

生産性向上へむけたPC技術の展開

－第44回PC技術講習会－

平成28年6月

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会

目 次

プレストレストコンクリート建築作品・技術の紹介…………… 1

—大空間建築、PC タワー、プレキャスト化、工期短縮、BIM 活用—

京都大学大学院教授・本工学会会長
近畿大学建築学部教授・本工学会理事
(株)石本建築事務所
(株)竹中工務店
(株)日建設計
(株)KAP
(株)竹中工務店

西山 峰 広
阿波野 昌 幸
原 健一郎
奥 出 久 人
福島 孝 志
桐 野 康 則
太 田 義 弘

PC 構造物におけるプレキャスト技術の現状と展開…………… 25

～プレキャスト化による多様な付加価値の創造～

—生産性向上、標準化、LCC、耐久性向上、環境負荷低減—

東京工業大学 環境・社会理工学院教授・本工学会理事
(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 技術部会

〃
〃
〃
〃
〃
〃

二 羽 淳一郎
河 村 直 彦
諸 橋 明
中 山 良 直
三 本 竜 彦
佐 藤 徹
長谷川 剛
青 木 治 子

PC サステナビリティ宣言について…………… 49

オリエンタル白石(株)・本工学会副会長
東京理科大学教授
明治大学教授
(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構
オリエンタル白石(株)
(株)安部日鋼工業
(株)富士ピー・エス

手 塚 正 道
加 藤 佳 孝
小 山 明 男
石 井 秀 和
加 藤 誠 一
國 富 康 志
星 野 展 洋

更新用プレキャスト PC 床版技術指針について…………… 65

—更新用プレキャスト PC 床版技術検討委員会の報告—

(株)複合研究機構、横浜国立大学名誉教授
日本大学工学部教授
近畿大学理工学部准教授
東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター准教授
中日本高速道路(株)

池 田 尚 治
岩 城 一 郎
東 山 浩 士
長 井 宏 平
酒 井 秀 昭

大規模自然災害への PC 構造の貢献..... 77

—大規模自然災害に対応可能な PC 構造に 関する研究委員会の報告—

(株)複合研究機構、横浜国立大学名誉教授
首都大学東京教授・本工学会副会長
横浜国立大学准教授
(株)ピーエス三菱

池 田 尚 治
宇 治 公 隆
細 田 暁
河 村 直 彦

点検診断技術の最前線..... 89

—予防保全を見据えた合理的なメンテナンスサイクルの 実現を目指して—

京都大学大学院 特定教授
国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター
(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会
〃
〃

(株)四国総合研究所
西日本旅客鉄道(株) 構造技術室
京都大学 学際融合教育研究推進センター 特任教授・本工学会理事

塩 谷 智 基
渡 辺 博 志
吉 松 慎 哉
徳 光 卓
藤 原 保 久
廣 瀬 誠
湯 淺 康 史
宮 川 豊 章

海外の PC 技術の動向..... 127

—日越ワークショップ、最近の海外基準類、海外の PC 橋、 fib シンポジウム2015—

埼玉大学大学院教授・本工学会理事
国際対応小委員会

睦 好 宏 史

プレストレストコンクリート建築作品・技術の紹介

—大空間建築、PC タワー、プレキャスト化、工期短縮、BIM 活用—

京都大学大学院教授
近畿大学建築学部教授
(株)石本建築事務所
(株)竹中工務店
(株)日建設計
(株)KAP
(株)竹中工務店

西山 峰 広
阿波野 昌 幸
原 健一郎
奥 出 久 人
福 島 孝 志
桐 野 康 則
太 田 義 弘

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) の普及、とくに建築分野の普及にとって重要なのは、意匠設計者に PC 利用によって拡大されるデザインの自由度を理解してもらい、PC でしか実現できないような作品を世に出してもらうことである。

プレストレストコンクリート工学会では、毎年優れた PC 建築物を表彰している。このような作品は、体育館のような大空間構造であったり、物流拠点であったり、あまり一般的ではないものが多い。また、プレストレスによりさらに施工性が高まるプレキャストでの利用も多い。

近年のプレストレストコンクリート工学会賞作品賞受賞建築物は以下のとおりである。

平成26年度11件中 4 件が建築物

- ・田辺スポーツパーク体育館
- ・稲森記念会館
- ・実践女子学園創立120周年記念体育館
- ・ダイキン・オー・ド・シエル蓼科セミナーハウス

平成25年度 8 件中 2 件が建築物

- ・羽田クロノゲート・フォーラム棟および託児所棟
- ・兵庫県立淡路医療センター

平成24年度 4 件中 2 件が建築物

- ・東北大学 WPI-AIMR 本館
- ・尾道冷凍流通センター

平成24年度は受賞作品数自体が少なく、比較対象とはなりにくいが、平成25年度、26年度と年々建築物の受賞件数が増加し、かつ、橋梁も含めた受賞作品全体に対する割合も増加している。プレストレストコンクリートというと橋梁を代表として挙げられることが多いが、建築物にも本工学会賞作品賞を獲得するような優れた作品が多くなっている。

本稿では、その中でも特徴的な建築物を紹介する。田辺スポーツパーク体育館は、和歌山県田辺市で2015年秋に行われた紀の国わかやま国体に向けて整備された田辺スポーツパーク内に建つ体育館である。市立吹田サッカースタジアムは、昨年10月にオープンし、2020年東京オリンピックに向けた国立競技場騒動とも相まって、構造だけでなく、デザイン、施工やコストの面、さらには、隣接するショッピングモールとともに各所で話題となっている。羽田クロノゲート・フォーラム棟および託児所棟は、羽田空港近くに建設された物流拠点ではあるが、地域に開放されており、地域に住む人々の活動拠点ともなっている。いずれも意欲的および先進的な作品であり、一見の価値がある。

また、静岡県草薙総合運動場体育館は、木造の大屋根によって構成される大空間というデザインおよび構造の面で傑出した建築物であるが、本稿では、PC 部分の設計・施工における BIM (Building Information Modeling) の活用事例として採り上げた。さらには、建築作品ではないが、プレストレスの有効利用という点から、プレキャスト版を、網目状に配置したアンボンド PC ストランドにより組み上げた風力発電タワーも最後に紹介している。

2. 田辺スポーツパーク体育館の設計・施工

2.1 はじめに

大空間を覆う屋根は、鉄骨や木などの軽量な材料を用いるのが一般的であるが、本体育館では、PC 技術を駆使して RC 大空間を実現した。PC 架構による、力学的合理性・施工性・意匠性に優れた空間設計の過程を報告する。

2.2 施設概要

世界遺産熊野古道の玄関口として知られる田辺市は、和歌山県の海岸線のほぼ中央に位置する風光明媚な地である。その歴史は古く、平安時代から熊野詣で賑わう紀南の中心地として発展してきた。

「田辺スポーツパーク」は、2015年秋の紀の国わかやま国体に向けて整備され、30ha 以上の広大な敷地に、陸上競技場、野球場、雨天練習場などの体育施設のほか宿泊施設を備えている。本作品はパークの中核をなす体育館で、陸上競技場に隣接した管理事務所・宿泊室・研修室からなる施設である（写真－2.1）。



写真－2.1 田辺スポーツパーク全景

2.3 建築計画

本体育館の設計では、地域の歴史を重んじ、伝統に根ざした建築を目指した。体育館棟の中心となるアリーナの外観は、熊野大社を思い起こさせるデザインとして、外壁を内側に15度傾斜させた正四角錐台形に、外装材は檜肌葺きを想起させるタイル張りとした。安全性に配慮して、天井は無しとし、構造躯体で熊野古道の森を表現する内観を目指した。

災害に強い堅牢な施設を求める施主の要望と、意匠設計者が強く思い描いた RC 空間のイメー

ジが合致し、構造種別はRC造とした。RCによる大空間を実現するためには、構造的な合理性に優れ、工期内に施工が可能なシステムが必要であり、現場での労務を最小限にできるPCaPC構造が最適と判断した。陸上競技場と体育館アリーナの間には、このエリアの中心的な空間として二層吹き抜けのホールを計画した。ホール東側は眼前に陸上競技場が広がり、西側にはアリーナが、南北両翼には宿泊施設および研修棟がつながっている（図-2.1、2.2）。

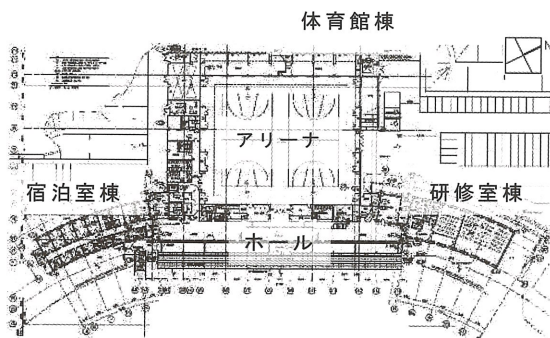


図-2.1 1階平面図

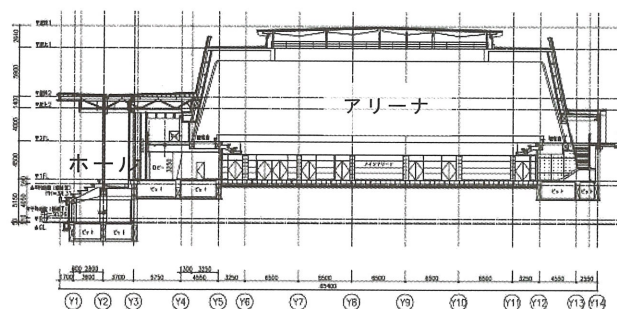


図-2.2 断面図

2.4 構造計画

2.4.1 構造計画概要

体育館棟と宿泊施設・研修室棟は、エキスパンションジョイント（EXP.J）を設け、構造的に分離した。機能用途上RC壁が多く計画されたことから、積極的に耐震壁を活用する強度型架構とした（図-2.3、2.4）。

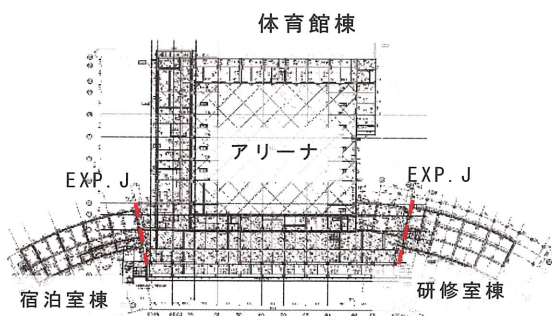


図-2.3 1階床梁伏図

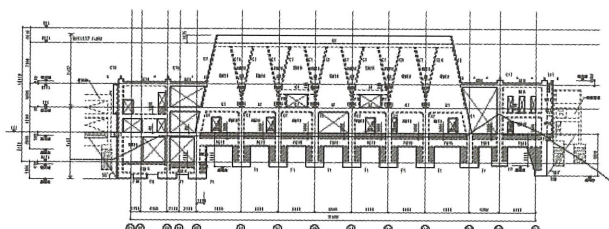


図-2.4 軸組図

2.4.2 体育館棟アリーナ構造計画概要

アリーナ構造計画の課題は、「傾斜したRC壁に囲まれた大空間を合理的に構成する構造システム」の創造である。ここでは平面に対して45度方向に斜格子ラーメンフレームを架け渡し、壁の傾斜に伴うスラスト力をフレームごとにバランスさせる架構を発想した（図-2.5）。整形なフレームを対称に並べていくこのシステムは、PCa化効率を最大限高められる工法ともいえる。

さらにこのフレームについては、今までのRC空間

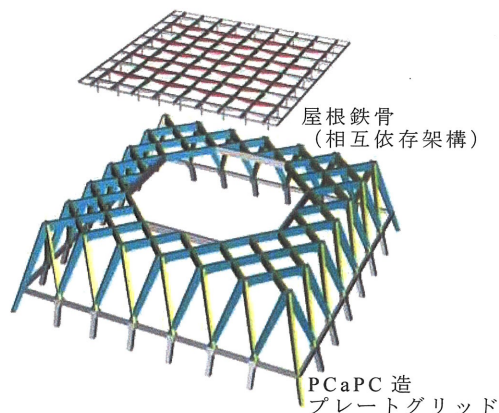


図-2.5 アリーナ架構イメージ

とは一味違う緊張感や軽快さを感じられるスポーツ空間を目指して、幅の狭い板状部材で構成する格子梁「プレートグリッド」の実現に挑戦した。本作品では材料強度を高め、かつプレストレスによる応力調整の可能な PCaPC とすることで、部材プロポーションのスリム化を徹底的に追求し、空間デザインを洗練させた。また、梁と柱の交差部を R 形状でなめらかにつなげることで、交点に生じる大きな応力を伝達させるとともに、表情豊かな樹状架構により、躍動感あふれる内部空間の演出を図っている。

2.4.3 耐震設計方針

耐震設計はルート 3 とした。地域の災害拠点として、重要度係数を考慮した十分な保有水平耐力を確保している。アリーナの屋根架構は、大地震時にも短期許容応力度以内となるよう設計した。

2.4.4 部材計画

アリーナ屋根の斜格子グリッドは一辺約 4.6m となる。施工性や工期を考慮し、柱は PCaRC、梁は PCaPC 造とした(図-2.6)。

2.4.5 PCa 部材の設計

PCaPC 梁は、プレートグリッドの実現に向け、可能な限り梁幅を抑えることを第一の目標とした。梁のプレストレス導入方式はディビダーク工法(DW工法)、PC鋼より線 15.2φ(SWPR7BL)を配置するポストテンション方式とした。緊張定着部分やケーブル配線、個材分割位置などの詳細を検討し、基本となる部材幅を 300mm に抑えた。梁はフルプレストレスングを目標とし、梁上端は PRC まで許容している。応力に応じた PC ケーブルの配置と緊張方向の工夫により、アリーナ内観にはケーブル定着体が現れないようにした。一方、PCaRC 柱は、脚部を現場打ち RC として計画した。現場打ち部分を PCa 部材と下部の主筋を繋ぐ接続範囲としながら、施工誤差を吸収する調整しろとして活用することで、PCa 部材の現場での施工性を高めるよう配慮した。

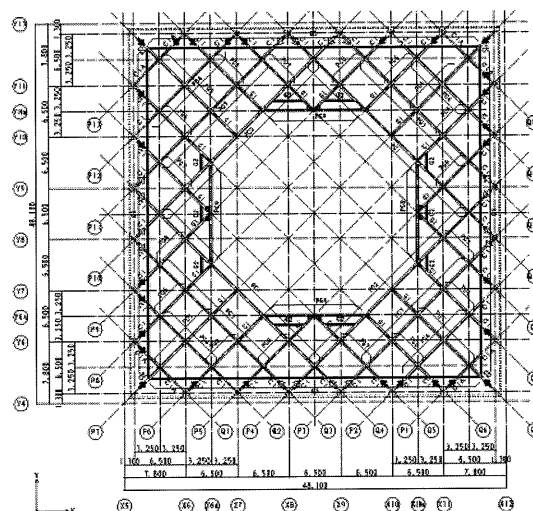


図-2.6 アリーナ R 階伏図

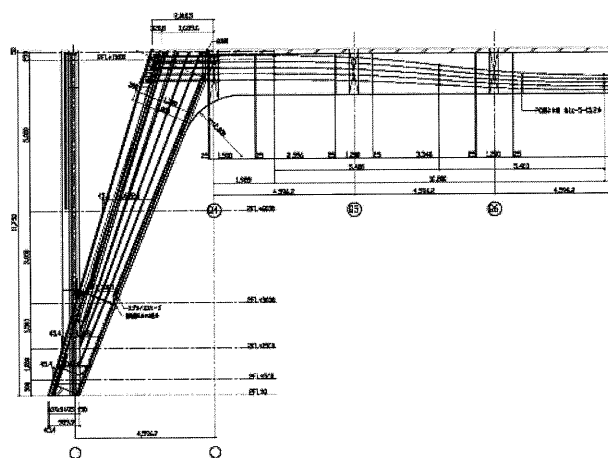


図-2.7 PC ケーブル配線図

2.5 施工概要

2.5.1 PCa 部材の製作

部材の形状および配置を図-2.8に示す。部材の分割位置を工夫することで、部材の形状を梁

8種類、柱4種類とした。形状や部材の取合において立体的な検討が必要であったため、複数の模型を作成し、課題解決に向けた多角的な検討を行った。柱は脚部に向かってテーパーが付けられ、加えて狭い角度で交差することから、柱脚部は3次元CADを用いて検討および作図を行った。まず柱脚部材の上部・下部で主筋の納まりを検討し、上下の主筋位置を確定する。

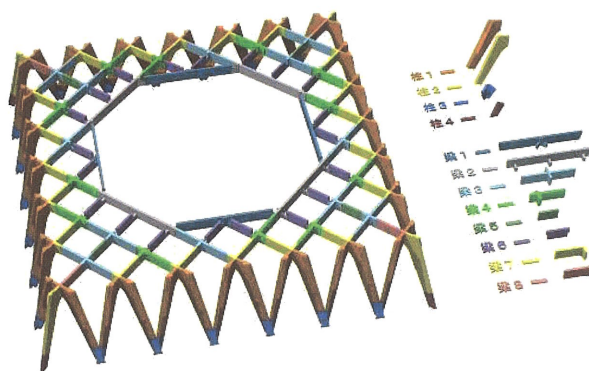


図-2.8 部材配置・形状図

そののち、各断面を輪切りに切断することで、形状確認と配筋図の作図を行った。切断箇所は帯筋の位置とし、柱脚部材を25断面、柱部材を88断面で切断、各断面における主筋位置やかぶりなどの確認を行った。柱脚部材の配筋図および配筋状況を図-2.9、写真-2.2に示す。

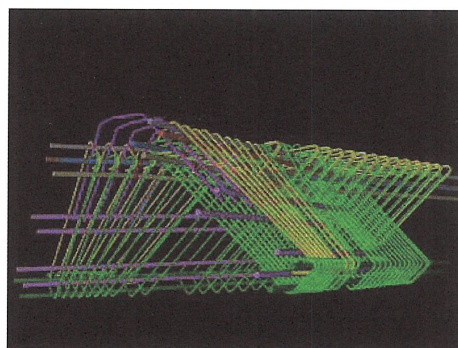


図-2.9 柱脚部材配筋図



写真-2.2 柱脚部材配筋状況

2.5.2 PCa 部材の建て方

本工事は、立体的に交差する柱脚および、傾斜する柱での継手施工という難易度・特殊性ともに高い工程を含むことが特徴である。

柱脚は床から約 900mm の範囲を現場打ちとし、下部から立ち上がる主筋と、PCa 柱に打ち込んだ主筋を、スプライススリーブを用いて接続することとした。PCa 柱と下部から立ち上がる主筋の位置にずれがないよう、全数の位置確認を行い、重点的に現場監理を行った。

傾斜柱の中間継手は、主筋が傾斜に沿って斜めに立ち上がる。PCa 柱頭部材の吊りこみ時に所定の位置に精度よく取り付けられるよう、予め工場で試験建て起しを行い、仮設ガイドを設置することで主筋を傷めないよう配慮した。傾斜したPCa 柱に対しては、傾斜角度を適切に支持できる支保工を柱ごとに設置した。写真-2.3に施工時状況および試験施工状況を示す。

PC 梁の架設は、各部材の分割目地部に支保工を設けた総足場工法にて行った。PC 梁架設

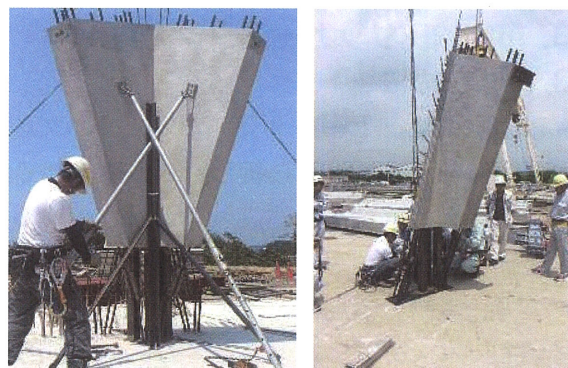


写真-2.3 施工状況（左）および試験建起し（右）

後、スラブコンクリート打設、プレストレス導入を経てジャッキダウンを実施した。プレストレス導入はスパンの短い四隅の梁から順に行い、4台の緊張ジャッキを用いて、平面的に対角の関係となる梁2本を同時に緊張した。プレストレス導入によるスラブへの影響については、施工前に緊張順序を追ったFEM解析を行い、スラブに過大なせん断変形が生じないことを確認した。

2.6 おわりに

アリーナ内部は、熊野古道の森につつまれた荘厳な雰囲気を醸し出し、ハイサイドライトからの光は木漏れ日のように柔らかく、内部をほのかに照らしている。

本建物では、PCa部材の特長を活かした構造計画を行い、合理性を追求し、ひとつひとつの部材を洗練することで、構造躯体をインテリア要素に高めた。高い精度での製作や緻密な施工と相まって、高品質な構造躯体を実現し、田辺市ならではの魅力あるスポーツ空間を実現した(写真-2.4)。(執筆者：原 健一郎)



写真-2.4 アリーナ内観

3. 市立吹田サッカースタジアム

3.1 はじめに

市立吹田サッカースタジアムは、日本プロサッカーリーグ(Jリーグ)に所属するガンバ大阪が、2016年シーズンから新しい本拠地として使用しているスタジアムである。サポーターならびに企業からの寄付金で建設された日本で初めてのスタジアムで、収容人数40,000人は西日本で最大規模のサッカー専用スタジアムとなっている。

一方、労働者不足に起因する生産効率の向上が、近年の建設業においては、大きな課題となっている。本スタジアムの建設においても、膨大な躯体工事を効率よく短工期で施工することが最大の課題であった。設計の初期段階から設計者と作業所担当者が協議を重ね、さまざまなプレ

キャスト（以下、PCa という）工法を適用して、現場での生産効率の向上と工期短縮に取り組んだ。

本編では、これらの内容について以下に説明する。

3.2 構造計画概要

スタンドの主要構造体には、多人数歩行に対する剛性確保やジャンプ応援に対する振動防止、耐久性向上や維持管理費の削減などを目的として、鉄筋コンクリート（以下、RC という）造を採用した。また、コンクリート断面の縮小やひび割れ防止、施工効率の向上を目的として、プレストレスト鉄筋コンクリート（以下、PRC という）梁を併用している。なお、架構形式は純ラーメン構造で、エネルギー吸収用のオイルダンパーを設置している。コンクリート強度については、柱および大梁は $F_c = 45\text{N/mm}^2$ 、床スラブは $F_c = 24\text{N/mm}^2$ を標準とし、ホームスタンドの一部の柱には $F_c = 200\text{N/mm}^2$ の高強度スリム柱を適用した。

屋根構造には、大スパンの実現や軽量化を図る目的から鉄骨造のシングルラス構造を採用し、屋根直下に免震装置を配置する屋根免震構造とした。免震装置には高減衰ゴム系積層ゴムと直動転がり支承を併用した。

【建築概要】

建物名称：市立吹田サッカースタジアム

建 築 地：大阪府吹田市千里万博公園内

設計者・施工者：(株)竹中工務店

【構造概要】

下部構造：鉄筋コンクリート造（一部 PRC 造）屋根構造：鉄骨造

建築面積：24,717.59m² 延床面積：66,509.36m²

最高高さ：40.33m、階数：地上 6 階

基礎形式：杭基礎

構造形式：オイルダンパーを有するラーメン構造および屋根免震構造

工 期：2013年12月～2015年 9 月（22ヵ月）

PC 製作・工事：(株)ピーエス三菱



写真-3.1 完成写真

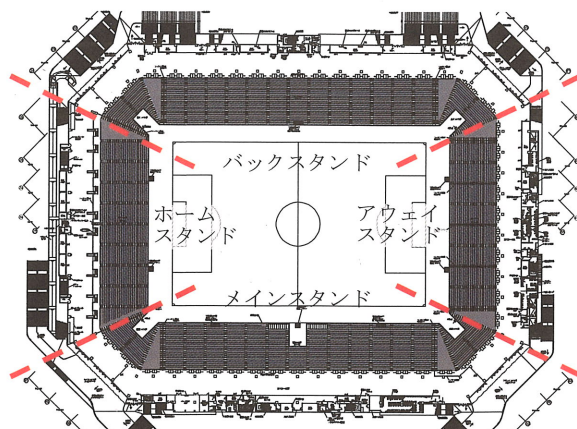


図-3.1 3階平面図

3.3 PRC 梁を採用したスタンドの構造設計概要

3.3.1 コンコースおよび下段席の設計概要

図-3.2にスタンドの軸組図と PRC 梁の採用範囲、PCa 化の範囲図を示す。コンコースの柱スパンは 10.75m であり、外側に 4.05m の跳ね出し梁が取りつくため、大梁は PRC 梁 (600×1100mm) とした。また、床版には主として穴あき PC 版 (厚さ 175mm、200mm) を採用し、柱と大梁だけのシンプルな構造形式とした。

3階コンコースからスタンドの最前列にのびる下段席は、柱スパンが最大 8.55m であるため RC 梁 (600×1100mm) とした。床スラブはなく、階段状の梁 (段梁) に直接 PC 段床を設置している。

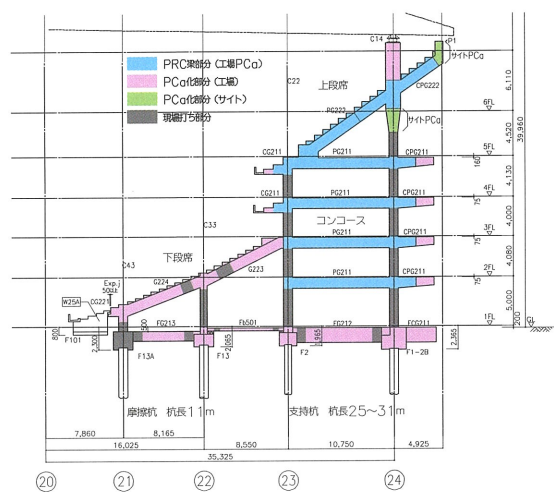
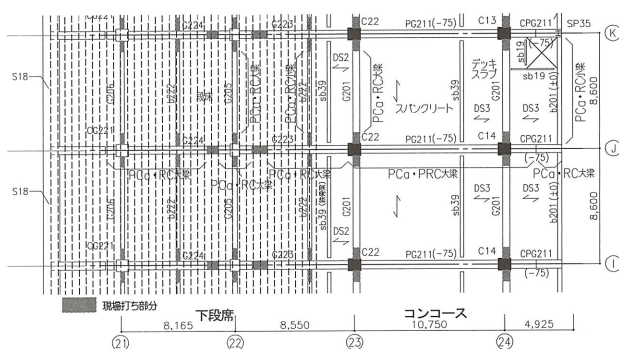


図-3.2 軸組図 (PRC 梁と PCa 化の範囲図)



图一3.3 3階伏図

3.3.2 上段席の設計概要

上段席は35度の勾配があり、外部側への跳ね出し長さは、一般部で 4.925m、コーナー部では 7.480m となっている。さらに、一般部では「覆い壁」と称している外壁の荷重を負担しており、曲げモーメントが大きくなることから PRC 梁を採用した。工場製作や運搬上の制約から一体での PCa 化は困難であったので、構造的な影響の少ないところで分割し、圧着接合で PCa 梁を接続させる計画とした。図-3.4に上段席 PRC 梁の配線図を示す。一般部の断面寸法は 600×1,250mm、コーナー部の断面寸法は最大部で 800×2,200mm となっている。

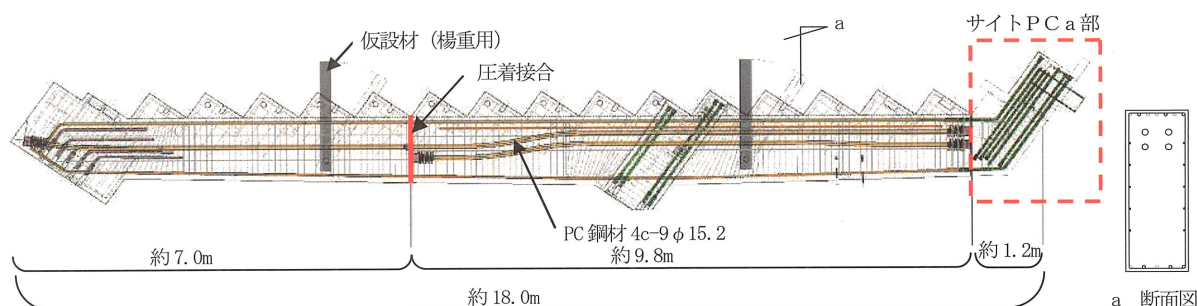


図-3.4 上段席部分の PRC 梁配線図 (一般部)

3.4 施工概要

3.4.1 コンコースおよび下段席の施工概要

写真-3.2にコンコースの施工状況を示す。また、施工手順を下記に示す。コンコースの大梁を PCa 化した PRC 梁としたことで、揚重ピース数が削減でき、工事工程の短縮が実現できた。

- ①先組鉄筋とシステム型枠を用いた現場打ちコンクリートにて柱を構築
- ②運搬の関係で一体化できなかった跳ね出し大梁の先端部分を地組ヤードにて一体化
- ③一体化したスタンド方向の PRC 大梁をノンサポートで柱に直接設置し（写真-3.2(a)）、仕口部の柱主筋とシース管の間にグラウトを充填
- ④桁行方向の大梁を中央のサポート 1 箇所で設置し、接続部分の配筋および型枠を施工（写真-3.2(b)）
- ⑤跳ね出し部の先端小梁をノンサポートで設置
- ⑥床版（穴空き PC 版、鉄筋付きデッキ床版）を設置し（写真-3.2(c)）、床配筋
- ⑦コンクリート打設

下段席についても仕口接合部を PCa 化する方針とし、スタンド方向大梁（段梁）に 2 ヶ所の現場打ち部分を設けて（図-3.2）、鉄筋を接続した。また、桁行方向はコンコースと同様に大梁端部に現場打ち部分を設けた。

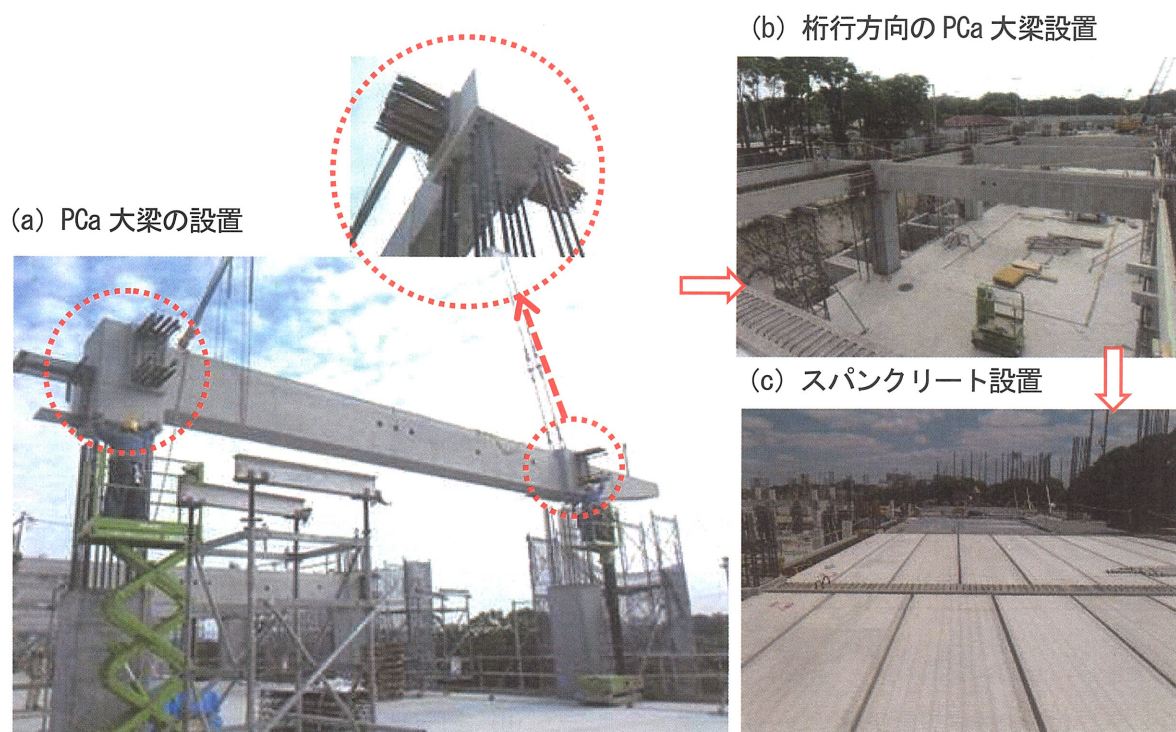


写真-3.2 コンコースの施工状況

3.4.2 上段席部分の施工概要

上段席のスタンド方向大梁は、工期短縮と高所での施工性を考えて PCa 化した PRC 大梁（段梁）を圧着接合で接続する設計とした。施工にあたっては、図-3.6に示すようにフィールド内の地組ヤードで、先行して緊張工事を行い、800トンクラスの超大型揚重機を利用して、一体化

した長さ 20m 弱の部材を一度の揚重で設置した。一般部の一体化後の重量は約 45tf、部材断面の大きいコーナー部（22.5度方向）は最大で 85tf に達した。写真-3.3に施工状況を示す。

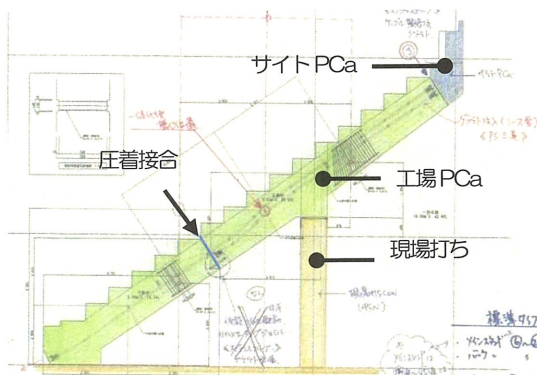


図-3.5 上段席 PRC 梁の断面図（一般部）

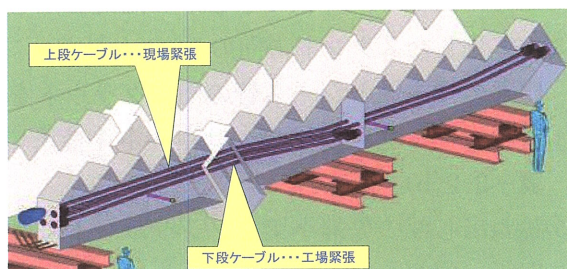
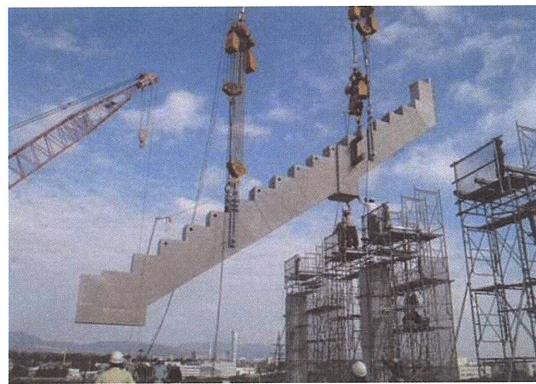


図-3.6 上段席 PRC 梁の施工模式図（一般部）



(a) 地組状況（一般部）



(b) 揚重状況（一般部）



(c) 上段席設置状況（コーナー部）



(d) 上段席完了状況（コーナー部）

写真-3.3 上段席 PRC 梁の施工状況

3.5 おわりに

40,000人を収容する西日本最大のサッカー専用スタジアムにおいて、PRC 大梁や PC 床版の採用による生産効率の向上を目指した。設計施工一貫のメリットを活かして、早くから設計者と施工者が PCa 化の範囲や施工手順などの検討を行い、躯体工事における省人化施工と工期短縮を

実現した。建設労働者の減少が顕著となっている今日において、本編で紹介した技術が、プレストレストコンクリート技術の発展の一助となれば幸いである。(執筆者：奥出久人)

4. 羽田クロノゲート・フォーラム棟のアップリフト構法

4.1 計画概要



建物名称：ヤマトグループ羽田クロノゲート／フォーラム棟
所在地：東京都大田区羽田
建築主：ヤマト運輸株式会社
ヤマトグループ
設計監理：(株)日建設計
施工者：鹿島建設(株)
工期：2010年12月
～2013年9月
延床面積：1,868.80 m²
階数：地上2階
最高高さ：13.48m
構造：PCaPC造+S造

写真-4.1 フォーラム棟内観
(屋根架構はテンション材と鉄骨梁を組み合わせたフープ式張弦梁を採用)

ヤマトグループ羽田クロノゲートは、東京都大田区羽田に建設された次世代型総合物流ターミナルである。高速道路のインターチェンジや空港・港から近く物流拠点としては好立地だが、周囲には住宅地が立ち並ぶ。建築主は計画の段階から、この施設を「地域に開かれた物流施設にしたい」という要望を持っており、住宅地側の敷地南側にフォーラム棟、託児所、スワンカフェ&ベーカリーや宅急便センターなどが入り、地域住民が自由に使うことのできる地域貢献エリア「和の里」を計画した。

フォーラム棟は、この「和の里」に計画された施設である。逆円錐形という類例の少ない外観を有している。この課題に対し、プレキャスト部材の圧着工法を中心に構造的な解決を図った。さらに施工面では、壁面のプレキャスト壁の自重を使って地組した鉄骨屋根を持ち上げる構築方法（アップリフト構法）を考案し、実施した。

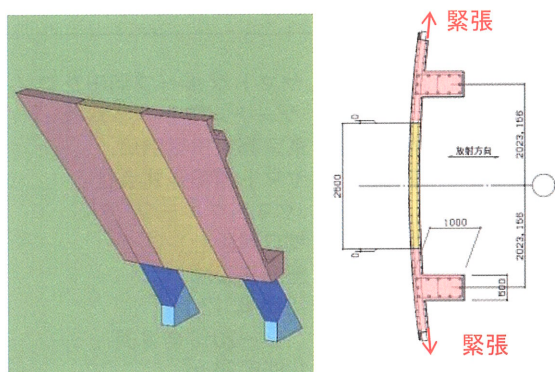
4.2 フォーラム棟の構造計画概要

4.2.1 逆円錐形状のプレキャスト壁

フォーラム棟は機能上、外周を壁で囲むことが必要であった。まずは鉄筋コンクリートの耐震壁を円周上に配置した耐震壁付ラーメン構造とすることを考えた。ここで難しかったのは、内外観ともにコンクリートあrawしを意匠設計者が要望していたことであり、構造設計者が施工的な観点からスタディを行った。その結果、現場打ちのコンクリートでは望むような外観は得られないと判断し、プレキャスト壁（PCa壁）の圧着工法という大方針をまず決定した。構築の手順を以下に示す。

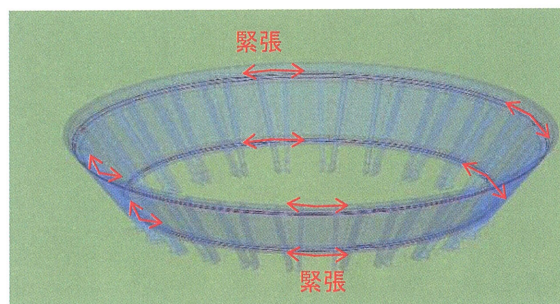
- ・PCa壁を3分割し、場内搬入を行う。つぎに壁部分は300mm間隔のPC鋼線1-15.2φを緊張し（図-4.1）、ついで屋根梁および2階梁の主筋をスリーブ継手とすることで一体化する。

- ・構築した24枚のPCa壁を、12-12.7φのPC鋼線4ケーブルを円周方向に緊張する（図-4.2）ことで、屋根梁および2階梁を圧着する。
- ・1階には現場打ちのコンクリート壁部分を打設して、耐震性能上十分な壁量を確保する。



名称	10-15.2φ
引張荷重	261KN/ケーブル
降伏荷重	222KN/ケーブル
許容引張荷重	導入時 189KN/ケーブル 定着時 178KN/ケーブル
導入力	178KN/ケーブル

図-4.1 PCa 壁分割部材の一体化



PC鋼材	
名称	4C-12-12.7φ
引張荷重	2196KN/ケーブル
降伏荷重	1872KN/ケーブル
許容引張荷重	導入時 1591KN/ケーブル 定着時 1498KN/ケーブル
導入力	1498KN/ケーブル

図-4.2 24枚のPCa 壁の圧着

4.2.2 プレキャスト部材の構造設計

屋根梁および2階梁は、断面設計上はフルプレストレスト・コンクリートとして設計している。日本建築学会「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」に準拠して、終局限界状態に対応する荷重係数を乗じた組合せ応力に対して、プレキャスト部材間の接合面に離間が生じないことを確認した。また壁についても、プレストレスに摩擦係数を乗じたせん断強度が上記組合せ応力に対して十分な余裕のあることを確認している。

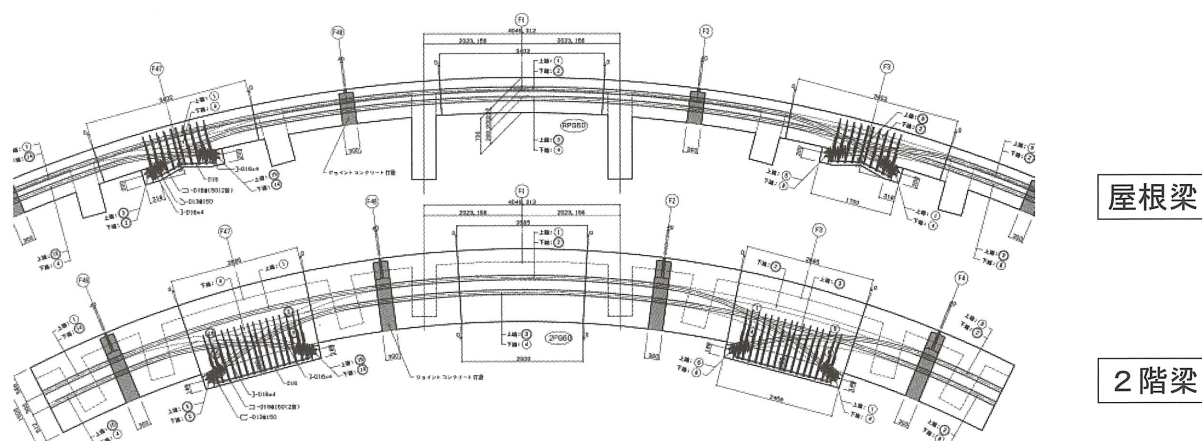
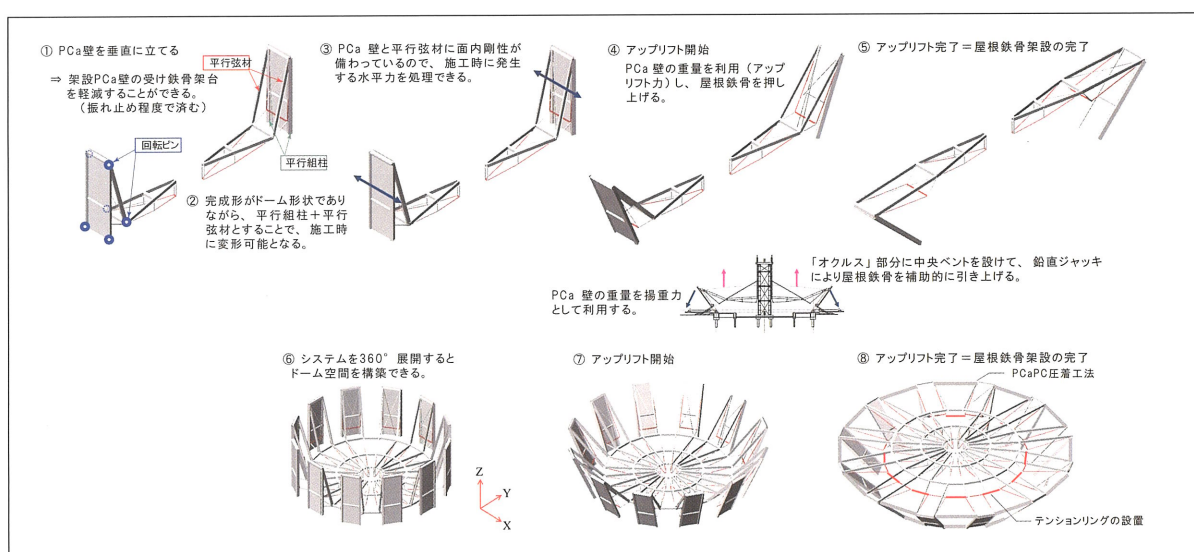


図-4.3 PC 鋼線配線詳細図

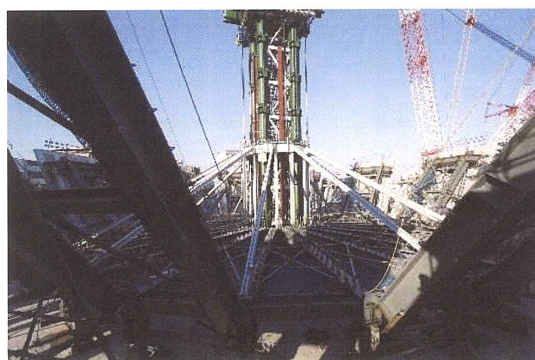
体とする構築方法を採用した。一方で、屋根鉄骨は、不安定な上空のベントの上で重量鉄骨を架設するのではなく、なるべく安定した地表近くで地組を行い、リフトアップによる施工とすべきと考えた。逆円錐形状で足元よりも上空で跳ね出してしまう部分のベントの支保の難度が高いように思われたこと、構造体のフープ式張弦梁をそのまま現しとしたいと考えていたこと、さらには、美観上極めて高い施工精度が求められたためである。

試行錯誤の末、PCa 壁の自重を使って鉄骨屋根を持ち上げるアップリフト構法（図－4.6参照）を考案した。屋根を所定の位置に引き上げた後で、フープ式テンションリングのあと施工分を設置してテンションリングを閉じ、同時に PCa 壁をプレストレスにより圧着して、下部構造も閉じる構法である。上棟後すぐに、屋根と屋内工事の2段を同時施工できる本構法は、工程上も合理的であると考えた。

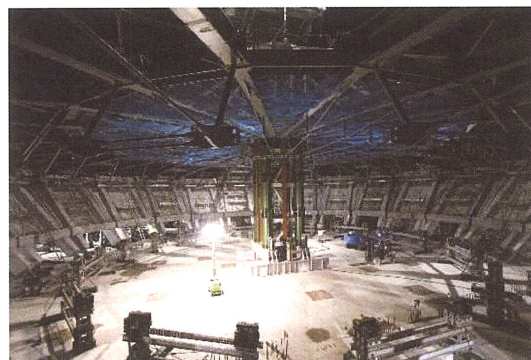
アップリフト施工の当日、地切り開始から8時間という極めて短時間の間に大空間が出現した。実測したテンション材の張力は、概ね計算どおりであり、ばらつきもほとんどないことから、本工事はほぼ計画どおりに完了できたと判断する。また、高所作業量の低減や内部足場簡略化についても期待通りの成果を得られた。（執筆者：福島孝志）



図－4.6 アップリフト構法の概要と施工手順



写真－4.2 アップリフト開始前のフォーラム棟



写真－4.3 アップリフト後、屋根鉄骨の架設完了

5. 静岡県草薙総合運動場体育館—PC 建築の施工における BIM の活用—

キーワード：木造、免震、スラスト、フープテンション

5.1 はじめに

静岡県天竜川流域の天竜杉は、吉野杉、尾鷲檜と並んで日本三大人工美林と言われ、良質の杉の産地である。本体育館のコンペの要項に「県産木材の活用」があり、木材を如何に使うかということが一つのテーマだった。当選案となった内藤廣建築設計事務所の案は、下屋根と呼んでいる観客に近い壁面に杉集成材の柱を細かいピッチで楕円状に配置し、その上に鉄骨トラス構造の切妻屋根（上屋根）を架けるといふ、今まで見たことのない構造方式だった。この木造の大屋根を実現するために、本建物ではさまざまな工夫を凝らしている。



写真－5.1 建物外観写真¹⁾



写真－5.2 建物内観写真¹⁾

5.2 建築概要

1 階を競技者空間、2 階を観覧空間と位置づけ、競技・運営者と観客の動線を明快に分離している。2 階から運動場に連続するゆるやかなスロープの広場や、2 階外周通路から外部へ接続する出入口を各所に設け、避難安全性に配慮している。

所在地：静岡県静岡市駿河区栗原 19-1

発注者：静岡県

設計管理：(株)内藤廣建築設計事務所

構造設計：(株)KAP+桜設計集団

施工：鹿島・木内・鈴与特定建設工事共同企業体

PC 工事：黒沢建設(株) 延面積：13,509m²



写真－5.3 施工時写真

5.3 構造計画

5.3.1 ジオメトリー

下屋根の形態は、木材をできるだけシンプルに使うという考えに基づき、同じ長さ、同じ断面の集成材を256本、ほぼ等間隔に配置している。その上に切妻屋根のキールトラス上屋根を架けているのが最大の特徴である。長辺側の中央になるほど切妻屋根の軒先が下がるので集成材は鉛

直状態から大きく傾く。上屋根の屋根勾配は3寸(3/10)であり、下屋根の集成材の傾きは短辺側の最も鉛直に近い位置で69度、長辺側の最も水平に近い位置で45度である。上屋根の切妻形状と下屋根の曲面形状は別物なので、取り合い部で一致せず隙間が生じるが、その部分は適切に連結している。

5.3.2 上屋根

上屋根は切妻屋根形状を活かし、シンプルな平面鉄骨トラスを架けている。トラスの間隔は、集成材6本分(外周楕円上の長さが約5.4mとなるような間隔)である。しかし、一方向のトラスだとスパンの違いによって集成材に掛かる荷重が大きく異なるので、集成材に掛かる荷重をできるだけ均等にするようにキールトラスを設け、中央部の荷重を両端部に分配するようにしている(図-5.1参照)。トラスの高さは最大で9.5mになる。

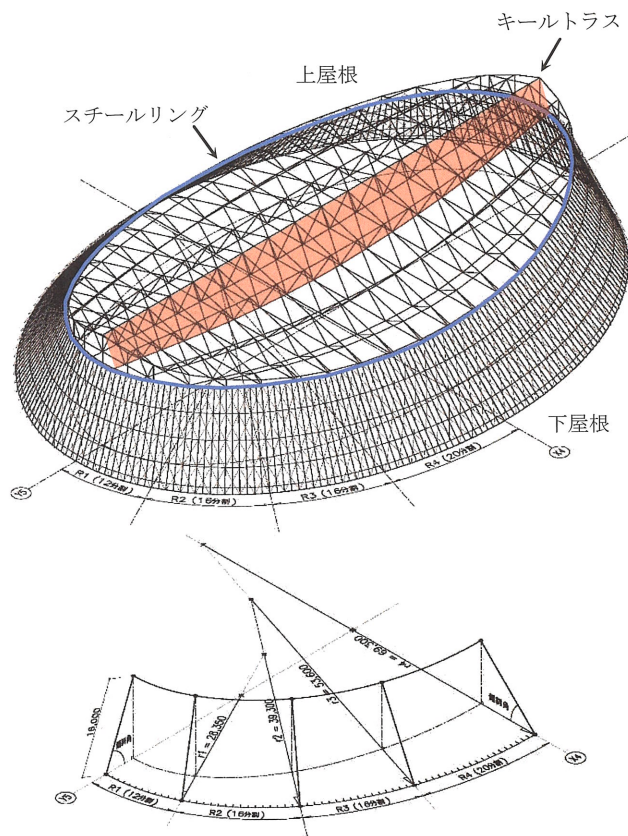


図-5.1 屋根構造芯のジオメトリー

5.3.3 スチールリング

上屋根と下屋根の境界部は、トラスの荷重を集成材に均等に伝達するために重要な部材であり、スチールリングと呼んでいる。スチールリングの断面形状は、3次元曲線上に配置されるということと、後述する下屋根ブレースの軸力による偏心曲げをねじり曲げとして伝達する必要性から500φの鋼管としている。

5.3.4 下屋根

下屋根の256本の集成材が屋根の鉛直荷重を支えている。水平力に関しては集成材の背中にラグスクリーでベースプレートを固定し、それに連結して網目状に配置したアングル断面の鉄骨ブレースが水平力を負担している(写真-5.3参照)。また鉄骨ブレースを水平方向に拘束するため、角形鋼管二丁合わせの水平繋ぎ材を配置している。集成材同士の間にはコマ材と呼ぶ木製の横つなぎ材を設け、木斜材の座屈止めとしている。

5.3.5 免震構造

東海地震に備えて静岡県では地震地域係数を1.2としているので、用途係数1.25と合わせると通常の1.5倍の地震力に抵抗することが求められた。

屋根の集成材に無理をさせないために免震構造を採用している。厳しいコストとエキスパンションの取り易さを考慮してRC水平リングレベルで中間階柱頭免震とした。免震装置はRC柱

32本の上に錫プラグ入り積層ゴム 1 基と天然ゴム系積層ゴム 1 基の 2 基ずつ、合計64基を配置している。錫プラグは鉛プラグに比べて降伏応力度が約 2 倍と高く、免震装置の設置位置が限られている場合に有利である。

5.3.6 RC 水平リング

RC 水平リングは屋根の雨水を受ける庇、木材への着火を防ぐ防火装置としての機能に加えて、免震層の基壇として十分な剛性と強度が要求される。さらに集成材が内側に傾いているため屋根の自重によって RC 水平リングを外に押し開こうとする力（スラスト）が常時発生する。

これらの要求性能を満足するために、幅 9m、厚み 400～650mm の現場打ち RC とし、 $12 \times 12.7 \phi$ スtrandケーブル 4～6 セットを水平に配置してプレストレスを導入することにより、常時スラストに抵抗するとともにコンクリートのひび割れを抑制した。



写真-5.4 柱頭の免震装置

5.3.7 RC 水平リングの応力解析

屋根の自重によるスラストで RC 水平リングの長辺には外側を引張、内側を圧縮とするモーメント、短辺にはその反対向きのモーメントが作用し、RC 水平リングの全体に 1000～2000kN のフープテンションが作用する。これらスラストによる応力に対して常時でフルプレストレス状態となるようにした。全体で 8 箇所の緊張端用ブロックを設け、ケーブル長は 28～48m としている。常時荷重による鉛直方向の曲げや地震力による応力など、上記のスラストによる応力以外はすべて RC として負担している。

5.4 施工における BIM の活用

PC 工事の定着工法は KTB 工法である。strandケーブルは、 $12 \times 12.7 \phi$ 4～6 セットを使用している。RC 水平リングの設計基準強度は $F_c = 36 \text{ N/mm}^2$ とし、緊張作業は設計基準強度以上のコンクリート強度を確認してから行うものとした。

strandケーブルは図-5.2のように平面的に位置が変化している。下屋根の脚部はアンカー鉄筋が密集し、しかもその角度が少しずつ変化しているので、その部分を通ずるときに鉄筋と干渉しないようにケーブルシースを通すのは至難の業である。ここでは施工者が BIM で鉄筋とシースをモデル化し、干渉状況を確認しながら検討を行った。

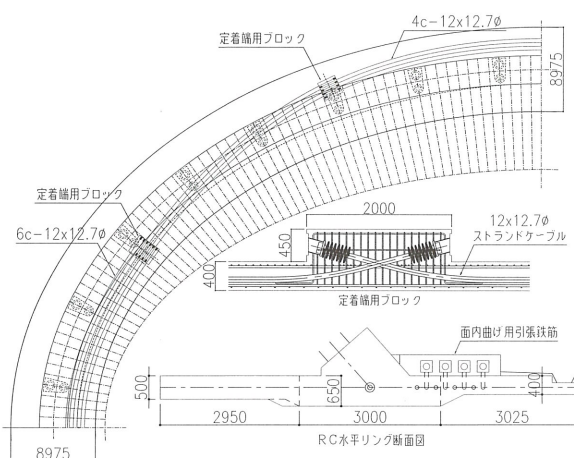


図-5.2 ケーブル配置と詳細図

BIM で干渉チェックを自動的に行えるので、見落とすことなく干渉状況を確認することができる。図-5.3の3つの図は同じ位置の干渉を別の視点から図化したものだが、このように複雑な状況も多視点から図化することで立体的に把握しやすくなる。同様に設備貫通と配筋の干渉も容易に確認することができる。

施工者が作成したBIMデータを設計側で直接見ることができれば、より複雑な情報をやり取りすることができる。実際鉄骨に関しては3次元的な納まりを2次元に図面化して情報を伝えるのが困難なので、BIMデータをやりとりして施工図チェックの代わりとした(図-5.4参照)。

5.5 おわりに

新しい構造形態により大規模な木造建築が実現した。その背景には木材をできるだけシンプルに使うという思想がある。水平力はすべて集成材の外側の鉄骨ブレースで負担し、免震構造で地震時の水平力を低減している。この構造の要はRC水平リングであり、プレストレストコンクリートの技術が大きな役割を果たしている。その施工においてBIMを活用することにより配筋とケーブルの干渉を3次元的に確認し、配筋工事の効率化を図ることができた。(執筆者：桐野康則)

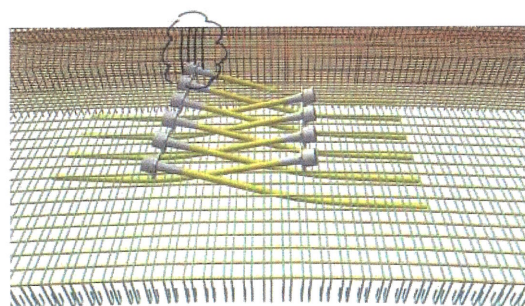
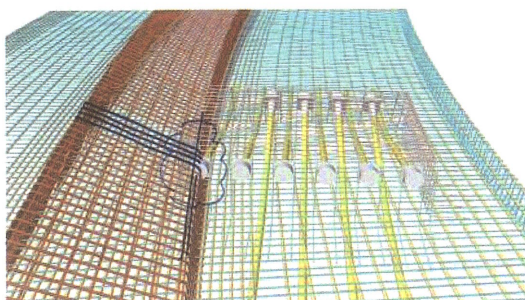
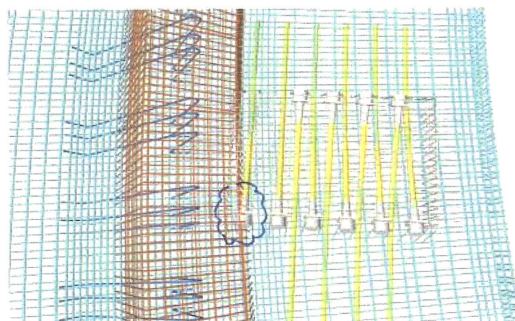


図-5.3 BIMを用いた干渉のチェック

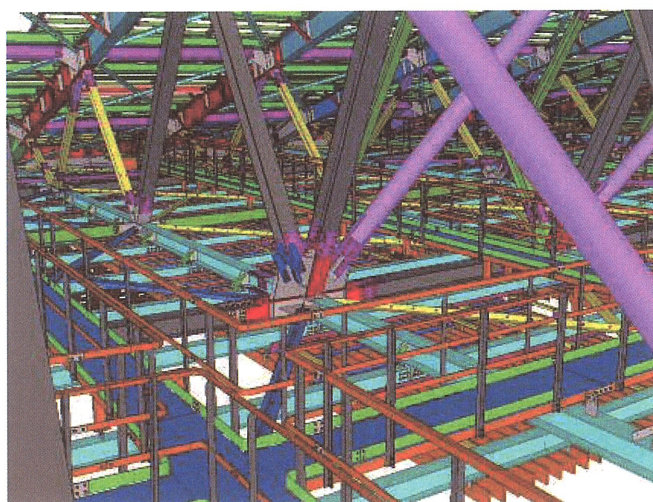


図-5.4 鉄骨のBIMモデル図

写真・図提供 1) (株)内藤廣建築設計事務所

6. 風力タワーの提案と実験

6.1 はじめに

6.1.1 風力発電の現状

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO と記す）の調査データによる日本における風力発電の導入推移を図-6.1に示す。現在、わが国の風力発電設備導入量は、2013年度末に総設備容量270万 kW を超え、総設置基数1,934基を達成している。

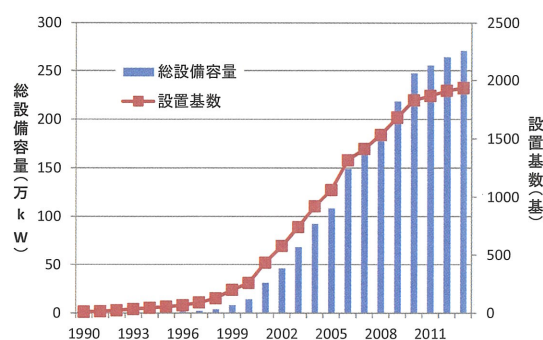


図-6.1 日本における風力発電の導入推移

6.1.2 風力発電タワーの今後の方向性

このような現状に対して、風力発電の今後の方向性とそれに伴うタワーに求められる要求性能を以下に示す。

(1) 風力発電施設立地の洋上への移行

わが国の陸上風力発電の立地は2020年以降頭打ちとなり、陸上風力発電に代わって、洋上風力発電が主流になると予測されている。これは、陸上における風況に優れた立地の不足などから、洋上風力発電の積極的な導入の必要性が表れているといえる。NEDO は、沖合における洋上風力発電の実現に向けて、千葉県銚子沖および北九州市沖の2か所で実証研究を行っており、洋上風力発電の実現が近いと考えられる。このような動きに対して、風力発電タワーには高い耐久性が要求される。現状の国内の風力発電は、鉄筋コンクリート製に対してコスト優位性のある鋼製が主である。しかし、鋼製タワーはその疲労性能により発電機の供用期間の20年とほぼ同じ期間で取り替える必要性が生じる。風車の立地が洋上に移行することにより、タワーの構造が耐久性の高いコンクリート製とするのが望ましい。さらに施工を考慮するとプレキャストを用いたプレストレストコンクリート構造が適している。

(2) 風車の大型化

陸上、海上を問わず、風況の優れた立地を有効活用するためには、風車の大型化が望まれている。その一方で、タワーの高さが高くなると、コンクリートを活用したタワーの方がコストを低く抑えることができることを示した報告がある。風車の大型化により、コストの面からもタワーの構造を鋼構造からコンクリート系構造への転換が必要である。

6.2 風力発電 PC タワーの新たな提案

6.2.1 コンセプト

写真-6.1にネットに入ったミカンを示す。斜めに配線されたネットによって、5つのミカンは1本の棒のように挙動する。本提案は、この原理を応用して、いくつかのプレキャスト部材を螺旋状に配置したPC鋼材に緊張力を与えることにより一体化して、タワーを形成させるというものである。



6.2.2 構造概要

図-6.2に提案する構造の概要を示す。本構造はプレキャスト化

写真-6.1 ネット入りミカン

されたコンクリートシェル部材をタワー状に組み上げた後、その外側からPC鋼材を螺旋状に配置して緊張力を与えることにより、タワー全体に圧縮応力場を形成させて一体化するものである。プレキャスト化されたコンクリートシェル部材同士は、接合面に発生する圧縮力によって断面力に抵抗するので、部材同士を結ぶ接合金物は不要となり、施工の合理化を図ることができる。

PC鋼材は螺旋状に配置することにより、図-6.3に示すようなタワーの軸方向と円周方向の圧縮力に加えて、円の中心に向けての拘束力も与えることが可能である。また、コンクリートシェル部材は、鋼繊維を混入した超高強度コンクリートを用いることにより、部材断面を薄くすることが可能でかつ鉄筋の配筋の無い部材とし、部材製作の合理化を図る。

6.2.3 設計法

図-6.4にコンクリートシェル部材の2軸圧縮状態を示す。螺旋状に配置したPC鋼材に緊張力を与えることによって発生する鉛直断面での面内圧縮応力 $\sigma_{cp,h}$ 、水平断面での面内圧縮応力 $\sigma_{cp,v}$ とすると、以下のように表される。

$$\sigma_{cp,h} = \frac{n(\eta p_o) \sin \theta \tan \theta}{\pi d t}$$

$$\sigma_{cp,v} = \frac{n(\eta p_o) \cos \theta}{\pi d (d - t)}$$

ここで、

n : スtrand総本数

p_o : PC鋼材1本あたり

導入時プレストレス力

η : プレストレス有効率

d : タワー直径

t : コンクリートシェル部材の厚さ

θ : PC鋼材の角度 (図-6.4参照)

鉛直および水平接合面でのせん断設計は、以下とする。

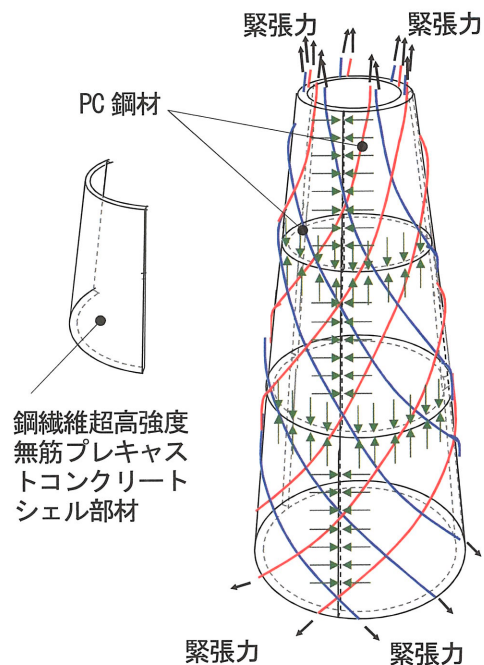


図-6.2 提案するタワーの構造概要

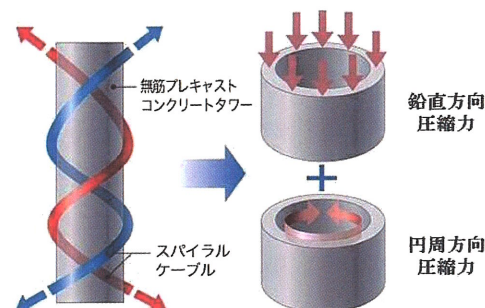


図-6.3 コンクリートシェル部材に加わる力

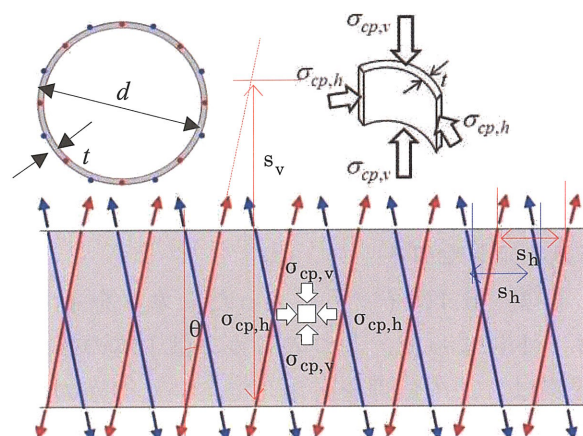


図-6.4 コンクリートシェル部材の2軸圧縮状態

$\sigma_{cp,h} \cdot \mu \geq$ (鉛直接合面での設計用断面応力)

$\sigma_{cp,v} \cdot \mu \geq$ (水平接合面での設計用断面応力)

ここで、

μ : 摩擦係数 (=0.5)

タワーの曲げ耐力は、以下とする。

離間曲げ耐力 = $(\sigma_{cp,v} + \sigma_{dv})Z$

終局曲げ耐力 = $(\sigma_{cp,v} + \sigma_{dv}) \cdot A_c \cdot (0.5d - d_c)$

ここで、

σ_{dv} : 自重および積載荷重による鉛直荷重

Z : 断面係数

A_c : 断面積

d_c : 圧縮縁から圧縮合力位置までの距離

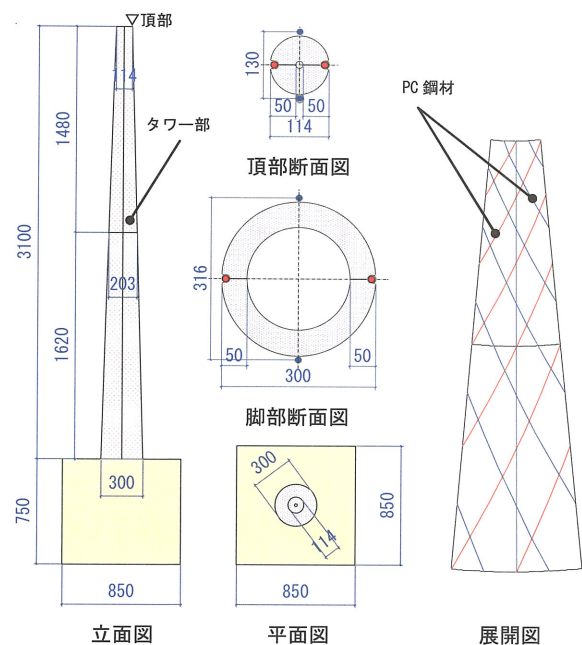


図-6.5 試験体図

6.2.4 構造性能把握

提案するタワーの構造性能を把握するために、パイロット実験¹⁾ および 1/4 縮小試験体
 載荷実験²⁾ を実施した。ここでは、パイロット実験の概要を示す。

(1) 実験計画

図-6.5に試験体図を示す。タワー部は、高さ 3100mm、頂部の直径 114mm、脚部の直径 300mm とし、厚さは 50mm 一定とする。また、タワー部は高さ方向および断面においてそれぞれ 2 分割で、合計 4 つのコンクリートシェル部材から構成される。試験体は 4 つのコンクリートシェル部材を部材間に無収縮モルタルを介しながら、下から順番に組み立てた後に螺旋状に配置する PC 鋼材を緊張することにより一体化する。

PC 鋼材は 7 本より線 9.3mm を、時計回りと反時計回りにそれぞれ 2 本ずつ配置する。PC 鋼材はポリエチレンシースに被覆されており、コンクリートシェル部材とは付着はない。PC 鋼材 1 本あたりの導入緊張力は 52.9kN とする。PC 鋼材に対する緊張力の導入は、タワー頂部を固定端とし、タワーのベース部分に設けた凹部を緊張端側とし、4 本の PC 鋼材を同時に行う。

試験体は 2 体で、パラメータはコンクリート部材内の鋼繊維の有無であり、そのほかはすべて同じものとする。(以下、コンクリート部材内に鋼繊維が入った試験体を試験体 F 1、鋼繊維が入っていない試験体を試験体 N 1 と示す。) 実験時のコンクリート強度は 129N/mm² である。

(2) 実験結果

図-6.6に部材角と水平荷重の関係を示す。各試験体の破壊経過は以下のとおりである。

< 試験体 F 1 >

部材角 5.0/1000rad 時にタワー脚部とベース部での水平目地において離間が生じ、水平剛性が低下し始めた。部材角 15.0/1000rad 時にプレキャスト部材間に水平方向にずれが生じ、部材角 20.0/1000rad 時に最大耐力に達した。そののち、プレキャストシェル部材間の目地部のずれが顕著となり、耐力低下を起こした。

< 試験体 N 1 >

試験体 F 1 と同様に、部材角 5.0/1000rad 時にタワー脚部とベース部での水平目地において離間が生じ、水平剛性が低下し始めた。部材角 10.0/1000rad 時の加力サイクル時にコンクリート

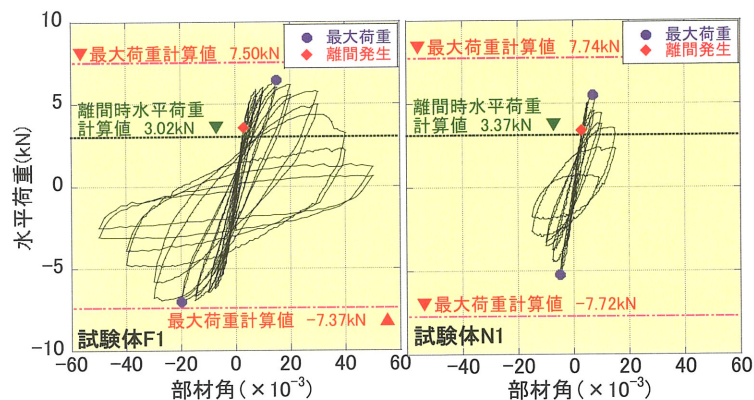


図-6.6 部材角と水平荷重の関

の破壊音がして大きな耐力低下を起こした。これらの結果より、コンクリートシェル部材内の鋼繊維は PC 鋼材からコンクリートシェル部材に伝達される局部応力による破壊の防止などに寄与することが分かった。

試験体 F1 は離間時および終局曲げ耐力荷重時ともに計算値は実験値を比較的良く表わしている。試験体 N1 は離間時では計算値は実験値を良く表わしているが、終局曲げ耐力時では早期のコンクリートの破壊により計算値は実験値を上回った。

6.2.5 施工実験

輸送のための大型トラックや大型揚重機を使用することなく建設すること、および螺旋に配置した PC 鋼材の緊張力管理手法を検討することを目的として、細かく分割した無筋プレキャスト部材を螺旋に配置した PC 鋼材により緊張力を加えて構築する 8m のタワーの施工を行った³⁾。施工状況および完成状態を写真-6.2に示す。

1 部材 50~60kg の無筋プレキャスト部材をウインチなどにより、揚重しながら組立てを行い、螺旋状に PC 鋼材の配置および緊張作業によりタワーの構築を行った。また、PC 規準⁴⁾の算定式を用いた従来の緊張力管理方法は有効であることを確認した。



写真-6.2 8m タワーの施工状況と完成状態

6.3 まとめ

風力発電の今後の動きから、風力発電タワーの PC 化の可能性を示した。また、PC タワーとして、プレキャスト部材を螺旋状に配置した PC 鋼材に緊張力を与えることにより一体化して、タワーを形成させる提案を行った。構造実験および施工実験により、その性状と課題を示した。

(執筆者：太田義弘)

6.4 謝 辞

本報告の研究に関しては、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「新エネルギーベンチャー技術革新事業」において実施いたしました。関係各位には深く感謝いたします。

6.5 参考文献

- 1) 太田義弘ら：螺旋状に配置した PC 鋼材を用いたプレストレスト無筋コンクリートタワーの研究（その 1 構造概要とモデル実験）、日本建築学会大会梗概集（東海）、pp937-938、2012.9
- 2) 張拓ら：螺旋状に配置した PC 鋼材を用いたプレストレスト無筋コンクリートタワーの研究（その 2 1/4 縮小試験体載荷実験概要、その 3 1/4 縮小試験体載荷実験結果と考察）、日本建築学会大会梗概集（北海道）、pp897-900、2013.8
- 3) 太田義弘ら：螺旋状に配置した PC 鋼材を用いたプレストレスト無筋コンクリートタワーの研究（その 4 8m タワーの施工実験）、日本建築学会大会梗概集（北海道）、pp901-902、2013.8
- 4) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、1998年11月

PC 構造物におけるプレキャスト技術の現状と展開

～プレキャスト化による多様な付加価値の創造～

—生産性向上、標準化、LCC、耐久性向上、環境負荷低減—

東京工業大学 環境・社会理工学院教授

（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会 技術部会

〃

〃

〃

〃

〃

〃

二 羽 淳一郎

河 村 直 彦

諸 橋 明

中 山 良 直

三 本 竜 彦

佐 藤 徹

長谷川 剛

青 木 治 子

1. はじめに

わが国の社会インフラを巡る動きは、一時の維持管理一色の時期を過ぎて、現在はより積極的に生産性の向上に注目が集まるようになってきている。これはもちろん維持管理を軽視するということではなくて、むしろ社会インフラの維持管理に関するメンテナンスサイクルが好転し、例えば道路構造物であれば、5年に一度の近接目視点検が順調に動き出してきたことにより、維持管理の次のキーワードとして、生産性の向上を目指そうという趣旨であろうと思われる。

PC 構造物における生産性の向上の具体策として、すぐに思い浮かぶのが「プレキャスト技術」である。従来まで、PC 構造におけるプレキャスト技術は、多くの場合、工期の短縮や省力化といった観点からのみ、考えられてきたように思われる。しかしながら、フレシネーのマルヌ 5 橋の例を見るまでもなく、プレキャスト技術により、高耐久な PC 構造物を容易に実現することができる。さらに耐久性のみならず、プレキャスト技術を利用することにより、多様な付加価値を創造できるのではないかという発想が本論の意図するところである。

ここでは、以上の観点から、プレキャスト技術の特徴、プレキャスト技術の歴史、プレキャスト技術の適用性、プレキャスト技術による特徴的な構造物、プレキャスト技術の将来、という構成で、プレキャスト技術の多様な特徴を順次紹介するものである。具体的な内容については、次章以下をご覧いただきたいが、耐久性の向上に加えて、品質の向上、環境負荷の低減、社会的便益の向上、LCC の低減など、さまざまな価値が創造できることをあらためて確認していただきたい。また世界各地で、プレキャスト技術を用いた積極的な取り組みが行われていることを認識していただきたい。従来ややもすれば、初期コストや、接合部の問題などが指摘されてきたが、さまざまな付加価値は初期コストを十分に補うことができると考えられる。また、PC 技術とプレキャスト技術を併用することで、接合部の問題には十分に対処できる。生産性向上に向けて、プレキャスト技術に注目が集まっている今こそ、プレキャスト技術を大きく進展させる絶好の機会ではないだろうか。

2. プレキャスト技術の特徴

2.1 品質向上・ライフサイクルコストの低減

プレキャスト製品は、一貫した品質管理のできる専用工場で製造されるために、直射日光・気温・風雨などの環境条件が厳しい場所打ちコンクリートよりも品質が安定し、工程遅延のリスクも低減できる。また、設備の整った上屋内で製造されるため十分な養生がおこなえ、コンクリート表面を緻密にできるとともに高強度コンクリートも製造しやすくなり、耐久性を向上させることができる。さらに、生産設備の整った工場では、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末を利用しやすいため、これらを利用することにより水密性が向上するだけでなく、温度応力やアルカリシリカ反応の抑制効果も期待できる。

その結果、維持補修に要する費用を節減でき、また長寿命化も図れるので更新間隔が長くなり、ライフサイクルコストの低減に寄与できる。

2.2 工期短縮・資源節約

現場で支保工と型枠を組んで鉄筋を配置し、生コンを打設して養生を行ってコンクリート構造物を構築する場合に比べて、工場製作された部材を現地に運搬し、一体化する工程が主なプレキャスト部材は、現場工期を大幅に短縮できる（図-2.1）。また、現場に大勢の型枠工や鉄筋工などの労務を配置する必要がないので人的資源の節約が可能となり、工場勤務であれば女性の活用も図りやすく、労働力・担い手不足の解消につながるとともに、労働災害のリスクも低減される（表-2.1）。さらに、標準化された部材を工場で作成する場合、型枠の転用が可能になり、工事現場で使用する型枠などの木材資源を減らすことができ建設廃棄物の大幅な削減につながる。

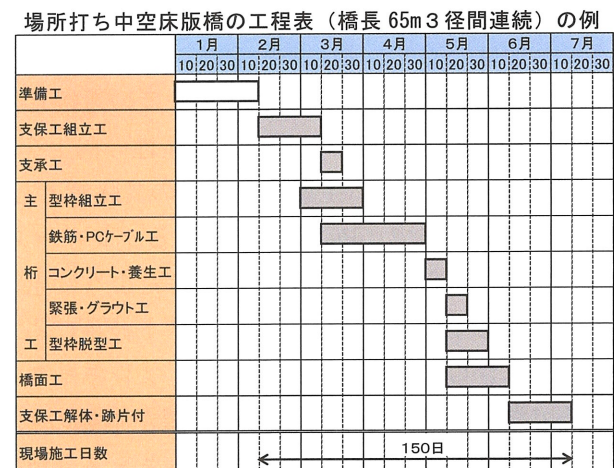
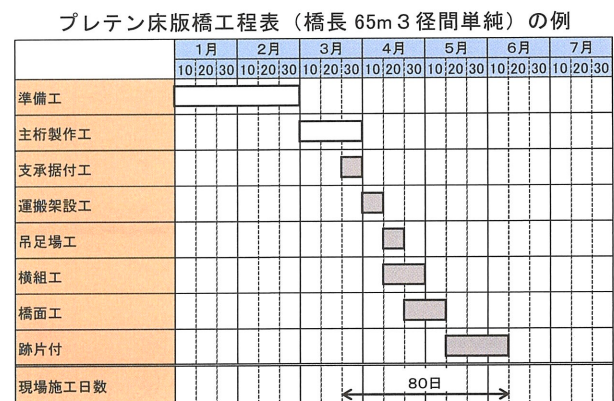


図-2.1 現場施工日数の試算

表-2.1 労務人員と災害リスクの試算

	場所打ち	プレキャスト	備考
労働人員	100	工場40 + 現場20 = 60	
労働災害比率	1.75（現場作業）	1.00（工場作業）	PC 建協調査
災害リスクの推定値	100	$40/1.75 + 20 = 43$	相対値で評価

2.3 社会便益の向上

社会資本を整備する上では、初期コストだけでなく、工期短縮による交通渋滞の早期開放での経済的効果、そして現場工事における騒音や振動といった周辺環境への影響軽減効果なども考慮する必要がある。しかし、これまでは経済的便益に比べて環境便益への寄与の検証が重要視されてきたとは言いがたく、そのため、土木学会では「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」²⁻¹⁾を策定した。試案では、コンクリート構造物の環境側面の検討に際しては、地球環境、地域環境、作業環境などの環境を考慮することとし、検討項目としては、温室効果ガス、資源・エネルギー、廃棄物、水質・土壤汚染物質、騒音・振動などが挙げられている。付録資料には、PC橋上部工における構造形式の影響について、CO₂、SO_x、NO_x、ばいじんの排出量に関して統合化の試算結果が掲載されており（表-2.2）、プレキャスト製品の方が約30%少ないという結果が示されている。

プレキャスト技術は、現場工期を短縮できるうえに環境面でも優位であり、社会便益の向上が図れる技術と言える。

表-2.2 統合化計算表²⁻¹⁾

	統合化指標（無次元/m ² ）				
	CO ₂	SO _x	NO _x	ばいじん	合計
プレキャスト T 桁橋	268	50	45	17	380
場所打ち連続中空床版	335	58	62	26	481

2.4 i-Construction の取組み

国土交通省では「i-Construction ～建設現場の生産性向上の取組みについて～」を推進しており、生産性の低迷、労働災害や労働力不足といった現場の生産性に関する現状に対して、「ICT技術の全面的な活用」「規格の標準化」「施工時期の平準化」という三本の柱で、一人ひとりの生産性を向上させ、魅力ある建設現場にすることを目指している。

この中で、プレキャスト技術に関係の深い「規格の標準化」では、材料が最も少なくなる個別最適の設計から、設計・施工・維持管理に至るプロセス全体の最適化が図られるように各段階において規格の標準化を検討している。これは、各部材を工場製作にして、資機材の転用などでコストを低下させ、プレキャスト技術の普及を進めようとするものである。そして、プレキャスト化を推進するために、工期や環境影響なども考慮した評価システムを構築する準備が進められている。初期コストだけでなく、工期短縮による交通渋滞の早期開放での経済的効果、工事現場における騒音や振動といった周辺環境への影響の軽減などの社会便益をも考慮し、全体最適によってプレキャスト化を推進することが期待されている。

3. プレキャスト技術の歴史

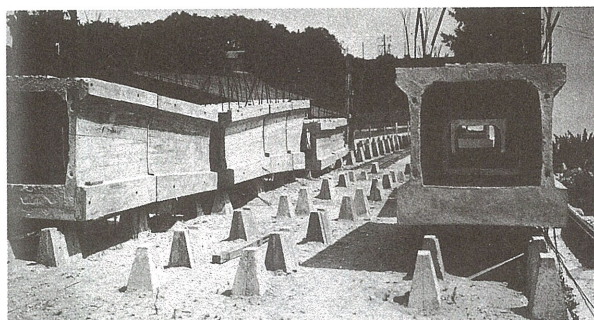
3.1 海外におけるプレキャスト技術の歴史

3.1.1 1940～1950年代のプレキャスト技術

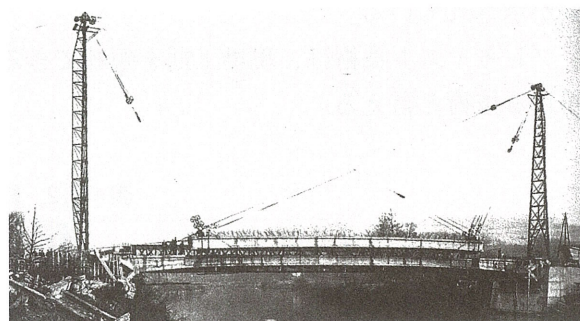
近代的なプレストレストコンクリート（PC）構造の祖といえるフレシネーは、フランスのLuzancy 橋において、すでに多くのプレキャスト技術を採用入れている³⁻¹⁾。本橋はスパン 55m、

幅員は歩道を含めて 8.0m、ライズ 1.22m の扁平なアーチ橋であり、各桁は中央部16個と両端部各 3 個の22個の部材で形成され、高欄などにもプレキャスト部材を用いており、プレキャスト部材の総数は1,016個となっている（写真－3.1、写真－3.2）。

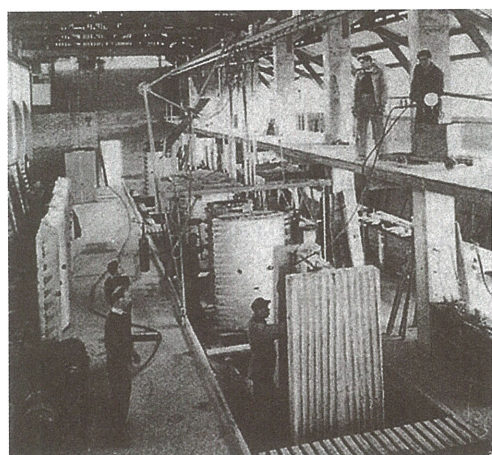
そののち、フレシネーは1947～1951年にかけてマルヌ川にさらに 5 橋の PC 橋を架設した。これら 5 橋の架設地点はそれぞれ異なるが、すべて同一の形状、同一の寸法であるところに特徴がある。これらは、スパン 74m、幅員 8.4m、ライズ 4.96m のフラットなアーチ橋である。I 型桁は Esbly 橋架設地点付近の工場で製造され、プレキャスト部材はマルヌ川を利用して舟運により架設位置まで運ばれ（写真－3.3）、架設にはケーブルクレーンが使用された（写真－3.4）。これらの橋梁は、70年を経た現在でもまったく健全な状態である（写真－3.5）。



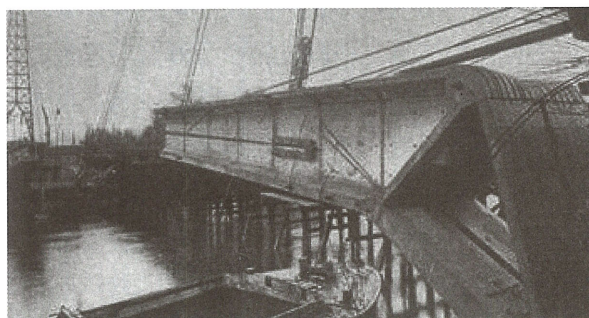
写真－3.1 Luzancy 橋のプレキャスト部材³⁻¹⁾



写真－3.2 Luzancy 橋の架設状況³⁻¹⁾



写真－3.3 プレキャスト部材の製作状況³⁻¹⁾



写真－3.4 プレキャスト部材の架設状況³⁻¹⁾

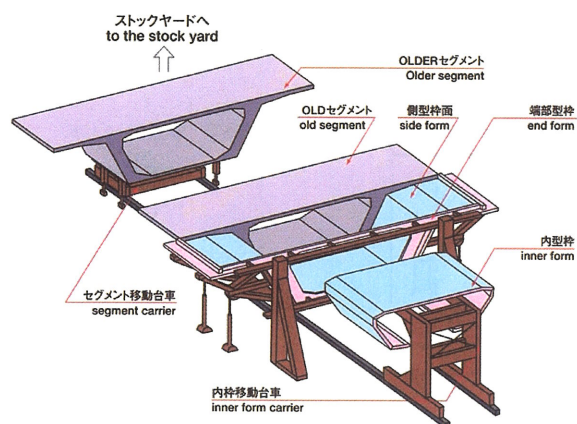


写真－3.5 現在の Luzancy 橋

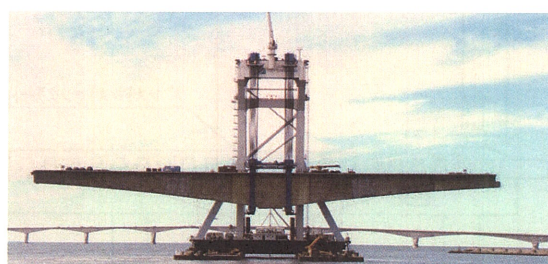
3.1.2 20世紀後半のプレキャスト技術

20世紀後半には大規模プロジェクトにおいてプレキャスト技術が大幅に採用されることとなり、生産性向上を目指してショートラインマッチキャスト工法（図－3.1）が開発された。本工法での実績を表－3.1に示す。

一方、海峡横断プロジェクトでは海上輸送のメリットを活かして、重量が数千トンの大規模プレキャスト桁を一括架設する実績を有している。この実績を表－3.2に、Confederation Bridgeの架設状況を写真－3.6に示す。



図－3.1 ショートラインマッチキャスト工法の概要



写真－3.6 Confederation Bridgeの架設状況³⁻²⁾

表－3.1 海外でのショートラインマッチキャスト工法によるプレキャストセグメント橋の実績

橋 名	国 名	橋 長	セグメント数	完成年
Long Key Bridge	アメリカ	3,701m	734	1981
Seven Miles Bridge	アメリカ	10,931m	2,154	1982
Bubiyah Bridge	クウェート	2,383m	593	1983
Sunshine Skyway Bridge	アメリカ	(不明)	584	1987
Kempis Chuspita	ベネズエラ	5,500m	1,800	1987
Biloxi Interstate-110 viaduct	アメリカ	3,097m	2,164	1988
Metro Viaduct	メキシコ	18,700m	6,503	1989
バンコク第二高速道路	タイ	17,000m	14,474	1993
Mid-Bay Bridge	アメリカ	5,870m	(不明)	1993
Riverside Viaduct	韓国	3,670m	(不明)	1993
Sun Antonio "Y" Project	アメリカ	16,000m	4,844	1994
C&D 運河橋（アプローチ部）	アメリカ	914m	590	1995

表－3.2 海峡横断プロジェクトにおけるプレキャストセグメント橋の実績

橋 名	国 名	橋 長	径間数	完成年
Great Belt Link West Bridge	デンマーク	6,611m	63	1997
Confederation Bridge	カナダ	12,910m	43	1997

3.2 わが国におけるプレキャスト技術の歴史

3.2.1 長生橋でのプレキャスト技術

わが国の PC 技術の実用化は1951年に施工されたプレキャスト製品の長生橋³⁻³⁾から始まる。この長生橋は桁長 3.84m のプレテンション部材を 1 径間32本、3 径間で計96本用いたものである (図-3.2)。なお、桁重量は 254kg あり、これを 4 人がかりで架設したとのことである (写真-3.7)。



写真-3.7 長生橋の架設状況³⁻³⁾

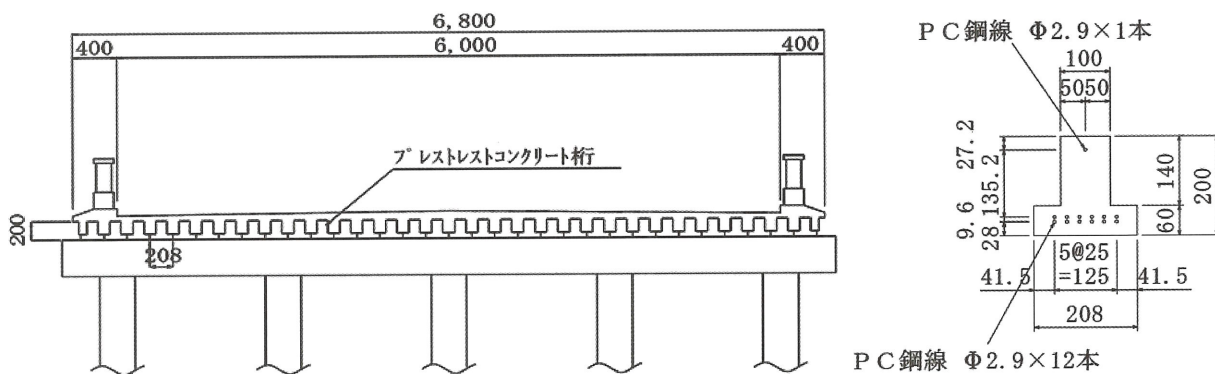


図-3.2 長生橋の断面図³⁻³⁾

3.2.2 プレテンション桁の標準化

プレテンション桁橋については、当初は PC 専門建設業各社がそれぞれ独自に開発した桁断面の橋桁が建設されていたが、プレテンション橋の普及とともに、1959年に JIS A 5313「スラブ橋用プレストレストコンクリート橋げた」、1960年に JIS A 5316「けた橋用プレストレストコンクリート橋桁」、1963年に JIS A 5319「軽荷重スラブ橋用プレストレストコンクリート橋げた」が制定されている³⁻⁴⁾。

これらの JIS 桁は技術の進歩に応じて改正および統廃合され、現在は JIS A 5373推奨仕様 B-1 に「道路橋用橋げた」として定められている。この仕様では適用支間長は 24m までであり、形状などが統一されて生産性の高い構造形式となっている。JIS A 5316および JIS A 5373における「けた橋用プレストレストコンクリート橋げた」の断面の形状の変遷の事例を図-3.3に示す。

年度	1960年制定	1971年改正	1980年改正	1991年改正	1995年改正
断面寸法					
適用支間	8~15m	10~21m	10~21m	14~21m	18~24m

図-3.3 JIS における「けた橋用プレストレストコンクリート橋げた」の断面形状の変遷³⁻⁵⁾

3.2.3 PC コンボ橋の開発

支間長が 24m を越える PC 橋梁はポストテンション方式となる。一般的には場所打ち桁で計画されるが、この範囲の橋梁についても工場で分割して製作されたプレキャスト桁を現場でポストテンション方式により一体化する方式が提案された。

この技術開発においては、建設省土木研究所（当時）とプレストレスト・コンクリート建設業協会（PC 建協）がプレキャストブロックに関する共同研究を行い、ブロック継ぎ目でのせん断伝達機構およびせん断耐力を明らかにしている^{3-6)~3-8)}。

次に、主桁数を減らし主桁間に PC 板を設置して埋設型枠とし、床版部を場所打ちの合成床版とすることで省力化と経済性を両立させる構造を開発している^{3-9)、3-10)}。この形式の橋梁は「PC コンボ橋」という名称で普及し、支間長 25~45m の中規模橋梁の生産性向上に貢献している。現在は JIS A 5373 推奨仕様 B-2 に道路橋橋げた用セグメントとして定められている（図-3.4、写真-3.8）。

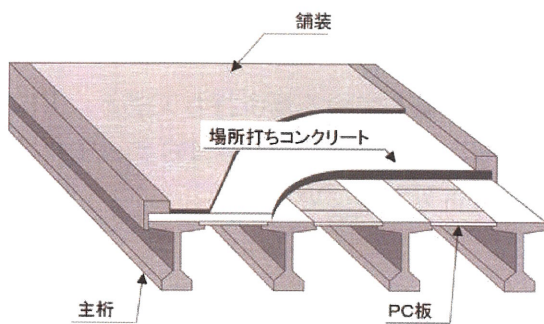


図-3.4 PC コンボ橋の概念図



写真-3.8 PC コンボ橋の主桁製作状況

3.2.4 プレキャストセグメント工法の実用化

わが国では高速道路の供用が急ピッチで進められ、新東名・新名神高速道路の建設は1990年代から本格化している。この新東名・新名神高速道路では大規模橋梁が多数計画され、生産性向上を目的にプレキャストセグメント工法が多数取り入れられている。とくに広大な製作ヤードを確保できる伊勢湾岸地区では、多くの橋梁が施工された。その中でも木曽川橋・揖斐川橋はセグメント重量が 400ton にも達する巨大セグメントを海上輸送して架設している。

さらに、プレキャストセグメントを既存の工場にて製作する橋梁（古川高架橋・西平尾高架橋・上和会高架橋など）、コア断面をプレキャストセグメントで架設し、その後、張出床版を場所打ち施工する橋梁（内牧高架橋）のような、さまざまなバリエーションをもつ橋梁が設計施工されている。

また、海上の長大橋梁においても、施工時の生産性向上と品質向上を目的としてプレキャストセグメント工法が採用されており、この事例としては古宇利大橋や伊良部大橋がある。

わが国における代表的なプレキャストセグメント橋の実績を表-3.3に示す。

表-3.3 わが国における代表的なプレキャストセグメント橋の実績

橋 名	所在地	橋梁形式	橋長 (m)	セグメント数	完成年
重信高架橋	愛媛県	(4 + 5 + 6) 径間連続 PC 箱桁橋	1,901	749	1996
弥富高架橋	愛知県	(7 + 11 + 12) 径間連続 PC 箱桁橋	1,519	1,481	1999
揖斐川橋	三重県	5 径間連続鋼 PC 複合箱桁橋	1,397	204	2001
木曽川橋	三重県	4 径間連続鋼 PC 複合箱桁橋	1,145	170	2001
古川高架橋	三重県	(9 + 10 + 13) 径間連続 PC 箱桁橋	1,475	1,276	2002
西平尾高架橋	三重県	10径間連続 PC 箱桁橋	426	437	2002
上和会高架橋	愛知県	17径間連続 PC 箱桁橋	1,262	1,028	2003
内牧高架橋	静岡県	21径間連続 PC 箱桁橋	2,072	636	2004
古宇利大橋	沖縄県	8 径間連続 PC 箱桁橋 他	1,960	550	2004
伊良部大橋	沖縄県	(32 + 14) 径間連続 PC 箱桁橋	3,540	977	2015

4. プレキャスト技術の適用性

4.1 適用できる領域

PC 橋では、現場でコンクリートを直接打込み橋体を構築していく場所打ち工法と、主に工場製品の主桁を橋体構造として用いるプレキャスト工法に大きく分けられる。PC 橋の主な構造形式は、一般的に支間長を1つの目安に図-4.1のように区分されている。

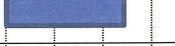
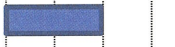
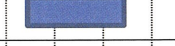
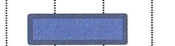
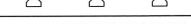
主桁形式			断面形状		標準支間長(m)					
					10	20	30	40	50	60
プレキャスト工法	プレテンション工法	スラブ桁		5~24						
		T 桁		18~24						
	ポストテンション工法	現場製作桁	T 桁		20~45					
			合成桁		20~40					
		工場製作プレキャストセグメント桁	スラブ桁		25~45					
			バルブ T 桁		25~45					
			コンボ橋		25~45					
			U コンボ橋		40~60					
場所打ち工法	ポストテンション工法	中空床版橋		20~30						
		版桁橋		20~35						
		箱桁橋		30~						

図-4.1 PC 橋の適用支間長

この中で支間長 24m 以内であれば、場所打ち工法に比べ経済性、施工性、耐久性などで優れるプレテンション方式の PC 桁を用いるケースが多く、主桁断面はスラブ桁と T 桁に分類され、支間長や架設される現場の適合条件などにより使い分けられる（図-4.2）。

		プレテンション方式		ポストテンション方式（セグメント桁）		
		スラブ桁	T 桁	スラブ桁	バルブ T 桁	PC コンボ橋
主桁断面						
適合斜角		90～60°	90～70°	90～60°	90～70°	90～70°
制約条件	平面線形変化に対する適合性	◎	○	◎	△	○
	桁高制限への適合性	◎	○	◎	○	△
	反力低減への適合性	○	◎	△	◎	○
	塩害対策への適合性	◎	○	◎	○	△
	現場での施工速度への適合性	◎	○	◎	○	△
	経済性への適合性	○	◎	△	○	◎

注1：プレテンション方式、ポストテンション方式それぞれの工法で順位付け

注2：凡例：◎適合性が高い，○適合性は普通，△適合性は高くない

図-4.2 プレキャスト桁の適合性

支間長 24m 以上となると PC 桁の運搬ができなくなることから、ポストテンション方式が採用され、経済比較などにより場所打ち工法かプレキャスト工法に選択される。そのプレキャスト工法では、近年、PC 工場でセグメント桁として製作され、現場で一体化されるプレキャストセグメント構造が増えており、その主桁断面は安定して自立可能なスラブ桁、T 桁、I 桁、U 桁断面などが用意されている（図-4.2）。

現在ある技術を用いてもプレキャスト化が可能な範囲は図-4.3に示すように広く、これまで PC 橋が不得意であった 40～60m の範囲でも U コンボ橋（図-4.4）によって構造的、経済的にも適応できるようになっている。

このほかにも、一定規模の PC 箱桁橋であれば、場所打ち構造の一部をプレキャスト化させる技術もあり、プレテンション・プレキャストウェブ（写真-4.1）や PC コンボ橋と同様に上床版の一部に PC 板

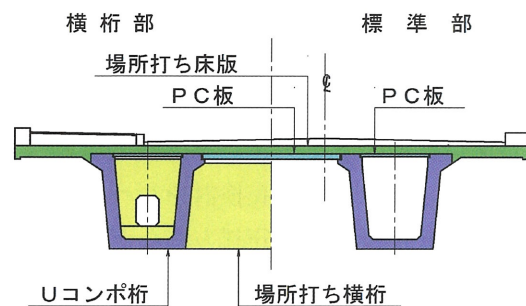


図-4.4 U コンボ橋断面図

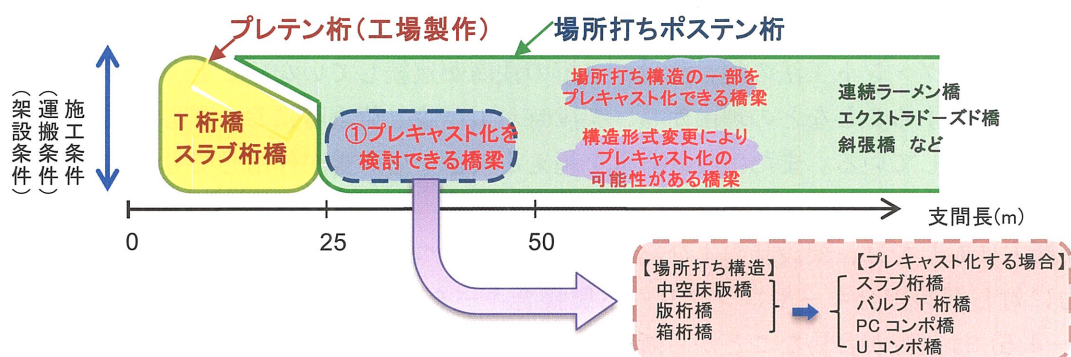


図-4.3 プレキャスト化の対象となる橋梁⁴⁻¹⁾

(写真－4.2)を用いた実績もある。さらに大規模なPC箱桁橋となれば箱桁断面のすべてをプレキャスト化(写真－4.3)、もしくは箱桁断面の一部だけをプレキャスト化(写真－4.4)するセグメント工法も採用することができる。



写真－4.1 プレキャストウェブ構造



写真－4.2 箱桁上床版に配置したPC板



写真－4.3 フルプレキャスト箱桁断面



写真－4.4 部分プレキャスト箱桁断面

4.2 各段階における配慮事項

4.2.1 設計時における配慮事項

プレキャストセグメント工法の計画にあたっては、通常のPC橋と同様に架設地点の諸条件などについて十分な調査検討を行うと共に、セグメントの製作箇所、製作方法、運搬方法、架設方法、主桁断面形状、分割方法などについても計画する必要がある。とくに公道でセグメントを運搬する場合は、道路法、道路交通法などにより搭載寸法や積載重量が制限されることから、主桁断面形状や分割方法など運搬面からも検討する必要がある。

設計段階においては、製造時、吊上げ時、運搬時、そして架設といくつかの施工段階を踏まえ橋体が完成されることから、各施工段階の安全性を確保した設計をしなければならない。とくにプレキャストセグメント工法の継目部は、主桁の鉄筋が連続していないこと、接着剤が硬化するまでに時間を要することなどの理由から、架設時および設計荷重時においても引張応力度を発生させない設計としている。また、設計荷重を超える大きな活荷重が作用しても継目部にひび割れが発生しないように制限している。

せん断力に対しては、架設時および終局荷重作用時について照査を行い、継目部に作用するせん断力に対し鋼製接合キーやコンクリート製接合キーを用いて抵抗させている。鋼製接合キー(写真－4.5)は設置が容易なことから断面力の少ない支間45m以下のT桁橋などのプレキャストPC桁に多く用いられ、箱桁断面のような大規模な構造物ではコンクリート製接合キー(写真－

4.6) を多段配置しているケースが多い。

近年、PC 構造物の耐久性向上のためにポリエチレン (PE) シースを用いるケースが増えてきているが、プレキャストセグメント桁に PE シースを配置する場合、その外径が大きくなることから部材内への配置が懸念される。そのため、「PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)」⁴⁻²⁾ では、PC 鋼材が後挿入であっても先挿入用のシース径を用いてよいとするなど、シース径の選択方法も示している。また、継目部においてはセグメントカップラーの使用を標準とし、仮に目開きが生じて直接、PC 鋼材に腐食促進物質が触れないような配慮が示されている。

なお、プレキャストセグメント工法の設計施工時に用いる規準類としては、「道路橋示方書Ⅲ 17章」、「外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法の設計施工規準」⁴⁻³⁾ などがあり、PC 建協からも各種構造の標準設計資料⁴⁻⁴⁾ ~⁴⁻⁸⁾ が用意されている。

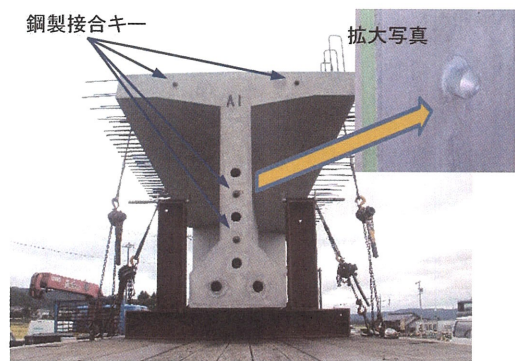


写真-4.5 鋼製接合キー

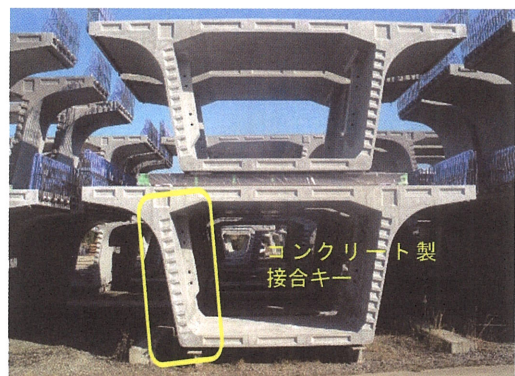


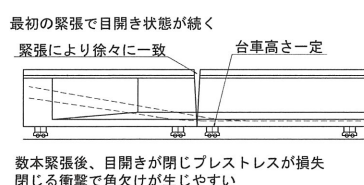
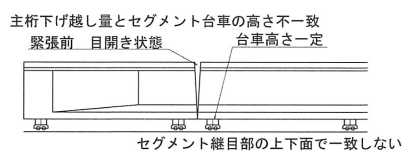
写真-4.6 コンクリート製接合キー

4.2.2 施工時における配慮事項

吊上げ時、仮置き時および運搬時のプレキャストセグメントは、主方向にプレストレスが導入されていないこともあり、設計時に検討された支持位置、支持方法など設計図書に記載された施工方法と施工順序に従うとしている。

セグメントの施工では、既に製作されたセグメントを順次、接合、架設していくため、施工段階での修正は困難であり、製作段階のセグメント形状管理はとくに重要となる。また、架設段階においても、種々の要因で誤差が生じることから、これらの誤差を把握し、その誤差要因に対する調査・分析、そして可能ならば以降に製作されるセグメント形状へのフィードバックも必要となる。T 桁などのセグメントの接合時は、主に下げ越し管理を行い製作しているため、製作時の

【下げ越し量が不一致の場合】



【下げ越し量が一致している場合】

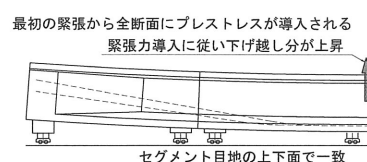
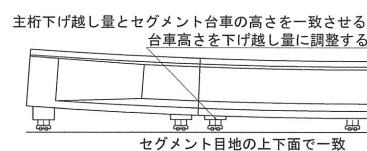
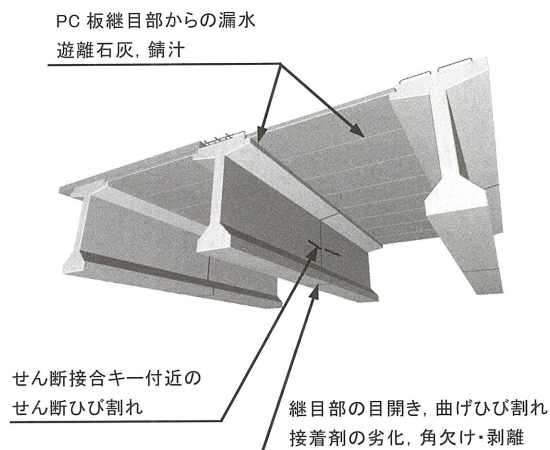


図-4.5 プレキャストセグメント桁接合時の留意点

下げ越し量と接合時の下げ越し量が一致していないと接合面が一致しないケースがある。このような場合は、部材縁に局部的なプレストレスの作用や緊張作業による接合面同士の衝突により、角欠けやプレストレスの損失につながる恐れも生じる（図－4.5）。とくに架設桁上で接合する場合は、架設桁のたわみの影響も生じることからこれらも考慮した管理が求められる。

4.2.3 維持管理における配慮

プレキャストセグメント橋の維持管理は、基本的に通常のPC橋と変わるものではないが、継目部が弱点となりやすい。PCコンボ橋を例に着目する項目を図－4.6に示す。継目部付近は、コンクリート引張縁の目開き、曲げひび割れ、施工時の角欠けや剥離、接着剤の劣化、せん断接合キー付近のせん断ひび割れ、そして床版部ではPC板の継目部などからの漏水が考えられる。これらの損傷が大きくなる場合は、腐食促進物質が部材内部に侵入しやすくなることから十分注意して点検する必要がある。



図－4.6 維持管理時の着目点

5. プレキャスト技術による特徴的な構造物

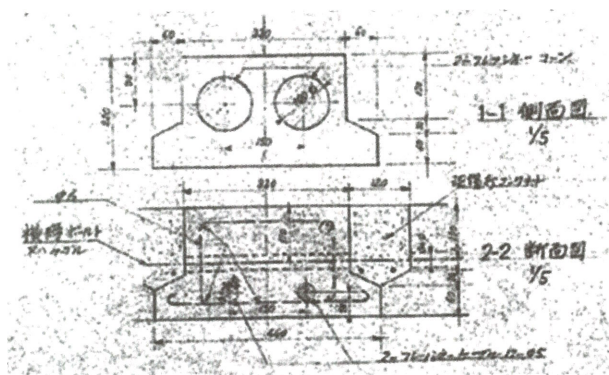
5.1 国内の事例

5.1.1 橋梁上部工

(1) 歴史的な橋梁

長生橋から始まったPC橋の技術は、国内に導入されてすでに60年以上を経過している。この間にさまざまな調査研究が行われ、優れた耐久性を有していることが確認されている。

十郷橋（図－5.1）（写真－5.1）は、国内初となるポストテンション方式の橋梁として1953年に架橋されており、建設から60年以上が経過した現在でも供用されている。1954年に建設された第一大戸川鉄道橋（図－5.2）（写真－5.2）は、スパン 30m のPC橋として建設され、本格的なPC鉄道橋の第一号となった。両橋ともに、建設から50～60年後に調査が行われており、コンクリート圧縮強度、中性化深さ、塩化物イオン濃度、表面透気試験の優れた結果も示され、きわめて耐久性の高いコンクリートであることが確認されている⁵⁻¹⁾。



図－5.1 十郷橋断面図



写真－5.1 十郷橋

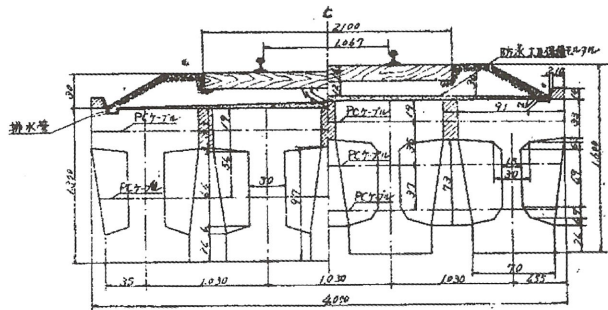
図-5.2 第一大戸川鉄道橋断面図⁵⁻²⁾

写真-5.2 第一大戸川鉄道橋

(2) フルプレキャスト化した橋梁

大規模橋梁では、現場付近に製作ヤードを設け、箱桁断面のプレキャストセグメントを製作し、現場で一体化する工法が多く用いられている。

新名神高速道路の木曽川橋・揖斐川橋（写真-5.3）は、鋼コンクリート混合構造であり、コンクリート桁部はプレキャストセグメントを用いたPC箱桁としている。プレキャストセグメントを製作ヤードより台船にて海上運搬し、エレクションノーズにて吊上げ架設を行っている。

伊良部大橋（写真-5.4）は、架設桁を用いて施工された海上架橋であり、極めて厳しい環境条件下の橋梁である。そのため、耐塩害性向上対策として、鉄筋には、エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋、CFCC（炭素繊維複合材ケーブル：Carbon Fiber Composite Cable）を使用し、PC鋼材もエポキシ樹脂被覆鋼材、PE シース、定着具はエポキシ樹脂塗装品を標準としている。



写真-5.3 木曽川橋・揖斐川橋の架設状況



写真-5.4 伊良部大橋架設状況

(3) 一部をプレキャスト化した橋梁

橋梁の一部をプレキャスト化し、場所打ちコンクリートと組み合わせる技術も開発されている。鉄筋量の多い部位やコンクリート打設が困難な部位をプレキャスト化することは、施工の合理化や品質向上に有効な対策である。

中新田高架橋（写真-5.5）は現場施工の省力化およびウェブの品質向上を目的としてプレテンション・プレキャストウェブが採用された橋梁である。通常、場所打ちで施工されるPC箱桁橋のウェブをプレキャスト部材に置き換えた箱桁橋で、本橋では約4,000枚のプレキャストウェ

ブ部材を採用している。ウェブ部材をプレキャスト化したことで、現場作業の省力化およびウェブの品質向上を実現している⁵⁻³⁾。

桶川第2高架橋(写真-5.6)は、工場製作されたプレキャストセグメントによるスパンバイスパン工法が採用されている。セグメントを軽量化するために、PC箱桁の上床版を後打ち施工するリブ付きU形コアセグメントを使用し、さらにウェブにはバタフライウェブのプレキャスト部材を採用している。このコアセグメント断面の採用により、主桁の軽量化、工期の大幅短縮が可能となった⁵⁻⁴⁾。



写真-5.5 中新田高架橋



写真-5.6 桶川第2高架橋

鉄道の高架化事業として、京急蒲田駅付近連続立体事業(写真-5.7)(図-5.3)においてもプレキャスト部材が使用されている。鉄道営業線直上でラーメン高架橋を構築する上で、夜間作業の短縮、騒音による近隣環境対策として、足場型枠機能を兼用できるハーフプレキャスト部材を採用している。ハーフプレキャスト部材を使用することで、狭隘用地においても施工可能となり、現場での作業量の低減、工期短縮が図られている⁵⁻⁵⁾。



写真-5.7 京急蒲田駅付近連続立体事業

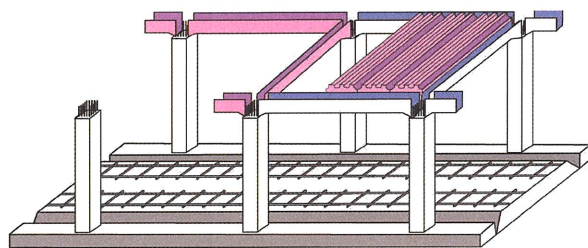


図-5.3 京急蒲田駅付近連続立体事業プレキャスト部材概要図

(4) 維持更新への対応

1975年に竣工した沖縄自動車道の億首川橋は、場所打ちRC中空床版橋の劣化が顕著になってきたため、プレテンション方式スラブ桁橋に架け替えられた(写真-5.8)。既存の2柱式橋脚に対応するために、支承線上の横梁を介してPC桁を連結する構造を採用し、架替え時の対面通行期間を短縮している。

劣化した鋼橋のRC床版の取替え工事においても、プレキャスト技術が活用されている（写真－5.9）。塩害や疲労により劣化したRC床版を、工場で製作されたプレキャストPC床版に取替えることで、従来よりも高耐久化を図ることができる。また、現場での作業も省力化できるため、急速施工が求められる床版取替え工事には有効となる。



写真－5.8 億首川橋架設状況



写真－5.9 鋼橋の床版取替え工事

5.1.2 橋梁下部工

橋脚の施工は、河川内施工における渇水期による施工期間の制約、既設構造物との近接施工による掘削の制約などを受けることがある。また、耐震性を確保するため下部工の配筋が密になることも多くあり、現場施工における品質確保、工期短縮を図るうえで大きな課題となっている。このような課題に対し、下部工のプレキャスト化は有効な手段になると期待されている。

(1) プレキャスト橋脚

写真－5.10は既設構造物に近接した橋脚をプレキャスト化して急速施工した事例である。橋脚部材を輪切りにしたセグメントを工場製作し、現地に運搬して積み重ね、鉛直方向にプレストレスを与え一体化して橋脚を構築することで、現場施工の省力化、工期短縮が図られている。

(2) ハーフプレキャスト橋脚

写真－5.11は高橋脚の円形中空橋脚の一部を工場製作したプレキャスト部材を用いて急速施工した事例である。現場での配筋作業の削減を目的として、橋脚表面を形成するプレキャスト部材に帯鉄筋や中間帯鉄筋をあらかじめ組み込



写真－5.10 プレキャスト橋脚



写真－5.11 ハーフプレキャスト橋脚

んだ構造とすることで、現場作業における鉄筋や型枠組立てが省力化でき、従来の場所打ち施工より2倍の速度で完成に至った⁵⁻⁶⁾。

5.1.3 カルバート

近年、PC技術を活かした大型プレキャストボックスカルバートが開発され、採用事例が増えている。PC構造を採用することで、部材の薄肉化が図れることに加え、頂版部材を複数のセグメントに分割して製作し、現地でプレストレスを与えて一体化することができる。そのため、運搬などの制約により従来プレキャスト化が難しかった内空幅15mクラスのボックスカルバートもプレキャスト化できることから、適用性の拡大に寄与している(写真-5.12)。



写真-5.12 大型ボックスカルバート

5.1.4 海洋構造物

海水の影響を強く受ける海洋・港湾構造物でも、耐久性や施工性を改善する目的でプレキャスト化が進んでいる。プレキャスト部材は生産設備が整った工場で作製するため、品質が安定していることに加え、高強度化や混和材等の使用によってコンクリートをより緻密にし、耐久性を向上させることができるという利点がある。代表的な海洋構造物であるPC栈橋の事例を写真-5.13に示す。



写真-5.13 PC栈橋

5.1.5 容器構造物

(1) PCタンク

PCタンクは浄水場、排水池、貯水槽などさまざまな容器構造物に採用されている。PCタンクの側壁部をプレキャスト化したPCタンクは、容量が $5,000\text{m}^3$ 以下の小規模なPCタンクに採用されることが多いが、実績としては容量が $10,000\text{m}^3$ を超える事例もある。また、写真-5.14は、内径80.0m、有効水深10.5m、有効容量 $50,000\text{m}^3 \times 2$ 基の大型のPCタンクであるが、安定した品質が得られ工期短縮につながるプレキャスト部材がPCタンクの屋根の一部や柱に使用されている⁵⁻⁷⁾。



写真-5.14 PCタンク

(2) 雨水調整池

集中豪雨時に雨水を貯留するための雨水調整池をプレキャスト部材で施工した事例⁵⁻⁸⁾を写真-5.15に示す。屋根部材をPC構造とすることで柱間隔が広くなり有効貯水量を向上させることができ、また主な部材をプレキャスト化することで現場工期を短縮できるという利点がある。



写真-5.15 雨水調整池

5.1.6 防災構造物

(1) ロックシェッド、スノーシェルター

ロックシェッド（写真-5.16）や、スノーシェルター（写真-5.17）などにもプレキャストPC部材が多く採用されている。このように道路全体を覆う構造物は、現道を規制して施工することが多く、交通への影響を最小限にするため工程短縮が強く求められることから、急速施工ができるプレキャスト部材の使用が適している。



写真-5.16 ロックシェッド



写真-5.17 スノーシェルター

(2) 津波避難施設

津波被害を低減させるため、高地への迅速な避難が困難な沿岸地域において、津波避難人工地盤（写真-5.18）がプレキャストPC構造によって建設されている⁵⁻⁹⁾。PC構造とすることで、柱間隔を広くすることが可能となり、津波の波圧作用面積を少なくできること、また人工地盤下の空間を有効利用できる利点がある。PC構造は剛性・じん性が高いため、津波に対して安定した構造が維持できるとともに、プレキャスト化によって大幅な工期短縮と高い耐久性が確保できる。



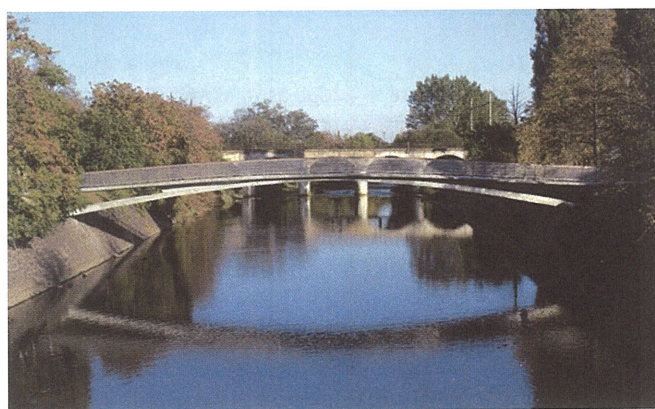
写真-5.18 津波避難人工地盤

5.2 海外の事例

5.2.1 欧州の事例

プレキャスト部材を用いたアーチ橋は、欧州での採用実績が多く見受けられる。チェコ共和国のブルノに架橋されたアーチ構造の歩道橋（写真－5.19）は、すべての部材がプレキャスト化された事例である⁵⁻¹⁰⁾。本橋は2010年に *fib* Award for Outstanding Concrete Structures を受賞しており、支間 42.90m に対してアーチライズ 2.65m、スパンライズ比が 1/16 と扁平なアーチ構造となっている。扁平構造であることから、自碇式構造を採用することで橋台に作用する水平力を低減している。歩道部の有効幅員は 3.0m、プレキャスト床版の厚さは標準部が 0.220m、PC 鋼材を配置する幅員中央部で 0.326m となっている。

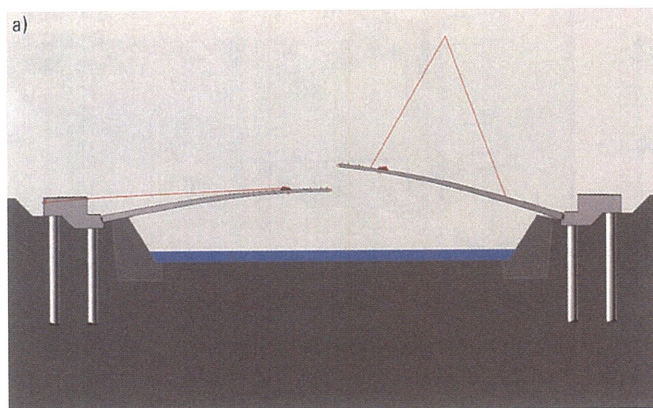
架設方法は、2 主桁で構成されるプレキャストアーチ部材を支間中央部で 2 分割して両橋台背面から架設し（写真－5.20）、橋台に固定させた仮設 PC 鋼材でアーチ構造を支持する（図－5.4）。それぞれのアーチ部材の架設が完了した後、アーチ高さを調整して仮設 PC 鋼材を外ケーブルに設置し直し、アーチ構造を自立させる。プレキャスト床版は、架設した後に床版幅員中央にあるダクト（写真－5.21）に PC 鋼材を配置して、プレストレスを導入している。支間中央部のアーチ部材と床版との接合にはスタッドを採用している。



写真－5.19 ブルノの歩道橋⁵⁻¹⁰⁾



写真－5.20 アーチ部材の設置⁵⁻¹⁰⁾



図－5.4 アーチ部材架設⁵⁻¹⁰⁾



写真－5.21 床版の設置⁵⁻¹⁰⁾

プレキャスト技術の採用が進んでいる欧州では、高速鉄道の高架橋においてもプレキャスト部材を積極的に採用し、工期短縮とコスト低減を図っている。2005年に完成したフランス国鉄が運

営する高速鉄道（TGV）の José 高架橋⁵⁻¹¹⁾、Herve 高架橋⁵⁻¹²⁾、Battice 高架橋⁵⁻¹³⁾ は、ブリュッセルから東へ約 90km のベルギー東部リエージュからドイツのケルンを結ぶ高架橋である。本橋は橋脚および主桁、床版の大部分がプレキャスト化された高架橋であり、橋脚形状が V 型で、橋脚と主桁は PC 鋼棒で剛結されたラーメン構造となっている。橋長は、それぞれ 422m、459m、1,227m、幅員は 5.6m で計画されている。

主桁支間部の部材長は最大 40m 程度で、2 基の V 脚と主桁がラーメン構造で接合されており、V 脚部の主桁には水平方向のストッパーが配置される。主桁に使用する PC 鋼材は、1 主桁あたり 19S15.2 が左右のウェブに 4 本ずつ 8 本配置され、橋脚と梁の接合には $\phi 75\text{mm}$ PC 鋼棒が用いられている。施工状況を写真-5.22、床版部材の仮置き状況を写真-5.23 に示す。



写真-5.22 施工状況



写真-5.23 床版部材

5.2.2 アジア諸国での事例

最近のアジア諸国での案件では、国内で採用実績のある下部工のプレキャスト技術を活用した事例がある。タイ王国ノンタブリ県に架橋されたノンタブリ橋は、PC 3 径間連続エクストラドーズド箱桁橋で、橋長は 460m、全幅員は 32.8m である。現地特有の感潮河川であることから、干潮時の施工を短期間かつ確実にを行うため、フーチングの側面と底板をハーフプレキャスト化して陸上で事前製作する方法を採用した（写真-5.24）。さらに、上部工においては、広幅員であることや主桁断面中央部に斜材定着部が設置されることから、断面剛性の向上と省力化を図るために上床版に配置するリブ部材をプレキャスト部材とし、張出し架設時の施工サイクルを短縮させている（写真-5.25）⁵⁻¹⁴⁾。



写真-5.24 下部工プレキャスト部材

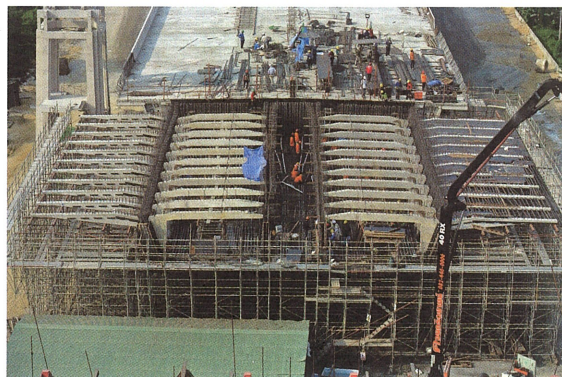


写真-5.25 上床版リブプレキャスト部材

6. プレキャスト技術の将来

6.1 生産性向上に対する貢献

わが国の建設業が現在抱えている大きな課題は、近々に予測される技能労働者の高齢化問題であり、いわゆる「担い手不足」への対処である。この喫緊の課題に対して先般、国土交通省から建設業界に「生産性向上」の方針が出された。これは、合理化・省力化・情報化施工により生産性を向上させ、技能労働者の不足分を補うというものである。そして、これらに有効な技術として「プレキャスト技術」が着目され、活用を促されている。

プレキャスト技術がなぜ生産性向上に対して相性がいいのか。大きな理由として以下の3つの特質が挙げられる。

①急速施工が可能

プレキャスト工法は、構造物を構築する場所と別の場所で先行して部材を製作すること、現地では製作した部材を架設・組立てといった作業が主となることから、場所打ち工法において工程上クリティカルとなる多くの項目を排除できるため、急速施工が可能となる。

②機械化施工が可能

PC工場や現場近傍の製作ヤードなどで製作を行うため、繰り返し使用できる定置式の機械設備を多く配備できる。また、これらを運搬して架設するため、トレーラーなどの運搬機械、クレーンやエレクションガーダーなどの大型架設機械を有効に活用することができる。

③合理化・省力化が可能

一括架設、現地条件に合わせた適材適所の部分プレキャスト化、埋設型枠兼用など合理化・省力化技術を取り入れやすい。

6.2 プレキャスト技術で得られる付加価値

プレキャスト技術には以下のような付加価値が得られる。

①環境への配慮（施工中の環境負荷低減）

市街地における工事などでは、部材の製作場所を建設地と別に配備することで、現場での施工量を減らせるプレキャスト技術は、施工中の周辺環境に配慮した工事を可能とする。

②省力化・省人化

機械化・ICT技術活用などによる省力化が可能となり、技能労働者の不足を補える。また、適切な休日確保することで、技能労働者の労働環境改善が図れ、モチベーションを向上させることができる。

③社会的便益の向上

工期短縮が図られ、公共構造物の早期供用による経済効果、通行規制期間の短縮など、社会的便益性を向上させることができる。

④温室効果ガスの抑制

PC構造物への低炭素型コンクリートや高強度コンクリートの研究が進められ、工場製作部材へ適用が増えてきている。これによりCO₂排出量の削減に寄与できる。

⑤耐久性およびライフサイクルコスト

工場製作とすることで、従来から言われている品質管理の高度化による高耐久化に加え、高強度の繊維補強コンクリートや高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど高耐久性コンクリートを採用できるため、耐久性の高いコンクリートを得ることができる。

6.3 評価手法の提案

わが国におけるこれまでのプレキャスト技術は、工期は短縮できるが初期コストが高い、という理由で採用が見送られることが多かった。また、採用される工事は、工事規模が大きく経済比較で優位性が得られる場合に限定されていた。

しかしながら、プレキャスト技術は多様な付加価値を有しており、その付加価値を考慮すると、わが国の現在から近い将来にかけた国民の要望に応えることが可能な技術である。そのためには、計画・設計段階における構造選定時に、これらの付加価値を客観的・定量的に評価できる手法の確立が急務であると考え⁴⁻¹⁾。

表-6.1にプレキャスト構造の選定時における評価項目の案を示す。

表-6.1 プレキャスト構造の選定時における評価項目 (案)

項 目		評価手法 (案)
構造形式選定における従来の評価項目	構造特性	
	工期	・ 着工から完成までの総日数
	経済性	・ 初期コスト
	施工性	
	景観性	
	維持管理性	・ 定期的なメンテナンスの必要性。点検の容易性。
プレキャスト技術を用いることで向上する付加価値の評価項目	環境配慮	・ 騒音・振動 定量的指標：騒音（振動）累積値＝Σ（各作業時間×dB） ・ 粉塵 定量的指標：粉塵発生の可能性＝Σ（粉塵発生作業時間） ・ 水質汚濁 定量的指標：コンクリート打設時と仮定＝現場で打設するコンクリート体積
	省力化・省人化	・ 労務 定量的指標：調達容易性＝現場での労務者延べ人数 ・ 省力化・省人化 定量的指標：現場生産性＝（労務者数）×（施工日数） ・ 作業所全休日 定量的指標：休日確保＝作業所全休日
	社会的便益	・ 早期開通による経済効果 定量的指標：社会的便益性（早期開通）＝社会的コスト効果 ・ 現場工期短縮による経済効果 定量的指標：社会的便益性（現場工期短縮）＝外部コスト（通行規制の影響をコスト換算）
	温室効果ガス抑制	・ 低炭素型セメント採用による効果 定量的指標：低炭素型セメント使用＝CO₂ 排出量 ・ 高強度コンクリート採用による効果 定量的指標：高強度コンクリート使用＝CO₂ 排出量
	耐久性・LCC	・ 高強度コンクリート採用による効果（高炉セメント使用も同様） 定量的指標：高強度コンクリート使用＝塩分浸透抵抗性、中性化速度 ・ 工場製作により耐久性向上 定量的指標：工場製作による高品質化＝工場で作成するコンクリート体積

7. おわりに

プレキャスト技術は、フレシネーの例を見るまでもなくとくに目新しい技術ではない。従来、工期の短縮や施工の省力化などの観点から採用されてきたプレキャスト技術を耐久性向上の観点

からも、もっと前向きに評価すべきである。

その際に、プレキャスト化特有の問題である継目の一体化の問題が指摘されることも事実である。しかしながら、PC 構造の分野では、マッチキャスト技術、ならびにプレストレスの導入により、部材同士の一体化の問題には十分に対応できている。さらに、部材間で異形鉄筋の一体化が求められる場合には、たとえば、モルタル充填式の機械式継手も利用可能となっていることから、一体化の問題は、もはや大きな障害にならないものと思われる。ぜひ、品質に優れたプレキャスト部材を使用して、良質な社会インフラの建設に努めてほしいと願うものである。

参考文献

- 2-1) 土木学会：コンクリートライブラリー125「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」、2005.11
- 3-1) J. A. Fernandez Ordonez (池田尚治 監訳)：PC 構造の原点フレシネー、2000.5
- 3-2) <http://www.confederationbridge.com/media-room/photo-gallery.html>
- 3-3) 奥田由法：長生橋物語、ピーエス三菱技報第4号、2006.10
- 3-4) プレストレストコンクリート工学会：コンクリート構造診断技術、2016.4
- 3-5) 道路保全技術センター：橋梁技術者のための橋梁技術の変遷、2005.11
- 3-6) 建設省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書（Ⅰ）、1992.3
- 3-7) 建設省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書（Ⅱ）、1993.3
- 3-8) 建設省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書（Ⅲ）、1994.3
- 3-9) 建設省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会：コンクリート橋の設計・施工の省力化に関する共同研究報告書（Ⅰ）、1996.11
- 3-10) 建設省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会：コンクリート橋の設計・施工の省力化に関する共同研究報告書（Ⅱ）、1998.12
- 4-1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC プレス Vol.9、2016.1
- 4-2) プレストレストコンクリート工学会：PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針（案）、2015.8
- 4-3) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工指針、2005.6
- 4-4) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC コンボ橋 設計・施工の手引き [改訂版]、2007.5
- 4-5) プレストレスト・コンクリート建設業協会：JIS A 5373 推奨仕様2-1 道路橋用橋げた 設計・製造便覧、2004.6
- 4-6) プレストレスト・コンクリート建設業協会：JIS A 5373 推奨仕様2-2 道路橋用橋げた用セグメント 設計・製造便覧、2004.9
- 4-7) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 道路橋計画マニュアル [改訂版]、2007.10
- 4-8) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート道路橋 ポス

トテンション方式プレキャストブロック工法 中空床版橋設計図集、1995.3

- 5-1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全―PC 橋の更なる予防保全に向けて―2015年版]、2015.3
- 5-2) 仁杉巖：支間 30m のプレストレストコンクリート鉄道橋（信楽線第一大戸川橋梁）の設計、施工及びこれに関して行った実験研究の報告：土木学会論文集 第27号、1955.7
- 5-3) 藤田清和、桶田康行、荒田成一、宮武竜治、堀内達斗：プレテンションウェブ橋の施工（中田高架橋）、橋梁と基礎、Vol.43、No.5、pp.5-9、2009.5
- 5-4) 樋本 智、池田裕司、中積健一、紙永裕紀：首都圏中央連絡自動車道桶川第2高架橋の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.48、No.11、pp.5-12、2014.11
- 5-5) 太田和幸：京急蒲田駅付近連続立体交差事業、コンクリート工学、Vol.51、No.11、pp.874-875、2013.11
- 5-6) 芦塚憲一郎、黒川秀樹、諸橋 明、松原 勲、水野克彦、富山茂樹：新名神高速道路武庫川橋（仮称）の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.49、No.3、pp.5-11、2015.3
- 5-7) 伊藤朋紀、下川 浩、菅原 伸：新石川浄水場原水調整池の工事報告、プレストレストコンクリート、Vol.54、No.3、pp.24-31、2012.5
- 5-8) 竹中倫明、松川治雄、関東継樹：赤坂町雨水調整池の施工―プレキャスト PC 部材組立式雨水貯留施設―、プレストレストコンクリート、Vol.49、No.5、pp.36-42、2007.9
- 5-9) 所 佳輝、杉浦亮介、岡林秀勝、森田輝生：PCaPC 工法による津波避難施設の施工―掛川市津波避難タワー―、プレストレストコンクリート、Vol.56、No.1、pp.31-36、2014.1
- 5-10) Jiří Stráský, Petr Štefan, Radim Nečas : Footbridge across the River Svratka in Brno, Czech Republic, Structural Concrete 12 (2011)、No.2、pp.76-81、2011.6
- 5-11) <http://structurae.net/structures/jose-viaduct/>
- 5-12) <http://structurae.net/structures/herve-viaduct/>
- 5-13) <http://structurae.net/structures/battice-viaduct/>
- 5-14) 高橋克行、平喜彦、齋藤謙一、二宮大樹：ノントブリ橋の施工、橋梁と基礎、vol.49、pp.2-11、2015.5

PC サステナビリティ宣言について

オリエンタル白石(株)

東京理科大学教授

明治大学教授

(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構

オリエンタル白石(株)

(株)安部日鋼工業

(株)富士ピー・エス

手塚正道

加藤佳孝

小山明男

石井秀和

加藤誠一

國富康志

星野展洋

1. はじめに

現在、将来にわたる持続可能な社会形成に向けた活動として、多くの企業や団体などがサステナビリティを重視するようになってきている。この動向を受け、PC 工学会としても、将来世代により良い環境・社会・経済を受けわたすことに貢献するため、サステナビリティ宣言を発信することとした。また、宣言の内容を理解しやすくするため、参考資料として、PC 技術の変遷、宣言文に対応する具体的な事例、サステナビリティ活動に繋がる事例集を取りまとめている。本報告では、2章に「プレストレストコンクリートサステナビリティ宣言（案）」を紹介し、3章では、宣言を理解しやすくするため、宣言文に対応する具体的な事例を記載する。ただし、紙面の都合によりすべての宣言文に対応して事例を記載することは困難であるため、ここでは参考資料の一部を抜粋した紹介とする。

なお、ここで記載する宣言は試案であり、本報告で提示することによって、関連技術者からの幅広い意見を伺うことを目的としている。

2. プレストレストコンクリートサステナビリティ宣言（案）

宣言（案）の構成

本宣言は、以下の4つのカテゴリーで構成している。

I. サステナビリティ社会に向けて

II. プレストレストコンクリート技術の足跡

III. サステナビリティ社会の実現に向けた PC 工学会の活動（宣言）

1. 社会環境の安全・安心を維持していくため、プレストレストコンクリート技術を活用し、良質な構造物の建設と維持管理に努める。
2. 社会のニーズに対応した構造物の創造を可能とするプレストレストコンクリート技術の開発に努める。
3. 構造物のライフサイクルにわたり、環境負荷低減に努める。
4. 3側面（環境性、社会性、経済性）の見える化を推進し、バランスに配慮した評価に努める。

Ⅳ. PC サステナビリティ活動を継続するために

1. 活動に貢献するため、プレストレストコンクリート技術の継承と発展に努める。
2. 活動を理解する人材の確保と育成に努める。
3. PDCA サイクルを構築し、宣言活動の見直しに努める。
4. プレストレストコンクリート技術の魅力と活動を社会へアピールすることに努める。

カテゴリーⅠでは、PC 工学会として、サステナビリティ宣言を発信することの必要性について、わが国を含む世界的な動向を踏まえて言及している。

カテゴリーⅡでは、宣言は将来に向けての内容であるものの、過去の活動からの連続性が重要になることから、これまでの PC 技術について大筋を顧みている。

カテゴリーⅢは、実際のサステナビリティ宣言の内容を述べている。本カテゴリーは、4つの項目から構成されており、それぞれ、社会性を意識した現在の技術をベースとした活動、社会性を意識した将来の技術開発をベースとした活動、環境性に関する活動、3側面のバランスを意識した活動、について言及している。

カテゴリーⅣは、サステナビリティ宣言の内容を、継続するために必要な活動について述べている。本カテゴリーも4つの項目から構成されており、それぞれ、技術の継承と発展、人材の確保と育成、PDCA サイクルの構築、社会への情報発信、について言及している。

カテゴリーⅠ【サステナビリティ社会に向けて】

人類は文化・文明を発展させることで生活を豊かにしてきた。その中で、科学技術の発展により産業・農業・工業などを発展させ、さらなる生活の質の向上を目指し、自然環境へ生活範囲を広げてきた。多くの資源や燃料が使用されることで経済活動は飛躍的に拡大し、当時はこの活動が人類の生活を豊かにすると信じられていた。しかし時代の経過とともに、資源の枯渇化や廃棄物の増大、生態系の破壊、環境負荷物質の排出といった環境問題、生活水準の向上にともなう加速的な人口増加とそれに付随した食料・エネルギー不足といった社会問題、また、先進国と途上国間での貧富差の拡大といった経済問題が顕在化してきた。そのため、この生活を続けることは将来世代の豊かな生活を奪いかねない問題視されるようになり、20世紀終わり頃から21世紀にかけては、地球規模で「将来世代のニーズを損なうことなく、現代世代のニーズを満たす」サステナビリティ活動が活発に行われるようになってきている。しかし、急激な人口増加が進む発展途上国においては、今後、自国の経済成長を図るために、大量の資源を消費することが想定される。限られた資源を有効に活用し、後世へ可能な限り自然・資源・資財を残すためには、地球規模でのサステナビリティ活動が必要となる。

これは、先進国となった日本国内も同じであり、地球全体に配慮したサステナビリティ活動が求められている。一方、日本は少子高齢化が深刻化しているとともに、従来からの問題であるエネルギー供給問題など、世界で前例のないほど多数の問題を抱える「課題先進国」と言われており、課題解決に向けて早急な対応が求められている。また、これらの諸課題に対して解決策を打ち出すことは、今後同様な問題を抱える国が参考にできるモデルケースを示すこととなり、このような国際社会への貢献を通して、わが国の国際社会におけるプレゼンスを高めることは、今後のわが国にとって重要な戦略である。

ここで、建設関連分野に目を向けると、文化・文明の発展を望む声に対し、社会基盤となる土

木・建築構造物を建設することで貢献してきた。しかし、これらの構造物を整備・運営する上では、資源などを消費することも事実であり、環境問題などが重要視されるにつれ、建設そのものが抑制されるようになった。そののち、東日本大震災で経験した未曾有の災害をとおり、人命確保の重要性が改めて強く意識され、強靱な社会基盤施設の必要性が再認識されている一方で、建設技術者の不足によって復興住宅の供給が停滞するなど、分野全体としての人材不足が顕在化しており、長期的な人材確保の必要性が新たな課題として捉えられている。

プレストレストコンクリート（PC）構造物は、高強度かつ高耐久であるため、長支間化や部材のスリム化、長期健全性確保など、環境への影響を抑制できる技術の一つである。ただし、環境負荷抑制はさらなる改善の余地があるとともに、人材不足などといった課題は、PC 分野も同様に抱えている問題である。PC は20世紀初頭に実用化され、19世紀に主要建設構造であった鋼構造やRC 構造に対し、20世紀後半にはそれらに匹敵する使用量となる構造にまで発展してきており、社会基盤整備を支える重要な構造物に多く採用されるようになった。

このような現状を鑑み、PC を扱う立場から、具体的なサステナビリティ活動に関する考えを社会に示すことは必須要件の一つであると捉え、PC 工学会として、PC サステナビリティ宣言を発信することとした。

なお、サステナビリティは、将来への持続可能な発展を目的とし、その実現に向けて多様な考え方が示されているが、PC 工学会では、環境、社会、経済の3つの側面のバランスが重要で、つねに3側面に配慮することが必要であると考え。ただし、本宣言のカテゴリーⅢでは、3側面のうちとくに主眼をおいた側面を明確にするため、あえて各側面を分けて記載している。

カテゴリーⅡ【プレストレストコンクリート技術の足跡】

プレストレストコンクリート（PC）は、高い張力をもつPC 鋼材を使って高強度のコンクリートに大きな圧縮力（プレストレス）を与えることで、ひび割れを許さない高強度・高耐久なコンクリート構造物を造ることができる。PC は、それより前に誕生した鉄筋コンクリート（RC）では避けられなかったひび割れを克服するために発明され、1928年、フランスのフレシネーは、前述のPC 鋼材と高強度コンクリートを用いて高いレベルのプレストレスを作り出すことに成功し、基本特許の取得やPC の実用化を果たした。コンクリート構造物建設において、PC はRC に比べコンクリート部材を薄く軽量にできる点で使用材料が減り、リデュースに貢献できる。そして長大化や大空間の確保といった特徴を有するため、自然破壊の影響を小さくできる技術とも言える。

日本におけるPC の歴史は、土木分野においては、鉄道技術研究所で基礎研究が行われた1940年頃に始まり、その10年後には鉄道に使用するマクラギや、橋梁としてPC 技術が実用化された。そののち、1960年代の高度成長期にPC も大きく普及・発展した。コンクリート部材の軽量化や長大化が可能なことで、名神・東名高速道路や東海道新幹線などの大規模プロジェクトで多くのPC 橋が建設された。また、経済成長に伴う人件費高騰などを背景に低コストや急速施工が求められ、多様な構造形式のPC 橋が誕生すると共に、長大化に貢献した張出し架設工法に代表されるような、大型機械を用いた架設工法が発展した。橋以外の構造物では、PC の特徴を活かし、容器構造物・港湾構造物・防災施設への採用が増加した。バブル崩壊に始まる1990年代以降、全国各地の新幹線整備や新東名・新名神高速道路の建設が本格化し、コスト縮減や施工の合理化、加えて高品質・高耐久といった高い要求がPC に求められた。材料面では、防食性の高いPC 鋼材や超高強度コンクリートなどの新材料の開発、また設計面においても、鋼との複合やPPC 構

造などの合理的構造の採用が増えていった。こうした技術の発展により、プレキャストセグメント工法、といった合理的な施工方法や、エクストラードーズ橋、波形鋼板ウェブ橋などの特徴的な構造形式による橋梁が多く実現した。

建築分野に目を向けると、1954年に浜松町駅上屋に日本初のプレキャスト PC 構造が採用されたのを皮切りに、鉄道関連施設を中心に発展してきた。1960年代からは、事務所ビル、大学施設、競艇場など幅広い用途の建物への採用が増加し、中でも、ボーリングブームに後押しされた多くのボーリング場建設では、PC 構造が採用されることで大空間の確保に貢献してきた。1980年代に入ると新耐震設計法(1981年)や建設省告示1320号(1983年)の施行により大地震に対する設計も可能となってきている。1990年代に入ると PC 合成床版設計施工指針(1994年)が発刊されるなど、プレテンション工法による規格化されたプレキャスト床版製品が開発され、PC 構造も多様化してきた。2000年代以降は、冬季長野オリンピックや日韓サッカーワールドカップといった国際的なイベントの開催により、競技場など大型建築物が多数建設され、工期短縮や環境への配慮を目的としてプレキャスト PC 構造が多く採用されるようになった。近年では、免震構造と PC 構造の組合せや部材の高強度化による薄肉部材への適用、そのほか、意匠部材への採用や鉄骨造との複合構造の開発、免震レトロフィットへの応用なども増加してきている。

PC 技術の飛躍的な普及・発展の過程で、PC 技術者は、ほかの建設関連分野と同様に、環境(自然)と向き合い、人類生活の質の向上をめざし、自然の猛威や災害から人々の生活を守るためや、社会システムの発展のために、社会基盤施設の整備に努めてきた。つまり、環境に配慮しつつ安全な構造物を、経済的に構築することを従来から実施してきた。これら、先人たちの努力によって残されてきた構造物は、現在でも高く評価されているものが多数存在している。

その間、PC 工学会(前 PC 技術協会)は、PC の普及・発展の時代において、設計・施工の思想統一や品質の平準化を図るため、基準類の整備、PC に関する資格認定制度の制定、技術講習会の開催などに着手した。そののち、PC 鋼材を保護するグラウトの充填不足や厳しい腐食環境で PC 橋が劣化する事例などが顕在化し、PC 構造物の早期劣化への対応や耐久性が重要となり、「PC グラウトの設計施工指針」や「PC 橋の耐久性向上マニュアル(現在、PC 構造物高耐久化ガイドラインに発展)」を整備し、近年では「コンクリート構造診断士制度」を制定するなど、品質確保はもちろん、耐久性向上や合理的な維持管理、技術者養成に向けて取り組んできた。また、東日本大震災に代表される未曾有の自然災害を経験してきた日本では、設計基準の改訂や補強対策の強化によって PC 構造物の安全性を確保し、同時に、防災システムの一部として PC 技術の活用を図った。

21世紀以降、PC 関連分野においても環境・社会・経済の3側面を配慮したさまざまな対応が必要とされ、例えば地球環境問題に目を向けると、PC の特徴を活かしたリデュースの取り組みに加え、リサイクル・リユースの技術開発や定量的な環境負荷の評価などに取り組んできた。しかし、前述した3側面のバランスを考慮した取り組みを実現するという点では、未だ多くの課題が残されている。そのため、これからの PC には、既存技術を継承しながらも、変化する時代要請に対応できる技術の発展や多様な技術を有機的に結び付けていくことが求められている。

カテゴリーⅢ【サステナビリティ社会の実現に向けた PC 工学会の活動（宣言）】

1. 社会環境の安全・安心を維持していくため、プレストレストコンクリート技術を活用し、良質な構造物の建設と維持管理に努める。

【解説】

安全・安心とは、人々に安全な環境を整備することで、安心した生活を提供できるものとして考える。安全には、食の安全性や医療の安全性、交通の安全性、生産活動での安全性など、あらゆる安全性が考えられるが、本宣言では社会資本施設の、とりわけプレストレストコンクリート(PC)技術による構造物を対象としている。

本宣言では、PC 構造物を通して社会環境の安全・安心を維持するための活動について、新設と既設の構造物に着眼点を分けて「1-1」と「1-2」に具体的内容を述べる。「1-1」では計画・設計・施工時に着目し、「1-2」では維持管理に着目して述べている

これらの宣言により、PC 工学会は、施工時の安全に配慮した社会基盤整備に努め、人々が安心して暮らせる自然災害にも強い構造物を長期にわたって提供するため、高強度かつ高耐久である PC 構造物の展開を推進するとともに、既設構造物に対する維持管理技術の高度化に努める。

1-1. 良質な社会基盤整備に貢献するため、耐久性・耐震性に優れた PC 技術を展開する。

【解説】

高強度かつ高耐久である PC 構造物は、長期にわたる健全性確保に加え、地震時においても復旧性が確保される構造物であると期待される。また、PC 技術の特徴であるプレキャストブロックを活用した技術は、部材の品質確保に加え、現場作業での安全性や、工期短縮に伴う近隣住民への影響軽減を期待できる。

PC 工学会は、PC 技術を重要構造物へ展開するとともに、PC 技術を利用されていない新たな構造物への展開も図ることで、被災時の安全性や復旧性のさらなる向上に努め、良質な社会基盤の整備に貢献する。

1-2. 社会基盤の安全性を確保するため、維持管理に関わる PC 技術の高度化と活用を推進する。

【解説】

PC 構造物の健全度は、PC 鋼材の劣化のように外観から劣化状況を容易に判断することが困難な場合もあるため、今は健全であるが長期間使用されることで変化する健全性を適切に把握し、必要に応じて対策を講じることで、利用者が安心して使用できる状態を保持しておくことが重要となる。近年は維持管理に関わる技術や材料など幅広い分野で高度化が積極的に進められているが、人材不足を考慮して、効率的に維持管理が行える技術開発も重要となる。

PC 工学会は、維持管理に関わる既存の技術を高度化し、構造物の安全性を持続させるとともに、今後も強化が懸念される自然災害の影響に配慮した検討をすすめる。また、外ケーブル補強のように、維持管理に関わる PC 技術が PC 分野以外でも活用される方法を模索することで、構造物全般の効率的な安全性確保に努める。

2. 社会のニーズに対応した構造物の創造を可能とするプレストレストコンクリート技術の開発に努める。

【解説】

社会のニーズは、政治の変化や経済の変動、地球環境問題の深刻化、少子高齢化の加速など社会情勢の変化に伴い、常に変化するものである。そして、建設分野においても多様なニーズへの対応が求められている。ニーズに対応した構造物とは、社会のニーズによって必要とされた空間(建物の内部空間や橋梁での通行空間など)を提供できる構造物と考え、これを空間的ニーズと捉える。空間的ニーズは、その構造物を構築する地域で異なるといった、場のニーズが関連する。さらに、時間の経過に伴って変化するという、時間的ニーズの影響も受ける。

本宣言では、PC技術を通して社会ニーズに対応できる構造物の創造を実現するための活動について、空間・場・時間に関するニーズに着眼点を变えて「2-1」「2-2」「2-3」に具体的内容を述べる。「2-1」では計画・設計に着目し、「2-2」では施工時に着目し、「2-3」では維持管理に着目して述べている。

これらの宣言により、PC工学会は、今後の社会ニーズの変化に必要なPC技術の開発に努め、構造物の計画の段階から設計、施工、維持管理、および更新の段階を見据え、変化する社会情勢に柔軟に対応できる構造物の創造を推進する。

2-1. 自由度の高い空間を創造するため、PC技術の特徴である部材のスリム化や長支間化などのさらなる向上を推進する。

【解説】

自由度の高い空間とは、供用期間中の用途変更に対して容易に対応できる大空間に加え、限られた土地に構造物を構築して確保される空間と考える。前者は、梁部材の長支間化や部材の薄肉化によって確保される。後者は、狭隘部や急峻な土地でも、構造物を構築することで確保される。PCは高強度の材料を用い、プレストレスを導入することで、RCに比べて部材のスリム化、梁部材の長支間化が可能な技術であり、自由度の高い空間を確保するために有効な技術であると期待できる。

PC工学会は、PC技術の特徴を活かし、多種多様な構造物へのPCの適用やさらなるスリム化・長支間化を推進し、自由度の高い空間を創造することで、長期間にわたって使用できる構造物の展開に努める。

2-2. 地域ごとのニーズに対応した施工方法を提案する。

【解説】

構造物の建設や補修・補強において、施工条件や環境条件は地域によって異なる。また人材不足に加えて就労者の一極集中が進むなど、地域ごとで異なる多様なニーズに対応した施工方法が必要と考えられる。プレキャストPC技術は、現場作業の省力化・効率化を可能とし、早期の社会基盤整備に対応できるうえ、地域への影響軽減も可能である。また、人手不足にも有効な対応技術だと考えられる。プレキャスト化の活用に加え、大型架設機材による施工方法の進化、新材料(高強度材料など)・新技術(外ケーブル構造との併用など)の組合せなど、さらなる省力化や工程短縮を実現する技術開発が必要となる。

PC工学会は、既存のPC技術の活用および新たな技術の開発により、さまざまな施工方法を

提案することに努め、地域ごとの多様なニーズを満足することに貢献する。

2-3. 時代のニーズに対応して既存構造物を活用するため、有効活用技術の高度化を推進する。

【解説】

建設分野では、免震レトロフィットや耐震補強など、PC技術に関わらず、耐震性能の向上や機能向上を目的としたあらゆる技術を利用し、既存の構造物を生かし長く使用する取組みが行われてきている。近年では、既存建物のコンバージョンのように建設当初の使用目的を変更し、その構造物を長期間有効に活用する事例や、文化遺産の保護を目的として、古墳を保存するためのドーム型構造物が建設される事例など、PC技術を活かした補強や大空間の確保は、さまざまな目的に活用されてきている。また、将来出てくる新たなニーズにも、柔軟に対応していく必要があるため、これらの取組みを発展させ、PC技術をはじめとして、既存構造物を有効活用するあらゆる技術の高度化を推進していくことが重要である。

PC工学会は、PC技術の活用によって、既存構造物の維持管理と、新規構造物の維持管理を含めた長寿命化に配慮した計画やシステムの構築を実現するなど、構造物を長期にわたり有効に活用できる技術を高めることを推進する。

3. 構造物のライフサイクルにわたり、環境負荷低減に努める。

【解説】

環境負荷とは、温室効果ガスの排出、資源やエネルギーの消費、廃棄物の排出、自然破壊などに加え、振動や騒音など公害に関わる内容も考えられる。ここで、エネルギーには、施工時に発生するエネルギーに加え、運用時や解体時に発生するエネルギーが含まれる。そのため、社会基盤に関わる構造物は、その計画から廃棄までのあらゆる段階において、環境負荷を低減することが重要となる。

本宣言では、PC関連分野において環境負荷低減を実現するための活動について、構造物本体に関わる環境負荷低減、資源循環型社会、そのほかの環境負荷低減に関わる活動に分けて「3-1」「3-2」「3-3」に具体的内容を述べる。「3-1」では構造物の計画から廃棄までの施工方法や材料などの選定に着目し、「3-2」では3R活動に着目し、「3-3」では自然エネルギーなどに着目して述べている。

これらの宣言により、PC工学会は、設計や施工、維持管理に加え、解体後までも対象とし、あらゆる場面での環境負荷低減に努める。また、自然エネルギーを活用するプロジェクトなど、環境負荷低減につながる活動へ積極的に関与することも推進する。

3-1. 環境負荷低減に貢献するため、設計・施工・維持管理の高度化を推進する。

【解説】

PC技術は、高強度材料であることから長支間化が可能となり、使用する資源・資材の抑制に貢献できる。また、山間部での橋梁では下部工の数を減らせることにより、自然破壊の抑制にも貢献できる。これらの特徴を活用し、計画・設計段階から資源消費抑制・工期短縮に配慮することで、環境負荷低減に貢献できると考える。施工方法に関しては、自然破壊を最小限とする施工方法の選定が可能であり、プレキャストブロックの活用や、大型架設機材の利用によって、効率的な施工が可能となり、CO₂排出やエネルギー消費の抑制にもつながる。

維持管理時や解体時に関しては、省力化や効率化に配慮した技術の高度化を図ることが重要となる。

PC 工学会は、PC に関わる既存の技術と新たに開発されてきている技術の高度化を図ることと、維持管理技術の高度化を推進することで、あらゆる段階で環境負荷低減に関わる最適解を検討し、長期健全性を確保した構造物を展開することで、環境負荷低減に貢献する。

3-2. 資源循環型社会に貢献するため、リデュース・リユース・リサイクルに関わる技術の開発を推進する。

【解説】

高耐久である PC 構造物は、元来よりライフサイクルの観点で資源消費抑制、廃棄物の発生抑制（リデュース）に貢献している。また、耐久性の高さから長い年月使用されても健全性を保持している部材が存在し、それらは解体後も構造部材として使用（リユース）できる可能性がある。さらに、産業廃棄物から採取される高炉スラグやフライアッシュを混和材として利用（リサイクル）することが、PC 分野でも盛んに実施されるようになっており、廃棄物の有効活用に加え、コンクリート材料面からの耐久性向上も高度化されてきている。

PC 工学会は、新設される PC 構造物への、産業廃棄物のさらなる活用を検討し、その構造物の展開に努めるとともに、リデュース・リユース・リサイクルに関わる技術の開発を推進することで、資源循環型社会に貢献する。

3-3. 環境負荷低減に関わるさまざまな活動に、積極的に関与・貢献する。

【解説】

構造物の建設は、PC 分野も含めて建設時に環境負荷に配慮したとしても、少なからず資源やエネルギーを消費し、環境負荷物質の排出が伴うものである。

PC 工学会は、PC 構造物の建設において、施工現場ではゼロエミッションを目指した活動を積極的に取り組むことに努める。また、自然エネルギーを活用するために必要となる構造物の建設に積極的に関与し、その構造物の建設を効率的（低コスト、短工期、高耐久）に実施するための技術開発に努めることで、環境負荷低減に貢献する。

4. 3側面（環境性、社会性、経済性）の見える化を推進し、バランスに配慮した評価に努める。

【解説】

カテゴリーⅠで言及したように、サステナビリティ社会の実現のためには、環境性、社会性、経済性の3つの側面のバランスが極めて重要となるが、例えば、社会性を他の2側面よりも重視するなどの3側面のバランスは、社会ニーズや個別プロジェクトの目的に応じて異なる。そのため、例えば、各側面に重み付けをして、3側面の評価結果を統合する方法を提案すると、画一的な評価方法となり、関連分野の行動を誤った方向に誘導する可能性がある。重要なことは、各側面について、客観的な情報に基づき定量的あるいは定性的な指標で表現し、第三者が評価結果を理解できるように分かりやすい説明を加えて情報公開することである。これにより、プロジェクトごとの、3側面のバランスに配慮した評価に繋がることとなる。

カテゴリーⅢの1.～3.では、社会性および環境性に関連する内容について言及しているため、ここでは、経済性の指標としてライフサイクルコスト（LCC）を例に取る。経済性の視点で考え

ればLCC最小化が重要になるが、構造物の予定供用期間終了までのすべてのコストを見積もることは難しい場合がある。例えば、PCのプレキャスト部材活用によって、工期短縮による経済効果を見積もることはできるが、品質管理の向上に伴う構造物の耐久性向上の結果として維持管理費用を低減させる効果を定量的に見積もることは必ずしも容易ではない。このとき、重要なことは、前提条件を明示した上で、LCCの試算方法および結果を分かりやすく公開することである。これにより、将来、前提条件や試算方法の誤りや、社会ニーズの変化などに基づいて再評価し、必要に応じて対策することが容易になる。すなわち、構造物のライフサイクルにわたり経済性評価のPDCAが実現しやすくなる。

PC工学会は、バランスに配慮した評価に努めるために、まずは、構造物のライフサイクルを通した環境性、社会性、経済性を評価する項目の見える化を推進する。

カテゴリーⅣ【PCサステナビリティ活動を継続するために】

1. 活動に貢献するため、プレストレストコンクリート技術の継承と発展に努める。

【解説】

PC分野を含む建設分野における技術継承とは、文献や設計図書などデータとして残し継承するものと、現場特有の表現や想像力（不測の事態に至る予兆を表す事象表現や、安全で品質の確保された構造物を構築するための工事全体を俯瞰できる想像力など）といった経験を記憶に残し継承するものが存在すると考える。

データとしての継承では、PC技術は、これまで経験した災害や劣化など、あらゆる困難に対応するための技術開発や改善が進められ、その度にマニュアルや指針類が制定されてきた。また、ゼロにすることが困難であるヒューマンエラーに伴って発生する事象に対し、どのように対処したかなど、工夫された記録も残されている。ただし、ヒューマンエラーなどに関わる記録が必ずしも有効に活用されているわけではないため、ヒューマンエラーなどが発生した原因とその解決策を後世に継承し、その技術を有効活用できるシステムの構築も重要である。

さらに、危険を察知する感覚的なものや、ヒューマンエラーを発生させないための配慮事項に関わるデータの保存も重要であるが、これらは工事の種類に係わらず共通する内容が多く存在する。PC工学会でも過去に発生した災害事例を発刊しているが、集約されている内容は事例数の多いものに着目しているため、建設分野共通の災害事例となっている。しかし、PC分野では、大容量となる荷重を構造物へ導入するPC緊張作業が必要不可欠であり、この緊張作業に関連した災害が、わずかながら発生している。そのため、PC分野に特化した内容の災害事例（体験談など）を整理し、記録することも重要である。

一方で、経験として残す継承においては、日本の建設市場を考えると、PC構造物を含め新設構造物の建設に携わる機会が減少しており、継承が困難となる懸念がある。そのため、これまでの経験談などを如何に有効に活用できるかが重要である。さらに、調査・診断・補修・補強など、これまで注目されることが少なかった作業が重要視されるようになってきており、これらに関わる記録などは新設工事ほど蓄積されているとは言い難い。そのため、これらに関わる経験談や関連図書類を将来世代が有効に活用できるよう、データを蓄積し整理することも重要と思われる。

また、海外へのPC技術の普及を図ることで、さらなる発展に努めることも重要である。

PC工学会は、これら設計図書や指針類、体験談などの記録を保存し、活用を図ることで、PC技術の継承と発展に努める。

2. 活動を理解する人材の確保と育成に努める。

【解説】

建設関連分野の人員総数は年々減少しているが、その中でもとくに50代までの年齢層で低下傾向が顕著である。2010年のデータで他分野と比較すると、とくに55～64歳の割合が多く、55歳以上の割合が建設関連分野で33.6%、全分野で28.7%と、とくに団塊世代の労働力に支えられている分野である。そのため、建設関連分野では、他分野よりも早く人口減少・高齢化の問題に直面することになる。2015年現在では、新入社員の確保が難しいだけでなく、とくに民間の建設関連分野では、公共団体の中途採用による人材の流出が止まらず、民間の人材確保は非常に困難な状況にある。そのため、プレストレストコンクリート（PC）サステナビリティ活動を理解する人材の確保の前に、とくに、民間の建設関連分野の人材確保が喫緊の課題である。一般社団法人日本建設業連合会（日建連）が2015年3月に「再生と進化に向けて－建設業の長期ビジョン－」を公表しているが、産業の魅力、やり甲斐、生き甲斐のある産業、安定感のある産業、ワークライフバランスを考慮した社員の処遇などが重要であることを指摘している。このような内容を真に実現し、人材の確保、人材流出の防止に努める必要がある。人材の育成については、新しい価値観に柔軟に対応できる人材の育成の観点が重要である。既に建設関連分野で長年、経験と知識を備えてきた技術者・技能者の中には、新しい価値観に柔軟に対応できない人も少なくない。本提言が対象としている、「サステナビリティ」も同様であろう。残念ながら、直近の業務や工事などに直結しない技術的な知見などを積極的に学び、取り入れていくモチベーションは必ずしも高くはない。業務あるいは工事の発注時における技術者評価において、最近では、資格の有無のみならず継続教育（CPD）制度を活用した評価が始められており、人材の育成の観点からは非常に良い試みである。サステナビリティを理解する技術者とは、社会のニーズ（環境性、経済性も含めて）を理解し、課題に対して技術的な解決策を提示することができる人材である。そのためには、自らが直接関わっている事項以外にも、自ら学ぶ意欲を備えさせるとともに、各組織では、その意欲を阻害しないことが重要である。

PC工学会は、他団体とも連携し人材の確保と人材の流出の防止に努めるとともに、自ら学ぶ意欲のある技術者・技能者が魅力とを感じる技術情報などを積極的に提供する。

3. PDCA サイクルを構築し、宣言活動の見直しに努める。

【解説】

プレストレストコンクリート（PC）工学会では、既に述べられた背景をもとにサステナビリティ宣言をここに行うが、宣言すること自体が目的ではなく、最も重要な点は時々刻々と変化する社会情勢を踏まえて工学会ならびに関連業界が種々の改善に努め、それを実行し続けることである。サステナビリティ活動とは、環境側面だけを捉えがちであるが、社会側面からみれば震災復興や少子高齢化など、わが国が抱えている社会問題を常に監視し、それに対応できる学会・業界である必要がある。また、当然のことながら経済側面からのさまざまな改善活動を怠ることもできない。そのためには、いわゆるPDCAサイクルを構築し、サステナビリティの実現に向けて組織的に取り組むことが肝要である。

PDCAサイクルとは、次の4つの観点から一連の活動を行うフレームワークであり、④ Actionから次の① Planへとつなげ、スパイラルアップすることで継続的な改善を図ることが可能となる。

① Plan（計画）：実績や将来予測などをもとに目標を設定し、行動計画を作成する

- ② Do (実行)：行動計画に沿って活動を行う
- ③ Check (点検・評価)：活動が計画に沿っているかどうかを確認し、評価する
- ④ Action (処置・改善)：評価結果を踏まえて、修正・改善などの処置をとる

これを、サステナビリティ宣言に置き換えてみるとその内容がPlanであり、これをPC工学会が先導しつつ学会に所属する個人・組織が実行(Do)する。さらに、PC工学会は、定期的に活動の点検・評価を行う(Check)とともに、評価結果をもとに修正・改善点(Action)を示し、次の計画へとつなげていくこととなる。これらを繰り返し実施していくことが、PCサステナビリティ活動である。その活動においては、点検・評価ならびに処置・改善を行い、組織への提言ができる定常的な組織が必要で、サステナビリティを推進する上で重要な役割を担うこととなる。

PC工学会は、時々刻々と変化する社会情勢を踏まえて、必要に応じた宣言活動の見直しを行うことで、最適なPCサステナビリティ活動に努める。

4. プレストレストコンクリート技術の魅力と活動を社会へアピールすることに努める。

【解説】

国土交通省が平成24年に実施した国民意識調査における「東日本大震災後の考え方の変化」への回答では、「防災意識の高まり」(52.0%)が最多で、「節電意識の高まり」(43.8%)、「家族の絆の大切さ」(39.9%)と続いている。また、「社会資本に求める機能」については、「安全・安心を確保する機能」(74.4%)が最多で突出しており、「高齢者、障害者対応の機能」(25.8%)、「環境対策の機能」(24.1%)、「地域経済活性化の機能」(23.5%)、「省エネ機能」(19.3%)が僅差で続いている。さらに、重視する住宅性能については、「耐震化や免震化など、地震に強い家」が最多(67.5%)で、次いで「省エネに優れた家」(54.0%)であった。

この調査結果から、国民は防災、安全・安心などへの要求を強く感じていることが分かり、その実現が建設業なくしてあり得ないことから、建設関連分野は、社会基盤を支える基幹産業であるといえる。

一方で、近年の建設関連分野への一般の人々からの印象は、決して良いわけではない。例えば、東日本大震災における復興支援への貢献度への認識は、建設関連分野で働く人々と一般の人々の間で大きな差があった。すなわち、実際には震災直後から道路を切り開き、最前線でライフラインを確保するために努力していたことが、一般の人へは十分に理解されていないのが現実である。

このような実態は、建設業界に携わる者のモチベーションを低下させ、社会基盤を支える技術の活用や革新を阻害しかねない。また、サステナビリティ宣言を行い、その活動を継続していくためには、学会や業界だけの努力だけではなく、その活動の幅広い理解者が必要である。

PC工学会は、会員向けへの技術や情報の提供だけでなく、サステナビリティ活動を通じて、さまざまな対象に向けPC構造物やそれに携わる技術者の役割と社会との関連性について、積極的かつ客観的に示していくことが重要である。

3. 宣言に対する具体的な事例

本章では、前章で記載したカテゴリーⅢに記載している宣言文に対し、関連する具体的な6事例(表-3.1の●表記)を紹介する。

表-3.1 宣言文と PC 技術の具体事例

宣言文	PC 技術事例	備考
1-1	PC グラウト技術の向上	材料
	立川市庁舎（免震構造と PC 造）	● 建築分野
1-2	外ケーブル補強を併用したモニタリング技術	● 維持管理技術
	県西部浜松医療センター（免震レトロフィット）	建築分野
2-1	波形鋼板ウェブ PC 橋	土木分野
	マブチモーター本社棟	建築分野
2-2	PC 橋におけるプレキャストセグメント工法	● 土木分野
2-3	山梨市庁舎（プレキャスト PC アウトフレーム）	● 建築分野
3-1	高強度 PC 鋼材	● 材料
	NTT 中央研修センタ	建築分野
3-2	PC 構造物への産業副産物の利活用	● 材料
3-3	洋上風力発電施設へ向けた PC 構造の展開	

3.1 免震構造と PC 造を組み合わせた長寿命・環境建築（立川市庁舎）

本事例は、免震構造とプレキャスト PC 造を組み合わせて採用された建物であり、自然エネルギーの活用や省エネルギーの観点からさまざまな環境技術を取り入れたものである^{1)、2)}。

構造躯体に対しては、免震構造を採用することで安全性を確保し、庁舎としての機能性を損わず、また、プレキャスト PC 造を組み合わせて採用することにより躯体の耐久性（長寿命化）も向上させることができる（宣言文 1-1）。このことは、作り変えに伴う環境負荷を低減させることにもつながる（宣言文 3-1）。

PC 造による梁および床の構造を 4 本の鉄骨柱が支えることにより、見通しが良く、かつ将来の用途変更も可能なフレキシブルな空間構成を可能にしている（宣言文 2-1）。さらに、屋上緑化、自然通風をはじめとする自然エネルギーの積極的利用（宣言文 3-3）や、混合セメント（高炉 B 種）などのエコマテリアルの利用（宣言文 3-2）にも配慮されている。



写真-3.1 立川庁舎全景

3.2 外ケーブル補強を併用したモニタリング技術

本事例は、耐荷性能の低下が懸念される PC 桁に対して外ケーブルを設置すると同時に外ケーブルに張力測定用センサーを設置し、外ケーブルの張力変動を連続的にモニタリングするものである。測定結果より、内ケーブル破断を検知するとともに、内ケーブル破断時には補強ケーブルとして機能させることもできる手法である³⁾。本手法は、新幹線構造物の劣化に対する補強手法として開発されたものであり、既設構造物の長寿命化を図ることができる（宣言文 1-2）。また、

新幹線の運行を休止することなくPC桁の機能を回復できるため、社会のニーズに対応した施工方法である（宣言文 2-2、2-3）。加えて、PC 桁の内ケーブルの破断やグラウト充填状況の調査の効率化が図れること、人手をかけずに継続的にモニタリングができること、モニタリング用のケーブルが補強も兼ねており補強ケーブルを新たに配置する必要がないことから、作業の省力化にも寄与し経済性も向上する（宣言文 1-2、3-1）。

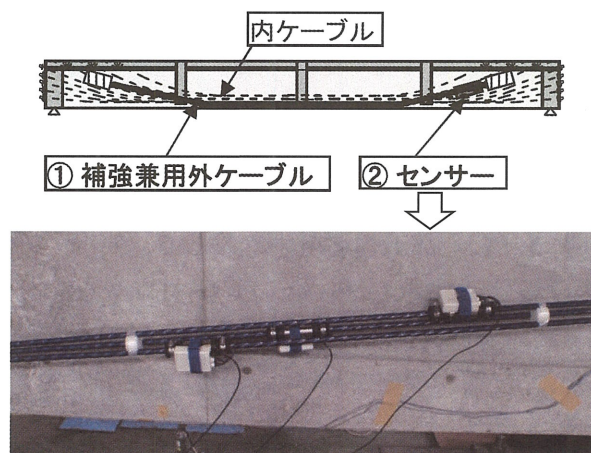


図-3.1 外ケーブル張力モニタリング技術

3.3 PC 橋におけるプレキャストセグメント工法

本事例は、あらかじめ工場や現場サイトで分割して製作したプレキャスト部材（セグメント）を架橋地点で接合し、プレストレスを与えて一体化するプレキャストセグメント工法⁴⁾である。本工法は、セグメント製作と架設地点での下部工工事を並行して進めることができ、架設地点での作業が減少するため、工期短縮、省力化に有効である（宣言文 2-2）。また、作業の省力化は現場作業の安全性向上にもつながる（宣言文 1-1）。さらに、セグメントの製作方法や現場での架設方法にバリエーションがあり、都市内や山間部といった架設地点ごとに異なるニーズに対応しやすい工法である（宣言文 2-2）。

セグメントを工場や現場サイトなど、整った設備で製作し、一定の機材で繰り返し架設することによって作業者の習熟度が上がるため、品質および耐久性の向上に繋がる（宣言文 1-1、3-1）。また、大型架設機や鋼製型枠設備など機械設備を多用した製作・架設による現場施工の効率化は、騒音・振動など周辺環境への負荷低減（宣言文 3-1）、建設コストの削減を可能とする。



写真-3.2 プレキャストセグメント工法

3.4 プレキャストPC アウトフレームによる既存建物のコンバージョン（山梨市庁舎）

本事例は、既存建物が工場であったものから市庁舎へとコンバージョンするための耐震補強に、プレキャストPC 構造のアウトフレームを既存の躯体と連結することで生まれ変わった、前例のない建物事例¹⁾である（宣言文 2-3）。既存施設を極力生かし、かつ再利用できるものは徹底的に利用して地球環境に最大限配慮した計画となっている（宣言文 3-1）。

アウトフレームへ、プレキャスト PC 構造を活用することで、工期が短縮され、省力化が図れる施工方法と言える（宣言文 2-2）。また、工事に伴う騒音、振動、粉塵および現場廃材を低減できるなどの環境配慮型の工法である（宣言文 3-1）。

プレキャスト PC 構造のアウトフレームは高強度（ $F_c 50\text{N/mm}^2$ ）のコンクリートであるため、高耐久で安全性が確保されたコンバージョンを実現できる（宣言文 1-2）。



写真-3.3 山梨市庁舎

3.5 高強度 PC 鋼材

本事例は、高強度 PC 鋼材を PC 上部工へ適用することで、使用する資材の低減を図ったものである。高強度 PC 鋼材の使用は、設計において、PC 鋼材本数を少なくでき、製造、運搬および現場作業の各段階において、省資源化・省エネルギー化や環境負荷低減が図れるなどの利点を有する（宣言文 3-1）。また、PC 鋼材や定着具の数量低減だけでなく、高強度 PC 鋼材を使用して部材寸法を縮小することで下部構造物を含めた構造物全体の数量を低減することが可能となり、その結果、環境負荷を低減することが可能となる⁵⁾（宣言文 3-1）。また上記の特徴は、箱桁橋の外ケーブル数量の大幅な削減による施工の省力化・人材減少への対応（宣言文 1-1、2-2）、設計の自由度を高める効果もある（宣言文 2-1）。

同様に維持管理に関わるライフサイクルにおいても、劣化や設計荷重の増加などに対する構造物の補強において、少量の材料で施工可能なことから環境負荷低減に有利である⁵⁾（宣言文 3-1）。



写真-3.4 高強度 PC 鋼材の適用事例（外ケーブル）

3.6 PC 構造物への産業副産物（高炉スラグ）の利活用

本事例は、高炉スラグ微粉末を PC 構造物へ適用することで、環境負荷低減を図ったものである。

高炉スラグ微粉末を PC 構造物へ採用するにあたって、初期強度の確保が課題であったが、使用するセメントを早強ポルトランドセメントとし、高炉スラグ微粉末の比表面積を、一般的に使用されていたものより細かく（比表面積 $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ から $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ へ）したことで、PC 構造物への採用を可能とした。産業廃棄物である高炉スラグ微粉末を活用することによって環境負荷を低減するとともに（宣言文

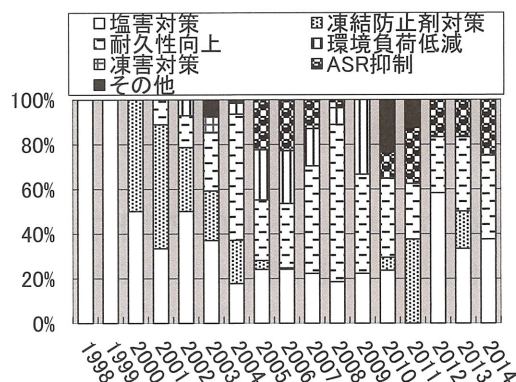


図-3.2 BSPC の採用理由

3-2)、高耐久化(宣言文 1-1)、LCC や $LCCO_2$ の削減にも貢献できる(宣言文 3-1)。また、高炉スラグ微粉末を採用した理由(「高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物(BSPC)研究会」集計データより)に着目すると、時代に応じてその理由が変化していることが分かり、社会のニーズに対応している技術と捉えることができる(宣言文 2-3)。

4. おわりに

社会のニーズは、人々が生活を豊かにするために時代に応じて変化するものであり、ニーズに対応するためには科学技術の発展が必要不可欠となる。将来のニーズを的確に予測することは困難であるため、本宣言は、過去の PC 技術の変遷と現状の PC 技術から、近未来を想定して検討した内容である。前述のとおり、本宣言は試案であり、幅広い意見を集約し最終的な宣言文を完成させたいと考えており、PC 技術者からの御意見を PC 工学会にお寄せ頂ければ幸いである。

なお、ご意見は下記アドレスへお寄せ下さい。

【pc-sustaina@jpci.or.jp】

参考文献

- 1) 日本建築学会関東支部：進化《深化》する PC 建築—最近10年の PC 建築作品と PC 技術—、PC 建築専門研究委員会、2013.3
- 2) 城戸隆宏：立川市庁舎の設計・施工—PCaPC 間柱を耐震要素とした中間層免震構造—、第18回 PC 建築技術講習会テキスト、プレストレスト・コンクリート建設業協会、2010.6
- 3) 丸山直樹、村田一郎、近藤拓也、森川英典：外ケーブル張力モニタリング方式による PC I 形桁の健全度把握手法の開発、プレストレストコンクリート工学会 第21回シンポジウム論文集、2012.10
- 4) プレストレスト・コンクリート建設業協会：コスト縮減を目指す PC 橋 - 従来橋に加え、さらに広がる選択肢 -、2007.9
- 5) プレストレストコンクリート技術協会：高強度 PC 鋼材を用いた PC 構造物の設計施工指針、2011.6

更新用プレキャスト PC 床版技術指針について —更新用プレキャスト PC 床版技術検討委員会の報告—

(株)複合研究機構、横浜国立大学名誉教授

日本大学工学部教授

近畿大学理工学部准教授

東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター准教授

中日本高速道路(株)

池 田 尚 治

岩 城 一 郎

東 山 浩 士

長 井 宏 平

酒 井 秀 昭

1. 背 景

東・中・西日本高速道路株式会社（以下、「高速道路3会社」と言う。）が管理する高速道路は、昭和38年7月16日にわが国最初の高速道路として名神高速道路・栗東～尼崎が開通して以降、順次整備を進め現時点で総延長約 9,000km が供用している。これらの高速道路は、供用後の経過年数が30年以上の区間が 3,700km となり、大型車交通量の増加、積雪寒冷地や海岸部を通過するなど厳しい環境条件下で橋梁・土構造物・トンネルの老朽化や劣化が顕在化してきている。

高速道路ネットワークを将来にわたって持続可能で的確な維持管理・更新を行うため橋梁を始めとした高速道路資産の長期保全および更新のあり方について予防保全の観点も考慮に入れた技術的見地より基本的な方策を検討する必要があることから、「高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会」が設立され、平成26年1月に報告書（以下、「高速道路長期保全報告書」と言う。）が作成された。高速道路長期保全報告書によれば、高速道路のうち、変状が顕在化しており大規模更新・大規模修繕が必要な事業の規模は、表－1のとおりであり、今後15年間で実施する計画としている。

表－1 大規模更新・大規模修繕が必要な事業の規模

	区 分	項 目	主な対策	延 長
大規模更新	橋 梁	床版	床版取替	約 230km
		桁	桁の架替	約 10km
	小 計			約 240km
大規模修繕	橋 梁	床版	高性能床版防水など	約 360km
		桁	桁補強など	約 150km
	土構造物	盛土・切土	グラウンドアンカー 水抜きボーリングなど	約 1,230km
	トンネル	本体・覆工	インバートなど	約 130km
	小 計			約 2,110km
合 計				

高速道路長期保全報告書では、「鋼橋の鉄筋コンクリート床版は、内在塩分（海砂などの使用によりコンクリートの骨材に含まれていた塩分）と海岸からの飛来塩分の両方の影響がある場合に、95%以上の床版で健全度が著しく低下しており、早い段階で、耐久性の高いプレストレストコンクリート床版に取替えが必要である」としている。また、「何れかの劣化要因（疲労、内在塩分・飛来塩分・凍結防止剤による塩害、アルカリシリカ反応）があるものも、健全度が今後急激に低下することが想定され、いずれ床版取換えが必要と考えられる」としている。

これらのように、床版の取り換え工事だけでも年間1千億円程度が見込まれており、しかも早急に工事発注の始まることが予想される。現在のわが国のPC工事は年間3千億円程度であるから如何にその規模が大きいかを考えることができる。PC工学会としては、PC技術の確固とした貢献ができるよう供用中の路線の床版取り換え工事を対象としたプレキャストPC床版技術の合理的な適用方法を検討することが必要であると考えられるため、「更新用プレキャストPC床版技術検討委員会」を組織し、2015年3月に第1回の委員会を開催して、2016年3月までの1年間で「更新用プレキャストPC床版技術指針」の策定を行った。

2. 委員会

2.1 委員会などの構成

本委員会は、委員長1名、委員34名であり、表-2に示す構成となっている。なお、委員会のもとに幹事会を組織し、委員会で審議する資料の検討を行った。また、本委員会は、プレキャストPC床版を製造可能な15社が本学会へ委託したことにより設置された。

2.2 委員会などの実施

委員会は、2015年3月から2016年3月までの1年間で3回開催し審議を行った。幹事会は、7回開催した。

3. 更新用プレキャストPC床版技術指針

3.1 指針の構成

本指針は、以下に示す5章と参考資料から構成されている。

- ・第1章 総則
- ・第2章 既設構造物の変状調査および更新構造物の設計作用の推定
- ・第3章 設計
- ・第4章 施工
- ・第5章 維持管理
- ・参考資料

表-2 委員会の構成

役 職	氏 名	所 属
委員長	池田 尚治	横浜国立大学名誉教授
委員	岩城 一郎	日本大学教授
委員	齋藤 成彦	山梨大学大学院准教授
委員	鳥居 和之	金沢大学教授
委員	長井 宏平	東京大学生産技術研究所准教授
委員	中村 光	名古屋大学大学院教授
委員	東山 浩士	近畿大学准教授
委員	藤山知加子	法政大学准教授
委員	松井 繁之	大阪大学名誉教授
委員	睦好 宏史	埼玉大学大学院教授
委員	渡辺 博志	(国研) 土木研究所
委員	寺島 善宏	首都高速道路(株)
委員	金治 英貞	阪神高速道路(株)
委員	緒方 辰男	西日本高速道路(株)
委員	本間 淳史	東日本高速道路(株)
委員	上杉 泰右	八千代エンジニアリング(株)
委員	前田 晴人	(株)日本構造橋梁研究所
委員兼幹事長	酒井 秀昭	中日本高速道路(株)
委員兼幹事	広瀬 剛	(株)高速道路総合技術研究所
委員兼幹事	土橋 浩	首都高速道路(株)
委員兼幹事	内野 英宏	(株)富士ビー・エス
委員兼幹事	大澤 浩二	川田建設(株)
委員兼幹事	平 義彦	三井住友建設(株)
委員兼幹事	立神 久雄	ドービー建設工業(株)
委員兼幹事	中村 定明	(株)IHI インフラ建設
委員兼幹事	大村 一馬	(株)安部日鋼工業
委員兼幹事	三島 康造	(株)ビーエス三菱
委員	中西 昌洋	コーアツ工業(株)
委員	大信田秀治	オリエンタル白石(株)
委員	山岸 健治	日本コンクリート工業(株)
委員	佐藤 徹	昭和コンクリート工業(株)
委員	中田 順憲	極東興和(株)
委員	原 幹夫	(株)日本ビーエス
委員	平井 圭	黒沢建設(株)
委員	藤森 信一	日本高圧コンクリート(株)

3.2 適用の範囲

鋼道路橋においては、工事費の削減などを目的として、比較的大きな床版支間長の橋梁に PC 構造の床版が採用されており、その一部の橋梁には、工期の短縮などを目的として PC 工場製品の床版や工事現場近くのヤードで製作されたプレキャストの PC 床版が採用されている。既設鋼道路橋の RC 床版の更新においては、工期の短縮や性能の向上などを目的として、プレキャストの PC 床版が採用された事例が多い。本指針は、既設鋼道路橋の床版（RC 構造および PC 構造）の更新工法として、プレキャストの PC 床版を採用する場合の既設構造物の変状調査、撤去および更新構造物の設計作用の推定、更新構造物の設計、施工、維持管理について、「コンクリート構造設計施工規準」（プレストレストコンクリート工学会）をもとに、既往の施工事例や研究成果などを参考に定めたものである。

本指針の適用の範囲を以下に示す。

- 1) 本指針は、既設鋼道路橋の床版の更新工法として、プレキャストの PC 床版を採用する場合の既設構造物の変状調査、更新構造物の設計、施工および維持管理に適用する。
- 2) 本指針が対象とする部材は、プレキャストの PC 床版および床版相互の接合部材ならびに床版と伸縮装置とを接合する部材、床版と鋼桁とを接合する部材、床版の更新時に撤去して再構築する部材（地覆、高欄など）とする。
- 3) 本指針は、新設の鋼道路橋のプレキャストの PC 床版の設計、施工および維持管理に適用してもよい。

本指針によるプレキャストの PC 床版を採用する場合の既設構造物の変状調査および更新構造物の設計作用の推定、更新構造物の設計、施工および維持管理の基本的な手順を図-1に示す。

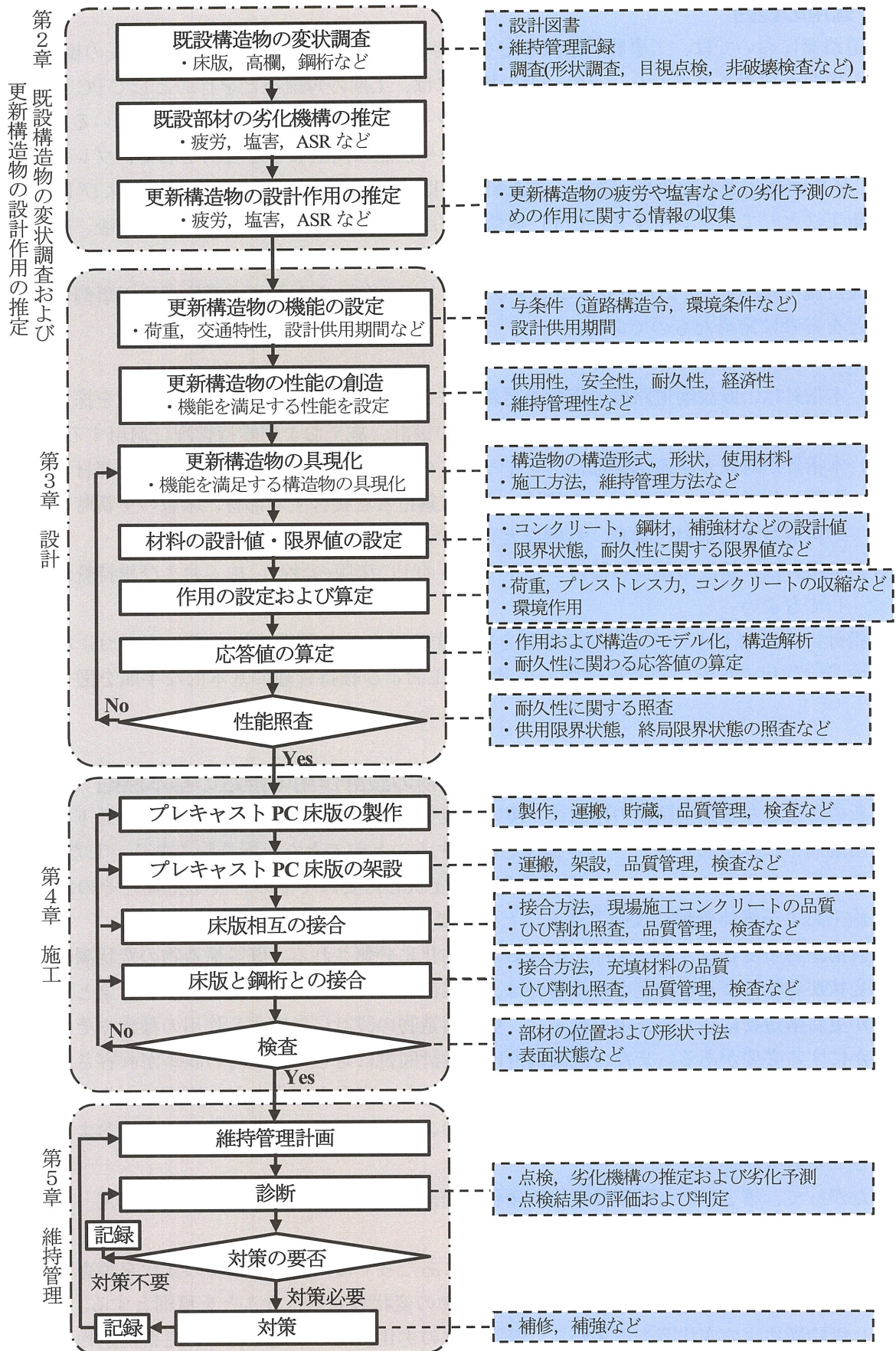
3.3 既設構造物の変状調査および更新構造物の設計作用の推定の基本原則

更新の対象となる鋼道路橋の床版は、塩害や疲労などにより変状が発生し性能が低下して、予定供用期間中に構造物が果たすべき機能を確保することができない構造物である。したがって、更新構造物の設計にあたっては、既設構造物が変状した要因やその程度を把握しその結果を設計、施工および維持管理に反映させることが重要である。

既設構造物の変状は、初期欠陥、損傷および劣化に分類される。既設構造物の変状調査結果から、変状が劣化によると推定される場合は、既設部材の劣化機構の推定を行い、対象となる劣化機構が更新構造物に与える作用を推定し、更新構造物の設計に考慮する作用の種類やその程度を明らかにする必要がある。また、既設鋼桁は、設計図書に対して施工時の誤差が許容されていること、供用中に形状が変化している可能性があること、腐食や疲労などの要因により劣化している可能性があることなどから、既設鋼桁の形状および変状を調査しその結果を設計および施工に反映させる必要がある。

したがって、第2章の「既設構造物の変状調査および更新構造物の設計作用の推定」の基本原則を以下のとおり定めた。

- 1) 更新構造物の設計、施工および維持管理にあたっては、既設構造物の変状を調査しその結果を考慮する必要があるため、既設構造物の変状調査を行うことを原則とする。
- 2) 既設構造物の変状調査結果から、既設部材の劣化機構の推定を行い、更新構造物の設計に考慮する作用の推定を行うことを原則とする。



- 3) 既設構造物の変状調査にあたっては、設計図書および診断や対策などの維持管理記録を調査するとともに、必要に応じて変状箇所の外観、形状および非破壊検査などによる調査を行うものとする。
- 4) 更新構造物の設計および施工にあたっては、既設鋼桁の形状および変状を調査しその結果を考慮する必要があるので、既設鋼桁の調査も併せて行うものとする。

3.4 設計の基本原則

3.4.1 設計方法

プレストレストコンクリート工学会では、近年のPC技術の急速な発展に対応して各種の構造物や構造形式の規準化を進めてきた。「コンクリート構造設計施工規準」は、これらを含む基本的な規準となるものであり、超高強度コンクリートに代表されるような新しい高性能コンクリートまでを含む総合的な規準となることを意図としている。そして、コンクリートを用いるすべての構造物が、要求される機能を満足するような性能を当該規準に基づいて創造していくことを目的としている。したがって、本指針においても、更新構造物の設計にあたっては、対象構造物を具現化する際に要求される機能を設定し、その機能を満たす性能を有する構造物を、「コンクリート構造設計施工規準」に規定されている性能創造型設計に基づき設計するものとした。

3.4.2 構造の選定

(1) 基本方針

構造の選定においては、構造物が発揮すべき性能を合理的に満たすことのできる構造や形式、使用材料、主要寸法の組合せを創造する必要がある。この構造の選定においては、形式、使用材料、主要寸法の組合せは無限に存在するが、この組合せの中で最も合理的なものを創造する。ここでの「合理的」という意味は、必ずしも経済性のみが最適であるということではなく、維持管理性や景観性、あるいは極めてまれにしか発生しない事象に対する冗長性なども考慮した総合的なものである。新しい材料や構造についても、優位性がある場合は採用を考慮するのがよい。ただし、開発されてからの期間が短いものについては、長期の供用に対する経年変化については不明あるいは不確かな場合もあり、安全率を高めにとっておくか取替えや追加ができるようにしておくなどの配慮をしておくのがよい。

更新の対象となる既設構造物の床版は、交通荷重による疲労、コンクリート製造時に骨材に付着した塩分や海からの飛来塩分および積雪寒冷地における凍結防止剤による塩害、アルカリシリカ反応などにより変状が発生し性能が低下しており、更新することが決定した構造物である。したがって、更新構造物の構造の選定にあたっては、既設構造物の変状調査結果をもとに構造の選定を行う必要がある。更新構造物の施工においては、既設橋の交通規制が必要となることから、交通規制の規模、規制期間および交通や工事の安全性を考慮した施工方法や構造を採用する必要がある。

更新構造物のうち床版の構造の選定例の手順を図-2に示す。

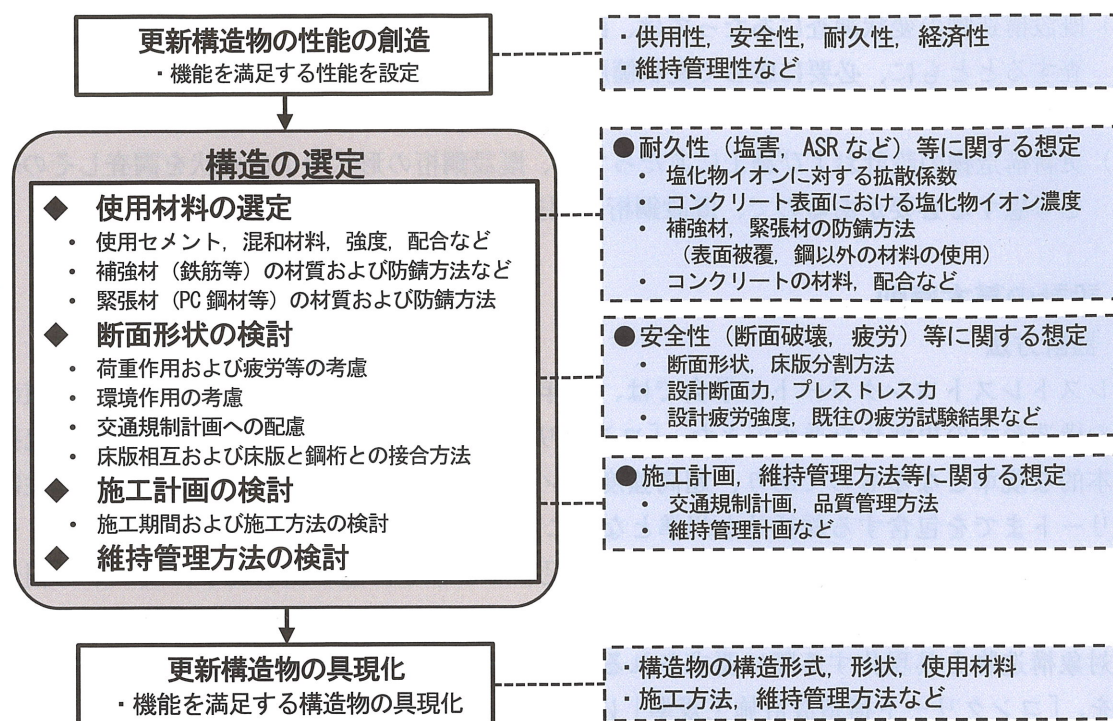


図2 床版構造の選定の手順例

(2) 床版の構造や主要寸法が荷重作用および施工方法から決定する場合の具現化の例

①構造および形式

床版の構造としては、橋軸直角方向にプレストレスを導入したプレキャスト PC 床版および場所打ち PC 床版を用いること、プレキャスト PC 床版相互の接合部を RC 構造とすることが既往の施工事例では標準となっている。

本指針においては、既設構造物の主な劣化要因が、疲労、塩害およびアルカリシリカ反応であることから、供用限界状態においてひび割れの発生を許容しない限界値を設定することを基本としている。このため、鋼材に対して所定のコンクリートかぶりを確保すること、橋軸直角方向にはプレストレスを導入した PC 構造として供用限界状態においてひび割れの発生を防止することを基本とする。さらに、マルチレイヤープロテクションとして床版防水工を床版上面に実施することが必要である。床版相互の接合部や橋軸方向についても、供用限界状態におけるひび割れの発生が生じないように必要に応じてプレストレスを導入するかひび割れが発生したとしても鋼材が腐食しない対策が必要である。床版相互の接合部は、橋軸直角方向にプレストレスを導入することが困難であるので、ひび割れや劣化因子の抑制が可能な材料の使用およびエポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋、鋼以外の材料の補強材の使用なども考慮する必要がある。

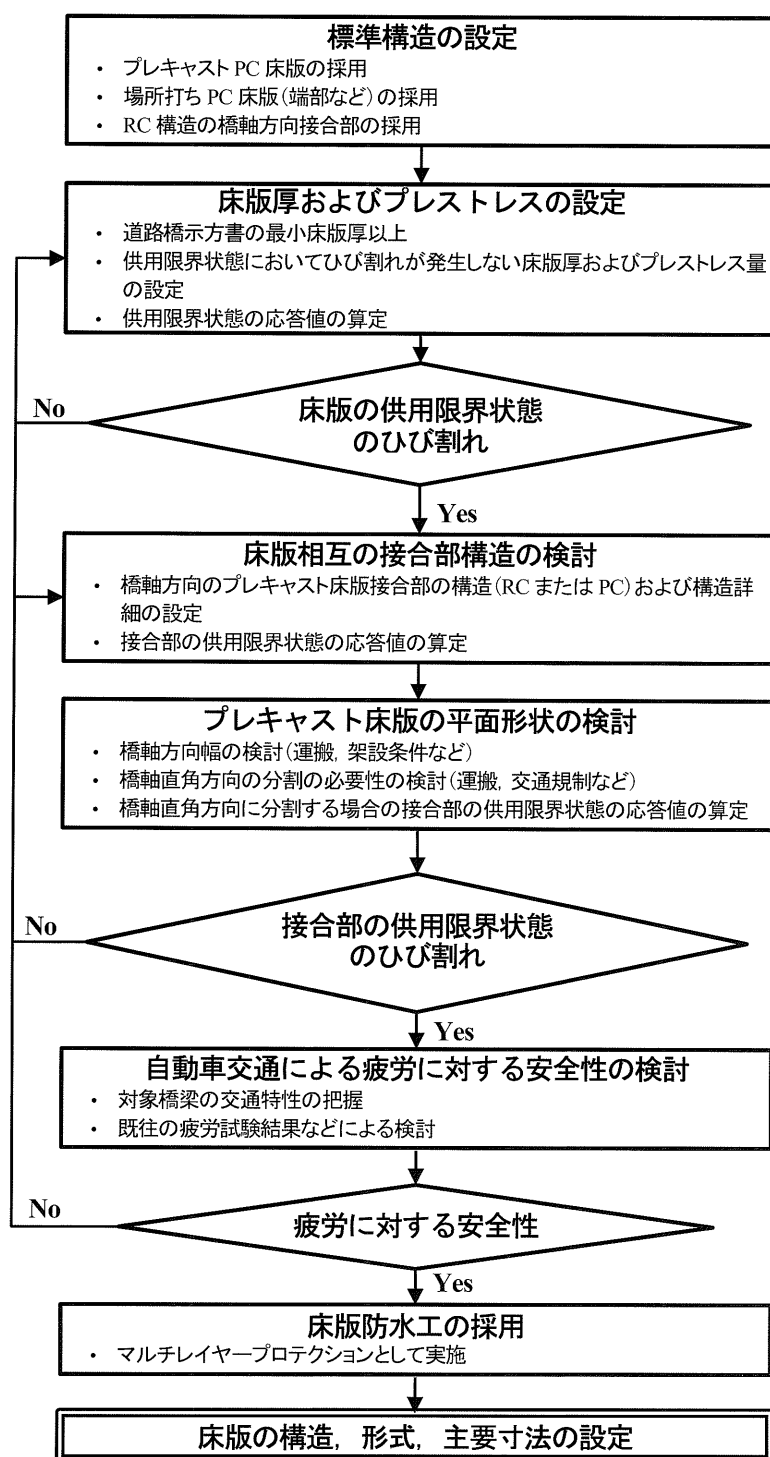
②主要寸法(床版厚)

床版厚の決定にあたっては、供用限界状態においてひび割れが発生しない限界値を満足するために、輪荷重による疲労および床版を支持する桁の剛性が異なるために生じる曲げモーメントなどの影響も適切に考慮する必要がある。疲労に対する安全性の照査は、床版の既往の疲労試験結果を参考に行うのがよい。「道路橋示方書 II 鋼橋編」においては、鋼橋の RC 床版および PC 床版の最小全厚を規定しているので、これを参考に床版の最小全厚を決定するのがよい。

③主要寸法（平面形状）

床版の橋軸方向の幅は、公道を運搬可能な重量と幅から決定され、一般に 2～2.5m としている事例が多い。橋軸直角方向の長さは、交通規制を行い、橋梁幅員を全幅で一度に更新する場合は、橋梁幅員とする。ただし、橋梁幅員が広く公道を運搬することが困難な場合や交通規制の方法が橋梁全幅で一度に行うことができない場合は、橋軸方向に分割した長さとする。

この具現化の例の手順を図－3 に示す。



図－3 形式および主要寸法が荷重作用および施工方法から決定する場合の具現化の手順例

(3) 既設床版の劣化が凍結防止剤による塩害の場合の使用材料の具現化の例

凍結防止剤は路面に散布されるため、床版の構造の選定にあたっては、床版上面からの塩化物イオンの侵入の抑制方法および鉄筋やPC鋼材の防錆方法が課題となる。床版上面からの塩化物イオンの侵入の抑制方法としては、床版のコンクリート上面を被覆する床版防水工およびコンクリートの配合や混和材によりコンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数を低減する方法などがある。鉄筋やPC鋼材の防錆方法としては、かぶりを大きくする方法、表面にエポキシ樹脂を塗装した鋼材を用いる方法、ステンレス鉄筋やステンレスPC鋼材を用いる方法および鋼材に替えて炭素繊維やアラミド繊維などを用いた繊維強化プラスチックの補強材や緊張材を用いる方法などがある。

床版の構造の選定においては、「2章 既設構造物の変状調査および更新構造物の設計作用の推定」にもとづき既設構造物の変状調査の結果から、フィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて、回帰分析によりコンクリート表面における全塩化物イオン濃度 C_{0s} を算定し、この値を考慮する必要がある。 C_{0s} の量の程度に応じて、以下に示す方針により、床版の構造の選定を行うことが望ましい。なお、床版の構造としては、橋軸直角方向にプレストレスを導入したプレキャストPC床版および場所打ちPC床版を用いること、プレキャストPC床版相互の接合部をRC構造とすること、PC床版には早強セメントを接合部には普通ポルトランドセメントを使用すること、エポキシ樹脂などを塗装していない鉄筋やPC鋼材を使用することを標準とする。

既設床版の主たる劣化要因が凍結防止剤による塩害の場合のコンクリートの配合や使用材料の具現化の例を以下に示す。

- ①全塩化物イオン濃度 C_{0s} が小さく鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が1.0以下の場合

設計供用期間中にコンクリート中の鋼材が腐食しないが、セメントの水和に起因するひび割れ、乾燥収縮に伴うひび割れおよび初期欠陥によるひび割れなどによりひび割れ箇所の鋼材位置における塩化物イオン濃度が増加するおそれがあること、ひび割れに水が浸入した場合は疲労強度が低下することなどから、鋼材の腐食を防止するために、マルチレイヤープロテクションとして床版防水工を床版上面に実施することが必要である。したがって、鋼材位置における塩化物イオン濃度の算定においては、床版防水工の効果を考慮しないで算定する必要がある。なお、床版防水工の機能としては、床版上の舗装と同等以上の設計供用期間を有するとともに、設計供用期間中に水をコンクリートに浸入させない機能を有する必要がある。また、床版上の舗装の更新時には、床版防水工も併せて更新する必要がある。

プレキャストPC床版相互の接合部は、隣接するプレキャストPC床版によりコンクリートの収縮が拘束されること、狭隘な箇所での施工になることなどから、RC構造の場合は、接合部に荷重によるひび割れ、セメントの水和に起因するひび割れおよび乾燥収縮に伴うひび割れが発生する可能性がPC構造部と比較して増大するため、適切な検討が必要となる。ひび割れの発生が想定される場合は、必要に応じて、使用するセメントの変更、コンクリートの収縮を抑制する混和材(剤)の使用、接合部の鋼材の防錆あるいはプレストレスの導入などの対策が必要となる。

- ②全塩化物イオン濃度 C_{0s} が大きく鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が1.0以上の場合

設計供用期間中にコンクリート中の鋼材が腐食する可能性があるため、以下に示す方法により鋼材の腐食を防止する必要がある。

i. コンクリートの水セメント比を低下させる方法

水セメント比を低下させることによりコンクリート中の塩化物イオンに対する拡散係数の特性値を低下させて、鋼材位置における塩化物イオン濃度を低下させる。

ii. 塩化物イオンに対する拡散係数の特性値の低下が可能なセメントまたは混和材の使用

高炉スラグやフライアッシュはコンクリート中の塩化物イオンに対する拡散係数の特性値を低下させる効果があるので、これらが混合されたセメントを用いるか混和材として用いることにより鋼材位置における塩化物イオン濃度を低下させる。ただし、高炉スラグおよびフライアッシュはコンクリート強度の発現を遅延させること、高炉スラグは自己収縮量を増加させることなどの課題がある。既往の施工事例や試験などにおいては、セメント量の50%を高炉スラグ微粉末に置換した事例やセメント量の20%をフライアッシュに置換した例などがある。

iii. エポキシ樹脂を鋼材表面に塗装した鉄筋およびPC鋼材の使用

エポキシ樹脂を鋼材表面塗装した鉄筋やPC鋼材を用いることにより鋼材腐食発生限界濃度を増加させる。ただし、エポキシ樹脂塗装の設計供用期間については推定が困難であり、塗膜の変状事例も報告されている。また、エポキシ樹脂塗装の被膜は、保管時や施工時にきずが発生しマクロセル腐食を促進させるおそれがあること、エポキシ樹脂塗膜を日照下に放置すると塗膜が劣化することから、保管や施工にあたっては適切な養生が必要となる。したがって、その採用にあたっては、十分な調査や検討が必要である。

iv. ステンレス鉄筋およびステンレスPC鋼材の使用

ステンレス鉄筋やステンレスPC鋼材を用いることにより鋼材腐食発生限界濃度を増加させる。ただし、ステンレス鉄筋やステンレスPC鋼材については、異種金属との接触による腐食が発生すること、また採用事例も少ないことなどから、その採用にあたっては十分な調査や検討が必要である。

v. 鋼以外の材料の補強材および緊張材の使用

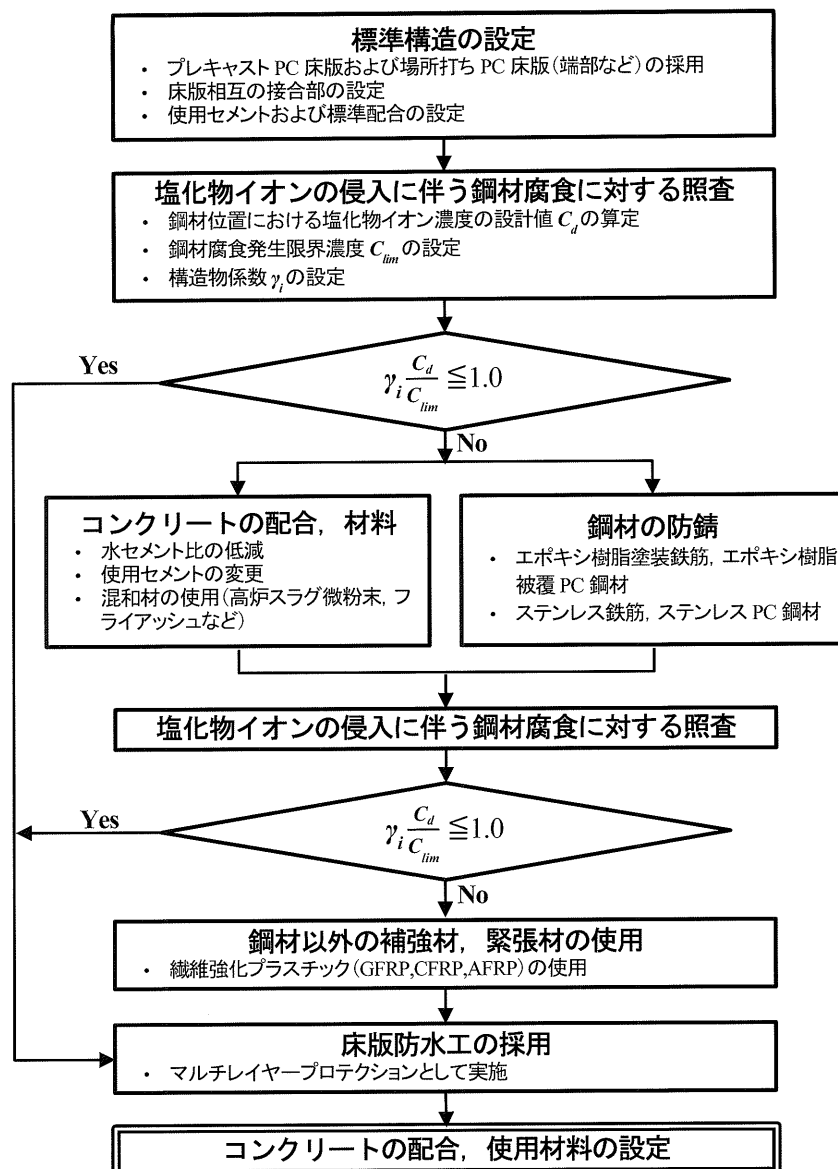
腐食環境下における鋼の腐食を防止するため、繊維強化プラスチック（FRP）の補強材（鉄筋の代替）や緊張材（PC鋼材の代替）を用いる。繊維強化プラスチックの補強材としては、炭素繊維によるもの（CFRP）、ガラス繊維によるもの（GFRP）およびアラミド繊維（AFRP）によるものがある。繊維強化プラスチックの緊張材としては、炭素繊維によるものおよびアラミド繊維によるものがある。ただし、繊維強化プラスチックの補強材や緊張材については採用事例も少ないことなどから、その採用にあたっては十分な調査や検討が必要である。

前述までの方法は、単独または組合せて用いるが、その採用にあたっては、経済性なども考慮して決定する必要がある。

前述の方法を採用した場合においても、鋼材の腐食や繊維強化プラスチックの劣化を抑制するために、マルチレイヤープロテクションとして床版防水工を床版上面に実施することが必要である。したがって、鋼材位置における塩化物イオン濃度の算定においては、床版防水工の効果を考慮しないで算定する必要がある。

対象となる床版と同一箇所にある鉄筋コンクリートの地覆や高欄については、直接に凍結防止剤の影響を受けるので、十分な検討が必要となる。

この具現化の例の手順を図-4に示す。



図ー４ 既設床版の劣化が凍結防止剤による塩害の場合の使用材料の具現化の手順例

3.5 施工の基本原則

施工にあたっては、設計時に設定した機能を満たす性能を有する構造物を構築するため、設計図書を十分に確認し、適切な方法で行う必要がある。

したがって、第４章の「施工」の基本原則を以下のとおり定めた。

- １）更新構造物の施工にあたっては、設計で決定した機能を満たす性能を有する構造物を構築するものとする。
- ２）前項の目的を達成するため、施工にあたっては、設計図書に基づいて施工計画を立案し、この施工計画にしたがって、適切に品質を管理しながら構造物を構築し、構造物が設計図書どおりに構築されていることを検査することを原則とする。
- ３）設計図書に示された施工方法や施工順序を施工時の状況により変更しなければならない場合は、設定した機能を満たす性能を有した構造物として構築されることを照査するとともに、必要に応じて設計図書を変更しなければならない。

3.6 維持管理の基本原則

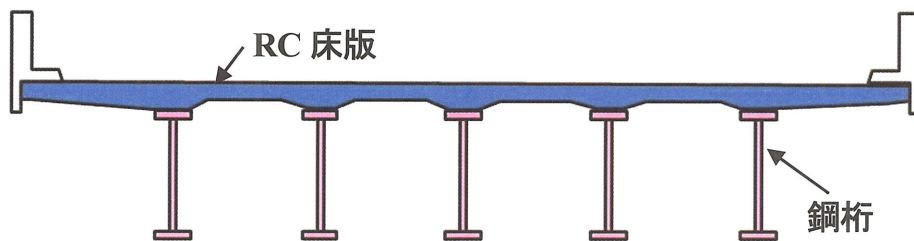
更新構造物の維持管理者は、設計供用期間中に構造物が所要の機能を果たすために、適切に維持管理計画を立案し、維持管理を行う必要がある。とくに床版防水工は、目視点検が困難であること、床版上面の舗装更新時に床版防水工も更新する必要があることから適切に維持管理を行う必要がある。また、設計供用期間中に定期的診断および臨時の診断を行わなければならない。診断は、構造物の性能を評価し、対策の要否を判定することが目的となる。この評価および判定は、単に変状の程度や規模などをもとに対処療法的に実施するのではなく、設計で設定した機能に対して診断を実施する構造物の性能を明らかにして、適切な検討を行う必要がある。

したがって、第5章の「維持管理」の基本原則を以下のとおり定めた。

- 1) 更新構造物の維持管理においては、設計供用期間中に設計で決定した機能を満たす性能を有するように構造物を保持するものとする。
- 2) 更新構造物の維持管理においては、設計で決定した機能を明確にして、設計供用期間中に更新構造物が所要の機能を果たしているかについて、定期的に診断しなければならない。

4. 更新用プレキャスト PC 床版の施工例

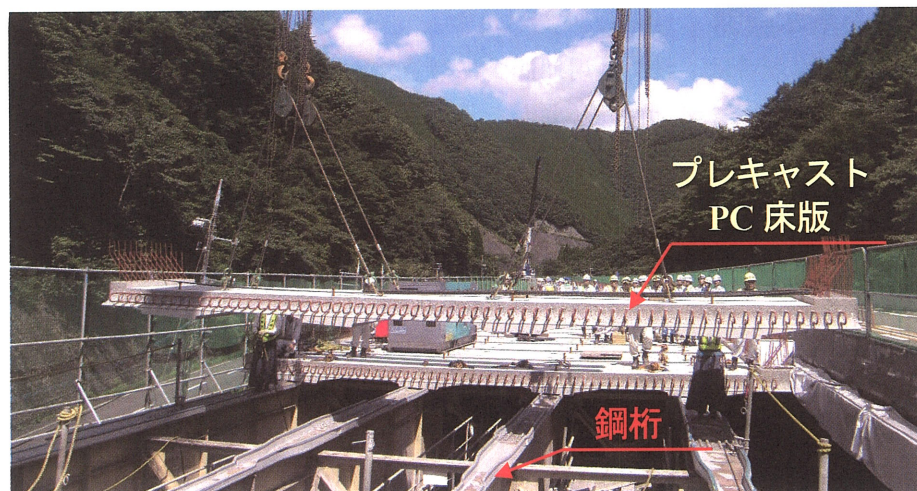
鋼橋の RC 床版の更新は、図－5 に示す鋼橋の RC 床版を撤去して、耐久性の高いプレキャスト PC 床版に更新するものである。既往の事例においては、写真－1 に示すように既設の RC 床版を撤去して、写真－2 に示すようにプレキャスト PC 床版の架設を行っている。



図－5 更新の対象となる既設鋼桁橋の RC 床版



写真－1 鋼橋 RC 床版の更新工事における既設 RC 床版の撤去事例



写真－２ 鋼橋 RC 床版の更新工事における更新用プレキャスト PC 床版の架設事例

5. あとがき

本委員会は、約１年間で更新用プレキャスト PC 床版の技術指針を策定するという大きな課題について、委員の皆様の絶大なるご協力のもとに「更新用プレキャスト PC 床版技術指針」として策定することができた。本指針の詳細については、本年７月に講習会を行うことを計画している。

既設鋼橋の RC 床版は、塩害、骨材のアルカリシリカ反応、疲労などにより劣化が進行しており、喫緊の課題となっている。本委員会で作成した技術指針は、この課題をプレストレスト技術で解決する具体的な手法を明らかにしたものであり、今後の既設鋼橋の床版の更新事業に大きく貢献することが期待される。

大規模自然災害への PC 構造の貢献 —大規模自然災害に対応可能な PC 構造に 関する研究委員会の報告—

(株)複合研究機構、横浜国立大学名誉教授	池 田 尚 治
首都大学東京教授	宇 治 公 隆
横浜国立大学准教授	細 田 暁
(株)ピーエス三菱	河 村 直 彦

1. 津波防災とプレストレス技術の役割

1.1 はじめに

海岸地域では突然の大津波の発生に対して常に備えがなければならないが、海岸から離れていても海拔が低くとくに過去に大津波の侵入のあった地域では海岸地域と同様に大津波に対して十分な対策を持っていなければならない。2011年3月11日の東日本大震災の津波被災の記憶はまだ新しいが、近々発生が予想されている南海トラフ地震による大規模な津波に対しては該当地域における可能な限りの防災や減災の対策を実施することが必須である。1498年の明応地震の津波では4万人の死者が出たと言われており、これと同規模の津波が東海地方や南海地方に再来すれば被災の程度は明応地震津波の数十倍になると予想されているので、何とかこのような災害を未然に防ぐ対策を立てることが焦眉の急である。今や大津波のリスクがあるという段階ではなく、既にクライシスの段階であることを認識しなければならない。熟慮の結果を検討して的確な答えを出し、即座に実行可能な対策を立てて未曾有の大災害に立ち向かうことが必要の筈である。また、地域、民族、国家の存亡を賭けて取り組むべき最重要な課題とし津波防災の本質を常に探究しなければならない。ただし、日常生活との調和が基本である。大津波は長い再現期間をもって発生するので遠い将来のことも考えて着実に次世代以降の津波防災をも考えるべきなのである。

1.2 記憶すべき大津波の大災害

わが国で大災害を発生させた津波の例として1498年の明応地震津波（死者4万人）、1707年の宝永地震津波（同2万人）、1741年の北海道の渡島噴火津波（同1千4百人）、1771年の八重山地震津波（同1万2千人）、1792年の雲仙岳地震津波（同1万5千人、島原大変肥後迷惑）などがある。最近では2011年の東日本大震災（同1万8千人）があるがこの地震津波に関しては869年の貞観地震津波（同1千人以上の被災規模）、1896年の三陸地震津波（同2万2千人）、1933年の三陸沖地震津波（同3千人）などの大被害の歴史が存在する。外国の津波被害としては1755年のポルトガルリスボン地震津波（同6万人）、1908年のイタリアのメッシナ地震津波（同8万人）、2004年のインドネシアのスマトラ地震津波（同28万人）などの例があり、オランダのような低地の国では大津波のリスクが深刻に認識されている。なお、1976年の中国の唐山地震（同24万人）や1923年の関東大震災（同10万人）などのように津波以外にも多数の人的被害が記録されている

が地震動に対しては耐震設計技術が相当に進んできたので、今後はこれまでほとんど無防備であった大津波に対する対策を喫緊に進める必要がある。

1.3 これまでの取り組み

わが国では、これまで多くの津波被害の経験を持ちながら1923年の関東大震災の被災の規模があまりに大きかったために地震対策に関心が奪われ、津波対策に対してはその困難さから津波常襲地域を除いて関心が低かったのではないかとと思われる。2004年のスマトラ地震津波による大災害があったにも拘らず、他国の事情として教訓を得ることができず東日本大震災に対する防備と結び付かなかったことは誠に残念であった。

著者らはこれまで大地震の被害はその都度違った顔を持っているので津波にも備えなければならないと何回か指摘してきたが、東日本大震災の津波被害を頭の中で想像することができなかった。現実には津波の大災害を目のあたりにして感じたことは防災に対して自分の専門にとらわれず取り組むことの必要性とその勇気であった。

コンクリート構造物の耐震設計に関しては、許容せん断応力度を低減したこと、柱に鉛直プレストレスを導入して耐震性と復元性を大幅に向上させること、性能創造型の設計法を提案して構造物の安全性を合理的に高めること、などの成果を上げることができた¹⁻¹⁾。一方、これに対して津波に関する取り組みは、東日本大震災以降のことであり、先ず大被災から得た教訓と今後の進むべき方向の探究であった。ここではPET ボトル携行による浮力の保持、防災に関する基本的な憲章の策定の必要性、土地の海拔表示の必要性、などが示唆された。以下にこれらも含めた津波への取り組みについて列記する^{1-2)~1-5)}。

- a) 被害の分析、教訓、および緊急提案
- b) 空の PET ボトル携行による即座の浮力確保の提案と効果の実証
- c) 平成防災17条憲章の策定
- d) 自己浮上津波シェルター、自己起立津波防波堤の開発
- e) 固定式 PC 津波防波堤の提案
- f) 「防災 PC 構造物の提言」の提案（本工学会 PC 技術規準委員会、防災懇談会座長：河村直彦）
- g) 大規模自然災害に対応可能な PC 構造に関する研究委員会の設立と活動（委員長：宇治公隆）
- h) PC 津波防災シンポジウムの開催
- i) 津波防波堤設計の基本概念の提案¹⁻⁶⁾

津波防災を重点対象として PC 構造の貢献の可能性を探ることを目的に2015年8月に開催した PC 津波防災シンポジウムでは、特別講演3題、委員会報告2題、一般講演16題および総括講演1題について熱心な討議が行われた。

1.4 津波防災の基本概念の提案

津波防波堤の建設に際しては津波襲来地域の資産や富を保全することを第一義とし、対応する発生頻度と規模、高さの設計津波を設定することを提案したい。人命に関しては高所避難および住民各自の PET ボトルなどによる浮力の確保を前提として津波防波堤の設置と分離することがここで提案する津波防波堤設計の基本概念である。この基本概念により津波防波堤の建設費と維持管理費は保全すべき社会の財産と直結した形で決定することが可能となる。

発生頻度の極めて低い大津波に関しては、設計で想定する津波の規模を超える大津波が襲来した場合の人命の安全性を高めることを考えなければならない。このことは防浪施設の設計にとって第一に重要なことである。そのためには、津波防波堤の内部にいる人々も、その堤域内で高所のより安全な場所を求めて緊急に避難することを基本とする必要がある。しかし繰り返し発生する中規模の津波の襲来に対して津波堤防によって安全に堤防内を保持できるならば、家屋や社会基盤のみならず結果的に人命を津波から守ることができる。また、堤防を津波が越流する場合でも堤防の存在によって避難時間に若干でも余裕ができる。このような防災思想に立つならば設計想定津波の規模と津波高さを定めることが容易となる筈である。例えば再現期間が50年の津波の規模を設定する場合には50年に1度は家屋や社会基盤などは津波の被害を受ける可能性があるが人命に対しては高所への避難が前提なので社会的な安全が確保できるのである。このように人命の安全と家屋や社会基盤などの財産の保全とを分離することにより、計り知れない未知の大津波を考慮に入れた防浪対策が合理的に立案できると思われる。社会の持続発展性を考えるのならば、100年程度に1度の大津波を設計で想定し、大津波に対する防波堤を建設するのが良いと思われる。

津波が堤防を越流しても住民の避難行動には堤防の存在が大きく貢献できるとともに、土砂などを含んだ泥流の侵入を相当に阻止することができるので堤防は越流時に決壊しないことが必須である。現在のPC技術を性能創造的に適用すれば越流しても決壊しない合理的で耐久的な津波防波堤の建設と保全が可能なのである。

1.5 プレストレス技術の役割

これまでプレストレス技術が津波防波堤に適用されたことはほとんどないものと思われる。その理由としては、具体的な設計の提案がこれまで皆無であったこと、防波堤の建設は伝統的な技術であるので従来の技術がそのまま踏襲されてきたこと、プレストレス技術は特殊な技術と思われ、地元の設計施工業者の採用が容易でないこと、などの理由が考えられる。一方、PC技術者も積極的にプレストレス技術を海岸構造物に適用しようとしなかったことも考えられる。しかしながら、津波の前の地震動にも十分耐え、津波の波力や土砂を含んだ海水の流体力や動水圧、越流、津波の引き波、などにも耐えるような強靱な構造が求められる時、プレストレス技術は大いにその役割を果たすことができると思われる。PC構造は固定式津波防波堤は勿論のこと、自己起立津波防波堤の構造形式として最適なものとなり得ると考えられる。越流時の浮力に対しては、プレストレスによる強固な地盤アンカーの存在は必須であり、新しいPC構造物の発展の分野となることが期待できる。

津波防波堤は100年、200年の長期にわたってその役割を果たさなければならないのでプレストレス技術の要であるPC鋼材の長期耐久性能が必須の条件となるが、近年はエポキシ樹脂塗装による高耐久なPCストランドを入手可能であることが認識されなければならない。とくに、自己起立式の津波防波堤は、外ケーブルの適用によるコンクリート中空構造であるのでプレストレス技術の活用に適した構造形式である。また、プレキャスト工法を活用すれば工期を大幅に短縮できるので今後の技術的発展が期待できる。

1.6 プレストレストコンクリート工学会としての防災に関する提言

プレストレス技術の防災に対する提言の起草にあたっては津波のみならず火山の噴火や大規模

な土砂災害、洪水、高潮などの自然災害全体を対象とすることとしたため、極めて広範な視点からの提言となっている。

この提言は、本工学会のPC技術規準委員会で発議され、同委員会の中に提言作成の懇談会を組織して原案を作成し、これを同委員会の提言とすることとして本工学会理事会の承認を得た。本来、理事会としての提言とするべきであったが、喫緊の課題であったため、少しでも早く社会に発信することを考え、敢えてPC規準委員会の提言とした。

この提言では、地震や津波とともに火山の噴火災害も大きく取り上げたことが特徴である。PC技術者が自然災害の全貌を把握しておくことが重要なのである。ただし、近々発生が予想されている南海トラフ地震に対する備えを注意喚起することが第一の目的である。本稿2.に提言文を後述する。

1.7 おわりに

東日本大震災を経験し、己の専門分野に捉われずに津波防災についてこれまでに取り組んできた事柄を纏めてみた。防災の専門家にPETボトルによる即座の浮力の保持について提案をしたところ、津波の死者は泥流に含まれる土砂や瓦礫などによる打撲が原因であるので浮力を持っても効果はないとの答えであった。著者の簡単な実験でも浮力があれば水面に留まっていられるので水底での土砂などによる打撲の被害は大幅に軽減される筈であるから、専門家の考えだけでは津波防災はできないと判断した次第である。PC技術については著者らの専門であるので是非この技術を津波防災に適用したいと考えている。

2. 大規模災害に対するプレストレストコンクリート技術の役割と展開の提言

阪神淡路大震災および東日本大震災では、多数の国民の生命および財産の損失を受けた。また、東海・東南海・南海地震も確実視されている。このような大災害に対して、PC技術を有効に使うことにより、被害を大幅に低減できるのではないかとの思いがある。そこで、PC工学会技術規準委員会において防災懇談会を設け、PC技術およびPC技術者が防災に果たすべき役割について議論し、その結果を提言としてまとめたものである。

防災提言の全文および資料は本工学会誌「プレストレストコンクリート」Vol.57、No.5、2015に公表²⁻¹⁾しているが、本稿では紙数の都合により一部を省略している。なお、防災提言は平成27年3月9日付であるが、資料は平成27年版防災白書（平成27年6月発行）の図表を用いている。

2.1 提言の趣旨

1995年の阪神淡路大震災では、大都市神戸を中心に直下型地震に見舞われ6,000人以上の死者が出た。2011年3月11日の東日本大震災では、地震後の津波により18,000人以上の死者・行方不明者の発生とともに福島第一原子力発電所が被災して未曾有の原子力発電所事故が勃発した。古くは1498年の明応地震の津波により人口の少ない当時で40,000人の死者が出たとされている。これと同等の地震が今発生すればその被害は想像を超えるものになりかねない。一方、東海・東南海・南海の巨大地震の発生が確実視されている現在、わが国では万難を排して来たるべき大地震と大津波に取り組まなければならない。大規模災害には、火山の大噴火被災や地震に伴う大火災、伊勢湾台風のような大規模高潮被災などもある。

本提言は、現代および次世代の社会が備えるべき主として自然現象に起因する大規模災害を想定して、その対策に最新のプレストレストコンクリート技術が大いに貢献すべくその役割と技術の展開について述べるものである。

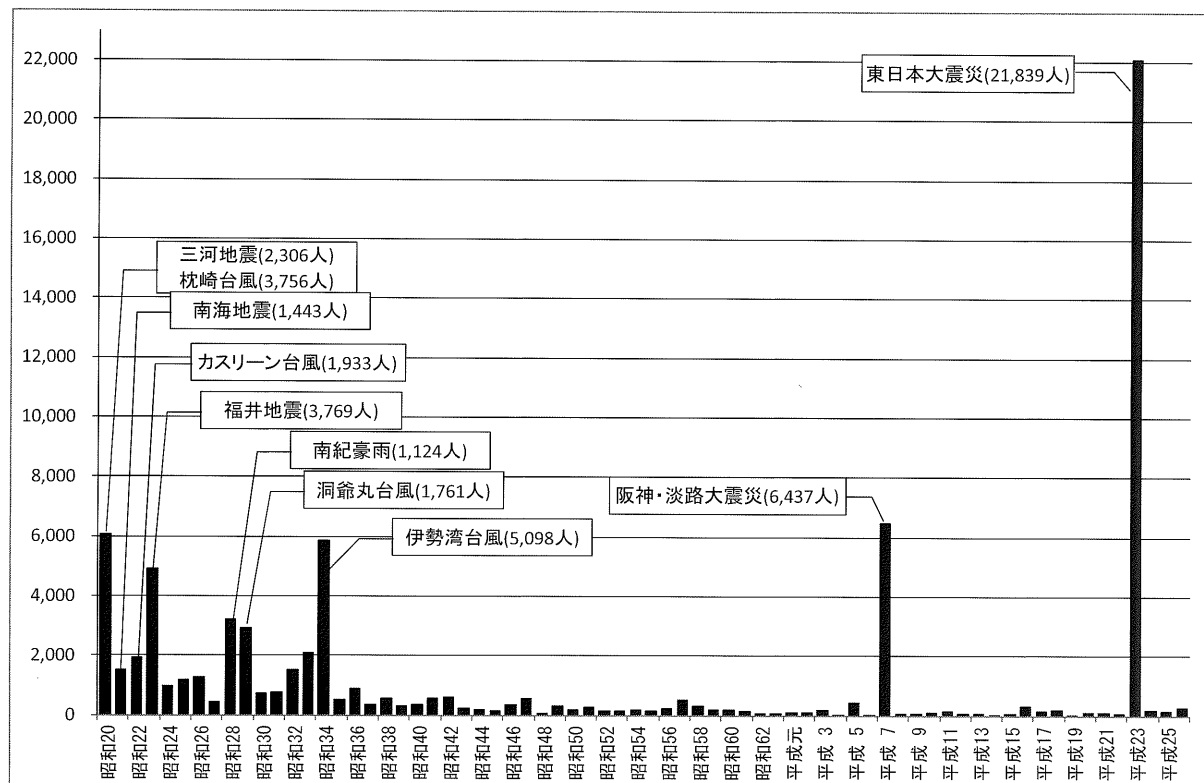
なお、予測の困難な大津波に対しては、防災施設のみに頼ることなく潜在的な被災者である各人が浮力を創造的に身に着ける対策なども極めて重要である。

2.2 わが国の災害作用と取り組むべき課題

本提言の対象は、自然現象により引き起こされる大規模な災害とする。また、自然現象によって引き起こされる派生的な大災害、例えば津波による原子力発電所事故、地震による地盤の液状化によってエネルギー施設などが大規模に被災する、なども考慮することが必須である。一方、ヒューマンエラーやテロリズムによる大災害のリスクも認識することが必要である。ただし、他国からの侵略による災害についてはここでは考慮しない。

自然災害による死者・行方不明者数は、昭和30年代までは毎年数百～数千人の被災者を生じていたが、昭和40年代以降はダム・河川堤防・分水路のような防災施設の整備、構造物の耐震化などにより、頻繁に発生する自然現象に対しては生命・財産の損失は大幅に減少している。しかし、今後とも一層の防災努力が必要である（資料－1）。一方、百年、数百年あるいは千年単位で発生する大地震およびそれに伴う大津波に対しては、対策が不十分であったことが分かる。なお、わが国では1959年（昭和34年）の伊勢湾台風による大災害を契機として災害対策基本法が1961年に公布された。

資料－1 わが国の自然災害による死者・行方不明者数

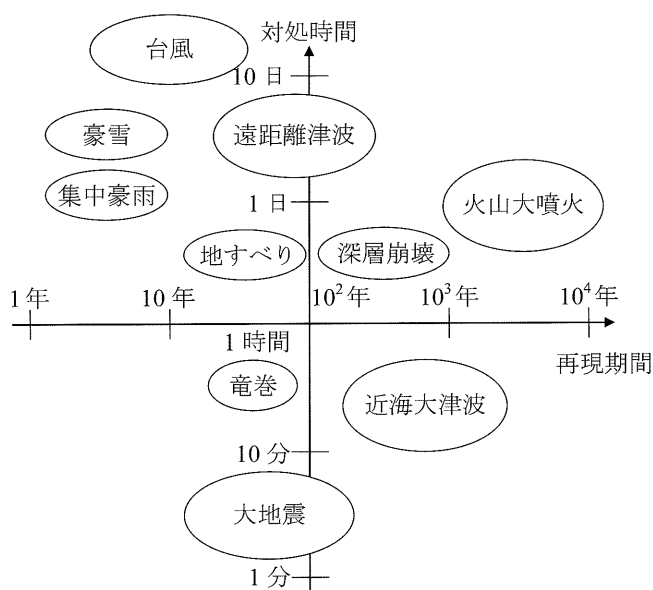


(内閣府 平成 27 年度版防災白書 附属資料 8)

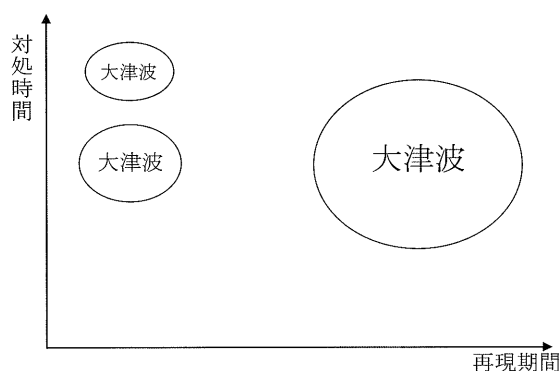
災害を引き起こす自然現象を図－1に示す。なお、横軸は再現期間、縦軸は予報または警報の発令から被災までの避難準備可能な対処時間をとる。また、各現象を示す楕円の大きさは概略の被災の規模を示す。図－1は過去のデータや災害の状況などをイメージして作成したが、それぞれの自然現象は再現期間が長くなれば図－2に示す大津波の場合の例のように当然その規模も大きくなり、一方、対処時間が長くなれば被災の規模も小さくなる。したがって、災害を引き起こす自然現象については図－1の概念図に加えて図－2に示すような規模の増大や縮小があることを認識しなければならない。図－2の状況を認識することにより「想定外」という安易な評価方法を用いることなく自然現象と論理的に対峙できるものと考えられる。

発生頻度が高い自然現象に対しては普段から物心両面で準備がなされているが、その中でも発生までの予報・警報による対処時間が短い自然現象では度々災害は引き起こされている。

一方、発生頻度の極めて低い自然現象に対しては日常生活や経済的な観点からもその対策を立てることは容易でなく、さらに発生までの対処時間が短ければ自然災害としての被害は決定的に甚大となり得る。この頻度を単に確率論的に考えれば現実に大災害の到来を認識することは容易



図－1 自然現象の分類（楕円の大きさは災害の規模を表す）



図－2 大津波の再現期間および対処時間と災害の規模のイメージ

でない。しかしながら大地震の発生については地殻の累積歪の解放に起因する確定論的な力学現象であるから単なる確率論的な頻度とは別に予測に基づいた対策が必要となる。

このような考え方で、各種の自然現象について検討すると、現時点では想定されている大地震および近海大津波への対応が緊急な優先度をもつと考えられる。とくに、東海・東南海・南海の巨大地震や首都直下地震については今後30年以内に70%の確率で発生するとされており、対応の急がれる自然現象である。

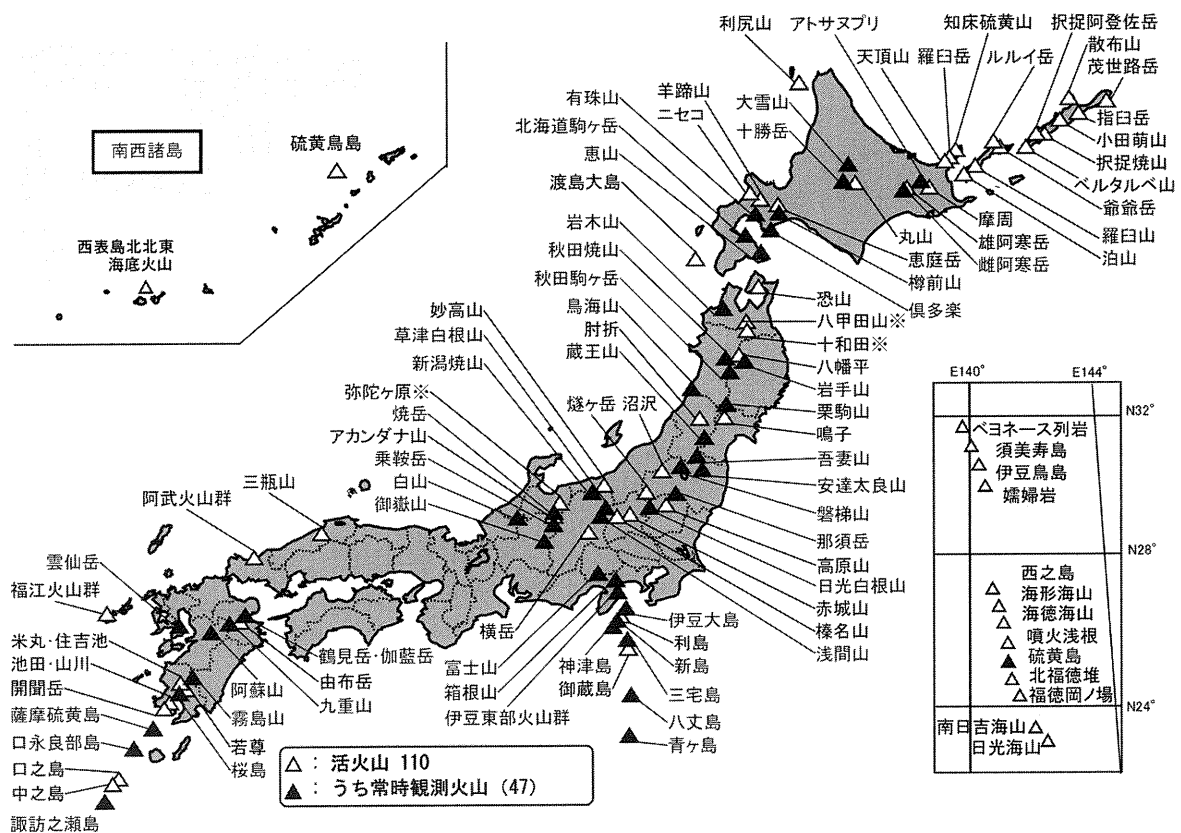
東海・東南海・南海の巨大地震や首都直下地震をはじめとした地震動に対しては、橋梁などの耐震化が進んでおり、人的・経済的被害もある程度限定的になると思われるが今後も大地震に対する対策を真摯に続けていかなければならない。その一方で、大地震に伴う大津波への対応はまだまったくの途上である。したがって、警報から襲来までの時間が短い近海大津波への対応が先ずは急務であると考えられる（資料－2）。

資料－2 わが国の主な地震・津波による被災者数

災 害 名	年 月 日	死者・行方不明者数
濃尾地震 (M8.0)	1891年（明治24年） 10月28日	7,273人
◎明治三陸地震津波 (M8.25)	1896年（明治29年） 6月15日	約22,000人
関東大地震 (M7.9)	1923年（大正12年） 9月1日	約105,000人
北丹後地震 (M7.3)	1927年（昭和2年） 3月7日	2,925人
◎昭和三陸地震津波 (M8.1)	1933年（昭和8年） 3月3日	3,064人
鳥取地震 (M7.2)	1943年（昭和18年） 9月10日	1,083人
東南海地震 (M7.9)	1944年（昭和19年） 12月7日	1,251人
三河地震 (M6.8)	1945年（昭和20年） 1月13日	2,306人
南海地震 (M8.0)	1946年（昭和21年） 12月21日	1,443人
福井地震 (M7.1)	1948年（昭和23年） 6月28日	3,769人
十勝沖地震 (M8.2)	1952年（昭和27年） 3月4日	33人
◎1960年チリ地震津波 (Mw9.5)	1960年（昭和35年） 5月23日	142人
新潟地震 (M7.5)	1964年（昭和39年） 6月16日	26人
1968年十勝沖地震 (M7.9)	1968年（昭和43年） 5月16日	52人
1974年伊豆半島沖地震 (M6.9)	1974年（昭和49年） 5月9日	30人
1978年伊豆大島近海地震 (M7.0)	1978年（昭和53年） 1月14日	25人
1978年宮城県沖地震 (M7.4)	1978年（昭和53年） 6月12日	28人
◎昭和58年（1983年）日本海中部地震 (M7.7)	1983年（昭和58年） 5月26日	104人
昭和59年（1984年）長野県西部地震 (M6.8)	1984年（昭和59年） 9月14日	29人
◎平成5年（1993年）北海道南西沖地震 (M7.8)	1993年（平成5年） 7月12日	230人
平成7年（1995年）兵庫県南部地震 (M7.3)	1995年（平成7年） 1月17日	6,437人
平成16年（2004年）新潟県中越地震 (M6.8)	2004年（平成16年） 10月23日	68人
平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震 (M7.2)	2008年（平成20年） 6月14日	23人
◎平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)	2011年（平成23年） 3月11日	21,839人

◎があるものは津波被害が主因である。 Mw：モーメントマグニチュード
（内閣府 平成27年度版防災白書 附属資料5に◎を防災懇談会にて追加）

一方、広範囲に被害を及ぼす自然現象として火山大噴火があげられる(資料-3、資料-4)。噴火時の飛散物の落下と降灰、火砕流、溶岩流、火山灰の成層圏到達による地球の低温化など、世界各地で過去に多くの火山噴火による大災害が発生してきた。1792年の雲仙岳の噴火では火山性地震による眉山の山体崩壊によって九十九島が生じるとともに大津波が発生して15,000人ものが死者が出たのである。富士山は1707年に大噴火しており、今後もし大噴火すれば首都機能をはじめ周辺部の施設が大打撃を受けることが予想される。したがって、広範囲に影響を及ぼす恐れのある火山大噴火について、火山災害に関する認識を強くもつことが重要である。火山の大噴火に関しては一般に事前の予知が可能なのが大地震や大津波の場合と異なるが上述の雲仙岳の火山活動の場合のような大津波の発生、および1985年のコロンビア国のネバドレルルイス山の噴火による大泥流の発生(死者25,000人)などを予知することは困難である。



(内閣府 平成 27 年度版防災白書 附属資料 4)

資料-3 わが国の活火山の分布

資料－４ わが国の主な火山噴火および噴火災害

噴火年	火山名	犠牲者数	噴火および被害の特徴
1707	富士山※		「宝永噴火」多量の降灰、終息後の土砂災害
1721	浅間山	15	噴石
1739	樽前山※		火砕流、多量の降灰・軽石
1741	渡島大島	1467	山体崩壊、岩屑なだれによる大津波発生
1769	有珠山		大量の降灰・軽石、火砕流
1777	伊豆大島		「安永の大噴火」溶岩流、スコリア降下
1779	桜島※	150余	「安永の大噴火」噴石、溶岩流
1781	桜島	15	高免沖の島で噴火、津波
1783	浅間山	1151	「天明大噴火」火砕流、溶岩流、土石なだれ、吾妻川、利根川の洪水
1785	青ヶ島	130～140	噴石、泥土、島民の1/3以上が犠牲。以後50年余無人島
1792	雲仙岳	15,000	「島原大変肥後迷惑」眉山の崩壊による対岸の津波
1822	有珠山	50～103	火砕流、旧アブタ集落全滅
1853	有珠山		多量の火山灰・軽石、溶岩ドーム形成、火砕流
1856	北海道駒ヶ岳	21～29	降下軽石、火砕流
1888	磐梯山※	461～477	岩屑なだれによる5村11部落が埋没、土石流（火山泥流）
1900	安達太良山	72	噴石、火口の硫黄採掘所全壊
1902	伊豆大島	125	全島民が犠牲
1914	桜島※	58	「大正大噴火」火山雷、溶岩流、地震、空振、村落埋没、多量の降灰
1926	十勝岳	144	大規模火山泥流、上富良野、美瑛埋没
1929	北海道駒ヶ岳	2	多量の降灰・軽石、火砕流、火山ガス被害
1940	三宅島	11	多量の火山灰・火山弾、溶岩流
1952	ベヨネース列岩（明神礁）	31	火砕サージ
1943～45	有珠山	1	多量の火山灰、噴石、昭和新山形成
1958	阿蘇山	12	噴石
1991	雲仙岳	43	火砕流、土石流
2010～11	霧島山新燃岳		火砕流
2014	御嶽山	57	噴石
2015	口之永良部島（新岳）		水蒸気爆発、多量の降灰

（内閣府 平成27年度版防災白書 附属資料20を一部省略、霧島山・口之永良部島は防災懇談会にて追加）

2.3 プレストレストコンクリート技術が果たすべき役割

（1）性能の特性

プレストレストコンクリート構造物は、他の構造物と比較して以下の性能上の特性をもつ。

- a) 高強度コンクリートと PC 鋼材の緊張による高性能コンクリート部材によって構成される PC 構造物は平常時にはコンクリートにひび割れが発生せず各種の防災施設構造物として耐久的で、かつ、経済的な特性をもつことが可能である。
- b) 強靱な復元特性と共振回避性能とを合わせもつため、大地震に対する応答の増幅を低減しつつ、地震後には変形は元に戻る。例えば、鉛直プレストレスが導入された PC 柱や PC

橋脚は、比類のない耐震性能を保持することが可能である。

- c) 薄い壁厚をもつPC 中空函体構造物は耐久的な浮体構造として機能できるので津波対策の構造物として所用の機能を果たすことが可能である。
- d) プレキャスト化による施工の合理化、プレストレスによる部材接合の優位性、など設計の自由度が大きく、各種の防災機能を対象として最適な性能をもつ構造物を創造することが可能である。
- e) 損傷を受けた構造物に対して、外ケーブルの追加などの手法により比較的容易に復旧することが可能である。この場合、対象はプレストレストコンクリート構造物ばかりでなく、鉄筋コンクリート構造物や場合によっては鋼構造物も対象となり得る。
- f) 必要最小限のメンテナンスで所期の性能を維持することができる。
- g) 延焼火災に対し、相当な耐火性能を保持できる。
- h) コンクリートにひび割れを生じさせないことが可能であることから放射性物質の格納時の漏洩防止および放射線拡散の抑制に優れている。
- i) 防災構造物のみでなく、災害復旧工事に際して堰堤や土留めの安定化にグラウンドアンカー等プレストレス技術を応用することが可能である。

このような特徴は防災構造物に最適な特性となる可能性があり、防災に対してプレストレストコンクリート構造物が果たす役割は大きい筈である。今後ともこの特性を十分に発揮できる構造物の研究開発を鋭意進め、プレストレストコンクリート構造を適用することによって優れた防災構造物が建設できることを積極的に提案することが必要である。

(2) 機能

上述の性能を発揮することによってプレストレストコンクリート構造の防災構造物は、被災時の外乱に対して以下の機能を果たすこととなる。

- a) 自然現象による水圧などの圧力を強靱な曲げおよびせん断機構によって抵抗することにより防災機能を果たすもの（例：防波堤・防潮堤）
- b) 自然現象のエネルギーに反発またはエネルギーを吸収することにより防災機能を果たすもの（例：ロックシェッド）
- c) 耐久的な部材や耐火性能の高い部材により構成される構造によって避難場所を確保することにより、防災機能を果たすもの（例：津波避難タワー）
- d) 強靱な復元性能を有する高層フレームや高架構造を築造して津波や地震に対し安全に機能するとともに道路や鉄道のネットワークの構造物として被災時の避難や災害復旧に寄与する機能（例：人工台地、交通ネットワークの橋梁構造物）

いずれの機能を持たせるかについては、PC 構造の特性を把握した上で計画時によく検討する必要がある。なお、機能には意図しないケースが潜在的に存在することがあり得ることに留意しなければならない。

(3) プレストレストコンクリート技術者

一方、プレストレストコンクリート技術者は、構造物の設計施工において上述のPC 構造物のもつ本来の性能について十分に認識し、以下の事項を念頭に置いてその性能を防災のために発揮させることが重要である。

- a) 材料の非線形性や構造物の不静定性、動的特性を認識して、その挙動を定性的・定量的に把握する。
- b) 多種多様の材料について、力学的強度や化学的抵抗性などを判断して材料を選択し、最適な構造物を構築する。
- c) 再現期間の著しく長い大津波などに対して防災構造物を建設する場合には、平常時にも社会基盤として活用できるような複合防災施設を建設することにより防災と日常生活との調和を図ることを探求する²⁻²⁾。
- d) 自然の外乱や災害に関する学習に心掛け、情報を収集するとともに、一社会人として突然発生する大災害に対して必要な準備を整えた上で周辺の市民に防災の重要性を啓蒙する。

以上述べたように、プレストレストコンクリート技術および技術者が活躍して適切な防災構造物を創造することは、わが国の防災に対して大きく貢献することになると考えられる。それゆえ、プレストレストコンクリート工学会およびその会員は、プレストレストコンクリート技術の適用による防災構造物の開発と発展を鋭意進めていく必要のあることを強く提言する。

平成27年3月9日

プレストレストコンクリート工学会 PC技術規準委員会 PC防災懇談会

池田尚治、上杉泰右、太田誠、春日昭夫、加藤敏明、

河村直彦(座長)、堤忠彦、花島崇、山本徹

参考文献

- 1-1) 池田尚治：耐震設計の進化の経緯に関する探究、コンクリート工学 Vol.51、No.1、2013年1月号、pp.49-54、日本コンクリート工学会
- 1-2) 池田尚治、細田暁、林和彦：東日本大震災における地震、津波および放射能による被害の分析、教訓および緊急提案、コンクリート工学 Vol.49、No.12、2011年12月号、pp.53-61、日本コンクリート工学会
- 1-3) 池田尚治、町田篤彦：大災害に備えての平成防災17条憲章の策定に関する提案、プレストレストコンクリート Vol.55、No.1、2013年1月号、pp.52-56、プレストレストコンクリート工学会
- 1-4) 池田尚治：ペットボトルで今すぐ大津波に対処開始を、高速道路と自動車2012年3月号、高速道路調査会
- 1-5) 池田、宇治、細田、林：津波に対する自己浮上PCシェルターと自己起立PC防波堤の提案、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、2014年10月、工学会
- 1-6) 池田尚治、宇治公隆、林和彦、松本修一：津波に対するPC防波堤設計の基本概念、PC津波防災シンポジウム「津波防災のためのPC構造物の可能性を探る」講演論文集、2015年8月、pp.29-32、プレストレストコンクリート工学会
- 2-1) 河村直彦、池田尚治、上杉泰右、花島崇：大規模災害に対する提言—プレストレストコンクリート技術の役割と展開—、プレストレストコンクリート、Vol.57、No.5、pp.62-67、2015年9月
- 2-2) 池田尚治、町田篤彦：大災害に備えての平成防災17条憲章に関する提案、プレストレストコンクリート、Vol.55、No.1、pp.52-56、2013年1月

点検診断技術の最前線 —予防保全を見据えた合理的なメンテナンスサイクルの 実現を目指して—

京都大学大学院 特定教授

国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター

(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会

〃

〃

(株)四国総合研究所

西日本旅客鉄道(株) 構造技術室

京都大学 学際融合教育研究推進センター 特任教授

塩谷 智基

渡辺 博志

吉松 慎哉

徳光 卓

藤原 保久

廣瀬 誠

湯淺 康史

宮川 豊章

1. はじめに

持続可能な社会を実現するうえで、その根幹をなす社会インフラが安心して末永く活用できるように管理することは必須である。わが国の社会インフラ整備の基本方針を示した第4次社会資本整備重点計画（平成27年）では、インフラ老朽化の加速を大きな課題として取り上げている。本計画によればメンテナンス対策費は20年後には現在の約1.2～1.5倍と試算され、維持管理コストの集中に警鐘を鳴らしている。平成26年に国交省から示されたインフラ長寿命化計画（行動計画）では、橋梁をはじめトンネル河川構造物など各種施設の現状が取りまとめられ、それぞれの施設ごとに維持管理の合理化に向けた取り組みが具体的に記載されている。

こうした計画では、老朽化が進展する社会インフラについて、更新も視野に入れつつ安全で安心して活用できるようにすることと、そのライフサイクルコストの縮減と平準化を求めている。適切な維持管理シナリオを策定し、そのシナリオに基づいて点検・診断・対策措置（更新）といった一連のメンテナンスサイクルを確実に実施していくことが重要となる。予防保全も見据えたメンテナンスサイクルを構築しなければならない。

こうしたメンテナンスサイクルの実現のためには、その根幹となる点検や診断、対策措置に関連する技術が確立していなければならない。とりわけ点検診断は、対策要否あるいは更新といった判断に直結するものであり、メンテナンスサイクルを構成する重要な要素である。

これまで、点検診断技術については、さまざまな調査や研究がなされてきた。コンクリートの品質を知るための各種非破壊試験や微破壊試験、コンクリート中に存在する鉄筋の腐食環境を推定するための電気化学的な手法などが研究され、実構造物への適用を経て土木学会規準やJIS規格に制定され標準化がなされた試験方法も存在する。また、必ずしも専門的な知識を有していない点検技術者であっても、一定の信頼性を持った点検結果が得られるような点検マニュアルの整備も進展しつつある。構造物の劣化損傷メカニズムの解明、残存耐荷性能評価技術も進歩を遂げてきている。

しかし、近年の社会情勢の変化も踏まえると、これまでに培ってきた点検や診断技術にも、まだ改善の余地が多く残されている。例えば、近い将来、社会インフラを構成する構造物の老朽化の進展とともにその数が増加する一方で構造物の維持管理に従事する熟練技術者の減少が予想される。このため構造物の点検作業にはさらなる効率化が求められ、そうしたニーズにこたえる技術開発が期待されている。例えば、構造物に近接しなくても遠隔からの点検を可能とする点検技術の実用化や、構造物に損傷を与えずに内部の状況を把握する検査技術になどである。また、財政状況が厳しい状況の中で社会インフラのメンテナンスに財源や資源を投入していくためには、その妥当性について幅広い理解を得ることが必要であり、構造物の管理者はそれに応えられるよう説明責任を全うしなければならない。そのためには維持管理対象となる構造物の損傷状況の評価や将来にわたる性能の予測結果に対する信頼性を高めるための研究を活発化し、実務に適用できる形で成果を作り上げていく必要がある。また、構造物の内部の劣化の予兆を客観的にとらえるための検査技術も重要となる。前述のインフラ長寿命化計画（行動計画）では、そうした技術開発を促進させていく必要性を述べるとともに、新たに開発された新技術については、現場での検証試験を通じて、円滑に展開を迅速化させていくこととしている。

内閣府では戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）を設立し、その枠組の中でインフラ維持管理・更新・マネジメント技術を研究課題の一つとして取り上げ、精力的な研究が進められつつある。また、維持管理に関連する各種団体が連携した技術研究組合といった組織を構築し、幅広いネットワークを構築しつつ、さまざまなシーズ技術の実用化に向けた検討が活発化している。

本稿はこうした背景をふまえ、プレストレストコンクリート橋を中心とした点検診断技術について総括するとともに、近年、新たに研究が進展している技術の最前線について紹介をするものである。

2. 劣化現象と診断技術

2.1 PC 橋の劣化現象

2.1.1 コンクリート橋の変状

1951年に日本ではじめてのPC橋である長生橋が建設されて以来、1970年代を中心に数多くPC橋が建設され近年さまざまな変状の報告が増加している。一般的なコンクリート構造物の変状は、①初期欠陥、②劣化、③構造的変状および④損傷に分類される。初期欠陥とは、構造物または部材に必要な性能が建設初期から欠けている状態で、初期ひび割れ、かぶり不足、グラウト充填不足などである。劣化とは材料の特性が時間の経緯とともに損なわれていく現象で、塩害、中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学的侵食などである。構造的変状とは、力学的作用によって生じる変位やひび割れなどで、設計上の想定以上の構造的変化をいい、疲労や支承の機能不全などである。損傷とは、地震や衝突によるひび割れや断面欠損など、短時間のうちに発生し、その進行が時間の経過を伴わない変状をいう。コンクリート橋の主な変状と原因を表-2.1.1に示す。

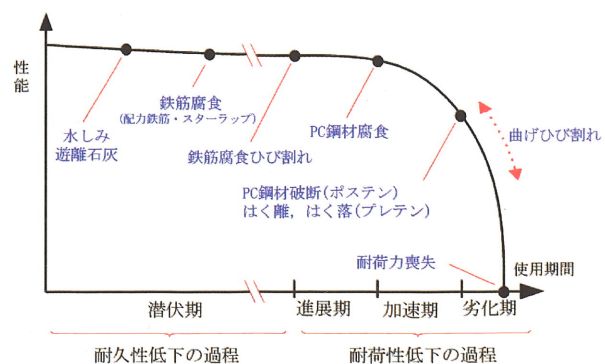
表-2.1.1 コンクリート橋の変状と原因

分 類	原 因	変状の要因	現 象	指 標
初期欠陥	初期ひび割れ	・支保工支持力不足 ・マスコン	・施工時の支保工沈下や水和熱による温度応力などの要因によって施工中にひび割れが生じる ・ひび割れからの劣化因子の浸入を招く	・ひび割れ
	かぶり不足	・スパーサー ・型枠移動	・所定の鋼材かぶり厚さを満たしていない状態 ・時間の経過に伴って鋼材腐食の原因となり、耐久性の低下を招く	・かぶり厚さ ・鋼材腐食量
	PC グラウト充填不足	・グラウト材料および施工方法	・ダクト内のPC グラウトが充填不足の状態 ・PC ケーブルに沿ったひび割れ、遊離石灰が生じることがあり、場合によってはPC 鋼材破断に至ることもある	・グラウト充填度 ・PC 鋼材腐食量 ・PC 鋼材に沿ったひび割れ
	後埋めの施工	・後埋め材料および施工方法	・後埋め部と既設コンクリートとの一体化が不十分な状態やひび割れが生じている状態 ・劣化因子の浸入によりPC 定着部の腐食を招く	・後埋め部隙間 ・後埋め部ひび割れ ・定着部鋼材腐食
劣化	塩害	・塩化物イオン	・塩化物イオンの浸入により内部鋼材の腐食、断面減少が生じ、コンクリートのひび割れ、剥離を引き起こす	・塩化物イオン濃度 ・鋼材腐食量 ・腐食ひび割れ
	中性化	・二酸化炭素	・二酸化炭素によりコンクリートのアルカリ性が中性化し、内部鋼材の腐食、断面減少を生じ、コンクリートのひび割れ、剥離を引き起こす	・中性化深さ ・鋼材腐食量 ・腐食ひび割れ
	凍害	・凍結融解作用	・コンクリート中の水分の凍結融解作用により、表面よりスケーリング、微細ひび割れおよびポップアウトを引き起こす	・スケーリング深さ ・鋼材腐食量
	アルカリシリカ反応	・反応性骨材使用	・コンクリート中の反応性骨材とアルカリ性水溶液が反応して、コンクリートの異常膨張やひび割れを引き起こす	・膨張量（ひび割れ）
	化学的浸食	・酸性物質 ・硫酸イオン	・酸性物質や硫酸イオンにより、コンクリート硬化体が分解したり、劣化する	・劣化因子浸透深さ ・中性化深さ ・鋼材腐食量
構造的変状	疲労	・重交通	・鉄筋コンクリート床版などが輪荷重の繰り返し载荷によって、ひび割れや陥没が生じる	・ひび割れ密度 ・たわみ
	支承の機能不全	・支承材料	・ゴム支承の劣化や鋼製支承の腐食により、支承の機能が低下する状態 ・支承の支持条件の変化により橋梁本体にひび割れなどが生じる場合もある	・ゴム材料ひび割れ ・鋼材腐食量 ・支承移動、回転状況
損傷	地震	・地震外力	・地震外力により、構造物にひび割れ、断面欠損などの損傷が生じる	・ひび割れ ・断面欠損
	衝突	・衝突力	・車両や船舶の衝突により、構造物にひび割れや断面欠損などの損傷が生じる	・ひび割れ ・断面欠損
	火災	・火災温度、継続時間	・火災の高温の影響により、コンクリートのひび割れ、剥離、爆裂や内部鋼材の強度低下を引き起こす	・ひび割れ ・中性化深さ ・鋼材強度

2.1.2 PC 橋特有の変状

(1) PC 橋の劣化の特徴

PC 橋は、水結合材比が小さい密実なコンクリートを使用し、プレストレスによりひび割れを制御しているため、塩化物イオンなどの劣化因子が浸入しにくく、耐久性に優れた構造である。しかし、飛来塩分や凍結防止剤散布による塩害劣化では、図-2.1.1のPC 橋の劣化過程の概念図に示すように、塩化物イオ

図-2.1.1 PC 橋の劣化過程の概念図²⁻¹⁾

ンがPC鋼材に達すると腐食が急速に進展し、耐荷力が急激に低下するため注意が必要である。

(2) ポストテンション方式のPC鋼材に関する変状

ホストテンション方式の橋梁では、PC鋼材の防錆とコンクリートとの一体化を図るためPCグラウトが施工されてきた。PC橋の耐荷性能に重大な影響を与えるPCグラウト充填不足やPC鋼材の腐食や破断のリスクは、変状状況、建設時期、PC鋼材種別、構造形式、架橋環境、PC鋼材の防錆などが要因として大きな影響を与えると考えられる。例えば、建設時期の古いPC橋では、PCグラウトのブリーディングが許容されており、PC鋼材配置においても上縁定着が採用されていたため、PC鋼材腐食・破断のリスクが大きいと考えられるが、1990年代以降はPCグラウト材料や配置方法が改良されたことによりPC橋の耐久性が大幅に改善されている。こうした既設PC橋の耐久性については、PC工学会の委員会で検討中である。

また、1980年代後半から90年代中頃までに建設されたPC鋼棒を用いた張出架設方式のPC箱桁橋では、図-2.1.2に示すように多数のグラウトホースを束ねて桁上面に配置する方法が採用されていた。束ねたグラウトホース間に空隙ができ、グラウトホースの後処理も適切でなかったため、橋面上の凍結防止剤散布による塩分を多く含んだ水がグラウトホースの外周部を伝わってシーす内に浸入し、PC鋼材の腐食に至ることが報告されている²⁻²⁾。

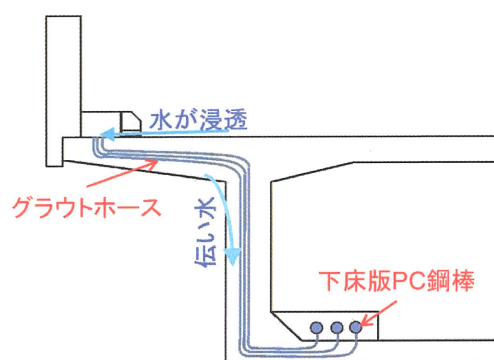


図-2.1.2 グラウトホースの伝い水の概念図

(3) 施工目地に関する変状

PC橋は張出し架設工法などの分割施工ができ、プレキャスト部材をプレストレスにより接合することが可能である。しかしながら、施工目地は弱点となる可能性があり、プレキャストセグメント施工による鉄筋が貫通していない接合目地、PC箱桁橋のウェブと上床版の打継ぎ面を適切に処理しなかった水平方向の施工目地およびPC連続合成桁橋の一次床版と二次床版の施工目地などで変状が生じている場合がある。また、建設時期の古いPC橋では橋面防水工を全面施工していないため、写真-2.1.1に示すようにプレキャストPC桁の間詰め部から漏水やエフロレッセンスが見られ、横締めPC鋼材の腐食やT桁橋の間詰め床版の抜け落ちなどの変状が生じている。



写真-2.1.1 T桁橋の間詰め床版の劣化

(4) コンクリートのクリープ・乾燥収縮に関する劣化

中央ヒンジ構造の橋梁など、比較的変形しやすい構造形式では、ヒンジ部の変位が設計で想定した値以上になることがあり、車両走行性に支障をきたす場合がある。この原因としては、想定外のクリープ・乾燥収縮や地盤の不等沈下などが考えられる。また、これらの橋梁は比較的建設時期が古いため、ヒンジ部の支承も摩耗しやすい構造で繰り返し荷重によって段差が生じる場合もあり、さらに走行性の悪化を招いている例もある。

2.1.3 変状原因と調査方法

PC 橋の変状が確認された場合、変状の進行を予測し適切な対策を講じるためには、変状の原因を推定し、構造物の性能を適切に評価することが重要である。2.1.1で示したようにそれぞれの原因によって生じる変状には特徴があるものの、ひび割れなど各原因に共通する指標も多いことから、原因推定の精度を向上させるためにさらに詳細な調査が必要になる。

とくに、PC 橋の場合、PC 鋼材の状態が耐荷力に大きな影響をおよぼすが、外観変状だけでは腐食状況や破断の有無などの判断が難しい。PC 橋として性能評価を適切に行うには、外観変状に加えて、コンクリートの状態やPC 鋼材の状態および残存プレストレスの状態など詳細な調査を行う必要がある。表-2.1.2に主な変状原因と調査方法を示す。

表-2.1.2 変状原因と調査方法

一般的な調査項目	得られる情報	主な調査方法
構造物の概要	・適用示方書、設計基準、設計図書 ・施工記録、検査記録、維持管理記録	・書類調査 ・ヒアリング
外観変状・変形	・ひび割れ、断面欠損 ・コンクリートの浮き、剥離 ・鋼材露出・腐食・破断の有無 ・スケーリング、ポップアウト ・変形、支承部の損傷	・遠望目視 ・近接目視 ・カメラによる方法 ・たたき検査 ・赤外線法
コンクリートの状態	・使用材料、配合 ・物理特性（強度、弾性係数） ・化学特性 ・劣化因子の浸透深さ	・反発度法 ・弾性波を利用する方法 ・電磁波を利用する方法 ・局所的な破壊による方法（コア採取など）
鋼材の状態	・鋼材量、位置、かぶり ・鋼材腐食状況、断面欠損 ・PC グラウト充填状況	・X 線法 ・ファイバースコープ ・自然電位法、分極抵抗法
構造物の供用状態・健全性	・供用状態（荷重、外力） ・活荷重によるたわみ、支持の状態 ・異常音、異常振動 ・残存プレストレスの状況	・目視観察（外観、移動量） ・応力頻度測定 ・載荷試験、振動試験 ・応力解放法、鉄筋切断法

2.2 診断技術

2.1.3で述べたように PC 橋の性能を適切に評価するには、コンクリートや PC 鋼材の状態を把握するとともに、部材の応力状態を調査することも必要である。ここでは、現在 PC 橋に適用されている診断技術の現状について記述する。

2.2.1 コンクリートの特性と応力

(1) コンクリート強度・弾性係数の調査

1) 小径コア法²⁻³⁾

一般的に既設構造物のコンクリート強度を推定するには、構造物からコアを採取して強度試験を実施する。しかしながら、コア寸法が 100mm～150mm と比較的大きいため、PC 橋のように部材寸法が小さく鋼材配置が密な構造物には適用できない場合があるため、一般的なコア法より小さいコア径で強度推定できる小径コア法が採用されている。

小径コア法は、構造物から直径 20mm 程度のコンクリートコアを採取し、強度試験を実施する方法で、その試験結果に、あらかじめ定めた実験式を用いて補正することにより、構造体コン

クリートの圧縮強度を推定する方法である。この方法には、コアの直径が小さいので、構造体への影響が少ないことやコンクリート中の鉄筋を切断する可能性が低いなどの利点がある。

小径コアの測定精度について、実験結果によれば、 $\phi 25\text{mm}$ の小径コア供試体の圧縮強度の平均値から 2 N/mm^2 を減じれば $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体の強度に換算でき、また、通常の構造物のコンクリート強度の一般的なばらつきの範囲（標準偏差 5 N/mm^2 程度）では、小径コア供試体6本による圧縮強度の推定精度は、 $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体3本による推定精度と同等であった。すなわち、 $\phi 25\text{mm}$ の小径コア供試体を用いても、供試体の本数を適切に選定することにより、 $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体を用いる方法と同等の測定精度が得られることが確認された。ただし、高強度コンクリートの場合には供試体数を増やすことが望まれている。

2) 反発度法（リバウンドハンマー）²⁻³⁾

コンクリート表面をリバウンドハンマーを用いて打撃し、反発度より圧縮強度を推定する方法である。コア採取による強度測定と比較して試験方法が簡便なこと、構造物を破壊することなしに測定できることから多く適用されている方法である。

反発度から圧縮強度を求める推定式については、種々提案されているが、一例として日本材料学会式による推定式を式(2.1)に、東京都建築材料検査所による推定式を式(2.2)に示す。

$$F_c = -18.0 + 1.27R \quad (2.1)$$

$$F_c = -10.8 + 0.98R \quad (2.2)$$

ここに、 F_c ：コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

R ：反発度

なお、高強度のコンクリートが使用されているプレストレストコンクリート構造物にリバウンドハンマーを用いる場合の留意点としては、反発度と圧縮強度の関係は、低強度域では日本材料学会式と一致するものの、高強度域まで含めて回帰した一次式の傾きは日本材料学会の式よりも大きくなることである。反発度と圧縮強度の関係を低強度域から高強度域まで総括的に表すには、図-2.2.1に示すように直線回帰よりも曲線回帰の方が適当であるという実験結果も報告されている²⁻⁴⁾。

3) 超音波法²⁻³⁾

超音波法は、コンクリート中を伝播する超音波の速度を測定し、この値からコンクリートの動的特性、強度、ひび割れの状態などを推定する方法である。表-2.2.1に超音波伝播速度とコンクリートの品質・強度レベルの判定例を示す。この方法による推定精度は、あまり精度がよくないためリバウンドハンマーとの複合法として用いることが望ましい。

(2) 残存プレストレスの調査

1) コア切込応力解放法²⁻³⁾

コア切込応力解放法は、応力調査の対象箇所に、2方向のひずみゲージを貼り付け、コアを切り込む

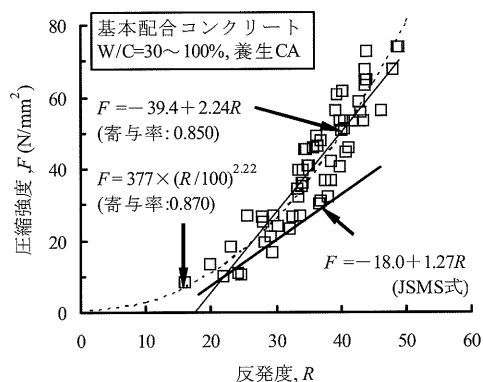


図-2.2.1 測定反発度と圧縮強度の関係

表-2.2.1 超音波伝播速度によるコンクリートの品質・強度レベルの判定例

超音波伝播速度 (m/sec)	品質・強度基準 (N/mm^2)	備考
4600以上 3700~4600 3100~3700 2100~3100 2100以下	優良 やや良 不良 不可	米 カナダ
4500以上 4000~4500 3500~4000 3000~3500 2000~3000 2000まで	卓越 非常に良い 良い 満足 悪い 非常に悪い	40以上 40まで 25まで 10まで 4まで -
		旧ソ連

ことによって解放されるひずみを測定する方法である。2方向のひずみ差と算定式により乾燥収縮およびクリープひずみの影響を消去することにより、知りたい有効応力を取り出すことができる。構造物へのダメージを軽減するため、コアの切り込み深さを浅くすることも可能である。コア切込応力解放法の測定原理を図-2.2.2に示す。

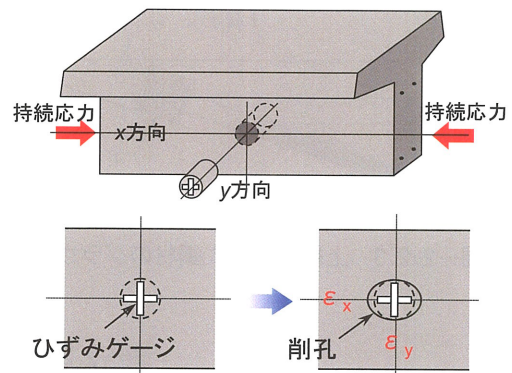
2) スリット応力解放法²⁻³⁾

スリット応力解放法は、コンクリート表面を部分的に切削し、応力解放した際のひずみを光学的全視野ひずみ計測装置により測定し、現有応力を推定する手法

である。光学的全視野ひずみ計測装置は、撮影した範囲内の任意の位置・方向のひずみ（全視野ひずみ）を画像解析により測定可能な装置である。測定状況を写真-2.2.1に示す。

3) 鉄筋切断法²⁻³⁾

鉄筋切断法は、PC 構造物の鉄筋をはつり出し、ひずみゲージを貼り付けたのち、鉄筋を切断し解放されるひずみを計測する手法であり、PC 構造物の残存プレストレスの測定法の一つとして挙げられる。切断した鉄筋を復旧するために鉄筋接統治具を取り付けたのち断面修復を行う。鉄筋接統治具の取付け状況を写真-2.2.2に示す。



切込により応力が解放されひずみが生じる
図-2.2.2 コア切込応力解放法の測定原理



写真-2.2.1 全視野ひずみの測定
（切削前後）

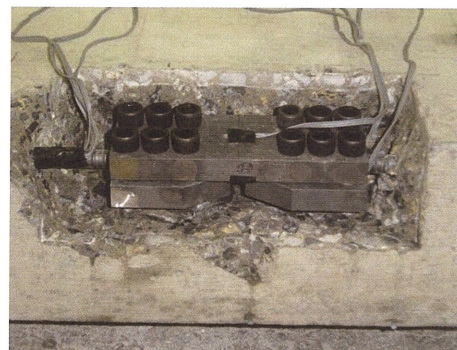


写真-2.2.2 鉄筋接統治具取付け状況

2.2.2 PC 鋼材の健全性（内・外ケーブル）

(1) PC グラウトの充填調査

PC グラウトの充填調査は充填不足を生じやすい箇所を対象に行う。図-2.2.3に PC 鋼材上縁定着部付近、図-2.2.4に曲げ上げ部付近における PC グラウト充填不足のイメージをそれぞれ示す。充填不足の発生は、前者がブリーディング、後者が先流れによる空气の滞留を主原因とするが、充填不足は、いずれも上り勾配のシースの上部付近に発生しやすいため、充填調査はこのような位置を対象に実施する。

PC グラウト充填調査方法の一覧を表-2.2.2に示す。PC グラウトの充填調査方法としては、弾性波を用いる方法、放射線を用いる方法、目視による方法が一般的である。この内、X 線透過法と削孔法は従来から行われている手法のため、説明は割愛する。弾性波を用いる方法は比較的新しく、広帯域超音波法、衝撃弾性波法、インパクトエコー法などがある。これらはいずれも弾性

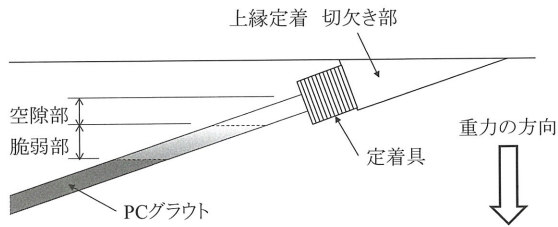


図-2.2.3 上縁定着 PC 鋼材のグラウト充填不足

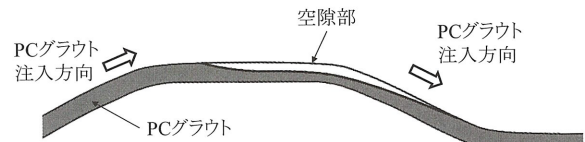


図-2.2.4 曲げ上げ部のグラウト充填不足

表-2.2.2 PC グラウト充填調査方法の一覧

種別	非破壊検査の名称	非破壊検査の概要
弾性波を用いる方法	広帯域超音波法	PC 鋼材直近のコンクリート面に接触探子を配し、発信子から弾性波を入射し、シースの反射波の変動を解析することによってグラウト充填を判断する方法
	衝撃弾性波法	PC 鋼材の片側の定着部から弾性波を入力し、PC 鋼材を伝達して反対側の定着部で受信した弾性波の特性から、シース内のグラウトの充填状況を把握する方法
	インパクトエコー法	PC 鋼材側面のコンクリート上からハンマーなどにより弾性波を入力し、シースからの反射波の周波数応答を解析してグラウト充填を判断する方法。衝撃弾性波法の一つ
放射線を用いる方法	X 線透過法	PC 鋼材側面から X 線を放射し、反対側に設置したフィルムやイメージングプレートで透過画像を得て、その画像からグラウトの充填状況を判断する方法
目視による方法	削孔法（ファイバースコープ法）	コンクリート表面からシース位置までドリルで削孔し、シースを破り孔内にファイバースコープを挿入して、目視によりグラウトの充填状況を判断する方法

波を使用するが、弾性波の周波数帯や、弾性波の入力方法と検出方法が異なっている。すべてに共通する課題として、手前のシースの影となる位置にシースが配置されている場合、奥側にあるシースは検査できない。また、調査位置から見て手前側に鉄筋が配置されている場合には検出精度が低下する場合があります、鉄筋が密に配置されている場合は検査ができないなどの問題がある。

1) 広帯域超音波法

広帯域超音波測定装置を写真-2.2.3に、充填不良の波形の例を図-2.2.5に示す。広帯域超音波法は、シースに向けてコンクリートの表面から超音波の入力を行い、シースからの反射波を解析してグラウトの充填度を判断する方法である。この方法はコンクリートの表面から検査を行うため、定着部が見えていない場合でも適用できる。しかし、シース径が小さな場合や、かぶりがある

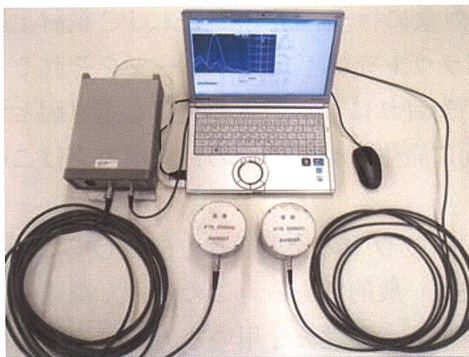


写真-2.2.3 広帯域超音波測定装置

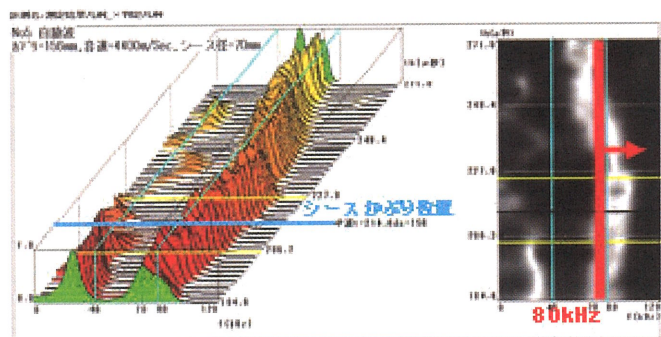


図-2.2.5 広帯域超音波による充填不良の波形例

大きな場合は探査精度が劣り、対象物の材齢や形状によっては超音波の散乱や反射などの影響を受け、検査できない場合がある。

2) 衝撃弾性波法

PC 鋼材の端部から弾性波を入力し、反対側の端部で検出した弾性波の特性からグラウトの充填度を判断する。この方法では、定着部近傍にセンサーを設置する必要があり、PC 鋼材がシースと接触している場合は弾性波が減衰するため、検査できない場合がある。

3) インパクトエコー法

インパクトエコー測定装置を写真-2.2.4に示す。コンクリートの表面からインパクトを用いて弾性波の入力を行い、シースからの反射波を解析してグラウトの充填度を判断する。特徴や課題は広帯域超音波法とほぼ同じであるが、反射波の解析結果の良否が検査の精度に影響することから、使用する周波数帯や検出装置の種類、分析方法などが異なる種々の方法が使用されている。



写真-2.2.4 インパクトエコー測定装置

(2) PC 鋼材の調査

表-2.2.3に PC 鋼材調査方法の一覧を示す。PC 鋼材に対する調査としては、PC 鋼材の腐食状態、PC 鋼材の張力、PC 鋼材破断の有無などがある。

1) PC 鋼材の腐食状態の調査

PC 鋼材の腐食状態を調査する方法としては、鋼材が腐食した時に生じる鋼材表面での電気化学的特性の変化から判断する方法や、ファイバースコープにより直接 PC 鋼材の腐食状態を観察する方法がある。電気化学的測定方法としては、自然電位や分極抵抗を測定する方法がある。自然電位は電位差計により測定し、腐食性の評価は ASTM C 876の基準によることが一般的である。分極抵抗法は、鋼材の分極抵抗と腐食電流密度が反比例の関係にあることを利用して、腐食速度を推定するもので、腐食の初期段階での検査に適している。ファイバースコープを用いる方法はグラウトの充填状態と同時に判断できるメリットがある。

2) PC 鋼材の張力

PC 鋼材の張力を測定する方法としては、磁気ひずみを用いる方法と振動法が用いられている。

磁気ひずみを用いる方法では、PC 鋼材が強磁性体であることを利用し、応力が作用した時に変化する磁気特性の変化を利用し、磁気特性と張力の関係から PC 鋼材の張力を検出する。この方法では PC 鋼材周囲にコイルを配置して電圧を印加し、張力の無い状態と透磁率を比較することで PC 鋼材の応力を求める装置が製品化されている。

表-2.2.3 PC 鋼材調査方法の一覧

調査項目	非破壊検査の名称	非破壊検査の概要
PC 鋼材の腐食状態	電気化学的測定法	コンクリートの表面にセンサーを設置し、コンクリート中にある PC 鋼材の自然電位や分極抵抗などの電気化学的な情報から、PC 鋼材の腐食状態を判断する方法
	削孔法（ファイバースコープ法）	コンクリート表面からシース位置までドリルで削孔し、シースを破いて孔内にファイバースコープを挿入して、PC 鋼材の腐食状況を判断する方法
PC 鋼材の張力	磁気ひずみを用いる方法	PC 鋼材が強磁性体であることを利用し、応力が作用した時に変化する磁気特性の変化を利用し、磁気特性と張力の関係から PC 鋼材の張力を検出する方法
	振動法	外ケーブルなどの PC 鋼材を加振し、共振周波数の特性から PC 鋼材の張力を推定する方法
PC 鋼材の破断	衝撃弾性波法	PC 鋼材の片側の定着部から弾性波を入力したとき、PC 鋼材破断部で反射波を生じることを利用し、弾性波の伝播速度から PC 鋼材の長さを求め、PC 鋼材の破断を検出する方法
	漏洩磁束法	PC 鋼材が強磁性体であることを利用し、磁石によって PC 鋼材を着磁させ、PC 鋼材破断箇所での N 極と S 極の発生に伴う漏洩磁束の有無を測定して、PC 鋼材の破断を検出する方法

振動法は外ケーブルの PC 鋼材に対して用いられる。緊張された外ケーブルを加振して弦振動を生じさせ、加速度計などで振動を検知し、解析により求めた共振周波数から張力を推定する。

3) PC 鋼材の破断

PC 鋼材破断の調査には、衝撃弾性波法と漏洩磁束法が用いられている。

衝撃弾性波法による調査の測定装置は、PC グラウトの充填調査で用いるものと同様である。衝撃弾性波法による PC 鋼材破断の破断調査では、PC 鋼材の片側の端部で入力と受信を行い、入力波が破断部で反射する特性を利用し、弾性波の伝播速度から PC 鋼材長を求めることで、PC 鋼材の破断の有無と位置を推定する。

漏洩磁束法による PC 鋼材破断調査は、コンクリート表面から着磁装置により PC 鋼材を着磁し、磁気計測装置によって漏洩した磁束を検知することによって PC 鋼材破断の有無を調査する検査手法である。着磁装置を写真-2.2.5に、磁気計測装置を写真-2.2.6に示す。

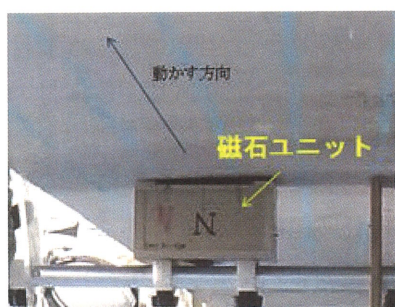


写真-2.2.5 着磁装置図



写真-2.2.6 磁気計測装置

測定原理のイメージを図-2.2.6に示す。鋼材を着磁すると端部はそれぞれS極とN極に分かれるため、鋼材破断箇所を挟む鋼材端部はN極とS極に分かれる。計測結果の例を図-2.2.7に示す。PC 鋼材が健全な場合は、磁束密度と位置の関係がなだらかな勾配を示すのに対し、破断を生じた場合では、破断箇所では磁束密度が急変しS字形の曲線となる。現在、PC 鋼材のかぶり厚が 200mm 程度まで適用できる。

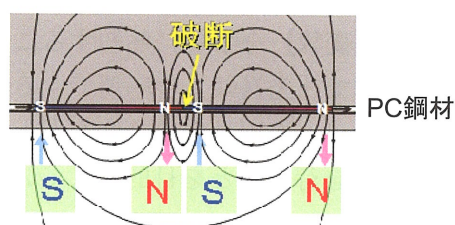


図-2.2.6 測定原理イメージ

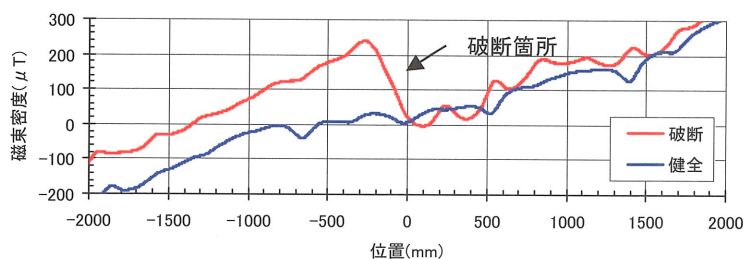


図-2.2.7 計測結果の例

(3) PC 定着装置のあと埋め部の調査

通常、PC 定着装置のあと埋め部の調査は目視と打音により行う。PC 橋の主ケーブルのあと埋め部は桁端部や橋上部となるため、舗装や伸縮目地に隠れて見えない場合も多い。一般に、狭い隙間の箇所での調査は、ファイバースコープや伸縮機能が付いた打診棒を用いて行う。舗装の下にある場合は路面切削時などに直接目視と打音点検を行う。

(4) グラウトホースの伝い水の調査

写真-2.2.7に実験で確認されたグラウトホースの伝い水による漏水の状況を示す。グラウトホースを伝う水は、長い時間をかけて浸透するため、ホースに沿った位置のコンクリート表面に水しみを生じる特徴がある。現在、非破壊によるグラウトホースの探査技術は確立されていないため、水しみや漏水を生じた箇所を削孔してグラウトホースの存在を確認する方法によっている。



写真-2.2.7 グラウトホースの伝い水による漏水

2.2.3 PC 橋の構造物の健全性

(1) 目視点検による性能診断

PC 建協では、目視点検による変状【外観状況】から健全性評価【性能診断】を行う手法を試みている。その方法は、表-2.2.4に示すように性能診断の区分をⅠ～Ⅳのように定義し、PC 橋の部材の部位に生じる35事例の変状を写真で紹介し、外観状況から推定できる性能診断と対策例

表-2.2.4 性能診断の区分

区分	変状【外観状況】から判断される健全性評価【性能診断】	対策の方向性
Ⅰ	健全	不要
Ⅱ	劣化の作用は認められるものの、まだ耐久性や耐荷性（構造安全性）はほとんど低下していないと考えられるもので、このまま放置すると劣化が進行し、耐久性の低下が懸念される場合があるもの。	予防保全
Ⅲ	劣化により耐久性が低下していると認められるが、まだ耐荷性はほとんど低下していないと考えられるもので、このまま放置すると劣化が進行し、耐荷性の低下が懸念されるもの。	補修 耐久性保持が主目的
Ⅳ	劣化の進行による耐久性の低下が顕著であり、耐荷性の低下が懸念される段階と考えられるもので、このまま放置すると耐久性の回復が困難になるとともに、耐荷性の低下も深刻になることが懸念されるもの。	補修・補強 耐荷性保持が主目的

について提案している²⁻¹⁾。ただし、この手法のみで性能診断が可能としているのではなく、【見るべき所】を事前に熟知することで「見ない」を解消、【気づくべき変状】を事前に熟知することで「見過ごし」を解消、【予想すべき劣化】を事前に熟知することで「先送り」を解消できると考えており、この手法を用いることで、危ないPC橋を早期に見つけ、原因推定の精度を向上させるために詳細な調査を実施し、予防保全によるPC橋の維持保全を行うことを目的としている。

(2) 載荷試験による健全性評価

載荷試験には、20tの荷重車両を複数台使用し、決められた位置に停車させて計測を行う静的載荷試験と20tの荷重車両を走行させ、動的特性を計測する走行載荷試験がある。図-2.2.8は、妙高大橋の荷重制限の必要性を検討するために実施された静的載荷試験での載荷図である。載荷試験により測定する一般的な項目を表-2.2.5に示す。

次に、載荷試験を行う際の留意点を列記する。

- ・ ひずみゲージを貼る箇所に、コンクリートのひび割れがないことを確認する。
- ・ 載荷前に、車両などが載荷されていないことを確認し、イニシャル値を測定する。
- ・ 健全部と劣化部、補修・補強の前後および複数年での測定など比較検討することで健全性の評価精度が良くなる。

本方法はPC桁のたわみやコンクリートの引張応力が計算値以下であること、荷重車両を載荷したときのひび割れ幅や施工目地幅が想定以上に広がらないかを確認することで行う。

(3) 振動測定による健全性の評価

振動測定による健全性評価は、PC橋を強制的に加振させて、橋梁の振動性状の変化から、その劣化度を評価する方法である。振動測定には、20tの荷重車両を段差から落下させる車両落下法と質量25kg程度の重錘を高さ1.0mから自由落下させる重錘落下法などがある(写真-2.2.8)。両方とも高次振動モードの振動数が低下することを確認することでPC橋の健全性を評価する。ただし、車両落下法は、車両の固有振動数と橋梁の固有振動数とが一致する場合があり、適切な測定ができない場合もある。

なお、本方法は力学的損傷を大きく受けたPC橋では振動数の低下を明瞭に捉えることができるが、PC鋼材の腐食や腐食によるPC桁の断面欠損の段階では振動特性の変化が小さい。したがって、本方法は橋梁新設時にイニシャル値を測定して比較するか、多数のPC橋を比較するこ

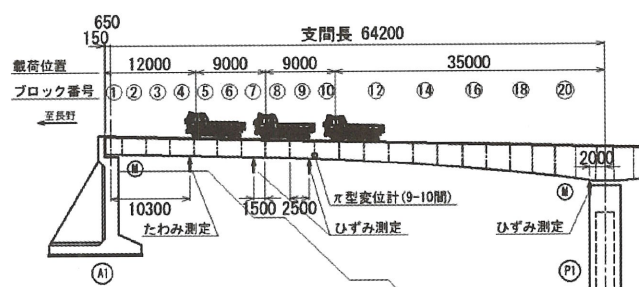
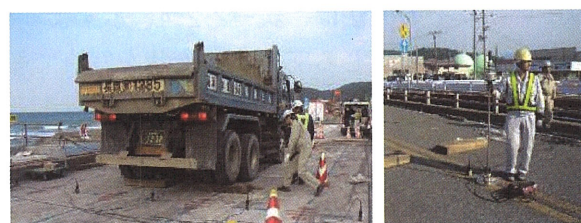


図-2.2.8 静的載荷試験載荷図²⁻⁵⁾

表-2.2.5 載荷試験での測定項目

計測内容	測定値	計測方法
PC 桁の剛性	鉛直方向のたわみ	変位計
PC 桁の引張応力度	桁下縁のコンクリートのひずみ	ひずみゲージ
ひび割れの開き	ひび割れ幅	π型ゲージ
施工目地の開き	目地幅	π型ゲージ



車両落下法

重錘落下法

写真-2.2.8 振動測定状況²⁻⁶⁾

とで異常を検知する手法として用いることが望ましい。

(4) 外ケーブル張力のモニタリングによる健全性の評価

PC 桁において主方向 PC 鋼材の破断や主桁に曲げひび割れが発生すると、主桁の曲げ剛性が低下するとともに、あらかじめ外ケーブルを設置している場合には外ケーブル張力が増加する。本方法は、この現象に着目して、張力センサーにより外ケーブル張力を常時モニタリングすることで、この健全性の低下（曲げひび割れ）を早期に検知する方法である。外ケーブル張力モニタリングの概要図および鉄道橋において行われているモニタリング例を図-2.2.9、図-2.2.10にそれぞれ示す。モニタリングは活荷重の作用による外ケーブル張力の増加量を管理指標とし、主方向 PC 鋼材の破断を考慮した解析結果に基づいて設定された管理値と計測値とを比較することによって行われている。

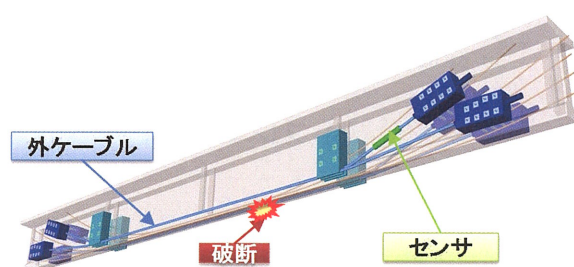


図-2.2.9 外ケーブル張力モニタリング

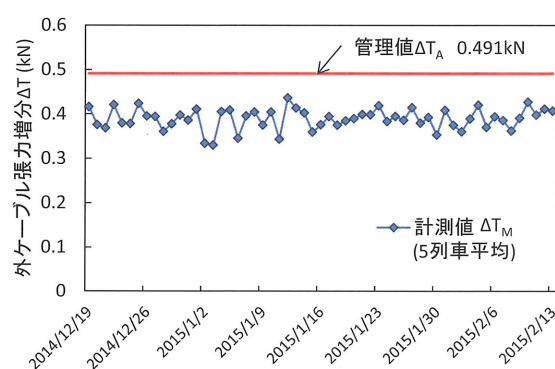


図-2.2.10 外ケーブル張力のモニタリング例

なお、本方法は曲げひび割れが発生した段階で、はじめて健全性の低下を検知できる。曲げひび割れが発生した段階では、多数の主方向 PC 鋼材の破断、耐荷性の低下、さらには交通規制の可能性も危惧されるが、あらかじめ外ケーブルが設置されていることから、外ケーブルの再緊張によって速やかに耐荷性を回復することができる。

2.2.4 診断技術の実例

(1) 残存プレストレスの測定（コア切込応力解放法）

1) 調査概要

本橋梁は1970年に建設された4径間ポストテンション方式PCT桁橋である。近年の点検ではすべての径間で支間中央の過大なたわみ、曲げひび割れ等の変状が確認された。このようなことから、適切な補強設計の検討にあたり、残存プレストレスの調査が実施された。調査方法の選択に際しては、図-2.2.11に示す調査位置の支間中央付近の主桁下フランジ部は、鉄筋かぶり小さく、PC鋼材が密に配置されているので、小口径によるコア切込応力解放法が採用された。

2) 調査位置

残存プレストレスの調査位置は、各主桁につき1箇所、4主桁×4径間（計16箇所）について調

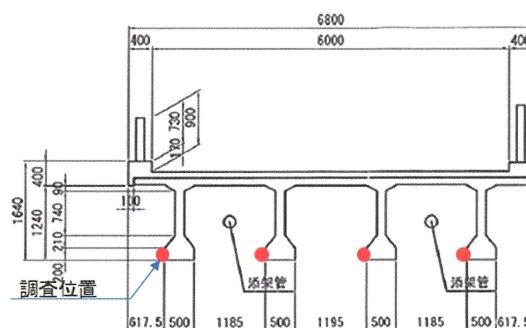
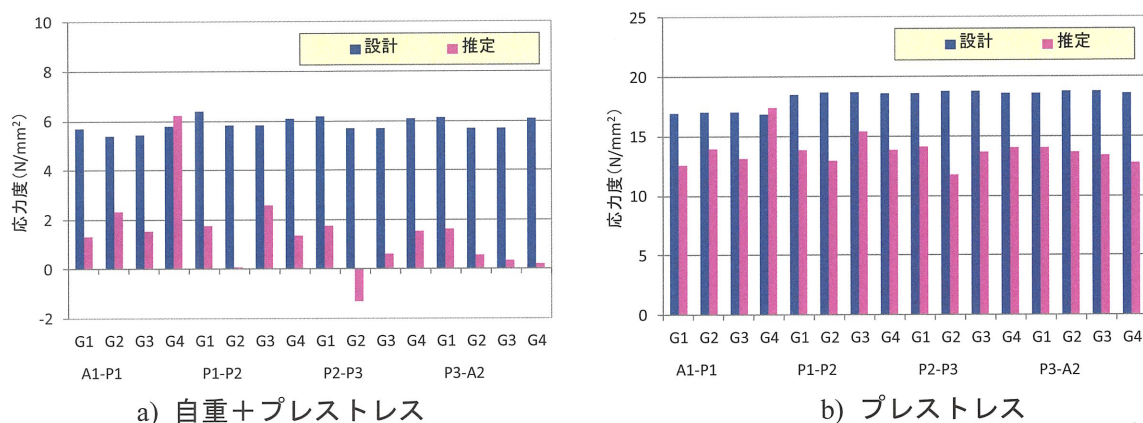


図-2.2.11 調査位置

査した。通常、下フランジ下面で計測するが、本橋では下フランジの底版側にモルタルによる増厚補修が施されていたため、下フランジの側面を計測対象とした。

3) 調査結果

調査の結果、死荷重時（自重＋プレストレス）における主桁の応力度は、設計値に対して測定値がかなり低い結果となった（図－2.2.12 a)）。また、プレストレスは、設計値 18N/mm^2 程度に対して72～84%程度の残存プレストレスであることが推定された（図－2.2.12 b)）。



図－2.2.12 設計値と推定値の比較

4) 補修・補強方法の提案

本橋梁の補強方法は、調査結果による残存プレストレス量から補強に必要なプレストレス量を求め、外ケーブルによるプレストレス導入工法が採用された。

5) 今後の課題

コア切込応力解放法による残存プレストレスの測定では、切込み箇所の2方向ひずみの差を利用することにより、乾燥収縮による内部拘束応力などを除去できる。このため、プレストレスによるひずみは従来法に比べて精度よく抽出可能であり、合理的な維持管理を実現するための有用な技術と考える。しかしながら、このひずみをプレストレスに換算するためには、実構造物コンクリートのヤング係数が必要となる。ヤング係数測定用のコア採取位置やコンクリートの品質によってヤング係数がばらつき、残存プレストレスの推定精度が低下する可能性があるため、非破壊による方法など、ヤング係数測定精度の向上が望まれる。

(2) 広帯域超音波法によるPCグラウトの充填調査

1) 調査概要

本橋梁は1964年に竣工したポストテンション方式PCT桁橋である。主ケーブルには12φ5が10ケーブル配置されており、そのうち5ケーブルが上縁定着されている。竣工後45年を経過して管理者の目視点検により、写真－2.2.9に示すように、上縁定着されている主ケーブルに沿ったひび割れや遊離石灰が確認されたことから、PCグラウト充填調査が実施された。調査方法の選択に際しては、非破壊で調査を行うこと、曲げ上げケーブルにも適用可能なこ



写真－2.2.9 主桁の損傷状況

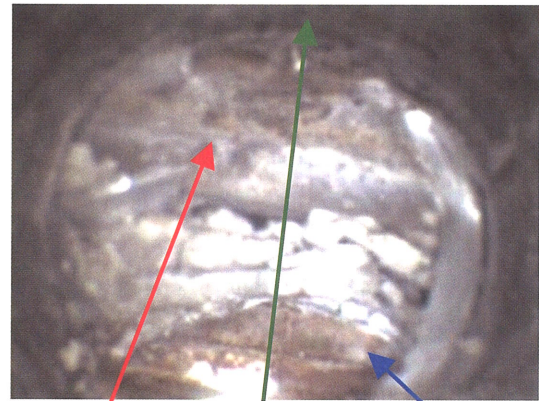
と、シースまでのかぶり厚が多少変化しても適用可能なこと、などから本工法が採用された。

2) 調査位置

PC グラウトの充填調査は、主ケーブルに沿った損傷が見られる主桁3本を対象とし、上縁定着されている9ケーブルの両端部近傍で実施した。また、PC グラウト充填不足と判断された2箇所とひび割れや遊離石灰の損傷位置近傍は、超音波ドリルで削孔してシースやPC鋼材の腐食状況などを調査した。

3) 調査結果

調査の結果、9ケーブルのうち7ケーブルでPCグラウトの充填不足という判定であった。このうち、2箇所では削孔調査を実施した結果、写真-2.2.10に示すようにシース上部に空隙が確認されたが、シース内の滞水やPC鋼材の腐食などは確認できなかった。また、ひび割れや遊離石灰の損傷位置近傍での削孔調査結果では、PCグラウトは完全に充填されていたが、シース外面に腐食が確認された。



グラウト 空隙 シース
写真-2.2.10 グラウト充填不足部の状況

以上の結果から、上縁定着されている主ケーブルに沿ったひび割れや遊離石灰の発生原因は、上縁定着切欠き部と後埋めコンクリートとの隙間から雨水が浸入し、シース外側に滞水して凍結膨張によって発生したものと判断された。

4) 補修・補強方法の提案

本橋梁の補修方法は、PCグラウトの充填不足が一部で確認されたが、PC鋼材に腐食は見られないことから、水の浸入口と考えられる上縁定着後埋め部を無収縮モルタルとうでの打替えと、橋面防水の設置を提案した。

5) 今後の課題

広帯域超音波法によるPCグラウトの充填調査は、主ケーブルを対象としたPCグラウト調査のための有用な技術と考えられる。しかし、PCグラウトの充填率やシース内の滞水など状況を判定することは困難である。このため、削孔調査が必要で、削孔によりシース内への通気でPC鋼材の腐食が懸念される。今後は削孔調査を行わない方法の検討が必要である。

2.3 診断技術の現状と課題

道路管理者は、劣化の進展を監視し適切な対処の検討、対策が必要か判断し予防保全による長寿命化の実施、そして最終的には通行止めにするべきか判断し落橋の危険性のリスクを回避することが要求されている。

PC橋の場合、PC鋼材の状態が耐荷力に大きな影響をおよぼすが、外観変状だけではPC鋼材の腐食状況や破断の有無、プレストレスの状態の判断が難しい。現在の診断技術の多くは、PC橋の損傷が生じた段階でのコンクリート劣化、PC鋼材の腐食およびPCグラウトの充填状況の調査方法は進歩したが、現時点ではPC橋の構造物の健全性評価が難しい。したがって、道路を共有しながら早期に「危ない橋を見つけること」で、予防保全によるPC橋の維持保全に適用できる診断技術が求められる。

3. 最新技術の現状と課題

構造物の定期点検は、従来主に外観調査に基づき実施されてきた。例えば、国交省が実施している近接目視での健全区分Ⅱ「予防保全段階」に注目すれば、自ずと外観調査で予防保全が可能であるかのように考えることができる。ここで、図-3.1に目視に基づく等級付けと実際の健全性（劣化度）の関連付け例を示す。例えば外観調査により初期の劣化と判断される区分 A は、本来初期の劣化とされる、「鋼

材腐食の潜伏期や劣化期」など内部に生じる劣化ではなく、実際には、区分 D、つまり、表面劣化が顕在化した劣化期以降と考えることができる。つまり内部の劣化を合理的に判断できる点検・診断技術開発が追いついておらず、実情とのかい離（図中、両矢印）があることは明らかである。一方、すべての構造物を予防保全に基づき維持管理する、というのは費用対効果からも到底考えられず、維持管理基準は対象とする構造物の重要度を定めるインパクト（供用不可となった場合の直接的、間接的影響）を考慮して決定すべきものといえる。例えば、同型式、同諸元の構造物でも構築される場所や、例えば道路構造物の場合には迂回路が確保されているかどうかなども重要な算定因子となる。いずれにせよ、重要度が高いと判断された構造物は高い維持管理監視基準（図中、重要度_高の横破線）に基づいて、微細な変状を敏感に察知できる高度な調査手法により管理すべきといえるが、実際にはこの段階を構造物全体にわたり広範に、かつ合理的コストで評価できる調査法は確立されていない。

わが国では笹子トンネル天井板崩落事故を教訓に、5年に一度の近接目視が法令化され、併せてSIP（戦略的イノベーションプログラム）、COI（革新的イノベーション創出プログラム）などでインフラ維持管理に向けた革新的国家プロジェクトが数多く進行中である。以下にはその最新成果も含めたインフラ材料あるいは構造物の調査法の現状を示す。

3.1 弾性波

コンクリートなど固体に短時間外力（例えば衝撃力）を加えると、その力は固体中を応力波として伝搬する。固体中を伝搬する波は、弾性波と呼ばれ、波源では外力の励起時間や各材料の物性（剛性など）に特徴付けられた特性を有し、伝搬中に媒体の物性や次元に加え、水、空隙、そして粘性などの影響を受ける。そこで、弾性波の特長を利用して伝搬媒体の評価を実施しようとする試みが多くなされてきた。例えば、米国ではコンクリート中を伝わる弾性波の速度を利用して、コンクリートの品質を評価しようとする規格が発表され（表-2.2.1参照）、わが国でも試験方法が非破壊検査協会規格³⁻¹⁾としてとりまとめられている。

ここで弾性波を用いた調査方法は、その発生形態により、能動的手法と受動的手法に大別される。能動的手法は、弾性波を人工的に励起して対象物を透過あるいは、反射して検出された波形に基づき、対象物の物性や対象物中のひび割れや空洞などを特徴付けようとする手法であり、超

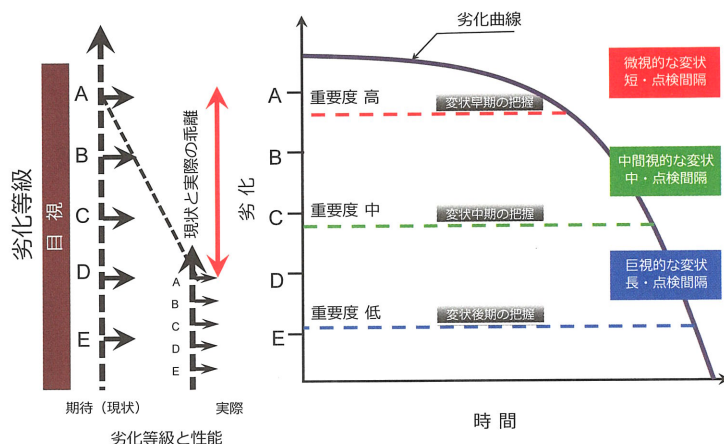


図-3.1 劣化等級付けの現状と健全性評価

音波法、弾性波法、打音法などがこれに属する。一方、受動的手法は、対象物の内部で生じるひび割れ発生などにともなう弾性波を検出して、発生源の特長を見いだそうとする手法であり、広義では地震の震源探査法が、狭義では材料を対象とするアコースティック・エミッション法がこれに属する。この方法では、破壊のマルチスケール性を利用して対象破壊規模を決定することができる。すなわち、初期の破壊過程で生じるひび割れはミクロ的な規模、後期の過程で生じるひび割れはマクロ的な規模となり、周波数領域で表現すれば、前者はMHz、後者はHzということとなり、この過渡的振動を検出するには、それぞれの周波数帯に対応したAE（あるいは超音波）センサー、地震計（あるいは加速度計）が必要となる。以下、能動的／受動的手法さらに、両者を組み合わせた最新のハイブリッド手法を紹介する。

3.1.1 能動的手法

(1) 衝撃弾性波

衝撃弾性波法は対象物の表面で弾性波を励起させ、対象物中を透過あるいは、欠陥などから反射する弾性波を利用して対象の物性や欠陥の位置を推定する手法であり、励起される弾性波が非可聴域まで至らない場合、それは衝撃弾性波と呼ばれる。反射波を利用した方法では、欠陥部における弾性波の反射・回折を利用し、弾性波の周波数スペクトル成分のピーク周波数から欠陥位置を決定する。例えば、空隙部（未充填グラウト部など）の検出の場合には、供試体底部の反射による共振周波数 f_T および空隙部からの反射による共振周波数 f_{void} が、検出波形のスペクトルピークとして、図-3.1.1のように出現するとされる。それらの周波数は、コンクリートのP波伝搬速度 C_p 、板厚 T 、シース管までの距離を d として、次式のように表される。

$$f_T = C \frac{C_p}{2T} \quad (3.1.1), \quad f_{void} = C \frac{C_p}{2d} \quad (3.1.2)$$

現在、実際のさまざまな波の反射や屈折などを考慮したSIBIE（Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo）法³⁻²⁾が提案されている。同手法は、検出波形の周波数スペクトルを用いて供試体断面を画像化する手法である。

(2) 超音波

衝撃弾性波と同様に、欠陥の位置や対象の厚さを推定する方法であるが、非可聴域（20kHz以上）の弾性波励起を基本とするため超音波（法）に分類される。この方法は弾性波速度一定で、対象物の厚さ T や内部の水平欠ひび割れ深さ、 d が以下の式で簡便に求められる。ここで、 v は弾性波速度、 t は伝搬時間である。

$$T \text{ or } d = \frac{vt}{2} \quad (3.1.3)$$

また、図-3.1.2の鉛直ひび割れでは、深さ D_v は次式より求められる。

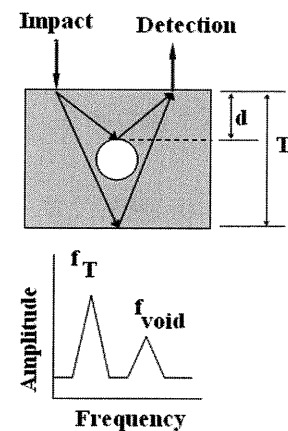


図-3.1.1 衝撃弾性波法の原理

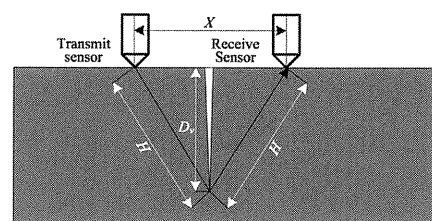


図-3.1.2 鉛直ひび割れ深さの検出

$$D_v = \sqrt{\frac{1}{4}V_p^2 t^2 - \frac{x^2}{4}} \quad (3.1.4)$$

ここで、これらの方法は、均質材料を対象に発展してきた経緯があり、実際のコンクリートがさまざまな骨材、さらには鉄筋から構成されることを考慮すれば直接的には適用できず、あくまでも概査として用いることが望ましい。

(3) 弾性波トモグラフィ法

医療分野でCTとして知られる診断技術は、詳細にはX線を用いて対象に定めた各格子のX線吸収係数を求め、画像処理により分布を描くものであり、X線Computed Tomographyの俗称である。X線は小規模な対象に開発され、大規模には人体に有害なほどの出力が必要となるため、地盤分野では古くからX線に代わり弾性波が用いられている。弾性波は発破などで励起でき、遠方まで伝搬できることから、一見簡便で、解析も容易に考えられる。しかし、X線が励起点と受信点を結ぶ直線でその伝播経路が仮定されるのに対し、弾性波では、物性（音響インピーダンス）の異なる異物が介在した場合、波は容易に迂回、回折さらには、反射し、伝搬経路は未知として取り扱われる。以下、簡単な解析手順と事例を示す。

図-3.1.3に解析フローを示す。調査対象が与えられたとき、まず求めたい要素（セル）の一辺を定め、その2倍の間隔でセンサーあるいは、弾性波の励起点（図中○）を定める。初期モデルを作成するため励起点と検出点を結ぶ直線に沿って弾性波が伝搬するとして一般には逆投影法を用いて速度の逆数、スローネスを求めその分布が初期のモデルを作成する。具体的には波線数を N 、分割セル数を M とし、 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 番目の波線について考えると、観測される伝搬時間（以下走時と呼ぶ）を T_{oi} 、励起点・検出点間の波線長を L_i とすると、この波線が通過するセルの平均スローネスは式(3.1.5)となる。

$$\bar{s}_i = \frac{T_{oi}}{L_i} \quad (3.1.5)$$

k 番目のセルを i 番目の波線が通過する長さを l_{ik} とすると、 k 番目のセルのスローネスは式(3.1.6)で求めることができる。

$$S_k = \frac{\sum_i (l_{ik} \cdot \bar{s}_i)}{\sum_i l_{ik}} \quad (3.1.6)$$

このように S_k を k が1から M まで順次求めれば、これがスローネス分布の初期モデルとなる。さらに波線追跡を行いモデル内の波動の伝搬経路と伝搬時間を求め、計算された理論走時と観測データである実測走時とを比較し、両者の差が許容誤差内でなければ、同時反復などを用いてモデルを修正する。ここで、波線追跡、同時反復法などの詳細は参考文献³⁻³⁾を参照されたい。

弾性波トモグラフィを床版の初期ひび割れ補修効果確認に適用した事例を図-3.1.4 (a. 補修

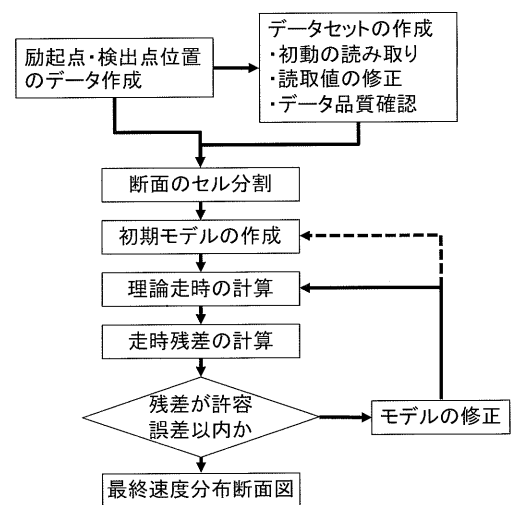


図-3.1.3 解析フロー

前、b. 補修後) に示す。本床版では上下面にひび割れ(図中矢印位置)が確認でき、いわゆる貫通ひび割れと考えられた。弾性波トモグラフィにより弾性波の低速度領域として斜めひび割れが可視化でき、さらに同手法を補修後にも適用することで、補修効果を確認することができる。

3.1.2 受動的手法 (アコースティック・エミッション)

(1) ひび割れ発生にともなう一次 AE

ひび割れなど材料中の微小破壊にともなう弾性波はアコースティック・エミッション (AE)、とくに、既存のひび割れからの AE と区別するため一次 AE と呼ばれる。AE は、観測点を複数設けることで地震と同様に AE 源の位置、大きさ、さらには破壊様式なども推定できる。ここで、AE は短時間で生じる破壊にともなう弾性波であることから、周波数領域はメガ、あるいはギガに渡り、超音波センサーと同様な素子がセンサーに使用される。

図-3.1.5に RC 梁の三点曲げ試験の AE 適用例を示す。図よりいつ、どこで、どのような破壊が生じたかが推定可能となる。また、载荷履歴と AE 発生傾向を利用した健全性指標が提案されている。これらは、Load 比、Calm 比として知られ³⁻⁴⁾、RILEM の Recommendation を経て、現在 ISO 規格化がわが国を中心に進められている。

(2) 既存ひび割れからの二次 AE

既に存在する欠陥やひび割れ界面の擦れ、あるいはその界面を通過する気体や液体との摩擦で生じる AE は、二次 AE と呼ばれ、膨大な既存土木構造物の健全性診断には、一次 AE ではなく、この二次 AE の取得とそれに基づく健全性評価が重要となる。以下に事例を示す。図-3.1.6 は、港湾にかかる PC 橋床版に AE センサーを配置し、重車両 (20t) を走行させたときに得られた AE イベント頻度である。3 回の走行時すべてに 25-30m 区間での顕著な AE が確認され、別に実施した弾性波トモグラフィ結果から、その区間での損傷が確認されている。

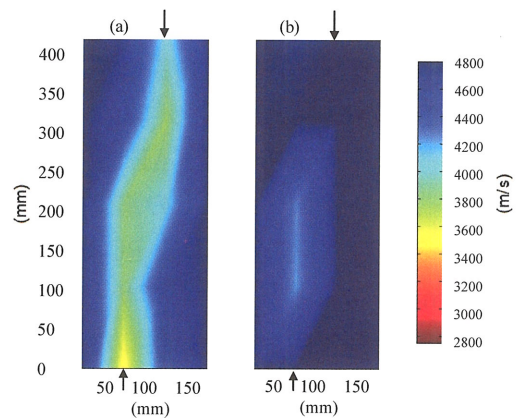


図-3.1.4 補修工での弾性波トモグラフィ

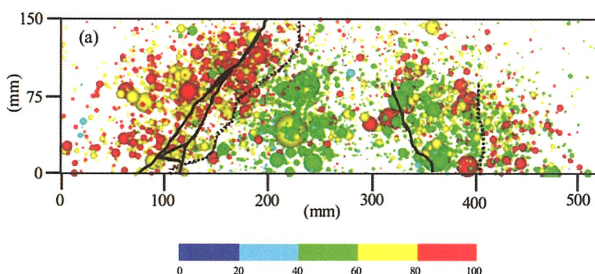


図-3.1.5 RC 梁の三点曲げ試験 (色は発生時期)

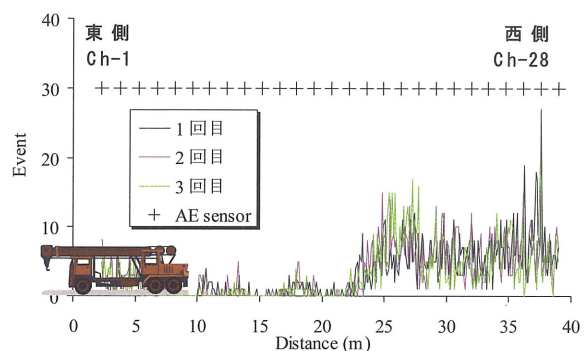


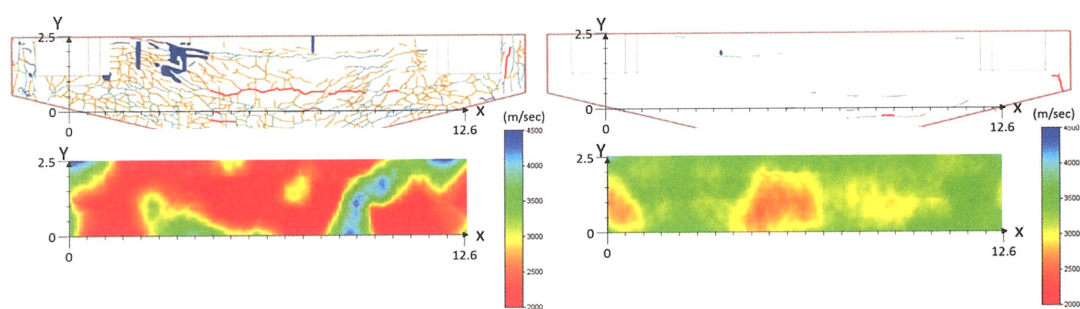
図-3.1.6 PC 橋の AE 計測例

3.1.3 ハイブリッド手法 (AE トモグラフィ)

先述の二次 AE を利用した損傷評価には、いくつかの課題があった。すなわち、交通荷重などで二次 AE が期待できない引張型や内力変動が与えられない部位では損傷があっても評価できな

い、などである。そこで AE 法の補完手法として、弾性波を人工的に励起した波源に基づく、弾性波トモグラフィ法が実施されてきた。ここで、もし AE 源がトモグラフィでの波源となり得れば、AE 計測のみでトモグラフィも実施可能なはずである。そこで、AE 源を用いたトモグラフィ手法、“AE トモグラフィ (AET)” が発案³⁻⁵⁾され、そのアルゴリズム、コーディング、シミュレーション、室内・野外での基礎検討が実施されている。

図-3.1.7に SFR 劣化した RC 橋脚への適用事例を示す³⁻⁶⁾。ここで、AE 源は人工的に鋼球 (φ30mm) により与え、センサーは加速度計を用いている。同図より、表面ひび割れが顕著であった a 橋脚で内部まで発達した 2500m/s 以下の低速度領域が観察されている。現在、AE トモグラフィは 3 次元まで拡張され、速度異方性を有する複合材料、さらに、分散性 (速度の周波数依存) を考慮したエネルギー減衰に基づくトモグラフィなどが考案、鋭意研究されている。



(a 橋脚) 表面ひび割れが多い

(b 橋脚) 表面ひび割れが少ない

図-3.1.7 SFR 劣化した RC 橋脚の表面ひび割れと 3 次元 AE トモグラフィ結果の一例

3.2 電磁波

電磁波は、空間の電場と磁場の変化によって形成される波動で、光 (赤外線、可視光線、紫外線) や電波は電磁波の一種である。電磁波は波と粒子の性質を持ち、波長の違いによりさまざまな呼称や性質があり、通信から医療に至るまで数多くの分野で用いられている。電磁波は波動であることから、散乱や屈折、反射、また回折や干渉などの現象が生じ、波長によってさまざまな性質を示す。電磁波は波長によって分類がされ、長い波長から電波、光、X 線、ガンマ線などと呼ばれる。

3.2.1 赤外線

赤外線は波長が $0.75 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$ の電磁波である。

赤外線は $0 \text{ K } (-273.15^\circ\text{C})$ 以上のすべての物質から自然に放射されており、放射量は物体の温度と放射率により決まる。放射率は表面状態によって変わり、赤外線エネルギーと放射率、温度には次式で表される関係が成り立つことが知られている。

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.2.1)$$

$$1 - \varepsilon = R \quad (3.2.2)$$

ここで、 W : 赤外線エネルギー (W/cm^2)、 ε : 放射率 (完全黒体放射の場合は $\varepsilon = 1.0$)、 σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($= 5.67 \times 10^{-12} \text{ W}/\text{cm}^2/\text{K}^4$)、 T : 絶対温度 (K)、 R : 反射率である。放射温度計は、物体が放射している赤外線エネルギーを検出素子で測定することで物体の温度を測

定するため、式(3.2.1)から分かるように放射率の影響を受ける。赤外線カメラは放射温度計の一種であり、赤外線カメラを用いて物体の温度を測定する手法を赤外線サーモグラフィ法という。

赤外線サーモグラフィ法による欠陥検出の原理を図-3.2.1に示す³⁻⁷⁾。例えば、昼間日射の影響を受けるとコンクリート表面の温度は高くなり、健全部ではコンクリート内部に向かうほど徐々に温度が低くなっている。一方、浮き部では内部に生じた空隙が断熱層となるため、表面温度が健全部よりも高くなる。このように、日射や気温変化により生じる表面温度の日変動の中で剥離部と健全部との間に表面温度差が生じる時間帯があるのを利用することで、内部欠陥を検知することができる。一般的に昼間撮影では欠陥部が高温領域として検出され、夜間撮影では低温域として検出される。

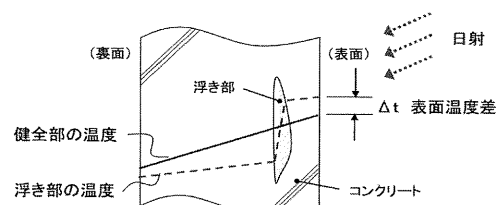


図-3.2.1 赤外線サーモグラフィ法による欠陥検出の原理

赤外線カメラのセンサー（検出素子）には、センサー自体の温度変化による抵抗値の変化を利用した熱型（常温型）と、赤外線を光子としてとらえ、それによって発生する光電効果を利用した量子型（冷却型）がある。それぞれのセンサーで測定波長が異なり、赤外線センサーの検出素子に依存する。一般に熱型カメラの測定波長は長波長帯（8～13 μm ）で量子型カメラの測定波長は短波長帯（3～5 μm ）である。長波長帯を検出する熱型カメラでは対面物体の反射の影響を受けやすいが、太陽反射の影響を受けにくく、量子型カメラでは短波長帯を検出するため、太陽反射の影響を受けやすいが、対面物体の反射の影響を受けにくいという特徴をもつ。一方、地下やトンネル構造物は、温度変化が小さく熱流を利用する受動的手法（パッシブ法）では測定を行うことができない。そのため人工熱源で測定面を強制加熱することにより測定を行う。このような能動的手法をアクティブ法と呼ぶ。アクティブ法の利点としては日変動による熱流が発生しないような構造物に対しても診断が可能となる点が挙げられる。ただし、アクティブ法の場合は人工熱源の加熱時間を適切に設定する必要がある。アクティブ法により温度ムラが発生した供試体の赤外線サーモグラフィ測定に強調指標を適用することで欠陥部の検知も可能である³⁻⁸⁾。

3.2.2 X線

X線は波長が1 μm ～10nm程度の電磁波である。X線非破壊検査には、モニターに投影しながらリアルタイムに検査を行う方法と、X線フィルム等に撮影する方法との2種類がある。前者は、さまざまな方向や角度からの検査が可能であるが、撮像体の性質上、使用できるX線エネルギーはそれほど高くないため、厚物の検査には向かない。後者は、現像に時間が掛かる代わりに、高エネルギーのX線による撮像に耐えうるため、薄物から厚物まで検査することができる。

X線非破壊検査における透過像のコントラストは、X線が検査物内で弱められる度合いの差によって生じる。これは、X線が検査物内を通過する過程で、電子に衝突するなどして、吸収・散乱されて弱まるためである。物質の量や密度が大きく、電子密度が高いほど吸収・散乱は大きくなり、これらの差によって生じるX線透過率の差が透過像のコントラストになる。検査物の条件から適切な管電圧を決定するためには、図-3.2.2のような露出線図が用いられる。露出線図とは、X線フィルムに撮像した時に、指定のフィルム濃度にするための管電圧・露出量といった撮影条件の関係を示したもので、代表的な物質に対するX線の透過量は露出線図によって推定

できる。

X線装置から照射されたX線が検査物を透過するとき、検査物の中に空洞のようなきずが存在するとその分だけ透過する厚さが減少し、逆に透過するX線の量が増え、フィルム濃度が濃くなり、フィルム上で健全部ときずの部分の濃度差からきずの存在と大きさを知ることができる。

近年では、コンクリート分野においてもX線CT法は利用されている。X線CT法は、計測対象にX線を照射し、トモグラフィ処理により物体の内部構造を可視化・定量化する手法である。照射されたX線は、計測対象の物性に応じて吸収および減衰する。物体を通過したX線は、照射位置から対面側に存在するX線検出装置に記録される。CTデータは、どの方位からどの程度のX線が吸収されたかを表す吸収率によって評価される。粗骨材とモルタル界面での微細ひび割れの発生・集積が強度特性へ及ぼす影響が明らかにされており、載荷過程における内部構造の破壊に関する詳細な検討により精緻な物性評価が可能とされている³⁻⁹⁾。

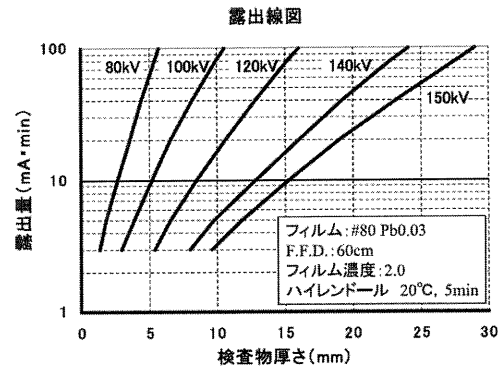


図-3.2.2 露出線図例(鋼板)

3.2.3 レーダ

レーダ(地中レーダ、および電磁波レーダ)による測定は電磁波を対象に向けて放射し、対象物からの反射波を測定することによって対象物の状態や性質、空間的な分布や時間的な変化量を推定する手法である。

地中レーダでは電磁波パルスを地表に置かれた送信アンテナから地中に放射し、受信アンテナで受信する。送信アンテナから放射された電波は地中を伝搬し、地層境界面などによって反射を受ける。地中の伝搬速度 v がわかっている場合、送信電波が反射波として戻ってくる時間 τ (s)を計測することで反射体の深度 d (m)は次式で推定できる。

$$d = \frac{v\tau}{2} \quad (3.2.3)$$

電波が地中から反射するのは地中に不均質な物質が存在することによる。電波を反射する不均質物体は金属のような導体が最も顕著であるため、パイプやケーブルの地中レーダによる検出は容易である。しかし、電波に対しては絶縁体も反射体となりうる。反射が発生するためには2種類の異なる比誘電率を持った絶縁体が存在する必要がある。最も簡単な場合として図-3.2.3では上層と下層で比誘電率の異なる2層媒質構造を考える。このとき、上層から入射する振幅1の電波は境界面で反射を受け、振幅 Γ の反射波が発生する。 Γ は反射係数であり水平な2層構造の境界面では次式で与えられる。

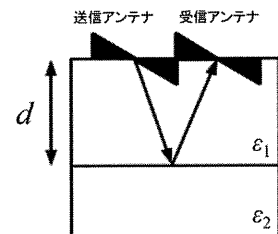


図-3.2.3 比誘電率の異なる媒質中の反射

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (3.2.4)$$

式(3.2.4)は2層の異なる媒質の比誘電率の比率が反射波の大きさを決めることを示している。反射係数は $-1 \leq \Gamma \leq 1$ の範囲に存在する。これに対して下層媒質が導体である場合、反射

係数は $\Gamma = -1$ となり、最大となる。したがって金属からの反射体が最も顕著に検出できる。

3.2.4 核磁気共鳴 (NMR: Nuclear Magnetic Resonance)

核磁気共鳴とは、外部磁場に置かれた原子核の磁気モーメントのゼーマン準位間の共鳴遷移を共鳴周波数の電磁波を用いて計測する分光学と定義されている。すなわち、核の歳差運動を磁石と高周波コイルで構成されたセンサーでファラデーの電磁誘導法則に基づいて計測するもので、含水素流体（水、石油）を対象とした探査に適している。

コンクリート中の水を含んだき裂を定量計測するために、核磁気共鳴を利用した表面スキャナの開発も進行中である。これは、直径 40cm、高さ 10cm の円筒形をした、鉄・ネオジム・ホウ素系の強力な希土類永久磁石の端面の上に、プロトンの共鳴周波数である 4.1MHz にチューニングされた高周波コイルを置いたセンサーユニットと分光器で構成されており、探査深度 1~4cm の条件でのき裂幅計測確度が確認されている。計測イメージを図-3.2.4に示す³⁻¹⁰⁾。

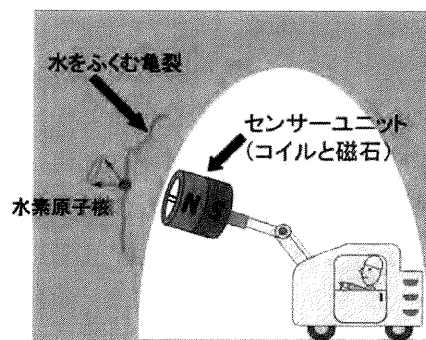


図-3.2.4 核磁気共鳴表面スキャナのイメージ図

核磁気共鳴には、水素を含む流体（水など）を直接的に計測できる（他手法は弾性波速度や電気伝導度の違いから間隙流体を間接的に計測している）、全プロトン量（空隙率または含水率）の推定を、対象物の化学組成の情報がなくともある程度信頼性で可能である。非破壊、およびリアルタイムで空隙率や浸透率を、従来の原位置透水試験のように注水・用水作業や大がかりな装置を必要とせずに行える、強力な磁石やハードウェアが発達すれば、プロトン以外の低感度の核種（塩水の成分である²³Na など）の計測も可能といった長所をもつ、一方、S/N 比が悪い、探査深度が小さい、多孔質媒体モデルの信頼性不足による適用範囲の狭さ（自己拡散の距離以下の空隙サイズでしか正しく浸透率を計測できない）、含水素間隙流体を胚胎しない対象物には使用不可などの短所をもつ。このように、核磁気共鳴による原位置計測には、マグネットやコイル材料の進歩などの技術開発も含め、多くの課題が残っているが、水を直接計測できる本手法はさまざまな分野で望まれているため、更なる技術革新が期待されている。

3.3 電気

構造物の劣化のうち、とくに鉄筋の腐食に関しては、電気化学的な反応により生じることから、金属分野の知見を応用して、自然電位法や分極抵抗法などが用いられてきた。また、物理探査分野においては、電気探査による地下水水位の評価などが行われている。ここでは、これらの技術に関して述べる。

3.3.1 自然電位

金属は、周辺の環境によってそれぞれ異なる電位を示す。自然電位法では、この原理を利用してコンクリート内部の鉄筋の腐食状態を推定する方法で、測定方法に関しては、ASTM 規格³⁻¹¹⁾や土木学会基準³⁻¹²⁾として定められている。

自然電位の測定には、一般に、図-3.3.1に示す方法が用いられる。電位差計の+端子に鉄筋を、-端子に照合電極を接続し、鉄筋直上のコンクリート表面において、含水させたスポンジな

どを介して照合電極を接触させて行う。照合電極には、飽和硫酸銅電極、飽和カロメル電極、飽和塩化銀電極、鉛電極などが用いられ、得られる自然電位の値は電極種類により異なり換算式が提案されている。一般に、自然電位が低い場合は鉄筋の腐食が進行している可能性が高く、電位が高い場合は腐食が進行していない可能性が高いとされる。手法は、1950年代に Stratful によりコンクリート床版橋の鉄筋腐食の調査に利用され、そのうち高速道路床版などの計測結果などを踏まえ ASTM C 876 として、測定方法が制定された。腐食判定基準としては、飽和硫酸銅電極 (CSE) を用いて表-3.3.1のように、腐食確率に基づいた評価が定められている。日本においては、2000年に土木学会規準として、「コンクリート構造物における自然電位測定方法 (JSCE-E-601-2000)」が制定されたが、腐食判定基準については明記されておらず、表-3.3.1などを準用することを基本としている。

一方で、計測される自然電位は、鉄筋周囲の状況のみならず、コンクリートの含水状態、塩化物イオン濃度、気温などの環境条件に影響を受けるため、普遍的な判定基準を設けることは難しいとされており、実際の腐食状態と適合しないこともあるため注意が必要である。

3.3.2 分極抵抗

コンクリートは高い pH を有しており、その中に埋設された鉄筋は不動態被膜と呼ばれる酸化物に覆われ、腐食しにくい状況にある (図-3.3.2)。しかし、中性化などにより pH が低下するあるいは、塩化物イオンにより不動態被膜が破壊されると、コンクリート内部の鉄筋は腐食反応が活性化する (図-3.3.3)。

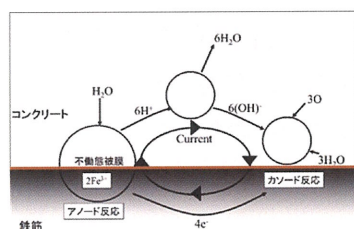


図-3.3.2 不動態被膜存在下での腐食反応

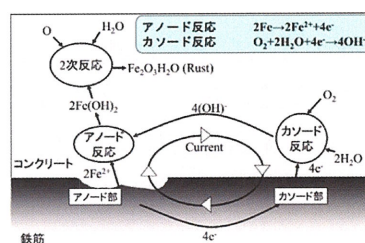


図-3.3.3 不動態被膜破壊後の腐食反応

このように、コンクリート内部の鉄筋の腐食は、不動態被膜の存在が大きく関与している。不動態被膜は、一般に、抵抗と電気回路を模擬した図-3.3.4に示すような形式で表される。この際の抵抗部分が分極抵抗と呼ばれ、鉄筋の腐食速度と関連している。Stern らは、この分極抵抗から腐食電流を求める式として以下の式を提案している。

$$I_{corr} = K/R_p \quad (3.3.1)$$

ここで、 I_{corr} は腐食電流密度、 K は金属種類、環境によって決まる定数(V)、 R_p は分極抵抗をそれぞれ示す。この式から、腐食電流は分極抵抗 R_p と反比例の関係にあり、分極抵抗が減少することにより腐食速度が増加する。分極抵抗を求める方法としては、直流法(直線分極法)、交流法(交流インピーダンス法)、定電流パルス法などが提案されているが、測定条件で結果が大きく異なる場合があり、基準化された方法はない。

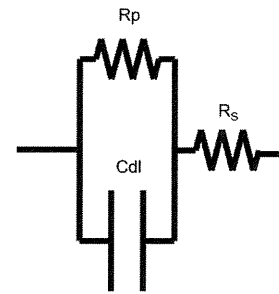


図-3.3.4 鉄筋周囲の簡易電気回路モデル

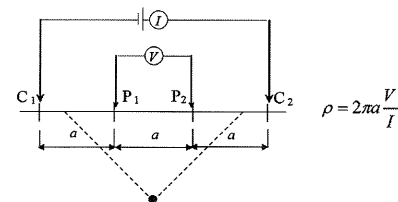
3.3.3 電気探査

電気探査法の一つとして、コンクリート分野で直流比抵抗法³⁻¹³⁾ が用いられている。この手法は、単位体積辺りの電気の流れにくさを表す比抵抗を測定対象とする探査手法であり、比抵抗は、間隙率、含水率、変質状態、間隙水のイオン濃度や温度に関する物性であるため、コンクリート構造内部の鉄筋などの存在やその腐食状況を調べるのに有効であると考えられている。

電気探査法は、オームの法則による電流と電位を関係付けるものであり、使用する電極の本数により2極法、3極法、および4極法といった電極配置がある。電極配置によって、可探深度、分解能、データのS/N比、作業効率が異なるため、探査の目的や、状況などを考慮して上記の電極配置を選択する必要がある。近年では、データ品質が良く、規則的配置を容易とする4極法が主に用いられている。4極法は電位電極2本と電流電極2本を用いる電極配置であり、配置方法においても、各種存在する。代表的な4極法電極配置に、wenner（ウェナ）法、schlumberger（シュランベルジャ）法、およびdipole-dipole（ダイポール・ダイポール）法があり、それぞれ以下のような特徴がある。配置図を図-3.3.5に示す。

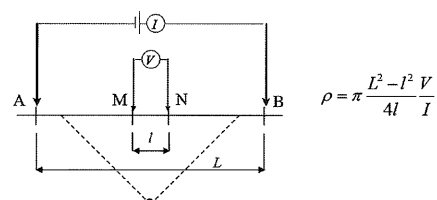
1) wenner 法: 4本の電極を、外側に電流電極、内側に電位電極として、直線上で等間隔に配置する。可探深度の目安として、電極間隔 a が採用されている。得られる信号が大きいため、比較的安定したデータが得られる。また、虚像が少ないため、浅部の垂直探査や水平探査に用いられることが多い。

1. wenner法



2) schlumberger 法: 電極系の中心を固定し、電位電極間隔を一定のまま、電流電極間隔を大きくして、垂直探査を行う。S/N比を維持するため、電流電極間隔 L と、電位電極感覚 l は $L \geq 5l$ にすることが望ましい。可探深度の目安として、 $L/2$ が用いられる。電極系の直下における感度が高いため、深部の垂直探査に適している。

2. schlumberger法



3. dipole-dipole法

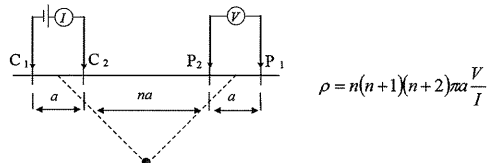


図-3.3.5 4極法電気探査法における代表的な電極配置

3) dipole-dipole 法: 等間隔に設定された1対の電流電極（ダイポール）と、もう1対の電位電極（ダイポール）を離して配置する。通常、ダイポール相互の間隔は、ダイポール長 a の整数倍 na とする。とくに、 n が1の場合は eltran 法と呼ばれる。この手法は、ダ

イポール相互の間隔の分解能は優れているが、得られる信号レベルが低いという問題がある。主に、水平探査に用いられる。

ここで、図-3.3.5で表される比抵抗 ρ は対象物を均質としたときの値であるので、 ρ は見かけ比抵抗と呼ばれ ρ_a と表わされる。実際の比抵抗 ρ (真の比抵抗) を求めるためには、インバージョン解析が必要となる。また、垂直探査は測点の深度方向の ρ_a を測定し、水平探査は測線に沿った任意の電極間隔における ρ_a を測定する。測線下の ρ_a を多数の測点で測定し、インバージョン解析を行うことで2次元的 (あるいは3次元的) 比抵抗分布を得ることも可能である。

3.4 光

土木構造物を維持管理する上で、性能の長期把握は重要である。そこで広い範囲を網羅でき、かつ長期計測が可能な計測手法として光センシング技術が注目され、さまざまな機関でセンサーへの応用が検討されている。光ファイバーセンシングは、高い耐久性に加えて長期的な大規模構造物計測に重要となる無誘導性、耐腐食性、低損失性などに優れた特性がある。ここで、同技術は多種多様に開発されてきた経緯があり、それぞれの特長を理解することが重要である。例えば、OTDR や B-OTDR は、光ファイバー自身がセンサーとなり、ファイバー上の任意の位置に生じる屈曲やひずみの変化をとらえる手法である³⁻¹⁴⁾。その測定精度は数十 μ 以上であるが測定範囲が広いので大きなひずみや変位の計測に利用可能となる。さらに近年では、ポンプ光としてパルス光源とプローブ光源を組み合わせた PPP-BOTDA が開発され、10cm の空間分解能と $\pm 0.0025\%$ のひずみ測定が可能な器機が市販されている。また、FBG (Fiber Bragg Grating) によるセンシングは、ファイバー上に焼き付けた回折格子 (FBG) を利用し、5 μ 以下の高精度でひずみが検出できる。

3.4.1 FBG 光ファイバーセンシング

FBG とは、図-3.4.1に示すように、コアに2方向から紫外線を照射することで形成される回折格子 (グレーティング) の集団を示し、その格子の周期は紫外線の交差部に発生する干渉縞の間隔により決定される。このとき、光ファイバーの一端から光を入射させると、その一部は格子周期に応じた特定波長の反射光として得られる。ファイバーに軸ひずみが生じると、FBG 格子間隔が変化し、それに応じた反射波長が得られる。反射光の波長移動とひずみの関係は式 (3.4.1) で表される。

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \Delta\varepsilon \quad (3.4.1)$$

ここで、 λ_B 、 $\Delta\lambda_B$: それぞれ FBG の反射波長と波長移動、 P_e : 実効光弾性係数、 $\Delta\varepsilon$: 付加ひずみである。波長は 1 pm ($= 1 \times 10^{-9}$ mm) の単位で計測可能であり、これは約 0.8 μ に相当するため、ひずみを高い分解能で計測することができる。FBG 光ファイバーセンサーの場合、複数の FBG を同一の光ファイバー上に配置することにより、多数のセンサーを同一システムの計測システムとして活用することが可能である。また、それぞれの反射波長を測定する方法には、測定する波長領域で多重化する波長分割多重化方式 (WDM) と時間領域で多重化する時間分割多重化方式 (TDM) がある。FBG 光ファイバーセンサーでは光強度の減衰が小さい C バンド帯

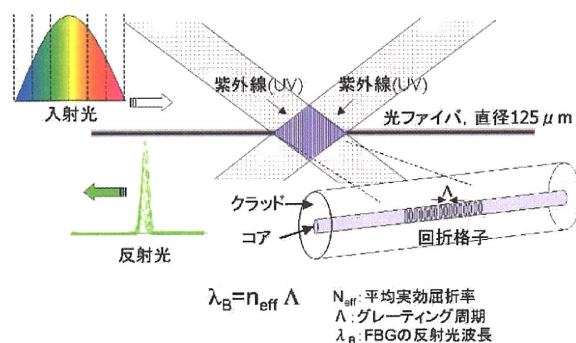


図-3.4.1 FBG によるひずみ測定原理

(1500nm 付近) の光信号を使用するが、WDM ではそれぞれの FBG の反射波長が異なることを利用して、各 FBG を識別する。したがって各 FBG は反射波長が異なる固有の格子周期をもつ必要があり、波長帯の範囲が限定されているため、各 FBG のひずみ測定範囲は FBG の個数が増えるほど狭くなるが各 FBG に固有な波長を有することから、動的測定には向いている。一方 TDM では、それぞれの FBG の反射光の到達時間より個々の FBG を識別する。この場合、同一の格子周期をもった FBG を 1 本の光ファイバーに直列で多数配置（光損失が小さい場合は、100 センサー配置可能）することができ、測定範囲がセンサー数に依存することなく最大約 9,000 μ と一定である。このように、TDM では多点を合理的に計測するのを得意とする。

3.4.2 PPP-BOTDA センサー

PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) センサーは、光ファイバーにレーザ光を通したときに生じるブリルアン後方散乱光の周波数がひずみの大きさに比例して変化する特徴を利用したセンサーである。周波数シフト量がひずみの大きさに比例することを利用して定量的なひずみを検出し、時間情報を含む周波数解析を行うことで、ひずみ変化位置を標定できる。この方式は、前方よりポンプ光としてのパルス光源、後方よりプローブ光として CW 光源を入射させることで、主に計測時間の短縮を図った測定方式である。定量的ひずみ検出やひずみ変化位置標定の方法(図-3.4.2)は BOTDR 方式と同様であるため、光ファイバー全体がセンサーとして機能し、大型構造物の計測に適する特徴を有している³⁻¹⁵⁾。PPP-BOTDA 方式では、1 本の光ファイバーを敷設することで、対象物全体のひずみ分布情報を一度に取得することができる。現在、本方式ではパルス光の形状を改善することで、空間分解能 2cm、 $\pm 25 \mu\epsilon$ のひずみ測定精度まで可能としている。

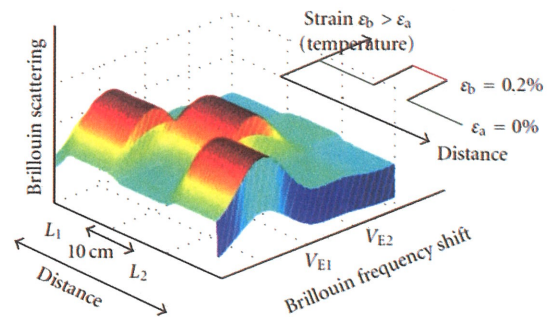


図-3.4.2 PPP-BOTDA 方式によるひずみ計測原理

3.5 画像

衛星画像や航空画像などの広範囲画像や、デジタルカメラ写真画像やボアホールカメラなどの狭範囲画像で得られる画像から何らかの情報を取り出す処理手法や、計測物に処理を加えて、画像を撮影し、特徴を抽出する処理手法がある。以下にこれらの技術を示す。

3.5.1 デジタル写真測量

写真測量とは、写真画像から対象物の幾何学特性を得る方法である。写真測量の最も単純な例として、写真画像面に平行な平面上に存在する 2 点間の距離を求める手法がある。写真画像の縮尺が既知であれば、画像上の距離から実際の距離を求めることができる。高度な応用例であるステレオ写真測量では、対象物体上に存在する任意の点の 3 次元座標が得られる。デジタルカメラにより撮影された画像を用いるものはデジタル写真測量と呼ばれ、近年のデジタルカメラの高解像度、多機能化、および低価格化で、デジタルカメラと PC を利用した簡易かつ高精度なデジタル写真測量が可能となっている。

デジタル写真測量は、デジタルカメラの画像を数学的に解析することで対象物上の複数点の空間座標を求めるものである。具体的には、デジタルカメラで対象物をさまざまな方向から撮影すると、対象物上の点 P_n が、複数の写真に写るので、その像 P_n^k と対象物 P_n および、カメラ始点 O_0^k の幾何学的な関係に基づいた連立方程式から、対象物上の点 P_n の座標 $P_n(x_n, y_n, z_n)$ を求める。概念図を図-3.5.1に示す。デジタル写真測量の精度は、撮影距離、焦点距離および、カメラ間距離に依存するため、カメラキャリブレーションにより、カメラの焦点距離補正、レンズ歪補正、およびレンズの中心位置の正確な設定などが必要となる³⁻¹⁶⁾。

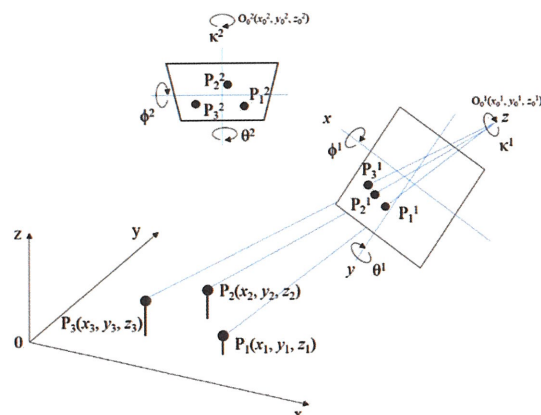


図-3.5.1 写真測量概念図

3.5.2 孔内画像

孔内画像は、調査対象物に直接ボーリングを行い、ボアホールカメラ（スキャナ）を孔内に挿入することで、測定器のモニタで孔壁のき裂状態を確認する手法である。この手法は、コア採取が困難である区間のき裂状態を直接確認できるため、信頼度の高い手法と考えられている。

ボアホールカメラによる撮影は、簡便な前方視カメラによる撮影と、高精度な孔壁展開画像システム（BIPS）がある。前者は主に孔内状況の観察のみであるが、後者の孔壁展開画像からは、層理面やき裂面の走向・傾斜の測定や、き裂の有無・開口幅の把握などが可能である。BIPSでは、円錐鏡を介して孔壁の全周映像を取り込み、展開画像を作成することで、不連続面の走向・傾斜や開口幅などの解析や統計処理が可能となる。BIPSは、 $\phi 66\text{mm}$ 以上のボーリング孔を利用して岩盤調査に広く用いられているが、コンクリート構造物に対して、小口径カメラを用いた $\phi 15\sim 20\text{mm}$ 程度の孔径への適用も行われている。展開画像の精度は、プローブ（あるいはゾンデ）の昇降速度にも依存するが、現在では、 0.1mm までのき裂も確認可能である。

3.5.3 蛍光剤含浸

蛍光剤含浸は、コア採取による目視や棒型スキャナを用いた方法などの適用が困難である微細ひび割れ（ 0.02mm 以下）の可視化を目的として適用される。蛍光剤含浸では、赤インクや蛍光剤を注入する手法や蛍光剤をメチルメタアクリレートに減圧注入する手法などがあるが、多孔質化したコンクリートに対して有効な手法として、蛍光エポキシ樹脂含浸法が開発されている。この手法は、コア試料に蛍光塗料を添加した超低粘度エポキシ樹脂（粘度： $130\pm 20\text{mPa}\cdot\text{s}$ （ 20°C ））に低真空（ $1/100$ 気圧）状態で注入・硬化させ、硬化後にダイヤモンドカッターで供試体を切断し、評価面を研磨した後、評価面に紫外線を照射して、肉眼観察またはデジタル画像取得による観察を行う。これは、微細ひび割れ等を可視画像として評価するものであり、数 μm 程度のひび割れ幅が可視化できる（図-3.5.2参照）。

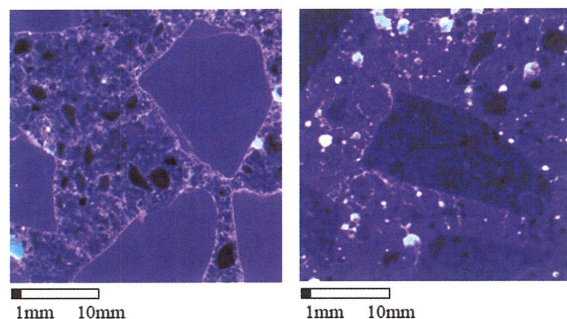


図-3.5.2 蛍光エポキシ樹脂含浸による結果例

3.5.4 デジタル画像相関

デジタル画像相関法は、輝度分布相関法またはパターン追跡法とも呼ばれている。この手法は、変形前後の測定対象物表面を CCD (CMOS) カメラなどのデジタルカメラで撮影したデジタル画像を画像処理することで、計測範囲全体表面の変形の大きさと方向の両方の要素を計測することが可能である。本手法では、測定空間の揺らぎに比較的強いこと、2 台のデジタルカメラと 3 軸自動ステージを用いることで、面外変形も含めた 3 次元変形計測法も可能となる。

デジタル画像相関法の解析原理は、デジタル画像が一般的に 256 濃度階調で表現される画素から構成された濃淡のある画像であることを利用したものである。まず、測定対象物表面の模様のランダム性を基にして測定対象物の変形前後をデジタルカメラ等で撮影し、得られたデジタル画像の輝度値分布から試料表面の変形量と方向を求める解析方法である。単色の対象物を撮影する場合には、濃淡の異なる塗料や吸着性の高い粉体等を用いて表面にランダム模様をつけ、画像に濃淡を施す必要がある。

対象物表面のある点 A が対象物の変形により移動した場合、変形前の画像において、点 A を中心とした微小領域（以下、サブセット）を考える。変形後の画像中のどこかに移動後の点 A が存在することから、変形後の画像における任意のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。変形前後におけるサブセットが高い相関が得られれば、移動後の点として同定できることから、点の移動量と移動方向を算出できる。なお、デジタル画像相関法では、粗探索と精密探索を組み合わせることにより、サブピクセルオーダーの高い精度でサブセットの移動位置を特定することができる。任意の点の移動位置を同定できることから、対象物における矩形領域の変形を算出することができる。

デジタル画像相関法を利用したひずみ解析は、直接ひずみが得られるものではなく、変位計測結果を利用してひずみ分布を求める方法である。これは予め求めたい点を中心としてある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の 2 点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。この解析方法の特長として、水平、垂直、斜めといわゆる 3 軸のひずみゲージと同じ解析を行い、最大主ひずみ、最小主ひずみの値と方向を求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわちゲージ長の自由な選択が可能となることなどがあげられる。コンクリート分野における解析事例としては、コンクリートの圧縮強度試験のひずみ分布、コンクリートはりに曲げが作用する場合におけるせん断スパンのひずみ分布、レジンコンクリートの硬化収縮過程のひずみ分布などがある³⁻¹⁷⁾。

3.5.5 モアレ、ひずみ可視化シート

ひずみ可視化シートとは、構造物の健全性評価のために、構造物のひずみを、アンプ、信号線、および、ひずみゲージなしで可視化するセンサー技術であり、変形に応じて模様が変わるモアレ縞や変色を起こす薄膜を構造物表面に貼り付けて、その変形をモニタリングする手法である。モアレ縞とは、図-3.5.3のようにピッチ p の直線格子 1 とそのピッチよりも Δp ($\ll p$) ほど大きいピッチ $p + \Delta p$ の直線格子 2 を重ねることで生じるピッチ W の縞のことである。このモアレ縞の関係は、式 (3.5.1) で表される。

$$W = \frac{p + \Delta p}{\Delta p} \cdot p \quad (3.5.1)$$

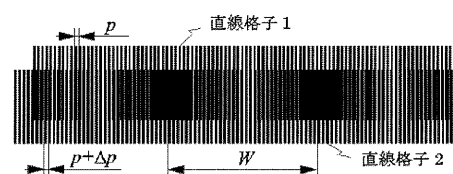


図-3.5.3 モアレ縞

直線格子1に変位 X が与えられたとき、直線格子1がピッチ p 動くとする、モアレ縞は同方向にピッチ W 動く。つまり、変位 X を視覚的に $(p + \Delta p)/\Delta p$ 倍に拡大表示できる。この拡大率を M とし、モアレ縞の移動量を X_m とすると、これらの関係は式 (3.5.2) で表される。

$$X_m = MX \quad (3.5.2)$$

高拡大率のモアレ縞を得るためには、直線格子2を n 個のピッチ p の縞を一塊として、これを $np + \Delta p$ おきに配置する。このときのモアレ縞のピッチ W は、式 (3.5.3) で表される。拡大率 M は $(np + \Delta p)/\Delta p$ となる。

$$W = \frac{np + \Delta p}{\Delta p} \cdot p (= Mp) \quad (3.5.3)$$

現在開発されているモアレ縞を利用したひずみ可視化シートは、ひずみゲージと比較して $10 \mu\epsilon$ 未満の偏差、かつ $100 \mu\epsilon$ 程度の分解能で目視によるひずみ量を計測できる³⁻¹⁸⁾。

また、変色によるひずみ可視化シートとして、ポリスチレンの微粒子を自己集積化し、シリコンエラストマーで充填したオパール薄膜をPETシート状に成膜したものも開発されている³⁻¹⁹⁾。このオパール薄膜は弾性変形、塑性変形によって可逆的にブラッグ解析波長が制御できるため、条件を最適化することで、赤-緑、紫外-可視、あるいは可視-近赤外をそれぞれ跨ぐような構造色のピークシフトが得られる。このひずみ可視化シートは $1600 \mu\epsilon/\text{nm}$ のひずみ感度を有している。このひずみ可視化シートをモルタル供試体に貼り付け、き裂検出を行った例を図-3.5.4に示す。ひずみ可視化シートと、望遠レンズや画像解析技術を併用することで、遠望から肉眼で見えにくい微小き裂を検出できる可能性がある。

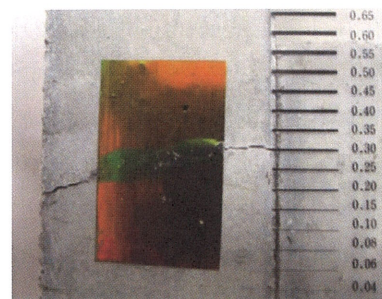


図-3.5.4 オパール薄膜ひずみ可視化シートによるき裂検出

3.6 自動化技術

現在、近接目視が法令化される中、次世代の点検法として、人が近づけない、あるいはコストを要する部位をいかに省力でかつ、統一の精度で調査することが期待されている。そこで国交省で「次世代社会インフラ用ロボット」、内閣府の戦略的イノベーションプログラムでは「ロボット技術の研究開発」などが始められている。自動化技術は既に米国で成果が実り、電磁波、衝撃弾性波、表面波、電気、赤外線等のさまざまな非破壊検査技術を組合わせた「非破壊検査ツールボックス (NDToolbox)」に取りまとめられ、それぞれの非破壊検査技術で最も優れた性能を発揮した器機および、技術を結集させた「非破壊検査ロボット (RABIT™)」が2012年に完成されている。以下にこれらの実例を示す。

3.6.1 高速動作レーザー

原子力機構が「高速動作が可能な振動励起レーザーの開発」、レーザー総研がコンクリート壁を素早くスキャンし、振動の計測が可能な「高速掃引レーザー計測システム」を研究し、従来の50倍の早さ、1秒間に25回 (25Hz) で検査が可能な「高速掃引レーザー欠陥検出装置」(図-3.6.1 参照)を開発している³⁻²⁰⁾。開発された装置では、熱ひず

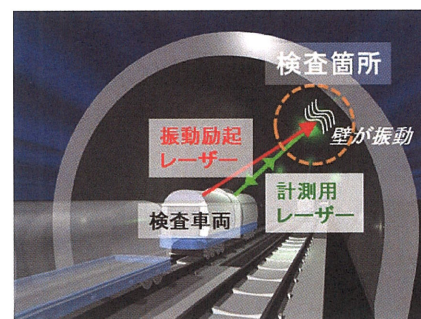


図-3.6.1 レーザー欠陥検出方の概念

みを低減させる専用の水冷機構を組み込んだ光増幅器を新たに開発するとともに、レーザー光の品質低下を抑制する光学配置を新規に設計することで、50Hz までの「高速動作が可能な振動励起レーザー」が実現されている。

3.6.2 ドローン

自然災害などで人が容易に近づけない場所を調査する需要が急増している。こうした中、近年注目を集めているのがドローン技術である。ドローン (drone) とは、自立して命令を実行する無人機を総称して呼んでいる。

現在、医療や警備、宅配などの分野において広く応用されているドローン技術であるが、建設分野においては3次元写真測量、橋梁や住居などの点検、さらには人が近づけない火口付近の撮影等、種々のカメラを掲載したドローン技術の開発・実用化がすすめられている。このような、ドローンとしては掲載重量が 100kg を超す機器から手のひらサイズの小型なものまで、種々開発が進んでいる。自走式のものは、GPS を搭載し、広範囲に渡る写真撮影とその合成ができる機器も開発されている。

一方で、小型無人機などの飛行を規制する改正航空法が平成27年12月10日に施行された。改正法では、(1) 人家の密集地、(2) 150m 以上の上空、(3) 空港周辺などの飛行禁止空域を定めた他(4) 日中、目視の範囲内で飛行、(5) 人や建物などから 30m の距離を保つ、(6) 物を投下しない、(7) 祭礼や縁日、展示会など人が集まる場所で飛ばさない、(8) 爆発物は輸送しないことを飛行のルールとして定めている。このような状況の中、申請を静観している利用者も多くおり、本格実装となるには解決すべき課題も残されている。

機器開発の課題としては、突発的な風等に対して対応可能で墜落や掲載物落下の危険性を軽減することが挙げられる。とくに、橋梁下部やトンネル内においては、悪意を持った利用者を如何に規制するかも大きな問題である。これらの課題を解決することで、近接目視などに代わる点検の効率化に向けた実装が可能になると考えられる。

3.6.3 多機能統合

国内に橋長 6m 以上の道路橋を60万橋も抱える米国では、連邦道路庁の進める LTBP (長期橋梁性能プログラム) の一環として、Rutgers 大学 (ニュージャージー州) に委託し、2012年に図-3.6.2に示す RABIT (ラビット) と呼ばれる床版の多機能型検査用ロボットを開発している^{3-21)、3-22)}。RABIT には、世界中の最も優れた技術が採用されている。例えば、鉄筋位置を探索する GPR は、イタリアの IDS 社製の手押し型多配アンテナ「Hi-BrigHT」のアンテナアレイが2基 (計16アンテナ、水平・垂直波) 採用されている。さらに、位置情報を取得する GPS (全地球測位システム) は、ディファレンシャル GPS を採用し、アンテナを「RABIT」上と基準局とする三脚上に設置する。そのほか、ひび割



図-3.6.2 道路橋床版非破壊検査ロボット

れなどを高解像度で撮影するカメラ、鉄筋の腐食環境を探る電気抵抗、コンクリートの浮きや強度を調べる衝撃弾性波と超音波器機を搭載する。また、改良版ではわが国の赤外線解析技術も採用される予定である。

各センサー、デジタルカメラからのデータは、無線で送信され、1時間あたり橋梁床版面積で300m²の速度でデータ収集が可能となる。さらに、連続モードでは、GPRとデジタルカメラのみのデータを収集するので、速度は1,000m²/時間となる。計測車内では、リアルタイムあるいは準リアルタイムで調査結果が図-3.6.3のように表示できる。同図より、上から表面の可視画像、

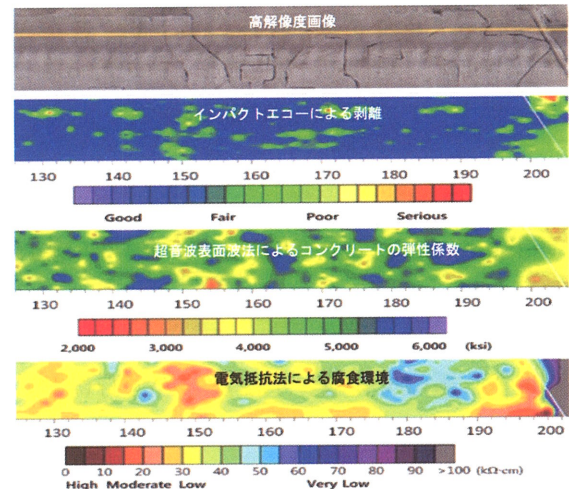


図-3.6.3 非破壊検査健全度マップ

衝撃弾性波による剥離、超音波表面波法によるコンクリートの弾性係数の大きさ、電気抵抗による腐食環境の状態が評価可能となる。RABITは、今後5年間で1000橋に適用する目標を掲げて改良と量産に取り組んでいる。

3.7 関連コア技術

点検技術を支えるセンサーは、将来単独で設置計測されるのではなく、MEMSとよばれる微小電気機械システムなどに統合され、省電力で、遠隔で動作することが理想的である。そのために、必要なコア技術は、無線化、空中給電あるいは、自己発電などであり、近年集中的にNEDOの国家プロジェクトなどで研究開発されている。ここではこれらの一端を概観する。

3.7.1 無線化技術

構造物の劣化や損傷をモニタリングする上で、ひずみ、荷重、変位、温湿度、振動など計測すべき項目は数多くある。これらの項目を有線あるいは個々の記録計によりデータを保存し維持管理することは対象構造物の数が増えるに従い、現実的ではない。そこで重要となるのがデータ記録、転送の無線化技術である。

これらのデータの記録・転送を無線通信により行うためには、対象とする構造物数に応じてネットワークの構築が必要となる。この際、コストの低減およびネットワークシステムの簡素化は必要不可欠であり、複数の通信方式を併用することが肝要である。現状の通信方式は表-3.7.1のようにまとめることができる。とくに、無線マルチホップ通信では、アクセスポイントが不要で、各端末同士で無線伝送が可能となる。また、一つの経路が通信不可となっても別経路を選択可能である。さらに、免許が不要な特定小電力無線を利用して、広範囲なネットワーク構築が可能であることから、構造物のモニタリングを行う上で有力な通信方法と考えられる。一方で、通信端末が多数必要であり、その低コスト化および低消費電力化が必要となる。構造物の置かれる環境は、都市部から山間部まで多岐にわたり、かつ太陽光発電などによる電力を十分に期待できないような場所も多々ある。そのような幅広い環境において、適切な電力を確保することは容易ではない。したがって、端末の省電力化を進めるとともに、発電方法についても検討する必要がある。最終的には、集約装置などに集約された情報を既存のデータ通信サービスを利用した1:N

通信や電力線を利用した電力線通信を介して、センターまで必要情報を伝送し、その場で分析や解析を行うことが理想とされる。

表-3.7.1 構造物モニタリングに応用可能な通信技術

種 類	概 要	特 徴
無線マルチホップ通信 (無線)	集約装置（コンセントレータ）までマルチホップ転送により通信を行う方式であり、特定小電力無線などを通信媒体として利用する。	適用できる対象が広く、低コストで実現できる。山間部などを除いて幅広く適用可能であり、必要な集約装置の数を抑えられるため、低コストが期待できる。
1:N 通信（無線）	携帯電話や WiMAX などの通信キャリアによるデータ通信サービスを利用する。	通信キャリアのサービスに依存するが、山間部などでの適用が可能である。
電力線通信（有線）	既存の電力線（Power Line）を通信回線として利用する。	既存設備であり、実装しやすいが、電柱上の隣接する変圧器を超えて通信することが難しく、変圧器ごとに通信の集約装置をセッティングする必要がある。

3.7.2 空中給電

構造物の点検の省力化あるいはモニタリング技術の高度化のためには、前述のとおり適切な電力の確保が必要不可欠である。構造物によっては、電力線からの受電、太陽光発電からの受電などにより、センサーや通信端末を稼働させることが可能である。しかしながら、構造物によっては、上記のような受電が容易でない場合も多々ある。

このような場合に期待されている技術が、「空中給電技術」である。空中給電は、ワイヤレス電力伝送、非接触給電、無線電力伝送などとも呼ばれ、21世紀に入りその技術が注目されている。現在では、コードレス電話、電気シェーバー、電動歯ブラシなどに使用されており、金属接点やコネクタなどを介さずに電力を伝送すること、およびその技術を総称して呼ばれる。従来、無線伝送可能なものは情報だけであったが、エネルギーも送電できる可能性が見いだされ、現在世界中でさまざまな研究開発や商品化が行われている。

空中給電の構想は20世紀初頭にニコラ・テスラが考案した、電離層の反射を利用する世界システムと呼ばれるものであったがその理論は不完全であった。そののち、さまざまな研究が進められ、現在では種々の方式が提案されている。例えば、磁場を用いた短距離の電磁誘導方式や共鳴送電方式、電磁波、主にマイクロ波を用いた長短距離のマイクロ波無線電力伝送などの方式である。また周辺の電磁波を「収穫」する電磁波エネルギーハーベスティングという技術もある。電磁誘導方式は、原理としては電磁誘導そのものであり、磁束を媒体として受信側コイルに送電する。電磁界共鳴技術については2006年11月にマサチューセッツ工科大学（MIT）が実用化の可能性を発表した³⁻²³⁾。二組のコイルとコンデンサによる共振器同士が共鳴（共振）して結合されることから、「磁界共振方式」や「共振結合方式」とも呼ばれる。

わが国の空中給電の研究の歴史は古く、1980年代よりマイクロ波無線電力伝送の研究が行われ、世界をリードしてきたが、標準化・法制化や実用化では世界に後れを取っているのが現状である。そこで、わが国での空中給電技術の実用化を加速するため、「ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム」³⁻²⁴⁾ が設立され、建設業界に限らず種々の分野での実用化が検討されている。

3.7.3 自己発電

小電力であるが、環境にある揺らぎエネルギーを利用して発電し、見かけ上の永久機関を構成する目的で、「環境エネルギーを用いた発電・電力貯蔵（エネルギーハーベスト）」が注目を浴びている。エネルギーハーベスティング技術は、近年のデジタルデバイスの急速な発展により mW 、 μW レベルの電力利用が可能になることで、これまで利用されていなかった自然振動、人体動作、体温、廃熱、電磁波などの希薄分散エネルギーを利用して自己発電を行う技術である。構造物の分野では、橋や道路などの振動で発生するエネルギーを電力に変換する振動発電が適用されることが多い³⁻²⁵⁾。振動エネルギーから電気エネルギーへの変換には、電磁誘導、圧電効果、静電誘導の3つが主に用いられる。以下に各手法の概要を述べる。

(1) 電磁誘導型発電

バネなどの先端に取り付けた永久磁石を振動させて、ピックアップコイルに鎖交する磁束を変化させ発電する（図-3.7.1）。これは、構造が比較的単純であり、永久磁石が熱消磁しない限り性能が劣化しない、単位体積辺りのエネルギー密度が比較的大きいといった利点をもつが、コイルの断面積が減るほど鎖交磁束が減少するため、小型化が困難である。

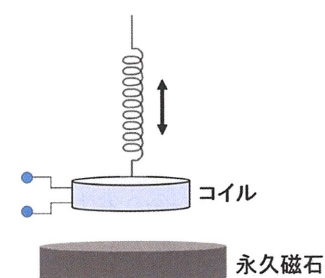


図-3.7.1 電磁誘導型発電

(2) 圧電型発電

圧電素子の変形すると、素子内部で分極が発生し、素子が力から解放された際にその電荷が放出されることで発電する（図-3.7.2）。圧電材料にはセラミックスおよびPVDF（ポリフッ化ビニリデン）がよく用いられるが、前者は高出力を得られるものの壊れやすく、後者は、微量の電力しか得られないといった特徴をもつ。

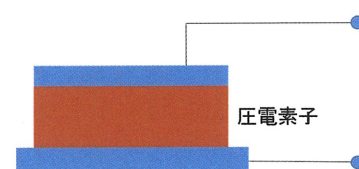


図-3.7.2 圧電型発電

(3) 静電誘導型発電

対向する電極が振動すると静電容量が変化し、電荷が誘導されることで発電する。低共振周波数、小容積を同時に満たすために、エレクトレットを用いた発電が注目されている（図-3.7.3）。エレクトレットは、誘電体に電荷を打ち込んだもので、半永久的に静電場を発生させることができる。数Vオーダーの

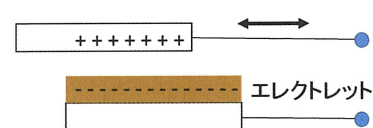


図-3.7.3 静電誘導型発電

電圧がトランスを介さず直接発生できるため、微小サイズでの発電が可能である。これらの振動発電をはじめとするエネルギーハーベスティング技術は、環境・経済的に与える影響が多大的になると見込まれているが、現時点における発電効率が小さく、自立電源としての電力供給に達していないこと、消費電力減少（ローパワー化）などの技術革新が必要不可欠であること、および、さまざまな分野での認知度が低いことなどの課題を解決していく必要がある。

3.8 最新技術の課題

各技術の技術的課題は枚挙にいとまがないことから、ここでは、点検実施の上で重要となる4つの共通課題について示す。1) 予防保全の定義、2) 重要度による維持管理基準の設定、3) 補修補強効果の定量化、4) 技術革新、費用、その経時的変遷である。

1) については、当然重要な構造物を対象とすることから、表面に変状が現れる前の内部変状

の評価が必用となるが、現状の検査は、外観が主かつ、初期の外観変状に応じた対策が予防保全とされている。つまり、内部の変状を網羅的かつ、合理的に評価できる検査技術が必用といえ、この点で弾性波や電磁波は検査対象規模を波長で定めることができるので有望な手法といえる。

2) については、まず構造物の重要度を定めるためのインパクト（供用不可となった場合の直接的、間接的影響）について考える必要がある。とくに土木構造物は、建築構造物と異なり影響度を算定するための平面的／空間的境界条件の決定が困難であり、直接的な影響に加え社会的影響までを含めた環境影響評価の考え方を導入する必要があるが、未だに整備されていない。原発と同様に稼働まで、または廃炉まで、さらには事故時の影響を予め定量的に算定するなど、算定範囲の明確化が重要となる。

3) については、構造物のライフサイクルを考えれば、当然担保すべき行為といえ、ライフサイクルシナリオ策定には欠くことができず、わが国のみならず海外でも喫緊とされる課題となる。そこで、筆者らが中心となり、非破壊で補修補強効果を定量化する技術の整理、課題抽出と試験の標準化などが、国内（非破壊試験によるコンクリートに生じたひび割れの補修評価方法の確立に関する研究委員会、JCI）、海外（Damage Assessment in Consideration of Repair/Retrofit-Recovery in Concrete and Masonry Structures by Means of Innovative NDT、RILEM TC-1AM）で始まっている。

4) についてはまず‘革新’について再考する必要がある。例えば、18世紀半ばの産業革命でさえ、蒸気機関が馬に代わり主エネルギー源となったのは、特許が切れた19世紀初頭を過ぎ、高品質な製品が製造できるようになった19世紀半ば以降であったとされる。このように革新が成就するには年月が必用といえ、ことインフラに当てはめてみても革新的な点検技術がすなわち、合理的なインフラの維持管理に繋がるとは考えがたい。つまり、その派生技術あるいは、その革新を構成する技術が飛躍的に向上した後に合理的なインフラの維持管理は可能といえる。さらに、高度なIT技術を駆使した診断技術は、現状高価であり、例えば、一部の重要な構造物のみに試験的に適用されるにとどまることもあろう。しかし、電子器機の価格変遷と同様に、将来合理的な価格になれば、まさしく7割以上を占める地方管理の橋梁にも展開可能となるはずである。以上に示したようにダウングレードを見越した高度な診断技術をわが国が一体となって研究、開発することが引いては、新しい維持管理を含む新産業、インフラシステム創出に貢献できるものと考えている。

4. おわりに

維持管理に関わる技術はまだまだ発展途上のものが多く、点検・評価・判定・診断・対策・記録の流れすべてにわたって最前線は活気に満ちている。予防保全を見据えた合理的なメンテナンスサイクルを実現するためには、従来の技術のみでは不十分な場合もあり、種々の最新技術の応用が必要となる場面も生じる。本稿では維持管理の流れの中の点検診断、とくに点検に絞ったかたちでの紹介を行った。

維持管理の流れからすれば、点検診断を行った後は、場合によっては対策をとることとなり、記録し、また点検に戻ることになる。今回の担当題目が“点検診断技術の最前線”であったため、本文では補修補強を代表とする対策工法にまで触れることはできなかった。したがってまた、対策工法を採用した場合の、再劣化の問題にも触れる余裕がなかった。

塩害における電気化学的防食工法、アルカリ・シリカ反応における亜硝酸リチウム圧入工法な

どのように、比較的定評を得られつつある工法もある。しかし、グラウト不良部に対する補修、とくにグラウト再注入工法については、まだ完璧な定評が得られた工法が確立されたという段階には至っていない。新しい防食メカニズムに基づく再注入工法なども検討されてはいるものの、今一步の確認検証が必要であるものも多いのである。今後対策工法の開発がより一層活発となることを期待している。

コンクリート構造物、とくにプレストレストコンクリート構造物は“丈夫で、美しく、長持ち”することが求められている。しかし、すべての構造物が同じ機能を求められてはいないように、すべての構造物に同様・同等の性能が要求されるわけではない。対象となる個々の構造物にふさわしい生涯シナリオをデザインすることによって、要求される性能が明確となり、必要とされる点検診断技術の種類および水準を定めることができる。そのような適切な点検診断技術を用いることによって始めて、丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物、さらには市民社会を実現することができると考えている。

参考文献

- 2-1) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全—PC 橋の更なる予防保全に向けて—、2015.3.
- 2-2) 横山和昭ほか：PC 箱桁橋を模擬した供試体によるグラウトホース伝い水の検証試験、土木学会第69回年次学術講演会、V-148、pp.295-296、2014.9.
- 2-3) PC 工学会：コンクリート構造診断技術、2015年4月.
- 2-4) 独立行政法人土木研究所、日本構造物診断技術協会：非破壊検査を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル、平成15年10月.
- 2-5) 国土交通省北陸地方整備局：管内事業研究会発表資料、http://www.hrr.mlit.go.jp/library/happyoukai/h23/ino_iji/2.pdf、2011.7.
- 2-6) 小林ら：プレストレストコンクリート T 桁橋の振動計測（計測手法に関する検討）、プレストレストコンクリート技術協会第20 回シンポジウム論文集、2011.10.
- 3-1) 日本非破壊検査協会、NDIS2426-1～3、2009.
- 3-2) Ohtsu, Watanabe: Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT&E International, 35 (3) :189-196, 2002.
- 3-3) 佐々、芦田、菅野：物理探査、森北出版、1993.
- 3-4) 日本非破壊検査協会、NDIS2421、2000.
- 3-5) 塩谷、奥出、桃木、小林：AE トモグラフィによるインフラ構造物の健全性評価手法の提案、日本非破壊検査協会、第18回 AE 総合コンファレンス論文集、pp.39-42、2011.
- 3-6) 西田、塩谷、麻植、古野：ASR により劣化したコンクリート橋脚の3次元弾性波トモグラフィによる内部損傷評価、JCI、コンクリート工学年次論文集（投稿中）.
- 3-7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術’09 [基礎編]、pp.107-110、2009.
- 3-8) 林、橋本、明石：赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート損傷の検出精度向上、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.1813-1818、2013.7.
- 3-9) 大塚：X 線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究、土木学会論文集、451、pp.169-178、1992.
- 3-10) 中島：多孔質媒体の微小空隙構造測定のための物理探査用核磁気共鳴表面スキャナーの

- 改良. GREEN NEWS (地圏 資源環境研究部門広報誌)、No.18、p.3、2007.
- 3-11) ASTM C 876-91 (Reapproved 1999) : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999.
- 3-12) 土木学会：コンクリート構造物における自然電位測定方法 (JSCE-E601-2000) コンクリート技術シリーズ30、2000.
- 3-13) 島、梶間、神谷：建設・防災・環境のための新しい電気探査法 / 比抵抗影像法、古今書院、pp.12-189、1995.
- 3-14) 西村、白川：やさしい光ファイバ通信、オーム社、p.187、1999.
- 3-15) 福田、平野、横山、松田：PPP-BOTDA 方式光ファイバ計測による超長尺先受け鋼管のひずみ挙動、土木学会第67回年次学術講演会、pp.43-44、2012.
- 3-16) 福本、萩野ほか：エース測量学、朝倉書店、2003.
- 3-17) 松田ほか：光学的非接触全視野計測法によるコンクリート構造物のマルチスケール診断法の開発、平成20年度～平成21年度建設技術研究開発費補助金総合研究報告書、2010.
- 3-18) 梅本、大畑ほか：モアレ縞を用いたひずみ可視化シートの開発、土木学会第66回年次学術講演会、pp.509-510、2011.
- 3-19) Fudouzi: Optical properties caused by periodical array structure with colloidal particles and their applications, Advanced Powder Technology, Vol.20, pp.502-508, 2009.
- 3-20) <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20160111/>
- 3-21) <http://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrc/programs/infrastructure/structures/ltpb/ltpbpresearch/rabit.cfm>
- 3-22) <http://www.nikkei.com/article/DGXMZO78679160R21C14A0000000/>
- 3-23) 日経 BP、2009年 5 月21日付
- 3-24) ワイヤレス電力送電実用化コンソーシアムホームページ <http://www.wipot.jp/about/>
- 3-25) エネルギーハーベストおよびマイクロバッテリーの研究開発動向と応用：社団法人新化学発展協会、2010.

海外の PC 技術の動向 — 日越ワークショップ、最近の海外基準類、海外の PC 橋、 fib シンポジウム2015—

埼玉大学大学院教授
国際対応小委員会

陸 好 宏 史

1. 第5回日越 PC 橋ワークショップと橋梁視察

1.1 概 要

日本－ベトナムのプレストレストコンクリート（以下 PC）橋に関するワークショップは、日本の PC 技術の海外での更なる発展を目的に、公益社団法人プレストレストコンクリート工学会（以下 PC 工学会）とベトナム運輸省傘下の研究機関である交通科学技術研究所（Institute of Transportation Science and Technology、以下 ITST）の共催により、2007年に第1回が開催されて以来¹⁻¹⁾、2009年に第2回、2011年に第3回¹⁻²⁾、2013年に第4回¹⁻³⁾と2年ごとにワークショップが開催されてきた。これらのワークショップの成功を受けて、2015年10月にベトナムのハノイ市で第5回ワークショップが開催された。

ここでは、第5回ワークショップならびにワークショップに併せて開催された PC 工学会と ITST の相互協力に関する会議、さらにはハイフォン市郊外にて建設が進められているラックフェン国際港アクセス道路・橋梁工事の視察などについて報告する。

第5回ワークショップの開催にあたっては、これまでと同様に、PC 工学会の国際対応小委員会内に実行委員会が設置された。ワークショップと橋梁工事視察は、2015年10月8日、9日および10日の3日間で開催された。日本からの参加者は、国際対応小委員会委員長の陸好教授をはじめ、20名が参加した（写真－1.1）。第1日目にワークショップが開催され、第2日目の午前に PC 工学会と ITST との会議が開催された。そののち、ハイフォンへ移動し、第3日目はラックフェン国際港アクセス道路・橋梁工事の視察が行われた（表－1.1）。

表－1.1 全体スケジュール

日 時	イベント
10月8日（木）終日	ワークショップ（全9編講演）
10月9日（金）午前	PC 工学会と ITST との会議
10月10日（土）終日	ラックフェン工事視察



写真－1.1 日本からの参加メンバー

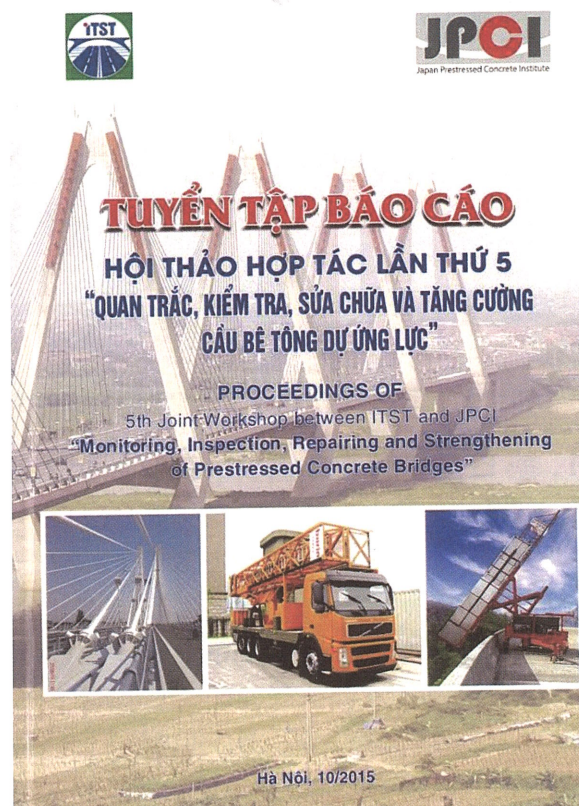
1.2 ワークショップ

今回のワークショップのテーマは、ITSTの要望を受け、PC橋のモニタリング、検査、補修および補強であった。前回のテーマは、PC橋のメンテナンスであり、ベトナムにおいては、道路整備に伴う新設橋梁の建設が進む一方で、維持管理への関心の高さがうかがえる。投稿件数は、日本側から5編、ベトナム側から4編の合計9編であり、報文集（写真－1.2）には、英語とベトナム語の2カ国語で掲載されている。

ワークショップの報文集に投稿された9編の論文は、表－1.2に示すプログラムにしたがって発表された。発表は英語で行われ、説明用スライドは2つのスクリーンに英語およびベトナム語で映された。

日本からは、PC橋梁の点検・調査・診断・評価・補修・補強に関する最新技術、高速道路における橋梁の劣化・損傷状況と床版の更新技術、超高性能繊維補強コンクリートによる床版補強技術とスイスにおける適用事例、CFRPを用いた橋梁の補強技術、およびグラウト再注入工法について紹介された。ベトナムからは、補修・補強工法の評価方法、外ケーブルの点検および評価方法、PC斜張橋のモニタリング技術とその適用例、および既設橋梁の点検・診断の現状について紹介された。

今回のワークショップには、ベトナムから100名程度の参加者があり、すべての講演について活発な意見交換が行われた。日本の発表に対してベトナムから、各工法に関する基準類の有無の質問や各工法の詳細に関する質問が多く、実用化への意欲と日本のPC技術および橋梁の維持管理に対する関心の高さが伺われた。また、JICAベトナム事務所から松野専門家および高田専門家が出席され、新聞社などによる報道もあった。ワークショップの開催状況を写真－1.3に示す。



写真－1.2 報文集表紙

表－1.2 ワークショップのプログラム

Time	Contents
8:30－9:00	Opening Ceremony
9:00－9:40	Recent Developments on Repair and Strengthening of Concrete Bridges in Japan 平 喜彦（三井住友建設）
9:40－10:20	Sustainable Renewal Plan for Expressway Bridges in Japan 酒井 秀昭（中日本高速道路）
10:35－11:15	Evaluation of Some Methods for Repair and Strengthening of Concrete Bridges in Vietnam Nguyen Trung Ha (ITST)
11:15－11:55	Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHP-FRC) for Strengthening of Bridge Deck Slabs 牧田 通（中日本高速道路）
14:00－14:40	Strengthening of Bridge Members using CFRP in Japan 小林 朗（新日鉄住金マテリアルズ）
14:40－15:20	Methods for Inspection and Evaluation of External Cable System in Pre-Stressed Concrete Bridges in Vietnam Le Van Hung (ITST)
15:20－16:00	Development of Repair Method for Corroded PC Tendons in Incomplete Grouting Areas Using LiNO 2 鴨谷 知繁（ピーエス三菱）
16:15－16:55	Technical Solutions, application technology in the Monitoring of the Cable-Stayed Bridges in Vietnam Pham Huy Cuong (TRICON Joint Stock Company)
16:55－17:35	Current Status of Inspection and Evaluation of Existing Bridges in Vietnam Nguyen Thai Khanh (ITST)



写真-1.3 ワークショップ開催状況

1.3 PC 工学会と ITST との相互協力に関する会議

ワークショップの翌日、10月9日の午前に開催されたPC工学会とITSTとの合同会議には、日本から17名、ベトナムから12名が出席した。

会議ではまず、今後のワークショップの開催について討議を行った。PC工学会の国際対応小委員会としては、これまでの5回のワークショップで技術情報交換が一区切りついたとの判断から、継続はするが開催頻度を落とす方向も考えていた。一方で、ITSTからは2年後に次のワークショップを開催したいとの提案であった。協議の結果、2017年に開催都市をダナンに移し、長大橋など特殊橋梁のモニタリング、点検、補修・補強などをテーマとし、現地視察を含む情報交換というより実践的な内容にする方向で合意した。今後、双方の幹事で調整を行うこととなった。

会議では、日本側から新材料および新技術に関する情報提供を行った。神鋼鋼線工業の細居氏から、被覆鋼材や高強度鋼材など最新のPC鋼材とケーブルの張力測定技術が紹介された。また、牧田委員よりトレント法によるコンクリート表層品質検査手法およびフェーズドアレイ超音波探傷検査が紹介された。

1.4 ラックフェン国際港橋梁工事視察

合同会議の終了後、ハイフォンへ移動し、最終日の10月10日には、ラックフェン国際港アクセス道路・橋梁工事の視察を行った。ハイフォンは、ベトナム北部最大の港湾都市であり、経済成長の続くベトナムにおいて、輸送の拠点となっているベトナム北部の「重要経済中核」のひとつである。市内を流れるカム川沿いに、多数の港湾荷役施設が立ち並んでおり、コンテナを積んだトレーラで混雑して市内の交通を妨げている。このような状況を受け、大水深の国際港の整備が日本のODAとJICAの資金援助で進んでおり、この工事もこれらのインフラ整備の一環である。

ラックフェン国際港アクセス道路・橋梁工事は、新国際港と整備中の高速道路新5号線を結ぶもので、海上を横断する5.44kmの橋梁と軟弱地盤上の道路工事10.19kmが含まれる。橋梁部分は、主橋が橋長490mのPC4径間連続ラーメン箱桁橋で、片持ち張出し架設工法で施工される。主橋東西の取付け橋は、西側が橋長4,434m、75径間のPC箱桁橋で、支間長60mのPC5径間連続箱桁橋をスパンバイスパン架設工法で施工される。一方、東側の取付け橋は、橋長519m、PC9径間箱桁橋で、片持ち張出し架設工法によって施工される。

スパンバイスパン架設される西側の取付け橋では、ショートラインマッチキャストで製作され

たセグメントが用いられる(写真-1.4)。セグメント数は、橋脚間部が1,405個、柱頭部が90個、総数は1,495個である。製作されたセグメントは、特殊車両によって運搬され、写真-1.5に示す架設桁によって吊り下げられ、プレストレスによって接合される。外ケーブルは、ポリエチレン被覆エポキシ塗装PC鋼より線19S 15.2mm が使用され、内ケーブルには、PC鋼より線12S 15.2mm が使用されている。写真-1.6は、東側の取付け橋で始まっている片持ち張出し架設の状況である。

海上の橋梁区間の約 4km は、盛土によってアクセス道路が建設されている。盛土の両側は、ジオテキスタイルを編んだ長い土嚢に砂を充填したジオチューブ(サンドバック工法)によって補強されている(写真-1.7)。



写真-1.4 セグメントの製作状況



写真-1.5 セグメントの架設状況



写真-1.6 片持ち張出し架設の状況



写真-1.7 盛土補強用ジオチューブ

1.5 ニャットン橋の完成

今回のワークショップで2年ぶりにハノイを訪れたが、一つ印象深い出来事があった。それは、完成したニャットン橋との出会いであった。先述の2011年の第3回ワークショップ¹⁻²⁾、および2013年の第4回¹⁻³⁾とワークショップにおいて、建設中のニャットン橋を視察している。2011年には、工事がまだ始まって間もなく、橋脚の施工中であった(写真-1.8)。

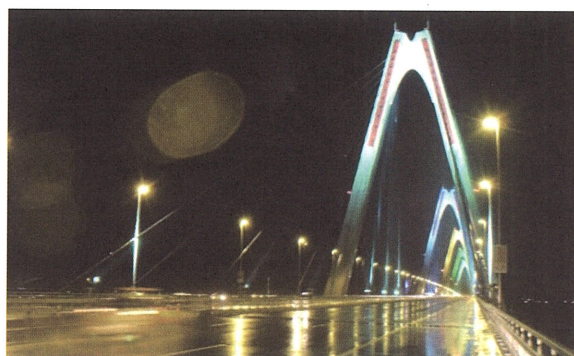


写真-1.8 施工中のニャットン橋 (2011年)

2013年には主橋の張出し施工の最盛期であった（写真－1.9）。その橋が、今回のワークショップには立派に完成していた。橋の完成のおかげで、ノイバイ国際空港から市内への移動時間がかかなり短縮されており、ハノイの交通事情の改善に大きく貢献していた。夜間にはライトアップされており、逞しく華麗な姿を見せていた（写真－1.10）。



写真－1.9 施工中のニャッタン橋（2013年）



写真－1.10 完成したニャッタン橋（2015年）

1.6 おわりに

今回のワークショップを通して、ベトナムでは急速にインフラ整備が進む一方で、PC 橋の維持管理に対する体制整備も急務であることを感じた。今後もベトナムとの技術交流を継続することで、日本の PC 技術がベトナムにおける橋梁の建設および維持管理に貢献することを期待する。

最後に、ラックフェン国際港アクセス道路・橋梁視察の集合写真を写真－1.11に示す。本ワークショップの開催にご協力いただいたITSTのスタッフの方々、現地での工事の視察にご協力いただいた山地所長（三井住友建設（株））をはじめとするラックフェン国際港アクセス道路・橋梁工事関係者の皆様にこの場を借りて感謝の意を表する。



写真－1.11 橋梁工事視察参加者

2. fib の PC 関連の技術関係資料および英国の PC 橋の維持管理に関する基準の紹介

本章では、近年 *fib* により刊行された PC に関連する技術関係の資料と、2015年に英国において刊行された PC 橋の維持管理に関する基準について紹介する。

2.1 *fib* 刊行の技術関係資料²⁻¹⁾

fib は、査読付き論文を掲載する季刊の学術誌「Structural Concrete」のほかに、技術関係の資料を「Bulletin」という総称の下に刊行している。Bulletin は内容などに応じて数種類に分類されるが、分類は *fib* の組織内に存在するさまざまなグループのいずれかに承認を受けることで行われている。そのため、ある種類の Bulletin がどのような特性のものであるかを適切に理解するためには、*fib* の組織構成について知っておく必要がある。本節では、*fib* の組織構成を説明し

た後に Bulletin の種類について解説し、最後に近年 *fib* から刊行された 2 つの PC 関連の Bulletin を紹介する。

2.1.1 *fib* の組織構成

fib の組織構成は図-2.1に示される形態となっており、最上部に各国の会員組織の代表者からなる General Assembly（総会）があり、General Assembly で選ばれた会長や副会長などの幹部から構成される Presidium（常設執行委員会）が組織の中心となって重要事項の決定を行っている。また、Presidium と連携するかたちで、各国の会員組織の代表者や Presidium の委員などからなる Technical Council（技術評議会）があり、Technical Council の下にはコンクリート構造物の設計・施工・維持管理などの主題別に Commission（委員会）が設置され、Bulletin の作成を行っている。さらに、各 Commission の中には特定の分野や課題を取り扱う Task Group（分科会）があり、Task Group の中には特定項目の詳細な検討を行う Working Party（作業部会）がある。表-2.1は、現在 *fib* に設置されている 9 つの Commission を示している。

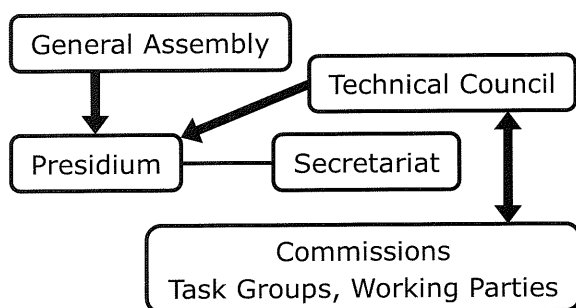


図-2.1 *fib* の組織構成

表-2.1 Commission と主題

Commn.	主 題
1	Concrete structures
2	Analysis and design
3	Existing concrete structures
4	Concrete and concrete technology
5	Reinforcements
6	Prefabrication
7	Sustainability
8	Structural service life
9	Dissemination of knowledge

2.1.2 *fib* Bulletin の種類

Bulletin は、既往の研究や調査の成果および実構造物への適用事例を基に各 Commission や Task Group が取りまとめたものであり、1998年に *fib* が発足して以来、現在までに77冊の Bulletin が刊行されている。Bulletin の刊行は定期的ではないが、1年に約5～6冊の頻度で行われている。

Bulletin は刊行前に *fib* 組織内のいずれかのグループにより承認を受けることとなっているが、承認を受けるグループの *fib* 組織内でのレベルにより、Bulletin の種類は次の7つに分類される。すなわち、Technical report、State-of-the-art report、Manual、Textbook、Guide (to good practice)、Recommendation、Model code である。表-2.2に分類と刊行前に必要な最低限の承認の区分を示す。

表-2.2 Bulletin の分類と刊行前に必要な最低限の承認の区分

分 類	刊行前に必要な最低限の承認
Technical report	Task Group と Commission の委員長による承認
State-of-the-art report	Commission による承認
Manual, Textbook, Guide (to good practice), Recommendation	Technical Council による承認
Model code	General Assembly による承認

2.1.3 fib から近年刊行された PC 関連の Bulletin

近年、fib から刊行された PC に関連する Bulletin には、2012年の *Effect of zinc on prestressing steel* と2014年の *Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning* の2つがある。本節では、これらの Bulletin についておのおのの概要を説明する。

【fib Bulletin No. 64】

Effect of zinc on prestressing steel (亜鉛メッキの PC 鋼材への影響)

Technical report として2012年に刊行された。作成は、2015年1月に現行の Commissions の組織構成に改正される前の Commission 9, Reinforcing and prestressing materials and systems (委員長: Josée Bastien 氏 [カナダ ラヴァル大学 教授]) における Task Group 9.17, Prestressing steel and zinc (分科会長: Hans Rudolf Ganz 氏 [スイス VSL]) により行われた。Task Group 9.17には、日本から白浜昭二氏 [神鋼鋼線工業(株)] と木戸俊朗氏 [住友電工スチールワイヤー(株)] の2名が参加されていた。

本書は、高強度の鋼線・鋼より線・鋼棒が、亜鉛メッキされている状態か亜鉛メッキ部材が近傍にある状態で、フレッシュ状態のセメント系グラウトやコンクリートに曝された場合および曝されなかった場合の水素脆化型応力腐食割れの発生に関する知見の概要と、発生に関連するパラメータの評価について取りまとめたものである。コンクリート構造物の内部で使用される PC 鋼材と、外気中において使用される PC 鋼材の両者が対象として記述されている。本書では、主に以下の3つの使用状態の鋼材について論じられている。

- (1) 外気中の腐食環境下で使用される亜鉛メッキ高強度鋼材
- (2) フレッシュ状態のセメント系グラウトやコンクリートの中に設置された亜鉛メッキ PC 鋼材
- (3) フレッシュ状態のセメント系グラウトやコンクリートの中に設置された亜鉛メッキ部材 (例: 亜鉛メッキシース、亜鉛メッキ鉄筋、亜鉛メッキ留め金具・ジベルなど) に曝されている、または曝されていないものの直近傍にある、フレッシュ状態のセメント系グラウトやコンクリートの中に設置された裸 PC 鋼材

表-2.3に本書の目次 (章のタイトルのみ) を示す。

表-2.3 fib Bulletin No. 64: *Effect of zinc on prestressing steel* の目次

Forward
1 Introduction
2 Summary of relevant parameters on the risk of hydrogen-induced stress corrosion cracking of prestressing steel
3 Assessment of particular applications
4 Summary and conclusions
5 References

【fib Bulletin No. 75】

Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning (ポストテンション方式内ケーブル用プラスチック製シース)

Recommendation として2014年に刊行された。作成は、2015年1月に現行の Commissions の

組織構成に改正される前の Commission 9, Reinforcing and prestressing materials and systems (委員長: Josée Bastien 氏 [カナダ ラヴァル大学 教授]) における Task Group 9.16, Plastic ducts (分科会長: Hans Rudolf Ganz 氏 [スイス VSL]) により行われた。Task Group 9.16には、日本から白浜昭二氏 [神鋼鋼線工業(株)] が参加されていた。

本書は、2000年に Technical report として刊行された *fib Bulletin No. 7: Corrugated plastic ducts for internal bonded post-tensioning* に、最新の情報を加えて修正したものである。ポストテンション方式内ケーブル用プラスチック製シース製品の技術認証の、また将来作成されるであろう試験基準に記載される試験手順の基礎資料となることを意図して作成された。

本書には、プラスチック製シースを用いた緊張材が使用されるコンクリート構造物の設計や細部構造に関する最新の情報のほかに、プラスチック材料、シースの構成部品およびシース全体に対する詳細な試験仕様が記述されている。さらに、プラスチック製シース全体の認証試験と適合証明に関する推奨も記述されている。プラスチック製シースはこれまで約20年に渡って使用されてきており、その使用実績から得られた知見と、プラスチック製シースの基準化に繋がるような新しい仕様が示されている。表-2.4に本書の目次(章のタイトルのみ)を示す。

表-2.4 *fib Bulletin No. 75: Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning* の目次

Forward
1 Introduction, scope of report
2 Terms, definitions and abbreviations
3 General and design/detailing considerations
4 Considerations for installation and use on site
5 Material requirements
6 Component requirements
7 System requirements
8 Approval
9 Evaluation of conformity
10 References and standards
Annexes
A Component assessment procedures
B System assessment procedures
C Summary of requirements, methods of verification and acceptance criteria for polymer-duct systems – Recommended specification

2.2 英国 Highways Agency (現称: Highways England) 刊行の PC 橋の維持管理に関する基準²⁻²⁾

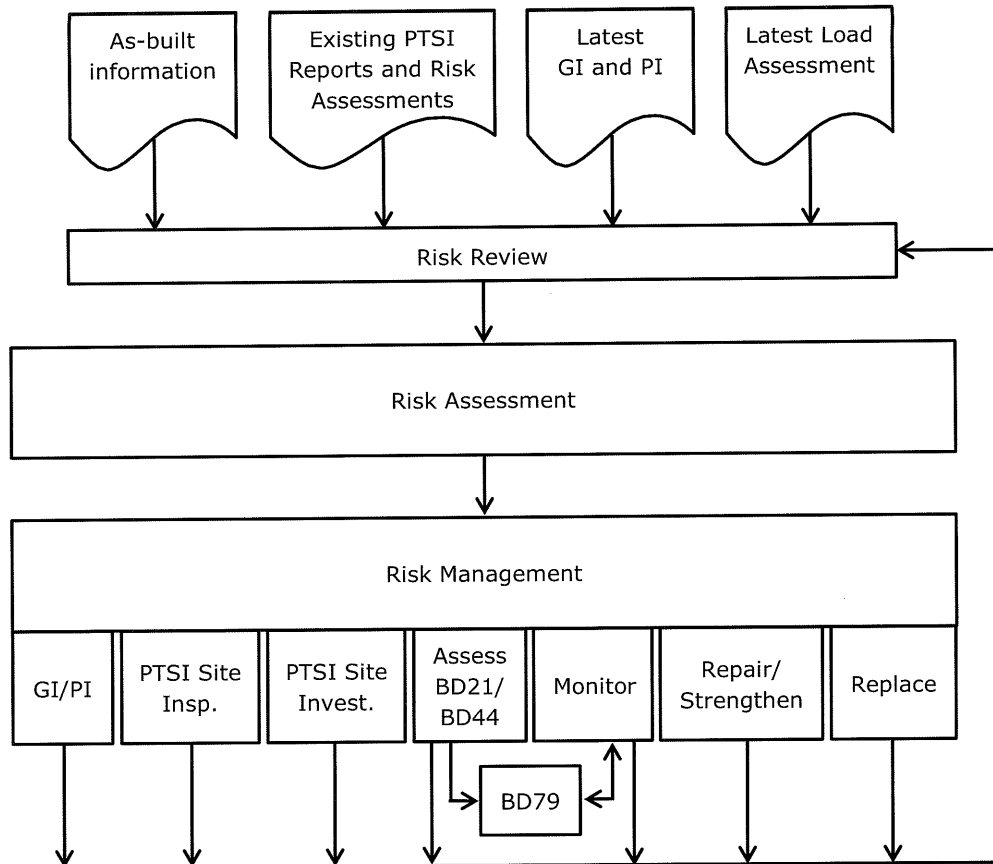
2015年に英国の Highways Agency (現称: Highways England) から刊行された「*Management of post-tensioned concrete bridges*」は、イングランド、スコットランド、ウェールズおよび北アイルランドの英国の全地域の主要道路にあるポストテンション方式 PC 橋の維持管理において使用されている基準である。本基準は、1993年刊行の「*Post-tensioned concrete bridges prioritisa-*

tion of special inspections」[*Post-tensioned concrete bridges: planning, organisation and methods for carrying out special inspections*] および1994年刊行の「*Strengthening, repair and monitoring of post-tensioned concrete bridge decks*」の既存の3つの基準を1つにまとめ、最新の知見などを踏まえて改訂したものである。

本基準には、ポストテンション方式PC橋に関するリスクレビュー、リスク査定およびリスク管理の一連の行為の実施に関する要求事項と推奨事項が記述されるとともに、ポストテンション方式PC橋のリスク管理の方策として実施される特別点検・調査、補修、補強およびモニタリングに関する要求事項と推奨事項が記述されている。表-2.5に本基準の目次（章のタイトルのみ）を示す。ここで、リスクレビューとは従前のリスク査定を詳細に調査することや、さらなるリスク査定の必要性を判断するために収集した情報を詳細に調査すること、リスク査定とは危険事象に繋がる変状の要因、リスク事象、リスク事象の発生可能性、リスク事象が発生した場合の結果およびリスクのレベルを認識し、リスクを定量的に評価すること、リスク管理とは認識されたリスクを緩和または除去するためのさまざまな方策を実施することである。図-2.2にリスクレビュー、リスク査定およびリスク管理の一連の行為の流れを示す。以下では、本基準に記述されるポストテンション方式PC橋の維持管理において中核をなすと考えられるリスク査定について、概要を説明する。

表-2.5 Management of post-tensioned concrete bridges の目次

1	Introduction
2	Risk Review
3	Risk Assessment
4	Risk Management
5	PTSI – Organisation
6	PTSI – Site Inspection
7	PTSI – Site Investigation
8	Monitoring
9	Repair
10	Strengthening
11	Normative References
12	Informative References
13	Enquiries
	Annexes
A	Example Risk Assessment Report
B	Case Studies
C	Advice on severe localized corrosion (crevice corrosion)
D	List of TPB Contributing Organisations



※用語等の解説

PTSI: Post-Tensioned concrete bridge Special Inspection

(ポストテンション方式 PC 橋の特別点検；必要に応じて実施；近接目視に加えて試験やモニタリングを行う場合有り)

GI: General Inspection (一般点検；1 回／2 年の頻度；遠望目視)

PI: Principal Inspection (主要点検；1 回／6 年の頻度；近接目視)

BD21: The Highways Agency: Design Manual for Roads and Bridges Volume 3 Section 4
Part 3 BD21/01 *The assessment of highway bridges and structures*

BD44: The Highways Agency: Design Manual for Roads and Bridges Volume 3 Section 4
Part 14 BD44/15 *The assessment of concrete highway bridges and structures*

BD79: The Highways Agency: Design Manual for Roads and Bridges Volume 3 Section 4
Part 18 BD79/13 *The management of sub-standard highway structures*

図-2.2 リスクレビュー、リスク評価およびリスク管理の全体概要

リスク査定の最も重要な目的は、橋梁の管理者に特定の構造に関連するリスクを認識させ、それにより橋梁の供用期間に渡る適切なリスク管理の方策の選定を可能にすることである。また、点検・調査や対策実施の優先順位付けのためのリスクの定量的な評価も、リスク査定の目的である。リスク査定は、詳細な定性的なリスク評価と優先順位付けおよび格付けを目的とした定量的なリスク評価の2段階に分けて行われる。

定性的なリスク評価では、利用可能なすべての判断材料を詳細に調査し、それに基づき危険事象に繋がる変状の要因を特定し、一覧化する。そして、危険事象に繋がる変状の要因を6つの項目に分類して整理する。6つの項目とは、供用年数、橋梁の形式、変状が発生しやすい部位・構

造詳細・材料、現在の橋梁の状態、点検の実施状況などの経歴および耐荷力である。特定された危険事象に繋がる変状の要因のおおのは、次の項目に着目して説明する必要がある。

- ・危険事象に繋がる変状の要因が対応されなかった場合、3～4年の間で起こり得るリスク事象
- ・理由とともに確実・高・中・低で評価分けした、リスク事象の発生可能性
- ・理由とともに高・中・低で評価分けした、リスク事象が発生した場合の結果
- ・リスクのレベル
- ・リスク管理として実施する方策の提案

定量的なリスク評価は、供用年数、橋梁の形式、変状が発生し易い部位・構造詳細・材料、現在の橋梁の状態および橋梁崩壊により引き起こされる事象、の5項目について条件に応じて所定の係数を決定し、それらの係数を所定の計算式に代入して評価値を算出することにより行われる。

3. 海外の PC 橋梁

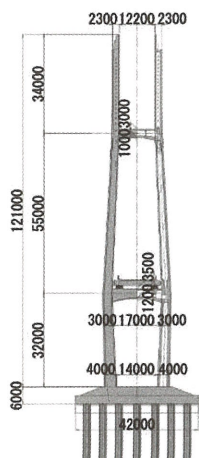
3.1 カンボジアの斜張橋

3.1.1 工事概要

ネアックルン橋は、カンボジア王国の首都プノンペンの南東 60km に位置し、南部経済回廊（ホーチミンープノンペンーバンコク）のメコン川を渡河する橋梁である。本工事は日本の無償資金協力によるものであり、メコン川に架かる橋長 640m の 3 径間連続 PC 斜張橋（メイン橋）を中心に、東西兩岸 1575m のアプローチ橋（PCI 型合成桁橋）および東西 3.2km のアプローチ道路（盛土区間）から成る全長 5.4km のプロジェクトである。本橋の開通により、南部経済回廊を通じた物流や交流などが円滑になり、カンボジア国内のみならず、メコン地域全体の経済発展が期待されている。



図－3.1 架橋位置



図－3.2 主塔断面図



写真－3.1 完成写真

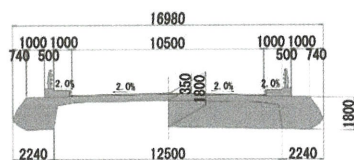


図-3.3 主桁断面図

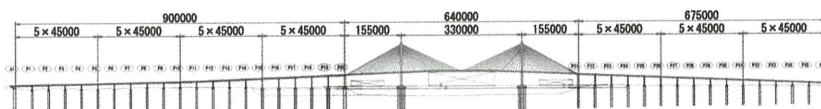


図-3.4 側面図

3.1.2 メイン橋の施工

主桁の張出し施工には、下支え式移動作業車を採用した（写真-3.2）。移動作業車の前方部を本設の斜材で支持する構造になっており、それにより移動作業車の鋼材重量を大幅に軽減するとともに、当初設計 4m であった施工ブロック長を斜材配置間隔である 8m にて施工することを可能とした。

型枠支保工は、型枠のセット、調整、脱型作業の簡素化を図るため、底板と横桁型枠をすべて一体化して油圧ジャッキにて全体を上下させるシステムを採用しており、標準施工サイクル10日にて施工をおこなった。



写真-3.2 下支え式移動作業車



写真-3.3 張出し架設状況

3.1.3 アプローチ橋の施工

アプローチ橋の上部工はコンボ橋であり、ヤード内で製作した PCI 桁を場内運搬して所定の位置に架設した。PCI 桁の長さは 45m、総重量は 130t であり、国内でも最大級の大きさである。現場内には3つの製作ベッドを設け、1サイクル9日で製作した。PCI 桁の架設方法は、抱込み式桁架設工法を採用した。これは、2組の架設桁の間を後方から運搬してきた PCI 桁を吊り上げ、所定の位置に移動させて設置する工法である（写真-3.5）。架設は1径間5本の PCI 桁を3日のペースで進めた。



写真-3.4 PCI 桁製作状況



写真-3.5 PCI 桁架設状況

3.1.4 外国の通貨になった ODA (カンボジアの500リエル紙幣)

日本の支援で建設されてきたネアックルン橋の閉合式が開催され、式典にはフン・セン首相、中根一幸外務大臣政務官ほか、多数が出席した(写真-3.7)。式典で、フン・セン首相は、この橋を「つばさ橋」と命名すると発表。また、新たな500リエル紙幣が発行され、裏面にこれまでのきずな橋だけでなく、つばさ橋も描かれている(写真-3.6)。本橋は2015年4月6日に開通し、日本とカンボジアの友好関係強化の新たなシンボルとなることが期待される。



写真-3.6 500リエル紙幣



写真-3.7 閉合式

3.2 ベトナムの橋梁

ビンカイン橋(J1工区)、チャー橋(J2工区)、フッカイン橋(J3工区)はベトナム南部の物流の促進、ホーチミン市内の交通緩和と将来の交通需増への対応を目的として日本のODAにより計画された橋梁である。本橋はホーチミン市とハノイ市を結ぶ南北高速道路の一部で、同市南部を東西に走るベンルック～ロンタイン高速道路区間(57.1km)に位置する(図-3.5)。

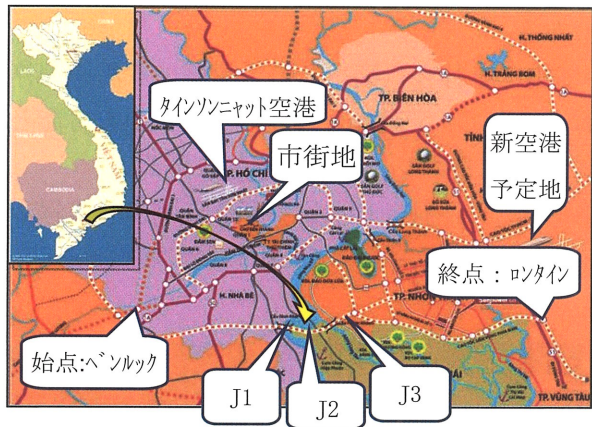


図-3.5 工区位置図

表-3.1 南北高速道路の工事概要

	延長 (m)	橋梁形式
J1	2,764	メイン橋：3径間連続PC斜張橋 西側：4径間連続ラーメン箱桁橋 + 13径間連続ラーメン箱桁橋 東側：12径間連続ラーメン箱桁橋
J2	4,750	4-6径間連結PCスーパーT桁橋(4,438m) 3径間連続PC箱桁橋(312m)
J3	3,194	メイン橋：3径間連続PC斜張橋 西側：13径間連続PC箱桁橋 東側：13径間連続PC箱桁橋 + 5-6径間連結PCスーパーT桁橋



図-3.6 工事概要(J1工区、J2工区、J3工区)

3.2.1 ビンカイン橋 (J1工区)

ビンカイン橋は、ホーチミン市とハノイ市を結ぶ南北高速道路の一部で、同市南部を東西に走るベンルック〜ロンタイン高速道路区間(57.1km)に位置する。工事延長は全長 2,763.5m、最大幅員 30.35m、うちニャーベー川を渡河する主橋梁部は橋長 749.5m、最大支間長 375m の3径間連続 PC 斜張橋となり、主塔の高さは 155m である。主橋梁に通じる西側と東側のアプローチ(高架橋)部の橋長はそれぞれ 1,202m と 812m、主橋梁部を含む橋梁全体を支える橋脚数は33基である。また、現地の軟弱地盤を克服するために、主塔の基礎には長さ 63.5m、直径 1.5m の長尺大口径の鋼管杭を144本(基礎1基あたり72本)打設する計画である。本工事では、施工の難易度が高い斜張橋部の主桁の高速施工が不可欠になるため、移動作業車を用いた主桁施工の効率化に取り組む予定である。



図-3.7 完成パース

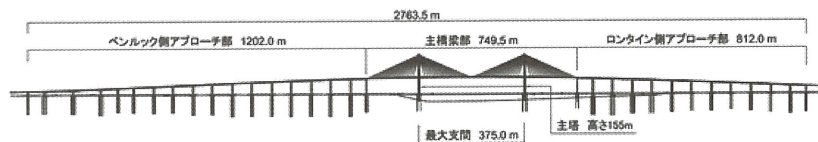


図-3.8 工事概要 (J2工区)

3.2.2 チャー橋 (J2工区)

チャー橋は、ホーチミン市とハノイ市を結ぶ南北高速道路の一部でプロジェクトの中間地点に位置する。工事内容はビンカイン橋とフッカイン橋を結ぶ高架橋である。工事延長は全長 4,750m、うち橋梁形式として4-6径間連結 PC スーパー T 桁橋が 4,438m、3径間 PC 箱桁橋が 312m である。下部工事としては橋脚数が115基である。

スーパー T 桁部は自走式の門型クレーンを用いて施工を行う(図-3.9)。橋脚の鉄筋や型枠は地上で地組みし、門型クレーンを用いて架設を行うことで、急速施工と安全性の向上を可能としている。主桁も下部工と同様に、地上で製作した桁を門型クレーンにより架設する。

PC 箱桁部は固定支保工と移動作業車によって施工を行う。柱頭部および側径間は楔式支保工を用いたオールステージング工法を行い、河川内は移動作業車によって張出し架設を行う。



図-3.9 門型クレーンによる桁架設



図-3.10 完成パース (チャー橋)

3.2.3 フッカイン橋 (J3 工区)

フッカイン橋は、ホーチミン市とハノイ市を結ぶ南北高速道路の一部で J1 工区と J2 工区の東側に位置する終点工区 (J3) である。

工事延長は 3,194m、うち本橋のメイン橋は 599m の 3 径間連続 PC 斜張橋である。また、西側と東側のアプローチ橋は PC 箱桁橋およびスーパー T 桁橋で構成される。

PC 斜張橋の最大スパンは 300m、主塔の高さは 65m であり、2 面吊りの構造形式である。また、断面は台形箱型形状であり、幅員は 30.35m、桁高は 2.8m である。

メイン橋である斜張橋と PC 箱桁橋は移動作業車による張出し架設を行い、スーパー T 桁部はエレクトリオンガーダーまたはクレーンによる架設を行う。斜張橋と箱桁橋のリブはプレキャスト化し、工期短縮を図る。スーパー T 桁部は 1 本約 70t のスーパー T 桁を 1 スパンに 9 本架設する。

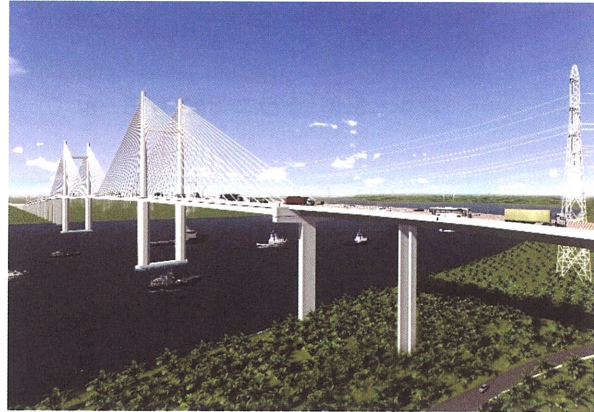


図-3.11 完成パース (フッカイン橋)

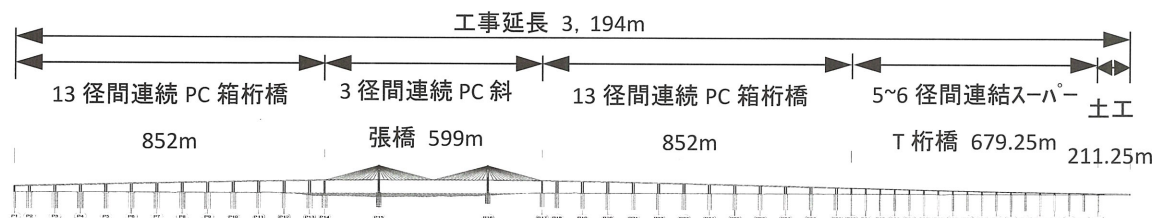


図-3.12 工事概要 (J3 工区)

3.3 スリランカの橋梁 (コロンボ外郭道路プロジェクト)

本プロジェクトは、スリランカ最大の都市であるコロンボの交通渋滞を緩和するため、市内と空港を結ぶコロンボ～カトナヤケ高速道路と南部高速道路を接続する外郭環状道路を建設するもので、日本の ODA (JICA 有償) 案件であり、発注者はスリランカ道路開発公社 (RDA) である。本プロジェクトは全長 29km で、本工事は 3 工区のうちの中央に位置する。本工事のうち橋梁工事は、本線橋 8 橋、料金所のあるランプ橋 8 橋、オーバーパス橋 5 橋であり、総延長は約 6.5km (本線橋：約 4.7km、ランプ橋：約 1.5km、オーバーパス橋：約 0.2km) である。橋梁形式はポストテンション I 桁橋で、I 桁の標準的な長さは 35m、桁高は 2m である。I 桁を単径間ずつ架設した後、桁間を現場打設して 3 径間連続構造を 1 ユニットとしたものを基本としている。最長の橋梁は、43 径間で橋長は約 1500m である。ほとんどが湿地帯を通過する高架橋であり、唯一、比較的大きな河川を横過する橋梁は HB-9 (KELANI RIVER CROSSING BRIDGE) で橋長は 383m である (写真-3.8)。桁架設は、現場の状況に合わせて 3 つの工法が採用され (写真-3.9、3.10、3.11)、① 2 台の 150t タンデムクレーンで相吊りする方法、② 移動エレクトリオンガーダー (TEG) による架設で桁を横から送り込む方法、③ TEG を用いて桁を後ろから送り込む方法である。使用された I 桁は、全橋梁で約 2,000 本である。



写真-3.8 ケラニ河橋 (HB-9)



写真-3.9 タンデムクレーンによる相吊り



写真-3.10 桁を横から送り込む架設



写真-3.11 桁を後ろから送り込む架設

3.4 ラオスのエクストラードーズド橋 (ラオス・セコン橋)

本プロジェクトは、ラオス人民民主共和国セコン県の国道16B号線がセコン川を横断する位置に、JICA 無償資金協力によりエクストラードーズド橋を架設するものである。発注者は公共事業運輸省道路局 (Department of Roads, Ministry of Public Works and Transport) である。国道16B号線は、タイ～ベトナム間を結ぶ国際幹線道路の一部であるが、セコン川で分断されているため渡河手段としてフェリーが用いられており、この未開通部分の解消が求められている。本橋は、橋長 300m で、支間割はエクストラードーズド橋区間 (80m + 110m + 65m) + PC 箱桁区間

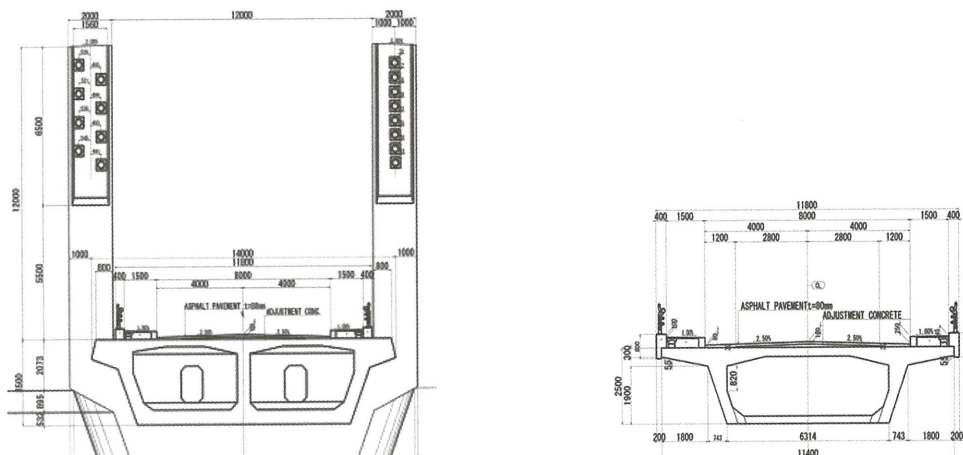


図-3.13 主桁断面図
(左：エクストラードーズド部、右：PC 箱桁部)

(45m)である。断面構造は、エクストラードード部は2室箱桁断面(総幅員:14.0m)、PC箱桁部は1室箱桁断面(総幅員:11.8m)で、桁高は柱頭部が3.5m、支間中央部が2.5mである(図-3.13)。架設方法は、エクストラードード部は移動作業車による片持ち張出し施工、PC箱桁部は総支保工施工が採用される予定であり、2017年春に竣工予定である(図-3.14)。



図-3.14 セコン橋全体パース図

4. fib シンポジウム2015報告⁴⁻¹⁾、4-2)

4.1 概要

2015年5月18日から20日までの3日間にわたり、*fib* (Fédération internationale du béton : 国際コンクリート連合) の2015年国際シンポジウムが、デンマークの首都コペンハーゲンの Tivoli Congress Center (写真-4.1) において開催された。本年のシンポジウムのテーマは、“Concrete-Innovation and Design” (写真-4.2) であった。

開会式では46カ国から合計388名が参加していると発表された。



写真-4.1 シンポジウム会場



写真-4.2 プログラム表紙

4.2 プログラム

今回のシンポジウムは、表－4.1に示すプログラムに沿って進められた。

初日の午前中に行われた開会式では、Harald S. Müller *fib* 会長と Kåre Dahl 組織委員長の開会スピーチに続いて、*fib* 名誉会員（今回は2名）と *fib* Medal of Merit（今回は3名）の授与式が行われた。*fib* Medal of Merit は、コンクリート構造および *fib* 組織活動に大きな貢献をされた個人に贈られる賞である。今回は、Bræstrup デンマーク工科大学教授の他、上田多門 北海道大学大学院教授と堺孝司 日本サステイナビリティ研究所代表に授与された。

表－4.1 シンポジウムプログラム

5 / 18	9 : 00 ~ 10 : 30	Opening Performance			
	11 : 00 ~ 12 : 30	Keynote Speakers			
	14 : 00 ~ 15 : 30	Young Engineer Award Session	Civil Works	New Material and Structures	Life Cycle Design
	16 : 00 ~ 17 : 30	Analysis and Design			
	19 : 00 ~	Welcoming Reception			
5 / 19	9 : 00 ~ 10 : 30	Analysis and Design	Modeling of Concrete	New Material and Structures	Life Cycle Design
	11 : 00 ~ 12 : 30				Conservation of Structures
	14 : 00 ~ 15 : 30		Analysis and Design		
	16 : 00 ~ 17 : 30				
	19 : 00 ~	Gala Diner			
5 / 20	9 : 00 ~ 10 : 30	Analysis and Design	Numerical Modeling	New Material and Structures	Conservation of Structures
	11 : 00 ~ 12 : 30			Safety and Reliability	Innovation in Buildings
	14 : 00 ~ 15 : 30			Analysis and Design	
	16 : 00 ~ 17 : 30	Closing Lecture and Closing of Symposium			

4.3 基調講演および一般講演

今回の基調講演は、表－4.2に示すテーマの講演が行われた。

表－4.2 基調講演テーマ

Topics	Title / Speaker
Civil Works	The Development of the Concrete Requirements Fehmarnbelt Fixed Link
	Ulf Jönsson (Construction Manager at Femern A/S)
New Material and Structures	Digital Fabrication of a Full-Scale Sculptural Concrete Structure
	Thomas Juul Anderson (Danish Technological Institute)
Life Cycle Design	The Role of Limit State Selection in The Design and Management of Sustainable Reinforced Concrete Infrastructure
	Micheal D. Lepech (Stanford University)

今回の一般講演は、プログラムにも示されたように9つのトピックスに関してさらにテーマに沿って各セッションに分けられ、合計191の発表が4会場に分かれて行われた（表－4.3）。日本からの発表は18件と約1割を占めていた。

表-4.3 一般講演

Topics	Session	講演数	日本分
Analysis and Design	Shear	54	2
	Columns and Elements		
	Fiber Reinforced Concrete		
	Mechanics		
	Special Loadings and Conditions		
	Crack and SLS		
Civil Works		13	3
New Material and Structures	Structures	40	3
	Structures and UHPC		
	Materials		
	Material Properties		
Life Cycle Design	LCA, LCC and Service Life	14	2
Modeling of Concrete	Mechanics Cracking and Transport	16	-
Conservation of Structures	Asset Management	2	7
	Asset Management and Diagnosis		
	Repair		
	Repair and Strengthening		
Numerical Modeling		17	-
Safety and Reliability		6	1
Innovation in Buildings		9	-
合 計		191	18

また、一般講演の合間にはポスターセッションが実施され、全20件のプレゼンテーションが行われた。このうち日本からの発表は3件であった。

参考文献

- 1-1) 睦好宏史、Ha Minh：日本-ベトナムのPC橋に関するワークショップ、プレストレストコンクリート、Vol.50、No.1、pp.66-70、2008
- 1-2) 睦好宏史、齋藤公生：第3回日本-ベトナムのPC橋に関するワークショップ、プレストレストコンクリート、Vol.54、No.1、pp.62-64、2012
- 1-3) 齋藤公生：第4回日越ワークショップとベトナムの橋梁視察、プレストレストコンクリート、Vol.56、No.1、pp.68-71、2014
- 2-1) fib ホームページ. <http://www.fib-international.org/>
- 2-2) The Highways Agency: Design Manual for Roads and Bridges Volume 3 Section 2 Part 5 BD 54/15 *Management*
- 4-1) 二羽、下村、鴨谷、片：fib シンポジウム2015とデンマーク・フランスにおける橋梁視察報告、プレストレストコンクリート Vol.57、No.5、Sep. 2015、pp.57-61
- 4-2) fib-news Copenhagen 2015, Structural Concrete 16 (2015), No.3, pp.438-440

執筆者メンバー表

氏 名	所 属	備 考
睦好 宏史	埼玉大学大学院	国際対応小委員会委員長
伊藤 均	八千代エンジニアリング(株)	国際対応小委員会委員
木戸 俊朗	住友電工スチールワイヤー(株)	国際対応小委員会委員
平 喜彦	三井住友建設(株)	国際対応小委員会委員
堤 忠彦	(株)富士ピー・エス	国際対応小委員会委員
中井 聖棋	(株)ピーエス三菱	国際対応小委員会委員
二井谷教治	オリエンタル白石(株)	国際対応小委員会委員
細谷 学	大成建設(株)	国際対応小委員会委員
牧田 通	中日本高速道路(株)	国際対応小委員会委員
山崎 啓治	鹿島建設(株)	国際対応小委員会委員

資料

－ 資 料 －

プレストレストコンクリート技術講習会年次テーマ

- (第1回) プレストレストコンクリート構造物の設計法と現況
昭和46年11月
- (第2回) プレストレストコンクリート橋の設計・施工上の最近の諸問題
昭和48年10月
- (第3回) プレストレストコンクリート構造物の設計実技
昭和49年11月
- (第4回) 最近の PC の動向について
昭和50年11月
- (第5回) プレストレストコンクリート構造技術最近の話題
昭和52年 1 月
- (第6回) プレストレストコンクリート構造物設計・施工の基本
昭和53年 1 月
- (第7回) プレストレストコンクリート世界の動向と新道路橋示方書による設計計算例
昭和54年 1 月
- (第8回) プレストレストコンクリート構造物の設計・施工
昭和55年 1 月
- (第9回) PC による構造物の補強と PC 構造物の設計・施工
昭和56年 1 月
- (第10回) プレストレストコンクリート技術の現況
昭和57年 1 月
- (第11回) プレストレストコンクリート構造物の設計・施工の現状
昭和58年 1 月
- (第12回) PC 構造物最近の設計例と未来像
昭和59年 1 月
- (第13回) プレストレストコンクリート構造物の設計・施工と最近の話題
昭和60年 1 月
- (第14回) 最近のプレストレストコンクリート構造物と30年の歩み
昭和61年 1 月
- (第15回) 21世紀に向けての PC 技術
昭和62年 2 月
- (第16回) 新しい PC 技術とその展望
昭和63年 2 月
- (第17回) 新しい分野での PC の活用
平成元年 2 月
- (第18回) 最近の PC 技術の動向と話題
平成 2 年 1 月
- (第19回) 新たな展開を示す PC 構造
平成 3 年 2 月
- (第20回) PC 技術の役割と発展
平成 4 年 2 月
- (第21回) PC 構造物の供用性と耐久性の向上
平成 5 年 2 月

- (第22回) 新しい PC 技術の実用化
平成 6 年 2 月
- (第23回) 最近の PC 技術の展開
平成 7 年 2 月
- (第24回) 高性能な PC 構造物をめざして
平成 8 年 2 月
- (第25回) 社会基盤と PC 構造物
平成 9 年 2 月
- (第26回) 新しい PC 技術の動向
平成10年 2 月
- (第27回) PC 構造物の耐震設計の現状
平成11年 2 月
- (第28回) PC 技術の新しい動向と国際化
平成12年 2 月
- (第29回) プレストレストコンクリートの歩みと21世紀の展望 *
平成13年 2 月
- (第30回) プレストレストコンクリートの新たな発展—21世紀— *
平成14年 2 月
- (第31回) プレストレストコンクリート技術の適用拡大と世界の動向 *
平成15年 2 月
- (第32回) プレストレストコンクリート構造物の新たな動向 *
平成16年 2 月
- (第33回) 今求められる PC 技術
平成17年 2 月
- (第34回) PC 技術の進歩とその応用
平成18年 2 月
- (第35回) PC の新たな展開 *
平成19年 2 月
- (第36回) PC 技術の新たな発展 *
平成20年 2 月
- (第37回) PC 技術・最近の動向
平成21年 2 月
- (第38回) PC 技術の新たな適用と展開
平成22年 2 月
- (第39回) PC 構造物の長寿命化技術と課題
平成23年 2 月
- (第40回) 東日本大震災と PC 構造物 *
平成24年 2 月
- (第41回) 防災・減災・強靱化に対する PC 構造物の取組み *
平成25年 6 月
- (第42回) インフラのストックマネジメント 将来像と今やるべきこと *
平成26年 6 月
- (第43回) PC 構造物の戦略的メンテナンスに向けて *
平成27年 6 月
- (第44回) 生産性向上へむけた PC 技術の展開
平成28年 6 月

*印はテキスト在庫あり

平成28年 5 月27日 印 刷
平成28年 5 月30日 発 行 **生産性向上へむけた PC 技術の展開**

定価6,000円
(送料別途300円)

発 行 者 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会 専務理事 西垣義彦

印 刷 所 レタープレス株式会社 広島市安佐北区上深川町809番地の5

発 行 所 **公益社団法人プレストレストコンクリート工学会**

TEL. 東京 (03) 3260-2521
FAX. 東京 (03) 3235-3370

〒162-0821
東京都新宿区津久戸町4番6号
第三都ビル
