

プレストレストコンクリートの
新たな発展 — 21世紀 —
— 第30回PC技術講習会 —

平成14年2月

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会

目 次

21世紀に求められるプレストレストコンクリート技術	1
---------------------------------	---

日本大学教授・本協会会長	山 崎 淳
京都大学大学院教授・本協会副会長	渡 邊 史 夫
大阪工業大学教授・本協会理事	小 林 和 夫

プレストレストコンクリート構造の形と美 — 建 築 —	39
-----------------------------------	----

京都大学大学院教授・本協会副会長	渡 邊 史 夫
大阪大学大学院教授・本協会理事	大 野 義 照
(株)安井建築設計事務所	森 高 英 夫
(株)日建設計	陶 器 浩 一
(株)構造空間設計室	長谷川 一 美

新しい複合橋梁への挑戦	71
-------------------	----

JHにおける鋼とコンクリートの複合構造橋梁の採用事例 —

日本道路公団 技術部 構造技術課課長代理	溝 江 実
〃 〃 構造技術課	青 木 圭 一

橋梁への性能照査型設計法導入	97
----------------------	----

国土交通省国土技術政策総合研究所 道路研究部 橋梁研究室室長	中 谷 昌 一
--------------------------------	---------

プレストレストコンクリート構造物の維持管理と診断技術	111
----------------------------------	-----

京都大学大学院教授	宮 川 豊 章
(株)ピー・エス	森 拓 也
ドービー建設工業(株)	濱 田 讓
オリエンタル建設(株)	石 川 善 信

21世紀に求められるプレストレストコンクリート技術

日本大学教授・本協会会長 山 崎 淳
京都大学大学院教授・本協会副会長 渡 邊 史 夫
大阪工業大学教授・本協会理事 小 林 和 夫

〔I〕 fib の動向および大阪コンGRESに向けて

—ベルリンのシンポジウムの意義—

2002 年の年初にあたり、プレストレストコンクリートの技術開発への従来の当協会の役割を想起し、国内・海外の情勢の推移を注視しつつ、活動が動的且つ相互的であるよう勤めることを確認する。会員の皆様の当協会活動への取り組みが一層便利で開かれたものであるよう努力する。今年は、*fib*（国際構造コンクリート連合）の初めての世界大会（コンGRES）が大阪で開催され、当協会にとって歴史を画する年になる。コンGRESへの会員の方々の参画は様々な方法で可能であり歓迎されるので、協会事務局にお問い合わせ頂きたく、またコンGRESの趣旨や準備状況については協会誌プレストレストコンクリート第一号から連載で掲載されるのでご一読頂きたい。

例年の年次シンポジウムは、*fib* コンGRES第一回世界大会で代替される。コンGRESの公用語が英語であることが、通常の年次シンポジウムで発表される方々にとって不都合にならないように、また、英語を日頃使われない方も、この機会に慣れ親しんで頂くことをお勧めしており、質疑応答においては、実行委員会で応援の方策を講じている。それでも、昨年の年次シンポジウム発表者の 176 名を数倍規模で上回る国内 500 件、海外 300 件、合計 800 件を超える発表申し込みがあるため、通常の年次シンポジウムで得られる参加の方々の緊密な交流と継続的な発展の流れが途切れないかの懸念が否めない。従って、コンGRESへの参加や主催者としての準備段階や運営への参画を通じて、通常の年には得られないような人々との邂逅によって新たな視点が開けるような対処を心懸けたい。

fib コンGRESの趣旨が如何なるものなのかについて、最新の *fib* シンポジウムであった昨年(2001 年)開催された「環境とコンクリート」に関するベルリン・シンポジウムを回顧点描し、記念すべき最初の世界大会が日本に委ねられたのは何故か考察したい。プレストレストコンクリートの建設実績における国力と傑出した個人の業績に対する外国の評価が主原因であることは想像に難くないが、更に超えて、新たな世紀の幕開けの舞台に、世界の

人々が日本を選んだ期待は何なのか？ 昨今世界は予測もしない出来事が起き変転きわまりない。中でもヨーロッパの統一と巨大国の商業主義の行き過ぎによる軋みに対して人間らしい営みを取り戻そうとする努力は、ヨーロッパでもアメリカでも形を見せ始めている。西欧の社会の流れの中で西欧の人々が日本を選んだ事に対し、主催国としては、習慣としての秩序の整った基礎の上に立って、歴史の長い人々の生活から醸される自然な空気のなかで世界の人々がくつろいで交流できるようにしたいと思う。

ベルリン・シンポジウムのテーマは、「環境とコンクリート」であったが、ベルリンはこのテーマを考えるためにまたとない好適地であったと今改めて思い出される。シンポジウムで発表された技術課題のいくつかを、下記(1)～(7)に列記している。

(1) 市の中心の大商業区、ポツダム広場が僅か 5 年の工期で現出した。ベルリンは地下水位がマイナス 1～1.5m と極めて高く、飲料水にも用いられている。木々が極めてよく繁茂する主原因でもある。ブラウンシュヴァイク大学の Falkner 教授は、工事の環境課題として、高層建築の基礎ピットの構築において、通常のポンプアップによる排水を行わず、地下水位を原位置のまま維持した工事を報告した。底版スラブは 15,000 平方メートルにも及ぶ範囲で、20m の水頭による揚力に耐える設計であり、繊維補強コンクリートで強化された。止水壁の継ぎ目の漏水によりピット全域が水没してしまった状態の絵葉書があった。環境の第二の留意で成功した点は、ロジスティックの問題の解決に、市中で工事用道路に使用する部分を一般道と区分して確保したことが挙げられている。

(2) 交通・建築・住宅省の Guenther, Ornth 氏らは、持続可能 (sustainable) な設計のガイドラインについて報告した。本文は簡潔な記述により、計画・設計・施工の手順が示されており、また種々の評価 (アセスメント) の様式が付属文書として添付されている。ガイドラインの前書きに、大臣の Bodewig 氏の言葉として、「最も重要なことは、設計と施工の初期においてすべての関係者が協力すること」、また、建設プロジェクトにおいてホリスティック (holistic) な取り組みを実施する為に役立つこと」を目指したとある。

(3) ドイツ・セメント協会の Schneider 氏は、「持続可能性に関する建設材料の環境の側面」について論じた。ライフサイクルの為に統合化された視点である「いわゆる統合製造物政策 (Integrated Product Policy, IPP)」には、建設材料への適用には未だ不明点があること、規制を徒に増やさないこと、むしろ、情報とコミュニケーションが不可欠であること、ただし凝縮された (condensed) 情報である環境ラベル (echo-label) は建設材料に関しては限界があり、詳細な環境宣言 (declaration) の経験の蓄積が必要であると述べている。それらの前提で、コンクリートと外界の物質移動、コンクリート中の追跡物質 (trace element)、セメント材料からの有機物質の離脱潜在性、飲料水と接触するコンクリート、IPP (前出)、ライフサイクル評価、環境宣言、について論じた。

なお、セメントにより結合された物質からの無機・有機物質の離脱については、同氏と Spanka 氏の共著による詳細な報告もなされた（概要は割愛させて頂く）。

(4) デンマーク、コヴィ社 (COWI) の Rostam 氏は、「性能に基づいたコンクリートの設計：強度、耐久性、及び持続可能性の統合化への挑戦」と題する報告を行った。氏は、*fib* の耐久性（供用性）に関するコミッション（技術委員会）の委員長としての活躍がよく知られている。コンクリート中の物質移動の科学に基づき、最新の建設材料の使用方法に至るまで、科学的で且つ実用的な設計法がかなり進んでいる。Rostam 氏を始めヨーロッパで活発な耐久性設計法の開発は、CEB（*fib* のもうひとつの前身、ヨーロッパコンクリート委員会）のシンポジウムで、当時東大で岡村・国島・二羽氏らによって考案された耐久性設計指針を、二羽淳一郎教授が、発表したことが衝撃的刺激となって始まった。この主題の設計の科学根拠であるコンクリート中の物質移動の研究では、前川・石田の両氏の土木学会の受賞論文がある。*fib* では、昨年からは若手研究者および実務技術者の表彰制度が創始され、研究部門で石田哲也氏（東大）が、また実務技術分野では、オランダの建設会社の女性の技術者が受賞した。後者のテーマは連続した壁状構造物にひび割れを生じさせないための特殊養生型枠の開発を含めた建設方法であった。Rostam 氏は、早速石田氏に委員会に参画するよう要請していた。

(5) 北海油田リグ等の海洋構造物の耐久性予測についてノルウェイの Helland 氏が、コンクリートへの塩分浸透について拡散に関する Ficks の第二法則を Collepardi 氏が 1970 年代に用いた式により、現存する構造物の年毎、部位毎の鉄筋への塩分到達予測を数値で示した。また、同じくノルウェイの Olsen 氏は、油井が採掘し尽くされた場合の施設の廃棄またはリサイクルの国際協定を報じた。鋼製は撤去、コンクリート製は猶予があるなどの問題点や、上部構造を破砕する特殊作業船が紹介された。北海の着底式第一号エコフィスク（ドリルス社設計、1973 年）、インドネシア海域の浮体式第一号アルジュナ（アメリカ・タコマ市の ABAM 社設計、1974 年）から既に 30 年になろうとしている。

(6) 自己充填コンクリートは、オランダやチェコでも工事に有効に使用されている。チェコの Vitek 氏は、現場施工でも、プレキャスト工場でも、仕上がり肌の状況、充填状況のほか、騒音、振動の低減による環境負荷の低減、また作業者の人体への負荷低減を報じた。自己充填コンクリートは、岡村甫氏（当時東大）の発想と開発になるが、十数年前の大学研究としての発想が産業上また環境上かつ人体健康上の問題の解決に国境を越えて活用されている。

(7) 環境へのコンクリート構造の関わりとしての景観に関しては、Schlaich 教授が構造設計の喜びと題して基調講演を行い、またコンクリート表面の仕上りをよくするための材料（カオリンなど）や施工方法、評価方法の報告もなされた。シュライヒ教授はシュツツ

ガルト大学の定年を迎えられ、後任は同じ大学ながらシュライヒ教授の前任のレオンハルト教授のマッシブな建設の講座からではなく、フライオットー研究室の吊屋根構造やシェルなど軽量建築構造の講座の Sobek 教授が就任したと伝えられる。ポツダム広場、ソニープラザの大屋根は吊屋根構造の傑作とされている。

ベルリンは、環境と未来を語り合う適地であったと回想される。市の中心に緑のラウンジと呼ぶ森があり、その中に運河に面して今回のシンポジウムの会場、世界文化の家、が在る。森の中心を「菩提樹の木の下通り」（ウンターデンリンデンシュトラッセ）が通じており、その西端はベルリンシテイマラソンの出発点である。東に 2km に勝利記念塔の遥か頂点に天使像があり、更に 2km 東にブランデンブルク門、北に国会議事堂、南にポツダム広場が指呼の間にある。

国会議事堂は、荘重巨大な石造建築にガラスのドームがつけられ、その内側につけられた螺旋階段は常時見学者で賑わっている。その直下のガラスの床を通して会議場が見通せる。ポツダム広場は、ベルリンフィルハーモニーのコンサートホールにもほど近く、ソニープラザのガラスの天蓋の下のカフェに昼は陽光が降り注ぎ夜は外へ光が放射される。

ベルリンシテイマラソンは、走路と観客を隔てる仕切りはなく、走者の先導者の自転車が走路を空けるよう通過し、シードされた女性の走者は数名の男性のガードランナーに守られて走る。一般参加者が大部分で、総勢 30,000 人が同時に走るレースであったが、そのカオスのような群衆の走者の流れの中でも、高橋尚子選手の世界最高記録が生まれた（一週間後に更新されはしたが）。このような大群衆の熱狂による混乱をきたし兼ねない中で、マラソンという人間の体力技術の極限を試す競技において、規制といえるものが殆どない極めて緩やかな運営のなかで、最高水準の記録を達成せしめたことは驚きに堪えない。

ドイツの国民性は、開放的で、透明性を基本にしながら、物事の最高水準を現出させる天才があると思うしかない。彼らが事を行う際のおおらかな広さ、深さは、大阪コンGRESの運営に際しても範としたい。

旧市街に、フランス統治時代のジャンダルム広場の壮麗な佇まいが東南部にあり、その東にニコライ地区という東欧的雰囲気の一画がある。森鴎外の寄宿先は、ユダヤ地区と呼ばれ、今は若者達の活気があるの居住区から程近いところにフンボルト大学により保存されている。交通に関しては、広い道路が、車道、自転車道、歩道が、並木で隔てられてゆとりがあり、地下鉄 U バーンや、高架鉄道 S バーンや、国鉄が絶え間なく深夜まで運行しており極めて便がよい。共通乗車券を初乗り時に刻印しておけば、ドイツやオーストリアの通例で改札口はないので、人の流れは極めてスムーズである。

1930 年代に世界最大、最先端の文化文明の中心として完成された都市の遺構が現在の市民の生活の便を支えている。あまりに巨大な構築のため、旧式であったり手入れが行き届かない部分もあるが、磨けば再び世界でも最も美しく威厳もある都市となるであろうと一旅人にも容易に想像される。

都市というものが、土木技術、環境技術、自然の恵み、歴史、文化、そして今を生きる人々を映すものであることをこれほど鮮やかに示すことを体感させられたことは、訪れたことのある西欧のすべての主要都市での経験のなかでも初めてのことであった。建設の理想の追求をエトスとする *fib* であればこそ、またその初めてのコンGRESであるがゆえに、開催都市が自然と人知が作り出す居住の理想に近いものでありたいことが、ベルリンに来て初めて痛切に感じられた。わが国の文化と歴史の根幹である、奈良、京都、神戸の中心にある大阪が開催地に選ばれていることが改めて最善の決定であったと喜ばしく得心された。

ベルリンの表通りの重厚壮大なファサードの歩道に面し、目立たない出入り口がある。入ると中庭があり、建物の 1 階が店舗やカフェになっており、更に次の入り口、次の中庭とつながっている。ヘーフェというヒューマンスケールの商業空間においては、落ち着いた生活居住空間から社会活動空間へと繋がっている。

fib のシンポジウムは、第一回が 1999 年プラハ、2000 年アメリカのオーランド、2001 年ベルリンと続いた。テーマは、それぞれ、「人々の間に架ける橋」、「高性能コンクリート（副題：次世代へ歩み寄ろう）」そして「環境とコンクリート」であった。一貫して感銘を受けることは、人々の関係、世代間の関係、そして人を包む周辺が取り上げられたが、それがヨーロッパとアメリカの人々の身近な感覚の反映なのならば、人と状況の相互作用が共通して軸にされていることに驚かされる。次世代に関しては、PhD の学生の教育プログラムも発足しており、学位論文の中間発表と位置付けられるシンポジウムが一昨年ウイーンで開催されている。*fib* の活動は、建設事業の発展を目的とするが、その為の手段の重要点として、人と人の繋がりが中心に据えられてきた。ベルリンはその高い到達点であった。ベルリンでは、43 年も前に既に、FIP のコンGRESが開催されている。

時宜に適したシンポジウムを主催された *fib* ドイツ代表のミュンヘン工科大学 Schiessl 教授、ドイツ土木学会 Litzner 博士、また実行委員の方々（Meyer 氏、Wiens 氏の僅か 2 名で切り盛り！）、他関係の産官学機関ならびにドイツ、ベルリンの各位に衷心より敬意と感謝を申し上げる。建設の理想への思索と希求を深めてくれたシンポジウムの余韻を友邦国日本のコンGRESで一層確かなものに発展させたい。

追記：シンポジウム論文集の題目を添付している。フルペーパーは CD-ROM で、2 ページの圧縮論文が本の形式であった。奇しくも、大阪コンGRESで予定の様式と同じである。



写真-1 ポツダム広場
右下がソニープラザ



写真-2 ポツダム広場基礎工事
ピット水没

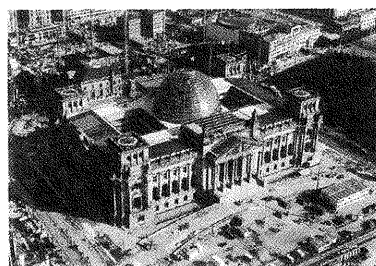


写真-4 国会議事堂と
ガラスドーム

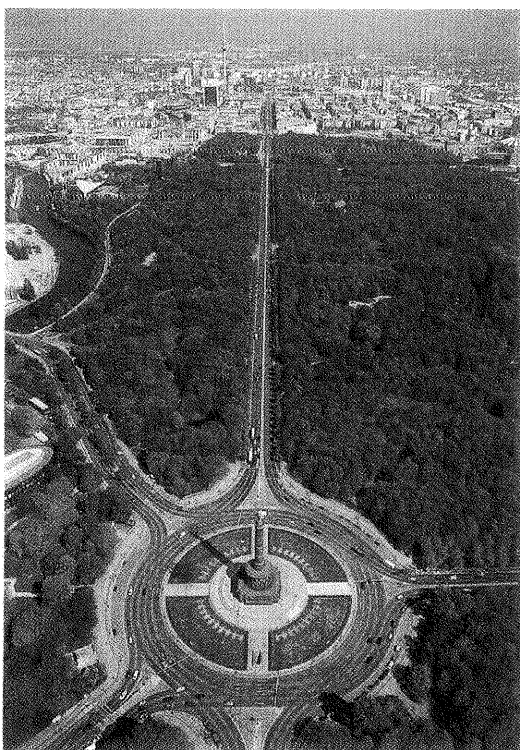


写真-3 緑のラウンジ、
ウンターデンリンデンシュトラッセ、
勝利の天使像

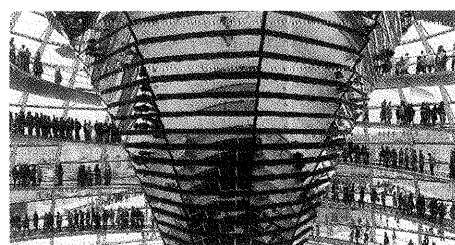


写真-5 議事堂ガラスドーム、
見学者

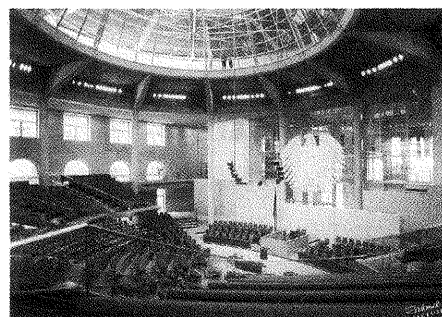


写真-6 議事堂内部

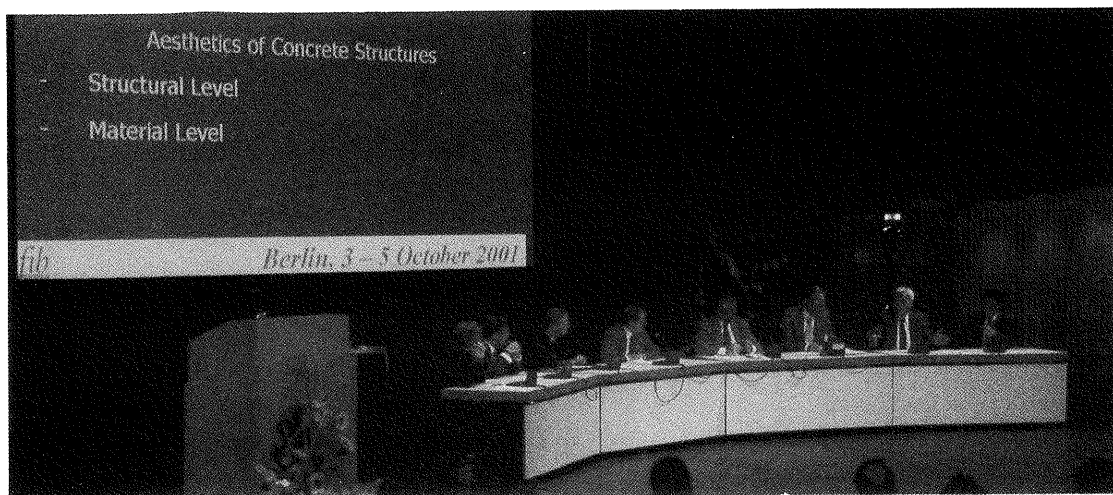


写真-7 fib ベルリン シンポジウム 環境とコンクリート



写真-8 ジャンダルム広場



写真-9 ニコライ地区

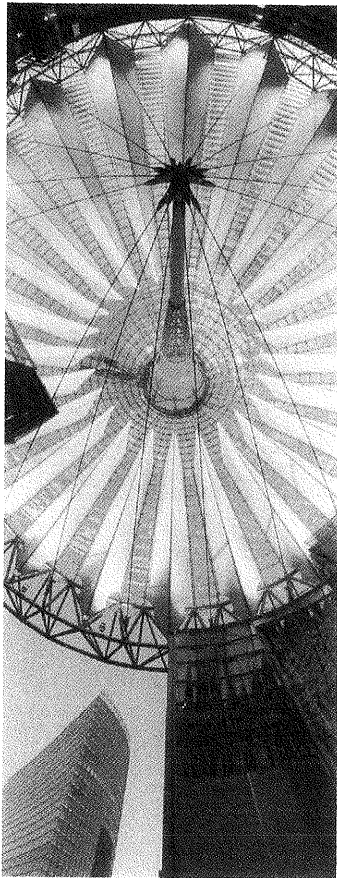


写真-10 ソニープラザ
吊屋根構造



写真-11 ヘーフェ Hackescher Markt



写真-12 森鷗外旧居

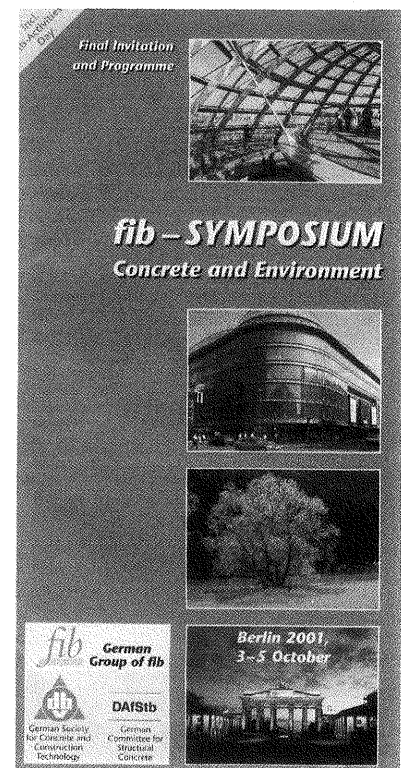
THANK YOU BERLIN

2001



For paving road of
SUSTAINABILITY

And for many
Fond memories



fib-Symposium

Concrete and Environment

Berlin, Germany
3-5 October 2001

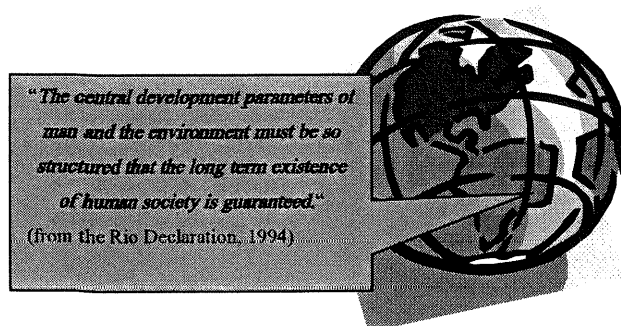
Haus der Kulturen der Welt
(House of World Cultures)
John-Foster-Dulles-Allee 10
10557 Berlin
Germany

organized by:

German Group of fib

DBV - Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.

DAfStb - Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.



Contents	No.
Foreword – President’s Message	FW1
Foreword – Organizing Committee of the fib-Symposium	FW2
Keynotes A1, A2, B1 and B2	KN1
<i>Session A1: Aesthetical Aspects of Concrete Structures</i>	<i>A1</i>
<i>Session B1: Sustainability and Life Cycle Analysis (I)</i>	<i>B1</i>
<i>Session A2: Protective Structures</i>	<i>A2</i>
<i>Session B2: Sustainability and Life Cycle Analysis (II)</i>	<i>B2</i>
Keynotes A3, A4, A5, B3, B4 and B5	KNII
<i>Session A3 Strengthening, Prolongation of Service Life, Service Life Design</i>	<i>A3</i>
<i>Session B3: Material Aspects of Concrete and Environment</i>	<i>B3</i>
<i>Session A4: Prediction and Durability (I)</i>	<i>A4</i>
<i>Session B4: Recycling</i>	<i>B4</i>
<i>Session A5: Prediction and Durability (II)</i>	<i>A5</i>
<i>Session B5: Release from Cement bound Materials</i>	<i>B5</i>
Keynotes A6 and B6	KNIII
<i>Session A6: Energy Conservation, Environmental Aspects in Operation, Aspects of Health and Working Environment</i>	<i>A6</i>
<i>Session B6: Practical Construction, Demolition, Demountable Structures</i>	<i>B6</i>

Contents	No.
Keynotes A1, A2, B1 and B2	
Approaches to Sustainability in Building Construction	Sjöström KN1
Establishing Performance Criteria for Concrete Protective Structures	van Breugel KN2
Session A1: Aesthetical Aspects of Concrete Structures	
Bridge Design and Urban Development	Sigrist, Leuthard A1-1
Bright High-Performance Concrete by Using Metakaolin	Dehn, König A1-2
Execution and Assessment of Architectural Concrete Structures - Design Requirements and Limits of Technology	Meyer A1-3
Realisation of Form and Function of a Unique Structure with Innovative Structural Concepts and Design	Kanappan, Ramakrishna, Ranganath A1-4
Session B1: Sustainability and Life Cycle Analysis (I)	
Guide for Sustainable Design	Günther, Ornth B1-1
Sustainable Pre-Fabrication	Punkki B1-2
Comprehensive Approach to LCA of Construction Materials and Buildings	Reinhardt, Kümmel B1-3
Environmentally based Optimisation of Concrete Floor Slabs	Hajek B1-4
The Environmental Effects of Cement and Concrete within the Concept of Sustainable Development	Hauer B1-5
Durability Design and Life Cycle Analysis in Reinforced Concrete Engineering	Krätzig, Petryna, Pölling, Stangenberg B1-6
Session A2: Protective Structures	
Application of Concrete and Reinforced Concrete on Construction and Transformation “Shelter Object” of the Destroyed Chernobyl NPP Fourth Block	Kryvosheyev, Nemohynov, Bambura A2-1
Performance of Concrete Based Building Materials Against Blast and Impact	Gebbeken, Greulich, Pietzsch A2-2
Design Assistance for Secondary Barriers Produced of Uncoated Concrete Structures	Brauer, Wiens A2-3
Probability of failure and risk using a concrete layer as the second barrier to water-endangering fluids	Curbach, Proske A2-4
Session B2: Sustainability and Life Cycle Analysis (II)	
Comparison of the Ecological Properties of Concrete, Steel and Timber	Lünser B2-1
Durability of Resource Saving "Green" Types of Concrete	Tange Jepsen, Mathiesen, Munch-Petersen, Bager B2-2
Environment-Friendly “Green” Concrete Structures	Edvardsen, Tollose B2-3
Sustainable Facts for Cement and Cement Bounded Building Products	Huber B2-4
Ecological Sound Cement Manufacture in Switzerland	Grieser, Jacobs, Hunkeler B2-5

Contents	No.
Keynotes A3, A4, A5, B3, B4 and B5	
Environmental Aspects of Construction Materials with Respect to Sustainability	Schneider KN3
Performance Based Design of Future Concrete Structures: The Challenge of Integrating Strength, Durability and Sustainability	Rostam KN4
Session A3: Strengthening, Prolongation of Service Life, Service Life Design	
Service Life of Concrete Offshore Structures	Helland A3-1
Service Life Prolongation Concepts: How to Watch and Listen Concrete Structures	Stubler, Youdan A3-2
Strengthening of Concrete Members with Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement	Matthys, Taerwe A3-3
Method for Increasing Shear Capacity of Old Reinforced Concrete Girders	Kollegger, Martinz A3-4
Opinions on Static Renewal of Precast Panel Concrete Buildings	Štěpánek A3-5
Structural Monitoring of a Pre-Stressed Concrete Girder Bridge and a Quay Wall with Bragg Grating Sensors	Moerman, Taerwe, Coppens, De Waele, Degrieck, Callens, Baets A3-6
Session B3: Material Aspects of Concrete and Environment	
Use of Granulated Blast Furnace Slag – A Contribution to Sustainable Development in Construction Industry	Härdtl B3-1
Fly Ash Obtained from Co-Combustion - State of the Art in Europe	van den Berg, Vissers, Hohberg, Wiens B3-2
Simulation of the Corrosion Behaviour of Concrete Elements Reinforced with High Performance Steel	Brühwiler, Denarié, Conciatori B3-3
Behavior of Prestressed Concrete Beams with Artificial Lightweight Aggregate Made from Coal Ash	Watanabe, Suzuki, Sakurada, Murai B3-4
Session A4: Prediction and Durability (I)	
Prediction of Chloride Ingress into Concrete with Additions	Wiens, Schiessl A4-1
Probabilistic Service Life Design: Application of the DURACRETE-Approach to Existing Structures	Gehlen, Schiessl, Pabsch A4-2
A study on the applicability of ECC to highway bridge slabs	Ichinomiya, Suda, Kanda, Masumoto A4-3
Effects of Curing Conditions on Strength and Permeability Properties of Concretes with Various Fly Ash Contents	Atac, C. Tasdemir, Sonmez, A. Tasdemir A4-4

Contents	No.
Session B4: Recycling	
Design of Concrete Structures Made from Recycled Aggregates – A Global Recommendation following the DIN 1045-1	Zilch, Roos B4-1
Structural RC Members from Recycled Aggregate Concrete	Ajdukiewicz, Hulimka, Kliszczewicz B4-2
Technical, Environmental and Economic Factors Affecting Present and Future Volumes of Recycled Construction Materials in Germany	Schmidt B4-3
Recycling of Offshore Concrete Structures	Olsen B4-4
Concrete Design toward Complete Recycling	Tamura, Noguchi, Tomosawa, Kitsutaka B4-5
Session A5: Prediction and Durability (II)	
Durability of High-Performance Concrete and Life-Time Prediction	Setzer, Palecki A5-1
Simulation of Corrosion in Sewer Systems by Laboratory Testing	Monteny, De Belie, Vincke, Beeldens, Taerwe A5-2
HPC – American Practice, European Perspective	Bodi, Bruce A5-3
Computational Durability Analysis of Concrete Structures Considering Damage, Moisture Transport and Chemical Dissolution Process	Meschke, Bangert, Grasberger, Kuhl A5-4
Session B5: Release from Cement bound Materials	
Release of Inorganic and Organic Substances from Cement Bound Materials	Spanka, Schneider B5-1
The Influence of The Characteristics of Cement Hydration on Leaching Calcium from Hardened Mortar	Hisada, Oguchi, Ooi, Nagataki B5-2
Environmental Compatibility of Fresh Concrete in Contact with Soil and Ground Water	Brameshuber, Hohberg, Uebachs B5-3
Modelling of the Leaching Behaviour of Concrete in Contact with Ground Water	Hohberg B5-4
Leaching of a Concrete Superplasticizer from Fresh Cement in Contact with Groundwater	Ruckstuhl, Suter, Kohler, Giger B5-5

Contents	No.
----------	-----

Keynotes A6 and B6

Environment and Energy Behaviour of our Buildings	<i>Gertis</i>	n.a.
Global Environmental Issue in Construction Industry	<i>Fujimori</i>	KN5
Research & Development and Practice in Japanese Construction Industry		

Session A6: Energy Conservation, Environmental Aspects in Operation, Aspects of Health and Working Environment

Adiabatic Curing Cuts Carbon Dioxide and Saves Energy	<i>Imai, Yoshioka, Wu, Takahashi</i>	A6-1
Seasonal Storage of Solar Energy in Hot-Water Tanks made out of High Performance Concrete	<i>Reineck, Lichtenfels, Greiner</i>	A6-2
Health- and Environment-Related Aspects of the Use of Cement Bound Construction Products	<i>Thielen</i>	A6-3
Improvement of Working Environment in Concrete Construction by the use of Self-Compacting Concrete	<i>Bartos, Cechura</i>	A6-4
Self-compacting Concrete – Examples of Application	<i>Vitek</i>	A6-5
Practical Experiences with the Application of Self-Compacting Concrete in Germany	<i>Brameshuber, Uebachs</i>	A6-6
Application of Photocatalysis to Develop Pollutant Degrading and Self-cleaning Building Materials	<i>Benedix, Dehn, Quaas</i>	A6-7

Session B6: Practical Construction, Demolition, Demountable Structures

Experimental Study on Seismic Performances of Precast Segmental PC Pier	<i>Hishiki, Ichinomiya, Arai</i>	B6-1
Potsdamer Platz Berlin – Environmental Aspects During Construction	<i>Falkner</i>	B6-2
Removal of Gypsum Plaster by the Use of Microwaves	<i>Gerlach, Eibl, Stempniewski</i>	B6-3
A Complete Testing Including Earthquake Behaviour of a Demountable Concrete Structure	<i>Popaescu, Praun, Schiau</i>	B6-4
Condition Assessment of Concrete Bridges During Demolition	<i>Vogel</i>	B6-5
Design for Disassembly – Approach towards Sustainable Building	<i>Graubner, Reiche</i>	B6-6

Foreword – President’s Message

“Concrete and the environment” is on its way to become one of the major topics in practical design and construction. During the last decade’s research on concrete and concrete structures has mainly focused on aspects like safety and serviceability. The consciousness of the significance of durability and sustainability is still relatively young. However, it is now already a common feeling that those aspects must play a crucial role in the near future. This new way of thinking will have important consequences for the direction in which design strategies will develop. The same holds true for the process of execution and the developments of contractual regulations, code requirements and research.

fib is an international organization with National Groups in 39 countries and members or participants in its work from about 60 countries. Its main goal is to stimulate and coordinate future-oriented research and to give direction to the development of new building codes. In the past CEB and FIP, the organizations, which preceded *fib*, published “Model Codes” for Structural Concrete in 1963, 1978 and 1990. Those Model Codes were intended to be a source of information for the development of national and international codes. The Model Code 1990 has been an important basis for the new Eurocode, which is bound to be the code used throughout Europe, as such stimulating and strengthening the international cooperation.

The interest of CEB and FIP in durability in the past was mainly directed to durability in the sense of expected lifetime. The way in which deterioration processes endanger the life of a structure was well described in CEB Bulletin 183 “Durable Concrete Structures”. This Bulletin was the onset to the development of the new approach “Design for Durability”. The conceptual work leading to this new approach was mainly done within the scope of the European research program “Duracrete”. The design strategy developed enables predicting the forthcoming need for repair, to select the most appropriate maintenance strategy and to allow cost optimization calculations for concrete structures with due regard to their lifetime. It furthermore gives impetus to the introduction of defined performance concrete’s, tailor-made for the governing environmental conditions. *fib* is now starting its work for a new Model Code for Concrete Structures. Design for durability will be a major point of attention. Studies in this area are now performed in *fib*-Commission 5 under the chairmanship of Dr. Steen Rostam from Denmark.

However, in spite of its significance, “durability” as a thematic indication is still too narrow. In order to save our environment from unnecessary burdens now and in the future and to improve the quality of life, suitable strategies have to be developed. This covers a wide area, from the development of clean production methods to the generation of structural systems, which can be adapted to changing demands in time, methods for the optimum use of resources, and new concepts for concrete structures protecting the environment. Such subjects are studied in *fib*-Commission 3, under the chairmanship of Prof. Peter Schiessl from Germany. These relatively new areas are of utmost importance for a responsible use of concrete in the near future.

In the area of durability and sustainability considerable work is still necessary in order to develop new ideas and methods, and establish regulations. Therefore this symposium has been organized exactly at the right time. The papers in the proceedings cover various areas of importance, give a good idea of the state of the art and show perspectives to new ideas and developments. We are indebted to our German colleagues for their initiative to organize this symposium and the efforts they have done to make it a major event. We sincerely hope that this symposium will be a milestone in a very important new process of development.

Joost Walraven

President of fib

Foreword – Organizing Committee of the fib-Symposium

Environmental aspects or, in other words, sustainable development have become a major concern of our time. The general principle of sustainable development has been first formulated by the Brundtland Commission in 1987. Due to the adoption of the Agenda 21 in Rio de Janeiro by 179 Nations in June 1992, the course for sustainable development was set. As a result of that a gradual change in the fundamental social and economic values will take place. Sustainable development means the satisfaction of the present-day needs without risking that future generations will not have the chance to satisfy their needs.

National legislation has taken place in several countries following these principles, thereby strongly influencing technical rules. This development will have a major impact on all activities related to design and construction in the future.

Therefore, the fib-Symposium “Concrete and Environment” will deal with these aspects and highlight the following main subjects:

- Impact of concrete structures on man and environment,
- influence of environment on the service life of concrete structures,
- ability of concrete structures to protect man and environment against hazards.

The symposium with its highly relevant programme will offer an international forum for engineers active in practice or research, politicians, architects, consultants and contractors.

Peter Schiessl	Hans-Ulrich Litzner
Lars Meyer	Udo Wiens

Organizing Committee of the fib-Symposium

[Ⅱ] 建築に於けるプレキャスト、プレストレストコンクリート骨組み構造

1. まえがき

プレキャストコンクリート（以下 PCa）及びプレストレストコンクリート（以下 PC）部材を用いた耐震骨組みには、一体打ち同等型鉄筋コンクリート（以下 RC）PCa 構造（以下 PcaRC）、一体打ち PC 構造及び圧着を用いた PCa PC 構造等、種々の形態がある。これらに対する耐震設計の考え方は、各々の構造システムによって異なったものとなるが、要点は、接合部、部材及び部分骨組みの構造挙動と、それらが骨組み全体の構造挙動にどのように反映されるかである。地震横力と構造靱性の関係に基づいて、骨組みは高レベル靱性骨組み、中レベル靱性骨組み及び弾性骨組みの 3 種類に分類される。図 1 にバイリニア及びトリリニアにモデル化した構造物応答と実際の非線形応答が示されている。これらのモデルに基づいて構造靱性は定義される。バイリニアの場合の線形弾性部分と実応答の交点を与える係数 β は、0.7 程度にとられる。トリリニアモデルの場合には、エネルギーを等価にする手法、すなわち図 1 中の面積 A_1 と A_2 を等しくすることが一般的である。ここで、 P_c はひび割れの無い線形弾性限界を示す。

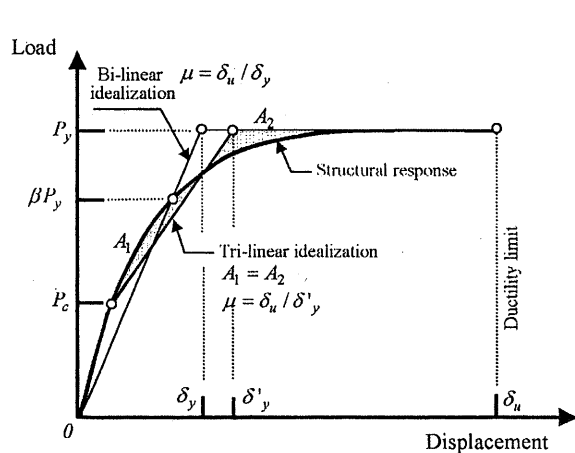


図 1 構造靱性の定義

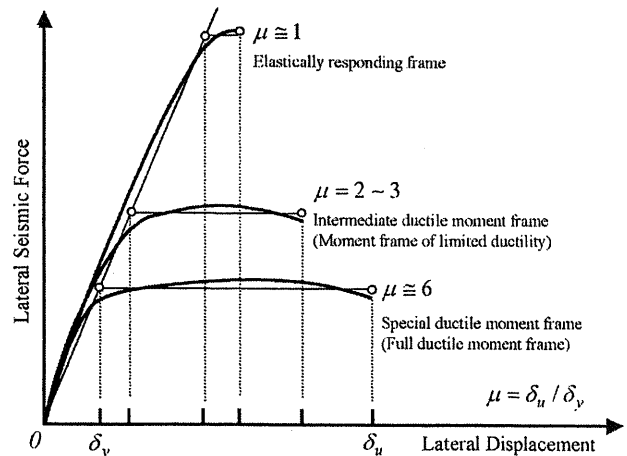


図 2 構造物の靱性に応じた分類

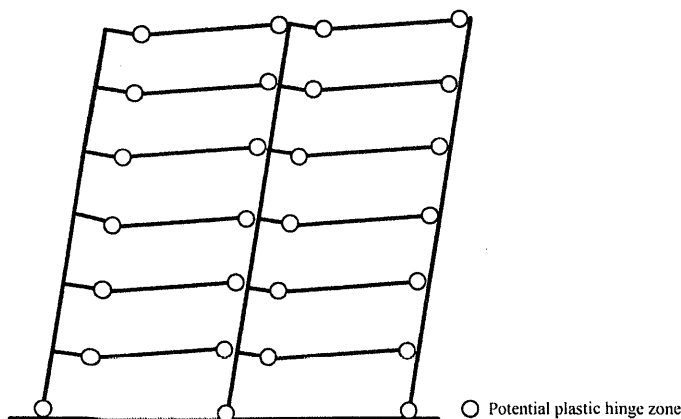


図 3 特別靱性架構に求められる崩壊形

静的設計地震荷重に対する設計では、水平強度と要求靱性は各国の基・規準類で、エネルギー一定則又は変位一定則に基づいて与えられている。図 2 に、先に述べた 3 種類の骨組みに対する水平荷重と変位の関係が示されている。高レベル靱性骨組みの構造靱性は最大で 6 程度であり、同時に、梁端降伏による全体崩壊形（図 3）が求められる。地震入力エネルギーは、骨組み全体に分布した梁端部潜在ヒンジの塑性回転によって消費される。中レベル靱性骨組みは、もう少し小さな構造靱性をもつものであり、弾性応答骨組みの構

造靱性は1程度である。

2. 一体打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート骨組み

一体打ちと同等の構造性能を目指した、PcaRC 骨組が数多く建設されてきており、それらの耐震設計は、通常によく整備された一体打ち RC 建物に対する基・規準が準用されている。設計に於いては、一体打ちと考えて曲げモーメント、せん断力及び軸力を計算し、その後部材分割と接合部位置決定を行うのが通常である。ここでは、部材力の分布、潜在塑性ヒンジの位置、可能な接合部詳細、建てこみ手順、運送、製造コストなどを考慮して決定される。図4に、部材分割の各種可能性について示す。

一体打ちとの同等性をいかにして実現するかが設計のキーであり、その為には注意深い接合部設計が不可欠である。また、これは使用性、耐久性及び耐火性に対しても同様である。

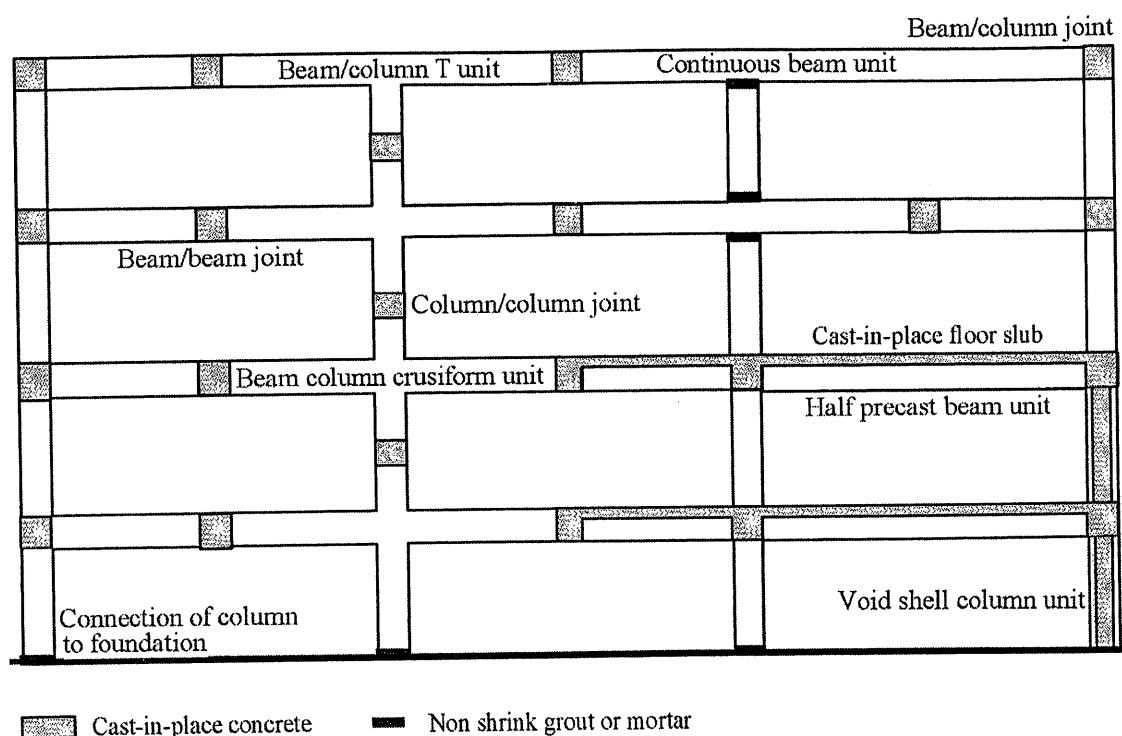


図4 各種部材分割例

しかしながら、プレキャスト構造の接合面では、若干の滑り変形が生じることが避けられない。従って、構造全体としての一体打ち同等性の確保とのための工学的な尺度が重要と成る。日本建築学会で策定中の、一体打ち同等型プレキャスト構造設計指針では、以下のような尺度を推奨している。

- 1) 梁又は柱が曲げ降伏するときの水平剛性は、対応する一体打ち構造に於ける値の 80-120%
- 2) 塑性領域に於いて、同一振幅の第二サイクルにおけるエネルギー消費量が対応する一体打ち構造の 80% 以上

この構造同等性の検証は、接合部、プレキャスト部材及び柱・梁部分架構に関する実験で行われるが、信頼できる解析でも可能である。多くのプレキャスト工法があるが、実験によって一体打ちとの同等性が証明されている工法の例を以下に例示する。

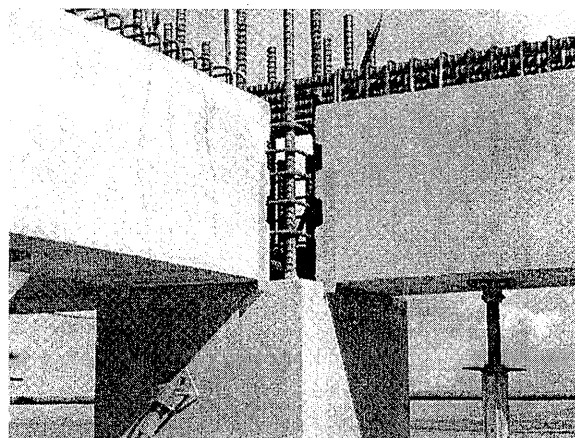
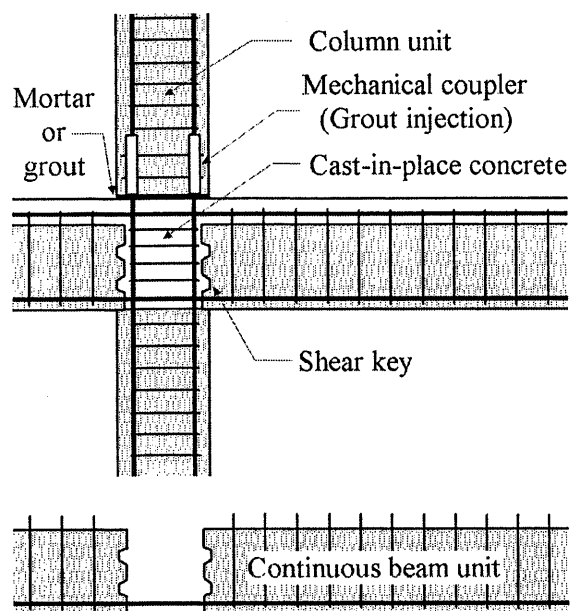


図5 我が国における典型的な PCaRC 工法

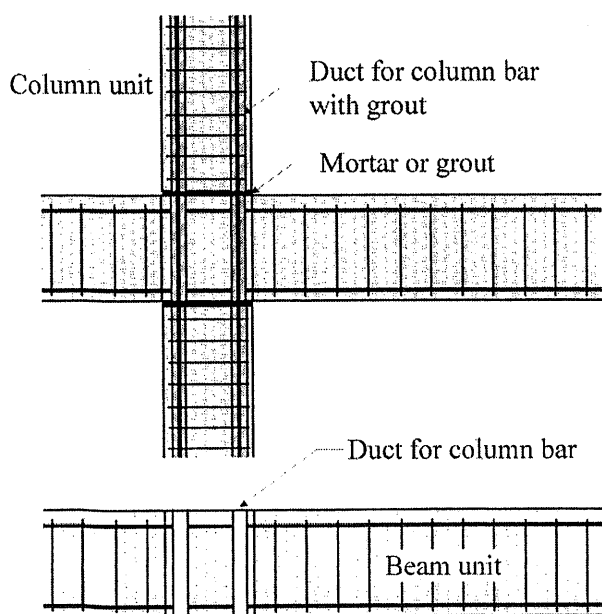


図6 連続梁を用いた PCaRC 工法例

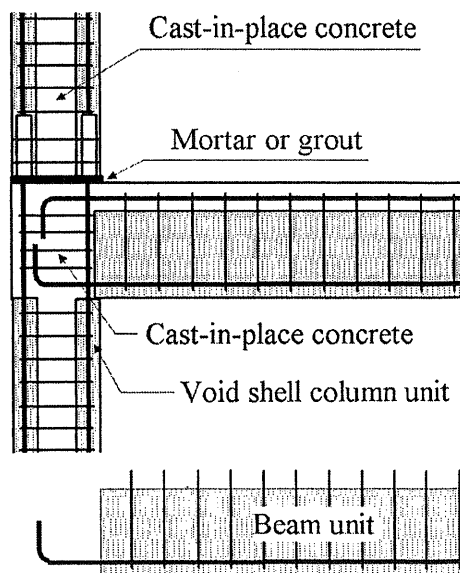


図7 外殻プレキャスト柱部材を用いた PCaRC 工法

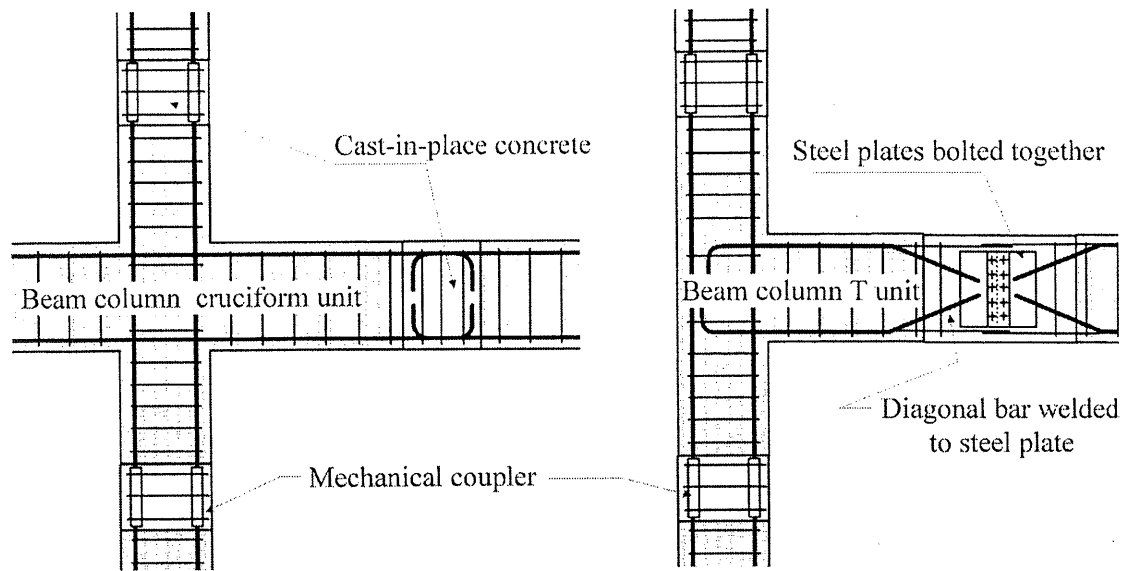


図 8 弾性応答部分に接合部を持つプレキャスト工法

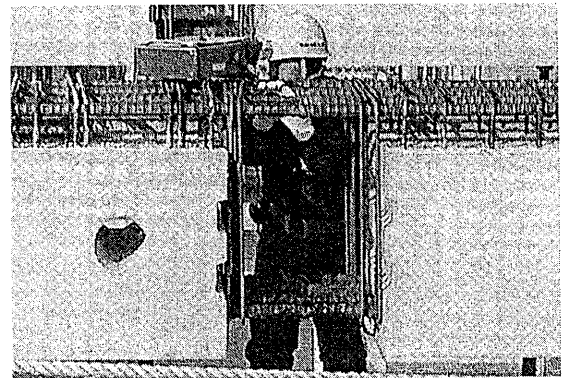
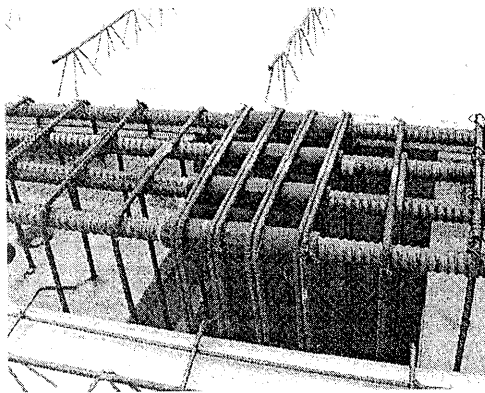


図 9 弾性応答部分の接合部実例（鉄筋機械継ぎ手又は溶接継ぎ手とシャーキー）

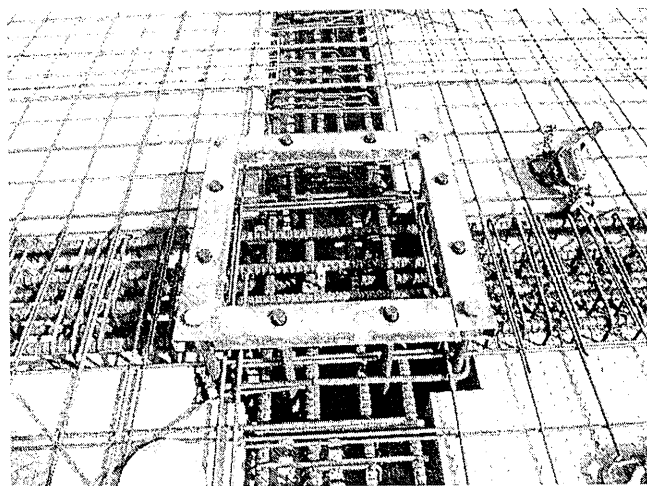


図 10 骨組みと床システムの接合実例

3. プレキャストポストテンションド(PCaPC)骨組み

PC 骨組みの耐震性は、通常の RC に比べて劣るとされてきた。しかし、これはエネルギー消費のみに着目した近視眼的な見方である。阪神淡路大震災では、震度 7 の地域に 150 棟以上の建物が存在したが、ボーリング場の RC 柱のせん断破壊と小学校のプレキャスト PC シェルの落下(図 11)以外には、目立った被害は無かった(図 12 に震災後の PCaPC 建物の様子を示す)。また、残留変形も無く、殆どの建物が継続使用に耐えたとの事実がある。このことより、PC 架構はその復元性に大きな特長があり、それに着目すると耐震性は極めて高いと評価される。

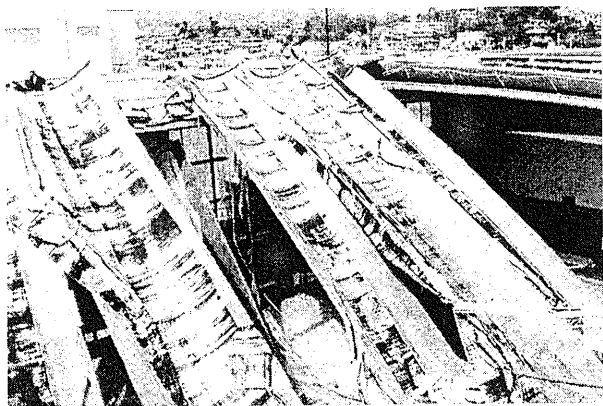


図 11 PCaPC シェルの落下

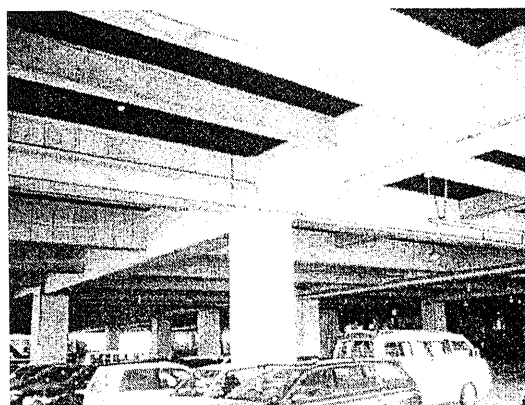


図 12 震災後の PCaPC 建物

PCaPC 骨組みは、柱と梁や柱と柱を圧着することによって建設される。その方法は種々であり以下に例を示す。

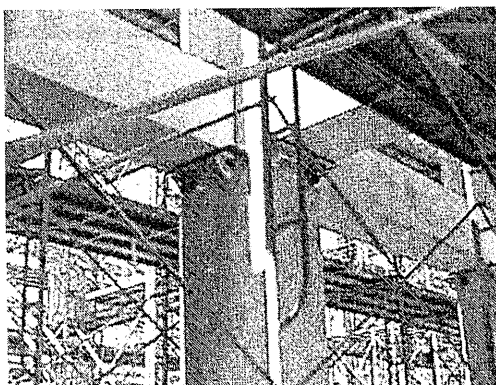
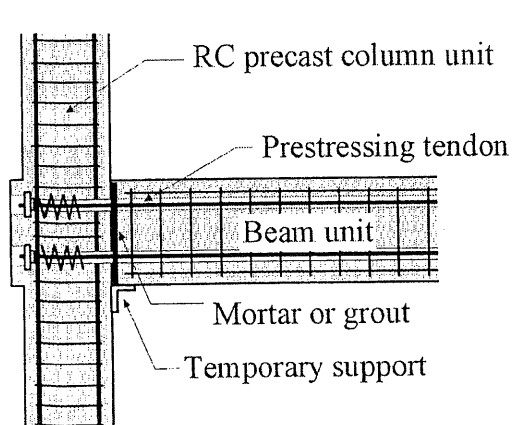


図 13 PCaPC 建物工法例

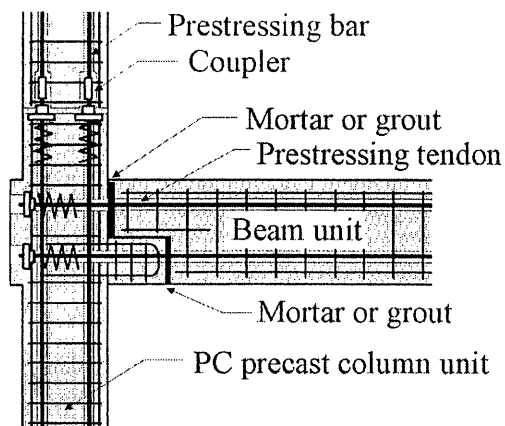


図 14 PC 柱と PC 梁を圧着した PCaPC 工法

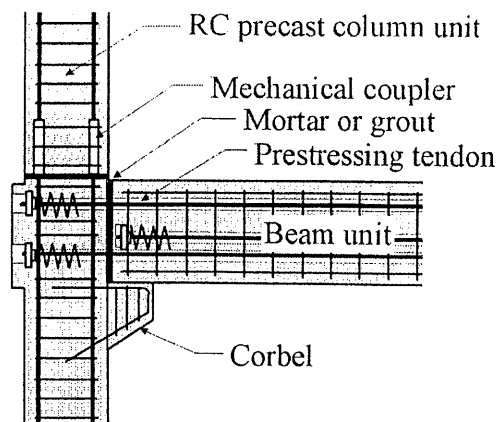


図 15 RC 柱と PC 梁を圧着した PCaPC 工法

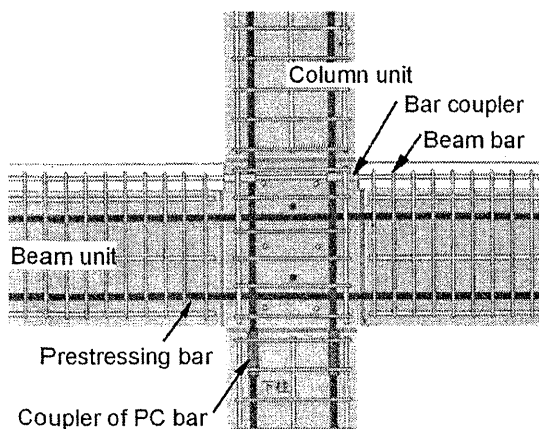
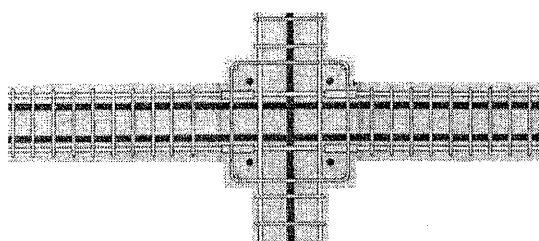


図16 無応力鉄筋を梁上端に配置したPCaPC工法

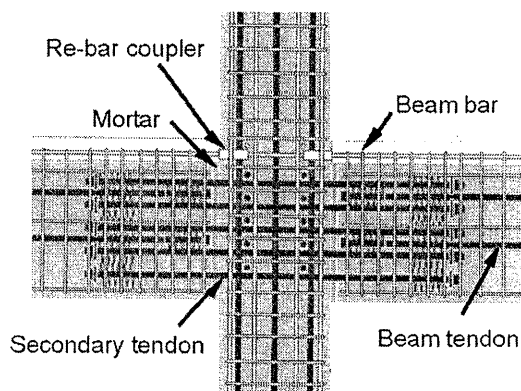
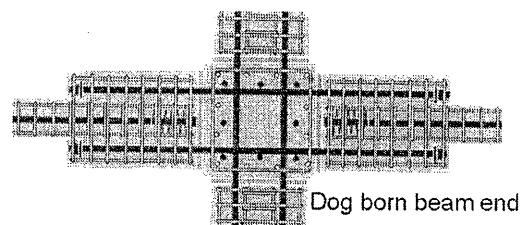


図17 拡大PC梁端部をRC柱に圧着したPCaPC工法

以上例示した工法が広く用いられており、今後共に広く活用されることを期待している。今後の研究テーマとしては、アンボンド工法の有効利用がある。現在は、耐震架構への利用が禁止されているが、不十分なグラウトの問題もない工法なので、以下の諸点をクリアーすることにより実用化に進むことを期待している。

- 1) 緊張材の定着部に於ける破断防止
- 2) アンボンド PC 部材の地震時挙動の把握
- 3) 緊張材破断時における鉛直荷重保持能力のリダンダンシーによる維持

文責（渡邊史夫）

〔Ⅲ〕 P C技術の最近の動向と今後の役割

1. まえがき

1928年にフレシネー（仏）によりP Cの本質的前提が明らかにされ、同氏の設計・施工管理のもとに1945年世界初のP C橋であるルザンシー橋（支間長55m、プレキャストセグメント方式）が完成した。これは桁高が支間中央で1.27m、桁高／支間長比が約1/45の驚異的なコンクリート橋である。続いて1951年に同様のエスブリ橋（支間長74m）などマルヌ5橋が完成した。まさにP C時代の幕開けである。わが国では1940年代にP C技術が導入され、1952年に長生橋が完成した。

「P C構造の原点フレシネー」¹⁾によると、フレシネーはコンクリートを様々な条件下で適用して普遍化し、格納庫の天蓋、巨大なアーチ形天井、さらにかつては厳密には鋼の建設分野であった橋梁をも造った。フレシネーは、プレストレッシングの技術を用いてコンクリートを高貴で永続的な材料に生まれ変わらせ、質量が大きいうという根本的な欠点を見事に克服したのである。

P Cは、このような黎明期を経て、材料、設計・施工法や構造形式などの進歩により飛躍的に発展してきた。今後のP C技術を展望すれば、複合化、プレキャスト化、高性能材料などの高度利用技術や創造的な発想に基づく新技術の社会基盤施設構築への適用性の拡大を図り、P Cを一層普及させることが挙げられる。同時に、耐久性や維持管理手法、環境への配慮を念頭においた一段と信頼性の高い技術の追求が要望される。ここでは、P C技術に関するこれらの項目からいくつかを取り上げ、最近の動向および今後の役割や期待について概述する。

2. 構造関連

P Cは断面・構造形式、架設法、ケーブル配置様式などの技術開発や解析法の高度化により、構造面で多様な発展を遂げているが、以下では複合化とプレキャストセグメント化を取り上げる。

2.1 複合化

経済性、合理化、省力化や高耐久化を目指す構造形式の一つとして、コンクリートと鋼の長所をフルに活かした複合構造に関する研究開発が必要不可欠となっている。P C技術を活用した橋梁分野の複合構造を大きく分類すると、①上部構造を合成断面としたもの、②上部構造を区間により使い分けた混合構造とがある。

複合構造については、後記の「新しい複合橋梁への挑戦」で詳述されるので、その一端について簡単に述べることにする。

上記の①に関しては、現在、波形鋼板ウェブP C橋と鋼トラスウェブP C橋に代表される。

前者は、1986年のコニャック橋（仏、3径間連続桁、最大支間42.9m）が最初である。わが国では、外ケーブル方式の積極的な活用とあいまって、1993年に新開橋（単純桁、支間30m）に適用されたのが最初である。最近、わが国では道路橋を中心に施工実績が急激に増えており、計画中的のものも含めて現在30橋程度存在する。鉄道橋でも計画があり、疲労、騒音、たわみや保守などの観点から検討がなされている²⁾。

波形鋼板ウェブP C橋に関しては、これまで種々研究がなされてきたが、その特徴である面外変

形に係る事項、例えば波形鋼板の座屈安全性、波形鋼板の軸方向接合方式（本構造に適用しやすい一面重ねすみ肉溶接の張出し架設時施工性を考慮した最適な構造詳細や品質管理法）、波形鋼板とコンクリート床版の接合法（水平せん断伝達や橋軸直角方向耐力、活荷重などによる疲労耐久性、防食）³⁾、供用時と終局時のせん断抵抗メカニズムと波形鋼板・床版のせん断分担率などの他に、動的特性（構造減衰、車両走行時の動的応答増幅率など）をより明確化し、設計・施工の合理化に反映させる必要がある。波形鋼板ウェブPC橋は、ケーブルの配置様式（一般型・大偏心型外ケーブル、エクストラドゾド橋、斜張橋）、高性能材料、架設法などとの組み合わせにより、橋梁の更なる合理化に大きく寄与する可能性を秘めており、今後の新たな展開が期待される。

一方、鋼トラスウェブPC橋は、フランスのアルボア橋（最大支間 $l=40.4\text{m}$ ）が最初で、その後ロアーズ橋（ $l=40\text{m}$ ）、プロネ橋（ $l=110\text{m}$ 、1997年）が完成している。この形式では、鋼トラス部材とコンクリート床版の接合格点部に複雑で大きな応力が生じやすく、当該個所以外の部材にも大きく影響するので、その力の伝達機構を明確にすることが特に重要である⁴⁾。

格点構造に関しては、アルボア橋の架設時にかなり研究されたようであるが、最近わが国で活発な研究開発が進められている。格点構造の例を図-1に示す。(a)～(c)のように鋼トラス部材を相互に結合する方式では、コンクリート床版に大きな付加モーメントが生じないように、橋軸方向面内のトラス軸線の交点は床版の図心線と一致させることが望ましい。やむを得ず一致しない構造を採用する場合には、その影響を適切に評価して設計に反映させなければならない。一方、(d)はプロネ橋で採用されたもので、斜材鋼管と上下床版は鋼管にグループ溶接された鋼板にネジ切りした鉄筋をねじ込んで接合し、鋼トラス部材を相互に結合しない方式である。

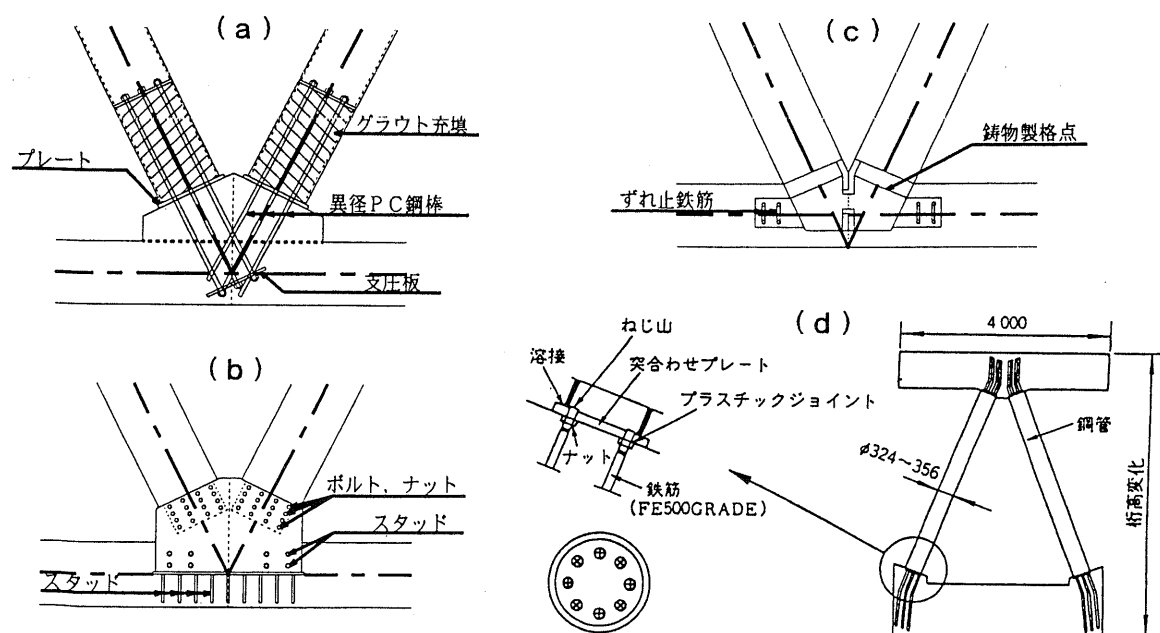


図-1 格点構造形式の例

トラス型式に関して、最も基本的なプレストレス力で上下両弦材を圧縮した場合を例にとると、ピン構造トラスを仮定すれば、例えば、a)プラットトラスでは径間の1/2区間の全ての格間変形は同じで平行四辺形となり、せん断型変形が生じるのに対し、b)鉛直材を有するワーレントラスでは変

形累加の影響は生じない (図-2⁵⁾)。また、鉛直材と斜材が上下コンクリート床版に結合されたことによる各格間部分の剛度を考慮に入れて取り扱ってもこのような変形状況は説明される。この場合、2つのトラス型式に関して比較すると、図-3のように、a)のプラットトラスでは斜材の圧縮力の影響は累加され、上床版は橋脚に近いほど大きな圧縮力を受けるのに対し、下床版では減少する。一方、b)のワーレントラスでは1節点で交わる斜材の圧縮力の影響は互いに打ち消され、各2格間内ではほぼ同じ力を受けることになる⁶⁾。格点は実際にはピン構造ではないために2次応力が生じるが、その影響はトラスの型式で異なる。

鋼トラスウェブPC橋は通常のコンクリート箱桁橋に比べて横方向剛性が小さく、荷重分配、横方向荷重やねじりに対する抵抗性から、図-4に例示するような構造とする⁵⁾。

鋼トラスウェブPC橋は、桁高の低い中小規模径間ではPC箱桁橋のウェブをトラスに置換するメリットが小さく、格点数も増加して不経済となるので、支間長100m以上に適用するのが望ましい。本構造は上部工の軽量化、トラス構造により比較的高い部材剛性が確保できること、トラスを並列に配置して直角方向に結合することにより広幅員橋梁にも対応できること、などの特徴を活かした今後の発展が期待される。しかし、経済性にも影響する格点構造型式と2次応力の影響、トラスの型式によって異なる力の伝達機構などに関する詳細な検討が必要である。

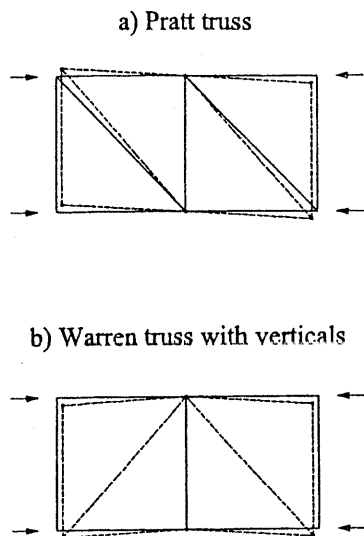


図-2 上下両弦材に圧縮力作用時の変形

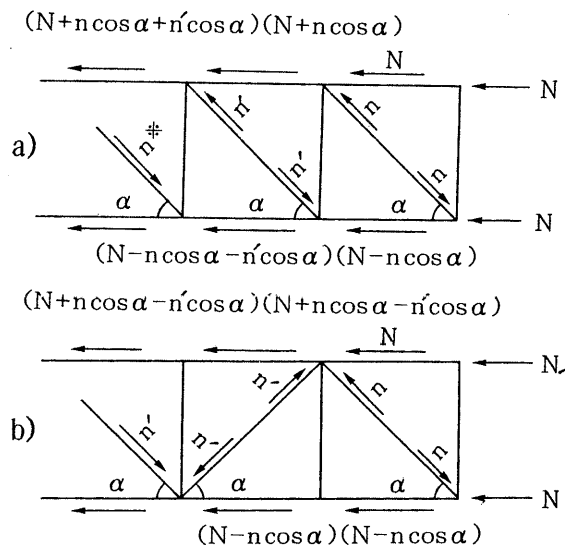


図-3 トラス軸力分布状態

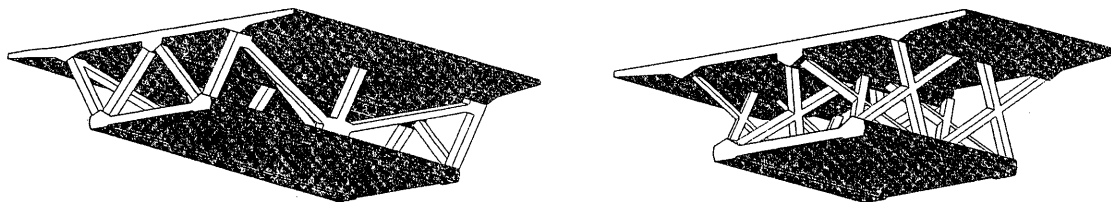


図-4 鋼トラスウェブPC橋の構造形式例

最近の特筆すべき、斬新なコンセプトに基づく複合橋の一つに、ギリシャのリオン・アンティリオン橋が挙げられる。これは、全長ほぼ2880mのきわめて厳しい架橋条件の海峡横断橋で、主橋梁286m + 3 × 560m + 286mの5径間連続複合斜張橋 (主桁: I形鋼桁・コンクリート床版の合成断

面)である(図-5)。架設に際しては、まず水深70m以下の沖積層に径2m×長さ30m鋼管で補強地盤を造り、次にドック製作の直径90m×高さ13.5mのRC円錐台フーチングに直径38m×高さ53mのRC基礎シャフトを構築して海底に沈設し、その上に橋脚シャフトと4本柱RC主塔を建設する。主塔は橋面から113m、海底から総高227mの超高層である。本橋は主桁位置の最大応答加速度が1.2g、基礎は直下型地震で水平・垂直方向に2mの断層ずれが生じることを前提に設計されている⁷⁾。

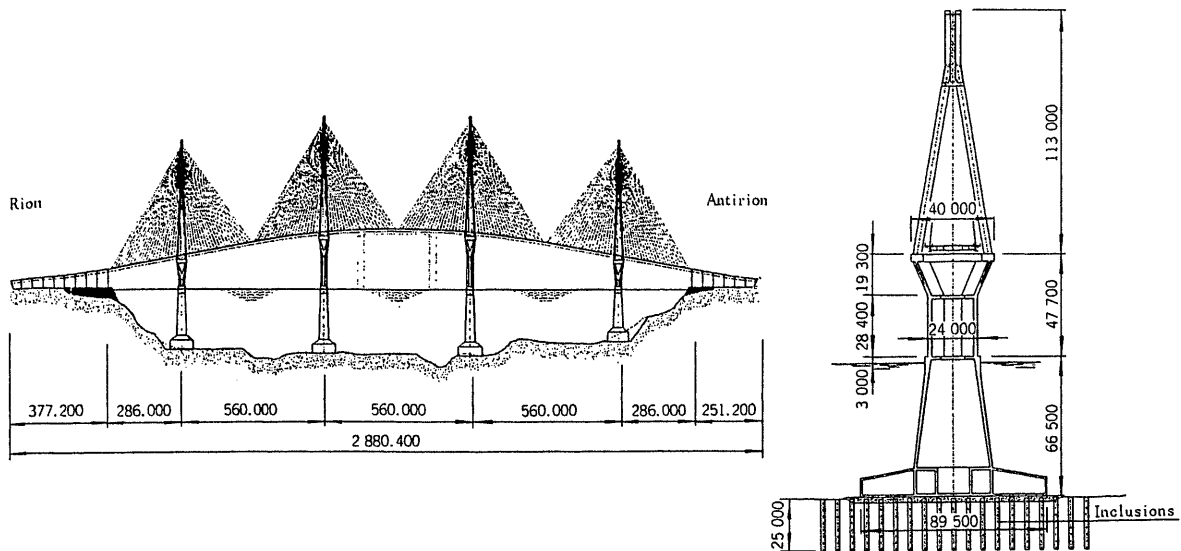


図-5 リオン・アンティリオン橋

一方、②混合構造は、架橋条件から長大径間となるような場合にコンクリート桁と重量の軽い鋼桁との複合により断面力を低減できる利点がある。超大規模の複合斜張橋として知られるノルマンディ橋(支間856m、1993年)や多々羅大橋(支間890m、1999年)に適用され、長大径間橋梁に対する混合構造の優位性が明確に実証された。最近、エクストラードズド橋にも採用され、この形式では世界最大級の第2名神・木曽川橋(最大支間275m)と揖斐川橋(271.5m)が架設されている。

波形鋼板ウェブ構造の斜張橋やエクストラードズド橋への適用、波形鋼板ウェブ構造の支間中央部を鋼桁とした混合構造などにより一層の軽量化や長支間化が可能となる。現在fib大阪2002に向けて第2名神・栗東橋が世界初の波形鋼板ウェブ連続エクストラードズド橋として建設されている⁸⁾。

SETRA(フランス道路研究所)の元橋梁部長で、ノルマンディ橋などにも深く関与されたfib前会長のビルロジュ博士は、21世紀の橋梁について、「橋梁がもっと多様化するの間違いはない。コンクリート橋と鋼橋が融合して、複合橋はもっと発展していく」と述べている⁹⁾。

2.2 プレキャストセグメント化

施工の省力化から欧米では大規模なプレキャストセグメント工法が採用されてきた。セブンマイル橋(米)やレ島橋(仏)はこの工法と外ケーブルを併用した先進的海上長大橋である。その後、全長4179m・全外ケーブルの第2セバン橋アプローチ部(1996年)、グレートベルト橋(1996年)、250m×43径間・氷海上世界最長PC橋のプリンスエドワード島橋(1997年)、全長55kmのバンコク高速道路高架橋(2000年)などが次々と完成している。プリンスエドワード島橋はカナダ本土とを結び、夏季の結氷しない短期間に集中架設しなければならない厳しい条件のため、上下部工・基礎工の全てにプレキャストセグメントを用い、かつ100年の供用寿命を想定している。

わが国では、1960年代にプレキャストセグメント工法が実用化され、多くの長大橋が架設されたが、その後適用例が少なくなっていた。1997年に外ケーブル併用型プレキャストセグメント工法による松山自動車道・重信川高架橋が完成したのに続き、同様の第二名神・弥富高架橋（全長1500m）が完成し、この工法が新たに本格化している。また、海外では、イロワーズ橋（仏、一面吊りでは世界最長支間400m、1994年）のような長大PC斜張橋にプレキャストセグメント工法が採用されている。わが国のPC斜張橋は従来は場所打ちであったが、大芝大橋（支間210m、エッジガーダ桁、1997年）¹⁰⁾ や天建寺橋（支間219m、3室箱桁、1999年）¹¹⁾ などのプレキャストセグメント工法による大型PC斜張橋が完成している。両橋では、プレキャスト工法の採用により養生管理が良好となることから、主桁に設計基準強度60N/mm²の高強度コンクリートを用い、スレンダーな断面としている。さらに、前述の木曽川橋と揖斐川橋のような、複合、エクストラドーズド、プレキャストセグメントという今後のキーワード的技術の総合化による新たな展開も始まっている。

今後、架設地点の近くにセグメント製作ヤードを確保できないケースが増え、工場製セグメントの採用に関連した技術が一段と重要となるであろう。この場合、架設現場への運搬からセグメントの重量と大きさが制限される一方、施工の合理化や工期の短縮という本来の目的を達成するためにはセグメント長をできるだけ大きくしてセグメント数を減らすことも同時に要求され、このような観点からの断面形状の選定や軽量化の検討が不可欠となってくる。

プレキャストセグメントの軽量化を図るため、図-6のようなU形断面が考案されている¹²⁾。例えば、チェコ都市内のPlzen高架橋は同図(c)の断面形状のセグメントを張出し架設後、上床版を場所打ちして合成する方式で、張出し床版部をストラットで補強した構造である。第二名神・古川高架橋は(c)と同様の合成方式であるが、この場合は(b)のように張出し床版をリブで補強するU形コア断面+リブ構造である。図-6には、上床版を将来打ち替え可能なプレキャストセグメント工法として、Plzen高架橋(c)に加えて古川高架橋と同じ断面の(b)が紹介されている。プレキャストセグメントの採用の考え方は異なるものの、全く同じ断面構成になっているのは興味深い¹³⁾。U形コア断面+リブ構造は形状がシンプルでコンパクトなため運搬には有利であるが、架設時には上縁の圧縮フランジがなく、通常の箱形断面に比べてねじり剛性が小さいので注意を要する。

ウェブの軽量化から、ベッキオ橋（コルシカ島、1999年）は、3径間連続の中央径間137.5mのウェブに連続しない台形プレキャストパネルを用いたオープンウェブ箱桁構造を採用している¹⁴⁾。張出し架設時の各セグメントは2枚の台形プレキャストパネルと場所打ち上下床版から構成され、図-7のようにパネル内に配置した鉛直方向PC鋼棒を緊張し上下床版に定着されている。このようなオープンウェブ構造は、箱桁橋とトラス橋の中間的な構造である。現在、本協会ではプレテンションウェブPC橋の研究が進められており、ウェブの軽量化とともに施工の合理化も期待される。

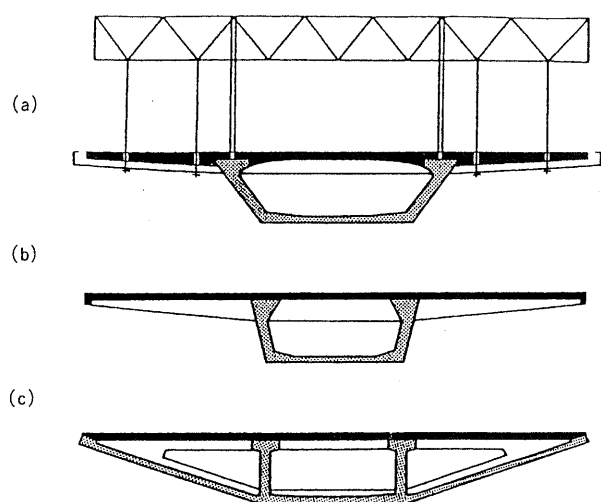
工場からの運搬条件によりセグメント重量が制限される場合、1主箱桁断面では橋軸方向セグメント長が短く、目地数が増え工期が長くなる。このため、第二東名・上和会高架橋（PC17径間連続桁）では、2主箱桁断面を1主ごとの箱断面に分割して工場製作し、架設時に接合している。セグメントの橋軸直角方向には製作時にプレテンション方式でプレストレスを導入し、分割セグメントの橋軸直角方向の接合にはダブルループ継手による場所打ち工法（図-8：幅50cm、膨張+繊維補強コンクリート）を採用している。橋軸方向は全外ケーブルである¹⁵⁾。

中小径間の新しい橋梁形式として、図-9の大日橋（支間73m）のようなPCを活用した吊橋も開発されている¹⁶⁾。この場合、プレキャスト床版をPC鋼材で緊張一体化することにより、架設の簡略化と工期の短縮を図っている。本構造は、適度な重量と高い剛性により、優れた静的特性と

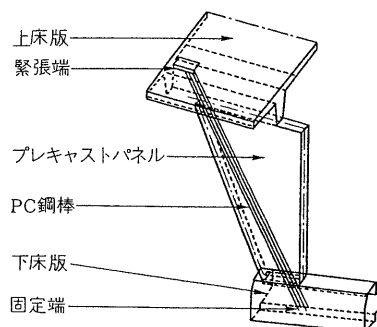
ともに、振動試験からPC斜張橋や吊床版橋に比べて減衰がやや大きく（減衰率0.036）、フラッタ一の発現性に対しても安全であるなど、動的にも安全性が確認されている。

このように、プレキャストセグメントPC橋は世界的規模で非常に多様な展開をみせており、厳しい施工条件下での適用、迅速な施工速度、セグメントの厳格な品質管理による耐久性の向上、環境への影響の低減など、多くの利点を有する。後記のように、持続可能な発展から構造物の耐用年数は最小100年とすべきであり、セグメント橋はこの要件を満たすものと期待される¹⁷⁾。

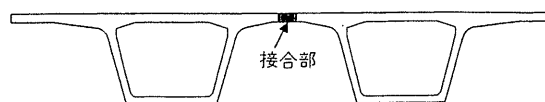
高性能コンクリート（高強度、軽量など）、斬新な断面形式、外ケーブル、鋼との複合化などとの併用により、プレキャストセグメント方式はさらに大きく発展するものと考えられる。



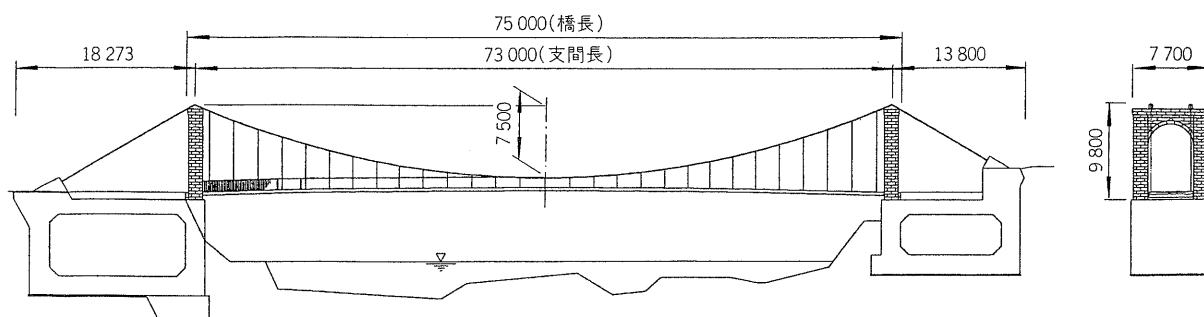
図－6 床版を打替えできる断面の例



図－7 ベッキオ橋のパネルウェブ



図－8 セグメントの橋軸直角方向接合部



図－9 大日橋（プレキャストPC床版を用いた吊橋）

3. 耐久性と材料

PC構造物の耐久性で近年特に関心の高い問題は、グラウト不良や塩害などに伴うPC鋼材の腐食である。後記「プレストレストコンクリート構造物の維持管理と診断技術」と若干重複する点もあるかも知れないが、耐久性とその向上のために期待される材料について簡単に述べる。

英国では、Ynys-y-Gwas橋が凍結防止剤の散布により鋼材が腐食し、落橋したのに端を発し1992

年にグラウト充填型ポストテンション方式の禁止令が出され大きな反響を呼んだ。この場合には、実際は橋面防水が不十分であったうえ、プレキャストセグメント継目部に対する配慮不足によるグラウト充填不良などが重なったのが大きな原因であった。しかし、英国やベルギーで鋼材腐食による著しい劣化や落橋の事例が他にもあり、このような措置がとられた。その後、設計・施工規準やグラウト仕様の詳細な検討、既設構造物の調査の結果などから1996年に解除された¹⁸⁾。

ドイツでは、薄いウェブに内ケーブルを配置するとコンクリート打設が困難で品質に支障をきたすことがあるため、ウェブコンクリートの打設性や維持管理性に優れた外ケーブルを推奨し、1998年「外ケーブルを使用したコンクリート橋に関する指針」を発刊している。これは、主方向ケーブルを全外方式（箱桁内に配置）と内外併用方式（ウェブ以外の内ケーブルと箱桁内の外ケーブル）とし、後者は外ケーブルによるプレストレスが総量の20%以上のものに適用する¹⁹⁾。

わが国のPC建設業協会では、ノンブリーディング型高性能注入用混和剤を用いた大規模なグラウト注入試験などの成果を反映し、1997年にノンブリーディンググラウトの採用、流量計の使用、グラウトについて十分な知識と経験を有する技士の立会いなどを定めている。

最近、プレグラウトPC鋼材や防食型PC鋼材の採用が増えている。後者は、鋼材表面をエポキシ樹脂などで防食加工したもので、米国ではASTMとして規格化されており、ISOでも規格化される。エポキシ樹脂などの防食加工にポリエチレン被覆を施した多重防食型もある。外ケーブル方式の増加に伴ってグラウトの管理面から透明シースの採用も増えつつある。

コンクリート構造の補強材としてFRPへの関心が各国で高まっており²⁰⁾、腐食性環境では従来の鋼材に替わるものともなっている。FRPは連続繊維緊張材と耐震補強などの外面接着シート材として利用されている。前者は、1986年にドイツでポストテンション緊張材に用いた世界最初の道路橋の完成後、その耐久性が注目され、わが国や米国の他にベルギー（鉄道橋）、スイス（PCボール）、デンマーク（PC斜張橋）、オランダ（外ケーブルPC橋）などでも適用例が増えている。

FRPに係わる設計・品質管理規準の策定に向けて国際的な取組みがなされている。統一的なガイドライン作成のため、fibのRCとPC用材料・システム委員会（Commission on reinforcing and prestressing materials and systems）のタスクグループ（FRP reinforcement for concrete structures）が活動している。一方において、「International Conference on the Use of Fiber Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS)」の国際会議が、1993年カナダで第1回、1997年札幌で第3回、2001年は英国で第5回が開催されている。

耐久性に関する課題として、PC橋の沿岸域での飛来塩分による塩害も重要である。厳しい寒冷地では平成3年のスパイクタイヤ使用禁止後、凍結防止剤（塩化カルシウム、塩化ナトリウム）が多量に散布されるため将来は内陸部でも塩害が予想され、有効な対策が必要な状況にある。

塩害に対しては、桁断面（飛来塩分には閉断面：箱桁・中空床版）、かぶり厚、支承や伸縮継手などの構造面およびコンクリート（W/C制御、混和材料）、鉄筋・PC鋼材（防食型）、定着具（防錆）、シーシ（硬質ポリエチレン管）、高欄などの材料面での総合的な配慮が必要である²¹⁾。

これらの中で最近注目される一つに、混和材として高炉スラグ微粉末の利用が挙げられる。従前の比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 級のは早期強度の点からPCに用いられることは殆どなかった。近年、比表面積 6000 、 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 級が開発（1995年JIS化）され、早期強度の発現性が改善されるとともに、このような高炉スラグ微粉末を適量混入すると水和生成物の組織がポルトランドセメント単味の場合に比べて緻密になり、塩化物イオンに対し優れた遮蔽性能を有することが認められている²²⁾（図-10²³⁾）。なお、これに関連した報告として、通常の高炉セメントB・C種、普通ポルトラン

ドセメントを用いたコンクリート供試体を、干潮時には一時露出する状態で10年間天然海水中に浸漬した試験によると、塩分浸透量は高炉スラグ含有量の多いセメントほど少なく、10年間で高炉C種で約0.25%、高炉B種で約0.3%、普通ポルトランドセメントで約0.6%であった²⁴⁾。

このような比表面積の大きい高炉スラグ微粉末の特徴を活かして耐塩性に優れた高耐久PC構造物が実用化され、約20橋の適用例がある。例えば、飛来塩分と高温多湿な環境下のポストテンション道路橋・屋嘉比橋（橋長60m、2径間単純中空床版橋）²³⁾、凍結防止剤散布環境下のプレテンション道路橋・俵山4号橋（支間15m、単純中空床版橋）²⁵⁾、大断面主桁・少数主桁に伴う広幅員PC床版の施工合理化、高耐久化、環境負荷低減を目的とした第二東名・PCプレキャスト床版²⁶⁾などがある。現在は工場製作のプレキャスト部材（設計基準強度約50N/mm²、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000cm²/gで置換）として用いているが、今後は場所打ちPC構造への適用も期待される。

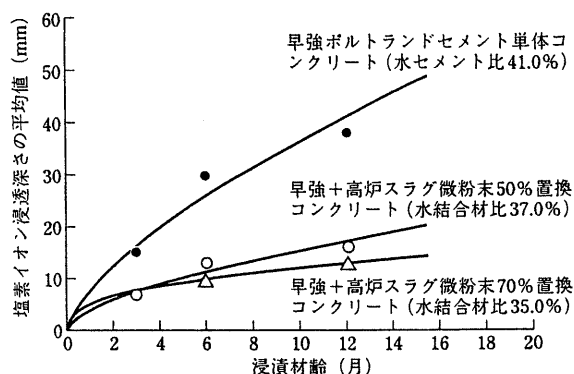


図-10 10%NaCl溶液浸透試験における塩素イオンの浸透速度

場所打ちによる設計基準強度60N/mm²級高強度コンクリートの適用実績はわが国では少なかったが、構造的にも、また耐久性の面からもその使用によるメリットは大きいと考えられ、最近プレキャストセグメント工法や押出し工法などによるPC橋においてその優位性が確認されている。

さらに、60N/mm²程度以上の高強度コンクリートに関しては、桁高縮小や主桁本数の減少によるPC橋の一層の合理化や面内力活用構造（シェル、折板）への適用の有効性などに加え、最近では特にコンクリート組織の緻密化による耐久性の向上に着目した利用への関心が高くなっている。

コンクリートの高強度化に関して、カナダの「reactive powder concrete (RPC)」と呼ぶ超高強度コンクリート（設計強度200N/mm²）を用いた床版・充填薄肉鋼管トラスからなるPC複合トラス橋（主径間60m）の報告²⁷⁾に続いて、フランスでも同様の報告²⁸⁾がなされている。後者によれば、RPC（長さ1cm×直径0.2mm高張力鋼繊維混入）はポンプ圧送も可能であり、場所打ちにも適用できる。鋼繊維の混入によりせん断に抵抗できるので、プレストレスング以外は付加的な鉄筋を必要としない。その超高強度特性から、断面を大幅に縮小でき、しかも組織が非常に緻密（通常コンクリートの約100倍の水分拡散抵抗性）なため高耐久である。支間120～150mのポストテンション橋やパイプ、トンネル、タンクへの適用が予定され、将来は優れた塩化物イオン遮蔽性による高耐久・低維持費型長寿命構造への活用も検討されている。

PC構造物の耐久性の向上に向けた継続的な取組みがPCの一層の普遍化に繋がるが、今後はグラウトの充填性も含めて構造全体系を捉えた効果的な予防保全的対策の検討が重要である。

4. 環境への配慮

建設産業においても、「環境との調和」や「環境負荷」などの環境への配慮は非常に重要な課題となっている。今後、構造物には安全性、使用性、耐久性や経済性のみならず、環境への配慮が同時に要求される。ここでは、橋梁を対象として、これらに関する最近の動向の一端を概述する。

4.1 環境との調和

社会的ニーズの高度化、複雑化に伴い、橋梁においても、ハード面の安全性、使用性、耐久性などとともに、自然環境、生活環境、地域の活性化などのソフト面での美観・景観への対応が非常に重要になってきている。このため、橋梁の計画、設計、施工、維持管理において、エンジニアの立場からだけではなく、デザイナーの観点からの橋梁技術の追求も求められている。

国際構造工学会議（IABSE）の発行誌²⁹⁾で「構造工学における美意識」と題する特集が生まれ、8名の著名な構造技術者が「美的貢献（aesthetic contribution）」に対して、構造技術者ができること、すべきことに関して論述している。この中で、レオンハルト教授は「構造物における美学の重要性」と題し、構造設計に際しては、まず建設地点の視覚的環境、景観や町並みを理解することが大切であり、構造物の規模は周辺環境のスケールにあわせるべきであると述べている。環境との調和は、構造物の色彩の選定とも関係している。また、橋梁には耐荷性能や使用性能などに加え、3次元空間におけるプロポーションの調和も重要な性能として要求される。例えば、連続桁橋において、支間長と桁高との間や橋脚間隔と床版厚との間などに良好なプロポーションが存在するはずである。最近、深い渓谷を横切る橋梁も増えているが、その支間長、主桁や高橋脚の形状などについても論及している。構造物の美観・景観は社会に大きなインパクトを与えるので、社会における技術者の評価を一層高めるには今後この課題に真剣に取り組む責任があると述べている。

ビルロジュ博士⁹⁾は、エレガントな橋梁を造るうえで重要なことは力の流れであり、スレンダーであることや影の落ち方にも配慮する必要があると述べている。「統一性(unity)」、「秩序(order)」や「単純性(simplicity)」も重要である。同時に、「いい設計」とは「構造的に合理性があり、どのようにして造ったかが明確であること」を強調している。

さらに、コリンズ教授³⁰⁾によれば、構造工学とは作用外力に安全に抵抗できる、経済的でエレガントな構造物を設計・施工するアートおよびサイエンスである。構造物の安全性と経済性という目標はどの技術者にも明快であるが、エレガンスという目標はそれほどよく理解されていない。エレガントはラテン語の“eligere”に由来し、「chooseまたはselect」を意味する。したがって、エレガントな構造物とはその個々の機能を満足すべく入念に精選されたものであり、そのような観点から欧州と北米の過去2000年間のエレガントな構造物の代表例を取り上げて論述している。

4.2 環境負荷

環境負荷（D）は、次のように相互に関連する3つの要因の関数として表せる³¹⁾。

$$D = f(P \times I \times W)$$

ここに、P：人口、I：産業・都市の発展を表す指数、W：文化社会が天然資源の消費を促進する程度を表す指標

21世紀には、CO₂排出量は図-11のように、指数的に増加すると予測される。ただし、図-11では、人口が60億から90億に増加する見込とそれに対応した産業の発展や都市化（地球人口の3/4が都市部で生活）を考慮するとともに、現在の天然資源の消費形態は変化しないと仮定している。

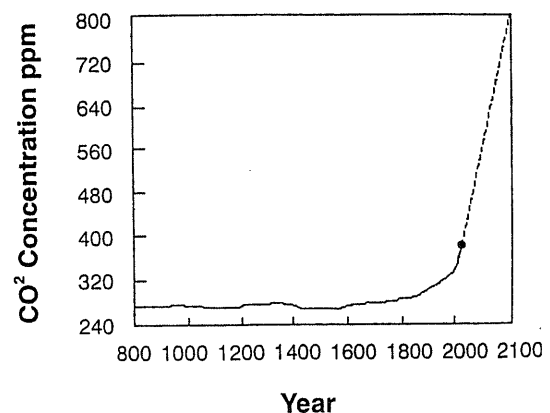


図-11 大気中のCO₂濃度の経年変化

このように、Wは環境負荷に対して乗数的に影響するので、資源の有効活用や再利用を図ってWを制御することにより環境負荷を制御できる。

構造物は、そのライフサイクルを通じて多くの資源やエネルギーを消費し、環境負荷を発生させている。すなわち、資材消費、資材運搬や施工機械の燃料消費などによりCO₂を排出している。このようなCO₂排出量を定量化する手法としては、解析対象の建設活動を工程段階に区分して各段階での資材・燃料の消費量やエネルギー消費量を算出し、各々の消費単位量当りの環境負荷量(原単位)を乗じて集計するのが一般的である。

コンクリート橋の構造形式による橋面積当たりのCO₂排出量の試算結果の一例³²⁾を図-12に示すが、この例では支間長との関連性が大きい構造形式によってCO₂排出量に差がみられる。

PC橋を対象とし、構造としてプレテンションT桁橋(6@20=120m、トラッククレーン架設)と場所打ち箱桁橋(3@40=120m、固定支保工架設)の2形式(有効幅員11.5m)、コンクリート種類として普通および軽量コンクリートで設計基準強度 σ_{ck} を要因とした7ケース(表-1:支間40mポストテンション単純T桁、有効幅員14m、下部工 $\sigma_{ck}=24, 30\text{N/mm}^2$)のCO₂排出量の試算の一例³³⁾を図-13、14に示す。コンクリート種類別のCASE-4~6では軽量コンクリートの許容圧縮・引張応力度を普通コンクリートの70%に低減し、CASE-7では同値に設定している。CO₂排出原単位には、土木学会地球環境LCA研究小委員会推奨値や日本建築学会地球環境委員会推奨値があるが、本試算では両者に対して1990年産業関連表を用いた修正値を設定している。本試算条件に限ってみれば、概ね次のことが認められる。

- ① いずれの場合も資材消費によるCO₂排出量が全体の8割程度以上を占める。また、資材消費に占めるコンクリート消費量の割合が大きい。
- ② 上部工のCO₂排出量に関しては、箱桁橋はプレテンションT桁橋に比べて5割程度増加するが、前者はコンクリート消費量が多く、かつ施工機械のエネルギー消費量も多いためである。また、高強度および軽量コンクリートを用いた場合には、CO₂排出量が増加するが、これは桁高を低く抑える一方で、原単位が大きくなるためである。
- ③ 上+下部工のCO₂総排出量に関しては、箱桁橋はプレテンションT桁橋に比べて2割程度増加する。コンクリート種類別では、軽量コンクリートの許容応力度を普通コンクリートと同値としたCASE-7が最も減少する。

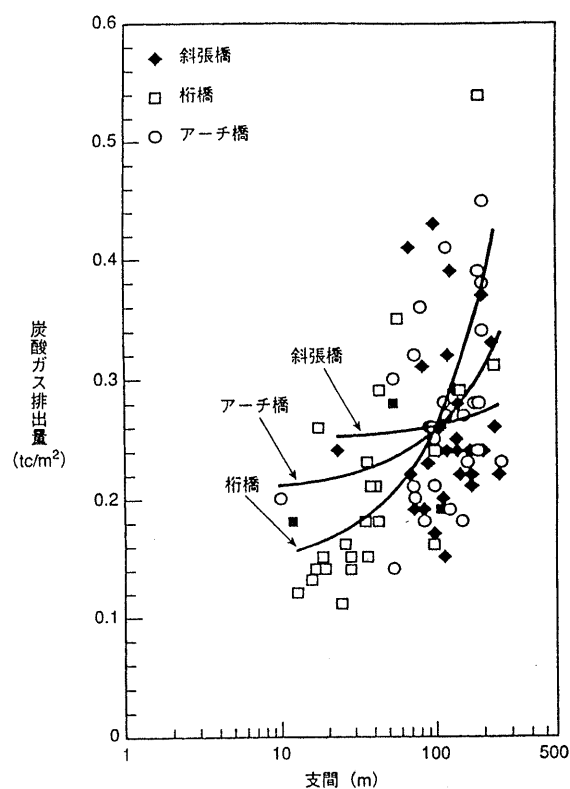


図-12 橋梁形式によるCO₂排出量

表-1 コンクリート種類(上部工)

ケース	コンクリート σ_{ck}	単位重量	桁高
CASE-1	40N/mm ²	24.5kN/m ³	2.3m
CASE-2	80N/mm ²		2.0m
CASE-3	100N/mm ²		1.7m
CASE-4	40N/mm ²	20.0kN/m ³	2.5m
CASE-5	80N/mm ²		2.0m
CASE-6	100N/mm ²		1.8m
CASE-7	40N/mm ²		2.0m

下部工のみに関しては図は省略したが、プレテンションT桁橋は箱桁橋に比べて橋脚数が増えるが、橋脚幅を縮小できるため全体として大きな差はみられない。また、上部工に高強度および軽量コンクリートを使用すると橋脚断面を縮小でき、CO₂排出量が減少する傾向がみられる。

今後、CO₂原単位を整備・標準化して精度の向上を図り、PC橋の各種要因に対してライフサイクルにわたるCO₂排出量の試算データを蓄積し、LCA（ライフサイクルアセスメント）の形で評価が必要である。環境保全に対する社会的要求が高まっている現在、リサイクルも考慮したより合理的で精度の高いLCA評価手法の確立が望まれる。

環境負荷に関しては、第28・29回PC技術講習会テキスト^{3,4)}において詳しく取り上げられているので、参照されたい。

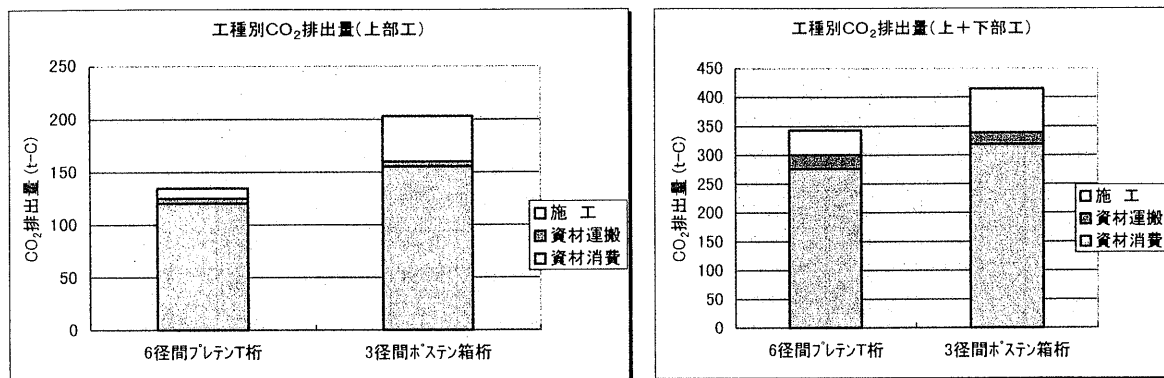


図-13 構造形式別の試算結果

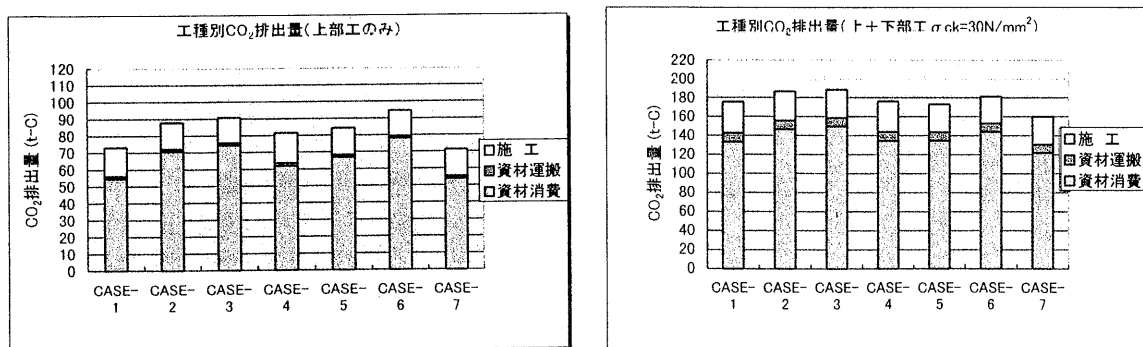


図-14 コンクリート種類別の試算結果

5. ライフサイクルコスト (LCC)

現在、わが国のコンクリート橋は膨大な量に達しており、将来の維持管理費や架替費の負担がきわめて大きくなると予想される。将来負担を抑制するには、ライフサイクルコスト (LCC) を最小化させる長寿命で維持管理負担の少ない橋梁 (ミニマムメンテナンス橋、MM橋) の実現に向けて材料利用技術、設計・施工技術、管理技術の充実とLCCを考慮した適切な評価が必要である。しかし、現状では、橋梁の寿命評価やLCCを算出する手法や規準は確立されていない。

LCC分析の際の項目として、①初期建設費用、②維持管理費用、③廃棄費用、④補修工事中の

渋滞などによる社会的損失、⑤物価の変動、⑥新技術の影響、⑦社会的割引率、⑧その他が挙げられる³⁵⁾。

LCCの算定には、耐久性モデルを設定する必要がある。例えば、国土交通省では³⁵⁾ 図-15に示す2種類のモデルを想定し、上記①、②に着目して試算を行っている。従来の設計・施工を想定した「標準橋」モデルは、本体工の劣化進行が比較的早く、補修しても分析期間（100年を想定）に一度（便宜的に50年）は架替が必要な橋である。一方、最小限の維持管理で最大限の長寿命化を目指して耐久性喪失要因の対策となる要素技術を導入し、高度な施工管理を行う「MM橋」は分析期間中に更新を考えなくてよい。LCCの評価にあたっては、環境条件（都市、海岸、山間部）と各々の損傷要因（塩害、中性化、凍結融解作用、アルカリ骨材反応、疲労など）、PC橋の構造形式および各損傷要因に対する耐久性向上のための要素技術、などを考慮している。

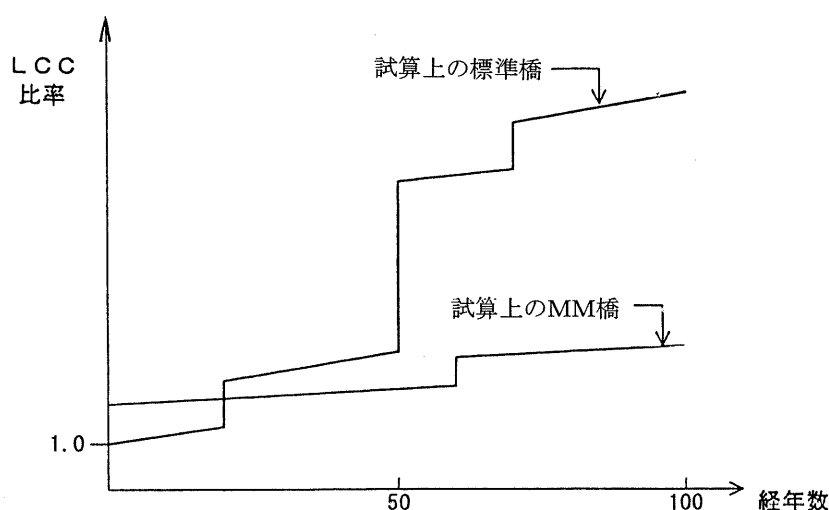


図-15 LCCイメージ図

最近、諸外国でもLCCに対する関心が高く、橋梁を対象として例えば文献36)、37)のような報告があり、非常に参考になると思われる。以下に、これらの報告の要点を略述する。

それらによると、LCCの評価にあたっては、将来の維持管理費用（コスト）を次式によって、現在価値（present value）に変換する。

$$\text{現在価値} = C / (1 + r)^t$$

ここに、C：将来コスト(future cost)、r：割引率(discount rate)、t：(建設時から)将来出費の期日(年)(date of the future expenditure (from time of construction), in years)

将来の維持管理費用の重要性は割引率rと密接に関係する。現在、rの設定値は米国：8%、ドイツ：6～8%、フランス：8%などで、総体的には8%程度である。参考のため、r=2、4、8%に対応する割引係数(discount factor)を図-16に示す。

r=8%の場合、割引係数は30年で0.1、60年で0.01である。これは、30～60年で、維持管理費用はささいなものとなり、初期費用の安い構造物を暗に奨励することになる。つまり、割引率をこのような値に設定すると、できるだけ安価で、30～60年で更新するような構造物を造るという構造設計理念を支持することになる。エコノミストがどう言おうと、持続的な発展のためには、構造技術

者は最小設計寿命100年に適合し、かつ将来の維持管理費用の重要性を軽視しない割引率で橋梁の将来の維持管理費用を評価する必要がある、このため割引率は2～3%とすべきである。

図-17は、初期費用 (capital (initial) cost) とLCC (純現在価値 (net present value)) に変換) に占めるコンクリート・鋼合成桁橋の各部位の費用比率を示す。同図によると、付帯設備 (図中の“Bearings” から“Parapets”までの部位) の合計費用の占める比率は、LCC (純現在価値) では33%で、初期費用におけるこれらの占有率の2倍程度となる。同図は $r = 5\%$ の場合であるが、 $r = 2 \sim 3\%$ の場合はこのことがより顕著になる。これは、これらの付帯設備は寿命が比較的短く、非常に高い維持管理費用もしくは早期更新を必要とするという事実を反映している。このことから、維持管理における一つの方策として、各部位の更新までの目標寿命 (性能プロフィールプラン: possible performance profile plan) を、例えば、表-2のように設定するという考え方がある。

表-2 各部位に対する性能プロフィールプラン

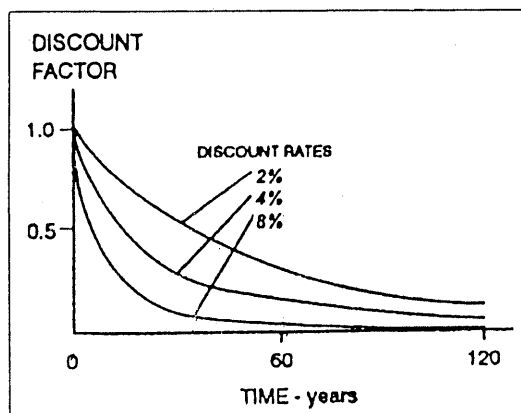
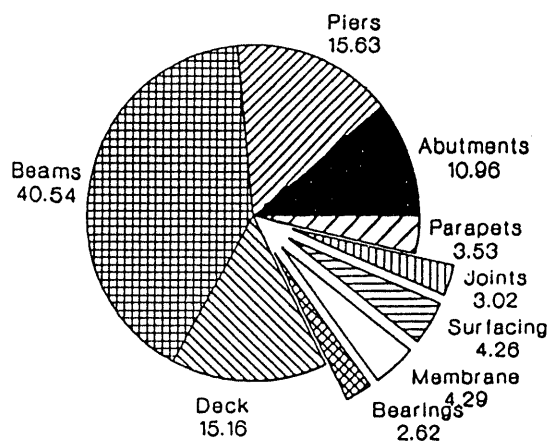


図-16 割引係数

	Target life before replacement (years)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Foundations					
Piers, abutments					
Main beams					
Deck slab					
Bearings					
Parapets					
Joints					
Waterproofing					
Surfacing					
Sealants					
Drainage					
	15 year upgrade	30 year upgrade	60 year major upgrade		

Capital Cost



Net Present Value

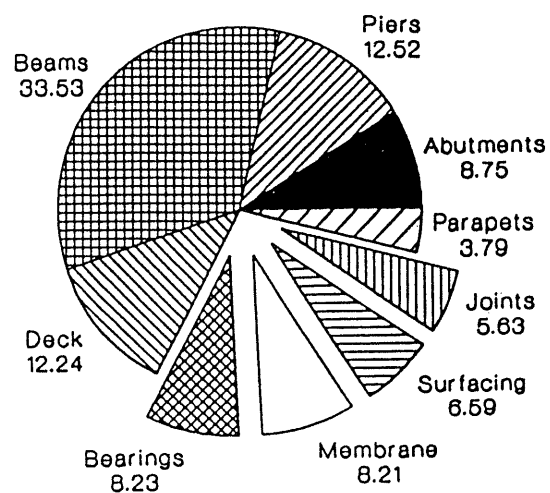


図-17 コンクリート・鋼合成桁橋の各部位の費用比率 ($r = 5\%$)

LCCの評価においては、供用寿命 (service life) の設定が非常に重要となる。例えば、英国規格では1988年以降は最小120年、その他の欧州諸国では1990年代以降は主要橋梁・トンネルで100年としている。デンマークとスウェーデン間を結ぶオーレスンド橋 (Øresund Bridge) は主橋梁とアプローチ部からなる長大橋であり、主橋梁 (全長1092m) は中央径間490mの複合斜張橋から構成されており、LCCの概念を取り入れて目標寿命 (主要部は100年で、部位ごとに異なる) を達成するよう計画的な維持管理手法が導入されているとされている。

PC橋の設計、施工および維持管理にあたっては、以下のことに留意する必要がある。

- ① 21世紀にPC橋が持続的な発展を遂げるためには、LCC解析と併せて最小100年の設計寿命が要求される。また、都市部の主要橋梁に対しては最小150年が推奨される。
- ② LCC解析は、LCCを最小化する橋梁形式の選定に合理的な判断基準を与える。
- ③ 設計寿命を最小100年あるいは150年とするには、維持管理を一層重視する必要がある。
- ④ 初期建設費用を多少増加させることで、PC橋に対し最小100年の設計寿命を達成できる。
- ⑤ ハイパーフォマンスコングリート、防食鉄筋・緊張材、高性能グラウト・硬質プラスチックダクトなどの高性能材料の適切な活用により、ごく僅かの初期建設費用の増加でPC橋の設計寿命を一層長くでき、維持管理費用を縮減できる。

新たな発想や工夫による新技術や新工法の採用にあたっては、LCCによる評価が重視される方向にあり、それを取り入れやすい環境が次第に整いつつあると思われる。この場合、長期の設計寿命を設定すると、構造物が耐久的で、かつ維持管理しやすくなるようにきめ細かく配慮すると同時に、予防保全的な維持管理に対する意識を高めることにもなるであろう。

参 考 文 献

- 1) José A. Fernandez Ordoñez: Eugène Freyssinet; ホセA F オルドネス著「PC構造の原点フレシネー」(池田尚治監訳)、建設図書、2000. 5
- 2) 金森 真: コンクリート鉄道橋の展開、土木技術、Vol. 55、No. 11、pp. 60-68、2000. 11
- 3) 角谷 務: 今後のPC橋の将来展望—波形鋼板ウェブPC箱桁橋への展開—、PC技術協会第10回シンポジウム論文集・特別講演、pp. 7-15、2000. 10
- 4) プレストレストコンクリート技術協会: 複合橋設計施工基準 (案)、1999. 12
- 5) M. Rosignoli: Trusses Instead of Solid Webs? Concrete International, pp. 51-53, 2001. 5
- 6) 猪股俊司: プレストレスされた鋼・コンクリート組合せ橋梁—鋼・コンクリート合成構造の最近の話題、第17回PC技術講習会テキスト、pp. 1-21、1989. 2
- 7) 森元峯夫: フランスと日本の違い“特に橋梁分野”についての感想、橋梁と基礎、179-181、2000. 8
- 8) 池田博之: PC橋の新たな構造を目指して、PC技術協会第11回シンポジウム論文集・特別講演、pp. 5-12、2001. 11
- 9) 池田尚治、藤野陽三、春日昭夫: Virlogeux博士に聞く、橋梁と基礎、pp. 31-41、2001. 6
- 10) 清水敏弘、森光俊樹、井手慶吾、山本哲也: 大芝大橋上部工の施工、橋梁と基礎、pp. 2-9、1998. 2
- 11) 井上哲典、他 5: 天建寺橋の上部工の施工、橋梁と基礎、pp. 2-9、1998. 12
- 12) J. Strasky: Segmental Structure with Replaceable CIP Deck Slab, International Bridge Conference, 2000
- 13) 池田博之、水口和之、春日昭夫、室田 敬: 古川高架橋の設計と施工 (上)、橋梁と基礎、pp. 2-9、

2001. 6

- 14) 橋梁と基礎 海外文献研究グループ：ベッキオ橋、橋梁と基礎、pp. 52-53、2000. 4
- 15) 鈴木裕二、酒井英昭、上杉泰右：工場製作プレキャストセグメント工法による P C 連続箱桁の計画と設計—第二東名高速道路上和絵高架橋、橋梁と基礎、pp. 15-21、2001. 4
- 16) 福田栄仁 他 5：大日橋の設計と施工—プレキャスト P C 床版を用いた吊橋—、橋梁と基礎、pp. 2-7、2001. 5
- 17) C. L. Freyermuth：The years of Segmental Achievements and Projections for the Next Century, PCI Journal, Vol. 44, No. 3, pp. 36-52, 1999. 6
- 18) The Concrete Society Technical Report No. 47：Durable Bonded Post-tensioned Concrete Bridges, 1996、および海外技術情報：イギリスにおけるポストテンション方式の橋梁に関する基準見直しと事故報告、プレストレストコンクリート、Vol. 36, No. 4, pp. 79-80、1994. 7、菅原 操：プレストレストコンクリートのグラウト作業とグラウト品質の改良、セメント・コンクリート、No. 603, PP. 8-15、1997. 5
- 19) 青木圭一、益子博志、森 拓也、山本 徹：ドイツの外ケーブルを使用したコンクリート橋に関する指針、プレストレストコンクリート、Vol. 42, No. 5, pp. 81-88、2000. 9
- 20) 例えば、S. Matthys and L. Taerwe：FRP reinforcement：developments in Europe, Concrete, pp. 20-21, 2001. 6
- 21) 神田昌幸：東北・日本海沿岸における P C 塩害橋の補修と更新—その経緯と塩害対策—、セメント・コンクリート、No. 656, pp. 92-99、2001. 10
- 22) 日本材料学会・高耐久性 P C 構造物開発検討委員会報告書：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発、1998. 3
- 23) 上津 敏、田中和幸、豊福俊泰：塩害に対応した高耐久性 P C 構造物の建設—屋嘉比橋上部工工事—、コンクリート工学、Vol. 37, No. 3, pp. 20-23、1999. 3
- 24) 大即信明、檜野紀元、片脇清士、小林明夫、宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害（I）、pp. 52-54、技報堂出版、1986. 5
- 25) 石田祐一、江崎 守、前田悦孝、坂本賢次、松下博通：高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 P C 橋の設計・施工—熊本高森線 俵山 4 号橋—、コンクリート工学、Vol. 42, No. 3, pp. 45-51、2000. 5
- 26) 酒井秀昭、横山博司、高野茂晴、前田悦孝：高炉スラグ微粉末（6000cm²/g）を用いた鋼橋の P C プレキャスト床版の検討、プレストレストコンクリート、Vol. 43, No. 5, pp. 50-57、2001. 9
- 27) P. Y. Blais and M. Couture：Precast, Prestressed Pedestrian Bridge—World's First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal/May-June, PP. 60-71, 1999. 6
- 28) W. J. Semioli：The New Concrete Technology, Concrete International, pp. 75-79, 2001. 11
- 29) F. Leonhardt：The Significance of Aesthetics in Structures, IABSE Structural Engineering International, pp. 74-76, 1996. 2
- 30) M. P. Collins：In Search of Elegance：The Evolution of the Art of Structural Engineering in the Western World, Concrete International, pp. 57-72, 2001. 7
- 31) P. K. Mehta：Reducing the Environmental Impact of Concrete, Concrete International, pp. 61-66, 2001. 10
- 32) 泉 満明：橋梁建設から考える地球環境問題、建設業界、pp. 62-65、2001. 11

- 33) 西村一紀、張 建東、廣井幸夫、児島孝之：P C橋のL C Aに関する調査・研究、P C技術協会第11回シンポジウム論文集、pp. 687-690、2001. 11(詳細については、建設コンサルタンツ協会近畿支部：コンクリート構造物の高性能化研究員会(委員長：小林和夫)報告書—コンクリート構造物の高性能化に関する調査・研究—(2001. 3)を参照されたい)
- 34) P Cプロジェクトの国際化と技術的な発展(第28回P C技術講習会、2000. 2)および21世紀におけるプレストレストコンクリート技術の展望(第29回P C技術講習会、2001. 2)
- 35) 国土交通省土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンスP C橋の開発に関する共同研究報告書(I) —ライフサイクルコスト算出方法に関する検討—、第273号、2001. 3
- 36) G. Somerville : The Role of Whole Life Costing in Selecting Durable Bridges, Proc. of FIP Symposium 1997 (Johannesburg South Africa), pp. 377-382, 1997. 3
- 37) C. L. Freyermuth : Life-Cycle Cost Analysis for Large Segmental Bridges, Concrete International, pp. 89-95, 2001. 2

プレストレストコンクリート構造の形と美

—建築—

京都大学大学院教授・本協会副会長	渡 邊 史 夫
大阪大学大学院教授・本協会理事	大 野 義 照
(株)安井建築設計事務所	森 高 英 夫
(株)日建設計	陶 器 浩 一
(株)構造空間設計室	長谷川 一 美

ま え が き

過去の講習会での建築分野のトピックスは、「平成11年：高層PC建築の設計と施工」、「平成12年：プレストレストコンクリート建築—高機能空間の創造—」、「平成13年：21世紀のプレストレストコンクリート構造—建築—」と成っており、新世紀に向かっての新たな技術課題が主として構造設計の立場から扱われてきた。その一方で、鉄筋コンクリート構造に比べて、大スパン構造や複雑な形態創生が可能なPC構造は、多くの芸術的ともいえる作品に適用されてきている。21世紀の最初の講習会は、従来の構造・材料学的見地からの講習ではなく、PC構造の可能性を「構造の形と美」という観点から捕らえて、その将来発展を図るべく、以下の趣旨に基づいて計画された。

- 1) PC造建築の可能性を、「構造の形と美」という観点から捕らえて、将来発展につなげる。
- 2) 参加者の多数を占める土木関係者（PC専業者、設計者、プレキャスター、公団、行政）への情報発信。
- 3) 建築設計家やPC技術者に構造一辺倒でない考えを披露し、幅広い素養を培う助けとする。
- 4) 漠然とした言葉の羅列による講習でなく、実施例を通した実態有る解説を行う。

この目的に添って、「形態美、景観との共生」、「建物機能の形態表現等に関するコンセプト」、「形態美実現のための構造形式選択のコンセプト」、「プレストレストコンクリート構造を選択した理由」、「構造詳細におけるアイデア」、「当初意図の実現度」及び「維持管理上の問題」等をキーワードとし実際の代表的建築物を取り上げて解説したものが本資料である。取り上げた代表的な建築物は新旧含めて5種類であるが、数多くのすばらしい建築物からの抽出は困難を極めた。最終的には、執筆グループ内での議論である程度独善的に決定せざるを得なかった点をご了解いただきたい。すなわち、これら建物のほかにも、同等に優れた数多くのPC建築物が存在している。

建設投資が減少する建設産業界の実情のなかで、多くの技術者や研究者が、「構造の形と美」という視点をもってPC建築の普及に努力することが、成熟した社会、すなわち、効率のみを求めるのではなく、より歴史や文化を大切にする都市形成に資する事になると信じている。

1. シドニーオペラハウス（世界を代表するPC建築）
2. 出雲大社・庁の館（モダンにして古典的優雅さを持つPC建築）
3. 愛媛県美術館（史跡環境との調和を目指した美術館）
4. 那覇国際空港国内線旅客ターミナルビル（国内初の本格的なプレキャストPC造による空港ターミナルビル）
5. 下関地方卸売り市場・唐戸市場棟及び駐車場棟（構造形式の新しい挑戦）

1. シドニー オペラハウス

—世界を代表するPC建築—



1-1. 取り巻く条件

世界でも最も美しい港の一つとして有名であるオーストラリアの首都シドニーが面する広い入江、ポートジャクソン。そのシンボルであるシドニーハーバーブリッジから入江を一つへだてたベネロング岬の上にこの建物は計画された。

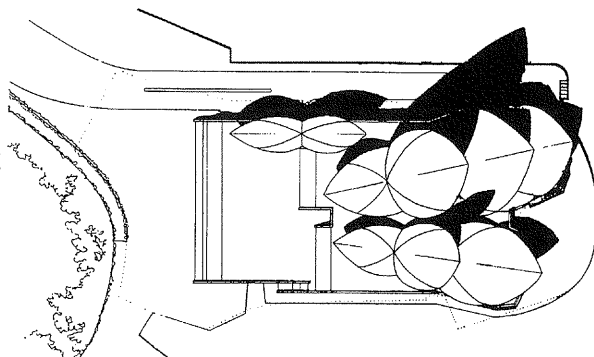
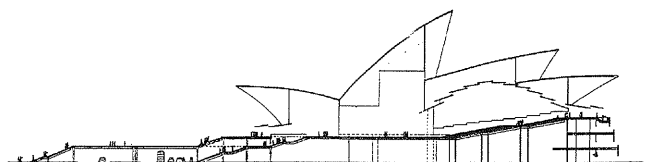
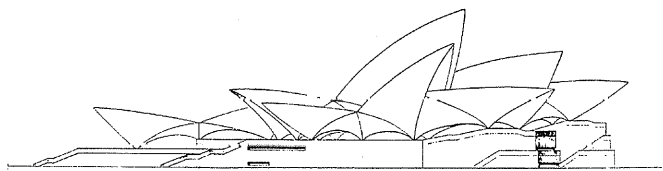
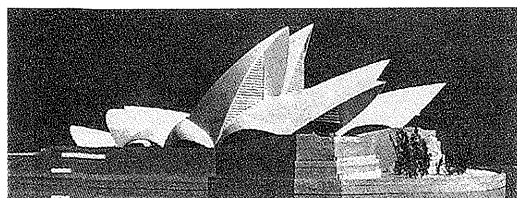
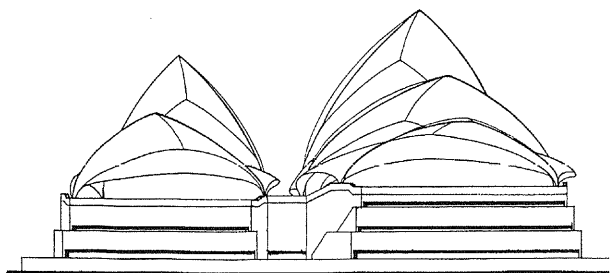
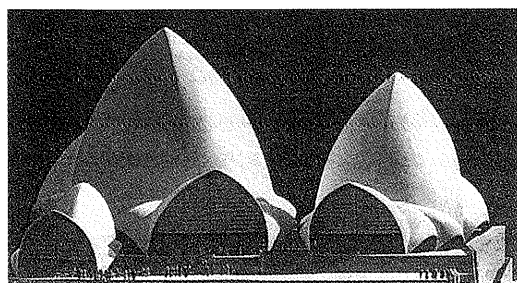
世界から230人が設計案を提出した設計競技において、当時まだ無名であったデンマークの建築家、ヨーン・ウツソンの案が入選した。

1-2. コンセプト

1956年にウツソンがコンペ事務局から送られてきた敷地の写真と地図を検討したとき、彼は大切なことに気が付いた。巨大なハーバーブリッジ以外に、この周辺には視覚的な中心となるものが何もなく、もしそれを置くとしたら、ベネロングポイントこそ最良の場所だ。ということである。この場所にフォーカルポイントとなるような美しい建物を創出することこそ、このコンペに優勝するための最大の条件であって、機能的に良くできているだけでは不十分だ、という思いが彼のここを強くとらえた。

ウツソンの計画案の最も衝撃的であったのは、曲面を大胆に駆使した屋根構造の提案であったことは疑いをいれない。風をはらんだ帆船の白帆を連想させる形態は、美しい入江の先端に美しく存在する。

これらのシェルは、全体としてランドスケープの中のフォーカルポイントを形成しているだけでなく、そのシェルのひとつひとつがその内部に包み込んでいる劇場の各部分の機能自体を象徴しているのである。



設計競技入選案（出典（1））

1-3. 計画の過程

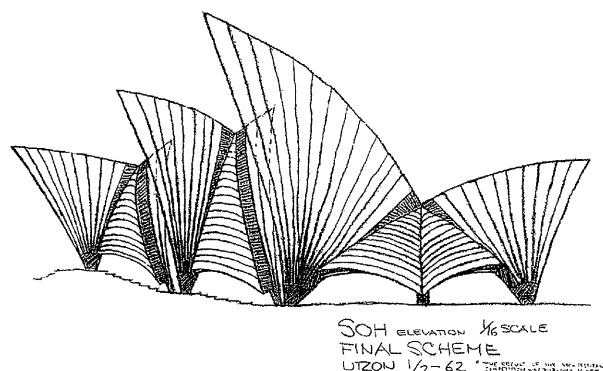
自由な彫刻的アプローチから出発した案であったが、最終的には極めて厳格な幾何学的規律を有するデザインへと到達した。その道のりは長く、困難を極めた。

当初の案はフリーフォームなコンクリート薄膜構造で考えられていたが、この形態は膜構造として成立するための条件を満たしていなかった。

実現に向けて協働したのは、世界的な構造デザイナー、オヴ・アラップである。

コンペ案のフリーな曲面は、パラボラに整理され、パラボラ二重シェル方式となり、さらにパラボラ・プレキャスト方式となっていた。プレキャストで成形したリブをつなぎ合わせて扇形の肋をつくる。このリブを如何に標準化するかが次の課題であった。

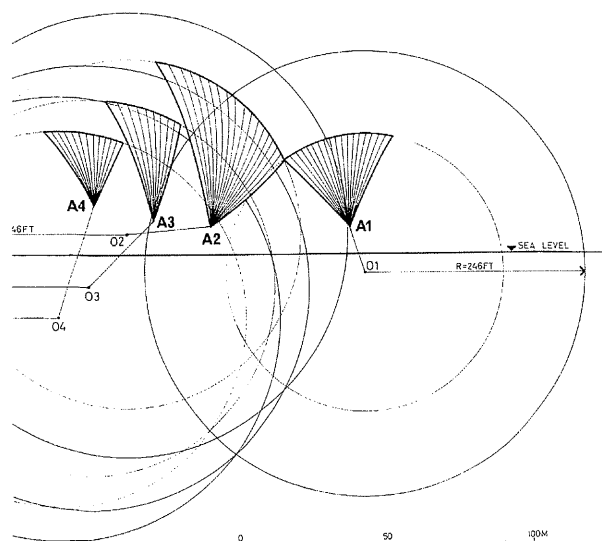
ウツソンは、普通の球体を切り取ることによって同じカーブを繰り返す肋に必要な形をすべて得られることに気づいた。これですべての肋のセクションは、単一の型から作られることになる。球面・プレキャスト方式の発見によってこの建物は実現にむけて大きく進展した。



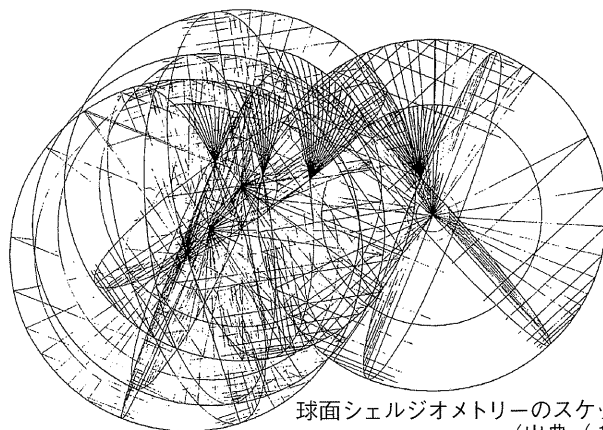
ウツソン自筆の屋根スケッチ 1962. 2
(出典 (1))



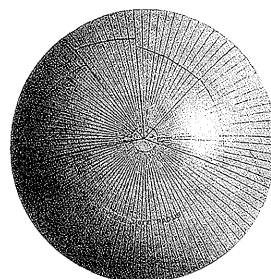
模型を囲んで討議 左端がウツソン (出典 (1))



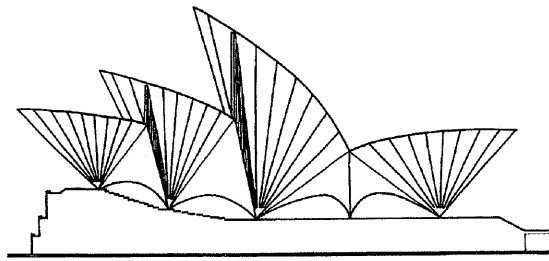
4つの球面を合成して得られる屋根全体の立面図
(出典 (1))



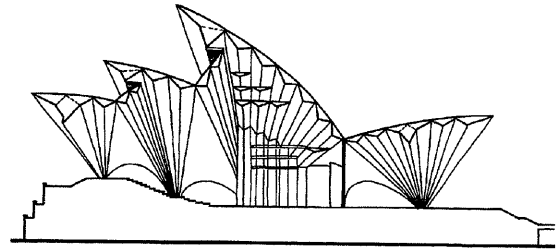
球面シェルジオメトリのスケッチ
(出典 (1))



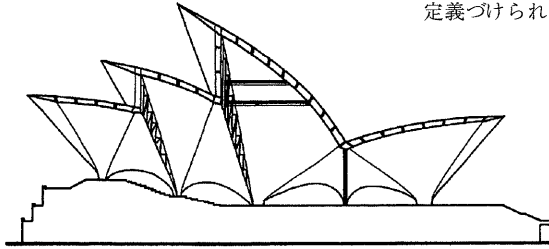
球面から切り出す
(出典 (1))



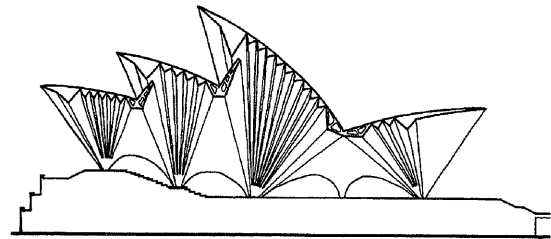
当初のフリーフォームはパラボロイドとして幾何学的に定義づけられた



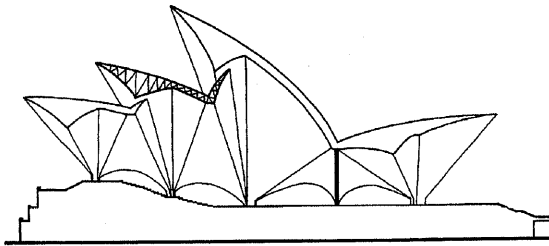
ステージタワー壁でシェルを支える案



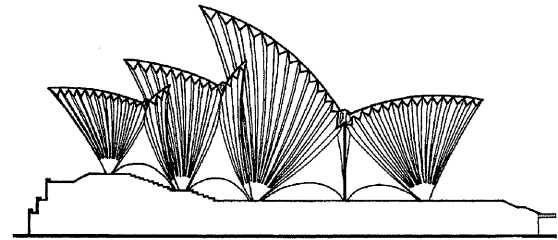
格子状のリブを中間に持つダブルシェル案



楕円の幾何、プレキャスト部材の標準化は未解決



鉄骨スペースフレームの両面にコンクリートを吹き付ける案



球面幾何、標準化されたプレキャストリブの組み合わせ

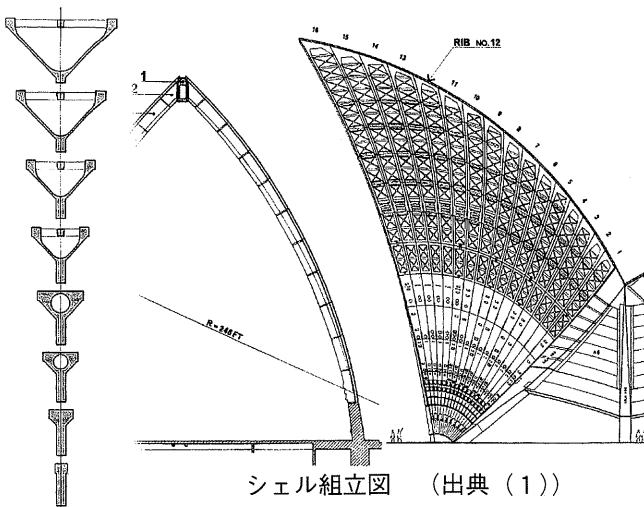
実現へのアプローチ (出典 (3))

1-4. PCa 構造の選択

球面から切り出された構造体を構成するのは、地球儀の経度線のような大円によって区切られた、細く切ったメロンの皮のようなリブである。球の半径は約 75 m である。紆余曲折があったが、最終的に量産のメリットを優先して、すべてのリブを同一半径・同一形状とした。

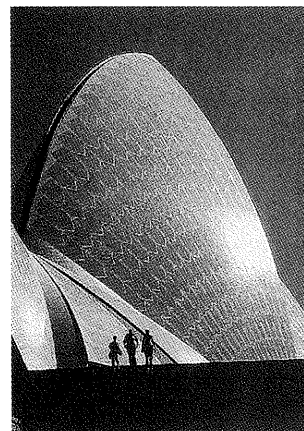
リブを構成するセグメントは断面が下部から上部へと連続的に変化する。この断面形はほとんどすべてのリブについて同じなので、理論的には最長のリブをプレキャストできる型枠 1 個からすべてのリブが生産できることになる。

この繰り返しによる大量生産こそが、球面ジオメトリの最大のメリットであり、この形態を実現可能とした。また、同時にこの形態の採用により、幾何学的な模様で光り輝くタイルのパターンが実現した。

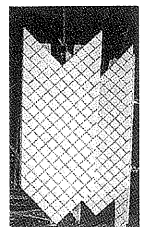
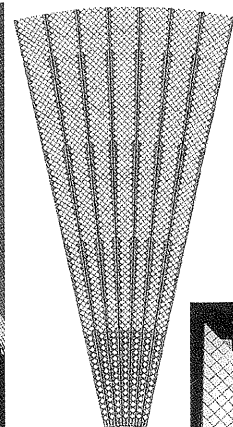


シェル組立図 (出典 (1))

連続的に形状が変化するリブ断面 (出典 (1))



規則的なタイルのパターン (出典 (1))

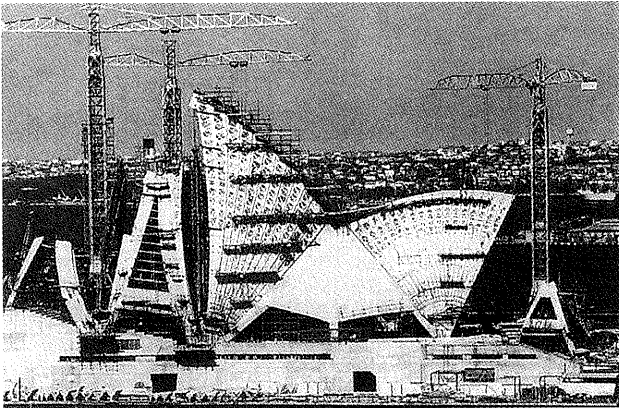


1-5. 施工

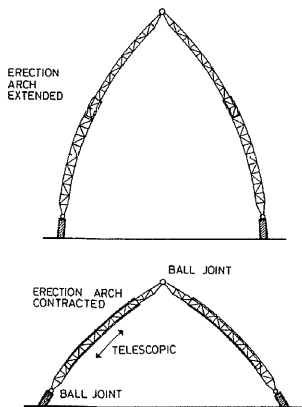
屋根工事の最大の問題点は、プレキャストされたリブの構成部材を通常のパイプ足場などの仮設材を使用しないでどうやって合理的に組み立てるか。というところにあった。

この難問に答えを出したのは、“エレクション・アーチ”であった。これはリブの長さは大幅に変化するが、その曲率は恒に一定であるというこの屋根のジオメトリの原理を巧みに応用したものである。

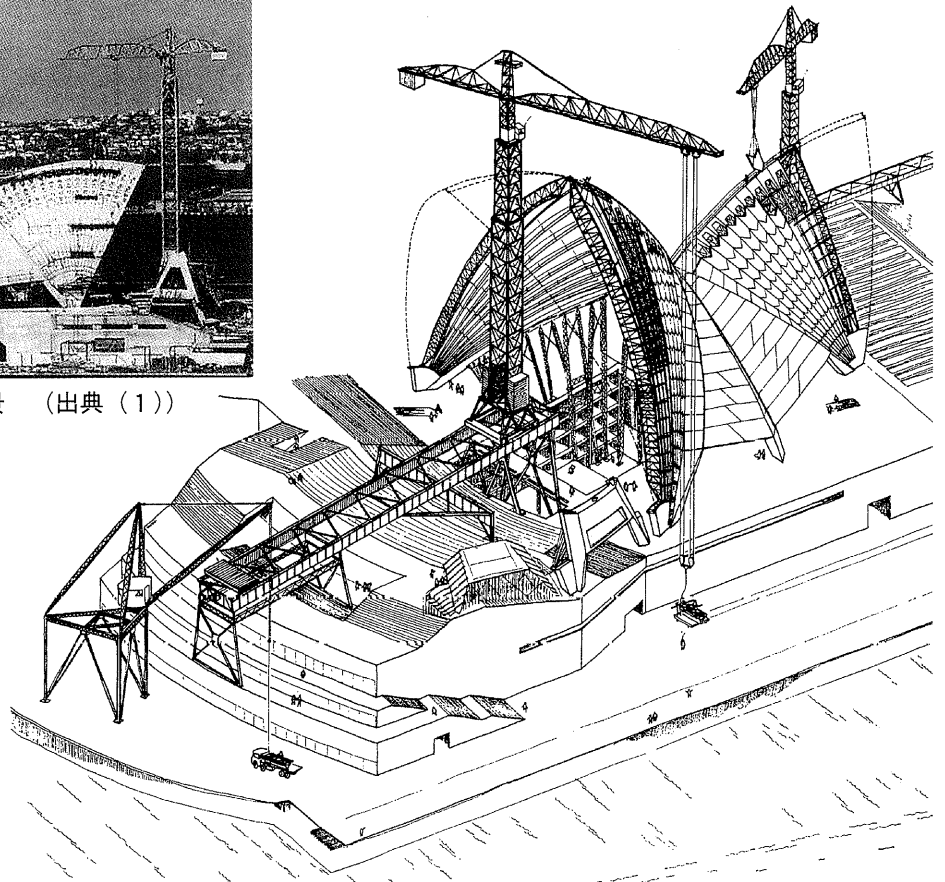
このスチール骨組は抜き差し自由であって、高い肋に合わせるときは引き伸ばされ、短い肋には推して短くする。また、アーチは水平に動かすことが出来、どんな角度にも傾斜できた。



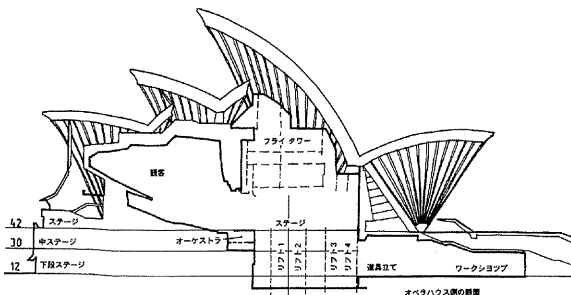
施工風景 (出典 (1))



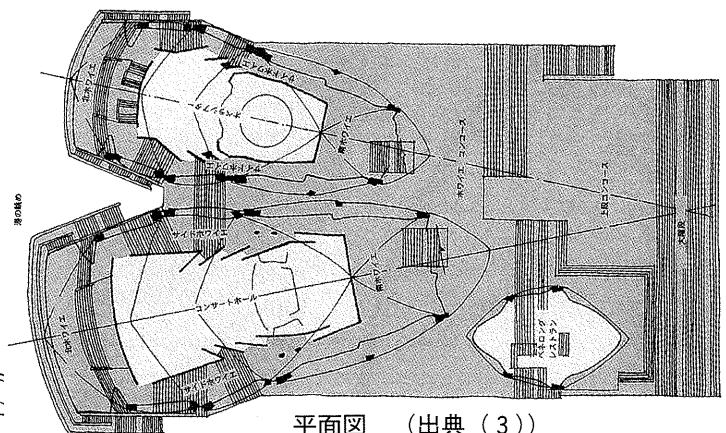
エレクションアーチのフレキシブルな
ジオメトリ (出典 (1))



工事状況アイソメ図 (出典 (1))



断面図 (出典 (3))



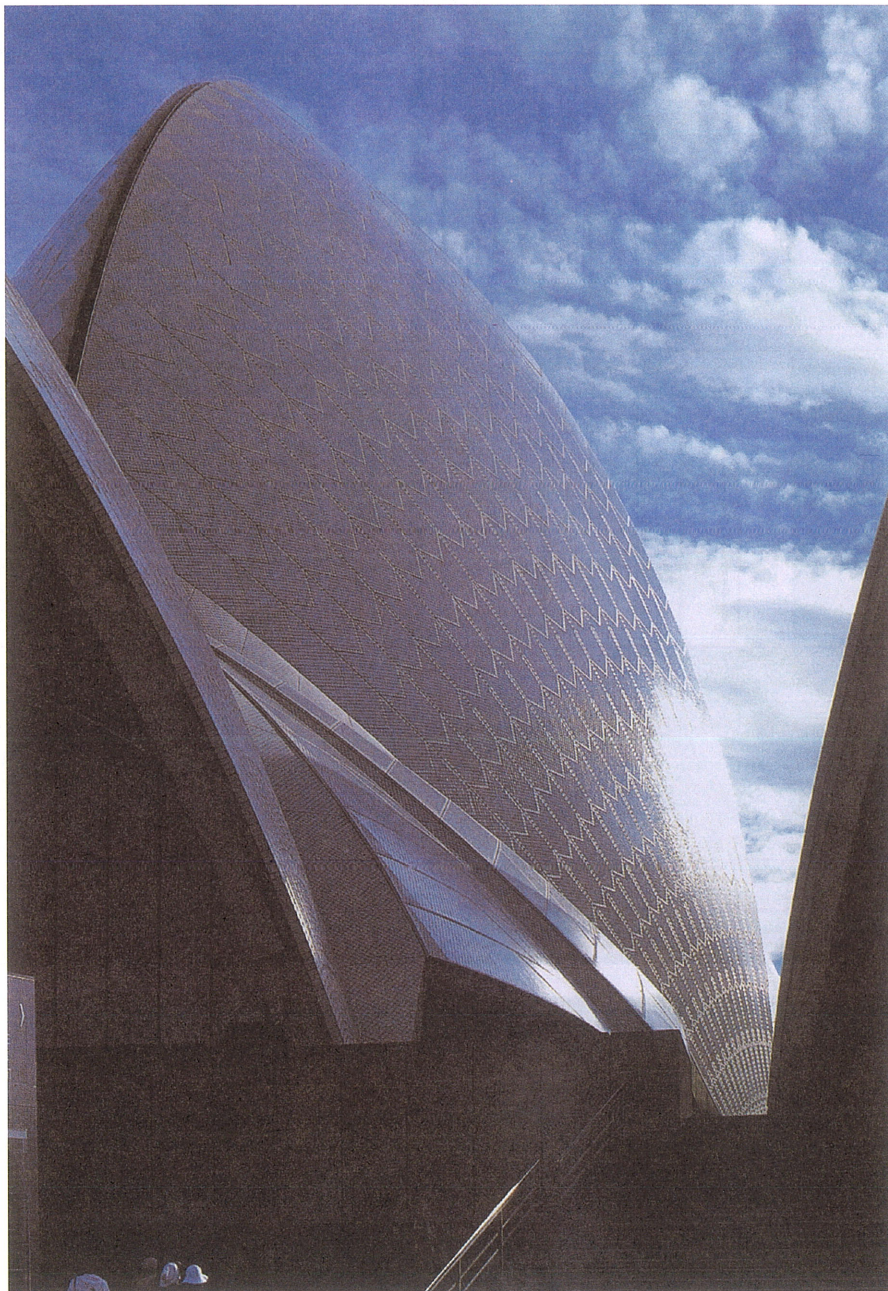
平面図 (出典 (3))

1-6. おわりに

シドニーオペラハウスが20世紀における建築作品の傑作のひとつとして歴史にその名を留めることは疑いのないところであろう。今やオペラハウスの白い帆のイメージはシドニーと不可分に結びつき、世界の人々の目に焼き付いている。しかし、その実現までの過程は、非常に多くの歳月と、紆余曲折を経ており、創造者であるヨーン・ウツソンにとっては苦闘の軌跡であり、未完に終わった主題でもある。詳しくは「シドニーオペラハウスの光と影：彰国社」を参照されたい。

(参考文献)

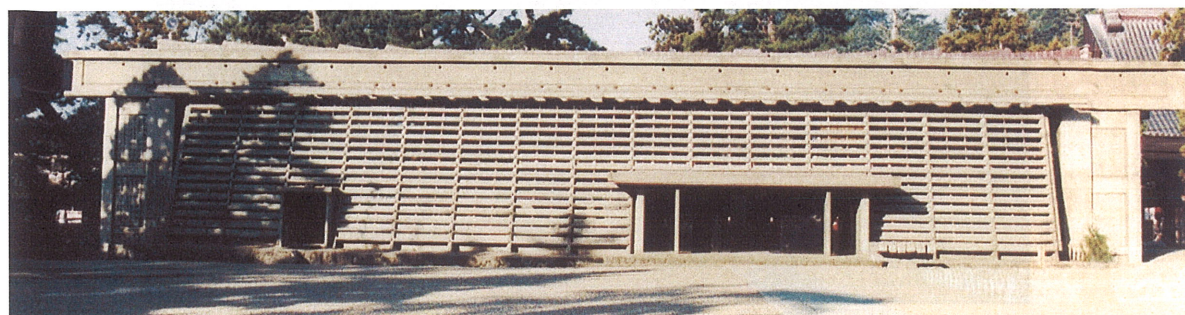
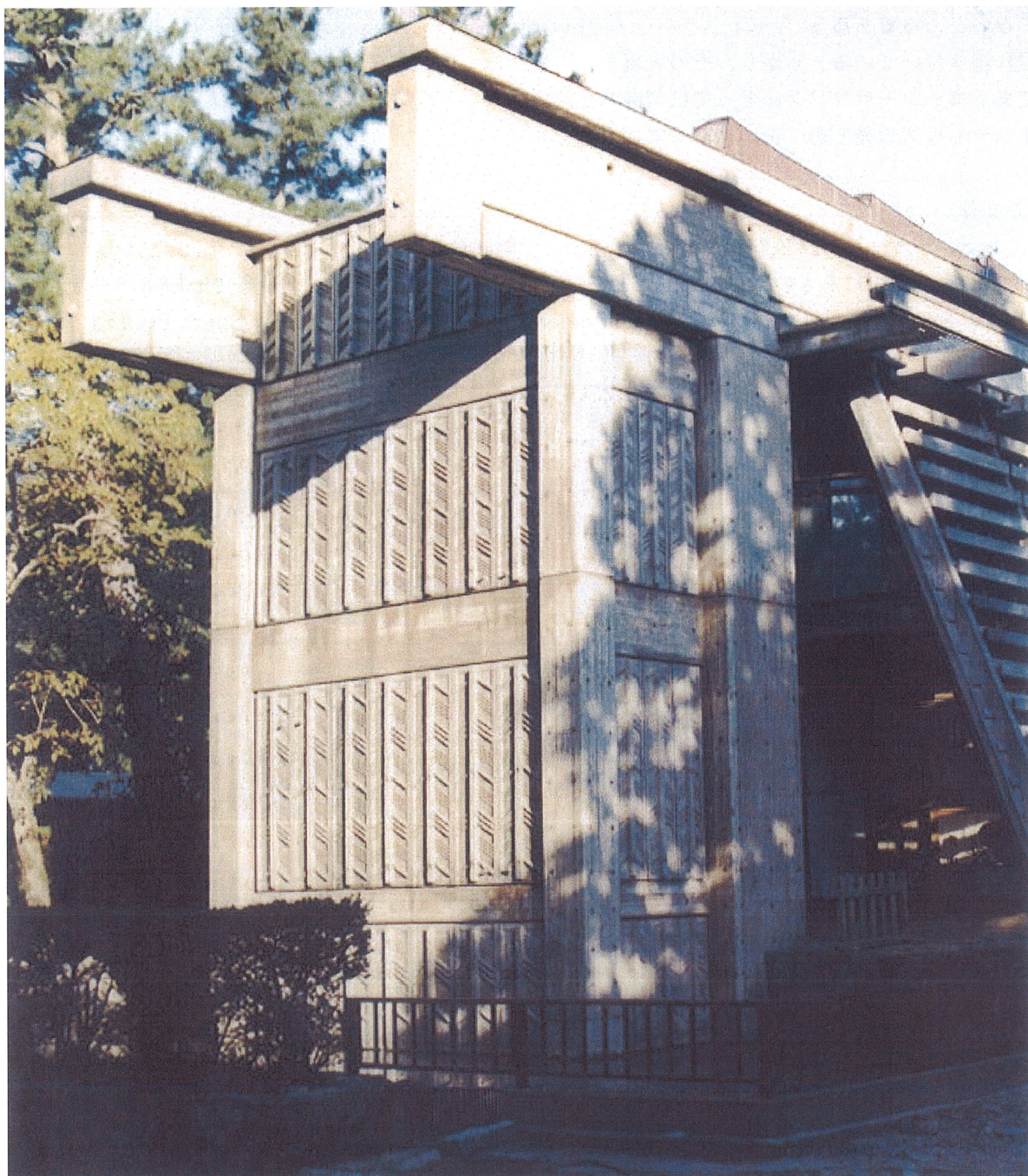
- (1) シドニーオペラハウスの光と影 三上祐三 : 彰国社
- (2) 創造をうらづけるもの 青木繁・三上祐三・山本学治・横山不学 : 建築文化1968.9月号
- (3) The Sydney Opera House Michael Pomeroy Smith Michael Pomeroy Smith Pty Ltd



光り輝く優美な曲面 1973年完成(出典(1))

2. 出雲大社・^{ちよう} ^や 庁の舎

— モダンにして古典的優雅さをもつPC建築 —



2-1. 取り巻く条件

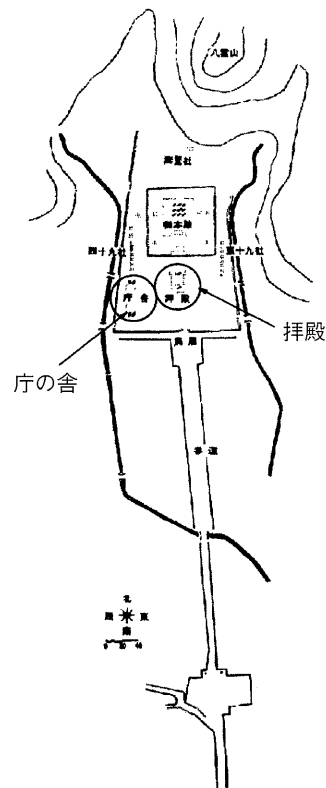
1953年5月の火災によって讃火殿、庁の舎、拝殿が焼失したため、その復興として、まず拝殿が1959年5月に見事な木造建築（当時、戦後最大の神社建築といわれた）でよみがえった。



伝統木造建築によりよみがえった拝殿

つづいて庁の舎が復興されることになった。

庁の舎は、いわば社務所ともいべき性格のもので、設計にあたって十分な耐火性および耐久性（敷地が海岸に近く、北西の季節風にさらされる）を有することが条件として与えられた。

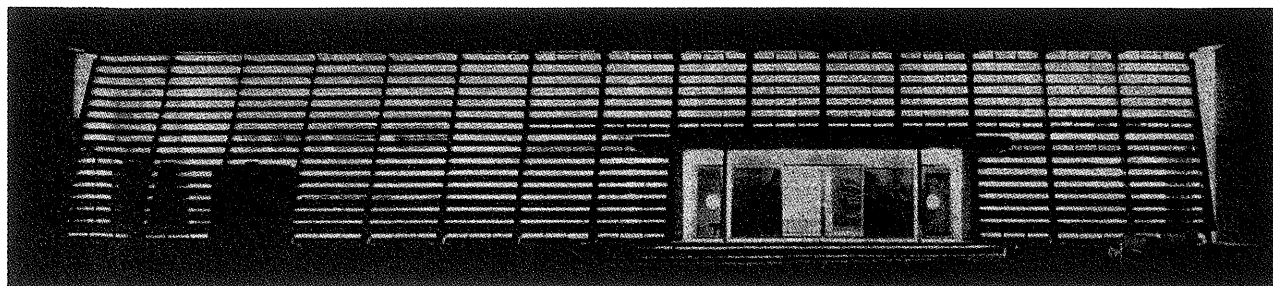


配置図

2-2. コンセプト

設計者である建築家の菊竹清訓氏によれば、庁の舎のデザインコンセプトとして終局的に求めた機能は出雲大社の神域を照らす「あかり」であり、当初は建物の外壁をすべてあめ色の強化色ガラスで覆いたいと考えていたようだ。しかし技術的に困難であるということで、プレキャストコンクリートの横棧の間に特殊ガラスをはめ込んだデザインとし、昼よりも夜の表情が印象的になるよう工夫されている。

また構造は耐火性および耐久性に優れた高強度コンクリートによるPC造で、プレキャストコンクリート部材と場所打ちコンクリート部材の併用による組立架構方式としている。



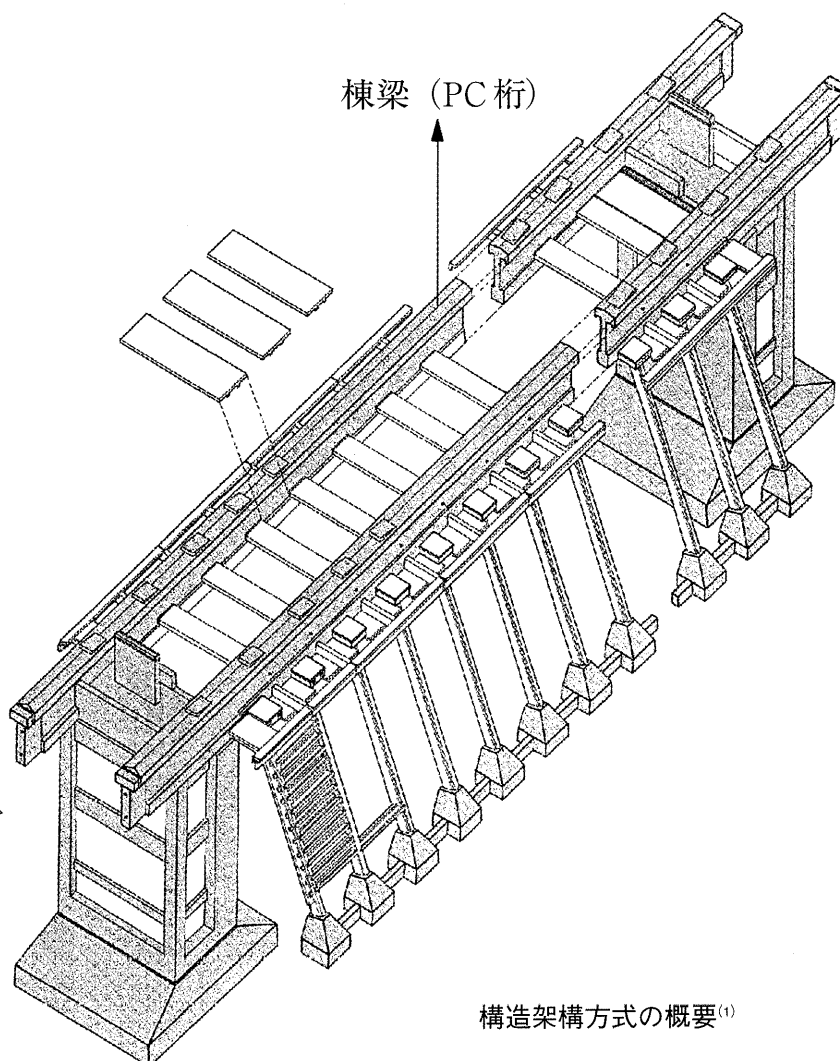
庁の舎全景（神域を照らす「あかり」のコンセプト）

2-3. 形態美実現のための構造形式選択のコンセプト

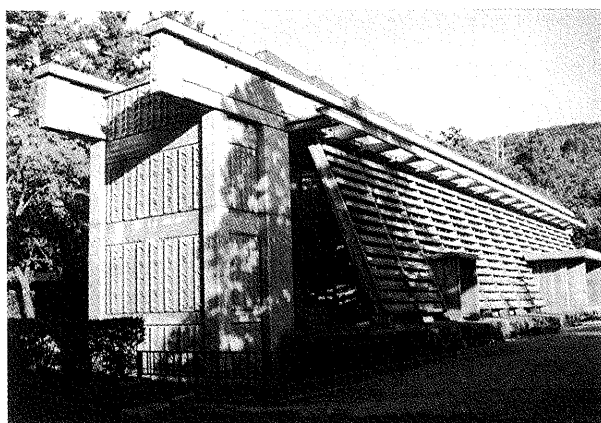
木造建築でとくに古い伝統と秩序を持った出雲大社の神域に現代建築技術としてのコンクリートをどのように導入するかがテーマであった。

出雲地方独特の稲架けの形を外壁デザインにとり入れた架構方式で、構造の形態がそのままイメージされる古典的優雅さのある外観を感じさせる。

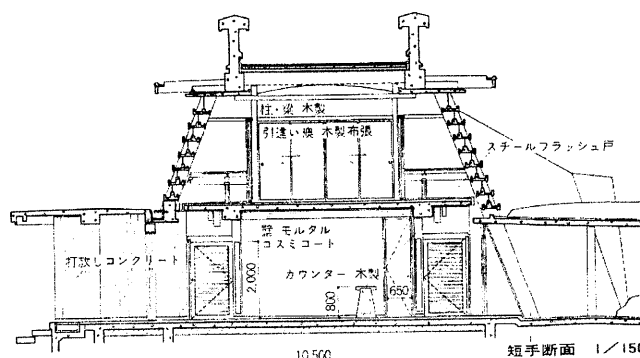
棟梁に取りつけられた庇受け、庇、方立受け、方立、横棧はすべてプレキャストコンクリート部材



構造架構方式の概要⁽¹⁾



構造の形態がイメージされる外観

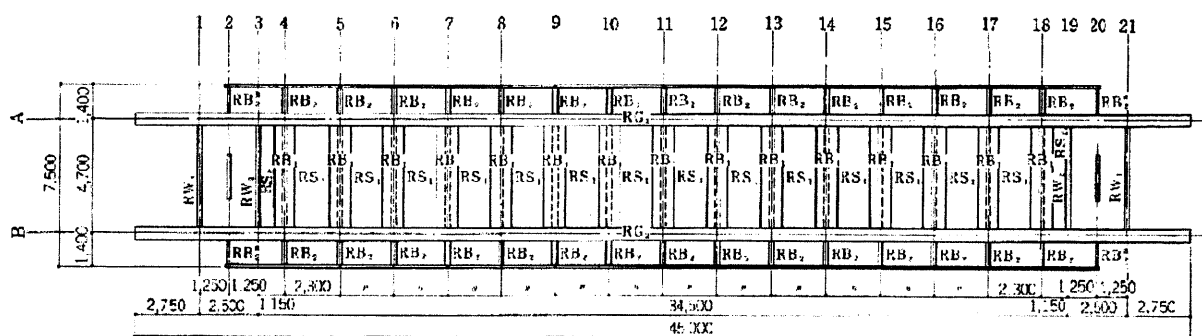


断面図⁽¹⁾

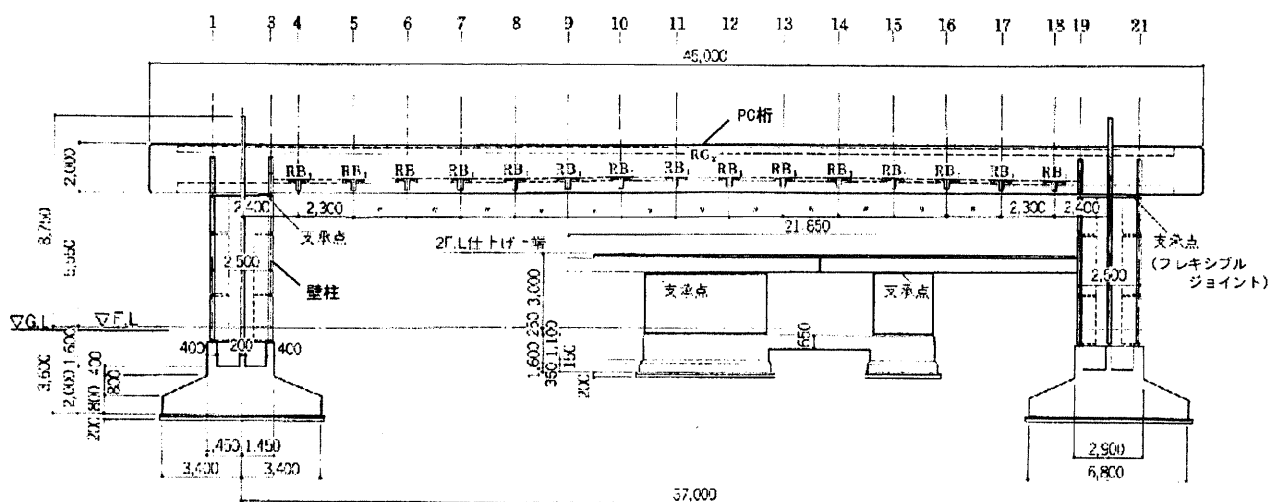
コンクリートの素材を最大限に生かすためにプレストレストコンクリート工法が採用され、また構造部材だけでなく意匠部材も巧みにプレキャスト化されており、施工精度および躯体の品質が高く、コンクリート構造物でありながら非常に繊細な印象を与える PC 建物となっている。

2-4. PC 構造形式の概要と構造詳細におけるアイディア

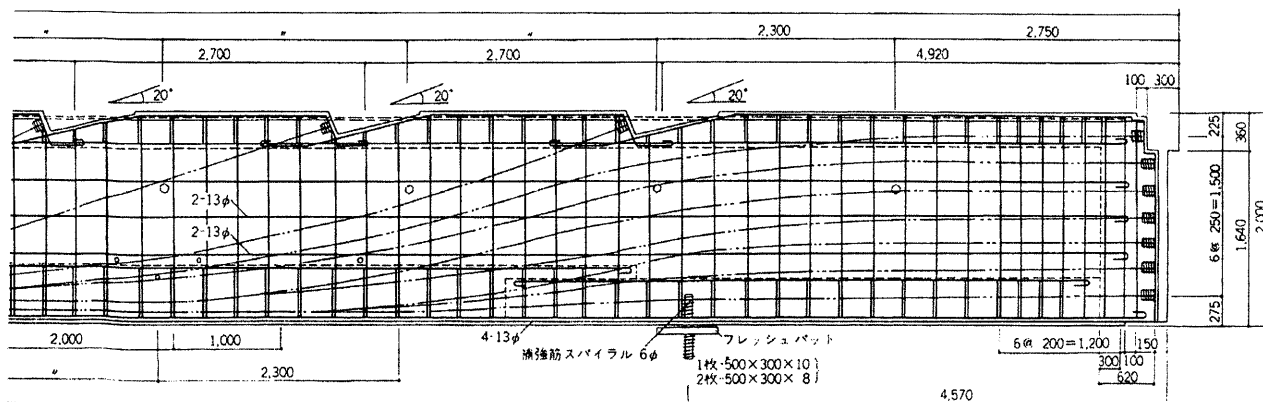
約45mの長さの桁を2本かけ渡したシンプルな構造システムである。桁は現場打ちのコンクリートにポストテンション工法を用いたもので、スレンダーな断面となっている。主構造は、桁と桁を受ける壁柱のみであり、PC桁にプレストレスを導入するときに、壁柱に二次応力を生じさせないように、桁と壁柱の接合部はフレキシブルジョイントとなっている。原案では、構造体のすべてをプレキャストコンクリートによるブロック工法を用いて造る予定であったが、運搬や架設、その他の諸問題を考慮して現場打ちコンクリートのポストテンション工法にふみ切ったようである。PC桁のプレストレス導入はフレシネジャッキ2台を使用して両端より同時に緊張された。コンクリート強度はFC45で、導入時圧縮強度は40N/mm²である。屋根版はD.T版と二列のPC桁を結ぶプレキャスト小梁が交互に配置された構成となっている。



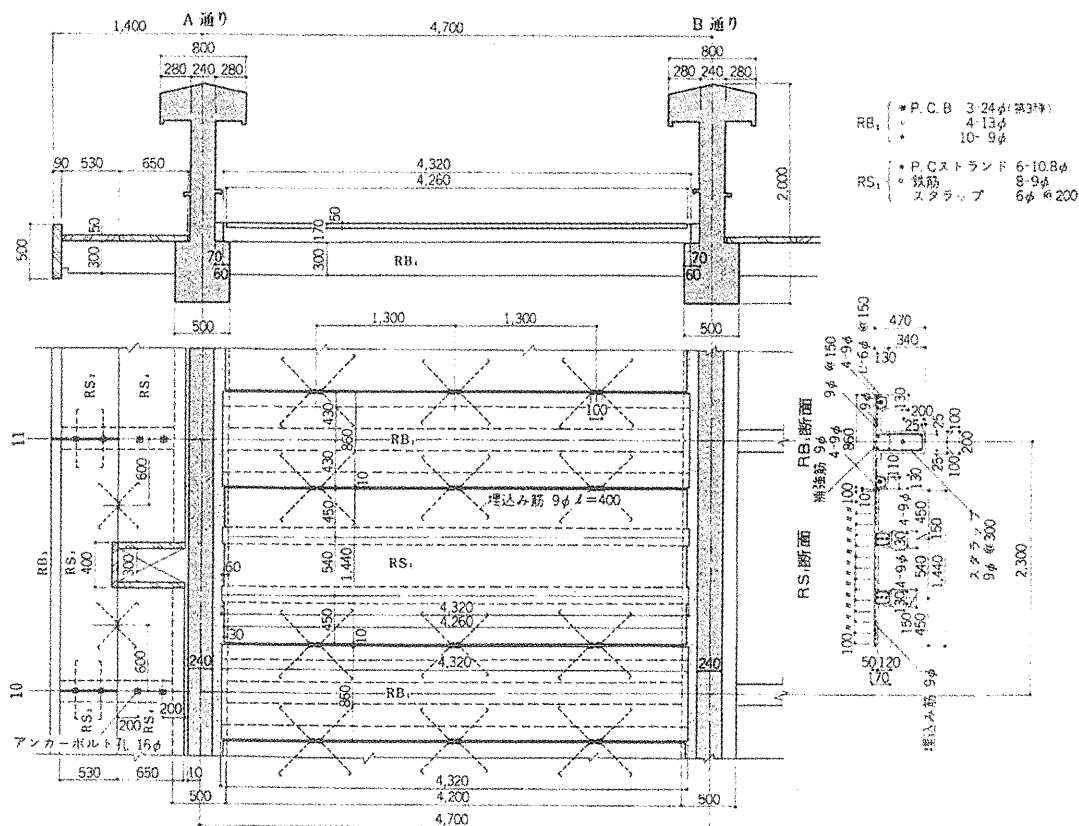
屋根梁伏図(1)



B通り軸組図(1)



PC桁配筋・配線詳細図(1)



屋根床版詳細図⁽¹⁾

2-5. デザインコンセプトの実現度

1963年に竣工したこの建物は、伝統と現代の調和を目指した建築として社会的に高い評価を受け、当時の芸術選奨や学会賞などを受賞した。さらに、1996年には建築・設備維持保全推進協会（BELCA Building and Equipment Life Cycle Association）からロングライフ部門でBELCA賞を受賞し、完成

後の維持・管理により高い耐久性を実現していることが評価された。これは、設計当初のデザインコンセプトが評価されただけでなく、ある意味でPC構造の優れた造形性と高い耐久性の結果が評価されたとも思われる。

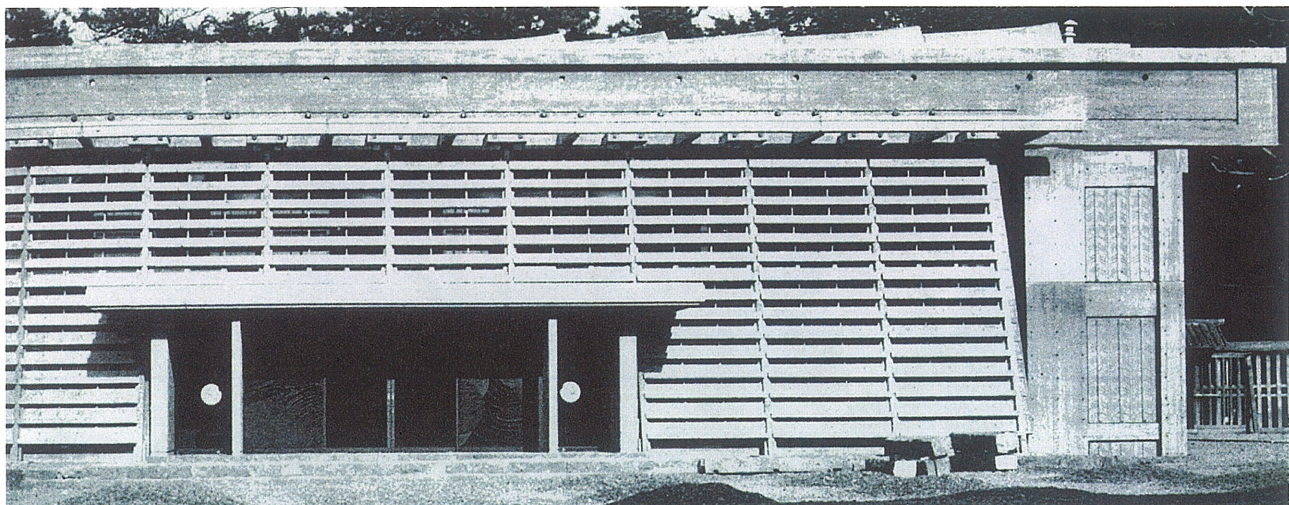
PC構造を支える技術は、魅力的でデザイン性の高い空間の創造に大きな役割を果たすことができるだけでなく、建物の長寿命化を実現することにより世界共通の課題である「地球環境の保全」にも貢献してゆけるものとする。

（参考文献）

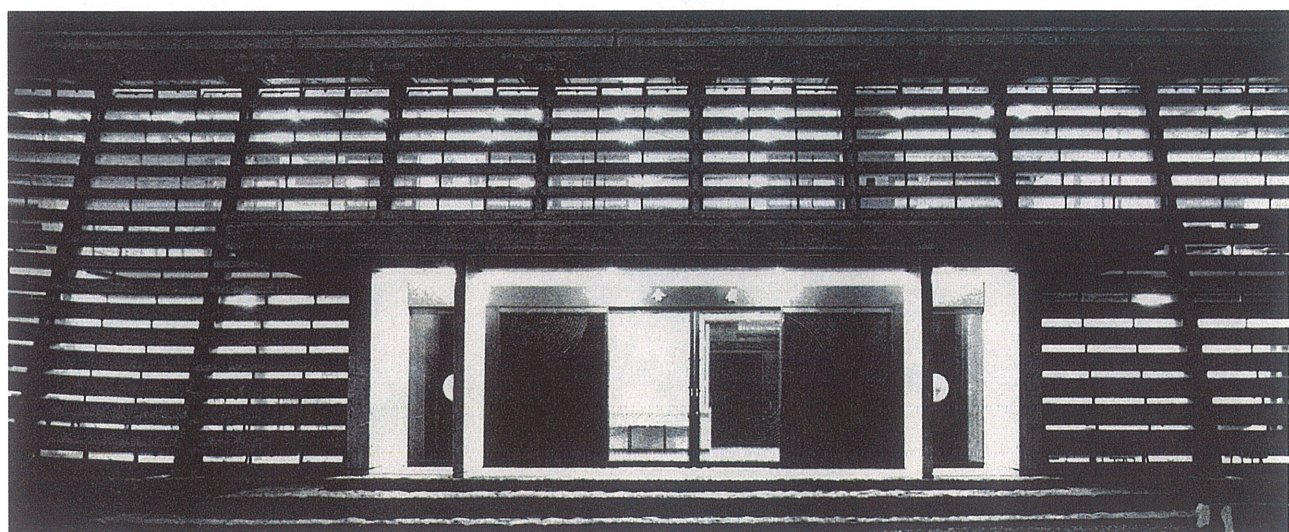
（1）新建築、1963年9月

建築概要

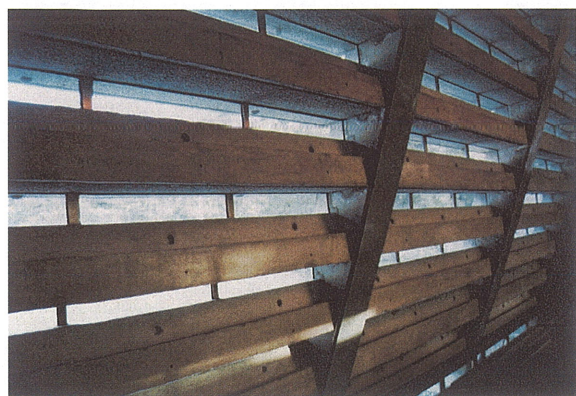
- 1) 鉄筋コンクリート造平屋建一部中2階
P.C.コンクリート組立架構
最高高さ 8.04m（棟梁上端）
深 さ 3.02m（棟柱基礎下端）
主屋内北 41.90m（棟柱間隔）
東 西 10.50m
- 1) 延べ床面積 631.02㎡
設計 菊竹清訓建築設計事務所
構造 早大 松井源吾構造研究室
協力 星川明雄
監理 菊竹清訓建築設計事務所
施工 大成建設株式会社
プレキャスト製作 漆建材工業株式会社
PC工事 オリエンタル工業株式会社
（現、オリエンタル建設株式会社）
工期 1961.10～1963.5



建物外観の昼の表情



建物外観の夜の表情



内部からみたプレキャスト方立および横棧と特殊ガラス
(横棧についている黒点3コは寄進者の名を入れたクリスタルガラスの壺である)



建物内部空間をみる

3. 愛媛県美術館

— 史跡環境との調和を目指した美術館 —

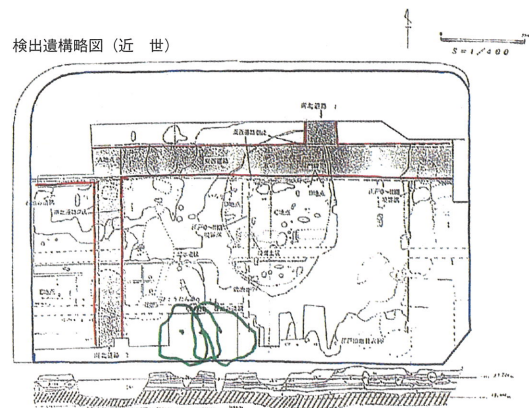


3-1. 取り巻く条件

この建物は、国の史跡・松山城址の三の丸に建つ美術館である。
国の史跡内という特別の地に位置するため、景観・環境に対する十分な配慮が必要であったが、それに加え、敷地内に存在する江戸時代の遺構を保存することが求められた。また、設計開始から、乾燥期間（アルカリ濃度低減期間）を含めて、開館まで2年9ヶ月の短さで完成させる必要があった。



自然の中の美術館



敷地内で発見された遺構

3-2. コンセプト

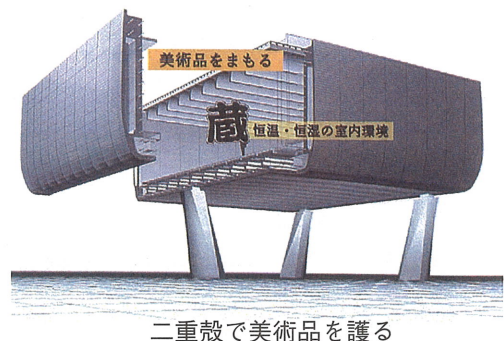
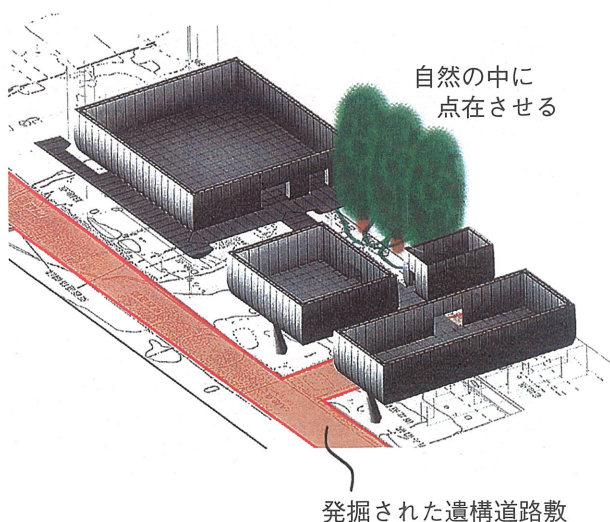
この美術館では史跡公園の環境に相応しい「新名所」をつくることがコンセプトであったが、空間構成としては建物を宙に浮かして3本の柱で支える計画がなされた。

なぜこのような計画となったか。理由は2つある。

1つ目は自然を護るため。建物が建つことで豊かな自然環境が分断されるのを避け、緑の中に浮いたような印象とする。

2つ目は遺跡を護るため。敷地を縦横に横切る形で発掘された道路敷跡を尊重し、土の中に埋まった遺構を守るために建物のコーナーに柱を立てたくない、という理由で3本柱で建物を浮かすという計画となった。

そして美術館の機能としてとても大事なことに美術品を守るということがある。雨や風や熱や湿気などの厳しい自然状況から中の美術品をまもるため、建物の外周である床や壁を二重に囲い“蔵”のような環境をつくることが求められた。

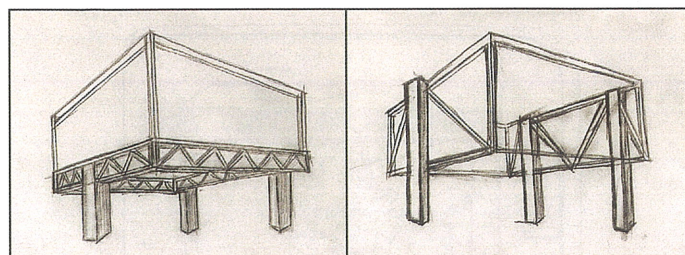


3-3. 計画の過程

さて、この一見不安定な3本足で浮いた建物、これをどのように成り立たせるかということが構造設計者の腕の見せ所である。

3本足の台をつくりその上に建物を載せるのがオーソドックスだが、これだと非常に大きな土台が必要となる。

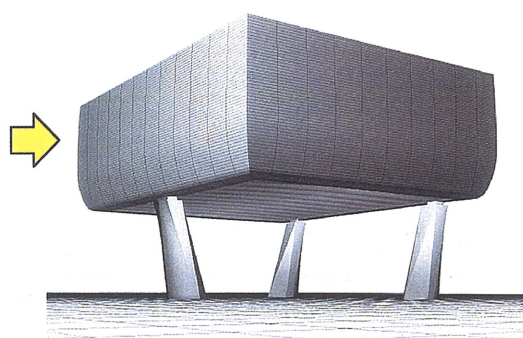
3本の主塔を建てて、床を吊そうとも考えたが、吊り構造と緑の中の美術館というイメージが合わない。



台をつくり、建物を載せる？

主塔を立て、吊り下げる？

3本柱で建物を浮かす？！



独立柱で「箱」を支える！

3-4. 箱構造の考え方 — 「閉じた箱」は強い！ —

そこで考案されたのが、この建物は美術品を護るための“二重の箱”であるということである。箱というのは蓋がないと非常にぐにゃぐにゃした物であるが、蓋をして閉じた箱とすると頑丈な構造になる。「閉じた箱は強い！」これを活かさないか。つまり建物を床、柱などとして考えるのではなく、建物全体を1つの箱と考えようと、その箱を3本の柱で支える、箱全部を1つの面としての構造体にしようということが考案された。これはコンクリートという素材の利点を活かした考え方である。

コンクリートという素材の他に無い長所は、

- ① 可塑性のある材料であり自由な造形が可能である。
- ② 部材の組み合わせでなく連続した面としてのSTRUCTUREを構成できる。

ことであろう。そして、そのもちあじを最大限に発揮するのは、ラーメン構造ではなく、スラブやシェルのような面的構造である。

一方、「引っ張りに弱い」コンクリートの弱点をカバーするPC構造の開発により、コンクリートの持ち味をより活かした、多様な空間設計ができるようになった。

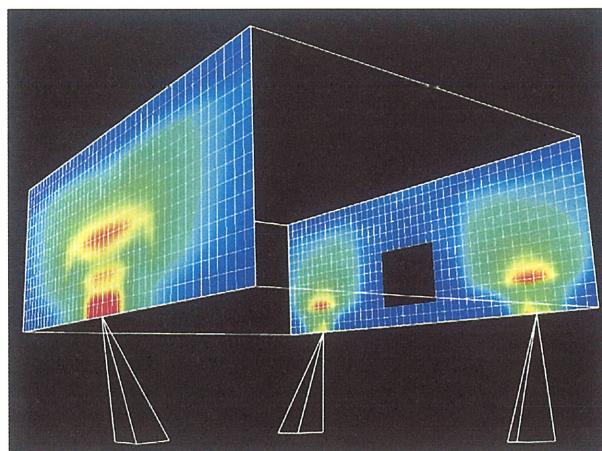
建物を一つの箱として考える、「箱構造」としての概念は、コンクリートの持ち味を活かした考え方である。



蓋がないと弱い

閉じた箱は強い

「閉じた箱は強い！」



箱全体で力を伝える

3-5. PC a 構造の選択

次はこの箱をどのようにしてつくるのか。二重の核の複雑な構造である。これを工事現場で一からつくっていくのは大変な作業である。そこでプレキャスト構造として組み立ててつくることとなった。

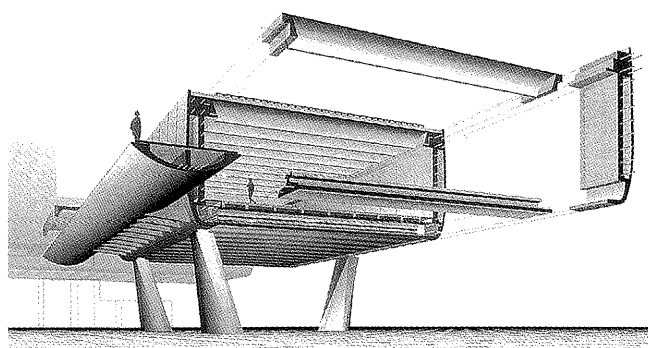
建物を屋根・床・壁それぞれのパーツでつくる。複雑な形状の壁も工場で寝かせてつくれば簡単にできる。それを現場に持ち込んで、クレーンで吊り上げてセットし、並べた版に鋼線を入れて縦・横方向に縛り込んで、箱が完成となる。

工場における型の段階で複雑な表現を盛り込むことが出来るため、独特の曲面壁と船底形状の軒天井とを実現し、お城の歴史景観と融和した独特の存在感を醸し出すことが出来た。

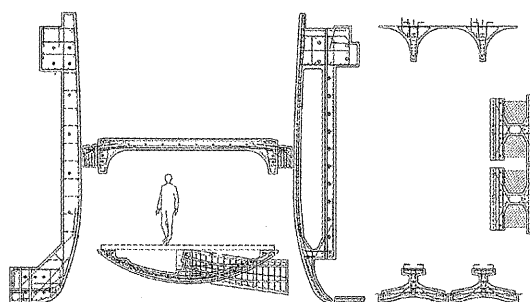
また、PC構造の追求によって、通常より3ヶ月以上の短工期化と、アルカリガスの放出を早期に終えた躯体を実現した。

この結果、竣工2ヶ月後という異例の早さで、美術館としての機能を満足させることに成功した。

プレキャスト化の追求は現場作業を減らし、構造体に通常必要なベニヤ型枠の使用を50%抑制した。環境問題にも配慮している。

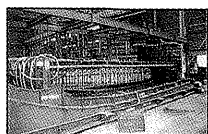
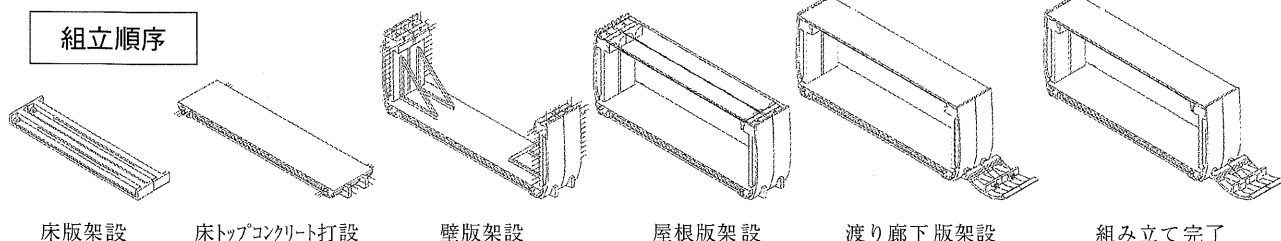


幅1.8mのパーツで構成

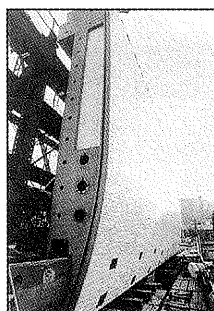
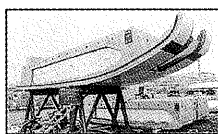


PC a 版構成図

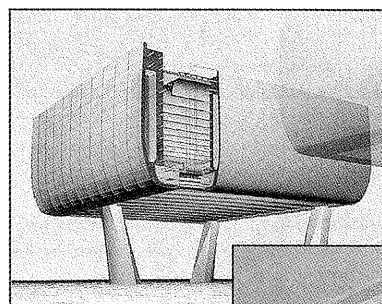
組立順序



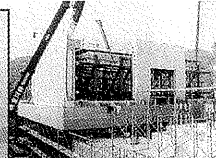
①壁版は工場で寝かせて施工し



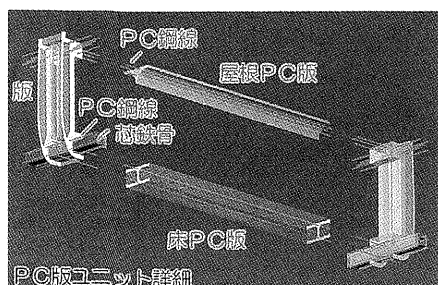
②クレーンで吊り上げ鉛直にセット



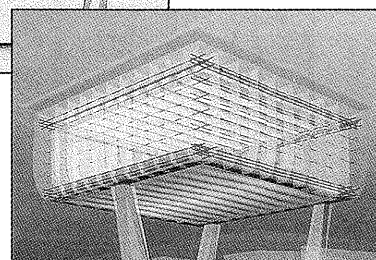
④鋼線でしばる



③ユニットを順次並べて・・・



プレキャスト化したパーツを組み立てる



⑤箱の完成！！

3-6. 実現へのアプローチ

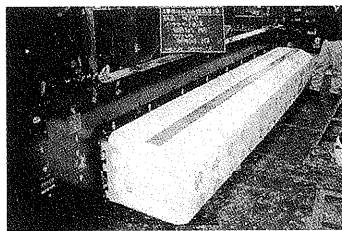
建物を特徴づける P C a 壁版は幅 1.8 m、高さ 7.4 m、重量約 20 トンで、1 ピースで 2700 枚ものタイルを打ち込む、中央に断熱材の発泡スチロールを打ち込んだ H 型形状の二重壁である。それらを縦横に圧着して「箱」を形成する。

P C 圧着工法自体は、建築でも土木でも決して目新しい特殊技術ではないが、建物全体をブロック圧着工法で構成した計画は類を見ない。そこで、建物の施工に着手する前に実大実験を行って、接合ディテール及び組み立て手順の施工性を確認することとなった。

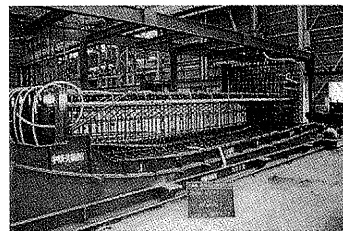
特に検討が重ねられたのは、重量が大きくタイル打ち込みで施工精度の要求される壁版の建て方精度、および例を見ない大きな断面の圧着となる壁版と床、壁版同士の接合ディテールで、予備実験を繰り返し、最適な材料・施工法が決められている。また、実際に組み立てを行って、組み立て手順、施工性の確認、および、緊張力の導入が確認された。



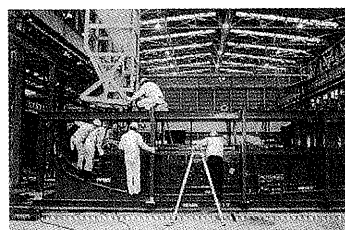
2700 枚のタイルを打ち込む



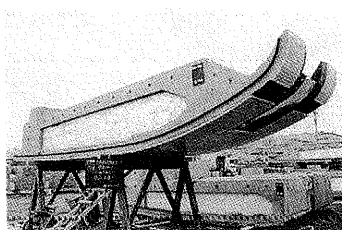
二重壁中央の発泡スチロール



先組みした鉄筋を型枠内にセット



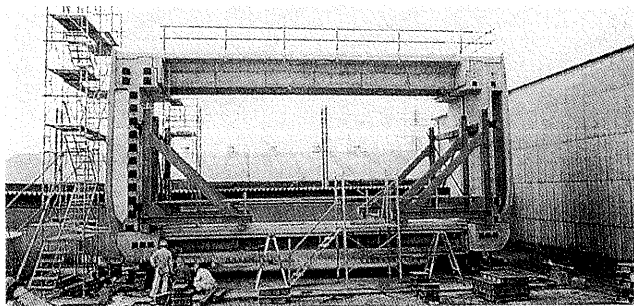
高流動コンクリートを打設



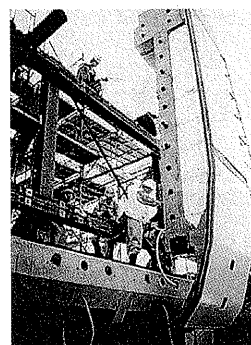
高さ 27m、幅 1.8m、重さ 20t の P C a 壁版の完成



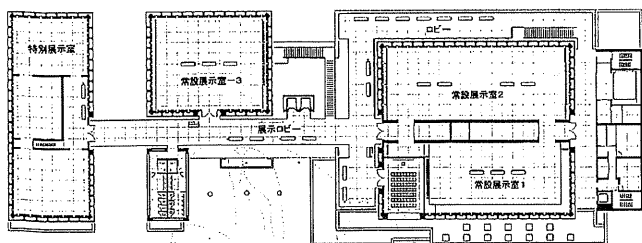
工場製作状況（壁版製作）



実大実験概要



架設施工試験



2 階平面図

建築概要

- 1) プレキャストコンクリート圧着工法、鉄筋コンクリート造及び鉄骨造
- 2) 地上 3 階、地下 1 階
高さ : G L + 19.00m
延床面積 : 10,920 m²
- 3) 設計監理 : 愛媛県土木部建築住宅課
(株) 日建設計
施工 : 大成・野間建築共同体
P C 工事 : (株) ピー・エス
工期 : 1996. 12 ~ 1998. 9

3-7. おわりに

箱構造で建物を浮かすことにより視界が通り抜け、外部環境と連続した半屋外的な明るい公共の空間が実現している。この「箱」はふっくらとした曲面と細かなタイルの組み合わせで美術館らしい優しい表情をつくっている。この建物に使用したタイルは非常に小さいもので約80万枚を色を変えながら使っており、光を受けてきらめく。こういうことが出来るのもプレキャストの特徴であろう。

古代ローマの建築家、Vitruviusは建築には用・強・美が備わっている必要がある、と言っているが、この建物は蔵として美術品を守る機能=用=、頑丈な箱としてのストラクチャー=強=、そして、自然の中の美術館としての表情=美=、これをPCaPCの“箱構造”で実現している。

(参考文献)

- (1) PCaPCによる「組立箱構造」 陶器浩一 : 建築技術 1999. 4月号
- (2) 「PCaPC圧着工法による「組立箱構造」の建築物の設計—愛媛県美術館—」大和田精一・陶器浩一
: コンクリート工学、平成11年5月号 (社) 日本コンクリート工学協会
- (3) 面としてのSTRUCTURE—素材・架構・技術・・・そして空間— 陶器 浩一
: 建築と社会 2001.10 (社) 日本建築協会



「箱構造」で建物を浮かす



陽光を受けてきらめくタイル



PCa版ならではのやさしい室内空間

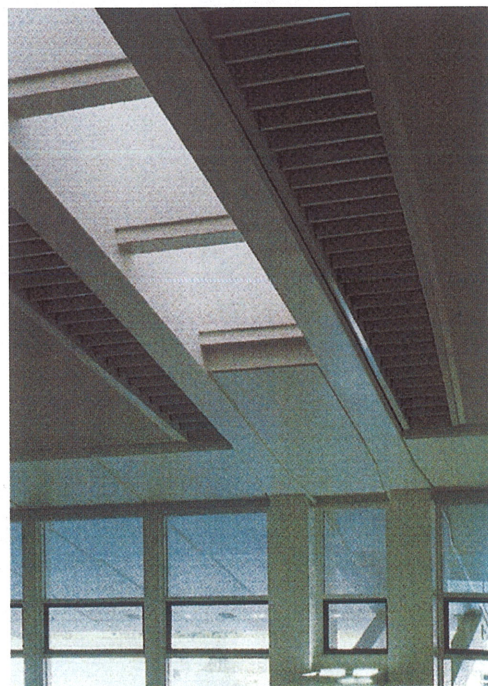
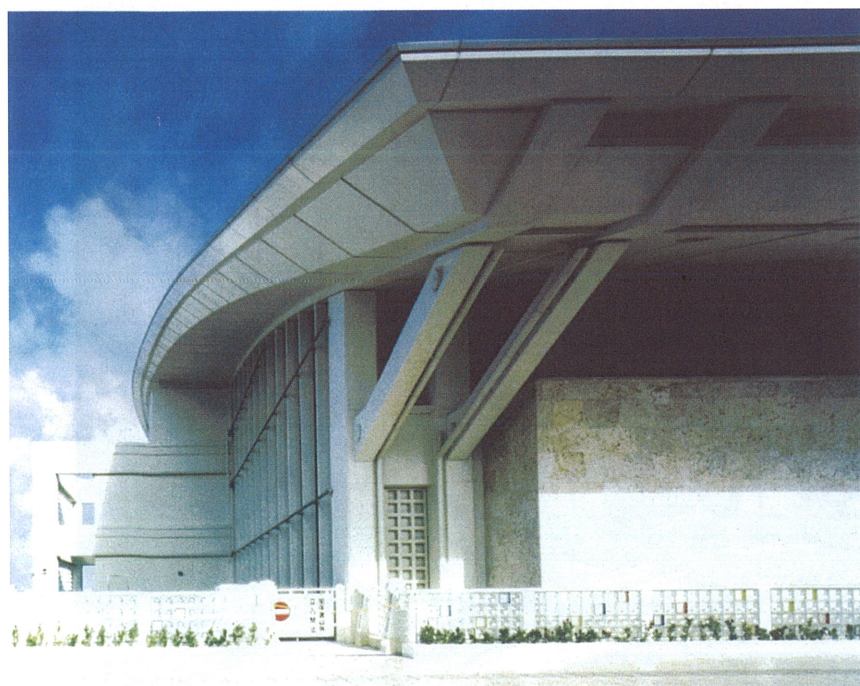


自然の中に浮いた美術館

開放的なエントランス空間

4. 那覇空港国内線新旅客ターミナルビル

— 国内初の本格的なプレキャストPC造による空港ターミナルビル —



4-1. 取り巻く条件

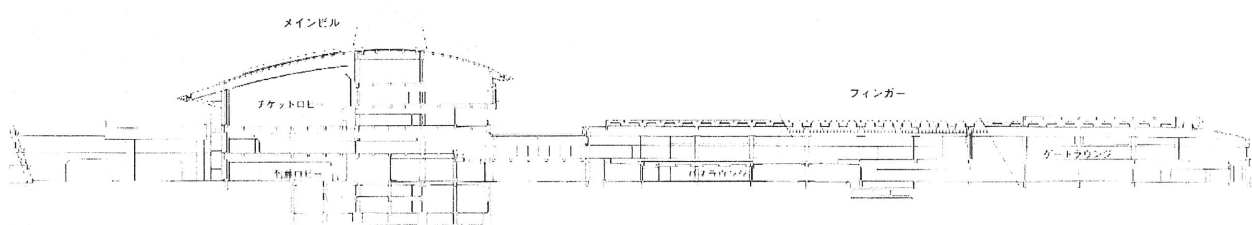
このプロジェクトは「空港ターミナル地域整備計画」の一環として、分散配置していた国内線施設の集約を目指したものである。新ターミナルビルは、上位計画で定められた「フィンガー方式」に基づき、本館と2棟のフィンガー棟により構成されている。本館部分では、国内線としては東京国際空港に次いで、出発・到着の階層分離を行っている。

沖縄県は高温多湿の亜熱帯地域に属し、四方を海で囲まれているため、世界的にも有数の塩害地域である。そのため、建物の耐久性を確保する上で内・外部ともに十分な塩害対策が求められた。

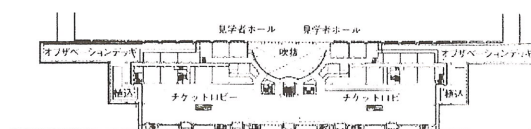
建築主：那覇空港ビルディング㈱
 所在地：沖縄県那覇市字鏡水
 主用途：国内線旅客ターミナルビル
 建築面積：30,369.19 m²
 延床面積：77,713.80 m²
 構造：プレキャスト・プレストレストコンクリート構造、
鉄筋コンクリート構造
 階数：地下1階 地上5階 塔屋1階
 設計監理：安井建築設計事務所・宮平建築設計事務所
 施工：(北工区) 國場・大成・大米・仲本・善太郎特定建設
工事共同企業体
 (南工区) 大城・三井・日航・大晋・東開発特定建設
工事共同企業体
 PC施工：ビー・エス
 設計期間：1993年9月～1996年6月
 施工期間：1996年12月～1999年3月



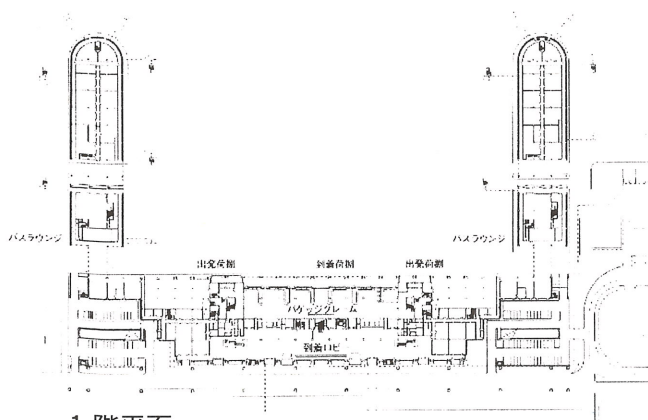
空港ターミナル地域の全体整備状況



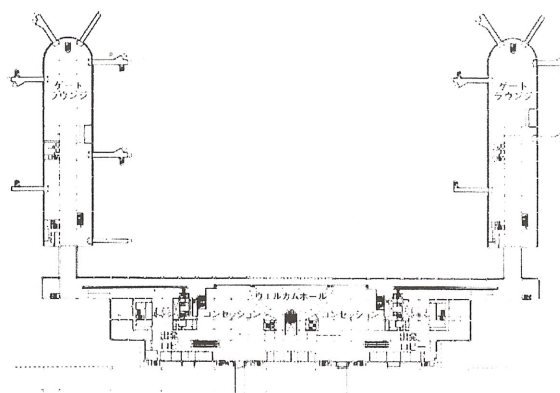
断面



3階平面



1階平面



2階平面

4-2. コンセプト

沖縄県の玄関口にふさわしい風格と地域のアイデンティティをキーワードとし、以下の基本コンセプトをもとに意匠・構造・設備のトータルデザインを目指した。

- ・地域社会との調和・共存および景観への配慮
- ・旅客の利便性・快適性および施設の安全性・機能性の重視
- ・塩害に強く耐久性の高い建物とする。→運用・維持管理・保全コスト軽減によりLCCの低減を図る。
- ・将来の拡張対応の容易性
- ・制約の多い施工条件での工期短縮・品質向上および安全確保



ターミナルビル全景

(手前に立体駐車場及びモノレール駅が整備されている)

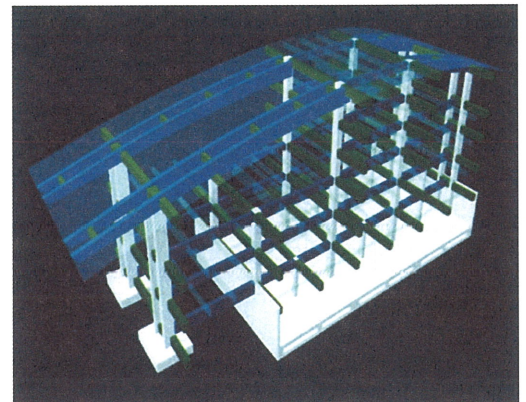
4-3. 形態美実現のための構造形式選択コンセプト

コンクリートの素材を活かした意匠デザインと一体となった構造形式の実現をコンセプトとした。
また、技術的課題としては

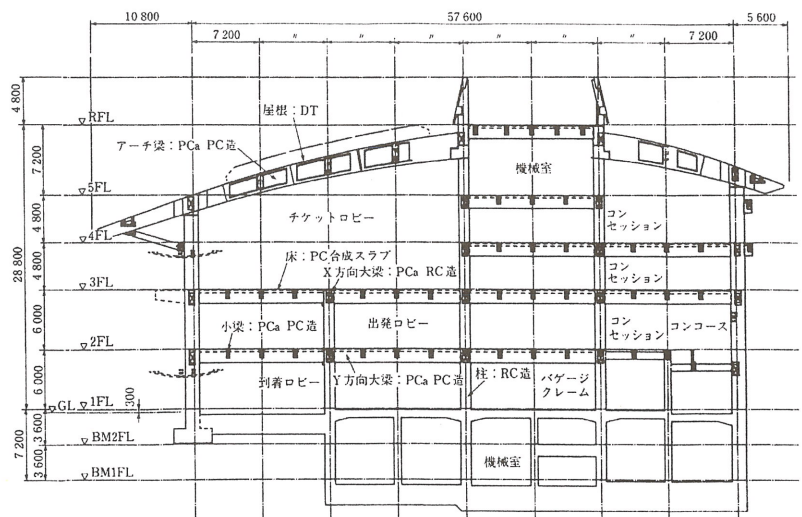
- ① 快適で高機能な広い内部空間の確保
- ② エキスパンション・ジョイント無しによる長大構造物（ $348.0 \times 57.6\text{m}$ の平面規模）の実現および塩害に対する耐久性の確保
- ③ 工期短縮

があり、以下のような提案により課題に応えた。

- ① 大スパンを有するPC造剛節フレーム架構（基本グリッド $14.4\text{m} \times 12.0\text{m}$ ）とし、さらに全長約 40m のダブルガーダーとそれらを受けるダブルカラムによる架構を組み込み、軽快で開放的な構造デザインとした。
- ② 梁・床版はプレキャスト化し、高強度コンクリートの採用、かぶり厚の増大により塩害に対して耐久性を向上させた。
- ③ プレキャストPC積層工法の採用により工期短縮を図り、1層1ヶ月サイクルで1～5階の躯体施工を約4ヶ月で完了した。



構造骨組パース



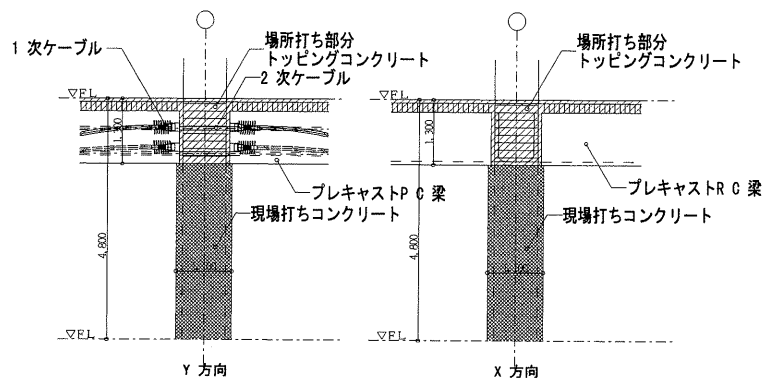
プレキャストPC架構概要図

4-4. 工・構法における特徴

メインターミナルビルは全長が約350mにおよぶ長大構造物であるが、建物用途上エキスパンションジョイントを設けない方向で検討を進めた。コンクリートの乾燥収縮やクリープによる影響をできるだけ少なくするために、柱・壁の垂直部材のみを現場打ちとし、梁・床版などの水平部材および外壁はプレキャスト（以下、PCa）化を図った。大梁については、X方向を鉄筋コンクリート造とし、梁主筋をパネルゾーンに定着させた。また、スパンが大きいY方向については、プレストレストコンクリート造とし、PC鋼線による圧着のみで一体化を図っている。

1～5階までの地上躯体部分は、

- ① 1層分のRC造柱を梁下まで場所打ちコンクリート工法で構築する。
- ② 型枠撤去後、その柱頭部にPCa梁を架設する。
- ③ さらに小梁・床版などのPCa部材を架設する。
- ④ 上端筋および2次PCケーブルを配置後、場所打ちトッピングコンクリートを打設する。



プレキャストPC積層工法による接合部概要図

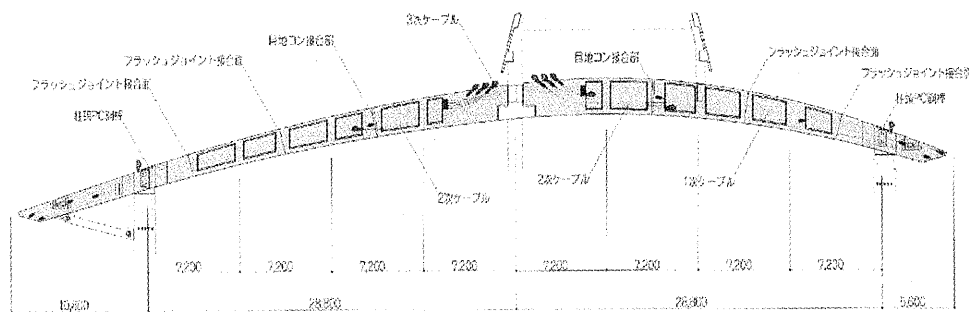
- ⑤ 所定のコンクリート強度が発現した後、ポストテンション方式によりプレストレスを導入して一体化を行う。

の手順を各層繰り返していく積層工法として計画した。

STEP1 ① 1階柱筋建て込み、型枠建て込み、コンクリート打設 ② 在来梁の架設、および鉄筋工事 ③ 現場PC配線工事（梁配筋工事と同時施工）	STEP2 ① 柱コンクリートの養生 ② 2階PC梁の架設 ③ PC版の敷き込み ④ パネルゾーンのシーズジョイント ⑤ 梁スラブ筋材荷揚げ	STEP3～4 ① 2次緊張ケーブルの挿入 ② 梁、スラブ配筋 ③ 現場PC配線工事 ④ トッピングコンクリート打設
STEP5～6 ① トッピングコンクリート養生 ② 墨だし ③ コンクリート強度確認後、2次ケーブル緊張 ④ コンクリート強度確認後、現場配線ケーブル緊張 ⑤ 2-4F 躯体工事はSTEP1～5の繰り返し作業とする	STEP7 ① 5階柱筋建て込み ② 柱、堅留め鋼棒のセット ③ 柱型枠施工 ④ 5階柱コンクリート打設	STEP8～9 ① 柱コンクリート養生 ② E～G間の梁架設 ③ パネルゾーン定着具の組立 ④ 2次緊張ケーブルの定着具の組立
STEP10～11 ① A～C間、C～E間フラッシュジョイント ② A通り、C通り支保工セット ③ A～C間、C～E間大梁、繫ぎ梁、桁梁、架設 ④ A～E間2次ケーブルの挿入 ⑤ G通り支保工解体	STEP12～13 ① DT版、雨樋の架設（300t、160tクレーン） ② A通り1通り支保工のジャッキダウンおよび解体	STEP14～15 ① A通り梁受けブラケットの取付 ② PC梁、PC版の架設（120t油圧クレーン） ③ PC梁目地無収縮モルタル施工 ④ PCケーブルの挿入 ⑤ トッピングコンクリート打設 ⑥ A～C間1階土間コン打設

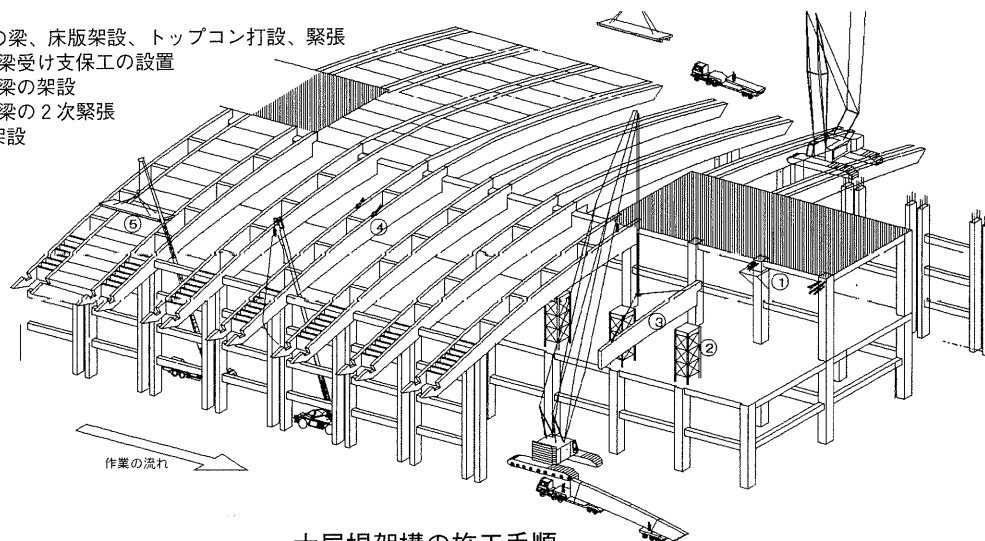
プレキャストPC積層工法の施工手順

航空機の翼をイメージした大屋根の梁は、複数の曲線を組合せた形状を採用し、さらに軽量化を図るために梁せい約1,500～2,800mm、梁ウェブ幅250mmと非常にスレンダーな断面形状としている。そして、PC圧着接合工法により一体化した梁を2本1組の組み梁（ダブルガーダー）形式とし、その間をトップライトの組込みスペースに利用した。この屋根梁は2本1組の組み柱（ダブルコラム）で支持させた。これらの柱には高強度せん断補強筋を採用し、靱性の確保を図っている。また、アーチ梁は長さが40m（28.8m＋片持ち10.8m）で約140tの重量があるので、14.1m～7.4m長の4セグメントに分割してサイト工場で製作し現場へ搬入した。これらのセグメントを現場で緊張接合（フラッシュジョイント）して一体化し、2ブロックにして揚重・架設した後、最終緊張により柱と一体化した。なお、屋根スラブには、軽量化を図るため板厚300mm、板幅2,400mm、長さ約10mのプレテンション方式のDT版を使用している。



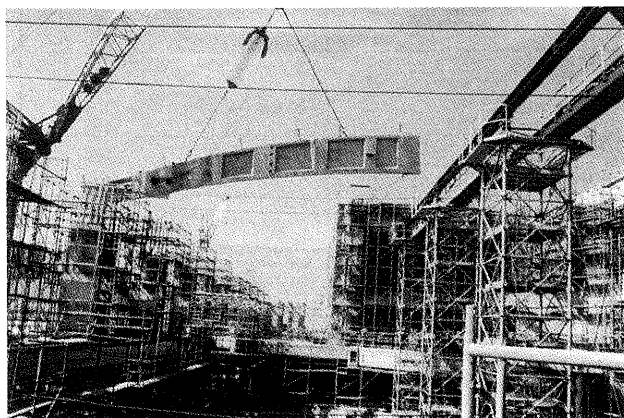
航空機の翼をイメージしたダブルアーチ梁

- ① EG間の梁、床版架設、トップコン打設、緊張
- ② 屋根大梁受け支保工の設置
- ③ 屋根大梁の架設
- ④ 屋根大梁の2次緊張
- ⑤ DT版架設



大屋根架構の施工手順

（敷地に制約があり、重機を建家内に設置して屋根梁を架設した）



ブロック分割した屋根梁の架設状況



屋根梁架設完了後の状況

4-5. デザインコンセプトの実現度

- ・大屋根による軒および庇によって深い陰影を持たせたデザインとし、沖縄特有の気候である激しい雨・風を凌ぎ、また強い日差しに対して優しい日陰をつくり、沖縄県の玄関口にふさわしい風格を表現した。
- ・ダブルアーチ梁の大屋根は、柔らかな梁の曲線を生かしたりズミカルな大天井とガラスカーテンウォールで構成し、視認性の高い快適で広い空間を旅行者に提供している。
- ・工法・材料の選定において塩害対策に配慮した結果、維持管理が容易となっている。



5. 下関地方卸売り市場・唐戸市場棟及び駐車場棟



5-1. 位置付け及びテーマ

関門橋を望む新唐戸市場（山口県下関市）は、旧市場の老朽化、狭隘化に伴う隣接埋立地への立替であり、下関市が進めるウォーターフロント開発の中核施設として位置づけられていた。

立地条件は、商店街や行政庁等のある市街地と関門海峡に隣接し、周辺には数多くの歴史的、文化的遺産が点在している。加えて市民利用も多い。こうした好条件を活かし、周辺との連続性を設計のテーマとした。

5-2. 構造システム創生までのアプローチ

「市場を積極的に市民に開放し、かつ開放空間を無柱で構成する」という計画コンセプトに基づき、様々な新しい試みが成された建物である。建物の内外に備わる機能性を空間と創生という立場で把握すると共に、特殊な環境下での耐久性を十分備えたものでなくてはならなかった。従って、構造的な基本コンセプトはかなりグレードの高いものに設定していた。

- (1) オープンな空間（平面プランを大きなグリッドで構成）の構成
- (2) 高さ制限下での、多層階（三階）仕様
- (3) 使用する材料の高い耐久性の確保
（海岸際に建設される構造物である為、特に塩害等の腐食への耐蝕性）
- (4) （全体を構成する構造システムの）高い耐震性、品質性の確保
- (5) （採用する構造システムの）優位な生産性、施工性の確保
- (6) 緑地屋根を持つせり場空間の無柱空間化：44.8mの大スパンを効率良く美しく構成
- (7) 構造システムのデザイン化（空間創出へ積極的に関与）
- (8) 設備とのボキャブラリーの共有

上記コンセプトに基づき構造システムを創生した。

5-3. 建物の構成

2つのリニアなボリューム（幅100m奥行き15m）を、東西方向に45mの間隔をとって配し、その間に大空間を創り出している。こうして、創られた45m×100mの空間の西側半分は無柱空間となっており、東側半分は、1層吹抜けの有柱空間となっている。

来場者は、1階からの一般動線に加え、周辺施設との連携、見学者の来場を考慮した2階からのアプローチも可能で、せり場や各売場の賑わいを眺めながら、大空間を取り囲む2階のギャラリー（歩行デッキ）から1階に降りて行くことができる。また、屋上の一部は海峡を望むことのできる緑地広場とし、建物全体を緑の丘と見立て、後背地及び対岸（門司）からの眺望に寄与している。

・階高と有効階高及び部材の断面構成

環境性（後背地からの展望の妨げ）から決定された高さ制限という足かせは、断面計画にかなりの重圧を与えてくれた。限られた全体ボリューム内に要求されるスペースをボリューム仕立てで、当て嵌めて行く作業は上階の階高を益々苦しいものにしていった。当然、有効天井高を可能な限り高く設定することは必要である。かつ、天井懐寸法の確保は、設備の配管配線の自由性から言って必然的要求でもある。必至的に、構造寸法が小さめの値に収斂されて来るのである。と同時に、構造的に必要な断面寸法も算出される。これらを如何に解決するかが断面計画の主要なテーマになっていた。

まず、整理すべき事項は、「設備導線と構造との共存が可能か」ということである。双方がそれぞれ導線的に又は力学的に方向性を持たせることが可能であれば、解決の糸口が見えて来る。設備的には主に桁行き方向をメインの設備導線とする。それに対して、構造的には桁行き方向梁を主梁とし張間方向梁を極力梁成の小さな断面とする案である。具体案として張間方向梁をジョイストスラブ形状とすることでワンウェーの考え方を導入。しかし、張間方向大梁の両端部は必要な耐力を保持する必要があるため、変断面とすることで解決した。

〈PC化〉

上記条件を満足する（全体を構成する）構造システムの立案には、材料的に抜群の性能を発揮する水セメント比の少ない高強度コンクリートを用いることを前提に考えた。システム性に着目し、工法的なことを踏まえ、かつ高い性能を有するプレキャスト・プレストレスト・コンクリート（PSC）造による組立構造（ラーメン構造システム）が我々が求めた解答であった。プレファブリケーション化されたPSC部材を現場で組み立て、特に柱と梁をプレストレスによって圧着緊結するこの構工法（システム）は、建物の規模としてのスケールメリットを考慮すると最も適したものであった。

常にプレストレス（圧縮力）を強制的に作用させておくことは、引張に弱いコンクリートを完璧にフォローするものであり、この構造の最大の特長と言える。特に常時荷重時では想定される如何なる荷重状態でもコンクリート断面内に引張域を存在させることはないフルプレストレッシングとすることができる。また、施工時応力状態も適宜に設定可能で初期想定変形の逆向きの変位を与えておくことも可能なアクティブなものであり、パッシブな鉄筋コンクリート（RC）造とは全く異なる構造である。

PSC部材のケーブル配線方式として、断面内に配線するインナーケーブル方式が一般的であるが、断面外に配線する OUTER ケーブル方式も考えられる。本計画では、両方式を採用している。

〈無柱空間化のための張弦システム＋斜張式システムとのハイブリッド化〉

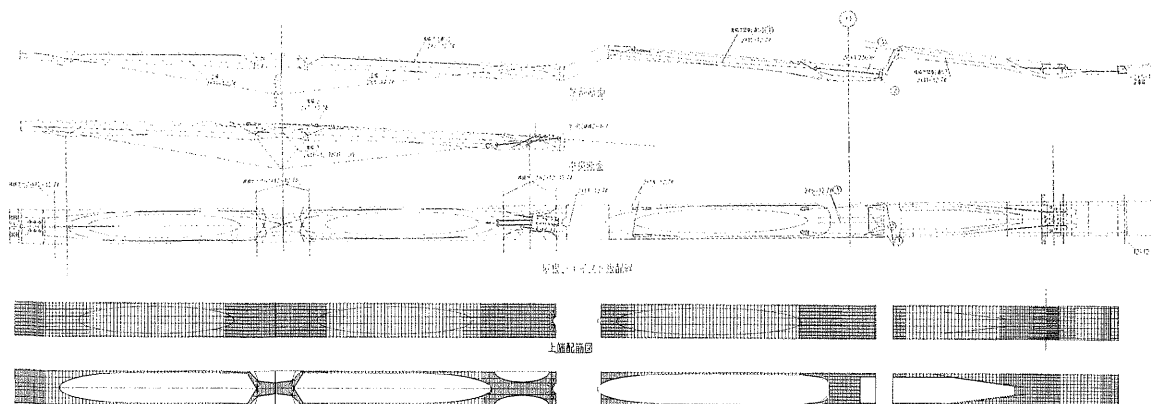
・せり場屋根を支える構造

西ブロックに位置するせり場屋根は緑地公園化のため、重量的にかなり重い。重量的に整理すれば、仕上げ荷重 450kgf/m^2 、積載荷重 360kgf/m^2 、計 810kgf/m^2 であり、これらの荷重が大きいことが判る。更に、固定荷重である構造躯体重量が付加されるが、客観的に見て総量に対する躯体の重量比率が低いことが予想できる。従って、構造素材の差異はあまり問題にならない。言い換えれば、重量的な要因のみで屋根構造素材の選択がなされる必要はなく、適宜素材毎の特長を鋭意検討し最善のものを決定すれば良いことになる。

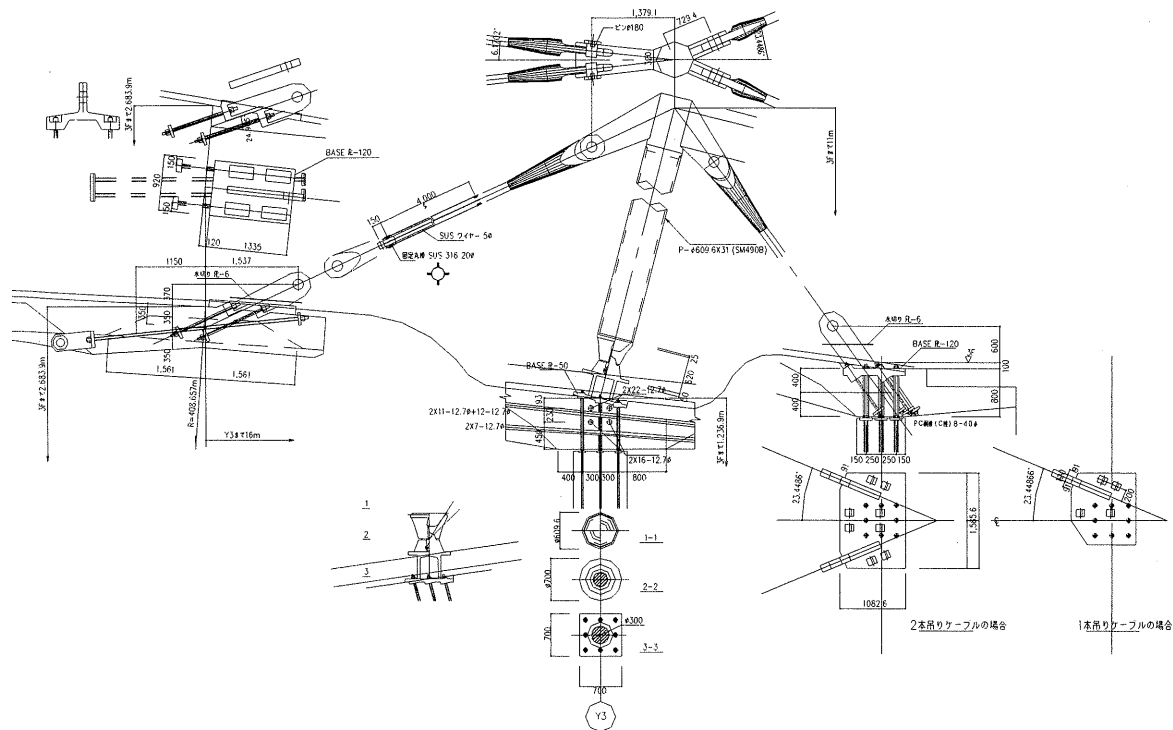
また、必然的に上床版の剛性の確保が必要となる。従って、軸剛性並びに曲げ剛性の高いPSC部材を用いながら、かつ相対的な重量を少しでも軽減することができる張弦梁システム及び斜張式システムとのハイブリッド化が最も適したものと考えた。結果、構造躯体重量は約 500kgf/m^2 に抑えることができた。

基本的に自己釣り合い系を保つため、張弦及び斜張ケーブル張力による水平反力は、圧縮力として上床版であるPSC部材に負荷するが、このことはPSC部材にとってマイナス要因ではなく、逆にプレストレスト・コンクリートの概念から言って非常に有効である。この有効性を発揮するためには、厳密な自己釣り合い系が施工時に保たれている必要がある。

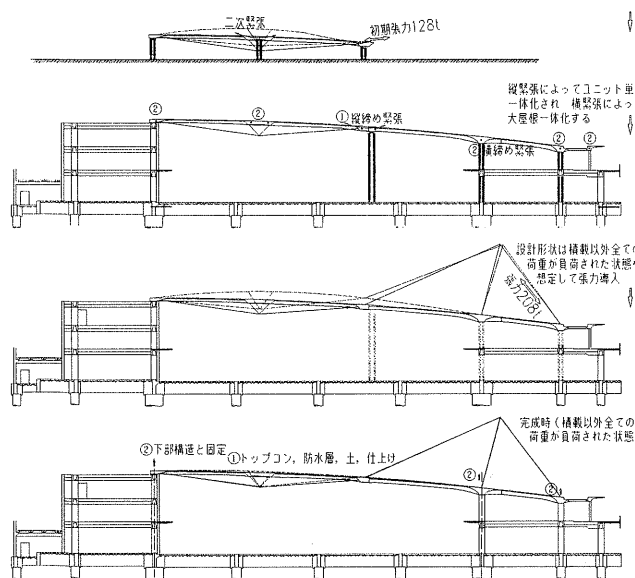
つまり、斜張の吊り元であるポストの脚部ではピン支持とするが、長さ方向の屋根版両端部では、ローラー支持とすることで自己釣り合い系場が設定可能となる。但し、完成形時では、これらの支持部は剛接合とし、以後建物全体と一体化する。



せり場屋根を構成するPSC版



斜張部の納まり PSC版と吊りケーブルの取り付け



せり場屋根建方順序

各施工段階での各応力（変位）は生き物のように変化する

構成された屋根の総重量は重く南北ブロックに押し掛かり、その影響は大きい。例えば、該当する柱1本当たりの軸方向力及び地震時の慣性力は相当大きな値である。この力の伝達がスムーズに行われ、かつ施工時のローラー支承が可能な接合ディテールがこのシステムにとって要であり、最も重要な決定事項であった。

5-4. PSCの魅力及びその可能性

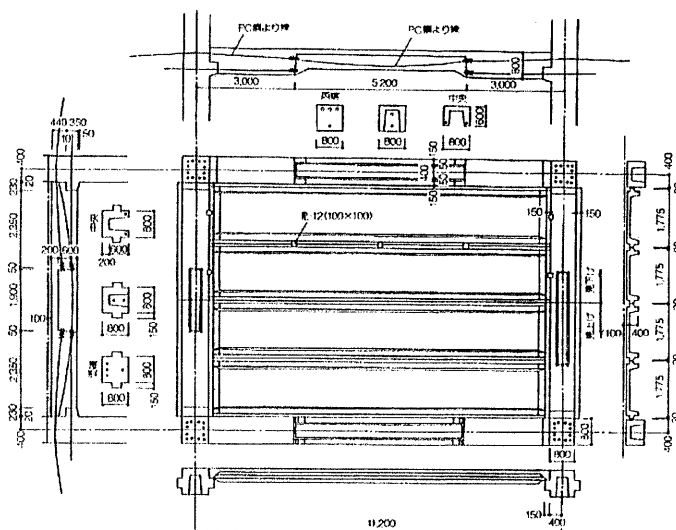
さて、建物の概要が判って頂いたところで、PC本来の魅力をこの建物を通して探ってみたい。

まず、導入部として、PCだからこそできる建築（構造）が究極の目標とすべきであると申し上げたい。初期の段階から、PC化を念頭に計画を進めて行かなければ達成し得ないものであり、幾多のハードルをクリアすることのエネルギー消費量は殊の外大きく、失速しかねない場合も多々あることは承知している。当の私も実践者である。目標は大きい方が好い。その目標の達成には、チームワークと共にフットワークが大切で、内外のコラボレーションが重要な架け橋となる。

では、本題である「PC の魅力」について、第一に挙げるとすれば、システム建築の楽しさがある。部品の形状設定、分割、組立て方及び手順、そして接合方法の構築とプラモデル感覚の楽しさである。

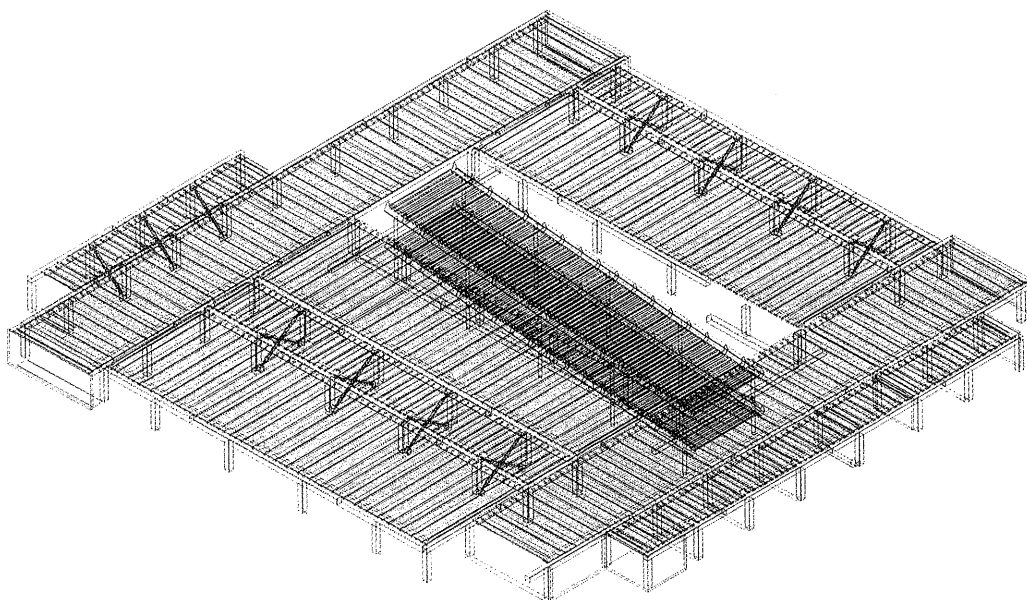
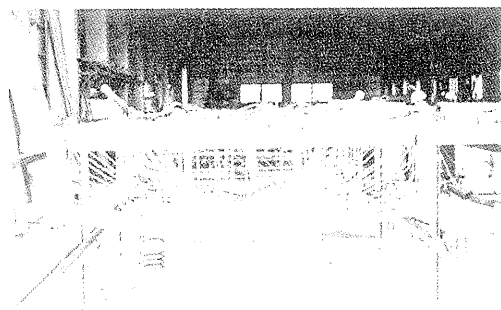
第二には、「可塑性」素材であること。極端には脱型さえできれば、難しい形状の部品も製作可能である。基本的には、鋳物と言える。但し、落とし穴があるとすれば、鉄筋配筋及び緊張材配線の納まりの良否。成功すれば、コンクリートの素材表現が如何なく発揮できる。

特に、同じ形状の部品であれば、幾体も容易に製作可能であり、最大のメリットと言えるだろう。



市場棟一般架構構成

桁梁と張間梁とは、各々構造以外の役割を持たせている。又、ジョイント版同士の隣接間に溝を設けることで、フロアーレベルで配管類の収まりに寄与している。

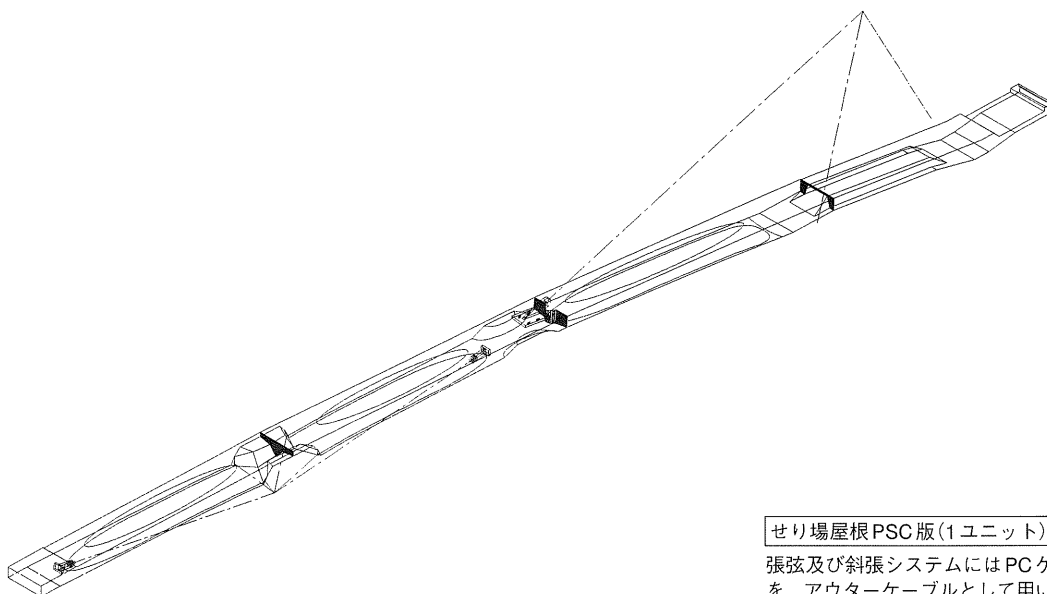


駐車場棟の構成

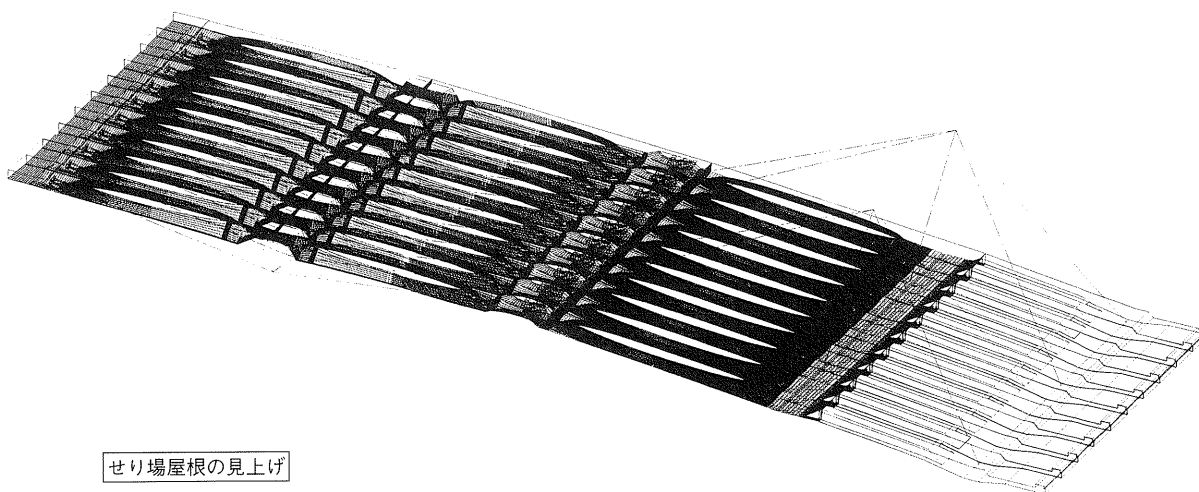
方向性を持たせたシステムが特長
一方向ラーメン、一方向ブレース架構と明確に分けている

第三には、応力操作が可能であること。システムの構築の自由性が挙げられる。

インナーケーブルとアウターケーブルの使い分けとして適材適所に可能であることは、魅力的である。屋根版であれば、アウターケーブルとして使用するメリットは高いと思う。



せり場屋根PSC版(1ユニット)の構成
張弦及び斜張システムにはPCケーブル
を、アウターケーブルとして用いている



せり場屋根の見上げ

5-5. 完成写真



市場棟

西側マリオンとせり場屋根



せり場屋根の表情



屋上広場



駐車場棟

金太郎アメで構成したスロープ



駐車場棟

鉄骨ブレースとPSCとのハイブリッド構造

新しい複合橋梁への挑戦

—JHにおける鋼とコンクリートの複合構造橋梁の採用事例—

日本道路公団 技術部 構造技術課課長代理 溝 江 実
〃 〃 構造技術課 青 木 圭 一

1. はじめに

日本道路公団(JH)における高速道路の延長は、昭和38年7月の名神高速道路(尼崎IC～栗東IC間71.1km)の開通以来、モータリゼーションの発展とともに高速道路の整備も急速に進み、平成13年11月17日現在で6,877kmと法定予定路線(11,520km)の約6割に達し、我が国の社会・経済の発展に欠くことのできない極めて重要な基盤設備となっている。一方、工事費の内外価格差、採算性の問題など、高速道路を取巻く環境は非常に厳しいものがあり、建設費や維持管理の節減が強く要請されているところである。このような背景のもとに、JHでは経済性および耐久性を追求した工事の省力化、プレキャスト化などの新構造・新技術の積極的な開発・採用を図っているところである。

鋼とコンクリートの複合構造の採用は、それぞれの短所・長所を生かすことによって、経済的な橋梁の建設を可能とし、また、構造的にも合理化が図れるものである。異種材料の部材を一つの構造物に適宜用いる複合構造の発想は、決して新しいものではなく、建築分野では、SRC構造が大正の初期から用いられており、1978年に宮城県沖地震により大きな地震力を受けたが、構造体には大きな被害はなく、その安全性も検証されている。土木の分野でも、SRC構造は広く用いられ、東海道新幹線の馬込高架橋もSRC構造であり、1976年にはSRC構造基準も制定されている。その他、合成梁や合成床版、合成トラスなど様々な構造も積極的に用いられている。しかし、鋼とコンクリートの特性をさらに発揮させ、より合理的な構造物を建設するためには、従来の構造形式に捕われず、自由な組合せによって構造物を作り上げることが重要である。

異種材料の部材を一つの構造物に用いることは、決して新しくはなく、古くは1864年に架けられているイギリスのクリフトン吊橋などは、主塔は石造、桁は鉄製の構造となっており、100年以上の年月に耐えている。しかし、異種部材の組合せによる複合構造の総合的な研究が始まったのは、1970年代であり、最近では1972年のクルト・シューマッハ橋、1979年のフレーエ橋などが著名であり、我が国では、1991年しゅん功の生口橋(本州四国連絡橋公団)が最初の本格的な複合構造橋梁である。

JHにおいても、鋼とコンクリートの短所を補い、長所を活かすことによって、経済的で合理的な橋梁の建設を試みており、今後の橋梁構造の一つのあり方として研究開発を進めている。本文では、JHにおける複合構造橋梁の取組みを事例とともに紹介する。

2. JHにおける複合構造の種類

複合構造は、合成構造と複合構造に大別され、断面レベルで異種材料を組合せて用いている構造を合成構造、部材レベルで異種材料を組合せて用いる構造を混合構造と呼んでおり、これらを総じて複合構造と呼称している。異種材料を合成して合成して使用することは単一の材料で得られない力学特性を作り出すことであり、鉄筋コンクリート構造やプレストレストコンクリート構造、鋼合成桁も複合構造の範疇にあると言える。しかし、これは古くから用いられている構造形式であり、ここでは、新たな構造形式について述べることにする。

3. 上部工の複合断面構造（波形鋼板ウェブ橋）の概要¹⁾

波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、PC箱桁橋の自重の2～3割を占めていたコンクリートウェブを軽量の波形鋼板に置き換えたもので、コンクリートの上・下床版と波形鋼板ウェブを組合せた複合構造は、鋼とコンクリートの特性を生かしたPC橋の新しい構造形式である。鋼橋に比べ安価なPC橋において、できる限りの最小限を鋼構造に置き換えたもので、かつ波形の製作にプレス加工を採用することで製作が容易で安価な鋼構造採用することが可能となっている。下記に特徴をまとめ列挙してみる。

①鋼板を波形にすることにより、高いせん断座屈強度が得られ、軸力に抵抗しない波形鋼板のアコーディオン効果により、コンクリートの上下床版に効率よくプレストレスを導入できる。

②主桁自重の2～3割を占めるウェブに軽量の波形鋼板を用いることにより主桁自重を軽減できる。本谷橋による試算結果を表1に示すが、約21.5%の重量軽減を可能としている。これにより、より長支間化が可能となるばかりでなく、建設費節減を可能とする。また、張出し架設工法においては、張出し1ブロック当たりの重量が軽減できるため、架設ブロック長を大きくでき、架設工期の短縮をも可能とする。

表1 本谷橋における上部構造の主要数量比較

	従来型	波形鋼板	増減率
コンクリート	2,150m ³	1,630m ³	▲25%
PC鋼材	125 t	110 t	▲15%
鉄筋	290 t	220 t	▲25%
波形鋼板	—	130 t	—

③コンクリートウェブが不要となるため、コンクリートウェブの鉄筋組立て、ケーブル配置、コンクリート打設が省略でき、施工の省力化・品質向上・耐久性向上が期待できる。これまで、鋼橋の床版においては、床版が劣化した際に床版打ち替えが行われている。しかし、PC橋においては、高いプレストレスが導入されていることや、内ケーブルが配置されているため、大規模なコンクリート打ち替えは実施されていない。この波形鋼板ウェブPC橋は、将来損傷が懸念される床版の打ち替えが現在のPC橋より容易となるばかりでなく、補修が困難なウェブ部分を鋼板に置き換えているため耐久性が飛躍的に向上するものと思われる。

④上述したように、主桁自重が軽減されるため下部構造の荷重負担が軽減され、また、慣性力が小さくなるため耐震上優れた構造となる。

以上のような利点を有している波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、今後適用がより広がっていくものと思われ、特に長大支間を有する橋梁にとって革命的な構造であると言えよう。しかし、長支間化には検討課題も多く、更なる設計の合理化、安全性の照査をおこなう必要がある。

3. 1 波形鋼板ウェブPC箱桁橋の歴史

波形鋼板ウェブについては、我が国においては1960年代に鉄鋼メーカーにおいて開発され、工場のクレーン走行用鋼ガーターのウェブとして延長10km以上が建設され、現在においても使用されている（写真1）。また、ヨーロッパでは飛行機の機体に波形材が用いられたこともある。さらに、コンテナや飛行場のボーディングブリッジなどにも波形鋼板は使用されており、決して波形材料自体は新しいものではなく、古くから用いられているものである。しかし、コンクリートとの複合構造は、フランスにおいて初めて登場し、我が国においては、1993年の新開橋が最初の橋である。

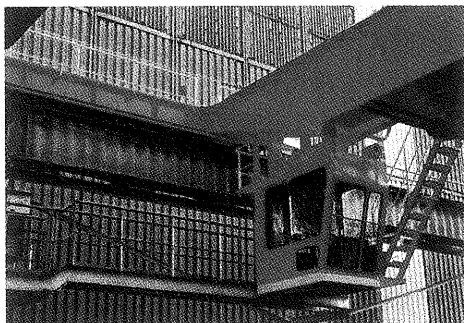


写真1 波形鋼板の適用例

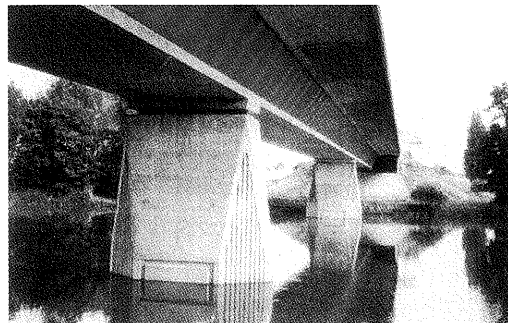


写真2 コニャック橋

コンクリートウェブに鋼板を置き換えた複合橋は、FougerolleによってLa ferte Saint-Aubin橋に採用された（1983年）。この橋は、1982年以来フランスにより提案された形式で、重量低減のためウェブを鋼板（フラット）に置換したものである。しかし、プレストレスはコンクリートではなく鋼板部分へ流れるため、鋼板の補強が必要となり、現在この種の構造は採用されていない。続いて、Campenon Bernard社のPierre Thivans、Jacques Combault、Marcel cheyreyziは、波形鋼板を用いたPC橋を考え出し、Charente川に架かる3径間のCognac橋を建設した（写真2）。本橋は、直線橋でスパ



写真3 モープレ橋

ン中心と横方向に関して全く対象であり、支保工施工で実施された試験橋梁であり1986年に完成している。最初の波形鋼板ウェブを用いた橋梁であるため、建築家のミカエリアンによりコンクリート橋脚の表面、ウェブの色、連結板や防護柵の色が互いに合致するように配慮されている。この橋よりさらに独性的なものが、Val de Maupre高架橋（写真3）であり、1987年に完成している。本橋は、設計コンペにおいてCampenon Bernard社から出された橋梁であり、コンクリート上床版、 45° に傾斜した波形鋼板ウェブ、コンクリートを充填した径60cmの鋼管からなる三角形断面を有しており、架設工法は、送出し工法により架設されている。その後、同様の形式がAsterix Park跨道橋（写真4）で1989年に施工され、1994年にDoubs川に架かるDole橋（写真5）が施工されている。Dole橋は、最大支間長80mの7径間連続桁であり、断面形状はCognac橋と同様であるが、支点上がコンクリート断面であること、張出し施工で架設されていること、内外併用ケーブル構造が採用されていることなどが特徴的である。

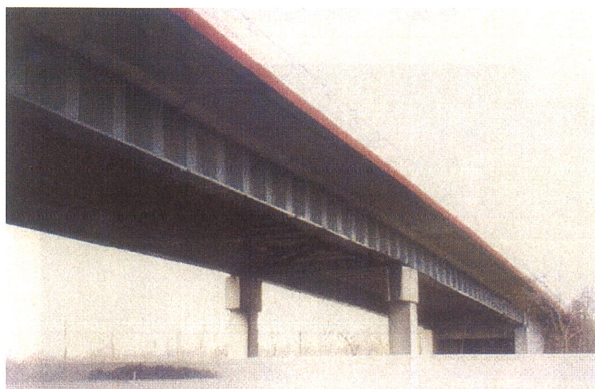


写真4 アステリスク橋

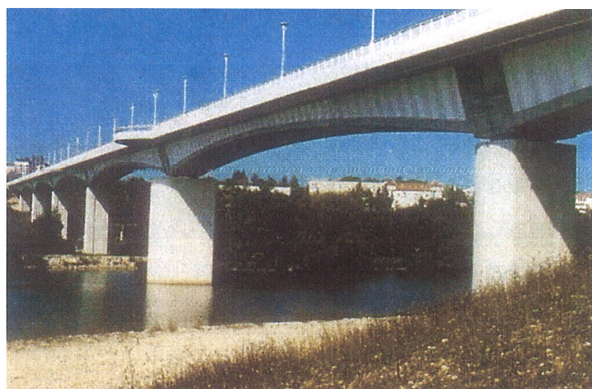


写真5 ドール橋

表2 フランスにおける波型鋼板ウェブPC箱桁橋の施工実績

橋 梁 名	形 式	支 間 構 成 (m)	幅 員	完成年
コニャック橋	3径間連続	32.455+42.91+32.455	12.10	1986
モープレ橋	7径間連続	40.95+44.1+47.25+50.4+53.55+47.25+40.95	10.75	1987
アステリスク橋	2径間	2×37.0	13.00	1989
ドール橋	7径間連続	48.0+5@80.0+48.0	14.50	1994

表3 日本における波型鋼板ウェブPC箱桁橋の施工実績

橋 梁 名	形 式	支 間 構 成 (m)	幅 員	完成年
新開橋	単純桁	30.0	14.80	1993
銀山御幸橋	5径間連続	27.4+3@45.5+44.9	9.70	1995
本谷橋	3径間連続	44.013+97.202+55.978	10.49	1998

我が国においては、これまで新潟県の新開橋や秋田県の銀山御幸橋、東海北陸自動車道の本谷橋が完成している。新開橋（写真6）は、一般国道116号の新潟西バイパス高山ICと現道とをアクセスする主要地方道に架かる橋で、橋長31.0mの単純桁橋である。架橋条件は、河川上に位置し、支持地盤が軟弱であるうえ桁下空間が狭いため、現場制作ヤードで桁を製作し、架設桁により架設する施工法（写真7）を採用している。

銀山御幸橋（写真8）は、橋長210mの5径間連続PC箱桁橋で、架橋位置が沢沿いの片斜面上で桁下空間の利用が厳しいこと、冬季雪崩等を考慮し、押出し工法が採用されている。いずれの橋もコンクリート上下床版と波形鋼板は、鋼板上下に取り付けたフランジプレートとスタッドジベルによって結合される構造（写真9）である。波形鋼板のどうしの継手は、新開橋は現場での突き合わせ溶接、銀山御幸橋は高力ボルトによる摩擦接合方式が採用されている。また、防食方法は、新開橋が塗装、銀山御幸橋は耐候性鋼材によっている。



写真6 新開橋

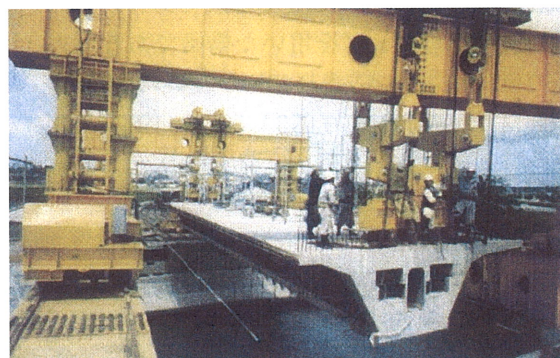


写真7 新開橋施工状況

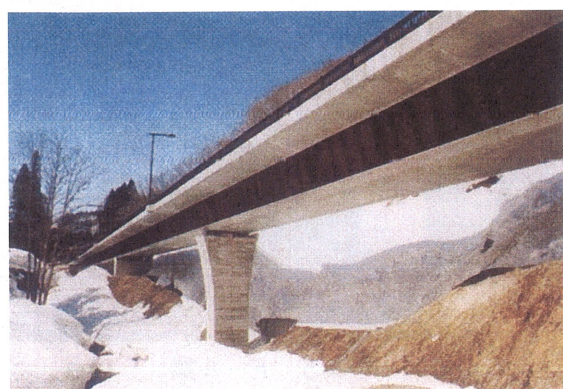


写真8 銀山御幸橋



写真9 銀山御幸橋波形鋼板詳細

本谷橋（写真10）は、我が国で初めてラーメン構造の採用、張出し架設工法によって施工された橋梁である。本橋は、主径間97mの3径間連続ラーメン橋である。柱頭部と波形ウェブの接合は、波形鋼板を1.2m埋め込み、橋脚からの帯鉄筋を貫通させる構造としている。帯鉄筋は4分割し波形鋼板を貫通させた後、カップラーにより機械的に接続している。また、ワーゲンは200tf・mの中型ワーゲンで、波形鋼板が鉛直な状態で吊り上げられる様一般のワーゲンより高く設計されている。波形鋼板の橋軸方向の接続は、高力ボルトにより接続されている。



写真10 本谷橋

3. 2 波形鋼板ウェブ構造の課題

波形鋼板ウェブPC橋の大きな設計上の課題は、その特徴である面外方向変位（図1）に関する事項、例えば波形鋼板の座屈安全性、波形鋼板の軸方向の接合方法や波形鋼板と上下床版の接合法である。

1) 座屈に対する検討

波形鋼板の座屈に対しては、国内3橋の実績では、局部座屈および全体座屈を個別に取り扱い、弾性座屈強度によりその安全性を照査している。また、全体座屈については、Easleyの式による弾性座屈強度に対して、非弾性域を考慮した算定式も提案されているが、連成座屈強度に関しては研究段階である。

そこで、波形鋼板ウェブを対象に有限変位解析プログラムによるパラメトリック解析および実験（図2）による検証を行い安全性の検証を実施している。解析および実験は、波形鋼板の板厚および波高をそれぞれ2.3 mmから9.0 mm、10 mmから60 mmと変化させておこなっている。実験および解析結果を写真11および図3、4に示すが、 H_w/d （桁高波高比）が20を超える範囲では、座屈荷重が降伏荷重を下回り、また、面外方向変位は波高の小さいものにおいては荷重の低い部分で非線型性が現れ、変形量が大きくなることが判明した。この結果から、支間長がこれまでの実績を超える場合においては、振動問題も含め波高の選定には注意を要する必要がある。

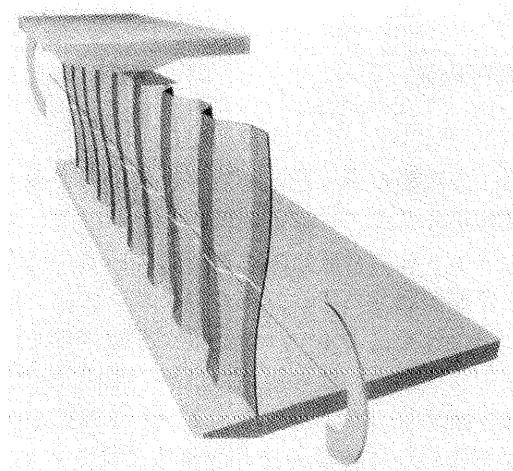


図1 波形鋼板の変型イメージ

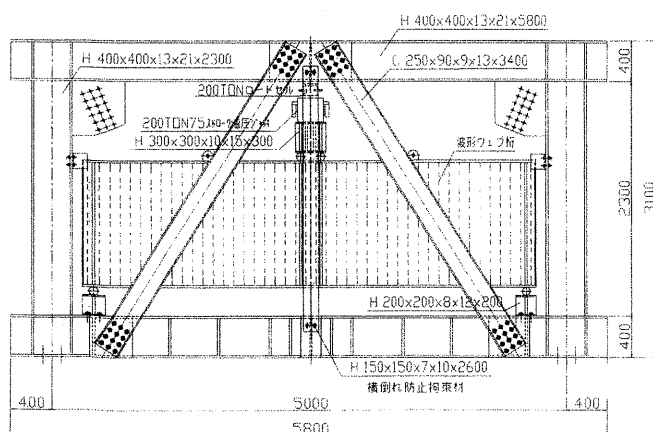


図2 実験状況概要

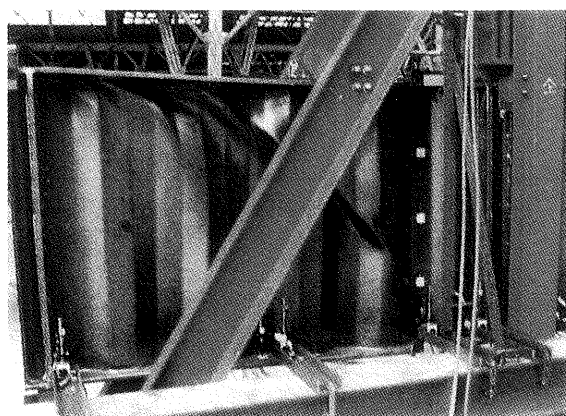


写真11 座屈状況 $t=3.2\text{mm}$ 、波高=60mm

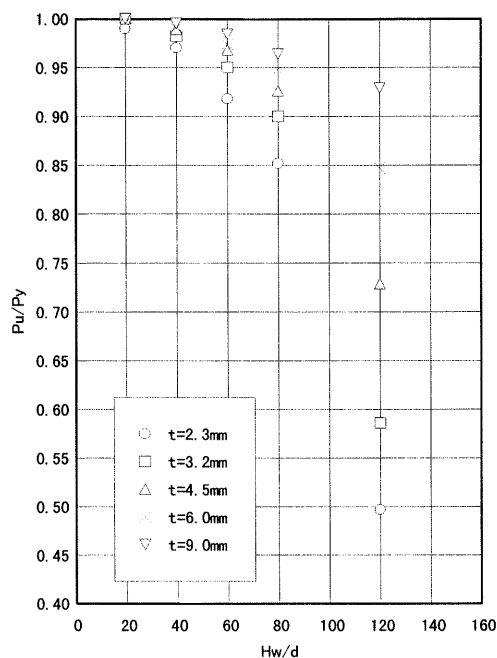


図3 P/uPyと桁高波高比との解析結果

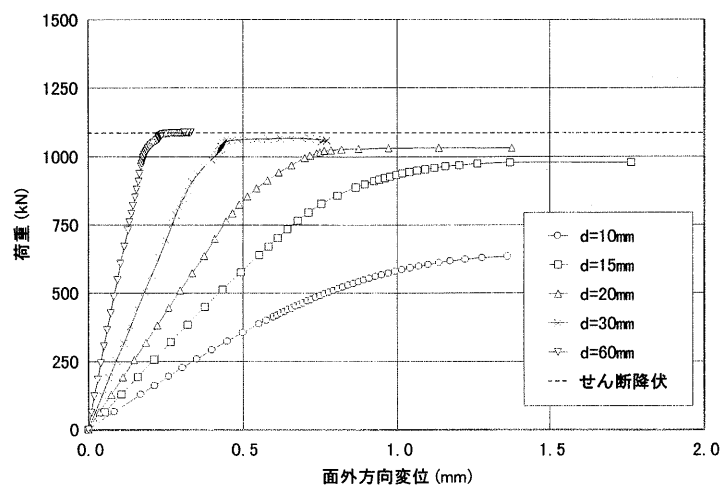


図4 波高差による面外変位解析結果

2) 波形の橋軸方向接合

これまで波形鋼板の接合方法は、新開橋が突き合わせ溶接、銀山御幸橋と本谷橋が高力ボルトによる摩擦接合を採用している。本谷橋の摩擦接合には、一面重ね摩擦接合を採用しているが、張出し架設における上げ越し管理や施工誤差のため高力ボルト孔の合致に困難を要している。また、波形鋼板ウェブには、プレストレス力や荷重による面外方向の変形が懸念されることや、フランスにおいては維持管理の観点からボルト接合は避けられている現状から、重ね合わせによるすみ肉溶接が採用されている(図5、写真12)。これらより、より合理的で安全な接合形式が望まれる。このため、張出し架設における施工性を考慮し、一面重ねすみ肉溶接における最適な構造詳細を検討する必要がある。また、すみ肉溶接の品質管理方法も検討する必要がある。そこで、ドール橋タイプを含めた3種類の接合部構造(写真13、14)について、1/2モデル実験(図6)により疲労に対して検証を行っている(図7)。

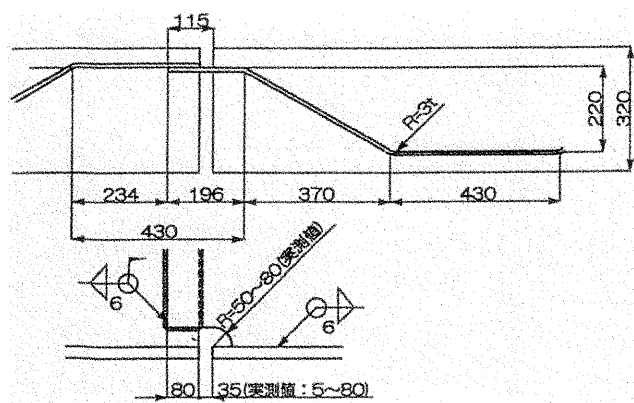


図5 ドール橋の接合部構造詳細

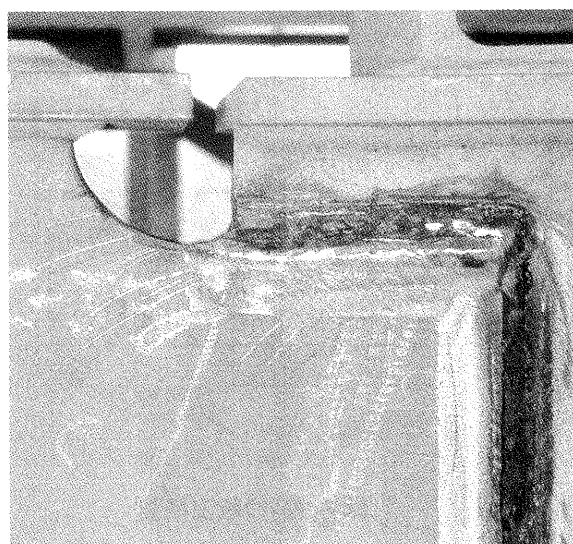


写真12 ドール橋の接合部スカーラップ構造(Cタイプ)

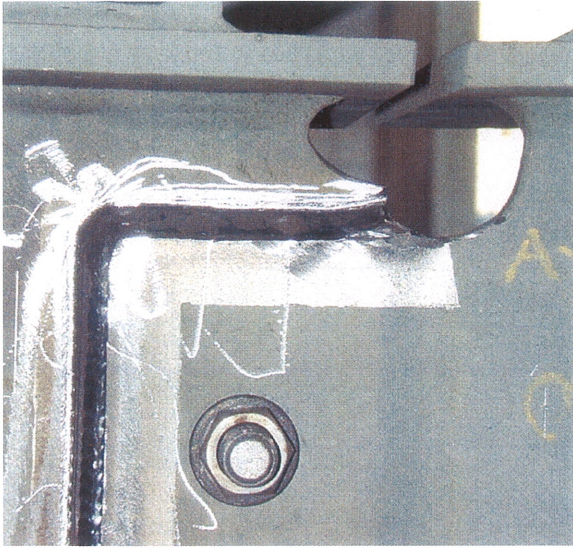


写真 1 3 片差込タイプのスカーラップ (Aタイプ)

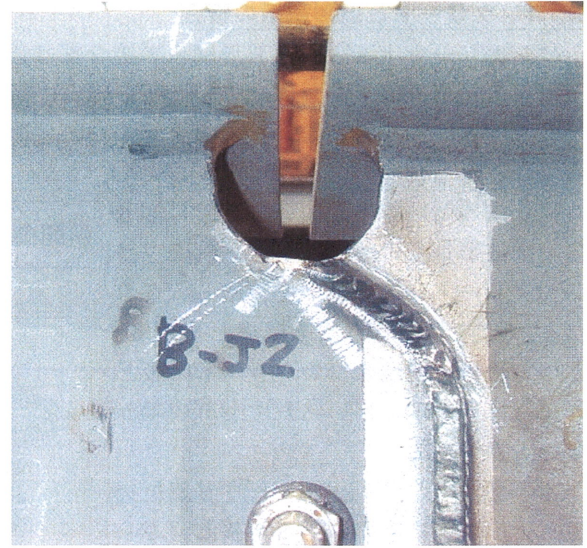


写真 1 4 両差込タイプのスカーラップ (Bタイプ)

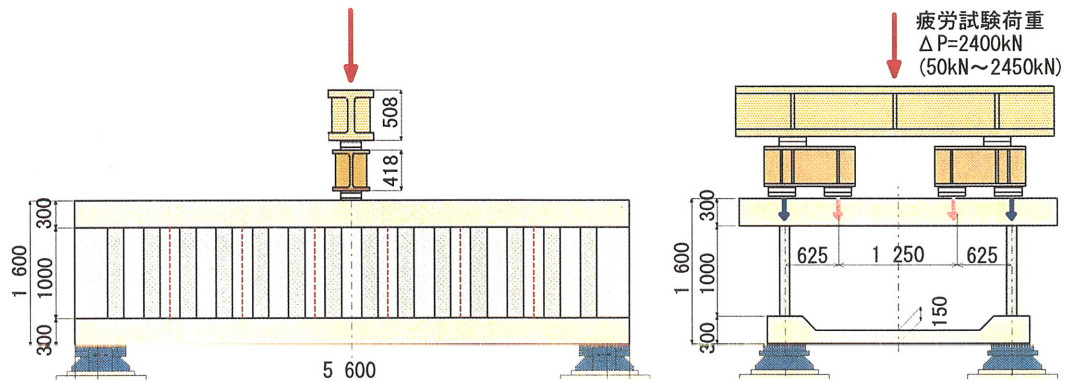


図 6 波形鋼板継手 1 / 2 モデル試験概要

構造		継手タイプ C	
		 ● : 首溶接部 ● : 現場溶接部	
止端部 仕上なし	首溶接	JSSC-F 等級 ($\Delta \sigma f = 65 \text{ MPa}$)	
	現場溶接	JSSC-G 等級 ($\Delta \sigma f = 50 \text{ MPa}$)	
止端部 仕上あり	首溶接	JSSC-E 等級 ($\Delta \sigma f = 80 \text{ MPa}$)	
	現場溶接	JSSC-F 等級 ($\Delta \sigma f = 65 \text{ MPa}$)	

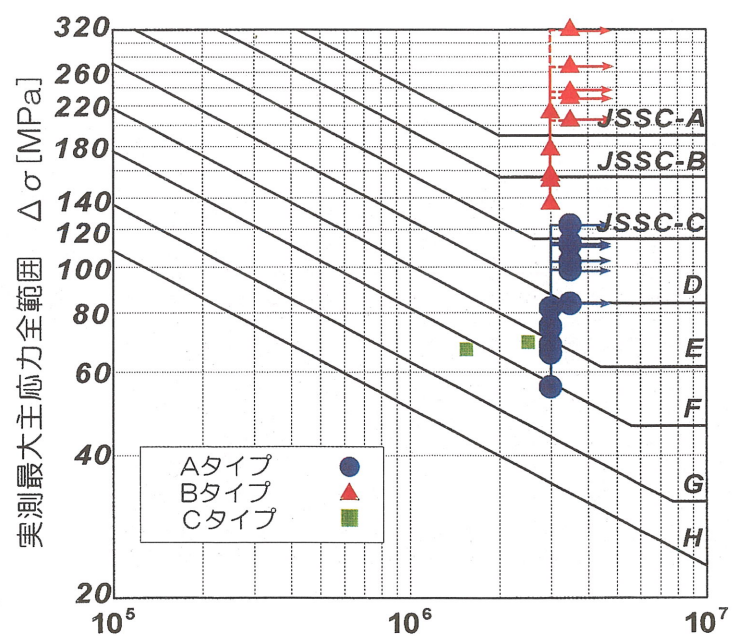


図 7 疲労試験結果および継手疲労等級

3) コンクリートと波形鋼板の接合

コンクリート上下床版と波形鋼板の接合部は最も重要な構成要素であり、軸方向の水平せん断力を確実に伝達するとともに、直角方向の箱断面を確実に構成するよう十分な耐力が必要となる。さらに、接合部は鋼とコンクリートとの異種部材の組合せのため適切な防食が必要であり、活荷重等による疲労等による耐久性も要求される部位である。

我が国の新開橋や銀山御幸橋では図8に示す波形鋼板の上下に溶接されたフランジプレートにスタッドを養殖し、これによって接合する方法を採用している。この方法は、鋼橋のコンクリート床版との接合に一般的に用いられており実績が多い方法である。

本谷橋では、図8に示す波形鋼板の上・下端に軸方向の鉄筋を溶接し、さらに波形鋼板に孔を開け、そこに橋軸直角方向の鉄筋を通し、コンクリート床版に埋め込む方法を採用している。これは、コンクリートに埋込まれた波形鋼板の斜め方向パネル、溶接された軸方向鉄筋、鋼板孔に充填したコンクリートがずれ止めとして作用するものである。

一方、フランスにおいては図9に示すアングルを溶接した接合方法を採用しており、耐久性の観点では、最も古いコニャック橋が約14年経過した現在においても損傷等は発見されていないとCanpenon Bernard社から報告を受けている。フランスにおけるアングルジベルの設計は、我が国の道路橋示方書にほぼ合致した設計が実施されており、また、フランスにおいて実物大の疲労試験により検証が実施されているため、当面JHにおいては、アングルジベル方式による接合方法（写真15）を採用していく方針である。

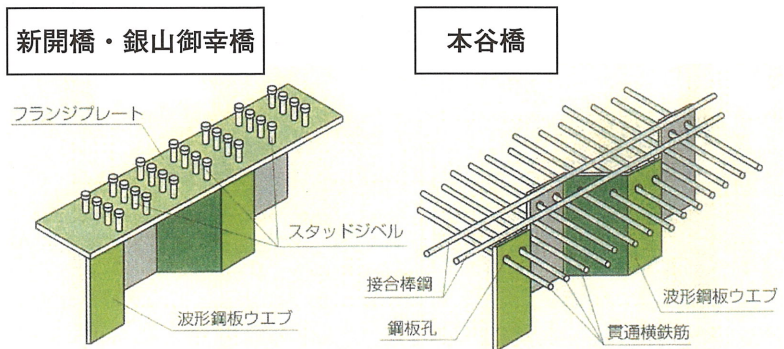


図8 我が国における接合部構造

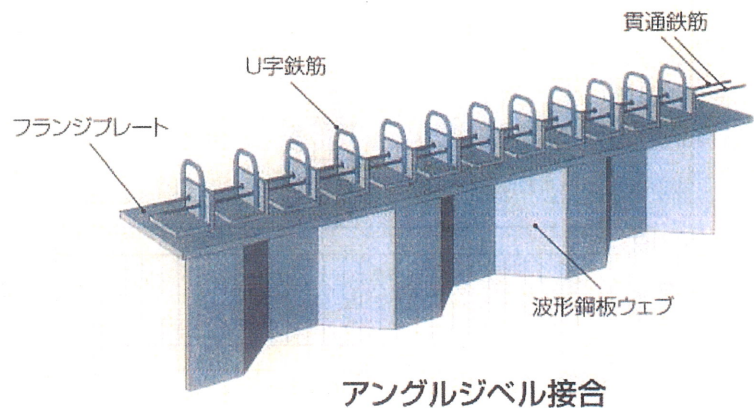


図9 フランスにおける接合部構造

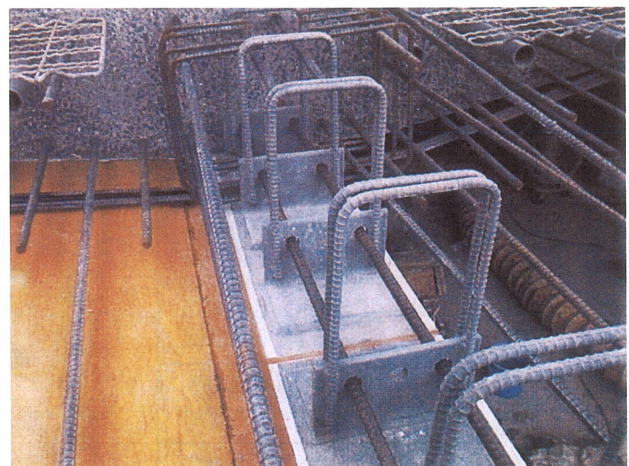


写真15 前谷橋における接合部構造

3.3 波形鋼板ウェブを用いたPC構造の今後の展開

本構造は、前述したとおり死荷重の軽減やコンクリートウェブの省略等による施工性改善、品質向上、維持管理の容易さから全国的に適用が広がっている。現在、JHにおける波形鋼板ウェブPC箱桁橋の施工中橋梁は表4に示すとおりであるが、計画中の橋梁も含めると現在30橋程度が波形鋼板ウェブPC箱桁構造となる予定である。

表4 JHにおいて施工中の波形鋼板ウェブを使用したPC箱桁橋

橋梁名	形式	支間構成(m)	備考
前谷橋	2径間連続ラーメン	75.3+83.3	張出し架設
勝手川橋	3径間連続ラーメン	59.3+96.5+69.8	張出し架設
鍋田高架橋	3径間連続	47.0+91.5+47.0	場所打ち施工
興津川橋	4径間連続ラーメン	69.1+112.0+142.0+130.6	側径間部のみ使用
下田橋	4径間連続ラーメン	44.25+136.5+48.5+38.75	張出し架設
大内山第二橋	7径間連続ラーメン	49.0+66.0+120.0+57.0+43.0+34.0	張出し架設
鍋田西高架橋	3径間連続	60.0+125.0+60	張出し架設
小犬丸川橋	6径間連続ラーメン	50.9+4@81.0+55.0	張出し架設
小河内川橋	2径間連続ラーメン	2@77.75	張出し架設

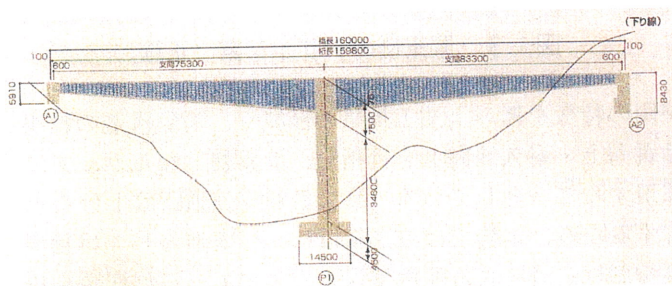


図10 前谷橋一般図

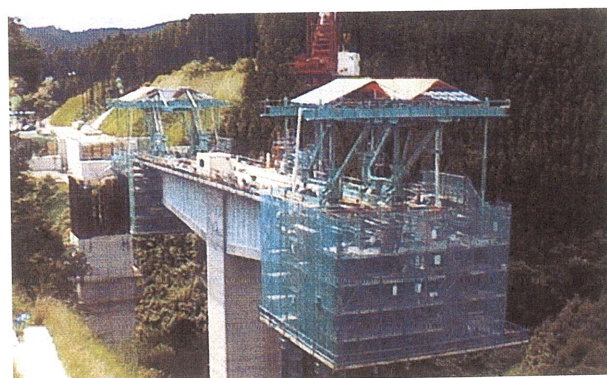


写真16 前谷橋施工状況

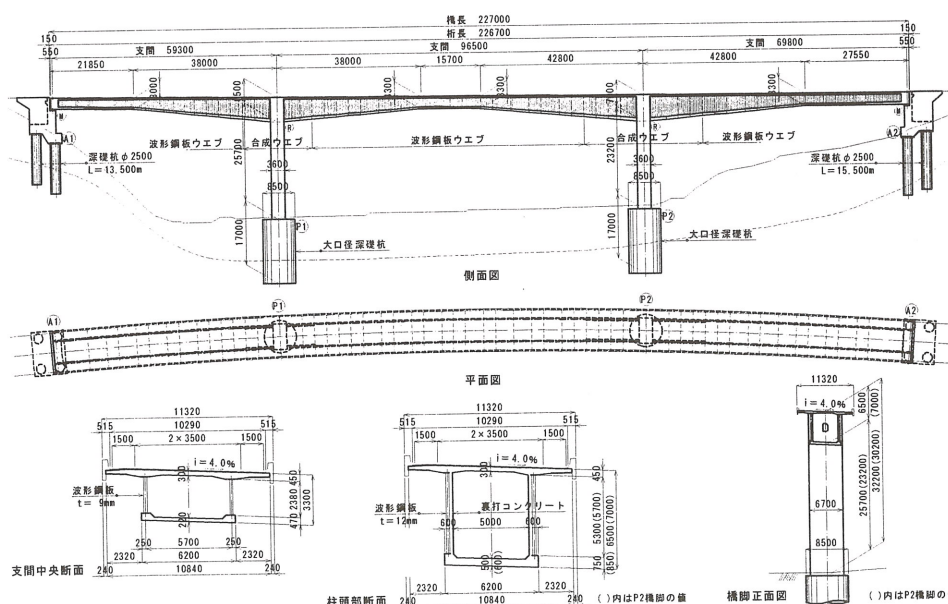


図11 勝手川橋一般図

また、波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、死荷重の軽減等から更なる長支間化が可能となる構造である。特に、PC構造においてはPCグラウトの充填性が大きな課題であり、外ケーブル構造と組合せた波形鋼板ウェブ橋が主流となるであろう。この点で、PCエクストラード橋やPC斜張橋における波形鋼板ウェブ構造の採用は、今後のPC橋を更なる長支間化、高耐久性化へと導くものと思われる。

JHでは、波形鋼板を使用したエクストラード橋を第二名神高速道路の栗東橋（図12、13）において施工予定であり、現在、下部構造を施工中である。栗東橋は、第二名神高速道路 信楽IC（仮称）から大津JCT（仮称）の間、日本の六古窯の一つで1250年にもおよぶ信楽焼の里として著名な甲賀郡信楽町と、草津と石部の「間の宿」として栄へJRA栗東トレーニングセンターで有名な栗太郡栗東町の行政境に架かる橋で、かわせみの生息地や三上・田上・信楽県立自然公園に指定された緑豊かな地域を横過する橋梁である。架橋地点には、大戸川ダムの建設が予定されており、また急峻な地形を横過するため、最大支間長が

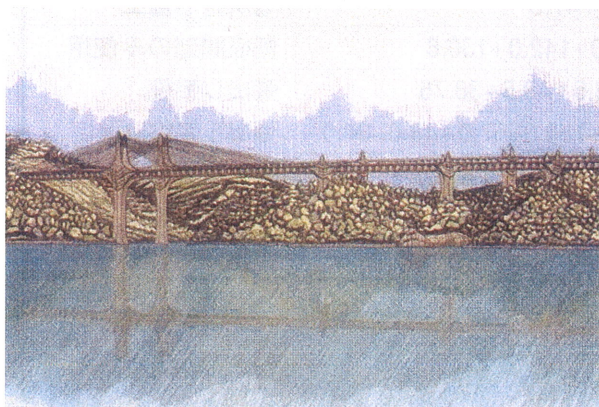


図12 栗東橋のデザイン案（側面）

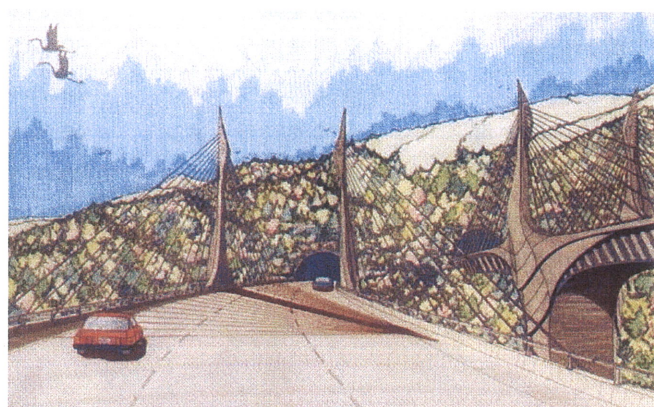


図13 栗東橋のデザイン案（正面）

170mに及ぶ規模となり、また、地震国である我が国の特徴を鑑み上部工重量の軽減や、基礎構造の縮小化、ウェブ部分の施工省力化等による建設費節減や品質向上・耐久性向上を目指し、世界初となるウェブに波形鋼板を使用したPCエクストラード構造を採用することとしている。第二名神高速道路は十分な車線数を確保するため片側3車線、幅員16.5mを有するため、本橋では波形鋼板ウェブ構造としては世界初となる3室箱桁構造を採用し、さらに、横方向剛性や斜材定着による剛性確保のためにエッジ型構造を採用し、さらに、これまでコンクリートの断面内に配置されていた全ケーブルを断面外に配置する全外ケーブル構造を採用し維持管理のし易さを向上させる試みを採用している。また、本橋は、県立自然公園に架橋されることや、第二名神高速道路の関西地区への入口としてのランドマークを考慮して意匠設計を行っており、また世界初となる技術を採用することを考慮し、Tanja Wilcox 女史（米BRENNAN ASSOCIATES 社）によってデザインされている。

栗東橋以外にも、長大支間へ波形鋼板ウェブを採用する試みを検討しており、現在、PC斜張橋での設計を実施中（図14）である。本来、波形鋼板を使用する場合は、波形鋼板の製作、架設から等断面が望ましいが、支間長が大きい場合は経済性を追求し変断面を採用している。しかし、エクストラード形式や斜張橋を採用することにより、等断面形状とすることが可能となり波形鋼板ウェブ橋の更なる施工性向上が期待できる。更にこのような大偏心外ケーブル構造や斜張橋への適用においては、鋼構造に比べ剛性が高く、PC構造と同様な張出し架設が適用可能であること、PC斜材の変動応力が小さく安価な現場制作ケーブルや一般のPC定着構造も採用可能であること、PC構造に比べ死荷重が軽減されることから下部構造の規模が縮小されるとともに、慣性力も小さくなることから耐震性能の向上が期待でき、今後、PC構造の主流となるとともに、鋼構造の適用支間において本構造が広く適用されていくことが期待できる。

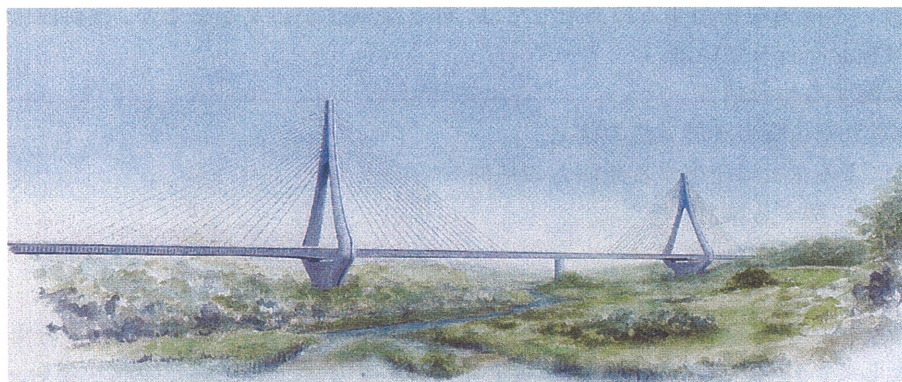


図 1 4 波形鋼板を使用した斜張橋の例（矢作川橋）

4. 上部工の複合断面構造（鋼トラスウェブ構造）の概要

現在、JHでは、波形鋼板ウェブ同様に鋼トラスウェブ橋について検討を進めている。²⁾ 最大支間長が100mを超える橋梁に対し、鋼トラスウェブ橋の優位性について検討を進めているものである（図15）。この橋梁形式は、従来のPC箱桁橋のウェブに鋼トラス材を使用した複合構造であり、新技術・新工法の一つとして、鋼とコンクリートそれぞれの材料特性を生かし、上部構造の軽量化、主桁底版幅の縮小（図16）を図り、下部構造を含めた全体でより合理的な構造を追求している。

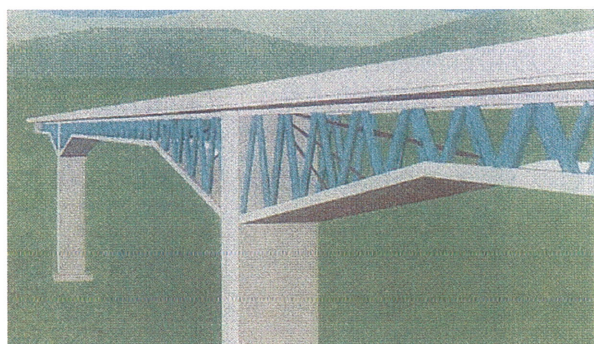


図 1 5 ー鋼トラスウェブのイメージ図

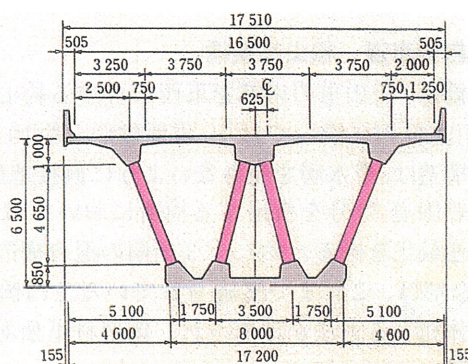


図 1 6 ー断面図



図 1 7 鋼トラスウェブ橋の完成予想図

本形式は上下床版を場所打ちコンクリート床版とし、ウェブの鋼トラス材は張出架設のブロック長（5m）に合わせたワーレントラスで構成されている。プレストレスは張出架設時には上床版内に配置したPC鋼材、主桁完成時には外ケーブルより与えられる。トラス材は4主構とすることより、床版支間を縮小するとともにねじれ剛性を向上させている。ウェブをトラス化した結果、1室のPC箱桁橋に比べ、全死荷重で約88%まで上部構造が軽量化され、施工性、経済性に有利な等桁高（ $h=6.5\text{m}$ ）が可能となっている。

国内に実績の無い本構造を採用するにあたっては、様々な検討が必要となるが、検討段階では2つの部材を重要項目に掲げ検討を行っている。

①床版の設計に関する検討項目

- 1) 点支持された床版の設計方法の確立
- 2) 大変形による床版に発生する断面力の把握

②トラス格点構造に関する検討

- 1) 合理的な格点構造の開発
- 2) 格点の応力伝達、疲労特性、耐力の確認

これらを確認するため、FEM解析や部分モデルによる疲労試験、破壊試験を行い検討している。さらには、今後の課題として、外ケーブルにおける床版下面側のディビエータ位置での取り扱い、定着位置等の細部検討や、施工性、維持管理と立場からより詳細な検討、床版あるいは格点部における防水対策、防錆対策の検討が必要であり、更なる検討を行っていく予定である。

5. 上部工における混合構造の概要

5.1 混合構造の概要

コンクリート桁と鋼桁を橋軸方向に接合する混合構造は、ノルマンディー橋や生口橋、汲水門橋等の斜張橋で実績が多い構造である。架橋条件等からこれまでにない径間長となる場合などに、重量の軽い鋼構造を一部採用するにより、モーメント等を改善できる利点がある。ここでは、JHにおける事例を紹介する。

5.2 松山自動車道 松山高架橋

松山高架橋は、松山市の南部を東西に伸びる約4.7kmの高さ約10mの連続高架橋である。本橋の架橋地点は、一級河川重信川に沿っており、現地盤から約10m程度の砂礫層に帯水層が多く存在している。このため、橋梁の基本構造は、帯水層を犯さないように直接基礎形式のRC連続ラーメンBOX形式が採用されている。しかし、一般国道33号を横過する箇所においては、約34mの支間となるため、鋼桁形式としているが、一般部との連続化を図るために、3径間の混合構造を採用（図18）している。

また、接合部は、これまで実施されている生口橋など同様の鋼殻セルにコンクリートを充填し、スタッドにより一体化する方法が採用され、鋼部材単独あるいはコンクリート部材単独で安全であるように設計されている（図19）。

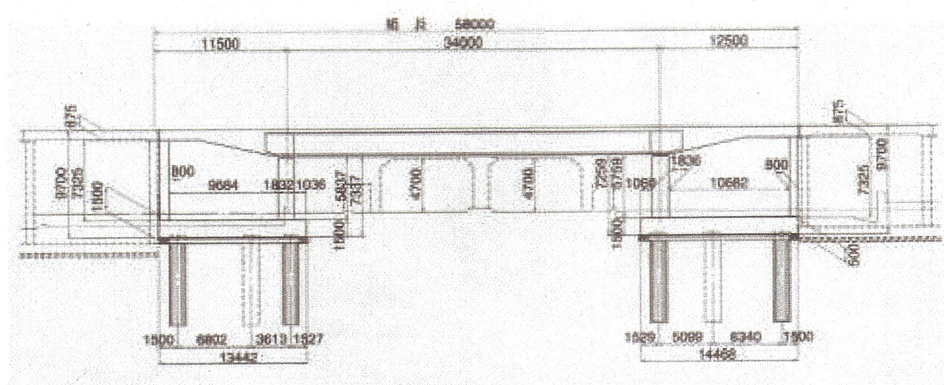


図18 松山高架橋 一般国道33号横過部の一般図

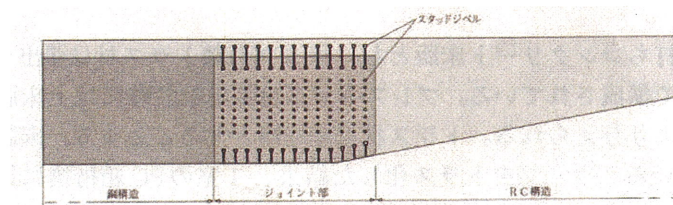


図19 松山高架橋の接合部概要図

この形式は、中央径間の鋼桁部と側径間のコンクリート部を結合したもので、鋼桁部とコンクリート桁部が接する部分もジョイントレス構造となり、走行性の向上および将来のメンテナンスの低減が図られると期待されるものである（写真17、18）。



写真17 松山高架橋一般国道33号交差部

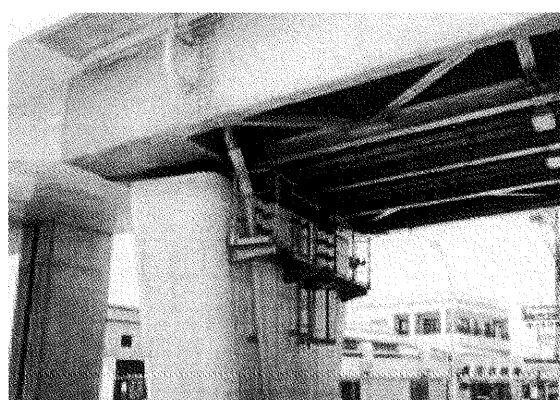
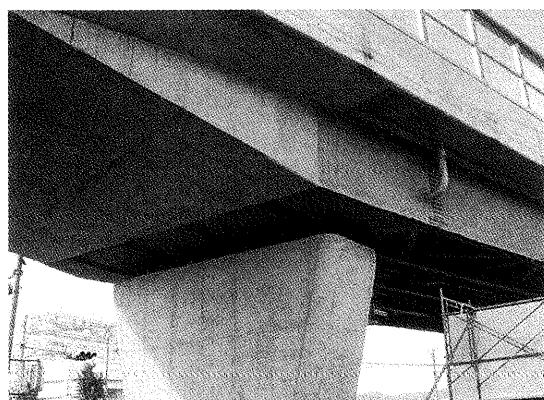
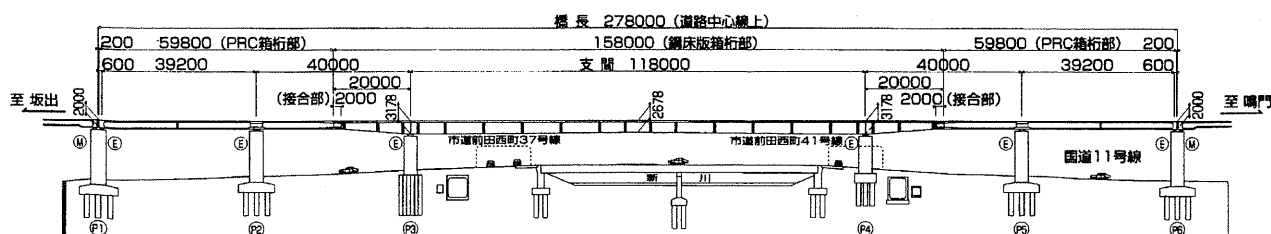


写真18 松山高架橋の接合部

5.3 四国横断道 新川橋

P C橋は、山岳部において経済性や施工性の面において有利な場合が多く高速道路での実績も多い。しかし、支間がアンバランスな場合で片持ち張出し架設では、柱頭部にP C鋼棒を埋め込むなどの対策が必要となる場合がある。このような場合、混合構造を採用することにより、アンバランスモーメントの改善に寄与できる。

高松自動車道 新川橋（写真19）では、鋼とコンクリートの接合位置や応力分担について検討を重ね、混合構造として施工されている。新川橋は、図20に示すように、橋長278mの5径間連続であるが、中央支間の支間長が河川部を横過するため、118mとなっている。従来であれば、3径間の鋼箱桁構造を採用するところを、側径間部にP R C箱桁を採用し、かつ混合構造とすることで、工費削減および走行性の改善がなされている。



側面図
図20 新川橋一般図

接合構造の基本は、それまで実績のある方法と同様で、鋼殻セルにコンクリートを充填する方法（中詰めコンクリート後面支圧板方式）が採用されているが、これまでは、中詰めコンクリートと鋼殻セルの一体化のためにスタッドシェアコネクタが用いられていたものを、本橋では孔あき鋼板ジベル（PBL）を採用している（図21、22）。

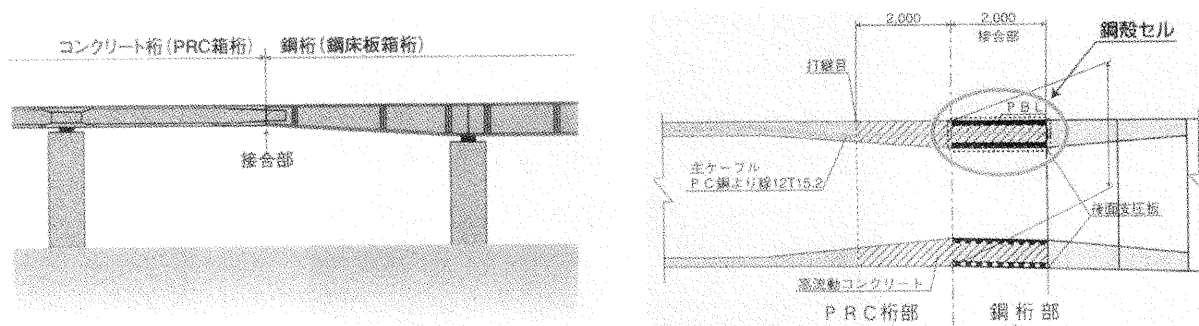


図21 新川橋接合部概要図

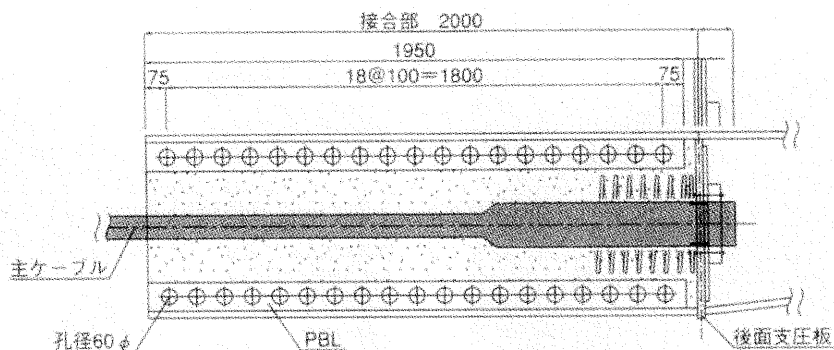


図22 新川橋接合部詳細図

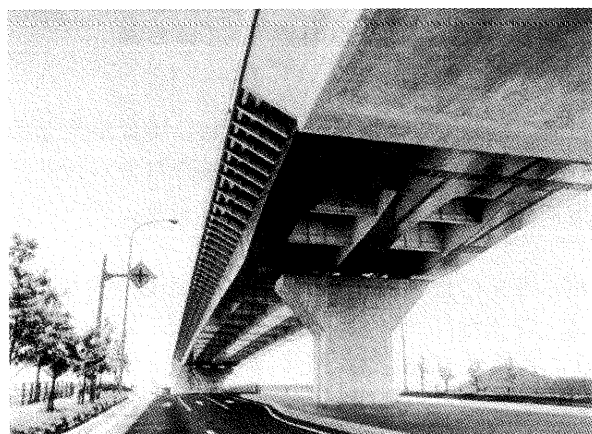


写真19 新川橋完成状況

5.4 中央自動車道 跨高速道路橋群

中央自動車道の上野原ICから大月JCTの改築事業は、基本的に現在の往復4車線から6車線に両側を拡幅するものである。これに伴い、両側拡幅区間にある跨高速道路橋（以下、OV）の架替えが必要となる。架替えるOVは、高速道路の通行止めを最小限とした架設工法により施工することを大前提として計画され、さらに、経済性や架橋地点の立地条件を考慮して、鋼とコンクリートの複合斜材付π型ラーメン橋が採用されている（写真20）。

一般に、夜間通行止めの中で架橋される形式としては、鋼単純鈑桁や鋼単純箱桁が採用される。しかし、この形式では、架設重量が重くなるため、クレーン等の架設重機が大型とならざるを得ない。そこで、通行

止め時に架設される鋼部材（写真 2 2）を最小限とする形式が検討されている。その結果、図 2 3 に示す構造が採用されている。また、斜材付 π 型ラーメン橋では、支間比が 1 : 3 ~ 4 程度とされてきたが、中央支間に鋼構造を採用することにより 1 : 6 程度まで可能としている。本橋の特徴は下記のとおりである。

- ① 鋼桁よりコンクリート桁の方が安価であることに着目し、支保工設置可能な範囲をコンクリート構造とし、支保工の設置できない区間は鋼構造とする。
- ② 斜材付 π 型ラーメン橋を採用することにより、断面力が小さくなり、主桁を既成の H 鋼で構成することが可能となる。
- ③ コンクリート構造と鋼構造の接合部は、これまで実績のある鋼殻セルにコンクリートを充填し、スタッドにより一体化する構造とする。

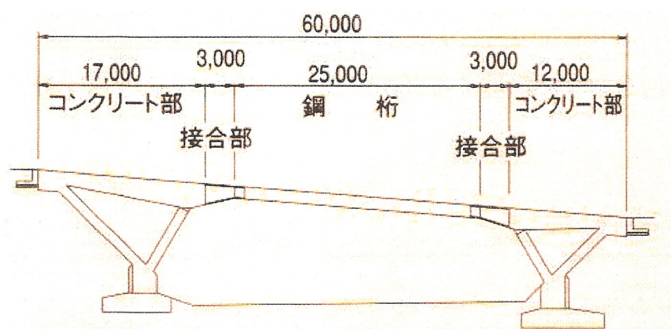


図 2 3 中央道 O V の複合斜 π 橋概要図



写真 2 0 中央道 O V 完成写真

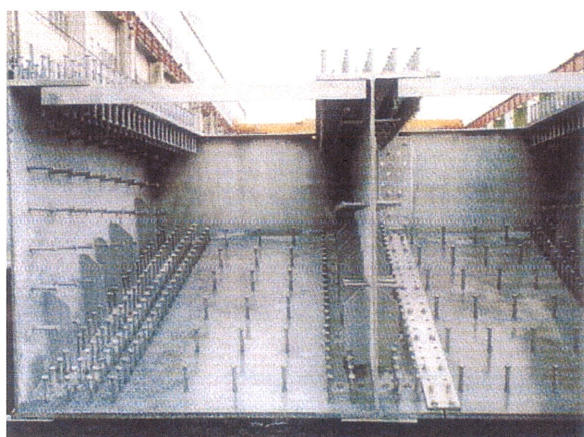


写真 2 1 接合部の鋼殻セル



写真 2 2 夜間通行止めによる鋼桁部の架設

接合部の設計（写真 2 1）においては、本来、RC 構造と鋼構造の合成断面で抵抗するが、本橋では、接合区間長が短いことから、RC 構造と鋼構造それぞれ単独で抵抗できるように設計している。また、ずれ止めの設計では、曲げモーメントと軸力によりフランジに働く水平せん断力を計算し、この力がフランジとコンクリートの接合面に働くせん断力と考えて、フランジに設置するスタッドの本数としている。また、鉛直方向のせん断力に対しては、ウェブ面に設置するスタッドを介して伝達されるものとしてウェブ面に設置するスタッド本数を決定している。

$$\cdot \text{フランジ} \quad n = S_h / Q_a \quad S_h = M / h \pm N / 2$$

$$\cdot \text{ウェブ} \quad n = S_v / Q_a \quad S_v = S$$

ここに、 n : ずれ止めの必要本数

h : ウェブ高さ

Q_a : ずれ止めの許容せん断力

上記の設計方針に従い、中央自動車道の改築区間では、4 橋の O V（鳶ヶ崎橋、北川橋、北久保橋、強瀬跨道橋）が複合斜材付 π 型ラーメン橋で施工されている。

5.5 第二名神高速道路 木曽川橋、揖斐川橋^{3) 4)}

木曽川橋、揖斐川橋は、第二名神高速道路のうち三重県内を横過する橋梁である。本橋は、河川条件から支間長が200mを超える長大橋として計画する必要がある、経済性や施工性に優れた鋼コンクリート複合エクストラード橋(図24、25)を採用している。

木曽川橋および揖斐川橋は、側径間および支点部をPC箱桁、中央径間支間部を鋼床版箱桁としたPC・鋼複合エクストラード橋であり、PC桁と鋼桁との接合部を有する。接合位置は、曲げモーメントの交番点に近い位置が選定されており、作用曲げモーメントは小さいものの、PC桁-鋼桁間の力の伝達を円滑に行う上で、より良い接合構造とすることが重要になる。

しかし、複合橋梁における接合部では、PC桁と鋼桁部材間の剛性急変は避けられず、応力集中の発生、さらには、異種材料間の接合に対する信頼性についても懸念される。特に、上床版および鋼床版は主桁系の外力、すなわち、曲げモーメント、せん断力およびねじりモーメントを受けるだけでなく、T荷重による床版・床組系の力も作用する。このような部位では、静的な強度を満足するだけでなく、疲労に対しても十分なディテールを選定する必要がある。

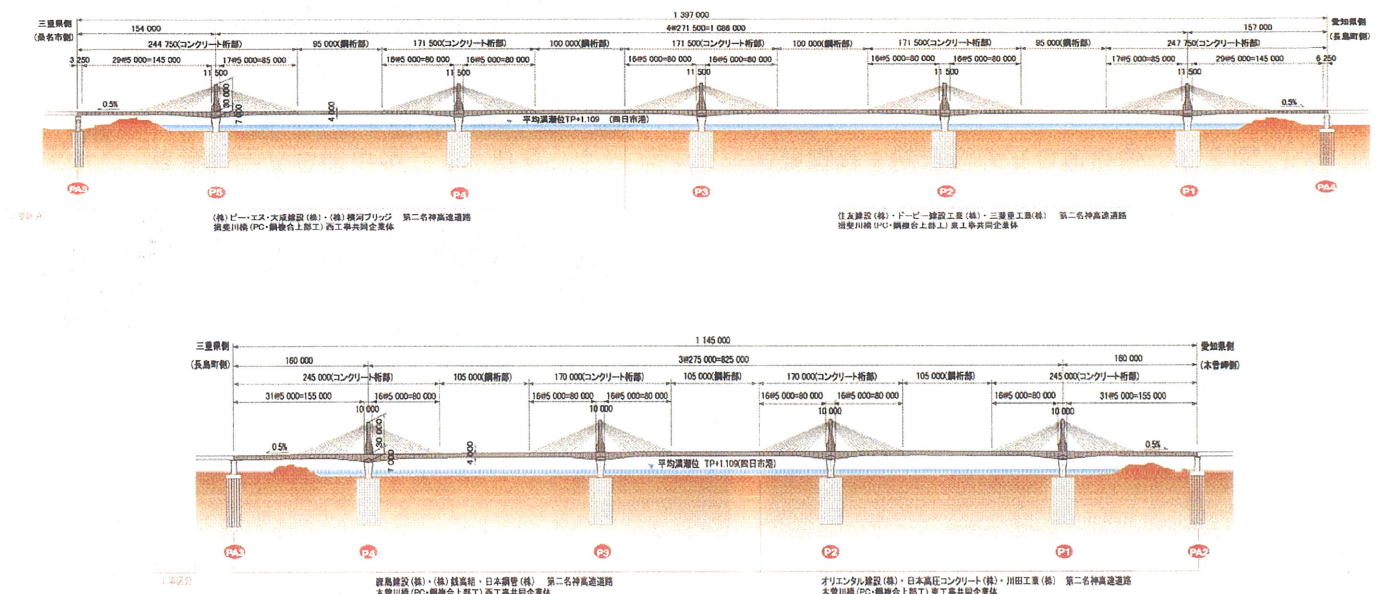


図24 第二名神高速道路 木曽川橋・揖斐川橋一般図

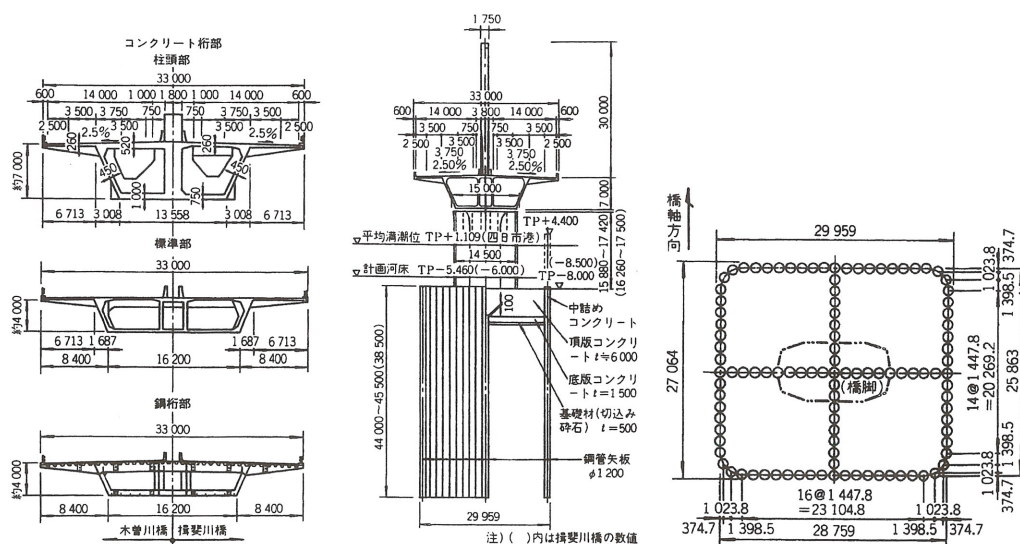


図25 木曽川橋・揖斐川橋断面図

また、本橋は、世界的に例のない鋼とコンクリートの複合エクストラードス橋であり、次のような特長を有している。

- ① 斜ケーブルの主桁定着付近まではP C箱桁、径間中央部は死荷重軽減のため鋼床版箱桁である。
- ② 斜ケーブルは、6車線断面の中央分離帯位置に配置される1面吊り構造である。
- ③ 主塔高さは、斜張橋に比較し約半分となり、施工の省力化と下部工の経済性が期待できる。
- ④ 斜ケーブルに生じる応力変動は、斜張橋に比べ桁剛性が大きいため小さくなる。従って、現場製作ケーブルの使用が可能となり、経済性が期待できる。
- ⑤ コンクリート桁部には、高強度コンクリート ($\sigma_{ck} = 60 \text{ N/mm}^2$) を用いる他、内ケーブルおよび外ケーブルを併用することによりP C箱桁部の軽量化を図るとともに、プレキャストセグメント工法を採用することで低コストおよび工期短縮を図っている。
- ⑥ P C箱桁と鋼箱桁との接合部は、剛結構造とし、P C鋼材で補強するとともに、鋼箱桁内部にもP C箱桁と連続して外ケーブルを下フランジ側に配置する。

以上の新技術を導入することにより、経済性、施工性および耐震性の向上を図っており、さらに、これらの特長を十分生かすために、国内外の最新の研究成果等を参考にし、下記の項目について検討を行っている。

- ① 耐風性および耐震性の検討および確認
- ② 巨大セグメント (400t/個) の合理的な製作方法
- ③ セグメントの合理的なマッチキャスト方法の検討
- ④ 鋼とコンクリートの接合部詳細構造の検討
- ⑤ 接合部の疲労特性

④の接合部においては、まず、表5に示すような接合形式をリストアップして、比較検討を行った。まず、第2案の中詰めコンクリート案（後面板形式）は、わが国において施工実績があり、力の伝達は良好なものとなる。しかし、合成部、および補強部は、狭隘部への溶接量も多く、鋼桁製作性は劣る。さらに、コンクリート部の施工において、P C桁部と合成桁部に一括して高流動コンクリートを打設した場合、その打設量や充填確認箇所なども多く、品質確保を行う上で、施工管理上の配慮が多くなる。合成桁部や間詰部（横桁）のような狭隘な部分への配筋・型枠工など施工性についても難点が多い。

表5 接合形式の比較

	第1案 中詰めコンクリート案 (前後面板併用形式)	第2案 中詰めコンクリート案 (後面板形式 生口橋・多々羅大橋)	第3案 メタルプレート案 (支圧形式 ノルマンディー橋)
構造概略図			
力の伝達	○軸方向力、曲げモーメント 合成部のずれ止め(せん断)と前・後面板(支圧)から鋼桁へ伝達される。 ○せん断力、ねじりモーメント 前面板のスタッド(せん断)から鋼桁へと伝達される。	○軸方向力、曲げモーメント 合成部のずれ止め(せん断)と後面板(支圧)から鋼桁補強部(応力分散)、鋼桁へ伝達される。 ○せん断力、ねじりモーメント デッキ、腹板および下フランジ部のスタッドから鋼桁へと伝達される。 ※上記、2系統の足し合せ昭査を行う。	○軸方向力、曲げモーメント メタルプレート(支圧)から鋼桁補強部、鋼桁へと伝達される。 ○せん断力、ねじりモーメント メタルプレートとの摩擦とU字筋のせん断により鋼桁へと伝達される。

次に、第3案のメタルプレート案は、コンクリート部の施工がオープンスペースで行え、かつ、一般部のPCセグメントと同種のコンクリート材質を採用できることになり、施工上および品質管理上、最も優れている。鋼桁部は、極厚のメタルプレート（支圧板）を用いることとなるが、比較的製作性も良い。ただし、メタルプレート位置で鋼部材に大きな応力集中が発生し、コンクリート支圧応力度も大きく許容値を超えるものとなった。鋼桁部の補強構造や鋼板厚を種々変えて部分FEM解析を実施し、発生応力の改善を試みたが、スムーズな応力伝達にはならなかった。

第1案は、コンクリートの支圧応力度や鋼桁の垂直応力度は、滑らかな分布形状を示し、局部的な応力集中の発生はなかった。第1案におけるPC-鋼桁間の力の伝達は、前・後面板位置（支圧）、および合成部のスタッド（せん断）の合計3つのルートから行われるため（第2案は後面板・スタッドの2ルート）、最も円滑に行われるものと考えられる。鋼桁製作性は合成部において密閉構造を形成することとなるが、密閉板を最後に外周溶接することで、他案に比べて最も優れたものとなる。さらに、PC桁部においても、第3案と同様に、コンクリート品質、施工性に優れている。また、合成部においても、密閉部へのモルタル充填もしくは高流動コンクリートの打設は、第2案より施工上の管理が行いやすく、打設時期にも選択の自由度がある。

そこで、接合形式は、応力伝達性状、鋼桁製作性、およびコンクリート施工性に優れる第1案の中詰めコンクリート案（前後面板併用形式）を採用することとしている（図26、写真23）。

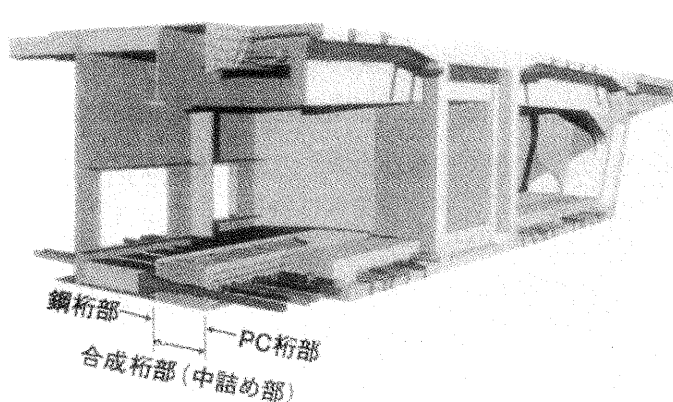


図26 接合部の概要図

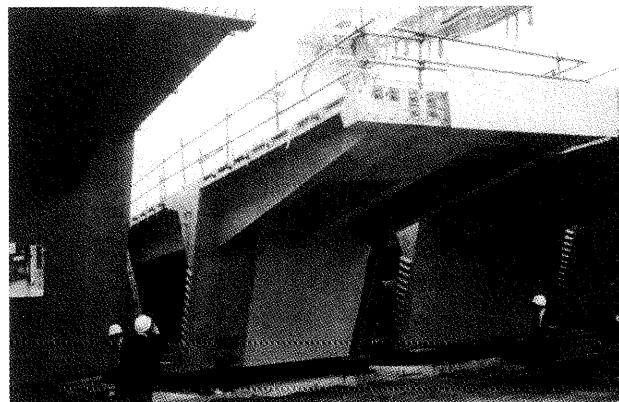


写真23 接合部セグメント

次に、接合桁の床版部には、前述したように、主桁系断面力以外にT荷重による床版・床組系の力も作用する。T荷重の作用によっても、剛性急変に伴った応力集中が十分予想される。大型車の計画交通量の多い本橋においては、T荷重に対する疲労強度特性についても十分な検討のもとに把握し、実構造に反映させる必要がある。そこで、本橋では、接合桁床版部の疲労強度評価を行うために、移動輪荷重による疲労実験（図27、写真24）を行っている。実験は、鋼床版と複合部との境界部および複合部とコンクリート部との境界部の2点に着目し、以下の項目について行っている。

- 1) 輪荷重を静的に橋軸・橋直方向に載荷した場合の局部応力および変形状況
- 2) 同様に、着目部位において疲労照査を行う上での応力振幅
- 3) 移動輪荷重による繰返し載荷による疲労強度
- 4) 鋼桁部の製作施工性や接合部におけるコンクリートの施工性の確認

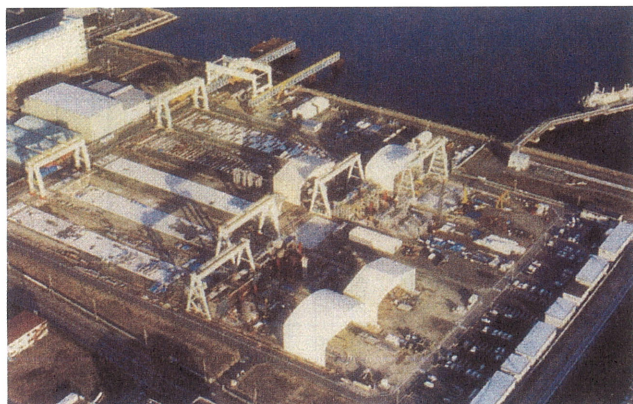


写真 2 5 セグメント施工ヤード

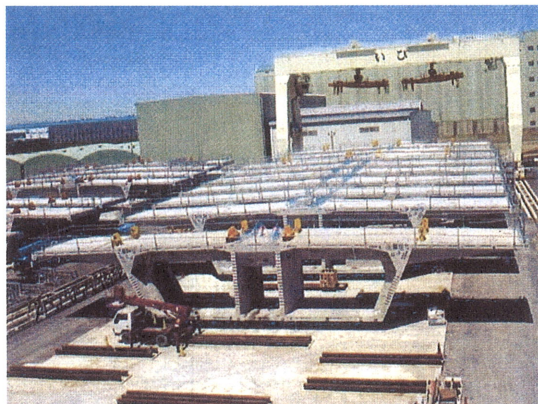


写真 2 6 セグメント仮置き



写真 2 7 セグメント架設状況



写真 2 8 張出し架設完了状況



写真 2 9 鋼桁部架設状況



写真 3 0 木曽川橋・揖斐川橋完成

6. その他の複合構造

JHでは、前述してきた合成構造、混合構造の他にも、鋼上部工とRC下部工の剛結構造や、下部構造における合成構造などにも積極的に採用し、新技術・新工法の検討を行っている。

6.1 第二東名高速道路 富士川橋

RCアーチ橋は、V字谷などの地形条件や周辺の景観との調和、美観に力点をおく場合に優れた形式として採用され、常に架設工法等に関しては最新の技術を開発してきている。

長大スパンを有するRCアーチ橋の施工例としては、ピロン・メラン併用工法によって施工した中国自動車道の帝釈川橋（支間145m、1978年）、温泉地帯でトラス式張り出し工法にメラン工法を併用して施工された大分自動車道・別府明礬橋（支間235m、1989年、写真31）など、すでに複合構造が一般化して採用されている。



写真31 大分自動車道・別府明礬橋

しかし、第二東名高速道路・富士川橋（支間261m、施工中）においては、圧縮に強いコンクリートをアーチリブに採用し、補剛桁に鋼少数主桁を用いることにより軽量化を図り、経済性、施工性に優れた複合アーチ形式（図28）の施工を実施している。⁵⁾

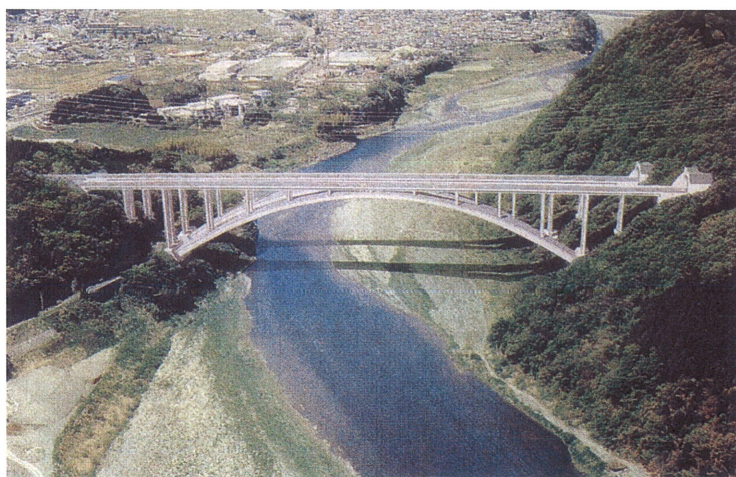


図28 第二東名高速道路 富士川橋

本橋の施工では、河川内に設置した仮支柱およびアーチリブの上に構築したピロンを併用した斜吊り材により張出し施工により、アーチリブを構築する方法が採用されており、長大アーチで一般的に用いられるメラン材は用いないピロン単独工法によって施工されている。また、補剛桁である鋼2主桁は、送り出し架設工法によって架設される予定であり、現在、桁の製作が実施されている。また、床版は、耐久性を向上させるために、プレキャスト床版とし、さらに弱点となる継ぎ手を極力減らすために、大型プレキャスト部材としている。さらに、耐震性、維持管理を含めた合理性、車両の走行性の改善を図るために、アーチクラウン

部および鉛直材の高さが高い箇所において、補剛桁と柱を剛結とする構造を採用している。

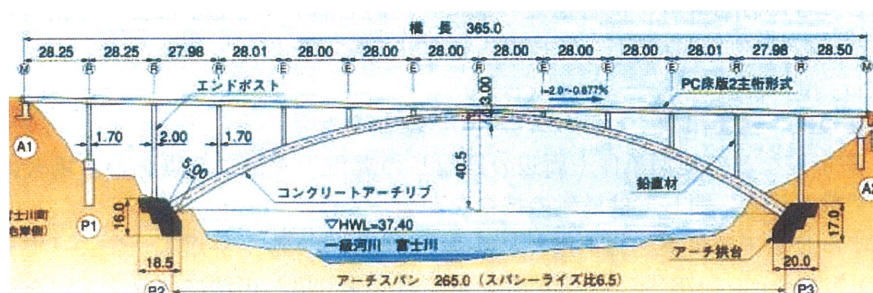


図 2 9 富士川橋一般図



写真 3 2 富士川橋施工状況

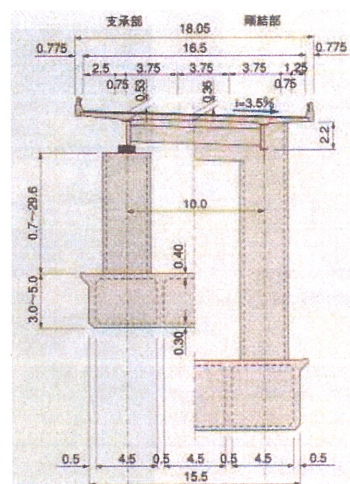


図 3 0 剛結構造部

剛結構造については、図 3 2 に示す孔あき鋼板ジベル（PBL：パーフォボンドジベル）を用いた剛結構造を採用しており、3次元FEM解析および1/4スケールモデルによる載荷試験により、安全性を検証している。

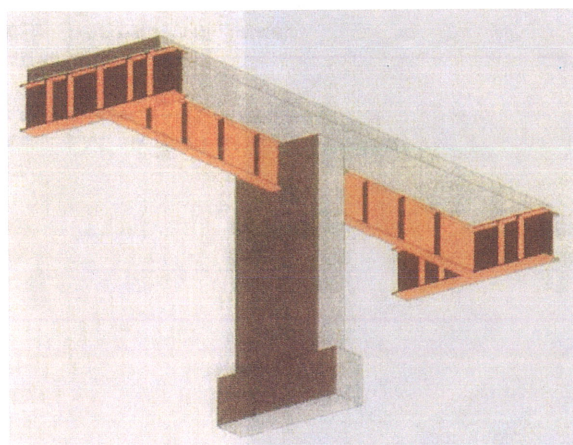


図 3 1 剛結構造概要図

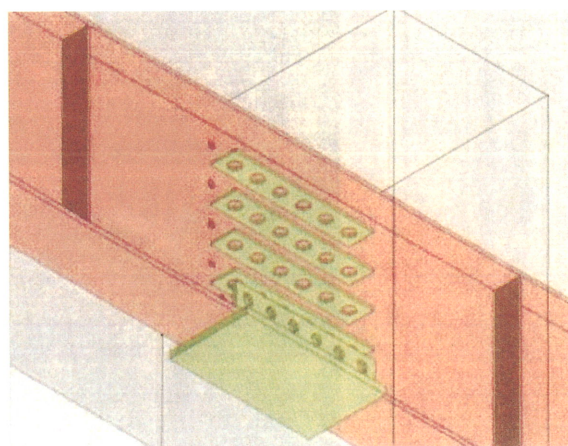


図 3 2 剛結構造詳細

6. 2 鋼上部構造とRC橋脚の剛結構造

従来、連続ラーメン橋はPC橋で多く採用されてきたが、鋼桁においても鋼桁とRC橋脚を剛結してラーメン構造とすることにより、連続桁橋に比べて、より合理的な構造とすることができる。このため、鋼板桁あるいは鋼箱桁とRC橋脚とを剛結した橋梁の採用が増加しつつある。しかし、剛結構造部の接合方法や設計手法は未だ確立されたものではなく、更なる検討が加えられているところである。

JHにおいては、平成10年4月の設計第二集橋梁建設編の改正において、初めて複合構造を要領化し、剛結

構造についてこれまでの事例を記述している。⁶⁾

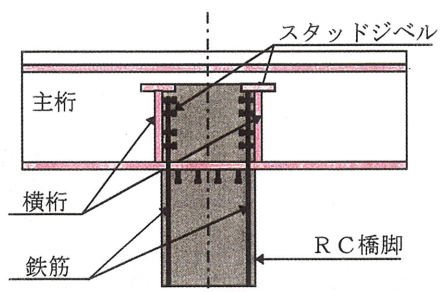


図 3 3 鋸桁（横桁）形式

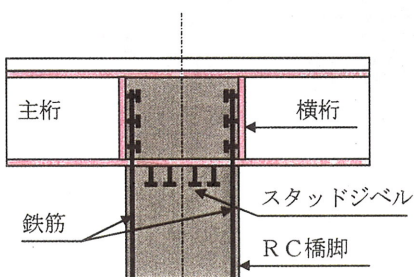
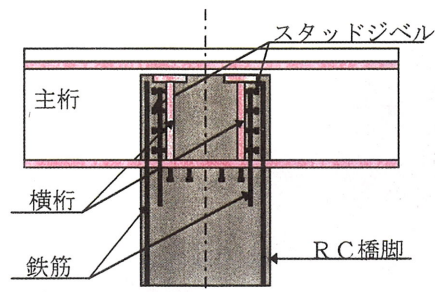


図 3 4 箱げた（鉄筋定着）形式

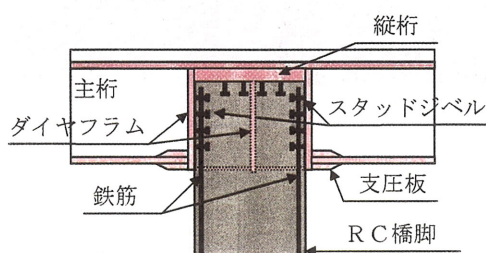


図 3 5 箱げた（下フランジ支圧板）形式

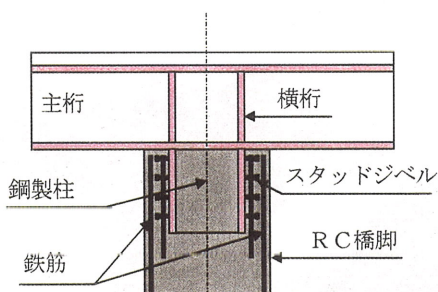


図 3 6 箱げた（鋼製柱）形式

J Hにおいて、初めて剛結構造が採用されたのは、図 3 3 の方式によるもので、東北横断自動車道阿古耶橋がある。構造形式は3 @ 3 6.0 mの鋼3 径間連続鋸桁ラーメン橋である。阿古耶橋では、鋼桁の曲げモーメントが横梁に伝えられ、さらにP C鋼棒を介して橋脚頭部に曲げモーメントとして伝達されるよう設計されている。接合部の力がこのように伝達されるためには、横梁と橋脚とが隙間なく完全に接触している必要があり、このために、接合部に8 cmの隙間を設けておき、ここにモルタルを充填して密着させている。



写真 3 3 阿古耶橋全景



写真 3 4 阿古耶橋接合部

JHでは、阿古耶橋以降、千曲川橋、観音沢川橋、横浜青葉IC橋（写真35）、岡豊橋（写真36）、川之江JCT橋、小針岸川橋、今別府川橋などが施工されている。



写真35 横浜青葉IC橋



写真36 岡豊橋

また、今別府川橋では、従来、鋼横桁とコンクリートとをスタッドを介して一体としていたものを、孔あき鋼板ジベル（PBL）を用いており（図37）、さらに、PC橋では一般に用いられていた張出し架設工法（写真37）により施工されている。

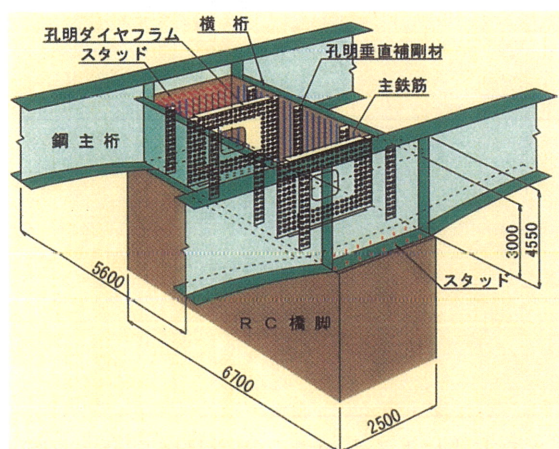


図37 今別府川橋接合部



写真37 張出し施工状況

6.3 下部構造における複合構造

高速道路建設は日本列島を横断する横断道や山岳地を縦断する路線が主体となり必然的に橋梁は高橋脚を有するものが多くなっている。そのような中、JHでは高橋脚の設計施工において耐震性を確保しつつ施工性もよい構造・工法が求められ検討を行ってきている。鋼管・コンクリート複合構造橋脚は平成5年に高速道路本線橋で試験施工を行い、その後更に開発・検討が進められ、現在では橋脚数で100を超えるものが完成もしくは施工中である。

鋼管・コンクリート複合構造橋脚は、鋼管を主体とする鉄骨鉄筋コンクリート構造であり、その構造は図38、写真38、写真39に示すように、鉄筋コンクリートの内部に鋼管を配し、帯鉄筋にはPC鋼より線を巻きつけるもので、降伏強度換算した帯鉄筋量で、所定のじん性能の確保およびせん断補強を行っている。なお、鋼管内部はじん性補強部を除いて中空としている。

本工法の採用にあたっては模型供試体での正負交番載荷試験を行い、帯鉄筋の代わりに用いるPC鋼より線のらせん巻きの効果および内部に配置した鋼管の効果によって、PC鋼より線の降伏強度が発揮されることなど、耐震性能を確認している。

施工は図39に示すように鋼管を先行して建て込み、昇降大型型わくを足場として、主鉄筋を配置し、P

C鋼より線を巻き付け、コンクリートを打設する。主鉄筋の替わりである鋼管を先行して建て込むこと、帯鉄筋にP C鋼より線を用いることで急速施工が可能となり、昇降式大型型わくを用いることで高所作業の安全性が向上している。

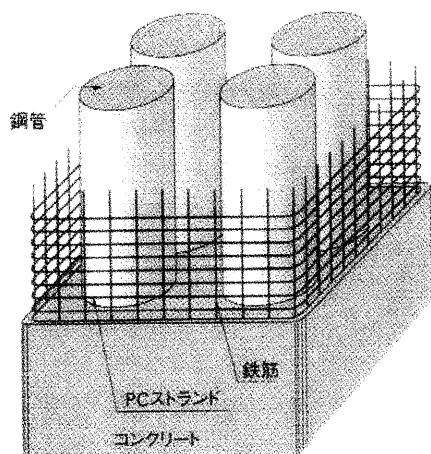


図 3 8 鋼管・コンクリート複合橋脚概要図

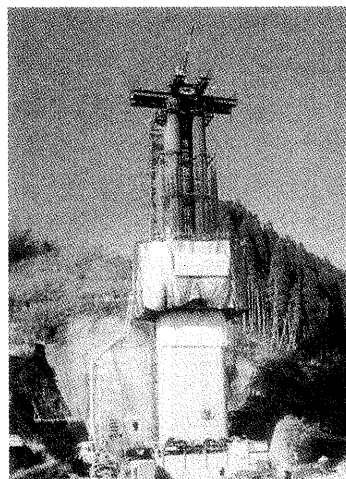


写真 3 8 鋼管・コンクリート複合構造橋脚

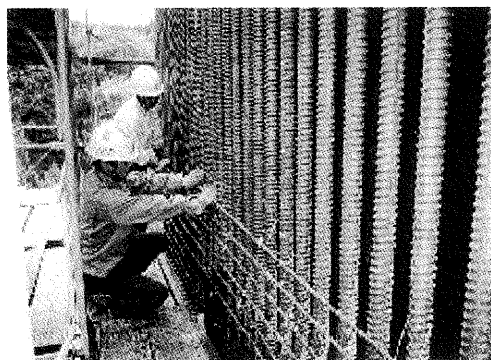
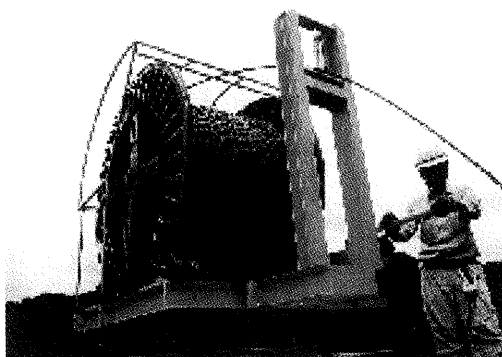


写真 3 9 P C鋼より線の施工

施工順序

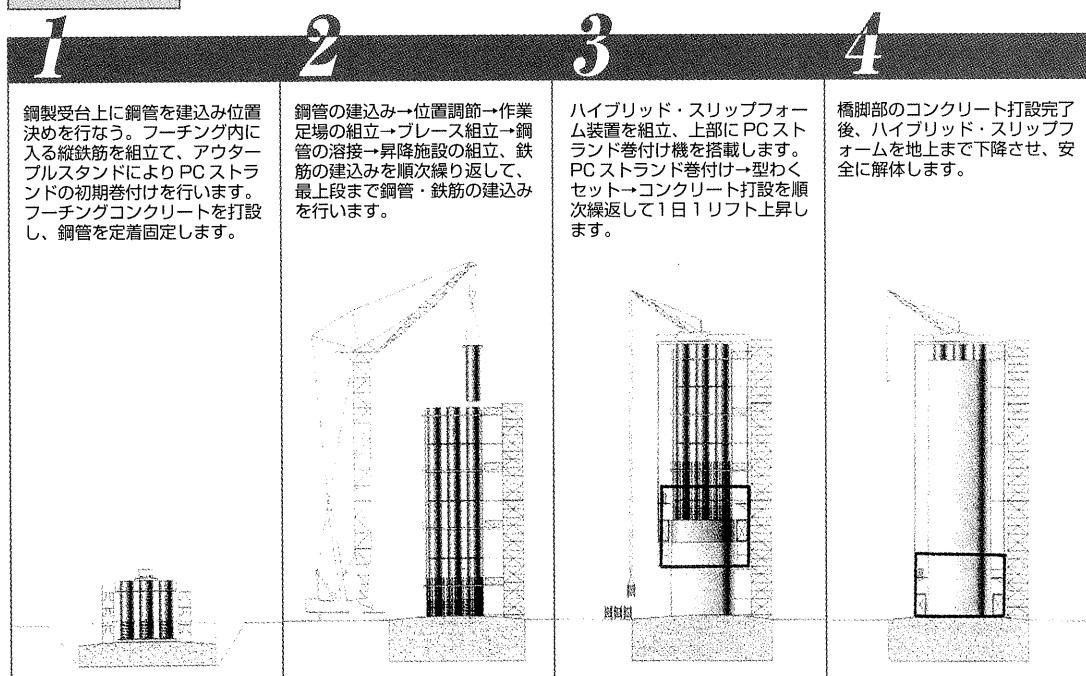


図 3 9 鋼管・コンクリート複合橋脚の施工手順

7. まとめ

鋼とコンクリートの複合構造は今後とも更なる進歩が見込める構造であり、従来の既成概念にとらわれない構造であるといえよう。複合構造はこれまでにない新たな発想・見識が必要であり、プレストレストコンクリート橋の分野でも鋼構造について更なる検討が必要であり、これまでの専門分野にとらわれない技術力を結集し、研究・開発をする必要がある。

また、これまで紹介してきた波形鋼板ウェブPC橋や鋼トラスウェブ橋、鋼桁とRC橋脚の剛結構造、鋼管・コンクリート複合橋脚といった構造でも、更なる省力化や力学特性については、研究の余地が十分に残っている構造であり、特に、じん性や耐久性に関わる事項は更なる研究が必要であろう。

また、コンクリート橋では、工場等におけるプレキャストセグメント構造が積極的に採用されており、品質向上に有効な工法であるが、輸送や架設機器等からの条件により形式に制限を受けることが多く、今後、複合構造との組合せも期待できるものであろう。

JHでは、今後、初期投資の削減はもちろん、維持費の削減、さらには、道路資産として後世へ美しいものを継承できるように、更なる検討を実施していく予定である。

(参考文献)

- 1) 角谷務：今後のPC橋の動向＝波型鋼板ウェブPC箱桁橋への展開＝、第10回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、平成12年10月
- 2) 黒岩正、後藤昭彦：巴川橋、猿田川橋の設計-鋼トラスウェブPC橋-、プレストレストコンクリートVol.41、No.2、1999
- 3) 小松秀樹、中須誠：木曽川橋、揖斐川橋の設計・施工-複合エクストラード橋-、プレストレストコンクリートVol.41、No.2、1999
- 4) 池田博之他：木曽川・揖斐川橋における接合部の設計と床版部の疲労実験、土木学会論文集Vol.46A、2000年3月
- 5) 高橋昭一：複合アーチ橋の計画設計、プレストレストコンクリートVol.40、No.6、1998
- 6) 設計要領第二集橋梁建設編、日本道路公団、平成10年7月

橋梁への性能照査型設計法導入

国土交通省国土技術政策総合研究所 道路研究部 橋梁研究室室長 中 谷 昌 一

はじめに

近年の国際社会においては、国際規格及び国際適合性評価制度の発展と、それによる国際貿易容易化が求められている。一方、国内建設事業において、設計・施工の自由化を向上し、民間企業の活力を活かした新技術開発導入を促進するために、設計基準等を構造物本来の目的達成を重視したものへと改訂することが求められている。これらの社会的要求に対応するためには、土木構造物に本来求められる性能に着目した技術基準を規定して、これを合理的かつ的確に管理・検査することが有効である。そのための一方策として、土木分野への性能規定（性能照査型規定）導入が期待されている¹⁾。

本稿では、「技術基準の性能規定化」の観点から、性能規定化概念および各分野における性能規定化の状況について述べる。次に、橋梁における性能照査型設計の導入に関連し、道路橋示方書の改訂について述べる。最後に、将来の道路橋示方書の本格的な性能規定化に向けて、今後検討が必要な課題について述べる。

なお、本稿の執筆時点では、道路橋示方書は改訂作業中であり、内容が確定したものではない。したがって、本稿と、実際の条文および解説とで内容に若干の相違がある可能性があるのでご注意いただきたい。

1. 性能規定化とは

1. 1 性能規定化の定義

性能規定化のイメージは、明確に定まったものが存在せず、議論が混乱する原因となっている。しかし、現時点で性能規定化の厳密な定義を行うことは、困難であり、かつ、本稿の趣旨ではない。本稿では、簡潔でわかりやすい例として、緑川²⁾による以下の定義を紹介するにとどめる。

性能規定化：何のために（目的）、何に対して（対象）、何を要求しているか（条件）をできるだけ明確に表現すること

1. 2 性能規定と仕様規定

性能規定化がなされた後の基準類、すなわち性能規定とは何かということを、簡潔に説明するのは困難であるが、表-1に示すように、反対の概念である仕様規定と対比すると理解が容易である³⁾。

ただし、実際の技術基準は、仕様規定と性能規定の中間にあるのが普通である。道路橋示方書の

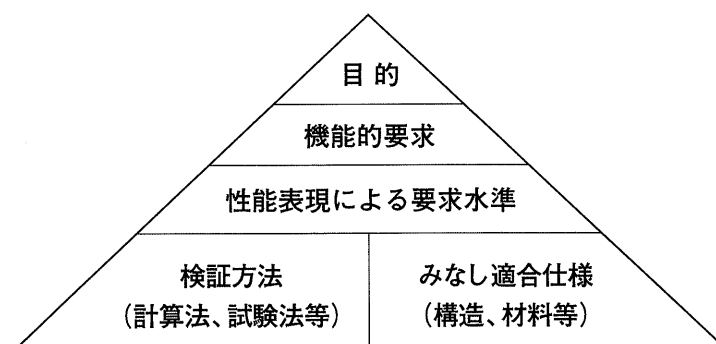
改訂作業も、より性能規定の方に近づけようとしているのであり、極端から極端に移行するものではない。

表－１ 性能規定と仕様規定

	仕 様 規 定	性 能 規 定
性質	使用材料、形状、寸法を具体的に規定	規定の目的とする性能のみを記述
長所	具体性がある 誰にも理解しやすい 設計に高い能力を求めない 適合性の審査が容易	設計の自由度が大きく柔軟性がある 実現すべき目標性能が明確 技術進歩に対応しやすい 基準の国際調和に資する
短所	硬直的である 実現すべき目標性能が不明確 代替性に乏しく技術進歩の障害になる 非関税障壁になる	審査適合性の判断に高度の技術が必要 設計に高い能力が求められる

1. 3 性能規定の理念的モデル

図－１は、性能規定の理念的モデルを示したものである。図中、三角形の上部の３段階を占めているのが「要求性能」である。上から「目的」、「機能的要求」、「性能表現による要求水準」と分類されており、下に行くほど要求の表現は具体的となる。これに対して「検証方法」があり、上段の「要求性能」と対になって、それを満たすか否かを判断する方法が示される。具体的には、解析モデルや試験法等が考えられるが、断面力から各部の応力を算出し、許容応力度との比較により判断することも、検証方法の一種ともいえる。しかし、橋梁をはじめとする土木構造物の設計においては、多くの経験的な判断が行われており、全ての要求性能に対して検証方法が用意されるとは限らない。これらの問題を解決する概念として、「みなし適合仕様」がある。長年にわたり経験的により結果をもたらしてきた寸法、形状、材料等については、これまでの実績がその性能を検証していると考えられる。したがって、「以下の仕様を満たす場合には、要求を満足するとみなしてよい」という表現で従来の方法を位置づければ、既存の橋梁との整合も取りやすく、いたずらに既存不適格を増やさずに済む。



図－１ 性能規定の理念的モデル

1. 4 性能規定化の目的

性能規定化とは、基準類の目的やそれを満足するための要求を明らかにしていくことであるが、

この作業はあくまでも目的を達成するための手段にすぎない⁴⁾。性能規定化の目的（期待される効果）は数多くあるが、そのうち、主なものを列挙する。

- ①技術開発の促進
- ②アカウントビリティの向上
- ③公共工事のコスト縮減
- ④非関税障壁となる規制の撤廃
- ⑤規定見直しのプロセスの容易化

2. 国内基準の動向

1. で性能規定化の概要について述べたが、国内においても各分野で基準類の性能規定化が進んでいる。ここでは代表的な事例として、舗装、防護柵、建築に関する基準の性能規定化について述べる。

2. 1 土木分野

(1) 舗装

舗装の構造の基準を性能規定化し、舗装構成等に自由度を与えることにより、コスト縮減や新技術の導入を推進することとし、道路構造令が改正された⁵⁾（平成13年4月25日公布）。また舗装の構造が有すべき具体的な性能については、新たに制定された「車道及び側道の舗装の構造の基準に関する省令」において規定された⁶⁾（平成13年6月26日公布）。

これらの政省令に施行にあわせ、舗装の設計及び施工に必要な技術基準として、「舗装の構造に関する技術基準」（以下、「技術基準」という）が定められ、国道交通都市・地域整備局長、道路局長通知「舗装の構造に関する技術基準について」（平成13年6月29日国都街第48号、国道企第55号）により、各道路管理者あてに発出された⁷⁾。また、平成13年9月には、日本道路協会より、「舗装の構造に関する技術基準・同解説」が出版された。

これらの技術基準の趣旨は以下の通りである⁸⁾。

1) 性能規定の導入（設計方法を限定しない）

設計法を限定しないで、性能指標（疲労破壊輪数）のみを規定することにより、現在原則としてTA法（路床の支持力と設計交通量に応じて目標とする等値換算厚（TA）を定め、舗装の厚さや舗装構成を決定する構造設計手法）で行われている設計方法に自由度を与え、コスト縮減、新技術の導入を推進する。

2) 設計期間にライフサイクルコストの考え方を導入（設計期間を限定しない）

それまで、原則として10年で設定していた設計期間を、供用後の管理にかかる費用、施工時の当該道路交通及び沿道への影響等を総合的に勘案して設定することにより、耐久性の向上、コスト縮減を推進するとともに、渋滞対策の一方策とする。

3) 具体的な性能指標の設定

自動車の安全かつ円滑な交通を確保するために、車道および側道の舗装が備えるべき性能指標（疲労破壊輪数、塑性変形輪数、平坦性、浸透水量）を設定する。

図－2 に、技術基準の概要を示す。

(1) 車道及び側帯の舗装の構造の基準に関する省令

①新設及び改築の「車道及び側帯の舗装」の性能指標、基準値、測定方法

- ・疲労破壊に対する耐久力 → 疲労破壊輪数
- ・わだち掘れに対する抵抗力 → 塑性変形輪数
- ・路面の平坦性 → 平坦性
- ・雨水等の透水能力（必要な場合規定） → 浸透水量

②自動車の安全かつ円滑な通行を確保することを目的とする透水性（排水性も含む。）の舗装は必要に応じ実施

(2) 舗装の構造に関する技術基準（局長通達） → 省令の運用

①技術基準の対象範囲の拡大

- ・大規模な修繕を行う場合にも配慮

②積雪寒冷地域にあっては、地下水の凍結融解による破損を防止する対策

③舗装の設計期間の考え方

- ・設計期間は、当該舗装の施工、供用後の管理にかかる費用、施工時の当該道路交通及び沿道への影響、管路等の埋設のための占用工事等の計画等を総合的に勘案して設定。

④舗装計画交通量の考え方

- ・舗装計画交通量は、将来の自動車交通の状況等を勘案して当該道路管理者が設定。

⑤舗装の性能指標の設定の考え方

- ・地域の地質、気象その他の状況及び交通の状況ならびに沿道の土地利用を勘案して、舗装の備えるべき性能指標及びその値を決定
- ・疲労破壊に対する耐久力 → 疲労破壊輪数
- ・わだち掘れに対する抵抗力 → 塑性変形輪数
- ・路面の平坦性 → 平坦性
- ・雨水等の透水能力（必要な場合規定） → 浸透水量
- ・性能指標の値は、原則として施工直後の値。
- ・すべり抵抗、耐骨材飛散、耐摩耗、騒音の発生の減少等の観点から必要に応じ性能指標を追加設定

⑥舗装の施工の考え方

- ・舗装の施工の原則を明記
- ・舗装の管理を適切に行うため、また、優れた施工技術を蓄積するため、台帳等に結果を記録。

⑦舗装の性能指標の具体的な測定方法

- ・疲労破壊輪数 : 土木研究所舗装走行実験場での荷重車による測定と同等の方法
- ・塑性変形試験 : ホイールトラッキング試験と同等の方法
- ・平坦性 : 3 mプロフィルメータによる測定と同等
- ・浸透水量 : 現場透水性試験と同等の方法
- ・独立行政法人土木研究所において、舗装の性能指標の測定方法として認められる方法を公表

⑧現行の設計方法への配慮

- ・経験的に認められている断面、設計方法は、疲労破壊輪数、塑性変形輪数の測定を免除
- ・アスファルト舗装要綱等の設計方法（TA法）の骨子を別表として添付し、疲労破壊輪数の測定を免除

図－2 舗装の構造に関する技術基準の概要⁸⁾

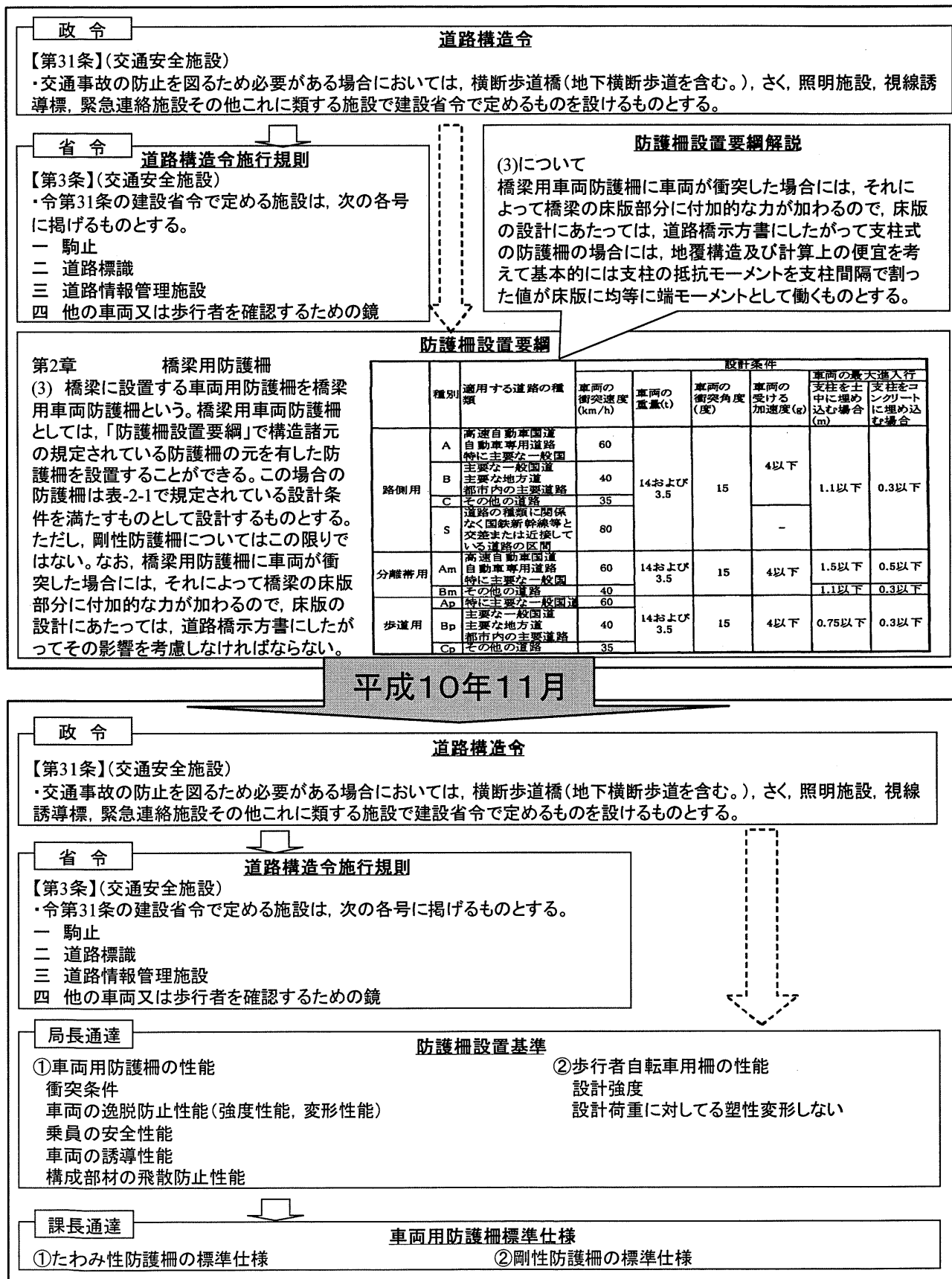
(2) 防護柵

防護柵の設置基準は、国際化に対応した車両大型化などの道路交通環境の変化や、地域特性や景観への配慮などのニーズの多様化を踏まえて改訂され、局長通達として適用が定められた。従来の基準は、構造諸元等の仕様を規定する方式であったが、平成10年11月の改訂により、要求性能として、①車両の逸脱防止性能、②乗員の安全性能、③車両の誘導性能、④構成部材の飛散防止性能が規定された。それぞれの性能は、「決められた条件で車両を衝突させて、項目ごとに定められた基準値を満たすこと」と規定されている。

設置基準は、衝撃波による防護柵の強度と車両乗員の安全を確保するように配慮されており、これらの設計基準が正しく設計されているかの判断基準は、実車実験および3次元シミュレーションにより以下の項目の要求を満たさなければならないとしている。

- ①車両の衝突時に防護柵の変形量が30cm以下であること
- ②車両重心加速度が安全評価基準以下であること
- ③車両の衝突時に車両の突破・横転がないこと
- ④衝突時の車両に以下の機能により、円滑に誘導することができること
 - ・離脱速度：衝突速度の60%以上
 - ・離脱角度：衝突角度の60%以上
- ⑤構成部材の飛散がないこと

図-3に、防護柵に関する新旧の法体系を示す。新基準による性能の確認されている車両用防護柵については、車両用防護柵標準仕様が課長通達として通知されている。旧基準体系では、設計にあたっての条件が細かく記述されている。

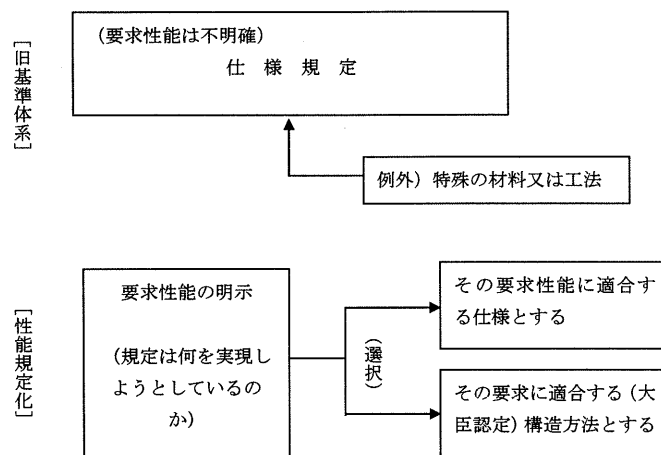


図－3 防護柵に関する新旧法体系（上：昭和47年10月、下：平成10年10月）

2. 2 建築分野

昭和25年に制定された建築基準法が50年ぶりに大改正された(平成10年6月公布、平成12年6月最終改正：施行)が、改正のポイントの一つとして、仕様規定の「性能規定化」があげられる。図－4に、建築に関する新、旧法体系を示す。「性能規定化」については、以下の施策で実施している。

- ①性能項目、性能基準を明示するとともに、それを検証するための試験法や計算方法を提示する。
- ②性能規定に対応した申請者の負担軽減、確認審査の効率化の措置を講じる。技術基準を満たす型式の標準設計仕様等を認定(型式適合認定)することにより、建築確認を簡素化する。
- ③従来の仕様規定は、性能基準を満たす例示仕様として政令・告示等で位置付ける。



図－4 建築に関する新、旧法体系

図－5に、旧建築基準に関する法体系の模式図を示す。政令で仕様が規定されていることが確認できる。

図－6に、新建築基準における、防火関連の法体系の模式図を示す。政令では要求性能が示されており、告示で適合仕様が示されている。また、性能を有することが確認できれば、適合仕様以外の方法も採用できるようになっている。

性能規定導入により、設計の自由度が高まり性能水準が明確になるため、技術開発や海外資材の導入が促進され、より合理的で低コストの技術等の円滑な導入や市場の活性化が期待されている。実務においては、法令中に規定されていた具体的な仕様がなくなり、要求性能を抽象的に表すようになったため技術の進歩に対応しやすくなったが、設計作業にあつたては告示まで読まねばならず、以前よりも設計手法がわかりづらくなった面もある。

また、性能規定化は、対応できる箇所から進められているため、性能規定化の度合いは分野ごとにばらつきがある。例えば防火に関しては性能規定化が進んでおり、図－6に示すように、政令に規定されている要求性能をみたすために、告示に記述されている防火構造を採用するかまたは大臣の認定を受けた構造を採用する必要がある。これに対し、例えば「居室の採光及び換気」に関しては、性能規定ではなく仕様規定として法に定められている。図－7に、「居室の採光及び換気」に関する新、旧の基準を以下に示すが、どちらも仕様規定であることがわかる。

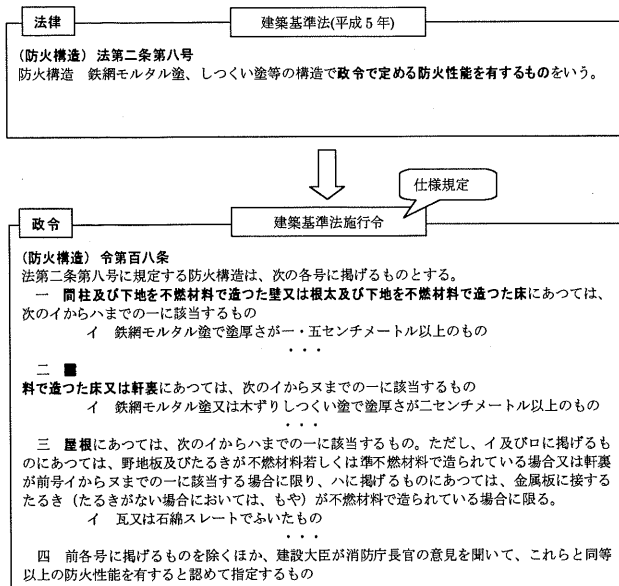


図-5 建築の防火に関する法体系(平成5年)

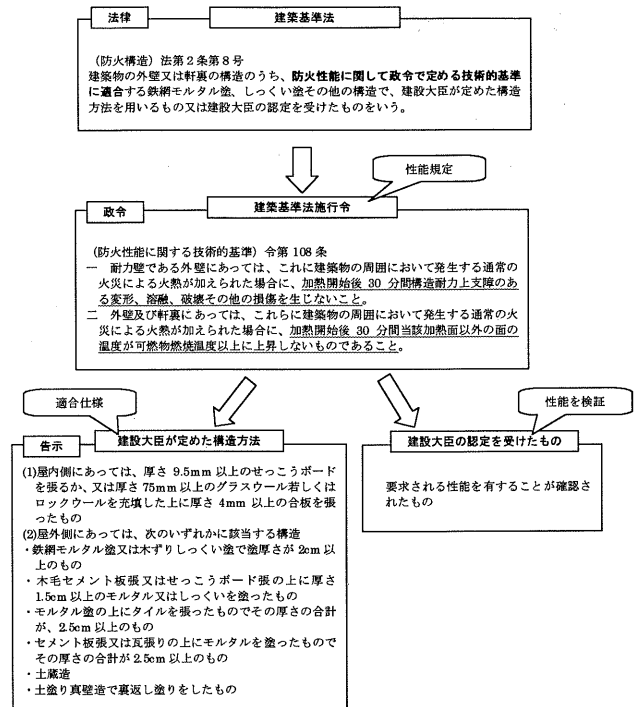


図-6 建築の防火に関する法体系(平成12年)

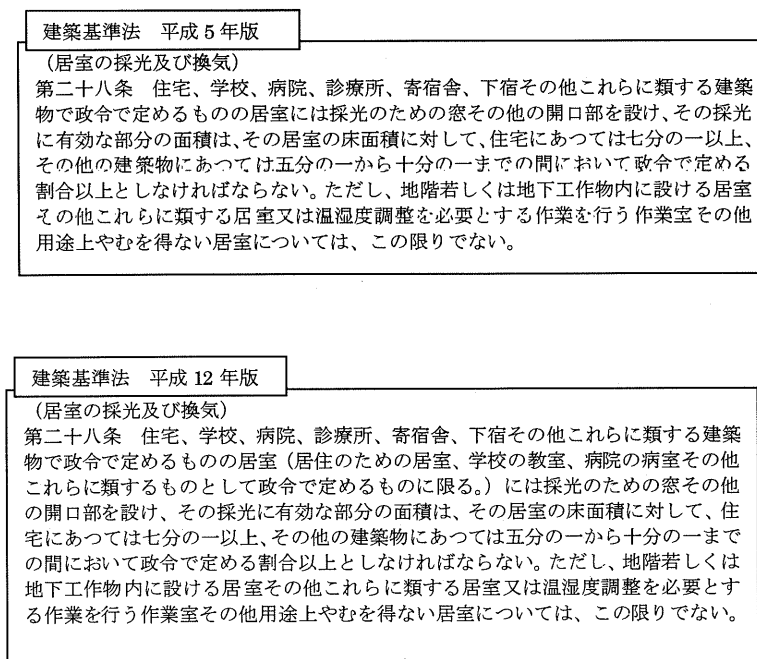
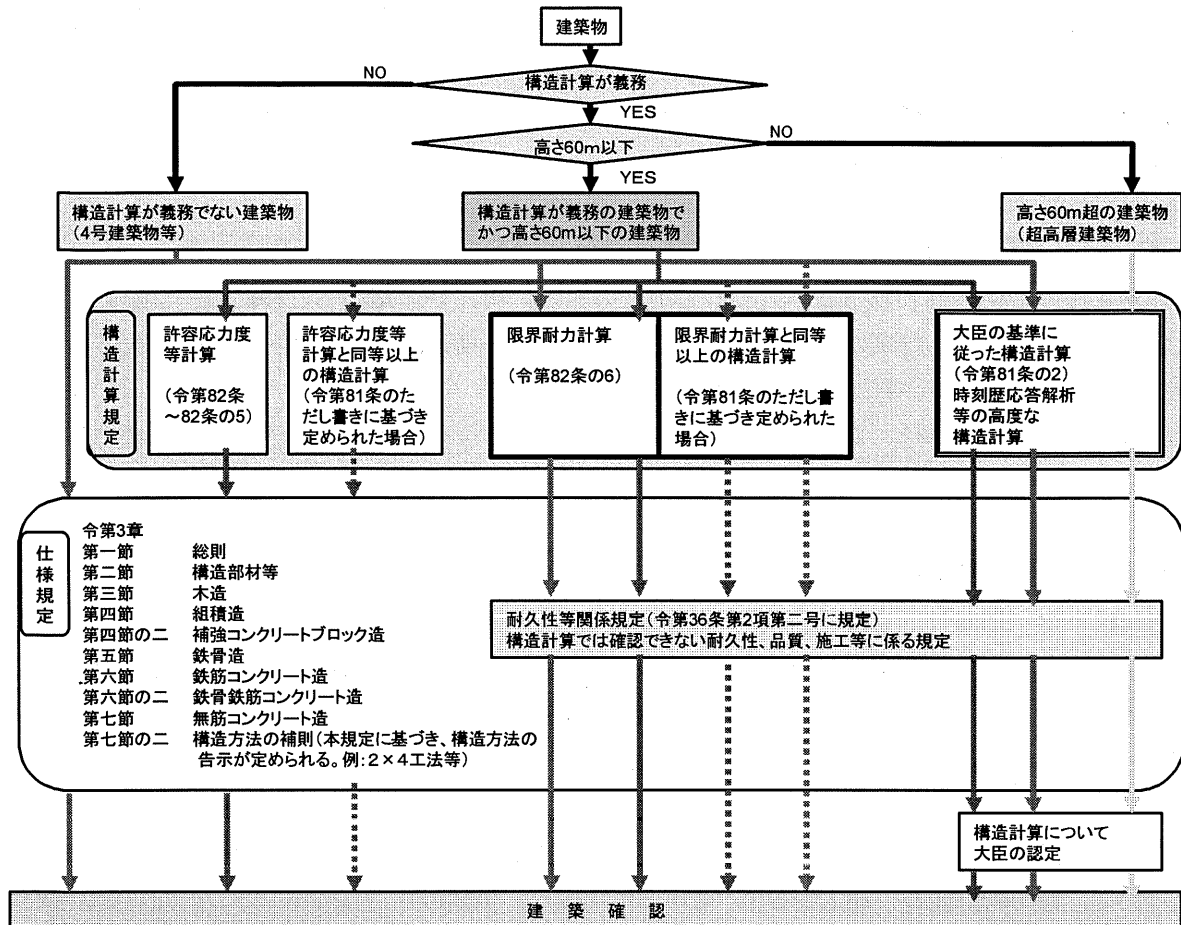


図-7 建築基準の仕様規定の例(居室の採光及び換気)

構造上の安全性に関しては、大規模な構造物等は構造計算を義務づけているが、それ以外のものには一般的な仕様規定に適合することが義務づけられている。大規模な構造物(高さ60m未満)については、地震力以外の荷重・外力に対しては許容応力度法により設計し、地震力に対しては地震力による加速度によって各階に作用する水平力が損傷限界耐力を超えないこと及び各階に生ずる層間変位が1/200を超えないことを確かめるとされている。

構造計算に関して、建築基準法施行令第81条において、許容応力度計算または限界耐力計算による場合と同等以上に安全さを確かめることができるものとして建設大臣が定める基準に従った構造計算による方法も適用してよいとしている（図－8）。



図－8 構造関係規定の適用関係⁹⁾

3. 橋梁への性能照査型設計の導入

3. 1 道路橋示方書における性能照査型設計法導入の目的

道路橋示方書の改訂は、最近では、平成5年、および8年に行われてきたが、それぞれ設計活荷重（25トン）、および兵庫県南部地震を受けての耐震設計の改訂が主たる目的であった。今回の改訂にあたっての主たる背景と目的は以下の通りである。

①急速に進展する国際化への対応

国際化といえば外国企業の参入が連想されるが、わが国の技術者が海外で活動することも視野に入れる必要がある。ここでは技術者の競争力がものをいうが、現行の道路橋示方書は、短期間に大量の事業を進める必要性から仕様書的な色彩が強く、ともすると新技術の提案や導入の障害になっている。

一方、外国から見ると、経験則に基づいた仕様規定の占める割合が多く、不透明な印象を与え、非関税障壁との誤解を生む原因ともなっている。

さらにISOにおける技術基準の国際統一化の動き（SI単位への移行を含む）も大きな背景である。

②構造等の多様化への対応

利用者（納税者）の要求が多様化し、コスト面のみならず、構造形式、造形、景観、環境との調和等への対応が不可欠になるとともに、これらを実現するために、VE、DB、PFIなど、発注・契約方法も多様化しつつある。しかしながら、現行示方書が工法を限定するような印象を与えるため、新たな試みに対して障害になっているケースが見られる。

技術基準が新技術の導入や新しい発注形態を制限することは、本来あるべき姿ではなく、より柔軟な基準への移行が望まれている。

③維持管理、耐久性の重視

維持管理の時代と言われるようになってから久しい。現在の道路橋示方書にも、「耐久性に考慮して」、「維持管理に便利な」等の表現はあるが、大半が精神論的であり、具体性に欠けることが耐久性のある橋づくりが進まない要因となっている。

耐久性に関して具体性のある規定を設けることにより、今後、設計、建設される橋をよりよい方向にシフトすることが必要とされている。

④コスト縮減等の成果の早期導入

近年のコスト縮減努力の結果、従来とは発想の異なった橋梁構造や設計の考え方が出てきている。これらの中には、安易に見かけだけ真似をすると、耐久性に問題が出るおそれがあるものがある。同時に、非常に優れた構造でありながら、道路橋示方書に位置づけられていないというだけの理由で、せっかくの技術が活かされないという問題も存在している。

以上を整理すると、技術基準の目指すところを明確にし（透明性）、目的を達成するための方法について、新技術の開発、導入を促し、わが国の技術力（競争力）を早急に高めなければならない、ということになる。このことは、1. で述べた性能規定（性能照査型規定）の基本理念と一致することがわかる。これが今回の道路橋示方書改訂の柱に「性能規定」を据えた理由である。

3. 2 道路橋示方書の改訂概要

（1）改訂スケジュール

制度や経済構造が複雑に絡み合った中で、混乱を最小限に押さえ、新しい規定の考え方が円滑に導入されることが改訂の必須条件である。そのため、改訂は二段階とすることとした。

第一段階は、短期間に道路橋示方書の性格を性能規定の方向に向けることを最重点と考え、「みなし適合仕様」という概念を活用することとした。すなわち、現在の道路橋示方書の条文および解説（場合によっては行間）の中から、それぞれの条項における要求事項を探り出して冒頭に記述し、現行の規定を「みなし適合仕様」としてそのまま残すというものである。この際、要求性能の表現など、不完全さは許容することにしていく。

これにより、道路橋示方書の性質は、「この通りでなければならない」から「この通りでもよい」へ180度変わることになり、新技術導入に対する抵抗を減らすことができる。また、「みなし適合仕様」として現行規定を残すことで、大半を占める中小事業の混乱を回避することも可能となる。

第二段階では、性能照査型の規定として、より完全な形への移行を目指すことになる。この第二

段階の改訂にあたって検討すべき課題等については4. で述べる。

(2) 改訂概要

ここでは、今回の道路橋示方書改訂においてポイントとなる共通事項と、規定の内容が変化する事例を示す。ただし、冒頭でも述べたように、本稿の内容と、実際の条文および解説の内容が異なる可能性があるため、道路橋示方書改訂の詳細は別途実施される予定の講習会等でご確認いただきたい。

1) 改訂のポイント（共通事項）

- ①設計上の要求と示方書の構成を整理する
- ②許容応力度を基本とする
- ③各項の要求事項を条文化し、従来の規定をみなしと位置づける書式とする
- ④耐久性向上という目的意識の明確化を図る

2) 新規規定の例（塩害対策に関する規定）

近年、新たな知見が得られた分野においては、新たに規定を設けることとした。その一例として、コンクリート部材の塩害に対する規定について述べる。

現在の道路橋の塩害対策は、「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」¹⁰⁾に基づいているが、この指針（案）は昭和57～58年に実施された実態調査¹¹⁾に基づき規定されたものであり、現在まで一定の成果をあげている。しかしながら、近年の実態調査結果や、拡散理論に基づく予測式による試算結果などから、海岸線付近で環境の厳しい地域においては、現行の対策では長期的な耐久性を確保できない可能性が高いことが明らかになった。そこで、塩害対策に関しては、新たに条文に記載するとともに、塩害対策指針（案）の対策区分および対策を見直し、環境の厳しい一部地域については、塗装鉄筋又はコンクリート塗装を併用するといった、かぶり以外の対策を行うことを「みなし適合仕様」として条文に記述することとしている。

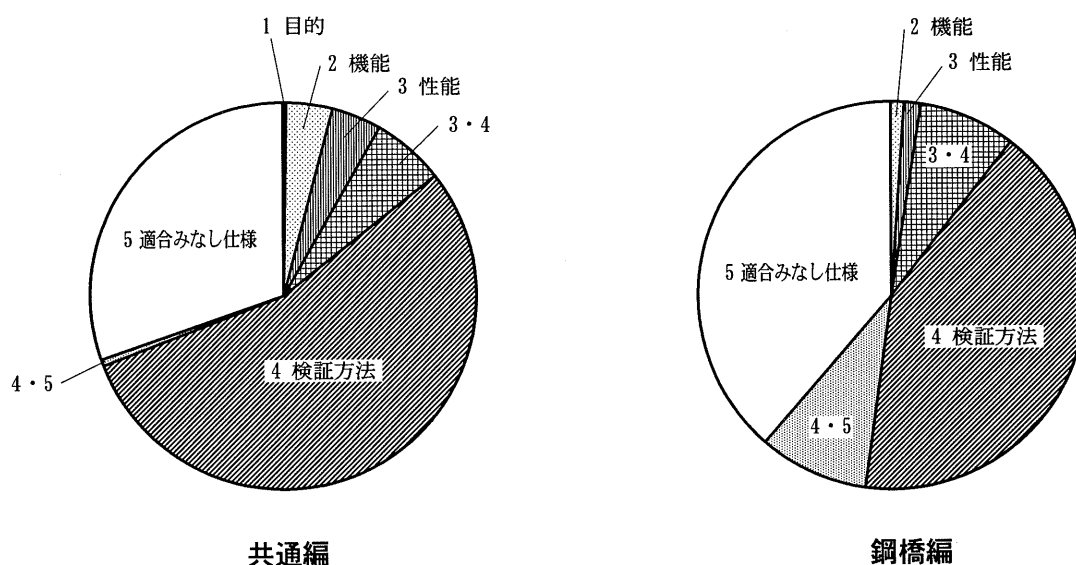
4. 性能規定化完成に向けての今後の課題

今回の道路橋示方書の改訂作業では、性能照査型の規定として、より完全な形への移行を目指すことになる。この作業には、かなりの時間を要すると考えられる。ここでは、今後想定される主な検討項目について簡単に述べる。

①道路橋示方書の法的位置づけ

現在の道路橋示方書は、国土交通省の局長通達であり、省令や政令にはなっていない。これは道路橋示方書が現在の形でまとめられた当時、技術の進歩に追随しやすいように配慮してのことだと聞いている。現在では、技術の進歩がよりスピードアップしており、より機動性の高い道路橋示方書にしていく必要がある。

道路橋示方書の規定を分析してみると、本来、国の責任で規定すべき事項は多くなく、大半の規定は技術標準あるいは標準仕様を示している（図－9）。したがって、国の責任において規定すべき技術基準（要求性能）と技術標準あるいは仕様（解決法）に分離し、それぞれに適した法的位置づけを与える必要がある。



図－9 道路橋示方書（平成8年）のレベル分類結果

②編構成の再考

現行の編構成、特にⅡ（鋼橋編）、Ⅲ（コンクリート橋編）Ⅳ（下部構造編）は、ある意味では使用材料や業種毎に分かれており、このことが合成・複合構造や上下部一体構造など、複数の領域にまたがる自由な発想を阻害していると考えられる。将来は、橋としての要求性能・検証方法を規定する編と、部材設計や材料に関する編に再編する必要がある。

③書式の変更

既に国際共通語になりつつある限界状態設計法への変更が必要であるが、この場合、書式のみならず検証方法の変更となる。現在の許容応力度設計法と並行して適用を可能とする暫定期間を設けるか、設計者の選択に任せるかの判断が必要になる。

いずれにしても現行規定とのすりあわせに時間がかかることが予想されること、国際的な技術基準の統一に対応できる形にすることが急がれることなどから、第一段階の改訂が済み次第、取り組む必要がある。

おわりに

本稿では、「技術規準の性能規定化」の観点から、性能規定化の概念、各分野における性能規定化の状況、道路橋示方書の改訂状況、今後の課題について概略を述べてきた。本文中でも述べたが、今回の道路橋示方書の改訂で、実際の橋の姿が激変することはないと考えられる。しかし、性能規定化を一步進めることで、関係者の意識が変わることは大いに期待している。今後は、各機関における技術開発がさらに活発化し、より合理的で、耐久性の高い橋梁の建設が実現することを期待する次第である。

参 考 文 献

- 1) 独立行政法人土木研究所技術推進本部先端技術チーム, 「土木工事発注・施工への性能規定概念導入方法」, 土木研究所資料第3834号, 2001.5
- 2) 緑川光正, 「性能規定型の建築構造基準とは」, 建設省建築研究所秋期講演会テキスト, 1997
- 3) 西川和廣, 「道路橋示方書の改訂－性能規定化への取り組み－」第48回道路講習会講義要旨, 日本道路協会, 2000.3
- 4) 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室「コンクリート構造物基準類の性能規定化に関する検討」, 土木研究所資料第3594号, 1998.9
- 5) 石原, 「道路構造令の改正について」, 舗装36-6, 2001.6
- 6) 畠中, 「「車道および側帯の舗装の構造の基準に関する省令」の制定」, 舗装36-8, 2001.8
- 7) 柳橋, 「「舗装の構造に関する技術基準」の策定について」, 舗装36-10, 2001.10
- 8) 「「舗装」に関する講習会講義要旨」, 日本道路協会, 2001.9
- 9) 国土交通省建築研究所, 「改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景」, 2001.3
- 10) 「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」, 日本道路協会, 1984.2
- 11) 池田道政, 「塩害によるコンクリート橋の損傷実態調査」, 道路, 1984.2

プレストレストコンクリート構造物の維持管理と診断技術

京都大学大学院教授 宮 川 豊 章
(株)ピー・エス 森 拓 也
ドーピー建設工業(株) 濱 田 譲
オリエンタル建設(株) 石 川 善 信

1. はじめに

1. 1 維持管理の基本理念

コンクリート構造物は適切に設計、施工した場合極めて耐久性に富む構造形式である。しかし、いくら耐久性に富むと言えども、劣化はやはり供用年数とともに生じる。20世紀はコンクリート構造物を作りさえすれば良い時代であった、しかし、21世紀は作り、使いこなす時代になるのである。まして、万国博覧会やオイルショックの時代でセメントコンクリートに不足し、初期の本格的な大量ポンプ施工により建設された、現在問題となっている構造物群がある。コンクリートの品質は相当にばらつき劣悪であり、その時点では最適と考えられる種々の調査点検手法により、維持管理され、補修・補強が行われてきた。建設されてしまった劣悪な構造物は、これらのような真摯な努力を最大限に要求し、耐久性に富む構造物に比べてはるかに多くの労力が強いられることが明らかとなったのである。

構造物は、要求される期間、要求される水準の機能を有するように設計することが要求される。機能では工学的に捉えにくいので、構造物あるいは部材に要求される性能を、設計供用期間のあいだ、適切な信頼性を持って必要な水準で確保する、と言い換えることができよう。そのためには、構造物あるいは部材の性能の経時的な変化を把握することが必要である。しかし、現在の工学レベルでは厳密な照査、時系列解析が困難である場合も多い。そのため、予想される劣化メカニズムにおいて耐久性上の限界状態を設定し、劣化モデルおよびそれに基づく劣化レベルに区分することによって照査される場合が多い。この場合、単なる劣化に対する抵抗性という定性的なものではなく、設定された劣化つまり性能低下の区分に到らない抵抗性、つまり耐久性能として取り扱うことによって、定量的な取り扱いが容易となる。その結果、維持管理をライフサイクルの中に組み込む考え方が可能となる。

ここで、維持管理の水準が異なれば、設計、施工の水準も異なれば良い筈である。言い換えれば、維持管理を行わない場合、設計、施工は十分な余裕を持って行う必要があり、モニタリングを含む詳細な管理体制を予定する場合には、余裕は少なくて良い筈である。例えば、近年活発な議論が行われている Eurocode の基本理念は、設計供用期間の間、適切な信頼性と十分な耐久性を有して、供用にあって十分な性能を発揮することであり、適切なメンテナンス戦略、言い換えれば、構造物の時間的なシナリオが、構造物の設計概念の一部をなしていると言っている。したがって、コンクリート構造物の性能は、本来、維持管理を念頭に置いたシナリオによってはじめて具体的となる。単純なスクラップ・アンド・ビルドの時代は終わったのである。

コンクリート構造物の維持管理は、計画、建設、供用（維持管理）、解体、廃棄あるいは再利用といった一連のサイクルの一過程であり、この一連のサイクルにおける総合的な考え方のもとに要求される性能を確保するための行為である。特に解体から再利用の過程においては、資源の有効利用を進めるとともに、排出される二酸化炭素、エネルギー消費、環境負荷の低減を目指す必要があり、“持続可能な発展”を実現するためには、これらのことに十分に配慮した維持管理が求められる。

1. 2 コンクリート構造物のシナリオ

コンクリート構造物が設計される場合、対象とする構造物に起こりうる最悪の外乱であっても、安全性、使用性が保証されることが要求される。従来は耐震設計に見られるような空間的なシナリオ、つまり荷重作用下における力学的挙動のシナリオが中心であったが、近年は時間的なシナリオが注目されるようになってきた。

コンクリート構造物を時間軸に沿って自由自在に挙動させるためには、コンクリート構造物の耐久性を把握する必要がある、設計上は耐久性能によるアプローチが必要となる。シナリオ通りに構造物が挙動できるかどうかの確認が必要なのである。このため現在、種々の検討がなされ、ツールとしてのモデル化の試みが発表されている。

このようなシナリオをデザインする場合、コンクリート構造物の維持管理、なかでも補修、補強、リハビリテーション、廃棄、再利用に対する知識がなければ、経時的な構造的な性能の評価は不可能であり、これらの知識がきわめて重要である。特に、土木コンクリート構造物の経時的な劣化メカニズムとして最も重要な中性化、塩害やアルカリ骨材反応については、劣化機構に対応する適切な補修、補強工法の確立が必要である。

いわゆる性能設計とは、所有者あるいはその代理人の要望を設計者が性能という形に翻訳し、その性能を達成するように設計することであって、技術者は代理人に対して、構造物がどのように挙動するかを明確に示す必要がある。これに対して代理人は対象とする構造物をどのように挙動させたいかを要求しなければならない。ここでは、代理人には所有者に対して適切なアカウンタビリティ（説明責任）が要求される。

コンクリート構造物のシナリオをデザインすることは、コンクリート構造物の将来をどのように戦略的に決定するかが問われることである。この戦略（Strategy）は持続可能なものでなければならないのは当然であるが、戦略は兵站・物流（Logistic）と費用・調達（Fund）の両面を有している。したがって、これら両者の面からの評価が必要とされる。現在、構造物の評価の上でライフサイクルコストが重要とされるようになってきた。ライフサイクルコストはシナリオを設定してはじめて計算が可能なのである。

コンクリート構造物が、丈夫で美しく長持ちするために、コンクリート構造物のシナリオデザインに関するルール及早急な確立が望まれている。

このような、ますます重要性が増すコンクリート構造物の維持管理に対する社会的要求を受けて、『コンクリート標準示方書〔維持管理編〕』土木学会（2001年制定）、および『P C橋の耐久性向上マニュアル』プレストレストコンクリート技術協会（以下、P C技術協会）（平成12年11月）が相次いで刊行された。ここでは、その概要について述べることにする。

2. 土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編

2. 1 「維持管理編」作成の背景

コンクリート構造物に対する維持管理の重要性はかねてから指摘されており、土木学会コンクリート委員会では、維持管理小委員会（小柳治委員長）を1988年に設立した。その後、以下に示すような委員会、部会によりコンクリート構造物の維持管理についての検討が精力的に行われてきた。そして、2001年1月、ついに「コンクリート標準示方書 維持管理編」としての発刊に至った。

維持管理小委員会	小柳治委員長	1988～1989
維持管理調査部会	小柳治主査	1990～1991
維持管理部会	関博主査	1992～1994
「コンクリート構造物の維持管理指針（案）」		1995年発刊
維持管理計画部会	宮川豊章主査	1997～1999
「維持管理編（案）」		1999年公表
維持管理編作成部会	宮川豊章主査	1999～2001
[維持管理編]		2001年発刊

コンクリート標準示方書に[維持管理編]を新規に加えたいという要求はかねてよりあったが、なかなか現実とはならなかった。今回、それが実現された背景としては、ここ数年のコンクリートの劣化、損傷の問題がクローズアップされ、社会問題化したことが挙げられる。しかし、そのような社会的要求だけでなく、上記に示すように、構想から12年の歳月をかけて、多くの委員により慎重に検討が加えられてきたことも見逃すことはできない。すなわち、維持管理に対する必要性の拡大とともに、コンクリート技術の進展にともなう新しい知見が蓄積されたことにより、今回の[維持管理編]の発刊が可能になったと考えるべきである。

2. 2 「維持管理編」の作成方針

[維持管理編]は、上述の1999年に公表された「維持管理編（案）」をベースとして、以下のような基本方針により作成された。

- ① コンクリート構造物の計画から供用までの流れの中で、維持管理の関わる場面を明確にする。つまり、維持管理の水準が設計、施工に与える影響を考慮して、構造物の総合計画の段階で維持管理を考慮するものとする。
- ② 性能照査を含む性能規定型の記述とする。性能としては、安全性能、使用性能、第三者影響度、美観・景観、および耐久性能を中心として考慮し、それらの性能に対して、点検時および予定供用期間終了時において、時間軸を考慮した性能照査を行うことを基本とする。
- ③ 基本的な維持管理の考え方および流れを示す「第一部 維持管理」と、より具体的な方法を示す「第二部 維持管理標準」との二部構成とする。仕様規定を含んだ見なし規定を「第二部 維持管理標準」の中で詳述する。
- ④ 維持管理区分を、技術者の行為と関連づけて明確にする。

維持管理の目的は、コンクリート構造物の供用期間中の性能を維持することであるが、それは設計および施工にも共通した目的である。したがって、維持管理行為は独立したものではなく、設計および施工と関連して体系化されるべきものである。図1は、設計、施工および維持管理における性能照査とそれら三者の相互関係を示したものである。図中にあるように、フィ

ードバックによる相互作用を常に働かせることが、構造物としての性能を維持する上で必要である。このような作業あるいは研究、議論等を踏まえて、今後の土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕、〔施工編〕、〔維持管理編〕の改訂は進められるべきである。

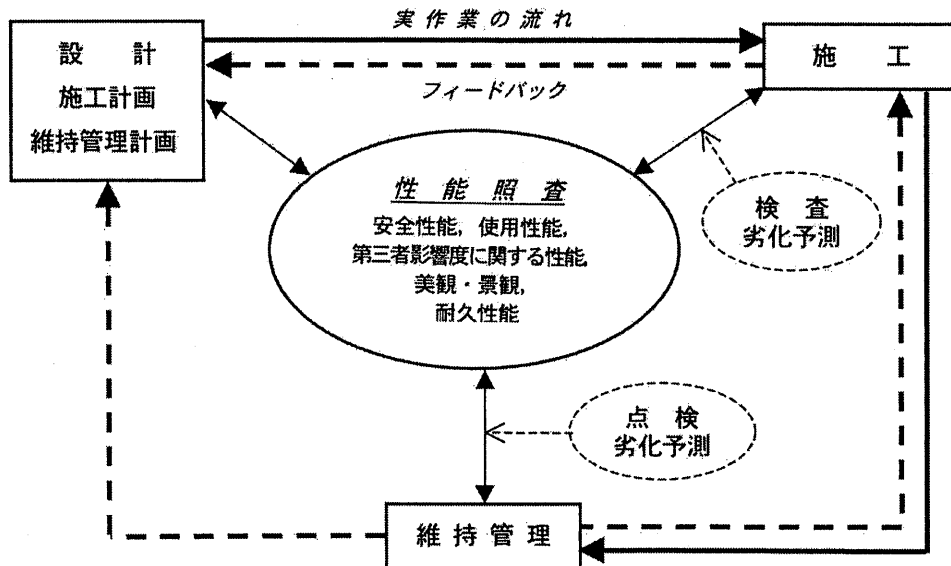


図1 設計、施工および維持管理における性能照査とそれら三者の相互関係

2. 3 〔維持管理編〕の概要

(1) 全体構成

〔維持管理編〕の目次を以下に示す。前述のように「第一部 維持管理」と「第二部 維持管理標準」との二部構成となっている。第一部では、維持管理の基本および業務の流れに沿った基本的な考え方が記述されており、第二部では、より具体的に各劣化機構に対する維持管理が示されている。

「第一部 維持管理」

- 1 章 総則
- 2 章 構造物の要求性能
- 3 章 維持管理の基本
- 4 章 劣化機構の推定
- 5 章 初期点検
- 6 章 日常点検
- 7 章 定期点検
- 8 章 詳細点検
- 9 章 臨時点検
- 10 章 試験および調査の方法
- 11 章 対策
- 12 章 記録

「第二部 維持管理標準」

- 13 章 中性化維持管理標準
- 14 章 塩害維持管理標準
- 15 章 凍害維持管理標準
- 16 章 化学的侵食維持管理標準
- 17 章 アルカリ骨材反応維持管理標準
- 18 章 鉄筋コンクリート床版の疲労維持管理標準
- 19 章 鉄筋コンクリートはり部材の疲労維持管理標準

本稿では、「第一部 維持管理」を中心にその基本的な考え方を説明する。

(2) 要求性能

構造物の要求性能を明確にすることは、合理的な維持管理を行う上で重要なことであり、また、性能照査を行うためにも必要不可欠なことである。構造物の種類は多様であり、それぞれの構造物個別に求められる機能も非常に多岐にわたる。本来であれば、多岐にわたる機能それぞれに対して要求される性能について述べるべきであるが、全てを網羅することは不可能である。[維持管理編]では、一般的な構造物を想定し、図2に示すように、大きく「安全性能」、「使用性能」、「第三者影響度に関する性能」、「美観・景観」および「耐久性能」に分類している。



図2 構造物の性能の分類

このうち、第三者影響度に関する性能は、構造物の一部（かぶりコンクリート片やタイル片など）が落下することによって構造物下の人やものに危害を加える可能性（第三者影響度）について考慮されるものである。これらは、一種の安全性能ともいえるが、構造物本体の耐荷力に関わるものではなく、性能照査プロセスも異なるので、ここでは第三者影響度として区別した。また、構造物の供用に伴う、周辺への騒音問題についても第三者影響度を含むものと考えられる。さらに構造物の種類によっては、錆汁やひび割れなどによる美観・景観への影響が対策の判定状重要となる場合もあるので取り上げている。

構造物の耐久性能という言葉は、かなり漠然としてとらえられている場合が多いが、[維持管理編]では、「安全性能」、「使用性能」、「第三者影響度に関する性能」、「美観・景観」といった性能が、供用期間中に渡って許容範囲内に維持される性能を耐久性能と定義し、これを維持管理の対象としている。

（３）維持管理の基本

「３章 維持管理の基本 ３.１ 原則」の本文を以下に示す。

３.１ 原則

（１） 構造物は、維持管理の区分を定め、供用期間を通じて構造物が保有すべき要求性能を許容範囲内に維持するよう維持管理計画を策定し、初期点検、劣化予測、点検、評価および判定、対策、記録を適切に行える維持管理体制を構築のうえ、維持管理しなければならない。

（２） 構造物の維持管理では、点検時での評価および判定とともに、点検に基づく劣化予測によって予定供用期間中の性能照査を行わなければならない。

（３） 評価および判定では、対象とする部位・部材あるいは構造物に要求される性能（要求性能）を明確にし、設計耐用期間を明らかにしなければならない。

（４） 劣化予測、性能照査の方法は、維持管理の区分、劣化状況などを考慮して、適切なものを採用しなければならない。

（５） 構造物の適切な維持管理を行うために、設計、施工、初期点検、劣化予測、点検、評価および判定、対策などの結果を、記録、保存しなければならない。

ここで、維持管理計画とは、構造物の維持管理において、維持管理区分の設定、初期点検、維持管理区分の決定、劣化予測、点検、評価および判定、対策、記録などの時期、頻度、方法等を総合的に計画することをいう。

上記に従った一般的な維持管理の手順を図３に示す。図に示すように、維持管理区分の設定、初期点検、劣化予測、評価および判定の後、対策または点検といった手順が維持管理の基本である。一般に、構造物の耐久性および耐用期間は未知であるので、新設構造物においては、設計作業段階より維持管理区分を設定し、維持管理の第一歩として供用開始以前に初期点検を行い、構造物に関する情報を収集する必要がある。さらに、維持管理の区分を定め、劣化予測、評価および判定、対策、記録を合理的に組み合わせた維持管理を行う必要がある。

また、図中で、「初期点検」の後に「維持管理区分の決定」があるのは、[維持管理編]が新設構造物ばかりでなく既設構造物も対象としていることによる。すなわち、既設構造物におい

ては最初に行われた点検を初期点検として、構造物に関する情報を収集のうえ維持管理区分を定める場合があることを想定したものである。

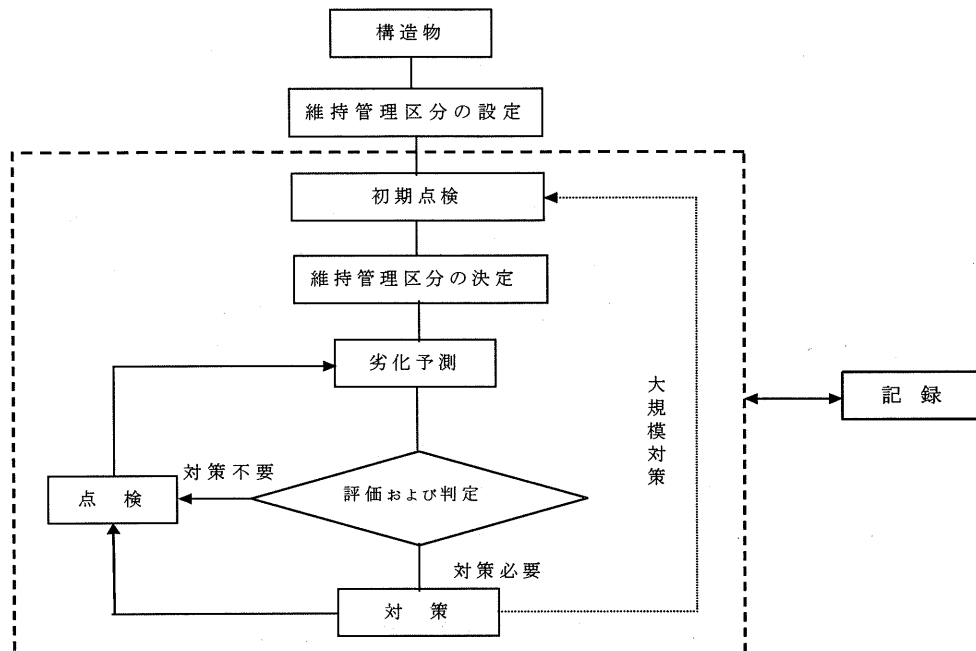


図3 一般的な維持管理の手順

(4) 維持管理区分

対象とする構造物によって社会的、経済的重要度、第三者影響度、予定供用期間などによって維持管理の必要性は大きく異なり、劣化予測、補修、補強などの維持管理の難易も相違するため、画一的な維持管理の考え方では不都合である。したがって、実際の維持管理では、どの程度の維持管理行為を行うかをあらかじめ設定し、適切な維持管理を行う必要がある。

〔維持管理編〕では、維持管理の区分として、次の4つに分類している。

A：予防維持管理（予防保全を基にした維持管理）

- ①劣化が顕在化した後では、対策が困難なもの。
- ②劣化が外へ表れては困るもの。
- ③設計耐用期間が長いもの。

この区分のものは一般に重要度の高いものが多く、モニタリングを必要とする場合が多い。

B：事後維持管理（事後保全を基にした維持管理）

- ①劣化が外に表れてからでも何とか対策がとれるもの。
- ②劣化が外へ表れてもそれほど困らないもの。

C：観察維持管理（目視観察を主体とした維持管理）

- ①使用できるだけ使用すればよいもの。
- ②第三者影響度に関する安全性を確保すればよいもの。

D：無点検維持管理（点検を行わない維持管理）

①直接には点検を行うのが非常に困難なもの。

この区分のものは構造物の基礎など直接には点検を行ことが非常に困難なため、間接的な点検（測量、地盤沈下、漏水の有無など）から評価および判定を行うものが対象となる。ただし、天災・事故の発生や地盤沈下など構造物周辺の状況変化によっては、臨時点検を行うことともあり、その結果必要と認められた場合は、詳細点検を行うことがある。

（５）点 検

構造物の耐久性を確保する上で、点検はきわめて重要な作業である。その目的は、構造物の現状を把握することであり、その結果によっては応急処置を行うこともある。さらに、応急処置を必要としない場合でも、構造物に予想外の劣化が生じていないかどうかを確認し、その後の劣化予測の貴重なデータを得ることができる。維持管理における点検の位置づけを図４に示す。

構造物の維持管理の流れの中で、点検は、様々な段階において適切な方法で行われなければならない。維持管理者は対象とする構造物の維持管理区分に応じて、適切な点検マニュアルを作成する必要がある。〔維持管理編〕では、表１のように分類し、目的や標準的な点検方法を示している。

表１ 点検の目的と標準的な点検方法

分 類	目的と標準的な点検方法
初期点検	・ 構造物の初期状態を把握することを目的とし、供用開始以前、あるいは大規模対策後に行う。また、既存の構造物で、それまで点検されていなかった場合には、最初の点検を初期点検とする。 ・ 点検は、目視や打音法と設計・施工関係図書の調査を原則とする。
日常点検	・ 日常の巡回において、劣化、損傷、初期欠陥の有無や程度の把握を目的とする。 ・ 点検は、目視や車上感覚による点検を主体とし、場合により打音法を組み合わせる。
定期点検	・ 構造物全体ばかりでなく、日常点検では把握しにくい細部を含めて、劣化、損傷、初期欠陥の有無や程度の把握を目的とする。 ・ 目視や打音法を主とし、必要に応じて非破壊検査やコア採取などを組み合わせる。
詳細点検	・ 初期点検、日常点検、定期点検および臨時点検で必要と判定された場合に実施する点検であり、構造物の状態や劣化の状況を詳細に把握するために実施する。 ・ それまでの点検結果に基づいて、目的に合致する点検方法を選定する。 ・ 目視、打音法、コア採取などの他、推定される劣化機構に応じて、電気化学的方法、電磁波による方法、コンクリートの成分分析、載荷試験などを行うこともある。
臨時点検	・ 地震や台風などの天災、火災、および車両や船舶の衝突などの事故の後、構造物の状況を把握し、対策の要否を判定することを目的とする。 ・ 点検は、原則として目視や打音法による。

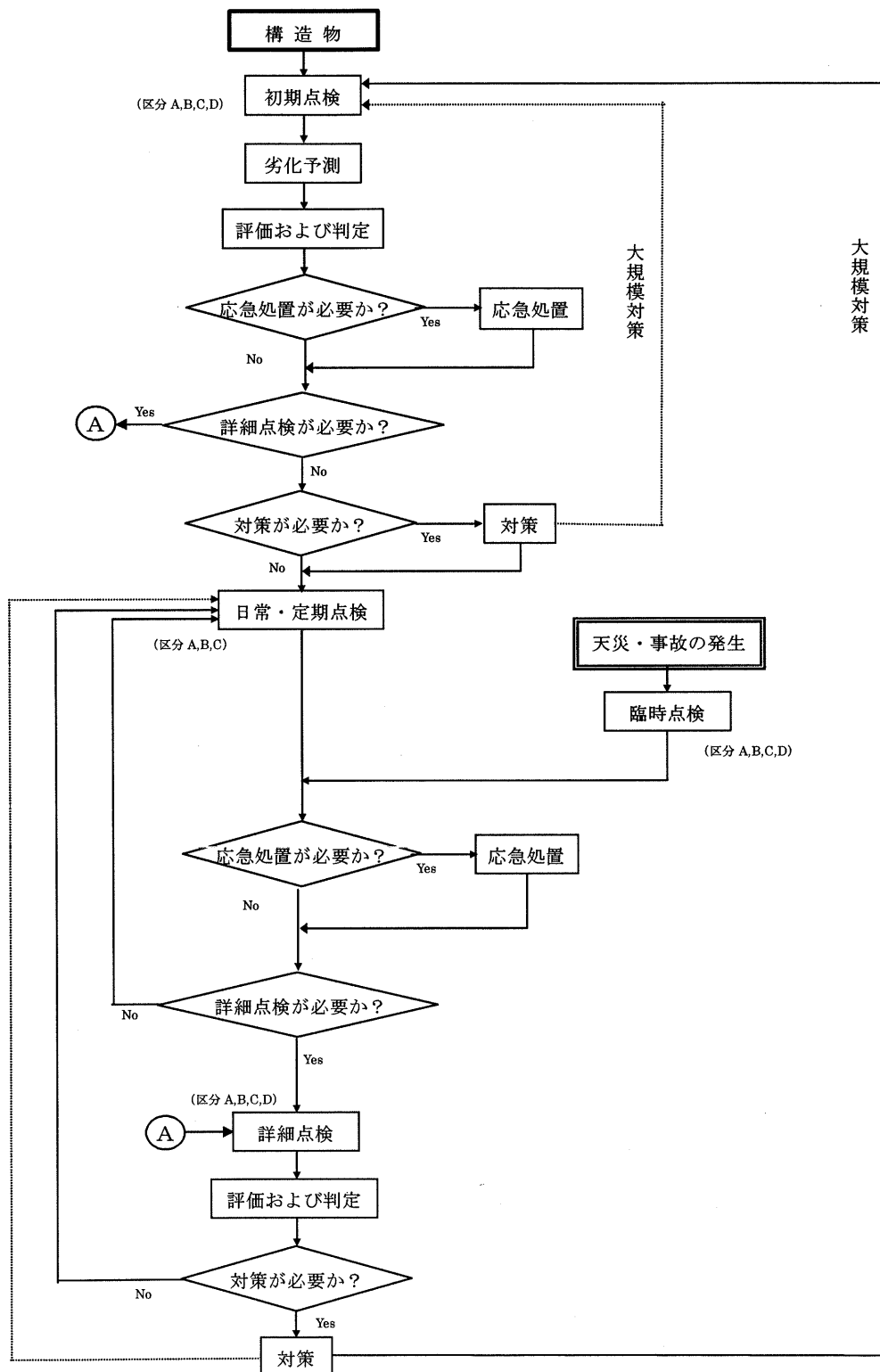


図4 維持管理における点検の位置づけ

(6) 劣化機構の推定

点検によって、構造物の変状を発見した場合は、まず第一に劣化機構を推定する必要がある。劣化機構とは、構造物に変状を与えた原因となるメカニズムのことであり、維持管理編では、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、床版の疲労、はり部材の疲労を対象としている。

図5は、劣化機構推定の基本的な流れを示したものである。外的要因による推定では、構造物の環境条件や使用条件から、生じやすい劣化機構を推定することができる。表2は、外的要因と劣化機構の関係をまとめたものである。また、各劣化機構には特徴的な変状が現れることがあり、これらを参考に、ある程度劣化機構の推定を行うことができる。表3に、変状とそれから推定される劣化機構を示す。また、劣化指標とは、中性化深さや塩化物イオン濃度などのように劣化の進行や劣化度を示す数値である。これらは、詳細点検で得られている場合があり、劣化機構の推定精度を高める上で有効である。

なお、複数の劣化機構によって変状が生じていると考えられる場合には、複合劣化モデルについて検討しなければならない。

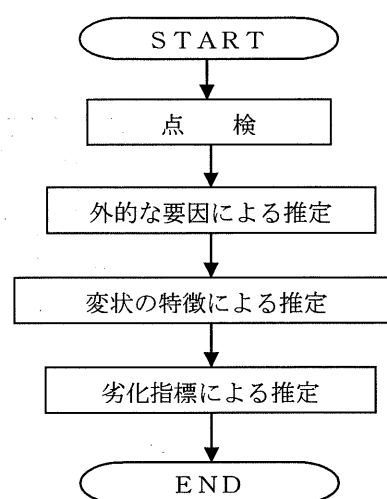


図5 劣化機構推定の基本的な流れ

表2 環境条件、供用条件から推定される劣化機構

外的要因		推定される劣化機構
環境条件	海岸地域	塩 害
	寒冷地域	凍害、塩害
	温泉地域	化学的侵食
供用条件	乾湿繰返し	アルカリ骨材反応、塩害、凍害
	凍結防止剤使用	塩害、アルカリ骨材反応
	繰返し荷重	疲 勞
	二酸化炭素	中 性 化
	酸 性 水	化学的侵食

表3 変状から推定される劣化機構

変 状	推定される劣化機構
鉄筋軸方向のひび割れ、コンクリートはく離	中 性 化
鉄筋軸方向のひび割れ、錆汁、コンクリートや鉄筋の断面欠損	塩 害
微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウト、変形	凍 害
変色、コンクリートはく離	化学的侵食
膨張ひび割れ（拘束方向、亀甲状）、ゲル、変色	アルカリ骨材反応
格子状ひび割れ、角落ち、遊離石灰	疲労（道路橋床版）

(7) 劣化予測

劣化機構の推定の後、供用期間中の劣化予測を行い、要求される性能がどのような影響を受けるかを把握しなければならない。該当する劣化機構に対して、適切なモデルを用いる必要がある。それぞれの劣化機構に対する劣化モデルは、「維持管理編 第二部維持管理標準」に示されているので、参考にとすることよい。ただし、第二部に示されている劣化モデルは、現状では必ずしも完璧なものではなく、検討の余地が残されている。したがって、劣化予測を行うにあたっては単に詳細な劣化予測を行うより、点検結果を用いて劣化モデルの考え方を適切に反映し予測することが重要である。

(8) 評価および判定

構造物の性能低下は、点検結果に基づいて劣化機構を推定し、その劣化の状態による影響を考慮することにより行われる。性能の照査は、点検時および予定供用期間中において要求水準を満足するか否かによって行うものとする。ここで、通常の構造物における性能低下の経時変化は一般に単調的であると考えられることから、性能の照査は、基本的には点検時と予定供用期間終了時の二つの時点において行うのが原則である。つまり、安全性能、使用性能、第三者影響度に関する性能、美観・景観について、これら二つの時点において照査することにより、点検時における性能とそれらの性能に関する耐久性能について照査することになる。

なお、詳細点検による構造物の性能の評価は、詳細点検に基づく劣化予測により定量的に評価することが望ましいが、現状では定量的に評価することが困難な場合も多く存在する。この場合は半定量的に構造物の性能をグレードで種分けするグレーディングを用いて性能の評価を行う方法も有効である。

(9) 対 策

構造物の性能低下が問題となる可能性があるとして評価および判定された場合には、維持管理区分、残存供用期間、維持管理の難易度などを考慮して、適切な種類の対策を選定しなければならない。目標とする性能の水準は、図6に示すように、

- ① 建設時と現状の中間の性能を回復しようとするもの
- ② 建設時の性能を回復しようとするもの
- ③ 建設時の性能よりさらに性能を向上させようとするもの

の3つが考えられる。目標とする水準と構造物の基本性能との関係に応じた対策の種類を表4に示す。

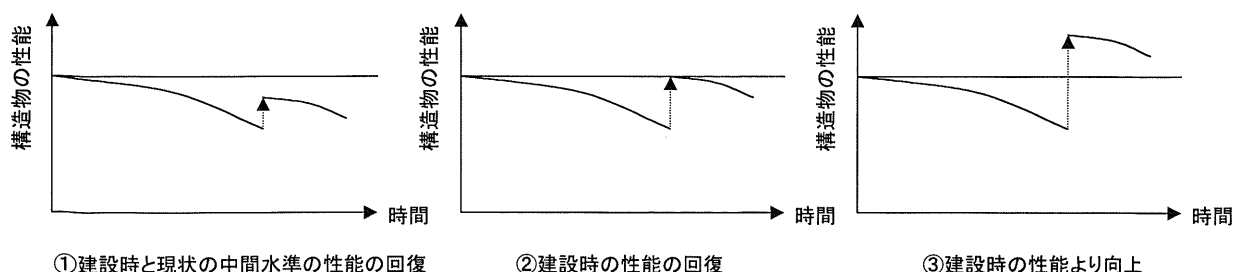


図6 目標とする性能水準の分類

表4 構造物の基本性能と目標水準に応じた対策の種類

構造物の基本性能	対策の目標水準		
	建設時と現状の 中間性能	建設時の性能	建設時よりも 高い性能
耐久性能	補修	補修・補強	補修・補強
安全性能		補強	補強
使用性能		使用性回復・補強	機能性向上・補強
第三者影響度に関する性能	補修	補修	
美観・景観		修景	修景

〔維持管理編〕では、対策として、点検強化、供用制限、補修、補強、修景、使用性回復、機能性向上、解体・撤去を挙げているが、このうち、補修、補強については、日本コンクリート工学協会「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針」や土木学会「コンクリート構造物の補強指針（案）」を参考にするとよい。

（10）記 録

構造物の適切な維持管理を行うために、設計、施工、初期点検、劣化予測、点検、評価および判定、対策などの結果を、記録、保存しなければならない。

現状の維持管理の現場では、構造物に関する設計・施工上の記録や、補修の記録などが残されていないことが数多くあり、維持管理業務を非効率的なものとしている場合がある。設計・施工から維持管理まですべてを包括した記録を残すことは、その後の維持管理においてきわめて重要なことである。構造物の諸元、構造物の設計、施工に際して適用した規準類、工事記録、点検の内容や結果、劣化予測、点検結果の評価および判定、補修、補強などの対策の実施内容など、構造物の維持管理に必要な内容を、参照しやすい形で、記録として保存しなければならない。

3. PC技術協会〔維持管理マニュアル〕

プレストレストコンクリート（PC）は、一般のコンクリート構造物に比べて、強度が高く耐久性に富むコンクリートが用いられている。また、引張強度が高いPC鋼材を使用してコンクリートに圧縮応力を与えひび割れを制御するため、適切に設計、施工、維持管理された場合、極めて高品質で耐久性に富む構造物とすることが可能である。このためPC構造は、橋梁の分野をはじめとして各種構造物に広く適用されてきている。更に近年では、PC鋼材の防錆法やPC定着工法などのPCに関する要素技術の改良、発展にめざましいものがあり、より信頼性の高い構造物を構築することを目指してきた。しかし、いくら高耐久の性能を持つコンクリート構造物と言えども、供用年数と共に劣化が生じてくる。また、昨今コンクリート構造物の劣化が社会問題として取り上げられ、PC構造物においても、グラウト充填不足による損傷・劣化等が発見されるようになり、構造物としての信頼を損なうような損傷・劣化の事例も報告されている。

これらの損傷劣化の現象を分析し、原因を解明して十分な対策を講じることは、次世代へ負の遺産を残さないための重要な課題である。これから建設される新設PC構造物では、設計・施工技術や使用する材料面からの見直しを行い、耐久性の優れた構造物を造る必要がある。既に何らかの初期欠陥・損傷・劣化の変状が生じた構造物に対しては、点検によりの確に性能を評価、判定し、主要要因の明確化と総合的かつ詳細な対応で補強・補修などの適切な対策を施すことが必要である。

PC技術協会が発刊した『PC橋の耐久性向上マニュアル』は、〔第一部 設計・施工編〕と〔第二部 維持管理編〕から成っている。第一部は、耐久性に優れたPC構造物を設計・施工するための方策を示したものであり、第二部は、作られたPC構造物の維持管理について記述したものである。ここでは、〔第二部 維持管理編〕（以下、〔維持管理マニュアル〕と称す。）の内容について紹介する。

3. 1 〔維持管理マニュアル〕の作成方針

PC技術協会〔維持管理マニュアル〕は、基本的に土木学会〔維持管理編〕の作成方針に従って作成された。しかし、実務者が利用しやすいマニュアルを作成することを目的としたため、以下に示す事項に関しては独自の方針に基づくこととした。また、記述はすべてPC橋に関してのものとなっている。

- ① 〔維持管理マニュアル〕は、実際に劣化が顕著化しているPC橋の維持管理対策の基本を標準化することを第一の目標としている。従って、事後保全を中心にPC橋の維持管理の基本を示した。
- ② 土木学会〔維持管理編〕は、維持管理の基本について示した第一部〔維持管理〕と各劣化機構について具体的に述べた第二部〔維持管理標準〕の2部で構成されている。しかし、〔維持管理マニュアル〕では、実務者にとってより有用なマニュアルとするために、第一部と第二部を有機的に組み合わせるとともに、PC橋に対する有効なみなし規定をより多く取り入れるものとした。

3. 2 [維持管理マニュアル] の特徴

本マニュアルの特徴をまとめると以下ようになる。

- ① 道路橋を中心にPC橋の維持管理の基本を示す。適用の範囲はPC橋とするが、鋼橋のPC床版、RC橋の外ケーブル補強およびPCタンクやPC建築構造物などについても参考となるように配慮している。
- ② 予めPC橋の補修・補強に関する既存の文献調査を行い、その結果を分析し、マニュアルの各項に反映させた。その結果、耐荷特性などのPC橋の性能に大きな影響を与えるPC鋼材の破断現象は、その多くはグラウトの充填不足を劣化要因として生じていることが明らかとなった。そこでPC橋の内的劣化要因にグラウト充填不足があることを明記するとともに、この劣化要因による劣化の特徴を詳述した。
- ③ PC橋の点検をより合理的に実施することを目的として、PC橋の主要点検部位とそこに発生する変状の例および点検に用いるチェックシートの例を示している。また、詳細点検の目的を明確にするために、特別な計測機器を用いない詳細一次点検と試験・計測を行って劣化指標を明確にするために実施する詳細二次点検を分類して行うこととし、PC橋の詳細二次点検に用いられる各試験方法の概要を示している。
- ④ 劣化機構では、一般的な塩害、中性化、凍害およびアルカリ骨材反応の他に、PC橋特有のものとして、想定外の収縮・クリープ挙動および橋梁付属物の機能低下を取扱っている。
- ⑤ 既設PC橋の劣化状況の評価および補修・補強などの対策の選定は、PC鋼材の腐食発生限界状態に対して行うこととした。これは、PC鋼材の腐食進行状況がPC部材の性能に多大な影響を与えることを考慮したものである。
- ⑥ 補修工法の選定では、各劣化機構に対する補修方針および適用可能な補修工法を示すとともに、PC橋特有の事項として大規模な断面修復および電気化学的補修工法などを適用する場合の留意点を示している。
- ⑦ 補修工法の選定では、一般的なコンクリート部材の補強工法の他に、PC橋の機能を改善する主桁連続工法や支承の補強および橋脚の補強などにも解説を加えている。

3. 3 PC橋の変状調査

[維持管理マニュアル] 作成に当たり、既存の文献によるPC橋の補修・補強に関する調査を行った。収集事例は、国内115件、海外49件の合計164件である。調査事例から、PC橋の変状と劣化機構・劣化要因について分析した結果を図7に示す。

この調査結果によれば、PC橋の変状と劣化機構・劣化要因について以下のような傾向がある。

- ① 全体を通して塩害が変状の原因となっている場合が最も多く、次いでグラウト不良、施工不良が多い。
- ② 特に、鉄筋の露出やコンクリートの剥離については、塩害が劣化現象となっている事例が多い。
- ③ PC鋼材の破断に対しては、グラウト不良が劣化要因となっている場合が最も多く、グラウト不良がPC構造物に対して致命的な損傷を引き起こす可能性が高いことが確認された。

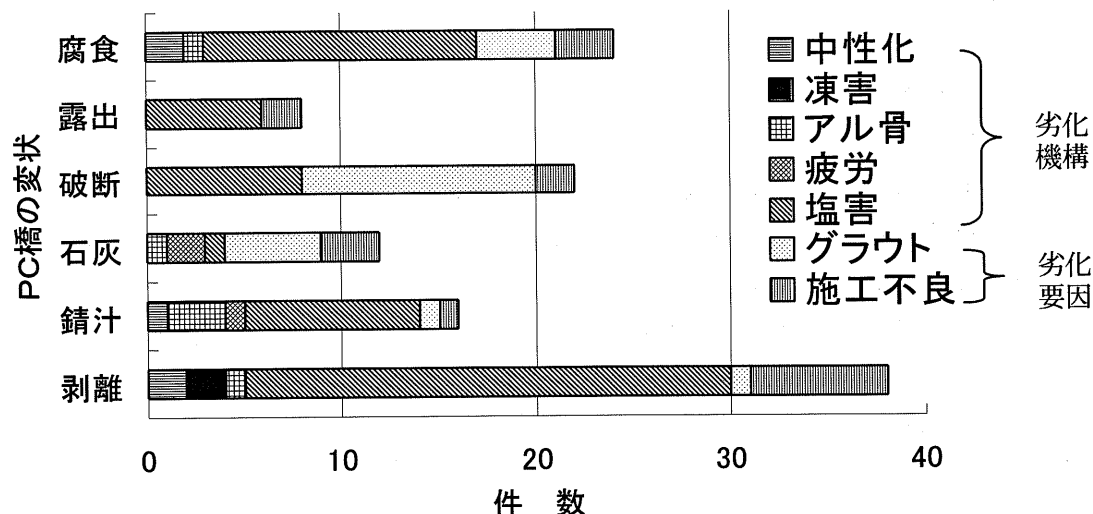


図7 PC橋の変状と劣化機構・劣化要因の関係

3. 4 [維持管理マニュアル] の概要

3. 4. 1 総則

(1) 適用範囲

PC橋には既に40年以上供用されているものもあり、その間のストック量を考えると今後は増々、劣化や老朽化に対する問題浮上が予想される。この問題を解決するためには既設のPC橋をいかに適切に維持管理していくかが重要となる。

本マニュアルは、PC橋の維持管理に関する点検、評価および判定、対策について記述している。適用範囲はPC橋とするが、鋼橋のPC床版、RC橋の外ケーブル補強は含むものとし、プレストレス導入による橋脚補強については工法紹介として加えた。また、本編は橋梁以外のPCタンクやPC建築構造物等についても参考とするとよい。ただし、対象がPC橋であってもRC構造部材や付属物および鉄道橋に関しては他のマニュアル等も参照にして実状に適応した維持管理をする必要がある。

また、一般的に行われている維持管理では、“構造物の劣化”を顕在化させないための予防保全についても考慮しているが、本編では予防保全にはあまり触れず、変状が顕在化した後からの事後保全を中心として記述している。

(2) 維持管理の基本

PC橋についても、一般のコンクリート構造物と同様に、予定供用期間において必要とする性能水準を維持することを維持管理の目的としている。また、維持管理の基本的な手順は図3に示したものと同じく、点検、劣化予測、評価および判定、対策あるいは点検という流れに沿って行われる。

ただし、PC橋の変状は多岐にわたることが予想され、劣化要因や劣化機構を明確にすることが困難な場合がある。したがって、点検、評価および工法の選定などの規準化には限界があり、高度な技術的判断が要求されるため、本マニュアルでは、PC橋の維持管理で、詳細点検、劣化予測のように高度な技術を要するものは、PC橋の設計・施工に関する十分な知識を有し

ている技術者の下で行うのを原則とした。

3. 4. 2 点検

(1) 概 要

点検は、P C 橋の部位・部材の変状（初期欠陥、損傷、劣化）を把握するために行われるものであり、橋梁の重要度、第三者影響度、予定供用期間、環境条件、劣化予測等を考慮して適切な方法、頻度で実施する必要がある。

具体的な点検方法は、点検の種類や目的によって決定されるが、主として目視や打音法による初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検と、点検部位に近接し計測機器を用いて行う詳細点検とがある。図 8 は、P C 橋の点検を維持管理の手順に従って示したものである。

P C 橋の点検は、現状の橋梁構造物の有する耐久性能や耐荷性能を把握し、性能の低下が認められたときには対策の必要性を判断するための情報収集手段となる。P C 橋に要求される耐久性能や耐荷性能を評価するためには、橋梁構造物の変状や発生部位等を的確に発見し、原因を見出すことが重要である。特に、点検の時期や方法を適切に選ぶことによって、変状を早期に発見できれば、橋梁構造物の維持管理対策を容易にし、維持費用も低減することが可能となる。また、情報収集として、構造物の変状を直接点検することも大切であるが、事前に設計や施工に関する図書調査をしておくことも点検方法や項目を決定するうえで重要なことである。初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検の結果、変状が著しく、交通の安全確保、または第三者に対して支障となっているか、もしくはそのおそれがあり緊急に対策が必要と判断される場合には、その支障を除去するため、できるだけ速やかに応急処置を行う。

なお、一般的には応急処置は一時的な処置であるため、必要に応じて詳細点検を行い変状の状況、変状原因、進展性等を確認したうえで改めて適切な対策を選定しなければならない。

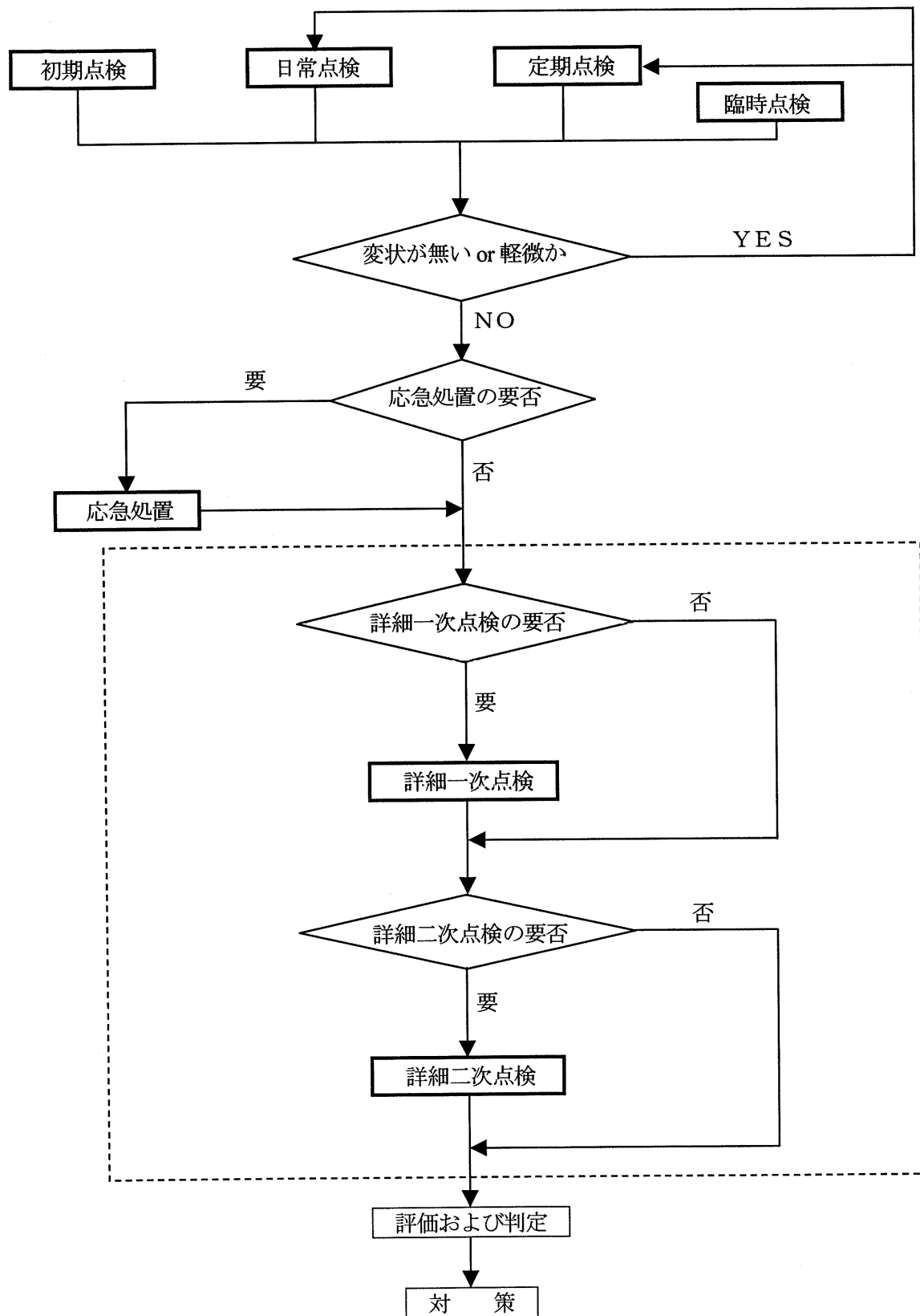
(2) 点検の種類

P C 橋の健全度に対する情報を得るためには、その橋梁の重要度および劣化予測を考慮して適切な時期に目的に合った点検を行わなければならない。以下に点検の種類を示す。

- (a) 初期点検
- (b) 日常点検
- (c) 定期点検
- (d) 詳細点検
 - i) 詳細一次点検
 - ii) 詳細二時点検
- (e) 臨時点検

ここでは点検をその目的別に初期点検、日常点検、定期点検、詳細点検、臨時点検の 5 種類に区分した。この区分は、土木学会〔維持管理編〕と基本的に同様であるが、詳細点検についてさらに一次点検と二時点検に分類している。この内容については『(4) 詳細設計』の項で詳しく述べる。

基本的には、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検は特別な計測機器は用いずに目視や打音感触により部位・部材の表面に生じた変状を発見する点検方法である。詳細点検は、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検では劣化予測することが困難な場合や、変状が明らかに初期欠陥や損傷であっても補修・補強対策のために詳細データを得ることを目的として行われ



注) ----- 線内は詳細点検を示す。

図8 PC橋における点検のフロー

る点検である。いずれにしても詳細点検は、部位・部材に近接し、必要に応じて計測機器を用いて行う。表5に各点検ごとに点検すべき部位・部材を示した。

表5 各点検における対象部位

部位 \ 種別		初期点検	日常点検	定期点検	詳細一次点検	詳細二次点検	臨時点検	摘要
主構造	外面	○	△	○	(○)	(○)	(○)	
	コンクリート					(○)	(○)	基本性状
	鉄筋					(○)		
	P C 鋼材			△		(○)		
	グラウト					(○)		
	定着具			△		(○)		
支 承		○		○	(○)	(○)	(○)	
落橋防止システム		○		○	(○)	(○)	(○)	
地覆・壁高欄		○	○	○	(○)			
橋梁用防護柵		○	○	○				
伸縮装置		○	○	○			(○)	
橋面舗装		○	○	○				
橋面防水						(○)		
排水装置		○	○	○				
点検施設		○	○	○				
付属施設		○	○	○				
添架物		○	○	○				

注1：○は各点検種別において対象とすべき部位または箇所を示す。

注2：(○)は各点検の目的によって対象部位または箇所が特定される。

注3：△は可能な限り対象とした方が望ましい箇所を示す。

P C橋の点検では、先ず橋梁の構造的特徴や建設時の情報、対策の履歴等を確認する机上(事前)点検が重要な資料となる。例えば、P C橋の形式によって変状を受けやすい箇所を推測したり、環境条件によって発生しやすい変状の種類や原因を予測したりすることによって、重要点検部位を絞ることができる。また、点検橋梁の事前踏査を行うことにより、点検方法や点検器具等の準備を合理的に行うことも可能となる。

机上点検で調査しておく必要のある事項として下記の項目が考えられる。

- (a)設計年次、適用示方書(活荷重、床版設計法、支承の種類および示方書の変遷等)
- (b)構造形式、規模、構造の特徴(変状の特性、発生部位等の推定等)
- (c)架設年次(施工方法の特徴、変状の特性等)
- (d)使用材料(P C鋼材、コンクリート、無収縮材、ゴム、鋼材等の種類および特性)
- (e)交通量、大型車混入率(変状の進展性推定、点検の頻度等)

- (f) 架橋地点の環境（気象、桁下等）
- (g) 使用条件の変化（耐久性、耐荷力等）
- (h) 変状（種類、原因、進展性、影響等）
- (i) 対策工法（種類、目的、効果、履歴、費用等）
- (j) 点検機械、計測器具（用途、性能等）

（３）変状の種類と部位

一般にＰＣ橋の変状では橋梁全体を対象としたものと、部位・部材を対象としたものがある。詳細点検、臨時点検等特定の部位・部材の変状を確認する目的で行われる点検以外は、先ず橋梁全体を対象とした変状について点検するのが合理的である。表６に示す橋梁全体を対象とした変状を確認することで、間接的に部位・部材の変状を推測することが可能となる場合がある。コンクリート橋の部位・部材に見られる一般的な変状には以下の種類がある。

- (a) ひび割れ
- (b) 浮き、はく離、はく落
- (c) 鉄筋露出
- (d) 錆汁、遊離石灰
- (e) 漏水、滞水
- (f) 変色

表６ 橋梁全体を対象とした変状

項 目	着 目 ポ イ ン ト
異常たわみ	・主桁が垂れ下がっていないか ・せり上がっていないか
異常音	・車両走行時に異常な音がしないか ・きしみ音がしないか
異常振動	・体感で振動が異常と考えられないか ・不均一な振動をしていないか
異常遊間	・桁遊間が広すぎたり、狭すぎたりしないか ・伸縮装置に異常はないか
沈下	・橋体が異常に傾いていたり沈下していないか
移動	・橋台や橋脚が回転したり移動していないか

ＰＣ橋特有の変状は、ＰＣ鋼材定着部やＰＣ鋼材に沿って発生するひび割れ、ＰＣ鋼材定着部跡埋め部および場所打継目部に発生したひび割れなどである。ＰＣ鋼材に沿ったひび割れの原因としては、グラウトの充填不足によりシース内に雨水等が浸入することによる凍結融解作用や発錆による膨張等が考えられる。

鉄筋やＰＣ鋼材位置まで水や塩分などの劣化因子が到達すると、鋼材の腐食による錆汁、遊離石灰の原因となる。これは、コンクリート表面や打継面に発生したひび割れにより加速される。変状がさらに進行するとＰＣ鋼材の破断やＰＣ鋼棒の突出、鉄筋腐食の膨張圧によるコンクリートはく離などが生じるので注意が必要である。ＰＣ橋の部位・部材に見られる特有な変

状には以下の種類がある。

- (a) P C鋼材に沿って発生するひび割れ、定着部付近のひび割れ
- (b) P C鋼材定着部跡埋め保護コンクリート部の遊離石灰、錆汁
- (c) P C鋼材の破断および突出
- (d) 場所打継目部の漏水、錆汁

(4) 詳細点検

本マニュアルは、実際に変状が顕在化した後からの維持管理対策を規準化することに主眼をおいているため、事後保全を中心としている。そのため、解説では変状の有無確認を主目的とした初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検については概要を記述するにとどめ、詳細点検について別途項目を設け詳細に記述した。

初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検で発見された変状について原因推定、劣化機構の確化、評価および判定、対策の選定資料を得る必要がある場合は詳細点検を行う。詳細点検は(1)詳細一次点検、(2)詳細二次点検、の2種類に分類される。

詳細点検は、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検を補足する必要がある場合に行われるもので、吊り足場や点検作業車等を利用して点検部位に近接し、目視あるいは計測機器を用いて行う。また詳細点検の内容により、コンクリート表面の変状に関する詳細なデータを得ることを目的とした詳細一次点検と、コンクリート内部の変状に関する詳細なデータを得ることを目的とした詳細二次点検に区分できる。基本的には、詳細一次点検の結果により変状原因の推定が不可能な場合に、上段階である詳細二次点検に移行する。

1) 詳細一次点検

詳細一次点検は、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検等、主として橋面上の車上感覚や橋梁下からの目視、打音法による点検では変状把握が困難な場合や、変状が重大あるいは進展のおそれが想定される場合に、構造部位に近接して変状を詳しく把握することを目的として行われる。内容は詳細目視およびクラックゲージ等を用いたひび割れ測定等を行い、主に部位・部材の表面での変状についての詳細データを作成・記録する。

点検項目や部位は橋梁全体について行うこともあるが、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検で指摘された事項やP C鋼材に沿ったコンクリート表面、定着体付近を重点的にを行い、変状部位、状況等をできる限り定量的に記録する。

なお、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検の結果によっては、詳細一次点検を行わずに詳細二次点検を行うこともある。P C橋の詳細一次点検は、以下の内容を含むことを原則とする。

- (a) 変状の状況
- (b) 変状近傍（周辺）の状況
- (c) 変状の経過
- (d) 設計図書類
- (e) 施工記録
- (f) 構造物の使用・環境状態

2) 詳細二次点検

詳細二次点検は、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検で必要と判断した場合や、詳細一次点検でも変状の度合いや劣化機構の明確化が困難だった場合に、評価および対策のためにコンクリート部材内部の変状を、計測機器等を利用して詳細かつ定量的なデータを得ることを目的として行う。PC橋の詳細二次点検では、それぞれの目的別によって以下の試験・測定を行うことによって劣化指標を定める。

- (a) コンクリートの強度試験
- (b) 鋼材鉄筋位置調査
- (c) PC鋼材・鉄筋の腐食度試験
- (d) ひび割れ深さ測定
- (e) 塩化物イオン含有量試験
- (f) 中性化試験
- (g) アルカリ骨材反応試験
- (h) グラウト充填確認試験

3. 4. 3 劣化機構の推定および劣化予測

(1) 概 要

PC橋を適切で計画的に維持管理するためには、部位・部材の性能低下が、構造物の供用される環境の下でどのように推移するかを把握しなければならない。本マニュアルでは、構造物の部位・部材に生じる経時変化のうちで性能低下を生じさせる「劣化」を対象としている。劣化の状態を、点検あるいは補修・補強などの時点で予測することが劣化予測であり、PC橋の性能の評価および判定においては欠くことのできないものである。また、劣化予測を行うためには、どのような機構で劣化が進行しているか、その劣化機構を推定することが重要である。劣化機構を明確にしないまま補修・補強を実施した場合、適切な対策とならず、再補修・補強を実施する必要がある場合もある。また、劣化機構に対して不適切な補修を実施した場合などは、その後の維持管理をしにくくするばかりか、劣化の進行を促進することもある。したがって、劣化機構の推定は、慎重に実施しなければならない。

(2) 劣化機構の分類

本マニュアルでは、劣化機構として、一般的な塩害、中性化、凍害およびアルカリ骨材反応の他に、PC橋特有のものとして、想定外の収縮・クリープ挙動および付属物の機能低下を取扱っている。表7に、劣化機構と劣化外力、劣化現象、劣化指標の関係を示す。なお、劣化指標とは、劣化の進行や劣化度を評価する指標となるもので、詳細点検時の測定項目となっている場合もある。

表7 劣化機構と外力、指標、現象の関連

劣化機構	劣化外力	劣化現象	劣化指標
塩害	塩化物イオン	コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンにより促進され、コンクリートのひび割れやはく離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象。	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量
中性化	二酸化炭素	二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、細孔溶液中のpHを低下させることで、鋼材の腐食が促進され、コンクリートのひび割れやはく離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象。	中性化深さ 鋼材腐食量
凍害	凍結融解作用 水分	コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって、コンクリート表面からスケーリング、微細ひび割れおよびポップアウトなどの形で劣化する現象。	凍害深さ 鋼材腐食量
アルカリ 骨材反応	アルカリ骨材反応 水分	骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる劣化現象。	膨張量 (ひび割れ)
想定外の クリープ挙動	クリープ 乾燥収縮 リラクセーション	クリープや乾燥収縮などの挙動が設計で想定している以上に進行し、変形の進行、耐荷力の低下などを引き起こす劣化現象	変形 耐荷力

(3) 劣化機構の推定

点検によってPC橋の変状を発見した場合、それが劣化機構から推定される劣化現象か否かを判定しなければならない。劣化機構の推定は、PC橋の点検結果から、その劣化要因の外的な要因と変状の特徴に基づいて実施することを基本とする。外的な要因とは、PC橋の環境条件、使用条件を主体とする劣化要因のことである。劣化要因とは、劣化を誘発・促進する原因となるもののことをいう。

(4) 劣化予測

発見された劣化に対して、劣化機構と劣化要因を適切に分類して劣化機構を推定し、適切なモデルを用いて劣化予測を行わなければならない。具体的には以下の目的で劣化予測を行うが、対象橋梁の竣工時の状況あるいは現在の劣化程度を把握し、その重要度、要求されている性能および要求性能を維持する期間を明確化しておくことが劣化予測の前提として重要である。

- ① PC橋の残存耐用期間の推定
- ② 供用期間中に生じる劣化が許容限界以内に入っているかどうかの推定
- ③ 適切な点検時期の把握
- ④ 各性能に影響を与える劣化限界の把握

本マニュアルでは、各劣化機構の劣化モデルを示している。例として、塩害における劣化過程と構造物の性能低下の関係を図9に示す。また、現時点で劣化指標や劣化モデルを明確にできない付属物の機能低下による劣化については、表8に示すように、付属物の機能低下がPC橋に与える影響を具体的に示している。PC橋の劣化は、基本的にRC構造物と同様であり、特殊な場合を除いて図9に示すような劣化モデルを使用することができる。本来、劣化予測では、構造物の性能低下を直接予測すべきである。しかし、現在の技術レベルではそれを行うこ

とが困難な場合が多いため、表 7 に示す劣化指標を用いて、各劣化過程の長さ等を予測することになる。

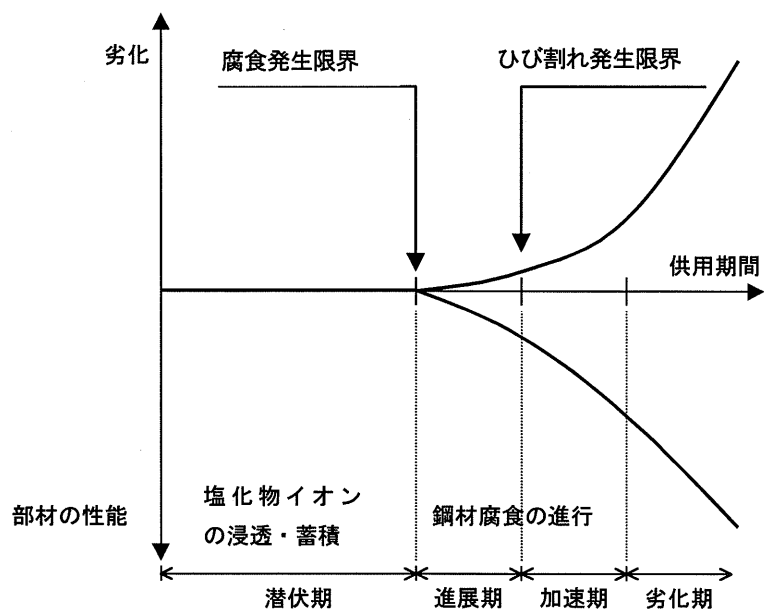


図 9 劣化過程と構造物の性能低下（塩害の例）

表 8 付属物の機能低下が P C 橋に与える影響

付属物	機 能	P C 橋に与える影響例
支承	・反力支持 ・回転 ・スライド	・桁端拘束によるひび割れ ・査沈下による走行不良 ・査の破損によるねじれおよび不等沈下（二次応力の発生）
落橋防止システム	・落橋防止	・地震時の落橋 ・落橋防止システムの劣化による桁拘束
橋梁用防護柵	・落下防止 ・美観、景観 ・第三者影響度	・損傷による劣化 ・美観、景観イメージのダウン ・第三者災害防止
地 覆	・第三者影響度 ・走行安全性 ・水切り ・美観、景観	・鋼材の腐食 ・高欄衝突の防止 ・走行安定性不良 ・コンクリート不良の劣化促進 ・主桁の汚れ
排水 橋面防水	・排水機能 ・走行性	・水の影響によるコンクリート劣化促進 ・雨天時の走行安定性不良
橋面舗装	・走行性	・走行時の異常振動
伸縮装置	・走行性	・走行時の異常振動 ・水の影響による桁端部の劣化促進

(4) 劣化要因

図 10 は、P C 橋の劣化に影響を与える劣化要因をまとめたもので、各劣化機構に関係の深い要因を凡例を挙げて記している。図 7 から今回の調査では、塩害を劣化機構とする事例がほとんどであったことが分かる。また、耐荷特性などの P C 橋の性能に大きな影響を与えると考えられる P C 鋼材の破断現象は、多くの場合、グラウトの充填不足を劣化要因として生じていることも明らかとなった。海外においては、1985 年に英国の Ynys-y-Gwas 橋（ポステン I 形単純桁橋）がグラウトの充填不足を直接的原因として落橋したことなどが報告されており、グラウトはますます重要視されるようになってきた。そこで本マニュアルでは 3 章に「3.3 劣化要因」を設け、その解説において P C 橋の内的劣化要因にグラウトの充填不足があることを明記するとともに、この劣化要因によって誘発・促進される劣化の特徴を詳述した。

3. 3. 4 評価および対策

(1) 概 要

劣化予測の結果に基づいて、点検時あるいは予定供用期間終了時の劣化進行状況を推定し、P C 橋の性能を評価しなければならない。その結果、対象となる P C 橋に要求される性能のいずれか一つ、もしくは複数の性能が低下しており、その性能低下が許容しうる限界を超えている、あるいは残存設計耐用期間中に超える可能性があるとして評価された場合には、対策の実施を検討する必要がある。

P C 橋の劣化予測は、劣化が著しい部位・部材などに対して実施された特定の点検結果に基づいて実施される場合が多い。このような限定されたデータから構造物の性能を評価するためには、対象となる部位・部材の構造物に対する重要度、要求性能、残存供用期間、経済性などを評価する各性能ごとに考慮することが重要である。また、劣化の状況や進行程度が P C 橋の性能の低下に及ぼす影響は、劣化予測で用いた劣化モデルの段階区分などに基づく定量的な評価あるいは構造物の外観上のグレーディングなどを用いた半定量的な評価により検討する必要がある。

(2) 評 価

P C 橋の劣化状況の評価は、P C 鋼材に腐食が発生しているか否かを確認して行うことを基本とした。具体的には、P C 鋼材の腐食発生限界状態に対して検討を行うものとした。塩害では、P C 鋼材の劣化過程が図 9 に示す潜伏期から進行期に移行する P C 鋼材の腐食発生限界状態を基準として、各鋼材位置におけるコンクリートの塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達していないことを確認する。また、中性化では、中性化深さが各鋼材の腐食発生限界深さに達していないことを確かめることを原則とした。これは、P C 鋼材の腐食進行状況が P C 部材の性能に多大な影響を与えることを考慮したものである。鋼材の腐食状況と構造物の諸性能の関係を定量的に判断するための研究成果は、未だ少ないのが現状であるが、P C 鋼材が既に腐食している場合は、将来 P C 鋼材が破断することも予測され、耐荷性能などの構造物の性能に問題が生じる場合がある。したがって、既設 P C 橋において劣化が顕在化している場合は、P C 鋼材に腐食が発生しない状態をもって構造物の性能を阻害しない限界状態とするのが妥当であると思われる。

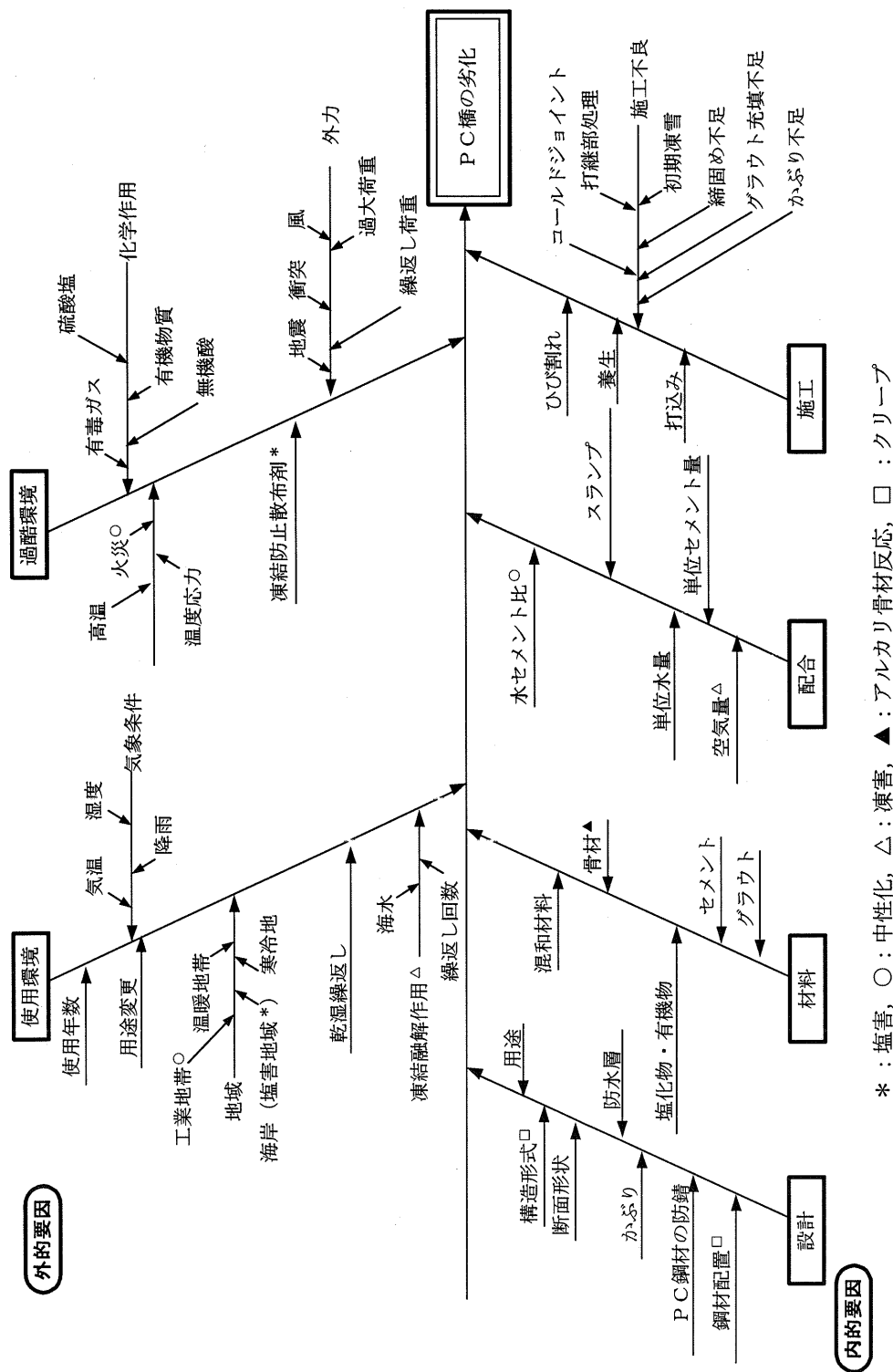


図 10 P C 橋の劣化要因図

(3) 対策の種類

劣化が顕在化したPC橋に実施する対策としては、①点検強化、②補修、③供用制限、④補強、⑤撤去・再構築、⑥修景等が挙げられる。

本マニュアルでは、劣化の生じたPC橋を主な対象としているため、使用性回復、機能性向上は対策として取扱っていない。しかし、上記の対策と使用性回復・機能性向上を併用して実施することにより、効率的な対策となる場合もある。例えば、単純T桁が連続している道路橋に対して、外ケーブルにより主桁同士を連結すれば、安全性能の向上と同時に、伸縮装置を無くして、機能性の一つである車両の走行性を向上することもできる。

(4) 対策の選定

劣化したPC橋に対する補修・補強などの対策の選定は、評価と同様に、PC鋼材の腐食発生限界状態に対して行うこととした。したがって、基本的には、PC鋼材が腐食発生限界に達していない時は補修工法の検討を、達している時は補修・補強の検討を行う。

本マニュアルでは、各劣化機構ごとに、対策の標準と適用可能な補修・補強工法を示している。一例として、塩害により劣化が生じている場合の劣化進行度と対策の標準を表9に、補修・補強に適用可能な工法とその効果の概要を表10に示す。塩害においては、これらを参考に、標準的な評価および対策を図11に示すようにフローチャートにまとめている。本編は、劣化が顕在化した後に実施するPC橋の維持管理対策の基本を示すものである。しかし、塩害においては劣化初期に対策を実施することが非常に重要であるので、フローチャートや解説では、PC橋の塩害に対する予防保全対策についても記述している。

ただし、図11は標準的なフローチャートを示すものである。PC橋の劣化度の評価は既往の評価技術を主体に実行されるが、対策の要否と選定は必ずしも評価時点の技術的判断のみによって行うことはできない。本来は、対策の結果として得られる残存設計耐用期間だけではなく、構造物の撤去・再構築やリサイクルなども念頭に置いた戦略的な維持管理計画に基づいて評価する必要がある。これを言い換えれば、対象構造物のライフサイクルのシナリオをあらかじめデザインして対策を選定するということになるが、実際の評価は、ライフサイクル・コストあるいはライフサイクル・マネージメントなどに基づいて実施する必要がある。したがって、対象橋梁に対する維持管理方針もしくはシナリオが明確にされており、それに従って対策を実施する場合は、このフローチャートに従わなくてもよい。

表9 構造物の劣化過程と対策（塩害の例）

	点検強化	補 修	供用制限	補 強	撤去・再構築	修 景
潜伏期	○	(○)				
進展期	○	○		(○)		
加速期	◎	◎	○	◎	○	◎
劣化期		○	◎	◎	◎	○

注) ◎:推奨される標準的な対策、○:場合によっては考えられる対策、(○):予防的な対策

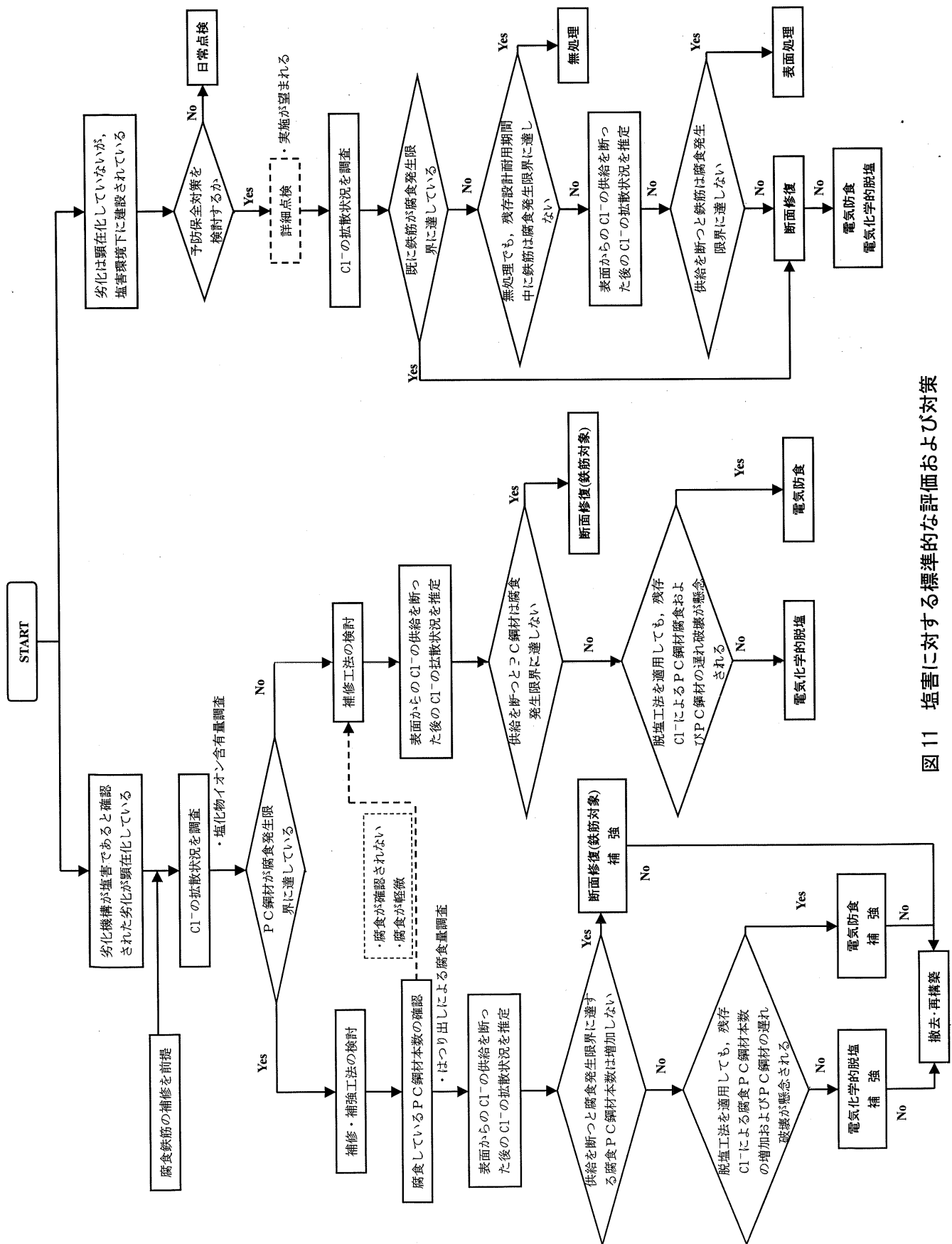


図 11 塩害に対する標準的な評価および対策

表 10 補修・補強に期待する効果と工法（塩害の例）

期待する効果	適用可能な工法の例
腐食要因の供給を遮断	表面処理
腐食要因の除去	断面修復、電気化学的脱塩
腐食進行の制御	表面処理、電気防食、断面修復、防錆処理
耐荷力を向上	連続繊維シート接着、外ケーブル、増厚

3. 4. 5 補修・補強工法

（1）概 要

補修は、一般に、コンクリート片の落下による第三者への影響を除去したり、劣化の進行の抑制や劣化の発生を未然に防ぐことにより、耐久性を回復もしくは向上させることを目的とした対策に適用される。一方、補強は、構造物や部材の耐荷性や剛性などの力学的な性能の回復、あるいは向上を目的とした対策に適用される。評価および対策において補修・補強を実施することが選定された場合、その目的や目標とする水準を明確にし、補修・補強計画を立案しなければならない。この章では、P C 橋に対して補修・補強計画を立案する際の留意点を示している。補修・補強工事の計画に当たっては、施工場所、施工環境、施工時期、工期などの施工条件を考慮し、詳細な計画を作成しなければならない。また、補修・補強後の維持管理の難易度、景観など周辺環境に及ぼす影響についても考慮することが重要である。

（2）補 修

表 11 に、各補修工法の概要と特性を示す。表には、P C 橋特有のものとして、P C グラウトの再注入工法も示している。コンクリートのひび割れやはく離といった劣化状況が類似であっても、劣化機構によって補修工法は異なるため、劣化機構に適合した工法を選定しなければならない。例えば、同じひび割れであっても塩害による鉄筋腐食による場合と、アルカリ骨材反応による場合とでは、補修工法や材料が別のものとなる。したがって各補修工法の補修効果や特性をよく理解し、適切な工法および組み合わせを選定する必要がある。

また、P C 橋に大規模な断面修復および電気化学的補修工法等を適用する場合は、注意する必要がある。P C 橋は一般には全断面有効として設計されているので、コンクリート断面を大きくはつり取る場合には部材応力に影響を及ぼすこともある。電気化学的脱塩工法などの比較的大きな電流の通電を必要とする電気化学的補修工法を適用する場合には、水素脆性により P C 鋼材が遅れ破壊を生じることが懸念されるので、補修計画において通電密度および通電期間を適切に選定しなければならない。

（3）補 強

表 12 に、補強工法の分類を示す。本マニュアルでは、一般的なコンクリート部材の補強工法の他に、P C 橋の機能を改善する主桁連続工法や支承の補強および橋脚の補強等にも解説を加えている。P C 橋の補強工事は、補修と比べ大規模工事となるため、補強目的や補強水準をより明確にして、工法選定や補強計画立案を行う必要がある。また、P C 橋の補強では、十分

表 11 補修工法の分類

分 類	工 法 名	主 な 使 用 材 料	特 性					
			耐 久 性					防 密 水 着 性 性
			ひ び 割 れ	中 性 化	塩 害	凍 害	ア ル 骨	
注 入	グラウト再注入工法	超微粒子セメント エポキシ樹脂	○		○			○ ○
	ひび割れ注入工法	エポキシ樹脂 ポリマーセメントスラリー	○	○		○	○	○ ○
充 填	充 填 工 法	エポキシ樹脂 ポリマーセメントモルタル	○					○ ○
修 復	断 面 修 復 工 法	ポリマーセメントモルタル ポリマーモルタル		○	○	○	○	
表 面 保 護	表 面 被 覆 工 法	エポキシ樹脂系塗料 セメント系塗料	○	○	○	○	○	○
電気化学的	電 気 防 食 工 法	陽極装置 陽極被覆材 断面修復材 照合電極		○	○			
	電気化学的脱塩工法	陽極装置 照合電極			○			
	再アルカリ化工法	陽極装置		○				

○：補修効果の期待できる項目

な点検・調査によって劣化状況を把握し、現状の耐荷力や剛性を評価することが大切である。とくにPC橋の耐荷性能は、コンクリートの品質やPC鋼材の健全度に依存しており、これらの状態を的確に判定する必要がある。PC橋に適用できる主な補強工法は、①コンクリート断面の増加、②部材の追加、③支持点の増加、④補強部材の追加、⑤プレストレスの導入などがあり、各々耐荷機構が異なるため、適切な設計手法により補強後の耐荷性能を評価することが大切である。

また、[維持管理マニュアル] 巻末には、今後PC橋への適用が期待されている工法も含め、表 13 に示す補修工法 8 種類と補強工法 10 種類の概要を整理している。

なお、本マニュアルの理解を助けるため、本稿の最後に上記の考え方に沿った「補修・補強選定例」を示しているので参考にされたい。

表 12 補強工法の分類

補強目的	分類	対 策 の 概 要	工 法 名
コンクリート部材の補強	接着	既設の床版や主桁に鋼板または連続繊維シートを配置し、既設部材との一体化を図り合成構造とすることにより耐荷力を向上させる工法	・ 鋼板接着工法 ・ 連続繊維シート接着工法
	増厚	既設部材の上面、下面に鉄筋などを配置し、コンクリートやモルタルを打設することによって抵抗断面を増加させ、耐荷力を確保する工法	・ 上面増厚工法 ・ 下面増厚工法
	プレストレス導入	既設部材の外側にPC鋼材を配置して、プレストレスを導入することにより、耐荷力を向上させる工法	・ 外ケーブル工法
構造体としての補強	主桁の連結	隣接する主桁、端支点部の床版や横桁部を連結することで、外力を分散・減少させ、必要な耐荷力を確保したり、耐震性の向上を図る工法	・ 主桁連続化工法
	支持	既設支持点の他に支持点を増設することによって、外力を分散、減少させ、必要な耐荷力を確保する工法	・ 支持点増設工法
支承の補強	支承の取り換え	主桁を仮受けし、既設支承を撤去した後に、新設支承を設置することによって、支承の機能や耐震性を向上させる工法	・ 支承取り換え工法
	支承の補強	既設支承部材の補強や交換、あるいは落橋防止装置を増設することによって耐震性を向上させる工法	・ 支承補強工法
橋脚の補強	プレストレス導入	既設橋脚をPC鋼線で巻き立てて、プレストレスを導入したり、壁式橋脚の壁厚方向にプレストレスを導入することによって、既設橋脚の耐震性を向上させる工法	・ PC巻き立て工法 ・ 壁式橋脚プレストレス導入工法

表 13 参考資料に列挙した補修・補強工法

	補修工法	補強工法
(1)	グラウト再注入工法	鋼板接着工法
(2)	ひび割れ注入工法	連続繊維シート接着工法
(3)	充填工法	上面増厚工法
(4)	断面修復工法	下面増厚工法
(5)	表面処理工法	外ケーブル工法
(6)	電気防食工法	主桁連続化工法
(7)	電気化学的脱塩工法	支持点増加工法
(8)	再アルカリ化工法	支承取替工法
(9)		PC巻き立て工法
(10)		壁式橋脚プレストレス導入工法

3. 3. 6 記 録

維持管理における記録は、P C橋の効率的かつ合理的な維持管理のための資料を得ることを目的とする。P C橋の諸元、P C橋の設計、施工に際して適用した規準類、設計図書、図面、工事記録、点検の内容や結果、劣化予測、点検結果の評価および判定、補修、補強などの対策の実施内容など、P C橋の維持管理に必要な内容を、参照しやすい形で、記録として保存しなければならない。また、記録はP C橋の状態に関するデータベースであるので、新たにP C橋の点検、劣化予測、評価および判定、対策などを行った時は、その内容を常に記録するように配慮しなければならない。

維持管理の結果を記録として保存することにより、維持管理技術の妥当性を確認することができる。また、記録の分析により、維持管理面からみた設計、施工上の問題点や改善点が明らかになるなど、技術の進歩に役立たせることが期待される。

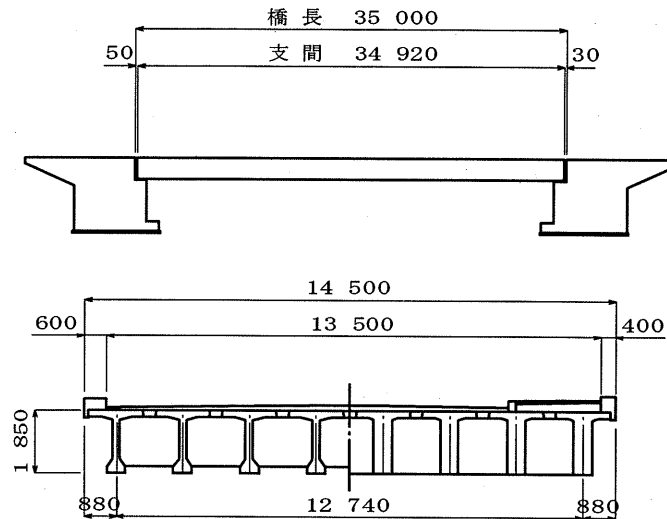
参考文献

- 1) 宮川豊章、森川英典、上東泰、守分敦郎、佐伯竜彦『土木学会・コンクリート標準示方書〔維持管理編〕の制定』セメント・コンクリート No. 656、pp6-30 (平成 13 年 10 月)
- 2) 『コンクリート構造物の維持管理指針 (案) 』土木学会コンクリートライブラリー81 (平成 7 年 10 月)
- 3) 『〔維持管理編〕制定資料』土木学会コンクリートライブラリー104 (2001 年 1 月)
- 4) 『コンクリート構造物の補強指針 (案) 』土木学会コンクリートライブラリー95 (平成 11 年 6 月)
- 5) 『コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針』コンクリート工学協会 (昭和 62 年 2 月)

【参考資料】 補修・補強選定例

1. 対象構造物

温暖な地域の海岸線から 200m の位置にある PCT 桁橋であり、残存供用期間は 50 年である。橋梁の一般図を参考図 1 に示す。



参考図 1 橋梁一般図

2. 点 検

2. 1 初期点検・日常点検結果

竣工検査時の初期点検から、初期欠陥、損傷等は認められなかった。また、道路巡回パトロールによる日常点検からも損傷、劣化等は認められなかった。

2. 2 定期点検結果

5 年毎に行う目視主体（双眼鏡）の定期点検の結果、経過供用期間 15 年目に一部の桁底面に錆び汁が認められた。各部位の現地点検チェックシートを参考表 1 に示す。

2. 3 机上点検結果

設計図書等による机上点検を行い、架設後補修・補強の履歴は無いことが分かった。机上点検チェックシートを参考表 2 に示す。

2. 4 定期点検結果の判定

定期点検の結果、主桁底面に橋軸方向のひび割れ、錆び汁が認められ、架橋環境を考慮し進行性の変状であると判断した。また、変状に対して有効な対策を講ずるため詳細な試験データが必要であると判断し詳細点検を行うことにした。

また、現在発生している劣化は軽微であることから耐荷性には支障がないものと判断し、河川上の橋梁であることから第三者影響度は小さいと判断し応急処置は実施しなかった。

参考表 1 現地点検チェックシート（定期点検）

点 検 日		平成12年6月			点 検 者		*****	
項 目 点 検 部 位		変 状						×：損傷あり △：損傷の疑い有り ○：損傷ナシ 点 検 メ モ
		ひ び わ れ	遊 離 石 灰	剥 離	鉄 筋 露 出	漏 水	錆 汁	
主 桁	1/2 L	×	×	△	○	○	×	下フランジ底面に橋軸方向のひび割れが発生している。錆汁による汚れ有り。
	1/4 起 点 L 側	×	×	△	○	○	×	表面変色のあり、剥離の疑いもある。
	1/4 終 点 L 側	×	×	△	○	○	×	下フランジ底面に橋軸方向のひび割れが発生している。錆汁による汚れ有り。
	桁 起 点 端 側	×	×	△	○	○	×	下フランジ底面に橋軸方向のひび割れが発生している。錆汁による汚れ有り。
	桁 終 点 端 側	×	×	△	○	○	×	下フランジ底面に橋軸方向のひび割れが発生している。錆汁による汚れ有り。
	支 承 周 辺 起 点 側	△	△	△	○	○	△	
	支 承 周 辺 終 点 側	△	△	△	○	○	△	
	中 間 支 点							
	()							
床 版	中 間 床 版	○	○	○	○	○	○	
	張 出 床 版	○	○	○	○	○	○	
	()							
横 桁 部		×	△	△	○	○	×	主桁と同様である。
地 覆 ・ 高 欄		△	○	○	○	○	○	
伸 縮 装 置		○	○	○	○	○	○	損傷ナシ
排 水 装 置		○	○	○	○	○	○	損傷ナシ

参考表 2 机上点検チェックシート

点 検 種 類	初期	・ 日常	・ 定期	・ 臨時	・ 詳細一次	・ 詳細二次
記入日	平成 1 2 年 6 月			記入者	耐久高太郎	
橋梁名	○△□ 橋					
所在地	自 至					
管轄						
橋格	1 等級					
上部構造形式	P C 単純 T 桁橋					
橋梁区分	道路橋					
橋梁種別	コンクリート橋					
橋長	35. 000m					
支間長	34. 020m					
径間数	1 径間					
全幅員	14. 500m					
有効幅員	13. 500m					
架設年次	昭和 58 年					
架設方法	架設桁架設					
下部構造形式	鉄筋コンクリート逆 T 式					
基礎構造形式	直接基礎					
適用示方書	T 15 S 14 S 3 1 S 3 9 S 4 7 S 5 3 S 5 5 H 2 H 6 H 8 S59. 2 「道路橋の塩害対策指針 (案)」適用前					
架設地点の環境	温暖な地域の海岸線から 200m の位置である。 S59. 2 「道路橋の塩害対策指針 (案)」の塩害対策区分Ⅱに相当					
交通量	5 0 0 0 台/日					
大型車混入率	1 0 % または 台/h					
使用材料	コンクリート	主桁 400-8-20-H 床版 300-8-20-H				
	P C 鋼材	主ケーブル 12S12. 4 横締めケーブル 1S21. 8 鉛直ケーブル：ナシ その他：ナシ				
	鉄筋	S D 3 0 (塗装鉄筋は使用せず)				
	支承	ゴム支承				
	その他	ゴムジョイント				
補修・補強履歴	ナシ					
鋼材かぶり	主桁	鉄筋：3 5 mm	P C 鋼材：6 2 mm			
	床版	鉄筋：3 0 mm	P C 鋼材：5 7 mm			

2. 5 詳細点検（一次、二次）結果

定期点検で認められたひび割れ、錆び汁の発生原因推定、評価および判定、対策の選定資料を得るため詳細点検を行った。詳細点検は点検作業車を用い、詳細一次点検と詳細二次点検を同時に行った。詳細点検項目と点検結果を以下に記述する。

(1) たたき点検

テストハンマーによる主桁のたたき点検の結果、ひび割れ、錆び汁の発生部近傍で部分的な浮きが確認され、その他の部位は健全であることが分かった。

(2) 自然電位測定

飽和硫酸銅電極を用い自然電位を測定した結果、平均的に -300mV (vs. CSE) 程度の電位が得られたが、部分的にさらに卑な電位の部分もあった（維持管理マニュアル「2.3.3 詳細点検」参照）。

(3) 鋼材のはつり出しによる腐食状況の調査

錆び汁部をはつり出した結果、錆び汁はスターラップの腐食から発生しており、腐食は鉄筋表面の軽微な錆びであった。また、ひび割れ部をはつり出した結果、一部主鉄筋の腐食も認められたが、PC 鋼材の発錆は認められなかった（同「解説 表 3.2.2」参照）。

(4) かぶり測定

はつり出し部の実測と電磁波法によるコンクリート表面からの測定の結果、かぶりの平均値は 3.0cm であり、90 点の測定データによる標準偏差は 1.0cm であった。また、PC 鋼材のかぶりの平均値は 6.0cm であった。

(5) 塩化物イオン濃度調査結果

主桁から採取した 20 本のコアについて行った塩化物イオン濃度測定結果から以下の各項目が分かった。

- 塩化物イオン濃度グラフの形状より、全てのコア位置において主桁表面から塩化物イオンの侵入がみとめられる。
- 海側主桁側面のほうが山側主桁側面より多く塩化物イオンを含んでいる。
- 15 箇所が鉄筋位置で一般的な腐食発生限界値 (1.2kg/m^3) を超えている（最大 5.0 kg/m^3 ）。
- 鉄筋位置で一般的な腐食発生限界値を超えている 15 箇所中、3 箇所が PC 鋼材位置でも一般的な腐食発生限界値を超えていた（最大 3.5 kg/m^3 ）。
- 鉄筋が発錆している位置の塩化物イオン濃度は 1.7 kg/m^3 であることから、本橋の腐食発生限界値は 1.7 kg/m^3 であると判断した。

3. 劣化機構の推定

点検結果より劣化機構の推定を行った。以下に、劣化機構推定条件を示す（同「解説 図 3.1.1」参照）。

- 外的な要因：海岸線から 200m に位置し、冬季には北西風が吹く。
- 変状の特徴：定期点検において、主桁底面に軸方向ひび割れ、錆び汁が認められた。
- 劣化指標：塩化物イオン濃度調査から、全てのコア位置において主桁表面からの塩化物イオン

の侵入が認められ、海側主桁側面のほうが山側主桁側面より多く塩化物イオンを含んでいることが分かった。

以上より、鋼材の腐食、腐食に伴うひび割れ等の劣化現象は海からの飛来塩分による「塩害」が劣化機構であると判断した（同「解説 表 3.1.1、図 3.1.2」参照）。

4. 劣化予測

点検時のひび割れ状況、鉄筋の腐食状況より、劣化過程は進展期と加速期の過渡期にあると判断した（同「解説 表 3.2.1」参照）。また、点検時既にひび割れや鉄筋の腐食が認められたことや鉄筋位置の塩化物イオン量が一般的な腐食発生限界値を超えていることから、残存供用期間中このまま放置しておくとも塩害による劣化が更に進行し PC 鋼材の腐食等部材の性能低下を招くことは明らかであると判断した。

5. 評価および対策

以下の条件で本橋の劣化に対する評価を行った。

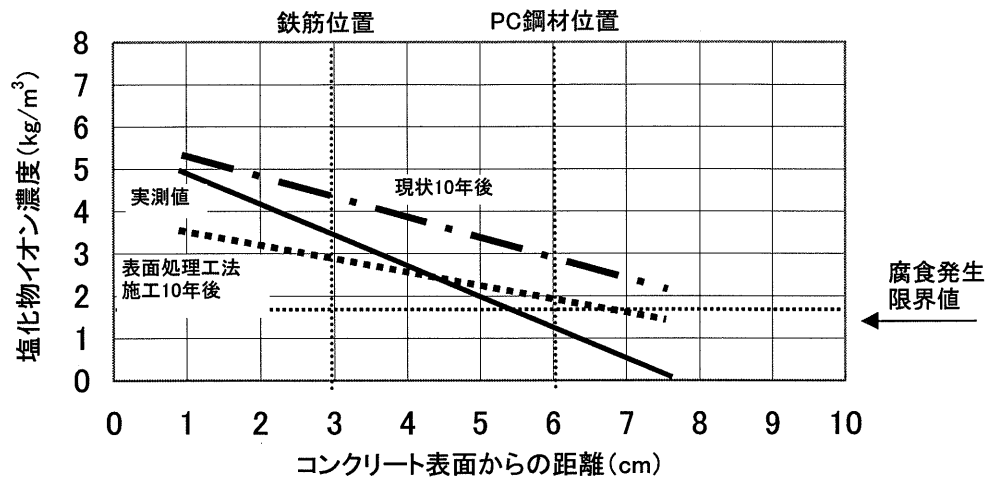
- 主要幹線の一般国道に位置し重要橋梁である。
- 将来的な架け替えを前提とした場合、工事中の迂回路等はない。
- 残存供用期間中に部材の性能低下を招くことは明らかである。
- PC 鋼材は健全であることより、適切な維持管理計画を策定すれば劣化に十分対応できる。

以上から、腐食進行の制御を期待し事後保全としての「補修対策」を施すことにした。補修対策の回復水準は「建設時と現状の中間性能」とした（同「解説表 4.1.1」参照）。また、劣化の進行度（進展期と加速期）からも、適切な対策として補修対策が選定される（同「解説表 4.2.1」参照）。

6. 補修工法の選定（補修設計）

塩害に対する補修工法として一般的な、表面処理工法、断面修復工法、電気化学的脱塩工法、電気防食工法について検討を行った（同「解説表 5.2.1」参照）。検討方法は、各工法を採用した場合の塩化物イオン濃度の拡散を Fick の拡散方程式により推定し鋼材位置の塩化物イオン濃度を検討した（同「3.2.2 塩害」参照）。各工法についての検討結果を以下に示す。

- 表面処理工法：新たな塩化物イオンの侵入は防止するが、内部に侵入した塩化物イオンが拡散することにより部材内で均一なイオン濃度になる。10 年後の拡散予測から、PC 鋼材位置で発錆限界値を上回るのは 9 箇所となり、ほぼ半数の PC 鋼材位置で腐食環境になる。塩化物イオン濃度検討例を参考図 2 に示す。
- 断面修復工法と表面処理工法の併用：10 年後には 20 箇所中 7 箇所の鉄筋位置で発錆限界値を上回る。



参考図 2 塩化物イオン拡散予測例

以上から、物理的な手法で残存供用期間中鋼材の腐食を防ぐことは不可能であると判断し、根本的な対策工法として電気化学的補修工法の採用を検討した。

- 脱塩工法：鉄筋と外部電極間に $1A/m^2$ 程度以上の電流を 1～2 ヶ月流し、コンクリート内部の塩化物イオンをコンクリート外へ取り出す工法。脱塩後、表面被覆工法を施工する場合が多い。
- 電気防食工法：コンクリート表面から $10\sim30mA/m^2$ 程度の電流を常時流し、鉄筋を陰極に保つことにより不活性化する工法。外部電源方式と流電陽極方式がある。

以上 2 工法について本橋架設環境を踏まえて検討した結果、本橋の劣化に対する補修工法として、「電気防食工法」または「電気化学的脱塩工法」を採用する。

7. 記 録

以上の点検から得られた以下の資料を記録として残した（同「解説表 6.4.1」参照）。

- 施工時資料
- 机上点検チェックシート
- 現地点検（定期点検）チェックシート
- 詳細点検結果
- 劣化予測資料
- 評価及び判定資料
- 補修工法の選定（補修設計）

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P C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) P Cによる構造物の補強とP C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) P C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

*印はテキスト在庫あり

平成14年1月31日 印刷
平成14年2月4日 発行

プレストレストコンクリートの新たなる発展—21世紀—

頒価 5,000円
(〒500円)

発行者 桑 山 誠 東京都新宿区津久戸町4番6号

印刷所 有限会社 コーケン印刷 東京都千代田区飯田橋3-2-9

発行所 財団法人 プレストレストコンクリート技術協会

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
