

PC技術の新たな発展

－第36回PC技術講習会－

平成20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

fibシンポジウム(クロアチア)とクロアチアにおける橋梁調査 1

(株)複合研究機構 (横浜国立大学名誉教授)	池 田 尚 治
(財)海洋架橋・橋梁調査会	小 川 和 也
(財)首都高速道路技術センター	佐々木 一 哉

PC建築構造の原点に還り、将来を見る 21

大阪大学大学院教授・本協会副会長	大 野 義 照
京都大学大学院教授・本協会理事	渡 邊 史 夫
京都大学大学院准教授	西 山 峰 広
(独) 建築研究所構造研究グループ主任研究員	加 藤 博 人
(株)大林組東北支店建築工事部技術グループ長	北 川 公 章
(株)ジェーエスディー	加 藤 元 樹
(株)ジェーエスディー	照 井 健 二

コンクリート構造物の環境設計 49

香川大学工学部安全システム建設工学科	堺 孝 司
広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻	河 合 研 至
大成建設(株)技術センター土木技術研究所	大 脇 英 司

PC橋の新たな構造形式の現状と将来 77

東京工業大学大学院・本協会常務理事	二 羽 淳一郎
鹿島建設(株)土木設計本部	織 田 一 郎
三井住友建設(株)土木管理本部	平 喜 彦
(株)富士ビー・エス 技術製造本部	堤 忠 彦

『PC道路橋計画マニュアル』の改訂について 99

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 PC道路橋計画マニュアル改訂部会	
改訂部会設計WG主査	佐 藤 徹
改訂部会部会長	大 浦 隆
改訂部会幹事長	脇 本 優
改訂部会設計WG委員	吉 田 政 宏
改訂部会設計WG委員	志 道 昭 郎
改訂部会設計WG委員	西 村 一 博
事務局次長	三 浦 貴 洋

fibシンポジウム(クロアチア)と クロアチアにおける橋梁調査

(株)複合研究機構 (横浜国立大学名誉教授)
助海洋架橋・橋梁調査会
助首都高速道路技術センター

池田 尚 治
小川 和 也
佐々木 一 哉

1. はじめに

fib (国際構造コンクリート連合、federation internationale du beton) の2007年国際シンポジウムが、クロアチア (Croatia) のドゥブロヴニク市 (Dubrovnik) で2007年5月20日から23日まで開催された。本シンポジウムは、4年ごとに開催される fib コンGRES の開催されない年に開催される国際シンポジウムであり、36カ国から総勢約350名の参加者があった。

今回、このシンポジウムに参加するとともに、プレストレストコンクリート技術協会の支援を受け橋梁調査団を結成しクロアチアと隣国のボスニア・ヘルツェゴビナの橋梁調査を実施したため、その概要を報告する。



図-1 クロアチア共和国

2. fibシンポジウム2007の概要

本シンポジウムが開催されたドゥブロヴニクは図-1に示すようにクロアチア南部のアドリア海沿岸に位置しており、その旧市街 (写真-1) が世界遺産に登録されており、風光明媚な観光名所として世界的に有名である。

本シンポジウムは、世界各国のコンクリート構造に関係する多くの技術者が参加し、各国の建設技術を報告する国際シンポジウムである。このため、本シンポ



写真-1 ドゥブロヴニク旧市街

ジウムに参加することは、世界のコンクリート構造の技術動向に触れるとともに、日本の建設技術水準を認識するうえで非常に有意義な場であるといえる。特に、近年の日本の建設業界における社会ニーズは、低コスト化、合理化、省力化である。今後、建設業界の大きな発展のためには、技術者個々が国内のみならず世界に対する広い技術的見識を持つことが非常に重要である。近年のPC橋梁技術の発展においては、諸外国の技術を導入しそれを大きく展開させた事例も多い。このことから国際調査には大きな必要性和意義があるといえる。

2.1 テーマおよびプログラム

今回のシンポジウムは「Concrete Structures－Stimulators of Development（コンクリート構造物－発展を刺激するもの）」というテーマのもとに基調講演4題を含む120題の講演が行なわれた。シンポジウムの日程を表－1に示す。

表－1 シンポジウムの日程

月/日	午前		午後		
	9:00-11:00	11:00-13:00	14:00-16:00	16:30-18:00	19:00以降
5/20	—	—	—	レジストレーション	—
5/21	オープニングセッション	基調講演	パラレルセッション	パラレルセッション	ウェルカムレセプション
5/22	パラレルセッション	パラレルセッション	パラレルセッション	パラレルセッション	ガラディナー
5/23	パラレルセッション	クロージングセッション	テクニカルツアー	—	—

2.2 基調講演

基調講演は、主催者であるクロアチアのラディッチ教授（Prof. Radic）、現 *fib* 会長のスイスのガンツ博士（Dr. Ganz）、前 *fib* 会長のイタリアのマンチーニ教授（Prof. Mancini）および *fib* 理事のノルウェーのヘランド氏（Mr. Helland）によって行なわれた。それぞれの基調講演のテーマを表－2に示す。

ラディッチ教授は「クロアチアのコンクリート構造物－遺産と現代構造」と題して極めて興味深い講演を行い、その中で当地ドゥブロヴニクも旧ユーゴスラビア連邦の内戦（1991年～1995年）で大きな被害を受けたこと、ドゥブロヴニクの北西40kmの海岸線9kmがボスニア・ヘルツェゴビナ（Bosnia-Herzegovina）の領有となっているのでクロアチアの領土が分断されていること、この分断を回避するためにベレシャス半島と本土とを長大橋で結ぶ工事が始まっていること、世界最大規模のコンクリートアーチ橋であるカーク橋の耐久性や補修工事のこと、支間304mの長大複合斜張橋ドゥブロヴニク橋が2002年5月に完成したことなどが報告された。

表－2 基調講演

講演者名	講演タイトル	国 名
J. Radić	Concrete structures in Croatia - the legacy and contemporary projects	Croatia
	クロアチアのコンクリート構造物－遺産と現代構造	
H. R. Ganz	Post-tensioning in buildings - a technology with significant potential	Switzerland
	建築におけるポストテンション工法	
G. Bertagnoli, G. Mancini & F. Tondolo	Early age behaviour of massive concrete piers	Italy
	マスコンクリート橋脚の材齢初期の挙動	
S. Helland	Coming CEN and ISO standard for the execution of concrete structures	Norway
	コンクリート施工に関して登場するCENとISO規格	

2.3 一般講演

一般講演は、5つの課題に分けて行なわれた。表－3に示すように、開催国のクロアチアからは最も多い52題の発表があり、次いでイタリアの7題、日本、オーストリアの6題の順であった。各課題における主な講演内容、講演数は表－4に示すとおりである。

表－3 国別講演論文数

	国 名	講演論文数
1	Argentina	2
2	Austria	6
3	Belarus	1
4	Belgium	4
5	Brazil	4
6	China	4
7	Croatia	52
8	Czech	3
9	France	4
10	Germany	1
11	Greece	1
12	Hungary	3
13	Iran	1
14	Italy	7
15	Japan	6
16	Norway	1
17	Poland	3
18	Romania	4
19	Serbia	1
20	Spain	1
21	Sweden	1
22	Switzerland	5
23	Ukraine	1
24	United kingdom	4
		120

※アルファベット順

表-4 一般講演のテーマ、主な講演内容および講演数

	テーマおよび主な講演内容	講演数
Topic 1	Concrete Structures Connecting Mainland and Islands - Bridges (本土と島々をつなぐ構造物-橋) 高架橋, 新構造形式, 海洋橋梁, 美観	16
Topic 2	Concrete Structures in Energy Production (エネルギー施設のコンクリート構造物) 原子力発電, 水力発電, ダム	9
Topic 3	New Materials (新材料) 高性能繊維補強コンクリート, FRP, ガラス繊維, 自己充填コンクリート	26
Topic 4	Analysis (解析) 温度解析, 風洞, 地震応答, 火災, 熱応力解析	26
Topic 5	Durability, Inspection and Maintenance (耐久性, 検査, 維持管理) 維持管理, 高耐久, アセスメント, 非破壊検査モニタリング, アセットマネジメント	39

2.4 fib 表彰

fibシンポジウムの開会式では、会長と主催国来賓の開会スピーチに続き、fib表彰が会長の司式で行なわれるのが恒例となっている。今回のシンポジウムでは、前会長のマンチーニ教授が名誉会長に、リーガン教授 (Prof. Regan) が名誉会員に推挙され、我が国の元日本道路公団技術部長角谷務博士とウクライナのクリボシェエフ教授 (Prof. Kryvocheyev) の2名に2007年のfibメダルがガンツ会長から授与された。

fibメダル (fib Medal of Merit) は、コンクリート構造とfibへの傑出した貢献に対して授与され、年に原則2名以内 (さらに4年ごとのコンGRESの年の授与はない) との制限もあるように極めて国際的に価値の高いものであり、我が国では角谷博士が始めての受賞である。メダルの授与に際しては、会長より受賞者の業績の紹介があった。

クリボシェエフ教授は、チェルノブイリ原子力発電所事故後の遮蔽構造物の築造を指導した国際的に著名な学者であり、旧ソビエト連邦、ウクライナで同教授の業績が関係した構造物とともに紹介された。

角谷博士の業績は、耐震工学、初期の斜張橋 (東名足柄橋) の技術の確立、そして中でも多種多様な複合橋梁の具現化が顕著である。角谷博士は2002年に大阪で開催された第1回fibコンGRESの基調講演者であり、また第1回コンGRESの主催国として、技術の複合と融和の象徴として近江大鳥橋を実現した推進者であることもfibの理想の先駆者として表彰に相応しいであろう。ガンツ会長は、角谷博士が中心となって設計施工された第二東名や第二名神の栗東橋 (近江大鳥橋)、矢作川橋 (豊田アローズブリッジ)、湾岸木曽川橋、湾岸揖斐川橋、長崎自動車道の日見夢大橋等々を美しい写真とともにつぶさに紹介するとともに、透明シースによるPCグラウト技術の画期的な開発と実用化に果たした同博士の功績を大いに讃えた。さらに、ガンツ会長は角谷博士が無類のオペラファンであることなど、受賞者達のひととなりや趣味や日頃の情景も織り交ぜ紹介し、受賞者達が学術・技術に傑出しているだけでなく人間的にも大いに魅力的であることを感じさせた。コンクリート構造技術を世界の共有財産として育てていこうとするfibの新たな担い手に我が国の代表が迎えられたことは同国人としてまことに慶賀の至りである。

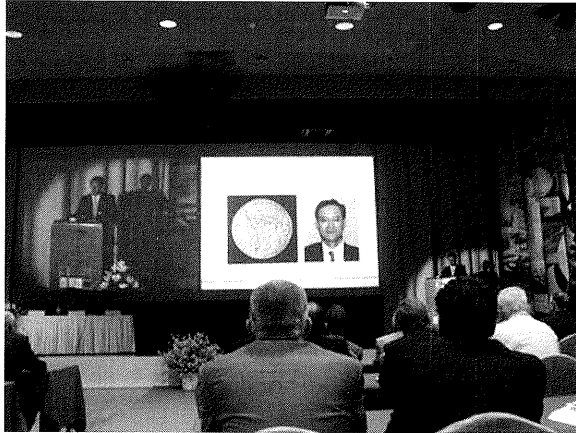


写真-2 角谷博士の紹介

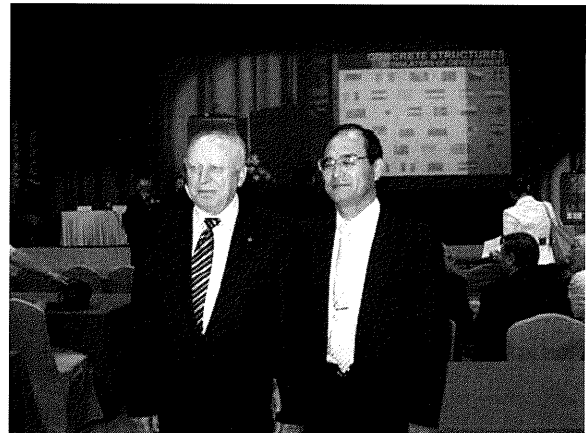


写真-3 クリボシェエフ教授と角谷博士

2.5 fib 理事会報告

fibの理事会 (Technical Council) は5月19日に開催された。昨年12月に従来の国代表理事会 (Council) と運営委員会 (Steering committee) が統合され年2回開催されることになった。構成は、技術委員会 (Commission) 委員長、特別活動グループ (Special activity group, SAG) 主査、幹部会 (プレジディウム、Presidium) 委員、元会長、会長任命委員から成る。主な議題は、技術委員会報告、出版物進捗状況、シンポジウム、コンGRES、PhDシンポジウム、特定セミナー予定、未加入国への勧誘 (中南米、中東)、各国国内活動と fib との関係 (今回は、クロアチア、ハンガリー、チェコが報告、前回 (初回) はドイツ、フランス、オランダ、日本が報告) 等であった。技術委員会テーマと委員長は、

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| 1. 構造 (Clark氏) | 2. 安全と性能 (Taerwe教授) |
| 3. 環境 (堺教授) | 4. 挙動モデルと設計 (Foster教授) |
| 5. サービスライフ (Mathews博士) | 6. プレファブ (Menegotto教授) |
| 7. 耐震設計 (Fardis副会長) | 8. コンクリート (Muller教授) |
| 9. 補強鋼材システム (Ganz会長) | 10. 施工 (van der Horst教授) |

SAGと主査は

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 2. 教育および技術広報 (Balazs教授) | 4. 接合アンカー (Elinghausen教授) |
| 5. モデルコード改訂 (Walraven教授) | |

新規SAGとして

- プレキャストセグメント橋 (Mancini前会長)
- 鋼・コンクリート複合構造 (Cosenza教授)

が提案された。

シンポジウム予定は2008アムステルダム、2009ロンドン、コンGRESは2010ワシントンDCが決定しており、2011シンポジウムは南アフリカ、2014コンGRESはインドがそれぞれ招致活動中である。当理事会への我が国の委員は、fib日本代表・魚本健人教授 (PC技術協会会長、芝浦工業大学教授、東京大学名誉教授) および fib 役職者として任命された池田尚治横浜国立大学名誉教授 (前プレジディウム委員)、堺孝司香川大学教授 (第3委員会委員長)、山崎淳日本大学教授 (プレジディウム委員) である。

3. クロアチアの概要

クロアチアはバルカン半島の西の付け根に位置し、この辺りは中東欧の一部をなし、最近では南東ヨーロッパとも呼ばれている。北海道と緯度をほぼ同じくし、国の北端がサハリンの南端、首都ザグレブが稚内、国の南端に位置するドゥブロブニクが室蘭と同じである。

面積は56,500km²（九州の約1.5倍）、人口444万人（2001年国勢調査）、首都ザグレブの人口は約78万人で、人口の約90%がクロアチア人、主な宗教はカトリックである。

クロアチアの歴史を辿ると、10世紀前半にクロアチア王国が建国されたが、12世紀以降は、オーストリア・ハンガリー帝国、オスマントルコ等に支配されてきた。第2次世界大戦後の1945年にユーゴスラビア連邦の構成共和国となったが、1991年にユーゴスラビアより独立宣言し、独立戦争が勃発、1995年まで続いた。

クロアチアの欧州連合（以下EUとする）への加盟時期は未定であるが、近い将来に実現となる見込みである。（次期EU拡大が予定されている2007年の加盟には間に合わないとの見方が一般的。）クロアチアのEU加盟がなれば旧ユーゴスラヴィア構成国家の中ではスロヴェニアに続く2例目となる。

3.1 クロアチアの道路事情

交通ネットワークの整備は国家が社会的、経済的に発展するための最も重要な施設であり、多くのヨーロッパ諸国と同様に、クロアチアにおいても道路ネットワークの整備は陸上交通の最重要施策である。クロアチアには6,800kmの既設道路が存在するが、現在の交通需要には不十分であり、1999年に図-2に示す長期道路ネットワーク整備計画が策定されている。この計画は、①国内の隅々を結ぶ、②pan-european道路、euroasian道路の建設、③完成済み区間のネットワークへの取り入れ、④隣国ボスニア・ヘルツェゴビナとのネットワーク統合を見込む、の4つの基本理念に基づいて策定された。

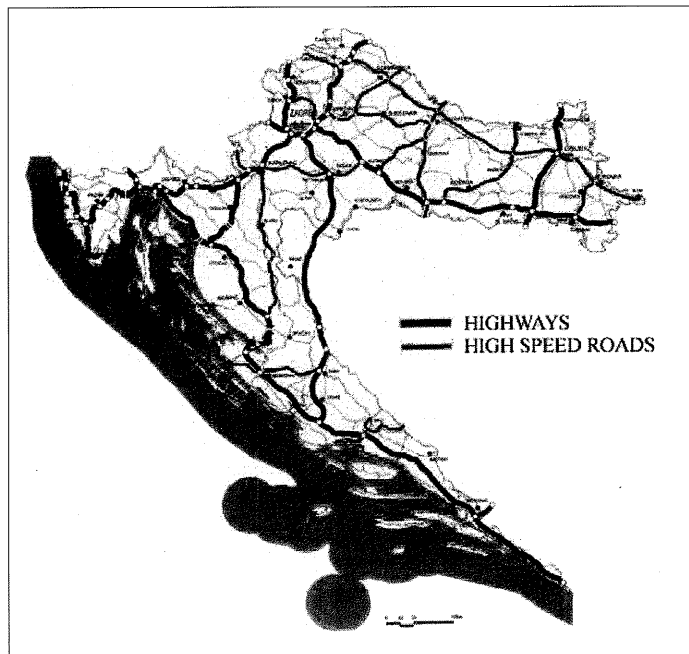


図-2 長期道路ネットワーク整備計画

高速道路（Highway）は有料道路となっている。建設・管理は4社（公社1社、特殊会社3社）に委託されており、建設費は3つの特殊会社の場合は借入金と料金収入によって賄われるが、公社の場合はそれらに加えて燃料税からの収入も充てられる。

1970年代から2001年の30年間で、414kmの高速道路が建設された。その半分以上がpan-european道路で、その他は首都ザグレブと北方隣接国やリエカを結ぶ道路であり、南方を結ぶ道路の建設はほとんど行われなかった。最近では北と南を結ぶ道路の建設に重点が置かれている。例えば、ザグレブースプリット道路（A1 motorway、380km）の場合、1972年にザグレブ付近の

38km区間が完成したが、残りの区間が完成したのは最近5年間である。現在の高速道路総延長は1,019kmで、ここ5年間で倍増した。

2005年～2008年の高速道路建設管理計画が策定されている。その主なものは、南方への延伸209km、pan-european道路Vc（ハンガリーを經由して北東ヨーロッパとクロアチアを結ぶ）の建設着手。クロアチア内延長89kmの内、23kmが2007年に、32kmが2008年に完成する予定。また、現在片側1車線で供用している区間の片側2車線化を行なう。この4年間の予算は19億ユーロ。

新規路線の建設に加えて、既存路線の補修にも予算を配分する。補修の対象は1980年代に完成した最も古い高速道路区間183kmが中心で、これらの区間は1990年代は戦争のために維持作業が行なえず、その後も新規路線建設に莫大な費用を要したために、十分な補修が行なえなかった区間である。

補修作業は2003年より開始しており、主なものは舗装の打ち替え、付属物の交換、排水施設の補修等である。



写真4 リエカーザグレブ高速道路の料金所
(手前が料金表、4車種に分かれている)

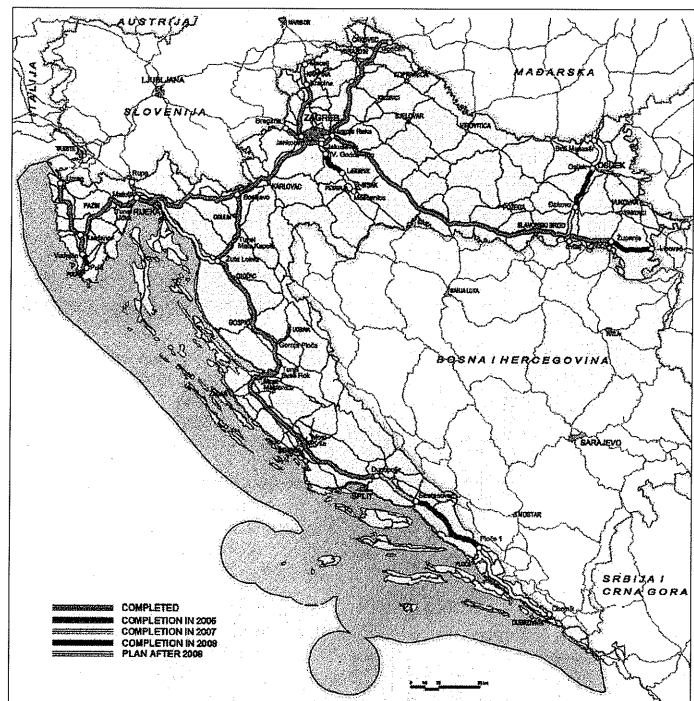


図3 2005年～2008年の高速道路建設管理計画

4. 橋梁調査

橋梁調査はシンポジウムの開催国であるクロアチアとその隣国のボスニア・ヘルツェゴビナで実施した。調査日程を表5に示す。調査した橋梁は、クロアチアの首都ザグレブ（Zagreb）郊外の高速道路高架橋、ドゥブロヴニク橋、トロギール（Trogir）の跳開橋、クロアチア本土とカーク島を結ぶ世界最大規模のコンクリートアーチ橋カーク（Krk）橋である。ボスニア・ヘルツェゴビナでは世界文化遺産にも指定されているモスタル（Mostar）の石造アーチ橋を視察した。

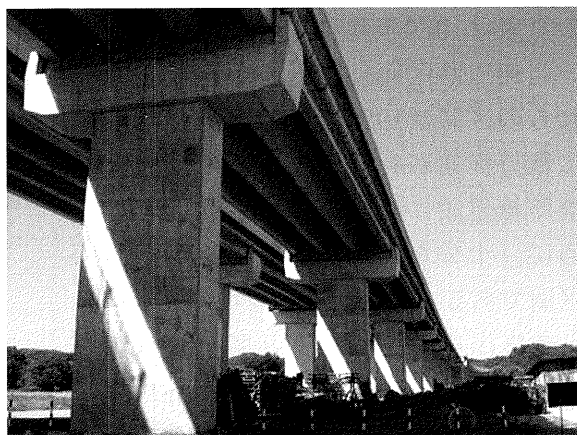
表－5 橋梁調査日程

調査日	場 所	橋名・構造物名
5/19	ザグレブ	ザグレブーリエカ高速道路橋視察 市内構造物視察
5/20	ドゥブロブニク	Dubrovnik橋視察, <i>fib</i> -Registration
5/21-23		<i>fib</i> シンポジウム
5/24	モスタル, スプリット	Mostar橋視察 スプリット宮殿跡視察
5/25	トロギール	Ciovo橋, 歴史的構造物視察
5/26	カーク(クルク)島	Krk橋視察

4.1 ドレズニック (Dreznik) 高架橋

ドレズニック高架橋は、首都ザグレブとアドリア海沿岸のクロアチア第2の都市リエカ(Rijeka)を結ぶリエカーザグレブ高速道路のカルロヴァック(Karlovac)付近に建設された全長2485mの道路橋である(写真－5)。本橋はPCT桁(桁高1.82m)にプレキャスト版を用いた合成床版構造となっている。標準支間長は35mであるが、クーパ川(Kupa)跨河部では写真－6、7のようにスプライス構造とすることで支間長70mの長支間化を図っていることが特徴である。

また、長支間化することで柱頭部の桁下縁の圧縮応力が卓越するため、抵抗部材としてプレキャスト下床版を部分的に配置し、T桁構造から箱桁構造にする工夫がなされている。また、標準構造を多用することで経済的となっているだけでなく、景観上も好ましい効果をもたらしている。柱頭横梁部の端部を面取りするなど景観上の細かい配慮もなされている。



写真－5 ドレズニック高架橋



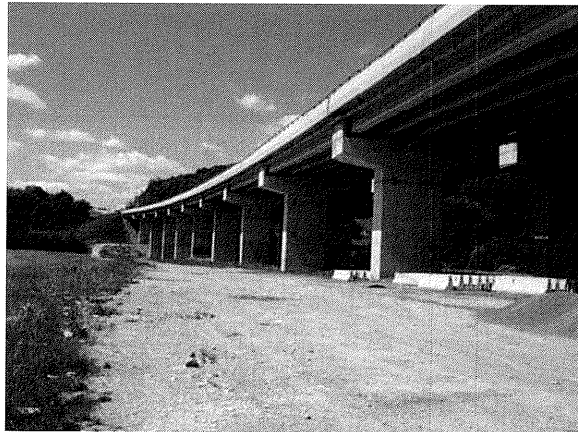
写真－6 ドレズニック高架橋 渡河部（側面）



写真－7 ドレズニック高架橋 渡河部（桁下面）

4.2 ドブラ (Dobra) 橋

ドブラ橋は、ドレズニック高架橋と同様に、ザグレブーリエカ高速道路のカルロヴァック付近に建設された全長550mの道路橋である（写真－8）。本橋は、PCT桁のフランジを型枠として使用してRC床版を施工した合成床版構造となっている。本橋では、ドレズニック高架橋とは異なり主桁間にプレキャスト版を使用せず、写真－9のように主桁フランジ端部を密着させるように主桁を配置することで主桁間の型枠を不要とし、施工の省力化を図っている。



写真－8 ドブラ橋 全景



写真－9 ドブラ橋 桁下面

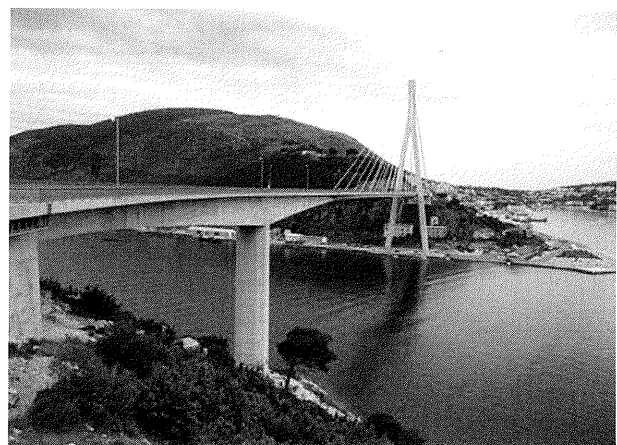
4.3 ドゥブロヴニク橋

ドゥブロヴニク橋はシンポジウムの開催地であるドゥブロヴニクの市新市街の沿岸部に架橋された橋梁である（写真－10）。2002年5月に完成した本橋は、鋼斜張橋とPCラーメン橋が中央ヒンジで連結された複合橋であり、クロアチアでは最初の斜張橋である。ドゥブロヴニク橋の橋梁諸元を表－6に示す。本橋の特徴を以下に列記する。

- ① 本橋は、1988年の基本設計では掛違い部でPC桁と鋼斜張橋を分割する構造としていたが、1999年の実施設計において、中央ヒンジを設ける現構造に変更となった³⁾。本橋の架設地点は、強風が吹く地域であり、また、地震の発生地域でもあるため、PC橋部と鋼斜張橋部相互の橋軸直角方向に変位を生じる。その変位の解消を目的に、中央ヒンジ部にバッファが設置されている。

表－6 ドゥブロヴニク橋 橋梁諸元

橋 梁 区 間 長		490.9m
支 間 長	PC 桁 部	87.35+60.05m
	鋼 桁 部	244.0+80.7m
	アンカー部	18.8m
桁 高	PC 桁 部	3.25～8.22m
	鋼 桁 部	2.26m（鋼桁2.0m+RC床版0.26m）
桁 構 造	PC 桁 部	PCTラーメン桁
	鋼 桁 部	2主桁複合斜張橋
主 塔 構 造	主 塔 高	141m
	主 塔 形 式	逆Y字形コンクリートタワー



写真－10 ドゥブロヴニク橋 全景

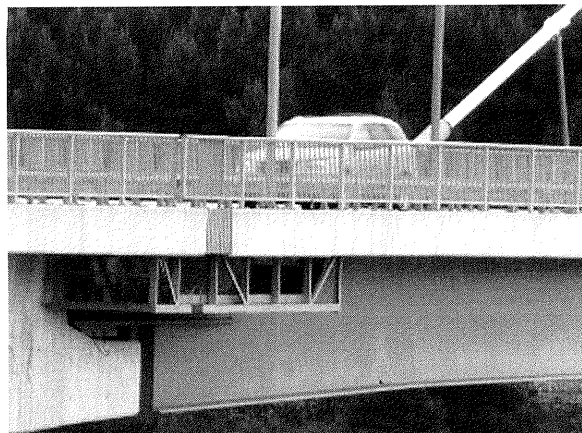


写真-11 中央ヒンジ部（側面）



写真-12 中央ヒンジ部（下面）

- ② 斜張橋部側のアンカー橋台は、ラーメン構造となっており、2主鈑桁とアンカー橋台は剛結されている。そのため、鋼斜張橋部側の橋軸方向変位は、中央ヒンジで吸収している。



写真-13 鋼斜張橋部側のアンカー橋台

- ③ PC橋部側の橋台は、PC桁部と橋台の接合部には橋軸方向にタンパーを設置されている。支承はパット沓であると推測される。



写真-14 PC橋部側の橋台

- ④ 中央径間側のケーブルは、ファン形式で10本張られ、側径間側のケーブルは、ハープ形式の6本とファン形式の3本で張られている。上段のハープ形式6本は、アンカー橋台に定着され、下段のファン形式3本は、主桁に定着されている。完成時には設置されていなかったケーブル制震装置が、設置されていた。

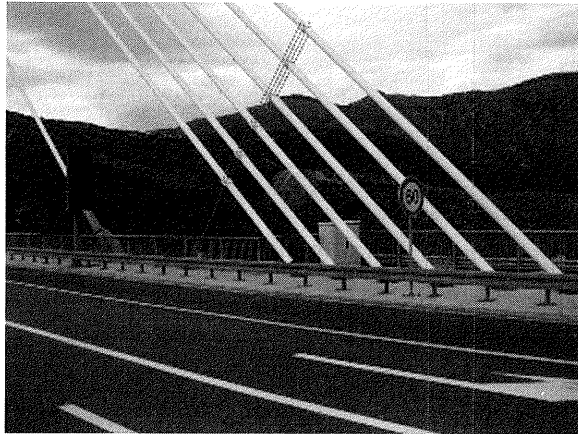


写真-15 側径間側のケーブル

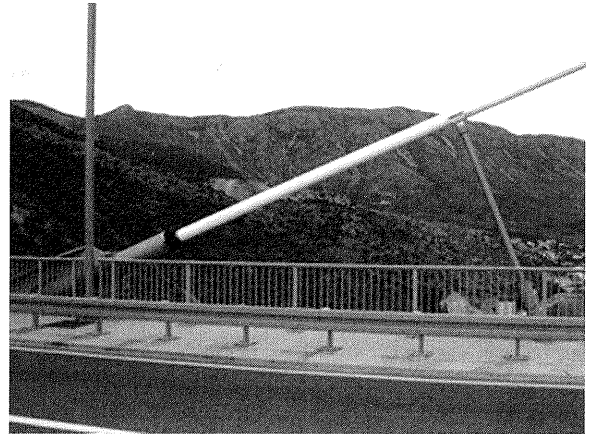


写真-16 制震装置の側面

本橋の平面線形は、南側は直線であるが、北側の一部に曲線が含まれている。そのため、直線区間を斜張橋とし曲線区間をPCラーメン橋とした複合橋が計画されたと推測される。

鋼斜張橋部の主桁には、維持管理に必要と思われる上部工検査路は確認できなかった。また、ケーブル定着部のコンクリートは、場所によってはかなり大きなひび割れが確認された。

本橋の建設にあたっては、「世界文化遺産を所有する街には、斜張橋よりアーチ橋のほうが景観に調和する」との要望もあったらしいが、完成した本橋は見事に周辺景観と融合しており、ドゥブロヴニクのモニュメント的な存在となっている。なお、内戦（1991年～1995年）の影響で本橋の建設が遅れを生じた。

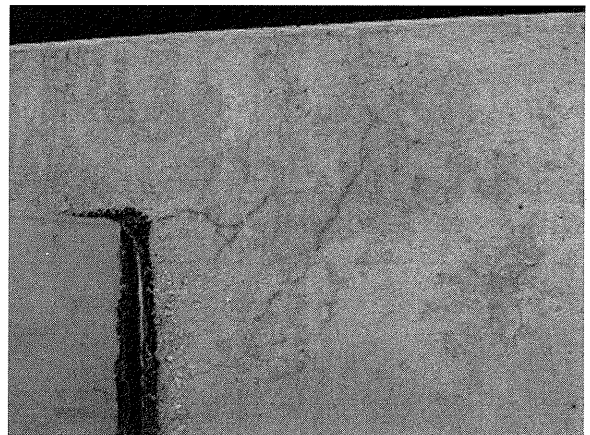


写真-17 ケーブル定着部付近のひび割れ

4.4 モスタル (Mostar) 橋

モスタル橋は、ボスニア・ヘルツェゴビナのモスタルのネレトヴァ (Neretva) 川の渓谷が最も狭くなる場所に架けられている。古くは木の吊り橋であったらしいがオスマン・トルコ時代の1566年にトルコ人技術者により石造アーチ橋に架け替えられた。橋長は29mで、水面から高さは約20mである。その景観は、写真-18のように純白のアーチラインを青いネレトヴァ川の水面に映し出して周囲の景観と見事に調和しアーティスティックな美しさを演出している。観光名所である本橋は、橋上から川に飛び込むパフォーマンスが有名である。しかし、1993年、内戦中の砲撃により落橋し、400年以上続いたその姿をひと時の間消した。その後、橋はユネス

コ、世界銀行、民間からの募金などの支援により2004年に復元された。復元にあたっては破壊され落下した石をネレトヴァ川から拾い上げ、足りない石は建設時と同じ石切場から補われた。

モスタル市街には、写真-21のように、いたるところに現在も内戦の傷跡が生々しく残されており、痛々しく感じられた。復元された橋の袂には「don't forget '93」(写真-22)と書かれた小さな石碑が置かれていた。



写真-18 モスタル橋

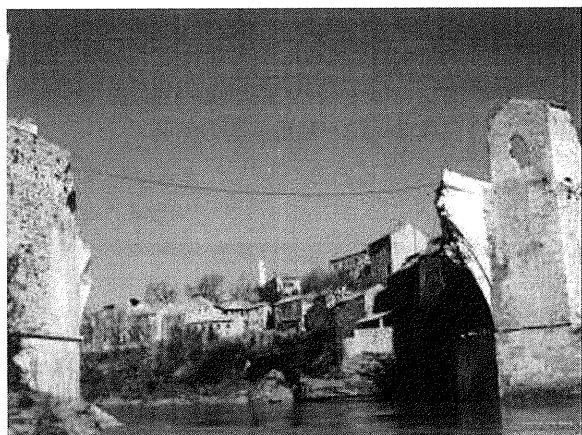


写真-19 砲撃により破壊されたモスタル橋



写真-20 橋上からの飛び込み



写真-21 モスタル市街(内戦の傷跡)



写真-22 橋の袂の石碑

4.5 トロギールの跳開橋（チオヴォ橋）

クロアチア南部アドリア海沿岸のクロアチア第3の都市スピット（Sprit）から20kmほどに位置するトロギールは、東西500m、南北300mの小さな島である。本土とは小さな橋で結ばれていて、かつては島全体が城壁で囲まれていた。ギリシャ人が紀元前380年頃に植民地として発展させ、現在は世界遺産に登録されている。

トロギール旧市街とその向かいにあるチオヴォ（Ciovo）島との間にはチオヴォ橋が架けられている。本橋は3径間からなり、両側径間は石造アーチ橋、中央径間は鋼製2主鈑桁構造となっている。中央径間の鋼製桁については溶接構造となっておりこの部分はあまり古くはない建造と思われる。本橋の特徴はこの鋼製桁が船舶航行時には跳ね上がる跳開橋であることである。

桁の跳ね上げは橋の側面に設けられた手動ハンドルによると思われるが、近年はあまり跳ね上げられることがないのであろうか、ハンドル部分の歯車は塗装が剥がれることなく歯車が回転した痕跡はなかった。跳開橋は日本では東京の勝鬃橋が、世界的にはロンドンのタワーブリッジがよく知られているところである。

中央径間橋面に立つと鋼製桁同士の継ぎ目部分を車両が通る度にガタンガタンという衝撃音と振動が発生しており耐久性に不安を感じた。

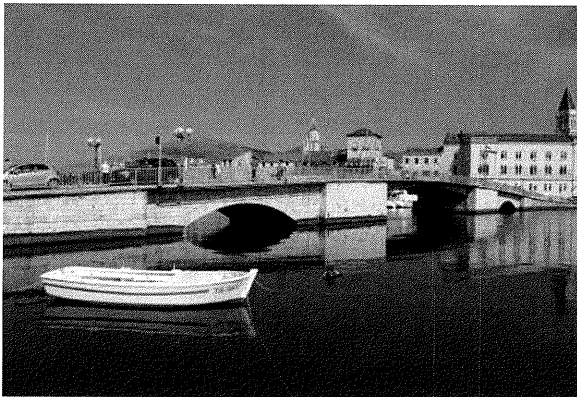


写真-23 チオヴォ橋 全景

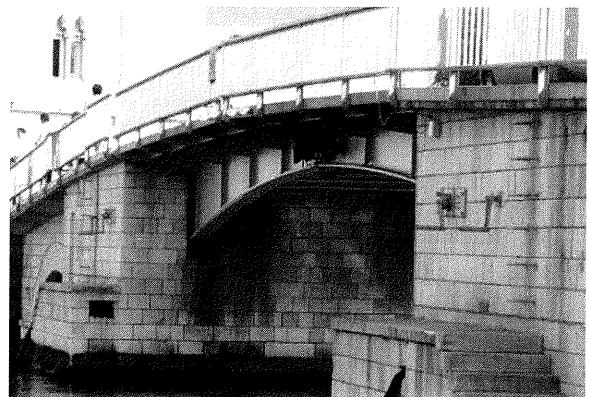


写真-24 チオヴォ橋 中央径間

4.6 カーク橋

カーク（Krk）島はアドリア海沿岸北部に位置するクロアチア最大の島で、古い歴史を有するとともにリゾートスポットでもある。カーク橋は、本土とカーク島を結ぶアクセス道路として1976年～1980年にかけて建設された鉄筋コンクリートアーチ橋である。アクセス道路の長さは1430mであるが、中間にはサンマルコ（St.Marko）島が存在し、本土とサンマルコ島およびサンマルコ島とカーク島には、それぞれ鉄筋コンクリートアーチ橋が架けられている。橋名はチトー橋、カーク橋、サンマルコ橋と変化したと聞いているが、カーク橋と呼ぶのが一般的らしいので、ここではカーク橋と記す。

本土とサンマルコ島およびサンマルコ島とカーク島を結ぶアーチ橋の支間は、それぞれ390m（大アーチ橋）と244m（小アーチ橋）、大アーチ橋のライズはそれぞれ67mと54mであり、当時の鉄筋コンクリートのアーチ橋としては世界最大であった。写真-25に示すようにカーク島側（左側）の小アーチ橋の頂点は少し窪んでいるように、本土側の大アーチ橋はせり上がっているように見える。なお、このアーチ橋の頂点の高さが、通行する船舶の仕様あるいはアーチ支間とアーチライズの関係で決められたかは調査した範囲では不明である。

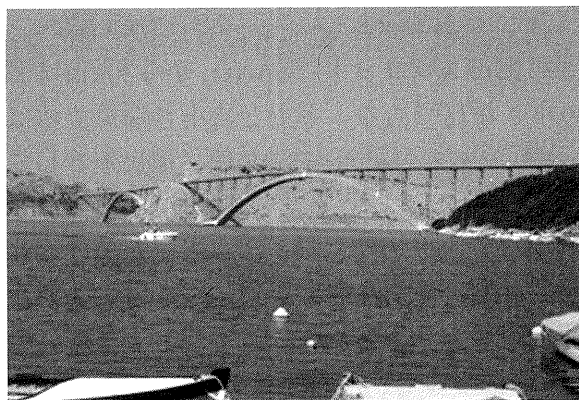


写真-25 カーク橋 全景

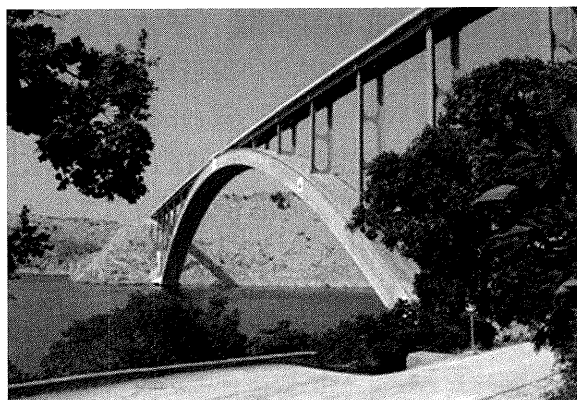


写真-26 カーク橋 大アーチ橋

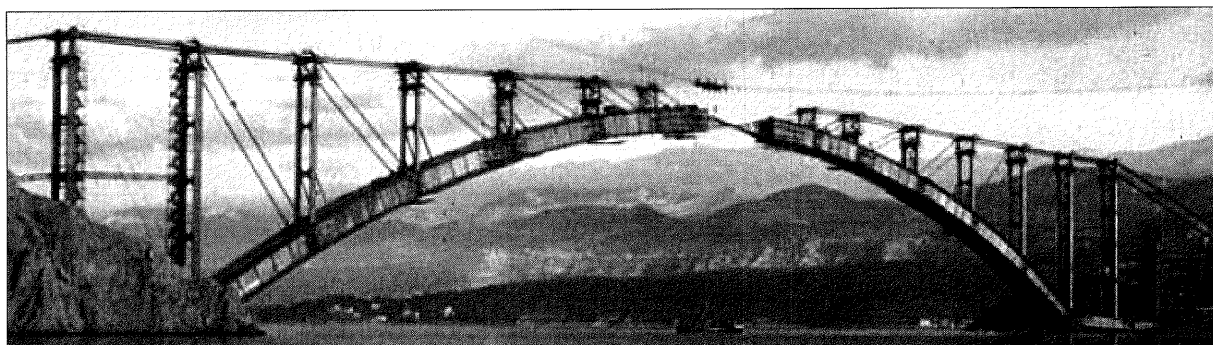


写真-27 架設状況

カーク橋は張出し工法によって建設された。この張出し工法は、左右のアーチを独立して組み立てるために考案された新しい方法であり、片持ちのトラス梁を形成するために橋桁を支える鉄筋コンクリート柱を圧縮材に利用し、引張力が作用する上弦材と斜材に仮設の鋼材を使用した。

また、アーチ部分は中空のプレキャストコンクリート部材であり、3つに分割して製作された。これらは場所打ちコンクリートにより一体化され、アーチが形成された後に仮設の上弦材と斜材が撤去された。

写真-28はカーク橋のスラブ下面の写真である。クロアチアにおける一般のPC橋においては、横補剛としての横桁が設けられていなかった。しかし、カーク橋においてはプレキャストの3主桁間に横桁が設けられていた。

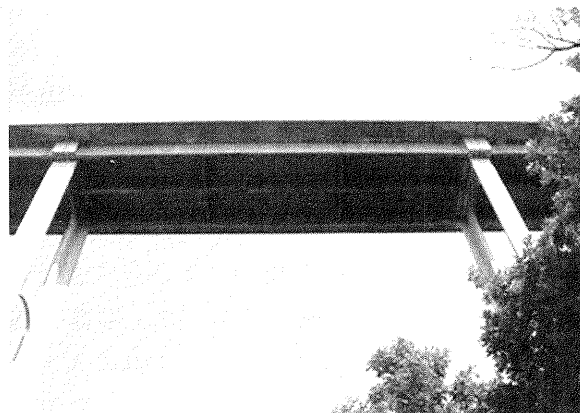


写真-28 スラブ下面

写真-29は主桁の桁かかり部と雨水処理（雨とい）の状況である。写真に示すように梁には30cm程度の切り欠きが設けられ、梁は柱に単に架けられているような状況であった。特に落橋防止の措置などは施されていないようであった。また、雨水処理としては、排水管がスラブを貫通して設けられているのみであった。

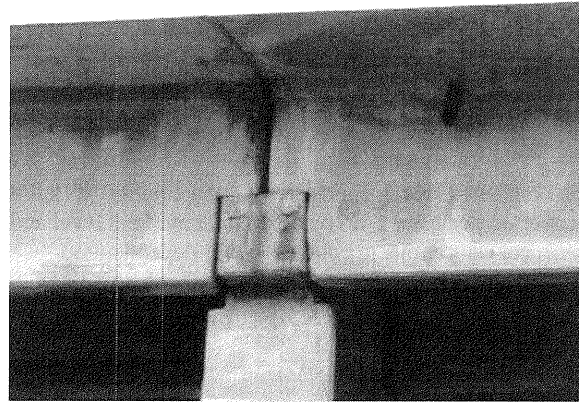


写真-29 桁かかり部

fibシンポジウムにおいて、カーク橋の劣化状況と補修についての報告があった^{4), 5)}。その概要を紹介する。

アドリア海は他の海に比べ塩分濃度が高く、北東風のBoraと呼ばれる強烈な季節風が吹くことから、アドリア海沿岸地域は橋梁にとって非常に厳しい環境条件にある。しかし、カーク橋の設計においては、当時としては例外的な長支間化を実現するために、死荷重をできる限り小さくする必要があったため、このような厳しい環境条件にも関わらず、主要部材のコンクリートかぶり厚さを25mmとした。

実橋の調査結果によると、最初の10年におけるかぶりコンクリートへの塩化物の浸入は非常に遅く、主筋はまだ腐食していなかった。この要因として、非常に良い品質のコンクリートと高炉スラグを加えたセメントの使用によると推察されている。なお、使用したセメントは、約20%の高炉スラグを含んでおり、現在のコンクリート圧縮強度は約75MPaである。しかし、図-4に示すように、塩化物の浸入は確実に進行しており、コンクリートの剥離、鉄筋の腐食が顕著となり補修が急務となった。

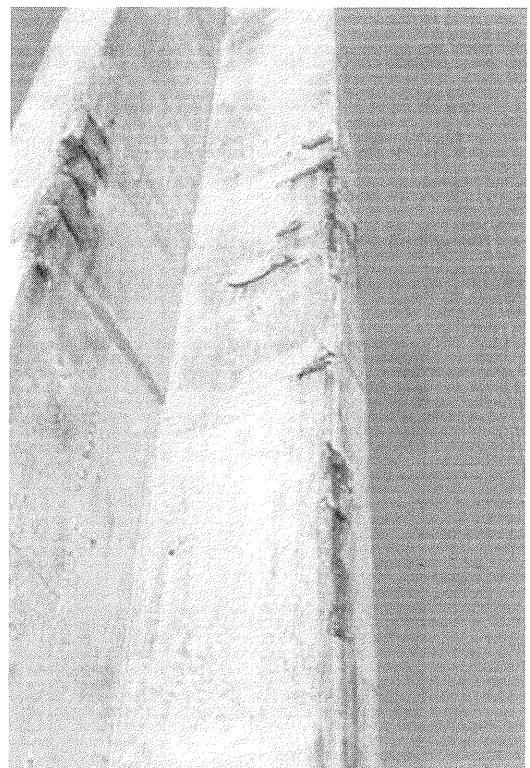


写真-30 脚柱損傷状況

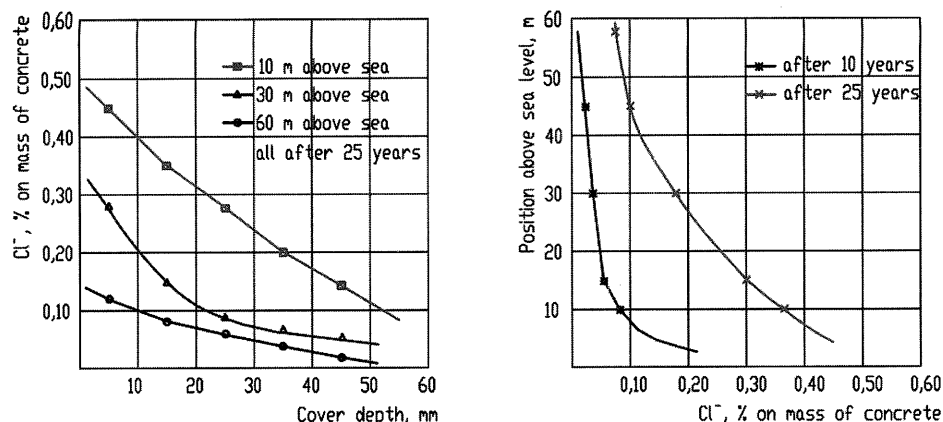


Figure 3. Chloride concentrations in concrete cover on column 18 (left dependent on the depth of concrete cover on positions 10, 30 and 60 m above seal level and the right average concentrations in concrete cover dependent on the position above sea level after 10 and 25 years)

図-4 塩化物侵入測定結果

環境条件のより厳しい小アーチ橋から補修作業が行なわれている。小アーチ橋の補修方法は、以下のとおりである。

- ① カーク島アプローチ部の全ての脚柱については、海面から25mまでは30mm厚の、それ以上の部分は20mm厚の高品質モルタルを吹付ける（乾式）。とする。モルタル圧縮強度は45Mpaとし、旧コンクリートとの付着強度は2 Mpa以上とする。さらに表面を厚さ1.5mmの弾性プラスチックポリマーで被覆する。
- ② 海面から25mまでのアーチ部材とアーチヒール部については、旧かぶりコンクリートを高圧ウォーターポンプにより除去し、50mm厚の高品質モルタルを吹付ける（湿式）。モルタル圧縮強度は50Mpa、旧コンクリートとの付着強度は2 Mpa以上とし、1.5mmの弾性プラスチックポリマーで被覆する。
- ③ 海面から25m以上のアーチ部材と床版下面は、高品質モルタルにより部分的に補修する。橋の上からの補修および補強は写真-31のような方法で行われている。



写真-31 補修・補強施工状況

写真-32は、視察時に観察された道路脇に置かれていた施工機械である。

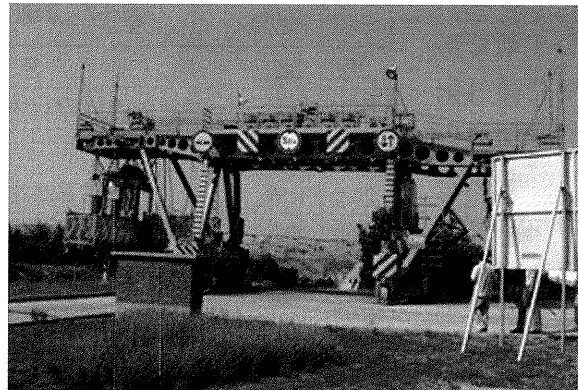


写真-32 補修・補強施工機械

現在、小アーチ橋の補修が完了し、大アーチ橋の補修が始まっている。大アーチ橋のアーチアバット部は斜材と水平材の2つの部材からなり、斜材は水面下19mの岩盤は鉛直力を伝達する構造となっている。この部材には電気防食を施工する計画となっている。

なお、補修作業中および補修完了後の変形をモニタリングするための光ファイバーセンサーが設置される予定である。

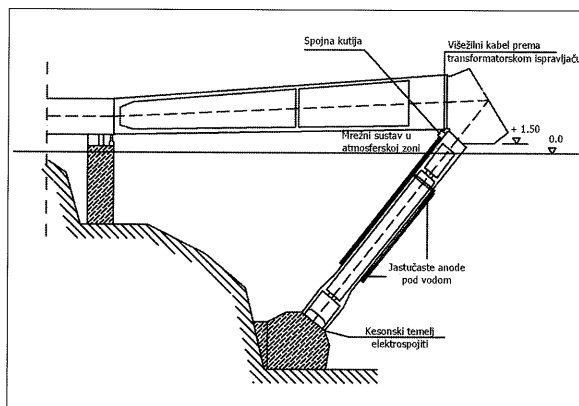


図-5 大アーチ橋アバット部補修方法

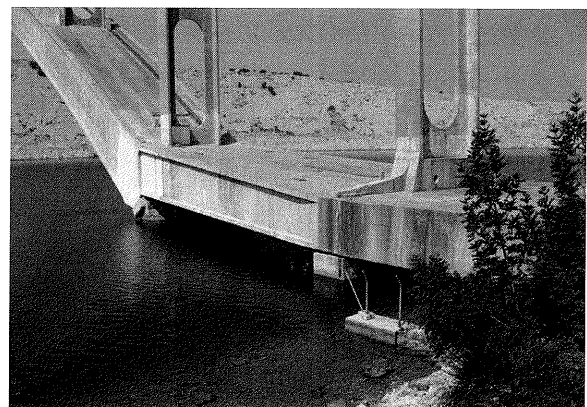


写真-33 大アーチ橋アバット部

なお、カーク橋は有料道路で通行料は30kn～120kn（600円～2400円）、カーク島に渡る時に料金を支払うシステムになっている。

KRČKI MOST CJENIK (HRK)				
I	II	III	IV	
1. kategorija	2. kategorija	3. kategorija	4. kategorija	
30 kn	60 kn	70 kn	120 kn	

写真-34 カーク橋の通行料表

5. おわりに

クロアチアは、内陸部、アドリア海沿岸部とも非常に美しい土地であるとともに、食文化や歴史に諸外国の様々な影響を受け継ぐ興味深い国である印象を受けた。特に、シンポジウムの開催地であるドゥブロヴニクのアドリア海と調和する旧市街の美しさは、最も印象深い景観のひとつであった。また、高速道路建設などの社会資本整備が拡充しつつあり、日本の高度成長期に似た活気が感じられた。

今回、*fib*シンポジウムに参加し諸外国の技術動向に触れるとともに、我が国のプレストレストコンクリート技術レベルを認識できたことはたいへん有意義な経験であった。

本文は、(社)プレストレストコンクリート技術協会主催の「2007 *fib*シンポジウム出席ならびにクロアチア橋梁調査」の報告書に基づいて作成した。本報告を作成するにあたりご協力をいただいた表-7に示す調査団の皆様に感謝の意を表します。

表-7 調査団名簿

氏 名	所 属
池田 尚治	(株)複合研究機構(本調査団長)
川口 直能	国士舘大学 理工学部 都市ランドスケープ学系
佐々木一哉	財団法人 首都高速道路技術センター 構造管理部
小川 和也	財団法人 海洋架橋・橋梁調査会 技術部
唐木 正史	新構造技術(株) 北陸支店 設計部
古村 豊 ^{※2}	(株)ピーエス三菱 東北支店 土木統括部 技術部
秦 栄	川田建設(株) 東京支店 事業企画部
須田 泰弘	(株)安部日鋼工業 本社 技術工務本部
細井 清剛	神鋼鋼線工業(株) 技術部 PC鋼線技術部
村田 義行	高周波熱錬(株) 製品事業部 開発企画部
山崎 淳 ^{※1}	日本大学 理工学部 土木工学科 <i>fib</i> 理事会出席
角谷 努 ^{※1}	(株)ハナミズキ・ブリッジ・プランニング <i>fib</i> メダル受賞者
春日 昭夫 ^{※1 ※2}	三井住友建設(株) 土木管理本部 PC設計部
小倉 篤	(株)グローリアツーリスト

※1：シンポジウム参加のみ

※2：シンポジウム発表者



写真-35 調査団一行 (*fib*会場前にて)

参考文献

- 1) 池田尚治：*fib*2007シンポジウム（ドゥブロブニク）とマルコポーロの国クロアチア、コンクリートテクノ、Vol.26、No.7、2007
- 2) 古村豊、秦栄、須田泰弘、山崎淳：*fib*シンポジウム2007とクロアチアにおける橋梁調査報告、プレストレストコンクリート、Vol.49、No.5、2007
- 3) J.Radic, J.Bleiziffer, Z.Zderic, Z.Savor, D.Tkalcic : CONCRETE STRUCTURE IN CROATIA 2002-2006
- 4) J.Beslac, D.Tkalcic, E.Barisic : PRESENT STATE OF KRK BRIDGE REPAIR AND PROTECTION, *fib* Symposium Dubrovnik 2007 Proceedings 'Concrete structures-Stimulators of Development' 2007
- 5) K.Mavar, D.Sekulic, D.Wurth : MONITORING OF KRK BRIDGE COLUMNS INTERFEROMETRIC FIBRE OPTIC SENSORS, *fib* Symposium Dubrovnik 2007 Proceedings 'Concrete structures-Stimulators of Development' 2007

PC建築構造の原点に還り、将来を見る

大阪大学大学院教授・本協会副会長 大 野 義 照 (株)大林組東北支店建築工事部技術グループ長 北 川 公 章
京都大学大学院教授・本協会理事 渡 邊 史 夫 (株)ジェーエスディー 加 藤 元 樹
京都大学大学院准教授 西 山 峰 広 (株)ジェーエスディー 照 井 健 二
(独)建築研究所構造研究グループ主任研究員 加 藤 博 人

1. PC構造の原理と歴史

20世紀におけるコンクリート系構造の大きな技術革新にプレストレストコンクリート（PC）の発明・実用化がある。コンクリートの引張強度は圧縮強度の1/10と極めて小さいと共に、一度引張応力によってひび割れが発生すると再び引張応力には抵抗できない。この欠点を、鉄筋によって補うものとして鉄筋コンクリート（RC）が発明されたが、ひび割れ発生は避けられない。また、これに付随して大スパン構造では撓みが大きくなりRCでは対応できない。このひび割れ発生を防止するために、外力によってコンクリートに発生する引張応力を、あらかじめコンクリートに与えられた元圧縮応力によって打ち消すのが、プレストレストコンクリートの基本原理である。元圧縮応力は、緊張材（Tendon）と呼ばれる高強度より線（PC Strand）又は高強度棒鋼（PC Bar）によって、梁、柱及び壁等の構造部材を絞め付けることによって与えられる。

この原理は、19世紀末期から20世紀初頭にヨーロッパ及びアメリカにおいて確立されていたが、実際の構造物に適用するには至らなかった。その理由は、緊張材によって導入されたプレストレス力が、コンクリートのクリープと乾燥収縮歪みによって時間の経過と共に喪失してしまうためであった。緊張材応力で200N/mm²のプレストレスを導入しても、コンクリートが0.1%収縮すれば、その応力はゼロになってしまう。すなわち、十分な大きさの初期緊張材応力でもってプレストレスを導入しないと効果はない。たとえば、初期の緊張材プレストレス応力が1000N/mm²程度あれば、たとえ、200N/mm²失われても、800N/mm²残存し、十分にプレストレスの効果を保持出来る。その為には引張強度の大きなPC鋼材が必要不可欠であった。一方、コンクリートのクリープと乾燥収縮歪みを抑制する必要もあった。すなわち、PCの発達が阻害された原因は、構造形式に有るのではなく、材料そのものにあった。これらの問題を解決し実用化したのが、フレシネーであり、1928年高強度鋼材及び鋼材の定着端をセットで提案した。日本では、昭和31年5月まで、その技術に対して原理特許としての工業権が与えられていた。

わが国におけるPCに関する研究は、昭和16年に運輸省鉄道技術研究所でプレテンションで始まり、同時期に福井大学吉田宏彦教授も同様の研究を行っている。しかし、これら研究は第二次世界大戦で中断し、真の研究推進及び実用化は戦後となった。戦後、軍需資材として大量に余ったピアノ線をPCに用いて、昭和21年に商工省鉱山局に設けられた鋼弦コンクリート小委員会が研究を開始し、多くの研究・教育機関が参加した。その後、高強度より線（PC Strand）又は高強度棒鋼（PC Bar）を用いたPCに関する研究が推進され実用化へと進んだ。以上の歴

史的背景は故六車熙博士著「プレストレストコンクリート」(コロナ社)に詳しく記述されている。

建築では、昭和32年5月に建設省告示が出され、さらに、昭和36年に、日本建築学会よりPC設計施工規準・同解説が学術的研究成果を盛り込んで出版され(現在は改訂を重ね1998年版となっている)、広くPCが用いられるようになった。特に、大スパン構造への適用が多く、昭和30年代には数多くのボーリング場建物がPCによって建設された。

その後、PCの典型的応用である大スパン構造のみでなく、テンション構造、テンションリング構造、ポストテンション工法によるプレキャスト構造(圧着接合)、プレストレスト鉄筋コンクリート構造(PRC)及びPC床板等に幅広く応用されている。特にプレキャスト構造に用いられる圧着接合は、RCプレキャスト構造の接合部と比べて単純明快な接合方法であり、現場でのコンクリート打設が無いことと接合面応力伝達機構の合理性の故に幅広く用いられている。このように、現在のPCに関する技術水準は極めて高く、特に耐震構造の開発に関しては、世界をリードする立場にあり、故坂静雄京大名誉教授、故六車熙京大名誉教授及び鈴木計夫阪大名誉教授等多くの先人の努力の賜物である。PCの耐震性は、兵庫県南部地震時に激震地区に多くのPC造建物があつたにもかかわらず殆ど無被害であつたことより証明された。

以下に、PC構造の発展でのトピックスを取り上げる。

1) PRC構造

PC構造は、本来の目的がコンクリートに発生する引張応力を元圧縮応力によって打ち消す構造形式である。従って、初期の開発・実用段階では常時荷重の下で一切引張応力の発生を許さないフルプレストレスが主流であつた。しかし、PCは、プレストレスの大きさを徐々に減じ、無応力鉄筋(普通鉄筋)を徐々に増加させていくと最後にはRCとなるように、プレストレスのレベルを変えることによって、フルプレストレスからRCまで変化する。このフルプレストレスとRCの間に位置する構造形式をPRCと呼び、プレストレスレベルの選択により曲げひび割れ幅を自由に制御できる。このPRCの特徴を生かすために、日本建築学会では「プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説」を1986年に出版している。そこでは、ひび割れ幅制御設計が詳細に記述されており、以後ひび割れ幅制御を目的としたPRC構造が数多く実用化されている。

2) アンボンドPC構造¹⁾

PC構造の主たるものは、あらかじめ緊張されたPC鋼材を型枠内に配置し、コンクリートを打設しその硬化を待って緊張材を切断するプレテンション方式と、型枠内にダクト(シース)を配置しコンクリートの硬化後にダクト内に緊張材を挿入しプレストレスを導入するポストテンション方式である。実際構造では、ポストテンション方式が最も広く用いられているが、耐久性と付着性能の確保を目的に、プレストレス導入後にダクトと緊張材の間の空隙を埋めるためにセメントペーストもしくはモルタルを注入(グラウトと呼ぶ)しなければならない。この施工上の煩雑さを避けるために、アンボンド鋼材が開発された。これはプラスチックパイプの中に緊張材を挿入し、防錆及び可動性を確保するためにグリースを注入するもの(アスファルトを塗布したもの等もある)で、型枠内に配置しコンクリートが硬化した後プレストレスを導入するものである。グラウト作業が不必要なこと及び防錆が完全なことより、床スラブ、小梁及び軽微なプレストレスのPRC部材に広く用いられている。これまで緊張材が地震荷重による

繰返し載荷で破断した場合の結果の重大さの故に、耐震部材への使用は禁じられていたが、平成19年6月の告示の改正により、限界耐力計算によって耐力と変形を確認し、万一鋼材が破断した場合にも常時荷重は支持できるようにすることで、耐震部材への適用も可能になりその発展が期待される。

3) 後硬化型アンボンドPC構造

通常のアンボンド鋼材に用いるグリースの代わりに、ある時間が経過した後硬化するエポキシ系樹脂を緊張材周囲に塗布し、ポリエチンシースで被覆されたPC鋼材（プレグラウト鋼材）を用いる後硬化型アンボンドPC構造が実用化されている。これは、プレストレス導入まではアンボンド工法と同じ簡便さであり、エポキシ系樹脂が硬化した後は通常のポストテンション工法と同じ構造性能を有するものである。耐火性に関する注意は必要であるが今後発展の期待される構造である。

4) PC技術を用いた建築物の耐震改修²⁾

耐震改修で求められるのは、耐震性の向上が第一ではあるが、耐震性向上のために建築としてのその他の機能が大幅に低下することは避けなくてはならない。工期や改修コストの他に、工事中も建物が使用できる「居ながら施工」が可能かどうか、なども工法選択要因である。これらの条件に適合するような様々な工法が開発されている。PC技術を利用した工法としてはプレキャストコンクリートのフレームを既存の躯体に圧着接合する工法、プレストレスを導入したブレースを用いる工法、せん断耐力の不足する柱をPC鋼材で補強する工法などが開発されている。これらの工法におけるPC技術は「緊張材にてあらかじめ圧縮応力度を与えてひび割れの発生を防ぎ大スパンを可能にする」というPCの基本技術とは別に、圧着の技術や引張材へのプレストレス導入、高強度PC鋼材の活用などPC技術の新たな利用法として開発されたものである。

日本におけるPC建築の歴史³⁾

年次	PC建築物	PC技術・法令・規準等
1932(昭7)		・フレシネーが日本でPCの基本特許取得
1951(昭26)	・小松市市庁舎地下室床版(PCの建築物適用,国内第一号)	
	・長生橋(プレテンション橋)	
1954(昭29)	・浜松町駅上屋(プレキャストPC建築の国内第一号)	・プレストレストコンクリート設計施工指針(土木学会)
1957(昭32)	・南淡町庁舎(重層不静定建築の国内第一号)	・B.B.R.V工法(スイス)導入
1958(昭33)	・新宿信号所(プレキャストPC造)	
1960(昭35)		・建設省告示223号
1961(昭36)		・プレストレストコンクリート設計施工規準(建築学会)
1973(昭48)	・郵政省大阪倉庫(国内初のPCフラットスラブ構造)	・建設省告示949号
1975(昭50)		・プレストレストコンクリート設計施工規準(建築学会)の大改定(アンボンド工法の導入)
1979(昭54)	・福岡歯科大学(PC高層建築)	
1980(昭55)	・近畿郵政局資材部倉庫(アンボンドPCケーブル使用)	・新耐震設計法施行
1981(昭56)		・建設省告示1320号
1983(昭58)		・プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計施工指針(建築学会)
1986(昭61)		・プレストレストコンクリート合成床版設計施工規準(建築学会)
1994(平6)		・建設省告示1320号改正
2007(平19)		

参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会、プレストレストコンクリートの新たなる発展
－21世紀－、第30回PC技術協会、平成14年2月、pp.21-56
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会、PC技術の進歩とその応用、第34回PC技術協会、
平成18年2月、pp.37-72
- 3) (社)プレストレストコンクリート技術協会、歴史的にみたプレストレストコンクリート建築
と技術、技報堂出版、2002年11月

2. 法規、設計法の変遷

2007年6月20日にPC造に関する建設省告示1320号が改正された。旧告示1320号が制定されたのは1983年なので、約24年ぶりの本格的な改正である。今回の改正は、2005年に起きた耐震設計偽装問題をきっかけとして発覚した不適切な構造設計の実態(サンプル調査の約1/3が該当)を受けて、構造計算方法に関する規定を明確にすることを目的とした建築基準法、並びに関連法令の見直し作業と同じタイミングで行われた。

PC造告示の主要な改正点は、限界耐力計算法の導入、主要構造部材へのアンボンドPC鋼材の使用を認めること、施行令等関連規定との整合を図ること等である。

建築基準法、並びに施行令では、性能規定化を指向した改正が2001年に既に行われており、PC造の告示改正は遅ればせながらの実施となった。この時の改正の主旨は、建築物の仕様を細かく規定する従前の体系を改め、“一定の性能さえ満たせば、多様な材料、設備、構造方法を採用できる”ことを目指したものであった。しかし、細かな構造規定を外し、設計の自由度を高めることを意図した改正が適正に運用されず、初めに触れた一部の設計者による“不適切な構造設計”を誘発する原因となった可能性もある。2007年の一連の法改正は、このような流れの中で構造計算に係わる規定を明確にし、建築確認の厳格化を求める社会的背景から実施された。

PC造建物に目を転じれば、プレストレス力を導入することで特殊な構造物と受け取られる嫌いもあり、これまで一般の設計者があまり手を出さず、PC専門業者によって設計、並びに施工が行われる傾向が強かったことも事実である。このことは、PC造建築物の普及という面ではマイナス要因であったが、質の高い建築物が実現されることに繋がった。1978年の宮城県沖地震や1995年の兵庫県南部地震でも、PC造建築物の被害は他構造に比べて非常に少なかったことでも証明されている。

PC造建築物に対する最初の法的規制は、1960年(昭和35年)の建設省告示第223号で、当時一般的であった短期許容応力度設計法の代わりに終局強度型設計法が導入された。本設計法の特徴は、地震時に対しては $1.2(G+P) + 1.5K$ で与えられる荷重組合せに対して、部材の曲げ終局強度が下回らないことを確かめるものであった。ここに、G：固定荷重、P：積載荷重、K：地震荷重。また、PC造建築物は大スパンで大きな積載荷重が載るような用途に用いられることから、常時に対する荷重組合わせ $1.2G + 2.4P$ 、および、 $2.0(G+P)$ のいずれに対しても部材曲げ耐力が下回らないことを検討することが要求されていた。実際、PC造の低層建物では、常時に対する荷重組合わせで断面が決定される場合も多いといわれている。RC造などの他構造に比べて大きな設計荷重が要求されていたこと、常時に対する荷重組合わせについても設計を行っていたことは特徴的である。さらに、建物の高さは16m以下、かつ4層以下と建物規模に対する制限も厳しく設定されていた。この時のコンクリート設計基準強度は、ポストテンション方

式で 30N/mm^2 以上、プレテンション方式では 40N/mm^2 以上とされた。

1973年(昭和48年)にはPC造の告示が改正され(建設省告示第949号)、以前の高さ制限16mが撤廃され、建物高さ31mまでの建設が認められるようになった。地震に対する設計用荷重の組合わせとして、曲げに対して $G+P+1.5K$ 、せん断に対して $G+P+2.0K$ と改訂された。以前の長期荷重に対する応力割増し係数1.2が1.0に低減され、一方、せん断については $2.0K$ に対して部材設計を行うことなど、部材をせん断破壊させないための設計の考え方がはっきりと示されている。また、この時は1968年(昭和43年)の十勝沖地震の被害によって明らかになったRC造短柱のせん断破壊を防止するための帯筋に関する構造規定(1970年の施行令改正の内容)も盛り込まれている。常時に対する荷重組合わせは、告示第223号と同等であった。

1981年には、耐震設計の大きなターニングポイントとなった施行令改正、いわゆる“新耐震設計法”の導入が行われている。新耐震設計法では、地震荷重に対する設計が1次設計(短期許容応力度設計)と2次設計(保有水平耐力の確認)の2段階となり、建築物の動的効果を加味した外力設定などが導入された。それに合わせてPC造告示1320号が、1983年(昭和58年)に制定され、2次設計における保有水平耐力の確認と同等な設計法として、従来からの終局強度型設計は設計ルート3aとして位置付けられた。ルート3aでは、RC造など他構造と併用する場合も含めて、高さ31m以下のPC造建築物に終局強度型設計法が適用可能とされた。保有水平耐力の確認はルート3bと名付けられ、高さ31m以下の建築物で選択可能であり、建物高さ31mを超える場合には、本設計法によることが規定された(ただし、高さ60m以下)。ルート3aでは、地震に対する設計荷重は $G+P+1.5 \cdot F_{es} \cdot K$ とされた。 F_{es} は、剛性率、偏心率による割増し係数。また、常時に対する荷重組合わせは、 $1.2G+2.0P$ 、および、 $1.7(G+P)$ と改定された。PC構造では、地震荷重に対しては、従来、標準ベースシア係数にして0.3($=0.2 \times 1.5$)に対する弾性応力を用いて終局強度型設計を行ってきたので、新耐震設計法を先取りしていたといえる。また、荷重係数の値は修正されてきたが、地震荷重ばかりでなく常時荷重に対する終局強度の検討も行ってきたことは、最初の告示から一貫している。

告示1320号では、プレストレスレベルを低く抑えたプレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)構造やアンボンド工法も適用範囲に盛り込まれた。PRC造に対するコンクリートの設計基準強度は、 24N/mm^2 以上(特別な検討による場合には、 21N/mm^2 以上)である。第1章でも述べられているように、PC造の開発当初は常時荷重状態で部材に引張応力が発生することを許容しないフルプレストレスの設計が主流であったが、一定の条件の下で引張応力の発生、あるいはひび割れの発生を許容するPRC造が導入され、設計の自由度が広がり、使いやすいPC造としてPRC造建築物が数多く建築されるようになった。

アンボンド工法は、スラブや小梁に使用範囲を限定して認められた。その理由として、アンボンドPC造部材が、地震時に予測される正負の繰返し曲げ応力を受ける場合の定着部の安全性に関して、十分な信頼性を得るに到っていないこと、調査研究資料が整備されていないことが挙げられていた。アンボンド工法は、PC造ばかりでなくRC造においても、少しスパンの大きいスラブのたわみやひび割れ防止を目的として、盛んに使用されるようになった。

プレキャスト部材をプレストレスによって圧着接合し剛接架構とする構法は、PC造の導入当初から行われてきたものであるが、告示1320号においても引き続き認められている。

そして今回、2007年のPC造告示改正である。ルート3aなどの設計法は、そのまま踏襲され、加えて高さ60m以下のPC造建築物の設計にも限界耐力計算法が追加された。限界耐力計算法は、

地震応答スペクトルと、建物を等価1質点系モデルに置換した荷重-変位関係の比較から建物の応答値(耐力と変形)を評価する方法で、動的解析によらずに比較的簡便な方法で地震時応答に対する設計が可能になる。しかし、PC造の場合、フルプレストレスからRC造に近いPRC造まで復元力特性が大きく変化するため、設計においていかに適切にその特性を反映できるかが課題である。告示では、PC鋼材と普通強度鉄筋が部材の復元力特性に及ぼす影響(プレストレスレベル、 λ)を評価する式を導入している。限界耐力計算では、中小地震に対して建物の大幅な補修を必要としない状態に留めること(損傷限界)、大地震に対しても崩壊や倒壊によって人命を損なうような状態に到らないこと(安全限界)の2つの限界状態について検討を行うことになっている。本計算法による場合は、PC鋼材や普通強度鉄筋に対するかぶり厚さなどの一部の規定(耐久性等関係規定)を除いて、仕様規定が適用除外される。

もう一つの改正点は、アンボンドPC鋼材の使用を大梁や柱などの主要構造部材にまで拡大したことである。条件として、限界耐力計算法によって耐力と変形の両方を確認することが求められる。(時刻歴応答解析等の方法によって、変形を予測する設計も勿論可能である。ただし、大臣認定を受ける必要がある。)併せて、アンボンドPC鋼材が破断した場合においても不測の事態を避けるため、付着のあるPC鋼材あるいは普通鉄筋と併用し、少なくとも固定荷重と積載荷重を保持できるようにする等、最小限のバックアップシステムを設けておくことなどが求められている。

その他、従来のコンクリート設計基準強度の上限(場所打ち: 54N/mm^2 、プレキャスト: 63N/mm^2)が撤廃され、高強度コンクリートの使用も可能となった。ただし、設計式や評価法の適用範囲が、高強度コンクリートまでカバーしていないものもあるので、注意が必要である。このように、今回の改正では従来の設計ルートは残しながら、性能設計に繋がる道筋が整ったことになり、PC造の設計自由度が拡大することを期待したい。

告示等の法令では特別な規定は設けられていないが、既存建物の耐震補強にPC技術が使用される例も多くなっている。補強用部材をPC造で設計する例や、PC鋼材によって既存建物に部材を圧着接合する方法など、PC技術が広く応用されている^{1)、2)}。

参考文献

- 1) コンクリート構造診断技術、(社)プレストレストコンクリート技術協会、2007年7月
- 2) 既存鉄筋コンクリート造建築物の外付け耐震改修マニュアル、(財)日本建築防災協会、2002年7月

3. 超高層建築物とプレストレストコンクリート技術

1988年に始まった産官学の総合プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(通称NewRCプロジェクト)により高強度コンクリートおよび高強度鉄筋に関する技術資料が整備され、設計基準強度60MPaまでの高強度コンクリートを使用した超高層鉄筋コンクリート建築物が実現できるようになった。その後も、高強度コンクリートおよび高強度鉄筋に関する研究開発が続けられ、設計解析技術の進歩や施工技術の発展もあり、現在では、150MPaの超高強度コンクリートを利用した高さ150mを超えるような集合住宅が建設されている。

このような超高層建築物では、耐震性などの構造的な要求だけでなく、高強度コンクリートや高強度鉄筋などの高性能材料を利用して高機能空間を提供することが要求される。しかしな

がら、材料の高強度化だけで、従来の鉄筋コンクリート構造の範疇を出ないならば、本当の意味での高機能空間創出は不可能である。

本章では、鉄筋コンクリート構造が、プレストレストコンクリート技術によってどのように高機能化されるのかを、超高層建築物を例に紹介する。

3.1 高強度コンクリートと高強度鉄筋の利用

高層建築物の柱であっても常時に作用する圧縮応力は、コンクリート設計基準強度 F_c の $1/3$ である長期許容応力度以下になるように設計されている。普通強度コンクリートを利用した中低層建築物と比べると、作用させることが可能な応力がコンクリート強度に応じて高くなるが、コンクリートのヤング係数は、コンクリート圧縮強度に比例して増加はしないので、常時荷重による軸変形を検討することが重要となる。

常時荷重により柱に生じる軸変形は以下の3つに分離することができる：

1. コンクリート硬化時の自己収縮および長期的な乾燥収縮
2. 軸力によって生じる弾性変形
3. クリープ変形

超高強度コンクリートでは、硬化時の自己収縮が大きいことが指摘されている。また、コンクリートのヤング係数は、圧縮強度に比例して増加するわけではない。例えば、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（1999）」では、コンクリートのヤング係数算定には、圧縮強度の $1/3$ 乗に比例する式が与えられている。したがって、図3.1に示すように、コンクリート設計基準強度の $1/3$ として決まる長期許容圧縮応力度までの軸力を与えることになると、軸力による弾性ひずみは、高強度コンクリートを使用した場合には、普通強度コンクリートを使用した場合と比べて大きくなる。コンクリートのクリープ係数は、コンクリートが高強

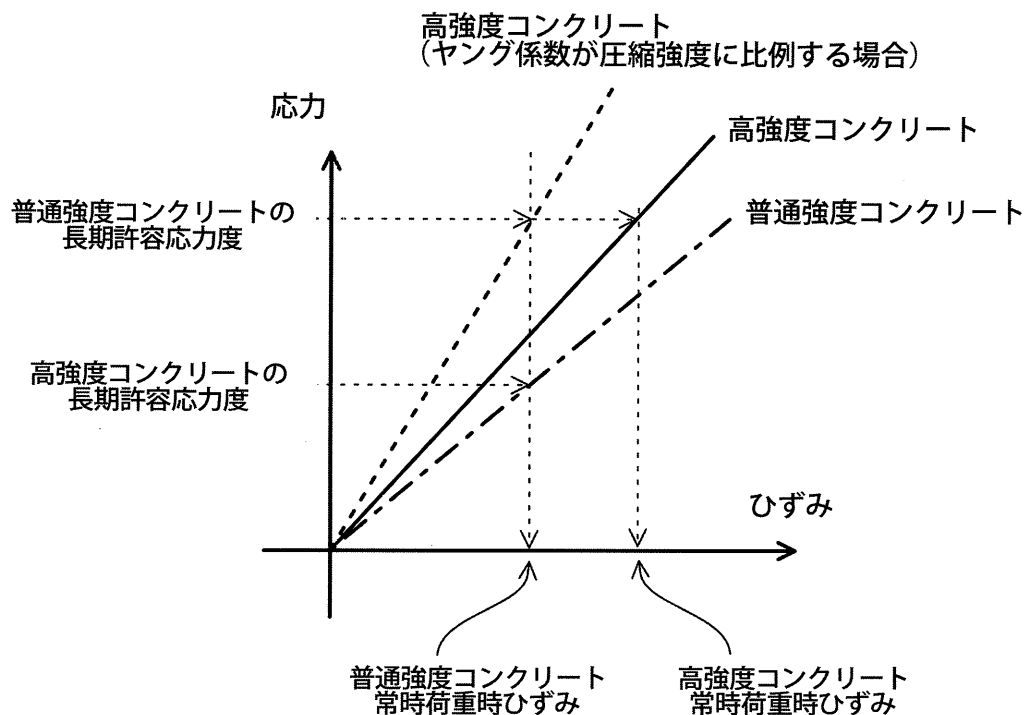


図3.1 普通強度コンクリートと高強度コンクリートを使用した柱の軸ひずみ

度となるほど小さくなることが知られている。一方、クリープひずみそのものは、高強度コンクリートと普通強度コンクリートではあまり差がないとの指摘もなされている。

このように高強度コンクリートを用いた柱では、普通強度コンクリートを用いる場合と比べて、大きな軸変形を強制されることになるため、普通強度鉄筋を利用していたのでは、常時荷重下で鉄筋が圧縮降伏してしまうこともあり得る。

小室は、軸力比 $1/3$ にあたる軸力を加えた場合において、コンクリートの自己収縮やクリープを考慮した場合の、コンクリートと鉄筋の負担軸力割合を算定している^{3.1)}。また、このような軸力下での柱断面の曲げ解析を行い、軸方向鉄筋として普通強度鋼材を用いたのでは、小さな外力レベルで圧縮鉄筋が降伏し、剛性低下することを示した。このような早期の軸方向鉄筋降伏を防止するためには、高強度鉄筋を使用することになる。小室は、また、SD685級の高強度鋼材を用いればこのような早期の圧縮鉄筋降伏を回避できることも示した^{3.1)}。

このように、軸力を受ける柱への高強度鉄筋の利用は、早期の降伏とこれに伴う剛性低下を防止するために有効であるが、梁に対してはどのような効果があるのかを以下に検討する。

高強度鉄筋を梁に利用すれば、鉄筋の引張降伏によって決まる曲げ強度を大きくすることが可能である。しかしながら、梁においては、鉄筋の長期許容応力度を200MPa程度にすることによって、間接的に梁に生じる過剰なひび割れを防止している。このため、鉄筋の長期許容応力度と降伏応力との差が大きくなり、鉄筋の高強度をフルに利用するには長期荷重時からの大きな部材変形が必要となる。超高層建築物では、通常、大地震時においても $1/100$ 程度の層間変形角までにしか達しないように設計されている。このため、高強度鉄筋を使用した梁部材が曲げ強度に達する以前に、建築物としての設計限界変形に達してしまうことになる。高強度鉄筋を利用したからと言って、その高強度を十分に利用しているわけではなく、そのメリットがなくなってしまう。

これを回避するには、鋼材にプレストレスを導入して、常時荷重時から終局時までの差を小さくすればよい。図3.2には、曲げ破壊する梁を対象にして、普通強度鉄筋、高強度鉄筋、および、プレストレス導入を行ったPC鋼材を利用した際の、荷重－変形関係と鋼材応力－変位関係を示す。普通強度鉄筋を使用しても、高強度鉄筋を使用しても、ほぼ同じ点で曲げひび割れが発生する。常時荷重時は、鉄筋応力約200MPaに対応し、ひび割れ時よりも少し変形が進んだ点に設定できる。普通強度鉄筋の場合には、常時荷重時応力の約2倍の点が降伏時となるが、高強度鉄筋、例えば、SD685などを使用すれば、降伏応力が発揮されるのに、常時荷重時の約3倍の部材変形が必要となる。

一方、PC鋼材を使用し、プレストレスを導入すると、部材の初期剛性は同じでもひび割れ時は、鉄筋コンクリートの場合と比べて、大きな荷重となる。また、設計方針にもよるが、フルPCとすれば常時荷重時にはひび割れは発生しない。プレストレスが導入されているためPC鋼材は、高強度鉄筋と比べて小さな部材変形で降伏する。

しかし、通常のプレストレストコンクリート部材とするとコストの点で合わない場合もある。このため、PC鋼材に比べてコスト的に有利な高強度鉄筋にプレストレスを導入し、その高い強度を有効利用することも行われている^{3.2)}。ただし、高強度鉄筋では、普通強度鉄筋と比べて降伏棚が小さく、降伏比が大きいことが、部材としての変形能力を低下させる要因となり得るのでその利用には注意が必要である。

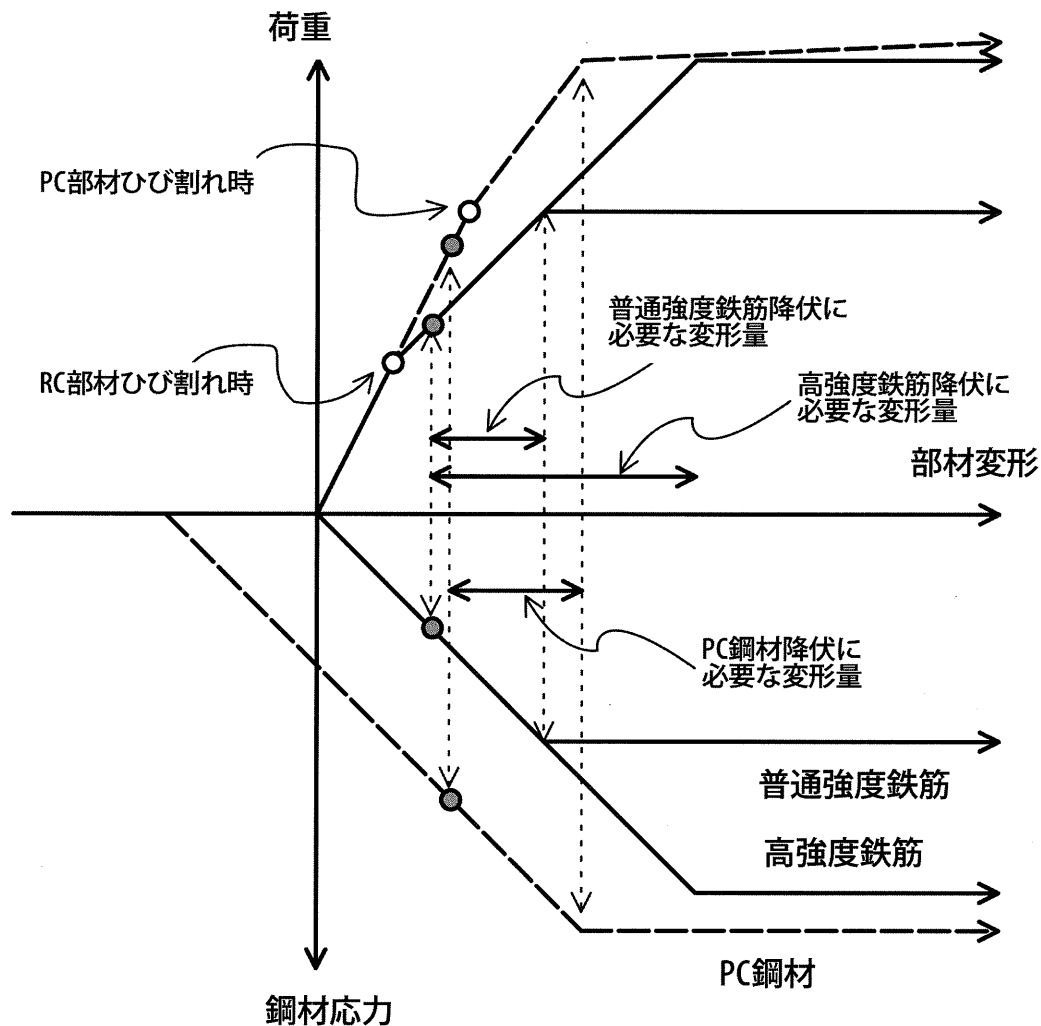


図3.2 梁へのプレストレス導入の効果

3.2 超高層建築で利用されるプレストレス技術

建築技術の粋を集めて建設される最近の超高層建物には、集合住宅が多くなっており、このため鉄筋コンクリート構造とされることがほとんどである。材料分野では、高強度コンクリートや高強度鉄筋の使用、構造設計分野では、高度な解析技術の利用、施工分野では、プレキャスト部材の利用による工期の短縮など様々な最新建築技術が駆使されている。

原理的に見れば、プレストレス技術は、引張に弱いコンクリートに元圧縮応力を導入することにより、引張にも圧縮と同様にある程度の大きさの抵抗をコンクリートに期待できるようにする。これを利用して、部材としては、特に梁部材の常時荷重における性能を改善し、たわみを小さくし、ひび割れをなくす、あるいは、ひび割れ幅を制御するために利用されてきた。

このような原理をRC梁の常時荷重における性能改善効果というような限定された用途だけでなく、利用範囲を広げる試みが行われてきている。そのいくつかを超高層鉄筋コンクリート造建物への適用例から紹介する。

3.2.1 PC梁により構築される大空間

最初は、これまでの利用法に近い。すなわち、RC梁と比べて大スパンとすることができ、かつ、梁せいを抑えることが可能なPC梁を利用して、柱を少なくし、利用効率の高い大空間を構築する例である。

図3.3に示される「神戸芸術センター」は、新神戸駅の南側に位置し、神戸の芸術と映像文化の拠点となり地域活性化に寄与する施設として計画されている。低層部に店舗・スタジオ・ホール・事務所、高層部に住宅（賃貸）が配置された複合施設である。地上37階塔屋1階、最高高さは131.14mの超高層建物である。

フレキシビリティに富む住戸計画を実現するために、図3.4に示されるような12.8mのPC梁を採用している。梁せいは800mmであり、スパンに対する比は、 $1/16$ となっている。このような大スパン梁をRC構造で計画することは不可能である。制震部材としての「波形鋼板壁」と組み合わせることにより、大地震時においてもPC梁には塑性ヒンジが発生しないように計画されている。

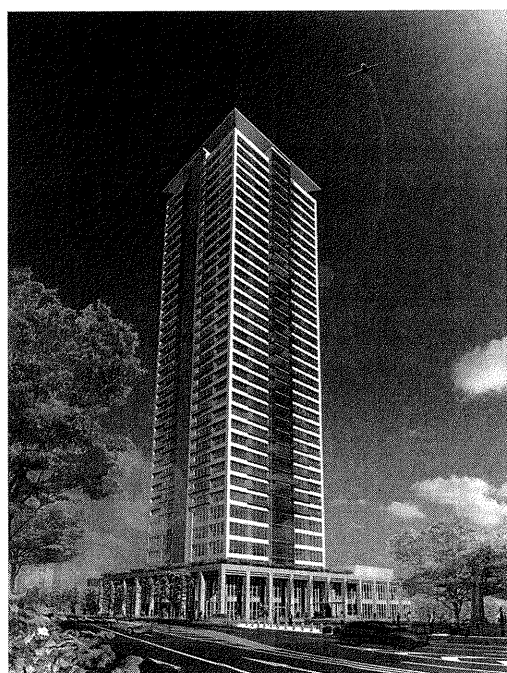


図3.3 神戸芸術センター

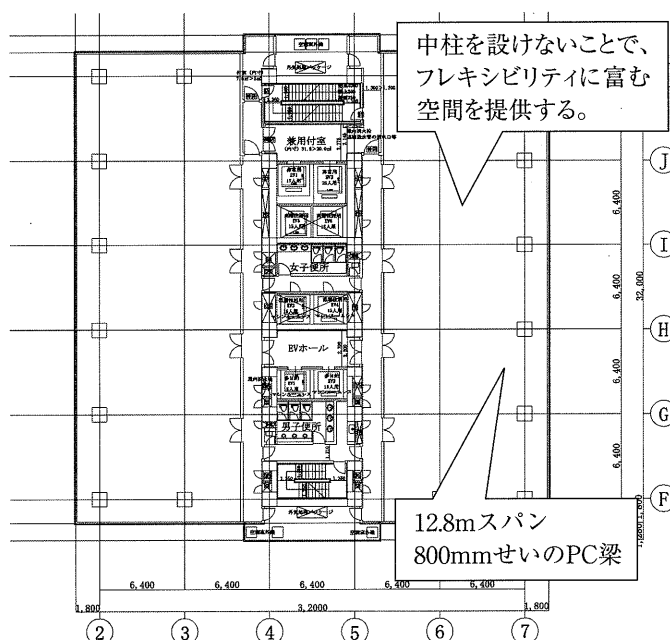


図3.4 基準階平面図

図3.5は、先ほどの例と同様に、住戸階における天井高さの確保と住戸計画のフレキシビリティを高めるために梁せい550mm梁幅750mm長さ9.6mのPC扁平梁を用いた例である。梁スパンに対する梁せいの比は、 $1/17$ となっている。本建物は、高さ136.5m、地上38階塔屋1階地下1階で基礎免震の超高層共同住宅である。

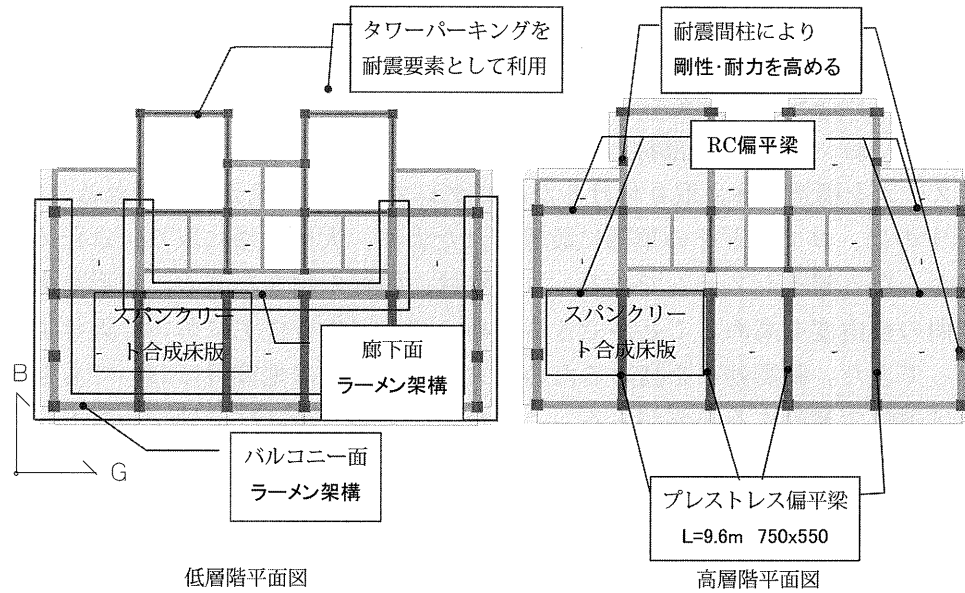


図3.5 低層階と高層階の平面図

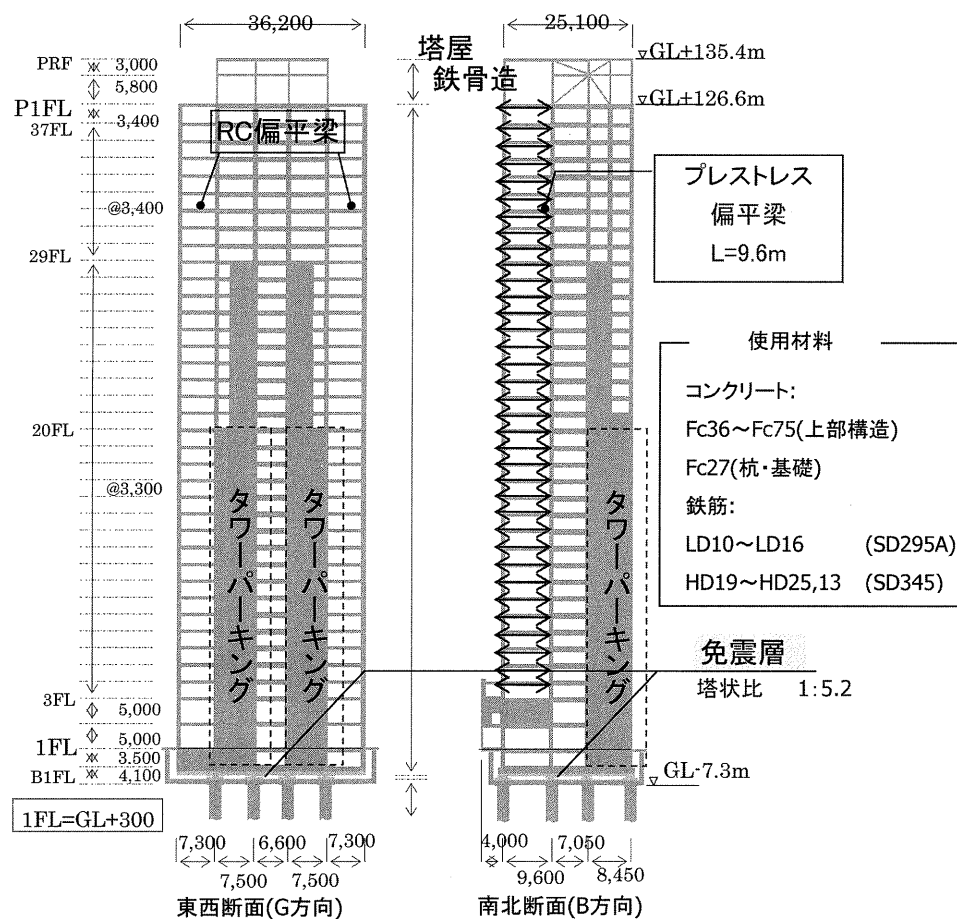


図3.6 断面図

本建物では、図3.6に示すように、壁梁の下部に位置する、免震層直上の大梁にプレストレスをアンボンドで導入することにより、曲げによる引張応力を相殺している。

3.2.2 制震システムにおける利用

PC部材自体にエネルギー吸収システムを組み込む、アメリカにおけるプレキャストに関する総合プロジェクトPRESSSSで提案され実建物に適用されたハイブリッドシステムのようなものもあるが、国内においては、PC部材と制震部材を組み合わせたシステムが利用されている。また、制震システムを構造躯体に取り付けるためにプレストレス技術が利用されることもある。

図3.7に示すのは、コア壁とその頂部に設置された大梁、大梁先端に取り付けたオイルダンパーと接続柱からなる制震システムである。コア壁は、建物の剛性を高め、変形を少なくし、かつ、内部空間の自由度を高めることができるため、超高層集合住宅において近年よく利用されるようになってきた。制震効率を高めるため、大梁と接続柱は地震時においてもひび割れることなく、ほぼ弾性で挙動する必要がある。このため、大梁と接続柱にはプレストレスが導入されている。図3.8にPC大梁断面例を示す。梁全せい5m、幅1.25mという巨大な梁となっている。図3.9には、コア壁、PC大梁、オイルダンパー、および、接続柱からなる制震システムの模式図を示す。コア壁が曲げ変形することにより、これに接続するPC大梁が、地表面と接続する接続柱の頂部に設置されたオイルダンパーを押す。図3.10には、大梁端部配筋状況を、図3.11には、大梁へのプレストレス導入状況を示す。図3.12には、本システムを用いて建設された超高層ビルの例を示す。建物頂部に巨大なPC大梁が見られる。

制震部材を構造躯体に取り付ける際にプレストレス技術が利用された例として図3.13がある。耐力と剛性を確保し、エネルギー吸収能力を高めるために、フルプレキャストの鉄筋コンクリート造制震装置をプレストレス力により、建物構造躯体に取り付けている。このようにプレストレス技術は、構造躯体に制震部材を圧着し、その性能を高めるためにも利用される。

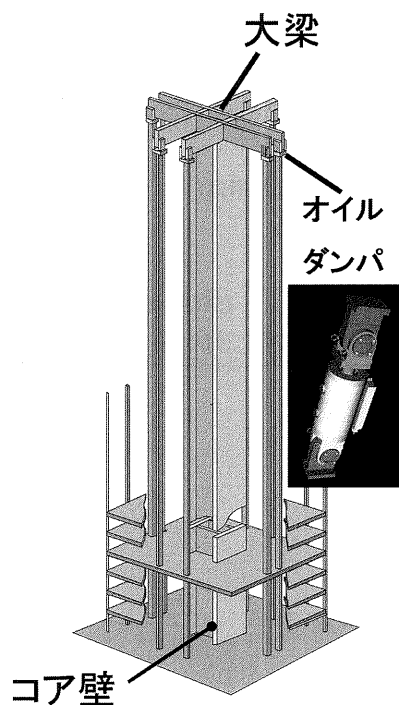
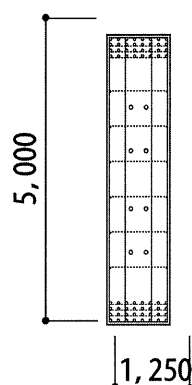


図3.7 スーパーRCフレーム構法



上端筋・下端筋共：本数 32本
 主筋径 : D41 (SD685, SD490)
 せん断補強筋 : 4-D19@200 (SD345)
 PC 鋼線配線 : 8-(12-12.7φ)

図3.8 PC大梁断面例

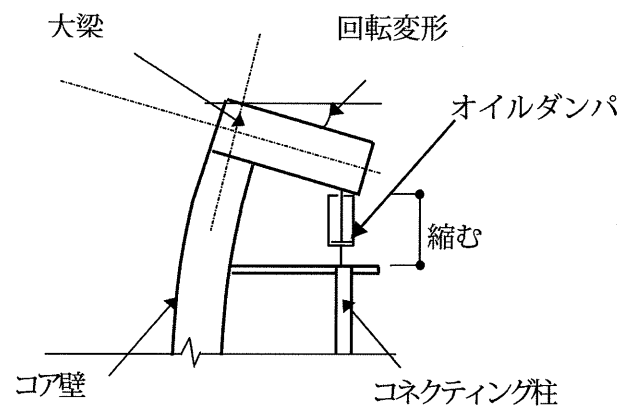


図3.9 制震システムの挙動

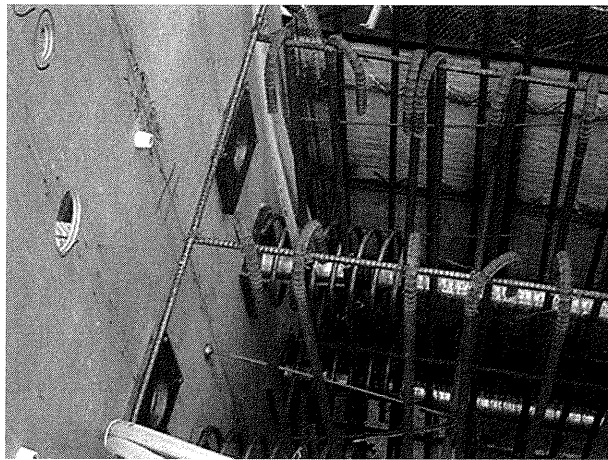


図3.10 大梁端部配筋

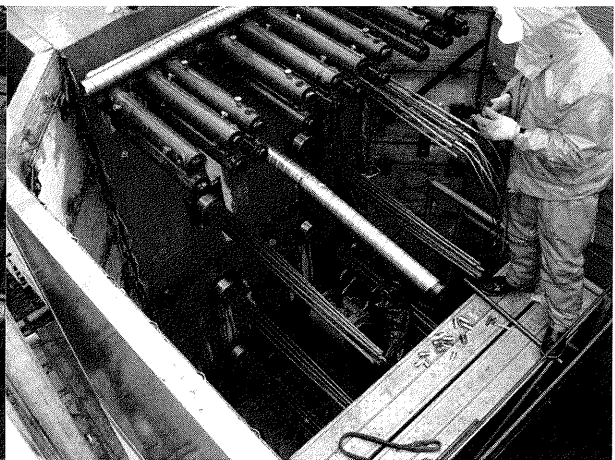


図3.11 大梁へのプレストレス導入



図3.12 適用例(芝パークタワーとクロスタワー大阪ベイ)

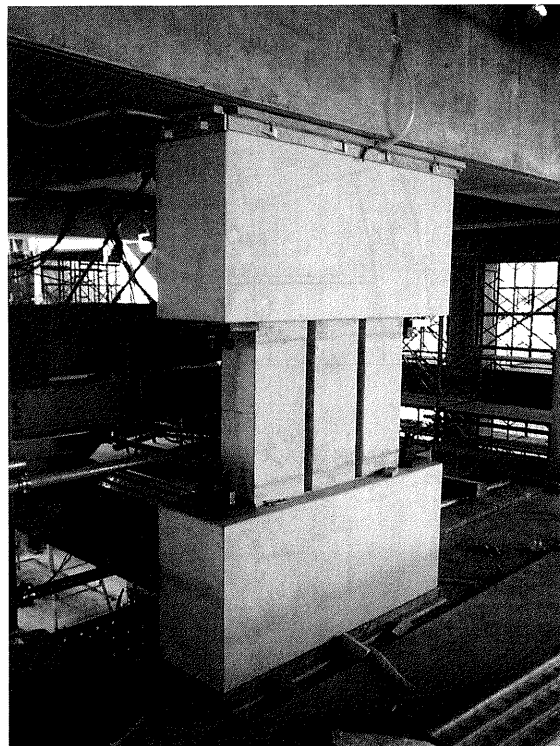


図3.13 RCカラムダンパー

3.2.3 その他の利用

図3.14は、地上50階、地下1階、塔屋2階、最高高さ177.4mの超高層集合住宅である。本建物では、建物全体の曲げ変形を抑制するために、建物頂部に鉄骨造のトラス（ハットトラス）を設置している。このハットトラスの支点となる柱には地震時に大きな反力が作用し、自重と積載荷重の小さな上層階柱には引張応力が生じる。通常のRC柱では、このような引張応力によりひび割れが発生し、それに伴い軸剛性が大きく低下し、ハットトラスの変形抑制効果も低下する。そこで、ハットトラスの曲げ戻し効果を十分に活用するために、レベル2地震動時にひび割れが生じない量の初期圧縮軸力をプレストレスによりハットトラス直下の柱に導入している。また、PCグラウトは、充填を確実にを行うため、シース内を真空状態にして実施されている。

図3.15に示す超高層集合住宅は、地下1階、地上46階、塔屋2階の基礎免震RC構造建物である。最高高さは150.6mである。この建物の外形は、東西方向30.8m×南北方向29.2mのほぼ正方形である。24階と33階において東西方向にセットバックし、それぞれにおいて30.8mから29.0mへ、また、29.0mから26.8mへと辺長が小さくなる。図3.16に示すように、セットバックする部分では、柱断面を2層に渡って大きくし、上階と下階の柱を包絡する断面としている。上階からの柱軸力は、下階柱へと斜めに流れるため、横方向へのスラスト力が発生する。このスラスト力によって梁とスラブに引張軸力が生じないように、スラスト力を相殺できる量のプレストレス力が梁に導入されている。プレストレス力はスラスト力に対してのみ抵抗し、その他の力学挙動には寄与しないと想定し、梁そのものはRC梁として設計されている。

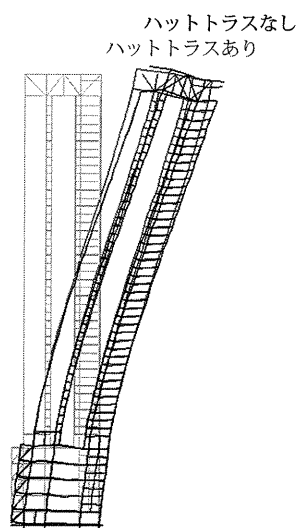
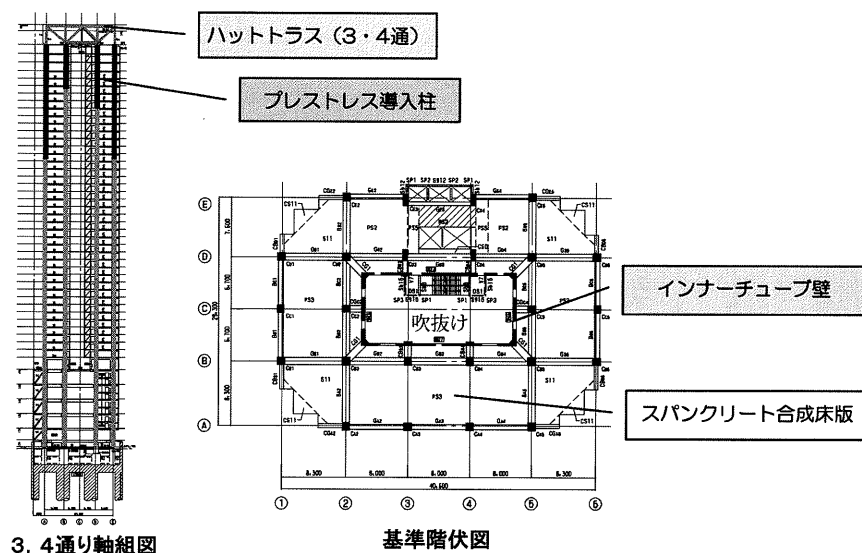


図3.14 ハットトラスを頂部にもつ超高層集合住宅



図3.15 建物完成予想図

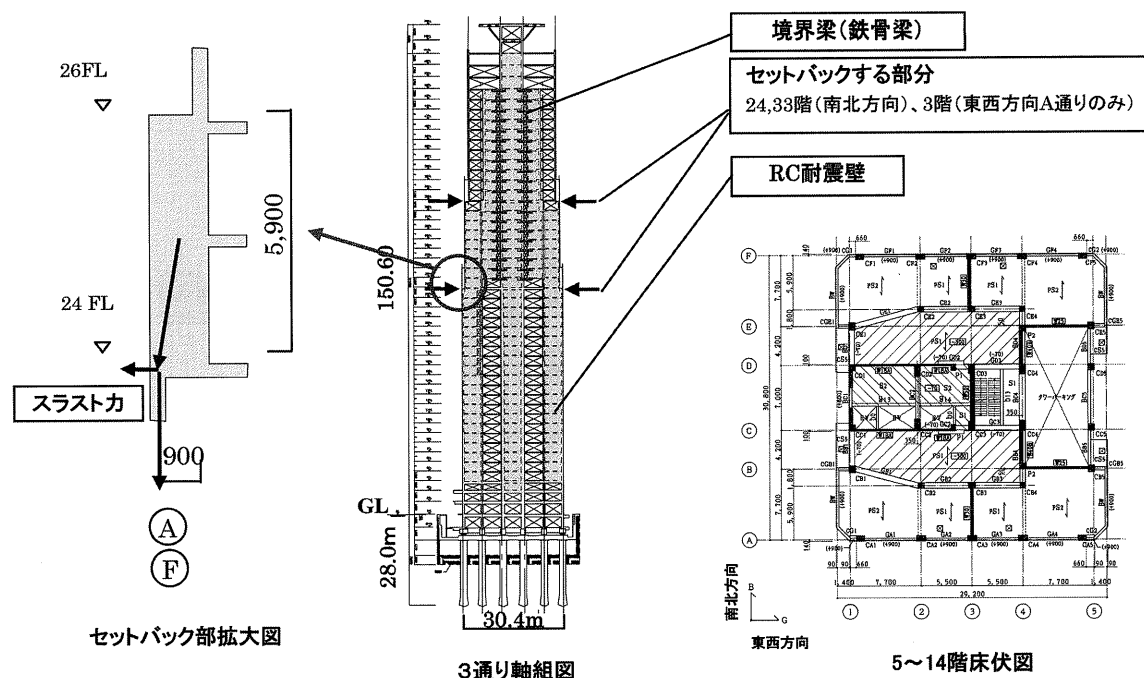


図3.16 上階からのスラスト力を相殺するための梁へのプレストレス力導入

3.3 まとめ

引張応力が生じることが予想される部位に、あらかじめ圧縮力を加えておくというプレストレス技術は、ここで見てきたように、鉄筋コンクリート造超高層建築物においても、様々に利用されている。また、部材どうしを接合する技術としても利用される。構造部材のほとんどをプレストレストコンクリート造とした、いわゆる、PC建築でなくても、部分的に、様々なアイデアによりプレストレス技術の利用法が広がっていくものと期待される。

謝辞

本資料をまとめるにあたり下記の方々より、資料とご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

上田博之氏(竹中工務店)、小室努氏(大成建設)、増田安彦氏(大林組)、丸田誠氏(鹿島建設)(五十音順)

参考文献

- 3.1 小室努「超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性に関する研究」京都大学学位請求論文、2007年
- 3.2 小室努、河本慎一郎、竹崎真一、甲斐隆夫「知的制振システムを採用した事務所ビル設計 -大成札幌ビル-」プレストレストコンクリート、Vol.48、No.4、pp.100-110、2006年7月
- 3.3 田口耕一、小島博、杉本訓祥「RC造制震装置を使用した高層RC造集合住宅の設計・施工」コンクリート工学、Vol.40、No.6、pp.28-34、2002年6月
- 3.4 中村幸太郎、清水美木夫、林信之、吉松敏之「コア壁集約型新架構法による超高層集合住宅の施工」、コンクリート工学、Vol.40、No.11、pp.42-48、2002年11月

4. PC建築事例

4.1 PCaPC構工法による二層式フローティングバンクの施工

—— いわき平競輪場 ——

1. はじめに

本プロジェクトは、既存施設の老朽化に伴い現在地で全面改築することになった地方競輪場のメインスタンド及びバンクの建設工事である。

競輪事業を取り巻く環境は、バブル崩壊後の景気低迷、ファン層の固定化・高齢化などにより全国的に入場者数及び売り上げが減少傾向にあり、当競輪場においても同様に厳しい事業運営を強いられている状況であった。事態を打開するため、施設の刷新による競輪人気の回復、若者や女性など新たなファン層の獲得、不足している客用駐車場の確保、地域との共生等を意図して老朽化した施設を全面改築することが計画された。

施設の中心となるバンクには、下部空間の有効利用（駐車場として）を図ること、自転車走行時の振動発生をおさえること、走路面の精度を確保すること、集客力向上を狙ったモニュメント性を持つことなどが求められた。一見浮遊して見える大きな皿状の造形的な形状は、PCaPC造（プレキャストプレストレストコンクリート造）圧着工法によって成立し、これらの要求事項のすべてを満足させている。

本稿では、日本初と言われているこのPCaPC造二層式バンクの製作と施工にスポットをあて、その概要を紹介する。

2. 建物概要

工事概要を表1に、全体概略工程と建物概要図をそれぞれ図1、図2に示す。

施設はメインスタンド、バンク、カーニバルプラザ、選手宿舍、地域開放型施設により構成される。工事は施設全体を三工区に分割して発注され、当社JVはメインスタンド・バンク・カーニバルプラザを担当した。

施工条件として工事期間中であっても場外開催は通期で行えること、既存バンク閉鎖による本場休止期間を12ヶ月とすること等を満足する必要があった。

表1 工事概要

工事名称	いわき平競輪場メインスタンド・バンク建設工事									
建築主	いわき市									
建設地	福島県いわき市谷川瀬字西作1									
用途	観覧場ほか									
工期	平成16年6月17日～平成18年9月29日									
設計監理	(株)日本設計									
施工	大林組・常磐開発・東部産業・大和電設工業・クレハ電機・クレハ設備・日化エンジニアリング特定建設工事共同企業体									
建物概要										
構造	メインスタンド S R C造、一部S造、R C造 バンク P C a P C造 カーニバルプラザ S造、一部S R C造									
階数	メインスタンド 地下1階、地上6階 バンク・カーニバルプラザ 地下1階、地上1階									
建築面積	メインスタンド 3,979.19㎡ バンク・カーニバルプラザ 15,319.55㎡									
延床面積	メインスタンド 17,354.99㎡ バンク・カーニバルプラザ 3,953.45㎡									

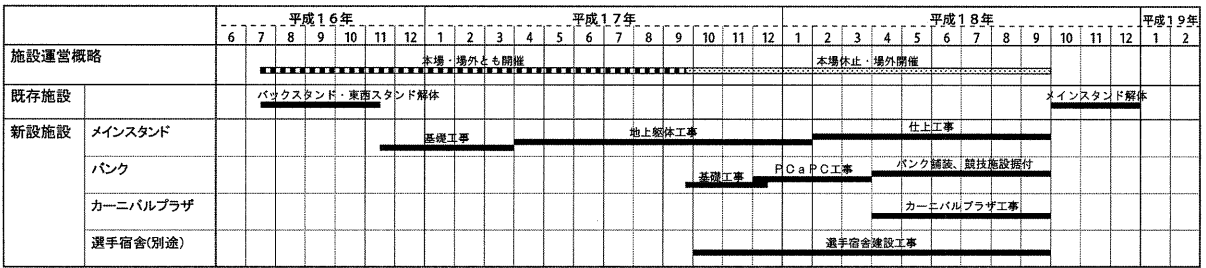


図1 全体概略工程

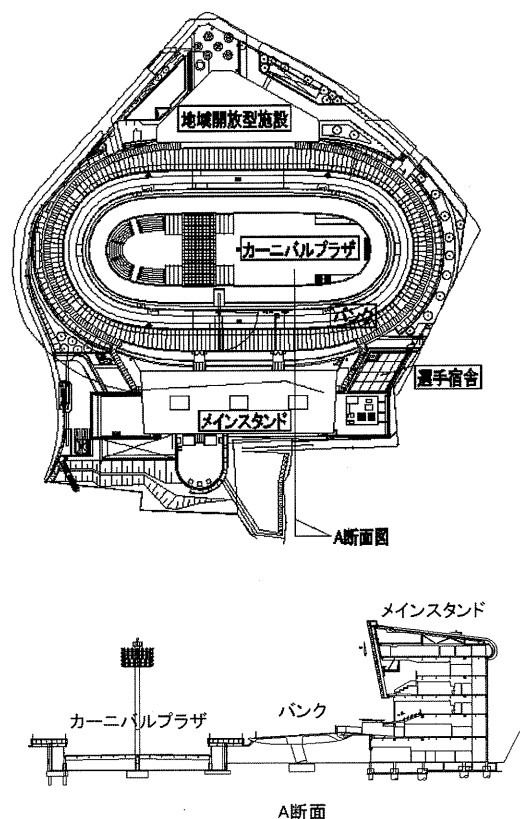


図2 建物概要図

3. PCaPC工事

3.1 バンク形状・PCa部材形状

バンクは「新マッコネル曲線」と呼ばれる緩和曲線を有した一周400mの楕円で、それを200列の短冊に分割しPCaの1ユニットとした。一つの短冊を側面から見ると図3の様に三日月状を呈している。各短冊はAスラブ、B桁、Cスラブ、W版の4種類の部材で構成される。また4列の短冊毎に傾斜した柱一本がB桁下に配置され、バンク全体をわずか52本の柱で浮かせて支持している。全904ピースのバンクは円周方向及び直径方向にプレストレスを導入して初めて構造的に成立する設計となっている。

写真1は短冊2列分の模型写真である。バンク走路面はこの模型のように平面の曲率に応じたカント（傾斜）を持つ。それゆえバンクの断面は少しずつ変化する難解な双曲放物曲面となり、結果同一形状のPCa要素で構成することがほとんど出来ないという状況であった。

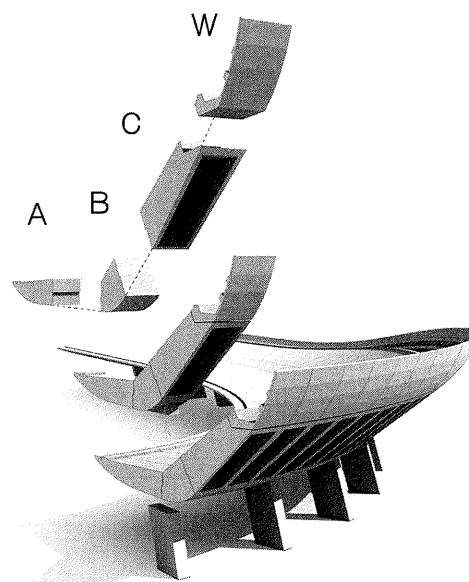


図3 バンク形状説明図

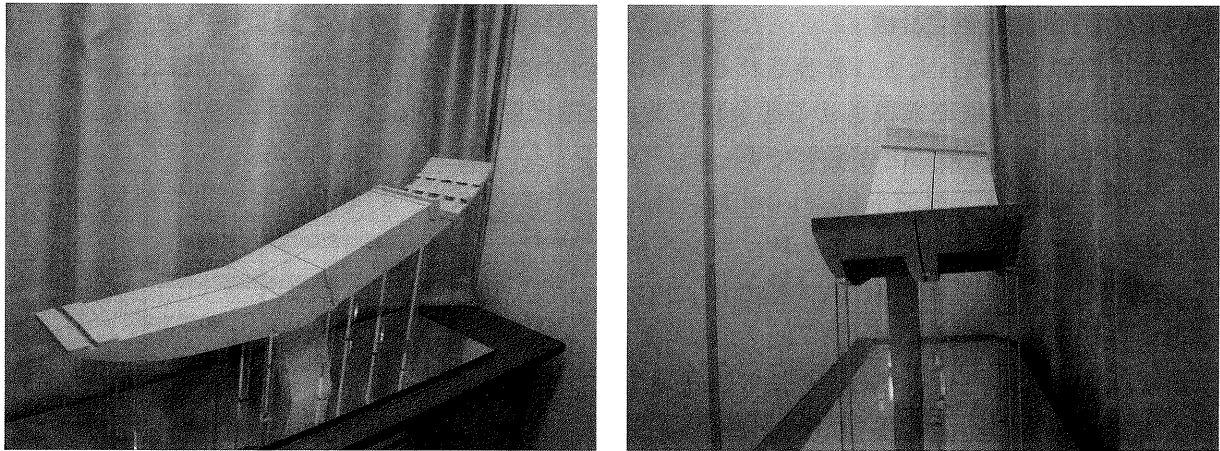


写真1 PCa模型写真

3.2 型枠精度・寸法管理

図面上各ピースの主要点は三次元の座標でのみ与えられる。これをベースに、部材製作用の二次元図面（断面図、側面図）を作図し、型枠を製作した。型枠はPCaの形状に応じて鋼製型枠、もしくは鋼製と木製との混合型枠とを使い分けた。

緩和曲線部分では、各部材とも捻れながら変化するため、組み立てた型枠の寸法検査をその都度行った。この際、三次元立体図より四隅点の位置・高さ・実長さ一覧表を作成し寸法検査に活用した。また型枠寸法その他、シース管位置の検査にも特に注意を払い慎重に行った。

3.3 マスコンクリート対策

PCa部材はいずれも1ピースあたり十数 m^3 の体積があった。特にB桁は $2.0\text{m} \times 3.0\text{m} \times 2.5\text{m}$ のマッシュパな形状をしており、温度ひび割れの発生が懸念されたため、温度解析及び温度応力解析を行い、マスコンクリート対策を検討した。

PCaはその製作環境上外部からの拘束が小さいため、外部拘束によるひび割れの危険性が小さいことが確認できた。一方、断面内部の温度勾配による内部拘束によるひび割れが、脱型から蒸気養生終了直後までの期間に発生しやすいことが分かった。さらにシミュレーションを行った結果、その間の内外温度差を 25°C 以下に保つことでひび割れの危険性を小さくできることがわかり、部材の内外温度差が大きくならないように脱型前後に蒸気養生温度を適度に保ちつつ養生シートで保温することをマスコン対策とした。

製作1ピース目のB桁に熱電対を設置し、内外温度差を 25°C 以下に保つこと、それによりひび割れが発生しないことを確認し、上記判断が正しい旨の検証を行った。測定結果を図4に示す。

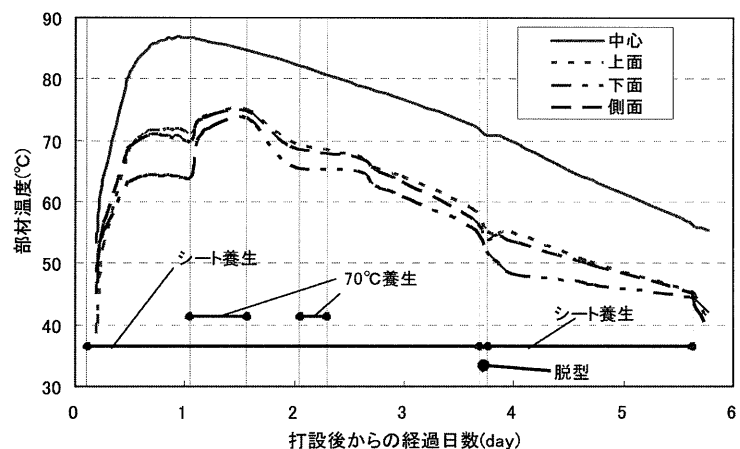


図4 B桁コンクリート温度推移

3.4 PCa工程計画、組立計画

全体工期の中でPCa工事に許容される期間はわずか4.5ヶ月間であった。その間に、隣接する既存施設で場外開催を継続させる悪条件下でPCa総重量22,700ton、ベント総重量2,300tonもの膨大な物量を消化することが必要であった。4

ヶ月の内訳は概ね、ベント組立1.0ヶ月、PCa建方2.0ヶ月、プレストレス1.0ヶ月、ベント解体0.5ヶ月である。PCa工事工程を図5に、PCa工事フローを図6に示す。

また工程を満足させるため、PCaの組立は全体を3工区に分け、大型重機3台(500tCC1台、350tCC2台)を使用して行った。PCa建方計画図を図7に、その状況を写真2に示す。

	平成17年												平成18年										
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
型枠製作																							
部材製作																							
PC部材運搬																							
支保工組立・解体																							
PC部材取付																							
目地・緊張・グラウト																							

図5 PCa工事工程

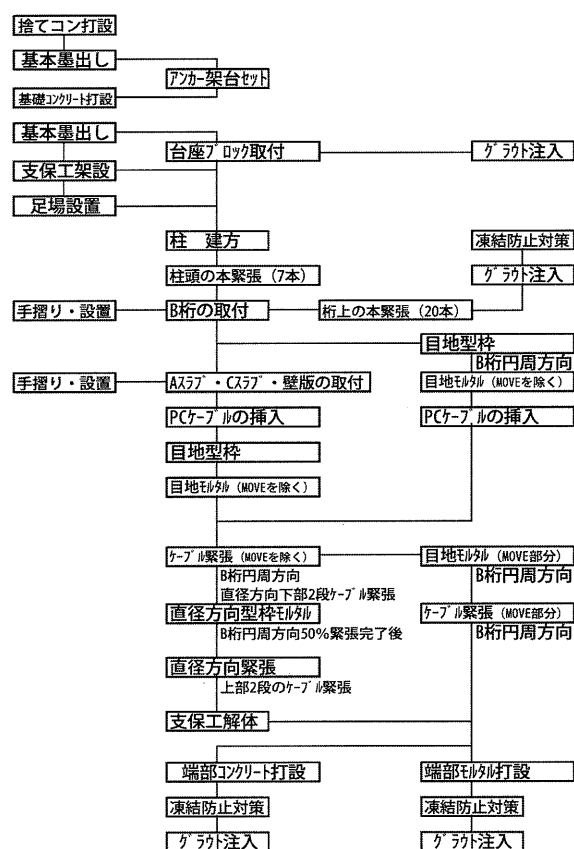


図6 PCa工事フロー

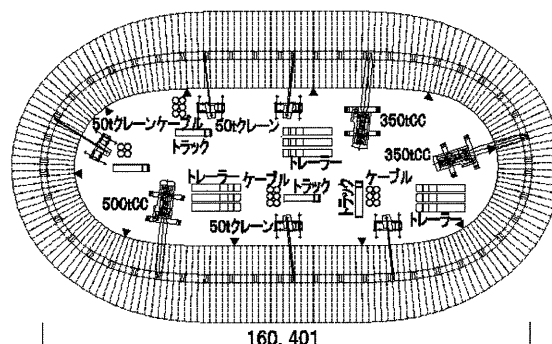


図7 PCa建方計画図



写真2 PCa工事状況

3.5 仮受け支保工 (ベント) 計画

三次元的に変化するPCaを支持するため、ベントの受け点も三次元的に変化させながら配置することが必要であった。受け点位置はPCaの部材毎に設定し、各点の三次元座標を算出して受け点位置を定めた。

また受け点に載るPCa面は場所毎に異なる角度を持っているため、それぞれの角度に対応す

る受け金物を製作しPCa側に取り付けた上で、ベント受け点にあずけることとした。受け金物は全1,864個で、583種類にもなった。

ベント下部の地盤についても相応の強度が要求される。現地盤表層の一部には軟弱層が存在していたこともあり、ベント下部の地盤には地盤改良+土間コンクリートt200を施した。土間コンクリートはベント組立時の位置出し（墨出し）にも有効であった。また地震による水平荷重に対する検討を行い、PCa架設途中においても倒壊しないようベントの強度を確保した。

3.6 組立精度管理・三次元計測システム

バンクが難解な三次元形状であるにもかかわらず、組立時の精度管理にスピードが要求されたため、基礎工事からベント解体までのほぼ全期間において必要となる計測作業には自社開発の三次元計測システムを利用した。

ベント組立に際しては各部材に対して3～6点の計測が必要となり、合計で約2,800点に及ぶ計測点を計画した。計測は①ベントの組立位置確認、②レベル計測と調整、③PCa部材建方のための墨出しを目的とした。計測回数は、①・②で1回、③で1回の計2回であった。

PCa部材については、各部材1～6点、合計で約1,300点の計測点を計画した。計測は、①各PCa部材建方後の位置計測と変位量の把握、②PCケーブル緊張後の変位量の把握、③ベント解体後の全体形状確認を目的として行った。計測回数は①で約3回、②・③でそれぞれ1回ずつの計5回を計画した。

計測システムはトータルステーションと操作端末で構成される。計測作業は2班体制で行い、一班を計測者とプリズムを持つ相番者との2名で構成した。また計測結果を遠隔な場所で作業する相番者に無線連絡した。使用した座標は一般の直交座標系のxy座標ではなく、円周方向と直径方向の成分に分解した直交曲線座標系への変換を行っている。やや難解ではあるが一般の測量工が簡単に操作できる形式となっている。計測システムのインターフェースを図8に示す。

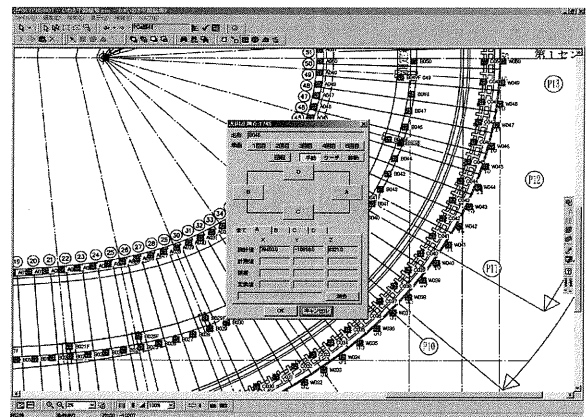


図8 計測システムインターフェース

3.7 プレストレス

緊張時における弾性変形を吸収するため、一周400m（200ユニット）の中に10ヶ所のムーブを設けた。緊張はムーブ間を先行して行い、その後にムーブを跨いでの緊張を行ってバンク全周を一体化させた。緊張時導入力は最大で1,400kNである。

施工時期が冬期間であったため、緊張に先立つ目地モルタル充填及び緊張後のグラウト注入の際には、養生上屋を架設した上で採暖養生を行い、初期凍害防止を図った。

またベント解体に際しては、解体手順によってバンクの挙動が異なることをシミュレーションによって確認し、最も影響の少ない手順を選択した。解体時に生じた変位量は約5mmであった。

4. むすび

国内初となるPCaPC造の競輪場バンクは、ベント解体と同時に我々施工者自身をも圧倒する造形的な偉容を現した。今後発注者及び設計者が意図するファン層の拡大に大いに貢献するであろう。また一見不安定なその構造の上に30~40tonもある舗装機械を載せるといった“試練”をも無難に乗り越えてくれた。設計及び施工の適切性が証明された証と確信している。(写真3、4)

競輪場バンクの構造としては国内初であったことに加え、その構造や形状が極めて難解であったため完成までには種々の試行錯誤や苦難が伴ったが、各段階で用いた個々の技術は今までの技術の組み合わせと応用であった。バンクの完成は、それらの知恵を適切なタイミングで持ち寄り、組み合わせていった関係者の努力と苦勞の賜である。労を惜しむことなく協力してくれた関係者に対し、この場をお借りして感謝の意を表し、むすびとする。

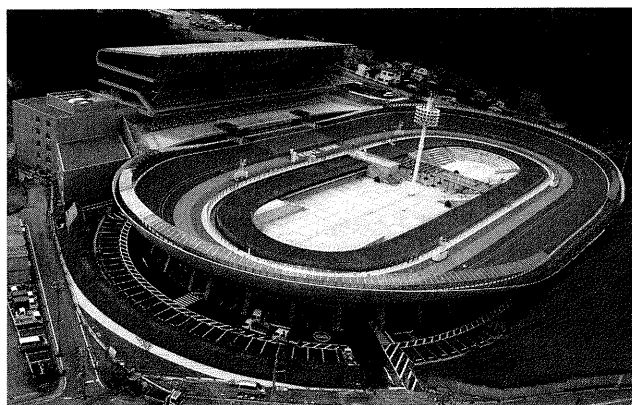


写真3 競輪場全景

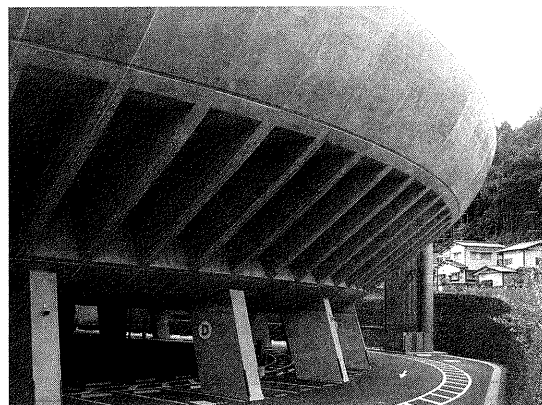
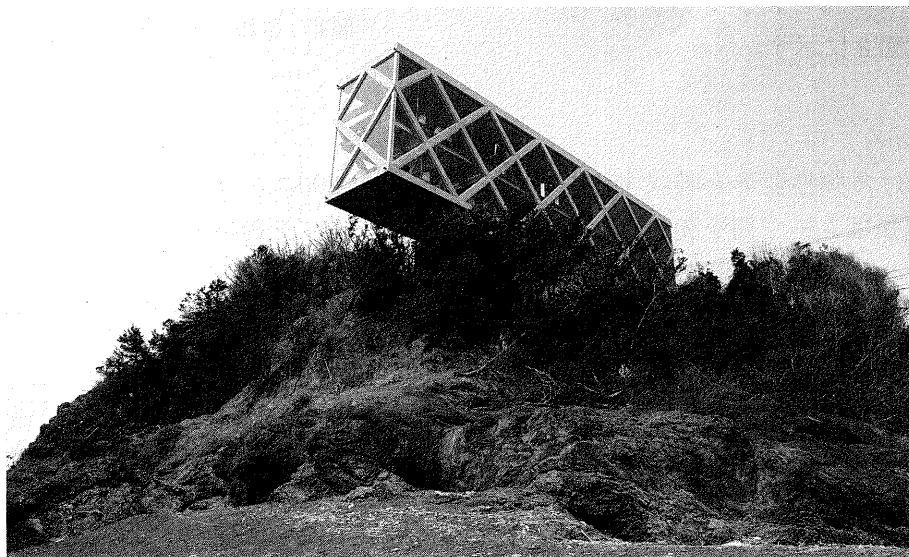


写真4 バンク見上げ

4.2 押出し施工法による空中レストラン

1. はじめに

地上2階建て、延べ床面積約290m²の商業施設である。建物の敷地は太平洋に面する砂利浜から高さ約30mの崖地である。その敷地から海に9mを跳ね出し、日々変わる自然美を堪能出来る現場打ちPRC構造の建物は、一度地上で造成されてから、一日にして海へと突き出された。



【建築概要】

用 途：飲食店+物販店（高知県）

設 計：河江正雄/河江正雄建築設計事務所

規 模：地上2階

構造設計：徐光+照井健二/JSD

面 積：延床面積287.95m²

照井清道/照井構造事務所

高 さ：軒高さ 7.59m

施 工：田中工務店+新世鋼業+植野組

構造種別：現場打ちPRC造

P C施工：建研

2. 構造計画

2.1 上部躯体

9 mの跳ね出しを可能にし、尚且つ美しい自然の眺望を内部に取り入れる構造形式として、跳ねだし部が一体となり、また大きな開口の採れる、柱・梁をトラス形状に構成した鳥籠のような構造形態を基本案とした。素材は、強風を受ける崖地に建つ建築物には最低限の重量は必要であると考え、また、海岸に建つ建物である為、耐久性を考慮しコンクリート系構造躯体を計画した。トラス架構である為、軸力が主応力となり、引張の発生する部材にはPC鋼材を配する計画とした。自然の眺望を最大限に取り入れる為、各部材は300角とミニマム寸法とし、最大で6つの部材が取り付け、その箇所を2本のPC鋼材が通るパネルゾーンは、鉄骨プレートを加工したボックスに各部材の鉄筋を溶接する事で納めるよう計画した。

2.2 基礎計画

崖地に建つ立地条件と9 mの跳ね出し架構の基礎である事に配慮し基礎計画を行った。基礎形式は杭基礎、及び地盤改良による直接基礎を併用とし、各基礎形式のみでも建物を支持できるよう設計を行った。さらに改良底面は奥行勾配となるよう計画し地盤の水平移動を考慮した。

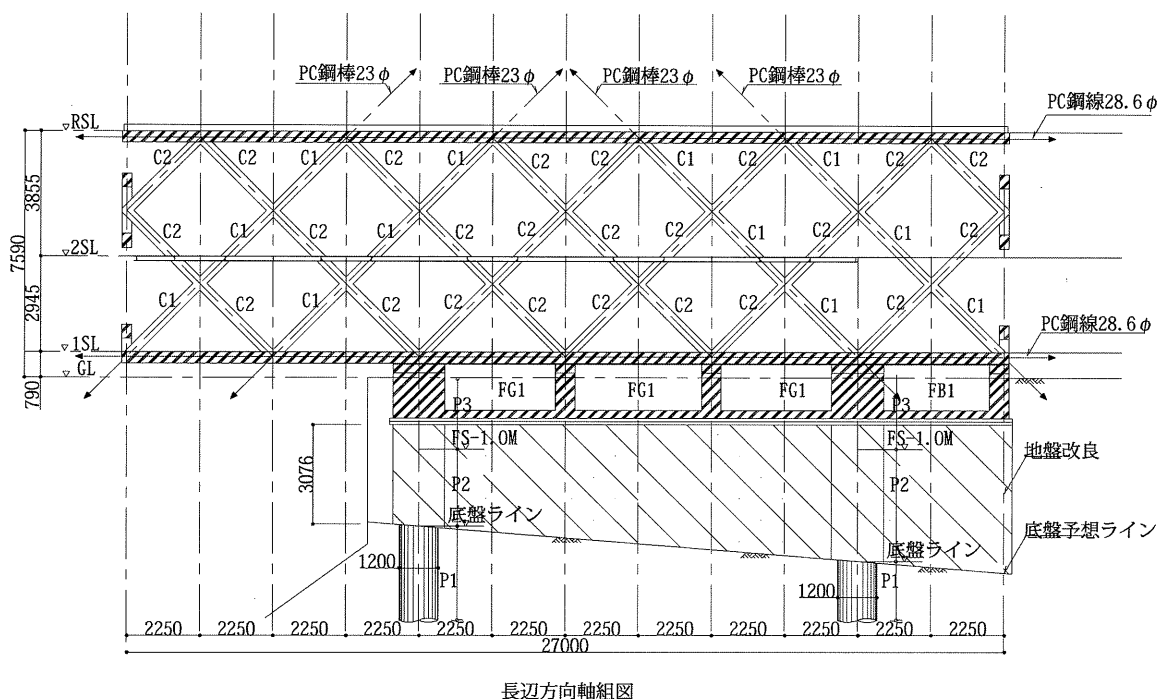


図2.1 構造概要図

3. 施工計画

9 m跳ね出す現場打ちの躯体は、地上で造成した後、海に引張り出すという案を検討した。斜め柱の打設は内枠を全面で建て込み、内枠に墨出しをする事で躯体の精度を高め、1階立ち上がりからR階床までを1度に打設した。パネルゾーンはボックスに孔を開け、流動化コンクリートにより打設を行い充填性に配慮した。

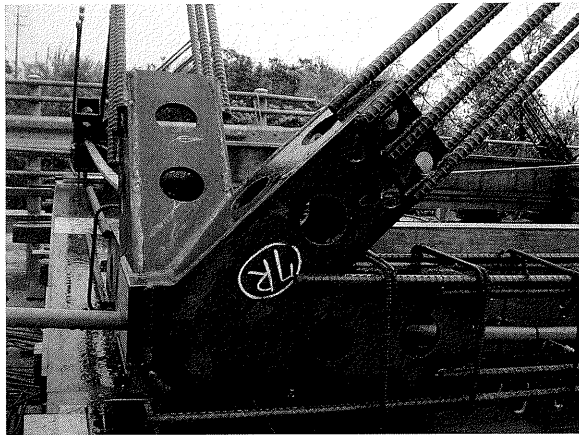


図3.1 パネルゾーンの納まり



図3.2 パネルゾーン打設後

4. 移動システム

上部躯体はパネルゾーンの鉄骨ボックス下に、「舟」となるプレートを取り付け、それを基礎梁天端に設置したレール用プレート上を滑らせることにより移動した。基礎躯体を反力とし、レールと「舟」との間に潤滑油を注入することで、3tの電動ウィンチ2台の動力で上部躯体の移動が可能となる。上部躯体移動完了後、ボルトにより基礎と上部構造を連結した。

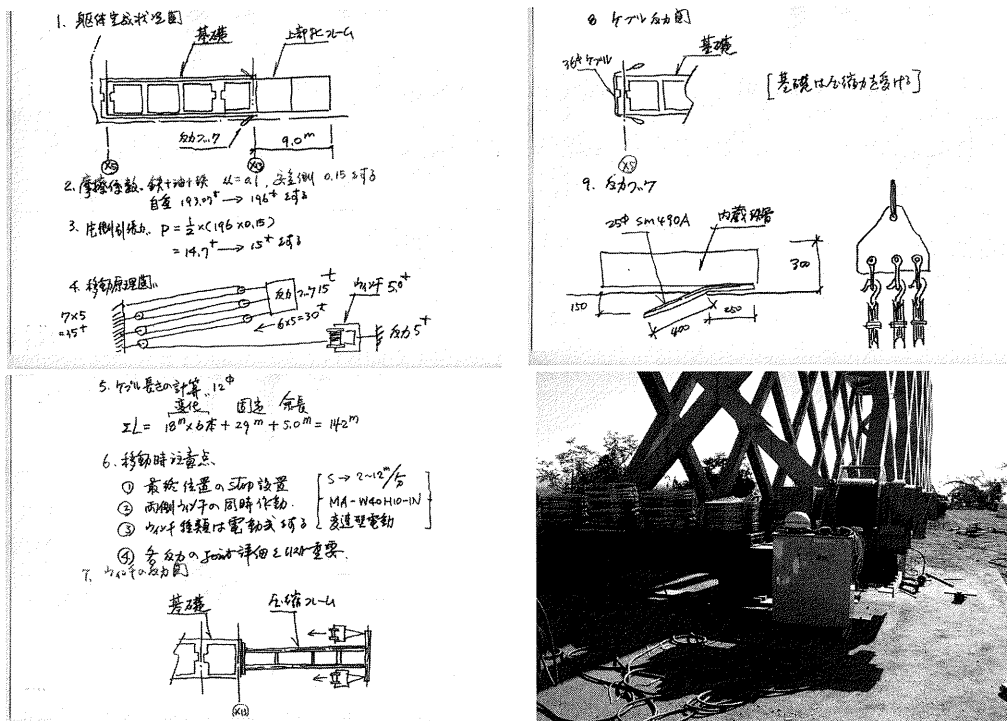


図4.1 移動システム

5. あとがき

PC構造は他構造と比較して、耐久性を向上させる構造であると言える。プランと形態の自由度を向上させる構造でもあると言える。長寿命建築であればこそ、それを見据えたプランとデザインを模索し、提供する事も建築に携わる者としての使命のひとつと考えている。

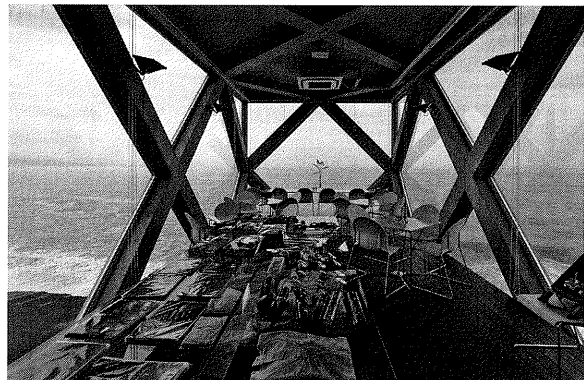


図5.1 竣工時（内観）



図5.2 移動完了時

4.3 都心部に建つ狭小PC住宅

1. はじめに

PC工法によって実現した都心部狭小敷地に建つPC住宅例として本建物を紹介する。

【建築概要】

用 途：住宅

所 在 地：東京都港区西新橋

規 模：地下1階 地上5階

建築面積：44.37 m²

延床面積：191.66 m²

構造種別：上部PC造、下部RC造

設 計：倉田裕之／建築・計画事務所

構造設計：(株)ジェーエスディー (JSD)

施 工：(株)田中工務店

P C 工事：オリエンタル建設(株)

事 業 主：オリエンタル建設(株)

(株)三田ハウジング共同企業体

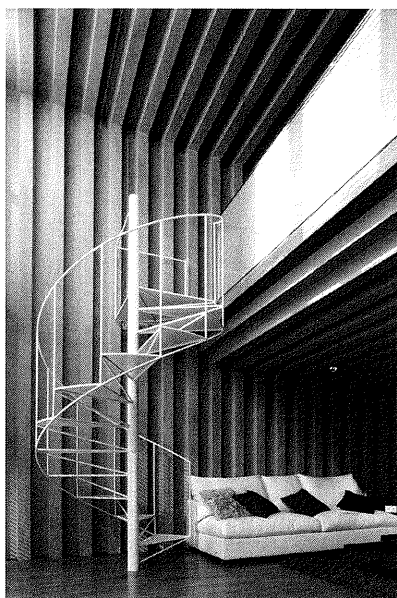


図1.1 4階吹き抜け空間

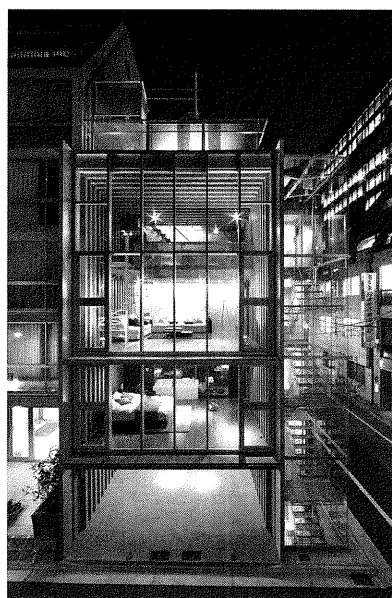


図1.2 建物正面

2. 構造計画

2.1 リブ付壁式構造

内部空間を最大限有効に利用するための構造形式として間口方向は薄肉ラーメン構造を、奥行き方向は耐震壁構造を主体とした構造計画を行った。薄肉部材は内部空間を圧迫せず、かつ十分な面外剛性を確保できる断面としてリブ付板を計画した。部材断面は床、壁とも共通とし、リブせいを250mm、リブピッチを@310mm、壁厚(床厚)を120mmとした。(図2.1)

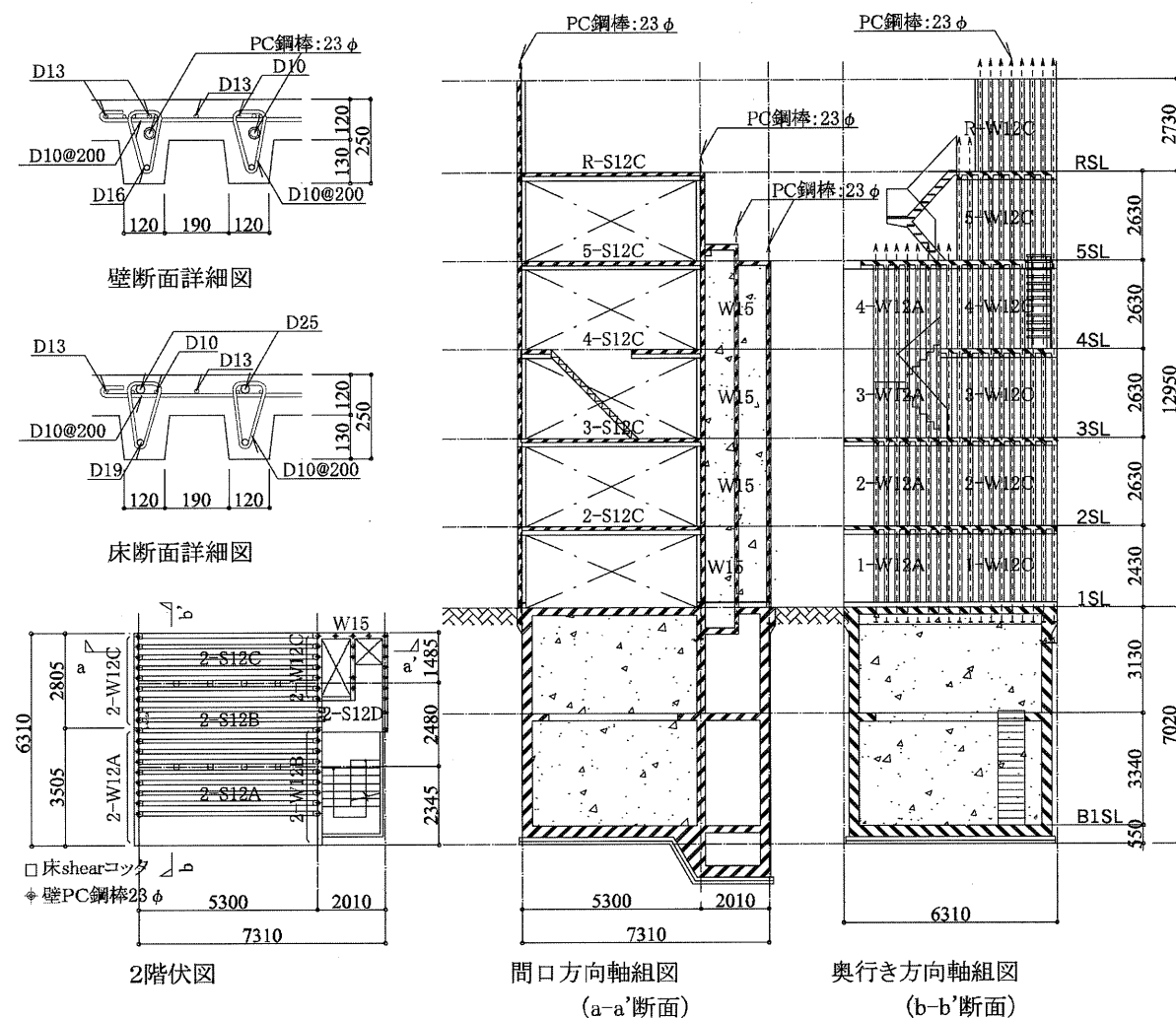


図2.1 構造概要図

2.2 PC縦締め工法

PC緊張計画は、“縦締め”のみの現場圧着工法とした。壁部材と床部材の接合部は床勝ちとし、床部材を上下から壁部材により挟み込み、PC鋼棒により縦方向に緊張力を導入する。PC鋼棒は23φを用いリブピッチに合わせ@310mmピッチに配置した。この方法を採用することにより、水平方向の緊張工事が発生せず緊張スペースを必要としないため、敷地を有効に活用できる。

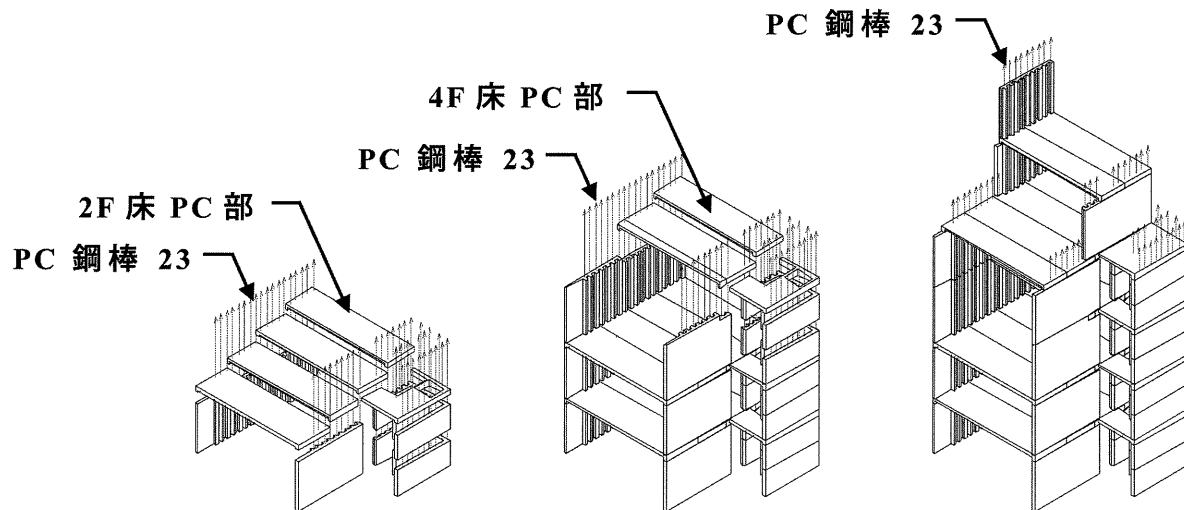


図2.2 PC建方概念図

3. 外断熱先貼り工法

外壁は外断熱工法を採用した。断熱パネルは事前にプレキャストコンクリート工場において壁部材に取り付けて出荷される。現場ではPC部材建方後に目地部のシール工事のみが発生するため最小限の施工スペースを確保すればよい。

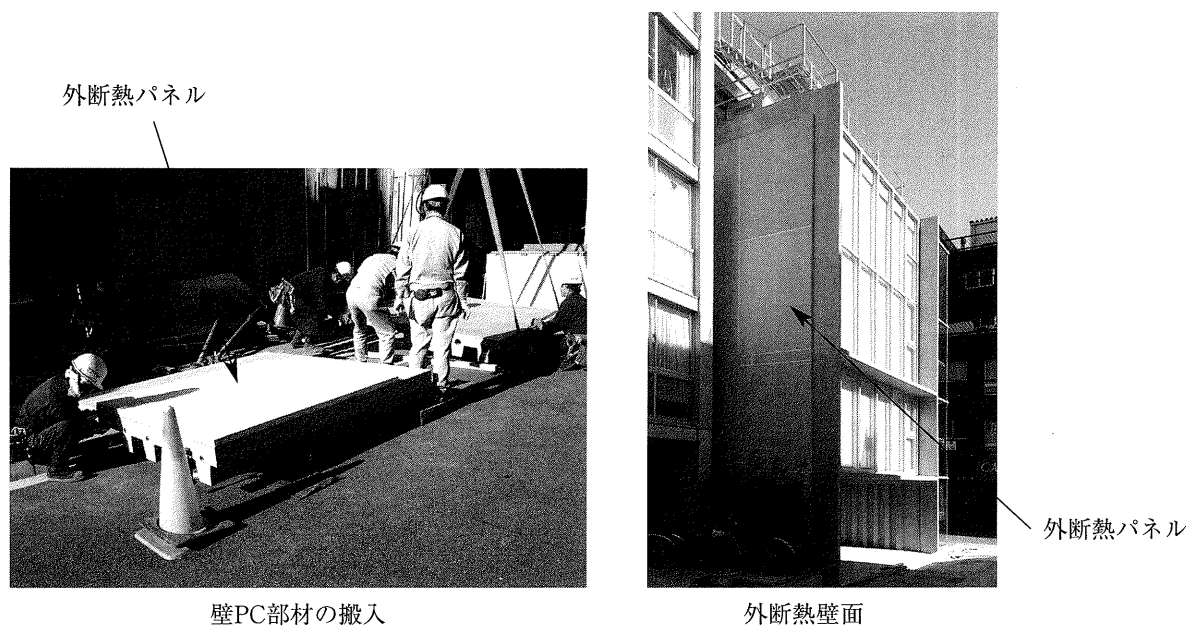
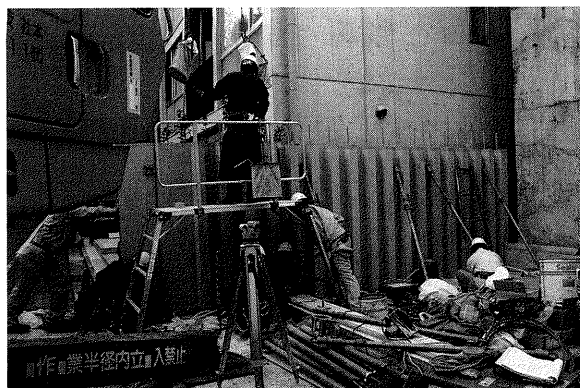


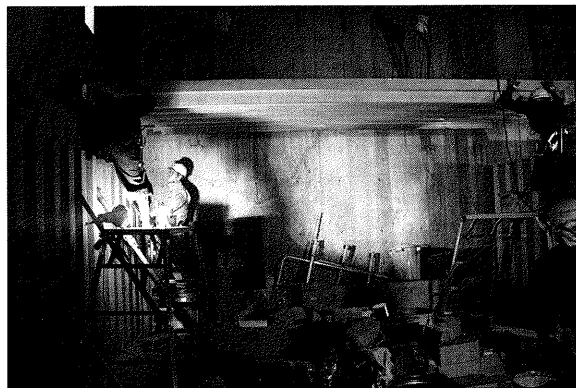
図3.1 外断熱先貼り工法

4. 建方計画

仮設は壁部材の斜めサポートのみであり、敷地一杯に建設が可能となる。隣地境界からのクリアランスは西側125mm、北側90mmである。PC部材は壁・床・エレベータシャフトから構成される。建方は1層1日、計5日間で終了した。



壁PC部材の建て込み



床PC部材の建て込み

図4.1 PC建方写真

5. まとめ

PC構造は工期が短く、現場の騒音が小さく近隣への影響が小さい工法であるため、都心部の狭小敷地に適した工法であると言える。また、都市型住宅はコスト面において土地の価格が大きな比重を占めるため、一般的に高価なPC構造を採用しても、全体のコストに対する影響は小さい。むしろPC構造を採用することにより、耐久性および耐震性の向上だけでなく、狭小敷地の高効率利用が図られ、より資産価値を高めることができると言える。

コンクリート構造物の環境設計

香川大学工学部安全システム建設工学科
広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
大成建設(株)技術センター土木技術研究所

堺 孝 司
河 合 研 至
大 脇 英 司

1. まえがき

IPCC (気候変動に関する政府間パネル) は、2007年当初から相次いで発表された3つの作業部会の評価報告書を統合した第4次報告書を採択した。報告書は、人間の活動が地球温暖化を招いたことを明記するとともに、地球の平均気温が今世紀末までに最大で6.4度上昇する可能性があり、気温の上昇幅を2～3度に抑えるためには2050年までに温暖化ガスを半減させる必要があるとしている。IPCCと元米国副大統領で「不都合な真実」を映画化したアル・ゴア氏が2007年のノーベル平和賞を受賞したことに示されるように、地球温暖化は世界の最も重要な政治問題となってきた。京都議定書で決定した1990年比の温暖化ガス削減量はほとんど実質的な意味は無いと言わざるを得ないが、温暖化ガスを削減する端緒となったことでは重要な決定であった。

このような状況の中で、建設分野は今後どのような展開をすべきであろうか。人間の社会経済活動を機能させる社会基盤整備には、世界中で膨大な資源・エネルギーが消費されている。その正確な統計資料はないが、石材が200億トン、鉄鋼生産のために10億トン以上の鉄鉱石、セメント生産量が20億トン程度とされている。コンクリートは100億トン弱の生産量と見られている。世界の物質フローが約260億トン程度であることを考慮すれば、建設関連分野は極めて多くの資源を用いていることが分かる。また、鉄鋼やセメント生産に多くのエネルギーを消費している。今後、これらの数値が著しく大きくなることは自明の理である。建設分野で排出される温暖化ガスも現在は、全体の10%に満たないと考えられるが、今後それらが倍増する可能性がある。更に、他の分野が省資源・省エネルギーを進めていけば、建設分野の全体に占める割合は増加することとなる。今や、工業製品の分野は「環境」を中心に据えてビジネス展開を図らざるを得ない状況になっているが、それと比べると建設分野は相当出遅れている感は否めない。その大きな理由は、土木・建築構造物は工業製品の様な単一大量生産でないこと、コンクリートの体積で約7割が骨材であることに見られるように建設材料自体のイノベーションが容易でないこと、及びその寿命が著しく長いことなどが考えられる。一方、高強度コンクリートの利用による超高層ビルや橋梁等に見られるように、土地利用・環境便益を著しく大きくするなどの側面もある。また、地下空間構造物の建設も環境便益が大きいと考えられる。ダムによる水力発電は、火力発電と比べて、ダム建設時の負荷を考慮しても単位発電量あたりの温暖化ガス排出は著しく小さい。

このように、建設行為は、環境負荷と環境便益の両面がある。重要なことは、これらを定量

的に評価し、環境負荷を最小にして環境便益を最大にする設計・施工・維持管理・解体・リサイクルを行うことである。そのような命題を明確にすることにより、必要な技術開発がなされ、建設分野も地域及び地球規模での環境負荷低減に寄与することができると考えられる。本稿では、このような観点から、コンクリートの環境側面及び環境技術の現状について概説するとともに、コンクリート構造物の環境負荷低減のためのシステムとして土木学会「コンクリート構造物の環境性能照査(指針)」を紹介し、これを踏まえた環境設計の事例を示す。なお、本稿は、2007年「コンクリート工学」5月号¹⁾特集から、堺・河合・大脇の記事を転載し、加筆・修正したものである。

2. コンクリート構造物の環境負荷低減に向けた技術とシステムー現状と展望ー

2.1 コンクリートの環境側面および環境技術

(1) 骨材

世界で年間約260億トンのマテリアルフローがある中で、建設資材としての骨材に約200億トンが用いられているとされる²⁾。つまり、天然砂・砂利、碎石は、自然界に最も潤沢に存在し、そしてそれ故にこれらが社会基盤の整備に最も多く利用されている。骨材事情は国および地域により異なるが、近年環境保全上の制約から天然骨材から碎石骨材へとシフトしつつある。それに伴い、骨材の品質も変化してきていると思われる。骨材の品質はコンクリートの品質、つまり耐久性に大きく影響する。碎石骨材は、一般に鋭角を有し、従ってコンクリートの水量を増大させる。近年、碎石製造において、骨材の角ばりを低減させる新しい技術が開発されているが、製造に伴う環境負荷およびこのような骨材のコンクリートの性状に及ぼす影響についての検討はほとんど行われていない。

近年、日本においては、インフラ整備の成熟が言われている。国土交通省直轄の一般国道と地方自治体が管理する建設後50年以上の橋梁数は、2005年で8,191であるが、2025年にはそれが63,494に増大する³⁾。一方、都市部での建築物の建て替えが増大している。日本政策投資銀行の試算⁴⁾によれば、コンクリート塊の排出量は、2005年で1.12億トンであるが、2025年には2.1億トンと倍増する結果となっている。2005年のコンクリート総生産量が、約2.85億トンであることを考慮すれば、これらの排出量は極めて大きいと言える。これまで、コンクリート塊はそのほとんどが路盤材として用いられてきたが、その需要が急速に縮小することが予測されている。廃棄物処理場の逼迫や骨材資源の保存などの観点から、これらを再生骨材として利用することが重要となっており、再生骨材製造技術の開発が進められている。

日本における再生骨材製造技術には、加熱すりもみ法⁵⁾、堅型偏心ロータ法⁶⁾、および機械式すりもみ法⁷⁾などがある。加熱すりもみ法は、コンクリート塊を300℃程度で加熱して、セメントペースト部分を脆弱化し、骨材に付着したモルタルやセメントペーストを除去する方法である。

この再生骨材製造技術は、倉庫の建替工事において実際に適用された⁸⁾。図-2.1に、本方法による再生骨材製造装置の概要を示す。再生骨材製造には多量の微粉が発生し、これらの処理は再生骨材製造・利用システムの運用において極めて重要となるが、微粉を深層混合処理工法(ソイルセメント壁)の固化材置換材として利用できることが示された⁹⁾。堅型偏心ロータ法は、原コンクリートを外筒部と高速で偏心回転する内筒部の間を上部から下部へ通過させ、すりもみ作用により粗骨材とモルタル分に分離させる方法である。図-2.2に、本方法による再生骨材製造装置の概要を示す。この方法で製造された粗骨材は、実際に住宅建替プロジェクトにおけ

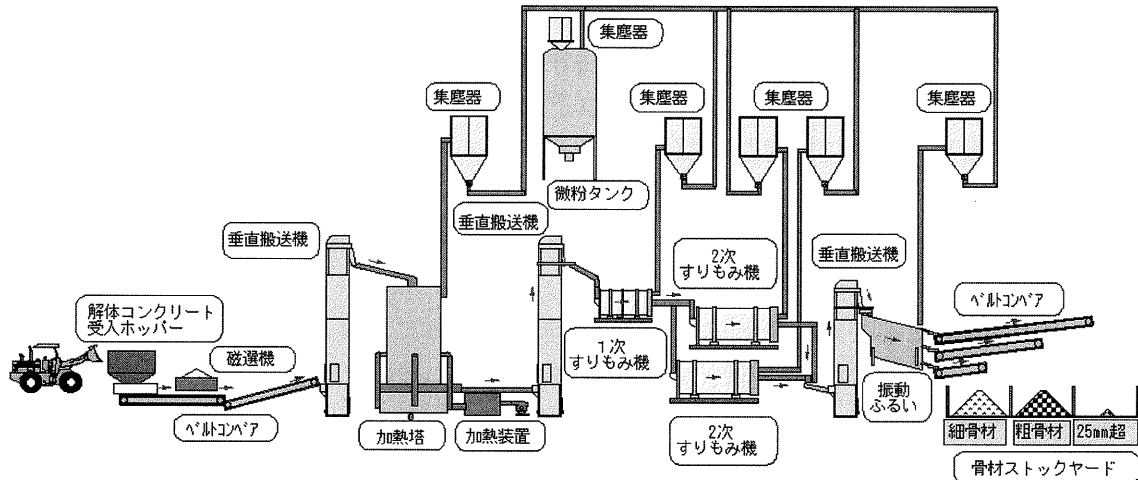


図-2.1 加熱すりもみ法による再生骨材製造概念図(清水建設提供)

る基礎および杭コンクリートなどに用いられた¹⁰⁾。機械式すりもみ法は、ドラムを仕切り板で細かく区切り、これにすりもみ用の鉄球を装填し、仕切り板を回転させることにより粗骨材および細骨材を製造するものである。図-2.3に、本方法による再生骨材製造装置の概要を示す。この方法で製造された粗骨材は、実際に平屋建て集会場の上部躯体に用いられた¹¹⁾。

一般に、再生骨材製造はバージン骨材と比べてエネルギー使用量が多くなり、従って環境負荷が大きくなる。この環境負荷を外部コストとしてどのように扱うかが大きな課題であるが、再生骨材の製造・利用システム全体でこれらを吸収できるのが理想である。黒田ら¹²⁾は、この観点からオンサイト型コンクリート資源循環システムを構築し、本システムが従来の路盤材利用の場合よりCO₂排出量が少なくなることを示した。これは、資材の

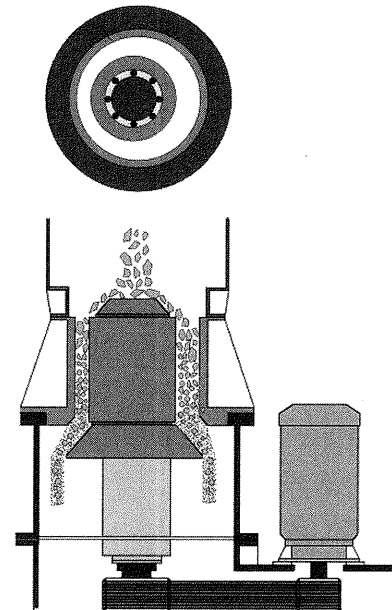


図-2.2 縦型偏心ロータ法による再生骨材製造概念図(竹中工務店提供)

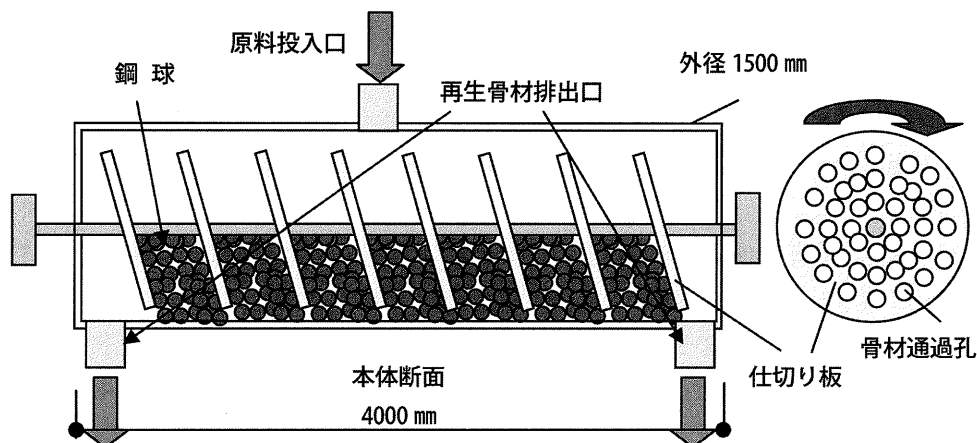


図-2.3 機械式すりもみ法による再生骨材製造概念図(鹿島建設提供)

輸送量や微粉利用による地盤改良固化材の減少によって実現されたものである。柳橋¹³⁾は、コンクリート塊の路盤材に利用する場合、再生粗骨材と再生砂をそれぞれコンクリートと路盤・埋戻材に用いる場合、再生粗骨材と残りをそれぞれコンクリートとセメントクリンカーに用いる場合のCO₂排出量について検討し、CO₂排出量がほとんど同じであるから再生骨材としての利用は天然骨材の保存に寄与し、環境に優しいと結論している。増田ら¹⁴⁾は、火力発電所の建替をモデルに、再生骨材の新設建物の構造躯体への利用に関して、経済性および環境負荷の検討を行っている。

鉄鋼スラグも骨材として利用されている。2005年度の日本における高炉スラグおよび製鋼（転炉および電気炉）スラグの生成量は、それぞれ25,747千トンおよび14,897千トンである¹⁵⁾。この内、コンクリート用骨材としては、高炉スラグがほとんどであり、その量は3,158千トンである。

フライアッシュは、セメント代替混和材として利用されてきたが、最近これを細骨材として利用する考え方が生まれている¹⁶⁾。将来予想される世界的なフライアッシュの生産量の増大を考慮すれば、セメント代替及び細骨材代替を統合する配合設計の開発が望まれる。

近年、廃棄物処分場の逼迫およびダイオキシンや重金属の処理の問題から、ごみおよび下水汚泥を熔融処理することが一般的になりつつある。熔融処理により残滓として熔融スラグが発生する。ごみおよび下水汚泥熔融処理施設は2004年度で全国にそれぞれ144箇所および18箇所稼働しており、熔融スラグの生産量はそれぞれ48万トンおよび4.4万トンとなっている¹⁷⁾。将来、ごみ熔融スラグの生産量は最大270万トンになることが推計されている。一方、香川県豊島における60万トンにも及ぶ不法投棄産業廃棄物¹⁸⁾も2005年から熔融処理を開始した。10年間で約30万トンの熔融スラグが生産され、香川県ではこれを全量コンクリート用骨材として利用する予定である。環境省によれば、不法投棄残存総量は約1,096万トンに及び、毎年40万トン前後の不法投棄がなされている。これらも、最終的には熔融処理が必要になると考えられる。これまで、ごみおよび豊島熔融スラグのコンクリートへの適用に関する基礎的な研究が行われてきた^{例えば19-25)}。熔融スラグの特徴は、ガラス質であることによって保水性が低く、その利用量が多くなるとブリーディングが増大し、コンクリートの強度低下や、鉄筋コンクリートでは鉄筋とコンクリートの付着性が低下する。従って、熔融スラグの許容細骨材置換率は、要求されるコンクリートの性能によって異なってくる。また、熔融スラグ中に含まれる金属アルミニウムがセメントのアルカリと反応して水素ガスを発生させコンクリートが膨張劣化を起こす場合がある²⁰⁾ので注意が必要である。後述するように、コンクリート用熔融スラグ骨材のJIS²⁶⁾が制定された。今後、熔融スラグを貴重な資源として利用していく必要があるが、現状の熔融処理施設は必ずしも熔融スラグをコンクリート用骨材として利用することを目的に稼働しておらず、生産される熔融スラグはコンクリート用骨材としては不適なものも少なくない。今後、熔融固化処理方法の改善等により、熔融スラグが全量骨材資源として利用される環境を整えることが望まれる。

(2) セメント

セメントは、社会基盤整備の基礎材料として最も重要なものである。セメント製造における環境との関わりに関して2つの側面がある。CO₂排出と原料・燃料としての各種廃棄物の利用である。日本においては、混合セメントおよび輸出を含めてこの10年で8億トン以上生産している。また、世界のセメント生産量は現在20億トン程度と考えられる。図-2.4は、Humphreysら²⁷⁾によるセメント需要の予測である。これによれば、今から30年後には40億トン前後の生産が見込まれる。図-2.5は、セメント製造における各国・地域のCO₂排出原単位を示す。これら

の平均値0.87 (kg-CO₂/kg-Cement)を用いれば、セメント40億トン製造は、約35億トンのCO₂排出となり、これは現在日本が排出している総CO₂約13億トンの約2.7倍となる。また、最も低い日本のCO₂排出原単位0.73を用いれば、30年後の世界のCO₂排出量は約29億トンとなる。これは、日本のセメント製造技術により世界のセメント起源CO₂排出量を約8%削減できることを意味する。

現在、日本におけるセメント製造には、3,000万トン弱の各種廃棄物・副産物が原料・燃料として用いられている。原料としては高炉スラグ、フライアッシュ、下水汚泥等が、また燃料としては廃タイヤや廃プラスチックなどが用いられている。図-2.6は、日本におけるセメント生産量と廃棄物・副産物使用量の推移を示す。セメント生産量は減少しているが、廃棄物・副産物使用量は確実に増加していることが分かる。セメント産業では2010年度における目標値として400kg/t-cementを設定している。図-2.7は、セメントクリンカ1トン当たりのエネルギー消費量の国際比較であるが、日本が飛び抜けて高いエネルギー効率を示している。このように、日本のセメント生産技術は極めて優れている。このことは、結果としてコンクリート構造物建設に関わるCO₂排出量を減少させていることを意味する。

(3) 混和材

コンクリートにおける混和材利用の基本的技術は確立されているとい

える(例えば28, 29)。混和材をコンクリートに利用する理由は、これまで、産業副産物の有効利用の観点と、これらの利用によるコンクリート特性の改善にあった。しかし、最近ではこれらに加えて、環境負荷低減技術として改めてその重要性が注目されている。

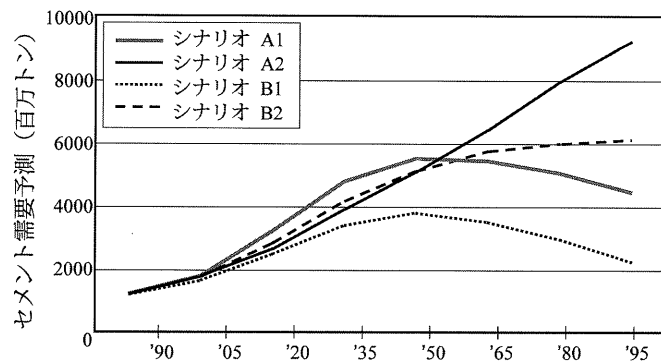


図-2.4 セメント需要予測

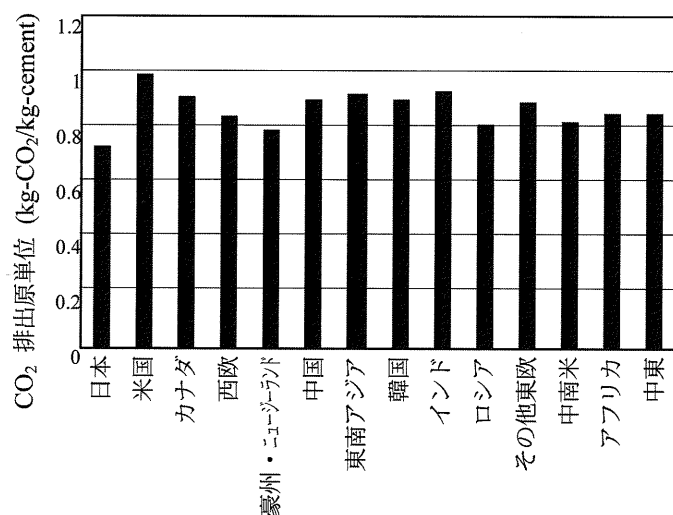


図-2.5 セメント製造における各国・地域のCO₂排出原単位

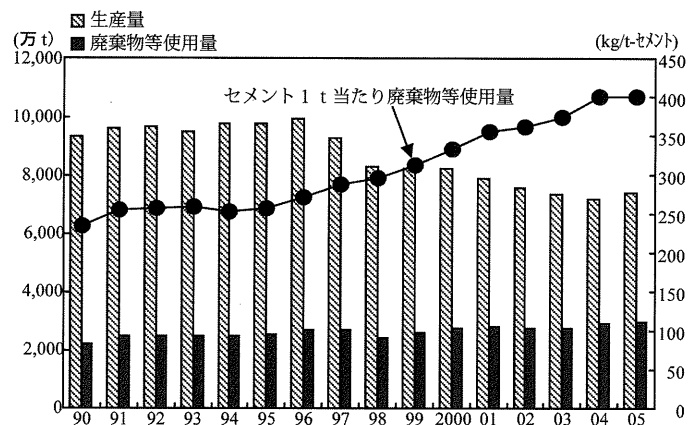


図-2.6 セメント生産量と廃棄物・副産物使用量の推移(セメント協会提供)

図-2.8に示すように、日本における2005年の高炉スラグ利用量の約67%が高炉セメントに利用されている¹⁵⁾。これは、高炉スラグの性能を最も合理的な形で利用しているといえる。図-2.9は、日本における2004年度の石炭灰利用量9,792千トンの利用内訳³⁰⁾である。セメント分野利用70%の内ほとんどがセメント原材料としてのものである。コンクリートへ利用できるフライアッシュが石炭灰総生成量の約20%程度であるにもかかわらず、コンクリート用混和材としての利用は約1%に過ぎない。フライアッシュが混和材としてその優れた性能を有することを考えれば、この状況は必ずしも適切とは言えない。なお、日本では現在、発生する石炭灰の約10%は埋め立て処理がなされている。

図-2.10は、2002年と2020年における世界の各種混和材料の生産量の推定値³¹⁾を示す。特に

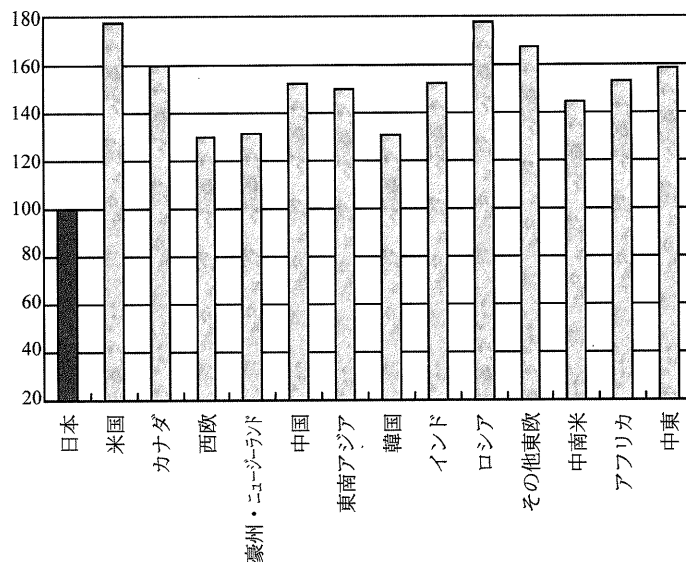


図-2.7 セメントクリンカ1トン当たりのエネルギー消費量の国際比較 (セメント協会提供)

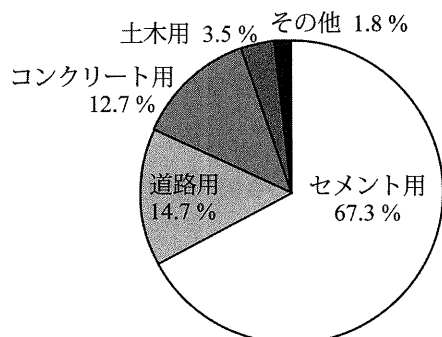


図-2.8 高炉スラグの利用内訳

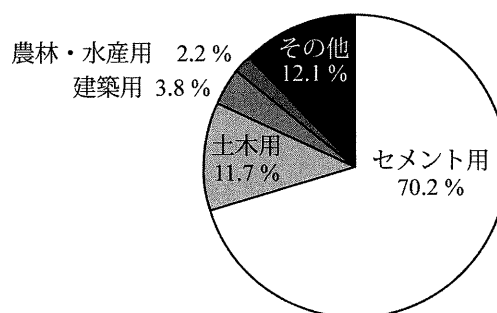
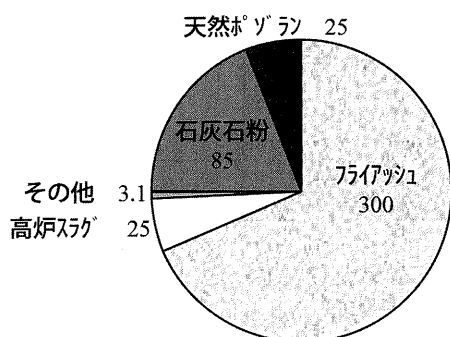
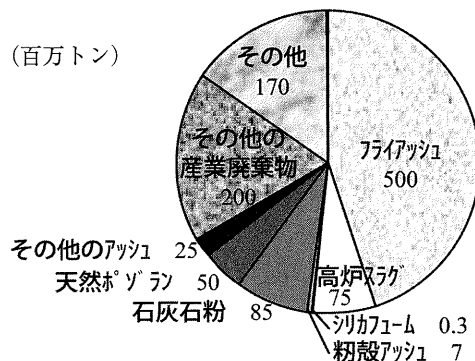


図-2.9 フライアッシュの利用内訳



2002



2020

図-2.10 各種混和材料の生産量の推定値

表-2.1 再生骨材Hの物理的性質

試験項目	再生粗骨材 H	再生細骨材 H
絶乾密度 g/cm ³	2.5 以上	2.5 以上
吸水率 %	3.0 以下	3.5 以下
すりへり減量 %	3.5 以下	—
微粒分量 %	1.0 以下	7.0 以下

フライアッシュと高炉スラグの生産量は、それぞれ約1.7および3倍に増加する。これら混和材の将来増加分をコンクリートに有効利用することにより、今後のコンクリート需要の増加による環境負荷を抑制することが可能となる。

2.2 コンクリートの環境関連規格・指針

(1) 再生骨材JIS^{32, 33)}

構造物の解体などによって発生したコンクリート塊に対し、破碎、磨砕、分級等の高度な処理を行って製造したコンクリート用高品質再生骨材Hに関する規格が、JIS A 5021として2005年に制定された。再生骨材Hの物理的性質は、表-2.1を満足する必要がある。絶乾密度には許容差 $\pm 0.1\text{g/cm}^3$ が設けられている。また、表-2.2に示すように、再生骨材Hに含まれる不純物量の上限值が規定されている。再生骨材の大きな問題の1つは、アルカリシリカ反応性であるが、これについてはアルカリシリカ反応性試験により無害と判定される必要がある。

この他、低品質再生骨材Lを用いた再生骨材コンクリートに関する規格も制定されている。このコンクリートは、裏込めコンクリート、間詰めコンクリート、均しコンクリート等を対象にし、アルカリシリカ反応性対策としてB種混合セメントや混和材を用いることが前提となっている。

(2) 溶融スラグ骨材のJIS²⁶⁾

一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を1,200℃以上の高温で溶融し、冷却固化して製造されたコンクリート用溶融固化骨材に関する規格が、JIS A 5031として2006年に制定された。溶融スラグ骨材の物理的性質は表-2.3の規定を満足する必要がある。これらの数値は、「コンクリート用碎石及び

表-2.2 再生骨材Hの不純物量の上限值

分類	不純物の内容	上限値 (%)
A	タイル、煉瓦、陶磁器類、アスファルトコンクリート塊	2.0
B	ガラス片	0.5
C	石こう及び石こうボード片	0.1
D	その他無機系ボード	0.5
E	プラスチック片	0.5
F	木片、紙くず、アスファルト塊等	0.1
	不純物量の合計（全不純物量）	3.0

表-2.3 溶融スラグ骨材の物理的性質

試験項目	溶融スラグ粗骨材	溶融スラグ細骨材
絶乾密度 g/cm ³	2.5 以上	2.5 以上
吸水率 %	3.0 以下	3.0 以下
安定性 %	12 以下	10 以下
粒径判定実績率 %	55 以上	53 以上
微粒分量 %	1.0 以下	7.0 以下

砕砂 (JIS A 5005)」の規定と同じである。溶融スラグ骨材の化学成分に関しては、酸化カルシウム (CaOとして) が45%以下と規定されている。また、有害物質の溶出量と含有量は、それぞれ土壤環境基準および土壤汚染対策法基準で規定している。このように、コンクリート用溶融スラグ骨材規格は、基本的には従来の規格・基準にしたがったものである。このことは、溶融スラグの基本特性が骨材としての要件を備えていることを意味する。なお、この規格で対象とするコンクリートの設計基準強度は35N/mm²以下のプレキャスト無筋および鉄筋コンクリート製品ならびに呼び強度が33以下のレディーミクストコンクリートであり、耐久性を確保するために水セメント比は55%以下としている。

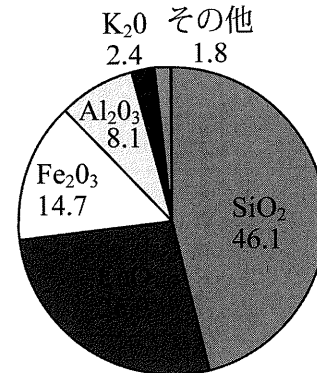


図-2.11 豊島廃棄物等溶融スラグの化学成分

本JISは、産業廃棄物溶融スラグは対象外となっている。豊島産業廃棄物等溶融スラグの化学成分を図-2.11に示すが、CaOの割合は比較的少なく、SiO₂が多い。そのことに起因してアルカリ骨材反応が懸念されるが、化学法・モルタルバー法により常にモニターされている。

(3) 環境規格・指針

環境に関わる国際規格としてはISO14000シリーズがある。ISO 14040は、環境マネジメント(ライフサイクルアセスメント)の原理とフレームワークが規定されている。この規格は一般的な製品を対象としており、ライフサイクルアセスメントは、目的・範囲の定義・インベントリ分析・負荷評価・解釈からなる。建築・土木構造物を対象としたものとしては ISO 15686-6³⁴⁾がある。この規格は、構造物のサービスライフ計画における環境負荷考慮に関するもので、設計オプションの環境負荷評価の一般的な手順を示している。また、現在ISO/TC59/SC17/WG3は、建築・土木構造物の環境製品宣言規格原案³⁵⁾の検討を行っている。この原案は、建築・土木構造物を「製品」と見て、環境負荷、資源使用、および廃棄物発生等について環境製品宣言(EPD)を行うものである。これら2つのISO規格(原案)は、対象物が同じであるにもかかわらず、その考え方・手法は異なる。なお、現在、ISO/TC71において「コンクリートおよびコンクリート構造物の環境マネジメント (Environmental Management for Concrete and Concrete Structures)」に関する分科会(SC)の設置が検討されている。

一方、土木学会は、2005年に、「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」³⁶⁾を発刊した。本指針(試案)は、コンクリート構造物の設計、施工、供用、維持管理、解体・廃棄や解体後の再利用を行う際の、環境性の配慮に対する一般を示すものであり、コンクリート構造物の安全性、使用性、および耐久性に関する性能照査型規定を「環境」にも拡張適用することを意図している。本指針(試案)の概要は、次章で記述する。

2.3 今後の展望

以上、コンクリートに関わる環境側面の現状について概観した。建設分野における環境配慮の実際の適用については、建築分野で進められてきた。GBC (Green Building Challenge) がカナダで提唱され、環境負荷評価ツールGBTToolの開発が行われた。それを契機に Sustainable Building 世界会議が開催され、その後も継続している。環境性能評価ツールとしては、この他、

よく知られたBREEAM（英国）、LEED（米国）、CASBEE（日本）などがある。しかし、これらは必ずしも構造物の躯体を対象として環境負荷低減を目指すものではないといえる。従って、コンクリートの分野では、今後コンクリート構造物自体の環境負荷低減を図る技術開発を進める必要がある。これを促進するには、環境性能に基づく環境設計システムの導入と環境性能評価ツールの開発、およびそれらの実際への適用システムの構築が必要となる。

環境負荷低減を図る上でもう一つ大きな問題がある。環境負荷低減がコスト低減に繋がるのが理想的であるが、現実には環境コストが増大する。また、現在、環境負荷低減が設計上の要件になっていない。一般市場では、これらの外部コストを表出させないで価格低減を図ることが追求されてきた。温暖化ガスによる影響が我々の日常に深刻に現れない現状で、これらを価格へ内部化することは容易ではない。京都議定書のCDMや排出権取引は環境コストの一つの内部化であり、機能し始めている。しかし、これらは全体から見れば極めて限られたものであり、圧倒的に多くを占める日常の社会経済活動には適用できない。このような状況の中で、インフラ整備に関して注目されるのは総合評価入札方式である。これまでは環境負荷は外部不経済であった。外部不経済の内部化を可能とするシステムとして、現在注目されている総合評価入札方式がある。この制度は、入札に価格以外の項目を設定し、総合的に評価するものである。今後、この方式を環境に関して機能させることが望まれるが、そのためには客観的かつ有効な環境評価指標の確立が必要となる。更には、プロジェクトの発注者が環境に関わる社会的説明責任を果たすという強い意思を示すことが極めて重要となる。

環境設計では、環境負荷量の算定が必須である。つまり、あらゆる行為における環境負荷原単位が必要となる。現在、コンクリートに関わる基本的な環境負荷原単位に関しては、土木学会「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」で示されている。しかし、今後これらはより正確なものに更新していく必要がある。

LIME³⁷⁾による環境負荷からの保護対象は、人間の健康、社会資産、生物多様性、一次生産である。様々な物質の排出、土地利用、廃棄物排出、資源使用が、最終的にこれら保護対象に影響を与える訳であるが、これらの影響の程度を考慮して統合化を図る必要がある。LIMEでは、統合化係数が与えられているが、これらは社会科学的な処理を含むため、その合理性については多くの議論がある。また、コンクリート構造物を対象にして環境影響の総合評価を行う場合、LIMEの枠組が合理的であるかどうかの検討も必要である。

3. 土木分野における環境性能評価

3.1 これまでの取組み

土木学会コンクリート委員会の中で、環境負荷への配慮を意識した取組みが最初になされたのは、平成9年～平成11年に設置されたコンクリート資源有効利用小委員会（委員長：広島大学・田澤榮一教授（当時））である。この委員会は、省資源・省エネルギーなど環境に配慮したコンクリートの開発と利用を促進する目的で第1種小委員会として設置され、委員会成果として、資源を有効に利用するための材料評価システムとコンクリート構造物の環境負荷評価手法に関する提言を行った^{38, 39)}。この中で、コンクリート構造物の環境負荷評価手法に関しては、コンクリートのライフサイクルにおける環境負荷を考慮した性能評価値としてエコバリューを定義した。これはバリューエンジニアリングの概念を導入したもので、コンクリートに必要な機能を建設に関わるコストと環境を意識したコスト（エココスト）の和で除した値で表わす

ものである⁴⁰⁾。すなわち、エコバリューが大きいほど環境に対する意識が高いことを意味するが、時間的な制約から概念的な議論にとどまってしまうている。

この成果を受け、資源有効利用を推進する方法の一つとして環境負荷の観点からコンクリートの性能を評価する手法について調査研究を行うことを目的として、平成11年に第3種小委員会としてコンクリートの環境負荷評価研究小委員会（委員長：広島大学・河合研至）が設置された。この委員会では、2年間の活動を通じて以下の内容を実施した⁴¹⁾。

- コンクリート構造物のライフサイクルにおける環境負荷を評価する上で必要となるインベントリデータとして、エネルギー発生量、CO₂排出量、廃棄物処理量・発生量を収集した。
 - コンクリート構造物のライフサイクルにおける環境負荷を簡便に評価できる方法として環境ポイントを作成し提案した。
 - 環境負荷評価をコンクリートに適用する場合の問題点を整理し、運用方法に関して検討した。
 - コンクリートの環境性能を念頭に置き、コンクリートの環境負荷評価手法の一提案を提示した。
- ここで、コンクリートが環境に及ぼす影響の度合いを、コンクリートが有する一種の性能として捉えることとし、これを環境性能と称した。

この活動から、一般的に環境負荷の評価にあたって用いられるLCA（Life Cycle Assessment/ Analysis）の手法はコンクリートに対しても十分に適用可能であることが認められたが、評価の実施や運用にあたっての問題点は、なお山積していた。そのため、環境性能が性能照査の対象となることを前提におき、環境性能の内容と照査・検査方法の具体化について調査研究を行うことを目的として、同小委員会は平成14年よりさらに2年間の第2期目の活動を実施した。そして、その成果として以下の内容を得ることができた⁴²⁻⁴⁴⁾。

- インベントリに関して、第1期の収集データを更新するとともに、エネルギー資源消費量、非金属資源消費量、鉄資源消費量、SO_x排出量、NO_x排出量、ばいじん排出量を新たに追加し、コンクリート構造物の構成材料、施工、解体、廃棄・リサイクルに関わる91項目、輸送に関わる16項目、各種エネルギーに関する13項目、総計120項目のインベントリデータを整備、提示した。
- 環境負荷の定量的評価手法について、異なる環境負荷要因の統合化を含めて体系化を図り、推奨する統合化手法を提案した。
- 現行の性能照査型設計の枠組の中で、環境性能の照査を行う評価手法を提案した。

なお、平成14年度の土木学会全国大会では、コンクリート委員会が企画して「コンクリート構造物の環境設計－技術革新への挑戦－」と題する研究討論会（座長：香川大学・堺孝司）が開催され、コンクリートや関連領域における環境設計に関して国内外の状況を把握するとともに、環境に配慮したコンクリート構造物の設計施工技術の革新に向けた議論が活発に行われた⁴⁵⁾。

さらに、平成15年には、現行のコンクリート標準示方書に環境側面を組み込むためのフレームの構築と環境側面に関する具体的な情報の整理を行い、環境設計指針（案）を作成することを目指して、コンクリート委員会示方書小委員会の中に環境側面検討部会（部会長：香川大学・堺孝司）が設置された。そして、その成果が「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」として平成17年に刊行され³⁶⁾、さらに、条文と解説を英訳した英語版が翌年に刊行された⁴⁶⁾。

3.2 「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」について

図-3.1に示すように、コンクリートライブラリーの中には指針（試案）と合わせて数多くの付属資料が盛り込まれているが、ここでは指針（試案）について概説する。

先述のように、本指針（試案）は、現行のコンクリート標準示方書における性能照査型設計の枠組の中に、環境性能を取り込むことを目指したものである。すなわち、コンクリート構造物の建設から廃棄までの行為における環境に及ぼす影響を環境性と定義し、構造物の要求性能として安全性、使用性、耐久性に加えて環境性に関する検討を求めている（図-3.2）。ただし、本来であれば、環境性能は力学的性能や耐久性性能とのバランスが図られつつ最適な解が見つけ出される体系が必要であるが、現時点では示方書の体系そのものを変化させるまでの学術的・技術的背景が備わっていないため、本指針（試案）では設計体系の中で環境性能のみを抽出した形を取り、力学的性能や耐久性性能は示方書によることとしている。

本指針（試案）における環境性の検討手順は、示方書における安全性、使用性、耐久性の検討手順と何ら変わりはないが、唯一の大きな相違点は、環境性についてはライフサイクルを通じて検討を行う必要があることである。そのため、示方書が設計作業から施工計画、コンクリートの製造、施工作業、維持管理を対象としているのに対して、本指針（試案）が対象とする範囲は、上記に加えてコンクリート材料の製造段階、構造物の解体・廃棄、解体コンクリートの再利用にまで及ぶことになる。

具体的な検討手順のフローを図-3.3に示す。コンクリート構造物が関わる環境側面には、様々な内容があるが、その中から要求する環境性能が抽出され、要求性能としての性能値がまず設定される。ここで、本指針（試案）で扱う環境側面は、地球環境、地域環境、工事従事者

1章 総 則

- 1.1 適用の範囲
- 1.2 コンクリート構造物の設計と本指針（試案）の位置付け
- 1.3 環境性の検討の手順
- 1.4 用語の定義

2章 コンクリート構造物の環境性

- 2.1 一 般
- 2.2 環境側面
 - 2.2.1 一 般
 - 2.2.2 温室効果ガス、大気汚染物質、資源・エネルギー、廃棄物
 - 2.2.3 水質・土壌汚染物質
 - 2.2.4 騒音・振動
 - 2.2.5 その他
- 2.3 環境性能の設定
 - 2.3.1 一 般
 - 2.3.2 環境性能の設定手順

3章 環境性能の評価

- 3.1 一 般
- 3.2 環境性能の評価方法
 - 3.2.1 一 般
 - 3.2.2 温室効果ガス、大気汚染物質、資源・エネルギー、廃棄物
 - 3.2.2.1 インベントリ分析
 - 3.2.2.2 特性化および統合化
 - 3.2.3 水質・土壌汚染
 - 3.2.4 騒音・振動
 - 3.2.5 その他

4章 環境性能の照査

- 4.1 一 般
- 4.2 照査方法

5章 環境性能の検査

6章 記 録

付録資料

I 環境側面への取組み

1. 建設分野の現状
2. 将来展望

II 環境側面の関連法規類

1. 国内の法規類
2. 海外の法規類

III コンクリート関連材料の環境負荷の現状

1. インベントリデータを使用するにあたっての留意点
2. セメント
3. 高炉スラグ微粉末
4. 化学混和剤
5. 天然骨材
6. コンクリート用スラグ骨材
7. レディーミクストコンクリート
8. 施 工
9. 工場製品
10. 有機系接着剤

IV 各種構造物における大気排出物量評価に関するケーススタディ

1. ダムを対象とした大気排出物量に及ぼす材料・配合、施工の影響
2. RC ラーメン高架橋における大気排出物量に及ぼす構造形式の影響
3. PC 橋上部工における構造形式の影響
4. 道路橋脚における大気排出物量に及ぼす構造形式の影響
5. 過酷塩害環境下における電気化学的防食工法の CO₂ 排出量評価

V コンクリートへの副産物利用に関する環境面からの評価

1. コンクリートへの各種副産物の利用の現状
2. 代表的副産物利用の浸透度に対する各種要因の影響分析
3. リサイクルに関する環境負荷評価と設計指針への活用の可能性

図-3.1 「コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」の構成

の作業環境としており、居住環境は扱っていない。また、供用時の構造物が機能を果たす故に生じる環境負荷、例えば道路構造物を建設した場合の通過車両によるCO₂排出などは、コンクリート構造物に直接起因する環境側面ではないので、これも対象外としている。

本指針（試案）の2.2節における環境側面の分類は、評価方法に対応させている。すなわち、温室効果ガスや大気汚染物質、資源・エネルギー、廃棄物はLCA手法による評価を想定し、水質・土壌汚染物質は試験・分析による評価、騒音・振動は直接測定などによる評価を想定している。

環境性に対する要求性

能としての性能値を、本指針（試案）では、「規制値」、「制限値」、「目標値」の3つに分類している。要求性能として抽出する環境側面の中には、法規制によって許容される限界値が定められているものも少なくない。この場合には、その限界値が要求性能における性能値となりうることから、これによって定まる性能値を「規制値」と称している。安全性、使用性、耐久性と同様に、環境性に関しても基本的には発注者が定量的に要求性能を設定することになり、これによって設定される性能値を「制限値」と称している。ただし、環境性能の場合、発注者が定量的に性能値を設定することが困難なことも十分に考えられる。その場合には、設計者が発注者の意向を理解した上で環境性能を定量的に数値化する必要がある。このようにして設定される性能値を「目標値」と称している。

以上で環境性能が設定されれば、その設定された環境性能が満足されるか否か、設計段階で照査する必要がある。そのために、次には環境負荷量としての評価値を求めることとなる。

試験・分析や直接測定の場合には、その実施結果によって値を求めることとなるが、LCA手法による場合には、インベントリ分析を行う必要がある。コンクリート構造物のライフサイクルに関連するインベントリは、まだ十分に整備されているとは言い難く、客観的で信頼性の高いインベントリの整備が急務となる。

環境性能を十分に満足することが設計段階で確認されると、実施段階（材料製造、施工、供

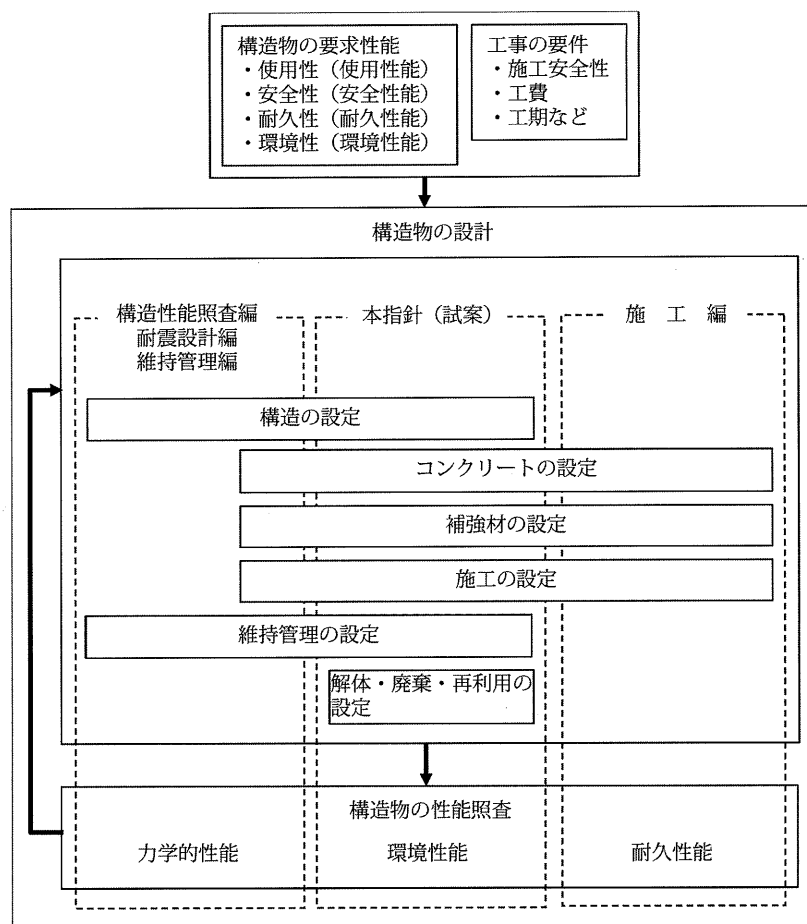


図-3.2 コンクリート構造物の設計における示方書各編と本指針(試案)の位置付け

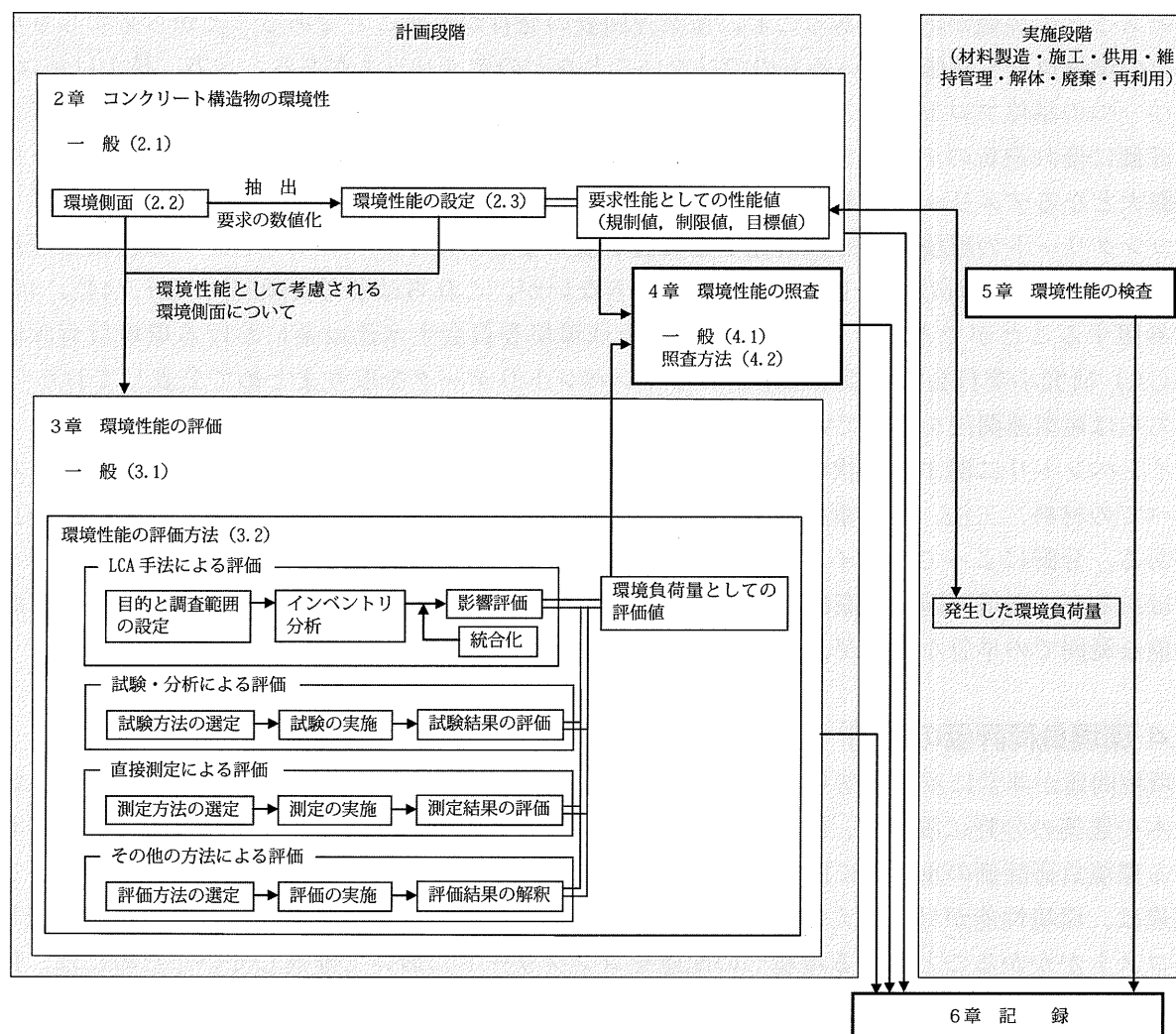


図-3.3 環境性検討手順のフロー

用、維持管理、解体・廃棄、再利用）において、実際に排出される環境負荷量が環境性能を満足するか否かの検査が行われる。環境性能の場合には、検査で不合格となった場合の対処が非常に難しい。概して、何らかの対処を講じることは環境への負荷を増すことにつながるからである。

上述したコンクリートの環境負荷評価研究小委員会では、その対処方法の一つとして、ペナルティーを課す方法をあげている⁴²⁾。例えば、入札制度における入札参加企業決定前の企業評価の段階で、環境性能を満足させられなかった実績を工事成績評価に反映させ、入札の制限等に利用する方法である。

3.3 コンクリート関連のインベントリ

インベントリの収集方法には、大別して2種類ある。産業連関法と積上げ法である。産業連関法とは、国内400業種以上の産業間および消費者等との経済取引を行列で表した統計表である産業連関表を利用し、各産業部門に投入あるいは各産業部門から排出されるエネルギーや物質量を基に環境負荷量を求める方法であり、マクロ的な評価に優れる反面、個々の製品またはプ

ロセスごとの評価が困難であること、産業連関表の発行が5年ごとであることから必ずしも現時点の環境負荷を評価しているものではないことなどのデメリットがある。一方、積上げ法は、一つ一つの単位プロセスごとに環境負荷量を積み上げていく方法であり、製品やプロセスごとの評価に優れ最新のデータを反映できる反面、正確さを求めれば求めるほど収集すべきデータが膨大となるデメリットがある。

コンクリートの環境負荷評価研究小委員会が取りまとめたインベントリデータは、積上げ法によっている。紙面の都合上ここでは掲載できないが、これらは参考文献36)、42)、44)、46)で参照することができる。一方、土木学会地球環境委員会土木建設業における環境負荷評価(LCA)研究小委員会も建設業にかかわるインベントリデータを取りまとめて公表しており⁴⁷⁾、こちらは産業連関法を用いている。

インベントリに関する現状の問題点は、鉄筋コンクリート構造物のライフサイクルに関わるすべての材料、工法、建設重機類等について、インベントリが整備されているとは言い難い点である。分野によっては、インベントリの公表が企業ノウハウの提供につながりかねないようではあるが、環境問題が国際的な最重要課題の一つとして取り上げられている現状を鑑みれば、可能な範囲での早急な拡充が、今後の環境負荷評価の進展のためには不可欠である。

3.4 環境負荷評価の運用

環境問題が非常に重要であり、環境負荷の低減へ向けた努力を行わなければならないことは、土木や建築の分野に限らず、誰しもが認識しているところであり、これまでも土木分野における環境負荷評価の重要性に関しては述べられてきている⁴⁸⁻⁵¹⁾。環境性能と他の性能との大きな相違は、環境性能が目に見える形でのコンクリートの性能ではない点である。そのため、概してコストがかかることとなる環境への配慮をコンクリートにおいて推進していくためには、何らかの動機付けが必要となる。

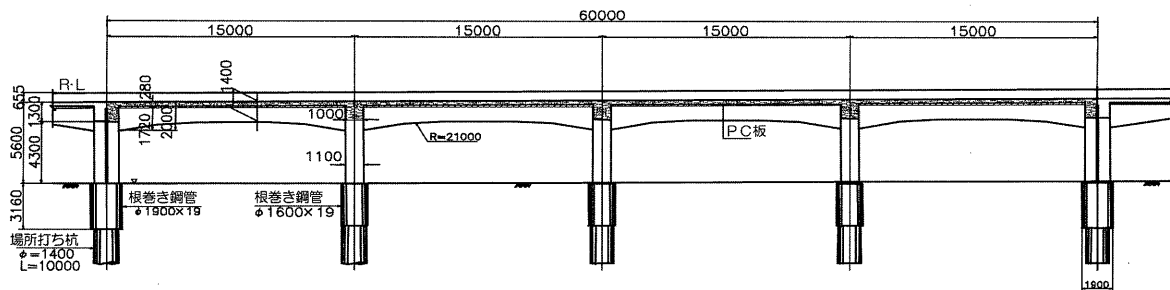
上述した、性能照査型設計への環境性の導入は、性能として規制を設けることによる環境への配慮であり、一つの動機付けとなりうる。もう一つの動機付けの方法としては、総合評価方式の活用があると考ええる。現在実施されている除算方式、加算方式のいずれにせよ、技術評価点の中に環境負荷の要素が組み込まれれば、環境への配慮を推進する動機付けと十分になりうると考える。最近では加算点が引き上げられる傾向にあり、この加算点の評価項目として、是非とも環境負荷の要素が導入されることを望むところである。

4. 環境設計、環境便益評価とLCA

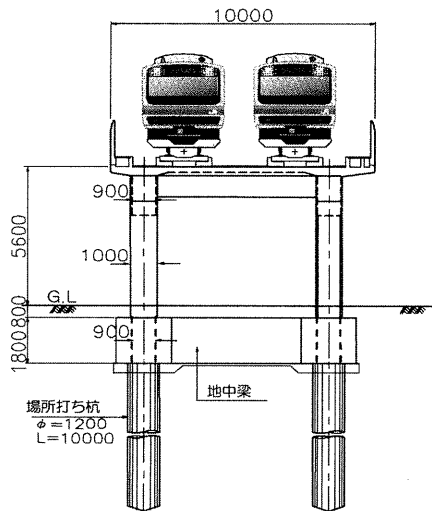
4.1 土木学会「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」³⁶⁾に基づく環境設計の例

(1) 概要

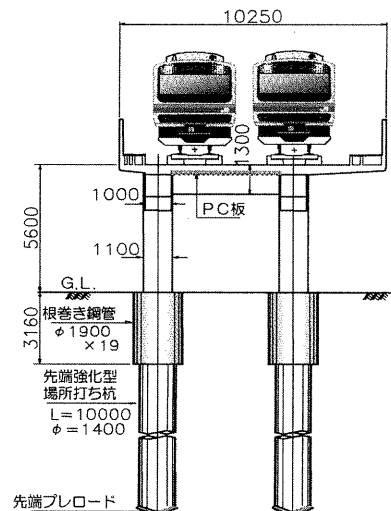
コンクリート構造物の設計では、これまで安全性、使用性、および耐久性に関する照査を行ってきた。今後は、これらに加えて環境性についての検討が必要となる。しかしながら、環境性は安全性等と本質的に異なることは明らかである。つまり、安全性に対する設計では、構造物が破壊して直接的に人間や社会に被害を及ぼさないことが設計要件となる。環境性に関しては、直接的な汚染や騒音については法的な規制の下で考慮されてきたものの、温室効果ガス、大気汚染物質、資源・エネルギー、廃棄物の抑制のためのシステムは整備されていない。これ



(a) 一般図 (地中梁なし)



(b) 断面図 (地中梁あり)

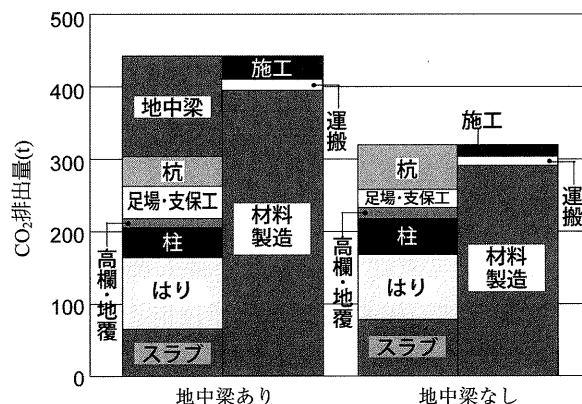


(c) 断面図 (地中梁なし)

図-4.1 RCラーメン高架橋への環境設計の適用

は地球環境問題における最終的な被害が明確になっていないことによる。人類の活動の結果発生する各種の物質が、最終的には、人間・社会と生態系に被害をもたらすであろうことは容易に想像できるが、問題はこれらを定量的に評価することが容易ではないことである。しかし、それらが不明確であるという理由で如何なる対策も取らずに事態の悪化を招くことは避ける必要がある。

コンクリートに関わる様々な活動においても、環境負荷低減を可能とするシステムを確立すべきであるとの考え方に立って策定したのが、「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」である。本指針（試案）は、土木学会のコンクリート標準示方書の体系である性能照査を基本としているが、環境性能に関する比較設計、あるいはISOの環境ラベル・宣言にも利用できる。つまり、本指針（試案）は、ISO環境規格のコンクリート版と考えることができる。ここでは、実構造物を対象に、本指針（試案）の適用性について検討した事例⁴⁸⁾ について紹介す

図-4.2 RCラーメン高架橋の建設によるCO₂排出量

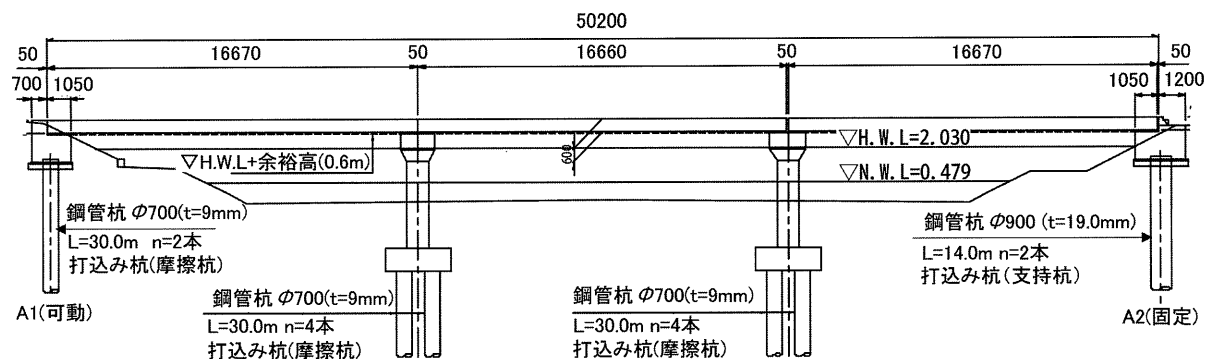


図-4.3 想定されるPC橋の一般図

表-4.1 UFCの配合

水	セメント	珪石微粉末、 シリカ、他	鋼繊維	減水剤
180	818	1479	157	24

単位：kg/m³、水 180kg/m³は高性能減水剤の水分 19kg/m³を含む

る。これらの事例により、環境性能の導入と環境負荷低減システムの構築が、コンクリート構造および材料の技術革新を促進するものであることが理解できよう。

(2) RCラーメン高架橋

鉄道踏切は、交通渋滞を起こすとともに安全上の問題がある。これらの解消には鉄道軌道施設の立体交差化が必要となる。図-4.1 (a) に、対象とするRCラーメン高架橋を示す。一般的なラーメン高架橋は、杭の支持力のばらつきを吸収し、耐震性能を確保するために、図-4.1 (b) に示すように杭と接合部に地中梁が設置される。

ここで、本指針（試案）に基づいて環境要求性能として、上記標準タイプの構造における環境負荷CO₂の20%削減を設定する。この環境要求性能を満足するために、図－4.1（c）に示すように、地中梁の代わりに先端プレロードによる杭の支持力強化と杭・柱接合部の根巻き鋼管補強技術を導入し、標準タイプと同じ耐震性能を確保した。図－4.2に、地中梁のある標準タイプと新たに導入した構造におけるCO₂排出量を示

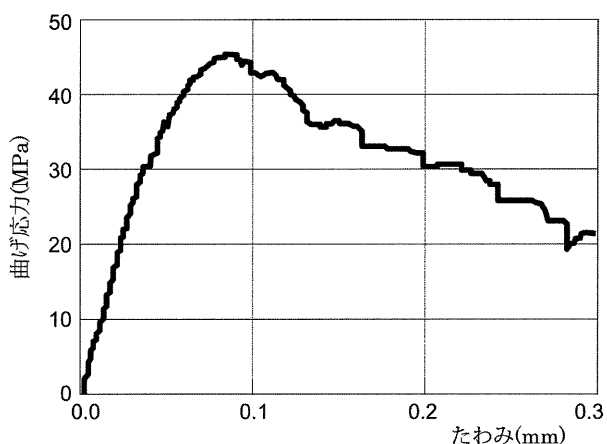
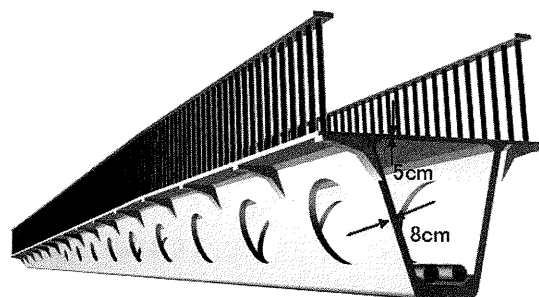


図-4.4 超高強度鋼繊維補強コンクリート(UFC)の曲げ挙動



圖一4.5 UFC橋断面狀況

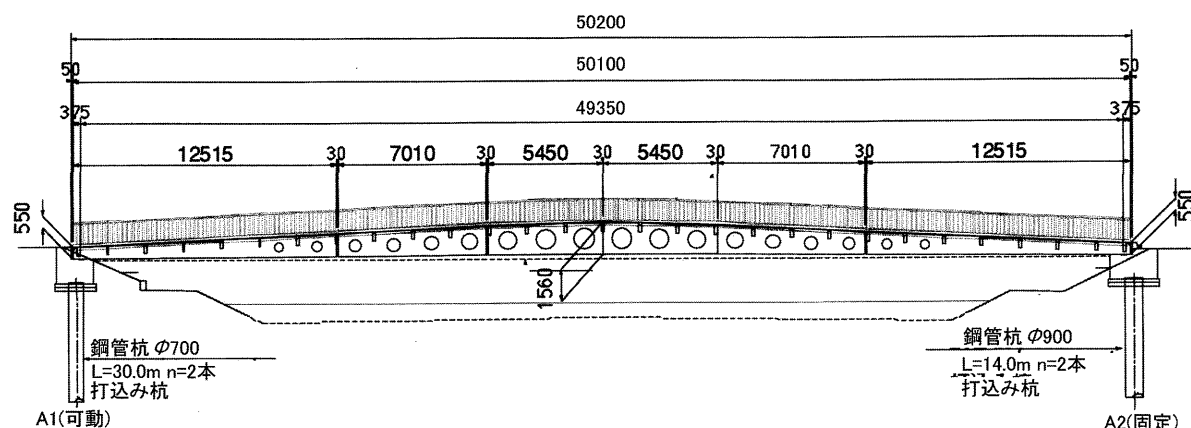


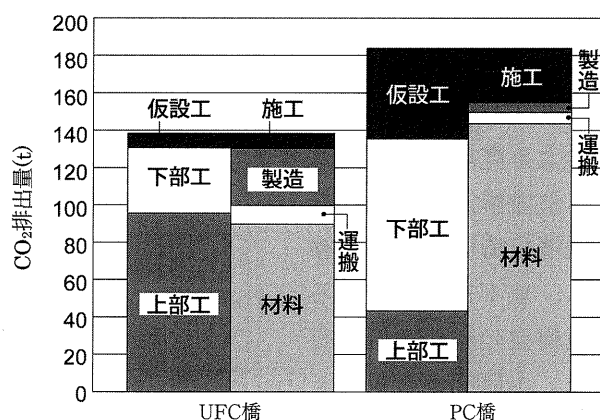
図-4.6 UFC橋一般図

す。結果は、新しい構造はCO₂排出量を約28%削減することができた。従って、新たに導入される構造は、設定された環境要求性能「CO₂の20%削減」を満足することになる。

(3) 歩道橋

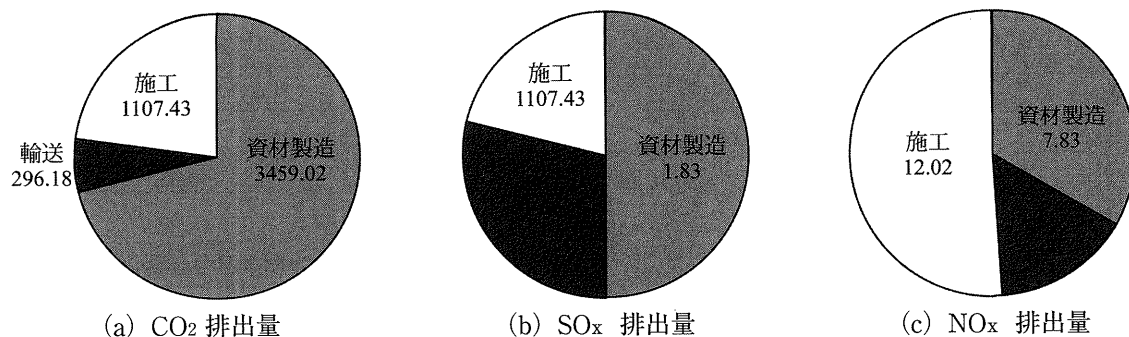
河川をまたぐ50m程の歩道橋を架設するプロジェクトが計画された。歩道橋の標準タイプ構造は、図-4.3に示すように3径間PC単純床版橋となる。ここで、本指針（試案）に基づいて環境要求性能として、上記標準タイプ構造における環境負

荷CO₂の20%削減を設定する。この環境要求性能を満足するために、超高強度鋼繊維補強コンクリート（UFC）の適用を考えた。UFCは、表-4.1に示すようにセメント使用量は著しく多い材料であるが、図-4.4に示すように、優れた曲げ強度を有する。この優れた強度特性から構造物の自重を著しく減少させることができる。UFCを用いることにより、図-4.5および図-4.6に示すように、スラブおよびウエブ厚さがそれぞれ5 cm及び8 cmの1スパンホロー構造にすることが可能となった。図-4.7に、UFCとPC歩道橋のCO₂排出量を示す。結果は、UFC歩道橋はPC歩道橋よりCO₂排出量を約25%削減することができた。従って、新たに導入されるUFC歩道橋は、設定された環境要求性能「CO₂の20%削減」を満足することになる。

図-4.7 UFC/PC橋架設に関わるCO₂の排出量

4.2 コンクリート構造物建設による環境便益評価

土木構造物は、社会経済活動の基盤であり、生活環境を快適かつ効率的なものにすることに大きく貢献してきた。土木構造物の建設が環境破壊の象徴として捉えられてきた不幸な側面もあるが、これは環境負荷に対する評価技術が十分でないことに起因すると考えられる。つまり、土木構造物の建設が、社会的便益と環境便益にどのように貢献しているかを評価することが社会的説明責任を果たす上できわめて重要であるが、これまで後者についての包括的な検討がほ

図-4.8 資材製造、輸送および施工によるCO₂、SO_x、およびNO_x排出量

とんだなされていない。

このようなことを背景に、著者ら⁵²⁾は、慢性的な交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道を対象にして、地下道建設による直接的な環境負荷と渋滞解消による間接的環境負荷低減効果を検討し、地下道建設による環境便益の総合評価を行った。本研究が対象とした地下道は、ある地方都

市の郊外と都市中心部の間を流出入する交通車両が集まる6車線を有する南北及び東西の一般国道交差点地点における慢性的な渋滞解消を目的に、東西に片側1車線で実際に建設されたものである。この地下道建設による環境便益を評価するために、建設による環境負荷を算定した。図-4.8に、資材製造、輸送、および施工別のCO₂、SO_x、およびNO_x排出量

を示す。CO₂排出量は資材製造によるものが多いが、SO_xおよびNO_xに関しては施工および輸送の割合が増加する。次に、自動車交通による環境負荷を、地下道建設前後の自動車の旅行速度に基づいて算定した。地下道建設前後における一日当たりのCO₂排出量と石油使用の低減量は、それぞれ1.434トンおよび0.557トンとなった。また、NO_x及びSO_xの排出低減量は、一日当たり9 kgおよび1 kgとなった。

地下道建設による各負荷量と、交通改善による負荷低減量の関係は、個別の排出物質ごとに検討することができる。表-4.2に、負荷量と低減量が等しくなる年数の算定結果を示す。地下道建設には、資源消費として非金属、鉄、木材も使用されている。これらを総合的に評価するために、LIMEの手法による統合化³⁷⁾を行った。図-4.9に、統合負荷量と負荷低減量の結果を

表-4.2 地下道建設による環境負荷量と渋滞解消による負荷低減量が等しくなるまでの年数

負荷の種類	建設による負荷量(kg)	交通による1日当たりの負荷低減量(kg)	負荷量と低減量が等しくなる年数
CO ₂	4862629	1434.3	9.3
NO _x	23503	8.5	7.6
SO _x	3660	0.8	12.2
石油	745898	556.7	3.7

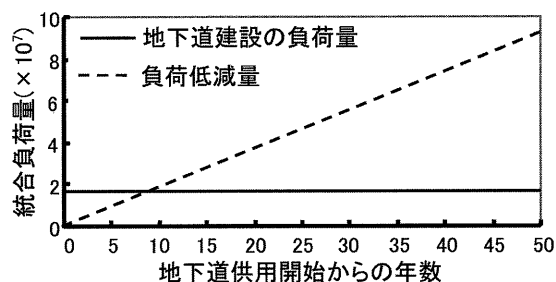


図-4.9 地下道建設による環境便益評価

示す。この結果は、約9年で、地下道建設時の環境負荷が自動車交通の環境負荷低減分により相殺されることを示している。一般的には、交通量が多いほど、また渋滞の程度が大きいほど、これらの相殺までの時間は短くなり、地下道建設の便益が大きくなる。

ここではコンクリート構造物を建設することによる環境便益の評価方法の一例を示したが、構造物の建設には経済的な便益あるいはライフラインとしての社会的便益など多様な側面がある。最終的には、これらの総合便益を評価する必要がある。

4.3 建設工事におけるLCAの実施例^{53, 54)}

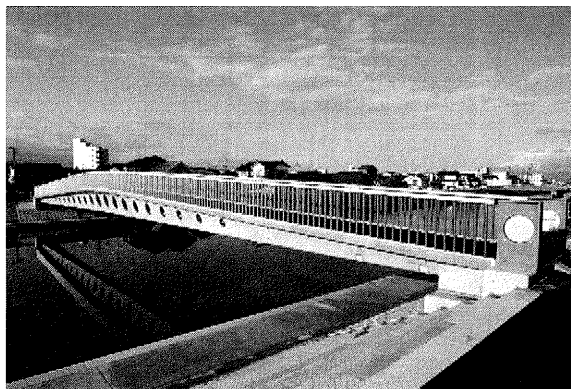
(1) 構造物の概要と環境影響評価の方針

UFCを採用したPC箱桁橋である酒田みらい橋（UFC橋；写真－4.1、表－4.3）の施工実績に基づいて環境への影響を評価し、普通コンクリートを用いた在来工法によるPC橋（PC橋；表－4.3）を架設する場合と比較した。UFCは強度特性や耐久性能に優れることに加え、配合上の特徴として単位セメント量が多いこと、鋼繊維を含むことが挙げられる（表－4.4）⁵⁵⁾。UFCの使用量を他の主要な資材の量とともに表－4.5に示す。

大気排出物質、資源消費、廃棄物に関わる環境負荷量を算出して、負荷量の低減効果について比較した。また、統合化手法による単一指標を用いて評価を行った。統合化手法のひとつとして資源消費や廃棄物処分に関して国内の実情が考慮されているLIME（日本版被害算定型影響評価手法）⁵⁶⁾を用いた。

(2) 環境負荷量の算出方法

環境負荷量を算出して環境影響を比較する範囲は“材料の製造～現地での施工”とし（図－4.10）、運搬を含む各段階で上部工、下部工、仮設工に分類した。供用期間中は両橋の機能が同一で、環境便益や影響が等しいと仮定できることから“供用”について省略した。また、UFC



写真－4.1 酒田みらい橋（UFC橋）⁵³⁾

表－4.3 構造物の概要⁵³⁾

	UFC 橋	PC 橋
構造形式	単径間 PC 箱桁橋 全外ケーブル方式	3 径間 PC 単純床版橋 プレテンション方式
橋長	50.2m	
幅員	2.4m（全幅）、1.6m（有効幅員）	
支間長	49.35m	16.7m
桁高	0.55m(端部) 1.56m(支間中央)	0.6m
架設工法	プレキャストブロック架設工法	
下部構造	鋼管杭基礎	

表－4.4 UFCの配合⁵⁵⁾

(単位：kg/m³)

水 ^注	セメント	けい石微粉末 シリカ他	鋼繊維	高性能 減水剤
180	818	1479	157	24

注；高性能減水剤の水量19kg/m³を含む

表－4.5 主な資材の使用量⁵³⁾

	UFC 橋		PC 橋	
	上部工	下部工	上部工	下部工
UFC	21m ³	—	—	—
鉄筋 コンクリート	—	24m ³	51m ³	45m ³
PC 鋼線	3.5t	—	2.8t	—

橋は耐久性が高く、数十年～百年程度を想定した供用期間内では維持・管理の必要性が少なくと考えて対象外とし、PC 橋での扱いも同様とした。また、“解体～再利用・廃棄”の過程について、現時点では特定の方法に限定することやそのインベントリを定めることが困難であった。さらに、再利用のために発生する負荷の負担者が明確でなかったため、供用後の段階についても比較の対象から除外した。

“材料の製造”では原料の採取から製品製造まで、“橋桁の製造”では主桁の製造、型枠の加工などを対象とした。酒田みらい橋の桁は特殊な形状であったため新規に鋼製型枠を作製し、形状を変更しながら複数回使用した。他の構造物の型枠への転用や再利用は考慮しなかった。PC橋の桁の製造には標準的な鋼製型枠を使用し、一般的な転用回数として300回の転用を想定した。“運搬”では材料や資材の輸送に関わる環境負荷量を算出し、“現地での施工”では建設機械の使用など、架設現場での施工に関わる負荷量を算出した。

施工の手順を図-4.11に示す。UFC橋では架け替えの対象となった旧橋の橋脚を利用してUFC桁を架設した後に旧橋脚を撤去したが、PC橋との比較のため旧橋脚の撤去後に工事を開始するものとし、評価の対象を“作業ヤード構築”以降とした。

環境負荷量は表-4.6に示す項目について、積み上げ法により求めた。インベントリデータは既往の報告^{42, 57)}から引用した。

(3) 環境負荷量の算出結果

環境負荷量の算出結果を表-4.6に示す。UFCの適用により大気排気物質について、CO₂とNO_xの排出量はそれぞれ27%、43%削減できたが、SO_xとばいじんの排出量はそれぞれ45%、76%増加した。資源使用量、廃棄物発生量はPC橋の場合を下回った。

UFC橋では橋脚が不要になり、鋼管杭および仮設栈橋、二重締切工が省略できたため、下部工と仮設工において環境負荷が削減できた。また、桁の軽量化や施工の省力化などにより“運搬”や“現地での施工”においても削減することができた。一方、上部工では鋼製型枠の新規作製や蒸気養生時の燃料消費により負荷が増加した。これらのように環境負荷項目ごとに増減

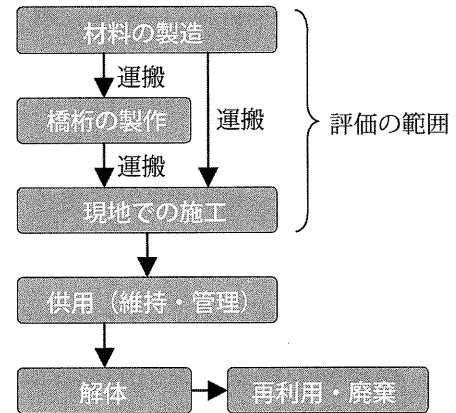


図-4.10 環境影響評価の範囲

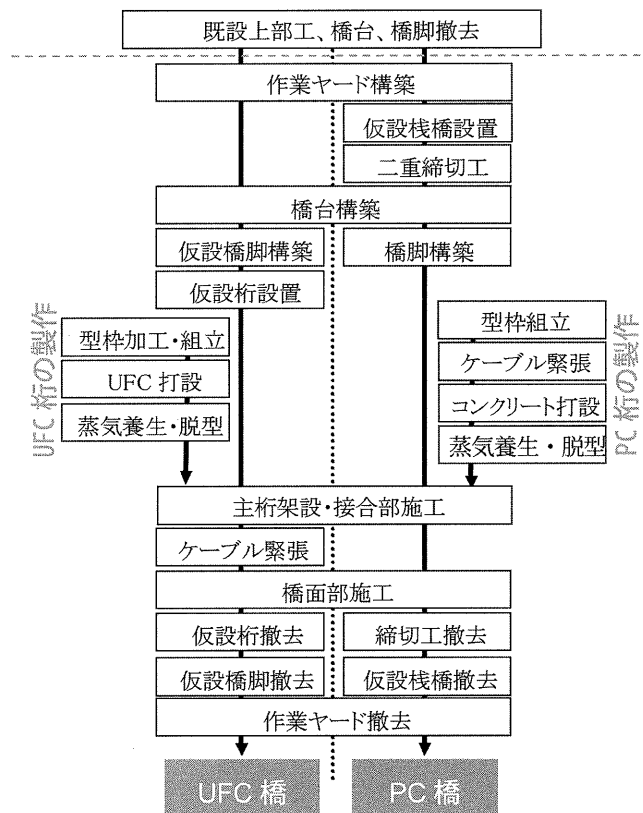


図-4.11 施工手順と評価の対象

の傾向が異なった。

主要な材料であるコンクリートの使用量はPC橋の約半分であったが(表-4.5)、PC橋の上部工での単位セメント量を400kg/m³とするとUFCの単位セメント量は2倍程度であり(表-4.4)、コンクリート材料に関わる効果は相殺されていた。

(4) 環境影響の評価

環境への影響は“地球温暖化”などの影響領域ごとの評価と、単一指標を用いて総合的に評価する統合化手法による評価を行った。影響領域ごとの評価として地球温暖化と酸性化について評価した。また、統合化手法を用いた評価ではEcological Scarcity⁵⁸⁾とLIME(日本版被害算定型影響評価手法)⁵⁶⁾を用いた。

地球温暖化は、温暖化ガスの主要な成分でありインベントリデータの利用が可能なCO₂排出量について評価した。UFCの適用により排出量を27%削減できた(図-4.12)。

酸性化は主要な原因物質であるNO_x、SO_xを対象とし、酸化負荷指数(式(1))で評価した⁵⁹⁾。UFC橋のSO_x排出量はPC橋より多かったが、NO_x排出量が削減できたことにより、酸化負荷指数として約10%の低減効果があった(図-4.13)。

大気排出物質についてEcological Scarcity⁵⁸⁾により統合評価を行った。環境負荷量と重み付け係数；eco-factor(UBP/g)を用いて単一指標；eco-point(UBP)を算出した。UFC橋はPC橋に比べて約20%低減できた。大気排出物質を統合して評価した場合においても環境への影響を低減していることを確認した(図-4.14)。

LIMEは人間の健康や生物多様性などへの影響を考慮した日本版被害算定型影響評価手法である⁵⁶⁾。本検討における統合化の流れ、対象とした環境負荷、影響領

表-4.6 環境負荷量の算出結果

環境負荷項目		単位	UFC 橋	PC 橋
大気排出物質	CO ₂	t	135	185
	SO _x	kg	225	156
	NO _x	kg	243	474
	ばいじん	kg	37	22
資源消費	石油換算	t	6	13
	石炭換算	t	44	72
	天然ガス	kg	285	853
	購入電力	MWh	16	27
	非金属鉱物	t	108	222
	鉄	t	58	93
廃棄物	使用量	kg-wet	3608	5039
	発生量	kg-wet	404	675

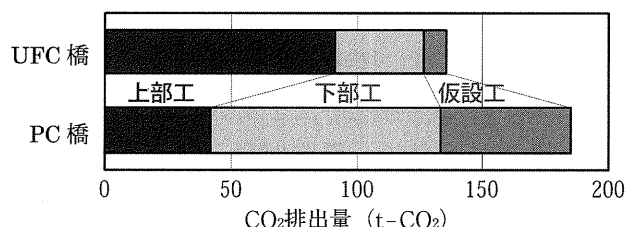


図-4.12 温暖化ガス(CO₂)排出量

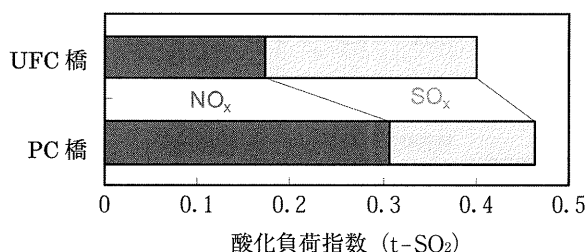


図-4.13 酸化負荷指数(L_{AC})

$$L_{AC} = L_{SOx} + 0.7 \times L_{NOx} \quad \text{式(1)}$$

ただし、 L_{AC} ：酸化負荷指数 (t-SO₂)

L_{SOx} ：SO_x排出量 (t-SO_x)

L_{NOx} ：NO_x排出量 (t-NO_x)

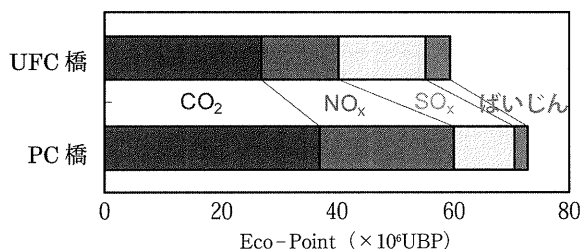


図-4.14 Ecological Scarcityによる統合化

域、保護対象を図-4.15に示す。環境負荷量から被害係数を用いて保護対象への被害量を算出し、統合化係数を用いて単一指標に換算した。

LIMEでは3種の統合化係数が用意されている。コンジョイント分析による経済評価係数を用いる場合にはVer.1と呼ばれる単一指標が得られ、コンジョイント分析による統合化係数を用いる場合はVer.2、階層化分析法による統合化係数を用いる場合はVer.3の指標が得られる。費用対効果分析、環境会計、フルコスト評価などにはVer.1の指標が有用であり、ISO14040シリーズに規定される統合化や環境効率に関する検討などにはVer.2、3の指標が適用される³⁷⁾。

UFC橋についてPC橋と比較するとVer.1～3の単一指標についてそれぞれ16%、16%、12%低減できることが分かった(図-4.15)。UFCの適用により、環境負荷量の増減は項目により異なったが、環境影響については低減効果があることが明らかになった(図-4.16)。一方、UFCの採用により上部工と下部工を合わせて約10%のコスト削減が実現しており⁶⁰⁾、環境影響の低減と建設コストの合理化は必ずしも相反するものではないことが明らかである。

4.4 LCAを用いた環境保全・改善と課題

(1) LCA手法の適用による環境保全・改善

歩道橋建設工事に関わるLCAを行い、対象とする項目毎に環境負荷量の増減の傾向が異なる場合においても統合化手法を用いることで環境影響を評価することができ、UFCの適用が環境影響の低減に有効で、環境保全・改善効果が見込めることを確認した。また、環境影響の低減が必ずしも建設コストの上昇を招くものではないことを示した。

一方、UFCの適用については型枠の新規製作、蒸気養生時の燃料消費が低減効果を損なっていることが定量的に明らかになった。このことから蒸気養生の効率化を進めており、以後、UFCを適用する構造物では環境影響の更なる低減が期待できる。このようにLCA手法を適用して、新技術の開発や改良およびその適用による環境保全や環境改善を進めることが可能である。

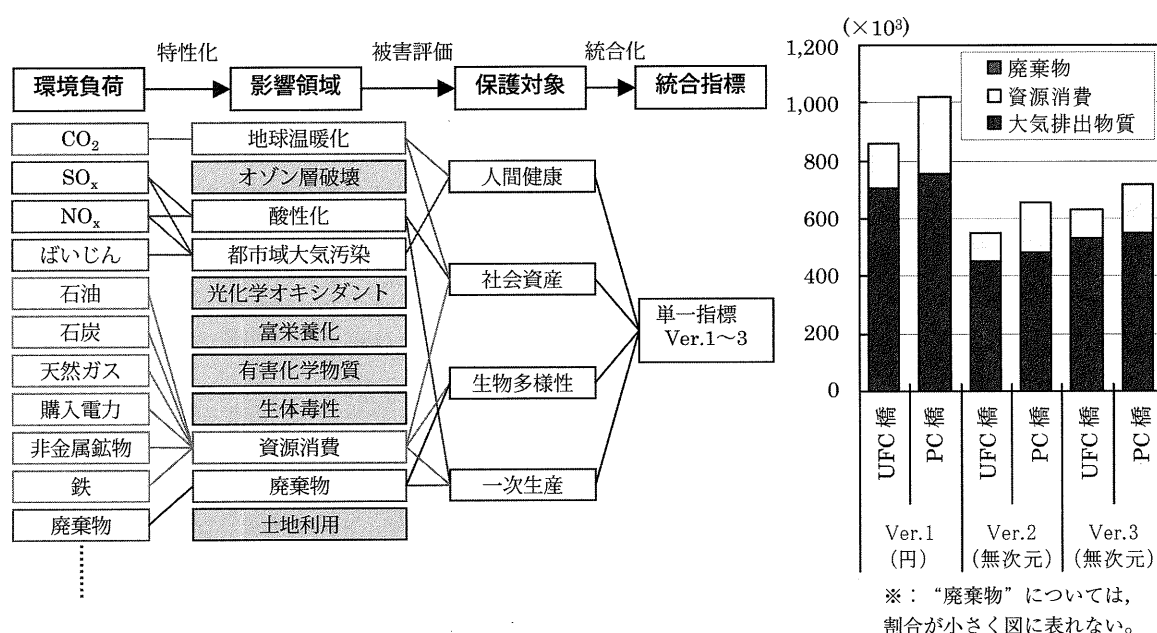


図-4.15 LIMEによる統合化の流れと評価の結果

(2) 建設工事におけるLCA手法の課題

LCAやそこで用いられる統合化手法は建設工事に関わる環境保全・改善の検討に有効であったが、これらの手法は主に工業製品を対象として開発されていることから、建設工事に適用する場合には、インベントリデータ、評価の範囲や評価の手法、評価結果の取り扱いなどについて課題も残されている。これらについて以下に述べる。

建設現場では、例えばシールドマシンのように使用機材が単品生産であるため機材の製造や運転に関わるインベントリデータの整備が不十分であったり、コンクリートの再利用のように方法が多様で、実施時期が将来になるため方法が確定できず環境影響の評価が不十分な場合がある。また、鋼材やコンクリートの再利用時に発生する環境負荷の負担や、輸入材の環境負荷の評価や負担についても明確にはなっていない。

評価手法について、例えば今回採用したLIMEやそれを進歩させたLIME2⁶¹⁾は種々の環境影響に対して幅広く評価でき、本項で示したように建設工事のLCAにも適用できる。日本の国情を鑑みて開発された方法であることから、諸外国で開発された方法に比べて使用するメリットは大きいと考えられる。しかし、施工時の振動や排水の影響など、公害の観点から法的規制を受けているが、十分に評価されていない環境負荷項目もある。

構造物のライフサイクルは一般的な工業製品と比較して長いため、環境に対する認識の変化やインベントリデータの更新など、社会情勢の変化を反映して評価の見直しが必要になる。それぞれの構造物についても当初の計画から供用期間や用途の変更などが行われる場合があり、想定したライフサイクルの更新が求められる。このため建設終了後もLCAを継続することが望ましく、随時、情報を更新していくダイナミックLCA⁶²⁾の考え方も参考にする必要があると思われる。しかし、オフィスビルなどで供用期間中の省エネ評価を行う場合を除くと継続的なLCAの実施が予定されている構造物は多くないものと思われる。

また、工事契約は現場毎に締結され、施工期間において想定以上の環境負荷を発生した場合、それを回復する機会が十分に得られない可能性が高い。このため環境負荷の発生に関する迅速かつ正確な管理が求められる。さらに冒頭に示したように建設産業に関連する環境影響は大きい、工事件数も多いため現場あたりの環境影響は小さく、環境影響を低減するためにはより多くの現場で低減のための活動を推進する必要がある。これには標準的で労力を要しない評価方法の水平的な展開が不可欠であるが、このような手法は未だ十分に開発されていない。

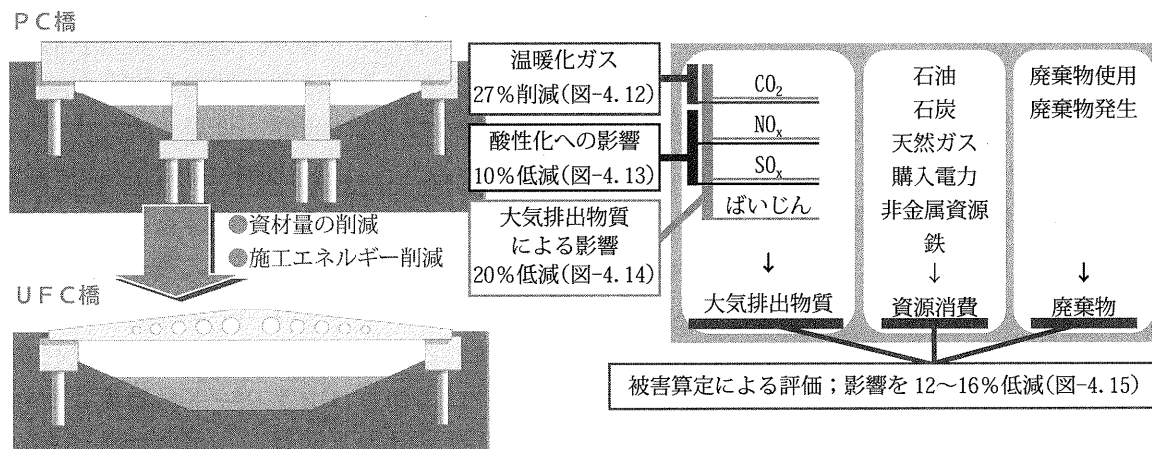


図-4.16 UFCの適用による環境影響の低減効果

建設工事の環境影響は構造物の利用の際に環境便益として回収される。オフィス・ビルのような建築構造物では、例えば空調などに必要なエネルギーの削減が便益となり、構造物ごとに環境保全・改善に関する効果を評価可能な場合がある。一方、土木構造物の場合は、道路交通網の整備など社会システムの中で環境便益が発生することが多い。評価の対象となる社会システムは全国規模である場合や特定の地域に限定される場合など多様である。建設工事のLCAと環境便益の関係を評価した事例⁵²⁾が少なく、評価の方法も定まっていない。今後の検討事例の増加が待たれる。

これらの課題を解決し、建設工事におけるLCAの精度、網羅性を改善して更なる信頼性の向上を図ることで、建設工事におけるLCAは環境保全・改善に取り組むために不可欠な手法になるものと考えている。

5. あとがき

日本の社会基盤整備は成熟したと言われている。その主な意味は、極論すれば取りあえず道路・鉄道・空路・海路網はできたということに過ぎない。それはそれで非常に大きな意義を有する。しかし、それらを「環境」という観点から見た場合、必ずしも最適なシステムとなっていないことは明らかである。日本におけるCO₂排出は運輸部門が2割弱を占めているが、この内どれ程が交通インフラの質に起因するかについてはよく分かっていない。車にバイオ燃料を用いる動きも急であるが、その結果穀物の供給不足や食糧価格の上昇を招くことから、その効果には限界がある。従って、今後は、インフラ整備による環境便益を適切に評価し、他の方法との組み合わせをも含めた最適な環境負荷低減システムを構築していくことが建設分野の最も重要な課題となる。

IPCCが指摘するように2050年までに温暖化ガスを50%削減するとの目標が設定された場合、建設分野はどのような戦略でこれに対応することになるのか。当然、分野ごとにその削減量に凹凸がでてくると思われるが、建設分野が全く何もしないという免罪符が与えられることにはならないし、素材産業である鉄鋼やセメントのみにその負担を強いることは合理的ではない。素材製造に加えて構造・施工・維持管理・解体・リサイクルに関する技術イノベーションを図ることが必須である。そのためには、建設に関わる全ての領域で環境負荷低減の切り口を地道に探し求める努力をする以外に方法が無いのである。

構造物をライフサイクルで環境負荷を評価するというと、必ず鋼・コンクリート論争が頭をもたげる。我々はインフラ構造物の寿命を100年オーダーで考えているが、実際には近代材料としての鋼及びコンクリートを大量に消費するようになってからそれほどの歴史を有していないことに謙虚であるべきである。また、地球の資源は限られている。現在、世界でコンクリートと鋼はそれぞれ約100億トンおよび13億トン生産されているとされる。世界の物質フローが260億トン程度であることを考慮すれば、これらの量は著しく膨大である。一方、日本における鋼生産は約1億トンであり、建設関連にはそのうちの約15%が利用されているに過ぎない。鉄筋はほぼ100%電炉鋼を使用している。すなわち、鉄鉱石ではなく鉄スクラップを原料とする鋼材を用いている。つまり、鉄鉱石を用いて高炉から生産される鋼材はほとんどが工業製品に利用されていることになる。資源の供給バランスを考慮すれば、鋼をコンクリートに優先して利用する必然性は全くない。コンクリートの体積の約7割は骨材であり、ローカルに生産できる材料である。また、セメントの主原料も石灰石と粘土であり、少なくとも日本においては資源的

に問題になることはない。鉄鉱石は100%輸入である。しかし、鋼なしでコンクリート構造物が成立しないことも事実である。このような状況を考慮すれば、日本が選択すべき方向は極めて明確である。日本で唯一と言って良い自給可能な材料、コンクリートを最大限活用することである。建設の分野においては外国に依存する資源、鉄鉱石を起源とする鋼の利用は最小化し、その多くは工業国として他産業で利用するのが理想的である。コンクリートで家電製品や車は作れないのである。この考え方は、一般的には世界でも有効であると考ええる。資源利用の適材適所は、今後益々重要になると思われる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：500号記念特集号＊環境とコンクリート、コンクリート工学、Vol.45、No.5、平成19年5月
- 2) Lester R. Brown：Eco-Economy, Earth Policy Institute, 2001
- 3) 国土交通省：国土交通白書、平成17年度版、2005
- 4) 日本政策投資銀行：都市再生と資源リサイクルー資源循環型社会の形成に向けてー、調査、No. 33、2002
- 5) 立屋敷久志・岡本雅道・西村佑介・黒田泰弘：解体コンクリートからの高品質再生骨材の回収試験、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.2、pp.1099-1104、2000
- 6) 柳橋邦生・米澤俊男・神山行雄・井上孝之：高品質再生粗骨材の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.1、pp.205-210、1999
- 7) 依田和久・新谷彰・高橋功・柳瀬茂夫：機械式すりもみ装置により製造した再生粗骨材及び再生細骨材の品質、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1527-1532、2004
- 8) 黒田泰弘・橋田浩・宮地義明：再正骨材コンクリート12500m³を建築躯体に本格採用ー東京団地倉庫平和島倉庫A-1棟建替工事ー、セメント・コンクリート、No.685、pp.8-8、2004
- 9) 内山伸・黒田泰弘・橋田浩：加熱・磨砕処理したコンクリート微粉を用いる深層混合処理工法、基礎工7月号、pp.62-65、2003
- 10) 再生粗骨材コンクリートのプロジェクトへの適用ー新千里桜ヶ丘住宅建て替え計画の事例ー、コンクリート工学、Vol.44、No.2、pp.46-53、2006
- 11) 2種類の再生粗骨材コンクリートによる現場適用事例、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.1463-1468
- 12) 黒田泰弘・橋田浩・内山伸・他：オンサイト型コンクリート資源循環システム、清水建設研究報告、第79号、pp.1-10、2004
- 13) 柳橋邦生：コンクリート用再生骨材製造時の環境負荷と経済性、建設用原材料、Vol.13、No.1、pp.38-45、2004
- 14) 増田彰・道正泰弘・中込昭・他：建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート廃材のリサイクルシステムー経済性および環境負性に関するシミュレーションー、日本建築学会技術報告集、第4号、pp.1-6、1997
- 15) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成16年度実績）、平成17年8月
- 16) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）、2003

- 17) 日本産業機械工業会エコスラグ利用普及センター：循環社会の輪をつなぐごみと下水の溶融スラグ（エコスラグ）有効利用の課題とデータ集（2005年度版）、2005年12月
- 18) Hiroshi Takatsuki : The Teshima Island industrial waste case and its process towards resolution, SPECIAL FEATURE : CONFERENCE REPORT, Journal of Material Cycles and Waste Management, (2003) 5 : 26-30
- 19) 北辻政文、藤居宏一：ごみ焼却灰溶融スラグのコンクリート用細骨材への適用に関する基礎的研究、農業土木学会論文集、No.192、pp.1-8、1997
- 20) 北辻政文、藤居宏一：ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質、農業土木学会論文集、No.200、pp.59-67、1999
- 21) 越川茂雄、伊藤義也、佐藤次郎、金子輝一：焼却灰溶融スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol.11、No.2、pp.39-47、2000
- 22) 北辻政文、田中礼治、遠藤孝夫、鳴海繁実：都市ごみ溶融ガス化溶融スラグのコンクリート用細骨材としての利用、コンクリート工学論文集、Vol.13、No.2、pp.89-98、2002
- 23) 松家武樹、堺孝司、渡辺健也、草薙悟志：産業廃棄物溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ挙動、コンクリート工学論文集、Vol.16、No.3、pp.39-48、2005
- 24) 松家武樹、堺孝司、錦織和紀郎、横山卓哉、西本祐三、小野寺誠司：各種溶融スラグのコンクリートへの適用における磨砕の効果に関する基礎的研究、土木学会論文集E、Vol.62、No.1、pp.174-185、2006
- 25) 松家武樹、堺孝司、中村俊之、草薙悟志：産業廃棄物溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断耐荷挙動、土木学会論文集E、Vol.62、No.1、pp.159-173、2006
- 26) 日本規格協会：一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材、JIS A 5031、2006
- 27) K. Humphreys and M. Mahasanen : Toward a Sustainable Cement Industry, Climatic Change Sub-study 8, World Business Council for Sustainable Development, 2002
- 28) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針、コンクリートライブラリー86、1996
- 29) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）、コンクリートライブラリー94、1999
- 30) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成16年度実績）、平成18年3月
- 31) P. Jahren : Greener Concrete – What are the options? The CO₂ Case, STF22A03610 Report, SINTEF, 2003
- 32) 日本規格協会：コンクリート用再生骨材H、JIS A 5021、2005
- 33) 日本規格協会：再生骨材Lを用いたコンクリート、JIS A 5023、2006
- 34) ISO 15686-6 : Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 6 : Procedures for considering environmental impact, 2004
- 35) ISO/DIS21930 : Environmental Declarations of Building Products, 2006
- 36) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）、コンクリートライブラリー125、2005
- 37) 伊坪徳宏・稲葉敦編著：ライフサイクル環境影響評価手法、産業環境管理協会、2005
- 38) 土木学会：コンクリートと資源の有効利用、コンクリート技術シリーズ29、322p、平成10

年11月

- 39) 土木学会：資源有効利用の現状と課題、コンクリートライブラリー96、160p、平成11年10月
- 40) Kawai, K. and Tazawa, E. : An Assessment Method for Environmental Impact of Concrete, Proceedings of the RILEM/CIB/ISO International Symposium on Integrated Life-Cycle Design of Materials and Structures, Helsinki, pp.334-339, 2000.5
- 41) 土木学会、コンクリートの環境負荷評価、コンクリート技術シリーズ44、186p、平成14年5月
- 42) 土木学会、コンクリートの環境負荷評価（その2）、コンクリート技術シリーズ62、123p、平成16年9月
- 43) Kawai, K., Sugiyama, T., Kobayashi, K. and Sano, S. : A Proposal of Concrete Structure Design Methods Considering Environmental Performance, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.1, pp.41-51, 2005
- 44) Kawai, K., Sugiyama, T., Kobayashi, K. and Sano, S. : Inventory Data and Case Studies for Environmental Performance Evaluation of Concrete Structure Construction, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.3, pp.435-456, 2005
- 45) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の環境設計－技術革新への挑戦－、土木学会平成14年度全国大会（札幌）研究討論会 研-04 資料、47p、2002年9月
- 46) Japan Society of Civil Engineers : JSCE Guidelines for Concrete No.7 Recommendation of Environmental Performance Verification for Concrete Structures (Draft) , 28p., 2006.6
- 47) 土木学会：土木建設業における環境負荷評価（LCA）研究小委員会講演概要集、1997
- 48) K. Sakai : Environmental Design for Concrete Structures, Journal of Advanced Concrete Technology, JCI, Vol.3, No.1, pp.17-28, 2005
- 49) 土木学会コンクリートの環境負荷評価研究小委員会：コンクリートの環境負荷評価研究小委員会報告、コンクリート工学、Vol.40、No.12、pp.10-16、2002.12
- 50) 河合研至：コンクリートの環境負荷評価、プレストレストコンクリート、Vol.47、No.6、pp.34-39、2005.12
- 51) 杉山隆文・河合研至：環境設計に向けたコンクリート構造物のライフサイクルアセスメント、セメント・コンクリート、No.706、pp.11-20、2005.12
- 52) 堺孝司・小嶋克宏・草薙悟志・入谷祥王：交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道建設による環境便益に関する研究、土木学会論文集G、Vol.63、No.1、pp.40-50、2007
- 53) 石原明日子、大脇英司、新藤竹文、堺孝司：超高強度繊維補強コンクリートの適用による環境負荷低減効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.2、pp.1651-1656、2006
- 54) 石原明日子、大脇英司、新藤竹文：超高強度繊維補強コンクリートを適用した構造物の被害算定型影響評価手法による環境負荷評価、土木学会第61回年次学術講演会、5-531、pp.1057-1058、2006
- 55) 田中良弘、武者浩透、下山善秀、小林忠司：PC橋梁に用いた高強度繊維補強コンクリートの用途開発、コンクリート工学、Vol.41、No.3、pp.26-32、2003
- 56) 産業環境管理協会：平成14年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書、2005. 3
- 57) 南齋規介、森口祐一、東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）－

- LCA のインベントリデータとして、国立環境研究所地球環境研究センター、2002
- 58) Brand G et.al.: Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997; BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297, 1998
- 59) サイエンスフォーラム：戦略LCA 研究フォーラムLCA 製品の環境ライフサイクルアセスメント、1994
- 60) 武者浩透・大熊光・大竹明朗・児玉明彦・関文夫・小林忠司：無機系複合材料（RPC）を用いた酒田みらい橋の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.36、No.11、pp.2-11、2002
- 61) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業/製品等ライフサイクル二酸化炭素排出評価実証等技術開発/ー環境技術開発の効率的展開を目指した評価手法の開発ーインパクト等環境影響評価手法の開発、平成17年度成果報告書、2006. 3
- 62) 稲葉敦：「ソーシャルLCA」と「ダイナミックLCA」の検証とLCAの今後の方向性、LCA日本フォーラムニュース、第26号、pp.4-7、2002

PC橋の新たな構造形式の現状と将来

東京工業大学大学院・本協会常務理事
鹿島建設(株)土木設計本部
三井住友建設(株)土木管理本部
(株)富士ピー・エス 技術製造本部

二 羽 淳一郎
織 田 一 郎
平 喜 彦
堤 忠 彦

1. はじめに

プレストレストコンクリート（PC）橋における新しい構造形式の現状について取りまとめ、さらに将来的な発展について展望することとした。本文で対象とした形式は、複合構造、吊床版橋および張弦桁橋、ならびにプレキャストウエブを中心としたプレキャスト構造である。これらの形式を対象として最近の知見に着目し、その現状と将来を分析した。

複合構造では、コンクリート部材と鋼部材の複合化に関して、最近の斜張橋やエクストラード橋の事例、波形鋼板ウエブを架設材とした事例、複合トラス橋の事例等を紹介するとともに、今後の課題について考察を行った。吊床版橋および張弦桁橋に関しては、技術の変遷、ならびに最近の適用事例について紹介を行った。吊床版橋および張弦桁橋は、設計者の自由な発想により、これまでに多くの独創的な提案がなされてきた構造形式であり、今後のますますの技術革新が期待される場所である。プレキャスト構造では、特にプレキャストウエブ構造を中心に、最近の適用事例の紹介を行った。施工の合理化、省力化、耐久性の向上を考えた場合、プレキャスト化は有力な手法であることに疑いはなく、さらなる技術の向上と用途の拡大が期待される。

2. PC橋における複合化の動向 —斜張橋その他での複合化事例—

2.1 概要

複合橋の構造形式は多岐にわたり、その中でも波形ウエブ橋と複合トラス橋が近年著しい技術的発展を遂げている。

波形ウエブ橋は、1987年にフランスで実用化された合成構造の橋梁形式¹⁾で、国内では1993年に新潟県の新開橋²⁾で初めて適用された。その後、採用実績は年々増加し、架設方法も張出し架設や押出し架設など多様化している。波形鋼板ウエブ同士の接合や波形鋼板ウエブとコンクリート床版の接合方法には、わが国独自の工法も開発され経済性や力学特性の改良が進められている。

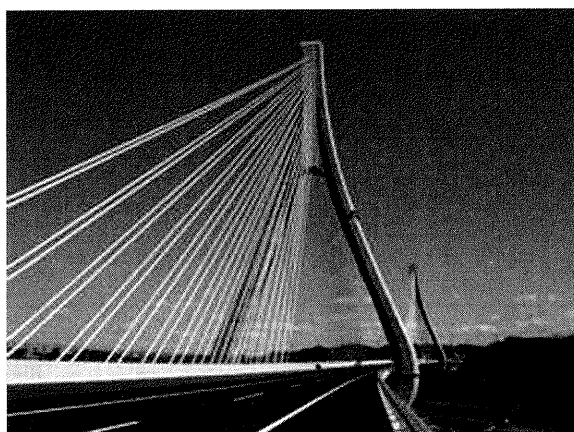
複合トラス橋も波形ウエブ橋と同様に主桁の重量軽減の目的で開発されてきた。現在の直接的に鋼トラス材とコンクリート床版を結合する方式はフランスで開発・実用化されたものであるが、わが国独自の工法も開発され適用されている。複合トラス橋は、支間長によっては接合部に大きな断面力が作用するため構造詳細に留意する必要があるが、その適用範囲は高架橋から斜張橋まで幅広く、採用実績も増えてきている³⁾。

2.2 斜張橋・エクストラードスド橋での適用事例

桁橋に比べて、より長大支間で適用される吊り形式のPC橋である斜張橋やエクストラードスド橋では、さらなる長支間への対応として、部材の複合構造化や混合構造化を行う事例が増えてきている。ここでは、旧日本道路公団の事例について、その概要を紹介する。

(1) 豊田アローズブリッジ

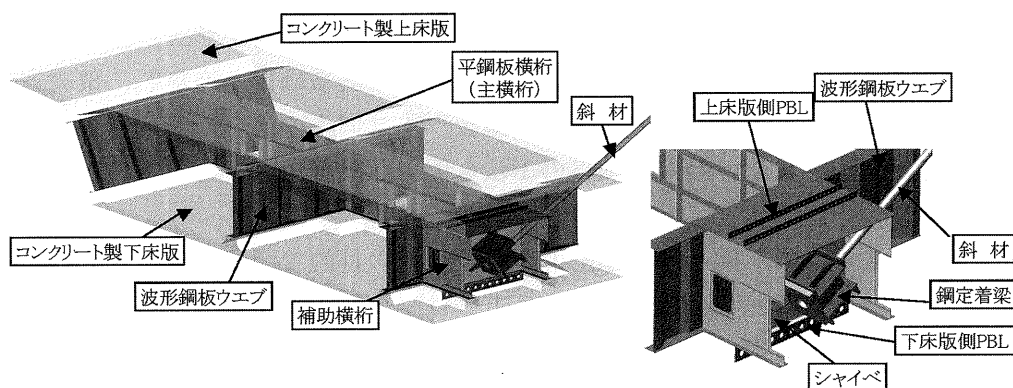
豊田アローズブリッジ（矢作川橋）^{4)、5)}は、第二東名高速道路と東海環状自動車道との共有区間で、1級河川矢作川を横過する世界初の波形鋼板ウェブPC・鋼複合斜張橋である（写真－2.1）。最大支間235m、橋長820mはともに波形鋼板ウェブPC橋として世界最大であり、上下線一体（8車線、総幅員43.8m）構造の一面吊り構造は世界最大級である。以下に豊田アローズブリッジの構造的な特徴を概説する。



写真－2.1 豊田アローズブリッジ全景

①PC桁への波形鋼板ウェブおよび鋼製の斜材定着部構造の採用

斜張橋部分であるPC主桁部は、広幅員1面吊りの主桁断面の軽量化と断面の合理化を目的に、波形鋼板ウェブPC箱桁とし、斜材定着部には、鋼製定着梁構造および鋼製横桁を採用した（図－2.1）。これにより一般的に煩雑となるPC斜張橋の斜材定着部の鋼製ユニット化や、上下床版コンクリートの分離打設が可能となり、主桁施工の大幅な省力化と工程の短縮を可能とした。本構造については、斜材軸力のコンクリート床版への伝達やコンクリート部分の耐力確保、さ



図－2.1 主桁斜材定着部の構造概要

らにいかにより波形鋼板に大きな局部応力を生じさせないかが課題となったが、通常の梁理論や立体FEM解析等による部材照査に加え、各種の構造実験を実施することで、局部応力や耐疲労性を確認し、実構造に反映させている。

②主桁のPC・鋼接合構造

PC桁と鋼桁の接合構造は、木曾川橋・揖斐川橋での実績を基本に前後面プレート方式としているが、波形鋼板ウェブと鋼床版箱桁ウェブとの接合は今回が初めてであったため、せん断力の伝達性状を検討するとともに、本接合部近傍に定着されるPC桁外ケーブルによる局部応力に対する検討を立体FEM解析により行った。この結果、ウェブ同士は直接的に接合せず巻立てコンクリートを介してせん断力を伝達させる構造とし、またPC桁に補強横桁を追加することで、波形鋼板ウェブPC桁と鋼桁の複合構造を可能とした(図-2.2、写真-2.2)。

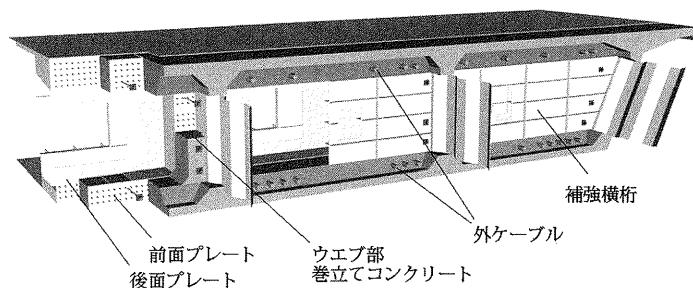


図-2.2 PC・鋼接合部の構造概要

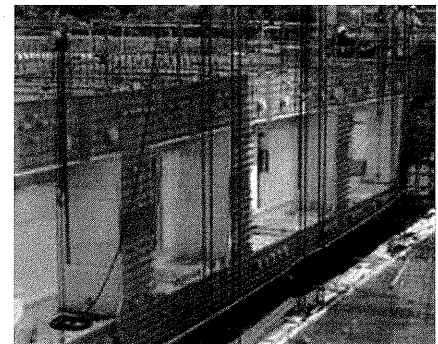


写真-2.2 接合面(前面プレート)

③主塔基部

主塔基部は、橋梁全体を支える重要な部位であるとともに、各種交差条件による制約もデザインに活かし、大きく湾曲した形状を有している。これにより非常に大きな断面力が作用するため、厚板鋼板を組み合わせた鋼殻構造に加え、プレストレスでひび割れ制御した構造を採用した(図-2.3)。本構造の適用は過去に実績が無く、充腹鋼板で補強されたコーベルのせん断

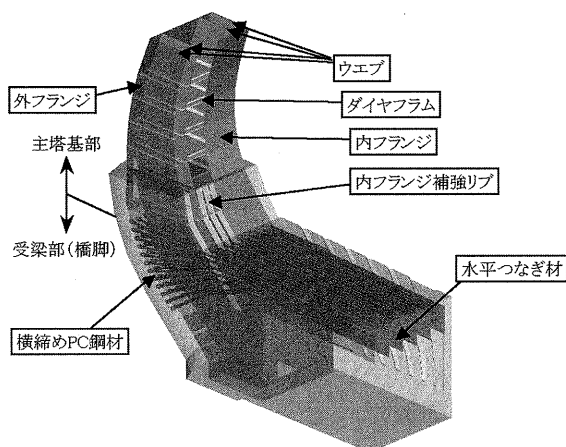


図-2.3 主塔基部鋼殻構造の概要

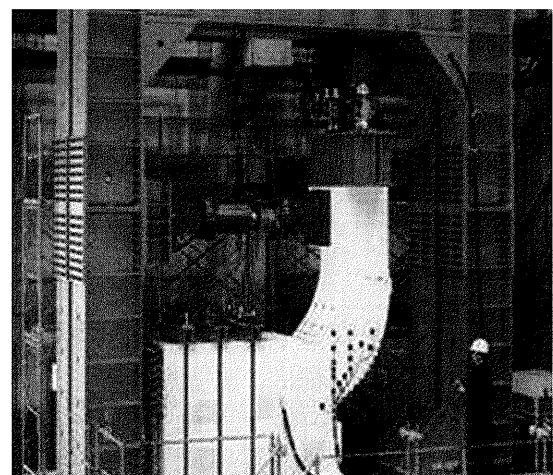
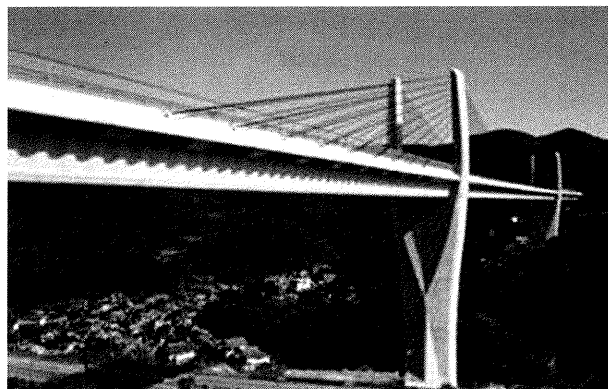


写真-2.3 鋼殻構造の耐力確認実験

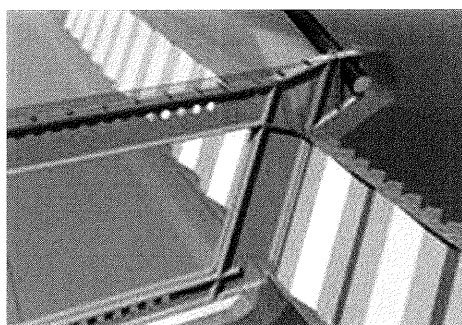
耐力に関する鋼板部材の寄与率等の設計法を提案するとともに、耐荷力確認実験（写真－2.3）や非線形FEM解析等により、終局時および使用時の安全性を確認した。

（2）日見夢大橋

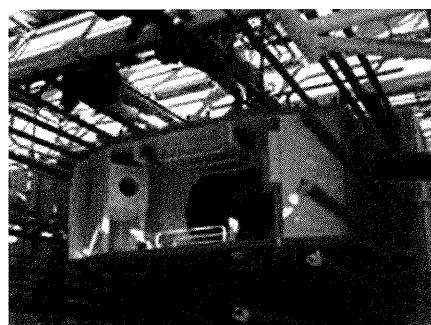
日見夢大橋^{6)、7)}は、長崎自動車道に建設された波形鋼板ウェブを有する世界で初めてのエクストラードード橋である（写真－2.4）。主桁の斜材定着部は、斜材の引張力を効率よく主桁に伝達し、かつ波形鋼板ウェブへの付加応力があまり作用しない構造とすると同時に、主桁自重の低減を図ることのできる構造として、鉛直・水平リブとも鋼部材を使用したダイヤフラム構造を選定している（図－2.4）。斜材張力の伝達機構としては、斜材定着部よりコンクリートを介してダイヤフラムに鉛直力を伝達する構造であり、このとき、波形鋼板ウェブとコンクリートウェブとの接合部と波形鋼板とダイヤフラムの隅角部近傍には局部的な応力の発生が予想された。このため、立体FEM解析により局部応力を把握し、接合部の構造詳細を決定後、実験にて安全性を確認して実橋の設計に反映させている。主塔側の斜材定着部は、鋼殻構造とすることで工場製作の優位性と現場施工の省力化を発揮できる構造としている（写真－2.5）。



写真－2.4 日見夢大橋全景



図－2.4 主桁側斜材定着部構造



写真－2.5 主塔側斜材定着部構造

2.3 波形鋼板ウェブを架設材と兼用した事例

波形鋼板ウェブ橋は、高強度で軽く、プレストレスの導入効率に優れた波形鋼板ウェブの特性により、コンクリートウェブ橋と比べて、全体工事費を削減できるメリットがあると言われている。しかし、これまでは主に死荷重の低減による下部工のスケールダウンといった完成後の構造に着目したものとどまっていた。これに対し、波形鋼板ウェブ橋の優位性をさらに高

める方策として、波形鋼板にある程度の施工時荷重を負担させることで、施工の合理化を図った事例が報告されている。

(1) 波形鋼板の剛性を張出し施工に利用した事例

張出し架設において波形鋼板ウェブを先行架設し、フランジ、ウェブを接合して剛性を確保することにより架設材として利用して施工の合理化を図った事例を紹介する。

第二名神高速道路の信楽第七橋（上り線）、津久見川橋⁸⁾では、上床版の施工にあたり鋼フランジ上にプレキャストコンクリート製の水平リブを設置し、その上に埋設型枠を敷設、さらにその上に現場打ちコンクリートを打設することで現場作業の省力化を図っている。さらに上床版と下床版を個別に施工することで従来の移動作業車よりも機構を合理化した簡易作業車での施工が可能となった。簡易作業車のルールも波形鋼板の上フランジを利用している（図-2.5）。

第二名神高速道路の杉谷川橋（下り線）⁹⁾では、上記方法に加えて下床版の施工に波形鋼板の下フランジにプレキャストPC版を敷設して埋設型枠とする方法を採用している（図-2.6）。

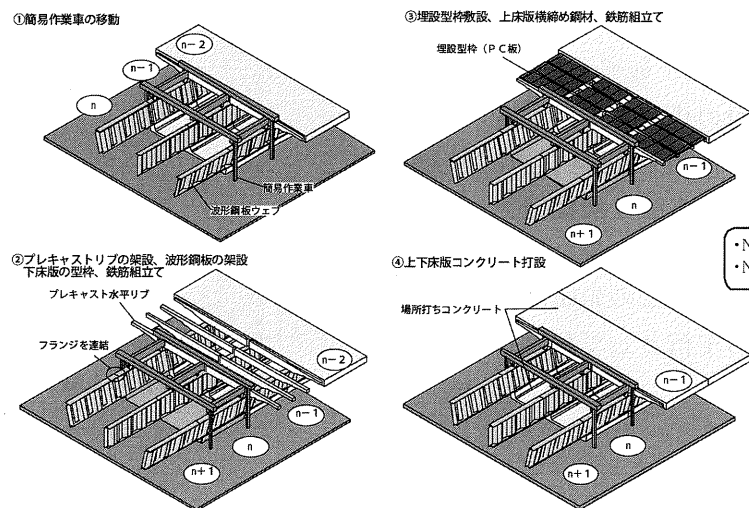


図-2.5 信楽第七橋（上り線）施工概要

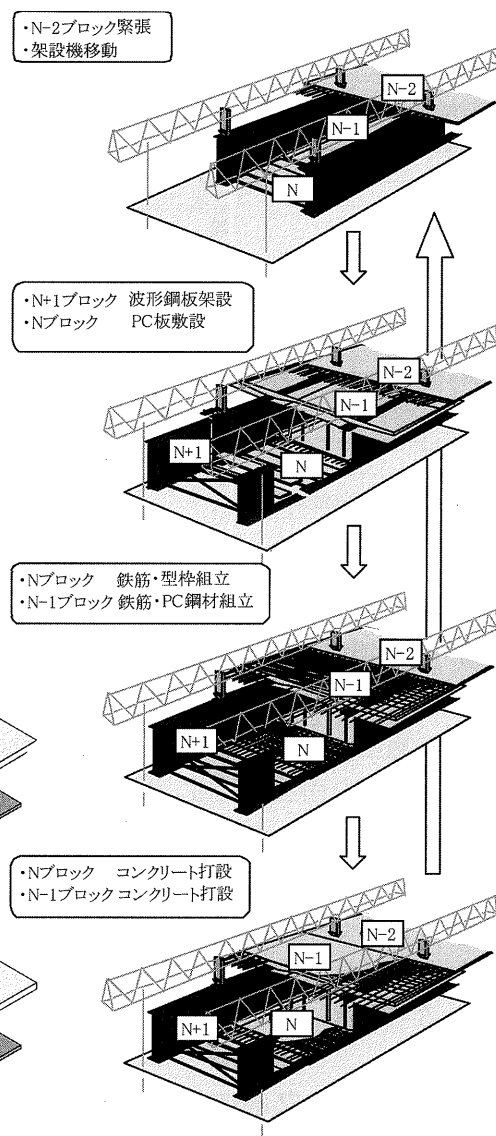


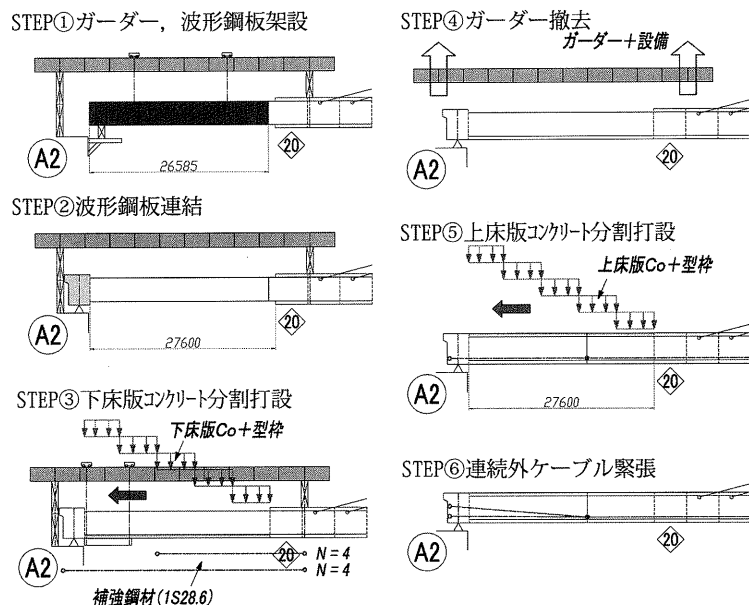
図-2.6 杉谷川橋（下り線）施工概要

(2) 波形鋼板の剛性を閉合区間に利用した事例

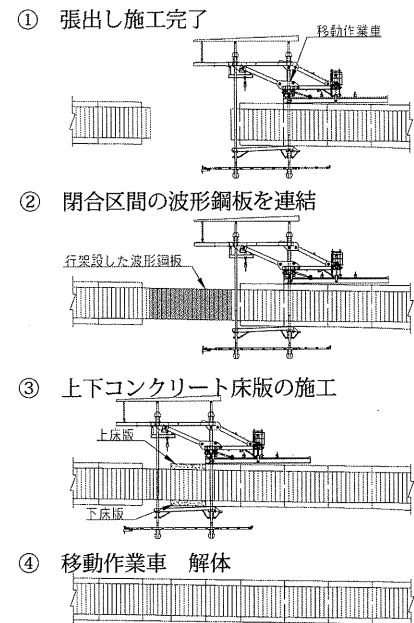
閉合区間において波形鋼板の上下フランジを橋軸方向に連続させることで、曲げモーメントに対する耐荷性能を付与し、工費削減、工期短縮を図った事例を紹介する。

第二名神高速道路の近江大鳥橋（栗東橋）^{10)、11)}では、側径間長が37.6mと長いため、架設用ガーダーと連続させた波形鋼板を併用し側径間部を施工している（図-2.7）。

第二名神高速道路の信楽第七橋（下り線）¹²⁾では、中央閉合や側径間部において波形鋼板を先行架設し、その後、張出し施工に使用してきた移動作業車を用いて上下床版を施工している。この方法は波形鋼板に曲げモーメントを分担させるので、この区間の張出し鋼材が不要となる（図－2.8）。



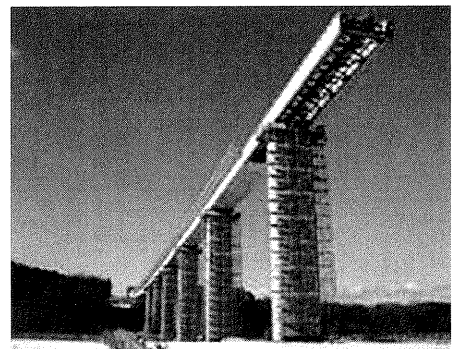
図－2.7 近江大鳥橋（栗東橋）施工概要



図－2.8 信楽第七橋（下り線）施工概要

(3) 波形鋼板を押出し施工に利用した事例

北海道縦貫自動車道鳥崎川橋^{13)、14)}では、波形鋼板を、押出し施工に用いる鋼製架設手延べ桁の代わりにして施工の合理化を図っている。本設の主桁押出し先頭区間を、波形鋼板ウェブ、鋼上下弦材、および超高強度繊維補強コンクリート（UFC）の下弦材で構成される軽量の構造として押出し架設を行い、押出し完了後にこの先頭区間の桁の上下床版を製作して、完成系の主桁として利用している（写真－2.6）。



写真－2.6 鳥崎川橋の押出し状況

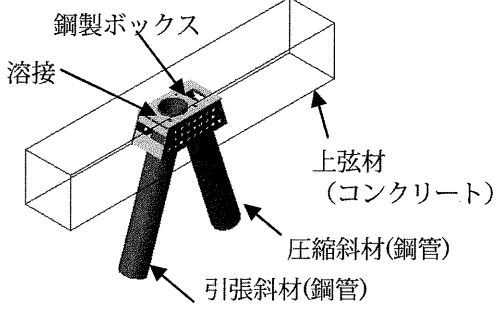
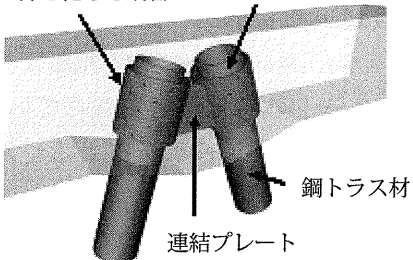
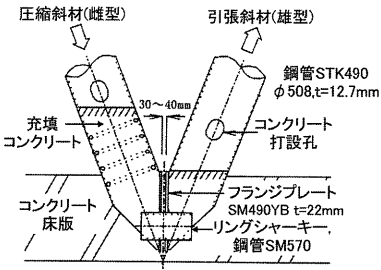
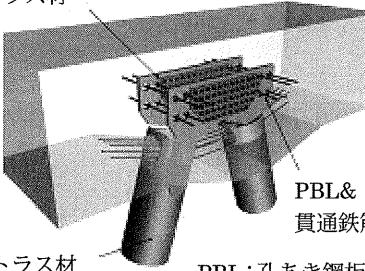
2.4 複合トラス橋の構造事例

複合構造橋梁の代表的な形式として複合トラス橋があげられる。複合トラス橋の性能は、コンクリート床版と鋼トラス部材の接合点となる格点部で左右され、格点部には確実な力の伝達性能と十分な耐力、および施工誤差吸収が容易となる施工性が求められる。

(1) 代表的な格点構造と適用事例

複合トラス橋は、1984年のアルポア橋（フランス）で初めて施工された。国内では2003年の木ノ川高架橋^{15)、16)}で初めて施工され、その後、山倉川橋¹⁷⁾（2003年）、志津見大橋¹⁸⁾、猿田川橋、巴川橋¹⁹⁾が施工された。これらの橋梁で採用された格点構造を表－2.1に示す。

表-2.1 格点構造の概要

格点構造	概 要
 鋼製ボックス 溶接 上弦材 (コンクリート) 圧縮斜材(鋼管) 引張斜材(鋼管)	【特長】引張と圧縮が別々のトラス材であるため、施工誤差を吸収することができる。鋼製ボックスは製作が容易で、孔あき鋼板はコンクリートの充填性を向上することができる。 【適用橋梁】木ノ川高架橋、山倉川橋 参考文献 20)
 内外リブ付き孔あき鋼管 外側リブ付き鋼管 鋼トラス材 連結プレート	【特長】軸力レベルに応じた経済的な設計が可能。また鋼管間に適当な間隔があることで、張出し施工における上げ越し管理や鋼トラス材の設置に柔軟に対応できる。 【適用橋梁】猿田川橋、巴川橋（主に一般部） 参考文献 21)
 圧縮斜材(雌型) 引張斜材(雄型) 鋼管STK490 φ508, t=12.7mm コンクリート打設孔 フランジプレート SM490YB t=22mm リングシャキー、鋼管SM570 充填 コンクリート 床版	【特長】両トラス材のフランジプレート間に間隙を設けることにより、施工中の上げ越し管理や施工誤差を吸収することが可能。格点部のトラス材内部にもコンクリートを充填するために、確認孔を兼ねた打設孔がトラス材に必要となる。 【適用橋梁】志津見大橋、参考文献 22)
 鋼トラス材 PBL&貫通鉄筋 鋼トラス材 PBL: 孔あき鋼板ジベル	【特長】ラーメン柱頭部やその近傍の高軸力部に適用。通常のカセット接合に対して添接板のコンパクト化が可能で、景観と施工性に優れる。 【適用橋梁】猿田川橋、巴川橋（ラーメン柱頭部、高い軸力部） 参考文献 23)

(2) 韓国での複合トラス橋

韓国の複合橋は、波形ウェブ橋よりも複合トラス橋が主流となっており、現在12橋が施工中および計画中である。その架設方法は、クレーン架設、押出し施工と支保工施工であり、張出し施工での施工や計画は現在の所はない。

現在、計画中のJi Jwa橋（慶尚北道、橋長：62.5+2@80.0+62.5=285.0m、幅員：10.7m、桁高：3.75m、施工：クレーン架設、支保工架設）を図-2.9に示す。

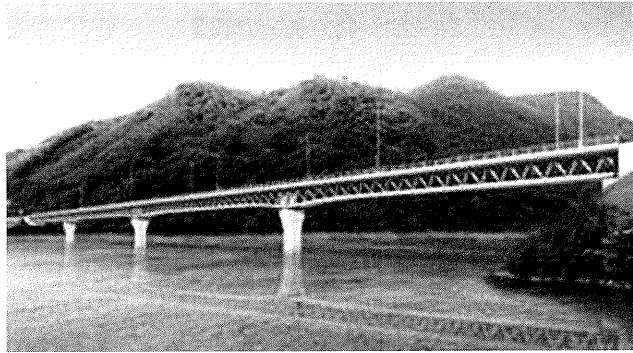


図-2.9 Ji Jwa橋

2.5 複合構造の耐久性向上対策

木曽川大橋のトラス材の腐食・破断事例から分かるように、複合構造の鋼材の下側にコンクリートとの結合部がある場合、鋼材に付着した雨水・結露水が鋼材に沿って接合部に集まるため、鋼材の腐食やコンクリート内部への浸透によるコンクリートの劣化が指摘されている。

腐食対策として、波形ウエブ橋ではポリウレタン皮膜の吹付けやシール材による止水対策を施している事例がある。複合トラス橋の木ノ川高架橋では、波形鋼板ウエブ箱桁橋の波形鋼板とコンクリートの接合部にウレタン樹脂による塗布防水を施工している（写真-2.7）。さらに耐久性等を調査する目的で暴露試験を実施している（写真-2.8）。



写真-2.7 ウレタン防水工（木ノ川高架橋）

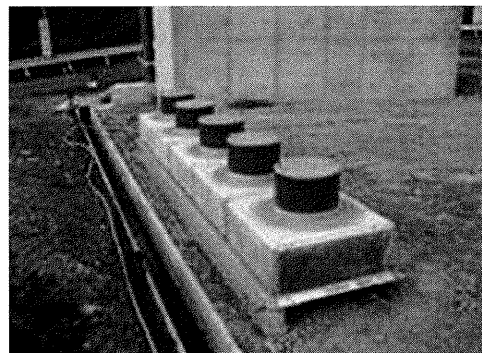


写真-2.8 暴露試験状況（木ノ川高架橋）

2.6 まとめ

コンクリートと鋼構造の互いの利点を融合させ構造の合理性を追求した複合構造は、PC橋の可能性をさらに飛躍させる21世紀の技術であるといえる。

波形ウエブ橋では、従来のコンクリートウエブの代替にとどまることなく、波形鋼板の特性を利用し、スパンの長大化や架設材利用による合理化などの技術的な発展をとげつつある。

複合トラス橋は、国内で様々な格点構造が開発され、実際に施工されている。吊構造への適用を図ったハツ場2号橋も施工中であり、今後の長大化に期待がかかる。また、韓国では日本以上に複合トラス橋が注目を集めており、今後の発展が期待される。

木曽川大橋の例を挙げるまでもなく、複合構造における耐久性向上の最大の課題は、鋼とコンクリートの境界面である。現在、様々な鋼とコンクリートの接合部分の耐久性試験が行われているが、複合構造の発展のために、十分な耐久性を確保することが肝要である。

2.7 参考文献

- 1) Jacques Combault (大浦訳) : シャロール近くのモープレ橋、プレストレストコンクリート、Vol.34, No.1, pp.63-71, 1992.
- 2) 近藤、清水、小林、服部 : 波形鋼板ウェブPC箱桁橋新開橋の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.28, No.9, pp.13-20, 1994.
- 3) 山崎 : コンクリートからみた複合橋、橋梁と基礎、Vol.36, No.8, pp.7-10, 2002.
- 4) 寺田、上東、山本、奥山 : 第二東名高速道路矢作川橋の設計、プレストレストコンクリート、Vol.46, No.5, pp.14-22, 2004.
- 5) 上東、忽那、垂水、山本、奥山 : 矢作川橋の上部構造の設計、橋梁と基礎、Vol.39, No.2, pp.17-25, 2005.
- 6) 佐川、岡澤、白武、益子 : 波形鋼板ウェブエクストラード橋の施工と振動実験、プレストレストコンクリート、Vol.46, No.5, pp.23-31, 2004.
- 7) 佐川、酒井、岡澤、益子、春日、田添 : 日見橋 (仮称) の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.37, No.6, pp.2-10, 2003.
- 8) 村尾、宮内、毛利、田中、佐川、西村 : 信楽第七橋 津久見川橋の設計と施工、橋梁と基礎、Vol.38, No.2, pp.5-13, 2004.
- 9) 芦塚、高橋、當真、小林 : 第二名神高速道路 杉谷川橋 (下り線) の設計・施工、プレストレストコンクリート、Vol.49, No.3, pp.26-33, 2007.
- 10) 宮内、安川、中藺、森、張 : 第二名神高速道路 栗東橋の計画と設計、橋梁と基礎、Vol.37, No.12, pp.9-18, 2003.
- 11) 中藺、福原、西田、須田 : 第二名神高速道路 栗東橋の施工、橋梁と基礎、Vol.38, No.10, pp.5-11, 2004.
- 12) 井手、小林、平木、山口 : 信楽第六橋・第七橋 (下り線) の設計と施工、プレストレストコンクリート、Vol.49, No.3, pp.18-25, 2007.
- 13) 東田、吉田、安里、白谷、稲原、大島 : 北海道縦貫自動車道 鳥崎川橋の計画と設計、橋梁と基礎、Vol.39, No.11, pp.13-20, 2005.
- 14) 持田、武田、大川、堀口、塚本、神田 : 北海道縦貫自動車道 鳥崎川橋上部工の施工、橋梁と基礎、Vol.40, No.6, pp.5-12, 2006.
- 15) 木村、本田、山村、山口、南 : 那智勝浦道路 木ノ川高架橋の設計、橋梁と基礎、Vol.36, No.10, pp.31-35, 2002.
- 16) 南、小野、瀬戸、尾鍋 : 那智勝浦道路 木ノ川高架橋の施工、橋梁と基礎、Vol.38, No.1, pp.10-20, 2004.
- 17) 石田、木戸、小山、大久保 : 羽越線 山倉川橋りょうの設計・施工、プレストレストコンクリート、Vol.46, No.2, pp.56-63, 2004.
- 18) 藤原、正司、坂田、後小路、梶木、野呂 : 志津見大橋の設計・施工、橋梁と基礎、Vol.39, No.11, pp.2-12, 2005.
- 19) 青木、能登谷、加藤、高德、上平、山口 : 第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋の設計・施工、橋梁と基礎、Vol.39, No.5, pp.5-11, 2005.
- 20) 吉田、古市、日紫喜、山村 : 鋼トラスウェブPC橋の格点構造に関する実験的研究、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、pp.29-34, 2000.

- 21) 加藤、本間、青木、星加：PC複合トラス橋の格点構造に関する研究、第12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、pp.277-280, 2003.
- 22) 江口、二井谷、関口、野呂：鋼トラスウェブ格点構造の静的および疲労試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No.3, pp.1015-1020, 2000.
- 23) 青木、本間、山口、星加：PC複合トラス橋の設計・施工－第二東名高速道路 猿田川橋・巴川橋－、コンクリート工学、Vol.42, No.8, pp.38-43, 2004.

3. 吊床版橋・張弦桁橋の動向

3.1 技術の変遷

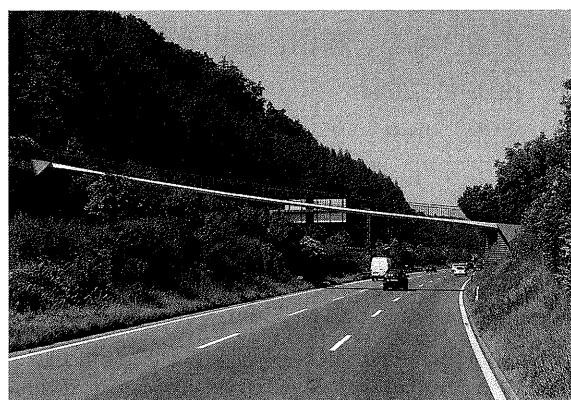
吊床版橋は、橋台間や橋脚間に張り渡したPCケーブルを利用してコンクリート床版を架設し、その上を人や車両が直接、または鉛直材等を介して間接的に通れるようにした橋梁形式である。吊床版橋のコンクリート床版は、プレストレスの導入によって荷重に対する引張抵抗材として機能するとともに、構造系全体の曲げ剛性やねじり剛性の向上に対しても寄与している。さらに架設においては、PCケーブルを利用したコンクリート床版の架設が可能であるため、桁下の制約条件に左右されることがなく、支保工等が不要となる。

吊床版橋の歴史は古く、海外では1958年にFinsterwalder によってボスポラス海峡架橋計画に中央支間408mの吊床版橋が提案された事例が見られる。その後1964年にドイツで工場内のセメント運搬用として吊支間216mの吊床版橋が初めて適用され、続いて1967年にスイスで吊支間40mのPfaffikon橋が歩道橋として世界で初めて建設された（写真－3.1）¹⁾。

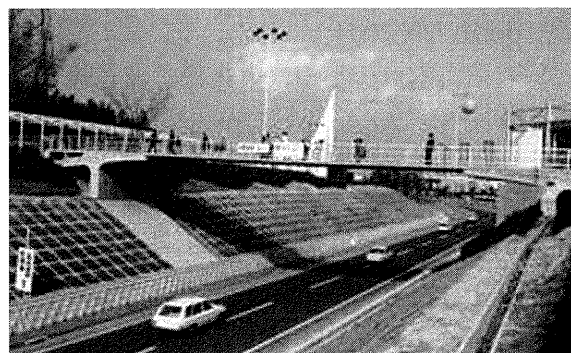
わが国では、1969年に国内で初めて大阪万国博覧会場内に万博9号橋（写真－3.2）が建設されて以来、ゴルフ場や溪谷などの谷間に架かる歩道橋を中心に吊床版橋は数多く建設されてきた。適用支間も大きく伸び、1996年には最大吊支間147.6mの夢吊橋が建設されるに至った。さらに、吊床版橋の形式も多様化が進み、2径間連続形式（双龍橋、1984年）や3径間連続形式（宇田津横断歩道橋、1991年）、あるいは3方向分岐形式（亀甲橋、1991年）などが建設された。

これらの形式はいずれも、架設したコンクリート床版を直接路面として使用することから直路式吊床版橋と呼ばれている。

直路式吊床版橋に対して、架設したコンクリート床版上に鉛直材やトラス材を設置して路面となる上床版を設けたものが上路式吊床版橋である。直路式吊床版橋では路面の勾配が直接PCケーブルの配置形状に左右されるのに対して、上路式吊床版橋では鉛直材等を介して上床版が構築されるため、路面形状の影



写真－3.1 Pfaffikon橋



写真－3.2 万博9号橋

響を受けずにPCケーブルのサグ量を自由に設定できるという利点がある。このためサグを大きくとってPCケーブルの張力を低く設定することができ、鋼材量を抑えて下部工への負担も軽減させることが可能となる。わが国では1977年に国内で初めて道路橋である速日峰橋が建設され(写真-3.3)、1995年には多径間連続形式の潮騒橋が建設された。海外ではKollstrommen橋(ノルウェー、1971年)や方杖構造と組み合わせた支間124mの道路橋であるRio Colorado橋(コスタリカ、1972年)などの事例がある。

上路式吊床版橋は、バリアフリーへの対応も可能であるため、従来の直路タイプの改善として近年では事例も増えている。曲弦トラス橋と呼ばれる形式では、橋台間に張り渡したPCケーブルを利用して上部工を構築した後に、最終的にPCケーブルを桁に定着させて自旋構造としている。この形式としては2001年に初めてがんもん橋が建設された。

吊床版橋に関してはこのようなわが国における設計施工事例や研究成果を基に、(社)プレストレストコンクリート技術協会よりPC吊床版橋設計施工規準(案)²⁾が刊行されている。

一方、鉛直ストラット等を介して桁下に配置したPCケーブルによって主桁に上揚力と軸力を与えることで主桁を補剛した構造形式が張弦桁橋である。

張弦桁橋は吊床版橋と異なり、主桁剛性を高めて主桁を主たる抵抗部材とした構造と位置づけられる。通常の桁橋と比べて桁高を抑えて自重の軽減が可能となる。さらには主桁剛性ととも主桁下に配置した張弦ケーブルの張力および偏心量などをパラメータとして設定することができるため、設計の自由度が増す。ただし架設時には、主桁を一時的に仮支持する必要があるため、一般に支保工施工や架設ガーダーを用いたスパンバイスパン架設などが行われている。

わが国では、2001年にあゆみ橋が建設され(写真-3.4)、海外では1995年にスペインのバルセロナ近郊に建設された橋長504m、標準支間40m、有効幅員12mの道路橋である13径間連続張弦桁橋のOsormort高架橋などの事例がある(写真-3.5)。

上路式吊床版橋と張弦桁橋は、上下の構造部材の剛性を自由に設定することで異なる構造特性となり、その設定に応じて新しい橋梁形式を生み出すことが可能となる。そこで以降では、従来の吊床版橋、張弦桁橋の構造特性や架設工法を積極的に改善した幾つかの事例を紹介する。

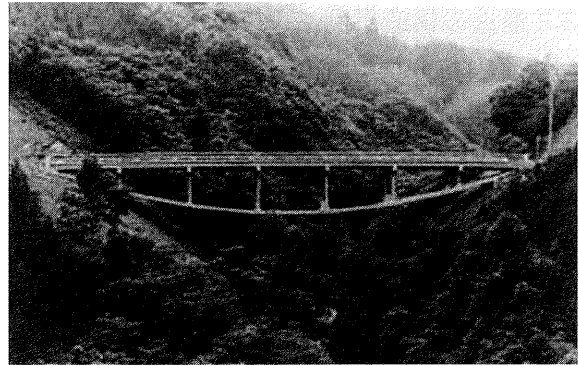


写真-3.3 速日峰橋



写真-3.4 あゆみ橋

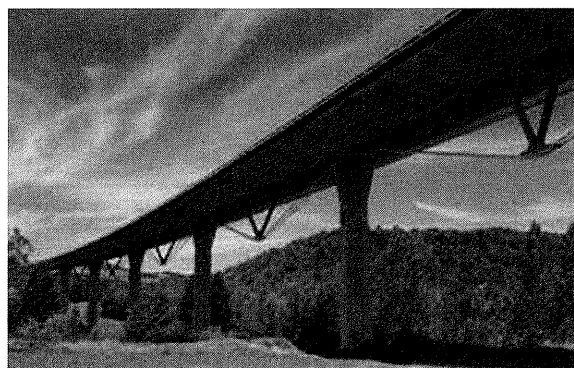


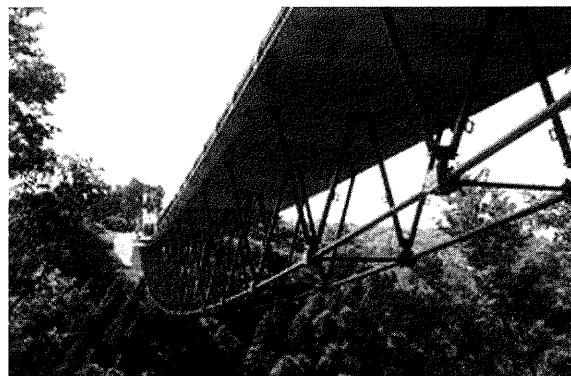
写真-3.5 Osormort 高架橋

3.2 最近の構造事例

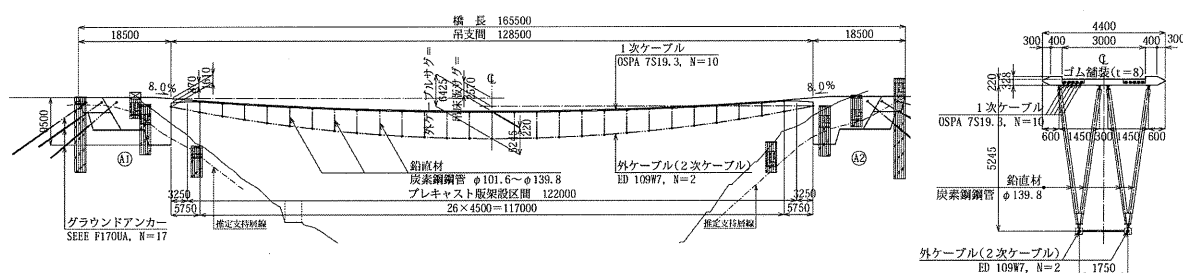
(1) 森のわくわく橋

森のわくわく橋は、福島県いわき市の県立いわき公園内に建設された、橋長165.5m、吊支間128.5mの歩行者専用橋である（写真－3.6、図－3.1）。本橋は建設地点が丘陵地であるため、長支間化が可能な構造で、公園内のランドマークとして軽快で優美な意匠が要望されたこと、建設地点の支持層が風化泥岩であるため上部構造から作用する水平力を低減する必要があることなどから、外ケーブル併用吊床版橋を世界で初めて採用した。従来の直路式吊床版橋では吊床版断面内に配置していたプレストレス導入用の2次ケーブルを、鉛直材を介して吊床版断面外に配置して外ケーブル形式とした橋梁である。この形式は、吊床版橋の長支間化や簡易な道路橋への適用に対応したものであり、従来の直路式吊床版橋に比べて外ケーブルを配置することで外ケーブルのサグを大きく設定でき、下部構造に作用する水平力を70%程度に低減している。また、ねじれ振動モードの特性が改善されるので、フラッター発現風速が増加し、耐風安定性が向上している。

さらに、外ケーブルにプレファブケーブルを用いることでグラウトが不要となり、必要に応じて取替えや再緊張も可能となる。なお本橋では、永久荷重作用時の死荷重分担率を、概ね吊床版が40%、外ケーブルが60%となるように設定している。



写真－3.6 森のわくわく橋



図－3.1 森のわくわく橋

(2) のぞみ橋

のぞみ橋は、岐阜県の新丸山ダム建設の資材運搬用道路として木曾川上流に位置する蘇水峡国定公園内に建設された、橋長91.63m、吊支間90mの上路式吊床版橋である（図－3.2、写真－3.7）。本橋は、上路式吊床版橋にトラス構造を組み合わせ、吊床版を橋台から切り離した端部分離型上路式吊床版橋である。ダム完成後には撤去を行う必要があるため、橋体の解体および再構築が容易にでき、解体後に部材の再利用を可能としている。

ケーブル配置は、1次ケーブルは橋台に定着させ、吊床版にプレストレスを導入するための2次ケーブルは端横桁に定着して橋台と切り離している。すなわち上部工の自重は1次ケーブルで支持し、橋面荷重や活荷重はトラス桁の曲げ剛性で支持する形式である。

本橋では活荷重や温度変化によって橋台に作用する水平力を抑えることが可能となり、従来

の吊床版橋と比較して下部構造への水平力を30～40%低減している。トラス桁の剛性により、吊ケーブルに生じる応力増加も抑えられ、端部ストラットに生じるプレストレスやクリープによる断面力も低減されている。完成後には、1次ケーブルを外ケーブルとしたことで、ケー

ブルの点検や橋自体の撤去および移築を容易に行うことが可能となっている。

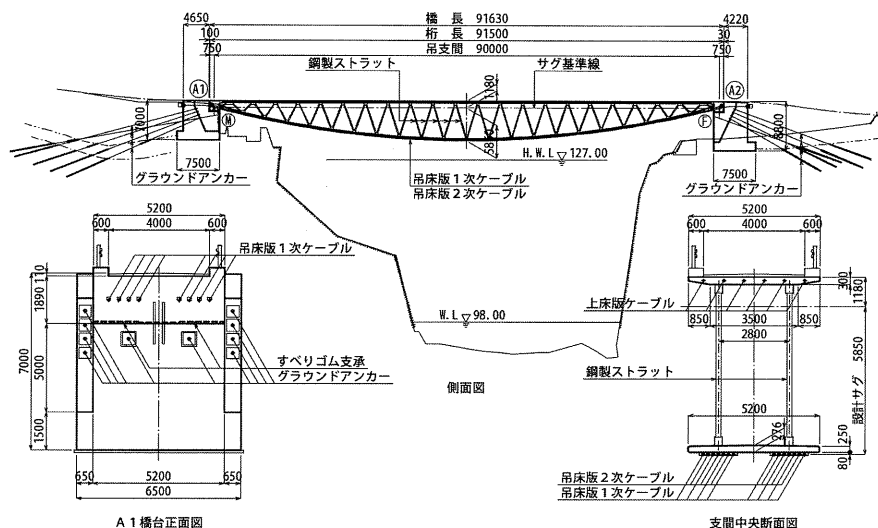
(3) 青雲橋

青雲橋は徳島県山城町（現三好市）に建設された、橋長97m、支間93.8mの複合トラス橋である（写真－3.8、図－3.3）。本橋は路面となる上弦材の補剛桁、下弦材のPC吊床版部、および鋼トラス材から構成され、上床版補剛桁が圧縮弦材、吊床版部がコンクリート部材で補剛された引張弦材となる。

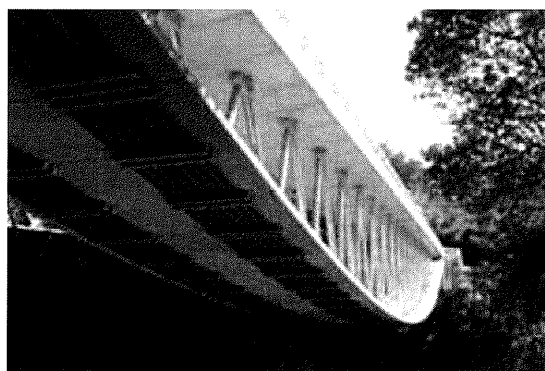
本橋では吊床版部の軽量化を図るため、1次ケーブルを外ケーブル方式として吊床版断面内に配置させないことで、全幅6.3mに対して吊床版幅を2.8mと小さく設定している。また、トラス構造の格点部を吊床版部の図心に一致させることにより、付加モーメントの発生を防いでいる。

完成時には、架設時の他碇式構造を自碇式構造に変換することで永久アンカーを不要としてグラウンドアンカーを低減し、かつ補剛桁にプレストレスを導入している。さらに鋼トラス材やプレキャスト部材を採用することで、橋全体の軽量化を図り、大がかりな架設設備を用いずに短期間の施工を可能としている。上床版の補剛桁は、プレキャスト部材、埋設型枠となるPC板および場所打ち床版で構成され、補剛桁の軽量化と現場作業の省力化を図っている。

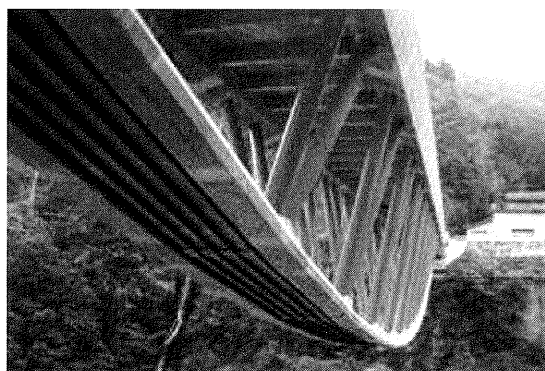
なお本橋には2006年のfibコンgresにおいて、わが国の橋梁として初めてfib最優秀賞が与えられている。



図－3.2 のぞみ橋



写真－3.7 のぞみ橋



写真－3.8 青雲橋

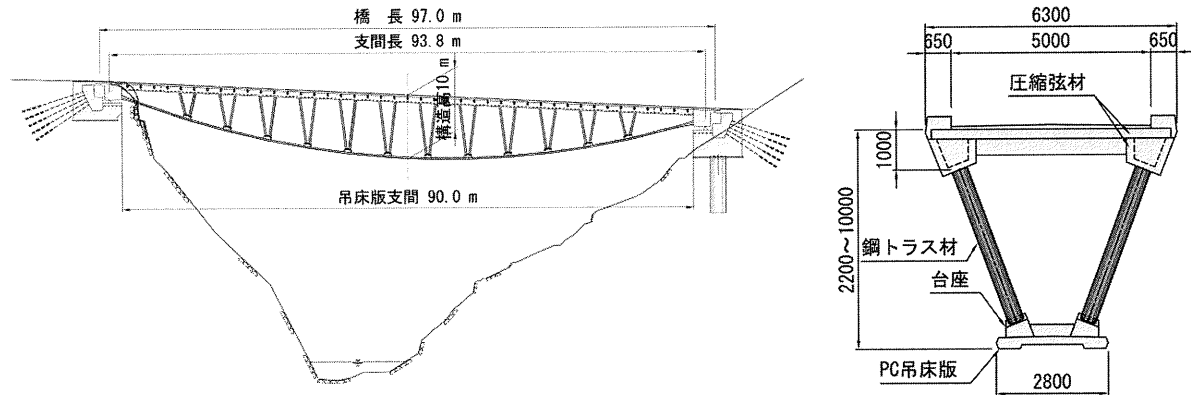


図-3.3 青雲橋

(4) 青春橋

青春橋は群馬県嬬恋村に建設された橋長60.1m、有効幅員2.0mの歩道橋である（写真-3.9、図-3.4）。本橋は、中学校と運動公園とを急峻なV字谷で結ぶ地点に位置し、バリアフリーや路面凍結の観点から、路面の縦断勾配にケーブル配置が影響されない構造として、U形断面を有するPC二重張弦桁橋が採用されている。

主桁は高欄部まで構造部材としたU形断面とし、PCケーブルは架設時に主桁を支持する1次ケーブルと、主桁のサグを調整する2次ケーブルで構成されている。従来の張弦桁橋では、主桁が自立するまでは架設ガーダー等により仮支持させる必要があるが、本橋では吊床版橋で用いられる懸垂架設を適用し、U形断面の側面に1次ケーブルを配置して架設時の主桁を支持している。1次ケーブルを桁側面に配置することにより、従来の上路式床版橋と比較して、架設時の安定性も増している。さらに、U形断面の採用により、主桁の剛性を高めて、活荷重などによるたわみや応力、振動等を低減している。



写真-3.9 青春橋

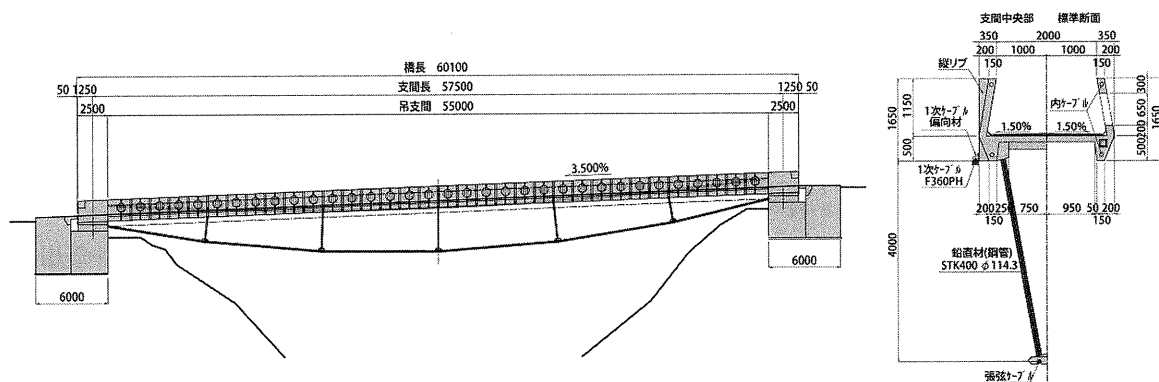


図-3.4 青春橋

3.3 将来展望

吊床版橋および張弦桁橋は、各構成部材の剛性やケーブルの張力を自由に設定できるため、これらを適切に設定することでより広範な地質条件への適用も可能となるとともに、道路橋への適用も増えることが期待される。また、吊ケーブルを支保工代わりに用いることやプレキャスト部材の組み合わせにより施工の省力化を図ることができるため、桁下の架橋条件に左右されない合理的な架設方法が可能となり、周辺環境の保全という観点からも今後の適用拡大が期待される。

吊床版橋、張弦桁橋の分野では、これまでわが国で独自の発展が見られ、多くの独創的な構造、設計、施工方法が実現してきた。技術者が独自の発想を活かして、構造を楽しむことのできる橋梁形式とも言えることから、今後もさらなる合理的な構造、架設方法の出現が期待される。

3.4 参考文献

- 1) fib : Guidelines for the design of footbridges, fib Bulletin 32, 2005.
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC吊床版橋設計施工規準（案）、2000.

4. PC橋におけるプレキャスト化の動向 ―プレテンションウェブ橋の施工事例―

4.1 はじめに

PC橋の建設においてコンクリート部材をプレキャスト化することは、現場作業の軽減や工期短縮等が図られることでコスト削減効果が大きく、また品質の向上にもつながることから、これまでに多くの建設工事で採用されてきた。

本章では、PC橋における「プレキャスト化の変遷」について述べるとともに、新たな試みとしての「プレテンションウェブ工法」を採用した錐ヶ瀧橋と中新田高架橋の設計・施工事例をふまえ、PC橋におけるプレキャスト化の最新の動向を概説するものである。

4.2 プレキャスト化の変遷

PC橋の建設におけるプレキャスト化は、部材の製作が単純化・機械化されて省力化が図られ、現場においては作業が軽減されるとともに工期短縮、作業環境の改善による作業効率が向上するなど、多くの点でコスト削減効果が大きい。またプレキャスト部材の製作は、工場など作業環境の良いところで行われるために品質が向上し、それが耐久性の向上につながることから維持管理費の削減にもつながることとなる。このようなことからプレキャスト工法に関する技術開発が進み、従来からT桁やI桁のようなプレキャスト桁、PCコンポ橋に代表されるハーフプレキャスト桁や、鋼橋のRC床版の劣化対策としてのプレキャスト床版等に採用されてきた。さらに近年では、長大橋の工期短縮やコスト削減を目的に、プレキャストセグメント工法が多く採用されている。

プレキャストセグメント工法とは、工場または現場近くのヤードであらかじめ製作されたコンクリート部材を架橋地点に運搬し、プレストレスを与えることで一体化して架設する工法である。本工法は、松山自動車道の重信高架橋で、ショートラインマッチキャスト方式とスパンバイスパン架設工法が採用されたことで注目された。その後様々な技術開発が行われ、大規模セグメントによる新名神木曽川橋および揖斐川橋、構造中心で分割したプレキャストセグメントを場所打ち床版により接合する構造とした第二東名上和会高架橋、安城高架橋、また主桁断

面をコア断面とストラットに支持された場所打ち床版部に分割した断面分割型プレキャストセグメント工法を採用した内牧高架橋など、数多く建設されてきた。

しかしながら、わが国においては、製作ヤードの規模が限られることなどから、本工法を採用するにあたっては、①セグメントを製作・ストックするヤードの確保が困難なケースが多くある、②一般公道を運搬する場合は、セグメントの重量が30t以下程度に制限される等、いくつかの課題がある。これらの課題を解決し汎用性のある工法とする方策としては、セグメントを適切な規模に分割するか、断面の一部を場所打ち工法とすることでセグメント重量の軽減を図り、一般公道を運搬可能な規模とする方法などが考えられる。この一方法として、ウェブをプレテンション方式でプレストレスを導入した、プレキャスト部材とする「プレテンションウェブ工法」が開発され、いくつかの工事で採用されている。

4.3 プレテンションウェブ工法

プレテンションウェブ工法とは、現場打ちで施工されるPC箱桁橋のウェブをプレテンション方式のプレキャスト部材に置き換えて箱桁を構築する工法である。本工法の特徴は、①高強度コンクリートを使用したプレテンション部材を使用することで高いせん断抵抗性が確保され、ウェブ厚を薄くして主桁自重の軽減が可能となり、上下部構造の規模が縮小されることで橋梁建設の低コスト化が期待できる。②プレキャスト部材を品質管理の行き届いた工場で製作することにより、高品質化が期待でき、耐久性の向上が図れる。③ウェブを施工するための型枠作業やコンクリート打設が不要となり大幅な現場施工の省力化が図れる、というものである。図-4.1にその構造イメージを示す。

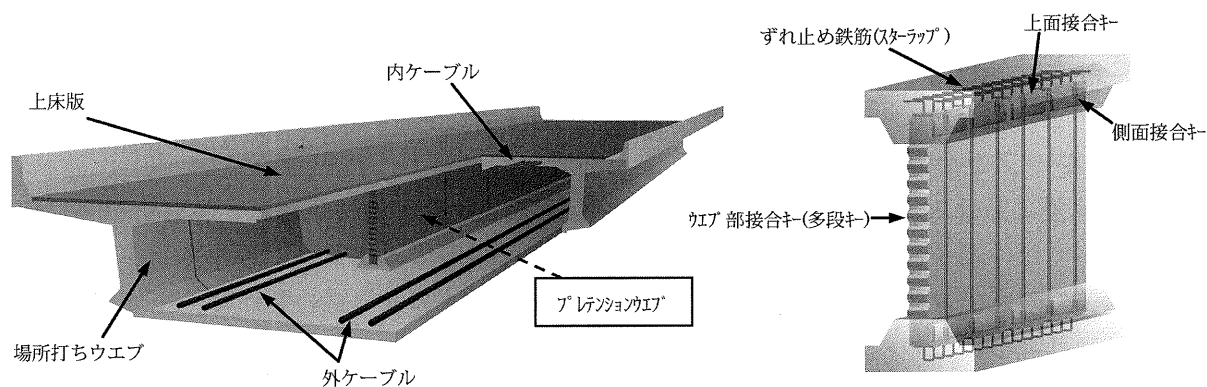


図-4.1 構造イメージ

海外では既にいくつかの施工実績があり、1947～1951年にかけて、パリ郊外のマルヌ川に建設されたマルヌ川5橋、また1977年には同じくフランスのプロトンヌ橋、さらに1999年にはフランス領コルシカ島においてポストテンション方式のプレキャストウェブを採用したベッキオ橋などが建設されている。一方、日本国内においては、これら諸外国の施工実績や独自に実施した種々の実験や検討成果をもとに、(社)プレストレストコンクリート技術協会から、「プレテンションウェブ橋設計施工ガイドライン(案)」¹⁾が刊行され、基本的な技術基盤が整備されている。

4.4 プレテンションウェブ工法の施工事例

(1) 錐ヶ瀧橋

1) 橋梁概要

錐ヶ瀧橋は、新名神高速道路の亀山ジャンクション（仮称）から甲賀土山インターチェンジ（仮称）間に位置し、全長1,257m、最大支間長115mを有する張出し架設施工のPC連続ラーメン箱桁橋である。本橋では、国内初の試みとして2室箱桁の中ウェブをプレテンションウェブ工法によって施工している（平成19年3月竣工）。プレテンションウェブへの置き換えを2室箱桁の中ウェブに限定したのは（写真-4.1）、橋梁の一部を、ストラットに支持された床版構造を有する主桁構造として施工するため、外ウェブに適用した場合にはストラット受台を含めたプレキャストウェブとする必要があり製造が煩雑となることと、施工が煩雑となる中ウェブのみのプレキャスト化でも現場作業の省力化への効果が大きいと判断したためである。写真-4.2に完成写真を示す。

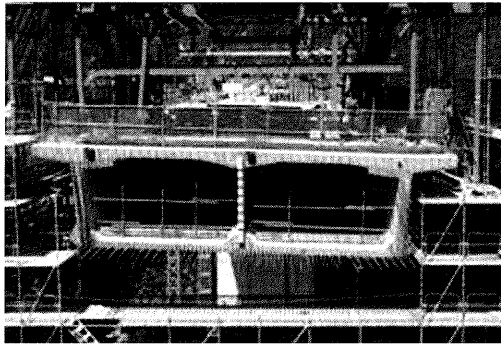


写真-4.1 主桁断面



写真-4.2 完成写真

2) 設計

2-1) プレテンションウェブの構造

桁高の変化に合わせて台形のパネルを製作する場合、ウェブパネル個々で下フランジとの接合側の辺長が変化し、これに合わせてPC鋼材や鉄筋貫通用の開口位置も変化し製作が煩雑となることから、1枚のウェブパネルは長方形とし、ハンチ内への埋込み深さを変化させることで対応している。また、プレテンションウェブと上床版および下床版の接合部は、ずれ止め鉄筋とコンクリートせん断キーを併用した構造としている。プレテンションウェブ同士の接合方法には、アクリル系接着剤を塗布したコンクリート多段せん断キー方式を採用している（写真-4.3）。

プレテンション鋼材の定着構造は、プレストレスによるせん断補強を有効に活用するため、付着定着長の低減効果を実験により確認した圧着グリッパ（70mm）による定着方法を採用し（写真-4.4）、設計有効伝達長を30φとしている。その結果、道路橋示方書²⁾で規定されている65φとした場合と比較して、プレテンション鋼材量を30%低減することができる。図-4.2にコンクリート表面のひずみ分布を示す。

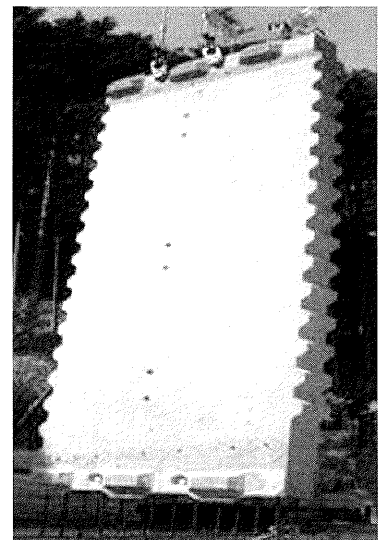


写真-4.3 ウェブ形状

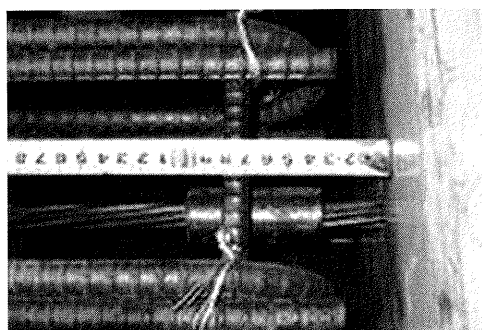


写真-4.4 圧着グリップによる定着

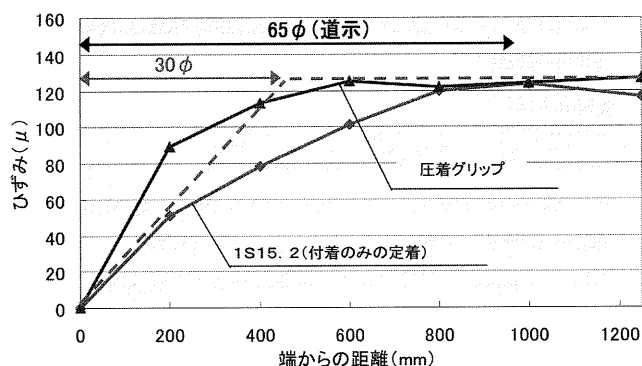


図-4.2 コンクリート表面のひずみ分布

2-2) 設計の合理化

諸外国では、終局限界状態におけるせん断の照査において、AASHTO LRFD³⁾が鉄筋量の算出においてひび割れ角度の影響を考慮していること、またBPEL91⁴⁾では平均せん断応力度の制限値の設定においてひび割れ角度の影響を考慮するなど、いわゆる修正圧縮場理論を適用して合理的な設計を行っている。そこで、ウェブにプレストレスを導入することの効果を非線形有限要素法解析によって検証し、せん断圧縮破壊を照査する場合の τ_{max} を 8.0N/mm^2 と定め、さらなる構造の合理化を図ることとした。プレテンションウェブの厚さは、標準部で150mm、支点部付近は200mmの厚さである。図-4.3に解析で得られたひび割れ角度、また図-4.4に平均せん断応力度-圧縮ひずみの関係を示す。ウェブ厚を薄くすることにより主桁重量を約3%低減することができる。

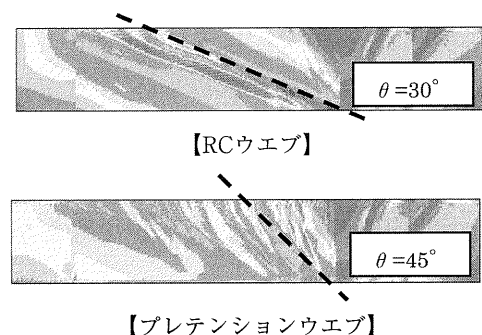


図-4.3 ひび割れ角度（最小主応力度）

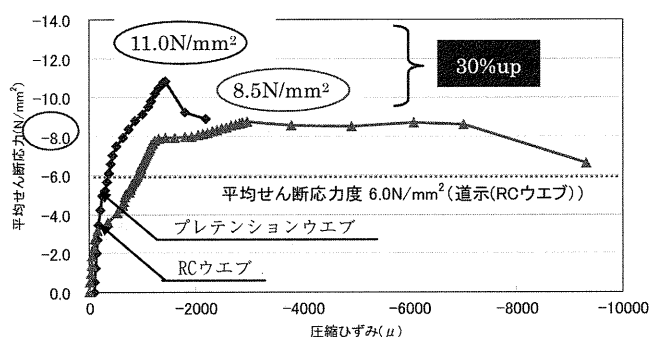


図-4.4 平均せん断応力度-圧縮ひずみ

3) 製作および施工

プレテンションウェブの製作は、十分な接合精度が確保されることを接合試験により確認した上で、単独モールドによるセパレート方式で製作している（写真-4.5）。

プレテンションウェブはタワークレーンによって荷揚げを行ったのち、移動架設作業車内の荷役設備により吊下げ・設置を行い（写真-4.6）、接合面に接着剤を塗布した後、引寄せ用の鋼製ブラケットを使用して鋼棒を緊張することで接合を行った（写真-4.7）。中ウェブの型枠・鉄筋組立、コンクリート打設などの現場作業の軽減により、張出し架設の1サイクルを約1日短縮でき、全体で約1.5ヶ月の工期短縮となっている。

また、本橋の側径間の一部では中・外ウェブともにプレテンションウェブ工法を適用し、外ウェブへ適用した場合の構造的・施工性の検証を行っている（写真-4.8）。

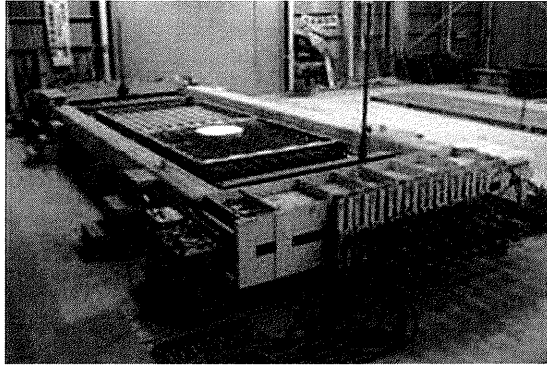


写真-4.5 単独モールドによる製作状況

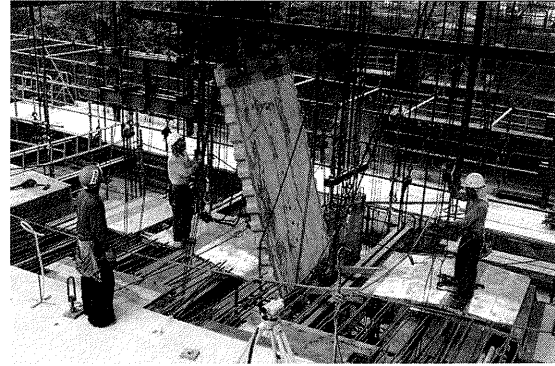


写真-4.6 吊下げ状況

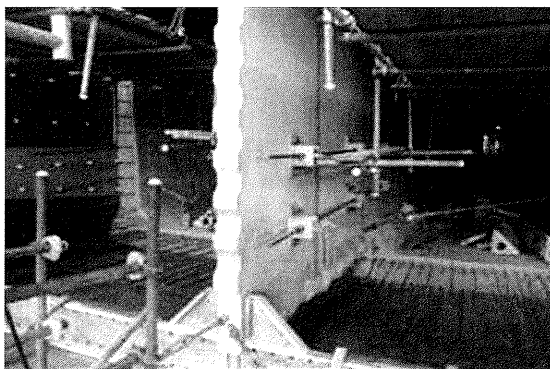


写真-4.7 引寄せ

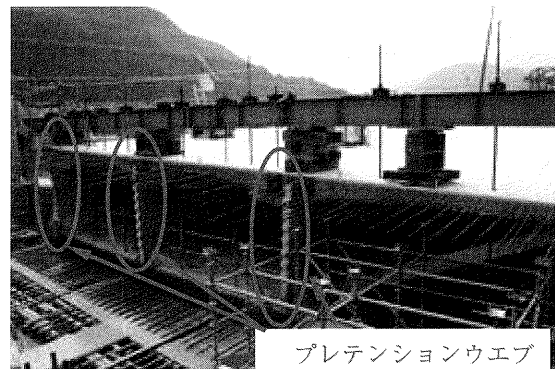


写真-4.8 外ウェブへの適用

(2) 中新田高架橋

1) 橋梁概要

中新田高架橋は、さがみ縦貫道路の（仮称）海老名北インターに位置する、上り線958m、下り線991m、最大支間43mの固定支保工施工のPRC 2主連続箱桁橋であり、固定支保工施工としては国内初のプレテンションウェブ橋となる。主ケーブル配置は内外併用方式で、内ケーブルはSWPR7B 12S12.7を上下床版に配置し、外ケーブルにはSWPR7B 12S15.2を使用している。またプレテンションウェブの厚さは、標準部で150mm、支点部付近は200mm、250mmである。本橋では、現場での工期短縮、ウェブの施工性改善、上部工の重量軽減を目的としてプレテンションウェブ工法が採用された。図-4.5に構造概要図、図-4.6に主桁断面図を示す。

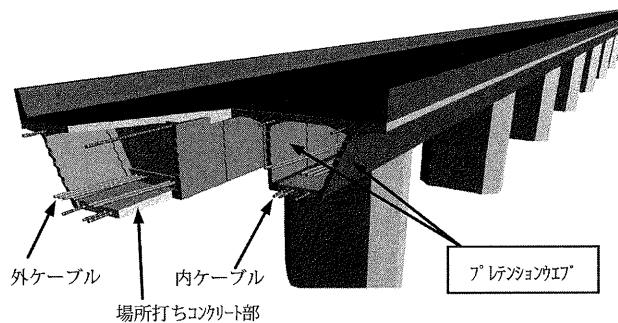


図-4.5 構造概要図

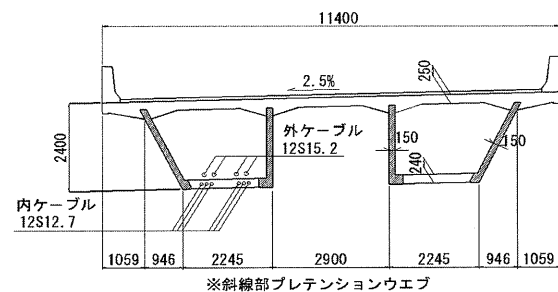


図-4.6 主桁断面図

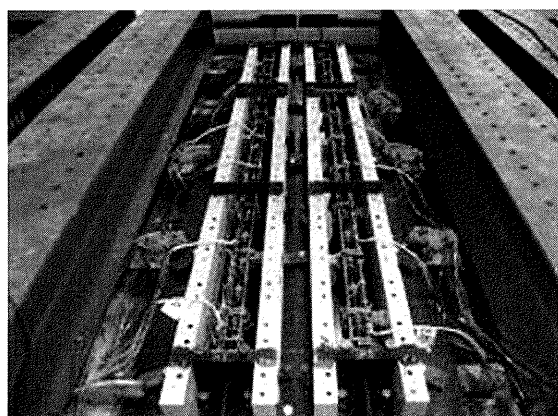
2) 設計

2-1) プレテンション鋼材の定着方法

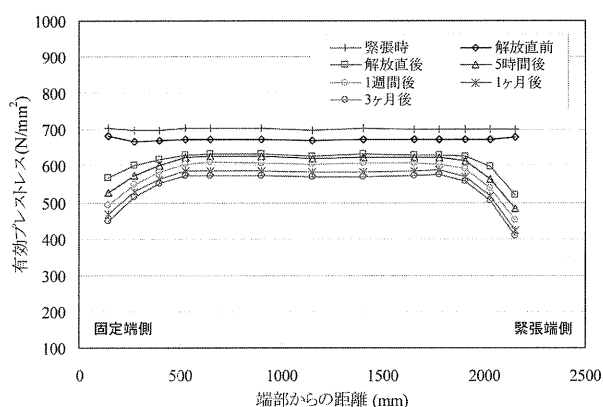
プレストレスを導入するための適切な鋼材を選定するために、表－4.1に示す鋼材および定着構造で付着定着性能試験を行っている（写真－4.9）。結果として、十分な付着性能を有し、経済性にも優れる（丸棒＋ナット）の組合せを採用している。図－4.7に鋼材応力度分布を示す。

表－4.1 鋼材種別

鋼材種別	定着部
鋼より線 SWPR7B 1S15.2	圧着グリップ
丸棒 SBPR930/1080 $\phi 17$, $\phi 23$	ナット
異形棒鋼 SBPD930/1080 $\phi 17$, $\phi 23$	なし or ナット



写真－4.9 付着定着長試験

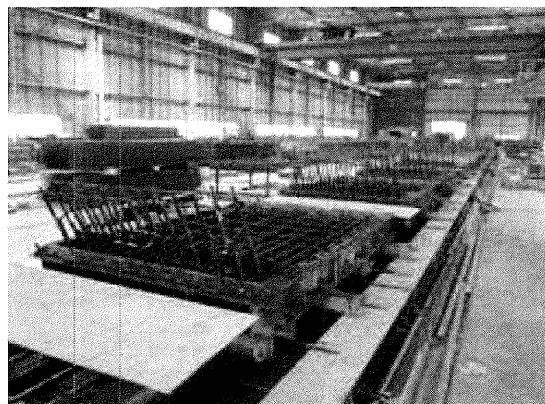


図－4.7 鋼材応力度分布（丸棒＋ナット）

3) 施工

工場でのプレテンションウェブ製作は、セパレート方式のロングラインで製作し、1ラインあたり8枚同時に製作している（写真－4.10）。また、プレテンションウェブは、工場での製作、運搬、現場で設置できるトラッククレーンの吊り能力を考慮し、1枚当りの重量を2.5t程度としている。

施工は2径間ごとの分割施工で行われている（写真－4.11）。プレテンションウェブを使用することにより、従来の場所打ち支保工施工と比較し、現場での作業工種が削減できることから、20%程度の工期短縮が見込まれている。施工ステップは図－4.8の通りで、プレテンションウェブの引き寄せは、鋼材とブラケットを使用して行っている。



写真－4.10 プレテンションウェブ製作状況

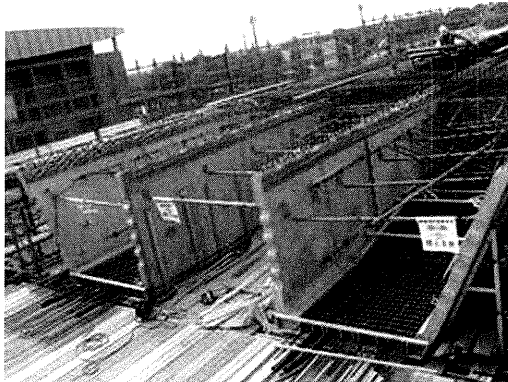


写真-4.11 プレテンションウエブの配置

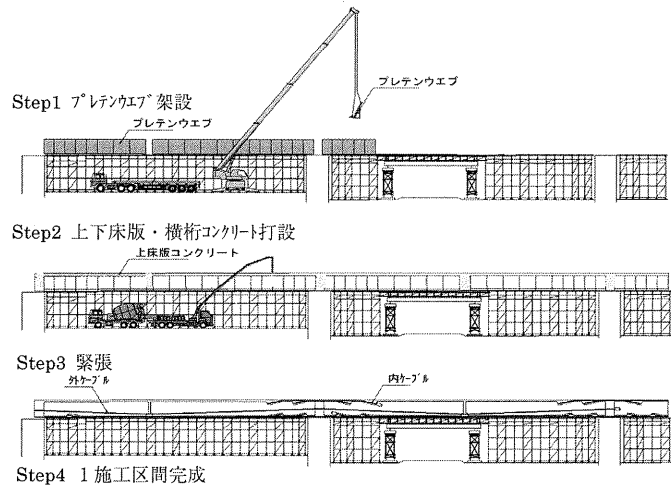


図-4.8 施工ステップ

4.5 接合技術について⁵⁾

近年のコスト縮減を背景として、PC構造物の形式が多様化するなかで、大型構造物中に部分的なプレキャストPC部材の活用が見られる。その際には、接合部の設計が重要な課題となり、これまでに実験的な検討が行われているが、個別の構造に特化したものが多く、接合設計の根本的な考え方が必ずしも明確にはなっていない。このような現状を踏まえ、(独)土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会によって、「橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究」が行われた。

PC合成桁の照査荷重、接合面の最小鋼材量規定、せん断伝達耐力の照査法等についての経緯や影響度の整理、接合構造として重要なせん断伝達機構に関しては、プッシュオフ試験による接合面の表面粗度と鉄筋量がせん断伝達耐力に及ぼす影響についての検討等を行っており、その成果として、「橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究報告書（I）」(平成19年2月)がとりまとめられている。

接合構造の設計法に関する基本的な考え方が示されたことにより、PC道路橋のさらなるコスト縮減に向けてプレキャストPC部材の活用促進が図られていくものと考えられる。

4.6 おわりに

「施工の合理化」、「耐久性向上」等を目的にPC構造物のプレキャスト化が採用され、これまでに様々な技術開発が行われてきた。近年では、プレテンションウエブ、ストラット、PC床版など、大型構造物中での部分的なプレキャストPC部材の活用が見られる。これは、合理化を図った構造形式の一つと言える。接合構造設計法の体系化や新たな構造細目の考案に関する研究も実施されており、今後、プレキャスト技術の活用範囲がさらに拡大していくものと期待される。

4.7 参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会：プレテンションウエブ設計施工ガイドライン(案)、2003.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ、2002.

- 3) American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Ed, 1998.
- 4) Regle BPEL91, Regles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en beton precontraint suivant la methode des etats limites, 1992.
- 5) (独) 土木研究所：橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究報告書（I）、2007.

5. おわりに

以上、鋼とコンクリートの複合化、吊床版橋および張弦桁橋、プレキャスト化、特にプレテンションウェブをキーワードに、PC橋の新しい構造形式の現状と将来について概観した。PC橋の設計施工にあたって、技術革新は必須の項目であり、新しい技術の開発と提案が強く求められている。新技術の適用拡大とPC橋の発展のため、今後のますますの研究開発を期待したい。

『PC道路橋計画マニュアル』の改訂について

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 PC道路橋計画マニュアル改訂部会

改訂部会設計WG主査	佐 藤 徹	改訂部会設計WG委員	志 道 昭 郎
改訂部会部会長	大 浦 隆	改訂部会設計WG委員	西 村 一 博
改訂部会幹事長	脇 本 優	事務局次長	三 浦 貴 洋
改訂部会設計WG委員	吉 田 政 宏		

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下「PC」）の技術がわが国に導入され、すでに55年の歳月が経過した。PC橋は、長支間化が可能なこと、架設方法や景観設計からみて自由度の多い点や、耐久性そしてメンテナンス性にも優れることから今日までに広く採用されるようになってきている。

しかし一方で、PC橋については設計、積算、施工ともに複雑で分かりにくいという課題が指摘されており、計画段階における構造形式の選択と経済性の検討、さらには概略の工費や工期が容易に推定できる手引書のようなものが求められている。そのため(社)PC建協では、その要望に応えるべく道路橋の企画・計画に携わる技術者のために「PC道路橋計画マニュアル」の初版を平成元年に発刊しており、その後2回の改訂を行ったものの、早10年経過した。

またここ近年、建設業界をとりまく社会情勢の変化に伴い建設コストの縮減だけでなく、さらなる耐久性や施工品質の確保、維持管理の容易さや環境への配慮も要求されている。そして新技術の開発・導入が以前にもまして進み、大規模な長大支間橋りょう、より合理的な構造形式が新たに提案され、次々に建設されてきている。

このような背景から、その最新技術情報と実績を取込み、さらにはより使いやすい内容とするために施工計画などの資料の充実化と維持管理技術を追加し、「PC道路橋計画マニュアル」平成19年度改訂版を発刊するに至った（図-1.1に表紙を示す）。本稿は、その改訂された「PC道路橋計画マニュアル」について解説するものである。

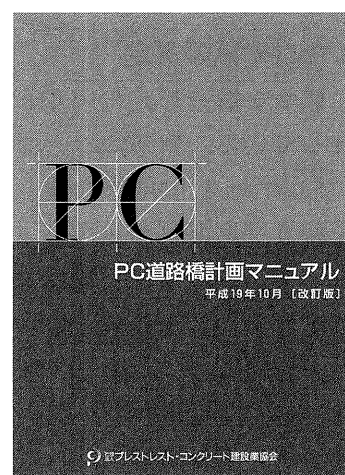


図-1.1 改訂版の表紙

2. 計画マニュアルの改訂点

「PC道路橋計画マニュアル」は、上述したような趣旨で平成元年に初版を発刊して以来、PC道路橋の計画に携わる多くの方々に広く利用して頂いている。その後、平成5年の道路構造令の改正による道路橋示方書の改訂（25t荷重を規定）と兵庫県南部地震以降の新しい耐震設計も取入れて平成7年に第1回改訂版を、そして平成8年の道路橋示方書の改訂に対応して平成9年に第2回改訂版を発刊している。

今回の改訂では、平成14年度の道路路橋示方書の改訂だけではなく、時代にマッチした新しいPC道路橋計画マニュアルにすべく以下の点を主に改訂している。

- ① 計画段階におけるPC橋の構造形式と主げた断面形状の選択手法の紹介
- ② 最新の構造形式の紹介と新技術・新工法の紹介
- ③ 計画時における施工方法の充実化、最新施工方法の紹介
- ④ プレキャストPC床版など鋼橋に使用される床版技術の紹介
- ⑤ 既設PC橋の維持管理技術の紹介

その目次構成は、前回の改訂版から「第5章 新構造形式の提案」、「第6章 床版構造」、「第8章 PC橋の維持管理」の3つの章を新たに加え、図-2.1に示す全10章で構成されている。その結果、全体で従来の倍の300ページ以上にもなり、厚さだけではなくその内容も大きくリニューアルされた改訂版となっている。

3. 各章の解説

3.1 「第1章 架橋地点に適したPC橋の選定」

3.1.1 PC橋の適用支間

PC橋の構造形式について、断面形状・架設工法に着目した適用支間の一例を図-3.1.1～図-3.1.2に示す。実際のマニュアルでは、(その1～その7)までの7頁に分け、PC橋として実績のある各構造形式別に紹介しており、PC橋を比較や計画する上で活用して頂きたい資料としている。その図中に示す標準支間は一般的に適用される範囲を示したもので、その他にも実績最大支間、一連の最大けた長とその径間数についても併記している。

3.1.2 PC橋の選定

様々な構造形式の中から、各種の要因により構造形式を選定するための一般的なフローを紹介している。PC橋は、大別すると工場または橋りょう架設位置付近にてけたを製作し架設する「プレキャストPCげた橋」と支保工または架設機材を用いて直接コンクリートの打込み、緊張を行う「場所打ちPC橋」の2つの工法に分類される。その選定に際しては、架設地点の周辺状況(市街地、海岸、山岳など)、けた下状況(平地、鉄道上、河川上など)、支間長などのさまざまな条件により決定される。

一般的に「プレキャストPCげた橋」選定の際における条件としては、

- ・ 架設用クレーン車、けた運搬車および架設機材の進入および搬入が可能であること。
- ・ 平面線形に対しての適合すること。
- ・ 適用が可能な支間長であること。
- ・ 場所打ち工法PC橋に対して経済的優位性があること。

などがあげられ、これらの条件を満たす場合、「プレキャストPCげた橋」が採用される。

一方、「場所打ちPC橋」選定の際における条件としては、

- ・ 「プレキャストPCげた橋」選定の際の条件を満たさず、採用が不可能であること。
- ・ プレキャストPCげた橋に対して経済的優位性があること。

などがあげられ、これらの条件を満たす場合において「場所打ちPC橋」が採用される。また、「場所打ちPC橋」は、固定支保工架設工法、片持架設工法、移動支保工架設工法、押出し架設

工法などの架設工法が存在しており、経済性や施工性そして地形条件などを考慮し選定する。

1 例として「プレキャストPCげた橋」の選定フローを図-3.1.3に示す。架設されるけたの支間長に着目し、それぞれ考えられる制約条件により断面形状の選定を行うものである。

P C 道路橋計画マニュアル 目次構成	
活用の手引き	第5章 新構造形式の提案
1 本計画マニュアルの位置付け	5.1 中規模橋りょうへの対応
2 便利に使用していただくために	5.2 箱げた橋における広幅員橋への対応
第1章 架橋地点に適したPC橋の選定	5.3 その他の合理化構造
1.1 PC橋の分類	第6章 床版構造
1.2 PC橋の適用支間	6.1 一般
1.3 PC橋の選定	6.2 プレキャストPC床版
1.4 実績工事費と工期の例	6.3 場所打ちPC床版
第2章 プレキャストPCげた橋	6.4 合成床版(合成床版用プレキャスト板)
2.1 一般	6.5 鋼・コンクリート合成床版との比較
2.2 プレテンション方式PCげた橋	第7章 各種条件へのPC橋の対応
2.3 ポストテンション方式PCげた橋	7.1 構造的対応
2.4 プレキャストセグメント方式によるPCげた橋	7.2 社会的要請への対応
2.5 プレキャストげた架設方式連続げた橋	第8章 PC橋の維持管理
第3章 場所打ちPC橋	8.1 維持管理の流れ
3.1 一般	8.2 点検
3.2 中空床版橋	8.3 劣化機構の推定および劣化予測
3.3 版げた橋	8.4 評価および対策
3.4 箱げた橋	8.5 補修・補強工法
3.5 PRC構造	8.6 補修・補強後の維持管理
3.6 外ケーブル構造	8.7 記録
3.7 複合橋	第9章 下部構造
3.8 プレキャストセグメント方式による箱げた橋	9.1 下部構造の計画
第4章 その他の構造形式	9.2 橋台・橋脚の計画
4.1 コンクリートアーチ橋	第10章 計画に関する資料編
4.2 PC斜張橋	10.1 計画の基本
4.3 エクストラドーズド橋	10.2 材料
4.4 斜版橋	10.3 支承構造・落橋防止システム・伸縮装
4.5 その他の大偏心構造	10.4 関連示方書、指針、便覧、基準など
4.6 吊床版橋	
4.7 PC吊橋	
4.8 混合げた橋	
4.9 その他	

図-2.1 PC道路橋計画マニュアル 目次構成

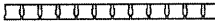
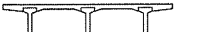
分類	構造形式	断面形状	主たる架設方法	標準支間 (m)											実績最大支間 (m)	けた高支間比の目安
				10	20	30	40	50	60	70						
単純げた橋	プレテンション方式	スラブげた橋 (スラブ橋げた) JIS A 5373 ⁻²⁰⁰⁴		クレーン架設	5~24										(24)	1/14~1/24
		Tげた橋 (けた橋げた) JIS A 5373 ⁻²⁰⁰⁴		クレーン架設	18~24										(24)	1/18~1/20
		軽荷重スラブげた橋 JIS A 5373 ⁻²⁰⁰⁴		クレーン架設	5~13										(13)	1/22~1/33
		Uコンボ橋		クレーン架設	15~20										19.2 常磐新線 (鉄道橋)	1/14~1/16
	プレキャストけた	Tげた橋 (旧建設省制定)		クレーン架設 架設けた架設	20~45										(45) 49.0 かもめ大橋	1/13~1/18
		合成けた橋 (I げたタイプ)		クレーン架設 架設けた架設	20~40										43.5 松原側道橋	1/15
		バルブT げた橋		クレーン架設 架設けた架設	25~45										49.4 久之浜跨道橋	1/14~1/19
		PCコンボ橋 JIS A 5373 ⁻²⁰⁰⁴		クレーン架設 架設けた架設	25~45										46.4 大吹沢橋	1/13~1/17
		スラブげた橋		クレーン架設 架設けた架設	25~45										45.0	1/23~1/26
		Uコンボ橋		クレーン架設 ベント式架設 架設けた架設	40~60											55.5 第一戸倉瀬高架橋

図-3.1.1 PC橋の適用支間 (その1) プレキャスト単純げた橋

分類	構造形式	断面形状	主たる架設方法	標準支間 (m)											実績最大支間 (m)	けた高支間比の目安	最大けた長さ [倍間数]
				20	40	60	80	100	140	180							
場所打ちけた	場所打ちけた	中空床版橋	固定支保工	20~30										49.3	大洲南ランプ橋	1/22	725.0 [29]
		移動支保工	20~30											40.9	太田下町高架橋	1/22	916.7 [28]
		版げた橋	固定支保工	20~35										36.5	阿賀野川東高架橋	1/15~1/17	851.0 [32]
		移動支保工	20~35											39.0	岸ノ上高架橋	1/15~1/17	736.2 [23]
		箱げた橋	固定支保工	30~60										77.3	大鏡19号線	1/17~1/20	716.0 [11]
		移動支保工	30~45											50.0	七色高架橋	1/17~1/20	300.0 [6]
		片持架設	50~110											170.0	平原大橋	*1/15~1/35	1585.0 [23]
		押出し架設	30~60											66.6	玖波高架橋	1/15~1/18	833.0 [13]
		波形ウェブ橋	固定支保工	30~60										115.0	千代川橋	1/17~1/20	1432.0 [23]
		片持架設	50~110											150.0	朝比奈川橋	*1/15~1/35	1005.0 [16]
		押出し架設	30~60											56.0	島崎川橋	1/15	554.0 [11]
		複合トラス橋	固定支保工	30~60										60.0	志津見大橋	1/12~1/18	279.4 [5]
		片持架設	50~110											119.0	巴川橋	*1/10~1/30	625.0 [7]
	セグメント方式	箱げた橋	固定支保工	30~60										—	—	1/17~1/20	—
		片持架設	50~100											87.5 弥富高架橋 100.0 中部空港 連絡橋 (鉄道橋)	*1/15~1/35	480.0 [8]	
		スパンバイスパン	40~50											66.3 木戸川橋	1/17~1/20	717.0 [15]	

図-3.1.2 PC橋の適用支間 (その2) 場所打ち連続げた橋

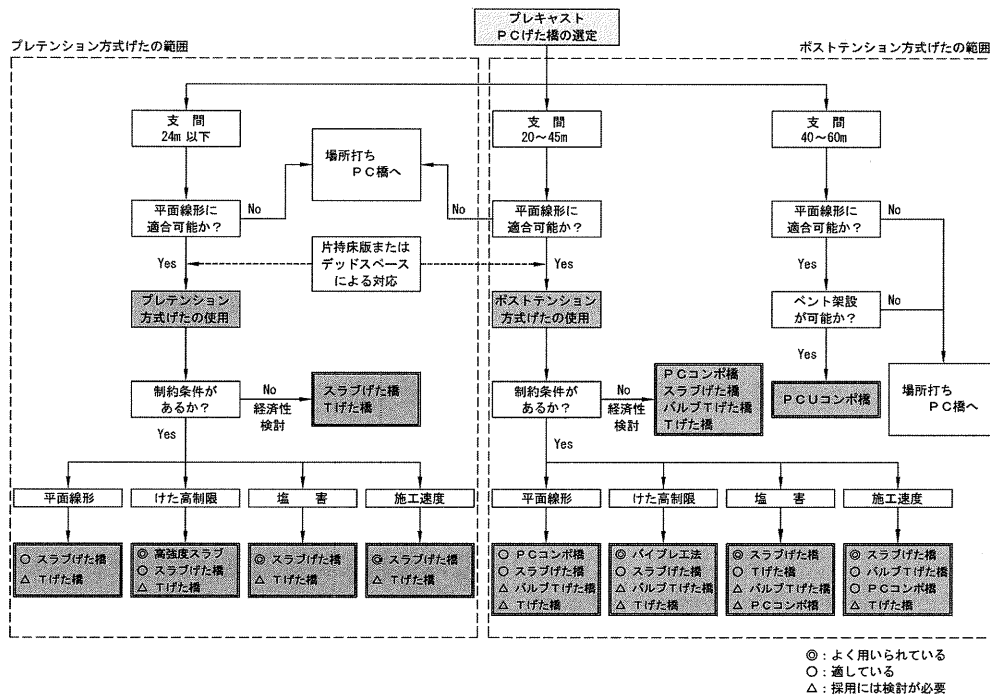


図-3.1.3 プレキャストPCげたの選定フロー

3.2 「第2章 プレキャストPCげた橋」

3.2.1 架設工法

(1) 架設方法の選定

プレキャストげた橋は、架設地点以外の工場または架設地点付近の製作ヤードでPCげたを製作し、運搬設備を使用して架設地点まで搬入して架設機械設備により架設する。その架設工法は、図-3.2.1に示すフローチャートのように選定される。

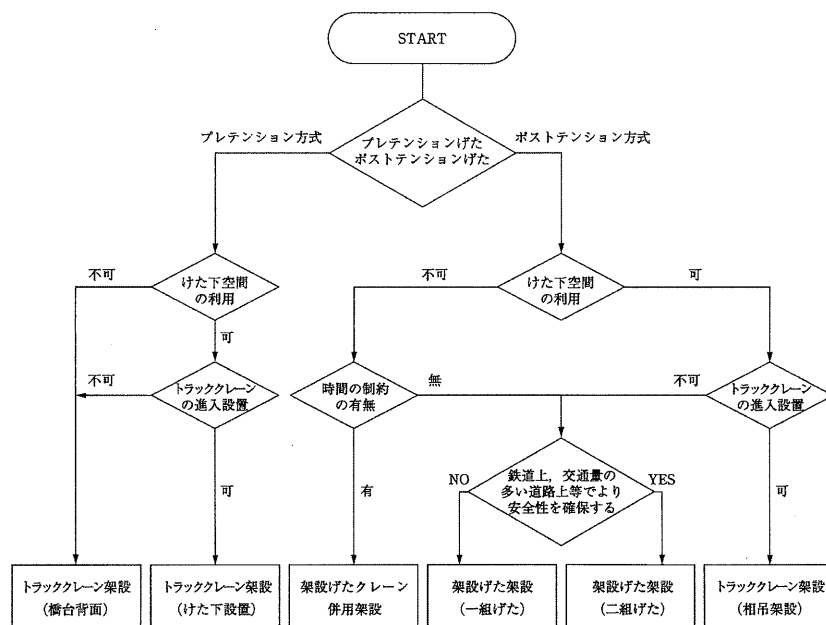


図-3.2.1 プレキャストげたの架設選定フロー

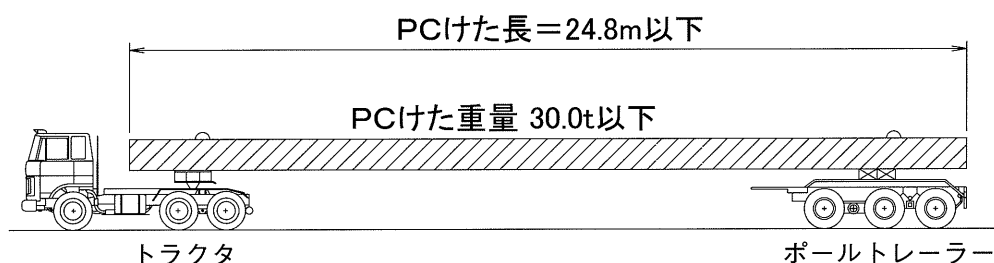
(2) 運 搬

PCげたの一般道路の運搬に際しては、PCげた製作工場より架設地点までの運搬ルートでの十分な検討が必要となる。ルート上の橋りょうの耐力や交差点などにおける方向変換の可否および縦断勾配などを確認し、安全・確実な運搬の検討を行う。また、下記の関連法令を遵守し、特殊車両の通行許可を必要とする。

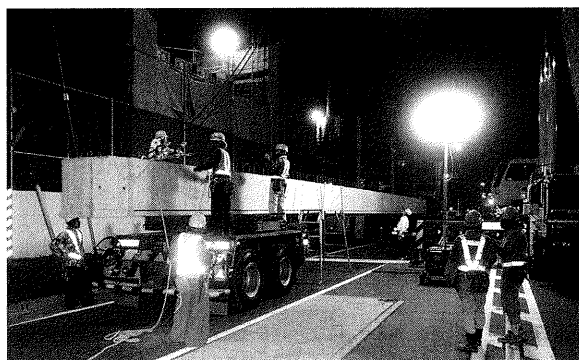
- | | |
|-----------------------|------------------------------|
| 1. 道路法（国土交通省） | ：車両幅（2.5m）、重量、高さ、長さ、最小回転半径など |
| 2. 道路交通法（警察庁） | ：交通安全上の観点から、過積載などの制限 |
| 3. 道路運送車両法保安基準（国土交通省） | ：自動車自体の安全性の確認など |

一般的にPCげたを運搬する特殊車両をもった運送会社は、主要ルートの許可申請をおこなっている場合が多く、下記に示す重量、長さについては運搬実績があり、その範囲内で計画することを推奨する。PCげたの運搬荷姿の例を図－3.2.2および写真－3.2.1、図－3.2.2に示す。したがって、下記の範囲を超えたPCげたを運搬する場合は、ルート検討と合わせすべての許可申請の可否を確認して計画する必要がある。

最大けた重量	： 30.0 t	最大けた長さ	： 24.8 m
最大けた高さ	： 3.0 m	最大けた幅	： 2.5 m



図－3.2.2 ポールトレーラーによる運搬荷姿



写真－3.2.1 ポールトレーラー運搬



写真－3.2.2 低床トレーラー運搬

3.2.2 プレキャストセグメント工法

(1) 一般

プレキャストPCげた橋として、JIS A 5373-2004で規定されているプレテンション方式PCげた橋、旧建設省で制定されているポストテンション方式PCTげた橋に加え、近年施工実績の多いセグメント橋（PCコンボ橋、バルブTげた橋、スラブげた橋）を紹介している。

プレキャストセグメント工法とは、あらかじめ橋げたを工場で運搬可能な大きさのセグメントに分割して製作したものを架設地点に運搬し、セグメント接合面に接着剤としてエポキシ樹脂を塗布し引寄せたのちにプレストレスを与えて一体の橋げたを製作する工法である。

本工法は、既に40年余りにわたる実績を重ねており、現場における省人化・省力化および工期の短縮など、時代の要請に応じて採用が急増している工法である。図-3.2.6にプレキャストセグメント方式の概念図を示す。また、一般的に使用される主げた断面形状を図-3.2.7に示す。

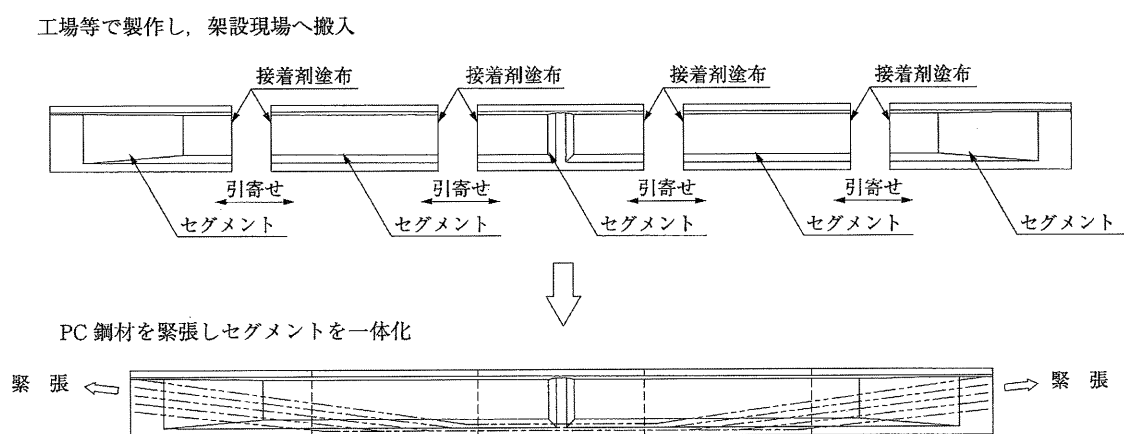


図-3.2.6 プレキャストセグメント方式概念図

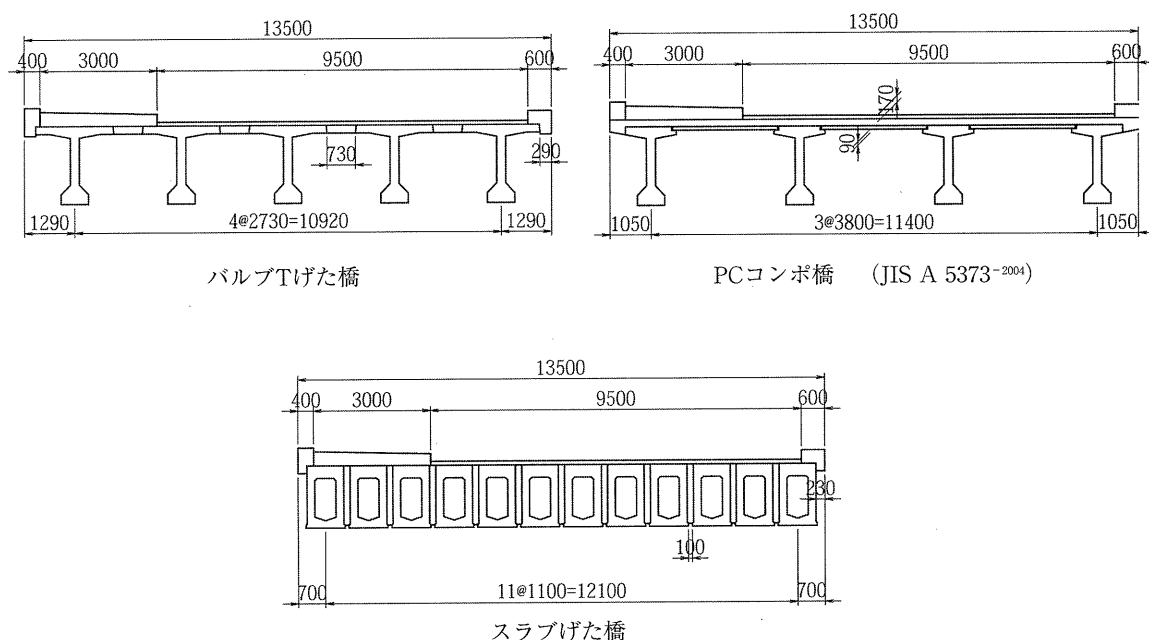


図-3.2.7 プレキャストセグメント主げた断面形状

(2) プレキャストセグメント工法の特徴

プレキャストセグメント工法の主な特徴として、下記の点があげられる。

- セグメントげたを工場で製作することで、現場作業の低減、施工日数の短縮、熟練労働者の要員を低減可能。
- 架設地付近にけた製作ヤードが不要で、作業用地は少なくできる。
- 現場でけた製作のコンクリート打設が不要であり、騒音・振動を低減可能。
- 従来工法と比較した場合、主げた製作ヤードの設置費用が必要ないこと、また上記の特徴により、一般的に経済的となるケースが多い。

実際のマニュアルでは、これらの特徴の他に計画時における留意事項や、既に現場製作げたで計画された橋りょうをプレキャストセグメント方式に変更する場合の留意点、そして標準的なけた高、セグメント寸法、概算数量に加え、施工方法や工程例なども紹介している。

3.3 「第3章 場所打ちPCげた橋」

場所打ちPCげた橋では、様々な架設工法があることから、今回の改訂版では施工概要を充実させている。また、従来からの中空床版橋、版げた橋、箱げた橋に加え、近年実績の多いPRC構造、外ケーブル構造、複合橋、プレキャストセグメント工法による箱げた橋なども新たに紹介している。

3.3.1 場所打ちPCげた橋の架設工法

場所打ちPC橋の計画にあたっては、架橋地点の地形、河川などの環境条件、橋の支間や工事規模に対応する構造形式、主げた断面形状、架設工法を適切に選定する必要がある。

その架設工法には、それぞれ適用可能な構造形式と主げた断面形状があり、その構造形式との組合せ例を表-3.3.1に、主げた断面形状との組合せ例を表-3.3.2に示す。また、片持架設工法、移動支保工架設工法、押出し架設工法の概要とその特徴を表-3.3.3～表-3.3.4に示す。

表-3.3.1 架設工法と構造形式

	単純 げた	連続 げた	ラーメン橋				
			T ラーメン	連続 ラーメン	有ヒンジ ラーメン	斜材付きπ 型ラーメン	方杖 ラーメン
固定支保工	○	○	○	○	○	○	○
片持架設	×	○	○	○	○	×	○
移動支保工	×	○	×	△	×	×	×
押出し架設	△	○	×	×	×	×	×

表-3.3.2 架設工法と主げた断面形状

	床版橋	版げた橋	箱げた橋
固定支保工	○	○	○
片持架設	×	×	○
移動支保工	○	○	○
押出し架設	△	×	○

○：適している
△：採用にあたっては検討が必要である
×：適さない

表-3.3.3 場所打ちPCげた架設工法の特徴(その1)

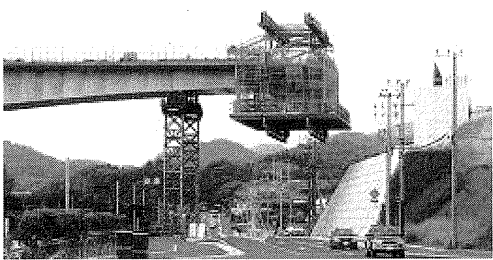
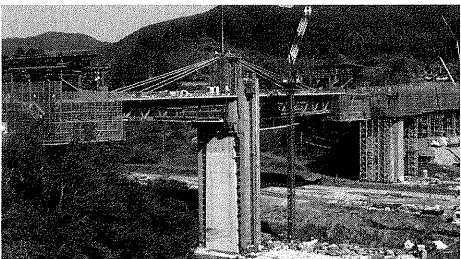
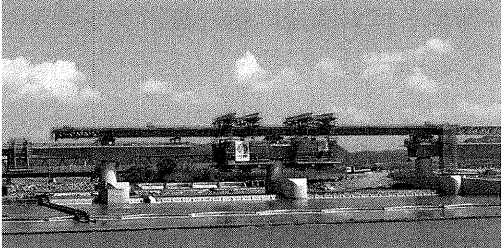
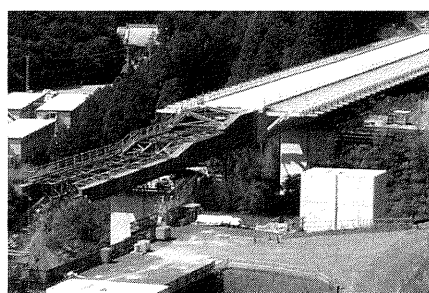
片持架設工法	
・ 支間長 50m 以上の長大橋をけた下空間に左右されることなく架設可能。 ・ ブロック長は、移動作業車の能力と主げたの重量により決定され、一般的に 2~4m 程度。 ・ 施工順序は、各橋脚から両側に順次バランスを取りながら片持架設を繰り返し、側径間、中央径間閉合部と施工を行い、橋体を結合させて完成させる。	
一般的な片持架設工法 	仮支柱併用片持架設 
斜吊り片持架設工法 	架設げた併用片持架設工法 

表-3.3.4 場所打ちPCげた架設工法の特徴(その2)

架設工法	特 徴	架設概要
移動支保工架設工法	・ 1 径間分の鋼製ガーダーと型枠とを組合せ、1 径間を一括して施工する工法。 ・ 架設工法には、ハンガータイプとサポートタイプの 2 種類がある。 ・ けたの製作は上屋内で行われ、気象条件に左右されず工程および品質管理に優れる。 ・ 同じ作業の連続で作業員の熟練度が速く、機械化により省力化、急速施工が可能。	
押出し架設工法	・ 主げた先端に鋼製手延げたを取付け、押出し装置を用いて主げたを順次前方に押出す工法。 ・ けたの製作は上屋内で行われ、気象条件に左右されず工程および品質管理に優れる。 ・ 架橋地点での作業と高所作業も少ないことから、安全性に優れている。	

3.3.2 PRC構造

(1) 特 徴

近年、コンクリート橋の上部工の構造としてPRC構造が採用され始めている。PRC構造は、所要のひび割れ条件を満足するようにPC鋼材と異形鉄筋で補強された構造で、PC構造とRC構造の両者の特徴を兼ね備えたものであり、その適用範囲は、中空床版橋、版げた橋、箱げた橋などの場所打ち橋に多く採用されている。現在、東・中・西日本高速道路㈱の高速道路橋と鉄道橋では多く採用されているが、一般道路橋での採用実績は数少ない。しかし、今後一般道路橋での採用が増加することが想定され、道示にも将来的に採用されると思われる。

PRC構造の利点について、PC構造物と比較すると以下の2点があげられる。

- ① 構造的に鉄筋で補強されており、鉄筋量が増加することから終局時のじん性が向上するとともに、ひび割れを分散させひび割れ制御が容易となる。
- ② 経済性では、PC鋼材量が減少することにより一般的に工費が減少する。

塩害地域など環境条件が厳しい場合、塩化物イオンの侵入によってPC鋼材が腐食するおそれがあり、一般にひび割れの発生を許さない設計を行うことが望ましい。しかし、ひび割れを許す場合は、環境条件、荷重条件、耐久性などに対する検討を十分に行う必要がある。

(2) 設計上の留意点

PRC構造の設計手法は道示に規定されておらず、現在の道路橋の設計では東・中・西日本高速道路㈱の設計要領第二集のみに規定されている。

また、道示Ⅲコンクリート橋編「2章設計の基本 2.3 (2)」の解説には、PRC構造の採用を視野に入れた以下のような記述がある。「衝突荷重又は地震の影響を考慮しない荷重の組合せに対して、計算上のひび割れを許容する構造（PRC構造）を採用する場合には、環境条件を十分照査するとともに、採用する部材及び設定する許容ひび割れ幅、導入するプレストレス量などを十分検討した上で採用しなければならない。」

その環境条件としては、① 塩害地域など環境条件が厳しい場合、② ひび割れが床版の損傷となる連続げたの中間支点部が考えられ、採用に当たっては十分な検討が必要となる。

(3) ひび割れの制御方法

東・中・西日本高速道路㈱の設計要領第二集における設計荷重時のPRC部材のひび割れ制御方法を表-3.3.5に紹介している。また、コンクリート標準示方書[構造的性能照査編]では、鋼材の

表-3.3.5 PRC部材のひび割れ制御方法

設計部位 環境区分	連続げたの 中間支点上	その他部位
一般の環境	方法A または方法B	方法A
腐食性環境	方法B	方法B
特に厳しい腐食性環境	方法C	方法B

方法A：コンクリートに生じるひび割れを、ひび割れ幅の制限値まで許容するひび割れの制御方法

方法B：コンクリートに引張応力を発生させるが、ひび割れは発生させない方法

方法C：コンクリートに引張応力を発生させない方法

表-3.3.6 許容ひび割れ幅 w_a (mm)

鋼材の種類	鋼材の腐食に対する環境条件		
	一般の 環境	腐食性 環境	特に著しい 腐食性環境
異形鉄筋・普通丸鋼	0.005c	0.004c	0.0035c
P C 鋼材	0.004c	—	—

c：曲げひび割れ幅算定の主鉄筋のかぶり(mm)

腐食に対する許容ひび割れ幅を、一般に環境条件、かぶりおよび鋼材の種類に応じて表-3.3.6のように定めている。腐食性環境の場合や特に厳しい腐食性環の場合に、PC鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅を設定していないのは、緊張力により曲げひび割れの発生を許さない制御が可能であり、PC鋼材の腐食に対して特に配慮を必要とすることとしている。

3.3.3 プレキャストセグメント方式による箱げた橋

(1) 特徴

プレキャストセグメント方式の箱げた橋は、工事の大規模化、現場作業の工期短縮が要求される場合などに採用され、現場施工用地の制限・少子高齢化にともなう熟練就業者の不足、合板型枠の削減などにも有効である。以下に、その特徴について示す。

- セグメント製作工程と現場工程との並行作業のため、現場の工期短縮が可能。
- 工場または製作ヤードにてセグメントを製作するため、品質管理が容易。また、機械化による省力化、合理化が可能。
- セグメントは架設時までストックヤードで保管されるため、乾燥収縮やクリープの影響を小さくできプレストレス力が有効に活用できる。
- 大規模な橋りょうでは、大型の設備や機械装置を用いて経済効果が期待できる。
- セグメントの継目部は鉄筋が連続していないため、継目部の応力度照査が必要。
- 線形への対応、施工性および橋体の形状調整を目的として、一般的に各径間に1箇所ないし2箇所、場所打ち調整目地を必要。

(2) 架設工法

プレキャストセグメント方式による箱げた橋の架設方法は、片持架設工法とスパンバイスパン工法に大きく分類される。

片持架設は、橋脚から1セグメントづつ左右対称にバランスを確保しながら順次張出していく工法で、架設げた（エレクションガーダーあるいはエレクショントラス）タイプ（写真-3.3.1参照）と吊り込み装置（エレクションノーズ）タイプ（写真-3.3.2参照）に分類でき、架橋位置の地形、セグメントの搬入経路などによりその架設方法を計画的に選定する。

スパンバイスパン架設は、エレクションガーダー上にセグメントを乗せるサポートタイプ（写真-3.3.3参照）とセグメントを吊り込むハンガータイプ（写真-3.3.4参照）に分類でき、架橋位置の地形、橋脚の形状、橋りょうの平面線形、セグメントの搬入経路などにより計画的に選定する。

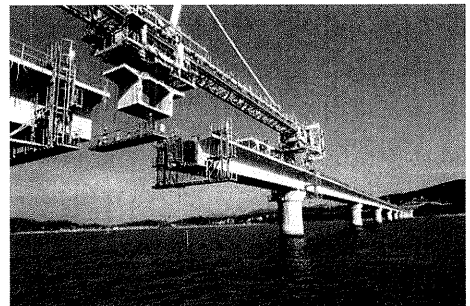


写真-3.3.1 エレクショントラスによる架設（角島大橋）

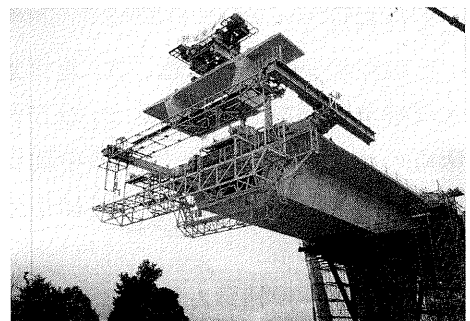


写真-3.3.2 エレクションノーズによる架設（弥富高架橋）

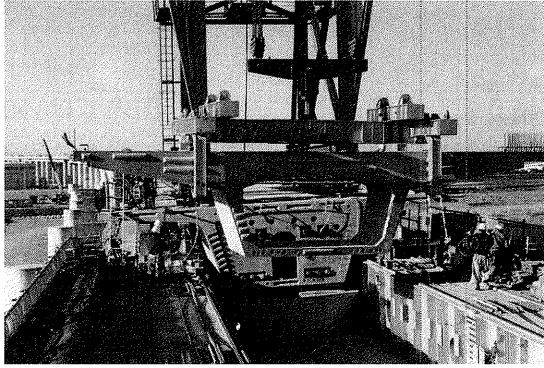


写真-3.3.3 スパンバイスパン架設
(重信川橋 サポートタイプ)

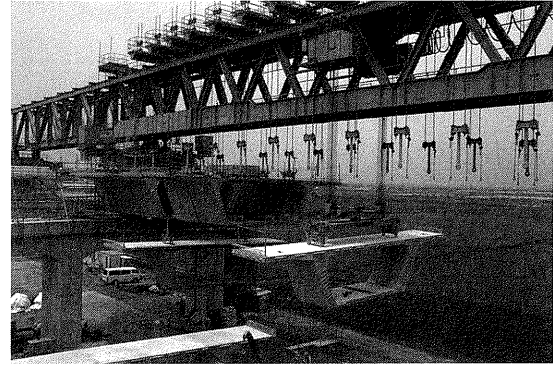


写真-3.3.4 スパンバイスパン架設
(鋼田高架橋 ハンガータイプ)

3.4 「第4章 その他構造形式」

3.4.1 コンクリートアーチ橋

(1) 架設工法別概要

アーチは、主な断面力が軸力であるため圧縮力に強いコンクリートの特性を有効に利用している点が特徴であり、構造的に合理的でかつ景観に優れた橋りょう形式である。現在アーチ橋の架設は、PC架設工法の著しい技術進歩により、全面支保工を必要としない工法が主流となってきた。そのアーチ橋の架設工法の代表的な事例を写真-3.4.1～3.4.4に示す。



写真-3.4.1 トラス片持架設(池田へそっ湖大橋)

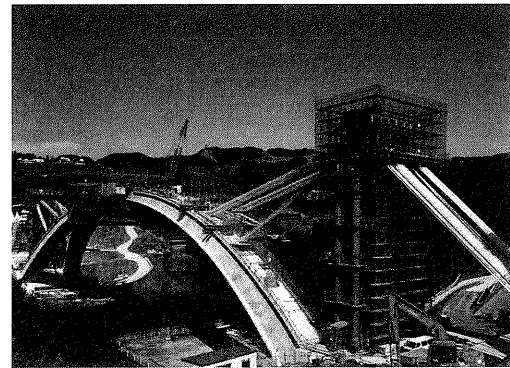


写真-3.4.2 ピロン片持架設(朧大橋)

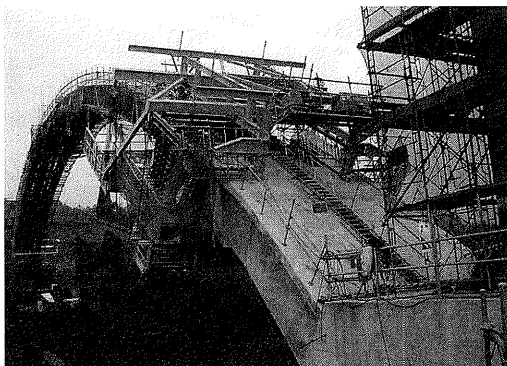


写真-3.4.3 メラン架設(下田原大橋)

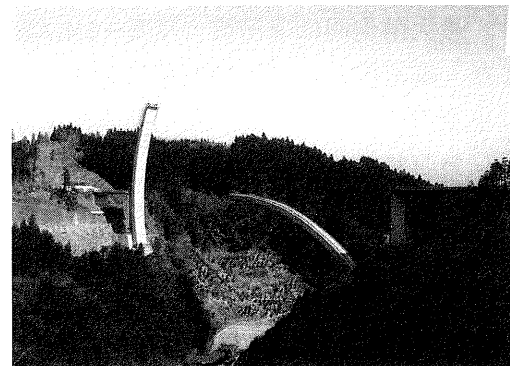


写真-3.4.4 ロアリング架設(神原溪谷大橋)

3.4.2 エクストラードーズド橋

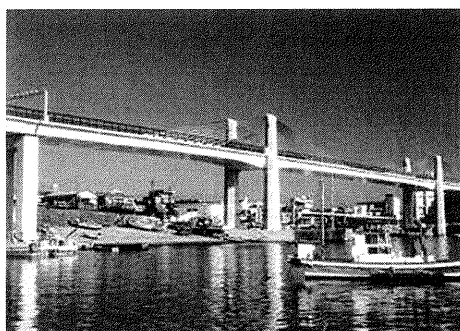
(1) 一般

エクストラードーズド橋は、斜張橋とけた橋の間を補う新しい構造形式であり、国内では1994年に小田原ブルーウェイブリッジ（写真－3.4.5参照）で初めて採用され、これまでにおよそ30橋の実績がある。その特徴は斜張橋と比較して、一般的に低い塔と斜材で形成されたプロポーシオンを持ち、活荷重に対して主げたが抵抗する割合が高いため、斜材の応力変動が小さい。

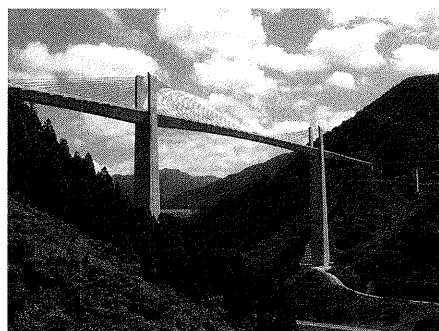
国内におけるエクストラードーズド橋の最大スパン長は、徳之山八徳橋（写真－3.4.6参照）の220mがあり、世界最大となっている。また複合橋としては、波形ウェブ橋である日見夢大橋の最大スパン180m、中央径間の一部が鋼げたの混合橋である木曾川橋の最大スパン275mがある。

けた橋および斜張橋と比較したエクストラードーズド橋の特徴は次のとおりである。

- けた橋と斜張橋の中間的な規模の橋に適し、けた高もその中間に位置する。
- 斜張橋と比較して主げた剛性が大きく、通常のけた橋と同様な管理方法（たわみ管理）で片持架設工法が可能。
- 斜張橋と比較して活荷重による斜材の応力変動が小さいため、斜材の応力制限値を大きくとれ、斜張橋で $\sigma=0.4P_u$ 、エクストラードーズド橋で $\sigma=0.6P_u$ が使用される場合が多い。
- 斜張橋と比較して主塔が低く、耐風安定性に優れている。



写真－3.4.5 小田原ブルーウェイブリッジ



写真－3.4.6 徳之山八徳橋

3.4.3 吊床版橋

(1) 直路式吊床版橋と上路式吊床版橋

吊床版橋は橋台間に緊張材（ケーブル）を並列配置し、これらをコンクリート床版で包み込んで床構造を形成した橋であり、国内では歩道橋に実績が多い。現在までに70橋以上の実績があり、最大吊支間は夢吊橋（写真－3.4.7参照）の147.6mであり、世界最大となっている。

また、車道橋としては1971年にノルウェーでPC吊床版上に鉛直材（脚柱）を建て込み、その上に車道用の上床版を載せた上路式吊床版橋のKollstrommen橋が建設され、国内でも1977年宮崎県に連日峰橋が、そして2001年には交流橋（写真－3.4.8参照）が建設された。吊床版上の上床版の有無により構造特性も異なることから、上床版を有する「上路式吊床版橋」に対し、上床版の無い吊床版を「直路式吊床版橋」と区分している。

直路式吊床版橋の一般的な特徴は次のとおりである。

- 構造形式が単純であり、力学的にも明快。
- 縦断線形は滑らかな曲線で床版厚は一定となり、柔らかさ、スレンダーさを与える。
- 床版の架設は、あらかじめ張り渡したケーブルを利用して行えるため、大規模な架設機械

が不要。また、プレキャスト床版を用いるので、急速施工が可能。

- 支保工を必要としないため、施工条件の悪い渓谷などでも比較的容易に建設が可能。
- 変形量が大きいため、活荷重による振動やケーブルの応力振幅に対する配慮が必要。
- アンカーを支えるために堅固な地盤が必要。

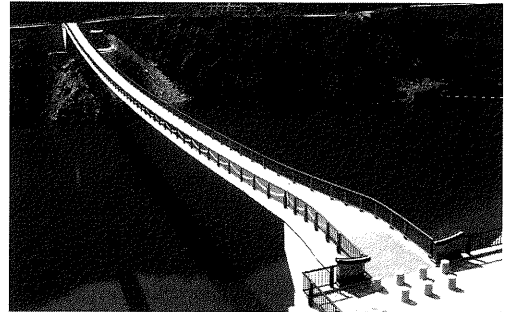
また、上路式吊床版橋は、直路式吊床版橋の特徴に加え、縦断線形を自由に設定できること、サグを大きくとれるので水平力を抑えることができるなどの特徴を有している。

(2) 自碇式吊床版橋

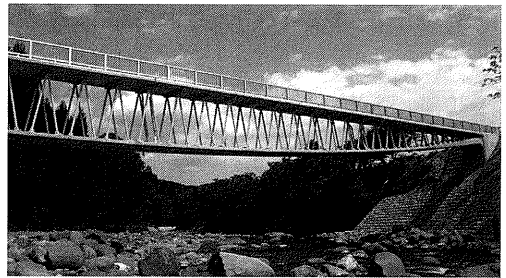
自碇式吊床版橋は、吊床版ケーブルを主げたに定着し、吊床版から作用する水平力を主げたに負担させ、完成系においてグラウンドアンカーを不要とした構造である。国内では、青雲橋（写真－3.4.9参照）など数橋の実績がある。

一般的な特徴は次のとおりである。

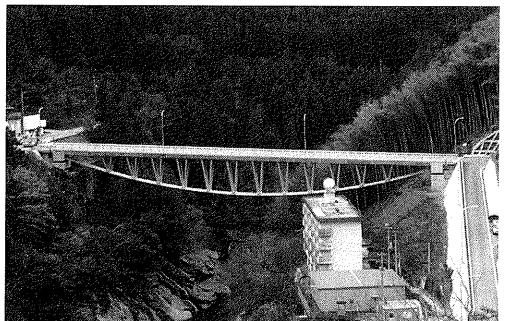
- 自重が軽く、完成系においてグラウンドアンカーに頼らない構造であるため、地盤条件がそれほど良好でない架橋地点にも適用可能。
- 架設はあらかじめ張渡したケーブルを利用するため支保工を必要とせず、大規模な架設機械も不要。
- プレキャスト部材を用いるので、急速施工が可能。また、施工条件の悪い渓谷などでも比較的容易に建設が可能。
- 全体剛性が高く、道路橋にも適用が可能。



写真－3.4.7 直路式吊床版橋
(夢吊橋：歩道橋)



写真－3.4.8 上路式吊床版橋
(交流橋：車道橋)



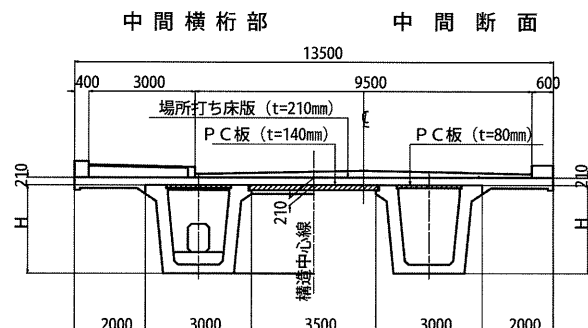
写真－3.4.9 自碇式吊床版橋
(青雲橋：道路橋)

3.5 「第5章 新構造形式の提案」

3.5.1 ポストテンション方式Uコンポ橋

(1) 一般

ポストテンション方式PCUコンポ橋は、主げた断面形状をU形とした工場製作によるプレキャストセグメントげたと、床版部にプレキャストPC板を採用した合成床版構造の橋りょうである（図－3.5.1参照）。工場製作による高品質なプレキャスト部材に加え、内外併用のPCケーブル配置によりPC連続構



図－3.5.1 Uコンポ橋の標準断面図

造に対応できるとともに施工の省力化、コスト縮減に配慮された橋りょう形式となっている。また適用スパンは40m～60mであり、従来のプレキャストげたと比べ長支間化に対応している。

本橋の標準けた幅は3.0mのため、運搬の際には特殊車両通行許可、制限外許可の申請が必要となり、採用に当たっては運搬経路、現場条件などを十分検討する必要がある。また、けた重量も他のプレキャストげたと比べ大きいため、セグメント分割数を多くとるなど1セグメントの重量を運搬可能な重量(30t以下)に抑える配慮も必要である。

(2) 架設方法

本構造の標準的な架設工法は、トラッククレーンおよびベント基礎併用による方法としている(写真-3.5.1参照)。また、けた下空間が使用できないなどの現場条件の制約により、2組けた架設工法によって架設することも可能である(写真-3.5.2参照)。

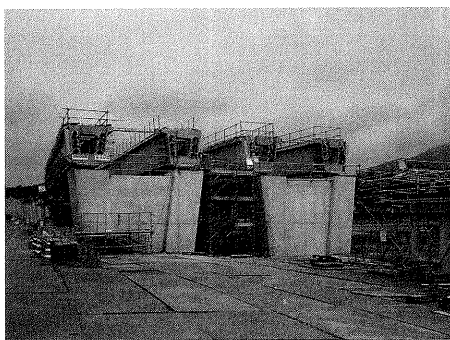


写真-3.5.1 ベント基礎架設
(兵道高架橋)

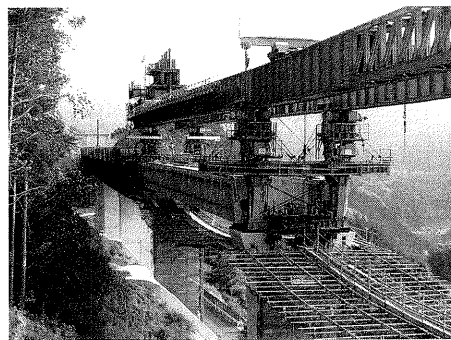


写真-3.5.2 架設げた架設
(第二戸奈瀬高架橋)

3.5.2 箱げた橋における広幅員橋への対応

(1) 一般

PC箱げた橋は、道示に示される床版の適用支間の規定を受け、従来までは、有効幅員で13m程度までは1室箱げた断面、それを越える広幅員の計画に対しては多室または多主箱げた断面が主に採用されてきた。しかし、近年の解析技術の向上により、比較的容易に道示に示される要求事項を満足する床版の設計が可能となったことから、適用支間を超える1室箱げた断面やリブ付き床版箱げた断面、ストラット付き床版箱げた断面、およびこれらを組み合わせた断面の適用事例が増えている(図-3.5.2および写真-3.5.3～3.5.5参照)。広幅員の橋りょうに対してこれらの断面を採用することにより、主げた重量の軽減および箱げた幅の縮小に伴う橋脚幅の縮小が可能となるため、より経済的な橋りょう計画が可能となる。

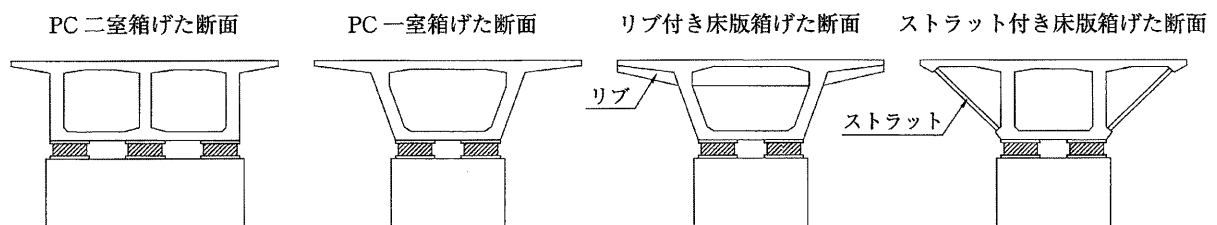


図-3.5.2 広幅員に対応した箱げた形状

また、実際のマニュアルでは、それぞれの床版構造の特徴を示すと共に施工実績やその部材寸法も紹介している。

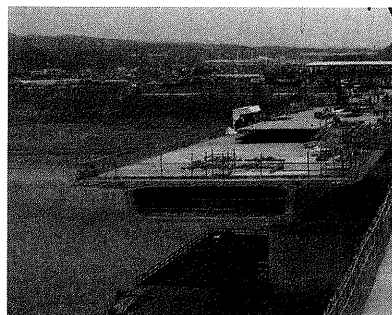


写真-3.5.3 広幅員一室箱げた橋
(天竜川橋)

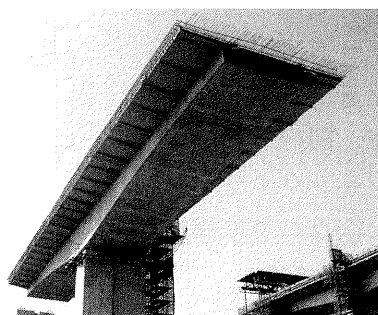


写真-3.5.4 リブ付き床版箱げた橋
(瀬戸川橋)



写真-3.5.5 ストラット付き床版箱げた橋
(芝川高架橋)

3.5.3 その他の合理化構造

国内における施工実績は少ないものの、海外の施工事例を参考に新たな合理化構造がいくつか提案されている。そのうち、ここでは下記の3つの構造を紹介している。

(1) スプライスPC橋

スプライスPC橋とは、主げた端部および中間支点部付近を場所打ちげた構造とし、径間部をプレキャストげた構造（一般にプレテンション合成げたまたはスラブげた）とした混合構造橋である。

部材の接合は、鉄筋継ぎ手によるウェット接合とし、プレストレス導入により場所打ち部およびプレキャスト部を一体化する。径間部に高強度のプレテンションげたを用いることによるけた高の低減と支点部近傍に場所打ちげたを用いることによる変断面への対応により、合理的な設計を可能としている。図-3.5.3にスプライスPC橋の構造概要を示す。計画に際しては、プレキャスト部と場所打ち部の接合位置を曲げモーメントのインフレクションポイント近傍とする他、運搬に支障がないよう連結鉄筋の突出長を考慮してプレキャストげたのけた長を決定する必要がある。

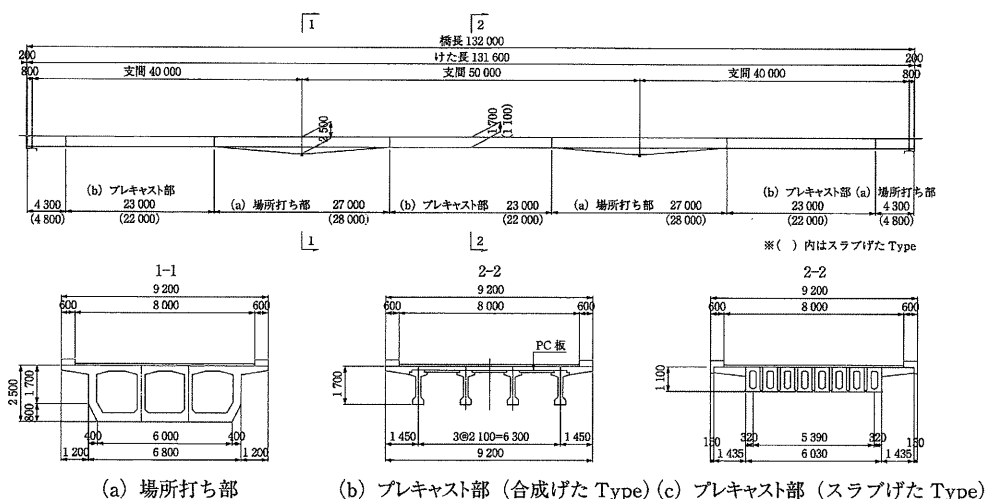


図-3.5.3 スプライスPC橋

(2) プレテンションプレキャストPCウエブ橋

プレテンションプレキャストPCウエブ橋は、通常場所打ち施工されるPC橋のウエブを、工場またはプレテンション設備を有するヤードで製作されるプレテンション方式のプレキャストウエブに置き換えた合成げた橋である。現在、国内では2室箱げた橋の中ウエブにプレテンションウエブを配置した錐ヶ瀧橋と、2主箱げたの全ウエブに採用した中新田高架橋(図-3.5.4参照)がある。

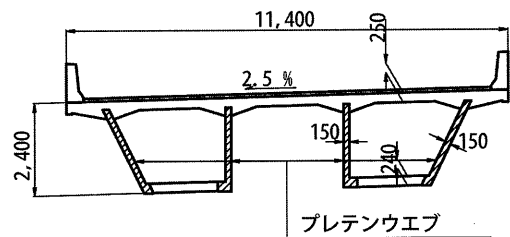


図-3.5.4 プレテンションウエブ橋
(中新田高架橋)

(3) RC床版連結方式連続げた橋 (リンクスラブ構造)

リンクスラブ構造は、プレキャスト単純げたを中間支点部の床版だけで連結する連続構造である(図-3.5.5参照)。一般的な連続げた構造は、主げた架設完了後に中間支点部の床版・横げたを場所打ちRC構造で連結する構造となっているが、この部分を床版だけで連結させることで、従来施工と比べ省力化が図れる構造である。同構造は、海外では新設橋への適用も報告されているが、国内においては都市高速道路でのノージョイント化工事の補修事例のみである。

今後、国内においてもこのリンクスラブ構造の検証方法が確立されれば、上部工の軽量化や施工の合理化などに大いに寄与するものと考えられ、既設橋の補強手段だけでなく新設橋のプレキャストげたによる連続化構造への適用も期待される工法のひとつと考えられる。

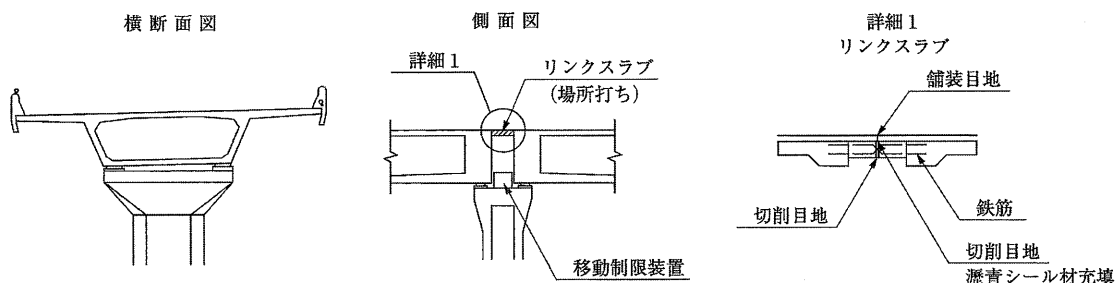


図-3.5.5 リンクスラブ橋の海外事例 (バンコク高速道路橋)

3.6 「第6章 床版構造」

本章では、鋼橋の床版構造に適用されるPC床版について記述している。床版をPC構造とすることにより、従来のRC床版と比較して床版の長支間化に伴う少主げた化が可能であり、ひび割れ制御によって優れた耐久性を有する。また、片持床版長も長く設定できるため、想定する幅員計画に対して主げた配置の自由度が高く、より合理的な断面構成が可能となる。

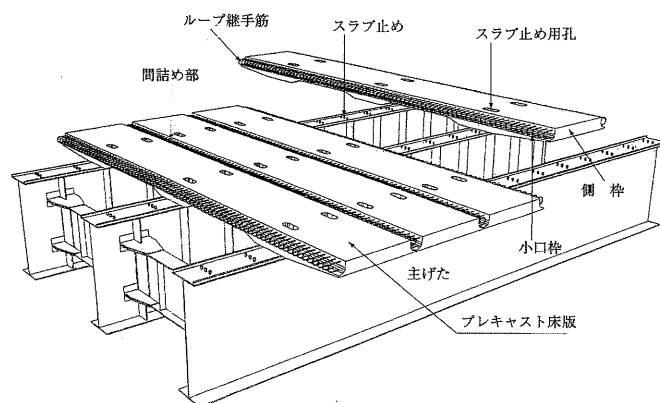
3.6.1 プレキャストPC床版

プレキャストPC床版は、橋軸方向に分割したプレキャスト部材を接合させて一体化したPC床版である(図-3.6.1参照)。一般に、橋軸直角方向はプレテンション方式によるPC構造、橋軸方向はRC構造として計画されるが、連続げたの中間支点部付近において負曲げの影響が大きい場合などには、ポストテンション鋼材による橋軸方向のプレストレス導入も可能である。

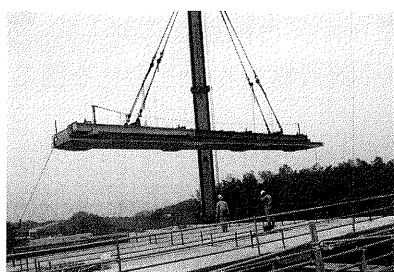
また本構造は、幅員構成(橋軸直角方向の長さ)7.9m~18.5m(主げた数2~4)により23

タイプが規格化されており、詳細については「道路橋用プレキャストPC床版 設計・製造便覧 (JIS A 5373-2004)」：(社)PC建協を参照願う。

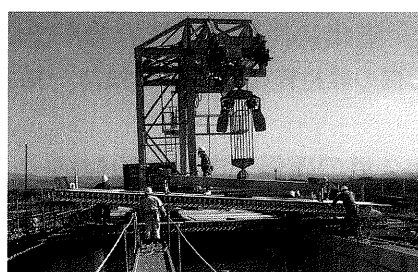
プレキャストPC床版の架設方法は、けた下から直接トラッククレーンで架設出来る場合、クレーン架設（写真－3.6.1参照）で行い、クレーンが設置できない場合は、専用の架設機（写真－3.6.2参照）を用いる場合が多い。



図－3.6.1 プレキャストPC床版（概念図）



写真－3.6.1 クレーン架設



写真－3.6.2 旋回式架設機による架設

3.6.2 鋼・コンクリート合成床版との比較

鋼・コンクリート合成床版とは、底型枠として鋼板を敷設し、その中にコンクリートを場所打ちした合成床版であり、現時点で仕様の異なる10数種類提案されている。ここでは、主に技術的観点からプレキャストPC床版との鋼・コンクリート合成床版との比較を表－3.6.1に記載する。

表－3.6.1 床版構造の比較表

項目	プレキャストPC床版	鋼・コンクリート合成床版
適用支間	道示に準拠（最大 6m） ※道路橋示方書	支間 6m まで道示に準拠 6m～最大 8m まで鋼構造物設計指針：土木学会準拠に準拠
疲労耐久性	上縁下縁とも高い疲労耐久性を有するPC構造	床版上面の負曲げ領域はRC構造でひび割れを許容
施工性	現場工期短縮可能	現場工期比較でPC床版の約2倍
維持管理性	直接目視による点検が可能	直接目視ができず、点検手法の難易度が高い
施工実績	従来より多くの実績有り	近年多くの採用有り
規格化	JIS A 5373-2004（ループ継手）	規格化されていない

3.7 「第7章 各種条件へのPC橋の適用」

3.7.1 環境への配慮

PC橋は、車両通行に対する優れた低騒音性および低振動性を有し、また一般的に、鋼橋に比較して建設時におけるエネルギー消費量、CO₂排出量が少ないことから、環境に優しい構造とされている。しかしながら、PC橋の建設において、さらなる環境負荷の低減を図るためには、以下のような省資源・省エネルギーに関わる取組みや技術開発の提案も必要となってくる。

- ① 各種材料などの要素技術の導入により、経年的な劣化要因に対する耐久性を向上させ、構造物の長寿命化を図る。
- ② プレキャストセグメント工法の採用により、製作設備の集中化、鋼製型枠の使用による建設副産物の排出量削減も期待できる。また、工事期間の短縮に伴う騒音・振動の発生期間、交通規制の実施期間の短縮が可能となる。
- ③ 架設地点の条件をふまえ、計画段階から環境保全に配慮した架設工法を採用する。
- ④ 循環型社会の形成に向けて、環境物品などの調達推進および建設副産物の再資源化率の向上を図る。PC橋でも製鋼副産物である高炉スラグ微粉末（H7：JIS規格化）を使用することで、早強セメント比較してCO₂排出量を削減でき、また、アルカリシリカ反応の抑制や耐凍害性、耐硫酸塩性に優れ、塩化物イオンの浸透に対しても高い抵抗性を示すと言われている。
- ⑤ 経年劣化に伴う耐久性の低下や設計荷重の見直しなど性能の陳腐化に対して、「第8章 PC橋の維持管理」に示す補修・補強技術の導入により、既設構造物の延命化を図る。

3.7.2 耐久性の確保・向上への対応

PC橋の耐久性を低下させる経年的な劣化要因としては、中性化や塩害、凍害、アルカリ骨材反応、疲労、化学的侵食などがあり、所要の品質を確保するために耐久性の向上を図る技術が重要となってくる。ここでは、その要素技術の概要を紹介する。

- ① コンクリートは、中性化や塩害劣化などを考慮し、水セメント比を低減した密実なコンクリートをかぶり厚を確保して打込まなければならない。また、施工性や耐久性も考慮して適切な高性能コンクリート（表-3.7.1参照）の使用の検討を行うことも重要である。

表-3.7.1 高性能コンクリートの例

	性 能	使用状況・箇所
高流動 コンクリート	・ 高い流動性 （自己充填性）	・ 過密に配筋された箇所 ・ 小さな断面寸法の部材
高性能 A E 減水剤の使用	・ 高い減水性 ・ 空気連行性 ・ スランプロス低減	・ ポンプ施工 ・ 練混ぜから打込みまでの時間が比較的長い場合 ・ 高流動コンクリート ・ 高強度コンクリート
膨張 コンクリート	・ 膨張性能（収縮補償）	・ プレキャストげたの間詰め部 ・ 鋼橋の場所打ち床版
高炉スラグ 微粉末の使用	・ 長期強度の増進 ・ 水和熱発生速度の低減 ・ 水密性の向上	・ 塩害対策 ・ 凍結防止剤対策

② コンクリート内の鋼材を防錆するため、以下の材料の使用も検討するとよい。

- 樹脂塗装鉄筋 : エポキシ鉄筋など
- 樹脂塗装PC鋼材 : エポキシ樹脂系、高密度ポリエチレン系など
- プレグラウトPC鋼材 : エポキシ樹脂が充填され、ポリエチレン管で被覆
- 非鉄シース : ポリエチレンなどのプラスチックシース

③ シート系や塗膜系の防水層を設置し、橋面防水・舗装浸透水を適切な処理する。

3.8 「第8章 PC橋の維持管理」

3.8.1 維持管理の流れ

PC橋の維持管理は、予定供用期間やPC橋に要求される性能を明確にし、耐久性、耐荷性や安全性などを著しく損なうような変状が発生しないように、変状の早期発見や早期対策を実施して維持管理を行うことが重要である。予定供用期間や要求される性能によっては、維持管理を必要とする判断・評価などの基準は大きく異なり、劣化予測、補修・補強など維持管理の難易度も変わってくる。従って、PC橋を適切に維持管理する場合、要求されている性能を考慮して、①点検、②モニタリング、③劣化予測、④評価および判定、⑤対策、⑥記録からなる維持管理を行う必要がある。

3.8.2 点 検

PC橋の特有の劣化現象は、コンクリート橋の一般的な変状の他にPC鋼材定着部やPC鋼材に沿って発生するひび割れ、PC鋼材定着部後埋めコンクリートおよび場所打ちコンクリート継目部に発生するひび割れなどが多い。

今までの点検実績によると、構造形式などにより大きな断面力が作用する箇所や局部的に応力が集中する箇所、あるいは漏水の影響を受けやすい箇所など特定の箇所に変状の発生が予想されるので、これらの部位は特に注意して点検を行う必要がある。PC橋の点検において特に注意が必要な点検箇所を、図-3.8.1に示す。

3.8.3 補修・補強工法

PC橋の補修を行う場合、劣化機構や補修後の耐久性を考慮して、各劣化機構に適合した補修工法、材料を選定することが必要であり、適切な補修方針を定めて補修計画を立案することが重要である。また、補修後の耐久性は、使用材料、環境条件、交通量などを考慮して、総合的に判断する必要がある。

PC橋の補強を行う場合、補修と比べて大規模工事となるため、構造物の重要度、残存供用期間を考慮して補強目的や補強方針をより明確にして、工法選定や補強計画の立案を行うことが重要である。また、十分な点検・調査によって劣化状況を把握し、現状の耐荷力や剛性を適切に評価することも重要である。

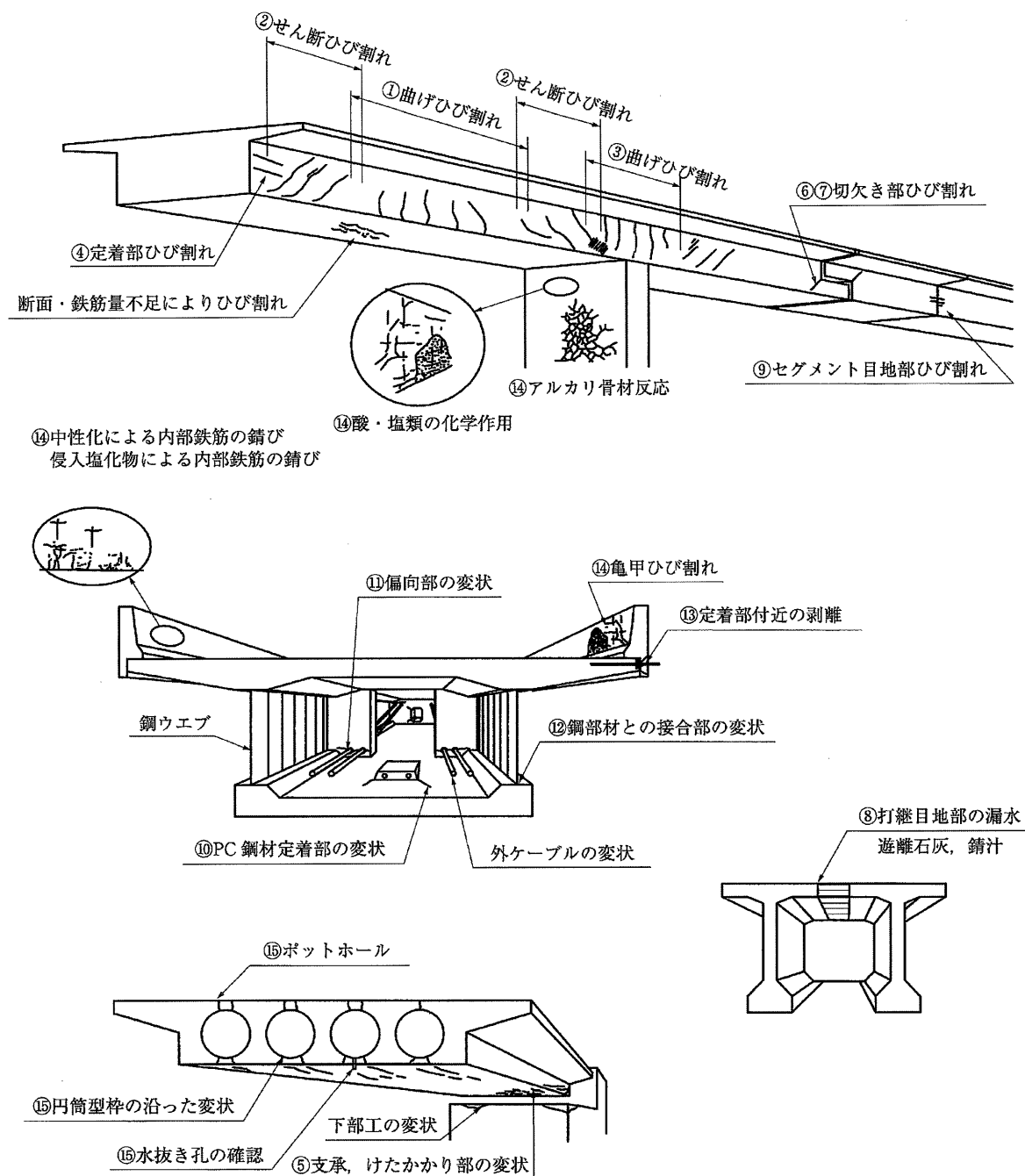


図-3.8.1 PC橋において変状の発生が予想される箇所と点検着目ポイントの例

4. おわりに

昨今の建設環境を取り巻く社会情勢は、従来にもまして厳しい状況が続いており、今後計画される橋りょうは、様々な要因を考慮し適切な判断をもって計画していくことが望まれている。また、PC構造物の品質確保はもちろんのこと、総合評価入札制度に代表されるように計画時・施工時にも新たな技術提案が必要な時代となってきた。そのような状況の中で、本稿で解説した「PC道路橋計画マニュアル」が、PC橋に携わる多くの方々に役立つ資料となり、そして今後計画されるPC橋の発展に寄与出来るように努めていきたい。

資料

－ 資 料 －

プレストレストコンクリート技術講習会年次テーマ

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

- (第19回) 新たな展開を示すPC構造
平成3年2月
- (第20回) PC技術の役割と発展 *
平成4年2月
- (第21回) PC構造物の供用性と耐久性の向上 *
平成5年2月
- (第22回) 新しいPC技術の実用化
平成6年2月
- (第23回) 最近のPC技術の展開 *
平成7年2月
- (第24回) 高性能なPC構造物をめざして *
平成8年2月
- (第25回) 社会基盤とPC構造物 *
平成9年2月
- (第26回) 新しいPC技術の動向 *
平成10年2月
- (第27回) PC構造物の耐震設計の現状 *
平成11年2月
- (第28回) PC技術の新しい動向と国際化 *
平成12年2月
- (第29回) プレストレストコンクリートの歩みと21世紀の展望 *
平成13年2月
- (第30回) プレストレストコンクリートの新たな発展—21世紀— *
平成14年2月
- (第31回) プレストレストコンクリート技術の適用拡大と世界の動向 *
平成15年2月
- (第32回) プレストレストコンクリート構造物の新たな動向 *
平成16年2月
- (第33回) 今求められるPC技術 *
平成17年2月
- (第34回) PC技術の進歩とその応用 *
平成18年2月
- (第35回) PCの新たな展開 *
平成19年2月
- (第36回) PC技術の新たな発展 *
平成20年2月

*印はテキスト在庫あり

平成20年 1月31日 印 刷
平成20年 2月 4日 発 行

P C 技 術 の 新 た な 発 展

会員特価5,000円
(〒500)

発 行 者 藏 愼 一 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 - 6

発 行 所 豊 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
