

◆ 特 集 ◆

PC 技術の海外動向

PC 技術の海外における動向

睦好 宏史*

1. はじめに

コンクリートにプレストレスを与える原理が考案されたのは、今から約 100 年前である。その後、1928 年に Freyssinet(仏) が PC 用緊張材を開発してから本格的な PC の幕開けとなった。今や PC は橋梁や建物等の社会基盤になくはならない構造形式である。これまでは、合理化あるいはコスト縮減等を睨んだ新しい PC 構造の研究・開発が盛んに行われ、長大 PC 橋梁をはじめとして、鋼と組み合わせた波形鋼板ウェブ PC 橋や PC 鋼材をコンクリート躯体から切り離した外ケーブル構造等さまざまな構造形式が生み出され、またそれらが実際に建設されるという華やかな一面をもっていた(図-1、図-2)。一方、建設後、年月を経た PC 構造物はこれまでに経験したことがない大きな試練の場に立たされている。すなわち、PC 橋梁の経年劣化による老朽化やポストテンション方式におけるグラウトの施工不良による PC 鋼材の腐食等が大きな問題となっている。このように、現在の PC 技術の開発は単に新しさ

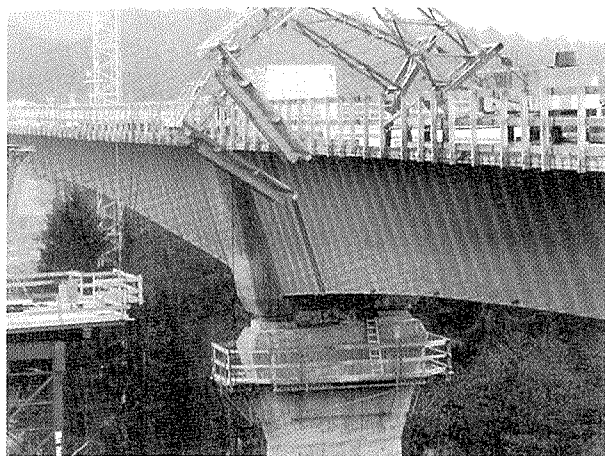


図-1 Altwipfergrund 高架橋 (ドイツにおける初めての波形鋼板ウェブ PC 橋)

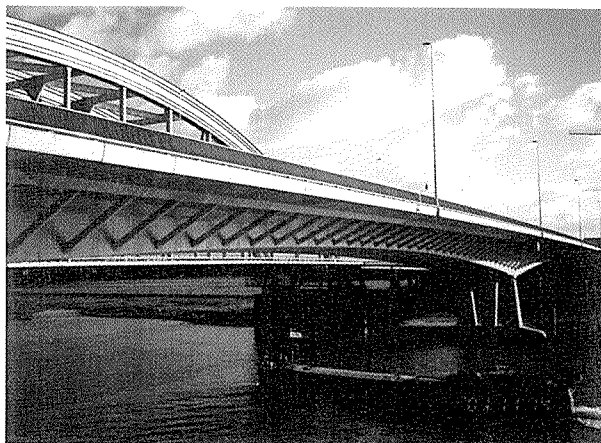


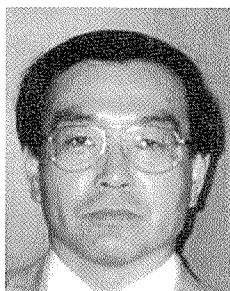
図-2 Lek 橋 (オランダにおいて最近建設されたストラットを有する PC 箱桁橋)

のみを追求する研究・開発だけではなく、既往の技術の改良や既設構造物の維持・管理といった“地味”な面をあわせもっており、両者がうまくバランスした技術開発が今後必要とされる。本文では、華やかな一面である、最近建設された特徴ある海外の PC 橋梁のいくつかを紹介するとともに、他の一面であるグラウト技術の改良および耐久性に関する最近の海外における技術の動向についても簡単に述べることにする。

2. 最近の海外における PC 橋梁

PC の先進国であるヨーロッパにおいては、造る時代から維持・管理する時代に入ったといわれている。しかし、規模的には大きくはないものの、機能性と優美性に重きを置いたユニークな PC 橋が最近建設されている。

昨年(2002年)、時を同じくして、ユニークな2つのPC水路橋が完成し供用されている。一つは、ベルギーにある Sart 運河橋である(図-3)。この橋はブリュッセルの南約 50 km に位置する所にあり、100 年間にわたり航路として供用されていた運河を近代的な PC 水路橋に改良したものである。橋は 1 スパン 36 m で、13 スパンを有し、断面は図-4 に示すように、46 m の幅を有する台形状の断面である。景観的には、側面は曲線状で、リブを配置しており、円形状の橋脚を採用している。このような景観上の配慮によって構造物全体の重量感(圧迫感)を軽減している。橋梁形式の選定にあたっては、コンベ方式が採用され、本 PC 橋は鋼橋に比べ約 3 割安い価格となっている。本橋の架設は押し出し工法で行われ、65 000 ton の上部工を 1 週間に 12 m の速さで押し出している。これは世界記録である。なお、本橋は高度な構造設計技術と景観の優雅さなどにより、



* Hiroshi MUTSUYOSHI

埼玉大学教授
同地域共同研究センター長

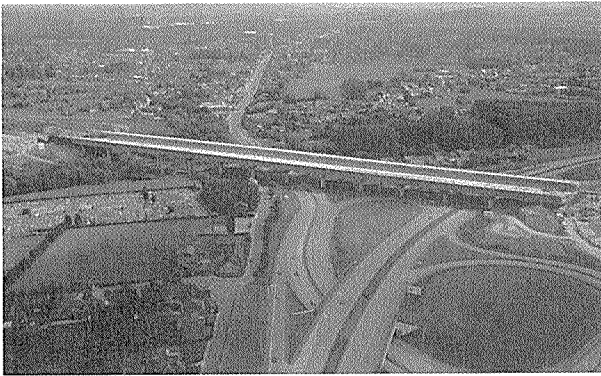


図 - 3 Sart 運河橋 (ベルギー)

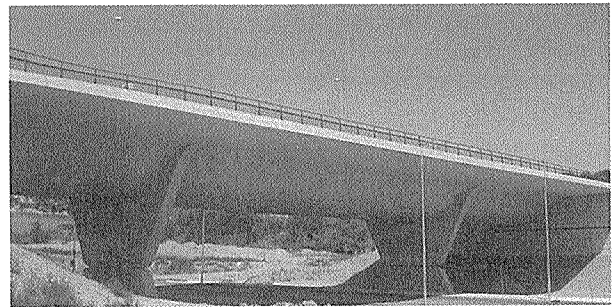


図 - 5 Aragon の PC 水路橋 (スペイン)

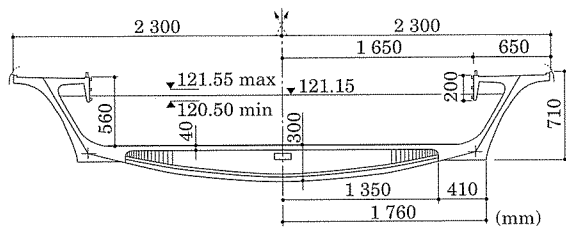


図 - 4 断面形状

2002年 *fib* 賞を受賞している。図 - 5 は、スペインの Zaragoza にある PC 水路橋である。本水路橋は図 - 6 に示すように、幅が 34.4 m で、断面中央に水路、その両側に車道と歩道が設けられており、通常の橋と水路のふたつの機能を持ち合わせている。図に示すように、断面形状は逆アーチ状のシェル構造をしており、コンクリート厚さが 0.2 から 0.45 m と変化している。先に述べた Sart 運河橋に比較してシンプルな構造であり、道路橋とはかなり異なる構造形式をしている点が興味深い。

図 - 7 (a) はスペイン西部の Ebro 川に架かるユニークな高速鉄道用 PC 橋である。高速鉄道は Madrid から Zaragoza を経由してフランスとの国境近くまで建設される予定である。本橋梁は全長 546 m でもっとも長いスパンは 120m である。橋の構造は図に示すように、箱桁構造で、箱内に軌

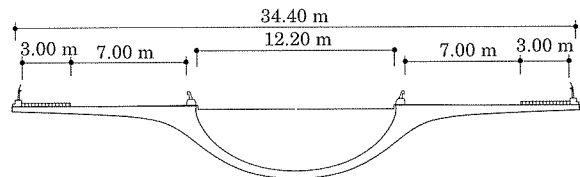
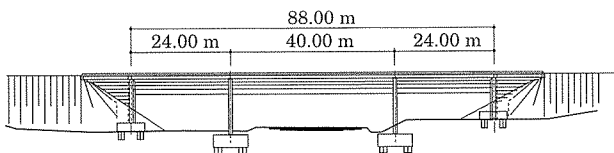
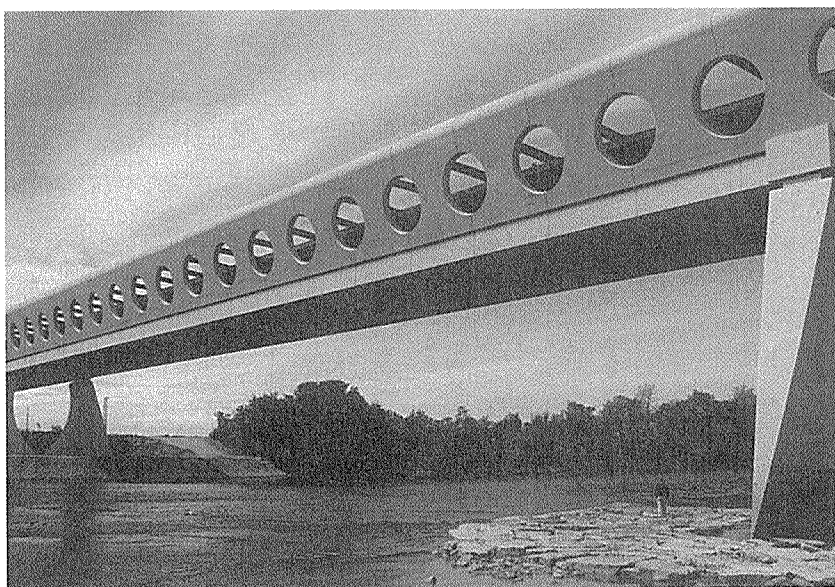
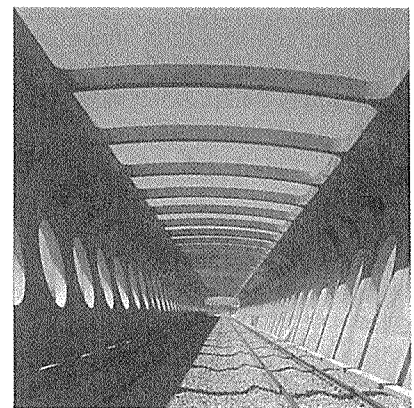


図 - 6 PC 水路橋の形状寸法



(a) 外観



(b) 箱桁内部

図 - 7 高速鉄道 PC 橋 (スペイン)

道が敷設され、鉄道が走る構造となっている。ウェブには6 m 間隔で直径3.8 m の円形の開孔が設けられており、また、上フランジには6 m 間隔でリブを配している点に特徴があり、非常にユニークな構造となっている。図-7(b)は断面形状を示したもので、台形状をしている。図-7(a)から分かるように、箱桁は長さ6 m のセグメントで組み立てられている。このような複雑な構造をしている橋の設計には有限要素法が用いられている。このような橋のデザインは従来のわが国の橋梁とは一味異なるものであり、建築構造物に近い感がある。

図-8はスイスの南部のTicino州にあるTicino橋である。橋長は47 m、幅は7 m と小さな橋であるが、PC緊張材は桁の外に配置されている、いわゆる大偏心外ケーブルPC橋である。外ケーブルは図に示すように、引張弦材となっている鋼箱の中に設置されており、緊張力を導入した後にグラウトが注入され、PC鋼材の腐食を防ぐとともに、引張弦材の剛性を高めている。本橋は新しい構造形式の採用による軽量化と景観の優雅さなどにより、2002年fib賞を受賞している。余談であるが、本橋の設計者のAurelio Muttoni博士(現スイス連邦工科大学ローザンヌ校教授)は著者がスイス連邦工科大学(チューリッヒ)に留学していた時(1988～1989年)の研究室の同僚である。

以上のように、ヨーロッパの最近のPC橋梁は、規模的にはそれほど大きくはないものの、構造上の合理性、機能性、経済性、耐久性、景観等に重きが置かれて建設されている。

わが国ではPC斜張橋の建設は非常に少なくなっているが、海外における発展途上国では大径間のPC斜張橋がいくつかに建設されている。ベトナムのハノイの西約140 kmにあるハロン(Ha Long)湾にPC斜張橋が日本の施工会社により建設されている。詳細は後述されている「ベトナムにおけるPC技術の動向とプロジェクト」に譲るが、ここではその概略を述べることにする。図-9はPC斜張橋の形状寸法を示したもので、橋長903 m、中央スパンが435 m、主塔の高さ90 m、橋脚高さ47.5 mで、6径間を有するPC斜張橋である。上部工の施工は張出し架設(場所打ち)で、本橋は完成すれば、独立1本柱形式の主塔を有する1面吊りのPC斜張橋としては世界で最大支間長となる(2位はフ

ランスのElorn橋で400 m)。また、主桁重量の軽減および剛性確保のため、大きな張出し床版と鋼管ストラットを有する1室箱桁断面を採用している。さらに、工期短縮を図るため、張出し架設の1ブロック長を6 mとしている(通常は2～5 m)。ハロン湾はベトナム屈指の観光地であり、本斜張橋がランドマークになることが期待されている(図-10)。

図-11(a)はブラジルのPara州の州都Belemから約40 kmのところにあるGuama橋である。橋長は約2 kmで、アプローチ部の高架橋(719 m + 629 m)とPC斜張橋(584

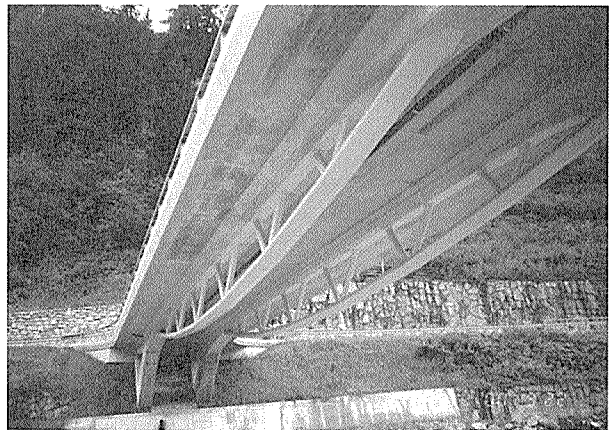


図-8 Ticino橋(スイス)

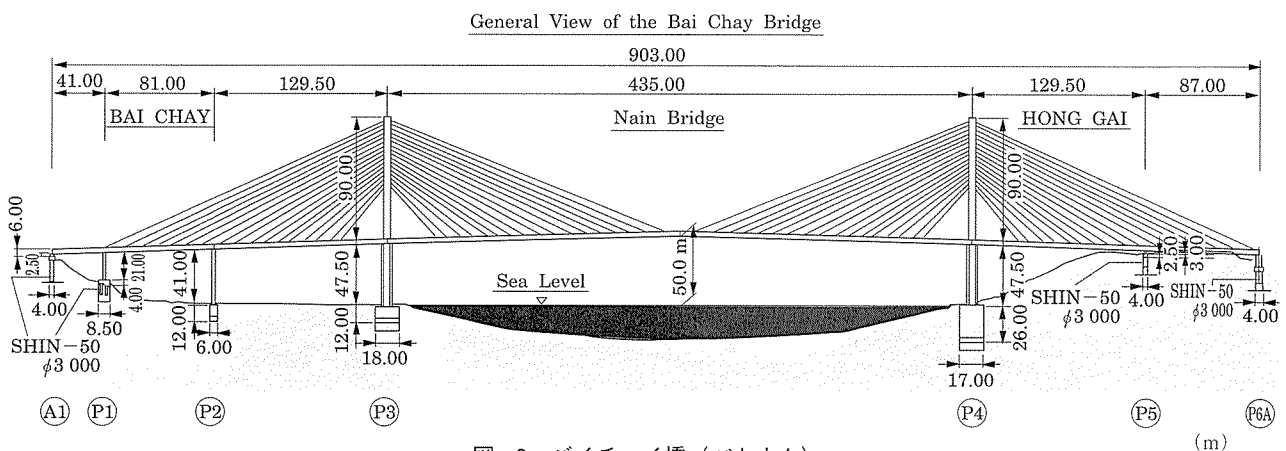
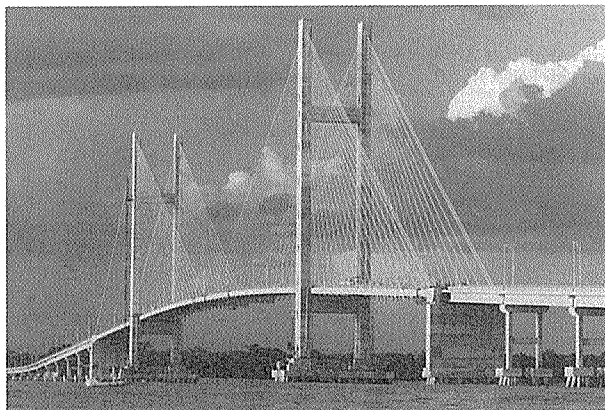


図-9 バイチャイ橋(ベトナム)

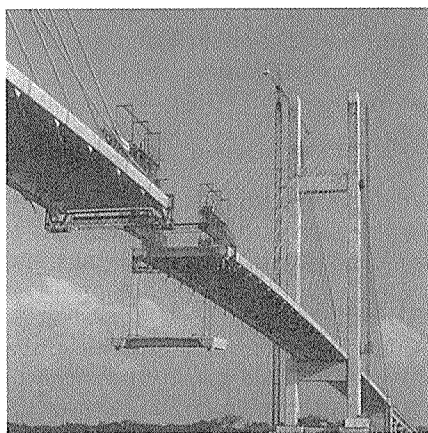
m) から成る。斜張橋の中央径間は 320 m である。本橋梁はアマゾンの熱帯雨林を横切る道路の一部で、Para 州東部の基幹道路である。高架橋部は長さ 45m の I 型プレキャスト PC 桁から成り、斜張橋の桁は建設ヤードで製作されたセグメントが船で運ばれ、図 - 11 (b) に示すように現場で組み立てられた。ケーブルには亜鉛メッキされたストランドがワックスと高密度ポリエチレンシースによって防護されており、ケーブル間隔はセグメント長に合わせて 7.6 m である。また、ポリエチレンシースには雨による振動をさけるために、らせん状にリブが取り付けられている。



図 - 10 バイチャイ橋 (完成想定写真)



(a) 概観



(b) セグメントの架設

図 - 11 Guama 橋 (ブラジル)

3. PC 橋の耐久性に関する技術の動向

最初に述べたように、PC 橋の耐久性はわが国をはじめ、主に先進国で大きな問題となっている。1985 年 12 月、英国のウェールズ州にある Ynys-y-Gwas 橋が PC 鋼材の破断により突然崩壊した。同橋は 1953 年に施工された単純プレキャスト I 桁橋である。また、アメリカのフロリダにある Mid-Bay 橋は図 - 12 に示すように外ケーブルに用いられていた PC 鋼材 (ストランド) の一部が破断していることが発見された¹⁰⁾。このように、建設後数十年を経た PC 橋梁において、PC 鋼材の腐食による劣化がわが国をはじめ全世界で大きな問題となっている。PC 鋼材が腐食する原因として、1) グラウトの施工不良、2) 海岸近傍に建設された橋では海水や海風を浴びることにより、塩分がコンクリート中に浸透することによる鋼材腐食、3) 寒冷地では融雪材による塩分がコンクリート中に浸透することによる鋼材腐食、4) 不十分な防水工による水分の浸透による腐食等が考えられる。このようなことから、2001 年ベルギーの Gehnt で “Durability of Post-Tensioning Tendons (ポストテンション鋼材の耐久性)” に関するワークショップが開催され^{4,5)}、先進国における PC 構造物の耐久性に対する取り組み方が話し合われた。ここでは PC の耐久性にもっとも重要であると考えられるグラウトについて、海外での最近の取り組み方を簡単に紹介する。

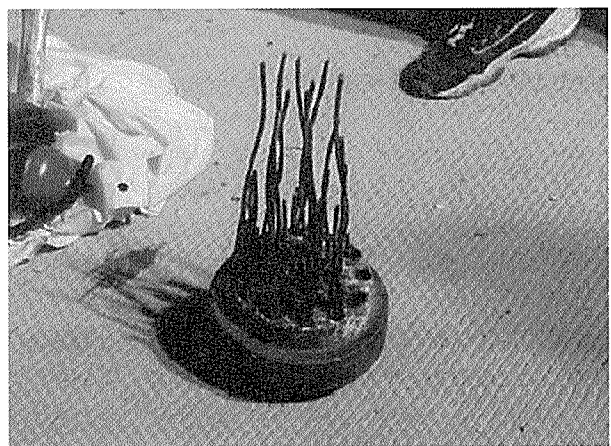


図 - 12 PC 鋼材の腐食による破断

グラウトの目的は一般に、緊張材を腐食から保護すること、ならびに緊張材とコンクリートの付着を確保することである。緊張材は外部からの空気、水、腐食性物質などの侵入により腐食する。緊張材の腐食が進行すると、その断面が減少し、破断による耐荷力の急激な低下を引き起こし、構造物に著しい損傷をもたらす。また、コンクリートとの付着が不完全であると、ひび割れが生じた場合、ひび割れが集中するとともにその幅が大きくなり、構造物の耐久性を損なうこととなる。すなわち、グラウトの良否が PC 部材の耐久性に大きな影響を及ぼすのである。

ヨーロッパおよびアメリカでは最新のグラウトに関する基準が以下に示すように相次いで刊行されている。

- 1) bulletin 20 “Grouting of tendons in prestressed concrete”, fib, 2002 年
- 2) Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, PTI(Post-Tensioning Institute), 2001 年 2 月 (米国)
- 3) Technical Report No.47 - Second Edition “Durable post-tensioned concrete bridge”, Concrete Society, 2002 年 (英国)
- 4) Grout for prestressing tendons-Specification for common grout, BS EN447, BSI, 1997

上記の基準について、グラウトに求められる主な特性を日本の基準（土木学会）と比較すると表-1 のようになる。

その後、グラウト施工の4週間以上前に、施工者がグラウト作業手順書を提出し、設計技術者の許可を得た後にグラウトの施工を行うことになっている。また、フロリダ州では、グラウト技術者の訓練が行われており、一日の講習会では講義と現場実習が行われる。アメリカセグメント橋協会（ASBI : American Segmental Bridge Institute）ではグラウトの三日間のトレーニングプログラム（グラウトの重要性、正しい施工手順、正しい材料の知識（配合、注入法など））を行い、グラウト技術者の認定書を発行している。このように、グラウトの良否がPC 構造物の耐久性に大

表 - 1 グラウトに関する各基準の比較例

| 特 性 | fib | TR 47 (英国) | EN 447 (欧州) | PTI (米国) | JSCE (日本) |
|--------------------------------|---|---|--|---|--|
| 流動性 | とくに無し | 練混ぜ直後：25 秒以内 ダクト排出時：10 秒以上 流動性試験用コーン (φ 152 から φ 10 に変化) | 練混ぜ直後：25 秒以内 ダクト排出時：10 秒以上 流動性試験用コーン (φ 10 ~ 12.7 mm) | 11 ~ 30 秒 (ASTMC 939) (フローコーン法) | 施工計画書準拠 |
| ブリーディング率 | 0.3 %未満 (内田) | 1.0 %以下 (連続 4 回の試験結果の平均が 0.3 %以下) | - 1% ~ + 5% (3 時間後) | 0 % (3 時間後) | 0 % |
| 膨張率 | ± 5 %以内 (内田) | 0 ~ + 5 % | - 1% ~ + 5% | 0 % ~ + 0.1% (24 時間) 0.2 %以下 (28 日) | - 0.50 % ~ 0.5% |
| 圧縮強度 (7 日) (28 日) 試験用供試体 | ≥ 27 N/mm ² 50 ~ 100 mm 立方体 φ 50 ~ 100 mm 円柱 | ≥ 27 N/mm ² 100 mm 立方体 | ≥ 27 N/mm ² ≥ 30 N/mm ² 40 × 40 × 160 角柱 φ 100 × 80 mm 円柱 | ≥ 21 N/mm ² ≥ 35 N/mm ² 50 mm 立方体 | ≥ 30 N/mm ² φ 50 × 100 mm 円柱 |

英国では、Ynys-y-Gwas 橋の落橋により、1992 年から数年間ポストテンション PC 橋の建設が禁止されていた。その後、Technical Report No.47 (以下 TR47 と略記) 初版が出版されるに至って、ポストテンション PC 橋が復活したのである。TR47 ではマルチレイヤプロテクション(multi layer protection) という概念が導入されている。これは、もし一つのレイヤ (腐食を防護する手段) に効果がなくなったとしても他のレイヤが効果を発揮して、全体として完全な防食機能を発揮することをいう。このことは、一層のレイヤだけでは十分に信頼することができないからであり、たとえば高品質なグラウトが施工されたとしても、それだけでは PC 部材の耐久性を保証できないという視点に立っている。マルチレイヤプロテクションの概念の具体例としては、1) グラウトでダクトを充填して緊張材を保護、2) 耐腐食性ダクトの使用、3) 定着具の位置、詳細、防護の設計、4) 水ならびに凍結防止塩などの侵入を阻止する表面防水層の設置、5) 透水係数の大きい密実なコンクリートの使用などがあげられる。さらに、厳しい環境下 (たとえば海洋にかかる橋) では、追加対策として、1) かぶり厚の増大、2) コンクリートの透水性低減、3) 密封ダクト、4) 腐食監視装置、5) 防食鋼材の利用などが考えられる。

ヨーロッパでは、グラウトの品質をチェックするために、日本で用いられていない傾斜管試験を使用している。これは図-13 に示すような傾斜管を用いて、その中に PC 鋼線 (ストランド) を入れてグラウトを下方から上方へ注入して、ストランドの影響を考慮したグラウトのブリーディング特性と分離安定性を検査することを主な目的としている。

アメリカでは、グラウト施工の8週間以上前に、現場で使用材料と機材を用いてグラウトの試験練りが行われ

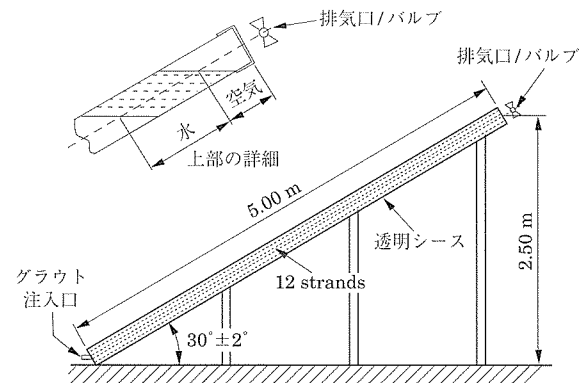


図 - 13 グラウトの傾斜管試験 (ヨーロッパ)

きな影響を及ぼすことが先進国で再認識され、いかに品質の高いグラウト施工を行うかということについて技術開発されている。

4. ま と め

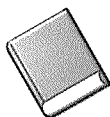
最初に述べたように、最近の PC の技術は、設計、施工の合理化やコスト削減を目的とした新しい構造形式の研究・開発を追求するだけではなく、これまで“良し”とされていた既往の技術の見直しや既設構造物の維持・管理といった“地味”な面を持ち合わせている。また、本論では触れなかったが、品質の高い PC 構造物を建設するためには、グラウトも含めた全体の施工マネジメントシステムの開発や、既設構造物においてはアセットマネジメント (あるいは BMS : Bridge Management System) 等の開発が今後必要になってくるものと思われる。

なお、最近入った情報では、2001年ベルギーのGehutで開催された“Durability of Post-Tensioning Tendons (ポストテンション鋼材の耐久性)”に関するワークショップの2回目が、今年の10月11、12日に、スイス、チューリヒにあるETH (スイス連邦工科大学) で開催される。

最後に本稿を作成するにあたって、清水建設(株)の土田一輝氏に資料のご提供を頂いた。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 13, No.2, May 2003
- 2) Fib Awards for Outstanding Concrete Structures, 2002
- 3) Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 13, No.3, August, 2003
- 4) Durability of Post-Tensioning Tendons, IABSE, fib, 2001
- 5) PC 構造物の現状の問題点とその対策, コンクリート技術シリーズ 52, 土木学会, 2003
- 6) bulletin 20 “Grouting of tendons in prestressed concrete”, fib, 2002
- 7) Specification for Grouting of Post-Tensioned Structures, PTI(Post-Tensioning Institute), 2001.
- 8) Technical Report No.47 - Second Edition “Durable post-tensioned concrete bridge”, Concrete Society, 2002
- 9) Grout for prestressing tendons-Specification for common grout, BS EN447, BSI, 1997
- 10) Brett H Pielstick P.E : Grouting of Segmental Post-Tensioned Bridges in America, Proceedings of the first fib Congress 2002.
- 11) Teddy Theryo, Pepe Garcia and William N. Nickas : Lessons Learned from the Vertical Tendon Corrosion Investigation of the Sunshine Skyway Bridge High Level Approach Piers, Proceedings of the first fib Congress 2002.
- 12) コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2002年
【2003年12月2日】



刊行物案内

第1回 *fib* コンgress 2002 — 21世紀のコンクリート構造 — 論文集

(平成14年10月)

平成14年10月に大阪で開催された標記コンgressの講演論文集です。

下記の3種類となります。

- | | |
|--|--|
| <p>(1) プロシーディングス1(印刷物 全2巻) : 全ての招待講演論文および採用論文の要旨 (1論文あたり2ページ)を掲載 頒布価格: 10 000円(送料1 200円別途)</p> <p>(2) プロシーディングス2(CD-ROM 全3枚) : 全ての発表論文を掲載 頒布価格: 2 000円(送料400円別途)</p> | <p>(3) プロシーディングス3(印刷物 全8巻) : プロシーディングス1および全ての採用論文を掲載 頒布価格: 30 000円(送料2 000円別途)</p> |
|--|--|