

fib シンポジウム 2012 と 北欧における橋梁視察報告

齋藤 公生*1・大熊 光*2・古村 豊*3・林 克弘*4

1. はじめに

fib シンポジウム 2012 が、6 月 11 日から 14 日の 4 日間、スウェーデン王国の首都ストックホルムにおいて開催された。fib シンポジウムは、fib（国際構造コンクリート連合、federation internationale du beton）が開催する国際シンポジウムであり、コンクリート構造に関する世界各国の研究者・実務者が数多く参加する。

fib シンポジウム 2012 の開催にあたり、公益社団法人プレストレストコンクリート工学会の支援を得て橋梁調査団（表 - 1、写真 - 1）を結成し、同シンポジウムに参加するとともに、北欧諸国（スウェーデン、ノルウェー、デンマーク）の橋梁を視察した。本文は、fib シンポジウム 2012 および橋梁視察について報告するものである。

表 - 1 調査団参加者

氏名	所属
二羽 淳一郎（団長）	東京工業大学
二羽 ひろみ	同伴者
池田 尚治	(株)複合研究機構
池田 菊江	同伴者
春日 昭夫	三井住友建設(株)
古村 豊	(株)ピーエス三菱
滝田 基裕	首都高速道路(株)
三角 哲也	(株)富士ビー・エス
松本 徳人	川田建設(株)
齋藤 公生	鹿島建設(株)
大熊 光	大成建設(株)
山下 和則	極東鋼弦コンクリート振興(株)
野崎 博	アイ・エス・エル・ジャパン(株)
林 克弘	(株)オリエンタルコンサルタンツ
中田 錠司	(株)安部日鋼工業
土居 敏彦	(財)海洋架橋・橋梁調査会
山家 芳大	神鋼鋼線工業(株)
松澤 均郎（添乗員）	グローリア・ユーレックス

2. fib シンポジウム 2012

2.1 シンポジウム概要

fib シンポジウム 2012 は、ストックホルム市の中心から北へ約 2km に位置する王立工科大学（Royal Institute of Technology）（写真 - 2）にて開催された。今回のシンポジウムのテーマは、“持続可能な社会のためのコンクリート



写真 - 1 橋梁調査団



写真 - 2 王立工科大学

構造物（Concrete Structures for Sustainable Community）”であり、同テーマに沿って基調講演と一般講演が行われた。講演以外には、技術展示やテクニカルツアーが催されたほか、レセプションパーティーやバンケットのソーシャルイベントも催された。今回のシンポジウムには、39 の国や地域から 260 名が参加した。日本からの参加者数は、開催国スウェーデンに次ぐ 37 名であった。

前年にブラハで開催された fib シンポジウムには、50 の国や地域から 475 名が参加したのに比べると、参加した国や地域の数、参加者数ともに大幅に減少しており、やや規模の小さいシンポジウムであったといえる。

なお、次回の fib シンポジウムは 2013 年 4 月 22 日から 24 日にイスラエルのテルアビブにて開催される予定であ

*1 Kimio SAITO：鹿島建設(株) 土木設計本部

*2 Hikari OHKUMA：大成建設(株) 土木技術部

*3 Yutaka KOMURA：(株)ピーエス三菱 技術本部

*4 Katsuhiko HAYASHI：(株)オリエンタルコンサルタンツ 中部支店 技術部

○ 会議報告 ○

る。また、4年に1度となる次回のfibコンGRESは、2014年2月10日から14日にインドのムンバイにて開催される予定である。

2.2 基調講演

今回のシンポジウムでは、5題の基調講演が行われた。シンポジウムの開会式に引き続いて行われた基調講演では、香川大学の堺孝司教授が“A New Concept concerning Concrete Sustainability for a Sustainable Society”と題して発表した。同講演では、東日本大震災の被害を例にとり、相反する二つの課題、“安全性向上”と“環境負荷低減”が説明されたうえで、課題克服へのシナリオが提示された。

2.3 一般講演

一般講演に対しては、今回のシンポジウムのテーマに沿った12のトピックが用意された。それぞれのトピックに関する合計137件の発表(表-2)が、3会場に分かれて行われた。テーマに沿ったトピックが用意されたにもかかわらず、実際の発表にはサステナビリティとの関係が見出せないような内容のものが散見された。

日本からは、11件の発表があった。本調査団からは、三井住友建設(株)の春日昭夫氏が“Construction of a Butterfly Web Bridge”と題して、東九州自動車道の田久保川橋におけるバタフライウェブ橋の施工について発表した。

表 - 2 一般講演のトピックと発表件数

トピック	発表件数
Design Concrete Structures	30
Sustainable Concrete Materials	18
Durability	18
Sustainable Concrete Structures	17
Repair, Renovation and Upgrading	15
Case Studies and Aesthetical Issues	8
LCC & LCA	7
Alternative Binders	7
Carbonation and Carbon Dioxide & Recycling	5
Sustainable Concrete Pavements	5
Thermal Mass, Energy Storage & Fire Protection	4
Sustainable Concrete Production, Rheology and Flow	3
合計	137

3. ストックホルム市内の橋梁視察

3.1 概 要

スウェーデンの首都ストックホルムは、人口約75万人の北欧最大の都市である。メーラレン湖がバルト海に達する場所に位置し、市の中心部が14の小島の上に建設されているため、「水の都」、「北欧のヴェニス」とも称される。島々は橋によって結ばれ、市内には数多くの橋が存在する。今回の調査では、コンクリート鉄道橋であるベルタバナンス橋、アルビック橋およびアルスタ橋の3橋を視察した(図-1)。

3.2 ベルタバナンス橋 (Värtabanans 橋)

ベルタバナンス橋は、北欧最大規模の道路トンネルプロジェクトであるNorra länkenプロジェクトの一環として建設された鉄道橋である。都市開発が進められるNorrtull地区に整備される環状交差点の上空を横断することとなる。



図 - 1 ストックホルム市内視察橋梁

桁下面が曲面とされているほか、景観への配慮から、構造上機能を持たない橋脚が本来の橋脚の間に狭い間隔で配置されている(写真-3, 4)。



写真 - 3 ベルタバナンス橋



写真 - 4 構造上の機能をもたない橋脚

3.3 アルビック橋 (Alvik 橋)

アルビック橋は、2000年に完成したStora Essingen島とBromma地区を結ぶLRT用の橋梁で、歩道が併設されて

いる。橋長 400 m、中央支間長 140 m の 6 径間連続 PC 箱桁ラーメン橋で、主橋脚には 2 枚壁式構造が採用され、レンガ貼りの意匠が施されている（写真 - 5）。



写真 - 5 アルピック橋

本橋では、完成から 3 年後にウェブに多数のせん断ひび割れ（幅：0.1 ～ 0.3 mm）が発見された。このためウェブが、せん断鋼棒によって補強されたほか、内面から炭素繊維シートによって補強された。Stora Essingen 島側からの視察では、桁下面に露出したせん断鋼棒の定着部を確認できた（写真 - 6）。

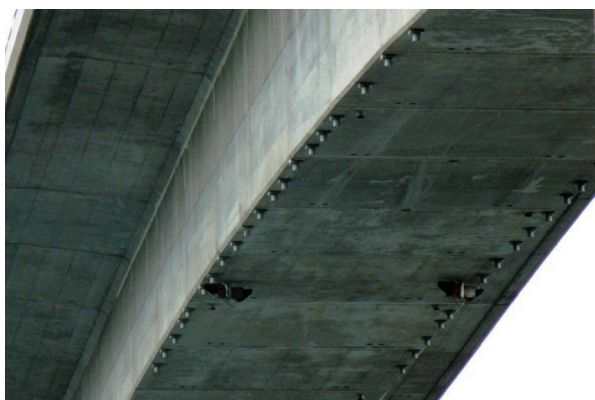


写真 - 6 せん断鋼棒による補強

ひび割れの発生原因を明らかにする目的で有限要素解析が行われた。解析の結果から、プレストレスの導入および温度変化がひび割れの原因とされている¹⁾。

3.4 アルスタ橋（Årsta 橋）

アルスタ橋は、Södermalm 島と Årsta 地区を結ぶ鉄道橋で、新橋と旧橋が平行して建設されている。1929 年完成の東橋（旧橋）の橋長は 753 m で、完成当時スウェーデン最長の橋梁であった。主径間には支間長 100 m の中路式鋼トラスアーチが、主径間以外にはコンクリートアーチが適用されている（写真 - 7）。ただし、コンクリートアーチ区間の 1 支間には、航路確保のため可動の鋼桁が適用されている。

東橋を Södermalm 島側から視察したところ、アーチ部のコンクリートには塗装が施されているため、変状などを



写真 - 7 アルスタ東橋

見出すことはできなかった。脚部の前後面には補強のためと見られるコンクリートブロックが取り付けられていた。

一方、2005 年完成の西橋（新橋）は、橋長 833 m、幅員 19.5 m で、複線の鉄道に歩道が併設されている（写真 - 8）。構造形式は 11 径間連続 PC 箱桁橋で、両端の支間を除く 9 支間で支間長が 78 m に統一されている。桁断面は、桁高が 3.4 m から 5.3 m まで変化する 3 室箱桁である²⁾。

西橋のデザインは、イギリスの著名なデザイナーである Norman Foster 氏によるもので、曲面を多用した桁と橋脚の形状や色彩によって、周辺環境への調和を図っている。



写真 - 8 アルスタ西橋

4. ノルウェーの橋梁視察

4.1 概要

ノルウェーはスカンジナビア半島の西岸に位置し、南北に細長い国土を有する。スカゲラック海峡、北海、ノルウェー海などの北大西洋に面し、その海岸線の大部分は氷河による浸食で形成されたフィヨルドである。また、同国の面積が日本とほぼ同じである一方、人口は 480 万人と少なく、国土の約 80 % を森林、山、湖などが占める自然豊かな国である。フィヨルドは、都市部で港湾に利用されるほか、地方部では、その世界的にも美しい景観から、観光資源として利用されている。同国では、フィヨルド特有の複雑な地形から、長大橋梁が多く建設されている。今回の調

査では、オスロより北西約 550 km のステインヒル市近郊に建設された PC 斜張橋であるスカルスンド橋と、首都オスロ近郊のアーチ橋であるレオナルド橋を視察した（図 - 2）。



図 - 2 ノルウェーでの視察橋梁位置

4.2 スカルスンド橋^{3, 4)}

スカルスンド橋は、ステインヒル市近郊のスカルスンド海峡に 1991 年に建設された 2 車線の道路橋である。橋長 1 010 m、幅員 13 m、中央支間長 530 m の PC 斜張橋（写真 - 9）で、中央支間長 530 m は今回の視察時点（2012 年 6 月）でも、複合形式を除く PC 斜張橋として世界最長である。主桁には、耐風性への配慮から桁高 2.15 m の逆三角形 2 室箱桁断面が採用されている。主塔は A 型で、高さは 105 m である。斜材配置はファン型 2 面吊りで、26 段の斜材ケーブルが配置されている。主桁側の斜材定着間隔は中央径間で 10 m、側径間で 5.4 m である。斜材ケーブルには、ロックドコイルロープ ϕ 52 ~ 83 mm が使用されている。



写真 - 9 スカルスンド橋

今回の調査時点で、スカルスンド橋は供用開始から 20 年が経過しているが、主桁、主塔および橋脚のコンクリートに目立った変状は認められなかった。一方、主桁側の斜材定着部に取り付けられたゴム製止水カバーの破損が、多くの箇所を確認された（写真 - 10）。また、斜材ケーブルの塗装が数箇所で剥がれていることも確認された（写真 - 11）。



写真 - 10 止水カバーの破損

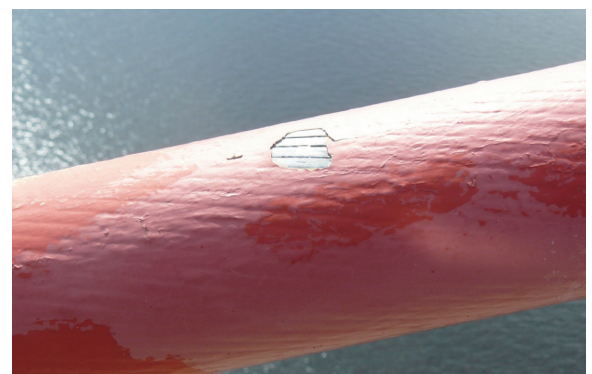


写真 - 11 斜材塗装の剥がれ

4.3 レオナルド橋⁵⁾

レオナルド橋は、ノルウェーの首都オスロ近郊に架かる歩道橋で、橋長 109.2 m、アーチ支間 40 m の木製アーチ橋である（写真 - 12）。本橋は、ルネッサンスの巨匠レオナルド・ダ・ヴィンチが約 500 年前に考案した、ボスポラ



写真 - 12 レオナルド橋

ス海峡の金角湾を跨ぐ長さ 240 m の巨大な石造アーチ橋のデッサンを元に、ノルウェーの芸術家を中心となって 2001 年に建設したものである。

アーチリブおよび床版は、木製の薄板を何層も重ね合わせたラミネート構造であり、床版を支持する支柱は金属製、基礎はコンクリート製である。本橋では、アーチアバットに向けて裾広がりに描かれたレオナルド・ダ・ヴィンチのデッサンを、3本のアーチリブの構成によって表現しており、流線型で美しいフォルムをしている。アーチリブの断面形状は逆三角形であり、センターアーチが鉛直荷重を、サイドアーチが水平荷重を支持している。

耐久性に関しては、白木の白色を残すように開発された防水材料が用いられており、アーチリブ側面については建設後 10 年以上が経過しても変状などは見受けられなかった。しかし、アーチリブ天端は完成時には無かったステンレス製と見られる薄板で覆われていた。ステンレス板によるアーチリブの保護は、変色あるいは腐食に対する措置とも考えられる。アーチリブ側面には軸線方向に若干の亀裂が見られたものの、顕著な劣化は確認されなかった。

5. デンマークの橋梁視察

5.1 概要

デンマークの国土は、首都コペンハーゲンのあるシェラン島やフュン島をはじめとする大小 400 以上もの島々と、ドイツと陸続きのユトランド半島からなる。多くの島々が橋で結ばれており、以下に述べるオーレスン橋やグレートベルト橋などにより、スウェーデンからデンマークを通りドイツまでが道路および鉄道で繋がっている。また、南のファルスター島、ロラン島についてもファロー橋などにより結ばれている（図 - 3）。これらの道路、鉄道網はデンマーク国内だけではなくスカンジナビア半島や中央ヨーロッパの経済圏の拡大と、旅行者の利便性向上に大きく貢献している。デンマークでは紙幣の裏面に橋が描かれており、同国における橋の重要性が伺える（図 - 4）。



図 - 3 デンマークでの視察橋梁位置



図 - 4 デンマークの紙幣（1000 クロネ）

今回の調査では、オーレスン橋、グレートベルト橋およびファロー橋を視察した。

5.2 オーレスン橋⁶⁾

デンマークとスウェーデンの国境にあるオーレスン海峡は、デンマーク側からスウェーデンに向かって、沈埋トンネル-人工島-橋で構成される全長約 16 km のオーレスン・リンクによって結ばれている。オーレスン・リンクは 2000 年に開通しており、4 車線の道路と複線の鉄道が通っている。デンマークのコペンハーゲンとスウェーデンのマルメを中心とするオーレスン地方は、オーレスン・リンクの開通によって、国境を越えた経済・教育・文化圏として成長しており、ボーダーレス化する EU 諸国のモデルケースとも考えられている。

オーレスン・リンクの橋梁部であるオーレスン橋（写真 - 13）は、中央支間長 490 m の鋼斜張橋と前後の高架橋より構成され、全長は 7 845 m である。斜張橋の斜材配置はハープ型 2 面吊り、主塔は H 型で高さ 204 m のコンクリート製である。主桁は桁高 10.2 m の鋼トラス構造であり、上路が道路、下路が鉄道となっている。上路にはポストテンション方式の PC 床版、下路についてもコンクリート床版が適用されている。ただし、斜張橋中央径間部の下路では、軽量化のため鋼材で軌道を支持している。後述する道路橋であるグレートベルト橋では吊橋が採用されているのと対照的に、道路・鉄道併用橋である本橋では鉄道橋としてのたわみ制限を満足させるために斜張橋が採用されている。



写真 - 13 オーレスン橋（スウェーデン側より）

供用開始から 12 年が経過しているが、スウェーデン側から目視した範囲ではとくに変状は認められず、伸縮装置からの漏水なども見受けられなかった。桁端部には保守点検用の自走式 Gondola が駐機されており（写真 - 14）、桁下には Gondola 用のレールが、各橋脚天端には Gondola 通



写真 - 14 保守点検用ゴンドラ

過用の切り下げ部が設けられていた。

5.3 グレートベルト橋) 7, 8, 9)

グレートベルト橋は、デンマークの首都コペンハーゲンが位置するシェラン島と古都オーデンセが位置するフン島の間に横たわるグレートベルト海峡を跨ぐ全長約 20 km の路線（設計速度は道路 120 km/h, 鉄道 160 km/h）に建設された道路橋および鉄道橋である。グレートベルト海峡上のスプロー島から東側をイースト橋, 西側をウェスト橋と称する。

1997 年には鉄道橋が, 1998 年には道路橋が開通しており, 本視察時点で供用後 14 ~ 15 年となる。

(1) イースト橋 (道路)

イースト橋は, スプロー島とシェラン島を結ぶ道路橋である。橋長は 6 790 m, 幅員は 25 m であり, 吊橋と前後の高架橋から構成される (写真 - 15)。吊橋の中央支間は 1 662 m (2012 年現在世界第 3 位) であり, コンクリート製の主塔は高さ 254 m, 主ケーブルの直径は 850 mm である。高架橋部の桁形式には, 塩害対策のため暴露面積の小さい逆台形の鋼床版 1 室箱桁が採用されている。



写真 - 15 グレートベルト・イースト橋

シェラン島側から高架橋部を視察した範囲では, 鋼桁の塗装や支承の劣化は見られなかった。桁には点検用のゴンドラが設置できるような工夫が見られ, 実際に点検した跡 (チョーキング) も確認できた。海上にはコンクリートの暴露供試体が設置され, コア抜き跡が見られた (写真

- 16)。橋面をバスで通過した際には, 走行車線のわだち部分の舗装が, ほかの部分と異なっているのが確認された (写真 - 17)。



写真 - 16 暴露供試体



写真 - 17 イースト橋の舗装

(2) ウェスト橋 (道路, 鉄道)

ウェスト橋は, スプロー島とフン島を結ぶ道路橋および鉄道橋である。道路橋と鉄道橋が平行し, 両橋の橋長は 6 611 m, 道路橋の幅員は 25 m, 鉄道橋の幅員 13 m である (写真 - 18)。海中部では, 並立する両橋の橋脚を単一のケーソン基礎で支持している。構造形式は, 両橋ともに



写真 - 18 グレートベルト・ウェスト橋 (鉄道橋)

10～11 径間連続 PC 箱桁橋が 6 連で最大支間長は 110 m である。桁の断面形状は 1 室箱桁であり、道路橋の桁高は 3.8～7.3 m である。一方、鉄道橋の桁高は、列車通過時のたわみを抑制するため、道路橋より 2～3 割高い 5.1～8.7 m である。25 m の幅員に対して 1 室箱桁形式を採用した道路橋では、張出し床版長が 6 m 程度になっている。本橋の建設には、陸上で 5 セグメントを接合して製作した長さ 110 m、最大重量 6 000 t の大ブロックを、大型フローティングクレーン船を用いて架設する工法が適用された。

フェン島側からウェスト橋を視察した範囲では、コンクリート表面の汚れ（変色）が目立つものの、コンクリートの劣化を示す変状は認められなかった。伸縮装置部からの漏水も認められなかった。道路橋および鉄道橋のウェブには、橋梁点検用バケットを取り付けるためのレールが設置されていた（写真 - 19）。



写真 - 19 バケット取付け用レール

5.4 ファロー橋

ファロー橋は、シェラン島とファルスター島の間のストールストレーン海峡を横断する全長 3 322 m、幅員 22.4 m の道路橋である。1985 年に完成した本橋は、ストールストレーン海峡に浮かぶ小島「ファロー島」を境に、北橋 1 569 m と南橋 1 726 m で構成されている。今回の調査では、ファロー島とファルスター島を繋ぐ南橋を視察した。

南橋は、中央径間の斜張構造を含む 18 径間連続鋼床版箱桁橋であり、デンマーク初の斜張橋である。桁高は 3.3 m、コンクリート製の主塔は高さ 95.1 m、斜張構造部の中央支間長は 290 m である。アプローチ部の支間長を 80 m と 120 m で構成し、中央径間に向かって支間長を長くすることで、景観に配慮している。主塔は、特徴的なダイヤモンド形である（写真 - 20）。箱桁内部を無塗装とし、除湿装置により湿度を 40 % 以下に管理して防錆することで、建設費ならびに維持管理費を削減している^{10, 11)}。また、本橋には幅 0.9 m の緊急用歩道帯が設置されており、この歩道帯には、壁高欄一体型のプレキャスト床版が採用されている。このプレキャスト部材は、鋼主桁に設置されたブラケット部材によって支持されている。（写真 - 21）。

本橋の完成から 27 年が経過しているものの、ファロー島側から視察した範囲では、目立った変状は認められな



写真 - 20 ファロー橋（全景）



写真 - 21 鋼製ブラケットに支持されるプレキャスト床版

った。

本橋の桁の外形は、先に紹介したグレートベルト・イースト橋に似ているが、グレートベルト・イースト橋に見られたようなゴンドラ設置用のレールは認められなかった。橋脚頂部の形状についても、オーレン橋およびグレートベルト橋で見られたような点検への配慮が認められなかった。以上は、本橋建設以降の維持管理への配慮の面での進歩を示しているとも考えられる。

6. おわりに

以上、*fib* シンポジウム 2012 および北欧諸国における橋梁視察について報告した。ここで紹介した橋梁の多くについては、過去にも報告されているが、今回の視察報告が今後の橋梁計画などに少しでも参考になれば幸いである。

本文の執筆にあたっては、橋梁調査団の団長を務められた東京工業大学大学院の二羽淳一郎教授に、丁寧なご指導をいただいた。ここに、深い感謝の意を表す。

視察にあたって、事前の綿密な準備と現地での柔軟かつ迅速な対応をしていただいたグロリア・ユーレックスの松澤氏ならびに小倉氏に、感謝する。

最後に、公益社団法人プレストレストコンクリート工学会の本視察へのご支援に対して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Richard Malm, Ander Ansell: Crack formation in two segmentally constructed balanced cantilever box-girder bridges, fib Symposium Stockholm 2012, pp.151-154, 2012.
- 2) M.J.Haydon: A Critical Analysis of the New Årsta Bridge, Stockholm, Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2009, University of Bath, 2009.
- 3) 阿部 登: 北欧橋梁の長大スパンへ挑戦, プレストレストコンクリート, pp.45-54, Vol.35, No.2, Mar, 1993.
- 4) 宮本文徳: 技術会議報告 T7 プレストレストコンクリート斜張橋における新しい技術, プレストレストコンクリート, pp.59-66, Vol.36, No.2, Mar, 1994.
- 5) <http://www.leonardobridgeproject.org/>
- 6) S.Hughes: A Critical Analysis of the Oresund Bridge, Connecting Copenhagen to Malmo, Proceedings of Bridge Engineering 2 conference 2010, University of Bath, 2010.
- 7) 田島二郎: グレートベルト連絡路線, 橋梁と基礎, pp.110-112, 1990年8月
- 8) 神 弘夫: グレートベルトリンク, オーレスンリンク, pp.187-189, 橋梁と基礎, 1998年8月
- 9) A.Petersen, 山崎康嗣: グレートベルトイーストブリッジとケーブルの詳細設計, 橋梁と基礎, pp.18-26, 1994年1月
- 10) 藤本 朗: 国外のプロジェクト Faro 橋, 橋梁と基礎, p.187, 1990年8月
- 11) <http://www.cowi.dk/menu/project/Brotunnelogvandbygning/Broer/Skraastagsbroer/Documents/0233-1702-006e-low.pdf>

【2012年8月1日受付】

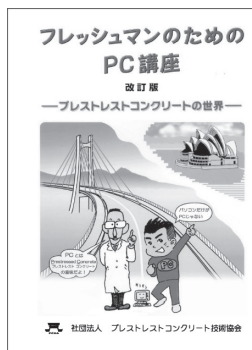


図書案内

フレッシュマンのための PC 講座・改訂版 — プレストレストコンクリートの世界 —

大変ご好評をいただいております「フレッシュマンのための PC 講座」も平成 9 年に第一版が発刊されてから約 10 年が経過いたしました。

その間に、基準値・規格値をはじめとした技術基準が従来単位系から SI 単位系に移行しました。また、プレストレストコンクリート構造物においても、複合構造等の新しい構造物が誕生しています。そこで、これらの項目を新しく見直して、改訂版を発刊することにいたしました。これからの技術者を育てるためには、大変有意義な図書であると確信しておりますので、是非有効利用されることをお勧めいたします。



主な改訂項目

- ・従来単位系から SI 単位系に変更しました。
- ・PC を利用した構造物の紹介に、最近の新しい構造物を盛り込みました。

発 刊 日：2007 年 3 月

定 価：3,600 円／送料 400 円／冊

会 員 特 価：3,000 円／送料 400 円／冊

体 裁：A 4 判, 140 頁

申 込 先：公益社団法人プレストレストコンクリート工学会