

耐久性向上のためのプレキャスト化という選択肢

二羽 淳一郎*

プレストレストコンクリート（以下 PC と略記）構造におけるプレキャスト化は、工期の短縮、現場作業の省力化、工場製作にともなう品質の向上等といった観点で、その卓越した特性が語られることが多い。しかしながら、耐久性の向上においてもその優位性は実証されている。将来の良質な社会インフラの形成を念頭におき、今後プレキャスト化という選択肢を積極的に活用していくことを検討すべきである。

キーワード：プレキャスト化, PC 構造, 耐久性向上

1. はじめに

2012 年 12 月の笹子トンネルの事故を契機に、わが国では社会インフラに対して、適切な維持管理を実施していくことの機運が高まってきた。国土交通省は道路構造物に対して、5 年に 1 回の近接目視点検を義務付け、また同時に道路構造物の点検・診断業務における民間資格の認定を開始した。本工学会の資格であるコンクリート構造診断士はコンクリート橋の点検と診断業務に、またプレストレストコンクリート技士は同じく点検業務に認定されることとなったのは周知のとおりである。社会インフラを取り巻く重要なキーワードが、新設ではなく、維持管理や耐久性となってきたことは、わが国の置かれた状況を考えると容易に理解できることである。

さて、今回の特集号のテーマである「プレキャスト技術」について考えてみる。プレキャストは、とくに目新しい技術ではなく、PC の濫觴の頃から存在していたものである。プレキャスト部材は、従来、工期短縮、現場作業の省力化、工場製作された部材を使用することによる品質の向上等の観点から、各種の工事や構造部材に適用されてきたものと思われる。しかし、そのみではプレキャスト技術に対するある特定の側面のみを評価するものであって十分ではないと筆者は考えている。つまり、プレキャスト化による PC 構造物の耐久性向上をもっと前面に出して、より積極的に評価していくべきであるということが本論の趣旨である。



* Junichiro NIWA

東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻・教授

2. プレキャスト化による耐久性向上事例

2015 年 5 月にフランスで Luzancy 橋とマルヌ 5 橋を見学する機会を得た。これらはいずれもフレシネーの設計によるものである。現地を訪れるのは 4 回目であったが、いつも感じるのは、これら建設後 70 年近くになる PC 橋群が何ら耐久性上の問題なく、現在もお普通に供用されているという事実に対する驚きである。これらはいずれもパリから東に 30 ~ 50 km 離れた地域に位置しており、マルヌ川を渡河するために建設されたフラットな PC アーチ橋であるが、いずれもプレキャスト部材を使用したものである。

Luzancy 橋（スパン 55 m, 幅員 8 m, アーチライズ 1.22 m）（写真 - 1）は他の 5 橋とは主桁の本数やスパン長が異なるが、5 橋に先駆けて 1946 年に架設されたものである。



写真 - 1 Luzancy 橋とその下面

3 本の箱桁はそれぞれ 22 個のプレキャスト部材によって構成され、PC 鋼材によって一体化されている。箱桁と箱桁の間はプレキャストスラブでつながれており、箱桁の上下フランジに配置された横締め PC 鋼材により、箱桁とスラブが一体化されている。桁の側面には、定着突起のコンクリートブロックが見える。写真 - 2, 3 は架設当時の様子であり、写真 - 4 は現在の Luzancy 橋である。まったく健全な状態であるのは前述のとおりである。

Luzancy 橋に続いて、フレシネーはマルヌ川にさらに 5 橋のフラットな PC アーチ橋を架設した。これらは、1947 ~ 1951 年にかけて順次架設されたものである。これら 5 橋の架設地点はそれぞれ異なるが、すべて同一の形状、同

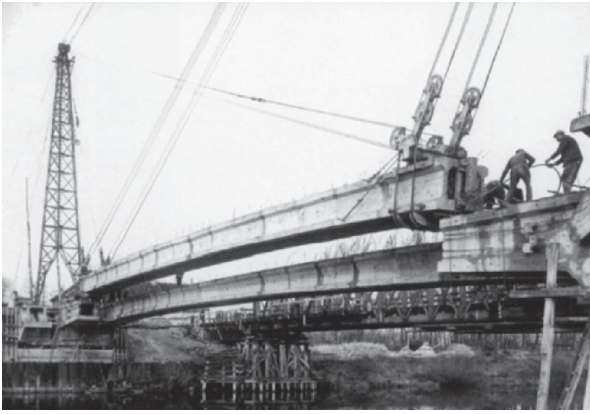


写真 - 2 桁の架設状況¹⁾

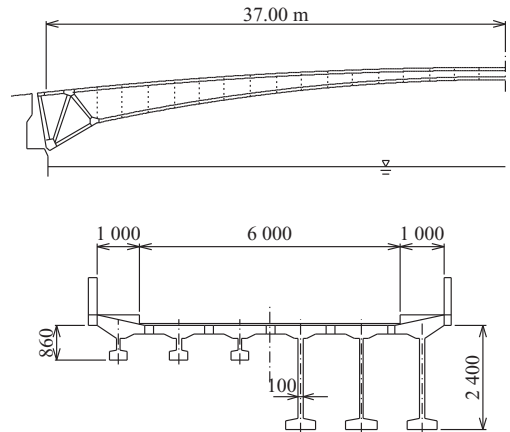


図 - 1 マルヌ5橋の構造一般図¹⁾

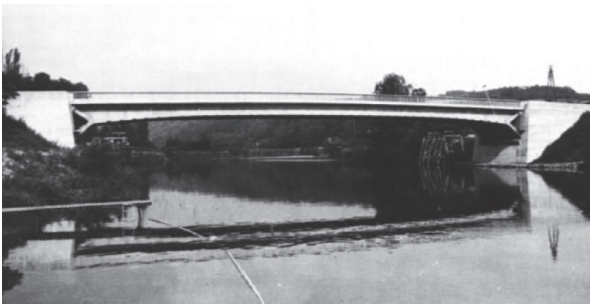


写真 - 3 完成 (1946年)¹⁾

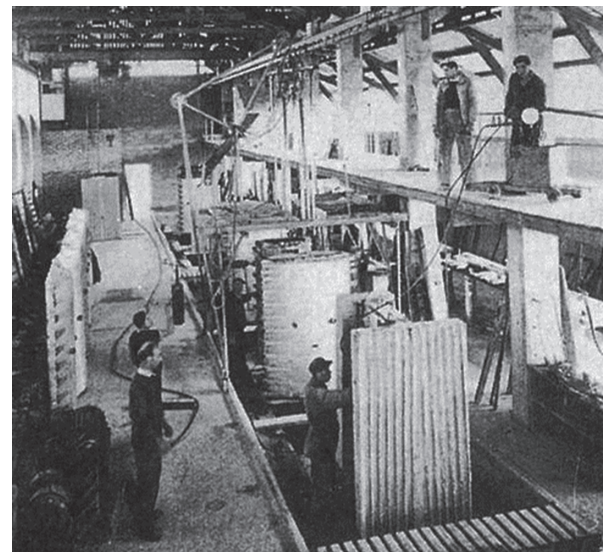


写真 - 5 プレキャスト工場での製作状況¹⁾



写真 - 4 現在のLuzancy橋



写真 - 6 架設状況¹⁾

一の寸法であるところに特徴がある。マルヌ川の上流側から、Ussy, Changis, Esbly, Trilbardou, Annetの5橋であるが、これらは、図 - 1 に示すように6本のI型桁から構成されている。スパン74 m、幅員8.4 mでアーチライズはわずか4.96 mのフラットなアーチ橋である。I型桁はEsbly橋架設地点付近の工場で製造された(写真 - 5)。架設用のPC外ケーブルによって主桁は6ユニットにまとめられ、マルヌ川を利用して舟運により架設位置まで運ばれた。架設にはケーブルクレーンが使用された(写真 - 6)。

なお、桁のせん断補強のためウェブにはプレテンション方式によりプレストレスが導入されている。この結果、I型桁のウェブ厚さはわずか100 mmに低減することが可能となっている。各I型桁はそれぞれ32個のプレキャストセグメントからなっており、各セグメントは長さ約2 m、重さ1.8～3.8トンである。1橋では32×6で192個のセ

グメント、5橋の総セグメント数は960個となる²⁾。

写真 - 7はマルヌ5橋内のChangis橋の現在の状況であるが、重大な損傷はまったく認められず、普通に供用されている。以上、紹介したように現在から70年も前にすでにこのように大々的にプレキャスト部材が使用され、しかもそれらが何ら重大な損傷もなく、現在も供用され続けているということは、プレキャスト技術の優秀性を実証し



写真 - 7 現在の Changis 橋

ているといえる。

3. 内外のプレキャスト化事例

フランスにおける過去の事例に続いて、内外のプレキャスト化の事例を 2, 3 紹介する。

3.1 羽田空港 D 滑走路棧橋部

羽田空港の年間の発着能力を増加し、発着容量の制約を解消し、利用者の利便を向上させ、さらには国際的な航空需要に対応するため、4 番目の滑走路である D 滑走路が 2010 年に竣工した (写真 - 8)。この D 滑走路は、従来の A および C 滑走路の沖合に北東から南西に向けて建設されたもので、A および C 滑走路と交差する形となっている。D 滑走路の北東側は埋め立てられた人工島となっているが、南西側は多摩川の河口にあたるため、河川の流れを阻害しないように、鋼製のジャケットの上に、コンクリート製の床版を敷設した棧橋構造となっている。このコンクリート製の床版部に、大量のプレキャスト PC 床版とプレキャスト UFC (超高強度繊維補強コンクリート) 床版が使用された。



写真 - 8 羽田空港

図 - 2 は棧橋部のコンクリート製床版部全体を示している³⁾。総面積は約 51 万 m² であり、このうち、青く着色された周辺部 (着陸帯と称されている) 約 20 万 m² がプレキャスト UFC 床版部であり、それ以外の滑走路、誘導

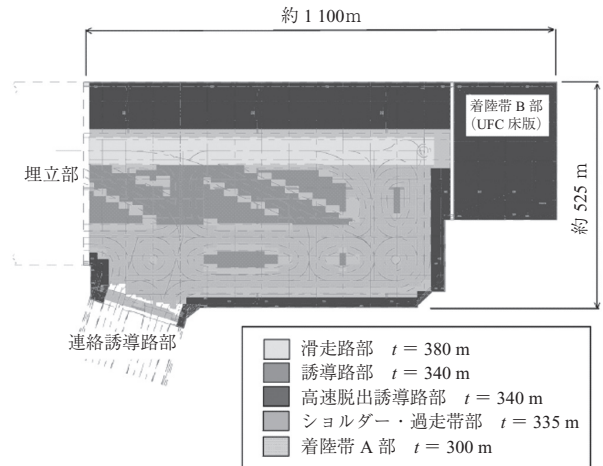


図 - 2 羽田空港 D 滑走路棧橋部区分³⁾

路等の約 31 万 m² がプレキャスト PC 床版部である。

羽田空港 D 滑走路は、わが国にとってもっとも重要な社会インフラの一つであることから、設計供用期間は 100 年とされた。この期間は基本的にメンテナンスフリーであることが望ましい。一方、海上に建設されているということと、航空機の離着陸による厳しい疲労の影響に対して、十分に耐久的事であることが求められる。耐久性に不安があり、補修・補強、あるいは更新が容易に予想され、将来の航空機の運航に支障を来すような構造は基本的に認められなかったのである。

厳格な工期の制限があったにせよ、ここで大量のプレキャスト PC 床版や UFC 床版が採用されたのは、その耐久性における優位性が評価されたからにほかならない。

プレキャスト PC 床版部は、その全体の 70 % が工場製作のプレキャスト床版であり、このプレキャスト床版同士が場所打ちの RC 構造で連続化された。工場で製作されたプレキャスト床版はジャケットの上に設置された鋼桁の格子のマス目に合せて敷設され、その間を場所打ちのコンクリートで間詰めされた。滑走路方向の鋼桁の上フランジにはずれ止めが配置されており、プレキャスト床版と鋼桁はこのずれ止めと間詰コンクリートを介して一体化された³⁾。プレキャスト PC 床版 (写真 - 9) の標準的な寸法は、おおよそ長さ 6.6 m × 幅 3.3 m × 厚さ 0.3 ~ 0.5 m で重量は

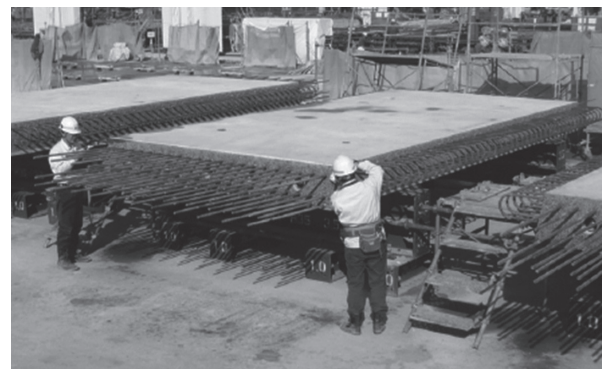


写真 - 9 完成したプレキャスト PC 床版³⁾

最大で約 25t である。これが全部で 10 697 枚製作され、D 滑走路の滑走路自体や誘導路等の重要な部分の建設に使用された³⁾。

一方、着陸帯にはプレキャスト UFC 床版が設置された。着陸帯は常時に航空機が走行することはない。万が一、航空機が逸走した場合にのみ走行の可能性のある部分である。ここでは、滑走路自体に要求されるような曲げ剛性は必要なく、むしろ下部構造に対する影響を小さくするため軽量で、長期耐久性の高いことが求められた。この条件にピッタリと当てはまるものが UFC である。

D 滑走路の栈橋部のうち、滑走路と誘導路等を除いた外側の約 20 万 m² のエリアに約 7 000 枚の UFC 床版(写真 - 10)が配置されることとなった⁴⁾。UFC 床版の標準的な寸法はおおよそ 7.8 m × 3.6 m であり、千葉県富津市に設けられた専用の製作工場において 2 方向プレテンション方式で製作された。使用された UFC の総体積は約 24 000m³ であり、一か所あたりの UFC の使用量としてはもちろん世界最大である。



写真 - 10 運搬されるプレキャスト UFC 床版

D 滑走路でこのように大量の UFC 床版が使用された具体的理由は、① UFC が高強度であるため(設計圧縮強度 180 N/mm²)、通常のコンクリート製の PC 床版と比較して断面を縮小でき、その結果、自重が約 50% に低減できること。またそれによって、栈橋部を支える鋼管杭や基礎構造の負担を減らし、基礎の鋼材量を大幅に削減できたこと、② 緻密な UFC の水和組織が塩化物イオンの浸透を防ぎ、鋼材腐食を防止するため、維持管理の問題を大幅に省力化できること、があげられる。このように使用目的がはっきりとしている場合、UFC は非常に有力な材料である。

D 滑走路は 2010 年 10 月から供用され、国内線のほか、国際線にも有効に利用されている。社会インフラ施設の耐久性向上とプレキャスト化が結びついた格好の事例である。

3.2 ドバイメトロ

アラブ首長国連邦(UAE)のドバイで、2010年3月に開業した新交通システムであるドバイメトロは、レッドラインとグリーンラインからなり、それぞれ 52.0 km、22.7 km で計 74.7 km あり、そのうちの高架橋区間は 46.5 km、14.6 km で計 61.1 km に及んでいる。

このプロジェクトのインフラ工事は、わが国の大手ゼネ

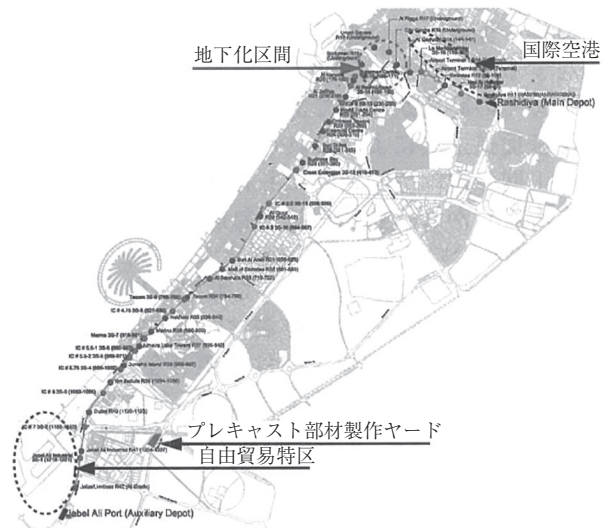


図 - 3 ドバイメトロの路線図⁵⁾

コン 2 社とトルコの会社との JV により実施された。

総延長 61.1 km、支間数 1 696 のドバイメトロでは、合計 15 895 個のプレキャストセグメントが製作された⁶⁾。

写真 - 11 はレッドラインの西側終点近くの約 50 万 m² のプレキャストセグメント製作ヤードで製作された標準主桁セグメントの仮置き状況である。通常は、このような標準型の主桁セグメント(長さ 4 m)を組み合わせて、長さ 28 m、32 m あるいは 36 m の主桁を製作し、スパンバイスパン方式で架設が行われた⁶⁾(写真 - 12)。しかし、他の道路等との交差状況によってはこれ以上の長さとなる場合



写真 - 11 標準主桁セグメントの仮置き状況



写真 - 12 主桁のスパンバイスパン架設

もあり、その際には曲げモーメントの増加に対応するため、標準型セグメントの下にさらに箱桁を設けた写真 - 13 に示すような特殊セグメントが製作され、支点部に配置された (写真 - 14)⁷⁾。



写真 - 13 特殊セグメント



写真 - 14 スパンが長い場合の支点部

なお、プレキャスト化は主桁だけではなく、橋脚の横梁にも適用された。橋脚横梁は、写真 - 15 に示すように複雑な 3 次元形状をしているのであるが、現場での作業をできるだけ省略するため、写真のようなプレキャスト型枠が製作され、これを現地で橋脚上に設置した後、内部をコンクリート充填して、横梁が構築された。

ドバイは基本的に砂漠の国であるが、年間を通して高温であり、またペルシャ湾沿いの沿岸地域は湿度も非常に高くなる。このため、鋼材の腐食に関しては非常に厳しい環境にある。また、湾岸諸国特有の問題である硫酸塩を含む骨材に対して、十分な抵抗性も求められる。



写真 - 15 橋脚横梁のプレキャスト型枠

場所打ちのコンクリートでは、これらの諸問題に対して、十分に対応することが困難な場合もあると思われる。これに対して、プレキャスト化を進め、独自の製作ヤード

で、十分に管理した材料を使用し、セグメントや埋設型枠を製作していくことにより、強度と耐久性に優れたコンクリート構造物の建設が実現できたものと思われる。工期の短縮のみに目が向きがちであるが、プレキャスト化により、この過酷な環境の地に安全で耐久的な社会インフラが建設できたことはわが国土木技術の大きな成果であるといえよう (写真 - 16)。



写真 - 16 運行中のドバイメトロ

3.3 桶川第 2 高架橋

PC 箱桁のコンクリートウェブを、プレストレスを導入した高強度繊維補強コンクリートパネルに置き換えて建設する事例が増えている。この高強度繊維補強コンクリートパネルは、設計基準強度が $f_{ck} = 80 \text{ N/mm}^2$ であり、パネル内に異形鉄筋は一切配置されていない。その代わりに、コンクリートに対する体積比で 0.5% (= 39.3 kg/m^3) の鋼繊維が混入されており、さらに PC 鋼材によりプレストレスが導入され、あたかも部材全体をダブルワーレントラスのように挙動させることができる (写真 - 17, 図 - 4)⁸⁾。



写真 - 17 仮置きされたバタフライウェブ

この結果、バタフライウェブパネル厚を 150 mm 程度に薄くできるので、従来の PC 箱桁に比較して、主桁重量を 10% 程度軽量化できる。このことは、PC 主鋼材数量の低減、支承の縮小、下部工への影響の低減、架設時の張出し長さの拡大等、さまざまなメリットに結び付き、その結果、有用な構造形式として、受け入れられるに至っている⁹⁾。これまでに東九州自動車道の寺迫ちょうちよ大橋や、新名

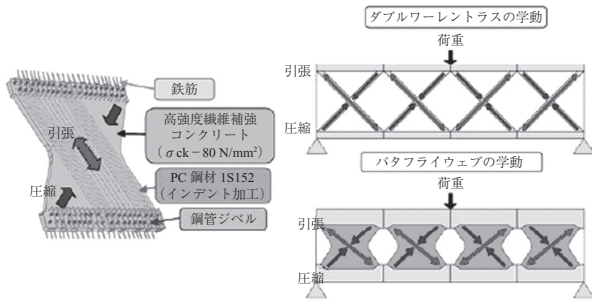


図 - 4 バタフライウェブの構造特性⁸⁾

神高速道路の武庫川橋などの実績がある。このバタフライウェブは、あらかじめ工場で製作されるものであり、プレキャスト部材であるが、箱桁全体をプレキャスト化するのではなく、その一部に利用するという点に特徴がある。

一方、2015年10月に開通した首都圏中央連絡自動車道(圏央道)の桶川北本ICと白岡菖蒲IC間にある桶川第2高架橋では、このバタフライウェブを使用したうえで、さらにプレキャスト化が図られている。寺迫ちょうち大橋や武庫川橋のように、PC箱桁のウェブにバタフライウェブを用いるだけでなく、PC箱桁の内、後打ちする上床版以外の部分をプレキャスト化し、張出し床版部にはリブを配置し、バタフライウェブ付き、リブ付きU形コアセグメントを製作するというものである(写真-18)¹⁰⁾。リブ付きU形コアセグメントはすでに新名神高速道路の古川高架橋で使用されているが、公道を運搬する要件をクリアするための、プレキャストセグメントの軽量化手法として、有力な方法であるといえる。



写真 - 18 バタフライウェブを用いたU形コアセグメント

桶川第2高架橋では、バタフライウェブを用いたリブ付きU形コアセグメントをスパンバイスパン架設していくことにより、大幅な工期短縮に貢献することができた(写真-19)。

写真-20は桶川第2高架橋の箱桁内部の状況であるが、当然のことながら、内部是相当に明るく、今後の維持管理においても容易であることが理解できる。写真-21は完成した桶川第2高架橋である。

この事例は、プレキャスト化の主たる目的が工期の短縮であったわけであるが、箱桁の出来上がりを見ると、設計基準強度80 N/mm²のバタフライウェブはもちろんである



写真 - 19 U形コアセグメントのスパンバイスパン架設



写真 - 20 箱桁内部の状況



写真 - 21 完成した桶川第2高架橋

が、その他の部分も設計基準強度50 N/mm²のコンクリートが使用されており、十分に耐久的であると判断される。

4. おわりに

プレキャスト技術は、フレシネーの例を見るまでもなく、とくに目新しい技術ではない。従来、工期の短縮や施工の省力化等の観点から採用されてきたプレキャスト技術を、耐久性向上の観点からも、もっと前向きに評価すべきとの趣旨から本論をまとめた。

その際に、プレキャスト化特有の問題である継目の一体化の問題が指摘されることも事実である。しかしながら、PC構造分野では、マッチキャスト技術、ならびにプレストレスの導入により、部材同士の一体化の問題には十分に

対応できる。さらに部材間で、異形鉄筋の一体化が求められる場合には、たとえばモルタル充填式の機械式継手も利用可能となっていることから、一体化の問題はもはや大きな障害にはならないものと思われる。是非、品質に優れたプレキャスト部材を使用して、良質な社会インフラの建設に努めてほしいと願うものである。

参考文献

- 1) J. A. Fernandez Ordonez (監訳 池田尚治)：PC 構造の原点 フレシネー，建設図書，2000
- 2) 池田尚治：コンクリートの活用による橋梁技術の展開，土木学会論文集，No.616/ IV-42, pp.1~11, 1999
- 3) 熊谷善明，武田哲郎，園田強介，栗田朋樹：プレキャスト床版の設計・製造 - 羽田空港 D 滑走路新滑走路島棧橋部プレキャスト床版 -，(株)ピーエス三菱技報，No.8, 2010
- 4) 大竹明朗，野口孝俊，大熊 光，横井謙二：羽田 D 滑走路工事における UFC 床版の製作，プレストレストコンクリート，Vol.52, No.1, pp.15~23, 2010

- 5) 大場誠道，伊藤隆吉，齋藤公生，山崎啓治：ドバイ・メトロプロジェクト高架橋建設におけるプレキャスト部材の広範な利用，プレストレストコンクリート，Vol.50, No.5, pp.6~11, 2008
- 6) 大場誠道，山崎啓治，岩城孝之，櫻田 爽：海外での日平均 26 個の主桁セグメントの製作 - ドバイ・メトロプロジェクト高架橋上部工工事 -，プレストレストコンクリート，Vol.51, No.3, pp.37 ~ 44, 2009
- 7) 大場誠道，片桐冬樹，神田晶平，加藤秀一郎：海外での架設術による月平均 1700 m セグメント架設 - ドバイ・メトロプロジェクト高架橋上部工工事 -，プレストレストコンクリート，Vol.52, No.1, pp.46 ~ 51, 2010
- 8) 三井住友建設：PC 設計 NEWS, No.167
- 9) 芦塚憲一郎，花田克彦，中積健一，片 健一：東九州自動車道（仮称）田久保川橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.46, No.11, pp.5~10, 2012
- 10) 樋本 智，池田裕司，中積健一，紙永裕紀：首都圏中央連絡自動車道 桶川第 2 高架橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.48, No.11, pp.5 ~ 12, 2014

【2016 年 1 月 12 日受付】



刊行物案内

会誌「プレストレストコンクリート」講座集 2015 年 10 月

本書は、当工学会が発行する会誌「プレストレストコンクリート」に掲載された連載記「講座」のバックナンバー（1963～2014 年）を系統的に整理して単行本化したものです。

「講座」では、プレストレストコンクリートに関連する材料、設計、施工、維持管理、数値解析等、多岐にわたる技術を取り上げ、各分野の専門家による当時の最新技術の紹介や適当な専門書がないテーマの解説がされています。この機会に、過去の貴重で良質な連載記事「講座」を体系的な知識習得にお役立てください。



冊子の構成

講座集 1.	建築編
講座集 2.	施工・品質管理編
講座集 3.	施工・品質管理編
講座集 4.	設計編
講座集 5.	材料編
講座集 6.	PC に関する試験および測定入門講座編
講座集 7.	PC の新しい材料入門講座編
講座集 8.	FEM 解析・耐震解析・温度応力解析編
講座集 9.	よくわかる補修・補強・非破壊検査編
講座集 10.	プレストレッシングの基本編
講座集 11.	わかりやすい PC 技術編

セット販売価格（全 11 冊 化粧箱入）
定 価 27,000 円＋税／送料 1,500 円
会員特価 22,000 円＋税／送料 1,500 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会