

観音寺高架橋の設計・施工について

曾田 信雄*1・高橋 広幸*2

1. まえがき

平成3年3月に供用を開始した舞鶴自動車道の福知山IC～舞鶴西IC間は、福知山ICから北西約3kmの位置で一級河川由良川と交差する。この位置は由良川の氾濫による水害恒襲地域であり、現河川上に由良川橋、左岸側に観音寺高架橋、右岸側に私市高架橋と、約1.2kmの区間を3つの高架橋群で横過する。本文では、このうちPRC連続2主版桁形式を採用した橋長751mの観音寺高架橋の設計と施工について報告する。

2. 橋梁概要

路線名：近畿自動車道敦賀線
 位置：福知山～綾部間
 道路規格：1種3級A
 橋種：プレストレストコンクリート道路橋
 橋格：一等橋
 橋長：751m
 有効幅員：9.0m
 構造形式：PRC3,4径間連続2主版桁橋
 基礎形式：場所打ち鉄筋コンクリート杭基礎
 架設工法：支保工による場所打ち工法
 PC工法：アンダーソン工法、フレシネー工法
 適用示方書：道路橋示方書、昭和53年1月

コンクリート標準示方書、昭和61年制定

発注者：日本道路公団大阪建設局
 受注者：住友建設(株)・ピーシー橋梁(株)近畿自動車道観音寺高架橋(PC上部工)工事共同企業体

3. 設計概要

3.1 橋梁形式の選定

架橋地点は由良川の氾濫によって開けた沖積低平地である。水害の恒襲地域であるため、河川改修計画が進められているものの、水害を防ぐにはまだ時間を必要とするため、橋台位置については過去の水害および不等流計算結果から氾濫域を避けて決定した。また、過去に床上浸水を起こしていない10年確率の高水流量に対して床上浸水を起こさないこと、ならびに洪水時に流木の流下を阻害しないことを念頭に、平均径間長を28mと決定した。

その結果、経済性・施工性を考慮して、PRC連続2主版桁形式を採用することとした。

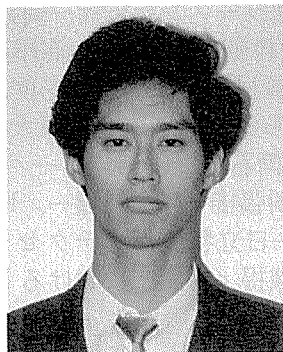
3.2 設計方針

本橋を設計する時点では、国内のPRC道路橋はわずか4例しかなく、昭和60年度に(財)高速道路調査会によって「PRC道路設計要領(案)」が策定されているものの、PRC道路橋の設計方法が確立されているとはいえなかった。そこで本橋の設計にあたっては、①PRC構造である、②2主版桁である、③連続構造であることなどの特徴に着目して、本橋独自の設計方針を立てることとした。

PRC部材の設計に際して、PC部材と比較した場合に、特にひびわれ制御と疲労に対する照査が重要となる。これらの項目について合理的かつ安全に設計を行うためには、現在の道路橋示方書の基礎となっている許容応力度設計法では不十分であると考え、限界状態設計法を適用することとした。したがって、部材の設計には、使用限界状態においては断面のひびわれおよび応力度に対して、疲労限界状態においては引張鋼材応力度に対し



*1 Nobuo SODA
 日本道路公団
 大阪建設局構造技術課



*2 Hiroyuki TAKAHASHI
 日本道路公団
 東京第一建設局
 小田原工事事務所

て、終局限界状態においては断面の破壊に対して、それぞれ安全性を確認するものとした。

3.3 断面力の算出

(1) 解析手法

2主版桁は、2本の主桁を荷重分配版としての床版で結合した、桁橋と版橋の両方の力学的性質を有する構造形式である。その構造解析にあたっては、各種の簡易解析法が用いられ、統一されていないのが現状であった。一般には、床版、主桁などの解析に対応して、Bieger理論、Pucher理論、格子理論、梁理論などを使い分けられている場合が多い。例えば、道央自動車道の北郷・白石高架橋では、床版の橋軸直角方向に対してBieger理論を、主桁については梁および格子理論をそれぞれ用いている¹⁾。

このような状況の中で、観音寺高架橋では、床版の橋軸直角方向について平面ラーメンでモデル化し、主桁については梁および格子理論を用いて解析を行うこととした。これについては、3次元有限要素解析の結果をもとに、床版についてはBieger理論、Pucher理論、梁理論を、主桁については梁理論、格子理論をそれぞれ5～6断面力で比較し、解析精度および簡便性などを考慮して決定した。

(2) 曲げモーメントに対するフランジの有効幅

2主版桁の設計に際して先の解析手法を用いる場合、フランジの有効幅を決定しておく必要がある。一般に、

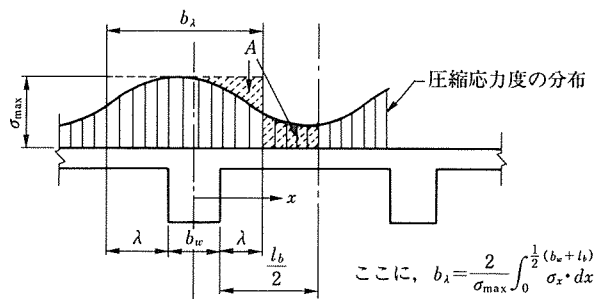


図-1 主桁断面の圧縮応力分布

フランジを有する桁に発生する曲げ応力は、フランジ部で図-1のように分布する。設計に用いる有効幅を決定するための検討において、簡単のため、図-1中の面積Aが等しくなるような幅を真の有効幅と仮定した。ただし、フランジの曲げ応力分布は、有限要素法を用いた構造解析によって得られるものとする。

各荷重ケースに対して得られた曲げモーメントに対する有効幅と道路橋示方書²⁾による有効幅算出方法および格子計算の各断面力よりインフレクションポイントに着目して求める方法(簡易法)による有効幅とを比較したものを表-1に示す。

側径間と中央径間の圧縮フランジについては、道路橋示方書の算出方法によると全幅有効となっているが、有限要素解析の結果から得られた有効幅についてはすべての荷重ケースに対して全幅有効とはなっていない。一方、中間支点上の引張フランジについては、どの方法によっても全幅有効とはなっておらず、道路橋示方書の算出方法による有効幅に比べて有限要素解析の結果から得られた有効幅は小さい値となっている。以上のことから、道路橋示方書の算出方法はここで仮定した真の有効幅より大きめの値を与えると考えられるため、本橋の設計において、使用限界状態および疲労限界状態の検討を行う場合には道路橋示方書の算出方法によって得られる有効幅の90%値を用いるものとした。ただし、終局限界状態の検討を行う場合には、道路橋示方書の算出方法によって求められる有効幅とし、その引張フランジ内の引張鋼材はすべて有効とした。

3.4 ひびわれ

(1) ひびわれの制御

PRCの設計では、コンクリートのひびわれを許容幅以内に制御することにより、必要な安全性を確保しつつPC鋼材を鉄筋に置き換えることを可能とした、より経済的で合理的なコンクリート構造物の設計を目的としている。したがって、設計上最大の問題は、コンクリート

表-1 曲げモーメントに対するフランジ片側有効幅の比較

(単位: m)

最大有効幅 張出し側: 1.80 中央側: 1.95		フランジの片側有効幅					
		側 径 間		中 間 支 点		中 央 径 間	
		張出し側	中央側	張出し側	中央側	張出し側	中央側
有限要素法解析 有効幅算出方法	自重 (D ₁)	1.73	1.89	1.38	1.54	1.62	1.83
	橋面荷重 (D ₂)	1.71	1.57	1.48	1.71	1.48	0.47
	活荷重 (L)	-	-	1.45	1.43	-	-
	D ₁ +D ₂ +L	1.67	1.86	1.42	1.54	1.67	1.85
	プレストレス	1.74	1.90	1.57	1.75	1.53	1.72
	道路橋示方書の算出方法	(2.95) 1.80	(2.29) 1.95	1.56	1.56	(2.29) 1.80	(2.29) 1.95
簡易法	(2.95) 1.80	(2.95) 1.95	(1.82) 1.80	1.82	(1.80) 1.80	1.80	

※ ()内は計算値を示す。最大有効幅を超えているので最大有効幅で表示。

のひびわれをどのように制御するか、である。

世界で初めて公式に PRC について記述した設計基準は、1968 年に発行されたスイスの SIA 162 であり、ここでは、鉄筋の引張応力が 150 N/mm^2 を超えないことでひびわれ幅を制御することになっている。また、わが国においては、例えば、北海道の上姫川橋の場合には破壊に対しては鉄筋コンクリート構造として設計され、奈良県の桜井線ボケラ B 橋の場合には鉄筋の応力度を 1000 kg/cm^2 以下におさえることでひびわれ幅を制御している。これらの間接的なひびわれ制御に対して、本橋の設計では、引張鋼材のかぶり、間隔、応力などからひびわれ幅を推定し、それが許容ひびわれ幅以内となるように設計するものとした。

ただし、架設が積雪寒冷地帯であることを考慮して、中間支点上では、ひびわれを発生させず、コンクリートの引張応力がコンクリート標準示方書の引張強度以下になるように定めた。その結果、PC 鋼材の本数は中間支点上の引張応力で決定している。

また、観音寺高架橋が腐食性環境にないことから、コンクリート標準示方書³⁾に基づいて、許容ひびわれ幅を $0.005c$ (cm) とした。ここで、 c は引張鉄筋の純かぶり (cm) である。

(2) 曲げひびわれ幅の推定

コンクリートの曲げひびわれ幅については、前 3.3 節に基づいて得られる断面力をもとに、コンクリート標準示方書に示される次式によって推定することとした。

$$\omega = k_1 \{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se} + \varepsilon_{cs}}{E_s} \right] \dots\dots (1)$$

$$S_e = S_p + k_2 \cdot S_r \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

ω : ひびわれ幅 (cm)

k_1 : 鉄筋の付着性状を表す定数。一般に、異形鉄筋の場合には、1.0 としてよい。

c : かぶり (cm)

C_s : 鉄筋の中心間隔 (cm)

ϕ : 鉄筋径 (cm)

σ_{se} : S_e によって生ずる鉄筋応力度の増加量 (kgf/cm^2)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (kgf/cm^2)

ε_{cs} : コンクリートのクリープ・乾燥収縮ひずみ

S_p : 永久荷重による断面力

S_r : 変動荷重による断面力

k_2 : 永久荷重によるひびわれ幅と変動荷重によるひびわれ幅が鋼材の腐食に及ぼす影響度の差を考慮するための定数

である。なお、本推定式を用いるにあたって、実際のひびわれ幅がこの推定式により得られるひびわれ幅を上回

らないことを模型実験によって確認している。

なお、式 (2) の中の k_2 は、変動荷重の持続性や頻度を考慮して決定し、その値の範囲は 0.5~1.0 であり、変動荷重の頻度に比例して設定するのがよいとされている。PRC 構造は、死荷重に対してひびわれが発生しないように設計されるため、ひびわれに与える活荷重の影響が死荷重のそれに比べて特に大きいと考えられる。そこで、本橋の設計にあたっては、 $k_2=1.0$ とした。

3.5 曲げモーメントに対する安全性の照査

(1) 使用限界状態

使用限界状態については、コンクリート・鋼材の応力度およびコンクリートのひびわれ幅を制限することで安全性を確保する。具体的には、全死荷重に対する鋼材の増加応力を、①異形鉄筋については 1200 kgf/cm^2 以下、②PC 鋼材については 1000 kgf/cm^2 以下、とする。また、コンクリートの推定ひびわれ幅を許容ひびわれ幅以下に抑え、かつ中間支点付近のコンクリートの引張応力を設計引張強度以下に抑える。

(2) 疲労限界状態

疲労限界状態については、疲労荷重 (TT-43) により引張鉄筋および PC 鋼材に発生する変動応力が設計疲労強度以下となるように制限する。ただし、鉄筋および PC 鋼材の設計疲労強度は「PRC 道路橋設計要領(案)」の算出式によることとした。

(3) 終局限界状態

終局限界状態については、設計曲げ耐力の設計曲げモーメントに対する比が 1.0 (構造物係数) 以上であることで、断面破壊に対する安全性を確認する。設計曲げ耐力についてはコンクリート標準示方書に、設計曲げモーメントについては道路橋示方書に、それぞれよるものとした。

3.6 設計結果

観音寺高架橋の設計結果のうち、代表的な 3 径間連続 2 主版桁について、PRC 構造と PC 構造の比較を表-2 に示す。また両者の主桁断面図を図-2 に示す。

中間支点上では、PRC 構造のプレストレス導入度が約 0.65 となり、使用限界状態時の上縁側のコンクリート引張応力度で、PC 鋼材本数が決定した。また、PRC 構造の使用状態時の側径間中央付近のコンクリート下縁の引張応力度は、約 40 kgf/cm^2 となり、ひびわれ発生が予想される。そのひびわれ幅は、標準示方書の推定式によれば最大で 0.28 mm 程度であり、許容ひびわれ幅 (0.30 mm) 以下となっているので、耐久性は問題ないと考えている。

PRC 構造の疲労限界状態時の鋼材の変動応力度は、鉄筋で 480 kgf/cm^2 、PC 鋼線で 370 kgf/cm^2 となっており、いずれも設計疲労強度 (鉄筋で 1055 kgf/cm^2 、

表-2 PC 構造と PRC 構造の比較

項 目	PRC 構 造		PC 構 造		
	側 径 間	中 間 支 点	側 径 間	中 間 支 点	
使用状態モーメント M_{d+t}	1 137 tf・m	-1 230 tf・m	1 147 tf・m	-1 168 tf・m	
主桁 PC 鋼材本数 (PC 鋼より線 12-φ12.4 mm)	12 本	12 本	24 本	24 本	
断 面 係 数	0.955 m ³	1.804 m ³	0.928 m ³	1.753 m ³	
プレストレス効果	89.1 kgf/cm ²	44.4 kgf/cm ²	134.5 kgf/cm ²	75.0 kgf/cm ²	
デコンプレッション・モーメント M_{dec}	851 tf・m	801 tf・m	1 248 tf・m	1 315 tf・m	
プレストレス導入度 M_{dec}/M_{d+t}	0.748	0.651	1.088	1.126	
有 効 係 数	0.899	0.905	0.858	0.844	
使用状態 PC 鋼材応力度	110.7 kgf/cm ²	95.3 kgf/cm ²	97.0 kgf/cm ²	83.3 kgf/cm ²	
引張側配置鉄筋	主桁 D 29	主桁 D 25 床版 D 22	主桁 D 16	主桁 D 16 床版 D 16	
活荷重作用時コンクリート 応力度 (kgf/cm ²)	上 縁	49.3	-23.3	52.3	8.3
	下 縁	-40.2	95.7	5.1	76.8
曲げひびわれ幅	0.28 mm	引張応力度で制限	-	-	
疲 勞 荷 重 時 設 計 荷 重 時	PC 鋼材	3.7 kgf/cm ²	3.2 kgf/cm ²	-	-
	鉄 筋	476 kgf/cm ²	386 kgf/cm ²	-	-
終局時抵抗モーメント	2 158 tf・m	1 889 tf・m	2 835 tf・m	1 810 tf・m	

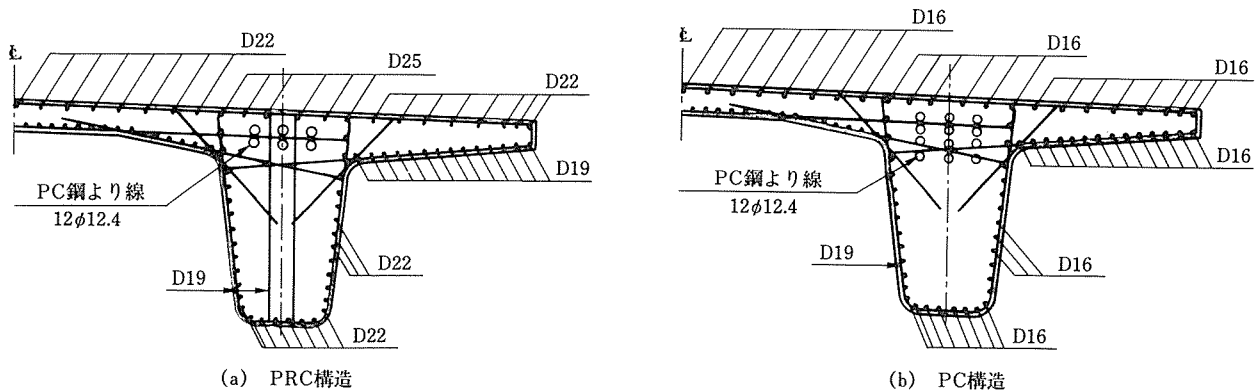


図-2 PRC 構造と PC 構造の鋼材配置断面図 (中間支点上)

PC 鋼材で 790 kgf/cm²) 以下であるので、疲労に対しても十分に安全となっている。

4. 施 工

4.1 概 要

観音寺高架橋の全長 751 m は 27 径間からなり、3 ある

いは 4 径間連続の 2 主版桁を基本とした PRC 構造となっている。ただし、A₁~P₀ 間は PC 単純ポステン T 形桁、P₈~P₁₀ 間は PC 2 径間連続 2 主版桁となっている。

架設は支保工による場所打ち工法とし、基本的に、①支保工・型枠の組立、②鉄筋・PC 鋼材の組立、③コン

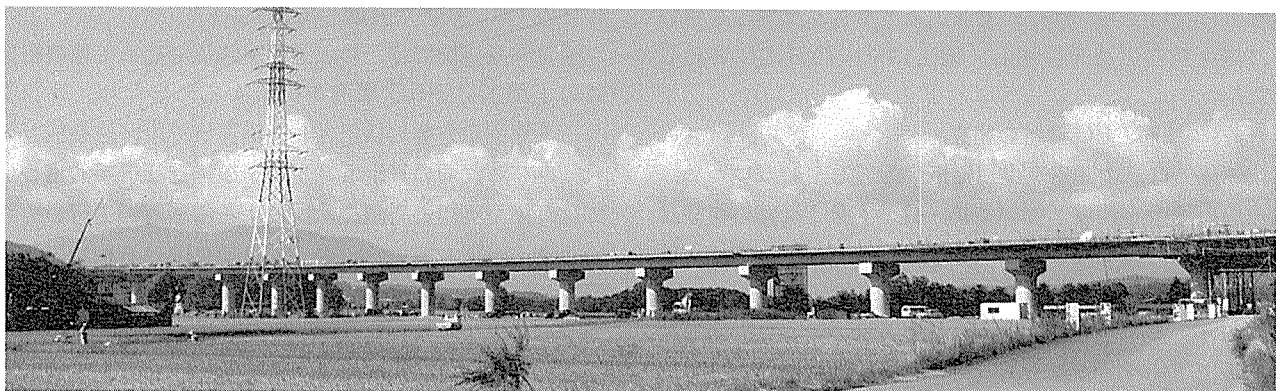


写真-1 側面遠景 (橋面工施工中)

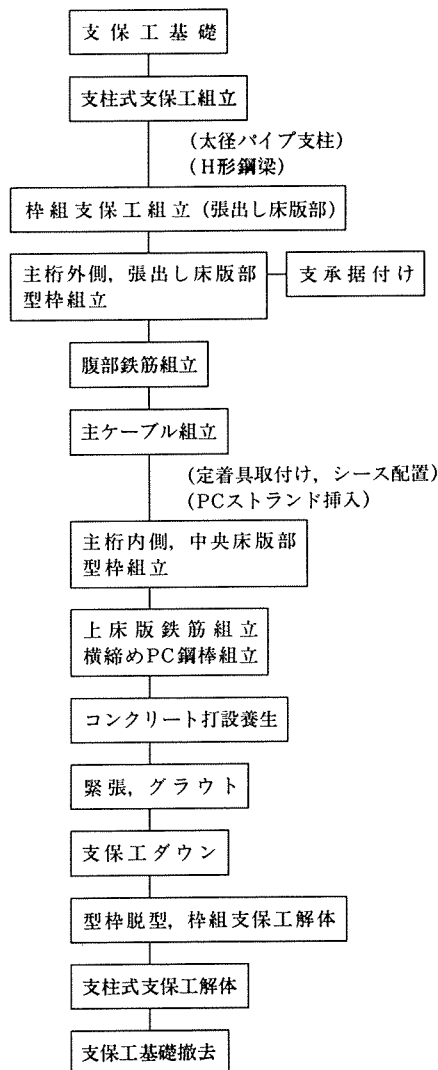


図-3 施工フローチャート

クリート打設, ④緊張, ⑤橋面工の順で施工する。施工フローを図-3に示す。このように, 施工方法は一般のPC構造物と同様である。

4.2 支保工および型枠

支保工については, 地盤支持力を検討した結果, H鋼杭を基礎とした支柱式支保工あるいは地盤改良を併用した支柱式支保工を用いることにした。また, JR山陰本線についても, 支柱式支保工とトラス式支保工を用いた場所打ち工法を採用し, 施工はJR西日本に委託した。

4.3 鉄筋・PC鋼材の組立

本橋では, 中間支点上に横桁を配置していないため, 一般の場合と比較して, 型枠・鉄筋・PC鋼材の組立は容易になっている。また, 桁高が2mと高いため, 鉄筋およびPC鋼材の組立作業はスターラップ内で行われることになる。そのため, ウェブ下縁の太径鉄筋の圧接桁下で予め行っておくようにした。

PC鋼材については, 主桁にはフルプレストレスで設

計した場合の半分のPC鋼材しか配置されないため, 比較的作業量が少なくすむ。しかし, 床版にはc/c 600で橋軸直角方向にPC鋼棒が配置されるため, 主桁に比較して施工性は悪い。

4.4 コンクリート打設

コンクリート打設はポンプで行った。PRC区間については, 1日の打設量が最大800m³程度であり, その場合の打設時間はおよそ13時間であった。

また, 養生には養生マットを床版面に敷いた湿潤養生を採用した。

4.5 緊張

主桁の主鋼材であるPC鋼より線を1主桁に対して6本配置し, 両引きで緊張を行った。緊張管理は摩擦係数管理によった。

また, 床版にはPC鋼棒を橋軸直角方向に配置し, 主桁のPC鋼より線の後に緊張を行った。

4.6 橋面防水工

観音寺高架橋では, 中間支点上のコンクリートに発生する引張応力を許容引張応力度以下に制限することで, 橋面にひびわれが発生することを制御しているが, 積雪寒冷地帯であることも考慮して, 橋面コンクリートに引張応力が生じる範囲に橋面防水を施すこととした。

一般に, 鉄筋コンクリート床版に適用される防水層はシート系防水層, 塗膜防水層および舗装系防水層の3つに分類される。ここでは, 不透水性が高く実績の多いシート系防水層を用いた。その施工に際しては, 「道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料」⁴⁾に基づき, 床版面のレイタンス, 塵埃, 油脂などの有害物を除去した後に接着層および防水層の施工を行った。

5. あとがき

1928年にフランスのE. FreyssinetがPC構造物を提案して以来, 近代PCの歴史が始まった。さらに, 1961年に横道博士により, RCに比較的低いレベルのプレストレスを導入することでひびわれを制御するプレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)の概念が提案され, 今日のPRC技術が発展してきた。

観音寺高架橋では, わが国の道路橋で初めて連続桁形式の上部工にPRC構造を採用するに当たり, コンクリート標準示方書に採用された限界状態設計法を取り入れ, ひびわれ幅の算定と2主版桁の構造解析手法については, 模型実験と有限要素法による構造解析を行いその妥当性を確認している。さらに実橋における載荷試験を行い, ひびわれの大きさ, 性状, 2主版桁の偏載荷重に対する荷重分配効果等の確認も行っている。

これらの成果が, プレストレストコンクリート設計技術の発展に貢献すれば幸いである。

最後に、本橋の設計および施工にあたって、ご指導およびご検討いただいた「観音寺高架橋（上部工）のPRC適用に関する調査研究委員会」（委員長：西澤紀昭・中央大学教授）の委員ならびに幹事の皆様に、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高速道路技術センター：観音寺高架橋（上部工）のPRC適用に関する調査研究（その4）報告書，1991年3月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1978年1月
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書，1986年10月
- 4) 日本道路協会：道路橋鉄筋コンクリート床版防水層設計・施工資料，1987年1月

【1992年8月12日受付】

◀刊行物案内▶

PC プレキャスト部材

本書は、プレストレストコンクリート第33巻特別号として刊行されたもので、最近のPCプレキャスト部材の概要・特色を分野別に分類し紹介したものです。

体 裁：B5判 162頁

頒布価格：3 000 円（送料：350 円）

内 容：〈総論〉PCプレキャスト部材の展望 〈道路〉概論／プレテンション方式プレストレストコンクリート橋桁／軽荷重スラブ橋用プレストレストコンクリート橋桁／ポストテンション方式プレストレストコンクリート橋桁／PC合成床版工法／PPCS工法／プレキャスト床版／PCスノーシェッド（逆L型）／PCスノーシェルター（アーチ型）／ロックシェッドプレキャストPC部材／ボルト連結式ロックシェッド／ドーピーシェッド／キャンティール工法 〈鉄道〉概論／PCマクラギ／軌道スラブ／ 〈建築〉概論／ダブルTスラブ／FC板スラブ工法／CS版／ π スラブ／CSTスラブ／DV合成スラブ／KS合成スラブ／DTアーチ合成スラブ／FPC合成スラブ／アサノダイナスパン合成床工法／スパンクリート合成床工法／高層PCラーメン組立工法 プレストレス圧着接合による柱自立工法 〈地下〉概論／プレストレストコンクリート矢板／既成コンクリート杭／PCウェル工法／AJパイル／PCボックスカルバート／プレキャストボックスカルバート／プレキャストコンクリート共同溝／PCフレーム／KKEクロスビーム／PC-壁体／プレキャストPC可撓性樋管／地中横断構造物構築工法（非開削工法）PCR工法用PCR桁 〈海洋〉概論／PC栈橋用プレキャストホロー桁／フローティングピアシステム／ベイテックポンツーンシステム 〈その他〉PCプレキャスト版舗装／プレキャストPCタンク／防火用水貯水槽 TAR耐震性貯水槽