

PC床版の押抜きせん断強度

浜田 純夫*

1. まえがき

プレストレストコンクリート(PC)床版の強度は押抜きせん断が最も支配的な破壊パターンになることはよく知られている。しかし、PC床版の押抜きせん断強度に関する研究は国内外ともに少ない。PC床版の押抜きせん断強度に関する研究は始まったばかりであり、過去に行われた実験供試体数も少なく、静的強度試験、疲労強度試験ともに十分な研究がなされていないように思える。また、従来は鉄筋コンクリート(RC)床版の使用例が多く、PC床版の使用例は現在のところ少なく、今後期待されているものである。

しかしながら、押抜きせん断耐力に関してはPC床版もRC床版の一部と見なして、その評価式を作る必要がある。RC床版の押抜きせん断強度に関する研究は国内外で多くなされており、基本的にはコンクリート部分の抵抗面積(鉄筋比を含める)とコンクリートのせん断強度あるいは引張強度を乗ずることによって求められている。抵抗面積については、土木学会コンクリート標準示方書¹⁾の耐荷力のようスラブの抵抗する深さとして有効高さを用いている評価式と、松井らのようにひび割れの生じていない深さと床版下縁のかぶり部分を有効とみなしている評価式とがある²⁾。

PC床版では、荷重が小さければ当然ひび割れは生じない。また、一般には設計荷重に対してもひび割れは生じないように設計されている。一方、RC床版は荷重の大小にかかわらず、ひび割れは生じ、その深さは鉄筋コンクリートの力学から計算されている。それに対し、PC床版のひび割れ深さは荷重の増加とともに大きくはなるものの、直線的な比例関係とはならない。さらに、PC床版は鉄筋量も少なく、耐荷力の評価式として有効高さを用いることは論理的に合致しない。

本稿においては、RC床版とPC床版の押抜きせん断強度のメカニズムに関する比較を行い、PC床版の押抜きせん断強度の検討を行うこととした。

2. 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断強度

PC床版の押抜きせん断強度はRC床版の押抜きせん断強度の応用として考えることができよう。したがって、RC床版の押抜きせん断強度から検討することにしよう。過去において、RC床版の押抜きせん断強度に関する研究は極めて多い。多くの実験と同時に、強度の推定式も多く提案されている。1981年に小柳³⁾はそれ以前の研究について詳しく解説を行っている。さらにその後、角田⁴⁾および松井らの広範な実験および研究が行われた。

床版の押抜きせん断強度は二、三の考え方がある。その代表的な研究は角田および松井によって行われている。角田は多くの実験を行うとともに押抜きせん断強度の評価式を提案した。松井は橋梁床版を対象に大きい床版の押抜きせん断実験を行い、従来とは考え方の異なる評価式を提案した。いずれの評価式も実験値によく合い、海外の研究者よりもさらに精度がよい。彼らの押抜きせん断耐力 P の評価式を以下に示そう。

角田は自身の多くの実験とともに海外の実験結果を基に次式を提案した。

$$P = 0.674(u + 3\pi d) d \sqrt{\sigma_{ck}} \left(1 + 0.5 \frac{p \sigma_{sy}}{\sqrt{\sigma_{ck}}}\right) / \left(1 + \frac{d}{20}\right) \dots (1)$$

ただし、 $p \sigma_{sy} / \sqrt{\sigma_{ck}}$ が3.33より大きいとき、この値は3.33とする。ここで u は載荷板周長、 p は鉄筋比、 σ_{sy} は鉄筋の降伏強度、 σ_{ck} はコンクリート圧縮強度、および d は有効高さである。

角田は床版の押抜きせん断の深さとして有効高さの d を選んでいる。一方、松井は図-1のように中立軸より上のひび割れの生じていない部分と、ダウエル効果としてかぶり部分のコンクリートの引張強度が有効であると仮定して次式を提案した。

$$P = \tau_{smax} \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + \sigma_{tmax} \{2(4C_m + 2d_d + b)C_m + 2(a + 2d_m)C_d\} \dots (2)$$

- a, b : 載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の辺長(cm)
- x_m, x_d : 主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸深さ(cm)
- d_m, d_d : 主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ(cm)
- C_m, C_d : 主鉄筋および配力鉄筋からのかぶり厚さ(cm)
- $\tau_{smax}, \sigma_{tmax}$: コンクリートの最大せん断応力度
最大引張応力度(kgf/cm²)

また土木学会標準示方書を参考にすると、設計押抜きせん断耐力 P_d は以下のように表される。

$$P_d = \beta_a \beta_b \beta_r \cdot f_{pcd} u_p d / \gamma_b \dots (3)$$



* Sumio HAMADA
山口大学 工学部
社会建設工学科教授

$$f'_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} \quad (\text{ただし } f'_{pcd} \leq 1.2 \text{N/mm}^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}, \quad \beta_p = \sqrt[3]{100P}$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

f'_{cd} はコンクリートの設計圧縮強度、 u_p は設計断面の周長で、載荷面から $d/2$ 離れた位置で算定したもの、および γ_b は部材係数である。

ACI Building Code⁵⁾では極めて簡単に与えられているが、その精度は極めて悪い(Gardner⁶⁾によれば変動係数22%)。最近Gardnerは過去の多くの実験から後述の式を提案して、その変動係数が13.5%であることを報告している

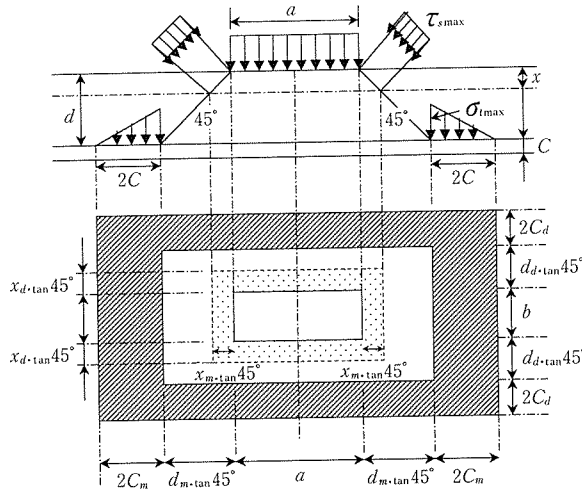


図-1 松井らの提案式が仮定した応力分布

が、角田(変動係数10.4%)や松井(変動係数10.2%)の提案式の精度を超えるものではない。ちなみに角田の研究によればElsner-Hognestad, Whitney, Moe, およびYitzhakiの変動係数はそれぞれ19%, 24%, 18%, および17%となっている。

また、プレストレストコンクリート床版の押抜きせん断耐力に適用する際に、比較的容易に適用できるのは松井の考え方と思われる。というのは、松井はあくまでも押抜きせん断耐力は中立軸までの深さと、かぶりの厚さを対象にしている。これはプレストレストコンクリート床版に対しても同じ考え方が成り立つものと思われることによるものである。

3. PC床版の押抜きせん断強度の既往の研究

前述のように、PC床版の押抜きせん断耐力に関する研究あまり多くない。「コンクリート工学年次講演会」および「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」において発表された実験供試体および押抜きせん断耐力を表-1に示す。

石橋ら^{7), 8)}はプレストレス量と供試体のサイズを変えて実験を行った。浜田ら^{9), 10)}は2種類のサイズの異なる供試体を数個ずつ実験するとともに、継ぎ目を有する供試体についても実験を行っている。

石橋らはプレストレストコンクリート床版の押抜きせん断強度として、コンクリート標準示方書を次のように修正した式を提案した。

表-1 過去のPC床版の実験供試体および実験結果

(a) 石橋ら, 浜田らの供試体条件

文献	供試体	辺長 (cm×cm)	厚さ (cm)	スパン (cm×cm)	有効高さ (cm)	鉄筋径-間隔 (cm-cm)	鉄筋比 (%)	プレストレス (kgf/cm ²)	最大荷重 P_{max} (tf)
7), 8)	A-1	165×165	20	150×150	16.2	D13-10.0	0.782	0	44.2
7), 8)	A-2	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	10	59.0
7), 8)	A-3	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	20	60.0
7), 8)	A-4	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	40	65.0
7), 8)	A-5	〃	〃	〃	15.6	D19-10.0	1.873	0	57.5
7), 8)	A-6	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	10	65.0
7), 8)	A-7	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	20	63.5
7), 8)	A-8	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	40	65.0
7), 8)	B-1	115×115	15	100×100	12.0	D10-10.0	0.594	0	27.3
7), 8)	B-2	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	10	37.7
7), 8)	B-3	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	20	45.5
7), 8)	B-4	〃	〃	〃	〃	〃-〃	〃	40	45.3
9), 10)	PCS1	120×120	16	110×110	—	—	—	45.5	62.0
9), 10)	PCS2	〃	〃	〃	—	—	—	〃	63.9
9), 10)	PCS3	130×130	13	120×120	—	—	—	43.8	31.6
9), 10)	PCS4	〃	〃	〃	—	—	—	〃	37.1
9), 10)	PCS5	〃	〃	〃	—	—	—	〃	32.0
9), 10)	PCS6	〃	〃	〃	—	—	—	〃	32.0
9), 10)	PCJ1	120×120	16	110×110	—	—	—	45.5	50.2
9), 10)	PCJ2	〃	〃	〃	—	—	—	〃	50.6

(b) 松井らの供試体条件

床版タイプ	床版厚 (cm)	コンクリート(kgf/cm ²)		プレストレス(kgf/cm ²)		実験値 (tf)
		σ_c	E_c	橋軸方向	橋軸直角方向	
文献 16)	18	598	3.44×10^5	34	0	101.5
文献 17)	18	576	3.30×10^5	40	69	140.0

$$P = \beta_n P_{RC} \dots \dots \dots (4)$$

$$\beta_n = 1 + 2M_o/M_u$$

ただし、 $\beta_n \leq 1 + 0.35(1/p)^{1.2}$

で、プレストレス効果の有効係数であり、鉄筋量によりその効果の異なることを示している。

P_{RC} はRC床版の押抜きせん断強度

M_o は載荷直下のプレストレスを消去する曲げモーメント

M_u は載荷中心点における2方向の曲げ破壊耐力の平均値

p は引張鉄筋比(%)である。
石橋らの実験結果を彼らの得た耐力式に適用すると、表-2のような結果が得られた。

浜田らはいくつかの実験を行うとともに、松井のプレストレストコンクリート床版の押抜きせん断強度式を参考にして(図-2参照)次の式を提案している。

$$P = \tau_{smax} \left\{ 2(a + 2X_m \tan 35^\circ) X_d \tan 35^\circ + 2(b + 2X_d \tan 35^\circ) X_m \tan 35^\circ \right\} + \sigma_{tmax} \left[2 \left\{ a + 2 \frac{d_m}{2} (\tan 35^\circ + \tan 45^\circ) \right\} C + 2 \left\{ b + 2 \frac{d_d}{2} (\tan 35^\circ + \tan 45^\circ) \right\} C \right] \quad (tf) \dots \dots \dots (5)$$

表-2 石橋らの実験結果と計算結果

供試体	圧縮強度 (kgf/cm ²)	実験値			計算値	
		最大荷重 (tf)	※破壊荷重 (tf)	P/P _{RC}	β_n	
A-1	582	44.2	40.2	—	—	
A-2	456	59.0	56.5	1.41	1.23	
A-3	449	60.0	57.7	1.44	1.45	
A-4	441	65.0	62.9	1.57	1.47	
A-5	534	57.5	52.2	—	—	
A-6	479	65.0	61.2	1.17	1.12	
A-7	456	63.5	61.0	1.17	1.17	
A-8	498	65.0	60.4	1.16	1.17	
B-1	522	27.3	25.0	—	—	
B-2	512	37.7	34.7	1.39	1.29	
B-3	529	45.5	41.0	1.64	1.58	
B-4	536	45.3	40.9	1.64	1.65	

※コンクリート強度を(400/f_{ck})^{1/3}で補正した結果

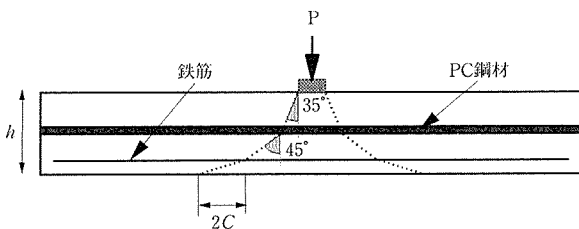


図-2 PC床版の押抜き部分のモデル図

ここに、

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度

$$\left(= \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_p + 2\sigma_{tmax})^2 - \sigma_p^2} \right) \quad (tf/cm^2)$$

X_m, X_d : 全断面有効時の主鉄筋断面, 配力鉄筋断面の圧縮縁から中立軸までの距離 (cm)

$\sigma_{ck}, \sigma_{tmax}$: コンクリートの圧縮強度, 最大引張応力 (= 0.583 $\sigma_{ck}^{2/3}$) (tf/cm²)

a, b : 載荷版の主鉄筋, 配力鉄筋方向の辺長 (cm)

d_m, d_d : 引張側の主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ (cm)

σ_p : 有効プレストレス力 (tf/cm²)

h : スラブ厚さ (cm)

ここで、中立軸の位置は次のような仮定で求めている。まず、板の中央に荷重が作用したときの曲げモーメントをチモシェンコの表を用いて求める。このとき、押抜け面が載荷板から板の中央面まで35°の角度で広がったものとした。また、中立軸の位置は全断面有効として求めた。このように“中立軸の位置 x と荷重”および“中立軸と耐力力”の曲線が求まり、それを図上(図-3)に示し、交点が破壊荷重となる。浜田は上式を自身の実験および石橋らの実験値に適用して表-3の結果を得ている。

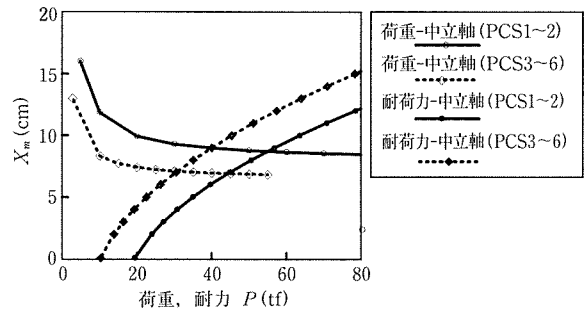


図-3 中立軸位置と荷重および耐力力の関係

表-3 浜田らの提案式による検証結果

供試体	有効プレストレス力	P_{max} (tf)	P_{cal} (tf)	P_{max} / P_{cal}
PCS1	45kgf/cm ²	62.0	58.0	1.07
PCS2		63.9		1.10
PCS3		31.6	31.0	1.02
PCS4		37.1		1.20
PCS5		32.0		1.03
PCS6		32.0		1.03
PCJ1	50.2	58.0	0.87	
PCJ2	50.6		0.87	
A-2	10kgf/cm ²	59.0	57.0	1.04
A-3	20kgf/cm ²	60.0	60.0	1.00
A-4	40kgf/cm ²	65.0	65.0	1.00
B-2	10kgf/cm ²	37.7	38.0	0.99
B-3	20kgf/cm ²	45.5	41.0	1.11
B-4	40kgf/cm ²	45.3	46.0	0.98
平均				1.05

一方、松井はプレストレスの存在する応力状態において破壊面は平面方向に広がるとの仮定から次式を提案している。

$$P = \tau_{smax} \left\{ 2(a + 2X_m / \tan \theta_m) X_d / \tan \theta_d + 2(b + 2X_d / \tan \theta_d) X_m / \tan \theta_m \right\} + \sigma_{tmax} \left\{ 2(a + 2d_m / \tan \theta_m) C_d + 2(b + 2d_d / \tan \theta_d + 4C_d) C_m \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、

θ_m, θ_d : 式(6)による主鉄筋方向, 配力鉄筋方向の破壊面の角度で、次式で表される。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} (2\tau_{cr} / \sigma_p)$$

また、 σ_p はプレストレス応力で τ_{cr} は次式で求める。

$$\tau_{cr} = 1.005 \sqrt{\sigma_{tmax}^2 + \sigma_{tmax} \sigma_p} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

石橋らは破壊面の図を示し、浜田らも観察しているが、松井の仮定の妥当性を示すには至っていない。しかし、論理上は松井の角度に関する仮定は妥当のように思えるが、ひび割れが鉄筋コンクリート断面の中立軸まで生ずるとは考えにくい。また、表-4に松井らの計算結果を示す。

表-4 松井らの提案式による検証結果

供試体	実験値	計算値	実験値/計算値
文献 16)	101.5	101.2	1.00
文献 17)	140.0	138.3	1.01

国外では、Gardner¹¹⁾はPC床版の押抜きせん断強度を鉄筋コンクリート床版の強度とプレストレスによる強度を加えた形で次のように示した。

$$P = P_{RC} + P_p \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで P_p はDecompression Momentに相当するせん断耐力であり、プレストレスによるコンクリート床版の押抜きせん断強度の上昇分である。また、この値は次式で示される。

$$P_p = 2 \pi \rho_p d_p f_{sc} (d_p - h/3) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $\rho_p = f_{ck} h f_{sc} d_p$

f_{sc} は有効プレストレス、 d_p はプレストレスまでの深さである。

4. PC床版の押抜きせん断強度

PCスラブの押抜きせん断疲労強度に関する研究はほとんどない。RCスラブの押抜きせん断疲労強度に関する研究は、角田ら¹²⁾によって研究されている。その研究のなかで、角田らは鉄筋の疲労強度に左右されることを指摘している。一方、PCスラブは鉄筋の疲労の可能性が小さいことから、浜田ら¹³⁾は次のような考え方を示した。PCスラブの静的押抜きせん断強度に対する疲労押抜きせん断強度はRCスラブのそれに比較して著しく高い(図-4参照)。これはスラブの押抜きせん断強度には、ひび割れ深さが大きく影響するので、静的押抜きせん断強度の代わりに、最大荷重時のひび割れ深さに対する静的強度(この強度は式(5)で求めることができる)との割合を疲労最大荷重とすれば、PCスラブの疲労試験結果はRCスラブの疲労試験データの中に埋没する。図-5に浜田が行ったPCスラブの疲労試験データを示す。

松井ら¹⁴⁾は橋軸直角方向にプレストレスを導入した床版の疲労耐久性に関する研究を行っている。松井は移動荷重を与え、疲労耐久性としてひび割れ、たわみおよびひずみの進展を調べ、床版寿命の推定を行った。その結果、たわみの増加に注目し、ひび割れが中立軸まで到達したときの繰返し回数を寿命とした。床版のプレストレスの応力は0, 13.5, 27kgf/cm²であった。結果としてプレストレスを導入

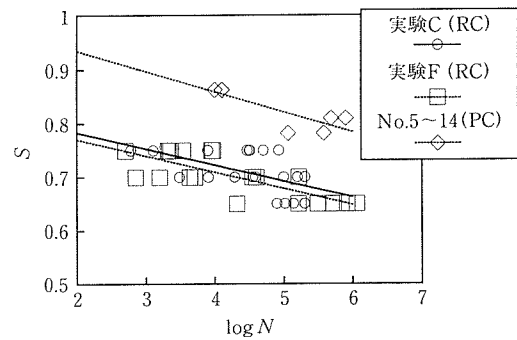


図-4 PC床版とRC床版のS-N曲線

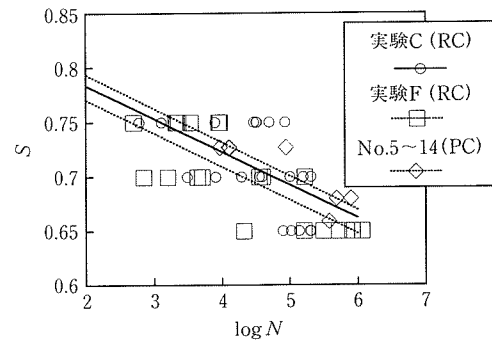


図-5 PC床版とRC床版のS-N曲線(修正後)

することで疲労耐久性が大きくなった。同様な研究をRC床版でも行っている¹⁵⁾。

5. む す び

PC床版が強いことは事実であろうが、定量的に一体どの程度強いかを論ずると、現状では即答が困難であろう。つまり、PC床版の押抜きせん断強度は今なお研究途上にある。本来、論理的でなおかつ実験結果とよく合う評価式であれば、これに越したことはない。しかし現状においては実験結果も少なく、また静的耐力式に対して十分な検討がなされていないように考えられる。佐藤が実験を行っているようにRC床版に比較するとPC床版は大きい押抜きせん断耐力を有している。また、いずれのPC床版の押抜きせん断耐力式もRC床版の耐力よりも大きいことを示している。さらに、PC床版の疲労押抜きせん断強度はRC床版のそれよりは大きいことも示されている。さらに移動疲労試験も行われているが、今後さらにデータを加えるとともに、自分のデータだけに頼らず他者のデータを参考にしながら押抜きせん断強度および押抜きせん断疲労強度、あるいは耐久性の評価式を求める必要がある。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、山口大学工学部の松尾栄治助手にご協力いただいた。ここに深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，1996.3
- 2) 前田，松井：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文報告集，No.348/V-1，pp.133-141，1984.8
- 3) 小柳治：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断とその設計上の取扱い，コンクリート工学，Vol.19，No.8，pp.3-13，1981.8
- 4) 角田，井藤，藤田：鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力

- に荷実験的研究, 土木学会論文報告集No.229, pp.105-115, 1974.9
- 5) ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), American Concrete Institute, Detroit, 1983
- 6) N.J.Gardner and Xiao-yun Shao: Punching Shear of Continuous Flat Reinforced Concrete Slabs, ACI Structural Journal, Vol.93, No.2, pp.218-228, Mar.-Apr.1996
- 7) 石橋, 佐藤, 大庭: PCスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, No.10-2, pp.109-114, 1988.6
- 8) 末広, 石橋, 佐藤, 大庭: PCスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, No.11-2, pp.149-152, 1989.6
- 9) 高海, 阿部, 野村, 浜田: プレストレストコンクリート床版の押抜き強度, プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, No.5, pp.483-488, 1995.10
- 10) 浜田, 阿部, 松尾: プレストレストスラブの押抜き強度に関する一考察, プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, No.7, pp.7-12, 1997.10
- 11) N.J.Gardner: Discussion on Punching Shear Provisions for Reinforced and Prestressed Concrete Flat Slabs, 1995 Annual Conf.of the Canadian S.C.E., pp.247-256, 1995.6
- 12) 角田, 藤田: RCスラブの疲労押抜きせん断強度に荷基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.317, pp.149-157, 1982.1
- 13) 松尾, 浜田, 阿部, 大岩: プレストレストスラブの押抜き疲労強度に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, No.7, pp.1-6, 1997.10
- 14) 大西, 松井, 北島, 長谷: 橋軸直角方向にプレストレスを導入した床版の疲労耐久性に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, No.7, pp.17-22, 1997.10
- 15) 松井: 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集No.9-2, pp.627-632, 1987.10
- 16) 防災科学研究所・ショーボンド建設(株): SB床版の疲労耐久性に関する研究報告, 1995.3
- 17) 松井, 中井, 袴田, 竹中: プレストレスを導入するプレキャスト床版の継目部の連続性と耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.34A, 土木学会, pp.285-296, 1988.3

【1997年12月1日受付】

◀刊行物案内▶

フレッシュマンのためのPC講座

—プレストレストコンクリートの世界—

頒布価格: 3 000円(送料400円)

体 裁: A4判, 140頁

内容紹介

＝基礎編＝

- 基礎編1 PCとは何か
- 基礎編2 PCはどんなものに利用できるか
- 基礎編3 プレストレスの与え方について考えてみよう
- 基礎編4 プレストレスは変化する
- 基礎編5 荷重と断面力について考えてみよう
- 基礎編6 部材に生じる応力度について考えてみよう
- 基礎編7 プレストレス量の決め方について考えてみよう
- 基礎編8 PCに命を与えるには(プレストレスングとその管理)
- 基礎編9 PCを長生きさせよう

○申込み先:

(社)プレストレストコンクリート技術協会 事務局
〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4番6号 第3都ビル5F
TEL: 03-3260-2521 FAX: 03-3235-3370

＝PC橋編＝

- PC橋編1 PC橋にはどんなものがあるか
- PC橋編2 PC橋を計画してみよう
- PC橋編3 PC橋を設計してみよう
- PC橋編4 現場を見てみよう

＝PC建築編＝

- PC建築編1 PC建築とは
- PC建築編2 PC建築にはどんなものがあるか
- PC建築編3 プレキャストPC建築の設計について考えてみよう
- PC建築編4 PC建築でオフィスを設計してみよう

資 料 PCを勉強するときの参考図書
索 引