

(2) プレストレストスラブの押抜き強度に関する一考察

山口大学工学部 正会員 ○浜田 純夫
 ㈱ピー・エス 正会員 阿部 宗人
 山口大学工学部 正会員 松尾 栄治

1. はじめに

近年、道路橋の鉄筋コンクリートスラブに対する補修や補強が必要な事例が増加している。スラブに柱を通じてあるいは直接に部分的な荷重が作用する場合には、荷重直下のコンクリート部分が押抜きせん断破壊を生じることが多い。その破壊に影響を及ぼす要因は、部材条件から载荷条件まで多岐に渡り複雑である。

RCスラブの静的押抜きせん断破壊については、これまでの研究結果からいくつかの押抜き強度算定式が提案^{1),2)}されている。しかしPCスラブについては、実用的な頻度が高いにも関わらず、その静的押抜きせん断破壊機構の解明はもちろん算定式の提案もほとんどされてない。本研究では、二方向にプレストレスを導入したPCスラブを作製し、静的押抜きせん断強度を実験的に求め、その結果から強度の算定方法について考察を行った。また実構造物において、品質管理や補修、補強が容易なプレキャストスラブが使用されるケースが増加しているが、この場合必然的に生じる打継目を設けたPCスラブも作製し、同様の試験を行い比較検討した。

2. 実験方法と結果

(1) 使用材料及びコンクリートの配合

鉄筋は JIS G 3112-SD295A種を使用し、PC鋼材は JIS G 3109 B種 1号、呼び径 17mm SBPR 930/1080 と JIS G 3536

表-1 PC 鋼材の機械的性質

記号	降伏点 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)
SBPR 930/1080	95 以上	110 以上
SWPR2	174	197

2本より線、呼び径 2.9mm

SWPR2 である。またコンクリートの配合を表-2に示す。設計基準圧縮強度は 500kgf/cm²である。

表-2 コンクリートの配合及び使用材料

G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	減水剤
20	6 ± 1.5	36.3	42.0	2 ± 1	156	430	747	1048	4.30

※ C : 普通ポルトランドセメント (比重 3.15)
 S : 北九州若松産海砂 (表乾比重 2.58)
 G : 山口県宮野産安山岩碎石 (表乾比重 2.70)

(2) 供試体

a) 打継目なしの供試体

普通PCスラブとして、図-1~2に示すような一方をプレテンション方式で、他方向をポストテンション方式でプレストレスを導入した正方形スラブを作製した。これらの供試体を以後 PCS と略記する。このシリーズでは、床版厚と一辺の長さが異なる2種類の供試体により実験を行った。すなわち 120×120×16cm を2体、130×130×13cm を4体の計6体である。

b) 打継目を設けた供試体

载荷位置近傍にプレキャスト部材の継ぎ目が存在する場合を想定したもので、実構造物には

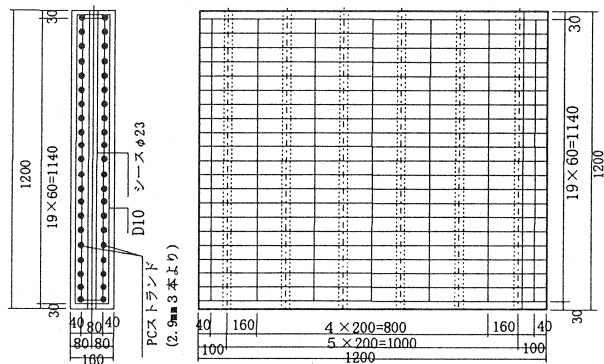


図-1 PCS 1 ~ 2 供試体 (mm)

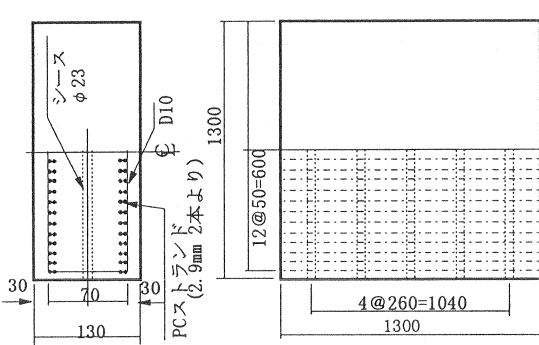


図-2 PCS 3~6 供試体 (mm)

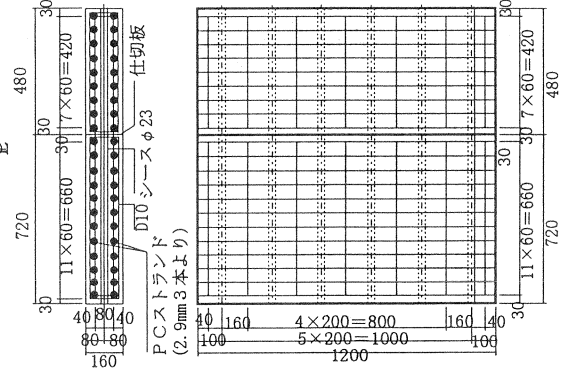


図-3 PCJ 1~2 供試体 (mm)

必然的に生じる構造形態である。まず一方向にプレテンション方式でプレストレスを与えた状態で 72×120cm の載荷側部分と 48×120cm の非載荷側部分の打設を行い 120×120cm の正方形スラブとし、2週間後に他方向にポストテンション方式でプレストレスを導入した。供試体数は2体であり、その詳細を図-3 に示す。以後この供試体を PCJ と略記する。

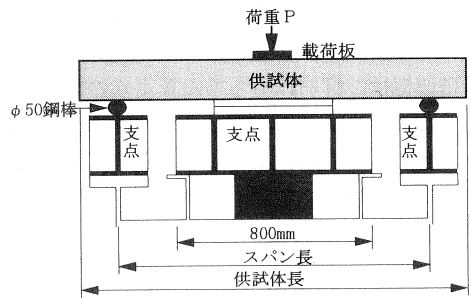


図-4 載荷状況

(3) 導入プレストレス力

プレキャストコンクリートスラブ相互の一体化をプレストレス導入によって行う場合、残存プレストレス量が 30kgf/cm² 程度以上であれば、スラブ相互の連続性は良好に確保できることが知られている。プレテンション方向に PC 鋼線 φ 2.9 (SWPR2) の有効引張応力を 114kgf/mm² とすると、全引張力 P_e は

$$P_e = 13.21\text{mm}^2 \times 58 \text{本} \times 114\text{kgf/mm}^2 = 87300\text{kgf} \quad (\text{PCS 1} \sim 2, \text{PCJ 1} \sim 2)$$

$$P_e = 13.21\text{mm}^2 \times 50 \text{本} \times 114\text{kgf/mm}^2 = 75300\text{kgf} \quad (\text{PCS 3} \sim 6)$$

有効プレストレス力は

$$\sigma_c = P_e / A_c = 87300 / (120 \times 16) = 45.5\text{kgf/cm}^2 \quad (\text{PCS 1} \sim 2, \text{PCJ 1} \sim 2)$$

$$\sigma_c = P_e / A_c = 75300 / (130 \times 13) = 44.6\text{kgf/cm}^2 \quad (\text{PCS 3} \sim 6)$$

となる。同様にポストテンション方向の有効プレストレス力は

$$\sigma_c = 45.4\text{kgf/cm}^2 \quad (\text{PCS 1} \sim 2, \text{PCJ 1} \sim 2), \quad \sigma_c = 43.0\text{kgf/cm}^2 \quad (\text{PCS 3} \sim 6)$$

となる。

(4) 試験方法

いずれも載荷時における支持条件は、スパン長 120×120cm, 四隅の浮き上がり防止を設けない四辺単純支持とし、支店は長さ 80cm で支持辺の中央に設置した。また図-4 に示すように、厚さ 1mm

表-3 供試体条件及び押抜きせん断耐力

No.	供試体寸法 (cm)	有効プレストレス力 (kgf/cm ²)		スパン長 (cm)	破壊荷重
		プレテン方向	ポストテン方向		
PCS 1	120×120×16	45.5	45.4	110	62.0tf
PCS 2	120×120×16	45.5	45.4	110	63.9tf
PCS 3	130×130×13	44.6	43.0	120	31.6tf
PCS 4	130×130×13	44.6	43.0	120	37.1tf
PCS 5	130×130×13	44.6	43.0	120	32.0tf
PCS 6	130×130×13	44.6	43.0	120	32.0tf
PCJ 1	120×120×16	45.5	45.5	110	50.2tf
PCJ 2	120×120×16	45.5	45.5	110	50.6tf

の硬質ゴム板を介した辺長 3 cm, 厚さ 3 mm の正方形鋼板を用いてスラブ中央部分に載荷した。

(5) 実験結果

結果を表-3 に示す。破壊形態はいずれも押抜きせん断破壊であった。スラブの形状が薄くなれば、さらには継目が存在することにより明らかな強度低下が確認できる。

3. 押抜きせん断耐力の算定方法

四辺単純支持のRCスラブにおいては、押抜きせん断破壊直前のスラブの応力分布を仮定し、その応力分布の載荷版まわりの積分力と破壊荷重が釣り合うという仮定に基づき、その釣り合い式から求めた松井らの算定式²⁾が実験値との適合性がよい。そこで本研究ではこの式を改良してPCスラブに適合させることとした。

図-5 は松井らの算定式が前提とした概念図である。すなわち実験結果の観察から、押抜きせん断破壊面の角度ををスラブ上縁から下縁まで 45° と一定にしている。また上縁から中立軸まで一様に最大せん断応力 $\tau_{s,max}$ が作用するとし、同時に引張鉄筋から下側のコンクリートには、最大引張応力 $\sigma_{t,max}$ からかぶりの 2 倍の距離で直線的に 0 になるような応力分布が作用すると仮定している。

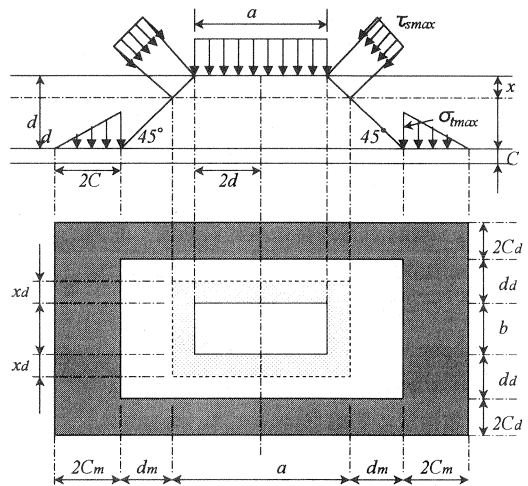


図-5 松井らによる押抜き面の応力分布の仮定

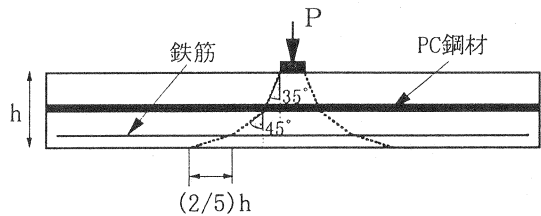


図-6 押抜き部分の模式図

それに対して本研究のPCスラブの実験結果を押抜き部分の角度に着目すると、図-6 に示すように、圧縮側表面から中心深さ付近までは約 35° の方向に、中心深さ付近から引張鉄筋までは約 45° の方向に押抜かれていた。

PCスラブについての耐力算定式を普遍的に導く場合には、種々のプレストレス力が対象となり、圧縮側表面から中心深さ付近までの角度は、プレストレス力が小さくなるにつれ 35° から 45° へと角度が増大することが予想されるが、本研究ではプレストレスの効果を十分發揮しているものに限定するため 35° と一定にし、中立軸を求める断面計算においても全断面有効とした。すなわち静的強度を求める釣り合い式では、圧縮側表面から中立軸までは角度 35° 方向に最大せん断力 $\tau_{s,max}$ が一様分布しているとした。また、かぶりの破壊始点は引張鉄筋の中心線とし、引張応力分布範囲はスラブ厚に比例するとして $(2/5)h$ とした。

また、PCスラブにおいては鉄筋量が少なく、主鉄筋比に比べて配力鉄筋比が小さいため、引張側鉄筋のダウエル効果が回廊状の四隅（図-5 における $2C_m \times 2C_d$ の部分）に及ばず、上向きの引張応力が発生していないと考えられるので、4 隅の上向きの引張応力を無視した。

以上のことを考慮したPCスラブの静的強度算定式を以下に示す。

$$P = \tau_{s,max} \left\{ 2(a + 2X_m \tan 35^\circ) X_d \tan 35^\circ + 2(b + 2X_d \tan 35^\circ) X_m \tan 35^\circ \right\}$$

$$+ \sigma_{tmax} \left[2 \left\{ a + 2 \frac{d_m}{2} (\tan 35^\circ + \tan 45^\circ) \right\} \frac{h}{5} + 2 \left\{ b + 2 \frac{d_d}{2} (\tan 35^\circ + \tan 45^\circ) \right\} \frac{h}{5} \right] \quad (tf) \quad (1)$$

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)

ただし、PCスラブの場合は荷重の変化に伴って中立軸の位置が変化するため、中立軸の位置決定を考慮した。

図-7 は縦軸にコンクリートを全断面有効とした場合の圧縮縁から中立軸までの距離 X_m をとり、横軸に荷重 (耐力) P をとったものである。

プレストレスが作用していない場合の供試体の断面計算により中央の応力を算出し、有効プレストレスと合成して、ある荷重 P が作用したときの中立軸の位置を算出する。

すなわちこの図において、全断面有効とした計算によって求めた荷重と中立軸の関係を示す曲線と、各中立軸位置における算定式耐力を示す曲線の交点が静的強度になると考えることができる。

図-8 は、引張側コンクリートを無視した場合の上縁から中立軸までの距離を縦軸にとったものである。図-7 により求めた理論値よりかなり小さくなる事がわかる。実験値との適合性も前者のほうが良い。

算定式の適合性を確認するため、スラブ厚、スパン長、有効プレストレス力の異なる供試体について「破壊荷重/算定式」とい

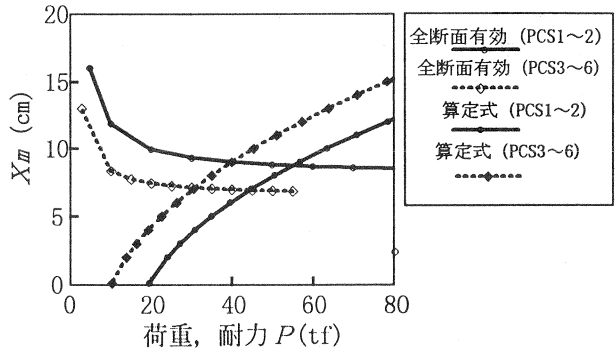


図-7 中立軸位置と荷重の関係(1)

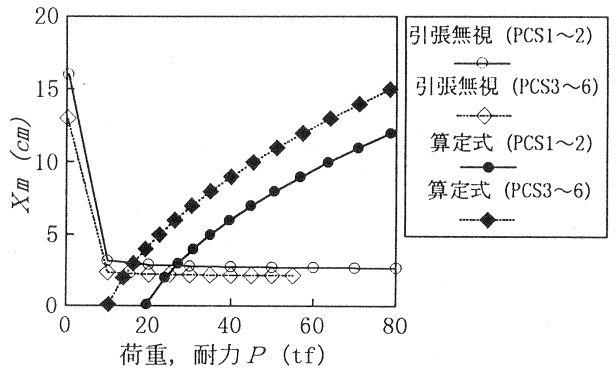


図-8 中立軸位置と荷重の関係(2)

表-4 算定式検証結果

No	有効プレストレス力	P_{max} (tf)	P_{cal} (tf)	P_{max} / P_{cal}	
PCS 1	45kgf/cm ²	62.0	58.0	1.07	
PCS 2		63.9		1.10	
PCS 3		31.6	31.0	1.02	
PCS 4		37.1		1.20	
PCS 5		32.0		1.03	
PCS 6		32.0		1.03	
PCJ1		50.2		58.0	0.87
PCJ2		50.6			0.87
A1		10kgf/cm ²	59.0	57.0	1.04
A2		20kgf/cm ²	60.0	60.0	1.00
A3	40kgf/cm ²	65.0	65.0	1.00	
B1	10kgf/cm ²	37.7	38.0	0.99	
B2	20kgf/cm ²	45.5	41.0	1.11	
B3	40kgf/cm ²	45.0	46.0	0.98	
平均				1.02	

うパラメータを用いて検討した結果を表-4に示す。

本研究の実験結果に加えて、末弘らの実験結果 A (165×165×20cm), B (115×115×15cm) シリーズ³⁾も併せて検証した。これらの実験は有効プレストレスを段階的に変化させたものである。

また、末弘らの実験ではドーナツ型の荷載版を使用しているため、断面計算における応力算出には、外円直径を荷載版辺長として計算した。そのため、若干算定式による理論値は小さくなる。

図-9～14にそれぞれの理論値を算出した図を示す。これらは断面計算を簡略するために鉄筋を無視して計算を行った。これも理論値がやや小

さくなる原因と考えられる。また、コンクリートを全断面有効として計算を行っているために、導入プレストレス力が極端に小さい場合には適応しないと考えられるが、本実験のような実用的範囲においては良好な適合性を示した。

供試体 PCS 1～2及び3～6はともに、実験値のほうが理論値より大きな値を示し、PCS 1～6供試体のほうがその差が大きい。この原因として、末弘らによる実験結果から考察すると、「スラブ厚/スパン長(h/L)」の値が大きいほどプレストレスの影響が静的強度に反映されている。供試体 PCS 1～6は(h/L)=0.146で、供試体7～20は(h/L)=0.108であり、強度への影響は無視できないと考えられる。

しかし、いずれの場合においても概ね精度良く理論値を算出することができた。

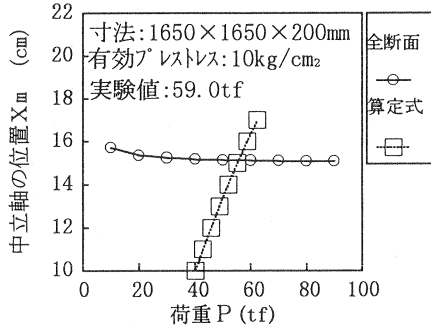


図-9 理論値算定図(A-1)

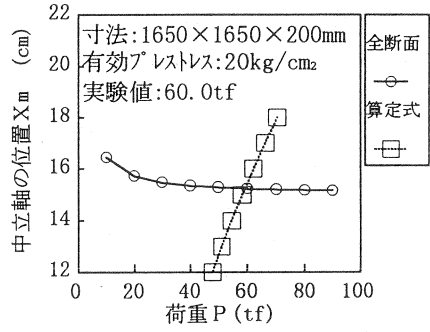


図-10 理論値算定図(A-2)

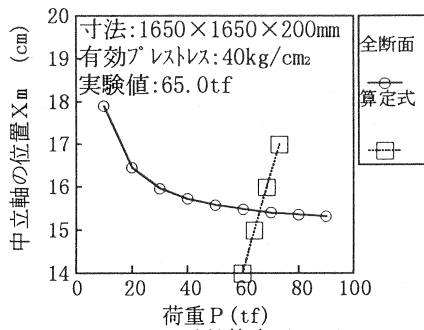


図-11 理論値算定図(A-3)

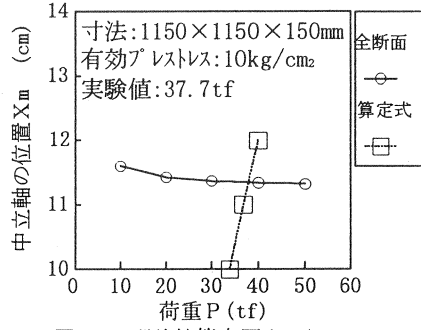


図-12 理論値算定図(B-1)

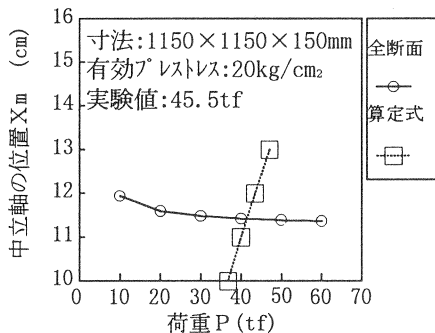


図-13 理論値算定図(B-2)

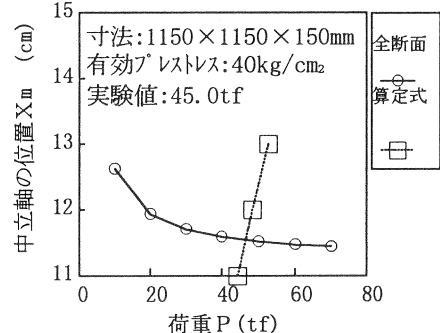


図-14 理論値算定図(B-3)

4. まとめ

本研究で得られた主な結論を要約すると以下の通りである。

- (1) PCスラブにおいては載荷板中心から離れた位置では、プレストレスの影響によりほとんど引張応力が作用しないため、ひび割れは押抜き面までしか発生せず、押抜き角度もRC床版より急な角度となり、押抜き面積は小さくなる。
- (2) PCスラブの押抜きせん断耐力を算定する場合、スラブの押抜ける角度と剥離する距離を実験値より仮定し、「全断面有効として求めた中立軸位置-荷重」曲線と、「中立軸位置-耐力」曲線の交点を求めることで、耐力を精度良く算定することが可能である。
- (3) プレストレスが小さい場合には、RCスラブの挙動に近づくために、理論値のほうが大きな値を示し、スパン長に対するスラブ厚の割合が大きい場合には、相応の強度増が見込まれる。
- (4) スラブ内に継目を設けることにより、本実験の場合では約20%程度の強度低下がみられた。

【謝辞】

本実験を行うにあたり、大成建設㈱の大岩昇氏、及び山口大学大学院の奥村征史氏に多大なる御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 角田与史雄, 伊藤照雄, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第229号, 1974.9.
- 2) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, 第348号, V-1, 1984.8
- 3) 末弘保, 石橋忠良, 佐藤春雄, 大庭光商: 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, 1989.11.