

# 論文 PC 鋼棒により外締め補強されたスラブ付き既存 RC 造梁のせん断性状に関する研究

鈴木 学<sup>\*1</sup>・香取 慶一<sup>\*2</sup>・林 静雄<sup>\*3</sup>

**要旨**：スラブ付き既存 RC 造梁を対象とし，コーナブロック及びプレートを設置 PC 鋼棒を周回させる外締め補強実験を行った。本論は，PC 鋼棒補強量及びプレストレス有無をパラメータとし，せん断ひび割れ強度，ひび割れ幅及び終局耐力に関する検討を行った。その結果，外締めによる横方向プレストレスが損傷制御に有効であることを確認すると共に，せん断強度を補強量と破壊形式に応じて評価することができた。また，片側スラブを対象とした補強工法を提案し，実験によりその補強効果を確認した。

**キーワード**：耐震補強，PC 鋼棒，プレストレス，せん断ひび割れ，せん断終局耐力

## 1. はじめに

既存 RC 造部材のせん断補強は，簡便かつ短工期な工法が求められると共に部材を周回することにより，その補強効果は期待される。しかし，梁部材ではスラブ床が付いているため周回することは困難である。そこで，筆者らはスラブ付き既存 RC 造梁を対象とし，PC 鋼棒による外締め工法を提案し，その補強効果を実験により確認した<sup>1)</sup>。しかし，そのせん断性状について未解明な点が残ると共に，その終局耐力の評価方法は確立されていない。

そこで本論では，本工法におけるせん断ひび割れ強度，ひび割れ幅及びせん断終局耐力の検討を行うため，プレストレスの有無，PC 鋼棒径及び間隔をパラメータとした梁の耐震補強実験を行った。更に，本論では片側スラブを対象とした補強工法を提案し，その補強効果を実験により確認を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体一覧を表 1 に，試験体配筋図及び外締め補強状況を図 1 に示す。また，使用した材料の機械的性質を表 2 に示す。試験体の共通要因は，断面 350mm×500mm，せん断スパン比 ( $M/QD$ ) 1.5，あばら筋  $\phi 6.4@250$ mm，主筋 12-D19(高強度鉄筋)である。スラブ幅はプレートが取り付けられる程度の長さとした。

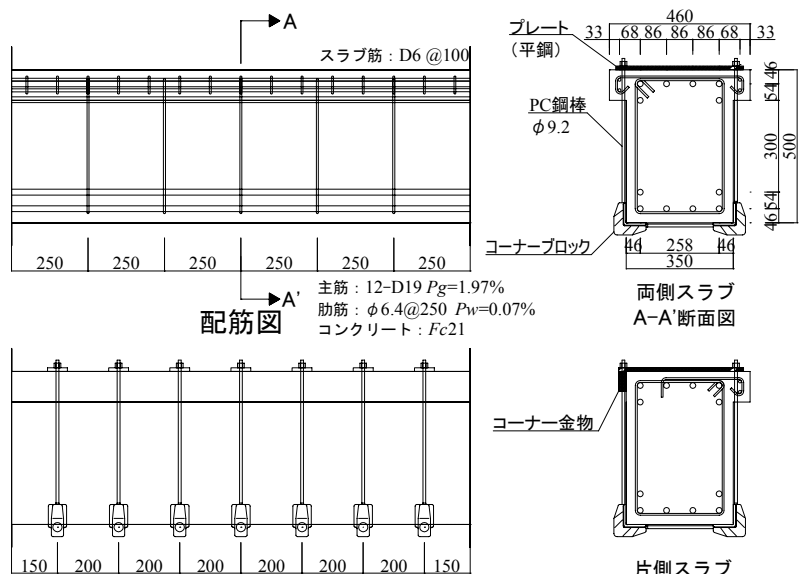


図 1 試験体図

Unit : mm

\*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 工修 (正会員)  
 \*2 東京工業大学 建築物理研究センター助手 工博 (正会員)  
 \*3 東京工業大学 建築物理研究センター教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	PC鋼棒径 [mm]	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$S_p$ [mm]	$P_p$ [%]	$\sigma_{py}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_L$ [N/mm <sup>2</sup> ]	備考
1	RC	-	-	-	-	-	-	-	両側スラブ
2	NPS-φ6@200	6.0	28.3	200	0.08	1279	0	0	
3	PS-φ6@200						640	0.5	
4	NPS-φ9.2@200	9.1	64.5	100	0.37	1175	0	0.0	
5	PS-φ9.2@200						588	1.1	
6	NPS-φ9.2@100						0	0.0	
7	PS-φ9.2@100						588	2.2	
8	片側スラブ	200	0.18	588	1.1	片側スラブ			

$A_p$ : PC 鋼棒断面積  $S_p$ : PC 鋼棒配筋間隔  $P_p$ : PC 鋼棒の補強筋比  $\sigma_{py}$ : PC 鋼棒降伏応力度

$\sigma_p$ : プレストレス導入応力度  $\sigma_L = \sigma_p \cdot P_p$

- 試験体名  
PS-φ9.2-@200
- ① PS : プレストレス有り  
NPS : プレストレス無し
- ② PC 鋼棒径[mm]  
③ PC 鋼棒ピッチ[mm]

表-2 材料の機械的性質

種類		降伏強度 $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	降伏ひずみ $\epsilon_y$ [μ]	ヤング係数 $E$ [ $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> ]
鉄筋	D19*	1023	5448	1.9
	φ6.4	289	1402	2.1
PC鋼棒	φ6.0	1279	6360	2.0
	φ9.2	1175	5947	2.0
プレート	SS400	601	3073	2.0
コンクリート	材齢 [日]	圧縮強度 $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	割裂強度 $\sigma_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング係数 $E$ [ $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> ]
	28	24	1.8	2.5

\* SD345 を焼入れし、降伏強度を 900[N/mm<sup>2</sup>]以上となるよう高強度化

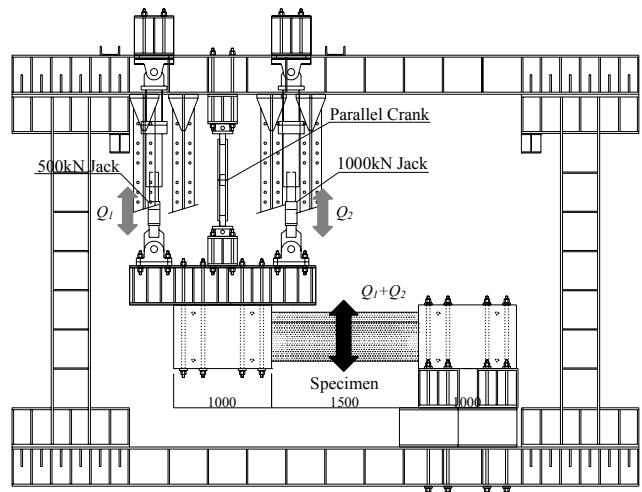


図-2 加力装置

試験体は、無補強試験体 1 体、補強試験体 7 体（うち 1 体は片側スラブ補強）の全 8 体である。補強方法はスラブに PC 鋼棒が通る孔を設け、スラブ上にプレート、梁下端にはコーナブロックを介し PC 鋼棒を周回させる外締め工法を行った。パラメータは、①PC 鋼棒径（φ6.0, φ9.2）②PC 鋼棒間隔（200mm, 100mm）③プレストレスの有無 ④両側・片側スラブ補強である。片側スラブ補強では、スラブのない側に従来のプレートにコーナブロックを取り付けたコーナー金物付きプレートを用いた（図-1 参照）。

プレストレスは、全ての PC 鋼棒に貼付したひずみゲージにより管理し、材料の機械的性質から得た降伏ひずみの 50%（約 3000 μ）を導入し、プレストレス無しの試験体は、手で締め付ける程度（約 100 μ）とした。ここで PC 鋼棒の補強筋比  $P_p$  とプレストレス導入応力  $\sigma_p$  の積の値を横方向プレストレス  $\sigma_L$  と定義する。

## 2.2 加力及び測定方法

加力装置図を図-2 に示す。加力は、変位制御による逆対称正負交番繰り返し载荷とし、部材角  $R = \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100$  及び  $\pm 1/50$  各 2 回ずつを行い、最大耐力を確認した時点で終了とした。ひび割れの測定には、デジタルマイクロスコープ（最小目盛 0.01mm）を使用した。ひび割れ幅  $W$  は、ひび割れに対し直交方向の幅とし、ひび割れ角度  $\theta$  は横補強筋とひび割れのなす角度とした。

## 3. 実験結果

各試験体の実験結果及び計算値の一覧を表-3 に示す。

### 3.1 破壊性状

$R = 1/200$  時における No.1, 4, 5 のひび割れ状況を図-3 に示す。破壊過程は、全試験体とも入力せん断力の増大に伴い、曲げ、曲げせん断、

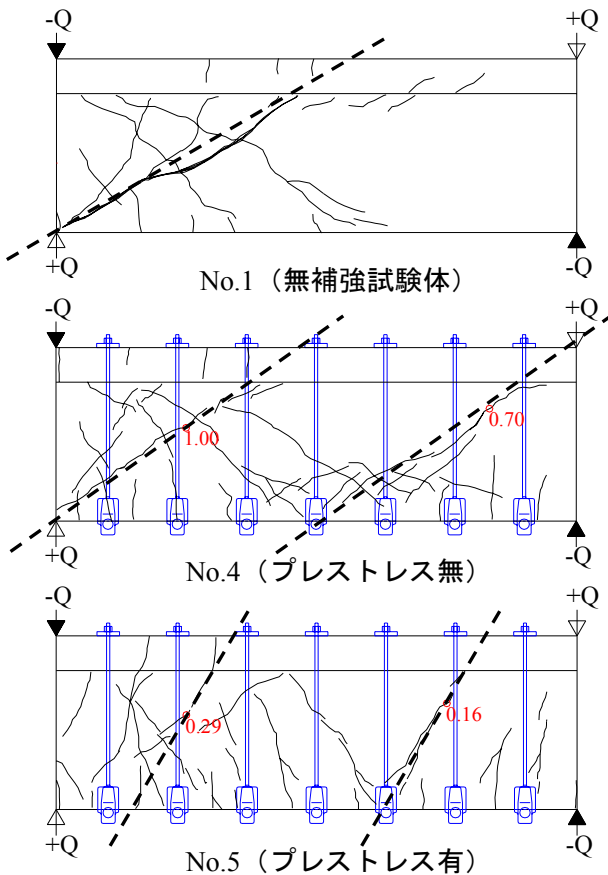
表－3 実験結果及び計算値

No.	$exp Q_{sc}$ [kN]	$exp Q_{max}$ [kN]	$cal Q_{sc}$ [kN]	$cal Q_{su0}$ [kN] <sup>式(5)</sup>	$cal Q_{su1}$ [kN] <sup>式(1)</sup>	$cal Q_{su2}$ [kN] <sup>式(2)</sup>	$cal Q_{su3}$ [kN] <sup>式(3)</sup>	$cal Q_{bu}$ [kN] <sup>式(4)</sup>	$ex Q_{max} / cal Q_{su}$ <sup>※1</sup>	$ex Q_{max} / cal Q_{bu}$ <sup>※2</sup>	破壊形式
1	195	223	189	295	220	370	540	407	1.01	1.01	せん断引張
2	186	421	189	372	410	443	570	449	1.03	1.03	せん断引張
3	208	424	217	372	410	443	570	449	1.03	1.03	せん断引張
4	199	589	189	422	615	500	570	491	1.18	1.18	せん断引張
5	267	575	244	422	615	500	570	491	1.15	1.15	せん断引張
6	178	712	189	492	1063	650	631	590	1.13	1.13	せん断圧縮
7	366	776	288	492	1063	650	631	590	1.23	1.23	せん断圧縮
8	236	543	244	422	558	465	535	477	1.17	1.17	せん断引張

$exp Q_{sc}$  : せん断ひび割れ強度実験値  $exp Q_{max}$  : 最大耐力実験値  $cal Q_{sc}$  : 文献2) より求めたせん断ひび割れ強度

※1 式(1)～(3)で評価 ※2 式(1)～(4)で評価

せん断ひび割れの順にひび割れが発生し、最終的に曲げ降伏を伴うことなく、せん断破壊に至った。尚、No.1～5, 8 はあばら筋もしくは PC 鋼棒の降伏及び破断により、No.6, 7 は PC 鋼棒が降伏せずに耐力は低下した。また、No.4, 6 は R=1/50 繰返しに伴い、上端の 2 段筋に沿う損傷が見られた。



(○ ひび割れ幅(mm) --- 顕著なひび割れ)

図－3 ひび割れ性状 (R=1/200 時)

### 3.2 荷重一部材角関係

No.4, 5, 8 の荷重一部材角関係を図－4 に、補強量及びプレストレス有無による影響を比較した包絡線を図－5 に示す。

#### (1) 補強量による影響

PC 鋼棒補強量の増大に伴い最大耐力及び変形能力の向上を確認した (図－5 (a))。

#### (2) プレストレスによる影響

プレストレス導入により、ひび割れ発生後の剛性低下は少なくなるが早期の変位にて耐力は低下することから変形能力に劣ることがわかる。最大耐力は 100mm ピッチで補強した試験体はプレストレス導入により向上したが、200mm ピッチで補強した試験体はプレストレス有無によらず一定であった (図－5 (b))。

#### (3) 付着による影響

No.4, 6 では若干逆 S 字型を呈し、付着滑りが生じていると思われる。同補強量でプレストレスを導入した No.5, 7 では、このような現象は見られなかった。但し、これらの最大耐力は同等であった (図－4)。

#### (4) 両側スラブと片側スラブ補強の比較

同補強量・プレストレス量の両側スラブ (No.5) と片側スラブ付き補強 (No.8) の比較を行うと、ほぼ同等な最大耐力と履歴性状を示した。本工法による片側スラブ補強の有効性を確認すると共に、両側スラブ補強の場合とほぼ同等の評価ができることがわかった。

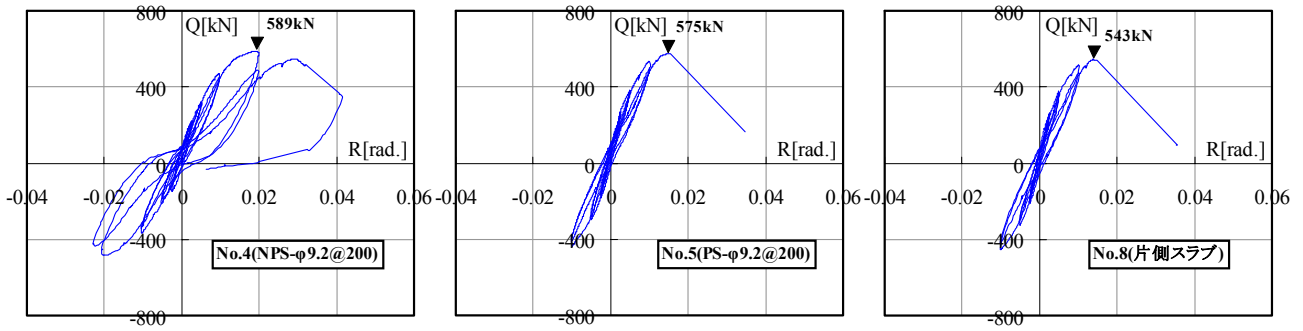
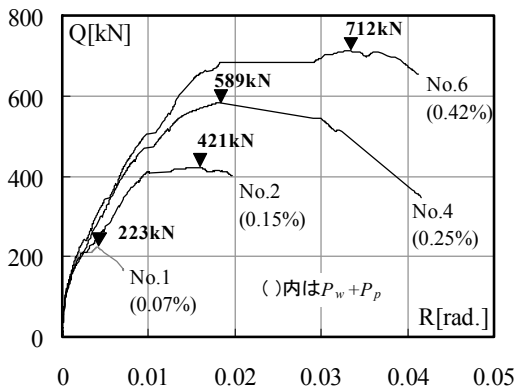
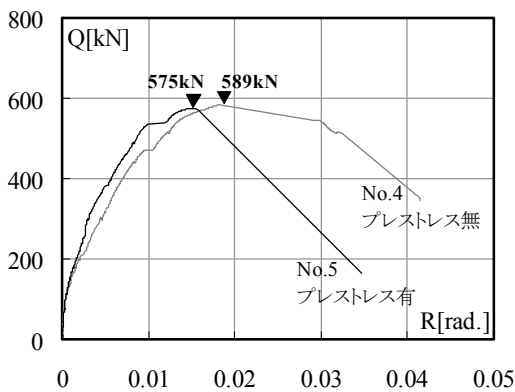


図-4 荷重一部材角関係

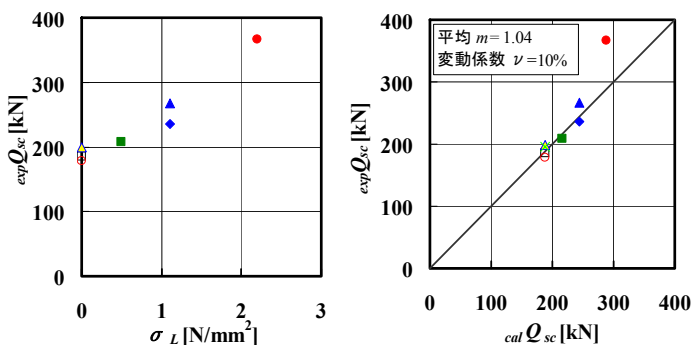


(a) 補強量による影響



(b) プレストレスによる影響

図-5 包絡線による比較



(a) プレストレスによる影響 (b) 計算値と実験値の関係

図-6 せん断ひび割れ耐力

#### 4. せん断ひび割れに関する検討

##### 4.1 せん断ひび割れ強度

実験より得られたせん断ひび割れ発生強度  $exp Q_{sc}$  と横方向プレストレス  $\sigma_L$  の関係を図-6 (a) に示す。横方向プレストレスの増大に伴いせん断ひび割れ強度の向上が確認できた。プレストレスを導入しない試験体は無補強試験体を含み、補強量によらず一定であった。せん断ひび割れ強度計算値  $cal Q_{sc}$  と実験値  $exp Q_{sc}$  の関係を図-6 (b) に示す。計算値は、靱性指針の主応力度式を基に横方向プレストレス  $\sigma_L$  の影響を考慮した提案式<sup>2)</sup>を用いた。実験値を計算値で除した平均値は 1.04、変動係数 10%と精度よく評価することができた。

##### 4.2 ひび割れ角度

$R=1/200$  (F 値=1 想定<sup>5)</sup>) 時に最もひび割れ幅の大きかったせん断ひび割れを図-3中に破線で示した。ひび割れと補強筋がなす角度  $\theta$  と横方向プレストレス  $\sigma_L$  の関係を図-7に示す。No.1を含めプレストレスを導入していない試験体のひび割れ角度は  $60^\circ$  程度で一定である。プレストレス導入した試験体は  $28\sim 50^\circ$  と  $\sigma_L$  の増大に伴いひび割れ角度は小さくなった。

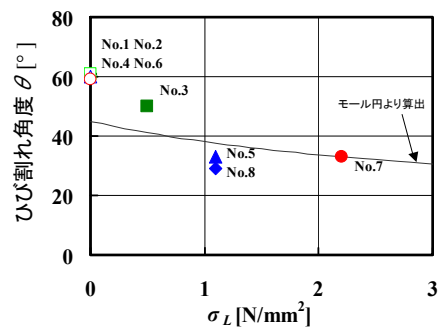


図-7 ひび割れ角度

### 4.3 ひび割れ幅

各サイクルの目標変形角到達時の最大せん断ひび割れ幅を最大ひび割れ幅  $W_{max}$ ，最大ひび割れ幅から長期許容せん断力まで除荷した時のひび割れ幅を長期残留ひび割れ幅  $W_L$  と定義する。長期許容せん断力は、日本建築学会 RC 規準<sup>4)</sup>による値である。

#### (1) 最大ひび割れ幅

各変形角とその時の最大ひび割れ幅の関係を図-8に示す。全試験体とも変形角の増大に伴いひび割れ幅は増大している。同変形時において補強量の増大及びプレストレス導入に伴い、ひび割れ幅は制御された。特にプレストレスを導入した試験体(No.3,5,7,8)において顕著であった。

#### (2) 長期残留ひび割れ幅

長期残留ひび割れ幅と直前に経験したピーク変形角の関係を図-9に示す。ここで、ひび割れ幅の使用限界を 0.3mm であるとし、そのラインを図中に点線で示した。R=1/200 時において、PC 鋼棒φ9.2 でプレストレスを導入した試験体(No.5,7,8)は、許容範囲内に収まっている。これは適切な補強量とプレストレス導入により継続使用の可能性が大きくなることを示す。

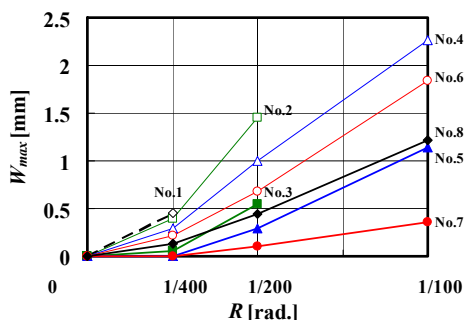


図-8 最大せん断ひび割れ幅

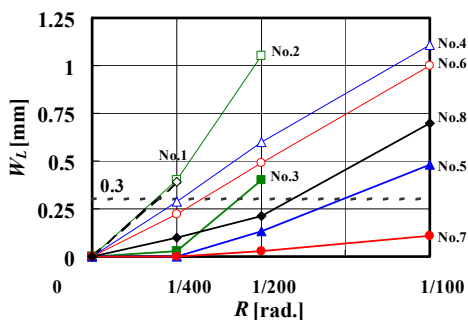


図-9 長期残留ひび割れ幅

## 5. 終局耐力の検討

### 5.1 せん断終局耐力の評価

実験より得られた終局耐力と計算値の結果を表-3に示した。計算値は靱性指針せん断信頼強度<sup>3)</sup>の横補強筋の項にPC鋼棒の量を累加した計算式である(式(1)~(4)参照)。実験より得られた最大耐力と横補強筋量の関係を図-10に示す。図中には、式(1), (2), (3)及び(4)より算出された計算値を示す。

$$cal Q_{su1} = \mu(P_{we}\sigma_{wy} + P_p\sigma_{py})b_e j_e + \left\{ v\sigma_B - \frac{5(P_{we}\sigma_{wy} + P_p\sigma_{py})}{\lambda} \right\} \frac{bD}{2} \tan \theta \quad (1)$$

$$cal Q_{su2} = \frac{\lambda v\sigma_B + (P_{we}\sigma_{wy} + P_p\sigma_{py})}{3} b_e j_e \quad (2)$$

$$cal Q_{su3} = \frac{\lambda v\sigma_B}{2} b_e j_e \quad (3)$$

$$cal Q_{bu} = T_x j_e + \left\{ v\sigma_B - \frac{2.5T_x}{\lambda b_e} \right\} \frac{bD}{2} \tan \theta \quad (4)$$

$P_p$ : PC 鋼棒の補強筋比  $\sigma_{py}$ : PC 鋼棒降伏応力度

$T_x$ : 部材単位長さあたりに負担できる付着力

( $T_x$ 内の横補強筋比  $P_w$ にも PC 鋼棒補強筋比  $P_p$ を累加)

靱性指針で、せん断信頼強度は式(1), (2), (3)及び付着破壊の影響を考慮したせん断信頼強度式(4)のうち最小値で求められるものとしている。No.4~7 は付着破壊で決まる試験体にも関わらず、実験値はNo.4, 5では式(2), No.6, 7では式(3)による計算値より大きな値であった(図-10参照)。また実験ではNo.4, 6で上端の2段筋に沿う損傷が見られたが、最大耐力には影響しなかったことより、本工法による付着強度は式(4)で予測した以上の強度が期待される。

これより以後の検討は式(1)~(3)の評価で行う。靱性指針では、式(1), (2)は横補強筋の降伏により終局耐力が決まり、式(3)は横補強筋の降伏によらずコンクリートのせん断圧縮破壊により終局耐力が決まると考えられている。本実験の破壊形式は、No.1~5, 8はせん断引張、No.6, 7はせん断圧縮であった。故に計算式による破壊形式と、実験による破壊形式が一致したことになる。

本式(1)~(3)による予測精度の検討を行うため、計算値と実験値の関係を図-11 に示す。また、荒川 mean 式<sup>4)</sup>の第2項に PC 鋼棒量を累加した計算値 (式(5)参照) と実験値の関係を比較して示す。式(1)~(3)での評価は、式(5)よりバラツキを小さく抑えられ、かつ精度良く評価することができた。

$$cal Q_{su0} = \left\{ \frac{\alpha k_u k_p (17.6 + \sigma_B)}{M/Qd + 0.12} + 0.845 \sqrt{P_w \sigma_{wy} + P_p \sigma_{py}} \right\} bj \quad (5)$$

## 5.2 設計上の留意点

文献1)では、補強量の少ない (式(1)で決まる) 範囲での実験を行い、プレストレスを導入した試験体は導入しない試験体より最大耐力が低くなると報告されている。このことから、たとえ PC 鋼棒が降伏しない範囲 (曲げ降伏先行型) であっても式(1)で決まる範囲での設計は危険であり、式(2)でせん断強度が決まる範囲での設計が望ましいと言える。

## 6. まとめ

本研究より以下の知見を得られた。

- (1) 本工法におけるせん断性状を明らかにすると共に、プレストレス導入による損傷制御の有効性を示した。
- (2) せん断信頼強度を靱性指針式の補強筋項に PC 鋼棒の量を累加した式により評価することができた。本工法は付着強度に対しても有効であった。
- (3) 設計する際、最低補強量があることを提案した。
- (4) 片側スラブ付き耐震補強工法を提案し、その補強効果は両側スラブ付きの場合と同等の評価ができることを示した。

## 謝辞

本研究は東京工業大学建築物理研究センターの全国共同研究の一貫として行われたものであります。本研究に際して多大な御協力を賜った高周波熱錬株式会社、三友エンジニアリング株式会社に深く感謝の意を表します。

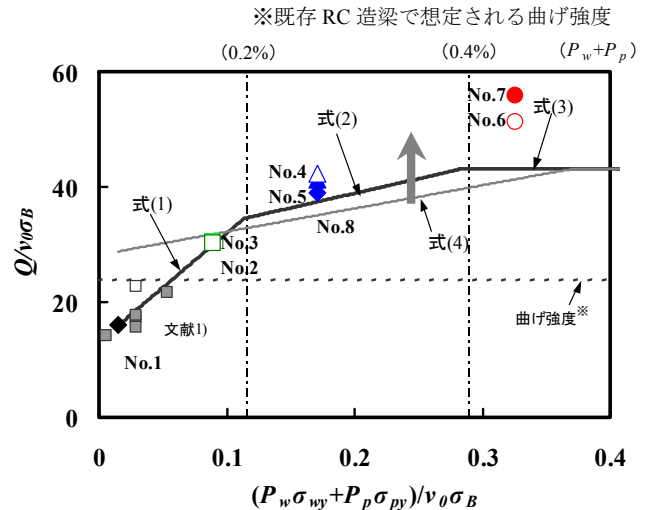


図-10 せん断強度と補強筋量の関係

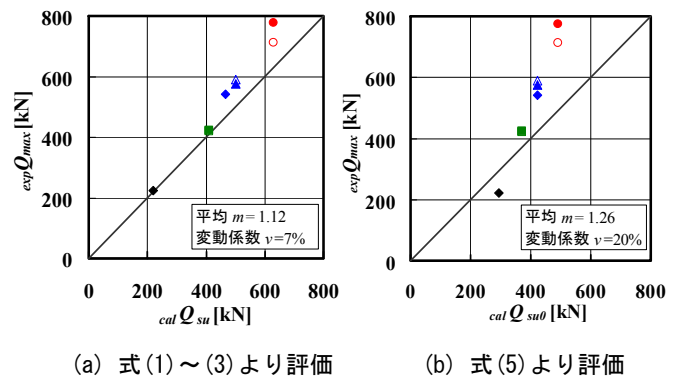


図-11 終局耐力計算値と実験値の関係

## 参考文献

- 1) 遣田英亮, 林静雄, 香取慶一: プレストレス導入による既存 RC 造梁の耐震補強効果, コンクリート工学, Vol.26, No.2, pp.1279-1284, 2004
- 2) 渡部洋, 河合繁, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 横方向プレストレスによる鉄筋コンクリート柱のせん断ひび割れ抑制と終局耐力の評価, 日本建築学会構造系論文集 第 577 号, 109-116, 2004.3
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 5) 財団法人 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 1990