

論文 プレストレスを導入して開孔補強した RC 造有孔梁のせん断性状

赤木 大介^{*1}・柳瀬 高仁^{*2}・香取 慶一^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：RC 造有孔梁の孔周囲に生じるせん断ひび割れに対しプレストレスを導入して開孔補強することを目的に、開孔補強工法、プレストレス導入量、開孔補強筋比、コンクリート強度を変数として実験を行ない以下の知見が得られた。(1) プレストレス導入に用いた PC 鋼棒を開孔補強筋としてせん断終局強度を算定できた。(2) プレストレスを導入しない場合、長期許容せん断力時の孔部最大せん断ひび割れ幅は制御目標値 0.2mm に対して約 6 倍危険側に上回り、RC 造有孔梁の長期に対する検討の必要性を示した。

キーワード：開孔補強工法，プレストレス導入量，開孔補強筋比，コンクリート強度

1. はじめに

RC 造有孔梁は開孔によって断面が欠損しているため、孔周囲に性能上無視できないほどにひび割れ幅が進展する恐れがある。この問題に対して著者らは、有孔梁のひび割れ幅抑制策として新規 RC 造建物の有孔梁を想定し孔際にアンボンド PC 鋼棒を斜め配筋しプレストレス(以下 PS)を導入する開孔補強工法(以下 UB 工法)を提案した¹⁾。本研究では UB 工法のせん断ひび割れ抑制効果とせん断終局耐力について PS 導入量、PC 鋼棒による開孔補強筋比、コンクリート強度の影響を検討するとともに、既存 RC 造梁に開孔を設けた場合を想定して孔際に PC 鋼棒を回周させて PS を導入する開孔補強工法(以下 AC 工法)を新たに提案し補強効果を実験に基づき検討している。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体を図-1、試験体一覧を表-1 に示す。全試験体孔部せん断破壊型となるよう計画した。共通因子は断面 $b \times D=300\text{mm} \times 450\text{mm}$ 、孔径 $H=150\text{mm}$ ($=D/3$)、シアスパン比 $M/Qd=1.54$ 、主筋 3-D22 高強度ネジふし鉄筋(引張主筋比

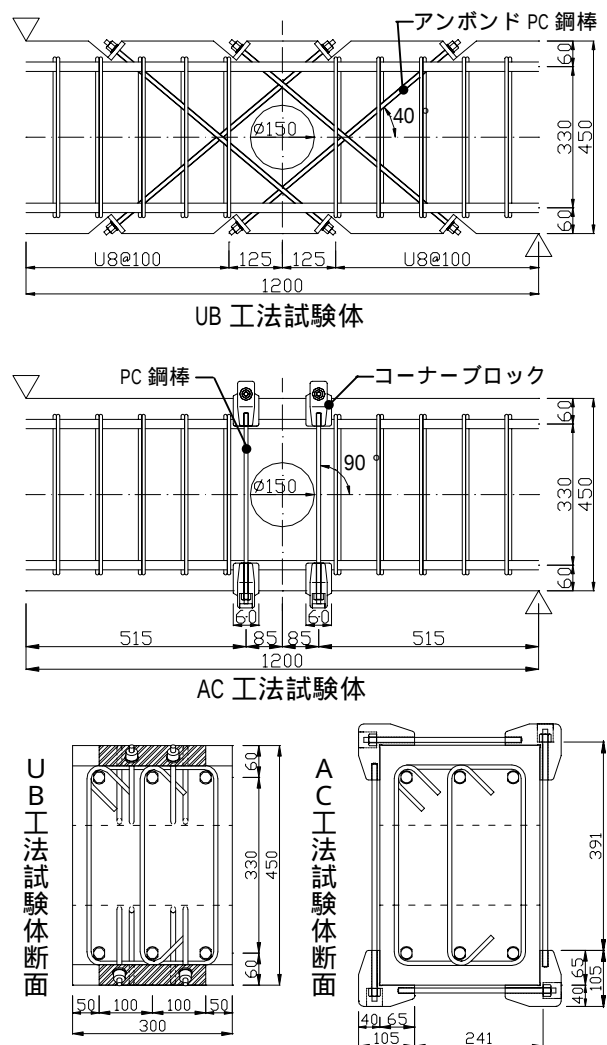


図-1 試験体図 Unit:mm : 正加力方向

*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 佐藤工業(株) 中央技術研究所建築研究部門 工修 (正会員)

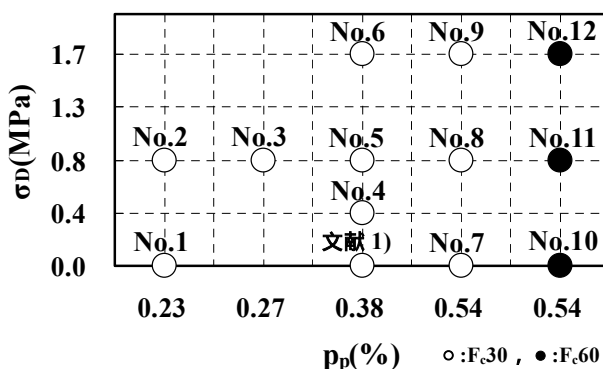
*3 東京工業大学助手 建築物理研究センター 工博 (正会員)

*4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体 番号	PC径 (mm)	補強 工法	F _c (MPa)	p _p (%)	P ₁ (kN)	P ₁ /P _y	σ _D (MPa)
No.1	7.1	UB	30	0.23	-	-	-
No.2					31	0.7	0.8
No.3	9.2	AC		0.27	40	0.5	0.8
No.4		UB		0.38	15	0.2	0.4
No.5					31	0.4	0.8
No.6					61	0.8	1.7
No.7	11			0.54	-	-	-
No.8					31	0.3	0.8
No.9		61			0.6	1.7	
No.10		60	-		-	-	
No.11			31		0.3	0.8	
No.12			61	0.6	1.7		

UB: UB工法 AC: AC工法

 F_c : コンクリート設計基準強度 p_p : 孔周囲 PC 鋼棒の開孔補強筋比 P_1 : PC 鋼棒 1 本当りの緊張力 P_1/P_y : 緊張力に対する降伏強度比 σ_D : 孔部 45° 断面における平均 PS 応力 $\sigma_D = nP_1 \cos(\theta_p - \pi/4) / b(\sqrt{2}D - H)$ 図-2 σ_D の定義 n : 孔部 45° 断面における PC 鋼棒の本数 θ_p : PC 鋼棒が材軸となす角度図-3 試験体間の σ_D と p_p の関係

$p_t=0.99\%$ 筋筋 3-U8 (孔際筋筋比 $p_s=0.30\%$) 開孔補強筋として用いた PC 鋼棒は全て C 種 1 号である。UB 工法試験体はアンボンド PC 鋼棒を材軸に対してなす角度 40° に 4 本づつ対称配置した。AC 工法試験体はコーナブロックを介して PC 鋼棒を回周させ孔際左右に 1 組ずつ配置し、梁せい方向、梁幅方向ともに同じ緊張力を与えた。PS はポストテンション方式で導入し、PC 鋼棒に添付した歪みゲージにより計測した歪みで管理した。工法の違いによる PS の影響を定量化するため、孔周囲に生じるせん断ひび割れ角度を 45° としひび割れ面に作用する平均 PS 応力 σ_D を定義した(図-2)。UB 工法試験体は PC 鋼棒径 (PC 鋼棒断面積) に基づいた

表-2 使用材料特性

鋼材 (径)	σ_y (MPa)	$s\sigma_t$ (MPa)	E_s (GPa)	A (mm ²)
梁主筋D22	1152	1279	190	387
肋筋U8	874	943	195	50
UB工法用PCφ7.1	1182	1192	185	40
UB工法用PCφ9.2	1244	1282	193	66
AC工法用PCφ9.2	1273	1312	196	66
UB工法用PCφ11	1220	1292	195	95
コンクリート (該当試験体)	σ_B (MPa)	$c\sigma_t$ (MPa)	E_c (GPa)	σ_y :降伏強度 $s\sigma_t$:引張強度 E_s :弾性係数 A:断面積 σ_B :圧縮強度 $c\sigma_t$:割裂強度 E_c :弾性係数 0.2% オフセット値
No.1~3	42	3.0	25	
No.4~6	39	2.8	24	
No.7~9	35	2.6	24	
No.10~11	66	3.8	29	

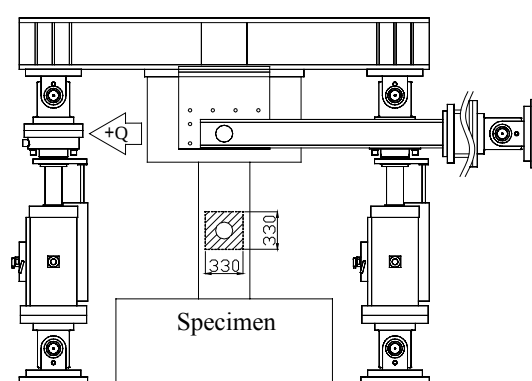


図-4 加力装置図 (斜線部: ひび割れ測定範囲)

開孔補強筋比 p_p を 0.23、0.38、0.54% と設定した。また図-3 に示すように p_p ごとに平均 PS 応力を揃え、 $p_p=0.54\%$ の No.7~12 試験体はコンクリート設計基準強度 F_c30 、60 を変数とし、それらの影響が検討できるように設定した。

2.2 加力方法

加力装置図を図-4 に示す。加力形式には建研式曲げせん断加力を採用した。加力サイクルは変位で制御し部材角 $R=\pm 1/500\text{rad}$ 、 $\pm 1/200\text{rad}$ 、 $\pm 1/100\text{rad}$ 、 $\pm 1/67\text{rad}$ 、 $\pm 1/50\text{rad}$ 、計 ± 5 サイクル各 1 回ずつ逆対称正負載荷を行った。

2.3 孔部せん断ひび割れ幅測定

孔周囲補強筋の有効な範囲 ²⁾330mm 角内 (図-4) に生じたせん断ひび割れの幅を測定し荷重との履歴をとった。ひび割れ幅 w はひび割れに対して直交方向に測定した値とし、孔部に生じた斜めひび割れを測定の対象とした。最小目盛 0.01mm のデジタルマイクロスコープを用い、ひび割れ長さに対して 30mm 間隔で測定した。

表-3 実験結果

試験体 番号	cQ_{bu} (kN)	cQ_{AL} (kN)	cQ_{AS} (kN)	cQ_{suo} (kN)	eQ_{sco} (kN)	eQ_{max} (kN)	eQ_{max} / cQ_{suo}
No.1	783	179	346	294	66	343	1.17
No.2				308	101	356	1.21
No.3					122	475	1.54
No.4		175	339	325	55	387	1.19
No.5				347	106	401	1.23
No.6					129	449	1.38
No.7	783	168	329	395	58	408	1.18
No.8					113	422	1.22
No.9					141	424	1.22
No.10		218	403	395	63	478	1.21
No.11					98	515	1.31
No.12					138	507	1.29

cQ_{bu} :略算式による曲げ終局強度

cQ_{AL} :RC 規準²⁾による無孔梁の長期許容せん断力

cQ_{AS} :RC 規準²⁾による無孔梁の短期許容せん断力

cQ_{suo} :PC 鋼棒を開孔補強筋とみなした場合の
修正広沢式(下式)による計算値⁴⁾

$$cQ_{suo} = \left\{ \frac{0.092k_u \cdot k_p (F_c + 18)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} \left(1 - \frac{1.61H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_s \cdot \sigma_y + p_p \cdot \sigma_y} \right\} b \cdot j$$

p_p :PC 鋼棒による開孔補強筋比 $p_p = \Sigma (a_s (\sin \theta_p + \cos \theta_p)) / bc$

a_s :PC 鋼棒断面積

θ_p :PC 鋼棒が材軸となす角度

$p \sigma_y$:PC 鋼棒の降伏強度

eQ_{sco} :孔部せん断ひび割れ強度実験値

eQ_{max} :最大耐力実験値

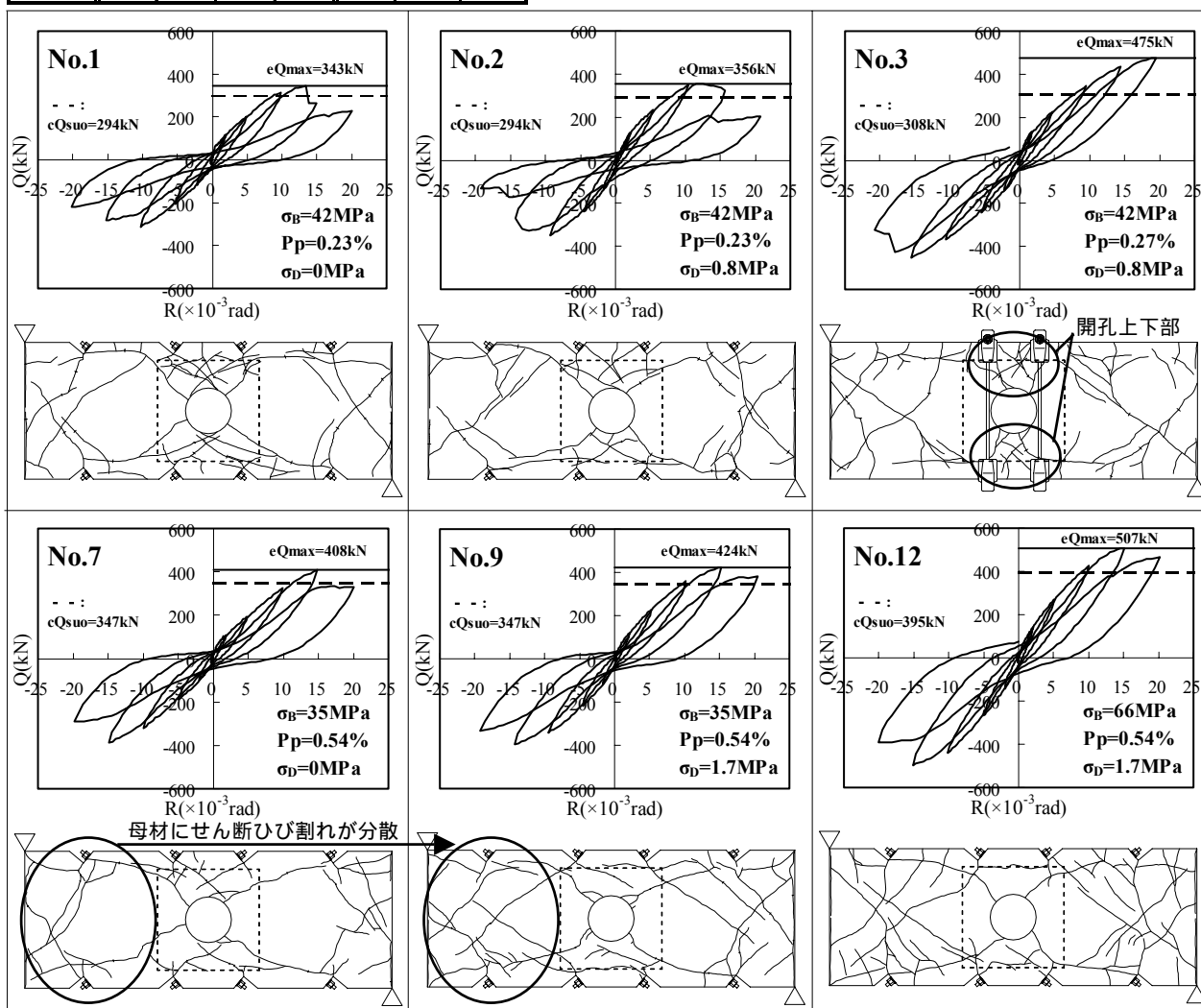


図-5 Q-R 曲線とひび割れ図 (破線枠: ひび割れ測定範囲)

3. 実験結果

3.1 破壊状況

表-3 に実験結果一覧、図-5 にせん断力 Q と部材角 R の関係と最大耐力時のひび割れ図を示す。全試験体とも最大耐力時まで梁主筋、肋筋は降伏しなかった。UB 工法試験体は孔周囲に生じたせん断ひび割れ幅が卓越し破壊に至った。

実験変数において開孔補強筋比の一番小さい No.1・2 試験体は $R=+1/67$ 手前で PC 鋼棒が降伏し最大耐力に達した。他の UB 工法試験体は $R=+1/67$ で最大耐力を迎えた。AC 工法 No.3 試験体は正側最終部材角 $R=+1/50$ まで耐力低下を示さなかったが、同部材角負側において開孔上下部がせん断破壊し耐力低下した。

3.2 孔部せん断ひび割れ性状

図-6 に孔部せん断ひび割れ強度 τ_{sco} と孔部 45° 断面における平均 PS 応力 σ_D との関係を示す。 τ_{sco} は PS 導入量の増加に伴い上昇する傾向を示した。しかし $\sigma_D=0.4\text{MPa}$ 程の PS では強度上昇を示さなかった。また τ_{sco} に開孔補強筋比 p_p 、コンクリート圧縮強度 σ_B が与える影響は見られなかった。 τ_{sco} が σ_B に依存しなかった理由は、梁せいの $1/3$ の開孔を設けたことにより孔際に応力が集中し、 τ_{sco} に対するコンクリート強度差の影響が小さくなったためであると考えられる。

孔部せん断ひび割れ発生後、PS 導入量の大きい試験体ほど孔周囲のせん断ひび割れが抑えられ母材梁せい面にせん断ひび割れが分散した(図-5)。孔部対角方向せん断ひび割れの材軸となす角度は UB 工法試験体で $34^\circ \sim 49^\circ$ と PS 導入量が大きいほど角度も大きくなった。AC 工法試験体は孔部から生じたひび割れがコーナブロックへ進展し、ひび割れと材軸となす角度 70° であった。

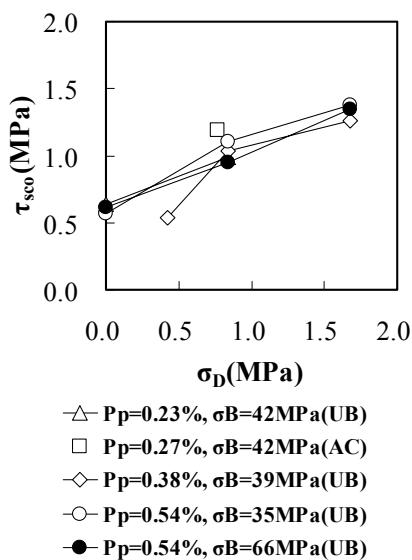


図-6 τ_{sco} と σ_D の関係

・ 図-6 の記号説明

$$\tau_{sco} = \tau_{sco} / b \cdot j$$

・ 図-7 ~ 10 の記号説明

$$\tau = Q / b \cdot j$$

AL: 長期許容せん断応力

$$= \tau_{AL} / b \cdot j$$

AS: 短期許容せん断応力

$$= \tau_{AS} / b \cdot j$$

j: 応力中心間距離 (= 341.25 mm)

3.3 孔部最大せん断ひび割れ幅

平均せん断応力 τ と孔周囲で測定した最大せん断ひび割れ幅 w_{max} との正加力側履歴曲線を図-7 ~ 10 に示す。図中の AL・AS は RC 規準²⁾による無孔梁長期・短期許容せん断応力計算値である。測定は部材角 $\pm 1/67\text{rad}$ まで行った。

荷重の増加に伴うひび割れ幅、除荷時のひび割れ幅は PS 導入量、開孔補強筋比が大きいほど小さく抑えられ、 $\sigma_D=1.7\text{MPa}$ 程度の軽微な PS 導入量でも AL 時に $\sigma_D=0\text{MPa}$ の試験体より約 $1/20$ までひび割れ幅を抑える効果を示した(図-7、8)。約 2 倍のコンクリート強度差とした試験体間で PS 導入しても τ に対する w_{max} にほとんど違いはなかった(図-9)。同程度の開孔補強筋比と PS 導入量の UB 工法試験体 No.2 と AC 工法試験体 No.3 では孔部せん断ひび割れ強度はほぼ同じであったが、PC 鋼棒の断面積が大きく長さの短い AC 工法の方が PC 鋼棒の軸方向剛性が高いため、よりひび割れ幅の抑制効果を示した(図-10)。

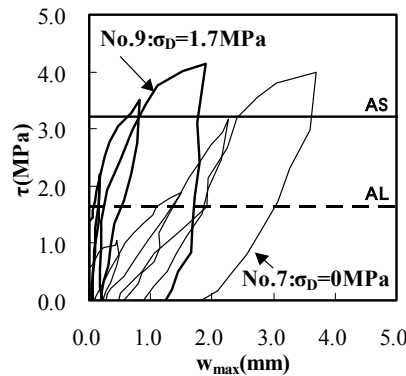


図-7 ひび割れ幅履歴
(変数: 平均 PS 応力 σ_D)

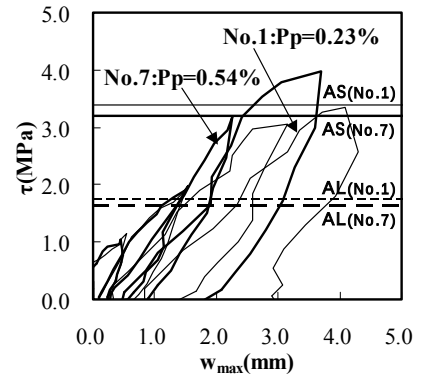


図-8 ひび割れ幅履歴
(変数: 開孔補強筋比 p_p)

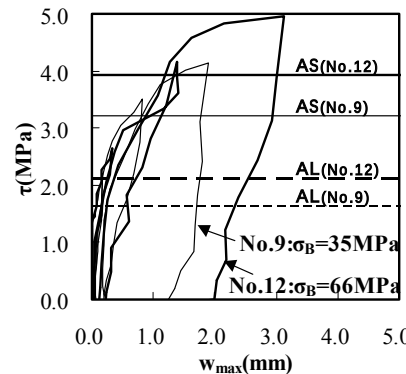


図-9 ひび割れ幅履歴
(変数: コンクリート圧縮強度 σ_B)

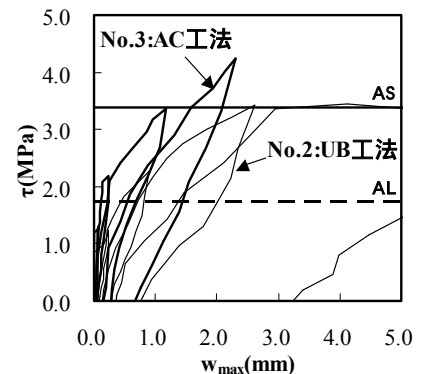


図-10 ひび割れ幅履歴
(変数: 開孔補強工法)

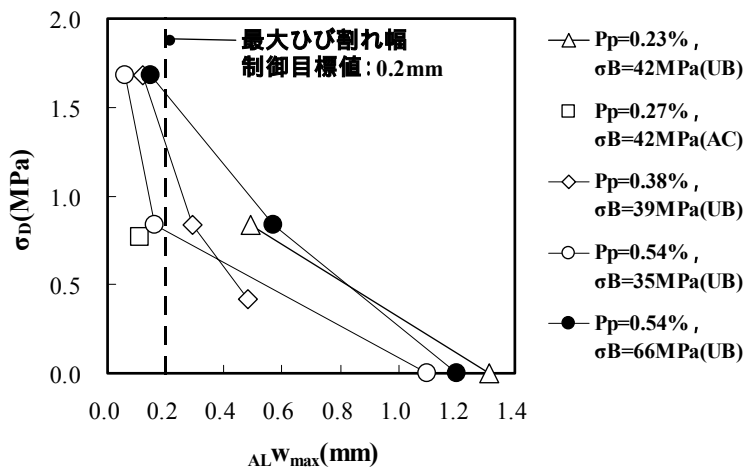


図-11 σ_D と ALW_{max} の関係

平均 PS 応力 σ_D と AL 時の孔部最大せん断ひび割れ幅 ALW_{max} との関係を図-11 に示す。PRC 指針³⁾に基づき AL 時の最大ひび割れ幅制御目標値 0.2mm とした場合、PS 導入していない試験体では 1.10～1.31mm と制御目標値に対して約 6 倍危険側であり、有孔梁は長期許容せん断応力が作用すると制御目標値を上回るひび割れが発生する可能性が非常に高いことが分かる。

また許容せん断応力計算値はコンクリート圧縮強度に比例して増加することから、 ALW_{max} を

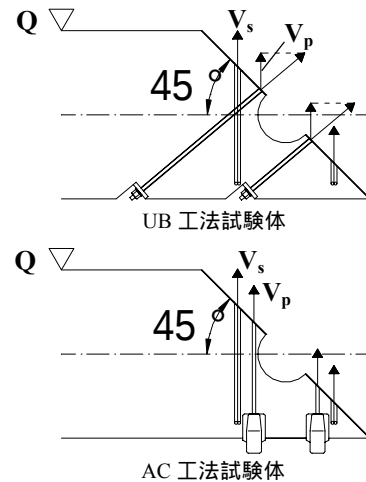


図-12 PC 鋼棒・肋筋鉛直負担せん断力

コンクリート強度の異なる試験体間で比較すれば高強度コンクリートを用いた方が孔部最大せん断ひび割れ幅を大きくとることになり(図-9)ひび割れの損傷に関して不利になる。

3.4 開孔補強筋の挙動

孔部 45°せん断ひび割れ面(図-12)において、最大耐力までの作用せん断力 Q に対する PC 鋼棒鉛直負担せん断力 V_p 、孔際肋筋鉛直負担せん断力 V_s と部材角 R の最大耐力時までの関係を図 13～18 に示す。但し降伏後の歪み硬化

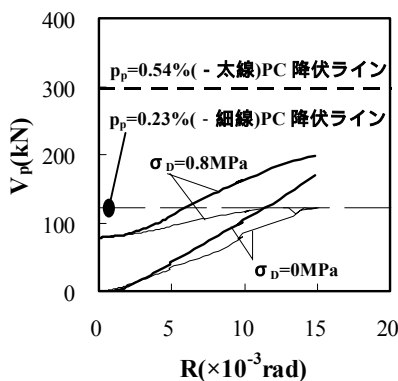


図-13 PC 鋼棒鉛直負担せん断力 (変数: p_p , σ_D)

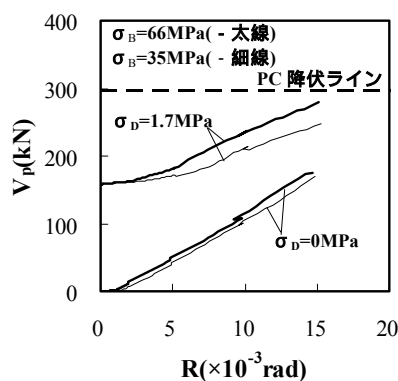


図-15 PC 鋼棒鉛直負担せん断力 (変数: σ_B , σ_D)

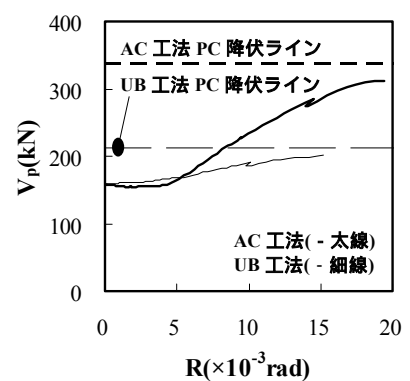


図-17 PC 鋼棒鉛直負担せん断力 (変数: 開孔補強工法)

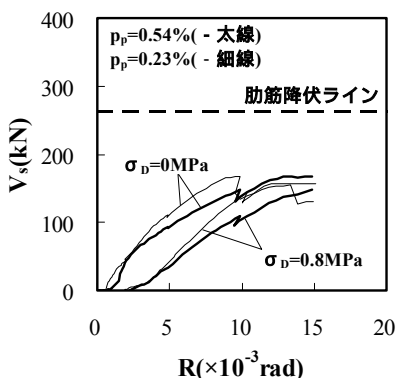


図-14 肋筋鉛直負担せん断力 (変数: p_p , σ_D)

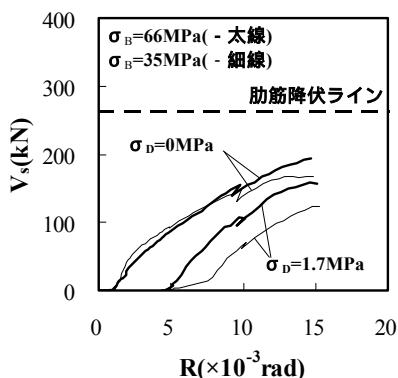


図-16 肋筋鉛直負担せん断力 (変数: σ_B , σ_D)

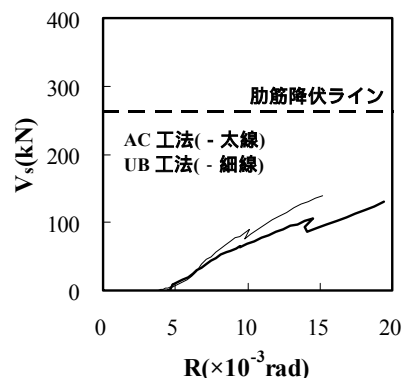


図-18 肋筋鉛直負担せん断力 (変数: 開孔補強工法)

は考えないものとする。PS 導入量が大きいほど孔部せん断ひび割れを抑制する為、孔際肋筋の負担せん断力が増加し始めるのが遅くなっているのが分かる。最大耐力時には孔際肋筋の負担せん断力は一定となり、PC 鋼棒負担せん断力の差分が耐力差になっている（図-13、14）。またコンクリート強度を変数とする試験体間では、PS 導入しなければ PC 鋼棒・孔際肋筋ともに同じ挙動を示したが、高強度コンクリート $\sigma_B=66\text{MPa}$ に PS 導入した場合、PC 鋼棒・孔際肋筋とも負担せん断力が増加する傾向にあり、作用せん断力に対して有効であったことが分かる（図 15、16）。同じ PC 鋼棒径・初期鉛直方向緊張力で工法の異なる試験体間では、作用せん断力に対して平行して PC 鋼棒を配置している AC 工法の方が UB 工法より PC 鋼棒の負担せん断力が大きく有効に作用した（図 17、18）。

3.5 せん断終局耐力

修正広沢式⁴⁾において PC 鋼棒を開孔補強筋とみなした計算値と実験値との対応を検討する。本試験体 12 体と文献 1)の UB 工法試験体 3 体を合わせて考察する。図-19 は縦軸を最大耐力実験値 $eQ_{\max}$ 、横軸をせん断終局強度計算値 cQ_{su0} としてプロットしたものである。全試験体とも計算値に対する実験値が安全側であるとともに傾向もよく合致している。なお、 $eQ_{\max}/cQ_{\text{su0}}$ の値は UB 工法試験体で 1.14 ~ 1.38、AC 工法

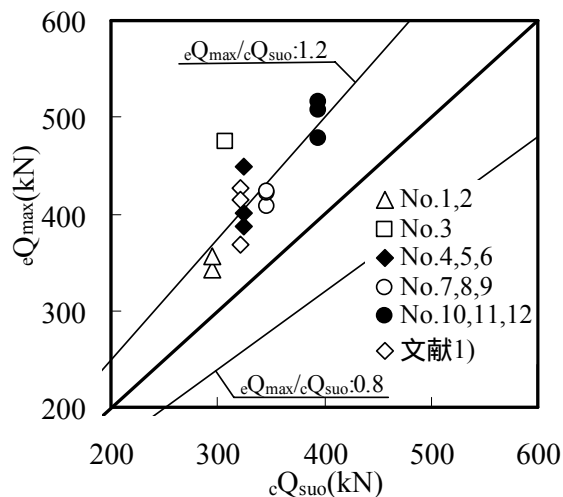


図-19 最大耐力実験値と計算値の関係

試験体で 1.54 だった。AC 工法試験体 No.3 の計算値に対する実験値の安全率が高い理由として、PC 鋼棒が作用せん断力に対して UB 工法より有効に抵抗したためであると考えられる。

4. まとめ

本実験の結果をまとめる。

1. 孔部せん断ひび割れ強度は、平均 PS 応力の増加に伴い上昇した。
2. RC 造有孔梁は制御目標値を大きく上回るひび割れが生じる可能性がある。
3. 開孔補強筋比と PS 導入量を適切に設定すれば制御目標値以下にひび割れを抑えることができる。
4. 普通強度に比べ高強度のコンクリートに PS を導入した場合、PC 鋼棒・肋筋を有効に利用できる。
5. UB 工法・AC 工法試験体ともにせん断終局強度は PC 鋼棒を開孔補強筋として修正広沢式で評価できる。

謝辞

本研究は東京工業大学建築物理研究センター、佐藤工業株式会社との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に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 高崎雄太，香取慶一，林 静雄：ひび割れの抑制を考慮した鉄筋コンクリート造有孔梁のせん断補強，コンクリート工学，Vol.24，No.2，pp.295-300，2002
- 2) 日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999
- 3) 日本建築学会プレストレス鉄筋コンクリート（種 PC）構造設計・施工指針・同解説，1986
- 4) 広沢雅也ほか：鉄筋コンクリート造有孔梁の設計方法に関する総合的な検討，財団法人日本建築センター，1994
- 5) 高周波熱錬株式会社 AC 耐震補強工法設計施工指針・同解説，2000
- 6) 大野義照ほか：鉄筋コンクリート梁のせん断ひび割れ幅，コンクリート工学，Vol.24，No.2，pp.343-348，2002