

(75) 横補強筋を用いてプレストリスを導入した RC 柱の圧縮及びせん断性状に及ぼす緊張力の影響

東京工業大学 総合理工学研究科 正会員 ○ 渡部 洋
 関東学院大学 工学部教授 横谷 榮次
 東京工業大学 建築物理研究センター教授 正会員 林 静雄
 (財)建材試験センター 伊藤 嘉則

1.はじめに

一般にプレストレストコンクリート (以下 PC と略記) とは、梁のように曲げが支配的となる部材の軸方向に元圧縮力を与え、コンクリートの引張に弱い性質を改善する考えに基づいている。一方、三軸圧縮応力下のコンクリートは一軸圧縮応力下のコンクリートと比較して圧縮強度が向上することに着目し、筆者らは昨年度までに軸圧縮力を受けるコンクリート部材に対し、軸直交方向を拘束するプレストリスを与える部材の圧縮及びせん断性状に関する実験・研究を行い報告してきた²⁾など。ここでは鉄筋コンクリート (以下 RC と略記) 部材の高強度横補強筋に引張応力 (緊張力) を与え、これを拘束力として部材に与える方法をとっている。本論文は、緊張力の大きさが及ぼす影響に関して実験を行い、昨年度までのデータを加え検証したものである。このように柱の横方向にプレストリスを与える機械的方法として、既存 RC 柱に対する断面外周からの耐震補強方法³⁾などが現在考案されているが、本論文は PRC 部材の新しい補強工法の提案を試みている。また、横補強筋を用いてプレストリスを与えない一般の RC 部材に対し導かれた既往のせん断強度評価式が、本論文の PC 部材のせん断強度推定式として適用可能であるかについても合わせて検証した。

2.実験概要

2.1 圧縮実験概要

2.1.1 試験体

試験体は約 1/5 スケールの 120mm×120mm の正方形断面、高さ 300mm からなる直方体柱、総数 22 体である (図 1、表 1 参照)。

変動要因は、横補強筋一本あたりの初期緊張力 σ_{wp} を溶接部の降伏強度の 90, 60, 30, 0% の 4 種類、横補強筋間隔を @120, 90, 60, 30mm の 4 種類、材種を 2 種類、主筋を 2 種類とした (表 2 参照)。固定要因は、横補強筋径を $\phi 2.0$ mm、コンクリートは早強ポルトランドセメントを用いたモルタルとし、目標基準強度 30MPa にて材齢 10 日目に加力した。また、22 体の他に各試験体の同一バッチのコンクリートを使用した無拘束コンクリートについても実験を行った。

2.1.2 加力及び測定方法

加力は AMS-2MN 試験機を使用し、加力鉄板を介し上部・下部ともに固定のもと一方向単調の中心圧縮力を載荷した。柱中央部 (検長 270mm) における軸ひずみを柱に埋め込んだ金具に取り付けた変位計より測定し、主筋及び横補強筋ひずみは図 1 の位置に貼付したひずみゲージにより測定した。

2.2 せん断実験概要

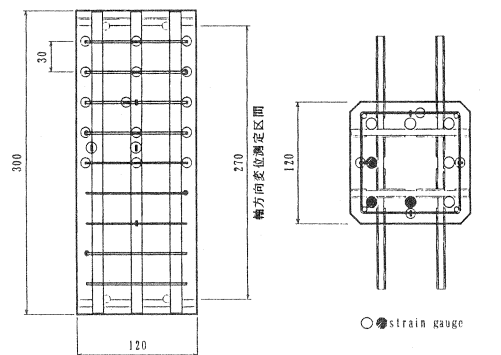


図 1 圧縮試験体詳細

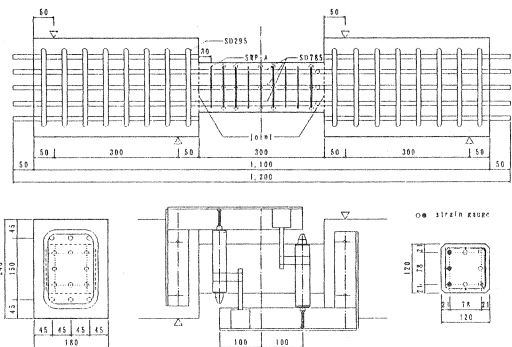


図 2 せん断試験体詳細

表1 圧縮試験体一覧

シリーズ	NO.	試験体名	横補強筋				主筋			**コンクリート			
			間隔 (mm)	種類	緊張力 (GPa)	横補強筋比 P_w (%)	配筋	種類	主筋比 P_g (%)	圧縮強度 σ_c (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν
120C	1	*120-PW-P1-4-D6-295-C	120	SWP-A	1.24	0.044	4-D6	SD295	0.91	36.1	2.1	27.9	0.2
	2	*120-PW-P0-4-D6-295-C			0	0.044							
	3	*120-SW-P0-4-D6-295-C			0	0.044							
90C	4	*90-PW-P1-4-D6-295-C	90	SWP-A	1.24	0.058	4-D6	SD295	0.91	38.7	2.1	28.9	0.2
	5	*90-PW-P0-4-D6-295-C			0	0.058							
	6	*90-SW-P0-4-D6-295-C			0	0.058							
60C-A	7	*60-PW-P1-4-D6-295-C	60	SWP-A	1.24	0.087	4-D6	SD295	0.91	38.0	2.3	28.7	0.2
	8	*60-PW-P0-4-D6-295-C			0	0.087							
	9	*60-SW-P0-4-D6-295-C			0	0.087							
60C-B	10	*60-PW-P1-8-D10-785-C	60	SWP-A	1.24	0.087	8-D10	SD785	4.18	29.2	2.0	21.4	0.2
	11	60-PW-P2-8-D10-785-C			0.83	0.087				27.7	1.5	19.7	0.2
	12	60-PW-P3-8-D10-785-C			0.41	0.087				26.3	1.1	19.8	0.1
	13	*60-PW-P0-8-D10-785-C			0	0.087				29.2	2.0	21.4	0.2
	14	*60-SW-P0-8-D10-785-C			0	0.087							
	15	*30-PW-P1-4-D6-295-C			1.24	0.174							
30C-A	16	*30-PW-P0-4-D6-295-C	30	SWP-A	0	0.174	4-D6	SD295	0.91	33.6	2.3	26.9	0.2
	17	*30-SW-P0-4-D6-295-C			0	0.174							
	18	*30-PW-P1-8-D10-785-C			1.24	0.174							
60C-B	19	30-PW-P2-8-D10-785-C	60	SWP-A	0.83	0.174	8-D10	SD785	4.18	30.8	1.7	21.8	0.2
	20	30-PW-P3-8-D10-785-C			0.41	0.174				26.5	1.7	20.3	0.2
	21	*30-PW-P0-8-D10-785-C			0	0.174				27.4	1.3	19.7	0.1
	22	*30-SW-P0-8-D10-785-C			0	0.174				30.8	1.7	21.8	0.2

*昨年度までに実験を行った試験体、**コンクリート強度は、100φ×200mmの標準シリンダー試験より得られた値とする。

2.2.1 試験体

基本的に圧縮試験体と同形状のせん断スパン比 (M/QD) 1.25、120mm×120mm の正方形断面、高さ300mmの総数10体の角型柱状試験体であり、柱上下の補剛材に相当する部分に載荷用スタブを設けた(図2、表3参照)。変動要因は、横補強筋の緊張力を溶接部の降伏強度の90, 60, 30, 0%の4種類、間隔を@30, 60mmの2種類、材質を圧縮実験と同様に2種類とした(表2参照)。緊張力を与える横補強筋は、柱区間のみとしている。固定要因は、主筋量、横補強筋形状(寸法 98.7×98.7mm, φ2.0mm)とし、コンクリートは圧縮実験と同じ割合にて材齢を10日間に統一した。

表2 鋼材の機械的性質

種類	断面積 (mm ²)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	降伏ひずみ (μ)	引張ひずみ (%)	ヤング係数 E_s (GPa)
D6 (SD295)	32.00	383.0	565.5	2220	N	206.9
D10 (SD785)	71.00	811.1	1024.6	3915	14.6	206.7
SWP-A	3.14	1790.0	1960.0	10700	2.4	206.9
SWP-A (溶接部)	3.14	1390.0	1640.0	8660	4.5	206.9
SW-A	3.14	1250.0	1350.0	8000	4.6	206.9
SW-A (溶接部)	3.14	1210.0	1350.0	7880	4.9	206.9

表3 せん断試験体概要

シリーズ	NO.	試験体名	横補強筋				主筋			**コンクリート			
			間隔 (mm)	種類	緊張力 (GPa)	横補強筋比 P_w (%)	配筋	種類	引張鉄筋比 P_t (%)	圧縮強度 σ_c (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν
60S	23	*60-PW-P1-8-D10-785-S	60	SWP-A	1.24	0.087	8-D10	SD785	2.00	33.4	1.5	22.8	0.3
	24	60-PW-P2-8-D10-785-S			0.83	0.087				34.7	1.6	23.5	0.2
	25	60-PW-P3-8-D10-785-S			0.41	0.087				30.6	2.5	21.8	0.3
	26	*60-PW-P0-8-D10-785-S			0.00	0.087				33.4	1.5	22.8	0.3
	27	*60-SW-P0-8-D10-785-S			0.00	0.087							
30S	28	*30-PW-P1-8-D10-785-S	30	SWP-A	1.24	0.174	8-D10	SD785	2.00	34.1	1.9	23.0	0.2
	29	30-PW-P2-8-D10-785-S			0.83	0.174				32.4	2.6	22.6	0.2
	30	30-PW-P3-8-D10-785-S			0.41	0.174				33.6	2.0	22.6	0.3
	31	*30-PW-P0-8-D10-785-S			0.00	0.174				34.1	1.9	23.0	0.2
	32	*30-SW-P0-8-D10-785-S			0.00	0.174							

*昨年度までに実験を行った試験体、**コンクリート強度は、100φ×200mmの標準シリンダー試験より得られた値とする。

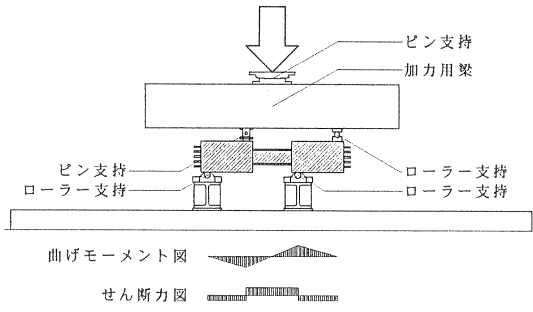


図3 せん断実験加力装置



図4 プレテンション用型枠

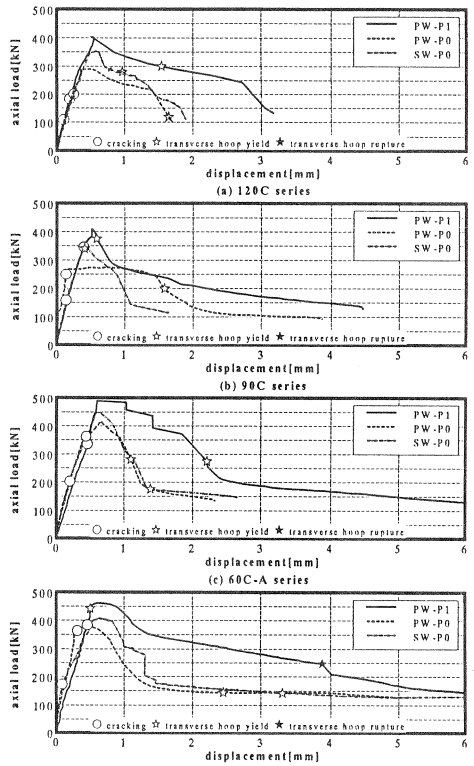


図5 荷重-変位曲線

2.2.2 加力及び測定方法

加力はアムスター-3MN試験機を使用し、柱に軸方向力は与えずに、一方向単調の大野式逆対称荷重の载荷を行った(図3参照)。相対変位は図2の位置の変位計の測定値の平均をとり、主筋及び横補強筋のひずみは同図の位置のひずみゲ-ジにより測定した。

2.3 プレストレス導入概要

横補強筋に緊張力を与え、プレストレスを導入した。図4の型枠にコンクリート打込前に緊張力を与えるプレテンション方式である。鋼製型枠4隅のネジをナットで同時に締めつけることにより横補強筋を緊張し、応力管理には各辺中央部に貼付したひずみゲ-ジを用いた。プレストレスは鋼材のリラ-ションなどの影響を受け実験時(材齢10日目)まで徐々に低下する。これを事前に行った予備試験より初期緊張力の80%とした。

3. 実験結果

3.1 圧縮実験結果

3.1.1 破壊経過

破壊経過は初亀裂発生、その後主筋降伏とそれに前後し最大耐力を迎え、徐々に耐力低下を示しか-コンクリートが剥落し始め、主筋の座屈が確認されて終局に至った。荷重-変位曲線の一例を図5に示す。初亀裂は、柱軸方向に沿う縦亀裂と与えられるものが多い。さらにPC柱では非常に特徴的な軸直交方向の亀裂が確認された。

3.1.2 圧縮強度に対する緊張力の影響

無拘束コンクリート圧縮強度 σ_{cb} にて除すことで無次元化した初亀裂発生時の圧縮強度 σ_c と緊張力 σ_{wp} の関係を図6-aに、同じく最大圧縮強度 σ_{cc} と σ_{wp} の関係を図6-bに示す。緊張力増大に伴い初亀裂発生強度、圧縮

強度ともに向上している。ただし降伏強度の50~60%の緊張力を与えた付近で最大値を迎え、その後は減少の傾向が見られる。同一横補強筋比の柱に対する回帰分析を行ったところ、2次の回帰曲線がよく適合した。これはか' -コンクリートとコアコンクリートの強度差が大きくなること等が原因として考えられるため、今後もこの回帰性状に関する検討が必要である。

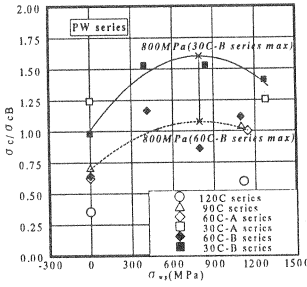


図 6-a σ_c/σ_{cB} と σ_{ax} の関係

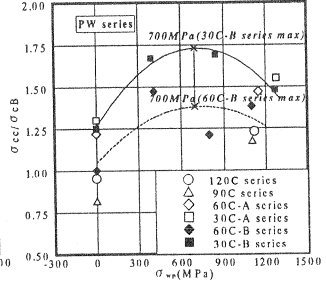


図 6-b σ_c/σ_{cB} と σ_{ax} の関係

3.1.3 柱軸直方向の変形

柱の各横補強筋位置における横方向ひずみ分布を図7に示す。ここで、横方向ひずみは圧縮実験開始時のひずみを0としている。RC柱と比較して、PC柱は横方向ひずみが相対的に小さくなっている。このことから横補強筋によるプレストレスは主筋沿いに発生する亀裂幅の拡大を抑える上で有効に働いていることが確認できる。

3.1.4 エネルギー吸収能力

全負担軸圧縮荷重 P のうちコンクリート負担分 P_c をコンクリート断面積 A_c で除した圧縮応力度と、軸方向ひずみ ϵ_L 曲線より囲まれる面積より、累積エネルギーを算出した。ここで主筋はひずみ硬化と座屈を無視した完全弾塑性型と仮定し、コンクリート断面積はか' -コンクリートがコアコンクリートから分離し剥離を生じる最大荷重近傍からはコアコンクリート断面積をとった。横軸に横補強筋比 p_w と緊張力 σ_{wp} の積を、縦軸に累積エネルギー W を示す(図8参照)。これより、緊張力 σ_{wp} および横補強筋比の増大に伴い、柱の圧縮エネルギー吸収能力が向上することが確認できた。

3.1.5 静水圧の仮定

横補強筋に囲まれるコアコンクリートに対するプレストレスを静水圧と仮定する(図9参照)。横補強筋に与えた緊張力は引張力 T として働き、この T と釣り合う拘束力 C がコアコンクリート側面に与えられるものとする。この C が等分布の荷重に置き換えられるものとする、コアコンクリート側面には側圧 σ_L が働く。

この側圧の考えに基づき横補強筋ひずみより側圧を求め、圧縮強度時の強度との関係を示す(図10参照)。横軸に側圧 σ_L 、縦軸に圧縮強度を無次元化したものを示した。これより側圧の増大とともに強度が向上していることが確認できる。図中の回帰直線は次式で与えられる。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{c0} + 17.9\sigma_L \quad \dots (1)$$

ここで、

σ_{cc} : 拘束コンクリート軸圧縮強度

σ_{c0} : 無拘束コンクリート軸圧縮強度

σ_L : 側圧

本実験より、(1)式が側圧と強度の関係式として求められた。こ

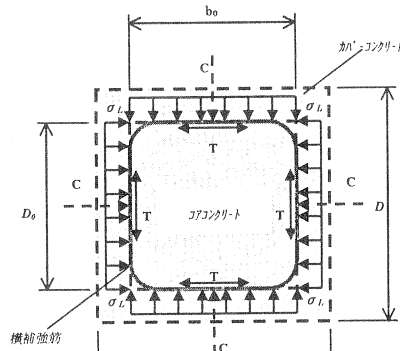


図 9 プレストレスによる拘束圧の仮定

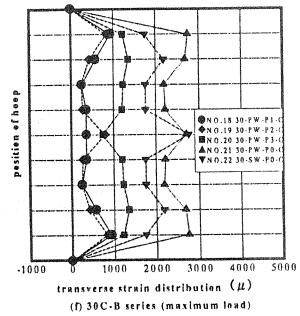


図 7 最大耐力時横方向ひずみ分布

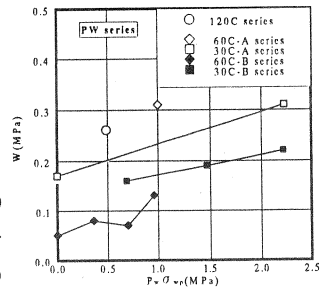


図 8 累積エネルギー吸収能

($\epsilon_s = 1.0\%$ 時)

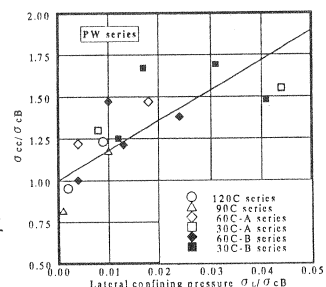


図 10 σ_c/σ_{cB} と σ_L/σ_{cB} の関係

れは、既往の側圧と圧縮強度の関係式¹⁾と同じ形を示しているが、この係数 k の値は(1)式のほうが大きい。本論文のプレストは横補強筋の断面積が柱の断面積に対し相対的に小さいため、与えることができた静水圧は決して大きくなかったにも関わらず、大きな効果が得られていることを意味する。これは本論のような横補強筋による能動的な拘束を行った際、コンクリートに対する三軸の拘束効果だけで圧縮強度の評価は与えられるのではなく、主筋の座屈防止に果す横補強筋の役割が大きくなること等他の要因も考えられる。この点は今後も検討していく必要があると考えられる。

3.2 せん断実験結果

3.2.1 破壊経過

基本的な破壊経過は、せん断ひび割れ発生、最大せん断耐力、横補強筋降伏、横補強筋の破断の順に進展した。せん断力 Q 一部材角 R 曲線を図11に示す。PC柱では特に、せん断ひび割れが曲げひび割れ発生前に生じ、最終破壊時にはRC柱ではせん断引張型破壊、PC柱ではせん断圧縮型破壊が観察された。

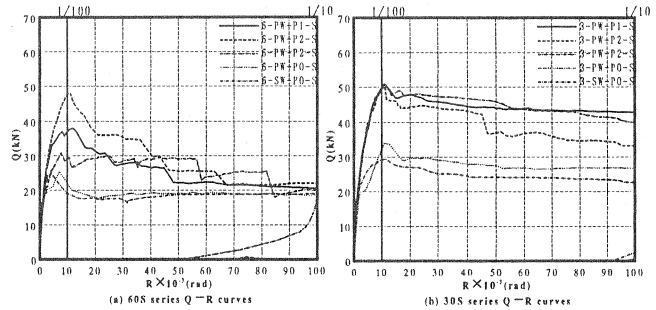


図11 せん断力-部材角曲線

また横補強筋破断は与えた緊張力の大きな柱ほど、部材変形角の小さな領域で確認される傾向にあった。一方で、横補強筋を密に配筋した柱の横補強筋の破断は少ない。これは横補強筋に与える緊張力が大きくなれば、変形の過程で横補強筋が破断に至る可能性は高くなるもの、ある程度以上の横補強筋の量を与えると、一本あたりの負担するせん断力が低減され、横補強筋の破断という脆性的な破壊に至る可能性を低減できることを示している。以上より横補強筋への緊張力を適切な範囲で与えることが肝要である。また、横補強筋の破断はせん断耐力軟化域にて最大せん断耐力の80%以下に低下した以降、降伏強度の90%まで緊張力を与えた試験体において確認されたことから、靱性型ではなく強度型抵抗を期待される柱部材として有効な方法であると評価できる。

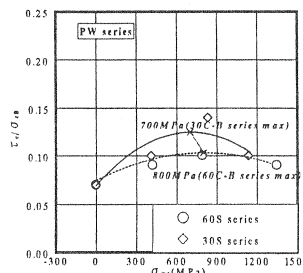


図12-a τ_c/α_0 と α_0 の関係

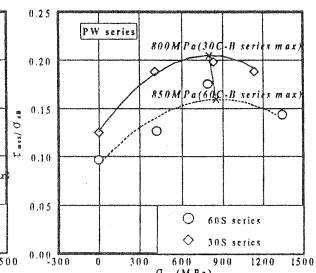


図12-b τ_{max}/α_0 と α_0 の関係

3.2.2 せん断強度への緊張力の大きさの影響

無拘束コンクリート圧縮強度 σ_{cB} にて除すことで無次元化したせん断ひび割れ応力 $\tau_c (=Q_c/bj)$ と緊張力 σ_{wp} の関係を図12-aに、同様に最大せん断応力 $\tau_{max} (=Q_{max}/bj)$ と σ_{wp} の関係を図12-bに示す。全体的には緊張力増大に伴い強度も向上しているが、圧縮実験結果と同様に降伏強度の50~60%で最大値を迎え、その後は減少の傾向が見られる。同一横補強筋比の柱の回帰分析を行ったところ同様に2次の回帰曲線がよく一致する。

3.2.3 柱軸直交方向の変形

柱の横補強筋位置における横方向ひずみ分布を図13に示す。ここでの横方向のひずみはせん断実験開始時のひずみを0としている。RC柱に対して、PC柱は横方向のひずみが相対的に小さくなっている。このことから、横補強筋に与えた緊張力はせん断ひび割れ幅の拡大を抑える上で有効に働いていることが確認できる。

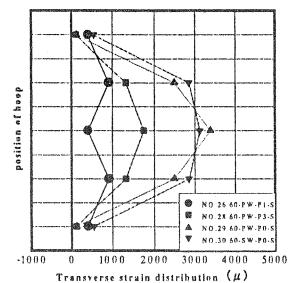


図13 横方向ひずみ分布
(最大せん断耐力時)

3.2.4 エネルギー吸収能力

せん断力 Q -変位 δ 曲線に囲まれる面積より、せん断累積エネルギー W を算出した(図14参照)。横軸は部材角 R 、縦軸にエネルギー W を表す。RC柱と比較して、PC柱は大きなエネルギー吸収能力を持つが、圧縮実験の累積エネルギーとは異なり、緊張力の増大に伴うエネルギーの比例的な増加は得られなかった。これは、緊張力を与えたことにより横補強筋が破断しやすくなったことと関係があると考えられるため、今後も十分な検討が必要である。

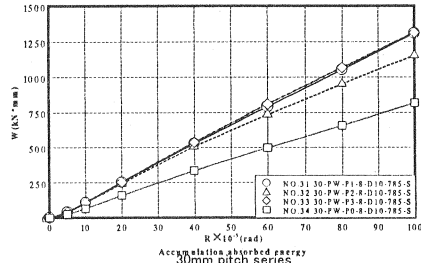


図14 累積エネルギー吸収能力

4.せん断強度推定式の提案

既往のRC部材のせん断強度推定式が、横補強筋を用いてプレストレストを導入した柱のせん断強度式として適用可能であるかを本論の実験から得られたデータに対し検証した。式には修正荒川式⁴⁾、New RCの提案式⁵⁾、靱性保証型耐震設計指針式⁶⁾を選定した。ここでPC柱において式中に代入するコンクリート圧縮強度は、本論文の圧縮実験より得られたPC柱の軸方向圧縮強度を用いた。同時に、PC柱の横補強筋降伏強度に関しては、溶接点降伏強度 σ_{wy} から与えた緊張力 σ_{wp} を差し引くという補正を行なっている。この補正を行い計算したところ、最も高い適合性を示したNew RC

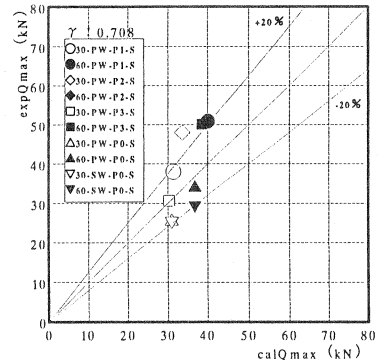


図15 New RCの提案式による計算結果

の提案式による算出結果を図15に示す。いずれのせん断強度式においても、拘束効果によるコンクリート強度の向上を評価に加える必要がある。また今後、本実験範囲外のデータに対して評価を行なう必要がある。

5.結論

以上の実験結果及び解析より以下の知見が得られた。

1. 横補強筋を用いたプレストレスト導入により、初亀裂発生強度及び最大圧縮強度、せん断ひび割れ発生強度及び最大せん断強度の向上が期待できる。
2. 実験結果を用いて回帰分析を行った結果、圧縮・せん断ともに最も高い強度をとり得る横補強筋への初期緊張力は降伏強度の約50~60%である。
3. 横補強筋への緊張力導入により、柱軸方向ひび割れ及びせん断ひび割れ幅の拡大を抑制できる。
4. せん断耐力の評価に関して、既往の評価式においては拘束効果の増加を付加することが可能である。

参考文献

- 1) F. E. Richart, A. Brandzaeg and R. L. Brown: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, University of Illinois Engineering Experimental Stresses, Bulletin No. 185, 1928
- 2) 渡部 洋、横谷榮次、伊藤嘉則、有馬裕樹: 横補強筋プレストレストを導入したRC短柱のせん断性状に関する実験的研究、第9回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論文集、pp.151-154、1999.10
- 3) 山川哲雄、鴨川重義、倉重正義: プレストレストを導入したPC鋼棒で外帯筋状に横補強したRC柱の耐震補強法に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、pp.141-145、1999.12
- 4) 日本建築学会 編、丸善: 鉄筋コンクリート構造設計標準・同解説—許容応力度設計法—、1999
- 5) 建設省総合技術開発プロジェクト: 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発、平成4年度構造性能分科会報告書、(財)国土開発技術研究センター、pp.V-4およびV-13-14、1993.3
- 6) 日本建築学会 編、丸善: 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999
- 7) H. Watanabe, E. Makitani, and Y. Ito: EXPERIMENTAL RESEARCH ON SHEAR STRENGTH OF SHORT REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH PRESTRESSED HOOPS, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000