

論文 斜張力を受けるプレストレスト鉄筋コンクリート壁のひび割れ挙動

吉岡 智和^{*1}・入倉 洋一郎^{*2}・大久保 全陸^{*3}

要旨：プレストレス導入による鉄筋コンクリート壁の損傷低減効果に着目し，P C 鋼棒により1方向もしくは2方向からプレストレスを導入した鉄筋コンクリート壁のせん断載荷実験を実施し，壁に生じるひび割れ性状に与えるプレストレスの影響を検討した。実験結果から，壁に生じるひび割れ本数，総ひび割れ長さおよび総残留ひび割れ幅に対するプレストレスの大きさ並びに経験せん断変形角の影響を定性的に明らかにした。

キーワード：鉄筋コンクリート壁，プレストレス，ひび割れ性状，残留ひび割れ幅

1. はじめに

筆者らは，耐震壁を含む鉄筋コンクリート壁（以下，R C 壁）に関して，地震により発生する損傷を抑制し，少ない補修で再利用可能にする手法として，P C 鋼棒を利用して壁にプレストレスを導入し補強する構法に着目した。このようなプレストレスを導入するR C 壁に関して，これまで幾つかの研究が行われている。例えば，宮井ら¹⁾はプレストレスを導入したR C 壁の曲げせん断載荷実験を実施し，プレストレス導入R C 壁の耐力と変形性能について報告を行っている。しかしながら，これらの既往の研究には，プレストレス導入R C 壁に生じる地震時損傷についての量的な報告が少なく，プレストレス導入によるR C 壁の損傷抑制効果は必ずしも明らかではない。

そこで，本研究では，P C 鋼棒により1方向もしくは2方向よりプレストレスを導入したR C 壁および無拘束R C 壁のせん断型載荷実験を実施し，壁に生じるひび割れ挙動に対するプレストレスの影響を検討した。本報告は，得られた実験結果を，R C 壁に発生する地震時損傷に対するプレストレス効果の観点から整理し報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体の形状，配筋およびP C 鋼棒の配置を示す。試験部分のR C 壁の寸法は，厚さ60mm×内法高さ700mm×内法スパン700mmで，壁筋としてD6を100mm間隔でシングル配筋（壁筋比 $p_s=0.53\%$ ）している。試験体には，壁の外側に配置したアンボンドP C 鋼棒によりプレストレスを導入した。なお，P C 鋼棒の壁断面積に対する割合を壁筋比と同様の方法で求めると $p_s=1.36\%$ となる。試験体に使用し

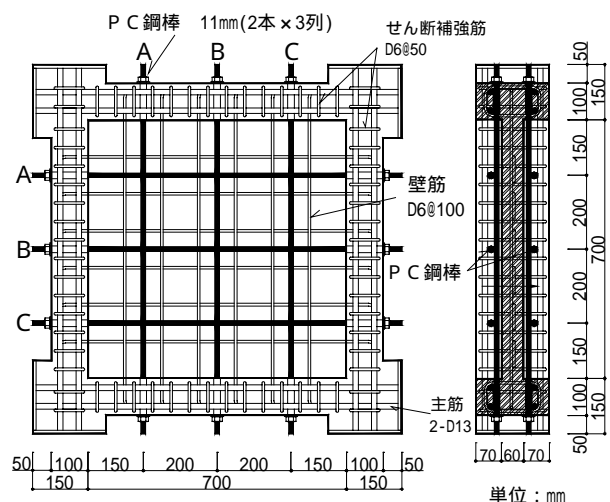


図-1 試験体形状および配筋

*1 九州芸術工科大学助手 芸術工学部環境設計学科 工修 (正会員)

*2 九州芸術工科大学大学院 芸術工学研究科生活環境専攻

*3 九州芸術工科大学教授 芸術工学部環境設計学科 工博 (正会員)

たコンクリートおよび鋼材の材料試験の結果を表-1 および表-2 に示す。

本実験では、水平方向（1方向）からPC鋼棒によりプレストレスを導入した試験体(PC1)、水平、鉛直両方向（2方向）からプレストレスを導入した試験体(PC2)、並びに比較のための無拘束RC壁試験体(RC)を計画した。なお、PC2には、PC鋼棒の初期導入張力をPC1と同等にしたPC2(1)と、初期導入張力をPC2(1)に対して2倍に増加したPC2(2)の2つのTestRunを同一試験体で実施した。なお、各試験体のプレストレスは、実験開始直前に導入した。

図-2 に、線形FEM解析により求めた初期導入プレストレスにより壁中央断面に発生する45度方向応力度 σ_{45} の分布を示す。なお、各PC鋼棒が負担する圧縮力は、PC2(1)試験体の壁中央断面の σ_{45} が均等に分布するように、位置A:B:Cで6:1:6に設定した。

2.2 計測方法および荷重方法

図-3 に試験体に取り付けた変位計の位置および

斜張力の作用位置を示す。計測には、壁の平均せん断変形角を算定するために壁対角方向の伸縮を計測する変位計と、壁に発生したひび割れ幅の開閉を計測するために対角線より75mm下方に配置した変位計をそれぞれ使用した。

加力は、壁の対角方向に圧縮力を交互に加えて、壁に斜張力を作用させるせん断型荷重とした。荷重履歴として、RC、PC1、PC2(1)試験体では平均せん断変形角 ($\times 10^{-3}rad$) = ± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 とし、PC2(2)試験体では ($\times 10^{-3}rad$) = ± 1 , ± 2 , ± 3 を計画した。

3. 実験結果

3.1 せん断応力度とせん断変形角の関係

本節では、各試験体の平均せん断応力度とせん断変形角の関係についての実験結果を示し、RC壁の強度と変形の関係に与える初期導入プレストレスの影響を確認する。図-4 に平均せん断応力度とせん断変形角の包絡線を、表-3 に初斜めひび割れ発生時強度 σ_c とせん断弾性

表-1 コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 σ_c (MPa)	割裂強度 σ_t (MPa)	ヤング係数 E_c (MPa)
23.6	1.79	26100

表-2 鋼材の材料試験結果

径	降伏点 σ_y (MPa)	引張強さ σ_t (MPa)	ヤング係数 E_s (MPa)
D6	391	541	1.93×10^5
D13	360	497	1.95×10^5
PC鋼棒	1171	1276	2.03×10^5

注)D6: 壁筋, せん断補強筋, D13: 周辺RC部材主筋

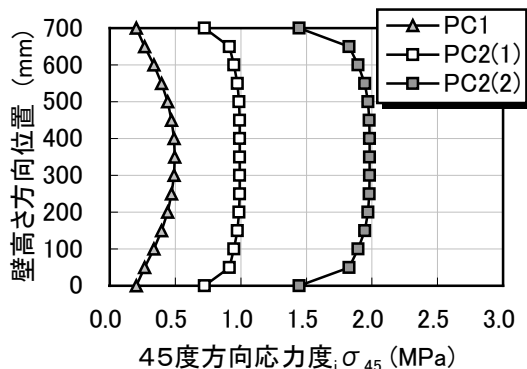


図-2 壁に生じる45度方向応力度 σ_{45}

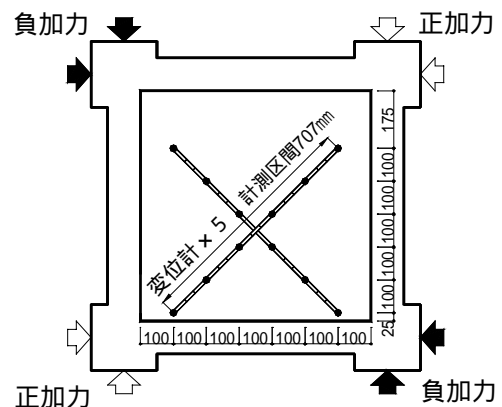
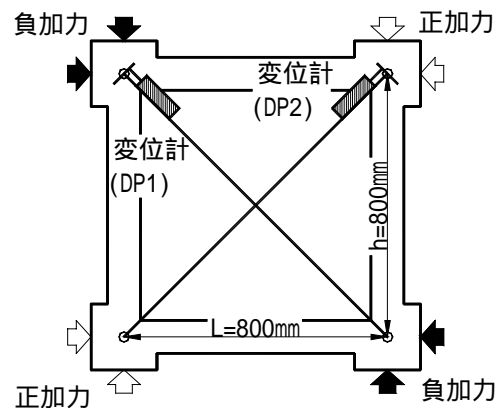


図-3 変位計測位置ならびに加力位置

係数 G および終局強度 τ_u の実験値と計算値の比較を示す。なお、図および表中に示した平均せん断応力度は、試験体に作用する斜張力の水平成分を壁厚(60mm)および周辺枠材中心間距離(800mm)で除した値としている。また、図中に示した 印は初斜めひび割れ発生時を、 印は最大強度時をそれぞれ示している。比較に用いた初斜めひび割れ発生時のせん断応力度 τ_c とせん断弾性係数 G の計算値は、壁に生じる最大引張主応力度がコンクリートの割裂強度(1.79MPa)に達した時点の平均せん断応力度およびせん断弾性係数を線形 F E M 解析により計算したもので、終局強度 τ_u は文献 2) に示される耐震壁のせん断強度式を準用し算定した。

図および表より分かるように、初斜めひび割れ強度および終局強度は初期導入プレストレスにより生じる 45 度方向応力度 $i\sigma_{45}$ の増加に伴い上昇した。また、RC および PC1 試験体では、 $i\sigma_{45} = -3/1000$ の時点において、壁中央の圧縮ストラットの圧壊により破壊に至った。一方、PC2(1) 試験体では、 $i\sigma_{45} = -4/1000$ 直前に最大耐力を観

測した後やや耐力は低下したが、本実験の変形範囲では明確な破壊は観察されなかった。また、初斜めひび割れ強度 τ_c およびせん断弾性係数 G の実験値は計算値と概ね一致した。

3.2 PC 鋼棒による拘束力の変動

ここでは、各試験体の載荷時に壁板の膨張により生じる PC 鋼棒の拘束力の増加について検討する。図-5 に各載荷サイクルの変形ピーク時における PC 鋼棒の拘束力の増加量を壁板と周辺枠材の断面積の和で除した平均拘束応力度の増分 $\Delta\sigma$ と変形ピーク時のせん断変形角 γ_p の関係を示す。

全ての試験体で、PC 鋼棒の拘束方向にかかわらず、 $\Delta\sigma$ は γ_p の増加とともに線形に増加し、増加割合も概ね一致した。また、全試験体で、PC 鋼棒の伸びは弾性範囲内であった。

以降、本報告では、PC 鋼棒による拘束力を表す指標として、各サイクル変形ピーク時における壁板の膨張に伴う拘束力の増分を加味した水平・垂直方向の平均拘束応力度の相加平均を 45 度方向応力度 $i\sigma_{45}$ と定義し検討を行う。また、

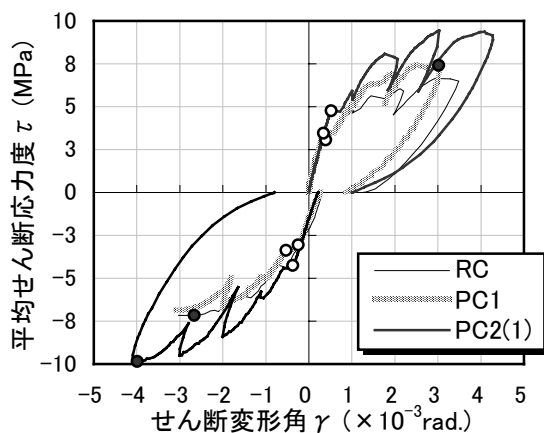


図-4 包絡線

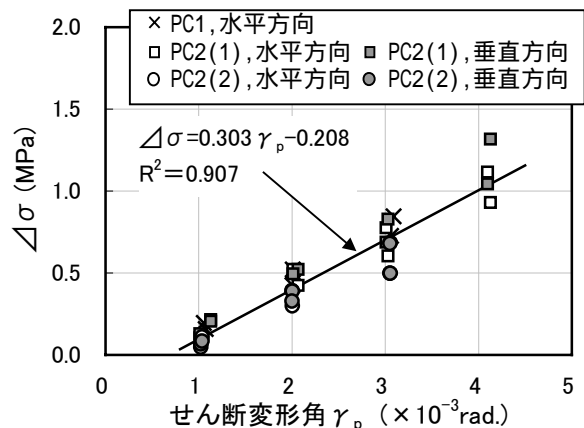


図-5 PC 鋼棒の拘束力の変動

表-3 実験結果一覧

試験体名	$i\sigma_{45}$ (MPa)	加力方向	実験値			計算値			実験値/計算値		
			τ_c (MPa)	G (GPa)	τ_u (MPa)	τ_c (MPa)	G (GPa)	τ_u (MPa)	τ_c	G	τ_u
RC	0.0	正	3.06	7.66	7.17	2.82	6.26	5.09	1.09	1.22	1.41
		負	3.06	-					1.09		
PC1	0.5	正	3.49	6.02	7.42	3.53	6.26	5.09	0.99	0.96	1.46
		負	3.37	-					0.95		
PC2(1)	1.0	正	4.72	6.55	9.85	4.31	6.26	5.09	1.10	1.05	1.94
		負	4.25	-					0.99		

本報告では、PC 鋼棒の拘束効果のみに着目し、周辺フレームの影響およびそれらの相互作用による影響は、今後の検討課題とする。

3.3 ひび割れ本数および総ひび割れ長さ

ここでは、壁に生じた斜めひび割れ本数および総ひび割れ長さに対する PC 鋼棒による拘束効果の影響を確認する。図-6 に $\rho = 3/1000$ 載荷

終了時に壁面に生じたひび割れ分布を、図-7 から図-10 にひび割れ本数 n_c および総ひび割れ長さ ΣL_c と経験せん断変形角 γ_p および PC 鋼棒による 45 度方向応力度 σ_{45} の関係を示す。なお、ひび割れ本数は壁対角線と交差したひび割れの総数を、総ひび割れ長さはひび割れを表す線分データ群の長さの総和を表している。また、

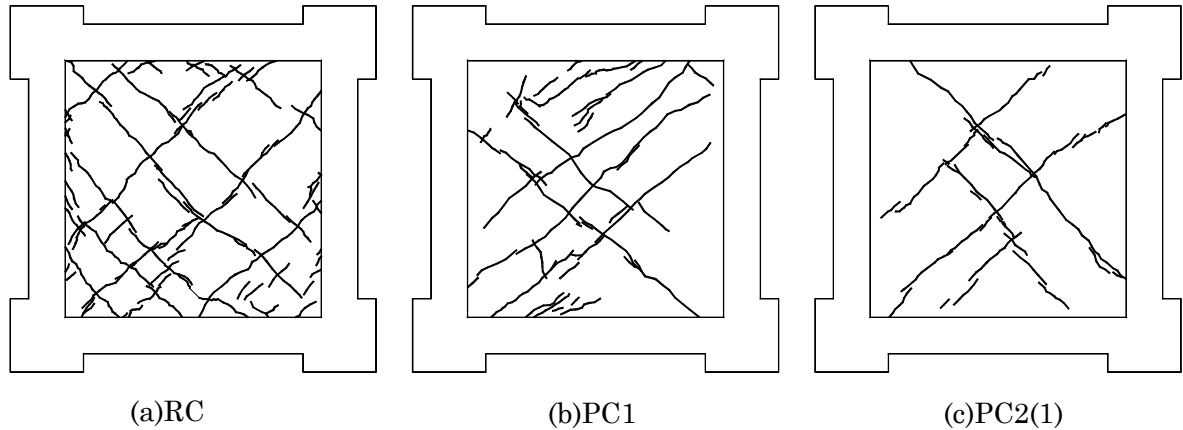


図-6 $\rho = 3/1000$ 載荷終了時のひび割れ分布

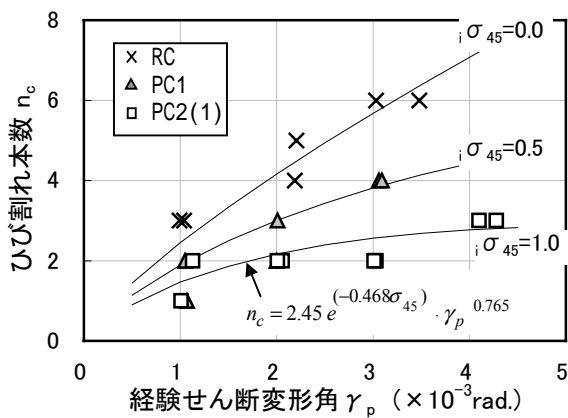


図-7 ひび割れ本数 n_c と ρ の関係

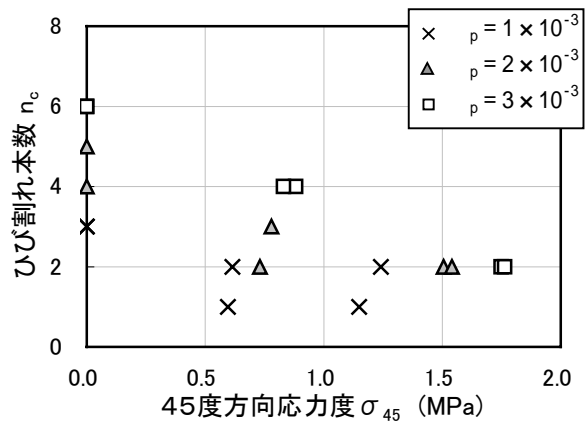


図-8 ひび割れ本数 n_c と σ_{45} の関係

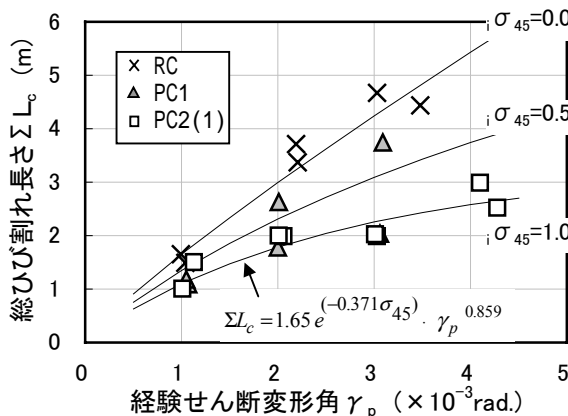


図-9 総ひび割れ長さ ΣL_c と ρ の関係

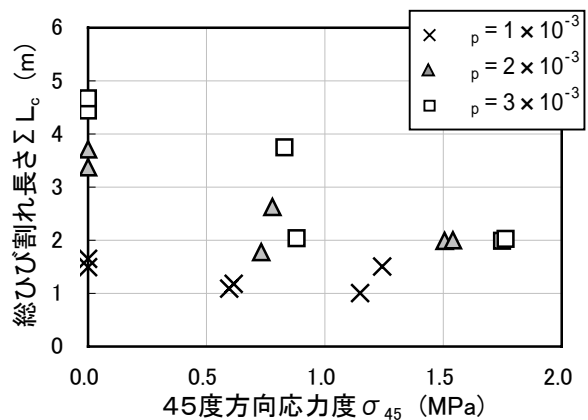


図-10 総ひび割れ長さ ΣL_c と σ_{45} の関係

経験せん断変形角は試験体が除荷前のサイクルで経験した最大せん断変形角を表している。以降文中では、経験せん断変形角は γ_p 、45 度方向応力度は σ_{45} の記号により記述する。

図-6 に示すように、RC 試験体と PC 鋼棒により拘束した PC1、PC2(1)では、 $\gamma_p = 3/1000$ 載荷終了時のひび割れ分布に相違が観られ、RC 試験体ではひび割れが壁全体に広く発生するのに対し、PC1、PC2(1)試験体ではひび割れが対角方向の一定幅の帯部分に集中し発生した。なお、各載荷サイクルで同一試験体に用いて初期導入張力を 2 倍にした PC2(2)試験体のひび割れ分布は、PC2(1)試験体と同様であった。

図-7、8 に示すように、ひび割れ本数 n_c は、いずれの試験体においても γ_p が大きくなるにつれ増加し、 γ_p が同じ場合には σ_{45} が大きいほど発生するひび割れ本数は少なくなる傾向が観られる。上記のひび割れ本数と γ_p 、 σ_{45} との相関を表す回帰式を図-7 中の実線で表す。

また、総ひび割れ長さ L_c についても、図-9、10 に示すように、図-7、8 に示したひび割れ本数の場合とほぼ同様の相関が、 γ_p および σ_{45} との間に観られた。総ひび割れ長さ L_c と γ_p 、 σ_{45} との相関を表す回帰式を図-9 中の実線で表す。

3.4 ひび割れ幅

ここでは、RC 壁の地震時損傷を表す指標の 1 つである変形ピーク時および除荷後の平均ひび割れ幅に対する PC 鋼棒による拘束効果の影響を確認する。図-11、12 に変形ピーク時の平均ひび割れ幅 W_p と γ_p および σ_{45} との関係を、図-13、14 に除荷後の残留平均ひび割れ幅 W_0 と γ_p および σ_{45} の関係を示す。なお、図-11 ~ 図-14 に使用した平均ひび割れ幅として、図-3 に示す壁面上の各対角方向に配置した各々 5 個の変位計により計測したひび割れ幅の総和をそれら変位計と交差したひび割れの本数で除した値を用いた。

図-12 が示すように、変形ピーク時の平均ひ

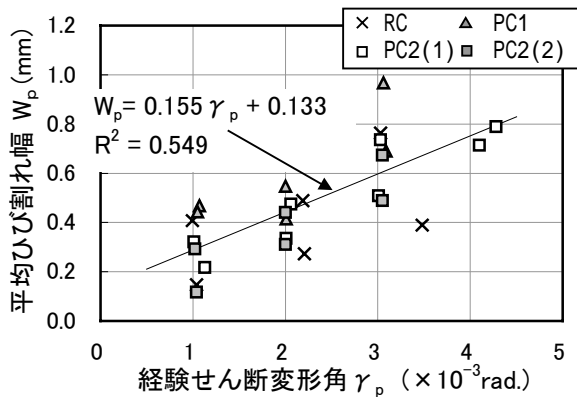


図-11 平均ひび割れ幅 W_p と γ_p の関係

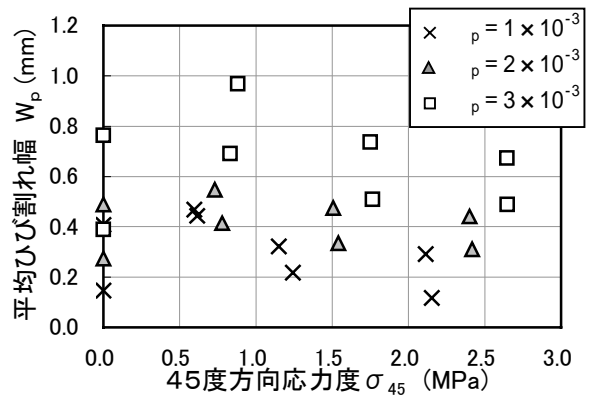


図-12 平均ひび割れ幅 W_p と σ_{45} の関係

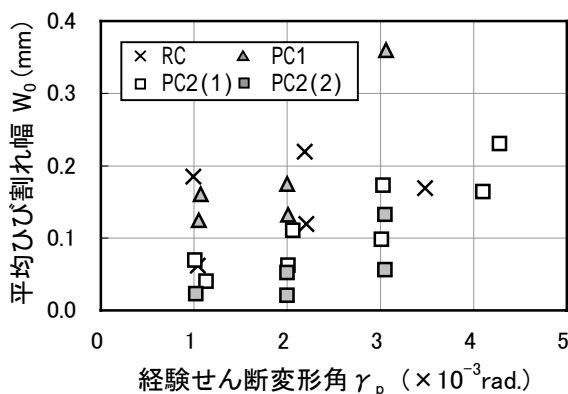


図-13 残留平均ひび割れ幅 W_0 と γ_p の関係

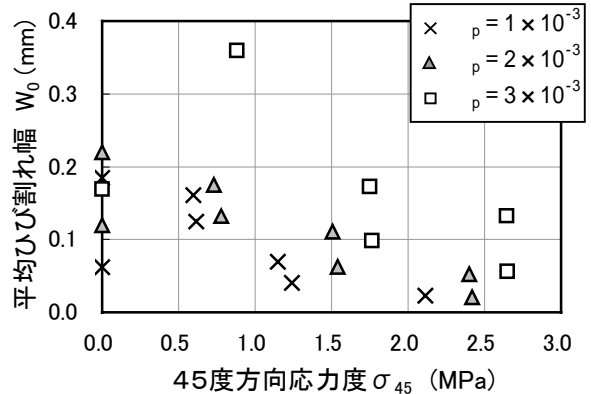


図-14 残留平均ひび割れ幅 W_0 と σ_{45} の関係

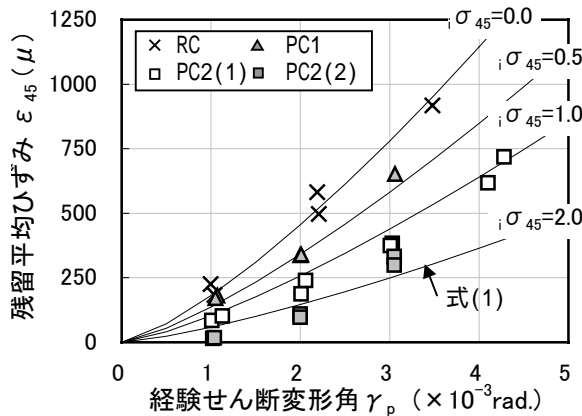


図-15 残留平均ひずみ ϵ_{45} と p の関係

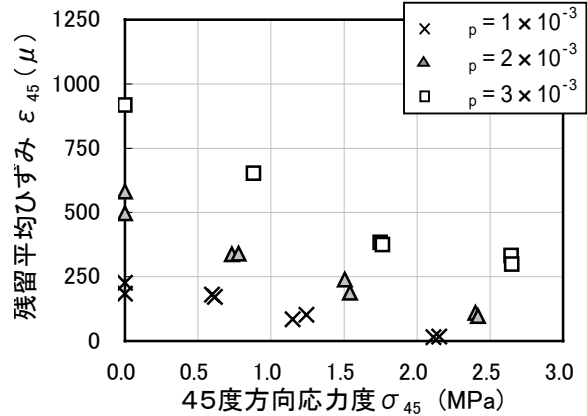


図-16 残留平均ひずみ ϵ_{45} と σ_{45} の関係

び割れ幅 W_p と ϵ_{45} の間には， $\epsilon_{45} = 0.60 \sim 0.88 \text{ MPa}$ となる PC1 の結果を除くと，ほとんど相関は認められない。一方，平均ひび割れ幅 W_p は p の増加とともに線形に増加し，図-11 中に示す回帰式で表される相関が認められた。

図-14 に示すように，除荷後の残留平均ひび割れ幅 W_0 と ϵ_{45} の間には， $\epsilon_{45} = 0.60 \sim 0.88 \text{ MPa}$ となる PC1 の結果を除くと， ϵ_{45} の増加につれ残留平均ひび割れ幅 W_0 が減少する傾向があった。一方，残留平均ひび割れ幅 W_0 は p の増加とともに大きくなる傾向が観られた。

なお，PC1 試験体のひび割れ幅が他の試験体に比較し大きくなったのは，壁面に発生したひび割れの総数に対して，変位計で幅を計測できたひび割れの数が少なかったことと，計測したひび割れ幅がその内の1箇所のみひび割れに集中した結果であると考えられる。なお，PC1 試験体で1箇所のひび割れに変形が集中した原因は今後の検討課題である。

最後に，除荷後の残留平均ひび割れ幅 W_0 を無次元化し評価するため，残留平均ひび割れ幅の総和を壁対角長さで除した45度方向残留平均ひずみ ϵ_{45} を定義し，それに対する p および σ_{45} の影響を考察した。図-15，16 に除荷後の45度方向残留平均ひずみ ϵ_{45} と p および σ_{45} の関係を示す。なお，図中の ϵ_{45} は，図-3 に示す変位計で計測した壁の対角方向残留伸びを内法対角長さで除した値としている。

図-15 に示すように，残留平均ひずみ ϵ_{45} は

p の上昇に伴い増加し， ϵ_{45} の増加率は p が大きくなるほど高くなる傾向を示した。また，図-16 に観られるように，同一の経験せん断変形角 γ_p レベルで観ると，残留平均ひずみ ϵ_{45} は σ_{45} が大きくなるほど減少する傾向が観察された。上記の残留平均ひずみ ϵ_{45} と p および σ_{45} の相関を表す回帰式を式(1)に示す。

$$\epsilon_{45} = 181 \cdot e^{(-0.564 \sigma_{45} - 0.033 \Delta \sigma_{45})} \cdot \gamma_p^{1.33} \quad (1)$$

ここで， ϵ_{i45} は初期プレストレスによる45度方向応力度を， $\Delta \epsilon_{45}$ は45度方向応力度の増分を表す。

4.まとめ

PC 鋼棒によりプレストレスを導入した RC 壁のせん断載荷実験を実施した結果，本実験の範囲内において，プレストレス導入による地震時損傷低減効果として，発生するひび割れ本数の減少，総ひび割れ長さの減少および除荷後に残留するひび割れ幅の総和の減少を確認でき，その実験結果を定性的に表す回帰式を示した。

参考文献

- 1) 宮井清忠ほか，アンボンドテンドンブレース内蔵耐震壁の弾塑性性状に関する実験的研究(その1)，(その2)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.2603-2606，1983.9
- 2) 鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針(案)同解説，日本建築学会，1997