

# 論文 せん断損傷 RC 極短柱の残存軸耐力と応急補強実験

上松 茂<sup>\*1</sup>・山川 哲雄<sup>\*2</sup>・吉井 大輔<sup>\*1</sup>・中田 幸造<sup>\*3</sup>

要旨：ひび割れ幅による損傷レベルを実験変数としてせん断損傷させたRC極短柱の中心圧縮載荷実験を行い，残存軸耐力を測定した。次いで，損傷レベルが大きくなるにつれて，コンクリート強度は大幅に低下していくことを示し，せん断損傷RC柱の損傷コンクリート強度と損傷レベルの関係を明らかにした。さらに損傷レベルの大きな柱に緊張PC鋼棒と鋼板を用いた応急補強を施すことで，損傷前と同等，もしくはそれ以上の耐震性能を回復可能であることが分かった。

キーワード：せん断損傷 RC 柱，損傷レベル，残存軸耐力，PC 鋼棒，応急補強

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災以降，日本各地で頻発する地震を通して震災直後の損傷建物の応急補強法や復旧技術に対する社会的ニーズや関心も，事前に行う耐震補強と同様にやや高まってきたように思われる。特に柱は鉛直荷重を支え，地震荷重に抵抗する重要な耐震要素である。山川らは柱が地震でせん断損傷したことを想定し，緊張PC鋼棒またはアラミド繊維ベルトと鋼板による外部横補強材を用いたせん断損傷RC柱の応急補強法に関する研究を行ってきた<sup>1)2)</sup>。

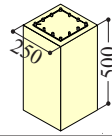
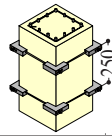
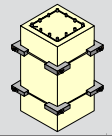
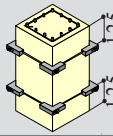
その結果，上記の応急補強が可能な柱であれば，本補強法を適用することで，せん断損傷後も軸耐力を回復し，せん断損傷前以上の十分な耐震性能を確保できることがすでに明らかにされている<sup>1)2)</sup>。しかし，せん断損傷後の残存軸耐力に関しては未だ十分な載荷実験が行われていない。そこで，本研究ではせん断損傷レベルが異なるせん断スパン比1.0のRC極短柱に鉛直荷重を載荷し，損傷コンクリートの強度低下を検討した。また，比較検討するために健全な同一柱試験体にも鉛直荷重を載荷し，保有軸耐力を測定した。本研究の目的は，せん断損傷レベルが異なる損傷RC極短柱の中心圧縮実験を行い，損傷レベルと損傷コンクリートの強度低下

の関係を明らかにし，次いで応急補強を施し，その耐震性能を確認することである。

## 2. 実験計画

試験体は250mmの正方形断面で，柱高さ500mm(せん断スパン比1.0)のRC極短柱であり，本シリーズはTable 1に示す中心圧縮実験用基準試験体1体(ER05S-P0)と，せん断損傷を起こさせた後，残存軸耐力を検討する柱試験体3体(ER05S-P2,P3,P4)の計4体である。せん断損傷を

Table 1 Details of column specimens (shear failure test)

	ER05S-P0	ER05S-P2	ER05S-P3	ER05S-P4
Elevation (mm)				
PC bar	-	3.8φ-@250		
Prestress	-	529 MPa	Non	
Common details	M/(VD)=1.0, N/(bDσ <sub>B</sub> )=0.2, σ <sub>B</sub> =25.8MPa, Rebar:12-D10 (p <sub>s</sub> =1.36%), Hoop:3.7φ-@105 (p <sub>v</sub> =0.08%)			

Note:  emergency retrofit specimen

Table 2 Properties of reinforcement

		a (mm <sup>2</sup> )	σ <sub>y</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (GPa)	σ <sub>u</sub> (MPa)
Rebar	D10	71	335	182	489
Hoop	3.7φ	11	643	199	688
PC bar	3.8φ	11	1279	216	1359
	5.4φ	23	-	206	1103
Steel plate	t=3.2	-	277	206	337

Notes: a=cross section area, σ<sub>y</sub>=yield strength of steel, E<sub>s</sub>=Young's modulus of elasticity, σ<sub>u</sub>=ultimate strength of steel

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (正会員)

\*2 琉球大学 工学部教授 工博 (正会員)

\*3 琉球大学 工学部助手 工修 (正会員)

起こさせる柱試験体は、せん断実験を兼ねてその損傷レベルを制御するため、PC 鋼棒で粗な外部横補強を行った。与える損傷レベルはII ~ IV を目標とした。主筋にはD10を12本( $p_g=1.36\%$ )、帯筋には $3.7\phi$ の丸鋼を105mm 間隔( $p_w=0.08\%$ )で配置した。実験に用いた材料の力学的特性を Table 2 に示す。PC 鋼棒 5.4 $\phi$  は降伏点強度前にネジ部で破断するため、破断強度のみ記載している。実験は Fig. 1 に示す2台のサーボアクチュエータにより、加力ビームをテストベッドに対して常に平行に維持する加力装置を用いて、中心圧縮荷重実験と一定軸力下(軸力比0.2)の正負繰り返し水平加力実験を行った。

試験体 ER05S-P3 と ER05S-P4 は Fig. 2 に示すように、軸力比0.2 でせん断損傷実験を行った後、残存軸耐力実験を行い、その後軸力を軸力比0.2 まで戻した。そして、軸力比0.2 を保持したまま 41mm 間隔で密に配置した緊張 PC 鋼棒で鋼板を損傷柱表面(4 面)に圧着した後、軸力比0.2 で正負繰り返し水平加力実験を行い、応急補強後の耐震性能を検討した。試験体 ER05S-P2 はせん断損傷実験後の残存軸耐力実験のみを行い、応

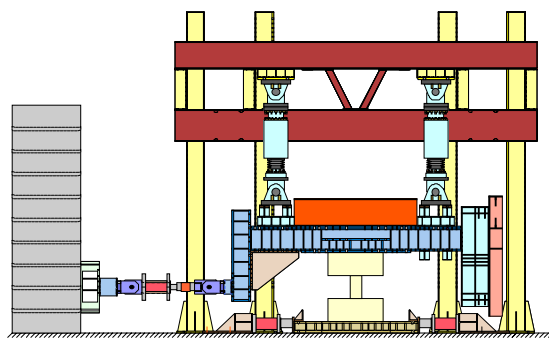


Fig. 1 Test setup

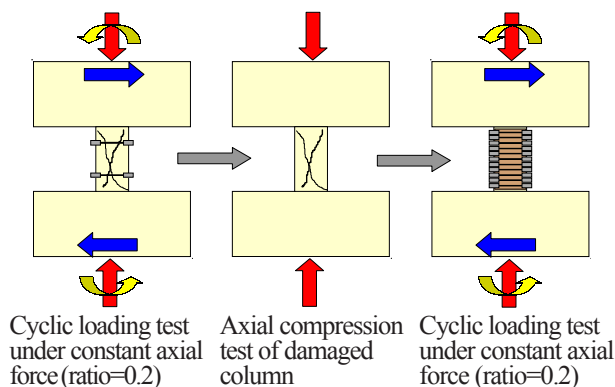
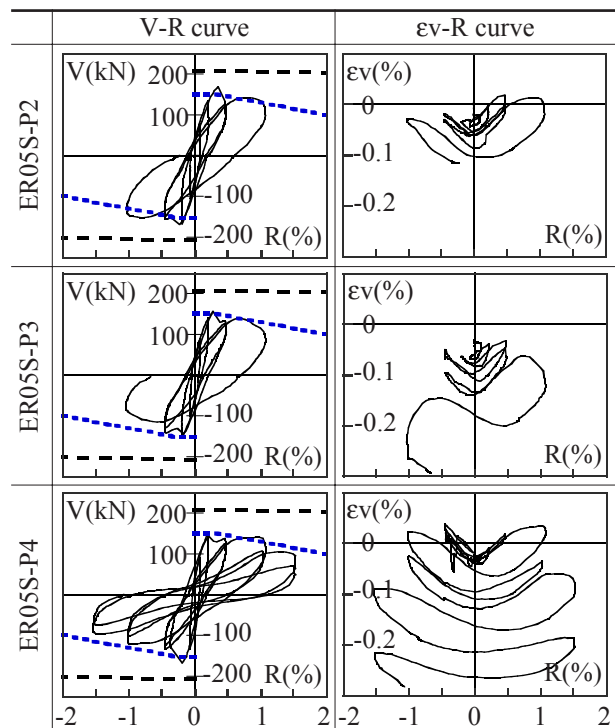


Fig. 2 Procedure of loading test

急補強実験を割愛した。基準試験体 ER05S-P0 は中心圧縮実験のみを行い、損傷の無い健全なコンクリート強度を評価し、シリンダー強度や損傷コンクリート強度と比較検討するために用いる。

### 3. せん断損傷実験

軸力比0.2でせん断損傷実験を行った試験体は、3.8 $\phi$ のPC 鋼棒を250mm 間隔で2 段配置(補強筋比0.035%)し、緊張ひずみを $2450\mu$ (降伏ひずみの1/3 程度)導入した試験体 ER05S-P2, ER05S-P3 と、緊張力を導入していない ER05S-P4 の3 体である。これらの試験体3 体は帯筋比( $p_w=0.08\%$ )に、PC 鋼棒の補強筋比(0.035%)を加えても最小せん断補強筋比0.2% を満足していない極短柱である。



--- Flexural strength by simplified Eq.  
 ..... Shear strength by AIJ Eq.

Fig. 3 Measured V-R and  $\epsilon_v$ -R relationships

ER05S-P2		ER05S-P3		ER05S-P4	
Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width
II (0.75mm)		IV (3.0mm)		IV (4.0mm)	

II,IV:Damage level<sup>5)</sup>, ( ):Max crack width(depth side)

Fig. 4 Observed cracking patterns after shear failure test

一定軸力下(軸力比0.2)の正負繰り返し水平加力実験(せん断損傷実験)により得られたせん断力 $V$ と部材角 $R$ , 柱材軸上の平均伸縮ひずみ $\epsilon_v$ と部材角 $R$ の関係をFig. 3に示し, $V$ - $R$ 曲線中にAIJ靱性指針式<sup>3)</sup>によるせん断強度と,多段配筋柱に関する略算式による曲げ強度の各計算値も合わせて示す。せん断強度にはPC鋼棒の効果を考慮している<sup>4)</sup>。また, Fig. 4にせん断損傷実験終了後のせん断ひび割れ図,ひび割れ幅,損傷レベルをそれぞれ示す。損傷レベルはひび割れ幅等により,日本建築防災協会の判定基準<sup>5)</sup>を用いて総合的に評価した。その結果,試験体ER05S-P2は損傷レベルII,ER05S-P3,P4は損傷レベルIVにあてはまる。

#### 4. 残存軸耐力測定実験(中心圧縮実験)

残存軸耐力を検証するために,せん断損傷RC柱3体と健全な基準RC柱試験体1体の中心圧縮実験を行った。中心圧縮実験は,せん断損傷実験終了後に軸力比を0.2に維持したまま水平力を零に戻し,残留変形が残った状態で外部横補強材としてのPC鋼棒を除去した。その後, Fig. 1に示す加力装置の加力ビームを平行に保ちながら軸力比を0.2から徐々に増大させ,最大軸耐力を確認後,すなわち圧縮荷重がピーク値を越え,降り勾配に入ったことが十分確認できたのち,軸力比が0.2になるまで除荷した。せん断損傷実験終了後に引き続き中心圧縮実験を行ったため,損傷がさらに増大した(Fig. 12参照)。一方,健全な基準RC柱試験体に関しても同じ加力装置を用いて中心圧縮実験を行った。

残存軸耐力実験結果をFig. 5に示す。中心圧縮載荷は試験体ER05S-P0を除き,残りの3体は

軸力比0.2から始めていることにFig. 5で注意する必要がある。また,本実験では軸力比0.2による鉛直ひずみとせん断損傷実験による鉛直ひずみが累積していると考えられるが,中心圧縮載荷のみによるひずみを考えるため,せん断損傷実験による鉛直ひずみはここでは考えず,中心圧縮実験開始時のひずみからせん断損傷実験による累積鉛直ひずみを差し引くことにする。次に, Fig. 8に示す損傷コンクリートの応力-ひずみ曲線を求めるため, Fig. 6に示す主筋の軸力負担分を平面保持を仮定して全軸力から除き,コンクリートのみが負担する軸力を計算した。その際,試験体ER05S-P3,P4はFig. 7のように,せん断損傷実験終了後に主筋のひずみは降伏ひずみ近くまで進行しているため,主筋の負担分は降伏点強度を差し引いた。これはFig. 5において,中心圧縮実験開始直後から,軸力-軸ひずみ関係がほぼ横ばいであることから全軸力のほとんどを主筋が負担し(Fig. 6参照),かつ,ほぼ降伏していることが推測されるからである。

このようにして求めた損傷コンクリートの応力-ひずみ曲線と健全なコンクリートのそれを比べたものがFig. 8である。Fig. 8より,損傷の無い健全なRC柱試験体ER05S-P0のコンクリート強度(16.1MPa)は,シリンダー強度( $\sigma_B=25.8$ MPa)に比較して約40%も小さい。文献6)によると形状寸法(250×250mm断面柱)

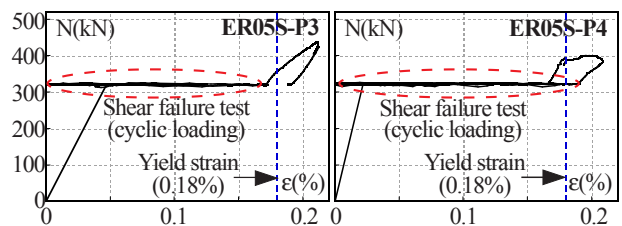


Fig. 7 Load-strain relationship of rebar

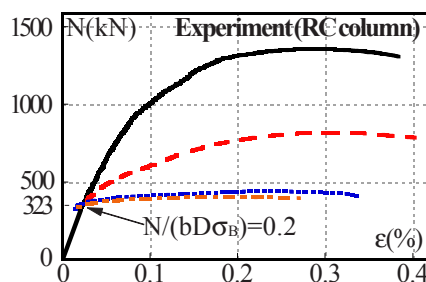


Fig. 5 Load-strain relationship of RC column

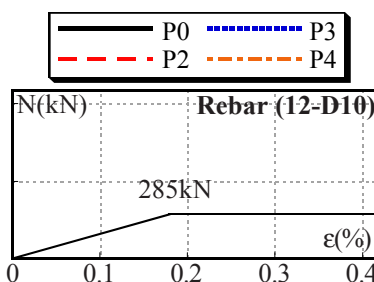


Fig. 6 Load-strain relationship of steel

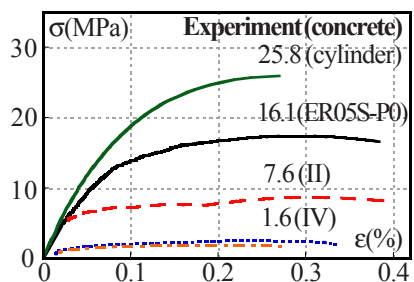


Fig. 8 Stress-strain relationship of concrete

を考慮したコンクリート強度はシリンダー強度の89%になるが、本試験体のコンクリート強度はそれよりさらに小さいことがわかる。この原因は柱試験体のコンクリート打設が縦打ちであるため、ブリージングや打設時のバイブレータの影響等が考えられる。損傷レベルIIでは健全な柱試験体 ER05S-P0 のコンクリート強度の約50%になるが、シリンダー強度に対しては約30%程度に低下する。損傷レベルIVになると残存軸耐力は主筋の降伏点強度のみの軸耐力近くになり (Figs. 5, 6 参照), せん断損傷したコンクリートの圧縮強度は小さくなる (ER05S-P0 の10%, シリンダー強度の約6%)。

## 5. 損傷コンクリート強度の検討

### 5.1 損傷コンクリート強度の推定

著者らはこれまで多数の応急補強実験を行い、同時にせん断損傷 RC 柱の残存軸耐力実験も行ってきた。しかし、主に応急補強後の曲げせん断性能の確認に重点が置かれていたため、これまでの残存軸耐力実験では、軸荷重のピーク値の確認までは行ってこなかった。本節では、ER05 シリーズを用いて圧縮応力度ピーク前の特定のデータから、Mander<sup>7)</sup>らによる応力-ひずみ関係式を用いてピーク値を予想し得ることを示し、文献2), 8), 9)で行われた残存軸耐力実験による損傷コンクリート強度のピーク値推定を行う。なお、主筋負担軸力は4章と同様の方法で除いた。

Fig. 9 には損傷コンクリートの応力-ひずみ曲線実験値と、Mander 式による推定結果を示している。Fig. 9(b)には文献8), 9)より代表して各一体の試験体を示した。ここで、文献2), 8), 9)でせん断損傷 RC 柱の残存軸耐力実験では、軸力比0.4 ~ 0.6 程度までしか鉛直載荷を行っていないため (Fig. 9(b) 参照), ER05S シリーズでも軸力比約0.4 時点の圧縮応力とそれに対応するひずみ (Fig. 9 印) を Mander 式が通過するようにコンクリート強度の推定を行う。ただし、ER05S-P3, P4 に関しては損傷レベルが大きく、残存軸耐力

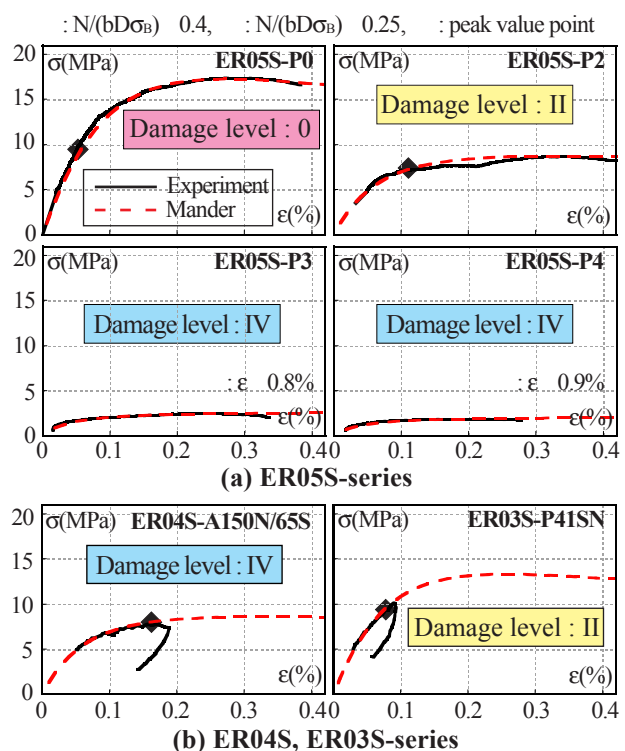


Fig. 9 Calculated  $\sigma$ - $\epsilon$  graphs of concrete to match experimental results

Table 3 Estimated values of shear damaged concrete strength

Specimen	ER05S-series				ER04S-series <sup>8)</sup>			ER03S-series <sup>2)</sup>			ER03S-series <sup>9)</sup>		
	P0	P2	P3	P4	A150N/A65S	A150M/A65S	A150H/A65S	Aw65S	Aw65SN	Aw65SA	P41SN	P41S	P65A
$\sigma_B$ (MPa)		25.8				27.5			28.5			28.3	
$\sigma_{p(ave.)}$ (MPa)		16.1				18.2			22.0			18.1	
Crack width (mm)	0	0.75	3.0	4.0	3.5	0.85	0.75	1.0	0.95	2.5	0.8	6.0	1.6
Damage level	0	II	IV	IV	IV	II*	II*	II	II	IV	II*	IV	III
$\sigma_B'$ (MPa)	16.1	7.6	1.6	1.1	7.6	9.8	11.0	12.7	12.2	3.4	12.6	3.1	10.6
$\sigma_B'/\sigma_B$	0.62	0.29	0.06	0.04	0.28	0.36	0.40	0.45	0.43	0.12	0.45	0.11	0.37
$\sigma_B'/\sigma_{p(ave.)}$	1.00	0.47	0.10	0.07	0.42	0.54	0.60	0.63	0.60	0.17	0.65	0.16	0.54
Common details	b x D x h=250 x 250 x 500mm (M/(VD)=1.0), Rebar: 12-D10 ( $p_g=1.36\%$ ), Hoop: 3.7 $\phi$ -@105 ( $p_w=0.08\%$ )												

Notes :  $\sigma_B$ =cylinder strength,  $\sigma_{p(ave.)}$ =calculated compressive strength of concrete by Mander,  $\sigma_B'$ =damaged concrete strength,

\*=revised damage level type that differs from Ref.8,9).

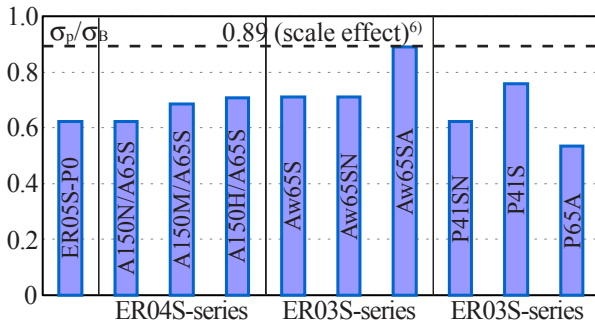


Fig. 10 Estimated values of concrete strength

が低いため、軸力比 0.25 程度 (Fig. 9(a) 印) を通過するように行った。Fig. 9(a)より、軸力比 0.4 程度 (損傷レベルが大きい場合は 0.25 程度) の圧縮応力データを用いれば、損傷コンクリート強度をほぼ推定出来ることが分かる。このようにして求めた ER05S シリーズ、文献 2), 8), 9) の損傷コンクリート強度の推定結果を Table 3 に示す。Table 3 において \* の付いた損傷レベルに関しては、ひび割れ幅が 0.75 ~ 0.85mm であったにも関わらずカバーコンクリートの損傷を過大評価し、文献 8), 9) では損傷レベル III と評価しているが、本論文ではひび割れ幅に基づいてこれを修正し、損傷レベル II とする。

### 5.2 健全な柱のブレンコンクリート強度の推定

ER05S シリーズは基準試験体 P0 (Fig. 9 ピーク値) からブレンコンクリート強度を求める。文献 2), 8), 9) では中心圧縮実験のみの試験体、つまり基準試験体がないことから、せん断実験前の定軸力比 0.2 までのデータを 5.1 節と同様に用いて、ブレンコンクリート強度を推定した。ただし、推定に使用した応力-ひずみ関係は、文献 8) の ER04S シリーズに関してのみは、せん断損傷実験で外部補強材にアラミド繊維ベルトを用いているため、これを考慮した応力-ひずみ関係<sup>10)</sup>を用いた。推定結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 のように推定された 250 x 250mm 断面柱のブレンコンクリート強度は、寸法効果係数 0.89 より小さいものがほとんどである。また、各シリーズのブレンコンクリート強度の平均値  $\sigma_{p(ave.)}$  を Table 3 に示す。

### 5.3 損傷コンクリート強度と損傷レベル

Fig. 11 は前節までの結果をひび割れ幅 (損傷

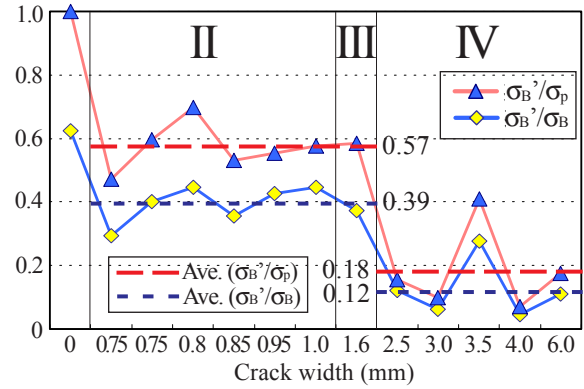


Fig. 11 Degradation of shear damaged concrete strength at different damage level

レベル) ごとに整理したものである。縦軸が損傷コンクリート強度、横軸がひび割れ幅 (損傷レベル) である。Fig. 11 より、損傷レベルが大きくなるに従い損傷コンクリート強度は小さくなり、損傷レベル II (ひび割れ幅が 0.2 ~ 1.0mm)、III (ひび割れ幅が 1.0 ~ 2.0mm 程度まで) であれば、シリンダー強度比で約 0.4 (ブレンコンクリート強度比で約 0.6)、同様に損傷レベル IV (ひび割れ幅 2.0mm 以上) ではそれぞれ約 0.1 (0.2) に概ね低下する。

## 6. 応急補強実験

中心圧縮実験終了後に軸力比を 0.2 に戻した時のひび割れ状況を Fig. 12 に示す。Fig. 12 をせん断損傷実験直後のひび割れ図である Fig. 4

ER05S-P2		ER05S-P3		ER05S-P4	
Depth	Width	Depth	Width	Depth	Width
0.75	1.6 mm	3.0	5.0 mm	4.0	8.0 mm

Note: Max crack width (depth side)

Fig. 12 Cracking patterns after axial compression test

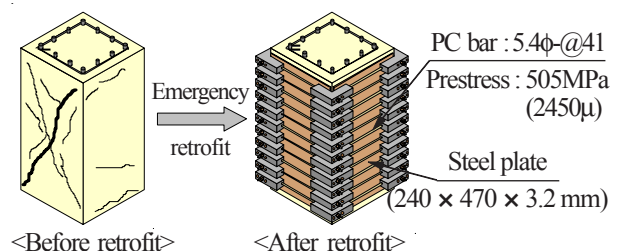


Fig. 13 Details of emergency retrofitted specimens

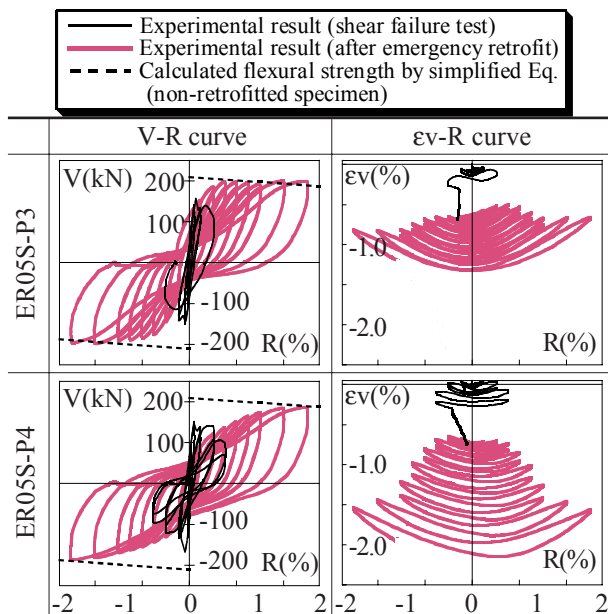


Fig. 14 Measured V-R and  $\epsilon_v$ -R relationships after emergency retrofit

と比較すると、ひび割れが更に進行していることが分かる。試験体 ER05S-P3, P4 に関しては軸力比 0.2 を維持したまま Fig. 13 に示すように厚さ 3.2mm の鋼板で損傷 RC 柱の 4 面を覆った後、コーナブロックを介して 5.4φ の PC 鋼棒を 41mm 間隔に配置して応急補強を施した。その後、緊張ひずみ 2450 $\mu$  を PC 鋼棒に導入して一定軸圧縮力下 (軸力比 0.2) の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、Fig. 14 のような V-R 曲線と  $\epsilon_v$ -R 曲線を得た。V-R 曲線中の破線は基準試験体 ER05S-P0 の曲げ強度略算値である。Fig. 14 より、試験体 ER05S-P3 は ER05S-P4 より損傷がやや小さいので、応急補強後の水平耐力の回復が早く、軸圧縮ひずみの進行が遅いことがわかる。本実験ではせん断損傷後に中心圧縮実験を行っているので、損傷レベルがさらに進行している。それにもかかわらず、すなわち損傷レベルが大きくても応急補強が可能な柱であれば、本補強法を適用することで、曲げ破壊先行で靱性に富んだ高い耐震性能が得られることがわかる。このことは本応急補強法がせん断損傷 RC 柱の耐震性能回復に効果的であることを意味する。ただし、本応急補強の適用条件としては、長期軸力を支え、柱の主筋が大きく座屈していないこと (床スラブのたわみ制限

を考慮して、柱の平均軸ひずみが 0.8% 程度以下<sup>1)</sup>、柱の残留変形が小さいことが必要である。

## 7. 結論

1) 損傷コンクリート強度は、損傷レベルが大きくなるにつれて小さくなり、損傷レベル II, III であればシリンダー強度比で約 0.4、さらに損傷レベル IV であれば約 0.1 にそれぞれ低下することが明らかになった。

2) 損傷レベルが大きくても長期軸力を支え、主筋が大きく座屈せず、柱の残留変形も小さく応急補強が可能であれば、本補強法が適用でき、しかもこの補強法がせん断損傷 RC 柱の耐震性能回復に効果的であることがわかった。

今後、残存軸耐力実験結果を増やして損傷レベルとの関係をさらに詳細に検討し、損傷レベルと応急補強量の適切な関係や、応急補強後の修復軸耐力についても明らかにすることが望まれる。

## 参考文献

- 1) 山川哲雄, 宮城敏明: 緊張力を導入した PC 鋼棒と鋼板を用いたせん断損傷 RC 柱の応急補強法, 日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp.171-178, 2004.12
- 2) 藤川将吾ほか: 緊張アラミド繊維ベルトで応急補強した損傷柱の弾塑性挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1579-1584, 2004
- 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, 日本建築学会 1999
- 4) 山川哲雄ほか: PC 鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋状に耐震補強した RC 柱の性能と設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 537 号, pp.107-113, 2000.11
- 5) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 日本建築防災協会 2001
- 6) 崎野健治ほか: コンクリート充填円形鋼管短柱の中心圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.231-236, 2002
- 7) Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988
- 8) 金城秀俊ほか: 緊張アラミドベルトを用いたせん断損傷 RC 短柱の応急補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1447-1452, 2005
- 9) 我謝美千代ほか: 緊張 PC 鋼棒で応急補強した損傷柱の残存軸耐力と弾塑性挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1291-1296, 2004
- 10) 新城良大ほか: 緊張アラミド繊維ベルトを用いたコンクリート柱の中心圧縮性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.97-102, 2004