

論文 PC 鋼棒外帯筋による耐震壁中間柱の耐震補強に関する研究

田中 睦^{*1}・江崎文也^{*2}・小野正行^{*3}

要旨：耐震壁中間柱にPC 鋼棒を外帯筋状に配置して耐震補強を行い，せん断力を加える実験を行った。実験では，壁板の位置の異なる2種類の試験体を用いた。また，補強方法は，プレストレスを導入した場合や導入しなかった場合，および壁板部分も補強した場合に分けている。得られた実験結果からは補強後の試験体の変形能力の格段の向上が見受けられ，耐震壁中間柱におけるPC 鋼棒を用いた補強の有効性を証明することができた。しかし，壁板の位置によっては多少の課題が残った。

キーワード：PC 鋼棒，耐震補強，耐震壁中間柱，プレストレス

1. はじめに

山川らにより外横補強材としてPC 鋼棒にコーナブロックを組み合わせ，プレストレスを導入し，高横拘束した既存RC柱の靱性型耐震補強法が提案されている¹⁾。しかし，この補強法は独立柱に対して提案されたもので，耐震壁の中間柱のような柱の両側に壁板が取り付く場合の補強効果についての実験資料はない。

本研究の目的は，耐震壁中間柱に対して，このPC 鋼棒を用いた耐震補強の補強効果を実験により明らかにすることにある。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究に用いた試験体8体は，その形状から2つのグループに分けられる。1つは耐震壁と

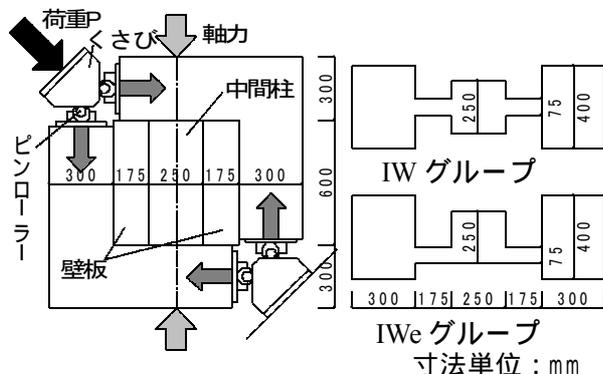


図 - 1 試験体立面図と各グループの断面図

中間柱の中心線が一致する場合(IWグループ: 4体)，もう1つは，耐震壁の外縁と中間柱の外縁が一致する場合(IWeグループ: 4体)である。

試験体は，図 - 1 に示すように耐震壁中間柱のせん断破壊の恐れのある部分を想定した要素試験体である。試験体の寸法は，中間柱が250mm × 250mmの正方形断面で，高さは600mmである。壁板の位置は異なるものの，両グループとも壁厚は75mmとし，柱と壁の構造要素は，剛な部材と剛接されている。その他の試験体の仕様及び材料の力学的特性を表 - 1 から表 - 3 に示す。

本研究で用いる基本的な補強方法を図 - 2 に示す。中間柱を補強するには，コーナブロック(材質：S45C(機械構造用炭素鋼))を柱の4隅に配置し，5.4φのPC 鋼棒を用いて締め付ける。壁板部分には，ドリルを用いて穴を開け，PC 鋼棒を通すという手法を取った。また，

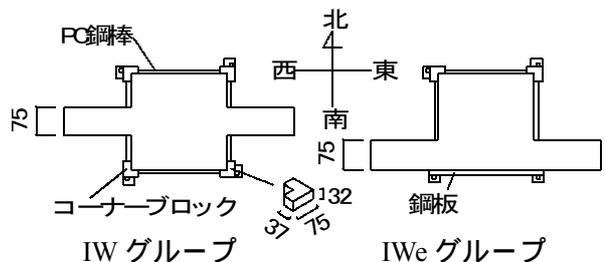


図 - 2 中間柱部分のPC 鋼棒による補強方法

*1 九州共立大学助手 工学部建築学科 工修 (正会員)

*2 九州共立大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 近畿大学教授 九州工学部建築学科 博士(工学) (正会員)

IWeグループの場合は壁板と中間柱の外縁が一致しているため、コーナブロックの代わりに41mm × 300mmで厚さ16mmの鋼板を用いている。プレストレスを導入する際には、PC鋼棒の降伏点強度の約1/3のプレストレス(490MPa)を導入した。プレストレスを導入しない場合は、手で軽く締め付けるにとどめた。補強に用いたPC鋼棒は、65mm間隔で配置され、9段積み上げられている。壁板の補強には、5.4φのPC鋼棒を用いて壁板を厚さ3.2mmの鋼板で押さえつけている。実験に際しては、表-1と表-2に示すように、両グループとも試験体を4タイプに分けた。1) 全く補強を行わなかった場合(IW-0, IWe-0), 2) PC鋼棒を外帯筋状に配置するがPC鋼棒にプレストレスを導入しなかった場合(IW-C0, IWe-C0), 3) PC鋼棒を外帯筋状に配置し、PC鋼棒にプレストレスを導入した場合(IW-C, IWe-C), 4) PC鋼棒を外帯筋状に配置しプレストレスを導入し、耐震壁を鋼板で挟みそこにもプレストレスを導入した場合(IW-CW, IWe-CW), 以上の4つに分けて実験を行った。

2.2 実験方法

実験は文献2)に示す載荷方法を用いて、試験体を45度に傾けて試験機の中へとセットする。セット終了の後、中間柱の中心に柱の軸力比0.2[$= N / (bD\sigma_B)$, N :軸力, b :柱幅, D :柱せい, σ_B :コンクリートシリンダー圧縮強度]の軸力をかけ、実験終了まで一定軸力を保持させた。剛なフレームに取り付けたピンローラーの間に挟み込んだ上下のくさびを圧縮すれば、図-1に示すような力が作用して、上下の壁板隅角部を結ぶ45度の破壊面が形成され、中間柱中央部が直接せん断破壊を起こすものと考えられる。部材の変位測定は、水平変位と鉛直変位を試験体の北側と南側でそれぞれ測定し、それらの平均を取った。

3. 実験結果

各試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R (=

表 - 1 IWグループ試験体一覧

	IW-0	IW-C0	IW-C	IW-CW
Specimen				
σ_B	23.0(MPa)	23.0(MPa)	23.0(MPa)	23.9(MPa)
prestress	—	0(MPa)	490(MPa)	490(MPa)
Comon details	Rebar:12-D10($p_g=1.36\%$), Hoop:4.0 -@105($p_w=0.1\%$), Axial compression ratio: $N/(bD\sigma_B)=0.2$, Wall thickness:75mm Wall reinforcement:4.0 -@65 single			

表 - 2 IWeグループ試験体一覧

	IWe-0	IWe-C0	IWe-C	IWe-CW
Specimen				
σ_B	24.4(MPa)	25.3(MPa)	24.4(MPa)	25.3(MPa)
prestress	—	0(MPa)	490(MPa)	490(MPa)
Comon details	Rebar:12-D10($p_g=1.36\%$), Hoop:4.0 -@105($p_w=0.1\%$), Axial compression ratio: $N/(bD\sigma_B)=0.2$, Wall thickness:75mm Wall reinforcement:4.0 -@65 single			

表 - 3 鉄筋および鋼板の力学的特性

		a (cm^2)	σ_y (MPa)	E_s (GPa)	ϵ (%)
Rebar	D10	0.71	375	178	21.6
Hoop	4	0.13	225	168	25.2
Plate	3.2	38.93	286	-	21.5

a =断面積, σ_y =降伏点強度, E_s =弾性係数, ϵ =伸びひずみ

柱水平変位 / 柱内法高さ)との関係、水平荷重 Q と中間柱の軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係を図-3、図-4に示す。水平荷重 Q は、試験機の荷重 P の水平成分として、 $Q=P/\sqrt{2}$ で求めた。また、各試験体の最終破壊状況を写真-1から写真-3に示している。写真は、IWグループは南側から撮影したもののみ、IWeグループは南側と北側の両方の写真を載せている。

図によると、最大耐力は、補強の有無にかかわらずほぼ等しいものと見ることができる。しかし、部材の変形能力に関しては、補強を行うことにより格段の向上が見受けられる。無補強の場合は最大耐力以後、せん断破壊を起こして急激に耐力が低下するのに対して、大変形時までほぼ耐力を維持する結果となり、PC鋼棒の補強効果があることがわかる。

無補強試験体では、ほぼ想定通りに45度方

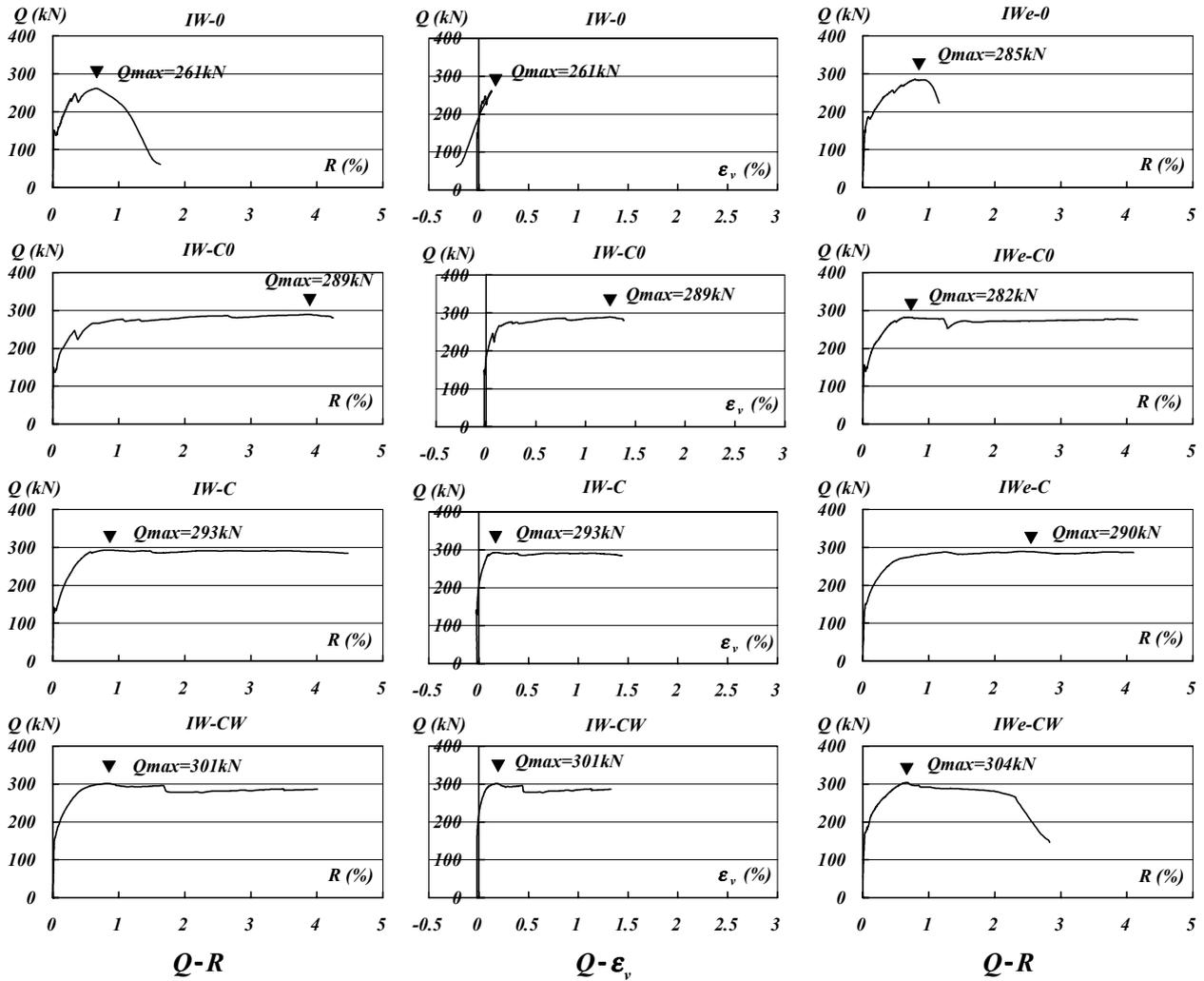


図 - 3 IW グループの荷重変形曲線

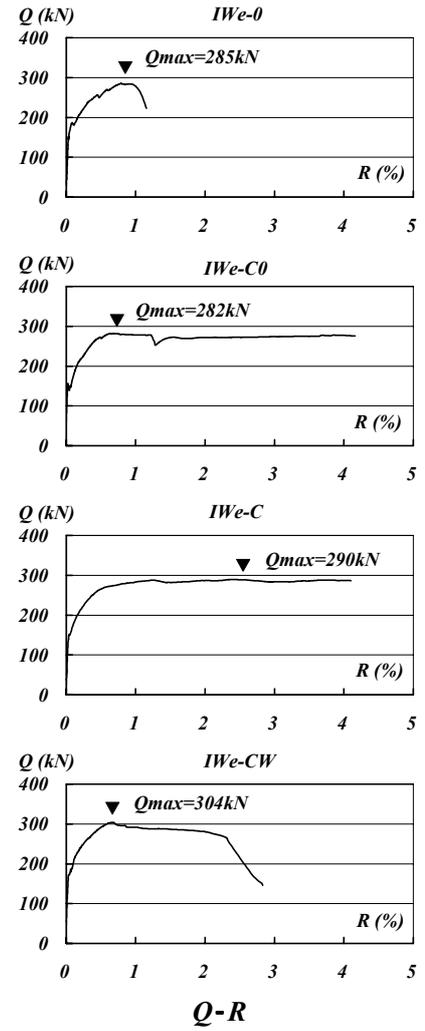


図 - 4 IWe グループの荷重変形曲線

向にせん断ひび割れが生じ、中間柱においても大きくひび割れが生じた〔写真 - 1 (a)参照〕。

補強を行った試験体での全体的な傾向としては、変形が進むにつれ、PC 鋼棒を通すために開けた穴をつなぐように壁板にひび割れが生じ、中間柱と壁板の間にスリットが生じたようになり、最終的には独立柱の変形状態に近づいてきた。また、中間柱におけるひび割れは、補強を行った試験体でもせん断ひび割れが生じるものの、補強を行わなかった試験体でのせん断ひび割れに比べるとはるかに小さなものであり、中間柱における主なひび割れは柱頭と柱脚部分の曲げひび割れであった。

次に、PC 鋼棒にプレストレスを導入しなかった場合と導入した場合での比較を行う。本実験においては、ある程度部材の変形が進んだ

時点で実験を終了している。図を見たところでは、大きな差異が見受けられず PC 鋼棒にプレストレスを導入しなくても耐震補強方法として問題はないように考えられる。ただし、プレストレスとノンプレストレスの違いをあえて上げるならば、ノンプレストレスでは耐力が途中でわずかだが急激に落ち、その後また耐力が上昇している点である。調べてみると、プレストレスを導入しなかった試験体では、ちょうどそのあたりから PC 鋼棒のひずみが急激に増大し始めている。PC 鋼棒にプレストレスを導入しなかった場合は、PC 鋼棒による補強の効果が生じるのに多少のタイムラグが生じるのではないかと考えられる。そういった点では、プレストレスの導入を行った方が良いものと思われる

る。また、写真 - 1 (b)と(c)の見比べると、(b)では柱の中央にせん断ひび割れが生じているのに対し、(c)では柱の中央はほぼ無傷である。このことから、プレストレスを導入しなかった場合では、柱にせん断破壊が生じそうになって初めて補強の効果が生じてきたものと考えられる。

中間柱だけでなく壁板も補強した試験体と中間柱のみを補強した試験体とは耐震性能に大きな差は見られず、今回の実験では壁を補強する必要が見当たらなかった。写真 - 1 (c)と(d)を比べても、壁板部分のひび割れ位置は異なっているが、柱部分のひび割れはほぼ同じものになっている。

耐震壁と中間柱の中心線が一致するグループ (IWグループ)と耐震壁の外縁と中間柱の外縁が一致する場合 (IWeグループ)でそれぞれ対になっているものを比較すると、耐力及び変形能力に関しては、ほぼ同じような結果が出ている。しかし、試験体 IWe-CW では、補強を行ったにも関わらず、耐力が急激に落ちている。これは、実験の途中で一部の PC 鋼棒が破断した試験体である。PC 鋼棒の破断箇所は、北側のせん断ひび割れが大きく入ったところの付近に配置された PC 鋼棒であった。今回の実験において、測定がうまく行えなかったので実験をやり直したものもあるが、その失敗した試験体の中で PC 鋼棒の破断という現象が起きたのも IWe グループと同じ断面の試験体であった。

ここで、比較のために IW-C0, IWe-C0, IW-CW の実験終了直前の PC 鋼棒のひずみと IWe-CW の PC 鋼棒破断直前での PC 鋼棒のひずみを表 - 4, 表 - 5 に示す。表の中で 1 段目は柱の高さ 40mm の場所で外帯筋状に配置された PC 鋼棒のひずみの値であり、2 段目以降はその

表 - 4 実験終了時における PC 鋼棒のひずみ

IW-C0 単位(μ)					IWe-C0 単位(μ)				
	西	北	東	南		西	北	東	南
9	423	1252	630	1738	9	1069	1997	2309	
8	1944	2730	1360	2325	8	1329	1282	2589	
7	2456	2649	2396	3929	7	1863	3463	3827	
6	4095	2729	4339	1902	6	2467	2027	4290	
5	2168	1082	2445	1388	5	2358	2782	3619	
4	2778	1718	2539	1882	4	1903	2014	4775	
3	875	-	753	1232	3	2567	959	2234	
2	764	-407	1501	608	2	2148	1374	1315	
1	1156	974	1242	777	1	1118	862	532	

表 - 5 実験終了時における PC 鋼棒のひずみ

IW-CW 単位(μ)					IWe-CW 単位(μ)				
	西	北	東	南		西	北	東	南
9	4921	-	3012	2508	9	3179	4728	5113	
8	4750	2881	3464	-	8	4109	3309	4324	
7	3407	2227	3245	2439	7	3135	2627	4965	
6	2541	2440	2910	-	6	2958	2465	3034	
5	2267	-	2422	2029	5	2617	2282	2354	
4	2407	-	2298	4396	4	2348	2539	2959	
3	2345	3535	-	2665	3	2708	2798	2707	
2	4248	2970	4012	2645	2	2635	3542	2928	
1	3276	-	3139	2321	1	2690	-	2692	

下の段から 65mm 高い場所に配置された PC 鋼棒の値である。東西南北の各場所の値を示しているが、IWe-C0, IWe-CW では南側に PC 鋼棒が存在しないため値はない。また、表の中の - はひずみがうまく取れなかった部分である。まず、IW-C0 と IWe-C0 では、プレストレスを導入していないために最初のひずみはほぼ 0 である。最終的には、ひずみは上側 (6 段目から 8 段目あたり) の PC 棒鋼で大きくなっていることが分かる。次に、IW-CW, IWe-CW のひずみでは、PC 鋼棒にはプレストレスを導入しているので、最初は 2450μ 前後のひずみとなっていた。PC 鋼棒の破断箇所は、IWe-CW の 7 段目の北側と 8 段目の北側である。値だけを見るとそれほど問題があるようには思えない。確かに、その周辺の値は他よりも大きくはなっているが、実際に破断した PC 鋼棒の値はあまり大きくなっていない。ただし、PC 鋼棒の破断箇所は棒の根元付近であり、ひずみの測定箇所は棒のほぼ中央で行っている。おそらくは、IWe グループでは、南側における補強が鋼板であるため、ひび割れ幅の拡大に伴う広がりを IW シリーズのように PC 鋼棒で拘束するということができないため、補強部分の変形に大きな偏りが生まれ、PC 鋼棒に曲げモーメントが加わっ



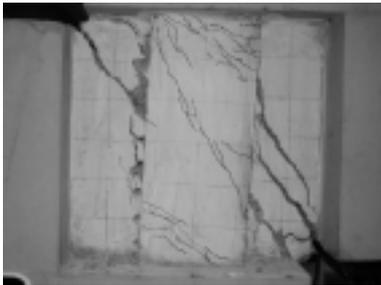
(a) IW-0 (南側)



(a) IWe-0 (南側)



(a) IWe-0 (北側)



(b) IW-C0 (南側)



(b) IWe-C0 (南側)



(b) IWe-C0 (北側)



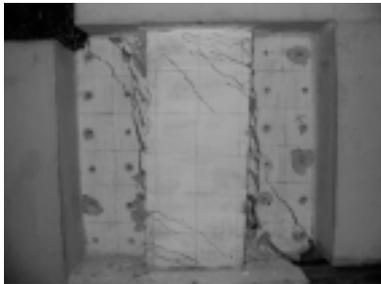
(c) IW-C (南側)



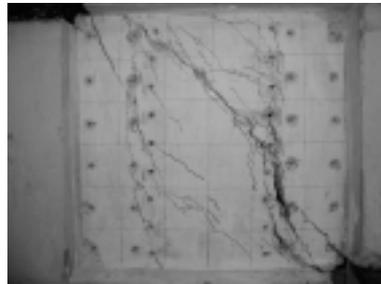
(c) IWe-C (南側)



(c) IWe-C (北側)



(d) IW-CW (南側)



(d) IWe-CW (南側)



(d) IWe-CW (北側)

写真 - 1 試験体の破壊状況
(IWグループ南側)

写真 - 2 試験体の破壊状況
(IWeグループ南側)

写真 - 3 試験体の破壊状況
(IWeグループ北側)

たのではと思われる。

なぜPC鋼棒が切断したものと切断されなかったものに分かれることになったかは、不明であるが、写真 - 2 と 3 のひび割れ状況を見ると、同じIWeグループにおいてもPC鋼棒が切断した場合にはひび割れが比較的集中しているのに対し、PC鋼棒が切断しなかった場合はひび割れが分散して存在し、中間柱と耐震壁の間にスリットが生じていた。力の伝達が微妙に異なっていたために結果が異なってきたのでは

ないかと思われる。

IWeシリーズのように壁板が柱の面と一致するような場合にはコーナブロックを用いることができないため、壁板のひび割れにつながる柱のひび割れに対し十分拘束することができずPC鋼棒の破断という現象が生じているので、今後はこの現象を防ぐ補強法を考案する必要がある。

耐震壁中間柱の適切な耐震補強を行うためには、破壊機構・抵抗機構に基づく中間柱のせん

断耐力を明らかにする必要がある。そこで、オープンフレームの柱や梁の曲げ終局強度やせん断強度の提案式^{3),4)}を用いて求めた中間柱要素試験体の水平せん断耐力算定値と実験値との比較を行った。その結果を表 - 6 に示す。

$${}_{cal}Q_{u1} = Q_{cuf} + Q_w \quad (1)$$

$${}_{cal}Q_{u2} = Q_{cus1} + Q_w \quad (2)$$

$${}_{cal}Q_{u3} = Q_{cus2} + Q_w \quad (3)$$

ここで、

$$Q_w = p_s \sigma_y t l$$

$$Q_{cuf}^{3)} = \frac{1}{h'} \left\{ 0.8 a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5 N \cdot D \left(1 - \frac{N}{b \cdot D \cdot \sigma_B} \right) \right\}$$

$$Q_{cus1}^{3)} = \left\{ \frac{0.068 p_t^{0.23} (\sigma_B + 180)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j + 0.1 \sigma_0 b \cdot j \quad (\text{kg})$$

$$Q_{cus2}^{4)} = b j_t p_w \sigma_{wy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2$$

注) 記号の説明は文献参照のこと

算定値は、いずれも実験値を大きく下回っており、耐震壁中間柱のせん断耐力を適切に評価するためには、オープンフレームの部材のせん断耐力算定式の適用法を含め、新たな評価法を検討する必要があるものと思われる。

4. 結論

- 1) 耐震壁中間柱においてもPC鋼棒を用いた補強法は、部材の変形能力の向上に大きな効果がある。
- 2) 耐震壁中間柱におけるPC鋼棒を用いた補強法でプレストレスを導入した場合とプレストレスを導入しなかった場合では、部材の耐震性能には大きな変化はない。
- 3) 耐震壁中間柱におけるPC鋼棒を用いた補強法で柱だけでなく壁にも補強を行った場合でも、壁に補強しなかった場合との大きな変化はない。
- 4) 耐震壁中間柱におけるPC鋼棒を用いた補強法では、中間柱に対する壁板の位置によりプレストレスの導入が難しくなり、場合によってはPC鋼棒が破断し、期待するような耐震性能が発揮されないことがある。

表 - 6 実験結果と耐力計算式との比較

	ex Q_u (kN)	cal Q_u (kN)		
		cal Q_{u1}	cal Q_{u2}	cal Q_{u3}
IW-0	261	230	177	124
IW-C0	289	230	177	124
IW-C	293	230	177	124
IW-CW	301	233	180	126
IWe-0	285	235	182	127
IWe-C0	282	239	185	130
IWe-C	290	235	182	127
IWe-CW	304	239	185	130

5) 耐震壁中間柱のせん断耐力を適切に評価するためには、オープンフレームの部材のせん断耐力算定式の適用法を含め、新たな評価法を検討する必要がある。

今後は、耐震壁中間柱の片側に出隅ができないように壁板が取り付く場合の補強法の工夫や耐震壁中間柱のせん断耐力の適切な評価方法について検討する予定である。

謝辞

本研究は、平成14年度基盤研究B(一般)課題番号14350306、「鉄筋コンクリート造柱と壁の応急的及び恒久的な耐震補強法の研究開発」研究代表者：山川哲雄の助成を受けた。補強に用いたPC鋼棒やブロックは高周波熱錬株式会社(ネツレン)より提供を受けた。関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: PC鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋上に横補強したRC柱の性能と設計, 日本建築学会構造系論文集, No.537, pp.107-113, 2000.11
- 2) 姜優子, 江崎文也, 小野正行: 耐震壁中間柱のせん断強度に及ぼす補強筋強度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.541-546, 2002.6
- 3) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説