

論文 CB 造耐震壁の耐震補強実験

森下陽一^{*1}・山川哲雄^{*2}・高良慎也^{*3}・山城浩二^{*4}

要旨：本研究は，通常地震力を負担しない帳壁として取り扱われる RC 造フレーム内に組み込まれたコンクリートブロック (CB) 造壁体を，耐震要素として活用するため，CB 造壁体の耐震性能を明らかにすることを目的として，一定鉛直荷重下の正負繰り返し水平加力実験を行なった。さらに CB 造壁体にコンクリートまたはモルタルを側柱幅まで増し打ちする耐震補強法によって，耐震性能を改善させることを検討するとともに，RC 造フレームのみと RC 造耐震壁を組み込んだものとの比較検討を行なった。

キーワード：耐震補強，コンクリートブロック，CB 壁，増し打ち，鋼板

1. 序

山川らは，RC 造耐震壁の壁板にコンクリートを増し打ちし，コンクリート硬化後に型枠として使用した鋼板を緊結材である PC 鋼棒に緊張力を導入して圧着する耐震補強法を提案している^{1), 2), 3)}。その結果，耐震壁のせん断破壊が防止され，耐力の上昇とともに靱性に富んだ曲げ壁や回転壁に移行することが可能になった。また，沖縄においては，RC 造建物のフレーム内にコンクリートブロック造 (以下 CB 造と略称) 壁体を組み込むことが多いことが知られている。この CB 造壁体は通常の構造設計においては，地震力を負担しない帳壁として取り扱われ，耐震要素としては用いられない。さらに，沖縄は建築基準法により地震地域係数が全国一小さく

0.7 であるため，耐震性の低い建物が多い。

本研究は，このような RC 造フレーム内に組み込まれた CB 造壁体を耐震要素として活用することを目的とし，CB 造壁体の耐震性能を明らかにするために一定鉛直荷重下での正負繰り返し水平加力実験を行った。さらに，CB 造壁体に前述のコンクリートまたはモルタルを増し打ちする耐震補強法を適用することによって，耐震性能を改善させることを検討するとともに，従来の RC 造耐震壁との比較検討を行った。

2. 実験計画

試験体は，実大の約 1/3 モデルを想定した 175mm の正方形断面柱 ($M/(VD)=2.5$) と梁 ($M/(VD)=2.6$) からなるフレームで，それぞれの柱

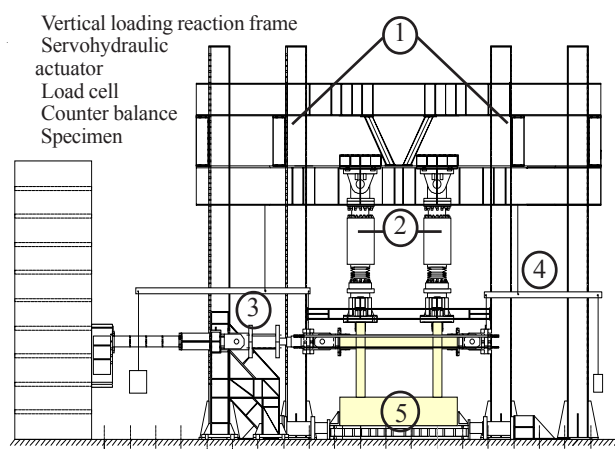


Fig. 1 Test setup

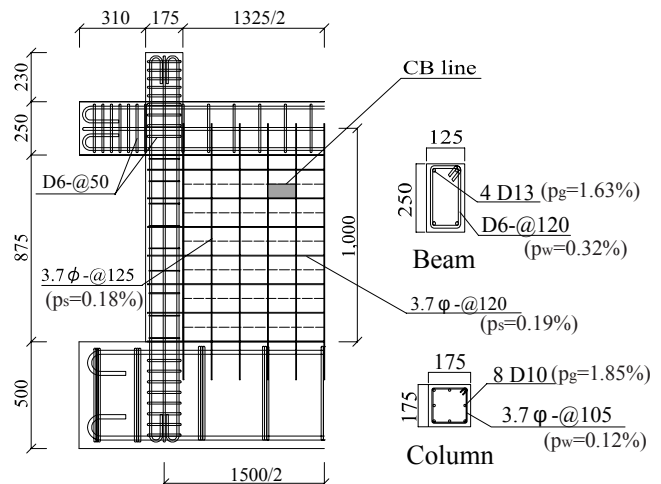


Fig. 2 Details of CB specimen (R06W-B0, BR)

- *1 琉球大学 工学部助教授・工博 (正会員)
- *2 琉球大学 工学部教授・工博 (正会員)
- *3 琉球大学 理工学研究科大学院生・工修 (正会員)
- *4 琉球大学 工学部環境建設工学科卒 (正会員)

Table 1 Properties of steel materials

		a (mm ²)	f _y (MPa)	ε _y (%)	E _s (GPa)
Rebar	D10	71	349	0.17	202
	D13	127	342	0.17	201
Panel wall and foop	3.7φ	11	650	0.31	208
Hoop and stirrup	D 6	32	423	0.24	175
Deck plate	t=1.2mm	-	268	0.13	203
Steel plate	t=2.3mm	-	348	0.16	212

Notes:a=cross sectional area; f_y=yield strength of steel; e_y=yield strain of steel; E_s=Young's modulus of elasticity.

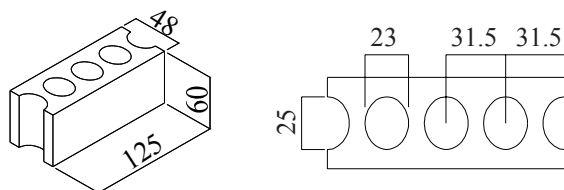


Fig. 3 Details of CB (unit:mm)

に軸力比 0.2 の一定鉛直荷重下での正負繰返し水平加力実験を行った。水平変位 δ =1.25 , 2.5mm で 1 回ずつ繰返し, 水平変位 δ =5mm からは 5mm ずつの増分で (δ =7.5mm を含む) δ =30mm まで 2 回ずつ正負繰返し載荷した。下スタブ上面から梁中心軸まで丁度階高が 1m あるので, 水平変位 1cm が層間変形角 R=1% に相当する。試験体に用いた鋼材の力学的性質を Table 1 に, コンクリート, コンクリートブロックプリズム強度及びモルタルの力学的性質を Table 2 に, コンクリートの配合を Table 3 に示す。なお, 各試験体はコンクリート一回打ちで制

Table 2 Compression strength of concrete

	Concrete	Block prism	Mortar
R05P-P0	28.3	-	-
R05W-P0	27.8	-	-
R06W-B0	26.7	13.6	25.7
R06W-BR			

(MPa)

Table 3 Mixing rate of concrete

	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	W/C (%)	Sramp (cm)
R05P-P0	236	186	959	886	79	18
R05W-P0						
R06W-B0	274	181	923	907	71	18
R06W-BR						

Notes:C=cement; W=water; S=fine aggregate; G=coarse aggregate.

作した。

Fig. 1 に加力装置を, また試験体一覧を Table 4 に示す。試験体 R05P-P0 は, 壁体を組み込んでいないフレームのみの基準試験体である。試験体 R05W-P0 は, 基準のフレームに RC 造壁板を組み込んだ試験体である。この 2 体の試験体は, 2005 年度実験を行ったものであり²⁾, CB 造壁体の実験結果と比較のために示す。試験体 R06W-B0 は, R05P-P0 と同様の試験体に CB 壁体を組み込んだものである。Fig. 2 に CB 造試験体の補強筋の詳細を, Fig. 3 に使用したコンクリートブロックの詳細を示す。コンクリートブロックの寸法は通常規格の 1/3 程度で製作したものであり, 全断面積に対するプリズム強度で約 14MPa と, C 種ブロック以上に相当する強度

Table 4 Details of test specimens (unit: mm)

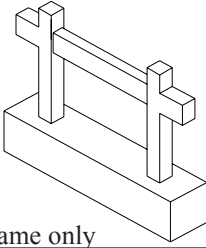
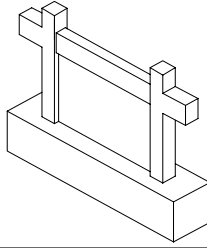
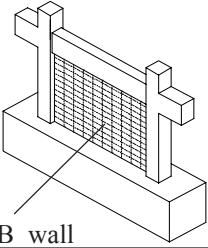
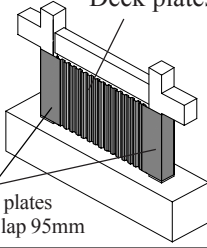
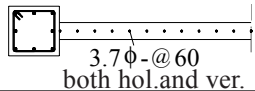
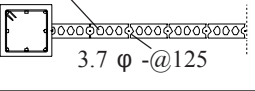
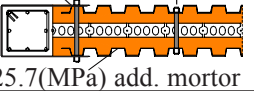
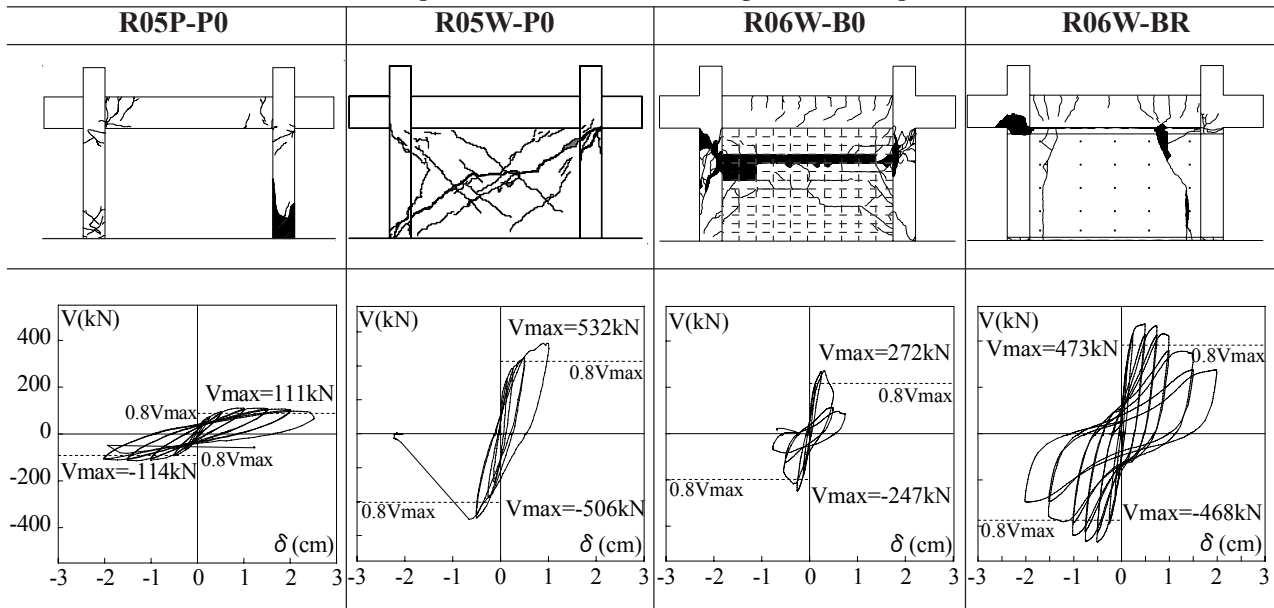
	R05P-P0	R05W-P0	R06W-B0	R06W-BR
Specimen				
Cross section				
σ _B (MPa)	28.3	27.8	26.7	26.7
Common details	Axial force ratio, N/(bDσ _B)=0.2 (per column); Reinforcement. in column:-main reinf.: 8-D10(p _s =1.85%), hoop:3.7φ-@105(p _w =0.12%); Reinforcement. in beam:-main reinf.:4-D13(p _s =1.626%), stirrup: D6-@120(p _w =0.32%); Reinforcement. in panel wall:-horizontal:3.7φ-@120(p _s =0.19%), vertical:3.7φ-@125(p _s =0.18%);			

Table 5 Experimental V- δ relationships and crack patterns



である。

試験体 R06W-BR は，R06W-B0 と同様の試験体に，市販のデッキプレート ($t=1.2\text{mm}$) を型枠にモルタルを側柱幅まで増し打ちし，柱を鋼板 ($t=2.3\text{mm}$) でチャンネル状に包み込み，グラウトする。コンクリート硬化後にデッキプレートとチャンネル状の鋼板を，緊結材である M12 中ボルト (JIS 準拠) に緊張力を導入して圧着する耐震補強法を施した試験体である。

3. 実験結果及び考察

実験で得られた水平耐力 V と水平変位 δ の関係と終局時のひび割れ図を，Table 5 に示す。V- δ 曲線に破線で示した直線は，最大水平耐力の 80% を示している。フレームのみの基準試験体である試験体 R05P-P0 は，水平変位 $\delta=5\text{mm}$ から 10mm ($R=0.5 \sim 1\%$) で柱と梁に曲げひび割れが生じ，柱主筋が降伏し，最大水平耐力約 120kN を記録した。その後， $\delta=25\text{mm}$ で柱にせん断破壊が生じて実験を終了した。なお，フレームにおける柱のせん断スパン比は内法高さで $M/(VD)=2.5$ であり，せん断補強筋比 $p_w=0.12\%$ (Table 4) である。また，柱のせん断強度計算値は 37.8kN ，曲げ強度計算値は 47.8kN であり，したがってせん断余裕度は 0.79 となり，柱がせん断破壊してもおかしくは無い試験体である。

RC 造耐震壁を組み込んだ試験体 R05W-P0 は，水平変位 $\delta=1.25\text{mm}$ で RC 壁体にせん断ひび割れが生じ，その後次第に広がった。正側の 1 サイクル目の $\delta=10\text{mm}$ ($R=1\%$) をクリアーし，負に向かう途中の $R=-0.5\%$ 近傍でせん断破壊が生じ，実験を終了した。最大水平耐力は $R=1\%$ で記録した約 530kN であった。

CB 造壁体を組み込んだ試験体 R06W-B0 は，水平変位 $\delta=1.25\text{mm}$ で CB 造壁体部分にコンクリートブロックを貫通するせん断ひび割れが生じた。水平変位 $\delta=5\text{mm}$ に到達する直前で，柱頭部にせん断ひび割れが生じ，そこで最大水平耐力約 270kN となった。CB 壁体が存在することで，R05P-P0 に比べて最大水平耐力は約 150kN (150% 程度) 上昇していることが分かる。水平変位 $\delta=7.5\text{mm}$ で，柱頭のせん断ひび割れ部分をつなぐように側柱にせん断ひび割れが抜け，スリップ破壊が生じて耐力が減少したため，実験を終了した。

CB 壁体部分に耐震補強を施した試験体 R06W-BR は，水平変位 $\delta=5\text{mm}$ で柱頭にせん断ひび割れが生じ，最大荷重約 470kN となった。その後荷重は減少し，水平変位 $\delta=15\text{mm}$ ($R=1.5\%$) で最大荷重の 80% 以下になり，水平変位 $\delta=20\text{mm}$ で柱頭部分から梁下部分へのスリップ破壊が顕著になり，実験を終了し

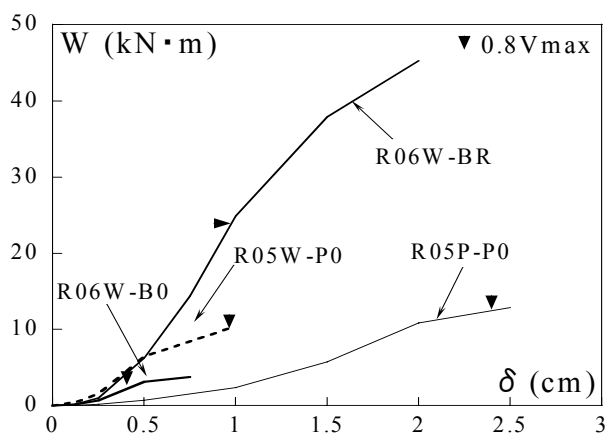


Fig. 4 Accumulated absorbed energy

た。なお、R05W-P0、R06W-B0は柱主筋は降伏せず、R06W-BRは $\delta=10\text{mm}$ ($R=1\%$)の変形時に降伏した。最大水平耐力は試験体 R06W-B0 に比べ、約 2 倍近く (約 200kN の増大) 上昇し、本補強法が有効であることを示す。しかしながら、CB 造壁体の場合、ブロックが梁下面と一体となりにくいためブロック壁と梁境界部のせん断強度が小さく、側柱頭部のパンチングシアで水平耐力が支配された。すなわち、柱頭部でパンチングシアが生じた時点で、損傷が梁と壁の境界部まで広がり破壊したと考えられる。CB 造壁体の最も効果的な補強法としては、梁部分までコンクリートを増し打ち補強し、梁とブロック壁境界部のパンチングシア強度を上昇させる方法が考えられる。

Fig. 4 に、各試験体の累積エネルギー吸収量 W を、各水平変位 δ 毎に示す。Fig. 4 より、CB 造試験体 R06W-B0 と R05W-P0 は、壁板から側柱へせん断ひび割れが抜けるせん断破壊の為、靱性に乏しいことがわかる。しかし増し打ち補強した試験体 R06W-BR は、他の試験体に比べて大きなエネルギー吸収能力を示している。

4. 解析的検討

4.1. I 形水平断面フレームとしての検討

Fig. 5 に、実験で得られた $V-\delta$ 関係のスケルトンカーブを示す。最大水平耐力は、フレームのみの基準試験体 R05P-P0 が約 120kN であり、CB 造試験体 R06W-B0 が約 270kN となり、CB 造壁体が水平耐力をかなりの割合で負担していることを

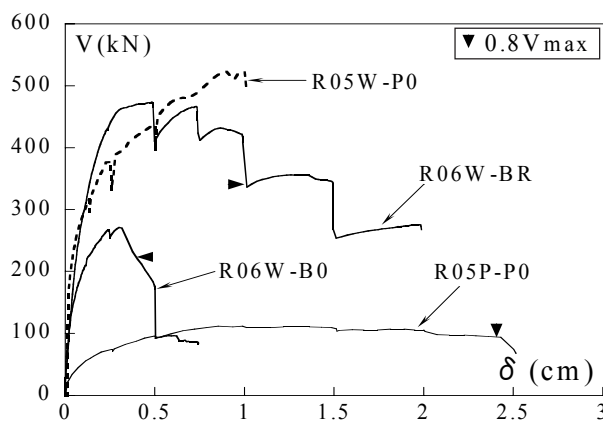


Fig. 5 Skelton curve

示す。さらに、コンクリートを増し打ちして耐震補強した試験体 R06W-BR は最大水平耐力が約 470kN と R06W-B0 に比べて約 200kN の増大があり、本補強法が有効であることを示す。しかし、本実験では側柱頭部のパンチングシアによるスリップ破壊で最大水平耐力が支配されたため、壁板の増し打ち補強の十分な効果は得られず、RC 造試験体 R05W-P0 の最大水平耐力である約 530kN まで達しなかった。以上の実験結果を検討するために Fig. 6 に各試験体の I 形水平断面フレームとして求めた曲げ及びせん断強度の、各材料試験結果に基づく計算値を示す。それぞれの計算方法は文献⁴⁾に示したように、曲げ強度は AIJ の曲げ強度略算式、せん断強度は AIJ 靱性指針式および荒川 mean 式をそれぞれ用いている。なお、CB 造試験体についてはコンクリート強度の代わりに、CB の全断面積に対するプリズム強度 (Table 2) を用いて算定している。また、側柱頭部のパンチングシアによるスリップ破壊が生じたと

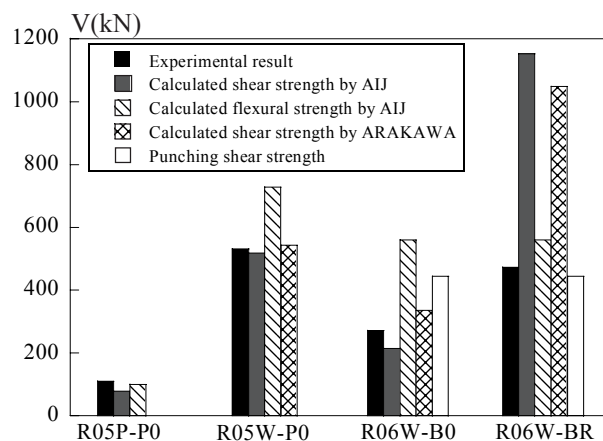


Fig. 6 Experimental result, calculated flexural and shear strength

考えられる試験体 R06W-BR は、その強度を文献⁵⁾に示された式により求めた。Fig. 6 に示した実験値と計算強度の関係より、試験体 R05P-P0 は各計算値がほぼ同じで、曲げ降伏後のせん断破壊であり、R05W-P0 はせん断耐力計算値が実験値にほぼ等しく、典型的なせん断破壊である。CB 造試験体 R06W-B0 も同様にせん断強度計算値が実験値に近く、スリップ状のせん断ひび割れが壁から柱に抜け、せん断破壊で水平耐力が支配されたと考えられる。モルタルを増し打ち補強した試験体 R06W-BR はパンチング Shea 耐力の計算値にほぼ等しいため、側柱頭部のパンチング Shea によるせん断破壊と推定した。このパンチング Shea を防ぐためには、デッキプレートではなく鋼板を壁から梁まで立ち上げ、梁を貫通する PC 鋼棒で鋼板を圧着して、鋼板にせん断力を負担させなければならない。そうして補強後の CB 壁全体を片持ち梁タイプの全体曲げ降伏に持ち込む必要がある。しかし、今度は曲げひび割れが側柱脚部に生じ、大きく開口があき、その結果柱脚部主筋にひずみが集中し、破断することになり、靱性も大きく期待できないおそれも出てくる。それでも部材角 $R=2\%$ 程度は文献¹⁾²⁾から期待できそうである。しかも、脆性的なせん断破壊から安定な曲げ

破壊に破壊モードの変更が可能になっただけでも、大きな改善と考える。

4.2. ブロック壁と柱の累加としての検討

ここで、CB 造壁体を耐震要素として活用することを目的として、試験体 R06W-B0 および R06W-BR の水平耐力を考察する。前述のせん断強度計算値が実験値より小さいため、以下のような CB 造壁体と柱とのせん断強度を累加する方法を検討した。Table 6(a) に示すように、先ず CB 壁体のせん断強度 Q_u を文献⁶⁾のせん断強度算定式により求める。次に柱のみのせん断強度 Q_c を前述の試験体 R05P-P0 と同様に算定した。ここで

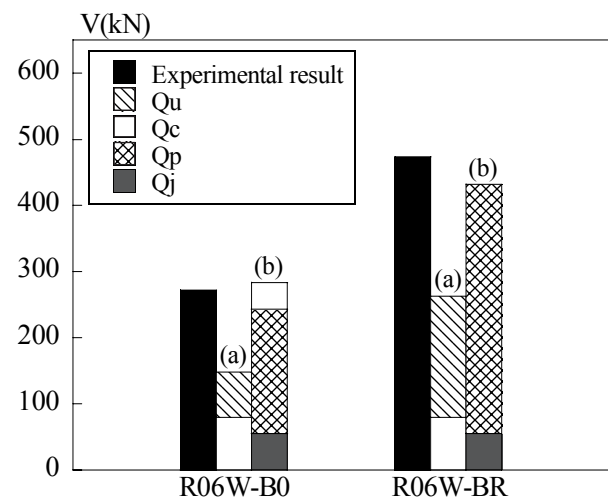


Fig. 7 Calculated and experimental results

Table 6 Calculation method of CB specimen

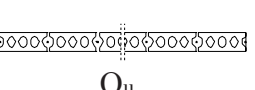
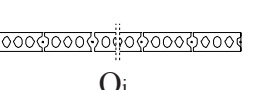
		(a) 柱とCB壁体のせん断耐力の累加	(b) 圧縮側柱, CB壁体の各パンチング Shea と引張側柱のせん断耐力の累加
概念図		 +  +  Q_c Q_u Q_c	 +  +  Q_p Q_j Q_c
柱 耐力	壁体 圧縮側	Q_c : 柱せん断耐力 ⁴⁾	Q_p : 柱パンチング Shea 耐力 ⁷⁾
	壁体 引張側	Q_c : 柱せん断耐力	Q_c : 柱せん断耐力
CB壁耐力		Q_u : CB壁せん断耐力 ⁶⁾	Q_j : CB壁パンチング Shea 耐力 ⁵⁾

Table 7 Calculated and experimental results

試験体	実験値 V_{MAX}	$2Q_c$	Q_u	(a)	Q_p	Q_j	(b)
				$2Q_c+Q_u$			$Q_p+Q_j+Q_c$
R06W-B0	272	79.6	68.0	147.6	188.3	55.1	283.2
R06W-BR	473	79.6	183.2	262.8	188.3	55.1	431.7*

*R06W-BR(b): $2Q_p+Q_j$

(kN)

は、柱のみの試験体においても柱の曲げ降伏後のせん断破壊で水平耐力が決まったため曲げ強度については検討していない。 Q_u と Q_c を単純累加した結果は実験値を十分に説明できないため、Table 6(b)に示す仮定を用いて算定を行なった。すなわちCB壁体を組み込んだ試験体の破壊性状を考慮して、文献⁷⁾の既存フレームと増設壁板(CB壁板)の耐力の累加として求める。このとき、CB壁を押す事で、壁板からの斜めの圧縮ストラットで突き上げられる側柱頭部のせん断強度はパンチングシエア耐力 Q_p で算定し、もう一方の側柱はせん断耐力 Q_c (内法高さのせん断スパン比2.5)で求め、CB造単独壁体のせん断耐力に加算して、フレーム付きCB造壁体全体の水平耐力を評価する。ここで、CB造壁体のせん断耐力は、前述の Q_u とともに、壁筋のせん断耐力 $Q_j^{5)}$ を求めた。R06W-BR試験体では、両側柱頭部のせん断強度がパンチングシエア耐力 Q_p で決まるものとし、増し打ち補強したCB造壁体のせん断耐力に加算する。

Table 7およびFig. 7に実験結果と計算値との比較を示す。CB壁試験体R06W-B0では、Table 6(b)に示す解析法が実験結果をよく説明できることが分かる。CB壁体が直接負担するせん断耐力だけでは実験結果を満たさないが、フレームの破壊性状に与える影響が大きいと考えられる。今後、増し打ち補強を梁部分まで施し、パンチングシエアを防止した場合について実験を行なう必要があると考えられる。

5. 結論

- (1) CB造試験体R06W-B0はCB壁体が存在することで、フレームだけの基準試験体R05P-P0に比較して、約150kN程度の水平耐力の上昇が期待できる。すなわち、純フレーム耐力の約2倍の水平耐力が得られる。また、RC造耐震壁試験体R05W-P0と比較すると、その約半分の耐力を有する。
- (2) CB壁体にモルタルまたはコンクリートで増し打ちし、緊張鋼棒と鋼板で柱を包み込

む耐震補強を施すことによって、さらに約200kN程度の水平耐力の上昇があり、最大水平耐力は473kNとなり、本補強法が有効であると考えられる。また、梁部分まで増し打ち補強をすることで側柱頭部のパンチングシエア破壊を防止できれば、さらに耐力と靱性が期待できるものと思われる。

- (3) CB造壁体を組み込んだ試験体の破壊性状を考慮した、既存フレームと増設壁板(CB壁板)の耐力の累加として求める解析法によって、せん断強度の算定式は実験結果を良好に評価できる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の平成18年度科学研究費補助金(基盤研究(B)17360272)「コンクリートを増し打ちした極厚壁に緊張PC鋼棒で鋼板を圧着した耐震補強法の応用」(研究代表者：山川哲雄)、及び国土交通省の平成18年度建設技術研究開発助成制度「緊張PC鋼棒と合成極厚無筋壁を用いたピロティ住宅の耐震改修」(研究代表者：山川哲雄)による。

参考文献

- 1) Hua ZHAO, Tetsuo YAMAKAWA, Md. Nafiur RAHMAN: Cyclic loading tests on retrofitted RC framed shear walls, 日本建築学会研究報告九州支部, 第45号・1(構造系), 2006.3
- 2) 高良慎也, 山川哲雄: 耐震補強したRC造耐震壁の一定鉛直荷重下の正負繰返し水平加力実験と解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)C-2, pp. 151-152, 2006. 9
- 3) Tetsuo YAMAKAWA, Md. Nafiur RAHMAN, Kozo NAKADA and Yoichi MORISHITA: Experimental and analytical investigation of seismic retrofit technique for a bare frame utilizing thick hybrid walls, 日本建築学会構造系論文集, 第610号, pp. 131-138, 2006. 12
- 4) 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, pp. 208-240, 1999. 8
- 5) Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, pp. 319-325, 1975
- 6) 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, pp. 592-593, 1990
- 7) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, pp. 100-116, 2001