

論文 耐震補修・補強を施した鉄筋コンクリート造壁フレーム模型の振動台実験

勝俣 英雄^{*1}・白井 和貴^{*2}・増田 安彦^{*3}・壁谷澤 寿海^{*4}

要旨：今までに開発された耐震補強工法の性能確認の一環として、損傷を与えた後、耐震補修・補強した被災RC壁フレーム4層模型の振動台実験を行った。主方向の耐震壁は下部を撤去してプレキャストブロックを組積した。直交方向両妻面の耐震要素のうち、補修前は腰壁付き短柱構面が破壊して偏心が生じたので、制振間柱とFRPブロックを用いて補強した。また、1層と2層の独立柱は炭素繊維を巻き付けた。実験の結果、補修・補強前に破壊した入力に対しても補修・補強後は破壊せず、ねじれ振動がほとんどなくなった。また、過大入力時は壁が取り付く柱が崩壊したが、補強柱は破壊せず、建物模型全体の倒壊を防いだ。

キーワード：耐震補強，耐震補修，振動台実験，壁フレーム構造，制振

1. はじめに

地震被害の低減に向けて特に既存建物の地震時破壊性状を把握すること、および地震を受ける前に耐震改修をしておくことは重要である。さらに、不幸にして被災を受けた場合に、建物を補修・補強して使い続ける技術確立し、耐震対策を完結させておく必要がある。

ここでは補修・補強に着目した実験を行った。大大特プロジェクトの一環として既存建物をモデルにした鉄筋コンクリート造4層建物模型試験体（以後、オリジナル試験体と呼ぶ）の振動台実験が行われている¹⁾ので、実験済の1体の試験体を補修・補強して同じような振動台実験を行い、補修・補強技術の有効性を検討することとした。採用した補強技術は、コンクリートブロック²⁾またはFRPブロック壁³⁾・摩擦ダンパー⁴⁾・柱の炭素繊維巻き⁵⁾、などである。

なお、これらの補強技術は地震前の耐震改修の技術としても利用されている。そこで、実験結果は耐震改修工法の性能確認としても用いることとした。

2. 実験方法

2.1 補修・補強要領

試験体は4層、1スパン×3スパンの建物模型で、1/4スケールである。試験体長辺(X)方向に入力地震動の主軸を合わせた振動台実験を行って、その加振による損傷¹⁾を補修補強したものをこの実験の試験体とした。試験体の軸組と平面を図-1に、既存部材リストと材料強度を表-1と表-2に示す。

図-1には試験体の補強要素も示している。建物の実際の補強における制約条件を想定して補強要素を配置した。

(1) 補修

補修は次の2つの方法を採用した；ひび割れにはエポキシ樹脂を注入（ひび割れ幅が0.3mm以上の場合）または塗布（ひび割れ幅が0.3mm未満の場合）した。コンクリートが剥落した箇所はエポキシモルタルを塗った。

(2) プレキャストブロック壁への交換

長辺方向の耐震壁は主たる加振方向の耐震要素である。2層まで大きな損傷を受けていたので、

*1 (株)大林組 技術研究所 工修 室長 (正会員)

*2 (独)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学センター 外来研究員 工修 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 工博 グループ長 (正会員)

*4 東京大学 地震研究所 教授 工博 (正会員)

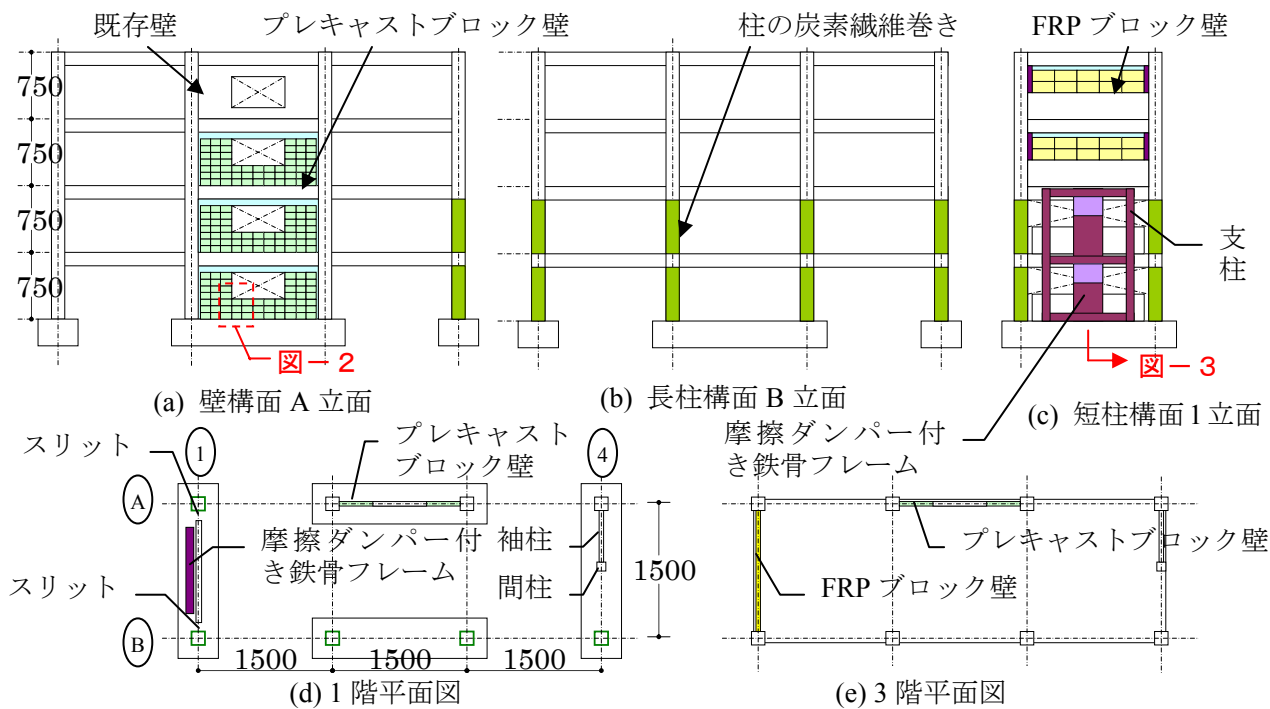


図-1 試験体の軸組と平面

表-1 試験体既存部分の断面一覧

部位	断面(mm)	主筋	せん断補強筋
長柱	150×150	12-D6 (pg=1.71%)	2-D4@60 (pw=0.29%)
短柱	150×150	同上	2-D4@40 (pw=0.44%)
間柱	90×90	4-D6 (pg=1.58%)	2-D4@60 (pw=0.49%)
梁 (長辺方向)	90×150	2-D6 (pt=0.54%)	2-D4@110 (pw=0.27%)
梁 (短辺方向：外構面)	90×150	上端 3-D6 (pt=0.81%) 下端 2-D6 (pt=0.54%)	同上
梁 (短辺方向：内構面)	90×150	同上	2-D4@55 (pw=0.53%)
スラブ	t80	D4@80 double	--
開口壁 (開口 h300×L600)	t45	D4@110 single (ps=0.27%)	開口補強筋 (縦横 1-D6)
腰壁・袖壁	t45	D4@110 single (ps=0.27%)	

表-2 試験体既存部分の材料強度

(a) 鉄筋の材料強度

鉄筋	降伏強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
D4	371 (0.2% offset)	195
D6	374	203

(b) コンクリートの材料強度

層	圧縮強度(MPa)	ヤング係数(GPa)
1	31.2	21.9
2~4	30.5(平均)	21.4

上下方向の連続性を考慮して3層までを取り去り、プレキャストブロックによる開口付き増設壁²⁾を設置した。

ブロック配置と配筋の詳細の代表部を図-2に示す。既存フレームと開口周囲にはガイドスチールを配し、定着筋を溶接している。ブロッ

ク(使用したモルタルの圧縮強度80.7MPa、割裂強度3.9MPa)の空隙に壁筋と定着筋を通した。既存躯体との間隙とブロックの空隙にはモルタル(圧縮強度82.9MPa)を充填した。ブロック配置の都合から、開口の大きさはh275×L600とし、壁上部はブロックを積まずに壁配筋を行ってモ

ルタルを充填した。なお、鉄筋は既存部分と同一ロットである。

壁厚はオリジナル試験体の 45mm から 75mm に増加するが、接着剤（コンクリートとの接着強度 3.1MPa：建研式引張試験による）を用いてブロック同士や既存フレームとブロックを接合しているため、剛性や耐力が少し低下する。ひび割れ補修をしても一般には剛性の回復にあまり寄与しないことが多いので、建物模型の剛性に関しては補修・補強前と同等、せん断耐力については向上すると考えた。ただし、この連層壁の耐力は曲げ、すなわち既存側柱の主筋量でほぼ決まるので、補修補強前後で壁耐力はほぼ不変である。1層の既存開口補強筋も残し、曲げ耐力をできるだけ変えないようにした。

(3) 摩擦ダンパー付き鉄骨外付け架構増設

短柱構面は主たる加振方向に直交し、腰壁が取り付く。オリジナル試験体では、この構面 1 が破壊し、壁構面Aによる剛性偏心に対して共同でねじれ変形を抑制していた逆の妻側構面 4（袖壁を持つ）とのバランスを失った。さらに短辺方向にも偏心が生じ、この2つに起因して試験体のねじれ振動が大きく励起された。そこで、被害が大きな1層と2層の腰壁端部に10cm幅の完全スリットを設けた上で、安定した耐力を短柱構面に与えるため、鉄骨間柱を構面の外側に取り付ける「外付け補強」した³⁾。建物の外側で工事が終了するため施工性がよく、意匠上、斜めのブレースがあまり好まれないことを考慮した。

間柱には摩擦ダンパー（ブレーキ材と皿バネにより安定した摩擦力を発生させるタイプ）を組み込み、制振装置として働かせた³⁾。制振装置の耐力は「直交方向地震力」および「ねじれ止め」に必要な耐力を加算して 100kNに設定し、皿バネと高力ボルトを2セット各層に設置した。他の部分は弾性を保つように設計した。なお、梁端は、完全スリットを設置したことも考慮し、補修しても間柱の転倒モーメントに抵抗するせん断力を負担できないと判断し、間柱構面に転

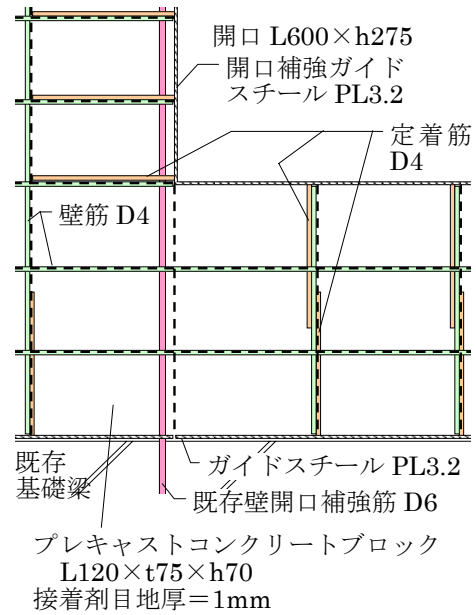


図-2 コンクリートブロック壁の詳細

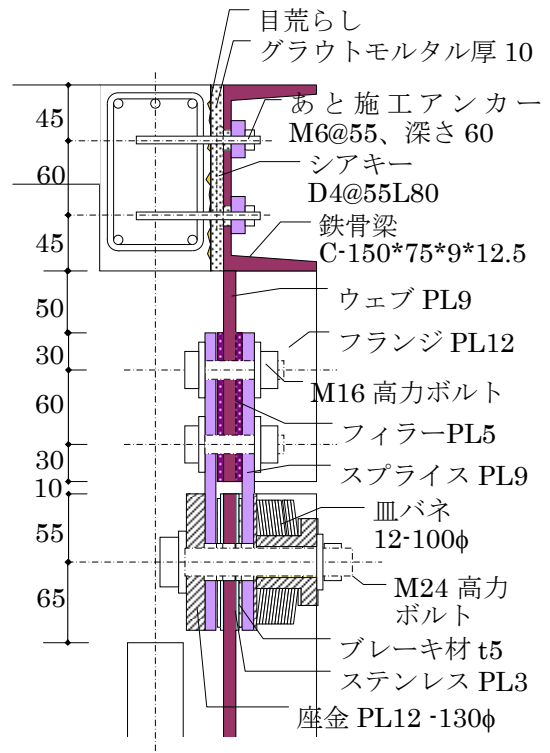


図-3 摩擦ダンパー付き鉄骨外付け架構の詳細

倒モーメントに抵抗する支柱C75×40×5×7を設置した(図-1(c))。

偏心して架構が取り付くので、接合部に十分な強度を持たせた。すなわち、十分な量のあと施工アンカーを配するとともに、鉄骨梁にシアキーを設け、既存梁は目荒らししてせん断伝達能力を確保した(図-3)。

(4) FRP ブロック壁による開口閉塞

表-3 実験結果の概要

Run	入力倍率 ^{*1}	Case1 (オリジナル試験体)		Case3 (補修補強試験体)	
		R _w ^{*3}	主な損傷	R _w ^{*3}	主な損傷
Run1	5%	1/8500	—	1/11000	—
Run2	20%	1/1550	開口壁開口隅角部と腰壁にひび割れ	1/1700	プレキャストブロック壁にせん断ひび割れ
Run3	40%	1/615	開口壁にせん断ひび割れ	1/605	袖壁にひび割れ
Run4	60%	1/381	開口壁にせん断ひび割れ	1/355	袖壁にせん断ひび割れ
Run5	80%	1/209	開口壁縦筋降伏	1/204	プレキャストブロック壁と袖壁にせん断ひび割れ
Run6	100%	1/124	腰壁端部の圧壊	1/107	腰壁にひび割れ
Run7	125%	1/32	開口壁の壁板圧壊	1/51	FRP ブロックと腰壁の間にひび割れ
Run8	150%			1/17	プレキャストブロック壁の壁板圧壊
Run9	150% ^{*2}			1/11	袖壁側柱とプレキャストブロック壁側柱の崩壊

*1：原波形に対する振幅の倍率 *2：時間軸は他の Run の 1.22 倍とした。

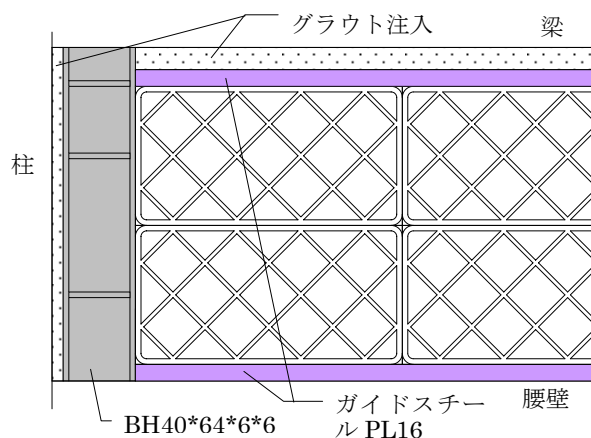
*3：開口壁構面 1 層の長辺方向の変形角 (rad.)

短柱構面の 3 層と 4 層の被害は軽微であったので、FRPブロックを既存腰壁の上に積み上げて開口を閉塞した耐震壁とした。FRPブロック壁⁴⁾は、耐力は劣るが、光と風を通し、意匠性に優れているため、試験的に採用した。

詳細を図-4に示す。接着剤を用いてブロック・ガイドスチール・既存躯体を接合する点はプレキャストブロック壁と同じ施工方法を取る。接着剤も同種である。FRPブロックの寸法の都合上、壁の左右に鉄骨を挿入し、既存躯体との隙間にはモルタルを充填した。この壁の耐力は文献⁴⁾に従って算定すると、接着剤で決まると考えられた。

(5) 柱の炭素繊維巻き付け補強

長柱構面Bに新規耐震要素(壁・間柱)は挿入せず、オープンフレームのままとした。袖壁構面も補強しなかった。ただし、被害が大きかった1層と2層の柱で、壁が取り付けしていない柱は炭素繊維シート(200g/m²を1層; 3400MPa級)を巻き付けて補強した⁵⁾(図-1)。なお、シートのラップ長は100mmとし、柱の隅角部は半径30mmの面取りを行った。



FRPブロック L240×h125×t40、接着剤目地厚 1mm

図-4 FRPブロック壁の詳細

2.2 加振方法

加振方法はオリジナル試験体と基本的に同様である。大林組の3次元振動台を用い、試験体長辺方向に入力地震動(JMA Kobe 1995)の主軸を合わせるよう、水平地震動の向きを回転させた。上下方向にも入力した。

試験体が1/4スケールであるので、相似則より時間軸はオリジナルの1/2に縮小した。この波形の振幅を20~150%まで少しずつ拡大して各runの入力とした。ただし、最終加振では試験体を崩壊させるため、時間軸を1/2×1.22倍とした。

各階各スパンに鋼製マスを設置し、1~3層は

76kN, 4層は92kNの重量とした。振動台負荷は基礎梁・計測ジグ込みで450kNとなった。

3. 実験結果

各加振 run の実験結果概要をオリジナル試験体と比較して表-3に示す。

地震入力が中程度(100%入力)までの範囲では、表-3に示さない変形も含め、一般に変形はオリジナル試験体の方が小さかった。これは、ひび割れにエポキシ樹脂が完全に充填されていないためであると思われる。実際、ひび割れに樹脂を塗布した箇所の多くは再びひび割れが開いた。

地震入力が大きくなっても、短柱構面の損傷はオリジナル試験体と比べると軽微であった。変位のオービットを比較する(図-5)と、オリジナル試験体は長辺方向と短辺方向に大きく変形しているが、補修補強試験体は長辺方向のみが変形が大きい。短辺方向の最大変位は補修補強により約35%に減少した。これは、短辺方向のFRPブロック壁や外付け間柱による補強効果であると言える。摩擦ダンパーは80%入力以上で滑っており、振動エネルギーを吸収していることが計測された。なお、補修補強試験体の降伏形は梁端に降伏ヒンジが発生する全体降伏形であり、オリジナル試験体と同様であった。

オリジナル試験体の最大入力は125%加振であり、短柱構面1の腰壁付梁や短柱、および壁構面Aの開口壁に大きな損傷を受け、終局状態に至った。しかし、補修補強試験体は、同じ入力に対して、妻面の袖壁にも損傷が生じたが、

開口壁の損傷は少なく、まだ終局には至っていないと判断された。1層の最大層間変形角は、オリジナル試験体は1/32であったのに対して、補修補強試験体は1/50であった。オリジナ

ル試験体の長辺方向の1層せん断力と1層変形角の関係と比較すると(図-6)、オリジナル試験体より補修補強試験体では耐力が約15%高くなっていることがわかる。これは、オリジナル試験体も含めた鉄筋のひずみ履歴によるひずみ硬化の影響だけでなく、外力分布がコンクリートブロック壁などの補強によってオリジナル試験体と変化した可能性もある。同時に、長辺方向のコンクリートブロック補強壁がこの増加したせん断力を負担できるほどのせん断強度を持ち、壁破壊時の変形量も増えており(表-3)、補強壁はオリジナルの壁よりせん断強度が高かったと言える。なお、短辺方向の負方向で補修補強試験体の終局耐力がオリジナル試験体より低くなったが、長辺方向で破壊した影響である。

そこで、補修補強試験体にはより大きな入力を加えることとした。150%入力とすると、コンクリートブロック壁の開口で上下を挟まれた梁・腰壁・垂れ壁の損傷が目立った。この現象は連層開口壁に特有と思われる。今後、設計に取り入れたいと考えている。また、袖壁の側柱の圧壊が進行していた。短柱構面を補強したため、逆の妻面にある袖壁の入力が増えたからである。

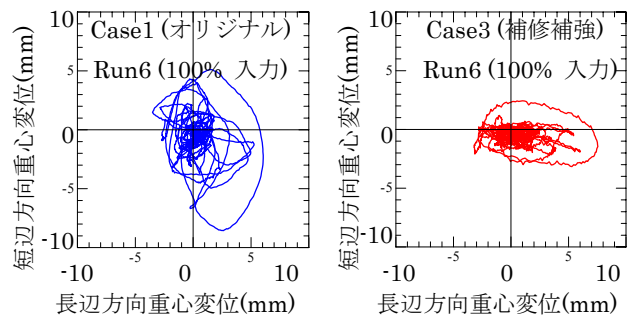


図-5 変位のオービット

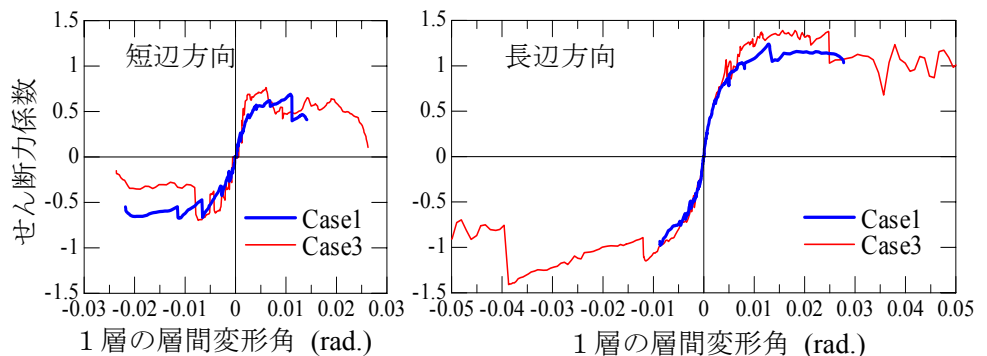
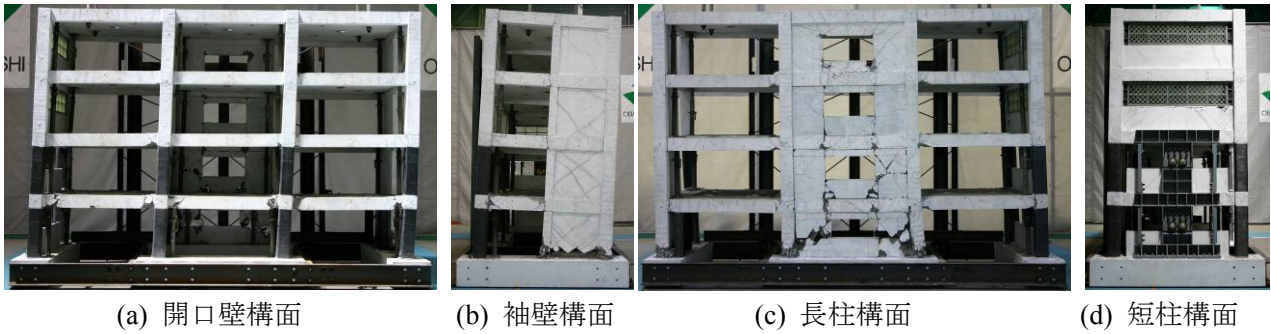


図-6 1層の復元力特性の包絡線



写真－1 最終破壊状況

最終加振には、加速度は150%のまま、時間軸を伸ばした入力を用いた。試験体の周期が長くなったため、入力の周期範囲を合わせて破壊しやすくした。結果は袖壁側柱が崩壊するとともに、これに隣接する開口壁側柱も崩壊し、これが補強壁の破壊も引き起こした(写真－1)。壁構面の袖壁側2階梁が防護フレームの上に乗った。防護フレームのクリアランスから考え、約10cm、床が落ちた。補強しない柱が崩壊したが、炭素繊維で補強した柱は端部の曲げひび割れ以外の損傷はなかった。炭素繊維による柱の補強は柱の崩壊を防ぎ、建物の終局的な安全性の確保に有効であることが再確認できた⁵⁾。

建物の耐震性をさらに向上させる方法の1つとして、既存壁に取り付く柱や梁の補強も行うことが考えられるが、実用性の面で疑問である。今回程度の補強が適正規模であると思っている。

4. 結論

振動台実験で損傷を与えた鉄筋コンクリート造4層建物模型試験体を利用して、被災後の補修・補強の実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) ブロック壁・摩擦ダンパー・炭素繊維巻きで補強した建物模型は補修・補強前より大きな地震入力に対しても破壊しなかった。
- 2) 補修・補強前に顕著であったねじれ振動は直交方向に適切に耐震要素(摩擦ダンパーおよびFRPブロック閉塞壁)を設けたため、小さくなった。
- 3) 建物は最終的に崩壊したが、補強できなかった壁側柱の破壊に起因するものであった。補

強要素の耐力・靱性は十分にあったと言える。

謝辞

防災科学技術研究所には文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」における実験済試験体を提供していただきました。東京大学地震研究所壁谷澤寿一氏には助言と協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 勝俣英雄・白井和貴・壁谷澤寿一・壁谷澤寿海・関松太郎：鉄筋コンクリート造4層壁フレーム模型の多方向入力振動台実験(その1)－(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.407-410，2005
- 2) 増田安彦・栗田康平・木村耕三ほか：小型プレキャストブロックを用いた増設耐震壁工法の開発(その2)－(その3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.687-690，2002
- 3) 永山憲二・勝俣英雄・田才晃・佐野剛志：既存RC建物の外付け制振フレームによる耐震補強に関する研究，日本コンクリート工学協会年次大会，24-2，pp.1207-1212，2002
- 4) 萩尾浩也・木村耕三・栗田康平ほか：FRPブロックを用いた増設耐震壁工法の開発(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.631-632，2004
- 5) 小島克朗・木村耕三・勝俣英雄：炭素繊維夜既存RC構造物の耐震補強工法の開発，日本建築学会技術報告集，No.2，62-67，1996