

論文 粗骨材コッターを用いた増設開口及び増厚耐震壁に関する研究

久保田 淳*¹・丸田 誠*²・関田 徹志*³・二村 有則*⁴

要旨：本研究では、既存 RC 造フレーム内周に粗骨材を接着剤で貼り付けてコッターとし、増設壁と既存フレームの一体性を確保する耐震補強工法を考案した¹⁾。増設壁には、既存フレームと増設壁境界面の肌別れを防ぐため膨張コンクリートを用いる。考案の工法を用いた有開口増設壁及び増打壁の水平加力実験を行い、その結果、(1)有開口増設壁は、上下梁の拘束の大きさにより構造性能が異なること、(2)既存フレームと有開口増設壁または増打壁との一体性が確保されていたこと、(3)実験の最大耐力が計算耐力を上回ったことを確認した。また、(4)弾塑性 FEM 解析で実験結果をシミュレートできることを確認した。

キーワード：耐震補強、有開口増設壁、増打壁、粗骨材、接着剤、膨張コンクリート

1. はじめに

既存 RC 造建物の耐震補強では、建物を使用しながら工事を行う「居ながら施工」への要求が高まっている。著者らは、図-1 に示すように、経済性及び施工性の向上を図り、あと施工アンカー工事をせずに、増設壁と既存フレームの一体性を確保する手法として、既存フレーム内周に粗骨材を接着し、それをコッター（以下、「粗骨材コッター」とするとともに、増設壁に膨張コンクリートを用いて既存フレームと増設壁の肌分かれを防ぐ工法を考案した。既報¹⁾では、無開口増設壁の構造実験結果について報告した。本報では、考案の工法を用いた増設開口及び増厚耐震壁（以下、「有開口増設壁及び増打壁」）の構造性能の把握を目的として行った構造実験結果、及び弾塑性 FEM 解析を用いたシミュレーション解析結果について報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体概要を図-2 に示す。試験体は、有開口増設壁 2 体、増打壁 1 体の計 3 体であり、縮尺は実建物の約 1/2.5 を想定した。有開口増設壁試験体は、両試験体とも柱際の偏在開口とし、W10 試験体は既存躯体を模擬した梁形状、W11 試験体は剛な梁とした。前者は上下階に壁が無い場合を、後者は上下階に連層壁があり拘束が十分ある場合を想定しており、上下階の拘束の大きさを実験因子とした。両試験体とも、アンカー筋を開口際の上に開口補強筋と十分な重ね継手長さをとって配した。アンカー筋は、増設壁と下梁の接合部がせん断耐力 (3.4 節 (1) 式) に達した際にアンカーに作用する引張力を、アンカー筋のコーン耐力が上回るように埋め込み深さを設定した。開口補強筋は、開口の縦横方向及び隅角部 45° 方向に十分な定着長さをとって配置した。増打壁試験体 (W12) は、既存壁と増打壁を同じ厚さとし、両者の境界面を加力方向軸芯と一致させた。コンクリート及び鉄筋の機械的性質を表-1、表-2 に示す。

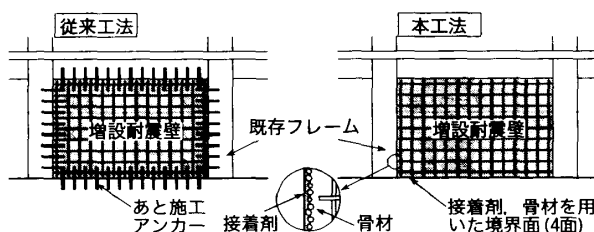


図-1 粗骨材コッターを用いた耐震補強工法

- | | | | | |
|----|----------|------------|--------|-------------|
| *1 | 鹿島建設 (株) | 技術研究所 | 研究員 | 工修 (正会員) |
| *2 | 鹿島建設 (株) | 技術研究所 | 上席研究員 | 工博 (正会員) |
| *3 | 鹿島建設 (株) | 技術研究所 | 上席研究員 | ph.D. (正会員) |
| *4 | 鹿島建設 (株) | ITソリューション部 | グループ主事 | 工修 |

2.2 試験体製作

はじめに既存フレームを製作した。W12 では既存壁も同時に製作した。続いて、フレーム内周と増設壁の境界部分のコンクリート表面をサンダーがけし、プライマー処理を行っ

た後、接着剤を粗骨材最小径（5mm）の約 1/2 の厚さで塗布してから粗骨材を貼り付け、接着剤が硬化するまで約 1 時間保持した。その後、増設壁部分の配筋を行い、膨張コンクリートを打設した。膨張性能を確実に発揮させるために、コンクリートの沈降がほぼおさまった後で、上部空隙に無収縮モルタルをグラウトした。壁コンクリート打設後、グラウト開始までの時間はコンクリートの沈降試験結果をもとに、約 4 時間とした。増打壁試験体の既存壁と増打壁の境界面は、コンクリートの打放しの状態とし、アンカー筋等のせん断抵抗要素は設けていない。

2.3 加力方法

試験体下梁を試験床に固定し、上梁上部に設置した軸力載荷ジャッキにて柱部分に軸力（軸力比 0.2）を加えた。その後、上梁左右の中央高さに設置した水平押し引きジャッキにより強制変位を与えた。加力履歴は、変形角 $R=1/1600$ （1 回）、 $1/800$ 、 $1/400$ 、 $1/200$ 、 $1/100$ （各 2 回）rad.（以下、rad.は省略）で繰り返した後に、加力途中で破壊を起こした試験体を除き、最終的に $R=1/50$ まで加力を行った。なお、有開口増設壁試験体（W10、W11）では、開口側からの加力を正加力とした。加力は左右の加力点位置の変形が等しくなるように行った。W11 及び W12 は左右の荷重はほぼ同様の値であったが、W10 は押し側の荷重が大きくなる傾向を示した。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重－変形関係

各試験体の荷重－変形関係を図-3 に、最終破

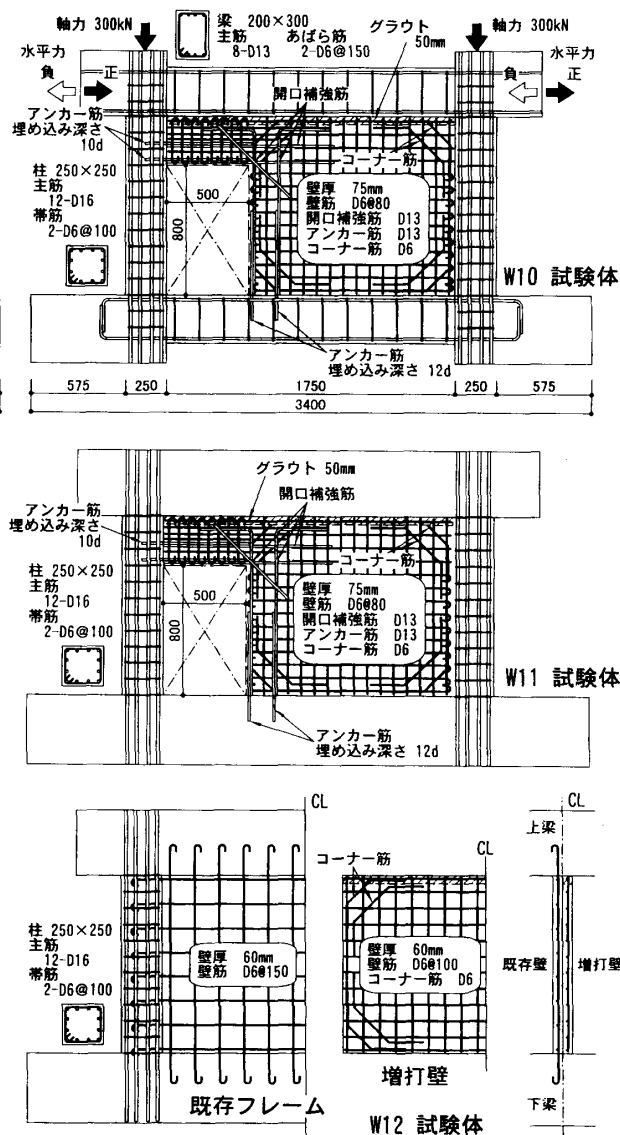


図-2 試験体概要

表-1 コンクリートの機械的性質

	使用箇所	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (10^3N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)
W10	柱	23.5	22.7	2.30
	上梁	23.9	23.9	2.44
	下梁	32.9	29.3	3.50
	増設壁	84.4	29.0	5.04
	グラウト部	84.4	29.0	5.04
W11	柱	22.1	21.1	2.13
	増設壁	29.5	26.2	—
	グラウト部	81.0	28.2	6.61
W12	柱	22.8	22.7	2.04
	既存壁	33.0	28.4	2.37
	増設壁	33.0	28.4	2.37
	グラウト部	85.9	28.2	4.84

※ グラウト部は無収縮モルタル

表-2 鉄筋の機械的性質

径	使用箇所	材質	降伏応力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	弾性係数 (10^3N/mm^2)	伸び (%)
D16	柱主筋	SD 295	359	532	187	29.0
D13	梁主筋		347	515	186	28.9
D13	アンカー筋		357	516	186	27.6
D13	開口補強筋		357	516	186	27.6
D6	柱フープ筋 梁S.T.筋 壁筋		351	483	172	標点外

壊状況を写真-1に示す。図-3中の計算耐力は、3.4節に示す式(1)(2)(3)及び表-3による。全試験体とも柱軸力は、実験終了時まで保持されており、また、既存フレームと有開口増設壁または増打壁境界面の最大耐力時のひび割れは小さく、両者は破壊まで一体性を保っていた。

(1) W10 試験体

正側加力では、開口上部壁及び梁のせん断ひび割れ($R=1/830$)の発生とほぼ同時に、柱脚の曲げひび割れが発生した。その後、開口上部壁筋が降伏($R=1/247$)し、 $R=1/200$ で最大耐力に達した。その後の繰り返し载荷でも、耐力の上昇は無く、 $R=1/182$ で開口上部壁及び梁のせん断破壊により荷重が大きく低下した。この時、開口際の縦アンカー筋が降伏に至った。一方、負側加力では、開口下部梁にせん断ひび割れ($R=-1/800$)が発生し、 $R=-1/621$ で開口下部梁あばら筋が降伏した。 $R=-1/200$ で最大耐力に達した後、 $R=-1/50$ まで大きな荷重の低下は見られなかった。

(2) W11 試験体

開口と反対側の柱間の壁(以下、壁)のせん断ひび割れ($R=\pm 1/800$)の発生とほぼ同時に、柱脚の曲げひび割れが発生し、負側加力で壁筋が降伏($R=-1/579$)した。正側加力では、 $R=1/138$ で最大耐力に達した後、壁のせん断破壊で荷重が大きく低下した。一方、負側加力では、前述の壁筋降伏の後、 $R=-1/200$ で最大耐力に達した。この時、開口際の壁下部に圧壊が見られた。

W10とW11の荷重-変形関係を比較すると、正側加力では、W11はW10に対し最大耐力が1.11倍、最大耐力時の変形が1.45倍となっており、負側加力では、最大耐力時の変形は同等であるが、W11の最大耐力はW10の1.50倍であった。また、最終破壊は、W10が開口上下の壁及び梁のせん断破壊となっているが、W11では壁のせん断破壊となっており、上下梁の拘束の大きさによる構造性能の違いが確認された。

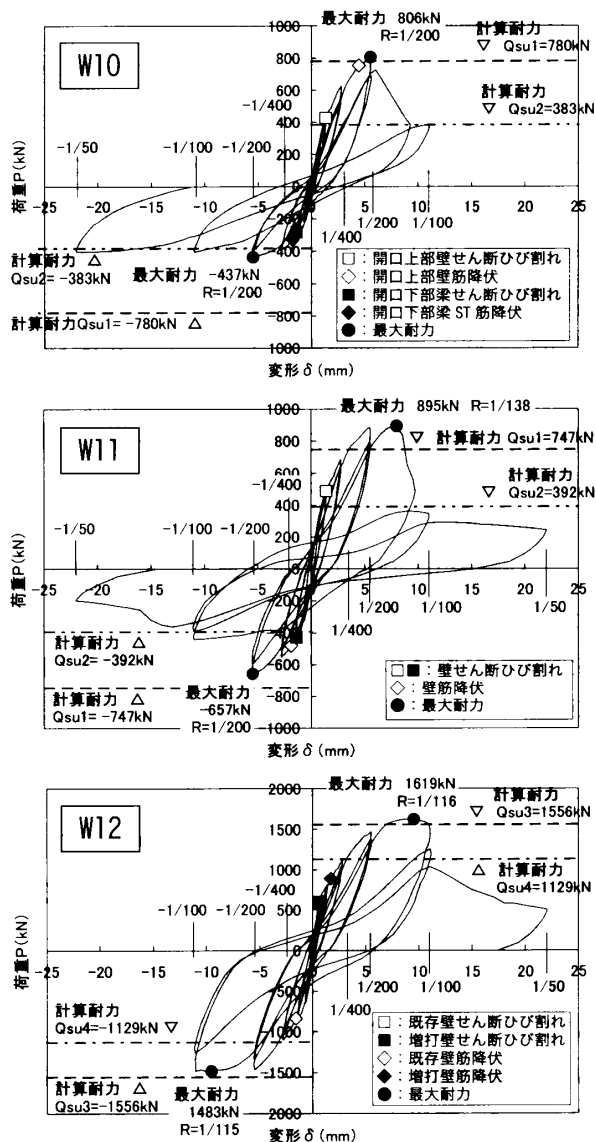


図-3 荷重-変形関係

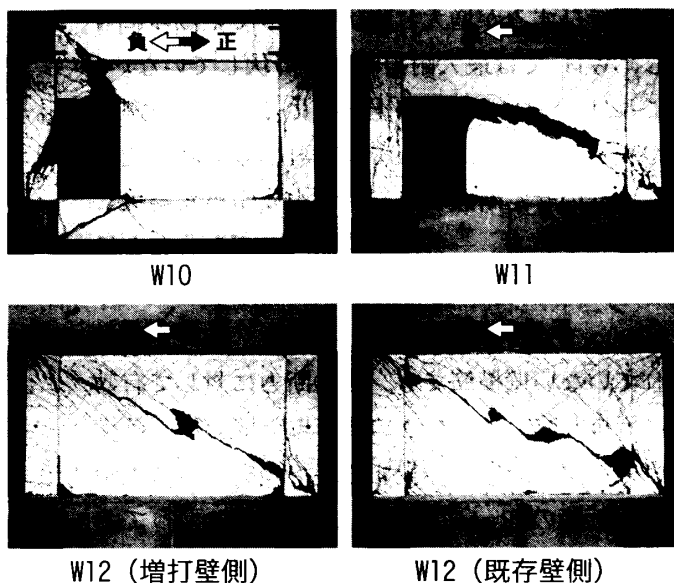


写真-1 最終破壊状況

(3) W12 試験体

増打壁のせん断ひび割れ ($R=1/2910$) の発生とほぼ同時に、既存壁にもせん断ひび割れが発生した。また、柱脚にも曲げひび割れが発生した。 $R=1/651$ で増打壁の壁筋が、 $R=1/692$ で既存壁の壁筋が降伏した後、壁のせん断ひび割れが進展し、正負加力ともに $R=1/115$ で最大耐力に達し、壁のせん断破壊により荷重が大きく低下した。なお、既存壁及び増打壁のひび割れ発生状況（表裏観察）を比較すると、同様の傾向を示していることが確認された。

3.2 変形状

各試験体の正側加力の水平変形を曲げ変形とせん断変形に分離した結果を図-4 に示す。曲げ変形は、試験体の両柱外側で計測した鉛直方向の変形差（6 区間）より回転角を算出、積分して求め、せん断変形は、全体変形から曲げ変形を差し引いたものとした。W10 及び W11 のせん断変形成分は約 70~85%，W12 のせん断変形成分は 65~80% であり、せん断破壊型と言える。

3.3 鉄筋のひずみ分布

W10, W11 の開口上部壁縦筋、壁横筋及び W12 の壁横筋のひずみ分布を図-5 に、W10, W11 の開口際縦アンカー筋のひずみ分布を図-6 に示す。開口上部壁縦筋のひずみ分布を見ると、W10 では、最大耐力前の $R=1/400 \sim 1/200$ の間でひずみが増大し降伏に至っているのに対し、W11 では最大耐力時まで降伏していない。これは、W11 では開口上部壁にせん断ひび割れが少なかったが、W10 では $R=1/200$ 以降に開口上部壁のせん断破壊で最大耐力に至った結果に対応している。一方、壁横筋のひずみ分布を見ると、W10 及び W11 とともに、 $R=1/800 \sim 1/400$, $1/400 \sim 1/200$ の間で降伏しており、柱に定着されていない壁横筋でも、せん断力に対して有効に抵抗している。W12 の増打壁と既存壁の壁横筋のひずみ分布を比較すると、両者とも最大耐力時近傍の $R=1/200 \sim 1/100$ で降伏に至っており、ひずみの分布性状も同様の傾向を示している。W10, W11 の開口際縦アンカー筋のひずみ

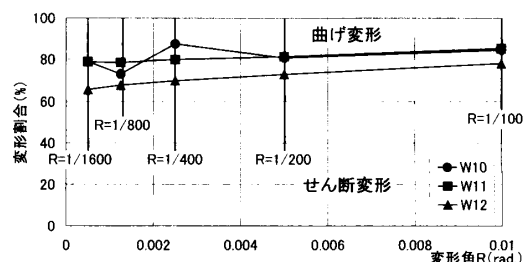


図-4 曲げせん断変形分離

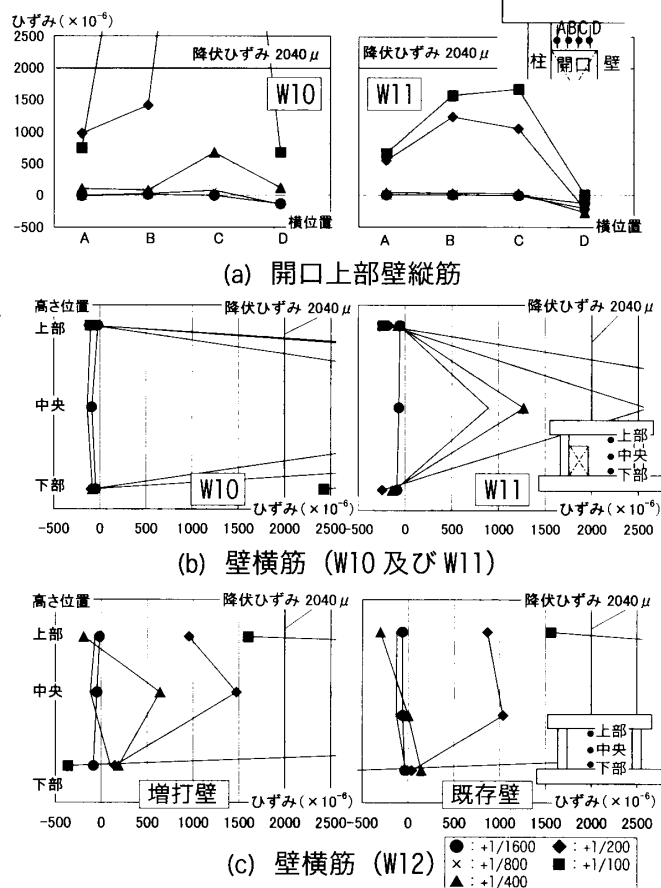


図-5 壁筋ひずみ分布

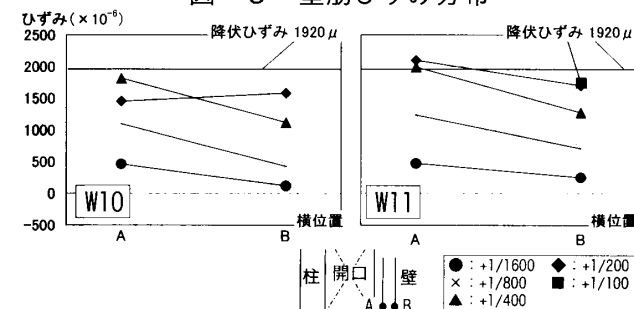


図-6 開口際縦アンカー筋ひずみ分布

分布を見ると、W10 では最大耐力時に降伏ひずみに近い値まで、W11 では $R=1/400$ 程度で降伏に至っており、正側加力において、開口際の壁と下梁との肌分かれの抑制に有効であることがわかった。

3.4 耐力評価

最大耐力の評価は、耐震診断基準の付則 2²⁾ に示されている既存フレームと増設壁が一体であると見なして計算されたせん断耐力（以下、診断基準付 2.1-2 式²⁾）のうち、有開口増設壁 (W10, W11) を Q_{su1} 、増打壁 (W12) を Q_{su3} 、また、耐震改修設計指針²⁾ に示されている接着接合部せん断耐力と柱のせん断耐力を累加した式 (1) を Q_{su2} (W10, W11) とし、既存壁の耐力を診断基準付 2.1-2 式²⁾ で求め、増打壁の耐力を接着接合部せん断耐力として累加した式 (3) を Q_{su4} (W12) として、実験結果 Q_u と比較した。なお、接着接合部せん断耐力 Q_j は既報¹⁾ より、式 (2) で評価することとした。計算値と実験結果の比較を表-3 に示す。

$$Q_{su2} = Q_j + 2Q_c \quad (1)$$

Q_j : 接着接合部せん断耐力

Q_c : 柱せん断耐力²⁾

$$Q_j = 0.38\sqrt{\sigma_B \cdot A_w} \quad (2)$$

σ_B : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

A_w : 接着接合面積

$$Q_{su4} = Q_w + Q_j \quad (3)$$

Q_w : 既存柱梁及び壁の診断基準付 2.1-2 式²⁾ による耐力

W10, W11 とともに、正側の最大耐力 Q_u は、 Q_{su2} を大きく上回り、W10 では Q_{su1} と同等、W11 では Q_{su1} を上回る結果となった。一方、負側では、 Q_{su2} を上回った。偏在した開口を有する耐震壁の場合、初載荷方向により、正側の初期損傷の影響が負側の構造性能に影響するため、今後は更なる耐力検討が必要である。W12 の最大耐力は、 Q_{su4} を上回り、 Q_{su3} と同等の結果となった。

4. 弾塑性 FEM 解析

4.1 解析概要

解析手法は、森川ら³⁾による積層シェル要素を用いた RC 弾塑性 FEM 解析を用いた。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側に Fafitis-Shah 式⁴⁾を、引張側に出雲らの式⁵⁾を

表-3 実験値と計算値の比較

	実験値 (kN)		計算値 (kN)		実験値/計算値			
	正加力	負加力	Q_{su1}	Q_{su2}	正加力	負加力	Q_u/Q_{su1}	Q_u/Q_{su2}
W10	806	437	780	383	1.03	2.10	0.56	1.14
W11	895	656	747	392	1.20	2.28	0.88	1.67
	Q_u	Q_u	Q_{su3}	Q_{su4}	Q_u/Q_{su3}	Q_u/Q_{su4}	Q_u/Q_{su3}	Q_u/Q_{su4}
W12	1619	1483	1556	1129	1.04	1.43	0.95	1.31

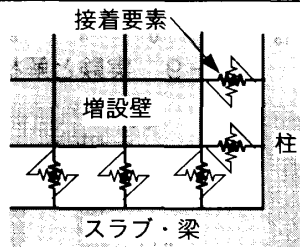


図-7 接着部分のモデル化

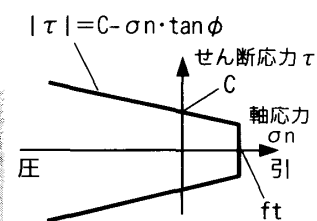


図-8 接着部分の降伏条件

用いた。また、コンクリートのひび割れには前川・福浦⁶⁾による非直交4方向ひび割れモデルを用い、柱・梁のコア部分には、崎野ら⁷⁾の式により拘束効果を考慮した。鉄筋の応力-ひずみ関係は bi-linear とし、コンクリートと鉄筋との接合は、柱主筋、梁あばら筋及びアンカー筋については付着を考慮し、柱・梁帯筋及び壁筋については剛結とした。接着材部分は、図-7 に示す軸方向とせん断方向の2軸バネでモデル化した⁸⁾。この2軸バネには、図-8 に示す修正 Mohr-Coulomb の破壊基準を参考にした降伏条件を導入した。解析での材料特性及び加力方法は、実験に準じた。

4.2 解析結果

各試験体の荷重-変形関係の解析値と実験値の比較を図-9 に、解析の最大耐力時の変形及びひび割れ発生状況を図-10 に示す。解析は、実験の正側加力方向のみの一方向加力のため、実験結果は正側加力のみを示している。なお、W11 の壁筋、W12 の既存壁筋の初期降伏は、実験では負側加力で生じているため記述されていない。図-9 によると、解析結果は実験値より剛性、耐力ともに高めの評価となっているが、概ね良好な対応を示している。また、破壊モードは実験と一致しており、試験体の形状の違いによる破壊モードの違いも捉えられた。今後、W10, W11 等の偏在開口壁の負側加力の場合及び開口形状、位置が変化した場合の耐力評価を行う。

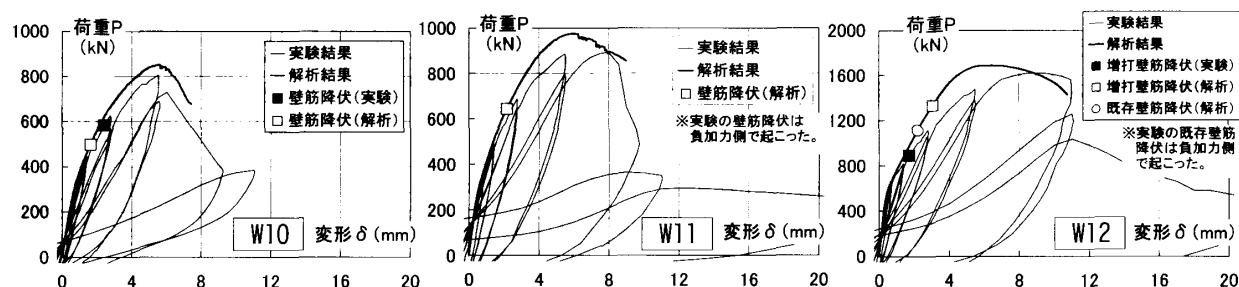


図-9 実験と解析の荷重-変形関係の比較

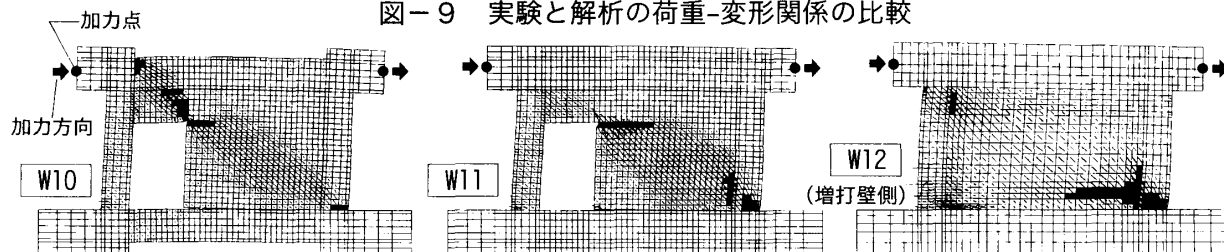


図-10 最大耐力時の変形及びひび割れ発生状況 ■: コンクリート降伏

5. まとめ

粗骨材コッターを用いた有開口増設壁及び増打壁の水平加力実験及び弾塑性 FEM 解析を行った。以下に本研究で得られた成果を示す。

- 1) 有開口増設壁試験体では、上下梁の拘束の大きさによる構造性能の違いが確認できた。既存フレームと増設壁境界面のひび割れ発生状況、増設壁横筋のひずみ分布より、両者の一体性が示された。また、開口際の縦アンカー筋は、壁と下梁の肌分かれ抑制に有効である。
- 2) 増打壁試験体の増打壁と既存壁の挙動は、ほぼ同様の傾向を示し、増打壁は既存フレームと一体性を保っていた。
- 3) 正加力側の最大耐力は、各試験体ともに、柱のせん断耐力と接着接合部せん断耐力を累加した評価式(1)による耐力を大きく上回り、壁筋が柱梁に定着された一体打ちの耐震壁の耐力と同等か、それ以上であった。一方、負加力側の最大耐力は、上記評価式(1)で安全側に評価できた。
- 4) 粗骨材による接着部分をモデル化した弾塑性 FEM 解析は、実験結果を概ねシミュレートできた。

参考文献

- 1) 高谷真次ほか；接着粗骨材コッターを用いた増設耐震壁に関する実験的研究, コンクリー

ト工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.1177

-1182, 2002

- 2) 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診断基準・同解説及び耐震改修設計指針・同解説, 2001
- 3) Suzuki, A., Morikawa, H. et al. ; Simulation Analysis of Shaking Table Test for RC Seismic Shear Wall in Multi-Axis Loading Tests, 13th WCEE, 2004.8
- 4) Fafitis, A., and Shah, S.P. ; Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, ACI Special Publication, No. SP-87, pp.213-232, 1985
- 5) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫；面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, 日本コンクリート工学, Vol.25, No.9, pp.1-14, 1987.9
- 6) 福浦尚之, 前川宏一；非直交する 4 方向ひび割れ群を有する平面 RC 要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集, No.634, pp.177-195, 1999.11
- 7) 崎野健治, 孫玉平；直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 461 号, pp.95-104
- 8) 丸田誠ほか；粗骨材コッターを用いた増設耐震壁の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.697-706, 2002