

# 論文 非耐力壁を有する実大RC造架構の修復性能評価に関する実験的研究

向井智久<sup>\*1</sup>・斉藤大樹<sup>\*2</sup>・衣笠秀行<sup>\*3</sup>・福山洋<sup>\*2</sup>

**要旨：**本論は、設計時において構造耐力上無視される非耐力壁を有する実大規模のRC造架構を対象に静的加力実験を行い、性能設計において必要となる修復性能評価のための基礎検討を行った。試験体の変動因子は非耐力壁と剛節架構の取り付け方法である。修復性を評価するための損傷量としてひび割れに着目し、損傷量を修復方法に応じてグレード分けし、各グレードに応じた修復方法を決定し、修復費用の試算を行うことで、修復費用算出までの基本過程を明確にした。

**キーワード：**実大規模, 非耐力壁, 損傷量, 修復方法, 修復費用, 構造スリット

## 1. はじめに

建築基準法では、中小地震に対して建物および構造部材の損傷を抑え、大地震に対しては建物の崩壊、すなわち構造部材の安全性について検討することが要求されている。その結果、近年の地震被害では構造部材の損傷は軽微であるものの、構造設計時において特段安全性の検討が行われない非構造部材に大きな損傷が集中し、建物の機能性を低下させる事例が散見<sup>(例えは1)</sup>される。RC造の共同住宅において非耐力壁部材は多く存在し、これらは

構造計算上無視されるために、構造スリットによって構造部材と切り離されることが多いが、切り離された非耐力壁の損傷については明確でない。一方、構造部材と切り離されていない場合、開口が大きく非耐力壁と扱われる場合も構造計算上はほぼ同様の扱いとなる。

そこで本論では、非耐力壁を有する実大規模のRC造架構(図-1参照)を対象に静的漸増載荷実験を行い、修復性能評価のための基礎的な知見の収集を目的とした検討を行った。

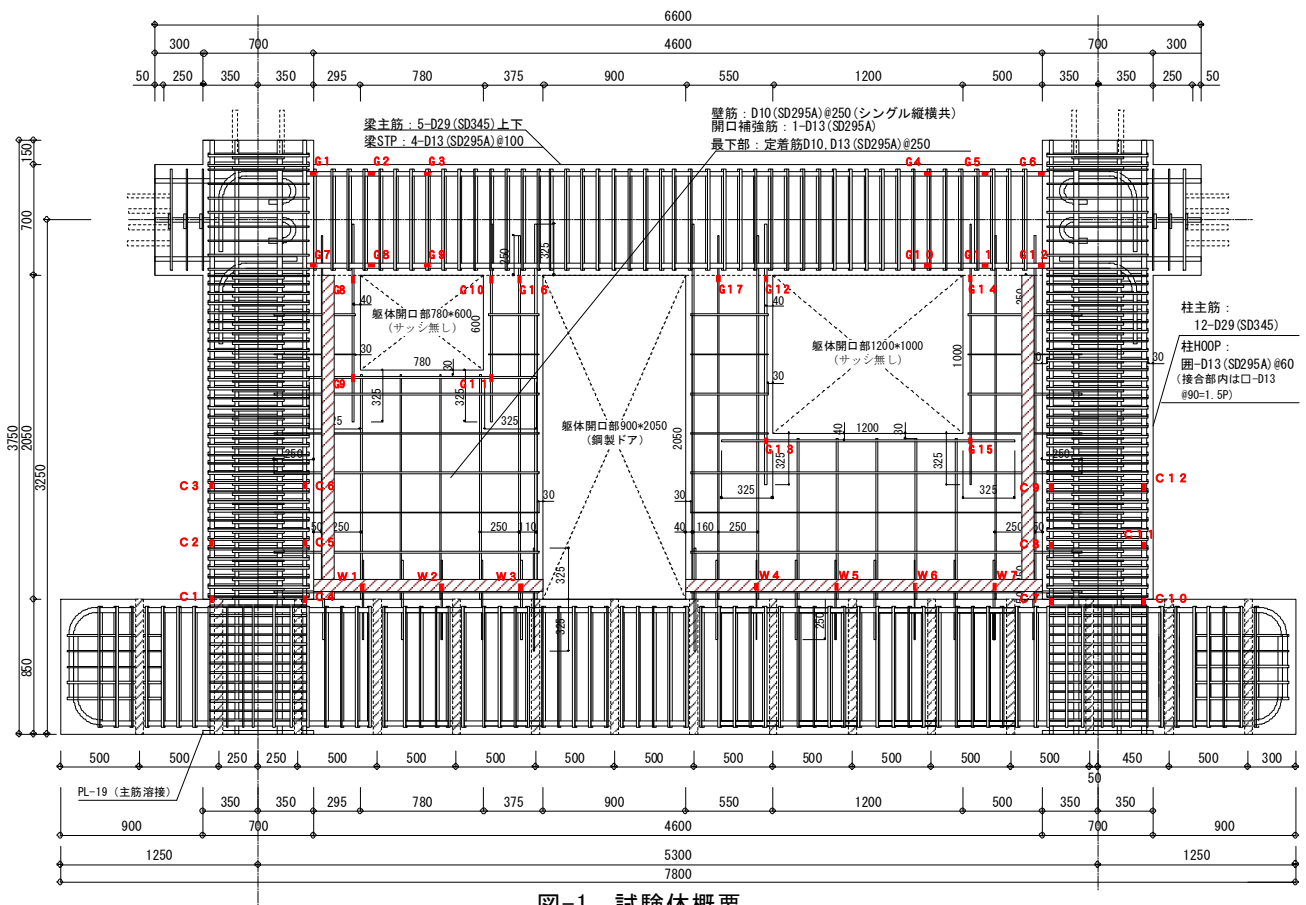


図-1 試験体概要

- \*1 独立行政法人 建築研究所 博(工) (正会員)
- \*2 独立行政法人 建築研究所 工博 (正会員)
- \*3 東京理科大学 工博 (正会員)

## 2. 実験計画概要

試験体は、開口付き非耐力壁を有する実大のRC造架構（等価開口周比は複数開口の包絡で0.79、累加で0.53）で、実在する共同住宅の北側構面を模擬している。ここで試験体規模を実大とする理由は、ひび割れ幅や本数などの損傷は、寸法効果の影響を受けるためである。実験は、まず非耐力壁を剛接した架構試験体（以下、剛接試験体）で増分載荷（1/120rad.まで）を行った後に、非耐力壁を除去した架構試験体（以下、架構試験体）で剛性・耐力を確認するための加力（1/120rad.）を行い、その後、スリットを有する非耐力壁を架構に取り付け（以下、スリット付き試験体）、構造部材が大きく損傷するまで載荷した。

表-1に示す材料（コンクリートは最大応力度、鉄筋は降伏応力度を示す）を使用し、試験体形状は図-1に示す柱断面700mm×700mm、梁断面500mm×700mm、壁厚120mm（偏心取付け）である。ただしスリット付き試験体のコンクリート強度は後打ちした壁部分である。また、スリットの位置は図-1の斜線部分であり3方スリットである。スリット形状は、スリット破壊後の非耐力壁の損傷性状が不明確である部分スリットを対象とし、既往の研究結果<sup>2,3)</sup>を基に、スリットが早期に破壊し壁部材に殆ど応力を伝達しない仕様で、かつ、残存壁厚は壁厚の1/2（60mm）以下かつ70mm以下という現行の構造基準解説書にある技術慣行<sup>4)</sup>に基づき30mmとした。スリットの最小幅は1/100rad.でもスリットが閉塞しないよう25mm（図-2）とし、応力伝達機構の種類は圧縮せん断型である。

柱梁部材は曲げ降伏が先行する配筋、断面である。前述の通り、本実験において、架構部分は実験で再使用すること、非耐力壁の修復性評価に着目していることなどから、柱および梁部材の補強筋量は実際より多く（梁で $p_w=1.0\%$ 、柱で1.2%）配した。その結果、得られる架構のメカニズムは梁降伏全体降伏形であり、メカニズム時層せん断力は約1600kNである。ちなみにメカニズム時の柱の負担せん断力に対するせん断余裕度は、大野荒川min式を用いて約1.56である。また開口補強筋は、当該壁が非耐力壁であるため特に検討していないが、文献5)に基づきD13（SD295）を1本配している。

加力計画は、図-3に示すジャッキを取り付け軸力は1本の柱に付き90ton（軸力比0.07）で一定載荷とし、水平力は左右の梁端部に接続し載荷した。北側に載荷する時を正載荷とした。また、北側のジャッキをマスターとし、南側のジャッキはマスタージャッキと逆向きでかつ同じ力で追随するよう制御している。剛接、スリット付き試験体の載荷履歴は1/120rad.までは同じで、1/1600、1/800、1/400、1/200、1/120rad.の順に漸増させ、1/400rad.以降は同振幅での繰り返し数を2回とした。

計測計画は、層間変形角や架構の面外変形を計測しているほか、ドアや窓の非構造部材の損傷把握のために、各開口部の変位に着目し、図-4に示す位置に変位計を取り付けた。スリット付き試験体では、壁脚部の滑り変位も計測している（図-4）。歪みゲージは、剛接試験体では、柱脚、梁端部、壁脚部に、スリット付き試験体においては、それらに加え、剛接試験体を加力した際、開口入り隅部のひび割れが顕著であったため、図-1に示す開口入り隅の補強筋にゲージを貼付した。壁脚部のゲージはスリット内部の鉄筋に貼付した。また、ひび割れの長さ、幅、個数は、各振幅のピークと除荷時にクラックスケールによる計測を行っている。さらに壁の片面の一部はタイル仕上げを施し、その損傷状況も記録した。

表-1 材料特性

コンクリート	剛接試験体	25.2(N/mm <sup>2</sup> )
	スリット付き試験体	23.0(N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋	壁筋(D10)	324(N/mm <sup>2</sup> )
	せん断補強筋(D13)	330(N/mm <sup>2</sup> )
	柱梁主筋(D29)	381(N/mm <sup>2</sup> )

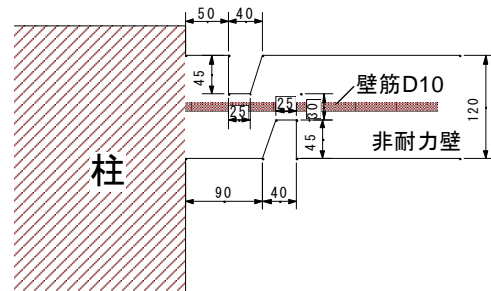


図-2 スリット断面詳細

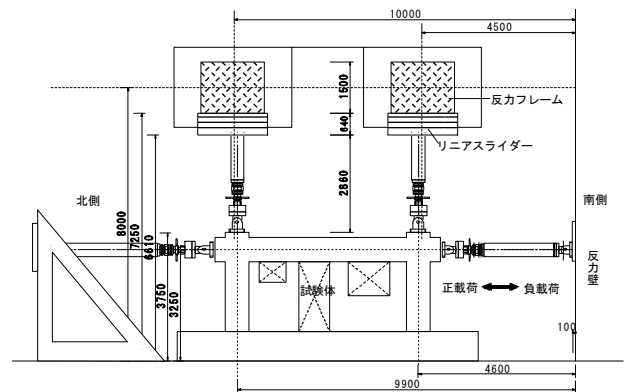


図-3 加力概要

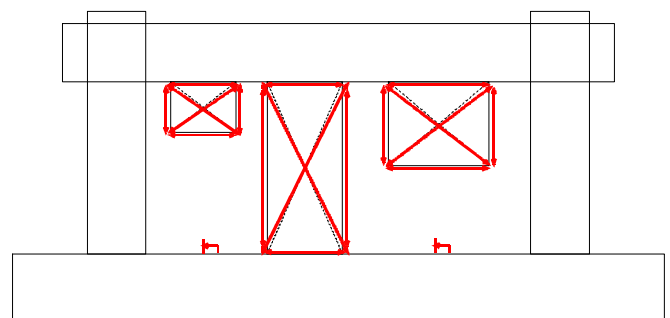


図-4 変位計位置

### 3. 構造特性と損傷評価

各試験体の荷重変形角関係を図-5に示す。剛接試験体は変形角1/120rad.で2406.6kN、架構試験体では1542.8kN、スリット付き試験体では約1801.8kNの耐力であった。

次に損傷過程について述べる。剛接試験体は、+1/1600rad.のピーク時では既に非耐力壁にひび割れがみられ、+1/800rad.において最大の残留ひび割れ幅が0.2mmであった。次に、-1/300rad.の1サイクル目の最大残留ひび割れが1.2mmとなり1.0mmを上回った。その後、+1/120rad.の1サイクル目の最大残留ひび割れが6.0mmとなり5.0mmを上回った。一方、架構に生じるひび割れは、最大残留ひび割れ幅0.2mm、1.0mmを初めて上回る層間変形角がそれぞれ1/200rad.の2サイクル目、-1/120rad.の1サイクル目であり、非耐力壁に比べて大きい層間変形角である。また柱脚と梁端の主筋が、全て降伏したのは+1/120rad.の1サイクル目であった。

スリット付き試験体は、-1/1600rad.のピーク時では既に非耐力壁にひび割れがみられ、+1/800rad.において最大の残留ひび割れ幅が0.3mmであった。次に、+1/400rad.の2サイクル目の最大残留ひび割れが1.1mmとなり1.0mmを上回った。その後、-1/120rad.の1サイクル目の最大残留ひび割れが7.0mmとなり5.0mmを上回った。よって、ひび割れ幅は、スリット付き試験体の方が同変形角時において大きい値であることが分かる。一方、+1/300rad.の1サイクル目においてドア開口上部の補強筋が降伏し、続いて+1/200rad.の1サイクル目においてスリット内に配された壁筋が降伏した。また窓開口周りの補強筋は降伏に至らなかった。なお、架構については、剛接試験体における実験で既にひび割れや主筋の降伏が生

じているためここでは扱わないこととした。

各試験体のひび割れ性状(変形角1/120rad.時)を図-6、7に示す。剛接試験体では、開口入り隅部と開口下部のひび割れが顕著であった。スリット付き試験体においては、開口入り隅部のひび割れは同様に顕著であったが、開口下部のひび割れは殆ど見られなかった。

本論では非耐力壁に生じるひび割れの損傷評価として、ひび割れ面積・長さ・個数に着目して検討する。ここで、ひび割れ個数は、2つのひび割れが直線的に繋がった場合は1つとして算定した。ひび割れ面積は、1つのひび割れに生じる最大ひび割れ幅にひび割れ長さを乗じたものである。ちなみに非耐力壁のみの損傷評価を行う理由は、前述したとおり架構部分は剛接試験体を加力した時点で既にひび割れが生じていること、また非耐力部分の損傷が卓越し修復費用に与える影響が小さかったためである。このことは、前章で述べたとおり、柱梁部材のせん断補強量を増加したこと、いずれも曲げ降伏が先行する(せん断に対して余裕度が大きくなる)よう設計していることも一要因と推察される。

図-8にひび割れ面積を各試験体別に示す。図より、両試験体のひび割れ面積は、剛接試験体の方が同等もしくはやや大きい程度である。一方、ひび割れ長さを図-9(凡例は図-8と同じ)に示す。ひび割れ長さは剛接試験体の方がスリット付き試験体を常に上回る結果となった。これは、剛接試験体の非耐力壁は架構に剛接されており、負担応力が大きく、かつ応力再配分され損傷が拡散したことが要因と思われる。一方、スリット付き試験体では、スリットの効果で架構からの応力伝達経路が制限され、限られたひび割れの幅が大きくなる損傷性状となった。

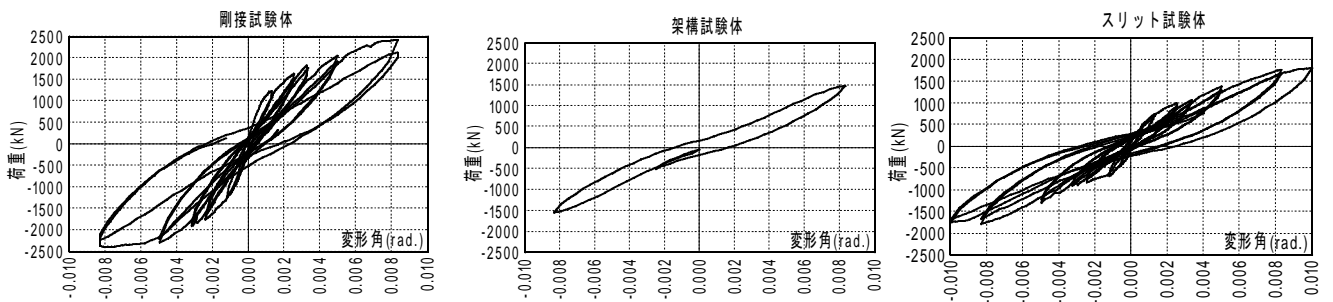


図-5 荷重変形関係

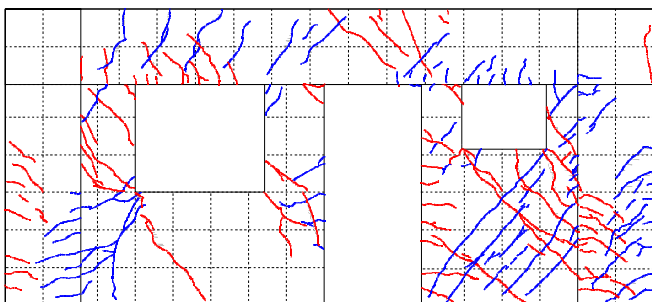


図-6 ひび割れ損傷(剛接試験体, R=1/120rad.)

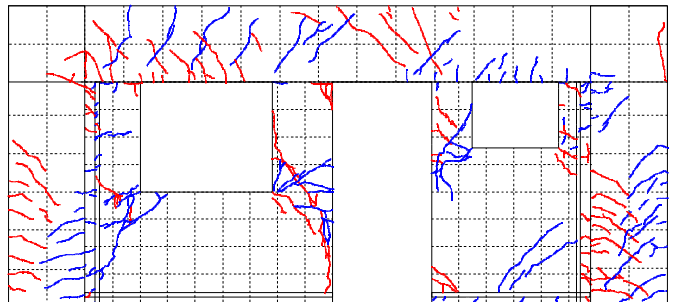


図-7 ひび割れ損傷(スリット付き試験体, R=1/120rad.)

ここで、剛接試験体及びスリット付き試験体の非耐力壁の負担したせん断力を以下に示す方法で検討し、取り付け方法の違いによる非耐力壁の構造特性を把握する。まず剛接架構試験体の荷重変形関係をトリリニアにモデル化した包絡線から、柱梁が損傷する前の状態と推定される架構試験体の荷重変形関係（メカニズムに達した時点第二折点とし、その荷重の1/3倍を第一折点時荷重、初期剛性を降伏時剛性の1/0.3倍として第一折点を決定）を差し引き求める。次に、スリット付き試験体の荷重変形関係をトリリニアにモデル化した包絡線から、架構試験体の実験で得られた荷重変形関係をトリリニアにモデル化した包絡線を差し引くことで求める。得られた非耐力壁の骨格曲線を図-10に示す。ただし、剛接試験体の最大変形角は1/120rad.であるため第二折点以前を表示する。図より剛接試験体の非耐力壁は第一折点後もせん断力を負担しメカニズム時には架構の負担せん断力の半分以上を負担している。またスリット付き試験体の非耐力壁は、第一折点以降、負勾配となっておりせん断力を負担しなくなる傾向にあることが分かる。

次にドアの開閉の可否を検討する。剛接試験体では層間変形角1/200rad.の除荷時に、スリット付き試験体では、1/120rad.の除荷時より開閉が不可能となり、剛接試験体のドアの機能はより小さい変形にて喪失した。

窓開口は、ガラスの破損による損傷の検討を行う。本試験体にはガラスは取り付けしていないが、開口の変形は計測しているため、ここではその値と、文献6)より一般的なサッシを用いたフロート板ガラスを対象として、ガラス破損の発生する窓開口の変形角をそれぞれ算出した結果、開口(大)では開口の変形角1/90rad.で、開口(小)では1/56rad.でガラスの破損が発生する結果が得られた。また、その時の層間変形角は、剛接試験体では開口(大)・(小)それぞれ約1/230, 1/150rad.であった。スリット付き試験体では、開口(大)は実験でガラスが破損する層間変形角に至らなかったが、開口(小)では1/120rad.程度であった。以上のことから、開口部分の変形は層間変形より大きいため、開口部分に納められている非構造材の損傷評価では層間変形と各開口部の変形の関係を把握する必要がある。

#### 4. 修復費用算出過程と結果

本論では損傷を受けた非耐力壁を対象とし、ひび割れ幅に応じた修復方法の決定および修復費用の算出過程と結果を示し、ひび割れによる損傷の程度が修復費用に及ぼす影響を検討する。また、本論で修復を行う箇所は、非耐力壁のみとし、架構やスリット部分・タイル部分(外装仕上げ)・ドアの修復作業については考慮していない。

##### 4.1 修復費用算出過程

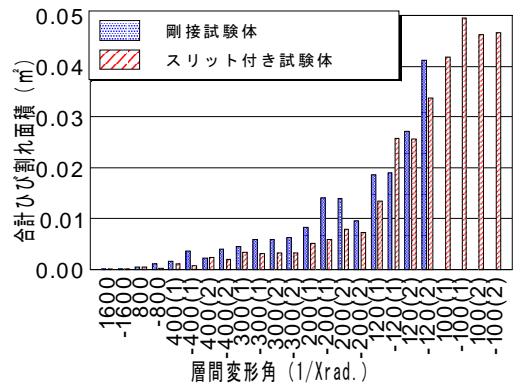


図-8 層間変形角とひび割れ面積

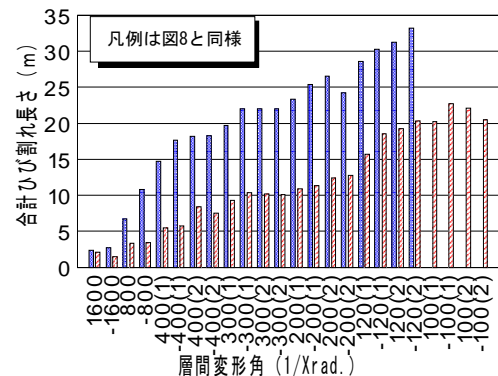


図-9 層間変形角とひび割れ長さ

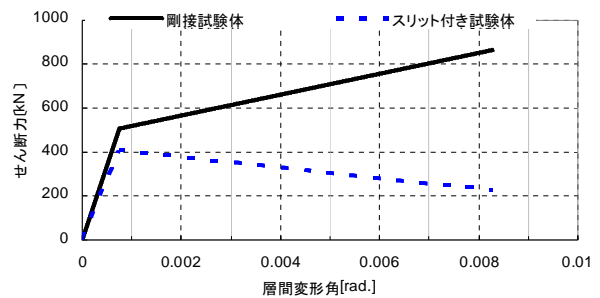


図-10 非耐力壁の骨格曲線（第二折点以前）

表-2 損傷レベルと修復方法および費用比率

損傷レベル	修復方法	修復費用比率
①(0.2mm以下)	シーリング工法	0.09
②(0.2mm~1.0mm)	手動式エポキシ樹脂注入工法+ シカト可とう性エポキシ樹脂充填工法	0.93
③(1.0mm~5.0mm)	手動式エポキシ樹脂注入工法+ シカトシーリング材充填工法	1.00
④(5.0mm以上・浮き・剥落・圧壊)	エポキシ樹脂系モルタル充填工法	2.49

##### (1) ひび割れ損傷に対する修復方法

本論では文献7)を参考に、ひび割れ幅に応じた4種類の修復方法を表-2に示す。ひび割れ補修は原則、補修材料を注入して行うが、0.2mm以下は物理的に注入が難しい。0.2mm以上は注入可能だが、1.0mm以上では充填材料を変える必要がある。5.0mm以上では、注入は行わず補修材料を充填することが合理的である。

##### (2) 修復作業の詳細

各修復方法における作業内容を表-3、図-11に示す。

##### (3) 修復費用の算出過程

表-3に基づき修復費用の算出方法を示す。まず修復費

用の算出を行う構面の調査を行う。次に修復を行う1本のひび割れに対して最大ひび割れ幅を測定し、かつ、当該ひび割れ長さも測定する。その測定したひび割れ幅によって、表-2に示す修復方法を選択し、文献8)を基に、修復費用を決定する。この際、作業単価として「単位長さ」及び「単位面積」に基づくものがあるが、本検討では「単位面積」は、作業毎に必要なとらるる幅を仮定し「(仮定した幅)×1m」として、「単位長さ」への変換を行い、各修復費用を単位ひび割れ長さで統一した。その結果、得られた単位ひび割れ長さ当たりの修復費用に、ひび割れ長さを乗じることで、1つのひび割れに対する修復費用を算出する。上記の作業を全てのひび割れに対して行い、それを合算することで全体の修復費用とした。ただしここでは、人工や足場設置等の修復のための準備作業にかかる費用は含んでおらず、非耐力壁のひび割れを修復するための材料費及び工事費のみの算出を行った。

今回の修復費用の算出に当たり、表-2に〔③手動式エポキシ樹脂注入工法+Uカットシーリング材充てん工法〕を基準とした1m当たりの修復費用に対する比率を示す。ちなみに③の修復費用は文献8)より算出した結果10960円であった。

#### 4.2 修復費用の算出結果

算出した修復費用の比率を剛接試験体の-1/200rad.の1サイクル目の修復費用を基準値1.0として図-12に示す。図より1/400rad.以降、剛接試験体の方がスリット付き試験体より約2倍程度の修復費用が必要であることが分かる。また1/100rad.以降においても剛接試験体の修復費用を上回る事はなかった。

#### 4.3 修復費用に関する考察

##### (1) 両試験体の修復費用の特徴

表-2に示す損傷レベル毎の修復費用の比率を図-13と図-14に示す。比率は図-12と同様で剛接試験体の-1/200rad.の1サイクル目を合計修復金額の基準値とした。剛接試験体では、損傷レベル①(表-2参照)は増減も少なく全体として小さい割合である。損傷レベル②は

1/200rad.まで増加し、それ以降減少するものの、全体を通して大きな割合を占める。損傷レベル③は1/300rad.以降、修復費用が発生し概ね増加する傾向であった。損傷レベル④も1/300rad.以降、修復費用が発生し、1/120rad.以降急激に増加し最終的に大きな割合を占める。一方、スリット付き試験体は、損傷レベル①は増減もなく全体として小さい割合である。損傷レベル②は1/120rad.まで増加し、その後は減少し一定の値となる。損傷レベル③は1/400rad.以降費用が発生し、1/120rad.まで増加し、その後は減少する。損傷レベル④は1/120rad.以降増加するが、最終的に一定の値であった。

3章で述べたとおり、剛接試験体では損傷が拡散して多くのひび割れ長さや個数を有し、スリット付き試験体では損傷が集中した結果、ひび割れ幅が開く傾向にある。本論で採用した修復方法は、④の修復の適応範囲が5.0mm以上は全て修復が可能であると仮定している事から、修復費用を抑えるためには、スリット付き試験体のようにひび割れ面積を増加させ、長さや個数を少なくする事が有効という結論に至った。しかしながら実際には、非耐力壁の損傷レベルが大きくなることで、非耐力壁自体・ドア・窓枠・タイルなどの取り替えやひび割れに伴う内、外装材の修復も視野に入れた費用算出が必要になり、

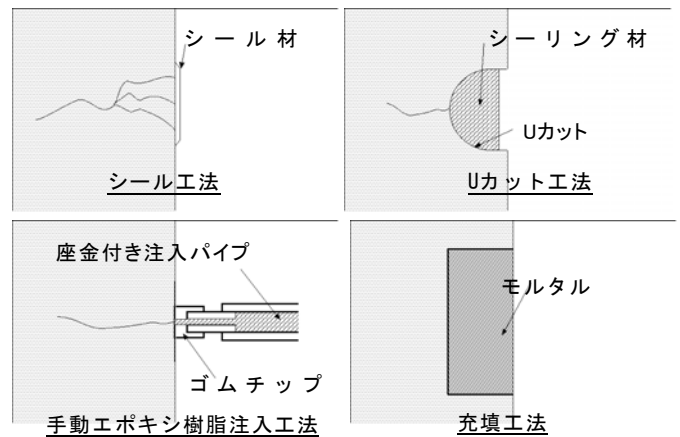


図-11 修復工法

表-3 各損傷レベルに応じた修復作業の過程

①シール工法	単位	②手動式エポキシ樹脂注入工法+Uカット可とう性エポキシ樹脂充てん工法	単位	③手動式エポキシ樹脂注入工法+Uカットシーリング材充てん工法	単位	④エポキシ樹脂系モルタル充填工法	単位
1)補修範囲の確認	面積	1)補修範囲の確認	面積	1)補修範囲の確認	面積	1)補修範囲の確認	面積
2)ひび割れ部分の清掃	面積	2)ひび割れ部分の清掃	面積	2)ひび割れ部分の清掃	面積	2)下地処理	面積
3)シール材の計量・混練・塗布	長さ	3)注入孔の設定	長さ	3)注入孔の設定	長さ	3)プライマーの計量・混練	面積
4)養生		4)座金付き注入パイプの設定	長さ	4)座金付き注入パイプの設定	長さ	4)プライマーの塗布	面積
5)清掃	面積	5)孔内の清掃	長さ	5)孔内の清掃	長さ	5)エポキシ樹脂モルタルの計量	箇所
6)自主検査		6)パテ状エポキシ樹脂の計量・混練	長さ	6)パテ状エポキシ樹脂の計量・混練	長さ	6)エポキシ樹脂モルタルの充填	箇所
		7)注入パイプの取り付け	長さ	7)注入パイプの取り付け	長さ	7)表面仕上げ	箇所
		8)ひび割れのシール	長さ	8)ひび割れのシール	長さ	8)養生	
		9)シール材の養生	長さ	9)シール材の養生	長さ	9)清掃	面積
		10)注入用エポキシ樹脂の計量・混練	長さ	10)注入用エポキシ樹脂の計量・混練	長さ	10)自主検査	
		11)エポキシ樹脂の注入	長さ	11)エポキシ樹脂の注入	長さ		
		12)養生		12)養生			
		13)Uカット	長さ	13)Uカット	長さ		
		14)ひび割れ部分の清掃・プライマー塗布	面積	14)ひび割れ部分の清掃・プライマー塗布	面積		
		15)可とうエポキシ樹脂の充填	長さ	15)シーリング材の充填	長さ		
		16)養生		16)養生			
		17)仕上げ・清掃	面積	17)仕上げ・清掃	面積		
		18)自主検査		18)自主検査			

それらは別途検討する必要がある。

### (2) 両試験体の損傷量と修復費用の関係

3章の検討結果より、両試験体の違いがあったひび割れ長さを各損傷グレード別、試験体別に図-15, 16に示す。図より、1/120Rad.以前における剛接架構試験体は、損傷レベル①が、1/120Rad.以降では①②④が支配的である。一方、1/200Rad.以前におけるスリット付き試験体では、レベル①がやや大きく、1/120Rad.以降ではレベル①と③がほぼ同程度である。それに対して修復費用は、1/120Rad.以前における剛接試験体では、レベル②が、1/120Rad.以降ではレベル④が支配的である。一方、1/200Rad.以前におけるスリット付き試験体ではレベル②が、1/120Rad.以降ではレベル②～④がほぼ同じ割合という結果が得られ、修復性評価においては、支配的な損傷量に対応しない場合が存在することが分かる。

### 5.まとめ

実大規模の非耐力壁を有するRC造架構の加力実験を行い、非耐力壁を対象として、ひび割れ損傷レベルに応じた修復方法を決定し、その修復方法にかかる費用の算出を行い、非耐力壁の各ひび割れに必要な修復費用の試算を行った。また非耐力壁の構造特性の把握も行った。謝辞：本実験研究は、文部科学省防災科学技術研究所の「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の一環で実施された。また、本実験の実施は、建築研究所の部外研究員の中澤氏及び東京理科大学衣笠研究室の学生諸氏の多大な協力を得た。関係諸氏に感謝の意を表す。

参考文献：

- 1) 向井智久, 福山洋, 福島順一, 鵜田隆：新潟県中越地震における病院建築物の地震被害と機能回復性, コンクリート工学, Vol.46, No.1, pp.12-16, 2008.1
- 2) 大久保全陸・塩屋晋一：構造目地を有する鉄筋コンクリート腰壁付き骨組の力学的特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.380, pp.10-20, 1987.10
- 3) 塩屋晋一：構造目地を有する鉄筋コンクリート腰壁付き骨組の力学的特性に関する研究 (その2：腰壁付き梁の力学特性と曲げ強度評価式), 日本建築学会論文報告集, No.416, pp.91-104, 1990.10
- 4) 独立行政法人建築研究所ほか：2001年版 建築物の構造関係技術解説書, pp.544
- 5) 日本建築学会：壁構造配筋指針, pp.83-84, 1987
- 6) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, p.224-230, 2005
- 7) 被災建築物の緊急補強技術開発委員会：地震被害を受けた鉄筋コンクリート及び鉄筋鉄骨コンクリート造建築物の補修方法, 1996.3
- 8) 財団法人 経済調査会「建築施工単価」2007-4 (春)

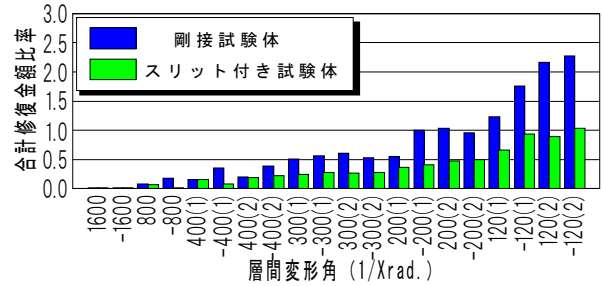


図-12 修復費用比率－層間変形角

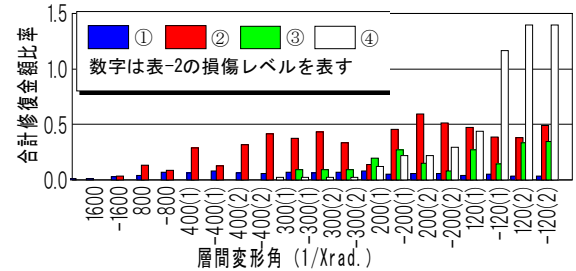


図-13 損傷レベル毎の修復費用比率－層間変形角 (剛接試験体)

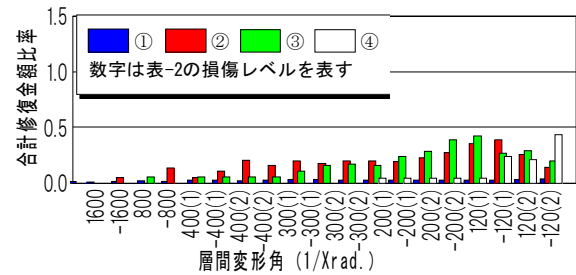


図-14 損傷レベル毎の修復費用比率－層間変形角 (スリット付き試験体)

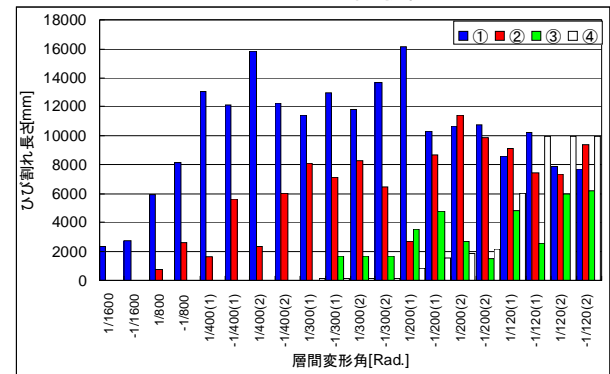


図-15 損傷レベル毎のひび割れ長さ－層間変形角 (剛接試験体)

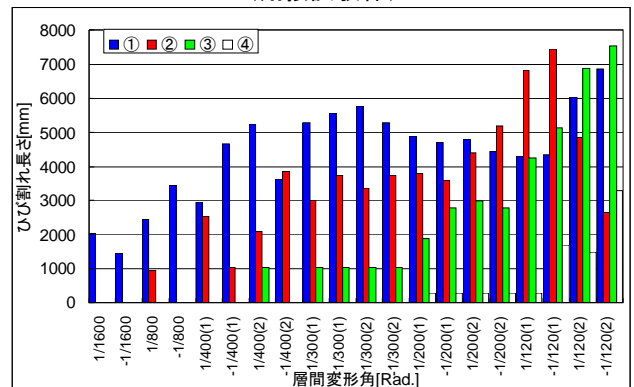


図-16 損傷レベル毎のひび割れ長さ－層間変形角 (スリット付き試験体)