

論文 構造部材として活用する袖壁が RC 造架構の損傷低減に与える影響と有用性の検証

門田 太陽人*1・向井 智久*2・前田 匡樹*3

要旨：袖壁が柱梁の骨組や周辺部材に及ぼす影響を検証するために、袖壁を構造部材として活用した実大試験体の実験結果に基づき架構損傷量を評価するとともに、袖壁無しと想定した純フレームモデルについて解析により損傷量評価を行った。袖壁有り・無し架構の損傷量、及び耐震性能を比較検討した結果、袖壁が柱梁の損傷を低減する効果が確認でき、架構の変形抑制効果や残存耐震性能の向上に関して有用性があることを示した。

キーワード：袖壁付き架構, 損傷量評価, 耐震性能評価

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）造建築物には、柱・梁の骨組に袖壁・腰壁・垂れ壁といった RC 壁が付帯することが多く、特に袖壁においては、取り付く柱の耐力及び剛性を上昇させる効果があり、耐震要素としての積極的な利用を目指した研究が近年行われるようになった。一方で、袖壁が柱梁の骨組や周辺部材に及ぼす影響に関しては不明瞭な部分も多く残されている。そこで筆者らは、国土交通省・総合技術開発プロジェクト「災害拠点建物の機能継続技術の開発」で実施された、実大 5 層 RC 造袖壁付き建築物の静的荷重実験¹⁾に建築研究所などと共同研究として参画し、袖壁付き柱の損傷量や負担応力²⁾などに関して検討してきた。本論文では、それらの検討結果を踏まえ、袖壁付き架構の損傷量(ひび割れ長さ、剥落面積)を評価する。さらに、純フレームの損傷量を解析モデルにより推定し、袖壁付き架構と比較することで、袖壁が架構に与える影響及び有用性について検証する。

2. 袖壁付き架構における損傷量評価

2.1 試験体概要

試験体の架構概要図^{3), 4)}を図-1に示す。両試験体ともに袖壁を耐震要素として架構に取り入れたものである。加力方法は、R 階及び 4 階に取り付けられたアクチュエータにより地震力分布と同じ層せん断力・転倒モーメントを生じさせるような外力比率(1:2)を与えた。柱・梁・袖壁の断面及び配筋は同一であり、その諸元を表-1に示す。両試験体は、スリットの配置方法が異なり、スリット有架構とは、袖壁のみを柱梁と一体化させ、その他の RC 壁をスリットにより切り離し、非構造壁として扱う試験体である。スリット無架構とは、腰壁・垂れ壁に設けていたスリットを無くし、袖壁のみではなく、腰壁・

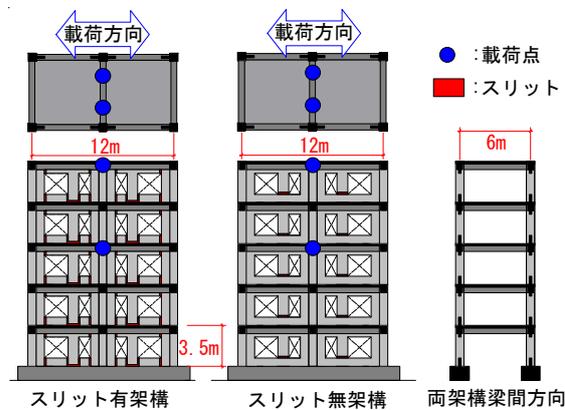


図-1 実大架構概要図

表-1 代表部材の諸元(単位: mm)

	1F柱	2F梁	1F袖壁	
断面				
主筋	16-D25(SD345)	8-D25(SD345)	壁端部補強筋	6-D16
帯筋	4-D13(SD295A)@100	2-D13(SD295A)@100	壁横筋	D10@100

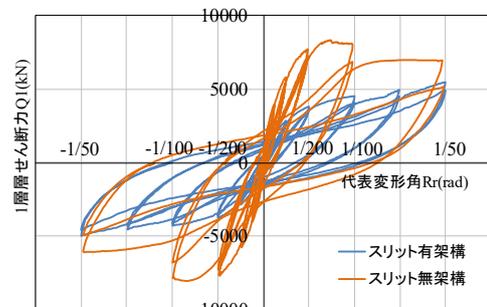


図-2 荷重-変形関係

*1 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)

*2 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 (正会員)

*3 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

垂れ壁も骨組と一体化させた強度抵抗型の試験体である。

2.2 荷重 - 変形関係の履歴特性

実験から得られた両架構の1階の層せん断力 $Q1$ - 頂部変形角 Rr (R 階の変形/ R 階高さ) 関係を図-2に示す。スリット有架構は、耐力低下が見られない靱性に富む挙動を示したのに対し、スリット無架構では、耐力・剛性ともに大幅に増加し、最大耐力以降は層せん断力が緩やかに減少するといった傾向が見られた。

2.3 損傷量評価の概要

実験時における損傷量計測について、1層の部材においては全てのひび割れや剥落を記録する詳細計測を行い、2層以上の部材に対しては、最大ひび割れ幅のみを記録する簡易計測を実施した。2層以上の部材に対しては、図-3に示す架構損傷量の評価概要図のように損傷量(ひび割れ長さや剥落面積)を仮定する。以下に評価手順を示す。

a) 損傷度 - 損傷量関係の整理

詳細計測を実施した1層部材の損傷度に対するひび割れ長さや剥落面積の関係を整理する。

b) 最大ひび割れ幅による全部材の損傷度判定

簡易計測を実施した2層以上の部材に対し、最大ひび割れ幅に基づく損傷度判定を行う。

c) 損傷度に応じた損傷量の適用

2層以上の部材について、a)で整理した同部材、同損傷度における損傷量を与え、損傷状況を仮定する。

2.4 地震動倍率による損傷量比較

両架構の性能を同じ強さの地震動によって比較することとする。図-4に、両架構を一質点系に縮約した性能曲線と第2種地盤の安全限界応答スペクトル(以下、基準地震動)を示す。実験時に損傷計測を行った各Peak点が地震動との応答点となるように、基準地震動に対する倍率を算定し、その結果も同図に併せて示す。図-5は地震動倍率に対する応答変位の関係であり、両架構において地震動倍率1では約2倍、地震動倍率2では約4倍の応答変形の差が生じていることがわかる。以下に、各地震動倍率時における損傷性状を考察する。

I) 地震動倍率1(大地震レベル)

地震動倍率1におけるひび割れ性状及び損傷量評価結果を図-6(左)、図-7に示す。ひび割れに関して、スリット有架構では、柱・梁・袖壁におよそ均等に生じているが、腰壁・垂れ壁の非構造壁には極わずかしか生じていない。一方、スリット無架構では、柱梁の損傷がスリット有架構に比べ少ないものの、袖壁や腰壁・垂れ壁には多くのひび割れが生じていることがわかる。一方、剥落に関しては、両架構でわずかであった。

II) 地震動倍率2(極大地震レベル)

地震動倍率2におけるひび割れ性状及び損傷量評価結果

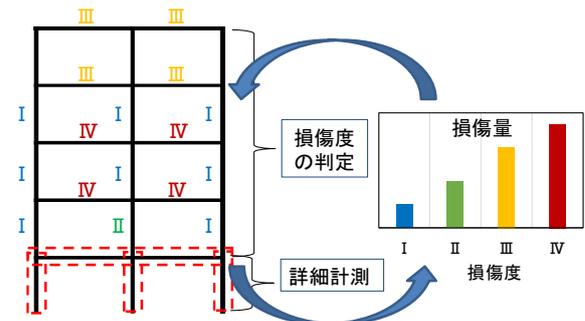


図-3 架構における損傷量評価の概要

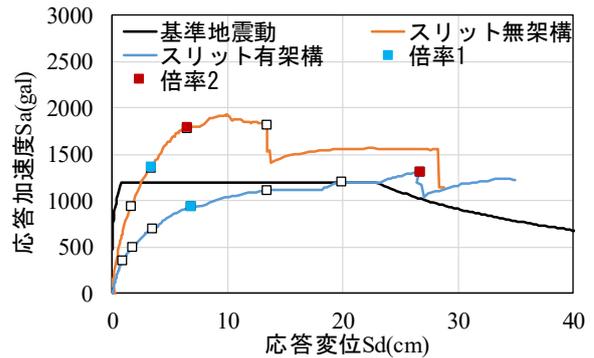


図-4 一質点系における性能曲線と基準地震動

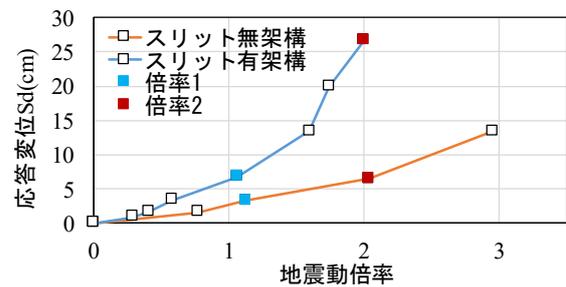


図-5 地震動倍率 - 応答変位関係

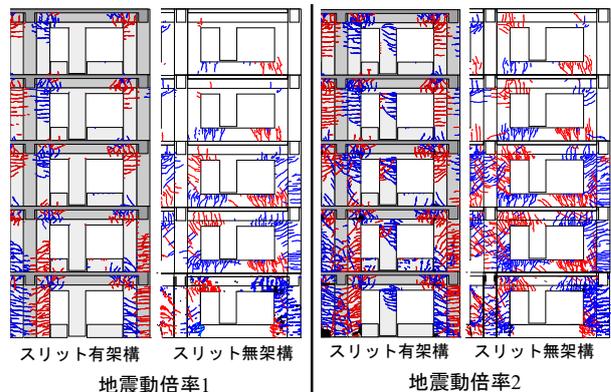


図-6 同地震動強さにおける損傷性状の比較

を図-6(右)、図-8に示す。スリット有架構は、袖壁フェイスのスリット位置に損傷が集中したため、梁のひび割れ及び剥落が多くなる傾向を示した。また、1層袖壁の剥落が大幅に増加しているが、柱の剥落量がわずかであった。

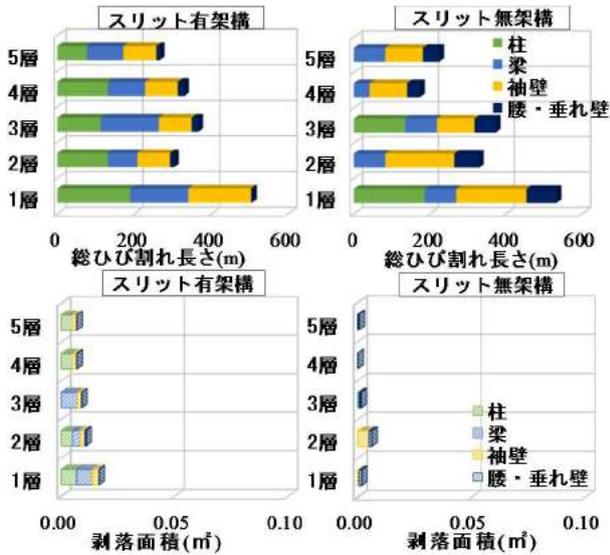


図-7 地震動倍率 1 における層別の損傷傾向

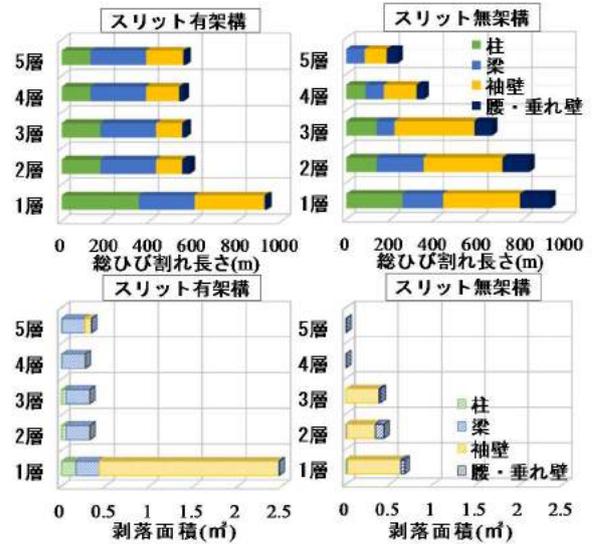


図-8 地震動倍率 2 における層別の損傷傾向

あることから、主に袖壁がせん断力を負担し、柱の損傷を低減したと考えられる。スリット無架構では、部分崩壊形が形成された 3 層までに多くのひび割れが生じており、最も多い袖壁は、骨組の 2 倍程度であった。袖壁の剥落に関して、3 層に渡って生じており、1 層に集中するスリット有架構とは異なり、分散する傾向であった。

3. 純フレームにおける架構損傷量の予測

前章で示した両架構の損傷性状の分析から袖壁の影響度を検証するため、本章では、柱梁のみを構造部材とする純フレーム解析モデルを設定し、損傷量を推定する。なお、袖壁の有無による影響を検証するため、袖壁付き架構同様、腰壁・垂れ壁・方立壁を有するものとする。

3.1 想定架構の概要

図-9 に損傷量評価を行う純フレームの想定架構概要図を示す。柱梁及び RC 壁の断面及び配筋は、実大試験体と同一とするが、腰壁、垂れ壁はスリットによって柱と絶縁させる。

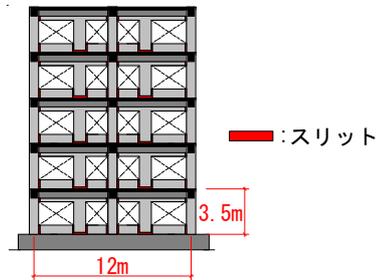


図-9 純フレームの想定架構概要図

3.2 部材の復元力特性

1 層の柱及び梁の復元力特性を図-10 に示す。なお、一般的な腰壁や垂れ壁付き梁においては、スリットが設けられている場合でも、取り付け壁を梁の剛性評価に考慮する必要があるが、断面形状が一様でなく、断面 2 次モーメントの評価が困難であるため、本研究ではこれらの影響を考慮せず矩形断面として算定した。

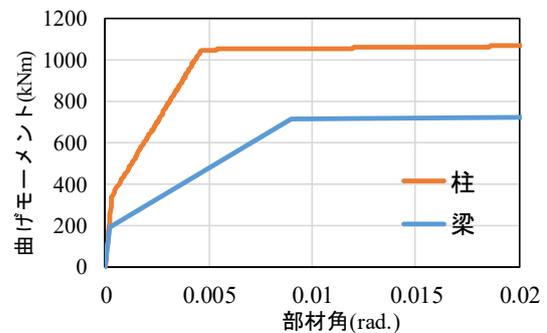


図-10 純フレームの復元力特性

3.3 損傷量の仮定

架構の損傷量の推定は、Push Over 解析により得られる部材の変形量に対し損傷量を仮定し、部材ごとに積算して推定する。以下に部材ごとの損傷量の仮定を示す。

1) 柱

向井ら⁵⁾は、災害後における建築物の迅速な機能回復

を目標に掲げ、実際の復旧事例や、部材の損傷実験結果をもとに損傷評価データベース(以降、損傷評価 DB)を構築している。当該データベースは実験結果や規定をもとに部材や層の応答値と損傷量の関係性について体系的にまとめており、本研究では、表-2 に示す最も属性に近い柱を選択し、実測データであるひび割れ率、剥落率を

表-2 損傷評価 DB から準用する柱の構造種別

大分類	中分類	小分類	細分類			
構造部材	RC	柱	1	破壊モード	3	仕上げ種類
				曲げ破壊		打ち放し
			2	せん断余裕度	4	反曲点高さ比
				1.22		0.5

純フレームの柱に適用する。損傷評価 DB に従い、仮定した柱の損傷量と部材角の関係を図-11 に示す。

2) 壁付き梁・腰壁・垂れ壁

純フレームにおいても梁端のスリット位置に損傷が集中することや、部材の形状・寸法がスリット有架構のそれに類似していることから、壁付き梁の損傷量はスリット有架構における損傷量計測結果⁶⁾を準用する。図-12 から図-14 に、スリット有架構の梁・腰壁・垂れ壁における損傷量-部材角関係の実測データを示し、これらに基づき純フレームにおける壁付き梁の損傷量を仮定する。

3.4 架構損傷量の推定結果

純フレームにおける損傷量推定結果を図-15 に示す。塑性ヒンジが生じる1階柱および全層の梁の損傷が多く、地震動倍率1になると剥落も激しく進展する結果となった。地震動倍率2では、多くの部材が塑性率5を超える大変形を起こしており、倒壊レベルの損傷であると判断できる。

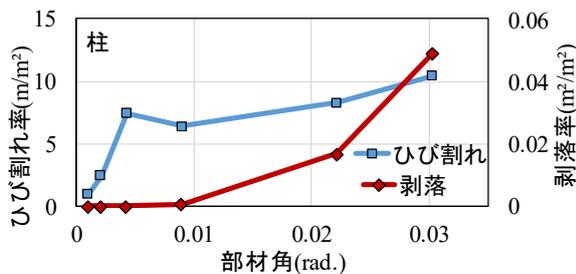


図-11 柱の損傷量(仮定値)

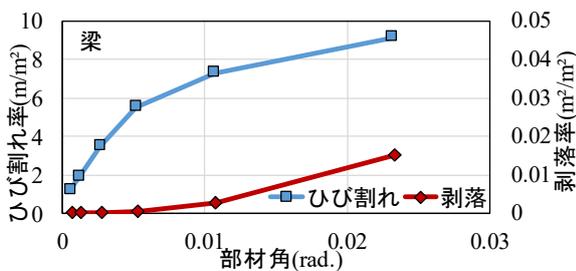


図-12 梁の損傷量(仮定値)

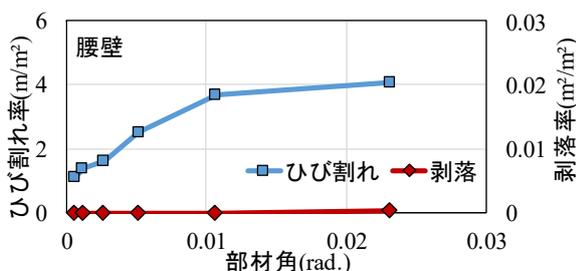


図-13 腰壁の損傷量(仮定値)

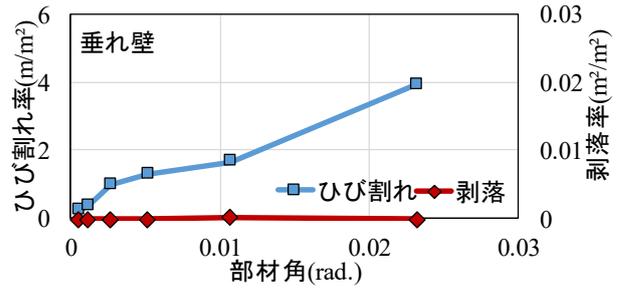


図-14 垂れ壁の損傷量(仮定値)

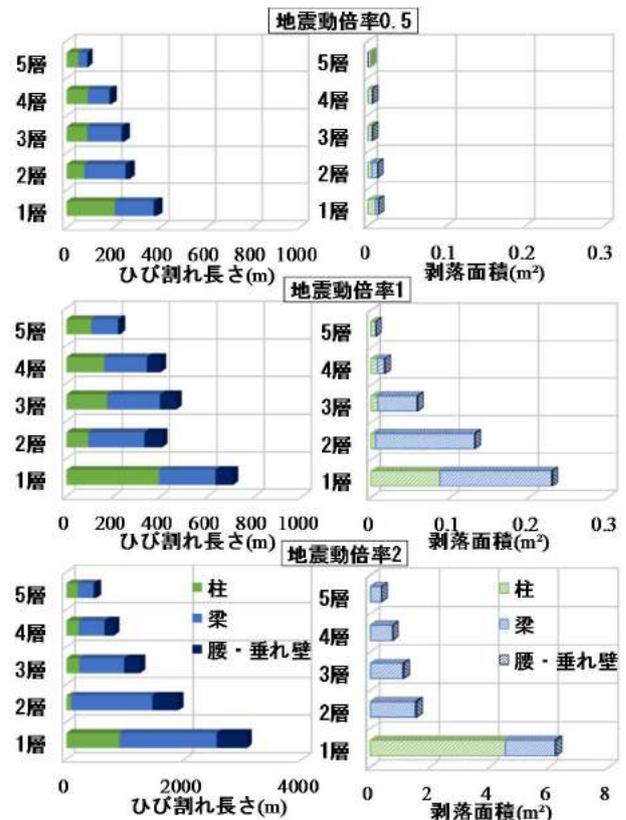


図-15 純フレームの損傷量予測結果

4. 袖壁が架構に及ぼす影響

本章では、2章及び3章における袖壁付き架構と純フレームの損傷量評価結果を用いて、袖壁が骨組や周辺部材に与える影響度、及び袖壁の耐震性向上や損傷低減に対する有効性について以下の項目について検討する。

4.1 損傷低減率

袖壁が部材 i に与える損傷低減効果を定量化するために、総ひび割れ長さ及び剥落量における損傷低減率を式(1)より定義する。

$$\text{損傷低減率} = \frac{d(i)_{\text{純フレーム}} - d(i)_{\text{袖壁付き架構}}}{d(i)_{\text{純フレーム}}} \quad (1)$$

ここで、 $d(i)$: 部材 i の損傷量

また、以下に袖壁付き架構における袖壁の損傷低減効果をまとめる。

(A) スリット有架構

スリット有架構におけるひび割れ及び剥落の低減率を図-16、図-17に示す。柱の損傷には、地震動倍率 0.3 程度(小地震レベル)で最も効果があり、倍率 1 を超えても剥落を大幅に減少できている。梁に関しては、ひび割れに対する損傷低減効果はやや低めであるが、剥落に対して地震動倍率 1 までは大きく効果を発揮している。また、非構造壁扱いである腰壁、垂れ壁においても効果が高く、非構造壁の損傷によって生活や事業が継続困難となるリスクを減少させる効果も確認できる。

(B) スリット無架構

スリット無架構におけるひび割れ量及び剥落の低減率を図-18、図-19に示す。柱と梁に関しては、ひび割れ・剥落ともに大幅に低減されていることがわかる。これは、袖壁にも損傷が分散し、柱梁の強度・剛性の減少が相対的に低くなるためであり、袖壁の付加により倒壊に対する耐震安全性が上昇したことを意味する。一方で、腰壁・垂れ壁においては、負の値を示している。これは、純フレームより損傷が増大することを意味し、地震動倍率 1 以降では剥落が急増することから、大地震を想定した設計や維持管理には注意を払う必要がある。

4.2 変形抑制率

袖壁が架構の変形性能に与える影響として、変形抑制率を式(2)より定義する。

$$\text{変形抑制率} = \frac{\Delta_{\text{純フレーム}} - \Delta_{\text{袖壁付き架構}}}{\Delta_{\text{純フレーム}}} \quad (2)$$

ここで、 Δ : 代表変位

両架構の変形抑制率算定結果を図-20に示す。スリット有架構では、小地震レベルで最も効果が高くなっているが、中・大地震レベルであっても 50%以上の抑制効果が期待できる。スリット無架構では、80%以上の抑制効果を一定して保持し、袖壁と腰壁・垂れ壁の骨組に及ぼす拘束効果が十分確認できる。

4.3 耐震性能残存率 R と被災度区分判定

本節では、袖壁が架構の残存耐震性能に与える影響について検証する。現行の被災度区分判定基準⁷⁾に基づき、全体崩壊形を形成する建物に適用する略算式(3)を用いて耐震性能残存率 R を算定し、その結果を図-21に示す。全部材において曲げひび割れが卓越したため、耐震性能低減係数 η には表-3に示す曲げ柱の値を一律に適用した。また、損傷度判定には壁を無視した柱梁の判定結果を用いた。これは、壁付き部材に対する損傷度判定に未だ課題があり、壁の損傷度を用いると部材全体の残存耐震性能を過小評価してしまうためである。

$$\text{耐震性能残存率} R = \frac{\sum M_u \eta}{\sum M_u} \quad (3)$$

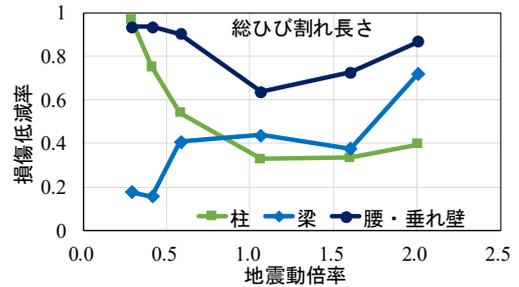


図-16 ひび割れの低減率(スリット有架構)

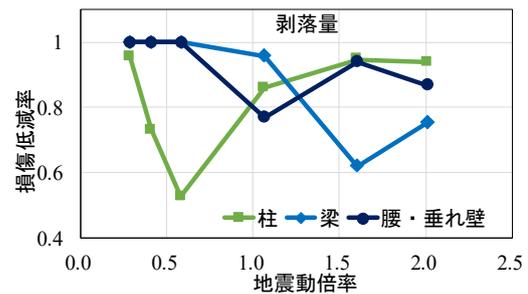


図-17 剥落の低減率(スリット有架構)

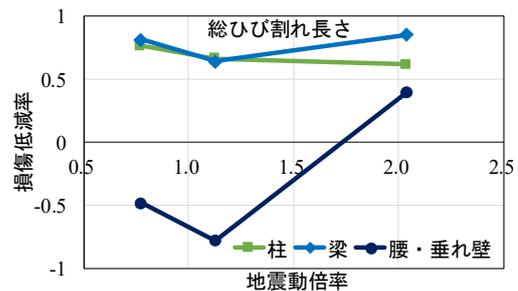


図-18 ひび割れの低減率(スリット無架構)

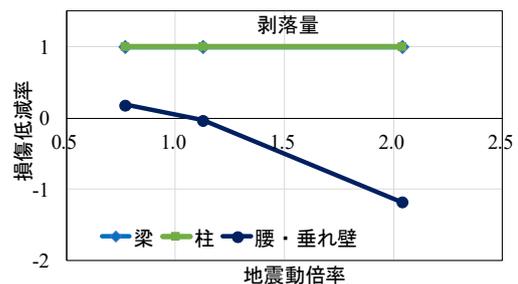


図-19 剥落の低減率(スリット無架構)

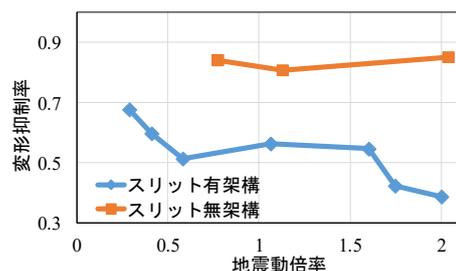


図-20 架構の変形抑制率

地震動倍率0.5の中地震レベルにおいては、全架構小破、あるいは軽微の判定であるが、倍率1の大地震レベルになると、純フレームが中破であるのに対し、袖壁付き架構は小破となり、袖壁の残存耐震性能を向上させる効果が見られた。図-22は、各架構の性能曲線と被災度の関係を明瞭化させたものである。被災度区分の境界線(破線)は、耐震性能残存率 R が同値となる応答点を結んだもので、各境界点までの包絡線の面積は架構が吸収したエネルギーに相当し、袖壁付き架構と純フレームを比較すると、袖壁がエネルギー吸収に大幅に寄与していたことが確認できる。

5. まとめ

袖壁が架構に与える影響及び有用性について検証した結果、以下の知見を得た。

- (1)袖壁は骨組に対する損傷低減効果が大きく、大地震に相当する地震動倍率1において、純フレームが中破であるのに対し、袖壁付き架構では小破レベルの損傷にまで抑えられることを示した。
- (2)腰壁・垂れ壁の損傷に関して、それらを非構造壁と見なすスリット有架構においては、同様の非構造壁を有する純フレームよりも被害を軽減できるが、耐力・剛性の上昇効果に寄与するスリット無架構では、剥落による被害の増加が見られた。
- (3)袖壁を架構に取り入れることで、エネルギー吸収能力が大幅に上昇し、架構の変形抑制効果や残存耐震性能の向上に関して有用性があるといえる。ただし、袖壁や腰壁・垂れ壁の損傷量や損傷の分散傾向等から決まる修復費用や復旧効率、継続使用性に関しては未考慮であり、より多角・多面的な検討が必要である。

謝辞

本実験は国総研総プロ「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」として実施され、検討は、建築研究所重点研究課題「庁舎・避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能評価手法の構築」との共同研究で実験に参画し、実験データを得たものを利用しました。関係各位に謝意を表します。また、「災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発」の一環として構築された損傷評価DBを有効に活用させていただきました。建築研究所の関係者をはじめ、関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 福山洋ほか：損傷低減のために袖壁を活用した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験 その1, 日本建築学会学術大会梗概集, 構造IV, pp361-362, 2015.7

表-3 曲げ柱の耐震性能低減係数 η

損傷度	I	II	III	IV	V
η	0.95	0.75	0.5	0.2	0

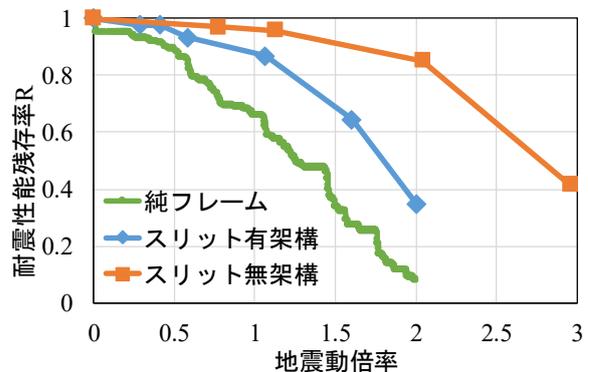


図-21 架構の耐震性能残存率 R

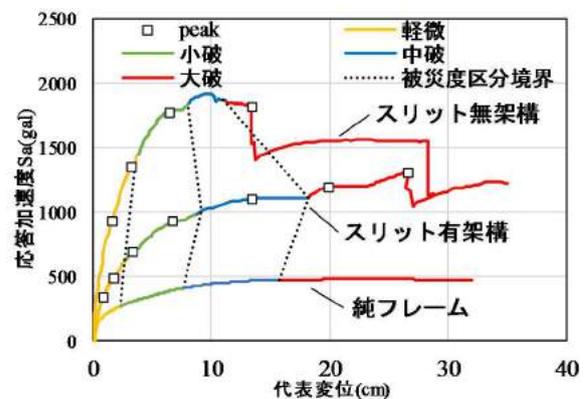


図-22 架構の性能曲線と被災度区分判定の関係

- 2) 門田太陽人ほか：実大5層RC造袖壁付き架構における袖壁付き柱の残存耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vo1.38, No2, 2016
- 3) 壁谷澤寿一ほか：損傷低減のために袖壁を活用した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験 その2, 日本建築学会学術大会梗概集, 構造IV, pp363-364, 2015.7
- 4) 壁谷澤寿一ほか：損傷低減のために袖壁・腰壁・垂れ壁を活用した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験 その2, 日本建築学会学術大会梗概集, 構造IV, pp211-212, 2016.8
- 5) 向井智久ほか：「災害後の建築物の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発」, 成果報告書, 建築研究所, 2011.1
- 6) 北村史登ほか：損傷低減のために袖壁を活用した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験 その9, 日本建築学会学術大会梗概集, 構造IV, pp377-378, 2015.7
- 7) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016.3