

袖壁を構造要素として活用した RC 造架構の耐震性能評価

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE FOR R/C FRAME WITH WING WALL UTILIZED AS STRUCTURAL MEMBER

門田 太陽人 (性能制御システム学分野)
Tabito KADOTA

Abstract

Recently, research focusing on the utilization of wing walls as structural members is briskly carried out. However, there remains unresolved topics, such as the effects of wing walls on R/C frame and surrounding members. Objective of this study is, therefore, to investigate the effects of wing walls and to verify their effectiveness, by comparing seismic capacities of R/C frames with and without wing walls from the aspect of damage level such as residual seismic capacity and reparability (down time and repair cost). From static loading tests of full-scale R/C frame structures and seismic response analyses, the wing wall noticeably reduced the damage to columns and beams, which led to the improvement of residual seismic capacity and reduction of repair cost. On the other hand, the expected period for repair work was extended due to an increase of number of damage locations which widely distribute into surrounding columns and beams. Nevertheless, the wing wall, if designed properly as a structural member, was found to be significantly effective on improving the structural seismic performance of the building.

Keywords : Wing wall, Damage evaluation, Residual seismic capacity, Seismic reparability

袖壁, 損傷量評価, 残存耐震性能, 耐震修復性能

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, 近年, 耐震要素としての積極的な利用を目指した研究が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。これらの問題点の解決を目指し, 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載荷実験¹⁾に建築研究所などと共同研究として参画した。本研究では, 実験結果に基づく袖壁付き架構の耐震性能と, 袖壁無しと想定した純フレームモデルにおける, 解析結果に基づく耐震性能を多面・多角的な観点から比較検討し, 袖壁の骨組や周辺部材に与える影響度及び有用性について検証する。

2. 架構耐震性能評価の概要

本研究では, 図-1 に示す架構耐震性能評価フローに基づき, 袖壁付き架構及び純フレームにおける耐震性能評価を実施した。本章では, その概要及び仮定事項を示す。

2.1 架構概要と設定

2 体の袖壁付き架構(スリット有・無)及び純フレームの架構概要図を図-2 に, 代表部材の諸元を表-1 に示す。柱・梁の断面及び配筋は全架構同一であり, 袖壁付き架構では, 袖壁を従来の非構造部材とするのではなく, 柱と一体化させ強度・剛性を発揮する構造部材として活用する。また, 両架

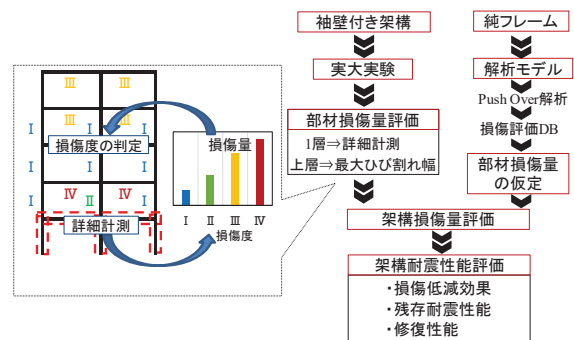


図-1 架構耐震性能評価フロー

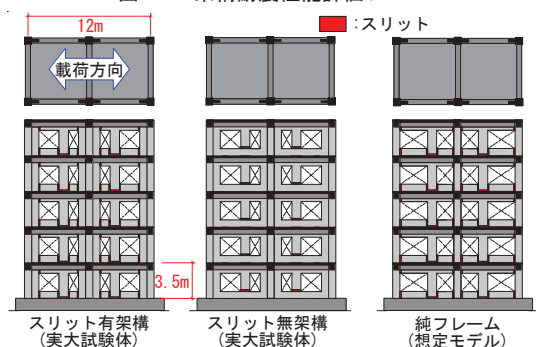


図-2 架構概要図

表-1 代表部材の諸元

	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

構においてスリットの配置箇所が異なり、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・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。純フレームには、袖壁付き架構と同様、腰壁・垂れ壁を設けるが、スリットによって柱と絶縁させ、梁の耐力・剛性評価にこれらの影響を考慮しないものと想定した。

2.2 損傷量の仮定

袖壁付き架構及び純フレームにおける架構損傷量は、以下に示す方法により各部材の損傷量を評価・仮定し、積算することで求める。

(a)袖壁付き架構

実験時における損傷量計測について、図-1に示すように、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、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層以上の部材損傷量(ひび割れ長さや剥落面積)については、最大ひび割れ幅から決まる損傷量に対応する同部材の詳細計測結果に基づき、損傷量を評価する。

(b)純フレーム

純フレームにおける各部材の損傷量は、既往実験により集積された実測データから、破壊モードやせん断余裕度といった類似する属性を持つ部材を選択し、その損傷量を Push Over 解析により得られる応答値と照合させることで損傷量の仮定を行う。図-3に仮定した各部材の部材角-損傷量関係を示す。ここで、柱の損傷量は、構造・非構造部材、設備機器等の応答値と損傷量の関係性を体系的に纏めている損傷評価DB²⁾から該当する属性の部材を選択し、腰・垂れ壁付き梁については、部材の形状・寸法及びスリットの配置方法がスリット有架構のそれに類似していることから、スリット有架構における損傷量計測結果を準用することとした。

2.3 性能曲線と地震動強さの関係性の整理

図-4は各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)である。損傷量評価を行う載荷サイクルのPeak点では、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、地震動倍率1, 2, 3となる応答点も同図に併せて示す。地震動倍率1において、純フレームが崩壊メカニズムに達しているのに対し、スリット有架構では低層の梁が降伏し始める段階であり、スリット無架構は弾性挙動を示している。地震動倍率2において、純フレーム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、大破レベルの状態であると判断できる。これに対し、スリット有架構では概ねメカニズム時耐力に達し、スリット無架構では部材の塑性化が進行しているものの最大耐力よりかなり手前の状態である。いずれの倍率においても純フレームと袖壁付き架構では大きな変形差が生じていることがわかる。

3. 袖壁が架構に与える影響と有用性に関する検証

本章では、下記の項目に関し、地震動倍率に対する各架構

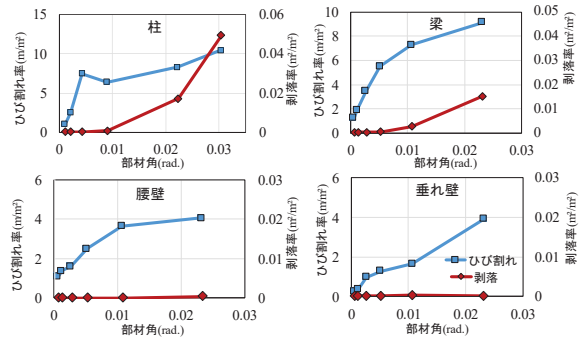


図-3 純フレームにおける部材の損傷量(仮定値)

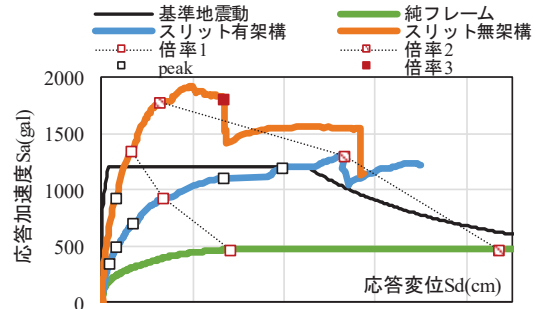


図-4 一質点系における性能曲線と地震動の関係

の耐震性能について比較検討を行う。

3.1 架構損傷量評価と袖壁の損傷低減効果

架構損傷量評価結果の一例として、大地震動を想定する地震動倍率1における損傷性状を図-5に示す。袖壁付き架構では袖壁にもひび割れが分散するため、柱梁の損傷が抑えられ、架構全体の損傷も純フレームより軽微であった。また、スリット有架構では、柱・梁・袖壁に同程度のひび割れが生じているのに対し、スリット無架構では、袖壁のひび割れが最も多く、腰・垂れ壁にも純フレームと同程度のひび割れが生じ、損傷の分散傾向に違いが見られた。

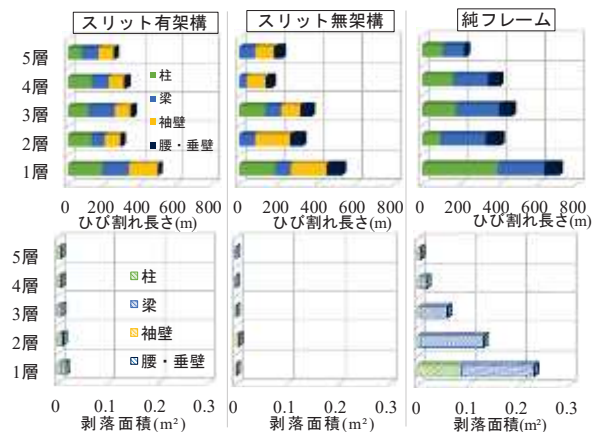


図-5 地震動倍率1における損傷傾向

上記の損傷性状を踏まえ、袖壁が各部材に与える損傷低減効果を定量化するために、ひび割れ長さ及び剥落量における損傷低減率を式(1)より定義し、算定結果を図-6に示す。

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

ここで、 $d(i)$: 部材 i の損傷量

スリット有架構では全部材に対し、袖壁の損傷低減効果が確認できた。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継続が困難となるリスクを減少させる効果も確認できる。スリット無架構においては、柱・梁の損傷に対し、大幅な低減効果を発揮した。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、大地震を想定した避難計画及び地震後の復旧計画を考える必要がある。

3.2 残存耐震性能評価

現行の被災度区分判定基準³⁾に基づき、全体崩壊形を形成する建物に適用する略算式(2)を用いて各架構の残存耐震性能を評価することとし、算定結果を図-7に示す。耐震性能低減係数 η には「曲げ柱」の値を一律に適用し、損傷度判定には壁を無視した柱梁の判定結果を用いた。

$$\text{耐震性能残存率} R = \frac{\sum M_u \eta}{\sum M_u} \quad (2)$$

柱梁の損傷が低減された袖壁付き架構では、同一の地震動倍率に対して純フレームよりも高い残存耐震性能を有し、地震動倍率1の大地震動レベルでは、純フレームが中破であるのに対し、袖壁付き架構は小破にとどまり、架構の残存耐震性能を向上させる効果が確認できた。図-8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。

3.3 修復性能評価

3.3.1 修復性評価概要

3.1節で見られた各架構の損傷量や分散傾向を踏まえ、修復費用及び修復時間の観点から袖壁付き架構の修復性能を評価する。修復費用・時間は、表-2に示す各修復工法に対する修復単価・補修人工を部材の損傷量に乘じ、積算することで算出することができる。ただし、部材の損傷度がVと判定された場合は打替えとし、それに伴う費用・作業期間は民間企業へのヒアリング及び文献⁴⁾を参考にし、表-3のように設定した。また、修復作業は、損傷の分散傾向や足場の設置・作業スペースの重なりによる部材別の修復効率を考慮し、最大投入可能な作業員数により、原則同時進行で行うこととした。衣笠ら⁵⁾は、対象部材の修復のために投入できる最大作業員数 m (人)を修復作業に使用される床面積(以下、修復作業面積 a (m^2))に基づき、式(3)により定めている。本研究では、この手法に準拠し、1層の全部材から定まる最大投入可能人数を復旧体制とした。

$$m = a \times K \quad (3)$$

K は修復作業面積 $1m^2$ あたり最大投入可能な作業員数を定める定数であり、図-9に示す状況を想定し $K=0.5$ (人/ m^2)

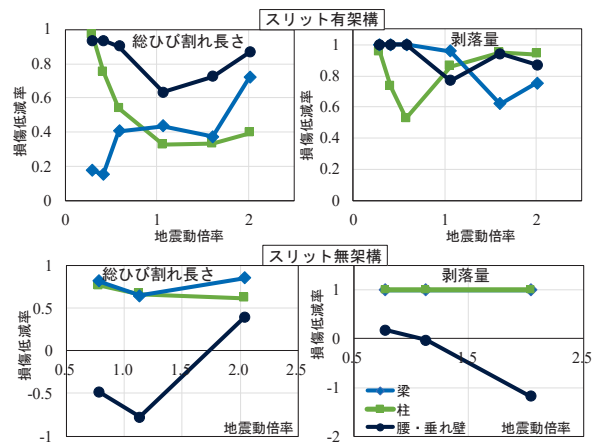


図-6 袖壁の損傷低減効果

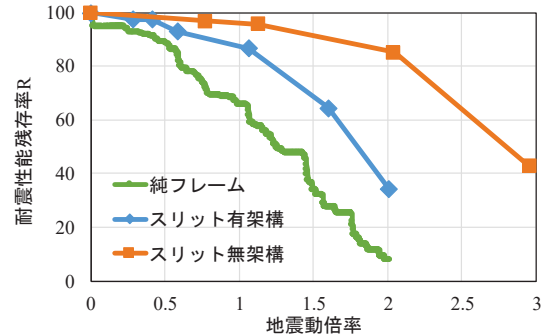


図-7 架構の耐震性能残存率 R

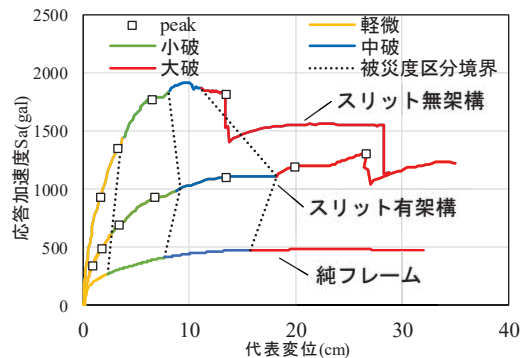


図-8 架構の性能曲線と被災度区分判定

表-2 修復工法に対する修復単価・補修人工

損傷レベル	修復工法	修復単価	補修人工
ひび割れ	<0.2mm	シーリング工法	840(円/m)
	0.2-2.0mm	手動式エポキシ樹脂注入工法	6,454(円/m)
	2.0-5.0mm	Uカットシーリング材充填工法+自動式低圧樹脂注入工法	12,031(円/m)
剥落	RCパッチング	268,500(円/m ²)	7.1(人・日/m ²)

表-3 部材打替えにおける費用と作業期間

部材	作業内容	打替え費用(万円/本)	作業期間
柱	軸力仮受支柱の設置+打替え	440	1カ月
梁	打替え	64	9.3(日・人)/本
袖壁	打替え	17	5.4(日・人)/本
腰壁	打替え	32	5.9(日・人)/本
垂れ壁	打替え	27	6.3(日・人)/本

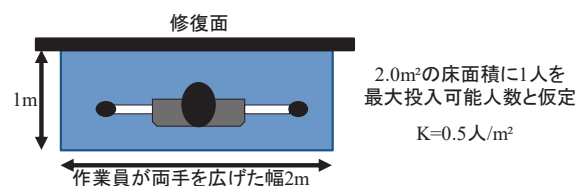


図-9 作業面積に応じた投入作業員数の設定

と設定する。修復作業面積 a は修復対象面から平行線を 1m 離してとり交差する点を結んで囲まれる面積とする。なお、修復の完了とは地震発生前の状態へ復元した時点とし、打替え部材に関しては作業期間に加え、コンクリートの強度発現に 30 日要するものとした。

3.3.2 修復費用・時間算定結果

図-10 に架構の修復費用・時間算定結果を示す。純フレームでは、地震動倍率 1.5 以降で、1 階柱や複数の梁で打替えが生じるため、修復に多大な費用と時間を要する結果となった。これに対し袖壁付き架構では、修復費用を大幅に軽減できる反面、修復時間において、倍率 1.5 まで純フレームより長期化する傾向を示した。前者は、袖壁の損傷低減効果により打替えを要する程の損傷を防止できたからであり、後者は、修復作業面積上多くの作業員数を確保できない袖壁や、梁との修復作業面積が重なり、作業の停滞が生じる腰壁にも損傷が分散することで修復効率が大きく低下したためと考えられる。

3.3.3 新設費用・期間による基準化と修復性能の傾向

図-11 は上記の結果を躯体新設に要する費用及び期間で基準化し、修復に対する深刻度及び傾向を可視化したものである。ここで、表-4 に示す各建築工事の基準コスト^④に基づき、躯体のみの新設期間を 4,050 万円と設定し、躯体新設期間は試験体製作に要した実働日数 100 日とした。各架構の傾向から、純フレームでは修復費用は高額化するが、修復作業人数を多く投入すれば修復の短期化が見込める架構といえる。一方、袖壁付き架構では、およそ逆の傾向を示し、修復費用を低額に抑えることができるが、修復時間の面で不利となり、作業人数の増員による修復の短期化は純フレームよりも期待できない。損傷の分散を視野に入れた施工計画・復旧体制が必要である。

3.4 残存耐震性能と修復性能の関係

本研究では、修復性能における費用・時間の両側面を重要度の比率で重み付けし、修復性評価指標を式(3)により定義する。ここで、両者の重要度を等しいものとして仮定し、修復性評価指標が 1 に近いほど、修復性能が低下することを意味する。

$$\text{修復性評価指標} = \frac{\text{修復費用}}{\text{新設費用}} \times 0.5 + \frac{\text{修復時間}}{\text{新設期間}} \times 0.5 \quad (3)$$

各架構における耐震性能残存率 R と修復性評価指標の関係、及び同地震動による各架構の応答点を図-12 に示す。スリット有架構では、大破と判定される $R=50\%$ においても純フレームと同程度の修復性能を保持していることがわかる。上記の検討を踏まえると、架構に袖壁を耐震要素として取り入れた場合、修復性能を低下させることなく強地震動に対する耐震安全性の向上が期待できる。腰・垂れ壁にも強度抵抗に期待するスリット無架構では、同残存性能における修復性能は修復時間の長期化が影響し、低下する結果となった。しかし、同地震動経験時における修復性能・残存耐震性能では 3 架構の中で最も優れ、地震動倍率 3 においても、新設に費やす費用と時間(修復性評価指標 1)に対する余裕度は十分に有しており、修復性能の低下は許容の範囲内であるといえる。

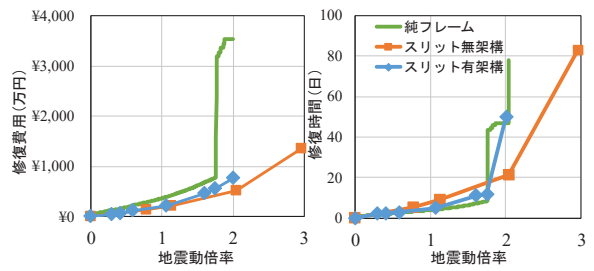


図-10 架構の修復費用・時間

表-4 新設費用の基準コスト

科目	基準コスト(万円/m)	科目	基準コスト(万円/m)
仮設工事	2.15	鉄筋工事	1.76
土木工事	1.18	杭地業	1.05
コンクリート工事	5.19	諸経費	1.7

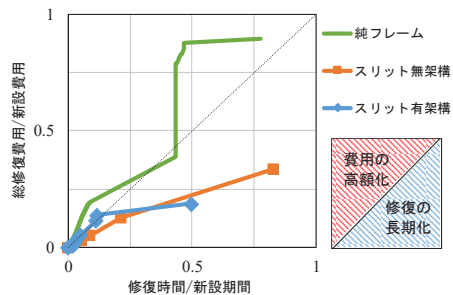


図-11 修復性能の傾向

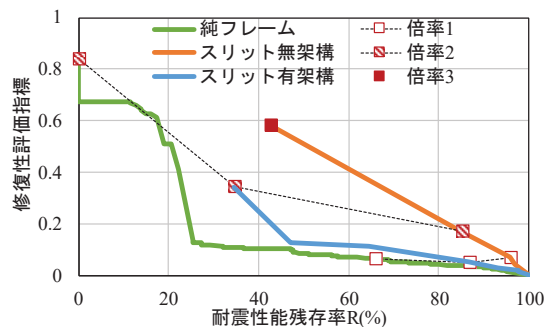


図-12 残存率 R と修復性評価指標の関係

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 袖壁は柱梁に対する損傷低減効果を十分に発揮したことで修復費用を大きく軽減するとともに、架構のエネルギー吸収及び高い残存耐震性能の保持に大いに寄与した。
- (2) 袖壁付き架構は修復時間の面で不利になる傾向が見られたが、修復性能の低下は許容の範囲内であり、総合的に考慮すると袖壁には有用性があるといえる。

謝辞

本研究は、国総研総プロ「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」として実施された実験に建築研究所との共同研究として参画し、実験データで得たものを利用した。建築研究所 向井智久氏をはじめとする関係各位に謝意を表す。また打替え費用に関し、(株)コンステック 平塚正一郎氏、(株)竹中工務店 高橋伸一氏に依頼した概算結果を有効に利用させていただいた。紙面を借りて御礼申し上げます。

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
- 2) 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的評価システムの開発」, 成果報告書, 建築研究所, 2011.1
- 3) 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
- 4) 公共建築工事積算研究会：公共建築工事積算研究会参考歩掛り, H27 年度版
- 5) 衣笠秀行ほか：機能維持性能の観点から RC 構造部材の耐損傷性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, 2016
- 6) 富谷豪：最新建築コスト算定技法, 財団法人経済調査会, 1993.8