

論文 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

門田 太陽人*1・向井 智久*2・鈴木 裕介*3・前田 匡樹*4

要旨: 被災した袖壁付き建築物の残存耐震性能評価手法の開発を目指し、荷重変形関係で決まる損傷度に対応する損傷量、及び耐震性能低減係数 η の関係性について検討した。その結果、最大残留ひび割れ幅やひび割れ幅の大きいひび割れ率に損傷度との相関性があること、曲げ柱程度の残存耐震性能を有していることを示した。

キーワード: 袖壁付き柱, 損傷度, 耐震性能低減係数 η

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い。中でも袖壁は、取り付く柱の耐力・剛性を上昇させる効果があることが明らかになっているが、架構内における損傷の進展や、袖壁の端部圧壊による剛性及び耐力低下が架構に与える影響など不明瞭な部分も多く残されている。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、地震後の継続使用性確保に資する残存耐震性能評価手法の構築に関する検討を行っている。本論文では、その前段階として、実大5層試験体の実験結果から、片側及び両側袖壁付き柱の各部材荷重変形関係を推定し、応答変形（損傷度 I～IV）に対する損傷内容の関係、及び耐震性能低減係数 η の関係を明らかにし、袖壁付き柱の残存耐震性能について検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の架構概要図を図-1に示す。本試験体は、桁行方向の柱に袖壁、梁に垂れ壁、腰壁、方立壁を有する実大5層RC造骨組架構である。この架構は、構造スリットにより袖壁を柱・梁と切り離し非構造部材とする近年の設計ではなく、袖壁を柱と一体にして積極的に強度・剛性を発揮させる構造部材として設計した架構である。断面詳細の一例として、1階両側袖壁付き柱の配筋図を図-2に示す。柱断面は700×700mm、柱主筋は16-D25、帯筋は4-D13@100である。袖壁の張出し長さは700mmとし、壁厚は200mmである。端部での集中破壊を軽減するために、端部縦筋に太径のD16を配し、横

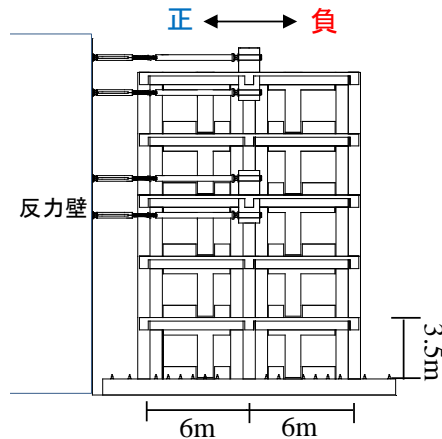


図-1 試験体架構概要図²⁾

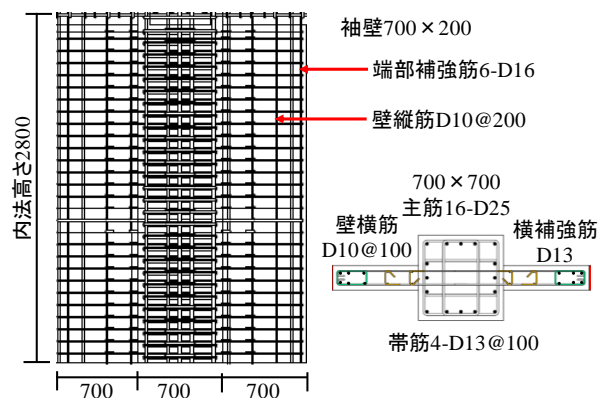


図-2 1階袖壁付き柱配筋図²⁾

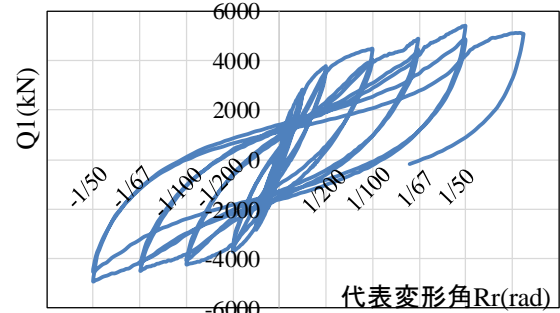


図-3 荷重変形関係³⁾

*1 東北大学大学院 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 災害科学国際研究所 助教 博士(工学) (正会員)
 *4 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

補強筋 D13 により拘束されている。腰壁、垂れ壁、方立壁はスリットにより構造部材から切り離されている。

2.2 加力計画

屋上階及び4階床位置に取り付けられたアクチュエータにより逆三角形分布の地震力と同じ1層の層せん断力・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。水平方向の载荷は、正負交番静的繰返しで、振幅は1/1600, 1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50である。

3. 架構の破壊性状

3.1 荷重-変形関係と破壊経過

1階の層せん断力 Q1-代表変形角 R_r (R階の変形/R階高さ)を図-3に示す。正負 $R_r=1/200rad$ で2, 3階の梁主筋が降伏し、正負 $R_r=1/100rad$ で全層の梁及び1階柱脚部の鉄筋が降伏し、梁降伏先行型全体崩壊形の挙動を示した。正負 $R_r=1/67rad$ で方立壁の水平変位が設計時に想定した構造スリット幅を上回り腰壁に接触したことで、架構の耐力上昇が見られた。その後、正側の $R_r=1/50rad$ で最大耐力に達した。全サイクル終了後、1階の全ての袖壁が圧壊し、特に中柱の両袖壁は損傷が著しく鉄筋の露出が観察されたが、構造部材である柱の大きな損傷や袖壁と柱が分離するような破壊は見られなかった。

3.2 袖壁付き柱の損傷性状と損傷度判定

ひび割れ幅やひび割れ長さなどの損傷量の詳細計測を行った1階片側構面における損傷状況を図-4に、被災度区分判定基準⁴⁾に基づく損傷度判定結果^{5), 6)}を表-1に示す。ここで、損傷度の判定は被災度区分判定基準に準拠したが、柱と袖壁を一つの部材とみなすのではなく、柱と袖壁部に分けて損傷度を判定した。 $R_r=1/50rad$ において、柱と袖壁を一体として損傷度を判定すると、両部分で大きい方の損傷度を採用することになり、部材全体として損傷をVと判定すると、袖壁付き柱の残存耐震性能がないことを意味するが、柱が健全に軸力を保持していること、図-3の荷重変形関係で、大きな耐力低下が見られないことから実態に則さない判定であり、損傷度判定には課題が残ると考えられる。よって、次章以降において、実大5層実験における各荷重及び変形などの測定データを基とした袖壁付き柱の残存耐震性能評価を実施する。

4. 袖壁付き柱の荷重変形関係の推定

以下では、1階の袖壁付き柱3本について検討を行う。これらの袖壁付き柱の残存耐震性能を評価するためには、各部材の荷重変形関係が必要である。本実験では、層せん断力は計測しているが、個々の部材応力は計測していないため、図-5に示すフローに従い、各袖壁付き柱の

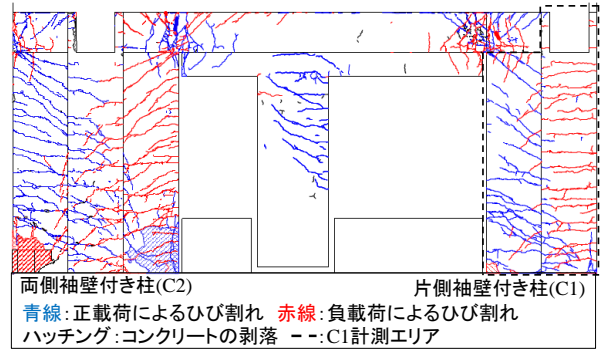


図-4 ひび割れ図 ($R_r=1/50rad$)

表-1 袖壁付き柱の損傷度推移

载荷サイクル $R_r(rad)$	両側袖壁付き柱(C2)		片側袖壁付き柱(C1)	
	袖壁	柱	袖壁	柱
1/1600	I	I	I	I
1/800				
1/400				
1/200	II	II	II	II
1/100				
1/67	V	V	-	-
1/50			II(III)	IV

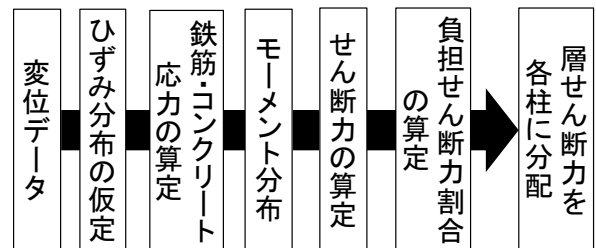


図-5 荷重履歴推定フロー

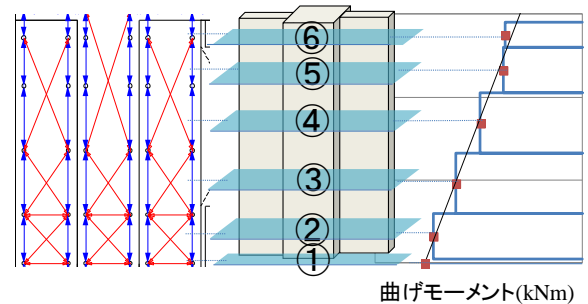


図-6 モーメント分布の推定概要図

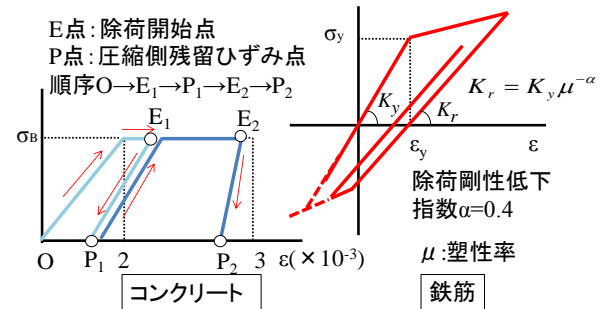


図-7 コンクリート及び鉄筋の応力度-ひずみモデル

せん断力分担割合を推定し、層せん断力を各袖壁付き柱に分配した。また、変位計で計測した曲げ・せん断変形成分から部材変形角を求めた。以下にその手順を示す。

1) ひずみ分布の仮定

柱、及び袖壁に取り付けられた曲率算定用変位計の変位データをひずみに換算し、断面のひずみ分布を仮定する。

2) 鉄筋及びコンクリートの応力の推定

得られたひずみ度から、後述する材料の応力度-ひずみ度関係モデルを用いて、各部の応力度を求める。

3) モーメント分布の算定

図-6 のように各曲率計測区間中央断面ごとに曲げ解析を行い、モーメント分布図を描く。

4) 負担せん断力の算定

1), 2), 3)をピーク時及び、ピーク点と荷重0点の間中点(以降、除荷中間点)で行い、モーメント分布の傾きから各部材の負担せん断力、及び負担割合を算定し、図-3の1層層せん断力 Q1 を各部材に分配する。その際、算定した負担せん断力割合を各サイクル開始時、及び除荷開始時に切り替える。

5) 部材角の算定

柱に取り付けられた曲げ変位計、せん断変位計から得られる変形成分の和を計測区間で除した値とする。

6) 荷重変形関係

4), 5)を合わせ袖壁付き柱の荷重変形関係とする。

4.1 コンクリート及び鉄筋の履歴特性

コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ履歴モデルを図-7 に示す。ここでは、コンクリートの圧壊など非線形挙動があまり卓越しない最大耐力以前の挙動の推定が中心であるので、履歴モデルは単純なモデルを用いることとした。コンクリートの圧縮側は bi-linear モデルとし、最大荷重 σ_B 到達後の除荷剛性は除荷開始点 E と荷重 0 における残留ひずみ点 P を線形で結び算定した。残留ひずみ点 P は、仮定したひずみ分布のコンクリート圧縮縁のひずみとした。引張側の応力負担は未考慮とした。鉄筋に関しては、degrading bi-linear モデルを用い、除荷剛性低下を考慮する。なお、使用する鉄筋の降伏強度、コンクリートの圧縮強度等は材料試験結果²⁾に基づき表-2 のように設定する。

4.2 推定結果と精度の検証

1階の袖壁付き柱に対し、正載荷時の変動軸力により圧縮力を受ける片側袖壁付き柱を C1、変動軸力の影響を受けにくい両側袖壁付き柱を C2、引張力を受ける片側袖壁付き柱を C3 とする(図-4 参照)。図-8 に正載荷時における材端曲げモーメントの推定値(プロット点)と耐力曲線⁷⁾を示す。推定値と耐力曲線を比較すると、C2 において推定値が耐力曲線の曲げ終局モーメントを超え

表-2 使用材料特性

鉄筋 (N/mm ²)	柱主筋	開口補強筋	壁筋	降伏ひずみ	コンクリート (N/mm ²)	1階部 圧縮強度
	D25 (SD345)	D16 (SD345)	D10 (SD295A)	2102 μ	35	
降伏強度	383	384	352			

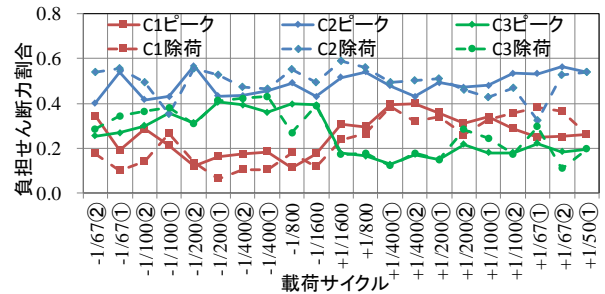


図-10 負担せん断力割合

る値が見られるものの全体的に概ね妥当な推定結果と言える。さらに、推定精度を確認するために、ピーク点と除荷中間点において、各袖壁付き柱のせん断力の合計値が1層層せん断力(図-3)と一致するか検証し、その結果を図-9 に示す(図中の①, ②はサイクル数を表す)。両者多少のばらつきが見られるが、概ね推定結果が実験値を精度良く捉えている。

4.3 負担せん断力割合

ピーク点、及び除荷中間点における各袖壁付き柱の負担せん断力割合の推移を図-10 に示す。C2 は全サイクルにわたり概ね層せん断力の50%のせん断力を負担しながら推移している。変動軸力の影響を大きく受ける C1, C3 に関しては正負逆対称に推移しており、载荷サイクルが大きくなり袖壁の損傷が進展すると両者の値は近くなる傾向が見られた。

4.4 推定荷重変形関係

1層層せん断力 Q1 を各部材に分配して得られた荷重変形関係を図-11 に示す。この結果を基に次章で袖壁付き柱の残存耐震性能について検討する。

5. 袖壁付き柱の残存耐震性能評価

損傷を受けた部材に対し、適切な損傷度判定を行い、相応しい耐震性能低減係数 η により残存耐震性能を評価しなければならない。本章では、損傷度・損傷量・耐震性能残存率 η の関係をまとめ、袖壁付き柱が有する残存耐震性能について検討する。

5.1 損傷度と損傷量の関係

被災度区分判定基準⁴⁾に基づき、図-12 に示す荷重変形関係を参考にし、推定した荷重変形関係(図-11)から袖壁付き柱の損傷度を決定した(3.2 節とは異なり、柱と袖壁に同じ損傷度を用いる)。損傷度 I と II の境界は柱主筋降伏時の部材角、損傷度 III と IV の境界は残存水平耐力

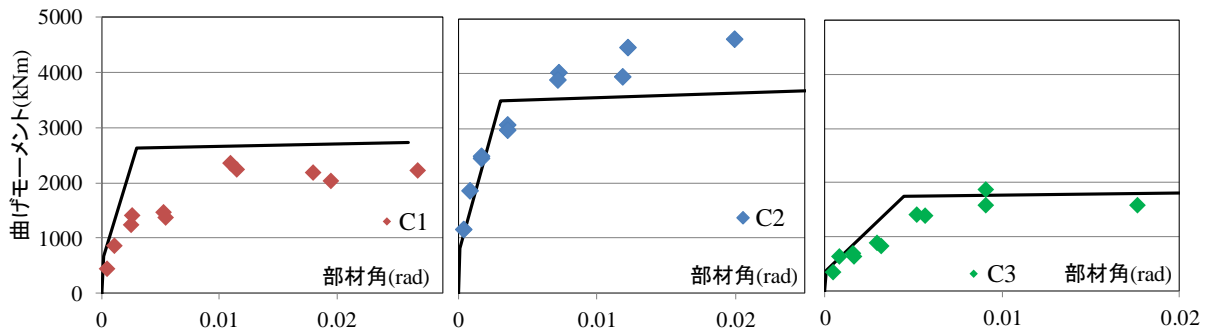


図-8 曲げモーメント算定結果

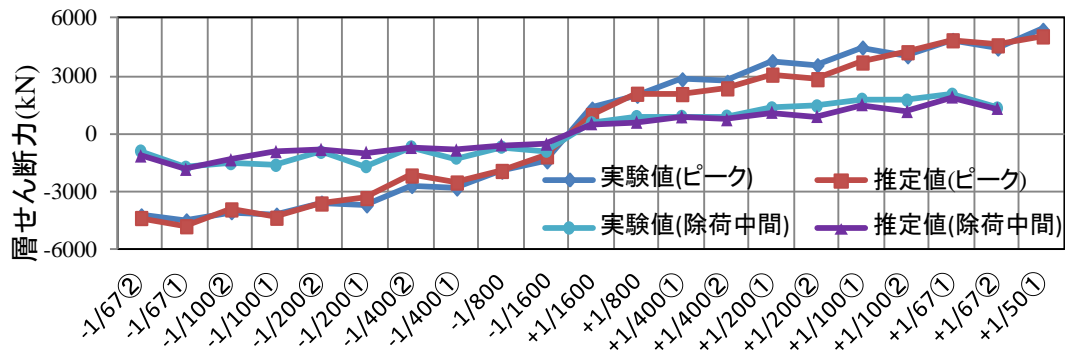


図-9 実験値と推定値の層せん断力推移

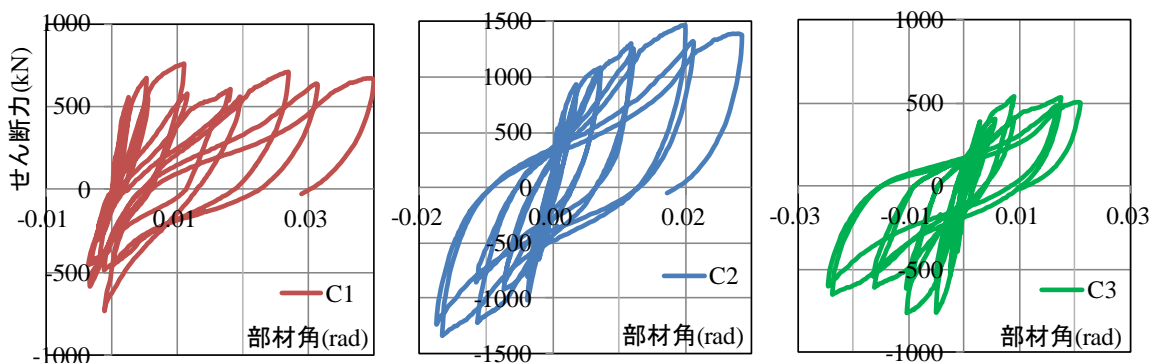


図-11 推定荷重変形関係

が減少し始める時の部材角、損傷度ⅡとⅢの境界はそれらの中間の部材角とした。以下に示す損傷量は、C1が負載荷時に引張軸力を受けた後の除荷時に計測したものであり、応答変形（損傷度Ⅰ～Ⅳ）に対する損傷量の関係を図-13から図-16に、損傷度を区分する部材角を表-3に示す。なお、C3は対称なので同様な傾向が見られると考えられる。C2は未検討である。図-13に示す損傷度-最大残留ひび割れ幅関係では、部材が降伏した損傷度Ⅱ以降に最大残留ひび割れ幅が袖壁・柱ともに増加している。従って、損傷度推移と最大残留ひび割れ幅の推移には相関関係があると言える。次に、損傷度とひび割れ率の関係を図-14、図-15に示す。縦軸のひび割れ率は、発生したひび割れを凡例に示すひび割れ幅ごとに区分し、それぞれの合計ひび割れ長さを計測面積（図-4参照）の平方根で除したものである。図-14の0.2mm未満のひび割れにおいては、損傷度が大きくなるにつれ（損傷度Ⅱ以降で）、ひび割れ率の上昇が収束する傾向が

あるため損傷度との相関性はないと言える。図-15は、図-14で示されるひび割れの内、0.2mm以上のひび割れ率を表す。いずれのひび割れ率も損傷度Ⅱ以降に上昇しており、損傷度との相関性を示した。このように部材が塑性化した後に生じる比較的大きなひび割れは損傷度と相関性を示す可能性があると考えられる。

最後に、損傷度-剥落率関係を図-16に示す。剥落率は、コンクリートの剥落面積を計測面積で除したものである。変動軸力により大きな圧縮力を受ける柱は、損傷度と共に剥落率が推移しているが、袖壁は損傷度Ⅲ以降、端部圧壊により剥落率が急激に増加し、柱とは異なる損傷度との関係が見られた。以上より、片側袖壁付き柱の損傷度推移において、現行基準と同じ指標である最大残留ひび割れ幅や、特定の幅のひび割れ率との間に相関性があることを確認した。また、同じ損傷度においても柱と袖壁では損傷の程度が異なるため、同じ指標により袖壁、及び柱の損傷度を定めるのではなく、それぞれの損

傷の程度を複合的に考慮して損傷度を決定する必要がある。

5.2 残存耐震性能

現行の被災区分判定基準では、被災建物に残存する耐震性能を、図-17のように部材の荷重-変形における全エネルギー吸収能力 E_{max} に対する被災後の残留エネルギー吸収能力 E_r の割合である耐震性能低減係数 η に基づいて求めている⁸⁾。本稿では、4章で推定した荷重変形関係から耐震性能低減係数 η を算出する。なお、本実験では、軸力を保持できない程の損傷は見られなかったため、部材の終局変形を最終サイクル 1/37rad 時の経験最大部材角（損傷度IVとVの境界）とした。

5.3 耐震性能低減係数 η と損傷度の関係

算定した耐震性能低減係数 η と損傷度の対応関係及び現行基準との比較を図-18に示す。表-4は現行基準で定められている耐震性能低減係数 η であり、袖壁付き柱は「柱型付壁」の値により残存耐震性能を評価することになっている。本章では、正載荷のみ対象として検討する。損傷度Iに関しては、C1でわずかに危険側の評価となる部分が見られるが、C2, C3では、基準値である0.95と同程度である。損傷度II、及びIIIでは、いずれの部材も表-4の「柱型付壁」よりも大きく、また「曲げ柱」と同程度の値を推移している。損傷度IVにおいては、いずれの部材も「曲げ柱」よりも大きな値を示し、高い残存耐震性能が確認された。以上、いずれの袖壁付き柱も現行基準である「柱型付壁」よりも高い残存耐震性能を有しており、現行基準では過小評価であることがわかる。従って、本試験体のように袖壁を構造要素として活用した袖壁付き柱に関しては、「柱型付壁」ではなく「曲げ柱」の耐震性能低減係数 η により残存する耐震性能を評価することが望ましい。

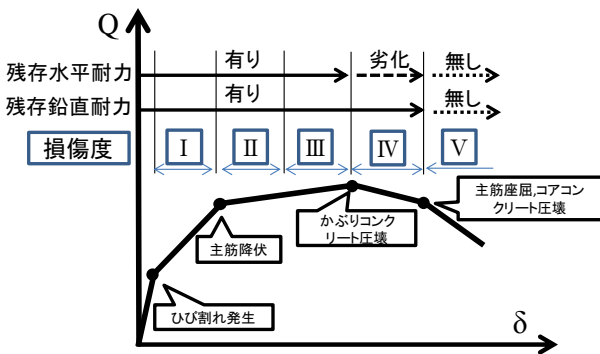


図-12 荷重変形関係と損傷度の関係の概念図

表-3 C1における損傷度区分と部材角

損傷度の境界	部材角(rad)
I ⇒ II	0.009
II ⇒ III	0.018
III ⇒ IV	0.027

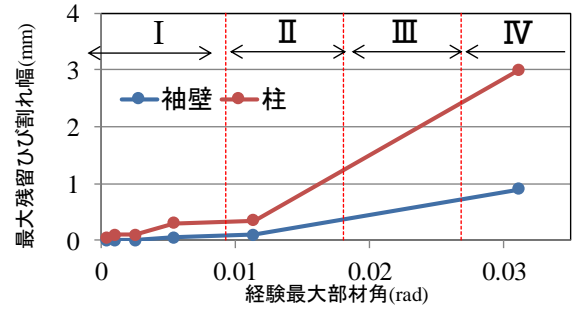


図-13 損傷度-最大残留ひび割れ幅関係

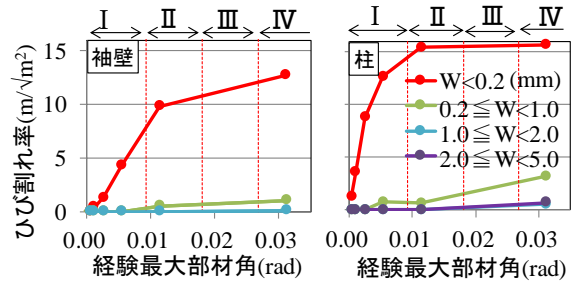


図-14 損傷度-ひび割れ率関係その1

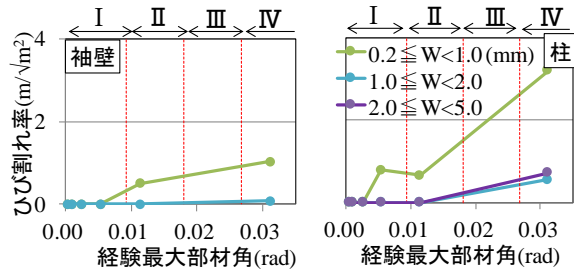


図-15 損傷度-ひび割れ率関係その2

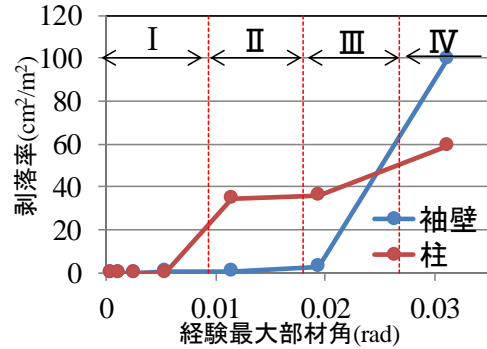


図-16 損傷度-剥落率関係

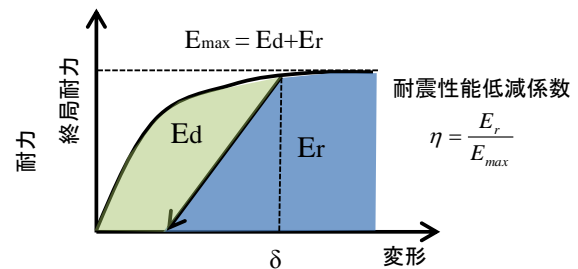


図-17 耐震性能低減係数 η の概念図

6. まとめ

実大5層袖壁付き建築物の静的載荷実験結果を用い、応答変形（損傷度Ⅰ～Ⅳ）に対する損傷内容の関係、及び耐震性能低減係数 η の関係を明らかにし、袖壁付き柱の残存耐震性能について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 袖壁付き柱の損傷度推移は最大残留ひび割れ幅や特定の幅によるひび割れ率との間に相関関係があることを示した。しかし、柱と袖壁では損傷の程度・進捗が異なるため、それぞれの損傷量を複合的に考慮して損傷度を決定する指標が必要である。
- (2) 各損傷度に対応する耐震性能低減係数 η の関係を定量化し、現行基準の「柱型付壁」よりも高く、「曲げ柱」と同程度の残存耐震性能を示した。

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。

表-4 現行基準の耐震性能低減係数 η

損傷度	柱型付壁	曲げ柱
I	0.95	0.95
II	0.6	0.75
III	0.3	0.5
IV	0	0.1
V	0	0

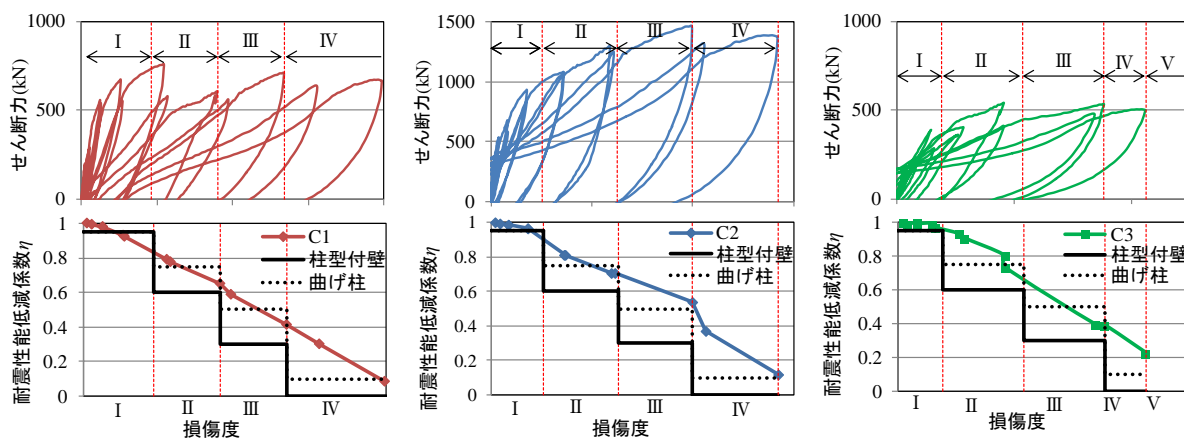


図-18 損傷度－耐震性能低減係数 η 関係

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) 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
- 3) 堀 伸輔 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5，日本建築学会学術大会梗概集，構造Ⅳ，pp.369-370，2015.7
- 4) 日本建築防災協会：被災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針，2002.8
- 5) 庄子由麻 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10，日本建築学会学術大会梗概集，構造Ⅳ，pp379-380，2015.7
- 6) 門田太陽人 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11，日本建築学会学術大会梗概集，構造Ⅳ，pp381-382，2015.7
- 7) 高橋 之 ほか：腰壁を有する鉄筋コンクリート部材の曲げ設計腰壁モデル，日本建築学会大会構造系論文集，vol.74，No.641，pp1321-1326，2009.7
- 8) 文野 正裕，前田 匡樹，長田正至：部材の残余耐震性能に基づいた被災RC造建物の被災度評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.22，No.3，pp1447-1452，2003