

論文 高靱性袖壁を用いた RC 建物の地震応答性状に関する解析的研究

糸田 響^{*1} ・ 井上 圭一^{*2}

要旨：筆者らは、ラーメン骨組の変形性能を活かしつつ、初期剛性及びエネルギー吸収性能を付加するための鉄筋コンクリート製の高靱性袖壁部材について研究を行っている。本研究では、6層建物モデルを対象として、RC 柱部材に高靱性袖壁を接合した場合の地震応答解析を実施し、袖壁が無い場合の建物モデルと比較することで、袖壁を有する建物の地震応答性状について考察する。袖壁の降伏ベースシヤー係数の大きさをパラメータにして、最大層間変形角、塑性率、残留変形、履歴エネルギーなどについて比較し考察する。高靱性袖壁の具体的な設計法について参考となるデータを得ることを目的とする。

キーワード：地震応答、袖壁、高靱性、層間変形角、残留変形、エネルギー

1. はじめに

袖壁を有する RC 建物の地震応答に関して、土田ら¹⁾が RC 造袖壁付の柱の挙動と、「損傷制御性 (25kine)」、「安全性 (50kine)」及び「想定外地震に対する安全性 (75kine)」を対象とした地震応答の概念を示し、1 質点系モデルの地震応答解析から、袖壁の地震応答に対する有効性について検討している。

村井ら²⁾は、RC 構造の地震応答の低減のために、高靱性の性能を有する袖壁の利用を提案している。高強度材料を使用すれば、変形性能が優れているスレンダーな骨組をつくることができるが、骨組としての初期剛性が小さいこと、地震動に対してのエネルギー吸収性能が小さいことを高靱性の性能の袖壁で解決を目指すものである。つまり、変形能力の高い骨組に対して、中地震に対しては袖壁の剛性が性能を発揮し、大地震動に対しては柱部分が大きな損傷を受ける前に剛性の高い袖壁が損傷しながらエネルギーを吸収し、応答変形や柱部の損傷を低減させるような構造システムである。このような高靱性袖壁には、骨組部分よりも低強度の繊維補強コンクリートと低降伏型の鉄筋を使うことが検討されている。

文献 2) のような高靱性袖壁の初期剛性とエネルギー吸収を利用する構造システムについては、地震応答低減効果や修復性にメリットがあり、さらなる研究が望まれる。筆者らは、文献 2) の考えを元に、骨組として鉄骨構造を想定した高靱性袖壁を有する建物の構造性状に関する研究^{3)~5)}を行っているが、RC 構造にも応用できる。

本研究では、このような高靱性袖壁を使った構造システムを有する RC 造建物の地震応答特性や地震応答低減効果についてのデータを得ることを目的に地震応答解析を行う。多層建物モデルについて、安全限界レベルの入力に対する最大応答変形、残留変形、地震入力エネルギー、履歴エネルギーなどの応答性状について検討する。

2. 地震応答解析の方法

2.1 解析モデル

本研究では、高靱性袖壁を有する建物の地震応答性状を確認することを目的とし、図-1 に概要を示すように、それぞれ柱部分の復元力と袖壁部分の復元力を並列バネでモデル化する。地震時には、柱及び袖壁部の剛性及びエネルギー吸収性能を期待する構造形式であり、単純化のため、本研究では梁の変形は考慮せず、簡潔な多質点系のせん断型建物モデルとしてモデル化する。

一般に、RC 造建物の耐震性向上のための方法には、低層 RC 建物は耐力・剛性の増加、高層 RC 建物は長周期化、変形性能の増加がある。高層 RC 建物に対しては、大地震後の損傷部の修復にかかる問題もある。本研究では、研究対象とする構造システムが、特に中層の RC 建物に有効と考え、6 層の建物モデルを仮定する。質量分布は、単位面積の質量を 1.2 ton/m^2 と仮定し、各階床面積 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ の範囲を対象とし、各層 76.8 ton 、建物全体で 460.8 ton の質量として設定した。

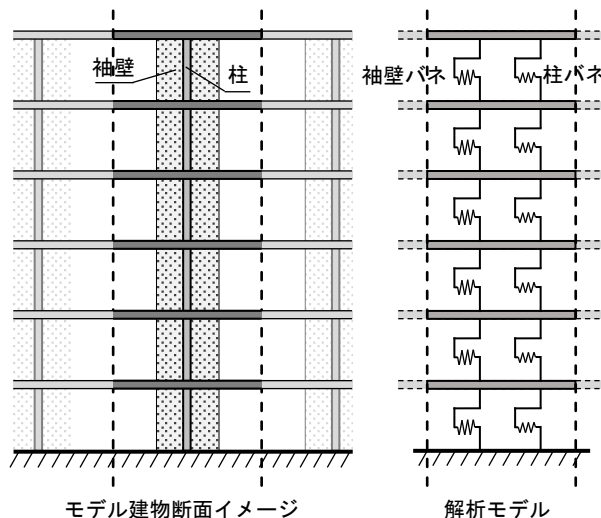


図-1 建物モデルの概要

*1 福井大学 大学院工学研究科 (学生会員)

*2 福井大学 学術研究院 建築建設工学講座 (正会員)

各層の剛性は1次モード形状が逆三角形分布になるように仮定する⁹⁾。各層の柱部及び袖壁部の降伏層せん断力係数は A_i 分布に基づき設定した。

減衰は、初期剛性比例型とし、柱バネの初期剛性に対して5%の粘性減衰定数を仮定する。本研究では、袖壁には、初期剛性、耐力、履歴減衰を期待するものであり、袖壁バネに関しては、粘性減衰を考えないこととする。

2.2 地震応答解析方法

ニューマークの β 法($\beta = 1/6$)によって、時刻歴応答解析を実施した。各層の最大応答加速度、最大応答層間変形角、柱塑性率、残留変位、地震入力エネルギー、塑性履歴エネルギーを求め、パラメータによる比較を行う。

2.3 解析モデルと降伏ベースシヤー係数の設定

本論文では、降伏ベースシヤー係数を0.3とした柱バネのみのモデルを、「基準モデル」と呼ぶことにする。

「基準モデル」に袖壁を追加するモデルを「袖壁モデル」と呼び、袖壁部の降伏ベースシヤー係数 $C_{yw}=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ の袖壁を追加したモデルを設定する。また、比較のために解析を行った、袖壁を設置しない柱のみのモデルを「柱モデル」と呼び、降伏ベースシヤー係数を0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6とした場合の解析を実施した。以下では、「袖壁モデルの降伏ベースシヤー係数の柱(0.3)+袖壁(C_{yw})」及び「柱モデルの降伏ベースシヤー係数」を C_y と表記する。「基準モデル」「袖壁モデル」「柱モデル」を比較することで、高靱性袖壁が地震応答に及ぼす影響について考察する。

2.4 復元力特性

柱と高靱性袖壁の復元力特性については、曲げ降伏型の挙動を示すと仮定し、ひび割れ、降伏を設定し、復元力が0になる点から最大点を指向する復元力特性モデルを仮定した。降伏後の戻り剛性値は、塑性率 μ の1/2乗で弾性剛性を除した値により算出し⁹⁾、戻り剛性の低下を考慮した。その概略を図-2に示す。袖壁に関しては、過去のS造の骨組を使用した実験結果^{4), 9)}から、袖壁と梁部分の接合が不十分である場合には、降伏後の剛性が低下すること及びスリップ性状が見られることが確認されているが、本研究では、RC骨組と高靱性袖壁は安全限界レベルの応答の範囲に対して、高靱性袖壁と柱又は梁との接合部の剥離などの影響によるスリップは改善でき、かつ降伏後の剛性も低下しないと仮定した。

降伏変形角は、耐力によらず、柱に関しては $1/150$ rad、袖壁は $1/250$ radと仮定⁷⁾した。柱及び袖壁とも、ひび割れ点は降伏強度の1/3と仮定⁷⁾した。柱のひび割れ変位は、初期剛性とひび割れ耐力から算出し、袖壁部モデルのひび割れ変位は降伏変位の1/10と仮定³⁾した。

2.5 固有周期

「基準モデル」、「柱モデル」、および「袖壁モデルの柱

部分」の1次固有周期は0.6(s)と仮定した。RC建物に対してはやや長い周期であるが、靱性型の骨組を仮定したためである。袖壁モデルに関しては、設定する袖壁の耐力に応じて剛性が大きくなるため、袖壁部のベースシヤー係数が大きくなるほど1次固有周期は短くなる。初期剛性及び降伏時剛性に対する固有周期を表-1に示す。

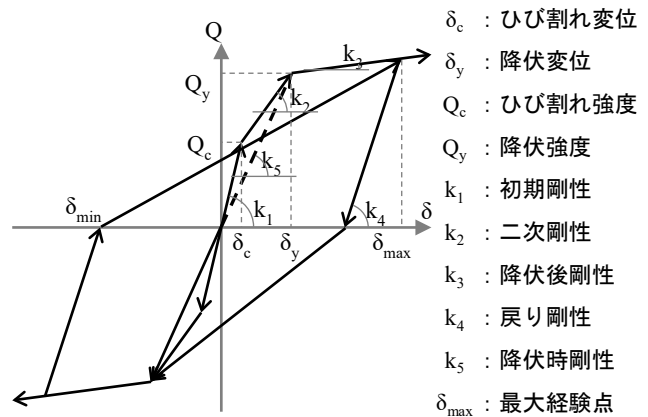


図-2 柱部及び袖壁部の復元力特性

表-1 1次固有周期

柱モデル		袖壁モデル (柱部の降伏ベースシヤー係数 = 0.30)		
C_y	固有周期(s)	C_{yw}	固有周期(s) (初期剛性)	固有周期(s) (降伏時剛性)
0.30	0.60	(0)	(0.60)	(0.60)
0.35		0.05	0.534	0.578
0.40		0.10	0.485	0.557
0.45		0.15	0.448	0.539
0.50		0.20	0.418	0.523
0.55		0.25	0.394	0.508
0.60		0.30	0.373	0.494

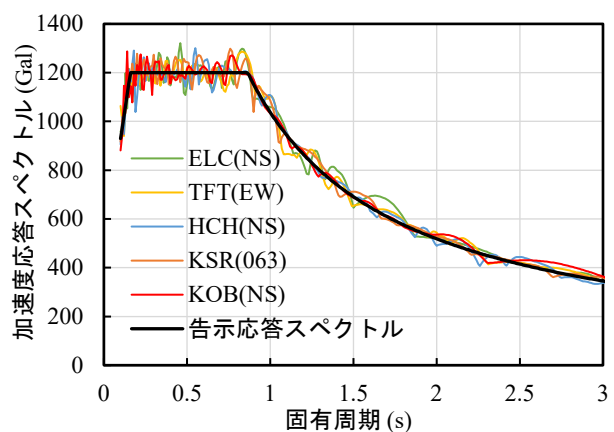


図-3 入力地震波の応答スペクトル

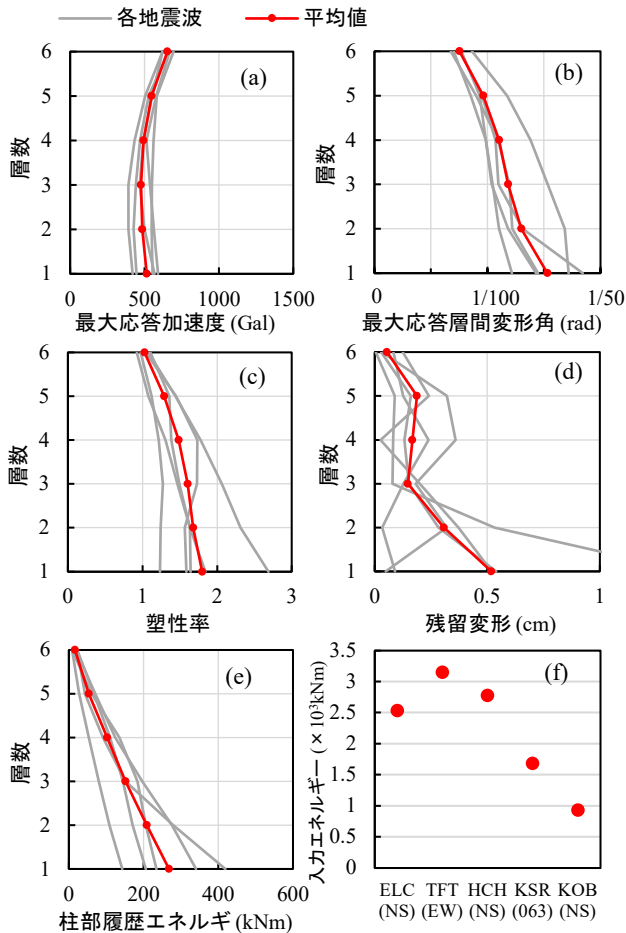


図-4 基準モデル($C_y=0.30$ 柱モデル)の解析結果

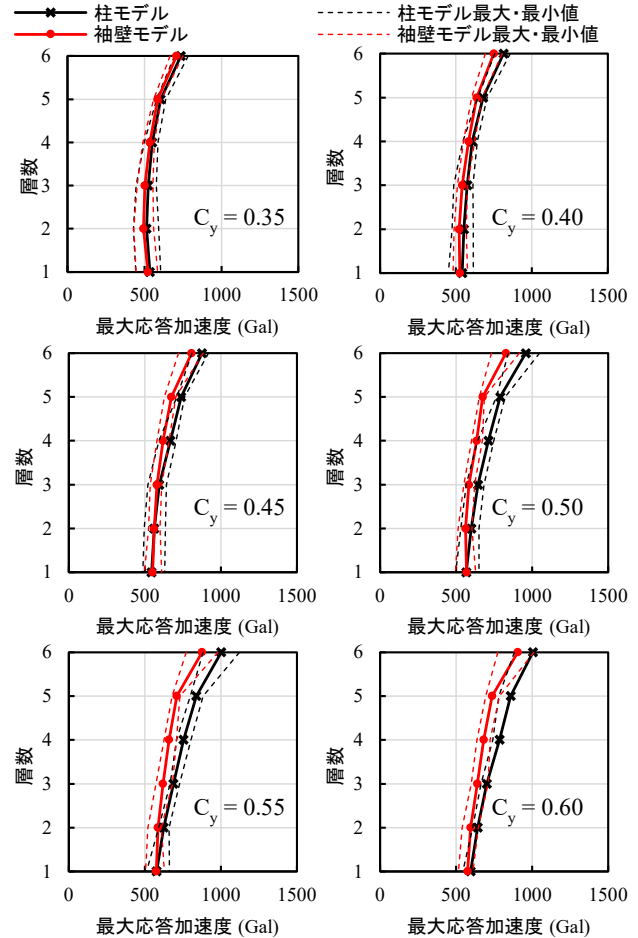


図-5 最大応答加速度（入力5波平均の比較）

2.6 入力地震動

入力地震動は、減衰 5%，第 2 種地盤の安全限界時の告示スペクトル適合波を使用する。地震応答解析でよく用いられる実地震動 5 波（El Centro NS，Taft EW，Hachinohe EW，Kushiro 063，JMA Kobe NS）の位相を用いて、加速度応答スペクトルが告示スペクトルに合うように加工したものである。以下、それぞれ ELC(NS)，TFT(EW)，HCH(EW)，KSR(063)，KOB(NS)と表現する。図-3 に入力地震動の加速度応答スペクトルを示す。なお、解析においては、建物モデルの地震応答が十分に減衰するまで確認するために、入力を 0 とした十分な時間を追加して解析を行った。

3. 地震応答解析

3.1 解析の概要

5つの位相特性を持つ入力地震波を用いて応答解析を行ったが、それらの入力波の違いにより解析結果にはばらつきが見られる。本研究では、袖壁による地震応答の低減効果や傾向などについて、袖壁を設けない場合と比較して考察することを目的に、主に5波入力による解析結果の平均値によって解析結果の考察を行う。

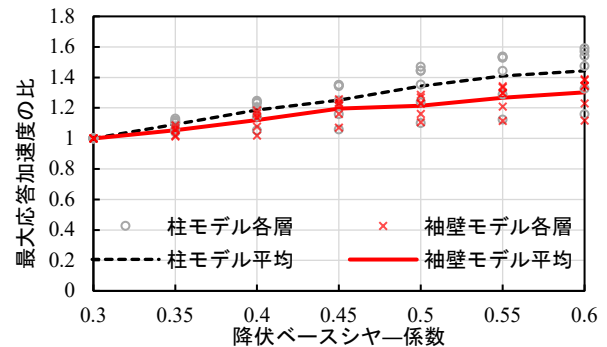


図-6 最大応答加速度の各層の平均の比較

3.2 基準モデルの地震応答解析結果

基準モデルの地震応答解析結果について図-4 に示す。入力地震波によって若干のばらつきが見られる。特に、(d)残留変形については入力波の違いによるばらつきが大きく、解析結果から応答予測することは困難ではあるが、柱モデルと袖壁モデルの地震応答性状の違いが現れるものと考え、平均値で比較・考察する。

3.3 最大応答加速度

図-5 に、降伏ベースシヤー係数 C_y に対する、各入力地震波の層ごとの最大応答加速度の平均値と解析結果の

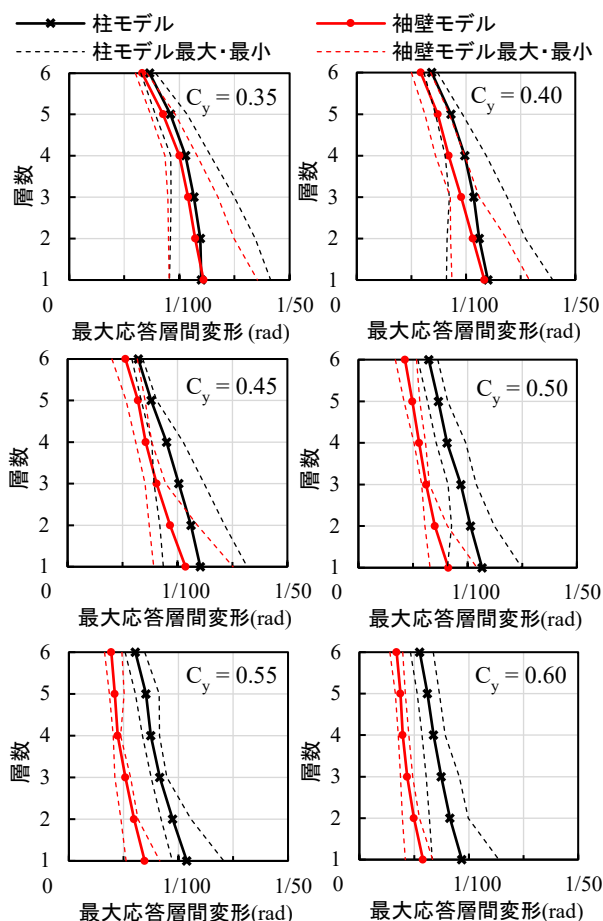


図-7 最大応答層間変形角（入力5波平均の比較）

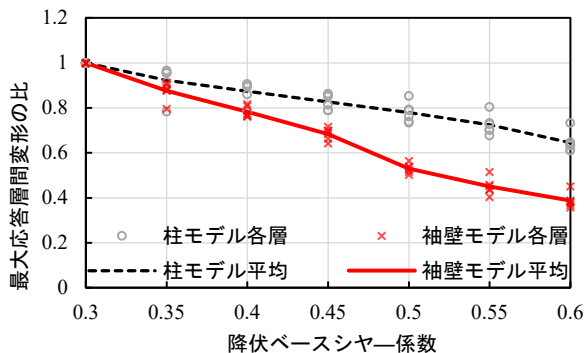


図-8 最大応答層間変形の各層の平均の比

最大値と最小値を、柱モデルと袖壁モデルで比較して示す。降伏ベースシヤー係数が大きくなるに従い、最大加速度が大きくなる傾向があるが、袖壁モデルの方が柱モデルよりも小さい値となり、上層ほどその差は大きくなっている。

図-6に、横軸に C_y をとり、各入力地震波に対する層ごとの最大応答加速度の値の平均と基準モデルの結果との比を示す。すべてのケースで1.0を上回り、応答加速度は、 C_y に対して1次関数的に大きくなる傾向がある。柱モデルと比較すると、袖壁モデルの方が応答加速度は小さい傾向がある。

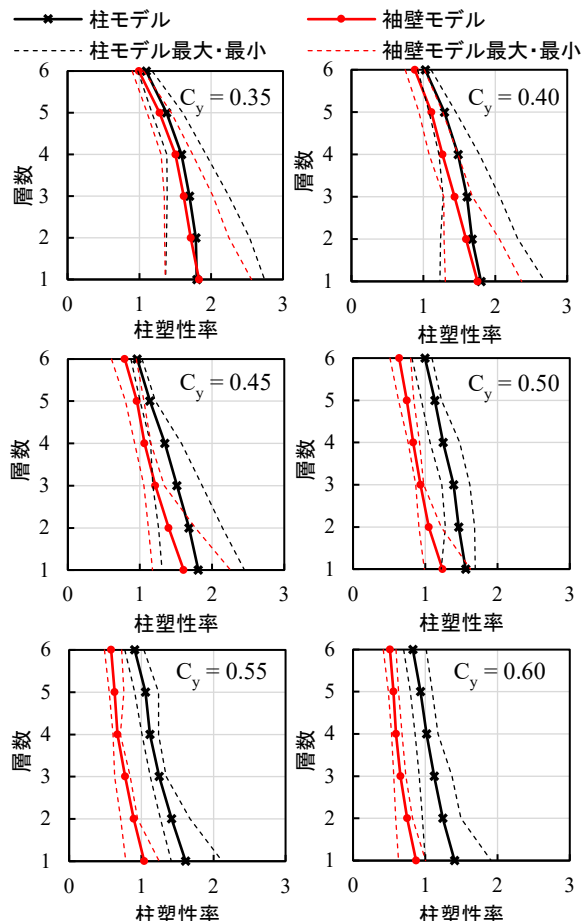


図-9 柱部塑性率（入力5波平均の比較）

3.4 最大応答層間変形角

図-7に、降伏ベースシヤー係数 C_y に対する、各入力地震波の層ごとの最大応答層間変形角の平均値及び最大値と最小値を柱モデルと袖壁モデルで比較して示す。 C_y が大きくなるほど、変形が小さくなる。また、柱モデルと比較して、袖壁モデルの層間変形角が小さくなる傾向があることが分かる。

図-8に、各層の最大層間変形角の値の基準モデルとの比を示す。他の指標と比べると比較的層ごとのばらつきは小さく、降伏ベースシヤー係数が大きくなるに従い、1次関数的に低減する。柱モデルと比較すると、袖壁モデルの方が変形の低減が大きいことが分かる。

3.5 塑性率

本研究では、塑性率は、層の最大変形を柱の降伏変形で基準化した値とする。図-9に、 C_y に対する入力地震波ごとの各層の塑性率の平均値及び最大値と最小値を示す。柱モデルでは、下層部分で塑性率の平均は1を超えるが、袖壁モデルに対しては、塑性率が1未満になる場合もある。ただし、両モデルに対して、柱部分でもひび割れ変形は超えている。また、袖壁モデルの解析を行ったすべてのケースで、袖壁については降伏に至っている。モデルの比較は図-8の最大応答層間変形と同様になる。

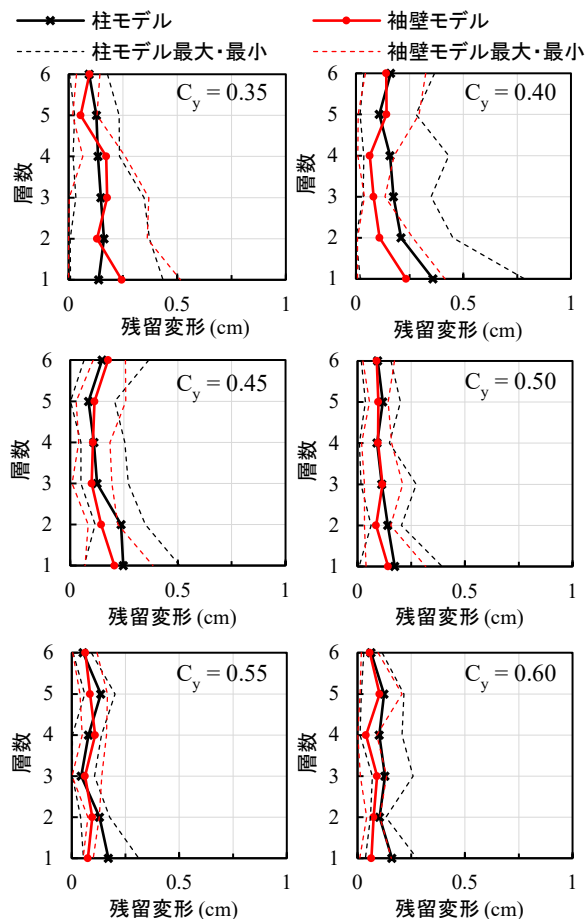


図-10 残留変形（入力5波平均の比較）

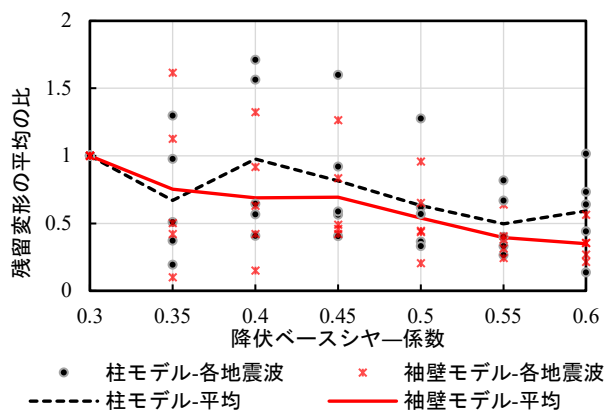


図-11 入力地震波ごとの残留変形の平均

3.6 残留変形

図-4(d)に基準モデルの残留変形を図示しており、残留変形は入力地震波や層ごとのばらつきは比較的大きいことが分かる。図-10に、 C_y に対する入力地震波ごとの各層の残留変形の平均値及び最大値と最小値を、柱モデルと袖壁モデルで比較して示す。 C_y が大きくなるに従い、残留変形の平均値は小さくなる傾向があり、また、袖壁モデルの方が柱モデルよりも小さくなる傾向があることが分かる。

各入力地震波に対する、基準モデルの残留変形と各モ

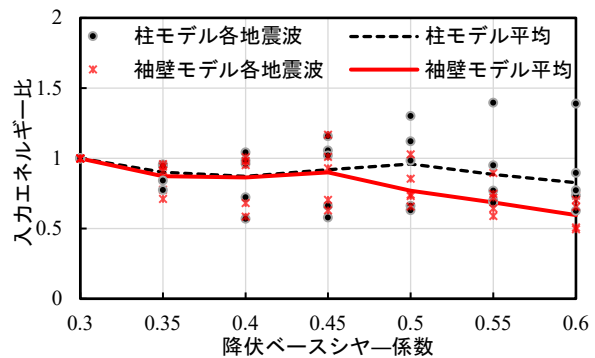


図-12 入力エネルギー比

デルの残留変形の比を図-11に示す。各層の残留変形には入力地震波によるばらつきが大きいため、入力地震波ごとに各層の値の平均値を求め平均残留変形を算出した。建物全体の残留変形の比は、入力地震波に対して約0.1～1.7程度までとばらつきが大きいことに注意が必要であるが、各入力地震波の平均値で見ると、 C_y が大きくなるに従い、柱モデルよりも袖壁モデルの方が、残留変形が低減される傾向がある。

3.7 入力エネルギー

図-4(e)に示したように、入力エネルギーには入力波による差が大きい。ここでは、モデルの違いの影響を確認するため、図-12に各入力地震波の入力エネルギーの基準モデルの値に対する比を示す。 C_y ごとに、基準モデルの値との比をとった値に対しても、比較的ばらつきが大きい。ただし、平均値を見ると、柱モデル及び袖壁モデルの比の値は1を下回っており、降伏ベースシヤー係数が大きくなるに従い、減少傾向がある。基準モデルとの入力エネルギーの比の平均値は、柱モデルに比べ、袖壁モデルの方が小さくなる傾向がある。

3.8 塑性履歴エネルギー

図-4(f)に示すように、塑性履歴エネルギーは、入力波によるばらつきは若干大きいことには注意する必要があるが、ここでは、入力波ごとの平均について検討する。

図-13に入力地震波ごとの各層の履歴エネルギーの和について、基準モデルの値との比を示す。図には、柱モデル、袖壁モデル（柱+袖壁）、袖壁モデル（柱部）に対する結果を示している。柱モデルの履歴エネルギーの平均は、 C_y によらず一定の傾向があるが、袖壁モデル（柱+袖壁）の履歴エネルギーは袖壁の降伏ベースシヤー係数が大きい場合には基準モデルとの比の平均が1を超える。袖壁モデルの柱部の履歴エネルギーについては、柱モデルより低減されるか、ほぼ同等程度となっている。赤の実線の袖壁モデル（柱+袖壁）と赤の点線の袖壁モデル（柱部）の履歴エネルギーの差が袖壁モデルの袖壁の履歴エネルギーを示すことになるが、袖壁モデルの袖壁による履歴エネルギーの平均は、降伏ベースシヤー係数によらず、ほぼ一定の傾向があることが分かる。

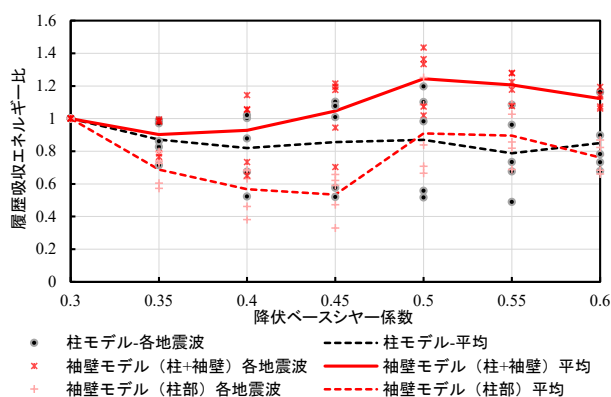


図-13 柱モデルと袖壁モデルの履歴エネルギー比

履歴吸収エネルギーについて、層せん断力 Q と変形 δ の関係から考えてみる。図-14 に ELC(NS)を入力したときの、 $C_y=0.45$ モデルの 1 層目の層せん断力-層間変形関係を示す。これは、図-13 において履歴エネルギー吸収比が小さくなる場合の例である。図-14(a)に層せん断力-変形関係を柱モデルと袖壁モデルを比較して示す。この場合、最大変形については、袖壁モデルが柱モデルに比べ 9.9%程度小さくなっている。この図の面積として求められる塑性履歴エネルギーについては、袖壁モデルは袖壁の影響により柱モデルより 19.5%大きい。図-14(b)に袖壁モデルについて、柱及び袖壁の復元力を分けて示す。袖壁と柱が履歴エネルギーを分担していることが分かる。その結果、袖壁モデルの柱の履歴エネルギーは、柱モデルの履歴エネルギーよりも 49.8%低減される。

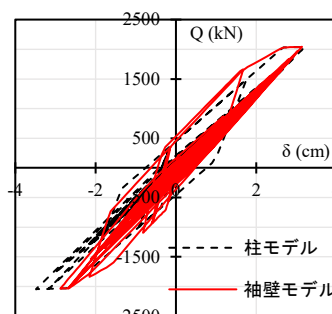
一方、 C_y が大きい範囲では、袖壁モデルの最大変形は柱モデルよりも小さくなるが、袖壁により剛性が大きくなるため、柱部分のひび割れ後の振動の繰り返し回数が多くなり、袖壁モデルの柱の履歴エネルギーは柱モデルと比較して低減されない傾向がある。

4. まとめ

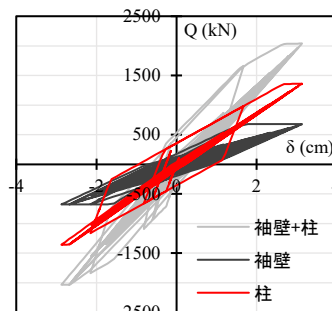
本研究では、高靱性袖壁を用いた RC 建物モデルの地震応答性状について検討するために、地震応答解析を実施し、袖壁モデルと、それと同じ層せん断力係数をもつ柱のみの建物の地震応答性状について比較を行った。

安全限界レベルの入力波 5 波を対象とした解析を行い、柱モデルに比べ袖壁モデルは、 C_y が大きい場合ほど、最大層間変形角と塑性率は応答低減効果が大きいことを示した。応答加速度と残留変形と入力エネルギーは低減される傾向があるが差は小さい。履歴エネルギーは、 C_y の増大による袖壁モデルの柱部の履歴吸収エネルギーは、柱モデルと同等となる。剛性が大きくなり、変形は小さくなるが、振動の繰り返し数が多くなるためである。

なお、本研究は 6 層モデルを対象にしたが、それよりも低層、高層建物に対しては別途検討する必要がある。



(a) 柱モデルと袖壁モデル



(b) 袖壁モデルの復元力特性

図-14 $C_y=0.45$ モデル 1 層目の履歴特性(ELC(NS))

謝辞：

本研究を進めるにあたり、福井大学名誉教授の小林克巳工学博士には、多大な助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 土田一輝，加藤大介：一質点系の地震応答解析による RC 造建物における袖壁の有効利用に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.521-522，2018.9
- 2) 村井一允，小林克巳 他：軽量コンクリートの高靱性化とその利用に関する研究 その 2，日本建築学会学術講演梗概集（東海），pp.331-332，2003.9
- 3) 井上圭一：高靱性袖壁パネルのエネルギー吸収能力による地震応答低減効果，日本建築学会構造工学論文集，Vol.61B，pp.409-418，2015.3
- 4) 新石雅文，井上圭一，小林克巳：エネルギー吸収能力を有する袖壁パネル付き鋼構造建物の構造性能評価 その 1～その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.905-908，2012.9
- 5) 糸田響，井上圭一：大地震動に対する制振袖壁建物の地震応答性状，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）pp.391-392，2023.9
- 6) 柴田明徳：最新耐震構造解析 第 2 版，森北出版，2003
- 7) 加藤大介，阿部直樹，黒井秀人：RC 造袖壁付き柱の復元力特性のモデル化に関する研究，その 1～その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.515-520，2018.9