

論文 鉄筋コンクリート造二次壁を有する架構の被害分析と耐震設計法に関する研究

伊藤 衛^{*1}・鈴木 裕介^{*2}・前田 匡樹^{*3}

要旨：近年、建物の耐震化が進み、地震時の建物被害として柱・梁等の構造部材に生じる被害は軽減されてきている。しかしながら、天井やRC二次壁など非構造部材の被害が甚大で修復性の面から建替となる事例が発生している。最近の構造設計では、RC二次壁には構造スリットを設けて、架構に影響しないようにする設計が主流であるが、適切なRC二次壁を配置し耐震性に有効活用する可能性も考えられる。本研究では、RC二次壁を耐震性能に寄与させる設計法の確立を目的とし、RC二次壁の強度・剛性が架構に与える影響について検討し、RC二次壁が架構の変形抑制に効果があり、架構の塑性化の防止や損傷・復旧費用の低減に有効であることを、実被災建物やモデル建物の解析により示した。

キーワード：非構造部材, RC二次壁

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物の耐震規定の強化や耐震補強により、建物の地震被害における柱・梁・耐震壁等の構造部材の被害は軽減してきており、東北地方太平洋沖地震時においても地震動で建物が倒壊して人命を奪うような甚大な構造被害は少なかった¹⁾。一方で、RC二次壁や天井等の非構造部材の被害が甚大であり、建物が継続使用できない、あるいは、改築を余儀なくされるなどの事例が多数あり問題視されている。現在の構造設計では、RC二次壁は構造スリットで架構から切り離すのが一般的である。しかしながら、RC二次壁（非構造部材）が取り付くことによって、構造部材の損傷被害を軽減している可能性も考えられる。

写真-1は、2011年東日本大震災で被災した11階建て鉄骨鉄筋コンクリート造集合住宅である²⁾。写真-2、写真-3に示すように、非構造部材であるRC二次壁にせん断破壊などの大きな被害が生じた。一方で、この建物の柱・梁部材にはそれほど大きな損傷は生じなかった（被災度で小破程度）が、修復費用などの問題から改築された。

そこで本研究では、二次壁を耐震要素とし、かつ被災後の修復性向上も考慮した設計法の提案を目的として、1質点系モデルを用いた解析によって、二次壁の強度及び剛性が架構の安全（耐震）及び修復性能に及ぼす影響について評価する。並びに、RC二次壁を有する実被災建物のフレームモデルを用いた静的及び動的解析を通して、被害分析の実施、及び二次壁の耐力を向上させた時の被害の低減効果について検討する。

写真-1 被災建物



写真-2 被害概要（廊下下面）



写真-3 被害概要（バルコニー面）



2. RC二次壁付架構の特性

2章では、主架構に対して、耐力・剛性を変化させた二次壁を組み込んだ1質点系の解析により、二次壁が架構の耐震性に及ぼす影響を検討した。

2.1 評価手法

評価手法として、下記に定義する変形抑制率・耐震性能残存率^{R³⁾}・修復コスト指標を用いた。その際、応答変形を算出するにあたり、地震動に第2種地盤の告示スペクトルを用いた限界耐力計算法⁴⁾により算出する。

$$\text{変形抑制率} = \frac{\text{「架構+二次壁」の最大応答変形}}{\text{「架構」の最大応答変形}}$$

$$\text{耐震性能残存率} R = \frac{E_r(\text{各変形時における消費エネルギー})}{E_r + E_d(\text{残存エネルギー吸収能力})}$$

尚、耐震性能残存率Rを求める上での消費エネルギーは、

*1 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 東北大学 災害科学国際研究所 助教 博士(工学) (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)

各部材に復元力特性モデルを設定した際の、片押し履歴面積としての履歴面積としている（図-1）。尚、架構の履歴特性には Takeda モデル、RC 二次壁に関しては塑性率 2 に至るまでは Takeda モデル、負勾配時は原点指向モデルとした（図-2）。修復コスト指標は、耐震性能評価指針²⁾中の変形角-修復費用を用いて、塑性率-修復コスト指標（図-3）を求めた。例えば、修復コスト指標 1 とは塑性率 4 時の修復費用、つまり建替レベルの修復費用を要すことを意味する。また、RC 二次壁の修復コスト指標に関しては図-2 のように架構の指標値に、架構に対する RC 二次壁の最大耐力の比及び 0.5 を乗じる仮定のもと、算出している。（今回の解析では、架構に対し、二次壁が十分に小さいことより、このような仮定を行った。）

2.2 解析モデル

解析モデルは、4 層 15m 建物を想定し、主架構は、最大耐力 1000kN ($C_0=0.3$)、降伏変形角 1/200 に固定し、RC 二次壁は剛性・強度を変化させたモデルを設定した。架構及び RC 二次壁の復元力特性を図-4 に示す。尚、履歴特性には、図-2 と同様のモデルを使用している。

2.3 等価粘性減衰定数 heq の設定

等価粘性減衰定数 heq (以下、 heq) は内部減衰を 5% とし、各変位時のポテンシャルエネルギーに対する消費エネルギー（片押しの履歴面積×2）の比をとる。なお、本研究では、2 次壁が早期に破壊してエネルギー吸収し、架構の応答を低減させる効果を評価するため、通常の主架構のエネルギー吸収に、片押しの 2 次壁の復元力特性が囲む面積（エネルギー）を累加して、建物全体の heq を算定した（図-5）。

2.4 RC 二次壁耐力の影響

RC 二次壁の降伏変形を固定し耐力のみを変化 ($nQ_y=100kN\sim 500kN$) させた際（図-6）の検討を行う。

2.4.1 耐震性能に二次壁耐力が及ぼす影響

図-7、図-8、図-9、図-10 に最大応答変形、変形抑制率、耐震性能残存率 R、修復コスト指標を示す。いずれのモデルも地震動倍率 0.3（中小地震レベル）時に RC 二次壁が降伏し、RC 二次壁に対する修復費用が発生し始めるものの、RC 二次壁部分がエネルギーを吸収するため、変形抑制効果は 60~80% 程度ある。

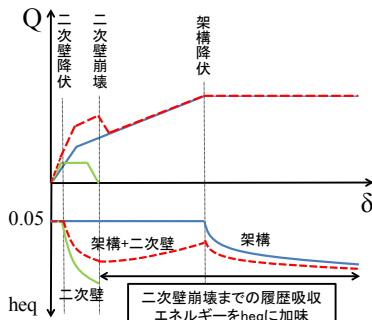


図-5 heq の設定

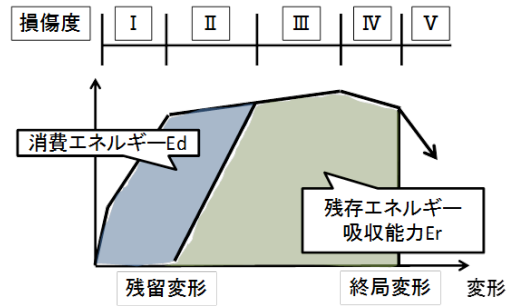


図-1 耐震性能残存率 R

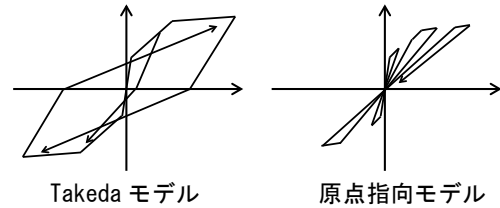


図-2 履歴モデル

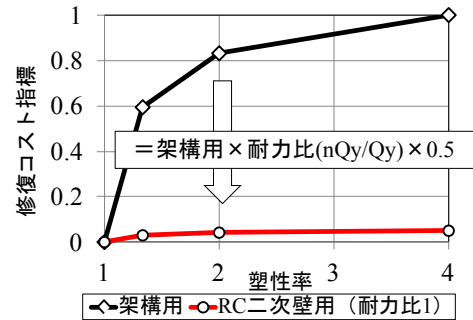


図-3 塑性率-架構修復費用指標

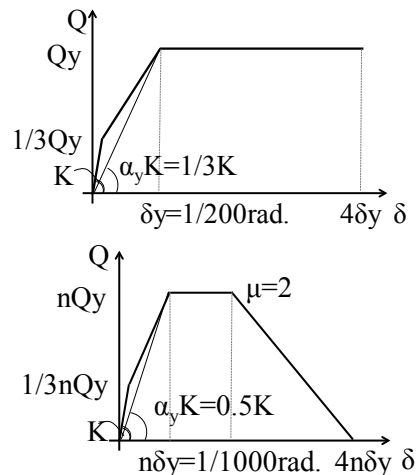


図-4 解析モデルの復元力特性
(上：架構 下：RC 二次壁)

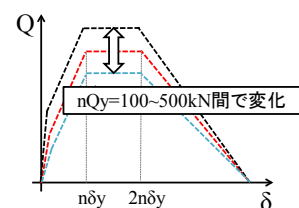


図-6 二次壁耐力変化モデル

また、この時点では架構モデルの損傷も殆ど無いため、耐震性能残存率 R はほぼ 100%を維持している。地震動倍率が 1.0 倍時になると、変形抑制効果が最も高く、50～70%となっている。尚、RC 二次壁に関しては大破レベルの損傷が生じており、取換えレベルの修復コストが発生している。この時、架構モデルも降伏に至っており、修復コストが発生し始めているが、その費用指標は 0.2 程度であり、RC 二次壁の修復費用と同程度である。地震動倍率 1～1.5 の範囲では、架構モデルの損傷が拡大し、耐震性能残存率 R が減少、修復コストが増大するのに対し、RC 二次壁付架構モデルは、RC 二次壁による変形抑制効果により、耐震性能残存率は高く、修復費用は半分以上に抑えられていた。また、RC 二次壁耐力が高いほど、高い地震動レベルで修復コスト低減効果が高い傾向を得られた。

2.5 RC二次壁剛性の影響

RC 二次壁の最大耐力を $nQ_y=200\text{kN}$ に固定し、降伏点剛性のみを変化 ($nd_y=1/1000\text{rad.} \sim 1/200\text{rad.}$) させた際(図-11) の検討を行う。

2.5.1 耐震性能に二次壁剛性が及ぼす影響

図-12、図-13、図-14、図-15 に最大応答変形、変形抑制率、耐震性能残存率 R、修復コスト指標を示す。剛性が高いモデル ($nd_y=1/1000, 1/500\text{rad.}$) の方が地震動倍率が小さい時に変形抑制効果が高いが、早期に RC 二次壁が壊れてしまうため、修復コストは高い傾向がみられた。

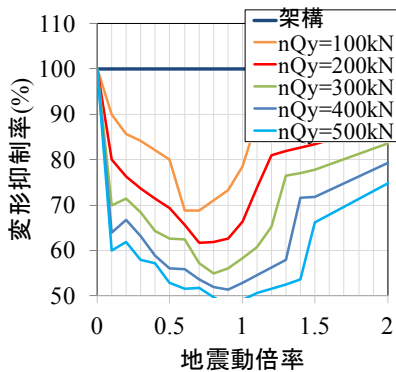


図-8 変形抑制率 (耐力変化)

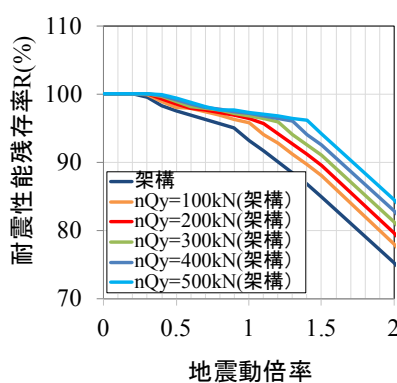


図-9 耐震性能残存率 R (耐力変化)

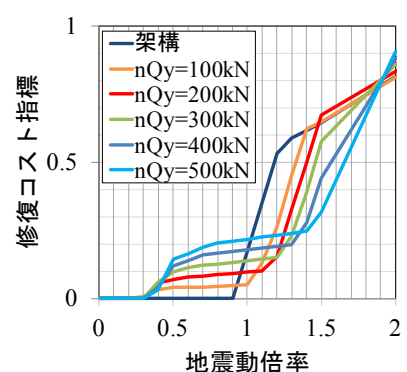


図-10 修復コスト指標 (耐力変化)

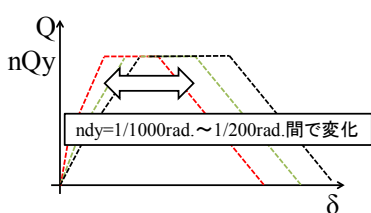


図-11 二次壁剛性変化モデル

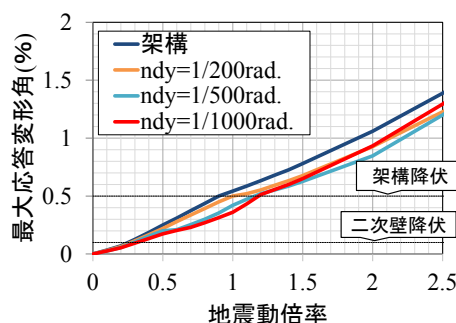


図-12 最大応答変形角 (剛性変化)

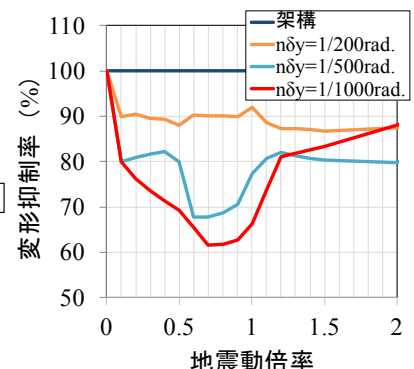


図-13 変形抑制率 (剛性変化)

一方で、架構モデルと同じ変形角で RC 二次壁が降伏に至る $nd_y=1/200\text{rad.}$ モデルは、変形抑制効果は低いものの、RC 二次壁が壊れるのが大地震レベル時なので、修復コストは低くなっている。

2.6 影響因子の検討

RC 二次壁の耐力と剛性の影響をまとめると、RC 二次壁の耐力を上げると変形抑制効果、耐震性能残存率 R が高く、架構部分の修復費用を低く抑えることが出来る。一方で RC 二次壁のみの修復コストは早期に大破レベルの修復費用となるため、一概に耐力を上げればよいというものでもないようである。剛性を変化させた場合、架構降伏前で RC 二次壁が降伏するようなモデルの方が変形抑制効果は高いが、修復コスト面で見ると、剛性が低い RC 二次壁モデルの方が有効である傾向が見られたため、想定する地震動レベルに対して、RC 二次壁の耐力・剛性を適切に判断することが必要だと思われる。

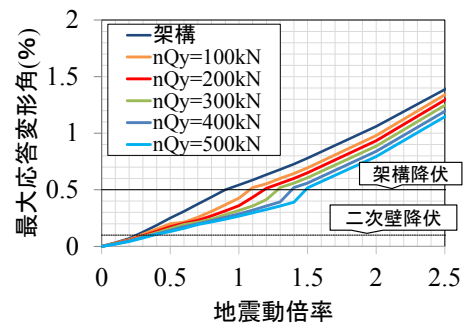


図-7 最大応答変形角 (耐力変化)

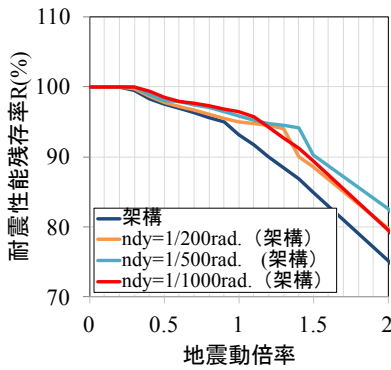


図-14 耐震性能残存率R(剛性変化) 図-15 修復コスト指標(剛性変化)

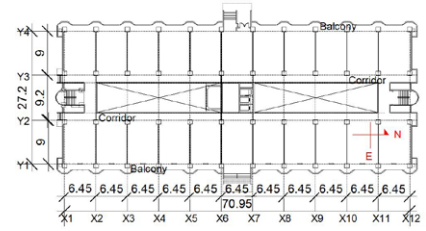
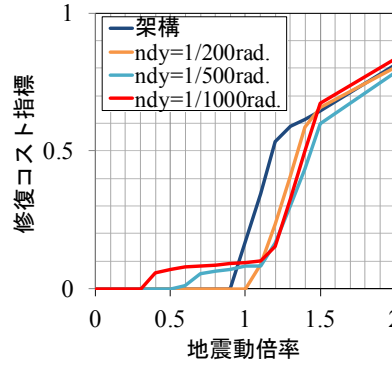


図-16 対象建物平面図(単位:m)

3. RC二次壁の有無による被害の検討

3.1 解析モデル

解析モデルは、前述したSRC造集合住宅(図-16)のY1構面とし、RC二次壁の有無により2ケース設定した。尚、RC二次壁(断面1000×150mm)は図-4と同様にモデル化し、X方向における各梁の中間に剛接合として配置した。代表部材を表-1に示す。

3.2 静的荷重増分解析

二次壁付モデルの静的増分解析結果を図-17に示す。架構が降伏に至る層間変形角約1.0%時よりも早期の0.5%時にRC二次壁にせん断破壊が生じており、実被害と同じ傾向が確認できた。

3.3 一質点系への縮約と地震時応答

図-18、図-19の縮約⁴⁾結果、東北地方太平洋沖地震波スペクトルを用いて地震時の応答値を求めた(図-20)。

3.4 各層の応答変形・変形抑制率

図-21、図-22に地震動倍率を0.2倍~1.0倍に変化させた際の各層の最大応答変形・変形抑制率を示す。いづれの地震動倍率においても概ねRC二次壁付架構の方が架構モデルに比べ変形を抑えることが出来ており、地震動倍率0.2時に最も効果が大きく、変形が集中する下層においても70%程度の変形抑制効果が見られた。また、地震動倍率0.4倍では、RC二次壁付架構も層間変形角0.5%を超え、塑性化する直前となった。さらに、地震動倍率を上げた1.0倍時は層間変形角が2.0%を超え、二次壁が完全にせん断破壊しているため、変形抑制に与える効果は殆どないものの、RC二次壁付モデルの方が最大応答変形が小さかった。

3.5 層の塑性化率

各層の塑性化割合-地震動レベルの関係を図-23に示す。塑性率 $\mu=1$ になる割合、塑性率 $\mu=2$ になる割合ともにRC二次壁付架構の方が低く、RC二次壁の効果が大きく表れたのは、塑性率 $\mu=1$ になる割合では地震動倍率0.4倍時、塑性率 $\mu=2$ になる割合では地震動倍率0.6倍時であり、中小地震レベルでRC二次壁の効果が期待できる結果となった。

表-1 代表部材断面図(単位:mm)

	1F 柱	1F 梁	1F RC二次壁
断面図			
b×D	850×850	550×750	1050×150
主筋	16 D256-D19	8 D25	D-10@180
鉄骨	BH-600-250-12-22	BH-500-250-12-25	
横筋	D13@100	D13@100	D-10@180

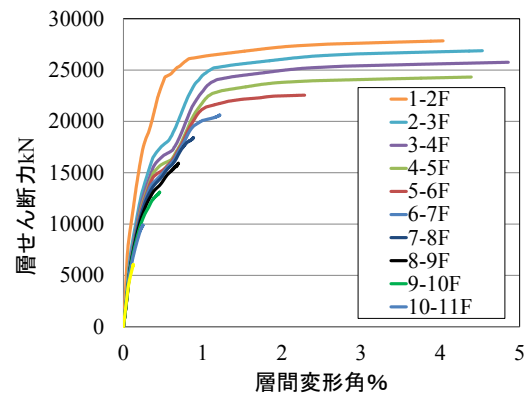


図-17 静的増分解析結果(架構+RC二次壁)

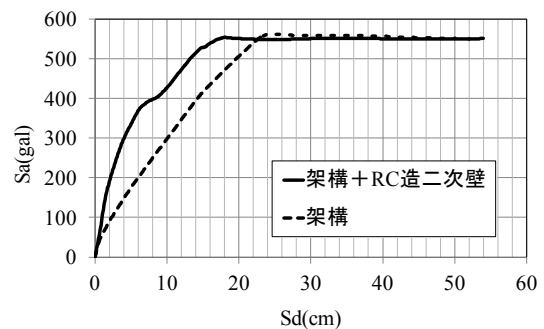


図-18 縮約結果

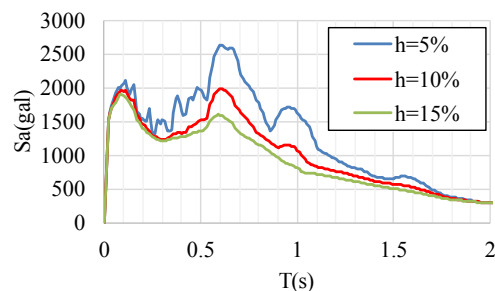


図-19 地震波特性(東北地方太平洋沖地震波)

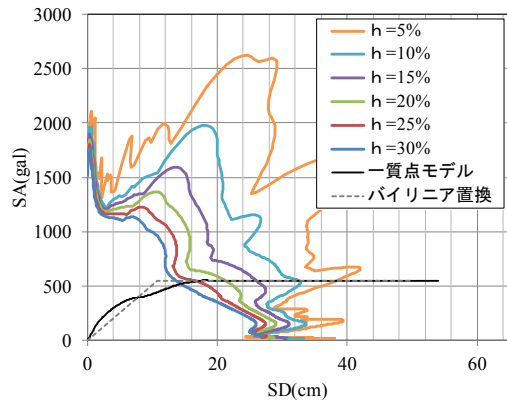


図-20 地震時応答 (架構+RC 二次壁)

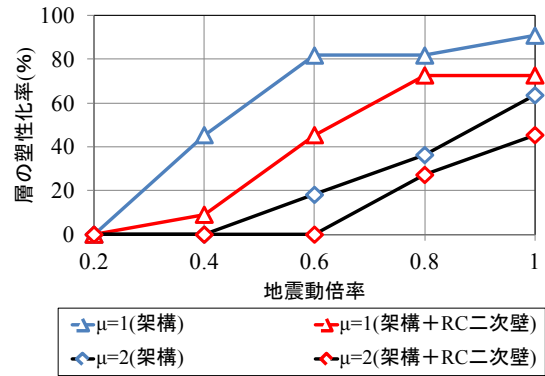


図-23 地震動倍率-層の塑性化率

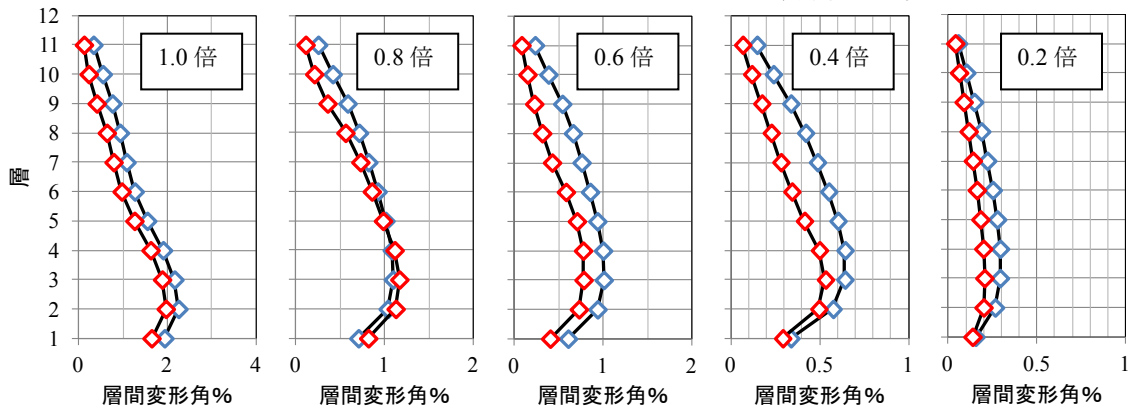


図-21 層-層間変形角

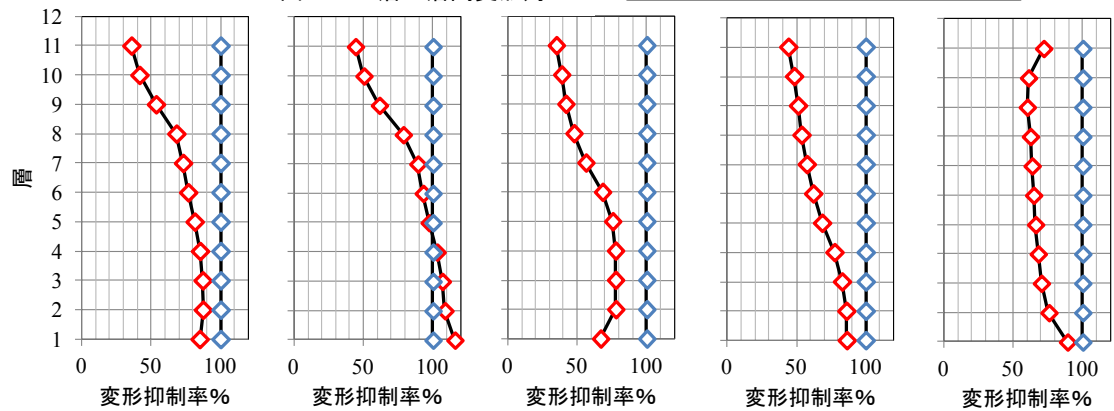


図-22 層-変形抑制率

4. 静的解析の精度検証

図-24 に静的解析の精度検証図を示す。その際、動的解析における初期減衰を 5%とし、減衰モデルには瞬間剛性比例型を用いている。尚、静的解析の層間変形角には、図-20 で求めた応答時における各層の最大層間変形角を用いている。地震動倍率 0.8 時に若干の精度誤差はあるものの、全ての地震動倍率時で概ね精度良く評価できている。ただし、地震動倍率 0.8 時の誤差も含め、静的解析において heq を過大評価している可能性もしくは高次モード等の動的効果の影響が考えられ、今後検討が必要だと思われる。

5. RC 二次壁が架構に与える影響の検証

5.1 低地震動倍率時の応答

図-21 より、地震動倍率 0.4 時において、RC 二次壁付架構の層間変形角が 0.5%に至り塑性化が生じている。そこで、RC 二次壁が架構に対して負担する耐力を 1~5 割に変化 (実建物の二次壁は 1 割負担モデル) させることで、塑性化を防止できるかの検討を行う。尚、前述したとおり、若干の動的効果の可能性も見られるため、この検討には動的解析結果を用いている。

5.2 RC 二次壁変更後の各層層間変形角、変形抑制率

図-25 に RC 二次壁の復元力特性を変更後の層-層間変形角を示す。変更前の 1 割負担モデルでは 2~5 層で塑性化が生じていたが、RC 二次壁耐力を上げ、5 割負担モ

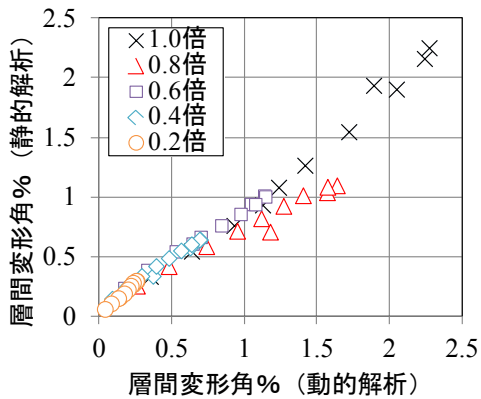


図-24 静的解析結果の精度検証

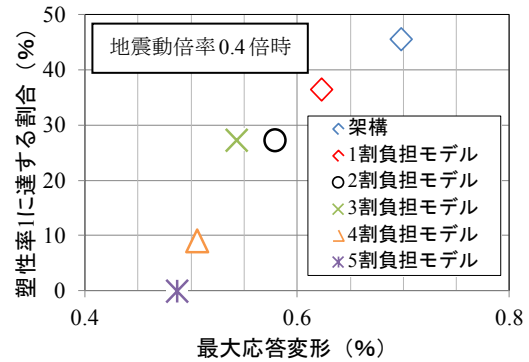


図-26 各層が塑性率1に達する割合

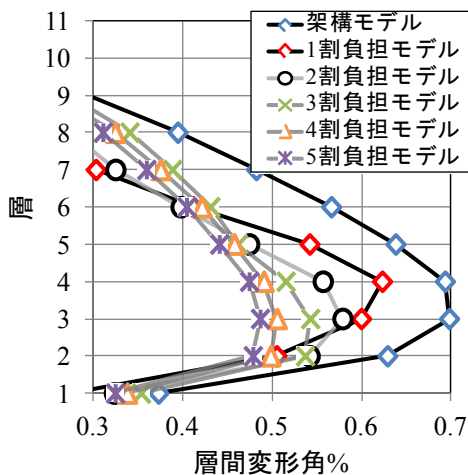


図-25 層-層間変形角

デルとすることで全層の塑性化を防ぎ、変形が集中していた下層の変形を60~70%に抑制できている。一方で上層部は変形が進む層が見られたため、変形の集中する下層部のみのRC二次壁耐力を上げるといった方法も有効な可能性があり、今後検討が必要である。

5.3 塑性化する割合

地震動倍率0.4時の最大応答変形一層が塑性率1に達する割合を図-26に示す。実建物モデルを模擬した1割負担モデルでは、塑性率1に達する割合が35%であり、架構モデルの45%と比較しても大差ないことから、RC二次壁の効果は小さいように思われる。また、耐力負担割合を2割まで増やすと、塑性化する割合が架構モデルに対して半分程度と効果が高かった。

5.4 RC二次壁の効果

前述した図-23, 24より、現状のRC二次壁(1割負担モデル)では架構に与える影響は小さく、今回検討したSRC集合住宅のような場合であると、RC二次壁にスリットを設けて架構との絶縁を図る設計が有効かと思われる。しかし、図-25, 26のようにRC二次壁の耐力を上げることで、架構の損傷軽減になることがわかり、今後のRC二次壁設計をする上で、有効な方法になり得ると考えられる。

6. まとめ

本研究では、RC造二次壁を耐震要素とする設計法の確立を目的とし、RC二次壁が架構に対して与える影響について検討を行い、以下の知見を得た。

- (1)4層建物を想定した1質点系モデルを用いた静的解析より、RC二次壁の耐力が高いほど、変形抑制、耐震性能残存率Rは高いが、修復費用は高くなる。また、剛性が高いほど、中小地震レベルでの変形抑制効果があるが、修復費用は剛性が低い方が良いため、設計時に適切な耐力・剛性の設定が必要である。
- (2)実建物モデルを用いた被害分析より、中小地震レベル時にRC二次壁が変形抑制に効果があることがわかった。
- (3)実建物モデルに対し、RC二次壁の耐力をパラメータとした動的解析結果から、二次壁の耐力負担が主架構の塑性化及び損傷の軽減に対し、どの程度効果があるか例示した。

参考文献

- 1) 向井智久: RC造壁付架構の構造特性と損傷状態に関する研究 その1~その4, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, p758-794, 2014
- 2) 小塩友斗: 非構造壁を有する靱性型SRC建物の被災度区分判定, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系(53), p149-152, 2013
- 3) 日本建築防災協会: 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- 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, 2014
- 7) 向井智久: 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その1~その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p407-412, 2008