

論文 RC造袖壁付き柱の復元力特性のモデル化の提案と地震被害を受けた学校建物を対象にした地震応答解析への適用例

小林 正英*¹・高松 恭一*¹・大塩 謙一*²・加藤 大介*³

要旨：RC造袖壁付き柱は、袖壁部分が圧壊するまでの強度が高い領域の後に変形能力の高い柱部分の挙動が出現するところに特徴がある。本論文では、この特徴を考慮した復元力特性のモデル化を提案した。次に、提案したモデルを用い東日本大震災で被災した2棟のRC造校舎を対象に地震応答解析を行った。解析は、部材の損傷度および建物の耐震性能残存率の評価に重点を置き実測値と比較した。その結果、袖壁の多い校舎の解析結果は被害の傾向をある程度再現できた。

キーワード：袖壁付き柱、復元力特性、損傷度、耐震性能残存率、地震応答解析、地震被害

1. 研究背景と研究目的

RC造袖壁付き柱は、袖壁部分が圧壊するまでの強度が高い領域の後に変形能力の高い柱部分の挙動が出現するところに特徴がある。本研究では、この損傷制御性と安全性のいずれも高いという有用な性能を生かした耐震設計法の構築を最終目標とし、その第一歩として、この特徴を考慮した袖壁付き柱の復元力特性のモデル化の提案を行う。

一方、東日本大震災（2011年）では、福島県本宮市のM中学校の隣接する2棟のRC造校舎（南校舎・北校舎）が大きな被害を受けている¹⁾。その構造的な特徴は、両校舎には1階のみに壁が存在しない典型的な壁抜け柱が存在すること、北校舎では壁抜け柱の他に袖壁が多数存在することである。また、北校舎の被害調査においては、袖壁付き柱は柱部の損傷度と袖壁部の損傷度を分けて測定しており、残存耐震性能も袖壁を無視した場合（袖壁の存在を無視し独立柱として扱い、柱部の損傷度により評価）と袖壁を考慮した場合（袖壁付き柱として扱い、柱部と袖壁部の損傷度の大きい方により評価）の両方得られている。このデータは、設計において袖壁を考慮する場合と無視する場合のいずれにも対応できるような手法の構築に寄与するデータになる可能性がある。すなわち、損傷制御性を検討する場合には袖壁の損傷を考慮し、安全性の検討を行う場合には袖壁を無視することにより、袖壁付き柱を有する建物のより合理的な設計法の構築に寄与できると考えた。

本研究では、提案した復元力モデルを用いて地震応答解析を行い、袖壁の多用されている北校舎の実被害を再現することに重点を置く。その際、部材の損傷度および建物の耐震性能残存率の比較に重点を置くが、特に袖壁を無視した場合と考慮した場合の違いに着目する。

表-1 解析対象建物諸元と被害の概要

校舎	階	階高 [m]	床面積 [m ²]	重量 [kN]	主筋	帯筋	コンクリート強度 診断採用値 [N/mm ²]	Is値	耐震性能残存率 (桁行)	
									R[%]	被害
南	1	3.8	609	8157	SR235, SD295	SR235 @250	18.0	0.39	(14)*	(倒壊)
	2	3.7	593	7858			17.0	0.37	74	中破
	3	3.7	762	9170			18.0	0.51	89	小破
北	1	3.8	677	8159	SR235	SR235 @250	14.0	0.33	49 (64)	大破 (中破)
	2	3.7	481	6065			14.0	0.31	96	小破
	3	3.7	600	6407			15.0	0.65	98	軽微

* () は袖壁を無視した場合の値

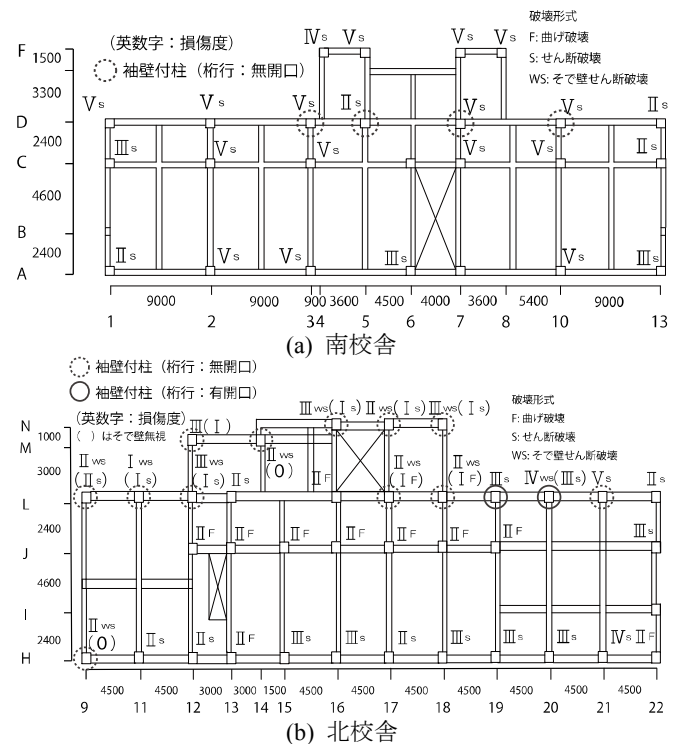


図-1 袖壁付き柱と1階の損傷度

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 工修

*3 新潟大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

2. 研究対象建物の概要と地震被害

M 中学校の 2 棟の校舎を解析対象とした。両校舎とも 3 階建てではほぼ整形であり、南校舎が A 型校舎（1 教室 1 スパン）、北校舎が B 型校舎（1 教室 2 スパン）という違いがある。M 中学校の建物と被害の概要を表-1 に示す。表中のコンクリート強度診断採用値はコア試験の平均値から標準偏差の 1/2 を減じたコンクリート強度、耐震性能残存率は被災度判定調査²⁾による被災による耐震性能の低下を表す指標である。また、1 階の平面図と損傷度を図-1 に示す。ここで、損傷度とは被災度判定調査²⁾による部材の損傷程度の指標で被害が軽微な方から I ～ V で表される。

南校舎は桁行方向に大きな被害を受け、1 階は大きく軸方向変形を生じて崩壊し耐震性能残存率は 14% となっている。さらに、下階壁抜け柱が存在しており、特に A2,A3,C2,C3 柱の 4 本は水平残留変形を伴う軸変形が生じていた。なお、図-1 に示したように南校舎の 1 階には袖壁付き柱が 4 か所あるが、損傷度の判定ではいずれも独立柱として扱い評価している。

北校舎には桁行に袖壁付き柱は 14 か所あり、南校舎に比べ多い。1 階には耐震壁はないが、2 階 3 階にスパンの短い耐震壁が 1 枚存在する。1 章で述べた通り、北校舎では袖壁を無視した場合と袖壁も考慮した場合の損傷度が測定されており、無視で耐震性能残存率 64%、考慮で 49% となっており、袖壁部の被害が大きいことが認められる。南校舎に比べ、個々の部材の損傷度は小さくなく I ～ III が主である。

3. 鉛直部材の復元力特性のモデル化と損傷度との対応

3.1 鉛直部材の分類およびモデル化の概要

建物を構成する鉛直部材を独立柱、袖壁付き柱、耐震壁の 3 種類に分類してモデル化を行った。3.4 節で詳述するが、袖壁付き柱は圧縮側の袖壁が有効な場合（袖壁モデル）と圧縮側の袖壁が無効な場合（柱モデル）に分けてモデル化を行っている。

表-2 にそれぞれの部材で用いた各種強度式をまとめて示した。また、全ての部材でひび割れ強度はせん断強度と曲げ強度の小さい方で決まる最大強度の 1/3 とした。さらに、初期剛性は曲げ剛性とせん断剛性を考慮し、初

表-2 地震応答解析の 1 階入力パラメータの値

部材の種類		曲げ終局強度式	せん断終局強度式
独立柱		耐震診断 ³⁾ 付 1.1-1 式	靱性保証 ⁴⁾ (6.4.1.2,3)式
袖壁付柱	袖壁モデル	全塑性式 ⁵⁾	異形断面式 ⁶⁾
	柱モデル	全塑性式 ⁵⁾	異形断面式 ⁶⁾
耐震壁（両側柱付壁）		耐震診断 ³⁾ 付 2.1-1 式	耐震診断 ³⁾ 付 2.1-2 式

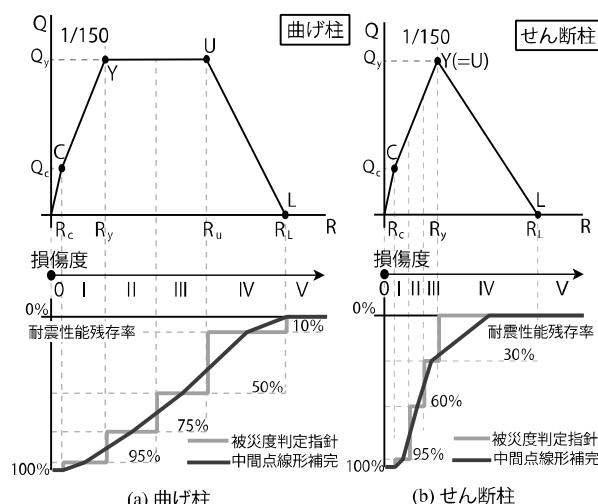


図-2 独立柱の復元力特性と損傷度・耐震性能残存率との対応

期剛性計算時の剛域長さは RC 規準⁷⁾の方法に準じて接合部長さの 1/4 だけ短くしている。

対象建物では南校舎には耐震壁は存在せず、北校舎の 2 階 3 階にスパンの短い壁が 1 枚存在するだけなので、本節では独立柱と袖壁付き柱のモデル化と損傷度についてのみ詳しく説明する。

3.2 曲げ破壊形式の独立柱のモデル化と損傷度

図-2(a)に曲げ破壊型の復元力特性と対応する損傷度および耐震性能残存率を示す。すなわち、ひび割れ点 C、降伏点 Y、終局（水平力負担能力喪失）点 U、限界（軸力負担能力喪失）点 L を結ぶ 4 本の折れ線でモデル化する。なお、横軸は層間変形角としている。

降伏変形角 R_y であるが、本研究では袖壁付き柱を主な対象としており、これらの降伏変形角を精算するのは難しく、柱部材等も含めて耐震診断基準³⁾等で想定されている一般的な層の変形角を設定した。具体的には曲げ破壊形式の独立柱の降伏変形角 R_y は 1/150rad に固定した。また、終局時変形角 R_u は文献 4) を参考にした。文献 4) では、トラス・アーチ式を用いて、曲げ降伏後のせん断破壊により決まる変形角（ここでは R_{us} とする、(1)式）を示している。 R_p は終局限界状態でのヒンジ領域の回転角である。また、簡単な平面保持解析に基づいて曲げ圧壊により決まる変形角（ここでは R_{uf} とする、(2)式）も示されている。 ϕ_{uf} は柱断面の限界曲率、 b は柱幅である。本論文ではこの小さい方を R_u とした。なお、これらの式の第 2 項は独立柱の内法高さを階高で除したもので層の変形角に換算している。

$$R_{us} = R_y + R_p \quad (1)$$

$$R_{uf} = R_y + \phi_{uf} \cdot b \quad (2)$$

一方、限界時変形角 R_L であるが、文献 8) では上記の式

(2)の ϕ_{uf} の係数を変更することにより、軸力負担能力喪失時の変形角を評価できることを示している。そこで本研究では、式(2)において ϕ_{uf} の係数を変更して適用し、限界時変形角 R_L を求めた。

次に、対応する損傷度と耐震性能残存率であるが、文献2)に従い図-2(a)に示したように設定した。具体的には、C～Y間でI、Y～U間では二等分しII、IIIとし、U～L間でIV、L以降をVとしている。また、その部材の耐震性能残存率も文献2)を参考にしている。文献2)では図-2(a)の下図の階段状の線を提案しているが、本研究ではそれを滑らかな折れ線とした。具体的には、各損傷度の領域の中間点の値を文献2)の提案値とし、それを線形補完している。なお、弾性状態(0～C間)は耐震性能残存率を100%とし、損傷度Vでは0%としている。

3.3 セン断破壊形式の独立柱のモデル化と損傷度

図-2(b)にせん断破壊型の復元力特性と対応する損傷度および耐震性能残存率を示す。すなわち、ひび割れ点C、せん断耐力低下点Y(=U)、限界(軸力負担能力喪失)点Lを結ぶ3本線でモデル化をする。降伏変形角 R_y は1/150radに固定した。また、限界時変形角 R_L であるが、文献9)ではせん断破壊型の柱の軸力負担能力喪失点の変形角を提案している(式(3))。ここで、 R_s はせん断強度低下時から軸力保持能力喪失時までの部材角である。なお、 R_s は独立柱の内法高さを階高で除したもので層の変形角に換算している。

$$R_L = R_y + R_s \quad (3)$$

次に、対応する損傷度と耐震性能残存率であるが、これも曲げ破壊型同様に、文献2)に従い図-2(b)に示したように設定した。損傷度はC～Y間では3等分しI、II、IIIとし、U～L間でIV、L以降をVと定義している。耐震性能残存率はせん断破壊型の復元力特性においても、弾性状態(0～C間)では100%としている。

3.4 袖壁付き柱のモデル化と損傷度との対応

(1) モデル化

文献6)では袖壁付き柱の挙動を圧縮側の袖壁が有効な場合と圧縮側の袖壁が無効な場合に分けてモデル化することによりよく表現できることを報告している。そこで、本研究では図-3に示すように柱モデルと袖壁モデルに場合分けをして評価することを試みた。具体的には、袖壁モデルは全断面を対象にし、柱モデルは袖壁が圧壊した後の挙動を表すものとして、圧縮側の袖壁を無視したものである。

図-4に袖壁付き柱のモデル化の例を示す。図-4(a)は袖壁モデルが曲げ破壊型の場合、図-4(b)がせん断破壊型の

場合である。いずれの場合も、この例では、柱モデルは曲げ破壊型となっている。図はそれぞれのモデルを同時に図示したものであるが、実際の挙動は袖壁が圧壊するまでは袖壁モデルで表され、圧壊後は柱モデルで表される、すなわち両モデルの包絡線が実際の挙動になると考えている。

次にそれぞれのモデルの復元力特性であるが、柱モデルも袖壁モデルも、降伏変形角 R_y を1/250radに変更する以外は、3.2節で示した独立柱のモデルを用いる。なお、袖壁付き柱の場合は腰壁と垂れ壁の存在は無視するので、内法高さを階高で除したものによる層の変形角への補正も行わない。また、袖壁モデルは柱モデルとの交点を swR_L とした。

一方、式(2)については、コア断面を対象にした式なので、袖壁の場合は壁筋が単筋の場合は適用できない、あるいは、複筋であっても壁筋の拘束効果が少ない場合が多く、適用しても実物を過小評価してしまう問題がある。そこで、式(2)については、拘束効果は無視し、そのかわりに、全断面を考えた場合についても評価し、その大き

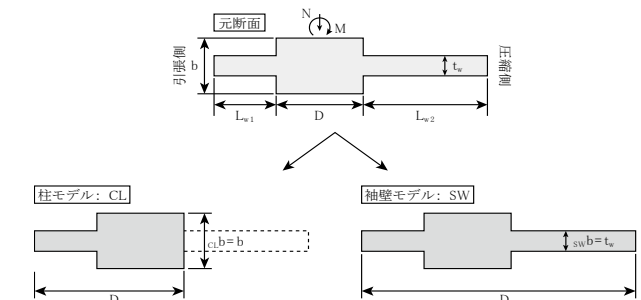


図-3 袖壁付き柱の断面の取り方

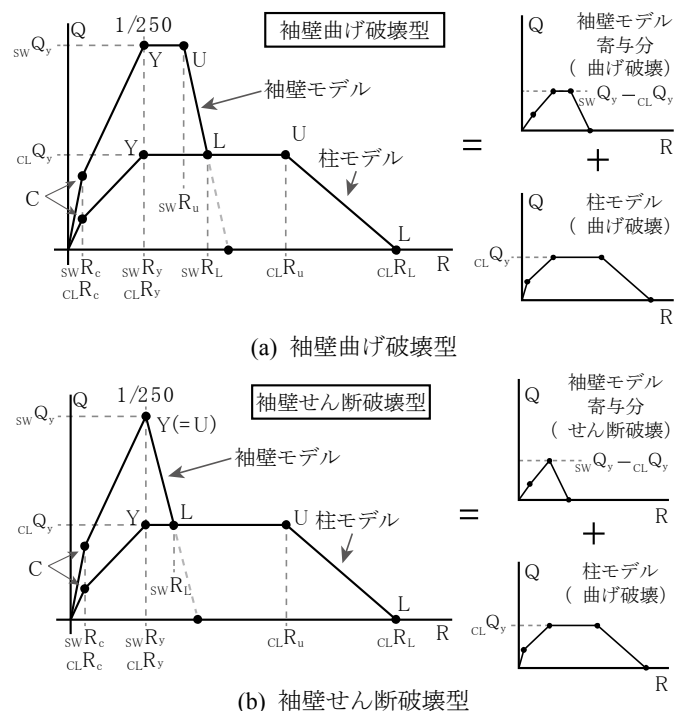


図-4 袖壁付き柱の復元力特性とその概念

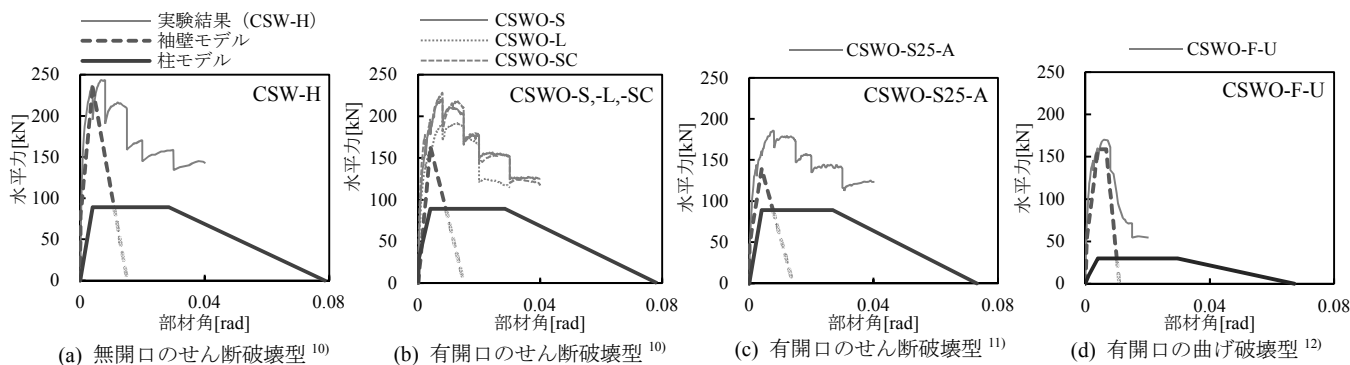


図-5 袖壁付き柱のモデルと実験結果との比較

い方を採用した。なお、それぞれのモデルの損傷度や耐震性能残存率は独立柱と同様とする。

(2) 地震応答解析での適用

袖壁付き柱の復元力特性を簡単に地震応答解析に用いるために本研究では全体を柱モデルと袖壁の寄与分に分離している。図-4の右側にその概念図を示した。分離方法は横軸の変形角はそのまま、最大強度は柱モデルではそのまま、袖壁寄与分は袖壁モデルと柱モデルの強度の差とした。これにより、地震応答解析では、それぞれのモデル別（柱モデルと袖壁の寄与分のモデル）に部材の損傷度を評価することができる。

(3) 実験結果との対応

モデル化の妥当性を検討するために、文献 10)11)12)の片側袖壁付き柱の実験結果と本節の方法で算定した復元力特性との比較を行った。図-5は細線が各試験体の実験から得た包絡線を示し、太破線は袖壁モデル、太実線は柱モデルの復元力特性モデルを示している。なお、これらの実験では軸力負担能力喪失まで加力を行っていない。したがって、限界変形角まで評価ができていないことに注意が必要である。

図-5(a)は無開口の試験体であるが、モデルと実験値はおおむね一致しているが、柱モデルがやや安全側に評価されている。これはモデルでは圧縮袖壁が全く考慮されていないことによる。

図-5(b)(c)はせん断破壊型の有開口試験体であるが、モデルはかなり安全側になっている。しかしながら、文献 10)でも報告しているように、袖壁付き柱に対する開口低減率の安全率が相当高くなっており、これが理由である。なお、図-1に示した通り本建物の場合有開口袖壁は比較的少なく、結果に大きな影響は及ぼさないと判断している。

図-5(d)も有開口の試験体であるが、これは曲げ破壊型である。したがって、開口低減率は影響がないので、実験とモデルはよく合っている。ただし、他の試験体と同様に柱モデルは安全側に評価されている。

4. 地震応答解析

桁行方向のみを対象とした各層を1質点とした多質点系モデルによる地震応答解析を行った。前述したように、部材は、独立柱、袖壁付き柱、および耐震壁の3つに分類したが、袖壁付き柱は柱モデルと袖壁モデルの寄与分にさらに分離される。復元力特性は個々の部材ごとに評価した。曲げ強度とせん断強度を評価しそれにより破壊形式を決定し、同じ破壊形式ごとに足し合わせることで集約した。このとき、終局点の変形角などの各種相間変形角は挙動の傾向をみることを目的として平均値としている。その結果、M 中学校の南校舎1階は、独立柱（せん断破壊型）、袖壁付き柱の袖壁寄与分（せん断破壊型）および袖壁付き柱の柱モデル（曲げ破壊型）の3つのばねに集約した。北校舎1階は、独立柱（せん断破壊

表-3 地震応答解析の1階入力パラメータの値

1F 入力データ	部材 (破壊形式)	初期剛性 [kN/cm]	ひび割れ強度 Q_c [kN]	降伏強度 Q_y [kN]	降伏変形角 R_y [rad]	終局変形角 R_u [rad]	限界変形角 R_L [rad]
南校舎	独立柱 (せん断)	11159	2700	8101	0.0067	0.0067	0.038
	袖壁モデル寄与分 (せん断)	2244	354	1064	0.004	0.004	0.012
	柱モデル (曲げ)	3959	575	1726	0.004	0.019	0.064
北校舎	独立柱 (せん断)	8162	1847	5541	0.0067	0.0067	0.058
	袖壁モデル寄与分 (せん断)	3252	569	1708	0.004	0.004	0.021
	袖壁モデル寄与分 (曲げ)	2431	254	765	0.004	0.011	0.022
	柱モデル (曲げ)	10857	1565	4697	0.004	0.019	0.101

型)、袖壁付き柱の袖壁寄与分(曲げ破壊型、せん断破壊型)および袖壁付き柱の柱モデル(曲げ破壊型)の4つのばねに集約した。これらのばねの復元力特性を1階のみ表-3に示す。また、繰り返し履歴特性は武田モデル¹³⁾としている。武田モデルの除荷時剛性低下率は0.4とする。

入力地震動はM中学校の位置する本宮市に最も近いK-net 郡山で記録された東北地方太平洋沖地震の地動加速度(EW1069.3gal, NS745.5gal)を用い、M中学校の桁行方向が東西方向とほぼ一致するためそのまま地震動を入力する。また、減衰定数は0.05とし、減衰は瞬間剛性比例型とする。

損傷度と耐震性能残存率は層の最大応答により前述した集約したばねごとに評価した。建物としての耐震性能残存率はこれらを設定したばねの強度の重みづけ平均により求めた。この際、北校舎で袖壁考慮と袖壁無視の両方の実測値があることに対応するため、解析でも両方を算出した。具体的には、袖壁考慮というのは、袖壁付き柱の柱モデルと袖壁寄与分の耐震性能残存率の小さい方を両方のモデルに適用し、建物全体の耐震性能残存率を算出したものである。袖壁無視というのは袖壁付き柱の袖壁寄与分を全く無視し、柱モデルの耐震性能残存率と強度を用いて建物全体の耐震性能残存率を算出したものである。

5. 解析結果と考察

5.1 解析パラメータと復元力特性

図-6(a)(b)に南校舎と北校舎の各層の復元力特性を示す。北校舎は南校舎に比べ、変形角 $1/50(=0.02)\text{rad}$ 以降の傾きが少し緩くなっている。これは袖壁が多く、独立柱に加え、柱モデルによるせん断耐力が残っているためである。一方で南校舎では変形角 $1/100(=0.01)\text{rad}$ で傾きが少し緩くなっているが袖壁付き柱が少ないため、 $1/150\text{rad}$ 以降はほぼ同じ傾きで耐力が低下している。

地震応答解析は地動加速度の倍率を0.5から1.5まで0.1刻みで変えて行っており、図-6には倍率0.5, 1.0, 1.5の時の最大応答がプロットされている。両校舎の最大応答を比べると、北校舎では1倍で $1/150\text{rad}$ (柱部材は降伏していない) 以下の最大応答であるが、南校舎の1, 2階では1倍で $1/150\text{rad}$ を超えすべての部材が降伏し、変形が進んでいることがわかる。

5.2 解析結果と地震被害の考察

図-7(a-1)(a-2)(a-3)に南校舎の各階の地震動倍率と耐震性能残存率の関係を示す。同様に、図-7(b-1)(b-2)(b-3)に北校舎の関係を示す。袖壁考慮と袖壁無視の両方実測されている北校舎の1階はその両方の実測値を示した。

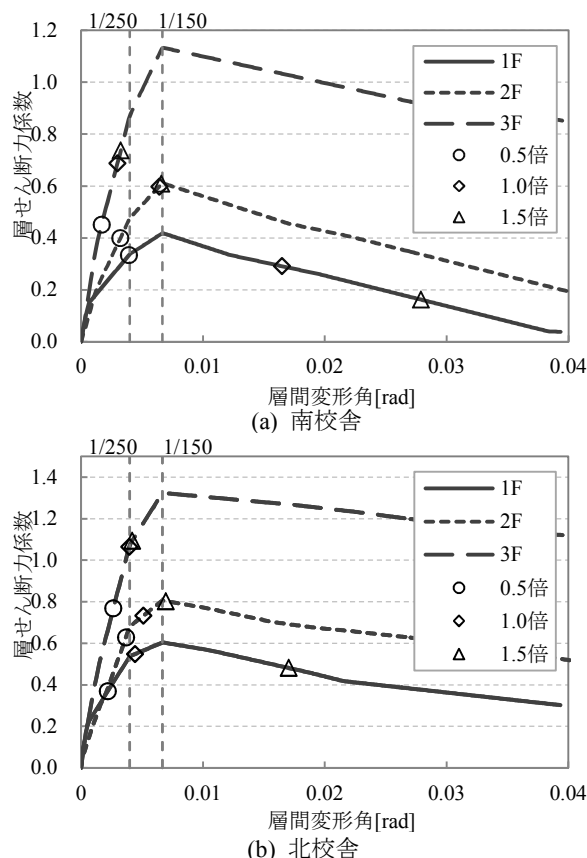


図-6 M 中学校の復元力特性と各倍率の最大応答

一方、南校舎の1階は袖壁無視の場合のみが測定され、さらに、北校舎の2階3階と南校舎の2階3階は袖壁を考慮した場合のみ測定されていたので、そのデータのみ示している。一方、解析値は袖壁を考慮した場合と無視した場合の両方を示している。したがって、北校舎1階以外はそのうち的一方だけが実測値との比較対象となる。

図-7(a-1)をみると、南校舎では解析値は袖壁無視の場合が対応するが、倍率1.0では解析値は実測値よりやや大きめであった。これは、南校舎は壁抜け柱の被害が大きく、文献14)では大きな付加軸力が作用したことにより南校舎の被害を説明できている。すなわち、本解析では軸力は定軸力のみを考慮しており、これが解析で残存率を大きく評価した原因の1つと考えられる。

一方、図-7(b-1)をみると、北校舎の場合、袖壁の損傷度も考慮した場合と柱のみの損傷度の場合とで耐震性能残存率に差が見られ、実際の被害の傾向をおおむね評価できていると考えられる。すなわち、地震波の倍率1で、袖壁考慮の計算値は実測値に近く、袖壁無視の計算値は袖壁無視の実測値に近いことがわかる。

一方、図-7(a-2)(a-3)(b-2)(b-3)を見ると両校舎共通して2, 3階は耐震性能残存率が低めに評価されている。2階以上も含めて全体の被害を解析で再現することは困難であった。

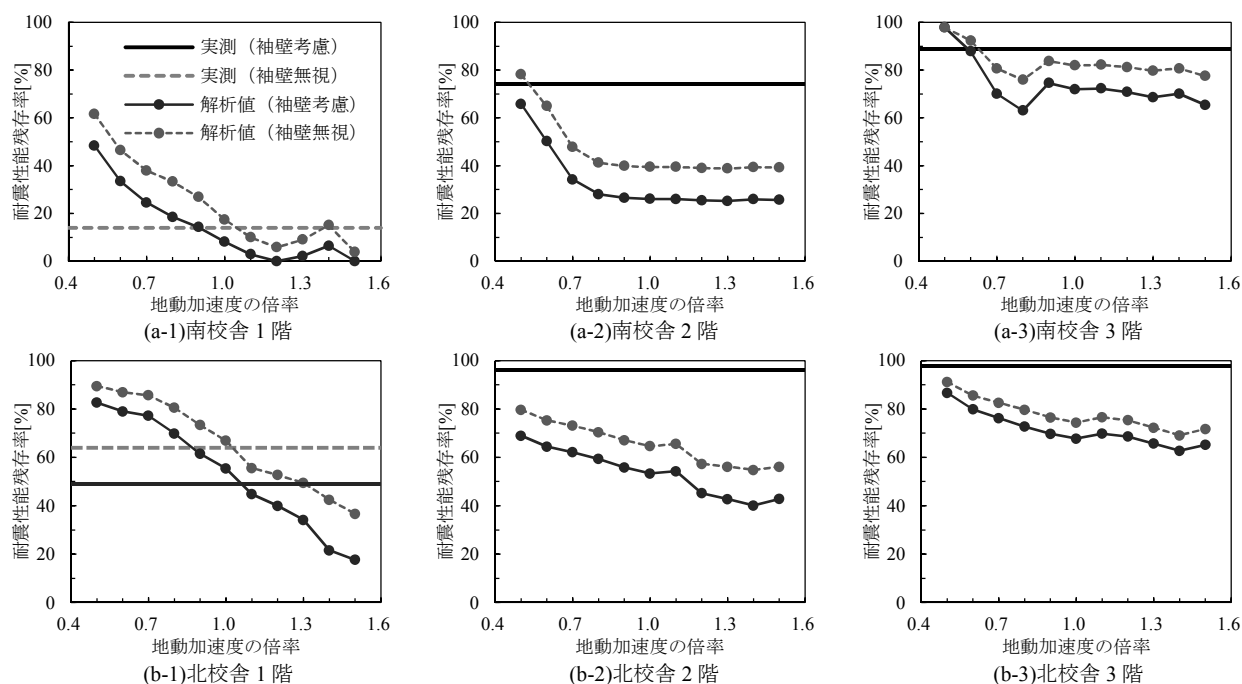


図-7 地震動の倍率と耐震性能残存率の関係

6. まとめ

(1)袖壁付き柱の復元力特性を袖壁モデルと柱モデルに分けてモデル化する方法を提案した。この方法で袖壁部分が圧壊するまでの強度が高い領域の後に変形能力の高い柱部分の挙動が表れるという特徴を持つ袖壁付き柱挙動を解析上で考慮することができる。

(2)この復元力モデルを使って地震応答解析をした結果、袖壁の多い北校舎では、袖壁を考慮する場合としない場合の差が表現され、実際の被害をある程度再現できた。

参考文献

- 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，6.2 鉄筋コンクリート造建物の被害 6.2.3 代表的な被害事例 6.2.3.8M 中学校，pp.418-419，2011.7
- 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，pp.26-34，2002.8
- 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説，pp.191，pp.221，2002.1
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，pp.114-126，2001.9
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の保有水平耐力計算と地震被害，2011年度日本建築学会大会(関東)構造部門 (RC 構造) PD 資料，pp.71，2011.7
- 加藤大介，孫浩陽：袖壁つき RC 造柱の最大耐力以降の挙動の評価法，日本建築学会構造系論文集第 566 号，pp.97-103，2003.4
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会，pp.66-67，2010.2
- 佐々木潤一郎，加藤大介：RC 造柱のひび割れ幅，圧壊領域長さおよび軸力負担性能の評価法，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.253-258，2002.6
- 加藤大介，細貝翔太，広瀬裕三郎，清水秀則：東日本大震災で大破した RC 造学校建物の壁抜け柱に関する検討(地震時作用軸力と軸力負担能力の推定)，日本建築学会構造系論文集第 681 号，pp.1747-1753，2012.11
- 坂上正裕，樋熊利亘，加藤大介，田村良一：RC 造有開口袖壁付き柱の曲げせん断加力実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.361-366，2013.6
- 樋熊利亘，坂上正裕，加藤大介，田村良一：せん断破壊型 RC 造有開口袖壁付き柱の曲げせん断加力実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.277-282，2014.6
- 渡邊哲央，中村孝也，田村良一，加藤大介：RC 造有開口袖壁付柱の曲げ破壊実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.283-288，2014.6
- 梅村魁：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続 (中層編)，技報出版，pp.291-292，1982.12
- 加藤大介，細貝翔太，渡邊哲央：東日本大震災で大破した RC 造学校建物の壁抜け柱に関する検討 (隣接する 2 棟の建物の被害の比較)，日本建築学会構造系論文集第 702 号，pp.1157-1165，2014.8