

# 論文 壁抜け柱を有する隣接する2棟の RC 造学校建物の東日本大震災における被害の比較

細貝 翔太\*1・渡邊 哲央\*2・加藤 大介\*3

**要旨:** 東日本大震災では、福島県本宮市の M 中学校の隣接する 2 棟の RC 造校舎が大きな被害を受けた。その構造的な特徴は、1 階のみに壁が存在しない壁抜け柱が存在することであるが、壁抜け柱の被害は南校舎で顕著であった。既往の研究では、南校舎の壁抜け柱の被害の原因は、地震時に柱に作用する軸力とその柱の軸力負担能力を超えていたことであると推測した。そこで、本報告では、同様に、地震時に柱に作用する軸力とその柱の軸力負担能力を比較することにより、両校舎の壁抜け柱の被害の差を検討した。その結果、必ずしも明快ではなかったが、北校舎に作用する軸力は南校舎よりも相対的に低い傾向が確認できた。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 柱, 軸力負担能力, 地震被害, 東日本大震災

## 1. はじめに

2011 年東日本大震災では、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）がそれぞれ大きな被害を受けている<sup>1)</sup>。その構造的な特徴は、南校舎には 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、北校舎には壁抜け柱の他に袖壁が多数存在することである。被害は南校舎が 1 階の壁抜け柱に大きな軸変形を伴う損傷を受けた大破であった。一方、北校舎は袖壁を含む多くの柱がせん断破壊し大破と判定されたが、壁抜け柱には大きな損傷が見られなかった。筆者らは文献2)において南校舎の壁抜け柱の被害の原因を検討し、地震時に柱に作用する軸力とその柱の軸力負担能力を超えていたことが原因であると推測した。本報告では、文献2)と同様の手法により、北校舎の壁抜け柱の軸力負担能力と地震時作用軸力を推定し、南校舎と北校舎の壁抜け柱の被害の差を検討した。

より入手できた。その結果を表-2 に示す。

表-1 建物と被害の概要 (南校舎, 北校舎)

階	床面積 (㎡)	重量 (kN)	主筋	帯筋	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )			耐震性能残存率(桁行)	
					平均値	推定値	診断使用値	R (%)	被害
南1F	530	7993	SR235, SD295	SR235 (端部 @150, 中央 @250)	23.9	22.7	18.0	14	倒壊
南2F	530	7701			19.2	17.4	17.0	74	中破
南3F	530	8987			24.8	23.6	18.0	89	小破

階	床面積 (㎡)	重量 (kN)	主筋	帯筋	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )			耐震性能残存率(桁行)	
					平均値	推定値	診断使用値	R (%)	被害
北1F	593	8159	SR235	SR235 (@250)	16.7	15.2	15.0	49 (79)	大破 (中破)
北2F	471	6065			16.6	14.5	14.0	94	小破
北3F	471	6407			17.4	14.5	15.0	98	軽微

( ) は袖壁を無視した場合の値

## 2. 建物と被害の概要

### 2.1 概要

本宮市 (震度 5 強) の M 中学校は 2 棟の RC 造校舎 (南校舎・北校舎, いずれも昭和 41 年建設) と鉄骨造の体育館, 作業場よりなる。2 棟の校舎はいずれもほぼ整形であり, 南校舎が 1 教室が 1 スパン (A 型校舎), 北校舎が 1 教室が 2 スパン (B 型校舎) という違いがある。周辺の地盤条件は良好ではなく, 南校舎の周辺で大きな変状が認められ, 1 階床レベルでも不陸が観察されている。杭の損傷も想定されている。被害は, 南校舎が一部激しい軸変形を伴う大破 (ほぼ倒壊), 北校舎は損傷度 V の柱を含む大破程度であった。両校舎の建物と被害の概要を表-1 に示す。基礎は杭基礎である。また両校舎は耐震診断が行われており, 本宮市教育委員会

表-2 耐震診断結果 (南校舎, 北校舎)

方向	階	E <sub>o</sub>	F	S <sub>D</sub>	T	I <sub>s</sub>	C <sub>TU</sub> S <sub>D</sub>
南校舎 桁行 X	3	0.55	1.0	0.93	0.998	0.51	0.51
	2	0.40	1.0	0.93	0.998	0.37	0.37
	1	0.42	1.0	0.93	0.998	0.39	0.39
南校舎 梁間 Y	3	1.75	1.0	0.93	0.998	1.63	1.63
	2	1.16	1.0	0.93	0.998	1.08	1.08
	1	0.89	1.0	0.93	0.998	0.82 0.36*	0.82

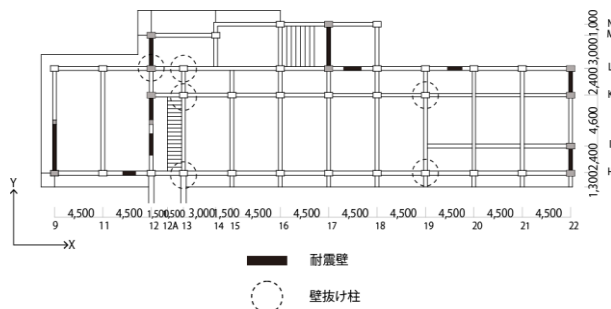
方向	階	E <sub>o</sub>	F	S <sub>D</sub>	T	I <sub>s</sub>	C <sub>TU</sub> S <sub>D</sub>
北校舎 桁行 X	3	0.70	1.0	0.93	0.990	0.65	0.65
	2	0.34	0.8	0.93	0.990	0.31	0.39
	1	0.35	0.8	0.93	0.990	0.33	0.41
北校舎 梁間 Y	3	1.19	1.0	0.93	0.990	1.11	1.11
	2	0.77	1.0	0.93	0.990	0.71	0.72
	1	0.65	1.0	0.93	0.990	0.60 0.18*	0.60

\*: 壁抜け柱による低減後

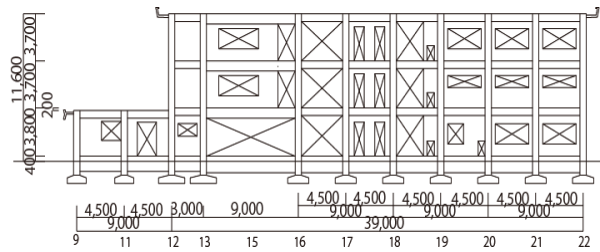
\*1 新潟大学自然科学研究科 大学院生 (正会員)  
 \*2 新潟大学自然科学研究科 大学院生  
 \*3 新潟大学工学部建設学科 教授・工博 (正会員)

## 2.2 北校舎の建物と被害

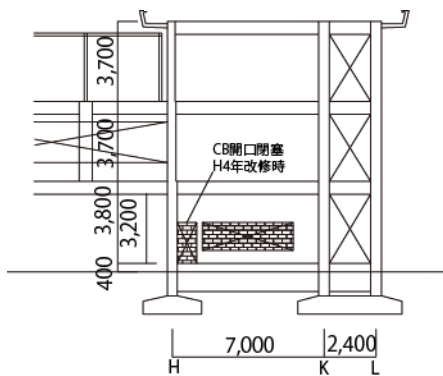
図-1(a)に北校舎の平面図を示す。図中には壁抜け柱を丸で囲んである。具体的には、桁行方向のL通りの12, 13軸の柱、梁間方向の13通りのH, K軸の柱、および、梁間方向の19通りのH, K軸の柱である。これらの軸組図を図-1(b)~(d)に示す。19通りのH, K軸の柱は上階が縦開口付きの壁であるが、典型的な壁抜けの独立柱になっている。一方、L通りの12, 13軸の柱および13通



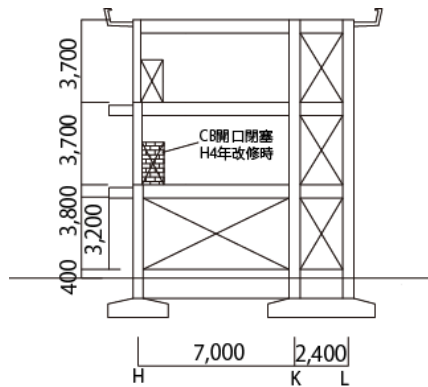
(a) 1階平面図



(b) L通り軸組図



(c) 13通り軸組図



(d) 19通り軸組図

図-1 平面図と軸組図の例

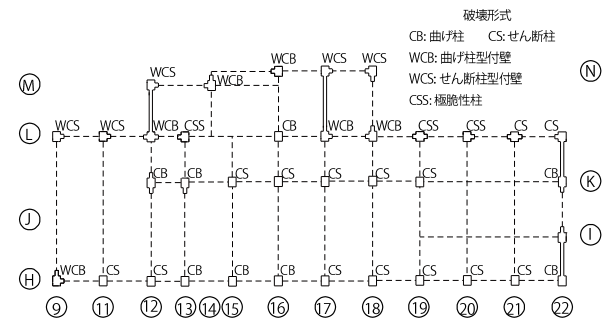
柱	1階H13	1階H19	壁	2,3階耐震壁
断面	600×450	600×450	断面	120
主筋(X)	2-22φ 2-19φ	5-22φ	縦筋	9φ-200 (シングル)
主筋(Y)	2-22φ 2-19φ	4-22φ	横筋	9φ-200 (シングル)
フープ	9φ-250@	9φ-250@		

図-2 柱および壁の断面と配筋の代表例

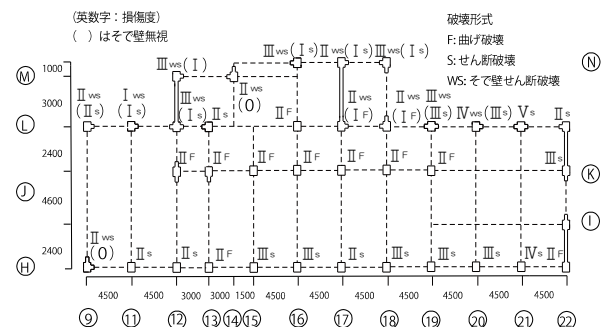
りのK軸の柱には袖壁が取りついている。さらに、13通り1階の開口はブロック壁により閉塞されているが、ブロック壁は柱の軸力負担能力にはほとんど寄与できないため、ここでは壁抜け柱として扱っている。基本的な柱型は600×450mmとやや扁平である。図-2に壁抜け柱や主要な壁の配筋を示しておく。

図-3(a)に北校舎1階桁行方向の耐震診断による部材破壊モードを示す。1階は多くが独立柱であるが、袖壁付きの柱も多数存在する。また、その破壊モードはせん断破壊が多いが、一部曲げ柱も存在する。

被害は2,3階で少なく、1階で大きい。図-3(b)は被災度判定調査により得られた各部材の損傷度であるが、ほとんどの柱にIIあるいはIIIのせん断ひび割れが見られている。本建物は袖壁のついた柱が多く、その袖壁部分



(a) 耐震診断における破壊モード



(b) 損傷度一覧

図-3 1階桁行方向の診断における破壊モードと損傷一覧

の損傷が多い。そこで、図中には袖壁の損傷を無視した場合の損傷度と袖壁も考慮した損傷度を示したが、その損傷度はやや異なる。従って、表-1 に示したように1階の耐震性能残存率は袖壁を無視した場合に79%であるのに対し、袖壁を考慮すると49%となった。

写真-1(a)は壁抜け柱 H19 (H 通りの 19 軸の柱) だが、そこまで損傷が大きくないことがわかる。写真-1(b)は袖壁が取りついた L20 柱 (L 通りの 20 軸の柱) のせん断破壊であるが、袖壁部分の損傷が大きく、柱本体の被害は少ない。北校舎にはこのような袖壁のついた柱が多く存在しており、前述したように、これらの損傷の扱い方により被災度が異なってくる。



(a) 壁抜け柱(H19) (b) 袖壁付き柱(L20)  
写真-1 1階の被害

### 3. 地震応答解析

本節では壁抜け柱の応答変形および上層の耐震壁に作用したせん断力の目安を得るために行った地震応答解析の結果を示す。

#### 3.1 解析手法

文献 2) と同じ解析手法を用いた。すなわち、建物のモデル化はねじれを考慮できるモデルとした。つまり、桁行・梁間の各方向において代表的なフレームごとにグルーピングを行い、これらをそれぞれの座標位置での3層分のせん断ばねに置換する。床は剛床とし、重心位置に集中質量を与えた。それぞれのばねの復元力特性は、トリリニア型とし、各部材の強度は耐震診断結果を用い、降伏点は菅野の剛性低下率により算出し、降伏後剛性低下率は 0.001 とした。履歴特性は武田モデルとしている。表 3 にモデル化された建物の性能一覧を、図-4(a)(b)に各方向各層の復元力特性を示す。なお、本モデルでは極脆性に対しても強度劣化のないモデル化を行っており、降伏後の剛性の影響も併せて、強度は表-2の  $C_{Tu}S_D$  値より大きくなる傾向がある。

地震応答解析に使用する地震動は、対象建物から南に

約 12km の位置に設置された K-net 郡山観測点の東北地方太平洋沖地震の本震のデータを用いる。

表-3 モデル化された建物の性能一覧

	桁行(X)方向			梁間(Y)方向		
	1F	2F	3F	1F	2F	3F
1次固有周期(sec)		0.23			0.21	
降伏強度の和(kN)	12811	8613	7164	13552	13000	12248
(せん断力係数)	0.62	0.69	1.12	0.66	1.04	1.91
静解析1/150rad時(kN)	9673	6372	3732	10876	6669	3141
(せん断力係数)	0.46	0.51	0.58	0.53	0.53	0.49

#### 3.2 解析結果

地震波は桁行方向に EW 波を、梁間方向に NS 波を入力した。また、地震波の倍率を 0.5, 1.0 および 1.5 の 3 通りに変化させて解析を行っている。

北校舎では、X 方向は 1.0 倍では、応答部材角は 3 階が最も大きい値となった。最大層間変形角は 1 階が 0.005rad, 2 階が 0.008rad, 3 階が 0.01rad となり、すべての階で降伏付近になった。一方、Y 方向は 1.0 倍では、応答部材角は 1 階が最も大きくなった。最大層間変形角は 1 階が 0.007rad, 2 階が 0.004rad, 3 階が 0.002rad となり、1 階は降伏近くに達しているが、2,3 階は達していない。これらの応答は主に袖壁に大きな損傷を生じている被害と対応していると判断できる。

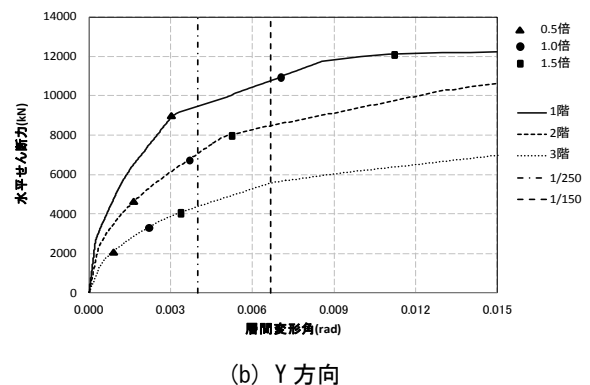
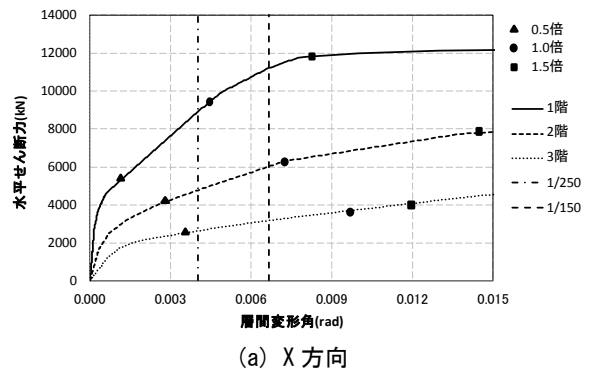


図-4 各方向各層の静力解析結果と地震応答点

### 4. 壁抜け柱の被害の検討

#### 4.1 地震時に作用する軸力の推定

日本建築防災協会の耐震診断基準<sup>3)</sup>では、壁抜け柱の地震時の軸力を推定し、基準値を超えた場合に構造耐震指標  $I_s$  指標を低減させる方法を紹介している。本論文で

は、耐震診断基準の示している方法により軸力を推定し、その柱の被害、さらには、耐震診断基準の提案の妥当性を検討する。対象とする壁抜け柱は、図-1(c)で示した13通りのH軸の柱(以降13H柱と表記)と袖壁の取りつく13通りのK軸の柱(以降13K柱と表記)および図-1(d)で示した19通りのH軸の柱(以降19H柱と表記)の3本である。

表-4に壁抜け柱の作用軸力の評価法を示した。(1)~(4)が診断基準で紹介されている一般的な手法で、壁抜けフレーム(すなわち、梁間方向のフレーム)を取り出し、1階の柱の中間で切断し、2階3階の壁をとりだしたモデルに、表-4に示した各種条件を変化させて地震時軸力を評価している。なお、廊下側の梁は無視している。(5)はスラブで周囲にせん断力が伝達されない場合、すなわち、一階の柱が上下で降伏する場合の軸力、(6)は長期軸力である。(7)~(9)は地震応答解析から推定した作用軸力であるが、まず、当該フレームの梁間方向の2階の応答変位を、その2階の壁で設定した復元力モデルに当てはめて、応答せん断力を推定した。同様に当該フレームの梁間方向3階の応答変位を求め、それにより地震時軸力を推定している。(10)は壁抜け柱の上階の壁の縦開口の上下の梁が破壊した場合の軸力である(19フレームのみ該当)。(1')~(5')と(7')~(9')は北校舎13K柱の(1)~(5)および(7)~(9)のとき軸力を袖壁に分担させた場合の軸力である。その分担法は耐震診断基準で提案されている方法を採用し、壁板が負担できる平均軸応力度を破壊形式で設定している。すなわち、壁板が曲げ破壊型の場合0.3Fc、せん断破壊型の場合0.1Fcとした。

表-4 壁抜け柱の軸力の推定法と地震応答解析による変形(図-5における線の説明)

(1)~(9):壁抜け柱に作用した軸力の推定値
(1)2階の壁がせん断崩壊した場合(外力は等分布)
(2)2階の壁がせん断崩壊した場合(外力は逆三角形分布)
(3)2,3階の壁がせん断崩壊した場合
(4)引張側柱が引張降伏した場合
(5)フレームだけで解いた場合、すなわち、1階柱上下の曲げ降伏(荷重分布は逆三角形分布)
(6)長期軸力の場合
(7,8,9)地震応答解析結果からの推定値(地震波の倍率は0.5,1.0,1.5の3通り)
(10)開口上下の梁が崩壊した場合(19フレームのみ該当)
(1')~(5'),(7')~(9'):上記(1)~(5),(7)~(9)の軸力を北校舎13K柱の袖壁に分担させたもの
(a)~(c):1階X方向の地震応答解析による最大応答層間変形角
(a)地震波の倍率0.5倍,(b)倍率1.0倍,(c)倍率1.5倍

#### 4.2 軸力負担能力喪失時の部材角の推定

図-5(a)の右下がりの曲線は、13H柱を対象にして、文献2)で提案した方法を用いて、作用軸力とその軸力を負

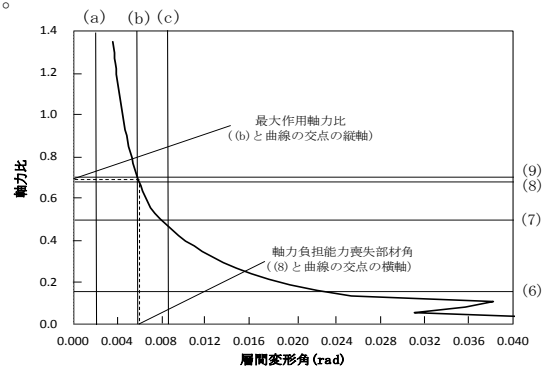
担できなくなる部材角(以降、軸力負担能力喪失部材角)との関係を示したものである。なお、作用する付加軸力は梁間方向が壁抜けフレームのために生じる付加軸力であるが、当該柱の場合は桁行方向に大きく変形しているので、柱の軸力負担能力喪失時の部材角は桁行方向を対象にしている。また、縦軸は軸力を $bD\sigma_B$ ( $\sigma_B$ は診断採用値で設計基準強度である)で除した軸力比で表現している。さらに、横軸の軸力負担能力喪失部材角は、柱の内法長さの部材角で評価されるので、図ではこれを層の部材角に換算している。具体的には、以下の式による。

$$R_{層} = (h_o/H) \times R_{柱} = (3200/3800) \times R_{柱} \quad (1)$$

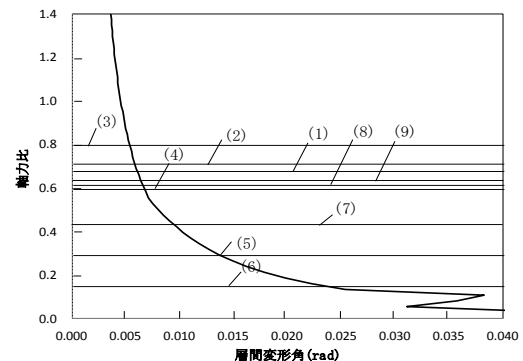
ここで、 $R_{柱}$ は文献2)の方法で評価した軸力負担能力喪失時部材角、 $R_{層}$ はそのときの層間部材角、 $h_o$ は柱内法長さ、 $H$ は階高である。

同図には地震応答解析により推定した軸力(7)~(9)を横線で、また、(a)~(c)の1階の桁行方向の最大応答層間変形角を縦線で示した。比較のために長期軸力(6)も横線で示してある。

図-5(b)は、図-5(a)と同じ図であるが、地震応答解析による推定軸力以外に、耐震診断で示されている方法により評価した作用軸力(1)~(6)を横線で示している。



(a) 地震応答解析による作用軸力と応答層間変形角の関係



(b) 耐震診断による推定作用軸力との関係

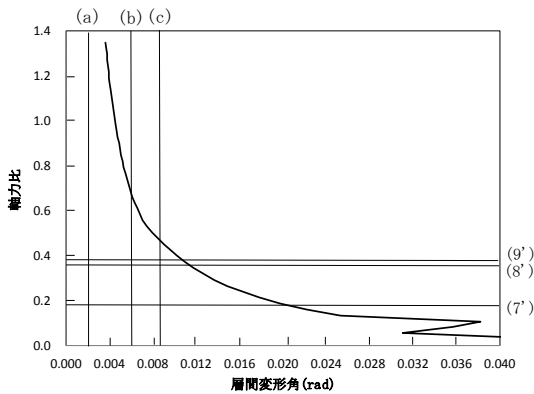
図-5 壁抜け柱13Hの軸力負担能力と推定された地震時の各種作用軸力と層間変形角の関係

#### 4.3 考察

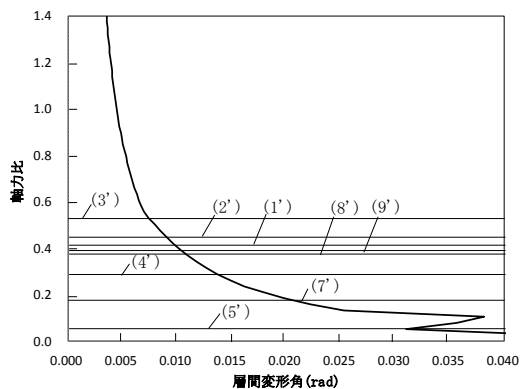
図-5(a)より、13H柱は地震波の倍率1.0((b)と(8)の組

み合わせ)では、地震応答部材角 (b)の線の横軸が軸力負担能力喪失部材角 (8)の線と曲線の交点の横軸)に達していない。すなわち、当該柱が被害を受けなかったことが説明できることがわかる。同様に、地震波の倍率 0.5 (a)と(7)の組み合わせ)でも、地震応答部材角が軸力負担能力喪失部材角を超えていないが、地震波の倍率 1.5 (c)と(9)の組み合わせ)では、地震応答部材角が軸力負担能力喪失部材角を超えてしまうので、被害を説明できない。

一方、図-5(b)をみると、2階3階の壁をせん断破壊させる軸力(3)が最も大きく、診断基準に従えば、軸力(4)の引張側柱が引張降伏した場合で壁抜け軸力を評価してよいことになる。いずれにせよ、これらは耐震診断で示されている基準値の縦軸 0.4 を相当上回っており、耐震診断基準では危険な高軸力柱であると判断されることがわかる。一方、地震応答解析により推定された作用軸力は少し幅があるが、診断基準による評価値と同じ程度であった。すなわち、13H 柱の場合は付加軸力は耐震診断基準で評価される程度の軸力が作用したが、柱の変形量が小さく、その軸力では軸崩壊するまでに至らなかったと解釈できる。



(a) 地震応答解析による作用軸力と応答層間変形角の関係



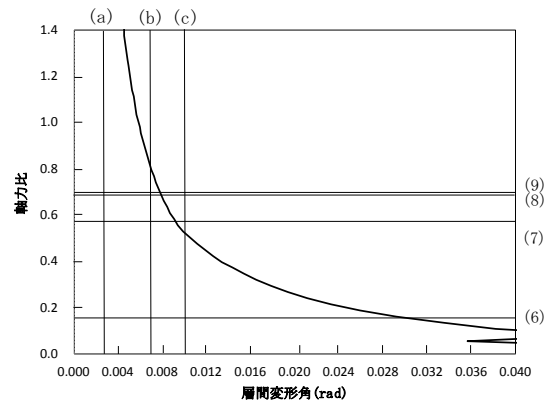
(b) 耐震診断による推定作用軸力との関係

図-6 袖壁を考慮した壁抜け柱 13K の軸力負担能力と推定された地震時の各種作用軸力と層間変形角の関係

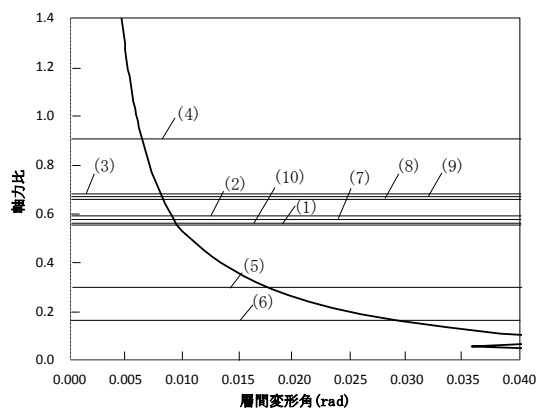
図-6(a) (b)は、図-5(a) (b)と同じ関係を、面内に袖壁がとりついている 13K 柱に適用したものである。ただし、袖壁を考慮しない場合は 13H と同じになるので、袖壁に軸力を負担させたケースのみを示す。負担させた軸力は、破壊形式は曲げ破壊形式なので、 $0.3 \times \sigma_B \times A = 0.3 \times 14(\text{N/mm}^2) \times 164500(\text{mm}^2) = 691(\text{kN})(2)$  とした。ここで、A は袖壁の断面積である。

図-6(a)より、袖壁による軸力負担を考慮した壁抜け柱 13K は地震波の倍率 0.5~1.5 の全てのケースで、地震応答部材角が軸力負担能力喪失部材角より十分小さく、損傷がなかったことを説明できることがわかる。

図-6(b)をみると、2階3階の壁をせん断破壊させる軸力(3')が最も大きく、診断基準に従えば、軸力(4')の引張側柱が引張降伏した場合で壁抜け軸力を評価してよいことになる。これは軸力比 0.3 程度であり、高軸力とは評価されない。



(a) 地震応答解析による作用軸力と応答層間変形角の関係



(b) 耐震診断による推定作用軸力との関係

図-7 壁抜け柱 19H の軸力負担能力と推定された地震時の各種作用軸力と層間変形角の関係

図-7(a) (b)は、図-5(a) (b)と同じ関係を、上部の壁に縦開口を有する 19H 柱に適用したものである。図-7(a)をみると、13H 柱を対象とした図-5(a)と概ね同様

の傾向を示したが、13Hより作用軸力が少なく評価されている。

ところで、19H柱の上の壁には縦開口があるので、その開口の上下の梁が破壊した場合の軸力を検討しておく。図-7(b)にはその軸力レベルを(10)として示しているが、(1)(2)で示した壁がせん断破壊する場合(この場合の壁のせん断強度は面積による低減が適用されている)とほぼ同程度で、その影響は大きくはなかった。

## 5. 南校舎との比較

本節では、本報告で対象とした北校舎の柱と文献2)で検討した大きく損傷を受けた南校舎の2A柱との比較を行う。北校舎で対象としたのは袖壁の無い13H柱と19H柱とした。比較するにあたって軸力負担指標という指標を設定する。軸力負担指標とは、地震応答時の柱の最大応答部材角時の軸力負担能力に対する作用軸力の比である。すなわち、1以上だとその柱は軸負担能力を喪失していることを意味する指標である。図-8には、軸力負担指標を縦軸に、横軸に地震波の倍率を取った図を、3つの柱を比較しながら示す。

南校舎2A柱と北校舎13H柱を比較すると、地震波倍率1.0倍で、南校舎壁抜け柱は、1.0を超えていて軸負担能力を喪失していることがわかる。北校舎壁抜け柱は、ぎりぎりを超えておらず、軸負担能力を喪失していないことが分かる。また、軸力負担指標の値が、全体的に北校舎より南校舎のほうが大きいことが分かる。一方、北校舎19H柱は南校舎2A柱と同程度の挙動となった。すなわち、地震時に作用した軸力の軸力負担能力喪失時の軸力に対する比は、明快ではなかったが、北校舎の方が小さい傾向にあり、地震被害を説明できる可能性が示された。

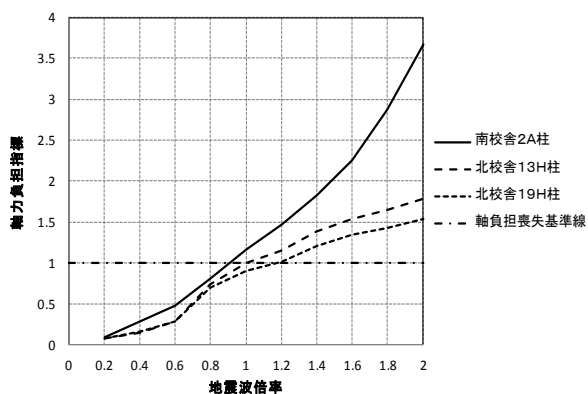


図-8 「地震動の大きさ」と「地震時に作用した軸力の軸力負担能力喪失時の軸力に対する比」の関係

この主な理由は、4.3 考察で述べたように、北校舎の柱の場合は付加軸力は耐震診断基準で評価される程度

の軸力が作用したが、柱の変形量が小さく、その軸力では軸崩壊するまでに至らなかったためと考えられる。すなわち、北校舎の桁行方向の応答変形が南校舎より小さめであったことが理由と解釈できる。

## 6. まとめ

- (1) 北校舎の壁抜け柱は大きな損傷を受けていなかったが、地震波の倍率を1.0倍とした地震応答解析の2,3階の応答変位から推定した柱への作用軸力と、既に提案している柱の軸力負担能力喪失時の部材角計算値、より説明できた。すなわち、壁抜け柱の地震応答層間変形角が、作用した推定軸力から評価される軸力負担能力喪失点より小さかった。
- (2) 北校舎の柱の挙動を壁抜け柱が大きな損傷を受けた南校舎と地震動の大きさを変化させてパラメトリックに比較した結果、地震時に作用した軸力の軸力負担能力喪失時の軸力に対する比は、明快ではなかったが、北校舎の方が小さい傾向にあり、地震被害を説明できる可能性が示された。この主な理由は、北校舎の桁行方向の応答変形が南校舎より小さめであったことが理由と解釈できる。
- (3) 本検討では、建物の終局強度は耐震診断の結果を用いている。北校舎の場合、袖壁付き柱が多数存在しているが、この耐震診断では袖壁に存在する小開口のために耐力に寄与していないケースもある。そのため耐震診断ではその強度を過小評価している可能性もあり、それらを考慮すれば南校舎との関係がより明快になる可能性もあり、今後の検討課題である。

## 謝辞

調査および耐震診断結果を参考にすにあたり、本宮市教育委員会に大変お世話になりました。

## 参考文献

- 1) 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年7月
- 2) 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77巻、第681号、2012年11月、pp.1747-1753
- 3) 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・同解節、2001.10