

報告 中越地震と中越沖地震の双方で被害を受けた RC 学校建築物の耐震性能

長橋 鉄雄^{*1}・小久保 拓哉^{*2}・中村 友紀子^{*3}・加藤 大介^{*4}

要旨：本建物は中越地震及び中越沖地震の双方の地震により被災している。その被災度は中越地震で 1, 2 階が小破, 中越沖地震では 1, 2 階が中破であった。本報告では建物の性能の紹介と両地震による建物の被害の報告を主とし, その元となるデータとして両地震の性質を示す。両地震の性質をより詳細に説明するために, 地震応答解析の結果も合わせて報告する。また, 実被害と耐震診断結果の相違から, 各パラメータを操作し柱の崩壊形の検討も行なう。

キーワード：中越地震, 中越沖地震, 被害報告, RC 建築物, 耐震性能, 耐震診断, 地震応答解析

1. 地震動と被害を受けた建物の耐震性能

1.1 地震動の概要

新潟県中越地震は 2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分に新潟県中越地方の小千谷市の深さ 13km を震源として発生した。地震規模は M6.8 で、最大震度は新潟県川口町で震度 7 を記録した。新潟県中越沖地震は 2007 年 7 月 16 日 10 時 13 分に新潟県上中越沖の深さ 17km を震源として発生した。地震規模は M6.8 で、最大震度は新潟県長岡市小国町, 柏崎市, 刈羽村, 長野県飯綱町で震度 6 強を記録した。

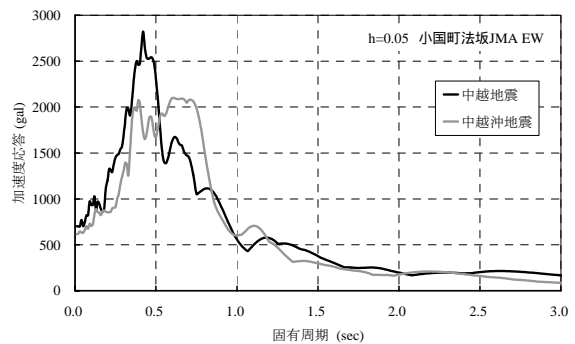
対象建物に最も近い JMA 小国町法坂の地震計は, 対象建物の南西方向約 3km に位置し, 中越・中越沖地震の双方で震度 6 強を観測した。表 - 1 に JMA 小国町法坂の地震計が観測した最大地動加速度および最大地動速度を示す。両地震ともに最大地動加速度および速度は EW 方向に卓越している特徴がある。図 - 1(a)(b)に EW および NS 方向の加速度応答スペクトルを示す。加速度応答スペクトルをみると, 中越地震では 0.3~0.5 秒の周期が卓越しているのに対し, 中越沖地震では 0.5~0.7 秒の周期が卓越している。また, EW 方向の応答加速度は中越地震の方が大きく, NS 方向の応答加速度は中越沖地震の方が大きいことがわかる。

1.2 対象建物の概要

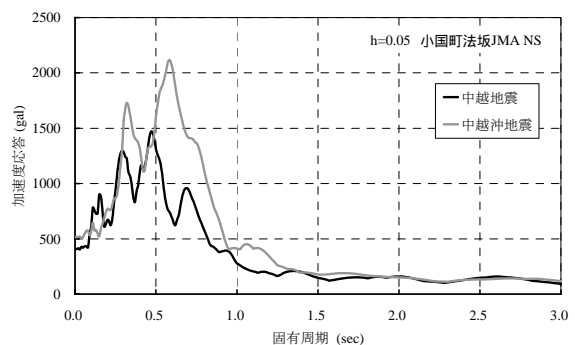
対象建物は新潟県長岡市小国町にある S 小学校教室棟である。本建物は 1963 年 (昭和 38 年) に建設され, 長辺方向 16 スパン, 短辺方向 2 スパンの RC ラーメン構造 3 階建である。基礎は杭基礎である。1 階平面図を図 - 2 に, A 通り軸組図を図 - 3 に示す。柱の断面形状は C1~C5 までであるが, 代表的な 1 階柱の C1 と C4 の諸元を表 - 2 に示す。配筋調査では帯筋間隔が 200mm であった

表 - 1 中越・中越沖地震の最大地動加速度および速度

JMA 小国町法坂	中越地震		中越沖地震	
	EW	NS	EW	NS
最大地動加速度 PGA (gal)	692	395	613	504
最大地動速度 PGV (kine)	64.5	35.0	80.1 (3成分合成)	



(a) EW 方向



(b) NS 方向

図 - 1 中越・中越沖地震の加速度応答スペクトル

*1 新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程 (正会員)

*2 新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程

*3 新潟大学工学部建設学科 講師 工博 (正会員)

*4 新潟大学工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

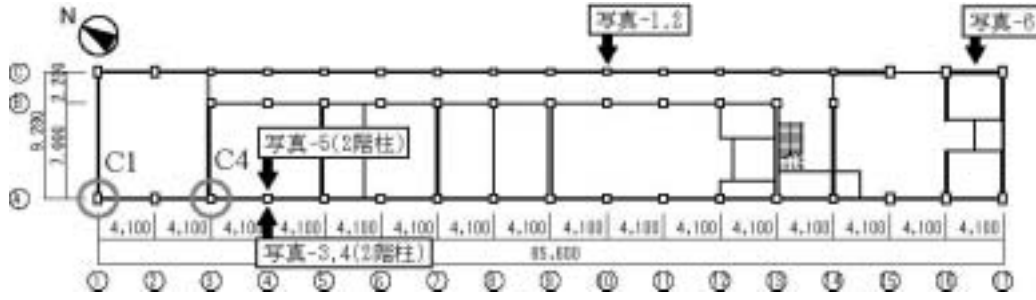


図 - 2 1階平面図

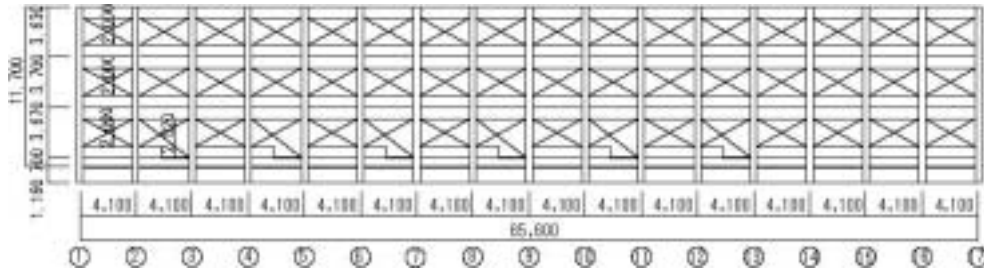


図 - 3 A 通り軸組図

が、90°フックであるため後述する診断の際には 400mm を採用している。建物の基本データである重量およびコンクリート強度を表 - 3 に示す。耐震診断では積載・積雪荷重を考慮した重量を用い、その際の積雪量は 320cm としている。

1.3 被害概要

本建物は 2004 年中越地震と 2007 年中越沖地震の双方で被災している。表 - 4 に被災度区分判定基準¹⁾により求めた結果を示す。中越地震で 1, 2 階が小破、中越沖地震では 1, 2 階が中破であった。中越地震被災後は耐震補強を実施していなかったが、中越沖地震の被災により耐震補強を実施している最中である。

図 - 4 に中越地震および中越沖地震時の 1 階柱損傷度一覧を示す。中越地震ではほとんどの柱に損傷度 I および II の曲げひび割れがみられた。ただし、せん断ひび割れもわずかに観察された。本建物は中越沖地震によりさらに大きな被害を受けた。1 階ではひび割れ幅の太い縦ひび割れが多かったが、これらをはつったところせん断ひび割れは観察されない場合が多かった。明瞭なせん断破壊が観察された場合 (写真 - 1) は、躯体にもせん断ひび割れが観察された (写真 - 2)。ただし、仕上げが完全に浮き上がって無損傷にみえる柱 (写真 - 3) をはつったところ、損傷度 IV のせん断ひび割れが観察された柱もあった (写真 - 4)。1 階は損傷度 III のせん断破壊柱が 3 本、IV が 2 本程度であった。2 階は曲げせん断ひび割れが主体であったが、損傷度 III のせん断破壊柱が 4 本、IV が 3 本程度であった (写真 - 5)。

表 - 2 1階柱の主な配筋表

階	符号	C1	C4
1	断面		
	Dx×Dy	550×550	550×800
	主筋	8 - φ 19 $\sigma_y = 294 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	10 - φ 22 $\sigma_y = 294 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
	帯筋	□ - φ 9 @ 200 $\sigma_{wy} = 294 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	□ - φ 9 @ 200 $\sigma_{wy} = 294 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
90°フックであるので診断では @400 とする。			

表 - 3 建物の基本データ

階	重量 (kN)*		コンクリート強度 (N/mm ²)		
	積載・積雪荷重あり	積載・積雪荷重なし	設計基準強度	診断採用値 (コア推定値)	コア平均値
3	11015	8896	18	21.4	21.7
2	7820	6888	18	22.5	29.7
1	8920	8022	18	22.5	34.3

* 診断時に採用した積雪量は 320cm である。

表 - 4 中越・中越沖地震の際の被災度区分判定結果

階	中越地震		中越沖地震	
	耐震性能残存率 略算法 R (%)	被災度区分	耐震性能残存率 略算法 R (%)	被災度区分
3	95.8	軽微	95.7	軽微
2	88.4	小破	77.0	中破
1	92.0	小破	63.1	中破

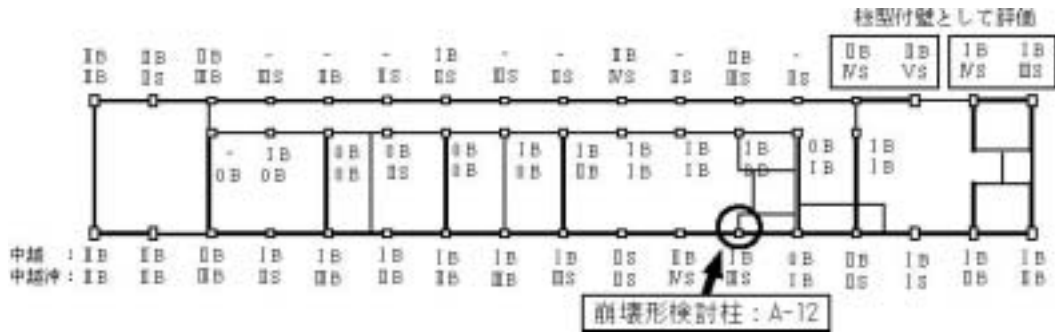


図 - 4 中越地震および中越沖地震時の1階柱損傷度一覧

また、1階の桁行き方向の有開口壁2枚は損傷度IVからVであった(写真-6)。

仕上げ表面とはつり後のひび割れ幅の関係を図-5に示す。文献2)では中越地震に長岡市のSM小学校を対象に同様の調査を行っているので、図-5は文献2)のデータに今回のS小学校のデータを加筆した。外部からの調査(外観と表記)と内部からの調査(内観と表記)を区別して示したが、S小学校は内部外部ともモルタル仕上げである。図をみると、仕上げ表面ひび割れ幅が5mm程度以内では、内観外観いずれも、モルタル仕上げ表面よりもはつり後のひび割れ幅が約半分程度に小さくなるという傾向がみられる。5mm以上になると、両者はほぼ同じ値となる。この傾向からモルタル仕上げ表面のひび割れ幅により判定する柱の損傷度は、はつり後のひび割れ幅を観察していないためにより大きな損傷度と判定される可能性が高い。図-6ではS小学校1階損傷柱25本分の内観表面と外観表面ひび割れ幅の関係を示す。図-6をみると、内観表面と外観表面のひび割れ幅はほぼ同程度であった。



写真-1 1階柱C-10 (はつり前)

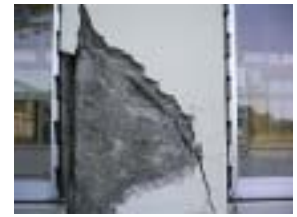


写真-2 1階柱C-10 (はつり後)



写真-3 2階柱A-4 (はつり前)



写真-4 2階柱A-4 (はつり後)



写真-5 2階柱A-4 (内観写真)



写真-6 1階柱型付壁 C-16~17

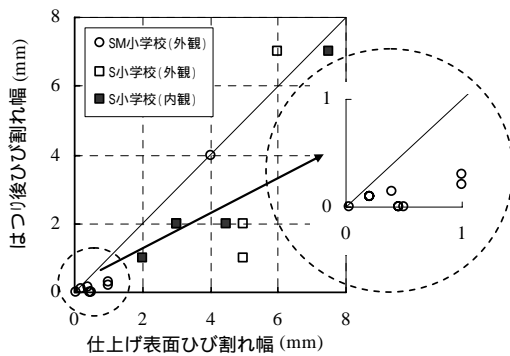


図-5 仕上げ表面とはつり後のひび割れ幅の関係 (SM小学校1階損傷柱8本、S小学校1階損傷柱4本)

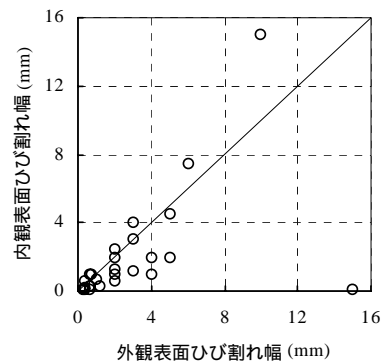


図-6 外観表面(モルタル仕上げ)と内観表面(モルタル仕上げ)幅の関係 (S小学校1階損傷柱25本)

表 - 5 中越地震被災前の診断値

(a) X方向正加力

診断階	2次		構造耐震判定指標 破壊形式	$I_{S0} = 0.7, C_{TU} \times S_D \geq 0.3 \quad E_0 = E_0' \times T/G, I_s = E_0 / (1/S_D \times Z \times R_t)$							判定
	C	F		E_0'	T/G	E_0	$1/S_D$	$Z \times R_t$	I_s	$C_{TU} \times S_D$	
3	0.80	1.75	CB	1.05	1.0	1.05	1/0.975	0.9	1.14	0.65	OK
2	0.46	1.27	CB	0.51	1.0	0.51	1/0.975	0.9	0.55	0.43	NG
1	0.47	1.00	CB,CS,WS	0.47	1.0	0.47	1/0.975	0.9	0.51	0.51	NG

(b) Y方向正加力

診断階	2次		構造耐震判定指標 破壊形式	$I_{S0} = 0.7, C_{TU} \times S_D \geq 0.3 \quad E_0 = E_0' \times T/G, I_s = E_0 / (1/S_D \times Z \times R_t)$							判定
	C	F		E_0'	T/G	E_0	$1/S_D$	$Z \times R_t$	I_s	$C_{TU} \times S_D$	
3	1.74	1.00	CB,WS	1.26	1.0	1.26	1/0.975	0.9	1.37	1.37	OK
2	0.81	1.00	CB,WS	0.69	1.0	0.69	1/0.975	0.9	0.75	0.75	OK
1	0.69	1.00	CB,CS,WS,WCB,WCS	0.69	1.0	0.69	1/0.975	0.9	0.75	0.75	OK

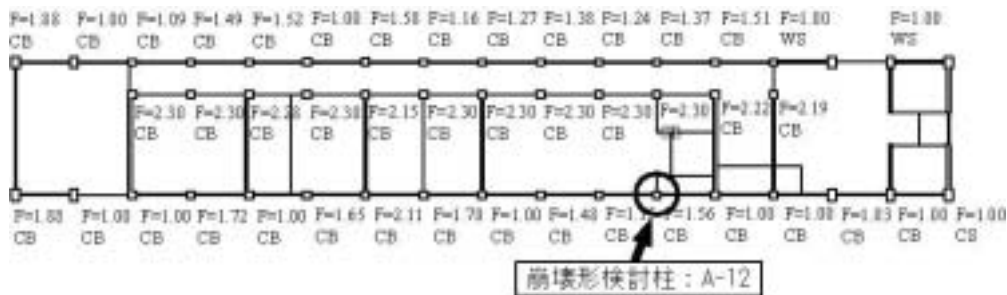


図 - 7 中越地震被災前の1階柱 F 値および破壊形式 (X方向正加力)

1.4 耐震診断結果

中越地震被災前の耐震診断結果を X (桁行き) 方向と Y (梁間) 方向別に表 - 5(a)(b)に示す。耐震診断は、2001年改訂版耐震診断基準³⁾により第2次診断を行っているが、この表の I_s 値は地域係数 $Z = 0.9$ で除した値となっていることに注意を要する。耐震診断の結果を学校建物の構造耐震指標 $I_{S0} = 0.7$ を用いて必要な耐震性能を有していたかを判断すると、表 - 5(a)の X 方向診断では、1, 2階の I_s 値が I_{S0} 値を下回っており、被災前の建物の耐震性能が十分でなかったと判断することができる。表 - 5(b)の Y 方向診断では全階で I_s 値が I_{S0} 値を上回っており、十分な耐震性能を有していたと判定できる。

また、図 - 7 に耐震診断による中越地震被災前の1階柱の F 値および破壊形式を示す。ほとんどの柱は曲げ破壊柱となったが、実被害では数多くのせん断破壊柱が確認された。

2. 柱の崩壊形の検討

2.1 実被害と耐震診断結果の相違

1.4 で述べた通り、耐震診断ではほとんどの柱が曲げ破壊柱と診断されたが、実被害では数多くの柱がせん断破壊を起こした。その理由として診断に採用したパラメ

ータを過剰評価した可能性も考えられる。そこで、コンクリート強度、帯筋断面積、軸力の3つのパラメータに着目し、パラメトリックに変化させることで柱の崩壊形について検討する。なお、基本的には1つのパラメータのみを変化させ、その他の値は診断採用値で固定することとする。検討した柱は全階を通して耐震壁が付属していないことと、損傷度Ⅲのせん断破壊柱であったことから1階の A-12 柱を採用した。

2.2 各パラメータの操作による柱の崩壊形の検討

(a) コンクリート強度を変化させた場合 (図 - 8(a))

コンクリート強度は診断採用値である 22.5N/mm^2 を基準とし、5 から 40N/mm^2 まで変化させた。コンクリート強度を 5N/mm^2 まで低下させた場合は F 値が 1.0 となったが、柱の崩壊形は曲げ破壊となった。このため、コンクリート強度の低下はせん断破壊を起こす要因として考えにくいことがわかる。

(b) 帯筋断面積を変化させた場合 (図 - 8(b))

帯筋断面積は診断採用値である $\phi 9 - @400$ を基準とし、 $\phi 4$ の範囲まで低下させた。帯筋断面積の場合は $\phi 4$ まで低下させた場合でも曲げ破壊となることから、(a) のコンクリート強度と同様せん断破壊を起こす要因とは考えにくい。

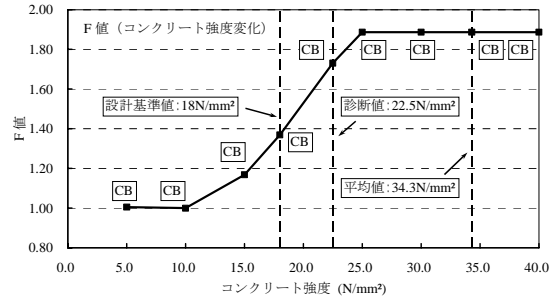
(c) 軸力を変化させた場合 (図 - 8(c))

軸力は地震時軸力を基準とし、定軸力、直交梁による最大軸力、上下動も考慮した最大軸力まで増加させた。ここで、直交梁は直交方向のメカニズム時の付加軸力とし、また、上下動による軸力はその柱が支える上部の建物重量に地震動のうちの上下動の最大値が作用したときの軸力を付加軸力とした。さらに、他パラメータとの相互作用を考慮するため、帯筋断面積をφ9、φ7、φ5とした場合について検討する。

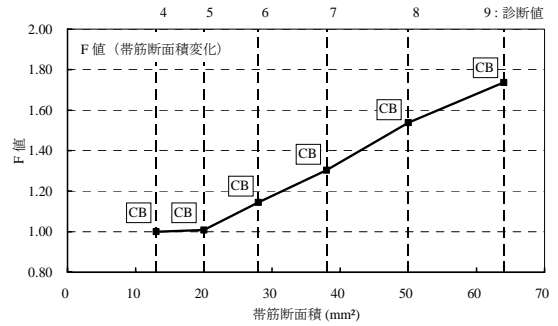
φ9の場合は上下動も考慮した最大軸力でF値が1.0と低下するものの曲げ破壊という結果となった。一方、φ7の場合は上下動も考慮した最大軸力 850kN の手前の840kN でせん断破壊が開始する結果が得られた。φ5の場合は直交梁による最大軸力726kNの手前の710kNでせん断破壊開始点となることがわかった。

2.3 考察

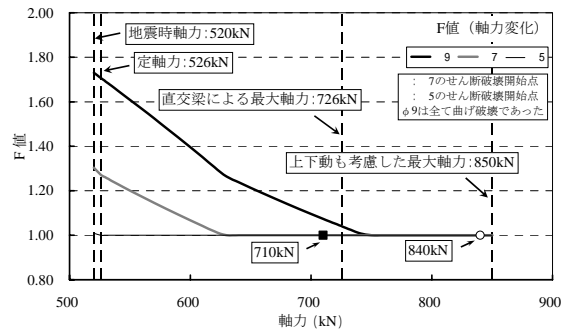
2.2の結果より、コンクリート強度および帯筋断面積を変化させた場合は全ての範囲で曲げ破壊となりせん断破壊に至らなかった。一方、軸力を変化させた場合は診断採用値よりも小さいφ7以下の帯筋断面積になると最大軸力到達以前にせん断破壊が開始することがわかった。また、診断採用値であるφ9の場合でも軸力を1000kNとするとせん断破壊が開始した。このことから、せん断柱となる第一の要因は軸力ではないかと考えられる。何らかの要因により最大軸力以上の軸力が柱に作用した場合、曲げ柱もせん断破壊を起こす可能性は高い。ただし、実際の配筋、鉄筋強度あるいは局所的なコンクリート強度などの影響も今後検討する必要がある。



(a) コンクリート強度を変化させた場合



(b) 帯筋断面積を変化させた場合



(c) 軸力を変化させた場合

図 - 8 柱の崩壊形の検討

表 - 6 地震応答解析結果

(a) EW 方向

階	中越地震				中越沖地震				中越・中越沖地震連結			
	最大層間変位		最大層間変形角		最大層間変位		最大層間変形角		最大層間変位		最大層間変形角	
	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向
	(cm)	(cm)	1/R (rad)	1/R (rad)	(cm)	(cm)	1/R (rad)	1/R (rad)	(cm)	(cm)	1/R (rad)	1/R (rad)
3	-0.68	0.80	-1/531	1/453	-0.65	0.72	-1/556	1/503	-0.68	0.80	-1/531	1/453
2	-1.74	3.71	-1/213	1/99	-2.01	2.68	-1/184	1/138	-1.81	4.40	-1/205	1/84
1	-2.24	5.01	-1/198	1/88	-2.87	3.94	-1/155	1/112	-2.36	5.78	-1/188	1/76

(b) NS 方向

階	中越地震				中越沖地震				中越・中越沖地震連結			
	最大層間変位		最大層間変形角		最大層間変位		最大層間変形角		最大層間変位		最大層間変形角	
	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向
	(cm)	(cm)	1/R (rad)	1/R (rad)	(cm)	(cm)	1/R (rad)	1/R (rad)	(cm)	(cm)	1/R (rad)	1/R (rad)
3	-0.47	0.44	-1/776	1/827	-0.52	0.55	-1/692	1/664	-0.52	0.56	-1/700	1/642
2	-0.94	0.91	-1/395	1/408	-1.13	1.30	-1/328	1/284	-1.18	1.41	-1/313	1/263
1	-1.29	1.32	-1/344	1/335	-2.01	2.44	-1/221	1/181	-2.13	2.53	-1/209	1/174

3. 地震応答解析

3.1 入力地震動

地震応答解析で使用する入力地震動は長岡市小国町に設置されている JMA 小国町法坂で計測された中越地震および中越沖地震の本震の地震動である。さらに、下小国小学校は両地震で被災しているため、中越地震と中越沖地震を連結した地震動も使用することにする。JMA 小国町法坂の地震計は、下小国小学校の南西方向約 3km に位置している。下小国小学校の桁行方向の軸はほぼ南北方向よりに向いているが、表 - 1 に示したように南北方向に比べ東西方向で計測された地震動の最大加速度が大きくなっているため、両方向について解析を行なう。

3.2 地震応答解析結果

解析に用いた建物の重量は表 - 3 に示した積載・積雪荷重なしの値である。モデル化は、鉛直部材を曲げ柱、曲げ壁、せん断壁の 3 つの部材群に分けて行なった⁴⁾。表 - 6(a)(b)に EW および NS 方向の地震応答解析結果を示し、図 - 9(a)(b)に EW および NS 方向の水平せん断力 - 変形角関係を示す。図 - 9(a)および表 - 6(a) (EW 方向)をみると、1 階の最大層間変形角は中越地震で 1/88rad、中越沖地震で 1/112rad、中越・中越沖地震連結で 1/76rad であり大きな損傷を受ける結果となった。図 - 9(b)および表 - 6(b) (NS 方向)をみると、1 階の最大層間変形角は中越地震で 1/335rad、中越沖地震で 1/181rad、中越・中越沖地震連結で 1/174rad であり軽微な損傷で済む結果となった。

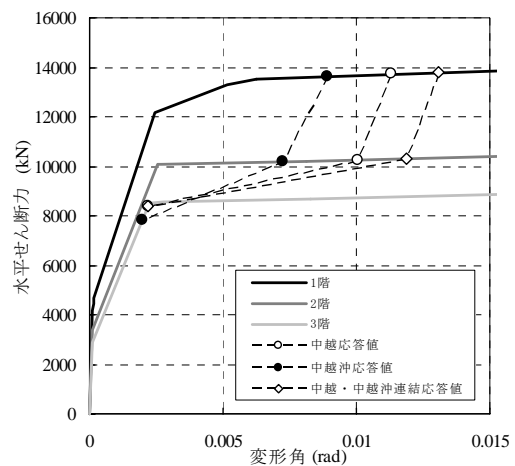
3.3 考察

3.2 の結果より、S 小学校は建物のほぼ軸である NS 方向の地震動の影響を強く受けていると判断できる。ただし、NS 方向の解析結果によると、中越・中越沖地震連結でも 1/174rad と軽微な損傷となっており十分に説明できていない。今後、EW 方向の地震動を考慮すれば実被害（被災度区分判定で中破）により近づく解析結果が得られる可能性がある。さらに、中越地震による数多くの余震の他に、JMA 小国町法坂の地震計は 2005 年 8 月 21 日にも震度 5 強の地震を観測しており、この地震動を考慮することでより現実に近い解析結果が期待でき、今後の検討課題である。

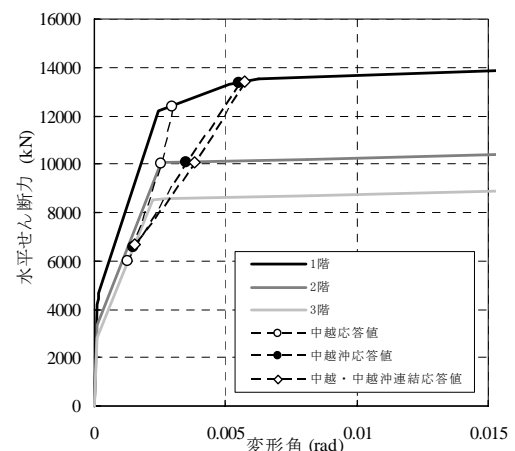
4. まとめ

- (1) 中越地震と中越沖地震の双方で被災した建物 S は、中越地震で 1, 2 階が小破、中越沖地震では 1, 2 階が中破であった。このことは地震波の特性から大まかに説明できるが、被害の大きさを十分説明し切れていない。繰り返し被災した建物の挙動を評価することは重要であり、今後の解明が必要である。
- (2) 建物 S の耐震診断結果では、ほとんどの柱が曲げ破

壊柱と診断されたが、実被害では数多くの柱がせん断破壊を生じた。その理由として、コンクリート強度、帯筋断面積、軸力の 3 つのパラメータを変化させて検討したところ、せん断柱となる第一の要因は軸力ではないかと考えられる。ただし、実配筋、鉄筋強度あるいは局部的なコンクリート強度などの影響も今後検討する必要がある。



(a) EW 方向



(b) NS 方向

図 - 9 水平せん断力 - 変形角関係

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針，2002
- 2) 日本建築学会：2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震災害調査報告，pp.117，2004
- 3) 日本建築防災協会：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2001
- 4) 平田 圭亮：2004 年新潟県中越地震における小千谷市の RC 学校建築の被害の解析，2007 年度日本建築学会学術講演梗概集，pp.375-376，2007