

# 論文 1999 年台湾集集地震により被災した鉄筋コンクリート造建物の耐震性能に関する研究

劉 鋒<sup>\*1</sup>・中埜 良昭<sup>\*2</sup>・真田 靖士<sup>\*3</sup>

要旨：1999 年台湾集集地震により被災した南投県草屯鎮虎山国民小学校と中興高級中学校の鉄筋コンクリート造校舎の耐震性能と被害程度の関係について解析的に検討した。地震による建物の被害状況を整理するとともに、耐震診断基準に基づいて耐震診断を行い、建物の耐震性能を評価した。また、研究対象建物の近傍で観測された同一の強震記録を用いて、フレーム地震応答解析を行った結果、同一入力下における建物の耐震性能の違いによる被害程度の違いを再現することができた。

キーワード：耐震診断，フレーム解析，地震応答解析，強震記録

## 1. はじめに

1999年9月21日に台湾中部地区を襲った「921 集集大地震」により数多くの建物が甚大な被害を受けた。本研究では、震央の近くで被災した南投県草屯鎮虎山国民小学校と中興高級中学校のRC造校舎を対象に、「耐震診断基準」<sup>1)</sup>に基づく耐震診断を行い、建物の耐震性能を評価した。また、建物近傍で観測された強震記録を用いて、フレーム地震応答解析を行い、同一入力下における建物の耐震性能の違いによる被害程度の違いを解析により再現することを試みた。

## 2. 研究対象建物及び被害の概要

図-1 に震央と研究対象建物の位置関係を示す。草屯鎮は今回の地震の原因である車籠埔活動断層の真上に位置し、観測された強震記録によると、最大加速度は 989gal に達した<sup>2)</sup>。以下に各建物の概要を、表-1 に各建物の被害の概要を示す。なお両学校は約 1km 南北方向に離れた場所に位置している。

### 2.1. 虎山国民小学校本館

管理・教室棟である本館は 1996 年度に建設された鉄筋コンクリート造の地上 4 階、地下 1 階建物である。1 階平面図を被災度区分判定基準<sup>3)</sup>による部材の損傷度とともに図-2 に示す。桁行方向(以下、X 方向)はほぼ純ラーメン構造、梁間方向(以下、Y 方向)は耐震壁を有するラーメン構造である。Y 方向は 3 階の X17 通りの 1 枚のみがレンガ壁で、その他は全て RC 造耐震壁(階段室部分が厚さ 20cm, D9@200 ダブル配筋, その他は厚さ 12cm, D9@200 シングル配筋)である。腰壁も全て RC 造(厚さ 12cm, D9@200 シングル配筋)であり、また腰壁には一部高さ調整用のレンガが積まれているところもある。また、間取りによっては耐震壁が必ずしも連層ではない箇所がある。基礎構造は不明である。

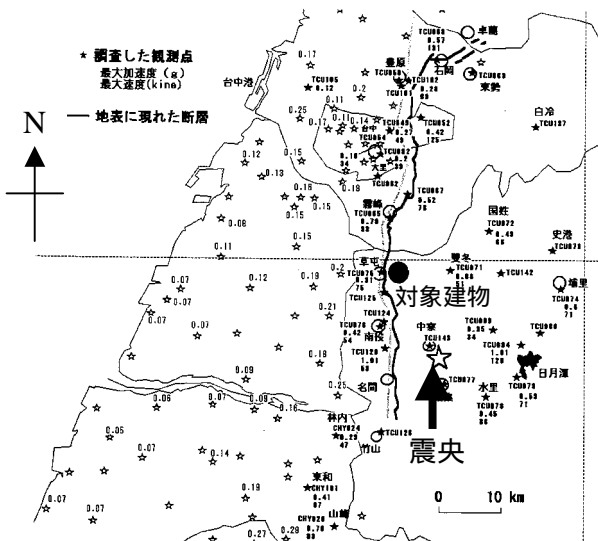


図-1 震央と研究対象建物の位置

\*1 東京大学大学院工学系研究科 (正会員)

\*2 東京大学生産技術研究所助教授 工博 (正会員)

\*3 東京大学生産技術研究所助手 博士(工学) (正会員)

## 2.2. 虎山国民小学校南館

南館は、1994年度にRC造1階建て建物として建設され、1996年度に上部3層を増築した建物(地上4階、地下1階、但し一部地下階なし)である。1階平面図を部材の損傷度とともに図-3に示す。平面形式と構造形式は本館とほぼ同じで、壁量はX方向よりY方向の方が大幅に多い。間仕切壁及び腰壁はRC造である。また、西側の本館との間に Exp. joint が設けられている。基礎構造は不明である。

## 2.3. 中興高級中学校中興楼

中興楼は4階建ての管理・教室棟で、東棟及び西棟からなる。両棟の間には Exp. Joint が設けられている。図-4に1階平面図を部材の損傷度とともに示す。

## 3. 耐震診断による耐震性能の検討

(財)日本建築防災協会「既存コンクリート造

建築物の耐震診断基準」<sup>1)</sup>により各校舎の耐震診断を行った。

### 3.1. 診断仮定

建物の重量を $9.8\text{kN/m}^2 (1.0\text{ t/m}^2)$ と仮定し、コンクリートの圧縮強度を $21\text{ N/mm}^2 (210\text{ kgf/cm}^2)$ 、鉄筋の引張強度を主筋で $420\text{ N/mm}^2 (4200\text{ kgf/cm}^2)$ 、帯筋で $280\text{ N/mm}^2 (2800\text{ kgf/cm}^2)$ と仮定した。経年指標Tは、第1次及び第2次診断ともに $T=1.0$ とした。

虎山国民小学校は本館、南館ともに地下室を有するため、いずれも地下階を有する地上4階建ての建物として診断した。ただし、一部にドライエリアが設けられているため、地下室の有無に関する $S_D$ 指標のグレードは0.9とした。また、腰壁のある外周フレームでは、その柱との間に肌分かれが見られたことから柱の可撓長さを $h_o+D/4$ とした( $h_o$ :柱の内法寸法、 $D$ :柱の断面せい)。柱と壁の寸法及び配筋は設計図書及び

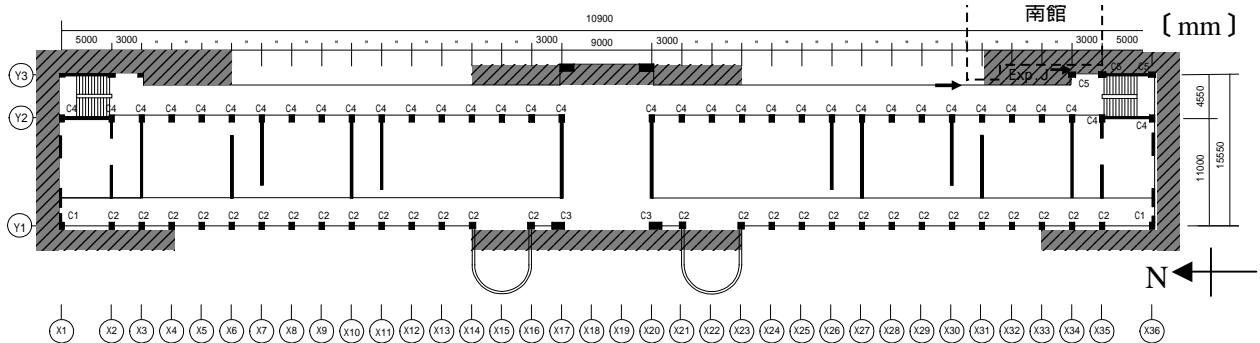


図-2 虎山国民小学校本館1階平面図と壁の損傷度  RC壁

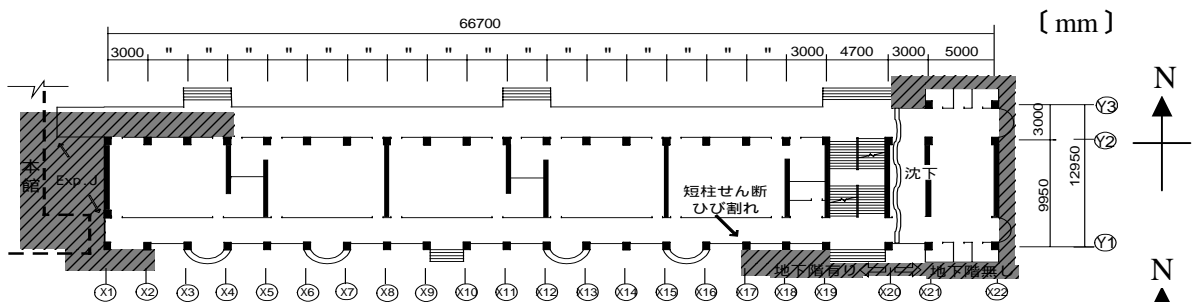


図-3 虎山国民小学校南館1階平面図と柱の損傷度  RC壁

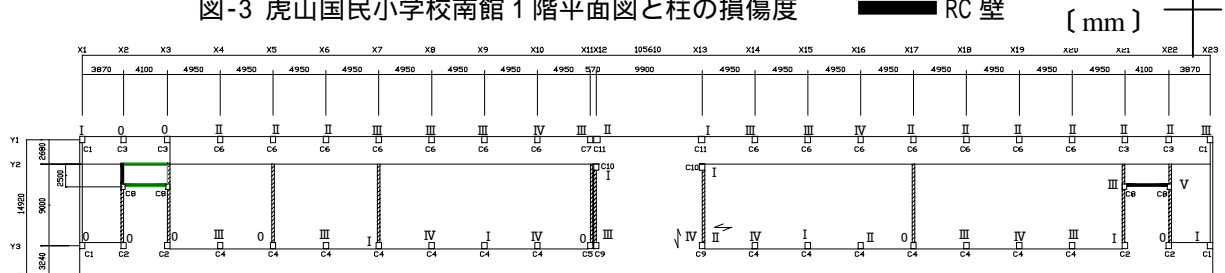


図-4 中興高級中学校中興楼1階平面図と柱の損傷度 (左:西棟 右:東棟)  レンガ壁  RC壁

現地調査結果に基づいた。本館 3 階 X17 通りのレンガ壁は面外方向に早期に転倒したと思われるため、耐力、剛性ともに無視した。なお、計算には電算プログラム(SCREEN Edition-2)<sup>4)</sup>を用いた。

中興高級中学校中興樓については文献 2)の診断結果を引用して示す。

表-1 診断対象建物の被害の概要<sup>2)</sup>

建物	判定	被害概要
虎山国民小学校本館	小破	壁と柱の接合面にひび割れが生じた。3 階のレンガ壁(X17 通り)が転倒・倒壊した。各階の RC 造壁には損傷度 からまでのせん断ひび割れが発生した。
虎山国民小学校南館	小破	地下室のない X20 ~ X22 間で建物が沈下し, X20 ~ X21 間で約 1° の傾斜が生じた。これに伴い, 梁・スラブにひび割れ(最大 3 mm)が生じた。また, 沈下した箇所を中心に柱のせん断ひび割れが生じた。レンガ壁により短柱化した柱のせん断ひび割れが 1 箇所が生じた 本館と接している各階の渡り廊下に衝突によるコンクリートの剥離, X 方向の腰壁にせん断ひび割れ, また 1 階の一部の柱に仕上げタイルの剥離が見られた。
中興高級中学校中興樓	中破	1 階の柱の X 方向にせん断ひび割れ(損傷度 程度)が生じた。 Y 方向のレンガ造の間仕切壁の一部にも大きなせん断ひび割れが生じた。2 ~ 4 階, 地下 1 階の被害は軽微であった。

### 3.2. 耐震診断結果

最も被害が大きかった各建物の 1 階について、1 次、2 次診断を行った。表-2 に、各方向の 2 次診断の結果をそれぞれ示す。また、2 次診断で得られた 1 階の強度指標(C)と靱性指標(F)の関係を図-5 に示す。同表及び図から、以下のことがわかる。

虎山小学校では梁間方向に耐震壁が多く配されているため、桁行方向より梁間方向の構造耐震指標(以下、 $I_s$  値)が高い値を示している。

虎山小学校では  $I_s$  値が最も低い南館の桁行方向の 1 階においても、2 次診断による  $I_s$  値が 0.65 と比較的高い値を示している。これは虎山小学校の両建物が比較的小規模な被害に留まったことと対応していると考えられる。

中興高級中学校については文献 2)の報告を要約して以下に示す。

ほとんどの柱がせん断柱であったが、比較的主筋量が多く ( $P_t=0.9 \sim 1.2\%$  程度)、終局時せん断応力度は平均で約  $17\text{kgf/cm}^2$  程度(1 次診断では  $=10\text{kgf/cm}^2$ )で、2 次診断の  $I_s$  値がそれぞれ 0.49, 0.52, 0.49, 0.50 となり、1 階の C 値が 0.45 程度の耐震性能を有するため、中破程度の被害に留まったと考えられる。図-5 によると、虎山国民小学校の本館と南館、中興高級中学校の東棟と西棟はそれぞれにおいて比較的類似した C - F 関係を示すことが分かる。

表-2 第 2 次診断結果一覧<sup>2)</sup>

建物	階	方向	C	F	$E_o$	$S_D$	$I_s$	$C_T \cdot S_D$
本館	1	桁行	0.66	1.0	0.66	1.07	0.71	0.71
		梁間	0.94	1.0	0.94	1.07	1.01	1.01
南館	1	桁行	0.60	1.0	0.60	1.07	0.65	0.65
		梁間	1.04	1.0	1.04	1.07	1.12	1.12
東棟	1	桁行	0.01 0.45 0.01	0.8 1.0 1.27	0.46 (0.27)	1.08	0.49 (0.29)	0.49
		梁間	0.01 0.46 0.04	0.8 1.0 1.27	0.49 (0.40)	1.08	0.52 (0.43)	0.52
西棟	1	桁行	0.01 0.45 0.01	0.8 1.0 1.27	0.46 (0.37)	1.08	0.49 (0.29)	0.49
		梁間	0.16 0.43 0.05	0.8 1.0 1.27	0.46 (0.38)	1.08	0.50 (0.41)	0.50

注) T は全て 1.0 とした;

BW=レンガ造壁, W=RC 造壁, SC=極短柱, C=柱;

( ):レンガ造壁, 極短柱で決まる場合

## 4. フレーム地震応答解析

前章で検討した虎山国民小学校の本館と南館、中興高級中学校の東棟と西棟はそれぞれ構造形式が似ていること、また、同様の C - F 関係を示したことから、本稿では南館と西棟に着目し、耐震性能と被害程度の関係について検討する。

### 4.1. 解析方法

(1) 建物のモデル化 柱、梁、壁をそれぞれ材端曲げバネとせん断バネを有する線材に置換し、床面を剛と仮定して、建物を X, Y 方向別の平面フレームにモデル化した。剛域は梁については

柱・壁端まで、柱については梁端、あるいは腰壁高さから  $D/4$  を引いた位置までとした( $D$ :柱の断面せい)。部材の耐力算定に用いた材料強度は耐震診断と同じである。1階柱脚は固定とした。

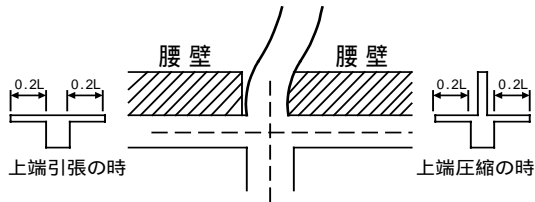


図-6 梁耐力計算における剛域の違い

(2) 部材の復元力特性 梁の耐力はスラブ協力幅を  $0.2L$  とし、スラブ筋を考慮して算定した ( $L$ :スパン長)。また、現地調査<sup>2)</sup>によると、虎山国民小学校では腰壁と柱の間に肌別れが見られたこと、中興高級中学校では腰壁筋が柱に十分定着されていない箇所が見られたことから、腰壁は梁の上端引張り耐力算定時には無視したが、上端圧縮算定時には考慮した(図-6)。但し、梁の剛性については腰壁の配置を考慮して十字またはT字断面として算定した。曲げ及びせん断に対する復元力特性<sup>5)6)7)8)</sup>は図-7に示すD-Triモデル及び原点指向モデルを仮定した。また、復元力特性を決定する諸量は耐震診断結果及び文献5)6)と同様の手法で算出した。中興高級中学校のY方向レンガ壁の剛性、曲げ耐力は無視し、せん断耐力のみ  $= 0.2\text{N/mm}^2(2\text{kgf/cm}^2)$ として考慮した<sup>2)</sup>。

(3) 入力方法・数値演算方法 実際の構造物は地震動により3次元的な挙動を示すが、計算を簡単にするため、鉛直方向の入力を無視し、建物のX,Y各方向に対する水平地震動入力のみを考慮した。減衰は、弾性時の1次モードの減衰定数を3%とする内部粘性減衰型とし、瞬間剛性に比例させた。なお、計算時間間隔は地震波の記録間隔と合わせて、0.005秒とした。

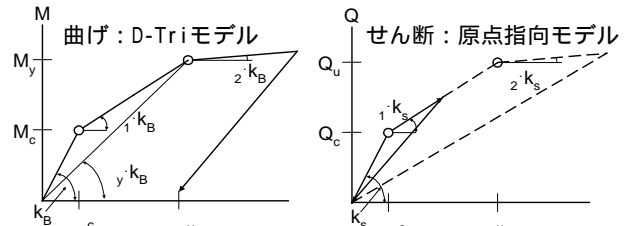


図-7 曲げ及びせん断に対する復元力特性

#### 4.2. 入力地震動

一番近い強震記録は虎山小学校から2km、中興高級中学校から3kmの地点で観測されたTCU075地震波である(東西方向最大加速度325.723gal、南北方向最大加速度257.584gal)。敷地の地盤特性に関する調査記録を得ることができなかったが、比較的近距离であることから、観測点と各学校の敷地への入力が同一であると仮定して原波のまま入力した。図-8に弾性加速度応答スペクトルを示す。卓越周期はおおよそ0.2~0.5秒の範囲である。

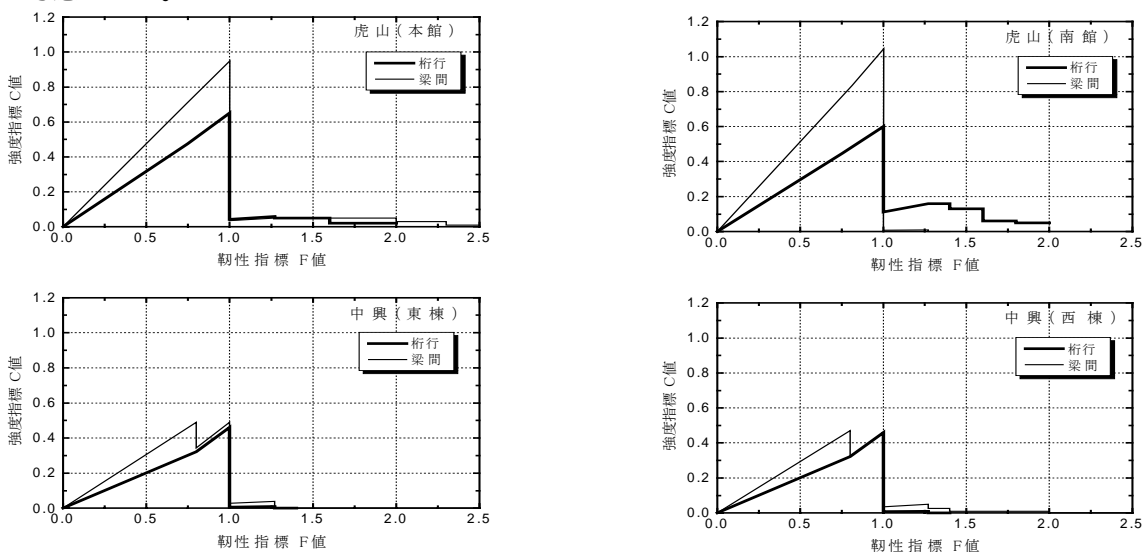


図-5 各棟の1階のC-F関係図<sup>2)</sup>

### 4.3. 建物の弾性応答性状

建物各方向の弾性固有周期を図-8 に重ねて示す。南館の桁行方向の1次周期が0.294secであるのに対し、梁間方向が0.138secと約1/2倍で、耐震壁の存在により梁間方向の剛性が相対的に高い。西棟では両方向とも0.4~0.5sec程度でほぼ同じである。

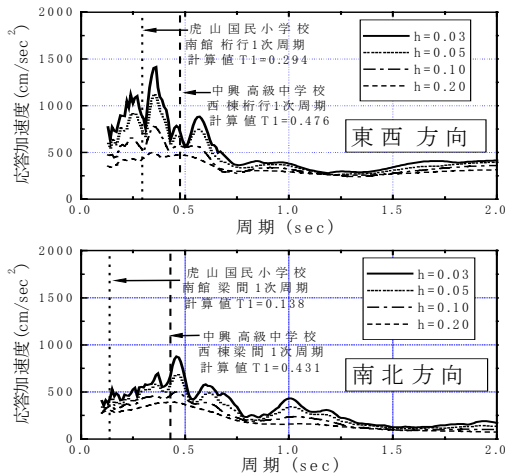


図-8 加速度応答スペクトル(h=3,5,10,20%)

### 4.4. 解析結果

図-9 に各フレーム1階の応答変位の時刻歴を、表-3 に各建物の階別に基礎からの最大応答変位、最大層間変位、変形角及び最大せん断力の一覧を示す。変形の時刻歴によると、いずれの建物も桁行方向で30秒付近の正方向への変形、梁間方向で28秒付近の負方向への変形が最も大きい。また、表-3によると両建物ともに桁行方向より梁間方向の変形及び層間変形角が小さく、とくに南館の梁間方向では最大層間変形角が1/327、1階層間変形角は1/419程度であった。これは南館の梁間方向は剛性が高く、弾性1次周期が0.138secであり、0.2~0.5secに卓越周期を有する南北方向地震波に対して振動が励起されなかったためと考えられる(図-8)。西棟も梁間方向では最大層間変形角が1/250を超えなかった。西棟の被害調査で梁間方向のレンガ造壁の一部に大きなひび割れが観測されたが、柱には被害があまり見られなかったことと対応する。一方、桁行方向の最大層間変形角は南館(1階で1/303、2階で1/242程度)より西棟(1階で1/202、2階で1/179程度)の方が大きかった。以上の結果

は地震被害が主に桁行方向で生じ、しかも中興樓の被害がより大きかったことと一致する。

図-10 に各方向別に1階の層せん断力と層間変位の関係を別途行った漸増載荷解析(外力分布は逆三角形分布と仮定した)による結果及び漸増載荷解析における柱の初ヒンジ発生点、降伏メカニズム形成点と共に示す。同図によると、すべての建物が弾性範囲を超えたが、メカニズムには至っておらず、部分的にひび割れあるいは降伏が生じる程度の被害に止まった。南館の梁間方向では柱の降伏ヒンジは生じなかった。図-11、図-12には各建物の桁行方向Y1通りについて各部材のせん断に対する損傷状況を示す。南館では1階X17通りの柱(極短柱)がせん断破壊したものの、その他の1階と2階の柱には局部的にひび割れが生じた程度であった。特に1階では腰壁の右端(東側)に位置するほとんどの柱にせん断ひび割れが生じていないが、柱のモデル化で腰壁との間の肌別れを考慮したこと、建物が東側に大きく変形したことが原因と考えられる。一方、西棟では1階の全ての柱のせん断耐力に対する入力せん断力の割合が50%を超える結果となり、南館が小破、中興樓が中破と判定された結果と対応すると考える。また、地震応答解析により被災度区分判定による柱の損傷状況を概ね再現することができたと判断する。

表-3 最大応答の一覧

建物	階	桁行(東西)方向				梁間(南北)方向			
		応答変位 (cm)	層間変位 (cm)	層間変形角 (rad)	せん断力 (tonf)	応答変位 (cm)	層間変位 (cm)	層間変形角 (rad)	せん断力 (tonf)
南館	4	4.00	0.37	1/973	452	3.17	0.42	1/857	536
	3	3.63	0.95	1/379	832	2.75	0.79	1/456	899
	2	2.68	1.49	1/242	1149	1.96	1.10	1/327	1190
	1	1.19	1.19	1/303	1340	0.86	0.86	1/419	1392
西棟	4	6.42	0.73	1/548	258	4.45	0.50	1/800	324
	3	5.69	1.48	1/270	465	3.95	1.13	1/354	534
	2	4.21	2.23	1/179	672	2.82	1.53	1/261	681
	1	1.98	1.98	1/202	799	1.29	1.29	1/310	767

### 5. まとめ

台湾集集地震で被災したRC造学校建物の耐震性能と被害程度の関係について検討を行った。結論を以下に示す。

耐震診断より得られたIs値から各建物の被災度区分判定結果の違いを概ね説明できる。

同一入力条件における地震応答解析により、地震被害が主に桁行方向で生じ、かつ虎山国民小学校南館より中興高級中学校西棟の被害

害がより大きくなる結果となった。解析から得られた柱の損傷状況は観測された実被害と概ね一致した。

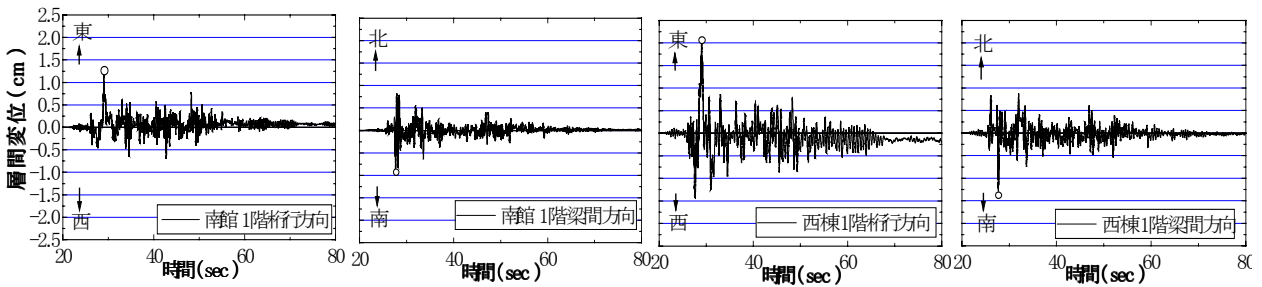


図-9 各建物 1 階の応答変位の時刻歴 ( :最大応答)

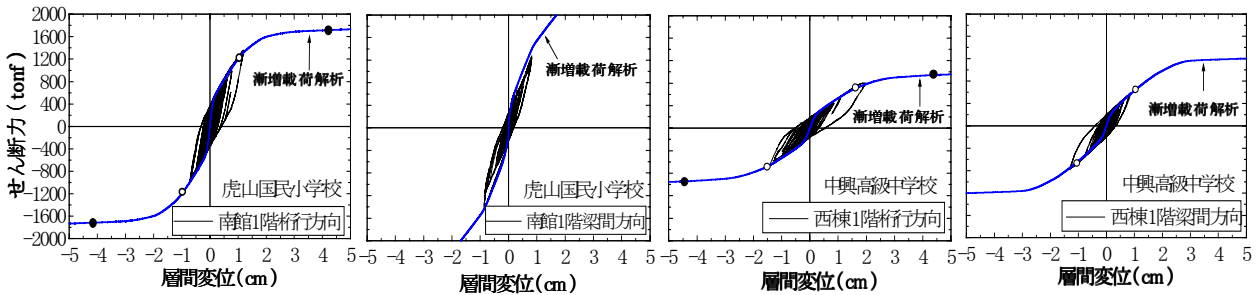


図-10 各建物 1 階層せん断力と層間変形の関係( :初ヒンジ発生点 :降伏メカニズム形成点)

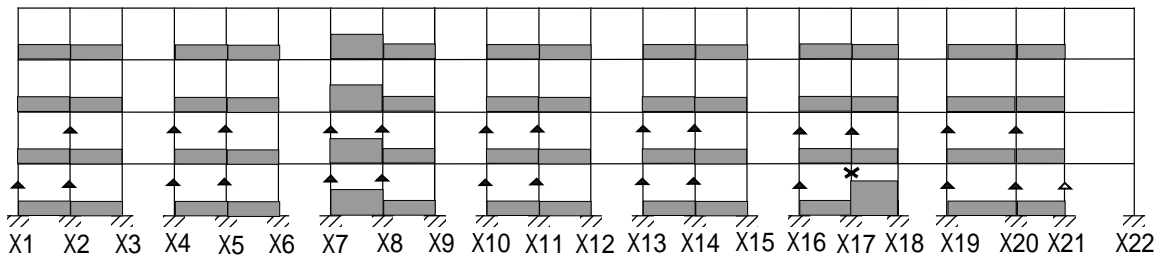


図-11 虎山国民小学校南館 Y1 通りの柱のせん断に対する損傷図

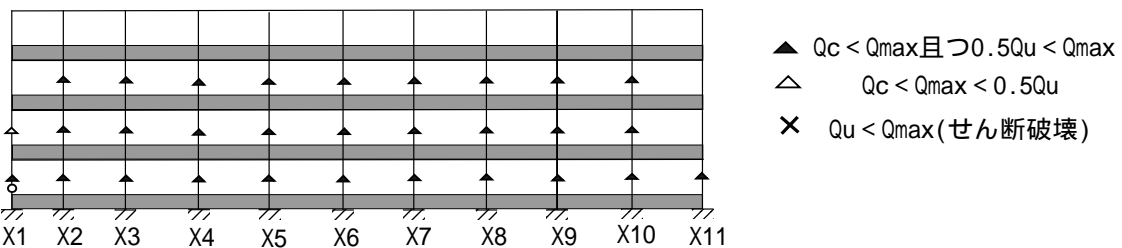


図-12 中興高級中学校西棟 Y1 通りの柱のせん断に対する損傷図

参考文献

- 1) 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 (1990 年版)
- 2) 日本建築学会：1999 年台湾・集集地震 第 編 災害調査報告~ 4.3.14 虎山国民小学校, 4.3.15 中興高級中学 2000.11
- 3) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針 1991 年
- 4) 日本建築防災協会：SPCR 委員会編「鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断プログラム SCREEN Edition-2」1980 年
- 5) Giberson, M.F.: Two Nonlinear Beams with Definitions of Ductility, Proc. ASCE, Vol.95, ST2, 1969.
- 6) 深田泰夫：鉄筋コンクリート建築物の復元力特性に関する研究, 日本建築学科関東支部研, 1969
- 7) 梅村魁編著：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法, 技報堂, 1973
- 8) 梅村魁編著：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法, 続(中層編), 技報堂, 1982