

論文 1999年台湾集集地震で被災した鉄筋コンクリート造建物の地震応答解析

境有紀^{*1}・吉岡伸悟^{*2}・頼織一起^{*3}・壁谷澤寿海^{*4}

要旨：1999年台湾集集地震で観測された強震記録を用いて、鉄筋コンクリート造建物を想定した一自由度系の地震応答解析を行い、被害と応答解析結果の対応性について検討した。その結果、特殊な要因で発生したと考えられる記録を除けば、公開された記録の中では車籠埔断層から東に20km以上離れた、埔里における記録が最も大きな破壊力をもち、実際の被害とも対応するが、1995年兵庫県南部地震の破壊力よりは、かなり小さいこと、地震動の破壊力の指標として、既往のものより周期1秒の弾性応答が適していること、調査した鉄筋コンクリート造学校建物の被害と地震応答解析結果は、非構造煉瓦壁を考慮すれば、ほぼ対応することがわかった。

キーワード：1999年台湾集集地震、地震応答解析、Takedaモデル、最大応答塑性率、必要耐力

1. はじめに

1999年台湾集集地震は、甚大な人的および構造物被害をもたらしたが、同時に、広範囲に渡り、非常に多くの強震記録が観測された。記録の多くは、鉄筋コンクリート造学校建物のすぐ脇で観測されており、地震動と鉄筋コンクリート造建物の被害の関係を検討するための非常に貴重かつ有用な資料が提供された。本研究では、1999年台湾集集地震で観測された強震記録を用いて、鉄筋コンクリート造建物の地震応答解析を行い、実際の被害と応答解析結果の対応性について検討する。

2. 鉄筋コンクリート造学校建物の被害

まず、今回の地震で行った、鉄筋コンクリート造建物の被害調査およびその結果の概要について述べる。

調査地域は被害の大きかった台中縣、南投縣とし、調査項目は、建物被害の調査に加えて、地震応答解析を行うためのデータ（部材断面寸法、スパン、階高、配筋等）を収集した。調査建物（強震観測点）位置を図1に、調査建物（強震観測点）および調査結果の一覧を表1に示す。調査建物は、全部で14箇所、総棟数は23棟である。建物被

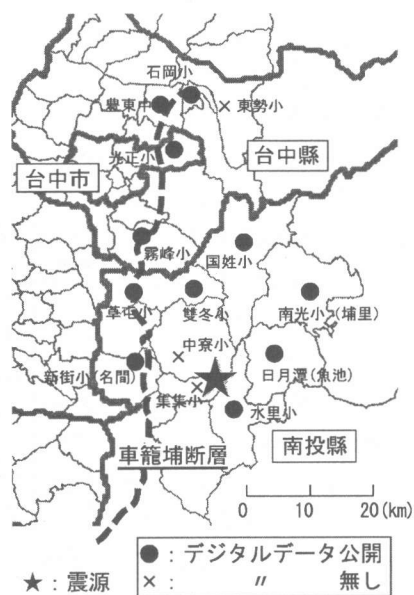


図1 調査建物（強震観測点）の位置

害度は、文献1)の被害ランクに従って、判定を行った。

また、強震観測点のある学校建物だけではなく、調査建物自体も含んだ、その周辺の被災度も併せて調査を行った。周辺の被災度は、表2のように定義を行い、できるだけ定量的に評価できるようにした。周辺の被災度は、何とか区別して判断で

*1 東京大学助手 地震研究所 工博（正会員）

*2 東京大学大学院工学系研究科

*3 東京大学助教授 地震研究所 理博

*4 東京大学教授 地震研究所 工博（正会員）

きる5段階とし、対象となる広さは500m～1km四方、地震動による被害のみを対象とし、断層の直上、地滑り、液状化などの地盤被害によるものは除いた。

調査の結果、被害が大きかったのは、震源から5kmほど北西の中寮、車籠埔断層から東

に10～20kmほど離れた東勢、埔里、國姓で、車籠埔断層近傍は、石岡、霧峰でやや大きな被害があったが、それ以外は、断層直上を除いては、さほど大きな被害はなかった。

3. 強震記録の性質

今回調査を行った地点における強震記録

の諸元を、既往の強震記録と併せて表3に、加速度波形の例を図2に、弾性加速度応答スペクトル(減衰5%)を図3にそれぞれ示す。なお、今回被害調査を行った地点で最も被害が大きかった中寮の中寮国民小学校、震源に最も近い集集国民小学校、中寮に次ぎ、埔里、國姓と並んで被害が大きかった東勢の東勢国民小学校の3点は、残念ながら1999年12月に公開された強震記録には含まれていなかった。

まず地動最大加速度(PGA)を見ると、全11点のうち068、065、071、074、129、084の6点で500cm/sec.²を越え、中でも129、084の2点はともにEW成分で1g程度と非常に大きな値を記録している。

次に地動最大速度(PGV)を見ると、特に068NSでは、200cm/sec.以上と非常に大きな値を記録している。その大きさは、1995年兵庫県

南部地震の記録(FKI)を遙かに凌ぐものである。これに対して、地動最大加速度、地動最大速度より地震動の破壊力を適切に表現する²⁾スペクトル強度(SI)を見ると、129、068は、大きい方の成

表1 調査建物(強震観測点)および調査結果一覧

地域	調査番号	名称	場所	強震計番号	建物データ収集度と建物被害(×の場合に理由)	周辺被災度
台中縣車籠埔断層の北端	1	石岡國民小学校	台中縣石岡鄉	068	◎大破○中破○中破	3
	2	東勢國民小学校	台中縣東勢鎮	×	×取り壊し中×無被害	4
	3	豊東國民中学校	台中縣豐原市	102	×無被害×大破 形状複雑	2
	4	光正國民小学校	台中縣台中市	052	○中破	2
震源の北西	5	霧峰國民小学校	台中縣霧峰鄉	065	○中破×取り壊し中	3
	6	草屯國民小学校	南投縣草屯鎮	075	○中破	2
	7	雙冬國民小学校	南投縣草屯鎮	071	○無被害○中破	2
	8	南光國民小学校	南投縣埔里鎮	074	×取り壊し中○無被害	4
震源の北東	9	國姓國民小学校	南投縣國姓鄉	072	◎中破×取り壊し済み	4
	10	水里國民小学校	南投縣水里鄉	078	×取り壊し済み	2
	11	日月潭氣象台	南投縣魚池鄉	084	◎大破	—
震源付近	12	集集國民小学校	南投縣集集鎮	×	×取り壊し済み○無被害	2
	13	中寮國民小学校	南投縣中寮鄉	×	◎崩壊	5
	14	新街國民小学校	南投縣新街鄉	129	○無被害	1

※建物データ収集度:◎:詳細な建物データが得られたもの、○:簡単な建物データが得られたもの、×:建物データが得られなかったもの

表2 周辺の被災度の定義

被災度	被災状況	目安となる倒壊率(%)
5	壊滅的被害。多くの建物が大破、倒壊	30
4	至る所で大破、倒壊の被害の大きい建物が存在。場所によっては、大半の建物が大破、倒壊	10
3	所々に大破、倒壊の被害の大きい建物が存在。2と4の間	3
2	数少ないが、大破、倒壊の被害の大きい建物が存在。小被害の多い階のある建物に至る所が存在	1
1	大破、倒壊の被害の大きい建物はないが、小被害の多い階のある建物が存在	0
0	被害は見当たらない	0

表3 強震記録

ID	地点名(強震計番号)	方向	地震	PGA	PGV	SI
068NS	石岡國民小学校(068)	NS	1999年台湾集集	371.1	217.8	161.2
068EW	"	EW	1999年台湾集集	507.6	180.0	185.3
102NS	豊東國民中学校(102)	NS	1999年台湾集集	169.8	74.0	118.1
102EW	"	EW	1999年台湾集集	298.3	112.0	143.7
052NS	光正國民小学校(052)	NS	1999年台湾集集	438.6	117.4	261.6
052EW	"	EW	1999年台湾集集	353.4	155.2	206.1
065NS	霧峰國民小学校(065)	NS	1999年台湾集集	538.0	74.3	194.0
065EW	"	EW	1999年台湾集集	778.7	120.2	186.7
075NS	草屯國民小学校(075)	NS	1999年台湾集集	264.4	33.3	61.1
075EW	"	EW	1999年台湾集集	313.2	84.0	104.6
071NS	雙冬國民小学校(071)	NS	1999年台湾集集	622.1	62.8	139.3
071EW	"	EW	1999年台湾集集	516.0	54.9	136.3
074NS	南光國民小学校(074)	NS	1999年台湾集集	380.3	46.0	133.6
074EW	"	EW	1999年台湾集集	604.0	68.6	204.6
072NS	國姓國民小学校(072)	NS	1999年台湾集集	358.3	54.3	135.2
072EW	"	EW	1999年台湾集集	465.5	78.7	154.1
078NS	水里國民小学校(078)	NS	1999年台湾集集	310.4	31.9	81.9
078EW	"	EW	1999年台湾集集	444.7	38.8	111.5
084NS	日月潭氣象台(084)	NS	1999年台湾集集	428.5	52.5	134.2
084EW	"	EW	1999年台湾集集	999.0	113.2	392.3
129NS	新街國民小学校(129)	NS	1999年台湾集集	616.8	37.3	111.3
129EW	"	EW	1999年台湾集集	971.2	58.5	153.7
FKI	大阪ガス畳合供給所	NS	1995年兵庫県南部地震	802.0	130.4	359.0
SLM	Sylmar	EW	1994年Northridge	826.7	125.7	277.5
KSR	銅路地方氣象台	EW	1993年銅路沖地震	711.4	33.1	115.4
ELC	El-Centro	NS	1940年Imperial Valley	341.7	34.8	93.1
HAC	八戸港湾	EW	1968年十勝沖地震	181.7	33.9	88.9
THU	東北大学	NS	1978年宮城県沖地震	258.2	41.0	117.1

PGA:地動最大加速度(cm/sec.²), PGV:地動最大速度(cm/sec.), SI:スペクトル強度(cm)

分でもそれぞれ 153.7cm, 185.3cm 程度と 1995 年兵庫県南部地震の記録(FKI)の 359.0cm より遙かに小さい。しかしながら, 084 のスペクトル強度(SI)は EW 成分で 392.3cm と 1995 年兵庫県南部地震の記録(FKI)より大きい。

加速度波形を見ると, 129EW は短周期が卓越し, 最大加速度が発生しているパルスもスパイク状であるのに対し, 084EW では, 長周期が卓越しているのがわかる。被害の大きかった埔里(074), 霧峰(065)の記録も, やや長周期が卓越している。また, 非常に大きな地動最大速度を記録した石岡(068NS)の記録は, 片側に長周期に渡ってシフトする, という, 特徴的な波形をしている。

弾性加速度スペクトル(図3)を見ると, 非常に大きな地動最大加速度を記録した新街(129EW)は, 短周期が卓越していて, 構造物に最も大きな被害を与える周期 1 秒前後³⁾では, 小さな値となっているのに対して, 被害の大きかった, 埔里(074), 國姓(072), 霧峰(065), 日月潭(084)は, 周期 1 秒前後で大きな値になっていることがわかる。特に, 084EW は, 振幅の大きさとも相まって, 非常に大きな値となっている。ただ, 084EW のある日月潭気象台は, 1000m を越える山の頂上にあり, 山のふもとの日月潭(湖)からも 300m 程高く, 地形の影響で局所的に大きな破壊力をもつ地震動が発生した, と考えるべきであろう。この 084EW を除け

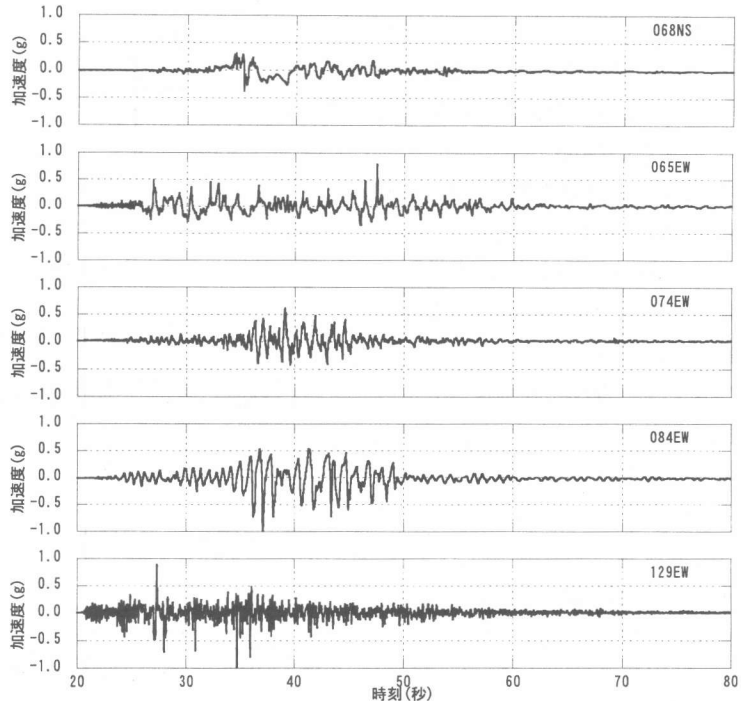


図2 加速度波形

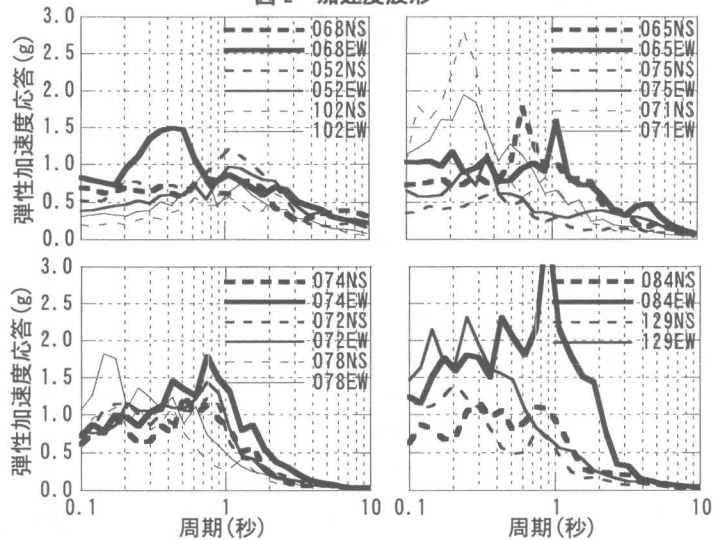


図3 弾性加速度スペクトル(減衰 5%)

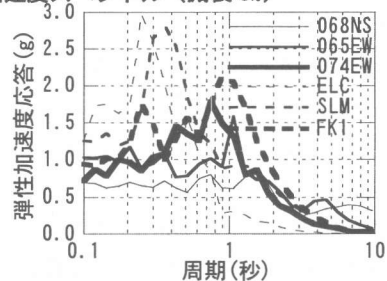


図4 弾性加速度スペクトルの既往の強震記録との比較

ば、074EW が1秒付近では、最も大きな値となっている。また、非常に大きな地動最大速度を記録した068NSの、周期1秒前後の弾性加速度応答は、065EW、074EWより小さい。

そこで、非常に大きな地動最大速度を記録した068NS、被害の大きかった074EW、065EWの3記録と、既往の強震記録FKI、SLM、ELCとの減衰5%の弾性加速度スペクトルを比較して図4に示す。これを見ると、構造物に最も大きな被害を与える周期1秒前後では、068NSは1994年Northridge地震(SLM)より小さく、074EWと065EWは、SLMより大きな値となっているが、1995年兵庫県南部地震(FKI)に比べれば、かなり小さい。

3. 一自由度系による 弾塑性地震応答解析

強震記録の破壊力をより正確に把握するために、鉄筋コンクリート造建物を想定し、非線形の復元力特性として Takeda モデル⁴⁾を用いた一自由度系弾塑性地震応答解析を行った。Takeda モデルのスケルトンカーブを図5に示す。Takeda モデルのパラメータは、ひび割れ耐力/降伏耐力を0.3、降伏後の剛性/初期剛性を0.01、降伏点剛性低下率を0.25とし、柱脚固定、減衰は弾性時5%として瞬間剛性に比例させ、Newmark- β 法($\beta=1/6$)を用い、時間刻みは系の周期の1/20とした。

ここでは、構造物の被害を表現する弾塑性地震応答として、塑性率をある一定値(以下、許容塑性率)に収めるために必要なベースシア係数(以下、必要耐カスペクトル)を求める。ここでは、許容塑性率 μ_a は2の場合を計算した。

必要耐カスペクトルを、建築物の大部分が所属する周期領域である0.2秒から1秒までについて図6に示す。ほぼ、周期1秒前後の弾性加速度スペクトルの値から予想される結果となっている。

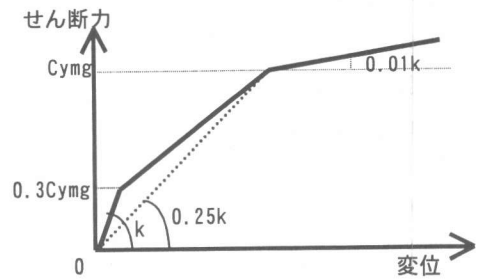


図5 Takeda モデルのスケルトンカーブ

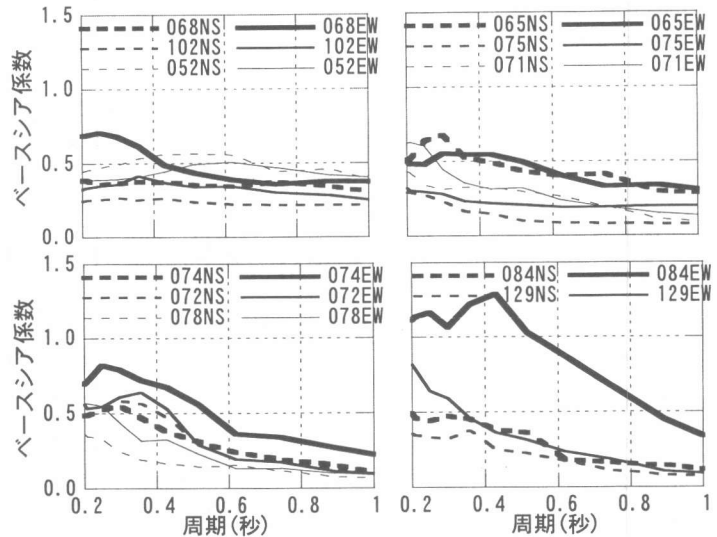


図6 必要耐カスペクトル(許容塑性率=2)

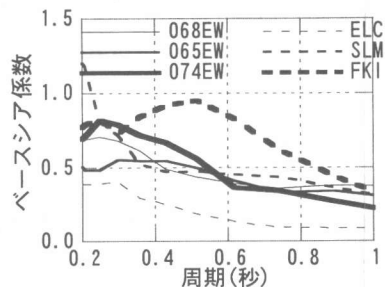


図7 必要耐カスペクトルの
既往の強震記録との比較

即ち、非常に大きな地動最大加速度を記録した084EWと129EWについて、084EWでは、必要耐カスペクトルは非常に大きな値になっているのに対して、129EWでは、はるかに小さな値になっている。特殊な要因で発生したと考えられる084EWを除けば、074EWが最も大きな値となり、最も破壊力が大きな地震動であることがわかる。しかしながら、既往の強震記録と比較した図7を見ると、最も大きい074EWでもFKIよりは、かなり小さい。

4. 地震応答解析結果 と被害との対応

まず、地動最大加速度等の地震動の破壊力指標と強震観測点周辺の被災度との対応について見てみる。地動最大加速度、地動最大速度、スペクトル強度に加えて、1秒における減衰5%の弾性加速度応答と周辺の被災度の関係について図8に示す。地動最大加速度は、ほ

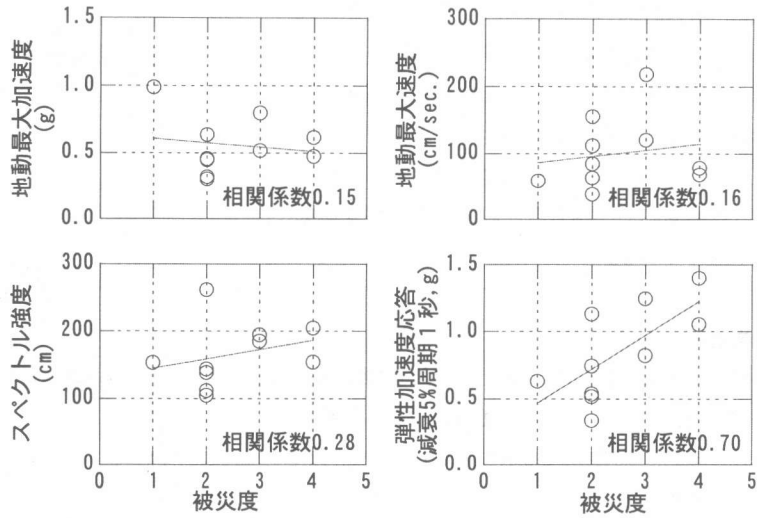


図8 地震動の破壊力指標と被災度の関係

とんど相関がなく、地動最大速度、スペクトル強度はやや相関が見られるが、1秒における減衰5%の弾性加速度応答が最も被災度と対応している。

次に、調査建物のうち、部材断面寸法のデータが得られた13棟について、一自由度系を用いた弾塑性地震応答解析を行った。対象建物を表4に示す。建物重量を

1.2ton/m²と仮定し、

建物の周期は、コンクリートの剛性を2100MPaと仮定して、柱断面寸法を基に求めた。耐力(ベースシア係数)は、柱の終局せん断応力度 τ_u を表4のように仮定して求めた。即ち、0.7MPaを基準とし⁵⁾、被害調査の際に、建設から5年以内で、明らかにコンクリートの品質が良いものを1.0MPa、建設から時間が経っており、コンクリートの品質が明らかに悪いものを0.5MPaとした。壁につい

表4 対象建物とその被害度および応答解析結果

ID	建物名	建物方向	階数	周期(秒)	耐力 煉瓦壁 非算入	耐力 煉瓦壁 算入	被害度	τ_u	強震 記録	μm 煉瓦壁 非算入	μm 煉瓦壁 算入
IAT	石岡国民小学校A棟	梁間	3	0.35	0.61	0.80	中破	0.7	068NS	1.630	0.379
JAL	"	桁行		0.44		0.61			068EW	2.558	1.345
TBT	" B棟	梁間	2	0.35	0.42	0.91	中破	0.5	068NS	1.805	0.296
TBL	"	桁行		0.33		0.66			068EW	5.608	1.767
TBT	" C棟	梁間	2	0.59	0.24	0.62	大破	0.5	068EW	7.764	1.234
TBL	"	桁行		0.70		0.43			068NS	6.733	1.673
TBT	" D棟	梁間	1	0.27	0.39	1.51	小破	0.5	068EW	9.562	0.395
TBL	"	桁行		0.46		0.95			068NS	1.856	0.237
SAT	光正国民小学校A棟	梁間	2	0.32	0.47	1.48	小破	0.7	052EW	1.215	0.089
SAL	"	桁行		0.44		0.81			052NS	4.244	0.833
UBT	霧峰国民小学校B棟	梁間	2	0.38	0.31	1.16	小破	0.7	065NS	6.917	0.755
UBL	"	桁行		0.57		0.72			065EW	3.194	1.078
NAT	草屯国民小学校A棟	梁間	2	0.44	0.31	1.04	軽微	0.7	075NS	0.615	0.182
OAL	"	桁行		0.42		0.56			075EW	0.969	0.461
OAT	雙冬国民小学校A棟	梁間	1	0.07	0.74	2.65	小破	0.7	071NS	5.744	0.071
OAL	"	桁行		0.16		1.77			071EW	1.627	0.760
OBT	" B棟	梁間	2	0.19	0.88	2.65	無被害	1.0	071EW	1.120	0.325
OBL	"	桁行		0.33		1.69			071NS	0.545	0.146
PDT	南光国民小学校D棟	梁間	2	0.20	0.75	2.72	無被害	1.0	074NS	0.801	0.069
PDL	"	桁行		0.35		1.41			074EW	1.905	0.622
KBT	國姓国民小学校B棟	梁間	3	0.36	0.85	0.85	中破	1.0	072NS	0.722	0.722
KBL	"	桁行		0.42		0.85			072EW	1.103	1.103
TAT	日月潭気象台	梁間	2	0.50	0.37	0.64	大破	0.7	084NS	1.728	1.179
TAL	"	桁行		0.65		0.74			084EW	3.837	2.312
GAT	新街国民小学校A棟	梁間	2	0.34	0.42	2.69	軽微	0.7	129NS	1.113	0.071
GAL	"	桁行		0.56		1.55			129EW	1.175	0.219

τ_u : 柱の終局せん断応力度(MPa), μm : 最大応答塑性率

ては、全て煉瓦造だったので、開口が全くない場合にのみ終局せん断応力度を鉄筋コンクリートの1/6として、即ち、面内方向は、2.5/6=0.42MPa⁵⁾、直交方向は、0.7/6=0.12MPaとして、算入した場合も解析した。用いた解析モデルは3.と同じである。

建物被害度を無被害:0, 軽微:1, 小破:2, 中破:3, 大破:4として、建物被害度と最大応答塑性率の張

間方向と桁行方向の大きい方（どちらか大きい方で建物被害が決まるので）との関係を図9に示す。煉瓦造壁を耐力として算入しない場合はあまり相関が高くないが、算入した場合は、高い相関を示している。また、被害度に対する最大応答塑性率の大きさの対応も、煉瓦壁を算入した方が妥当なものになっている。

5. まとめ

1999年台湾集集地震で観測された強震記録を用いて、鉄筋コンクリート造建物の地震応答解析を行い、被害と応答解析結果の対応性について検討した。その結果、

- ・特殊な要因で発生したと考えられる記録を除けば、公開された記録の中では車籠埔断層から東に20km以上離れた、埔里における記録が最も大きな破壊力を持ち、実際の被害とも対応するが、1995年兵庫県南部地震の破壊力よりは、かなり小さいこと、
- ・地震動の破壊力の指標として、既往のものより、周期1秒の弾性応答が適していること、
- ・調査した鉄筋コンクリート造学校建物の被害と地震応答解析結果は、煉瓦造壁を耐力として算入しない場合はあまり相関がよくないが、算入した場合は、よい対応を示すことがわかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 1978年宮城県沖地震災害調査報告, 1980.
- 2) 境有紀, 南忠夫, 壁谷澤寿海, 地震動の性質を簡便に表現する方法, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, 265-268, 1998.
- 3) 境有紀, 地震動の破壊力 - どのような性質の地震動が大きな被害をもたらすか -, 大加速度(速度)強震動の成因解明と強震動-地震被害との相互連関性に関する研究, 平成8-10年度東京大学地震研究所特定共同研究(B)報告書, 1999.

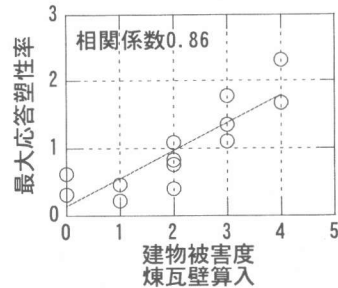
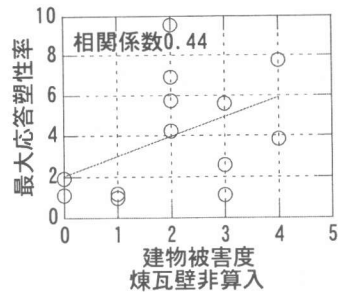


図9 建物被害度と最大応答塑性率の関係

- 4) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N. : Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST5, 1970.
- 5) 小野瀬順一, 鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布, 第6回日本地震工学シンポジウム講演集, 1982.

謝辞

被害調査は、筆頭および第3著者が集集大地震東京都調査団の一員として行ったものです。被害調査の際、現地の方々は、被災されていたにもかかわらず、快く対応していただき、様々な資料も提供していただきました。1999年台湾集集地震の強震記録は、台湾台北中央気象局より、1995年兵庫県南部地震の強震記録は、大阪ガスより提供を受けたものです。関係各位に深く感謝いたします。