

地震観測記録を用いた台湾集集地震における建物被害と地震動強さの関係

宮腰 淳一 護 雅史 神原 浩 林 康裕
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Relationship Between Building Damages and Indices of Seismic Ground Motion Based on Strong Motion Records from the September 21, 1999, Chi-Chi, Taiwan, Earthquake

by Jun'ichi Miyakoshi, Masafumi Mori, Hiroshi Kambara and Yasuhiro Hayashi

Abstract

A major earthquake ($M_w=7.6$) occurred near the town of Chi-Chi in Nantou county, central Taiwan, on September 21, 1999. We investigated the building damages around the earthquake observation stations. The strong motion recordings from over 400 stations in this earthquake area were pre-published by Central Weather Bureau of Taiwan on December, 1999. In this paper, we examined the relationships between building damages and four indices of seismic ground motions, which were peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), spectrum intensity (SI) by Housner (1965), and seismic intensity of Japan Meteorological Agency (I_{JMA}). In this result, we have shown the following features: (1) We pointed out that most of the damaged school buildings were not very tough, since most of the damages surpassing the minor ones in the investigated areas were all severe. (2) The correlation coefficient of PGA to PGV in the investigated areas was very low. Only a few buildings were damaged severely in the areas that PGA/PGV were less than about 3. (3) In the areas where PGA, PGV, and I_{JMA} were less than 400 cm/s², 50 cm/s and 5.5, respectively, only a few buildings were severely damaged. (4) In those cases where some indices are modified by filtering or where the selected PGA/PGV values fell in a determined area, it was shown that buildings damages could be explained to some extent by looking at the indices of seismic ground motions.

概 要

1999年9月21日に発生した台湾集集地震に関して、地震観測点のある学校の校舎とその周辺の建物の被害調査を行った。また、1999年12月には、延べ400点を越える強震記録が公表された。本論文では、建物被害調査結果と強震記録を用いて、台湾集集地震における地震動強さと建物被害の関係について分析した。その結果、以下のことを指摘した。(1) 調査した学校建物では小破を越える被害の多くは大破以上であり、被害を受けた建物の多くは靱性性能が低かった。(2) 本調査地点における地震動強さ指標（最大地動加速度 PGA、最大地動速度 PGV、SI値、計測震度）の間の関係は、とくにPGVとPGAの相関が低かった。また、(PGA/PGV)が3程度以下では建物被害は少なかった。(3) PGAが400 (cm/s²) 以下、PGVが50 (cm/s) 以下、計測震度が5.5以下では、建物被害は極めて少なかった。(4) 最大地動振幅をフィルターによって補正した場合や、(PGA/PGV)の値がおおよそ3~10の地点のみを選択した場合において、地震動強さ指標と建物被害の相関係数がいずれの場合も大きくなり、地震動強さ指標で建物被害をある程度説明可能であることを示した。

§ 1. はじめに

1999年9月21日に発生した台湾集集地震では、台湾中部を中心に甚大な被害が生じた。しかし、同時に多数の地震観測点で強震記録が得られた。台湾国内には600を越える地点の地盤上に強震計が設置されており、1999年12月には400を越える地点における本震の強震記録が公表された¹⁾。これらは、地震動と建物被害との関係の把握や、被災建物の被災原因の究明等を行う上できわめて貴重なデータである。筆者ら

は、この地震の地震動と建物被害の関係の全体像を把握することを目的として、10月7日より約10日間の日程で、主として地震観測点周辺に絞ったマクロな建物被害調査を行った。

本論文では、まず、この建物被害調査結果について報告する。台湾の地震観測点の多くは小中学校の敷地内にあることから、学校の校舎とその周辺建物のマクロな被害調査を行った。ここで、学校建物とその周辺の建物の被害との関連について若干の考察を加える。次に、1999年12月に公表された強震記録

市縣名	負傷者 (人)	死者 (人)	全壊 (棟)	全壊 (戸)	半壊 (棟)	半壊 (戸)	全戸数 (戸) (1999.04)	全壊率	半壊率
								(%) 全壊(戸)/戸数	(%) 半壊(戸)/戸数
台北市	316	72	3	76	20	325	872,050	0.009	0.037
新竹市	4	2	5	5			106,451	0.005	0.000
台中市	1,112	113	496	10,366	516	13,720	289,164	3.585	4.745
嘉義市	11		1	28			77,717	0.036	0.000
台北縣	145	39	1	44	2	80	1,075,387	0.004	0.007
桃園縣	84	3	9	2	2	11	472,649	0.000	0.002
新竹縣	4		2	2	1	1	109,951	0.002	0.001
苗栗縣	196	6	136	136	221	221	140,796	0.097	0.157
南投縣	2,434	817	4,197	調査中	3,509	調査中	145,614	-	-
台中縣	3,606	1,050	3,278	調査中	3,018	調査中	382,882	-	-
彰化縣	388	23	30	84	2	2	309,300	0.027	0.001
雲林縣	423	65	256	605	250	910	194,958	0.310	0.467
嘉義縣	5	2	40	40	33	33	150,588	0.027	0.022
台南縣	1	1			1	1	316,012	0.000	0.000
宜蘭縣	7		5				128,189	0.000	0.000
合計	8,737	2,192	9,909	-	7,575	-	4,771,708	-	-

被害統計は、台湾内政部²⁾による。全戸数は、内政部統計處³⁾による。

表一 台湾集集地震による1999年10月3日現在の死傷者数および被災建物数と全壊率および半壊率^{2), 3)}

を用いて地震動強さ指標を計算する。このときの地震動強さ指標は、最大地動加速度、最大地動速度、SI値、計測震度とした。そして、地震動強さ指標間の関係について、強震記録が公表された全観測点と建物被害調査を行った地点のうち強震記録が公表された地点の平均的な関係について考察する。最後に、ここで得られた各種の地震動強さ指標と建物被害の関係について分析する。このとき、地震動強さと建物被害との相関が低い地点があったので、その原因を探るために、地震動強さを補正した場合と、建物被害の特徴を吟味した上で調査地点を選択した場合について分析する。

§ 2. 被害統計

1999年9月21日午前1時47分(現地時間)頃、台湾中部の町、南投縣集集付近を震源とした M_w 7.6 (USGS-米国地質調査所調べ)の地震が発生し、台中縣、南投縣を中心に甚大な被害が生じた。この地震による人的被害および建物被害は、台湾内政部の報告²⁾によると10月3日午後2時現在で、表一に示すように、死者2,192名、負傷者8,737名、全壊建物9,909棟、半壊建物7,575棟である。表には、市および縣別の死傷者数と被災建物数も示している。また、

表には、1999年4月台湾内政部統計所発行の内政統計月報³⁾による各市および縣の全戸数と、全壊率(全壊戸数/全戸数)および半壊率(半壊戸数/全戸数)も示している。表より、震源に近い南投縣および台中縣でそれぞれ死者が1,000名程度、全壊建物が3,000棟以上と被害が大きかったことが分かる。また、台中市、台北市および台北縣では、全壊棟数よりも全壊戸数が非常に多く、特に台北市や台北縣では全壊棟数に対する死者の割合も非常に大きかったことが分かる。これは、高層のマンションやホテルの倒壊による影響が大きいと考えられる。

§ 3. 建物被害調査

3.1 調査方法と調査日程

台湾国内の地震観測点の多くは、小中学校の敷地内の地盤上に設置されている⁴⁾。そこで、筆者らは、地震観測点のある小中学校の校舎の被害調査と、地震観測点周辺の建物のマクロな被害調査を行った。実際の調査期間は、1999年10月9日から15日までの7日間とした。調査日程を表一2に示す。

学校の被害調査は、校舎毎に外観調査から被災度を判定した。一方、周辺建物の被害調査方法は、地震観測点周辺においてブロック全数調査を行い倒壊

から無被害までの被災度を判定した場合（調査方法III）、大破・倒壊のみを判定した場合（調査方法II）、外見上地震観測点周辺の建物被害が見られず明らかに大破・倒壊率が5%未満であると判断した場合および地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率が明らかに30%以上（TCU072）あるいは50%以上（TCU143）であると判断した場合（調査方法I）の3つの方法で行った。ブロック全数調査の一例を図-1に示す。このときの調査項目は、階数、用途、構造種別および被災度である。なお、建物被害調査では、主に5階建て以下のRC造建物を対象とした。

被災度判定基準は、図-2に示すように日本建築学会の1978年宮城県沖地震災害調査報告の表5・4⁵⁾に基づくものとし、被災度は倒壊、大破、中破、小破、被害軽微、無被害の6段階とした。なお、被災度判定は短時間での目視による外観調査であるため、建物内部までの詳細な調査を行うことによって被災度が変わる可能性がある。

調査を行った地震観測点を図-3に示す。図中には、震源、車籠埔断層、および雙冬断層の概略位置を併せて記してある。ただし、図に示した車籠埔断層の位置は、地表に現れた断層とは対応していない。また、調査した地震観測点の一覧を表-3に示す。調査した地震観測点は合計33地点であった。なお、TCU079は、学校の校舎の被害調査は行ったが、地震観測点周辺の建物数が少なかったため周辺建物の被害調査は行わなかった。また、TCU084の周辺には建物がなかったため周辺建物の被害調査は行えなかった。

3.2 調査結果の整理方法

地震観測点周辺の建物被災度ランクを周辺建物の大破・倒壊率に基づいて分類した。被災度ランク

調査日	調査地点
10月9日	豊原→石岡
10月10日	埔里→國姓→雙冬→草屯
10月11日	大抗→新社→東勢→卓蘭→内湾→石岡→豊原
10月12日	大里→霧峰→台中
10月13日	名間→魚池→日月潭→水里→集集→中寮
10月14日	南投→名間→竹山→二水→員林
10月15日	豊原→后里→豊原→潭子→台中

注) 太字の調査地点は地震観測点周辺でのブロック全数調査を行った地点を示す。

表-2 調査日程



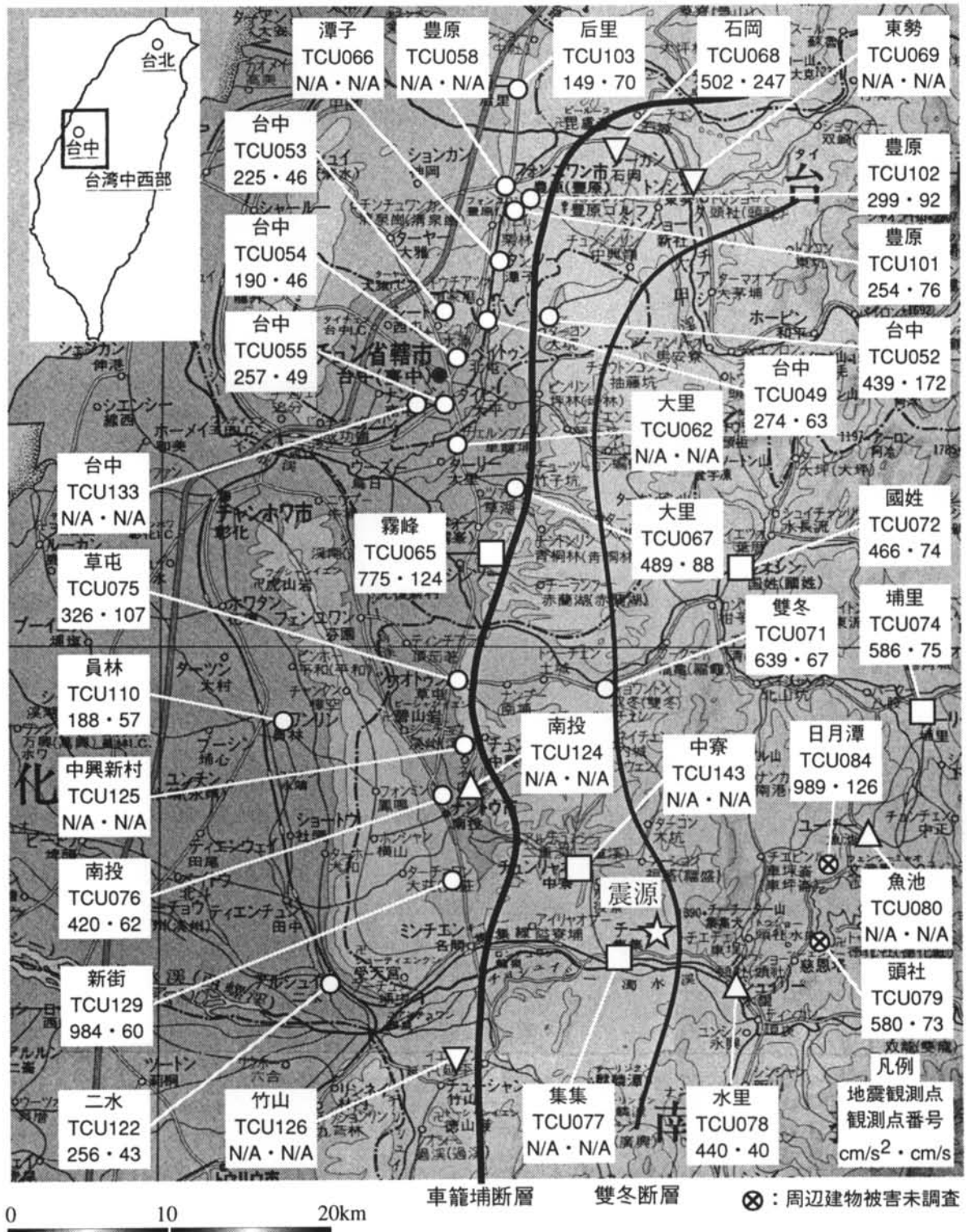
建物No.	階数	用途	構造種別	被災度	写真No.
1	3	住宅	RC造	大破	1
:	:	:	:	:	:

図-1 調査建物と全数調査シートの例

被災度 (ランク)	被害情況	スケッチ
倒壊 (V)	柱・耐力壁が大破壊し、建物全体または建物の一部が崩壊に至ったもの。	
大破 (IV)	柱のせん断ひびわれ・曲げひびわれによって鉄筋が露出・座屈し、耐力壁に大きなせん断ひびわれが生じて耐力に著しい低下が認められるもの。	
中破 (III)	柱に典型的なせん断ひびわれ・曲げひびわれ、耐力壁にせん断ひびわれが見られ、RC二次壁・非構造体に大きな損傷が見られるもの。	
小破 (II)	柱・耐力壁の損傷は軽微であるが、RC二次壁・階段室のまわりに、せん断ひびわれが見られるもの。	
被害 軽微 (I)	柱・耐力壁・二次壁の損傷が、軽微かもしくは、ほとんど損傷がないもの。	

図-2 本調査の被災度判定基準⁵⁾

□：建物被災度ランクA △：建物被災度ランクB ▽：建物被災度ランクC ○：建物被災度ランクD



図一 3 建物被害調査を行った地震観測点（上段：地名，中段：観測点番号）と強震記録より計算した最大地動加速度（下段左：cm/s²）・最大地動速度（下段右：cm/s）および地震観測点周辺の建物被災度ランク

観測点 番号	観測 地点名	地域名	最大 地動 加速度 (cm/s ²) <small>(注1)</small>	最大 地動 速度 (cm/s) <small>(注1)</small>	SI値 (h=0.20) (cm/s) <small>(注1)</small>	計測 震度	周辺建物 被害調査 方法 <small>(注2)</small>	周辺建物 被災度 ランク <small>(注3)</small>	調査 校舎 数	学校 被災度 <small>(注4)</small>	備考
TCU049	僑孝小学校	台中市北屯区	274	63	30	5.22	I	D	3	0.00	
TCU052	光正小学校	台中市北屯区	439	172	114	6.29	I	(D)	2	0.01	
TCU053	健仁小学校	台中市北屯区	225	46	24	5.20	I	D	4	0.00	
TCU054	省三小学校	台中市北区	190	46	28	5.12	I	D	3	0.00	
TCU055	忠孝小学校	台中市南区	257	49	32	5.35	I	D	3	0.01	
TCU058	瑞穂小学校	台中縣豊原市	—	—	—	—	II	D	5	0.00	
TCU062	崇光小学校	台中縣大里郷	—	—	—	—	II	D	2	0.01	
TCU065	霧峰小学校	台中縣霧峰郷	775	124	80	6.06	III	(A)	7	0.30	
TCU066	潭子小学校	台中縣潭子郷	—	—	—	—	II	D	4	0.01	
TCU067	健民小学校	台中縣大里郷	489	88	75	5.88	I	(D)	3	0.03	
TCU068	石岡小学校	台中縣石岡郷	502	247	94	6.05	I	(C~D)	3	0.04	
TCU069	東勢小学校	台中縣東勢鎮	—	—	—	—	III	C	4	0.03	50%以上の 地域有
TCU071	雙冬小学校	南投縣草屯鎮	639	67	47	5.92	I	D	3	0.00	
TCU072	國姓小学校	南投縣國姓郷	466	74	53	5.86	I	A	3	0.40	
TCU074	南光小学校	南投縣埔里鎮	586	75	79	6.04	III	A~B	3	0.73	
TCU075	草屯小学校	南投縣草屯鎮	326	107	59	5.51	I	(D)	3	0.00	
TCU076	南投小学校	南投縣南投市	420	62	51	5.68	II	D	8	0.11	解体済除 (1棟)
TCU077	集集小学校	南投縣集集鎮	—	—	—	—	II	A	3	0.20	
TCU078	水里小学校	南投縣水里郷	440	40	36	5.63	II	(B)	2	0.31	解体済除 (1棟)
TCU079	頭社小学校	南投縣魚池郷	580	73	57	6.00	—	—	2	0.30	
TCU080	魚池小学校	南投縣魚池郷	—	—	—	—	II	B	5	0.04	
TCU084	氣象観測所	南投縣魚池郷	989	126	152	6.49	—	—	—	—	
TCU101	豊南中学校	台中縣豊原市	254	76	29	5.36	II	D	8	0.00	補修済除 (1棟)
TCU102	豊東中学校	台中縣豊原市	299	92	71	5.71	II	D	7	0.09	
TCU103	内埔小学校	台中縣后里郷	149	70	26	4.98	II	D	5	0.00	
TCU110	員林小学校	彰化縣員林鎮	188	57	51	5.43	I	D	13	0.00	
TCU122	二水小学校	彰化縣二水郷	256	43	36	5.26	I	D	2	0.01	
TCU124	平和小学校	南投縣南投市	—	—	—	—	II	B	6	0.02	解体済除 (1棟)
TCU125	光華小学校	南投縣南投市	—	—	—	—	I	D	4	0.01	
TCU126	竹山小学校	南投縣竹山鎮	—	—	—	—	II	B~D	1	0.01	解体済除 (3棟)
TCU129	新街小学校	南投縣名間郷	984	60	56	5.98	I	D	4	0.00	
TCU133	大勇小学校	台中市西区	—	—	—	—	I	D	3	0.00	
TCU143	中寮小学校	南投縣中寮郷	—	—	—	—	I	A	4	0.80	
合計	33観測点								132		

注1) 最大地動加速度、最大地動速度およびSI値は水平2成分の最大値とした。なお、SI値は減衰定数20%の擬似速度
応答スペクトル(変位応答スペクトルから周期を介して求めたもの)より算定した。

注2) 周辺建物被害調査方法で、III:ブロック全数調査を行った場合、II:大破・倒壊率のみの調査を行った場合、
I:外見上建物被害が見られず明らかに大破・倒壊率が5%未満であると判断した場合および外見上大破・倒壊率
が明らかに30%以上(TCU072(國姓小))あるいは50%以上(TCU143(中寮小))であると判断した場合、—:調査を
行わなかった場合をそれぞれ意味する。

注3) 周辺建物被災度ランクで、大破・倒壊率が、A:20%以上、B:10~20%、C:5~10%、D:5%未満である。な
お、TCU052(光正小)、TCU065(霧峰小)、TCU067(健民小)、TCU068(石岡小)、TCU075(草屯小)などの周辺で
は地表に現れた断層変位による建物被害も含んでいる。また、TCU078(水里小)の周辺では地盤変状による建物
被害も含んでいる。

注4) 学校被災度は、校舎1棟毎の被災度に基づいて重み付き平均により算定した。このときの重み係数は、倒壊:
1.0、大破:0.6、中破:0.3、小破:0.1、被害軽微以下:0.0とした。

表一 3 調査した地震観測点、その周辺の建物の被害調査方法と調査結果、調査した学校の校舎数と学校被災
度、および強震記録より計算した地震動強さ指標の一覧

は、大破・倒壊率が、20%以上、10～20%、5～10%、5%未満の場合をそれぞれランクA、ランクB、ランクC、ランクDとした。これらの調査結果を表-3に示す。ここで、TCU069の周辺に関しては、観測点からやや離れた地域では大破・倒壊率が50%を超える場合もあったが、観測点周辺の地域では大破・倒壊率が数%程度であり、ここでは周辺建物の被災度ランクをCとした。

学校の被害は、倒壊から無被害まで被災度毎に棟数を集計した。また、各学校における学校全体の被災度（学校被災度とよぶ）を1棟毎の校舎の被災度に基づいて重み付き平均により算定した。このときの重み係数は、日本建築防災協会の被災度判定のための損傷割合⁶⁾を参考に、倒壊を1.0、大破を0.6、中破を0.3、小破を0.1、被害軽微および無被害を0.0とした。表-3に、各学校で調査した棟数（解体済みおよび補修済みの校舎は除く）と学校被災度を示す。調査した校舎の棟数は合計132棟であった。

なお、TCU052、TCU065、TCU067、TCU068およびTCU075の周辺では、地表に現れた断層変位による建物被害が多く見られ、震動による建物被害との分離が困難であった。また、TCU078の周辺では地盤変状もみられ、これらの地点での建物被害には震動以外による被害も含まれている可能性がある。

また、いずれも無被害または軽微な被害であったTCU080の2階建てRC造校舎とTCU103の3階建てRC造校舎および台中市内の3階建てRC造住宅に対して常時微動測定も行った⁷⁾。これらの建物に対する階数と常時微動による振動周期の関係を図-4に示す。図より、本調査範囲で対象とした5階建て以下のRC造建物の一次固有周期は、概ね0.5秒程度以下であると考えられる。

3.3 学校の被害と周辺建物の被害の関係

ここでは、地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率と学校の被害との関係について考察する。

まず、地震観測点周辺の建物被災度ランクがD（大破・倒壊率が5%未満）の地域と建物被災度ランクがA～C（大破・倒壊率が5%以上）の地域に分類し、各地域の学校の被害棟数を集計して被害率を算定した結果を図-5に示す。図より、周辺建物の被災度ランクがDの地域では学校の大破・倒壊率が2%、小破率が4%であるのに対して、周辺建物の被災度ランクがA～Cの地域では学校の大破・倒壊率が32%、小破率が12%と被害率が非常に大きい。また、周辺建物の被災度ランクがA～Cの地域では、中破の建物はなく、小破よりも大きな被害は大破以上であった。被災度判定結果のばらつきを考えれば、中破の建物が1

棟もなかったとはいきれないが、小破を越える被害の多くが大破以上であったことには間違いはない。このことから、本調査範囲で被害を受けた学校の校舎の多くは、靱性が乏しかった可能性が示唆される。

次に、学校被災度と周辺建物の大破・倒壊率の関係を図-6に示す。図より、TCU074では周辺建物の大破・倒壊率に比べて学校被災度が非常に大きく、逆にTCU126では学校被災度は非常に小さいが周辺建物の大破・倒壊率は大きい。このうち、TCU126に関しては、学校の校舎の4棟中3棟が解体済みであり、ここで示した学校被災度が実際の学校の被害と対応していない可能性がある。これらの地域を除けば全体的に学校被災度と周辺建物の大破・倒壊率には相関があり、学校被災度が大きい地域は周辺建物の大破・倒壊率も大きい傾向が読みとれる。

最後に、学校建物の大破・倒壊率と周辺建物の大破・倒壊率の関係を図-7に示す。表-3に示したように、各学校の校舎の棟数は4棟以下の場合が多く、それを母数として算定した学校建物の大破・倒壊率はやや信頼性が低いですが、図より全体的には学校建物

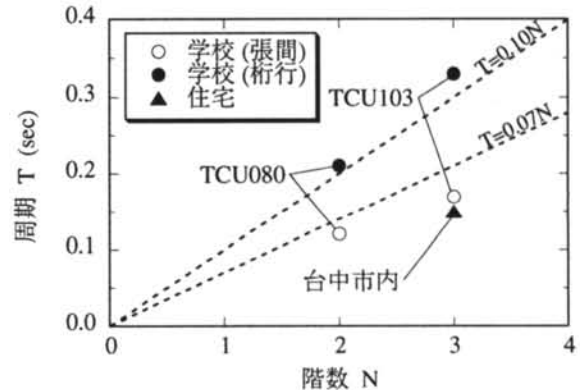


図-4 常時微動による低層RC造建物の振動周期⁷⁾

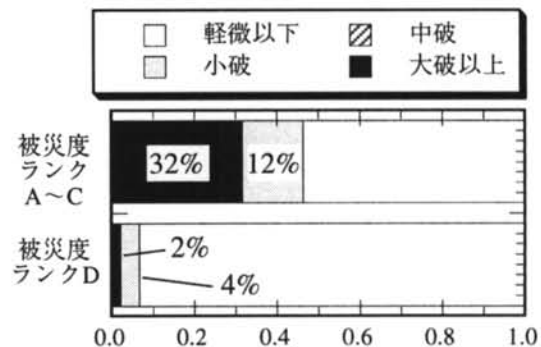


図-5 地震観測点周辺の建物被災度ランクによって分類した地域別の学校の被害率

の大破・倒壊率より周辺建物の大破・倒壊率の方がやや小さい傾向にあることが分かる。

§ 4. 地震観測記録に基づく地震動強さ

4.1 地震観測記録と地震動強さ指標

台湾国内には600を超える地点の地盤上に強震計が設置されている⁴⁾。このうち、延べ422地点での本震の強震記録が1999年12月6日にCD-ROMで公表された⁵⁾。これには、延べ422の地震観測点における水平2成分と上下成分の計3成分の加速度記録が含まれている。以下では、このうち、明らかにノイズの影響を受けている19地点を除いた延べ403地点の地震観測記録を用いて分析する。

本論文では、加速度波形および速度波形を求めるために、本震の強震記録に対して以下の処理を行った。まず、公表された加速度記録を基線補正⁶⁾して加速度波形を求めた。次に、線形加速度法を用いた数値積分により、加速度波形を速度波形に変換した。なお、積分の際には、周期20~40秒の範囲でcosine型のテーパを有するローパス・ハイカット・フィルターを用いて長周期成分を除去した。

一方、本論文で用いる地震動強さ指標は、最大地動加速度PGA、最大地動速度PGV、SI値および計測震度Iの4つとした。最大地動加速度および最大地動速度は、加速度波形および速度波形の水平2成分の最大値とした。SI値⁹⁾は、加速度波形から減衰定数20%の擬似速度応答スペクトル(変位応答スペクトルに $\omega = 2\pi/T$ (T:周期)を乗じたもの)を求め、周期0.1~2.5秒の範囲で積分した¹⁰⁾。SI値に関しては、2.4で除して平均化した値を用いることが多く^{例えば11)}、本論文

でもこの値を求め、水平2成分の最大値をSI値とした。計測震度は、3成分の加速度波形より気象庁の資料¹²⁾に基づいて計算した。建物被害調査を行った地点において計算した4つの地震動強さ指標の値を表-3に示す。また、このうち最大地動加速度および最大地動速度については図-3の地図上にも示す。

ここで、TCU068のNS成分、TCU074のEW成分、TCU078のEW成分、TCU129のEW成分の加速度波形から求めた減衰定数5%速度応答スペクトルを図-8に実線でそれぞれ示す。図-8(a)より、TCU068では周期数秒以上の長周期帯域にピークがあり、とくにPGVに大きな影響を与えたものと考えられる。図には示さなかったが、TCU052でも同様のスペクトル特性が見られた。図-8(b)より、TCU074では周期1秒付近にピークがあることが分かる。図-8(c)より、TCU078では周期0.5~1.0秒付近にピークがあるが、TCU068やTCU074に比べて短周期成分が多く、とくに周期0.15秒付近に卓越周期がみられる。図-8(d)より、TCU129では周期0.5秒以上の周期帯域で、応答スペクトルがほぼ一定となり明瞭なピークは見られないが、図-8に示した他の地点よりも明らかに短周期成分が多いことが分かる。しかし、表-3に示したとおりTCU129では、学校の校舎も含めて周辺の建物にはほとんど被害がなかった。この解釈には、地盤特性や震源特性を考慮したより詳細な検討が必要であろう。

4.2 全観測点に対する地震動強さ指標間の関係

ここでは、計算対象とした403地点に対する各種地震動強さ指標間の平均的な関係について考察する。

まず、計測震度と台湾中央気象局による震度階⁴⁾の関係を図-9に示す。図より、台湾中央気象局の震度

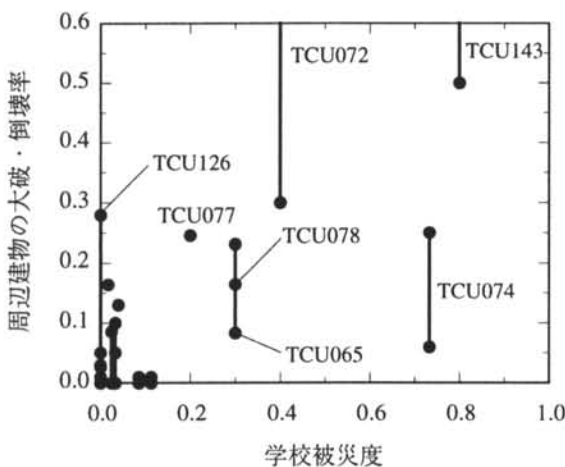


図-6 学校被災度と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との関係

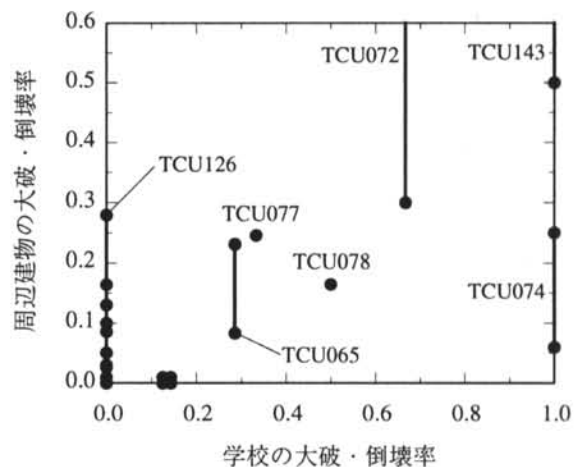


図-7 学校建物の大破・倒壊率と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との関係

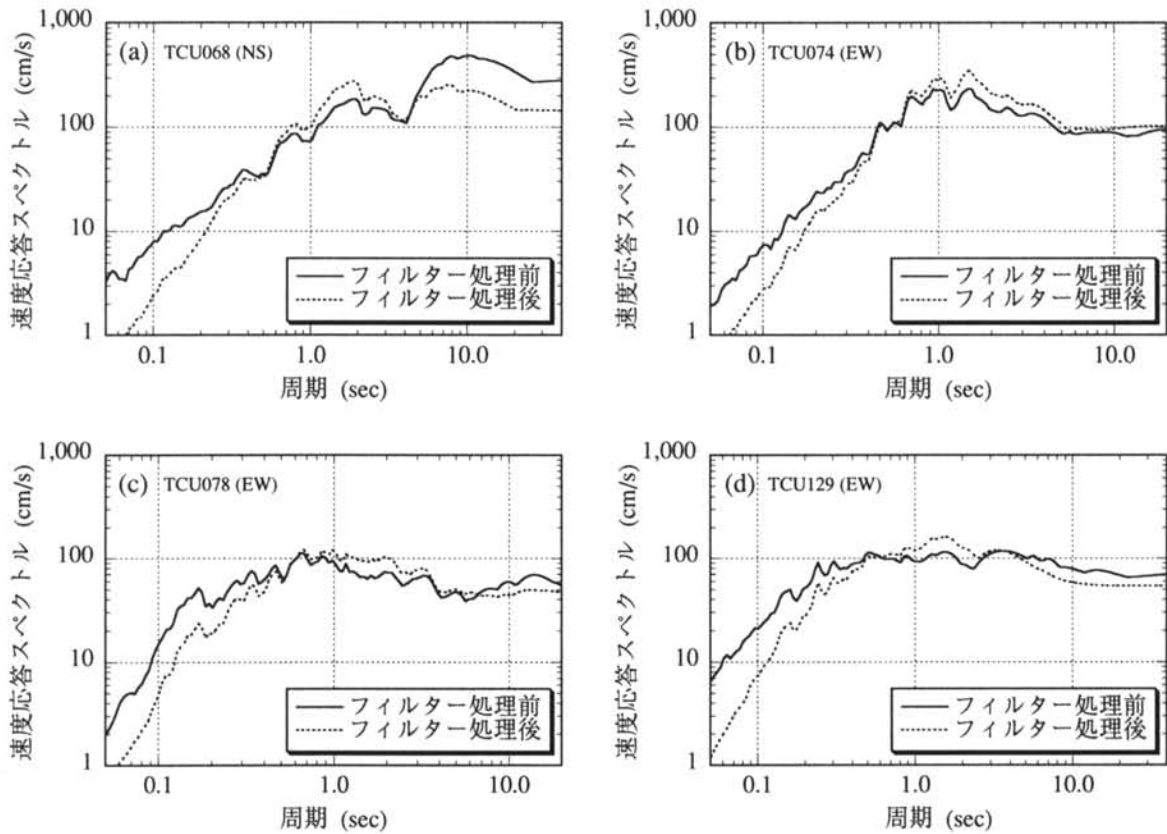


図-8 加速度波形より求めた減衰定数5%速度応答スペクトル

階が5あるいは6で計測震度の方が小さくなる場合もあるが、全体的には概ね対応しているといえる。台湾の震度階が日本の旧震度階の震度7を除いたものに概ね対応する¹³⁾ことから、図はそのことを裏付けたといえる。また、図中には、表-3に示した調査地点における計測震度と台湾中央気象局の震度階との関係も×印で示している。これより、本調査範囲は震度V~VIの地域であることが分かる。

次に、最大地動速度 PGV と最大地動加速度 PGA との関係を図-10に、最大地動速度 PGV とSI値との関係を図-11に示す。また、最大地動加速度 PGA、最大地動速度 PGV およびSI値と計測震度Iとの関係を図-12、図-13および図-14にそれぞれ示す。図では、本調査地点における関係を○印で示している。延べ403地点の強震記録を用いた場合の各種地震動強さ指標間の回帰式は次式のとおりである。

$$PGA = 4.45 PGV, \quad R = 0.72 \quad (1)$$

$$SI = 0.66 PGV, \quad R = 0.89 \quad (2)$$

$$I = 1.04 + 1.78 \log(PGA), \quad R = 0.96 \quad (3)$$

$$I = 2.39 + 1.66 \log(PGV), \quad R = 0.90 \quad (4)$$

$$I = 2.39 + 1.87 \log(SI), \quad R = 0.96 \quad (5)$$

ここで、Rは相関係数である。これらから、計算対象とした403地点に関しては、各種地震動強さ指標間には概ね相関があるといえる。しかし、最大地動速度

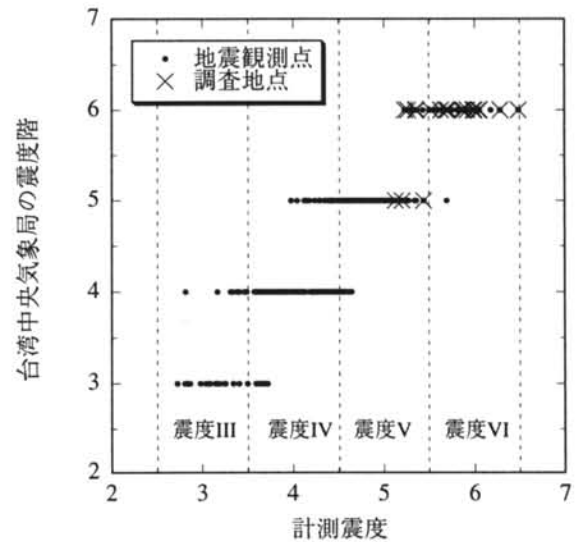


図-9 計測震度と台湾中央気象局の震度階の関係

と他の地震動強さ指標との相関係数がやや低く、とくに最大地動加速度との関係は、調査地点に概ね対応する地震動強さの大きい範囲でのばらつきが大きい。調査地点に対する詳細な考察は次節で行う。

また、主に日本の強震記録を用いて求められた地震動強さ指標間の既往の経験式^{14), 15)}も図中に示している。これらの関係と単純に比較すれば、台湾集集

地震での関係の方が最大地動速度に対するSI値は小さかった。また、SI値と計測震度の関係は非常に良く対応していたが、最大地動加速度に対する計測震度は台湾集集地震の方がやや大きく、とくに最大地動速度が大きい領域で最大地動速度に対する計測震度は小さかった。

4.3 調査地点に対する地震動強さ指標間の関係

本節では、建物被害調査を行った地震観測点に対する地震動強さ指標間の関係について考察する。

まず、前節で検討した地震動強さ指標間の関係において、本調査地点のデータだけで計算した相関係数を全観測点のデータを用いて計算した相関係数と比較して表-4に示す。表より、本調査地点での相関係数は、全地震観測点での相関係数に比べて低いことが分かる。すなわち、調査地点においては、相対的に地震動強さ指標間のばらつきが大きくなり、とくに最大地動速度と最大地動加速度との相関はほとんどないといってよい。

ここで、調査地点に限定した場合の最大地動速度と最大地動加速度との関係を図-15に示す。図中に

は、表-3に示した地震観測点周辺の建物被災度ランクも示している。図より、建物被災度ランクがAの地点は、(最大地動加速度 / 最大地動速度) (PGA / PGV) の値が5~10の範囲にあることが分かる。一方、表-3に示したとおり、TCU068では建物被災度ランクはCであるが、地表に現れた断層変位による被害が、またTCU078では建物被災度ランクはBであるが、地盤変状による被害も含まれていると考えられ

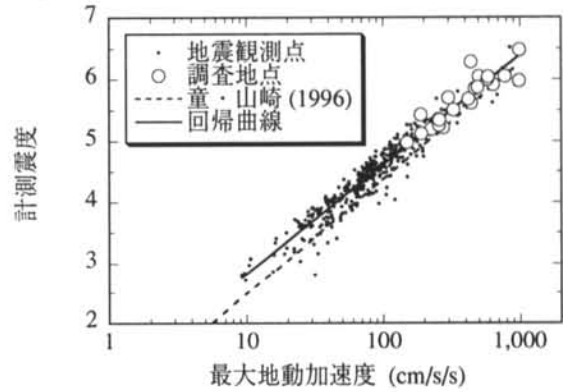


図-12 最大地動加速度と計測震度との関係

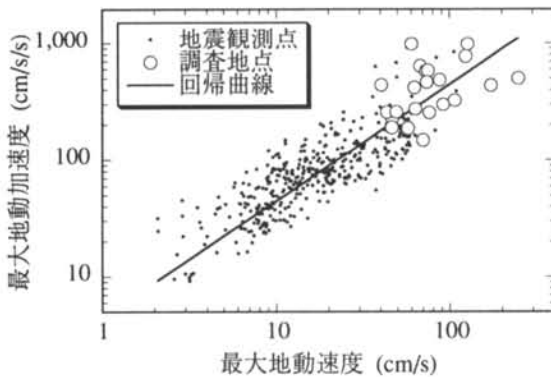


図-10 最大地動速度と最大地動加速度との関係

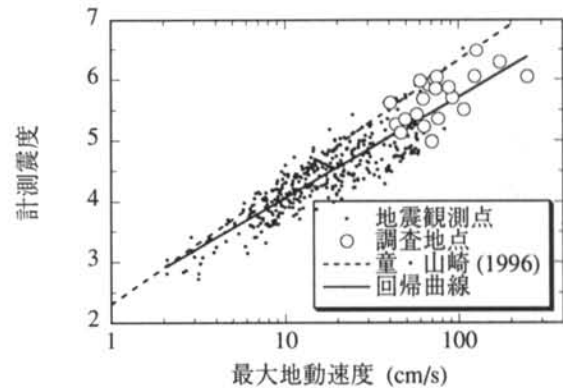


図-13 最大地動速度と計測震度との関係

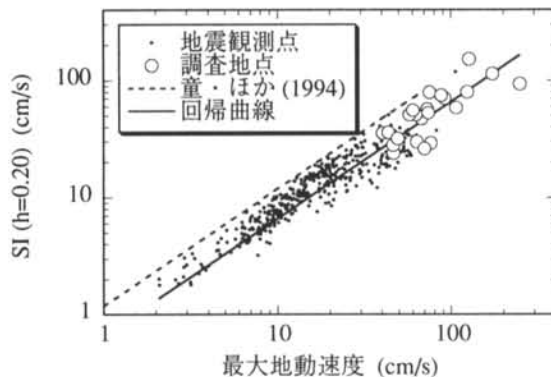


図-11 最大地動速度とSI値との関係

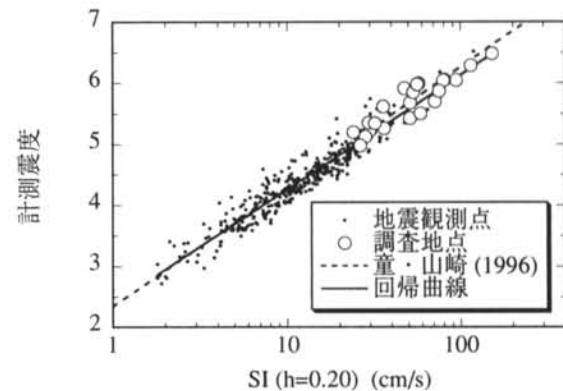


図-14 SI値と計測震度との関係

る。実際、図-8 (c)より、TCU078ではとくに周期0.15秒付近に卓越周期がみられ、このことがPGA/PGV (=10.9) に影響を及ぼしている可能性も考えられる。これらの地点では震動による被害が少ないと考えられ、とくにPGAが400 (cm/s²) 以下あるいは(PGA/PGV) が10以上や3程度以下の地点では被害が少ないといえる。参考までに、図中には1995年兵庫県南部地震の激震地域の非液状化地点での関係¹⁶⁾も示している。図より、兵庫県南部地震に比べて(PGA/PGV) の値が大きくばらついており、またその値の小さな地点が多いことが分かる。

§ 5. 地震動強さと建物被害の関係の分析

5.1 地震動強さと建物被害の関係

本節では、調査地点のうちTCU084を除く強震記録

対象地点	PGAとPGV	SIとPGV	IとPGA	IとPGV	IとSI
全地点	0.72	0.89	0.96	0.90	0.96
調査地点	0.29	0.70	0.89	0.65	0.92

PGA: 最大地動加速度 SI: SI値 (h=0.20)
PGV: 最大地動速度 I: 計測震度

表-4 全地震観測点と建物被害調査地点に対する各種地震動強さ指標間の相関係数の比較

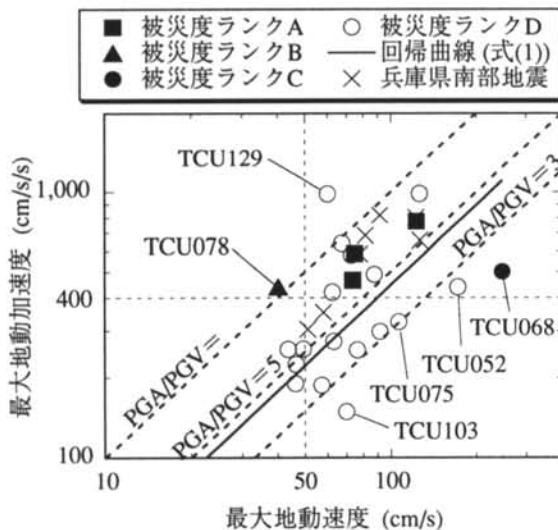


図-15 建物被害調査地点における最大地動速度と最大地動加速度との関係

が公表された21地点に対して、地震動強さ指標と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率および学校被災度との関係について考察する。

まず、地震動強さ指標と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との関係を図-16に示す。図では、(a)には最大地動加速度、(b)には最大地動速度、(c)にはSI値、(d)には計測震度と建物被害との関係をそれぞれ示している。図より、周辺建物の大破・倒壊率が5%以上の被害は、最大地動加速度が400 (cm/s²) 以上、計測震度が5.5以上であり、またTCU078を除けば最大地動速度が50 (cm/s) 以上、SI値が50 (cm/s) 以上の地域であることが分かる。ただし、TCU129、TCU052、TCU068 などのように、地震動強さが非常に大きいにも関わらず周辺建物の大破・倒壊率が5%未満の地域もみられた。このように地震動強さと建物被害の相関が低い地点は、4.3節の考察から、(PGA/PGV) の値が極端な場合であることが分かる。

次に、地震動強さ指標と学校被災度との関係を図-17に示す。図より、地震動強さと学校被災度との関係は、地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との関係と同様の傾向を示しており、学校被災度が0.1を越える被害は、先の考察とほぼ同様の地震動強さの地域となる。また、地震動強さと建物被害の相関が低い地点は、(PGA/PGV) の値が極端な場合であることが分かる。

5.2 地震動強さと建物被害の相関係数の比較

各種の地震動強さと建物被害との対応関係を定量的に比較するために、地震動強さ指標と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率や学校被災度との相関係数を計算する。このとき、周辺建物の大破・倒壊率が、例えばTCU074のようにある範囲で示されている場合にはその平均値とし、大破・倒壊率が0%の場合は0.5%として計算した。学校被災度は、被害軽微の重み係数を0.01として再計算し、学校被災度が0 (無被害) の場合は非常に小さな値を仮定した。また、建物被害と最大地動加速度、最大地動速度およびSI値とは対数正規分布関数、建物被害と計測震度とは正規分布関数として関係づけられるものとした。

得られた相関係数について、地震動強さ指標を計測震度とした場合の相関係数との比率を表-5および表-6の上段に示す。ここで、表-5には地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との相関係数を、表-6には学校被災度との相関係数を示している。表より、建物被害との相関係数は、相対的には計測震度が最も高く、最大地動加速度、SI値の順に低くなり、最大地動速度が最も低かった。図-16、図-17において、地震動強さと建物被害の相関が低かった地点

は、最大地動加速度に関してはTCU129、最大地動速度およびSI値に関してはTCU052・TCU068・TCU078などであると考えられる。図-15より、これらは(PGA/PGV)の値が極端に大きいかまたは極端に小さい地点であることが分かる。

一方、計測震度はいくつかのフィルター処理を行って計算されるが¹²⁾、本論文での検討において建物被害との相関が比較的良いということが、このフィルター処理によるものであるかもしれない。そこで、次節では、加速度波形および速度波形に対して同様のフィルター処理を行い地震動強さを補正し、建物被害との相関係数について再検討する。

5.3 地震動強さの補正による相関係数の比較

計測震度を計算する場合、3種類のフィルター処理を行うが、それらの総合特性を図-18に示す¹²⁾。図より、このフィルター処理によって周期0.3秒および周期5~6秒では約0.5倍、周期10秒では約0.3倍となるが、逆に周期1.0~2.5秒付近では増幅することが分かる。実際、このフィルター処理を行った加速度波形

に対する減衰定数5%速度応答スペクトルを、フィルター処理を行う前のものと比較して図-7に示す。図より、周期0.3秒以下の短周期帯域が小さくなっていることが分かる。また、とくにTCU068では周期10秒付近のピークが小さくなり、逆に周期1秒付近のピークが目立ってきている。

このような補正をした加速度波形および速度波形から最大地動加速度および最大地動速度を求め、また補正した加速度波形からSI値を4.1節と同様の方法で求めた。これらの地震動強さ指標と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率や学校被災率との相関係数を、5.2節で示した方法で計算し、計測震度との相関係数に対する比率として表-5および表-6の下段に示す。表より、以下のことが分かる。

最大地動加速度と建物被害との相関係数は、このフィルター処理によって計測震度との相関係数よりも大きくなった。これは、例えば建物被害との相関がとくに低かったTCU129の最大地動加速度が、より建物被害に対応するように補正されたためであると考えられる。実際、TCU129の加速度波形を、フィル

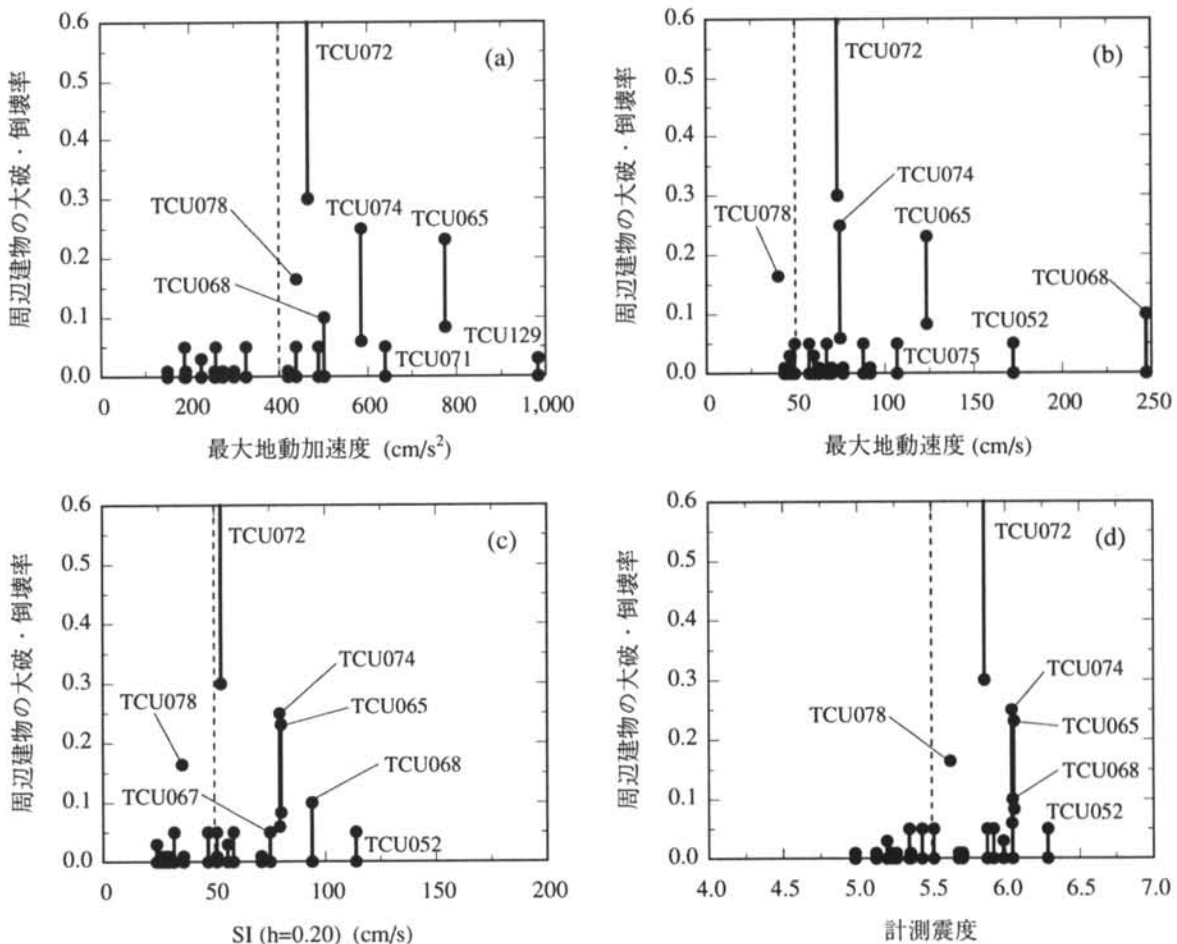


図-16 (a) 最大地動加速度・(b) 最大地動速度・(c) SI値 (h=0.20)・(d) 計測震度の各種地震動強さ指標と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との関係

ター処理の前後で比較して図-19に示す。図より、フィルター処理前の最大地動加速度の値は、15秒付近にみられる非常に短周期のパルスによって決まっていたが、フィルター処理後ではこのような短周期のパルスが取り除かれており、最大地動加速度の値も984 (cm/s²) から676 (cm/s²) と小さくなっていた。

次に、最大地動速度と建物被害との相関係数は、このフィルター処理によって2倍程度大きくなった。これは、図-8 (a) にも示したとおり、このフィルター処理によって周期数秒以上の長周期帯域のピークが小さくなり、対象建物の被害と対応するような補正が多少はできたためと考えられる。しかし、周期数秒の長周期成分が完全には取り除かれてはおらず、また、逆に周期1~2秒付近がピークとなるため、本論文で対象とした建物の被害との相関係数はそれほど高くはならなかった。

これに対して、SI値と建物被害との相関係数は逆に小さくなった。これは、図-18に示したフィルター処理により、周期1.0~2.5秒での応答スペクトルが増幅し、周期1秒よりも短周期の成分が小さくなる

ことから、とくにTCU068のように周期1秒前後が卓越するような場合には、SI値がより大きな値となってしまう、対象建物の被害とは対応しづらくなったためと考えられる。

以上のことより、とくに最大地動加速度や最大地動速度のような最大地動振幅に対しては、対象となる建物の特性を考慮した補正をうまく行うことで、地盤上で観測された強震記録から、建物被害とを対応づける地震動強さ指標を求められる可能性があることが示された。

5.4 調査地点の選択による相関係数の比較

表-5および表-6では相関係数比を示していたが、前節までの検討で建物被害と比較的相関の良かった計測震度でさえ、相関係数は0.51~0.56と非常に小さな値であった。これは、相関係数の計算に用いた被害率の算定方法(5.2節参照)にもよるが、むしろ地表に現れた断層変位による被害(TCU052やTCU068など)や地盤変状による被害(TCU078など)のように震動による被害と分離できない地域が

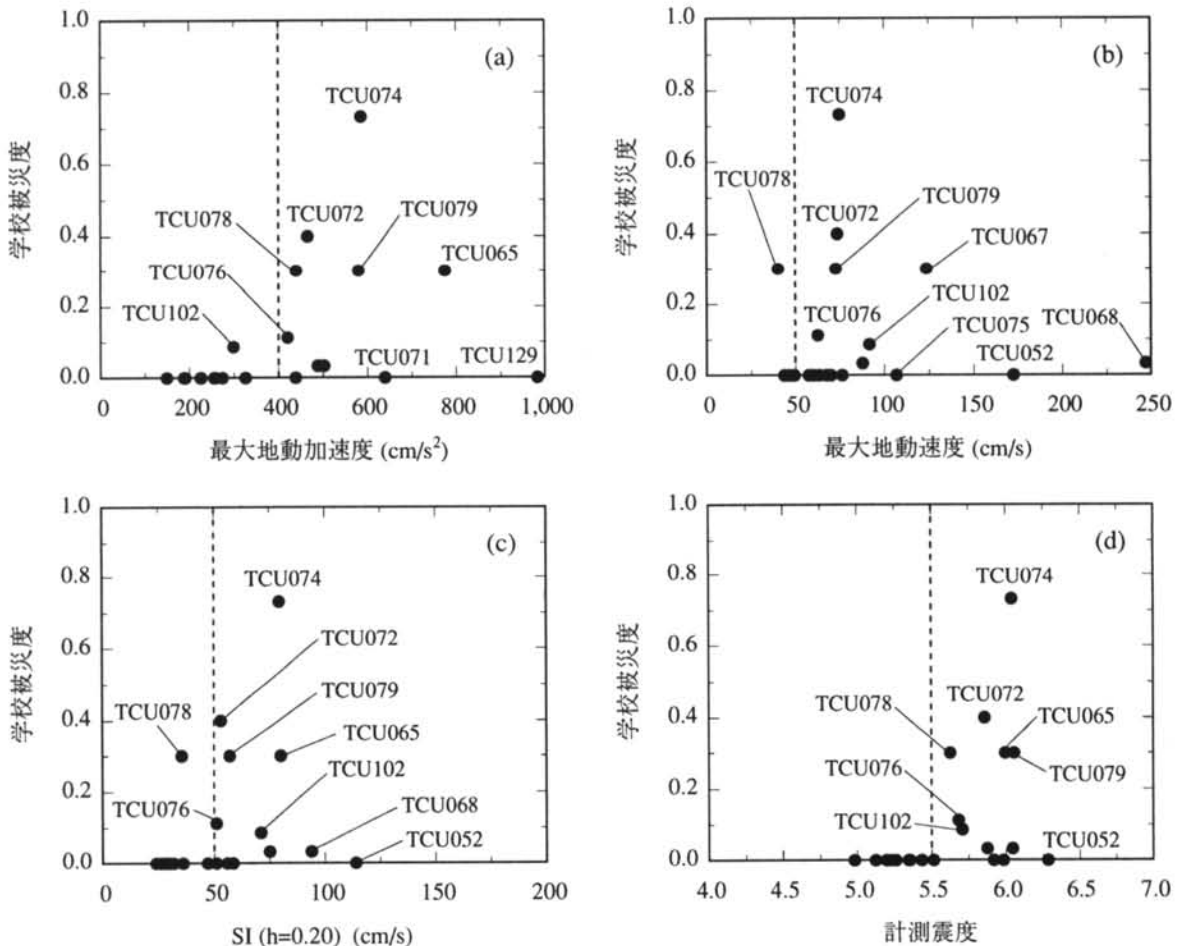


図-17 (a) 最大地動加速度・(b) 最大地動速度・(c) SI値 (h=0.20)・(d) 計測震度の各種地震動強さ指標と学校被災度との関係

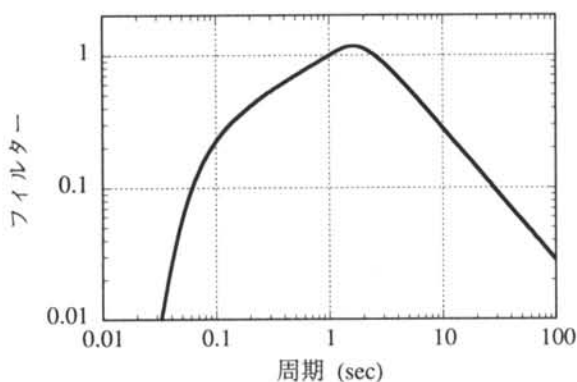
フィル ター処理	最大地動 加速度	最大地動 速度	SI値 (h=0.20)	計測 震度
	PGA	PGV	SI	I
無し	0.95	0.33	0.71	1.00
有り	1.04	0.59	0.33	1.00

表一五 地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率と計測震度との相関係数に対するその他の地震動強さ指標との相関係数の比

含まれていたためと考えられる。そこで、そのような地点をできるだけ取り除いた場合に、地震動強さ指標が建物被害をどの程度まで説明できるかについての若干の検討を行う。

まず、4.3節の考察を踏まえて、(PGA/PGV)が極端な値となる地点を検討対象から除くこととした。具体的には、(PGA/PGV)の値が10以上のTCU078とTCU129、(PGA/PGV)の値が3程度以下のTCU052、TCU068、TCU075およびTCU103を検討対象外とした。また、用いる地震動強さ指標は、5.3節の考察より最大地動加速度および最大地動速度については計測震度の計算に用いたものと同様のフィルター処理を行って求めたものとし、SI値はフィルター処理を行わないものとした。

このように選択した地点の建物被害と各種地震動強さ指標との相関係数を計算し、全調査地点における建物被害との相関係数と比較して表一七および表一八に示す。ここで、表一七には地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との相関係数を、表一八には学校被災度との相関係数を示している。これらの表より、すべての地震動強さ指標において、調査地点を選択し



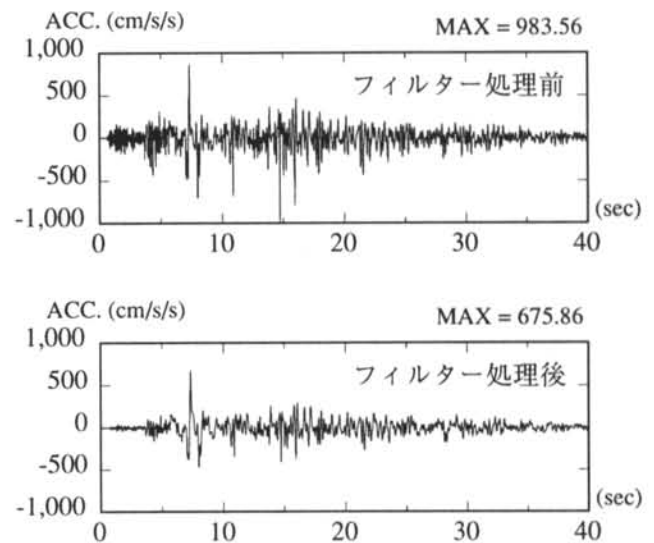
図一八 計測震度を計算するためのフィルターの総合特性¹¹⁾

フィル ター処理	最大地動 加速度	最大地動 速度	SI値 (h=0.20)	計測 震度
	PGA	PGV	SI	I
無し	0.87	0.23	0.85	1.00
有り	1.12	0.66	0.65	1.00

表一六 学校被災度と計測震度との相関係数に対するその他の地震動強さ指標との相関係数の比

た場合の相関係数は、全調査地点を用いた場合の相関係数よりもかなり高くなっていることが分かる。とくに、学校被災度との相関係数は、0.72~0.88までと高い相関係数となった。

また、このときの各種地震動強さ指標との関係(回帰式)を、地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率に対しては図一20に、学校被災度に対しては図一21にそれぞれ示す。図一20より、周辺建物の大破・倒壊率に関しては、TCU072を除けば概ね相関がよいといえる。また、図(b)に示した最大地動速度との関係において、1995年兵庫県南部地震の建物被害データから求められた、1971年以前の2~5階建てRC造建物の大破以上の被害率曲線¹⁷⁾を重ねて示す。このような大雑把な検討ではあるが、図より、本調査範囲における台湾のRC造建物の方が日本の旧基準でのRC造建物よりも被害率が大きめであり、平均的には耐震性能がやや低いといった傾向が読みとれる。た



図一19 TCU129地点のEW成分の加速度波形時刻歴のフィルター処理前後の比較

対象地点	最大地動加速度	最大地動速度	SI値 (h=0.20)	計測震度
	PGA	PGV	SI	I
全地点	0.53	0.30	0.36	0.51
選択地点	0.63	0.45	0.46	0.62

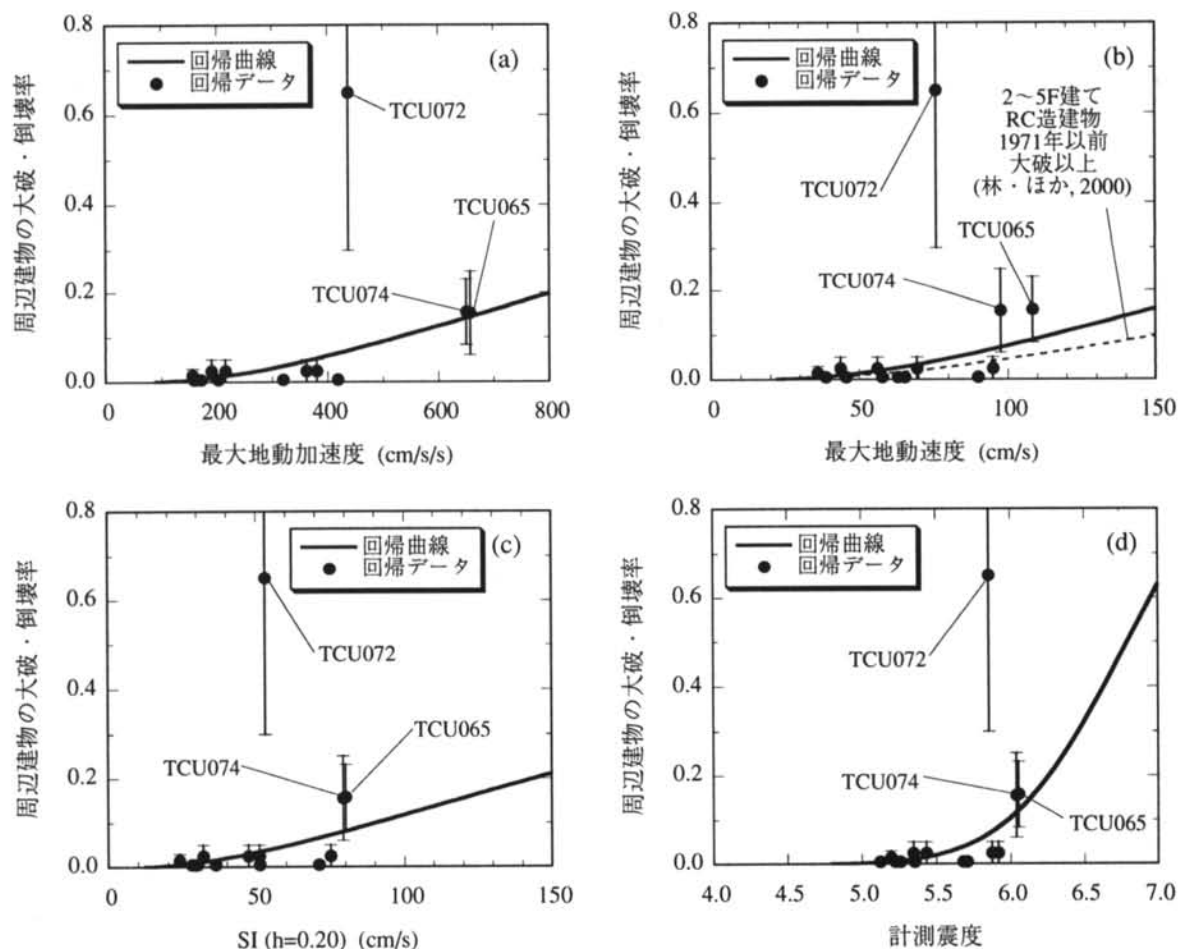
表一七 全調査地点と選択地点に対する各種地震動強さ指標と地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率との相関係数の比較

対象地点	最大地動加速度	最大地動速度	SI値 (h=0.20)	計測震度
	PGA	PGV	SI	I
全地点	0.62	0.37	0.47	0.56
選択地点	0.88	0.72	0.80	0.82

表一八 全調査地点と選択地点に対する各種地震動強さ指標と学校被災度との相関係数の比較

だし、図一20に示した回帰式（被害率曲線）の回帰データには、大破・倒壊率が5%未満の非常に小さな地点が多く、この影響により回帰式の傾きが緩やかになっていると考えられる。3.3節での考察から、本調査での被害建物の多くは靱性が乏しかったことを考えれば、回帰式の傾きはより急になることが予想されるが、本論文の検討では、そこまでは表現しきれていない。一方、図一21より、各種地震動強さ

指標と学校被災度との関係は、その相関係数も比較的高く、学校建物の被害を概ね説明できる可能性が示された。台湾での地震観測点が小中学校の敷地内に設置されていることを考えれば、強震記録から求められる地震動強さ指標と学校被災度が高い相関で関係づけられれば、学校建物の耐震性能の解釈に対する重要な視点となるであろう。



図一20 選択した調査地点に対する最大地動加速度・最大地動速度・SI値 (h=0.20)・計測震度の各種地震動強さ指標に関する地震観測点周辺の建物の大破・倒壊の被害率曲線

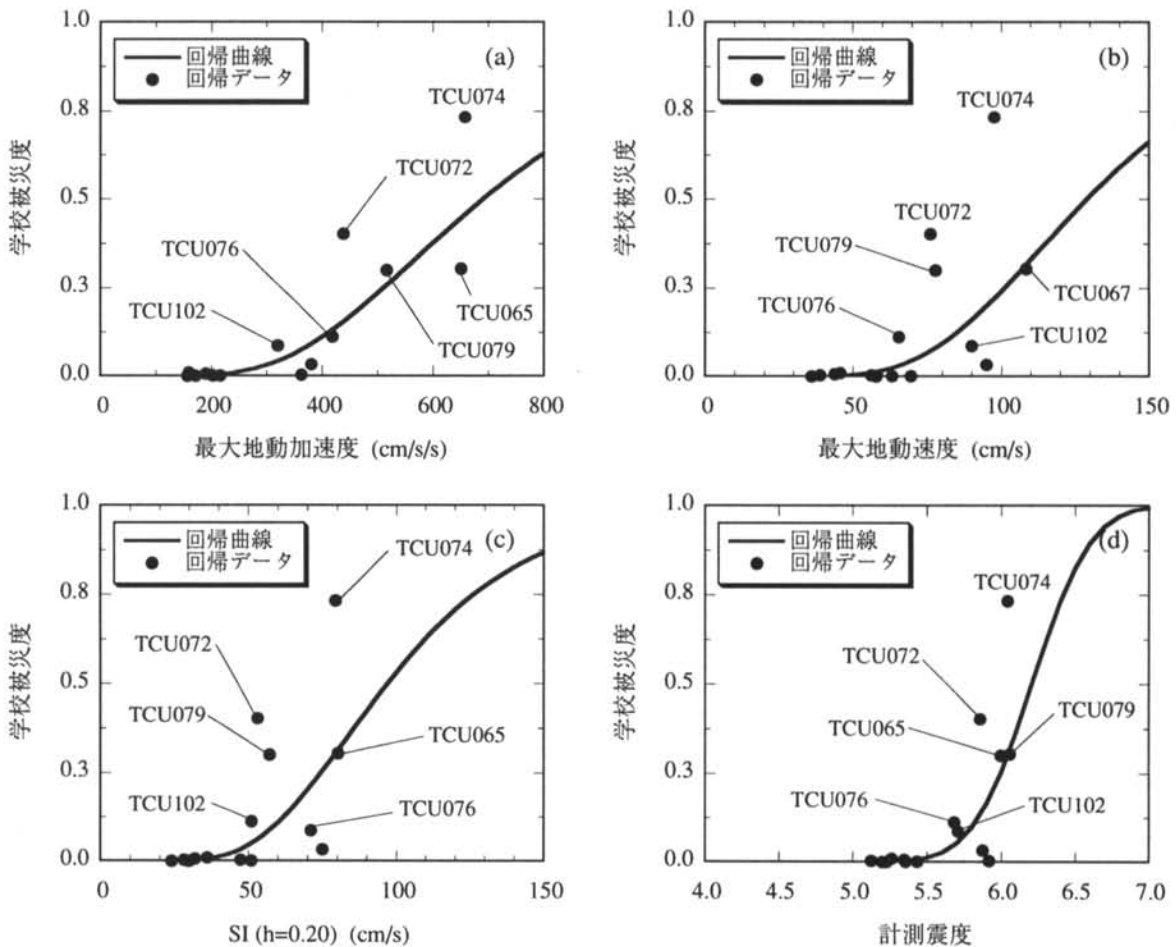
§ 6. まとめ

本論文では、1999年9月21日に発生した台湾集集地震に対して、その地震動と建物被害の関係の全体像を把握することを目的として行った建物被害調査結果の報告と、1999年12月に公表された本震の強震記録を用いて計算した地震動強さ指標と建物被害の関係について分析した。以下に、本論文で得られた結論をまとめる。

- 建物被害調査は、5階建て以下のRC造建物を対象として、地震観測点のある学校の校舎とその周辺の建物に対して行った。その結果、調査した学校においては小破を越える被害の多くは大破以上であり、被害を受けた学校建物の多くは靱性の乏しいものであったと考えられる。また、学校建物の被害とその周辺の建物の被害には相関がみられ、大破・倒壊率で比較すると周辺建物の大破・倒壊率の方がやや小さい傾向にあった。
- 強震記録を用いて最大地動加速度、最大地動速

度、SI値および計測震度の4つの地震動強さ指標を計算し、それらの指標間の関係について考察した。その結果、計算対象とした403地点での平均的な関係として、地震動強さ指標間には相関があった。一方、建物被害調査を行った地点のうち強震記録が得られている21地点での関係は、とくに最大地動速度とその他の地震動強さ指標との相関が低かった。これは、とくに最大地動速度が周期数秒以上の長周期成分の影響を大きく受けたためと考えられる。

- 建物被害調査を行った地点において、地震動強さ指標と建物被害の関係について分析した。その結果、地震動強さが大きいにも関わらず建物被害が小さい地域もあったが、最大地動加速度が400 (cm/s²) 以下、最大地動速度が50 (cm/s) 以下、計測震度が5.5以下の地域では、地震観測点周辺の建物の大破・倒壊率が5%以上の被害はほとんど無かった。また、周辺建物の大破・倒壊率が大きな地域は、(地動最大加速度/地動最大速度)の値が概ね5~10の範囲にあり、逆にこの



図一21 選択した調査地点に対する最大地動加速度・最大地動速度・SI値 (h=0.20)・計測震度の各種地震動強さ指標に関する学校被災度の被害曲線

値が3程度以下のような地域では被害が少なかった。

- 建物被害と各種地震動強さ指標との相関係数を比較した結果、計測震度との相関係数が最も高く、最大地動速度との相関係数が最も低かった。これは、地震動強さ指標と建物被害の相関が低い地点も含めた結果であり、このような地点に対する吟味を行い、再検討を行った。
- まず、計測震度の計算に用いたフィルター処理を行って地震動強さ指標を補正し、建物被害との相関性について検討した結果、最大地動加速度や最大地動速度といった最大地動振幅に対しては、対象となる建物の特性を考慮した補正をうまく行うことで、地盤上で観測された強震記録から建物被害とを対応づける地震動強さ指標を求められる可能性があることを示した。
- 次に、(最大地動加速度 / 最大地動速度) の値が10以上または3程度以下の地点を除いて、地震動強さ指標と建物被害の相関性について検討した。その結果、すべての地震動強さ指標において、全調査地点を用いた場合の相関係数よりも高くなり、建物被害の特徴を踏まえた地点の選

択をすることによって、建物被害に対する地震動強さ指標の説明能力が増す可能性があることを示した。とくに学校被災度との相関係数が非常に高くなり、台湾での地震観測点が小中学校の敷地内に設置されていることを考えれば、学校建物の耐震性能の解釈に対する重要な視点となるであろう。

謝辞

本調査は、家村浩和京都大学教授をリーダーとする文部省突発自然災害調査班のうち、川瀬博九州大学助教授・岩田和孝京都大学助手を研究分担者とする地震動に関する調査のもとで行ったものです。本調査に同行した清水建設(株)技術研究所の佐藤俊明主任研究委員・石井透研究員・佐藤智美研究員をはじめ、関係者各位に謝意を表します。翠川三郎東京工業大学教授には建物被害調査の期間中同行していただき、地震観測点や建物被害地域などの貴重な情報を提供していただきました。また、清水建設(株)技術研究所の片岡俊一副主任研究員には、SI値に関するご助言を頂きました。記して感謝致します。

<参考文献>

- 1) Lee, W. H. K., T. C. Shin, K. W. Kuo, and K. C. Chen: "CWB free-field strong-motion data from the 921 Chi-Chi earthquake: Volume 1. Digital acceleration files on CD-ROM, Pre-publication version (December 6, 1999)", Seismology Center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 1999.
- 2) 防災国家型科技計画のホームページ (<http://www.naphm.ntu.edu.tw/921/news.htm>).
- 3) 内政部統計處: "内政総計月報", 四月号, 1999.
- 4) 台湾中央気象局のホームページ (<http://www.cwb.gov.tw>).
- 5) 日本建築学会: "1978年宮城県沖地震災害調査報告", pp.43-54, 1980.
- 6) 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(鉄筋コンクリート造編)", pp.1-37, 1991.
- 7) 翠川三郎, 藤本一雄: "1999年台湾集集地震被害調査報告—主として強震記録と強震観測点の地盤条件について—", 東京工業大学地震工学研究グループ, 地震工学研究レポート, No.72, pp.15-30, 1999.
- 8) 大崎順彦: "新・地震動のスペクトル解析入門", 鹿島出版会, 1994.
- 9) Housner, G. W.: "Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault", Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, Volume I, pp.III-94-III-115, 1965.
- 10) Arias, A.: "A measure of earthquake intensity", in Seismic Design for Nuclear Power Plants, R. J. Hansen, Ed., The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England, pp.438-483, 1970.
- 11) 安藤陽一, 山崎文雄, 片山恒雄: "地震動の強さ指標による構造物損傷の評価", 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 第1分冊, pp.715-720, 1990.
- 12) 気象庁監修: "震度を知る—基礎知識とその活用—", ぎょうせい, 1996.
- 13) 京都大学防災研究所地震予知研究センターのホームページ (http://www2.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~sato/taiwan/index_j.html).
- 14) 童 華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: "被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係", 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, 第2分冊, pp.2299-2304, 1994.
- 15) 童 華南, 山崎文雄: "地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係", 生産研究, 48巻, 11号, pp.547-550, 1996.
- 16) 日本建築学会: "1995年兵庫県南部地震強震記録資料集", 1996.
- 17) 林 康裕, 宮腰淳一, 田才 晃, 大野義昭: "1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能", 日本建築学会構造系論文集, 第528号, pp.135-142, 2000.