

1999年台湾集集大地震における建物被害に関する一考察

1. はじめに
2. 地震概要
3. 被害統計
4. 台湾の活断層分布
5. 建物被害の概要
6. 建物被害要因の検討
7. 地盤-建物相互作用系の動的解析による被害の検討
8. おわりに

栗山利男*
荏本孝久**
望月利男***

要 約

平成11年(1999年)9月21日午前1時47分に台湾中部南投縣集集付近を震源とする大規模な地震が発生した。この地震により震源に近い台湾中部の台中縣、南投縣付近を中心として、死傷者約10,000人、建物全半壊約20,000棟に及ぶ被害が発生した。筆者らは地震発生直後の9月23日から26日の4日間、最も被害が激しい被災地域の一つである台中縣を中心に建物の被害調査を行った。本稿は、この被害調査から特徴的な被害の概要を報告するとともに、台湾地震で観測された強震記録と兵庫県南部地震で観測された強震記録を用いて、地盤-建物相互作用系の振動モデルにより動的解析を行い、その応答特性より被害モードの考察を実施したものである。

1. はじめに

平成11年(1999年)9月21日午前1時47分に台湾中部南投縣集集付近を震源とする大規模な地震が発生した。この台湾集集地震では、1995年1月15日午前5時46分に近畿地方阪神地域に大災害を発生させた兵庫県南部地震と同様に、その存在

が確認されていた内陸活断層の断層運動が引き起こした地震であった。この地震により震源に近い台湾中部の台中縣、南投縣付近を中心として、死傷者約10,000人、建物全半壊約20,000棟(1999年10月1日現在)に及ぶ被害が発生した。また、この地震による各地の地震動が台湾全土に配置されている多数の強震観測点において記録され、地盤や建物など動的挙動の解明や強震動特性を理解す

* (株)構造計画研究所・東京都立大学都市研究所研究生

** 神奈川大学工学部・東京都立大学都市研究所非常勤研究員

*** 東京都立大学大学院都市科学研究科

る上に貴重なデータを与えている。筆者らは地震発生直後の9月23日から26日の4日間、最も被害が激しい被災地域の一つである台中縣を中心に建物の被害調査を行った。その結果、建物被害では、特に最近建設されたRC造の高層建物が1階の柱部分で大きく損傷し倒壊に至る被害が多く発生し、低層建物でもRC造骨組に組積レンガ造の壁を配置した店舗併用建物やピロティー形式の建物が1階部分の柱・壁の崩壊により倒壊した被害例が多数見受けられた。これらの被害は、地震時の典型的な被害形態であり、上述の兵庫県南部地震においても多数発生した。本稿は、これらの建物被害を地震応答特性から考察するために、台湾地震において主に台中市内で観測された地震波3波と兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震波を用いて、地盤-建物相互作用系の振動モデルによる地震応答解析を行い被害モードの検討を行った。また、解析に当たっては、ピロティー形式の有無による応答特性の差異についても考察を実施したので概要を報告する。

2. 地震概要

地震の概要は以下のとおりである。

発生日時：1999年9月21日 01:47:12.6 am
(現地時間)

震源：N23.85°, E120.78° D = 1.0km (南投縣集集付近) 低角逆断層 (車籠埔断層, 雙冬断層)

断層長さ：80km

変位量：3~8m (上下)

規模： M_L 7.3 (CWB: 台湾中央気象局), M_s 7.7 (USGS: 米国地質調査所)

震度階：震度6 (南投縣名間、日月潭、台中)

最大水平加速度 (gal)：南投 (震災距離：10.2km) 146.0 (UD), 397.2 (NS), 973.4 (EW)

被害：死者2188人, 負傷者8739人, 全半壊建物17408棟 (10月1日現在)

台湾中央気象局が発表した台湾各地の強震観測地点における最大加速度値は、表1に示すとおりであ

り、幾つかの観測地点とその最大加速度値 (水平2成分のうち大きい方の数値を表示) の分布を図1に示す。

表1 観測された各地の最大加速度値

観測地点	記号	震央距離 (km)	N-S (gal)	E-W (gal)	U-D (gal)
宜蘭	ILA	141.2	61.3	82.3	25.4
成功	CMK	102.4	43.6	49.1	25.4
恒春一	TWK1	211.2	2.4	2.2	3.6
鯉魚潭	TWQ1	55.2	46.4	25.3	20.2
新營	TWL	71.4	43.9	58.6	25.6
三義	NSY	62.7	19.5	12.8	20.1
中大	NCU	130.7	0.9	0.5	2.1
台中	TCU	34.6	183.2	222.1	128.0
嘉義	CHY	53.3	166.0	151.2	47.2
澎湖	PNG	128.8	36.3	35.5	14.9
高雄	KAU	150.0	15.8	11.5	9.9
阿里山	ALS	37.7	149.1	231.0	98.4
三光	NSK	108.7	8.0	5.0	6.5
南投	WNT	10.2	397.2	973.4	146.0
古坑	WGK	28.7	383.9	235.1	147.3
佳里	SCL	95.8	63.7	100.8	21.0
春日	SC2	154.5	8.8	13.7	13.5
日月潭	SML	12.7	131.8	165.1	159.0
大庾	TAI1	105.9	44.2	37.8	21.0
四湖	WSF	61.6	41.9	34.3	21.1
四湖	ECL	61.6	42.7	9.9	16.9
恒春	HEN	204.3	6.7	6.0	9.1
新竹	HSN	107.2	93.9	77.5	36.5
大武	TAW	165.7	10.8	8.0	5.9
台東	TTN	127.0	22.9	22.4	14.2
台東	ELD	127.0	32.0	28.3	20.5
九如	SGL	128.0	28.8	38.5	11.7

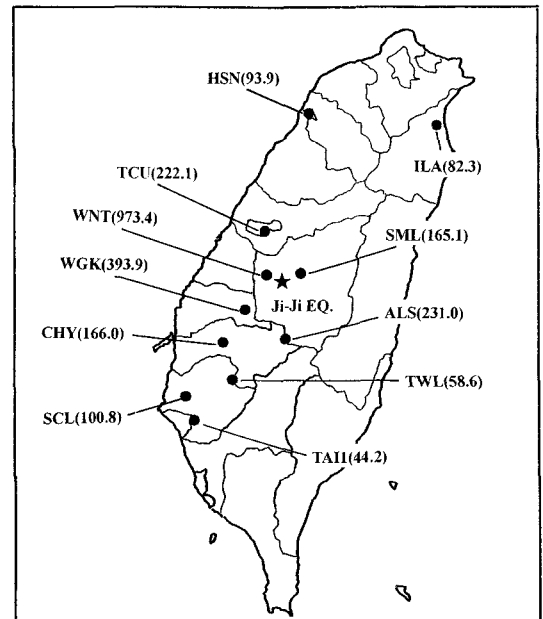


図1 各地の最大水平加速度値の分布 (単位: gal)

3. 被害統計

今回の地震による被害の概要（10月1日現在）を表2に示す。死者・負傷者および建物の全壊・半壊建物は震源近くの南投縣、台中縣と台中市に集中している。地震の発生時間が深夜の午前1時47分で、多くの市民が就寝中であつたことにより、震源近くの断層活動に起因する地盤の変状、斜面崩壊や強震動による被害建物の中で被災したものと思われる。

4. 台湾の活断層分布

台湾はフィリピン海プレートとユーラシアプレートの衝突境界にあり、世界的にも活発な隆起で知られている。特に台湾西部地域の逆断層による大規模な変位地形とその累積の変形は顕著であるとされている。図2に台湾で確認されている活断層の分布を示す。現在台湾では約50にのぼる活断層がリストアップされている。その中で、多くの顕著な活断層は、南北方向の走向を示しており、東西

表2 被害統計（1999年10月1日現在）

縣市名	死者 (人)	負傷者 (人)	全壊建物 (棟)	半壊建物 (棟)
台北市	71	317	3	20
新竹市	2	4	5	0
台中市	113	1,112	496	516
嘉義市	0	0	1	0
台北縣	39	145	1	2
桃園縣	3	84	9	2
新竹縣	0	4	2	1
苗栗縣	6	196	136	221
南投縣	813	2,436	4,197	3,509
台中縣	1,050	3,606	4,699	2,973
彰化縣	23	388	28	2
雲林縣	62	423	256	250
嘉義縣	2	5	40	33
台南縣	1	1	0	1
宜蘭縣	0	7	5	0
合計	2,188	8,739	9,878	7,530

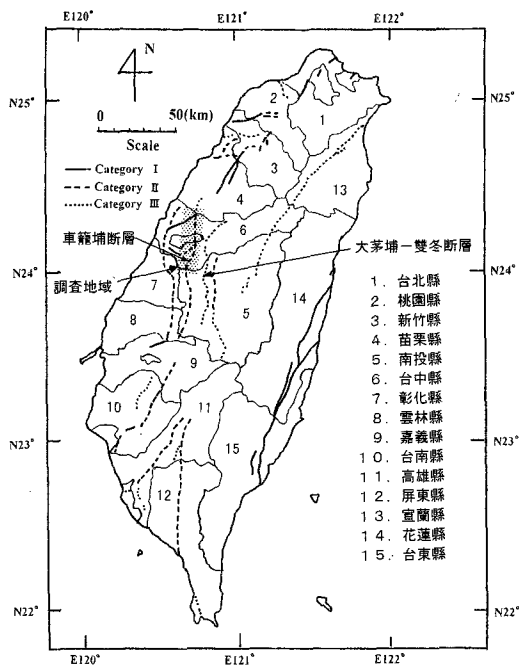


図2 台湾の活断層分布と車籠埔断層・大茅埔-雙冬断層および調査地域

方向の主圧縮力による東下がりの低角の逆断層が多く分布している。今回の地震の起震断層であり、上下ずれが3~5mに及んだ車籠埔断層は図中に示されており、地表面には明確な変位が確認されていないが、ずれを生じたと考えられている雙冬断層も図中に示してある。また、被害調査を実施した地域も図2中に示した。

5. 建物被害の概要

調査を実施した台中縣では、大抗および霧峰付近では、今回の地震で活動し地表に大きな上下のズレを生じた車籠埔断層の明瞭な断層変位が認められた。建物被害は、この車籠埔断層上の大きなズレにともなう多発している。特に、大抗や霧峰付近では隆起した上盤（東）側に多くの被害が見られ、下盤（西）側では断層から数メートル離れた場所においても著しい被害が見られないという著しい差異が認められた。また、台中市を始め豊原市、太平市、大里市などでも多くの建物被害

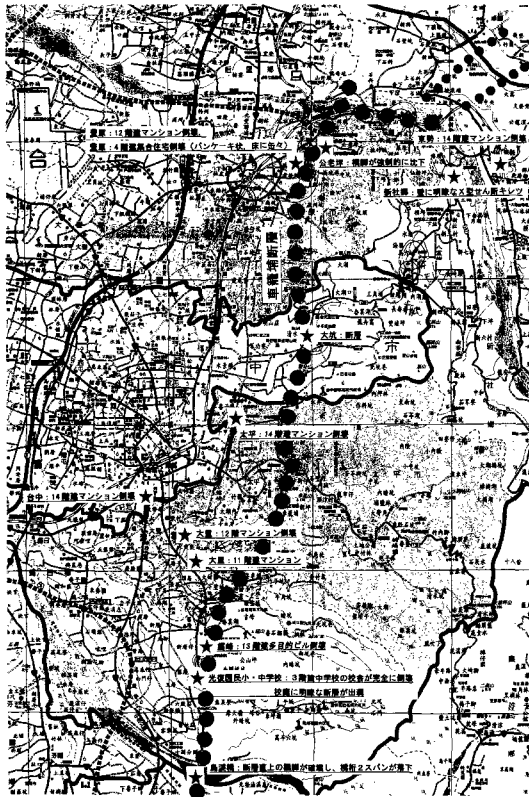


図3 被害調査地点と車籠埔断層の位置

が見られ、10階以上の高層RC造建物やピロティ形式の低層RC造建物の倒壊が見られた。これらの場所では、建物の極く周辺に断層運動による地表面のズレは明瞭には見られなかったが、位置的には車籠埔断層の延長線上にあり、少し離れた地域には断層の出現が報告されている。被害調査地点を図3に示し、建物の被害状況については写真1～15に示し、以下に若干の説明を記した。

台中市大坑：写真1は、車籠埔断層の断層運動により生じた、上下ずれ約3.0m（東側隆起）、水平ずれ4.0m（左ずれ）である。断層に沿って東側の上盤（隆起）側に被害が集中しており、西側の下盤側では周辺の建物にほとんど被害が見られなかった。豊原市：写真2, 3は、12階建マンションの倒壊状況であり、1階の柱が破断し上層階が転倒した被害状況である。柱には太径（ $\phi 28$ ）の異形鉄筋が密に入っており、上層階の壁には振動によるせん断キレツなどはほとんど見られず、一方向にかなり



写真1 車籠埔断層の断層運動にともなう上下ズレと建物の被害（大坑）

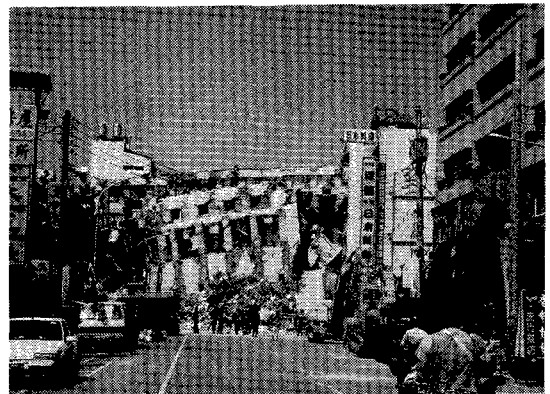


写真2 12階建マンションの倒壊状況（豊原市）



写真3 倒壊した12階建マンションの1階の柱脚部の崩壊状況（豊原市）

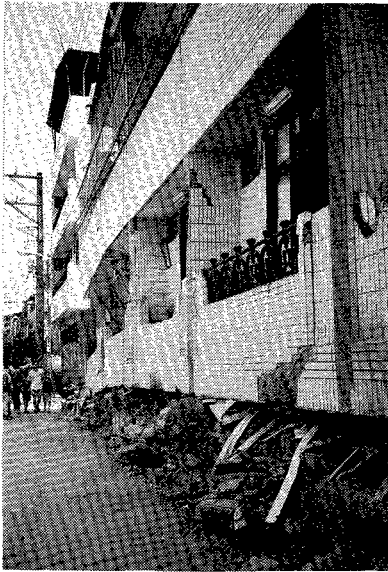


写真4 4階建集合住宅の崩壊状況（豊原市）



写真5 14階建マンションの倒壊状況（東勢）

短時間で倒壊に至ったものと考えられる。また、200mから300m程度離れた場所に被害建物が集中しており、写真4は4階建集合住宅の倒壊状況である。地下に駐車場があり、ほとんど無筋のレンガ造の柱・壁の梁への接合状況は認められず、1、2階部分はパンケーキ状に崩壊している。また、両建物とも床部の鉄筋コンクリートには空缶が多量に埋め込まれていた。

東勢郷東勢：写真5は、14階建マンションの倒壊状況である。建物内部に閉じ込められた住民の救出活動のため周辺地域への立ち入りが禁止されており、直接確認はできなかったが、建物の裏側から見られた1階主柱の引き抜き破断と建物の倒壊状況から、豊原市の高層マンションとほぼ同様の破壊状況を示したと思われる。周辺に2,3階建物（ピロティー形式）の倒壊がみられるが、比較的古い商店街の低層建物には、外見上被害は見受けられない。しかしながら、内部の壁にキレツ（一方向）が入り、商品もほとんど一方向（南側）に落下していることからかなり衝撃的な地震力が作用したことを示している。20～30m程東側に位置する橋の橋台付近の護岸にキレツが入っているが、断層運動によるものかどうかは不明であった。

新社郷：東勢とは大甲溪川を挟んで対岸の台地上

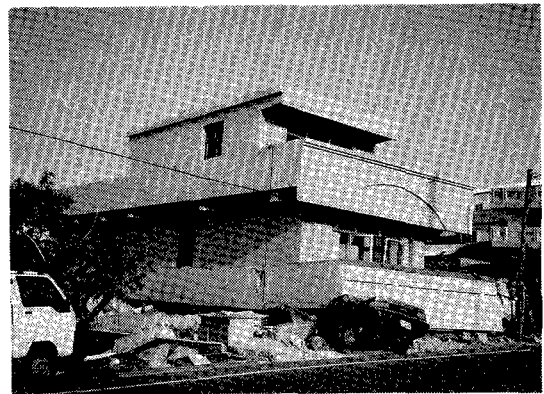


写真6 ピロティー形式の3階建建物の倒壊状況（新社郷）

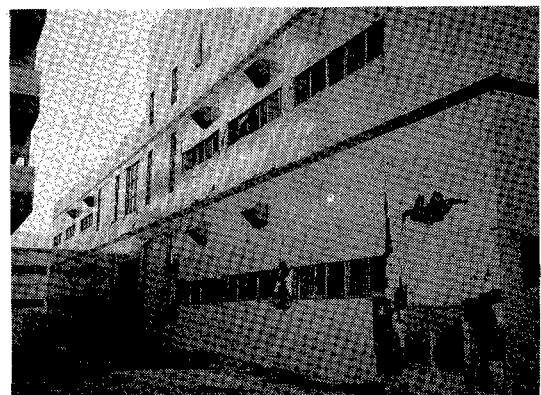


写真7 新築した建物の壁に明瞭なX型のせん断キレツが認められる（新社郷）

に位置する地域で、道路に沿って写真6に示すような3階建程度の建物が軒並み倒壊している。ピロティー形式の低層建物が多い。写真7は、新築の工場建物の壁に見られた明瞭なX型せん断キレツ（南北方向）である。この地域の建物被害は直接の断層運動よりも強震動による振動被害によるものと思われる。



写真8 1階の柱の崩壊と上層階が地下駐車場に潜り込んだ状況（大里市）

大里市：写真8は、12階建マンションの倒壊状況である。1階柱が破壊し上層階が地下駐車場に落下し、中間部が引きずられる形で倒壊した。この敷地には同様な構造の高層マンションが13棟あり、13棟に共通の地下駐車場が設置されている。敷地は沼地を開発した軟弱地盤であるが、建物には杭は使われていない。写真9は、11階建マンションの倒壊状況。同様な建物が3棟倒壊した。地下に駐車場があり倒壊した上層部が地下階に崩れ落ちている。近くに河川があり、地盤条件は悪いように思われる。また建物周囲には、大きな沈下により地表面には亀裂が生じている。

台中市：写真10は、14階建マンションの倒壊状況である。地下に駐車場があり、住民が内部に入り、バイクなどの物品を取り出すために準備している。建物1階の隅柱が破壊しており、1階部分が消失した形で倒壊している。

霧峰郷：国道3号線の道路に沿って、写真11のように倒壊、傾斜した建物被害が多数発生している。写真12は、1、2階がスーパーマーケットとゲームセンター、上層階は学生寮やホテルとして使用されていた13階建多目的ビルの倒壊状況である。主道路に平行する東側の道路沿いには、明瞭な段差

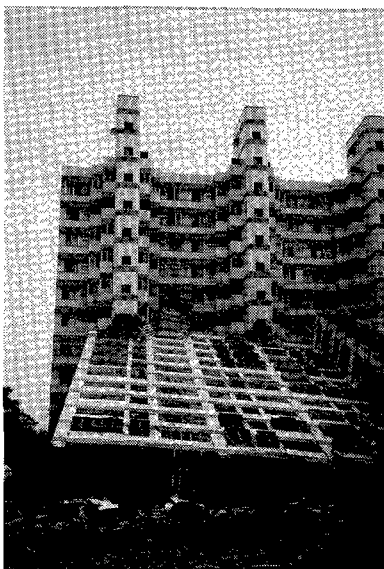


写真9 11階建マンションの倒壊状況（大里市）



写真10 1階の柱の崩壊状況（台中市）

は確認できないが断層によると思われる被害が集中している。国道付近の地盤はあまり良くなく、軟弱層は約10m程度で、地盤内に砂利のように、やや粒径の大きな礫成分は無く、砂質成分が多いように見受けられた。少し南に位置した場所にある光復国民小・中学校では、写真13に示す中学校の3階建校舎の1部が完全に倒壊し、全体的にも大きな被害を受けた。断層上の建物が倒壊し、少し断層からはずれた校舎は、被害程度は大きいが倒壊は免れていた。さらに、10~20m程離れた小学校は、ほとんど被害は無いように見受けられた。後者に隣接した校庭には、写真14に示すように約2~3m程度の上下ズレを伴う明瞭な断層が出現し、断層沿いに堤防が破壊し、河川敷から対岸の堤防に至るまで明瞭な断層による段差が続いていた。太平市：写真15は、14階建マンションの倒壊状況である。同様な建物が3棟倒壊した模様で、地下には建物に共通の大規模な地下駐車場が設置されて



写真13 光復国民中学校の3階建の校舎が完全に倒壊した状況（霧峰）

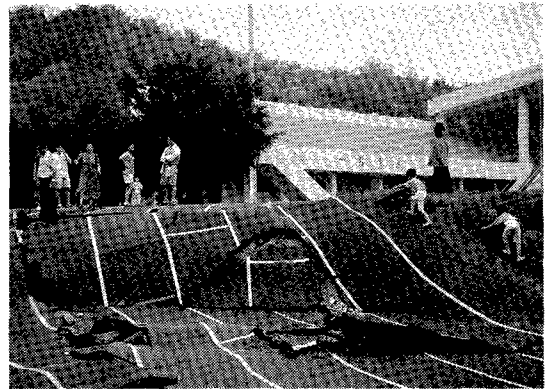


写真14 光復国民小・中学校の校庭に明瞭な断層が出現した（霧峰）

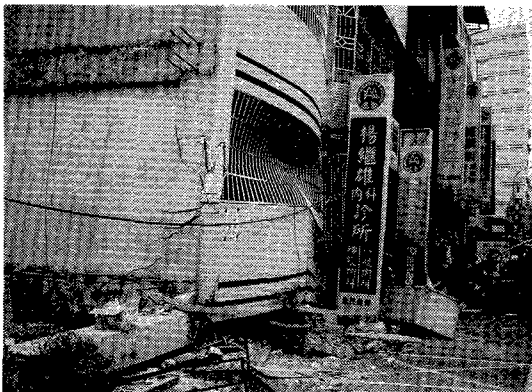


写真11 ピロティ形式の商店の倒壊状況（霧峰）

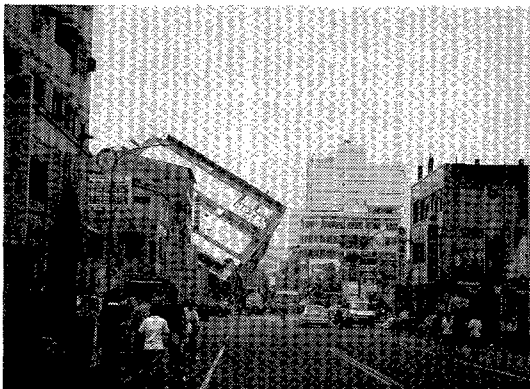


写真12 13階建多目的ビルの倒壊状況（霧峰）



写真15 14階建マンションの倒壊状況（太平市）

いた。南側1階部分の柱が破壊し、3階部分までが地下駐車場に南西方向に傾くように落下した。閉じ込められた住民の救助活動が行われていたが、警備責任者の許可を得て地下駐車場に入ったが、崩れ落ちた上層部の構造には大きな損傷は見受けられなかった。

6. 建物被害要因の検討

以上の調査結果から今回に台湾地震における建物被害の被害要因をまとめると以下ようになる。

- ①活断層運動：内陸直下に存在する延長80kmに及ぶ活断層の低角逆断層運動による強制変位
- ②最大加速度：低角逆断層運動にともなう断層近傍の断層直行方向の強震動
- ③耐震壁の欠如：主に低層RC造建物の無筋レンガ組積壁構造による耐震壁の欠如
- ④ピロティー形式：建物1階低層部の柱・壁量が不足している。
- ⑤地下駐車場：高層RC造建物の地下階に大空間の地下駐車場が設置されているために、地下階から1階部分に大きな地震力が作用したものと考えられる。
- ⑥施工不良：柱・梁・床部分のコンクリート内部に多量の空缶が詰まっている。

などが上げられる。①は、車籠埔断層として既にその存在が認められていた活断層の明瞭な断層運動であり、地表面の強制的な上下ズレ変形による作用が最も大きく寄与したものと考えられる。②は、建物の耐震設計で考えられていた地震力を上回る断層近傍の強烈な地震動の作用である。1995年兵庫県南部地震以降、最近では断層の破壊過程に伴う地震動のディレクティビティーややや長周期のパルス状の強震動の存在などの作用が考えられ、強震動特性の観点から興味深い要因が上げられる。③、④に関連して台湾の建物は、低層の古い木造建物も分布しているが、多くの建物は壁をレンガで作った（後に修理、補強したと思われる）ものが多く、倒壊に至る被害を受けた建物も散見された。2～6階建程度の低・中層非木造の多くは、RC造あるいはレンガ造の骨組構造に組積レンガで

壁を作る帳壁構造で耐震性は低いものと思われる建物で、特にピロティー形式で1階部分が倒壊する形式が多く見受けられた。

高層建物に関しては、特に最近の台湾の耐震規定は、1982年に制定され1997年に改定されているが、新しい耐震規定で建てられた建物の棟数はまだ数少なく、今回の地震で被害を受けた建物の大多数は新しい耐震規定以前の建物と考えられる。旧耐震規定によれば、耐震設計のための地域区分は地域係数として3区分されており、今回の地震で被害が集中した南投縣、台中市を含む台中縣付近は、地域係数では中位の地域に指定されており、本来台湾において高い地震危険度の地域とは考えられていなかったと考えられる。また、地震力係数Cは、建物の構造形式や用途による重要度の係数により異なるが、一般的なRC造建物を考えるとCの値は約0.1～0.12程度と考えられ、建物自重の約1.0～1.2割の水平力の地震荷重を設定している。従って、一般に考えられる日本の建物に対するC=0.2と比較すれば、約1/2程度となり、水平耐力は約半分程度と考えられる。

近年、台湾では人口の都市集中にともなって、建物の高層化が進んでいる。その際に、15階建以上の建物については、設計物件に対する第三者の審査を受けることが必要となっているが、14階建以下の建物は、その必要がなく設計者の裁量に任せられている。そのため、比較的新しい高層建物で倒壊に至る大被害を受けた建物にも、14階建以下の10～14階建の集合住宅（マンション）建物が多かった。特にこれらの被害建物は、1階部分に公共的な施設、例えば銀行、ショッピングセンター、スーパーマーケットなどを配置するよう設計計画され、1階部分の階高が2階以上の上層階の階高よりも高く設定されている。また、建物の地下には数棟共通の大空間の地下駐車場が配置されている。この地下駐車場から1階に至る空間構成において、構造的に低層部の柱、壁量は不足し、今回の地震による断層近傍の強い地震力に対して、主として1階の隅柱に過大な負担が掛かり、柱が破断し上層の自重に耐え切れずに、地下駐車場に崩れ落ちる形で崩壊・転倒したものと考えられる。

7. 地盤-建物相互作用系の動的解析による被害の検討

今回の地震の特徴的な被害のひとつに1階部分の崩壊があげられる。1階部分が崩壊した建物の多くは、1階部分がいわゆるピロティー形式となっている建物であることから、ここでは数値解析によりその被害要因を検討した。

7. 1 検討方法

(1) 解析モデル

解析モデルの概念図を図4に示す。本検討で設定した建物は、平面形状が正方形（18m×18m）で、

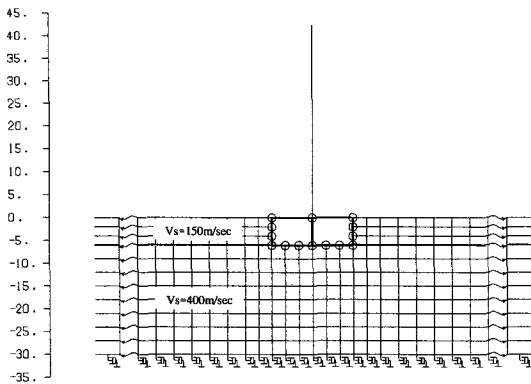


図4 解析モデル概念図

表3 設定したバネ定数

12階建モデル		
	K(t/m)	
12階	73300	
11階	122200	
10階	165600	
9階	205300	
8階	241800	
7階	275700	
6階	307100	4階建モデル
5階	336100	K(t/m)
4階	362800	11500
3階	387400	19100
2階	409800	25200
1階	377700	26400

地下階を有する地上階数が4階および12階の2種類のRC建物とした。建物重量を各階ともに1㎡あたり1トンと仮定し、日本の現行の建築基準法により、設計用の1次固有周期を各0.29秒、0.85秒とし、標準せん断力係数 $C_0 = 0.2$ で層間変形角が1/400となるように建物剛性（バネ定数）を設定した。設定したバネ定数を表3に示す。

前述したように台湾の一般的なRC造建物の設計用地震力係数Cは約0.1~0.12程度と考えられるため、本検討モデルは台中市に実在する建物よりは高い耐震性を有しているモデルとなっている。なお、ピロティーのある建物モデルについては1階部分の剛性（バネ定数）を単純に2/3とした。

台中市の地盤は、比較的硬質な地盤であり、地下数メートルでN値が50以上に達する礫質の地盤が現れることから、本検討における地盤モデルは図4に示すように、せん断波速度400m/secの地盤の上に建物が直接支持されているものとし、この支持地盤の上に層厚6mの表層地盤（せん断波速度150m/sec）が存在するものとして設定した。

なお、本検討における地震応答解析は、建物・地盤ともに複素応答法による弾性計算とし、地盤-構造物連成系での地震応答解析プログラム「SuperFLUSH/2D」を用いて実施した。

(2) 入力地震動

解析に用いた入力地震動は、台中市内で観測された加速度波形3波と兵庫県南部地震の神戸海洋気象台での観測波形（以下、神戸波とする）の計4波を用いた。これらの加速度波形と加速度応答スペクトルを図5, 6に示す。加速度波形の最大値は大きい順に、神戸波（約820gal）、PT129波（約770gal）、PT121波（約580gal）、PT156波（約460gal）の順となっており、最大値のみに着目すれば、PT156波と神戸波では約360galの差がある。

入力地震動の周期特性は、各波それぞれの特徴を有しており、神戸波の応答スペクトルと比較すると、PT121波には神戸波にはない周期0.2秒付近前後に大きな卓越が認められる。PT129波は図5の波形図からもわかるように他の観測波よりも長

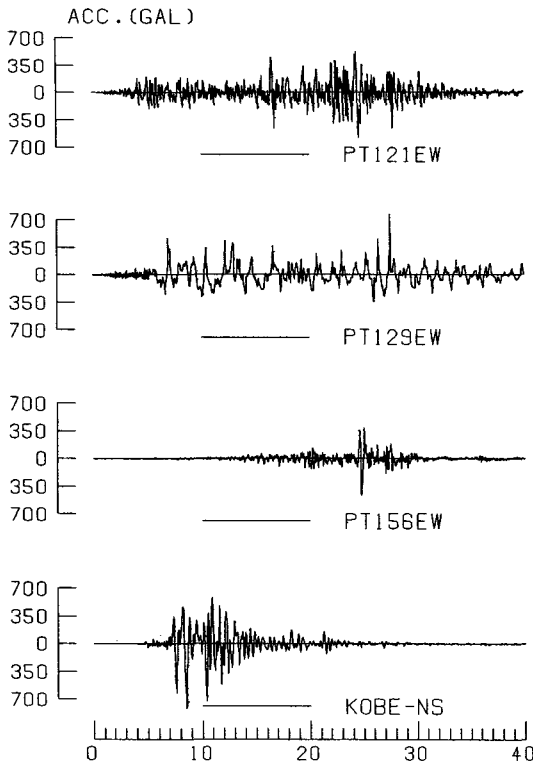


図5 加速度入力波形

周期成分が卓越した波形となっており、約1.1秒付近が卓越した地震波となっておる。PT156波は神戸波と同様に0.3~0.5秒付近において卓越しているが、約0.6秒以上の長周期成分はほとんど認められない。

本検討では、地表面での最大加速度応答が各波の有する最大加速度値となるように入力波を解析モデルの自由地盤地表面にそのまま定義した。したがって、入力レベルはそれぞれ異なっている。

7. 2 解析結果

(1) 建物固有周期 (伝達関数)

図7に建物最上階での伝達関数を示す。図7より、建物の卓越周期は4階建で約0.6秒、12階建では1次が約0.95秒、2次が約0.38秒となっており、地盤との連成系における建物の固有周期は前述した設計用の1次固有周期よりもやや長周期となっている。

(2) 最大応答加速度

図8に建物の最大応答加速度分布を示す。12階

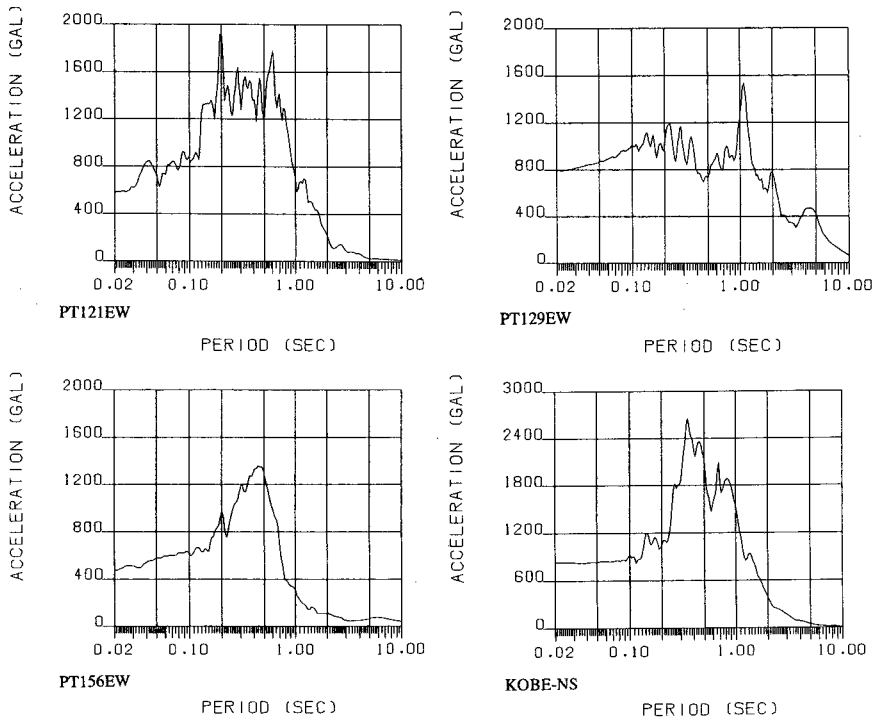
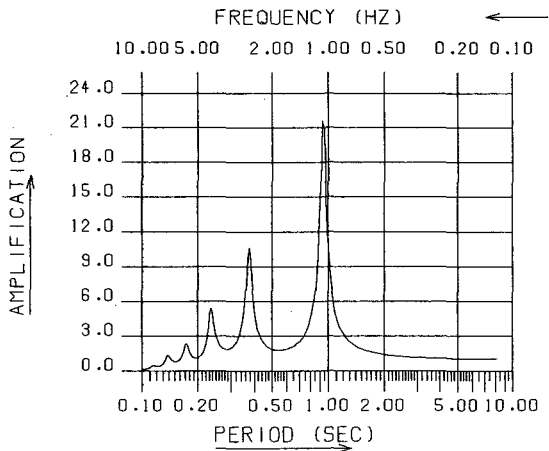
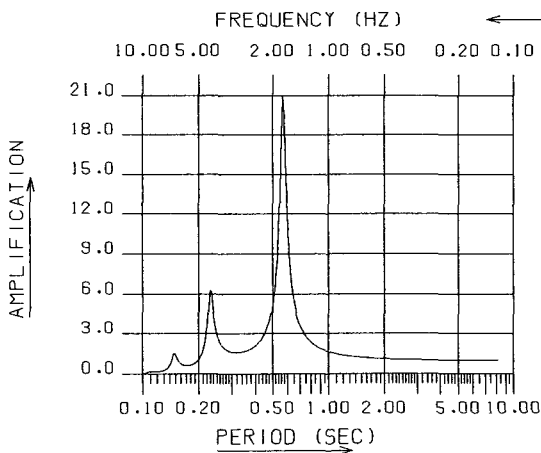


図6 加速度入力波形の応答スペクトル (h = 5%)



(a) 12階建モデル



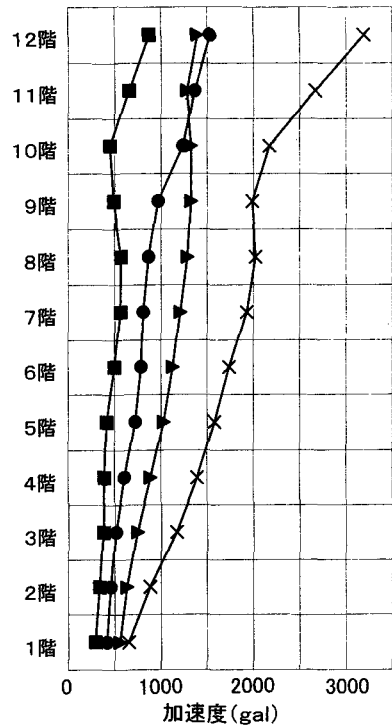
(b) 4階建モデル

図7 建物の伝達関数

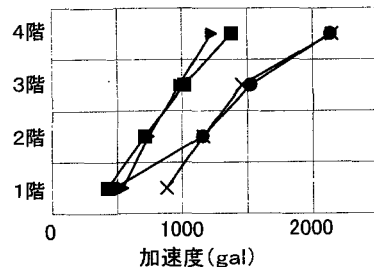
建の建物の最大応答加速度は、神戸波入力の場合が最も大きくなっており、建物頂部での最大応答加速度はPT121波、PT129波入力の場合の約2倍、PT156波入力の3倍強となっている。4階建の建物については、PT121波入力の場合が神戸波入力と変わらない最大加速応答を示しており、建物頂部での最大加速度応答は、12階建建物の頂部の最大加速度応答値よりも大きくなっている。

(3) 最大応答層間変位

図9に各階の最大応答層間変形角を示す。12階建の建物の最大応答層間変形角は、入力波によ



(a) 12階建モデル



(b) 4階建モデル

図8(b) 建物の最大応答加速度 (4階建モデル)

て異なった分布及び値を示している。神戸波入力の場合が最も大きく、約1/80前後となっている。PT121波とPT129波入力では、9階以上の上層階ではほぼ同様の変形角となっているが、下層階ではPT129入力の方が大きい変形となっている。また、PT156波入力の場合は、1/400から1/250程度の変形となっている。4階建ての建物

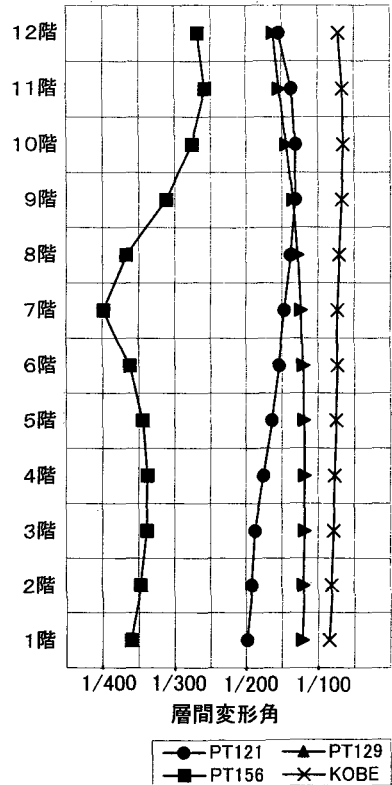
では、PT121 波入力と神戸波入力の場合の変形角は、ほぼ同様の分布、値となっている。また、PT129 入力およびPT156 入力の場合は、1層ではほぼ同じ変形角であるが、上層ではPT156 波入力の場合の方が大きい変形となっている。

(4) 建物高さによる比較

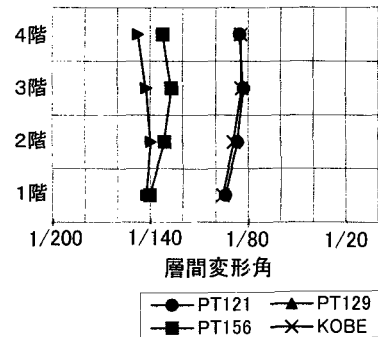
図8に示したPT121 波を入力した場合の4階建と12階建の最大加速度応答分布を比較すると、前述したように建物の最大加速度応答としては4階建のほうが大きく応答していることがわかる。これは、図7の4階建の伝達関数と図6のPT121 波の応答スペクトルから説明ができる。図6, 7より両者ともに約0.6秒付近に大きな卓越周期が認められ、建物の固有周期と地震動の持つ卓越周期とが一致して起きる共振現象によるものと考えられる。一方、12階建が4階建よりも大きく応答しないのは、12階建の建物が有する約0.9秒付近の卓越周期においては、入力動の成分が少ないことによる。このように、高層建物の方が低層建物よりも大きな応答になるとは限らず、建物の応答は、建物の有する固有周期と建物への入力動の卓越周期との関係によって左右される。

(5) 入力地震動による比較

図8に示した4階建のPT121 波入力とKOBE 波入力をした場合の最大応答加速度を比較すると、入力レベルが異なるにもかかわらず、両者ともにほぼ同様な応答を示している。入力レベルは地表面で神戸波が約820galに対してPT121 波は約550gal、建物基礎位置では、同じく約700galと470galであり、建物基礎位置において約230galの差があるが、建物頂部での最大応答加速度は両者ともに約2000gal強となっている。その要因は、建物高さによる比較で述べたように、4階建モデルの固有周期とPT121 波およびKOBE 波の周期特性との関係から説明ができる。また、図9に示した最大応答層間変形角は、約1/100から1/80と両者ともにほとんど同じ応答であり、建物への基礎位置での入力レベルが異なっても同等の応答変形角となっている。これらのことから、建物の応



(a) 12階建モデル



(b) 4階建モデル

図9 各階の最大層間変形角

答は、単に建物への入力となる加速度の最大値のみには依存せず、その入力波の持つ周期特性によって大きく左右されるといえる。

(6) ピロティー形式建物との比較

図10にピロティー形式の場合の最大応答層間変

形角を示す。ピロティー形式の建物と図9に示したピロティーのない建物を比較すると、各モデルともに2階以上の層については、両者ともにほぼ同様の応答を示すものの、ピロティー形式とした建物の1階部分の最大層間変形角は、ピロティーのない

建物よりも大きくなっており、ピロティー形式の建物は同じ入力を受けた場合には1階部分の変形が大きくなることを示している。

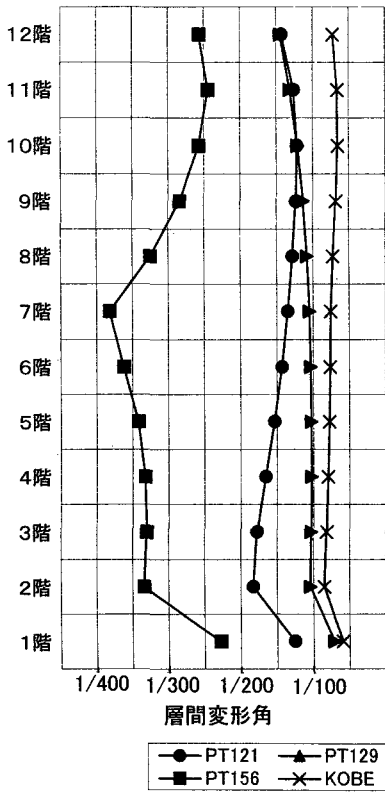
7. 3 まとめ

台湾集集地震における建物被害の調査結果の概要と被害要因について、地盤-建物相互作用系振動モデルを用いた地震応答解析による応答特性の比較から考察を行った。以上の検討結果より、以下のことが言える。

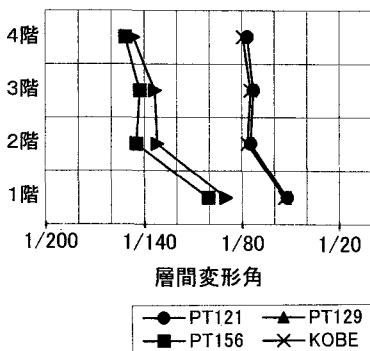
- ① PT121波を入力とした場合には、高層建物よりも低層建物の方が被害（応答）は大きくなり、神戸波入力の場合とほぼ同じ応答を示すことから、その被害の程度は阪神淡路大震災と同程度となると考えられる。
- ② PT129波を入力した場合には高層建物の方が被害（応答）は大きくなり、特にピロティーのある建物の1階部分の層間変形は、神戸波入力の場合に近い層間変形となっており、台中市において、12階や14階建のRC建物の1階部分が崩壊するといった被害が発生してもおかしくないことを解析的に示した。

8. おわりに

台湾では地形・地質的な条件において、河川による堆積作用を伴う大規模な沖積平野は認められず、いわゆる軟弱地盤による地震動の増幅作用による建物の振動被害は、顕著には認められなかった。このことは、マグニチュード7.7という大地震発生の近傍に多くの都市が存在していたにも関わらず、人的・物的被害が極端に拡大しなかった一つの大きな特徴であったと言える。しかしながら、震源断層と地盤構造のカップリングによる大きな地震動の入力問題は、条件により大規模な建物被害を生じる大きな要因となる可能性があるため、台湾でも今後大きな課題となるものと思われる。また、台湾中央部の山間地域の被害状況については、大規模な斜面崩壊をともなった集落の被害が多数発生しているとの報告があるが、現在に至るまでに全体の被害統計が公表されていない。今後の調



(a) ピロティー建物,12階建モデル



(b) ピロティー建物,4階建モデル

図10 各階の最大層間変形角

査により被害の統計量が変わる可能性もある。さらに、環境への影響、2次、3次災害への波及などの長期的な問題が懸念される。可能な限り長期的な復旧・復興過程などに着目した追跡調査が重要であると思われる。

謝 辞

本稿をまとめるにあたって台湾集集地震の強震観測記録について御教示頂くとともに使用の許可を頂いた東京工業大学・翠川三郎教授とUSGSのWillie Lee博士に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 太田陽子『変動地形を探るⅡ』古今書院, 1999. 6.
- 2) 太田陽子「台湾中部, 9.21集集大地震による地震断層第1報」, 『地質ニュース』通巻543号, 1999. 11.
- 3) M. G. Bonilla, "A Review of Recent Active Faults in Taiwan", *USGS Open-File Report*, pp.75-41, Version1.1, USGS, 1975.
- 4) 瀬川秀恭『1999年9月21日台湾集集(chichi)地震災害緊急報告』応用地質株式会社.
- 5) 中國の國家地理雜誌『大地・139・10月号』大地地理出版事業股分有限公司, 1999. 10.
- 6) 文部省突発自然災害調査班『内陸におけるプレート境界大地震の脅威-台湾921集集地震調査速報集-』1999. 10.
- 7) 日本建築学会災害委員会被害調査団『1999年9月21日台湾集集地震被害速報報告会資料』1999. 11.
- 8) Mario Paz, *International Handbook of Earthquake Engineering Codes, Programs and Examples*, Chapman & Hall Inc., 1994.

Key Words (キー・ワード)

1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake (1999年台湾集集地震), Building Damages (建物被害), Quick Report (速報), Dynamical Response Analysis (動的応答解析), Simulation (シミュレーション), Response Characteristics (応答特性)

Investigation on Building Damages due to the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake

Toshio Kuriyama*, Takahisa Enomoto** and Toshio Mochizuki***

*Kozo Keikaku Engineering Inc.

**Faculty of Engineering, Kanagawa University

***Graduate School of Urban Science, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.72, 2000, pp.61 - 75

The large-scale earthquake was occurred in Taiwan at 21 September, 1999 (local time, 1:47a.m.) and its epicenter was located close to Chi-Chi, Nantou County, middle part of Taiwan Island. The magnitude of this large-scale earthquake is estimated ML7.3 by CWB and MS7.7 by USGS and named the Chi-Chi, Taiwan Earthquake. The total number of death and injured people was about 10,000 and the total number of heavily and middle damaged buildings was about 15,000 concentrated in Taichung and Nantou County, middle part of Taiwan due to the Chi-Chi, Taiwan Earthquake.

We had a brief damage investigation of buildings, during 4 days from 23 to 26 September, just after the occurrence of this earthquake, mainly in Taichung County where is the one of the most severe damaged area and the many destroyed buildings were concentrated.

In this paper, we reported the investigated results about the building damages quickly and analytical results about the building damages using soil-structure interaction numerical models considering the soft-first story effect and building height which are assumed to be same conditions in height and scale to the actually damaged buildings. And using 3 types of strong motion records which have different spectral characteristics observed at near field in the Chi-Chi, Taiwan Earthquake and also the strong motion record observed at JMA Kobe in the Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, we calculated the floor response due to each input of strong motion records. We indicated the results and considered the damaged mode of buildings from these response characteristics.