

## 921 集集大地震（台湾中部地震）の強震動特性と建物被害

1. はじめに
2. 地震動の特性
3. 台湾の耐震設計
4. 建物の被害概要

西川孝夫\*

### 要 約

1999年9月21日午前1時47分12.6秒、台湾の南投県集集付近（北緯23.85度、東経20.78度、深さ約7km）を震源とする強震で、台中県、南投県を中心に死者約2500人、倒壊建物約45000棟に上る大被害を生じた。

地表断層は約80kmにおよび、断層東側が西側にのりあげた東西圧縮のほぼ完全な低角の逆断層で、その上下移動のズレは確認されているもので約7m（豊原）となっており、水平ズレは殆ど生じていない。台湾では1000点近くにも及ぶ世界で最も高密度な地震観測が行われており、震源から約10kmの間では東西方向984ガル、南北方向611ガルの強震動が記録されている。

一般の台湾の建物の構造的特徴は、1階の一方向がピロティー形式となっていることであるが、被害はその部分に集中した。また中高層共同住宅の場合には1階部分の柱がまるで膝が折れたように傾いたり、ひどい物では完全に転倒していた。これらの破壊を見ると、1階柱の鉄筋が完全に抜けていたり、コンクリートの品質（砂利とセメントの分離した状態）に問題のありそうなものが多く、コンクリートの打設方法に配慮が足りないのでは無いかとの印象と、鉄筋の配筋方法特に柱主筋の接合方法に問題があるのではないかとの印象を持った。また建物の被害現場から空き缶が見つかりコンクリートを節約するために用いたのではないかと疑われていたが、これらの空き缶はもともと騎楼上部の飾り梁に利用されていて、台湾では常識的な工法であることが判明したが、構造体の梁、あるいは柱梁接合部にまで挿入されているものもあり、施工者の資質の問題などが表面化した。しかし、耐震設計にあたり想定していたものよりはかなり強い地震が襲ったことも今回の大惨事の原因の一つであろう。

### 1. はじめに

1999年9月21日午前1時47分12.6秒、台湾の

南投県集集付近（北緯23.85度、東経20.78度、深さ約7km）を震源とする強震が発生した。地震の規模は台湾中央気象庁発表によるとローカルマグニチュード（ML）が7.3（USGSによる表面波マ

\* 東京都立大学大学院工学研究科建築学専攻

グニチュードMSは7.7)で非常に浅い震源を持つ地震であり、台中県、南投県を中心に死者2334人、負傷者10002人、倒壊建物約44338棟、半壊建物41633戸(10月14日現在。台湾行政院調べ)に上る大被害を生じた。各地の震度等を図1に示す。この震度は日本で計測震度が導入されるまで用いられていたものと同じである。図1の地震の規模は、MLであり、また震源深さ1.1kmは当時の暫定的なものである。またこの地震の6日後にMS=6.8の大規模な余震が生じている。

台湾の面積は日本の九州とほぼ同じでありそこに約二千二百万の人々が住んでいる。今世紀に入り死者15名以上を生じた地震は表1のように12を数え、特に1935年の関刀山を震源とする地震では

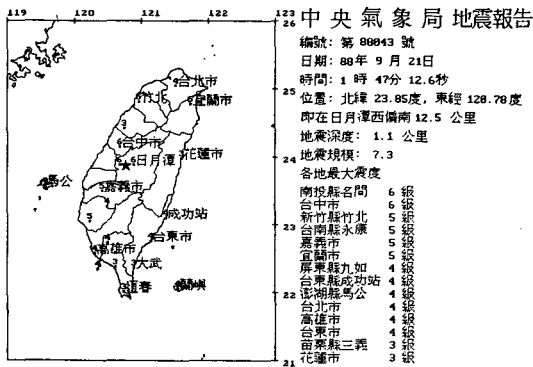


図1 各地の震度 (台湾中央気象局発表)

表1 1900年代の台湾地区災害地震一覽 (死者発生15名以上の場合)

発生日		震央	規模	災害状況			
年	月 日			死者	負傷者	全壊家屋	半壊家屋
1904	11 6	斗六	6.3	145	158	661	3179
1906	3 17	民雄	7.1	1258	2385	6769	14218
1906	4 14	店仔口	6.6	15	84	1794	10037
1916	8 24	南投	6.4	16	159	614	4885
1917	1 5	埔里	5.8	54	85	130	625
1935	4 21	関刀山	7.1	3276	12053	17907	36781
1941	12 17	中埔	7.1	358	733	4520	11086
1946	12 5	新化	6.3	74	482	1954	2084
1951	10 22	花蓮	7.3	68	856	2382(未分類)	
1951	11 25	台東	7.3	17	326	1016	582
1959	8 15	恒春	6.8	17	68	1214	1375
1964	1 18	白河	6.5	106	650	10500	25818

3千名を越える死者を出す等、日本と被害地震の発生頻度は余り変わらないが、今回の地震は台湾では中震地域(地震地域係で強震地域、中震地域、弱震地域と分類されている。)と目されてそれほど地震発生が注目されていなかった場所で発生した点で1995年兵庫県南部地震と状況が似ている。

## 2. 地震動の特性

今回地震の発生した地域は東側に双冬断層が西側に車籠埔断層がほぼ平行に南北に走っており、その下部では一つの断層であろうと推定されているが、今回はその2つが同時に動いた(南から北に向けて破壊した)と言われている。地表断層は約80kmにおよびほぼ車籠埔断層に沿っている。また断層東側が西側にのりあげた東西圧縮のほぼ完全な低角の逆断層でその上下移動のズレは確認されているもので約7m(豊原)となっており、水平ズレは殆ど生じていない(写真1)。台湾では1000点近くにも及ぶ世界で最も高密度な地震観測が行われており、強震記録も数多く採れており今後の分析が期待されるが、震源から約10kmの名間では図2に示すように東西方向984ガル、南北方向611ガルの強震動が記録されている。今回の強震記録の特徴は大きく揺れている継続時間が約20秒にも及ぶことと、東西方向の加速度が南北方向のそれよりかなり大きいことである。また震源から約



写真1 豊原で見られた断層。写真の向こう側が約7m押し上げられた。横ズレが殆ど無い。

150km離れた台北でも被害が生じているが、地表面加速度は100ガル程度と推定されているが、振動の継続時間は30秒以上になっている。台北は沖積盆地でその特異な揺れ方をすることは（約1.6～1.7秒の周期で揺れる）すでに分かっており、耐震設計基準にその影響が1989年より取り入れられている。

図3に断層と震源ならびに断層近辺の強震観測点を示す。この図でZone1～Zone4に分類したのは断層の破壊過程でスペクトル特性がどのように変化するかをみるための目的である。図4に断層近辺観測点の加速度の時刻歴の水平面内粒子軌跡を示した。

先に述べたようにほぼ断層線の垂直方向（東西方向）に加速度が大きくなっていることが分かる。図5に各Zoneごとの値の大きい東西方向記録の速度

度応答スペクトル（減衰定数5%）を示した。Zone1～Zone3は断層上の記録であり、断層破壊方向の順になっている。Zone1はZone2～Zone3と比較して、より短周期領域において速度応答が大きくなっている。Zone2ではZone1よりも長周期成分に卓越しており、Zone3ではさらに長周期領域に

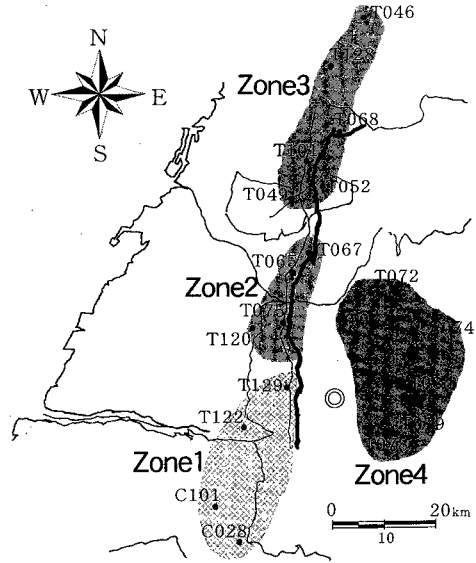


図3 断層と強震観測点

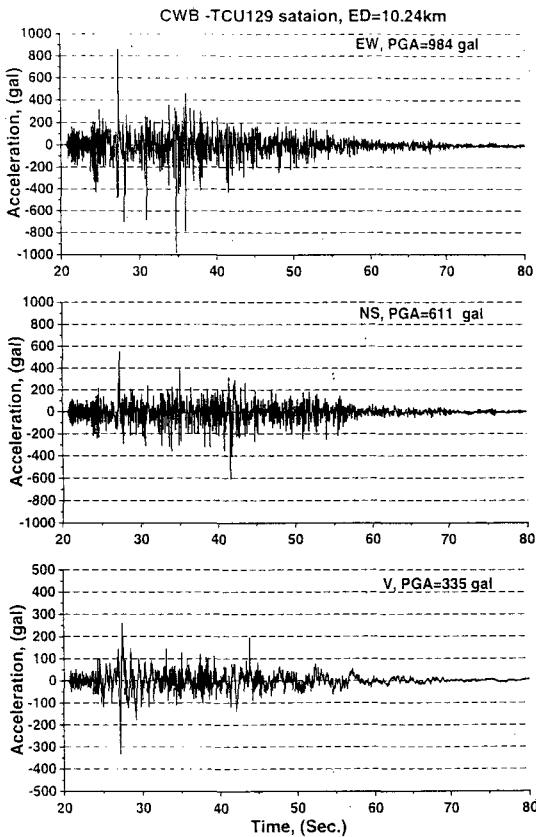


図2 地震記録の例（国立台湾大学・蔡克銓教授による）

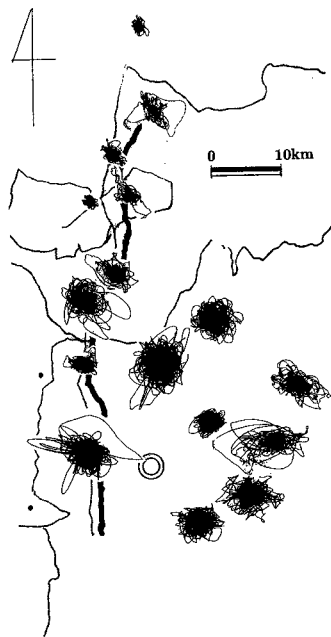


図4 加速度記録の水平面内粒子軌跡

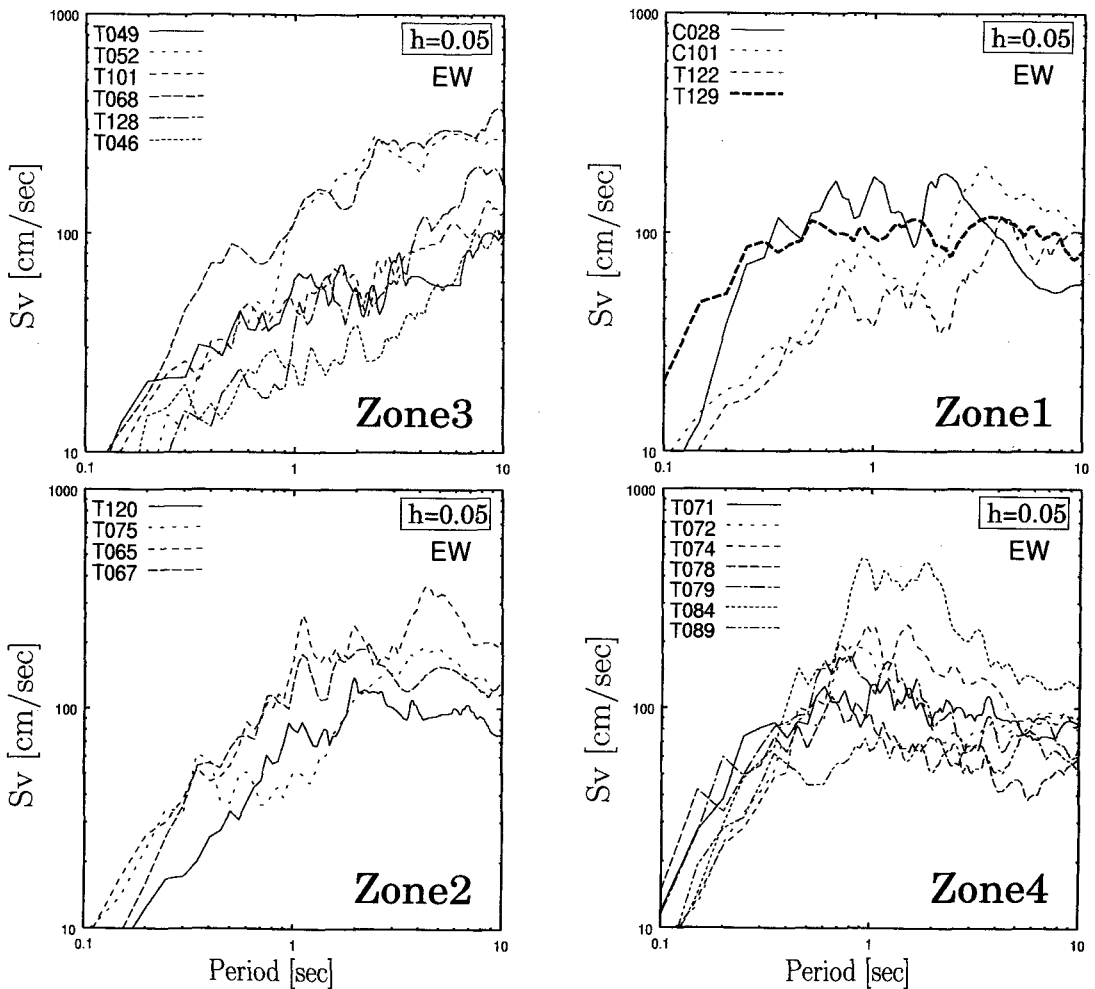


図5 断層近傍記録の速度応答スペクトル

において著しく卓越している。また Zone1~3 の順に  
 応答速度値が大きくなっている傾向は断層の破壊  
 進行方向に大きな地震エネルギーが放出されるテ  
 イレクティブイター効果であると考えられる。また  
 Zone4 は断層東の上盤の観測点である。一般に  
 低角度の断層によって発生した地震では断層上盤  
 側で被害が生じるとされているが、今回でも実際  
 に上盤側の被害が多く報告されている。Zone4 の  
 スペクトルをみると、他のグループと比較して短  
 周期において卓越し、周期1秒付近を山とした形を  
 している。また Zone1 の T129 と震源近傍である  
 Zone4 は、広い範囲の周期に亘って速度応答が大  
 きくなっているのが特徴的と言える。図6は今回の  
 地震と同年の8月17日に発生したトルコ地震の断

層破壊方向の観測点の記録、さらに1995年兵庫県  
 南部地震における神戸海洋気象台NSの速度応答ス  
 ペクトルを比較したものである。神戸の記録は周  
 期1秒付近で卓越するのに対して、台湾、トルコで  
 は長周期で著しく卓越しているのが分かる。また  
 図7は台湾の断層東上盤の観測点の記録と神戸海  
 洋気象台NSの速度応答スペクトルを比較したもので  
 ある。上盤の観測点のスペクトルはおおむね1秒付  
 近に卓越しており、神戸とよく似た性状を示して  
 いる。ここでは主に観測記録のスペクトル特性の  
 みについて考察したが、今後数多く観測された記  
 録をもとに、断層近傍の地震動特性についての研  
 究が行われ多くの貴重な成果が発表されることが  
 期待される。

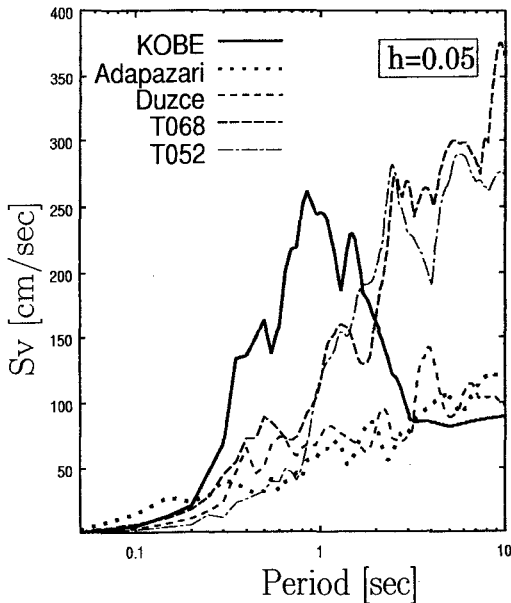


図6 神戸海洋気象台とトルコ、台湾断層近傍の比較

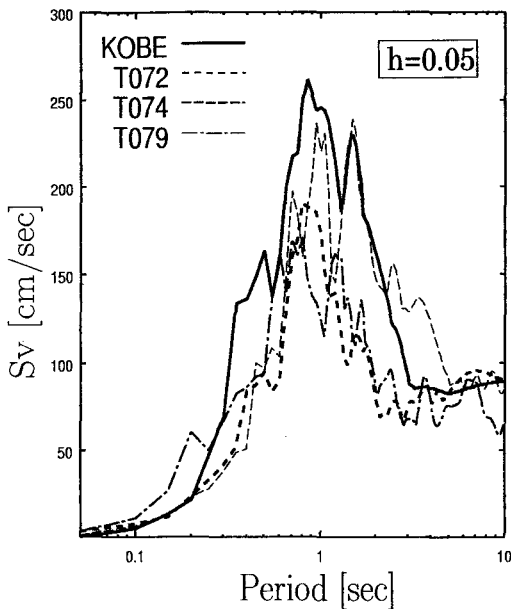


図7 神戸海洋気象台と上盤記録の比較

### 3. 台湾の耐震設計

台湾の耐震基準は1974年に米国のUBCコードに倣って制定されている。地震力は、 $V = ZKCW$  ( $V$ : 地震力、 $Z$ : 地域係数、 $K$ : 構造特性係数、 $C$ : ベースシア係数) で求めることとされたが、ベ-

ースシア係数を0.1としたので、日本の設計用外力(標準的にベースシア係数として0.2を用いる)のほぼ1/2となっている。以後順次マイナーチェンジを行い、1998年に大規模改訂を行い、比較的日本の耐震設計の要求レベルに近づいている。しかし今回の地震は改訂前の設計基準で設計された建物を襲ったものである。また超高層建築を除いて、45m程度以下(50m以上は審査会にかかりかつ動的解析が要求されている)の建物は鉄筋コンクリートで建設されるのが一般的である。

### 4. 建物の被害概要

一般の台湾の建物の構造的特徴は、1階部分を店舗あるいは駐車スペースとして使用するために間口方向には殆ど耐震壁を持たない構面で、逆に奥行き方向にはラーメン内に煉瓦壁をいれた構面(あるいは煉瓦壁の壁式構面)で構成し、2階以上は住宅として使用するため両方向に煉瓦の壁が入って剛性の高い、いわゆる一方向がピロティー形式となっていることである。さらに1階は道路から約3.6m幅の騎楼と呼ばれる通路を設けることが市街地では義務付けられているため(その上部はオーバーハングの状態になることが多く、しかも建築面積から除外される)、建物がトップヘビーの状態になりがちなこと構造的特徴である。またこれらの伝統的形態は中層の共同住宅にも継承されており、構造的にはピロティー形式になっているものが多く見受けられる。設計ではそれらの構造的特徴(例えば現日本の耐震設計法における剛柔比のようなもの)は考えられていないし、かつ一階部分の柱における配筋の詳細等にそのような配慮は無いようである。

被害の最も目立つのは、前述の構造的な欠陥いわゆるピロティー形式の建物の1階部分の崩壊である(写真3, 4)。中高層共同住宅の場合には1階部分の柱がまるで膝が折れたように傾いたり、ひどい物では完全に転倒していた(写真5, 6, 7)。当地の新聞では膝折破壊と呼んでいたが、まさに当を得た表現であると感じた。これらの破壊を見ると、1階柱の鉄筋が完全に抜けていたり、コンクリ-



写真2 ズレ上がった場所に建つ建物は無被害であった。

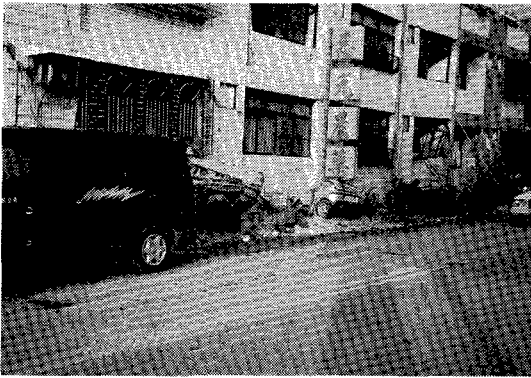


写真3 典型的な民家（多くは写真の様に長屋式になっている）の被害。1階部分が桁行き方向（間口方向）につぶれている。



写真4 かるうじて崩壊をまぬがれた建物の騎楼部分。柱頭部分に曲げヒンジが生じている。



写真5 台北市の複合建物の倒壊。台北市の震度は4.5程度と言われており、地表面加速度は100ガル程度とされている。この建物の倒壊後周りに白い粉（多分セメントと思われる）が舞い散り、かなり広い範囲に1mm程度ふり積もったとのことである。

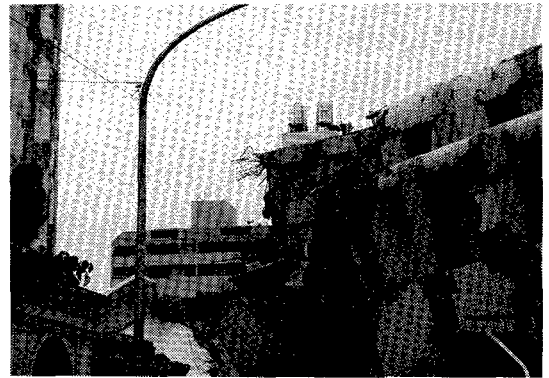


写真6 12階建の共同住宅。柱の鉄筋が完全に抜けている。



写真7 12階建の共同住宅。全部で4棟建っていたが将棋倒しに全部倒壊した。

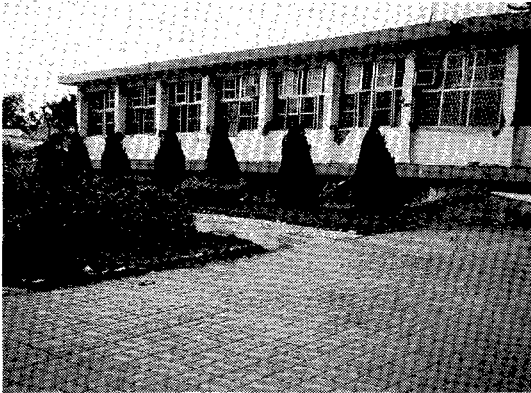


写真8 小学校の被害。1階部分が完全につぶれている。



写真11 避難所の風景

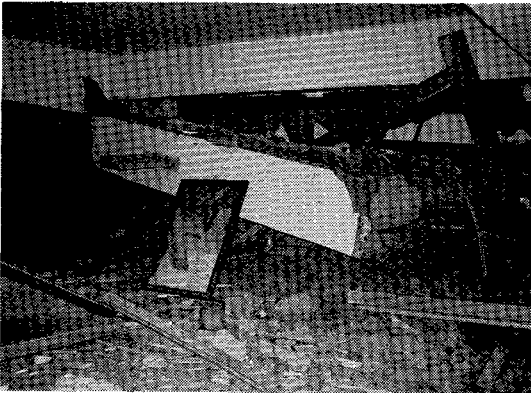


写真9 同小学校の1階柱。柱頭、柱脚が完全にヒンジとなっていることが分かる。



写真12 応急危険度判定の例



写真10 キャンティレバー先端の飾り梁に用いられた空き缶。但し、構造体の梁や柱-梁接合部に入っている物もある。

設方法に配慮が足りないのでは無いかとの印象と、鉄筋の配筋方法特に柱主筋の接合方法（ほとんど重ね継ぎ手であるが、重ね長さが不足しているのではないかと想像させるものも多く見られた）に問題があるのではないかと印象を持った。この様な10階から14階程度の共同住宅の崩壊により多くの死者を出したが、いずれも建設築年数は短いので、施工にあたり手抜き工事等があったのではないかと噂され、幾人かの設計者や工事業者が逮捕される騒ぎになっている。また建物の被害現場から空き缶が見つかりコンクリートを節約するために用いたのではないかと疑われていたが、これらの空き缶はもともとは騎楼上部の構造梁ではない飾り梁に利用されていて、台湾では常識的な工法であることが判明したが、構造体の梁、あるいは柱梁接合部にまで挿入されているものもあり、

トの品質（砂利とセメントの分離した状態）に問題のありそうなものが大半で、コンクリートの打

施工者の資質の問題などが表面化した。しかし、耐震設計にあたり想定していたものよりはかなり強い地震が襲ったこと、空き缶やコンクリートの打設等、施工業者の「なれ」あるいは教育不足、さらには施工監理の不十分さなどが複合して今回の大惨事に繋がったものと考えられ、我が国に於いてもこの教訓を生かさなければならないとの思いを強く持った。

#### 謝 辞

終わりに今回の被害調査はNHKの協力を得た。また日本設計周東修平氏、台湾在住の廖慧明氏、游顕徳氏には台湾の耐震基準、施工の実状など多くの情報をいただいた。ここに感謝いたします。なお本報告は日本建築学会の建築雑誌11月号に掲載した地震調査速報に加筆をしたものであり、また地震動の整理分析には本学大学院建築学専攻修士1年佐藤美保君の努力によるところが多い。

#### Key Words (キー・ワード)

Taiwan (台湾), Reverse Fault (逆断層), Strong Ground Motion (強震観測), Soft First Story (ピロテーター), Non-structural Wall (騎楼)



## Characteristics of Ground Motion and Damages of Buildings due to 921 Chi-Chi Earthquake, Taiwan

Takao Nishikawa\*

\*Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University  
*Comprehensive Urban Studies*, No.72, 2000, pp.51 - 59

The Chi-Chi earthquake triggered by Chelongpu Fault struck middle Taiwan on September 21, 1999 with magnitude 7.3 and depth of hypocenter 1.1 km. The maximum PGA recorded was about 1.0 g. The number of death was about 2500 and the number of totally collapsed building was about 45000.

The Chelongpu Fault at middle of Taiwan moved (reverse fault) with fracture length about 80 km and the vertical uplift on hanging wall was about 7 meters at north of the fault. There are about 1000 observation points of strong ground motion records by the Central Weather Bureau in Taiwan. Many records were obtained in this earthquake and also many kinds of analyses have been conducting. Useful and interesting results are expected about the characteristics of ground motions along the fault.

The typical street-front low-rise buildings in Taiwan has no or little walls in the first story parallel to pedestrian corridor. Such buildings collapsed at the first soft story. There were about 20 high-rise RC buildings collapsed in Chi-Chi earthquake. All these buildings had the same deficiencies structurely. Such as: one span structure; soft first story; non-structural walls were not considered in structural design; all the longitudinal rebars of column overlapped at floor level and etc.. And also the reasons for such serious building damages were due to not only the unexpected very high PGA in the structural design, but also bad construction quality and improper structural system.