

1999年台湾921地震による豊原・台中付近の地震災害と地形

Relationship between earthquake damage and geomorphologic condition of Fengyuan and Taichung areas caused by the 921 Earthquake in 1999, Taiwan

植村善博

Yoshihiro Uemura

佛教大学教授 文学部人文学科 (603-8301 京都市北区紫野北花ノ坊町96)

Professor, Bukkyo University, Dept. of Human Science

The purpose of this paper is to examine the relationship between earthquake damage and geomorphologic condition caused by the 921 earthquake in 1999, Taiwan. The relationship between both on the case of Fengyuan (豊原) and Taichung (台中) area has never been studied by former researchers. The results obtained are followings.

- 1) Damage of buildings and houses located along surface reapture in Fengyuan area is due to surface deformation by flexure associated with reverse faulting.
- 2) Damage of high apartment buildings in Taichung city is strongly affected by soft ground sediments deposited along river floor and valley bottom plain.

Key Ward : earthquake damage, geomorphologic condition, 921 earthquake, Taiwan

1. はじめに

1999年台湾集集地震の発生から今年(2009年)は10年目に当たる。車籠埔断層^{ちゅうろうぼ}の活動により出現した地表地震断層の特徴^{1) 2)}、山間地を含む広汎な地域に発生した巨大地震被害³⁾、迅速に取り組みされた緊急対応や再建・復興事業⁴⁾などについて多くの研究がなされている。しかし、地形と建物被害との関係について論じたものはほとんどみられない。地形研究者の関心が地表地震断層に集中した結果である。筆者は地震直後の調査と2009年2月の再調査を通じて、本地震における被害状況と地形環境との間に密接な関係があると考えている。本稿では台湾の自然災害を概観した後、台中盆地の豊原市および台中市における地震被害と地形との関係を予察的に検討し、解決すべき今後の課題を明らかにしたい。

2. 台湾の自然災害と921集集地震

(1) 自然災害の特徴

台湾は自然災害の多発地帯である。その最大の理由は太平洋西縁の弧状列島の一部をなし、太平洋プレートとフィリピン海プレートとの衝突境界に位置することにある。すなわち、1) プレート衝突による脊梁中央山脈の隆起が激しく、高度3000m級の高山域が広く分布する。このため起伏量は大きく地形は急峻である、2) 山地は複雑な地質構造ともろい岩盤から構成され、不安定な地質条件下にある。また、高度1000m以下に広がる広大な丘陵は軟弱な新第三紀～第四紀層からなり、侵食が活発で崩壊が多発する、3) 低地、台地、丘陵、山地の各地形境界には活断層が分布し、急傾斜の断層崖を発達させるとともに被害地震を多発させている、4) 全島が熱帯～亜熱帯モンスーン地帯にあって年1500mm以上の降水量をもち、高山域では年3000mm以上に達する。全降水の7割が夏季の梅雨と台風によってもたらされ、洪水や崩壊が多発する、5) 国土の約30%を占める西部低地帯に自然状態の大河川と活動度の高い活断層が多数分布するとともに

に、約 8 割の人口と主要生産基地が集中している、6) 台北、台中、高雄など西部大都市圏では急速な都市化が進み、無秩序で安全性を無視した土地開発や安易で耐震性の低い住宅や高層ビルなどが急増していることなどを指摘できる。

つぎに、過去 30 年間 (1971~2000 年) の災害資料を検討した林⁵⁾ の報告を中心に自然災害の特徴を概観する (表 1)。

1) 被害件数: 地すべりと崩壊が 1・2 位であり、両者で 546 件と全体の 52.3% を占める。急峻な山地域が広くかつ不安定な斜面が多く分布していることを示す。ついで、洪水の 173 件 (16.6%)、地震の 118 件 (11.3%)、土石流の 116 件の順となっている。

2) 死傷者数: 地震による死傷者が 14,736 名と圧倒的多数を占める。この大部分は 1999 年 9 月 21 日の集集地震 (以下 921 地震と称する) に起因する。921 地震による被害者を除く地震の死傷

者は 2 位で 926 名 (19.0%) に達し、地震災害による割合は高い。台風による 2,428 名 (49.9%) が約半分を占めて圧倒的に多く、洪水による 917 名 (18.8%) を合わせると 3,345 名で約 7 割に達する。毎年繰り返して発生する台風と洪水による人身被害が際立っている。

3) 全・半壊家屋数: 921 地震による巨大な家屋被害は全壊半壊合わせて計約 10.4 万戸に達し、深刻な影響をもたらしたことが明白である。921 地震によるものを除いた地震被害では 2,187 戸 (4.2%) と極めて少なく、台風による 33,693 戸 (64.0%) と洪水による 16,228 戸 (30.1%) とが断然抜きんでており、両者で約 9.5 割を占める。過去 30 年間における自然災害では 1999 年 921 地震による影響が巨大だった。これを除くと、最大の災害要因は台風と洪水で、発生頻度および被害数が極めて大きく、この対策が重要課題といえよう。しかし、低頻度とはいえ直下型地震への震災対策を怠ることはできない。一方、居住のまれな山地域において地すべりや崩壊の発生件数は多いが、被害は非常に少ない。

(2) 921 集集地震

1999 年 9 月 21 日午前 1 時 47 分、M=7.3 の集集地震が台湾中部で発生した。これに伴って中央山脈西縁に南北延長約 90km にわたって地表地震断層が出現した。これは既存の車籠埔断層に沿って現われたが、東傾斜の低角逆断層としての特徴をもつ。強い地震動によって山間地域を含む広い範囲が被災し、死者約 2,500 名、全壊約 50,000 戸といった未曾有の巨大な被害が生じた。しかし、台中市などの大都市は直撃されることがなかったため、被害は比較的軽微であった。地震大国の台湾において、921 地震は 1941 年 12 月 17 日嘉義地震以来 54 年ぶりの大規模被害地震となった。過去 160 年間に発生した被害地震を表 2 に整理した⁶⁾ ⁷⁾。これによると、台湾では過去 160 年間に死者 1,000 人を超える大震災が 4 回発生している。その頻度は平均約 40 年に 1 回という高さあり、人の一生に 2 回は遭遇するという計算になる。

表 2 過去 160 年間の主要被害地震^{6) 7)}

地震名	年月日	ML	D km	死者	負傷者	全壊	半壊
彰化	1848/2/12	7.1	10	1,030	?	22,664	
北港溪	1904/11/6	?	6.3	145	158	661	3,179
嘉義・梅山	1906/3/17	7.1	浅	1,258	2,385	6,769	14,128
埔里	1917/1/5	5.8	?	54	85	755	
新竹・台中	1935/4/21	7.1	10	3,279	12,053	17,907	36,781
嘉義・中埔	1941/12/17	7.1	10	358	733	4,520	11,086
台南新化	1946/12/5	6.3	浅	74	482	1,954	2,084
花蓮東南東	1951/10/22	7.3	浅	68	865	2,382	
台南東北東	1964/1/18	6.5	20	106	650	10,502	25,818
集集	1999/9/21	7.3	8	2,499	11,305	51,788	54,420

3. 台中盆地の地形

台中盆地は北部に豊原市、南部に台中市、南縁には大里市が位置し、台湾中部の中核地区をなす。盆地は東西約 10km、南北約 20km で長方形の箱状盆地をなし、北端を大甲溪、南端を大肚溪によって限られている。図 1 は高度 10m 間隔の等高線図である。盆地の西側には南北にのびる大肚台地が発達する。これは高度 200~310m の広大な河成段丘面からなる。中央部には活褶曲軸が走るが、その北端部で 1935 年の屯子脚地震断層がこれに斜行して出現した。また、台地西縁に沿って清水断層とよぶ活断層が分布している。本台地は逆断層と活褶曲の組み合わせによる複雑な隆起運動によって形成されたと推定される。一方、盆地東側には脊梁の雪山山脈西縁に位置する加裏山地とよばれる丘陵地が分布する。これは主に新第三紀の堆積岩層からなり、丘陵と低地との境界は車籠埔断層に一致している。この断層の最新活動が 921 地震を発生させた。このように、台中盆地は東を車籠埔断層に限られ、かつ西側の清水断層の上盤に位置しており、fold-thrust belt における活動的な変動性盆地であるといえよう。

盆地内は南西へゆるく高度を下げる扇状地面が卓越する。その高度は北東端の豊原市朴子口で約 240m、南端の大里市南部で約 30m、平均 1.1% の勾配で南南西へ傾斜している。これを台中扇状地面とよぶ。この扇状地面は図 2 の FT1 面相当の段丘面の南方への延長であると判断される。現在は西流して台湾海峡に流入する大甲溪は、かつて南流して台中盆地に流れ込み、扇状地を形成して大肚溪に合流していた。この旧扇状地面の形成年代は約 6 千年前頃と推定される⁸⁾。その後、大規模な流路変更が生じ、現在の西への流路に変わった。また、扇状地の東西両側方部には堆積が及ばなかった埋め残し性の低地が分布し、そこに旱溪および筏仔溪が南流し、大肚溪に合流する。



図 1 台中盆地の地形（低地部の等高線間隔は 10m）

現在西流して台湾海峡に流入する大甲溪は、かつて南流して台中盆地に流れ込み、扇状地を形成して大肚溪に合流していた。この旧扇状地面の形成年代は約 6 千年前頃と推定される⁸⁾。その後、大規模な流路変更が生じ、現在の西への流路に変わった。また、扇状地の東西両側方部には堆積が及ばなかった埋め残し性の低地が分布し、そこに旱溪および筏仔溪が南流し、大肚溪に合流する。

4. 豊原市東部における地表地震断層と被害

豊原市は台中盆地北部、大甲溪の南岸を占める人口約 16 万人の都市で、台中都市圏の一部を構成する。ここは車籠埔断層の北部にあたるが、地表地震断層が大甲溪南岸付近で南北走向から東西走向へ大きく変化する。また、地震断層が数本に分岐して複雑な分布を示すこと、水平ずれ成分が大きくなることなどから断層の北端部に位置すると考えられる。本地域における地形、地表地震断層と建物被害の関係を検討するため、1999 年 10 月 16~18 日および 2009 年 2 月 12~14 日に豊原市東部の南陽橋から北へ埤頭付近までの間で現地調査を実施した。また、地震 1 カ月後の空中写真から地形および撤去建物などを判読した。

(1) 地形 本地域は車籠埔断層によって東側の丘陵と西側の低地に二分される。大甲溪は中央山地を源流域として西流する大河で、中流の中和と東勢間は北流し、さらに再び西流して丘陵を横断して低地へ出る。この大きな鍵型の屈曲流路は西側の丘陵の隆起によって流路が迂回を余儀なくされた結果と考えられる。

1) 丘陵 車籠埔断層の東側には比高 100~150m 程度の断層崖が形成されており、その背後に高度 300~600m 程度の開析の進んだ丘陵が発達している。高度は南高北低を示し、丘陵高度 400~500m に顕著な定高性が

発達する。断層崖は侵食が進み断層位置よりかなり後退している。丘陵の地質は中新統の柱竹林層、鮮新～更新統の卓蘭層、更新統の頭崙山層から構成されている。

2) 段丘 大甲溪の南岸には多数の河岸段丘面が発達する。台湾中西部の段丘区分は、表層に赤色土をもつLT面系とそれをもたないFT面系に二大別される。これに従うと、本地区ではLT面系が4面に、FT面系が3面に細分される。つぎに各段丘の特徴を上位から下位へ順に要約する。形成年代は劉⁸⁾による値を採用した。

- ①LT2面：本地区で最高位の段丘で、高度380～500mに台地状の広い面を発達させる。公老坪では活褶曲による変形を受けており、その西端部で比高数mの西落ち低断層崖によって切られている。形成年代：約80ka。
- ②LT3面：LT2面の北側に分布し、高度450～480mの面を形成する。形成年代：約70ka。
- ③LT4面：430～450m程度の高度をもつ。形成年代：50～60ka。
- ④LT5面：分布は極めて断片的で、高度は380～400m程度。また、豊原東部の南上坑には高度250～310m本面が断層崖に付着して分布する。形成年代：約40ka。
- ⑤FT1面：大甲溪南岸から南西へ広がる扇状地性の段丘面で、車籠埔断層より東の上流側にはほとんど分布しない。面の高度は上流の翁社付近で約240m、豊原付近では高度220mに低下し、さらに南方へ連続していく。形成年代：約6ka。
- ⑥FT2面：大甲溪に沿って最も連続性のよい面を形成する。石岡付近で高度270m、埤頭で260m、下流の朴子口で230m程度となる。形成年代：3.5～4ka。
- ⑦FT3面：最も低位の河岸に接した位置に分布する。石岡付近で高度270m、下流の溪底で210～230mとなる。形成年代：2.7～3ka。

本地区のLT面群の高度と河床との比高から下刻速度を求めると2.9～3.7m/kaとなり、隆起速度はかなり速い。また、新期のものほど大きな値をもち、下刻が加速している可能性がある。

(2) 被害の特徴

図2に本地域の地形分類と地表地震断層の分布を示す。本地域の車籠埔断層は柱竹林層と卓蘭層との間にはさまれる錦水頁岩の層面に沿って活動するデタッチメント断層と考えられる⁹⁾。一方、1999年地表地震断層は丘陵末端の推定活断層の

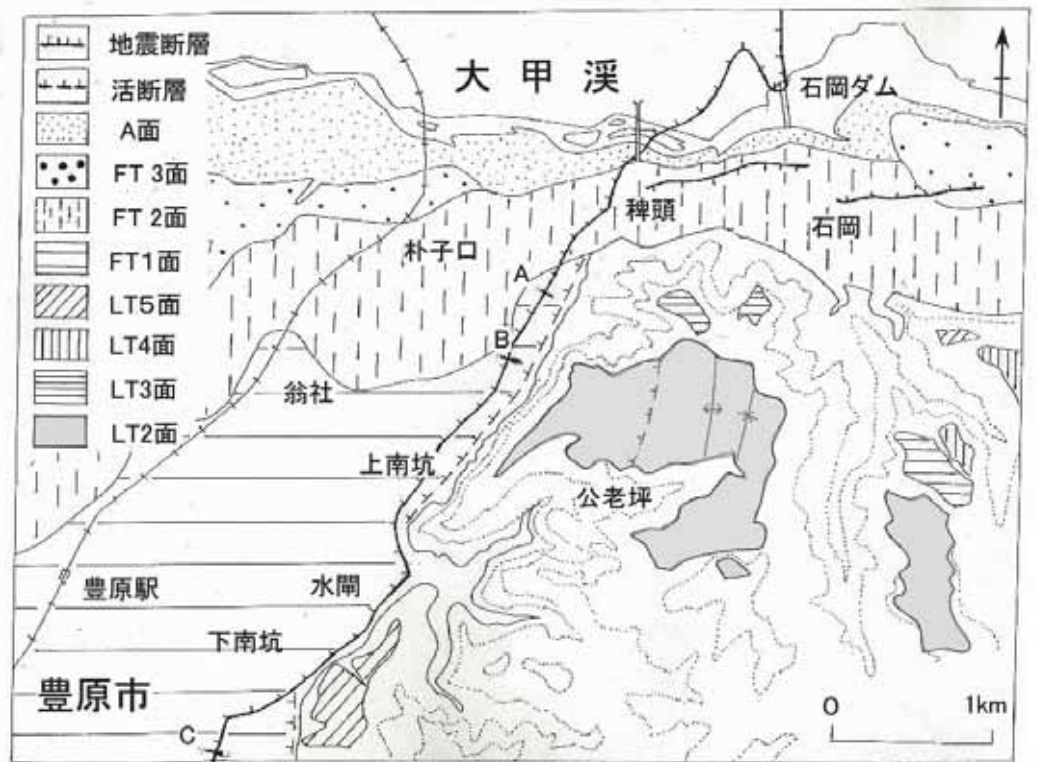


図2 豊原東部の地形分類と地表地震断層（段丘区分は楊貴三（未公表）による）

位置より100～500m程度西側の低地に出現した。地表に生じた変形は東上がりの低角逆断層の特徴を示し、顕著な撓曲帯として出現している。変位地形の実測断面を図3に示す。地表地震断層の縦ずれ変位量はA（朴子橋東）で4.8m、B（市公墓）で7.3m、C（南陽橋東）で3.2mであった。また、撓曲帯の幅はAから順に29m、50m、11mとかなり変化が大きい。そして、3地点とも撓曲頂部付近に張力性の地溝を伴うのが特徴といえよう。建物被害をみると、断層をまたいだものや撓曲帯内に位置しているものは例外なく大破している。一方、下盤側では被害が少なく、断層に接している建物ですら破損していないものが多い。上盤側でも変形帯から少し離れた建物には被害がほとんど見受けられなかった。このような事実は建物被害が断層変位の直接的結果であり、断層から離れた建物に被害がないのは断層運動がかなり緩やかだったことを反映している。大内他¹⁰⁾は加速計記録から断層破壊の速度は1～2m/秒程度と推定されることを述べており、かなりゆっくりとした動きだった。このため、建物被害は強い震動によるのではなく、大部分が地盤の変位・変形によるものと判断できる。

5. 台中市における高層住宅の被害と

地形環境

(1) 建物被害の概要

台中市は人口約 95 万人を擁する台湾第 3 位の大都市で、台中盆地や南部に位置する。市街地中心部の中・西・東の各区は地表地震断層から西へ約 4～6km 程度離れているため、被害は比較的軽微だった。しかし、市内は強い地震動に襲われ、人身被害や建物倒壊が発生している。市内で測定された加速度は表 3 の通りである¹¹⁾。

台中市における区別被害状況¹¹⁾を表 4、区ごとの死傷者数と住宅被害戸数の発生状況を図 4 に示した。

本市の人身被害は死者 114 名、重傷者 48 名、両者を合わせて 162 名で、人口比 0.017% である。一方、全壊住宅 2,803 戸、半壊住宅 3,743 戸、被害住宅の合計 6,546 戸は戸数比で 2.3% に達する。死傷者率に対して住宅被害率が 2.3% と著しく高率なのは、高層住宅建築物（以下高層住宅と称する）の被災が多かったことを反映している。台中市内において、全壊高層住宅 19 棟、同半壊 21 棟で計 40 棟の高層住宅の被災が報告されている¹¹⁾。また、死傷者は地表地震断層が通過した北屯区に圧倒的に集中した。一方、住宅被害は南区で最大を示し、北区、北屯区、東区でも相当数が被災しており、広域的に被害が発生している点に特徴がある。北区で全壊が多いのに対して南区では半壊が圧倒的に多いという地域差は注目される。

(2) 台中市の地形環境

台中市中心部の地形を図 5 から判読する。台中扇状地面の高度は 130m 付近から 40m 程度の高度をもち、南南西方向に約 0.96% の平均勾配で低下していく。面上には旧流路を踏襲していると推定される緑川、柳川、梅川、麻園頭溪など多数の河川が最大傾斜方向に南流している。これらは扇状地面を下刻しながら蛇行を繰り返すとともに、流路に沿って箱状の谷底低地を形成している。高度 80m 以下の部分で下刻が著しくなり、谷底から最大比高 3～5m の侵食崖を生じている。都心部では緑川、柳川、梅川の流路付け替えや直線化が進み、廃川化や暗渠化されてしまった部分も多い。一方、日治時代初期に計画・建設された台中旧市街地は高度 65～90m 間の扇状地湧水帯上に位置している。このため、高度 60～75m 付近に谷頭をもち南流する 6 本の小河川が認められる。また、東部の旱溪は約 200～300m の幅広い氾濫原を展開している。

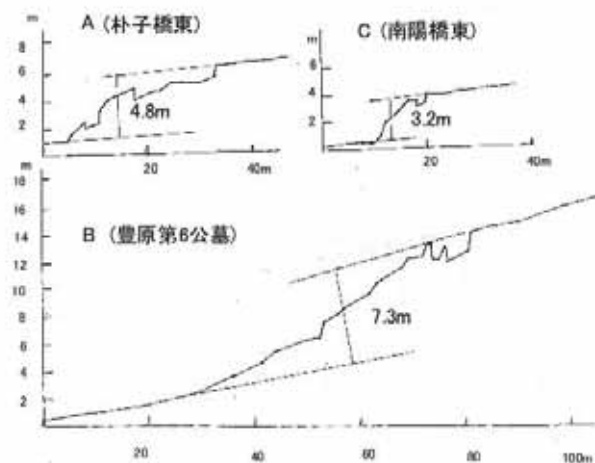


図 3 地表地震断層の実測断面（位置は図 2 に示す）

表 3 台中市の加速度（ガル）¹¹⁾

区名	垂直加速度	南北加速度	東西加速度
北区	129.3	182.5	221.1
北屯区	194	438.7	348.7
南区	153.3	208.2	256.9
西区	109.7	230.7	156.8

表 4 台中市の被害状況¹¹⁾

区名	死者	重傷者	死傷者数	全壊住宅	半壊住宅	被害戸数
中区	1	0	1	3	24	27
東区	9	10	19	34	401	435
西区	1	1	2	16	69	85
南区	5	2	7	846	2,158	3,004
北区	0	0	0	1,205	428	1,633
西屯区	1	0	1	0	99	99
南屯区	0	0	0	0	164	164
北屯区	97	35	132	696	395	1,091
総計	114	48	162	2,800	3,738	6,538

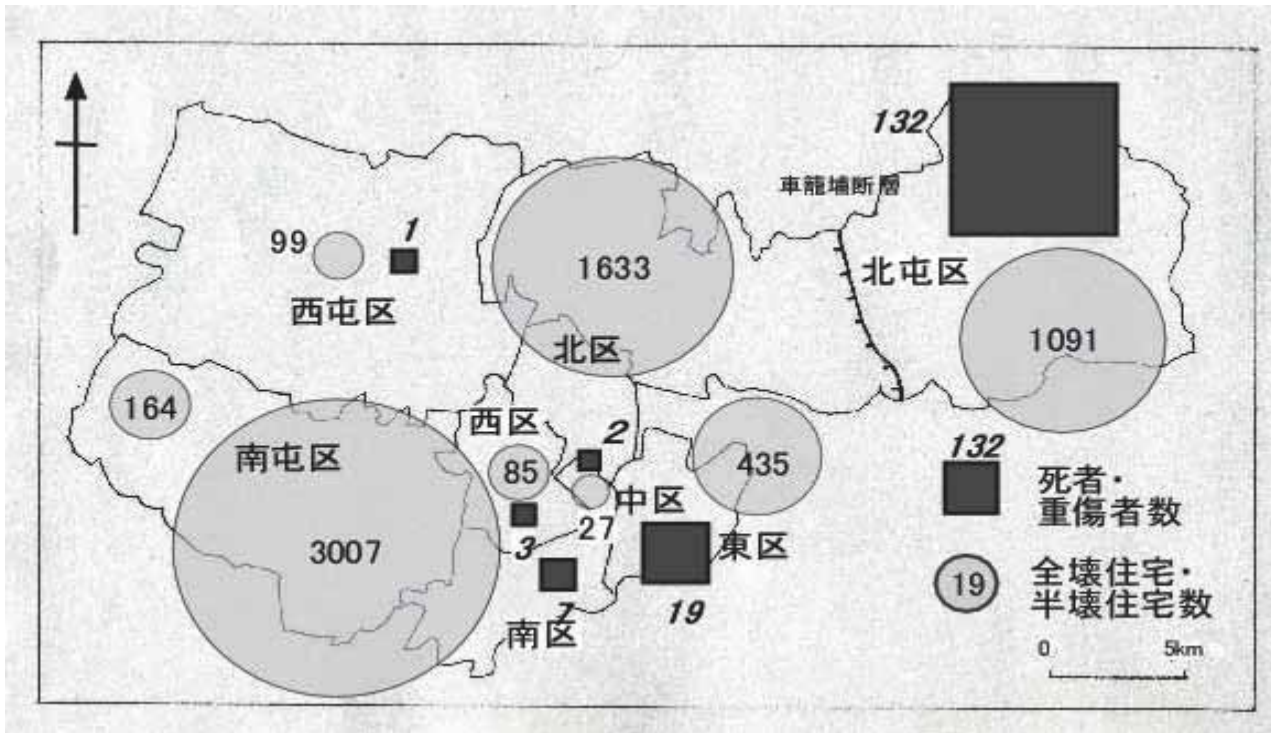


図4 台中市の死者・重傷者および全壊・半壊住宅の分布 (表4などより作成)

(3) 高層住宅の被害と発生要因

つぎに地形環境と建物被害との関係を図5にもとづき検討してみよう。図5には全壊18棟と半壊20棟の計38棟の高層住宅の位置が示され、台中市の被災高層住宅の95%を含む。これから読み取れる点を要約する。

1) 高度40~130m間において高度10mごとに被害分布を検討した。その結果、高度40~50mが最多の9棟、次いで70~80mに8棟、100~110mに6棟の順となっている。すなわち、高度70~110mの間に22棟が分布し、全体の57.9%がここに集中する。この高度帯は台中市の中心市街地と一致しており、多数の高層住宅が分布していることに関係すると考えられる。一方、市街地から隔たった南部の高度50m以下において9棟の被害が集中している点は重要であろう。

2) 旧市街地が位置する鉄道の北・西側では全壊12棟、半壊5棟だったのに対して、新市街地である鉄道南・東側では全壊7棟、半壊14棟であって被害状況が異なる。この理由は不明であるが、前者で建築年代の古い建物が多かった可能性がある。後者では全壊・半壊高層住宅の約半数が集中的に発生している点で注目される。

3) 河川流路およびそれに接するもの、谷底低地内に位置する高層住宅の被害が24棟あり、全体の63%を占める。これは被害要因が河川地形と密接な関係をもつことを推定させる。鉄道北西側では緑川沿いの国強街、柳川沿いの錦新街や三民路、麻園頭溪沿いの昇平華廈などの高層住宅は全壊している。一方、鉄道東側では、旱溪の汜濫原沿いや旧流路で全壊1棟、半壊4棟の被害が生じている。また、鉄道南側では緑川や柳川、旱溪の下流部にあたる流路や谷底低地で全壊4棟を含む10棟が集中的に被災した。とくに、4名が死亡し341戸が被災した徳昌新世界、132戸が被災した天下一家、30戸が被災した中興大樓、406戸が被災した文心大三元の4棟がこの地区の代表的な全壊高層住宅である(図5)。この地域は旱溪、緑川、柳川、麻園頭溪やその他小河川が収斂し合流する低湿地帯を形成しており、この深刻な被害が地形環境の劣悪な地域に発生したことを如実に示す。

これまで、921地震による高層ビルや住宅の被害原因として、1, 2階のピロティー形式や地下駐車場、騎楼といった構造的欠陥、日本の約半分という耐震基準、手抜き工事による粗雑な建築物などが指摘されてきた¹²⁾¹³⁾。しかし、上に示した事例から地形環境に支配された表層地盤の性質が被害に大きく関与している可能性がある。被災建物の年代や素材、建築構造の特徴などの検討とともに、地形分類や表層地質についての分析、異なった地形環境の他都市における被害状況の比較など、今後検討を進めるべき課題が多いことを指摘したい。

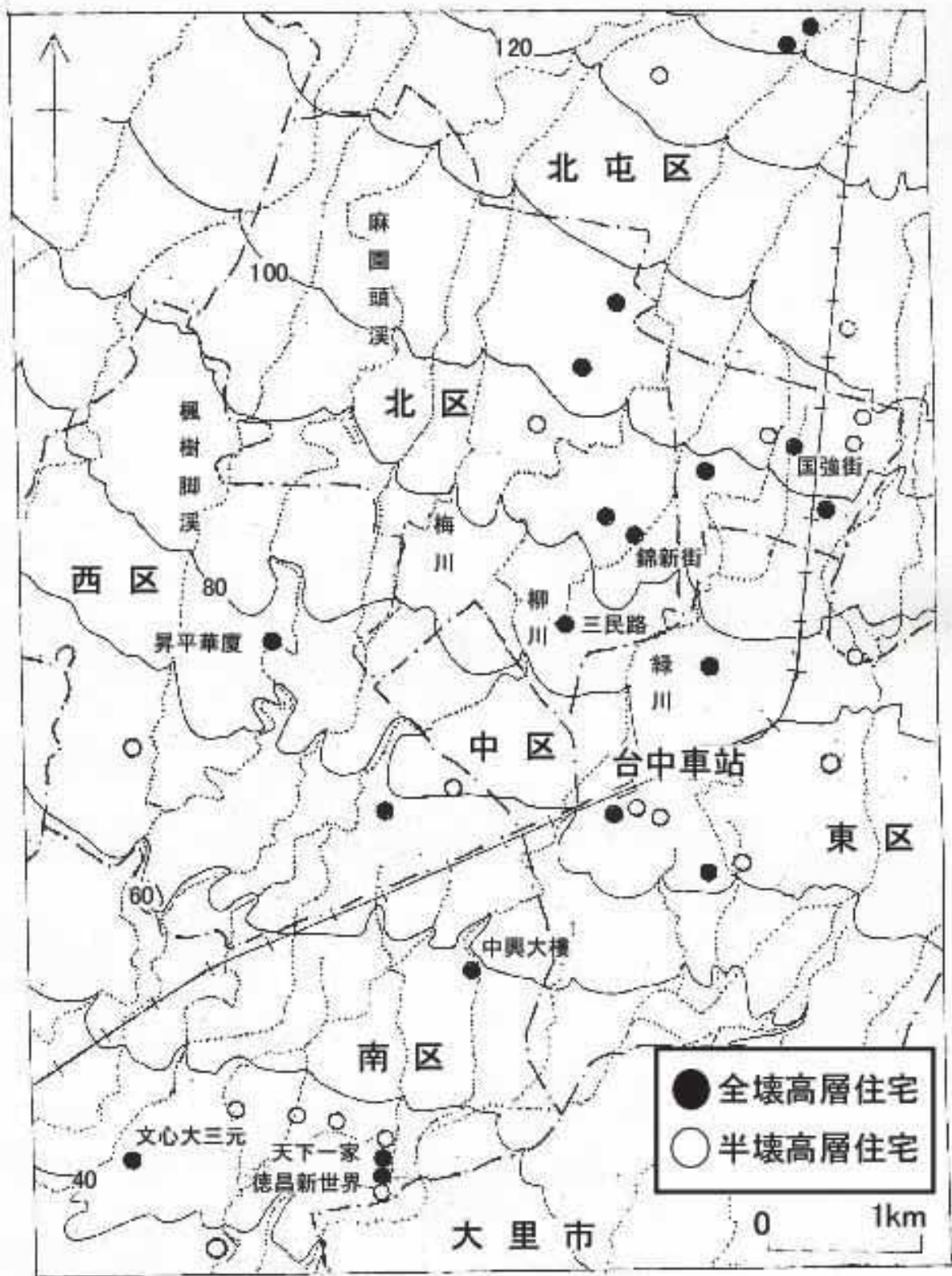


図5 台中市の被災した高層住宅の分布および地形と水系 (11)より作成)

6. まとめ

(1) 台湾における自然災害は毎年繰り返し発生する台風および洪水によるものが最も重要である。しかし、過去 30 年間で 921 地震災害の巨大さは突出している。また、同程度の直下型地震は 40 年程度の間隔で繰り返し発生してきた。

(2) 豊原市東部の車籠埔断層沿いに生じた地表地震断層と建物被害との関係を検討した。被害の発生要因は逆断層に伴う撓曲帯内に限定されており、地表の変位変形による直接的結果である。強い地震動による破壊が主要因とは考えられない。

(3) 台中市における高層住宅の被害と地形環境との関係を検討した結果、被災高層住宅の 6 割強が流路沿いまたは谷底低地内に位置しており、表層の軟弱地盤の影響を反映していると推定される。被害実態と地形環境との関係について検討することは今後の重要な課題である。

謝辞：本研究を進めるに当たって、台湾師範大学沈淑敏副教授、大漢技術学院許華杞名誉教授、彰化師範大学楊貴三教授には物心両面にわたって親しくご指導いただいた。また、台中市国立科学博物館の呉徳祺氏および 921 地震教育園区の黄嘉慧さんには現地での親切な助言をいただいた。以上の皆さんに厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中央地質調査所：九二一地震車籠埔断層沿線地表断裂位置図,1999.
- 2) 太田陽子：台湾中部集集大地震による地震断層 第 1 報, 地質ニュース,543,7~14,1999.
- 3) 中林一樹：921 台湾集集地震災害の特徴と震災対策の課題, 総合都市研究,72,117~133,2000.
- 4) 黄秀政総主持：九二一震災災後重建實録(摘要版),五南図書出版,p 639,2005.
- 5) 林雪美：台湾地区近三十年自然災害の時空特性, 師範大学地理研究報告, 第 41 期,99~128,2004.
- 6) 植村善博：台湾の地形と第四紀地殻変動, 立命館文学, 507,146~180,1988.
- 7) 林啟文・張徽正・蘆詩丁・石同生・黃文正編著：台湾活動断層概論 第二版, 中央地質調査所,特刊第十三号,p122,2000.
- 8) 劉明錡：台湾西北部河階之地形学的研究,台湾師範大学地理学系博士論文,p150,2004.
- 9) 李元希・吳維毓・石同生・蘆詩丁・謝孟龍・張徽正：九二一集集地震地表変形特性—埤豐橋以東,中央地質調査所特刊,12,19~40,2000.
- 10) 大内徹・林愛明・陳讚煌・丸山正：1999 年台湾集集地震—断層と地震被害—,921 集集地震(台湾)地震調査合同報告書,神戸大学都市安全研究センター,43~65,2000.
- 11) 台中市：台中市重建綱要計画(断層帯以西),2000.
- 12) 西川孝夫：921 集集大地震(台湾中部地震)の強震動特性と建物被害,総合都市研究,72,51~58,2000.
- 13) 栗山利男・荏本孝久・望月利男：921 台湾集集大地震における建物被害に関する一考察,総合都市研究,72,61~75,2000.