

断層崖近傍の建物被害に関する基礎的研究 - 1999年台湾・集集地震を例として -

Study of Building Damage near Fault Rupture
- Case Study of the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan -

宮島昌克¹, 橋本隆雄², 北浦 勝³

Masakatsu MIYAJIMA¹, Takao HASHIMOTO² and Masaru KITAURA³

¹ 金沢大学工学部土木建設工学科

Department of Civil Engineering, Kanazawa University

² 千代田コンサルタント(株) 都市計画部

Department of Urban Planning, Chiyoda Engineering Consultants Co., Ltd.

³ 金沢大学大学院自然科学研究科

Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

The present paper deals with building damages near fault rupture. The great fault ruptures appeared and severe building damage occurred in the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. To determine the degree of damage and relation between damage pattern and surface rupture, a survey was conducted around Fonyuan, Wufong and Chaotuen where the damage to buildings was severe and the fault scarp appeared at the ground surface. Survey of fault, damage evaluation of buildings and micro tremor measurements were conducted in the study area. The effect of distance from fault rupture on the damage level of buildings was discussed.

Key Words : Building damage, fault rupture, reverse fault, the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan

1. はじめに

1999年9月21日、台湾中部の南投縣集集鎮付近を震源とするマグニチュード7.7の地震が発生した。震源に近い台中市や南投縣では死者2千人、倒壊家屋1千棟を越す甚大な被害が発生した。この地震の特徴として、地表に約80kmにわたり地震断層が出現し、大きいところでは6mを越える鉛直残留変位が発生したことが挙げられる。この断層崖の出現により、ダムや橋梁、道路、多くの家屋、ライフラインに甚大な被害が生じた。

我が国においては、1891年濃尾地震において垂直、水平の食い違いが最大6~8mにおよび、田のあぜ道や道路が寸断されたことが知られている。また、1927年北丹後地震においては、山田断層で上下0.7m、水平0.8mの最大食い違いが生じ、郷村断層では、上下0.7m、水平3.5mの最大食い違いが生じたことが報告されている。1995年兵庫県南部地震では、淡路島の野島断層で最大水平1.8m、垂直1.6mの食い違いが発生したが、激震地域の本州側では明確な断層変位は現れなかった。以上のように、我が国でも地震断層が地表に現れることは稀ではないが、これまでの地震において建物被害との関連を研究した例は少ない。

伯野¹⁾は、1974年伊豆半島沖地震、1990年フィリピンルソン島地震、1995年兵庫県南部地震の被災事例を例に挙げ、地表に断層崖が現れてもその近傍での建物被害が極めて軽微である場合のあることを述べている。このこ

とは現地調査を行った研究者が直感的に感じていることではあるが、詳細に研究された例は見あたらない。一方、カリフォルニア州の活断層域開発規制法は、断層運動に伴う地表変位による被害を防ぐために、活断層真上に建物を建てないようにするものである。このような断層崖が建物に及ぼす影響を検討した研究は我が国においては皆無に等しいといえる。

これまで我が国では、地震時に都市域で大きな断層崖が現れた事例がなかったため、断層崖の変位については特に注目されてこなかったものと考えられる。そこで本研究は、台湾の事例をケーススタディとして、断層崖近傍の建物被害の特徴を明らかにすることにより、活断層近傍の建物の安全性を考えるための基礎資料を得ようというものである。

2. 断層崖近傍の建物被災度判定調査

台湾・集集地震において出現した数メートルにも及ぶ断層崖と建物被害との関係を明らかにすることを目的として、断層崖周辺建物の被災度判定調査および常時微動観測²⁾を以下の地点で行った。

- ・豊原市中正公園付近
- ・霧峰郷光復国民中学校北側
- ・草屯鎮3号線沿い付近

震央および調査地点を図-1 に示す。豊原市は震央から約 50km、霧峰郷は約 40km、草屯鎮は約 25km、それぞれ北西方向に離れている。なお、これらの地点はそれぞれ、断層崖の高さが異なり、地盤条件も異なっていると考えられる地点で、日中に常時微動観測が行えるような、交通振動などの少ない地点として選点されている。

調査項目は、構造形式、建物階数、被災度レベルである。被災度レベルは、無被害～小破、中破、大破、撤去済みの4段階とした。調査を行ったのが地震から3ヶ月半経った時点だったので、倒壊家屋は既に撤去されていたものと考えられる。被災度レベルの判定は目視および建物の傾斜によった。補強により使用可能な建物を中破とし、建物の傾斜が 2° を越えるようなものは大破とした。

また、常時微動観測には0.1Hz～70Hzまで振動計として計測可能な、速度・加速度型振動計を用い、各地点における微小速度を計測した。サンプリング周波数を100Hz、サンプリング時間を30秒とし、この内の波形が安定している1,024データ(10.24秒間)を解析に用いた。

(1) 豊原市中正公園付近

常時微動測定によれば、地盤の卓越振動数が6～7Hzであり、道路橋示方書では1種地盤に分類されるので、表層地盤は硬いものと考えられる。断層崖の鉛直変位は4～5mであった。断層崖周辺の建物被災度分布を図-2に示す。同図より、断層崖真上では大きな断層変位によりほとんどの建物が倒壊もしくは大破している。断層の上盤側は、地盤の滑り出しなどの影響を受けて被災度が大きい傾向がある。また、川を挟んだ南側の断層崖は、現況斜面を切土・盛土して宅地にした山際に出現したのと考えられ、断層崖とのり面に挟まれた宅地盛土部分の隆起により地盤が10%程度傾斜している。さらに、断層崖の出現に起因して高さ約40mの斜面崩壊が発生している。一方、下盤側は上盤側に比べて被災度は小さいが、隆起した断層崖の斜面崩壊により被災した建物も確認された。また、断層崖から少し離れることで、無被害または小破の建物が多く見られる。

(2) 霧峰郷光復国民中学校北側

霧峰郷光復国民中学校は日本建築学会災害委員会被害調査団が既に調査しているため³⁾、道路北側部分につい

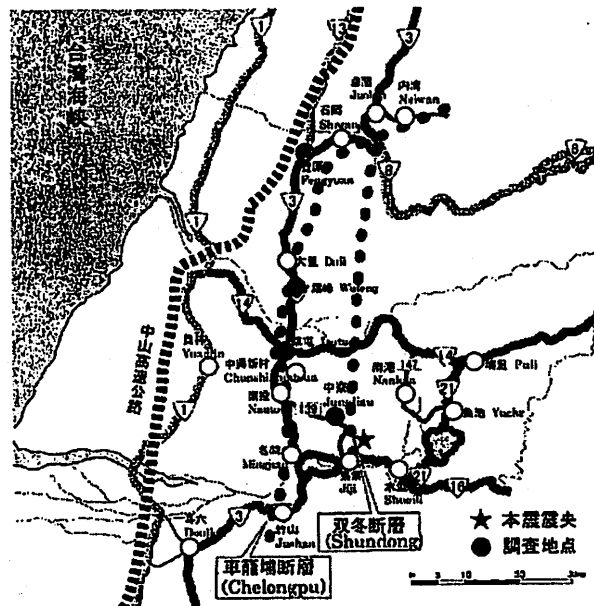
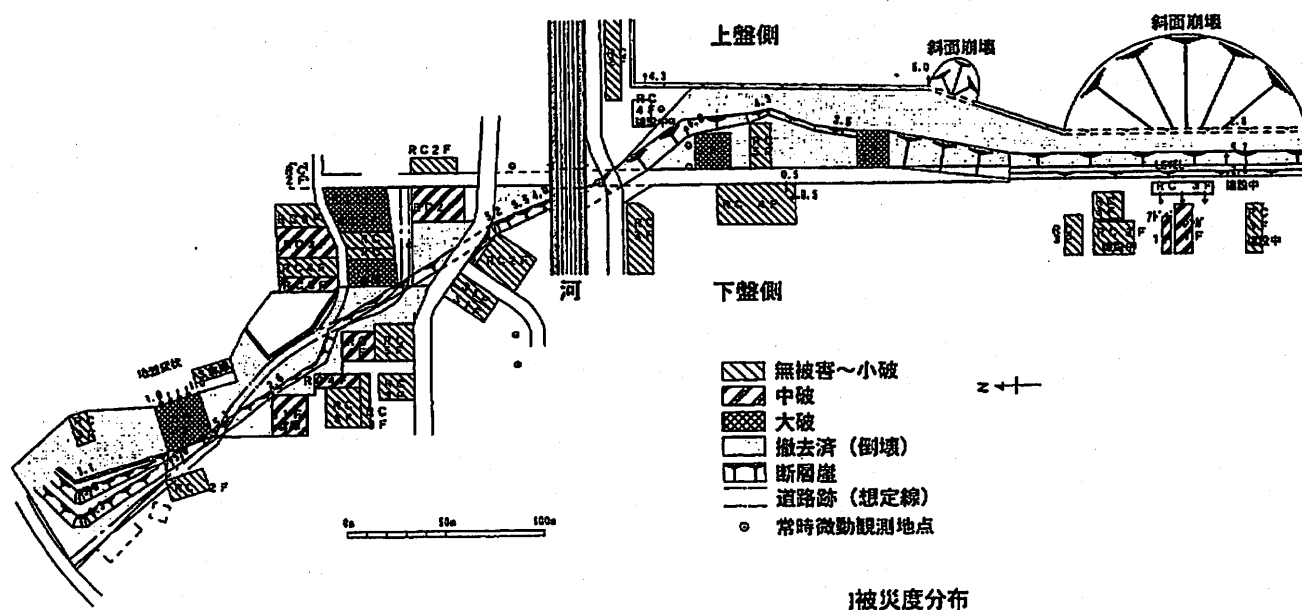


図-1 震央および調査地点

て追加調査を行った。地盤の卓越振動数は約4Hzであり、断層の鉛直変位は2～3mであった。道路橋示方書では2種地盤に分類され、豊原市の観測地点よりは表層地盤が軟らかいと考えられる。霧峰郷光復国民中学校北側の断層崖周辺の建物被災度分布を図-3に示す。同図より、断層線が2本に枝分かれし、その幅が約100mと大きいため、影響範囲が面的に大きくなっており、断層崖に挟まれた部分ではほとんどの建物が被災し、既に撤去されていた。断層変位が小さいことも影響しているのか、断層崖から少し離れると上盤側、下盤側ともに無被害または小破となっている。

(3) 草屯省道3号線沿い付近

地盤の卓越振動数は3～4Hz程度であった。鉛直変位は1～2mであり、表層が水田などで軟弱であるために鋭い断層崖が現れず、撓むような地盤変形が生じていた。また、1m程度のいくつかの枝断層および多数の亀裂が



被災度分布

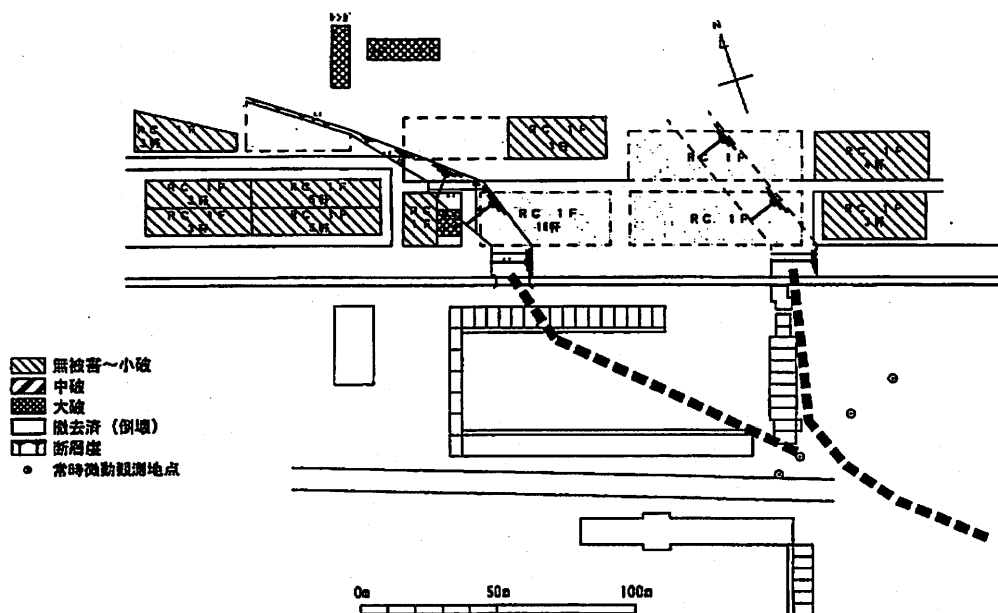


図-3 霧峰郷光復国民中学校北側の断層崖周辺建物被災度分布

見られた。草屯鎮3号線東側の断層崖周辺の建物被災度分布を図-4に示す。外壁部分の損傷に注目すると、大きなせん断ひび割れが多数確認されたが、×形ではなく/形で同じ向きに発生していることから、振動によるものではなく、隆起した地盤が側方流動したためにできたものと考えられる。

以上の事例によれば、硬い地盤では断層崖の鉛直変位が大きい場合でも地盤変状の影響範囲は小さく、逆に軟らかい地盤では、断層崖の変位は小さくても断層崖が複数に分岐し、地盤変状の影響範囲が大きくなることが明らかとなった。なお、これらの地域において表層地盤底面における断層変位が一樣であったかについては明らかではない。表層地盤底面の断層変位が地表面にどのように伝播するかについては今後の検討が必要である。

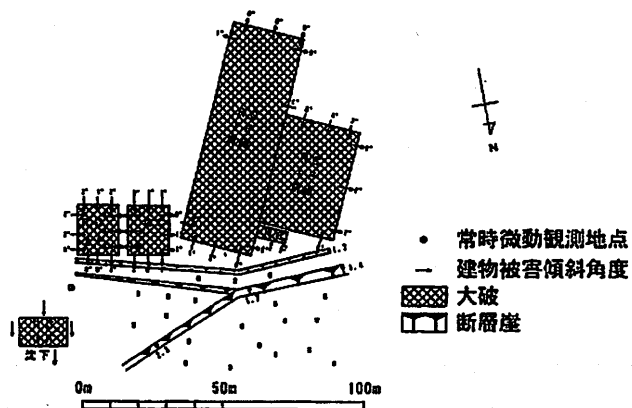


図-4 草屯鎮3号線東側の断層崖周辺建物被災度分布

3. 断層崖からの距離と建物被災度との関係

台湾・集集地震の地震断層が低角逆断層であったため、断層崖が現れた地域が震央から離れており、そのため、断層崖近傍では震動による建物被害が少なかったものと考えられる。本章では、前章の調査結果に基づいて断層崖からの距離と建物被災度の関係について検討する。

図-5は豊原市中正公園付近の建物被災度を断層崖からの距離との関係で示したものである。建物の構造形式や階数に関わらず、下盤においては断層崖から10m以上離れると無被害あるいは小破となっている。一方、上盤側では断層崖から50m以上離れても大破した建物もある。前章で示したように断層運動に伴う斜面崩壊の影響も考えられるので一概には言えないが、上盤側の方が下盤側に比べて被災程度は大きく、被災範囲も広いと考えられる。

図-6、7は、霧峰郷光復国民中学校北側における建物被災度と断層崖からの距離の関係を示している。断層崖が2本に枝分かれしていたので、建物から近い方の断層崖についてそれぞれとりまとめた。すなわち、図-6の

上盤側と図-7の下盤側は2本の断層崖に囲まれた地域であり、同じレベルである。前述したように2本の断層崖に囲まれた地域では、ほとんどの建物が大破し、撤去されている。図-6の下盤側では、断層崖から約10m離れると全ての建物が無被害あるいは小破となっており、図-5と良い対応がある。また、図-7の上盤側では断層崖から約30m離れると無被害あるいは小破となっている。上盤の方が被災範囲の広いことがわかる。

Yang et al.⁴⁾は本研究とは異なった地点において同様の検討を行っている。その結果、下盤側に比して上盤側の方が被災範囲が広いことを示しており、本研究結果とよい対応がある。また、前章の考察でも述べたように、断層崖の高さや地形が上盤側の被災範囲の大きさに影響しているものと考えられる。以上のように、限られたデータではあるが、断層崖周辺の建物被災程度を考える場合、今回のような逆断層においては断層崖からの距離だけではなく、従来から言われているように上盤側か下盤側かということが重要であることが知れた。さらに、表層地盤の硬さや断層崖の高さによって、上盤側の被災範囲が異なってくるのが新たに明らかとなった。なお、

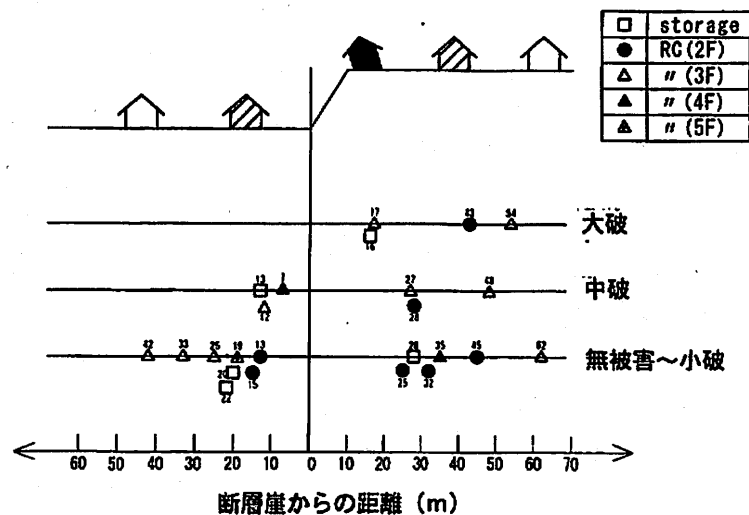


図-5 豊原市中正公園付近の建物被災度と断層崖からの距離との関係

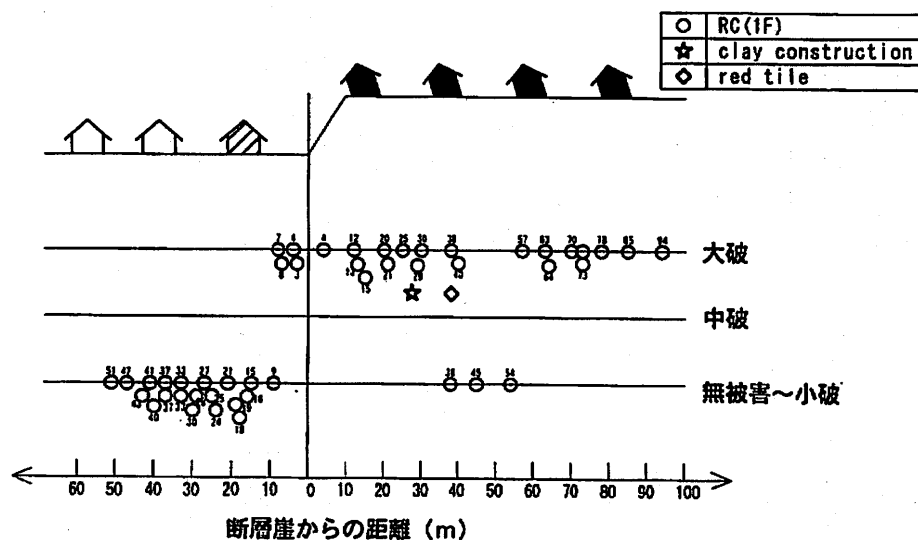


図-6 霧峰郷光復国民中学校北西の建物被災度と断層崖からの距離との関係

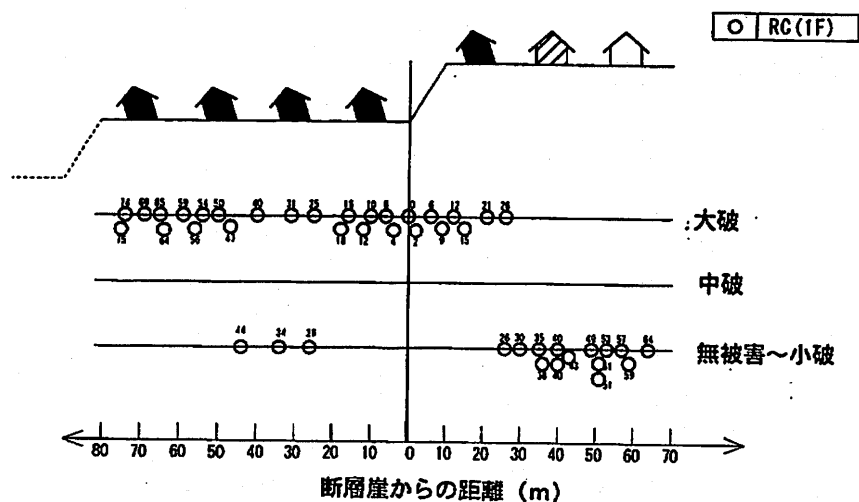


図-7 霧峰郷光復国民中学校北東の建物被災度と断層崖からの距離との関係

現地調査によれば震動による被害が断層崖近傍で特に顕著ではなかったことから、ここでは断層崖近傍に地震動強さについては特に考慮していない。これについては別途検討が必要である。

4. 個別要素法を用いた表層地盤硬さと厚さが断層鉛直変位分布に及ぼす影響に関する検討

台湾における現地調査より、建物被災度分布は断層崖からの距離だけではなく、表層地盤の硬さも影響していることが新たに明らかとなった。しかし、台湾における限られたデータから得られた結果であるので、一般性のある傾向であるのかを確かめるために、本章では個別要素法を用いた検討を行った。調査地点における表層地盤の諸特性が明らかではないことから、ここでは、表層地盤の硬さと厚さが地表面の鉛直変位分布に及ぼす影響を、個別要素法¹¹⁾を用いたモデル解析により検討した。

図-8に解析モデルを示す。予め左右と底面に剛体壁を設定し、要素を自由落下することによりモデル地盤を作成した。水平方向の解析対象領域を30mとし、鉛直方向の解析対象領域は表層地盤の厚さによるものとした。ここでは、表層地盤の硬さと厚さが地表面変位分布に及ぼす影響を定性的に確認することを解析の目的としているので、モデル地盤の底面に鉛直変位を与えることにより、断層運動を簡易に表現した。すなわち、表層地盤底面の鉛直変位が地表面にどのように現れるのかをここでは検討しようとしており、圧縮力により逆断層が現れる様子を直接シミュレートしようとしているものではない。このような目的に合うように、壁面の摩擦係数や粒子間摩擦係数などの諸定数を、鬼塚ら¹¹⁾が用いた値を参考に表-2のように定めた。表-2に示すように、ここでは表層地盤底面に、すべり角が 90° 、 0.1m/s の速度で1mの鉛直変位を与えている。

図-9に表層地盤厚さの異なるモデル地盤の地表面における鉛直変位量を、断層からの距離との関係で示した。層厚が5mの場合は、地盤底面の1mの断層変位の影響が地表面では上盤側の5mから下盤側の3mの範囲を遷移領域として現れているが、層厚15mの場合では上盤側-15mから下盤側7mの間を遷移領域としており、広範囲となっている。遷移領域より離れると絶対鉛直変位は勿論あるものの、その変化はほとんどなくなり、地盤ひずみとしては小さくなる。すなわち、表層地盤の層厚が厚くなることにより、断層運動に伴う地盤変状に起因する建物の被災影響範囲も広がると考えられる。

図-10には表層地盤の硬さの異なるモデル地盤における結果を示した。層厚は10mである。要素間ばねの設定方法については更に定量的検討が必要であるが、ここでは、要素間ばね剛性の異なる2つのモデル地盤における変位分布特性を定性的に検討する。同図によれば、剛性が大いだと断層変位が狭い範囲に現れ、比較的明瞭な断層崖となるが、剛性が小さいと上盤側から下盤側に水平方向の地盤変位が生じ、変形影響範囲が上盤側、下盤側ともに広がることになる。

以上より、表層地盤の厚さが厚いほど、あるいは表層地盤の硬さが軟らかいほど、表層地盤底面の断層変位が同じであっても、地表面に現れる影響範囲が大きくなるのが定性的ではあるが、個別要素法より確かめられた。

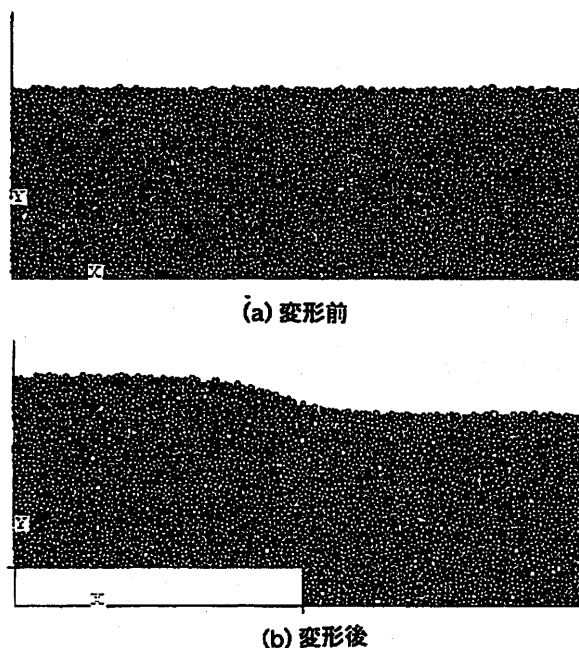


図-8 解析モデル地盤

表-1 解析に用いる諸定数

断層鉛直変位	1m
断層変位速度	0.1m/s
すべり角	90°
表層地盤厚さ	10m
粒子の密度	2500kg/m^3
最小粒子半径	0.1m
最大粒子半径	0.2m
法線方向ばね剛性	$1.0 \times 10^8 \text{ N/m}$
接線方向ばね剛性	$1.0 \times 10^8 \text{ N/m}$
粒子間摩擦係数	0.5
壁面の摩擦係数	0.0
減衰定数	0.7
時間刻み	0.001s

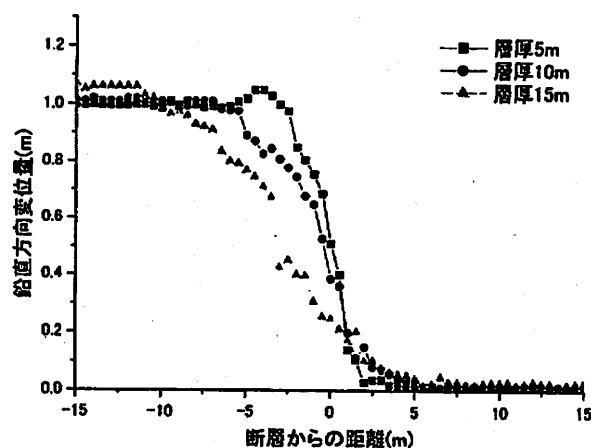


図-9 層厚が異なるモデル地盤の鉛直方向変位分布

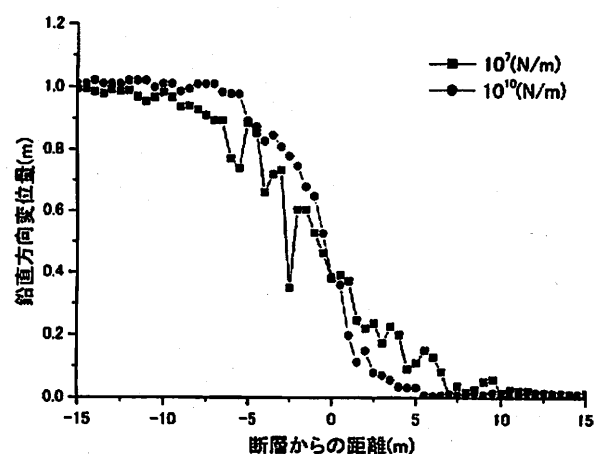


図-10 地盤剛性の異なるモデル地盤の鉛直方向変位分布

5. 結論

本研究は、台湾・集集地震における建物被害をケーススタディとして、断層崖近傍の建物被害の特徴を明らかにすることにより、活断層近傍の建物の安全性を考えるための基礎的資料を得ようとしたものである。台湾における現地調査と個別要素法を用いた基礎的検討により以下のことが明らかとなった。

- 1) 台湾の事例によれば、硬い地盤では断層崖の鉛直変位が大きい場合でも地盤変状の影響範囲は小さく、逆に軟らかい地盤では断層崖の変位が小さくとも、断層線が複数に分岐し、地盤変状の影響範囲が大きくなることが明らかとなった。
- 2) 下盤側では断層崖から約 10m 離れると全ての建物が無被害あるいは小破であるのに対して、上盤側では断層崖から 30m 離れても大破の建物が見られた。本論文では震動による影響を特に考慮してはいないが、従来から言われているように、逆断層においては上盤側の方が被災程度の大きいことが確かめられた。
- 3) 個別要素法を用いたモデル解析により、表層地盤の厚さが厚いほど、あるいは表層地盤の硬さが軟らかいほど、表層地盤底面の断層変位が同じであっても、地表面に現れる影響範囲が大きくなることが定性的ではあるが確かめられた。
- 4) 台湾で見られたような逆断層が地表面に現れる場所を予め特定できる場合には、カリフォルニア州の活断層域開発規制法に見られるような断層崖からの距離を一律に決めるのではなく、表層地盤の硬さや厚さなども考慮しなければならないことが明らかとなった。

謝辞

現地調査の際にご協力いただいた福井工業高等専門学校 吉田雅徳助教授、金沢大学工学部 村田晶助手、真柄建設(株)技術研究所 安田衛氏、常時微動解析においてご指導いただいた金沢大学工学部 池本敏和助手、解析を手伝っていただいた本学大学院生 吉藤祐也氏に深謝いたします。最後に、本研究の一部が科学研究費基盤研究(C) (No.11450175, 研究代表者 高田至郎神戸大学教授) および基盤研究(B) (No.13680542, 研究代表者 宮島昌克)の補助によるものであることを記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 伯野元彦：活断層のそばの地震動は強いのか？、第 18 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp.73-74, 1999.
- 2) 村田晶、宮島昌克、橋本隆雄、吉田雅徳、安田衛、北浦勝：1999 年台湾・集集地震における断層変位と常時微動の関係、日本建築学会学術講演会梗概集, B-2, pp.1-2, 2000.
- 3) 日本建築学会災害委員会被害調査団：1999 年 9 月 21 日台湾・集集地震被害調査速報会資料, 1999.
- 4) Yang, H.W., Lin, S.M. and Chu, D.: The observed building damage associated with fault movement in 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, Proc. of Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Paper No.10.13 (CD-ROM), 2001.
- 5) 伯野元彦：破壊のシミュレーション、森北出版株式会社, 1997.
- 6) 鬼塚信弘、伯野元彦、岩下和義、鈴木宗伸：逆断層運動に伴う表層地盤の変形シミュレーション、土木学会応用力学論文集, Vol.3, pp. 533-542, 2000.

(原稿受付 2001.6.11)