

台湾921集集地震に伴う地表地震断層について

松浦 一樹¹⁾・大友 淳一¹⁾・永田 高弘¹⁾・小林 淳¹⁾

1. はじめに

1999年は世界各地で大地震が多発した。夏以降をみても、7月17日のパプアニューギニアの津波地震、8月17日のトルコ・コジャエリ(イズミット)地震、9月21日の台湾・集集地震、9月30日のメキシコ・オアハカ地震、10月16日の南カリフォルニア地震と立て続けにマグニチュード7以上の大地震が発生し、被害を与えている。さらに、台湾では10月22日に、トルコでは11月12日にも大きな地震が発生して

いる。筆者らは、これら地震のうち、9月21日に発生した台湾921集集地震の地表地震断層を調査する機会を得たので、その概要について報告する。

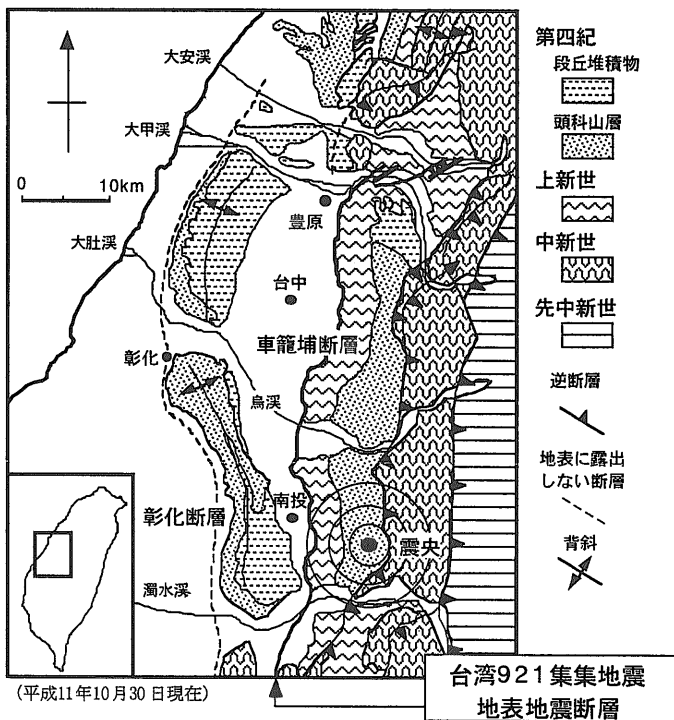
筆者らは、台湾についての知識も乏しく、現地知り合いもないことから、事前に情報収集を行った。地震発生後2週間近く経ており、幸いにも種々の調査機関の速報をインターネットのホームページ(以下HPとする)で得ることができたため、それらを参考に調査候補地点を絞り込んだ上、10月9日に現地へ向けて出発した。

現地では、地表地震断層の地形及び断層露頭観察から断層の性状の概略を把握するとともに、ハンドレベルを用いた地形測量などから、今回の地震に伴う実変位量を求めた。現地調査は、10日~12日の3日間で実施した。

2. 地震概要

現地時間1999年9月21日午前1時47分(日本時間:9月21日午前2時47分)に台湾中部の南投懸集集付近を震源とする地震が発生した(第1図)。台湾では、この地震を「921集集大地震」と呼んでいる。

地震の諸元については、調査機関や発表時期によりやや異なるが、平成11年10月30日現在、中央気象局HPによれば、震央位置はN23.85°, E120.78°, 震源の深さ1.1km, M_L 7.3, アメリカ地質調査所(USGS)HPによれば、震央位置はN23.781°, E121.090°, 震源の深さ5.0km, M_S 7.6と公表されている。また、

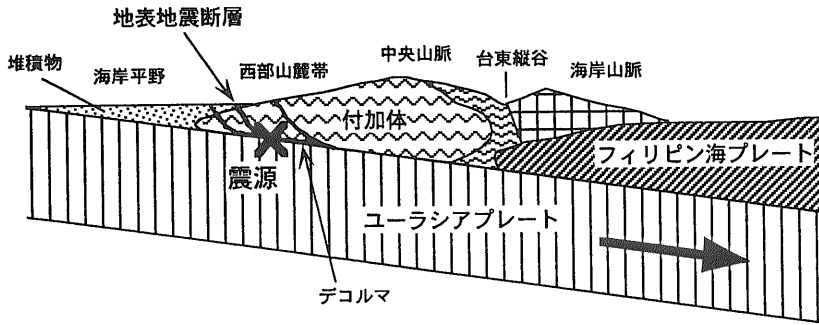


注) 地表地震断層の南端は、図のさらに南側に連続する。

第1図 台中付近の地質図及び地表地震断層位置図(中央研究院HPを編集)。

1) 株式会社ダイヤコンサルタント 東京事業部:
〒330-8660 埼玉県大宮市吉野町2-272-3

キーワード: 台湾921集集地震, 車籠埔断層, 地表地震断層, 変位地形, ネットスリップ



第2図
地震発生のテクトニックな解釈
(東京大学地震研究所の瀬野HP
を編集)。

南投縣及び台中市で最大震度6を示し、南投縣の日月潭では、水平最大加速度989galが記録されている(中央気象局HP)。なお、台湾では、基本的に日本の気象庁1949年版震度階から震度7を除いた震度階が用いられている。

菊地ほか(1999)によると、今回の地震は東西圧縮の逆断層運動により発生し、推定断層面の走向N26°E、傾斜27°E、断層長80km、幅40km、平均食い違い2.2~2.5mとされている。また、初期破壊点から主に北に向かって速度2.5km/sで破壊が進行したと考えられ、震源から約40km北に離れた地点の変位量(約6m)が最も大きくなっている。

今回の地表地震断層は、従来から活断層として知られていた車籠埔断層(Chelungpu Fault)に沿って出現した。經濟部中央地質調査所HPには、詳細な地表地震断層の位置図及び写真などが掲載されている。さらに、GPSによる測量から、地表地震断層の東側で最大5m程度の鉛直変位量、北西方向に最大8m程度の水平変位量が観測されており、地表地震断層の南部ほど西向き成分が卓越することが示されている。全体的には、北部ほど変位量が大きい。

被害については、日本放送協会(NHK)のHPによると、死者2,399人(平成11年10月21日現在)、負傷者約8,700人(平成11年9月28日現在)、建物の全半壊は5万件以上(平成11年10月21日現在)である。

地震後直ちに日本の研究者による現地調査も行われ、地表地震断層沿いの変位量についてもデータが続々と公表されつつある(大槻・Yang, 1999等)。

今回の地震のテクトニックな解釈について、東京大学地震研究所の瀬野HPで瀬野教授は「内陸で

起きた海溝系地震」(第2図)と表現し、地表地震断層はゆっくりと動き、かつ塑性流動を示した部分もあると考えている。

今回の地震に関する情報は、下記の機関のHP <台湾>

- ・經濟部中央地質調査所
(<http://www.moeacgs.gov.tw>)
- ・中央気象局 (<http://www.cwb.gov.tw>)
- ・国立中央大学地球物理研究所
(<http://www.ses.gep.ncu.edu.tw>)
- ・中央研究院 (<http://www.sinica.edu.tw>)
- ・国立成功大学衛星資訊研究中心
(<http://www.sgrc.ncku.edu.tw>)
- ・国家地震工程研究中心
(<http://www.ncree.gov.tw>)

<アメリカ>

- ・アメリカ地質調査所(USGS)
(<http://www.usgs.gov>)

<日本国内>

- ・東京大学地震研究所
(<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>)
- ・京都大学防災研究所地震予知研究センター
(<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp>)
- ・日本放送協会(NHK)
(<http://www.nhk.or.jp>)

などによって公表されている。

3. 地質概要

3.1 台湾の地質・テクトニクス

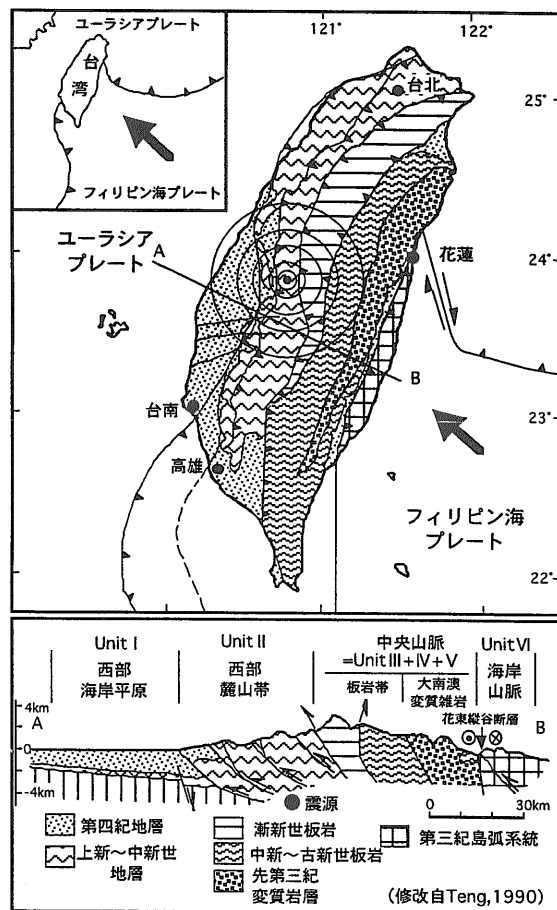
台湾は、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に位置している。フィリピン海プレートは、北西方向に向かって7.3cm/yr(「台湾新地体構造

形態図」,1997)で相対運動しており、フィリピン海プレートがユーラシアプレートにのし上がる構造になっている。このため、台湾の地質構造は、島の伸長方向の走向(北北東-南南西)で東傾斜の衝上断層と褶曲構造の繰り返しからなるthrust-fold belt構造で特徴づけられる。中央研究院HPによれば(第3図)、台湾の地質は大きく4帯に区分され(西から西部海岸平原; Unit I, 西部麓山帯; Unit II, 中央山脈; Unit III, IV, V, 海岸山脈; Unit VI), 中央山脈から西側では衝上断層で境された地層の年代は西側に向かって若くなっている。西部海岸平原(Unit I)はユーラシアプレート上の変形を受けていない地層からなり、第四系の厚さは約2kmに及んでいる。西部麓山帯(Unit II)は主に新第三系中新統~鮮新統からなり、第四系も含めて褶曲し、多くの衝上断層によって切られている。中央山脈(Unit III, IV, V)は主に先第三系の変成岩及び古第三系からなっている。海岸山脈(Unit VI)は第三系(島弧の岩石)からなっている。

3.2 車籠埔断層 (Chelungpu Fault) の概要

今回の地震で出現した地表地震断層は、西部麓山帯中に位置し、車籠埔断層として知られていた断層にはほぼ一致する(第1図)。国家地震工程研究中心HPの台湾活断層図(Prof.C.T.Lee氏による)によれば、台湾には49の活断層が分布しており、車籠埔断層はCategory IIに区別されていた。Category IIとは、經濟部中央地質調査所HPによると、最近10万年~1万年の間に活動した断層、もしくは、段丘堆積物や台地の堆積層を変位させている断層である。

經濟部中央地質調査所HPでは、既往文献をまとめた車籠埔断層についての概要が掲載されており、地形的にみると、車籠埔断層は台中縣及び南投縣の平野と丘陵・山地の境界線に沿って分布するとされ、豊原と名間に至る区間はほぼ南北走向を呈し、全長50kmを越えるものと記載されている。また、豊原東方の新社に分布する河成段丘面の一部が、断層活動の影響のため西に向かって下向きに撓む傾向があり、草屯に分布する河成段丘の西縁には、車籠埔断層の一部と考えられる草屯断層が分布すると記載されている。地質的には、車籠埔断層の上盤側には、上新世(鮮新世)の錦



第3図 台湾の地質構造図(中央研究院HPを編集)。

水頁岩層及び卓蘭層、下盤側には更新世の頭科山層と沖積層が分布し、断層露頭も報告されている。

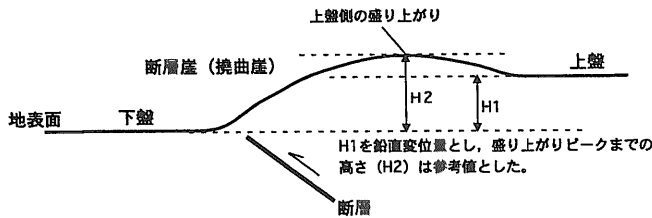
4. 調査結果

4.1 変位量の測定方法について

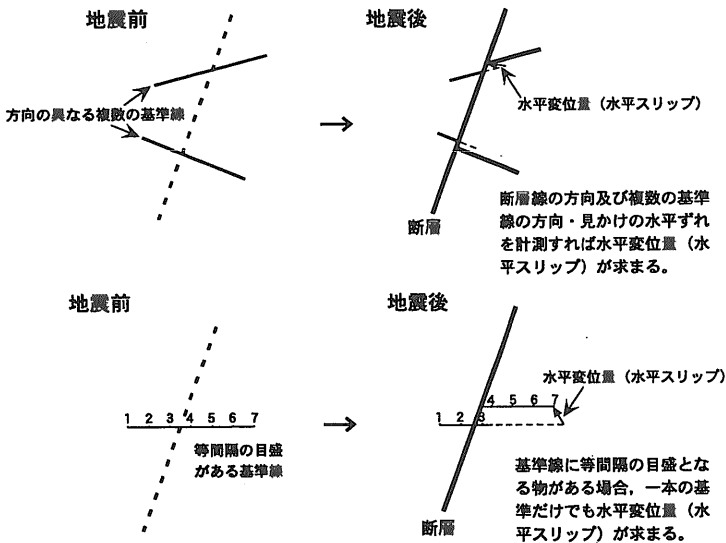
本調査では、今回の地震に伴う実変位量(ネットスリップ)を求めるために、鉛直変位量及び水平変位量を現地で測定した(第4図)。

鉛直変位量については、地震前に一連だったと考えられる地形面上で測量を実施し、地形断面図を作成した。そして、断層を挟んだ上下盤の平坦面の外挿線から鉛直変位量を推定した。測線は、断層崖(撓曲崖)を挟んで直角方向にそれぞれ約30~50m設定し、器材はハンドレベル、スタッフ及び巻尺を用いた。水平変位量(走向変位量及び水平傾斜変位量)については、断層を横断する方向の

<鉛直変位量の算出方法>



<水平変位量の算出方法>



第4図 変位量の算出方法.

異なる道路・水路等の直線状の基準があるか、地震前の形状・長さの分かっている基準がある場合、地震前後のそれらの基準の位置関係から水平変位量が求められる。これらの変位量の表現については、下盤側を固定し、上盤側の変位量及び方向を記載した。

変位量の定義については、地震前には接していたと考えられる点の相対的変位量を「スリップ」とする(第5図; 岩松・横田,1989)。

- 1) 接点の総変位量 ……「ネットスリップ」
- 2) 「ネットスリップ」の走向方向の成分 ……「走向スリップ」
- 3) 「ネットスリップ」の傾斜方向の成分 ……「水平傾斜スリップ」
- 4) 「ネットスリップ」の水平方向の成分 ……「水平スリップ」
- 5) 「ネットスリップ」の鉛直方向の成分 ……「鉛直スリップ」

本文では、「スリップ」を「変位量」に置き換えて用いる。

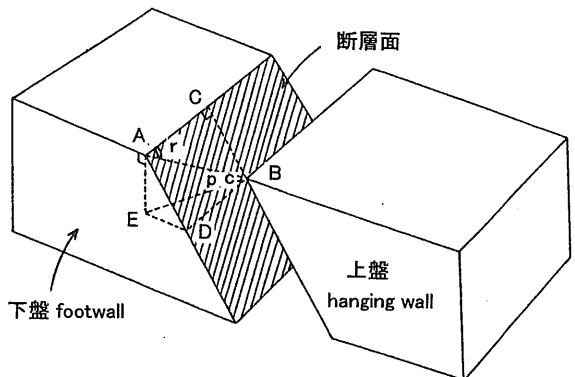
4.2 各調査地点の状況

調査は、北は卓蘭内湾から南は竹山山脚まで18地点で行った。以下、主な地点の状況を述べる(調査位置は第20図参照)。

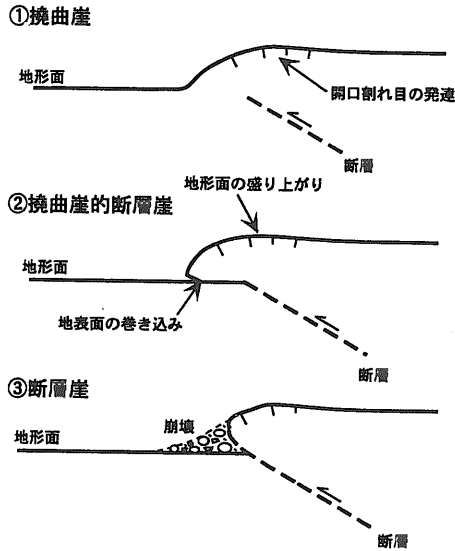
なお、本文では変位地形の呼称について、元の地形面に切れ目がないものを「撓曲崖」、一見元の地表面に切れ目はないように見えるが下盤との境界部にすべり面があるものを「撓曲崖的断層崖」、崖部分が崩壊しているものを「断層崖」という名称を用いた(第6図)。方位は磁北(西偏約3°)を基準とした数値を示している。

Loc.4 石岡ダム(写真1)

ダム堤体右岸軸部を通過すると推定される断層崖(ほぼ東西方向)を挟んで、ダム堤体に相対的に約7.6mの南側隆起の鉛直変位が認められる(大町, 1999)。断層通過箇所では、ダム堤体が破壊されているが、それ以外の部分はコンクリートの連結部に10~15cm程度の見かけ右ずれ変位が見られるのみである。また、石岡ダム下流の左岸にはN20°E方向に多くの割れ



第5図 変位量の定義(岩松・横田, 1989). AB: ネットスリップ, AC=CB: 走向スリップ, ED: 水平傾斜スリップ, EB: 水平スリップ, AE: 鉛直スリップ.



第6図 撓曲崖・断層崖の形態分類.

目が見られ、一部、地表面のコンクリートが座屈しており、堤防が破損している箇所も認められる。なお、石岡～卓蘭付近では断層崖は複数出現し、それぞれの断層崖の連続性は悪い。

Loc.5 石岡 埤豊橋下(写真2)

テレビや新聞等で報道された「滝」が出現した地点である。断層崖(N36°E方向)は、大甲溪の中州及び現河床を横断し、さらに、南方の石岡市街を通過する。大甲溪に架かる埤豊橋の左岸側橋脚

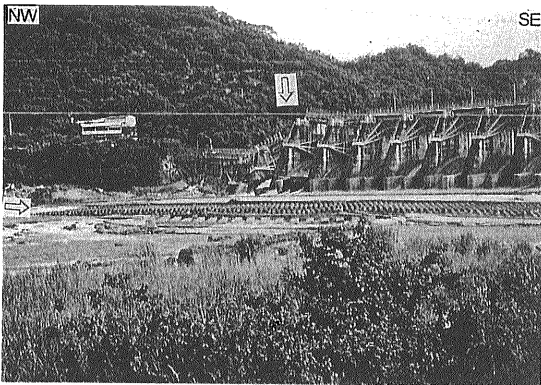


写真1 石岡ダム被害状況(Loc.4)。南側が鉛直方向に約7.6m相対的に隆起したために、ダム堤体右岸軸部が破壊された。

部付近に断層崖が出現したため、橋脚部が転倒し上部工が落橋している。大甲溪の断層上盤側には、新第三系の細粒砂岩・泥岩(層理面; N50°E40°S)が露岩しており、泥岩には二枚貝の貝化石が含まれる。断層崖近傍ではやや破碎質で節理が密集し、フィルム状～幅1cm程度の軟質粘土状破碎部が認められる。基盤が露出する河原での鉛直変位量は5.8m東側隆起である。同程度の変位が、大甲溪左岸の石岡市街地がのる河成段丘上にも見られる。水平変位を認定する基準物がなかったため、ネットスリップについては不明である。

この地点での被害は、断層崖を跨いでいる埤豊橋左岸部と断層上盤側の家屋に顕著であったが、下盤側にあたる埤豊橋中央～右岸部及び右岸の家屋については被害が見られなかった。

Loc.6 豊原 埤豊橋南(写真3)

断層崖(N10°W方向)は住宅密集地を通過している。断層崖の北方延長は、走向を北東-南西方向に変化させLoc.5地点へ連続している。一方、南方延長は、幹線道路(国道3号線)を横断した後、向きを変えて、道路と平行に南西方向へ連続する。

地形測量を行った場所はサイクリングロード(線路の跡地)で、地元の人の話では、地震前は水平でまっすぐであった。崖の走向はおおよそ道路に直交しており、鉛直変位量は5.2m東側隆起、上盤側の盛り上がり頂部で6.0mと求められた(第7



写真2 埤豊橋の落橋と断層崖(Loc.5)。橋脚間あるいは橋脚直下に出現したN36°E方向の地表地震断層により橋脚が転倒し、上部工が落橋している。上流側に出現した断層崖によって滝が形成されている。

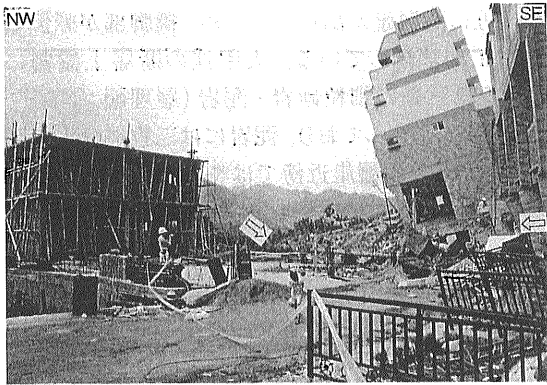


写真3 断層崖直上のマンションの被害状況 (Loc.6). 断層崖上のマンションは傾いているが、断層下盤側の建築中家屋には顕著な被害は見られない。

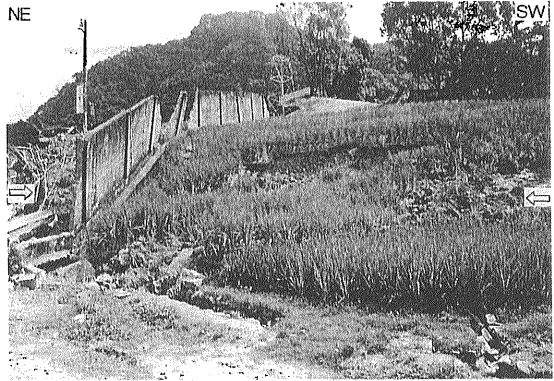


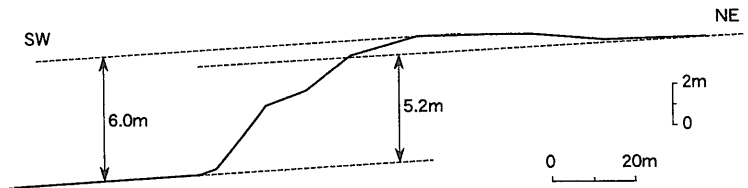
写真4 田園に出現した撓曲崖 (Loc.7). 撓曲崖はN45° E方向に連続し、上盤側盛り上がり頂部まで6.7mの鉛直変位量が求められる。

図). 上盤側の盛り上がり部には、崖の走向にほぼ平行な開口割れ目が発達する。また、道路に沿ったコンクリート製の側溝の食い違いから、走向変位量が4.7m北と求められた。さらに、地元の人の話では、建物の間隔が崖に対して直交方向に約1.5m短縮したということである(第8図)。以上のことから、鉛直変位量が東側5.2m隆起、走向変位量が4.7m北、水平傾斜変位量が1.5m西が得られたこ

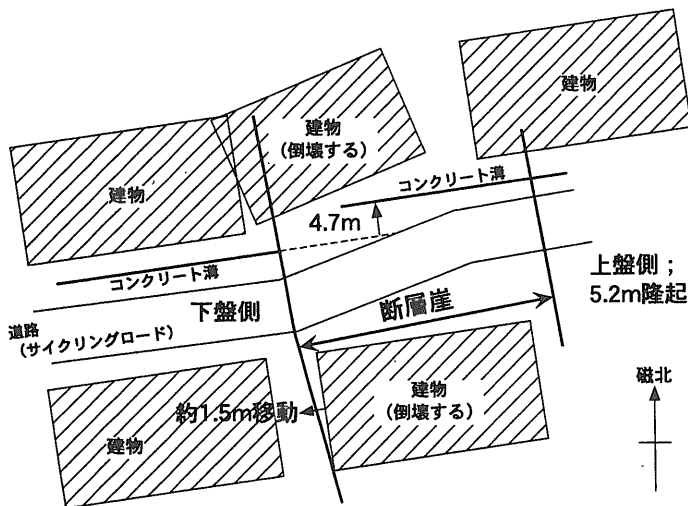
とにより、水平変位量がN28° W方向に4.9m、ネットスリップは7.2m、プランジ角は47° Eが算出される。

この地点では、断層崖の直上にあった建物は倒壊しているが、下盤側の建物は建築中のものにも被害は見られない。上盤側については、地表に盛り上がりが生じた部分では、その直上の建物に亀裂が生じている。

Loc.6 断層崖：N10W 測線：N84E



第7図 豊原 埤豊橋南 (Loc.6) の地形断面図。



第8図 豊原 埤豊橋南 (Loc.6) の平面図。



写真5 断層運動により隆起した新第三系 (Loc.9). 地質は新第三系の泥岩・砂岩で、全体的にやや破碎質である。断層は2条に分岐する。



写真6 断層露头の状況 (Loc.9). 第四系の河床堆積物に新第三系の泥岩・砂岩が $N50^{\circ} W58^{\circ} E$ の逆断層で接する。

Loc.7. 豊原 崎下埔北宙 (写真4)

起 上 般 例 の 成 果 上 が 部 部 2.0m 下 部 (第 9)

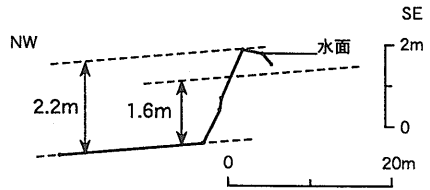


写真7 撓曲崖上盤側の状況 (Loc.10)。撓曲崖の上盤側に、地形の盛り上がりによって堰き止められた池が形成されている。背後には倒壊した橋(健民橋)が見える。

断層崖は新第三系のやや軟質な泥岩・砂岩からなるため、崖は後退しつつある。走向の異なる断層崖 (N50° W) は川の右岸で河床堆積物と泥岩が断層で接する露頭に連続している(写真6)。この断層面 (N50° W58° E) は、幅約5mmの褐色粘土状破碎部を伴っており、第四系堆積物中で高角度になる。この延長部の地表面に形成された崖の比高は約2m東側隆起である。

また、基盤内を通過する断層面は N17° E48° E の走向傾斜を示し、ほぼ平滑で直線状に連続する。幅約0.5~1cmの軟質な暗灰色の粘土状破碎部を伴い、不明瞭な条線(レイク68° S)が刻まれている。条線から求めた上盤の移動方向はN42° W、プランジ角は44° Eである。この断層面周辺には、泥岩と砂岩が混在した流動状の縞状構造からなる古い破碎部が認められる。上盤の泥岩・砂岩中には、明瞭な条線(レイク50° S)を伴うN17° E75° Eの断層面も認められたが、この断層面は、今回の

Loc.10 撓曲崖：N60E 測線：N75E



第11図 霧峰 竹子坑 (Loc.10) の地形断面図。

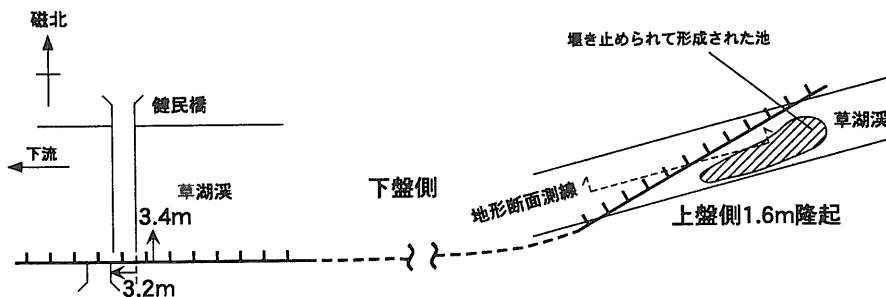
地震の際に活動したものかどうかは不明である。

この地点では、下盤側の建物にはほとんど被害は見られない。崖の直上にあった建物は倒壊しており、また、上盤側には盛り上がり部が生じているため、その直上の建物には亀裂が生じている。

Loc.10 霧峰 竹子坑 (写真7)

撓曲崖 (N60° E方向) が草湖溪を横断しており、上盤側の膨らみによって、河川が堰き止められ、池を形成している。鉛直変位量は1.6m東側隆起、上盤側の盛り上がり頂部で2.2mである(第11図)。撓曲崖は川岸に沿って東西方向に連続し、健民橋の橋脚間を通過したため、橋脚部が転倒し上部工が落ちている。橋の方向は南北方向で、崖の方向と直交している。この橋の変位を受ける前の形状・長さを復元すると、走向変位量が3.2m西、水平傾斜変位量が3.4m北となり、水平変位量はN43° W方向に4.7mと求められた(第12図)。河川横断部の鉛直変位量1.6mと合わせると、ネットスリップは4.9m、プランジ角は19° Eである。

この地点では、崖の直上にあった建物及び橋梁は倒壊しているが、下盤側の建物にはほとんど被害はみられない。また、健民橋付近では、上盤側は山地となっていることから地すべりが発生し、斜面部の道路に被害がみられる。



第12図 霧峰 竹子坑 (Loc.10) の平面図。

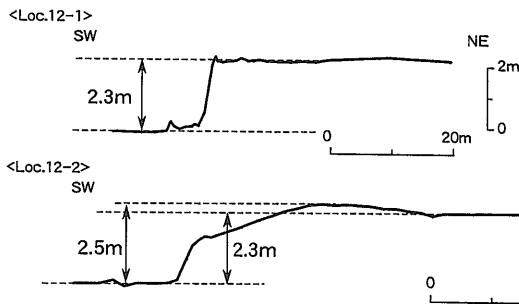


写真8 霧峰 光復小中学校グラウンドに出現した拗曲崖的断層崖 (Loc.12). 緩い崖を形成し, 末端部が巻き込まれている箇所がある.



写真9 駐車場を横断する断層崖 (Loc.13). 断層崖近傍のアスファルト舗装面は破損するが, 離れたところでは大きな被害は見られない. 背後の鉄塔にも被害は見られない.

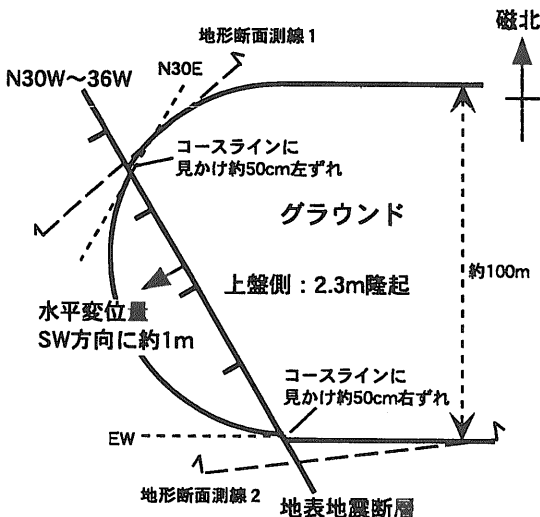
Loc. 12 拗曲崖的断層崖: N30~36W



第13図
霧峰 光復小中学校グラウンド
(Loc.12)の地形断面図.

Loc.12 霧峰 光復小中学校 (写真8)

拗曲崖的断層崖 (N30° ~ 36° W方向) が, 学校のグラウンドを通過している. 鉛直変位量は2.3m 東側隆起, 上盤側の盛り上がり頂部で2.5mである (第13図). 崖と下盤の交線は屈曲しており, この部分で芝生は切断され, 一部は巻き込まれて, 下盤側の芝生の上を覆っている. 断層崖は2地点で方向の異なるコースラインを横切っている. 北側の地点ではN30° E方向のコースラインに約50cm左ずれ (オフセット) が, 南側の地点ではEW方向のコースラインに約50cm右ずれ (オフセット) が認められた. 2箇所の見かけ変位量から求めた走向変位量は0m, 水平傾斜変位量は1m程度西となり, ネットスリップは南西方向に2.6m, プランジ角は67° Eと算出される (第14図).

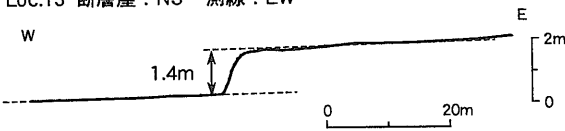


第14図 霧峰 光復小中学校グラウンド (Loc.12)の平面図.

Loc.13 霧峰 車平官 (写真9)

拗曲崖的断層崖 (南北方向) は, 畑及びアスファ

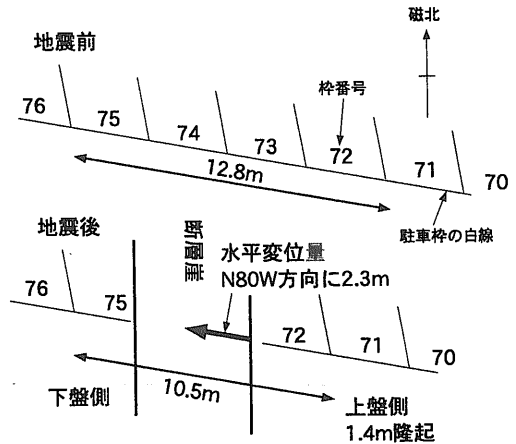
Loc.13 断層崖：NS 測線：EW



第15図 霧峰車平官 (Loc.13) の地形断面図。

ルト舗装された駐車場を通過している。鉛直変位量は1.4m東側隆起である(第15図)。また、断層により短縮を受けた駐車枠(番号がふられた白線の枠)を地震前の形状・長さに戻元すると、水平変位量はN80°W方向に2.3mとなる(第16図)。鉛直変位量及び水平変位量から求めたネットスリップは2.7m、プランジ角は31°Eである。

この地点では、断層崖の頂部から東側に15m程度しか離れていない送電線鉄塔の脚部や基礎部にも破損部が全く認められなかった。



第16図 霧峰車平官 (Loc.13) の水平変位量算出法。

この地点では、烏溪橋の橋軸が断層を挟んで約2m右に変位している。また、断層崖の下盤側にあたる橋脚部にはせん断破壊が認められる。

Loc.14 霧峰 烏溪橋下(写真10)

烏溪の河川敷にN50°E~N50°W方向に大きく走向を変化させる断層崖が見られる。この延長は烏溪橋の橋脚付近に達し、一部の上部工を落橋させている(第17図)。断層崖(N50°E)とほぼ直交する農道(N50°W)上での鉛直変位量は2.3m東側隆起である(第18図)。農道には見かけの横ずれは見られず、走向変位量は0mで、水平変位の方向はN50°Wである。断層崖の西側延長では崖が大きく湾曲し、農道とほぼ平行になる地点では、崖を挟んで水路が2.8m右ずれに変位している。以上のことから、水平変位量はN50°W方向に2.8m、ネットスリップは3.6m、プランジ角は39°Eと求められる。

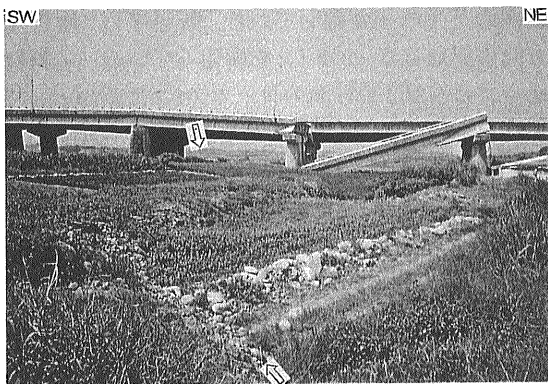


写真10 烏溪橋の落橋と断層崖 (Loc.14)。断層崖が大きく湾曲しながら、橋脚部付近に達する。

Loc.16 竹山 山脚(写真11)

撓曲崖的断層崖(N10°E方向)が茶畑などを通過しており、上に凸状の崖を形成している。下盤との境界付近では急激に高角度に変化し、崖と下盤の交線部分で畑は切断され、堆積物が露出する箇所がみられる。地元の話では、この付近の茶畑などは、地震前はすべて平坦であったという。鉛直変位量は4.0m東側隆起である。また、断層崖にほぼ直交する方向に敷設されるパイプを基準とすると、走向変位量は1.0m南である。水平傾斜変位量を測定できる基準物がないため、水平変位量は不明であるが、水平変位の方向は南~西である。

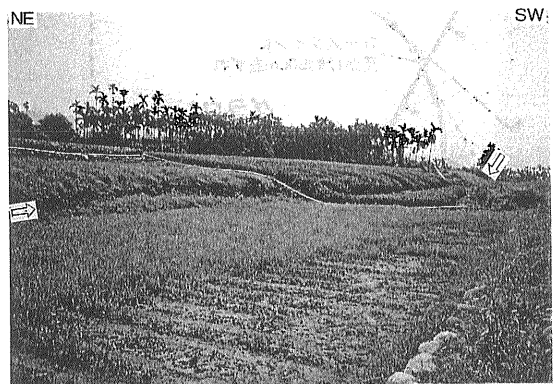
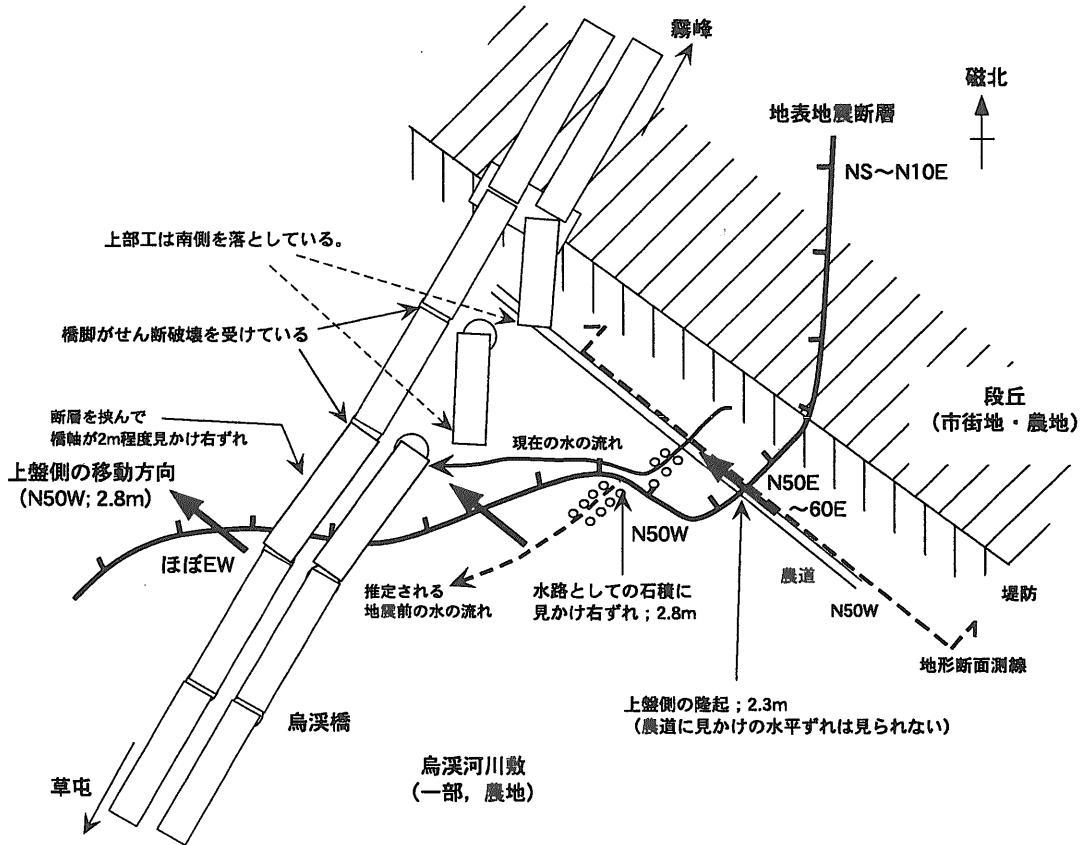


写真11 茶畑及び畑に出現した撓曲崖的断層崖 (Loc.16)。



第17図 霧峰烏溪橋下 (Loc.14) の平面図。

5. まとめ

今回の調査結果をまとめて以下に示す。

(1) 断層崖 (撓曲崖) の地形断面形態

崖は、撓曲崖、撓曲崖的断層崖、断層崖の3形態が認められた(第8図)。また、崖の上盤側背後には、比高1m以下の盛り上がり部が認められることがあり、盛り上がり部には、崖にほぼ平行な開口割れ目が多数発達している。

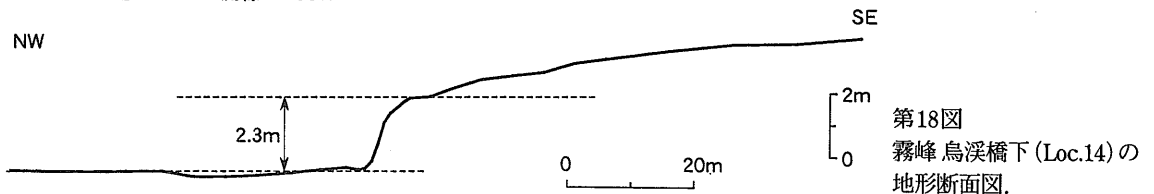
(2) 断層崖の走向、位置の変化

断層崖・撓曲崖等は、南北～東西走向まで様々な方向に屈曲を繰り返しながら、大局的には北北東-南南西走向を示し、東側の山地・丘陵と西側の平野のおおよそ境界部に分布している(第1図)。ただし、北端部及び南端部は東側の山地内に位置している。

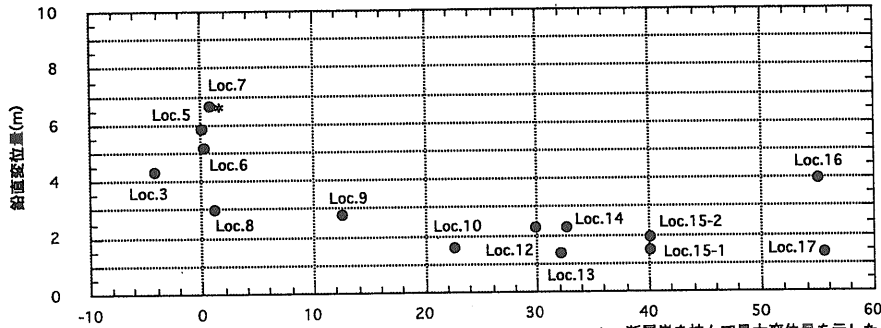
(3) 変位量

各地点における測量結果を第1表及び第19図に、断層トレースに沿った変位量分布を第20図に

Loc.14 断層崖: N50E 測線: N50W

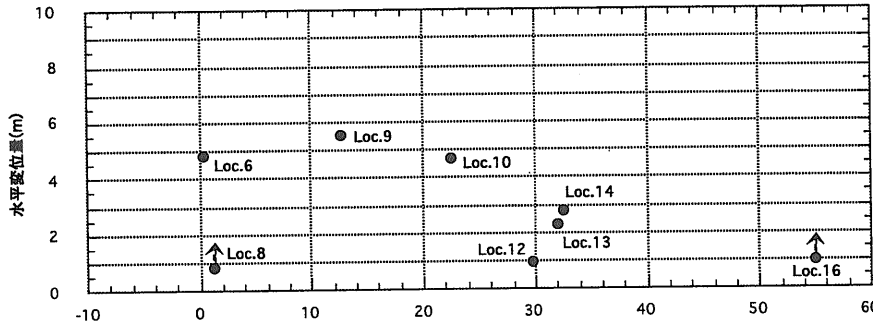


鉛直スリップ



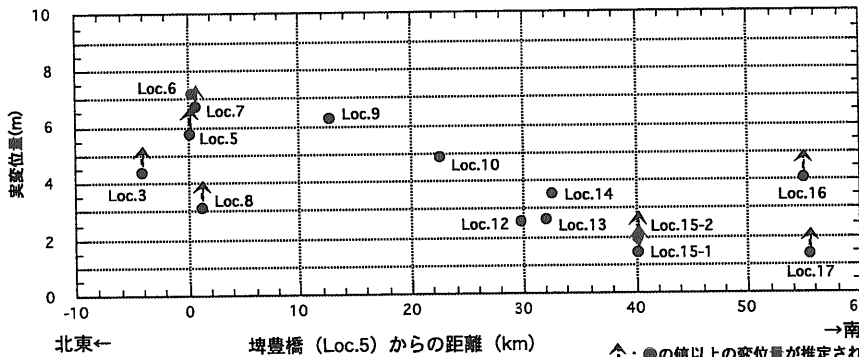
* ; 断層崖を挟んで最大変位量を示した。(地形面の平坦性が不明瞭なため)

水平スリップ



注) 変位量が求められなかった地点については載せなかった。

ネットスリップ



↑ ; ●の値以上の変位量が推定される。

第19図 変位量の変化。

示す。なお、地表地震断層の位置(トレース)については、経済部中央地質調査所HPで公開されているものを使用した。

a) 鉛直変位量

今までに報告されている最大鉛直変位量はLoc.4(石岡ダム)の約8m(大町, 1999)である。Loc.5(豊原埤豊橋), Loc.6(豊原埤豊橋南), Loc.7(豊原崎下埔北東)等でも5mを越える鉛直変位量が計測されている。特に、石岡付近では断続的な断層崖が複数分布し、Loc.7のような局地的な隆起部が出現し、地表部の変形が著しい場所である。

鉛直変位量は石岡付近から南に向かって次第に減少し、Loc.13(霧峰車平官)で1.4mとなるが、さらに南のLoc.16(竹山山脚)では、4.0mに増加する。

b) 水平変位量

今回の調査では北~中部のLoc.6(豊原埤豊橋南), Loc.9(台中大坑南), Loc.10(霧峰竹子坑)で約5mの水平変位量を確認している。大槻・Yang(1999)は、北部の豊原東方で10mを越える水平変位量を報告している。鉛直変位量と同様、南に向かって次第に変位量は減少する傾向がある。

第1表 変位置測定結果一覧。

地点名	地名	緯度経度	Loc.5からの距離 (km) <南;+>	崖走向	上盤側 の 方位	鉛直スリップ		走向スリップ		水平傾斜 スリップ		水平スリップ		ネット スリップ (m)	ブランチ 角
						変位置 (m)	ピーク (m)	変位置 (m)	方向	変位置 (m)	方向	変位置 (m)	方向		
Loc. 3	東勢岡頂 石園橋東	N24° 17' 13" E120° 47' 30"	-4.2	N60° E	SE	4.4		-	-	-	N	-	-	4.4+	-
Loc. 5	石岡埤豊橋下	N24° 16' 56" E120° 45' 11"	0	N36° E	SE	5.8		-	-	-	W	-	-	5.8+	-
Loc. 6	豊原埤豊橋南	N24° 16' 43" E120° 45' 02"	0.2	N10° W	NE	5.2	6.0	4.7	N	1.5	W	4.9	N28° W	7.2	47° E
Loc. 7	豊原崎下埔 北東	N24° 16' 35" E120° 44' 57"	0.6	N45° E	SE	6.7*	6.7	-	-	-	W	-	-	6.7+	-
Loc. 8	豊原崎下埔東	N24° 16' 11" E120° 44' 40"	1.1	N70° E	SE	3.0		0.8	W	-	N	0.8+	W~N	3.1+	-
Loc. 9	台中大坑 南西	N24° 10' 34" E120° 43' 32"	12.5	N10° E	SE	2.8	3.8	2.5	N	5.0	W	5.6	N55° W	6.3	27° E
Loc. 10	霧峰竹子坑	N24° 05' 14" E120° 43' 21"	22.5	EW	S	1.6	2.2	3.2	W	3.4	N	4.7	N43° W	4.9	19° E
Loc. 12-1	霧峰 光復小中学校	N24° 02' 38" E120° 41' 28"	29.7	N30° W ~ N36° W	NE	2.3		0	-	1	W	1	SW	2.6	67° E
Loc. 12-1						2.3	2.5								
Loc. 13	霧峰車平官	N24° 01' 10" E120° 41' 18"	32	NS	E	1.4		0.4	N	2.3	W	2.3	N80° W	2.7	31° E
Loc. 14	霧峰烏溪橋下	N24° 00' 45" E120° 41' 18"	32.5	N50° E	SE	2.3		0	.	2.8	W	2.8	N50° W	3.6	39° E
Loc. 15-1	南投 省訓園 ゴルフ場	N23° 56' 28" E120° 41' 46"	40	NS	E	1.5		-	-	-	W	-	-	1.5+	-
Loc. 15-2						2.0		-	-	-	W	-	-	2+	-
Loc. 16	竹山山脚	N23° 48' 45" E120° 41' 59"	54.9	N10° E	SE	4.0		1.0	S	-	W	1.0+	W~S	4.1+	-
Loc. 17-1	竹山山脚	N23° 48' 24" E120° 42' 01"	55.5	N56° W	NE	1.4		-	-	-	S	-	-	1.4+	-
Loc. 17-2						1.4		-	-	-	S	-	-	1.4+	-

注) 変位置は断層下盤側を固定した際の相対量である。 * ; 地形面の平坦性が不明瞭なことから、断層崖を挟んでの最大変位置を示している。

- ; 不明であることを示す。

c) ネットスリップ

今回の調査では、北～中部で大きく約7m、南に向かって減少し、中～南部で約3mであるが、さらに南のLoc.16(竹山山脚)では4.1m以上と判断される。大局的には、北部で大きく、南へ向かって減少し、さらに南ではまた増加する傾向が認められる。

ネットスリップの方位は、Loc.12(霧峰光復小中学校グラウンド)及びLoc.16(竹山山脚)での南～西方向を除くと、一般的に北西方向(N28°～80°W)を示している。ネットスリップのプランジ角は、おおよそ30°E前後の低角度のものが多いが、Loc.6(豊原埤豊橋南)で47°E、Loc.12(霧峰光復小中学校グラウンド)で67°Eと相対的に高角度のものもあった。

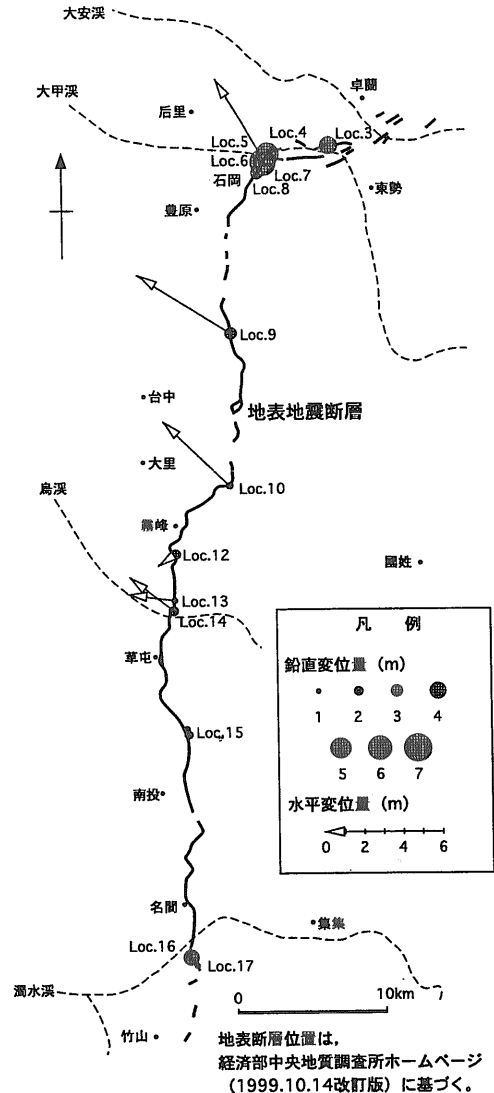
(4) 断層破碎部の性状

Loc.9(台中大坑南)では、今回の地震で動いた断層面が、新第三系泥岩・砂岩中及び新第三系泥岩と第四系が接する部分で観察できた。基盤の新第三系泥岩・砂岩中には、幅0.5～1cmで暗灰色を呈する軟質な粘土状破碎部が見られる。断層面は、ほぼ平滑で直線状に連続している。断層周辺には、泥岩と砂岩が混在した流動状の縞状構造からなる古い破碎部が認められた。

断層面の傾斜角は、泥岩・砂岩中で48°E、新第三系泥岩と第四系が接する部分で58°Eである。断層面の条線から求めた上盤の移動方向はN42°W、プランジ角は44°Eである。

(5) 地表地震断層付近の被害

今回の地震に伴って出現した地表地震断層上の建物は、数mの段差が出来たために例外なく倒壊している。上盤側は崖から数10mの範囲に地表面の盛り上がり及び開口割れ目が形成されているため、半壊となっている建物が多い。この範囲からはずれると被害はほとんど見られなくなる。一方、下盤側には一般的には断層崖・拗曲崖等の近傍にも被害は見られず、レンガ積みの建物や建築中の建物にも被害はないことがある。以上のことから、地表地震断層付近の被害の多くは、地震動によるものというより、地表の変状による直接的なものと考えられる。



第20図 断層トレス沿いの変位量分布。

6. 考察

6.1 ネットスリップの方向と大きさ

今回地表の変位から求めたネットスリップの方向は、北西方向のものが卓越していた。この方向は菊地ほか(1999)の地震波の波形解析から求められた結果、經濟部中央地質調査所のGPSによる測量結果及び大槻・Yang(1999)等の地表の変位から求められた結果と一致しており、フィリピン海プレートの相対運動方向に調和的である。しかし、一部の地点では南西方向の変位を示しており、これは、地表面付近が塑性流動したためと考えられている

(東京大学地震研究所の瀬野HPより)。また、菊谷ほか(1999)は、変位の向きは北部では北、中部では北西、南部では西～南西方向を示し、変位ベクトルの向きの分布は、隆起側の(表層)の地塊が全体として、震源域の外側に向かって、張り出すようにして衝上したことを示すとしており、この原因として、隆起側の地塊の重力による移動、粘性流動的な動き等が寄与していることを示唆するとしている。

ネットスリップのプランジ角については、おおよそ 30° E前後の低角度のものが多く、菊地ほか(1999)の地震波の波形解析から求められたものとほぼ一致する。しかし、局所的により高角度な地点も見られる。

ネットスリップの大きさについては、北部で大きく南方に減少し、南部でまたやや大きくなる傾向が見られる。地震波の波形解析から求めた推定断層面内の変位量分布図にも、複数のピークが表れている(菊地ほか, 1999)。最大のピークは震源地から北に約40km地点で、最大約6mである。また、震源地から南南西方向に10km地点には約3mのピークが認められる。これらのピーク間の最小地点は、震源地から北北東方向に10km地点で、約1.5m程度にまで減少している。この特徴は、地表で見られたように、北部で大きく南方に減少し、南部でまたやや大きくなる変位量の地域変化とおおよそ一致している。

6.2 地表地震断層の出現位置

今回の地震に伴う地表地震断層は、台中盆地等の低地部と山地・丘陵部との境界に概ね沿って出現している。石岡以北の地表地震断層を除き、「25万分の1台湾地質図」(1974)に記載されている推定断層に一致する。特に、草屯北方の烏溪沿いに分布する河成段丘の西縁を限るよう出現した地表地震断層は、經濟部中央地質調査所のHPによって草屯断層として記載されていた断層に一致する。

北端部の石岡から卓蘭にかけて複数出現した北東-南西方向の地表地震断層については、「25万分の1台湾地質図」(1974)、5万分の1地質図幅「東勢」(1935)などでは、断層は記載されておらず、現地でも顕著な変位地形を認めることができ

なかった。しかし、大甲溪に滝を形成した断層崖(Loc.5)に露出する泥岩は、全体的に破碎質で、部分的に軟質な粘土状破碎部を挟在していることから、地質図に表現されていない断層が存在していた可能性もある。過去に全く断層活動が無かった場所に、今回の地震で突然地表地震断層が出現したかどうかということは、非常に重要な点であり、今後のより詳細な現地調査が必要である。

6.3 被害と地震断層の関係

今回調査した地表地震断層沿いの被害は、地表の変状による直接的なものが多く、地震動による被害が比較的少ない。この理由としては、今回の地震断層は、断層面が 30° と低角度であるため、震央付近より地表地震断層出現部の方が、震源からの距離が遠いことが考えられる。今回は現地調査を実施していないことから詳細は不明であるが、最大加速度989galが記録され、かなりの被害を受けているとされている日月潭は震央付近に位置している。一方、新聞報道等で被害が大きいとされた東勢は、菊地ほか(1999)によるメカニズム解から求めた断層面のうち、最大変位量(6m)を示す地点に比較的近く、地下での断層変位量と被害に関連がある可能性が予想される。

新聞報道にもあるように、今回の被害の特徴をみると、建物の荷重を小さくするという理由で、ビルの柱に一斗缶を埋め込みコンクリートを減らしたり、質の悪い鉄筋を使用する等の手抜き工事あるいは施工後の改造(柱の切断)が、被害を増長させている可能性が高い。一方、石岡ダム、主要道に架かっている橋梁等、施工が完全なものは、断層通過部は当然被害を受けているが、それ以外の部分の被害は非常に小さい。今後、地震被害調査の進展により、被害と構造物、地盤、地下の断層との関係等が、詳細に解明されることが期待される。

6.4 活断層調査への留意点

今回出現した地表地震断層は、その断層トレスが山地と低地の境界を沿うように湾曲し、末端部では不連続に分布している。また、断層面が低角であることから断層崖は崩壊し、不明瞭な撓曲崖的な形状となっている。このように、低角度逆断層は、横ずれ断層と比較して、直線的で明瞭な変

位地形を形成しない特徴がある。

このような低角逆断層を対象とした空中写真判読を実施する際には、変位地形要素の「直線性」及び「明瞭さ」を根拠にして断層の存在、通過位置及び活動度を議論することには注意を要する。変位地形を抽出する際には、様々な縮尺の空中写真を使い分け、全体の地形を把握しながら、詳細部分を判読する必要がある。また、現地においては、地形測量などを実施し、傾斜変換点などの微細な地形に注目する必要がある。

7. あとがき

今回の台湾921集集地震に伴う地表地震断層調査は、地震発生後、約20日経過してから実施した。鉛直変位5m以上、実変位10m程度にも及ぶ断層崖(撓曲崖)のスケールには圧倒された。このような大きな変位にも関わらず、地表地震断層付近では大きな被害が断層崖上の狭いエリアに限られていることは大変驚きであり、今回の地震発生メカニズムの特異さを感じた。しかし、断層上盤・下盤側に限らず地盤条件の悪い所、建築物の構造上の不具合など悪条件が重なったところでは、結果として大きな被害が生じており、事前の地盤調査、建築物の設計から施工に至る一連の過程の重要性を再認識した。

被災後の復旧については、軍隊が大きな役割をなしており、断層変位に伴って大きな段差が生じて

破損した道路や落橋した河川橋についてもいち早く仮復旧工事が実施され、筆者らが訪れた時は大部分の箇所は通行可能となっていた。また、電気や上水道などのライフライン設備に関しても、地震後の復旧の早さが非常に印象づけられた。

ちなみに、霧峰の光復小中学校グラウンド(Loc.12)に出現した地表地震断層は、そのまま保存することが決まっているとのことであった。

謝辞：今回の調査報告投稿の機会を設けていただいた地質調査所の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 5万分の1地質図幅「東勢」及び説明書(1935)：台湾総督府殖産局。
 岩松 暉・横田修一郎(1989)：「断層調査法 野外における断層のみかた」。地学ハンドブックシリーズ・3, 地学団体研究会。
 苜谷愛彦・吾妻 崇・杉山雄一・李 元希・石 同生・廬 詩丁・呉 維毓(1999)：9月21日(M7.7)に伴う地表地震断層調査。日本地震学会秋季大会ポスターセッション。
 菊地正幸・八木勇治・山中佳子(1999)：1999年9月21日台湾中部の大地震の震源過程。日本地震学会秋季大会講演予稿集, A01。
 「25万分の1台湾地質図」(1974)：中華民国經濟部。
 大町達夫(1999)：1999年集集(台湾)地震によるダム被害の調査速報。「内陸におけるプレート境界大地震の脅威—台湾921集集地震調査報告会—」, 文部省突発自然災害調査班。
 大槻憲四郎・Chao-Nan Yang(1999)：9.21台湾地震調査資料。「内陸におけるプレート境界大地震の脅威—台湾921集集地震調査報告会—」, 文部省突発自然災害調査班。
 「台湾新地体構造形態図」(1997)：中華民国經濟部中央地質調査所。

MATSUURA Kazuki, OTOMO Junichi, NAGATA Takahiro and KOBAYASHI Makoto (2000) : On the surface rupture faults associated with Sep.21 Chi-Chi earthquake.

< 受付：1999年12月1日 >