

台湾集集地震土木構造物の被害と特徴

1. はじめに
2. 地震の概要
3. 台湾の地震活動と断層機構
4. 観測された地震動
5. 地震被害の概要
6. まとめ
7. 今後の課題

岩 楯 敏 広*
吉 嶺 充 俊*

要 約

1999年9月21日1:47am(現地時間)に、台湾中部南投県集集付近を震源とするM7.6の大地震が起こり、死者二千人以上、ビル・家屋の倒壊は、全壊約四万棟、半壊約四万棟にのぼり、三十二万人以上が家屋を失った。

筆者は、土木学会台湾地震調査団の一員として、土木構造物の内、主に、ライフライン・電力施設および山岳トンネルの被害調査を実施した。本報告は、調査結果に基づいて、土木構造物の地震被害の概要とその特徴について述べたものである。

以下に概要を示す。

(1) 今回の地震の最大の特徴は広範囲に渡って、大きな地表地震断層が出現(最大10m程度)し、断層変位による局所的な地盤変状により、石岡取水堰や石圍橋、稗豊橋、長庚橋等断層直上あるいはこれをまたいだダム、橋梁、道路、導水路トンネル、ライフライン施設などの土木構造物が大きな被害を受けたことである。しかし、概して、断層から離れた地点の被害は少なかった。

(2) 地震動(揺れ)による被害としては、山間部での大規模な斜面崩壊や地滑り、送電鉄塔の倒壊および丘陵地の変電所・開閉所等の機器等に見られた。このため、電力供給に大きな影響を及ぼした。

(3) 地震の規模は、M7.6で兵庫県南部地震の10倍程度であるが、地震動の揺れ(震幅)は、主要動部分で、最大で400gal程度であり比較的小さい。最大値の分布は南北方向に長い形状を示し、EW方向成分がNS方向成分より大きい(約2倍)。また1Gの部分は、高振動数域にあり、地盤の特性を反映していないと考える。

(4) 液状化は、台中港等の海岸地域や大肝溪流域の沖積低地等で発生し、このため、台中港の護岸の変状、背後地盤の沈下の被害や河川堤防の変状、建物の沈下や傾斜の被害が

* 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻

生じたが、被害の規模は、阪神・淡路大震災と比べて小さい。

(5) 今回の地震では、断層による局所的な地盤変状による被害が多く見られた。しかし地震断層の地表の表われ方やその規模など十分に解明されておらず、現行では断層を考慮した耐震設計はなされていない。今後、断層によって引き起こされる地表面の変状に対して、地表面断層の出現位置、規模の予測方法などを検討するとともに、耐震設計にどのように取り入れるか早急に検討し、断層変位による構造物の破壊を抑制する設計・施工技術の向上に努める必要があると考える。

1. はじめに

1999年9月21日1:47am(現地時間)に、台湾中部南投県集集付近を震源とするM7.6の大地震が起こり、死者二千人以上、ビル・家屋の倒壊は、全壊約四万棟、半壊約四万棟にのぼり、三十二万人以上が家屋を失った。

土木学会では、地震工学委員会地震調査小委員会の浜田委員長(早稲田大学教授)を団長とする調

査団(表1)を現地に派遣し、10/1~10/5に地震被害調査を実施した。

筆者は、調査団の一員として、土木構造物のうち、主に、ライフライン・電力施設および山岳トンネルの被害を調査した。そして調査結果を土木学会地震工学委員会の調査報告書「THE 1999 JIJI EARTHQUAKE, TAIWAN - Investigation into Damage to Civil Engineering Structures -」の一部として取り纏めた(文献1,2)。

本報告では、調査結果および土木学会の報告書に

表1 土木学会台湾地震被害調査団名簿

担 当	会社名・大学名	名 前
地震動+液状化	日本工営株式会社	大角 恒雄
	東京理科大学	森地 重暉
	東京工業大学	年縄 巧
	京都大学	佐藤 忠信
	(株)土木情報サービス	志毛 宏次
交通(鉄道,道路)	(財)鉄道総合技術研究所	西村 昭彦
	建設省土木研究所	運上 茂樹
	東京大学	阿部 雅人
	(株)千代田コンサルタント	橋本 隆雄
	(財)ダム技術センター	杉村 淑人
ダム	(財)ダム技術センター	三浦 三郎
	東京大学	小長井 一男
	(財)ダム技術センター	三浦 三郎
ライフライン	早稲田大学	浜田 政則(団長)
	(株)近代設計	島田 芳久
	(株)近代設計	エレン ワング
	東京大学生産技術研究所	目黒 公郎
ライフライン 電力	東京電力(株)	安田 登
	都立大学	岩橋 敏広
ライフライン 水道	東京都水道局	吉田 永
	(社)日本水道協会水道技術総合研究所	福田 勝年
ライフライン ガス	東京ガス(株)	島村 一訓
	金沢大学	宮島 昌克
港湾	運輸省港湾技術研究所	菅野 高弘
	日本大学	中村 晋

基づいて、土木構造物の地震被害の概要とその特徴について述べる。

2. 地震の概要

台湾の中央気象局の発表によると、今回の地震の正式名称は、「台湾集集地震」である。

2.1 地震の諸元

以下の通りである。

- (1) 発震時：1999年9月21日午前1時47分（現地時刻）
- (2) 震源：北緯23.85度，東経120.81度，震源深さ6.99km
- (3) マグニチュード：M = 7.3（台湾中央気象台）
Ms（表面波マグニチュード）= 7.7（米国地質調査所：USGS）
Mw（モーメントマグニチュード）= 7.7（米国地質調査所：USGS）

台湾集集地震を兵庫県南部地震と比較すると、兵

庫県南部地震では、Ms = 6.8（USGS），Mw = 6.8～6.9であり、破壊エネルギーに換算すると、約10倍となる。

2.2 各地の最大震度

台湾中央気象局による各観測点の等級および最大加速度と方向を以下に示す。

- (1) 南投地区：名間6級（163gal），日月潭6級（163gal），台中市6級，嘉義市5級（164gal）
- (2) 新竹地区：竹北市5級（93gal）
- (3) 台南地区：永康5級（87gal，EW），東山4級（53gal），宜蘭市5級（81gal）
- (4) 台東地区：蘭嶼4級（369gal，NS），成功4級（48gal），台東市4級（25gal），大武3級（10gal，NS）
- (5) 屏東地区：九如4級（38gal），小琉球4級（32gal），枋寮3級（23gal，EW），恆春3級（22gal），墾丁3級（14gal）

表2 集集地震と過去日本国内の活断層で発生した被害地震および最近発生した被害地震との比較

地震名	濃尾地震	福井地震	兵庫県南部地震	コジャエリ地震	集集地震
発生国	日本	日本	日本	トルコ共和国	台湾
発生日月日	1891年10月28日	1948年6月28日	1995年1月17日	1999年8月17日	1999年9月21日
発震時刻（現地時間）	6時38分	16時13分	5時46分	3時01分	1時47分
マグニチュード	8.0(M _{JMA} 相当)	7.1(M _{JMA})	7.2(M _{JMA})	7.4(M _s) ^{*1)}	7.7(M _s) ^{*1)} 7.3(M _L) ^{*2)}
地震モーメント (dyne・cm)	1.5 × 10 ²⁷ ^{*8)}	3.3 × 10 ²⁶ ^{*8)}	2.5～3.1 × 10 ²⁶ ^{*3)}	1.8 × 10 ²⁷ ^{*3)}	2.4 × 10 ²⁷ ^{*3)}
震源深さ (km)		0	16	17 ^{*1)}	1 ^{*2)}
震央位置	35.6°N 136.6°E	36.17°N 136.20°E	34.60°N 135.04°E	40.70°N 29.99°E ^{*1)}	23.85°N 120.78°E ^{*2)}
断層長さ×幅 (km)	85 × 15 ^{*8)}	30 × 13 ^{*8)}	40 × 10 ^{*8)}	60 × 20 ^{*3)}	80 × 40 ^{*3)}
平均すべり量 (m)	3.8 ^{*8)}	2 ^{*8)}	2.1 ^{*8)}	3.3 ^{*3)}	2.2 ^{*3)}
観測最大水平加速度 (gal)	—	—	818	399	989
被災建物（棟）	222,501 ^{*7)}	51,851 ^{*7)}	512,846	244,383 ^{*5)}	17,408 ^{*4)}
死者（人）	7,273 ^{*7)}	3,769 ^{*7)}	6,430	15,756 ^{*5)}	2,188 ^{*4)}
負傷者（人）	17,175 ^{*7)}	22,203 ^{*7)}	43,773	24,940 ^{*5)}	8,739 ^{*4)}
被害総額（億米ドル）	—	—	約1,000	約160 ^{*6)}	—

1) 米国地質調査所 2) 台湾中央気象局 3) 東大震研究菊地教授ら 4) 台湾内政部 10/01 06:00現在
5) トルコ首相府危機管理センター発表 (9/24 11:30現在) 6) ボガジチ大学HPによる推定値
7) 「宇佐美 (1996), 新編日本被害地震総覧」による 8) 「日本の地震断層パラメーター・ハンドブック」による

- (6) 澎湖地区：馬公 4 級 (36gal)
- (7) 高雄市 4 級 (32gal), 台北市 4 級, 花蓮市 3 級 (24gal)
- (8) 苗栗地区：三義 3 級 (19gal, NS)

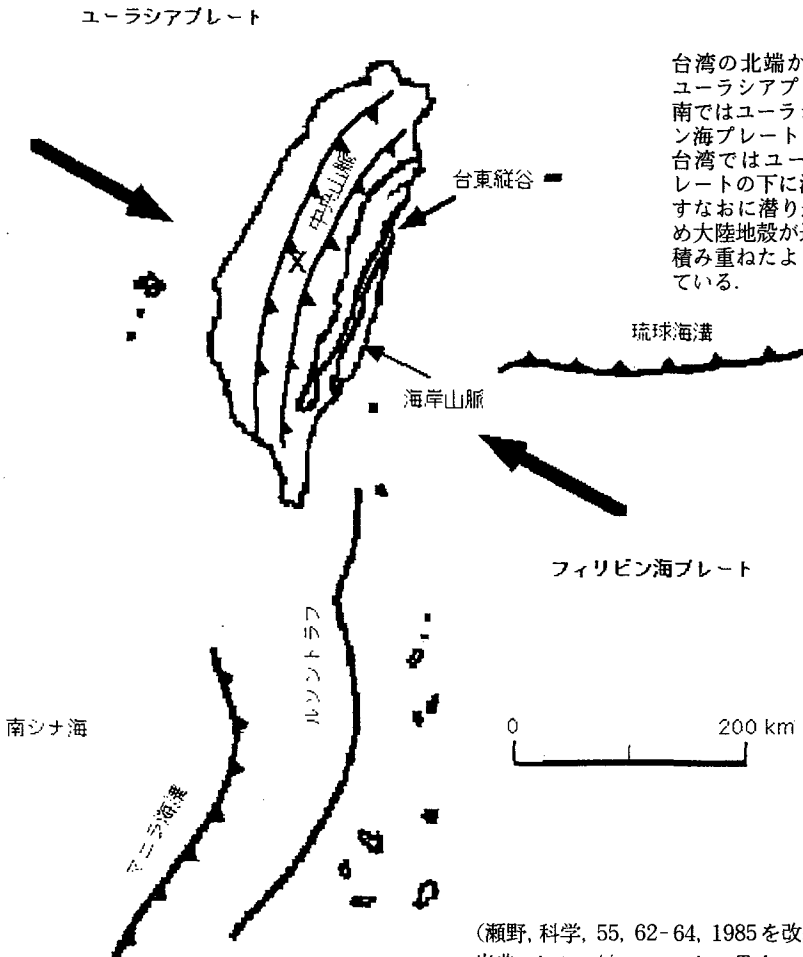
表 2 に、最近の被害地震との比較を示す。

3. 台湾の地震活動と断層機構 (東大震研 瀬野徹三氏による) (図 1, 2, 3)

3. 1 プレートおよび断層

台湾本島は、断層で区切られ南北方向に伸びる

地質学的区分に分断されている。島の中央に第三期中期～後期の火山活動で形成された中央山脈が連なり、その西側に西部麓山帯、西部海岸平野が広がっている。台湾島周辺は、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に存在するが、その北端から北では、フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に潜り込んでいる。一方、南ではユーラシアプレート(南シナ海)がフィリピン海プレート(ルソン弧)の下に潜り込んでいる。台湾では南の地学的構造が北へ延長され、ユーラシアプレートがフィリピン海プレートの下に潜り込もうとしている。しかし南シナ海にあたる海が



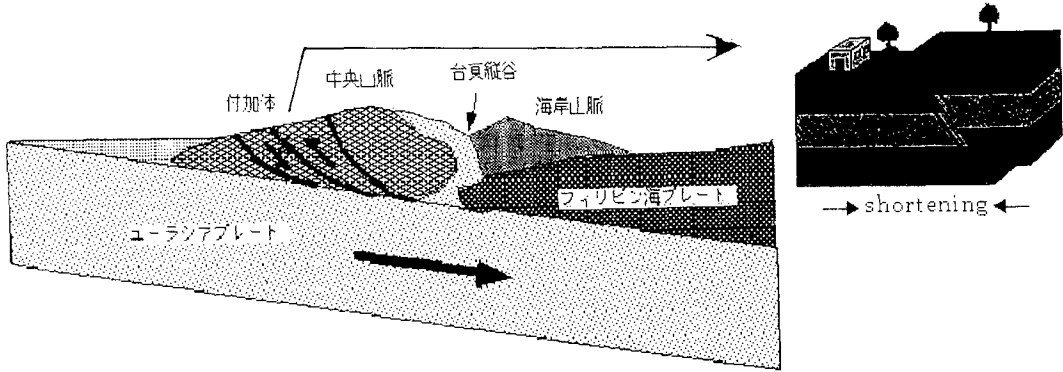
(瀬野, 科学, 55, 62-64, 1985を改変)

出典 : <http://www.eri.u-Tokyo.ac.jp/seno/Figures/taiwan1,2,3>

図1 台湾付近のプレート境界
(台湾のテクトニクス)

すでに消滅し、ユーラシア大陸とルソン弧が衝突している（図1）。この衝突により、大陸棚がかき集められて瓦を積み重ねたような構造をつくり、中央山脈が逆断層で急速に隆起している（図2, 図3）。

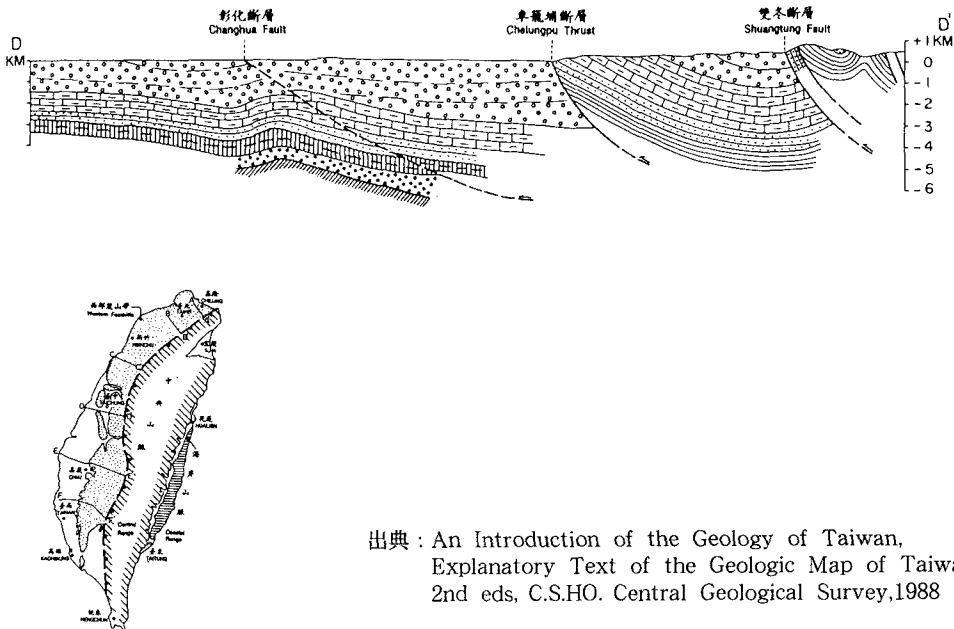
活断層については、ユーラシアンプレートの潜り込みに関係した「付加帯内部活断層」という説と衝突による「プレート内部の逆断層」という説がある。図4に、台湾の活断層分布図を示す。



今回の地震はユーラシアプレートが中央山脈の下に潜り込む運動が急激な断層運動となって現れたもので、中央山脈の麓で逆断層運動が起きたものである。ここは地学的にはマニラ海溝の陸上延長東側の付加プリズムにあたるので、今回の地震はプレート境界でおきた地震といえる。

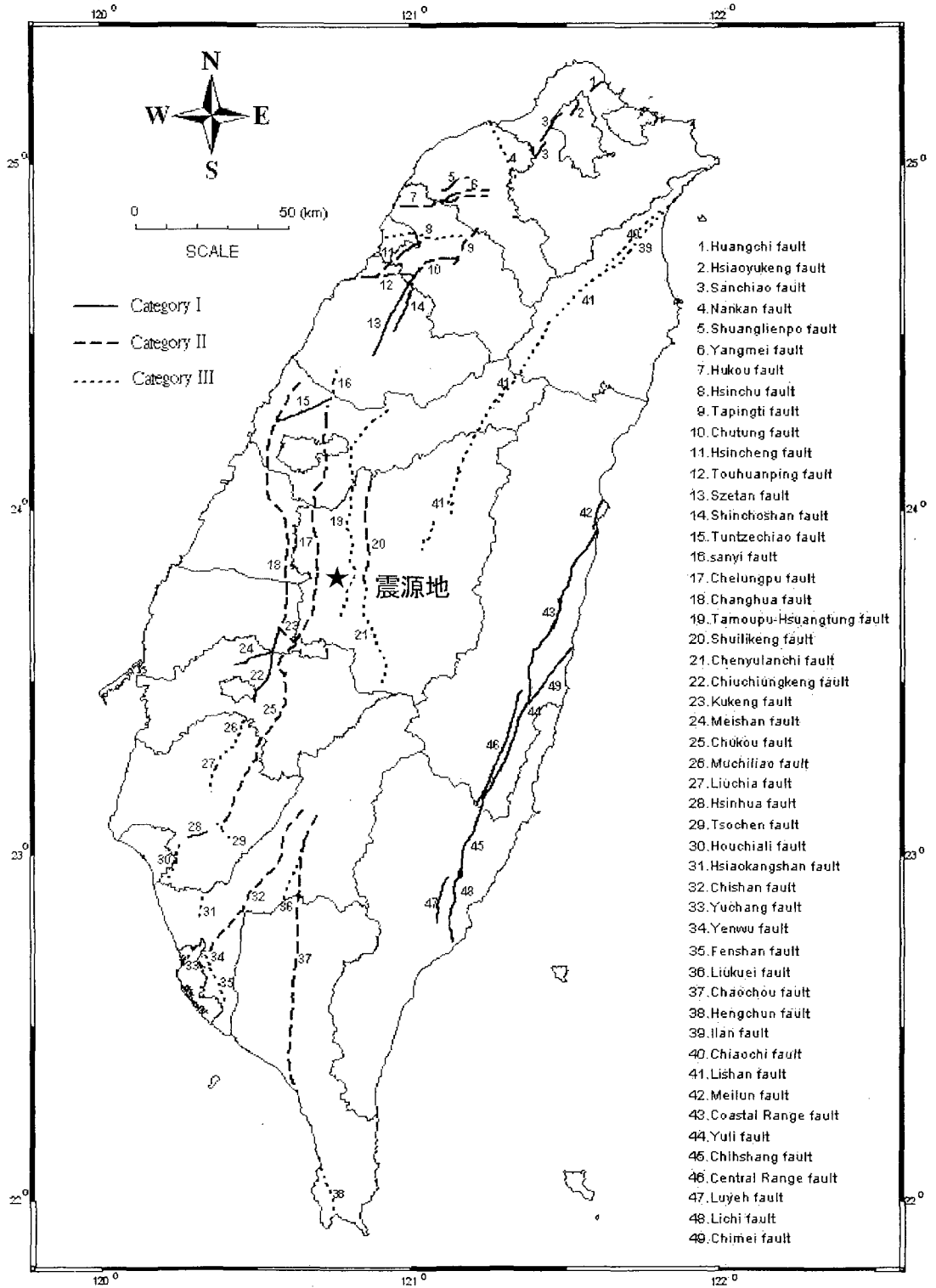
出典：http://www.eri.u-Tokyo.ac.jp/seno/Figures/taiwan1,2,3

図2 台湾の構造断面図（瀬野, 1994）



出典：An Introduction of the Geology of Taiwan, Explanatory Text of the Geologic Map of Taiwan, 2nd eds, C.S.HO. Central Geological Survey, 1988

図3 震源付近の地質図（下図のD-D断面）



(Data Source : Prof. C.T.Lee, NCU)

図4 台湾の活断層分布図

表3 台湾における過去の被害地震（死者100人以上）（文献3）

出典	年	月	日	時間	緯度	経度	深さ	M	津波	死	負傷	被害	備考
C	1661	2	15		23.00	120.20		6.0		many	-	seve	台湾[台南地震]
C	1720	10	31		23.00	120.30		5.5		many	-	some	台湾
C	1721	1	5		23.00	120.30		6.0		many	-	some	台湾
C	1736	1	30	200L	23.10	120.30		6.0		372	129	seve	台湾(別)死120/327
C	1776	12			23.50	120.50		5.5		many	-	cons	台湾(12-1月)[嘉義地震](12/11か)
C	1777	11			23.50	120.50		5.5		many	-	mode	台湾(11-12月)
? GM	1792	8	7		23.60	120.50			T	252	-	seve	China(8/9の誤りか)(別)死100以上
C	1792	8	9	1700L	23.60	120.50		6.8		617	781	seve	台湾[嘉義地震](I=9)
C	1815	10	13	2200L	25.20	121.20		6.5		113	2	seve	台湾[淡水地震](別)死93/24.0° 121.7° /M=7.7
C	1839	6	27	800L	23.40	120.40		6.5		117	534	seve	台湾
C	1845	3	4	1200L	24.10	120.50		6.0		381	数百	seve	台湾(2-3月)
? C	1848	2	12	600L	24.10	120.50		7.1		1030	many	seve	台湾(12/3の誤りか)
C	1848	12	3		24.10	120.50		6.8		2000	数千	extr	台湾[彰化地震](I=9)(別)死1000/1030
C	1862	6	7	1000L	23.40	120.10		6.5		数千	数千	extr	台湾[嘉義地震](別)死500傷>1000/M=7.0
C	1865	11	6		24.90	121.60		6.0		many	-	some	台湾(山崩れ)
CT	1867	12	18		25.50	121.70		6.0	T	数百	-	some	台湾[基隆北海地震](別)M=7.0
? G	1867	12	28		25.50	121.70				100	-	limi	China:Formosa(12/18の誤りか)
C	1904	11	6	425L	23.50	120.30		6.2		145	158	seve	台湾[嘉義地震]
C	1906	3	17	642L	23.60	120.50		6.8		1258	2385	seve	台湾[嘉義地震] 断層(Ms=6.8)
C	1935	4	21	601L	24.30	120.80		7.1		3276	12053	extr	台湾[苗栗地震/新竹・台中地震] 断層(Ms=7.1)
C	1941	12	17	319L	23.30	120.30		7.0		357	718	seve	台湾[嘉義地震](別)死358傷733/753(Ms=7.2)
C	1964	1	18	2004L	23.10	120.60		7.0		106	650	seve	台湾[台南東北地震](別)死107傷452(I>9)

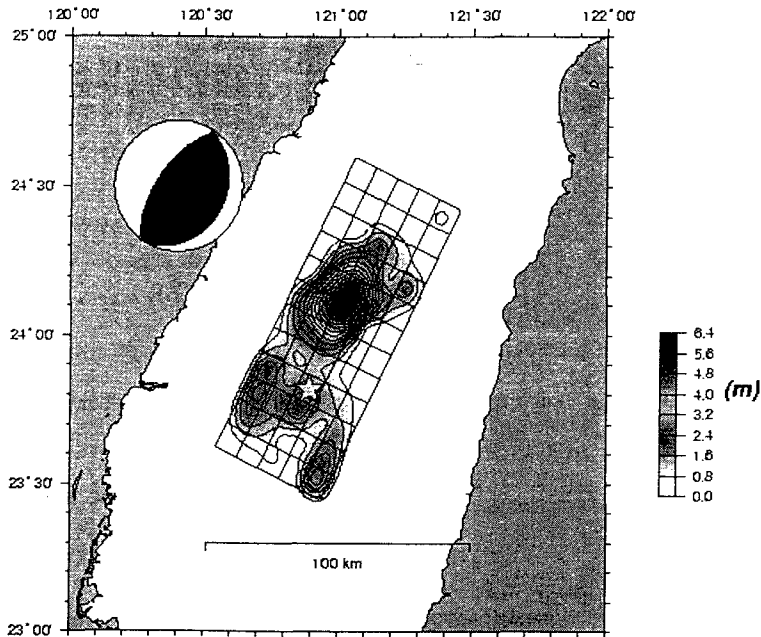
今回の台湾集集地震は、ユラシアンプレートが中央山脈の下に潜り込む逆断層運動により起きた逆断層地震であり、起震断層は、車籠埔(Chelungpu)断層と考えられるである。ここは、地学的には、マニラ海溝の陸上延長の付加プリズムにあたり、「ユラシアンプレートとフィリピン海プレートの境界で起きた地震である。図5に、本地震の断層の形状とメカニズム(CTM)を示す。CTMの形状から、南北走向の逆断層型の地震であることが推定できる。今回の断層調査によると、石岡の取水堰付近で最大で約10mの鉛直変位が確認されているが水

平変位はきわめて少ない。

表3に、台湾の過去の被害地震を示す。台湾では、歴史地震が記録されるようになった17世紀以降、死者が千人以上に達する地震が少なくとも6回以上起きており、近年では、1935年の苗栗・台中地震では、三千人以上を越える死者が出ており、今回の集集地震は今世紀では、この地震に次ぐものとなった。苗栗・台中地震は、今回の地震の震源よりやや北西よりの場所で発生しており、今回と同様、車籠埔(Chelungpu)断層の断層運動に伴う直下型地震であった。

Taiwan Earthquake (Mw=7.5)

Hypocenter: 23.82N 120.89E 12km



[<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tai/tai.html>より引用]

図5 集集地震の震源過程のメカニズム (CTM)

3. 2 地震断層の諸元

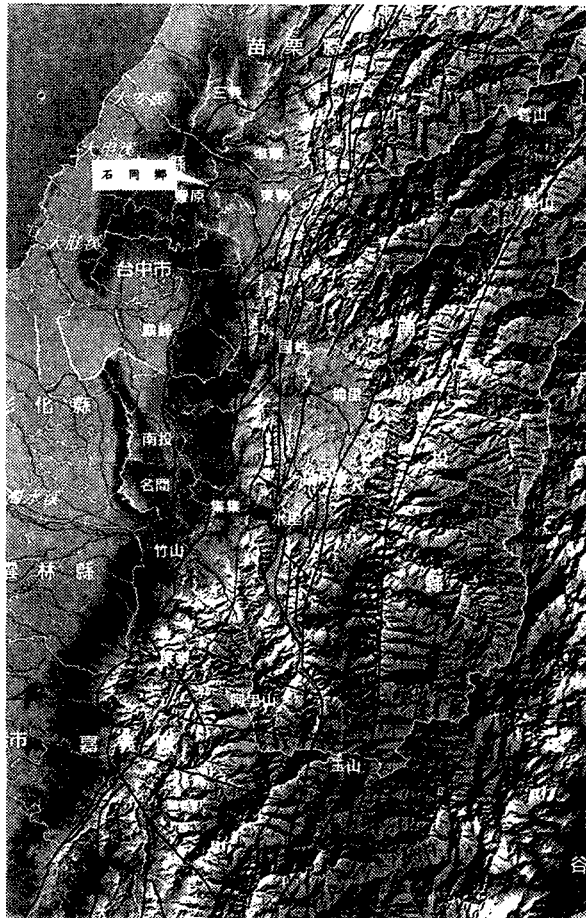
- (a) 東西圧縮の低角逆断層
- (b) 初期破壊点(震源): 23.82度N, 120.89度E
- (c) 深さ: $H = 11\text{km}$
- (d) 走向, 傾斜角, すべり角 = (26度, 27度, 82度)
- (e) 最大のアスペリティ(ずれ): 震源から約30-40kmほど北にあり, 最大のすべり量は約6mである。全体平均くい違い量は, 2.2mである。
- (f) 破壊速度: 約 2.5km/s
- (g) 破壊継続時間: $T = 28\text{s}$
- (h) 主破壊の断層面積: $S = 80\text{km} \times 40\text{km}$
- (i) 全地震モーメント: $M_0 = 2.4 \times 10^{20}\text{Nm}$ ($M_w = 7.5$)

3. 3 地表面に表れた断層変位

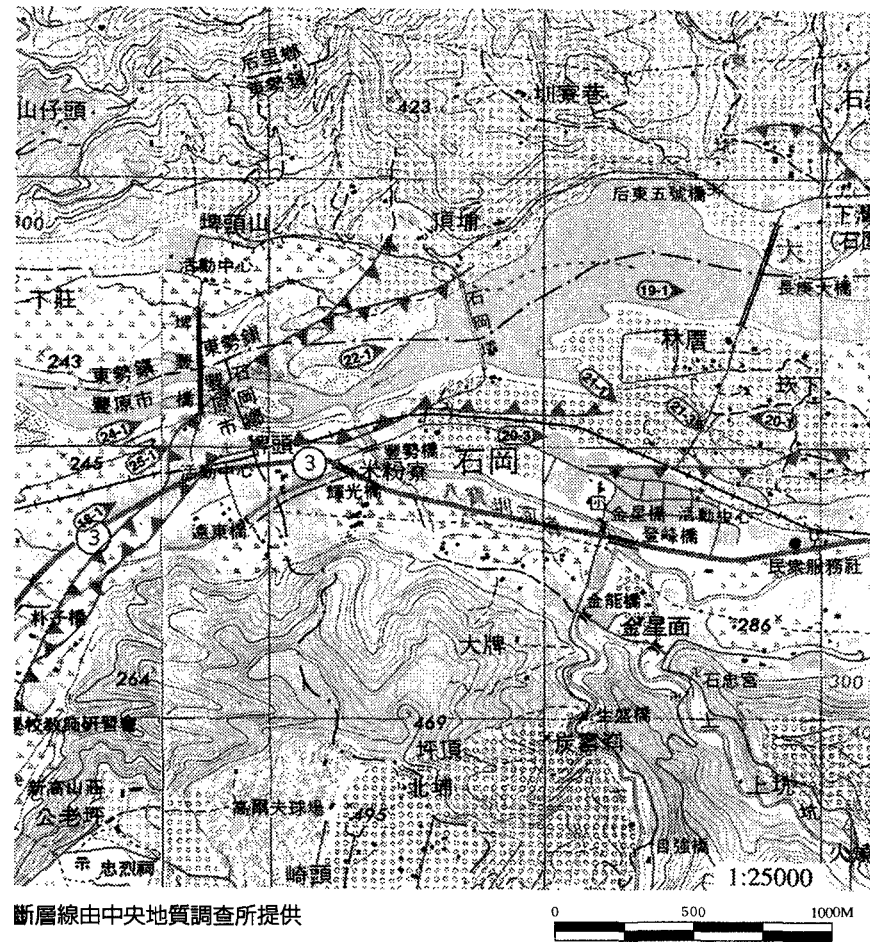
- (1) 南投県竹山から台中県豊原にかけて、縦ずれ

成分に富んだ地表地震断層が出現し、長さ80kmに及ぶ。断層の方向は、ほぼ南北で、東側が西側に対して約2m~10mほど隆起しそこには、既知の車籠埔断層が存在し、これが動いたものと考えられる。

(2) 車籠埔断層に沿って地表に現れていた地震断層は、台中県豊原市のあたりで東に大きく方向を変え、石岡地区を横切り、石岡取水堰下流左岸から大甲溪河床を横断し、ダム右岸に抜けている(図6, 図7)。しかし、この断層の延長は、1本の筋ではなく、枝分かれする(A-line, B-line, C-line)など、複雑な様相を呈している(図8)。このため、大甲溪川床が隆起(A-line: 約5m)し、滝を作った(写真1)。また、石岡取水堰では、長さ360mの堰の右岸部を断層(C-line)が横切りに、取水堰の一部が崩壊し約10mの段差を生じた。また、断層が横切った部分で、断層変位により、大甲溪およびその支流に架かる幾つかの橋梁(長庚橋、石圍橋、稗豊橋の倒壊)被害が見られた(写真2)。しかし、



中央地質調査所提供



斷層線由中央地質調査所提供

図6 地表に表れた断層変位(台中県石岡郷)(文献6)

岩櫃・古嶺：台湾集集地震土木構造物の被害と特徴

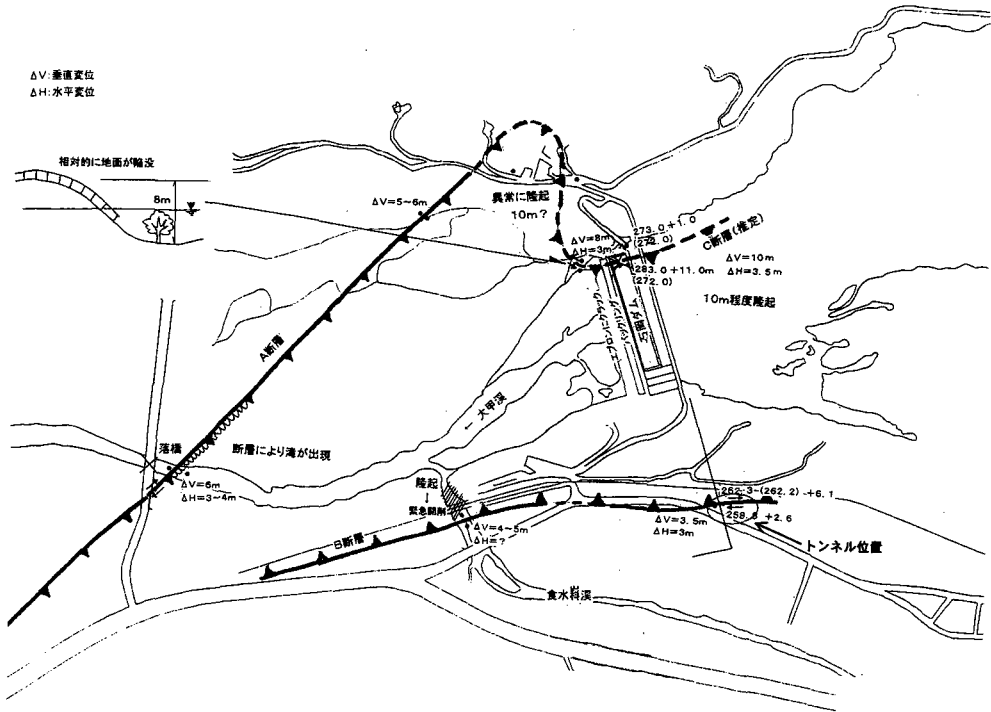


図8 地表に現れた断層変位（石岡ダム周辺）（土木学会調査団、ダムグループ）

構造物が地震動により大きな応答を示し崩壊した形跡は見られない。

(3) ダムから豊原浄水場にいたるRCコンクリート導水路トンネルは、断層変位（B-line：約4m）により、切断され、軸方向に約50cmほど圧縮された形跡がある。また、豊原－石岡に至る道路においても、断層（B-line）が横切った形跡があり、東側が約5m～7.0m隆起、道路東に約3.75m左ずれ、道路に埋設されていた直径2m管厚2cmの水道管が被害を受けた（写真3（a),(b)）。また、蘭の栽培畑が断層により東側約7m隆起、栽培畑周囲の塀が破損したが、断層線数十m離れた蘭の栽培畑上の民家には被害がなかった（写真4（a),(b)）。

(4) 台中市大坑では、3mの上下変位と4mの横ずれが生じ、断層上の建物が倒壊した。

(5) 台中県霧峯では、垂直変位約2m、水平変位約1mの断層が、幸福小学校の校庭を横切った（写真5（a),(b),(c)）。この地域では、地表付近に沖積層が存在しており、断層変位による斜面や建物の

被害（写真6）だけでなく、震動による被害（小学校の校舎）も見られた（写真7（a),(b)）。

(6) 内湾地区においても、断層の隆起（東側約2m程度）が確認された。断層の直上の新築家屋の被害が見られるが、断層から、約10m程度離れた部分では、家屋もブロック塀にも被害はなく、表層地盤の地震動の増幅は殆ど無かったものと推定される（写真8）。

(7) 草屯地区においても、断層が確認された。断層に沿って、東側が隆起しているが、傾斜は緩やか（5度程度）である。断層による食い違いは、2mから3m程度である。この地域は、表層部分に粘性土等が堆積していると思われる。断層の表れ方は、1本ではなく、かなり複雑（縞状に波を打って地表に表れている）であると推定される。この付近（富林路2単道路）では、断層方向に直角の道路（EW方向）沿いの家屋の大部分が1階部分がせん断破壊により崩壊し東側に傾斜していた（写真9）。建物の被害は、断層近傍に集中しているが、この付近

の地表面の最大加速度は、0.33gであり、地震動による影響もあると考える。

以上のように、今回の地震では、断層直上（直近）に地震被害が集中しており、それ以外の部分では、被害が比較的小さいことが特徴である。

4. 観測された地震動

台湾では、気象局の地震センターでは、約700地点の地盤上、約50カ所の建物および橋梁でリアルタイムアレー地震観測を実施している。また、台湾電力では、羅東および花蓮において、東京電力、電力中央研究所、アメリカEPR Iと協力して地表面アレー観測を実施している。

(1) 図9および表4に、中央気象局（CWB）の主な地震観測点の最大加速度を示す。また、図10は、CWB観測点の観測波形のPGAコンター（EW成分）を示したものである。NS方向、EW方向とも最大値分布は南北方向に長い形状を示した。最大値は、NS方向成分とEW方向成分を比較すると、

EW方向の方が大きく、震源に近い南投市（観測点WNT）で、973.4gal、台中市（TCU129）で984gal、台中市（TCU84）で、989.2galを記録した。NS方向成分は、EW成分の約60% - 50%であり、また、上下動成分は、30%以下となった。上下動成分の最大加速度は、台中市（観測点TCU068）で、519galとなった。

(2) 図11と図12は、台中市の観測点TCU78、およびTCU129で観測した加速度波形とその加速度スペクトル(5%)を示したものである。TCU078NS成分の加速度スペクトルは、0.1~0.5秒においてほぼ1Gであり、EW成分は、それ以上で、特に、1.5G以上となっている。一方、TCU129NS成分も、0.2秒付近において1.5Gに達している。EW成分は、0.1~0.6秒においてNS成分を上回り、1.5G~2.0Gに達している。

(3) 図13に国立中興大学で観測された加速度波形を示す。また、図14は、その加速度スペクトル、

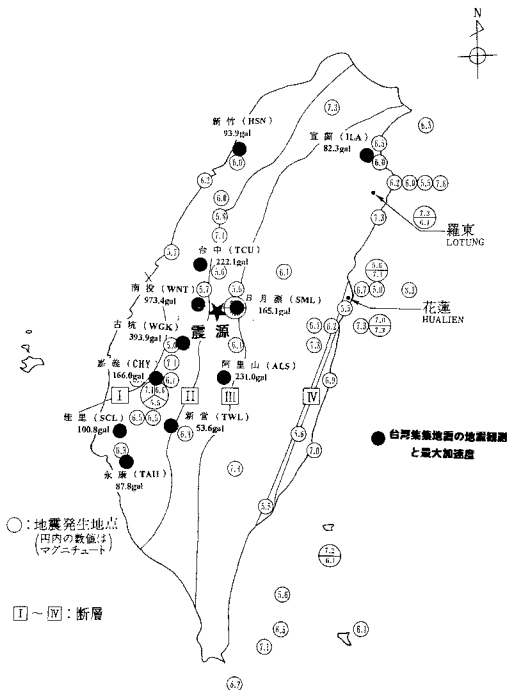
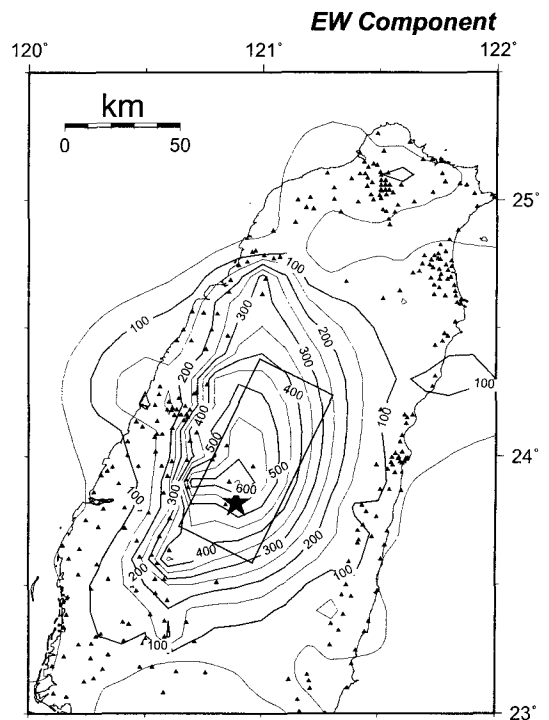


図9 台湾集集地震の主な観測点と最大加速度



(財) 電力中央研究所提供

図10 CWB観測点の観測波形のPGAコンター

表4 台湾中央気象局による加速度最大値（単位：cm/sec²）（文献3）

Sta. Name	Location	E. D. (km)	PGA(V)	PGA(N)	PGA(E)
TAW		165.5	3.6	5.7	5.5
TAP	台北	150.2	14.2	41.7	58.9
TTN		126.2	14.5	29	29.3
PNG		131.7	14.7	33.1	29.6
HSN		106.7	26.7	80.4	54.1
NST		88.7	122.2	391.3	305.4
ALS		37.6	86.2	145.9	213
HWA		82.1	42.6	108.1	119.2
WNT		13.2	311	602.4	921.1
WSF		64.4	32.1	67	107.2
TCU	台中	35.7	118.7	187.1	201.4
STY		76.3	20.1	39.3	36.8
ESL		63.6	56.5	72.3	66.5
CHY006	嘉義	39.6	211	351.5	348
TCU145	台中	49.2	52.1	60.2	69.5
CHY104	嘉義	40.4	129.6	177.1	142.9
TCU141	台中	35.3	107.2	88.6	86.5
CHY036	嘉義	43.2	104.4	199.6	266.9
TCU078	台中	5.5	171	302.4	439.7
TCU052	台中	39.2	194	438.7	348.7
TCU102	台中	45.1	173.3	168.9	298.4
TCU053	台中	40.7	120.9	132	224.8
TCU049	台中	38.5	178	242	273.4
TCU068	台中	47.6	519.4	361.9	501.6
TCU122	台中	20.8	236	255.7	207.5
TCU076	台中	15.1	275.4	420	340.2
TCU054	台中	37.1	132.9	190.4	143.2
CHY024	嘉義	23.1	141.4	162.1	276.4
CHY028	嘉義	31.8	335.5	749.9	624.2
CHY025	嘉義	31.1	169.7	152	158.6
TCU079	台中	8.6	383.8	416.9	579.8
TCU065	台中	26.1	257.7	563.3	774.4
CHY029	嘉義	38.8	157.5	233.2	283
TCU113	台中	43.4	80.2	72	69.6
TCU119	台中	51.4	60.2	52.6	62.7
TCU055	台中	35.3	153.3	208.2	256.9
TCU075	台中	20	223.9	257.3	325.4
TCU074	台中	19.7	270.1	368.4	585.9
TCU072	台中	21.5	274.6	370.5	465.2
TCU067	台中	28.3	230.6	312.7	488.8
TCU089	台中	7.6	190.2	225.3	347.8
TCU082	台中	35.7	129.3	182.5	221
CHY101	嘉義	31.1	162.2	390.2	332.7
TCU129	台中	13.2	335	610.7	983
TCU084	台中	9.9	311.7	422.8	989.2

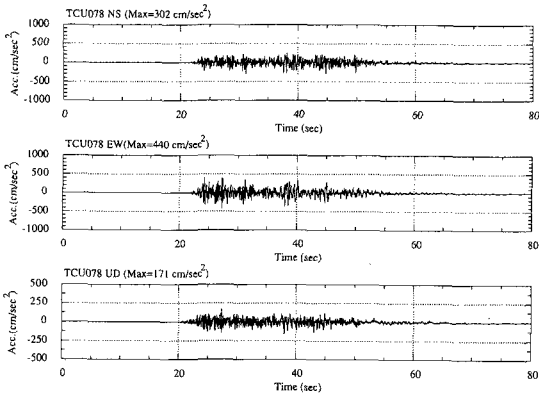


図11(a) 観測波形-1 (TCU078 加速度記録) (文献3)

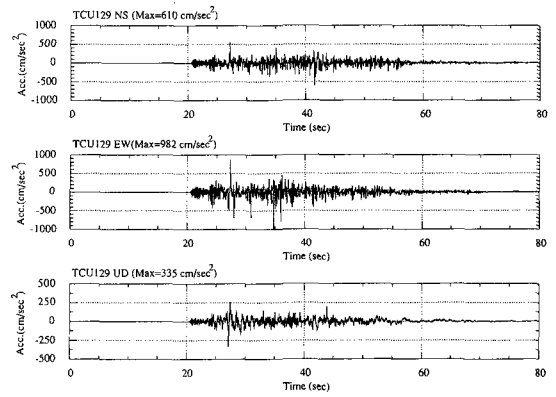


図11(b) 観測波形-2 (TCU0129 加速度記録) (文献3)

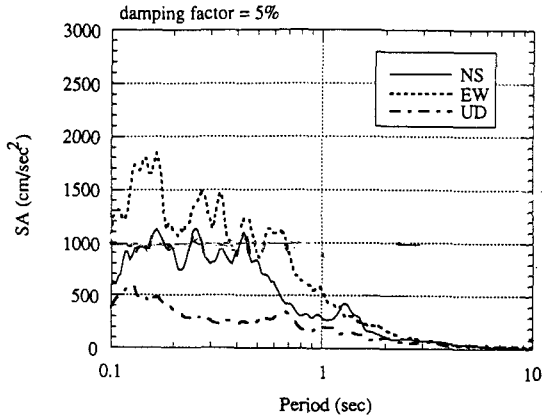


図12(a) 観測波形-1 (TCU078 加速度記録) の加速度スペクトル (文献3)

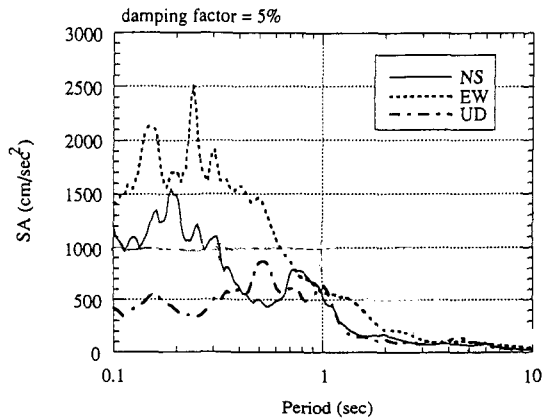
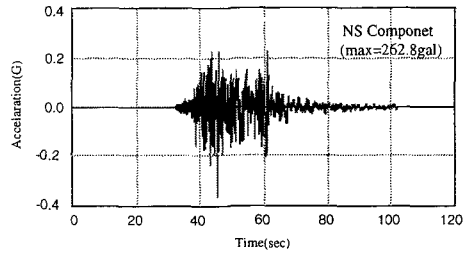
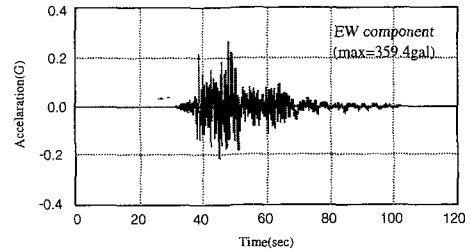


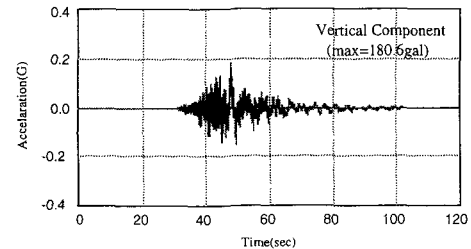
図12(b) 観測波形-2 (TCU0129 加速度記録) の加速度スペクトル (文献3)



(a) NS Component

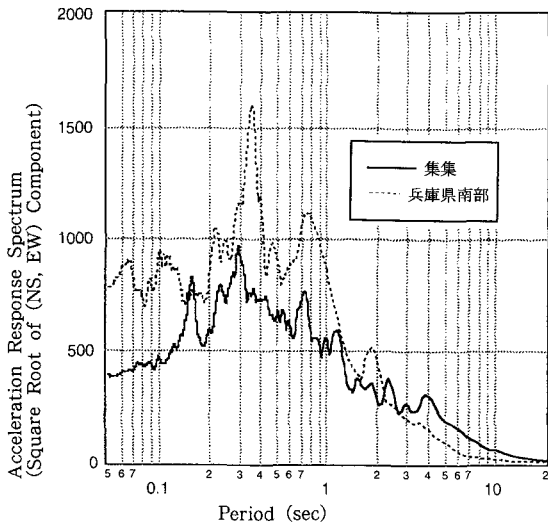


(b) EW Component

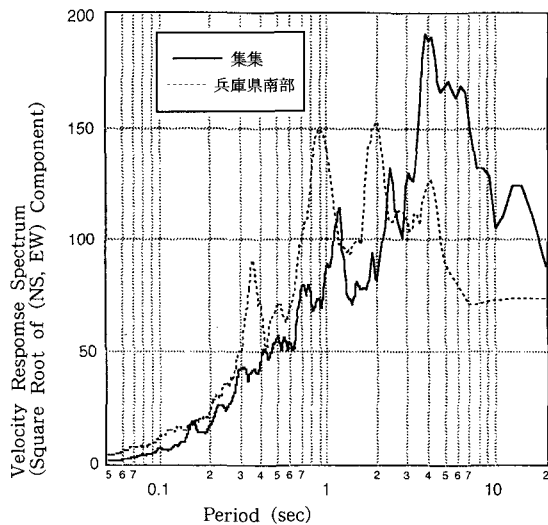


(c) UD Component

図13 国立中興大学における強震記録 (文献1)



(a) 加速度応答スペクトルの比較 (水平成分)



(b) 速度応答スペクトルの比較 (水平成分)

図14 国立中興大学における強震記録の加速度スペクトル、速度スペクトルと兵庫県地震のポートアイランド観測波形(−83m)のスペクトルの比較(文献1)

速度スペクトル(5%)を1995兵庫県南部地震のポートアイランド(GL−83m)の記録と比較したものである。速度スペクトルを見ると、2秒以上の長周期帯域で、神戸の記録の2倍以上の値を示した。(4)各観測点の地震動特性を比較すると、震央近

傍では、高周期の卓越した比較的継続時間の長い波形となっているのに対し、震央より南側では継続時間が短い短周期成分が卓越する傾向がある。また、震央より北側では、震央距離が増加するに従って長周期側へ卓越振動数が移動する傾向がある。これらの特性は、断層の破壊過程や観測点の地盤特性に依存しており、今後、これらのデータを用いて、震源過程の詳細な研究を行い解明する必要がある。

5. 地震被害の概要

5.1 調査地点

主な調査地点は以下の通りである(図15)。

①内湾・食水坑, ②石圍橋, ③石岡取水堰、石岡ダム水道用導水路トンネル、橋梁, ④東勢, ⑤豊原, ⑥新社, ⑦大里, ⑧霧峯市内、幸福中・小学校グラウンド, ⑨草屯, ⑩中興新村, ⑪南投, ⑫中寮開閉所, ⑬集集, ⑭濁水溪(集集―水理―日月潭)の水力発電施設, ⑮濁水系、烏溪沿いの道路トンネル(柑子林、育楽隊道) ⑯埔里, ⑰名間, ⑱国姓の鉄塔被害, ⑲大甲溪沿いの中部横貫道路(8号線)の山岳トンネル(裡冷隧道, 馬陵第2隧道), ⑳天輪開閉所等
ここでは、主として、土木構造物の被害とその特徴について述べる。

5.2 被害の概要

(1) 橋梁の被害

道路橋に関しては、被災後、台湾交通部・国立中央大学による調査が行われ、台湾中部地区の省道3, 16, 14, 21, 63, 127, 149甲の全路線754橋中、大破10橋(内通行止め6橋、速度制限4橋)、補強を必要とするもの10橋であることが報じられた。

土木学会では、大破した10橋梁を中心に、3号線沿線の、北から、石圍橋(大甲溪支流)、東豊橋(大甲溪)、烏溪橋(烏溪)、猫羅溪橋(猫羅溪)、南崗大橋(猫羅溪)、名竹橋(濁水溪)、延平橋(濁水溪支流)の7橋、136号線の一江橋(頭汀溪)、14号線の炎豊橋(烏溪)、軍功橋(猫羅溪)、16号線

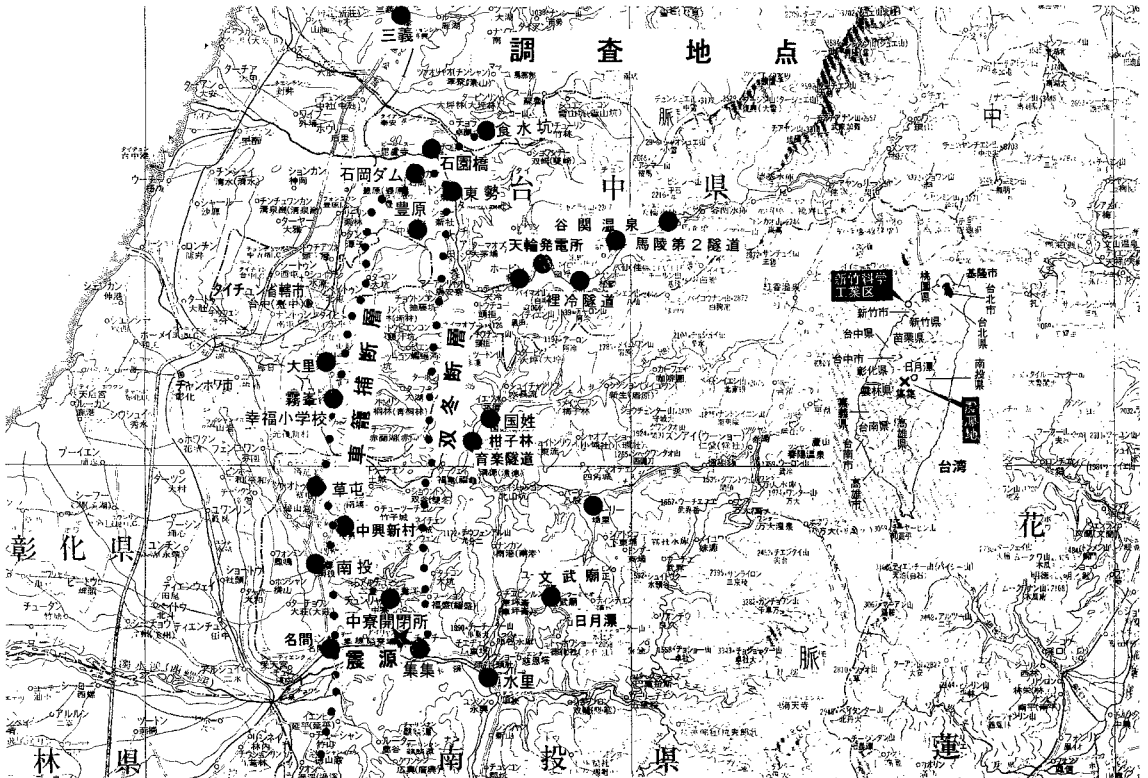


図15 地震被害調査地点

の磨杭2橋、龍泉溪（濁水溪支流）および、断層近傍で特徴的な被害見られた稗豊橋（大甲溪）、長庚橋（大甲溪）を調査した。また、震源地集集周辺において建設中の集鹿大橋（PC斜張橋：濁水溪）、林尾橋（鋼アーチ橋：濁水溪支流）の調査を実施した。これらの橋梁は、台湾の現行設計基準では、比較的地震危険度が低いとされる第2区（図16）に属しており、設計用応答加速度は、 $0.23g$ である。

(1) 被害の特徴

橋梁の被災パターンとしては、①主として断層変位や過大な地盤変状に起因するものと②主として過大な地震動によるものに大別できる。

①断層に起因する被害

石圍橋、稗豊橋、長庚橋などの橋梁は、断層の直撃あるいはその近傍を通過した断層により、大部分が、落橋や橋脚の倒壊などの大きな被害を受けた。

(a) 写真10 (a),(b) に、稗豊橋の被害を示す。

本橋梁は、石岡ダム下流にある多径間の鉄筋コンクリート単純橋（1991年1月竣工）である。本橋梁の左岸部に断層の通過地点があり、上流約10mの河床部分に滝が出現しており、断層の規模は段差約10m以上である。このため、左岸側の橋脚が倒壊、3スパンの桁が落橋している。しかし、断層が横切っていない部分での被害は軽微であり、自動車の通行も可能である。

(b) 写真11 (a),(b) に、石圍橋の崩壊・落橋の被害を示す。本橋梁は、石岡ダム上流（東方）3号線にある5径間の鉄筋コンクリート造単純橋である（1994年9月竣工）。断層により橋梁の左岸東側が隆起（5m程度）し、このため、橋脚が倒壊し落橋したものと考えられる。

(c) 写真12に、長庚大橋の被害を示す。本橋梁は、石岡取水堰上流約2kmにある鉄筋コンクリート造の単純橋である。断層により左岸側の部分で落橋の被害が見られた。しかし、断層から離れた部分

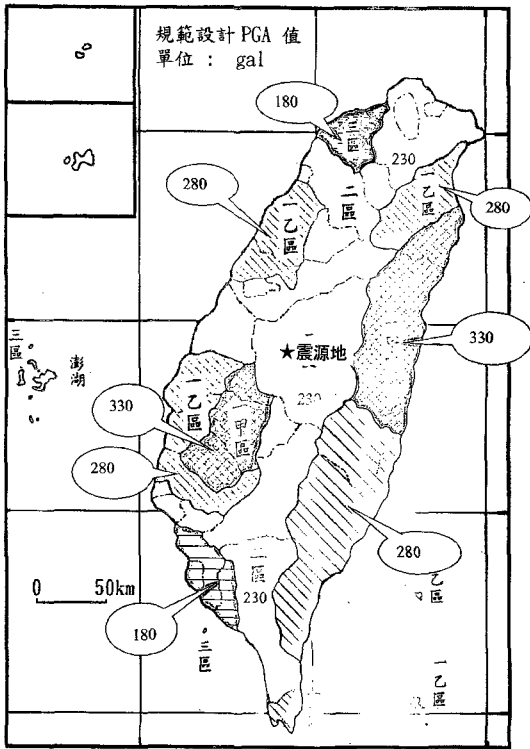


図16 台湾地区別耐震設計基準値
(規範設計PGA値：単位gal) (文献1)

は、橋梁の上部床板が橋軸（南北）方向に圧縮を受け座屈（変位量：約10cm）している程度で大きな被害ない。

以上から、被害の大部分は断層直上あるいは極近傍に集中していることが明らかとなった。

②過大な地震動による被害

東豊橋、猫羅溪橋（写真13）、集鹿大橋などは、断層の直撃を受けておらず、地震動により被害を受けたものとする。被害の特徴としては、鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊、圧縮破壊などである。また、震源に近い集鹿大橋では（建設中の prestressed concrete 斜張橋と8径間 prestressed concrete 桁橋）、強い地震動により、鉄筋コンクリート製主塔と中央部 prestressed concrete 桁が水平方向に回転し、接合部で圧壊が生じる被害がみられた。過大な地震動による被害の橋梁では、橋脚などに甚大な損傷を受け交通制限はなされたが、崩壊や落橋等壊滅的な被害に至

ているものは少ない。

(2) 石岡取水堰(Shih-Kang Dam)の被害

石岡ダムは、台中県石岡郷の大甲溪（Ta-Chia River）の下流に位置し、堤高25m、堤長357mの重力式コンクリートダムである。1974年10月31日に竣工し、1977年10月15日に完成した（総工費480million dollar）。ダムは、右岸側より左岸側にかけて18門の取水堰と2つの調整用洪水ばきを有するが、一番右岸寄りの取水堰4門（洪水吐No.15）のところに、前述の地震断層（C-line）が通過し、取水堰の4門の破壊を生じさせている（写真14 (a),(b),(c),(f) 写真1）。河床の左岸側が露出などから左岸側が隆起したものと考えられる（写真14 (d)）。台湾経済省水利処が地震後に測量した結果では、左岸側の洪水吐No.15の天端で約11m、右岸側非越流部で約1m隆起しており、結果的に10mの段差が生じたことになる。また、右岸側の詳細調査から、取り付けコンクリートも2m程度ずれており、下部の水平打ち継ぎ目からも漏水している。しかし、取水堰の断層から離れている部分では、クラック等はあるが大きな被害に至っていない（写真14 (e)）。

(3) 石岡ダム～豊原給水廠に至る導水路トンネルの被害

断層通過点のトンネルの被害隆起側（写真15 (a),(b),(c)）、元の部分（写真16 (a)）、導水路トンネル内の被害（写真16 (b)）、および取水堰とトンネルの連結部付近の被害（写真17）を示す。導水路トンネルは、高さ3.7m、内径3.8m～3.2m、コンクリートの巻厚70cm、H型鋼（15cm×13cm,t=10m/m）が支保工として、約60cm毎に埋め込まれている。トンネルの土かぶり、約5mである。断層（B-Line）が導水路部分を横切っており、通過地点で、約4mの段差（東側が隆起）が生じ、トンネルが切断されている（写真15 (a)～(e)、図17）。また、断層部から石岡ダムに至る導水路トンネル内には、三箇所打ち継ぎ目があるが、軸方向（断層通過点から石岡ダムの方向）に圧縮を受けたため、その影響で、その部分で幅約10cm以上

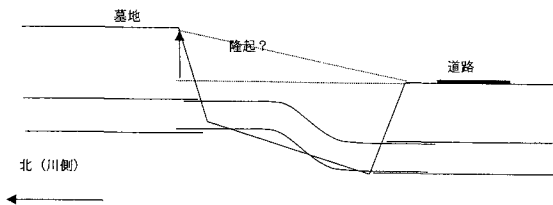


図17 石岡ダム～豊原給水廠に至る
導水路トンネルの断層の被害

の亀裂が全周に生じている（写真16（b））。さらに、導水路とダムの取水堰の連結部にも亀裂が生じている（写真17）。また、導水路トンネルの復旧状況を写真18に示す。

（4）電力設備の被害（文献4）

電力施設としては、送電鉄塔と変電所・開閉所の被害が大きく、水力発電所の被害は軽微、火力・原子力発電所は、台中火力発電所の機械設備に被害があった以外は殆ど無被害であり、配電線は、建物倒壊などにより他動的に被災が多い。表4に、台湾電力の設備の概要と被害に関する数値データを示す。

（1）水力発電所の被害

被災地域では、北側の台中県大甲水系の下流から、馬鞍、天輪、谷関、青山、德基までであるが、今回の調査では、馬鞍、天輪について調査した。谷関より上流は通行止めのため調査できなかったが、台湾電力から得た情報では、ダムおよび発電設備には被害はなく、付帯の変電設備に被害が集中しているとのことであった。

一方、南側の濁水水系では、明潭と大観二廠の揚水（上部湛水池は、両者共通日月潭）が2カ所、大観一廠などの水力発電所がある。発電器と水圧鉄管などに一部被害はあるものの、ダムの被災程度は小さい。日月潭の水社ダム（RCセンターコアフィルタイプダム、上流勾配1:3）は、表層が5cm程度沈下しているが構造的には問題がない（台湾電力に確認）。台湾電力の地震観測結果によると、明潭ダムと大観ダム（揚水発電所下部ダム）で、それぞれ、最大加速度は、400gal、477galであった。

（2）変電所・開閉所の被害

（a）中寮開閉所の被害（N23/53/17, E120/46/12）を写真20（a）～（d）に示す。

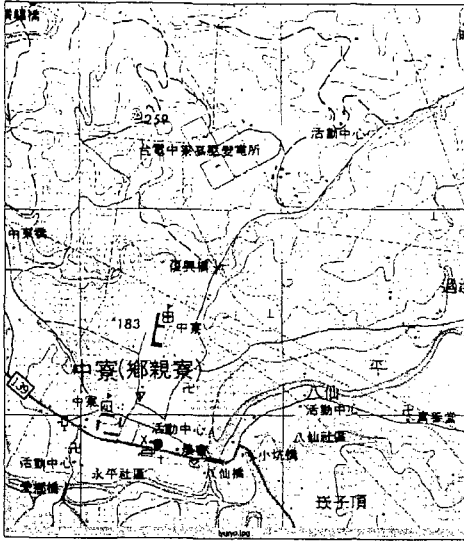
中寮開閉所は、丘陵地にあり、北側が約20m程度高く、北から南にかけて緩やかな勾配がついている。345kvの4系統の開閉設備を有している（図18, 図19）。これらの変電設備の大部分が地震により大きな被害を受けた。被災の原因は、地盤震動と構内に生じた断層（N20W方向の亀裂が確認）による地盤変状と考えられる。表層の砂地盤（盛土）の一部が液状化していた。地盤変位は最大で水平に1.4m（右ずれ）、東側が約1m～1.5m程度盛上がっている（写真20（a））。このため、地下に埋設してある制御関連のケーブル用コンクリートダクト（幅1m、深さ1.1m）が、完全につぶれていた（写真20（b））。変電機器、碍子の大部分が破損した（写真20（c））。また、変圧器基礎も100cmから150cmずれていた。送電線受け入れのための鉄塔基礎が一部浮き上がっていたが、当面の送電には支障が無いようであった（写真20（d））。復旧のための変電機器の取り替え作業を実施していた。

絶縁用ガス管（直径50cm）が、構内に南側に6条に設置されていた。13.5mに1箇所割合で設けられていたフレキシブルジョイント（長さ約20cm、7本）により、1m程度の地盤変状に対して管体の破断はない（写真20（e）、（f））。ただし、機能は確認されていない。

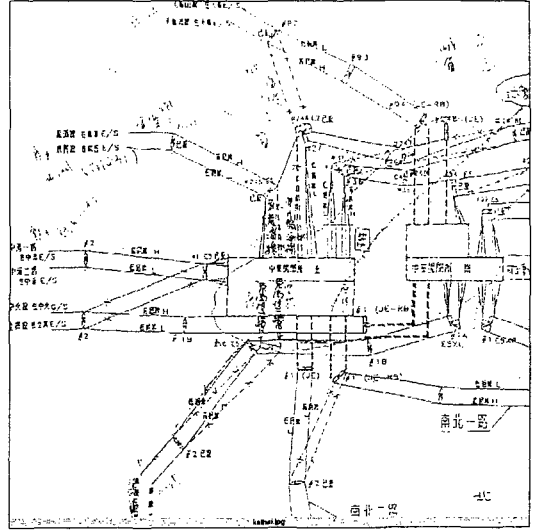
（b）天輪発電所の超高圧変電機器の被害を写真21（a）～（b）に示す。

変電所は河川脇の発電所と隣接した敷地にあるが、約10mほどの切土の上にある161kvおよび345kvの変電機器が大きな被害を受けた。161kv系統の復旧作業は、ほぼ完了していたが、345k系統の復旧は、全くされていなかった。

碍子、フッシング等変電機器の被害の他、変圧器のオイル漏れ（ショートが原因のオイル漏れとの説明）が観察された。変圧器基礎（6m×8m×1m）には、沈下、傾斜などの大きな被害はなかった。被害の原因は、振動によるものと考えられる。また、変電所の上の地山では斜面崩壊が見られるが、変電所の約10mの幅の切土部分で1部の崩壊があったものの電機器に影響があるような大きな



(1) Location Map (one Km meshes)



(2) Plan View

図18 中寮開閉所の平面図

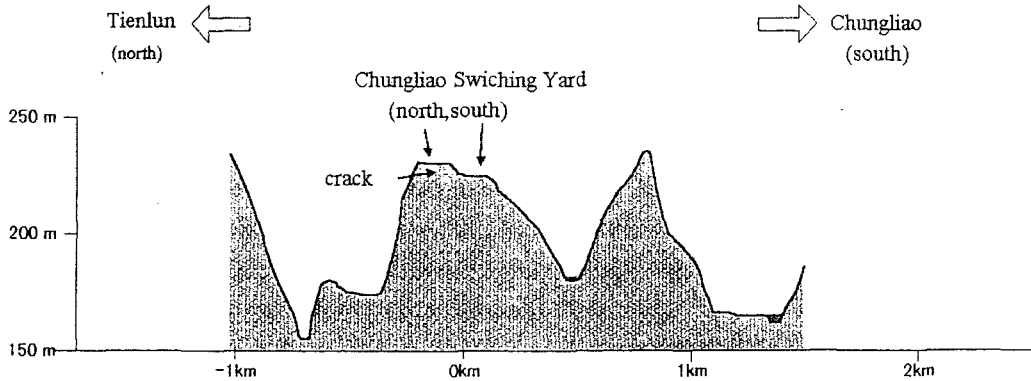


図19 中寮開閉所の断面図

被害ではない。地盤の被害としては、変電機器支持地盤の沈下（10cm程度）、クラック（数cm程度）である。

(3) 送電設備の被害

台湾電力の調査によると、中寮開閉所から峨眉に至る第2ルートで、約200基が被災している。主な被災原因は、基礎地盤の変状による鉄塔全体の傾斜、倒壊により、碍子損傷や電線の切断・短絡であった。送電線の応急復旧は、基礎部分補修せずに、倒壊した鉄塔および大きく傾斜した鉄塔の横に山形鋼を組み合わせて仮鉄塔をアースアンカーで固定し行っていた（写真22（d））。

倒壊した国姓の送電鉄塔（#203）の被害を写真22（a）～（d）に示す。本鉄塔は、懸垂型鉄塔で斜面に建設されている。基礎形式は4本基礎で、斜面の山側に2本、谷側に2本で、基礎レベルには約4m段差がある（図20、図21）。鉄塔は線路直角方向谷側に根本から倒壊している（写真22（a）、（b））。基礎部は比較的健全であり、角錐の4脚の内、山側の1脚が、約2m程度露出している（写真22（c））。周辺斜面では至る所で崩落が発生しているが、断層らしきものは、発見されていない。鉄塔の被害の主要因は、地震動による地盤変状、斜面崩壊により基礎の変状（移動）と思われるが、断層との

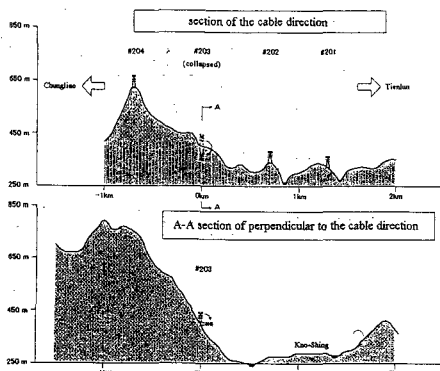


図20 国姓地点の転倒した送電鉄塔（# 203）の設置状況（文献2）

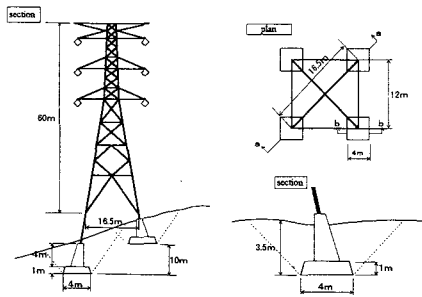


図21 国姓地点の転倒した送電鉄塔（# 203）の基礎（文献2）

関連について今回の調査では明らかにされておらず、今後詳細な調査をする必要がある。

送電鉄塔は、日本と同様、風荷重で設計が決まっており、今回のように地震による被害は、予想外であり、今後詳細な原因の究明と設計やルートの見直しが必要と考える。

(5) トンネルの被害

今回、山岳トンネルの被害調査として、以下に示す2カ所を中心に実施した（図22）。

(a) 大甲溪沿い（東勢－天冷－天輪－谷關－馬陵に至る）の中部横貫道路（8号線）トンネルの被害調査

(b) 濁水溪沿い（集集－水里－日月潭に至る）の16号線、21号線および日月潭から埔里、国姓に至

る14号線の道路トンネルの被害調査

また、(c) 内湾地区の老莊溪、食水坑のボックス型地下道および名竹橋のボックスカルバートの被害についても調査した。

さらに、ここでは、(d) 三義トンネルの被害についても合わせて示す。

(1) 被害の概要

(1-1) 大甲溪沿い中央横貫道路の山岳トンネルの被害

本調査では、5カ所の道路トンネルについて調査した。この地域では、道路沿いに、斜面崩壊、落石などの被害が多く見られた。特に、天輪以東の山岳道路では、谷關温泉付近など大規模な斜面崩壊が生じており、道路が寸断され不通の状態であった。周辺の山岳地域の被害状況、断層の存在などは明らかでないが、調査したトンネルを横切る断層は確認されていない。これらの山岳トンネルの被害の主原因は、周辺地山の振動による斜面崩壊、地滑りによるものと推定される。

(a) 写真23(a)は、天輪発電所付近の、裡冷トンネルの被害状況を示したものである。坑口部では覆工が施されているが、トンネル内部は、覆工されおらず素堀の状態では岩盤が露出していた。トンネルの被害としては、斜面崩壊（表層滑落型崩壊）により坑口付近で若干の損傷を受けているが、地震によるトンネル内部の損傷はほとんどない。

(b) 写真23(b)は、さらに上流の馬陵2号トンネル（2車線、内径約7m）の坑口の被害を示したものである。この付近では、大きな斜面崩壊があり、トンネルの坑口が崩落した土砂で埋まった状態であった。坑口付近では、トンネル周辺の地山の表層滑落型崩落により損傷を受けていたが、トンネル内部の覆工被害は大きくなかった。

(c) 写真23(c)は、同馬陵2号トンネルの内部被災状況を示したものである。山側側壁の覆工コンクリートにひび割れが生じている。また、この部分では、トンネル下部の排水溝が圧縮破壊し、上蓋が跳ね上がった状態であった。しかし、その他の部分では、顕著な損傷は見られなかった。トンネルは、地震時に周辺の地山よりせん断力を受けたと推定されるが、トンネルが崩壊に至るような

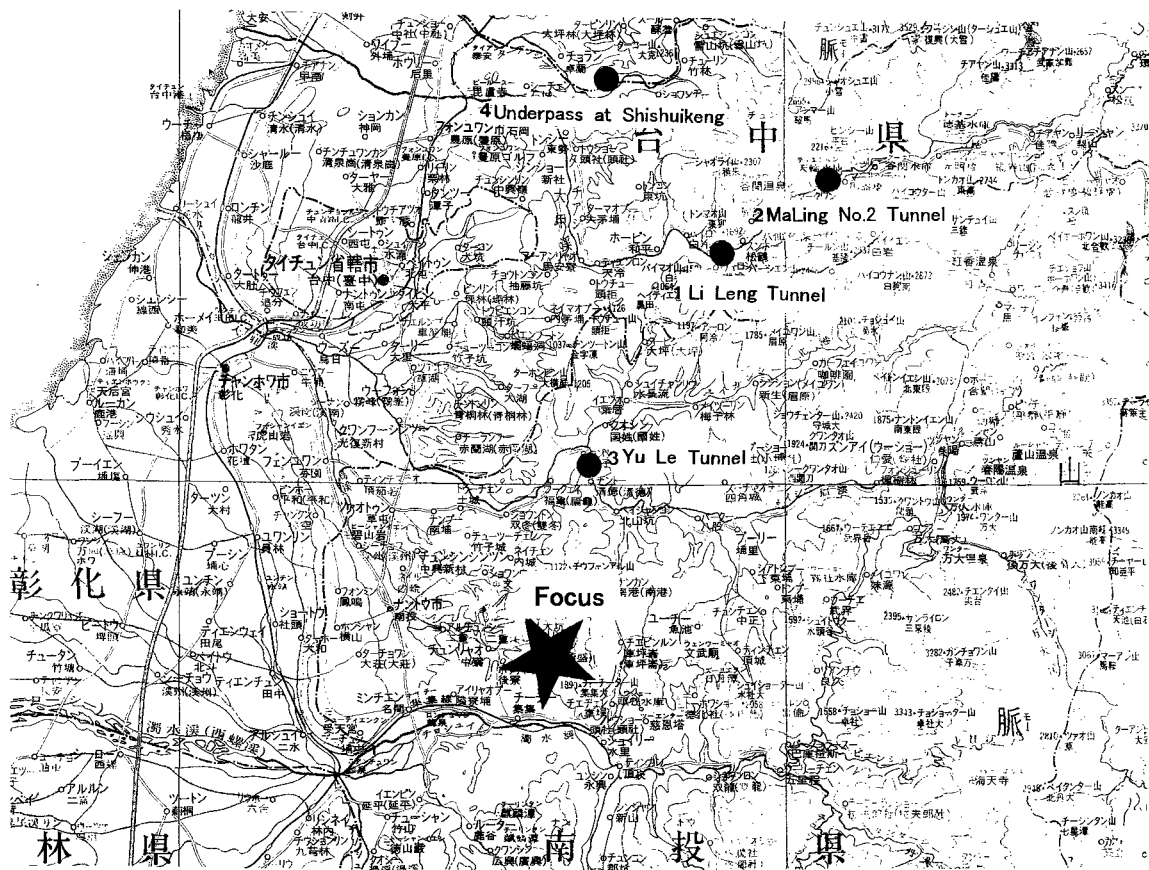


Figure 4.3.2.1 Location of Investigation Points

図22 山岳トンネルの地震被害調査地点

大きな被害には至っていない。

(1-2) 濁水溪、烏溪の山岳トンネルの被害

写真23(d)は、埔里から国姓に至る14号線の育楽トンネルの被害状況を示したものであるが、トンネル坑口やトンネル内部の損傷はなかった。この地域においては、大甲溪地域に比較して、周辺の地山の斜面崩落や落石が少なく、これが1つの要因としてトンネルの被害が無かったものと思われる。

(1-3) 食水坑地下道の被害(写真24)

内湾地区の老莊溪沿いの食水坑においては、通行用地下道(ボックス型:寸法:長さ:5.0m,縦:2.4m,横:2.0m,壁厚:20cm)が大きな被害を受けた。構造体側壁上部に軸方向にせん断クラックが生じているが、崩壊に至ってない。河川上流側を調査すると、断層により河床が約5m隆起して

いることが確認できた。断層に伴う河床の隆起により、アプローチの道路取り付け部(写真左側)と橋桁取り付け部に段差が生じ、このため、構造体が大きなせん断変形を受け崩壊したものと考えられる。(1-4)集集ダムの導水路トンネル(写真25)

名間と竹山を結ぶ名竹大橋の竹山側の橋台の脇に、建設中の導水路トンネルがある。この導水路は、集集ダムからの導水路で、構造形式は2連ボックスカルバート(寸法:幅11.4m,高さ5m,壁厚1m~0.5m)である。今回の地震では、この付近で、名竹大橋を横切る断層が確認されており、これにより、名竹大橋は、竹山側の橋桁の落橋および橋台に大きな被害を受けた。しかし、本ボックスカルバートには、ほとんど被害がなかった。ボックスカルバートに被害がなかったのは、断層の生じた位置が、カルバートと離れていたことおよび建

設中のため、土被りがなく、地震時に周辺地盤の振動や上載土の影響（せん断土圧等）を受けなかったことによるものと考えられる。

(1-5) 三義トンネルの被害（写真26）（文献7）

新縦貫鉄路の三義第1トンネルは、車籠埔（Chelungpu）断層の延長上にあるが、詳細な地盤調査に基づき、当初の計画線を変更し、大変形が生ずると予想される断層部を避けて再計画され1998年に竣工された。今回の地震では、覆工のひび割れや天端の落下、軌道変状（30cm程度）が生じたが、断層の影響は小さく、大きな被害には至っていない。被害の主要因は、地震動によるものと考えられる。トンネルの補修・補強作業は、裏込め注入後、ロックボルト（L=3m, 直径30cm, etc. 1.2m）+吹きつけコンクリートで行ったとのことである。

(2) まとめ

(a) トンネルの被害も橋梁同様、断層の通過点やその近傍付近に集中しており、断層変位に起因することによるものが大部分である。断層から離れた部分では、大きな被害は殆ど無い。

(b) 山岳トンネル被害として、地震動による周辺地山の表層滑落型崩壊による坑口部の損傷が見られたが、トンネル内部では、大きな被害は無かった。これらのトンネルの位置が断層から外れていたことと、また、トンネル断面が円形に近く閉じた系になっており、トンネル自体の安定性が、坑口斜面に比較して高いことによるものと考えられる。

今回は、山間部においては、大規模な斜面崩壊や地滑りが生じたため道路不通の状況であり、山岳トンネルの詳細調査が出来なかった。今後、断層位置と被害の関連など十分な検討が必要がある。

(6) 液状化の被害（文献5, 6）

台中港、鹿港、大肝溪流域下流の彰化市の河川敷、南投市および中寮開閉所等で液状化が発生した。

(1) 台中港では、液状化により、重力式ケーソンの移動、傾斜、およびケーソン背後地盤の沈下などの被害が生じた（写真27(a),(b)）。

(2) 鹿港では、動圧密工法により地盤改良した部分と未改良した部分があるが、この未改良部分において、液状化による噴砂口が点在していた（写真28）。

(3) 南投市では、大肝溪の支流である猫羅溪の河川堤防が、5kmに渡って1m沈下していた。ここでは、緑美橋近傍での河川敷で、液状化に伴う地割れがあり、これに伴う、河川堤防の変状、橋台部の沈下、変状が観察されている。また、緑美橋の北東部の市街地では、液状化に伴う家屋歩道の沈下が観察されている（写真29）。

(4) 中寮開閉所の盛土地盤の一部で液状化の噴砂の跡を確認した。

(5) 彰化市の河川敷、員林市内においても液状化が確認された。

図23は、台中港、南投市、中寮開閉所において液状化によって生じた噴砂の粒度組成を示す。図中には、港湾基準に示される液状化しやすい土の粒度組成の範囲を合わせて示した。これによると、南投市と台中港の試料は、液状化の可能性ありの範囲にあり、液状化しやすい粒度組成であった。液状化の生じた要因として、過大な地震動とこのような地盤の特性が考えられる。

(7) 地滑り・斜面崩壊

台湾の中央山脈の西部に位置する西部山麓帯に大規模な地滑りや斜面崩壊が多数発生し、山岳道路や集落の埋没などの大きな被害が生じた。それらは、概ね震源より60kmの範囲内に渡っている。ここでは、土木学会およびほぼ同時期に実施された地盤工学会の調査結果等に基づいて、大規模地

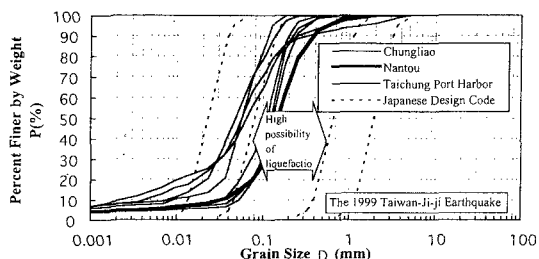


図23 台中港、南投市、中寮開閉所における噴砂の粒土組成（文献2）

滑りとして、草嶺と九分二山の2カ所および大規模な斜面崩壊として中央横貫道路の谷關付近および火炎山の被害事例について述べる。

(1) 草嶺は、嘉義県と雲林県の県境を流れる濁水溪支流の清水溪の上流に位置している。川の両側の山間部において、大規模な地滑りが発生した。地滑りによる流出土砂は、3億 m^3 以上、総延長4km以上と推定され、流域の村落のみ込むとともに、川を埋め尽くした(写真30(a))

(2) 九分二山は、南港の西数kmに位置し、向かい合う2つの山に地滑りが発生し、2つの集落が土砂のみ込まれた。この地滑りに伴う流出土砂は、0.5億 m^3 以上であると推定されている。これらの土砂により、河川がせき止められ、いくつかの湖(震生湖)が生じた(写真30(b))。

(3) 大甲溪上流の中央横貫道路谷關付近で大規模な斜面崩壊が発生し、いたるところで道路が寸断されていた(写真30(c))。

(4) 台中市東南東、約10kmに位置する九九峰(火炎山)では、山頂部における表層部が地滑りで剥落し、禿げ山状態となっていた(写真30(d))。

この主要因として、強い地震動によるものと斜面が急傾斜であること、また、表層地盤が風化したこと、玉石が含まれているなど樹木の根が不安定であったこと等が考えられる。

6. まとめ

1999年台湾・集集地震の土木構造物被害調査結果の概要とその特徴は以下の通りである。

(1) 広範囲に渡って、大きな地表地震断層が出現(最大10m程度)し、断層変位による局所的な地盤変状により、構造物が多大な被害を受けた。土木構造物の被害としては、石圍取水堰や石圍橋、稗豊橋、長庚橋等断層直上あるいはこれをまたいだダム、橋梁、道路、導水路トンネル、ライフライン施設などに集中しているが、概して、断層から離れた地点の被害は少ない。

(2) 地震動(揺れ)による被害としては、山間部で、大規模な斜面崩壊や地滑り、送電鉄塔の倒壊および丘陵地の変電所・開閉所等の機器等が見ら

れた。このため、電力供給に大きな影響を及ぼした。

(3) 地震の規模は、兵庫県南部地震の10倍程度であるが、地震動の揺れ(震幅)は、主要動部分は、最大で400gal程度で比較的小さい。1Gの部分はきわめて高い振動数域にあり、地盤の特性を直接反映していないと考える。

(4) 地震記録が、断層近傍を含めて全土500カ所以上で得られている。これらのデータは、今後、断層のメカニズム、断層近傍の地盤震動の解明・評価に貴重な資料を提供するものと期待できる。

(5) 液状化は、台中港等の海岸地域や大肝渓流流域の沖積低地等で発生し、このため、台中港の護岸の変状、背後地盤の沈下の被害や河川堤防の変状、建物の沈下や傾斜の被害が生じた。

なお、本文中の写真に関しては、筆者が撮影した写真を主として用いたが、調査していない地点の被害写真については、文献1~7から、また、図表についてもその一部を文献1~7より引用させていただいた。関係各位に深い感謝の意を表する。

7. 今後の課題

(1) 断層を考慮した耐震設計法の確立

集集地震では、大規模な断層による変位が構造物に大きな被害を生じさせた。

断層による変位(ずれ)の被害としては、我国においては、1930年の北伊豆地震において、丹那断層(横ずれ量2m~3m)によって、当時建設中であった東海道線の丹那トンネルが、また、1978年の伊豆大島近海地震では、伊豆急電鉄稲取トンネルが被害を受けた例がある。しかし、現行では、断層を考慮した設計はなされていない。

今後、断層によって引き起こされる地表面の変状に対して、地表面断層の出現位置、規模の予測方法などを検討するとともに、耐震設計に取り入れるか早急に取り組むことが必要である。

(2) 断層を想定した対策法の確立

地表面の断層変位を想定し、構造物の破壊を抑制する設計・施工技術の向上に努め対策法の確立を図る必要がある。



写真1 石岡郷の断層線 (文献6)

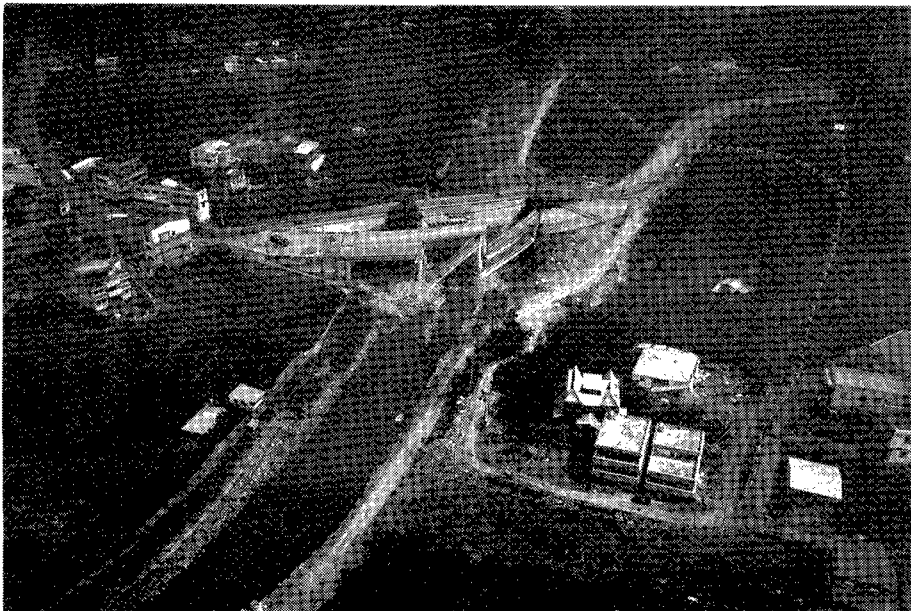
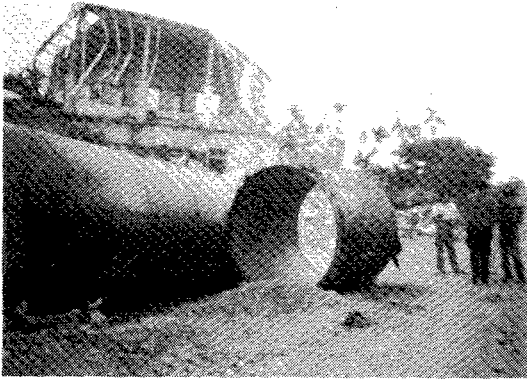
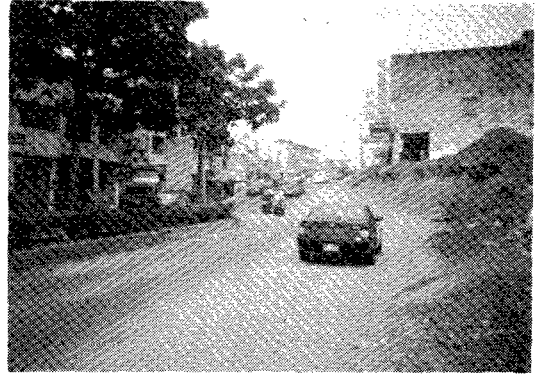


写真2 石岡橋付近の断層線 (文献6)



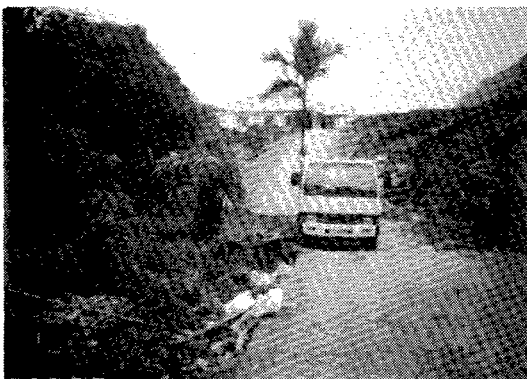
(a) 水道管の被害



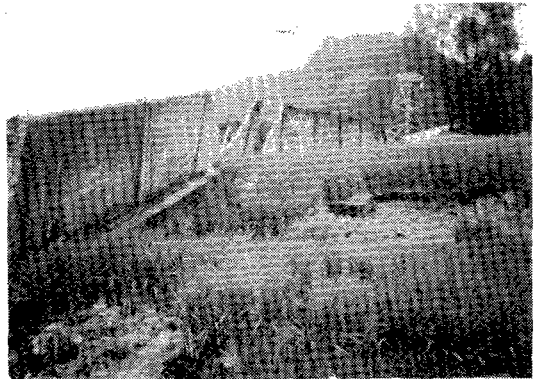
(b) 道路

断層による鉛直変位約3~5m, 水平変位東に約3.75m

写真3 豊原-石岡への道路と水道管の被害



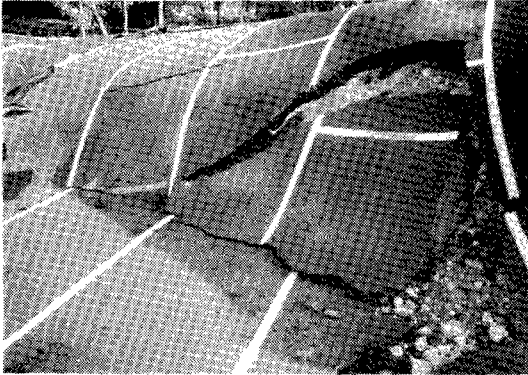
(a) 民家の被害



(b) 蘭の栽培畑の被害

約5m 東側が隆起

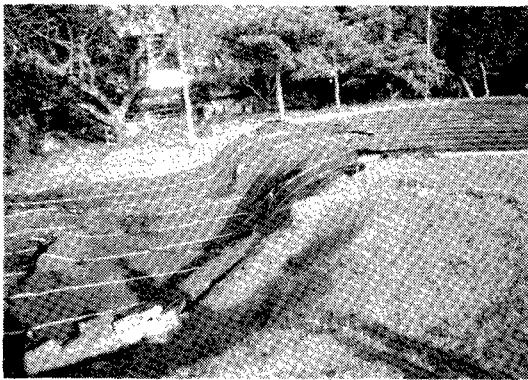
写真4 豊原-石岡 (N24/16/10, E120/45/22) の断層のと民家の被害



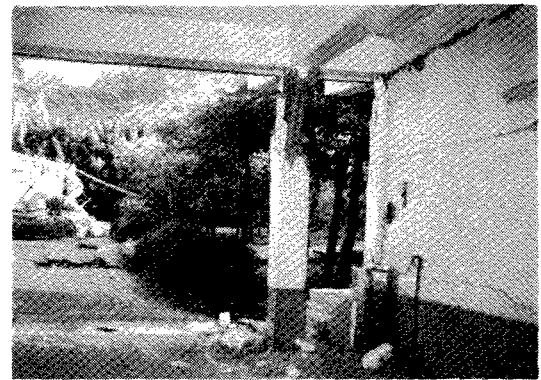
(a)



写真6 霧峯の斜面崩壊



(b)



(a) 校舎の柱のせん断破壊



(c) 航空写真による全体図 (文献6)



(b) 校舎の被害

写真5 霧峯の幸福小・中学校の総合運動場の断層

写真7 霧峯の幸福小学校の校舎の被害



断層上の建物は倒壊したが約10m離れたブロック
塀には被害なし

写真8 内湾地区の断層と建物の被害

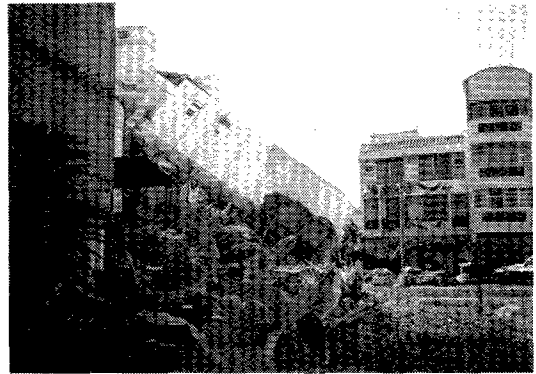
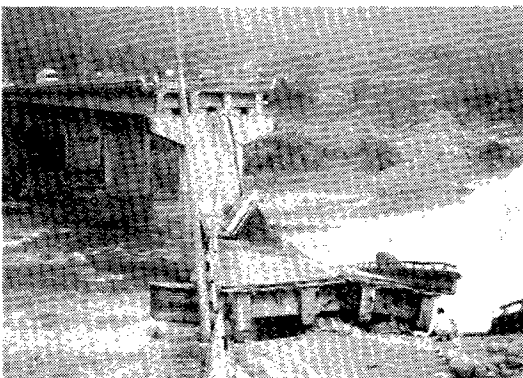


写真9 草屯の断層沿いの建物の被害
(N23/57/51, E120/41/09)

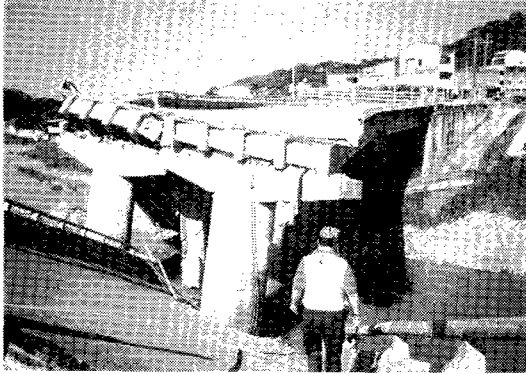


(a)

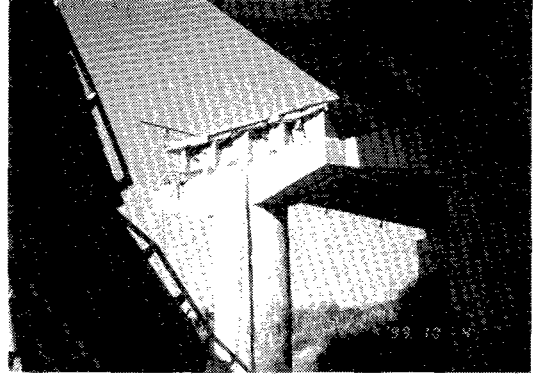


(b)

写真10 石岡ダム下流の稗豊橋の被害と河床に滝が出現



(a)



(b)

写真11 石圍橋の崩壊・落橋の被害

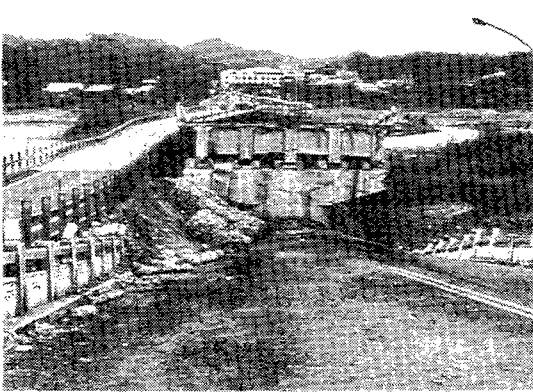


写真12 長庚大橋の被害 (文献3)

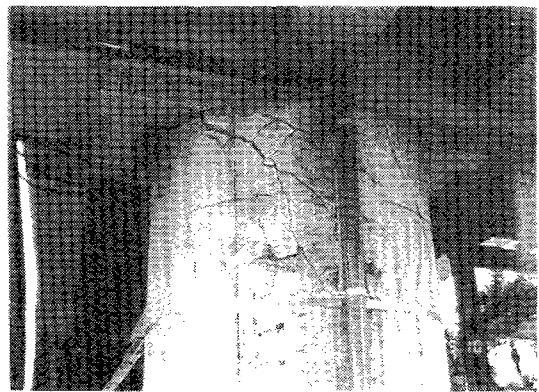
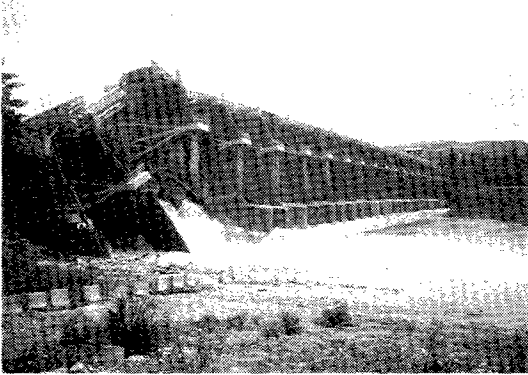
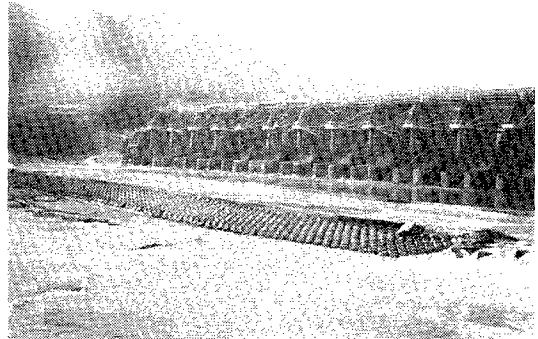


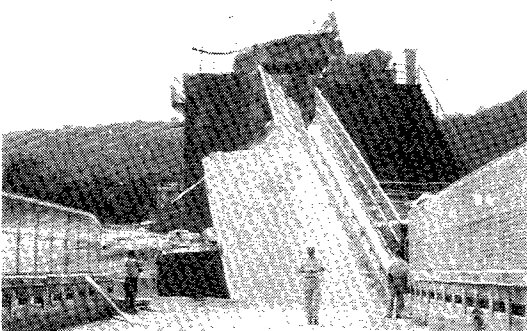
写真13 猫羅溪橋の橋脚の支承部付近の破壊 (文献3)



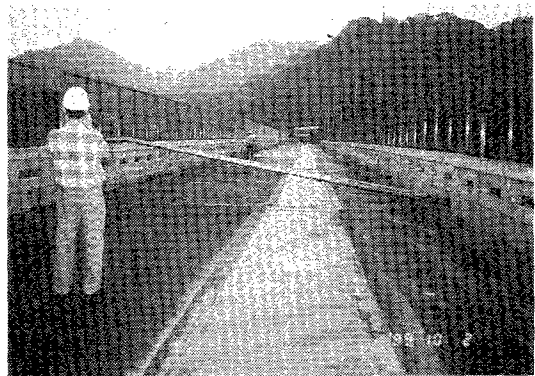
(a) 断層による隆起：
約10mにより全18門の内右岸側4門が倒壊



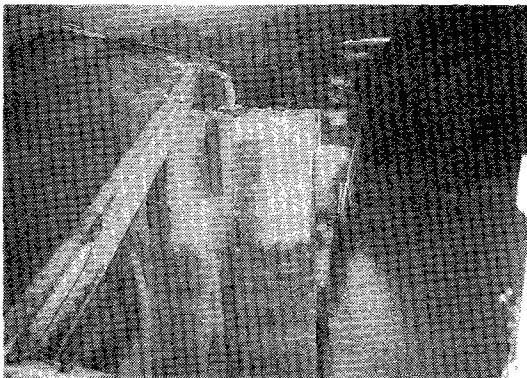
(d) 河床の隆起と堤体の被害



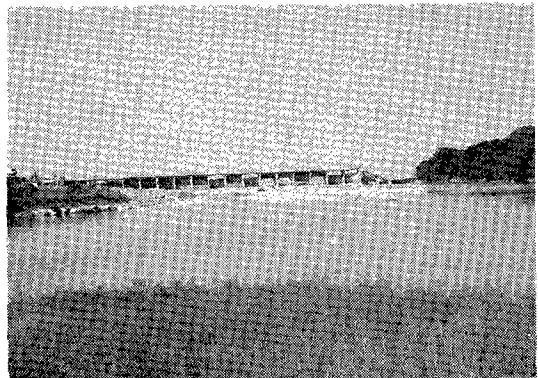
(b) 断層による隆起：
約10mにより全18門の内右岸側4門が倒壊



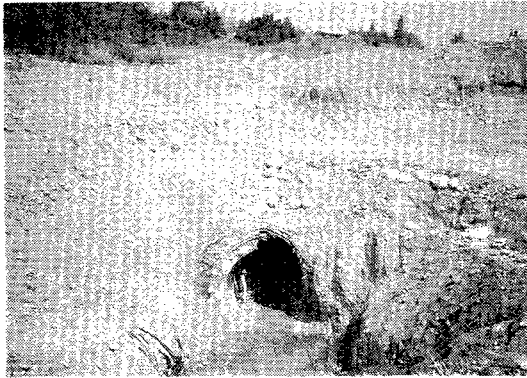
(e) 堤頂部の被害：断層通過点以外被害なし



(c) 断層による隆起：
約10mにより全18門の内右岸側4門が倒壊



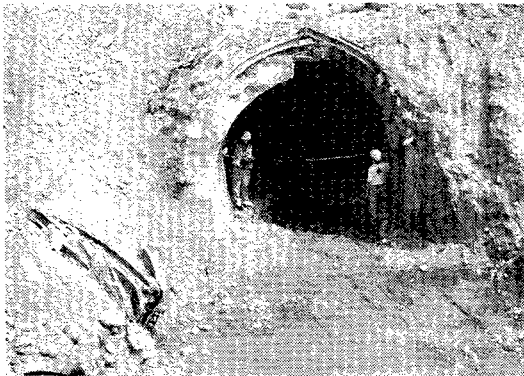
(f) 堤体の被害（上流からの遠望）



(a) 導水路トンネルの被害-1 (隆起側)
約3~4m, 土被り約5m



(a)

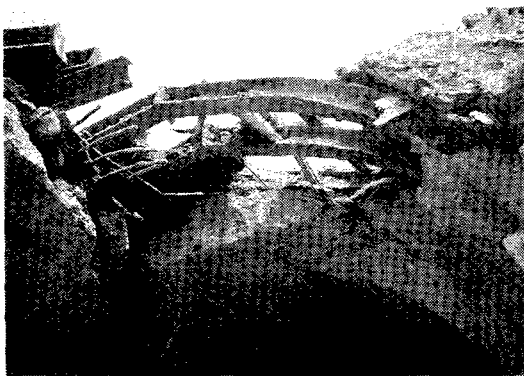


(b) 導水路トンネルの被害-1 (隆起側)



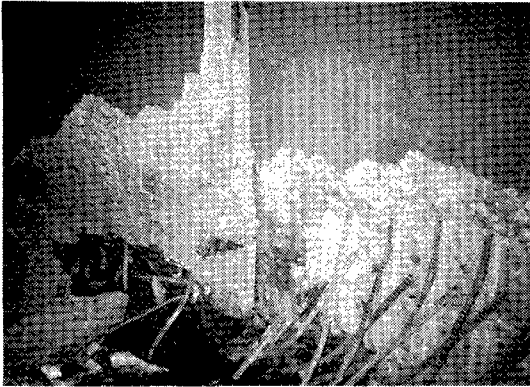
(b)

写真16 石岡ダム～豊原給水廠に至る導水路
トンネルの被害-2 (元の部分)



(c) トンネル頂部の破壊状況

写真15 石岡ダム～豊原給水廠に至る導水路
トンネルの被害-1 (隆起側)



(a) トンネル内打継目部分の被害

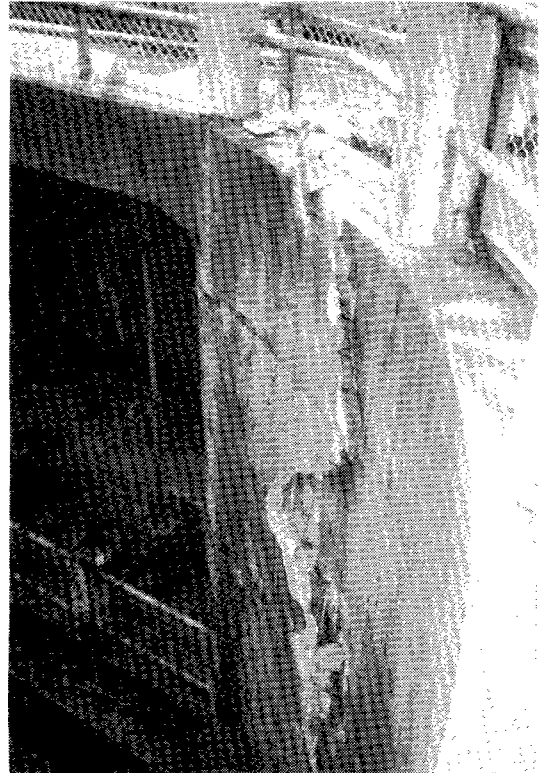


写真18 石岡ダム～豊原給水廠に至る導水路
トンネル内の被害-4
(トンネルと取水堰取付け部の被害)

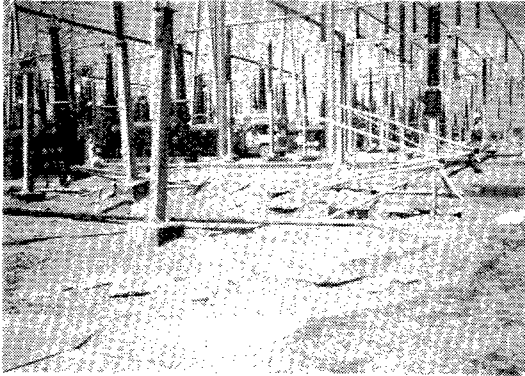


(b) 軸方向の圧縮により打ち継き目部分で約10cm以上の亀裂が全周に生じている。

写真17 石岡ダム～豊原給水廠に至る導水路
トンネル内の被害-3



写真19 石岡ダム～豊原給水廠に至る導水路
トンネルの復旧状況(文献7)



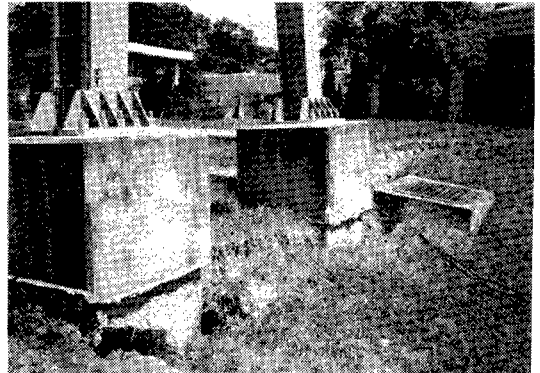
(a) 地盤の変状、液状化



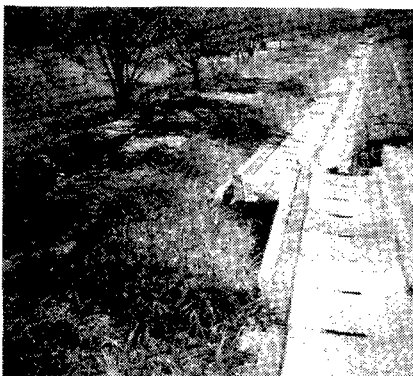
(b) 地盤の変状とコンクリートダクトの被害



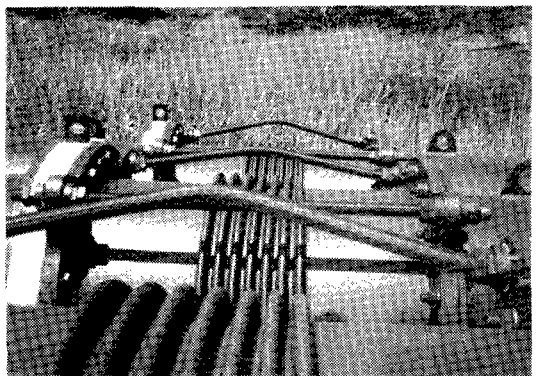
(c) 変電機器の被害



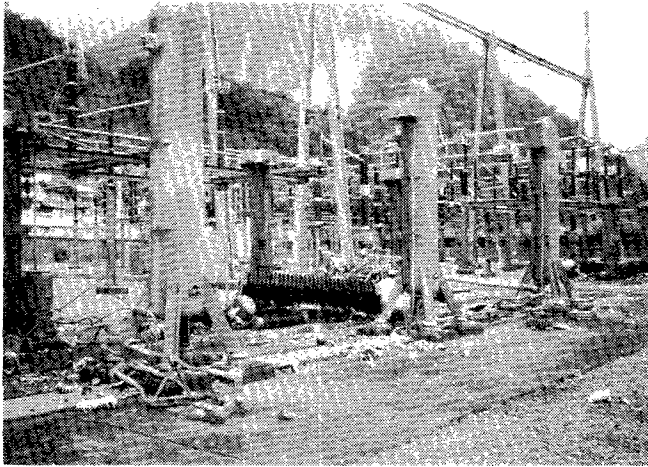
(d) 地盤の沈下と鉄塔基礎の被害



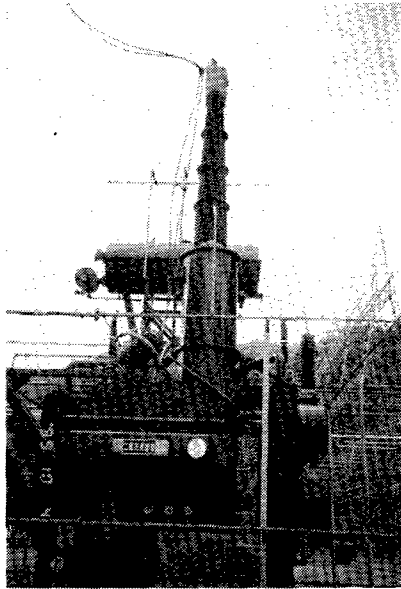
(e) 地盤の変状、亀裂



(f) 絶縁用ガス管のジョイント部の被害
(管本体には被害なし)



(a) 碍子、ブッシングの被害

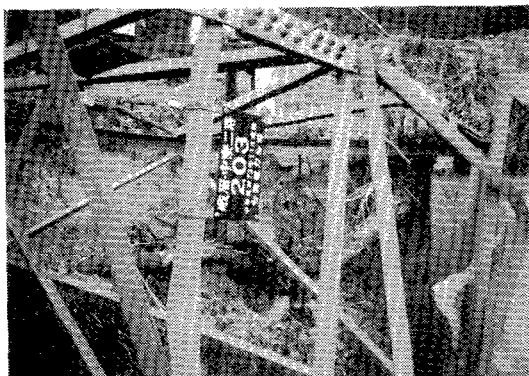
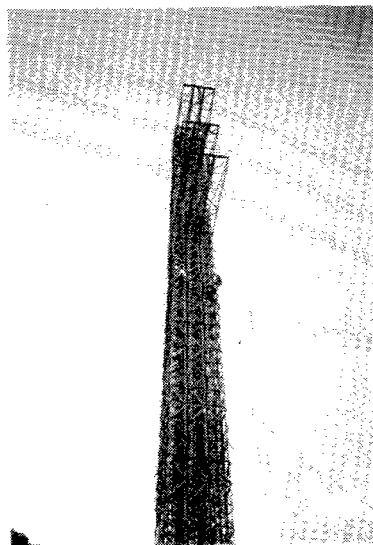


(b) 変圧器のオイル漏れ

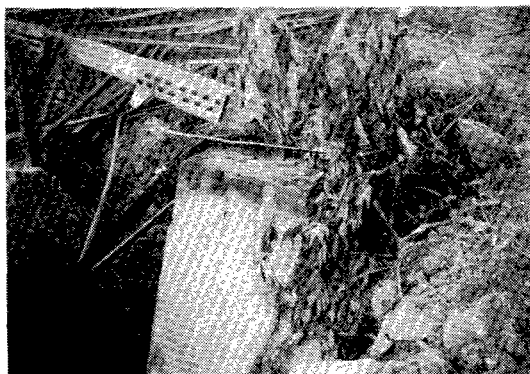
写真21 天輪発電所の変電機器の被害



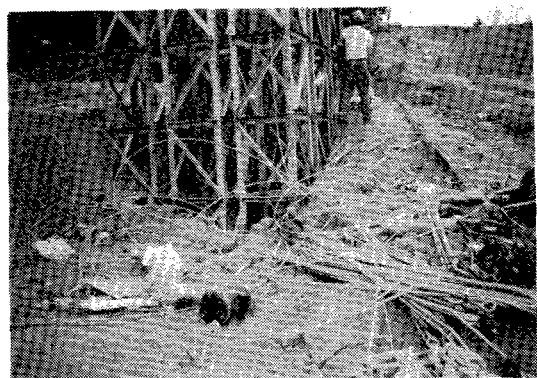
(a) 国姓の送電鉄塔（# 203）の倒壊



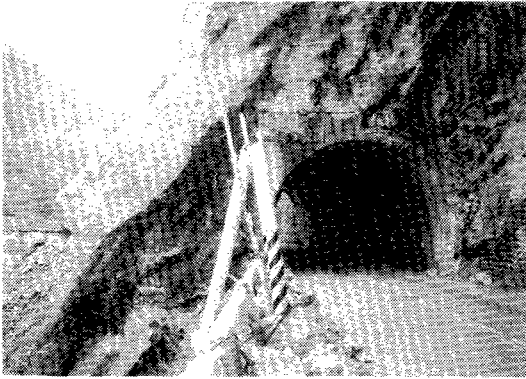
(b) 国姓の送電鉄塔（# 203）の倒壊



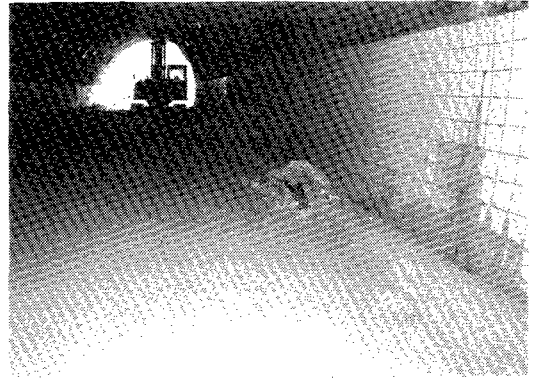
(c) 国姓の送電鉄塔（# 203）の基礎の被害



(d) 国姓の送電鉄塔（# 203）の復旧（仮鉄塔の設置）



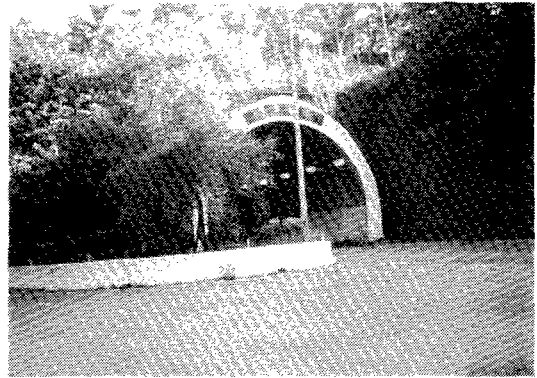
(a) 8号線：
天輪発電所付近の裡冷トンネルの坑口の被害



(c) 8号線：馬陵第2トンネル側壁と排水溝の被害



(b) 8号線：馬陵第2トンネル坑口の被害



(d) 14号線 育楽トンネルの被害

写真23 山岳トンネルの被害

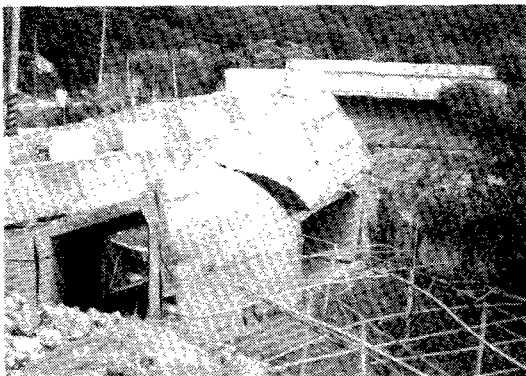


写真24 食水坑平和橋通行用地下道の被害



写真25 集集ダムの導水路トンネルの被害

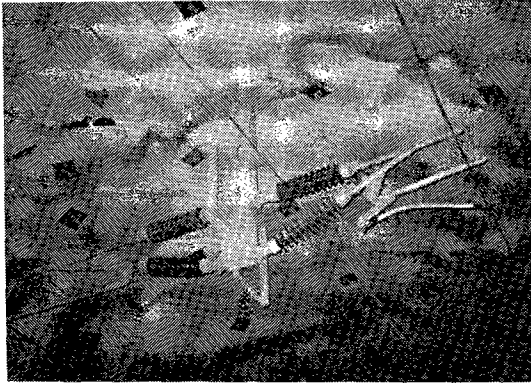
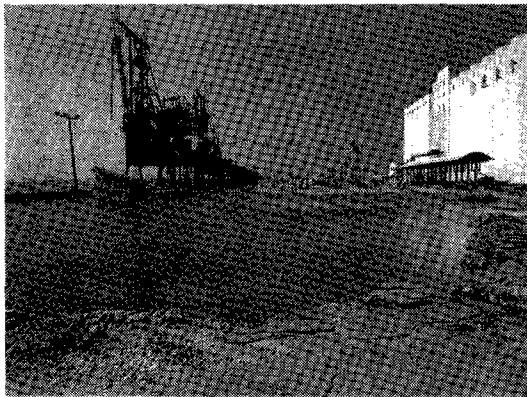
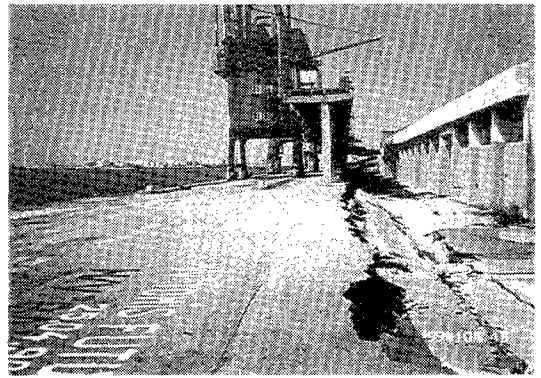


写真26 三義トンネル構内の補修、補強（文献1）



(a)



(b)

写真27 台中港岸壁の液状化による被害（文献3）



写真28 彰化県鹿港の港湾建設ヤードの液状化による被害（文献3）

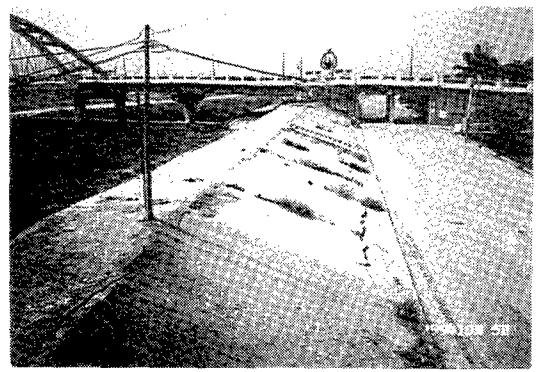
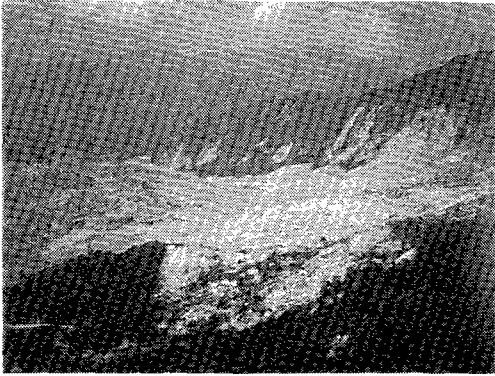


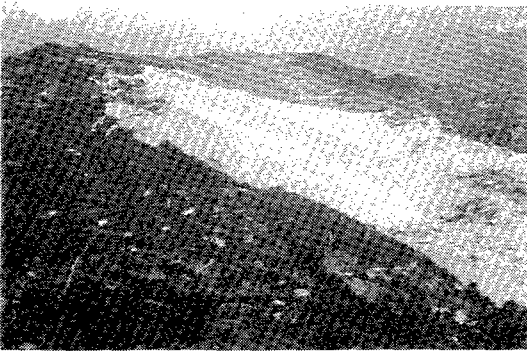
写真29 猫羅溪の右岸の緑美橋と軍功橋間の堤防不同沈下（文献3）



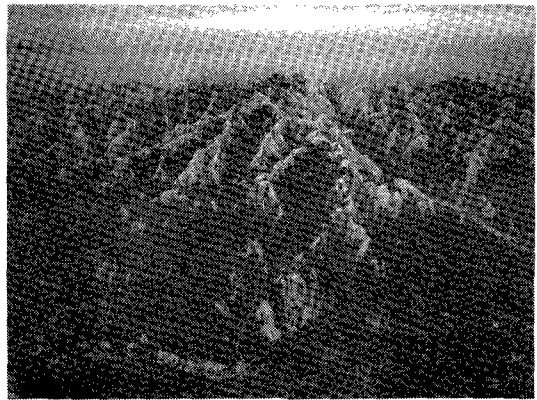
(a) 草嶺



(c) 中央横貫道路：谷關付近



(b) 九分二山



(d) 九九峰：火炎山の大地滑り

写真30 地滑りによる被害（文献5）

参 考 文 献

- 1) *Ji-Ji(Taiwan)EARTHQUAKE – Investigation into Damage to Civil Engineering Structure –*, JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1999 December.
- 2) 土木学会『1999年台湾・集集地震被害調査報告会・概要集』1999.6.
- 3) 清水建設株式会社技術研究所『1999年台湾集集地震被害調査報告書（速報）』1999.10.
- 4) 安田 登『台湾地震被害調査報告書（電力設備関係）』東京電力株式会社社内報告資料.
- 5) 地盤学会『台湾集集地震被害調査報告書』1999.12.
- 6) TAIWAN CHI-CHI EARTHQUAKE 9.21.1999 大地烈震 空中鳥瞰車籠埔断層』飛虎文化事業股份有限公司, 1999.9.
- 7) 東京電力株式会社・株式会社富士総合研究所『台湾地震（1999年9月21日集集地震）による地下構造物の被害調査報告』1999.11.

Key Words (キー・ワード)

Ji-Ji (Taiwan) Earthquake (台湾集集地震), Earthquake Damage Investigation (地震被害調査), Earthquake Fault (地震断層), Chelungpu Thrust (車籠埔断層), Shye-Gang Dam (石岡ダム)

Damage Characteristics of Civil Engineering Structures by the 1999 Ji-Ji Earthquake, Taiwan

Takahiro Iwatate* and Mitsutoshi Yoshimine*

*Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.72, 2000, pp.77-115

The Ji-Ji Earthquake, Taiwan with a magnitude of 7.6 occurred at 1:47 AM(local time) on 21 September 1999, in the central part of Taiwan.

Author of a member of JSCE team traced the surface faults and investigated into damage to civil engineering structures(bridges, dams, lifeline facilities) caused fault movements immediately after the earthquake.

This reports describes the characteristic aspects of the earthquake disaster the civil engineering structures by the 1999 Ji-Ji earthquake as follows.

- (1)The surface ruptures caused by the reverse earthquake fault appeared in the huge area and caused catastrophic damage to civil engineering structures (bridges, dams, buildings houses and lifeline facilities).
- (2)The road bridges were totally collapsed and more than 30 bridges suffered comparative light damages which needed repairs after the earthquake by the surface faulting. The concrete gravity dam with a height of 25m was also totally collapsed by the surface faulting. The total collapse of the bridges and the dam, which were directly caused by the fault movement is the first experience.
- (3)Lifeline system such as electricity suffered severe damage, and slope failures collapsed transmission towers, while the surface rupture damages a number of facilities of main switchyard for the electricity distribution.
- (4)Facilities of Taichung port were damaged mainly due to soil liquefaction, and a numerous number of huge slope failures occurred in the mountainous area and buried villages and valleys, resulted in loss of many lives.
- (5)The Ji-Ji earthquake will rise a new technical as well as social subject of the earthquake resistant design of structures against surface ruptures caused by fault activities. We have to review the current technologies and to develop a new methodologies to prevent the damage to various kinds of structures against the surface faultings.