

1999 年集集地震 (台湾) における道路橋の被害

川島一彦¹・家村浩和²・庄司学³・岩田秀治⁴

1 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

2 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

3 修 (工) 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

4 ジェイアール東海コンサルタンツ 土木設計部構造設計第三課 (〒460-0008 名古屋市中区栄 2-5-1)

1. はじめに

1999 年 9 月 21 日の午前 1 時 47 分 (日本時間), 台湾南投縣日月潭の西方 12.5km 付近を震源とする $M_s = 7.6$ の地震が発生した。台湾消防署によると, 10 月 20 日現在, 死者は 2405 名, 負傷者は 10718 名, 行方不明者は 79 名に達し, 建物をはじめ, 橋梁や電力施設などの社会基盤施設に甚大な被害が生じた。

筆者らは, 文部省台湾地震調査班 (家村は研究代表者, 川島は研究分担者, 庄司と岩田は研究協力者) として, 1999 年 10 月上旬に現地入りし, 交通施設の被害調査を行った。短時間での調査であり, 情報も十分ではないため, 間違いがあるかもしれないが, 概要を示すと以下のとおりである。

2. 道路橋の被害の概要と被災メカニズム

道路橋の被害は, 図-1 に示すように台湾中西部台中縣 (Taichung) をほぼ南北方向に走る省道 3 号線を中心として, 1) 石岡郷 (Shikangkang), 東勢鎮 (Tungshih) 周辺部, 2) 太平市 (Taiping), 霧峰郷 (Wufeng), 草屯鎮 (Tsaotun) 周辺部, 3) 南投市 (Nantou) 周辺部, 4) 震源近傍の集集鎮 (Chichi) 周辺部, 5) 名間郷 (Mingchien), 竹山鎮 (Chushan) 周辺部の 5 つの地域に生じている。以下, 順に被害の概要と被災メカニズムについて述べる。

2.1 石岡郷, 東勢鎮周辺の被害

(1) 卑豊橋 (Bei-Fong Bridge)

石岡郷の西に位置し, 大甲溪にかかる 13 径間の橋梁 (1991 年 1 月竣功) である。桁は RC の I ビーム 4 本で, 径間長 25m 程度, 幅員は 10m である。橋脚断面は $4.8\text{m} \times 2\text{m}$, 高さが 10m 程度の RC 構造で

ある。橋軸方向はほぼ南北方向となっている。

被害の特徴は, 南側の A2, P12, P11 の周辺地盤が N20E~N40E 方向に沿って 3~4m 程度隆起し, D13~D11 が落橋, P11 が倒壊した点である。なお, 一番北側に位置する桁, 橋台, 橋脚を D1, A1, P1 とし, 南に向かって順にナンバリングしている。ここでは以下の橋梁に対してもこのように桁, 橋台, 橋脚番号を北側からナンバリングすることとする。

地盤の隆起により河床には段差が生じており, その箇所で川の流れが滝のようになっている。断層は図-2 に示すように P11 の北面直下を通して, 川を斜めに横切ったものと考えられる。なお, 断層の方向と変位をまとめると表-1 のようになる。表-1 には後述する橋に対しても示している。

(2) 長庚大橋 (Chang-Geng Great Bridge)

石岡郷の東に位置し, 大甲溪にかかる 11 径間の橋梁である。桁高が 3m 程度で 5 主桁 RC 桁であり, 径間長が 20m 程度, 幅員は 12m である。橋脚は RC 橋脚で, 断面は $5\text{m} \times 2\text{m}$, 高さは 2~5m である。基礎は直径約 6m のケーソン基礎となっている。桁は平面寸法 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$, 高さ 30~50mm 程度のゴム支承で支持されている。橋軸方向はほぼ南北方向に相当する。

被害状況を図-3 に示す。D11 の北側桁端部が P10 から, 同じく D10 の北側桁端部が P9 からそれぞれ落下している。P10 や P9 には特に大きな損傷は見られない。P3 と P9 付近には噴砂がみられることから, 地震時に液状化したものと推測される。P3 天端は南側に 0.2m 程度, P9 天端は北側に 0.2m 程度傾斜しており, 液状化による地盤支持力不足により, P3 と P9 基礎が沈下したものではないかと考えられる。A1 付近では地盤が沈下しており, 堤防斜面も崩壊して

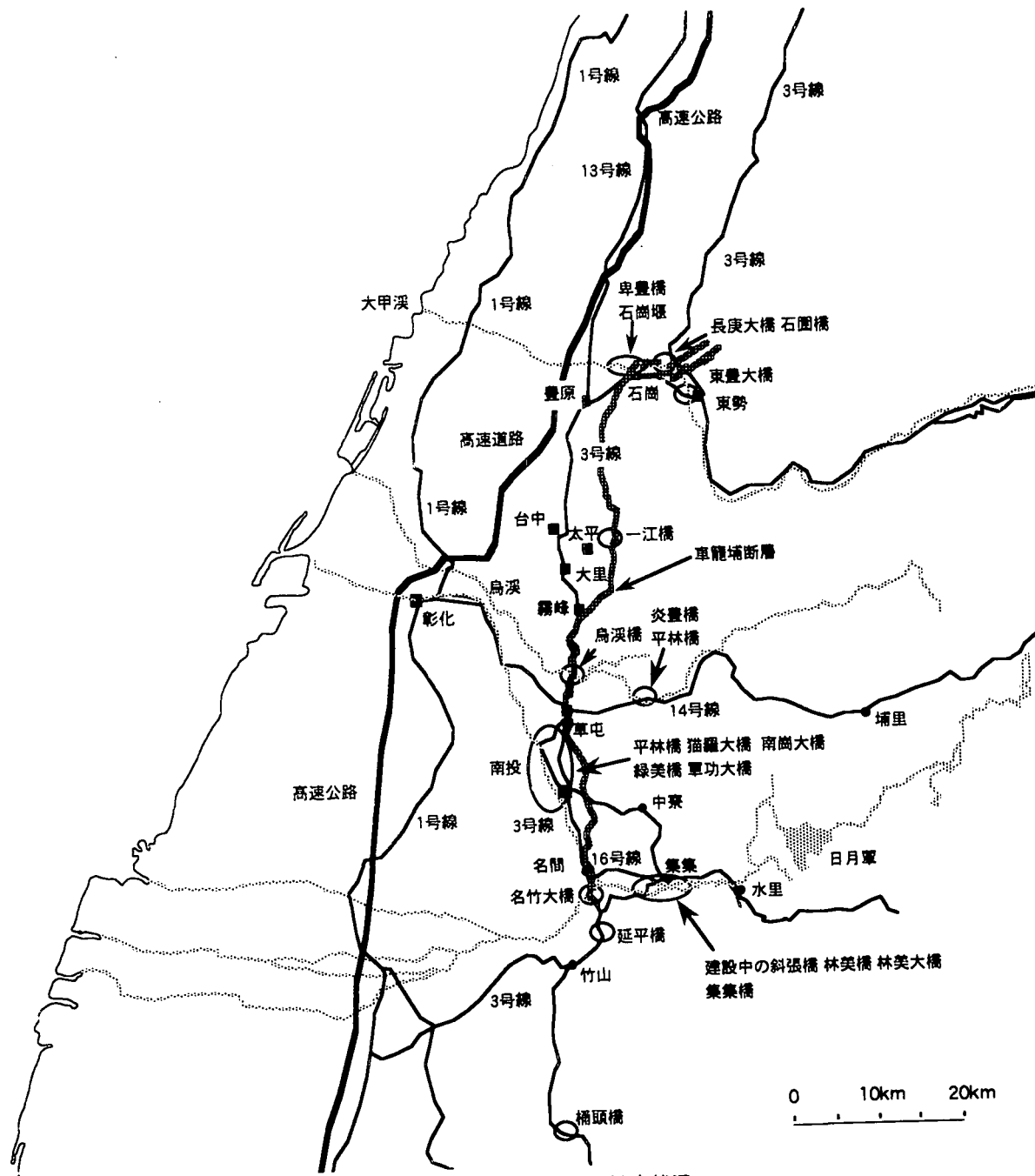


図-1 道路橋の被害状況

表-1 断層の方向と変位

		方向	水平変位	上下変位
卑豊橋	P12 ¹⁾	N42E	6m右ずれ	6m
	A2 ²⁾	N20-40E	4m右ずれ	?
石園橋 ¹⁾		NE-SW?	?	?
一江橋	東側 ¹⁾	N58E	?	3m
	P6 ¹⁾²⁾	?	0.7m右ずれ	3-4m
	西側堤防 ¹⁾	N33E	?	?
烏溪橋	P2~P3 ²⁾	N60E	2m右ずれ	1.8m
	河床 ¹⁾	N8-13E	?	?
	P8~P9 ²⁾	?	0.75m	?
	南側道路 ¹⁾	N7W	1m左ずれ	1.5m
延平橋	南側道路 ²⁾	N80E-NE	?	?

1) 大槻（東北大学）による

2) 川島・庄司・岩田による

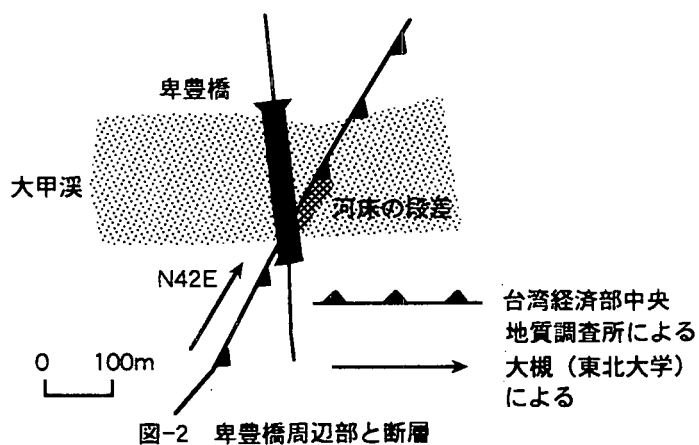


図-2 卑豊橋周辺部と断層

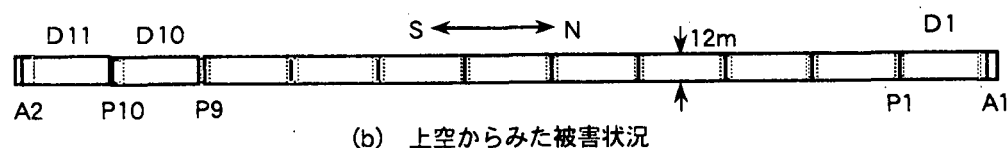
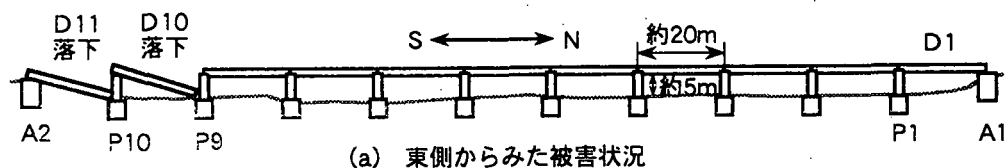


図-3 長庚大橋の被害

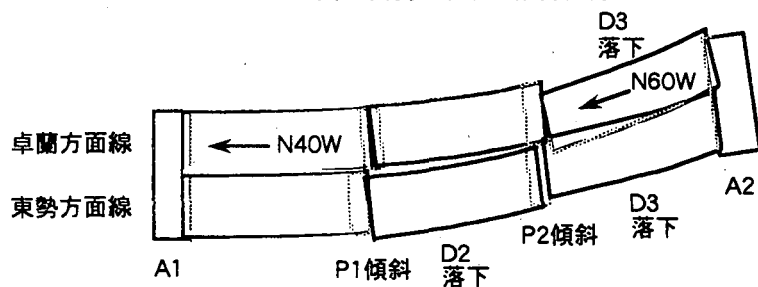
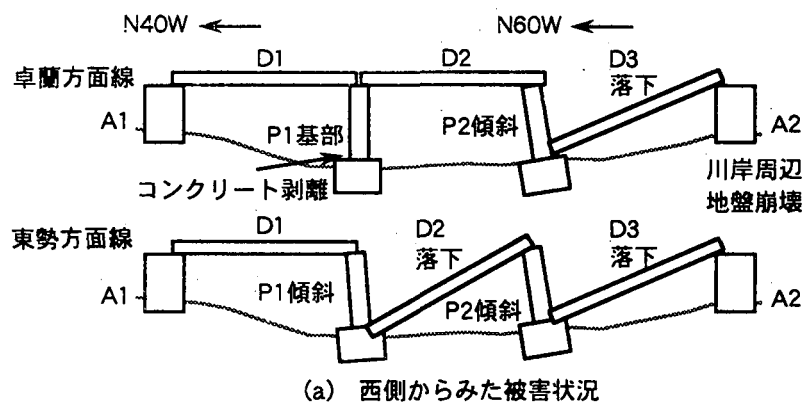


図-4 石圍橋の被害

いる。本橋の周辺地盤や川岸には断層変位が生じた痕跡は見あたらない。このため、断層変位が本橋の落橋の原因ではなく、地震動による桁の振動により桁が橋脚天端の桁かかり部から逸脱し、落下したと考えられる。

(3) 石圍橋 (Shc-Wci Bridge)

大甲溪の支流の砂連溪にかかる上下線分離3車線の3径間単純曲線橋(1994年9月竣工)で、省道3号線上にある。桁はRC桁の5主であり、径間長は20m程度、幅員は15m程度である。橋脚はRCで断面が4m×3m、高さが12~15mである。桁は平面寸法500mm×500mm、高さ30~50mm程度のゴム支承で支持されている。橋軸方向はN40W~N60Wである。

被害状況を図-4に示す。東勢方面線ではD2、D3が、また卓蘭方面線ではD3が落橋した。東勢方面線のD2、D3は北側の桁端部がそれぞれP1、P2より、また、卓蘭方面線D3も北側桁端部がP2よりそれぞ

れ落下している。東勢方面線のP1には大きな損傷は見られないが、卓蘭方面線のP1には北面の基部から1m付近でかぶりコンクリートの剥離が、高さ2m付近で東面から西面方向に1mm程度の斜めひび割れが生じている。東勢方面線、卓蘭方面線ともにP2は東側に傾斜しており、東勢方面線のP2は北側にも傾斜している。東勢方面線、卓蘭方面線ともA2上ではゴム支承が沓座からずれ落ち、サイドブロックも損傷している。D3の南側桁端部はA2に対して0.3~0.4m東側に移動している。

本橋周辺の南西部の川岸は大きく斜面崩壊している。この斜面はさらに丘陵地につながっているが、川面から100m程度の箇所では川方向に対する地すべり的な水平および鉛直すべりが生じている。大きい箇所ではすべり量は、上下方向には5m、水平方向には8mにも達する。本地点から約500m東勢方面(南東方向)に行った箇所では、断層(N60E)が省道3号線(N60W)を横断して高さ6m程度の段差を

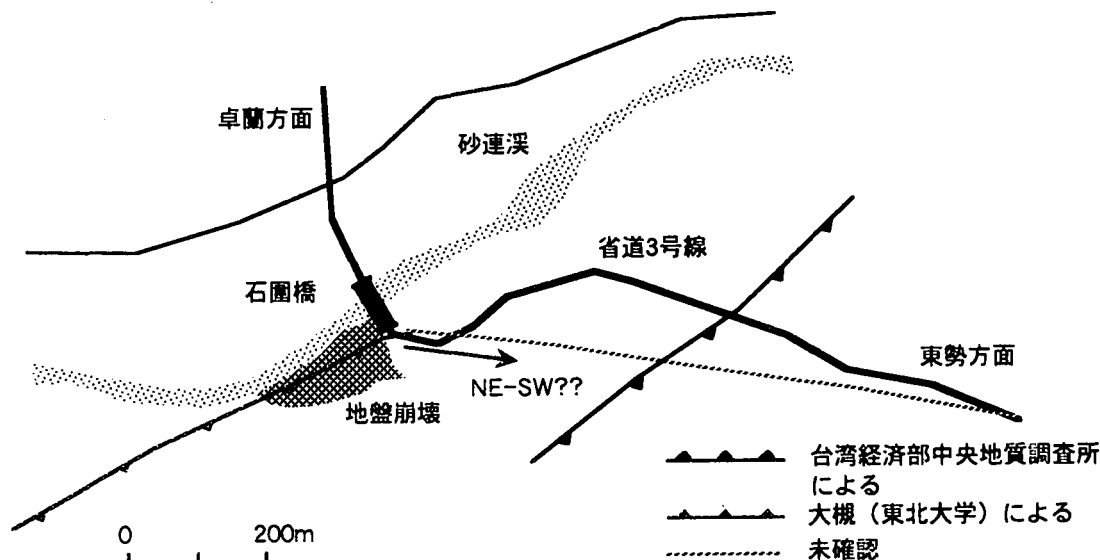


図-5 石圍橋周辺部と断層

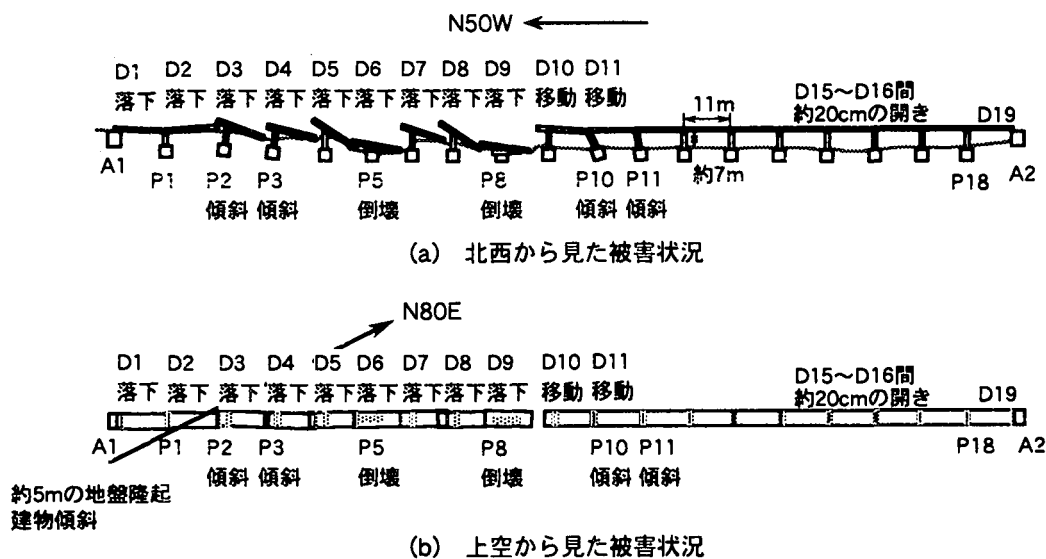


図-6 一江橋の被害

生じている。この断層が丘陵地上部を横断していると推定されることから、上述の大規模な斜面崩壊は、この断層の直接的もしくは間接的な影響を受けて生じたのではないかと考えられる。以上より、本橋では、右岸側の大規模斜面崩壊によって A2, P2 基礎が大きく変位したため、落橋したのではないかと推定される。なお、未確認ではあるが大規模によれば、上記の断層が図-5 に示すように直接 A2 や P2 を横切った可能性もある。

(4) 東豐大橋 (Don-Fong Bridge)

石岡郷と今回の地震で激甚な被害を受けた東勢鎮中心街を結ぶ 19 径間単純橋で、石圍橋と同様に省道 3 号線上にある。桁は 6 車線の PC 桁で、径間長は 30m 程度である。高さが 7m 程度で、断面が 2m×2m, 5m×2m, 3m×2m の 3 本の RC 橋脚で支持されている。桁は中央部とその両サイドの 3 本に分か

れており、恐らく中央部の桁が先に完成し、その後に両サイドに桁を並べて車線数を増やしたと考えられる。橋軸方向は N80E である。

調査時点では、コンクリート巻き立てにより橋脚の補修工事が行われていたため、橋脚の具体的な損傷は確認できなかった。なお、コンクリート巻き立てによる補修は P51～P71, P53, P63, P153 に対して行われていた。

2.2 太平市、霧峰郷、草屯鎮周辺の被害

(1) 一江橋 (Yi-Jian Bridge)

縣道 136 号上にあり、台中市から太平市に入ったところに位置する 20 径間単純橋である。上部構造は 4 主桁 RC ビーム桁であり、径間長は 11m 程度、2 車線で幅員は 9m 程度である、断面が 7.5m×1.5m、高さが 8m 程度の壁式 RC 橋脚で支持されている。

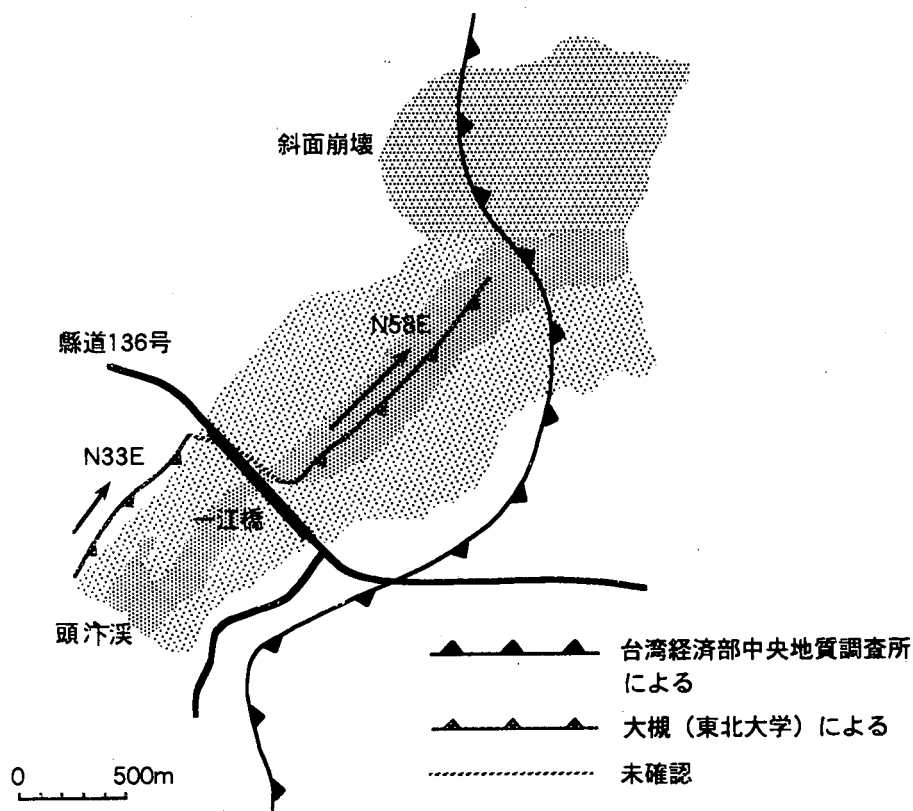


図-7 一江橋周辺部と断層

後述するように倒壊した P5 橋脚を見ると、 $\phi 15\text{mm}$ の鉄筋（丸鋼）が 300mm 間隔に一段配筋されている程度であり、非常に低鉄筋である。帯鉄筋もほとんど入っていない。橋軸方向は N50W に相当する。

被害状況を図-6 に示す。後述するように、断層（N80E）によって生じたと考えられる周辺地盤の隆起により D1～D9 が落橋し、P5、P8 が倒壊している。P2 は地盤中に埋没しており、外部からは見えない。D10 は落橋は免れたが、西側の桁端部が 4m 程度 P9 から西側に突き出し、桁自体も東側に大きく傾いている。また、D10 に引きずられるかたちで P9～P11 も西側に傾斜している。D6 と D9 は東側に倒壊した P5 と P8 上に落下しており、さらにこれらの西側に隣接する D5 と D8 の東側の桁端部は D6 や D9 の西側の桁端部よりも下に埋まっている。

橋の両端とも完全に落橋したのは前述した D6 と D9 でありこの他に、D2 を除く D1～D9 間の桁はいずれも桁端部が橋脚に引っかかって、東側に落下している。P6 の北西側と南東側では 4m 程度段差ができており、もともとの地盤面の痕跡からみると、P6～P8 間が隆起したと考えられる。このため、P6 の北西側では基礎が露呈している。

ここで、本橋と本橋周辺部の断層線の関係を図-7 に示す。A1、P1、P2 の西側周辺では地盤が 5m 程度隆起しており、本橋から西側に断層をたどると、や

がて 4 階建ての建物を直撃し、これを大きく傾斜させている。地盤の隆起した痕跡から断層走向を求めると N80E の方向となり、P1～P3 の範囲を通過している。前述したように P2 橋脚は地上から見えないが、断層の直撃を受け、地盤中に埋没したのではないかと考えられる。この方向の川の対岸（左岸側）の堤防には深さ 2m 程度の段差や沈下が生じており、この線上に断層運動が生じたことを示している。なお、本橋から 500m 程度上流の右岸では、断層によると推定される大規模斜面崩壊が生じており、一部の土砂が堤防を乗り越え、大規模に川中にまで堆積しているのが認められた。

(2) 烏溪橋 (Wu-Shi Bridge)

省道 3 号線上にあり、霧峰郷と草屯鎮の境界沿いに流れる烏溪にかかる旧橋（上流側、東側）/新橋（下流側、西側）3 車線ずつの 17 径間の橋（旧橋は 1983 年 7 月竣工）である。橋軸方向は N20E である。以下、旧橋の橋脚や桁には W を、また新橋の橋脚や桁には E を付けて、両者を区別する。桁は旧橋、新橋ともに 5 主桁の PC ビーム桁であり、径間長は 30m 程度、幅員は 12m 程度である。旧橋を支持する橋脚は断面が 8.5m×3m、高さが 10m 程度の RC 壁式橋脚で、新橋を支持する橋脚は高さが旧道と同じであるが断面を 5m×2m と絞った T 型張り出し式 RC 橋脚である。基礎は直径 6m のケーソン基礎である。

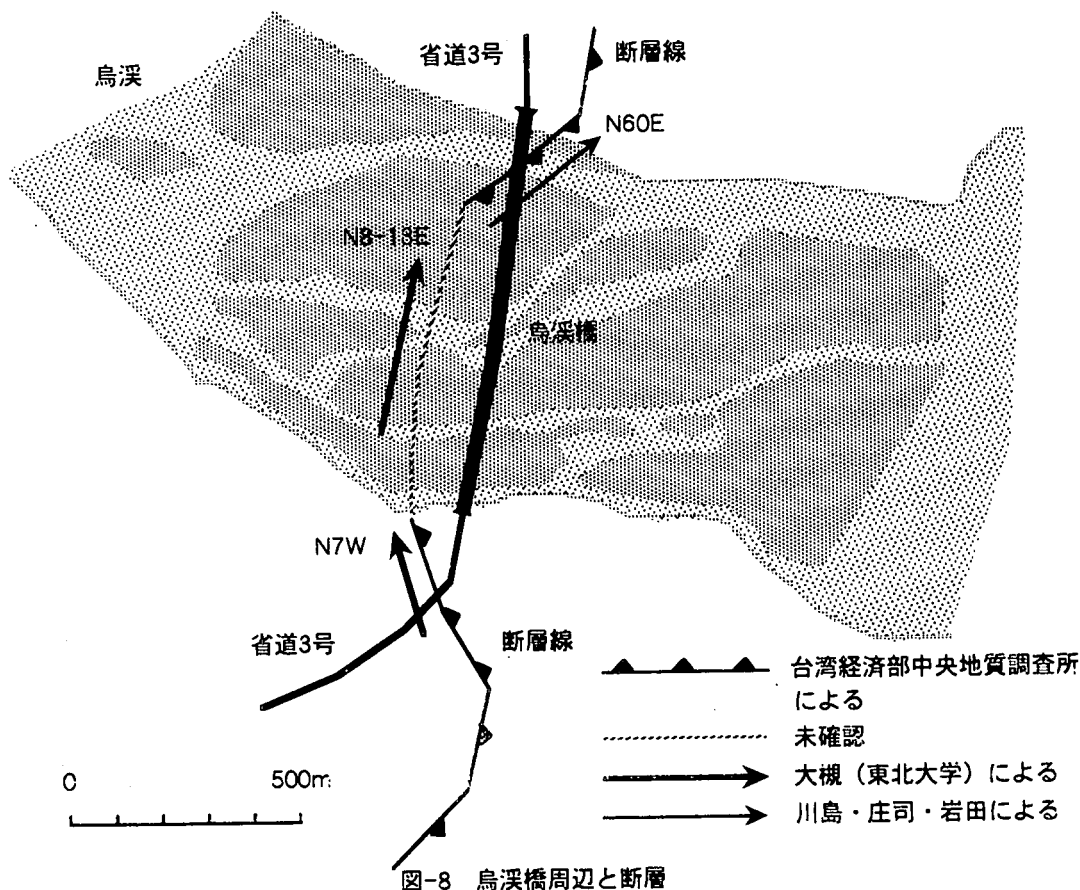


図-8 烏溪橋周辺と断層

支承は平面寸法 500mm×500mm、総厚 30mm のネオプレーンゴム支承 (5 層のゴム, 4 枚の鋼板) である。中心部分には桁と橋脚天端をつなぐアンカーボルト用の穴が開けられている。

本橋と本橋周辺部の断層線の関係を図-8 に示す。断層走向は N60E で P2～P3 間を横切っており、橋の真下では南側の地盤が北側に対して 2m 程度隆起している。旧橋の被害状況としては、1) D1E, D2E の落、2) P3E の西面の基部での半周にわたる幅 100～150mm の開口ひび割れである。新橋の橋脚の被害状況としては、1) P1W と P2W における東から西方向へのせん断破壊、2) P3W のケーソン基礎における東から西方向へのせん断ひび割れとかぶりコンクリートの剥離、3) P4W における基部から 1m 付近の全周にわたる幅 100～200mm 程度のかぶりコンクリートの剥落、4) P5W における西から東方向へのせん断破壊、5) P6W と P7W における幅 100mm 程度の全周にわたるかぶりコンクリートの剥離、6) P8W における東から西方向に向かうせん断破壊などである。

2.3 南投市周辺の被害

(1) 猫羅溪橋 (Mou-Loh-Shi Bridge)

猫羅溪に架かり、省道 3 丙号と省道 3 号を連結し

草屯鎮と南投市を結ぶ供用直前の多径間連続曲線橋である。桁は 4 主桁の鋼鈑桁であり、径間長が 30～40m である。直径 3m、高さが 6m 程度の RC 円形断面橋脚で支持されている。橋脚と桁の結合が独特であり、曲線区間であることから桁の重心を橋脚の中央からはずして鋼製取付用横梁を介して桁を PC 鋼棒で橋脚に結合している。しかし、橋脚に対して桁が一方に偏心しているため、偏心モーメントが作用し、橋脚天端に斜めひび割れが生じた。

2.4 集集鎮周辺の被害

(1) 建設中の斜張橋

集集街のほぼ南に位置し、濁水溪にかかる 4 車線の斜張橋で、現在建設中である。ケーブルは桁中央部で 2 面張りであり、主塔高さは 50m 程度、基部の断面は 6m×2.5m である。桁は中央部を現場打ちし、その両サイドにプレキャスト製のブロックを横締めして取り付けるようになっており、主桁位置を除いてほぼプレキャストブロックを取り付け終わった段階であった。主桁と主塔は剛結されている。

斜張橋への取付けは上下線に分離した PC の I 桁 (5 主桁) の単純構造である。斜張橋の主桁の両端はラーメン橋脚により支持され、主桁の変断面形状に合わせた壁式のバラベットにより橋軸直角方向の桁振

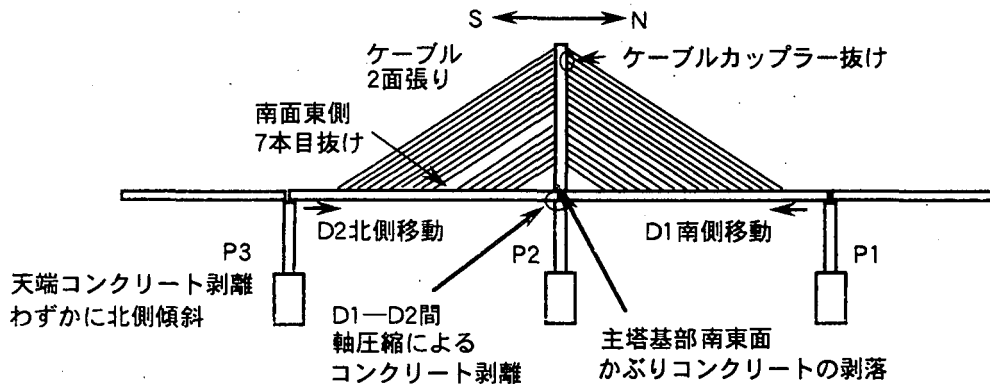


図-9 建設中の斜張橋の被害

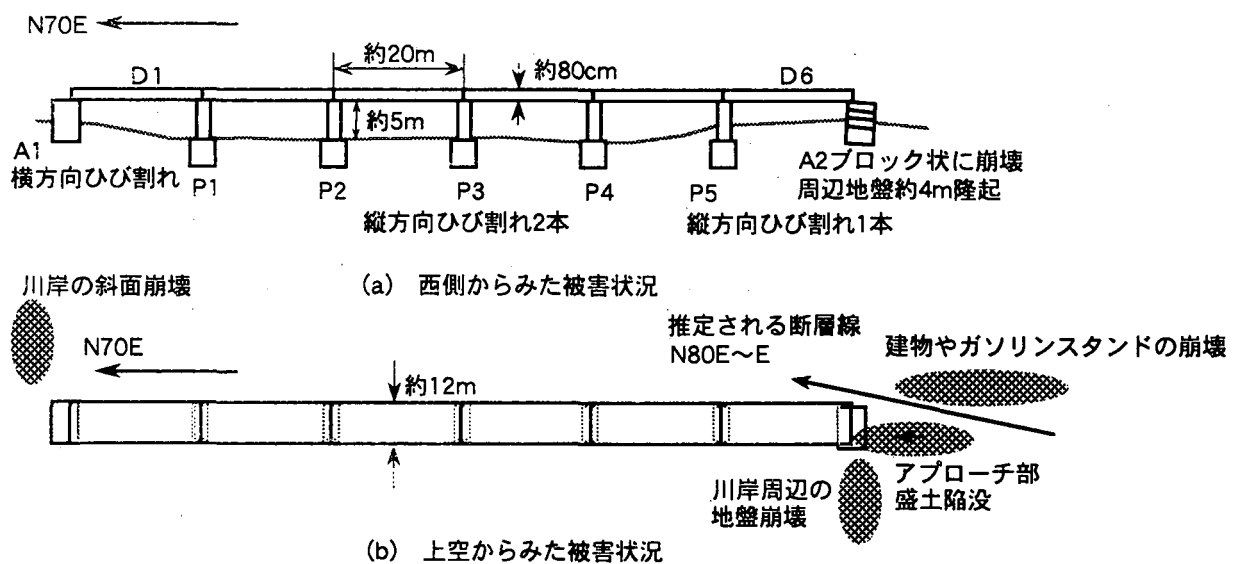


図-10 延平橋の被害

動を抑える構造となっている。

ケーブルは17段で、両端にはケーブル制振用のゴムガスケットが取り付けられている。

被害状況を図-9に示す。斜張橋の主桁は北側に100mm程度ずれており、その結果、南側の橋脚P3はわずかに北側に傾斜している。南側東面では下から7段目のケーブルが抜けている。これは、主桁とケーブルの定着点において、鋳鉄製のカップラーが破断し、ケーブルが抜け出したためと考えられる。また、この他に北側の2, 3本のケーブルではケーブル用の取り付けカップラーが緩んでおり、これ以外にもかなりのケーブルに張力変動が生じている可能性がある。

主塔基部には、東面では高さ2m程度、西面では高さ1m程度の範囲でかぶりコンクリートが剥離し、帯鉄筋が露出している。コアコンクリートにはまだ大きな損傷は生じていないが、主塔には降伏変位を3

～4倍上回る大きな変位が生じたことは間違いない。

主塔から0.5m程度南側では主桁の上下面に主鉄筋が部分的に座屈する程の大きな損傷が生じた。主桁の下面では、桁中央部分でこの損傷がさらに南側に3m進展しているのが認められた。主桁は主塔と剛結されており、地震力を受けた際に主塔を固定点として大きくカンチレバー状に上下方向に主桁が振動したためではないかと推測される。主塔近くであり、主桁には大きな軸力が作用しているため、主桁の復旧には十分注意する必要がある。

この他にも、地震時に斜張橋が大きく振動したことを示す痕跡として、主桁両端の壁式パラペットの損傷がある。主塔を中心として、やじろべい式に斜張橋が回転を伴う橋軸直角方向の振動をしたのではないかと推定される。

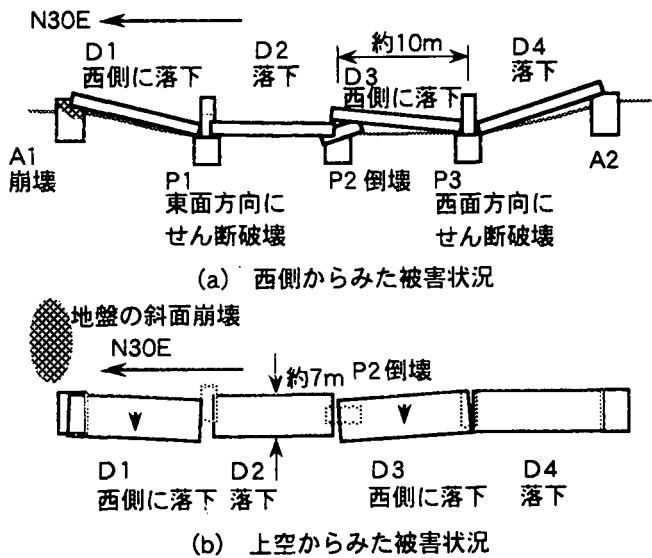


図-11 桶頭橋の被害

2.5 名間郷、竹山鎮周辺の被害

(1) 名竹大橋 (Min-Ju Great Bridge)

省道 3 号線上にあり、名間郷と竹山鎮を結ぶ 15 径間以上の橋梁である。橋軸方向はほぼ南北方向であり、南側の 3～4 径間の桁が落橋した模様である。調査時点では、倒壊した橋脚や桁の撤去作業が進んでおり、被害の状況や落橋原因について確認できなかった。

(2) 延平橋 (Yen-Pin Bridge)

竹山鎮中心街に入る直前の省道 3 号線上にあり、東埔蚋溪にかかる 4 車線 6 径間の橋梁 (1986 年 2 月竣功) である。桁は 3 本の RC の I ビームで、径間長は 10m 程度である。断面が 10m×2m 程度、高さが 5～6m の壁式 RC 橋脚で支持されている。橋軸方向は N70E である。

損傷状況を図-10 に示す。3～4m におよぶ南側周辺地盤の隆起による A2 の崩壊、P3 と P4 における 100～200mm もの縦方向に貫通する 2 本のひび割れ、P5 における 5mm 程度の縦方向に貫通する 1 本のクラック、A1 における 0.5～0.8mm の横方向クラックなどの被害が生じた。A2 周辺地盤の隆起によりプレハブの建物やガソリンスタンドが倒壊しており、これらの地盤の隆起から断層線の方を推定すると N80E～EW 方向となる。前述した橋台の崩壊や橋脚の縦方向に貫通するひび割れはこうした断層変位によって生じたものと考えられる。

(3) 桶頭橋 (Tong-Tou Bridge)

竹山鎮南西部清水溪にかかる 2 車線 4 径間の橋梁である。桁は 3 本の RC の I ビームで、径間長は 10m

程度、幅員は 7m 程度である。橋脚は T 型張り出し式 RC 橋脚である。橋軸方向は N30E である。

本橋の被害状況を図-11 に示す。A1 は崩壊しており、D1 は南側に傾いて落下している。P1 は西面から東面方向にせん断破壊し、東側に傾斜している。D2 は完全に落下しており、P2 も D3 の下に埋もれ倒壊している。D3 は西側に傾いて落下しており、P3 は東面から西面にかけてせん断破壊し、西側に倒壊している。D4 は北側に落下しており、桁の途中で折れ曲がっている。A1 橋台周辺では大規模な岩盤崩壊が生じており、また、A1 橋台の破壊の仕方が尋常ではないことから、この付近を断層が横切ったのではないかと推定される。

3. 結論

集集地震による道路橋の被害を調査した。短時間の調査であり、間違いがあるかもしれないが、現時点で確認出来る事項は以下のとおりである。

- 1) 合計 20 橋の被害を調査したが、このうち落橋した橋は 8 橋 (卑豊橋、長庚大橋、石圍橋、一江橋、烏溪橋、平林橋、名竹大橋、桶頭橋)、落橋は免れたが大きな被害を受けた橋は 4 橋 (東豊大橋、猫羅大橋、斜張橋、延平橋) である。その他の 8 橋では桁ずれや支承ずれなどの損傷が生じている。
- 2) 落橋もしくは大被害を受けた上記 12 橋のうち、5 橋 (卑豊橋、一江橋、烏溪橋、名竹大橋、延平橋) では周辺に断層が生じており、主として断層運動により被害が生じたと考えられる。2 橋 (石圍橋、桶頭橋) では橋梁周辺部に断層の痕跡が認められなかったが、被害の激甚さとともに、ある特定の支間だけが激甚な被害を受けている点からみて、断層によって被害を受けたと推定される。残りの 4 橋 (長庚大橋、東豊大橋、平林橋、猫羅大橋、斜張橋) では地震動による桁の振動によって桁の落下や損傷、あるいは下部構造の損傷が生じた。
- 3) 表-1 に示すように断層運動で落橋した橋の中には、上下・水平方向ともに 5m 以上の大変位によって被害を受けた橋がある。
- 4) 橋梁構造物—断層を含む周辺地盤を一つの系と考え、5m から 10m に及ぶ大断層変位が生じても橋梁としての機能を保持できる新構造形式を真剣に模索していく必要がある。

謝辞: 現地調査に際して、国家地震工程研究中心の C.H. Loh 所長、柴駿甫博士、廖文義博士に便宜を図っていただきました。また、文部省台湾地震調査班の東北大学大槻憲四郎教授には断層線の位置や方向に関する貴重な情報をご教示いただきました。ここに記して謝意を表します。