

報告 台湾大地震（1999年9月21日）による3橋梁の被害調査と 損傷メカニズムの推定

田崎賢治*1・藤井康男*2・佐藤峰生*3・鈴木直人*4

要旨: 集集大地震によって被害を生じた代表的な3つの橋梁の被害調査分析を実施した。その結果、一江橋と石圍橋では地震動と地盤の変動により桁の落橋が生じた。また、建設中の斜張橋である集鹿大橋では、主塔基部における橋軸直角方向の曲げ損傷や主桁と主塔の剛結部におけるコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈などが生じたことから、地震時に上部構造が橋軸方向と橋軸直角方向に大きく振動したことが明らかとなった。
キーワード: 橋梁, 地震被害, 曲げ損傷, 集集地震

1. まえがき

1999年9月21日、台湾の中央部集集で発生したM7.6の大地震では、台中県、南投県を中心に橋梁にも甚大な被害が生じた。筆者らは地震後、台中県を中心に、橋梁の被害調査および測量調査を実施した。本報告では、これらのうち、特徴的な損傷を生じた一江橋、石圍橋、集鹿大橋（建設中の斜張橋）について、詳細な損傷状況と測量調査から推定した損傷メカニズムについて報告を行う。

2. 調査した橋梁の被害概要

今回の地震では、震源近傍の南北に走る断層に沿って、局所的であるが多くの橋梁が落橋等の被害を受けたことから、図-1に示す10橋について被害調査を行った。橋梁の被害原因としては、大きく次の3つに分けられる。

- ① 振動による被害: 支承部やRC橋脚の損傷、桁の水平移動、建設中のPC斜張橋の主塔基部やケーブル、桁に損傷が生じている。(東豊大橋、平林橋、長庚大橋、集鹿大橋など)
- ② 振動と地盤変位による被害: 橋脚間のずれと

ともに、橋脚自身にも損傷が生じている。

(名竹大橋、烏溪大橋、一江橋、石圍橋など)

- ③ 大規模な断層変位による被害: 9m程度に及ぶ鉛直あるいは水平変位により、下部構造の転倒や桁の落下が生じている。(卑豊橋、石岡ダム通路橋など)

今回直接確認した以上の橋以外にも多数の落橋、通行止の橋梁が報告されている^{1)~4)}。



図-1 調査橋梁位置図

*1 大日本コンサルタント(株)技術本部耐震技術室 工修 (正会員)

*2 阪神高速道路公団工務部設計課

*3 (株)大林組土木技術本部設計第一部

*4 (株)建設技術研究所大阪支社 工修 (正会員)

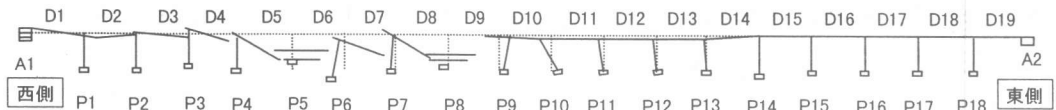


図-2 一江橋の被害概要

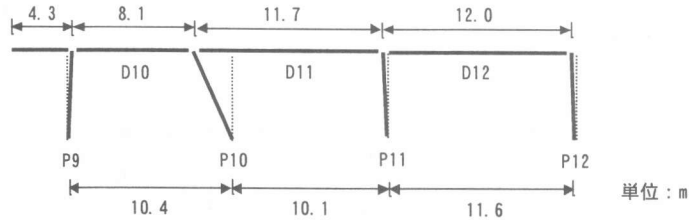


図-3 橋脚間距離 (P9～P12)

3. 一江橋

本橋は太平市内の県道 136 号線上にある 20 径間単純橋である。上部構造はすべての径間で、桁長 12m、幅員 8m 程度で、4 主桁を有する RC ビーム桁である。下部構造は断面が 7.0m×1.0m、高さが 6.0m 程度の RC 壁式橋脚である。後述する倒壊した橋脚の破壊面を見る限り、φ15mm の丸鋼鉄筋が 300mm ピッチで一段配筋されている程度で、非常に貧配筋な構造である。

被害状況の概要を図-2 に示す。橋の西側で被害が大きく、A1 橋台から水際に至る間の D1～D9 が落橋している。橋脚にも顕著な被害が見られ、P5 と P8 が倒壊し、P10 は約 22° 西側に傾斜している。他の橋脚でも 2～5° 程度の傾斜が認められる。なお、P1 と P2 は地中に埋まっており、被害状況は観察できなかった。

落橋した D1～D9 の大半は、西側の桁端部が橋脚上に残り、東側に落下している。D6 と D9 は、P5 と P8 橋脚が倒壊したことにより、桁の両端とも完全に落下している。D1 と D2 については、D1 が東側向かって下り、D2 は逆に東側向きに上っていくような勾配を有した状況になっているが、桁下が観察できないため、落橋の様子は定かではない。

一江橋の落橋で特徴的なことは、桁と橋脚とのずれの大きさである。写真-1 に、D7 と D8 が落橋した様子を示しているが、D8 西側端部と P7



写真-1 一江橋落橋状況

では 5m 以上もずれている。また、主桁の下面にはひっかき傷のようなものが見られ、桁が橋脚上を滑ったことがうかがえる。

図-3 に、P9～P12 の橋脚間距離の測量結果を示す。桁の長さを参考に、橋脚間距離は本来 12m であったと推測されるが、図-3 によると、P9 から P11 の橋脚基部間が約 2m ずつ縮まっていることがわかる。橋脚頭部においては、P9 と P10 の間で距離が約 4m 短くなり、D10 が P9 の西側へ約 4m 張り出している。基部が回転して P10 が大きく西側に傾いたために D10 は落橋こそしていないが、P9 にかろうじて引っかかっているという状況である。

以上より、橋脚間距離が小さくなっているこ

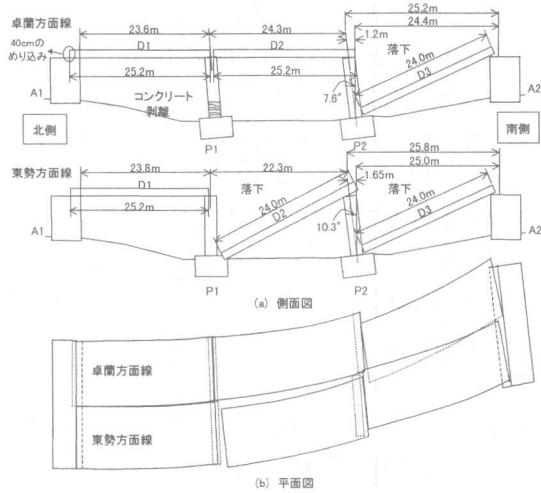


図-4 石園橋の被害概要と測量結果

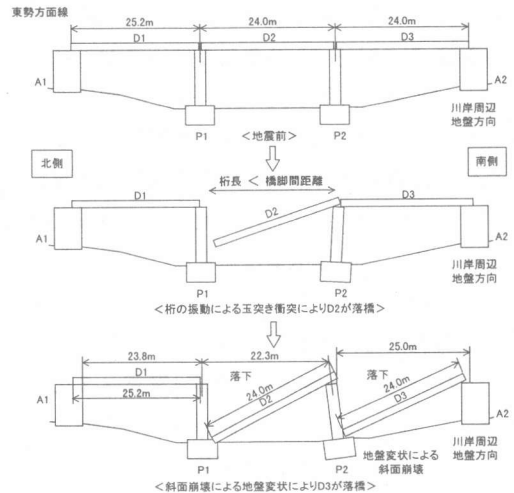


図-5 東勢方面線の落橋メカニズムの推定

と、すべての落橋で桁の東端が落ちていること、倒壊した2橋脚が西側に倒れていること等を考え合わせれば、地盤が西から東へ大きく動いたと考えられる。ただし、P11の東側では顕著な橋脚被害が見られず、橋脚間距離の変動も認められないため、この地盤変動はP11付近で終結したと推定される。A1付近はかなりの地盤隆起が見られ、川島らによれば、断層変位が直撃したと考えられている³⁾。実際の地盤変状については今後さらに調査・研究が必要であろうが、地震時に大規模な地盤の動きがあり、それがこの橋梁の破壊の主要因であることは間違いない。

なお、上述したように、P11より東側では比較的大きな被害は見られなかった。しかし、橋脚天端での桁間の隙間が大きなどころでは約40cmに達しており、地震時に桁がかなり水平振動したものと考えられる。

4. 石園橋

本橋は省道3号線上にあり、大甲溪支流を渡河する上下線分離3車線の3径間単純曲線橋である。上部構造はRC5主桁、桁長は24~25m程度、幅員は11~12m程度で、ゴム支承で支持されている。橋脚はRC小判型橋脚で、断面は3.9m×1.5~1.8m、高さが柱下端からはり天端まで9m程度である。



写真-2 石園橋の被害状況

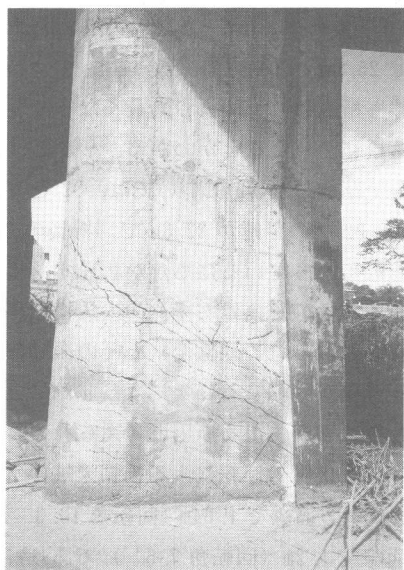


写真-3 卓欄方面線 P1 橋脚の損傷状況

被害状況を図-4および写真-2に示す。東勢方面線ではD2とD3の北側の桁端部がそれぞれP1とP2より落橋している。また、卓欄方面線でもD3北側桁端部がP2より落橋している。

東勢方面線のP1橋脚には大きな損傷は見られず、A1橋台側に 0.9° 程度傾斜している。P2は橋脚自体に大きな損傷は見られないが、基礎が大きく回転しており、P1側に 10.3° 程度、東側（橋軸直角方向側）に 4.8° 程度傾斜している。一方、卓欄方面線のP1橋脚は写真-3に示すように、高さ2m付近で東西方向にせん断および曲げひび割れが生じ、北側基部でコンクリートが剥離している。さらにA1橋台側に 2.2° 程度傾斜している。P2は橋脚自体に大きな損傷は見られないが、P1側に 7.6° 程度、東側に 3.4° 程度傾斜している。全体として橋脚が北側に傾斜している。

本橋周辺では写真-2からわかるように、右岸側（A2側）の川岸で大きな斜面崩壊が生じている。この斜面とつながる川岸から100m程度の丘陵地では川方向に地滑りが生じており、断層変位の影響を受けた可能性があるとの報告もある³⁾。

図-4には、下部構造間距離と桁長の測量結果を併せて示しているが、両方面線で落橋に至ったD3を支持するP2とA2間の距離が、東勢方面線は25.0m、卓欄方面線は24.4mで、いずれの路線も桁長の24.0mよりも長くなっているため、落橋に至ったことがわかる。しかし、東勢方面線で落橋したD2については、D2を支持するP1とP2間の距離が22.3mで、桁長の24.0mよりも短くなっているにもかかわらず落橋に至っている。D3の落橋は右岸側の大規模な斜面崩壊から裏付けられる地盤変状と桁の振動によってP2基礎が回転することにより北側に大きく変位したことが主たる原因と考えられる。このことは、P2橋脚の回転による橋脚天端の水平変位が、東勢方面線で1.64m（回転角 10.3° ）、卓欄方面線で1.2m（回転角 7.6° ）であり、地震前のP2～A2間の支間長24.0mにこれらの回転変

位を各々加えると、地震後の測量結果による支間長（東勢方面線：25.8m、卓欄方面線：25.2m）にほぼ等しくなることから裏付けられる。また、P1～P2間についても地震前の支間長が東勢方面線で24.0m、卓欄方面線で25.2mであり、回転変位を各々差し引くと、地震後の測量結果による支間長（東勢方面線：22.3m、卓欄方面線：24.3m）にほぼ一致する。

東勢方面線でP1とP2間の距離が桁長よりも短くなっているにもかかわらず落橋に至ったD2については、図-5に示すように、D3の落橋の前に、地震動による桁の慣性力が南側（A2側）に作用し、桁かかり長の不足などからD2が落橋したのではないかと推測される。地震動による慣性力を受けたことは、卓欄方面線のP1橋脚基部に曲げおよびせん断ひび割れやコンクリートの剥離といった損傷を生じていることや、A1、A2橋台パラペット部に桁衝突の痕跡があることから裏付けられる。

なお、卓欄方面線のD2は落橋に至らなかった理由としては、卓欄方面線のA1橋台部において、桁が北側（A1橋台側）に40cm程度めり込んで路面が盛り上がっていることや、P1橋脚に損傷が生じたことにより、これらの箇所地震エネルギーが吸収され、東勢方面線と比べて相対的に地震応答が小さかった可能性があることが考えられる。

5. 集鹿大橋

本橋は震央集集のすぐ南に位置し、濁水溪にかかるPC2径間斜張橋であり、主桁中央部の現場打ちを残して、その両サイドのプレキャストブロックを取り付け終わった段階の施工中のものである。

上部構造の主桁は円弧線形2室1主箱桁で、桁高2.75m、全幅員24.0m、支間割 $2@120m=240m$ である。また、主塔は $3.0m \times 4.0 \sim 6.0m$ の中空菱形変断面RC柱で高さ58m、斜材は片側17段の並列ケーブル1面吊り2組である。下部構造の主塔部橋脚は $6.0m \times 6.3m$ の楕円形RC柱、基

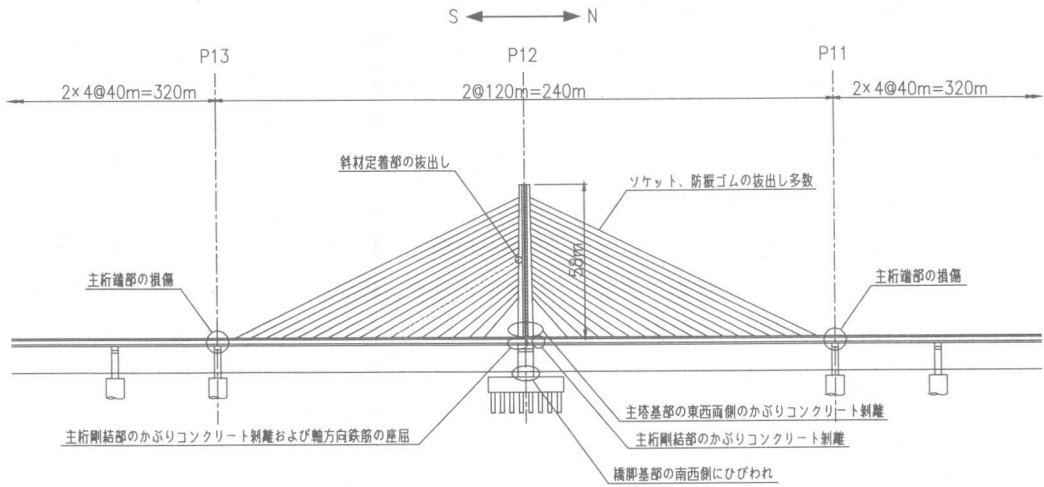


図-6 集鹿大橋の被害概要

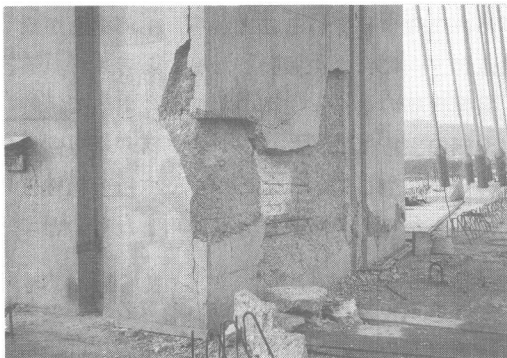


写真-4 主塔基部（東面）の損傷状況

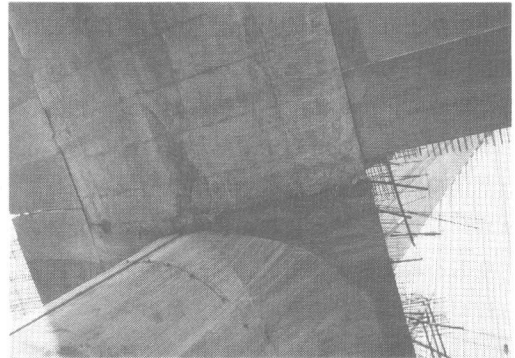


写真-5 主桁剛結部（南側）の損傷状況

礎は杭基礎である。

損傷状況を図-6および写真-4～写真-6に示す。特に上部構造の損傷が激しく、写真-4に示すように主塔基部の東西面のかぶりコンクリートが橋軸直角方向にかなり剥離しており、鉄筋が露出している。また、両主桁端のアプローチ橋との取り合い部において桁間が衝突した形跡があり、橋軸直角方向に桁が移動している。更に、この下のラーメン橋脚の上梁部にはせん断ひびわれが発生している。これらのことから、上部構造が大きく橋軸直角方向に揺動したものと推測される。

一方、主桁と主塔の剛結部においては、主桁

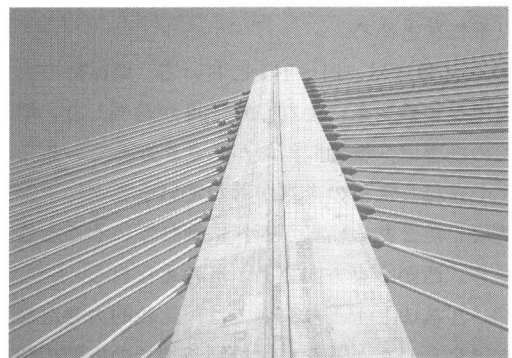


写真-6 主塔定着部のソケット・防振ゴムの抜け出し状況

コンクリートが剥落しており、特に南側は軸方向鉄筋が座屈している。このことから、主桁の橋軸方向にもかなり大きな地震力が作用したものと考えられる。

ただし、主塔東正面位置が架設用クレーン設置のために切り欠かれているため、この影響もあるものと思われる。

また、斜材の多数において定着部のソケットと防震ゴムの抜け出しが見られ、南東側の上から 11 段目斜材においては定着部からの抜け出しがあったものと思われる。これらのことから、斜材に大きな振動と引張り力が生じたもの推測される。

以上の損傷の主因は、建設地点に近い南投県名間で最大水平加速度 984gal (EW)、最大鉛直加速度 335gal が観測されており、おそらく設計上の想定よりはるかに大きな地震力が作用したことによるものと考えられる。しかし、橋脚基部ではなく、主塔や主桁に塑性ヒンジが発生していることや、斜材の定着部が抜け出したことなど、耐震設計上問題のある損傷形態を示している。したがって、今後の斜張橋の耐震設計のあり方を考える上でも、詳細な動的解析による本橋の地震時挙動の解明が望まれる。

6. まとめ

集集大地震により大きな被害を生じた代表的な 3 つの橋梁の被害調査により得られた結果を以下にまとめる。

① 一江橋では、P1~P11 において、地震時の大規模な地盤変動により、D1~D9 が落橋した。地盤の動きは、橋脚間距離が小さくなっていることや落橋した桁の東端が落ちていること、また倒壊した 2 基の橋脚が西側に倒れていることから、西から東方向であったと考えられる。

② 一江橋の P11 より東側では、比較的大きな被害は見られなかったが、橋脚天端での桁間の隙間が約 40 cm に達している箇所もあり、地盤変動に加え、地震時に桁が大きく水平振動したものと考えられる。

③ 石圍橋の D3 の落橋は、右岸側の大規模な斜面崩壊から裏付けられる地盤変状と桁の振動によって P2 基礎が回転することにより北側に大きく変位したことが主たる原因と考えられるが、その前に、桁の振動により東勢方面線 D2 が落橋したのではないかと推測される。

④ 一江橋と石圍橋では、地震による振動と地盤変位により、桁かかり長を超えて桁の落橋が生じた。仮に、上部構造が連続構造であれば、少なくとも今回のような地盤の変位に対しては、桁の落下を防ぐことができたのではないかと推測される。

⑤ 建設中の斜張橋である集鹿大橋では、主塔基部の橋軸直角方向の損傷や両主桁端とアプローチ橋の衝突による直角方向の桁ずれ、さらにその掛け違い部のラーメン橋脚の上梁にせん断ひびわれが発生していることから、上部構造が橋軸直角方向に大きく振動したものと考えられる。

⑥ 集鹿大橋の主桁と主塔の剛結部において、特に南側の主桁にコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈が生じていることから、主桁の橋軸方向にもかなり大きな地震力が作用したものと考えられる。

⑦ 集鹿大橋の斜材定着部では、多数のソケットと防震ゴムの抜け出しや定着部からの抜け出しがあったことから、斜材に大きな振動と引張り力が生じたものと考えられる。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション:台湾中部大地震, PP. 75-95, 1999 年 11 月 12 日号
- 2) 東京大学工学部土木教室:トルココジャエリ地震・台湾大震災被害報告速報, 1999. 11
- 3) 川島一彦, 庄司学, 岩田秀治:1999 年集集大地震における道路橋の被害と被災メカニズム, 文部省突発自然災害調査団 1999 年台湾集集大地震報告会資料, 1999. 11
- 4) Dai Zhong・Chai Junjin・Liu Yiyi:集鹿大橋主橋企画設計, 土木技術第一巻第八期 1998 年 10 月号