

台湾集集地震（1999年）による石圍橋の被災メカニズムの推定

田崎賢治¹・幸左賢二²・山口栄輝²・永瀬英生³・廣岡明彦³

¹正会員 工修 大日本コンサルタント 東京事業部 技術一部（〒343-0851 埼玉県越谷市七左町5-1）

²正会員 Ph. D. 九州工業大学助教授 工学部 建設社会工学科（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）

³正会員 工博 九州工業大学助教授 工学部 建設社会工学科（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）

1. はじめに

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。

本文では、これらのうち、特徴的な損傷を生じた石圍橋について、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. 構造条件

本橋は図-1に示すように省道3号線上にあり、大甲溪の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（1994年9月竣工）。上部構造はRC5主けた、けた長は24～25m、幅員は11.75mでゴム支承で支持されている。なお、支持条件は不明である。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。橋梁断面図を図-2に示す。

また、本橋は図-3に示すように、斜角が55度～85度程度まで変化している。

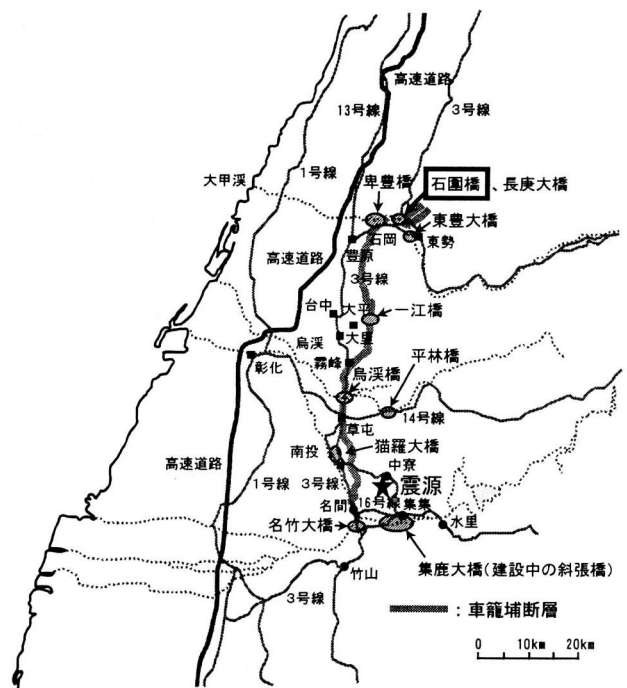


図-1 橋梁位置図¹⁾



写真-1 石圍橋の被害状況

3. 被害状況

被害状況を写真-1 および図-3 に示す。東勢方面線では D2 と D3 の北側のけた端部がそれぞれ P1 と P2 より落橋している。また、卓蘭方面線でも D3 北側のけた端部が P2 より落橋している。東勢方面線、卓蘭方面線とも A2 橋台上では、写真-2 に示すようにけたが衝突し、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。

また、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、写真-3～写真-4 に示すように、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、卓蘭方面線の P1 橋脚は写真-5 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、基礎が大きく回転しており、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-1 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おり、断層の影響を受けた可能性があるとの報告もある¹⁾。

4. 被害メカニズムの推定

(1) D3 の落橋メカニズムの推定

図-3 には、下部構造間距離とけた長の測量結果を併せて示している。これによると、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、卓蘭方面線は 24.4m で、いずれの路線もけた長の 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、けた長の 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°）、卓蘭方面線で 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、卓蘭方面線：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、卓蘭方面線で 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、卓蘭方面線：24.3m）にほぼ一致する。

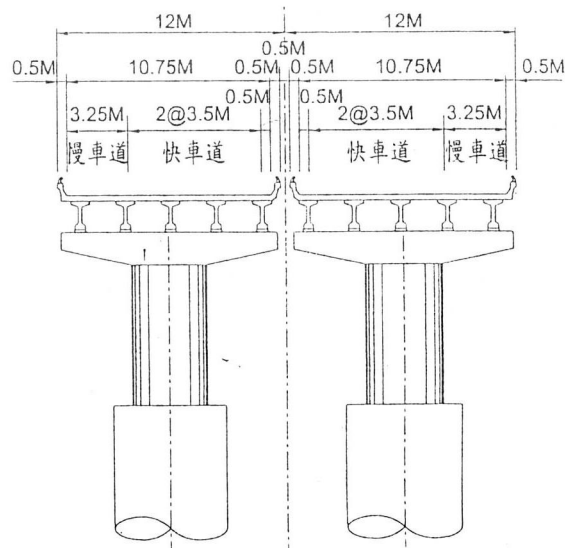


図-2 橋梁断面図

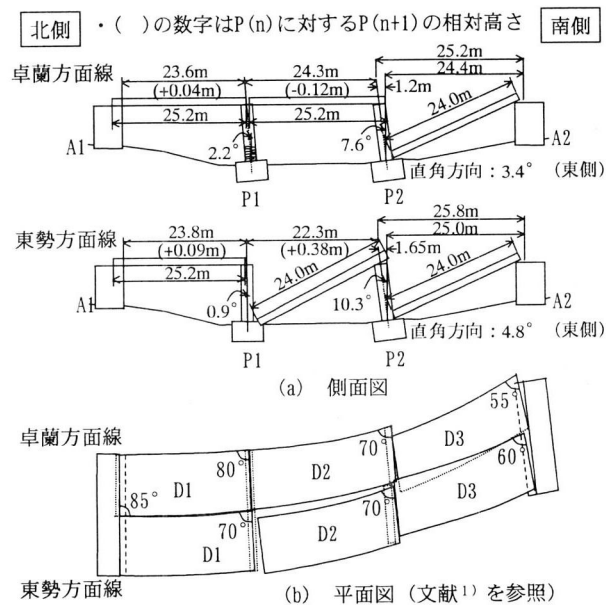


図-3 石圍橋の被害概要と測量結果

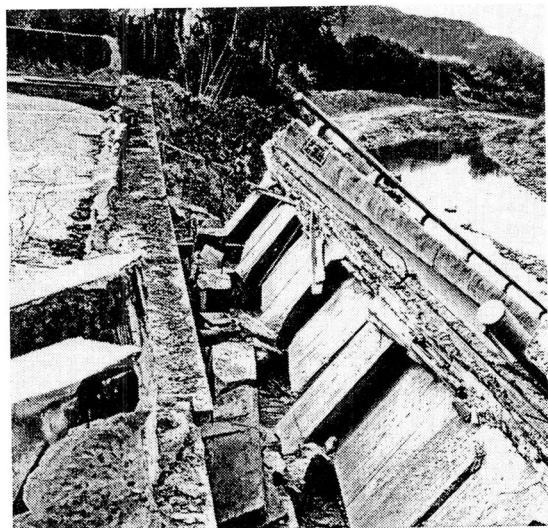


写真-2 A2 橋台支承付近の損傷



写真-3 東勢方面線 P2 橋脚の橋軸方向への傾斜

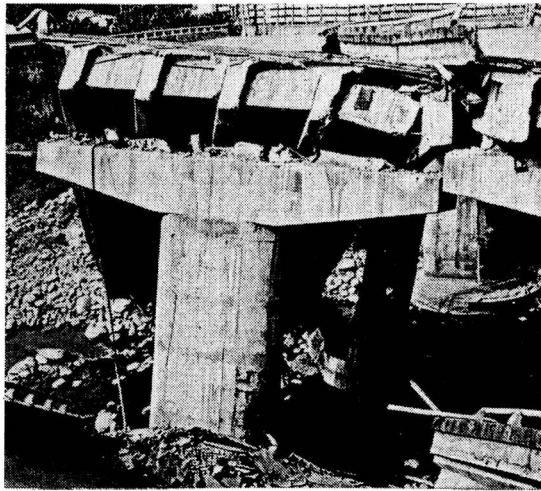


写真-4 東勢方面線 P2 橋脚の橋軸直角方向への傾斜

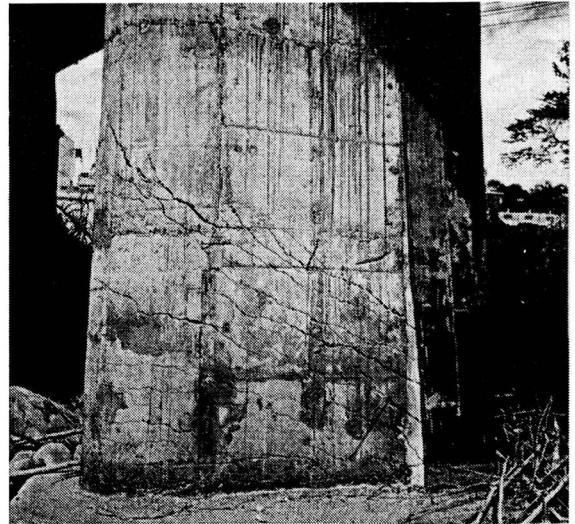


写真-5 卓欄方面線 P1 橋脚の損傷状況



写真-6 卓欄方面線 A1 橋台付近の損傷

(2) 東勢方面線 D2 の落橋メカニズムの推定

a) 推定-1：橋軸方向の振動による落橋の可能性

東勢方面線で P1 と P2 間の距離がけた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-4 に示すように、D3 の落橋の前に、地震動によるけたの慣性力が南側 (A2 側) に作用し、けた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けた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、写真-6 に示すように、卓蘭方面線の A1 橋台部において、けたが北側 (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。

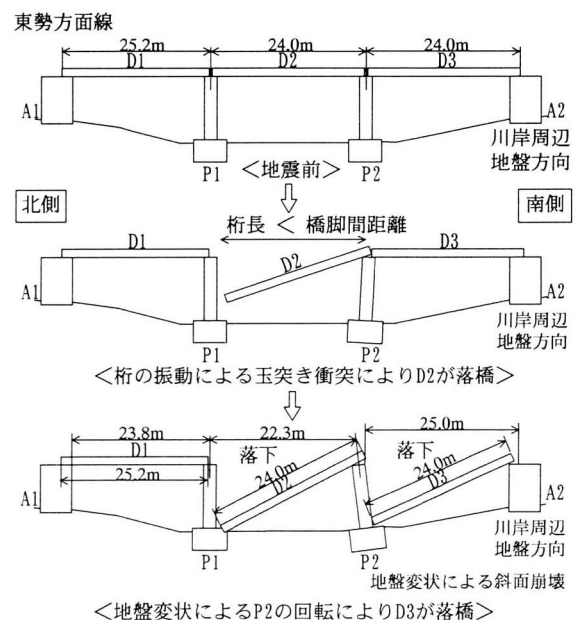
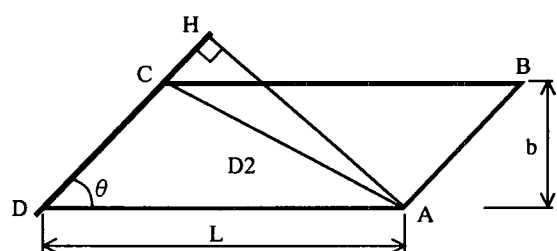


図-4 東勢方面線の落橋メカニズムの推定

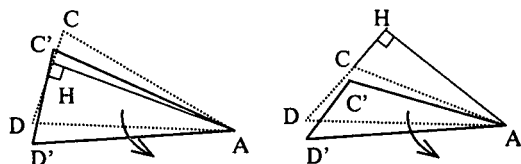
b) 推定-2：橋軸直角方向の振動による落橋の可能性

本橋は図-3 に示すように、斜角が 55 度～85 度まで変化する斜橋である。写真-2 に示した橋脚の損傷状況から、本橋は東西方向（橋軸直角方向）にも地震動を受けた痕跡があることから、東勢方面線 D2 が直角方向の地震動を受け、けたの回転挙動により、幾何学的に落橋に至った可能性の有無を検証した。

東勢方面線 D2 は P1 橋脚上のけたが落橋していることから、回転挙動は P2 鈍角側けた端部 A 点を回転中心とし、70 度の斜角を有するけたの北側で生じたものと考えられる。図-5 に幾何学的に回転可能な平面形状の判定概念図を示す。また、図-6 に回転可能な斜橋の平面形状比 (b/L) と斜角 θ との関係を示す。式(1)を満たす図の斜線内が回転可能範囲となる²⁾。東勢方面線 D2 の平面形状比 ($b/L=0.47$) と斜角 (=70 度) の関係を図中に●印で示しているが、回転可能範囲外となり、けたや橋脚位置が地震前と変わらないことを前提とすれば、D2 桁は幾何学的に回転することはないことがわかる。



(a) 斜角を有する上部構造



(b) $\overline{DC} \geq \overline{DH}$ 回転不能 (c) $\overline{DC} \leq \overline{DH}$ 回転可能

図-5 回転の判定

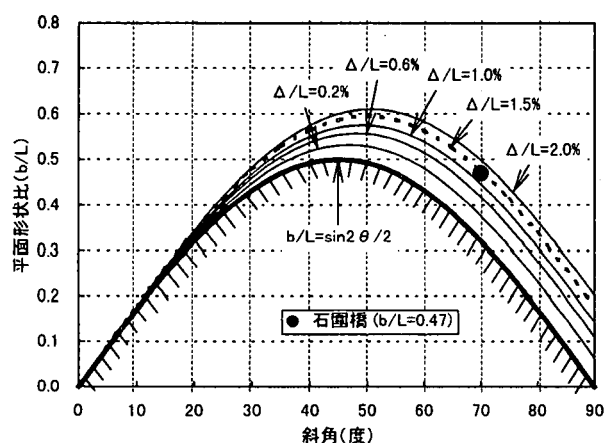


図-6 回転可能な斜橋の平面形状比と斜角 θ の関係

しかし、地震時には、前述したように橋軸方向の地震力も作用したことが判っており、橋軸方向の地震力により、D2 けた両端の遊間量の合計 $\Delta (= \Delta_1 + \Delta_2)$ が 35cm ($\Delta/L=1.5\%$) 広がったと仮定すると、回転可能範囲は式(2)の条件式²⁾ から、図-5 の太破線 ($\Delta/L=1.5\%$) のようになる。この仮定の場合、D2 けたの●印は回転可能範囲内となり、幾何学的に回転することになる。

また、東勢方面線の P1 橋脚はほとんど残留変位が生じておらず、P2 橋脚のみ橋軸直角方向に 4.8° 、橋脚先端の変位に換算して 75cm 東側に傾斜していることから、橋軸方向の変位と併せて、この影響もけたが回転しやすい方向に作用したものと考えられる。

今後は、けた同士の衝突を考慮した時刻歴応答解析によるシミュレーションと、橋軸方向および橋軸直角方向に対する強制変位解析を実施し、東勢方面線 D2 けたが P1 橋脚先端から脱落した可能性を検証する予定である。

$$L \geq 2b / \sin 2\theta \quad (1)$$

$$\left(1 + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{L}\right) L \geq \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{b^2 + \left(L - \frac{b}{\tan \theta}\right)^2} \quad (2)$$

ここに、

L : けた長、 b : 上部構造の全幅員、 θ : 斜角、

Δ_1 、 Δ_2 : けた端部の遊間量

5. まとめ

- (1) 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。
- (2) 東勢方面線 D2 は、D3 の落橋の前に、すでに落橋したことが推測される。
- (3) 東勢方面線 D2 は、橋軸方向の地震動により、桁端の遊間量の合計が地震前と比べて 35cm 程度大きくなったと仮定した場合、橋軸直角方向の地震動によって D2 桁が回転挙動を起こし、P1 橋脚上のけたかかり長を超えて落橋に至った可能性がある。
- (4) 仮に、上部構造が連続構造であれば、けたの落下を防ぐことができたのではないかと推測される。

参考文献

- 1) 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
- 2) 大塚久哲、神田昌幸、鈴木基行、川神雅秀：斜橋の水平地震動による回転挙動解析、土木学会論文集 No. 570/ I -40, 1997. 7