

# 報告 1999年台湾集集地震におけ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\*3

**要旨:** 集集大地震によって特徴的な損傷により落橋に至った石圍橋について、詳細な損傷状況と測量調査から本橋の落橋メカニズムを推定した。その結果、落橋に至った複数のけたのうち、橋脚基礎付近の地盤変位に伴う基礎自体の回転変位により落橋に至ったものと、橋軸直角方向の慣性力と地盤変位の複合的な作用によるけたの回転変位が原因で落橋に至ったものがあることがわかった。

**キーワード:** 橋梁, 地震被害, 曲げ損傷, 集集地震, 石圍橋

## 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、南投県を中心に甚大な被害が生じた。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、台中県を中心に、図-1に示す10橋について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、特徴的な損傷により落橋に至った石圍橋について、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主げた、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の平面図に示すように、斜角が55度~85度程度まで変化している。

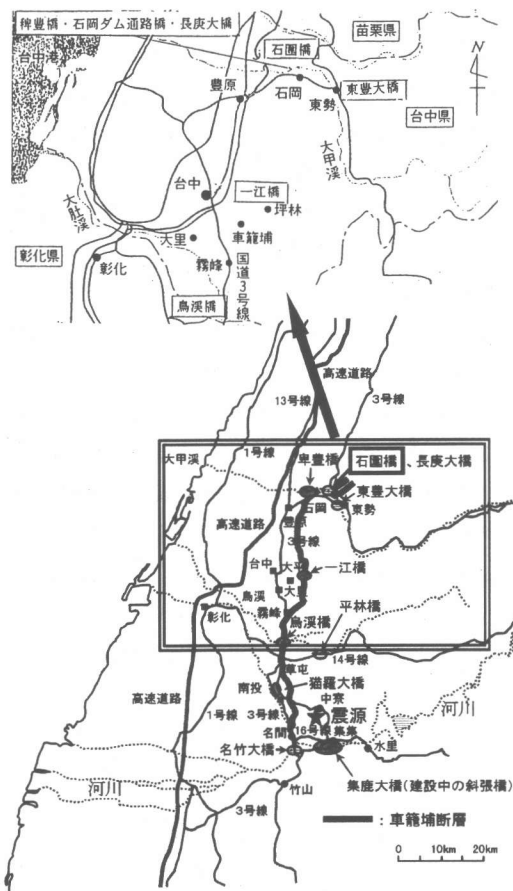


図-1 橋梁位置図

\*1 大日本コンサルタント(株) 東京事業部 技術一部 工修 (正会員)

\*2 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 Ph. D. (正会員)

\*3 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 Ph. D. (正会員)



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D5とD6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。

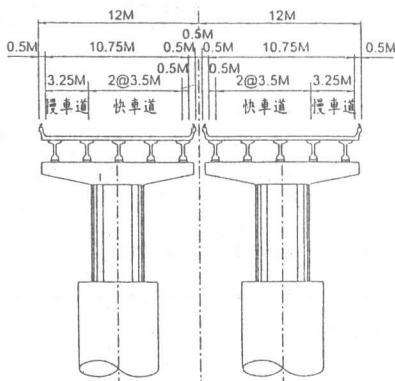


図-2 橋梁断面図

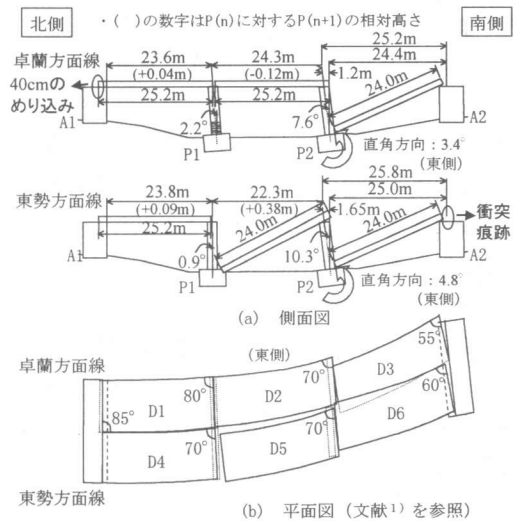


図-3 石圍橋の被害概要と測量結果



写真-2 A2橋台支承付近の損傷



写真-3 東勢線 P2 橋脚の橋軸方向への傾斜



写真-6 卓欄線 A1 橋台付近の損傷



写真-4 東勢線 P2 橋脚の直角方向への傾斜



写真-7 東勢線 P1 上のけた位置

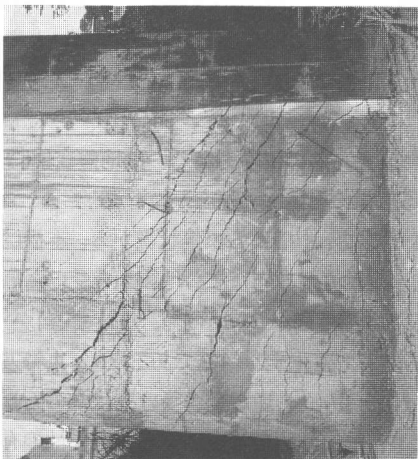


写真-5 卓欄線 P1 橋脚の損傷状況



写真-8 卓欄線 P1 上のけたの回転変位

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<sup>1)</sup>。

#### 4. 被害メカニズムの推定

##### 4.1 D3 および D6 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、D3 および D6 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 基礎が回転し、北側に大きく変位することにより、両方面線の D3、D6 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、いずれの路線もけた長の 24.0m よりも長くなっている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。

##### 4.2 東勢方面線 D5 の落橋メカニズムの推定

###### (1) 橋軸方向の慣性力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 D5 については、図-4 に示すように、D6 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 D5 の落橋

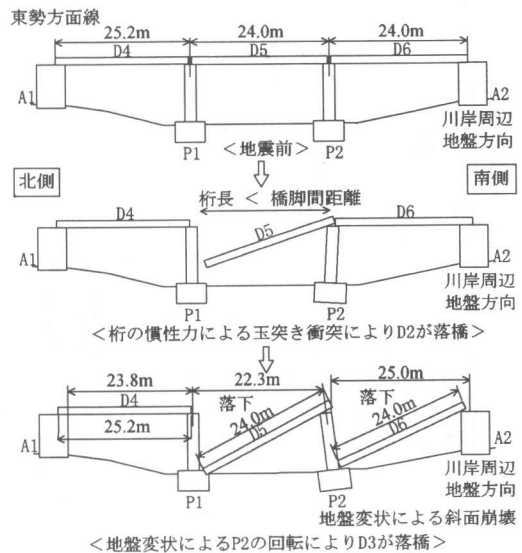


図-4 東勢方面線の落橋メカニズムの推定

の可能性を検証する。地震動による慣性力を受けたことは、A2 橋台パラペット部にけた衝突の痕跡があること (写真-2)、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 (写真-5)、卓欄方面線の 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 (写真-6) から裏付けられる。しかし、写真-7 に示す東勢方面線 P1 上のけた位置によると、D4 側のジョイント部分が橋脚天端の中間くらいに存在していることから、D4 側が単に橋軸方向に押し出した形ではないと考えることができる。

###### (2) 橋軸直角方向の慣性力あるいは地盤変位による落橋の可能性

写真-5 に示す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。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ため、東勢方面線 D5 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する。但し、D5 の落橋のタイミングが D6

よりも前の場合と後の場合が考えられるため、両者の場合を想定する。けたが回転挙動したことは、卓欄方面線 P1 上でけたの間隔が片側のみ 30cm 程度開いている写真-7 から明らかであり、このけたの開きは、卓欄方面線 P2 橋脚が直角方向に  $3.4^\circ$  傾斜することによる回転変位から算出したものと一致している (図-5 参照)。(P2 橋脚上; 53cm, P1 橋脚上; 28cm, けたの回転角;  $1.3^\circ$ )

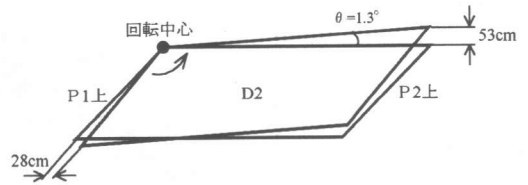


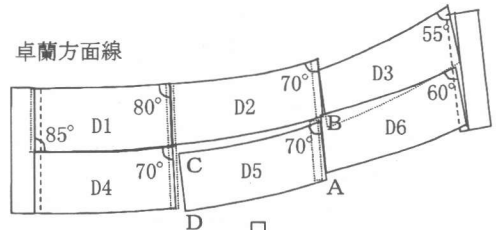
図-5 D2 けたの回転変位 (卓欄方面線)

① D6 落橋前に D5 が落橋したと仮定 (隣接の D6 が存在する場合)

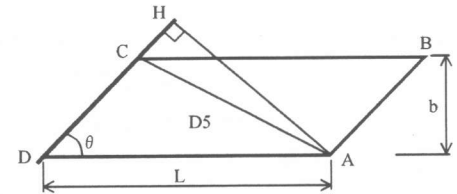
東勢方面線 D5 は P1 橋脚上のけたが落橋していることから、回転挙動は P1 鈍角側けたの端部 C 点を回転中心とし、70 度の斜角を有するけたの北側で生じたものと考えられる。ここで、幾何学的に回転可能な平面形状の判定概念図を図-6 に示す。また、図-7 に回転可能な斜橋の平面形状比 (b/L) と斜角  $\theta$  との関係を示す。図-6 の式 (1) を満たす図の斜線内が回転可能範囲となる<sup>2)</sup>。東勢方面線 D5 の平面形状比 (b/L=0.47) と斜角 (=70 度) の関係を図中に●印で示しているが、回転可能範囲外となり、けたや橋脚位置が地震前と変わらないことを前提とすれば、D5 けたは幾何学的に回転することはないことがわかる。

しかし、地震時には、前述したように橋軸方向の慣性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、D5 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<sup>2)</sup> から、図-7 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。

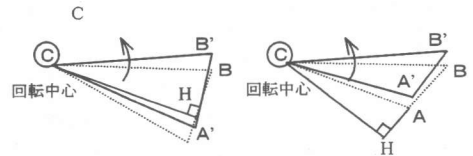
また、東勢方面線の P1 橋脚はほとんど残留変位が生じておらず、P2 橋脚のみ橋軸直角方向に  $4.8^\circ$ 、橋脚天端の変位に換算して 75cm 東側に傾斜していることから、橋軸方向の変位と併せて、この影響もけたが回転しやすい方向に作用したものと考えられる。



東勢方面線



(a) 斜角を有する上部構造



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

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

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

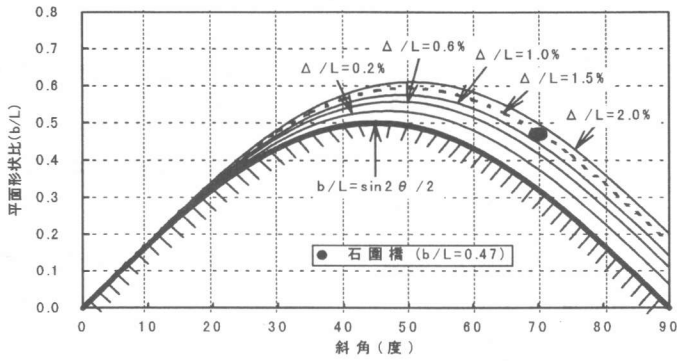
ここに、L : けた長

b : 上部構造の全幅員

$\theta$  : 斜角

$\Delta_1, \Delta_2$  : けた端部の遊間量

図-6 回転の判定

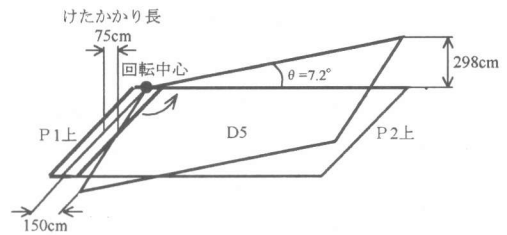


図一七 回転可能な斜橋の平面形状比と斜角  $\theta$  の関係

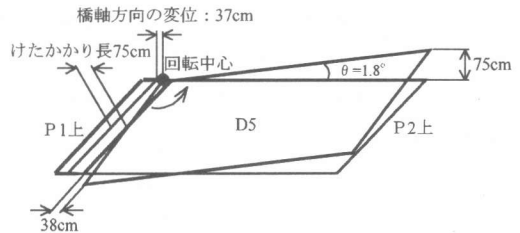
② D6 落橋後に D5 が落橋したと仮定

(隣接の D6 が存在しない場合)

東勢方面線 D6 が落橋後に D5 が落橋すると仮定する場合、D5 回転時に隣接の D6 は存在しない状態である。D5 の回転により、P1 橋脚上から脱落する条件は図一八に示すように、けたの中心が橋脚天端のけたかかり長 (75cm) 以上変位する場合である。図一八によると、P2 天端位置が直角方向に 3m 近く変位しなければ、脱落の条件を満足しないことになる。地震後、P2 橋脚の直角方向の傾斜は、橋脚天端位置で 75cm 程度であるため、D5 落橋時に 3m 近く変位することは考えにくい。逆に、P2 橋脚上で 75cm 変位した場合にけたが脱落する条件を示したものが図一九である。これによると、P1 橋脚上の変位は 38cm となり、橋軸方向に 37cm の変位が生じたと想定すれば落橋の可能性があるとと言える。



図一八 けたの回転により D2 が P1 上から脱落する条件(直角方向のけたの回転のみ)



図一九 P2 上の変位が 75cm になる場合のけたが脱落する条件

5. まとめ

- (1) D3 および D6 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 D5 と D6 の落橋の順序は明確にわからないが、いずれにしても慣性力と地盤変位の複合的な作用により、D5 けたが橋軸方向に 40cm 近く変位し、さらに、けたの回転挙動により 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高い。

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