

1999年集集地震による 一江橋の落橋メカニズムに関する一考察

劉 銘崇¹・森 敦²・水上善晴³

¹正会員 工博 日本技術開発株式会社 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町5丁目33-11)

²正会員 Ph.D. 日本技術開発株式会社 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町5丁目33-11)

³正会員 日本道路公団 仙台技術事務所 (〒989-3121 宮城県仙台市青葉区郷六字庄子39-1)

本論文は、1999年9月21日に発生した台湾集集地震により致命的に被災した一江橋の落橋メカニズムに関して考察したものである。一江橋の被害状況と地震後の周辺地盤の状況から、落橋を引き起こす要因として、橋脚周辺に現れた断層が考えられた。本論文では、露頭した断層状況を勘案した周辺地盤の動きに着目した仮説を立て、それにもとづいた落橋等の被害発生メカニズムについて推察した。その結果、地盤の水平方向の動きと鉛直方向の動きが密接に関連したことにより、落橋等の甚大な被害になった可能性が示唆された。

Key Words: Chi-Chi earthquake, I-Chiang bridge, earthquake damage, fault rupture

1. はじめに

1999年9月21日に台湾中部の集集地区を震源とする大規模な内陸活断層地震が発生し、多くの人命が奪われ様々な構造物が甚大な被害を受けた。その中において、特に橋梁の被害は社会経済に大きな影響を及ぼした。震源域周辺にある約1000橋の内、被害を受けた橋梁は200橋で、断層運動に起因する地盤の大規模変状の影響により落橋した橋梁は7橋(一江橋、石囲橋、長庚大橋、豊橋、烏溪橋、名竹大橋、桶頭橋)であったと報告されている¹⁾。この中で一江橋は、以下のような被害及び周辺地盤変状に関する特徴を有していた：①24径間の約半分に被害が及んでいた、②桁の玉突き現象と思われる水平方向への移動と橋脚の崩壊による落橋が発生した、③橋脚の上下・水平方向の移動があった、④橋梁を囲むように断層が表れた。

以上の特徴から、橋脚の移動と桁落橋の原因は、断層運動に伴い一江橋付近一帯の地表面に生じた隆起などの地盤変動が大きく影響していたと考えられる。本論文では、橋脚と桁の被害の特徴および橋梁周辺地盤の動きに着目した仮説を立て、それに基づいて落橋メカニズムに関して考察したものである。

2. 構造概要と被害の特徴

一江橋は震源地の集集町から約34.5kmの台中県道129号上にあり(図-1)、全長288mの24径間単純RC桁橋で(1950~1960年竣工)²⁾、RC小判タイプ壁式橋脚と直接基礎を有する(図-2)。橋脚の主鉄筋はφ15ctc300の1段配筋で、帯鉄筋はほとんど配置されていない³⁾。また、上部-下部構造の間に支承は無く、桁は直接橋脚に支持されていて、落橋防止装置もなかった。

橋梁の被害状況²⁾は、9径間(A1~P9)にわたる落橋、橋梁中央から右岸までの9橋脚の傾斜、2橋脚(P5、P8)の崩壊であった(図-3)。橋脚の間隔は地震前の12mから最大で1.6m狭まった(P19~P21)。桁の移動量に注目すると、落橋しなかったS10桁は橋軸の右岸方向に最大4mも移動した。しかも、これらの桁の底面を見ると、桁端部から橋脚と桁の接しているところまで、桁底面と橋脚上端部が接触したままずれた痕跡が見られた(写真-1)。

3. 断層運動と落橋メカニズムの仮説

(1) 一江橋付近の断層運動の推定

一江橋の被害の特徴より、落橋を引き起こした要因は橋脚周辺に現れた断層と考えられた。図-4の断層分布²⁾

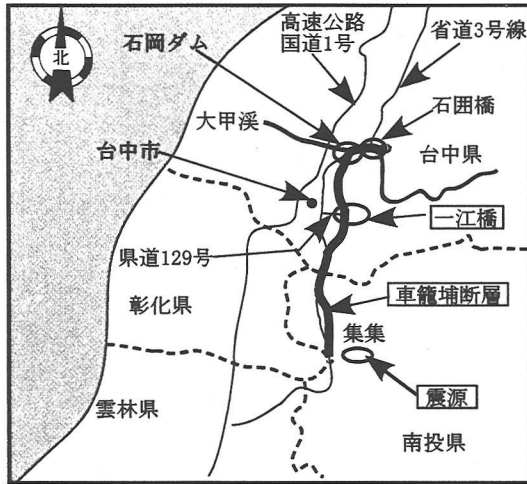


図-1 一江橋の位置

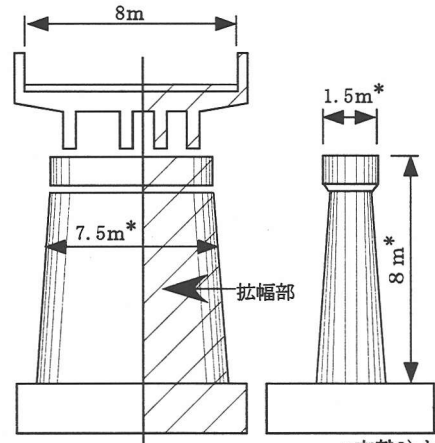


図-2 橋脚の構造一般図

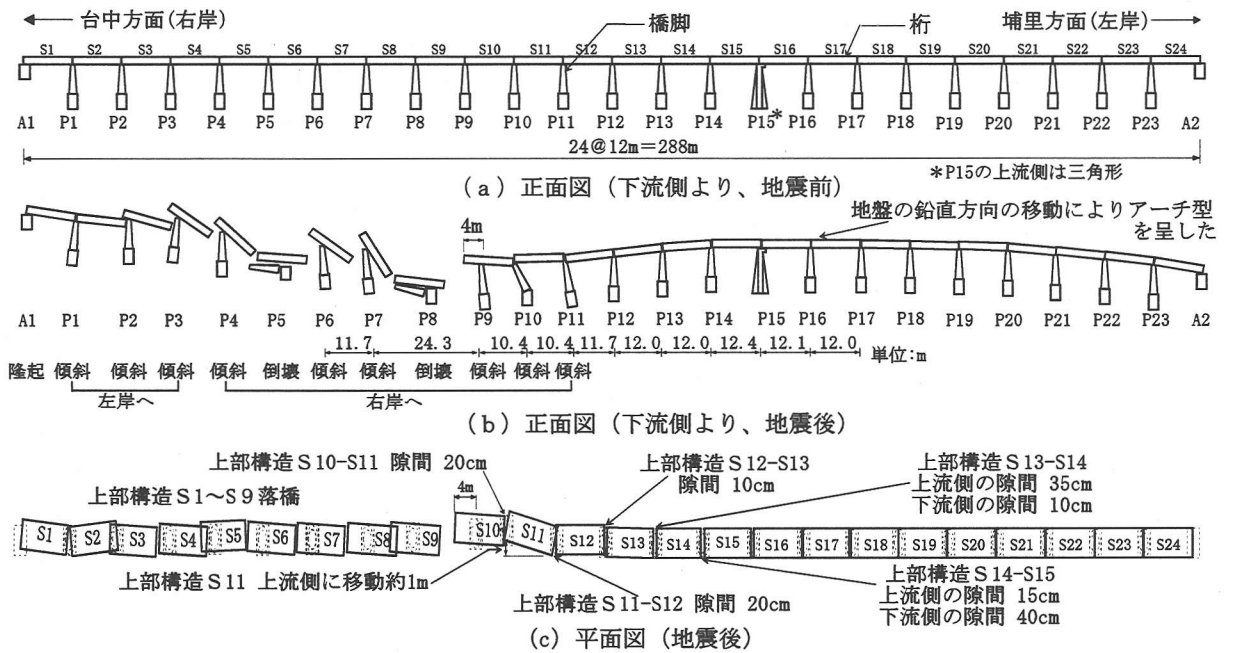


図-3 一江橋の被害概要²⁾



写真-1 桁と橋脚の接触移動の跡 (P3橋脚)

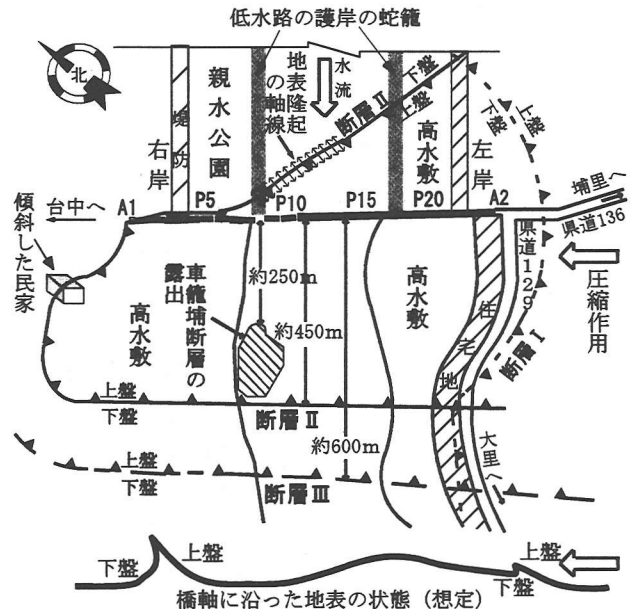


図-4 一江橋付近の断層分布²⁾

に示すように、断層Ⅰは一江橋の左岸を通過しており、橋は断層の下盤側にある。一方、断層ⅡはP5橋脚付近から橋軸方向に沿って橋の右岸端部を通過しており、このあたりで橋は上盤側に位置している。断層の上盤、下盤の関係から、左岸側の地盤が右岸側に向かっておされた状態（圧縮作用）となっていたことがわかる。また、図-4に想定される地表面の変化状況を示すが、断層ⅠとⅡの動き方からこれらにはさまれた一江橋には複雑な上下方向の変動が生じたと推定される。

(2) 落橋メカニズムについての仮説

一江橋の被害の特徴に基づき、断層変位による落橋メカニズムについて以下のような仮説を立ててみた。図-5に、以下のa)～e)の被害過程を図解した。

a) 地震発生前の状態を示す。

b)～c) 地震により左岸側から右岸側へ向かって圧縮力が働き、桁が突っ張り状態となり、桁と橋脚は接触したまま（橋脚と桁の間に支承がない）右岸側へずれてはじめた。それと共に右岸側上盤の地盤隆起が発生した。桁の移動と地盤隆起の影響より、橋脚の左岸側面に亀裂が発生した（P5、P8の倒壊方向から、その他の橋脚にも左岸側面に損傷が生じたものと推定）。また、上盤地盤の隆起および移動が続いて発生したことで、桁の移動量がだんだん大きくなった。このとき、地盤の隆起量が大きくなるに伴った橋脚の左岸側面（特にP5とP8橋脚）の亀裂が少しずつ断面内に進行し、橋脚の傾きも生じた。

d) 右岸側の地盤の隆起および移動が続いて発生していたが、その動きは不均一性を増していき、橋脚の上昇により突っ張っていた桁同士の端部接触面がある時はずれてしまい、バランスが崩れた（P3橋脚が最初に隆起したという報告もある⁴⁾）。その状態では桁端部と橋脚の相対位置が大きく変わっており、橋脚が桁を支持できなくなって落橋に至った。P5とP8橋脚の場合は、落下した桁が、亀裂により開口するとともにかなり傾いていた橋脚に乗り上げたため橋脚が破断して、桁と共に落下した。

e) 地震後の状態を示す。

以上より、一江橋の周辺は右岸側上盤の不均一な上昇と左岸側の圧縮力を受け、桁の水平移動および橋脚が上下に移動ないし回転し、この結果、落橋に至ったものと推定された。

4. 落橋メカニズムについての仮説の検証

右岸側の橋脚P1～P11は全て傾斜していたが、そのうちP5とP8橋脚は柱中間部で破断していた。その理由に

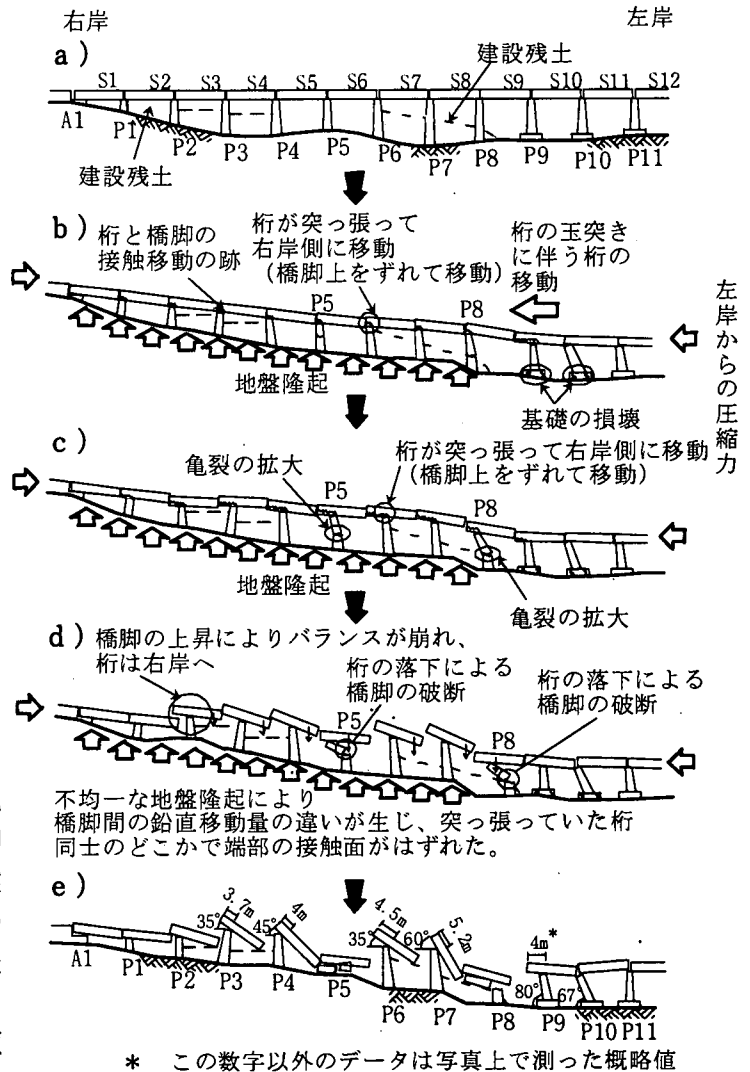


図-5 一江橋の損傷～落橋過程の仮説

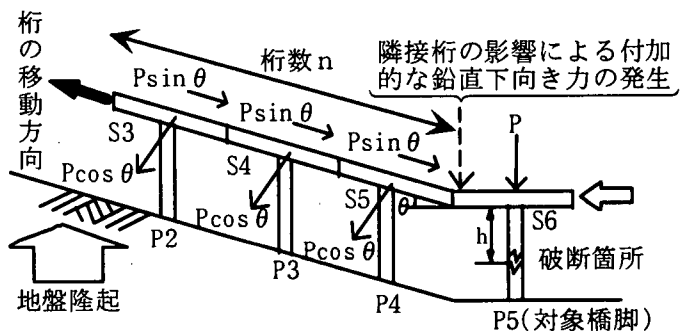


図-6 P5橋脚の破断原因の検証モデル

ついて仮説に基づき検証してみた。図-6に示すように、桁が突っ張り状態と地盤の隆起によって橋脚位置がずれていた状態のモデルで、検証を行った。ここではP5橋脚を対象橋脚とした。

上述の落橋メカニズムの仮説b)、c)より、桁が左岸側から右岸側へ圧縮力を受けるなかで、コンクリートのひび割れ曲げモーメントを生じる場合、式(1)が成り立つ。ここでひび割れ曲げモーメントを用いたのは、橋脚はほとんど無筋コンクリートであることと橋脚の損傷状況は

曲げモーメントより生じたものと判断したからである。

$$\frac{M_c}{h} \leq [n \times (P \sin \theta + P \cos \theta \times \mu) \times \sin \theta + P] \times \mu \quad \dots (1)$$

式中：Mc (ひびわれ時の曲げモーメント) ^{5),6)}

$$= W (1000 \sigma_{bt} + N/A) = 5600 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{bt} \text{ (コンクリートの曲げ引張強度)} \quad \dots (5), (6)$$

$$= 0.23 \sigma_{ck}^{2/3} = 1.75 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{ck} \text{ (コンクリートの設計基準強度)}$$

$$= 21 \text{ N/mm}^2 \text{ (台湾における一般的な材料強度)}$$

$$h \text{ (橋脚天端～破断箇所を目視距離)} \approx 7 \text{ m}$$

$$P \text{ (図面から推定した上部工重量)} \approx 1000 \text{ kN}$$

$$\mu \text{ (コンクリート同士の静摩擦係数)} = 0.5$$

$$W \text{ (橋脚の断面係数)} = 7.5 \times 1.5^2 / 6 = 2.8 \text{ m}^3$$

$$N \text{ (軸力)} = \text{上部工重量} + \text{橋脚重量} = 2811 \text{ kN}$$

$$A \text{ (断面積)} = 7.5 \times 1.5 = 11.25 \text{ m}^2$$

ここで断面積Aは、橋脚の軸方向鉄筋が少ないため、無筋コンクリート断面として求めた。

式(1)を用いて水平面の間角度θ(橋脚間の相対的な高さの違い)を桁数との関係から求めた結果を表-1に示す。なお、地盤隆起が発生していない場合(すなわち、桁の水平移動のみ)についてもP5橋脚に対する検討結果を示している。表-1の結果より、以下のことがわかる。

- ①地盤隆起が発生していない場合は、単純桁橋構造のため、P5橋脚に対する影響は1支間分の摩擦力だけである。地盤隆起なしで桁だけ移動した場合、桁と橋脚間の摩擦による水平力だけでは、橋脚コンクリートのひび割れ曲げモーメントには至らない。
- ②地盤隆起がある場合は、桁数が多いほど地盤の隆起角度が小さくても、橋脚にはひび割れ損傷が生じる。また、隣接桁との隆起量の差が大きい場合は、少ない桁数でも橋脚にひび割れ損傷を生じる可能性がある。
- ③現場で目測した橋脚の隆起程度から判断すると、P5橋脚とA1橋台～P4橋脚の相対的隆起量の差はそれほど大きくなく、多数の桁の影響を受けたものと考えられた。一方、P8橋脚の場合はP6、P7橋脚との相対的隆起量の差が大きかったため(4mという報告がある³⁾)、少ない桁数の影響を受けて損傷したものと推定される。
- ④現場での目測によると、P5橋脚とA1橋台間の相対高さは5m程度であり、計算による11.5m(=2.3m×5径間)より小さい。これは、図-6のような鉛直方向の作用力メカニズム以外の力(例えば水平振動)が、同時にS6桁に影響を及ぼした可能性を示唆している。

表-1 地盤隆起の角度・桁数と橋脚損傷の関係

項目	地盤隆起					
	なし	あり				
桁数	1	2	3	4	5	
最小隆起角度θ°	0	37	22	16	13	11
(両橋脚間の相対高さ)(m)	(0)	(7.4)	(4.5)	(3.3)	(2.7)	(2.3)
発生曲げモーメント ²⁾ (kN・m)	3500	5607	5691	5688	5740	5775

注1) 高さ=12m×sinθ、注2)ひび割れ曲げモーメント=5600kN・m

5. おわりに

上述の一江橋の落橋メカニズムに関する考察から以下のことがわかった。

- ・一江橋右岸側の落橋は、断層運動に起因した地盤の動きにより桁同士が圧縮された状態において、A1～P8あたりに顕著に発生したと思われる地盤隆起とあいまって、突っ張っていた桁のバランスが崩れたことによるものと推定される。
- ・P5とP8橋脚柱の破断は、地盤隆起の段階で隣接する複数桁の影響により付加的な鉛直下向き力が(図-6)、桁と橋脚間の摩擦抵抗力を増大させ、それが橋脚柱に作用したためと推定される。
- ・落橋メカニズムについての仮説の検証を試みたが、落橋要因を十分に説明するのは困難であった。水平振動などが落橋メカニズムに及ぼした影響に着目した研究を行い、ここでの仮説を検証することが望まれる。

謝辞：本論文の内容は、「土木学会地震時保有耐力法に基づく耐震設計法の開発に関する研究小委員会」(委員長：川島一彦東京工業大学教授)の中に設置された「トルコ・台湾地震による橋梁被害研究分科会」(分科会長：幸左賢二九州工業大学助教授)の成果の一部である。

参考文献

- 1) 国家地震工程研究中心(台湾)：921 大震災総結報告，1999-12.
- 2) 林呈，孫洪福：見證921 集集大地震－震害成因與因應對策，台湾土木技師公會，麥格羅・希爾出版，pp.136-154，2000.
- 3) 川島一彦，阿部雅人，家村浩和，庄司学，岩田秀治，高橋良和：1999年台湾・集集地震による橋梁の被害，橋梁と基礎，Vol.34，No.4，pp.15-23，2000.
- 4) (財)地震予知総合研究振興会：1999年台湾集集被害調査報告書，pp.41-43，2000-3.
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，1996.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，SI単位系移行に関する参考資料，1998.7