

中国四川地震による廟子坪大橋及び小魚洞橋の被害

川島 一彦¹・高橋 良和²・葛 漢彬³・呉 智深⁴・張 建東⁵

¹フェロー会員 東京工業大学教授 理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1）

²正会員 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

³正会員 名城大学教授 理工学部建設システム工学科（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1丁目501）

⁴正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

⁵正会員 江蘇省交通科学研究院副総工師（〒211112 中国南京市江寧科学園誠信大道2200号）

1. はじめに

2008年5月12日14時28分に発生した中国四川（汶川）地震による橋梁被害を調査するため、著者らは2008年8月10日～14日に成都を起点とし、都江堰市、汶川县、彭州市、綿竹市、青川县を中心に現地調査を行うとともに、個別調査も複数回実施した。本文はこれらに基づく、廟子坪大橋及び小魚洞橋の被害概要と被災メカニズムを示すものである。なお、この調査は、設計図面や測量結果、解析等に基づいた調査ではなく、あくまでも外観に基づく短時間の1次調査であり、著者らが間違えて理解した可能性もあり得ることを最初にお断りしておきたい。

2. 廟子坪大橋の被害

廟子坪大橋は成都と汶川を結ぶ成汶高速道路（Duwen Highway）が紫坪壩ダム（Zipingpu Dam）のダム湖（岷江）を渡る橋であり、地震発生時には床版の連続化が終了し、伸縮装置を設置しようとしていた段階にあった。写真-1に示すように、2径間連結PCT桁（写真-2参照）+3径間連続PCラーメン箱桁+5径間連結PCT桁+4径間連結PCT桁+4径間連結PCT桁からなる橋長1,440mの橋である。桁は上下線分離しており、高さ約100mの高橋脚によって支持されている。基礎は杭基礎と言われている。地震時には湖面は橋脚基部から約85mの位置にあったが、地震直後には写真-1のようにこれよりも湖面は約40m下げられていた。

主構造は3径間連続PCラーメン橋で橋長は約450m、中央支間は220mである。桁橋部は支間長50mの10



写真-1 廟子坪橋と落橋したスパン

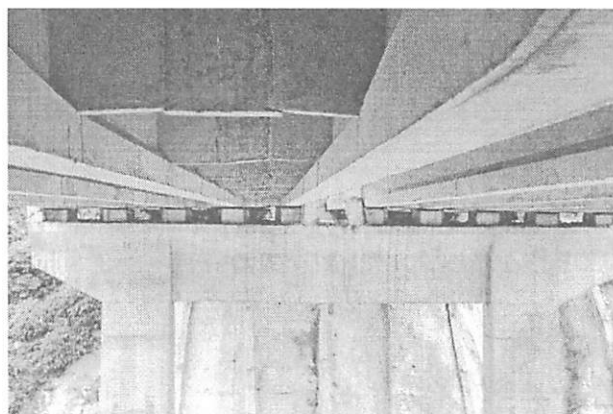


写真-2 PCT桁

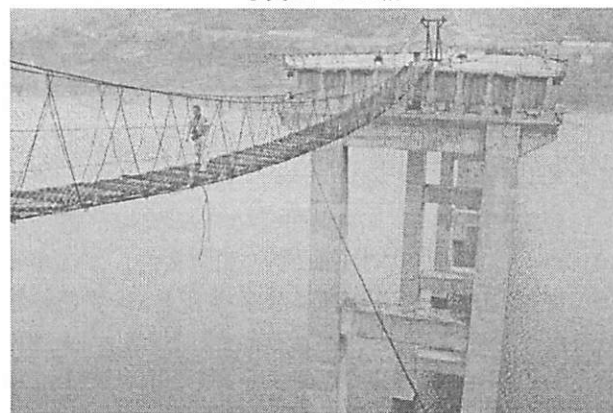


写真3 落橋部

主桁プレキャストT桁橋であり、床版を連結化して連結構造としている。桁橋は積層ゴム支承で支持さ

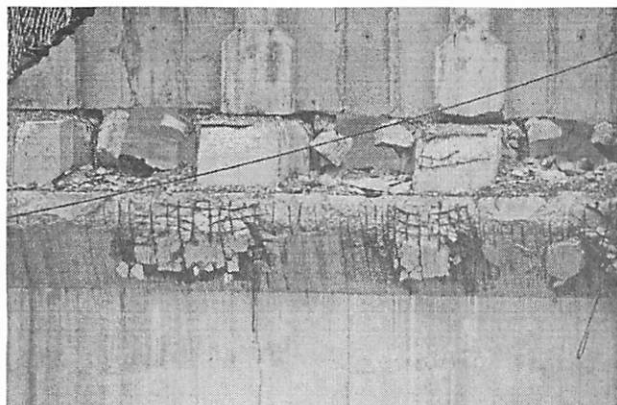


写真-4 桁が落下し始めた側の支承部

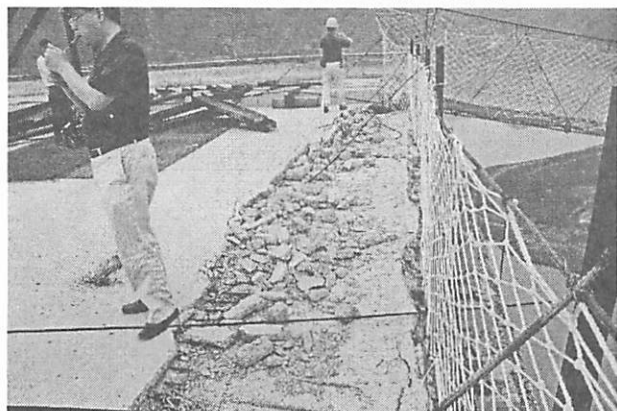


写真-5 引きずられて桁が落下した側の床版の損傷

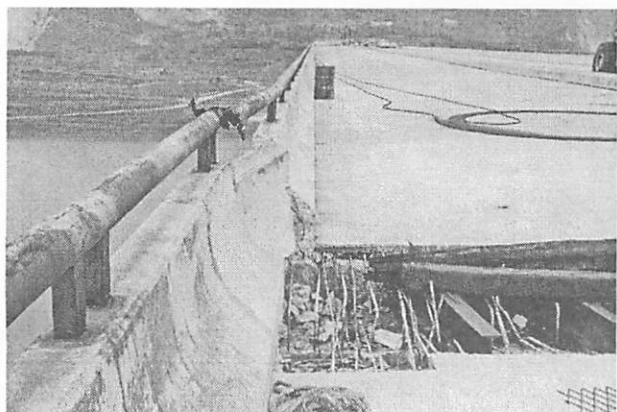


写真-6 連結桁間の橋軸直角方向の桁移動

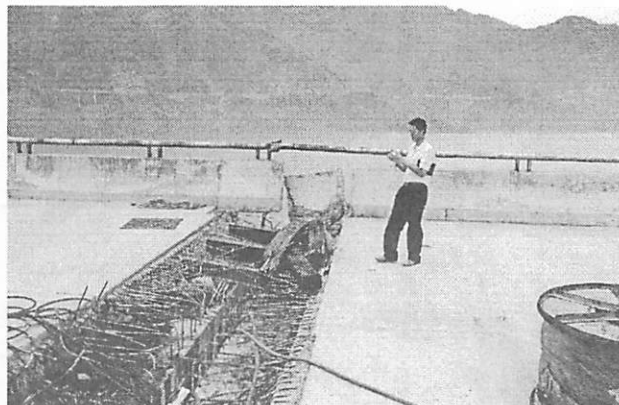


写真-7 写真-6に示す伸縮継ぎ手部

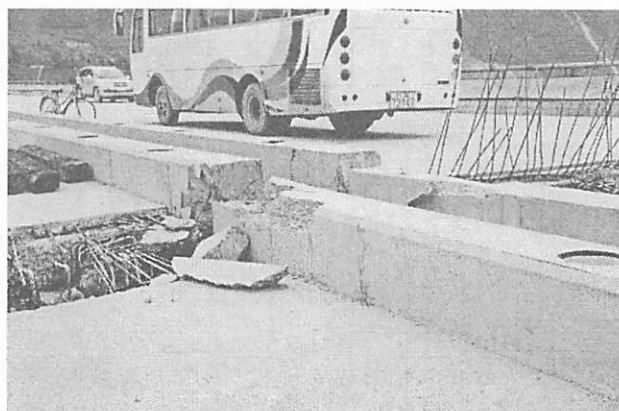


写真-8 連結桁間の衝突による損傷と上下方向の段差

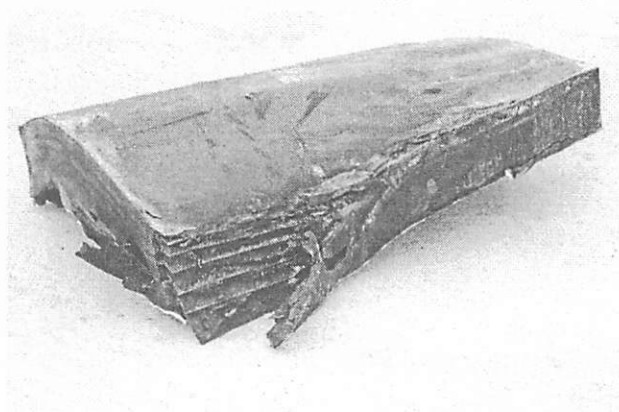


写真-9 損傷した積層ゴム支承（T桁橋）

れ、特に固定支点は設けられていないことから、オール弾性支持方式と考えられる。

5径間連結橋のうち、ラーメン橋とは反対側に位置する1径間が写真-3に示すように落橋した。地震後の測量によれば、本支間では橋脚天端位置で約690mmだけ橋脚間の水平距離（残留変位）が広がったと言われている。写真-4は落橋した5径間連結桁橋の桁端側を支持していた支承である。橋脚天端の張り出し部には、桁の落下に伴って生じた大きな損傷が残っている。明らかに桁はここから滑り落ちて落下していったと考えられる。一方、写真-5はこれとは反対側の床版の損傷である。床版が引きちぎられる形で桁が落下していったことを示している。積

層ゴム支承の抜け出しやサイドブロックの損傷等、大きな桁変位が生じたことを示す損傷が随所に残っており、こうした大きな桁変位に伴い、5径間連結桁の一番端部において、桁かかり長を上回る応答変位が生じ、落橋したと考えられる。

なお、落橋はしなかったが、その他のT桁連結桁にも、各所で大きな桁応答が生じた痕跡が残っていた。たとえば、写真-6はT桁連結桁間の橋軸直角方向の残留移動（約300mm）であり、写真-7は伸縮継ぎ手の設置位置である。写真-8はT桁連結桁間が衝突したことを示す縁石部の損傷と、上下方向の段差である。この位置の支承部は積層ゴム支承が本来の位置から移動して抜け出している。これも桁の応答

変位が大きかったことを示すものである。写真-9は損傷した積層ゴム支承である。写真-10は橋軸直角方向の桁移動を拘束するために、桁の両サイドに設置されたサイドブロックの損傷である。ほとんど全てと言ってよいほど、多数のサイドブロックが破断し、桁の橋軸直角方向への移動を十分拘束できなかった。中国では、サイドブロックは構造細目的な規定がなく、地震時の耐力照査をしていないことが原因と考えられる。

なぜ、690mmもの残留変位を伴う大きな応答変位が橋脚に生じたかが興味深い。地震後の調査によれば、橋脚には目視できるような損傷は生じていないが、橋脚基部に約1mm程度のひび割れが生じていると言われている。高さ100mもの高橋脚であり、塑性ヒンジ部でドリフト1%に相当する塑性変形が生じただけでも約1mもの応答変位が生じることを考えると、基礎の並進や回転とも併せて、橋脚の変形が桁に大きな応答変位を生じさせたと考えられる。中国では、桁間連結装置や桁と下部構造を連結する構造が用いられていなかったが、十分な強度を有するこれらの構造が採用されていれば、たとえ大きな相対変位が生じたとしても、落橋は免れた可能性がある。

写真-11及び写真-12は2008年10月段階で復旧中の落橋部である。PCT桁を順次架設中であった。橋軸直角方向の連結筋が見える。

3. 小魚洞橋の被害

小魚洞橋は小魚洞鎮に位置し、彭州（Pengzhou）と龍門山鎮（Longmenshanzhen）を結ぶ彭白道路が白水河（Baishui River）を跨ぐ箇所に位置する、橋長 187m、幅員 12m の 4 径間連続方杖ラーメン橋である。アーチ橋のように見えるが、アーチ主構が連続していないことから、方杖ラーメン橋と判断した。1998 年の竣工である。桁はラーメン脚のほかに斜材によって支持されている。一方、下部構造は 2 基の RC 杭で支持された 2 脚 1 層式ラーメン橋脚で、ラーメン橋脚天端の横桁により桁端は単純支持されている。杭頭はフーチングではなく、パイルキャップで結合されており、これにラーメン橋脚、ラーメン脚、斜材が剛結されている。このような構造では、ラーメン脚からパイルキャップに伝達される橋軸方向水平力のバランスが重要であり、これが崩れると、杭基礎のバランスが失われ、杭が傾斜する可能性が高い。支間長は約 40m である。



写真-10 サイドブロックの損傷とT桁の移動



写真-11 復旧のため架設中のPCT桁

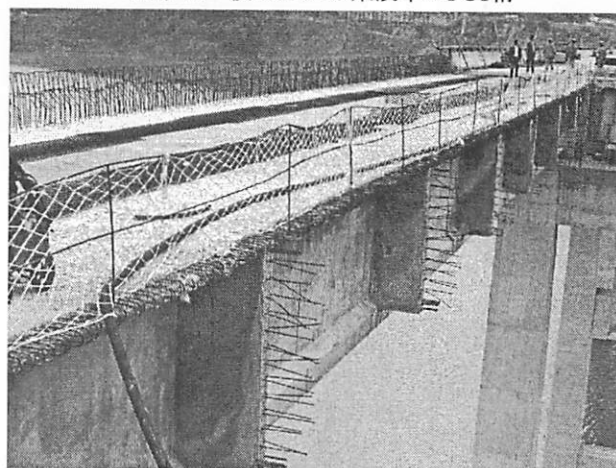


写真-12 橋軸直角方向の連結筋

図-1 に被害の概要を示す。左岸側（彭州側）から右岸側（龍門山鎮）に向けて桁、橋脚、橋台番号を打つと、桁 1、桁 3 及び桁 4 が落橋した。写真-13、写真-14 に示すように、桁 1 では A1 橋台側のラーメン脚及び斜材の基部が破壊し、落橋した。ラーメン脚及び斜材では、軸方向鉄筋は径 29mm 程度、帯鉄筋は径 10mm 程度と細く、全体的に配筋量は少ない。なお、桁の落下に伴い左岸側の護岸には写真-15 に示すようにクラックが入った。本橋周辺の地表断層については後述するが、このクラックは地表

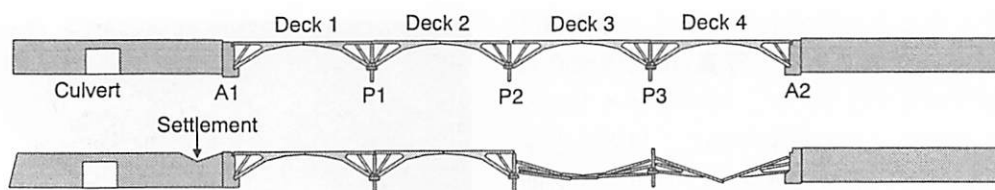


図-1 小魚洞橋の被害



写真-13 A2部におけるラーメン脚及び斜材の被害

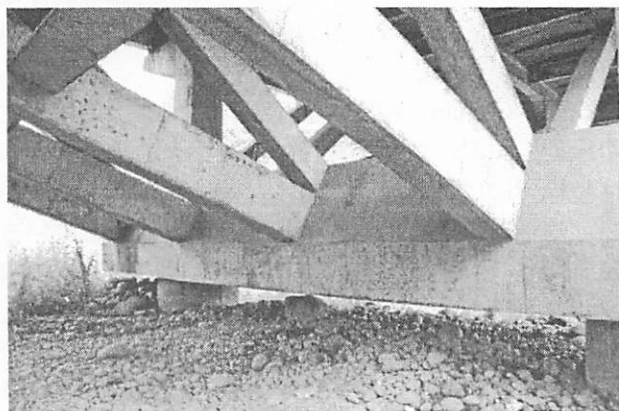


写真-16 P1 橋脚におけるパイルキャップ構造



写真-14 桁との接合部に近い斜材の破壊

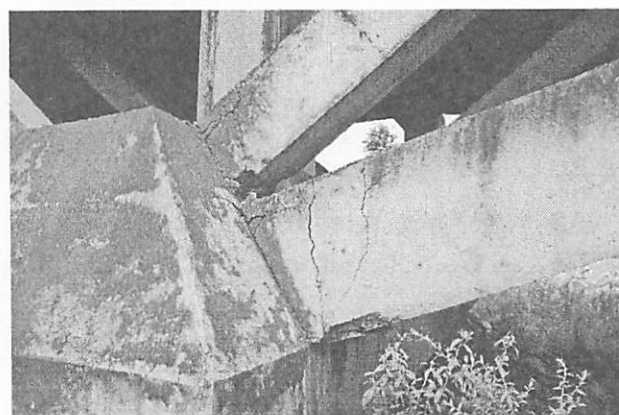


写真-17 パイルキャップとの結合部でラーメン脚と斜材に生じたクラック



写真-15 桁落下のため護岸（左岸側）に生じたクラック



写真-18 P2 橋脚上の桁 2 の支持状態

断層によるものではない。

写真-16、写真-17 は唯一落橋を免れた桁 2 を支持する P2 のパイルキャップとラーメン脚及び斜材の結合部である。パイルキャップの下には杭も見える。ラーメン脚及び斜材には曲げクラックの他、一部せ

ん断クラックも生じており、典型的な低横拘束で変形性能の低い損傷形態となっている。斜材の下面では、軸方向鉄筋の局部座屈も生じている。この状態がさらに進展すると、写真-13、写真-14 のようになり、落橋に至る。



写真-19 縦桁に生じたコンクリートの損傷
(引張及び圧壊)



写真-20 A2橋台から落下した桁4（桁が橋台に衝突し、橋台が裏込め側に押し込まれた結果、橋台側面の擁壁がせん断破壊している）

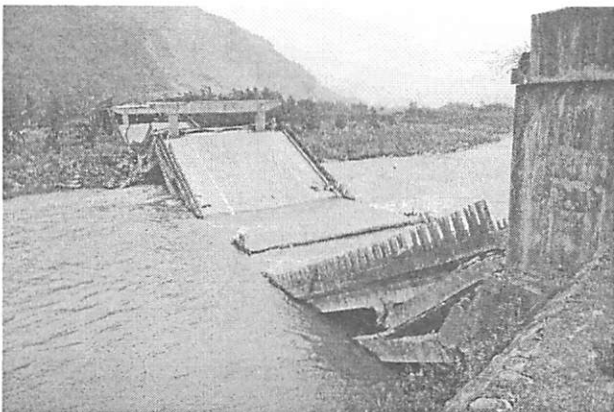


写真-21 A2橋台(上流側)から見た桁4

一方、P2位置における橋脚頂部での桁2の支持状態を示したのが写真-18である。桁2はP2橋脚頂部の横けたから逸脱寸前となっており、桁2とP2橋脚頂部間の橋軸方向の相対変位が大きかったことを示している。

写真-19は縦桁に生じたコンクリートの損傷であり、引張と圧壊の繰り返しを受けたことを示している。

A2橋台前面には桁4が衝突した痕跡があり、写

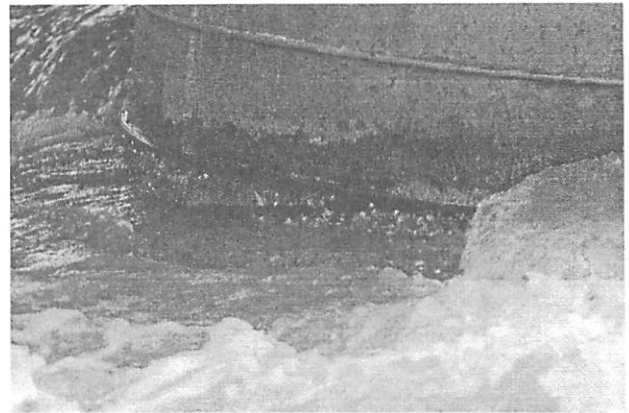


写真-22 パイルキャップ下の川面位置に生じた杭の曲げクラック（P3、下流側）



写真-23 A2側に傾斜したP3橋脚とこの頂部から落下した桁3及び桁4（右手はA2）



写真-24 左岸の上流側堤防（点A、小魚洞橋から約70m）に生じた段差

真-20に示すように、舗装面が浮き上がって裏込め側に約0.2m移動している。さらに、橋台側面のコンクリート擁壁にも大きなせん断クラックが生じている。これらの点からみて、桁4がA2橋台に衝突したことは確実である。桁4の応答変位が桁かかり長（0.3m程度）を超したため、写真-21に示すように、桁4はA2橋台から落下した。この結果、ラーメン脚及び斜材が桁重量を支持できなかったため、落橋したと考えられる。



写真-25 堤内地から見た護岸の損傷（写真-24 と同一点）



写真-26 護岸のコンクリート被覆に生じたクラック（ほとんど、水平方向の変位はない）



写真-27 護岸基部（堤内地側）に生じた約 0.8m の上下方向段差

写真-22 に示すように、P3 橋脚ではパイルキャップ下で河面すれすれの位置に大きなクラックが入った。これは、桁 4 が落橋した結果、桁 3 と桁 4 の水平力のバランスでつり合っていた P3 橋脚が不安定となり、A2 橋台側に押されたためと考えられる。これにより、写真-23 に示すように P3 橋脚は A2 橋台側に大きく傾斜し、この結果、桁 3 も落橋したと考えられる。後述する農夫の証言でも、桁 4 の落橋後少し時間をおいて桁 3 は落橋したとあり、このような被害メカニズムと矛盾しない。ただし、桁 3 が



写真-28 A1 橋台裏込め部の破壊（点 B）



写真-29 A1 橋台裏込め部の破壊（点 B）



写真-30 A1 橋台裏込め部の破壊（点 B）

落橋すれば、同じメカニズムで桁 2 も落橋して良さそうである。この理由はきちんと解析しなければわからないが、P2 橋脚に比較して P3 橋脚は河流中に位置し、突出長が大きいことが影響している可能性がある。

以上に示したように、本橋では、橋脚のパイルキャップ部におけるラーメン脚及び斜材の損傷、桁かかり長を超過する桁の応答変位、桁の損傷のいずれか、あるいはこれらが複合して、落橋したのではないかと考えられる。

なお、図-2 に示すように本橋周辺では地表断層が現れている。すなわち、本橋の左岸側では約 70m 程上流側（図-2 の点 A）では、写真-24、写真-25 に示

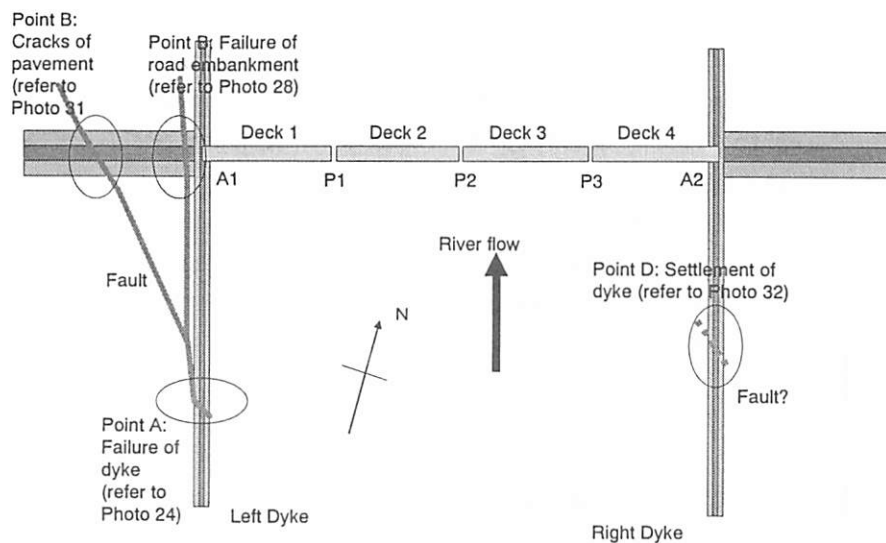


図-2 小魚洞橋周辺の断層



写真-31 A1 橋台裏込め部の破壊 (点 B)



写真-33 上流側から見た右岸上流側の堤防 (点 D, 小魚洞橋から約 50m) に生じた段差



写真-32 上流側から見た右岸上流側の堤防 (点 D, 小魚洞橋から約 50m) に生じた段差



写真-34 右岸上流側の堤防 (点 D, 小魚洞橋から約 50m) に生じた段差のクローズアップ

すように上流側が下流側に比較して 1.5m 程度盛り上がった。これは断層によると考えられる。写真-26 に示すように護岸では水平ズレはほとんど見られなかったが、写真-27 に示すように、護岸の基部では約 0.8m の上下方向の段差ができています。この断層は、左岸側護岸からコーン畑を経て小魚洞橋左岸側の取付道路盛土を横切った。取付道路盛土の下

流側はすでに整地され、断層の痕跡をみることはできなかったが、数条にわたって、A1 から 50m 程度の範囲で断層運動があったと考えられる。この結果、A1 橋台から約 10m の位置 (図-2 の B 点) と約 50m 位置 (図-2 の C 点) で取付道路盛土が大きく崩壊した。写真-28～写真-30 及び写真-31 はそれぞれ橋台から約 10m 及び 50m 位置における取付道路の崩壊

を示したものである。

興味深いのは、地震発生当時、近くにいた農民（朱順学氏）が断層の発生と小魚洞橋の落橋を目撃していた事である。この農民の証言によれば、地震発生時にはまだコーンを植え付けていなかったが、護岸近くと護岸から 10m 程度離れた水田の 2 カ所で地盤が盛り上がったという。さらに、朱順学氏によれば、地震発生と同時に桁 1 と桁 4 がほぼ同時に落橋し、前述したように、少し時間をおいて桁 3 が落橋したという。

なお、重要な点は、桁 4 や桁 3 の落橋に断層の影響がなかったかという点である。このため、右岸上流側の堤防を調査した結果、写真-32～写真-34 に示すように、右岸側で A1 より約 50m 上流側の護岸が 0.3m 程度沈下し、玉石ブロックの護岸の一部が崩れていた（図-2 の点 D）。ただし、水平ズレは見られず、護岸の損傷は左岸側の損傷に比較してかなり小さい。また、堤防の周辺には断層ズレや盛上がりは確認できなかった。

なお、小魚洞橋周辺の断層については、Hao らも調査し、本橋の右岸側の 190m 上流で水平ズレ 2.8m、鉛直ズレ 1.5m の断層が生じ、本橋はこのために落橋したと報告している²⁾。しかしながら、著者らが小魚洞橋の直近で発見した護岸や地盤の損傷は上述した通りであり、小魚洞橋が断層によって落橋したと断定する根拠はない。

したがって、桁4や桁3の落橋に対する断層の影響を否定し去ることはできないが、基本的には上述した構造的な被災メカニズムにより落橋したと考えられる。

4. 結論

以上に示した被害状況から被害のメカニズムは以下のように推定される。

1) 廟子坪大橋は、ダム湖に建設された杭基礎で支持されたハイピアーの下部構造の大きな応答に伴い、5径間連続桁の一方において桁が杓座及び橋脚天端

から逸脱し、落下したため落橋したと考えられる。ハイピアーで支持された橋梁に生じる大きな応答変位に対する対応の重要性を示している。桁端に有効な落橋防止構造が設けられていれば、落橋は避けられた可能性がある。

2) 小魚洞橋は、橋脚のパイルキャップ部におけるラーメン脚及び斜材の損傷、桁かかり長を超過する桁の応答変位、桁の損傷のいずれか、あるいはこれらが複合して、落橋したのではないかと考えられる。なお、本橋周辺では断層変位が生じており、この影響がどの程度であったかが関心のある所である。測量結果に基づいて、橋梁本体に影響を与えた地殻変動があったのかを詳細に調査する必要があるが、今回の調査に基づく範囲では、断層変位の影響ではなく、上述した構造的要因で落橋したと考えられる。

謝辞：本調査は文部科学省科学研究費補助金（特別研究推進費、代表：小長井和男東京大学教授）の一環として実施されたものである。調査にあたり、多数の方々のご支援、ご助力を得た。特に、中国地震局工程力学研究所の王自発所長、李山有教授、林均岐教授、西南交通大学の李喬主任教授、鄭史雄教授、東南大学の劉釗教授および現地震局の方々をはじめとする中国研究者のご協力が無ければ調査が実施できなかったことを記し、厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Li Qiao and Zhao Shichun (editors): Analysis of Seismic Damage of Engineering Structures in Wenchuan Earthquake, 2008.
- 2) Hao, K. H., Si, H. and Fujiwara, H.: A Preliminary Investigation of the Coseismic Surface-Ruptures for Wenchuan Earthquake of 12 May 2008, Sichuan, China, Proc. 14th WCEE, Paper No. S31-007, Beijing, China, 2008.