

花蓮地震で被災した橋梁調査

幸左 賢二¹・廣岡 明彦²・竹田 周平³・宮島 昌克⁴

¹正会員 九州工業大学名誉教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail: kosakenji@yahoo.co.jp

²正会員 九州工業大学教授 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

E-mail: ahirooka@gmail.com

³正会員 福井工業大学教授 (〒910-8505 福井市学園3-6-1)

E-mail: s-takeda@fukui-ut.ac.jp

⁴正会員 金沢大学教授 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

2018年4月12～15日に台湾花蓮地震による被害を受けた構造物の調査を実施した。その結果花蓮断層近傍の七星潭橋では地震動により15cmを超える橋軸直角方向の残留変位が観測され、桁が横方向変位制限構造に衝突し、橋脚に押抜きせん断損傷が発生した。照査の結果押抜きせん断抵抗が極めて小さいことが明らかとなった。

また2014年よりモニタリング調査を実施しているASR橋梁の内、中正橋は断層周辺に位置している。ASR劣化した橋台に地震力が作用し、幅3mmを超えるひび割れが発生しており、特に劣化部材において著しいひび割れが再発生していることが明らかとなった。

Key Words : damage of bridge, ASR, damage of structure, Hualien earthquake, fault

1. はじめに

2018年2月6日に発生した台湾花蓮地震においては長周期地震動により12階建てのビルの倒壊、橋梁の橋脚の損傷が認められている。著者らは過去4年間に亘り花蓮市におけるアルカリ骨材反応により劣化した12の橋梁を対象にモニタリング調査を実施して、花蓮市の構造物の健全度を評価している。そこで、本研究では4月12～15日に実施した構造物調査を基に、以下の項目の説明を行う。

- 1) 花蓮地震により被害が生じた構造物（橋梁1、建物2）の被害状況
- 2) 現在モニタリング中の橋梁(12基)の地震に伴う損傷状況および経年劣化度

2. 建物被害概要

花蓮地震により4つの建物が倒壊した。そのうちの図-1に倒壊したMarshalホテルとYumen Tsuiti complex (雲門翠堤大樓)の位置を示すが、断層近傍であることが分かる。それぞれ1名、14名が亡くなっている。



図-1 米崙断層の位置

図-2に示すMarshalホテルは1978年に建設されており、地下1階、地上11階建てである。日本でも問題となったピロティ構造で、低層階はオープンスペースが設けられ、壁が少ない特徴を有しており、弱点部となった可能性が高い。

またホテルはL字型形状をしている。外壁と側壁が斜め方向にひび割れており、地震力によりねじれ力が作用したと考えられる^{1), 2), 3), 4)}。

図-3にYumen Tsuiti complexの損傷状況を示す。1994年竣工し、地下1階地上12階建てである。新聞報道および関係者からのヒヤリングによると、損傷面から鉄筋の重ね継手長が十分でなく、鉄筋がロープのようにちぎれていることが指摘されている。また横方向鉄筋が不足して十分な拘束効果となっていない²⁾。

3. 地震動の特徴

2018年2月6日23時50分に花蓮市沖の 24.1° N, 121.73° Eでマグニチュード6.4の地震が発生した。震源の深さは6.31km、最大加速度は0.4Gを超えている。倒壊したビルはMilun断層沿いに発生している。Milun断層は1951年10月22日にマグニチュード7.0を超える地震が発生しており、再現周期は67年となる。

図-5(次頁)に花蓮市内で観測された加速度波形を示す。図-5に示すように断層沿いに数多くの地震観測が実施されており、多くの観測点で長周期速度波形が観測されている。いずれの観測点も初期の短周期波形ののちに、大きな長周期地震動を伴っている。

図-4には台湾における設計応答スペクトルとの関係を示す。1～5秒において、台湾の2500年確率の設計スペクトラム(赤点線)を超える波形(EW成分)が観測されており、断層近傍の波形が構造物に与える影響について注目する必要がある。特に、断層近傍に高層建物や長大橋梁を建設する場合はこれらの影響に注意する必要がある。この波形に対して東北大学大野や京都大学林らの分析では以下の点が指摘されている^{2), 6)}。また、同様の傾向は熊本地震における西原村小森の記録においても指摘されている。

- 1)断層近傍では、地震動のパルス周期が方向により異なる。また、パルス周期は2～4秒であった。
- 2)観測された地震動は、応答スペクトルを用いた分析より、10階以上のRC造建物で被害が大きくなる傾向が確認された。

4. 橋梁被害概要

(1) 損傷概要

断層沿いの多くの橋梁(農兵橋、花蓮市三号橋、林



図-2 Marshal ホテル損傷状況¹⁾



図-3 Yumen Tsuiti complex 損傷状況¹⁾

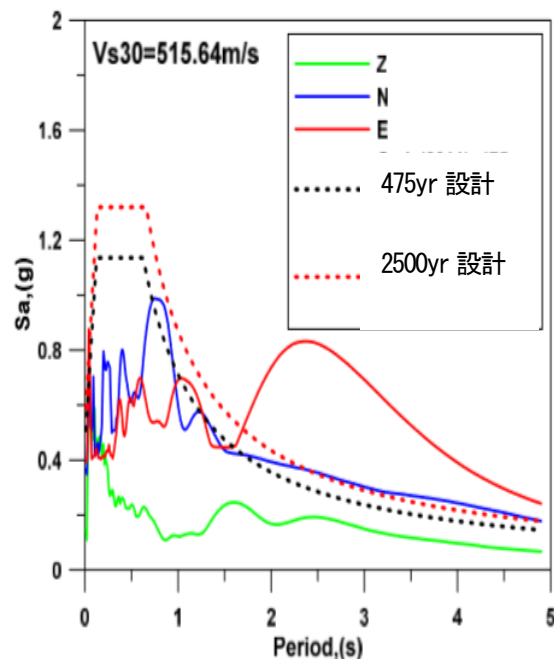


図-4 応答スペクトルとの比較²⁾

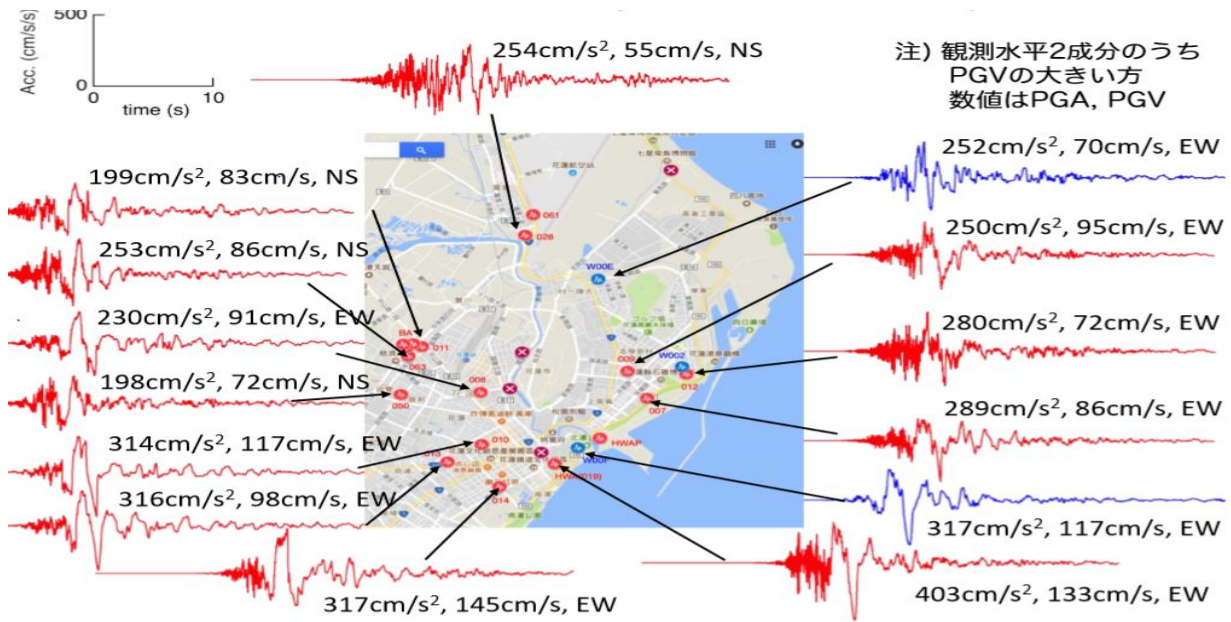


図-5 断層近傍の計測波形⁵⁾

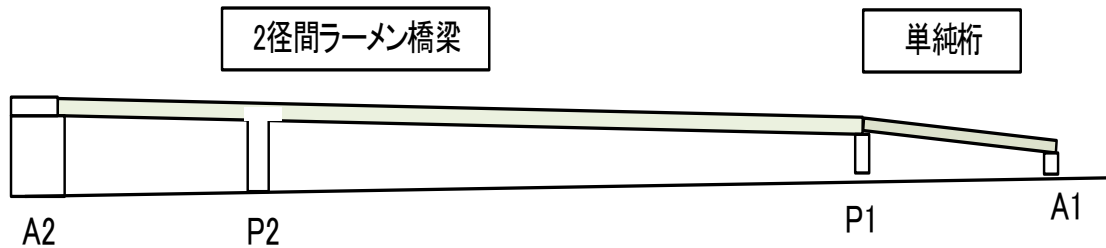


図-6 橋梁側面図

森路橋, 中正橋など) で桁衝突による高欄損傷や桁移動に伴う支承の損傷が認められた. ここでは代表例として花蓮大橋および七星潭大橋について説明を加える. 花蓮大橋は県道11号に位置するが, 断層が橋軸直角方向に横切っており, 地盤の変状あるいは地震動によりジョイント部が直角方向に数十センチずれているものが認められた. 損傷は軽微であったことからオーバーレイなどの補修により対応している.

七星潭橋は図-6の橋梁側面図, 図-7の橋梁平面図に示すように, 2径間の箱桁(P1~A2)と単純桁(A1~P1)から成る⁷⁾. 2径間箱桁は不等径間のうえにA2~P2間は小さな曲線半径となっている.

これは台湾側の研究者の説明によるとP1からP2間に断層が想定されることから, 断層をさけるために不等径間となったようである. 固定脚P2には損傷は認められず, 端部桁P1橋脚においては, 桁が橋軸直角方向に移動し, 変位制限構造 (あるいは支承隠し) に衝突し橋脚部に押抜きせん断損傷が発生している.



図-7 七星潭大橋位置図⁷⁾

(2) 橋脚損傷状況

図-8にP1橋脚の損傷状況、図-9には損傷橋脚の拡大図を示す。図-8, 9に示すように桁衝突に伴い、変位制限構造が橋軸直角方向に押し出され、橋脚の取り付け部が損傷に至っている。図-10には橋脚損傷模式図を示す。損傷形態としては、橋軸直角方向に水平荷重が作用し、押し抜きせん断破壊が発生している。発生角度は通常の 45° ではなく、水平方向と 60° 程度の角度でひび割れが発生している。

これは橋脚張り出し部であるため橋脚の抵抗面積が小さく、また、変位制限構造には横方向拘束鉄筋が配筋されていないため、かぶり部に沿って大きく損傷が発生したと考えられる。右側、左側の変位制限装置とも桁衝突が発生しており、その結果両側橋脚ともにほぼ同様の損傷が発生している。橋脚の押し抜きせん断について以下に考察を加える。

道路橋示方書横方向変位構造に関する照査式を基に式(1)が成り立つ。なお寸法は写真より推定している。

$$P = 3 \cdot k_h \cdot R_d = 3 \cdot 0.15 \cdot 14400 = 6480 \text{ kN} \quad (1)$$

P : 作用力 (kN)

k_h : 設計震度でここでは0.15とする。

R_d : 支承反力であるが、ここでは $m/2$ を採用する。

m : 桁重量 (kN)

$m = 1\text{m (平均桁高さ)} \cdot 12\text{m (平均幅員)} \cdot 100\text{m (2連の桁長)} \cdot 24 \text{ (単位体積重量)} = 28800 \text{ kN}$

よって $m/2 = 14400 \text{ kN}$

せん断抵抗として道路橋示方書の橋座式を基に式(2)が成り立つ。

$$R = \tau_c \cdot A_c = 0.22 \cdot 6 \cdot 10^3 = 1320 \text{ kN} \quad (2)$$

R : せん断抵抗 (kN)

τ_c : せん断応力でここでは 0.22 N/mm^2 を採用する。

A_c : せん断抵抗面積で以下と仮定する。

$A_c = 3000 \text{ mm (橋脚幅)} \cdot 2000 \text{ mm (ひび割れ長さ)} = 6 \cdot 10^6 \text{ mm}^2$

よって式(1), (2)を比較するとせん断抵抗力が小さく、横方向変位拘束構造としては極めて抵抗特性が弱いことがわかる。

(3) 支承構造

図-11には支承の損傷状況を示す。詳細な設計手法は不明であるが、桁の直角方向の移動により、上面板と支承には最大約15cmのずれが発生している。党らの報告によると、支承は(鋼板+滑り材+シーリング+



図-8 七星潭大橋 P1 橋脚⁷⁾



図-9 七星潭大橋 P1 橋脚損傷状況

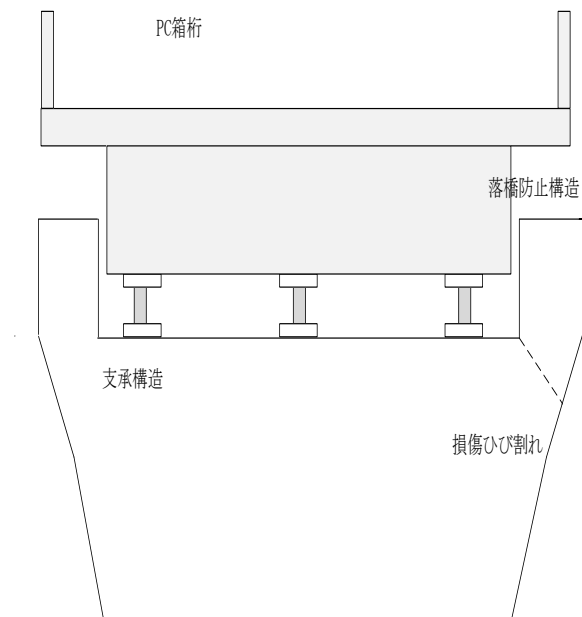


図-10 P1 橋梁模式図

鋼板+ゴム層)となっており、橋軸直角方向の変位により滑り材が押し出される損傷が認められた⁹⁾。

一方、単純桁 (A1～P1) 区間には、橋台や支承を含めて損傷は認められなかった。

図-12に支承模式図を示す。水平力を受けると、ゴムパッド支承はせん断変形で水平変位する可動支承と考えられる。ただし想定以上の水平力が作用すると、ゴムパッド支承が破断する前に下面と鋼板との摩擦が切れて、すべり変位が発生すると考えられる。ゴムパッド支承に大きな水平力が作用したため、鋼板とジャッキとの縁が切れて、鋼板が移動したと考えられる。

一方、文献によると、断層変位が生じたときに、ジャッキアップする機能を保持するとのことであるが詳細な設計法については今後設計者らに直接ヒヤリングする予定である⁹⁾。

5. ASR調査橋梁

1980年代に沖縄県の10を超える橋梁にアルカリ骨材被害が発生した。調査の結果、台湾花蓮産の粗骨材により発生したことが明らかになっている。

著者らは2014, 2015, 2017, 2018年花蓮県周辺のASR構造物を調査している。

表-1には2014年調査した構造物一覧表、ランク、損傷部位を示す⁹⁾¹⁰⁾。表-1の特徴をまとめると以下のようになる。

- 1) 木瓜溪橋橋や馬太鞍溪橋のようなPC構造物ではPCケーブル方向に沿った顕著なひび割れが確認された。
- 2) 武雲橋の橋台部分には大きなひび割れが発生するとともに、橋台表面の全体が太鼓状の変形を生じていた。ついで、豊平橋や東澳橋においてはひび割れ注入などの補修を行った痕跡が伺えた。



図-11 支承損傷状況

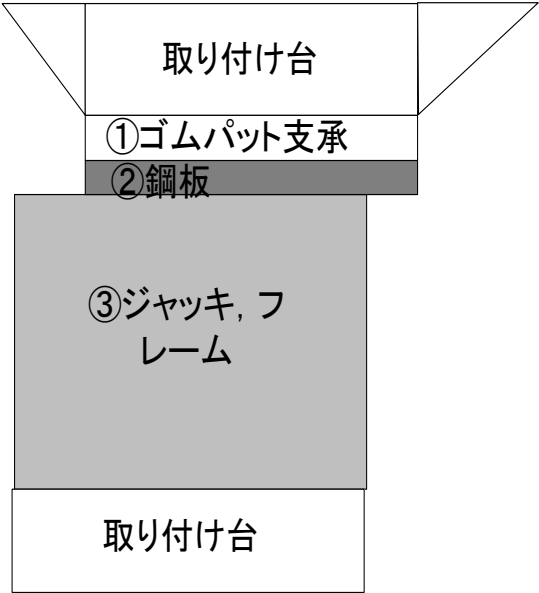


図-12 支承模式図

表-1 モニタリング橋梁

橋梁・ランク・部位	橋梁・ランク・部位
1. 中正橋・A・橋台	7. 北清水溪鉄道橋・B・梁
2. 木瓜溪橋・A・PC 桁	8. 豊平橋・B・桁
3. 木瓜溪鉄道橋・B・PC 桁	9. 澳花橋・B・桁
4. 馬太鞍溪橋・B・PC 桁	10. 武雲橋・B・橋脚
5. 大富橋・B・梁	11. 東澳橋・B・橋台
6. 北清水溪橋・B・梁	12. 護岸塊・A・躯体

3)過去4回の調査によって、台湾の橋梁には配水管を設けないのが一般的であることが分かった。そのため、雨水などは排水溝から直接構造物にあたって、劣化の進行を促進させ、水の影響を受けない部分より大きなひび割れ発生状況が確認された。

以上の構造物の目視観察により対象構造物12箇所のうち、中正橋の橋台部分、木瓜溪橋の橋脚梁と桁部分、護岸塊はランクAの大きな損傷が発生していると判断した^{9),10)}。

6. 中正橋損傷状況

(1) ひび割れ調査

中正橋、木瓜溪橋、護岸塊の外観にはひび割れが多く発生しており、白色析出物を伴うひび割れも多数認められた。

そこで、2015年中正橋A2橋台、木瓜溪橋G3およびP1橋脚、護岸塊を対象にひび割れ状況を詳細に観察した。ここでは代表例として図-13に中正橋橋台部のひび割れ観察状況を示す。観察は橋台のひび割れ発生面 $4\text{m}^2(2 \cdot 2\text{m})$ を対象とした。計測はまず、ひび割れ幅ごとに(0.05程度、0.1~0.15、0.2~0.25、0.3mm以上)に区分してチョーキング後、写真撮影によりひび割れ長さを求めた。

図-13に示すように、ひび割れ形状は鉄筋比が小さいため亀甲状に発生している。ひび割れ幅は0.05、0.1~0.15mmが多いものの、0.3mmを超えるひび割れも発生している。全ひび割れ密度では $6.4\text{m}/\text{m}^2$ 、0.2mm以上では $1.0\text{m}/\text{m}^2$ となっている。同様に4箇所で行った外観詳細ひび割れ観測をコンクリート標準示方書維持管理編に対応させると以下のような結果となった^{9),10)}。

1) グレードⅡ(進展期)

木瓜溪橋P1橋脚

2) グレードⅢ(加速期)

中正橋A2橋台、木瓜溪橋G3桁、護岸塊

(2) コアー調査

コンクリートコアは中正橋A2橋台および護岸塊から各5本を採取した。5本のうち、3本は圧縮強度2本は促進膨張試験を実施している。ここでは圧縮強度の結果のみについて説明を加える。

図-14に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度試験の平均値は中正橋で $48.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、護岸塊が $42.8\text{N}/\text{mm}^2$ であった。設計図書に記載されている中正橋の設計基準強度が $28\text{N}/\text{mm}^2$ であり、コンクリートコアの圧縮強度はこれを満足する値であった。護岸塊は、日本では $18 \sim 24\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であることを考慮すると、これも満足する値であった。

コンクリートコアの静弾性係数の平均値は中正橋A2

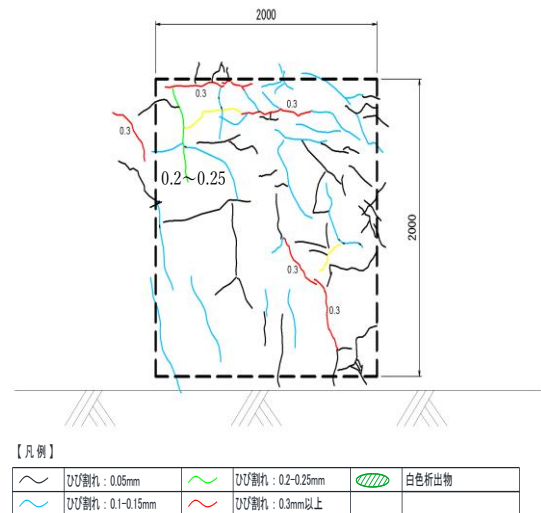


図-13 外観損傷状況

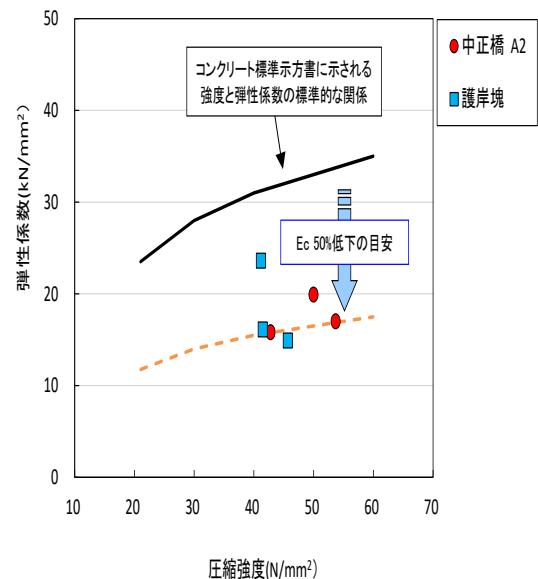


図-14 圧縮強度試験結果

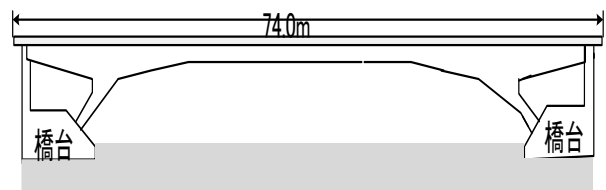


図-15 中正橋側面図

橋台が 17.6N/mm^2 、護岸塊が 18.2N/mm^2 であった。図-14に示すように道路橋示方書に示される圧縮強度と弾性係数の関係と比較すると、中正橋は50～60%、護岸塊は46～76%であった。一般に弾性係数の50%程度である場合、その原因はASRである可能性が高いとされており、ASRによる劣化の可能性が高い。

これらの結果を受けて、中正橋では橋台を中心に2016年に補修工事が実施された。補修工事はひび割れ注入およびポリマー系樹脂による表面コーティングが実施された。

7. 中正橋地震時損傷状況

2018年2月6日の地震において中正橋は断層沿いに位置しており、被害の発生が懸念された。図-15に一般側面図、図-16に橋台側面図を示す。

台湾国道路局花蓮管理事務所からのヒヤリングによると中正橋は1998年に竣工した橋長74.8mの π 型ラーメン橋である。片側3車線合計6車線および2車線の歩道部を含む広幅員橋梁である。

図-16の橋台側面図から分かるように、地盤条件が良くないにも関わらず直接基礎型式となっている。また、主鉄筋は $\phi 22\text{mm}$ が15cmピッチ、帯鉄筋は $\phi 16\text{mm}$ が20cmピッチとなっており、極めて低鉄筋比の構造物である。

橋台背面からは水が滲み出しており、鉄筋比が小さいこともありアルカリ骨材反応が発生しやすい環境であった。これに対して桁部は、鉄筋比が高いうえに、雨水がかかりにくい環境であり、2015年調査時点ではアルカリ骨材反応の発生は認められなかった。

2018年4月の地震後の調査によると、高欄や橋台の一部にひび割れの発生が認められる程度で、構造的に重要な損傷は認められなかった。

図-17には地震により発生した橋台のひび割れ状況を示す。ASRによる剛性の低下の影響からか地震により多数の新たなひび割れが確認され、一部のひび割れは長さも3mと長く、最大ひび割れ幅も3mmを超えるものが認められた。なお新たなひび割れ発生位置は従前のひび割れ位置に極めて近い。前述のように橋台は従来よりASRによる劣化が認められたことから、地震力により劣化した部材に再びひび割れが発生したと考えられる。

図-18に地震後の π 型ラーメン橋梁を示す。桁は地震前よりひび割れも発生せず健全であった。地震力も相対的に小さかったことから、地震後に新たなひび割れ発生は認められなかった。

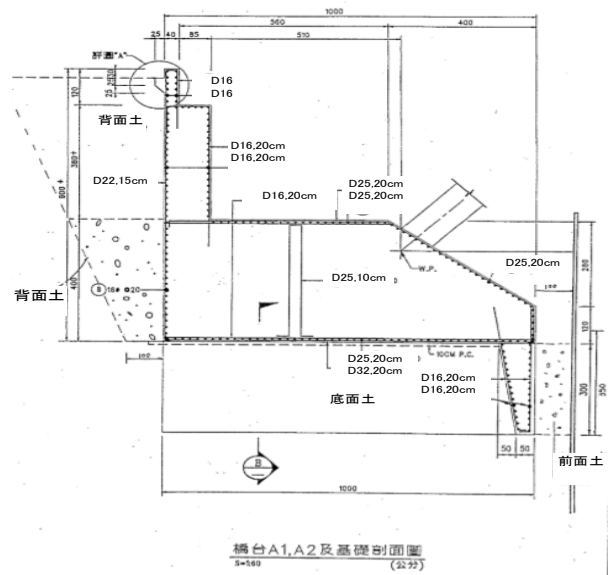


図-16 中正橋橋台図

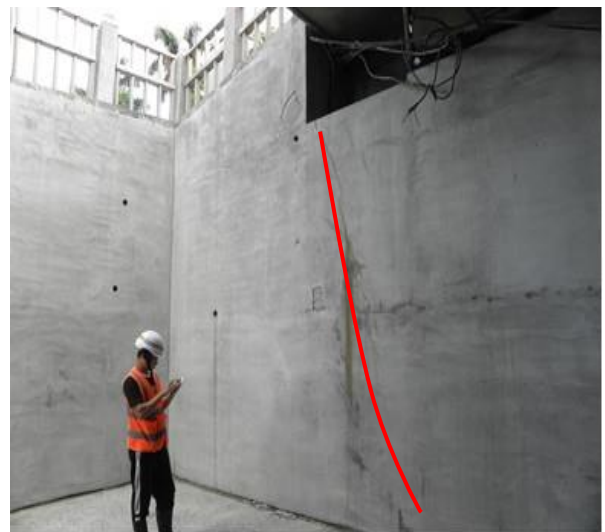


図-17 中正橋橋台ひび割れ図



図-18 中正橋桁形状

8. まとめ

2018年2月6日発生した台湾国花蓮地震に対して2018年4月12～15日に実施した構造物の調査結果を以下にまとめる.

- 1) 花蓮地震によって, 11階建てのMarshalホテルや12階建てのYumen Tsuti complexが倒壊した.
- 2) 断層近傍で数多くの地震波形が観測された. いずれも断層近傍の地震動では2～3秒で800ガルの応答加速度が観測されている.
- 3) 断層近傍の七星潭大橋では, 地震動により15cmを超える橋軸直角方向の変位が観測され, 桁が横方向変位制限構造に衝突し, 橋脚に押抜きせん断損傷が発生した. また照査の結果設計作用力に比べて抵抗力が極めて小さいことが明らかとなった.
- 4) 筆者らは2014年よりASRにより損傷が発生した構造物のモニタリング調査を実施している. このうち, 断層周辺に位置する中正橋においては, ASR劣化した橋台に地震力による再びび割れが発生した.

参考文献

- 1) Yi-An Li 作成パワーポイント: Damaged building feature of Hualien Earthquake, 2018.
- 2) 国家地震工程研究中心作成パワーポイント: February 6, 2018 (local time) M1-6.0 Hualien Earthquake, Taiwan, 2018.
- 3) Kuo, C.-H., Li, Y.-A., Shen, W.-C., Yang, C.-Y., Lin, F.-R., Chen, C.-C., Hsu, S.-Y., Lin, J.-L. and NCREE: Reconnaissance report of the 0206 Hualien earthquake, *NCREE Newsletter*, Vol. 13, No.1, March 2018.
- 4) 五十子幸樹作成パワーポイント: 2018 年台湾花蓮地震調査報告—建築物の被害—, 2018.
- 5) 大野晋作成パワーポイント: 2018.2.6 台湾花蓮地震被害調査 地震・地震動, 2018.
- 6) 林康裕, 杉野未奈, 郭耕杖作成パワーポイント: 2018 年 2 月 6 日 台湾花蓮地震におけるパルス性地震動の分析, 2018.
- 7) 国家地震工程研究中心作成パワーポイント: 橋梁勘災作業記録概要, 2018.
- 8) 党紀, 林祉青作成パワーポイント: 2018 年台湾花蓮地震橋梁支承地震被害調査, 2018.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書維持管理編, 2013.
- 10) 阪神高速道路: 道路構造物の点検標準 (土木構造物編)

(2018.10.24 受付, 2019.1.26 修正, 2019.2.17 受理)

INVESTIGATION OF BRIDGES DAMAGED DUE TO HUALIEN EARTHQUAKE

Kenji KOSA, Akihiko HIROOKA, Shuhei TAKEDA and Masakatsu MIYAJIMA

From 15th to 18th, April in 2018, We conducted the bridges survey due to Hualien Earthquake. In Qixingtan bridge located near the Milun fault, the girder moved to the transverse direction about 15 cm due to Earthquake load and punching shear failure by the girder pounding, was observed at the pier. The calculated resistance of punching shear is quite low, compared with applied Earthquake force. Zhongzheng bridge also located near the Milium fault, which abutment already damaged by ASR before Earthquake, also showed the severe cracks due to Earthquake load.