

2016年熊本地震による橋梁被害と 前震後の調査を踏まえた被害メカニズム推定

高橋 良和¹

¹正会員 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

2016年熊本地震は、震度7を観測する大きな地震が2度発生するとともに、震度6弱以上を観測した地震が7回発生するなど、過去の地震に比べて強い地震動が繰り返し発生している特徴がある。これら地震により、熊本県だけでなく大分県など広範囲にわたって、強震動に加え、地盤変状による被害も混在して発生している。熊本地震による被害を理解するにあたり、2度の大きな地震、すなわち、前震による被害を踏まえたうえで本震による被害を検討することが望ましいが、前震直後の被害情報が極めて少なく、この重要な情報の欠落が、被災メカニズムの推定を困難とさせている。本論は熊本地震による橋梁被害を整理するとともに、前震直後にも被害調査を行った木山川橋を対象に、本震前後での被害の変化に基づく被害メカニズムを推定するものである。

Key Words : Kumamoto Earthquake, bridge, damage, Kiyamagawa Bridge, foreshock, mainshock

1. はじめに

2016年4月14日21時26分に熊本県熊本地方を震源とするマグニチュード6.5の地震が発生し、熊本県益城町において震度7を観測した。これにより大きな被害が発生し、平成28年熊本地震の本震と考えられたが、4月16日1時25分に再び熊本県熊本地方を震源とするマグニチュード7.3の地震が発生し、被害が拡大した。以降、4月14日の地震が熊本地震の前震、4月16日の地震が本震と呼ばれている。

地震による死者は64名（震災関連死含む）、負傷者は2054名に達した（消防庁¹⁾：平成28年8月1日現在）。また、建物をはじめ、橋梁などの社会基盤施設に甚大な被害が生じ、熊本・大分両県の社会資本・住宅・民間企業設備が受けた被害総額は約2.4～4.6兆円に上ると試算されている（内閣府²⁾：平成28年5月23日）。うち、建築物等の被害が約1.6～3.1兆円、道路・港湾・空港等の社会インフラの被害が約0.4～0.7兆円である。

著者を団長とする（公社）土木学会被害調査団先遣隊は、2016年4月15日より現地調査を開始した。以降、数度の現地調査により、土木施設の被害状況の把握に努めている。著者は15日に九州自動車道の地震被害調査を行っており、本震16日午後に再度調査を行った。本論では、熊本地震による橋梁被害を整理するとともに、前震直後にも被害調査を行った九州自動車道木山

川橋を事例として、本震前後で被害がどのように変化したのかに着目し、被害メカニズムの推定を行うことを目的とする。

2. 熊本地震の特徴

熊本地震の特徴は、震度7を観測する大きな地震が2度発生するとともに、これらの地震を含めて5月6日までに震度6弱以上を観測した地震が7回、マグニチュード3.5以上の地震が234回発生する（気象庁³⁾）など、過去の地震に比べて強い地震動が繰り返し発生していることである。

熊本県熊本地方には、布田川断層帯、日奈久断層帯が存在し、4月14日の前震は日奈久断層帯（高野-白旗区間）が、4月16日の本震は布田川断層帯（布田川区間）の活動の影響が大きいと考えられている。地震調査研究推進本部地震調査委員会では、平成25年に九州地域の活断層の長期評価⁴⁾を行っており、日奈久断層帯（高野-白旗区間）について、活動時にマグニチュード6.8程度の地震が発生する可能性があり、30年以内の地震発生確率は不明、布田川断層帯（布田川区間）について、活動時にマグニチュード7.0程度の地震が発生する可能性があり、30年以内の地震発生確率は0～0.9%（やや高い）と評価していた。実際に発生した地震は、

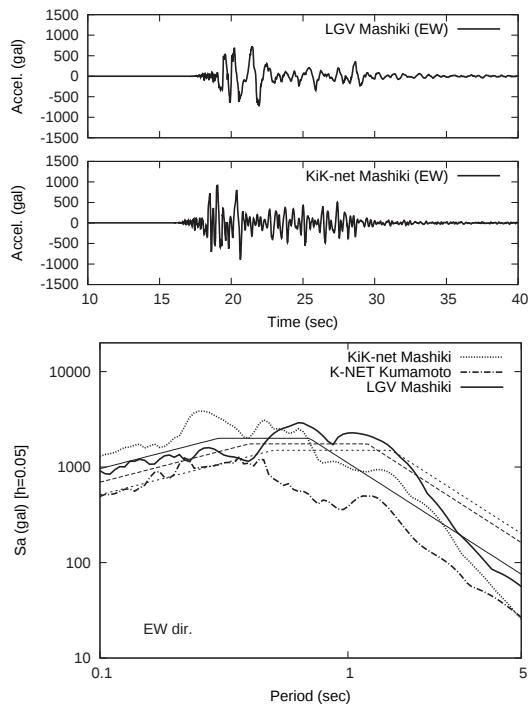


図-1 前震の加速度・応答スペクトルと道路橋示方書レベル2タイプ2地震動スペクトルの比較

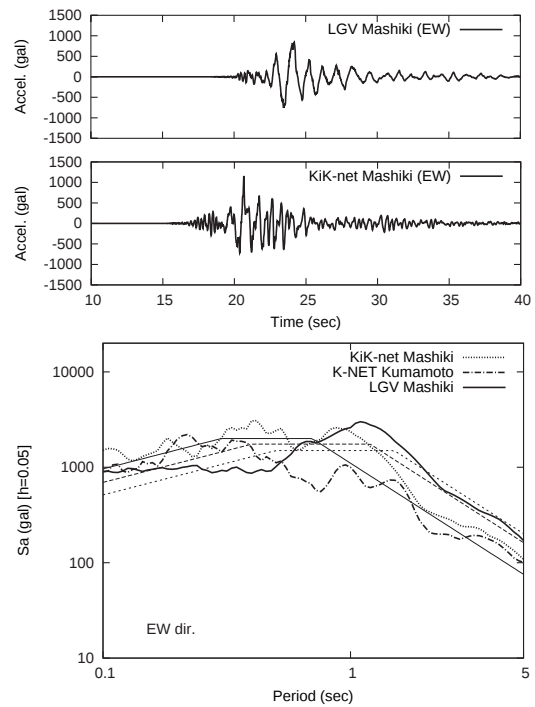


図-2 本震の加速度・応答スペクトルと道路橋示方書レベル2タイプ2地震動スペクトルの比較

事前評価と大きく異なるものであったことは評価できる。

KiK-net益城, K-NET熊本, そして熊本県自治体震度計(益城町)で観測された地震動の加速度応答スペクトルと、道路橋示方書レベル2タイプ2地震動スペクトルとの比較を図-1(前震), 図-2(本震)に示す。益城町の震度計は役場庁舎内に設置されているため、建物の影響がある可能性はあるものの、1Hz付近が卓越し、その値は道路橋示方書レベル2タイプ2地震動スペクトルを上回っている。KiK-net益城記録の1秒付近は益城町記録に比べて大きくないものの、1秒より短い周期帯ではレベル2地震動相当の値を示している。本震ではK-NET熊本記録もKiK-net益城とほぼ同等のスペクトル強度を示しているとともに、益城町役場の記録も含め、いずれも1秒以上の周期帯での値が大きくなっていることが分かる。

3. 熊本地震による橋梁被害

(1) 被害の特徴

橋梁の被害は、熊本県だけでなく大分県でも発生するなど、広範囲にわたり(図-3)、強震による被害に加え、山岳部では地盤変状による被害も混在していることが特徴である。平野部を走る九州自動車道では、高架橋の耐震補強未対策部に大きな被害が発生すると

ともに、高速道路跨道橋が本震で落橋した。山岳部では、兵庫県南部地震以降に改訂された示方書に基づく複数の橋梁において積層ゴム支承の破断や支承からの桁の逸脱等の大きな被害が発生するとともに、大規模な斜面崩壊によりアーチ橋が消失した。

熊本地震による被害を理解するにあたり、2度の大きな地震、すなわち、前震による被害を踏まえたうえで本震による被害を検討することが望ましい。最終的に甚大な被害を受けたとしても、1度の地震で甚大な被害に至ったことと、前震では限定的な被害にとどまったものの本震で甚大な被害となったこととは、学ぶべき教訓は大きく異なるためである。しかし、熊本地震の本震は、各機関による調査が本格化しようというタイミングで発生したことから、前震直後の情報が極めて少ない。この重要な情報の欠落が、被災メカニズムの推定を困難にさせている。

(2) 平野部における橋の代表的な被害

a) 熊本県道32号 府領第一橋

九州自動車道を跨ぐ府領第一橋は、昭和49年10月に竣工したロッキングピアを有する跨道橋である。中空RC床版の桁は東端に斜角を有しており、耐震補強時には桁かかり長拡張に加え、横変位拘束装置も設置されていた。

前震後、道路管理者により横変位拘束装置にひび割れが確認され、桁が水平にやや移動したものの落橋は

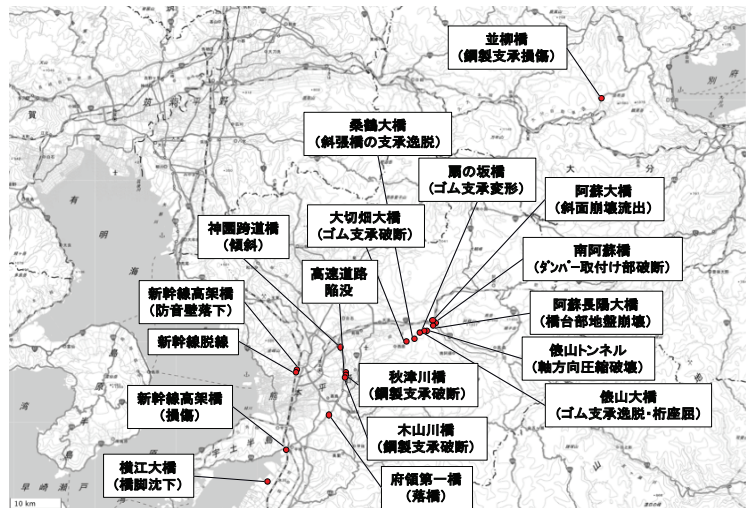


図-3 調査した被害橋梁の位置 (国土地理院地図に加筆)



写真-1 落橋した府領第一橋



写真-2 府領第一橋東端橋台部の損傷状況



写真-3 九州新幹線十五社高架橋の防音壁の落下

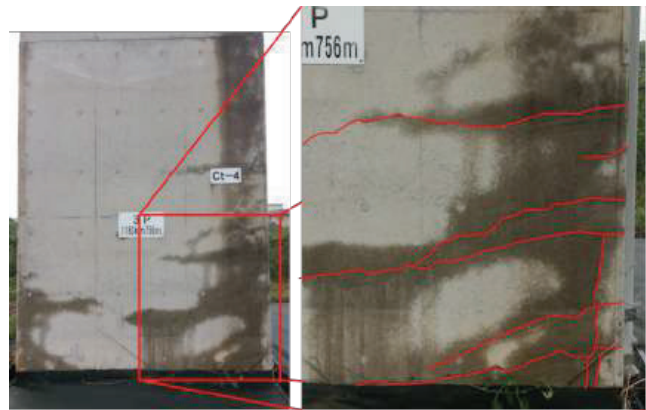


写真-4 九州新幹線十五社高架橋の単柱橋脚曲げ損傷

していなかったが、本震では斜角を有する側で桁の水平・回転移動を拘束することができず、ロッキングピアのみでは大きな桁水平変形により不安定であり、落橋した(写真-1, 2)。

b) 九州自動車道 木山川橋

本橋については、福永らにより損傷事例が報告されているが⁹⁾、本論では、本震前後における被害状況の変化に着目し、4章で被害メカニズムの推定を行う。

c) 九州新幹線 十五社高架橋

鉄道橋の被害については、笠らにより報告されているが⁹⁾、ここでは橋脚の被害について報告する。九州新幹線の博多-新八代間は平成23年3月12日に開業した。適用設計基準は平成11年鉄道構造物等設計標準(耐震設計)である。熊本-新八代間では、前震により熊本駅南側で新幹線の脱線や桁防音壁の落下などが発生したが、宇城市大野川を跨ぐ大野川橋りょうの北側の桁式

高架橋において、単柱橋脚の曲げ降伏損傷や圧壊、桁防音壁の落下などの被害が発生した(写真-3, 4)。ただし、本被害を発生させた地震は特定されていない。

d) 熊本県道338号 横江大橋

八代市鏡町にある横江大橋は、鏡川と鯉川を跨ぐ橋長200mの2連トラス橋であり、昭和54年3月に竣工した。本震により中間橋脚が横梁部まで約2m沈下し、それに伴い桁も沈下、2連トラス橋をつなぐ上弦材も座屈した(写真-5)。

(3) 山岳部における橋の代表的な被害

a) 熊本県道28号 大切畑大橋

大切畑大橋は橋長265.4mの5径間連続曲線鈑桁橋であり、2003年に竣工した。適用示方書は平成8年道路橋示方書である。桁は積層ゴム支承で支持され、桁端部には橋軸方向の落橋防止ケーブルが設置されている。

被害を発生させた地震は特定できていないが、A1, A2橋台およびP1, P3, P4橋脚上のゴム支承が破断し、桁が支承位置から橋軸直角方向に逸脱した(写真-6)。ゴム支承の破断は、ゴム層で生じているものもあるが、フランジ部との取付ボルトが破断することにより発生したことが多い。A1橋台部の落橋防止ケーブルは、桁の橋軸直角方向の移動によりすべて破断していた。唯一ゴム支承が破断しなかったP2橋脚のみ、橋脚基部が大

きく曲げ破壊し、約5mmの曲げひび割れが残留している(写真-7)。

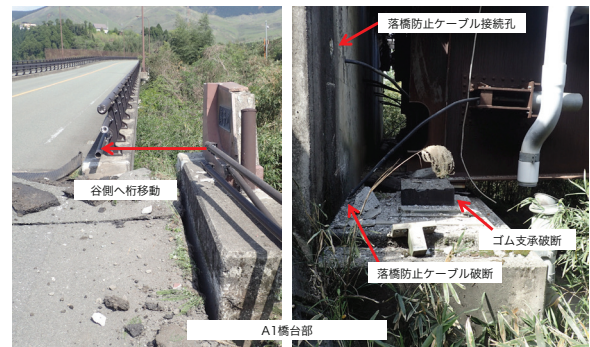


写真-5 横江大橋の橋脚沈下に伴う被害

写真-6 大切畑大橋のゴム支承の破断と桁逸脱

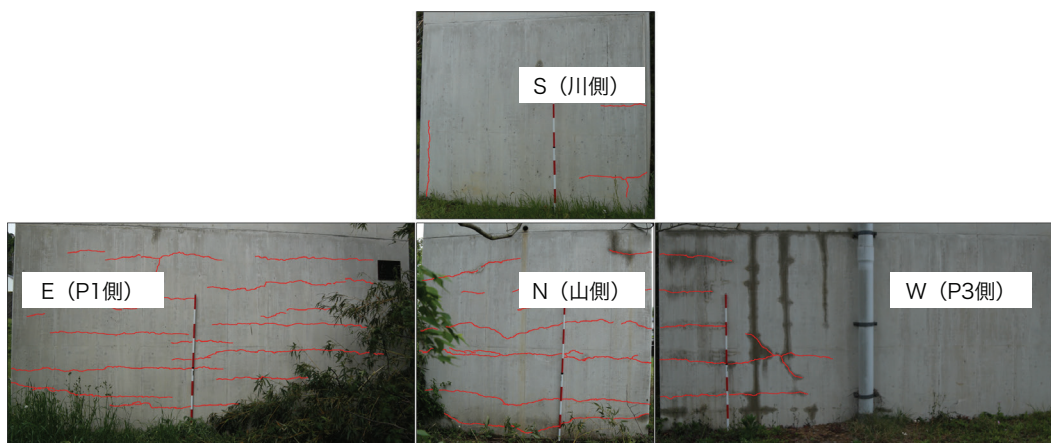


写真-7 大切畑大橋のP2橋脚基部の曲げ損傷ひび割れ展開図



写真-8 桑鶴大橋の損傷状況

本橋に隣接する山の斜面が崩壊しており、本橋の被害に影響を与えていると思われるが、支承のサイドブロックが左右とも損傷しているなど、振動による痕跡も確認できる。現行の道路橋示方書では、ゴム支承を有する橋脚が損傷する場合、支承は弾性範囲にとどめ、主たる塑性化は橋脚基部で発生させることを想定している。つまり、P2橋脚の損傷状態は想定どおりであるのに対し、弾性部材と想定しているゴム支承の破断は想定外である。橋脚の塑性化を伴うゴム支承を有する橋梁の地震被害は初の事例であり、ゴム支承の破断も含め、詳細な分析が必要である。

b) 熊本県道28号 桑鶴大橋

桑鶴大橋は橋長160mの2径間連続鋼斜張橋であり、緩やかな曲線橋である。適用示方書は平成8年道路橋示方書であり、平成10年に竣工した。地震により、桁端部の鋼製支承が破壊、橋台と桁衝突するとともに、一部のPCケーブルのソケットが抜け、緩みが生じた。また主塔部の鋼製支承も破壊し、桁が橋軸直角方向に残留変形した結果、PCケーブルが照明柱と接触していた(写真-8)。橋台周辺部には複数の地割れも確認され、地盤変状の影響も受けたと予想される。

c) 熊本県道28号 俵山大橋

俵山大橋は橋長140mの3径間連続鋼桁橋であり、平成13年に竣工した。適用示方書は平成8年道路橋示方書である。RC床版を有する桁はゴム支承により支持されている。

地震により橋台周辺部の地盤が沈下し、深礎杭が見える状態であり、地盤変状の影響も大きく受けたと考えられる(写真-9)。橋台部で桁衝突が確認でき、ゴム支承から桁が逸脱していた(写真-10)。中間橋脚ではフランジ部ごとゴム支承が外れ、一部の支承は桁下に落下していた。また、上部構造に大きな被害が発生したことにも特徴があり、主桁下フランジ部が座屈し、対傾構および下横構が変形している(写真-11)ことか



写真-9 俵山大橋の橋台周辺地盤の変状



写真-10 俵山大橋のゴム支承の逸脱



写真-11 俵山大橋の桁部の座屈損傷

ら、桁に橋台部での鉛直下向きの変形や横向きの力が作用したことが推察できる。

d) 国道325号 阿蘇大橋

阿蘇大橋は国道57号から分岐した国道325号に架かる橋長206mの上路式逆ランガー桁橋であり、昭和45年に竣工した。平成23年までに耐震補強実施済みである。

地震により、推定土砂流出量50万立方メートルと推定される阿蘇外輪山の大規模な斜面崩壊が発生し、橋梁が落橋した。橋台部やアーチ部を支える基礎(写真-12)と桁の一部(写真-13)が確認できるのみである。地震動により橋梁そのものが被災していたのか、大量の土砂による重量が橋に作用したため落橋したのか、また橋台地盤が移動したために落橋したのか、現時点では情報が無い。

e) 国道325号 南阿蘇橋

南阿蘇橋は国道325号に架かる主径間80mの鋼アーチ橋であり、昭和46年に竣工した。平成21年に耐震補強



写真-12 流出した阿蘇大橋の橋台部



写真-13 流出した阿蘇大橋の桁部



写真-14 南阿蘇橋のアーチ基部支承と鉛直材を繋ぐボルトの破断 (写真は地震後溶接による補修後)



写真-15 南阿蘇橋の制震ダンパー取付部の破壊

が実施され、アーチ部に座屈拘束ブレース、桁端部に制震ダンパーが設置された。地震により、アーチ基部

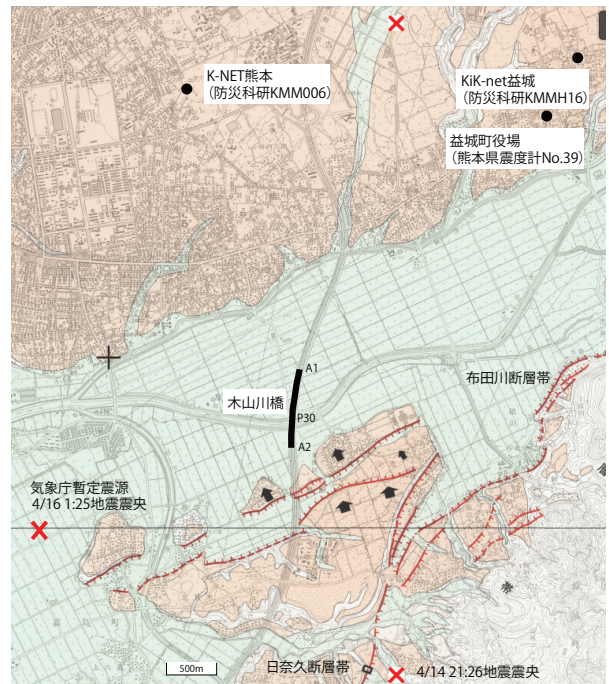


図-4 木山川橋と周辺の地震観測点 (国土地理院都市圏活断層図に加筆)

の支承部において、鉛直材と支承をつなぐボルトが破断する(写真-14)とともに、制震ダンパーの取付部が損傷、一部は完全に分離した(写真-15)。耐震補強においてダンパー固定部を確保できないため、側面に取付ブロックがアンカーにより固定されていたが、この部分が桁の橋軸方向の振動により破壊したと考えられる。この取付ブロックは橋軸直角方向の移動制限装置も兼ねており、アーチ部の橋軸直角方向の振動により破損した可能性も否定できない。また、制震ダンパー、座屈拘束ブレースとともに稼働した明瞭な痕跡は確認できず、今後の耐震補強対策への教訓として、詳細な調査が必要である。

4. 本震前後の被害の変化を踏まえた木山川橋の被害メカニズムの推定

(1) 調査対象橋梁

木山川橋は、九州自動車道益城熊本空港IC～嘉島JCT間で木山川を跨ぐ位置にあり(図-4)、鋼3径間連続鈑桁9連+鋼2径間連続鈑桁2連+鋼単純鈑桁1連の上部構造を有する橋長867mの長大橋である(写真-16)。標準的な3径間連続鈑桁の支間長は26m+26.4m+26mであり、幅員は11.7mである。下部構造は橋脚高さは約5～9mのRC構造であり、基礎形式は杭基礎である(図-5)。支承は支圧型ピン支承であり、支持条件は、1連当たり固定が1箇所、その他は可動(1本ローラー)である。昭



写真-16 木山川橋を木山川から北側へ望む (4月15日撮影)

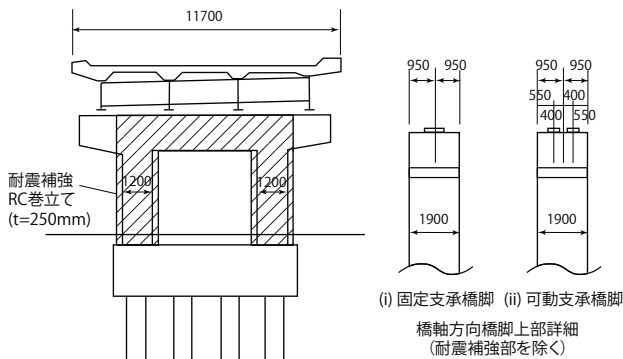


図-5 木山川橋の代表的な橋脚構造

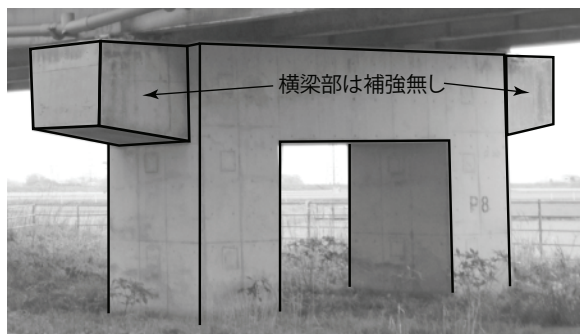
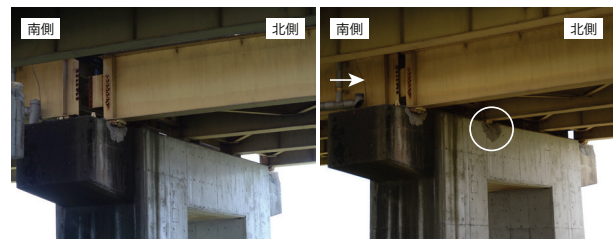


図-6 木山川橋橋脚の耐震補強状況

和47年道路橋示方書⁷⁾が適用され、昭和50年5月に竣工した。当時の設計震度は $k_h = 0.17$ である。昭和47年道示では、可動支承部の落橋防止構造として、桁かかり長、あるいは同一の下部構造頂部にある隣接する桁間を連結することが求められている。本橋では、どの時期に設置されたか不明ではあるが、桁間に可動機能を失わないように長孔を有する鋼板で連結されている。また、桁かかり長 $S(\text{cm})$ は支間長 100m 以下の橋においては $20+0.5l$ であり、 $l=52.4\text{m}$ の場合、 $S=46.2\text{cm}$ となる。

RC橋脚は平成14年から平成16年にかけて耐震補強され、厚さ 250mm のRC巻立てが柱部になされているが、張り出し横梁部は増厚されていない(図-6)。昭和55年道示⁸⁾以降、桁かかり長の算出式が変更され、 $S_E=70+0.5l$ となった。 $l=52.4\text{m}$ の場合、 $S_E=96.2\text{cm}$ となり、



(i) P18 前震後 (4/15 撮影)

(ii) 本震後 (4/16 撮影)



(iii) P15 前震後 (4/15 撮影)

(iv) 本震後 (4/16 撮影)



(v) P20 前震後 (4/15 撮影)

(vi) 本震後 (4/16 撮影)

写真-17 桁間連結板の破壊と桁遊間の変化

やや桁かかり長が不足するが、桁間連結されているため、示方書の要求は満足しているといえる。また、4主桁の内側2本については、 250mm の増厚があるため、昭和50年道示以降の桁かかり長も満足するものと思われる。木山川を跨ぐ桁は斜角を有しており、上記の落橋防止システムに加え、桁間連結ケーブルおよび移動制限装置が設置されていた。

(2) 各部位の被害と本震前後の変化

a) 桁遊間(桁間連結板の破壊)

同一下部構造上にある隣接する桁間は鋼板とボルトにより連結されていたが、その多くが破壊していた。接合ボルトの破断によるものが大半であるが、鋼板ボルト孔部の破断も見受けられる、また、圧縮力による座屈も確認された。

写真-17に、前震後に調査をした際、桁連結板が外れ、

桁遊間が大きく開き、北側桁の可動支承が損傷して落橋寸前であったP18周辺の本震前後の写真を示す。本震後の調査だけでは、桁遊間が狭く、被害程度が甚大ではないように見えるが、これは誤りである。P18上の2つの桁は、北側桁の端部をP15で、南側桁の端部をP20で支えられている。P15は、既に前震で可動支承が大きく損傷し、隣接した桁は桁連結板に圧縮力による座屈を発生させながらも、連結したまま支承から橋脚上に落下している。そして本震後も、その状況はほとんど変化していない。一方、P20の北側桁は、前震では可動支承、桁連結板ともに損傷していないが、本震により桁連結板が外れ、支承が破壊し、北側に移動した。結果、P18上では桁遊間が小さくなった。これにより、P18の北側桁も北側に押されたと考えられ、新たにRC巻き立てで厚くなった部分にも支承位置で欠けが見られる。ただ、既にP15では桁遊間が閉じていたため、ほとんど移動できなかったと考えられ、落橋しなかったのは幸運であり、桁かかり長の重要性を再認識させるものである。

b) 鋼製支承の破壊

本地震による被害で特徴的なことは、固定・可動に関わらず、ほとんどの鋼製支承に被害が発生していることである。

固定支承において、アンカー部の抜け出し、ピンの破断、桁との接合ボルトの破断が複合して発生し、上沓が落下しているものも見受けられた。ピン支承が橋軸に変形を受け、回転性能限界に達すると、上下沓が接触し、引張側の取付ボルトあるいはアンカーに損傷が発生する⁹⁾。また、橋軸直角方向に変形すると、支圧ピンのくびれ部で破断する。本地震においても同様のメカニズムにより被害が発生したと考えられる。また、一本ローラー可動支承において、ローラーの逸脱による橋軸方向へ上沓が大きく移動していることが多く確認された(写真-18)。結果、桁連結部において路面に大きな段差が発生している。

写真-19は、前震で固定支承が軸方向に回転し、取付ボルトが破壊した(小破)ため、変位固定機能が失われ、本震による桁の軸方向移動を止めることができず、



(i) アンカーの抜け出し (ii) 可動支承ローラーの逸脱

写真-18 鋼製支承の破壊 (4月15日撮影)



(i) 前震後 (4/15 撮影)

(ii) 本震後 (4/16 撮影)

写真-19 P7の鋼製支承の被害状況の変化

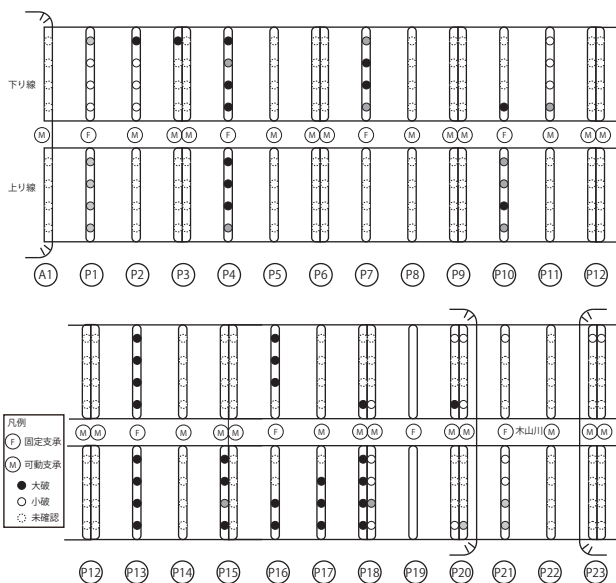


図-7 前震後の支承の損傷状況

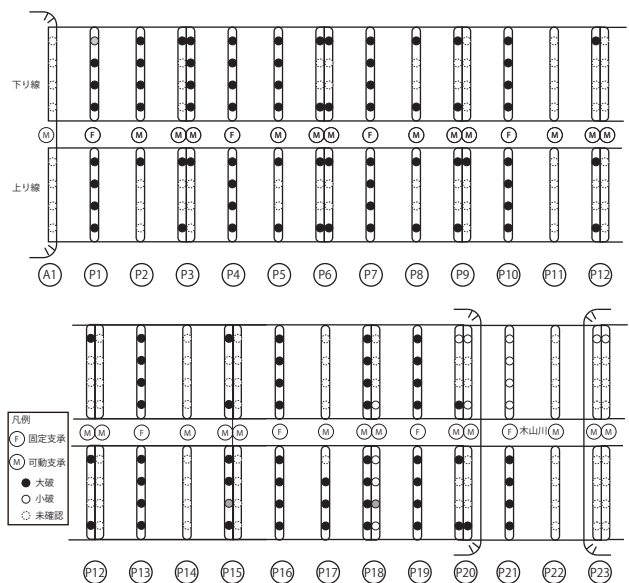


図-8 本震後の支承の損傷状況



(i) 前震後 (4/15撮影)



(ii) 本震後 (4/16撮影)

写真-20 P21の落橋防止構造の損傷の変化



写真-21 桁連結版・支承破壊による隣接桁間の開きと桁間連結ケーブル(P20) (4月16日撮影)

桁が大きく座屈した(大破)事例である。

木山川以北における支承部の本震前後の破壊状況を図-7, 8に示す。前震においては支承の明瞭な損傷パターンが確認され、固定支承を中心に発生していることが分かる。これは、橋梁の設計振動単位通りに地震力が作用したことを意味し、前震時の破壊形態は(壊れたことを除けば)ほぼ設計通りの挙動をしたと考えられる。一方、前震で固定支承の機能が失われ、また一部の可動支承も壊れていたことから、本震ではさらに鋼製支承の損傷が拡大した。これより、ほぼ全ての鋼製支承が破壊されていることが分かるが、一度の地震でこれらの支承が破壊したのではなく、まず設計の仮定通りに固定支承が地震力を負担し、破壊したことにより、二度目の地震で可動支承の被害が拡大したことを把握しておくことは重要である。

c) 落橋防止システムの損傷

桁かかり長、桁間連結以外の落橋防止構造として、斜角を有する桁に対し、横変位拘束構造、移動制限装置がP21, P22橋脚に設置され、桁端部には、桁間連結ケーブルが設置されていた。

P21の固定支承が損傷し、横変位拘束構造と桁が衝突した。横変位拘束構造は脆性的な破壊をしたものの、

橋軸直角方向の過大な移動は制限でき、ピンが破断した固定支承も上杓が逸脱することが防止された。

写真-20は、前震ではほぼ無被害にみえる支承が本震でピンが破断し、これにより桁が橋軸直角方向に移動したが、横変位拘束構造に衝突し、過大な変形を防止できたことを示している。ただし、横変位拘束構造は一度の地震で脆性的な破壊を呈していることが分かり、もしこの損傷が前震で発生していたならば、本震では落橋を防止できなかった可能性もある。今後、落橋防止システムの好ましい破壊性状のあり方について、検討が必要である。

また、P20において連結板が損傷、隣接する桁の可動支承が破壊したことにより、桁間の開きが大きくなったものの、桁間連結ケーブルが作動し、桁落下を防止したようにみえる(写真-21)。

d) 鋼桁の損傷

支承部が破壊したため、支承部周辺で鋼桁は大きく損傷した。写真-18にみられるように、回転性能を失った支承によるフランジの座屈、支承が桁補剛位置からずれることによる桁の座屈、支承から桁が落下することによる桁端の座屈、また写真-10にみられるように横変位拘束構造に桁が衝突したことによる対傾構の座屈



写真-22 RC柱の傾斜 (5月9日撮影)



(i) 前震後 (4/15 撮影) (ii) 本震後 (4/16 撮影)

写真-23 P1の被害状況の変化

などが発生した。

e) RC柱の損傷

RC柱はRC巻き立てによる耐震補強がなされていたため、柱部そのものには曲げひび割れ等の損傷が確認されていないことは、耐震補強の効果を発揮できたものとして評価できる。P11(可動支承橋脚)は柱部に損傷はみられないものの、約4度ほど起点側に傾斜していた(写真-22)。

また、一部の横梁部において、支承部からの押し出しせん断ひび割れとみられる斜め、縦方向のひび割れが発生していた。写真-23は、固定支承を有するP1橋脚の横梁の損傷状況を示すが、前震後では損傷が見受けられなかったものが、本震後に支承位置からの押し抜きせん断のようなひび割れが確認できる。本震では前震よりも大きな力が作用したことが予測できる。

(3) 被害メカニズムの推定

前震では、主に橋軸方向に橋梁の設計振動単位どお

りに地震力が作用し、耐震補強されていたRC柱には大きな被害は発生しなかったものの、耐震補強されていなかった固定支承に被害が集中した。固定支承に大きな損傷が発生しなかった桁は橋軸方向に移動しないため、隣接する桁間の桁間連結板の破断、あるいは座屈が発生した。

本震では、既に固定支承の機能が失われていたものも多く、また桁間連結板も損傷していたことから、桁の変位を拘束することができず、ほぼ全ての鋼製支承が破壊された。前震で桁遊間が開いた箇所は、桁がさらに橋軸北方に移動した。本震は橋軸直角方向にも大きく地震が作用した可能性が高く、支承が橋軸直角方向にも破壊したが、横変位拘束装置により過度の桁変形を制限できた箇所もある。

以上の被害メカニズムの推定より、現在の耐震設計で考えられている地震作用で説明できることが多く、熊本地震では大きな鉛直動が観測されているものの、本橋の被害は鉛直動よりも水平動によるものが支配的であると考えられる。

5. まとめ

2016年熊本地震は、兵庫県南部地震以降に発生した地震の中で、多くの橋梁に地震被害が発生した地震であり、その被災メカニズムを明らかにし、今後の耐震設計・補強に反映させることが重要である。しかしながら、2度の大きな地震が立て続けに発生し、特に前震による被害状況を把握するための情報が極めて少ないことが、被災メカニズムの推定を困難なものとしている。本論では、熊本地震による橋梁被害を整理するとともに、本震前後の被害調査に基づき、木山川橋の被害メカニズムについて検討した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 橋梁の被害は、熊本県だけでなく大分県でも発生するなど、広範囲にわたり、強震による被害に加え、山岳部では地盤変状による被害も混在していることが特徴である。平野部を走る九州自動車道では、高架橋の耐震補強未対策部に大きな被害が発生するとともに、高速道路跨道橋が本震で落橋した。山岳部では、阪神大震災以降に改定された示方書に基づく複数の橋梁において積層ゴム支承の破断や支承からの桁の逸脱等の大きな被害が発生するとともに、大規模な斜面崩壊に伴いアーチ橋が落橋した。
- 2) 本震前後で調査を行った木山川橋の被害メカニズムの推定を通じ、前震後の調査を踏まえた検討の重要性を示した。木山川橋は、鋼製支承の被害が

甚大である特徴があり、規則性を読み取ることが困難である被害であったが、前震では固定支承に被害が集中しており、設計の仮定通りに地震力が作用している。これより、過去の地震被害で多くみられた被害であることが分かる。ただ、固定支承が破壊し、桁を固定する機能を失った結果、本震により大きく被害が拡大したと推定できる。

- 3) 本地震において、落橋防止システムが脆性的に破壊している事例が多く確認された。木山川橋の落橋防止システムは設計の仮定通り機能したとみられるが、一度の地震で脆性的な破壊を呈している。落橋した府領跨道橋は、横変位拘束構造が前震で損傷し、本震で桁の移動を拘束できずに落橋に至ったと考えられるし、その他の被災橋梁でも、脆性的な損傷を受けたものも少なくない。名の通り落橋を防止するための最後の砦である落橋防止システムの好ましい破壊性状のあり方について、今後検討が必要である。
- 4) 通常の横変位拘束構造は許容応力（線形解析）により照査されているが、特にロッキング橋脚を有する橋梁は、水平変形に対して不安定な構造特性を有することを踏まえた上で、横変位拘束構造も主要部材として、終局限界状態を含む非線形挙動を検討することが望ましい。危機耐性の観点から、設計想定と異なる作用に対する配慮として、横変位拘束構造の非線形性を踏まえた検討をすることが正当化されると考える。

謝辞：本調査は、科学研究費補助金基盤研究(B)26289145番のもと実施したものである。現地調査において、葛西昭（熊本大学）、矢部正明（(株)長大）、池田隆明（長岡技術科学大）、秋山充良（早稲田大学）、松永昭吾（(株)共同技術コンサルタント）各氏を

はじめとする（公社）土木学会被害調査団先遣隊、調査委員会の方々に多大なご支援、ご協力をいただくとともに、前震直後の調査において、緒方辰男氏を始めとする多くのNEXCO西日本の技術者に多大なご協力をいただきました。また、本報告において、防災科学技術研究所K-NET, KiK-net強震記録および熊本県自治体震度計強震記録を使用させていただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府：熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について（8月01日12:00現在）、http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/pdf/h280414jishin_33.pdf（平成28年8月22日閲覧）
- 2) 内閣府：平成28年熊本地震の影響試算について、<http://www5.cao.go.jp/keizai3/kumamotoshisan/kumamotoshisan20160523.pdf>（平成28年8月22日閲覧）
- 3) 地震調査研究推進本部：平成28年（2016年）熊本地震の評価（平成28年5月13日公表）、http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf（平成28年8月22日閲覧）
- 4) 地震調査研究推進本部：九州地域の活断層の長期評価（第一版）、平成25年2月1日
- 5) 福永靖雄，西山晶造，柁木正喜：平成28年熊本地震による高速道路橋の被害報告，橋梁と基礎，Vol.50, pp.38-39, 2016.7.
- 6) 笠裕一郎，海老原毅，中島英明，前川聡幸：平成28年熊本地震による鉄道橋の被害報告，橋梁と基礎，Vol.50, pp.40-42, 2016.7.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1972.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1980.
- 9) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三，森重行雄，鶴野禎史：金属支承の水平終局挙動，土木学会論文集，No.773/I-69, pp. 63-78, 2004.

(2016.11.3受付, 2017.1.5修正, 2017.2.18受理)

DAMAGE OF BRIDGES CAUSED BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE AND ESTIMATION OF FAILURE MECHANISM BASED ON FIELD SURVEY AFTER FORESHOCK AND MAINSHOCK

Yoshikazu TAKAHASHI

In the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan, two severe ground shakings occurred consecutively on April 14 and 16 in the Kumamoto Region of Kyushu Island, Japan. Extensive damage to structure and infrastructures occurred across a wide region of Kyushu Island. Since the mainshock attacked some structures that had already damaged by the foreshock, it is very difficult to estimate the failure mechanism based on survey after the mainshock. In this paper, the damage of bridges on the plains and in the mountains are summarized and the failure mechanism of Kiyamagawa Bridge in Kyushu Expressway is estimated based on field survey after not only the mainshock but also the foreshock.