

2016年熊本地震における木山川橋の被害分析

高橋良和¹

¹正会員 博士（工学） 京都大学准教授 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）

1. はじめに

2016年4月14日に熊本県熊本地方を震源とするM6.5の地震は、熊本県益城町で震度7を観測し、土木構造物にも大きな被害を発生させた。その直後の16日未明、再び熊本県熊本地方を震源とするM7.3の地震が発生し、被害が拡大した。16日の地震（以降、本震と呼ぶ）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、14日の地震（以降、前震と呼ぶ）直後の情報が少なく、調査された被害が、どの地震により発生したものか、また2度の地震により被害が進行したのか、などの情報はほとんどないのが現状である。しかし、最終的に甚大な被害を受けたとしても、一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留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。そのため、2016年熊本地震の被害分析を行うにあたっては、できる限り前震の地震による被害を踏まえた上で検討することが望ましい。

著者を団長とする土木学会災害調査団先遣隊は、前震翌日の15日から17日にかけて熊本県に入り、各種土木構造物の被害調査を行った。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、九州自動車道木山川橋を対象に、被害の概要を整理するとともに、本震前後で被害がどのように変化したのかに着目し、被害分析を行うことを目的とする。

2. 調査対象高架橋

木山川橋は、九州自動車道益城熊本空港IC～嘉島



図-1 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」上に加筆）

JCT間で木山川を跨ぐ位置にあり（図-1）、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（図-2）。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-3）。支承は支圧型ピン支承



図-2 木山川橋を木山川から北側へ望む（4月15日撮影）

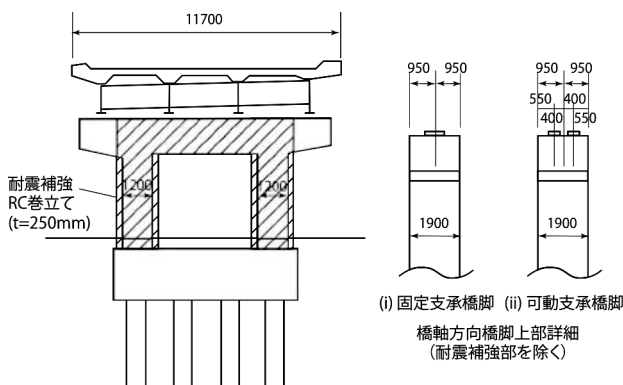


図-3 木山川橋の代表的な橋脚構造



図-4 木山川橋橋脚の耐震補強状況

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。1972年道路橋示方書¹⁾が適用され、1975年5月に竣工した。当時の設計震度は $k_h = 0.17$ である。1972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 $20+0.5\ell$ であり、 $\ell=52.4\text{m}$ の場合、 $S=46.2\text{cm}$ となる。

RC橋脚は2002年から2004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-4）。1980年道示²⁾以降、桁かかり長の算出式が変更され、 $S_E=70+0.5\ell$ となった。 $\ell=52.4\text{m}$ の場合、 $S_E=96.2\text{cm}$ となり、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、1980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。

3. 被害の概要

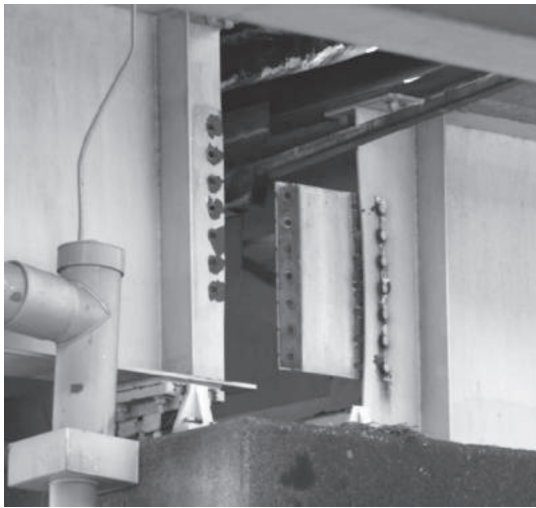
(1) 桁間連結板の破壊

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（図-5）。

(2) 鋼製支承の破壊

本地震による被害で特徴的なことは、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、



(i) 連結ボルトの破断



(ii) 連結板孔部の破断



(iii) 連結板の座屈

図-5 隣接桁連結板の破壊 (4月15日撮影)



(i) アンカーの抜け出し



(ii) 固定支承上沓の落下



(iii) 可動支承ローラーの逸脱

図-6 鋼製支承の破壊 (4月15日撮影)

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³⁾。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(図-6)。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。

(3) 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(図-7)。

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、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沓が逸脱することが防止された。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。

(4) 鋼桁の損傷

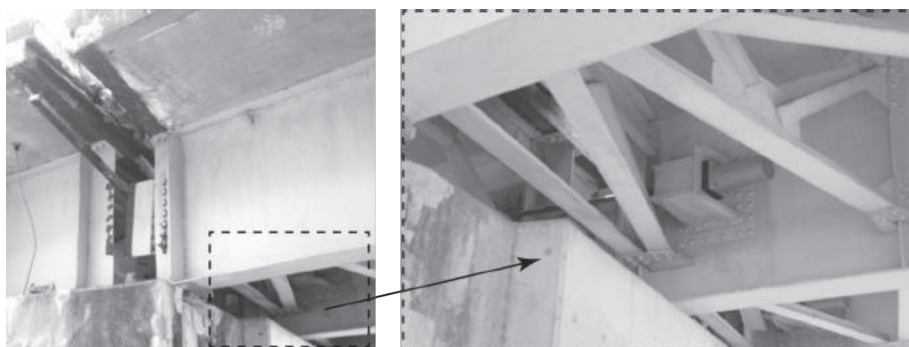
支承部が破壊したため、支承部周辺で鋼桁は大きく損傷した。図-6にみられるように、回転性能を失った支承によるフランジの座屈、支承が桁補剛位置からずれることによる桁の座屈、支承から桁が落下することによる桁端の座屈、また図-7で示すように横変位拘束構造に桁が衝突したことによる対傾構の座屈などが発生した。

(4) R C柱の損傷

R C柱はR C巻き立てによる耐震補強がなされて



(i) 鋼製支承破壊による横変位拘束構造の損傷(P21)



(ii) 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)

図-7 落橋防止構造 (4月16日撮影)



(i) 橋脚の傾斜(P11)



(ii) 横梁における鉛直方向のひび割れ (P1)

図-8 RC柱の損傷 (5月9日, 17日撮影)

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。

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（図-7）。

4. 2016年熊本地震と高架橋近傍の地震記録

木山川橋は国土地理院都市圏活断層図によると、布田川断層帯の北側に位置し、周辺には益城町役場（熊本県No.39）、KiK-net熊本(KMMH16)、K-NET熊本(KMM006)の地震計が設置されている（図-1）。本章では、これらで観測された記録を中心に、前震および本震の特徴を整理する。

(1) 前震

2016年4月14日21時26分に熊本県熊本地方を震源とするM6.5の地震は、熊本県益城町において震度7を観測し、KiK-net益城、K-NET熊本で、それぞれ計測震度6.4, 5.9を記録した。また、NEXCO御船IC観測所では、震度6強を観測している。日奈久断層帯（約81km）の北端部にあたる高野-白旗区間（約16km）が震源断層と推定されており、その震央は木山川橋から南南東に約2.75kmと近い（図-1）。

益城町の震度計は役場庁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益城記録は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（図-9）。

(2) 本震

2016年4月16日1時25分に熊本県熊本地方を震源とするM7.3の地震は、再び熊本県益城町において震度7を観測し、KiK-net益城、K-NET熊本で、それぞれ計測震度6.4, 6.0を記録した。布田川断層帯（約64km以上）の北東端に当たる布田川区間（約19km）が震源断層と推定されており、その震央は木山川橋から北北東に約4.2kmである（図-1）。

前震に比べて、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（図-10）。

5. 本震前後の被害状況の変化

レベル2地震動相当の前震で被害を受けた橋梁が、約28時間後の本震により、さらに被害が拡大したことは、熊本地震による被害メカニズムの推定を困難にしている。著者は前震後の15日に、木山川橋の被害状況の全体像を把握するために概略で調査した。この概略調査は、大きな被害であると判断したところを中心に記録したものであり、全ての被害を記録することを目的としたものではない。しかし、記録漏れがあるとしても、前震時の主要な被害を把握したものであり、本震後の16日の調査結果と比較することは、被害メカニズムの推定を行う上で重要であると考えられる。

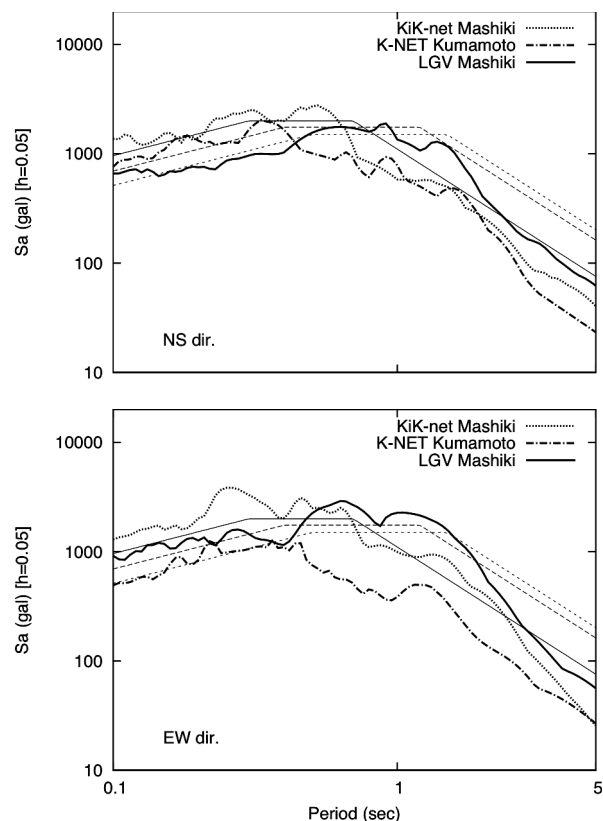


図-9 前震の加速度応答スペクトルと道路橋示方書レベル2タイプ2スペクトルの比較

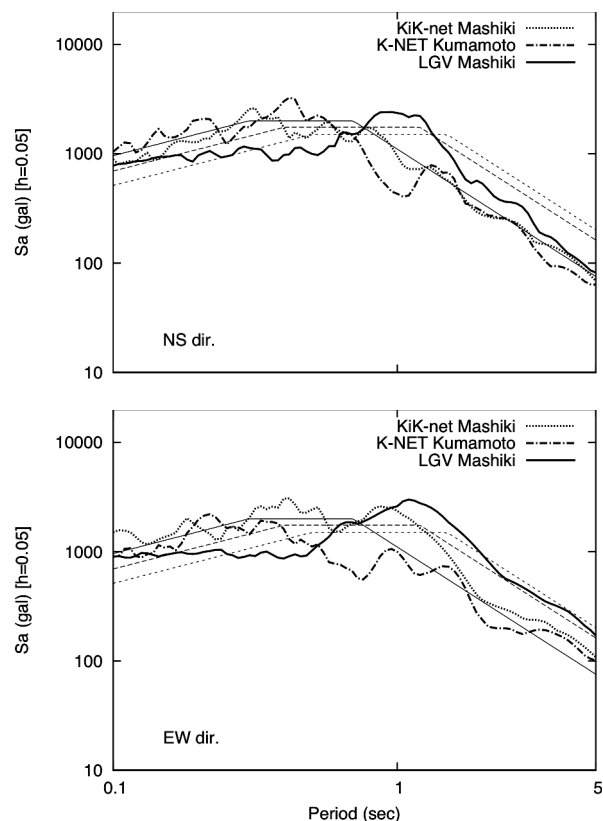


図-10 本震の加速度応答スペクトルと道路橋示方書レベル2タイプ2スペクトルの比較

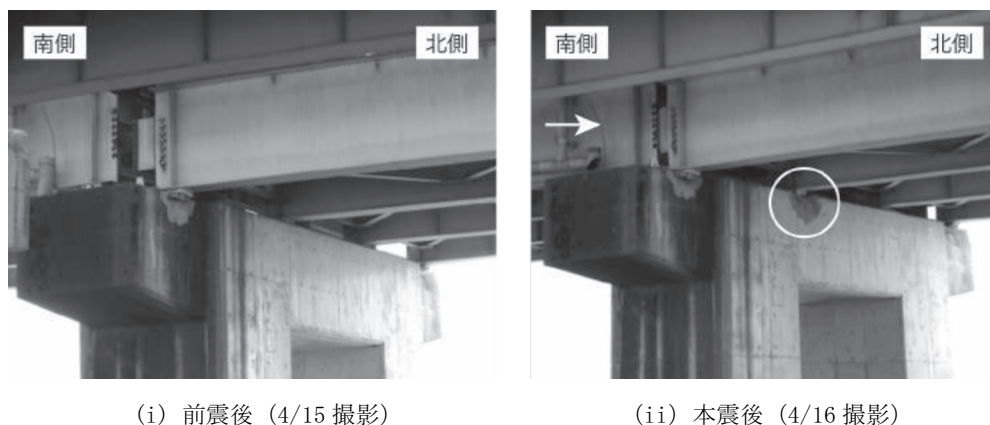
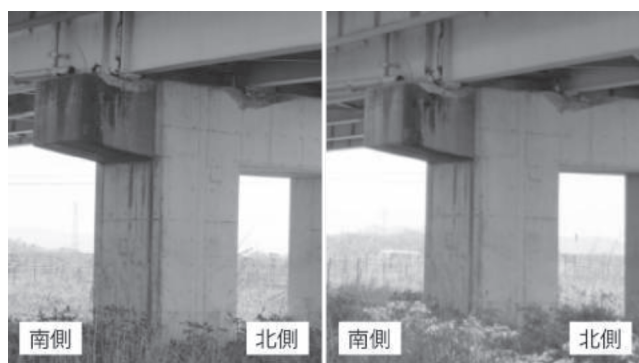
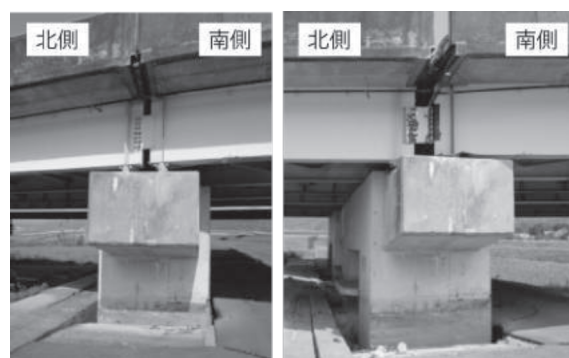


図-11 P18 の被害状況の変化



(i) 前震後 (4/15 撮影) (ii) 本震後 (4/16 撮影)

図-12 P15 の被害状況の変化



(i) 前震後 (4/15 撮影) (ii) 本震後 (4/16 撮影)

図-13 P20 の被害状況の変化



(i) 前震後 (4/15 撮影) (ii) 本震後 (4/16 撮影)

図-14 P7 の被害状況の変化

(1) 桁遊間の変化

図-11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上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。これらの本震前後の被害状況を図-12、13に示す。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。

(2) 鋼製支承の破壊の変化

図-14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、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-15、16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

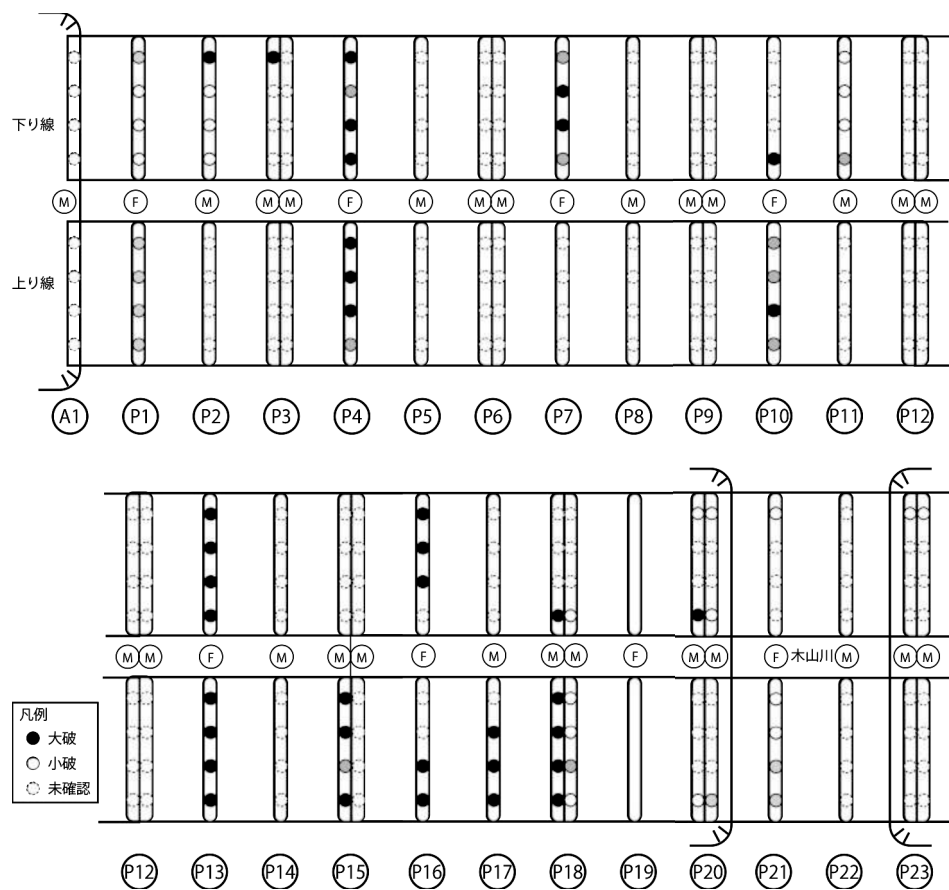


図-15 前震後の支承の損傷状況

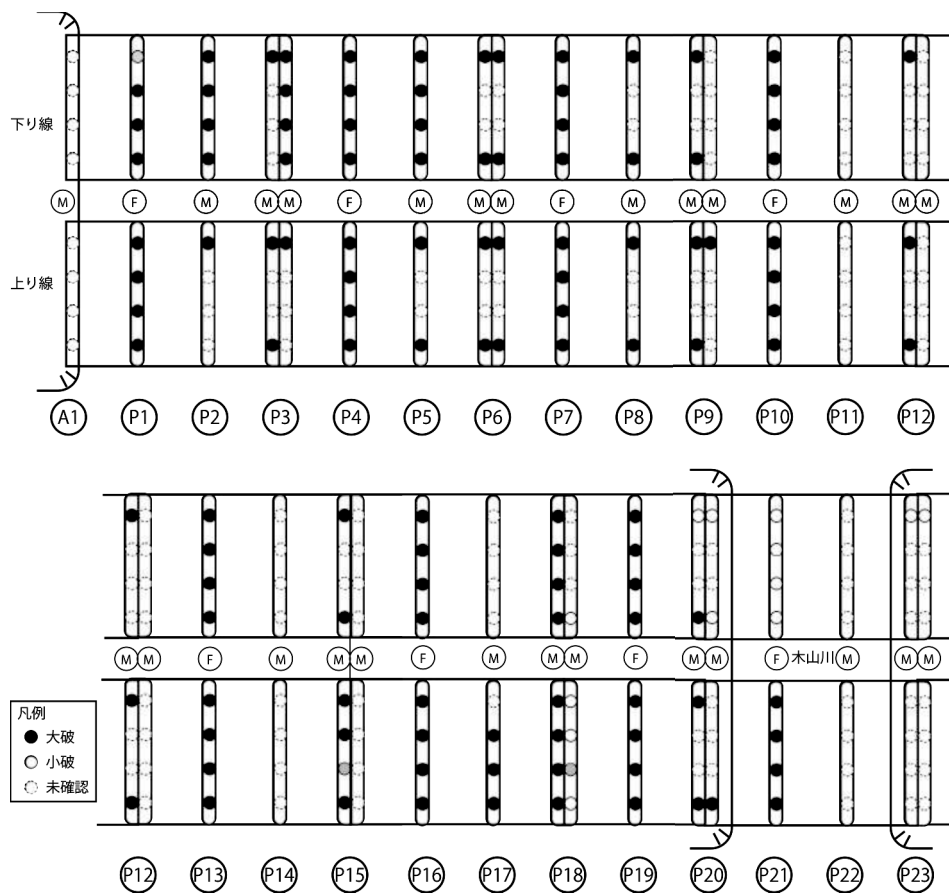


図-16 本震後の支承の損傷状況

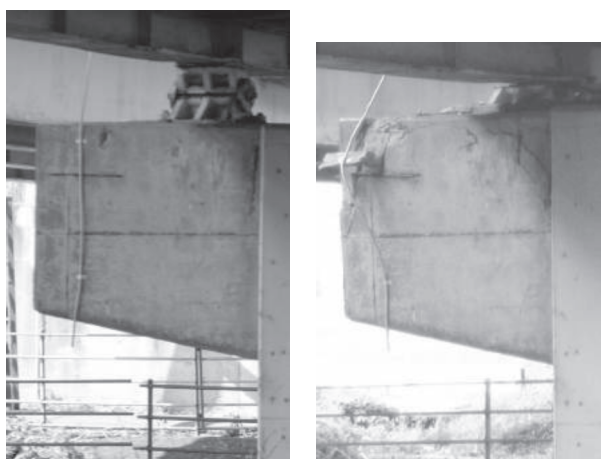


(i) 前震後 (4/15 撮影)



(ii) 本震後 (4/16 撮影)

図-17 P21 の被害状況の変化



(i) 前震後 (4/15 撮影) (ii) 本震後 (4/16 撮影)

図-18 P1 の被害状況の変化

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。

(3) 落橋防止システムの損傷の変化

図-17は、前震ではほぼ無被害に見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。

(4) R C柱横梁の損傷の変化

図-18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。

6. まとめ

2016年熊本地震は、二度の震度7を引き起こした地震が発生し、構造物被害が拡大するとともに、その被害メカニズムの推定を困難としている。本論では、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。

本橋は、鋼製支承の被害が甚大である特徴があるが、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。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。

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。本地震で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。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。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 1972.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書 V 耐震設計編, 1980.
- 3) 阿部雅人ほか5名: 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.