

2016 年熊本地震で被災した大切畑大橋の被害

渡邊学歩¹・葛西昭²・松永昭吾³・益田諒大⁴

¹ 正会員 山口大学准教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: gakuho.w@yamaguchi-u.ac.jp

² 正会員 熊本大学准教授 大学院先端科学研究部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)
E-mail: kasai@kumamoto-u.ac.jp

³ 正会員 (株)共同技術コンサルタント (〒813-0044 福岡市東区千早 4-15-12-307)
E-mail: matsunaga@kg-consul.co.jp

⁴ 正会員 山口大学 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: t061fd@yamaguchi-u.ac.jp

2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分以降に発生した、熊本地方を震源とする一連の地震では、多くの交通インフラ施設に被害が発生している。橋梁構造物の被害としては、布田川断層にほぼ平行して走る県道 28 号線(俵山バイパス)に架橋された橋梁構造物に、地震動による影響(震動)と見られる被害が多数発生している。中でも、橋長が 250m 以上である 5 径間連続曲線橋の大切畑大橋は、上部構造を支持する水平力分散脊のゴム部およびセットボルトが破断し水平抵抗を失ったため、橋台および橋脚上を大きく変位変位した。落橋防止ケーブルによって落橋を免れたものの、耐震余裕度が低かったことが判明した。本稿ではその被害原因等について報告する。

Key Words: Kumamoto Earthquake, Curved Bridge, Damage

1. 緒言

2016年4月14日21時26分以降に発生した、熊本地方を震源とする一連の地震では、建築構造物、盛土構造物および交通インフラ施設に多くの被害が発生している。震災後、早い段階から様々な研究者により調査が行われ、被害状況が報告されている^{1), 2)}。

今回の一連の地震は日奈久断層帯および布田川断層帯を起源とする地震であり³⁾、大きな地殻変動を伴った地震が観測されている。特に、4月16日午前1時25分に発生した地震(本震)では、モーメントマグニチュード $M_w=7.0$ という非常に大きな地震が発生し⁴⁾、震源域に近い長陽では水平方向に98cm、上下方向に24cmの地殻変動が観測されており、断層のずれ量は2mに達した。ここで、観測されたモーメントマグニチュードは、日本の耐震設計に大きな影響を及ぼし、地震工学および耐震工学の発展の起点となった1995年兵庫県南部地震のモーメントマグニチュード($M_w=6.9$)を上回っている。兵庫県南部地震の発生から20数年しか経過していないにもかかわらず、

活断層を起源とする大きな地震(マグニチュード7クラスの断層近傍地震)が発生したことは、断層近傍地震に対する備えを改めて考えさせられるものである。

今回、熊本で発生した一連の地震では、布田川断層にほぼ平行して走る県道28号線(俵山バイパス)に架橋された橋梁構造物に、地震動による影響(震動)と見られる被害が多数発生している。著者らは、震災直後から複数回の被害調査を実施した。本稿では、県道28号線上の被災橋梁のうち大切畑大橋の被害分析結果について報告する。

2. 2016 年熊本地震の橋梁構造物の被害

図-1には、2016年熊本地震における橋梁構造物の被害発生地域の概略を示す。また、同図には観測されている活断層(産総研、活断層データベース⁵⁾)および、熊本地震(本震)における想定断層面を併せて示す⁶⁾。斜面崩壊により流失した、国道325号線の阿蘇大橋の架橋地区(立野)から、熊本市街地に向かって布田川断層が走



図-1 2016年熊本地震における橋梁構造物の被害発生地域と起震断層^{5), 6)}

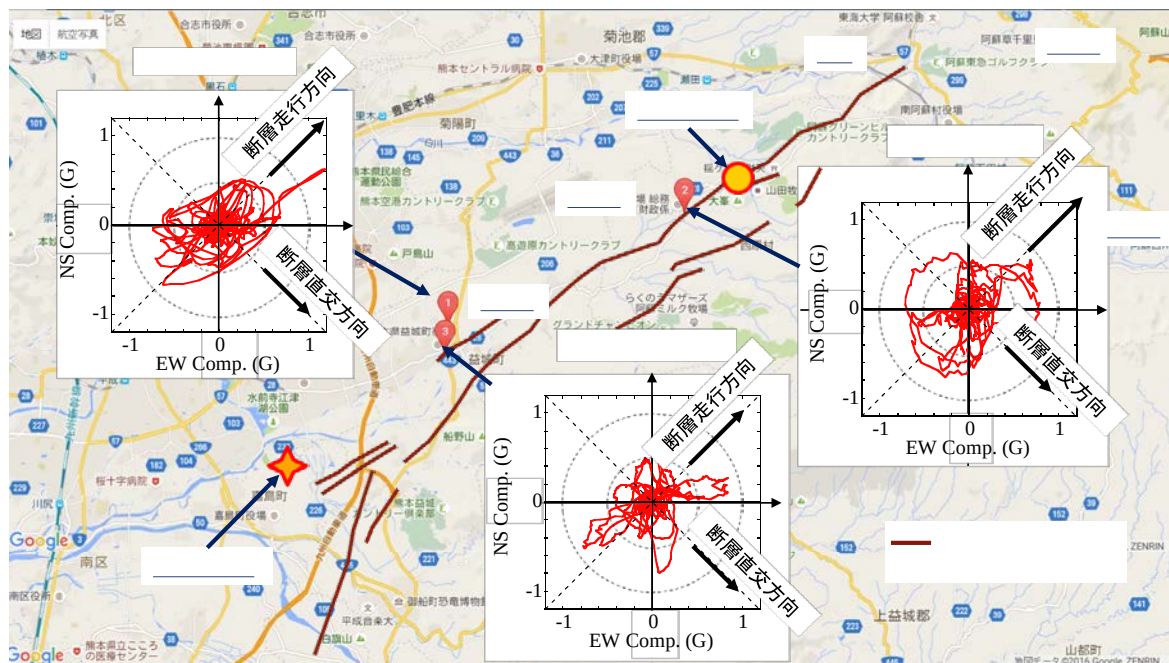


図-2 2016年熊本地震（本震）において観測された地震動記録（加速度）の平面内履歴^{7), 8)}

っており、これに沿って大小3つの起震断層が熊本地震を引き起こしたと考えられている⁹⁾。

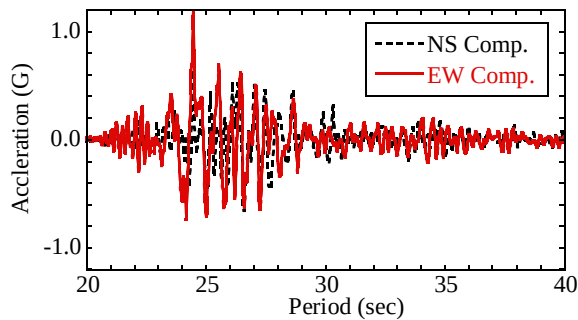
活断層にほぼ並行して走る県道28号線（俵山バイパス）沿いには、大切畑大橋、大切畑ダム橋、桑鶴大橋、扇の坂橋、すすきの原橋および俵山大橋が架橋されている。これらの橋梁では、強震動の作用によって、橋桁が大きく変位して上部構造を支持するゴム支承が破断するなどの被害が発生している^{1), 2)}。

今回の地震では、気象庁(JMA)、自治体(熊本県)および防災科学研究所(NIED)等が設置した強震記録計により様々な強震動データが観測されている^{7), 8)}。図-2には、各地点で観測された地震動のうち、後述する加速度応答スペクトルの大きな地震動記録が観測された、益城町

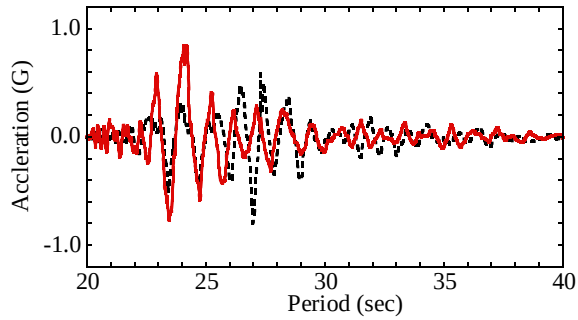
(熊本県、防災科研)と西原村(熊本県)での強震観測記録について、地震動の水平二成分の平面内履歴を地図上に示す。いずれの地点においても、南北および東西の両方向に、それぞれ1G近い加速度記録が観測されており、主として断層走行方向に大きな強震動となっている。

図-3には、各強震動のNS成分およびEW成分記録の時刻歴を示す。震源に近い益城町に比べて、西原村の強震記録ピーク発生が時間的に後方にシフトしていることからわかるように、震源（熊本市街地）から阿蘇方面に向かって、地震波が伝播している。

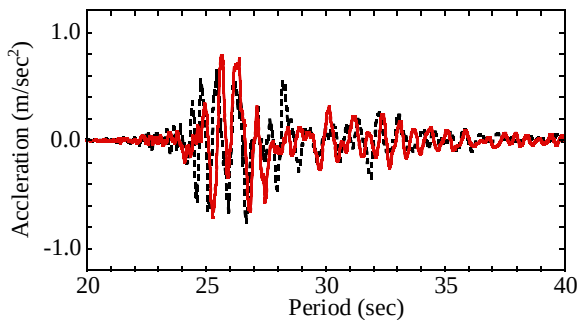
地震動の構造物に与える影響を調べるために、図-4には、観測された強震記録の減衰定数を5%とした場合の加速度応答スペクトルを示す。益城町では周期1秒付近



(a) 益城町 (K-net)



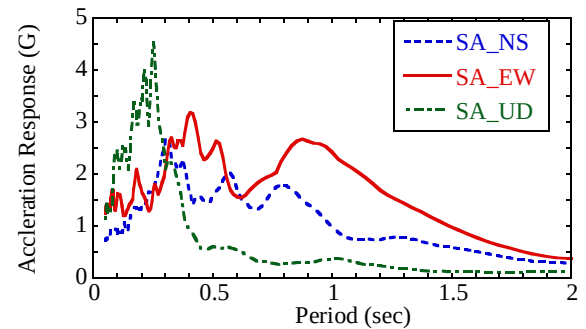
(b) 益城町 (熊本県)



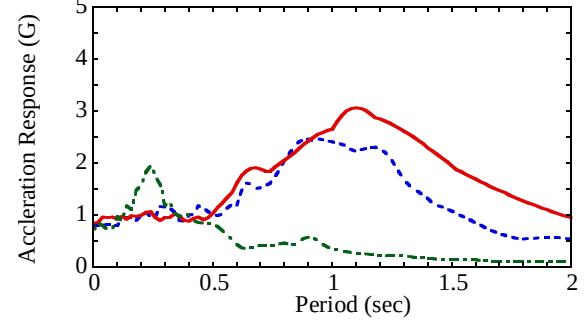
(c) 西原村小森(熊本県)

図-3 2016年熊本地震(本震)で観測された地震動の時刻歴

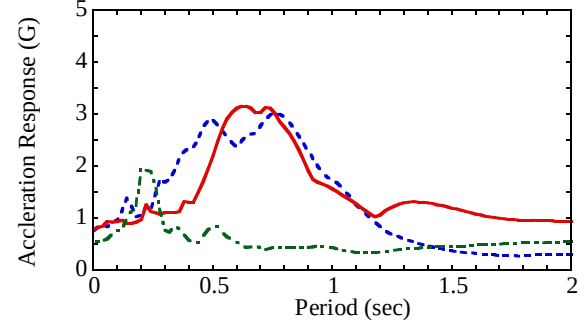
で、西原村周辺では周期0.7秒付近で、それぞれ、加速度応答スペクトルが卓越している。いずれの観測所でも、卓越周期付近では最大弾性地震力は $30 \text{ (m/sec}^2\text{)}$ に達する。なお、同図(d)には、1995年の兵庫県南部地震で観測された強震動記録(JMA神戸海洋気象台記録NS成分およびJR西日本鷹取駅記録EW成分)の加速度応答スペクトルを、熊本地震のそれと比較して示す。二種地盤上で記録されたJR鷹取駅記録(EW成分)の記録と比較すると、震源に近い益城町(熊本県)の記録の応答スペクトルは、0.5秒から1秒の周期帯域では、JR西日本鷹取駅記録の1.0倍~2.1倍、1秒から1.5秒の周期帯域では1.4倍~2.1倍と、いずれも平均して1.7倍程度大きくなっている。一方、後述する大畑大橋に近い西原村小森(熊本県)の記録は、1秒から1.5秒の周期帯域では、鷹取駅記録の0.5倍~1.2倍(平均0.8倍)と小さめの値を示すが、なっているが、1秒から1.5秒の周期帯域では、鷹取駅記録の1.1倍~3.4倍(平均2.3倍)と比較して、大きな加速度



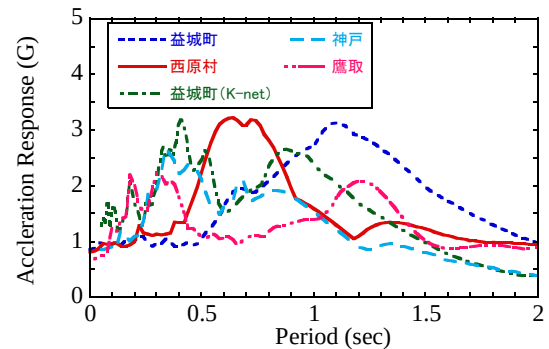
(a) 益城町 (K-net)



(b) 益城町 (熊本県)



(c) 西原村小森(熊本県)



(d) 他の地震動との比較

図-4 2016年熊本地震(本震)で観測された強震記録の加速度応答スペクトル

応答スペクトルの値を示している。

以上のことから、熊本地震(本震)の地震力(弾性地震力)は、兵庫県南部地震で観測された地震動より、同等かそれ以上となっている。

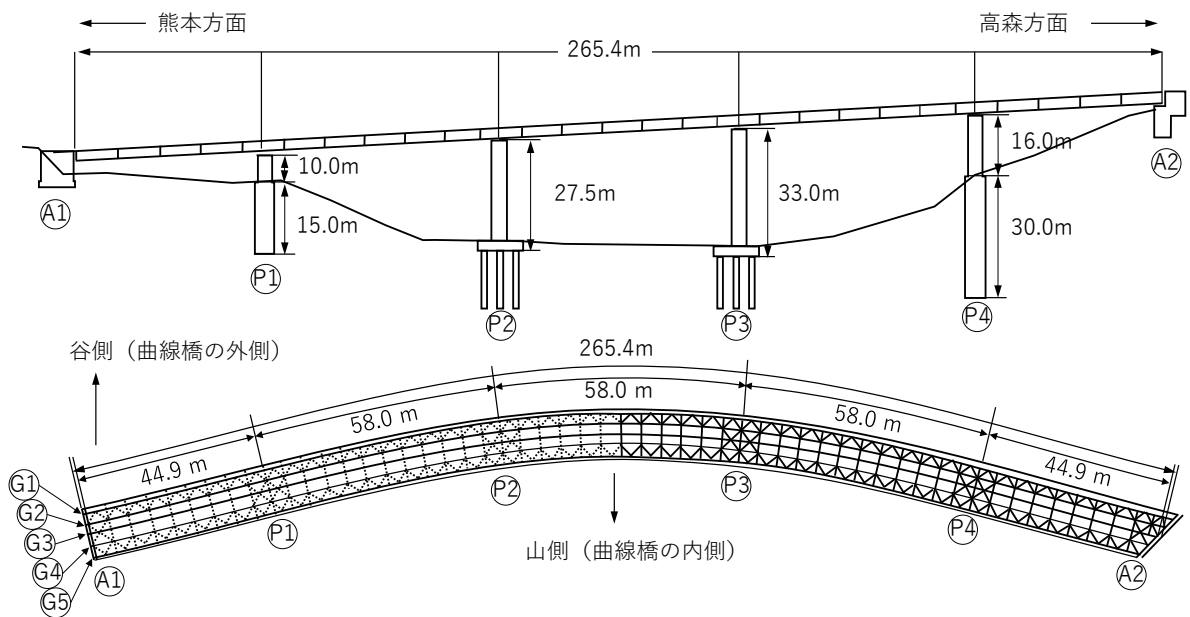


図-5 大切畑大橋の橋梁一般図

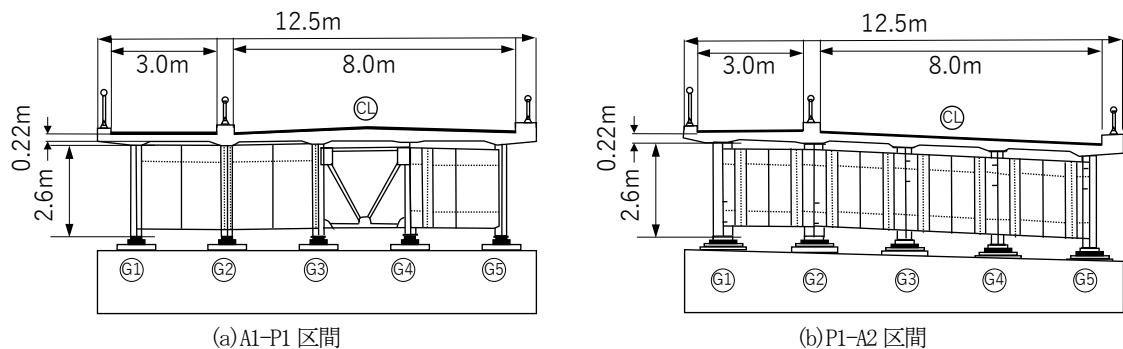


図-6 大切畑大橋の上部構造断面

3. 大切畑大橋の被害

前述した通り、2016年の熊本地震では14日の前震および16日未明の本震によって、布田川断層や日奈久断層沿いに架かる橋梁構造物が多数被災している。下部構造（橋脚）への目立った被害は観測されていないが、金属支承の損傷（秋津川橋、木山川橋）¹⁾やゴム支承の損傷（大切畑大橋他）²⁾によって上部構造が橋軸直角方向に大きく変位している橋梁が数多く見られた。ここでは、断層走行方向に平行して走る県道28号線（俵山バイパス）に架かる大切畑大橋について、被災状況および被害のメカニズムについて考察を行う。

図-5に大切畑大橋の橋梁一般図を示すが、本橋は橋長が265.4mの5径間連続非合成曲線鉄桁橋である。平成8年の道路橋示方書¹⁰⁾に基づき設計され、2003年3月に竣工している。上部構造が曲線桁となっており、高森方面側のA2橋台で斜角が65度となっている。図-6には、同橋の

上部構造断面を示すが、幅員構成は33mの歩道部と8mの車道部（上下2車線）からなり前幅員が12.5m、鉄桁が積層ゴム支承で支持されている。また、端部は荷重支持型のゴムジョイントが用いられている。これは、大規模地震時に桁が大きく変位しても、主桁部が橋台パラペットに直接接触（衝突）するのを防ぎ、上部構造の損傷防止を期待したためである。

写真-1には、熊本地震本震後に撮影された大切畑大橋の上空写真⁹⁾および側面全景を示す。大切畑大橋に隣接する山の斜面が地震によると見られる斜面崩壊を起こしており、土砂の一部が橋の近くにまで達している。

写真-2には、A1橋台部の桁および支承の損傷状況を示す。桁を支持する5基の積層ゴム支承が全てせん断破壊をしており、桁が橋軸直角方向（谷側）へと移動していた、これにより、桁上では谷側に30cm程度の相対変位が発生している。隣接する山の斜面が崩壊しているため、流れ出た土砂が本橋の損傷に影響を与えている可能性があるが、桁が橋台や橋脚に比べて谷側に側方変位していることから考えて、振動によって支承が破壊したとみる



(a) 上空写真 (4月16日 PASCO 撮影に一部加筆)⁹⁾



(b) 側面全景 (4月17日松永氏撮影に一部加筆)

写真-1 熊本地震で被災した大切畑大橋



(a) 桁下 (支承部)



(b) 桁上

写真-2 大切畑大橋 A1 橋台部周辺の損傷状況
(4月16日池田教授(長岡技科大)撮影)

べきである。

写真-3には、橋台部の支承および主桁の損傷状況を示す。前述の通り主桁が30cm程度側方変位しており、これにより落橋防止構造が側方に引きちぎられるようにして破断している。また、支承に取り付けられたサイドストッパーが、両側とも外れて転倒している他、桁下フランジが、捻れる様にして曲げ損傷(変形)をしている。

支承両サイドのサイドストッパーが破壊していることから、サイドストッパーの設計水平震度(レベル1地震動相当)を超える地震力が、橋軸直角方向の正負両側(谷側-山側)において、支承に作用したことになる。



(a) 橋台部側面

(4月16日池田教授(長岡技科大)撮影)



(b) 主桁～パラペット(胸壁)間

写真-3 A1 橋台部の支承および主桁の損傷状況

写真-4には、P1～P4の中間橋脚上の支承(G5)の損傷を示す。P2橋脚上の支承はせん断変形を生じたまま形状を保っているが、それ以外の橋脚上のゴム支承はゴムと上査版の取り付けボルトが破断することで、積層ゴム支承が損傷している。一方、P1～P4橋脚には、曲げひび割れ等の損傷が確認されたが、軸方向鉄筋が露出するようなコンクリートの剥離などの大きな被害は発生していない。東日本大震災でゴム支承が破断した橋梁において、橋梁の損傷が確認されたものではなく、ゴム支承が大きく変形したにもかかわらず橋脚が損傷した事例は初めてである。

写真-5にはA2橋台部周辺の損傷状況を示すが、前述の通りA2橋台側には斜角がついているものの、A1橋台部周辺の損傷と同様に谷側に上部構造が変位している。G1主桁直下の支承のゴムが下査側で破断し、A2橋台からはみ出す形で止まっている。A1橋台側のように、落橋防止ケーブルが破断していれば、主桁は橋台から落下(落橋)していことになる。この落橋防止ケーブルは、本来、橋軸方向の過大な桁の変位による落橋を食い止めるためのものであり、ケーブルが橋軸直角方向(谷側)への変位を拘束した事で、かろうじて落橋を防止したのは、偶然



(a) P1～P2 橋脚区間



(a) 桁上



(b) P3～P4 橋脚区間



(b) 桁側面

写真-5 A2 橋台部の損傷状況



(c) P2 橋脚基部に発生した曲げひび割れ

写真-4 中間橋脚の損傷について

の事象である。

4. 大畑大橋の被害に関する考察

(1) 塑性化の位置について

本橋の損傷状況を図-7にまとめた。主たる損傷は曲線桁を支持する支承部に集中している。本橋は積層ゴム支承による水平力分散構造形式であるため、強震動の作用下では、橋脚は塑性化し、橋脚基部には曲げひび割れによる損傷が発生するはずである。しかし、塑性化によるとみられる曲げひび割れが発生しているのはP2橋脚のみで、それ以外の橋脚では、曲げひび割れ等の損傷は見ら

れなかった。

図-8に示すように、現行の道路橋示方書では、橋としての機能の回復を速やかに行えるようにするために、塑性化を考慮する部材と塑性化させない部材を明確に区別し、地震時においては、塑性化を考慮する部材にのみ塑性化が生じるようにすることを規定している¹¹⁾。平成8年の道路橋示方書¹⁰⁾においても、橋脚基部に塑性ヒンジを設けた設計が行われており、主たる塑性化が橋脚基部以外の場所に生じるのは想定外である。

塑性化する部材やそのレベルが、設計時の想定と異なる原因の一つとして、本橋が不等橋脚で支持された曲線桁橋（図-5参照）であることが挙げられる。上部構造が不等橋脚で支持されているため、本橋の設計でも、各橋脚の荷重分担（慣性力分担率）を考慮した設計がなされている。しかし、一般に、不等橋脚で支持された曲線桁橋の、地震時における慣性力分担率を適切に評価することは難しい。曲線桁の地震力（慣性力）の分担について検討が必要であろう。

2) 曲線桁の回転変形について

斜桁や曲線桁が、地震時に直橋と異なる特異な挙動を示すことは昔からよく知られている¹²⁾。これは、図-9に示すように、橋桁が端部の橋台部に衝突をする度に桁が回転しながら、徐々に側方変位するというものであり、

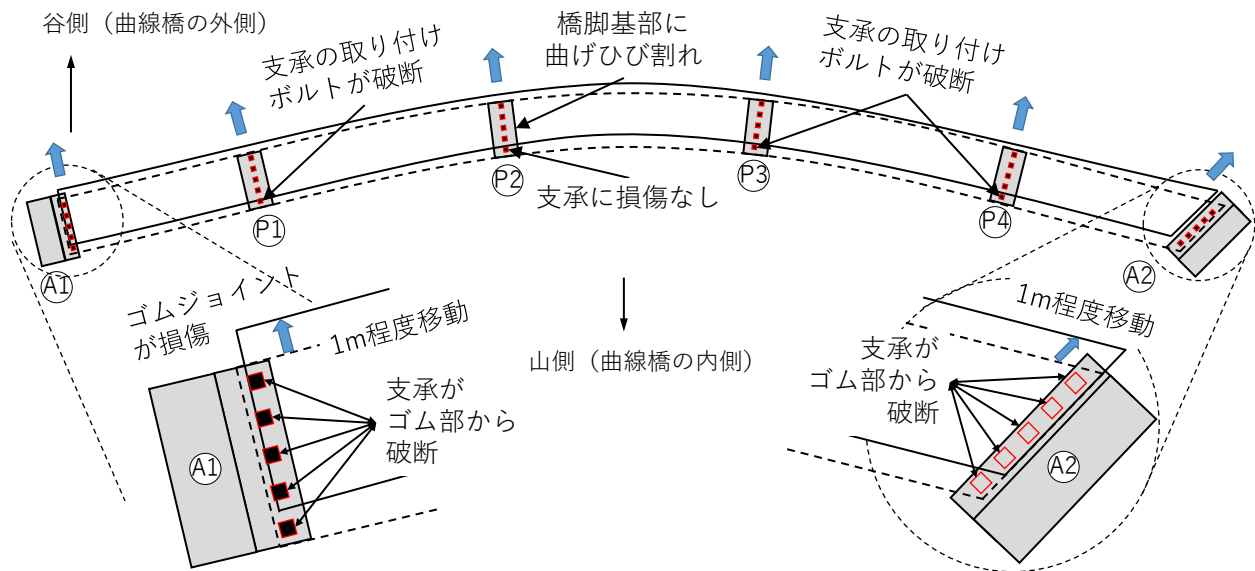


図-7 大切畑大橋の損傷のまとめ

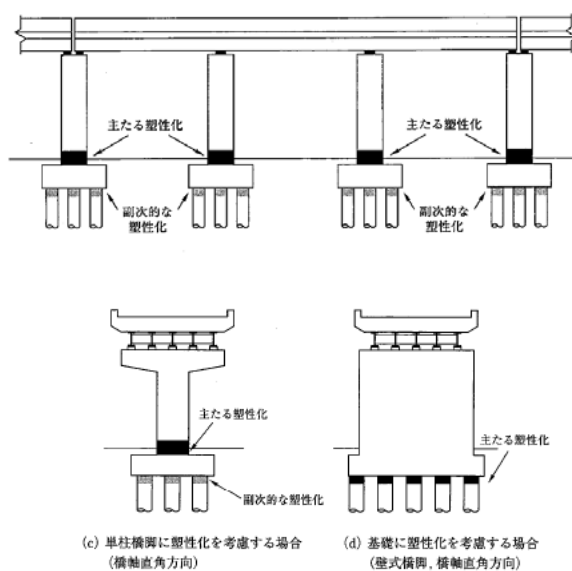


図-8 道路橋示方書で想定されている主たる塑性化位置¹⁰⁾

道路橋示方書においても記述されている^{10), 11)}。橋長に対する幅員の割合が小さいほど、僅かな斜角でも桁が回転と側方（外側）変位しやすくなり、橋軸直角方向への落橋防止構造（横変位拘束構造）が必要となる。

今回の地震では、橋軸および橋軸直角方向ともに大きな加速度が発生していることから、桁が強震動的作用により、並進変位した可能性も高い。ただし、図-7に示した通り、上部構造は、放射方向へと並進移動していることから、単純な並進移動だけではなく、桁端～橋台間の接触（衝突）による桁の回転運動が発生した可能性がある。被害メカニズムを分析する上で、曲線桁の回転を考慮出来るモデルを使った動的解析による地震時挙動の再現が必要となる。本研究では、図-10に示すような解析モデルを用いて解析を行った。なお、解析結果について

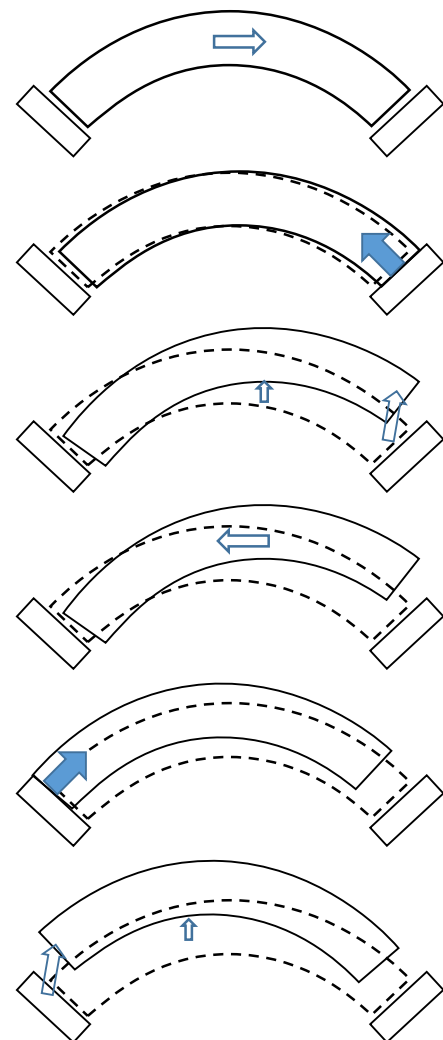


図-9 曲線の橋台部への衝突と桁の並進移動

は、発表時に紹介する。

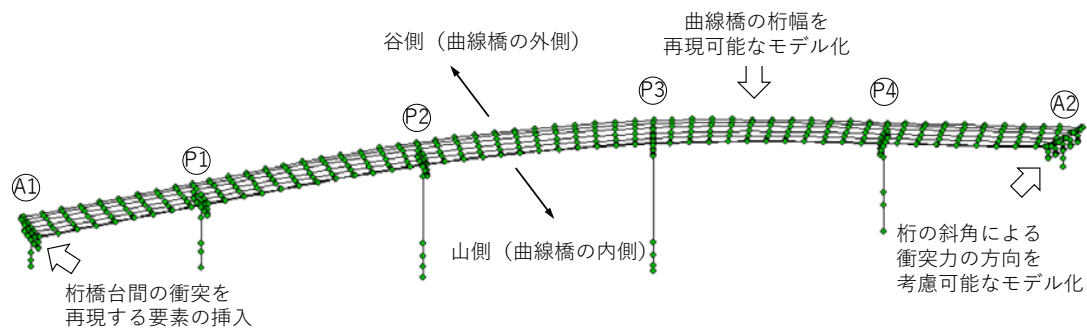


図-10 曲線の橋台部への衝突と桁の並進移動

5. 結言

2016年4月14日および4月16日に発生した熊本地震により、熊本地方を中心に強い地震が観測され、橋梁構造物にも様々な被害が発生した。本研究では、布田川断層に平行して走る県道28号線（俵山バイパス）沿いに建設された、大畑大橋について被害の分析とその考察を行った。以下にその結論を示す。

- 1) 熊本地震（本震）では、断層面上で観測された強震記録に、既往の地震動と比較して大きく、断層面上で観測された強震記録の弾性地震力は3Gに達する。
- 2) 図-1に示した様に、橋脚の被害と、断層面および断層の位置に強い相関があることを確認した。
- 3) 東日本大震災に引き続いて、積層ゴム支承の破断を伴う地震による橋梁構造物の被害が発生した。
- 4) 橋脚の塑性化を伴うゴム支承を有する橋梁の損傷は初の事例で、注意深く分析する必要がある。

謝辞：防災科学技術研究所K-NET, KiK-net強震記録および熊本県の強震記録を使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 平成28年(2016年)熊本地震地震被害調査結果速報会，土木学会，2016.4.27：
<http://committees.jsce.or.jp/eec2/node/76>
- 2) 土木学会西部支部「2016年熊本地震」地震被害調査報告会

～緊急災害調査と応急復旧の取組み～，土木学会西部支部，2016.4.27：

<http://committees.jsce.or.jp/report/node/117>

- 3) 「平成28年（2016年）熊本地震」について（第42報）
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1608/31a/kaisetsu201608312145.pdf>
- 4) 気象庁ホームページ（発震機構，CMT解）：
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20160416012505.html>
- 5) 国立研究開発法人産業技術総合研究所，活断層DB：
<https://gbank.gsj.jp/activefault/cgi-bin/search.cgi?>
- 6) 国土地理院 HP，平成28年4月の地殻変動について，別紙8-4 平成28年4月16日の熊本県熊本地方の地震（Mj7.3）震源断層モデル（暫定）
<http://www.gsi.go.jp/common/000140479.pdf>
- 7) 気象庁ホームページ，強震観測データ：
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/160416_kuma-moto/index.html
- 8) 防災科学技術研究所強震観測網(K-NET,KiK-net)：
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 9) PASCOホームページ：（「2016年4月 平成28年熊本地震災害」情報）
http://www.pasco.co.jp/disaster_info/160415/
- 10) 道路橋示方書・同解説 V(耐震設計編)，(社)日本道路協会，平成8年12月。
- 11) 道路橋示方書・同解説 V(耐震設計編)，(社)日本道路協会，平成24年3月。
- 12) 大塚久哲，神田昌幸，鈴木基行，吉澤努：水平地震動による曲線上部構造の移動挙動解析，土木学会論文集 No.570/I-40，pp.305-314,1997.7.

(2016.9.2 受付)

Analysis of Damage Mechanism of Ookirihata Bridge in 2016 Kumamoto Earthquake

Gakuho WATANABE, Akira Kasai, Shougo MATSUNAGA and Ryota MASUDA

Many transportation facilities suffered damage from the Kumamoto Earthquake in 2016. Bridge structures which were constructed along the Tawarayama the bypass of Prefecture Route 28 suffered severe damage. Especially, although it didn't have the major damage in the columns and abutments, the superstructure almost fell down due to the rupture of elastomeric bearings. This paper presents the damage mechanism analysis of Ookirihata Bridge which suffered from the Kumamoto Earthquake in 2016.