

# 平成28年熊本地震により被災した木山川橋の フーチング基礎の損傷原因推定

後藤源太

## 1. はじめに

平成28年4月に発生した熊本地震によって九州自動車道の高速道路橋は甚大な被害を受け、益城熊本空港IC～嘉島JCT間にある木山川橋（図-1）は特に大きな被害を受けた。

木山川橋では鋼製支承の損傷とそれに伴う桁の座屈や路面沈下のほか、橋脚梁部の損傷等の様々な被害が確認された。中でも下り線P11橋脚は外観目視で分かるほど起点側へ大きく傾斜していた（写真-1参照）。しかし、P11橋脚の支承は可動支承であり、本来、地震時には支承部には摩擦力しか作用せず、地震による上部構造の慣性力は作用しない構造であった。そこで、P11橋脚の詳細な被災状況を把握するための調査を行い、P11橋脚が傾斜するに至る損傷原因の推定を試みた<sup>1)</sup>。

## 2. 橋梁および地震の概要

### 2.1 橋梁概要

木山川橋は昭和51年に竣工された橋長867.0m、支間長24.6～33.0mの非合成鋼鈹桁橋（図-2～図-4）である。下部構造形式はRCラーメン橋脚（H=5.5～9.0m）およびRC壁式橋脚（H=13.0m）、基礎形式は打込み鋼管杭（φ800mm、杭長約30～40m）であり、平成14～16年にかけて、橋脚の耐震補強工事（RC巻立て工法）が実施されている。



図-1 木山川橋橋梁位置図

出典：国土地理院地図及び空中写真（電子国土Web）  
電子国土Web地図及び空中写真（国土地理院）を加工して作成

また、地盤条件としては、架橋地は熊本平野の南東部と山地との境界付近に当たり、橋梁周辺では全域に渡り、表層から約10mの深度に非常に軟弱な黒ボク土層（N=0～3）が堆積している。

### 2.2 地震概要

図-5は、NEXCO観測所のうち、木山川橋に近い熊本ICと御船ICで観測された熊本地震の前震と本震の加速度応答スペクトルを示す。木山川橋の固有周期は0.4～0.5秒程度（図中着色部）であるが、熊本地震では道路橋示方書・同解説V耐震設編（以下「道示V」という。）のレベル2タイプII

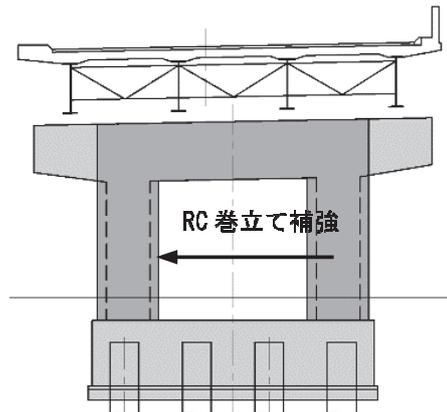


図-2 橋梁概要図（正面図）

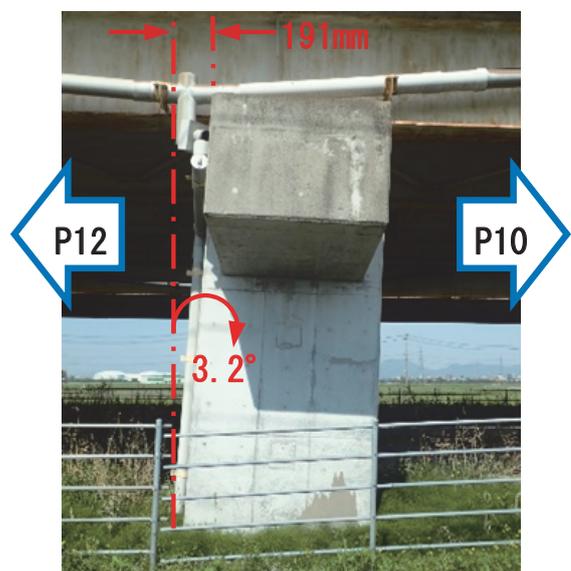


写真-1 P11橋脚変状

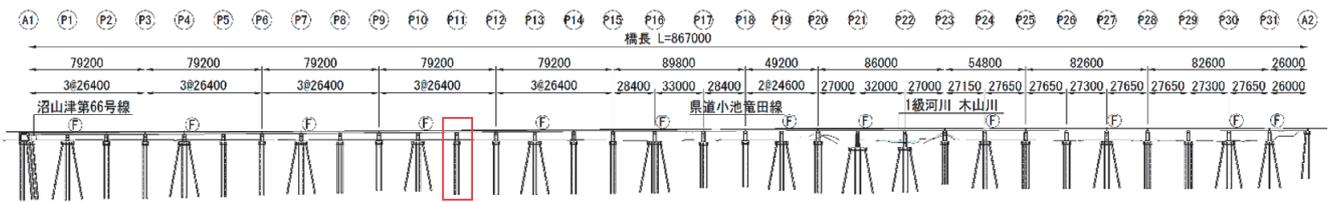


図-3 橋梁概要図（側面図）

地震動(B2地域、Ⅲ種地盤)を上回る加速度が作用したものと考えられる。

### 3. P11橋脚の被災状況

木山川橋P11橋脚の主な被災状況を柱基部の損傷、フーチングの損傷の2つの観点で整理し示す。

#### 3.1 柱基部の損傷

図-6は、本震後に実施したP11橋脚の傾斜計測と柱基部の状態を確認した結果であるが、柱部では $3.2^\circ$ の傾斜を確認した。また、P11橋脚は補強主鉄筋をフーチングに定着しないRC巻立による耐震補強を行っているが、柱基部では、フーチング上面から最大7cm程度の浮き上がりを計測した。

#### 3.2 フーチングの損傷

柱基部同様、図-6、写真-2にフーチングの損傷状況を示す。フーチング周辺の土を取り除き、損傷状況を確認した結果、フーチング上面の既設柱前面からフーチング下端にかけて貫通ひび割れが発生していることを確認した。また、ひび割れに伴うフーチングの傾斜が生じており、ひび割れを挟んでフーチングの起点側で $2.6^\circ$ 、終点側で $1.7^\circ$ の同一方向の傾斜を確認した。なお、鋼管杭の状況を確認するため、フーチング下面から約2.5mの掘削を行ったが、鋼管杭の変形や亀裂などの損傷は確認されなかった(写真-3)。

### 4. P11橋脚の損傷原因の推定

#### 4.1 可動支承の疑似固定化

P11橋脚の支承は可動支承であり、本来であれば地震による上部構造の慣性力は橋脚には作用せず、P11橋脚に大きな損傷が発生することは考えにくい。しかし、ピンローラーが上沓と下沓に挟まれたことで、上部構造の水平移動がピンローラーによって拘束され、可動支承が疑似的に固定化された。これにより、P11橋脚には設計で想定した水平力よりも大きな上部構造の慣性力が橋脚

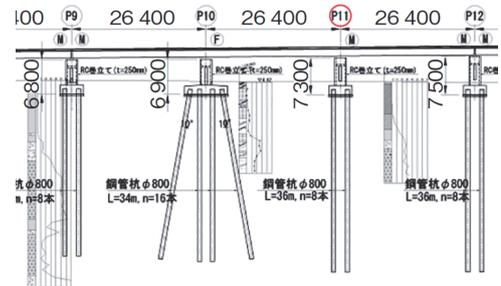
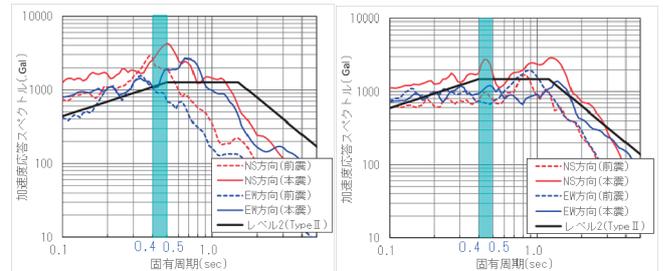


図-4 P9～P12間橋梁側面図



(1) 熊本IC

(2) 御船IC

図-5 加速度応答スペクトル

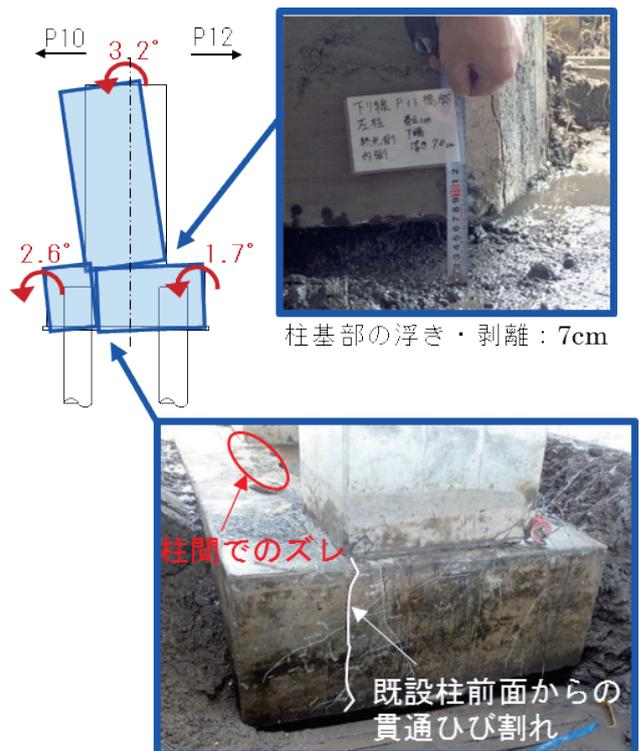


図-6 P11橋脚フーチングと柱基部の損傷状況

に作用したものと考えられる。

設計で想定していた地震時水平力(可動支承の摩擦力)は $H=515\text{kN}$  ( $=R_d \times 0.15$ ) 程度であるのに対し、支承が疑似的に固定化した場合の上部構造の慣性力としては、柱基部が損傷していることから、柱の終局耐力相当である $1600\text{kN}$ 程度が作用したと考えられ、これは想定した地震時水平力の約3倍に相当する。

#### 4.2 フーチングのせん断破壊

現行の設計基準では、P11橋脚のフーチングは、フーチングの張出長と有効高さの関係から、せん断に対する照査が不要となる形状であり<sup>2)</sup>、せん断に対しては大きな耐力を有しているはずであった。しかし、木山川橋の鋼管杭とフーチングの結合方法は、杭をフーチング内に埋込む「方法A」<sup>2)</sup>が採用されており、埋込まれた鋼管の外縁とせん断ひび割れ面がほぼ同位置にあったことから、鋼管埋込み部が弱点となり、設計上の有効高と実際のせん断耐力に寄与した有効高が異なる可能性が考えられた。そこで、フーチングの有効高をパラメータとし、フーチングのせん断耐力とそれに相当するせん断力を発生させる橋脚天端での水平力を検討した。

検討結果を図-7に示す。検討の結果、有効高によってはフーチングのせん断耐力が現行基準の約1/4になることが分かった。

#### 4.3 橋脚天端におけるP- $\delta$ 関係と各部材の耐力の比較

橋脚天端における水平力Pと変位 $\delta$ の関係を示すP- $\delta$ 曲線と、各部材の耐力を比較して推定したP11橋脚の被災メカニズムを図-8に示す。

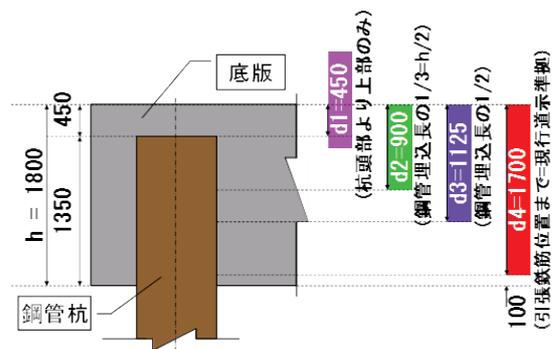
柱基部が塑性化した場合、フーチングには柱の終局耐力以上の力は作用せず柱基部とフーチング



写真-2 フーチング上面の柱間のひび割れ



写真-3 杭頭部の確認状況



| Case | 有効高 d (mm) | せん断耐力 Sc (kN) | Sc相当発生時の橋脚天端での水平力 P (kN) |
|------|------------|---------------|--------------------------|
| d1   | 450        | 4 107         | 147 (0.24)               |
| d2   | 900        | 10 571        | 1 572 (0.62)             |
| d3   | 1 125      | 12 264        | 1 945 (0.72)             |
| d4   | 1 700      | 16 964        | 2 982 (1.00)             |

※Case-d4は現行基準に準じて算出したせん断耐力

図-7 フーチングのせん断耐力検討結果

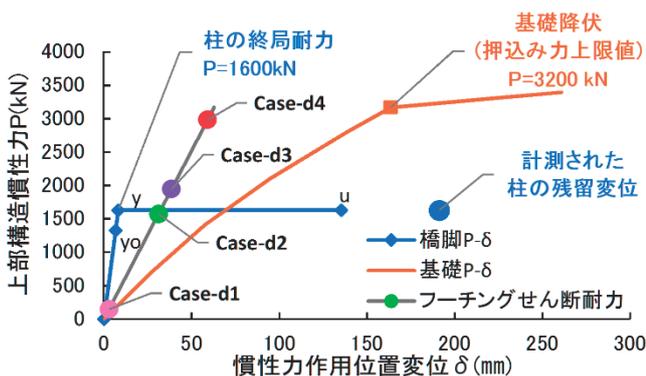


図-8 橋脚天端でのP- $\delta$ 関係と各部材の耐力の比較

の両方に損傷が生じていることから、フーチングのせん断破壊と柱基部の曲げ破壊はほぼ同時に生じたものと考えられ、フーチングのせん断耐力は柱の終局耐力と同等以下であったと考えられる。

図-8において、フーチングのせん断耐力がCase-d1の場合は、フーチングのみに損傷が生じ、柱は降伏に達しない。一方、フーチングせん断耐力がCase-d3、d4の場合では、フーチングのせん断耐力が柱の終局耐力以上となるため、フーチングのせん断ひび割れは発生せず、実際の被災状況と矛盾する。

よって、フーチングのせん断耐力は、柱の終局耐力に相当する上部構造の慣性力が作用した場合にフーチングのせん断破壊が生じるCase-d2が妥当と言える。したがって、P11橋脚フーチングのせん断耐力に寄与するフーチングの有効高は $h=900\text{mm}$ 程度、すなわち現行基準の約1/2程度のコンクリート断面しかせん断に対して有効に寄与していなかったと推定できる。

なお、図-8に示すように、柱の終局耐力が1600 kN程度であるのに対し、杭基礎は3200kN程度の降伏耐力を有し、杭頭の目視調査で鋼管杭に損傷が確認されなかったことも踏まえると、既設鋼管杭は健全であると考えられる。

4.1～4.3をまとめ、木山川橋フーチング基礎の被災メカニズムを推定すると次のとおりである。

#### 【被災メカニズム推定結果】

- ① 支承サイドブロックの破損・ピンローラーの不動化により P11 橋脚上の可動支承が疑似的に固定化し、設計時の想定水平力の約 3 倍の慣性力が P11 橋脚に作用。
- ② 目視調査と解析上でも既設鋼管杭は降伏に至っていないが、鋼管杭とフーチングの結合方法の影響により、フーチングのせん断耐力に寄与するコンクリート断面は、フーチング厚の 1/2 程度しか有効に寄与していなかった。
- ③ 上記 2 点の影響により、フーチングのせん断破壊と柱基部の曲げ破壊がほぼ同時に起こり、P11 橋脚が大きく傾斜した。

上記被災メカニズム推定結果をフェーズとして整理してみると、[損傷の起点]としての“可動支承の損傷”、

[損傷の進展]としての“フーチングの損傷”の2つのフェーズで区別できる。本報では、フーチング基礎、すなわち [損傷の進展] に着目したものの、[損傷の起点]である支承の損傷に着目すると、長期保全により健全な支承を維持することが損傷の発生抑止につながることを示唆している。

## 5. まとめ

平成28年熊本地震で被災した木山川橋で生じたフーチング基礎損傷原因の推定結果を報告した。

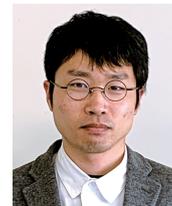
震災時の損傷事例を調査すると照査は満足せずとも実際には重篤な損傷に至っていない基礎が多いことを踏まえ、既設橋の基礎を対象とした耐荷力の合理的な再評価に関する共同研究を土木研究所等の関係機関と協同し行っている。それらの研究成果は、多大なコストや工期を要する基礎の耐震補強において、適切な優先順位の設定・効率化に大いに役立つものである。

本報で示した実被害に関する知見、研究での知見を総合的に取り込みながら耐震補強を推進することによって、高速道路ネットワーク全体のさらなる耐震性能向上に努めていきたい。

## 参考文献

- 1) 西谷朋晃、長谷俊彦、李首一、中谷隆生：熊本地震により損傷したフーチングの耐震性能評価に関する実験的検討、橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、第22回、pp.161～168、2019
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編、p.244、p.398、2012

後藤源太



(株)高速道路総合技術研究所  
橋梁研究室 研究員  
GOTO Genta