

熊本地震により被災した俵山大橋の復旧について

宮本 尚卓¹・増尾 明彦²・橋爪 隆介³

¹~³九州地方整備局 熊本復興事務所 工務第二課 (〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574番地)

2016年4月に発生した熊本地震により被災した、県道28号熊本高森線「俵山大橋」は、山間部にかかる橋梁であり、今回の地震による橋梁を含む周辺地盤の移動や斜面崩壊により、主桁や支承など安全性に大きく影響する部位で多大な被害を受けた。復旧設計という不確実性が内在し、従来の基準だけでは技術的な判断が難しい中、現橋構造の有効利用を図りつつ、耐震性の向上を図った復旧内容について発表する。

キーワード 橋の震災復旧、地盤の変状と斜面崩壊、支承の損傷制御、モニタリング計画

1. はじめに

熊本市～阿蘇郡高森町を結ぶ主要地方道「県道28号熊本高森線」の山間部に点在する橋梁群は、2016年4月に発生した熊本地震により被災し、通行不能となった。2016年5月13日に大規模災害復興法に基づき、高度な技術が必要である箇所や甚大な被害が生じている箇所があるため、熊本県知事からの要請を受け、国が代行して「県道28号熊本高森線」の災害復旧事業に取り組むこととなった。また橋梁およびトンネル・土工それぞれプロジェクトチームを設置し会議を行い、その中で、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」）や土木研究所（以下「土研」）の技術支援を受けるとともに、必要に応じ学識経験者の意見を得て、復旧方針を決定した。

2016年12月24日に被災の著しい橋梁区間を避け、本線土工部と旧道迂回路を利用した供用を再開した。翌2017年12月14日には復旧が完了したすすきの原橋、扇の坂橋と俵山大橋区間での仮橋を利用した鳥子地区の交通切替を行い、続く2018年7月20日に桑鶴大橋の供用も再開した。2019年7月時点で、残りの俵山大橋および大切畑大橋の復旧工事について、同年秋の県道熊本高森線の全線供用を目指して鋭意進めているところである（図-1参照）。



図-1 県道28号熊本高森線の被災および復旧状況

俵山大橋は、山間部に位置する深い沢部を跨ぐ鋼3径間連続非合成板桁橋である（図2参照）。地震により橋梁を含め

た周辺地盤が大きく移動したと共に、広範囲に斜面の亀裂や崩壊が生じ、本橋に大きな被害を及ぼしたと考えられる。

このような被災を受けた俵山大橋の復旧設計では、復旧に固有な不確実な要素もあり、従来の基準だけでは技術的な判断が難しい事項がある。そこで本橋の復旧に当たり、周辺地盤の変状がもたらす橋梁への影響を踏まえ、被災橋梁の損傷メカニズムの検証と、既設構造の再利用の可否の検討結果を踏まえ、復旧方針の検討を行った。また施工段階では、モニタリング技術を活用し、実際のプロセスにおける部材の状態や挙動を把握しつつ、復旧設計に内在する不確実性を補完しながら工事を実施した。

本稿では、震災にて多大な被災を生じた俵山大橋について、現橋構造の有効利用を図りながら、耐震性の向上を図った復旧工事の取り組みについて紹介する。



図-2 俵山大橋の復旧状況 (R1.6.11撮影)

2. 被災の特徴と損傷メカニズム

本橋梁に生じている損傷は、個々の損傷が単独で生じておらず、地震による基礎地盤の変動を起点とし、次の損傷を発生させるなど連鎖的に生じたと推定された。

(1) 周辺地盤の変状

本橋の周辺の地質分布は、火山灰の凝結層が主体であり、表層付近は固結度が低く比較的にもろい上に、更に地震により緩みが生じたと考えられる。

図-3に示すように、周辺地盤の変状は、橋梁を含めた地盤が北東方向へ移動しており、A1側は約2.6m移動の大きな変動に対して、A2側は約0.9m移動と、中央部の沢を挟み移動量が異なっていた。この様に地震動がもたらす周辺地盤の変動により、橋梁周辺の広範囲に斜面の亀裂や崩壊が発生し、橋梁構造へ大きな影響を及ぼしたと考えられる。なお被災後に実施した孔内傾斜計や地盤伸縮計での動態観測では、懸念された地中部の地盤変動は確認されず、変動は収束したものと判断された。



図-3 俵山大橋付近の地盤の変動状況

(2) 上・下部工の変動

被災後の橋梁の損傷状況を把握するために、現地踏査、橋梁目視点検、基礎詳細調査等を行うとともに、橋梁全体形状や複雑に挙動した上下部工の正確な位置関係を把握するために、三次元計測も併せて実施した。

下部工は、北東方向への移動、沈下、橋脚の傾き等が確認された。これは周辺の地盤変動に下部工が連動したためであり、A1橋台を除く各下部工の移動方向および移動量は概ね同じであった。しかしA1橋台は、その他の下部工より大きく移動しており、これはA1橋台前面の斜面が崩壊していることから、地山そのものの緩みにより大きく移動したものと想定された。

上部工は、地盤変動および下部工の挙動と同様に、北東方向に移動しており、A1橋台とP1橋脚は上部工と同じ方向に同じ移動量、またP2橋脚とA2橋台は上部工より移動量が小さかった。これはA1橋台とP1橋脚の支承が破壊されず上下部が一体挙動したためと想定された。

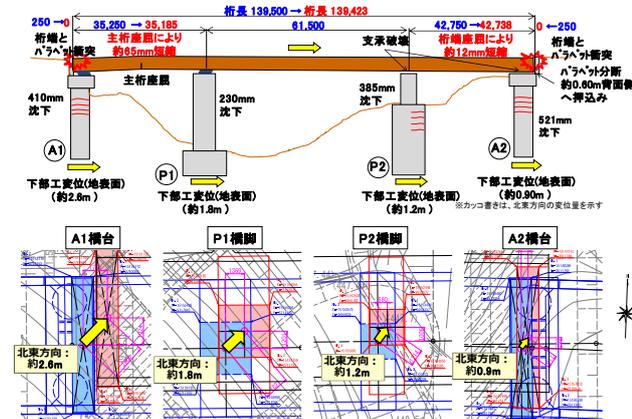


図-4 地震による俵山大橋の全体挙動



図-5 俵山大橋の被災状況

(3) 損傷メカニズム

前述(1)、(2)の変動により、上～下部工の相対変位が大きくなり、最終的には図4、5に示す様に、押し出された桁はA2橋台に衝突し60cmほど背面に押し出され、橋壁の損傷の他、A1-P1間の主桁の座屈や支承破壊にまで至ったと推定された。本橋を構成する各構造が損傷に至ったメカニズムとして、前述する地盤及び橋の変動や、上下部工の損傷状況などを踏まえ、表-1、図-6に示す現象が複合的に発生し、損傷に至ったと想定された。

表-1 想定される損傷メカニズム

各構造	想定される損傷メカニズム	引き起こす損傷	
下部工	A1	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の移動により谷側へ橋台が変動 前面斜面の崩壊、また上部工の胸壁衝突により橋直方向の変形 更に橋軸方向にも変形 	<ul style="list-style-type: none"> → 桁体上部の損傷 → 軀体の損傷
	P1	<ul style="list-style-type: none"> 柱の橋軸方向への変形 支持地盤の緩み（地盤抵抗の低下） 	<ul style="list-style-type: none"> → 柱基部の損傷 → 柱・基礎の傾斜
	P2	<ul style="list-style-type: none"> 柱の橋軸方向への変形 上部土砂の緩み 	<ul style="list-style-type: none"> → 柱基部の損傷 → 桁体中央部の損傷
	A2	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の移動により谷側へ変形 前面土砂の緩み、また上部工の胸壁衝突により橋軸方向の変形 	<ul style="list-style-type: none"> → 桁体上部の損傷 → 桁体中央部の損傷
上部工	<ul style="list-style-type: none"> A1橋台側で押し出され上部工が移動 脚高の高いP2支承が破損 橋直方向に上部工が振られA2方向へ移動 A1を軸に上部工が谷側に振られる P2-A2支承逸脱により主桁がA1-P1間で反り上がり、胸壁に押さえられ主桁座屈 	<ul style="list-style-type: none"> → A1胸壁破損 → P2支承破損 → A2支承破損 → A1-P1間主桁座屈 	

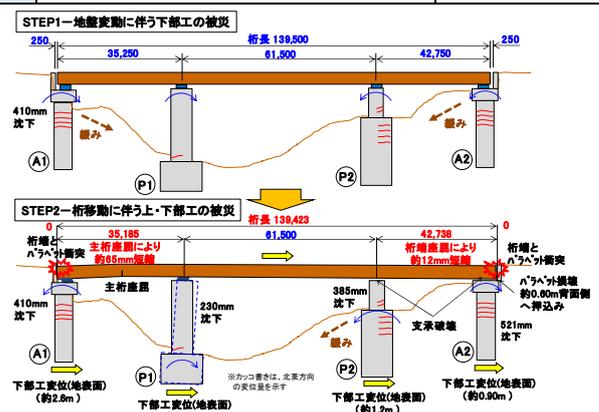


図-6 想定される損傷メカニズムのイメージ

3. 再利用検討および復旧対策工の検討

被災時の上・下部工の挙動の検証や地盤変状の整理より、橋梁本体が損傷に至るメカニズムについて検討を行った結果、損傷を引き起こした起因として橋梁周辺地盤の緩みの影響が大きいと考えられた。これらを踏まえ、損傷メカニズムに沿った現況（被災時）解析による既設構造の健全度について照査を行うと共に、被災後の地形・地盤条件や施工条件などを踏まえ、橋梁各部材の復旧方針について下記のように決定した（図-7,8参照）。

上部工：P2橋脚、A2橋台の支承破断による桁脱落と、A1-P1径間での主桁の座屈などの損傷がある。損傷部を中心にひずみや応力が残留している可能性や、逸脱した桁の移動など施工の困難さ、橋台位置見直しによる支間割りの変更により、上部工架替えとする。

A1・A2橋台：地盤の緩みによる影響で、杭体に過大な曲げモーメントが作用して損傷したと推定される。ひび割れ幅より杭体は終局状態に達していると考えられることから橋台躯体や基礎は再構築とする。更に、再構築する橋台位置については、地盤の緩み範囲を回避した位置までセットバックする。

P1橋脚：支承で拘束された上部工により下部工に過大な力が作用するとともに、地震動による支持地盤の緩みにより基礎ごと傾斜したと推定される。基礎地盤は不安定であるが、柱や基礎には顕著な損傷が見られないことから、増杭による基礎補強を行う。

P2橋脚：柱と基礎の両者に損傷が生じていることから、柱損傷後に地盤が緩んで基礎の損傷に至ったと推定される。ボアホールカメラ調査および被災時解析結果より基礎の損傷は軽微と判断出来ることから、橋脚柱のRC巻立補強を行う。

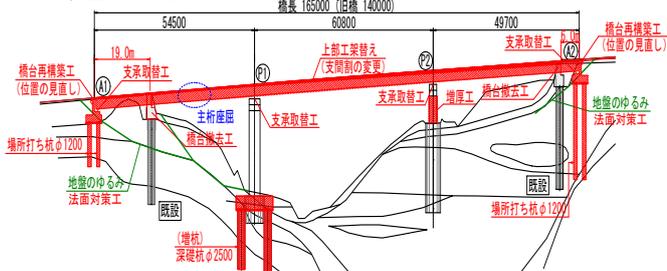


図-7 依山大橋復旧対策工一般図



図-8 復旧対策工の施工状況

4. 復旧設計における技術的特徴

今回の熊本地震では、強い地震の揺れの影響と、更に地盤変状の影響が加わったことにより、本橋を含め被災

のあった道路橋に、主桁等の構造的に重要な部位での顕著な被災例が確認された。ここで本復旧設計については、平成28年9月13日事務連絡『平成28年熊本地震を踏まえた橋の耐震設計に関する留意点について（道路局 国道・防災課）』を踏まえ、斜面変状や断層変位が橋に及ぼす影響を最小化出来るように、下部構造の設置位置や、構造形式に配慮して構造計画を行う方針とした。

(1) 橋台位置の設定

既設橋台付近の斜面は、図-10に示すように地震動により斜面の緩み・崩壊に至っており、斜面変状の影響による橋台・基礎の損傷が大きかった。よって、下記の条件に基づき復旧計画を行うものとし、A1側を19m、A2側を6mセットバックを行い、上部工架替え後の橋長を15m延伸させ165mとした。

- 地表面亀裂およびボーリングデータにより推定した緩み位置とを結ぶ範囲をすべり土塊として設定
- 再構築する橋台位置は、今回同様の斜面変状が発生しても影響の受けにくい、すべり土塊より外の堅固な位置まで橋台をセットバック
- 基礎構造は変形等が生じにくい組杭基礎を採用

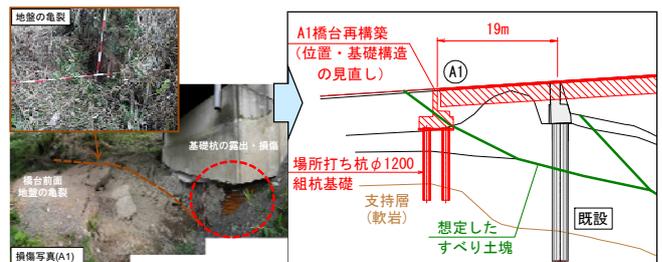


図-10 地盤緩み範囲を避けた橋台位置の考え方 (A1側)

(2) 耐力階層化による支承の損傷制御

被災した支承には、ゴム支承におけるゴム本体やセットボルトの破断が見受けられた。取替えた支承は、被災時の速やかな機能の回復を容易に行えることを目的に、下記および図-11に示すような、耐力階層化による支承部位の損傷を制御する考え方を導入し、支承下面側の下査取付ボルトを先行破壊するよう計画した。

- 想定外の変位・荷重に対して、被害が最小限に留まる支承部位の先行破壊を誘導し、下部工に想定以上の力を伝達させない
- 下側を破断させた場合、破断後に上部工が沓座に落下する際の段差が小さくなり、被災時走行障害や復旧時のジャッキアップスペースを確保する
- 支点部桁に垂直補剛材を設置し、想定外の変位が生じて、桁支点部には損傷を誘発させない

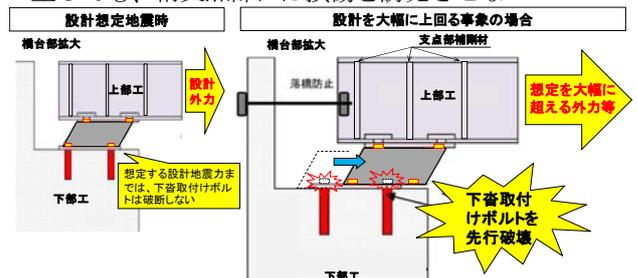


図-11 耐力の階層化による支承損傷制御のイメージ

5. モニタリングによる検証

(1) 設計における懸念事項および対応

被災後 P1 橋脚は、支持地盤の緩みにより基礎ごと橋脚が傾いており、柱頂部と基部の相対変位量として、橋軸直角方向に約 40cm (約 1/54rad)、橋軸方向に約 2cm (約 1/1118rad) 傾いていた。復旧設計では、その傾きを偏心モーメントとして設計荷重に考慮すると共に、橋軸直角方向の桁かけり長が確保出来るよう橋座 (梁) 拡幅を行った。また P1 基礎については、基礎地盤が降伏していると想定し、既設の大口径深礎杭について組杭式の深礎杭による底版拡幅及び増杭補強を計画した。

設計時点では、ゴム支承が変形したまま破断されていない状況のため、下部構造に内部応力が残存した状態と想定された。しかし橋脚でのひび割れ発生状況が柱基部の軽微なひび割れ程度のみあること、また橋脚天端に作用する水平力 (ゴム支承の残留変位よりゴムの等価剛性を用いて推定) は橋脚の保有水平耐力未滿と推定されることから、橋脚の変動は弾性挙動範囲内であると想定し、施工段階においては傾斜が戻ることを想定された。ただし実施工では、想定通りの挙動を示すかは不確実であり、モニタリング技術を活用し橋脚の挙動について計測を行った。これにより、施工の進展に伴う荷重の変化とモニタリングデータの変化の関係性を検証し、設計や施工の妥当性を確認しながら工事を進めた。

(2) モニタリング結果

4.に示す P1 橋脚のモニタリング結果は、下記および図9に示す状況であった。これは橋脚の傾きが戻る方向での変位であり、これは、設計時点での被災時に橋脚が弾性変形にて傾いていた想定と整合している。

- A1~P1間の床版撤去を実施し、支間部の上載荷重の除荷に伴い橋脚天端で山側へ約15mm戻る。
- A1の支点部の主桁と支承の縁切りを実施し、上部工の残留応力開放により更に山側へ約20mm戻る。
- P1~P2間の桁の縁切りを行い、P1~P2間の応力解放によりP1ゴム支承の変形が戻り、橋軸直角方向が山側へ約20mm、橋軸方向がA1側に約40mm変位した。

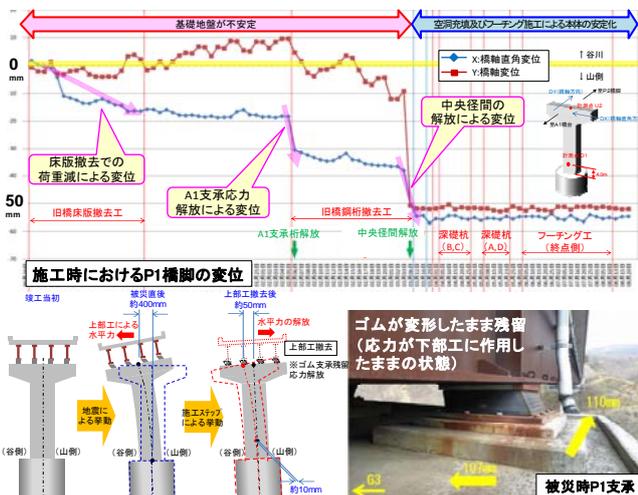


図-9 モニタリングの概要 (上表:モニタリング結果、下左図:P1の挙動イメージ、下右図:被災時P1 支承状況)

6. 施工時における配慮

本工事は2018年4月に現地着工し、同年8月末の工事用仮栈橋の設置後は、並行する他工事の工事車両の仮栈橋通行を確保しつつ、仮栈橋からの旧橋床版撤去を行い、12月14日に工事用仮栈橋の一般供用を開始させた。それ以降の本橋架設工事においては、図-12に示すように、橋台背面に設置したケーブルクレーンを使用し旧橋桁撤去～新橋桁架設を行い、一般交通を確保しながらの本橋架設が可能となる施工計画を行った。

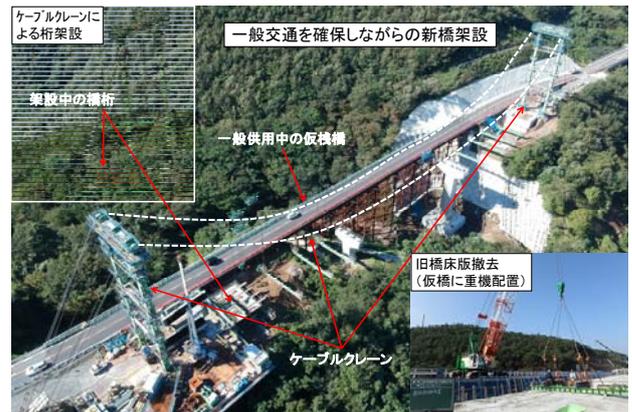


図-12 俵山大橋 ケーブルクレーン架設の状況

7. おわりに

本橋は、ここに記載した設計と施工により、2019年秋の供用に向けて鋭意工事を進めているところである。既に、本稿にとりまとめた橋梁補修工事についてはモニタリングを併用しながら概ね完了し、現在は最終段階である橋面工および摺り付け土工部の工事を実施している。

これらの設計および工事の実施にあたっては、国総研や土研ならびに設計コンサルタントや施工業者等の関係者が一体となって早期復旧に努めてきた結果であり、ここに感謝の意を示すものである。

今後は、俵山大橋の維持管理に向けたモニタリング計画についての手順書としてとりまとめる予定であり、俵山大橋の本復旧後の熊本県への返還にあたり有用なデータとなるよう、手順書としてとりまとめる次第である。