

## 阿蘇大橋（仮称）の計画及び設計における 地盤変状の影響への配慮

星隈 順一<sup>1</sup>・今村 隆浩<sup>2</sup>・西田 秀明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博（工） 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部  
（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

<sup>2</sup> 国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所  
（〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574番地）

<sup>3</sup>正会員 修（工） 国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター  
熊本地震復旧対策研究室  
（同上）

### 1. はじめに

平成28年（2016年）熊本地震では、地震動の影響だけでなく、橋を支える地盤自体が移動して橋に重大な損傷を与えた事例が確認された<sup>1)</sup>。地盤変状の影響によって橋が致命的な状態に至った事例はこれまでも平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震での祭時大橋の崩落のようにも生じており<sup>2)</sup>、そもそも路線計画の検討段階において橋の架橋位置は地盤変状による影響を受けないように選定することが重要である。

しかしながら、路線全体の計画に係る様々な諸条件により、やむを得ず地盤変状のリスクがある箇所に橋を計画せざるを得ない場合もある。このような場合には、橋が地盤変状の影響を受けにくくする（鈍感化）とともに、仮に橋に機能的な損傷が生じても、できる限り早期に機能回復することが可能となるように、ハードとソフトの両面から合理性のある対策を講じることが求められている。

こうした中、熊本地震で崩落した国道325号線の阿蘇大橋は、現在新しい橋の工事が行われているところであるが、既設の路線を構成している一要素である橋の再構築となるため、その架橋位置の選定には種々の前提条件がある。それらを考慮して総合的な検討を行った結果<sup>3)</sup>、やむを得ず地盤変状の影響が懸念される位置に橋を計画することになった。

そこで本稿では、熊本地震において地盤変状が橋に及ぼした影響やその復旧で講じた様々な配慮事項を踏まえ、新しい阿蘇大橋（仮称）の計画及び設計の段階において採り入れた地盤変状が橋の性能に及ぼす影響を小さくするための構造的な配慮や工夫、

さらには被災が生じた後の機能回復のための措置をしやすくするための技術的な配慮や工夫について紹介することにする。

### 2. 地盤変状の影響も加わって生じた橋の被害とその復旧において講じられた配慮

#### (1) 地盤変状による橋の被災

熊本地震における道路橋の被災の特徴として、地震動の影響とともに地盤変状の影響が加わったことにより橋としての機能を速やかに回復することが困難な損傷が生じたことが挙げられる。具体的には、a)橋の上方側斜面の崩壊に伴い落橋が生じた例、b)架橋地点周辺の地盤全体の移動や斜面崩壊等により、その地盤に設置していた下部構造が追従するように移動し、その結果支承の破壊を経て上下部構造間に大きな相対変位が生じた例がある。斜面に沿って架橋されていた南阿蘇村道の戸下大橋の被災はa)の事例であり、橋の上方側斜面が橋面上に崩壊したことに伴って、当該の径間が崩落した事例である。また、熊本県道の俵山大橋や大正橋、南阿蘇村道の阿蘇長陽大橋はb)の事例に分類される。

このように、地震の影響は地震動による慣性力の作用だけではなく、地盤変状の影響によっても橋の性能に重大な影響を及ぼす被災が生じている。道路橋示方書では津波、断層変位、斜面崩壊等の工学的に不確実性の極めて高い荷重要因については、耐荷性能の照査の前提としてこれらの影響を受けないよう架橋位置又は橋の形式の選定を行うことが標準的な対応として規定されている<sup>4)</sup>。下部構造の設置位置についても、斜面崩壊等の影響を受けない箇所を

選定することが標準と規定されている<sup>5)</sup>。そのため、道路橋示方書には、これらの影響に対して橋に作用する具体的な影響を評価するための手法は規定されていない。しかしながら、道路のような線状の施設では、やむを得ずこれらの影響を受ける架橋位置又は橋の形式とせざるを得ないケースも想定されることから、そのような場合には、少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等、地域の防災計画等とも整合するために必要な対策を個別に検討して講じていくことが求められている。

このような背景から、熊本地震において地盤変状の影響を受けた橋の復旧にあたっては、少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とするための様々な配慮が行われている<sup>6),7)</sup>。

## (2) 村道柵の木～立野線阿蘇長陽大橋の被災と復旧

阿蘇長陽大橋は4径間連続PCラーメン箱桁橋である。熊本地震により、斜面に設置されていた橋台の支持地盤が崩壊し、A1橋台が約2m沈下する状態となった。ただし、写真-1に示すように、橋台の沈下によって当該支点の鋼製可動支承が先に破壊して橋台とPC箱桁端部が分離したことにより、結果的にPC箱桁端部を下側に押し下げようとする力は支承の耐荷力相当の力で頭打ちとなり、このことが張出し架設されていた側径間の崩落を防ぐことにつながった。

橋台の復旧にあたっては、開口亀裂や地盤の緩みがみられた地盤は掘削除去し、地層状態を確認しながら確実な支持地盤の選定を行った。その上で、周辺の斜面変状に対して構造全体が変位しにくく、仮に変位が生じたとしても構造安全性を保持して最低限の供用性が確保されるように多点支持のラーメン構造により再構築する計画とした。その際、ラーメン構造の背面側はゆるみが確認された範囲の外側の位置まで伸ばし、構造的なリダンダンシーが発揮できるように十分配慮した。また、そもそも橋台前面側の斜面が将来の地震によって再度崩落するリスクを抑えるため、アンカー等による対策も併せて実施する等、多重の配慮を施した。

次に、下部構造についてであるが、P3橋脚の軸方向鉄筋段落し位置の周辺で中空断面を貫通するひび割れが生じた。貫通ひび割れが生じている中空断面は、コンクリートによるせん断抵抗機能が失われている状態と考えられるため、中空部に流動性の高いコンクリートを充填し、せん断抵抗機能を回復させることとした。その際、既設コンクリートと充填コンクリートの一体化を高めるため、貫通ひび割れが生じている断面周辺(高さ4.5mの範囲)には水平方向の鉄筋を配置することとし、内面側のコンクリート壁にあと施工アンカーによりアンカー筋を定着させた後にコンクリートを充填した。

ここで、コンクリートの充填にあたっては投入口の確保や配管等が必要となる。その際、橋脚頂部や上部構造の上面に孔を開ける必要があり、その位置の選定にあたっては、PC鋼材の位置を避けた上で部材の強度への影響が小さい箇所を選定するとともに、開口部の周囲は補強を行う等、既設部材への影響が最小限に抑えられるよう配慮した。さらに、貫通ひび割れが生じた断面



写真-1 阿蘇長陽大橋 A1 支点部の損傷状況

付近については、次に大地震が来た際に内部の状態を確認できるようにするため、カメラの挿入が可能な直径20cmの点検孔を設けた。

また、コンクリートを充填する工法の選定にあたっては、自重が増加することになるため、慣性力の増加や基礎への影響を照査し、本橋においては悪影響が生じないことを確認した。また、コンクリートが硬化する前に既設部材に作用する圧力の影響を確認した上で、1回あたりの打設高さを決定する等、施工段階での影響にも配慮を払った。

なお、中空断面となっている部位で地震による正負交番繰返し作用を受けると、外面側だけでなく内面側からも損傷が生じ、両側からコンクリート断面が剥落していくことにより最終的には死荷重による軸力を支持できなくなって致命的な状態へと至ることが既往の研究で明らかとなっている<sup>8),9),10)</sup>。このため、ひび割れが生じた中空断面の部位に対する診断や補修工法の選定にあたっては、ひび割れが内面側にまで貫通しているかどうかを把握することが重要となる。一方、阿蘇長陽大橋の調査では、地震直後は点検車等の車両をアクセスさせることができなかったため、まずはUAVにより損傷状態を概略で把握した。その後、ロープアクセスによる外面側の近接目視調査を行うとともに、柱頭部に小孔を設けて中空部にカメラと光源を降下させて内面側コンクリートの損傷状態の把握を順次実施した。このように、特に、地震後に速やかな点検が困難な場合もあり得る中空断面を有する高橋脚においては、外面側だけでなく内面側の調査も必要になることを想定し、地震後にその調査を実施しやすくするための構造側での配慮も重要と言える。

## (3) 県道28号線俵山大橋の被災と復旧

俵山大橋は4径間連続鋼桁橋である。熊本地震の影響により橋台前面の斜面が崩壊し、A1橋台が北東方向に2.6m、A2橋台が北東方向に0.9m移動するとともに、2基の中間橋脚もそれぞれ地盤変状に伴って移動した。地震動の影響に加えて地盤変状に伴う下部構造の移動が生じたことにより、上部構造を構成している鋼主桁の下フランジが大きく座屈した他、積層ゴム支承の脱落や支点直上部の鋼桁の損

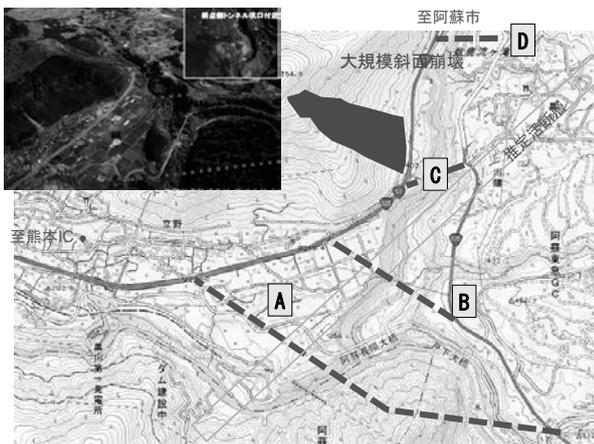


図-1 阿蘇大橋（仮称）のルート案

傷、上部構造端部の衝突による橋台パラペットの破壊、P1橋脚の傾斜、P2橋脚基部のかぶりコンクリートの剥離などの損傷が生じた。

依山大橋の復旧では、橋台を再構築する位置の設定が技術的論点の一つである。地震後の橋台背面側の地盤の緩み状態を面的に把握した上で、安定した地層に支持させることができるように橋台をセットバックさせた。また、上部構造は、鋼主桁の座屈や支点直上部に損傷が生じただけでなく、複雑な力が残留した状態となっており、上部構造としての耐荷性能に及ぼしている影響度合いが不確実性であること、さらには、橋台のセットバックに伴い橋長が25m延伸し、支間長が長くなることによる補強も必要となること等を含めて総合的に検討し、今回の復旧では上部構造を撤去して再構築することとした。

なお、本橋ではこの他にもP1橋脚基礎の増し杭、P2橋脚躯体のRC巻立て補修等も行っている。

### 3. 阿蘇大橋の計画及び設計における地盤変状の影響への配慮

#### (1) 阿蘇大橋ルート計画段階での配慮

新しい阿蘇大橋の架橋ルート検討においては、既設の路線を構成している一要素である橋の架け替えとなることも踏まえ、図-1に示す4通りのルート案が挙げられた<sup>3)</sup>。ここで、図中に示している推定活断層とは、既存資料に加え個別に実施された現地踏査や現地調査を踏まえてルート検討段階で推定されたもので横ずれが支配的な活断層の存在が推定される帯域である<sup>3)</sup>。そして、ルートの選定にあたっては、1)熊本地震による震災を踏まえて安全性が高いルート、2)可能な限り早期に復旧可能、3)阿蘇観光の玄関口としての機能確保、4)地域間交流の保持の4項目が基本的な考え方として設定された<sup>3)</sup>。具体的には、1)と2)の観点から、復旧の時期が不明確な斜面崩壊箇所や周辺斜面の影響を回避できるルートとすること、3)の観点からは主交通方向である熊本市と南阿蘇村を結ぶルートとして迂回感のないルートとすること、さらに4)の観点から南阿蘇村の中心部と同村立野地区のコミュニティー確保にも寄

与するルートであること等が総合的に考慮された。その結果、最終的に図-1のBのルートが選定された<sup>3)</sup>。

一方、本ルートは、推定活断層を跨ぐ計画となる<sup>3)</sup>。そこで、ルート上の地形条件と道路の縦断勾配等の諸条件を考慮して総合的に検討した結果、推定活断層と交差する区間の道路構造形式としてはやむを得ず橋で計画することとなった。このため、本橋に求められる性能を踏まえ、断層変位によって橋に生じる影響の範囲を少しでも小さくする観点から、ルートの線形は推定活断層となるべく直交に近い角度で交差させるとともに、橋面が高い位置となるV字谷の深い地点では交差させない等にも配慮した。

#### (2) 断層変位に対して橋の構造リダンダンシーを高めるための配慮

地盤に生じる断層変位は、その作用特性としての不確実性が大きく、橋が保有する耐荷力や変形能によって耐えられるように設計することには限界がある。そこで、本橋では、断層変位のように定量的な予測が難しく、不確実性も大きい作用に対しては、想定外の状況に対しても橋を致命的な状態にしにくくするために、断層変位によって橋に生じようとする変形を受け流せるように最終的な橋の破壊形態を予め計画し、その計画した破壊形態となる信頼性が高まるように設計段階で配慮した。

本橋の構造計画においては、推定活断層が横ずれを支配的とする断層であることを踏まえ、このような動きの変位に対して容易には落橋しないように配慮することが可能な構造形式を選定した。すなわち、図-2に示すように、推定活断層を跨ぐ区間は単純桁橋構造とし、断層変位により地盤に追従して下部構造が大きく移動するような状況となった際は、構造部材の破壊を支承で先に生じさせ、下部構造や隣接する上部構造に不測な力を伝達させないように配慮した。これは、下部構造は自立した状態を維持しつつ、単純桁は支承から脱落してはいるものの下部構造の頂部で支持され、かつ、隣接する桁には影響を波及させないという考え方によるものである。その際、上部構造間の相対変位が橋軸直角方向に生じた際に隣接する桁に力が伝達しないような伸縮装置を採用する等の配慮を講じた。さらにその上で、下部構造間に生じる横ずれの相対変位に対して単純桁の支点部が下部構造の頂部から脱落しにくくなるように、橋軸方向の落橋防止対策とともに橋軸直角方向の桁かかり長の確保にも配慮をした(写真-2)。

また、深いV字谷となっている渡河区間の構造形式は張出架設工法によるPCラーメン橋を採用した。これは、推定活断層の動きによって仮に端支点を支えるPR1橋脚が大きく移動したり沈下したりする状況となった場合には、PR1橋脚に設置された支承の破壊を先行させることでPC箱桁と橋脚の接合を分離させ、PR1～PR2の側径間はPR2橋脚と一体となって自立した状態を作ることによって崩落を防ぐという考え方によるものである。これは前述した阿蘇

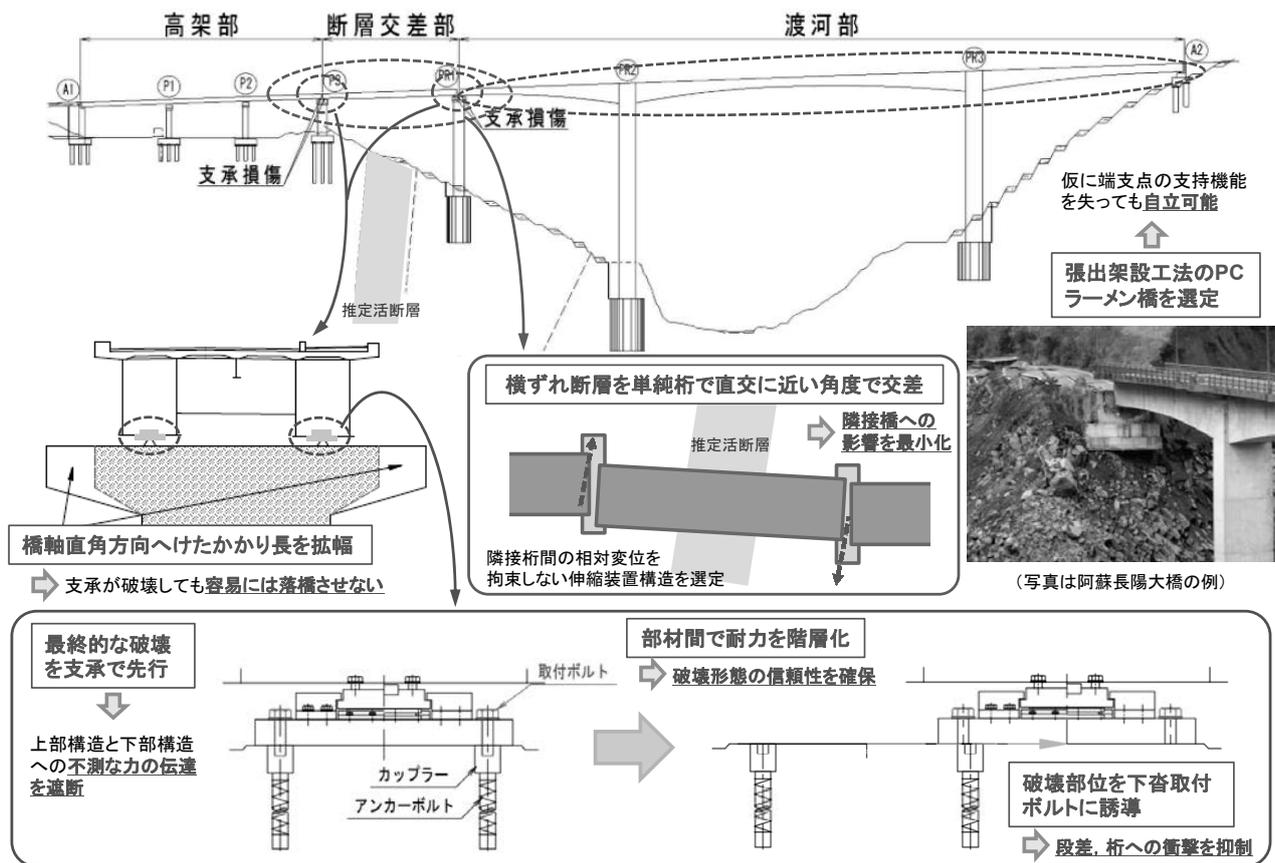


図-2 阿蘇大橋（仮称）における構造リダンダンシーを高めるための配慮

長陽大橋の震災経験を踏まえた考え方であり、橋の破壊形態をマネジメントすることにより PC ラーメン橋に内在している構造リダンダンシーを引き出し活用しようとするものである。

### (3) 橋としての機能回復性を高めるための配慮

断層変位に対して、支承の破壊を先行させる戦略を述べたが、支承自体も様々な部品で構成されており、その壊し方には幾つかの選択肢がある。本橋の設計においては、支承が破壊した後に生じる段差に着目し、これができる限り小さくなるような破壊形態に誘導できるように配慮した。これは、支承の上側の部位で破壊させると、それだけ段差も大きくなり、さらに橋座面に脱落する際の衝撃で桁の下フランジに悪影響が及ぶリスクも高まるため、橋の機能回復性の観点からは、図-2 のように支承の下側の部位で壊す方が望ましいとの考え方に基づくものである。このような破壊形態となる実現性を高くするために、支承に作用する荷重条件とその力の伝達経路を踏まえ、破壊させる部材（ここでは下査取付ボルト）と破壊させない部材のそれぞれの耐力のばらつきを考慮したうえで、両部材間で耐荷力の階層化を図る設計を行った<sup>11)</sup>。

次に、被災後の橋の状態を速やかに調査できるようにする観点から、図-3 に示す配慮を行った。すなわち、まず地震後の調査を迅速にできるように、調査対象位置へのアクセスをしやすいための配慮として中空断面内部への進入孔を設置した。また、



写真-2 断層交差部での橋軸直角方向の桁かかり長拡幅

渡河部は高橋脚となるため、橋梁点検車では橋脚外面側の近接目視調査を行うことができない箇所があるため、ロープアクセスによる調査が必要となることを想定しておく必要がある。ロープアクセスにあたっては、調査者がフックのインサートを橋脚に打ち込みながら調査箇所まで身を移動させていくため、調査に時間を要することとなる。そこで、橋梁点検車を活用しても近接目視調査の実施が難しい高橋脚においては、ロープアクセスによる調査で必須となるフック用のインサートを橋脚の施工段階で先施工により設置しておくこととした（写真-3）。

さらに、応急的な機能回復を速やかにできるようにする観点から、多少上部構造がずれた状態でも応急的な供用ができるように単純桁を支持する下部構造の横ばりに予め補強鉄筋を配置しておくとともに、

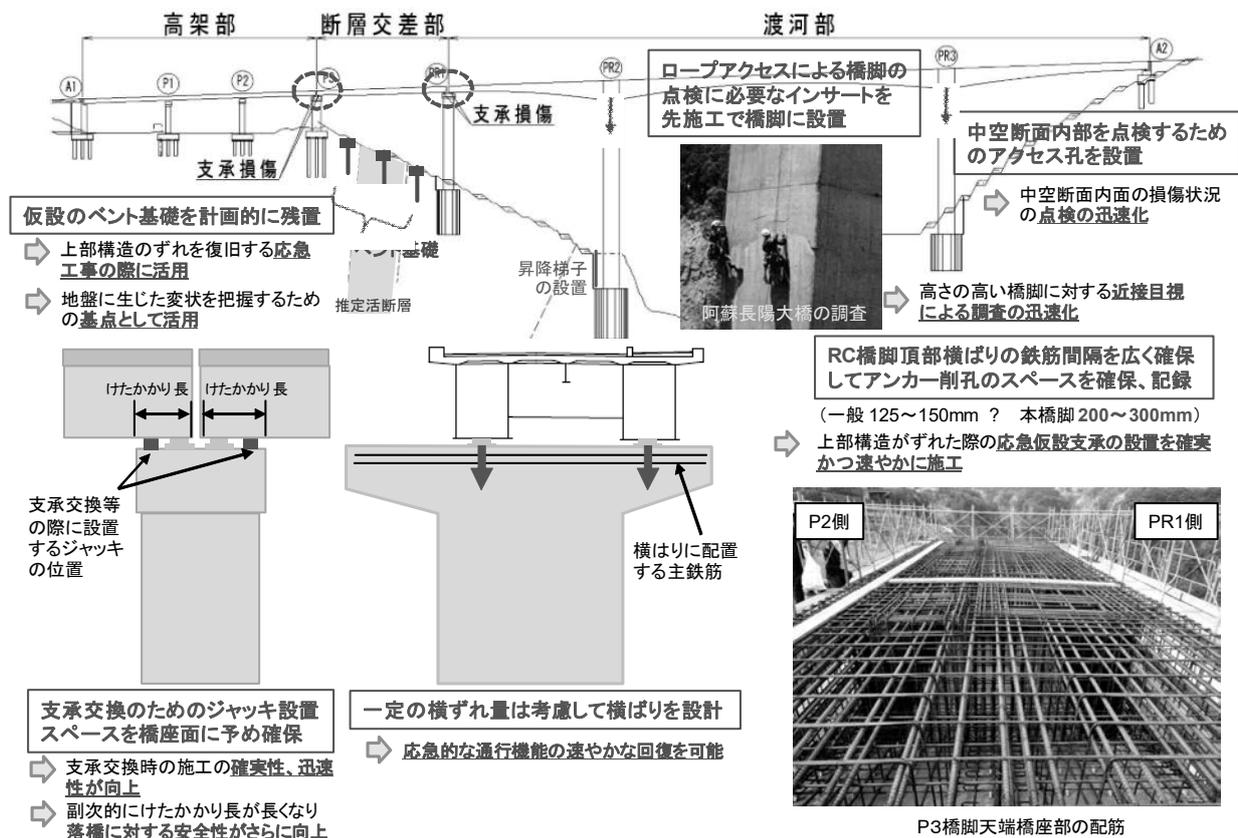


図-3 阿蘇大橋（仮称）における機能回復性を高めるための配慮

地震後における桁の応急的な固定装置の設置に備え、そのアンカー定着が容易にかつ確実に施工できるように鉄筋のあきを広めに設定する等の配慮をした。また、橋脚の橋座部は支保交換時の施工の確実性、迅速性を確保する観点から支保交換の際に必要なジャッキ設置用のスペースを考慮した大きさとした（写真-4）。さらに、断層交差部の単純桁橋についてはベント架設で施工を計画し、その施工段階で構築されるベントの基礎を計画的に残置することとした。これは、桁がずれるような状態となった際の応急措置や復旧工事においてこのベント基礎を活用できる余地を残しておくことを意図しており、復旧に要する工期を少しでも短くするための配慮である。

#### 4. おわりに

本稿で概述した検討を踏まえながら、阿蘇大橋（仮称）は元の位置から黒川の下流側約 600m の位置において架橋されているところである（写真-5, 6）。構造諸元としては、黒川の渡河部が橋長 345m の 3 径間連続 PC ラーメン箱桁橋、橋脚の高さは最も高いところ（PR2）で 97m である。また、黒川の右岸側（立野側）アプローチ部は 180m の区間を橋で計画し、3 径間鋼連続桁橋（橋長 115m）と断層を跨ぐ単純鋼箱桁橋（橋長 65m）で構成する構造である。

本橋は、既存路線の早期機能回復が求められる中

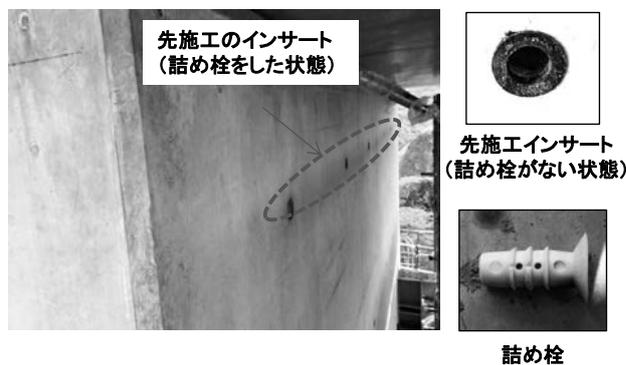


写真-3 橋脚に施工した先施工のインサート



写真-4 橋軸方向の橋座幅の拡幅

で、結果としてやむを得ず推定活断層を橋で跨ぐ計画となった特殊な事例であり、通則的な対策という位置づけではないが、今後このような検討が必要となった場合において、本稿で示したような様々な配



写真-5 阿蘇大橋（仮称）の建設状況（全景）  
（2019年5月撮影）

慮の事例が参考となれば幸いである。

なお、本稿で示したダメージコントロールのような設計の考え方は、構造物としての危機耐性を高めるための具体的な対策の一つになるのではないかと考えられる。一方で、部材の破壊特性の信頼性に基づいた設計体系についてはまだ研究途上の段階であり、今後研究開発の進捗に応じて発展が必要な分野であると考えている。

**謝辞：**復旧に係る検討の実施にあたっては、国土交通省九州地方整備局及び国土技術政策総合研究所、（国研）土木研究所、熊本県等で構成されるプロジェクトチーム（橋梁 PT）の委員から様々な助言を頂いた。また、阿蘇大橋のルート及び構造の選定については、九州地方整備局が設置した「国道 325 号ルート・構造に関する技術検討会」で助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

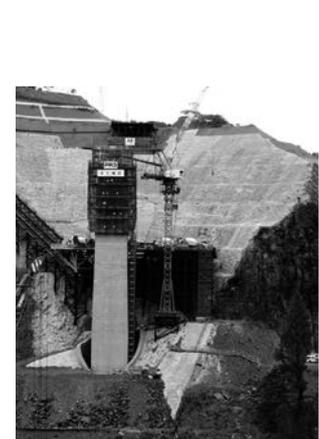
- 1) 平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第967号，土木研究所資料第4359号，2017年3月
- 2) 平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震被害調査報告，国総研資料第486号，2008年12月
- 3) 平敷健太，福原茂，湊康彦：推定活断層を踏まえた阿蘇大橋の橋梁設計について，平成30年度九州国土交通研究会，I部門，2018年7月
- 4) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2017年11月
- 5) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編，2017年11月
- 6) 辻芳樹，星隈順一，荒牧聡，平原慎也，宇土力，三



(a)高架部・断層交差部



(b)PR1,PR2 橋脚部



(c)PR3, A2 橋台部

写真-6 阿蘇大橋（仮称）の建設状況  
（2019年5月撮影）

写真一：熊本地震で被災した阿蘇長陽大橋の復旧，橋梁と基礎，Vol.60, 2018年

- 7) 星隈順一，今村隆浩，澤田守，西田秀明：熊本地震で被災したPCラーメン橋の復旧とモニタリングの活用，第21回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.229-234，2018年7月
- 8) 川島一彦，運上茂樹，飯田寛之：鉄筋コンクリート橋脚主鉄筋段落し部の耐震性判定法及び耐震補強法に関する研究，土木研究所報告第189号，1993年9月
- 9) Jun-ichi Hoshikuma, M. J. Nigel Priestley: Flexural Behavior of Circular Hollow Columns with A Single Layer of Reinforcement Under Seismic Loading, SSRP2000/13, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, November 2000
- 10) ハツ元仁，堺淳一，星隈順一：高軸力を受ける高軸方向鉄筋比の中空断面RC橋脚の正負交番繰返し荷重下における破壊特性，土木学会論文集A1，Vol.69，No.2，pp.139-152，2013年
- 11) 大住道生，西弘明，中尾尚史：超過作用に対する橋の損傷シナリオをデザインする新たな考え方，土木技術資料，Vol.60，No.4，pp.12-15，2018年4月