

# 構造特性と損傷状態に応じた鋼上部構造の補修方法の選定 ～熊本地震で被災した大切畑大橋の復旧事例～

宮原 史・今村隆浩・鈴木慎也・西田秀明・星隈順一

## 1. はじめに

熊本県西原村に位置する県道28号熊本高森線の大切畑大橋は、平成8年道路橋示方書に基づいて設計された鋼5径間連続非合成曲線鈑桁橋（写真-1）である。本橋は、平成28年熊本地震により橋脚や基礎の損傷、積層ゴム支承の破断が生じるとともに、上部構造全体が概ね橋軸直角方向にずれてゆがみが生じ、主桁の座屈やRC床版のひび割れ等上部構造を構成する部材にも損傷が及んだ<sup>1)</sup>。本橋の復旧<sup>2)</sup>においては、橋全体として被災前と同等の耐荷性能（以下、本稿における耐荷性能は、耐震設計に限らず橋全体の普遍的な耐荷性能を表す<sup>3)</sup>）に戻すことを基本方針とし、橋の構造特性と各部材に生じた損傷状態を踏まえて復旧対策を行った。

本稿では、大切畑大橋の鋼上部構造に着目し、そ

の構造特性と主桁や床版に生じた損傷状態に応じて選定した補修方法の検討プロセスを紹介する。

## 2. 上部構造の被災とその要因

熊本地震による本橋の被災のうち、本稿で着目する上部構造の被災とその要因について示す。

地震の影響により、P2橋脚上以外の全ての支点でゴム支承が破断し（写真-2）、主桁が支承から逸脱した。これにより、図-1に示すように、下部構造に対して上部構造が最大で1mほど谷側に相対的に水平移動した。

主桁及び床版に生じた損傷の平面的な位置を図-2に示す。主桁の変形は、各支点部（写真-3）並びに径間部であるP1-P2径間のG1、G2主桁のJ9とJ10（写真-4）及びP3-P4径間のG4、G5主桁のJ21で生じた。なお、Jは主桁の連結位置を表す。



写真-1 大切畑大橋の全景（上部構造を仮設ペントに支持させてジャッキアップし横移動した段階）



写真-2 支承の破断  
（A2橋台）



写真-3 主桁支点部の変形  
（A1橋台）



写真-4 主桁径間部の変形（P1-P2径間）



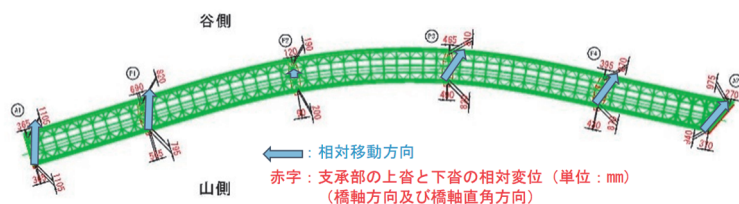


図-1 下部構造に対する上部構造の相対移動量

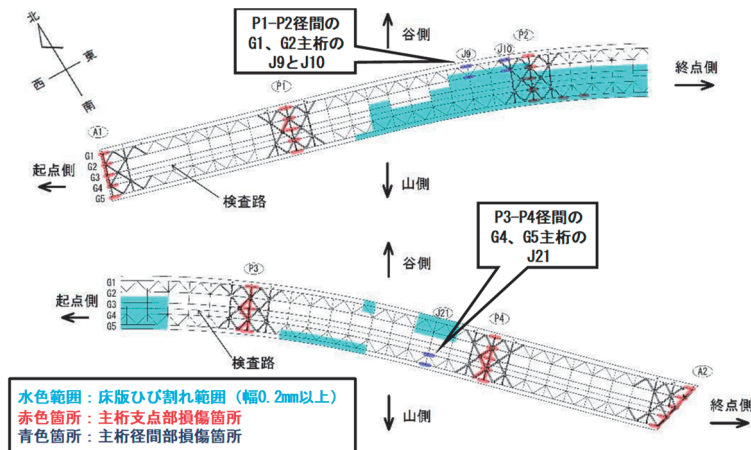


図-2 主桁及び床版に生じた損傷の平面位置

支点部の損傷はいずれも支点上の補剛材の局所的な変形に留まっていた。径間部の変形はG1主桁のP2橋脚支点部近くで最も大きかった。G1主桁のJ10付近の変形量を図-3に示す。J10のウェブにおいては水平方向に最大74mm面外変形が生じた。床版には、特にP2橋脚支点部周辺で山側を中心に広範囲にわたるひび割れが生じた。このひび割れは概ね横断方向に伸びており、山側ほど幅が大きくなる傾向であった。床版下面から確認したひび割れと、舗装面を一部剥がして床版上面から確認したひび割れの位置関係から、一部貫通ひび割れがあることを確認した。

P2橋脚付近の谷側で主桁径間部の座屈、山側で横断方向の床版ひび割れが生じたことから、P2橋脚付近は谷側が圧縮状態、山側が引張状態となったことが推測される。このような応力状態となったのは、上部構造の支点部位置の水平移動の量や方向を鑑みると、唯一支承が破断しなかったP2橋脚上の支点を拘束点として山側から谷側方向へ鉛直軸まわりの曲げが生じたことが要因の1つと推測される。

### 3. 上部構造の補修方法の選定

#### 3.1 鋼部材に対する補修方法選定の考え方

一般に、塑性変形した鋼部材を補修する方法には、常温でジャッキ等により外力を加えて矯正する冷間

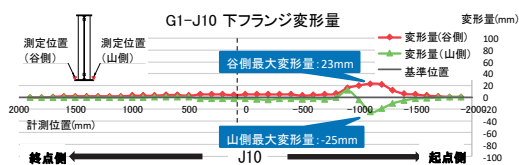
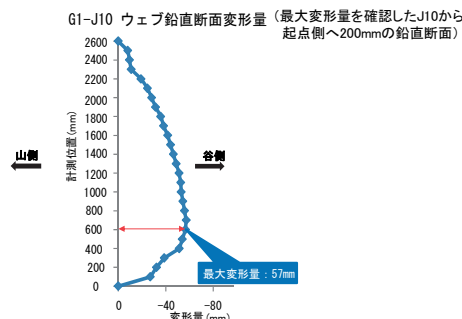
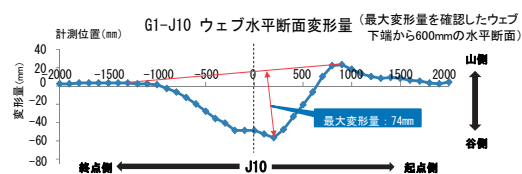


図-3 G1主桁のJ10付近の変形量

加工、熱した状態でジャッキ等により外圧を加えて矯正する熱間加工、変形した母材の一部または全部を撤去して材片を取替える材片取替、材片を追加して変形した母材を補う材片追加の方法等がある<sup>4)</sup>。これらの方法はそれぞれに適用可能な条件があるため、変形した鋼部材の状態、補修後の部材や部位に生じる応力状態、補修施工に係る現場条件等を勘案して変形部位毎に適切な方法を選定する必要がある。

例えば冷間加工は、道路橋示方書・同解説<sup>5)</sup>において主要部材に対して適用する場合は変形の内側半径が板厚の15倍以上とするのが望ましいと示されており、この程度の軽微な変形にのみ適用可能な方法である。また熱間加工は、変形部の曲げ半径が板厚の7倍以上であることを適用の目安とするのが一般的である<sup>4)</sup>。一方、熱間加工と材片取替はいずれも施工中に死荷重応力を分担できなくなるため、現場条件の観点からは、他の部材で死荷重応力を分担することも適用にあたっての条件となる。鋼部材に生じた変形の内側半径が小さく冷間加工や熱間加工が適用できない場合は、材片取替又は材片追加の適用を検討することになるが、その際には、死荷重応力の分担のために必要となる仮設部材の規模やその施工性の観点も含めて適切な方法を選定することになる。

本橋の上部構造における鋼部材の補修においても、



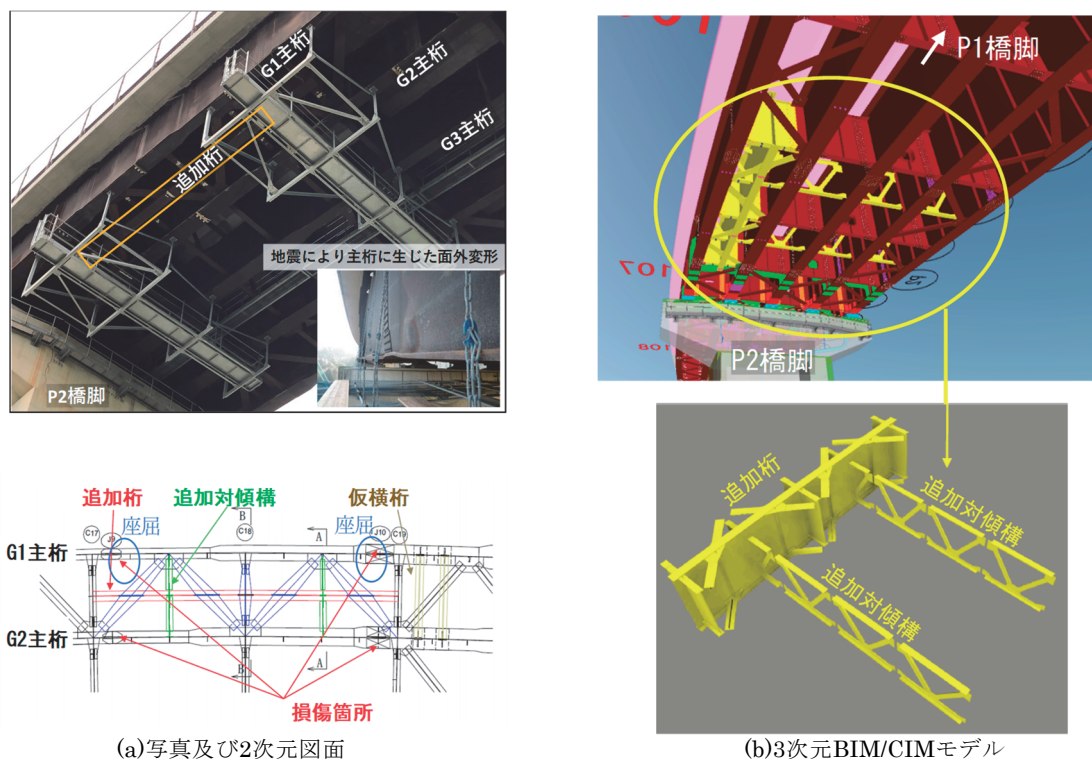


図-4 P1-P2径間部の追加桁設置位置

このような適用上の留意点を踏まえて補修方法を検討した。その際、フランジやウェブといった個々の部位毎に適用可能な補修方法を判断するだけでなく、断面として合理的な補修方法となることにも配慮した。また、本橋の復旧では、ずれた上部構造をジャッキアップして所定の位置に戻す施工プロセスがあり、支点部の補強と仮受け用のベントの設置が必要であった。このため、主桁の補修時にはベントによって死荷重応力の分担が可能であるという現場条件も勘案して補修方法の検討を行った。

### 3.2 塑性変形が残留した各断面への補修方法の選定 (1)P1-P2径間の主桁径間部

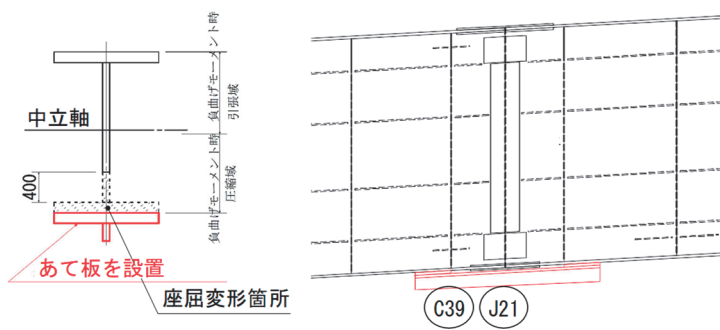
下フランジ及びウェブが座屈し大きく面外変形したP1-P2径間にあるJ9-J10間の断面は、G1主桁の変形状態やRC床版のひび割れ状態から当初保有していた耐荷性能に影響が生じている可能性が懸念される状態と判断した。変形した部位の形状から当該断面への冷間加工や熱間加工の適用は困難であり、材片追加としてのあて板工法についても、あて板と母材との空隙が大きくなってしまい、その空隙を別の材片等で埋めて一体化を図ることは困難と考えた。また、これらの部位に生じた変形状態から、当該断面を構成している他の鋼部材にも相応の応力が残留している状態であると考えておくべきであるが、その残留応力を定量的に推定することも困難である。

このため、材片取替についてはその施工プロセスにおいて他の部位に想定外の応力を生じさせるリスクも否定できないことから、適用は避けるのが望ましいと考えた。

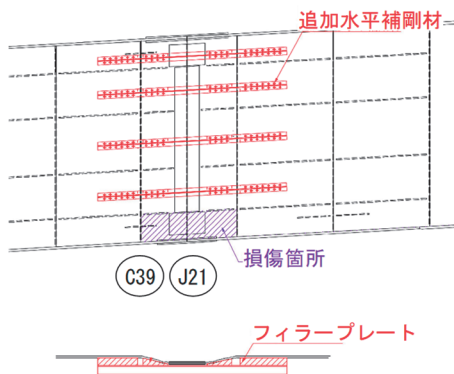
以上を鑑み、当該損傷部位についてはいたずらに切除するようなことはせずそのままの状態であえて残置し、その上で当該断面の曲げ耐荷力及びせん断耐荷力を回復させ、かつ横倒れ座屈の対策ともなるように主桁と対傾構を図-4に示すように追加して設置し、断面を改造することによって耐荷性能を確保する方策を適用することとした。なお、図-4(a)には仮横桁が設置されていることが示されているが、この部材は上部構造をジャッキアップする際に仮受け用ベントの支持点とするために設置した部材であり、そのまま残置して活用している。

また、今後の維持管理段階においてこの追加桁等を設置した断面に新たな変状が生じたかどうかを定量的に把握できるようにしておくことも重要である。この観点から、残置した損傷部材の変形状態や、損傷部材の変形が進行した場合に変化する可能性がある路面高等の記録をその計測方法とともに取得、整理することでその変化を容易に判断できるように配慮した。

なお、国土技術政策総合研究所熊本地震復旧対策研究室では、震災を受けて復旧した橋の維持管理段



(a) 下フランジに設置したあて板



(b) ウェブに設置した水平補剛材

図-5 P3-P4径間部に設置したあて板及び水平補剛材

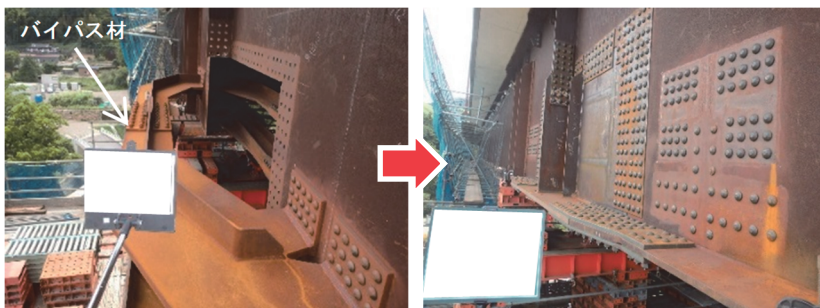


写真-5 主桁支点部の材片取替 (G1主桁 P1橋脚上の支点部)



写真-6 主桁支点部への補剛材の追加 (G5主桁 P3橋脚上の支点部)

階におけるBIM/CIMの活用について検討しており、図-4(b)はその一環として本橋の補修後の維持管理段階で活用することを念頭に別途作成した3次元BIM/CIMモデルである。既設の部材（赤茶色）、今回の補修において構造部材として位置付けて設置した部材（黄色）、補修工事における施工時荷重のために設置しそのまま残置している仮設部材（黄緑色）を色分けして表示するとともに、残置した損傷部材の変形状態に関するデータを属性情報として保管できるようにしている。なお、桃色は(4)に示す床版を撤去して打ち換えた範囲を表している。また、本橋では残置した損傷部位周辺の状態を容易に点検できるようにするため図-4(a)に示すように検査路を

新たに設置しているが、図-4(b)では主桁と対傾構等の設置状況をわかりやすく示すため、検査路は非表示としている。

## (2) P3-P4径間の主桁径間部

P3-P4径間のG4及びG5主桁のJ21付近に生じた座屈変形は、(1)に示したP1-P2径間に生じた損傷と比較すれば変形範囲が狭く、また変形量も小さい。変形した部位の形状から当該断面への冷間加工や熱間加工の適用は困難ではあるが、材片追加は母材との間に生じる隙間をフィラープレートで埋めることにより適用可能と判断した。具体には、図-5に示すように、下フランジに対しては変形範囲を跨ぐようにあて板を設置し、あて板の両端と下フランジの接





写真-7 主桁中間支点部へのバイパス材の設置

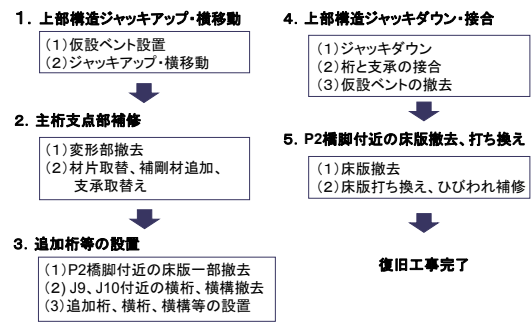


図-7 上部構造の補修方法の適用の前提とした施工手順

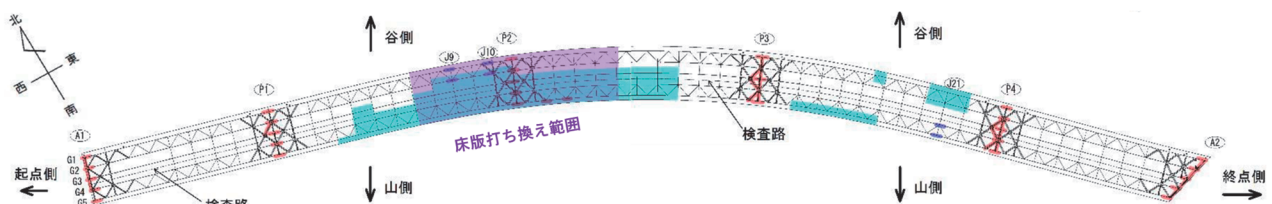


図-6 床版の打ち換え範囲



床版の一部撤去



追加桁落とし込み



設置完了

写真-8 P1・P2径間部における追加桁の設置

合面に生じる隙間にはフィラープレートを設置して一体性が高まるようにした。また、ウェブに対しては水平補剛材を既設の主桁添接板とボルトを跨ぐように設置し、水平補剛材の両端とウェブとの接合面に生じる隙間にも同様にフィラープレートを設置した。

### (3)主桁支点部

支点部に発生した変形は、その多くは局部的なものであったが、変形形状から冷間加工や熱間加工の適用外であることに加え、支承を交換するため下フランジへの材片追加（あて板）ができないという制約条件もあった。このため、支点部については部分的な材片取替と補剛材の追加で補修することとした（写真-5、6）。材片取替は下フランジとウェブの一部の範囲であり、この部位を切除する前にこの区間

を跨ぐようにバイパス材を設置し（写真-7）、この部位に生じていた死荷重応力を分担できるようにした上で切除の施工を行った。

### (4)床版

P2橋脚支点部周辺の床版には山側の広い範囲で多数のひび割れが生じるとともに、一部は床版高さ方向にひび割れが貫通している状態であることが確認された。そこで、このようなひび割れが生じたP2橋脚支点部周辺のうち、設計活荷重が作用する状況下で床版に引張応力が生じることになる範囲については、床版を撤去して打ち換えることとした（図-6）。その際、既設床版と新設する床版の一体性を確保するため、既設床版の橋軸方向配力鉄筋との接合は溶接継手ではなく重ね継手を適用し、継手位置を千鳥配置とした上で道路橋示方書<sup>7)</sup>の規定に準

じて算出される重ね継手長を確保した。

なお、打ち換えをした範囲以外のひび割れ箇所については樹脂を注入することにより補修を行った。

### 3.3 選定した補修方法の適用の前提とした施工手順

3.2で示した本橋の上部構造に適用した補修方法の選定の検討にあたって、その前提となった施工手順をまとめると図-7のとおりである。まず、横にずれた上部構造全体を各下部構造の直近に設置した仮設ベントに設置したジャッキにより持ち上げた上で、当初の位置付近へと横移動させ、その状態で3.2(1)～(3)で述べた補修及び支承の取替えを行うこととした。ここで、追加する主桁を設置する際は、写真-8に示すように、当該設置部位の上部にあたる床版の一部を撤去し、追加する主桁を上から落とし込むようにして設置し、追加する対傾構と併せて既設部材と接合させた。それらの補修施工後に上部構造をジャッキダウンさせ、高さの擦り付けがなされた下部構造の橋座部と接合させ、最後に3.2(4)に示した床版の打ち換えやひび割れ補修等を行うこととした。

## 4. まとめ

本稿では、熊本地震で被災した鋼5径間連続非合成曲線鋼桁橋である大切畑大橋に適用された復旧対策技術のうち鋼上部構造の補修方法の選定の検討プロセスについて報告した。3.2(1)で述べたとおり、大切畑大橋では座屈した主桁を意図して残置したまま当該断面内に新たに桁や対傾構を追加設置し、断面改造によって耐荷性能を挽回する新しい補修方法を選定したところが技術的な特徴の一つである。本橋で適用した断面改造による上部構造の補修設計の

考え方、並びに、施工時荷重を活用した補修設計の妥当性の検証等についても、本誌にて続報として報告していく予定である。

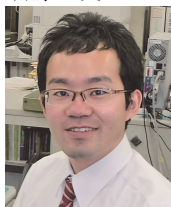
## 謝 辞

本稿で報告した大切畑大橋の復旧に関する技術的事項の検討にあたっては、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、国立研究開発法人土木研究所、熊本県等で構成されるプロジェクトチームの委員より助言頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 国総研資料第967号、土研資料第4359号：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、2017
- 2) 西田秀明：熊本地震で被災した俵山トンネルルートが全線開通～国総研・土研の高度な技術的支援が復旧に貢献～、土木技術資料、第61巻、第11号、pp.48～49、2019
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編、2018
- 4) 国総研資料第1108号：塑性変形した鋼橋の部材矯正に用いる熱間加工に関する研究、2020
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編、2018
- 6) 西田秀明、鈴木慎也、瀧本耕大、星隈順一：震災復旧工事における施工段階での情報取得と維持管理への活用、土木技術資料、第60巻、第10号、pp.24～27、2018
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編、2018

宮原 史



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 主任研究官  
MIYAHARA Fumi

今村隆浩



研究当時 国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所副所長、現 九州地方整備局道路部地域道路課長  
IMAMURA Takahiro

鈴木慎也



研究当時 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交流研究員、現 (株)エイト日本技術開発  
SUZUKI Shinya

西田秀明



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長  
NISHIDA Hideaki

星隈順一



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路構造物管理システム研究官、博士(工学)  
Dr.HOSHIKUMA Junichi