

耐荷性能の挽回に着目した鋼上部構造の補修設計 ～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

筆者らは、平成28年熊本地震で被災した鋼5径間連続非合成曲線鈹桁橋である大切畑大橋の復旧における鋼上部構造の補修方法の検討プロセスについて本誌で報告した¹⁾。その中で、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（Pは橋脚を表す）にあるJ9-J10間（Jは主桁の連結位置を表す）については、損傷した部位の断面を元の状態に戻すという従来の発想の補修ではなく、上部構造としての耐荷性能を挽回するという視点に立ち、座屈した主桁を意図的に残置したまま当該断面内に新たに桁（以下、追加桁）や対傾構を追加設置する方策を選定したところである（図-1）。

本稿では、この断面区間における上部構造としての耐荷性能の挽回を検討するにあたっての設計の考え方やその際の配慮事項を紹介する。また、復旧の施工プロセスで当該断面に生じる力を活用して、適用した補修設計の妥当性についても併せて検証を行ったので、その内容についても報告する。

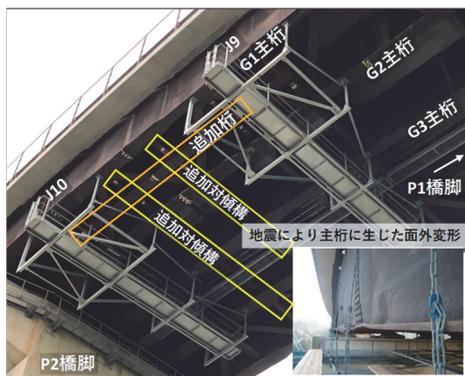


図-1 P1-P2径間に設置した追加桁

2. P1-P2径間のJ9-J10間断面の設計方針

一般に橋の設計においては、橋全体として目標とする性能を実現するため、設計で想定する状況に対して橋を構成する各部材がどのように抵抗し、どの

程度の安全余裕をもってどのような状態に留まるようにするのかという設計の基本方針を設定することが重要である。地震で被災した橋の復旧においても、橋の構造特性と損傷状態を踏まえつつ、このような設計の基本方針を決めていくことになる。

本橋では、地震の影響によって下部構造、上下部接続部（積層ゴム支承）及び上部構造のいずれにも損傷が生じたが¹⁾、下部構造上に設置された支承に上部構造が支持された一般的な桁橋形式の構造であることから、下部構造、上下部接続部及び上部構造のそれぞれの単位で耐荷性能を被災前と同等の水準に戻すことで橋全体としての性能を復旧させる方針とした。

上部構造としての耐荷性能を挽回させるシンプルな方法として、上部構造を構成している部材単位で損傷した断面を元の状態に戻す方法が考えられる。しかしながら、対象としているP1-P2径間のJ9-J10断面では、地震の影響によって上部構造を構成している部材の中に残留応力が生じている部材もあり、また、部材単位で元の状態に戻そうとするとその施工プロセスで隣接する他の部材に想定外の応力を生じさせるリスクもある。この観点からも、本橋では上部構造を構成している部材単位ではなく上部構造全体としての耐荷性能に着目して補修設計を行っていくことが合理的と判断した。

上部構造全体として耐荷性能を挽回するための補修設計では、例えば、設計で考慮する状況に対して上部構造を構成する部材間での荷重分担を被災前の当初設計時の考え方から変更することもあり得る。ここでP1-P2径間のJ9-J10間の断面を構成する各部材の損傷状況に着目すると、床版は断面を貫通する程度のひび割れが生じ、内部の鉄筋は塑性化していることが想定され、打ち換えが必要な状態であった。主桁は、G1（Gは主桁を表す）の下フランジとウェブに座屈変形が生じ、単一の桁としては耐荷力に影響が及んでいることが懸念される一方、G2～G5はG1と比較すると軽微な損傷に留まっている状態であった。このような各部材の状態把握の結果を

Repair Design for the Steel Superstructure of a Road Bridge Focusing on the Recovery of Load-Bearing Performance -Case Study of Ookirihata Ohashi Bridge Damaged by 2016 Kumamoto Earthquake-

総合的に踏まえ、この断面に対する補修は、G1は損傷した状態のまま残置させた上で、G1の損傷に伴う耐荷力の低下分を他の主桁で補完させる方策をとることで、上部構造全体としての耐荷性能を挽回させる戦略とすることにした。その際、既設の主桁を補強して補完させるのではなく、G1とG2の間にこれらと平行する追加桁を設置し、その追加桁が適切に荷重分担できるようにするため対傾構も設置して既設の主桁と接合させる対策をとることにした。

なお、今回の補修設計にあたっては、G1の損傷に伴う耐荷力の低下度合いや当該断面を構成している部材に生じている残留応力の影響等、新設の部材の設計時にはない不確実な初期条件が残る。このような不確実性に対しては、工学的に合理的な範囲で安全側の仮定を見立てながら補修設計を行っていく方針とした。

3. 追加桁の設計と既設桁の照査

3.1 不確実な条件に対する設計での考え方

2.で述べた方針に基づいて追加桁の設計と既設桁の照査を行うにあたり、不確実性が残る具体の事項としては、損傷したG1の剛性や残存耐荷力の評価、5径間連続曲線構造である上部構造をジャッキアップやジャッキダウンする施工プロセスにおいて各部材に生じる応力の評価が挙げられる。

G1の剛性や残存耐荷力の不確実性については、補修設計で想定する幾つかの状況に対して各部材に生じる応力の解析を行う際に、次のような配慮を行った。すなわち、被災直後の状況（死荷重のみが作用している状況）に対してはG1の全断面が被災前と同じく抵抗断面として寄与し得ると考える一方で、その後の状況（死荷重に加えて別の荷重が作用する状況）に対してはG1のうち下フランジとウェブの断面については抵抗断面として考慮しないモデ

ルにより評価することとした。これは、被災後に死荷重のみが作用している状況において、G1は損傷しているものの変形は進行せずに静止しており、力学的には釣り合った状態を保っていることから、死荷重のみに対してはG1が全断面で有効に抵抗に寄与しているとみなせると考えたためである。

補修工事に伴う施工時荷重が作用した際の各部材の応力の不確実性に対しては、その応力の照査に用いる許容値として施工時荷重に対して用いる許容値ではなく、それよりも小さい値（活荷重を作用させる状況に対して用いる値）を設定する配慮をした。これは、既設桁に残留応力が生じていることが想定される一方で、それを定量的に精度よく推定することも難しいことから、部材の照査において安全率を高めておく配慮をしたものである。また、復旧後の構造系に活荷重が作用する状況においても、当該断面を構成している部材には不確実な応力が残留していることが想定される。これに対しては対傾構を追加設置することにより、万が一いずれかの既設主桁が塑性化したとしても他の主桁と協働して上部構造全体として耐荷性能が確保されるように配慮した。

3.2 施工プロセスに応じた構造解析

3.1に示した考え方の下、追加桁を含む上部構造の各部材の照査を立体格子解析により行った。照査で着目するステップ（荷重の作用状況）と解析条件を表-1に示す。ステップ1は被災直後に相当する状況であり、載荷荷重として死荷重に加えて地震による各支点の沈下を強制変位により与えている。ステップ2～7は復旧施工の進捗に伴って構造条件が変化していく状況、ステップ8は復旧後の構造系に活荷重が載荷される状況をそれぞれ示している。3.1に示した考え方に基づき、損傷したG1の下フランジ及びウェブはステップ1でのみ抵抗断面として考慮した。すなわち、ステップ2以降の立体格子解

表-1 主桁の補修設計において着目したステップと適用した解析条件

ステップ	地震による各支点の沈下の影響	載荷荷重			支持状態	支持条件	G1主桁の損傷部の扱い	追加桁の扱い
		死荷重		追加部材分				
		既設部材分	活荷重 (L荷重、群衆荷重)					
		床版と舗装分						
		床版と舗装の一部分						
1	被災直後	○	○		支点支持	鉛直：固定 水平：自由 回転：自由	ウェブと下フランジの剛性を限りなくゼロに近く設定	モデル化するものの、断面剛性は限りなくゼロに近く設定
2	ベント支持に変更しジャッキアップ		○		ベント支持			
3	P2橋脚付近の床版一部撤去	○						
4	追加桁、対傾構等の設置	○		○	支点支持			
5	ジャッキダウンし支点支持に変更	○		○				
6	P2橋脚付近の床版撤去	○		○	支点支持			
7	P2橋脚付近の床版打ち換え		○	○				
8	活荷重が作用する状況		○	○				

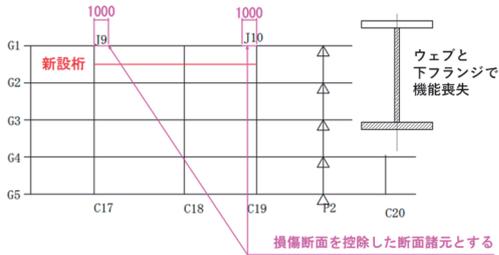


図-2 立体格子解析モデルでのG1桁損傷部の扱い（平面図）

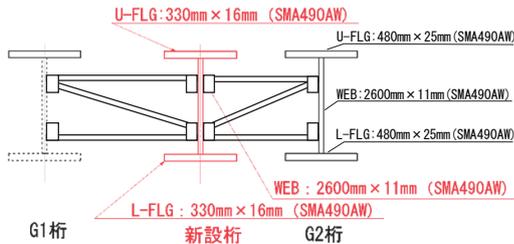


図-3 追加桁の諸元

桁では、図-2に示すように、J9及びJ10付近においてそれぞれ橋軸方向に1,000mmの範囲で下フランジとウェブを抵抗断面として機能しないようにモデル化した。

このような手法により各部材に生じる応力を求め、その値が許容値を超えないように追加桁の断面設計を行った。図-3に最終的に決定した追加桁の断面諸元を示す。なお、立体格子解析で考慮した対傾構等の主桁間の横つなぎ材についても、解析条件と適合するように設計した。

4. 施工時荷重を活用した補修設計の検証

4.1 施工時荷重を活用した補修設計の検証計画

3.1で示したとおり、補修設計にあたっては幾つかの不確実性を合理的な範囲で安全側の配慮となるよう見込んでいる。その配慮の妥当性を確認するため、着目している上部構造断面に対して载荷試験を行うことを検討した。ジャッキダウンが完了し床版が撤去された後（表-1のステップ6）にウェイトを载荷する方法や復旧後（ステップ7）に荷重車を载荷する方法も検討したが、追加桁や既設桁の応力より大きな変化を確認することができるのは当該断面で床版を一部撤去した状態で上部構造をジャッキダウンするタイミング（ステップ5）であることがわかった。そこで、そのチャンスを活用してジャッキダウン前後における上部構造の各部材に生じる応力の変化を計測し、その変化の度合いを解析値と比較することにより、設計での配慮の妥当性を確認する計画とした。

ここで、解析値としては、設計に採用したG1の

損傷部を抵抗断面として考慮しない条件の下で算出される値に加え、G1の損傷部も抵抗断面として考慮した場合の条件での値も算出し、結果に幅をもたせて評価することにした。これは、G1の損傷部は作用する荷重が小さい範囲では実際にはある程度抵抗することが想定されることから、このような幅をもたせて検証するのがよいと考えたためである。

4.2 ジャッキダウンと桁の応力変化の計測方法

上部構造のジャッキダウンは全支点で同時に施工するのではなく、A1側から順番に支点毎に70mmずつ実施した（図-4）。すなわち、A1に続きP1の支点をジャッキダウンすると、隣接するP2支点付近の断面には負の曲げモーメントが生じ、主桁の下フランジにはその作用に対してひずみが発生する。ここではそのひずみを計測して応力変化を把握する計画とし、図-5に示す位置にひずみゲージを設置した。

4.3 桁の応力変化と補修設計における配慮の妥当性

各支点で上部構造をジャッキダウンさせた前後における追加桁（C断面）の応力の変化を図-6に示す。例えばP1の支点をジャッキダウンすることによって、追加桁では計測値、解析値ともに圧縮側への応力変化が生じているが、これはP2支点断面付近に負の曲げモーメントが作用したことに対する応答で

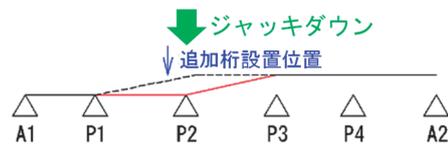


図-4 支点毎のジャッキダウン（P2支点ジャッキダウン時）

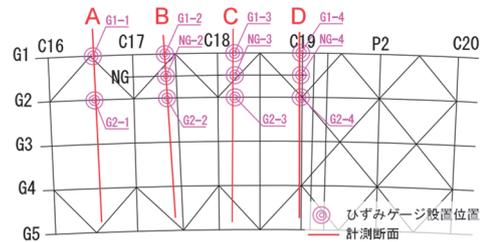


図-5 ひずみゲージの設置位置(主桁下フランジ)

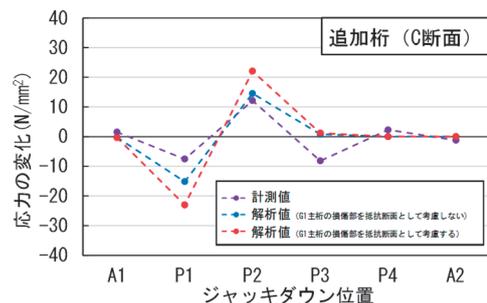


図-6 各支点のジャッキダウン前後の応力変化

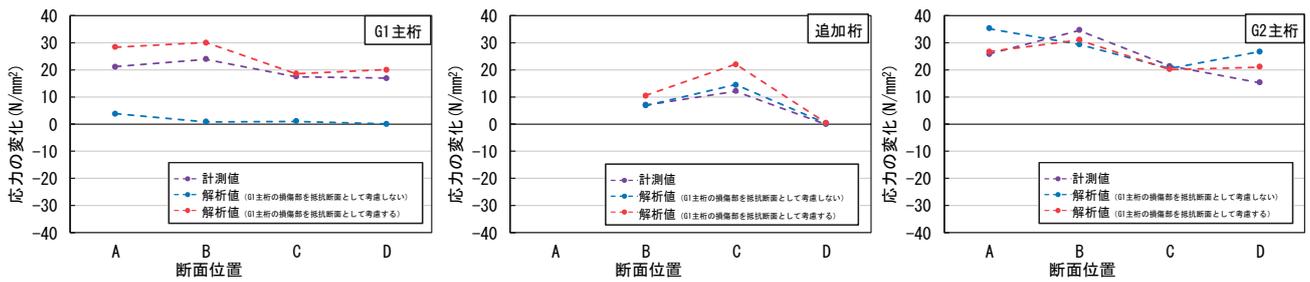


図-7 部材別の応力変化 (P2橋脚上の支点ジャッキダウン時)

ある。次に、P2の支点をジャッキダウンすると、この断面付近に作用していた負の曲げモーメントが緩和するため、計測値、解析値ともに応力の変化としては引張側となって表れており、P1の支点をジャッキダウンした時に生じた圧縮応力が概ねゼロに戻る挙動となっていることがわかる。

次に、P2の支点をジャッキダウンする前後に着目し、G1、追加桁及びG2の応力変化の計測値と解析値の比較結果を図-7に示す。追加桁並びにG2に着目すると、計測値と2ケースの解析値の応力変化の傾向は同様であり、変化の度合いも定量的に概ね近いことがわかる。また、G1に着目すると、計測値は2ケースの解析値の幅の中にあり、損傷部も抵抗断面として考慮する場合の解析値に近いことがわかる。このことより、支点のジャッキダウンに伴う応力変化の範囲では、結果的にG1の損傷部の殆どが抵抗断面として寄与していると解釈できる。なお、計測値はひずみの値に当初の弾性係数を乗じて算出した値であるものの、仮に実際には弾性係数が当初とおりではないとしても、2ケースの解析値の幅の中にあることとなる。これらの結果より、追加桁は既設桁と連携して抵抗する機能を発揮していること、また補修設計ではG1の一部断面の抵抗を考慮しない条件で追加桁の設計を行ったが、それは安全側の配

慮となっていたことを確認することができた。

5. 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中から、断面改造によって耐荷性能を挽回する上部構造の補修方法に着目し、その設計の考え方と復旧の施工プロセスを活用した補修設計の妥当性の検証方法について報告した。損傷した鋼部材の形状や耐荷力を単に元の状態に戻すのではなく、橋又は上部構造の耐荷性能の観点から補修設計を検討する際の参考となれば幸いである。

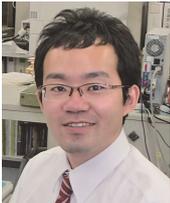
謝 辞

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) 宮原史、今村隆浩、鈴木慎也、西田秀明、星隈順一：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～、土木技術資料、第62巻、第7号、pp.8～13、2020

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



研究当時 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、現 中国地方整備局企画部長、博士 (工学)
Dr. HOSHIKUMA Junichi