

現地レポート：道路橋示方書の改定

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

澤田 守・今村隆浩・中川量太・星隈順一

1. はじめに

熊本地震では、地震動の揺れの影響だけでなく地盤変状の影響により橋に致命的な影響をもたらした事例がありました¹⁾。例えば、PCラーメン橋である阿蘇長陽大橋では、図-1に示すように、斜面崩落にともない橋台に大きな沈下が生じるとともに、中空断面となっている橋脚では壁を貫通するひび割れが発生する等大きな損傷が生じました。

阿蘇長陽大橋の復旧に関しては、本誌の平成29年10月号の「ニュース」として概略を速報的に紹介しましたが²⁾、本報では、地盤変状の影響への配慮や中空断面橋脚の補修について詳細を報告します。

2. 熊本地震を踏まえた技術基準類での対応

熊本地震による被災の教訓を踏まえ、平成28年9月に国土交通省道路局から「平成28年熊本地震を踏まえた橋の耐震設計における留意点について」の事務連絡が通知されました。その中で、斜面変状が橋に及ぼす影響については、その影響を最小化できるように、橋の架設位置や構造形式に配慮して構造計画等を行うことが明確化されました。また、その主旨については平成29年7月に改定された道路橋示方書にも反映されています。

V耐震設計編では、地震によって生じ得る斜面崩壊等及び断層変位に対して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を標準とし、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なる場合は、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、必要な対策を講じなければならないことが規定されました。また、IV下部構造編では、斜面崩壊等が考えられる場合は、地盤変動等に対する検討に必要な情報が十分に得られるように特に留意して調査を行わなければならないことや、支持層の選定にあたっては長期的に安定して存在する地層、すなわ



図-1 主な被災状況

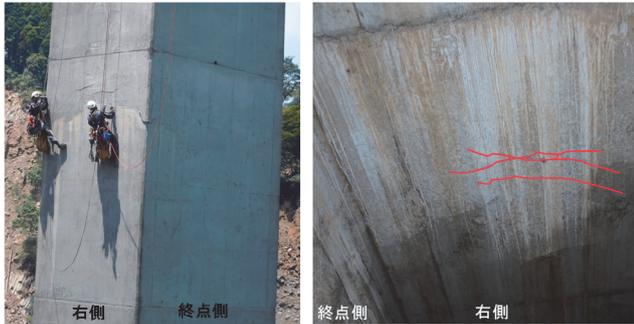
ち、斜面崩壊等の影響を受けないとみなせる地層を支持層として選定すること等が規定されています。

3. 阿蘇長陽大橋の被害と復旧対策

3.1 被害の状況と復旧方法検討のために実施した調査

阿蘇長陽大橋は、橋長276mの4径間PCラーメン箱桁橋です。昭和55年の道路橋示方書で設計され、平成5年に架設されています。

熊本地震による斜面崩落に伴いA1橋台は大きく沈下するとともに、橋台の直下だけでなく、橋台に接続する道路も斜面崩落で損傷を受けました。A1橋台及びこれに接続する道路周辺の地盤状態を把握するため地震直後に地表踏査を行った結果、地表面に開口クラックが確認されました。地盤のゆるみが懸念されたため、次に、3次元的にゆるみの範囲を把握することを目的として、地表クラックが確認された範囲でボーリング調査を実施しました。調査位置は格子状に配置し、橋台に近い位置を優先して行いました。A1橋台の支持層は、建設当時の設計では玄武岩が選定されていましたが、ボーリング調査等の結果、当該層に開口亀裂が確認され、ゆるみが生じていることがわかりました。このため、ボーリング調査や現地踏査の結果から地盤のゆるみの範囲を慎重に設定しました。



(a) ロープアクセスによる外面調査状況 (b)カメラで確認された内外面のひび割れ状況

図-2 P3橋脚の調査

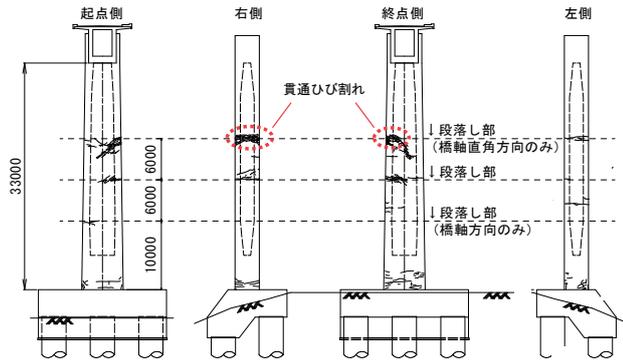


図-3 P3橋脚のひび割れ発生位置

A1橋台の沈下以外にも、橋脚や上部構造にひび割れが生じていました。橋脚は高さの高い構造であることから、地震直後の最初の調査ではUAVにより外面側の損傷状況の概略を把握しました。その結果、特にP3橋脚の中間高さ位置に大きなひび割れが生じていることがわかりました。その次のステップとして、図-2に示すロープアクセスにより外面側の損傷状態を近接目視により調査したところ、水平方向に生じたひび割れの上下でコンクリート表面にわずかなずれが生じていました。このような損傷状況から、外面で確認されたひび割れは中空断面の壁を貫通している可能性が疑われます。ひび割れがコンクリート壁を貫通しているかどうかは中空断面橋脚の補修方法の選定をする上で重要な情報となることから、橋脚に設けられていた既存の孔を活用して中空部に小型カメラを挿入し、内面側の状態も確認しました。その結果、図-2に示すように、外面側で確認されたひび割れ位置に概ね対応する位置で内面側にもひび割れが生じており、ひび割れはコンクリート壁を貫通していると評価しました。

このような調査のプロセスを経てP3橋脚のひび割れ状況の全貌が図-3のように明らかになりました。ひび割れは充実断面となっている基部でも



図-4 A1橋台の再構築

生じていましたが、中間高さ位置で生じたひび割れと比較すると損傷程度は小さいものでした。なお、充実断面で生じたひび割れと中空断面の壁を貫通するひび割れは、これらの断面に地震力が作用した時の最終的な破壊特性の観点からは重要な違いがあることから³⁾、その点にも注意してひび割れに対する診断を行うことが重要です。

3.2 A1橋台の復旧方法と技術的な配慮

図-4にA1橋台の復旧概要を示します。上部構造はPCラーメン橋であり、桁端部を支持する橋台前面側の平面的な位置を変更することは困難ですが、斜面変状のリスクを抑えるため、支持層の位置の見直しを行いました。地質調査で特定した亀裂等を有するゆるんだ地盤は除去し、現地で確認しながら支持層位置を設定しました。また、河川に沿う斜面の変状リスクを回避するため、道路の線形は斜面から離す方向へ変更しました。

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しました。ここで、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ました。また、橋台前面の斜面は、再度の崩落のリスクを抑えるため、アンカー等による対策も行っています。

3.3 P3橋脚の復旧方法と技術的な配慮

貫通ひび割れが生じている中空断面では、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、今回の復旧では、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にしました。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

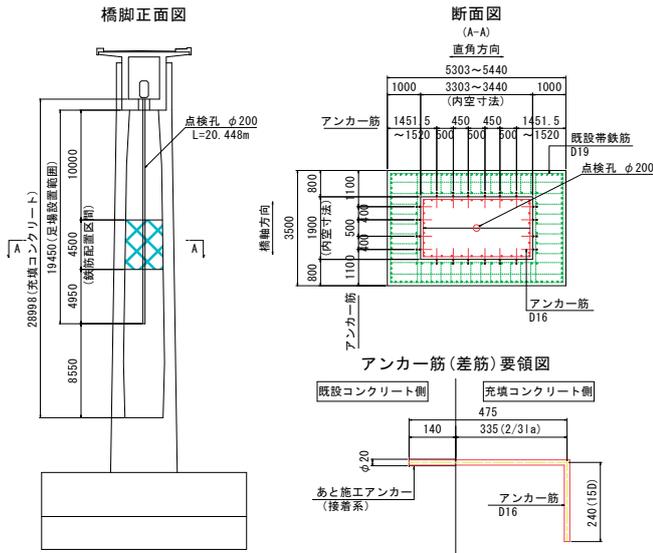


図-5 コンクリート充填の一体化を図るための対策

さ4.5mの範囲)には水平方向の鉄筋を配置することとし、図-5に示すように、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ました。

また、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ります。橋脚頭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ました(図-6)。さらに、貫通ひび割れが生じた断面付近については、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の点検孔を設けました(図-5)。

なお、コンクリートを充填する工法の選定にあたり、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ています。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回あたりの打設量を決定する等、施工による影響も検討しています。

4. モニタリングによる補修効果の確認

4.1 モニタリングの目的

阿蘇長陽大橋のような特殊な損傷が生じた橋の復旧設計やその施工には、様々な不確定要素が含まれます。このため、施工ステップごとに橋の状態の変化や補修効果をモニタリングにより確認することにしました。また、モニタリングの目的に

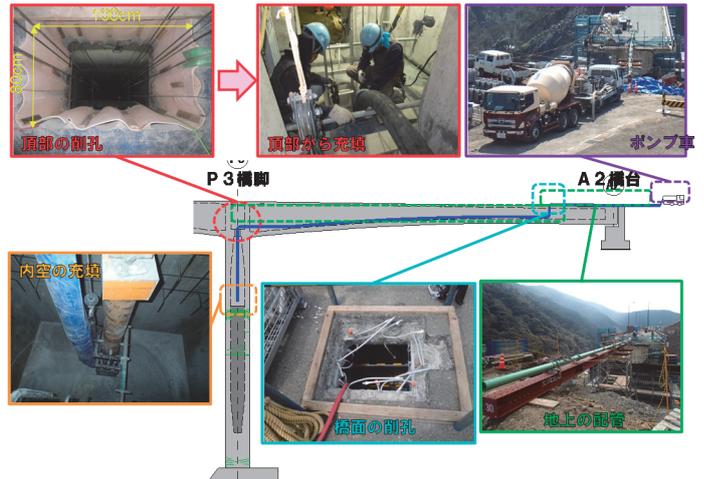


図-6 P3橋脚のコンクリート充填施工

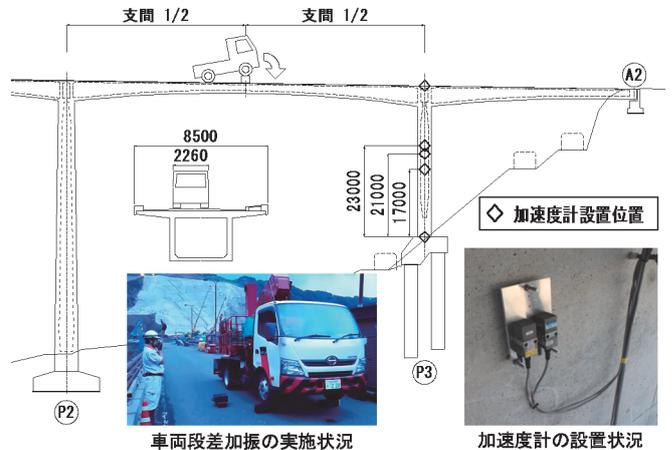


図-7 加速度計設置位置と載荷位置

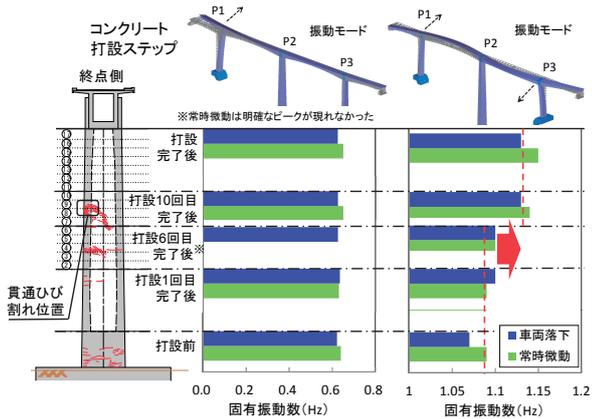
(計測機器選定協力：モニタリングシステム技術研究組合RAIMS)

は、復旧後の維持管理に資するデータを取得しておく観点もあります。P3橋脚の補修効果の確認内容は、本誌の平成29年10月号で一部報告していますが²⁾、本報ではコンクリート充填による橋脚の剛性変化と橋の固有振動数の変化の關係に着目して計測した結果を紹介します。

4.2 計測方法

P3橋脚の中空断面を貫通するひび割れにより、断面剛性が低下していることが想定されます。補修前後における剛性の回復を確認するため、P3橋脚に図-7に示す位置に加速度計を設置し、コンクリート充填に伴う固有振動数の変化を計測しました。

加振方法は、図-7示すように、工事用車両(車両重量は3.5トン)を15cm程度の角材上から落下させて橋に振動を与えました。あわせて常時微動計測も行いました。簡易な加振方法とする一方、微少な揺れでも測定できるよう、サーボ型の高性能加速度計を用いました。



(a)橋軸直角1次モード (b)橋軸直角2次モード

図-8 コンクリート充填に伴う固有振動数の変化

(測定結果整理協力：モニタリングシステム技術研究組合RAIMS)

4.3 コンクリートの充填と橋の振動特性の変化

コンクリート充填に伴う固有振動数の変化を図-8に示します。ここでは、貫通ひび割れが橋軸方向に平行な面（図-3に示す橋脚の右側）で発生していることから、橋軸直角方向の振動に着目しています。コンクリートの充填に伴いP1橋脚及びP3橋脚が振動する橋軸直角2次の振動モードにおいて固有振動数が増加しました。一方、P1橋脚が主に振動する橋軸直角1次の振動モードでは固有振動数の変化は確認されず、P3橋脚が振動するモードで固有振動数が変化しています。振動数 ω は式(1)で表されます。

$$\omega = \sqrt{K/M} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 K はバネ定数(剛性)、 M は質量を示します。コンクリートが充填され質量が増加する中、固有振動数が増加しており、これは補修によって剛性が増加したことを意味しています。

なお、補修後のデータは、供用再開時点の橋の状態を示すものであり、次に地震が起きた際の橋の診断等、今後の維持管理にも活用できると考えられます。今回のモニタリングで計測したデータは、維持管理の段階での活用方法とセットで記録

として保存されるようにしていきます。

今回の事例は地震被害に対する橋の補修工事ではありませんが、供用再開後の維持管理を効率的に進めていく観点から、橋の架橋条件や構造条件を踏まえ施工段階でどのようなデータをどのような形で記録として残しておくべきかについても教訓が得られました。このことは、現在、国土交通省として取り組んでいる橋梁分野の生産性向上 (i-Bridge) の推進の観点からも重要な論点だと考えています。

5. おわりに

阿蘇長陽大橋は、応急復旧工事の完了に伴い平成29年8月に開通しました。県道28号熊本高森線の桑鶴大橋、大切畑大橋、俵山大橋や国道325号阿蘇大橋等の復旧工事も進めており、熊本地震による橋の被災からの教訓を踏まえながら創造的な復興につなげていきたいと考えています。

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きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所、土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告、国総研資料第967号、土研資料第4359号、2017.3
- 2) 星隈順一：熊本地震で被災した長陽大橋ルート、1年4ヶ月ぶりに開通～国総研・土研の高度な技術の総合力が早期復旧に貢献～、土木技術資料、第59巻、第10号、pp.46～49、2017
- 3) 玉越隆史、星隈順一：軸方向鉄筋にSD490を用いるRC中空断面橋脚の耐震性について、土木技術資料、第53巻、第5号、pp.54～55、2011

澤田 守



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
Mamoru SAWADA

今村隆浩



国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所副所長
Takahiro MAMURA

中川量太



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 研究官
Ryota NAKAGAWA

星隈順一



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、博士(工学)
Dr. Jun-ichi HOSHIKUMA