

平成28年熊本地震により被災した道路橋基礎の 損傷調査結果に基づく非破壊検査の適用性と損傷要因分析

鈴木慎也・西田秀明・星隈順一

1. はじめに

道路機能の早期回復が求められる路線に位置する道路橋では、大規模な地震後には構造物の状態を直ちに把握するとともに機能回復を図るため必要な措置を速やかに講じることが求められる。しかしながら、基礎の損傷が要因となって、地震時における道路橋の復旧に時間を要している事例も少なくない。平成28年熊本地震においても、地震動の影響とともに地盤変状の影響も加わったことにより水平移動や沈下または傾斜が下部構造に生じた道路橋において、基礎に損傷が生じていた事例が確認されており、その復旧までには時間を要しているところである。この理由として、基礎が土中にある構造部材であることから状態の把握や補修を行うことが気中にある部材と比べると容易でないことが挙げられる。

上述の背景から、基礎の状態を速やかに把握できる非破壊検査の地震後の損傷調査における適用性を明らかにすることが重要である。また、地盤変状の影響を受ける道路橋の早期復旧をする上では、基礎の損傷を生じにくくするための形式選定、基礎設置条件等を明確にしておくことが重要である。

そこで本研究では、熊本地震で被災した道路橋を対象として行われた基礎の損傷調査データを活用し、非破壊検査の一つである高周波衝撃弾性波法について基礎の損傷調査におけるその適用性をボアホールカメラ調査との対比により検討した。さらに、基礎の構造形式や基礎周辺の地形条件が基礎の損傷に及ぼす影響について分析した。

2. 橋梁基礎に対する損傷調査手法

2.1 高周波衝撃弾性波法

橋梁基礎の状態把握手法には直接目視、ボアホールカメラによる間接目視、非破壊検査である弾性波法や磁気探査、AE法等の手法がある。このう

Applicability of a Non-Destructive Investigation Method and Damage Factor Analysis for Bridge Foundations, Based on Investigation Results in the 2016 Kumamoto Earthquake



写真-1 高周波衝撃弾性波法による調査例

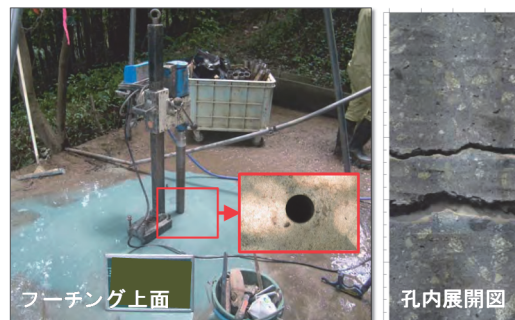


写真-2 ボアホールカメラによる調査例

ち、弾性波法は基礎本体の削孔や基礎側面における地盤の掘削が必要ないことから他の手法に比べて早期の状態把握という点で優れており、地震後の基礎の損傷調査に用いられている。

弾性波法では構造物表面をハンマーにより起振した際の構造物内部からの反射波を表面で計測する。計測結果からひび割れや杭先端などの断面急変部からの反射波を識別し、伝播時間と構造物の弾性波速度を用いて損傷深度や杭長の推定が行える。高周波衝撃弾性波法は弾性波法の一つであり、従来の弾性波法よりも高周波数成分を扱えることで、断面急変部からの反射波が明瞭になることやフーチング上面からでも実施できること(写真-1)等に特徴がある。

高周波衝撃弾性波法による既設杭の状態把握では杭体の損傷度評価も行われており²⁾、熊本地震における基礎の損傷調査においても文献²⁾と同様の損傷度評価が行われた。この損傷度評価では反射波を

表-1 高周波衝撃弾性波法による損傷度評価

損傷度	A	B	C	D
杭の健全性	良好	概ね良好	やや不良	不良
杭先端部の反射波の検知	高い確率で検知あり	検知あり	確率は低いが見知あり	検知なし
杭途中部の反射波の検知	検知なし	高い確率で検知あり	高い確率で検知あり	高い確率で検知あり

検知する確率から損傷度をA～Dの4段階に区分している(表-1)。反射波を検知する確率とは、同一の測点を複数回計測した際の計測回数と反射波の検知回数の比である。ここで損傷度Bは、耐荷性能に影響を及ぼす程度ではないものの軽微な損傷が生じている状態を想定している。また損傷度Cでは、耐荷性能への影響が懸念される損傷が生じている状態を想定している。損傷度BとCの違いは杭先端からの反射波が高い確率で検知されるかにあり、その具体的な閾値は個別の現場で設定されている。

2.2 ボアホールカメラ調査

ボアホールカメラ調査は、コアボーリングにより設けた調査孔の内部をカメラ撮影し、その結果を画像処理して作成する孔内展開図から損傷評価を行う調査方法である(写真-2)。間接目視が行えることから評価の信頼性が高い。しかし、コアボーリングに時間を要するとともに構造物を局所的に破壊する可能性がある。

3. 高周波衝撃弾性波法による橋梁基礎の損傷度評価の適用性

3.1 検討概要と検討対象

高周波衝撃弾性波法による基礎の損傷調査の適用性について、推定する損傷深度の妥当性をボアホールカメラ調査との比較により検証した研究例が複数ある^{3),4)}。しかし、これらの研究事例は限られた地盤条件や損傷状態におけるものであることから損傷調査における高周波衝撃弾性波法の一般的な適用性は十分に明らかとなっていないのが現状である。このため、高周波衝撃弾性波法を損傷調査手法に用いるには他の事例も検証し知見を蓄積する必要がある。本研究では、熊本地震後に実施された基礎の損傷調査データを活用して、ボアホールカメラ調査による損傷評価に基づき高周波衝撃弾性波法による損傷度評価の妥当性をクロス集計により分析した。

検討対象とした事例は、熊本地震後に実施された基礎の損傷調査の中で高周波衝撃弾性波法とボア

表-2 高周波衝撃弾性波法による損傷度評価とボアホールカメラ調査による損傷評価の関係

ボアホールカメラ調査	高周波衝撃弾性波法			
	A	B	C	D
不連続面なし	0	3	0	0
不連続面あり	0	3	3	0

ホールカメラ調査の測点位置が同じか近傍である5基8本の杭体における9測点の調査結果である。

3.2 ボアホールカメラ調査との比較

高周波衝撃弾性波法とボアホールカメラ調査による損傷評価のクロス集計を行うにあたっては、高周波衝撃弾性波法において損傷度BとCの評価の違いとなる杭先端からの反射波の検知確率の閾値を、全ての計測で反射波を検知した場合である100%とした。これは各測点における計測回数が3回程度であり確率を算出するにはサイズが小さいことによる。またボアホールカメラ調査による損傷評価は孔内展開図にひび割れによる不連続面が確認できるか否かの2区分で評価した。このとき、ボアホールカメラ調査でひび割れの幅が明確に測定出来るのは1mm以上⁵⁾の場合であるが、ここでは不連続面の有無のみに着目し最大幅1mm未満のひび割れによる不連続面も対象としている。これはひび割れが耐荷性能に及ぼす影響をひび割れ幅により一律に判断することが困難であることによる。

クロス集計の結果を表-2に示す。表-2をみると高周波衝撃弾性波法で損傷度Cと判定した3事例はボアホールカメラ調査でいずれも不連続面ありの評価だとわかる。損傷度Cは耐荷性能への影響が懸念される損傷が生じている状態を想定していることから、その事例にいずれも不連続面が確認されたことは高周波衝撃弾性波法による損傷度評価の妥当性を支持する結果である。

一方、高周波衝撃弾性波法で損傷度Bと判定された事例をみるとボアホールカメラ調査による損傷評価はばらついており、不連続面なしが3事例、不連続面ありが3事例あることがわかる。不連続面ありの3事例のうち1事例では、孔内展開図から杭頭付近に最大幅1mmのひび割れによる不連続面と、杭全体に幅1mm未満のひび割れによる不連続面を確認した。他の2事例については、孔内展開図から最大幅1mm以上のひび割れによる不連続面を複数確認した。この中には最大幅25mmのひび割れによる不連続面も認

められた。損傷度Bは軽微な損傷を想定していることを踏まえると、これらの結果は損傷評価方法が想定している損傷度の区分と実際に基礎に損傷が生じているレベルが対応しない場合があることを示唆していると考えられる。

4. 橋梁基礎の損傷に関する分析

4.1 検討対象とした橋梁基礎

基礎の構造形式や基礎周辺の地形条件と基礎の損傷との関係について明らかにすることを目的として、熊本地震後に行われた基礎の損傷調査データを用いて分析をおこなった。

検討対象は、外観調査により被害の有無を判断できる直接基礎、およびボアホールカメラによる損傷調査が行われた基礎とした。検討対象となった基礎は、橋台基礎9基と橋脚基礎11基の合計20基である。これらの基礎の構造条件と地形条件を表-3に示す。ここで表中の「損傷基数」には「基数」のうち損傷が確認された基数を記載している。直接基礎については、橋の性能に影響を与える沈下や平面移動等が確認された場合を損傷として計数した。また、表中の「斜面方向数」とは、下部構造が設置された周辺の斜面条件を簡易的に定量化したものであり、図-1に示すように下部構造の周辺の等高線の状況から周囲の傾斜した斜面の方向数を0から3の4区分に分類した。例えば、P1橋脚の斜面方向数が2であれば、表中にはP1(2)と記載している。

4.2 基礎の損傷に関する分析

図-2に斜面方向数別の基礎の損傷状況を示す。斜面方向数0~2の場合には、斜面方向数と基礎の損傷有無との間に関係性は認められなかった。一方、斜面方向数3に該当する直接基礎2基と橋軸方向に単列配置の深礎基礎1基では、いずれも損傷が生じていた。このうち深礎基礎は、橋の耐震設計法が大きく変わった平成8年の道路橋示方書を適用して設計された橋の基礎である。これらから橋台の前面側及び両側面側が全て斜面となっているような位置に橋台を設置すると、適用示方書によらず地盤変状の影響を受けた際に基礎に損傷が生じやすい傾向にあることがわかる。

また、図-3には斜面方向数1または2の場合を対象に、基礎の損傷状況を基礎の構造形式ごとに集計

表-3 検討対象とした橋梁基礎と地形条件

橋梁名	適用道路 橋示方書	下部構造形式	基礎形式	橋軸方向 杭形式	基数 (※1)	損傷基 数(※2)	斜面方向数
阿蘇長陽大橋	昭和55年	中空RC橋脚	直接基礎	-	1	0	P2(0)
		逆T字式橋台	直接基礎	-	2	2	A1(3), A2(3)
戸下大橋	平成2年	張出式RC橋脚	深礎基礎	単列	2	2	P4(1), P6(1)
俵山大橋	平成8年	張出式RC橋脚	大口径深礎基礎	-	2	0	P1(2), P2(1)
扇の坂橋	平成8年	逆T字式橋台	深礎基礎	単列	2	2	A1(2), A2(3)
		逆T字式橋台	直接基礎	-	1	0	A1(2)
		張出式RC橋脚	大口径深礎基礎	-	2	0	P1(2), P2(1)
桑鶴大橋	平成6年	鋼製橋脚	深礎基礎	単列	1	0	A2(2)
		逆T字式橋台	深礎基礎	単列	1	1	P1(2)
		逆T字式橋台	深礎基礎	複列	1	0	A2(2)
大切畑ダム橋	平成6年	逆T字式橋台	深礎基礎	単列	1	0	A2(0)
大切畑大橋	平成8年	中空RC橋脚	場所打ち杭	複列	2	1	P2(0), P3(0)
		逆T字式橋台	大口径深礎基礎	-	1	0	P4(1)
		逆T字式橋台	深礎基礎	単列	1	0	A2(1)

※1 直接基礎またはボアホールカメラ調査が実施された基礎

※2 沈下等が確認された直接基礎またはボアホールカメラ調査により損傷が確認された基礎

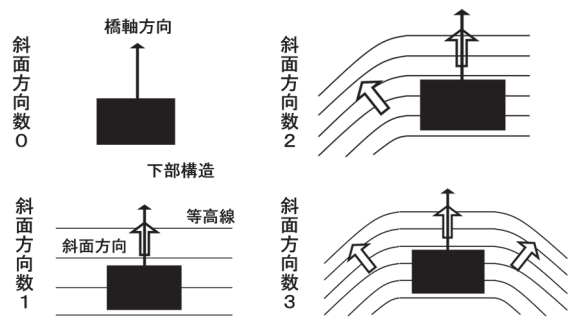


図-1 斜面方向数の定義

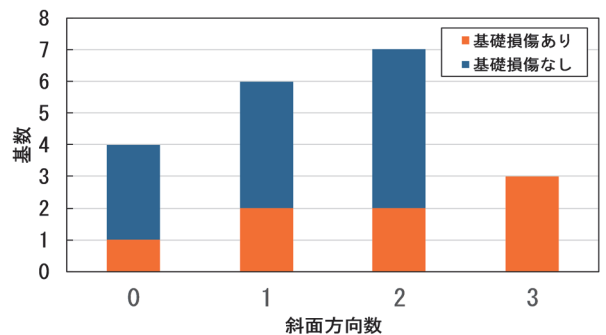


図-2 斜面方向数が基礎の損傷に及ぼす影響

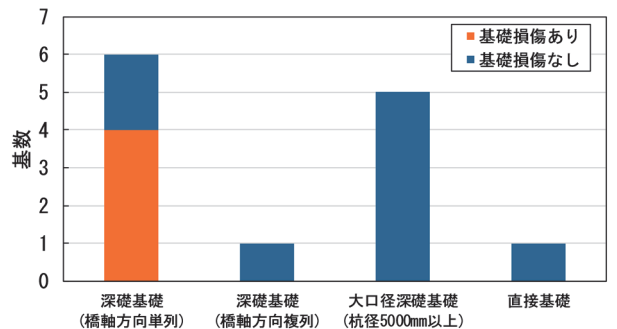


図-3 斜面方向数が1又は2の場合において基礎の構造形式が基礎の損傷に及ぼす影響

した結果を示す。これより基礎の損傷は橋軸方向に単列配置となった深礎基礎の場合に損傷が発生しやすい傾向があることがわかる。このことから、斜面の近傍に下部構造を設置せざるをえない場合に地盤変状の影響に対して基礎に損傷が生じるリスクが小

さくするためには、変形の生じにくい複数列配置の基礎形式にする、あるいは大口径深礎基礎のような剛性が高い形式を選定する方がよいことがわかる。この結果は、斜面上の基礎にすべり力が作用する状況を想定した遠心模型実験の結果⁶⁾と調和的である。

5. まとめ

本研究では熊本地震後に行われた道路橋基礎の損傷調査データを活用して、基礎の損傷調査における高周波衝撃弾性波法の適用性を検討した。この結果、高周波衝撃弾性波法により耐荷性能に影響ない程度の損傷と評価した場合でも、ボアホールカメラ調査により損傷が認められる事例を確認した。このことから、地震後の基礎の損傷調査において高周波衝撃弾性波法を活用する場合には、この調査法を単独で活用することよりも、ボアホールカメラ調査の実施対象を選定するスクリーニングとして活用することが考えられる(図-4)。すなわち、高周波衝撃弾性波法により損傷度B~Dと評価された場合にボアホールカメラ調査の対象とする活用法である。ただし、このような活用法をする際には高周波衝撃弾性波法により損傷度Aと評価された杭において実際の状況が整合していることが重要であるが、今回の検討対象からは損傷度Aの場合に基礎の耐荷性能に影響を及ぼす損傷が生じていないことを立証するに足るデータがなかった。このため今後もデータ数を増やし損傷度Aの場合には実際にも損傷なしであることの検証を行うとともに、損傷度評価の適用条件を明確化することが必要である。

また、熊本地震における橋梁基礎の損傷について分析を行った結果、下部構造の周囲を斜面に囲まれた場合や橋軸方向に単列配置された深礎において斜面変状の影響を受けやすいことが、実際の被災状況の分析から明らかにすることができた。

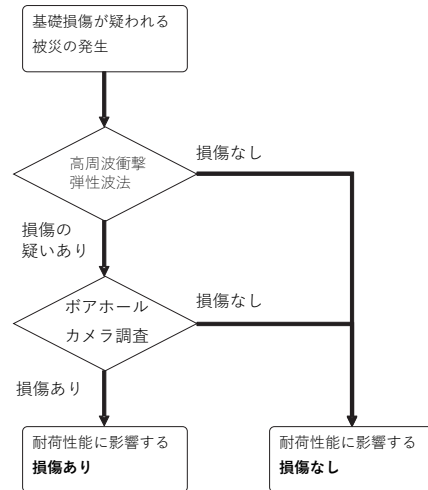


図-4 地震後の基礎の損傷調査における高周波衝撃弾性波法の活用の仕方

謝辞

本研究の実施にあたっては、国土交通省九州地方整備局熊本復興事務所から資料を提供頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大住道生、星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析、第20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、2017
- 2) 永井哲夫、中村敏明、永野賢司：高周波衝撃弾性波法による杭基礎の評価、全地連技術フォーラム2013論文集、論文No. 76、2013
- 3) 川嶋直人、大谷義之、吉川正浩：杭の再利用のための高周波衝撃弾性波法を用いた健全性評価の調査、土木学会第63回年次学術講演会、2008
- 4) 塩月隆久、甲斐健之：高周波衝撃弾性波法を用いた熊本地震被害基礎杭調査制度について、土木学会第72回年次学術講演会、2017
- 5) 建設省土木研究所、基礎地盤コンサルタント(株)、(株)東京ソイルリサーチ、梶谷エンジニア(株)：ボアホールカメラを用いた橋梁基礎の損傷調査法マニュアル(案)、1999
- 6) 藤村彰、谷本俊輔、七澤利明：地すべりにより道路橋基礎が受ける作用に関する実験的検討、土木技術資料、第61巻、第3号、2019

鈴木慎也



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
Shinya SUZUKI

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
Hideaki NISHIDA

星隈順一



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所熊本地震復旧対策研究室長、現 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. Jun-ichi HOSHIKUMA