

鉄筋コンクリート橋脚の地震損傷を 早期に検知・復旧する技術の開発

堺 淳一・運上 茂樹

大規模な地震が発生した場合、道路橋などのライフライン構造物の被災状況の把握とそれに基づく災害時道路ネットワークの確保は、地震直後の救急救命活動、被災者の避難、救援物資輸送等の震後対応において極めて重要である。道路橋が被災した場合には、まずはその被災を発見するとともに、被災の程度を把握することが重要であり、その後、必要に応じて道路橋の機能を応急的に確保するために修復が行われる。本研究では、鉄筋コンクリート橋脚を対象に、その地震被災度を客観的かつ速やかに推定する手法および被災発見後に即効性のある復旧工法を用いて迅速かつ合理的に機能回復を図るための応急復旧技術の開発を行った。

キーワード：橋、地震被害、損傷検知、応急復旧、鉄筋コンクリート橋脚、インテリジェントセンサ、繊維バンド巻き立て、振動台加震実験

1. はじめに

大規模な地震が発生した場合、道路橋などのライフライン構造物の被災状況の把握とそれに基づく災害時道路ネットワークの確保は、地震直後の救急救命活動、被災者の避難、救援物資輸送等の震後対応において極めて重要である。道路橋が被災した場合には、まずはその被災を発見するとともに、被災の程度を把握することが重要であり、その後、必要に応じて道路橋の機能を応急的に確保するために修復が行われる。

地震後の被災調査・被災診断、応急復旧や本復旧工法の選定に関しては、兵庫県南部地震の経験を含む過去の震災経験を反映した道路震災対策便覧（震災復旧編）¹⁾が活用されている。一方、2004年10月に発生した新潟県中越地震では、橋梁構造物の被災発見後、被災診断、復旧工法の選定、復旧工事の実施に約1週間を要し、この間通行止めを余儀なくされるという事例が見られ、機能回復に要する時間を短縮することの重要性が再認識された²⁾。このため、構造物の被災を速やかに検知し、その被災程度を推定する手法および被災発見後に即効性のある復旧工法を用いて迅速かつ合理的に機能回復を図るための応急復旧技術の開発が必要とされている。

（独）土木研究所構造物メンテナンス研究センターでは、こうした震後の対応を支援する技術を開発するための研究を行っており、鉄筋コンクリート（RC）橋

脚の応答周期の変化に基づき被災度を迅速かつ客観的に判定する手法（橋梁地震被災度判定手法）^{3,4)}および地震によるRC橋脚の損傷を1日以内に応急的に修復する手法⁵⁾を開発した。ここではその概要を紹介する。

2. 橋梁地震被災度判定手法

（1）橋梁地震被災度判定システムの概要

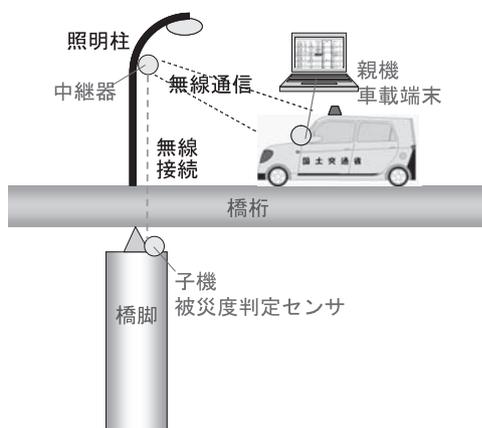
構造物の被災を速やかに検知し、その被災程度を推定する手法として、橋梁地震被災度判定システムを開発した。本システムは、道路管理者が地震発生後に実施する緊急巡視点検の際に利用することを想定している。地震による橋梁の被害としては橋脚、特にRC橋脚の被害が多いこと、また、橋脚の被害は地震後の橋梁の使用可能性に大きな影響を及ぼすことから、主としてRC橋脚の被害を検知することを目的とし、その性能目標を以下のように設定した。

- i) 地震直後に橋梁の地震被災度判定が可能である。
- ii) センサが小型で設置、取り扱いが容易である。
- iii) センサの製作および設置が安価である。
- iv) 道路管理者が緊急巡視点検車から降りずに情報を収集できる。
- v) 停電に対して非常用のバッテリーを備えている。

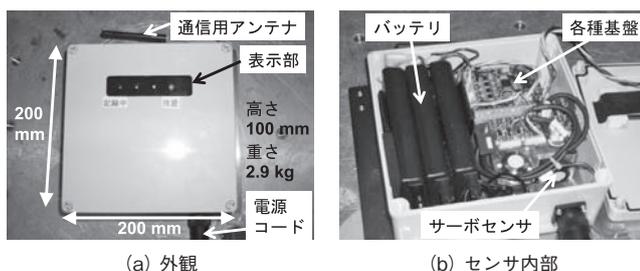
1つ目は、本手法の目的であり、最も重要な性能目標である。2つ目、3つ目の性能目標は、既設橋梁への設置を念頭においたシステムであることから、小型で

取り扱いや設置が容易であり、かつ、安価であることとした。4つ目、5つ目の性能目標は、センサで得られた被災情報を緊急巡視点検の際に確実にかつ簡便に把握できるようにするための性能である。

本システムの構成を図一^{3,4)}に示す。これは、子機（被災度判定センサ）、中継器、親機からなる。子機には、センサ、センサの観測記録の変換を行うAD変換器、計測結果に基づく被災度を演算・判定するためのマイクロコンピュータ、データを収録するメモリ、無線通信機、非常用バッテリーを内蔵している。図一2に子機の試作機を示す。中継器は無線通信機、マイクロコンピュータ、非常用バッテリーを内蔵しており、そのサイズは子機と同じである。親機は一般的なノートパソコンの使用を想定しており、これに専用ソフトウェアをインストールする。



図一1 橋梁地震被災度判定システム



図一2 地震被災度判定センサ（子機）の試作機

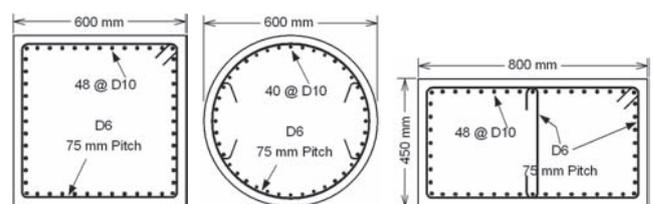
橋脚の損傷度をセンサにより検知する子機は橋脚天端に設置し、子機で得られた橋脚の損傷度を表示する親機は緊急巡視点検車の車中に設置する。中継器は、無線により子機から親機にデータを転送するために、必要に応じて用いられる。本システムを利用することにより、道路管理者は大規模地震後の緊急巡視点検中に走行する車中で橋梁の地震被災度に関する情報を収集することが出来る。また、本システムでは中継器に被災度判定結果の表示機能を装備させ、親機を持たな

い一般の道路利用者にも地震後の橋の状態に対する情報提供を行うことも可能である。

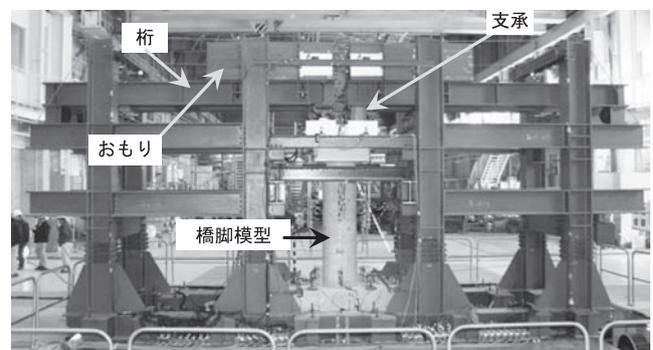
ここで、地震被災度を判定する技術の開発が重要となる。橋梁の地震後の使用可能性等は、局所的な損傷程度よりも橋梁全体の被災程度により判断されることから、本研究では、橋脚天端に設置する加速度センサにより計測される応答加速度をもとに、橋脚の応答周期が損傷によって変化する特性を利用して被災度を判定する手法を用いることとした。

(2) 被災度判定手法の開発

被災度判定手法の開発のために、柱基部で曲げ破壊するRC橋脚模型に対して実施された振動台加震実験結果を分析した。分析対象としたのは図一3に示すような実験セットアップにより加震された円形、正方形、長方形断面を有するRC橋脚模型9体に対する33ケースの加震である。



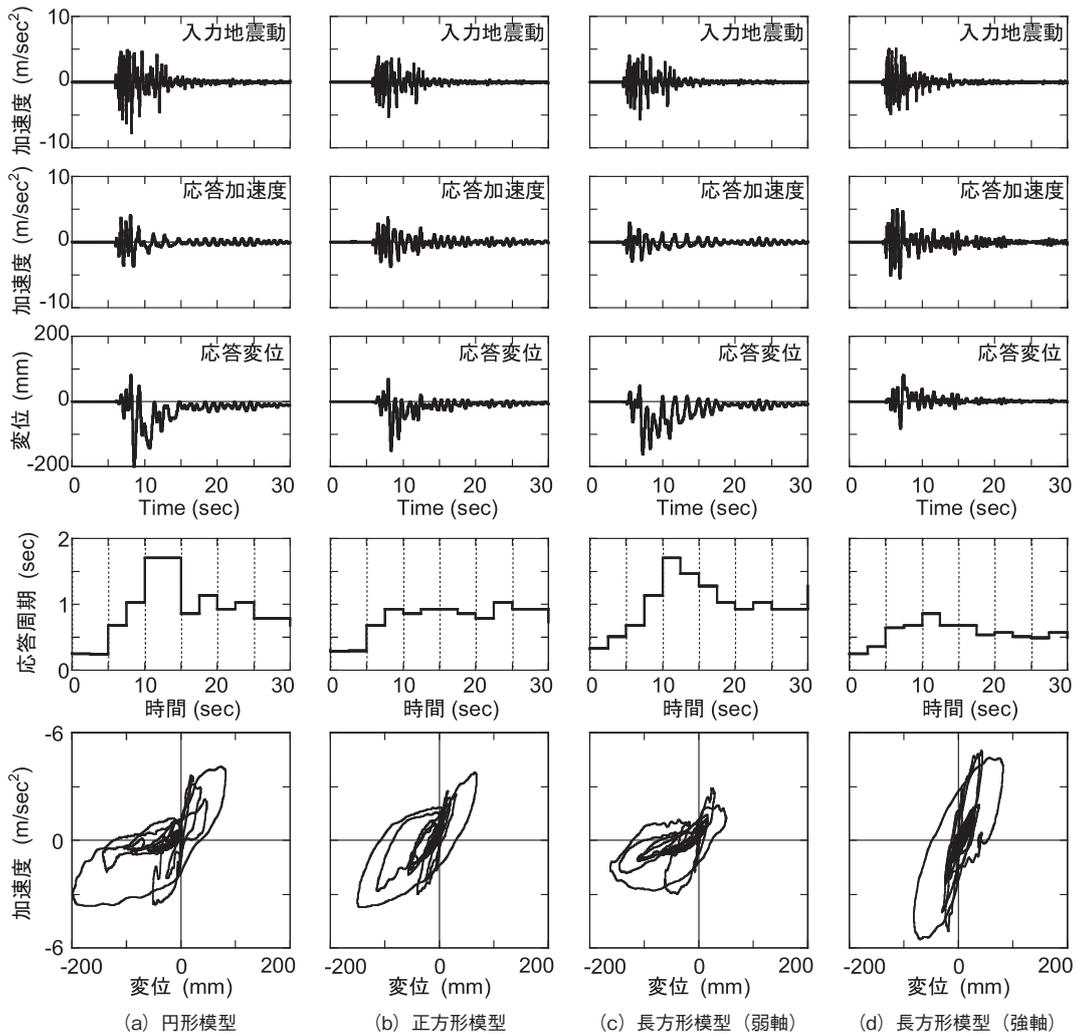
(a) 模型の断面の例



(b) セットアップの例

図一3 RC橋脚模型に対する振動台加震実験

図一4は、RC橋脚模型に対する振動台加震実験から得られた入力地震波、橋脚天端の応答を示した結果である。主要動によって橋脚模型に大きな応答変位が生じた後は橋脚天端の応答加速度、応答変位に固有周期が増加する特性が見られる。こうした特性を定量的に評価するために、橋脚天端で観測された応答加速度に対する時系列的な推移を考慮した高速フーリエ変換（FFT）解析による卓越周期を橋脚の応答周期として算出し、その変化を求めることとした。この結果も図一4に示している。これによれば、主要動が入力されて橋脚が大きく応答すると、固有周期は初期の値か



図一 4 RC 橋脚模型の地震応答と応答周期の変化

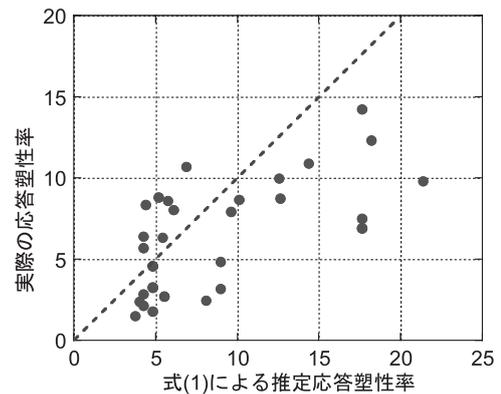
ら大きく増加し、その後、応答の減衰につれて固有周期はやや低下するが、最終的な値は初期値に比べて大きくなる事が分かる。

こうした特性を定量的に評価するために、ここでは1質点系の振動モデルを仮定し、構造物の復元力特性に弾完全塑性型の骨格曲線を用いて、損傷前後の周期の変化と最大応答塑性率 μ_{QEDDM} の関係を次式のように与えることとした^{3),4)}。

$$\mu_{QEDDM} = \frac{d_{r,max}}{d_y} = \left(\frac{T_d}{T_0} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 $d_{r,max}$ は最大応答変位、 d_y は降伏変位、 T_0 、 T_d はそれぞれ損傷前後の固有周期である。応答塑性率は構造物の損傷度合いに密接な関係があるため、これにより構造物の被災度を推定する。

図一 5 は、本提案手法による応答塑性率の推定精度を示した結果である。これより、結果にばらつきはあるものの本手法により応答塑性率をおおむね推定出来る事が分かる。



図一 5 被災度判定手法の精度

3. RC 橋脚に対する即効性のある応急復旧工法

(1) 即効性のある応急復旧工法の要求性能

本研究で提案する応急復旧工法に対する要求性能は以下の通りとした。

- a) 余震に対する応急的な安全性の確保のため、脆性的な破壊を防止すること

- b) 品質管理が容易であること
- c) 1日程度で復旧作業が完了すること
- d) 重機等による施工を必要としないこと
- e) 資材は長期間、備蓄可能なこと

上記の a), b) は耐震性能の観点からの要求性能である。a) の脆性的な破壊を防止するという性能は、せん断破壊を防止すること、あるいは変形性能を確保すること、もしくはその両者により満足される。また、b) は復旧後の性能（品質）を確保するという観点から重要である。これについては、作業に特殊な技術を要しないことも要求される。c), d) は応急復旧の作業において迅速、簡便であることを要求するものである。e) は平成 16 年の新潟県中越地震の例では修復資材の調達にもある程度の時間を要したという報告がある¹⁾ことから、震災後にすぐに利用できるように、例えば橋を管理する事務所や「道の駅」等に資材を長期間備蓄できるようにするための要求性能である。

こうした要求性能をふまえ、本研究では機械式定着による繊維バンド巻立て工法を提案した。

(2) 機械式定着による繊維バンド巻立て工法

本工法は、断面修復は超速硬性無収縮モルタルにより行い、断面修復後に繊維バンドを機械式定着によって巻立てる工法である。一般的な工程は図一6および以下に示すとおりである。

- 1. 損傷したコンクリートの除去、修復部の清掃

- 2. 下地処理剤（プライマー）の塗布
- 3. モルタル等による断面修復
- 4. 機械式定着による繊維バンドの巻立て

繊維バンドを巻立てる作業は、簡単な作業であり特殊な技術は要さない。また、繊維バンドは軽いため、施工には重機を要さない点もポイントである。さらに、本工法で用いた材料は、用いる繊維材によっては紫外線による劣化等があるため、備蓄には紫外線を防ぐ等の対策が必要な場合もあるが、こうした対策を施せば、長期間備蓄可能な材料である。

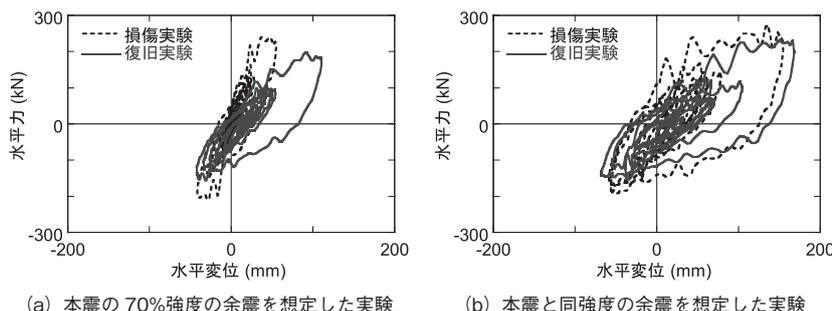
(3) 提案工法の効果

提案する応急復旧工法の効果を検証するために、柱基部に曲げ損傷が生じた模型に対して提案工法による応急復旧を行い、復旧された模型に対して振動台加震実験を行った。入力地震動には、兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で観測された記録を用いた。損傷を生じさせた実験（以下、損傷実験と呼ぶ）では、徐々に加震振幅を大きくし、最大で鷹取記録の振幅 120% 加震を行った。この結果、かぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋のはらみ出しが生じた。この後、提案工法により損傷を修復し、本震の 70% 強度および本震と同強度の余震を想定して、入力地震動の振幅をそれぞれ 80% と 120% とする場合の加震実験（以下、復旧実験と呼ぶ）を行った。

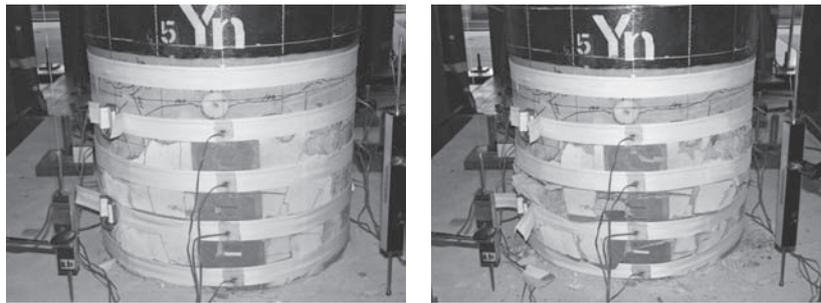
図一7に本震の 70% 強度の余震を想定した実験と



図一6 曲げ破壊した柱基部の提案工法による修復



図一7 水平力～水平変位の履歴



(a) 本震の70%強度の余震を受けた後

(b) 本震と同強度の余震を受けた後

図-8 損傷状況

本震と同強度の余震を想定した実験で得られた水平力～水平変位の履歴を示す。ここでは、損傷実験と復旧実験の履歴を比較している。また、各加震後の損傷状況を図-8に示す。

提案工法により応急復旧すると、本震の70%強度の余震により断面修復材にひび割れが生じ、繊維バンドのひずみが最大で0.01に達し、バンドがわずかにはらみだした。本震と同強度の加震では断面修復材の損傷は大きくなったが、バンドの伸び性能が高く破断しなかったため、断面修復材は剥落しなかった。図-7によれば、修復後の初期剛性は、損傷前の健全な状態に比べて40～50%程度低下したこと、曲げ耐力としては健全な状態と同程度の耐力が確保されることが分かる。応答変位としては、損傷を生じさせた実験よりも大きくなるが、提案工法で修復された橋脚はいずれも安定した地震応答を示しており、こうした応急復旧により損傷前とほぼ同程度の耐震性能を確保できたと考えられる。

4. まとめ

大規模地震が発生した後の震後対応を支援する技術として、鉄筋コンクリート橋脚を対象とした橋梁地震被災度判定手法および地震損傷を1日以内に応急的に修復する技術を開発した。橋梁地震被災度判定手法については、試作機を実橋梁に設置し、運用上の課題点の抽出を行うとともに、これを活用した道路橋の緊急点検手法の開発を行っている。また、地震損傷を1日以内に応急的に修復する技術として提案した機械式定

着による繊維バンド巻立て工法については、せん断破壊や軸方向鉄筋の途中定着部（段落し部）の損傷等への適用に向けた研究を進めている。これらの技術により、大規模な地震によって道路橋に損傷が生じても、道路啓開までに要する時間を飛躍的に短縮することが期待される。

JICMA

《参考文献》

- 1) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編），2007.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所，独立行政法人建築研究所：平成16年（2004年）新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要，2005.
- 3) 国土交通省：国土交通省総合技術開発プロジェクト「社会資本の管理技術の開発」総合報告書 第3章大規模地震発生直後に橋梁の被災度を迅速に把握する技術の開発，2008.
- 4) 堺淳一，運上茂樹：インテリジェントセンサを用いた橋梁地震被災度判定手法の開発に関する研究，土木研究所報告，No.213，2009.
- 5) 堺淳一，運上茂樹：震災を受けた道路橋の応急復旧技術の開発に関する振動台加震実験，土木技術資料，50-9，pp.32-35，2009.

【筆者紹介】

堺 淳一（さかい じゅんいち）
 (株)土木研究所構造物メンテナンス研究センター
 橋梁構造研究グループ
 主任研究員



運上 茂樹（うんじょう しげき）
 国土交通省 国土技術政策総合研究所
 危機管理技術研究センター
 地震災害研究官

