

鉄筋コンクリート橋脚に対する地震時被災度判定手法の開発

堺 淳一* 小林 寛** 運上茂樹***

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の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。現状では、大規模地震時の構造物の被災検知と被災程度の把握、継続使用の可能性などの判断は、専門家による外観からの目視判定に頼らざるを得ないのが現状であり、被災度の定量的な判定基準がないこと、土中・水中、夜間時等の目視が困難なケースが少なくないこと、限られた人員による状況把握には特に被災が多発した場合、多大な時間を要することなどの課題点がある。こうした背景から、構造物の損傷を迅速かつ客観的に検知・判定できる技術の開発が必要とされている。

本研究は構造物の地震被災度を迅速かつ客観的に判定するための技術の開発を目標とし、損傷による構造物の固有周期の変化に着目して、この特性を利用した被災度判定手法の開発を行った。本論文はその結果を報告するものである。

2. 被災度判定システム

本研究で開発するシステムは、道路管理者が大規模地震発生の際の緊急点検パトロールに利用することを想定しており、その性能目標を以下のように設定した。

- ・ 即時の地震被災度判定が可能である。
- ・ センサの製作および設置が安価である。
- ・ センサが小型で設置、取り扱いが容易である。
- ・ 停電に対して非常用のバッテリーを備えている。

地震被災度判定については、種々のセンサを利用することが考えられるが、ここでは実橋梁への設置が容易なこと、地震による橋梁の被害としては、橋脚の被害が多いこと、また、橋脚の被害は地震後の構造物の使用可能性に大きな影響を及ぼ

すことから、主として橋脚の被害を検知することを目的として、後述のように橋脚天端に設置する加速度センサによる手法を用いることとした。

本システムのイメージを図-1に示す。橋脚の損傷度を加速度センサにより検知する子機（被災度判定センサ）を橋脚天端に設置し、子機で得られた橋脚の損傷度を表示する親機は点検パトロールの車中に設置することを想定している。必要に応じて、無線により子機から親機にデータを転送するための中継器も用いられる。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点検パトロール中に、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。

3. 鉄筋コンクリート橋脚模型に対する振動台実験の分析

本研究では、柱基部で曲げ破壊する鉄筋コンクリート（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することにより被災度判定手法を構築することとした。分析対象としたのは図-2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。

図-3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

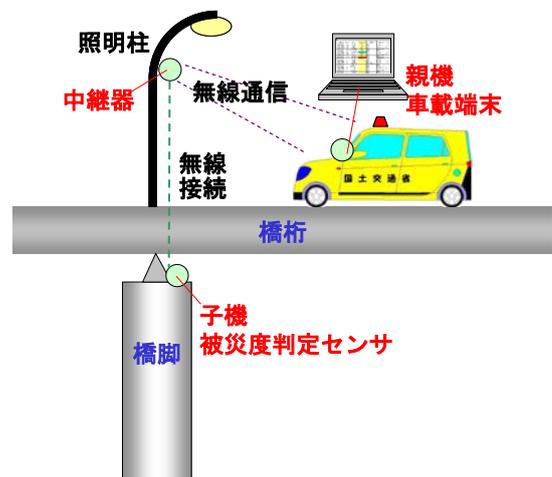
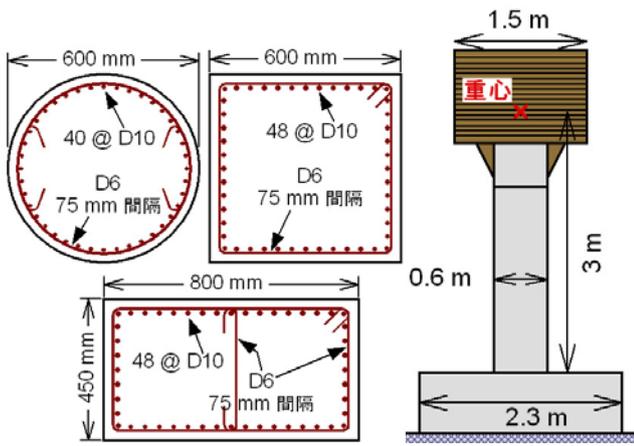


図-1 被災度判定システムの概要



(a) 模型の断面の例 (b) セットアップの例
図-2 RC橋脚模型

卓越周期を橋脚の固有周期として算出し、その変化を求めることとした。この結果も図-3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。

4. 提案する被災度判定手法と判定フロー

4.1 被災度判定手法

本研究では上述のような損傷に伴う構造物の固有周期の変化に基づき構造物の最大応答変位および被災度を推定する手法を提案する。

ここでは、構造物を1質点系の振動モデルに簡略化する。構造物の慣性質量、剛性をそれぞれ M 、 K とすると、振動モデルの固有周期 T は次式で与えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (1)$$

ここで、地震前の健全な状態の固有周期、剛性をそれぞれ T_0 、 K_0 とし、地震後の被災した状態の固有周期、剛性をそれぞれ T_d 、 K_d とすると、被災前後の固有周期の変化は次式で与えられる。

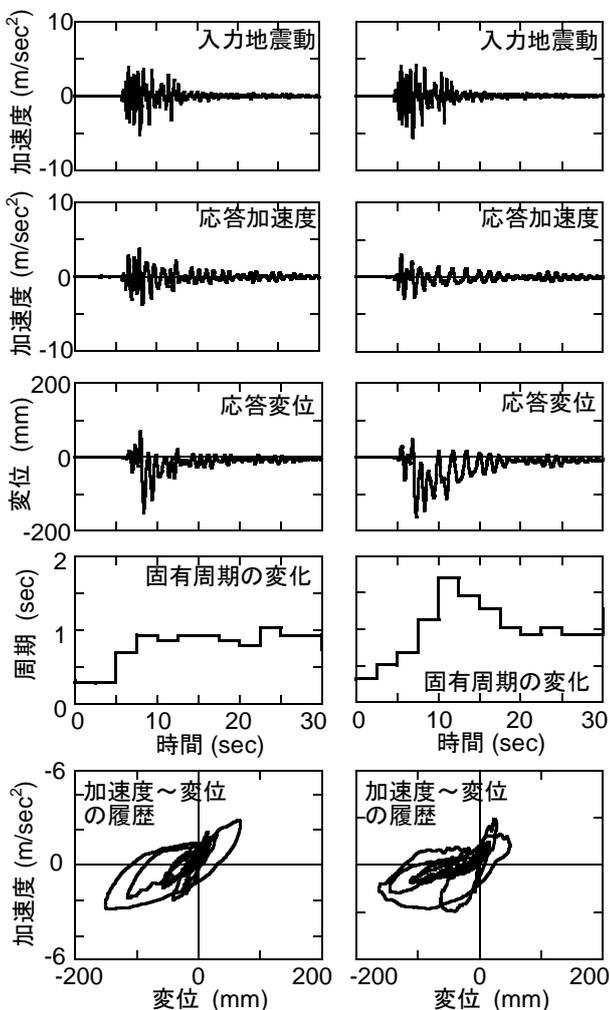
$$\frac{T_d}{T_0} = \sqrt{\frac{K_0}{K_d}} \quad (2)$$

ここで、構造物の復元力特性に弾完全塑性型の骨格曲線を仮定すると、被災前の健全な状態の剛性 K_0 は、降伏荷重 P_y 、降伏変位 d_y を用いて、また、被災した後の剛性 K_d は、一般には構造物の履歴特性に依存するが、これを仮に最大応答変位 d_{r-max} に対する割線剛性で与えると仮定して、式(2)の関係を応答変位に関して整理すると次式のようになる。

$$\mu = \frac{d_{r-max}}{d_y} = \left(\frac{T_d}{T_0}\right)^2 \quad (3)$$

応答塑性率 μ 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。

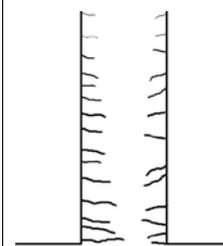
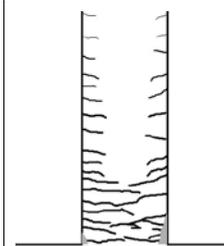
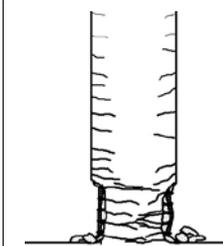
表-1に柱基部で曲げ破壊するタイプのRC橋脚を例に損傷の程度と応答塑性率の関係を示している。これまでの研究によれば、昭和55年以降の基準により設計された柱基部で曲げ破壊するタイプのRC橋脚では、応答塑性率が3程度までは曲げ



(a) 円形模型 (X方向) (b) 長方形模型
図-3 RC橋脚模型の地震応答と固有周期の変化

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

表-1 RC橋脚の損傷と応答塑性率の関係（柱基部曲げ破壊タイプ）

被害の程度	小	中程度	大
損傷のイメージ			
	曲げひび割れの発生	かぶりコンクリートの浮き・軽微な剥落	かぶりコンクリートの剥落 軸方向鉄筋の座屈 帯鉄筋のゆるみ

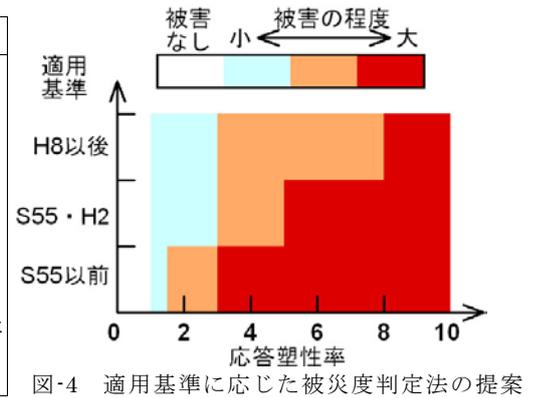


図-4 適用基準に応じた被災度判定法の提案

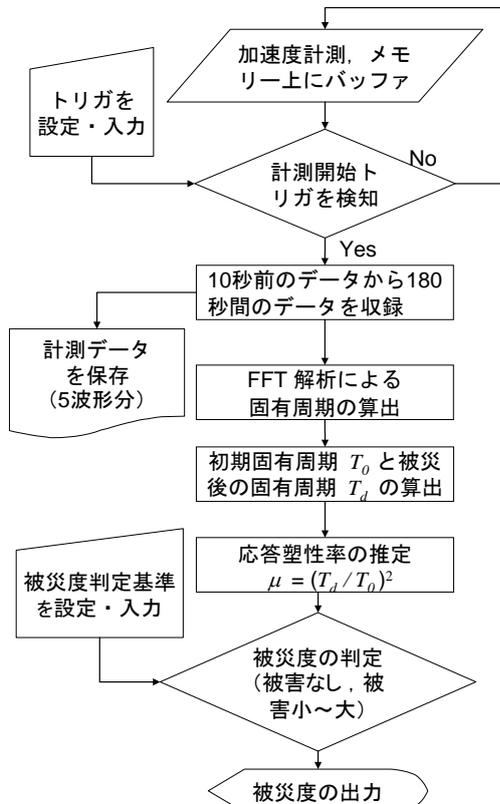


図-5 被災度判定フロー

ひび割れ程度の損傷が生じ、応答塑性率が5～8程度になるとかぶりコンクリートの浮きや軽微な剥落が見られるようになり、これ以上の変形によりかぶりコンクリートの剥落、軸方向鉄筋の座屈、帯鉄筋のゆるみ等の損傷が生じることが明らかになっている。一方、昭和55年以前の基準によるRC橋脚は、これより小さい応答塑性率で損傷が生じる。

これまでの実験データに基づき、被災度判定において被害の程度を「大」と判定する応答塑性率としては、適用基準によって図-4のように設定することとした。実験データやパラメータが十分ではない点もあることから、今後、実被害とのキャ

リブレーション等を行うことにより、調整する必要がある値であるため、ここでは暫定提案とする。

4.2 被災度判定フロー

被災度を判定するフローを図-5に示す。センサは常時、応答加速度を計測し、メモリ上にバッファしている。ユーザーが設定した計測開始トリガを検知すれば、そこからある所定の時間（ここでは、これを遅延時間とよび、10秒とした）だけさかのぼった点をデータ収録開始点として、それから180秒間のデータ（応答加速度）を収録する。固有周期の時系列的な変化を求めめるためのFFT解析の演算時間（以下、FFT演算時間と呼ぶ）については、後述のように5秒とする場合と10秒とする場合に対して精度の比較を行い、推定精度には影響が小さかったこと、演算時間を小さく設定する方が時々刻々の変化をよく表すことができることから、5秒にすることとした。

被災度判定センサでは、計測完了後、FFT解析を行い、被災前の健全な状態の初期固有周期 T_0 と地震後の被災した状態の固有周期 T_d から式(3)に基づいて応答塑性率を推定し、これに基づき橋脚の被災度を判定する。

ここで、 T_0 、 T_d をどのように定義するかが重要である。本研究では、 T_0 はセンサの設置時などに常時微動や交通振動による橋脚の常時振動をあらかじめ計測した結果に基づき定める。 T_d については、地震終了判定トリガを最後に下回った時刻の固有周期とすることとした。

計測開始トリガについては、実橋梁において常時の交通振動に対する計測結果をもとに、片振幅で50galとすることとした。また、地震終了判定トリガについては後述のように100 gal、50 gal、25galとする場合に対して被災度判定手法による

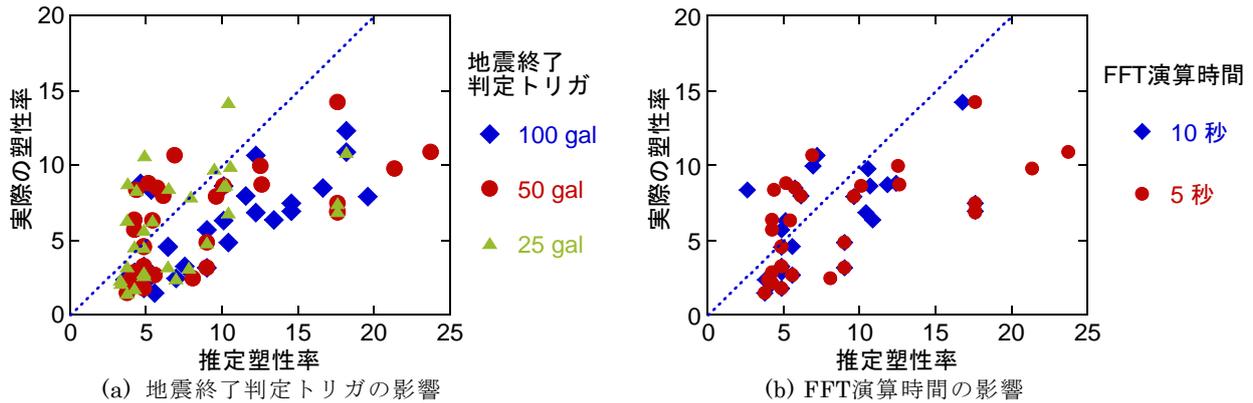


図-6 被災度判定手法の精度

応答塑性率の推定精度の比較を行い、その結果に基づき定めた。

5. 地震被災度判定手法の推定精度

ここでは、3. に示したRC橋脚模型の振動台加震実験の結果に本手法を適用することによりその推定精度を評価することとした。図-6に式(3)による推定応答塑性率の精度を示す。ここでは、地震終了判定トリガを100gal、50gal、25galとする場合とFFT演算時間を5秒、10秒とする場合の精度を比較している。

これらによれば、地震終了判定トリガを大きくすれば応答塑性率を大きめに推定する傾向がある。これは、上述のように応答の減衰につれて固有周期が小さくなる傾向があるため、地震終了判定トリガが大きい場合には応答が減衰しきっていない段階での固有周期を検出するためである。このため、ここでは計測開始トリガと同じ50galを用いることとする。FFT演算時間は、推定精度に及ぼす影響は顕著ではない。FFT演算時間を小さく設定する方が時々刻々の変化をよく表すことができることからこれを5秒とすることとした。

6. 結論

本研究では、構造物の地震被災度を迅速かつ客観的に判定するための手法を提案した。以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) RC橋脚に対する振動台加震実験から、主要動が入力されてRC橋脚が大きく応答するときに固有周期は大きく増加し、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。この特性を利用して、RC橋脚の被災度を判定することが可能である。
- 2) 振動台加震実験から得られた損傷の観察から、適用された設計基準ごとに応答塑性率と損傷の関係を明らかにし、これをもとに1)に示した特性を利用してRC橋脚の被災度を推定する手法を提案した。
- 3) 基部で曲げ破壊するタイプのRC橋脚の振動台実験結果を本手法によって分析し、地震終了判定トリガを大きくすれば応答塑性率を大きめに推定する傾向があること、FFT演算時間の影響は大きくないことを示した。

堺 淳一*



独立行政法人土木研究所
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、博(工)
Dr. Junichi SAKAI

小林 寛**



阪神高速道路株式会社大阪
管理部調査設計グループ
(前 独立行政法人土木研究
所耐震研究グループ耐震
チーム主任研究員)
Hiroshi KOBAYASHI

運上茂樹***



独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究
センター橋梁構造研究
グループ上席研究員、工博
Dr. Shigeki UNJOH