

# 論文 Pushover 解析と振動モニタリングによる RC 橋脚の地震被災度の即時判定手法について

古川 愛子\*<sup>1</sup>・崔 準祐\*<sup>2</sup>・大塚 久哲\*<sup>3</sup>

**要旨:** 本研究では、地震時の被災形態として橋脚基部の曲げ破壊が支配的となる RC 橋脚を対象に、地震時の振動モニタリングによって得られる橋脚の最大相対変位から、橋脚基部の曲げ破壊の程度を即時に判定する手法を提案する。提案手法は、Pushover 解析により、橋脚の最大相対変位を橋脚基部の曲率の最大応答塑性率に変換するための関係を事前に求めておくことで、地震直後の迅速な被災度判定を実現するものである。橋梁全体モデルを用いた数値シミュレーションによって、提案手法の有効性を検証した。

**キーワード:** RC 橋脚, 地震被災度, 即時判定, Pushover 解析, 振動モニタリング, 塑性率

## 1. はじめに

大地震が発生した際、防災上の中核となる道路橋などのインフラの被災度を即座に判定することは、救助活動や震後対策の策定において非常に重要である。現状では、大地震後の構造物の被災度判定は、専門家による目視によって行われている。被災度の定量的な判定基準がないことや、被災箇所によっては目視の出来ない場合があること、さらに人為的な方法では迅速性に欠けるといった問題がある<sup>1)</sup>。目視によらず、即座に定量的な被災度を判定する手法の開発が望まれている。目視に代わる被災度判定手法として、近年、MEMS と呼ばれる半導体技術を用いた安価な加速度センサと汎用マイコンボードを利用した振動モニタリングが注目を浴びている。構造物に取り付けたマイコンボード上で、加速度のリアルタイム計測と数値処理による被災度判定を行い、判定結果を無線通信によって管理者に伝達するシステムの開発などが行われている<sup>1),2)</sup>。即時性において大変優れており、定量的な被災度判定指標の構築が課題である。

被災度判定指標に関する既往の研究には、地震前後の固有周期の変化を利用するもの<sup>1)</sup>と、復元力特性を利用するものがある<sup>3),4)</sup>。以下、橋脚の事例について述べる。

固有周期の変化を利用する手法は、構造物が損傷すれば剛性が低下し、固有周期が低下することを利用するものである。橋脚を単純な 1 自由度系に置き換え、復元力特性を完全弾塑性と仮定すれば、地震前後の固有周期の比率から最大応答塑性率が得られる<sup>1)</sup>。しかし、橋脚の復元力特性は必ずしも完全弾塑性とは限らず、橋梁毎に復元力特性は異なるため、推定された最大応答塑性率の大小によって橋脚の被災度の順位付けをするのは難しいと考えられる。また、固有周期は剛性の 1/2 乗に反比

例するため、かなり損傷が進み大きな剛性低下が起こらない限り、有意な固有周期の変化は見られないという問題も考えられる。

復元力特性を利用する手法は、橋脚を 1 自由度系に置き換えたとき、橋脚上端の絶対加速度と相対変位の関係が復元力特性に相当することを利用するものである<sup>4)</sup>。時刻同期をとった 2 つの加速度計を橋脚上端と基部に設置すれば、上端の絶対加速度は直接計測され、相対変位はマイコンボード上で差分・積分することにより得ることができる。復元力特性は時々刻々と変化する塑性化の程度を表す重要な指標であるが、情報量の多い指標でもある。塑性率のような単純な指標で 1 次判定を行った上で、危険と判断された橋脚についてのみ復元力特性を詳細に分析 (2 次判定) するのが効率的であると思われる。

以上を踏まえ、本研究では、地震時の被災形態として橋脚基部の曲げ破壊が支配的となる RC 橋脚を対象に、1 次判定のための最大応答塑性率を推定する手法を提案する。時刻同期の取れた 2 つの加速度センサによって得られる橋脚の最大相対変位の利用を想定する。橋脚を 1 自由度系と見なしたときの応答塑性率は変位の応答塑性率であるが、耐震設計では橋脚断面の曲率の最大応答塑性率によって照査がなされていることを鑑み、基部の曲率の最大応答塑性率を被災度指標とする。対象橋梁の Pushover 解析によって事前に相対変位と基部の曲率の塑性率の関係を構築しておくことで、地震時に計測される最大相対変位から基部の曲率の最大応答塑性率を推定する手法を提案する。橋梁全体モデルを用いた数値シミュレーションによって、提案手法の有効性を検証する。加速度を 2 階積分して変位を求める際の精度の検討については、既往の研究<sup>3),4)</sup>に譲り、本研究の対象としない。

\*1 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教 博(工) (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門学術研究員 博(工) (非会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

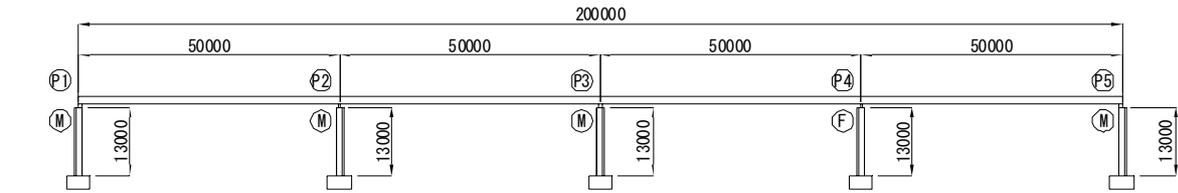


図-1 対象橋梁の概略図 (単位: mm)

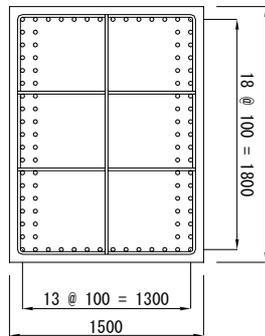


図-2 橋脚の断面図 (単位: mm)

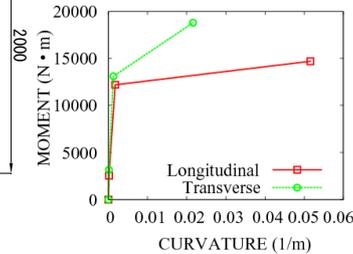
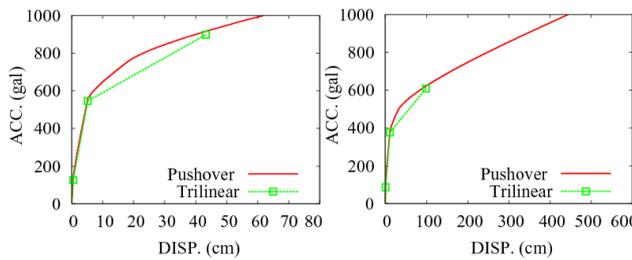
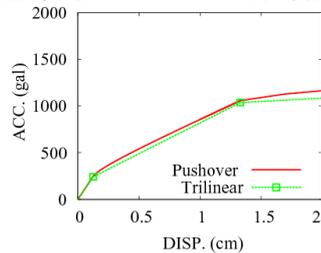


図-3 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係



(a) 橋脚高さ 13m

(b) 橋脚高さ 19.5m



(c) 橋脚高さ 6.5m

図-4 Pushover 解析により求めた地動加速度と橋脚の相対変位の関係 (橋軸直角方向載荷時, P2 橋脚)

## 2. 数値解析による検討

### 2.1 解析対象橋梁

図-1に検討の対象とした4径間連続鋼床版箱桁橋の概略図を示す。橋長は200m、各支間長は50mであり、地盤はI種地盤と仮定した。橋脚は全橋脚ともRC単柱T型橋脚であり、橋脚高は13m、断面は2.0m×1.5mの矩形断面を想定し、道路橋示方書耐震設計編<sup>5)</sup>に準じて試設計を行った。図-2に橋脚の断面を示す。

解析モデルは、橋脚及び桁は梁要素で、支承はばね要素でモデル化した。橋脚の非線形復元力特性はファイバーモデルではなく武田モデルの曲げモーメント-曲率関係で表現した。橋脚上の全ての梁要素に対して、平面保持を仮定し、軸力毎に橋脚断面の曲率と曲げモーメントの関係を求め、コンクリートのひび割れ、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊(終局)の3折れ点からなるトリリ

ニアモデルで近似した。例として、自重により最も大きい初期軸力が作用する橋脚基部の断面の曲げモーメント-曲率関係を図-3に示す。支承の支持条件は、橋軸直角方向は全て固定、橋軸方向はP4支承を固定、残りの支承を可動とした。橋脚基部の支持条件は固定とし、地盤ばねは考慮していない。

減衰はレーリー減衰とし、固有値解析により得られた有効質量比の卓越する主要なモードを用いた。モード減衰定数をひずみエネルギー比例型減衰で計算する際に用いる各部材の減衰定数は、道路橋示方書耐震設計編<sup>5)</sup>を参考にし、橋脚、主桁、支承部を全て2%とした。

また、橋脚高が異なれば、橋脚上端の基部に対する相対変位(以降、橋脚の相対変位と記す)や橋脚基部に生じる曲げモーメントは異なり、橋脚上端の絶対加速度-相対変位関係(以降、変位の復元力特性と記す)と橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係(以降、曲率の復元力特性と記す)も異なると考えられる。そこで、橋脚高を1.5倍(19.5m)、0.5倍(6.5m)としたモデルについても検討を行った。橋脚高以外は全て同じである。

### 2.2 Pushover 解析

#### (1) 解析概要

橋梁全体の地震時挙動は、様々な振動モードを有する複雑なものであるが、橋脚の応答に着目した場合は、比較的単純な1次モードが支配的であると考えられる。よって、静的に荷重を漸増載荷するPushover解析によって、地震時の橋脚の相対変位から基部の損傷を推定するための関係を構築できるのではないかと考えた。

Pushover解析では、全質点に地動加速度による慣性力を0から2000galまで10gal刻みで漸増載荷し、各ステップの橋脚の相対変位と基部の曲率を求めた。慣性力の載荷方向は1方向とし、橋軸方向と橋軸直角方向を別々に載荷した。橋軸方向載荷時は、橋軸方向の相対変位と橋軸直角方向回りの曲率を求めた。橋軸直角方向入力時は、橋軸直角方向の相対変位と橋軸回りの曲率を求めた。

#### (2) 地動加速度と橋脚の相対変位の関係

図-4に、橋軸直角方向載荷時のP2橋脚の応答を例にとり、地動加速度と橋脚の相対変位の関係を実線で示す(凡例: Pushover)。橋脚基部においてコンクリートのひびわれ、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊(終局)が発生した3点を結びトリリニアで近似したのも併せて示す(凡例: Trilinear)。ここで、橋脚基部が降伏するとき

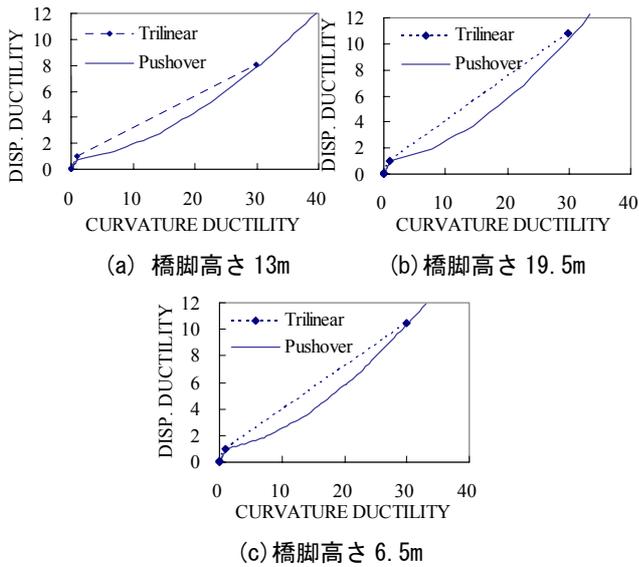


図-5 Pushover 解析により求めた橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係 (橋軸方向載荷時, P4 橋脚)

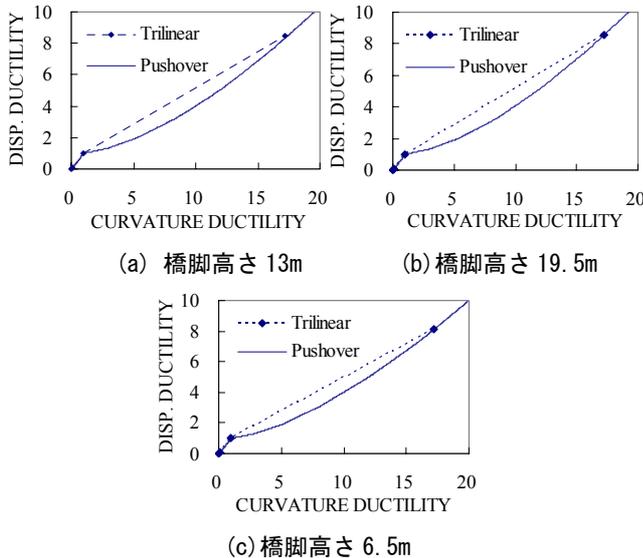
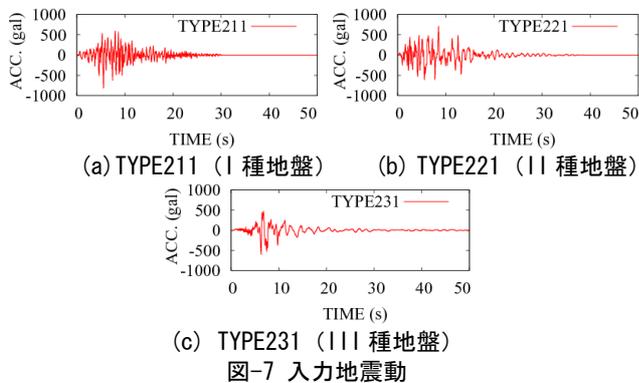


図-6 Pushover 解析により求めた橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係 (橋軸直角方向載荷時, P2 橋脚)



の相対変位を降伏変位と定義する。図-4 の関係は、橋脚を 1 自由度系に置換したときの変位の復元力特性の骨格に相当するものである。

図-4 より、復元力特性は必ずしも完全弾塑性で近似できるような単純な形ではなく、橋脚断面が同一であっても橋脚高によって勾配が異なり、ひびわれ・降伏・終局に至るときの相対変位も大きく異なっている。よって、完全弾塑性を仮定して塑性率を求める方法は、塑性率を精度良く推定できるとは限らないと思われる。なお、図は省略するが、橋軸直角方向載荷時の他の橋脚および橋軸方向載荷時の P4 橋脚についても同様の傾向が見られた。橋軸方向載荷時の P4 橋脚以外の橋脚は、可動支承であるため 2000gal を載荷しても降伏に至らなかった。

### (3) 橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係

橋脚の相対変位を降伏変位で除したものを相対変位の塑性率と定義する。橋軸方向載荷時の P4 橋脚と橋軸直角方向載荷時の P2 橋脚を例にとり、Pushover 解析の各ステップにおける相対変位の塑性率と曲率の塑性率の関係を図-5, 6 に示す (凡例: Pushover)。原点、ひびわれ、降伏、終局時を 3 折れ線で結んだものも示す (凡例: Trilinear)。ひび割れ時の塑性率は小さな値のため、原点に重なって見えている。(2) と同様に他の橋脚についても同様の傾向が見られた。

本研究では、図-4 に示す降伏変位と図-5, 6 に示す変位と曲率の塑性率の関係を用いて、地震時の橋脚の最大相対変位から基部の曲率最大応答塑性率を推定できるのではないかと考えた。なお、図-5, 6 の曲線が降伏以降 2 次曲線的に増加しているのは、地動加速度が増加するにつれて塑性化に至る要素が徐々に増えるためであると考えられ、トリリニア近似は近似の精度が良好でないことがわかった。

## 2.3 動的解析

### (1) 解析概要および入力地震動

動的解析により、橋脚の相対変位と基部の曲率を求めた。解析に用いた地震動は、道路橋示方書耐震設計編<sup>5)</sup> の I, II, III 種地盤用のレベル 2 地震動 (TYPE211, TYPE221, TYPE231) の 3 波 (図-7) である。対象橋梁は I 種地盤を想定して試設計を行っているが、ここでは提案する被災度判定手法の有効性の検証を目的としているため、周波数特性の異なる地震動を用いた。Pushover 解析と同様に、橋軸方向と橋軸直角方向に 1 成分ずつ入力した。

### (2) 橋脚の相対変位と基部の曲率の復元力特性

図-8 に、橋脚高 13m のモデルの P2 橋脚を例に、橋軸方向に TYPE231 を入力したときと、橋軸直角方向に 3 通りの地震動を入力したときの復元力特性を示す。左側に相対変位の復元力特性を、右側に基部の曲率の復元力特性を示す (凡例: 各地震動名)。比較のため、Pushover 解析で得られた地動加速度-相対変位の関係と、入力データとして与えた曲げ剛性の骨格を示す (凡例: Skelton)。

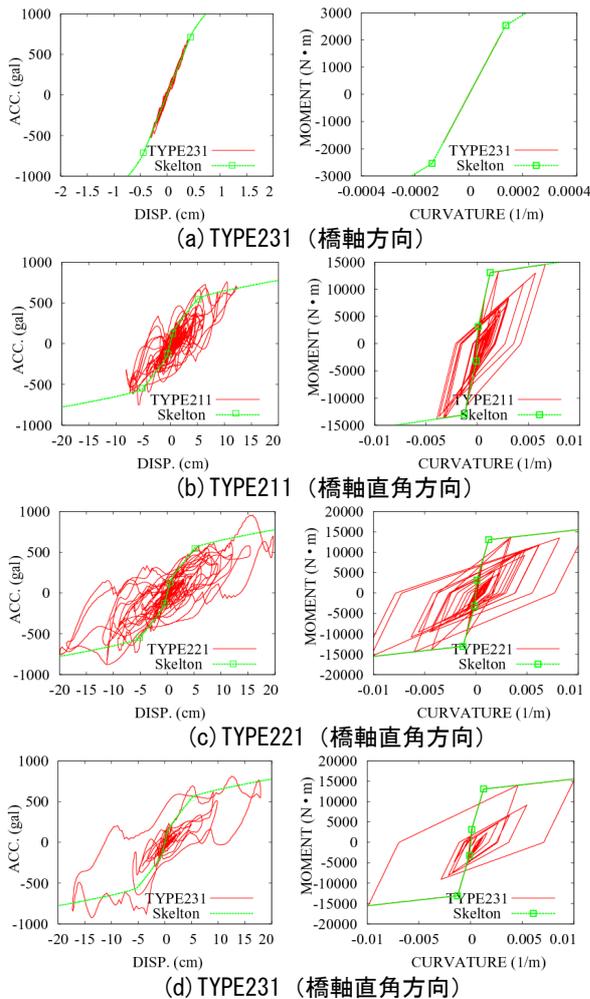


図-8 橋脚相対変位(左)と基部の曲率(右)の復元力特性(橋脚高さ13m, P2橋脚)

図-8(a)の復元力特性はほぼ線形であるが、この理由は橋軸方向が可動支承であり上部構造物の慣性力を負担しないためである。ひびわれが生じていないにも関わらず図-8(a)の左側のグラフが完全な直線でないのは、粘性減衰の影響である。一方、図-8(b)-(d)の復元力特性は線形ではなくループを描いているが、この理由は橋軸直角方向が固定支承であり上部構造物の慣性力を負担するため大きな水平力と曲げモーメントが上端と基部に発生しているからである。

全てのケースの結果を図示していないが、いずれの橋脚高、地震動、地震動の入力方向に対しても、相対変位と曲率の復元力特性は図-8のように形状が良く似ていることがわかった。また、Pushover解析で得られた地動加速度-相対変位の関係は、動的解析の相対変位の復元力特性の骨格に対応していることが確認できた。

### (3) 橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の時刻歴

図-9の左側に橋脚の相対変位の応答塑性率、右側に基部の曲率の応答塑性率の時刻歴を示す。橋脚基部の曲率の応答塑性率のほうが相対変位の応答塑性率より2倍程度大きい、波形形状は非常に良く似ていることが確認

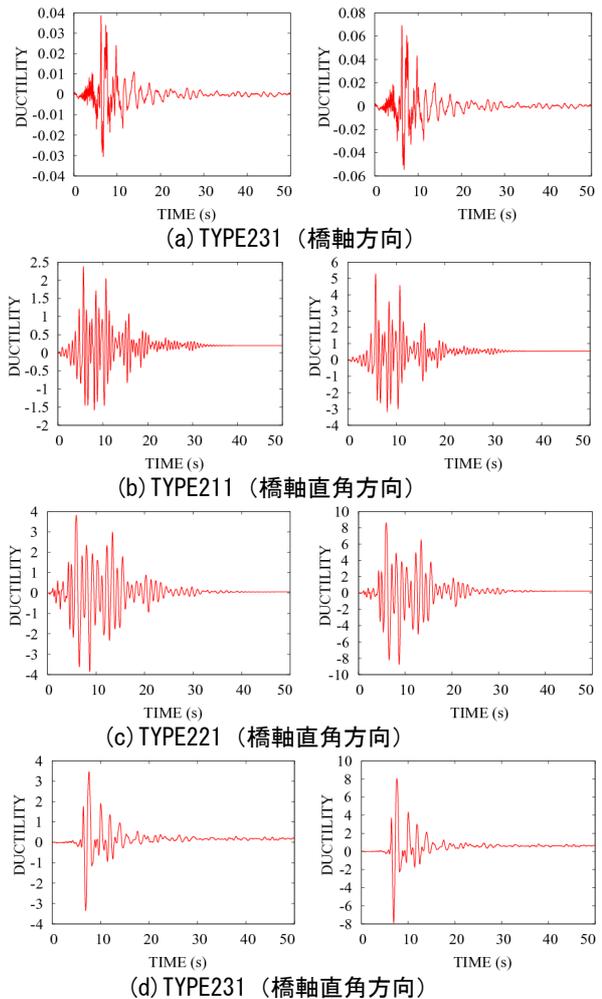


図-9 橋脚相対変位(左)と基部の曲率(右)の応答塑性率の時刻歴(橋脚高さ13m, P2橋脚)

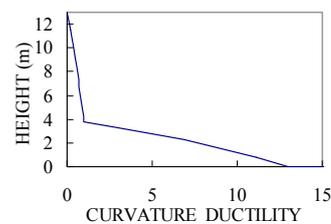


図-10 橋脚の曲率の塑性率と橋脚高さの関係(TYPE211(橋軸方向), 橋脚高さ13m, P4橋脚)

できる。図-10に、最も橋脚基部の塑性化が進んだTYPE211を橋軸方向に入力したときのP4橋脚を例として、橋脚高さと曲率の応答塑性率の関係を示す。いずれのケースにおいても、橋脚の塑性化は基部に集中しており、上部はほとんど塑性化していない。そのため、橋脚全体の塑性化程度を示す変位の応答塑性率は基部の応答塑性率より小さくなったものと考えられる。

### (4) 橋脚上端の変位と基部の曲率の塑性率の関係

橋軸方向加振時のP4橋脚と橋軸直角方向加振時のP2橋脚を例にとり、橋脚の相対変位と基部の曲率の最大応答塑性率の関係を図-11, 12に点で示す(凡例:Dynamic)。3つの点はTYPE211,TYPE221,TYPE231の3つの地震動

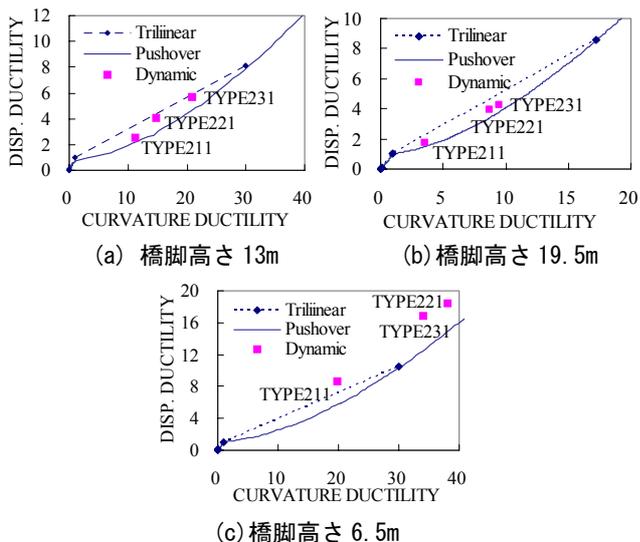


図-11 橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係  
(橋軸方向入力時、P4 橋脚)

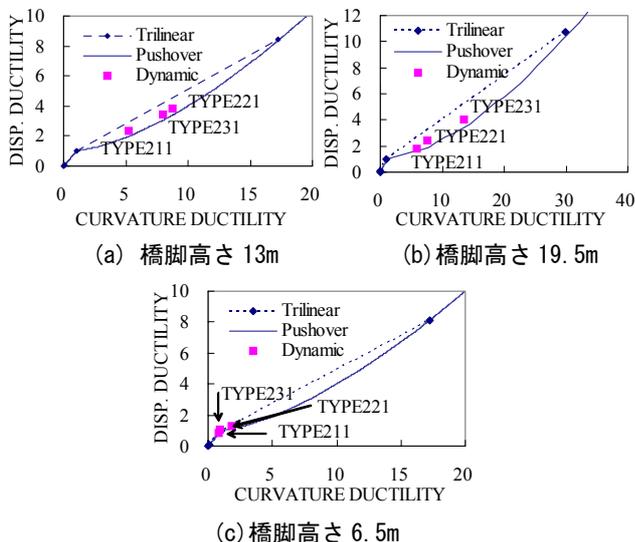


図-12 橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係  
(橋軸直角方向入力時、P2 橋脚)

に対応している。比較のため、Pushover 解析で求めた関係を実線で、ひびわれ、降伏、終局の3折れ点のトリリニアで近似したものを破線で示す。

図-11 より、Pushover 解析と動的解析の結果は概ね良い対応を示していることが確認できる。最大応答塑性率が小さい場合(図-11(c))は、動的解析の結果は Pushover 解析結果の曲線上にほぼ乗っており、最大塑性率が大きくなるほど復元力特性が履歴を描かない静的非線形解析で履歴を描く動的非線形性を再現することが困難となり、Pushover 解析結果の曲線から遠ざかる傾向が見られるが、概ね良好な精度で一致している。以上のことは、地震時の橋脚の最大相対変位を計測し、Pushover 解析によって事前に計算しておいた降伏変位で割れば最大変位応答塑性率が求まり、さらに Pushover 解析で求めておいた図-11 の関係から基部の曲率の最大応答塑性率が推定できる可能性を示唆している。頁数の制約上図示しな

いが、減衰定数を 0~2% の範囲で変化させたところ、この範囲では減衰定数に関わらず同様の傾向が得られた。

## 2.4 提案する RC 橋脚の被災度判定手法のまとめ

### (1) 事前解析

- 橋梁の解析モデルを構築する。本研究では一般的な耐震設計で用いる梁要素を想定している。

- Pushover 解析により慣性力を漸増载荷する。
- 橋脚基部が降伏する時の橋脚の相対変位を降伏変位とする。相対変位と基部の曲率の塑性率の関係を求める。

### (2) 事後解析

- 地震最中の橋脚上端と基部の加速度をモニタリングし、最大相対変位を得る。

- 事前解析により求めた降伏変位で割ることで、変位の最大応答塑性率を得る。

- 事前解析により求めた変位と曲率の塑性率の関係から、曲率の最大応答塑性率を推定し、被災度指標とする。

## 3. 実在する曲線橋梁を用いた検証

### 3.1 解析概要

2 章で用いた解析対象橋梁は、主桁が直線状で橋脚基部が固定の比較的単純な橋梁であった。また、入力地震動を橋軸・橋軸直角方向に 1 方向ずつ入力していた。本章では、実在する曲線橋梁を用いて、より複雑な条件下でも提案手法が有効であるかどうかを検証する。

### 3.2 解析対象橋梁

対象橋梁を図-13 に示す。上り線と下り線の 2 つの橋梁からなる高速道路のジャンクション部の 4 径間連続鋼箱桁曲線橋である。全長は内曲側が 230m、外曲側が 250m、曲率半径は内曲側が 100m、外曲側が 120m である。橋脚は RC 橋脚と鋼製橋脚からなり全部で 8 基である。RC 橋脚である P2、P4 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係を図-14 に示す。支承は、上部構造の接線直角方向は全橋梁固定で、接線方向は P2 橋脚の内曲側および P5 橋脚の外曲側は固定、他は可動である。橋脚基部は 6 自由度の地盤ばねで支持されている。

### 3.3 Pushover 解析の慣性力载荷方法と入力地震動

Pushover 解析では 3 成分に同じ慣性力を载荷した。

動的解析では、対象橋梁建設地点の地盤種別がⅢ種地盤であるため、兵庫県南部地震の際にⅢ種地盤の神戸ポートアイランドで観測された 3 成分(図-15)を用いた。EW、NS、UD 成分をそれぞれ X、Z、Y 方向に入力した。

### 3.4 解析結果

内曲側の P2 と P4 橋脚の橋軸方向の結果を例として示す。変位は橋軸方向成分に座標変換したものを示す。図-16 に、橋脚の相対変位と基部の曲率の応答塑性率の時刻歴を示す。橋脚の相対変位は、上端と基部の変位応答の差を取り求めた。両者の波形形状は良く似ている。

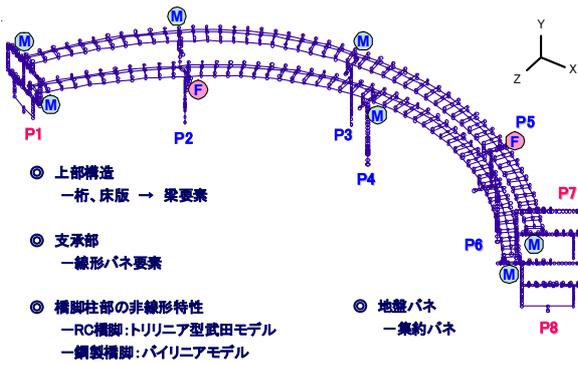


図-13 解析モデル図

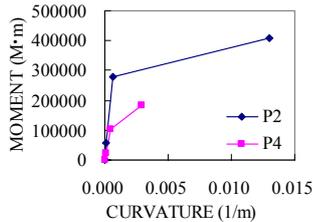


図-14 P2, P4 橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係

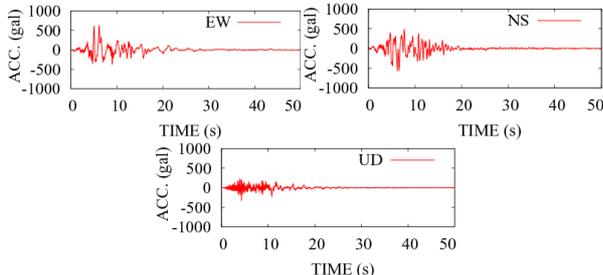
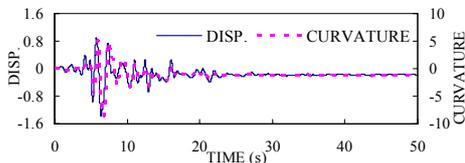
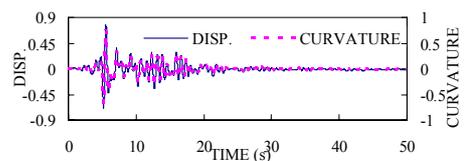


図-15 入力地震動

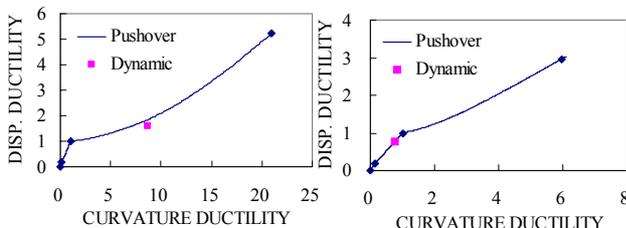


(a) P2 橋脚



(b) P4 橋脚

図-16 橋脚の相対変位と基部の曲率の応答塑性率時刻歴



(a) P2 橋脚

(b) P4 橋脚

図-17 橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係

図-17 に、Pushover 解析と動的解析で得られた橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係を示す。動的解析結果は Pushover 解析で得られた曲線上にほぼ載っており、

振動特性の複雑な橋梁に 3 成分を入力した場合であっても、提案手法によって基部の曲率の最大応答塑性率を良好な精度で推定できた。

なお、地盤の回転ばねを考慮しているため、相対変位は基部の回転の影響も差し引いて求めるべきであるが、本研究では回転の計測を想定していないため、回転の影響を無視した。基部の回転量が上端の並進量に比べて小さいため、良好な推定精度が得られたと思われる。

#### 4. まとめ

Pushover 解析による事前解析と地震最中の振動モニタリングを組み合わせた被災度判定手法を提案した。レベル 2 地震のように非線形化の領域と程度が大きい場合に、復元力特性が履歴を描かず減衰が存在しない静的非線形解析によって、復元力特性が履歴を描き減衰も存在する動的非線形性を必ずしも精度よく再現できるとは限らないが、Pushover 解析により得られた橋脚の相対変位と基部の曲率の塑性率の関係を用いて、動的解析により得られた橋脚の最大相対変位から基部の曲率の最大応答塑性率を良好な精度で推定することができた。なお、推定精度は、モデル化の精度に依存するため、実橋梁の振動特性を再現できるようにモデルアップデートをすることが望ましい。また、本研究の手法は、接合部からの主筋の抜け出しによる変形やせん断変形を考慮していないために、実際の変形を過小評価する恐れがある。今後、モデル化の改良と、実験や地震被災構造物のデータによる検証が必要である。

#### 謝辞

本研究は平成 21 年度科学研究費補助金の援助を受けた。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 小林寛, 運上茂樹, 加納匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 2005
- 2) 小野祐輔・清野純史・小林望・新垣芳一・高橋天平: 小型センサーを用いた構造物の地震被害の即時判定法の提案, 土木学会地震工学論文集, Vol.30, 2009
- 3) 本多弘明, 堀宗朗: 地震被害応急判定を目的とした構造物の復元力特性の計測方法の開発, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009
- 4) 竹淵悟, 小国健二: 加速度計のみを用いた構造物の復元力特性計測の可能性の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.53, I-032, 2008
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002