

道路橋の地震時被害度指標に関する一検討

A study on the earthquake damage index of road bridges

大日本コンサルタント(株) ○正会員 吉岡 勉 (Tsutomu YOSHIOKA)
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi SATO)
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki NISHI)
 大日本コンサルタント(株) 正会員 原田政彦 (Masahiko HARADA)
 大日本コンサルタント(株) 正会員 田崎賢治 (Kenji TASAKI)

1. はじめに

1.1 研究背景

大規模地震が発生した際、リアルタイムに橋梁の被害を精度良く推定することは、橋梁の応急復旧を迅速に行い道路の機能回復を図るために重要である。例えば、JR では旧国鉄時代から計測周波数範囲を 0.1~5Hz とした地表面地震波の最大加速度 (5HzPGA) を警報基準値として使用し、東京ガスでは速度応答スペクトルの固有周期 0.1~2.5 秒区間の積分値である SI 値を警報指標としている¹⁾。

道路橋の被害度指標について、兵庫県南部地震以降、いくつかの研究^{2)・3)} がなされているが、様々な特性を持った橋脚に対して被害と相関性の高い汎用的な指標を見いだせない課題がある。例えば、2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震では、宮城県栗原市築館において震度 7 を記録し、K-NET の観測波の最大加速度は 2933gal にも及ぶが、写真-1 に示すように昭和 55 年道路橋示方書以前に建設された無補強の橋梁で被害が生じていないものが見られる。また、地震動という構造システムへの入力情報から被害という応答情報を精度良く推定するため、構造物の固有周期特性を指標に取り入れた研究があるが、一般性を失うといった難点があり、実用化に至っていないのが現状である。

1.2 目的と実施方法

以上のことを背景として、本研究では道路橋の橋脚に対象を限定して、被害と相関性が高く、且つ、実用性のある地震動指標の開発を目的に解析的検討を行った。

具体的には、まず、北海道内の RC 橋脚の固有周期特性等の調査を行い、橋脚高さ区分別に平均的な固有周期を

有する橋脚 5 基を選定した。次に、入力エネルギーの累積量が一定で位相差分 (時間的集中度) が異なる模擬地震波を 8 波作成し、PGA や SI 値などの各強度指標を整理した。作成した模擬地震波を選定した橋脚 5 基の単柱モデルに入力して動的解析を行い、被害度を算出して地震動強度指標との相関性を分析した。また、東北地方太平洋沖地震による宮城県内の橋脚被害のデータを用いて、各地震動強度指標の適用性の確認を行った。

2. 北海道内の道路橋 RC 橋脚の特性

2.1 RC 橋脚の固有周期特性

本検討に用いる対象橋脚の選定を目的として、北海道内の道路橋のうち、けた橋 45 橋 (橋脚 313 基) を抽出し、橋脚高と固有周期の関係などを調査した (図-1)。いずれの橋脚も平成 14 年道路橋示方書を適用基準としたフルスペックの耐震補強設計が行われており、その設計計算書より橋脚高や固有周期、保有水平耐力等を抽出整理した。固有周期は降伏剛性を用いた場合の固有値解析結果である。

調査結果の一例として、橋脚高と固有周期のヒストグラムを図-2 に示す。橋軸方向では、橋脚高 5~15m で固有周期 0.4~0.8 秒程度の橋脚が比較的多く建設されている。橋軸直角方向では固有周期 0.2~0.5 秒程度の橋脚が多く、壁式橋脚を多く含んでいるため、橋軸方向より短周期となっている。

2.2 対象橋脚の選定

次に、5m ピッチごとの橋脚高別に固有周期を整理し、



写真-1 被害が極小さい年代の古い無補強の橋梁 (宮城県築館; 震度 7)

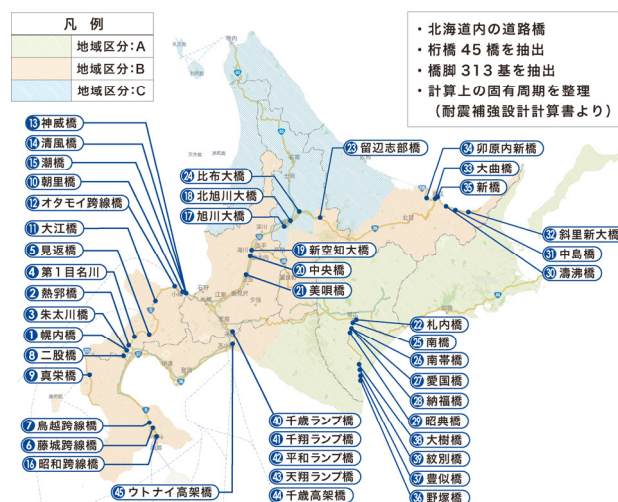
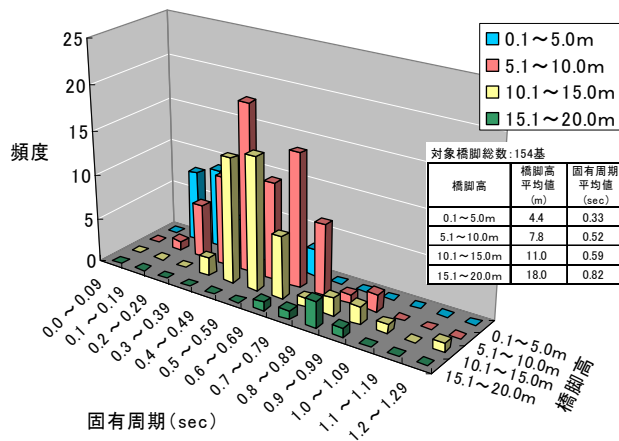
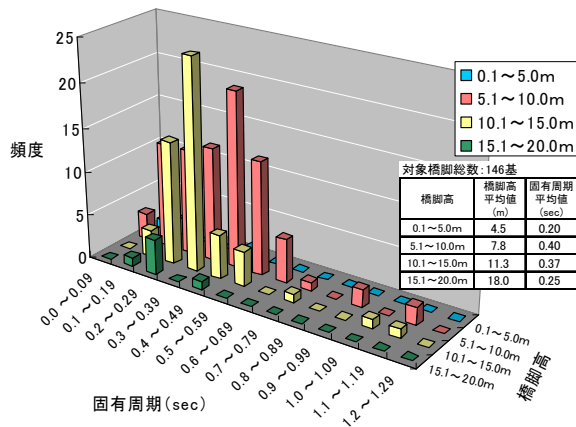


図-1 調査対象とした北海道内の道路橋



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-2 橋脚高と固有周期のヒストグラム

表-1 選定した橋脚

橋脚	方向	支持 条件	適用 耐震基準	橋脚高さ (m)	固有周期 (sec)	周期特性 の分類
1	LG	M	S55道示	4.9	0.348	短周期
2	LG	F	S48道示	6.2	0.879	中周期
3	TR	F	S48道示	6.4	0.362	短周期
4	TR	FF	S55道示	14.5	0.354	短周期
5	LG	MF	S55道示	16.5	1.207	中周期

※LG: 橋軸方向, TR: 橋軸直角方向

各平均値に該当する橋脚を5基選定して動的解析の対象とした(表-1)。選定した橋脚はいずれもRC壁式橋脚であり、橋脚基部の耐震補強が今後予定されている橋脚である。固有周期が0.3秒台の橋脚1, 3, 4を短周期型, 0.8秒より長い橋脚2, 5を中周期型に分類した。

3. 模擬地震波の作成

各震源域で発生する地震動は、異なる振動特性が発現する。ここでは、地震動応答による被害度指標を検討するため、入力地震波のエネルギー総量を一定として模擬地震波を作成した。作成方法は桑村らによる研究⁴⁾を参考に、図-3に示す振幅スペクトルを共通として、位相差分布の標準偏差 σ を $0.02 \times 2\pi \sim 0.2 \times 2\pi$ の範囲で変えた8通りの位相スペクトル(図-4)を作成し、両者をフーリエ逆変換により特性の異なる地震波を作成

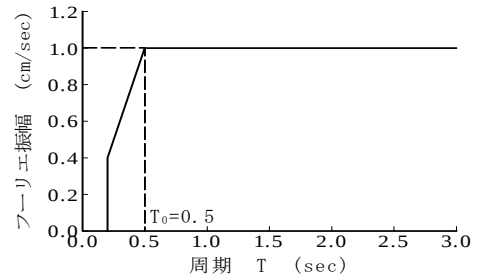


図-3 フーリエ振幅スペクトル

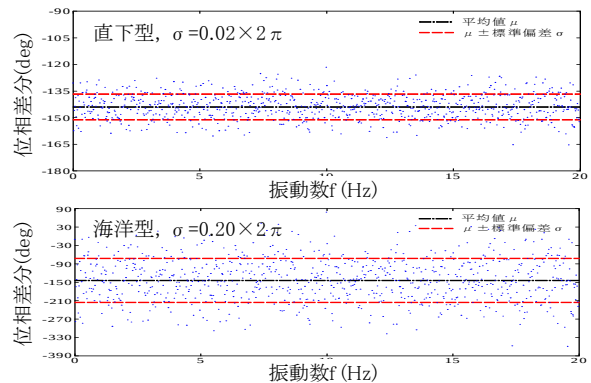


図-4 フーリエ位相スペクトル

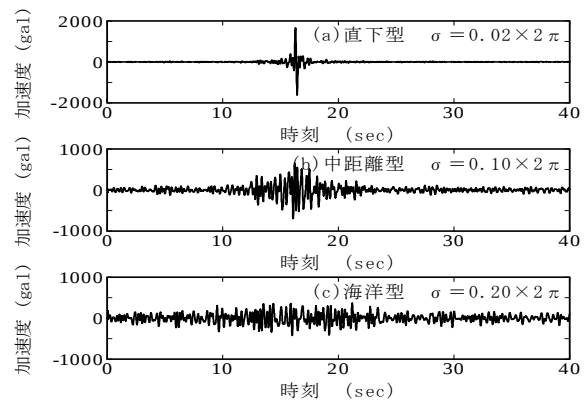


図-5 模擬地震波の時刻歴波形

した。位相差分布の標準偏差を小さくしたケース($0.02 \times 2\pi$)が主要動の継続時間の短い直下型であり、大きくしたケース($0.20 \times 2\pi$)が継続時間の長い海洋型である。作成した模擬地震波8波のうち代表的な3波の時刻歴波形を図-5に示す。

4. 動的解析による橋脚の被害度指標の検討

4.1 解析方法

選定した橋脚5基について、図-6のように上部構造の分担重量を1質点とした単柱モデルによる線形動的解析を行った。線形解析としたのは、曲げ破壊型橋脚の場合に降伏しているか否かの判定を重視しようとした意図による。入力する地震波は、前述の模擬地震波8波のほか、実地震波として道路橋示方書のレベル1地震動3波およびレベル2地震動タイプIの3波を加えた計14波を用いた。解析結果より、発生する最大断面力と保有水平耐力との比を算出し、被害度とした。この被害度と地

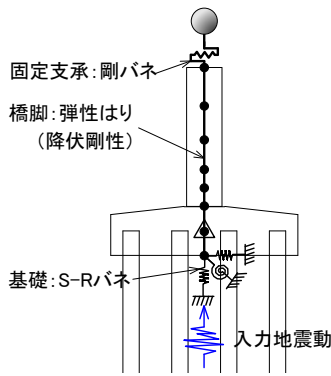


図-6 単柱モデルによる線形動的解析

震動指標との相関性を分析した。

4.2 地震動指標

比較検討する地震動指標は、最大加速度 PGA 、エネルギー入力率⁴⁾ および SI 値（速度応答スペクトルの固有周期 $0.1 \sim 2.5$ 秒区間の積分値）とした。エネルギー入力率とは、加速度パワーの時間的な集中度を表すものであり、最大加速度パワー密度を全加速度パワーで除した次式に示す無次元化最大入力率を指標の一つに用いることとした。

$$\Delta I_{E_{\max}} / I_{E_0} = \max_{t_1} \left\{ \int_{t_1}^{t_1+dt} a_g^2 dt \right\} / \int_0^{t_0} a_g^2 dt \quad (1)$$

ここで、 a_g は地動加速度、 $\Delta I_{E_{\max}}$ は最大加速度パワー密度で定義される最大入力率、 I_{E_0} は地動終了までの全加速度パワーである。

また、RC 橋脚の固有周期特性を考慮して速度応答スペクトルの積分範囲を変更した次式に示す固有周期依存型 SI 値²⁾ も指標の一つに加えた。

$$SI_{n,p} = \frac{1}{(\beta - \alpha)T} \int_{\alpha T}^{\beta T} Sv(\tau, h) d\tau \quad (2)$$

ここで、 S_v は速度応答スペクトル、 τ は積分変数（固有周期）、 h は減衰定数（0.05 とした）、 T は構造物の弾性固有周期（1.0 秒とした）、 α, β は定数（ここでは文献2に準じて $\alpha=1.0$ 、 $\beta=2.8$ とした）。

4.3 短周期橋脚の検討結果

短周期橋脚の場合の地震動指標と動的解析による応答値との相関図を図-7 に示す。せん断破壊型が多いため、縦軸はせん断耐力比としている。同図より、最大入力率では入力率が 0.2 以下の小さいところに実地震波のプロットが集中し、相関性が良好とはいえない。また、 SI 値は模擬地震波のプロットがやや非線形的な分布となっている。一方、 PGA は比較的良好な相関を示している。これは、短周期橋脚の場合、地震波の繰り返しによる動的増幅ではなく、1 回のパワーで損傷することを示唆している。また、 PGA が 250gal 程度でせん断耐力比が 1 を超えており、既設橋脚の設計水平震度 0.2~0.3 と概ね整合することから、250gal 程度が閾値となりうる。

4.4 中周期橋脚の検討結果

中周期橋脚の場合の相関図を図-8 に示す。曲げ破壊型が多いため、縦軸は曲げモーメント比としている。検討した地震動指標のうち、 SI 値が最も相関性が良く、中周期橋脚の曲げ損傷において動的増幅を無視できないことを示唆している。また、 SI 値が 40cm/sec 程度以上で曲げモーメント比が 1 を超えているが、これは気象庁震度階による震度 6 弱以上に相当する。

図-9 に相関図を各地震動指標の相関係数を比較したものとする。今回の検討条件では、短周期橋脚、中周期

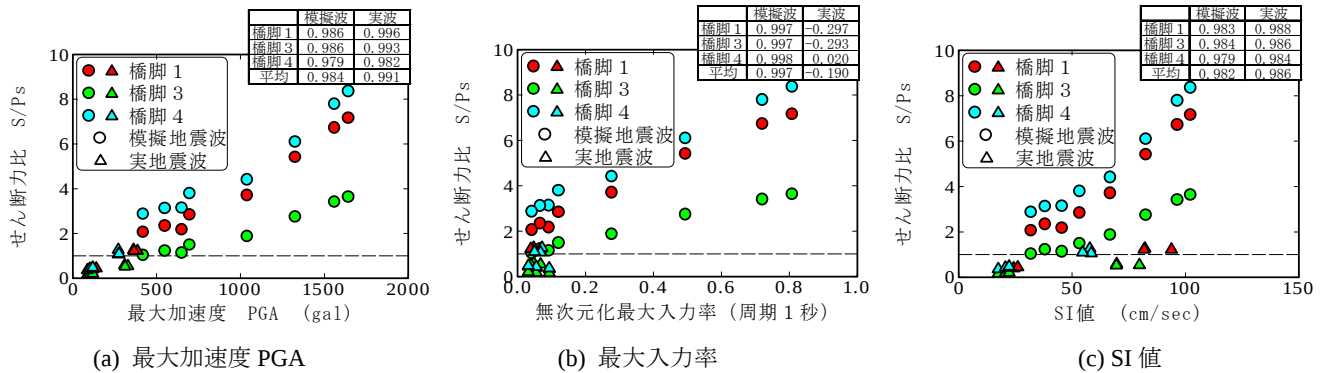


図-7 短周期橋脚の最大応答と地震動指標との関係

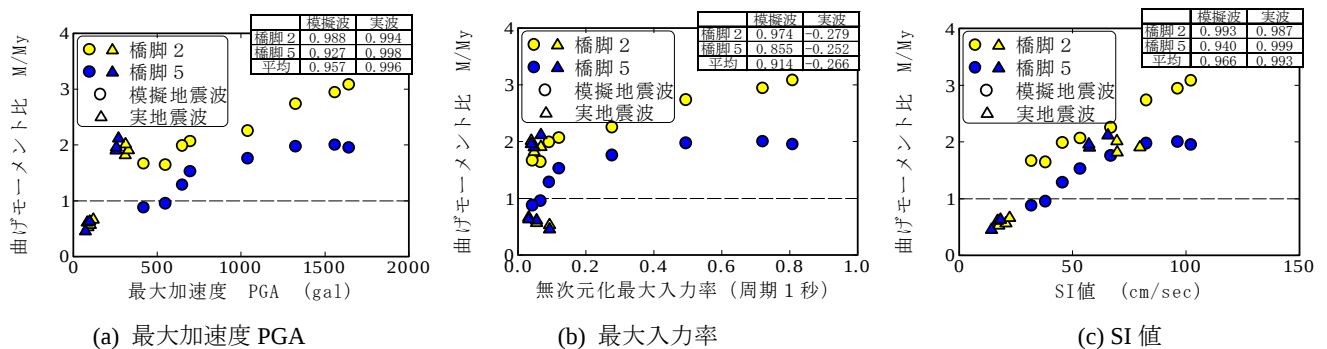


図-8 中周期橋脚の最大応答と地震動指標との関係

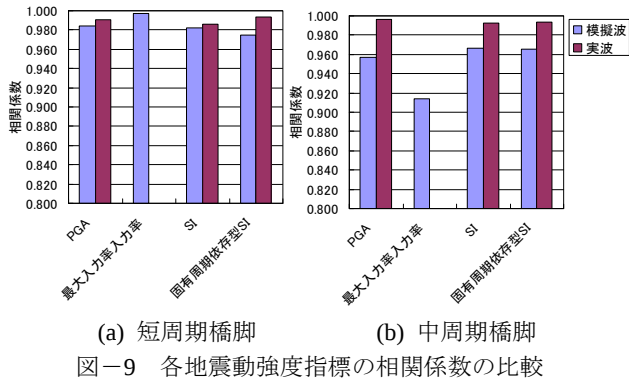


図-9 各地震動強度指標の相関係数の比較

橋脚ともに橋脚被害との相関性が高い強度指標は SI 値となった。また、橋脚の周期特性を考慮した固有周期依存型 SI 値は、通常の SI 値と比べて相関性の明確な向上は見られなかった。

5. 東北地方太平洋沖地震での被害データによる検証

前章の結果を踏まえ、東北地方太平洋沖地震による宮城県内の橋脚被害データを用いて、各地震動強度指標の適用性の確認を行った。

地震被害調査は、宮城県内の主に地方自治体が管理する 45 橋について行い、橋梁部材の損傷状況のほか、橋梁前後の道路盛土の状況や部材の経年劣化の状況等についても着目して調査した。写真-2 に橋脚被害の例を示す。単柱式橋脚の段落し部や基部において、塑性化によるかぶりコンクリートの剥落が生じた橋梁がいくつか見られた。塑性化した橋脚を被害レベル高とし、0.2mm 以上の曲げひび割れが認められるものを被害レベル中として区分した結果、中および高に該当する橋梁は 8 橋あった。

宮城県内の K-NET 観測点のうち、橋脚被害の生じた 8 橋に近い測点（築館，古川，豊里）の観測波を入力地震動と判断し、それらの地震動指標と被害橋梁割合との相関性を分析した。その相関図である図-10 によれば、SI 値より PGA の方が相関性は高い結果となっている。しかし、被害データが少ないため評価は困難であり、今後、対象エリアを広げて橋脚被害のデータ数を増加させる必要がある。

6. まとめ

本検討では、道路橋の橋脚を対象を限定して、被害と相関性が高く、且つ、実用性のある地震動指標の開発を目的に、解析的検討を行った。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 北海道内道路橋の RC 橋脚の固有周期特性を調査した結果、橋軸方向では固有周期 0.4~0.8 秒程度、橋軸直角方向では固有周期 0.2~0.5 秒程度の高さ 5~15m の橋脚が比較的多い。
- (2) 橋脚高さ区分別に平均的な固有周期をもつ 5 基の単柱モデルに対し、エネルギー累積総量一定の模擬地



写真-2 東北地方太平洋沖地震による宮城県内の橋脚被害（左；段落し部の被害，右；基部の被害）

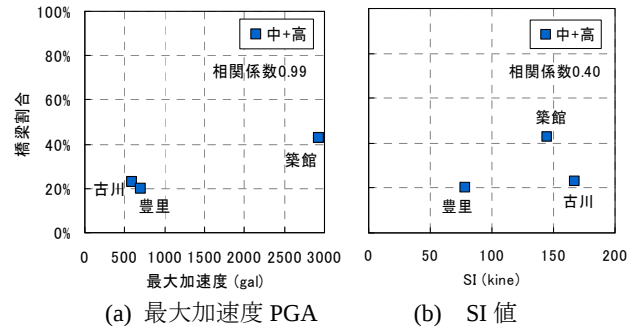


図-10 東北地方太平洋沖地震における地震動指標と橋脚被害との相関性

震波および実地震波を入力条件として動的解析を行った。今回の検討条件において橋脚被害との相関性が高い強度指標は SI 値であった。

- (3) 東北地方太平洋沖地震による橋脚被害データを用いて、各地震動強度指標の適用性確認を行った結果、PGA の相関性が高い結果となったが、データ数が少ないため評価は困難であった。今後は、地震被害のデータ数を増やすとともに、観測した地震動の橋梁位置への補正等を行っていく予定である。

謝辞

本報では、防災科学研究所 K-NET の観測波を使用させて頂きました。

参考文献

- 1) 中村豊：合理的な地震動強度指標値の検討，第 27 回土木学会地震工学論文集，pp.1-4，2003.
- 2) 北原武嗣，伊藤義人：鋼製および RC 橋脚の弾塑性動的応答と固有周期依存型 SI との相関性，構造工学論文集，Vol.45A，pp.829-838，1999.
- 3) 鈴木基行，井林康，藤原稔，尾坂芳夫：RC 橋脚の地震被害と地震動および構造特性との関連性，構造工学論文集，Vol.44A，pp.651-658，1998.
- 4) 桑村仁，竹田拓也，佐藤義也：地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率，日本建築学会構造系論文集，第 491 号，pp.29-36，1997.