

確率論的耐震性評価システムによる地震時挙動の変動性の検討

Influence of Natural Period and Phase Characteristics on Seismic Performance

北原武嗣

Takeshi KITAHARA

* 博(工) 群馬工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580)

In this study, modified spectrum intensity, called Natural-Period-dependent spectrum intensity (SI), is proposed. Natural-Period-Dependent SI is a mean value of velocity response spectra in the natural period ranges corresponding to the target structure. It is clarified that Natural-Period-Dependent SI has a strong correlation with the non-linear response of structures. In the Specifications for Highway Bridges, the earthquake loads are defined by the elastic acceleration response spectrum. However, the non-stationary phase characteristics of seismic waves strongly affect the nonlinear response of structures. Herein, the elasto-plastic responses of a single degree of freedom system subjected to the artificial seismic waves randomly generated having the same response spectrum are studied. Consequently, the coefficient of variation of the maximum response displacements is quantitatively estimated

Key Words : Maximum response displacement, Natural Period, Phase characteristics, Variation

1. はじめに

2000年以降、伊豆諸島群発地震(2000年)、鳥取県西部地震(2000年)、芸予地震(2001年)、三陸南地震(2003年)、宮城県北部地震(2003年)、および2003年十勝沖地震のように、大規模な地震が頻繁に発生しており、現在、日本は地震活動期に入っていると考えられる。このような状況の下、耐震設計や耐震診断、および地震防災の重要性はますます高まっている。

さて、耐震設計や地震被害防災を考える上で、地震動のどのような性質が構造物の応答や被害に強く影響しているかを検討することが重要である。

2003年三陸南地震はマグニチュード7.0、震度は最大6弱、最大加速度は、牡鹿で 1111cm/s^2 、釜石で 1038cm/s^2 を記録した。しかしながら、JR東北新幹線の高架橋にせん断ひび割れが発生するなど、若干の被害は生じたが、それほど大きな被害には繋がらなかった。一方、1995年兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台において観測された 818cm/s^2 が最も大きな最大加速度であったが、地震被害は未曾有のものであった。このように、地震被害は従来よく用いられていた最大加速度のような、単純な地震動指標のみでは評価することは困難である。

また、鳥取県西部地震、芸予地震、三陸南地震および2003年十勝沖地震等、多くの地震で震度6弱が観測されているが、これに対応した構造物被害が生じているとは言い難い。これは、現行の計測震度が地震被害と強い相関性を有していないためであると指摘されている¹⁾。

これらは、地震動や構造物の応答は元来波であるため、卓越

周期や固有周期を抜きには考えられないためであるといえる。そこで、構造物の固有周期を考慮し、動的応答と相関性の強い地震動の強さ指標に関して検討を行った。

さらに、地震動は本来非定常性を有しており、周期特性だけを考慮しただけでは十分とはいえない。構造物の弾塑性動的挙動は地震波の非定常性の影響を受けるため、同一の弾性応答スペクトルを有する複数の地震波による応答結果は、通常異なったものとなることが一般的に知られている²⁾⁵⁾。

この影響を考慮するため、道路橋示方書・V耐震設計編⁶⁾では、地盤種別ごとに標準地震動3波を示し、これら3波による動的応答結果の平均値で耐震性能を評価することとしている。また、FEMA(米国)⁷⁾では、3波による検討では3つの応答結果の最大応答で、7波による検討では7つの応答結果の平均応答で、耐震性を評価することとしている。ただし、道路橋示方書による標準地震動3波による平均応答や、FEMAの3波による最大応答や7波による平均応答が、どの程度、地震波の非定常性を考慮しているのかは必ずしも明確ではない。

そこで本研究では、地震波の非定常性として位相特性^{8)~10)}を考慮し、同一の設計応答スペクトルを有し位相特性の異なる地震波群による弾塑性応答の変動性を検討するものとした。ここでは、鋼製橋脚とRC橋脚の両者を検討対象とし、解析対象による差異についても考察するものとした。

なお、本研究の検討では多数の動的解析を行い、大量のデータの統計処理を必要とするため、著者らが開発した確率論的耐震性評価システム¹¹⁾を使用し、効率的に検討するものとした。

2. 地震動指標と応答との相関性の検討

2.1 解析対象と解析モデル

道路橋示方書によりⅡ種地盤上に設計された単柱形式の鋼製橋脚，RC橋脚を対象とした。固有周期の影響を検討するため，鋼製橋脚は0.38～1.41秒，RC橋脚は0.38～0.71秒を検討範囲とした。解析モデルは，図-1に示すように基礎固定のばね-質点系モデルとした。また，減衰定数は3%とした。

復元力特性は，鋼製橋脚は2パラメータモデル¹²⁾を，RC橋脚は武田モデルを用いた。図-2および図-3に，鋼製橋脚とRC橋脚の応答例をそれぞれ示す。

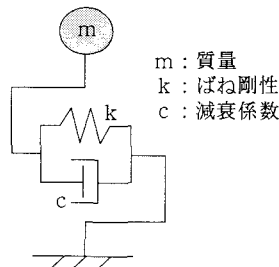


図-1 解析モデル

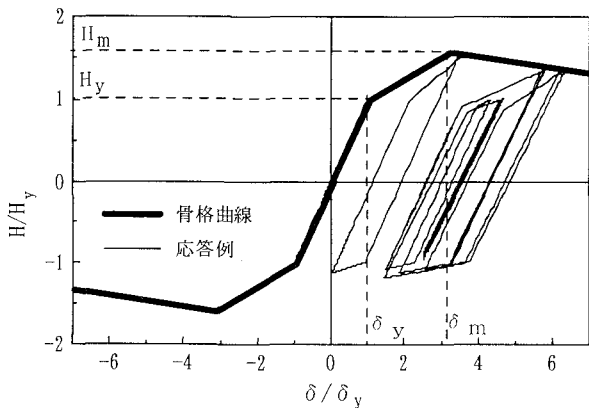


図-2 鋼製橋脚の復元力特性

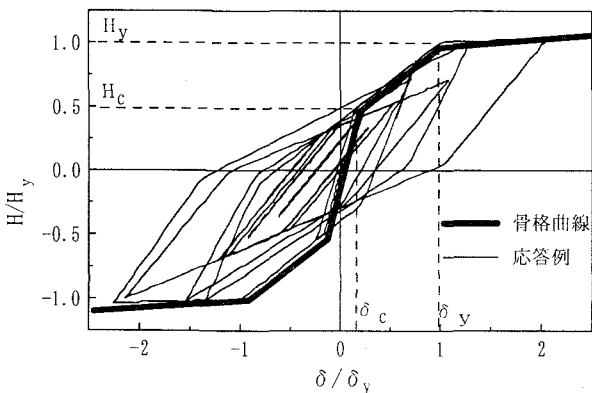


図-3 RC橋脚の復元力特性

2.2 入力地震動

表-1に示す観測波および道路橋示方書・V耐震設計編に示されている照査用地震波を入力地震波として用いた。表中には，観測地点，地震波略称，地震波種別と方位を示す。ただし，道示波は観測波ではないので観測地点と方位は記していない。

表-1 地震波の諸元

観測地点(地震名)	地震波略称	種別	方位
海洋気象台(1995 兵庫県南部)	JMA-NS	直下型	NS
海洋気象台(1995 兵庫県南部)	JMA-EW	直下型	EW
葦合(1995 兵庫県南部)	FUKI-X	直下型	(x)
葦合(1995 兵庫県南部)	FUKI-Y	直下型	(y)
J R 鷹取(1995 兵庫県南部)	TAK-NS	直下型	NS
J R 鷹取(1995 兵庫県南部)	TAK-EW	直下型	EW
El Centro(1940 El Centro)	EL-NS	海洋型	NS
El Centro(1940 El Centro)	EL-EW	海洋型	EW
Taft(1952 Taft)	TAFT-NS	海洋型	NS
Taft(1952 Taft)	TAFT-EW	海洋型	EW
八戸(1968 十勝沖)	HACHI-NS	海洋型	NS
八戸(1968 十勝沖)	HACHI-EW	海洋型	EW
(道示波タイプⅠ)	Typ1	海洋型	—
(道示波タイプⅡ)	Typ2	直下型	—

2.3 検討手法

時刻歴応答解析は，線形加速度法による直接積分法を用い，非線形解析部分は増分法により解析を行った。

2.1で述べた入力地震動全18波に関して，その地動最大速度を25,35,50,75cm/sに基準化して，上記解析モデルへの入力とした。したがって，1つの解析モデルについて合計18×4=72回の非線形解析を実行したことになる。各橋脚に対して72個の応答解析結果より，地震動指標と応答値との相関を検討した。

2.4 固有周期依存型SI

広範囲の固有周期領域に存在する構造物と安定して相関性の強い地震動強さ指標として，以下のような指標を著者らは提案している¹³⁾。すなわち，構造物の弾性固有周期に対応した積分範囲における，速度応答スペクトルの平均値として，次式にて固有周期依存型SIを定義する。固有周期依存型SIの概念図を図-4に示す。

$$SI_{n.p.} = \frac{1}{0.3T} \int_{0.9T}^{1.2T} S_v(\tau, 0.05) d\tau \quad (1a)$$

$$SI_{n.p.} = \frac{1}{1.8T} \int_{1.0T}^{2.8T} S_v(\tau, 0.05) d\tau \quad (1b)$$

ここに， $SI_{n.p.}$ ：固有周期依存型SI，

T ：構造物の固有周期，

S_v ：速度応答スペクトル。

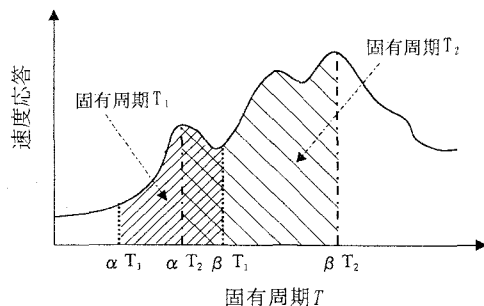


図-4 固有周期依存型SIの概念

式(1a), (1b)において, 鋼製橋脚とRC橋脚で積分範囲が異なるのは, RC橋脚の方が, 塑性化後の剛性低下が著しく, 長周期化の程度が大きいためである。

2.5 検討結果

図-5 に鋼製橋脚の最大応答変位と地震動指標との相関係数を, 図-6にRC橋脚の最大応答変位と地震動指標との相関係数を示す。縦軸に相関係数, 横軸に固有周期を示している。また, 凡例は図に示すとおりである。

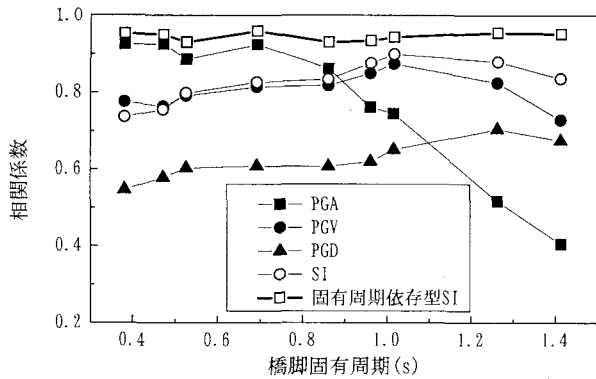


図-5 最大応答変位と地震動指標との相関性(鋼製橋脚)

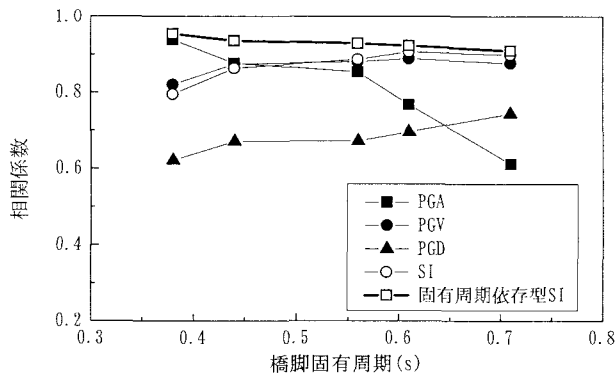


図-6 最大応答変位と地震動指標との相関性(RC橋脚)

これらの図から, 鋼製橋脚およびRC橋脚ともにほぼ同様の傾向を示しており, 地動最大加速度(PGA), 地動最大速度(PGV), 地動最大変位(PGD), SI等の既存の地震動指標は, 橋脚の弾性固有周期によって大きく相関性が変動していることが分かる。

PGAは短周期構造物との相関性は強いが長周期構造物との相関性は弱い, PGDはPGAとは逆の関係性を有している。また, PGVは両者の中間的な傾向を示し比較的安定した相関性といえる。これらの関係は, 既往の研究結果とも一致する^{14)~16)}。したがって, これらの指標では, 幅広い周期領域に存在する構造物の応答や被害を推定することは困難であると考えられる。

一方, 著者らが提案する固有周期依存型SIは, 幅広い周期領域において安定して強い相関性を示しており, 構造物の応答や被害の推定に有用な指標であると考えられる。

3. 地震波の位相特性の影響

3.1 解析モデルと入力地震動

解析対象は, 2.1に述べた鋼製橋脚およびRC橋脚とし, 解析モデル, 復元力特性等も同様の条件とした。

入力地震動としては, 道路橋示方書・V耐震設計編に示されるタイプIレベル2(II種地盤)地震の応答スペクトルをターゲットとし, Jennings型の包絡曲線になるよう, 正弦波合成法を用いて作成した。この際, 位相差を乱数として与え, 初期位相の値を変化させることで100波の模擬地震波を作成した。

作成した模擬地震波の加速度応答スペクトルを図-7に示す。図中, 左縦軸は加速度応答スペクトルを, 右縦軸は変動係数を表している。100波の応答スペクトルの平均値を実線で, 平均値±標準偏差を1点鎖線で示している。さらに, 変動係数を破線で表している。

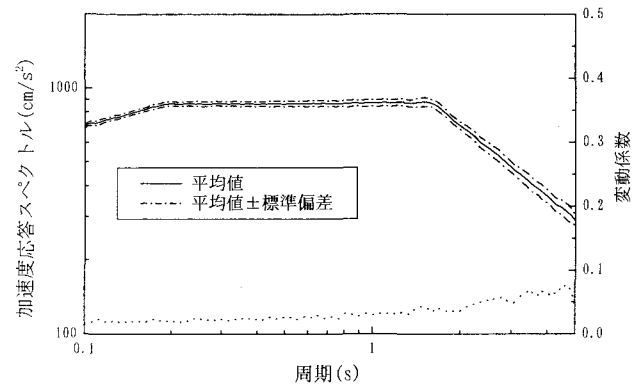


図-7 加速度応答スペクトル

3.2 検討結果

同一応答スペクトルを有する模擬地震波100波を入力として, 鋼製橋脚およびRC橋脚の弾塑性動的応答の変動性を検討した。ここでは, 動的応答値として, 耐震設計において重要な照査項目である最大応答変位 δ_{max} に着目して検討した。

図-8に, 鋼製橋脚の最大応答変位の変動性を示す。図中, ●は100波によるそれぞれの解析値を, □は100波の平均値を, △と▽で平均値±標準偏差を示している。また, 破線で変動係数の値を示している。同様に, RC橋脚に対する結果を図-9に示す。

鋼製橋脚の場合, 最大応答変位の平均値は, 降伏変位の1.5~4.8倍程度に, 変動係数は15~18%程度となっている。また, RC橋脚の場合, 最大応答変位の平均値は, 降伏変位の1.2~4.8倍程度に, 変動係数は20~24%程度となっている。鋼製橋脚, RC橋脚ともに, 最大応答変位は, 対象となる橋脚の固有周期によって大きくばらついているが, 変動係数はほぼ一定であることがわかる。鋼製橋脚とRC橋脚で最大応答変位の変動性に差異が生じたのは, 鋼製橋脚とRC橋脚の復元力特性の差異によるものであると考えられる。すなわち, RC橋脚の復元力特性は鋼製橋脚よりも, 降伏以降の第2勾配の傾きが小さく, 除荷剛性も小さいため, 荷重の少しの変動に対しても応答変位が大きく変動するからであると考えられる。

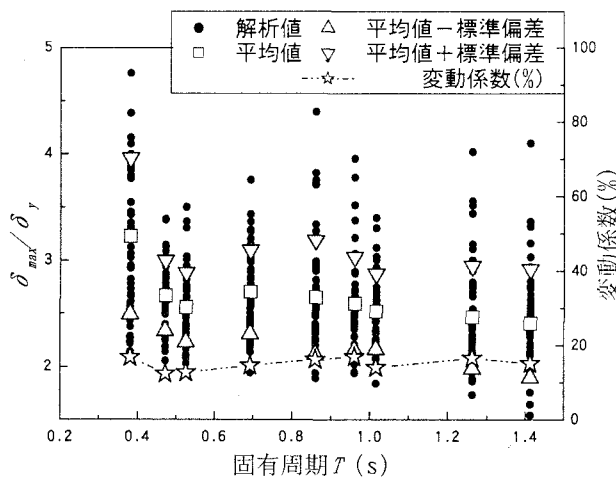


図-8 最大応答変位の変動(鋼製橋脚)

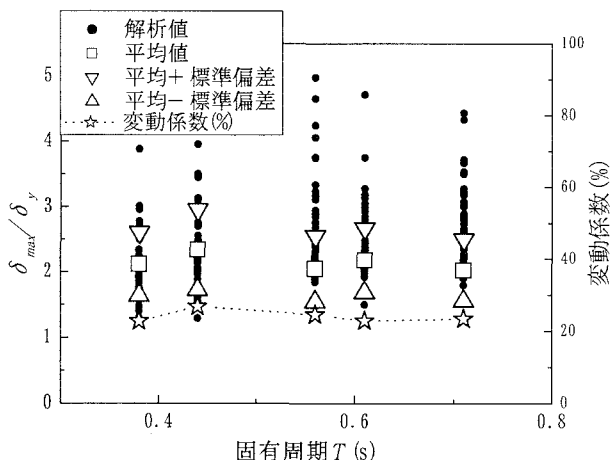


図-9 最大応答変位の変動(RC橋脚)

4. 結論

本研究では、地震動の周期特性や位相特性が構造物の動的応答に与える影響について検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 確率論的耐震性評価システムを用いることにより、複数の動的解析およびその統計処理を、効率的に行うことができることを確認した。
- (2) 既往の地震動指標である、PGA、PGV、PGD および SI 等は、構造物の固有周期により相関性が大きく変動する。
- (3) 提案した固有周期依存型 SI は、幅広い周期領域の構造物に対して、安定して強い相関性のあることを示した。
- (4) 固有周期依存型 SI に用いる積分範囲は、鋼製橋脚と RC 橋脚で異なる。これは、復元力特性の差異により、RC 橋脚の方が非線形化による長周期化の程度が大きいためと考えられる。
- (5) 同一の設計スペクトルを有していても、地震波の位相特性の影響を受け、構造物の最大応答変位は大きく変動する。
- (6) レベル 2 タイプ I 相当の地震波では、鋼製橋脚で 15~18% 程度、RC 橋脚では 20~24% 程度、変動することを示した。また、これらの変動性と、対象となる構造物の固有周期の間には明瞭な関係は見られなかった。

参考文献

- 1) 境有紀, 瀧川一, 神野達夫, 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, 85-91, 2002.
- 2) 中山隆弘, 藤原豪紀, 長谷川賢治, 児玉明日香, 竹本康弘: 地震動および材料強度の不確実性を考慮した既設橋梁の耐震信頼性に関する一考察, JCROSSAR2000 論文集, pp.197-204, 2000.
- 3) 北原武嗣, 伊藤義人: 同一応答スペクトルを有する模擬地震波群による弾塑性応答の変動性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1237-1242, 2001.
- 4) 丸山大輔, 秋山充良, 鈴木基行: 地震動の位相特性のばらつきが RC 橋脚の弾塑性応答に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1009-1014, 2002.
- 5) 星隈順一, 運上茂樹: 時刻歴応答解析に用いる入力地震波の数と非線形応答値のばらつき, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 447-454, 2003.
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 7) Federal Emergency Management Agency: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA356, 2000.
- 8) 佐藤智美, 佐藤俊明, 植竹富一, 菅原良次: 群遅延時間を用いたやや長周期地震動の経時特性評価のための基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第480号, pp.57-65, 1996.
- 9) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦: 観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No.640/ I -50, pp.119-130, 2000.
- 10) 藤原豪紀, 中山隆弘: 位相の非定常性を考慮した地震動シミュレーション法の開発, 土木学会論文集, No.661/ I -53, pp.119-132, 2000.
- 11) 北原武嗣, 伊藤義人: 地理情報システムを用いた確率論的耐震性能評価システム, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.289-298, 2002.
- 12) 鈴木森晶, 宇佐美勉, 寺田昌弘, 伊藤 努, 才塚邦宏: 箱形断面鋼製橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.191-204, 1996.
- 13) 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.653-662, 2000.
- 14) 長橋純男, 小林啓美: 地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅, 日本建築学会論文報告集, No.181, pp.15-22, 1971.
- 15) 安藤陽一, 山崎文雄, 片山恒雄: 地震動の強さ指標による構造物損傷の評価, 第8回日本地震工学シンポジウム, pp.715-720, 1990.
- 16) 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.