

論文 固有周期依存型 SI の RC 多質点系構造物への適用

北原武嗣*1・伊藤義人*2

要旨: 耐震設計において, 構造物の弾塑性動的挙動を簡便に, 精度良く表現し得る地震動指標を検討するため, 模擬地震波を入力とした非線形地震応答解析を行い, 種々の検討を行った. 解析対象は RC 造中高層建物とし, 多質点のパネ-質点系モデルに置換した. 本論文では, 基本的な地震動指標として PGA, PGV, PGD および SI を検討した後, より効果的な指標として固有周期依存型 SI を検討した. 検討の結果, 既往の実地震波による 1 質点系構造物の検討と同様, 固有周期依存型 SI は弾塑性動的応答と強い相関性があり, 動的解析による耐震設計の際, 構造物にとって厳しい地震波の選択が可能なることを明らかにした.

キーワード: 固有周期依存型 SI, 多質点系構造物, 弾塑性動的応答, 地震動指標, 相関

1. はじめに

近年, 土木・建築構造物の設計法が仕様規定型から性能照査型に移行されつつある. 性能照査型の耐震設計法においては, 構造物の動的挙動をより忠実に照査する必要があり, 動的解析による耐震性能の照査が重要となってきた.

動的解析による耐震設計を行うにあたり, 設計の初期段階における見通しを良くするために, 構造物の弾塑性挙動を簡便に, 精度良く表し得る地震動指標を検討することが重要である. 最も単純な地震動指標は, 震度法による弾性設計で用いられる地表面最大加速度である. また, 長周期構造物に対しては地表面最大加速度よりも地表面最大速度が用いられることもある.

構造物の弾塑性動的応答と地震動指標との相関に関して, これまで多くの研究がなされてきた^{1)~5)}. しかしながら, これらの研究では, 構造物の弾塑性動的応答と相関性の強い指標は構造物の固有周期に依存することが報告されている. 一方, 著者らは, 広い周期領域において常に構造物の弾塑性動的応答と相関性の強い地震動指標の検討を行い, 固有周期依存型 SI (スペクトルインテンシティ) という指標を提案して

いる⁶⁾. この指標は, 構造物の固有周期に対応した範囲における速度応答スペクトルの平均値として得られる指標であり, 構造物の塑性化による長周期化の影響を考慮できる指標である. 著者らは, 文献6)において, 固有周期依存型 SI は広い周期領域において構造物の動的挙動と強い相関性を有することを報告した. ただし, 対象とした構造物は 1 本柱形式の橋脚のため, 1 質点系の振動モデルに対する検討であり, 多質点系構造物による検討はなされていない.

そこで本研究では, 固有周期依存型 SI の多質点系構造物への適用性を検討することを目的とした. RC 造中高層建物を解析対象とし, 多質点のパネ-質点系モデルによる弾塑性地震応答解析を行い, 構造物の弾塑性動的応答と地震動指標の相関性を検討した. 文献6)において実地震動による検討を行ったので, ここでは入力地震動として模擬地震波を用いた.

この際, 基本的な地震動指標として, 地表面最大加速度 (PGA), 地表面最大速度 (PGV), 地表面最大変位 (PGD), スペクトルインテンシティ (SI)¹⁰⁾ の 4 種類を考慮し, より効果的な地震動指標として固有周期依存型 SI を検討した. また,

*1 群馬工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (名古屋大学大学院博士課程) 工修 (正会員)

*2 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター 工博

構造物の弾塑性動的応答としては、最大応答加速度、最大応答変形角および最大応答塑性率の3種類を検討した。

2. 解析方法

2.1 入力地震動

入力地震動として、4種類の震源を想定し、20波の模擬地震波(模擬波)を用いた。

模擬波は小林・翠川の式⁹⁾により地震基盤(せん断弾性波速度 $V_s=3,000\text{cm/s}$ 相当)での入射波速度応答スペクトルを求め、Jennings型の包絡曲線になるように正弦波合成法を用いて作成した。ここでは、模擬地震波作成自体が研究目的ではなく、構造物の弾塑性動的応答に用いる入力波を作成すればよいとの立場から、上述の、簡便な経験的手法を用いた。

東京近郊に実在する構造物を解析対象としたので、東京近辺で発生した安政地震(1855)、関東地震(1923)、神奈川県西部地震(1924)と仮想駿河湾地震⁹⁾を想定地震とした。これら想定地震の震央距離とマグニチュードを表-1に示す。以下、それぞれをA地震、K地震、Kg地震、S地震と記す。位相を $0\sim 2\pi$ の間でランダムに変えることにより、模擬波を5波づつ計20の地震波を発生させた。地盤データは東京低地に属する2種地盤における測定値を用いた。

表-1 想定地震の諸元

地震名称	震央距離(km)	マグニチュード
A地震	5.6	6.9
K地震	71.9	7.8
Kg地震	62.1	7.3
S地震	245.2	8.0

2.2 解析対象と解析モデル

東京近郊に実在するRC造中高層建物5棟を解析対象とした。表-2のように、解析に用いた建物の1次の固有周期(固有値解析による)は、0.42秒~2.11秒の間に分布している。

解析モデルは、図-1に示すような多質点のバネ-質点系モデルに置換し、地表面で基礎固定

とした。復元力特性は、 A_i 分布形の外力による非線形静的増分解析結果から各層で独立した骨格曲線を求め、図-2に示すような劣化型トリリニア(武田型)の復元力特性とした。図-2は、細線でBモデル最上層の復元力特性の応答例を、太線で骨格曲線を表している。これら解析モデルは、C、D、Eモデルの地下階以外は、上層になるにしたがい、なだらかに層間剛性が小さくなるような分布性状を有している。また、応答解析における減衰は、振動数依存のひずみエネルギー比例型減衰とし、減衰定数は3%とした。

表-2 解析モデルの諸元

モデル名称	層数	最下層降伏せん断力係数	1次固有周期 T (s)
Aモデル	5	0.39	0.42
Bモデル	12	0.41	0.96
Cモデル	26	0.62	1.59
Dモデル	33	0.71	1.78
Eモデル	34	0.70	2.11

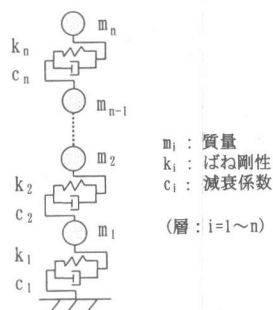


図-1 解析モデル

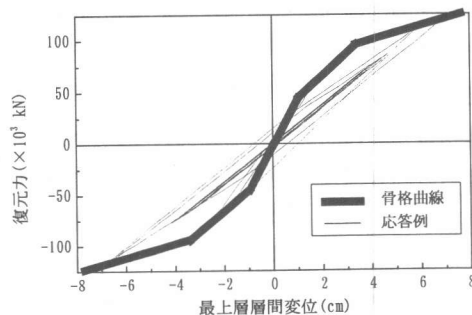


図-2 復元力特性

2.1で作成した模擬波20波に関して、その最大速度を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解析モデルについて合計 $20 \times 4 = 80$ 回の非線形解析を実施した。それぞれの構造物に関して、これら80個の応答解析結果より、地震動指標と弾塑性動的応答との相関を調べた。

3. 固有周期依存型SI

Housner¹⁰⁾は、一般的な構造物の固有周期の範囲を0.1~2.5秒と考え、0.1~2.5秒の間での速度応答スペクトルの平均値を、スペクトルインテンシティ(SI)と定義した。しかし、ある特定の構造物に対しては、固有周期付近の応答スペクトルが有意な値であると考えられるため、SIはスペクトル特性を効果的に取り入れているとは言い難い。

そこで、図-3に示すように、対象とする構造物の固有周期に対応して、速度応答スペクトルの積分範囲を変更する固有周期依存型SIを著者らは提案した⁶⁾。

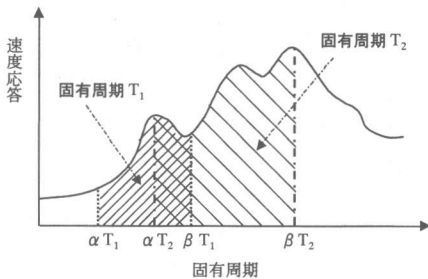


図-3 固有周期依存型SIの概念図

固有周期依存型SI($SI_{n.p.}$)は、式(1)のように表される。

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

ここに、 $SI_{n.p.}$: 固有周期依存型SI, α, β : 定数,
 S_v : 速度応答スペクトル, τ : 積分変数,
 h : 減衰定数, T : 構造物の1次固有周期。

本研究では、RC中高層建物に対する最適な積分範囲を文献6)と同じ手法で検討した。構造物の塑性化による、長周期化の影響を考慮するため、積分範囲の下限は1次の固有周期 T 、すな

わち $\alpha = 1.0$ とし、積分範囲の上限を $\beta = 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2$ と変化させて検討した。検討結果として、最大応答変形角に対する相関係数と β との関係を図-4に示す。図において縦軸は全モデルの相関係数の平均値を、横軸は β の値を示している。ここで、式(1)における減衰定数 h は、解析と同じ値とし、 $h = 0.03$ とした。

図-4から、 β が2.8の時に相関係数は0.95となり、最大であることが分かる。したがって、RC造中高層建物を対象とした多質点系モデルにおいても、RC橋脚と同様 $\alpha = 1.0, \beta = 2.8$ が最適な積分範囲であるといえる。文献6)において、復元力特性が異なれば、固有周期依存型SIの最適積分範囲も異なることを示している。したがって、固有周期依存型SIの最適積分範囲には、入力の大きさや降伏せん断力係数等の影響も受けるが、大きく影響するのは対象構造物の復元力特性であると考えられる。

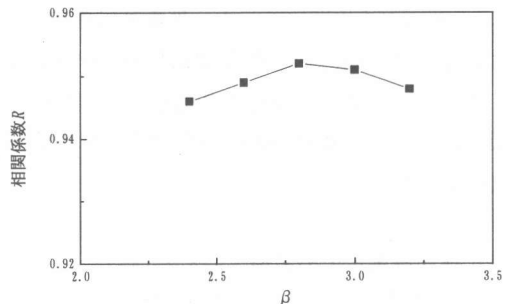


図-4 積分範囲 β と相関係数の関係

4. 最大応答値と地震動指標の相関の検討手法

最大応答値と地震動指標は両者とも対数正規分布に従ってばらついていると仮定し、両者の間の相関関係を両対数軸上で式(2)のように線形回帰により求めた。

$$\log(\text{応答指標}) = a + b \log(\text{地震動指標}) \quad (2)$$

(a, bは回帰定数)

例として、Cモデルの模擬波による結果を図-5に示す。縦軸は最大応答変形角を、横軸はPGAを示している。また、実線で線形回帰直線を、破線で対数標準偏差の推定幅を表している。

図-5より、相関係数は0.877であり弾塑性動的応答とPGAの間には相関性のあることが伺える。

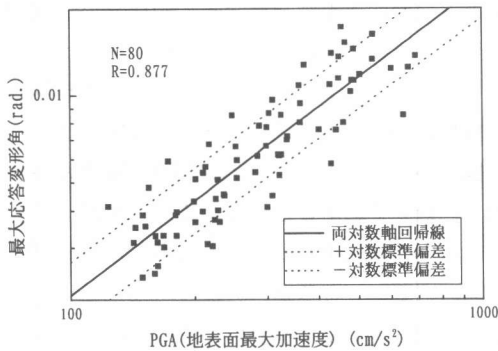


図-5 PGAと最大応答変形角との相関関係

同様の手法により、最大応答加速度と最大応答塑性率を構造物の応答指標とした場合についても、地震動指標との相関係数を求めた。なお、ここで最大応答値とは、ある層における最大値ではなく、全層における最大値のことである。

3種類の応答指標に対して、地震動指標(PGA, PGV, PGD, SI, 固有周期依存型SI)との相関を求めたが、その際、回帰の適合度をt-分布検定により、すべて有意水準0.01(1%)で適合することを確認している。

5. 検討結果とその考察

5.1 固有周期とによる相関性の変動

解析した全5モデルについて、横軸に固有周期、縦軸に相関係数をプロットしたものを図-6と図-7に示す。図-6、図-7はそれぞれ、最大応答変形角と最大応答加速度を応答指標とした場合を表している。図中、■はPGA、●はPGV、▲はPGD、○はSI、□は固有周期依存型SIとの相関をそれぞれ示している。最大応答塑性率を応答指標とした場合の結果は、最大応答変形角の場合とほとんど同様の結果となったので、図は省略する。

まず図-6より、最大応答変形角と地震動指標との相関性を検討する。PGAは、短周期構造物(0.5秒程度以下)では相関係数が0.94程度の強

い相関性を示すが、周期が長くなるに従い相関性が弱くなる。逆に、PGDは長周期になるほど相関性が強くなる。PGVとSIは、PGAとPGDの中間の周期領域(0.5~1.5秒程度)において、相関係数0.93から0.94程度と相関性が強い。

速度に着目した指標同士で比較すると、図-6と図-7より、SIの方がPGVよりも大きな相関係数を示すことが多い。ただし、その差は最大でも数%程度であり、今回の結果からPGVとSIとの間に有意な差はない。

単純には、速度応答スペクトルのある周期帯での積分値であるSIの方が、時刻歴における最大値であるPGVよりも情報量が多く、応答との相関も高くなるように考えられる。しかし実際は、SIが周期0.1~2.5秒とかなり広範囲にわたる積分を実行しているため、周期特性が平均化されており、単なる最大値と大差ない情報量しか持たなくなってしまうと考えられる。

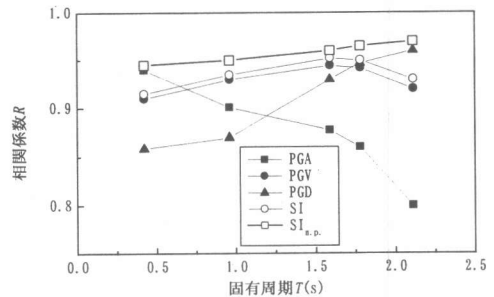


図-6 最大応答変形角に対する相関係数

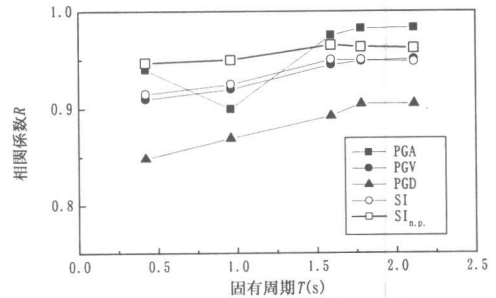


図-7 最大応答加速度に対する相関係数

ここまで検討した基本的な地震動指標と構造物の動的挙動との相関性の結果は、すでに報

告されている1質点系の振動モデルに、実地震波を入力した場合の結果^{1),3)}と同様な結果となっている。

これらの理由は次のように考えられる。剛構造物の場合、構造物自身の変位は零であるから応答加速度は理論的に地表面加速度と比例する。一方、柔構造物の場合、構造物の応答加速度は零となり応答変位は地表面変位に比例することになる。すなわち、剛構造物に近い短周期構造物では応答とPGAとの相関が高く、柔構造物に近い長周期構造物はPGDと相関が高くなると考えられる。また、PGAの卓越周期<PGVの卓越周期<PGDの卓越周期の順となるから、中周期構造物ではPGVとの相関が強いと考えられる。

PGA, PGV, PGDおよびSIといった基本的な地震動指標では、構造物の周期領域により相関性がばらつくのに対し、本研究で検討している固有周期依存型SIは、すべての周期領域において常に相関係数が0.95以上と強い相関性を有していることが分かる。

次に、最大応答加速度に対する相関性を検討する。図6と図7から、最大応答加速度に関しては、他の応答指標とは傾向が若干異なっている。すなわち、固有周期が1.5秒以上の構造物においてPGAと極めて強い相関性を示している。これについては次節にて考察する。

5.2 最大応答加速度に対する相関係数

図-7のように、周期1.5秒以上の構造物において、最大応答加速度とPGAとは極めて強い相関を示している。これを説明するため、Cモデルを例として図-8に高さ方向の剛性分布(棒グラフ)と応答加速度分布(■)を示す。縦軸は階数、上横軸は加速度、下横軸は剛性を表す。

これらの建物は地下階を有しており、1層目(地下階)部分の剛性が他層よりも極端に大きい。ため、構造物上部で応答が増幅されず、1層目で最大応答加速度が生じている(図-8参照)。したがって、構造物全体としての中周期的な挙動でなく、地下階のみの短周期的な挙動を示し、

PGAとの相関が高くなったと考えられる。

次に、全層にわたる最大応答ではなく、最上部における最大応答加速度に対する相関を検討した結果を図-9に示す。

図-9から、固有周期1.5秒以上の領域におけるPGAとの相関は全層での場合よりも小さくなり、図-6に示した最大応答変形角や、最大応答塑性率に対する相関と同様の傾向となっていることが分かる。これは、最上部の応答は1次モードの影響が大きいいため、構造物全体としての中・長周期的な挙動を示したためと考えられる。最上部応答加速度と固有周期依存型SIは、広い周期領域で強い相関性を有していることが分かる。

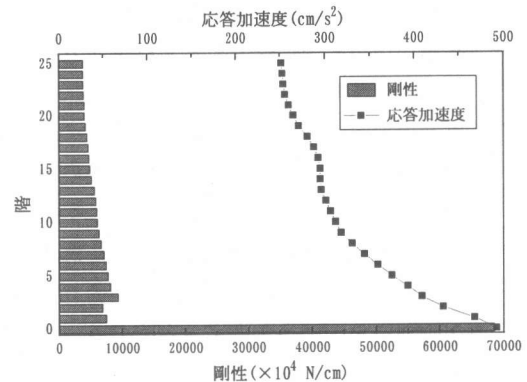


図-8 高さ方向の剛性と加速度分布(Cモデル)

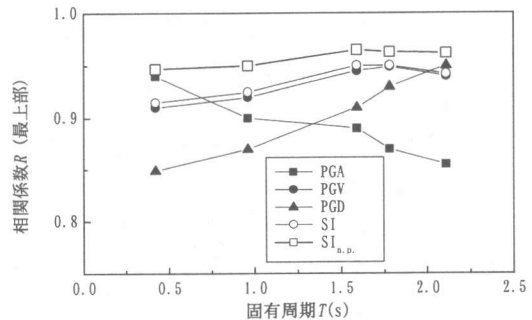


図-9 最上部最大応答加速度に対する相関係数

6. 結論

本研究では、固有周期依存型SIの多質点系構造物への適用性を、RC造中高層建物を対象とした多質点のパネー質点系モデルによる弾塑性

地震応答解析により検討した。以下に得られた結論をまとめる。

- (1) 多質点系のモデルにおいても、従来1質点系モデルで報告されていた結果と同様の結果が得られた。すなわち、短周期構造物ではPGAが、中周期構造物ではPGVが、長周期構造物ではPGDが、最大応答値と強い相関性を有する。これは、地震動指標と弾塑性動的応答との相関性は、構造物の固有周期に強く依存しているからと考えられる。
- (2) 固有周期依存型SIの最適な積分範囲は、構造物の1次の固有周期 T に対応して、 $1.0T \sim 2.8T$ となった。これは、RC橋脚を対象とした1質点系構造物での検討結果と等しい。最適な積分範囲に影響するのは復元力特性であると考えられる。
- (3) 固有周期依存型SIと最大応答加速度、最大応答変形角および最大応答塑性率との相関係数は、 $0.94 \sim 0.97$ と大きい値となった。
- (4) 多質点系構造物の場合も、1質点系構造物と同様、広い周期領域において、固有周期依存型SIと弾塑性動的応答は常に強い相関性を有することを確認した。
- (5) ただし、剛性の大きい地下階を有するような構造物では、最大応答加速度とPGA(地動最大加速度)との相関性が極めて強くなる場合のあることが分かった。

固有周期依存型SIは、多質点系構造物の弾塑性動的応答とも相関性が強いことが、今回の検討で確認できた。したがって、固有周期依存型SIは、多質点系構造物の耐震設計において、構造物にとって厳しい地震波の選択のための指標となり得る。

今後は、文献7)で提案している、固有周期依存型SIを地震動指標とした簡易な弾塑性最大応答変位の推定式を、多質点系構造物に適用をはかる必要がある。この際、高次の振動モードの影響を取り入れる手法の検討が課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 郭 猷群, 西岡 隆: 地震動の強さの指標と応答スペクトルの変動について, 土木学会論文集, No.428/I-5, pp.167-176, 1991.
- 3) 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論文集, pp.715-719, 1990.
- 4) 芳崎一也, 宇佐美勉, 才塚邦宏: 鋼製橋脚に大きな損傷を与える地震波の成分, 土木学会論文集, No.584/I-42, pp.125-134, 1998.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 北原武嗣, 伊藤義人: 固有周期依存型SIを用いた鋼製およびRC橋脚の弾塑性最大応答変位の推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.653-662, 2000.
- 8) Kobayashi, H. and Midorikawa, S.: A Semi-Empirical Method for Estimating Response Spectra of Near-Field Ground Motions with regard to Fault Rupture, *Proc. of 7th ECEE*, pp.161-168, 1982.
- 9) 石橋克彦: 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について—, 地震学会秋季大会, No.2, pp.30-34, 1976.
- 10) Housner, G. W.: Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault, *Proc. of 3rd. WCEE*, pp.94-115, 1965