

模擬地震動による一質点弾塑性系の応答性状と 保有水平耐力照査法に関する一考察

杉浦邦征*, 渡邊英一**, 山口達也***

*Ph.D. 京都大学大学院助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**工博・Ph.D. 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所 (〒263-0016 千葉市稲毛区天台 5-27-1)

中小の地震に対しては構造物の応答を弾性範囲内に抑え、大地震に対しては構造物の降伏後のねばりも考慮することが合理的な耐震設計と考えられるが、非線形動的応答解析をベースにした設計法は、試行錯誤的な反復計算により最適な解を求める作業には、不向きである。これに反して、静的弾塑性解析による保有水平耐力照査法は、構造物が保有する塑性変形能力に合わせて想定大地震を対象とした設計地震荷重を低減させ、終局時の構造物の耐力との比較で構造物の安全性を簡単に評価できる点は非常に有効である。しかし、非定常な地震動に対する保有水平耐力照査法の適用性は、その基本仮説・エネルギー一定則の妥当性に依存するので、本研究では、地震時弾塑性応答の変動を、同じ加速度応答スペクトルを有する模擬地震動群を用いて評価し、構造物の復元力の形態とも関連付け検討した。本解析により、最大応答変位は、応答加速度や応答速度に比べて、ばらつきが大きく、一方、応答速度の変動は、復元力特性の影響を受け難いことが明らかになった。

Key Word: Elastic-Plastic Response, SDOF Model, Artificial Ground Motion, Seismic Design

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震による地表の強震記録の中には重力加速度に匹敵する最大加速度、1m/sec前後の最大速度を示すものがあり、これらは日本の都市部で観測された強震記録として最大級のものと言える。都市への人口集中に対応すべく高密度な社会基盤施設が整備されてきた近代都市が、このような非常に強い直下型地震にさらされたのは未だかつて無く、国内外でのこれまでの震災から学んだ経験に基き、多くの技術革新がなされてきたにもかかわらず、甚大な被害が土木構造物に生じた。

このような状況下、陸上での都市物流の要でもある都市高速道路は、都市内といった立地条件から高架構造をとらざるおえず、地震力が構造設計を支配していることが多かったため設計で想定した以上の大地震であった兵庫県南部地震により鉄筋コンクリート製橋脚、鋼製橋脚をはじめとして、支承、桁、基礎などに多くの損傷が生じた。これまでの耐震設計の基本は、鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力照査¹⁾に代表されるよう、中小規模の地震に対しては使用性を重視し、弾性限界を照査対象とした1次設計に加え、大地震に対しては人命を脅かす崩壊を起こさないように構造物に十分な粘りを持たせることを意図し、構造物の塑性変形に期待した2次設計からなっていた。

一般に構造物が地震を受ける時、その揺れ方や被害は単に動的外力の最大加速度の大きさのみならず、継続時間、周波数特性、包絡曲線の形状など、外力の動的特性によって異なるとともに、構造物自身の持つ固有周期や耐荷力・粘りといった復元力特性によっても異なることが分かっている。構造物の耐震安全性を確保するには、着目地点で生じると考えられる地震動を用いて、構造物の応答を計算して部材を設計する必要があるが、地震の発生位置に加え、その強度および振動特性は、非定常で、非常に不確定である。信頼ある入力地震動の設定には、十分な記録の蓄積、すなわちデータベースの構築が必要不可欠である。特に、構造物の応答のばらつきを定量化するためには、今までに蓄積された強振動の記録から地震動の特性を計量化した上で、人工的に作成した地震動、すなわち模擬地震動を作成し、どのような入力地震動特性が特に重要か検討し、耐震設計の合理化が進められると考えられる。

そこで本研究では、強地震動の重要な波形特性を再現した上で、保有水平耐力照査法の適用性を検討することを目的とした。強地震動の特性として様々なパラメーターが挙げられるが、まだ未解明な部分も多いので、振幅特性と位相特性を反映した模擬地震動を作成した。すなわち、同じ弾性応答スペクトルを有し、包絡関数と関連付けた位相特性を考慮し、模擬地震動を数多く

作成し、それを入力に用いた弾性応答解析、弾塑性応答解析を行い、加速度、速度、変位の各応答値の平均及び変動係数を評価し、エネルギー一定則の妥当性、静的解析と動的解析の整合性に付いて検討を加えた。

2. 模擬地震動による1質点系の弾塑性応答解析

2.1 模擬地震動の作成

地震動評価には、地震が急激な断層運動によって引き起こされるとし、その地震動を断層の動き（すべり関数）と地球の応答（グリーン関数）を用いて示す理論的地震動評価とこれまでに観測した強震動記録のデータベースに基づいて地震動に含まれる普遍的で定量的な規則性を見出して、単純波を重ね合わせて地震動を合成する経験的地震動評価がある²⁾。

本研究では、地震動の発生メカニズムを検討するのではなく、構造物の設計に際して静的解析法である保有水平耐力照査法の妥当性の検討を行なうことが目的であるため、より実用的な後者の模擬地震動発生法を用いた。特に、設計時の地震荷重レベルを動的解析によって得ることを目的として、スペクトル適合法による波形発生法を用いた。ここでは、目標スペクトルに加速度応答スペクトルが適合するように正弦波を重ね合わせ合成した入力加速度波形の時刻歴を何回かの振幅修正を繰り返しながら作成することとなるが、この手順を図-1に示す（正弦波合成法）。この正弦波合成法は、時刻歴波形のフーリエ変換を利用した方法であり、時間関数のフーリエ変換が振幅スペクトルと位相スペクトルに分解できることから、付与すべき地震動の特性を振幅スペクトルと位相スペクトルの形として表現し、三角関数の重ね合わせ、またはフーリエ逆変換により地震動の時刻歴波形を合成するものである。主なパラメータは、

目標応答スペクトル： S_{target}

時刻歴波形の最大値： f_{max}

地震動の継続時間： T_d 、および

振幅包絡曲線： $E(t)$

であり、対象とする地震のマグニチュード、震源距離や地盤の性質などを含む危険度解析から求まり、地震動の統計的特性や工学的経験に基づいたものであるが、一般式として、波形の時刻歴 $f(t)$ は、以下のように表される。

$$f(t) = E(t) \sum_{i=1}^N A(\omega_i) \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (1)$$

ここに、 $E(t)$ 、 t 、 $A(\omega)$ 、 ω 、 ϕ 、 N は、それぞれ包絡線関数、時間、振幅、角振動数、位相差、正弦波の個数である。また、目標とする応答スペクトルとして、加速度、速度、変位のいずれも用いることができるが、設計時に地震荷重が震度ベースで設定されていることが多く、加速度応答スペクトルを用いるのが一般的で

ある。しかし、建築構造物に対するように、速度応答スペクトルを一致させるように波形調整する手法が採用されている基準もある³⁾。

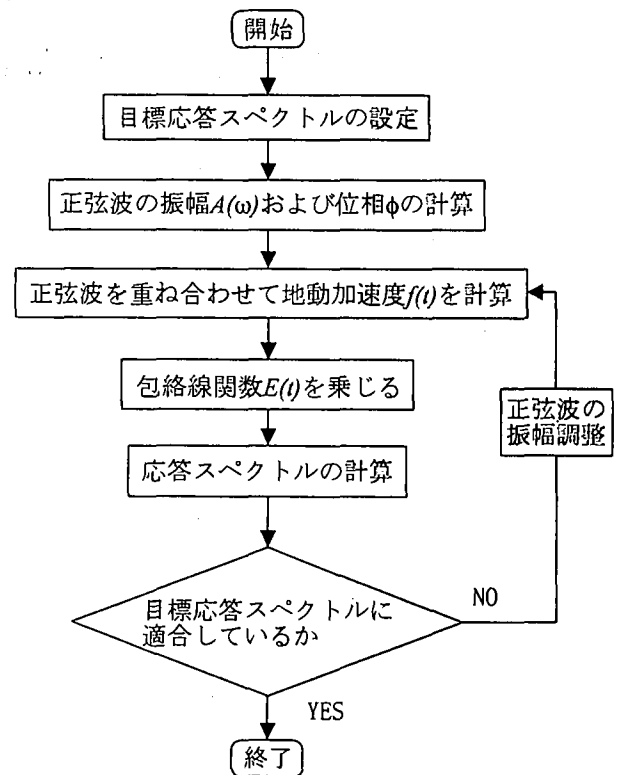
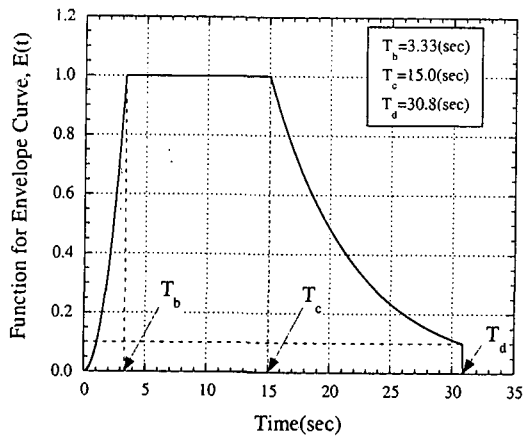


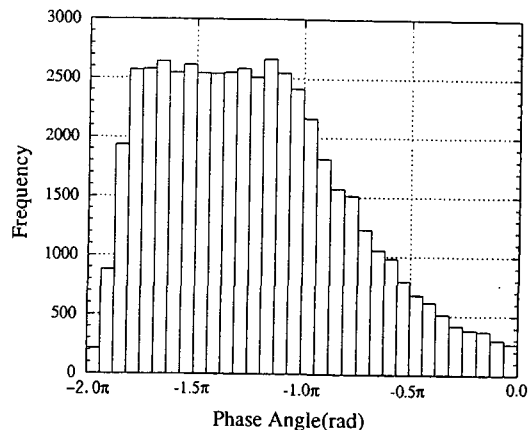
図-1 正弦波合成法による模擬地震動発生手順

このように、加速度波形の振幅スペクトルは、応答スペクトルに含まれ評価されるが、位相スペクトルに関しては、何らかの仮定が必要で、これまでは一様分布が仮定されていた。しかし、どのような地震動特性が構造物の応答性状に影響を及ぼすか検討されるようになり、その過程で弾塑性応答に及ぼす位相スペクトルの影響が最近指摘されつつある⁴⁾。ただし、この位相スペクトルに関しては、十分な検討成果が無く、位相差分スペクトルが加速度波形の包絡曲線の形状に類似しているとの報告がある程度である⁵⁾。本研究では、この成果を参照にして、加速度波形の包絡曲線を位相差分スペクトルの形状に合わせて、波形発生を行なった。重ね合わせる各正弦波の位相は、包絡線関数の形状を位相差の確率密度関数と仮定し、その累積確率を求め、各波数の位相差を求めたが、本解析で採用した一例を図-2に示す。なお、詳細については、文献(5)を参照していただきたい。

模擬地震動発生に際して参照した目標弾性スペクトルは、図-3に示すような道路橋示方書¹⁾に規定された加速度応答スペクトル（3種地盤用のレベル2地震動を対象）である。このような手法によって相異なる波形を100個作成した。ここでは、得られた加速度波形の入力による加速度応答スペクトルと目標スペクトルとが、実用上十分な精度で一致するまで各正弦波の



(a) 地震動の包絡線関数



(b) 位相差分布

図-2 各正弦波間の位相差分布の一例

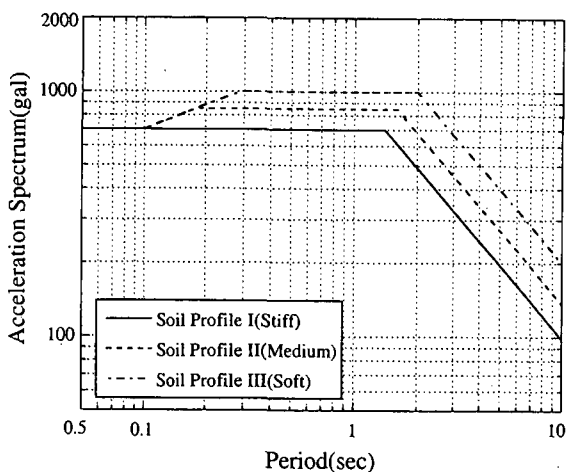
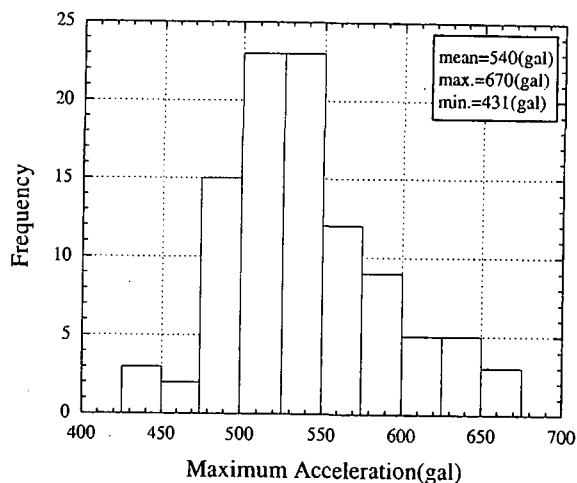


図-3 目標弾性加速度スペクトル (レベル2)



(a) 最大加速度

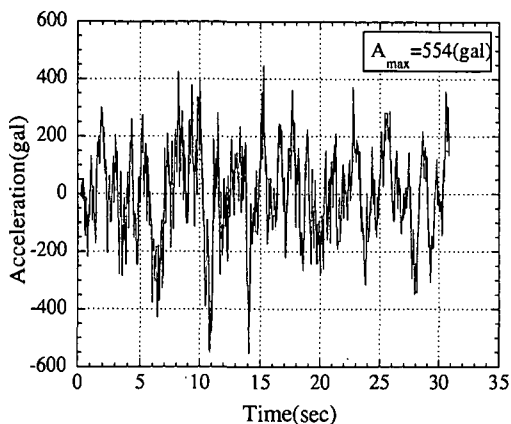
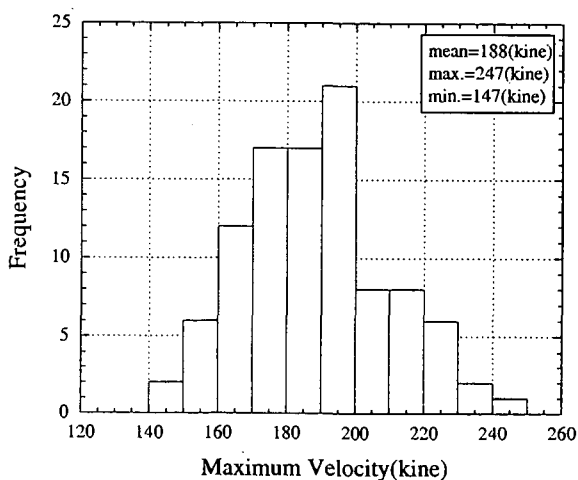


図-4 模擬地震動の加速度波形の時刻歴の一例



(b) 最大速度

図-5 模擬地震動波形群の最大加速度・速度分布

振幅調整を繰り返す必要があるが、この収束の判定基準として誤差の2乗平均を2%としてスペクトル適合波形を作り出した。作成した加速度波形の一例を図-4に示す。また、100個の模擬地震動の最大加速度および最大速度の頻度分布をそれぞれ図-5(a)および図-5(b)に示す。ここで、最大加速度は、加速度応答スペクトルが同じであっても、431(gal)から670(gal)の間で大きくばらつき、地震動の最大加速度のみが構造物の応答を支配する一要因とは断定しがたいことが分かる。一方では、最大速度の分布は、147(kine)か

ら247(kine)と比較的ばらつきが小さいことが伺える。

2.2 弾塑性応答解析

模擬地震動に対する弾塑性応答計算は、1質点弾塑性系モデルを用いて行なった。地盤の加速度入力を受ける1質点系の運動方程式は、

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F(t) = -M\ddot{Z} \quad (2)$$

ここに、
 M : 質量
 $F(t)$: 復元力
 C : 減衰係数
 X : 地面に対する質点の相対変位
 Z : 地動

である。なお、 $(\dot{\quad})$, $(\ddot{\quad})$ は、それぞれ時間に関する 1 回、2 回微分を表す。この運動方程式の数値解析法としては、この微分方程式を直接積分することにより数値解を求める線形加速度法を用いたが、時間増分の設定には、解の安定性に配慮し、十分小さい時間ステップを採用した。また、減衰定数としては、道路橋示方書で規定される震度法による地震荷重との整合性を考え、 $h=0.05$ を用いた。一方、一般に、 $F(t)$ は振動系の復元力特性に依存した関数として与えられるが、数値解析では、各構造要素に対して経験的な数値モデルが用いられるか、仮想的実験法のようにこれを数値モデル化が困難として構造モデルに対する載荷実験により求めるなどの方法が取られる。本研究では、弾塑性応答性状を算定するのに実用的と考えられる図-6 に示すようなバイリニア型の履歴性状を仮定した。この数値モデルの復元力特性は、降伏耐力と塑性 2 次係数によって表されるため、解析ケースとしては、降伏耐力が最大弾性復元力の 1/2, 1/3, 1/4 の 3 ケース、ならびに塑性 2 次係数が、弾性係数の 0.00, 0.01, 0.05 の 3 ケースから表 1 に示す合計 7 ケースを設定し、数値計算を行なった。

3. 結果および考察

100 個の相異なる模擬地震動の加速度波形を用いた一質点系の弾性ならびに弾塑性応答性状に付いて、応答値の平均 (M) および変動係数 ($COV=S/M$, S : 標準偏差) に基づき、以下に結果およびその考察を示す。なお、図-7 には、弾性系の応答値の変動を、図-8 から図-11 には弾塑性系の応答値の変動を $\alpha=2, 4$ および $\gamma=0.0, 0.05$ のケースを一例に示す。また、加速度応答を示す図には、最大復元力を加速度換算した結果を、変位応答を示す図には、各 α の値に対してエネルギー一定則に基づいて予測した最大応答変位をそれぞれ比較のために示す。

3.1 弾性応答

図-7(a) に示すよう弾性系の加速度応答の変動係数は、最大で 0.04 を多少上回る周期があるが、平均的には 0.02~0.03 と非常に小さく、目標応答スペクトルを再現する 100 個の加速度波形の生成が正しく行われていることを裏付けている。また、最大復元力は、最大慣性力とほぼ一致することがわかるが、これは、応答変位が最大になる時に、慣性力も最大となり、それぞれの波形の位相差が π であることを意味している。一方、加速度応答に加え、変位応答においても変動係数は非常に小さく、0.02~0.03 であり、最大復元力が

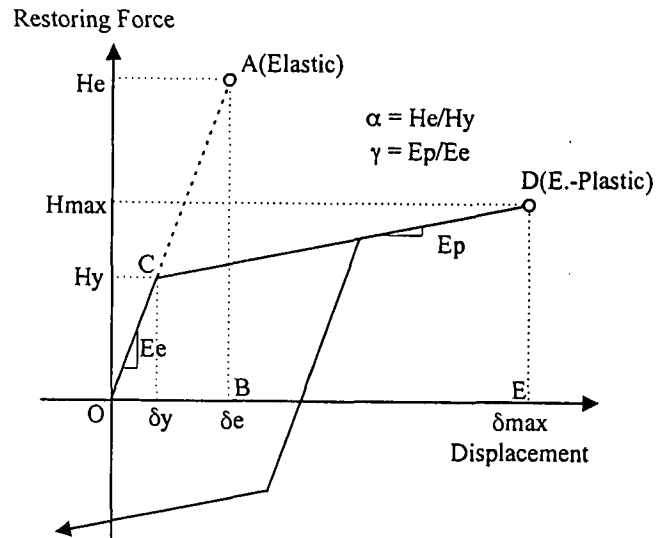


図-6 バイリニア型履歴特性

表-1 解析ケース

解析ケース		塑性 2 次係数 $\gamma = E_p/E_e$		
		0.00	0.01	0.05
降伏強度 $\alpha = H_e/H_y$	2	○	—	○
	3	○	—	○
	4	○	○	○

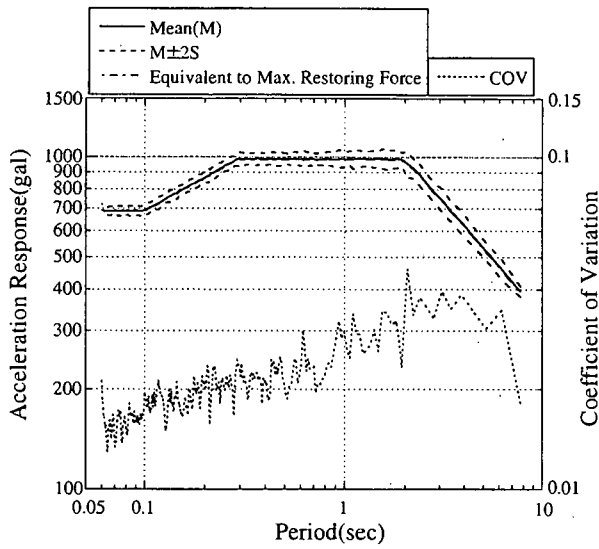
(note) H_e : 最大弾性復元力 H_y : 降伏復元力
 E_e : 弾性係数 E_p : 塑性 2 次係数

最大慣性力と整合している事実からも妥当と考えられる (図-7(b)). しかし、これに反して速度応答の変動係数に関しては平均的に 0.1 程度と相対的に大きくなっていることがわかる (図-7(c)).

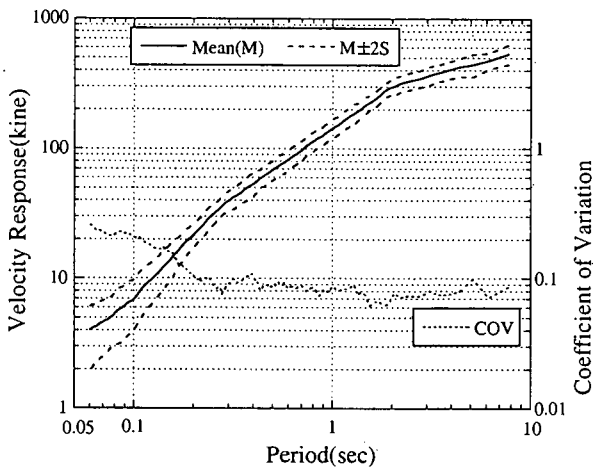
3.2 弾性応答と比較した弾塑性応答 ($\alpha=2, \gamma=0.00$)

図-8(a) に示すように弾塑性系の加速度応答は、構造物が塑性化 (耐力には上限がある) するため、弾性応答レベルに比べ、構造物の降伏耐力相当の加速度レベルまで低く抑えられる。その結果として、変動係数は、弾性応答時のそれより小さく、約 0.01 となっている。これに反して、変位応答の変動係数は、0.2 を上回り、特に短周期側で非常に大きくなる傾向があることがわかる (図-8(c)). しかし、速度応答の変動係数は、弾性応答のそれに比べて大きな変化は見られない (図-8(b)). 一方では、速度ならびに変位の平均応答に関しては、弾性と弾塑性系において大きな違いが見られないことがわかる。

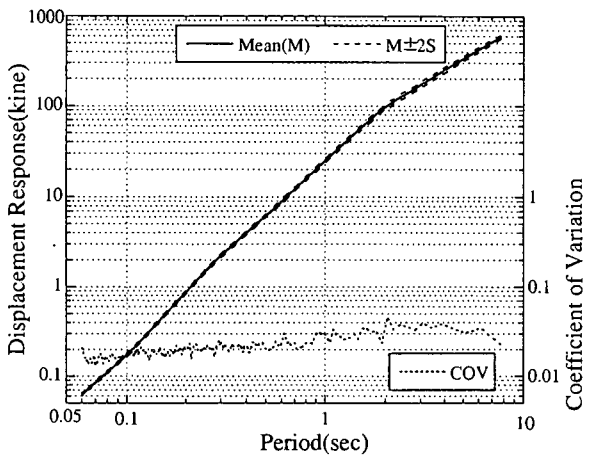
図-8(a) から短周期および長周期側において、最大復元力と最大慣性力が一致してないことがわかるが、場合によっては、その差異が 200(gal) となり構造物の降伏耐力と同レベルとなっている。特に、アンカーならびに基礎の設計に際しては上部構造の全慣性力を反力として受けるとして設計荷重を設定するため十分な注意が必要であることがわかる。これは、変位応答が最大・最小となる時 (速度応答がゼロ) に最大慣性



(a) 加速度応答



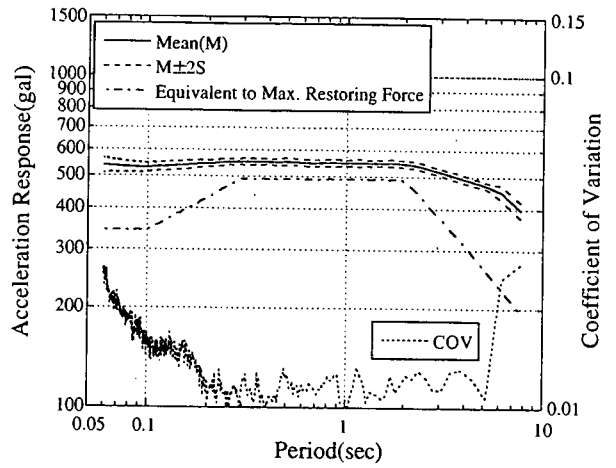
(b) 速度応答



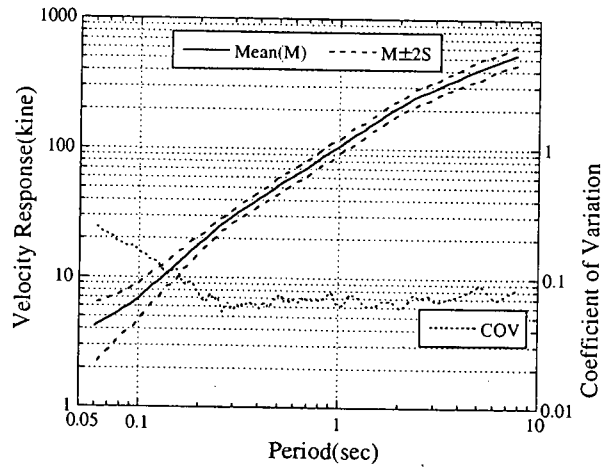
(c) 変位応答

図-7 弾性応答の平均値及び変動係数

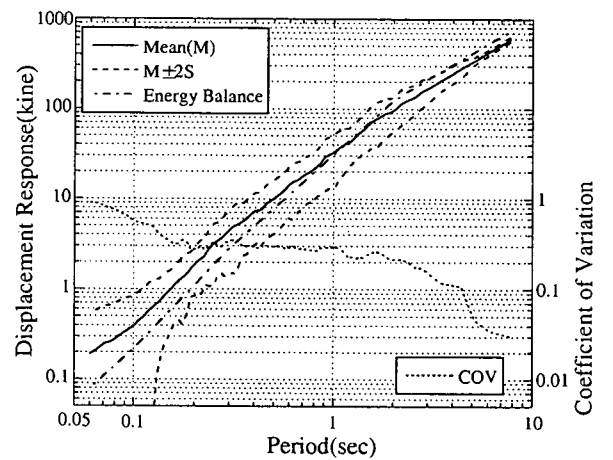
力が得られてないことを意味し、図-12 に示すような絶対加速度と速度の軌跡から、説明が可能と考えられる。図中の点線は、設定した減衰定数に対して降伏状



(a) 加速度応答



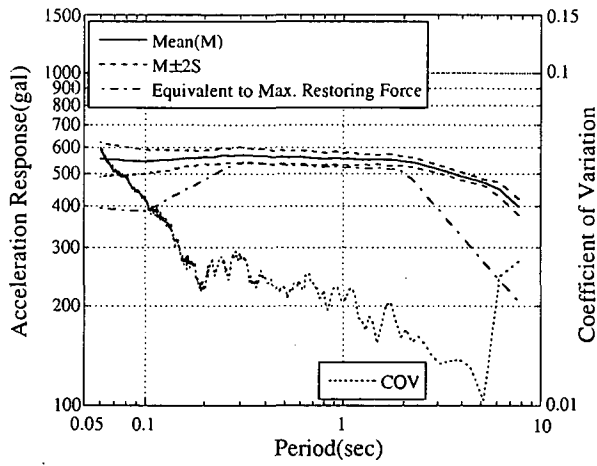
(b) 速度応答



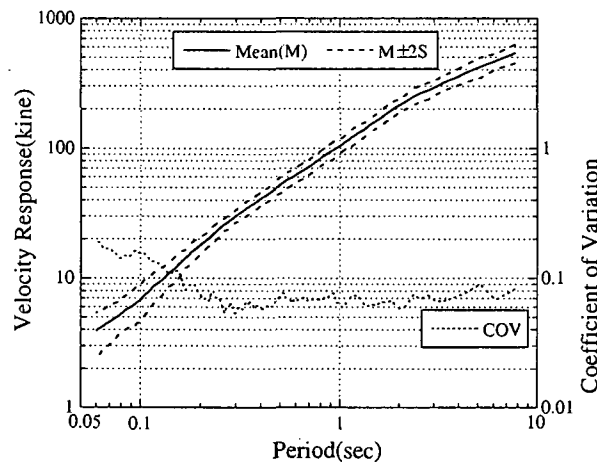
(c) 変位応答

図-8 弾塑性応答の平均値及び変動係数($\alpha=2, \gamma=0.0$)

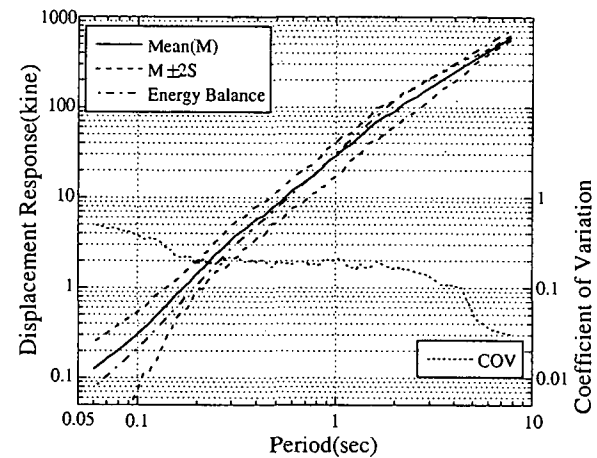
態で得られる加速度と速度の関係を示す。通常の軌跡は楕円形であるが、応答が大きくなるに従い楕円のサイズが大きくなり、前述の点線に交わることとなる。その後、この点線上を軌跡が移動して、速度がゼロ（最大応答変位が得られる時）になってはじめて除荷が開始することとなる。この直線は、右下がりであり、最



(a) 加速度応答



(b) 速度応答

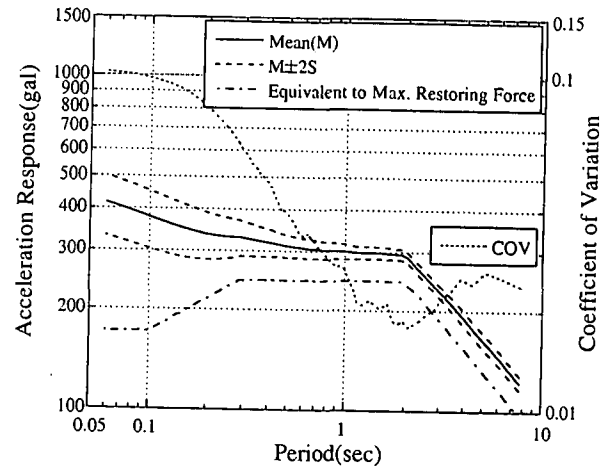


(c) 変位応答

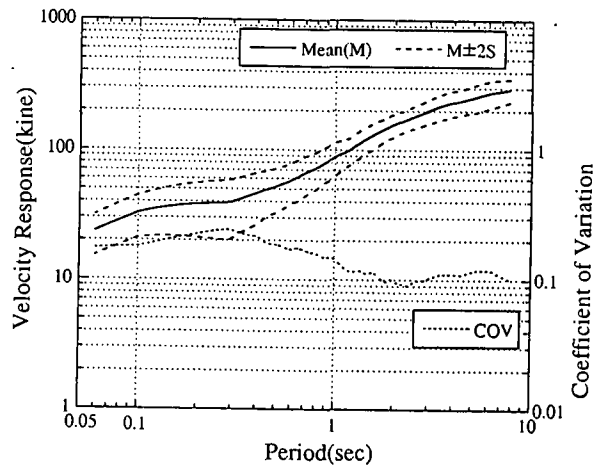
図-9 弾塑性応答の平均値及び変動係数 ($\alpha=2, \gamma=0.05$)

大復元力相当の加速度は、y切片で与えられるため、復元力と加速度が必ずしも一致しないことがわかる。

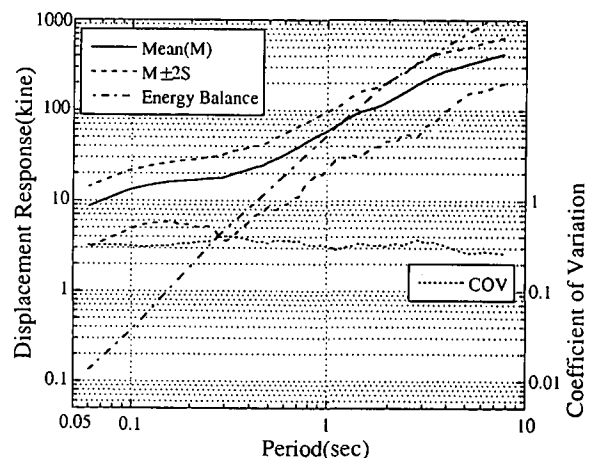
一方、変位応答のばらつきが大きいことは、保有水平耐力照査で保有変形能に応じて地震荷重は低減できるとする仮説の適用が大きな誤差を伴うことを意味する。保有水平耐力照査の重要な仮説であるエネルギー



(a) 加速度応答



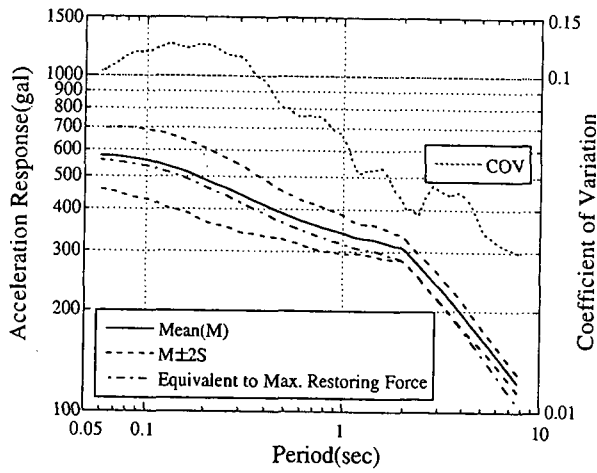
(b) 速度応答



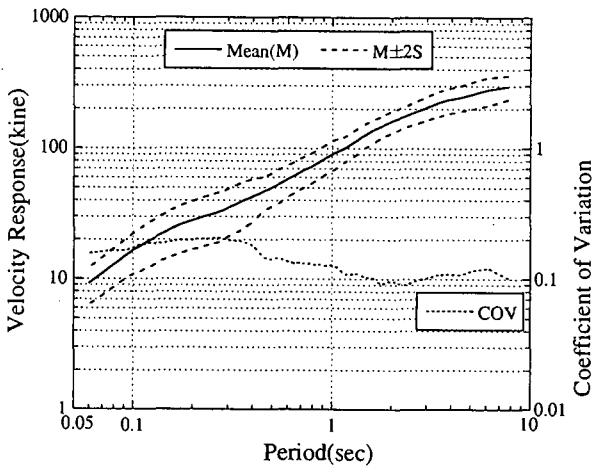
(c) 変位応答

図-10 弾塑性応答の平均値及び変動係数 ($\alpha=4, \gamma=0.0$)

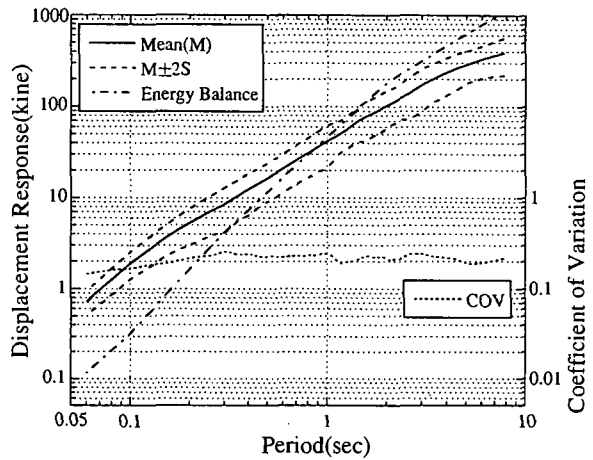
一定則による最大応変位予測を検証するために、参照曲線を図中に示した(図-8(c))。 $\alpha=2$ の場合には、比較的良くあっていると考えられるが、応答で安全となるには、建造物の周期が約1秒以上、さらに、応答のばらつきも考慮して安全側となるには、周期が3秒以上でなければならないことがわかる。周期0.2秒程



(a) 加速度応答



(b) 速度応答



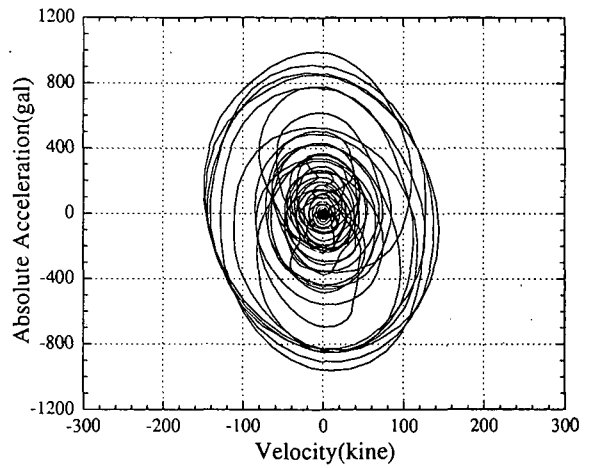
(c) 変位応答

図-11 弾塑性応答の平均値及び変動係数($\alpha=4, \gamma=0.05$)

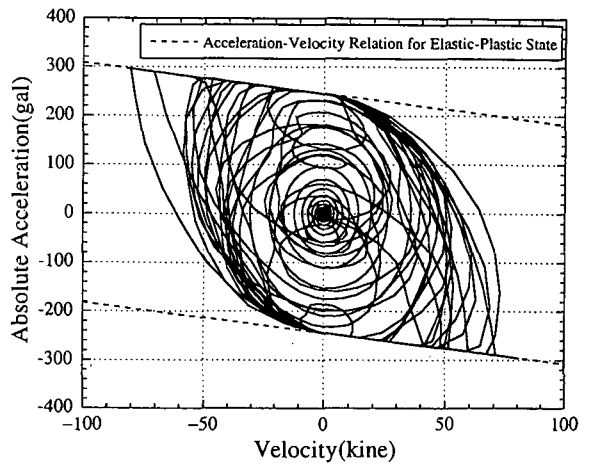
度では、エネルギー一定則による予測はほぼ危険側となる。

3.3 降伏耐力および塑性2次係数の影響

低降伏耐力の場合においては、各応答値が入力波形の非定常性、不確定性に大きく影響され、変動係数はさらに大きくなる(図-9~図-11)。特に、応答変位



(a) 弾性応答



(b) 弾塑性応答 ($\alpha=4, \gamma=0.00$)

図-12 絶対加速度応答と速度応答の軌跡

の変動係数が大きく、 $\alpha=4$ の場合で約 0.3 程度となっている(図-11(c))。したがって、エネルギー一定則、強いては保有水平耐力照査法の妥当性を失わせている。 $\alpha=3$ で、塑性率 5、 $\alpha=4$ で、塑性率 8.5 を目標としており、保有変形能の大きな構造物に対して大きく地震荷重を低減させるのは、これらのばらつきをより詳細に検討し、構造物の周期ならびに保有変形能に依存した部分安全係数の導入等により信頼性を高める必要がある。特に、0.3 秒を下回る低周期の構造物においては、その適用は望ましくないと考えられる。

一方、塑性2次係数が大きくなると、より弾性的な応答となるため、加速度応答の平均値が大きくなるとともに変動係数も微増する傾向がある。さらに、最大慣性力と最大復元力の差も小さくなる傾向がある。

これに反して、速度応答の平均値ならびに変動係数は、構造物の復元力特性を決定するパラメータに大きく影響されることなく、変動係数は比較的大きいものの、応答の変化は比較的小さくなっている。加速度応答、変位応答と速度応答の変動の関係を詳細に検討し、合理的な設計法の方角性を今後明らかにする必要がある。

4. 結論

本研究では、道路橋示方書のレベル2地震動に対して設定された地震荷重、すなわち保有水平耐力照査用の弾性加速度応答スペクトルを目標として、振幅包絡線関数の形状に位相差分スペクトルの形状を一致させた模擬地震動群を作成し、この地震動の加速度時刻歴を用いて一質点系モデルの弾塑性応答解析を行ない、加速度、速度、変位応答の平均値特性ならびに変動特性を明らかにした。さらに、保有水平耐力照査法と関連付けて、その合理性、問題点について検討を加えた。以下に得られた結果を述べる。

- (1) 同一加速度応答スペクトルを得る地震動は、無限個存在するが、強震動の一パラメータと考えられている最大加速度のばらつきは大きい。したがって、地震動の最大加速度が、必ずしも応答の大小に対して強い相関が存在するとは限らない。ただし、最大速度のばらつきはそれほどではない。
- (2) 弾塑性時の最大加速度応答のばらつきは、弾性応答時のそれより小さくなる。しかし、そのばらつきは、降伏耐力が大きくなるほど、塑性2次係数が大きくなるほど、大きくなる傾向にある。
- (3) 最大速度応答に関しては、弾性応答、弾塑性応答のいずれの場合でも、ばらつきに変化は無く、復元力特性に依存しない応答量として考えられる。
- (4) 最大変位応答のばらつきは、降伏耐力が小さいほど、非常に大きくなり、エネルギー一定則の適用性には限界がある。
- (5) 上部構造の最大慣性力と橋脚などの反力伝達構造の最大復元力には大きな差があり、ベースシアを参照

して基礎の設計を行なう際には、動的な効果も含めた上部構造の反力の設定が必要である。

今後の課題として、構造物の損傷と密接な関係がある速度応答スペクトルを基準とした耐震設計法を検討する必要があると考えられ、その特性を明らかにするとともに本研究の成果をより信頼あるものとするために、低周期及び高周期域の応答についても詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1989年2月。
- 2) 理論地震動研究会：地震動-その合成と波形処理-，鹿島出版会，1994年2月。
- 3) 日本建築学会：地震荷重-その現状と将来展望-，丸善，1987年12月。
- 4) 木村正彦：入力加速度波形の初期位相特性が履歴型非線形系の非対称応答に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集，第388号，1988年6月，pp. 28-33。
- 5) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，1994年5月。
- 6) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，1986年6月。
- 7) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，丸善，1990年10月（第2版）。

(1998年8月17日受付)

ASSESSMENT ON ELASTIC-PLASTIC RESPONSE OF SINGLE DEGREE OF FREEDOM SYSTEM SUBJECTED TO ARTIFICIAL GROUND MOTIONS AND SEISMIC DESIGN CONSIDERING DUCTILITY

Kunitomo SUGIURA, Eiichi WATANABE and Tatsuya YAMAGUCHI

Studied herein is the elastic-plastic response of the single degree of freedom system subjected to the artificial ground motions randomly generated by only adjusting the acceleration response spectrum equivalent to the earthquake loads defined in the Japanese Specification for Roadway Bridges. It is concluded that for the elastic-plastic system the coefficient of variation of acceleration response becomes smaller, but that of displacement response becomes larger compared to those of elastic system. In addition, it is also found that the coefficient for velocity response may be insensitive to the restoring force characteristics. Furthermore, the accuracy of maximum displacement response predicted by energy balance assumption is found to be not good enough in the case that the yield strength of the system is small as well as in the case that the natural period of structures is small, e.g., less than 0.3 seconds.