

構造物の非線形応答特性を考慮した 設計地震動の設定方法

吉田 仁司¹・田村 敬一²・中尾吉宏³

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)
²正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地-6)
³正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

平成 7 年兵庫県南部地震で生じたような非常に強い地震動に対しても構造物の安全性を確保するためには、構造物の塑性化を考慮した耐震設計を行うことが合理的であり、このような耐震設計では構造物の応答が非線形領域に及ぶことを想定したものとなる。構造物の非線形応答は地震動特性によって異なるものとなるため、設計地震動を定める場合に地震動特性が構造物の非線形応答に及ぼす影響をどのように考慮するのかが重要な課題となっている。本研究では、プレート境界型地震と内陸直下型地震のそれぞれの地震動特性が構造物の非線形応答に及ぼす影響を考慮した非線形加速度応答スペクトルの推定式を提案するとともに、その非線形加速度応答スペクトルに適合する非線形動的解析用波形の作成方法を提案した。

Key Words : nonlinear response, ground motion characteristics, seismic ground motion

1. はじめに

構造物の非線形応答は地震動特性によって種々変化することが知られており、構造物の塑性化を考慮した耐震設計では、地震動特性が構造物の非線形応答に及ぼす影響を考慮して設計地震動を定める必要がある。本研究では、プレート境界型地震と内陸直下型地震の地震動特性を考慮した非線形加速度応答スペクトルの推定式を提案するとともに、振動数領域で強震記録の振幅調整を行って、目標とする非線形加速度応答スペクトルに適合した非線形動的解析用波形を作成する方法を提案した。

表-1 μ_{tgr} , σ_{tgr} を算出する周期帯[sec]

No	周 期 帯
1	$2.56 \leq t < 5.12$
2	$1.28 \leq t < 2.56$
3	$0.64 \leq t < 1.28$
4	$0.32 \leq t < 0.64$
5	$0.16 \leq t < 0.32$
6	$0.08 \leq t < 0.16$

は完全バイリニアモデルを用い、内部減衰は5%とした。この解析結果に基づいて非線形加速度応答スペクトルの推定式を導出した。

2. 地震動特性を考慮した非線形応答の推定式

(1) 検討方法

プレート境界型地震と内陸直下型地震のそれぞれの地震動特性を有する模擬地震動を作成し、これを入力地震動として弾塑性型せん断バネを有する 1 質点系の非線形動的解析を行った。ここで、地震動特性として振幅特性と位相特性を考慮した。振幅特性は道路橋示方書¹⁾に規定される標準加速度応答スペクトルに適合するように振動数領域で強震記録の振幅調整を行い²⁾、位相特性は既往の強震記録から得られた統計的性質に基づいてモデル化した。系の非線形履歴モデルとして

(2) 既往の強震記録の位相特性

既往の強震記録を用いて位相特性の統計的性質について検討した。ここでは、地震動の位相特性を評価する指標として群遅延時間 T_{gr} に着目し、過去に観測された 54 記録、108 成分の加速度波形から T_{gr} を算出した。さらに、表-1 に示す周期帯ごとに T_{gr} の平均値 μ_{tgr} と標準偏差 σ_{tgr} を算出した。図-1 に平成 7 年兵庫県南部地震による尼崎高架橋記録 HA 成分の T_{gr} と μ_{tgr} , σ_{tgr} を算出した例を示す。ここで、 μ_{tgr} と周期 t の関係を $\log t$ の 1 次関数として(1)式で仮定し、プレート境界型地震(74 成分)と内陸直下型地震(34 成分)それぞれについて μ_{tgr} と t の関係について解析した。

$$\mu_{tgr} = K tgr \cdot \log t + C \tag{1}$$

ここで、 μ_{tgr} : 各周期帯における T_{gr} の平均値[sec]、

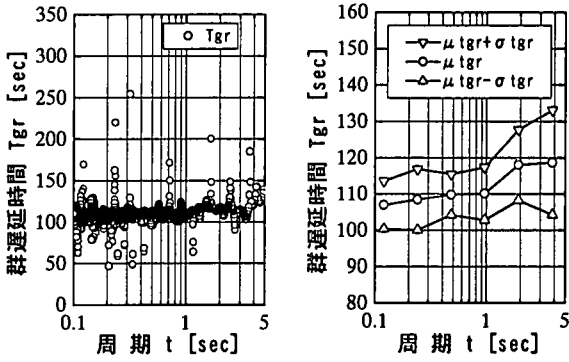
K_{tgr} : μ_{tgr} の周期軸に対する傾き、 t : 周期[sec]、 C : 定数である。なお、周期 t としては、表-1 に示した各周期帯の中央値を用いることとした。各強震記録の μ_{tgr} から最小二乗法により求めた K_{tgr} の平均値および標準偏差を表-2 に示す。同表によれば、 K_{tgr} の平均値±標準偏差の範囲はプレート境界型地震で 0~5 程度、内陸直下型地震で 0~7 程度であり、類似した傾向を示している。

次に、 σ_{tgr} の分析結果について示す。 σ_{tgr} は、各周期帯における T_{gr} が、その周期帯における T_{gr} の平均値 μ_{tgr} に対してどの程度ばらつきを有しているかを表しており、各強震記録について、周期帯ごとに算出されるものである。表-3 には地震動のタイプごとに全ての強震記録を用いて算出した各周期帯における σ_{tgr} の統計的性質として σ_{tgr} の平均値と標準偏差を示した。同表より、 σ_{tgr} の平均値は長い周期帯になるにしたがって大きくなるのがわかる。また、全周期帯において内陸直下型地震の σ_{tgr} の平均値は、プレート境界型地震の場合に比べて若干小さいことがわかる。 σ_{tgr} の標準偏差は、 $t \geq 0.32$ [sec] の周期帯では地震動のタイプによらずほぼ同等であるが、 $t < 0.32$ [sec] の短い周期帯では内陸直下型地震の σ_{tgr} の標準偏差は、プレート境界型地震の場合に比べて小さいことがわかる。

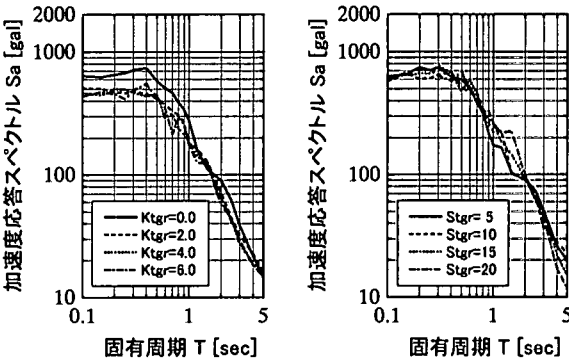
以上のように μ_{tgr} と σ_{tgr} は強震記録によって変動するため、その統計的性質を地震動のタイプごとに考慮して T_{gr} を設定し、この T_{gr} を模擬地震動の位相特性に反映させるものとした。なお、 T_{gr} は周期帯ごとに正規分布 $N(\mu_{tgr}, \sigma_{tgr})$ に従うものと仮定し、正規乱数を発生させることで T_{gr} を設定することとした。

(3) 位相特性が構造物の応答に与える影響

模擬地震動の位相特性は、 T_{gr} を設定する際にパラメータとする μ_{tgr} と σ_{tgr} に依存する。このため、 μ_{tgr} と σ_{tgr} が構造物の非線形応答に及ぼす影響を把握することが重要である。 μ_{tgr} は(1)式における K_{tgr} を用いてモデル化するため、ここでは K_{tgr} と σ_{tgr} が構造物の非線形応答に及ぼす影響について検討を行った。検討ケースとして、 K_{tgr} が構造物の非線形応答に及ぼす影響を検討するために、 $K_{tgr}=0, 2, 4, 6$ に変化させて $\sigma_{tgr}=5.0$ [sec] に固定したケースと、 σ_{tgr} が構造物の非線形応答に及ぼす影響を検討するために、 $K_{tgr}=0$ に固定し、 $\sigma_{tgr}=5, 10, 15, 20$ [sec] に変化させたケースを設定した。これらの検討ケースに応じて設定した T_{gr} を有し、道路橋示方書に規定される I 種地盤におけるタイプ II の地震動の標準加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動を各検討ケースで 3 波ずつ作成した。各検討ケースの 3 波は T_{gr} を正規乱数で設定する際に初期乱数を変えたものである。また、 T_{gr} からフーリエ位相を求める際の初期位相は全ケースとも $\phi_0=0$ [rad] とした。このようにして



(a) T_{gr} (b) μ_{tgr} と σ_{tgr}
図-1 尼崎高架橋 HA 成分の解析例



(a) K_{tgr} の異なる地震動 (b) σ_{tgr} の異なる地震動
図-2 加速度応答スペクトル(タイプ II, I 種地盤, $\mu=4$)

表-2 K_{tgr} の分析結果

	平均値	標準偏差	平均値-標準偏差	平均値+標準偏差
プレート境界型地震	2.40	2.68	-0.28	5.08
内陸直下型地震	3.40	3.24	0.16	6.64

表-3 σ_{tgr} の分析結果

周期帯 [sec]	プレート境界型地震		内陸直下型地震	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
$2.56 \leq t < 5.12$	21.57	11.81	18.94	12.76
$1.28 \leq t < 2.56$	14.59	6.67	12.01	6.96
$0.64 \leq t < 1.28$	12.56	6.45	11.42	6.07
$0.32 \leq t < 0.64$	11.19	4.28	9.03	4.51
$0.16 \leq t < 0.32$	10.61	3.91	8.34	2.51
$0.08 \leq t < 0.16$	10.98	4.62	7.94	2.33

作成した模擬地震動を入力地震動として非線形動的解析を行った。図-2 に非線形動的解析により算出した応答塑性率 $\mu=4$ の場合の加速度応答スペクトルを示す。なお、加速度応答スペクトルは各ケースの模擬地震動 3 波による応答値の平均としてプロットした。図-2(a)より、 K_{tgr} が異なる地震動による系の非線形応答は $K_{tgr}=0$ の場合に大きくなっており、これは既往の研究³⁾と整合するものである。また、図-2(b)より σ_{tgr} が異なる地震動に

表-4 回帰係数と相関係数

地盤種別	タイプⅠ地震動			タイプⅡ地震動		
	$T_i \leq 1.4$ $a = -0.649 \log_{10} \mu + 2.845$ $b = -0.246 \log_{10} \mu$ $r = 0.958$	$1.4 < T_i$ $a = -0.711 \log_{10} \mu + 2.991$ $b = 0.177 \log_{10} \mu - 1.000$ $r = 0.980$		$T_i < 0.3$ $a = -0.994 \log_{10} \mu + 3.650$ $b = -0.713 \log_{10} \mu + 0.667$ $r = 0.956$	$0.3 \leq T_i \leq 0.7$ $a = -1.138 \log_{10} \mu + 3.301$ $b = -0.989 \log_{10} \mu$ $r = 0.976$	$0.7 < T_i$ $a = -0.938 \log_{10} \mu + 3.043$ $b = 0.304 \log_{10} \mu - 1.667$ $r = 0.990$
Ⅰ種						
Ⅱ種	$T_i < 0.18$ $a = -0.785 \log_{10} \mu + 3.178$ $b = -0.489 \log_{10} \mu + 0.333$ $r = 0.911$	$0.18 \leq T_i \leq 1.6$ $a = -0.656 \log_{10} \mu + 2.929$ $b = -0.318 \log_{10} \mu$ $r = 0.958$	$1.6 < T_i$ $a = -0.766 \log_{10} \mu + 3.134$ $b = 0.215 \log_{10} \mu - 1.000$ $r = 0.977$	$T_i < 0.4$ $a = -0.988 \log_{10} \mu + 3.508$ $b = -0.814 \log_{10} \mu + 0.667$ $r = 0.970$	$0.4 \leq T_i \leq 1.2$ $a = -0.907 \log_{10} \mu + 3.243$ $b = -0.609 \log_{10} \mu$ $r = 0.980$	$1.2 < T_i$ $a = -0.984 \log_{10} \mu + 3.375$ $b = 0.368 \log_{10} \mu - 1.667$ $r = 0.986$
Ⅲ種	$T_i < 0.29$ $a = -0.651 \log_{10} \mu + 3.179$ $b = -0.407 \log_{10} \mu + 0.333$ $r = 0.872$	$0.29 \leq T_i \leq 2.0$ $a = -0.596 \log_{10} \mu + 3.000$ $b = -0.305 \log_{10} \mu$ $r = 0.959$	$2.0 < T_i$ $a = -0.671 \log_{10} \mu + 3.301$ $b = -0.057 \log_{10} \mu - 1.000$ $r = 0.974$	$T_i < 0.5$ $a = -0.899 \log_{10} \mu + 3.377$ $b = -0.804 \log_{10} \mu + 0.667$ $r = 0.960$	$0.5 \leq T_i \leq 1.5$ $a = -0.875 \log_{10} \mu + 3.176$ $b = -0.725 \log_{10} \mu$ $r = 0.983$	$1.5 < T_i$ $a = -1.095 \log_{10} \mu + 3.470$ $b = 0.521 \log_{10} \mu - 1.667$ $r = 0.987$

よる系の非線形応答は、一部の周期帯を除いて概ね同程度となっていることがわかる。以上のことから、標準加速度応答スペクトルに適合させた地震動による系の非線形応答は、 $K_{tgr}=0$ のときに大きくなる傾向があると考えられる。また、 σ_{tgr} が非線形応答に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(4) 非線形応答スペクトルの推定式

プレート境界型地震と内陸直下型地震の地震動特性を考慮した模擬地震動を作成し、これらを入力して非線形動的解析を行い、非線形加速度応答スペクトルを算出した。作成した模擬地震動は、道路橋示方書に規定される標準加速度応答スペクトルに適合し、位相特性として、 $K_{tgr}=0$ でモデル化した μ_{tgr} と表-3 に示した周期帯ごとの平均値および平均値±標準偏差の3ケースの σ_{tgr} を用いて設定した T_{gr} を有するものである。図-3にⅠ種地盤におけるタイプⅡの地震動について、応答塑性率 $\mu=4$ の場合の非線形加速度応答スペクトルを示す。同図には、3波の標準波形⁴⁾ による非線形加速度応答スペクトルも示している。これによれば、標準波形と本研究で作成した模擬地震動は概ね同等の非線形加速度応答スペクトルを示していることがわかる。これは標準波形の元波形の位相特性が $K_{tgr}=0$ に近い特性を有しているためであると考えられる。次に、非線形加速度応答スペクトル $S_A[\text{gal}]$ と系の初期固有周期 $T[\text{sec}]$ および応答塑性率 μ の関係式として式(2)を仮定し、 $0.1 \leq T \leq 5.0[\text{sec}]$ 、 $1 \leq \mu \leq 8$ の範囲で回帰分析を行い、非線形加速度応答スペクトルの推定式を導出した。

$$\begin{cases} S_A = 10^{\alpha_1} \cdot T^{\alpha_2} \\ a = \alpha_3 \log \mu + \alpha_4 \\ b = \alpha_5 \log \mu + \alpha_6 \end{cases} \quad (2)$$

回帰係数 α_i および相関係数 r を表-4に、Ⅰ種地盤におけるタイプⅡの地震動の加速度応答スペクトルの推定結果を図-4に示す。

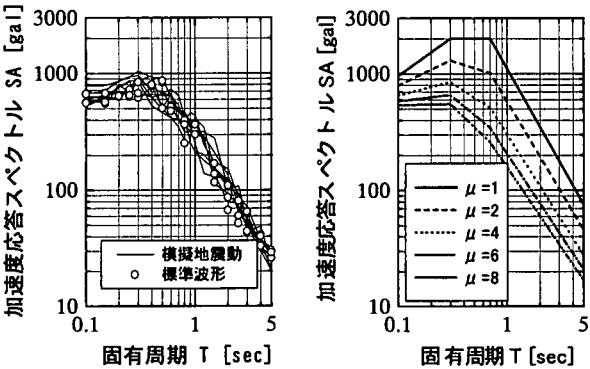


図-3 加速度応答スペクトル (μ=4) 図-4 加速度応答スペクトル (回帰式)

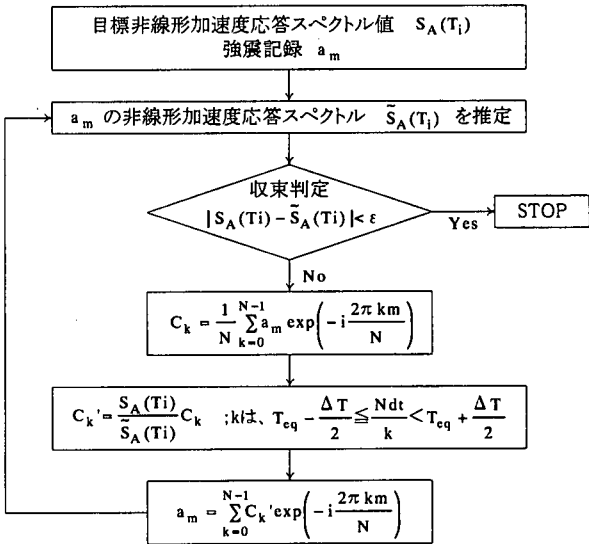


図-5 強震記録の振幅特性調整のフローチャート

3. 非線形動的解析用波形の作成方法

(1) 解析方法

本論文では、図-5 に示すフローに基づいて、振動数領域で強震記録 a_m の振幅特性を調整して、強震記録の非線形加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ を目標とする非線形加速度応答スペクトル S_A に適合させた。まず、強震記録

a_m の非線形加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ を推定し、収束条件を満足していなければ、系の等価固有周期 T_{eq} に近い周期帯のフーリエ振幅 C_k を $S_A(T_i)/\tilde{S}_A(T_i)$ 倍し、 $\tilde{S}_A(T_i)$ を $S_A(T_i)$ に適合させる。 $\tilde{S}_A$ を適合させる全ての初期固有周期 T_i において収束条件を満足するまで、このような振動数領域における強震記録の振幅調整を繰り返し行う。ここで、 T_i としては $0.05 \sim 10[\text{sec}]$ を常用対数軸上で均等に 39 分割したものを用い、 ΔT は隣り合う初期固有周期 T_i の差分とした。目標とする非線形加速度応答スペクトル S_A は、式(2)を用いて設定した。本論文では、図-4 に示した I 種地盤におけるタイプ II の地震動において応答塑性率 $\mu=4$ で応答する系の非線形加速度応答スペクトルを S_A とした例を示す。 $\tilde{S}_A$ は、初期固有周期 T_i 及び減衰定数 h の系が応答塑性率 μ で応答する場合の加速度応答スペクトルの推定値であり、応答塑性率 μ に基づいて推定される等価固有周期 T_{eq} 及び等価減衰定数 h_{eq} の系の弾性応答のフーリエ振幅スペクトルと、等価固有周期 T_{eq} 及び減衰定数 h の系の弾性応答のフーリエ位相スペクトルを組み合わせることにより非線形応答を推定する方法⁹⁾に基づいて推定した。当該推定方法は、系の非線形履歴モデルに完全バイリニアモデルを用いて検討されたものである。

(2) 解析結果

本論文では、図-4 に示した応答塑性率 $\mu=4$ で応答する場合の S_A に平成 7 年兵庫県南部地震による猪名川記録 N-S 成分の非線形加速度応答スペクトル $\tilde{S}_A$ を適合させた結果を一例として示す。図-6 には、目標とする非線形加速度応答スペクトル S_A と、振幅調整前後の猪名川記録の $\tilde{S}_A$ を示す。また、図-7 には調整前後の猪名川記録の時刻歴波形を示す。図-6 より、一部の固有周期 T_i において若干の乖離が認められるが、 $\tilde{S}_A$ が S_A に精度良く適合するよう強震記録を調整できていることがわかる。

4. まとめ

本研究から得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 線形加速度応答スペクトルが同等の地震動では、群遅延時間の各周期帯における平均値 μ_{tgr} が周期帯によらず一定 ($K_{tgr}=0$ の場合) となる位相特性を有する場合に構造物の非線形応答が大きくなる傾向がある。また、各周期帯における T_{gr} の標準偏差 σ_{tgr} が非線形応答に及ぼす影響は小さい。
- 2) 構造物の非線形応答が大きくなると考えられる位相特性を有するスペクトル適合波を入力地震動とした非線形動的解析結果に基づき、地震動のタイプお

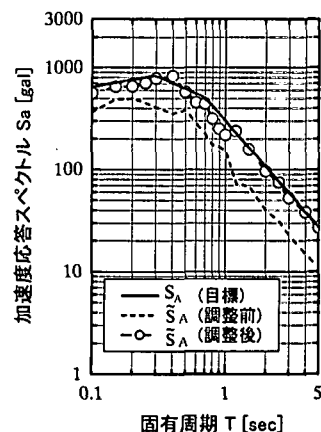
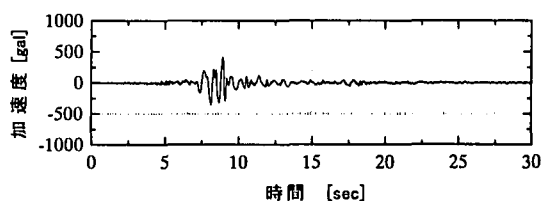
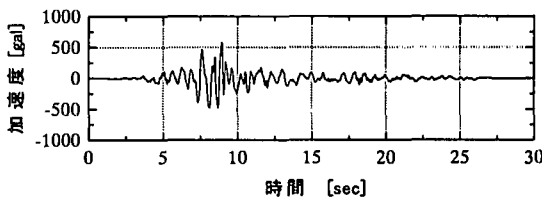


図-6 目標 S_A と振幅調整前後の $\tilde{S}_A$ ($\mu=4$)



(a) 振幅調整前



(b) 振幅調整後

図-7 振幅調整前後の時刻歴波形

よび地盤種別ごとに非線形加速度応答スペクトルの推定式を提案した。

- 3) 初期固有周期 T_i における非線形加速度応答スペクトル値は、等価固有周期 T_{eq} に近い周期帯における強震記録のフーリエ振幅を調整することにより、目標値に適合させることが可能である。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 8 年 12 月
- 2) 建設省土木研究所：動的解析用入力地震動の設定法、土木研究所資料第 2120 号、昭和 59 年 3 月
- 3) 羅休、室野剛隆、西村昭彦：群遅延時間を用いた適合波の作成とその非定常性が弾塑性応答に及ぼす影響，第 10 回日本地震工学シンポジウム、平成 10 年 11 月
- 4) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成 9 年 3 月
- 5) 吉田仁司、田村敬一、中尾吉宏：地震動特性に基づく非線形応答の推定方法に関する研究、第 4 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2000 年 12 月