

地震動特性を考慮した非線形応答の推定方法について

国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 吉田 仁司  
 独立行政法人 土木研究所 正会員 田村 敬一  
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 正会員 中尾 吉宏

1. はじめに

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、道路橋等の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必要がある。現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>ではエネルギー一定則に基づき構造物の非線形応答を評価しているが、実際の非線形応答は地震動特性によって異なる。そこで本研究では、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を考慮して非線形応答を推定する手法について検討した。

2. 検討方針

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た地震動を既往の強震記録から得られた位相特性の統計的性質を考慮して種々作成し、これらを入力地震動として非線形動的解析を行うことにより、地震動特性が非線形応答に及ぼす影響を検討し、構造物の非線形応答の推定方法を提案した。

3. 既往の強震記録の位相特性

地震動の位相特性を評価する指標として群遅延時間 Tgr 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 Tgr を算出した。さらに、表-1 に示すフーリエ成分波の周期帯ごとに Tgr の平均値  $\mu_{tgr}$  と標準偏差  $\sigma_{tgr}$  を求めた。図-1 および図-2 に平成7年兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録 N-S 成分および尼崎高架橋記録 HA 成分の解析例を示す。 $\mu_{tgr}$  は、図-1 のように周期によらず概ね一定値をとる場合と、図-2 のように周期とともに漸増する場合があることを踏まえて、プレート境界型地震(74成分)と内陸直下型地震(34成分)による強震記録の  $\mu_{tgr}$  と t の関係を(1)式を用いてモデル化した。

$$\mu_{tgr} = K_{tgr} \cdot \log t + C \quad (1)$$

(1)式中の t としては表-1 に示した各周期帯の中央値を用いた。Ktgr は  $\mu_{tgr}$  の周期軸に対する傾きを表し、Ktgr=0 の場合に  $\mu_{tgr}$  が周期によらず一定値をとることを意味する。また、C は定数である。表-2 に  $\mu_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  の分析結果を示す。Ktgr の平均値土標準偏差の範囲はプレート境界型地震では 0~5 程度、内陸直下型地震では 0~7 程度であり、類似した傾向を示している。また、 $\sigma_{tgr}$  は内陸直下型地震の場合の方が若干小さい値となることがわかる。本研究では Tgr が各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 Tgr を設定することとした。

4. 位相特性が構造物の応答に与える影響

既往の強震記録から求めた  $\mu_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  の分析結果に基づき表-3 に示した Ktgr から得られる  $\mu_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  を用いて発生させた正規乱数を Tgr とする位相特性を有し、道路橋示方

表-1  $\mu_{tgr}, \sigma_{tgr}$  を算出する周期帯[sec]

No	周期帯
1	2.56 t < 5.12
2	1.28 t < 2.56
3	0.64 t < 1.28
4	0.32 t < 0.64
5	0.16 t < 0.32
6	0.08 t < 0.16

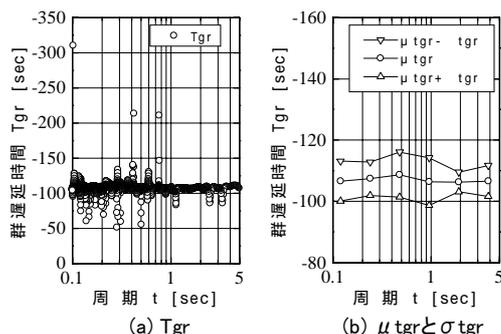


図-1 神戸海洋気象台記録 N-S成分

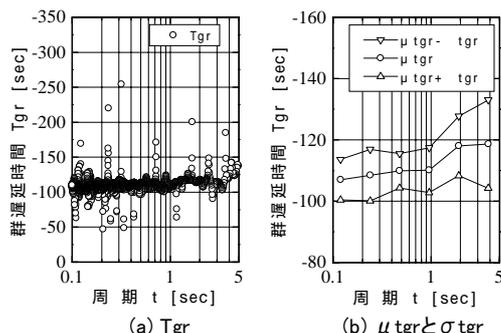


図-2 尼崎高架橋記録 HA成分

表-2  $\mu_{tgr}, \sigma_{tgr}$  の分析結果

周期帯	プレート境界型地震				内陸直下型地震			
	Ktgr		$\sigma_{tgr}$		Ktgr		$\sigma_{tgr}$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
$2.56 \leq t < 5.12$	-2.40	2.68	21.57	11.81	-3.40	3.24	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

キーワード: 非線形加速度応答スペクトル、塑性化、地震動特性

連絡先: 〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地 Tel 0298-64-3245 Fax 0298-64-0598

書に規定される I 種地盤におけるタイプ II 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ケースで 3 波ずつ作成し、弾塑性型せん断バネを有する 1 質点系に対して非線形動的解析を行った。系の非線形履歴モデルとしては完全バイリニアモデルを用い、内部減衰は 5%とした。なお、各ケースの 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。同表では  $\sigma_{tgr}=5.0[\text{sec}]$  に固定し  $K_{tgr}=0.0\sim 6.0$  に変化させたケースと、 $K_{tgr}=0.0$  に固定し  $\sigma_{tgr}=5.0\sim 20.0[\text{sec}]$  に変化させたケースを設定して  $K_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  が構造物の非線形応答に及ぼす影響について検討した。図-3 に非線形動的解析により算出した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をプロットした。同図より、 $K_{tgr}=0.0$  の場合に非線形応答が大きくなっており、これは既往の研究<sup>2)</sup>と整合するものである。また、 $\sigma_{tgr}$  が異なる場合の非線形応答はいずれも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の非線形応答特性としては、 $K_{tgr}$  が非線形応答に及ぼす影響が大きく、 $K_{tgr}=0.0$  のときに非線形応答が最も大きくなると考えられる。また、 $\sigma_{tgr}$  が非線形応答に及ぼす影響は小さいと考えられる。

5. 非線形応答スペクトルの推定式

本論文では、標準加速度応答スペクトルに適合し、 $K_{tgr}=0.0$  の位相特性を有する模擬地震動を作成した。ここで、 $\sigma_{tgr}$  には表-2 に示した分析結果をもとに、各周期帯ごとの平均値および平均値±標準偏差の3ケースの値を用いた。このようにして作成した模擬地震動の非線形加速度応答スペクトルを算出した。図-4 にタイプ II の地震動、I 種地盤、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<sup>3)</sup>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  $K_{tgr}=0.0$  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 1 質点弾塑性系の初期固有周期  $T[\text{sec}]$  および応答塑性率  $\mu$  の関係式として式(2)を仮定し、 $0.1 \leq T \leq 5.0[\text{sec}]$ 、 $2 \leq \mu \leq 8$  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。回帰係数  $\alpha_i$  および相関係数を表-4 に、タイプ II の地震動、I 種地盤の加速度応答スペクトルの推定値を図-5 に示す。

$$\log S_A = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \log T + \alpha_3 \cdot \mu + \alpha_4 \cdot \mu \cdot \log T \quad (2)$$

6. 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、 $K_{tgr}=0.0$  の場合に構造物の非線形応答が大きくなり、 $\sigma_{tgr}$  が非線形応答に及ぼす影響は小さい。

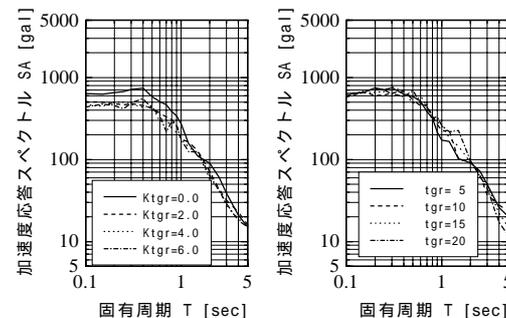
2) 構造物の非線形応答が大きくなる  $K_{tgr}=0.0$  の位相特性を有するスペクトル適合波を作成し、非線形動的解析結果に基づき、非線形応答スペクトルの推定式を提案した。

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) 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
- 3) 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

表-3  $K_{tgr}, \sigma_{tgr}$  の検討ケース

検討対象	Case	$K_{tgr}$	$\sigma_{tgr}$
$K_{tgr}$	1	0.0	5.0
	2	2.0	5.0
	3	4.0	5.0
	4	6.0	5.0
$\sigma_{tgr}$	1	0.0	5.0
	2	0.0	10.0
	3	0.0	15.0
	4	0.0	20.0



(a)  $K_{tgr}$  の異なる地震動 (b)  $\sigma_{tgr}$  の異なる地震動  
図-3 加速度応答スペクトル(タイプ II, I 種地盤,  $\mu=4$ )

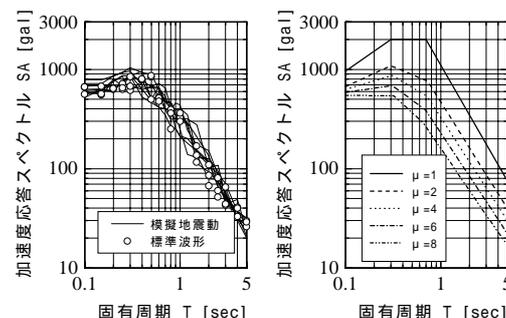


図-4 加速度応答スペクトル ( $\mu=4$ ) 図-5 加速度応答スペクトル (回帰式)

表-4 回帰係数と相関係数

地震動タイプ	地盤種別	固有周期	回帰係数				相関係数
			$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	
I	I	$T \leq T_i$	2.67	-0.01	-0.05	-0.03	0.82
		$T_i < T$	2.82	-1.00	-0.07	0.02	0.91
		$T < T_i$	2.90	0.19	-0.05	-0.03	0.66
	II	$T_i \leq T \leq T_j$	2.74	-0.05	-0.05	-0.03	0.80
		$T_j < T$	2.91	-0.96	-0.06	0.02	0.90
		$T < T_i$	3.02	0.28	-0.05	-0.04	0.60
	III	$T_i \leq T \leq T_j$	2.83	-0.10	-0.04	-0.02	0.81
		$T_j < T$	3.11	-0.99	-0.05	-0.01	0.89
		$T < T_i$	3.44	0.59	-0.09	-0.07	0.81
II	I	$T_i \leq T \leq T_j$	3.00	-0.25	-0.09	-0.08	0.88
		$T_j < T$	2.83	-1.57	-0.08	0.02	0.98
		$T < T_i$	3.28	0.52	-0.08	-0.07	0.86
	II	$T_i \leq T \leq T_j$	2.99	-0.28	-0.07	-0.04	0.88
		$T_j < T$	3.12	-1.50	-0.08	0.02	0.95
		$T < T_i$	3.09	0.46	-0.06	-0.06	0.84
	III	$T_i \leq T \leq T_j$	2.97	-0.07	-0.07	-0.08	0.89
		$T_j < T$	3.19	-1.54	-0.09	0.04	0.95

※ 固有周期  $T_i, T_j$  は、各回帰式の交点で与えられる。