

## 構造物の塑性化を考慮した設計地震動

中尾吉宏\* 田村敬一\*\* 吉田仁司\*\*\*

### 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構造物の安全性を確保するためには、構造部材の強度の向上だけでは限界があり、構造物に多少の損傷(塑性化)が生じることを許容した耐震設計を行うことが合理的である。構造物の塑性化を考慮した耐震設計とは、構造部材の変形性能を高めることにより、全体として地震に耐える粘りのある構造系を形成しようとするものである。例えば、兵庫県南部地震後に改訂された道路橋示方書<sup>1)</sup>では、地震時保有水平耐力法によりこのような構造物の塑性化を考慮した耐震設計を行っており、エネルギー一定則を用いて構造物の線形応答から非線形応答を推定することにより、構造物に作用させる設計地震力(慣性力)を算定している。エネルギー一定則は、構造物の非線形応答の簡便な推定手法ではあるが、構造物の非線形応答は地震動特性や構造物の特性により変化する。そこで、本研究では、構造物の塑性化を考慮した設計地震動の高精度化を目的として、地震動特性や構造物の特性を考慮した非線形応答の推定手法について研究開発を行った。本稿では、その成果として、プレート境界型地震及び内陸直下型地震による地震動特性と構造物の特性とを考慮して、1質点系構造物の線形応答の最大値を表す線形加速度応答スペクトルから1質点系構造物の非線形応答の最大値を表す非線形加速度応答スペクトルを推定する手法を提案する。

また、道路橋示方書では、動的解析用の入力地震動として、標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように既往の代表的な強震記録を振動数領域で振幅調整した時刻歴波形を用いることが原則とされている。標準加速度応答スペクトルは、線形加速度応答スペクトルを用いて入力地震動の特性を規定したものであるが、非常に強い地震動に対する構造物の耐震性能を照査する場合の動的解析は非線形動的解析となる。非線形動的解析に用いる入力地震動の特性は、線形加速度応答スペクトルより

も、非線形加速度応答スペクトルにより規定するのがより合理的である。そこで、本稿では、目標とする非線形加速度応答スペクトルに適合した動的解析用の入力地震動を設定する方法を提案する。

### 2. 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

#### 2.1 検討方法

プレート境界型地震と内陸直下型地震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、図-1に示す弾塑性型せん断バネを有する1質点系を用い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図-2に示す完全バイリニアモデルを用い、内部減衰は5%とした。地震動特性としては位相特性と振幅特性を考慮することとし、既往の強震記録の位相特性の統計的な性質に基づいて位相特性を変化させた地震動を種々作成した上で、振幅特性を振動数領域で調整<sup>2)</sup>して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模擬地震動を作成した。地震動特性として位相特性と振幅特性の両者を考慮したのは、そのどちらか片方だけの考慮では地震動の特性を十分に表現しきれないためである。非線形動的解析では、1質点系の降伏耐力を変更して繰り返し計算を行うことにより、予め設定した応答塑性率を持つ1質点系の非線形加速度応答スペクトルを算出した。この結果に基づいて、道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルを基本に、任意の応答塑性率の非線形加速度応答スペクトルを推定する方法を提案した。

#### 2.2 既往の強震記録の位相特性

既往の強震記録を用いてプレート境界型地震及び内陸直下型地震による地震動の位相特性の統計的な性質について検討した。地震動の位相特性を評価

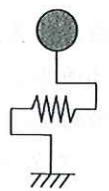


図-1 解析モデル

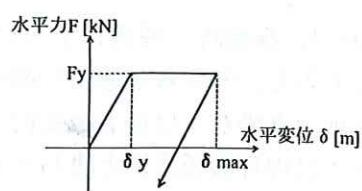


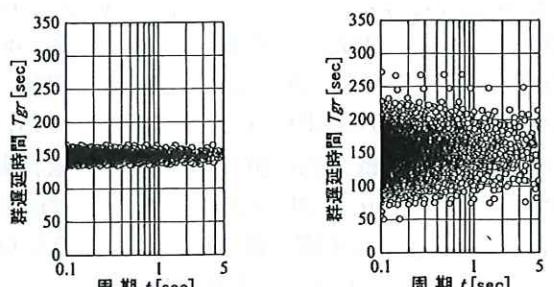
図-2 非線形履歴モデル

する指標としては群遅延時間  $T_{gr}(\omega)$  を用いた<sup>3)</sup>。ここで、群遅延時間  $T_{gr}(\omega)$  とは、フーリエ位相スペクトル  $\phi(\omega)$  を角振動数で微分したものであり、

$$T_{gr}(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad (1)$$

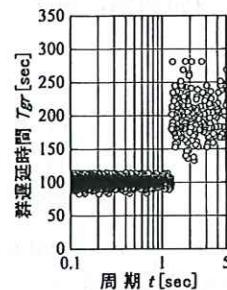
で表される。角振動数  $\omega$  ごとに算出される群遅延時間  $T_{gr}(\omega)$  について、ある角振動数帯  $\omega_l \leq \omega \leq \omega_u$  で平均値  $\mu_{tgr}$  と標準偏差  $\sigma_{tgr}$  を算出すれば、 $\mu_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  は、それぞれ、当該角振動数帯の地震動の時刻歴波形で振幅が大きい時間帯の中心的な時刻  $t_s$  と、時刻  $t_s$  回りに振幅が大きい時間帯の長さを表す指標となることが知られている<sup>4)</sup>。 $\mu_{tgr}$  及び  $\sigma_{tgr}$  と、時刻歴波形で振幅が大きい時間の関係を例証するため、位相特性としては図-3 に示す 3 種類の群遅延時間  $T_{gr}$  を有し、振幅特性は同一の地震動の時刻歴波形を、それぞれ、図-4 に示す。ここで、図-3 では、角振動数を周期に変更して表現している。また、図-3 及び図-4 では、群遅延時間の概念をわかりやすく示すために、実際の地震動波形ではなく、継続時間の長い人工波形を用いている。図-3 (a) 及び (b) は、 $\mu_{tgr}$  及び  $\sigma_{tgr}$  が全周期帶で一定となる群遅延時間  $T_{gr}$  を設定したものであり、図-3 (c) は、短周期帶と長周期帶で  $\mu_{tgr}$  及び  $\sigma_{tgr}$  が異なる群遅延時間  $T_{gr}$  を設定したものである。図-3 (a) 及び (b) の群遅延時間  $T_{gr}$  の全周期帶における平均値  $\mu_{tgr}$  は 150 [sec] であり、図-4 (a) 及び (b) の時刻歴波形は 150 [sec] 付近で振幅が大きくなっている。また、群遅延時間  $T_{gr}$  の全周期帶における標準偏差  $\sigma_{tgr}$  は図-3 (a) に比べて図-3 (b) で大きく、時刻歴波形で  $t_s=150$  [sec] の回りに振幅が大きい時間帯は、図-4 (a) に比べて図-4 (b) で長い。図-3 (c) では、群遅延時間  $T_{gr}$  の平均値  $\mu_{tgr}$  を、短周期帶及び長周期帶で、それぞれ、100 [sec] 及び 200 [sec] としており、図-4 (c) の時刻歴波形では、短周期成分及び長周期成分の地震動の振幅が、それぞれ、100 [sec] 付近及び 200 [sec] 付近で大きくなっている。また、図-3 (c) では、群遅延時間  $T_{gr}$  の標準偏差  $\sigma_{tgr}$  が長周期帶に比べて短周期帶で小さくなってしまっており、時刻歴波形で短周期成分の地震動の振幅が大きい時間帯は長周期成分の地震動に比べて短い。

本研究では、過去に観測された 54 記録、108 成分(プレート境界型地震: 74 成分、内陸直下型地震: 34 成分)の加速度波形から、表-1 に示す周期帯ごとに、上述の群遅延時間  $T_{gr}$  の平均値  $\mu_{tgr}$  と標準偏差  $\sigma_{tgr}$  を算出した。解析対象記録は、マグニチュード  $M \geq 6$ 、震源深さ  $h \leq 50$  [km]、



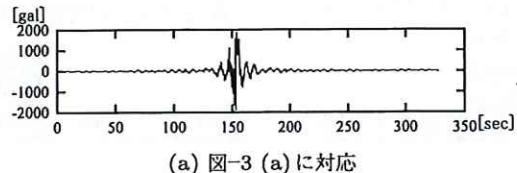
(a)  $\mu_{tgr}:150[\text{sec}]$ ,  $\sigma_{tgr}$ :小  
(全周期帶で一定)

(b)  $\mu_{tgr}:150[\text{sec}]$ ,  $\sigma_{tgr}$ :大  
(全周期帶で一定)

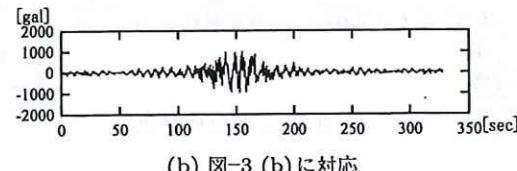


(c)  $\mu_{tgr}:100[\text{sec}]$ ,  $\sigma_{tgr}$ :小(短周期帶)  
 $\mu_{tgr}:200[\text{sec}]$ ,  $\sigma_{tgr}$ :大(長周期帶)

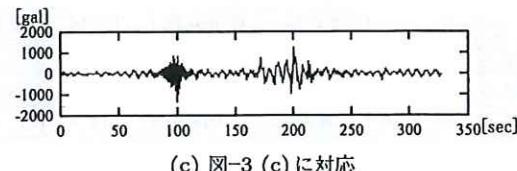
図-3  $\mu_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  が異なる群遅延時間  $T_{gr}$



(a) 図-3 (a) に対応



(b) 図-3 (b) に対応



(c) 図-3 (c) に対応

図-4 位相特性を変化させた時刻歴波形

最大加速度  $A_{max} \geq 50$  [gal] の強震記録である。

はじめに、プレート境界型地震と内陸直下型地震の強震記録を用いて算出した群遅延時間  $T_{gr}$  の平均値  $\mu_{tgr}$  を比較する。図-5 に示す平成 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  $\mu_{tgr}$  のように、多くの強震記録の  $\mu_{tgr}$  は周期  $t$  の常用対数に対して概ね線形となる関係が認められた。そこで、 $\mu_{tgr}$  と周期  $t$  の関係に式 (2) を仮定し、プレート境界型地震(74 成分)と内陸直下型地震(34 成分)による強震記録のそれについて  $\mu_{tgr}$  と  $t$  の関係を解析した。式 (2) にお

ける  $K_{tgr}$  は、 $\mu_{tgr}$  の周期軸に対する傾きであり、物理的には周期の長い地震動の振幅が大きい時間帯の中心的な時刻  $t_s$  が、周期の短い地震動に比べてどの程度遅れて出現するかを表している。プレート境界型地震と内陸直下型地震の強震記録を用いて算出した  $\mu_{tgr}$  の性質を把握するため、ここでは、それぞれの強震記録の  $K_{tgr}$  を比較した。

$$\mu_{tgr} = K_{tgr} \cdot \log_{10} t + c \quad (2)$$

ここに、

$\mu_{tgr}$  : 各周期帯における  $T_{gr}$  の平均値 [sec]

$K_{tgr}$  :  $\mu_{tgr}$  の周期軸に対する傾き

$t$  : 周期 [sec]

$c$  : 定数

なお、式(2)における周期  $t$ としては、表-1に示した各周期帯の中央値を用いた。各強震記録の  $\mu_{tgr}$  から最小二乗法により求めた  $K_{tgr}$  の平均値及び標準偏差を表-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の強震記録で0~5程度、内陸直下型地震の場合で0~7程度であり、類似した傾向が認められる。

次に、プレート境界型地震と内陸直下型地震の表-1  $\mu_{tgr}$  及び  $\sigma_{tgr}$  を算出する周期帯

表-2  $K_{tgr}$  の分析結果

No.	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
1	2.56 ≤ $t < 5.12$	2.40	3.40		
2	1.28 ≤ $t < 2.56$	2.68	3.24		
3	0.64 ≤ $t < 1.28$	-0.28	0.16		
4	0.32 ≤ $t < 0.64$				
5	0.16 ≤ $t < 0.32$	5.08	6.64		
6	0.08 ≤ $t < 0.16$				

表-3  $\sigma_{tgr}$  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 ≤ $t < 5.12$	21.57	11.81	18.94	12.76
1.28 ≤ $t < 2.56$	14.59	6.67	12.01	6.96
0.64 ≤ $t < 1.28$	12.56	6.45	11.42	6.07
0.32 ≤ $t < 0.64$	11.19	4.28	9.03	4.51
0.16 ≤ $t < 0.32$	10.61	3.91	8.34	2.51
0.08 ≤ $t < 0.16$	10.98	4.62	7.94	2.33

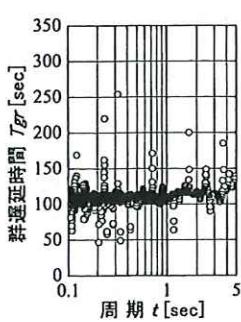
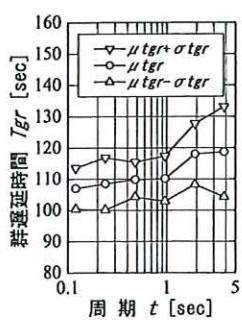
(a)  $T_{gr}$ (b)  $\mu_{tgr}$  及び  $\sigma_{tgr}$ 

図-5 尼崎高架橋記録 HA 成分の群遅延時間

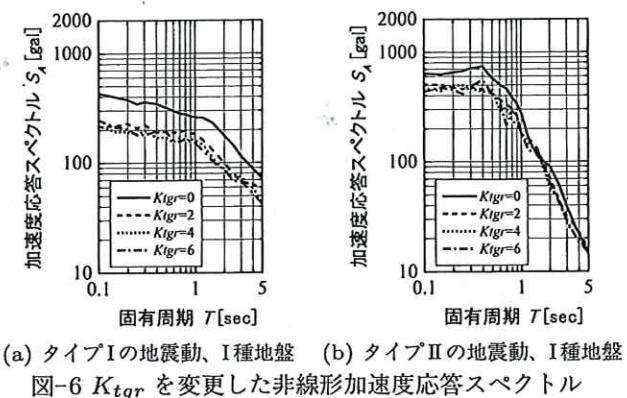
強震記録を用いて算出した群遅延時間  $T_{gr}$  の標準偏差  $\sigma_{tgr}$  を比較する。 $\sigma_{tgr}$  は強震記録ごとに表-1の各周期帯で算出されるものであるが、表-3には、全ての強震記録を用いて算出した各周期帯における  $\sigma_{tgr}$  の平均値と標準偏差を示した。同表より、 $\sigma_{tgr}$  の平均値は長い周期帯で大きくなること、また、プレート境界型地震の強震記録に比べて内陸直下型地震の強震記録の  $\sigma_{tgr}$  の平均値は若干小さいことが認められる。

以上のような群遅延時間  $T_{gr}$  の平均値  $\mu_{tgr}$  と標準偏差  $\sigma_{tgr}$  の性質を考慮して  $T_{gr}$  を種々設定し、プレート境界型地震と内陸直下型地震の地震動の位相特性を有する模擬地震動を作成した。 $T_{gr}$  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。

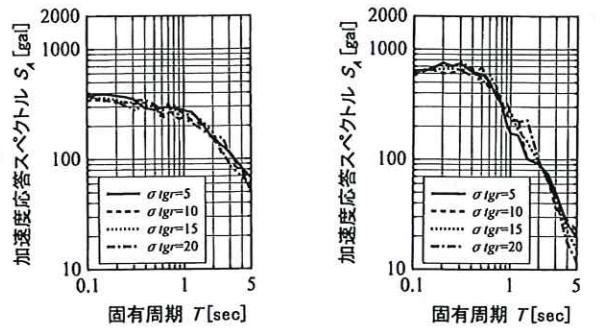
### 2.3 地震動の位相特性が構造物の非線形応答に与える影響

位相特性(群遅延時間  $T_{gr}$ )を種々変化させて模擬地震動を作成する際の参考とするため、模擬地震動の位相特性(群遅延時間  $T_{gr}$  の平均値  $\mu_{tgr}$  と標準偏差  $\sigma_{tgr}$ )が構造物の非線形応答に及ぼす影響について検討した。

$\mu_{tgr}$  は式(2)により  $K_{tgr}$  を用いてモデル化されているため、 $\mu_{tgr}$  が構造物の非線形応答に及ぼす影響について検討する際には、 $K_{tgr}$  を0~6の範囲で変化させて  $\sigma_{tgr}$  を全周期帯で5[sec]に固定したケースを設定した。また、 $\sigma_{tgr}$  が構造物の非線形応答に及ぼす影響について検討する際には、 $K_{tgr}$  を0に固定し、全周期帯における  $\sigma_{tgr}$  を5~20[sec]の範囲で変化させたケースを設定した。次に、 $K_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  のケースごとに  $T_{gr}$  を設定し、その  $T_{gr}$  を位相特性(群遅延時間)として有する地震動を作成した上で、地震動の振幅特性を振動数領域で調整することにより、道路橋示方書に規定されるタイプI及びタイプIIの地震動の標準加速度応答スペクトルに適合した模擬地震動を作成した。ここで、模擬地震動は1つの  $\mu_{tgr}$  と  $\sigma_{tgr}$  のケースについて3波作成した。3波の模擬地震動は、 $T_{gr}$  を正規乱数で設定する際に初期乱数を変更したものである。また、 $T_{gr}$  からフーリエ位相スペクトル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-6及び図-7に非線形動的解析結果の一例として、応答塑性率  $\mu = 4$  の非線形加速度応答スペクトルを示す。ここで、同図の非線形加速度応答スペクトルは



(a) タイプIの地震動、I種地盤 (b) タイプIIの地震動、I種地盤  
図-6  $K_{tgr}$  を変更した非線形加速度応答スペクトル



(a) タイプIの地震動、I種地盤 (b) タイプIIの地震動、I種地盤  
図-7  $\sigma_{tgr}$  を変更した非線形加速度応答スペクトル

初期乱数を変更して作成した模擬地震動3波による応答値の平均を表したものである。図-6より、 $K_{tgr}$  を変更した地震動の非線形応答は  $K_{tgr} = 0$  の場合に大きい。一方、図-7より  $\sigma_{tgr}$  を変更した地震動の非線形応答は、一部の周期帯を除いて概ね同程度となっていることが認められる。

実測強震記録の  $K_{tgr}$  には変動幅があるが、以上の検討を踏まえ、群遅延時間  $T_{gr}$  を  $K_{tgr} = 0$  となるように設定することにより、構造物の非線形応答が大きくなる模擬地震動を作成することとした。このように  $K_{tgr}$  が概ね 0 ( $0 \pm 0.5$ ) となるケースは、解析に用いたプレート境界型地震の強震記録 74 成分中に 8 成分、内陸直下型地震の強震記録 34 成分中に 5 成分認められる。 $\sigma_{tgr}$  については、構造物の非線形応答に及ぼす影響が小さいと判断されたため、ここでは、表-3に示した周期帯ごとの平均値及び平均値土標準偏差の3ケースの  $\sigma_{tgr}$  を用いることとした。

## 2.4 非線形応答スペクトルの提案式

2.2 及び 2.3 の検討結果を踏まえて種々設定した群遅延時間  $T_{gr}$  を用いて地震動を作成し、振動数領域で振幅特性を調整することにより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模擬地震

動を作成した。

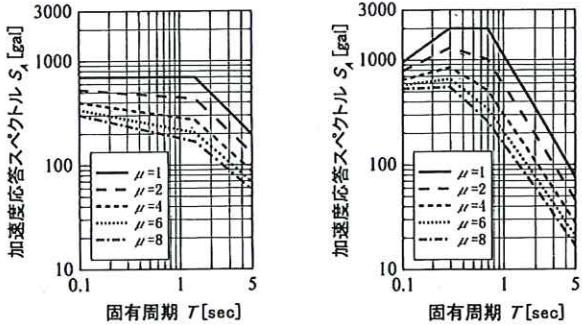
これらの模擬地震動を入力地震動とし、1質点系の降伏耐力を変更して繰り返し非線形動的解析を行うことにより、予め設定した応答塑性率  $\mu$  の非線形加速度応答スペクトルを算出した。算出した非線形加速度応答スペクトル  $S_A$  [gal] と系の固有周期  $T$  [sec] 及び応答塑性率  $\mu$  の関係式として式(3)を仮定し、 $0.1 \leq T \leq 5.0$  [sec]、 $1 \leq \mu \leq 8$  の範囲で回帰分析を行い、非線形加速度応答スペクトルの推定式を導出した。

$$S_A = 10^a \cdot T^b$$

$$a = \alpha_1 \cdot \log_{10} \mu + \alpha_2 \quad (3)$$

$$b = \alpha_3 \cdot \log_{10} \mu + \alpha_4$$

回帰係数  $\alpha_i$  及び相関係数  $r$  を表-4に、I種地盤におけるタイプI及びタイプIIの地震動の加速度応答スペクトルの推定結果を図-8に示す。



(a) タイプIの地震動、I種地盤 (b) タイプIIの地震動、I種地盤  
図-8 非線形加速度応答スペクトル

表-4 回帰係数と相関係数  
(a) タイプIの地震動

地盤種別	固有周期 $T$ (sec) に対する係数 $a, b$		
	$T \leq 1.4$	$1.4 < T$	$1.6 < T$
I 種	$a = -0.649 \log_{10} \mu + 2.845$ $b = -0.246 \log_{10} \mu$ $r = 0.958$	$a = -0.711 \log_{10} \mu + 2.991$ $b = 0.177 \log_{10} \mu - 1.000$ $r = 0.980$	
II 種	$T < 0.18$ $a = -0.785 \log_{10} \mu + 3.178$ $b = -0.489 \log_{10} \mu + 0.333$ $r = 0.911$	$0.18 \leq T \leq 1.6$ $a = -0.656 \log_{10} \mu + 2.929$ $b = -0.318 \log_{10} \mu$ $r = 0.958$	$1.6 < T$ $a = -0.766 \log_{10} \mu + 3.134$ $b = 0.215 \log_{10} \mu - 1.000$ $r = 0.977$
III 種	$T < 0.29$ $a = -0.651 \log_{10} \mu + 3.179$ $b = -0.407 \log_{10} \mu + 0.333$ $r = 0.872$	$0.29 \leq T \leq 2.0$ $a = -0.596 \log_{10} \mu + 3.000$ $b = -0.305 \log_{10} \mu$ $r = 0.959$	$2.0 < T$ $a = -0.671 \log_{10} \mu + 3.301$ $b = -0.057 \log_{10} \mu - 1.000$ $r = 0.974$

(b) タイプIIの地震動

地盤種別	固有周期 $T$ (sec) に対する係数 $a, b$		
	$T < 0.3$	$0.3 \leq T \leq 0.7$	$0.7 < T$
I 種	$T < 0.3$ $a = -0.994 \log_{10} \mu + 3.650$ $b = -0.713 \log_{10} \mu + 0.667$ $r = 0.956$	$0.3 \leq T \leq 0.7$ $a = -1.138 \log_{10} \mu + 3.301$ $b = -0.989 \log_{10} \mu$ $r = 0.976$	$0.7 < T$ $a = -0.938 \log_{10} \mu + 3.043$ $b = 0.304 \log_{10} \mu - 1.667$ $r = 0.990$
II 種	$T < 0.4$ $a = -0.988 \log_{10} \mu + 3.508$ $b = -0.814 \log_{10} \mu + 0.667$ $r = 0.970$	$0.4 \leq T \leq 1.2$ $a = -0.907 \log_{10} \mu + 3.243$ $b = -0.609 \log_{10} \mu$ $r = 0.980$	$1.2 < T$ $a = -0.984 \log_{10} \mu + 3.375$ $b = 0.368 \log_{10} \mu - 1.667$ $r = 0.986$
III 種	$T < 0.5$ $a = -0.899 \log_{10} \mu + 3.377$ $b = -0.804 \log_{10} \mu + 0.667$ $r = 0.960$	$0.5 \leq T \leq 1.5$ $a = -0.875 \log_{10} \mu + 3.176$ $b = -0.725 \log_{10} \mu$ $r = 0.983$	$1.5 < T$ $a = -1.095 \log_{10} \mu + 3.470$ $b = 0.521 \log_{10} \mu - 1.667$ $r = 0.987$

### 3. 非線形動的解析用波形の作成方法

#### 3.1 解析方法

本稿では、図-9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、強震記録の非線形加速度応答スペクトル  $\tilde{S}_A(T)$  を、目標とする非線形加速度応答スペクトル  $S_A(T)$  に適合させた。ここで、 $\tilde{S}_A(T)$  は、強震記録の入力に対して固有周期  $T$  及び内部減衰  $h$  の系が応答塑性率  $\mu$  で非線形応答する場合の最大の加速度応答値を表すものである。 $S_A(T)$  としては、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て表-4から推定される特定の応答塑性率  $\mu$  の非線形加速度応答スペクトルを用いることとした。表-4は、内部減衰が 5%、非線形履歴モデルが完全バイリニアモデルの 1 質点系を対象として導出された非線形加速度応答スペクトルの推定値を表すため、ここでは、 $\tilde{S}_A(T)$  を  $S_A(T)$  に適合させる 1 質点系にも同様の条件を仮定した。

$\tilde{S}_A(T)$  を  $S_A(T)$  に適合させる図-9の手順を次の(1)から(5)に示す。

(1)  $\tilde{S}_A(T)$  を推定する。

はじめに、固有周期  $T$  及び内部減衰 5% の 1 質点系が応答塑性率  $\mu$  で非線形応答する場合の等価固有周期  $T_{eq}$  及び等価減衰定数  $h_{eq}$  を、図-10に基づき、応答塑性率  $\mu$  及び固有周期  $T$  を用いて推定する。詳細は文献<sup>5)</sup>に譲るが、図-10の  $T_{eq}$  及び  $h_{eq}$  は、非線形系の周波数応答関数を線形系の周波数応答関数で近似することができる線形系の固有周期及び内部減衰として算定されたものである。次に、以下の①及び②に示す 1 質点系の線形応答のフーリエ振幅スペクトルと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<sup>5)</sup>に基づいて  $\tilde{S}_A(T)$  を推定する。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、内部減衰を 5%として検討されたものである。

①フーリエ振幅スペクトルを算出する 1 質点系：

等価固有周期  $T_{eq}$  及び等価減衰定数  $h_{eq}$  を、固有周期及び内部減衰として有する 1 質点系。

②フーリエ位相スペクトルを算出する 1 質点系：

等価固有周期  $T_{eq}$  を固有周期とし、内部減衰を 5%とする 1 質点系。

(2)  $\tilde{S}_A(T)$  の  $S_A(T)$  への収束判定

$\tilde{S}_A(T)$  を  $S_A(T)$  に適合させる全ての固有周期  $T$ において、収束条件  $|\tilde{S}_A(T) - S_A(T)| < \epsilon$  を満足しているかどうかを判定する。収束条件を満

足していれば、 $\tilde{S}_A(T)$  が  $S_A(T)$  に適合した強震記録が既に得られている。収束条件を満足していないければ、次の(3)から(5)の手順で強震記録  $a_m$  の振幅特性を振動数領域で調整する。ここでは、 $\tilde{S}_A(T)$  を  $S_A(T)$  に適合させる固有周期  $T$  として、0.05~10 [sec] を常用対数軸上で均等に 39 分割する固有周期を用いた。

(3) 強震記録のフーリエ変換

強震記録  $a_m$  を振動数領域にフーリエ変換する。

(4) 強震記録  $a_m$  の振幅特性の調整

等価固有周期  $T_{eq}$  に近い周期帶 ( $T_{eq} \pm \Delta T/2$ ) の強震記録  $a_m$  のフーリエ振幅  $C_k$  を  $S_A(T)/\tilde{S}_A(T)$  倍する。ここで、 $\Delta T$  は隣り合う固有周期  $T$  の差分とした。

(5) 強震記録  $a_m$  のフーリエ逆変換

振動数領域で振幅特性を調整した強震記録  $a_m$  を時間領域にフーリエ逆変換し、(1)に戻る。

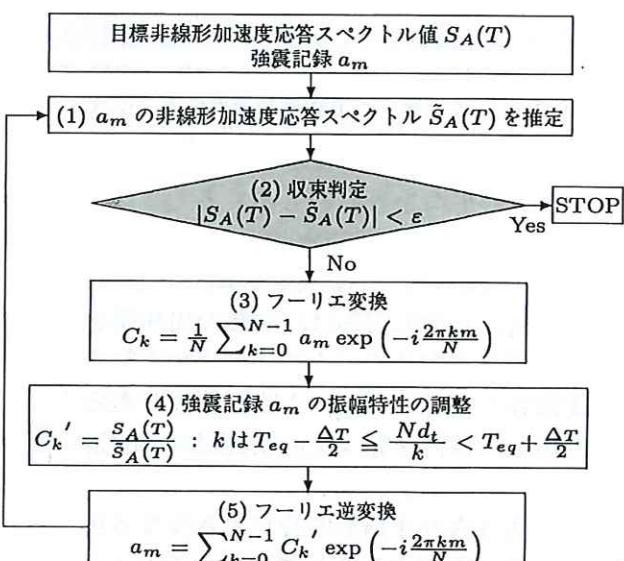


図-9 振幅調整のフローチャート

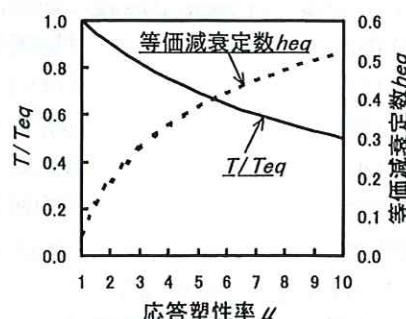


図-10  $T/T_{eq}$  及び等価減衰定数  $h_{eq}$  と応答塑性率  $\mu$  との関係

#### 3.2 解析結果

ここでは、図-8(b)に示した応答塑性率  $\mu = 4$  の非線形加速度応答スペクトル  $S_A(T)$  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

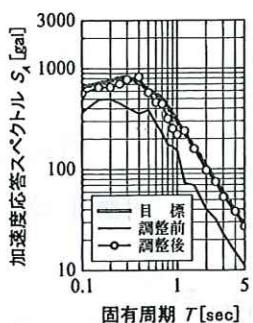


図-11 振幅調整前後の加速度応答スペクトル  
(応答塑性率  $\mu = 4$ )

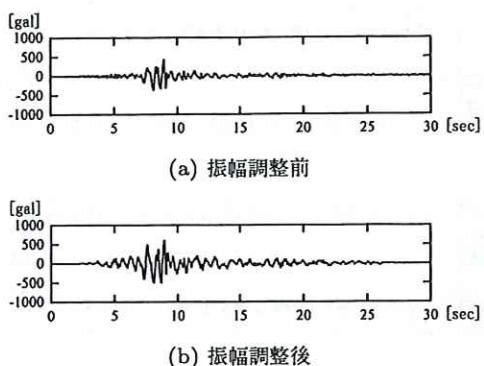


図-12 振幅調整前後の時刻歴波形

非線形加速度応答スペクトル  $\tilde{S}_A(T)$  を適合させた結果を示す。図-11には、振幅調整前後の猪名川記録を入力地震動として用い、1質点系の降伏耐力を変更して繰り返し非線形動的解析を行うことにより算出した応答塑性率  $\mu = 4$  の  $\tilde{S}_A(T)$  と、目標とする非線形加速度応答スペクトル  $S_A(T)$  を示す。また、図-12には調整前後の猪名川記録の時刻歴波形を示す。図-11より、一部の固有周期において若干の乖離が認められるが、 $\tilde{S}_A(T)$  が  $S_A(T)$  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

本稿の内容を以下にまとめる。

- (1) 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て模擬地震動を作成した。これらの模擬地震動は、強震記録の群遅延時間の特性と構造物の非線形応答との関係に基づいて、群遅延時間の平均値の周期軸に対する傾き ( $K_{tgr}$ ) を調整することにより、大きな非線形応答を生じさせるように作成した地震動である。
- (2) 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い、その結果に基づいて、道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルを基本とした任意の応答塑性率の非線形加速度応答の推定式を提案した。本推定式は、地震時保有水平耐力法に用いられる設計地震力の合理化に活用できるものである。
- (3) 強震記録を振動数領域で振幅調整することにより、目標とする非線形加速度応答スペクトルに近い特性を有する動的解析用の入力地震動を設定する手法を提案した。本手法は、地震動特性が構造物の塑性化に及ぼす影響を考慮した動的解析用の入力地震動の設定手法として、設計地震動の合理化に活用することができるものである。

#### 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) 和泉正哲、勝倉裕：地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集第 327 号, 昭和 58 年 5 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, 平成 12 年 12 月

中尾吉宏\*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター  
地震防災研究室研究官  
Yoshihiro NAKAO

田村敬一\*\*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ上席研究員  
Keiichi TAMURA

吉田仁司\*\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター  
地震防災研究室交流研究员  
Hitoshi YOSHIDA