

# 地震動の位相特性が1質点系弾塑性系応答値に 及ぼす影響について

平沢 高史<sup>1</sup>・田村 敬一<sup>2</sup>・中尾 吉宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 建設省土木研究所 振動研究室（〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地）  
<sup>2</sup>正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 室長（〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地）  
<sup>3</sup>正会員 工修 建設省土木研究所 振動研究室（〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1番地）

## 1. はじめに

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は、構造物が弾塑性域で挙動することを想定した耐震設計を行う必要があり、このような耐震設計においては、構造物の弾塑性域での挙動に影響を与える地震動特性及び構造物の応答特性を考慮して設計地震動を設定する必要がある。

しかしながら、構造物の弾塑性域における応答特性に影響を及ぼす地震動特性については必ずしも明確になっていないのが現状である。

本論文では、地震動の位相特性が構造物の弾塑性応答に及ぼす影響について、弾性応答に及ぼす影響との比較を行いながら検討した。

## 2. 弾塑性応答解析

本論文では、系に塑性化を許容した場合に必要な降伏耐力（以下弾塑性降伏耐力と言う） $F_y$  を弾塑性応答解析により求めた。また、合わせて、系が弾性領域内で耐えるために必要な降伏耐力（以下、弾性降伏耐力と言う） $F_{ye}$  を求めた（図-1 参照）。

弾塑性応答解析には、1 質点系弾塑性型せん断バネモデルを用い、非線形履歴特性としては完全バイリニアモデルを用いた。また、内部減衰は 5%とした。解析では、最大応答変位  $\delta_{max}$  と降伏変位  $\delta_y$  の比として定義される韌性率  $\mu$  をパラメータとした。

ただし、韌性率  $\mu$  は応答計算の結果得られるものであるため、実際には、弾塑性降伏耐力を種々変化させて弾塑性解析を繰り返し行い、韌性率  $\mu$  を目標値の誤差 1%以内に収束させることにより弾塑性降伏耐力  $F_y$  を算出した。目標とする韌性率  $\mu$  は 4 とした。なお、

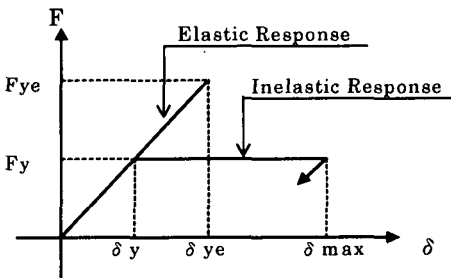


図-1 弾塑性降伏耐力  $F_y$  と  
弾性降伏耐力  $F_{ye}$  の定義

表-1 解析対象固有周期

|        |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 0.100 | 0.126 | 0.158 | 0.200 | 0.251 |
| 固有周期   | 0.316 | 0.398 | 0.501 | 0.631 | 0.794 |
| T(sec) | 1.000 | 1.259 | 1.585 | 1.995 | 2.512 |
|        | 3.162 | 3.981 | 5.012 |       |       |

目標の韌性率  $\mu$  を与える弾塑性降伏耐力が複数存在する場合があるため<sup>1)</sup>、そのような場合には、解析で算出された複数解のうちの最大値を弾塑性降伏耐力として用いることとした。

弾塑性降伏耐力  $F_y$  及び弾性降伏耐力  $F_{ye}$  を算出した系の固有周期を表-1 に示す。表-1 の固有周期は、0.1sec から 5.012sec までを対数軸上で等間隔に 17 分割した点に相当する。

## 3. 振幅特性の影響を一定とした場合に位相特性が構造物の応答に与える影響

位相特性が 1 質点弾塑性系に与える影響について検討するため、実観測記録の位相波に関し、その群遅延時間の標準偏差  $\sigma$  を  $0.5\sigma$ 、 $2.0\sigma$ 、 $3.0\sigma$  と変化させて人工地震波を作成した。ここで、位相波とは全周期

表-2 位相波の群遅延時間の平均と標準偏差

| 代表周期<br>(sec) | 周期範囲<br>(sec) | 群遅延時間平均<br>(sec) | 群遅延時間<br>標準偏差 |
|---------------|---------------|------------------|---------------|
| 5.012         | 4.467 ~ 5.623 | -105.80          | 24.005        |
| 3.981         | 3.548 ~ 4.467 | -116.40          | 23.726        |
| 3.162         | 2.818 ~ 3.548 | -132.40          | 10.431        |
| 2.512         | 2.239 ~ 2.818 | -111.70          | 45.973        |
| 1.995         | 1.778 ~ 2.239 | -141.50          | 5.043         |
| 1.585         | 1.413 ~ 1.778 | -135.70          | 14.382        |
| 1.259         | 1.122 ~ 1.413 | -123.10          | 36.767        |
| 1.000         | 0.891 ~ 1.122 | -125.40          | 24.101        |
| 0.794         | 0.708 ~ 0.891 | -121.10          | 12.562        |
| 0.631         | 0.562 ~ 0.708 | -124.60          | 17.974        |
| 0.501         | 0.447 ~ 0.562 | -166.30          | 36.073        |
| 0.398         | 0.355 ~ 0.447 | -146.50          | 11.913        |
| 0.316         | 0.282 ~ 0.355 | -139.00          | 28.682        |
| 0.251         | 0.224 ~ 0.282 | -133.90          | 40.205        |
| 0.200         | 0.178 ~ 0.224 | -132.50          | 34.961        |
| 0.158         | 0.141 ~ 0.178 | -130.10          | 25.133        |
| 0.126         | 0.112 ~ 0.141 | -140.00          | 31.783        |

帯において加速度フーリエ振幅スペクトルを一定値にすることにより振幅の影響を取り除き、時間軸上に位相角の影響のみを表現する時刻歴である<sup>2)</sup>。

また、群遅延時間は、位相角  $\phi(\omega)$  の円振動数に関する微分で、式(1.1)で定義される<sup>3)</sup>。

$$Gdt=d\phi(\omega)/d\omega \quad (1.1)$$

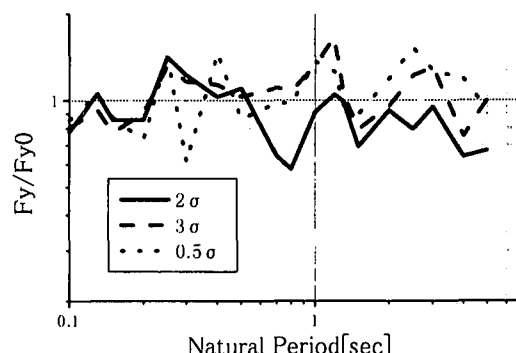
次に、これらの人工地震波を用いた弾塑性応答解析により弾塑性降伏耐力を算出し、群遅延時間の標準偏差の変化が弾塑性系の応答に与える影響について検討を行った。入力地震動としては1995年兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録を用いた。表-2に、神戸海洋気象台記録の周期帯毎の群遅延時間の平均及び標準偏差を示す。

人工地震波を作成する際には、各周期帯の平均値を固定したままで、それぞれの標準偏差を変化させた。また、本研究では、地震動の長周期成分と短周期成分が弾塑性応答に与える影響についてそれぞれ検討するため、短周期帯の地震動の標準偏差を変化させる場合は、長周期帯の群遅延の標準偏差は不変とし、長周期帯の地震動の標準偏差を変化させる場合は、短周期帯の群遅延の標準偏差は不変とした。

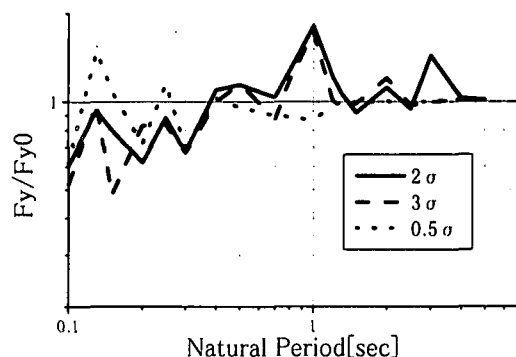
短周期帯と長周期帯の境界とする周期としては、多くの観測記録について固有周期0.8秒~1.0秒の程度以上で弾塑性降伏耐力スペクトルと加速度フーリエ振幅スペクトルの形状に類似性が見られたことから表-2において0.8秒と1.0秒の中間に位置する周期0.891秒を選定した。

群遅延時間の標準偏差を変化させた人工地震波について、弾塑性応答解析によって求めた弾塑性降伏耐力  $F_y$  を、群遅延時間の標準偏差を変化させない人工地震波による弾塑性降伏耐力  $F_{y0}$  との比として、図-2に示す。

また、群遅延時間の標準偏差を変化させた人工地震



(a) 長周期帯を変化させた場合



(b) 短周期側を変化させた場合

図-2 群遅延時間の標準偏差を変化させた人工地震波による  $F_y$  の変動

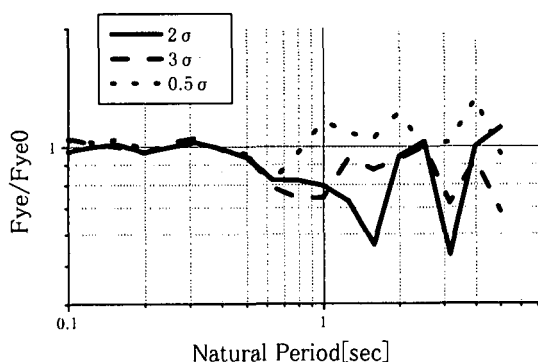
波の弾性降伏耐力  $F_{ye}$  を、群遅延時間の標準偏差を変化させない人工地震波の弾性降伏耐力  $F_{ye0}$  との比として、図-3に示す。

図-2と図-3を比較すると、群遅延時間の標準偏差を変化させた場合に、弾塑性応答では群遅延時間の標準偏差を変化させた周期帯よりも広い範囲の周期帯の応答値が変動しており、弾性応答では群遅延時間の標準偏差を変化させた周期帯とほぼ同じ範囲の周期帯の応答値が変動している。

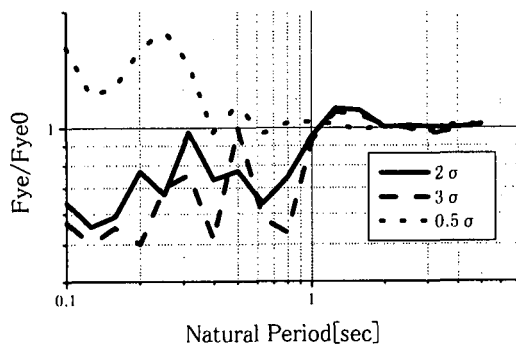
弾性応答値に着目すると、群遅延時間の標準偏差が小さくなると応答値が大きくなり、群遅延時間の標準偏差が大きくなると応答値が小さくなっている。

以上から、加速度フーリエ振幅スペクトルの影響を全周期帯において一定にした場合に、ある固有周期に影響を与えるのは、弾性応答ではその固有周期及び近接する固有周期の群遅延時間の標準偏差であるのに対し、弾塑性応答ではその固有周期の群遅延時間の標準偏差だけでなく周辺の広い範囲の周期帯の標準偏差の影響を受ける事が分かる。

#### 4. 振幅特性及び位相特性が構造物の応答に与える影響



(a) 長周期帯を変化させた場合



(b) 短周期側を変化させた場合

図-3 群遅延時間の標準偏差を変化させた人工地震波によるFyeの変動

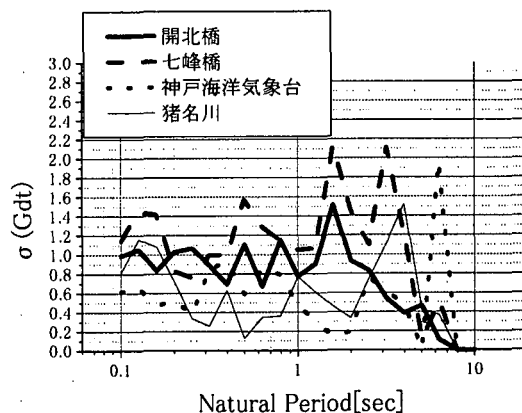


図-4 群遅延時間の標準偏差

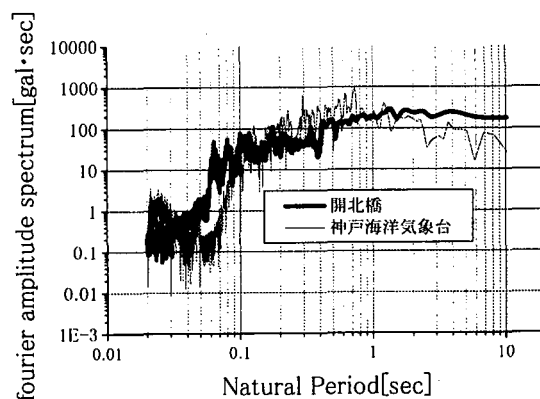


図-5 加速度フーリエ振幅スペクトル

表-3 人工地震波の組み合わせ

| No | 振幅特性                     | 位相特性                     |
|----|--------------------------|--------------------------|
| 1  | 開北橋記録(1978 年宮城県沖地震)      | 開北橋記録(1978 年宮城県沖地震)      |
| 2  | 同上                       | 七峰橋記録(1993 年北海道南西沖地震)    |
| 3  | 同上                       | 神戸海洋気象台記録(1995 年兵庫県南部地震) |
| 4  | 同上                       | 猪名川架橋記録(1995 年兵庫県南部地震)   |
| 5  | 神戸海洋気象台記録(1995 年兵庫県南部地震) | 開北橋記録(1978 年宮城県沖地震)      |
| 6  | 同上                       | 七峰橋記録(1993 年北海道南西沖地震)    |
| 7  | 同上                       | 神戸海洋気象台記録(1995 年兵庫県南部地震) |
| 8  | 同上                       | 猪名川架橋記録(1995 年兵庫県南部地震)   |

3.では、加速度フーリエ振幅スペクトルを全周期帯において一定値に固定し、振幅の影響を除去したときに位相特性が弾塑性系の応答に与える影響について考察したが、4.では振幅の影響がある場合の位相特性が弾塑性応答に与える影響について検討する。

まず、道路橋の耐震設計に用いられる時刻歴応答解析用標準波形<sup>4)</sup>のうちI種地盤の4種類の波形の特性を基に、表-3に示すような2つの振幅特性と4つの位相特性を組み合わせた8つの人工地震波を作成した。作成した人工地震波の位相特性として、群遅延時間の標準偏差 $\sigma$  (Gdt)を図-4に示す。また、振幅特性として加速度フーリエ振幅スペクトルを図-5に示す。

次に、これらの人工地震波を用いた弾塑性応答解析により弾塑性降伏耐力を算出し、振幅特性及び位相特性が構造物の応答に与える影響について検討した。

弾塑性応答解析結果を、図-6, 7, 8に示す。

図-6は、振幅特性を開北橋記録及び神戸海洋気象台記録とし位相特性を開北橋記録とした人工地震波(表-3のNo1, No5)による弾塑性降伏耐力 $F_y$ と弾性降伏耐力 $F_{y0}$ を、それぞれ振幅特性を変えずに位相特性を神戸海洋気象台記録とした人工地震波(表-3のNo3, No7)による弾塑性降伏耐力 $F_{y0}$ と弾性降伏耐力 $F_{y0}$ との比で示したものである。

同様に図-7は七峰橋記録の位相特性を持つ人工地震波(表-3のNo2, No6)、図-8は猪名川架橋記録の位相特性を持つ人工地震波(表-3のNo4, No8)、による弾塑性降伏耐力 $F_y$ と弾性降伏耐力 $F_{y0}$ を、それぞれ振幅特性を

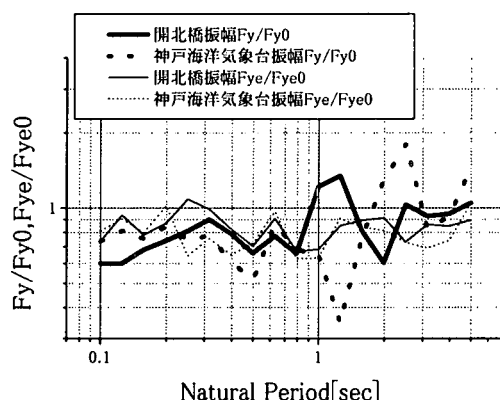


図-6 弾性降伏耐力 $F_y$ 及び弾塑性降伏耐力 $F_{ye}$ の比(No1/No3, No5/No7)

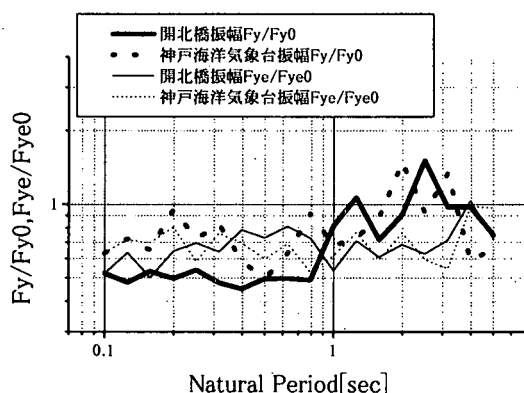


図-7 弾性降伏耐力 $F_y$ 及び弾塑性降伏耐力 $F_{ye}$ の比(No2/No3, No6/No7)

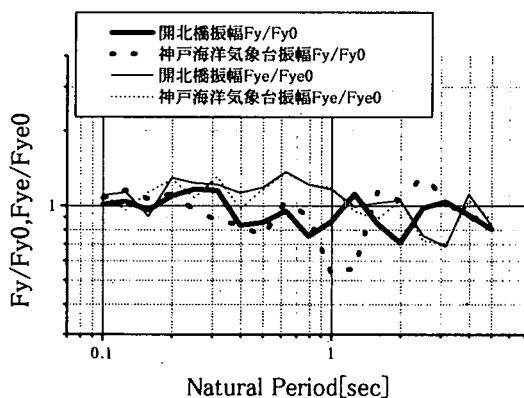


図-8 弾性降伏耐力 $F_y$ 及び弾塑性降伏耐力 $F_{ye}$ の比(No4/No3, No8/No7)

変えずに位相特性を神戸海洋気象台記録とした人工地震波(表-3 のNo3, No7)による弾塑性降伏耐力  $F_{y0}$  と弾性降伏耐力  $F_{ye0}$  との比で示したものである。

図-6 から、開北橋記録の振幅特性における  $F_{ye}/F_{ye0}$  と神戸海洋気象台記録の振幅特性における  $F_{ye}/F_{ye0}$  は

全周期帯にわたってほぼ同じであり、それに比べて開北橋記録の振幅特性における  $F_y/F_{y0}$  と神戸海洋気象台記録の振幅特性における  $F_y/F_{y0}$  は大きく異なっているのが分かる。図-7, 8 についても同様の傾向が見られる。

このことから、位相特性の違いが弾性応答に及ぼす影響はその波形の振幅特性にあまり左右されないが、位相特性の違いが弾塑性応答に及ぼす影響はその波形の振幅特性に大きく左右される事が分かる。

## 5. まとめ

地震動の位相特性が弾塑性系の応答に及ぼす影響について検討するため、振幅の影響を全周期帯において一定にして群遅延時間の標準偏差が変化した場合の弾性及び弾塑性降伏耐力がどのように変動するかを検討した。また、振幅特性が同じで位相特性の違う人工地震波について弾塑性応答解析を行い、弾性及び弾塑性降伏耐力がどのように変動するかを検討した。

その結果、振幅の影響を全周期帯において一定にした場合に、ある固有周期に影響を与えるのは、弾性応答ではその固有周期及び近接する固有周期の群遅延時間の標準偏差であるのに対し、弾塑性応答ではその固有周期の群遅延時間の標準偏差だけでなく周辺の広い範囲の周期帯の標準偏差の影響を受ける事が分かった。

また、位相特性の違いが弾性応答に及ぼす影響はその波形の振幅特性にあまり左右されないが、位相特性の違いが弾塑性応答に及ぼす影響はその波形の振幅特性に大きく左右される事が分かった。

本論文で、検討に用いた 2 つの加速度フーリエ振幅スペクトルは比較的形状の似たものであるが、位相特性の変化から受ける弾塑性応答値の変動の影響には大きな相違が見られており、この事からも位相特性が弾塑性系の応答に与える影響を考慮する際には、振幅特性との組合わせに注意する必要がある、これを検討していくことが今後の課題と考えられる。

## 参考文献

- 1) 山本、本田、田村、中尾、リダクションファクターによる弾塑性系の応答評価、第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集、1998.11
- 2) 大崎、新・地震動のスペクトル解析入門、1994.5
- 3) 理論地震動研究会、地震動 その合成と波形処理、1994.2
- 4) (社)日本道路協会、道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3