

## 弾塑性変形を伴う構造物の応答推定に関する一考察

九州大学

松田泰治\*

(株)建設技術研究所 入江達雄\*\*

兵庫県南部地震で観測された地震動は、加速度、速度ともに大きく、これまで設計最大と考えられていた地震荷重を上回るものであった。現在、これらの被害経験を踏まえ、耐震設計法の見直しが進められており、地震荷重についても再評価が行われている。現行の耐震設計は一部にエネルギー的な考え方が盛り込まれてはいるものの、基本的には震度および加速度をベースとした地震荷重による設計体系である。本研究では、構造物の弾塑性変形を考慮する場合の地震時挙動に着目し、その応答推定法に関して、エネルギー等を指標とした評価を試みた。

### 1. まえがき

従来、橋梁の橋脚の設計は震度法による静的な荷重に基づく許容応力度設計法で断面を定め、エネルギー一定則を考慮した地震時保有水平耐力法により、粘りに対する安全余裕度の照査が行われてきた。しかし、兵庫県南部地震により、土木構造物は甚大な被害を受け、耐震設計法の見直しが進められている。現在、国内の新設橋では暫定的に「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」を準用して耐震設計が行われている。この中には非線形の効果を考慮して動的解析を行う際の地震入力が規定されており、そのレベルは減衰5%の加速度応答スペクトルで2Gに達している。このような状況を踏まえ、今後、合理的な耐震設計法を確立していくため、大地震時の構造物の非線形挙動の解明、およびその解析評価手法を提案することが重要な課題と考えられる。本研究では、既往の地震動および兵庫県南部地震で観測された地震動を用いた、1自由度モデルによる地震応答解析を行い、これらの結果に基づき、特に構造物の弾塑性変形を考慮する際の応答推定法に関して、速度およびエネルギーを指標とした評価を試みた。

### 2. 解析方法

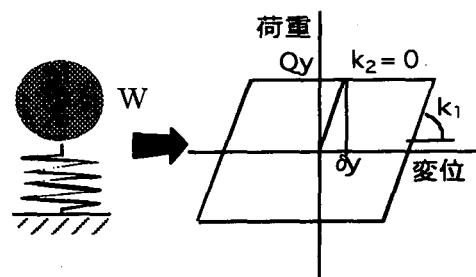
ここでは、完全弾塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度モデルに対して、既往の地震動および兵庫県南部地震で観測された地震動を入力とした非線形時刻歴応答解析を行い、その結果と、各種推定法による推定結果を比較検討する。

キーワード：弾塑性、エネルギー

\*九州大学工学部 建設都市工学科 092-641-1101

\*\* (株)建設技術研究所 福岡支社 092-714-2211

以下に非線形時刻歴応答解析の概要と各種推定法の解析手順について示す。



$$W = mg = 1000(\text{tf}), \quad k_1 = 4m\pi^2/T^2(\text{tf/cm})$$

$$k_2 = 0, \quad h = 0.05, \quad Q_y = 0.2W = 200\text{tonf}$$

$m$ : 質点の質量  
 $g$ : 重力加速度(980cm/sec<sup>2</sup>)  
 $h$ : 粘性減衰定数  
 $T$ : 弾性固有周期

$Q_y$ : 降伏荷重  
 $\delta_y$ : 降伏変位  
 $k_1$ : 弾性剛性(第1剛性)  
 $k_2$ : 第2剛性(=0)

図-1 解析モデルと復元力特性

#### (1) 非線形時刻歴応答解析

本解析で用いるバイリニア型の復元力特性は、材料や部材の弾塑性挙動を簡易的にモデル化する際によく用いられるもので、漸増載荷時の復元力を2本の直線で近似する。ここでは系の弾性固有周期をパラメータとして第一剛性を定め、粘性減衰定数を5%、降伏荷重を質点の重量の0.2倍、第二剛性をゼロと仮定した。1自由度系のバイリニア型モデル、及び復元力特性を図-1に示す。解析は表-1に示す各ケースに対して地震波を表-2に示す4種類選択し、その最大速度が25cm/sec, 50cm/sec, 75cm/sec, 100cm/secになるよう加速度時刻歴を係数倍して入力した。

表-1 解析ケース

NO	T(sec)	k1(tf/cm)	$\delta_y$ (cm)
1	0.1	4028.411	0.050
2	0.2	1007.103	0.199
3	0.3	447.601	0.447
4	0.4	251.776	0.794
5	0.5	161.136	1.241
6	0.6	111.900	1.787
7	0.7	82.212	2.433
8	0.8	62.944	3.177
9	0.9	49.733	4.021
10	1.0	40.284	4.965
11	2.0	10.071	19.859
12	3.0	4.476	44.683
13	4.0	2.518	79.436
14	5.0	1.611	124.118

表-2 解析に用いた地震波

項目 地震略名	地震名	方向	最大加速度 (gal)	最大速度 (cm/sec)
ELCENTRO-NS	Imperial Valley地震 (1940.5.18)	NS	340.9	33.45
TAFT-EW	Kern County地震 (1952.7.21)	EW	175.9	34.08
HACHINOHE-NS	十勝沖地震 (1968.5.16)	NS	226.3	17.71
JMAKOBEN-NS	兵庫県南部地震 (1995.1.17)	NS	817.8	90.63

(2) 応答推定法

1) 正弦 n 波法

正弦 n 波法は変電機器等<sup>1)</sup>の耐震設計用の地震荷重として用いられている。その理由は、構造物に対して一番厳しい入力となる共振正弦波を n 波連続で入力した際の応答が、既往の実地震波を用いた応答解析結果を包絡する事によっている。変電機器では正弦波の振幅は加速度で規定されており0.3G~0.5Gの値が用いられ、nは2~3とされている。本研究では、構造物に加わるエネルギーを評価する際の指標となる、速度に着目し、これにより正弦波の振幅を規定して応答推定を行う。パラメータは非線形時刻歴応答解析の速度振幅と同様に25cm/sec,50cm/sec,75cm/sec,100cm/secの4種類とした。

2) エネルギーの釣り合いによる推定法

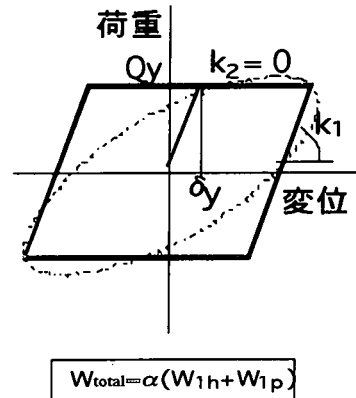
エネルギーの釣り合いによる推定法は、入力エネルギーと粘性減衰および弾塑性変形による吸収エネルギーに着目し、エネルギーの釣り合いにより最大応答値を推定する方法である。以下にエネルギー入力の基本的な考え方を示す。水平地震地動を受ける1質点振動系に対し、減衰力として粘性減衰力を考慮すると、この系に対する振動方程式は式(1)で表される。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + F(y) = -m\ddot{z}_0 \quad (1)$$

ここで、 $m\ddot{y}$ 、 $c\dot{y}$ 、 $F(y)$ 、 $-m\ddot{z}_0$ 、 $z_0$ 、 $y$ は各々慣性力、粘性減衰力、復元力、地震外力、水平地動変位、質点の相対変位を表している。式(1)の両辺に  $dy = \dot{y}dt$  をかけ地震の全継続時間 $t_0$ にわたって積分すると、 $t_0$ におけるエネルギーの釣り合い式(2)が導かれる。

$$m \int_0^{t_0} \dot{y}dy + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) y dt = - \int_0^{t_0} m\ddot{z}_0 y dt \quad (2)$$

右辺は地震外乱による系へのエネルギー入力の総量 $E(t_0)$ を表している。左辺の第1項は地震終了時の運動エネルギーを表し、左辺の第2項は粘性減衰による吸収エネルギーを表している。左辺第3項はバネ系の弾塑性変形による履歴吸収エネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーを表す。本推定法では、式(2)で示されるエネルギーの釣り合いを考慮して最大応答値を推定する。



- $W_{1h}$ : 1サイクル間の粘性減衰による吸収エネルギー
- $W_{1p}$ : 1サイクル間の履歴吸収エネルギー
- $W_{total}$ : 構造物の総吸収エネルギー

図-2 構造物の総吸収エネルギー

履歴型非線形系の変位 $\delta$ における総吸収エネルギーについては、既往研究<sup>2)</sup>の定義を参考に図-2に示すように設定する。本解析における構造物の総吸収エネルギー $W_{total}$ は、最大変位 $\delta_{max}(t=t_m)$ における、等価剛性 $k_e$ に対する、1サイクル間の粘性減衰による吸収エネルギー $W_{1h}$ (図-2の点線部分の面積)と1サイクル間の履歴吸収エネルギー $W_{1p}$ (図-2の平行四辺形の面積)の両者に係数 $\alpha$ をかけたもので定義される。本解析では入力波形より得られるエネルギー総量 $E(t_0)$ を用いて式(3)を満足する $\delta_{max}$ を収束計算により求めた。

$$E(t_0) = \alpha(W_{1h} + W_{1p}) \quad (3)$$

ここに、係数 $\alpha$ の値は、既往研究を参考に $\alpha=2.0$

として推定を試みた。本推定法の計算フローを図-3に示す。

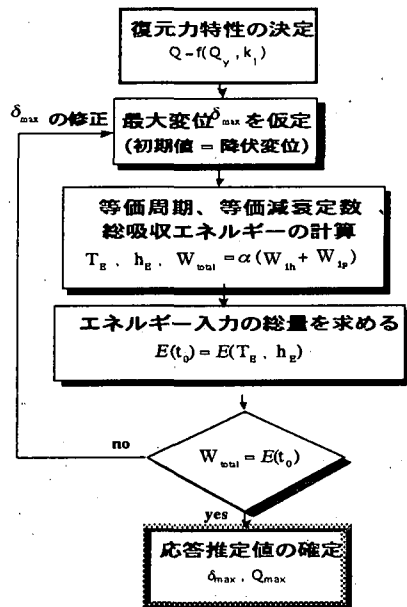


図-3 エネルギーの釣り合いによる推定法の計算フロー

### 3. 解析結果

各応答推定法による最大応答加速度、塑性率を応答解析結果と比較し、各推定法の照査を行う。

#### (1) 正弦 n 波法

地震動の最大速度と正弦波の速度振幅を一致させた際の、正弦3波入力時の塑性率および最大応答加速度の推定値を、各種地震波に対する非線形時刻歴応答解析結果と併せて図-4に示す。塑性率に関しては1~10の範囲で比較検討を行った。その結果、25cm/secおよび50cm/secの入力レベルでは、解析より得られた塑性率はJMAKOBE-NSのケースの周期0.5秒~0.8秒の範囲で推定値を上回った。しかし、75cm/secおよび100cm/secの入力レベルでは塑性率の推定値と解析結果の相関もよく、かつ推定値は解析結果を包絡しており安全側の評価となっている。ただし、周期2秒以降では推定値が解析結果に比べ大きな値を示している。今回の検討ではnの値として3を採用しており安全側の評価となつたと思われたが、一部のケースで解析結果が推定値を上回った。最大応答加速度は全てのケースで推定値が解析結果

をほぼ包絡している。しかし、短周期側では入力加速度レベルが大きくなるため推定値が大きな値を示し、長周期側では免震効果により解析結果が小さな値を示す。

#### 2) エネルギーの釣り合いによる推定法

エネルギーの釣り合いに基づいて推定した塑性率および最大応答加速度を、各種地震波に対する非線形時刻歴応答解析結果と併せて図-5および図-6に示す。塑性率はELCENTRO-NSのケースでは全ての入力レベルにおいて推定値が解析結果をやや上回っているが相関は非常に良い。TAFT-EWのケースでは推定値と解析結果は非常に良く一致している。HACHINOHE-NSのケースではELCENTRO-NSのケース同様、全ての入力レベルにおいて推定値が解析結果をやや上回っているが相関は非常に良い。JMAKOBE-NSのケースでは25cm/secと50cm/secの入力レベルで解析結果が推定値を上回る点が認められるが、75cm/secと100cm/secの入力レベルでは推定値と解析結果は良く一致しており、相関もよい。今回の検討ではαの値として既往の研究より2を採用したが、各ケースとも定量的にも概ね良い推定値が得られており、相関も良いと考えられる。

### 4. まとめ

弾塑性変形を伴う構造物に対する2種類の応答推定法の適用性評価を行った。その結果、以下の点が明らかとなった。

- ・地震動の最大速度を指標とした正弦 n 波法が弾塑性変形を伴う構造物の応答推定に対して有効であることが明らかとなった。本推定法は比較的簡便で、地震動の種類や入力レベルによらず適用可能であるが、波数 n の合理的設定法を検討する必要がある。
- ・エネルギーの釣り合いによる応答推定法が弾塑性変形を伴う構造物に対して適用可能であることが明らかとなった。本推定法は地震動の種類や入力レベルによらず適用可能であるが、係数 α の合理的設定法を検討する必要がある。

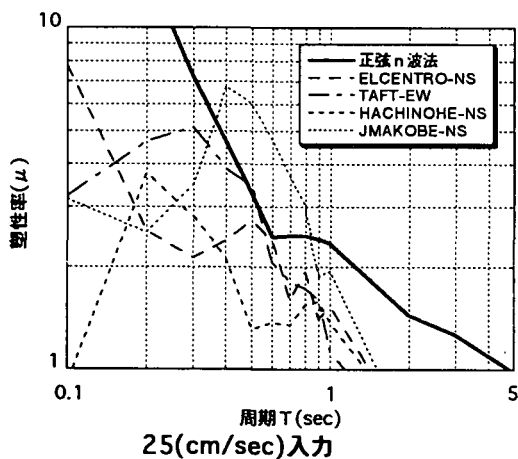
#### 参考文献

- 1)日本電気協会：JEAG5003-1980.
- 2)日本建築学会：免震構造設計指針、1993年12.

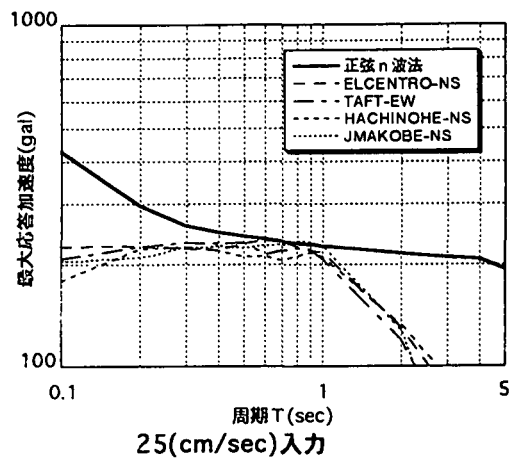
## A CONSIDERATION ON ESTIMATION METHODS FOR RESPONSES OF NONLINEAR HYSTERETIC STRUCTURES

Taiji MAZDA, Tatsuo IRIE

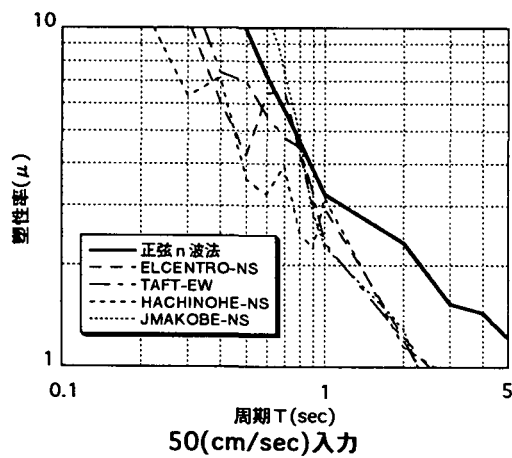
Two different methods for estimating the response of single-degree-of-freedom system with bilinear hysteretic restoring force are discussed. The first method is based on sinusoidal wave excitation, where the velocity of input amplitude is as same as the velocity of earthquake. The second method uses the equivalent linearization method and considers the total input energy of the earthquake and the total absorbed energy of the system due to the earthquake. The estimated response values of each method are compared with the results of the time history response analysis.



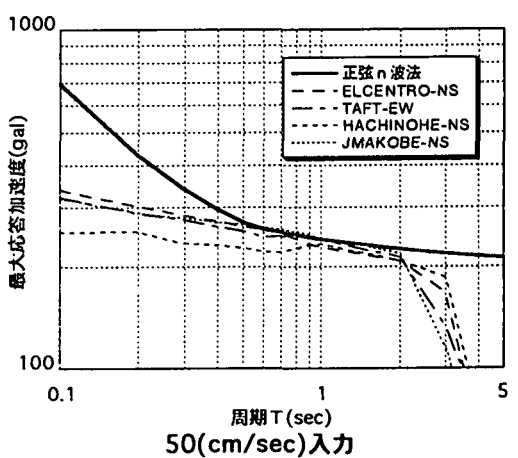
25(cm/sec)入力



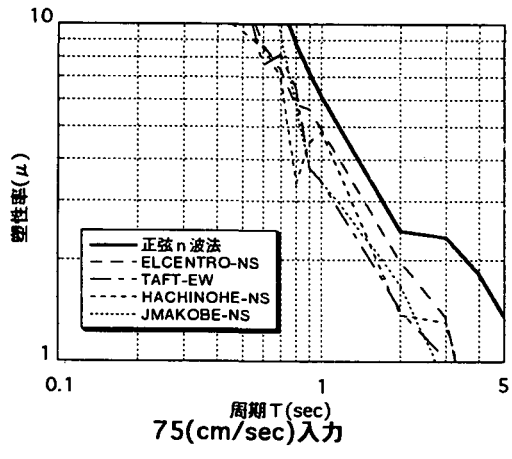
25(cm/sec)入力



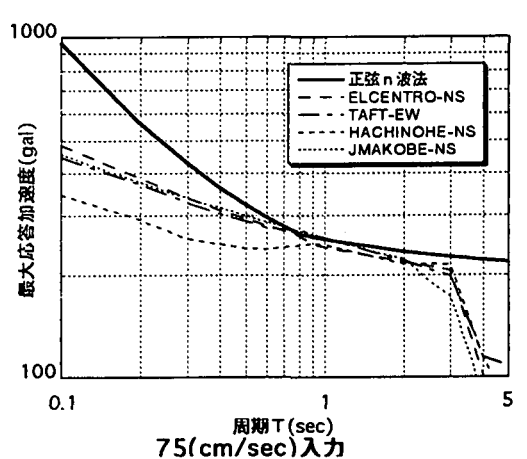
50(cm/sec)入力



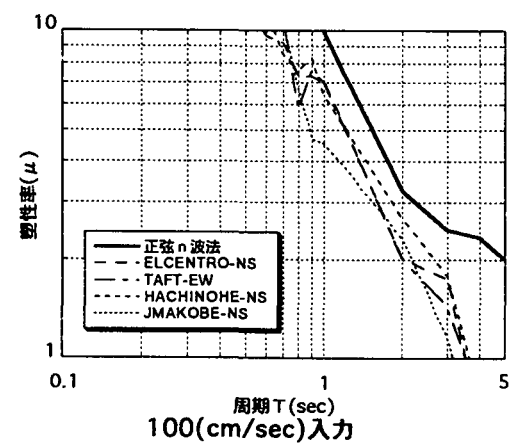
50(cm/sec)入力



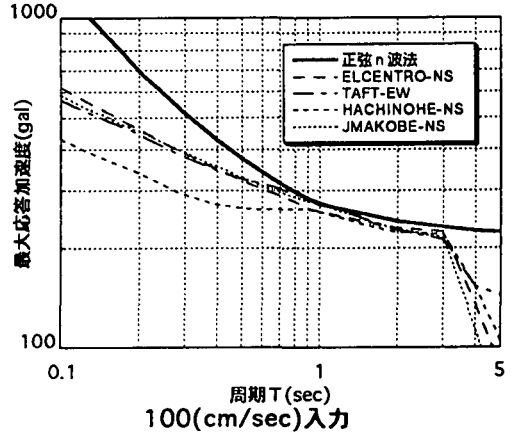
75(cm/sec)入力



75(cm/sec)入力

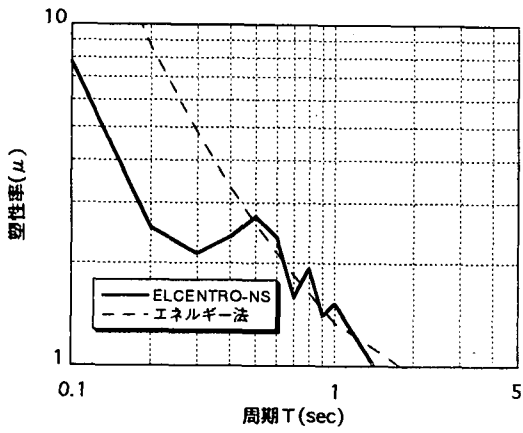


100(cm/sec)入力

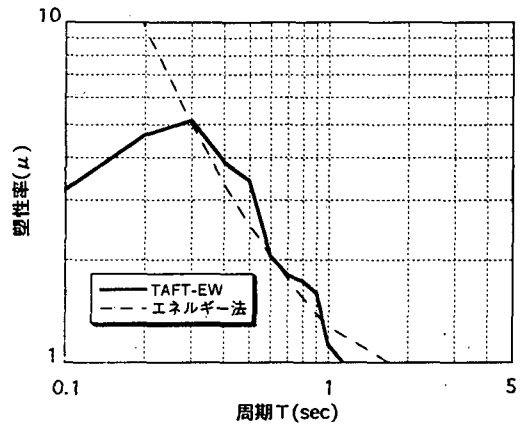


100(cm/sec)入力

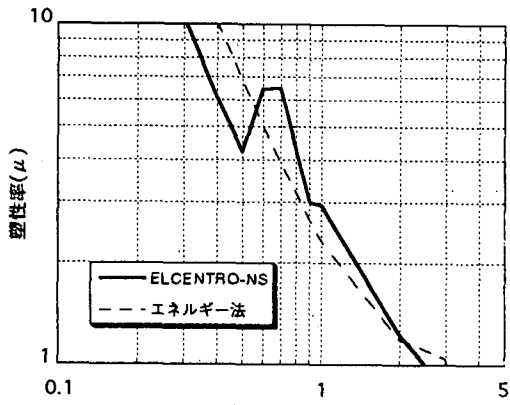
図-4 正弦 n 波法による推定値と応答解析結果の比較



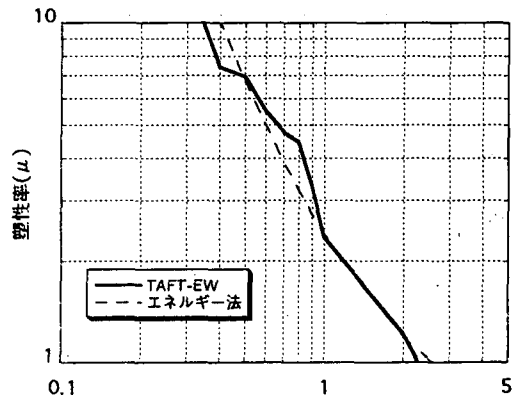
25(cm/sec)入力



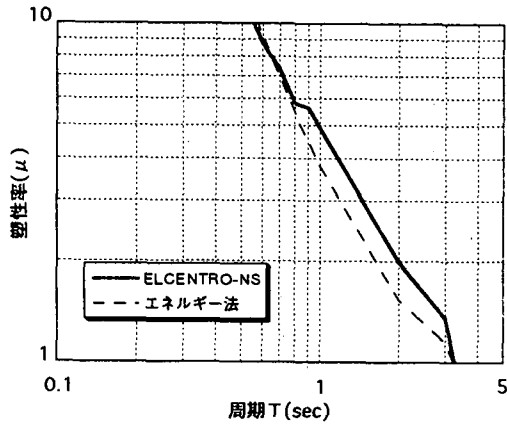
25(cm/sec)入力



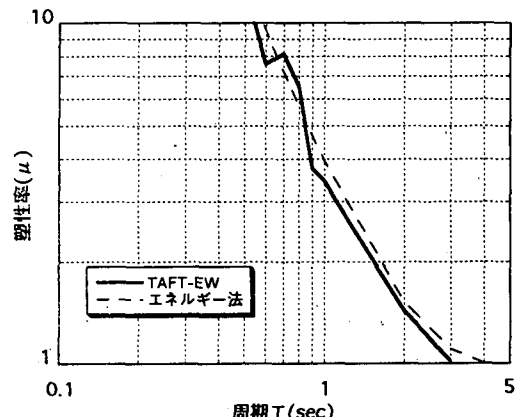
50(cm/sec)入力



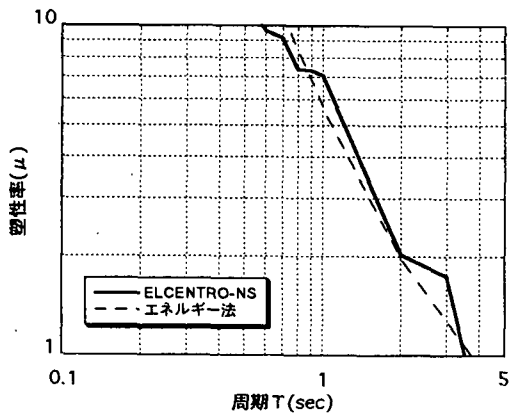
50(cm/sec)入力



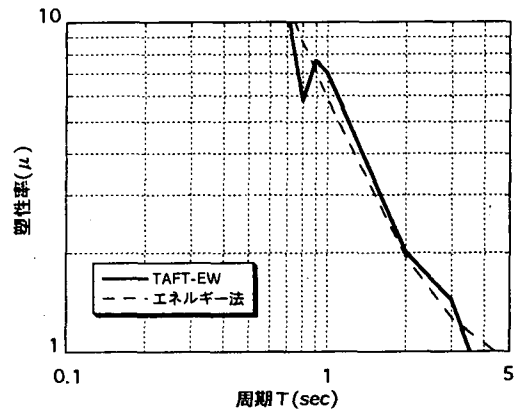
75(cm/sec)入力



75(cm/sec)入力

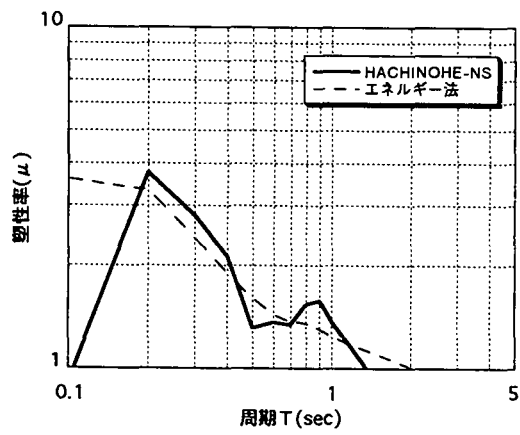


100(cm/sec)入力

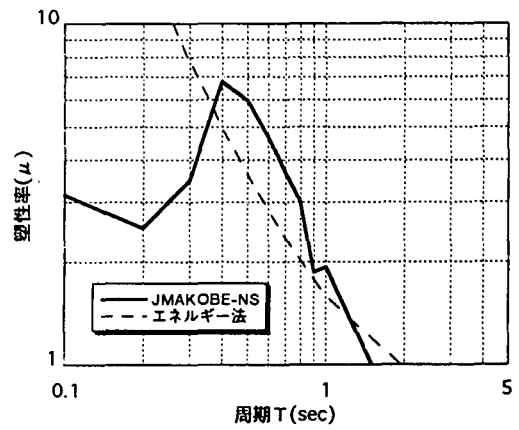


100(cm/sec)入力

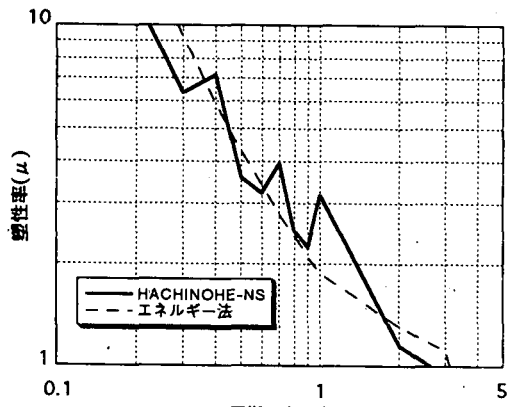
図-5 エネルギーの釣り合いによる推定値と応答解析結果の比較 (その1)



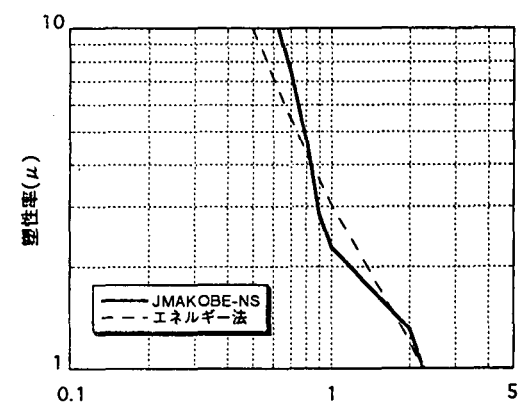
25(cm/sec)入力



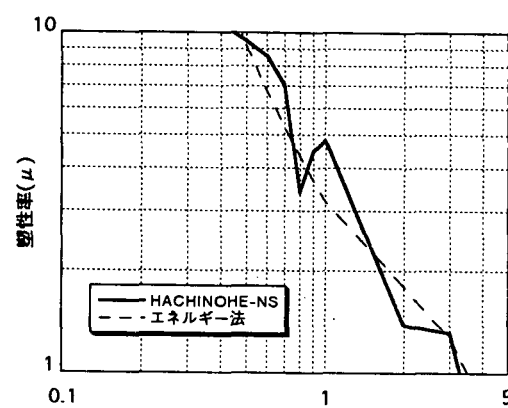
25(cm/sec)入力



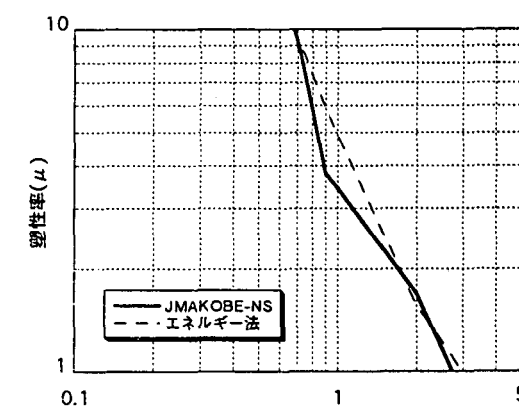
50(cm/sec)入力



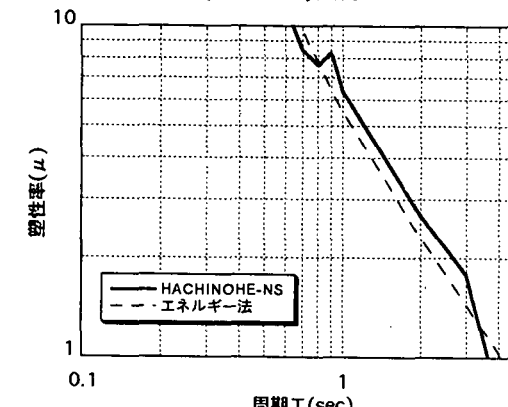
50(cm/sec)入力



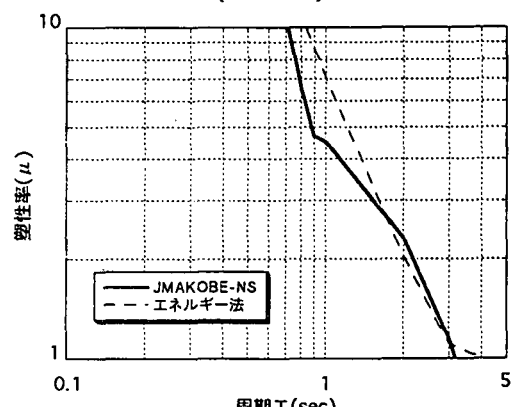
75(cm/sec)入力



75(cm/sec)入力



100(cm/sec)入力



100(cm/sec)入力

図-6 エネルギーの釣り合いによる推定値と応答解析結果の比較 (その2)