

エネルギー入力を考慮した構造物の応答推定に関する一考察

九州大学 松田泰治*

九州大学 入江達雄**

九州大学 大塚久哲***

九州大学 山本智弘****

現在、兵庫県南部地震の被害経験を踏まえ、耐震設計法の見直しが進められている。これまでの耐震設計で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が採用されている。本研究では、兵庫県南部地震で観測された地震動を用いて1自由度モデルによる地震応答解析を行い、エネルギーを考慮した地震荷重および構造物の弾塑性変形を考慮する場合の応答推定法に関して検討を行った。

1. はじめに

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、これまで設計で考慮されていた地震荷重を大きく上回るものであった。その荷重レベルは減衰5%の加速度応答スペクトルで最大2Gに達している。従って、今後、合理的な耐震設計法を確立していくためには、大地震時の構造物の非線形挙動の解明、およびその非線形挙動を考慮した応答評価手法の精度を向上させることが重要な課題と考えられる。これまでの橋梁の橋脚の耐震設計では、震度法による静的荷重に基づき許容応力度設計法で断面を定めた後、5%の加速度応答スペクトルを基準にした静的荷重で、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る耐震設計がなされている。本研究では、地震荷重としてのエネルギースペクトルの利用に着目し、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、地震動のエネルギー入力の総量と構造物の弾塑性変形による総吸収エネルギーの釣り合いを考慮した応答推定法¹⁾を提案しその適用性に関する検討を行った。

2. 解析方法

ここでは、弾完全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、兵庫県南部地震で観測された代表的な地震動を入力とした非線形時刻歴応答解析およびエネルギースペクトルの算定を行い、その結果と、地震動のエネルギーと構造物の弾塑性変形によるエネルギー吸収の釣り合いを考慮した推定結果を比較検討する。以下に非線形時刻歴応答解析の概要および地震荷重として考慮したエネルギースペクトルと応答推定法の解析手順について示す。

(1) 非線形時刻歴応答解析

本解析では弾完全塑性バイリニア型の復元力特性を用いた。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0.4倍、0.6倍、0.8倍の3種類と設定した。地震応答解析に使用した入力地震動は兵庫県南部地震で観測された神戸海洋気象台NS方向(以下JMAKOBE)、JR西日本鷹取駅EW方向(以下TAKATORI)、東神戸大橋橋軸直角方向(以下HIGASHI)の各加速度波形である。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。

(2) エネルギースペクトル

1自由度系の振動方程式よりエネルギーの釣り合い式を導くと式(1)のとおりである。

$$m \int_0^{t_0} \ddot{y} dy + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = - \int_0^{t_0} m \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad (1)$$

右辺は地震終了時($t=t_0$)の地震動による振動系へのエネルギー入力の総量、すなわち地震外力によって系になされた仕事の総量を表している。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

キーワード：エネルギー、弾塑性

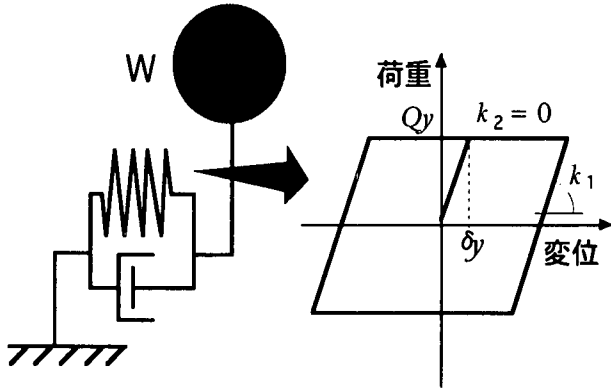
*正会員 工博 九州大学工学部 建設都市工学科
助教授 092-642-3267

**正会員 工修 九州大学大学院工学研究科
土木工学専攻博士課程 092-642-3268

(株)建設技術研究所 092-714-2211

***正会員 工博 九州大学工学部 建設都市工学科
教授 092-642-3266

****正会員 工修 九州大学大学院工学研究科
土木工学専攻修士課程 092-642-3268



$W=mg=1000$ (tf) , $h=0.05$, $Q_y=0.4W=400$ (tf)
 $k_1=4m \pi^2/T^2$ (tf/cm) , $k_2=0$ (tf/cm) , $g=980$ (cm/sec²)
 m : 質点の質量 Q_y : 降伏荷重
 g : 重力加速度 δ_y : 降伏変位
 h : 粘性減衰定数 k_1 : 第1剛性
 T : 弾性固有周期 k_2 : 第2剛性

図-1 解析モデルと復元力特性

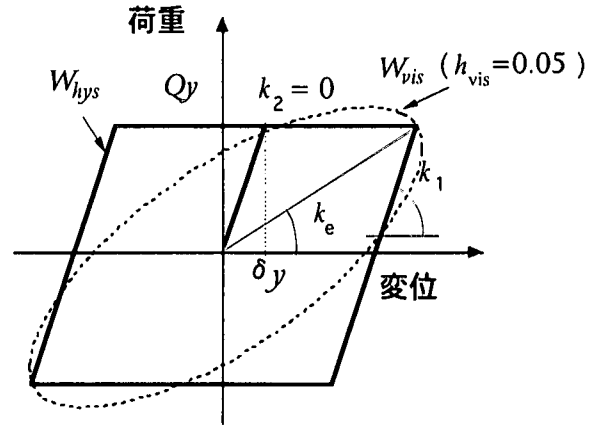
る。左辺第3項はバネ系の弾塑性変形による履歴吸収エネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーを表す。上式に基づき粘性減衰定数 h を10%と仮定したときの線形エネルギースペクトルおよび図-1のモデルを用いた非線形エネルギースペクトルを各地震動に対して算定する。

(3) エネルギーの釣り合いによる応答推定法

エネルギーの釣り合いによる応答推定法は、地震動によるエネルギー入力の総量と振動系で消費される粘性減衰および弾塑性変形による構造物の総吸収エネルギーに着目し、エネルギーの釣り合いより最大応答値を推定する方法である。本推定法では、式(1)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。最大変位 δ_{max} における総吸収エネルギー W_{total} は、図-2に示すように1サイクル間の履歴吸収エネルギー W_{hys} (図-2の平行四辺形の面積) と1サイクル間の粘性減衰による吸収エネルギー W_{vis} (図-2の点線部分の面積、等価剛性 k_e に対して粘性減衰定数で5%を考慮したもの) の両者に係数 α をかけたもので定義される。本推定法では式(1)による先に計算したエネルギースペクトルより各入力地震動に対するエネルギー入力の総量 $E(T)$ を読みとり、式(2)を満足する δ_{max} を収束計算により求める。

$$E(T) = \alpha (W_{hys} + W_{vis}) \quad (2)$$

ここで、係数 α の値は、既往研究²⁾を参考に $\alpha = 1, 2, 3$ とした。本推定法のフローを図-3に示す。



$$W_{total} = \alpha (W_{hys} + W_{vis})$$

$$W_{hys} = 4Q_y (\delta_{max} - \delta_y)$$

$$W_{vis} = \pi c \omega \delta_{max}^2$$

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

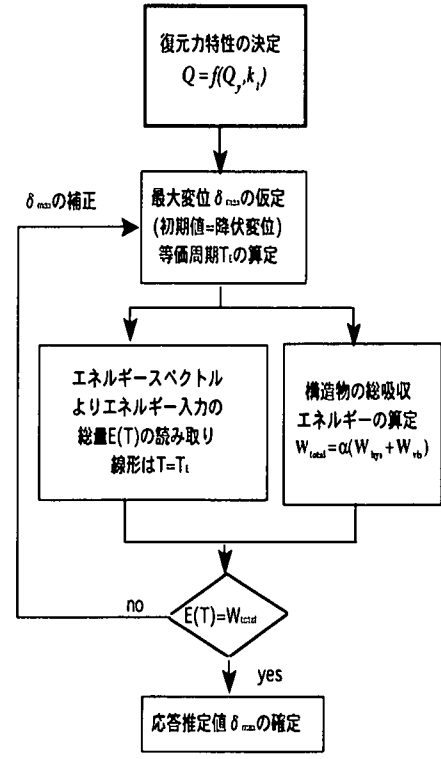


図-3 エネルギーの釣り合いによる推定法の計算フロー

3. 解析結果

(1) エネルギースペクトルの算定結果

粘性減衰定数 h を10%と仮定したときの線形エネルギースペクトルおよび3種類の降伏荷重に対する非線形エネルギースペクトルを各地震動に対して重ね書きしたものを図-4から図-6に示す。各地震動に

対する非線形エネルギースペクトルは降伏荷重によらず安定した値を示している。 Q_y が0.6Wと0.8Wのケースに対しては、線形エネルギースペクトルが非線形エネルギースペクトルをほぼ包絡する値を示しているが、 $Q_y=0.4W$ のケースに対しては周期帯により線形エネルギースペクトルが非線形エネルギースペクトルに比べ小さな値を示している。

(2) エネルギーの釣り合いによる応答推定法と 非線形時刻歴応答解析の比較

本推定法により得られた塑性率と非線形時刻歴応答解析より得られた塑性率を各地震動と降伏荷重別に重ね書きしたものを図-7～図-24に示す。

JMAKOB E に対する推定結果は $\alpha = 1$ のケースに対して応答解析結果との相関が高い。しかし、周期帯により応答解析結果が推定結果を大きく上回っている。また、線形と非線形のエネルギースペクトルを用いた推定結果を比較すると線形エネルギースペクトルに基づく推定結果は短周期側で特に相関が悪い。TAKATORI では応答解析結果が推定結果の $\alpha = 1$ と $\alpha = 2$ の間にほぼ入っている。JMAKOB E 同様に線形エネルギースペクトルを用いた推定結果は非線形エネルギースペクトルを用いた推定結果に比べばらつきが大きい。HIGASHI では推定結果が応答解析結果を大幅に下回っている。この原因のひとつは東神戸大橋の地震動に対する振動系の挙動が、本推定法で仮定しているような交番荷重的なものではなく、図-25に示すように一方向に変形が累積するようなものとなっているためと考えられる。

4. まとめ

弾塑性変形を伴う構造物の応答を推定する際の地震荷重および推定法についてエネルギーを考慮して検討を行った結果、以下の点が明らかとなった。

- ・エネルギースペクトルは降伏荷重等の非線形パラメータの影響を受けにくく、安定した値を示すため、構造部の弾塑性挙動を評価する際の荷重として適用性が高い。

- ・エネルギーの釣り合いによる応答推定法は構造物の弾塑性挙動を評価する手法として有効である。エネルギーの釣り合いによる応答推定法を兵庫県南部地震で観測された地震動に対して適用する場合、 α の値として1または2程度で評価を行うことが適切と考えられる。

今後は一方向に変形が累積するような地震動に対する適用方法等を検討する必要がある。

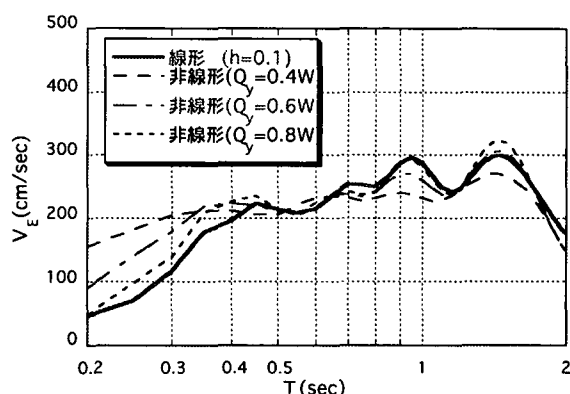


図-4 エネルギースペクトルの比較(JMAKOB E)

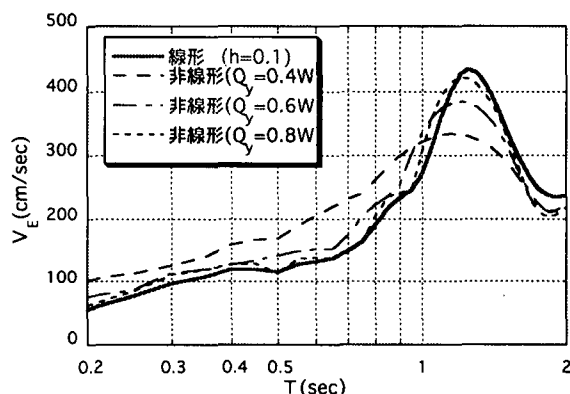


図-5 エネルギースペクトルの比較(TAKATORI)

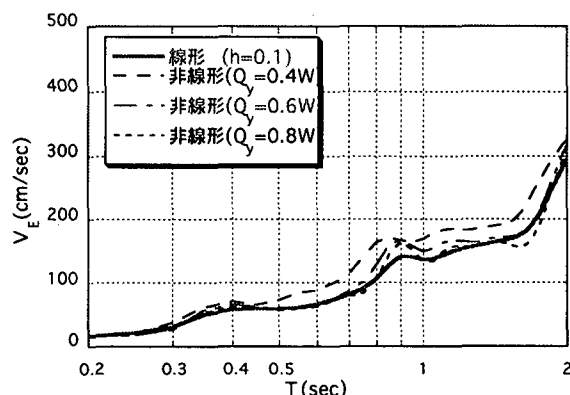


図-6 エネルギースペクトルの比較(HIGASHI)

参考文献

- 1) 松田泰治, 入江達雄: 弾塑性変形を伴う構造物の応答推定に関する一考察, 阪神・淡路に関する学術講演会論文集, pp531~536, 1996年1月
- 2) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 1993年12月
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 1990年
- 4) 兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様, 1995年
- 5) (社)日本道路協会: 「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), 1995年

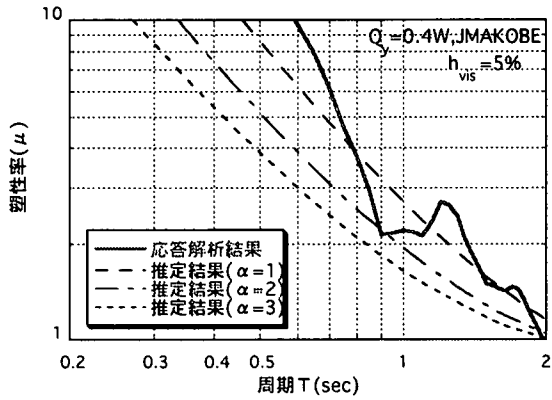


図-7 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

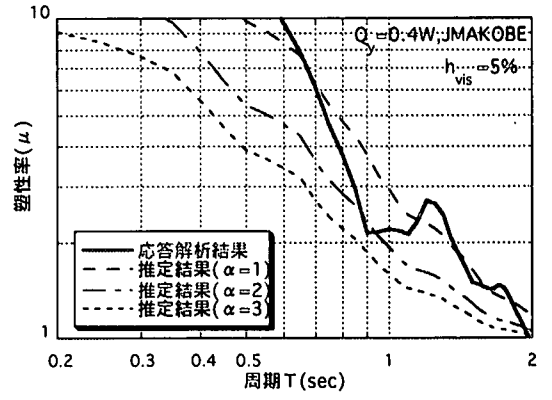


図-8 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

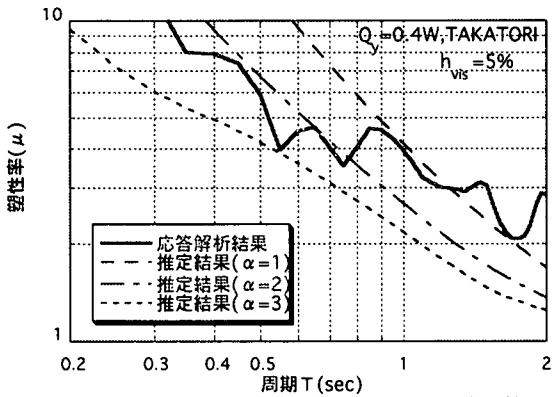


図-9 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

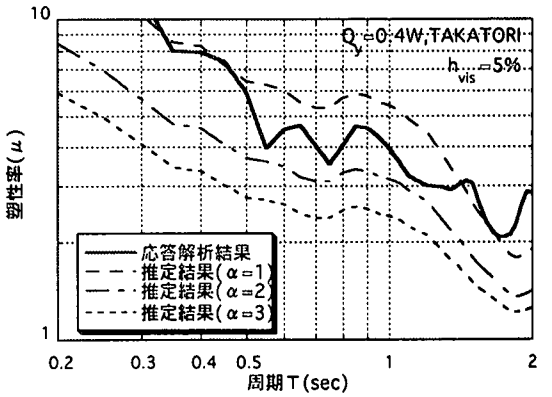


図-10 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

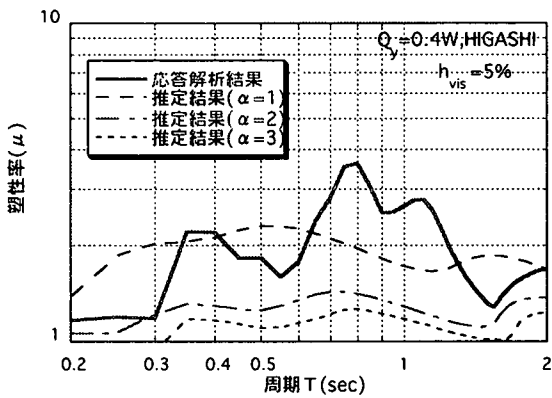


図-11 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

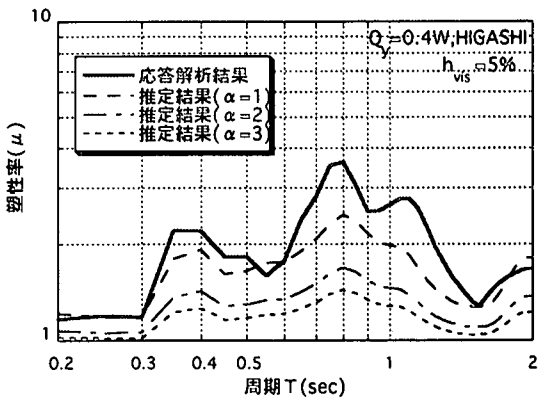


図-12 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

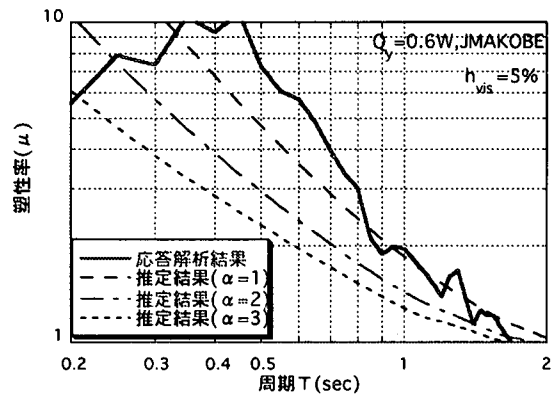


図-13 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

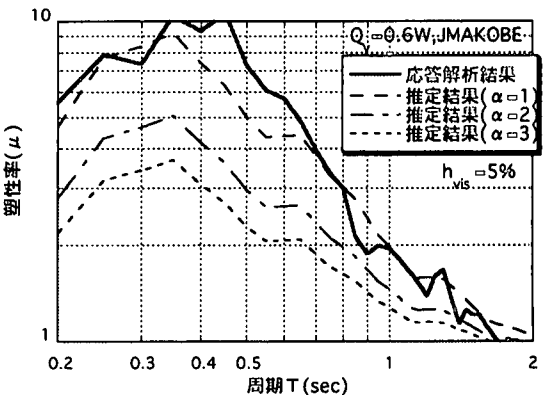


図-14 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

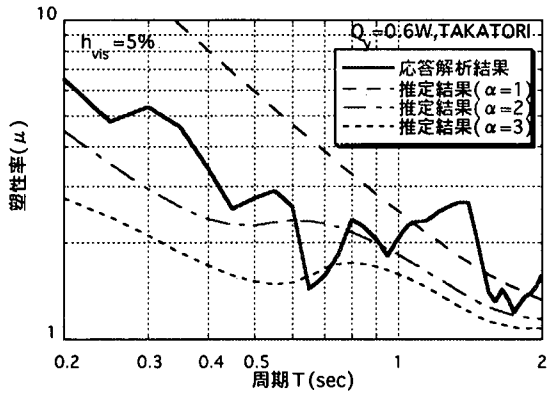


図-15 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

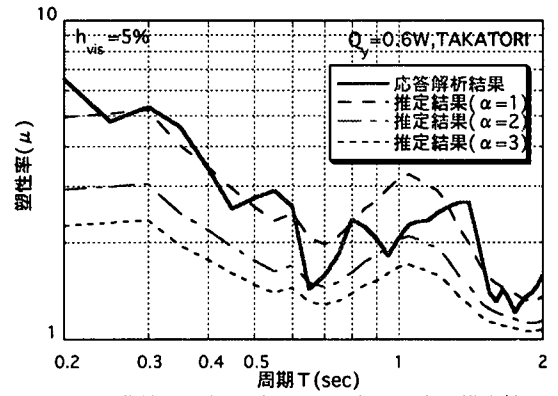


図-16 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

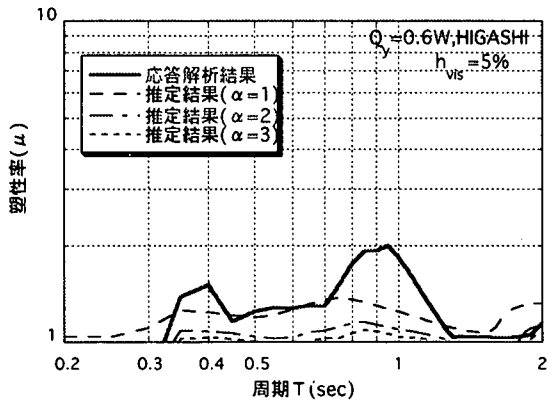


図-17 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

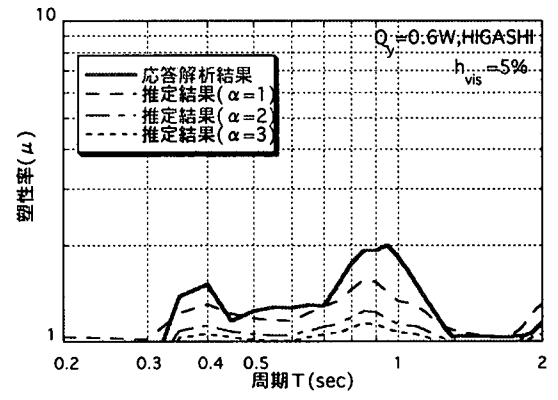


図-18 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

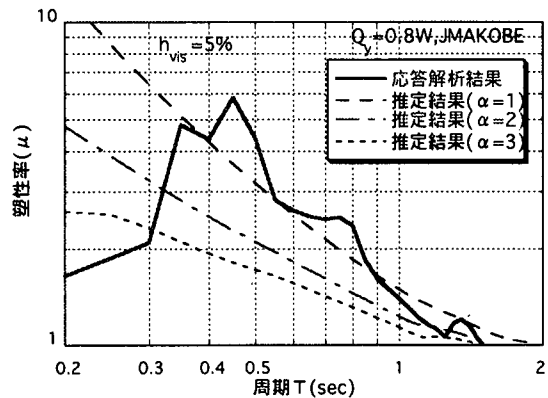


図-19 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

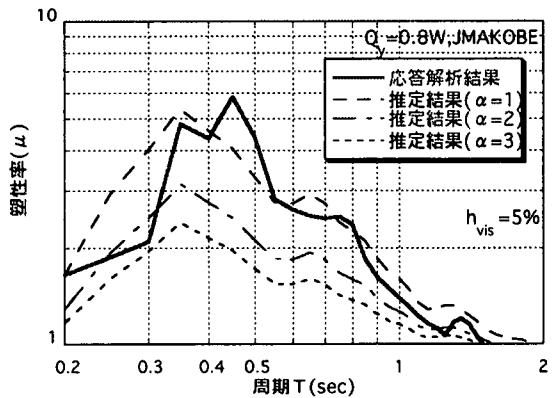


図-20 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

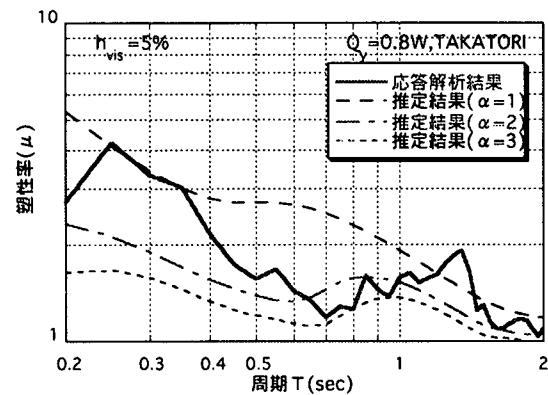


図-21 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

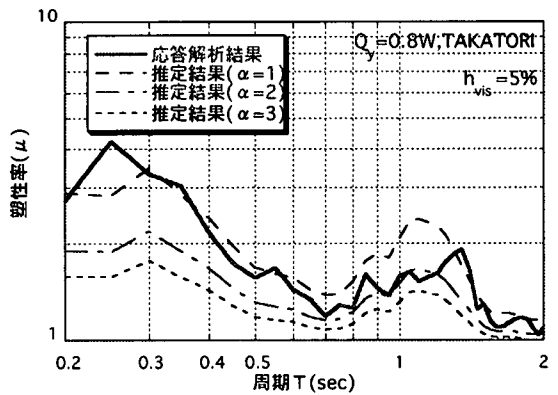


図-22 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

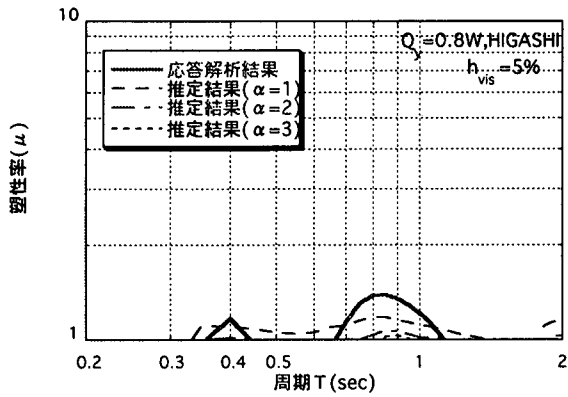


図-23 線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

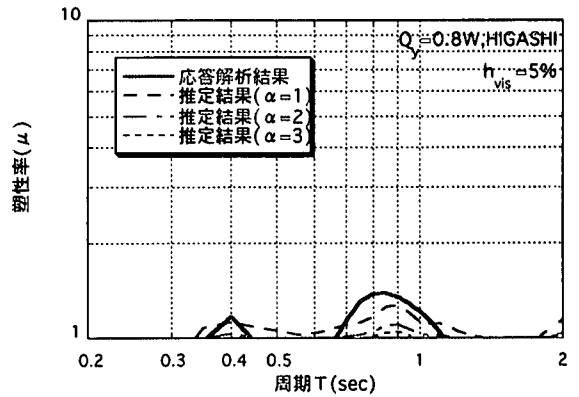


図-24 非線形エネルギースペクトルによる推定値と応答解析結果の比較

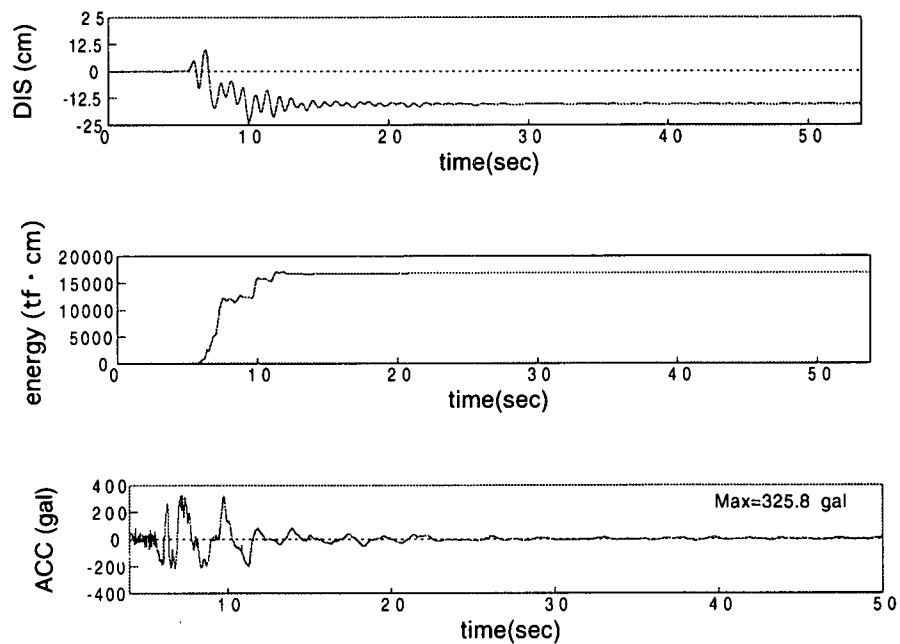


図-25 HIGASHI に対する振動系 ($Q_y=0.4W, T=0.8$) の挙動

A CONSIDERATION ON ESTIMATION METHODS FOR RESPONSES OF STRUCTURES USING ENERGY OF EARTHQUAKES

Taiji MAZDA, Tatsuo IRIE, Hisanori Otsuka, Tomohiro Yamamoto

The method for estimating the response of single-degree-of-freedom system with bilinear hysteretic restoring force are discussed. The 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 are compared with the results of the time history response analysis.