

エネルギーの釣り合いによる構造物の 応答推定法の実橋への適用

入江 達雄¹・大塚 久哲²・松田 泰治³・Allan D. SUMAYA⁴

¹正会員 工博 (株)建設技術研究所 福岡支社技術第2部 (〒810 福岡市中央区渡辺通り 2-1-10)

²フェロー 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³正会員 工博 九州大学助教授 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁴正会員 工修 (株)建設技術研究所 福岡支社技術第2部 (〒810 福岡市中央区渡辺通り 2-1-10)

兵庫県南部地震の発生後、免震支承が多く採用されるようになってきている。その合理的な設計のためには弾塑性の応答を簡便にかつ正確に推定することが重要である。筆者らは、簡便な応答推定法として地震動によるエネルギー入力の総量と免震支承による総吸収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の研究を行ってきた。本研究では、地震動のエネルギースペクトル図を利用して1質点系のバイリニア型モデルに対し構造物の復元力特性・降伏力を変化させた場合の最大応答値より簡便に求める方法を提案し、実橋への適用を行い、全体系の非線形時刻歴応答解析結果との比較検討を行っている。

Key Words : *elasto-plastic response, bilinear hysteresis, energy spectra, hysteretic absorption energy, menshin bridges*

1. はじめに

近年、免震支承を用い各橋脚に作用する地震力を分散・低減しようとする橋梁の設計・施工が増加している。今後、広く免震支承を用いた設計を行う場合、免震支承の持つ非線形性をどのようにモデル化し、弾塑性の応答をいかに簡便にかつ正確に推定するかということが、合理的な設計を行うために重要な問題である。構造物の弾塑性応答の把握には、力と変形をエネルギーを用いて表す研究が行われている。¹⁾
²⁾ 筆者らも、これまで簡便な応答推定法としてエネルギースペクトル図を利用して、エネルギー入力と免震支承による総吸収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について研究^{3) 4)}を行ってきた。本論文では、これらの研究成果に基づき実橋に対する応答推定を行う。

本推定法の評価は、全体系の非線形時刻歴応答解析および1質点系の非線形時刻歴応答解析による最大応答値との比較検討により行う。

2. 解析方法

(1) 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、図-1に示す橋長292.0 mの4径間連続PC箱桁橋である。橋脚基礎の地盤種別はⅡ種地盤で各橋脚の支承に免震支承が採用されている。また、橋梁はすべり支承が採用されている。

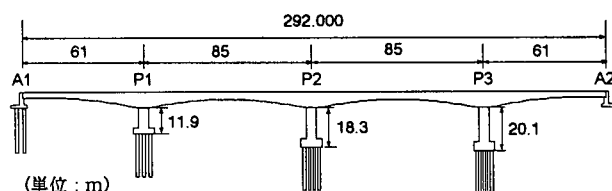


図-1 橋梁一般図

本橋梁は、マニュアル(案)⁵⁾の地震時保有水平耐力法レベルに対して設計されているが、本解析では、地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠ・タイプⅡの地震力レベルを対象に橋軸方向に関する解析を行う。入力地震動は新示方書⁶⁾の各タイプに対して3波形、合わせて6波形(Ⅰ-Ⅱ-1~3, Ⅱ-Ⅱ-1~3)⁷⁾を用いる。なお、波形の読み方については、第1の数字が地震波のタイプ、第2の数字が地盤種別、第3の数字が波形の種類を示す。

(2) エネルギーの概念

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、 $M, C, F(y), -M\ddot{z}_0, \ddot{z}_0, y$ は各々は質量、粘性減衰力、復元力、地震外力、水平地動による加速度、質点の相対変位を示している。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。

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

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。³⁾

ここで、地震動による構造物への入力エネルギーと釣り合う構造物の総吸収エネルギーを図-2に示すように設定する。

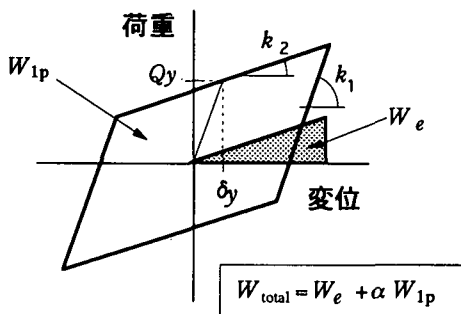


図-2 構造物の総吸収エネルギー

なお、式(2)の左辺第1項と第2項はここでは考慮していない。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、第2剛性 k_2 による弾性歪エネルギー W_e (図-2の斜線部分の面積) と1サイクル間の履歴吸収エネルギー W_{1p} (図-2の閉ループの面積) に係数 α をかけたものの和として定義する。ここで、 α を履歴吸収エネルギー係数と呼ぶこととする。

(3) エネルギーの釣り合いによる推定法

本推定法は、式(3)に示すように式(2)の右辺のエネルギー入力の総量 $E(t_0)$ と構造物の総吸収エネルギー W_{total} を等しいと仮定して応答を推定する方法である。

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

本推定法のフローチャートを図-3に示す。ここで、

地震力のエネルギー Spektral を式(4)に示す等価速度 V_E を用いて表す。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E(t_0)}{M}} \quad (4)$$

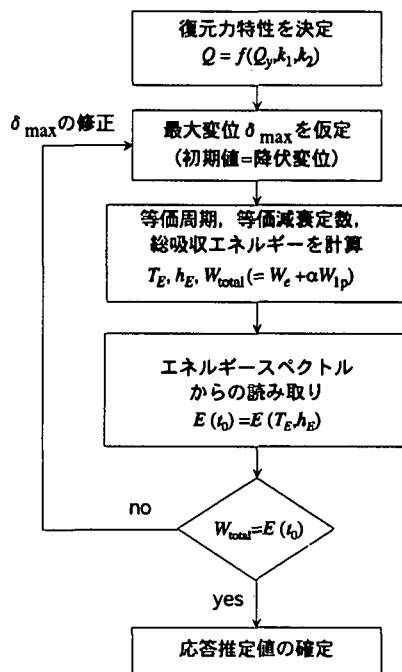


図-3 エネルギー法のフローチャート

推定法において用いる地震力のエネルギー Spektral の一部を図-4と図-5に示す。

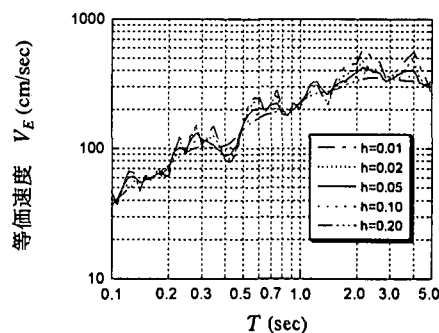


図-4 タイプIの地震波形によるエネルギー Spektral 図の例 (I-II-2)

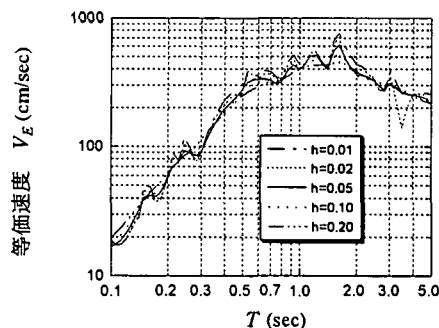


図-5 タイプIIの地震波形によるエネルギー Spektral 図の例 (II-II-2)

(4) 履歴吸収エネルギー係数

本推定法における履歴吸収エネルギー係数 α の値は、既往の研究¹⁾によれば $\alpha=2.0$ とされるが、地震動・弾塑性構造物の復元力特性により変動する。本研究では、1 質点系に対し入力波形より得られるエネルギー入力の総量 $E(t_0)$ を用いて式 (3) を満足する α を免震支承の復元力特性、降伏力をパラメータとした非線形時刻歴応答解析を行い、 α の読み取り図を作成している。その一部を図-6 と図-7 に示す。

(5) 実橋への適用

本解析では、橋脚及び基礎のバネと免震支承のバネを、直列バネとして合成し、1 つのバネとしてモデル化した。その際、免震支承の復元力特性はバイリニア型とした。質量は、各橋脚が支持する上部工質量のみを考慮し 1 質点系モデルによる解析を行った。表-1 に各橋脚の解析条件を示す。履歴吸収エネルギー係数 α は、剛性比、降伏力比、第 1 固有周期をパラメータとして図より内挿によって求める。

表-1 解析条件。(但し、括弧内の値はタイプⅡに対する値である。)

	単位	P1	P2	P3
① 上部工重量	tf	2560	2530	2560
橋脚・基礎剛性	tf/m	25220	21320	19500
免震支承降伏変位	m	0.0181 (0.0120)	0.0196 (0.0120)	0.0204 (0.0120)
② 免震支承降伏力	tf	278 (261)	280 (261)	281 (261)
免震支承第 1 剛性	tf/m	15377 (21802)	14312 (21802)	13784 (21802)
免震支承第 2 剛性	tf/m	2634 (2725)	2618 (2725)	2608 (2725)
③ 合成バネ第 1 剛性	tf/m	9553 (11693)	8563 (10779)	8076 (10293)
④ 合成バネ第 2 剛性	tf/m	2385 (2459)	2332 (2416)	2300 (2391)
剛性比 ④/③		0.250 (0.210)	0.272 (0.224)	0.285 (0.232)
降伏力比 ②/①		0.108 (0.102)	0.111 (0.103)	0.110 (0.102)
第 1 剛性固有周期	sec	1.04 (0.94)	1.09 (0.97)	1.13 (1.00)

3. 解析結果

各波形における履歴吸収エネルギー係数の値を表-2 に、最大応答変位および最大応答加速度の値

表-2 履歴吸収エネルギー係数 α

	Ⅰ - Ⅱ			Ⅱ - Ⅱ		
	1	2	3	1	2	3
P1	4.72	3.52	3.90	2.80	2.81	1.77
P2	4.79	3.42	3.83	2.68	2.51	1.79
P3	4.92	3.50	3.79	2.58	2.32	1.80

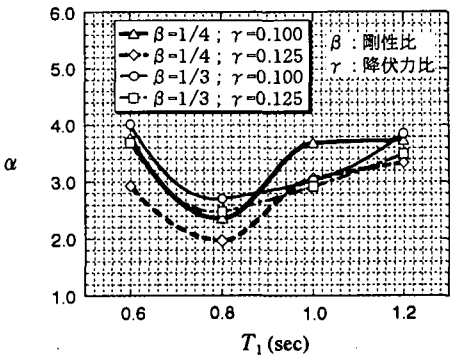


図-6 履歴吸収エネルギー係数 α の読み取り図の例 (タイプⅠ)

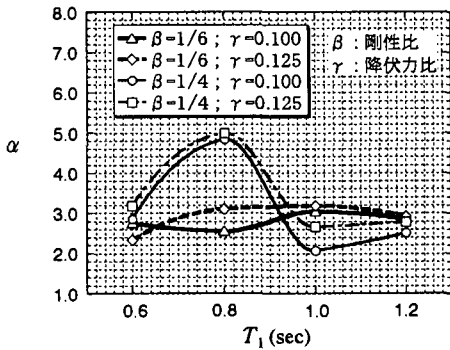


図-7 履歴吸収エネルギー係数 α の読み取り図の例 (タイプⅡ)

を図-8 に示す。

- ①履歴吸収エネルギー係数 α の値は、地震波形により多少ことなりタイプⅠの波形では 3.8~4.9 程度、タイプⅡの波形では 1.8~2.8 程度となりタイプⅡはタイプⅠよりも 2 程度小さな値となる。
- ②最大応答変位・最大応答加速度ともにタイプⅡの地震波形の方がタイプⅠの地震波形よりも大きな応答値となる。
- ③最大応答変位では、本推定法の応答値は全体系時刻歴応答解析結果とほぼ同等の良い結果を与えているが、タイプⅠの地震波形で本推定法は全体系時刻歴応答解析結果よりも若干小さな応答値を示す場合がある。タイプⅡの地震波形では全体系時刻歴応答解析結果よりも若干大きな応答値を示す。
- ④最大応答加速度においても、本推定法の応答値は全体系時刻歴解析結果とほぼ同等の良い結果を与えている。タイプⅠのⅠ-Ⅱ-3 波形で P1 橋脚においてのみ本推定法の応答値が全体系時刻歴応答解析結果よりも若干下回る値となる。

4. まとめ

エネルギーの釣り合いに基づき最大応答値を推定

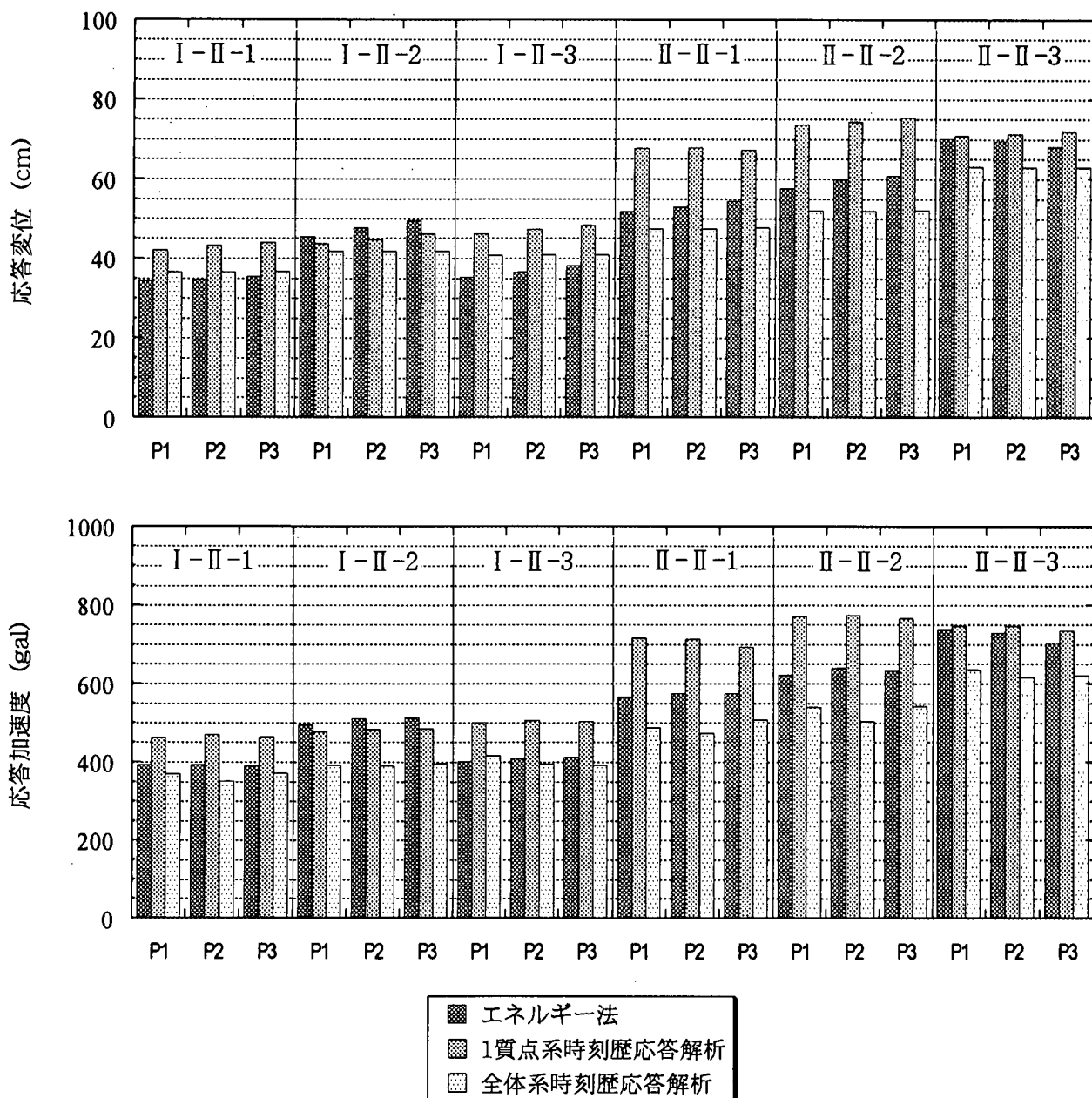


図-8 推定による最大応答変位と最大応答加速度

する方法を実橋に適用した結果、以下の点が明らかとなった。

主要動の継続時間の短いタイプⅡの方が継続時間の長いタイプⅠよりも履歴吸収エネルギー係数は小さくなる。履歴吸収エネルギー係数は本推定法のように地震波形ごとに設定する必要がある。

本推定法による応答値は全体系時刻歴応答解析結果と比較し、最大応答変位では平均10%程度、最大20%程度の誤差、最大応答加速度では平均15%程度、最大30%程度の誤差で本推定法は良い結果を示している。

以上より本推定法は1質点系で表現できる非線形復元力特性を有する構造物に対して簡便にかつ精度良く最大応答値を推定できる方法であることがわかる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針，1993。
- 2) 日本建築学会：耐震設計の一つの新しい方向、石丸辰治：エネルギー・スペクトルによる性能設計－粘性＆履歴ダンパーを有する系の応答特性－，pp.155～170，1995。
- 3) 構造工学論文集 Vol.42A，非線形履歴特性を有する構造物の応答推定法に関する研究，1996。
- 4) WCEE：A study on estimation methods for responses of nonlinear hysteretic structures，1996。
- 5) 建設省：道路橋の免震設計法マニュアル（案），（財）土木研究センター，1992。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，1996。
- 7) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997。
- 8) 秋山宏：建築物の耐震極限設計，第2版，pp.9～22，1987。