

エネルギーの釣り合いによる構造物の応答推定法の適用

APPLICATION OF AN ESTIMATION METHOD FOR RESPONSE OF STRUCTURES BY EQUILIBRATION OF ENERGIES

入江達雄^{*}、松田泰治^{**}、スマヤ アラン^{***}

Tatsuo IRIE, Taiji MAZDA and Allan D. SUMAYA

^{*} 工修 (株) 建設技術研究所 (〒810 福岡市中央区渡辺通 2-1-10、十八福岡ビル)

九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻博士課程

^{**} 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)^{***} 工修 (株) 建設技術研究所 (〒810 福岡市中央区渡辺通 2-1-10、十八福岡ビル)

This paper describes and proposes a method for estimating maximum responses of structures by equilibration of total input energy and total absorbed energy of structures with seismically isolated bearing. In this analysis, energy spectra are used to determine maximum responses of single-degree-of-freedom system for various cases of bilinear models with variation on yield loads and forms of hysteresis. Estimation diagrams are produced based on maximum responses obtained. Using these diagrams, it is possible to estimate maximum responses easily. Moreover, in order to examine the applicability of the proposed method, it is applied to an actual bridge with seismically isolated bearing. After comparing its results with dynamic analysis for single-degree-of-freedom system and frame model of structure, it reveals that the proposed method gives near and conservative estimations.

Key Words: bilinear model, energy spectra, total absorbed energy, seismically isolated bearing

1. まえがき

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。免震支承を用いれば多径間連続化する事が可能となり、伸縮継手を減少する事が出来、走行性の向上、騒音・振動の低減、維持管理性の向上等の効果も期待されるためである。さらに、兵庫県南部地震の発生後は、新設橋における下部構造への地震力の分散・低減のため、既設橋に対する耐震補強のために免震支承が多く採用されようになっている。兵庫県南部地震では、大きな加速度・速度が観測されており、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事が、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。

本研究では、エネルギースペクトル図を利用して1質点系のパイリニア型モデルに対し構造物の復元力特性・降伏荷重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、実橋への適用性を検討する。さらに、これらの結果を図化し、図より簡便に最大応答を推定できるようにしている。最大応答値の推定は、2種類の地盤種

別(I種地盤・II種地盤)と2種類の地震力レベル(道路橋の免震設計マニュアル(案)⁵⁾に示される地震時保有水平耐力法レベル・兵庫県南部地震での観測地震レベル)を対象に行っている。

また、本推定法の評価のために、本推定法の実橋への適用を行い、全体系の時刻歴解析および1質点系の時刻歴解析により最大応答値の比較検討を行っている。

2. 応答推定方法

2.1 エネルギーの釣り合いの概念

ここでは、エネルギー入力と免震支承による吸収エネルギーに着目した、エネルギーの釣り合いに関する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。

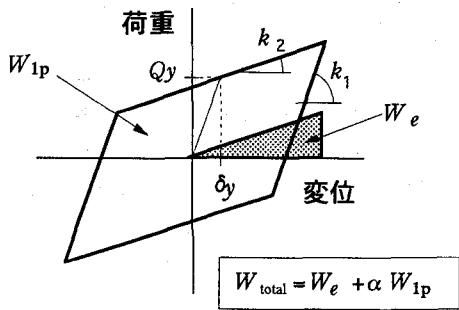
$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = -M\ddot{z}_0 \quad (1)$$

ここで、 $M, C\dot{y}, F(y), -M\ddot{z}_0, \ddot{z}_0, y$ は各々は質量、粘性減衰力、復元力、地震外力、水平地動、質点の相対変位を示している。式(1)の両辺に $dy = y dt$ 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す。左辺の第2項は粘性減衰機構による消費エネルギーを表している。左辺第3項はバネ系の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。⁶⁾

履歴型非線形系の変位 δ における総吸収エネルギーについては、既往の研究¹⁾において免震構造物の応答推定に用いられた定義を参考に図・1に示すように設定する。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 δ_{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・1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_{ip} (図・1の閉ループの面積) に履歴吸収エネルギー係数 α をかけたものの和で定義される。



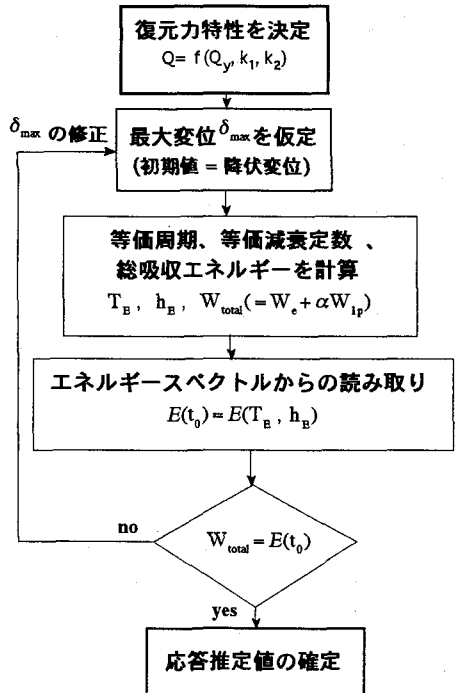
図・1 構造物の総吸収エネルギー

2.2 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手法である。

$$E(t_0) = W_e + \alpha W_{ip} \tag{3}$$

本推定法のフローチャートを図・2に示す。

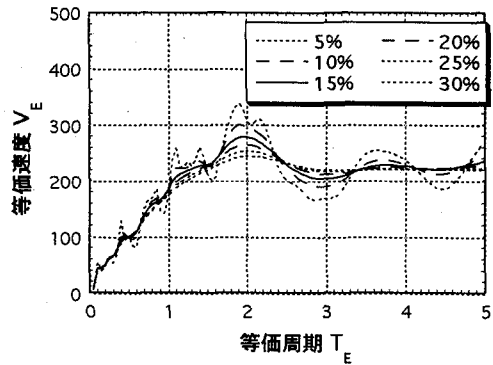


図・2 エネルギー法のフローチャート

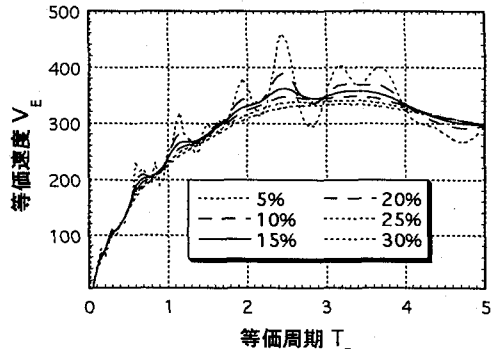
ここで、これまでの検討により履歴吸収エネルギー係数 α により応答値の推定精度が左右されることが判明しているため³⁾⁴⁾、今回は復元力特性等のパラメータの見直しを行い、 α の再評価を行った。ここで、地震力のエネルギースペクトルを式(4)に示す等価速度 V_E を用いて表す。

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

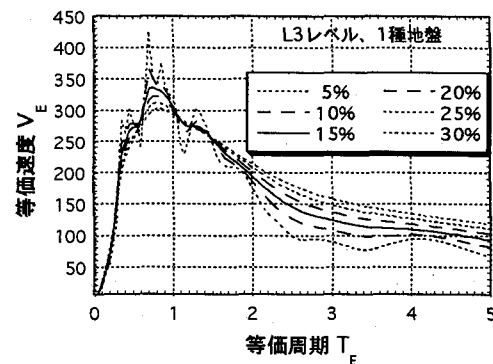
推定法において用いる各地震力のエネルギースペクトルを図・3～図・6に示す。



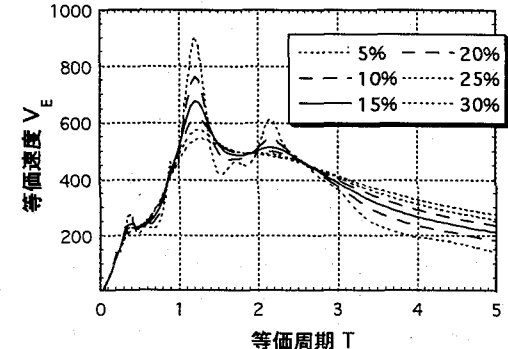
図・3 L2によるI種地盤のエネルギースペクトル



図・4 L2によるII種地盤のエネルギースペクトル



図・5 L3によるI種地盤のエネルギースペクトル

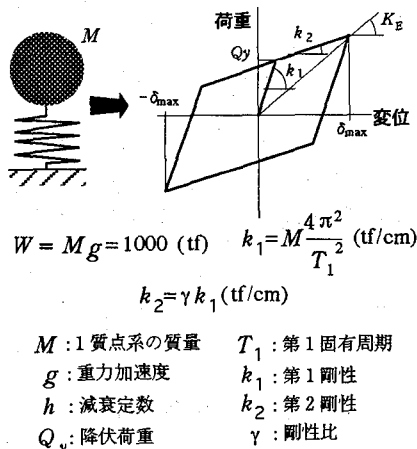


図・6 L3によるII種地盤のエネルギースペクトル

2.3 履歴吸収エネルギー係数 α の検討

解析に用いるバイリニア型モデルは、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モデルで、漸増載荷時に復元力特性が2本の直線で表される。免震支承が鉛入り積層ゴム・高減衰積層ゴム・積層ゴム+鋼棒ダンパー（鋼材の弾塑性性能を利用して減衰性のみを発揮するタイプ）のような弾塑性的な復元力特性を持つ場合に適用性が高いと考えられる。1質点系のバイリニア型モデル、及び復元力特性を図・7に示す。

解析は各地盤種別ごとに表・1に示す条件の組合わせ（復元力特性16ケース×降伏荷重6ケース）の96ケースについて行う。



図・7 バイリニア型の復元力を持つ1自由度モデル

表・1 解析ケース

復元力特性	T_1 (sec)	T_2 (sec)	k_1 (tf/cm)	k_2 (tf/cm)
1-a	0.60	1.04	111.90	37.30
1-b	0.60	1.20	111.90	27.98
1-c	0.60	1.47	111.90	18.65
1-d	0.60	1.70	111.90	13.99
2-a	0.80	1.39	62.94	20.98
2-b	0.80	1.60	62.94	15.74
2-c	0.80	1.96	62.94	10.49
2-d	0.80	2.26	62.94	7.87
3-a	1.00	1.73	40.28	13.43
3-b	1.00	2.00	40.28	10.07
3-c	1.00	2.45	40.28	6.71
3-d	1.00	2.83	40.28	5.04
4-a	1.20	2.08	27.98	9.33
4-b	1.20	2.40	27.98	6.99
4-c	1.20	2.94	27.98	4.66
4-d	1.20	3.39	27.98	3.50

※各復元力特性に対し6種類の Q_y の検討を行う。

$Q_y = (75, 100, 125, 150, 175, 200) \text{ tf}$

各推定法における等価剛性 K_E ・等価減衰定数 h_E ・等価固有周期 T_E は式 (5)～式 (7) で計算される。

$$K_E = \frac{Q(\delta_{\max}) - Q(-\delta_{\max})}{2\delta_{\max}} \quad (5)$$

$$h_E = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (6)$$

$$T_E = 2\pi \sqrt{M/K_E} \quad (7)$$

ここに、 W : 等価剛性による弾性ひずみエネルギー

ΔW : 1サイクルの履歴吸収エネルギー

地盤種別: I種地盤・II種地盤

地震レベル: 地震時保有水平耐力レベル (L2レベル)

兵庫県南部地震観測波 (L3レベル)

(I種地盤; 神戸海洋気象台N-S)

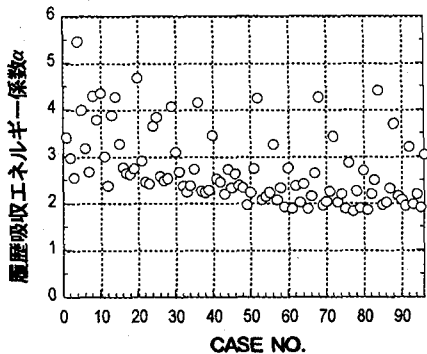
(II種地盤; J R 鷹取駅E-W)

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、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 α を復元力特性、降伏荷重の異なる96ケースについて求め、その平均値を用いる事とした。

なお、ここでは各解析ケースのうち耐震性の評価が安全側となる $E(t_m) \leq E(t_0)$ のケースのみを考慮した。計算された各地盤種別、地震荷重レベルにおける履歴吸収エネルギー係数 α を表・2に示す。また、II種地盤のL2レベルの地震力に対する各検討ケースの履歴吸収エネルギー係数の図を図・8に示す。

表・2 履歴吸収エネルギー係数 α

地盤種別	地震荷重レベル	α
I	L2	1.797
I	L3	2.188
II	L2	2.724
II	L3	2.213



図・8 II種地盤のL2レベルに対する α

これら得られた履歴吸収エネルギー係数 α を用いて免震支承による吸収エネルギーと入力波形によるエネルギー入力の総量の釣り合いより求めた復元力特性・降伏荷重をパラメータとしたII種地盤・荷重レベルごとの最大応答推定値の図を図・9～図・12に示す。構造物の復元力特性・降伏荷重を設定することにより、図より簡便に構造物の最大応答値を推定することが可能となる。

3. 実橋への適用

3.1 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、図・13に示す橋長292.0m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。

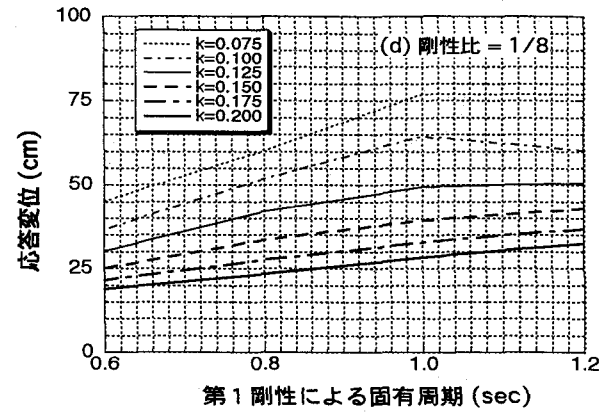
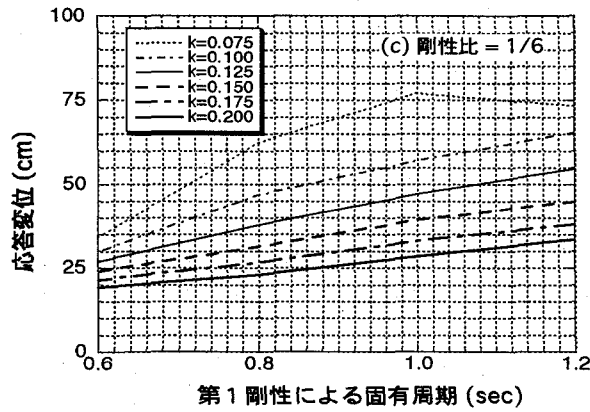
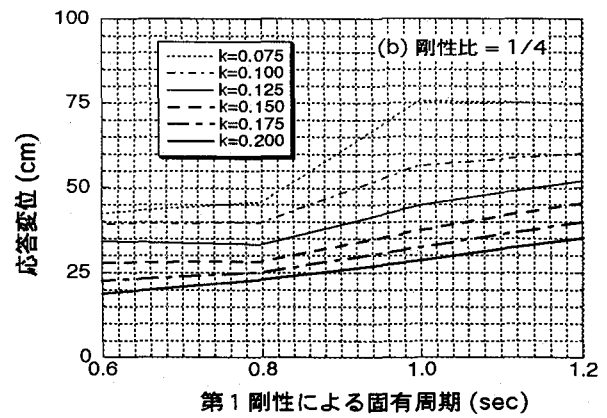
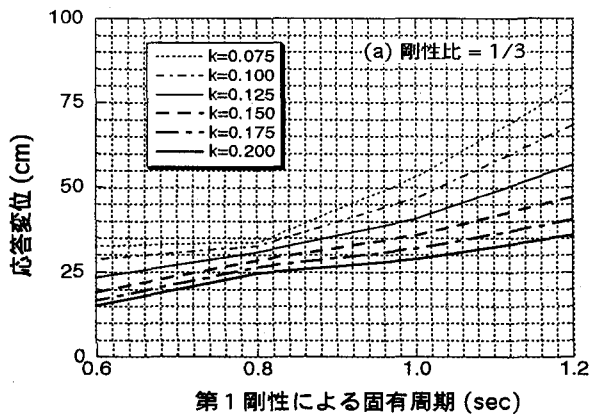


図-9 II種地盤に対応するレベル2の波形を入力したときの応答変位

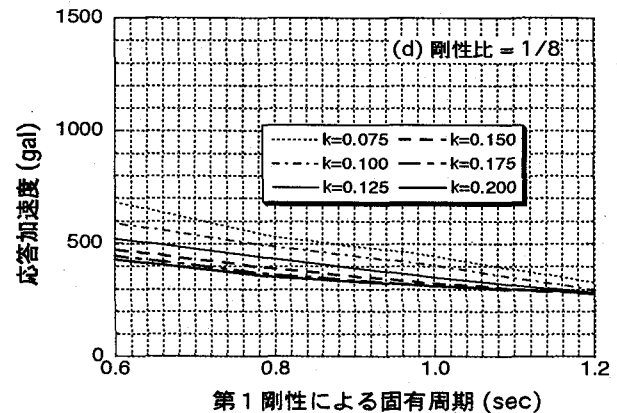
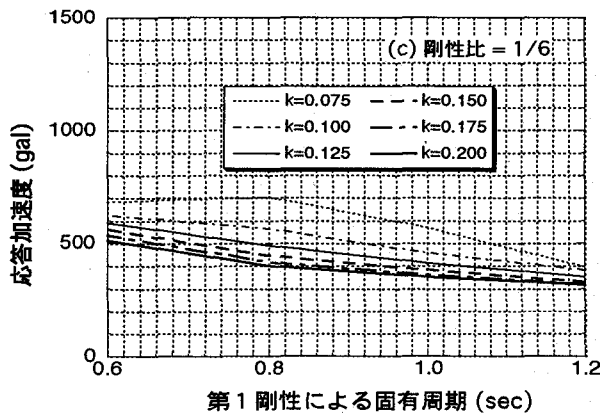
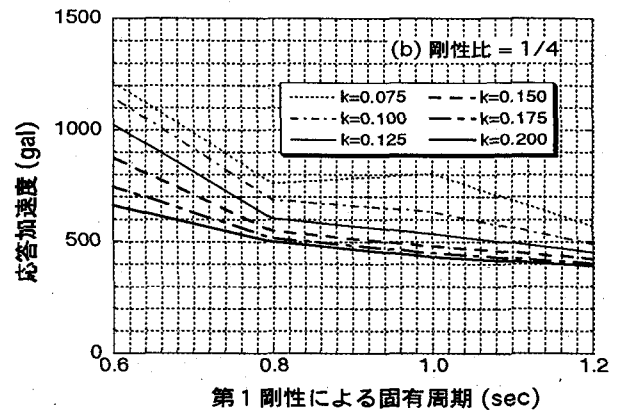
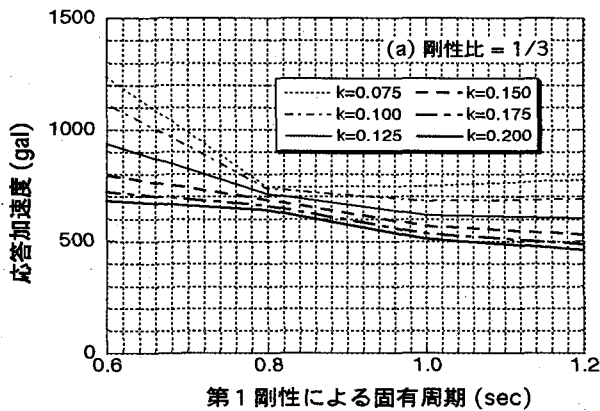


図-10 II種地盤に対応するレベル2の波形を入力したときの応答加速度

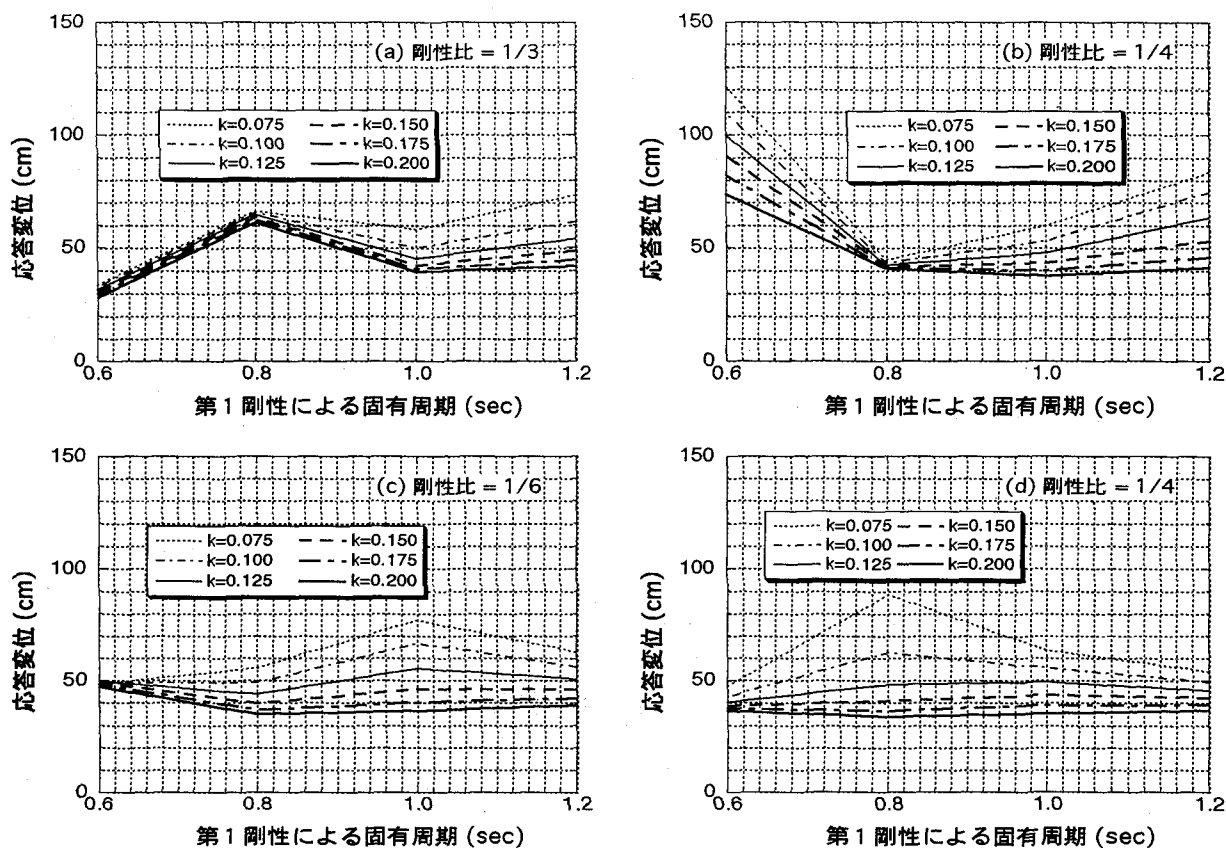


図 - 1 1 II 種地盤に対応するレベル 3 の波形を入力したときの応答変位

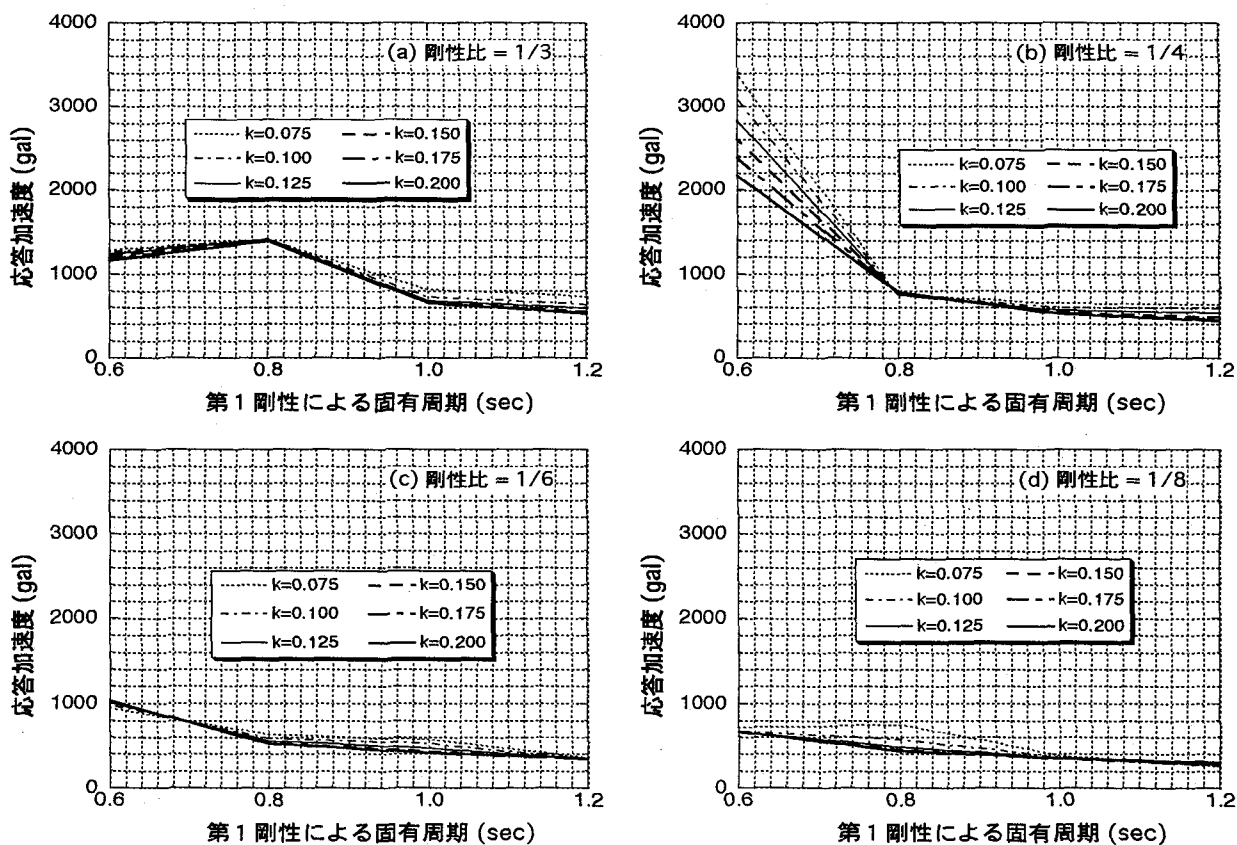
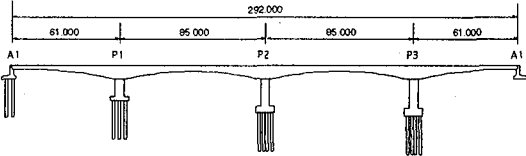


図 - 1 2 II 種地盤に対応するレベル 3 の波形を入力したときの応答加速度

解析では、橋脚及び基礎のパネと免震支承のパネを直列パネとして合成し、1つのパネとしてモデル化している。質量は、各橋脚が支持する上部工重量のみを考慮し1質点系モデルとして表した。これらの復元力特性を用いて図・2に示すフローチャートに従い、各橋脚の最大応答変位と最大応答加速度を推定した。各橋脚の復元力特性・降伏荷重比等の解析条件を表・3に示す。



図・13 橋梁一般図 (単位:m)

表・3 各橋脚の解析条件

	P1	P2	P3
上部工重量	2560 (tf)	2530 (tf)	2560 (tf)
免震支承降伏荷重	278 (tf)	280 (tf)	281 (tf)
免震支承第1剛性	15377 (tf/m)	14312 (tf/m)	13784 (tf/m)
免震支承第2剛性	2634 (tf/m)	2618 (tf/m)	2608 (tf/m)
橋脚・基礎剛性	25220 (tf/m)	21320 (tf/m)	19500 (tf/m)
合成パネ第1剛性	9553 (tf/m)	8563 (tf/m)	8075 (tf/m)
合成パネ第2剛性	2385 (tf/m)	2331 (tf/m)	2300 (tf/m)
剛性比 γ	0.25	0.272	0.285
降伏荷重比 k	0.108	0.111	0.11
第1固有周期	1.04 (s)	1.09 (s)	1.13 (s)

3.2 適用結果

推定の結果、得られた最大応答変位、最大応答加速度を表・4と図・14に示す。本推定法の妥当性を検証するために1質点系の同じモデルによる非線形時刻歴解析および橋梁全体をフレームモデルとし、免震支承を同じバイリニア型でモデル化した全体系モデルによる非線形時刻歴解析を行い比較検討を行った。また、本橋梁の基礎地盤はⅡ種地盤であるが、比較検討のためⅠ種地盤の地震力に対しても同様の比較検討を行った。

レベル2の地震力に対する検討では、以下の事がわかる。

- ①Ⅰ種地盤、Ⅱ種地盤ともにエネルギー法は1質点系および全体系の時刻歴解析結果よりも大きな応答変位、応答加速度を示す。
- ②エネルギー法の応答変位は、全体系の時刻歴解析結果と比較し、30～45%程度大きな値を示している。応答加速度では、50～55%程度大きな値となる。
- ③1質点系の時刻歴解析結果は、全体系の時刻歴解析結果と比較しⅠ種地盤の応答変位は同等であるが、その他のケースは全体系の結果を上回っており、エネルギー法により近い値を示している。

レベル3の地震力に対する検討では、以下の事がわかる。

- ①Ⅰ種地盤、Ⅱ種地盤ともにエネルギー法による応答速度・応答加速度は、全体系の時刻歴解析結果・1質点系の時刻歴解析結果とはほぼ同等の値を示し、最大10%程度の誤差である。

地震力により、エネルギー法と時刻歴解析結果との相関に相違が生じるのは、履歴吸収エネルギー係数 α の設

定によるものと考えられる。

表・4 解析結果

		地盤種別	荷重レベル	A法	B法	C法
応答速度 (gal)	P1橋脚	Ⅰ種地盤	L2レベル	621	442	402
			L3レベル	356	351	407
		Ⅱ種地盤	L2レベル	595	516	397
	P2橋脚	Ⅰ種地盤	L2レベル	618	444	390
			L3レベル	355	353	349
		Ⅱ種地盤	L2レベル	600	519	391
	P3橋脚	Ⅰ種地盤	L2レベル	605	442	397
			L3レベル	348	349	367
		Ⅱ種地盤	L2レベル	600	515	389
	P4橋脚	Ⅰ種地盤	L2レベル	646	701	571
			L3レベル	59.3	39.7	41.5
		Ⅱ種地盤	L2レベル	59.1	47.8	42.9

A法：エネルギー法
B法：時刻歴解析 (1質点)
C法：時刻歴解析 (全体系)

4. まとめ

バイリニア型の非線形復元力特性を有する構造物に対してエネルギーの釣り合いに基づく応答推定法を適用し、地震時保有水平耐力レベルおよび兵庫県南部地震観測波を用いた時刻歴応答解析結果との比較検討を行った。その結果、以下の点が明らかとなった。

免震支承を有する橋梁を対象に構造データに基づく1質点系バイリニア型モデルへの置換を行い、エネルギーの釣り合いに基づく応答推定法を適用した。その結果L2レベルの入力に対して構造物の応答加速度や応答変位の推定値は時刻歴応答解析結果に比べ約30～50%程度大きめの安全側の評価となった。L3レベルの入力に対しては推定値は時刻歴応答解析結果と良く一致した。このように地震動のレベルにより推定結果に差違が生じた理由の一つは非線形パラメータの見直しを行い履歴吸収エネルギー係数 α を平均値で再評価したにもかかわらず、個々の非線形パラメータに対する適切な履歴吸収エネルギー係数 α の値にばらつきが存在するためと考えられる。今後は履歴吸収エネルギー係数 α のばらつきの原因を明らかにして、本推定法の適用範囲を検討し推定精度の向上を図る必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：免震構造設計指針、1993年12月。
- 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年10月
- 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年4月。
- 4) WCEE: A study on estimation methods for responses of nonlinear hysteretic structures、1996年6月。
- 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年12月。
- 6) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、第2版、pp.9～22、1987年7月。

(1996年9月6日受付)

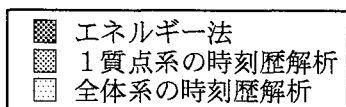
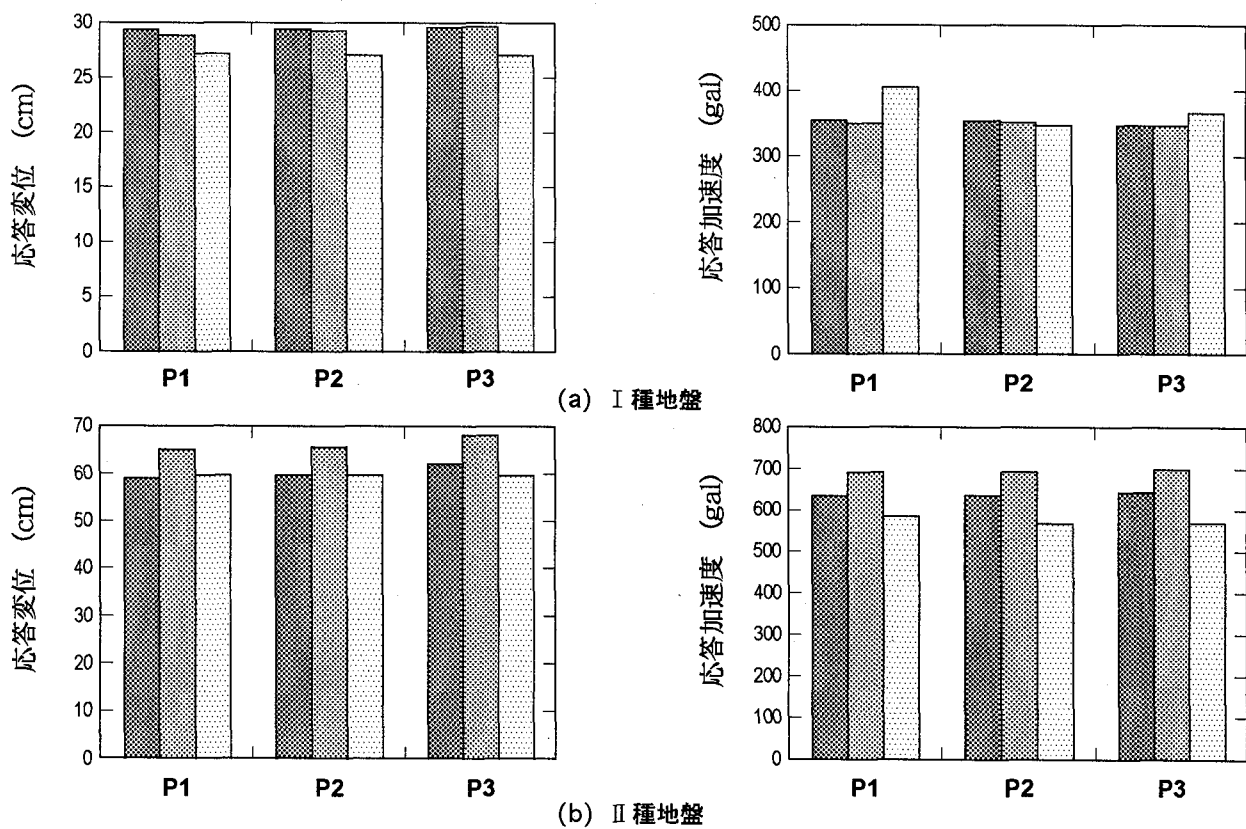
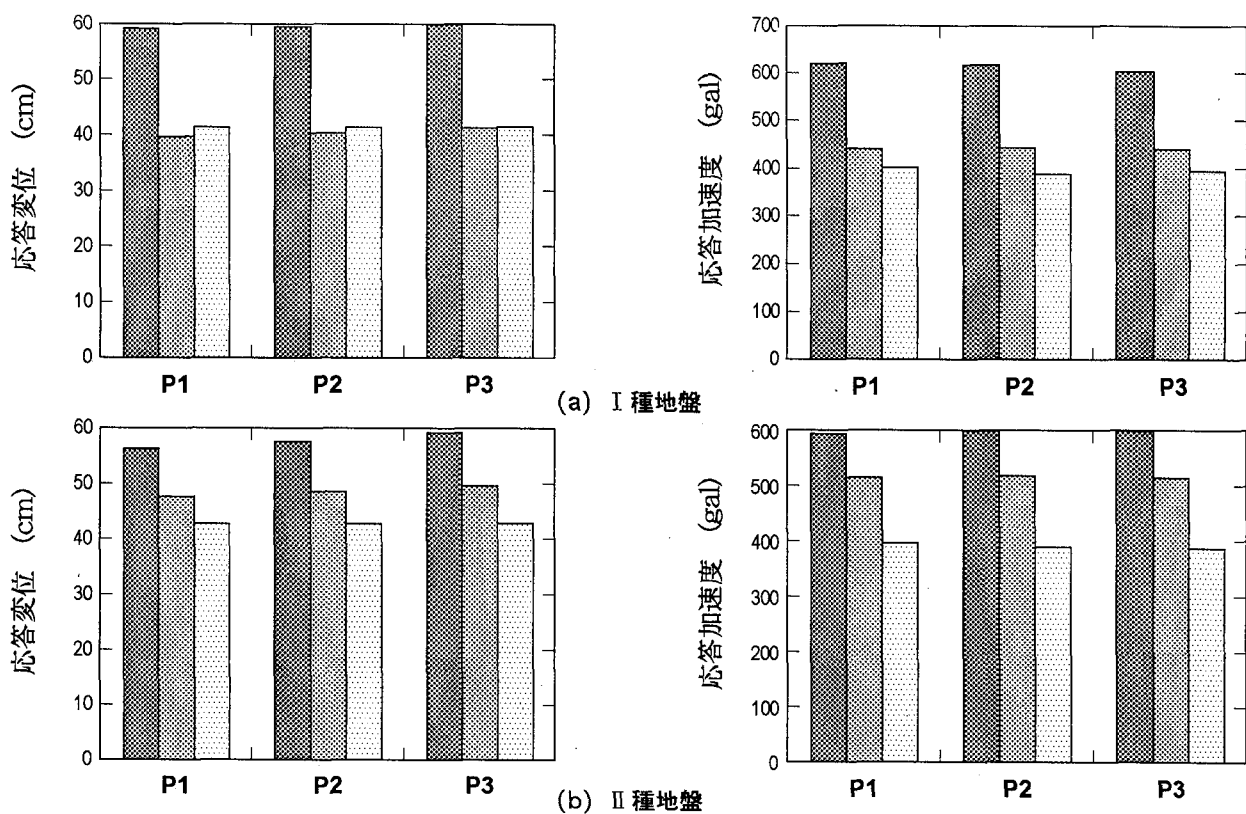


図-14 推定による最大応答変位と最大応答加速度