

マルチヒンジ系への等価線形化法の適用性に関する検討

— 等価線形化法の収束性 —

熊本幸¹・矢部正明²

¹正会員 修(工) (株)長大 構造事業部 構造防災室 (〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6)

²正会員 博(工) (株)長大 構造事業部 構造防災室 (〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6)

1. はじめに

非線形振動系の非線形最大応答を推定する方法は、様々な方法が提案されている。例えば、エネルギー一定則、変位一定則、リダクションファクター、エネルギーの釣合いに基づく方法、等価線形化法等がある。これらの方法は、何れも1自由度非線形系を対象にその非線形応答の推定方法が検討されてきており、1自由度系に関しては、入力地震動の違いによるバラツキがあるものの、その適用範囲や推定精度も明確にされてきている。このため、これらの方法は、各種の耐震設計基準にも採用されている。免震支承を用いない一般的な高架橋であれば、その設計振動単位は1基の下部構造とそれが支持する上部構造重量にモデル化することができ、非線形化も橋脚基部付近の塑性ヒンジ区間に集中するため、耐震設計に用いるモデルは1自由度非線形系とみなすことができる。しかし、免震支承を有する橋梁は、確実に免震支承と橋脚基部付近の塑性ヒンジ区間の2カ所が非線形化し、免震支承と橋脚それぞれの非線形応答が他の非線形応答に影響を及ぼし合うマルチヒンジ系となるため、上述した非線形応答の推定法をそのまま適用することはできない。マルチヒンジ系を対象に非線形応答を簡易的に推定する方法を検討した研究として、建築構造物を対象とした研究¹⁾や免震支承-RC橋脚系を対象とした足立らの研究²⁾がある。著者らも、耐震補強されたRC橋脚と免震支承からなる系を対象に、桁に生じる最大応答水平変位、免震支承と橋脚に生じる最大応答変形を実用上十分な精度で推定できる等価線形化モデルを提案している³⁾。

実際の耐震設計では、非線形応答値が未知であるため、等価線形化法をおこなうためには、非線形振動系に生ずるであろう非線形応答変位を仮定し、それに対応する応答塑性率に応じて等価剛性と等価減衰定数を定め、それらを用いて等価線形振動系を作成

し、その線形最大応答変位を求める。そして、等価線形振動系の線形最大応答変位と仮定した非線形応答変位が等しくなるまで、上述のプロセスを繰返し行う必要がある。このような非線形応答を仮定し、繰返し計算をとまなう等価線形化法では、初期値の与え方や、繰返し計算時の収束判定誤差および入力地震動によって非線形動的解析による解（以後、非線形解とする）に対する等価線形化法による解（以後、等価線形解とする）の推定精度が異なることが著者らによって指摘されている⁴⁾。

本報告は、文献3)で対象とした耐震補強されたRC橋脚と免震支承からなるマルチヒンジ系を対象に、等価線形解への収束性に焦点を当てて検討したものである。上述したように、初期値を仮定し繰返し計算をとまなう等価線形化法では、1つの非線形要素に関するパラメーターのみを変化させる1自由度非線形系であっても、複数の等価線形解が得られることがある。当然、2つの非線形要素に関するパラメーターを変化させなければならないマルチヒンジ系では、精度の良い等価線形解に収束するための条件は、1自由度非線形系よりも厳しくなることが予想される。ここでは、マルチヒンジ系を構成する非線形要素に与える初期値の違いや、非線形応答における各要素の非線形化の度合いが等価線形解への収束性に与える影響を検討する。

2. 検討対象とするマルチヒンジ系

対象とする構造系は、文献3)で用いられた耐震補強されたRC橋脚と免震支承からなる免震支承-RC橋脚系29基である。免震支承は大きな2次剛性を有しているため、地震時に、免震支承に大きな塑性変形が生じると橋脚の降伏水平耐力よりも大きな水平力が橋脚に作用するため、橋脚にも非線形化が生じる。このようなマルチヒンジとなる免震支承-橋脚系の非線形応答を、図-1に示すような、免震支承の非線形性をバイ

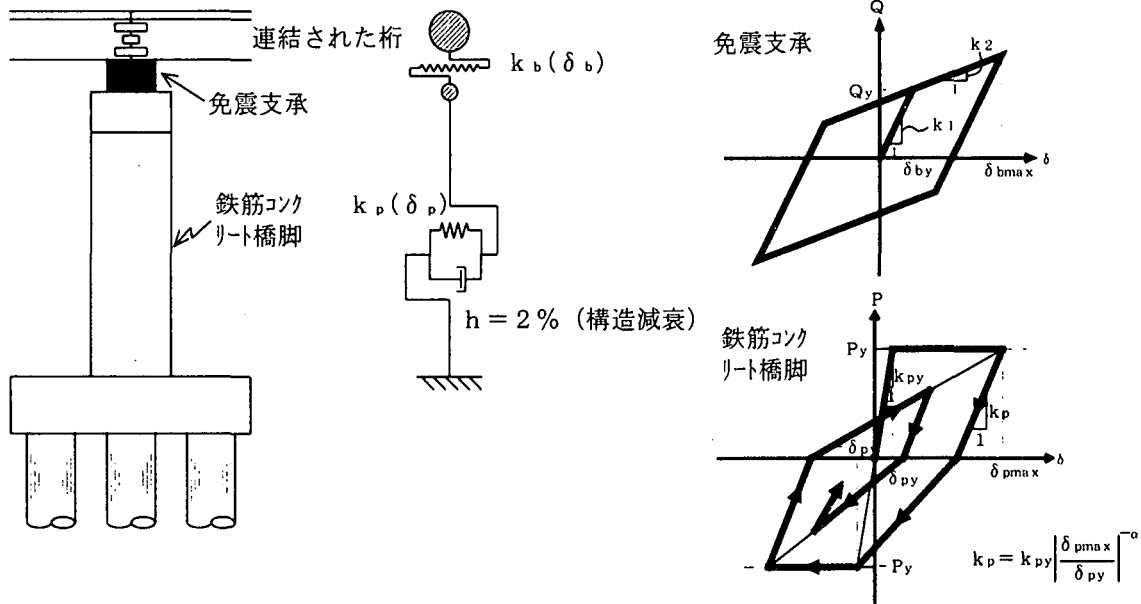


図-1 免震支承一橋脚系の非線形動的解析モデル

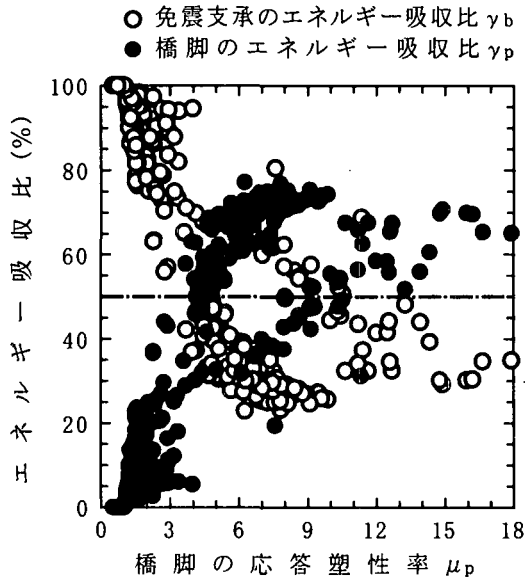


図-2 エネルギー吸収比と橋脚の応答塑性率

リニアモデル、RC 橋脚の非線形性をひびわれ点を無視した Takeda 型モデルで表した 2 質点系の非線形せん断ばねモデルから求める。上側の質点は、地震時に支持すべき上部構造部分を、下側の質点は橋脚基部に生じる曲げモーメントが等価となるように橋脚躯体重量の 1/2 をモデル化したものである。入力地震動は、道路橋示方書 V 耐震設計編に規定される地震時保有水平耐力法に用いる標準加速度応答スペクトルと同じ応答スペクトル特性を有する標準加速度波形 18 波形である。

図-2 は、対象とする免震支承一橋脚系に、上述の標

準加速度波形を作用させた場合の各要素の非線形化の度合いを、各要素のエネルギー吸収比と橋脚の応答塑性率 μ_p の関係で示したものである。免震支承と橋脚のエネルギー吸収比 γ_b, γ_p は、免震支承の履歴吸収エネルギー E_b 、橋脚の履歴吸収エネルギー E_p より次式のように定義する。

$$\gamma_b = \frac{E_b}{(E_b + E_p)} \times 100 ; \gamma_p = \frac{E_p}{(E_b + E_p)} \times 100 \quad (1)$$

図-2 より、対象とする免震支承一橋脚系は、免震支承のエネルギー吸収比 γ_b が 100% となり橋脚が弾性域に留まっているケース、免震支承と橋脚のエネルギー吸収比 γ_b, γ_p が約 50% とほぼ等しいケース、さらに、免震支承のエネルギー吸収比 γ_b よりも橋脚のエネルギー吸収比 γ_p の方が大きいケース等、免震支承と橋脚に生じる非線形化の度合いが様々に変化していることがわかる。

3. マルチヒンジ系の等価線形化モデル

文献 3) と同様に免震支承一橋脚系の非線形性を次式に示す等価線形化モデルで近似する。

$$\left. \begin{aligned} \mu_b^{eq} &= C_b^{eq} \cdot \frac{\delta_b^{\max}}{\delta_{by}} ; K_b^{eq} = \frac{K_1}{\mu_b^{eq}} \cdot \left\{ 1 + r(\mu_b^{eq} - 1) \right\} \\ h_b^{eq} &= \frac{2 \cdot \left\{ \mu_b^{eq} - (1 + r + \mu_b^{eq} \cdot r) \right\}}{\pi \cdot \mu_b^{eq} (1 - r + \mu_b^{eq} \cdot r)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_p^{eq} &= C_p^{eq} \cdot \frac{\delta_p^{\max}}{\delta_{py}} ; K_p^{eq} = \frac{K_{py}}{\mu_p^{eq}} \\ h_p^{eq} &= \beta_p \cdot \frac{1 - (\mu_p^{eq})^{\alpha-1}}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 K_b^{eq} ：免震支承の等価剛性、 K_p^{eq} ：橋脚の等価剛性、 h_b^{eq} ：免震支承の等価減衰定数、 h_p^{eq} ：橋脚の等価減衰定数、 $\delta_b^{max}, \delta_p^{max}$ ：非線形動的解析によって得られる免震支承と橋脚に生じる変形の最大応答値、 μ_b^{eq} ：免震支承の等価応答塑性率、 C_p^{eq} ：免震支承の等価係数(等価剛性、等価減衰定数算出時とも 0.85)、 δ_{by} ：免震支承の降伏変位、 K_1 ：免震支承の初期剛性、 r ：免震支承の 2 次剛性比、 μ_p^{eq} ：橋脚の等価応答塑性率、 C_p^{eq} ：橋脚の等価係数(等価剛性算出時 0.85、等価減衰定数算出時 0.75)、 δ_{py} ：橋脚の降伏変位、 β_p ：橋脚の減衰定数の補正係数(0.8)、 α ：Takeda 型モデルの除荷剛性の低下係数(0.5)である。この等価線形化モデルは、実用上十分な精度で非線形解を推定することが文献 3) で確認されている。

4. 等価線形化モデルの初期値と推定精度

等価線形化モデルに仮定する非線形応答値(初期値)が、推定精度に与える影響を検討する。等価線形化モデルに仮定する非線形応答値の初期値として、ここでは、次の 4 種類の初期値を想定して等価線形化法の推定精度の比較を行った。

初期値 1： $\mu_b^0 = 1, \mu_p^0 = 1$

初期値 2： $\mu_b^0 = 2\mu_b^{NL}, \mu_p^0 = 2\mu_p^{NL}$

初期値 3： $\mu_b^0 = 1, \mu_p^0 = 2\mu_p^{NL}$

初期値 4： $\mu_b^0 = 2\mu_b^{NL}, \mu_p^0 = 1$

ここで、 μ_b^0, μ_p^0 はそれぞれ免震支承と橋脚の等価線形化モデルに与える非線形応答の初期値(応答塑性率)であり、 μ_b^{NL}, μ_p^{NL} は非線形動的解析より得られた免震支承と橋脚の最大応答塑性率である。初期値 1 は、免震支承と橋脚に生じる非線形応答を小さく見込み、等価線形化法の収束過程の中で各要素に生じる非線形応答が大きくなりながら収束していく過程を、初期値 2 は、各要素に生じる非線形応答を大きく見込み等価線形化法の収束過程の中で各要素に生じる非線形応答が小さくなりながら収束していく過程を想定したものである。初期値 3, 4 は、免震支承と橋脚に見込む非線形応答の度合いを変化させることにより、等価線形化法の収束過程の中で各要素に生じる非線形応答の変化が複雑になるようにしたものである。

図-3 は、等価線形解 δ^{eq} の非線形解 δ^{NL} に対する比(等価線形化法の推定精度) δ^{eq}/δ^{NL} を頻度分布の形で表したものである。免震支承と橋脚に生じる非線形応答を小さく仮定して等価線形化法をスタートした初期値 1 の場合には、上部構造慣性力作用位置に生じる変位の推定精度 $\delta_u^{eq}/\delta_u^{NL}$ は、頻度分布のピーク値は 1.0 にあるが、頻度分布の裾が 1.0 よりも大きい領域に広がっているため、頻度分布の重心に相当する平均値は 1.07 と等価線形解 δ^{eq} が非線形解 δ^{NL} を大きく評

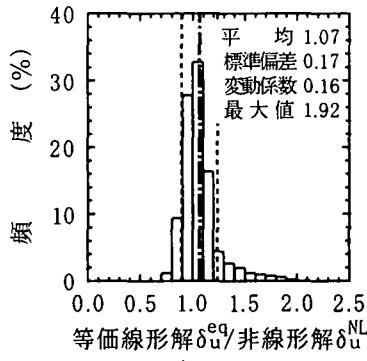
価する傾向にある。免震支承に生じる変形の推定精度 $\delta_b^{eq}/\delta_b^{NL}$ は、頻度分布のピークが 1.0 にあり、頻度分布の形状も 1.0 を中心にほぼ対称な分布となっているが、頻度分布の重心に相当する平均値は 0.96 と等価線形解 δ^{eq} が非線形解 δ^{NL} を若干小さく評価する傾向にある。橋脚に生じる変形の推定精度 $\delta_p^{eq}/\delta_p^{NL}$ は、頻度分布のピークが 0.9 付近にあるが、頻度分布の裾が 0.4~4.4 と広い範囲に渡って分布しているため、頻度分布の重心に相当する平均値は 1.05 と等価線形解 δ^{eq} が非線形解 δ^{NL} を大きく評価する傾向にある。また、ここで着目すべきは、橋脚に生じる変形の推定精度 $\delta_p^{eq}/\delta_p^{NL}$ の変動係数が 0.48 と大きく、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} や免震支承に生じる変形 δ_b^{eq} よりも約 3 倍も大きいということである。これは、免震支承と橋脚に生じる変形 δ_b, δ_p の和で表される上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u は、免震支承に生じる変形 δ_b が卓越しており、橋脚に生じる変形が相対的に小さい($\delta_p \ll \delta_b$) からである。

免震支承と橋脚に生じる非線形応答を大きく仮定して等価線形化法をスタートした初期値 2 の場合には、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} 、免震支承と橋脚に生じる変形 $\delta_b^{eq}, \delta_p^{eq}$ とともに、初期値 1 の推定精度の頻度分布と同じ傾向にある。

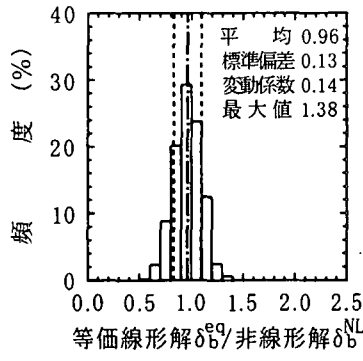
免震支承と橋脚に生じる非線形応答の度合いを片方は大きく、片方は小さく仮定して等価線形化法をスタートした初期値 3 と初期値 4 における上部構造慣性力作用位置に生じる変位の推定精度 $\delta_u^{eq}/\delta_u^{NL}$ は、平均値、標準偏差とともに初期値 1, 2 にほぼ等しいことがわかる。これより、免震支承と橋脚に生じる非線形応答の和によって構成される上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u は、どのような初期値の値によっても、等価線形化法によって実用上十分な精度で非線形解 δ^{NL} に近似した等価線形解 δ^{eq} を得ることができるといえる。初期値 3, 4 における免震支承に生じる変形の推定精度 $\delta_b^{eq}/\delta_b^{NL}$ は、平均値は初期値 1, 2 とほぼ等しいが、標準偏差の値が初期値 1, 2 に比較してわずかに大きくなっており、ばらつきの大きさを表す変動係数もわずかに大きくなっている。しかし、初期値 1~4 における免震支承に生じる変形の推定精度 $\delta_b^{eq}/\delta_b^{NL}$ を概観すると、実用上十分な精度を有していることがわかる。初期値 3, 4 における橋脚に生じる変形の推定精度 $\delta_p^{eq}/\delta_p^{NL}$ は、橋脚に生じる非線形応答を大きく仮定して等価線形化法をスタートした初期値 3 では平均値、標準偏差とも初期値 1, 2 にほぼ等しい値となっている。橋脚に生じる非線形応答を小さく仮定して等価線形化法をスタートした初期値 4 では、初期値 1~3 に比較して、推定精度 $\delta_p^{eq}/\delta_p^{NL}$ の平均値が 0.88 と小さくなっている。これだけをみると、初期値 4 は、免震支承-橋脚系におけ

平均値

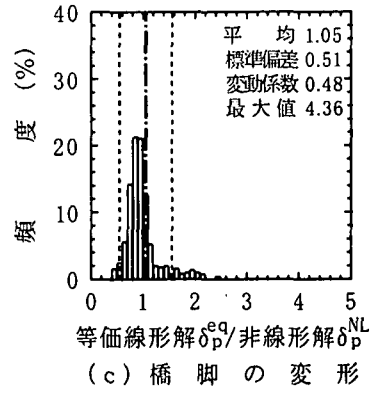
平均値±標準偏差



(a) 上部構造慣性力作用位置の変位

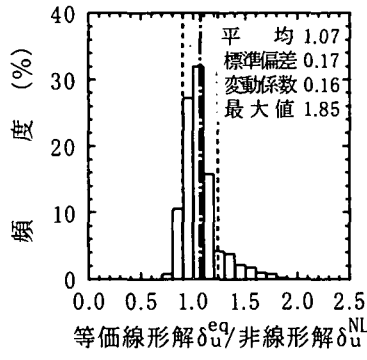


(b) 免震支承の変形

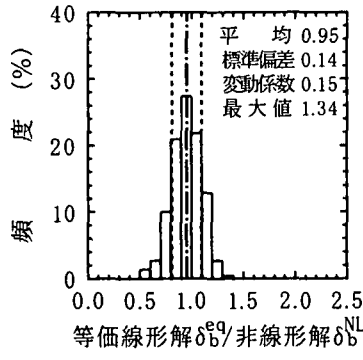


(c) 橋脚の変形

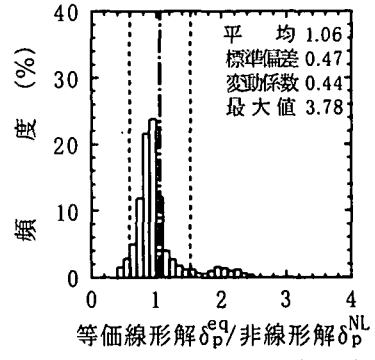
(1) 初期値 1 : $\mu_b^0=1, \mu_p^0=1$ の場合



(a) 上部構造慣性力作用位置の変位

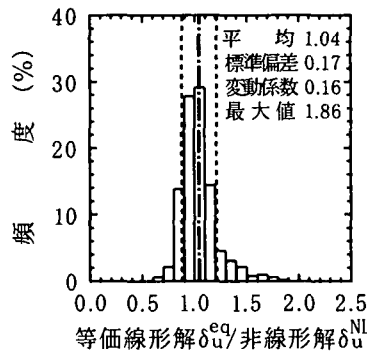


(b) 免震支承の変形

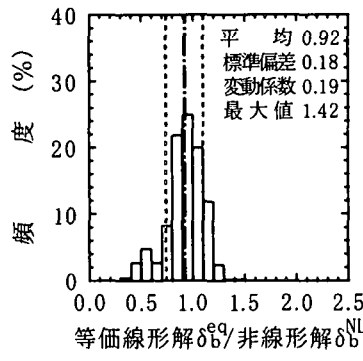


(c) 橋脚の変形

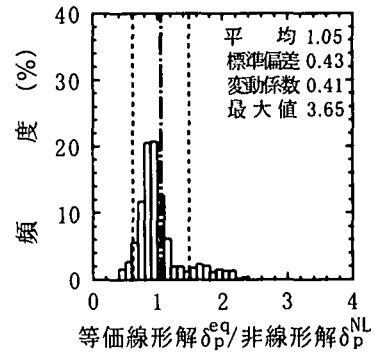
(2) 初期値 2 : $\mu_b^0=2\mu_b^NL, \mu_p^0=2\mu_p^NL$ の場合



(a) 上部構造慣性力作用位置の変位

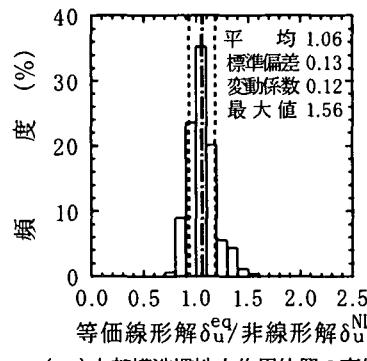


(b) 免震支承の変形

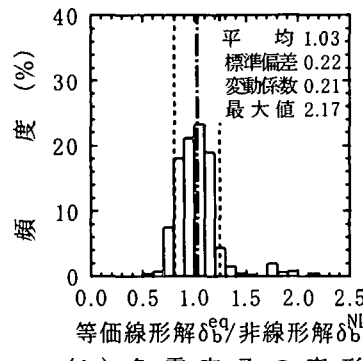


(c) 橋脚の変形

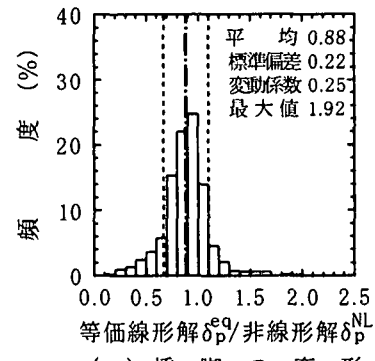
(3) 初期値 3 : $\mu_b^0=1, \mu_p^0=2\mu_p^NL$ の場合



(a) 上部構造慣性力作用位置の変位



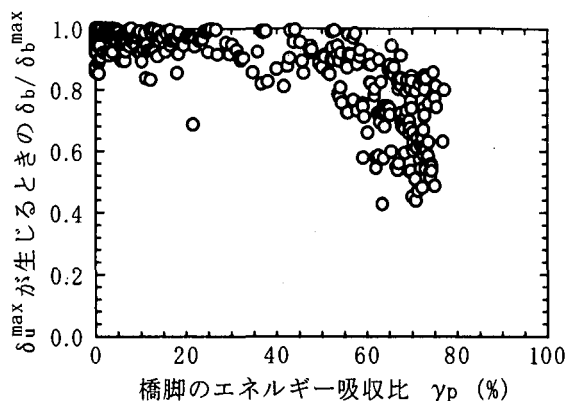
(b) 免震支承の変形



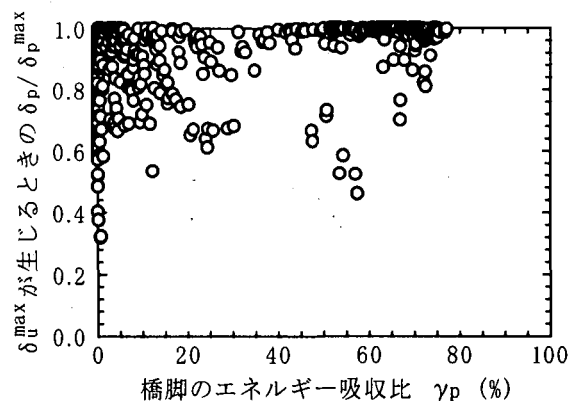
(c) 橋脚の変形

(4) 初期値 4 : $\mu_b^0=2\mu_b^NL, \mu_p^0=1$ の場合

図-3 等価線形解 δ_{eq} / 非線形解 δ_{NL} の頻度分布



(1) 免震支承に生じる変形 δ_b



(2) 橋脚に生じる変形 δ_p

図4 上部構造慣性力作用位置に生じる変位が最大になる時刻の各要素の最大値に対する割合

る橋脚に生じる変形 δ_p^{NL} を等価線形化法で推定する初期値として好ましくないように感じられる。しかし、標準偏差の値は初期値1~3よりも約1/2小さな値となっており、頻度分布の形状も初期値1~3よりも、その分布範囲が狭く、0.9付近を中心に対称な分布となっていることから、初期値4における推定精度 $\delta_p^{eq} / \delta_p^{NL}$ のばらつきは、他の初期値に比較して圧倒的に小さくなっていることがわかる。また、上部構造慣性力作用位置に生じる変位の推定精度 $\delta_u^{eq} / \delta_u^{NL}$ も、標準偏差は初期値4において最も小さく得られている。このように、免震支承—橋脚系からなるマルチヒンジ系の非線形応答のうち、免震支承に比較してその変形量が圧倒的に小さい橋脚の非線形応答を等価線形化法で推定する場合、初期値4が最もばらつきが小さい安定した推定精度となるのは、初期値4で免震支承と橋脚に仮定した非線形応答の度合いの大小関係が、非線形応答の中で実際に生じている非線形化の度合いの大小関係に一致しているからと考えられる。

5. 等価線形解の収束性と非線形相互作用

免震支承—橋脚系のようなマルチヒンジ系であっても、地震時に支持するべき上部構造重量が支配的となる橋梁構造では、その非線形応答は1次の固有振動モードが卓越した応答性状となることが期待される。図4(1)は、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} が最大値に達する時刻に免震支承に生じる変形 $\delta_b^{\max}$ と、免震支承に生じる変形の最大値 $\delta_b^{\max}$ の比 $\delta_b^{\max} / \delta_b^{\max}$ が、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p の大きさに応じてどのように変化するかを示したものである。図より、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が大きくなるにともない、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} が最大となる時刻に免震支承に生じる変形 $\delta_b^{\max}$ とその最大値 $\delta_b^{\max}$ の比 $\delta_b^{\max} / \delta_b^{\max}$ は減少しており、上部構造慣性

力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} が最大になる時刻と免震支承に生じる変形 δ_b^{NL} が最大になる時刻が異なっていることがわかる。特に、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が50%以上となるとこの傾向が顕著となる。図4(2)は、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} が最大値に達する時刻に橋脚に生じる変形 $\delta_p^{\max}$ と橋脚に生じる変形の最大値 $\delta_p^{\max}$ との比 $\delta_p^{\max} / \delta_p^{\max}$ が、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p に応じてどのように変化するかを示したものである。橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が小さい場合には、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} が最大値に達する時刻における橋脚に生じる変形 $\delta_p^{\max}$ が、その最大値 $\delta_p^{\max}$ よりも極端に小さくなっていることがわかる。これは、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が小さい領域では、免震支承でほとんどのエネルギーを吸収してしまい、橋脚には上部構造から作用する慣性力の影響が及ばず、免震支承—橋脚系の非線形応答があたかも上部構造と免震支承のみからなる1自由度非線形系として応答しているからである。言葉を換えれば、理想的な免震状態にあるといえる。逆に、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が大きくなると上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} が最大値に達する時刻に橋脚に生じる変形 $\delta_p^{\max}$ が、橋脚の最大変形 $\delta_p^{\max}$ とほぼ等しくなっている。これは、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が大きくなるほど橋脚に生じる変形 δ_p^{NL} が上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{NL} に占める割合が増加しているからである。

対象とする免震支承—橋脚系の非線形応答に、このような関係があることをふまえて、等価線形化法の収束性と非線形相互作用の影響を検討する。図5は、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p と等価線形化法の推定精度 $\delta^{eq} / \delta^{NL}$ を初期値4について示したものである。初期値4に着目したのは、前述したように、等価線形化法による推定精度 $\delta^{eq} / \delta^{NL}$ のばらつきが小さいからで

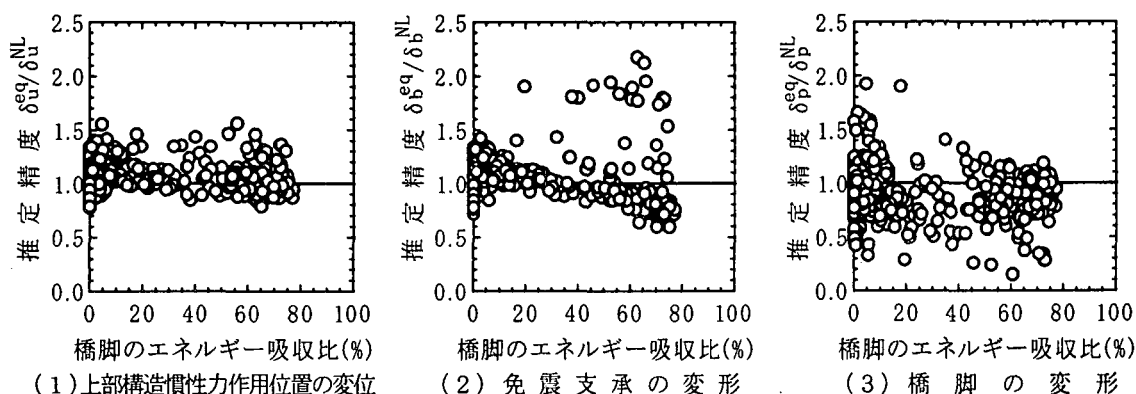


図-5 橋脚のエネルギー吸収比と等価線形化法の推定精度の関係

ある。図より、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u 、免震支承と橋脚に生じる変形 δ_b, δ_p とも等価線形化法の推定精度 δ^{eq}/δ^{NL} は、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が 0~20%と 60~80%の領域で推定精度が低下していることがわかる。これは前述したように、橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が 0~20%の領域では免震支承—橋脚系という 2 自由度振動系が、あたかも上部構造重量と免震支承のみからなる 1 自由度非線形系のような応答性状を示しているからと考えられる。このため、図の(3)に示す橋脚に生じる変形の推定精度 $\delta_p^{eq}/\delta_p^{NL}$ が、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} や免震支承に生じる変形 δ_b^{eq} よりもばらつきが大きくなっている。橋脚のエネルギー吸収比 γ_p が 60~80%の領域で推定精度が低いのは、免震支承と橋脚に生じる非線形応答が互いに影響を及ぼし合い、マルチヒンジ系としての複雑な応答性状を示しているからと考えられる。

6. 等価線形化法の収束過程

免震支承と橋脚の 2 ヶ所に非線形化が生じるマルチヒンジ系の非線形応答を等価線形化法によって推定する際に、系としての応答を代表する上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} を等価線形解の収束判定に用いるが、このときに、免震支承と橋脚に生じる変形の等価線形解 $\delta_b^{eq}, \delta_p^{eq}$ がどのような収束過程をたどるかに着目する。ここでも、非線形相互作用の影響を考慮できるよう、免震支承だけが非線形化し非線形相互作用が生じないケース、免震支承と橋脚の両方に非線形化が生じているが免震支承の非線形化の度合いが大きいケース、免震支承と橋脚の非線形化の度合いが同じであるケース、免震支承よりも橋脚の非線形化の度合いが大きいケースの 4 種類のケースをそれぞれ 1 つ抽出し、図-6 に示した。

ケース 1 : $\gamma_b = 100\%, \gamma_p = 0\%$

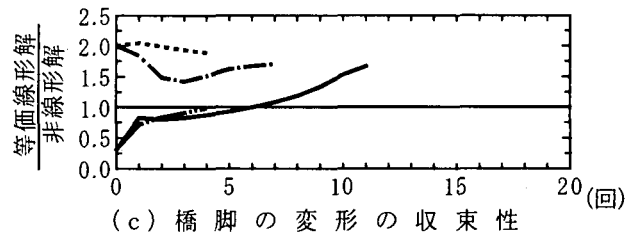
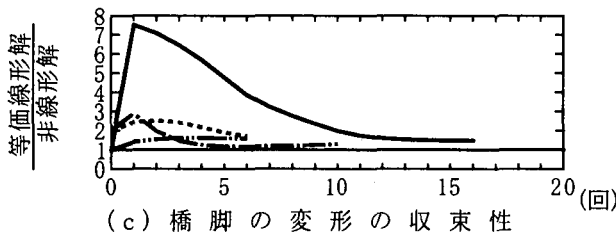
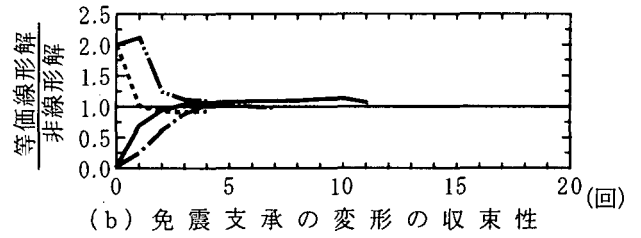
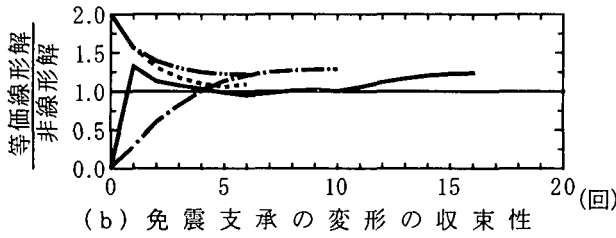
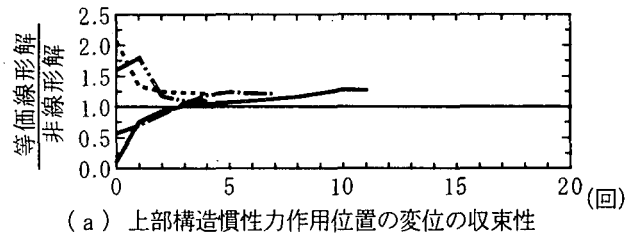
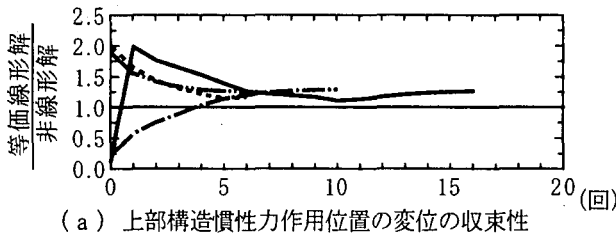
ケース 2 : $\gamma_b = 75\%, \gamma_p = 25\%$

ケース 3 : $\gamma_b = 50\%, \gamma_p = 50\%$

ケース 4 : $\gamma_b = 30\%, \gamma_p = 70\%$

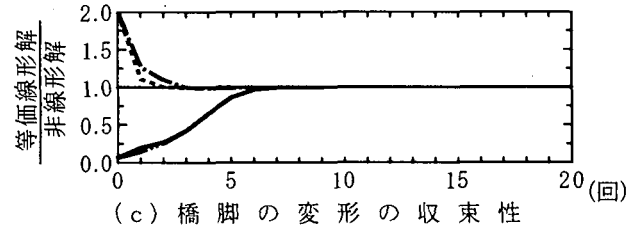
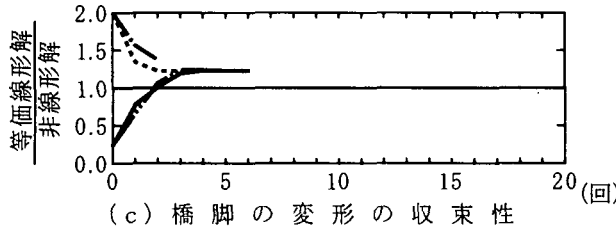
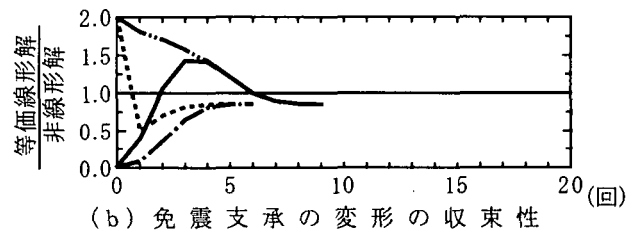
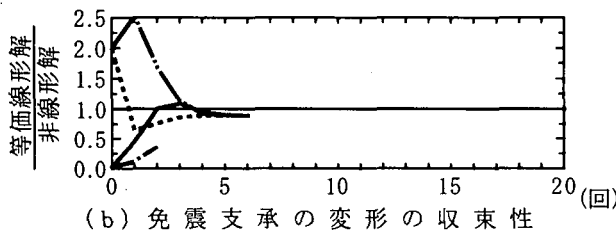
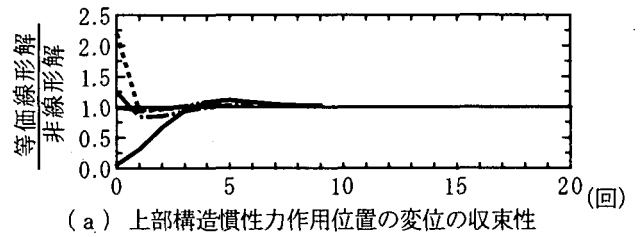
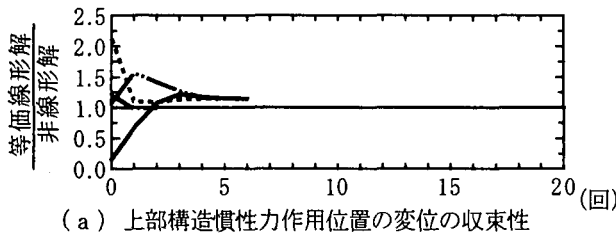
免震支承だけが非線形化するケース 1 として抽出したのは、免震支承の応答塑性率 μ_b^{NL} が 41.3、橋脚の応答塑性率 μ_p^{NL} が 1.0 となるケースであり、免震支承の非線形化が橋脚の非線形化よりも小さいケース 2 として抽出したのは、免震支承の応答塑性率 μ_b^{NL} が 32.5、橋脚の応答塑性率 μ_p^{NL} が 3.2 となるケースであり、免震支承と橋脚の非線形化の度合いが同じであるケース 3 として抽出したのは、免震支承の応答塑性率 μ_b^{NL} が 36.2、橋脚の応答塑性率 μ_p^{NL} が 4.2 となるケースであり、橋脚の非線形化が免震支承の非線形化より大きくなるケース 4 として抽出したのは、免震支承の応答塑性率 μ_b^{NL} が 55.7、橋脚の応答塑性率 μ_p^{NL} が 14.9 となるケースである。図中(a)~(c)は、それぞれ上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} 、免震支承に生じる変形 δ_b^{eq} 、橋脚に生じる変形 δ_p^{eq} の収束過程を示したものである。図の(1)に示すケース 1 の場合を例にとると、初期値 1 では上部構造慣性力作用位置に生じる変位の推定値 δ_u^{eq} が繰返し回数 1 回で急激に大きくなりその後低下して徐々に収束していき、免震支承と橋脚に生じる変形 $\delta_b^{eq}, \delta_p^{eq}$ も同様な傾向で収束している。初期値 2 では、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} と免震支承に生じる変形 δ_b^{eq} は、初期値から減少して徐々に収束しており、橋脚に生じる変形 δ_p^{eq} は繰返し回数 2 回までは増加するが、その後は減少して収束値に向かう。着目した全てのケースにおいても、このように、上部構造慣性力作用位置に生じる変位 δ_u^{eq} 、免震支承と橋脚に生じる変形 $\delta_b^{eq}, \delta_p^{eq}$ は、繰返し回数が少ないときにはその収束過程は複雑となるが、繰返し回数が増加するにともない得られる解の変動は小さくなり、等価線形解を目指して滑らかに収束する傾向にある。

— 初期値1: $\mu_b^0=1, \mu_p^0=1$ - - 初期値3: $\mu_b^0=1, \mu_p^0=2\mu_p^{NL}$
 初期値2: $\mu_b^0=2\mu_b^{NL}, \mu_p^0=2\mu_p^{NL}$ - · - 初期値4: $\mu_b^0=2\mu_b^{NL}, \mu_p^0=1$



(1) ケース1: 入力地震動Ⅰ-Ⅲ-1,
 $\gamma_p^{NL}=0\%, \mu_b^{NL}=41.3, \mu_p^{NL}=1.0$

(2) ケース2: 入力地震動Ⅰ-Ⅲ-1,
 $\gamma_p^{NL}=25\%, \mu_b^{NL}=32.5, \mu_p^{NL}=3.2$



(3) ケース3: 入力地震動Ⅱ-Ⅱ-1,
 $\gamma_p^{NL}=50\%, \mu_b^{NL}=36.2, \mu_p^{NL}=4.2$

(4) ケース4: 入力地震動Ⅱ-Ⅲ-1,
 $\gamma_p^{NL}=71\%, \mu_b^{NL}=55.7, \mu_p^{NL}=14.9$

図-6 等価線形化法による解の収束性

7. 等価線形化法の収束過程

免震支承と橋脚の2ヶ所に非線形性を有するマルチヒンジ系では、等価線形化法による推定精度は、初期値や各要素の非線形化の度合いの影響を受けることがわかった。マルチヒンジ系への等価線形化法の適用を実用化するためには、今後、等価線形解ができるだけ非線形解の近似値に収束するような初期値の設定法を検討する必要がある。例えば、図-3(4)に示すように、非線形応答で実際に生じている免震支承と橋脚の非線形化の度合いの大小関係を、等価線形化法の初期値の設定において考慮すると、等価線形解の推定精度はばらつきが少なくなる等の性質を利用することが考えられる。

参考文献

- 1) 建築研究振興協会：鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン，技報堂出版，pp. 29-86，2000.
- 2) 足立幸郎，運上茂樹：等価線形化法による多自由度非線形系の地震応答推定精度，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 81-86，1999.
- 3) 熊木幸，金治英貞，矢部正明：耐震補強された免震支承－橋脚系の非線形相互作用と等価線形化法の適用性に関する検討，構造工学論文集，Vol.46A，2000.
- 4) 熊木幸，矢部正明：1自由度系の非線形応答と等価線形化法の問題点，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 87-94，1999.