

鋼製橋脚振動系の弾塑性応答の推定に関する一考察

A consideration on estimation of elasto-plastic dynamic response of a steel bridge pier

栗原 修*・中沢正利**・安藤 聡***・岩熊哲夫****

Osamu KURIBARA, Masatoshi NAKAZAWA, Satoshi ANDO and Tetsuo IWAKUMA

*東北大学大学院修士課程 工学研究科都市・建築学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**正会員 工博 東北学院大学助教授 工学部土木工学科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1)

***学生員 東北大学大学院修士課程 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

****正会員 Ph.D. 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

In this paper, it is shown that the elasto-plastic effective input energy E_{ef} may become a important index for dynamic collapse of a steel bridge pier modelled as a SDOF vibration system with bilinear restoring hysteretic property. Moreover, the correlation between various kinds of energy indices and the elasto-plastic dynamic response displacements is investigated. From these results, some methods to estimate the elasto-plastic dynamic response displacement from the maximum displacement and/or energy input rate in elastic analysis are considered.

Key Words : Dynamic collapse, SDOF system, Residual&maximum dynamic displacement, Effective input energy, Energy input rate

1. まえがき

兵庫県南部地震を契機として、1996年には道路橋示方書の耐震設計編¹⁾が改定され、RC橋脚と同様に鋼製橋脚においても靱性能の考え方が導入されている。また、橋脚の耐荷力が小さいままで大きな変形性能に期待した設計を行うと、地震後に復旧が困難となるような大きな残留変位が生じることが考えられることから、特に重要度が高い橋では、残留変位に対する照査の必要性が規定された。これと同時に、これまでの震度法による検討、すなわち静的解析では地震時の橋の挙動を十分に表すことができないため、動的解析を行った上で構造物の耐震性能をより厳密に評価することが要求されるようになった。また動的応答解析を適用した多くの調査研究も実施されてきている。

しかしながら、動的解析の方法および解析レベル、および入力に用いる地震動の周期特性の違いによって、同一の地動最大加速度値であっても応答結果が異なってくることがよく知られている。これらは、与える地震動の特性に大きく依存しており、直下型地震やプレート境界型地震では、大きく異なる応答値を示す。したがって、動的解析による耐震性評価の精度を向上させるためには、構造物の動的応答と相関性の高い地震動指標を見出すことが重要な課題となる。

地震動の指標としては、前述の地動最大加速度の他、地動最大速度、地動最大変位、スペクトルインテンシティ、エネルギー入力率等の指標が考えられる²⁾。これらの指標と構造物の動的応答との相関性に関して従来からいくつかの研究が行われている^{3),4)}が、未だ十分に議

論され尽くしたとは言い難い。鋼製橋脚のような静定系構造物の基本的な耐震強度あるいは倒壊判定基準については、エネルギー論的な評価法に基づいた研究がある程度の成果をあげている^{5),6)}。しかし、地震動を受けても構造物が壊れない場合の、最大応答変位、残留応答変位は一般に推定精度が悪いとされており⁷⁾、異なる地震動特性とこれら応答変位の関係を明らかにすることは、構造物の耐震性能評価において重要な検討課題である。

よって、本研究では P - Δ 効果の影響を考慮した鋼製橋脚振動系に着目して、まず構造物の復元力特性と倒壊判定基準について明らかにする。次に、構造物が倒壊しない場合の応答変位と地震動の入力エネルギーあるいはエネルギー入力率の関係を詳細に検討し、地震動指標と応答変位量の相関性に着目する。この場合、弾性解析および弾塑性解析によるエネルギー指標の変動についても留意した。さらに、これらの相関解析の結果をもとに、鋼製橋脚振動系の最大応答変位量あるいは残留応答変位量等の弾塑性応答変位量をエネルギー指標から推定することを試みた。

2. 基礎理論

2.1 1自由度回転バネ系の運動方程式

図-1に示すように、鉛直方向の静的荷重 P を受ける質量 m の質点、長さ l で質量のない剛棒、およびばね定数 k の回転ばねからなり、水平方向に加振力 $F(t)$ を受ける1質点振動系について考える。このような単純な振動系を考える理由は、動的応答変位量の推定において、基本的1自由度系でも推定精度が悪ければ、多自由

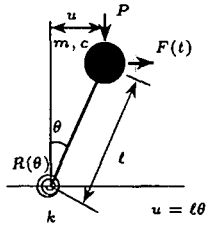


図-1 1自由度系振動モデル

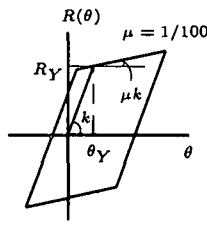


図-2 回転ばねの復元力特性

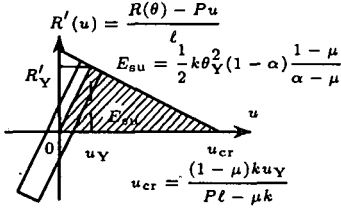


図-3 水平方向復元力特性

度系ではもはや精度は期待できないと考えられるからである。いま、質点の水平変位を u 、回転ばねの回転角を θ とし、 θ は剛棒の長さ ℓ に比較して十分小さく、近似的に

$$u \doteq \theta \ell \quad (1)$$

が成り立つものとする。粘性減衰係数を c 、回転ばねの復元モーメントを $R(\theta)$ とすると、モーメントの釣り合いより運動方程式は、

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + \frac{R(\theta) - Pu}{\ell} = F(t) \quad (2)$$

と表せる。

(1) 静的圧縮軸力を受ける 1 自由度振動系の基本特性

回転ばねの復元力特性が図-2 のようにバイリニア型であるとき、復元モーメント $R(\theta)$ は弾性域、塑性域においてそれぞれつぎのような θ の関数で表される。

$$R(\theta) = \begin{cases} k\theta & (\theta \leq \theta_Y) \quad (3a) \\ k\theta_Y + \mu k(\theta - \theta_Y) & (\theta > \theta_Y) \quad (3b) \end{cases}$$

ここで、 k は弾性域における回転ばね剛性、 μk は塑性域における回転ばね剛性、 θ_Y は降伏回転角である。また、式(2)の左辺の第3項は図-3 に示すように水平方向復元力 $R'(u)$ の特性を表し、式(1)が降伏時においても適用できるとすれば、 $\theta_Y \doteq u_Y/\ell$ であるから、式(3)を用いて、

$$R'(u) = \begin{cases} \frac{1}{\ell^2}(k - P\ell)u & (\theta \leq \theta_Y) \quad (4a) \\ \frac{1}{\ell^2}\{(1 - \mu)ku_Y + (\mu k - P\ell)u\} & (\theta > \theta_Y) \quad (4b) \end{cases}$$

と表すことができる。

式(4a)より、水平方向復元力 $R'(u)$ が弾性域にある場合で0となるのは座屈を起こす時である。よって座屈荷重 P_{cr} は、 $P_{cr} = k/\ell$ と書ける。また、水平方向復元力 $R'(u)$ が塑性域で0になるのは、水平方向変位が水平方向終局変位 u_{cr} になる時であることより、

$$\frac{u_{cr}}{u_Y} = \frac{(1 - \mu)k}{P\ell - \mu k} \quad (5)$$

となる。ここで鉛直荷重 P と座屈荷重 P_{cr} の比を α と定義すると、 $\alpha \equiv P/P_{cr} = P\ell/k$ より

$$\frac{u_{cr}}{u_Y} = \frac{1 - \mu}{\alpha - \mu} \quad (6)$$

となる。また、式(4a)は、

$$R'(u) = \frac{k}{\ell^2}(1 - \alpha)u = k'u \quad (7)$$

と表せるので、この振動系の固有角振動数 ω_0 は、

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k'}{m}} \quad (8)$$

となる。ここで、 $k' \equiv k(1 - \alpha)$ とおいた。このとき減衰定数 h は、粘性減衰係数 c 、固有角振動数 ω_0 を用いて $h = c/2m\omega_0$ と表せるので、この系の固有振動数は式(7)および式(8)より

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega_0}{2\pi} \sqrt{1 - h^2} \\ &= \frac{1}{2\pi\ell} \sqrt{\frac{k(1 - \alpha)}{m}} \sqrt{1 - h^2} \end{aligned} \quad (9)$$

と書くことができる。

2.2 エネルギー量による弾塑性終局状態の検討

(1) エネルギー保存の概念

式(2)の両辺に $\ell\dot{\theta}$ を乗じ、 $\ell\dot{\theta} = \dot{u}$ 、 $du = \dot{u}dt$ 、 $d\dot{u} = \ddot{u}dt$ という関係を用いて動的外力の継続時間 t にわたって積分すると、

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{2}m\dot{u}^2 \right]_0^t + c \int_0^t \dot{u}^2 dt + \int_0^t R(\theta) d\theta - \frac{P}{\ell} \left[\frac{1}{2}x^2 \right]_0^t \\ = \int_0^t F(t)\dot{u} dt \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、 u はそれぞれ時刻 t での回転ばねの回転角と質点の水平変位である。

式(10)において左辺の第1項は運動エネルギー E_k 、第2項は粘性減衰エネルギー E_c 、第3項はばね系の弾塑性ひずみエネルギー E_s 、第4項は回転角-回転モーメント復元力特性図がループを描くことにより吸収するエネルギーを表す履歴減衰エネルギー E_h を表す。右辺は地震力によって系に入力されるエネルギー E_f を表しているので結局、

$$E_k + E_c + E_s + E_h = E_f \quad (11)$$

と表される。地震外力が終焉した時点で考えると $E_k = 0$ であるから、エネルギー収支より弾塑性ひずみエネルギー E_s は、

$$E_s = E_f - E_c - E_h \quad (12)$$

として、求めることができる。

(2) エネルギー論に基づいた橋脚の倒壊判定条件

静的圧縮載荷を受ける 1 自由度系の質点の水平方向変位 u が終局変位 u_{cr} に達したとき、水平方向復元力 $R'(u)$ は0となり、このとき弾塑性ひずみエネルギー

E_s は最大値 E_{su} となる⁵⁾。すなわち、

$$E_{su} = \frac{1}{2} \frac{k}{\ell^2} (1 - \alpha) u_Y u_{cr} \\ = \frac{1}{2} k \theta_Y^2 (1 - \alpha) \frac{1 - \mu}{\alpha - \mu} \quad (13)$$

と表される。ここで、回転ばねの復元モーメント $R(\theta)$ が降伏復元モーメント R_Y に達するまでに蓄えられる弾性ひずみエネルギーを E_Y と定義して、 $E_Y \equiv k \theta_Y^2 / 2$ とおくと、

$$E_{su} = E_Y (1 - \alpha) \frac{1 - \mu}{\alpha - \mu} \quad (14)$$

と表すことができる。式(14)から分かるように、弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} は橋脚の構造諸元から直接求めることが可能である。本研究では入力エネルギー E_f から履歴減衰エネルギー E_h と粘性減衰エネルギー E_c を引いた有効入力エネルギー E_{ef} (式(12)の E_s と等価) が弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} を超えた場合に、構造物が倒壊に至ると考える⁵⁾。すなわち、

$$E_{su} \leq E_{ef} = E_f - E_c - E_h \quad (15)$$

と表せる。

2.3 エネルギー入力率の概念

継続時間 0 から t までに地震力によって入力されるエネルギー E_f は、地震外力が終焉した時点までに入力されるエネルギーの「総入力エネルギー」である。これに対して、ある時間区間 Δt に入力されるエネルギーは、次のように t_1 と Δt の関数として定義される。

$$\Delta E(t_1, \Delta t) \equiv \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} F(t) \dot{u} dt \quad (16)$$

ここに、 t_1 : 継続時間内の任意の時刻、 Δt : 単位時間である。この時間区間 Δt に入力されるエネルギーが最大となる量を

$$\Delta E_{\max} = \max \left\{ \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} F(t) \dot{u} dt \right\} \quad (17)$$

とし、この $\Delta E_{\max}$ を「エネルギー入力率」とする。すなわち、エネルギー入力率 $\Delta E_{\max}$ は地震動によって短時間に入力されるエネルギーを意味し、局所的な入力エネルギーの最大値である。

この単位時間 Δt の取り方について、桑村³⁾は、系を倒壊に至らしめるには、振動の 1/4 サイクルで安定限界点を越える必要があることから Δt を固有周期の 1/4 としている。また、実際には塑性化によって周期が延びる影響を考慮すべきであるが、その配慮による結果の改善は見られなかったとし、 $\Delta t = T/4$ でよいと結論づけている。よって、本研究でもこの値を採用した。

3. 倒壊判定基準に関する検討

弾塑性ひずみエネルギーを用いて構造物の倒壊判定を行う研究は、すでに行われた例がある^{5), 6)}。しかし、こ

表-1 解析に用いた実地震波

地震名	観測点	方角	最大加速度	
兵庫県南部	JR 鷹取 (GL)	EW	666.20	内 陸 直 下 型 地 震
		NS	641.73	
兵庫県南部	神戸海洋気象台 (GL)	EW	617.14	
		NS	817.83	
兵庫県南部	東神戸大橋 (GL)	N78E	327.31	プ レ ー ト 境 界 型 地 震
		N12W	280.72	
兵庫県南部	ポートアランド (GL)	EW	284.34	
		NS	341.21	
Imperial Valley	El Centro T.S.(BF)	NS	314.63	
十勝沖	八戸市役所 (B1F)	NS	203.81	
釧路沖	広尾町役場 (1F)	320	403.68	
		050	518.05	
釧路沖	釧路地方気象台 (GL)	063	711.40	
		153	637.24	
北海道南西沖	七峰橋 (GL)	LG	386.21	
		TR	379.10	
宮城県沖	開北橋 (GL)	LG	192.55	
		TR	286.79	
宮城県沖	仙台鉄道管理局 (B1F)	EW	232.61	
		NS	432.42	
宮城県沖	住友生命ビル (B2F)	EW	240.90	
		NS	250.90	

LG : 橋軸方向

TR : 橋軸直角方向

単位 : gal

これらの研究では鋼製橋脚系を想定していなかったり、復元力特性として完全弾塑性のみが仮定されており、降伏後にも若干の剛性を有する実際の鋼製橋脚の耐荷力特性に即していない。そこで、本研究ではバイリニア型復元力特性を持つ振動系の終局時の各種エネルギーについての定量的評価を行い、有効入力エネルギー E_{ef} 、および弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} を同様に算出し、これらが実橋脚の倒壊判定の指標になり得るかについて検討する。

3.1 鋼製橋脚の構造諸元および入力地震波

実際の鋼製橋脚に即した構造物の挙動を解析するため、現存する鋼製橋脚の構造諸元を参考にして解析を行った。解析に用いた鋼製橋脚の鋼種は SM490 とし、材料定数はヤング率 E を 206 GPa、降伏応力 σ_Y を 326 MPa と仮定した。

また、橋脚高さ ℓ 、質量 m 、回転ばね定数 k を変化させながら解析を行っていくため、細長比 λ を実際の橋脚の構造諸元の範囲に当てはめるよう決定した。因みに、実際の鋼製橋脚の細長比は 15 ~ 50 程度の値、鉛直荷重 P と降伏軸力 P_Y の比 α は一般に 5 ~ 30% とされている。さらに、鋼製橋脚振動系の減衰定数 h を 5%、降伏

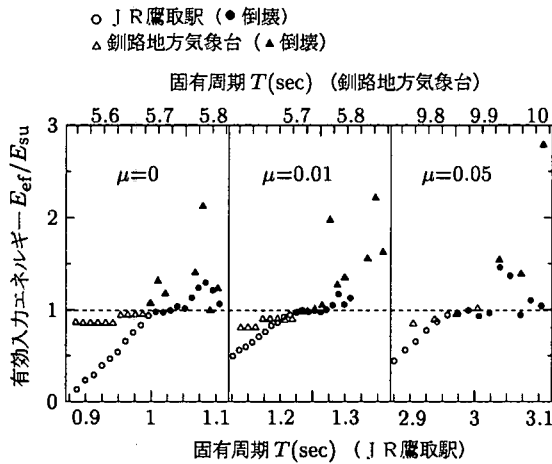


図-4 有効入力エネルギーによる倒壊判定基準

後の二次剛性については弾性域の剛性の1%, 降伏回転角 θ_Y を $\theta_Y=0.0025$ で一定とした。

本研究で用いた入力地震波は、兵庫県南部地震、Imperial Valley 地震、十勝沖地震、釧路沖地震、北海道南西沖地震、宮城県沖地震で観測された6地震のべ22加速度波形である。実地震記録波形を表-1に示す。ここでは加速度データを拡大縮小することはせず、観測された大きさをそのまま用いた。

3.2 弾塑性有効入力エネルギーを用いた倒壊判定基準の検討

鋼製橋脚振動系が倒壊する場合の有効入力エネルギーを、回転ばねの復元力特性が完全弾塑性型およびバイリニア型である場合について比較した。質点の質量の変化に伴って変化する固有周期 T を横軸に、また、縦軸には弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} で無次元化した弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} をとり、例としてJR鷹取駅と釧路地方気象台において観測された地震波を用いて解析した結果を図-4に示した。横軸には、入力地震波によって振動系が必ず倒壊する構造諸元を選び、その固有周期を示したため、釧路地震で $\mu=0.05$ の場合は非現実的に長い固有周期となっている。

解析結果より、ほとんどの場合で有効入力エネルギー E_{ef} と弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} の比が1前後で倒壊に至っていることが分かる。すなわち、 E_{ef}/E_{su} が1を超えているものは、ほとんどのものが倒壊に至っており、 $E_{ef}/E_{su} > 1$ は構造物が倒壊する場合の十分条件となっている。しかし、 E_{ef}/E_{su} が1を越えない場合で倒壊に至らないケースもあり、特に、図示してはいないが、神戸海洋気象台で観測された地震波を入力した場合が最も大きく下回っており、E-W成分で17.6%、N-S成分で19.6%程度である。 E_{ef}/E_{su} が大きく1を下回っている原因として考えられるのは、地震波データの時間間隔が0.02秒であり、時間間隔が0.01秒である

他の地震波より長く、分解能が低い分計算精度が低下しているためと思われる。

また、回転ばねの復元力特性が完全弾塑性型である時の解析とバイリニア型を比較してもそれほどの相違はない。つまり、復元力特性を最も簡単な完全弾塑性型で簡略化して解析し、有効入力エネルギー E_{ef} を構造物の倒壊判定指標として用いることができると結論付けられる。

4. 弾塑性応答変位量の評価および推定

一般に構造物が地震力を受けた後の損傷度は、その構造物に残った永久変形量、すなわち残留変位により評価される。また、この残留変位量は変位応答の中の最大応答変位量とも密接に関連していることが既存の研究より指摘されている。しかしこれらの研究では、系の復元力特性が完全弾塑性型に限定されていたり、地震波によってはその相関性に疑問が残る結果となっている。したがって、本研究では系の復元力特性をバイリニア型とし、同様に有効入力エネルギー E_{ef} 、弾塑性解析による弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} やエネルギー入力率 ΔE_{max} と、残留変位および最大応答変位の相関性について検討する。さらに弾性解析によるエネルギー指標とこれら応答変位量との相関性についても検討し、弾塑性応答変位量の推定を試みる。

4.1 残留変位量および最大応答変位量の評価

各地震波によって振動系が倒壊しないように回転ばねの剛性 k 、剛棒の長さ l 、質点の質量 m を設定し、 m を変化させることにより、パラメトリック解析を行った。

(1) 弾塑性応答変位量と弾塑性解析によるエネルギー指標との相関

各種地震波における残留変位量や最大応答変位量と弾塑性解析によるエネルギー入力率 ΔE_{max} および入力エネルギー E_f 、有効入力エネルギー E_{ef} との相関係数を図-5に示した。横軸には各種地震波を並べてある。

図-5-aを見ると残留変位量については、エネルギー入力率や入力エネルギーと比べて有効入力エネルギーに強い相関のあることが分かる。この中で、特に相関の悪いのは七峰橋(LG,TR)記録だが、他の地震波のスペクトル特性と比較して、特に明瞭な差異は見られなかった。一方、図-5-bの最大応答変位量に対しては目立って強い相関があると言えるエネルギー指標はなく、どのエネルギー指標においても相関係数のばらつきは小さい。

(2) 弾塑性応答変位量の評価

有効入力エネルギー-応答変位関係をJR鷹取駅と釧路地方気象台において観測された地震波を用いて解析した例を図-6に示した。縦軸は終局時の水平変位 u_{cr} で

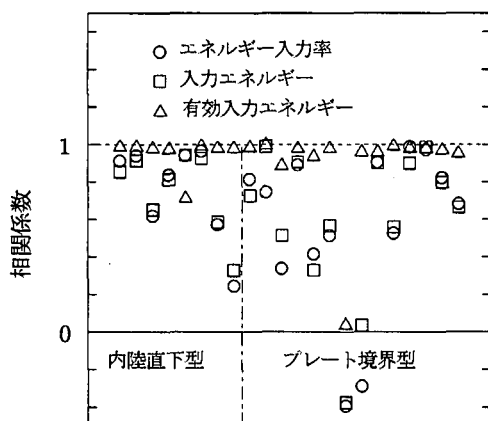


図-5-a 残留変位量

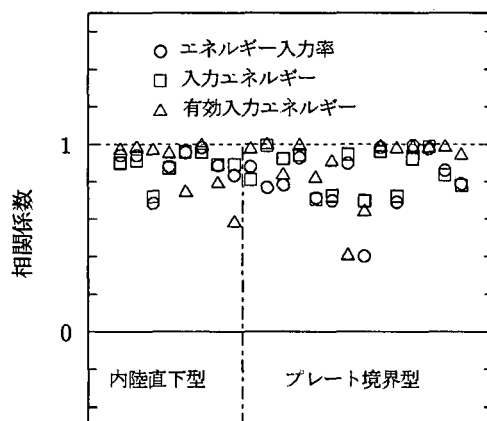


図-5-b 最大応答変位量

図-5 弾塑性応答変位量と弾塑性解析によるエネルギー指標との相関係数

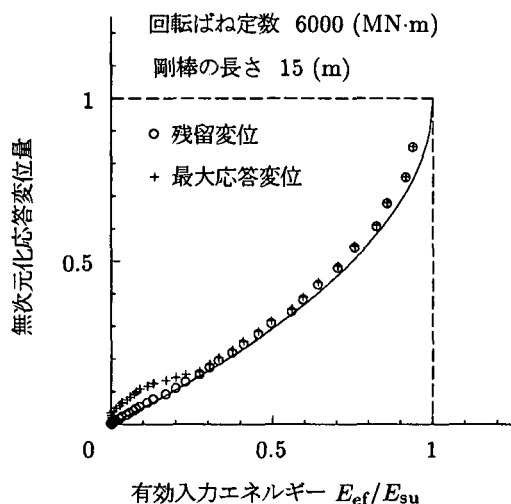


図-6-a J R 鷹取駅

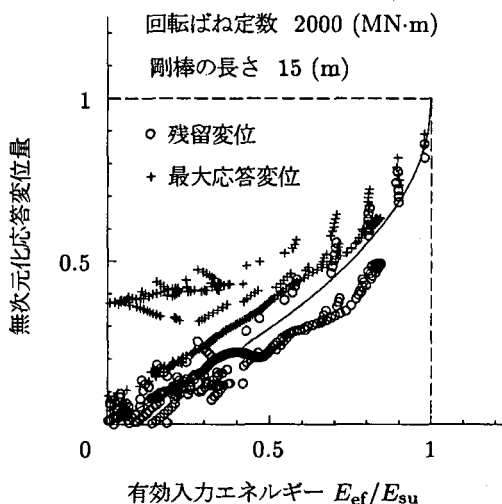


図-6-b 釧路地方気象台

図-6 有効入力エネルギー-応答変位関係

無次元化した残留応答変位量 u_r または最大応答変位量 $u_{\max}$ であり、横軸は有効入力エネルギー E_{ef} を弾塑性ひずみエネルギーの最大値 E_{su} で無次元化した値である。また図中にはそれぞれ解析の際に用いた構造諸元を示した。

ところで、既存の文献⁶⁾では、回転ばねの復元力特性が完全弾塑性型である時、残留変位量または最大応答変位量と有効入力エネルギーにはほぼ一対一の相関関係があるとして、次の回帰式で評価している。

$$\frac{u_r}{u_{cr}} \text{ Or } \frac{u_{\max}}{u_{cr}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{E_{ef}}{E_{su}}} \quad (18)$$

これを受けて、図中の実線は式(18)によって表される回帰曲線である。

結果を見ると、残留変位量に関しては比較的良好に実線に一致しており、復元力特性がバイリニア型である時も式(18)は残留変位量を推定するのに有効であると思われる。しかし、最大応答変位量に関しては E_{ef}/E_{su} が

0.5 以下ではばらつきが大きい。つまり、式(18)は E_{ef}/E_{su} が大きい場合には最大応答変位量を推定するのに有効であるが、小さい場合には適用性の低いことが分った。

(3) 弾塑性応答変位量と弾性解析によるエネルギー指標との相関

弾塑性解析を直接適用できるのであれば、応答変位量を推定せずとも正しい値を計算より直接求めることができるので、弾性解析によるエネルギー指標を用いて弾塑性応答変位量を推定することは意味がない。しかし、一般に弾塑性解析を行うことは実務レベルでは難しく、また解析レベルも統一されていないのが実状であるため、弾性解析より弾塑性応答変位量を推定するメリットは少なくない。また、これらの推定を行うことで、重要な地震動指標を見出すことも大事なことと考えられる。

よってここでは、弾性解析によるエネルギー指標より弾塑性応答変位量を推定することを考える。全ての地震波において同じ構造諸元を用い、回転ばね定数 k

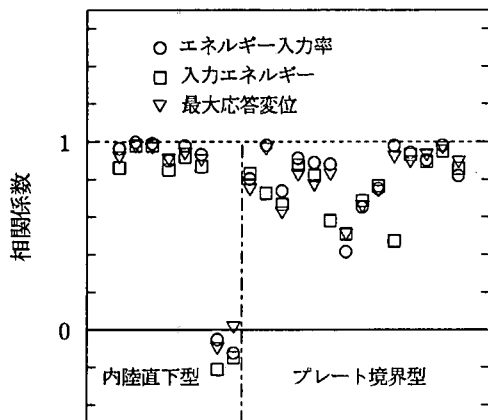


図-7-a 残留変位量

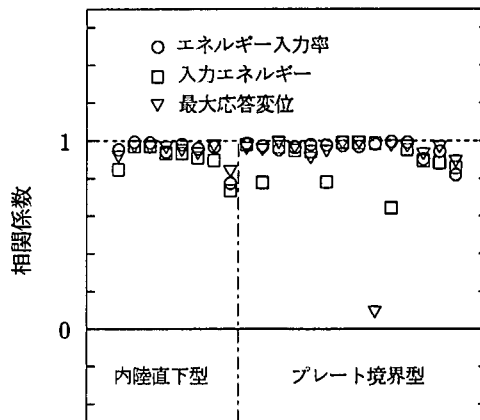


図-7-b 最大応答変位量

図-7 弾塑性応答変位量と弾性解析によるエネルギー指標との相関係数

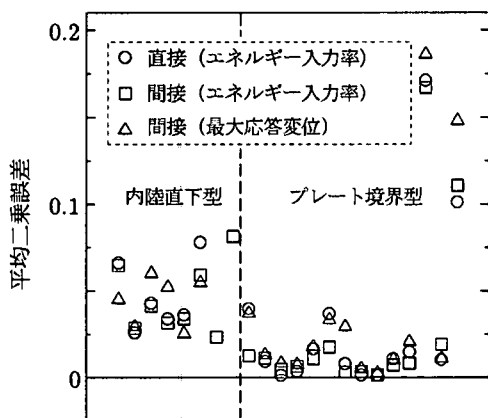


図-8-a 残留変位量

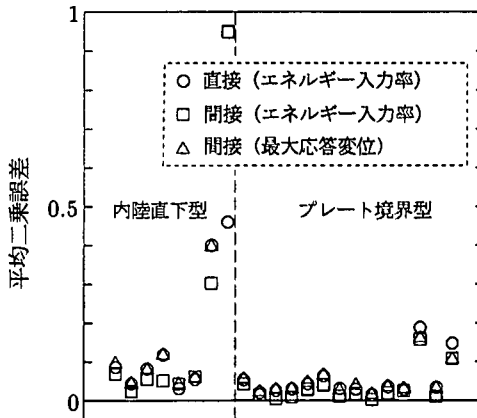


図-8-b 最大応答変位量

図-8 解析値からの平均二乗誤差

を 3333MN・m、剛棒の長さ l を 15m とし、質量を 300 ～ 1100ton と変化させて弾性および弾塑性パラメトリック解析を行った。このときの構造物の固有周期は 0.9 ～ 2.0 秒であった。また、弾塑性解析で質量を増加させていった際に倒壊に至ってしまった場合は、倒壊に至る直前までの値を採用した。この時の弾塑性応答変位量と弾性解析におけるエネルギー指標との相関係数を図-7 に示す。この結果を見ると、弾塑性解析によるエネルギー指標との相関に比べ、より強い相関が全地震波に対して見られた。

4.2 弾塑性応答変位量の推定

以上の相関解析の結果をもとに、弾塑性応答変位量を具体的に推定する方法について以下に検討した。

1. 弾性解析によるエネルギー入力率と弾塑性応答変位の相関から回帰式を算定し、その回帰式から弾塑性応答変位量を直接算出する (直接推定)
2. 弾性解析によるエネルギー入力率あるいは最大応答変位と、弾塑性解析による有効入力エネルギーの相

関から回帰式を算定し、その回帰式から有効入力エネルギーを求め、さらに式 (18) から弾塑性応答変位量を求める (間接推定)

これらの複数の方法による推定値の精度を比較をするため、解析値を代表値とした時のばらつきを平均二乗誤差として、各地震波ごとに求めたのが図-8 である。

残留変位量 (図-8-a) に関して、内陸直下型地震ではばらつきが比較的大きいが、プレート境界型地震ではいずれの推定方法においてもばらつきが小さく、地震動特性の違いが顕著に表われた。最大応答変位量 (図-8-b) に関しては、残留変位量に比べて精度がよく、安定していることが分かる。また、最大応答変位量に関しては残留変位量ほど地震動特性の違いが出ていない。

5. 結論

本研究では鋼製橋脚を検討対象とし、最も基本的な 1 自由度回転バネ系の弾塑性動的応答解析を行うことによって、動的終局時のエネルギーを定量的に評価した。

その結果より、倒壊判定基準と弾塑性応答変位量の推定に関して得られた知見を以下に示す。

1. 倒壊判定条件について

- (a) 回転ばねの復元力特性がバイリニア型である場合でも、弾塑性有効入力エネルギー E_{ef}/E_{su} を実構造物の構造諸元を持つ振動系の倒壊判定の指標として用いることができる。
- (b) $E_{ef}/E_{su}=1$ を、地震動特性によらず倒壊判定基準として用いることができる。
- (c) 弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} には、弾性解析におけるエネルギー入力率や最大応答変位と強い相関が見い出せるので、弾性解析を行うだけで構造物の倒壊判定を簡便に行える可能性が高い。

2. 残留変位量および最大応答変位量の推定について

- (a) 回転ばねの復元力特性がバイリニア型である場合でも、弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} と残留応答変位量 u_r には有意な相関がある。
- (b) 弾性解析におけるエネルギー入力率および入力エネルギーと弾塑性解析による残留変位量 u_r および最大応答変位量 u_{max} には有意な相関がある。

以上の結果より、弾塑性有効入力エネルギー E_{ef} や弾性解析によるエネルギー入力率が、構造物の倒壊可能性を判定したり弾塑性応答変位量を推定する上で重要な指標となり得ることが分かった。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1996。
- 2) 柴田明徳：最新 耐震構造解析，森北出版，1981。
- 3) 桑村仁・竹田拓也・佐藤義也：地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率，日本建築学会構造系論文集，第 491 号，pp.29-36，1997 年。
- 4) 北原武嗣・伊藤義人：鋼構造物の非線型動的応答と地震動指標との相関，第 2 回鋼構造物の非線型数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.275-282，1998 年。
- 5) 中島章典・阿部英彦・倉西茂・白石正俊：劣化型復元力特性を有する構造物の動的倒壊判定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.36A，pp.655-622，1990。
- 6) 安藤聡・中沢正利・井林康・岩熊哲夫：実地震波を受ける鋼製橋脚の倒壊判定基準に関する一考察，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，I-B92，pp.184-185。
- 7) 中島章典・深山大介・大塚久哲・佐藤貴志・鈴木基行：鋼製橋脚の弾塑性最大応答変位推定法について，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.297-304，1997。

(1999 年 4 月 23 日 受付)