

## 最大および残留変位推定におけるエネルギー および変位一定則の適用性

大塚 久哲<sup>1</sup>・山本 智弘<sup>2</sup>・松田 泰治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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）

<sup>2</sup>学生員 九州大学 工学部土木工学科（〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1）

<sup>3</sup>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）

### 1. まえがき

構造物が地震動を受けたときの最大非線形応答値を推定する方法として、VelesosとNewmarkにより提案されたエネルギー一定則および変位一定則<sup>1)</sup>がある。道路橋の設計においても、平成2年の道路橋示方書<sup>2)</sup>からエネルギー一定則が適用されてきた。<sup>3)</sup>しかしながら、日本で観測されてきた地震動は、プレート境界型の地震動が多く、1995年兵庫県南部地震のような内陸直下型の地震動に対するエネルギー一定則の適用性に関する研究はほとんど行われていない。

本研究では、内陸直下型の大規模な地震を受ける構造物の最大変位、残留変位の推定に対してエネルギー一定則および変位一定則の適用性を明らかにすることを目的とする。対象構造物は鉄筋コンクリート橋脚とし、それを弾完全塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度系にモデル化してパラメトリック解析を行った。残留変位についてはパラメトリック解析を行い、残留変位の推定式を算出し、非線形時刻歴解析結果と比較検討を行った。<sup>4)</sup>

### 2. エネルギー一定則、変位一定則の概要

エネルギー一定則は、弾性系の最大ひずみエネルギーと同じ弾性周期をもつ系の弾塑性ひずみエネルギーは、降伏耐力に関わらず等しいという考え方である。すなわち、弾性系に対する加速度応答スペクトルより弾性応答水平力 $Q_E$ を求め、これにより得られる弾性最大応答変位 $\delta_E$ とから、弾性ひずみエネルギー（図-1の三角形OBCの面積に相当）が算出される。これと、弾塑性系の応答変位 $\delta_P$ までに蓄えられるエネルギー（図-1の台形OAEFの面積に相当）が等しくなるように $\delta_P$ を求めると、この $\delta_P$ が弾塑性系の最大応答変位を近似しているという考え方である。

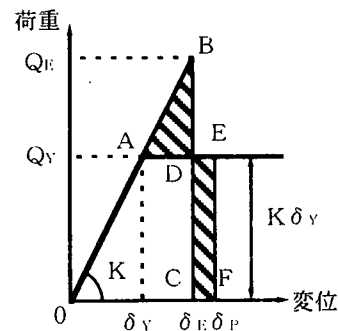


図-1 エネルギー一定則の概念図

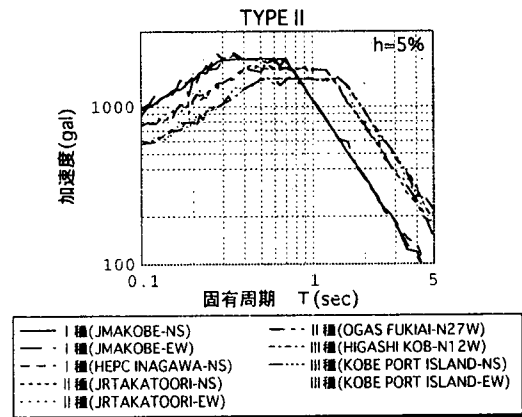


図-2 解析に用いた地震波形の加速度応答スペクトル

ある。

変位一定則は、弾塑性系の降伏耐力に関わらず、弾性最大応答変位 $\delta_E$ が、弾塑性系の最大応答変位とほぼ等しくなるという考え方である。

### 3. 解析の概要

解析モデルは、弾完全塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度系にモデル化した。系の弾性固有周期は、第1剛性 $k_1$ と質量 $m$ から算出し、0.1秒から2.0秒まで0.1秒刻みで変化させた。降伏水平震

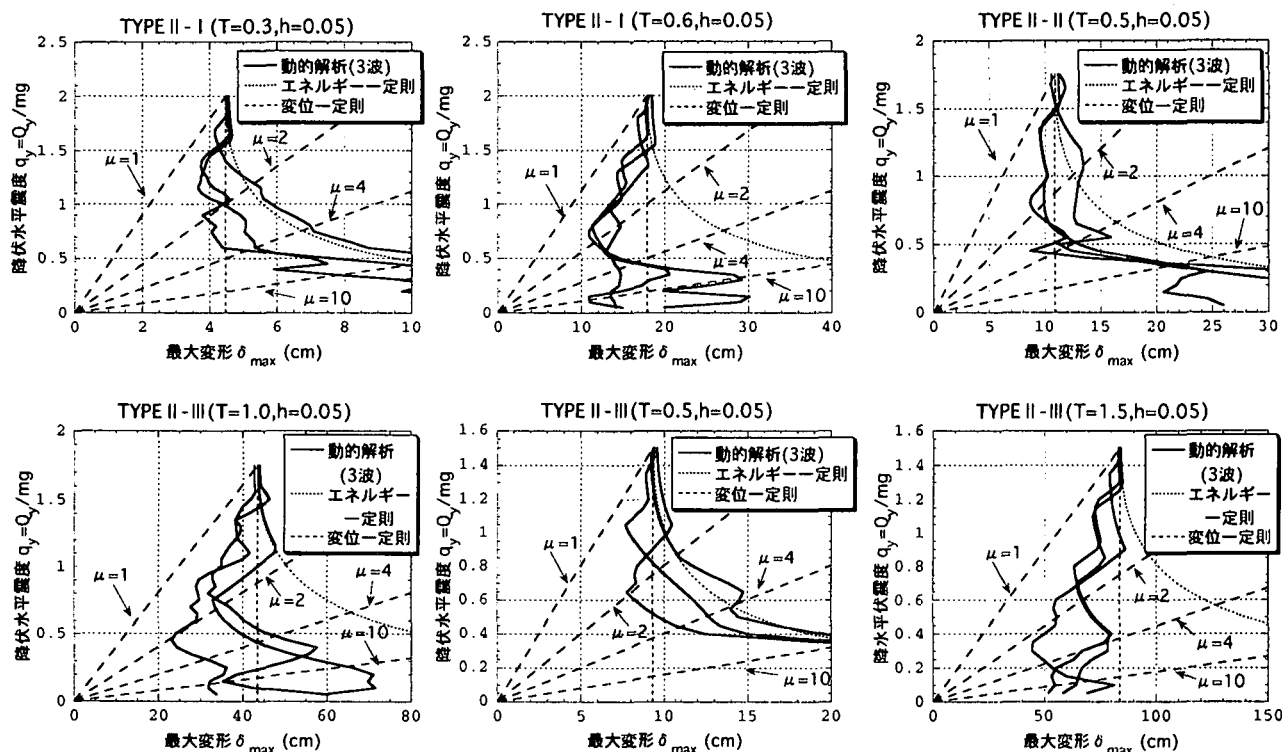


図-3 最大変位と降伏水平震度との関係

度（降伏水平耐力を重量で割った値）は0.05から設計水平震度まで0.05刻みで変化させた。減衰定数 $h$ は0.05とした。

解析手法は、直接積分法による時刻歴応答解析とし、ニューマークの $\beta$ 法（ $\beta=1/6$ の線形加速度法）を用いた。入力地震動は、道路橋の耐震設計に関する資料<sup>5)</sup>にある、地震時保有水平耐力法レベルのタイプⅡ地震動（内陸直下型地震）の標準地震波形（地盤種別ごとに3波形）を用いた。解析に用いた地震波形の加速度応答スペクトルを図-2に示す。

#### 4. 最大応答変位に対する一定則の適用性

##### （1）一般的傾向

降伏水平震度の影響を、地盤種別および代表的な固有周期ごとに図-3に示す。縦軸は降伏水平震度を示し、横軸は最大変形を示す。3本の実線は3種類の波に対する非線形時刻歴応答解析の結果であり、破線はエネルギー一定則と変位一定則による最大変位を表している。原点を通る直線は、傾きの大きい順から、塑性率1、2、4、10のときの変位を示しており、一定則の曲線あるいは直線との交点が、その塑性率のときの変位と降伏震度を表す。

タイプⅡ地震動に対するⅠ種地盤の結果からは固有周期が0.3秒までは、降伏震度が下がると動的解析の変位が急激に大きくなり、エネルギー一定則であっても精度はよくない。図-3（上左）に示す固有

周期0.3秒から0.5秒程度までは、降伏水平震度が下がり動的解析の変位が大きくなって、エネルギー一定則の変位が動的解析の変位を上回り、かつエネルギー一定則の精度がよい傾向がみられる。図-3（上中）に示す0.6秒からは、降伏水平震度が変わっても最大変位はあまり変わらず、変位一定則による変位を下回った。Ⅱ種地盤、Ⅲ種地盤についても同様の傾向がみられる。

##### （2）固有周期の影響

図-4は固有周期をパラメータとしたときのエネルギー一定則あるいは変位一定則により算出した変位と動的解析の変位との比について示している。なお、このデータとしては実際に使われるであろう範囲の、降伏水平震度が0.25以上のデータに絞って、変位の比の平均値を算出した。

これによると、エネルギー一定則による変位と動的解析の比は、どの地盤種別でも短周期側では1を下回り、その後1を上回っている。変位一定則による変位と動的解析の変位との比は、エネルギー一定則の場合と比較すると、長周期側で比が1を越える。また、長周期側では変位一定則の方がエネルギー一定則より精度がよい。

この図と解析に使用した地震波形の加速度応答スペクトル（図-2）とを比較してみた。加速度応答スペクトルが上昇する周期帯域では、両一定則による変位とも動的解析の変位より小さい値を示し精度は

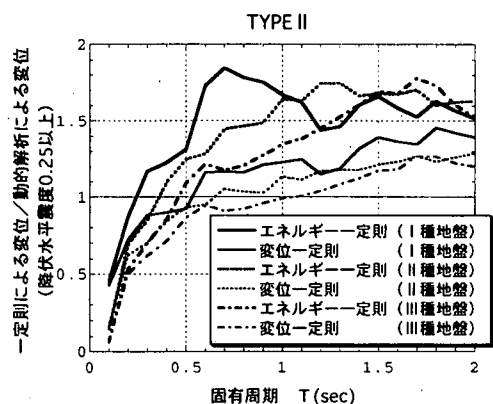


図-4 固有周期と一定則との関係

よくない。スペクトル値が一定の周期帯域では、ほぼエネルギー一定則による変位が動的解析の変位を適度に上回り、安全側の値を示している。スペクトルが減少しはじめる周期以上の領域では、変位一定則の精度がよい傾向がみられる。

これらの結果からエネルギー一定則が適用できる周期帯域は、Ⅰ種地盤では0.2秒から0.5秒、Ⅱ種地盤は0.4秒から0.7秒、Ⅲ種地盤は0.5秒から1.1秒といえる。これらの周期を越える周期帯域では、変位一定則を適用した方がよいといえよう。

## 5. 残留変位の推定

### (1) 残留変位比の検討

構造物が地震動を受け、非線形域にはいると一般に残留変位が生じる。大きな塑性率を許容する設計を行えば、大きな非線形応答を示すこととなり残留変位も大きくなる可能性が高い。残留変位が大きくなると、橋脚自体の損傷が大きくなっても、復旧が困難となる場合があり、そのため、残留変位量の推定を精度よく行うことが重要である。

ここでいう残留変位は、構造物が地震動を受けて強制振動をし、その後自由振動をすることにより応答変位が一定値に収束したときの変位を意味しており、式(1)で表した<sup>6), 7)</sup>。

$$\delta_r = C_r \delta_{r, \max} \quad (1)$$

$$\delta_{r, \max} = (\mu - 1) \delta_y \quad (2)$$

ここで $C_r$ は残留変位比、 $\delta_{r, \max}$ は最大変位が発生した直後に地震が終了したときに生じる残留変位のことで、起こりうる最大の残留変位を意味する。ここで、パラメトリック解析により $C_r$ について検討した。非線形時刻歴解析における解析モデル、解析手法は最大応答変位に対する一定則の適用性に関して行ったときと同一である。入力地震動に関しては、地震後の

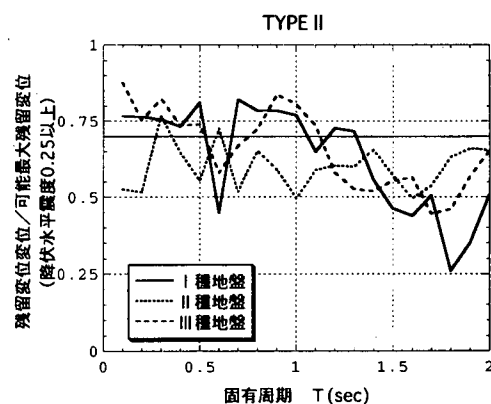


図-5 固有周期と残留変位比との関係

自由振動を考慮するため、入力地震動の最後に20秒ゼロ加速度をつけ加えて、解析を行い残留変位を求めた。

### (2) 解析結果

残留変位比（残留変位を可能最大残留変位で割った値）の固有周期に対する影響を図-5に示した。平均値としては降伏水平震度0.25以上の値を用いた。これによると、地盤種別によらず長周期領域では、残留変位比が小さくなっている傾向がみられるものの、ほぼ0.7付近の値を示している。

### (3) 残留変位の推定式

前項の考察から残留変位比 $C_r$ として0.7を採用すると、式(3)が得られる。

$$\delta_r = 0.7(\mu - 1)\delta_y \quad (3)$$

ここで残留変位を推定するに当たって、エネルギー一定則、変位一定則を用いて塑性率を算出すると、それぞれ式(4)、(5)が得られる。

$$\delta_r = 0.35 \left\{ \left( \frac{k_{hc}}{q_y} \right)^2 - 1 \right\} \delta_y \quad (4)$$

$$\delta_r = 0.7 \left\{ \frac{k_{hc}}{q_y} - 1 \right\} \delta_y \quad (5)$$

ここで、 $k_{hc}$ ：設計水平震度、 $q_y$ ：降伏水平震度以上の2式を用いて算出した残留変位と動的解析による残留変位とを比較検討した。

### (4) 残留変位の推定式の適用性

#### a) 一般的傾向

縦軸を降伏水平震度、横軸を固有周期で表した図を、地盤種別および代表的な固有周期ごとに図-6に示す。この図の細破線がエネルギー一定則を用いて推定した残留変位、破線が変位一定則を用いて推定した残留変位、3本の実線が3種類の波の動的解析に

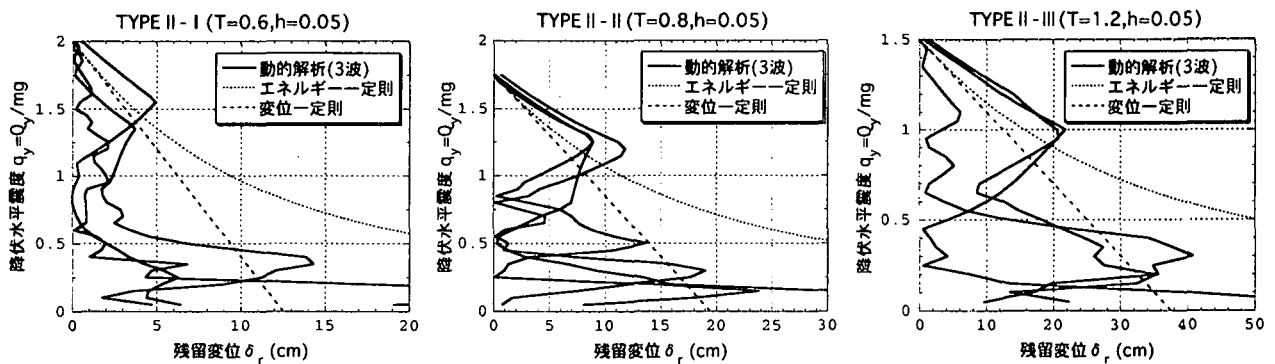


図-6 残留変位と降伏水平震度との関係

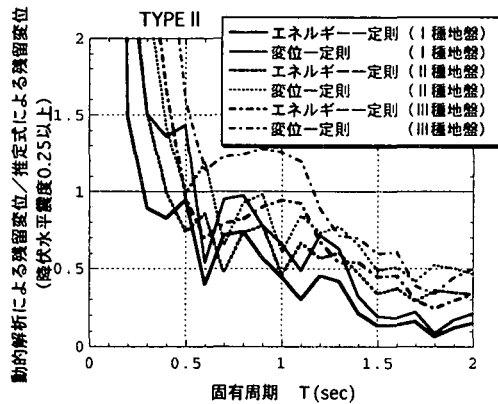


図-7 固有周期ごとの残留変位推定式の適用性

より得られた残留変位を表している。ここで固有周期としては、それぞれの地盤種別ごとに、最大応答変位を算出する際に、変位一定則が適用可能となり始める周期を取り上げてみた。

これをみると、どの地盤種別に対しても降伏水平震度が設計水平震度に近い場合、残留変位は、エネルギー一定則を用いた推定式より大きな値を示したが、降伏震度が下がるにつれ、変位一定則を用いた推定式より小さな値を示した。

#### b) 固有周期の影響

残留変位推定式の適用性をみるために、図-7に動的解析による残留変位と、エネルギー一定則あるいは変位一定則を用いた推定式との比を、固有周期ごとに降伏水平震度0.25以上の平均値で示した。この比が1を上回ると危険側、1を下回ると安全側の評価となる。

これによると、短周期側ではどちらの推定式も危険側の評価となり、エネルギー一定則の推定式が適用できるのは、I種地盤で0.3秒から0.6秒、II種地盤で0.4秒から0.6秒、III種地盤で0.5秒から1.2秒となっている、これらの周期よりも長周期側の周期帯域では、エネルギー一定則よりも変位一定則を用いた推定式の精度がよい。

## 6. あとがき

弾完全塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度系に鉄筋コンクリート橋脚をモデル化して時刻歴解析を行い、最大応答変位および残留変位推定におけるエネルギー一定則および変位一定則の適用性について比較検討を行い、以下の結果を得た。

- ・最大応答変位を推定する際、入力地震波形の加速度スペクトルと、エネルギー一定則および変位一定則の適用領域は関連があり、スペクトル値が上昇する短周期領域では両一定則とも精度はよくない。スペクトル値が一定の領域ではエネルギー一定則、減少し始める周期帯域では変位一定則の精度がよい。
- ・残留変位と可能最大残留変位の比は、長周期帯域では小さくなるものの、その他の周期帯域では0.7付近の値を示した。
- ・エネルギー一定則あるいは変位一定則を用いた残留変位推定式の適用可能な周期帯域は、最大応答変位を算出する際の適用可能周期帯域とほぼ同じである。
- ・降伏水平震度が設計水平震度に近い場合、推定式による残留変位は危険側の値となる。

## 参考文献

- 1) Newmark N.M. and A.S. Veleslos, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple System to Earthquake Motions", II WCEE, 1960
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 1990
- 3) 川島一彦、長谷川金二: 鉄筋コンクリート橋脚の非線形地震応答特性及びエネルギー一定則の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集, I-26, pp.137~146, 1994.1
- 4) 大塚久哲、他: エネルギー一定則および変位一定則の適用性に関する考察, 第24回地震工学研究発表会講演論文集 第2分冊, pp.989~992, 1997
- 5) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.3
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 1996
- 7) G.A. Macrae and K. Kawashima, "Post-earthquake residual displacement of bilinear oscillators", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.26, pp.701-716, 1997