

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

山本 智弘¹・大塚 久哲²・松田 泰治³・山口 斉⁴

¹ 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)

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 学生員 九州大学 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

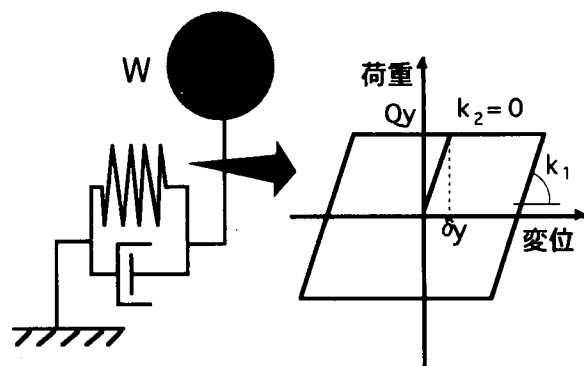
鉄筋コンクリート橋脚を1自由度系にモデル化し弾性最大応答水平力を作用させたときの弾性最大応答変位を求めた。次に弾完全塑性のバイリニア型復元力特性を有する1自由度系にモデル化し、エネルギー一定則および変位一定則により弾性最大応答変位を用いて最大応答変位を推定し、非線形時刻歴解析結果と比較しエネルギー一定則および変位一定則がどのような領域で適用できるかについて分析を行った。また、プレート境界型の地震と内陸直下型地震という2種類の地震で、適用範囲がどのようにになっているのかを分析した。

Key Words: bilinear model, the property of energy conservation, the property of displacement conservation, dynamic analysis, ductility factor

1. まえがき

平成7年兵庫県南部地震は、今まで日本で観測されてきた大きな振幅が長時間くり返して作用するプレート境界型の地震ではなく、継続時間は短いが振幅が大きい内陸直下型の地震であった。

地震後平成8年に改訂された道路橋示方書³⁾においては、これまでと同様に、震度を設計水平震度から等価水平震度へと下げるときにエネルギー一定則を使用しており、これによって終局変位を算出している。しかしながら、エネルギー一定則が適用できる範囲がどのようにになっているか、またエネルギー一定則とは別に変位一定則があり、この変位一定則の適用性はどうかを検討することは重要である。そこで、今回制定された地震時保有水平耐力法のタイプI(プレート境界型の大規模な地震)およびタイプII(内陸直下型地震)の標準地震波形(地盤種別ごとに3波形)の計6波形を用いて、1質点系にモデル化した場合の非線形時刻歴応答解析を行った。その結果とエネルギー一定則および変位一定則による推定結果とを比較し、各地震動タイプ、地盤種別ごとに両法則の適用性を検討した。



$$W=mg=1000(\text{tf}) \quad , \quad h=0.05 \quad , \quad k_2=0(\text{tf/cm})$$

$$k_1=4m \pi^2/T^2(\text{tf/cm}) \quad , \quad g=980(\text{cm/sec}^2)$$

m: 質点の質量 Q_y : 降伏荷重

g: 重力加速度 δ_y : 降伏変位

h: 粘性減衰定数 k_1 : 第1剛性

T: 弾性固有周期 k_2 : 第2剛性

図-1 解析モデルおよび復元力特性

2. 解析方法

本解析では、鉄筋コンクリート橋脚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、以下の解析を行った。解析モデルおよび

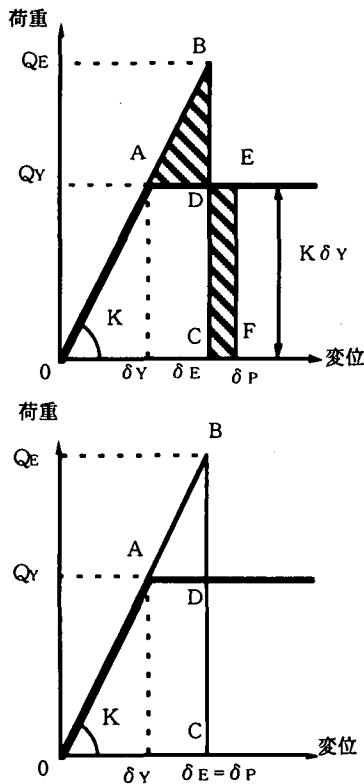


図-2 エネルギー一定則および変位一定則

復元力特性を図-1 に示す。

(1) 非線形時刻歴応答解析

本解析では、数値積分法のなかのひとつの Newmark- β 法 ($\beta=1/6$: 線形加速度法) を用いて、図-1 に示す解析モデルおよび復元力特性に対して、地震時保有水平耐力法レベルのタイプ I およびタイプ II の波形を用いて、非線形時刻歴応答解析を行った。本解析では、幅広い種類の断面を考慮できるように、弾性固有周期 T が $0.1 \sim 2.0$ 秒、降伏荷重が $0.2W \sim 0.8W$ と広範囲の値を設定して、パラメトリック解析を行った。

(2) エネルギー一定則および変位一定則

エネルギー一定則は、線形系の最大応答変位から非線形系の最大応答変位を簡便に計算できる手法として、N.M.Newmark らにより 1960 年に提案されたものであり、比較的短周期の範囲で精度がよいとされてきた。すなわち、まず図-1 の解析モデルに対して加速度応答スペクトルより弾性応答水平力 Q_E を求め、それより弾性最大応答変位 δ_E を求める。そして図-2 (上図) より、 δ_E までに蓄えられたひずみエネルギー ($\triangle OBC$ に相当する) と、 δ_P までに蓄えられたひずみエネルギー (台形 $OADEF$ に相当

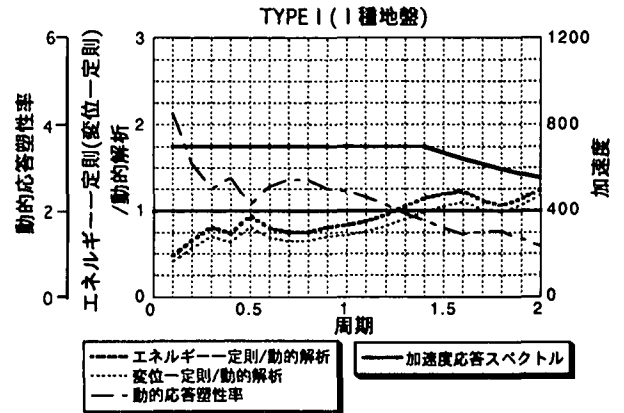


図-3 エネルギー一定則および変位一定則と応答スペクトルとの関係(タイプ I、I 種地盤)

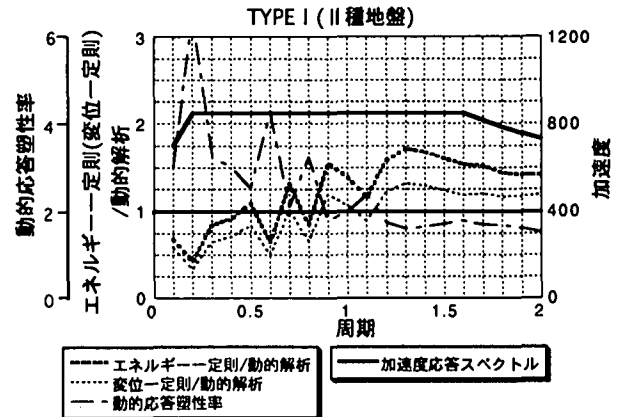


図-4 エネルギー一定則および変位一定則と応答スペクトルとの関係(タイプ I、II 種地盤)

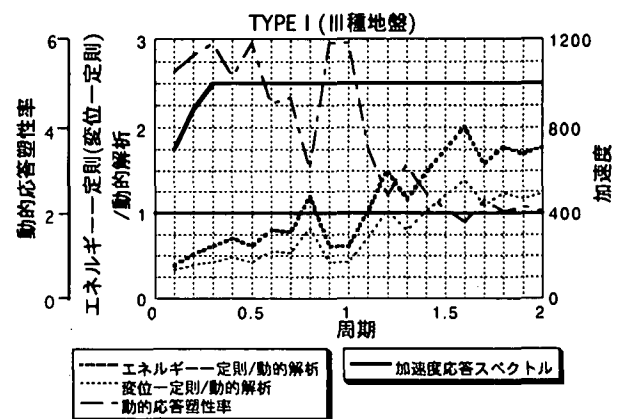


図-5 エネルギー一定則および変位一定則と応答スペクトルとの関係(タイプ I、III 種地盤)

する) が等しくなるように δ_p を求めてやると、 δ_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。

変位一定則は、比較的長周期の範囲で精度がよいといわれている。これは、図-2 (下側) に示すように、弾性最大応答変位 δ_E が弾塑性系の最大変形とほぼ等しくなるという考え方である。

3. 解析結果

設計用加速度応答スペクトルは、一般に短周期側が単調増加、長周期側が単調減少、その間が一定値の3つの区間に区分される。また、降伏水平震度の大きさにより、応答塑性率が変化する。したがって、本研究では弾性時固有周期と降伏水平震度をパラメーターに、新道示に定めるタイプⅠ、Ⅱの地震動と3つの地盤種別に対して、両法則による値の精度を調べた。

動的応答塑性率 (動的応答解析による最大変位と降伏変位の比) が小さく1に近い場合は、動的解析値、エネルギー一定則による推定値、変位一定則による推定値どれもがほぼ同じ値となるため、本論文には、タイプⅠでは降伏水平震度が0.4のケース(図-3～図-5)、タイプⅡでは0.4および0.6のケース(図-6～図-8)を示した。

タイプⅠのⅠ種地盤では、応答スペクトル値が一定で動的応答塑性率が2より大きい領域ではエネルギー一定則および変位一定則ともに過小評価となるが、エネルギー一定則は動的解析との比が0.8以上であり、精度的にはよい結果を示した。応答スペクトル値が減少している領域では、エネルギー一定則、変位一定則ともに動的解析との比が1を越えており、変位一定則の方が精度がよい。

タイプⅠのⅡ種地盤では、応答スペクトル値が一定の領域では、動的応答塑性率の周期の違いによる変動が激しいが、周期が0.5秒以上では、エネルギー一定則による値が動的解析値と良い精度を示している。動的応答塑性率が2より小さくなると変位一定則の方が精度が良くなり、スペクトル値が減少の領域でも変位一定則のほうの精度がよい。

タイプⅠのⅢ種地盤では、スペクトル値が上昇している領域では、エネルギー一定則および変位一定則ともに、動的解析値と比べ過小評価となる。スペクトル値が一定の領域でも、周期が1秒程度以内ではほとんど同様の傾向を示している。周期が1秒程度以降では、変位一定則が動的解析値と近い値を示している。

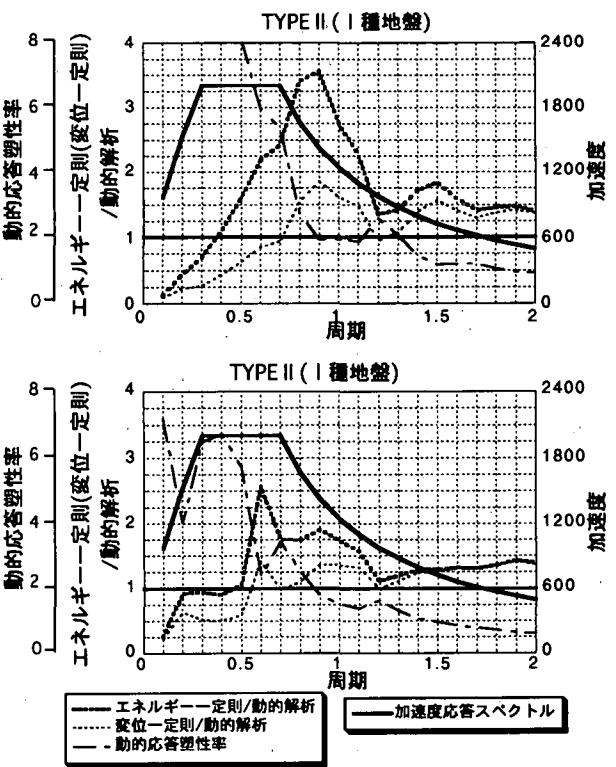


図-6 エネルギー一定則および変位一定則と応答スペクトルとの関係(タイプⅡ、Ⅰ種地盤、降伏水平震度は上図が0.4、下図が0.6)

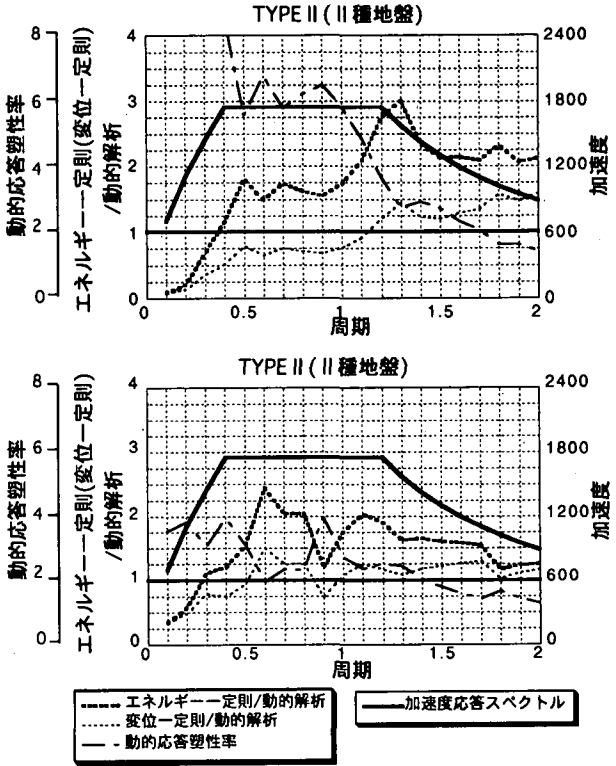


図-7 エネルギー一定則および変位一定則と応答スペクトルとの関係(タイプⅡ、Ⅱ種地盤、降伏水平震度は上図が0.4、下図が0.6)

タイプⅡのⅠ種地盤でスペクトル値が上昇している領域では、降伏水平震度が0.4のケースでは、エネルギー一定則および変位一定則ともに動的解析値を下回っていたが、降伏水平震度が0.6のケースでは周期が0.2秒から0.5秒まではエネルギー一定則と動的解析値がほぼ等しい値となった。スペクトル値が一定の領域の長周期側ではエネルギー一定則が動的解析値を上回って過大評価となり変位一定則のほうが動的解析結果と近い値となる。スペクトル値が下降する領域では変位一定則の精度がよい。

タイプⅡのⅡ種地盤でスペクトル値が上昇している領域では、Ⅰ種地盤と同様に降伏水平震度が0.4では過小となり、0.6では0.3秒でエネルギー一定則が動的解析値を上回った。スペクトル値が一定の領域ではエネルギー一定則が動的解析値を上回るが過大評価となり、変位一定則のほうが精度がよい。スペクトル値が減少している領域でも変位一定則のほうが精度がよい。

タイプⅡのⅢ種地盤でスペクトル値が上昇している領域では、スペクトル値が一定となる領域に近づくにつれ、エネルギー一定則が動的解析と精度が良くなる。スペクトル値が一定および減少している領域では、エネルギー一定則は過大評価となり、変位一定則が動的解析値と近い値を示している。

4. まとめ

タイプⅠ、タイプⅡ地震動ともに、スペクトル値が一定の領域では短周期側はエネルギー一定則の精度はよく、スペクトル値が一定の領域でも長周期側およびスペクトル値が下降する領域では、エネルギー一定則を用いると動的解析値より過大評価となり、変位一定則のほうが動的解析値に近い値を示している。

また、動的応答塑性率から、両法則の適用性をみると、動的応答塑性率が2以下の場合には、変位一定則の適用性がよいことがわかった。

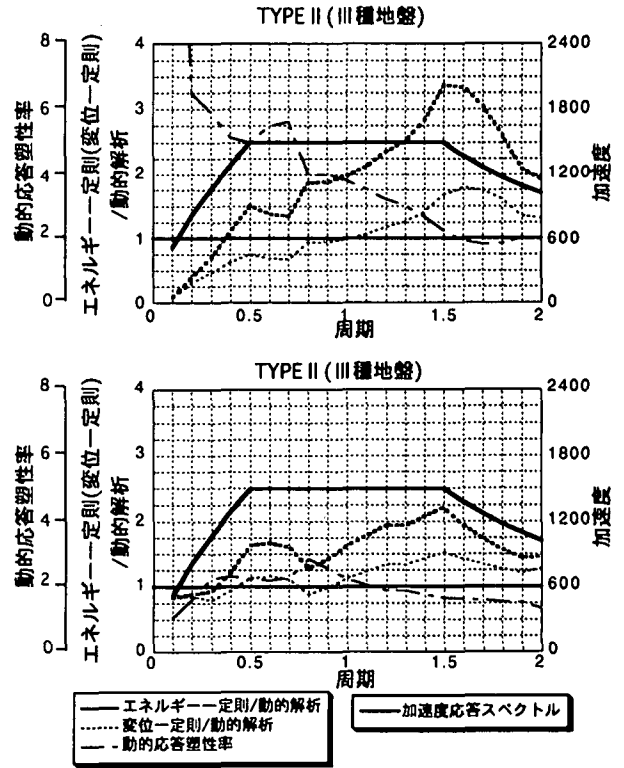


図-8 エネルギー一定則および変位一定則と応答スペクトルとの関係(タイプⅡ、Ⅲ種地盤、降伏水平震度は上図が0.4、下図が0.6)

参考文献

- 1) Newmark N.M. and A.S. Velesos, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple System to Earthquake Motions", II WCEE, 1960
- 2) 柴田明徳：最新耐震構造解析、森北出版、1981
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 v 耐震設計編、1996