

(37) エネルギーによる構造物及び地盤の地震荷重と安全性の評価
-液状化問題への適用-

大成建設(株) 五十嵐 俊一

1 はじめに

エネルギーによって構造物に対する地震荷重を評価する方法は、Housnerが1959年にエネルギー入力と極限設計の概念を提唱して以来、具体的に研究されてきた¹⁾。特に、建築物については、秋山(1980)²⁾をはじめとする詳細な理論的、実験的検討結果が数多く報告されている³⁾。現在、建築関係の設計規準においては、地震荷重はエネルギー入力に関係の深い速度応答スペクトルを用いて与えられている。土木構造物でも、地震記録の最大加速度から受けるイメージと実被害の大きさの違いがしばしば指摘され、エネルギーを用いてこれを説明する試みがなされているが、土木関係の設計規準は依然として加速度を基本にしている⁴⁾。土木構造物や地盤に対する地震荷重も、エネルギーを用いることによって合理的に評価できると考える。

多治見⁵⁾も指摘している様に、Housner、秋山らの方法は、運動方程式に構造物の相対変位を乗じて得られるエネルギー関係式を基本にしているので、そこで用いられている構造物の運動エネルギーが物理的な意味に乏しく独立に論じられないという問題点がある。ここで提案する方法は、慣性系で定義された現実のエネルギーを用いることによって、エネルギーの不変性、保存性、加算性などの性質を地震動の作用と構造物の安全性の評価に役立てようとするものである。

2 エネルギーによる地震荷重と安全率の評価

力や加速度は、本来瞬間で定義された量であるので地震動のように不規則な加速度は通常、ある微小な時間内の平均値としてしか計測できない。したがって、計測方法や計算方法に依存して、得られる値は大きく変わる。また、構造物内部の材質の空間的なばらつきによって加速度の値が変動することも考えられる。即ち、加速度は、構造物の占める時空間内に分布している量であるので、これによって地震動の作用を表そうとすると定義の仕方や、計測方法によって得られる値が変わるという不便さがある。

一方、エネルギーや仕事は、本来有限な時空間内の積分値であるので、土木構造物のように空間的に広がりを持って存在するものに対する、有限な継続時間を持った地震動の作用を表すには好都合である。また、構造物の状態の変化を考慮して、限界状態に対する安全性を評価するときも、ものの状態変化の指標であるエネルギーを用いると便利である。

地震は地盤の運動の繰返しであり、また、構造物はその周辺の地盤の運動によって地震の作用を受ける。従って、地震動の構造物に対する作用 L は、構造物に接する地盤の運動エネルギーの代表値 K と繰返し回数 N によって表されると考える。

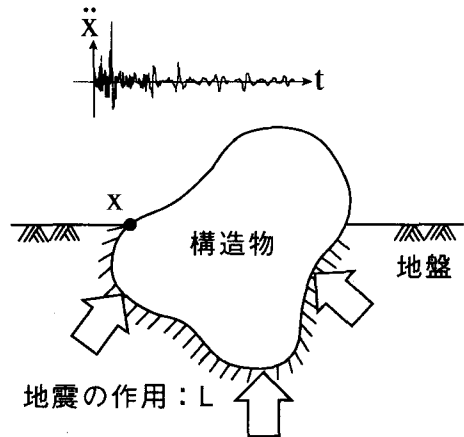


図1 構造物に対する地震の作用

$$L=KN \dots \dots \dots (1)$$

次に、構造物の安全性は、その状態を初期状態から問題となる限界状態まで変化させる時に必要な仕事 W_{i0} と、設計地震動が構造物の状態を変化させるためになした仕事 W_{e0} の比によって評価するものとし、エネルギーによる安全率 F_{le} を定義する。

$$F_{le} = \sqrt{\frac{W_{i0}}{W_{e0}}} \dots \dots \dots (2)$$

最後に、地震動の作用 L と構造物の状態変化 W_{e0} の関係を表す関数 f を定義する。

$$f = \frac{W_{e0}}{L} \dots \dots \dots (3)$$

これは、構造物の応答特性をエネルギーを用いて評価するものである。

地震動と構造物の力学的なモデルが具体的に決定されれば、以上の概念を用いて、構造物に対する地震荷重と安全性、及び応答特性を定量的に評価することが出来る。そこで、一自由度系の構造モデルを採用した場合について、この方法を具体的に説明する。

3 一自由度系による例

図2には、構造物の最も基本的な力学モデルとしてしばしば用いられる一質点系を描いた。質量 m の質点Bは、地盤と支点Aで繋がっている。支点A、即ち地盤の慣性系で計った位置を x とする。質点Bの位置は支点Aからの相対座標 y で計る。運動は水平面内で起こると仮定し、質点には任意の復元力特性を持つバネからの力 r のみが作用するものとするれば、質点の運動は次の様にかかる。

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + r(y, \dot{y}) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

両辺に質点の絶対変位 $dx+dy$ を乗じて時刻 t_1 から t_2 まで積分すると次の関係式を得る。

$$\left[\frac{1}{2} m(\dot{x} + \dot{y})^2 \right]_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} r(y, \dot{y}) dy = - \int_{t_1}^{t_2} r(y, \dot{y}) dx \dots (5)$$

左辺第1項は、質点の運動エネルギーの変化 ΔK 、第2項は復元力による仕事、右辺は外力による仕事 Q である。第2項を弾性的な復元力による仕事、即ちバネに蓄えられる弾性エネルギー ΔE と、摩擦などの非保存力による仕事 D の和として書いて、式(5)をまとめると、以下の関係式を得る。

$$\Delta K - \Delta E - D = Q \dots \dots \dots (6)$$

ここで、積分区間を相対速度 \dot{y} が、ゼロとなる隣り合う2つの時刻 t_1 、 t_2 にとると、左辺第1

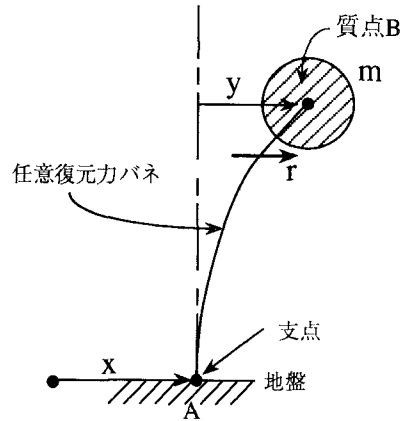


図2 一質点モデル

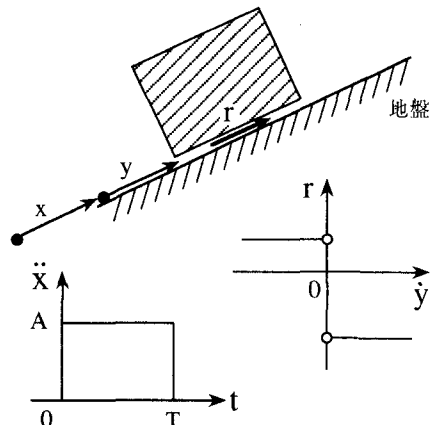


図3 滑りブロックモデル

項は地震動の運動エネルギーの変化になる。即ち、

$$\Delta K = \left[\frac{1}{2} m (\dot{x} + \dot{y})^2 \right]_{t_1}^{t_2} - \left[\frac{1}{2} m \dot{x}^2 \right]_{t_1}^{t_2}, \dot{y}(t_1) = \dot{y}(t_2) = 0, \dot{y}(t) \neq 0 \text{ for } t_1 < t < t_2 \dots \dots \dots (7)$$

地震動の作用によって構造物あるいは地盤が受ける損傷は (6) 式の左辺第 3 項の損失エネルギー D に強く関係すると考えられるが、この大きさは地震動の運動エネルギーを用いて評価出来ることが解る。即ち、式 (6) より、

$$D = \Delta K \left(1 - \frac{\Delta E}{\Delta K} - \frac{Q}{\Delta K} \right) = f \Delta K \dots \dots \dots (8)$$

ただし、 ΔK は式 (7) で定義した 1 サイクルの間の地震動の運動エネルギーの変化である。一般には、 ΔK は、各サイクル毎に変動するが、地震動の運動エネルギーは有限であると考えられるので、 ΔK を、地震動の継続時間全体についての最大値 K_{max} や、平均値 \bar{K} で代表させて、式

(3) で定義した関数 f の代表値を求めることが出来る。ただし、この例では、構造物の状態変化 W_{e0} を損失エネルギー D で表すと仮定している。

例えば、図 3 に示したような滑べりブロックモデルでは、復元力はクーロン摩擦力のみである。入力地震動が継続時間 T の長方形パルスの場合は、式 (8) の損失エネルギー即ち、摩擦力のした仕事は、次の様にかける。

$$D = m A_c Y = \frac{1}{2} m V^2 \left(1 - \frac{2 A_c X}{V^2} \right) = \frac{1}{2} m V^2 \left(1 - \frac{A_c}{A} \right) = K_{max} \bar{f} \dots \dots \dots (9)$$

ただし、 A 、 V 、 X はそれぞれ地震動の最大加速度、速度、及び変位である。また、 Y は質点の最大 (残留) 変位である。この関係は Newmark によって導かれ、盛土やフィルダム等の変形量を推定する式として用いられているものと等価である。入力地震動が、定常ガウス過程の継続時間 s_0 の部分としてモデル化できるときは、図 3 のような滑べりブロックモデルの平均損失エネルギーは次のようにかける⁶⁾。

$$D = \frac{1}{2} m v_{rms}^2 \frac{s_0 \omega_v}{\pi} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\frac{A_c}{a_{rms}} \right)^2 \right) \left(\alpha_v + \pi \sqrt{1 - \alpha_v^2} \right) = \bar{K} N_v f \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $\bar{K} = 1/2 m v_{rms}^2$ 、 $N_v = s_0 \omega_v / \pi$ は地震動の平均運動エネルギー及び、その繰返し回数で、両者の積は全運動エネルギーとも呼べる量であり、式 (1) の地震動の作用 L の具体的表現を与えている。また、 a_{rms} 、 v_{rms} はそれぞれ加速度、速度の 2 乗平均値、 ω_v 、 α_v はそれぞれ速度の中心振動数および、バンド巾指数であり、パワースペクトルから計算できる。 α_v は、正弦波で 1 をとり、ホワイトノイズではゼロとなる。

復元力 r が、線型弾性の場合を考える。実際の地震荷重の場合からは離れるが、最も基本的な例として、単調に y を増加させるような支点変位 x が作用した場合は、図 4 に示したようにエネルギーによる安全率 F_{ie} は発生復元力の比に等しくなる。従って、エネルギーによる方法は、発生応力の比によって安全率を表す従来の方法を特殊な場合として包含することが解る。図 5 には、系の剛性が変形に伴って減少する場合について、単調載荷時のエネルギーによる安全率を描いた。この場合は、応力比による従来の安全率とは大な違いがある。応力比は、塑性化が進んだ場合、意味を持たなくなる。そこで、従来は、図 4 と図 5 の間にエネルギー的な等価性を仮定し、靱性率によって等価な荷重や耐力を求める間接的な方法がとられていた。これは、あくまで力によって安全性を評価する立場をとっていたためである。直接、エネルギーに

よって安全率を定義することで、この様な手続きを省略し、より簡潔な評価法が得られる。

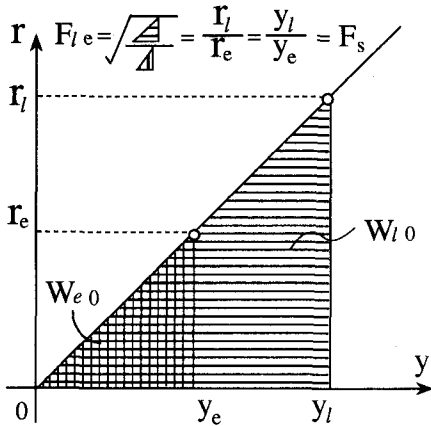


図4 線型弾性系のエネルギー安全率

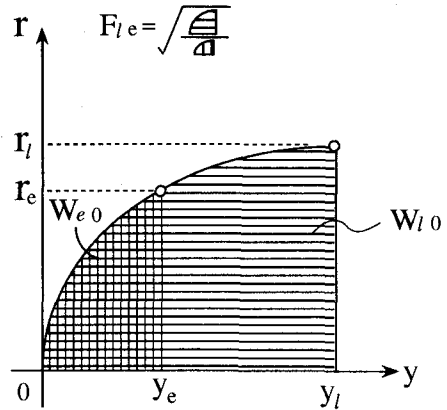


図5 非線型系のエネルギー安全率

4 液状化問題への適用例

エネルギーによる方法は、構造系の復元力特性の非線型性や系の状態変化が大きい場合に、特に有効である。液状化問題は、この様なものの代表例である。これに適用した結果が文献7)に報告されている。従来の応力比による F_l 値に比べて、物性値の決定、地震荷重の評価が直接的かつ現実的に行われる利点があることが解ってきている。例えば、米国のインペリアルバレーで1989年に相継いで起こった最大加速度が約130galと200galの2つの地震で、前者で全く間隙水圧の上昇が観測されず、後者でほぼ完全に液状化した事例についても、エネルギーによる方法は両者の違いを明確に説明することが確かめられた⁸⁾。一方、従来の F_l 値は、最大加速度に比例する判定結果となるため、この例の様な二つの地震の作用の違いを判別し難い。実際、式(10)で定義した全運動エネルギーは、2つの地震で前者が、約65 J/m³、後者が690 J/m³と10倍以上の違いがあった。

5 まとめ

現実のエネルギーを用いて構造物に対する地震動の作用と構造物の安全性を評価する方法を提案した。これは、構造物、地盤及び地震動の特性の把握とそれらの間の相互作用の評価に関して新しい判断指標を与えるものであると考える。

参考文献

- 1) Housner, G. W. :Behavior of Structures During Earthquakes, ASCE, EM4, pp. 109-129, Oct. 1959.
- 2) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計 第2版、東京大学出版会、1987年9月
- 3) 日本建築学会(編)：地震荷重-その現状と将来の展望、日本建築学会、1987年11月
- 4) 伯野 元彦、森川 修：地震加速度と構造物破壊の関係についての一つのシミュレーション、土木学会論文集、第344号/I-1 1984年4月
- 5) 多治見 宏：予測地震動と建築物の応答、第20回記念地盤震動シンポジウム、日本建築学会、1992年11月
- 6) Igarashi, S. :Earthquake resistant design of gravity-type and soil structures with friction response spectrum, Proc. 10WCEE, July 1992.
- 7) Igarashi, S. :Energy-based Factor of Safety against Liquefaction, Proc. of JSCE No. 455/I-21 pp. 13-24, Oct. 1992.
- 8) 五十嵐 俊一、志田 智之：地震動のエネルギーから推定した過剰間隙水圧と実測値、第28回土質工学研究発表会、1993年6月