

(69) 有効応答スペクトル・等価加速度による地震荷重評価について
 —— 構造的動線形母題の影響 ——

京大工学部 豊田弘行 京大工学部 大村真二

1. はじめに

構造物の土中構造物の動的挙動設計で用いられる設計震度は、従来地震動の観測記録から得られた地震動記録をその判断材料として用いられてきたが、その値は地震動を観測した最大加速度のみならずその周期成分も考慮されている。こうした両者の差は、構造物の構造特性、あるいは地盤の特性のみでは押し切れないものであり、これを補って、設計の簡便性と反復性を保つために、構造物の進行性破壊を取り入れて考慮を行うことが望まれている。そこでは地震動の線形母題の認識が深く、この点の物理的評価を行うことにより動的な地震動から静的な地震荷重に変換する方法を思いださなくてはならない。

設計震度の決定に際しては、地震・振動特性、線形母題、の関係を明らかにする。これらの中で、地震と構造物特性についてはすでに種々の形で評価定数として取り入れられているが、線形母題の認識については定量的・物理的評価定数を導き出すことが、これまで、これまで無視されてきた。これは地震動の持つ特徴が十分に生かされていないからである。

この点については筆者等は、地震動特性、上記の関係を明確に示すための動的な地震動の線形母題を静的な地震荷重に変換する方法を提唱し、その結果導き出した静的な等価加速度を「等価加速度」(EQA: Equivalent Ground Acceleration)と呼ぶ。本研究は等価加速度から、さらに地震動、地震荷重に近づけた概念として「有効応答スペクトル」を議論の中心に据えることを提唱したものである。また、文献1ではハイリニア系のみを扱ったが、その後に非線形ハイリニア系の解析をも行ったので、おこなって報告する。

2. 有効応答スペクトル (ERS: Effective Response Factor)

(1) 基本的な式化

地震動、構造物の最大応答は構造物の応答についての次のような2つの側面から捉えらる。a) 最大応答をとりまく応答するが、b) 最大応答に近い応答範囲が何回繰り返されるか。地震動、線形母題は、この2つの側面のいずれか一方の影響を及ぼす。こうした側面からの評価が求められようとする際、線形母題と式化を行った。

地震動の速度 $X(t)$ が与えられた場合に、 $X(t)$ に応答する構造物の応答を動的荷重として表現したものを「有効応答スペクトル」と呼ぶことにし、これを式で表す。

$$S_e = \lambda_a S_p \quad (1)$$

ただし、 S_e は加速度の単位で表現される有効応答スペクトル(一般に非弾性)、 λ_a は応答スペクトルを有効応答スペクトルに変換する「有効応答係数」とである。式(1)では最大応答を与える S_p に代えて、応答の持続性の影響を表現するための λ_a を組合わせることにより、地震動の破壊力を表現している。

(2) 有効応答係数 (ERF: Effective Response Factor)

構造物および構造物の進行性破壊における抵抗力と応答のくり返し、懸垂より、静的な地震荷重が最大応答加速度からどの程度減衰できるかを表したのが有効応答係数 λ_a である。構造物の耐震性能が、許容塑性率 μ と変形能力 m のもとでの応答の許容くり返し数 n_e で与えられる場合、在来型の設計とのアナロジーより有効応答係数 λ_a は次式のように式化される。

$$\lambda_a(T_n, \mu, n_e) = \left\{ \frac{\int_{T_1}^{T_2} \sum_{i=1}^{n_e} X_i^2(T_0)/n_e dT_0}{\int_{T_1}^{T_2} X_1(T_0) dT_0} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ただし、 X_1, X_2, \dots, X_{n_e} は塑性率 μ のもとでの最大値より1番目、2番目、...、 n_e 番目の応答レベルの範囲で

ある。8は減衰時間係数を表す。9は減衰時間係数を表す。10は構造物の固有周期である。11はVanmarcke, L. C. の理論による地震動継続時間 ($T_d = 7.5 \int X^2(t) dt / A_p^2$) である。ただし、 A_p は地震動最大速度を表す。

有効応答係数 α_n の計算例を図1に示す。図から継続時間が短いほど、有効応答係数が小さくなる傾向がみられる。すなわち継続時間が短くなると、最大応答幅の割合が2番目以下の応答幅が小さくなり、地震動の破壊力も相対的に小さいとみなすことができ、静的な地震動も小さい値としてよいこととなる。

以上の3つの応答係数を表した有効応答スペクトルの計算結果を以下に示す。継続時間が有効応答スペクトルを与える震動を明確に示すための地盤条件・地震動最大速度がそれぞれ、継続時間が14.6 sec (Kushiro), 1.1 sec (Kashima) と異なる2つの地震動の比較を中心に紹介する。図2の破線で示されているのは地盤条件から算出した有効応答スペクトルであり、 $n_e = 1$ の場合は $\alpha_n = 1$ となり、相対応答スペクトルと一致する。a) はバイリニア系の有効応答スペクトルであり、b) は剛性劣化型トリリニア系のものである。

図2に示されるように、応答の許容範囲が広いほど n_e が大きくなる(2) 式に示されるように有効応答係数 α_n の値は減少する。その結果有効応答スペクトル S_e は小さくなる。また同一の n_e に対しても上流したように、継続時間の短い Kashima の方が、継続時間の長い Kushiro よりも α_n は小さい値となるため、 n_e を大きくすることによる有効応答スペクトル S_e の減少の割合が大きくなる結果となる。

3. 最大応答に対する継続時間の関係 (最大応答係数: γ)

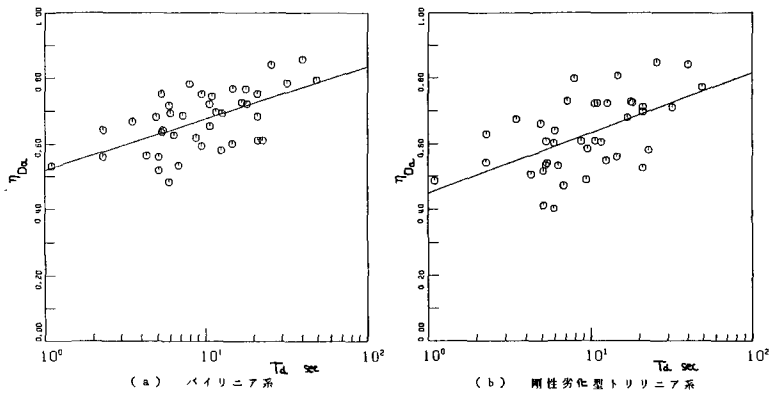
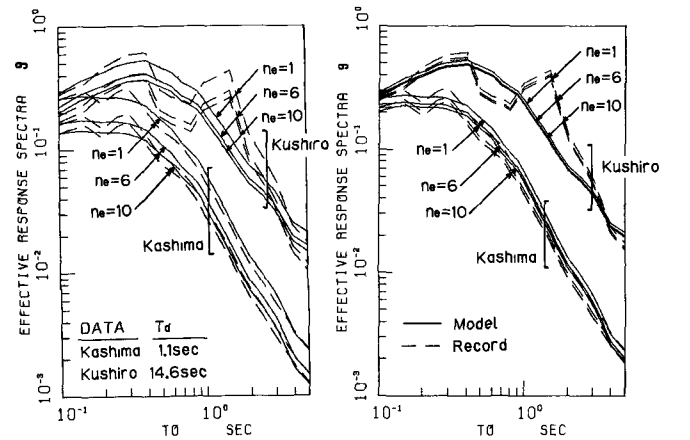
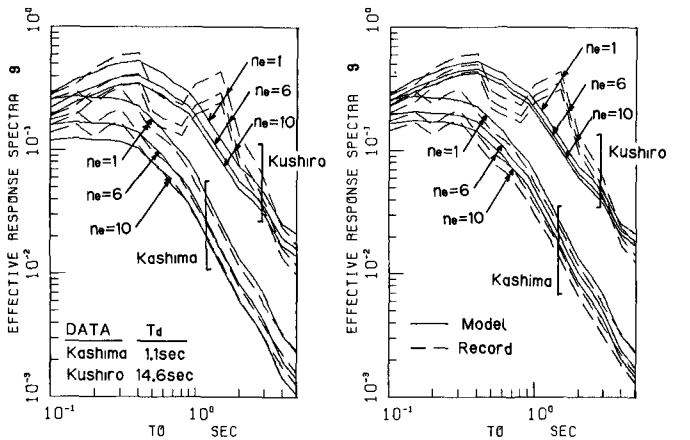


図1 有効応答係数 α_n の計算例 ($\mu = 3, n = 10, q = 1$; 変位応答より算出)



(一) 変位応答に対する有効応答スペクトル (二) 加速度応答に対する有効応答スペクトル

(a) バイリニア系に対する有効応答スペクトル



(一) 変位応答に対する有効応答スペクトル (二) 加速度応答に対する有効応答スペクトル

(b) 剛性劣化型トリリニア系に対する有効応答スペクトル

図2 有効応答スペクトルの計算例 ($\mu = 3, h = 0.05$)

応答スペクトル S_p は、構造物に地震動の応答性を与える地震の強さとして与えられる。

$$S_p = \xi^{(s)}(T_0, h, \mu) \gamma(T_0, T_d) A_p \quad (3)$$

ただし、 $\xi^{(s)}$ は標準応答倍率である。 γ は「最大応答係数」として与えられる。

$$\gamma(T_0, T_d) = S_p / (\xi^{(s)} A_p) \quad (4)$$

また与えられて、 T_0 は固有周期、 h は減衰定数、 μ は最大応答倍率である。

最大応答係数 $\gamma(T_0, T_d)$ は、最大応答に対する地震動継続時間の影響を示すものであり、この影響は異なる地震動の面々の相対比較の議論となるから、ある標準的な地震動に対する応答倍率を標準応答倍率 $\xi^{(s)}(T_0, h, \mu)$ として導入し、それとの比較で特定の地震動の強さを表現するに便利である。最大応答係数 γ はこうした目的で定義されるものである。図3の上記2つの地震動の最大応答係数の例を示した。

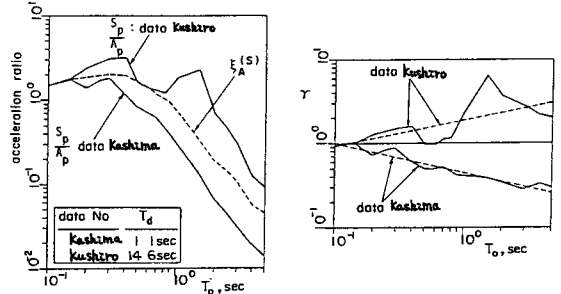


図3 応答倍率と最大応答係数の例

4. 等価加速度 (EQA: Equivalent Ground Acceleration)

式(1), (3)より、次のような加速度値を定義して、これを「等価加速度」と呼ぶ。

$$A_e = \gamma(T_0, T_d) \hat{a}(T_d, \mu, \eta_e) A_p = S_e / \xi^{(s)} \quad (5)$$

A_e に標準応答倍率 $\xi^{(s)}$ を掛け合わせると有効応答スペクトルと一致するから、 A_e は入力地震動のうち、構造物に作用する有効な加速度レベルを表すと考えられる。この等価加速度の概念を用いて、震度法および修正震度法により規定されている現行耐震基準の設計地震動の強さと問題を定量的に検討することとできる。また

$$C_e = \gamma(T_0, T_d) \hat{a}(T_d, \mu, \eta_e) \quad (6)$$

と定義される C_e は地震動最大加速度 A_p を等価加速度 A_e に変換する変換係数であり、これを「等価加速度係数」と呼ぶ。

5. 有効応答スペクトルの推定モデル

有効応答スペクトルを簡単に推定するためのモデルを開発したので、以下にその概要を示す。有効応答スペクトルの推定値 \hat{S}_p を次の形で示す。

$$\hat{S}_p = \xi^{(s)} \hat{\gamma} \hat{a} A_p \quad (7)$$

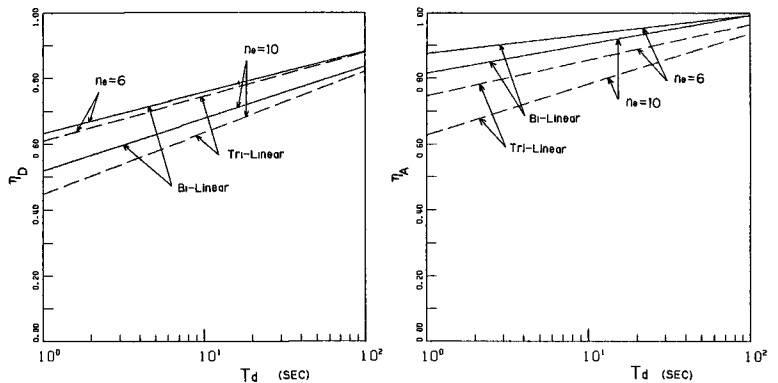
ただし、 $\hat{\gamma}$, \hat{a} は各々最大応答係数 γ および有効応答係数 \hat{a} の推定値である。

有効応答係数 \hat{a} と $\log T_d$ をプロットすると図1に示したような相関がみられ、回帰分析により次の形で \hat{a} が示される。

$$\hat{a} = \begin{cases} a_1 + b_1 \log T_d & , 0 < T_d \leq T_c \\ 1 & , T_d > T_c \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{ただし、 } T_c = 10^{(1-a_1)/b_1}$$

$\mu = 3$, $h = 0.05$, $\eta = 1$ に対して回帰分析を行った結果を図4に示す。a), b) は各々変位応答に基づく有



(a) 変位応答に対する有効応答係数

(b) 加速度応答に対する有効応答係数

図4 有効応答係数の回帰直線

動応答係数、回響係数、卓越係数を示すこととなり、卓越はハイリニア系に対する結果、卓越は剛性大化型トリア系に対する結果である。

最大応答係数 γ については、図3からわかるように固有周期が0.1~5.0 secの範囲では $\log \gamma$ と $\log T_0$ の間には線形関係があると考えられる。また $T_0 \leq 0.1$ secのときは $\gamma = 1$ と考えられる。よって γ は次式で示される。

$$\gamma = (10 T_0)^{0.7} \quad , \quad 0.1 \leq T_0 \leq 5.0 \text{ sec} \quad (9)$$

また、 α_r と次式で定式化される平均最大応答係数 γ_a の対応は非線形に把握される。

$$\gamma_a = \int_{T_0}^{\infty} \xi(T_0) dT_0 / \int_{T_0}^{\infty} \xi^{0.92}(T_0) dT_0 \quad (10)$$

そこで、 $\gamma_a = 1$ に対しては α_r が0となる条件のもとで回響分析を行うと次式となる。

$$\alpha_r = 1.196 \log \gamma_a \quad (11)$$

また、 $\log \gamma_a$ と $\log T_a$ の間には把握される回響分析の結果4種の地盤に対して i) 岩地盤: $\hat{\gamma}_a = 0.811 T_a^{0.02}$, ii) 沖積地盤: $\hat{\gamma}_a = 0.531 T_a^{0.02}$, iii) 沖積地盤: $\hat{\gamma}_a = 0.306 T_a^{0.077}$, iv) 軟弱地盤: $\hat{\gamma}_a = 0.313 T_a^{0.091}$ なる回響式が導かれた。

標準応答係数 $\xi^{(s)}$ は4種の地盤について各々10%の卓越率となる応答係数の平均値であることになっておられ、各々の地盤条件に対して標準応答係数に定める応答係数と示される。結果は図5に示す。

尤もKushiro, Kashimaの2つの地盤に対して以上の検討を同じに用いて有効応答スペクトルを推定した結果を図2に示す。卓越率から算出された有効応答スペクトルと比較すると、卓越率から算出されたものは卓越係数の影響から地盤条件を反映するロープを持つことになり、卓越率に於いては、上記の標準応答係数 $\xi^{(s)}$ を用いているので、各々地盤条件における応答の平均値を示す把握され、固有周期に対する変動もあきらめられることとなる。このように、卓越率から算出された有効応答スペクトルと推定された有効応答スペクトルは多少異なる性質を持っているが、全体的な傾向は一致している。特に、Kushiro 及び Kashima に対する回響係数との差異は、モデルに於ける推定値である固有周期 T_0 が最大応答係数 γ に及ぼす影響として評価されているものとなり、卓越係数 ξ が卓越率 h と与える影響が明確に認識される。

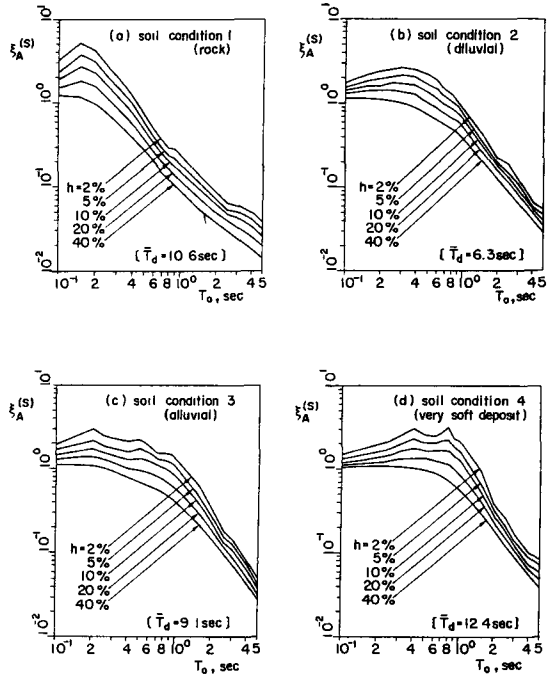


図5 標準応答係数 $\xi^{(s)}$

参考文献

- 1) Kameda, H and Kohno, K., "Effect of Ground Motion Duration on Seismic Load for Civil Engineering Structures - Development of Equivalent Ground Acceleration (EQA) -," April 1983.
- 2) Vanmarcke, E.H., and Lai, S.-S.P., "Strong Motion and rms Amplitude of Earthquake Records," August 1980.
- 3) 道路橋示方書・回響法 平成建設省 昭和55年5月.