

I-385

入力エネルギースペクトルの正規化について

筑波大学 学生員 郭 献群

筑波大学 正 員 西岡 隆

1. はじめに 正規化された応答スペクトルと地震動の強さの指標の積で地震動による構造物の応答を評価し、耐震設計を行うことは簡単で有効な方法である。正規化された応答スペクトルを整理する際に、まず地震動の強さの指標としての正規化因子をいかに選ぶかという問題に直面する。すなわち、地震動の特性が異なることによる正規化応答スペクトルの変動をなるべく小さくするように、地震動の強さの指標を選択しなければならない。最大弾性応答に着目する場合、地動の最大加速度 A_{max} 、最大速度 V_{max} 、地動加速度の全エネルギー $P(P = \int_0^{\infty} \dot{z}(t)^2 dt, \dot{z}(t): \text{地動加速度})$ 、応答スペクトル強さ $S_1 = \int_0^{\infty} \dot{S}_v(T_0, h) dT_0$ などがよく使われている。一方、エネルギー論に基づく耐震設計法では、地震による構造物への入力エネルギーを正確に評価しなければならない。瞬間的な応答値と比べて、入力エネルギーは応答値の時間に関する積分であるから、用いる地震動の強さの指標も新たに考える必要がある。著者らはすでに擬似地震動モデルを用いて、弾塑性系への入力エネルギーと地震動の特性値の関係を解明し、地震動による構造物への入力エネルギーの評価式 $E = P T_g S_E (T_0/T_g)$ を提案している¹⁾。すなわち、 $P T_g$ を地震動の強さの指標として、入力エネルギースペクトルを整理することである。本研究は数値実験で正規化された応答スペクトルの変動を調べることで、地震動の強さの指標としてよく使われている A_{max} 、 V_{max} 、 S_1 、 P と、著者らが提案した $P T_g$ を比較したものである。

2. 理論解析による入力エネルギースペクトル

非定常確率過程 $\ddot{z}(t) = \psi(t) g(t)$ ($\psi(t)$ は確定な関数で、 $g(t)$ は定常確率過程である)を擬似地震動の加速度波として、1質点系への入力エネルギーの期待値 $\bar{E}$ を求め、次のように整理した。

$$\bar{E} = \bar{P} \cdot T_g \cdot S_E (T_0/T_g, h_e)$$

$\bar{P}$: 地動加速度の全エネルギーの期待値

T_g : 地震動の卓越周期

T_0 : 構造物の固有周期

h_e : 構造物の等価減衰係数

$S_E (T_0/T_g, h_e)$: 正規化入力エネルギー

スペクトル, その一例は図1に示している。 図1 正規化した入力エネルギースペクトル($h_e=0.2$)

3. 数値解析に用いる擬似地震動の作成 2. で述べた結果により、正規化因子として $P T_g$ が適していると推定できる。しかし、他の地震動の強さの指標との比較を行っていないことと、擬似地震動や構造物モデルが単純すぎることを考えると、さらに詳細な検討が必要である。ここでは、非定常な周波数特性を持つ擬似地震動のサンプルを30個作成し、完全弾塑性型の履歴特性を持つ1質点系を対象に数値解析を行うことにした。擬似地震動の作成方法はつぎのとおりである。

$$\ddot{z}(t) = \psi(t) g(t) \quad \psi(t) = \frac{1}{T_p} \exp(1 - \frac{t}{T_p}) \quad g(t) = \frac{a}{N} \sum_{n=1}^N \cos((\exp(\alpha t) \omega_n + \delta) t + \phi_n)$$

ω_n は確率密度関数 $4 \frac{\omega_g^2}{\omega_g^3} \exp(-\frac{2\omega}{\omega_g})$ を持つ確率変数である。 ϕ_n は $[0, 2\pi]$ の範囲の一樣乱数,

$\alpha, \delta, T_p, \omega_g, a$ (本研究では $\omega_g=10\text{rad/sec}$, $a=1$)は常数である。

4. 応答スペクトルの変動とその考察 以上で述べた方法を用いて、パラメータの値を表1のようにとり、30個の擬似地震動のサンプルを作成する。これらの擬似地震動による速度応答スペクトル、加速度応答スペクトルと入力エネルギースペクトルを求めて、 A_{max} 、 V_{max} 、 S_1 、 P 、 $P T_g$ で正規化する。それぞれの正規化スペクトルの変動係数 $\text{cov}(S_v), \text{cov}(S_a), \text{cov}(S_E)$ を図2, 3, 4に示す。これらの図から以下のことが明らかになる。

a. 速度応答スペクトルの場合(図2): $P T_g$, S_1 は P , A_{max} より良い指標である,

b. 加速度応答スペクトルの場合（図3）：構造物の固有周期が短い範囲では、 A_{max} が特に優れている（変動係数が0.1以下である）。しかし、固有周期が長くなると、 V_{max} を除く各指標による正規化されたスペクトルの変動係数はほぼ同一レベルである。

c. 入力エネルギースペクトルの場合（図4）： PT_g による正規化スペクトルの変動係数は固有周期が大きくなるにつれて、0.1から0.4まで増大する。 P は PT_g の形に似ているが、全体的に変動係数が0.1程度大きい。これは指標 P が T_g の変動による入力エネルギーの変動を考慮できないためである。さらに、 A_{max} を指標とする場合、変動係数は PT_g より全体的に0.4程度大きい。原因は A_{max} が卓越周期 T_g の変動と継続時間の変動による入力エネルギーの変化を反映できないためである。応答スペクトル強度 S_1 を指標とすると全固有周期領域でその変動係数が0.4から0.6までの範囲内に納まっている。また、周期の長い領域では、変動係数は PT_g を指標とする場合とほぼ同一レベルである。

d. V_{max} を指標とする場合、どの応答スペクトルの変動係数も他の指標よりかなり大きい。本研究で用いている擬似地震動の速度波が実地震動よりランダム性を持つことが主な原因であると考えられる。

5. まとめ 構造物のそれぞれの応答値に応じて、最適な地震動の強さの指標を選択すべきである。入力エネルギーに着目する場合、 PT_g はその他の地震動の強さの指標と比べて優れている。

No.	T_p	α	δ	No.	T_p	α	δ	No.	T_p	α	δ
1	3.0	0.0	0.2	11	7.0	0.0	-0.2	21	5.0	-0.015	0.0
2	4.0	0.0	0.2	12	8.0	0.0	-0.2	22	6.0	-0.015	0.0
3	5.0	0.0	0.2	13	3.0	0.015	0.0	23	7.0	-0.015	0.0
4	6.0	0.0	0.2	14	4.0	0.015	0.0	24	8.0	-0.015	0.0
5	7.0	0.0	0.2	15	5.0	0.015	0.0	25	3.0	0.0	0.0
6	8.0	0.0	0.2	16	6.0	0.015	0.0	26	4.0	0.0	0.0
7	3.0	0.0	-0.2	17	7.0	0.015	0.0	27	5.0	0.0	0.0
8	4.0	0.0	-0.2	18	8.0	0.015	0.0	28	6.0	0.0	0.0
9	5.0	0.0	-0.2	19	3.0	-0.015	0.0	29	7.0	0.0	0.0
10	6.0	0.0	-0.2	20	4.0	-0.015	0.0	30	8.0	0.0	0.0

表1 擬似地震動のパラメータ

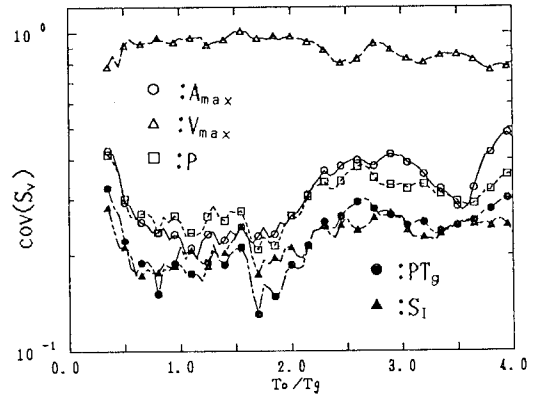


図2 正規化した速度応答スペクトルの変動

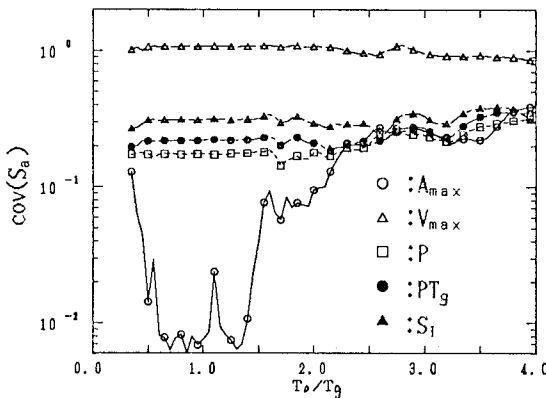


図3 正規化した加速度応答スペクトルの変動

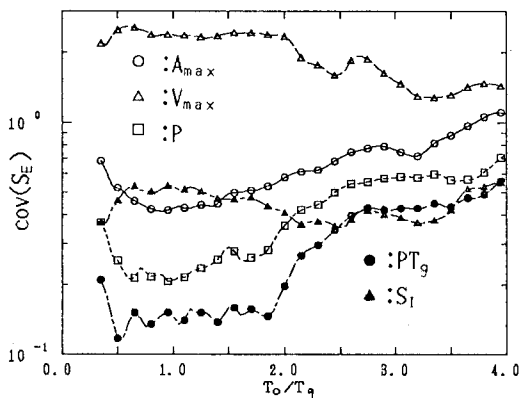


図4 正規化した入力エネルギースペクトルの変動

参考文献：1. 郭 献群・西岡 隆：構造物への入力エネルギーに対する地震動特性の影響 土木学会第42回年次学術講演会概要集I - p1118-1119