

武蔵工業大学 ○星谷 勝
清水建設 石井 清

1. 研究目的

平均応答スペクトルを耐震設計に用いる場合に次に示す問題点がある。(i)平均応答スペクトルは使用地震データにより変動するから、建設地奥に予想される地震波形を用いて作成した平均応答スペクトルでなければ設計の信頼性は疑問である。しかし、現在、各特性に地震データを分けた場合、十分なデータ数は完備してない。(ii)地震動データ自体の精度は測定装置に基因する誤差、数値化に伴う誤差等により十分とは云えない。

そこで、平均応答スペクトルの代わりに、安全側であり且つ実用に供することが出来る範囲で経済的な応答スペクトルの上限値が解析できるならば、設計法として上限値を用いる方法が採用されよう。

この報告は近地地震群に対する応答スペクトルの上限値を解析したものであり、各地震波は振幅及び周波数特性が非正常な波とし、自乗平方根強度Iで正規化したものを対象とする。

2. 近地地震の使用データ

耐震工学的に見て重要で構造物に顕著な被害をもたらす近地地震群を次に示すデータ選択基準に基づいて選択した。この基準に合うデータ22本を図1に示す。

地震動の規模 M	震央距離 Δ
M = 8	Δ = 200 Km 以内
M = 7	Δ = 40 Km 以内
M = 6	Δ = 10 Km 以内

図1から静岡市附近の地震(No.5,6)および松代群発地震(No.7~10)が上記基準からは外れていることがわかる。しかし、静岡市の地震は小規模ながら実際に被害を出した例とし、松代地震は群発地震の例として加えた。新潟地震(No.3,4)は液化現象のため長周期成分が卓越しているが、このデータを入れておけば長周期構造物にはより安全側の考察ができるので使用データに加えた。

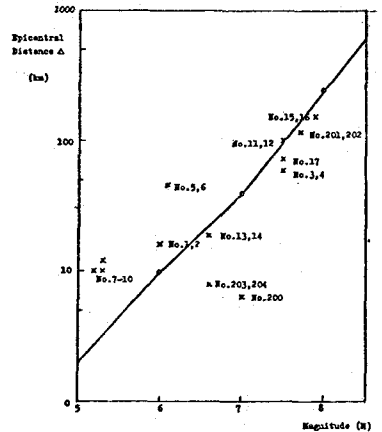


図1 使用地震データの
マグニチュード-震央距離

本研究ではこれらのデータを自乗平方根強度

$$I = \left[\int_0^{\infty} \{\ddot{y}(t)\}^2 dt \right]^{1/2}$$

(1) マグニチュード-震央距離

で正規化したものが与える応答スペクトル群を包絡する上限値を、経験から得られる拘束条件を用い、最適化手法で算出する。

3. 最適化手法による解析

本研究は地震動の振幅特性、継続時間、周波数特性及び単位地震動強さ(I=1)を持つ条件を拘束条件とし、1自由度系の応答を最大応答として、これを目的関数とする最適化問題に置換できる。

すなわち、

$$|x(t)_{max}| \longrightarrow \max. \quad \text{但し} \quad x(t)_{max} = \left\{ \int_0^t \ddot{y}(\tau) k(t-\tau) d\tau \right\}_{max} \quad (2)$$

とする、未知入力関数 $\ddot{y}(t)$ 及びこれに対応する $|x(t)_{max}|_{max}$ すなわち応答スペクトルの上限値を次の条件で

解析すること。

拘束条件1; $\ddot{y}(t)$ の周波数レベル, すなわち $\ddot{y}(t)$ の非定常スペクトルが近地震群の非定常スペクトルの包絡線の上限值に含まれること。

拘束条件2; $\ddot{y}(t)$ の振幅レベルが近地震群の振幅レベルの包絡線の上限值に含まれること。継続時間に関する拘束条件は自動的に満足される。

拘束条件3; $\ddot{y}(t)$ が単位の自乗平方根強度 $I=1$ を満足すること。

ここで, 未知関数 $\ddot{y}(t)$ を

$$\ddot{y}(t) = \sum_{k=1}^N g(t, \omega_k) \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (3)$$

$$g(t, \omega_k) = \{b_{1k}(e^{-b_{2k}t} - e^{-b_{3k}t})\}^{1/2} \quad (4)$$

とし, 非定常スペクトルを

$$S_{\ddot{y}}(\omega, t; W) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} W(t-u) \ddot{y}(u) e^{-i\omega u} du \right|^2 \quad (5)$$

とした。 $b_{1k}, b_{2k}, b_{3k}, \phi_k$ 等が最適化問題に於ける設計変数を構成する。

拘束条件1, 2を PHYSICAL SPECTRUM の上限値として図2のように求めた。図2の包絡線(実線)を満足し自乗平方根強度 $I=1$ を有する未知関数(3)式をモンテカルロ法で数多く作り出し, その中で応答(2)式を最大とするものを最適解として算出した。図3は応答スペクトルの上限值を与えた未知入力, いわば最悪入力の例を示す。図4は応答スペクトル上限値, 及び使用データの平均応答スペクトル(μ)等を示したものである。

図4より正規化応答スペクトルの上限值について次の考察ができる。正規化応答スペクトルが正規確率分布するならば, $\mu + \sigma, \mu + 2\sigma, \mu + 3\sigma$ はそれぞれ確率 0.841, 0.977, 0.999 で応答スペクトルを含むことになる。ここで求めた $(S_d)_{bound}$ は地震データの情報を考慮して解析されたので, 理論的上限值(Drenickによる)を大巾に改良している。 $(S_d)_{bound}$ は丁度 $\mu + 2\sigma$ と $\mu + 3\sigma$ の中間ぐらいの位置を占めるが, 長周期(6sec以上)になると, $\mu + \sigma$ 近辺になる。これは使用データ中に長周期成分を持つ新場地震が含まれていること, そして図2の包絡線はスムーズな曲線として求め長周期のこの拘束条件がやや緩和されていることによると思われる。新場地震データを除外して μ, σ を求めて, $(S_d)_{bound}$ と比較してみると図5のようになる。

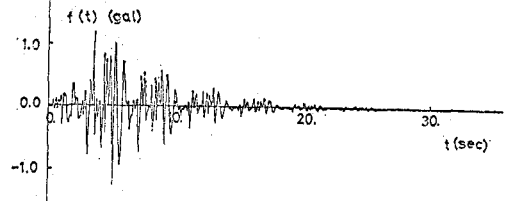


図3 最悪入力 - $T_0 = 0.5 \text{ sec}, \beta = 0.05$

図2 Physical Spectrum の包絡線

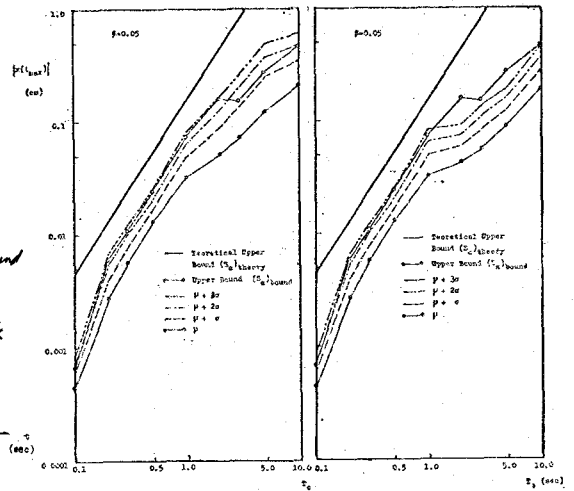
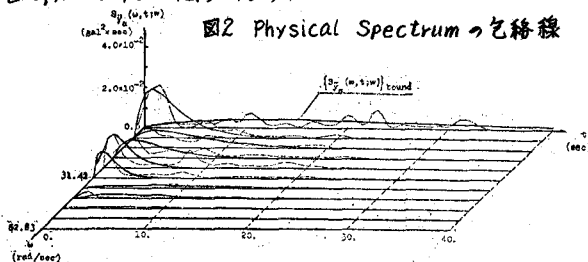


図4 正規化応答スペクトルの上限值 図5 正規化応答スペクトルの上限值