

武蔵工業大学土木工学科

正員

星 谷 勝

〇学生員

石 井 清

1. はしがき G.W. HOUSNER によって提案された平均応答スペクトル法は現在の耐震設計において、重要な役割をはたしている。しかし、平均応答スペクトル法を動的解析または修正震度法に適用する場合、平均応答スペクトルが使用地震データにより異なること、地震データ自体の信頼性などの問題がある。

これに対し、平均応答スペクトルのかわりに、応答スペクトルの上限値を用いるという方法は耐震設計法における一つの有力なアプローチとなる^(1,2)。しかし、現在求められている理論的⁽¹⁾上限値は実用にはほどとあい。そこで理論的⁽¹⁾上限値を過去の地震データを用いて改良することが考えられる。

このような観点から、本研究は、最適制御理論に基づき、最要制御問題を設定し、応答スペクトルの上限値を耐震設計に用いるというアプローチの実用性について基礎的な検討を行ったものである。

2. 最要制御問題の設定 応答スペクトルに理論的⁽¹⁾上限値を与える入力するなれち系に対して最もきびしい仮想最要地震入力に対し、振幅レベル、継続時間およびパワースペクトルの拘束条件を経験的に与えることにより、応答スペクトルの上限値を改良する。

はしがきに述べた問題は、次に示す最要制御問題に置換できる。

$$\text{拘束条件 1: } |f(t)| \leq g_{\text{bound}}(t) \quad (1)$$

拘束条件 2: $f(t)$ は非定常性を表わす傾向関数 $g(t)$ と定常性を表わす関数 $n(t)$ の積で与えられるとし $n(t)$ はパワースペクトル $G(\omega)$, $\omega \geq 0$ を有すること。 (2)

が与えられたとき、系の相対変位応答の絶対最大値 $|x(t_{\text{max}})|$ を最大とする。すなわち、

$$|x(t_{\text{max}})| \rightarrow \text{Max.} \quad (3)$$

とするような仮想最要地震入力 $f(t)$ を決定すること。

ここで、 $g_{\text{bound}}(t)$ は振幅レベルの包絡線の上限値(継続時間も含む)。また、 $|x(t_{\text{max}})|$ の t_{max} は系の応答の最大値を与える時間である。

応答 $x(t)$ は系の固有円振動数 ω_0 および粘性係数 β を有するとき初期条件 $x(0) = \dot{x}(0) = 0$ としてデュアメル⁽³⁾の積分により簡単に求まる。

さらに(2)式における $g(t)$ および $n(t)$ を次のように近似する。

$$g(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \{u(t - t_k) - u(t - t_{k+1})\} \quad (4)$$

ここで、 $t_k < t_{k+1}$ 、さらに α_k は時間 (t_k, t_{k+1}) で振幅レベルを決める非負の値をもつパラメータである。 $u(t - t_k)$ は UNIT STEP FUNCTION である。

$$n(t) = \sum_{j=1}^M a_j \sin(\omega_j t + \delta_j) \quad (5)$$

ここで、 $\omega_j = \omega_0 + (j - 1/2)\Delta\omega$, ω_0 および ω_m はパワースペクトル $G(\omega)$ の最小値および最大値である。 $\Delta\omega = (\omega_m - \omega_0)/m$, $a_j = \{2G(\omega_j)\Delta\omega\}^{1/2}$ および δ_j は $0.0 \sim 2\pi$ の定数である。

上記最要制御問題において、設計変数は $g(t)$ における α_k , t_k および $n(t)$ における δ_j と t_{max} である。

3. 解析方法 解析には MONTE CARLO METHOD と FEASIBLE DIRECTION METHOD を併用した。MONTE CARLO METHOD は拘束条件を満足する多くの可能な入力 $f_k(t)$ を作成する。次に $x_k(t)$ を直接計算し、 $x_k(t)$ の絶対最大値 $|x_k(t_{\text{max}})|$ を求める。十分なシミュレーション試行のうち、 $|x_k(t_{\text{max}})|$ の中で、最大のものを与える関数 $f_k(t)$ を仮想最要地震入力と推定する。FEASIBLE DIRECTION METHOD は最適化手法

の1つである。この方法は、初めに拘束条件を満足する設計変数の初期値を設定し、拘束条件を満たす領域内で目的関数 $|z(\text{max})|$ を大きくする方向に設計変数をくり返し改良し、目的関数を最大とする設計変数を求める方法である。また、目的関数および拘束条件が複雑であるため、FEASIBLE DIRECTION METHODでは、MONTE CARLO METHODの最適解を参考にし、数種の異なる初期値から出発した解が同じ値となることで全体的最適値と判定した。

4. 解析例 仮想最悪地震入力に対する振幅レベル、継続時間およびパワースペクトルの拘束条件を次に示す。振幅レベルおよび継続時間の拘束条件は実際地震加速度データより得られた包絡線を簡略化したものである(図1)。またパワースペクトルの拘束条件として3ケースを考えた。

Case 1は系の固有周期のみである。Case 2はパワースペクトルが系の固有円振動数を中心とした範囲($\omega_0 - \pi/2$, $\omega_0 + \pi/2$)で一定な有限ホワイトノイズである。Case 3はHOUSNERが強震地震データの分析から提案した数学モデルを田谷見の数学モデルで近似したパワースペクトルである。⁽⁴⁾

5. 解析結果 結果を図2に示す。図2は系の理論的変位応答の上限値(最大加速度1galのとき、 $1/2 B \bar{\omega}^2$, $\bar{\omega} = \omega_0(1 - \beta^2)^{1/2}$)が拘束条件により改良されていく過程を示している。

図2から次のことが考察できる。

- (1) パワースペクトルの拘束条件がCase 1からCase 3とゆるめられるにつれて最大変位応答値は改良される。
- (2) しかし、Case 3では最大変位応答値が実際の地震であるEL CENTRO地震を短周期において下まわっている。
- (3) したがって、最大変位応答値の改良はパワースペクトルについてCase 2とCase 3の間でなされるべきである。

6. 結論 本研究は応答スペクトルの上限値による耐震設計へのアプローチの1つの有効なうらづけとなる。しかし、振幅レベルの拘束条件あるいはパワースペクトルの拘束条件に関しては、理論解析および実際の地震データによる数値解析が十分に検討される必要性がある。

参考文献 (1) 土木学会：長大橋梁の安全性に関する調査研究報告書、応答スペクトルの正規化について、MAR., 1973. (2) DRENICK, R.E.; MODEL FREE DESIGN OF ASEISMIC STRUCTURES., ASCE, Vol. 96, No. EM4, AUG., 1970. (3) JENNING, P.C., HOUSNER, G.W. & TSAI, N.C.; SIMULATED EARTHQUAKE MOTIONS FOR DESIGN PURPOSES., THE 4TH WCEE, (4) HOUSNER, G.W. & JENNING, P.C.; GENERATION OF ARTIFICIAL EARTHQUAKES., ASCE, Vol. 90, No. EM1, FEB., 1964.

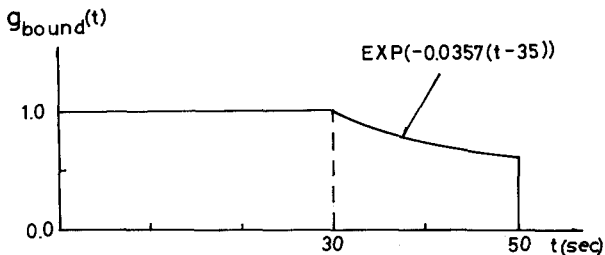


図1 振幅レベルの拘束条件 $g_{\text{bound}}(t)$

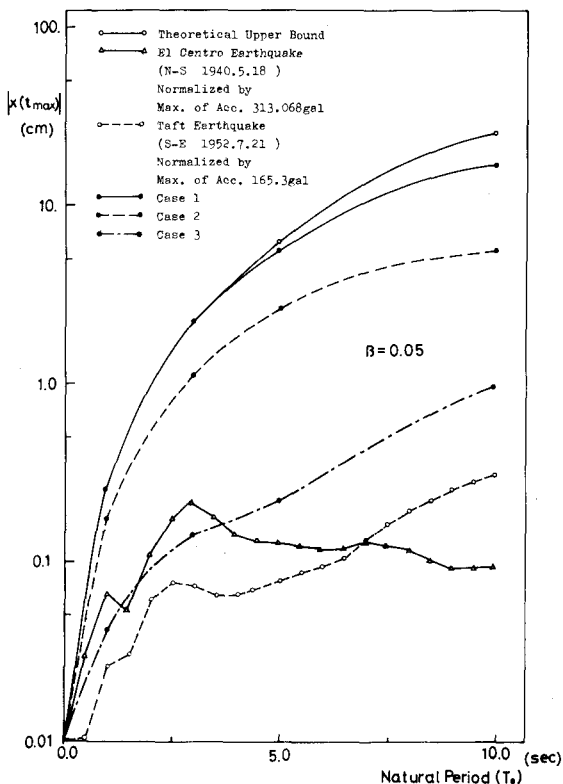


図2 変位応答スペクトルの上限値