

I - B 358

設計地震動の位相設定について

(財)鉄道総合技術研究所 ○ 正会員 王 海波

同上 正会員 室野 剛隆

同上 正会員 西村 昭彦

1. まえがき

耐震設計において、設計地震動は周期特性を反映出来る弾性応答スペクトルで定義することが一般である。周期 T での応答スペクトルは固有周期 T を持つ一自由度の振動系にある振動を受ける時の最大応答値である。構造物の固有周期が分かれば、設計応答スペクトルから構造物の最大応答加速度が分かるので設計者には非常に便利である。しかし、違う入力振動でも、弾性応答スペクトルが一致すれば、同じ振動として取り扱う。

ただし、弾性応答スペクトルは各周期成分のパワーだけを着目している。違う周期成分の振動間の位相関係は無視されている。その理由は、振動のパワーより地震動の位相の知識が少ないことに起因しているものと考えられる。しかし、弾性応答スペクトルには、構造物が全て振動に対して弾性変形であると言う前提がある。構造物が弾性であれば、位相の影響は少ないことは分かっている。

一方、発震断層の近傍では、弾性応答スペクトルが 2000gal も超える強地震動が最近発生した地震で観測された。このような強地震動に対して、特別の場合を除いて、構造物の損傷が避けられないと考える。損傷を生じた構造物の変形は、弾性範囲を越え、塑性範囲に入る。塑性変形をすることにより構造物の固有周期は応答レベルとともに変化して、弾性応答の性質とかなり違う状態を示す。従って、入力波の弾性応答スペクトルが一致しても、構造物の塑性応答はずいぶん異なる場合もある。

従って、構造物の損傷を考慮する現在の耐震設計手法においては、弾性応答スペクトルに規定されなかった地震動の位相特性は不可欠と考える。動的解析に用いる時刻歴は、観測記録の位相をそのまま用いて、実観測記録に近い特性を有する適合波を作成する方法が一般であるが、個々の観測記録の位相特性はその地震と観測地点に特有のもので、設計に要求された一般性はない。それを補うため、設計には、同様の弾性応答スペクトルに適合された数個の時刻歴を用いて検討しなければならない。そこで、位相が設定できれば、使用する波が少なく済むため、その設定方法を検討した。

2. 位相設定の提案

地震動の位相問題は最近多数の研究者¹⁾に注目された。元々設計弾性応答スペクトルが実際に存在しないので、それに適合させる波形は設計の目的に従って規定するのはよいと考える。ここでは実地震記録の位相特性より、設計上の地震動の位相設定方法について検討した。

振動系の応答の位相は振動系の伝達関数の位相関数 $\psi(\omega)$ と入力波の位相関数 $\theta(\omega)$ から決める。

$$\phi(\omega) = \psi(\omega) + \theta(\omega) \quad \text{式 1}$$

ω は円振動数である。各周期成分のエネルギーが振動系の応答に相殺しないような条件は、 $\phi(\omega) = \psi(\omega) + \theta(\omega)$ の差を $+90^\circ \sim -90^\circ$ 範囲に制限する必要がある。 $\theta(\omega) \equiv 0$ にすると、入力パルスになってしまい、 $\phi(\omega)$ は $0^\circ \sim 180^\circ$ まで変化する。ただ、地震波はパルスではないので、 $\theta(\omega)$ は適切に設定する必要がある。

全て違う固有振動数を有する振動系に対して、 $\phi(\omega)$ の変化範囲は $+90^\circ \sim -90^\circ$ にするのは難しいが、伝達関数の増幅特性を考えると、共振点前後だけに着目にする。入力の位相変化率は共振 ($\lambda = 1$) 時の伝達関数の位相変化率と一致すると考えられる。支持点で振動を受ける単自由度振動系の伝達関数の位相は

$$\psi(\lambda) = \tan^{-1} \frac{2\xi\lambda^3}{1 - \lambda^2 + (2\xi\lambda)^2} \quad \text{式 2}$$

になる。ここで、 $\lambda = \omega/\omega_0$ 、 ω_0 は単自由度系の固有振動数、 ξ はその減衰係数である。

式 2 の微分から、 $\lambda = 1$ 時の位相の変化率は

キーワード 設計地震動、弾性応答スペクトル、適合波、位相、非線形応答スペクトル
連絡先：〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38、Tel:0425-73-7262、Fax:0425-73-7248

$$\left. \frac{d\psi(\lambda)}{d\lambda} \right|_{\lambda=1} = \frac{3\xi + 1 - 4\xi^2}{2\xi} \approx \frac{1}{2\xi} \quad \text{式 3}$$

になる。つまり、共振時には伝達関数の位相関数 $\psi(\omega)$ の変化は固有振動数と減衰比で決められる。

$$\frac{d\psi(\omega)}{d\omega} = \frac{d\psi(\omega)}{d\lambda} \frac{d\lambda}{d\omega} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi(\omega)}{d\lambda} \approx \frac{1}{2\omega_0\xi} \quad \text{式 4}$$

ただし、減衰比が大きくなると、共振点両側の変化は速くなる。共振前後において応答位相の差を一定範囲にするのが目標とすれば、応答位相の変化率を小さいすればよい。式1と式4から入力波の位相変化率は

$$\frac{d\theta(\omega)}{d\omega} = -\frac{1}{2\xi\omega} \quad \text{式 5}$$

を用いた。伝達関数の共振点での最大位相変化率を入力波に適用するので、全体としては変化率がかなり大きい。応答位相 $\phi(\omega)$ の変化が $+90^\circ$ から -90° とすると、その振動数範囲は共振点近傍の範囲となる。小さな位相変化率を用いると、その振動数範囲を広げる。従って、入力波の位相は式6で設定する。

$$\theta(\omega) = -\frac{a}{\xi} \ln(\omega + b) + \theta_0 \quad \text{式 6}$$

ここで、 a と b は定数であり、それらの値は期待非線形応答スペクトルを満たすように規定するように考える。

a が小さくなると波の主動時間が短くなる一方、加速度のピーク値が大きくなる。波形は振動型から襲撃型に変り、非線形応答スペクトルが全体的に大きくなる。係数 b は短周期と長周期に異なる位相変化率を与え、 b を大きくすると非線形応答スペクトルでの降伏震度は長周期で大きくなる。図1と図2にそれぞれの影響を示している。実際 a と b は弾性応答スペクトルと同様に観測記録の位相から定めるのかよいと考えている。つまり、観測記録の位相を用いた適合波の非線形応答スペクトルを統計処理によって、それらを包絡できる期待値を設定し、係数 a と b の調整により適合波の位相を設定する。図3はこの方法で作成した例を示している。

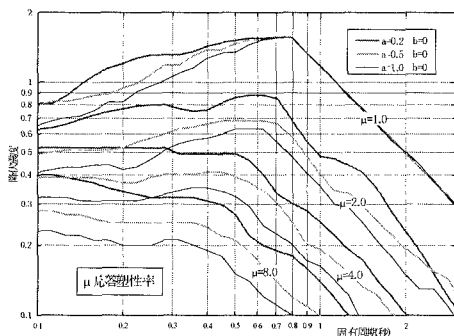


図1 係数 a による降伏震度への影響

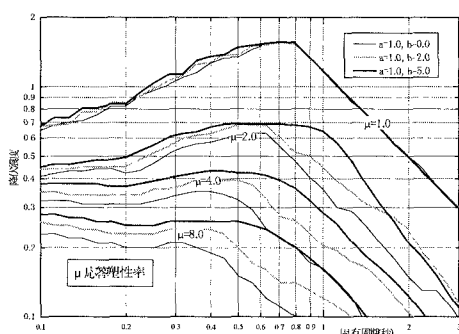


図2 係数 b による降伏震度への影響

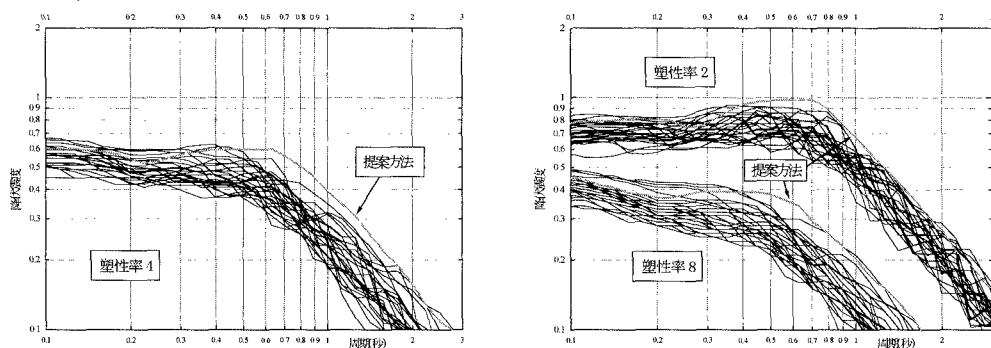


図3 提案方法で作成した波の非線形応答スペクトル

3. まとめ

以上の分析と計算結果から、式6を用いて適合波作成する際、波のパワーと位相を共に設計に考慮する地震動を満たすように規定できる。つまり、弾性応答スペクトルを満足とともに、期待塑性率もfittingできる。
参考文献：1)室野、佐藤、西村:地震動の位相スペクトルのモデル化、第2回都市直下地震災害総合シンポジウム、1997年。2)「地震動—その合成と波形処理」理論地震動研究会、鹿島出版会