

I-B 337

二乗和平方根法(SRSS法)の応答予測精度と補正方法

東京大学大学院 学生員 吉見雅行
 東京大学工学系研究科 正 員 阿部雅人
 東京大学工学系研究科 フェロー 藤野陽三

1. はじめに

耐震設計には応答スペクトル法がよく用いられる。応答スペクトルから多自由度系の応答を予測するには、二乗和平方根法(SRSS法)、固有周期が近接しているときにはCQC法などのモード結合則が使用される。SRSS法にしろCQC法にしろ定常白色雑音入力時には応答の期待値を与えることが理論的に示されている^[1]。ところが、実際の地震動、特に直下地震動はパルスのな挙動を示すなど非定常性が強い。そこで、観測地震動を用いてSRSS法の応答予測精度を調べ、その補正方法を検討した。なお、ここでは固有周期が近接していない系を対象とするため、CQC法は検討の対象とはしない。

2. 研究方法

線形せん断10自由度系モデルを例として取り上げ(図1)、直接時間積分して求めた応答の厳密解と、モード結合則から求めた予測値とを比較した。入力地震動として兵庫県南部地震、ロマブリータ地震、釧路沖地震などの観測地震動、合計114記録を用いた。なお、このモデルはモード連成を無視できる条件を満たしている^[1]。

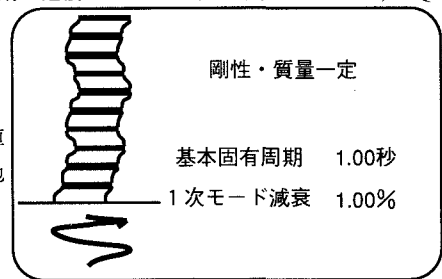


図1. 線形せん断10自由度系モデル

3. 予測精度の検討

最大変位の厳密解と予測値とを比較し、モード結合則による応答予測の精度を調べた(図2)。モード結合則としてはSRSS法の他に絶対値和法およびX乗和X乗根法(Xnorm法)を用いた。Xnorm法は以下のように表され、X=2はSRSS法、X=1は絶対値和法に対応する。

$$Xnorm = \left(\sum_{i=1}^n (R_i)^X \right)^{1/X} \quad (1)$$

ここで、 R_i は*i*次モードのモーダル最大応答値である。また、Xの値としては、数例の入力に対する数値計算の結果ほぼ常に安全側予測となるボーダー値であったX=1.2を採用した。

全入力に対する比較の結果、入力地震動によるばらつきはあるものの、概して以下の傾向が見られた。

- ・SRSS法 一般的に精度は良いが、場合によっては大きく危険側の予測となる。
- ・絶対値和法 常に安全側だが、予測が過大になりがちである。
- ・1.2norm法 上記2法の中間の性質を持ち、ほぼ常に安全側の予測となる。しかし、予測精度はあまり良くない。

また、応答値に及ぼす1次モードと2次モードの影響が大きいため、この2つのモードのみを考慮し同様な解析を行ったが、全振動モードを考慮したものと同様な結果が得られた。そこで、2つのモードのみを考慮した解析結果を用い、SRSS法の応答予測精度に何が大きな影響を及ぼすかを調べたところ、次の傾向があることが分かった。

- ・両モードのモーダル最大応答値の大きさが近づくほど精度が低下する。
- ・両モーダル最大応答値が発生する時間差 Δt の大きさが小さいほど精度が低下する。

つまり、全応答に対する両モードの最大寄与が、量的にも時間的にも近接するときに予測精度が低下する事になる。

4. 補正係数 γ の導出

両モードの寄与を含むSRSS法の補正係数 γ を、定常ホワイトノイズ入力1自由度系応答の最尤推定の考えに基

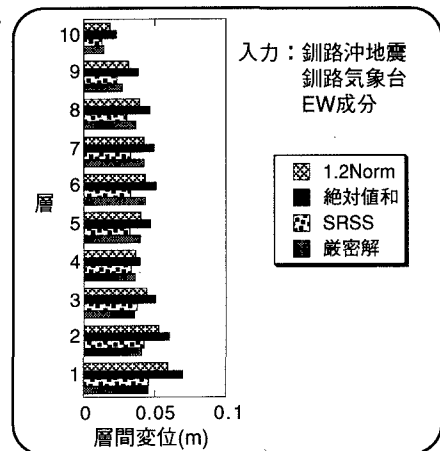


図2. 厳密解と予測値の比較の例

づき導出した^[2]。そして、両モード応答の最尤推定の包絡線の和から、最大応答値の推定値 M を求めた(図3)。さらに、SRSS法の補正係数 γ を $\gamma = M / (\text{SRSSによる予測値})$ と定義し、次の値を得た^[3]。

$$\gamma = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)^2 - 2A(R_1 + R_2)\Delta t}{(R_1^2 + R_2^2)}} \quad (2)$$

ただし、 $A = \text{Max}[\zeta_1\omega_1 R_1, \zeta_2\omega_2 R_2]$ である。また、 R_1, R_2 はモード最大応答値、 Δt はモード最大応答値発生時間差、 ζ_1, ζ_2 はモード減衰、 ω_1, ω_2 はモード固有円振動数である。

補正係数 γ の効果を調べるために、縦軸に厳密解とSRSSとの比を、横軸に補正係数 γ をとったものを図4に示す。縦軸の値が1より大きい部分はSRSS法が過小評価する場合に対応する。 γ が大きいところでは過小評価する傾向が見られる。また、図中の実線は γ による補正を表しているが、これは厳密解の平均的傾向をよく反映したものとなっている。

5. 補正係数 γ の算出

補正係数を導出する際に必要なモード最大応答値 R_1, R_2 は応答スペクトルから簡単に求めることができる。しかし、時間差 Δt を得るためには、時刻歴応答解析をする必要がある。そこで、地震動記録から直接 Δt を得る方法を考えた。

入力地震波のある周期成分が最大となった直後には、それに対応するモードの最大応答値が発生すると考えられる。そこで、周波数分析を時刻歴でおこなえる解析法であるウェーブレット変換に着目した。地震動にウェーブレット変換を施し、両振動モードの固有周期に対応する周期についてウェーブレット係数の絶対値の最大値を与える時刻をそれぞれ求め、両者の時間差 $\Delta t_{\text{Wavelet}}$ をとった。ただし、このウェーブレット変換には wave vector=5のMorletのウェーブレット基底を用いた。

Δt と $\Delta t_{\text{Wavelet}}$ との比較から、両者が比較的近い値をとることが確認できた(図5)。よって、 Δt の代わりに $\Delta t_{\text{Wavelet}}$ を使用することによって、時刻歴応答解析をせずに補正係数 γ を計算できる可能性がある。

6. まとめ

- (1)SRSS法の応答予測は、モード間の最大応答値の比およびその発生時間差 Δt によっては過小評価になる。
- (2)以上の影響を考慮したSRSS法の補正係数 γ を提案し、その有効性を確かめた。
- (3)補正係数 γ の算出に必要な時間差 Δt は、地震動から直接求めることが可能な $\Delta t_{\text{Wavelet}}$ で代用できる可能性がある。

[参考文献]

- [1]A.Der Kiureghian, "A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems", Earthquake Engineering Structure Dynamics 9, pp.419-435, 1981. [2]J.KVandiver, A.B.Dunwoody, R.B.Campbell, M.F.Cook, "A mathematical basis for the random decrement vibration signature analysis technique", Journal of Mechanical Design, Vol.104, pp307-313, 1982.[3]吉見雅行, 「せん断多自由度系の応答に対する地震動特性の影響」, 東京大学卒業論文, 1996

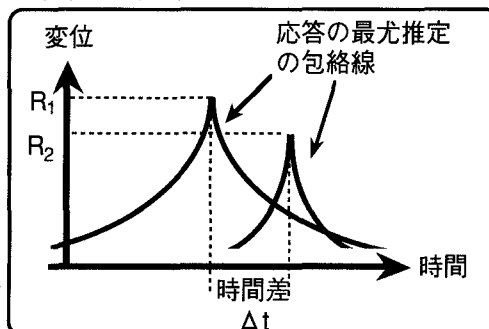


図3. 補正係数 γ の導出

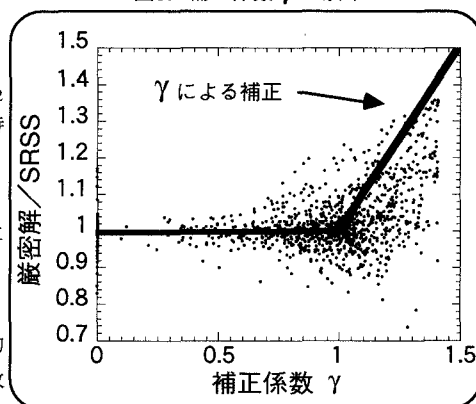


図4. 補正係数 γ の効果

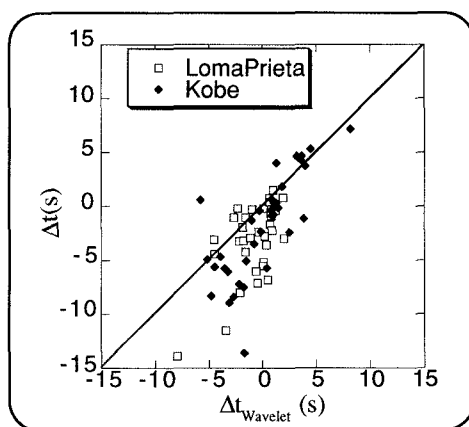


図5. Δt と $\Delta t_{\text{Wavelet}}$ との関係