

長周期成分を含む入力地震動による構造物の非線形応答

建設省土木研究所 正員 濱田 禎  
 京都大学工学部 正員 澤田純男  
 京都大学工学部 正員 土岐憲三

1. はじめに

本研究では、地震学の分野で最も一般的な震源スペクトルモデルであるオメガスクエアモデルを用いて長周期領域の加速度応答スペクトルを予測し、これを満たすような模擬地震動を作成し、非線形応答解析を行い、構造物の非線形応答特性を評価する。

2. 地震動の長周期成分の評価

地震動の変位波形のフーリエスペクトルは、その概型から、平坦部分（フラットレベル=D）と、平坦部分と $\omega^{-2}$ に比例して減少する部分との交点の周波数（コーナー周波数= $f_c$ ）の二つのパラメーターに代表させることができる。このフラットレベルとコーナー周波数は、地震の規模によって規則的に変化し、これを震源スケリング則というが、本研究では、マグニチュードMとストレスドロップ $\Delta\sigma$ (bar)及び震源距離X(km)から次式<sup>1)</sup>で震源スペクトルを評価した。

$$\log M_0 = 1.5M + 16.2 \quad M_0: \text{地震モーメント}(\text{dyn} \cdot \text{cm})$$

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \times 4.0 \times (\Delta\sigma / M_0)^{1/3} \quad (\text{Hz})$$

$$D = 3.7 \times 10^{-3} \times M_0 \times \frac{1}{1 + (f/f_c)} \times \frac{\exp(-7.1 \times 10^{-3} \times X)}{X} \quad (\text{cm})$$

応答スペクトルを考える場合、前述の変位のフーリエスペクトルを時刻歴の加速度波形に変換する必要が生じるが、本研究では、地震動の変位波形の主要部が概ね三角形に見て取れることが多いことに着目して、三角形の模擬変位波形にコーナー周波数とフラットレベルを代表させることを試みた。例えば、マグニチュード7.0、ストレスドロップ200barで震央距離が

20kmの場合、コーナー周波数及びフラットレベルはそれぞれ0.15Hz、36cm\*secと与えられるが、これは底辺4.5sec、高さ16cmの三角形に代表させることができる。これらの関係を示したのが図1である。

図2は、道路橋示方書・V耐震設計編<sup>2)</sup>に掲載されている加速度応答スペクトルの回帰式から作成した、マグニチュード7.0、震央距離20km、地盤種別Ⅲの場合のスペクトルと、上述のようにして作成した三角形模擬変位波形を時間で2回微分して得られた加速度波形を入力地震動として用いて得られた減衰5%の加速度応答スペクトルを重ねて示したものである。オメガスクエアモデルは巨視的な層層モデルであること、また基盤での地震動を対象としていることから、短周期成分については信頼できない。そこで、この場合、4.0秒より長い周期においては本研究の三角形近似による応答値を、3.0秒より短い周期においては距離減衰式による値を、3.0秒から4.0秒の間は両端の値を直線で補間した値をマグニチュード7.0の地震による震央距離20kmの種地盤における標準的な加速度応答スペクトルと考えることにする。

同様の手法で、マグニチュード7.0、震央距離20km、地盤種別Ⅰ、また、マグニチュード8.0、震央距離120km、地盤種別Ⅰ及びⅢの場合の合計4つのケースの応答スペクトルを評価し、これらの応答スペクトルを満足するような模擬地震動をそれぞれのケースについて作成した。

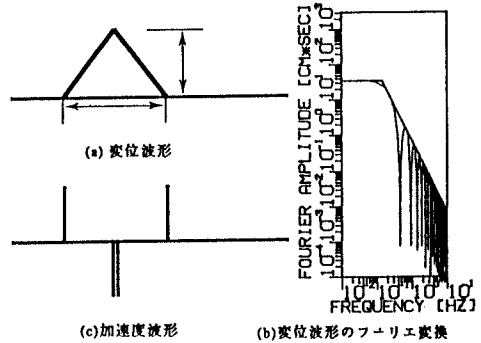


図1 マグニチュード7.0、震央距離20km、ストレスドロップ200barの場合の三角形模擬変位波形

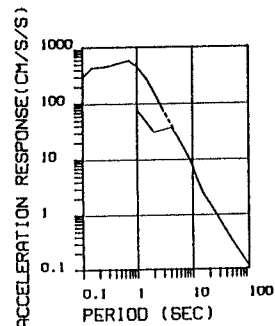


図2 マグニチュード7.0、震央距離20km、地盤種別Ⅲの場合の加速度応答スペクトル(減衰5%)

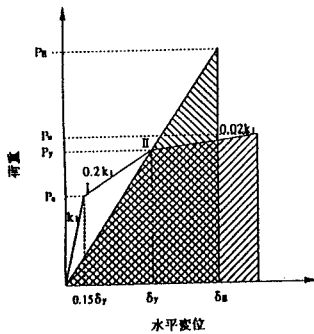


図3 トリリニアのパラメータの関係とエネルギー一定則

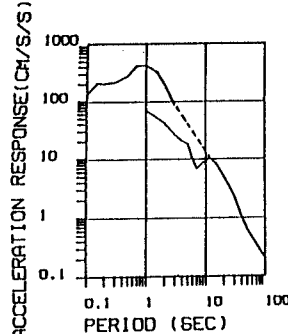
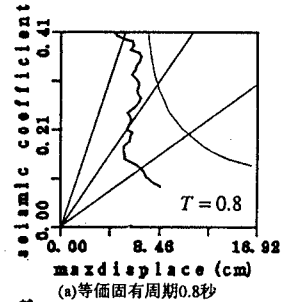
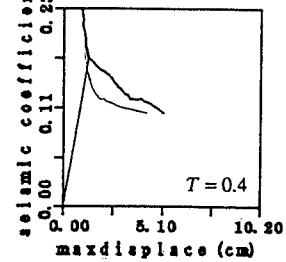


図4 マグニチュード8.0、震央距離120km、地盤種別Ⅲの場合の加速度応答スペクトル(減衰5%)



(a)等価固有周期0.8秒



(b)等価固有周期0.4秒

図5 降伏震度と最大変位

### 3. 非線形応答特性

現在、道路橋示方書では、鉄筋コンクリートの塑性変形能力を設計において考慮する場合、エネルギー一定則に基づいて△OABと□OCDEの面積が等しくなるように塑性変形耐力 $P_y$ を設定するように定めている(図3)。エネルギー一定則は、一般に固有周期が短い場合によく成り立つとされているもので、これを長周期の構造物にまで拡張すると過剰設計になる可能性があるが、どの程度の周期で適用できるかは入力地震動の特性に依存する。

そこで本研究では、前述の模擬地震動を入力地震動として、構造物が徐々に劣化して長周期化することを考慮したトリリニアの復元力特性を持つ1自由度のパネ-質点系モデルの応答計算を線形加速度法で行った。その計算結果のうち、マグニチュード8.0、震央距離120km、地盤種別Ⅲを想定(そのスペクトルが図4)した模擬地震動を用いたときの、等価固有周期が0.4秒及び0.8秒の場合の降伏力と最大変位の関係をそれぞれ図5(a)と(b)に示す。

図5(a)では、第三剛性に対応するスペクトルの値が等価剛性に対応する値よりも大きく低下しているために、降伏耐力を徐々に減少させていった場合の最大変位は、塑性率が4程度までは塑性しないとした場合の最大変位を変位を越えない(変位一定則)。この傾向は24種類の固有周期に対して、それぞれ4通りの入力地震動を用いた場合のほとんどについてみられ、特に地震動の応答スペクトルが-1以下の傾きで減少している周期においては塑性率4以下では、完全弾性の場合の最大変位を越えたものは見られなかった。

また図5(b)では、第三剛性に対応するスペクトルの値が等価剛性に対応する値よりも大きく、エネルギー一定則によって与えられる最大変位よりも大きな最大変位が計算されている。

### 4. まとめ

盆地構造による表面波が卓越する場合を除くと、加速度応答スペクトルは地盤の固有周期付近にピークを持ち、これより長周期の領域では大きく減少することが期待されるので、この領域の固有周期の構造物の塑性変形能力は変位一定則によって評価してよいことがわかった。また短周期の領域でスペクトル値が増加する場合、エネルギー一定則によって許容降伏力を算定すると危険側になる場合もあるということがわかった。

### 参考文献

- 1) David M.Boore:Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra,Bulletin of the Seismological Society of America,Vol.73,No.6,pp.1865-1894,December1983.
- 2) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編、平成2年2月