

I-632 エネルギー論的考察に基づく終局耐震信頼性

筑波大学大学院 学生員 郭 献群
筑波大学 正員 西岡 隆

1. はじめに

地震動による構造物の崩壊に直接的に関連するものは構造物の最大加速度応答や最大変位応答よりも、構造物への入力エネルギーが合理的と考えられる。すなわち、地震動による構造物への入力エネルギーと構造物のエネルギー吸収能力を対比させることによって、構造物の終局耐震安全性をより合理的に検討することができる。構造物への入力エネルギーは最大応答のような瞬間的な応答量ではなく、応答の地震動の全継続時間における積分値である。このため、入力エネルギーを評価する場合、地動最大加速度や地動最大速度は地震動の強さの指標として必ずしも適切ではない。本研究はこうした考えから、構造物への入力エネルギーを評価するための地震動の強さの指標を新たに選択し、新しい地震動の強さの指標の確率論的特性を解明することにより、構造物の終局耐震信頼性の特徴を検討するものである。

2. 地震動の強さの指標の選択と入力エネルギーの評価の定式化

著者らは既に擬似地震動モデルを用いて、入力エネルギーに及ぼす地震動の特性の影響を期待値のレベルで定量的に検討し、入力エネルギー E を $E = m P T_g S_E$ の形式で評価することを提案した¹⁾。ここでの m は構造物の総質量、 P は地動加速度の全継続時間における積分値(本研究では、地動加速度の全エネルギーと称する)、 T_g は地震動の卓越周期、 S_E は正規化入力エネルギースペクトルである。すなわち、 $P T_g$ は一つの地震動の強さの指標として考えられる。ここでは、よく用いられている地震動の強さの指標 A_{max} (地動最大加速度)、 V_{max} (地動最大速度)、 S_I (スペクトル強度)、 P (地動加速度の全エネルギー) と $P T_g$ を比較するため、継続時間 t_d と卓越周期 T_g がばらつきを有する擬似地震動の標本集合(50波、継続時間の平均値 $\bar{t}_d = 20$ sec, 変動係数 $COV(t_d) = 0.4$, 卓越周期の平均値 $\bar{T}_g = 0.6$ sec, 変動係数 $COV(T_g) = 0.4$)を作成し、それぞれの地震動の強さの指標で地震動の標本を基準化したときの入力エネルギースペクトルの変動係数を調べた。得られた結果を図1にまとめた。図1によると、短周期の領域と長周期の領域では、それぞれ P , $P T_g$ で地震動の標本を基準化した場合、入力エネルギーの変動係数は最も小さい。すなわち、短周期の構造物への入力エネルギーを評価する場合、長周期の構造物への入力エネルギーを評価する場合、それぞれ P , $P T_g$ を地震動の強さの指標として用いることが最適である。この結果をもとに、入力エネルギーの評価方法を次のように定式化した。

$$E = \begin{cases} m P \cdot \bar{T}_g S_E & T_g < \bar{T}_g \\ m P T_g \cdot S_E & T_g > \bar{T}_g \end{cases}$$

ここに、 T_g は構造物の固有周期、 P は地動加速度の全エネルギー、 $\bar{T}_g$ は地盤の卓越周期である。

3. 地震動の強さの指標 P , $P T_g$ の予測式とその確率分布

地震動の強さの指標の予測式は $\log y = c_1 + c_2 m - c_3 \log(r+25)$ の形を用いる。ここに、 y は地震動の強さの指標、 m は地震のマグニチュード、 r は震源距離である。 c_1 , c_2 , c_3 は地震の観測データを用いて得られた回帰式の係数である。この式は主に地動の最大振幅(最大地動加速度, 最大地動速度, 最大地動変位)を予測するために用いられている。ここでは、 P , $P T_g$ を予測するために、この式を用いることにする。Californiaの軟地盤における強震の地震動加速度記録(118成分)²⁾を用いて最小二乗法によって、係数 c_1 , c_2 , c_3 を定めた。比較するため、 P , $P T_g$ の予測式と共に地動最大加速度 A_{max} の予測式も求めておく。

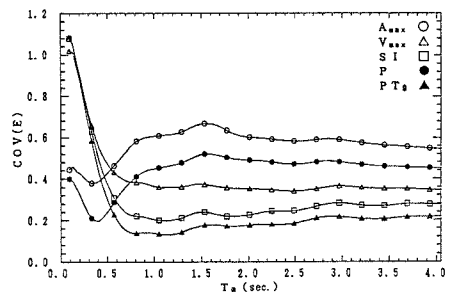


図1 入力エネルギーの変動係数

得られた結果は次の通りである。

$$\log A_{\max} = 6.01 + 0.95m - 1.76 \log(r + 25).$$

$$\log P = 7.70 + 2.10m - 2.83 \log(r + 25).$$

$$\log P T_g = 4.66 + 2.26m - 2.59 \log(r + 25).$$

ここに、マグニチュード m は Richter マグニチュードで、震源距離 r の単位は km 、 $A_{\max}$ の単位は cm/sec^2 、 P の単位は cm^2/sec^3 、 $P T_g$ の単位は cm^2/sec^2 である。地震動の強さの指標 P 及び $P T_g$ の確率分布は次の地震発生モデルをもとに求めた。(a) 地震発生の時間的分布はポアソン分布である。(b) 地震のマグニチュード別分布は上下限値 m_1 、 m_0 を持つ指数分布である。(c) 空間分布は点震源、線震源または面震源からなる一様分布である。(d) 地震動の強さの指標の値は上述した予測式に従うものとする。

4. 構造物の耐震信頼性のシミュレーション

図2に示した線震源の付近に建設する短周期の構造物(基本固有周期が同種類の地盤での地震動の卓越周期の期待値より小さい) a、b と長周期の構造物 c を想定する。構造物 a は $D = 10 \text{ km}$ の地点での再現期間50年の地動最大加速度 $A_{\max} = 395 \text{ gal}$ でその降伏強度を設計した構造物である。構造物 b は $D = 10 \text{ km}$ の地点での再現期間50年の地動加速度の全エネルギー $P = 151000 \text{ cm}^2/\text{sec}^3$ でそのエネルギー吸収能力を設計した構造物である。構造物 c は $D = 10 \text{ km}$ の地点での再現期間50年の $P T_g = 64200 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ でそのエネルギー吸収能力を設計した構造物である。構造物 a が50年間その弾性限界状態を超える確率、構造物 b、c が50年間終局限界状態を超える確率をそれぞれ P_{fes} 、 P_{fus} 、 P_{ful} とする。この3つの構造物を $D = 10 \text{ km}$ で建設する場合、超過確率 P_{fes} 、 P_{fus} 、 P_{ful} はすべて0.623である。震源域から a、b、c の3つの構造物を離すことによるそれぞれの超過確率 P_{fes} 、 P_{fus} 、 P_{ful} の変化を調べる。得られた結果を図3にまとめた。この図によると、建設地点を震源域から離すことにより、構造物の耐震信頼性を高める効果は、短周期の構造物の弾性限界状態に対する信頼性の場合、短周期の構造物の終局限界状態に対する信頼性の場合、長周期の構造物の終局限界状態に対する信頼性の場合の順に小さくなる。

図4に示した震源の深さは 20 km の線震源 S_1 、 S_2 と点震源 S_3 に隣接する地点 k で、短周期の構造物 a と長周期構造物 b を想定する。短周期の構造物 a が50年間終局限界状態を超える確率と、長周期の構造物 b が50年間終局限界状態を超える確率をそれぞれ P_{fus} 、 P_{ful} とする。構造物 a のエネルギー吸収能力を $W_0 = m(P)_{50} T_g S_E$ 、構造物 b のエネルギー吸収能力を $W_0 = m(P T_g)_{50} S_E$ で設計した場合 ($(P)_{50}$ は再現期間50年の地動加速度の全エネルギーで、 $(P T_g)_{50}$ は再現期間50年の $P T_g$ である)、50年間終局限界状態を超える確率は二つの構造物とも0.623である。構造物のエネルギー吸収能力 W_0 を n 倍にしたとき、超過確率 P_{fus} 、 P_{ful} を求めて図5にまとめた。この図から、同倍率で構造物 a と構造物 b のエネルギー吸収能力を増強すれば、長周期の構造物 b より短周期の構造物 a の終局耐震信頼性を高められる。

参考文献

1) 郭 献群・西岡 隆: 地震動による構造物への入力エネルギーの特性とその評価, 土木学会論文集, 第410号, 1989年10月. 2) Lai, S.P.: Statistical Characterization of Ground Motions Using Power Spectral Density Function, BSSA, Vol. 72, No. 1, 1980. 8

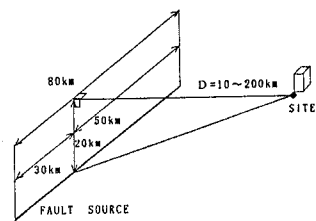


図2 例題1

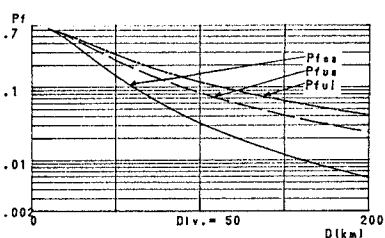


図3 震源距離と P_f

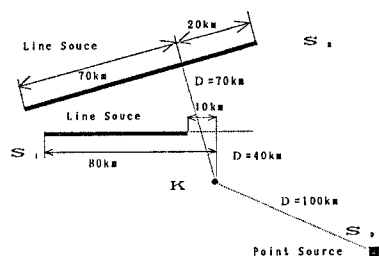


図4 例題2

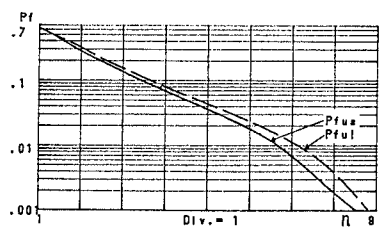


図5 エネルギー吸収能力と P_f