

地震信頼性理論に基づく免震構造の最適設計について

中川 肇*

Optimum Design of Base Isolated Structure on the Basis of Seismic Reliability Theory

Hajime NAKAGAWA

ABSTRACT

This paper presents the optimum parameter analysis of the base isolated building under Tokachioki type (2003) and Niigata-ken Chuetsu type (2004) random earthquake excitations. From the three viewpoints of seismic reliability, preservation of seismic safety and improvement of structural comfort, the optimum parameter on the base isolation interface is determined in such a way that the responses of base isolated structural systems agree with the response demanded by the structural designer. The optimality of the parameter is discussed for the performance demanded coefficient and some random earthquake excitation models.

KEY WORDS: optimum design, seismic reliability, seismic safety, structural comfort,
long natural period earthquake excitation

1. 序

1995年の兵庫県南部地震以後、M7クラスの巨大地震が日本各地、海外で発生している。2003年9月26日午前4時50分、釧路沖を震源とするM8.0の十勝沖地震が、2004年10月23日午後5時56分、新潟県中越地方を震源とするM6.8の新潟県中越地震が発生し、建築・土木構造物に被害を齎した。十勝沖地震はプレート境界地震で、苫小牧市は不整形な堆積盆地上に位置していたために、継続時間の長く、低振動数成分を多い揺れを観測している。所謂、「長周期地震動」の存在が確認された。一方、新潟県中越地震での震源地付近は活褶曲と呼ばれる地形で、内陸活断層破壊で生じた地震で、兵庫県南部地震に比較的類似している。従って、日本は「地震活動期にある」と言っても過言ではない。

海外では、2004年12月26日午前9時58分（日本時間）スマトラ島西方沖を震源とするM9.0のスマトラ沖地震が発生し、大津波によりインドネシアなどの東南アジア、東アフリカ諸国など13カ国で死者16万人以上の被害を齎した。スマトラ沖地震は、インド・オーストラリアプレートがユーラシア

プレートに沈み込みにより発生したプレート境界地震で、高さ約11mの巨大津波が発生し、時速720Kmでインド洋を横断し、壊滅的な被害を齎したと推定されている。

本論では、まず十勝沖地震時の苫小牧市（以下、Tomakomai型）と新潟県中越地震時の小千谷市（以下、Ojiya型）での観測波形を基に、非定常確率入力地震動モデルを構築する。次いで、過大地震入力は現今の免震構造評定で採用されている「極めて稀に発生する地震動」の1.25倍つまり最大速度100cm/sと定義し、過大ランダム入力（以下、過大入力）及び長周期型ランダム入力を受ける免震構造の最適設計法を筆者がかつて開発した最適化手法^{1)~3)}に加えて、地震信頼性理論に基づき開発する。

本論の様に、地震信頼性解析をベースにした免震構造の最適設計は既往の研究において全くなく、筆者が一貫して論じている確率論的地震応答解析に新たな展望を与えるものと考えている。

2. 非定常ランダム入力モデルの構築

2.1 非定常ランダム入力のパラメータ評価

非定常ランダム入力モデルのパラメータ評価法は既往の文献4),5)に示されており、ここでは、そ

*建築学科

の評価法は簡単に述べることにする。詳細は文献 4),5)を参照されたい。

一般に地震入力波形 $f(\tau)$ の非定常スペクトルは次式のように表現できる。

$$S_f(\omega, t) = \frac{1}{T_d} \left| \int_{t-\frac{T_d}{2}}^{t+\frac{T_d}{2}} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|^2 \quad (1)$$

ここで、 T_d は非定常スペクトル計算のウィンドウ幅であり、(1)式に対応する非定常スペクトルモーメントは、次式のように定義する。

$$\lambda_j(t) = \int_0^\infty \omega^j S_f(\omega, t) d\omega \quad (2)$$

ここで、 $j = 0, 1, 2$ であり、地震入力モデルを非定常なパラメータをもつ 1 質点線形フィルターの出力過程とする。本報では、金井 - 田治見モデル⁶⁾(以下、KT モデル)を採用する。ランダム入力の非定常パラメータ ω_g, h_g は、(3)式に示す KT モデルによるスペクトルモーメント $\bar{\lambda}_j(t)$ が(2)式に等値することにより求める。

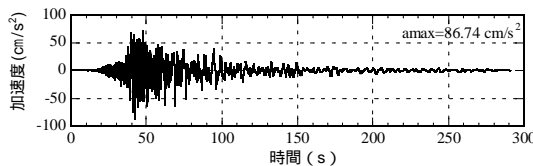
$$\bar{\lambda}_j(t) = \int_0^\infty \omega^j \frac{4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^4}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0 d\omega \quad (3)$$

また、地震入力の振幅包絡線関数 $\sigma_f(t)$ は次式のように与えられる。

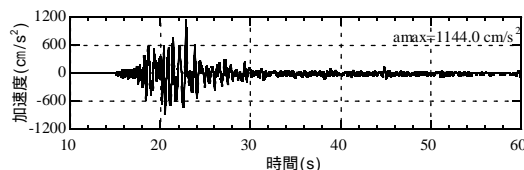
$$\sigma_f^2(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_f(\omega, t) d\omega = \frac{1}{\pi} \lambda_0 \quad (4)$$

2.2 非定常ランダム入力モデルの数値計算例

本論では、Tomakomai 型及び Ojiya 型の非定常ランダムパラメータを作成する。図 1、2 は苫小牧市、小千谷市で観測された地震波形とそのフリーエスペクトルを示している。図 2 より、十勝沖地震の卓越振動数は 0.29Hz でやや長周期であるが、新潟県中越地震では 1.44Hz であることが判る。図 3 には、2.1 節を基に計算した Tomakomai 型、Ojiya 型非定常ランダム入力モデルのパラメータが描かれている。

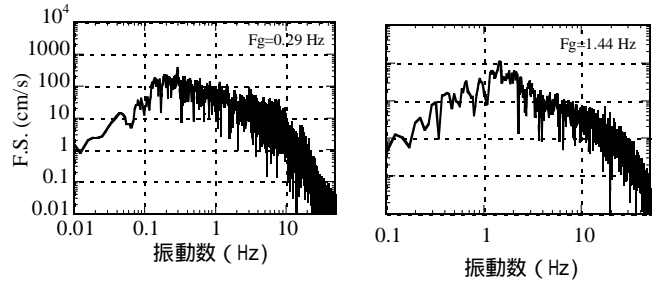


(a) 十勝沖地震苫小牧市 NS



(b) 新潟県中越地震小千谷市 NS

図 1 観測記録

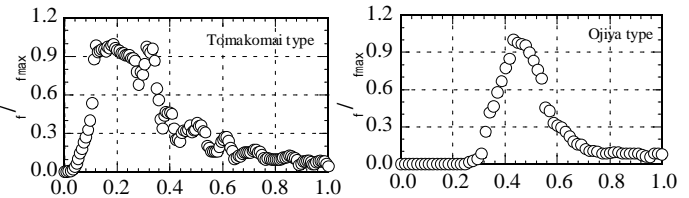


(a) 十勝沖地震 NS

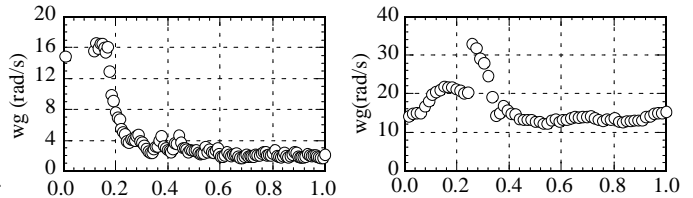
(b) 新潟県中越地震 NS

図 2 フーリエスペクトル

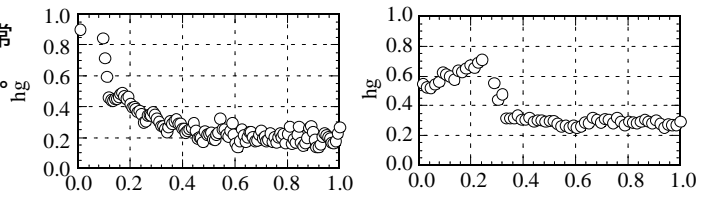
(a)図が無次元振幅包絡線関数 $\sigma_f / \sigma_{f \max}$ 、(b)図が卓越振動数 ω_g 、(c)図がスペクトルの形状係数 h_g である。図 3 より、 σ_f は強震付近を中心に単峰型を示し、 ω_g は Tomakomai 型の場合、単調減少するのに対し、Ojiya 型の場合 ω_g は 10 ~ 25rad/s を変動することが判る。また、形状係数 h_g の値は異なるが、類似した傾向を示している。



(a) 無次元振幅包絡線関数



(b) 卓越振動数



(c) 形状係数

図 3 非定常ランダム入力モデル

3. 解析手法

3.1 基礎免震系の運動方程式の誘導

上部構造物の復元力特性を Bi-linear 型、免震層は図 4 に示す積層ゴムと鋼棒ダンパーで構成される Bi-linear 型とし、それらの復元力特性に等価線形化⁷⁾されたランダム入力を受ける基礎免震系(以下、免震系)の運動方程式は次式のように与えられる。

