

武蔵工業大学

正会員 星谷 勝

首都高速道路公団

正会員 森河 久

(株)長大橋設計センター

正会員 友沢 武昭

"

正会員 ○高月 廣行

過去数年間に首都高速道路管内で記録された地震加速度データ46成分を解析した。記録は震度Ⅰ～Ⅳ, 最大加速度 60 gal 程度と小さく弱震記録である。地質は粘土又は粘土シルト質で、一部には埋土も含まれている。本研究はこれらの弱震記録から地震動強さ及び応答スペクトルを求め 2, 3 の考察を行った。次に耐震設計法の観点から、応答スペクトル作製に関する基礎的な検討を行った。

1 首都高速道路公団地震加速度記録の解析

1-1 使用データ

高速7号線及び高速5号線に於ける地表及び地中 5 m ~ 10 m 以内で観測されたデータを用いる。これらを記録毎に最大加速度 $|\ddot{y}|_{\max}$, スペクトル強度の $SI(0)$, $SI(0.2)$, 自乗平方根強度 I , ゼロ点交差率, 継続時間及び自己相関関数, パワースペクトルを算出した。

1-2 地震動強さを示すパラメーターの比較

地震動特性は周波数成分, 加速度レベル, 継続時間等の面から検討される。地震動強さは最も合理的なパラメーターを用いて示す必要があろう。過去には震度法の習慣から一般には最大加速度を用いてきたが, 時間経過とともに振幅レベルを変える加速度記録に対して, 固定した時間に於ける最大加速度を用いて地震動強さを示すのでは十分とは言えない。ここでは $|\ddot{y}|_{\max}$ の他に, スペクトル強度 $SI(\beta_0)$ 及び自乗平方根強度 I 等を計算し比較検討した。 I は Jagdish⁽¹⁾ の提案した I_{rms} を修正して, 次式で定義する。

$$I = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} (\dot{y})^2 dt} \cdot \sqrt{T_d} = \sqrt{\int_0^{T_d} (\dot{y})^2 dt} \quad (1)$$

すなわち加速度振幅レベルを継続時間の平方根 $\sqrt{T_d}$ で修正したものであり, T_d の影響を考慮した。なお I は地震加速度の全パワーの平方根になっている。

図1~3にパラメーター間の比較を示す。弱震記録を補うために強震記録をも併用した。 $|\ddot{y}|_{\max}$ と I の関係は図の通りであるが, 同じ加速度レベルでも, 継続時間の長いデータ(△印)は全体的に右側に又短いデータ(○印)は左側に分布する傾向がわかる。 I と $SI(0.2)$ の関係では, 継続時間の長短による影響は見られない。これは $SI(0.2)$ が応答を考慮したパラメーターであり, 当然継続時間の長短により最大応答量も変化し, それを $SI(0.2)$ は考慮しているからと思われる。 $|\ddot{y}|_{\max}$ と $SI(0.2)$ の関係では△印のデータ, すなわちゼロ点交差率が 5 ~ 10 回/sec (振道数領域で 2.5 ~ 5 Hz) のものは左上寄りに集まる傾向が見られる。これは周期で 0.4 ~ 0.2 sec の範囲に中心的なパワースペクトルがある波に相当する。しかるに $SI(0.2)$ ではこの範囲の周期特性の影響を十分に考慮しないことに帰因すると思われる。

以上の比較から最適なパラメーターを決めることは不可能に近いが, ここで新しく提案した I も他のパラメーターに比べて少なくとも同程度に地震動強さを示すと考えられる。最適パラメーターの決定には十分なデータ及び他の拘束条件(応答スペクトルと関連して)等も考慮して決める必要があろう。

1-3 応答スペクトルの検討

前項の I を用いて正規化した修正加速度応答スペクトル $\beta_I = S_A / I$ と従来の $|\ddot{y}|_{\max}$ で正規化し

た $\beta \ddot{y} = S_A / |\ddot{y}|_{\max}$ を各データ毎に算出し比較検討した。参考のため強震記録を用いた場合の結果も使用した。図4, 5は地上及び地中の弱震記録46成分より作った $\beta \ddot{y}$ と β_I の平均値, 標準偏差及び95%信頼区間の一例である。周期が0.1sec~1.0secでバラツキが少なく, 1.0sec以上の範囲で増大しているが, これは長周期部分にエネルギーの大きな波形とそうでないものが多く含まれているためであろう。両図を比較すれば $T > 0.5 \text{ sec}$ の範囲で β_I の信頼区間の方が小さく, $T > 0.5 \text{ sec}$ で両者はほぼ同程度になっている。

この事は応答スペクトルの正規化に用いるパラメーターとして I がやゝすぐれていることを示すのかもしれない。なお図5に於ける直線は Drenick⁽²⁾ による確定的上限値である。図6は強震記録を用いた場合との比較である。固有周期が1.0sec未満ではほとんど両者に差はないが2.0secあたりから, 本データ46成分の平均応答スペクトルが大きくなっていることが判った。図7は46成分中で地上及び地中記録の差を調べるために求めたものだが, ほとんど差は見られない。

1-4 結果

- (1) 修正 S_A 曲線の平均値とバラツキから, 地震動強さに I を使用した方が比較的良好い様である。
- (2) 弱震記録から求めた応答スペクトルでも $T < 0.5 \text{ sec}$ の範囲で強震記録のものと大差ない。 $T > 0.5 \text{ sec}$ での差は, むしろ今回使用したデータの地盤の性質の影響を受けていると思われる。

2 修正震度法に於ける応答スペクトルについて

2-1 基礎的考察

応答スペクトルを用いる現行の修正震度法では設計震度を

$$k = \alpha \cdot \beta \ddot{y} \quad (2)$$

より算出する。 α は重力の加速度の単位で示す定数で, 諸条件を考慮して決められている。応答倍率曲線 $\beta \ddot{y}$ の形状は, 使用した強震記録によって異なり, その為, 土研, 港湾研, 道路協会の指針又は米国 Housner の作成したものなど全て形状を異にしている。この点に関しては I を用いて

$k = (I/g) \beta_I$ としても同様であり, その統計的変動はさけられない。従って信頼度の高い設計には地震動強さ ($\ddot{y}/g$ 又は I/g) と $\beta \ddot{y}$ 又は β_I の統計的分布を推定し, その組合せとして k の統計的分布を決定する必要がある。しかし長周期成分に対しては測定, 誤差等で正確な推定は困難と思われる。

ここで修正震度法の転換として次式を用いて震度を決定する方法を考えよう。

$$k = (I/g) \beta_{\text{bound}} \quad (3)$$

ここで β_{bound} は統計量 β_I の確定的上限値である。(3)式に従えば応答スペクトルの作製は不必要であり, 単に理論的上限値 β_{bound} の開発と I/g に関する正確な分布形を解決すればよい。 I の確率分布を $F_I(i)$ とすれば $1 - F_I(I_p) = p$ を満足する I_p を用いて(3)式に代入すれば

$$k = (I_p/g) \beta_{\text{bound}} \quad (4)$$

より求めた震度 k は少なくとも危険度(確率)を p におさえた設計を可能としよう。

2-2 確定的上限値 β_{bound} の理論解析

Drenick⁽²⁾によれば1自由度系応答変位の最大値は

$$|X(t)|_{\max} \leq I \cdot N_x, \quad N_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt \quad (5)$$

ここで $h(t)$ は単位衝撃応答関数である。

従って加速度応答の最大値は

$$(2\pi/T_0)^2 |X(t)|_{\max} \leq I N_x (2\pi/T_0)^2$$

故に β_I の上限値は

$$\beta_{\text{bound}} = N_x (2\pi/T_0)^2 = 1.25 / \sqrt{T_0 \beta_0} \quad (6)$$

で与えられる。ここで T_0 = 固有周期, β_0 = 減衰定数 (6)式は図5に示すように, 非常に余裕のある上限値であり, (3)式に用いることは経済性から不可能であろう。(6)式の β_{bound} を与える

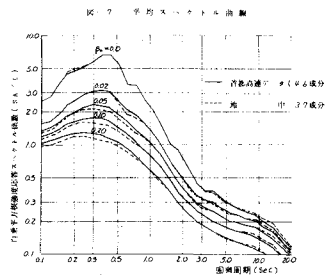
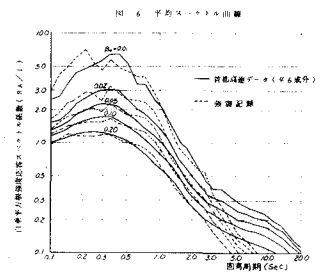
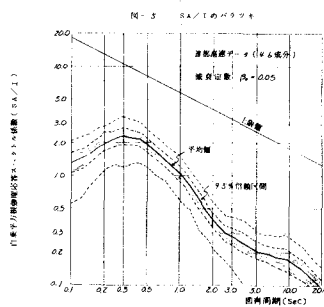
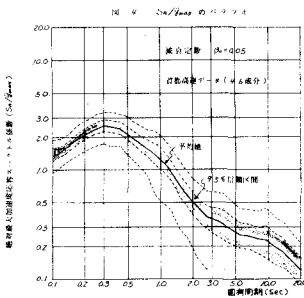
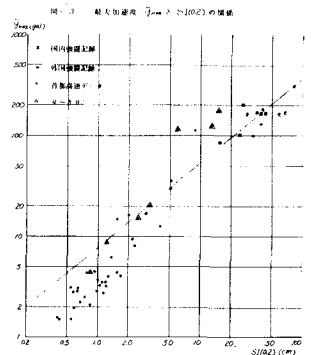
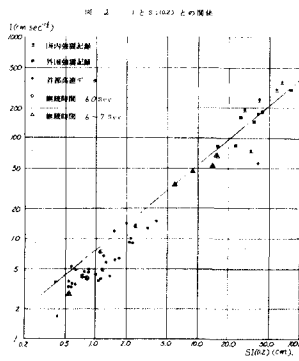
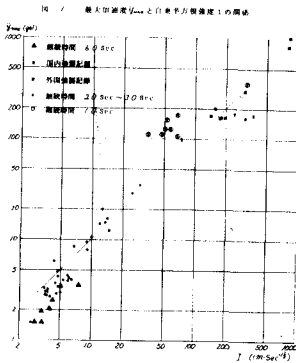
ような、いわば最悪入力は

$$\ddot{y}(t) = (2\beta_0^{1/2} \omega_0^{3/2} e^{\beta_0 \omega_0 t} / \bar{\omega}) \sin \bar{\omega} t, \quad \bar{\omega} = \omega_0 \sqrt{1 - \beta_0^2} \quad (7)$$

で与えられる。これは共鳴振動を起す調和函数 $\sin \bar{\omega} t$ とその振幅を指数函数で増大させる係数との積である。上限値の改良はこの事実を用いて、最悪入力 $\ddot{y}_c(t)$ を

$$\ddot{y}_c(t) = a e^{bt} \sin \bar{\omega} t, \quad a, b \text{ は未定定数} \quad (8)$$

と仮定し、 $\ddot{y}_c(t)$ が、多くの実際加速度記録（正規化したもの）を囲む包絡線の中にあるという条件、及び全パワーが1であるという条件を満足するような種々の a, b 値を求め、(8)式を入力としたときの最大応答を $\bar{y}$ に於ける上限値とすることで達成出来よう。さらに地震波の周波数特性は1周波数成分でなくパワースペクトルに示されるように広域に分布している事等を考慮することにより、さらに改良が可能とも考えられる。



参考文献

- (1) K. S. Jagadish : The Root Mean Square Intensity For Earthquake Ground Motions, Sym. on Earthquake Eng. Indian Soc. of Earthquake Tech. Nov. 14-16, 1970
- (2) M. Shinozuka : Maximum Structural Response to Seismic Excitations, EM, ASCE, Oct. 1970