

清水建設(株) 研究所 正会員 石井 清

1. はしがき

地震外力は構造物の設計にあたって最も取り扱いにくい外力の一つである。その理由は、地震外力が構造物に対して破壊的な外力となる反面、そのような地震はごくまれにしか発生しないからである。すなわち、地震外力の評価により、構造物の安全性および経済性が大きく左右されるためである。

このことから、構造物を最適に設計するためには、地震外力に対する構造物の信頼性を正確に評価する必要がある。

しかしながら、構造物の信頼性の評価にあたっては、地震外力のモデル化、構造物のモデル化、構造物の破壊基準の選定、また、モデルに含まれる各種パラメータの不確実性といった大きな問題がある。

しかし、本研究では、上記の観点から、現在使用されているデータにより、仮定あるいは理想化を通じて、構造物の信頼性オーダーをつかもうとしたものである。

信頼性オーダーの評価にあたっては、解析の結果得られる数値がBorgman(1963)が示したように、次のような特徴をもつように心掛けた。

- (1) 簡単で直観的な意味をもっていること。
- (2) 構造物の立地条件などの環境の適切な尺度となること。
- (3) 現在、手に入りのデータで解析可能なこと。

本研究では、以下の項目について検討を行なう。

- (1) 線形自由度系(SDF系)の信頼性オーダーの推定およびその考察。
- (2) 構造物の動的特性(固有周期)のバラツキによる信頼性オーダーへの影響を検討すること。

なお、本研究では、構造物の強度(耐力)を絶対最大加速度($\ddot{Y}|_{max}$)で評価した。

2. 解析方法

構造物の信頼性は星谷(1975)らによって以下のように定式化されている。

強度 S^* によって設計された構造物の使用年数中における信頼性 P_s は次式で与えられる。

$$P_s = P_s(s < S^* | Tu) = 1.0 - P_f \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 S は地震動に対する構造物の応答、 Tu は構造物の使用年数、 P_f は構造物の使用年数中に破壊する確率である。

(1)式は構造物の使用年数 Tu を N_T 期間に分割し、1期間には地震動が1回以上は生じしなと仮定すれば、

$$P_s = 1.0 - \sum_{n=1}^{N_T} P \left(N_T \text{ 期間に } n \text{ 期地震があり、そのうち少なくとも1回は } S > S^* \text{ の事象がおこる。} \right) \quad \text{----- (2)}$$

さらに、 N_T 期間に n 期地震がおこる確率と n 回のそれぞれの地震で $S > S^*$ となる事象の確率は独立であると仮定すれば、(2)式は、

$$P_s = 1.0 - \sum_{n=1}^{N_T} \left\{ P \left(N_T \text{ 期間に } n \text{ 期地震がおこる。} \right) \times P \left(n \text{ 回の地震のうち少なくとも1回は } S > S^* \text{ の事象がおこる。} \right) \right\} \quad \text{(3)}$$

となる。ここで、1期間中の地震動の生起確率を ρ 、また1回の地震動で $S > S^*$ の事象のおこる確率を p とすれば(3)式は、2項分布を用いて次式で表わされる。

$$P_s = 1.0 - \sum_{n=1}^{NT} \left[{}_{NT}C_n (p')^n (1-p')^{NT-n} \times \{1 - (1-p)^n\} \right] \quad \text{-----}(4)$$

(4) 式が 地震外力に対する使用年数 NT の構造物の信頼性である。

次に、1 期間中の地震動の生起確率 p' および 1 回の地震動で $S > S^*$ の事象がおこる確率 p について検討しよう。

1 期間中の地震動の生起確率 p' は、過去の地震動の統計的なデータが得られていれば、1 期間に生起する地震動の期待回数 ($p' < 1.0$) として与えられる。

また、1 回の地震動で $S > S^*$ の事象がおこる確率 p は S^* を確定値とすれば、 S の確率密度関数 $P_S(S)$ が推定できれば次式で与えられる。

$$p = \int_{S^*}^{\infty} P_S(S) dS \quad \text{-----}(5)$$

ここで 星谷 (1974) により 地震動に対する構造物の応答 S を地震動強 α と α で正規化された応答 $S\alpha$ の積；

$$S = \alpha \cdot S\alpha \quad \text{-----}(6)$$

で表わす。

(6) 式において、 α と $S\alpha$ が独立で α の確率密度関数 $P_\alpha(\alpha)$ と $S\alpha$ の確率密度関数 $P_{S\alpha}(S\alpha)$ が推定できれば (5) 式の p は次式で与えられる。

$$p = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S^*/\alpha}^{\infty} P_\alpha(\alpha) P_{S\alpha}(S\alpha) dS\alpha d\alpha \quad \text{-----}(7)$$

ここで $S\alpha$ の確率密度関数 $P_{S\alpha}(S\alpha)$ は 地震動波形のデジタル記録から、直接 構造物の応答 S を計算し $S\alpha = S/\alpha$ の分布から推定できる。また、 α の確率密度関数 $P_\alpha(\alpha)$ は 1 期間中の地震動の生起確率 p' の決定に用いたデータのマグニチュードおよび震央距離から地震動強 α の分布を推定することにより決定できよう。

なお、SDF 系の動特性を示すパラメター 本研究では 固有周期 T_0 に不確定性がある場合には、1 回の地震で $S > S^*$ の事象がおこる確率 p は、

$$p = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{S^*/\alpha}^{\infty} P_\alpha(\alpha) P_{S\alpha}(S\alpha(T_0)) P_{T_0}(T_0) dS\alpha d\alpha dT_0 \quad \text{-----(8)}$$

ここで $P_{T_0}(T_0)$ は SDF 系の固有周期 T_0 の確率密度関数である。

3. 解析例

解析例として、構造物の建設地点を東京 (緯度 35.68° 経度 139.75°) 地盤を沖積層とし、強度 S^* および使用年数 T_u をパラメターとして SDF 系の信頼性オーダーを検討する。

また 固有周期 T_0 がバラツキを有する場合として、平均値 0.3 sec 、標準偏差 0.06 sec の正規確率分布関数に従う確率変数として信頼性オーダーを検討する。

4. 使用地震データ

単位地震動強 α に対する構造物の応答の確率密度関数 $P_{S\alpha}(S\alpha)$ およびマグニチュード・震央距離から地震動強 α を推定するためのデータとしては、建設省土木研究所 (1968, 1970) により公表された地震資料の中から 28 成分を用いた。

データの選択基準としては、本研究の目的から次の点を考慮した。

(1) 観測地点の地盤状況が沖積層とする。

(2) マグニチュードおよび震央距離があまり片寄っていないこと。

使用した地震動データは上記の基準をほぼ満足していた。

なお、 P の確率密度関数としては、1次近似として正規確率分布関数を用いた。図1は使用地震動データから得られた平均値および標準偏差を示したものである。なお、正規化パラメータとしては、自乗平方根強度を用いた。また1期間中の地震動の生起確率 P および地震動強度 μ の確率密度関数 $P(\mu)$ の推定には東京で震度 V 以上と思われる地震46を用いた。(宇佐見/1970)ただし P の推定には1952年以後のものを用いた。

5. 解析結果

解析結果を 図2、図3、に示す。

図2からは、使用年数 $T_U = 50$ 年に対する構造物(減衰定数 $\beta = 0.05$)の信頼性オーダーに対して以下のことが考察できる。

(1) 構造物の強度 S^* を定数としたとき、構造物の信頼性 P_S は固有周期 $T_0 = 0.1 \text{ sec} \sim 1.0 \text{ sec}$ では、下側に凸、固有周期 $T_0 = 2.0 \sim 10.0 \text{ sec}$ では上側に凸である。

(2) 通常の設計震度 0.2 ($S^* = 200 \text{ gal}$) の構造物の信頼性 P_S は固有周期 $T_0 = 0.1 \sim 0.7 \text{ sec}$ では、 $0.15 \sim 0.20$ とまわめて低い。これに対して 固有周期 $T_0 = 2.0 \text{ sec}$ 以上では 0.85 以上であり、前者に比較するとはるかに信頼性が高い。

(3) 設計震度 0.2 で設計された短周期(固有周期 $T_0 = 0.1 \sim 0.7 \text{ sec}$)の構造物は、実際の地震時には、塑性応答をし、エネルギーを大幅に吸収しよう。このことから、実際の構造物の強度 S^* は 200 gal よりもはるかに大きい。この点を考慮して構造物の強度 S^* を 400 gal 、 600 gal および 800 gal とした場合、構造物の信頼性 P_S はそれぞれ、 $0.35 \sim 0.45$ 、 $0.6 \sim 0.7$ および $0.75 \sim 0.85$ となる。しかし構造物の強度を 800 gal とした場合でも、構造物の信頼性はあまり高くない。

(4) 一方、長周期(固有周期 $T_0 = 2.0 \text{ sec}$ 以上)の構造物に対しては、修正震度法では、設計震度の低減がみえる。この点を考慮して 構造物の強度 S^* を 50 および 100 gal としても、構造物の信頼性 P_S はそれぞれ 0.2 及び 0.5 以上となる。

(5) 長周期(固有周期 $T_0 = 2.0$ 以上)の構造物と短周期(固有周期 $T_0 = 0.1 \sim 0.7 \text{ sec}$)の構造物の信頼性を比較すれば、強度 $S^* = 100 \text{ gal}$ の長周期構造物の信頼性と強度 $S^* = 600 \text{ gal}$ の短周期構造物の信頼性がほぼ等しいことがわかる。

図3は、構造物の使用年数を $T_U = 75$ 年としたときの信頼性である。図3は図2の傾向とはほぼ同様である。

図4は、構造物の強度 S^* をパラメータとして、構造物の使用年数 T_U に対する構造物の信頼性 P_S を示したものである。実際は SDF系の固有周期 $T_0 = 0.3 \text{ sec}$ 、減衰定数 $\beta = 0.05$ の確定値の場合、破線は、SDF系の固有周期 T_0 を平均値 0.3 sec 、標準偏差 0.06 sec の正規確率分布に従う確率変数とした場合の結果である。図4からは、以下のことが考察できる。

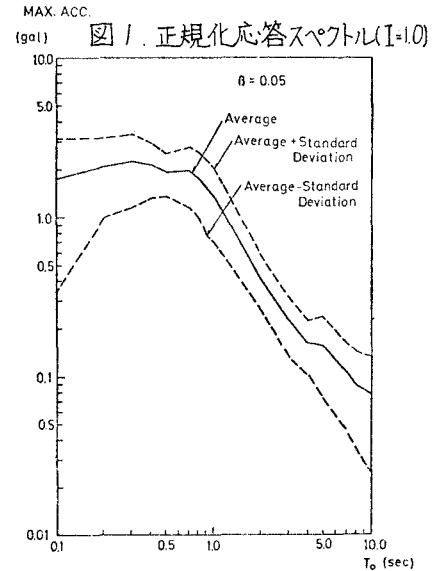


図1. 正規化応答スペクトル(I=1.0)

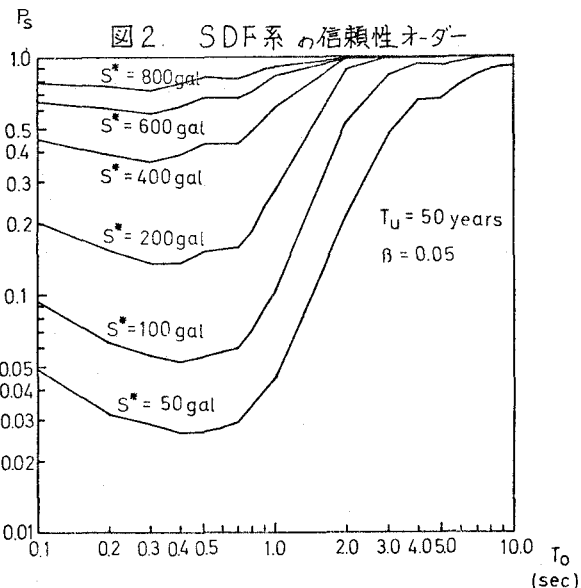


図2. SDF系の信頼性オーダー

(1) 構造物の信頼性 P_s は使用年数 T_u の増加につれて指数関数的に減少する。

(2) しかし、構造物の信頼性 P_s は構造物の強度 S^* が大きくなれば、ほぼ直線的に減少する。

(3) 構造物の信頼性 P_s は使用年数 $T_u = 10$ 年以下のときは、構造物の強度 S^* にかかわらず、あまり差がない。

また、構造物の信頼性 P_s は、構造物の強度 $S^* = 200 \sim 600 \text{ gal}$ において、使用年数 $T_u = 30 \sim 50$ 年において最も差がひろく。

(4) 固有周期 T_0 を確定値とした場合と確率変数とした場合、構造物の信頼性の差は構造物の強度 S^* が大きくなるほど大きくなる。

しかし、その誤差は、いづれの場合にも最高5%程度である。

6. あとがき

本研究では、仮定あるへは理想化を通じて、構造物の信頼性オーダーを推定・検討することを主題とした。本研究のアプローチにより、構造物の信頼性オーダーを把握することができ、しかし、以下に示す題目をさうに検討することにより、構造物の信頼性の評価はより厳密なものとならう。

(1) 地震動の生起過程の適切なモデル化。すなわち構造物の使用年数中にどのような規模の地震がどのように時間的に発生するかという問題の解決。

(2) 地震動波形のデータの適切な選択、あるいは地震動の波形の正確なモデル化。

(3) 構造物のモデル化。

(4) 構造物の破壊基準の問題。

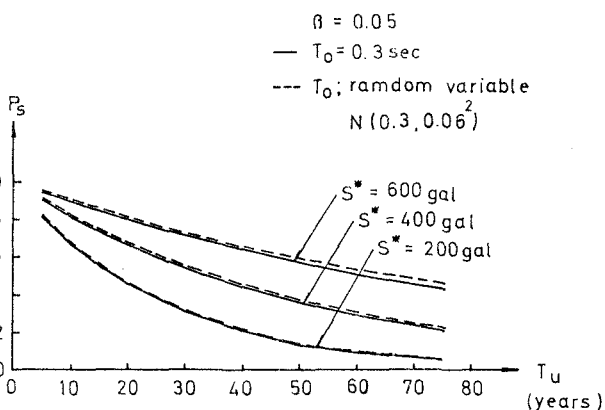
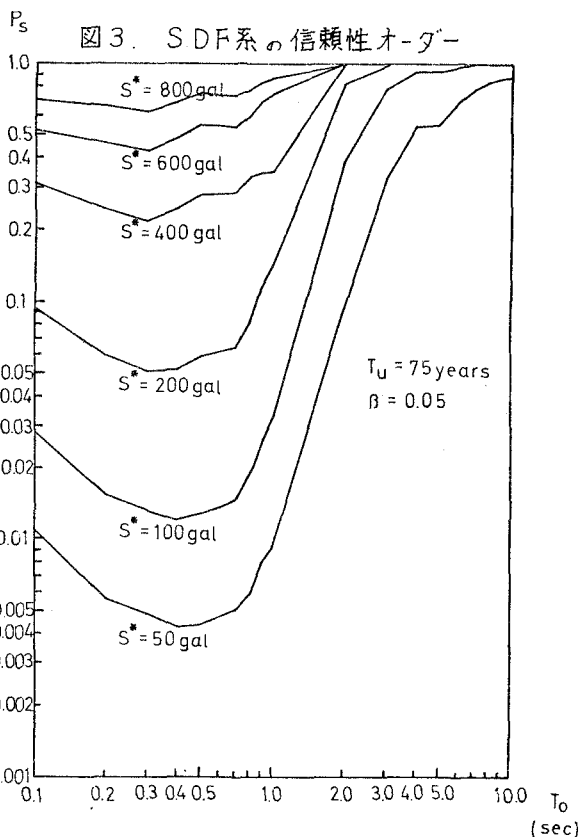


図4. SDF系の信頼性オーダー

参考文献

Borgman, L.E. (1963); Risk Criteria., ASCE, Vol. 89, No. 11, pp 1~35.

建設省土木研究所資料, (1968), No. 317, (1970), No. 175

星谷, 石井, (1975); 非定常周波数特性を有する最悪人工地震波, 土木学会論文報告集, No. 242,

星谷, 矢作, 柴田, 草野, (1974); 平均応答スペクトル作成に関する一考察., 土木学会論文報告集,

No. 232,

宇佐見, 久本 (1970); 東京の震度5以上の地震に襲われる確率., 地震研究所集報, Vol. 48,

pp 331~340.