寄 書

地震外力に対する構造物の
信頼性オーダー解析

清水建設(株)土木設計部

石 井 清

(昭和 50 年 9 月 20 日受理)

The Order Estimation of Structural
Reliability for Seismic Loads

Kiyoshi ISHII

Civil Engineering Design Department,
Shimizu Construction Co., Ltd.

(Received September 20, 1975)

§ 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つかいにくい外力の1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りうる反面、そのような地震動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適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定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、現在使用できうるデータにより、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、Borgaman (1963) が示したよう

に次のような特徴をもつようところがけた。

- (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、手に入る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った。

(1) 線形1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考慮すること。

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・石井 (1975) によつて、以下のように定式化されている。

強度 S^* によつ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。

$$P_s = P_s(S < S^* | T_u) = 1.0 - P_f \quad (1)$$

ここで、 S は地震動に対する構造物の応答、 T_u は構造物の使用年数、 P_f は構造物が使用年数中に地震外力により破壊する確率である。

(1) 式は、構造物の使用年数 T_u を N_T 期間に分割し、1 期間には地震動が 1 回以上は生起しないと仮定すれば次式で表わせる。

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

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、

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

となる。ここで、1 期間中の地震動の生起確率を p' 、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。

$$P_s = 1.0 - \sum_{n=1}^{N_T} [N_T C_n (p')^n (1-p')^{N_T-n} \times \{1 - (1-p)^n\}] \quad (4)$$

(4) 式が、地震外力に対する使用年数 N_T の構造物の信頼性である。(4) 式の定式化に際してはいくつかの仮定を設けているが、構造物の信頼性に対する一次近似としては十分であろう。

次に1期間中の地震動の生起確率 p' および1回の地震で $S > S^*$ の事象のおこる確率 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。

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

ここで星谷・他 (1974) により、地震動に対する構造物の応答 S を地震動強さ α と α で正規化された応答 S_α の積;

$$S = \alpha S_\alpha \quad (6)$$

で表わす。

(6) 式において、 α と S_α が独立で、 α の確率密度関数 $P_\alpha(\alpha)$ と S_α 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。

$$p = \int_0^{\infty} \int_{S^*/\alpha}^{\infty} P_\alpha(\alpha) P_{S_\alpha}(S_\alpha) dS_\alpha d\alpha \quad (7)$$

ここで、 S_α 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、構造系の応答 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さ α の分布を推定することにより決定できよう。

なお、SDF系の固有周期に不確実性がある場合には、1回の地震で $S > S^*$ の事象がおこる確率 p は、次式で与えられる。

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

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、強度および使用年数をパラメーターとして SDF 系の信頼性オーダーを検討する。

また、固有周期を平均値 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

単位地震動強さ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の強さ 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) で公表された地震資料の中から 28 成分を用いた。選択条件としては、本研究の目的から次の点を考慮した。

(1) 観測点の地盤状況は沖積層とする。

(2) マグニチュードおよび震央距離があまりかたよつていないこと。

なお、 S_α 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。

また、1期間中の地震動の生起確率 p' および地震動強さ α の確率密度関数 $P_\alpha(\alpha)$ を推定するためには、宇佐美 (1970) より東京で震度 V 以上と思われる地震 46 を用いた。ただし、 p' の推定には、1592 年以後のものを用いた。

§ 5. 解析結果

解析結果を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 1 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 $T_0=0.1 \sim 1.0$ sec では下側に凸、固有周期 $T_0=2.0 \sim 10.0$ sec では上側に凸である。

(2) 通常の設計震度 0.2 ($S^*=200$ gal) の構造物の信頼性 P_s は固有周期 $T_0=0.1 \sim 0.7$ sec では、0.15~0.20 ときわめて低い。これに対して、固有周期 $T_0=2.0$ 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 $T_0=0.1 \sim 0.7$ sec) の構造物は、実際の強震時には、塑性応答をし、エネルギーを大幅に吸収する。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

Fig. 1. Reliability order of SDF system for seismic loading.

Tokyo (latitude 35.68°, longitude 139.75°), Life time; 50 years.

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、0.35~0.45, 0.6~0.7 および 0.75~0.85 となる。しかし、構造物の強度 S^* を 800 gal とした場合でも、構造物の信頼性はあまり高くはない。

(4) 一方、長周期 (固有周期 $T_0=2.0$ sec 以上) の構造物に対しては、修正震度法では、設計震度の低減ができる。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, 0.5 以上となつている。

(5) 長周期 (固有周期 $T_0=2.0$ sec 以上) の構造

物と短周期 (固有周期 $T_0=0.1\sim0.7$ sec) の構造物の信頼性を比較すれば、強度 $S^*=100$ gal の長周期構造物の信頼性と強度 $S^*=600$ gal の短周期構造物の信頼性がほぼ等しいことがわかる。

Fig. 2 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。実線は、SDF 系の固有周期 $T_0=0.3$ 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。Fig. 2 からは以下のことが考察できる。

(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 $T_u=10$ 年以下のときには、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 $S^*=200\sim600$ gal においては、使用年数 $T_u=30\sim50$ 年においてもつとも差がひらく。

(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、いずれの場合にも最高 5% 程度である。

§ 6. あとがき

本研究では、仮定あるいは理想化を通じて、構造物の信頼性オーダーを指定・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る。しかし、以下に

Fig. 2. Variations of reliability order for life time.

示す項目をさら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ろう。

(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。

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

(3) 構造物のモデル化。

(4) 構造物の破壊基準の問題。

文 献

BORGMAN, L. E., 1963, Risk Criteria, ASCE., 89, 1-35.

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

星谷 勝・石井 清, 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, 1-14.

星谷 勝・矢作 枢・柴田定昭・草野直幹, 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, 17-24

宇佐美龍夫・久本壮一, 1970, 東京が震度V以上の地震に襲われる確率, 地震研究所集報, 48, 331-340.

地 震 第 2 組
第 28 卷 (1975) 486-489 頁

無限媒質中の有限断層によって生じる変位を計算する program

東京大学理学部地球物理学教室

佐 藤 良 輔

(昭和 50 年 9 月 22 日受理)

Machine Program to Compute Displacements
due to a Finite Moving Fault
in an Infinite Medium

Ryosuke SATO

Geophysical Institute, Faculty of Science,
University of Tokyo

(Received September 22, 1975)

無限媒質中の有限断層によつて生じる変位を, 2 重数値積分でなく 1 重積分で求める表現式を求めた

(SATO, 1975). 式はあつても, それを計算する program 作りが苦手の方がおられるかも知れないので, ここに, 変位を計算する program の基本の部分を示しておく. 現在手元にあるものは, だいたい以前に作ったものであるが, これに更に手を加えて完璧なものにしようとする, 往々にして意に反して改悪となつてしまうことがあるので, そのまま出すことにする. 従つて改良すべき余地は多々あるかと思うが, それは今後これを使用される方にお任せしたい.

source time function が rise time t_0 の ramp function である時, 変位 $u(t)$ は,

$$u(t) = U(t) - U(t - t_0)$$

で表わされる. ここに示す SUBROUTINE MOVE は, この $U(t)$ を計算するものである. 理論変位記象を計算する時の時間 step Δt を, t_0 の整数分の 1 ($t_0 = m\Delta t$) にしておけば, 上の $u(t)$ は, $U(t)$ が求まつていれば簡単に得られるし ($u(t_n) = U(t_n) - U(t_n - m)$), また他の source time function に対する変位も, 地震計の影響を考慮する時も, この $U(t)$ から容易に計算できる (convolution).

subroutine DTXY, UXYZ は, MOVE のなかで呼び出すものなので, MOVE の引数および COMMON にあらわれる変数についてだけ述べる事にする. 式については, SATO (1975) を参照されたい.

断層は, unilateral, bidirectional で, geometry は図に示した通りである. 断層の 4 隅から観測点までの距離を R_1, R_2, R_3, R_4 , 走時を T_1, T_2, T_3, T_4

Fig. 1. Geometry of the fault.