

I-140

基礎を考慮した立体フレームの動的信頼性解析

鹿島建設(株) ○右近 八郎

1. はじめに

構造物の地震時の安全性評価にあたっては、もっぱら地震という物理現象に含まれる不確定要因のために、統計的あるいは確率的取り扱いが合理的であり、その必要性が指摘されて久しい。特に長大橋梁に代表される、空間に大きな位置を占める構造物は時間域での不確定要因ばかりでなく空間域での不確定要因の影響を受けると考えられる。本報告は長大橋梁を想定した任意形の立体フレームモデルを解析対象として、その地震時の動的信頼性の評価を試みたものである。

2. 解析概要

入力評価(荷重解析)から信頼度判定(破壊解析)までを概記すれば、入力のモデル化では対象となる地盤を定常(均質)な確率場とみなし、Vanmarckeの提唱する確率場理論¹⁾(Random Fields Theory)を応用して、入力損失を評価した各入力点でのスペクトル密度関数および相互スペクトル密度関数を算定している。構造モデルは確定線形の立体フレームを採用している。応答特性の算定は、多点入力形式の運動方程式を基本として周波数応答解析により応答のスペクトル密度関数を求めている。最後に、信頼性の評価は、初期超過確率を算定することにより行っている。紙面の都合上詳細は割愛するが、以下にそれぞれの要点をまとめる。

(1). 入力の相互スペクトルマトリックス

$X(t_1, t_2)$ を二次元の均質な確率場、 $D=T_1 \times T_2$ を平均長(面積)とすれば、 $X(t_1, t_2)$ に極所平均なる操作を施して、もう一つの平均確率場と呼ばれるべき確率場 $X_D(t_1, t_2)$ が得られる。確率場 $X_{D_i}(t_1, t_2)$ および $X_{D_j}(t_1, t_2)$ の相互スペクトルマトリックス $[G_{ij}^I(\omega)]$ はVanmarckeの提唱する分散関数 $\gamma_\omega(T_1, T_2)$ を用いて次式で与えられる。

$$G_{ij}^I(\omega) = \frac{G(\omega)}{4D} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (-1)^k (-1)^l T_{1k} T_{2l} \gamma_\omega(T_{1k}, T_{2l}) \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここに、 $G(\omega)$ は固有のスペクトル密度関数であり、その他の記号は参考文献(1)を参照されたい。

(2). 応答の相互スペクトルマトリックス

多点入力形式の運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M_{AA} & M_{AB} \\ M_{BA} & M_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_A \\ Y_B \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{AA}^* & K_{AB}^* \\ K_{BA}^* & K_{BB}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_A \\ Y_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_B \end{Bmatrix} \quad \text{-----} \quad (2)$$

(2)式を $\{Y_A\}$ について解き、入力点 i で単位調和加速度入力を仮定して、その伝達関数 $\{H_i(\omega)\}$ を求める。各入力点について伝達関数を算定すれば、伝達関数マトリックス $[H_{ij}]$ が求められる。応答の相互スペクトルマトリックス $[G_{ij}^R(\omega)]$ は、 N を入力点の総自由度とすれば、次式で与えられる²⁾。

$$G_{ij}^R(\omega) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N H_{ik}^* G_{kl}^I(\omega) H_{lj} \quad \text{-----} \quad (3)$$

(3). 動的信頼性の算定

ここでは動的信頼性 $L_b(t_0)$ を、与えられた時間間隔 $[0, t_0]$ で確率場 $X_T(t)$ が与えられた閾値 b と交差しない確率(初期超過確率)として算定する。 $X_T(t)$ の極値の確率密度関数から閾値 b との交差の回数期待値 $v_{b,T}^+$ を求め、次式により $L_b(t_0)$ を算定する³⁾。

$$L_b(t_0) = \exp \left[-v_{b,T}^+ t_0 \frac{1 - \exp \left\{ -\left(\frac{n}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \delta_T Y \right\}}{1 - \exp \left(-\frac{Y^2}{2} \right)} \right] \quad \text{-----} \quad (4)$$

3. 数値解析例

図-1に解析モデルを示す。図-2と図-3に(1)式により算定した $G_{11}^J(\omega)$ および $G_{12}^J(\omega)$ の分散関数を示す。図-4と図-5に(3)式により算定した節点2および節点7での応答のスペクトル密度関数を示す。入力にはEl-centro(NS)波を採用した。図-6に(4)式により算定した節点7での応答の動的信頼性の様子を示す。表-1から表-3にそれぞれ各部材の軸力、曲げモーメントおよび応力度の動的信頼性の値を示す。

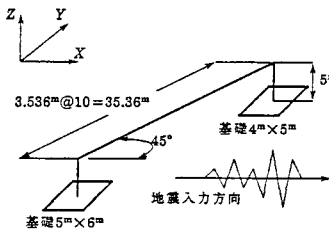


図-1 解析モデル

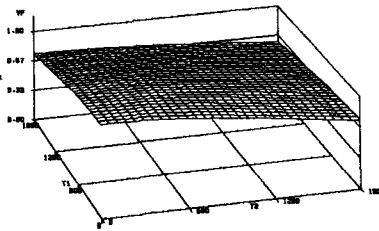


図-2 $G_{11}^J(\omega)$ の分散関数

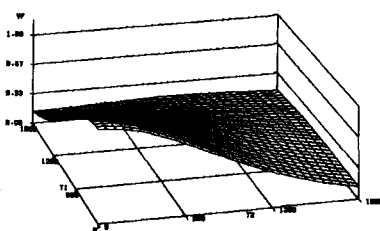


図-3 $G_{12}^J(\omega)$ の分散関数

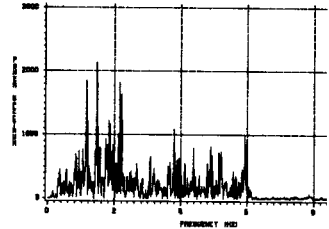


図-4 応答のスペクトル密度関数(節点2)

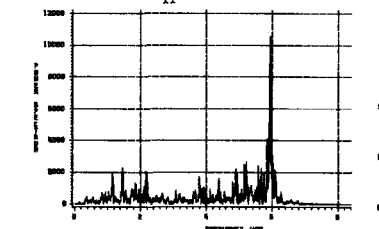


図-5 応答のスペクトル密度関数(節点7)

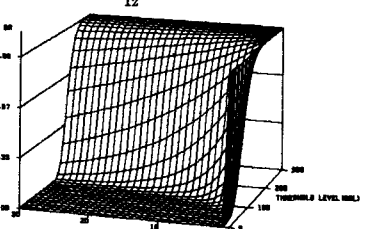


図-6 応答の動的信頼性(節点7)

表-1 軸力の動的信頼性

el.	b	10000.0(ton)	15000.0	20000.0
A-1		1.0	1.0	1.0
A-2		0.10352×10^{-4}	0.04570	0.97529
A-3		0.90805×10^{-4}	0.06891	0.97851
A-4		0.12647×10^{-4}	0.11275	0.98234
A-5		0.24678×10^{-4}	0.19527	0.98659
A-6		0.00340	0.31457	0.99023

表-2 曲げモーメントの動的信頼性

el.	b	10000.0(ton-m)	20000.0	30000.0
A-1		0.0	0.00125	0.62397
A-2		0.10380	0.99971	1.0
A-3		0.09504	0.99969	1.0
A-4		0.09836	0.99969	1.0
A-5		0.13958	0.99975	1.0
A-6		0.27045	0.99984	1.0

表-3 応力度の動的信頼性

el.	b	5000.0(ton/m ²)	10000.0	15000.0
A-1		0.0	0.10035×10^{-4}	0.01809
A-2		0.54847	1.0	1.0
A-3		0.99195	1.0	1.0
A-4		0.89674	1.0	1.0
A-5		0.31306	1.00000	1.0
A-6		0.06301	0.99998	1.0

4. おわりに

本論文で提案した解析手法は主に次の3点にその特徴を有している。

- (1) 入力から応答まで時間軸で表される波動(サンプル関数)を意識せずに母集団の統計的諸量のみで構造物の安全性評価を行う一貫した動的信頼性解析手法である。
- (2) 地震場を確率場とみなし、構造基礎による入力損失とその相関をそれぞれ算定し、各支点からの入力地震動の寄与率といったものを明確にしている。
- (3) 多点入力形式の周波数応答解析により構造物の応答特性を求め、直接応答のスペクトル特性を算定しており、簡潔な流れとなっている。

謝辞

本研究の遂行にあたり、御指導いただいたMIT(現在はPrinceton Univ.)のVanmarcke教授に深く感謝し、謝意を表します。

参考文献

- (1) Vanmarcke, E.H. : Random Fields : Analysis and Synthesis, the MIT press, Cambridge, Mass. and London, England, 1983
- (2) Lin, Y.K. : Probabilistic Theory of Structural Dynamics", McGraw-Hill, New York, 1967
- (3) Corotis, R.B., Vanmarcke, E.H. and Cornell, C.A. : First Passage of Non-stationary Random Process, EM. Div. ASCE, April, 1972