剛性のばらつきを考慮した梁の信頼性について†

西 橋 秀 一* 篠 塚 正 宜**

Reliability of Beams under Spatial Variation of Elastic Properties

by

Shuichi NISHIHASHI* and Masanobu SHINOZUKA**

The response variability of structures is generally caused by random loading and/or random structural properties. Recently, attempts to deal with interpretation of material properties as a problem of random fields have received considerable interest from engineers and researchers, and the finite element analysis combined with a Monte Carlo simulation technique or perturbation method has been proposed to evaluate the response variability of structures.

In this paper, the response variability of linear structures under spatial variation of elastic properties (in this case, flexibility) is investigated. Utilizing a Green's function formulation, the mean square statistics of statically determinate beams and, more importantly, statically indeterminate beams are determined in a simple integral form which can be readily evaluated by the numerical method in negligible computer time.

Using the fixed end beam model under uniform loading, the response variabilities of beam end moment and deflection were expressed in terms of random variables which were mutually correlated and were evaluated using the First-Order Second-Moment method. Due to the generality of the present approach, it seems feasible to treat a larger system (e. g. multi-bay / multi-story frames) with acceptable numerical effort. Finally, the safety indices for the beam midspan deflection and end moment were evaluated using two standard method (i. e. Lagrange's multiplier method and Advanced First-Order Second-Moment method).

Key words : Stochastic field, Response variability, Elasticity, Reliability index

1 はじめに

一般に、構造物の応答性状の変動は、構造物に作用する不規則荷重や構造部材の特性によるものである。近年、構造部材の特性値の空間的ばらつきを取り扱った研究が各所で行われており、モンテカルロ法を取り込んだFEM解析や摂動法を用いた解析に応用されている。

そこで、本研究では、不静定梁の剛性が軸方向に沿ってばらつく場合を想定し、グリーン関数を用いて応答の統計量を積分式の形で表して解析的に解くことにより、計算時間の大幅な削減を図ると共に、得られた限界状態関数（あるいは、破壊関数）を用いて信頼性指標を算定した¹⁾。

2 グリーン関数を用いた統計量の算定

2・1 場の定義

梁の柔性が材軸方向に沿ったガウシアン様不規則場 (Gaussian homogeneous stochastic field) であることを仮定する。この時、梁上の X 点における柔性は次式で表現できる。

$$\frac{1}{EI} = \frac{1}{E_0 I} [1 + f(x)] \quad (1)$$

ここに、 $1/E_0 I$ は柔性の平均値で、 $f(x)$ は平均値零の正規分布を持ち、その自己相関々数は次式で示される。

$$R_{ff}(x, y) = R_{ff}(x - y) = E[f(x)f(y)] \quad (2)$$

一例として、次の自己相関々数を考える。

$$R_{ff}(x, y) = \frac{1 - 3\left(\frac{x-y}{b}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{x-y}{b}\right)^2\right]^3} \sigma_{ff}^2 \quad (3)$$

式(3)の自己相関々数を Fig. 1 に示す。式(3)において、パラメータ b (相関距離) は自己相関々数の形をコントロールするパラメータである。 b が無限大となると完全相関を、 b が零に近づくとき無相関を意味する。また、 σ_{ff} はここでは 0.1 とした。

2・2 静定梁

梁の曲げに関する支配方程式は次式で示される。

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = p(x) \quad (4)$$

† 原稿受理 昭和62年12月12日 Received Dec. 12, 1987

* 大成建設(株) 東京都新宿区西新宿, Taisei Corporation, Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo

** 正会員 コロンビア大学, Columbia University, New York

Fig. 1. Correlation function $R_{ff}(x, y)$ as a function of the dimensionless parameter $(x-y)/b$.

ここに, w : 梁のたわみ

$p(x)$: 梁に作用する等分布荷重

x : 軸に沿った座標

式(4)を積分して

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = w'' = -\frac{1}{EI} M(x) \quad (5)$$

ここに, $M(x)$: x 点における曲げモーメント

この時, 積分定数を決定するための境界条件は, 梁の剛性には無関係であることと, 静定梁であるがゆえにモーメント分布は確定量であることから, 式(5)の右辺はただ一つの確率量(柔性 $1/EI$)のみからなる。

そこで, 式(5)に式(1)を代入すると, 次式が得られる。

$$w'' = \frac{M(x)}{E_0 I} [1 + f(x)] \quad (6)$$

式(6)より, w'' は正規分布を持つことを示し, これを積分して得られるたわみ量 $w(x)$ も正規分布であることがわかる。

そこで, $w(x)$ の平均値および共分散を求めるためにグリーン関数を用いて式(6)を解いた。

グリーン関数 $h(x, \bar{x})$ は, Dirac のデルタ関数を持つ微分方程式の解として定義される。

$$\frac{d^2}{dx^2} h(x, \bar{x}) = \delta(x - \bar{x}) \quad (7)$$

式(7)の積分により, 次式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} h(x, \bar{x}) &= a \quad (x \leq \bar{x}) \\ &= b \quad (x \geq \bar{x}) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし, Dirac のデルタ関数の性質より,

$$b - a = 1 \quad (9)$$

さらに, 式(8)を積分することにより, 次式が得られる。

$$\begin{aligned} h(x, \bar{x}) &= ax + c \quad (x \leq \bar{x}) \\ &= b(x - \bar{x}) + d(x \geq \bar{x}) \end{aligned} \quad (10)$$

式(9)と, $x = \bar{x}$ における連続条件および x に関す

る $h(x, \bar{x})$ の境界条件から, 定数 a, b, c, d がそれぞれ決定される。

片持梁の場合, 境界条件は, $h(0, \bar{x}) = h'(0, \bar{x}) = 0$ である。これらの条件および境界条件から, グリーン関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned} h(x, \bar{x}) &= 0 \quad (x \leq \bar{x}) \\ &= x - \bar{x} \quad (x \geq \bar{x}) \end{aligned} \quad (11)$$

また, 単純梁の場合, 境界条件は, $h(0, \bar{x}) = h(L, \bar{x}) = 0$ であり, グリーン関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned} h(x, \bar{x}) &= x \left(\frac{\bar{x}}{L} - 1 \right) \quad (x \leq \bar{x}) \\ &= \bar{x} \left(\frac{x}{L} - 1 \right) \quad (x \geq \bar{x}) \end{aligned} \quad (12)$$

ここに, L は梁の長さである。

つぎに, グリーン関数を用いて静定梁のたわみ $w(x)$ は次の積分式で表現できる。

$$w(x) = -\int_0^L h(x, \bar{x}) \frac{M(\bar{x})}{E_0 I} [1 + f(\bar{x})] d\bar{x} \quad (13)$$

この時, $w(x)$ の期待値は

$$E[w(x)] = -\frac{1}{E_0 I} \int_0^L h(x, \bar{x}) M(\bar{x}) d\bar{x} \quad (14)$$

式(13), 式(14)により, たわみ $w(x)$ の共分散関数が次式のように導かれる。

$$\begin{aligned} R_{ww}(x, y) &= \frac{1}{E_0^2 I^2} \int_0^L \int_0^L h(x, \bar{x}) h(y, \bar{y}) \\ &\quad \cdot M(\bar{x}) M(\bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y} \end{aligned} \quad (15)$$

この式を利用して, たわみの分散値の最大値を $f(x)$ の空間相関の知識なしに(変動係数¹⁾だけから求めることができることを指摘しておきたい。

2・3 不静定梁

N 次不静定構造物の解法においては, 通常 N 個の境界条件を満たすために N 個の不静定力 B_i ($i=1, 2, \dots, N$) を導入する。ここで, i 番目の境界条件を次式で表す。

$$V(x_i) = V_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (16)$$

$V(x_i)$ は, たわみやたわみ角を示す。この時, 不静定力は次に示す N 個の線形方程式により導くことができる。

$$V_0(x_i) + \sum_{k=1}^N B_k V_k(x_i) = V(x_i) = V_i \quad (17)$$

ここに, k : 不静定力の番号

i : 境界条件の番号

式中, $V_k(x_i)$ は関連する静定構造系の解として得られる。したがって, 不静定力 B_k は正規分布を持つ $V_0(x_i)$, $V_k(x_i)$ の関数で表現される。例えば, 梁のたわみ $w(x)$ は式(17)を用いて次式で表される。

$$w(x) = w_0(x) + \sum_{k=1}^N B_k W_k(x) \quad (18)$$

$w_0(x)$, $w_k(x)$ は, それぞれ静定構造系におけるた

Fig. 2. Fixed-end beam with uniform load.

わみおよび単位の不静定力が作用する時の不静定構造系のたわみである。 $w(x)$ は、もはや正規分布を持つとは限らない。式(18)の $w(x)$ は確率変数の関数であるので、その統計量はFOSM法やモンテカルロ法で容易に求めることができる。

3 解 析 例

上述の考え方の例として、Fig. 2に示すような等分布荷重 p を載荷した両端固定梁を想定する。不静定次数は2である。

この構造系の解法として、同図下に示す様に静定構造系としての片持梁に、等分布荷重 p および不静定力 B_1 、 B_2 が作用しているとして梁のたわみを求めることができる。等分布荷重 p および単位の不静定力 B_1 、 B_2 による梁の曲げモーメントは、次式で示される。

$$M_0(x) = -\frac{p}{2}(L-x)^2 \quad (19)$$

$$M_1(x) = -(L-x) \quad (20)$$

$$M_2(x) = -1 \quad (21)$$

この時、梁の右端のたわみは、式(13)を用いて次式のように表すことができる。

$$w_0(L) = \frac{p}{2E_0I} \int_0^L (L-\bar{x})^3 (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (22)$$

$$w_1(L) = \frac{1}{E_0I} \int_0^L (L-\bar{x})^2 (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (23)$$

$$w_2(L) = \frac{1}{E_0I} \int_0^L (L-\bar{x}) (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (24)$$

また、同様にしてたわみ角は、

$$w'_0(L) = \frac{p}{2E_0I} \int_0^L (L-\bar{x})^2 (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (25)$$

$$w'_1(L) = \frac{1}{E_0I} \int_0^L (L-\bar{x}) (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (26)$$

$$w'_2(L) = \frac{1}{E_0I} \int_0^L (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (27)$$

不静定構造物の任意点におけるたわみとたわみ角は式(17)より、次式で表現できる。

$$w(x) = w_0(x) + B_1 w_1(x) + B_2 w_2(x) \quad (28)$$

$$w'(x) = w'_0(x) + B_1 w'_1(x) + B_2 w'_2(x) \quad (29)$$

両端固定梁の端部の境界条件は、 $w(L) = w'(L) = 0$ である。

$$w(L) = w_0(L) + B_1 w_1(L) + B_2 w_2(L) = 0 \quad (30)$$

$$w'(L) = w'_0(L) + B_1 w'_1(L) + B_2 w'_2(L) = 0 \quad (31)$$

これにより、不静定力 B_1 、 B_2 が次式のように得られる。

$$B_1 = \frac{w'_0(L)w_2(L) - w_0(L)w'_2(L)}{w_1(L)w'_2(L) - w'_1(L)w_2(L)} \quad (32)$$

$$B_2 = \frac{w_0(L)w'_1(L) - w_1(L)w'_0(L)}{w_1(L)w'_2(L) - w'_1(L)w_2(L)} \quad (33)$$

また、任意点での片持梁のたわみは、式(22)~式(24)と同様にして次式で表される。

$$w_0(x) = \frac{p}{2E_0I} \int_0^x (x-\bar{x})(L-\bar{x})^2 (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (34)$$

$$w_1(x) = \frac{1}{E_0I} \int_0^x (x-\bar{x})(L-\bar{x}) (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (35)$$

$$w_2(x) = \frac{1}{E_0I} \int_0^x (x-\bar{x}) (1+f(\bar{x})) d\bar{x} \quad (36)$$

したがって、式(28)より両端固定梁の任意点でのたわみは、次式で示される。

$$\begin{aligned} w(x) &= w_0(x) + \frac{w'_0(L)w_2(L) - w_0(L)w'_2(L)}{w_1(L)w'_2(L) - w'_1(L)w_2(L)} w_1(x) \\ &\quad + \frac{w_0(L)w'_1(L) - w_1(L)w'_0(L)}{w_1(L)w'_2(L) - w'_1(L)w_2(L)} w_2(x) \\ &= X_1 + \frac{X_3X_5 - X_2X_7}{X_4X_7 - X_5X_6} X_6 + \frac{X_2X_5 - X_4X_3}{X_4X_7 - X_5X_6} X_9 \end{aligned} \quad (37)$$

ここに、 $X_i (i=1, \dots, 9)$ はそれぞれ $w_0(x)$ 、 $w_0(L)$ 、 $w'_0(L)$ 、 $w_1(L)$ 、 $w'_1(L)$ 、 $w_2(L)$ 、 $w'_2(L)$ 、 $w_1(x)$ 、 $w_2(x)$ を示す。

これは、式の形を簡明にすることと、これらが正規分布を持つ確率変数であることを示すためである。

これら $X_1 \sim X_9$ の統計量は、次のようにして求めることができる。まず、九つの確率変数の期待値は、以下ようになる。

$$E[w_0(x)] = \frac{p}{24E_0I} [x^4 + 6x^2L^2 - 4x^3L]$$

$$E[w_0(L)] = \frac{pL^4}{8E_0I}$$

$$E[w'_0(L)] = \frac{pL^3}{6E_0I}$$

$$E[w_1(L)] = \frac{L^3}{3E_0I}$$

$$E[w'_1(L)] = \frac{L^2}{2E_0I}$$

$$E[w_2(L)] = \frac{L^2}{2E_0I}$$

$$E[w'_2(L)] = \frac{L}{E_0I}$$

$$E[w_1(x)] = \frac{1}{6E_0I} [3x^2L - x^3]$$

$$E[w_2(x)] = \frac{x^2}{2E_0I} \quad (38)$$

また、上記九つの確率変数の共分散マトリックスは

9×9 のマトリックスである。ここでは、以下に示す省略形を用いて、共分散マトリックス C のいくつかの項を示すことにする。

省略形：

$$b_1(x, \bar{x}) = \frac{p}{2E_0I}(x - \bar{x})(L - \bar{x})^2$$

$$b_2(x, \bar{x}) = \frac{1}{E_0I}(x - \bar{x})(L - \bar{x})$$

$$b_3(x, \bar{x}) = \frac{1}{E_0I}(x - \bar{x})$$

$$b_4(x, \bar{x}) = \frac{p}{2}b_2(L, \bar{x}) = \frac{p}{2E_0I}(L - \bar{x})^2$$

$$b_5 = \frac{1}{E_0I} \quad (39)$$

共分散マトリックス：

$$\sigma_{x1}^2 = \int_0^x \int_0^x b_1(x, \bar{x}) b_1(x, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\rho_{12} \sigma_{x1} \sigma_{x2} = \int_0^x \int_0^L b_1(x, \bar{x}) b_1(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\rho_{13} \sigma_{x1} \sigma_{x3} = \int_0^x \int_0^L b_1(x, \bar{x}) b_3(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\rho_{15} \sigma_{x1} \sigma_{x5} = \int_0^x \int_0^L b_1(x, \bar{x}) b_5(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\sigma_{x2}^2 = \int_0^L \int_0^L b_1(L, \bar{x}) b_1(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\rho_{27} \sigma_{x2} \sigma_{x7} = \int_0^L \int_0^L b_1(L, \bar{x}) b_5(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\rho_{28} \sigma_{x2} \sigma_{x8} = \int_0^L \int_0^L b_1(L, \bar{x}) b_2(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\sigma_{x3}^2 = \int_0^L \int_0^L b_4(L, \bar{x}) b_4(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\sigma_{x4}^2 = \int_0^L \int_0^L b_2(L, \bar{x}) b_2(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\sigma_{x7}^2 = \int_0^L \int_0^L b_5(L, \bar{x}) b_5(L, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$$

$$\sigma_{x9}^2 = \int_0^x \int_0^x b_3(x, \bar{x}) b_3(x, \bar{y}) R_{ff}(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y} \quad (40)$$

式(40)の積分は、式(3)の自己相関々数を用いて解析的に求めることができる。しかしながら、式(37)の $w(x)$ の統計量を求める場合には、適当な近似解法が必要である。代表的なものとして、FOSM 法がある。これは、式(37)で示される $w(x)$ の式を $X_1 \sim X_9$ の平均値の回りでテーラー展開し、共分散マトリックスを用いて、平均値および分散を近似的に求めるものである。Fig. 3, Fig. 4 は、式(3)の自己相関々数を用いて Fig. 1 に示す両端固定梁の端のモーメントおよび中央点のたわみの変動係数 (C.O.V.) を相関距離 b の関数として求めたものである。比較として、共分散マトリックス C が対角マトリックス C' になるように変数変換を施した後、モンテカルロ法を用いて変動係数を求めた結果を Fig. 3, Fig. 4 に合わせて示す。また、以後の解析では、 $b/L=0.5$ とした時の平均値および共分散マトリックスを用いている。

Fig. 3. Coefficient of variation of end moment of the fixed-end beam as a function of correlation parameter b .

Fig. 4. Coefficient of variation of midspan deflection of the fixed-end beam as a function of correlation parameter b .

4 信頼性指標 β

これまで述べたように、等分布荷重が作用する両端固定梁の不静定力 β_1, β_2 およびたわみ $w(x)$ を九つの確率変数で示すことができた。ここで端部の応力およびたわみの限界状態 (limit state condition) がわかっている場合、信頼性指標 β を算定することができる。信頼性指標 β を算定する手法として、ここでは代表的な Lagrange の乗数法を用いた解法²⁾と Hasofer & Lind の提案した最適化手法³⁾を用いた。Lagrange の乗数法を用いた解析は、標準正規分布 $N(0, 1^2)$ を持つ独立な確率変数ベクトル Y' の場において、次に示す最適化問題として取り扱われる。

$$\begin{cases} \text{最小化: } r = (Y'^t, Y')^{1/2} \\ \text{条件: } g(Y') = 0 \end{cases} \quad (41)$$

ここに、 $g(\cdot)$ は構造系の機能状態を示す目的関数 (limit State function)、添字 t は転置行列を示す。上式の問題を解くために、Lagrange の乗数 λ を導入した関数 L を考える。

$$L = (Y'^t Y')^{1/2} + \lambda g(Y') \quad (42)$$

式(42)を Y'_i と λ で偏微分して零と置いた式を連立

で解くことにより, 最適解 Y^* が得られる. つまり,

$$\frac{\partial L}{\partial Y_i} = \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad (43)$$

得られた最適解 Y^* より信頼性指標 β が次のように計算できる.

$$\beta = (Y^{*T} Y^*)^{1/2} \quad (44)$$

Hasofer & Lind の最適化手法は, 上と同様に $N(0, 1^2)$ の独立な確率変数ベクトル Y' に対して, 原点から限界状態曲面 $g(Y')=0$ までの距離を信頼性指標 β と定義し, 限界状態曲面上の各点に対する β を繰り返し計算しながら, β の最小値を見つけ出す手法である. 繰り返し計算の手法として, Rackwitz と Fiessler のアルゴリズムを用いた. Fig. 5 に示す様に, 繰り返し回数 m ステップ目の点 $Y^{(m)}$ における限界状態曲面との接平面と, $g(Y')=0$ の平面との交線を求め, 原点から交線への最短距離にある点を次の計算点とし, ある点に収束するまで繰り返す. 接平面と $g(Y')=0$ との交線を求める式と次の計算点を求める式を次に示す.

Fig. 5. Illustration of solution method for the design point (Referred from 3).

$$g(Y^{(m)}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g(Y^{(m)})}{\partial Y'_i} (Y'_i - Y'_i{}^{(m)}) = 0 \quad (45)$$

$$Y'^{(m+1)} = (Y'^{(m)} \alpha^{(m)}) \alpha^{(m)} + \frac{g(Y'^{(m)})}{|\nabla g(Y'^{(m)})|} \alpha^{(m)} \quad (46)$$

ここに, $\alpha^{(m)}$: 方向余弦ベクトル

$$\alpha^{(m)} = - \frac{\nabla g(Y'^{(m)})}{|\nabla g(Y'^{(m)})|}$$

$\nabla g(Y'^{(m)})$: グラディエントベクトル

$$\nabla g(Y'^{(m)}) = \left(\frac{\partial g(Y'^{(m)})}{\partial Y'_1}, \dots, \frac{\partial g(Y'^{(m)})}{\partial Y'_n} \right)$$

以上二つの手法は, 標準正規分布 $N(0, 1^2)$ を持つ独立な確率変数に対してなので, 互いに独立でない確率変数の場合には, $N(0, 1^2)$ となる独立な確率変数に変換してやれば良い. この操作は, 直交変換マトリックスを用いて次式のように行う.

$$X = [\sigma_x] T [\sqrt{\lambda}] Y' + [\mu_x] \quad (47)$$

ここに, X : 互いに独立でない確率変数ベクトル

$[\sigma_x], [\mu_x]$: X の標準偏差, 平均値マトリックス

T : 直交変換マトリックス

$[\sqrt{\lambda}]$: 共分散マトリックス C の固有値マトリックス

以上の手法を用いて, 先に述べた両端固定梁の端モーメント M と中央点たわみ $w(x=L/2)$ の信頼性指標を求めた. 抵抗モーメントおよび最大たわみとして, 次式で計算される値をそれぞれ用いた.

$$M = E[M] + 3\sigma_M \quad (48)$$

$$w_R = E[w_{L/2}] + 3\sigma_{w_{L/2}} \quad (49)$$

M および $w_{L/2}$ の目的関数は, 以下に示される.

$$g_M(X) = M_R - M = M_R - \frac{X_2 X_5 - X_4 X_3}{X_4 X_7 - X_5 X_6} X_8 \quad (50)$$

$$g_w(X) = w_R - w_{L/2} = w_R - \left\{ X_1 + \frac{X_3 X_6 - X_2 X_7}{X_4 X_7 - X_5 X_6} X_8 + \frac{X_2 X_5 - X_4 X_3}{X_4 X_7 - X_5 X_6} X_9 \right\} \quad (51)$$

計算の結果 $g_M(x)$, $g_w(x)$ に対する信頼性指標 β_M , β_w は, それぞれ 2.53, 2.83 となり Lagrange の乗数法および Hasofer & Lind の方法とも当然のことであるが同じ結果となった.

5 ま と め

梁の剛性が軸に沿って変化する場合の応答量をグリーン関数を用いて解析的に導き出した. また, 両端固定梁の例題を用いて, 応答量の統計量を $f(x)$ を含む単純な積分の形で表されるいくつかの確率変数の関数として表現し計算時間の削減を図ると共に, 得られた統計量より信頼性指標を算出した. 以上より, さらに大きなシステム(フレーム等)についても, グリーン関数を導き出すことにより, FEM あるいはモンテカルロ法に要する計算時間を大幅に減らすことができると考えられる.

(昭和62年12月4日 第1回構造物の安全性および信頼性に関する国内シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) A. Kardara, C. G. Bucher, S. Nishihashi and M. Shinozuka, Structural Response Variability III-Technical Report, Dept. of Civil Engg. and Engg. Mech., Columbia University (1987).
- 2) M. Shinozuka, Basic Analysis of Structural Safety, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 3, 109, p. 721 (1983).
- 3) H. D. Madsen, S. Krenk and N. C. Lind, "Methods of Structural Safety", p. 50 (1986) Prentice Hall, Inc.
- 4) A. H. S. Ang and W. H. Tang, "Probability Concepts in Engineering Planning and Design" (Vol. II), p. 354 (1984) John Wiley & Sons, Inc.