

直杭式棧橋の信頼性指標の応答曲面法等 による評価に関する研究

A STUDY ON THE EVALUATION OF RELIABILITY INDICES OF PILE SUPPORTED WHARVES BY USE OF RESPONSE SURFACE METHOD

長尾 毅¹・藤森修吾²・築地健太郎³

Takashi NAGAO, Shugo FUJIMORI and Kentarou TSUIJI

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²日本工営株式会社(〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)

³正会員 若築建設株式会社(〒153-0064 東京都目黒区下目黒2-23-18)

The reliability-based design method was recently introduced to the technical standard for port and harbor facilities. The standard method is partial factors method, however, other methods that evaluate the reliability index directly can also be applied. Taking the design of pile supported wharves as an example, performance function is implicit and the application of the methods that evaluate the reliability index directly is difficult to the practical design. This study aims at clarifying the applicability of response surface method for pile supported wharves. As the performance function can be evaluated explicitly by the method, the calculation of reliability indices is comparatively easy. The applicability of first-order second-moment method is also discussed.

Key Words: reliability index, response surface method, first-order second-moment method, pile supported wharf

1. はじめに

港湾基準の改正¹⁾に伴い、棧橋のレベル1地震動に対する耐震性能照査は部分係数法を用いることが標準的となった²⁾。部分係数法は簡易な方法であるものの、FORM (First-Order Reliability Method)³⁾等の、より正確な方法と比較すると誤差を含むものである。従って、本来は、より正確な方法で破壊確率を制御することが望ましい。性能関数が陽な形式で求められる場合には、部分係数法よりも高度な方法の適用は比較的容易である。しかしながら、本研究で対象とする棧橋の性能照査について考えると、性能照査は骨組み解析の結果をもとに行われるため、信頼性解析を実施するためには、骨組み解析に信頼性指標の評価アルゴリズムを組み込む必要がある。設計実務の現場を考えると、骨組み解析のアプリケーションは実行形式のみを保有している場合がほとんどであろう。そのような場合には信頼性解析の評価アルゴリズムの組み込みは困難である。

このことは、単に部分係数法以外の信頼性設計法の適用が困難であることのみを示すものではなく、ライフサイクルコスト最小化などの、性能設計体系において許容されるはずの、より広範囲の方法の適用が困難であることを意味する。

このような背景のもと、本研究では、棧橋のレベル1地震動に対する耐震性能照査を対象として、骨組み解析に信頼性指標の評価アルゴリズムを組み込むことなく、より簡易に信頼性指標を評価する方法について検討を行った。具体的には、棧橋の確定的な骨組み解析結果をもとにして応答曲面法(Response Surface Method)および1次近似2次モーメント法(FOSM: First-Order Second-Moment Method)を適用して信頼性指標を評価し、骨組み解析に信頼性指標の評価アルゴリズムを組み込んだ場合の信頼性指標との比較を行い、精度について検証した。

2. 応答曲面法とFOSM

信頼性指標 β は、確率変数が独立な正規確率変数の場合には式(1)によって得られる。

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\sum_i^n \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_{X^*} (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_{X^*}^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (1)$$

ここに、 σ_y ：鋼管杭の降伏強度、 k_h ：水平地盤反力係数、 K ：作用震度、 σ_d ：鋼管杭に発生する応力度（ $\sigma_d = N/A \pm M/Z$ ）、 N ：杭の軸方向力、 A ：杭の断面積、 M ：杭の曲げモーメント、 Z ：杭の断面係数

信頼性解析に用いた確率変数は、鋼材降伏強度、水平地盤反力係数、作用震度で表-2に示す統計量と分布形を設定した。これらの確率変数は、長尾ら²⁾の研究を参考に設定した。

FORMpによる信頼性指標の評価は、震度が大きく、応答が弾性限界を越えても、バイリニアのM- ϕ 関係から得られる断面力を用いて信頼性解析を行っている。FORMpによる信頼性指標を震度 $K=0.157, 0.202, 0.282$ の場合を例にして、断面係数に対する信頼性指標の関係を示すと図-2のようになる。断面係数の増加に伴って信頼性指標は増加するが、両者は線形の関係にはないことが分かる。

表-2 信頼性解析に用いた確率変数

確率変数	平均値	変動係数	分布形
鋼材降伏強度(SKK490)	377 (N/mm ²)	8%	正規
水平地盤反力係数	2000N (kN/m ³)	75.5%	対数正規
作用震度	—	20%	対数正規

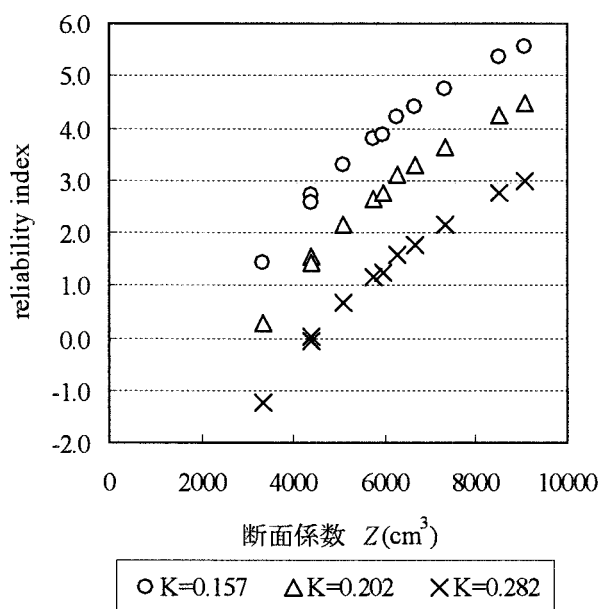


図-2 断面係数に対する信頼性指標の関係

(2) 応答曲面法による信頼性指標

応答曲面法による信頼性指標の評価では、まず、一般的な方法である式(3)の適用性を確認した。検討は、表-1に示したケース1について、作用震度の平均値が $K=0.157$ の条件とした。この条件における

FORMpによる信頼性指標は1.425であり、破壊確率に換算すると0.077である。一方、式(3)を用いて得られた性能関数は以下の通りである。

$$G = -13.4k_h^2 + 59.4k_hK + 37.0k_h - 1666K + 0.992\sigma_y - 56.1 \quad (5)$$

得られた信頼性指標は1.382であり、破壊確率に換算すると0.083である。式(3)を用いる応答曲面法は、FORMpによる信頼性指標と比較して比較的精度が悪いと判断できる。式(5)を見ると、鋼材降伏強度 σ_y の係数は1に近い値となっているが、式(4)を見ても明らかなように、この項の係数は本来1であるべきである。この他の項についても、適切ではない可能性がある。そこで、実際の栈橋の問題に対応した応答曲面を得るべく、再検討した。

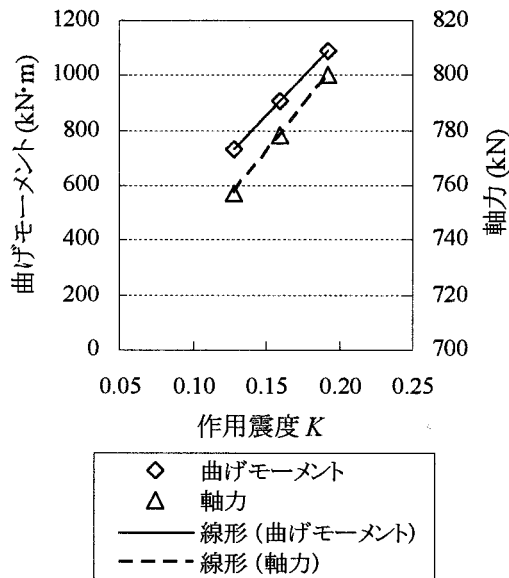
式(4)より、耐力については1次であり、問題となるのは作用効果のみである。そこで、作用震度および水平地盤反力係数のみについて、 $\mu \pm 1.0\sigma$ の範囲で変化させて応答を評価した。ここでは検討ケースのうち、表-1に示したケース10を対象に、作用震度の変動に伴う断面力の関係を図-3(a)に、水平地盤反力係数の変動に伴う断面力の関係を図-3(b)に示す。図-3(a)は震度の平均値が0.16の場合であり、図-3(b)は震度の平均値が0.20の場合の結果であり、水平軸は平均値で除して正規化している。

図より、まず震度については、弾性範囲内では作用震度と断面力の関係はほぼ比例関係にあることが分かる。従って、杭の断面力は、作用震度については一次式の関係で表現できるといえる。次に、水平地盤反力係数については強い非線形性を示すことがわかる。このため、両者の関係を2次関数で近似する。得られた近似曲線は図-3に併せて示すとおり、骨組み解析の結果とよく一致している。震度および水平地盤反力係数のいずれについても、図に示した以外の条件においても同様の結果を得た。

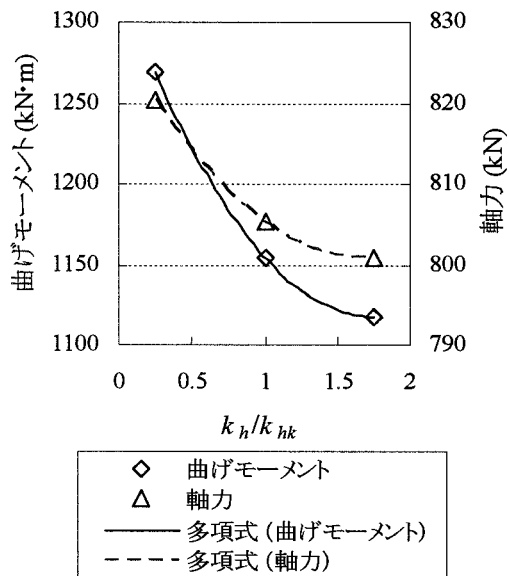
以上により、性能関数は式(6)に示す通り、震度について1次、水平地盤反力係数について2次で、両者の積により作用効果を表現した。各定数の値は表-3に示すとおりである。ここで、この方法は入力データの組み合わせとして、震度と水平地盤反力係数のそれぞれについて $\mu \pm 1.0\sigma$ の3種類で応答を評価するが、それぞれが平均値の場合は1回の応答計算でよいことから、性能関数（応答曲面）の評価に必要な骨組み解析の回数は5回でよいことになる。上述のように通常の10回の計算と比較すると半分の計算負荷で良いことに注意しておきたい。

$$G = \sigma_y - K \left(ak_h^2 + bk_h + c \right) / Z - \left\{ K \left(dk_h^2 + ek_h + f \right) + g \right\} / A \quad (6)$$

ここに、 $a \sim g$ ：定数であり、その他の記号については式(4)と同じである。



(a) 作用震度と断面力の関係

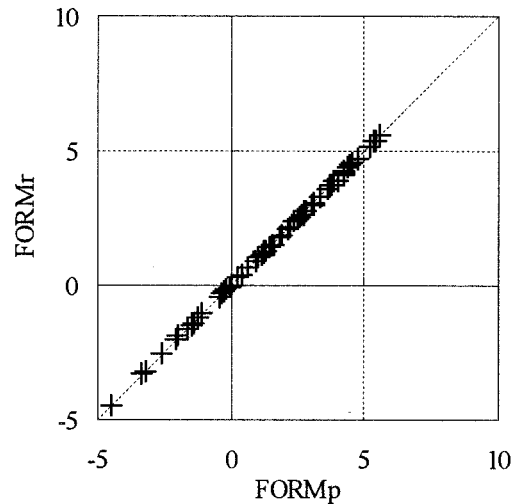


(b) 水平地盤反力係数と断面力の関係

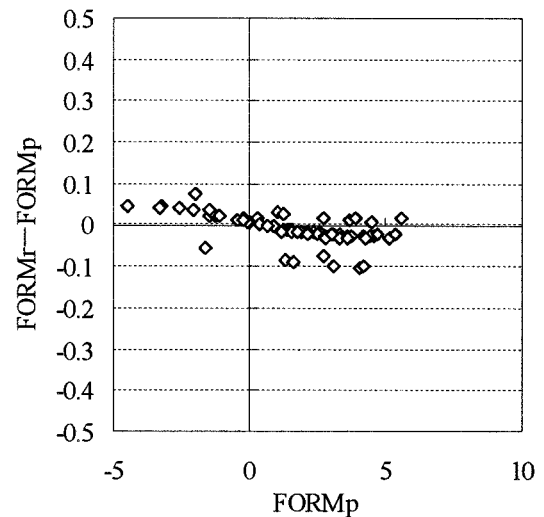
図-3 応答曲面の評価

表-3 各定数の値

case	a	b	c	d	e	f	g
1	3.095E+05	-9.980E+05	5.912E+06	230.3	-700	5882	6712
2	3.277E+05	-1.059E+06	6.074E+06	331.5	-1018	7055	6722
3	3.378E+05	-1.092E+06	6.165E+06	389.8	-1203	7678	6726
4	3.271E+05	-1.057E+06	6.096E+06	297.4	-912	6173	6707
5	3.468E+05	-1.122E+06	6.276E+06	406.2	-1257	7270	6714
6	3.578E+05	-1.158E+06	6.377E+06	467.0	-1453	7836	6717
7	3.486E+05	-1.128E+06	6.296E+06	411.9	-1276	7254	6713
8	3.544E+05	-1.147E+06	6.349E+06	443.5	-1377	7548	6714
9	3.655E+05	-1.184E+06	6.472E+06	470.5	-1467	7312	6704
10	3.773E+05	-1.223E+06	6.580E+06	531.9	-1667	7810	6707
11	3.840E+05	-1.245E+06	6.656E+06	523.5	-1643	7214	6694



(a) FORMpとFORMrの比較



(b) FORMrによる誤差

図-4 FORMpの精度

以上により性能関数が定式化できたので、式(6)および表-3を用いてFORMにより信頼性指標を評価した。FORMpとFORMrの比較を図-4に示す。両者は概ね良い対応を示しており、その誤差は最大で0.1程度である。例えば、上述した式(5)により信頼性指標を評価した条件では、信頼性指標の値は1.415であり、FORMpと比較すると誤差は0.010となり、式(5)の誤差0.043と比較して精度が良いと判断できる。

また、FORMpが正の領域ではほとんどのケースでFORMrのほうが小さく、FORMpが負の領域ではFORMrのほうが大きい傾向にある。つまり、FORMrは信頼性指標が正の領域では、安全側の評価を与える傾向にあり、信頼性指標が負の領域では危険側の評価を与える傾向にあるといえる。信頼性指標が負の領域は、基本的に断面が降伏している条件に対応する。降伏した場合にFORMpではバイリニアのM- ϕ 関係より得られる断面力を基にした信頼性指標を評価するので、弾性範囲内の応答と比較する

と同じ作用に対して大きな曲率が得られ、結果として大きな断面力が発生していると評価される。これに対してFORMrでは弾性範囲内の結果をもとに性能関数を評価しているため、信頼性指標が負の領域ではFORMrは信頼性指標を過大評価する。但し、設計実務で信頼性指標が負の領域で設計を行うことは考えられない。また、信頼性指標が正の範囲で安全側の評価を与えることを考慮すると、本研究による方法で応答曲面法を適用した場合には、実際に栈橋が設計される断面諸元の範囲においては十分な精度を有していると判断してよいと考えられる。

(3) FOSMによる信頼性指標

次に、より簡易なFOSMの適用を検討する。まず、表-2に示したように、確率変数の従う確率分布が正規分布と対数正規分布の2種類あるために、FOSMにおける扱いを検討する必要がある。これは、FOSMではFORMのように各変数の従う確率分布の違いを考慮できず、かつ、確率変数が全て正規分布の場合と全て対数正規分布の場合で式が異なるためである。

検討の結果、確率変数のうち鋼材の降伏強度については、変動係数が8%と小さな値であるため、正規分布としての扱いと対数正規分布としての扱いに大きな差が生じないことを確認した(図-5)。従って、本研究では、FOSMにおける信頼性指標の評価について、全ての確率変数を対数正規分布として扱うこととする。

FOSMによる信頼性指標は式(7)により得られる。FOSMによる信頼性指標は、確率変数が全て互いに独立な対数正規分布に従い、かつ性能関数が線形の場合には誤差を有さない。

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2}}$$

$$\zeta_x^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) \quad (7)$$

$$\lambda_x = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \zeta_x^2$$

ここに、 R ：耐力、 S ：作用効果、 λ ：対数平均、 ζ ：対数標準偏差、 μ ：平均値、 σ ：標準偏差

ここで、作用効果 S については、震度、水平地盤反力係数の2変数の影響を考慮する必要があることから、作用効果の確率変動を考慮した標準偏差を式(8)を用いて求め、そのうえで式(7)により信頼性指標を評価した。また、水平地盤反力係数に関しては非線形性が強いことから、ここでは平均による応答と、平均値±標準偏差による応答をもとに、式(9)を用いて性能関数の標準偏差を求めている。すなわち、平均値を中心に、平均値±標準偏差の片側ずつの2直線近似を行い、重み付けする方法⁹⁾を用いた。

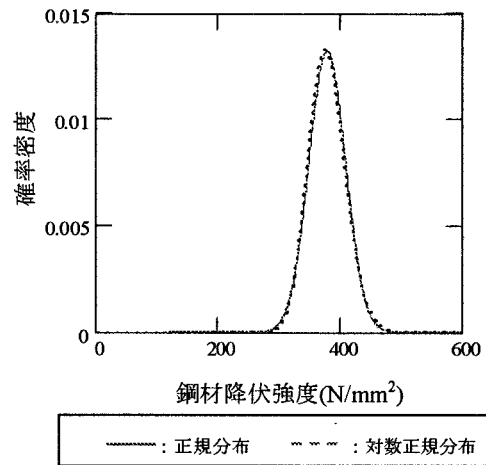


図-5 確率密度関数の比較

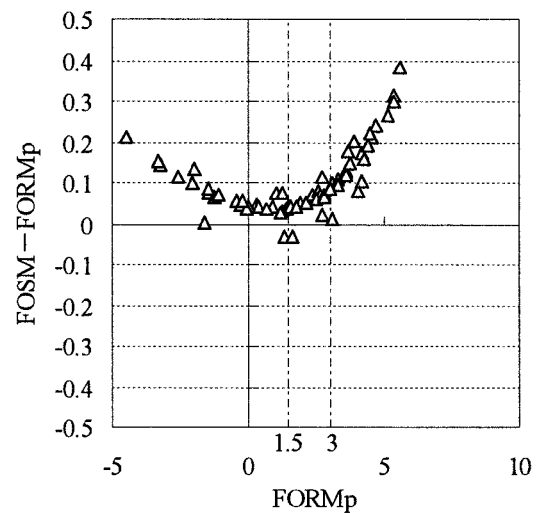


図-6 FOSMによる誤差

$$\sigma[G] = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial G}{\partial k_h} = \sqrt{\frac{(G(k_h^-) - G(k_h^\mu))^2 + (G(k_h^\mu) - G(k_h^+))^2}{2}} \quad (9)$$

ここに、 $G(k_h)$ は水平地盤反力係数が k_h に添えられた記号+、 μ 、-についてそれぞれ平均+標準偏差、平均、平均-標準偏差における性能関数の値を示す。FOSMによる信頼性指標とFORMpによる信頼性指標の差を図-6に示す。FOSMによる信頼性指標は、全体的に過大評価の傾向にあり、信頼性指標の精度は悪い。この誤差は性能関数の非線形性が強いことに起因しており、FOSMの限界であると考えられる。ただし、一般に栈橋に求められる信頼性指標の範囲として仮に1.5-3.0の範囲に着目すると、図-6に示すように両者の差は比較的小さい。FOSMの特徴は、応答曲面

法のように最終的にFORMのアルゴリズムを用いて収束計算を行って信頼性指標を評価する必要がなく、簡単に信頼性指標を算出できる点にある。従って、求められる信頼性指標の範囲、求められる精度を視野に入れた上で、FOSMによって信頼性指標の概略推定を行うことも可能と考えられる。

5. まとめ

本研究では、栈橋のレベル1地震動に対する耐震性能照査を対象として、骨組み解析に信頼性指標の評価アルゴリズムを組み込むことなく、より簡易に信頼性指標を評価する方法について検討を行った。本研究の主要な結論は以下のとおりである。

①応答曲面法の適用にあたり、一般的な2次関数を適用して信頼性指標を評価すると精度が悪い。性能関数は、震度について1次、水平地盤反力係数について2次で、両者の積により作用効果を表現する形式として信頼性指標を評価すると、正確な方法と比較して精度良く信頼性指標を評価することが可能である。またこの方法は、一般的な応答曲面法の適用と比較して応答の評価が少ない回数で応答曲面を評

価できるため計算負荷の観点からも優れているといえる。

②FOSMの適用については、信頼性指標の精度は悪い。但し、FOSMは適用が簡単であるため、求められる信頼性指標の範囲、求められる精度を視野に入れた上で、FOSMによって信頼性指標の概略推定を行うことも可能と考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007
- 2) 長尾 毅，菊池喜昭，藤田宗久，鈴木 誠，佐貫哲朗：栈橋式係船岸のレベル1地震動に対する信頼性設計法，構造工学論文集Vol.52A，pp.201-208，2006
- 3) Rackwitz, R. and Fiessler, B. : Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, Computers & Structures, Vol. 9, pp.489~494, 1978
- 4) Bucher, C. G. and Bourgund, U. : A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems, Structural Safety, 7, pp.57-66, 1990
- 5) 大島靖樹，村上通章，石川博之，武田智吉：土構造物の地震時信頼性評価システムの構築，JCOSSAR 2003論文集，pp.691-694，2003