

直杭式栈橋の作用震度と水平地盤反力係数の相関が
信頼性指標に与える影響に関する研究

中央復建コンサルタンツ(株) 正会員 ○栗原直範
国土技術政策総合研究所 正会員 長尾 毅

1. はじめに

港湾施設の技術上の基準・同解説(以下、基準と称す)で示されている部分係数算出時の信頼性解析は、作用震度と水平地盤反力係数が無相関として検討が行われている。しかしながら、震度が大きくなると、地盤自体のせん断変形が大きくなることに起因し、栈橋杭周辺を構成する地盤のせん断剛性は低下する。せん断剛性と水平地盤反力係数の間には一定の関係があることから、作用震度と水平地盤反力係数には相関の関係があることが考えられる。

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、栈橋の確定的な骨組み解析に、確率変数の平均値±標準偏差を入力して得られた応答結果をもとに、性能関数を陽な形で評価し(応答曲面法)、性能関数に対して相関係数を考慮したFORM(First-Order Reliability Method)を実施し、作用震度と水平地盤反力係数の相関関係が信頼性指標に与える影響について検討を行った。

2. 検討条件

表-1、及び図-1 に示す直杭式栈橋を検討モデルとして設定した。上部工はRC コンクリート梁とし、杭と上部工を結合した構造としている。鋼管杭のM-φ関係はバイリニアとした。地盤条件は、砂質土を対象として、軟弱な地盤を想定した地盤(固有周期 $T_g=1.2s$)となるように地盤のせん断波速度を設定した。骨組み解析に用いる水平地盤反力係数は、Imai 式¹⁾より、せん断波速度に対応するN値を求め(式(1))、式(2)より算出した。捨石層は、文献 2)の水平地盤反力係数に関する実験結果から、 $N=2.5$ として設定した。

$$V_s = 80.6N^{0.331} \quad (1) \quad k_h = 1500N \quad (2)$$

ここで、 V_s :せん断波速度(m/s), k_h :水平地盤反力係数(kN/m³)である。

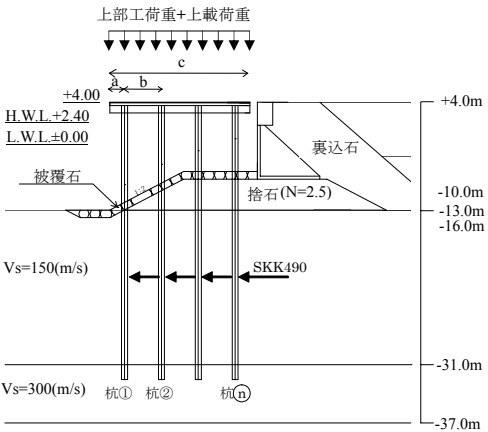


図-1 検討モデル断面図

3. 信頼性指標の評価

直杭式栈橋の性能関数は、長尾らの研究³⁾により提案されている方法を用いた(式(3))。

$$G = \sigma_y - K(a k_h^2 + b k_h + c) / Z - \{K(d k_h^2 + e k_h + f) + g\} / A \quad (3)$$

ここで、 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, A :杭の断面積, Z :杭の断面係数, $a \sim g$ は表-2に示す通りである。作用震度と水平地盤反力係数の相関関係は、最大加速度を変化させたWHITE-NOISE波を入力した2次元地震応答解析を実施し、直杭式栈橋上部工の最大応答加速度を重力加速度で除して作用震度を求め、直杭式栈橋中央1/β地点の地盤のせん断応力最大時のせん断剛性に対応したせん断波速度(式(4))を用いて式(1)、式(2)から水平地盤反力係数を求めて、両者の相関係数を評価した。

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

ここで、 G :せん断剛性(kN/m²), ρ :密

表-1 検討ケース及び杭諸元

Case	支持形式	設置水深	杭本数	杭諸元		根入標高(m)					a(m)	b(m)	c(m)	直径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm ²)	断面2次 モーメント (cm ⁴)	断面係数 (cm ³)
				直径 (mm)	肉厚 (mm)	杭①	杭②	杭③	杭④	杭⑤								
1	支持	-10	3	900	12	-32.0	-32.0	-32.0	—	—	2.0	5.0	14.0	900	12	334.77	3.30E+05	7.334
2	支持	-10	4	800	12	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	—	2.0	5.0	19.0	800	12	297.07	2.31E+05	5.766
3	支持	-13	4	900	14	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	—	2.0	5.5	20.5	900	14	389.68	3.82E+05	8.499
4	支持	-13	5	812.8	14	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	2.0	5.0	24.0	812.8	14	351.33	2.80E+05	6.897
5	支持	-16	4	1000	16	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	—	2.5	6.0	23.0	1000	16	494.61	5.99E+05	11.976
6	支持	-16	5	900	14	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	2.0	5.0	24.0	900	14	389.68	3.82E+05	8.499
7	摩擦	-10	3	900	12	-22.6	-21.9	-21.7	—	—	2.0	5.0	14.0	900	12	334.77	3.30E+05	7.334
8	摩擦	-10	4	800	12	-21.8	-21.2	-20.9	-20.9	—	2.0	5.0	19.0	800	12	297.07	2.31E+05	5.766
9	摩擦	-13	4	900	14	-26.0	-25.3	-24.7	-24.5	—	2.0	5.5	20.5	900	14	389.68	3.82E+05	8.499
10	摩擦	-13	5	812.8	14	-25.4	-24.7	-24.2	-23.8	-23.8	2.0	5.0	24.0	812.8	14	351.33	2.80E+05	6.897
11	摩擦	-16	4	1000	16	-30.1	-29.4	-28.8	-28.4	—	2.5	6.0	23.0	1000	16	494.61	5.99E+05	11.976
12	摩擦	-16	5	900	14	-29.0	-28.3	-27.7	-27.2	-27.0	2.0	5.0	24.0	900	14	389.68	3.82E+05	8.499

キーワード 信頼性指標, 応答曲面法, 相関係数, 直杭式栈橋

連絡先 〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4-11-10 中央復建コンサルタンツ(株) TEL06-6160-2162

度(t/m^3), V_s :せん断波速度(m/s)である. なお, 2次元地震応答解析にはFLIP⁴⁾を用いている. 解析に用いる杭諸元は表-1 から設定し, 地盤パラメタは表-3 に示す通り設定した. 図-2 に Case1 を例として, K と k_h の相関関係を示す. また, 表-4 に全ケースの作用震度と水平地盤反力係数の相関係数を示す. この結果, 作用震度と水平地盤反力係数の間には, 強い負の相関があることが確認された. 次に, 式(3)により定式化された性能関数を用い, FORM による信頼性指標を求め(式(5)), 作用震度と水平地盤反力係数が無相関としたケースと, 作用震度と水平地盤反力係数の間の相関を考慮したケースを算出し両者の比較し, 相関係数が信頼性指標に与える影響を評価した. なお, 信頼性解析に用いた確率変数は, 長尾らの研究⁶⁾を参考に設定した(表-5). 直杭式栈橋の設計を実施する上で特に重要と考えられる, 無相関としたケースの信頼性指標が 2~4 の間にあるケースに着目し, 相関の有無による信頼性指標の比較, 及び破壊確率の比較を行った(図-3, 図-4).

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\sum_i^n \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_{X^*} (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)_{X^*} \left(\frac{\partial G}{\partial X_j} \right)_{X^*} \rho_{ij} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}} \quad (5)$$

ここで, G : 性能関数, X^* : 確率変数 X の破壊点における値, μ : 平均値, σ : 標準偏差, ρ : 確率変数 X 間の相関係数である. この結果, 相関を考慮することにより, 信頼性指標は小さくなるのがわかる. これは, 耐力側と作用効果側の確率変数の間に負の相関が存在することにより性能関数の標準偏差が増加するためである. また, 信頼性指標が大きい程, その傾向は大きくなる. 本検討において, 例えば, 基準に示されている, 耐震強化施設以外の目標信頼性指標 $\beta_T=2.19$ (破壊確率 $P_f=1.4 \times 10^{-2}$)と同等となるケースでは, 信頼性指標は 1.89 と 1.5 割程度小さくなり, 破壊確率は 1.5×10^{-2} と 5 割程度大きくなる. 以上の結果から, 栈橋の信頼性指標を正確に評価するためには, 作用震度と水平地盤反力係数との相関関係を適切に評価した信頼性解析が必要であるといえる. なお, この結果は, 現行基準において旧基準と比較した場合, 安全性水準が低下していることを意味するものではない. しかしながら, 例えば, 栈橋の安全性水準としてライフサイクルコストなどの指標を基に標準以外の水準を設計の目標とする場合などにおいては, 作用震度と水平地盤反力係数との相関関係を適切に評価した信頼性解析を実施しなければ, 安全性水準を危険側に評価する.

参考文献

1) 社団法人土木学会: 動的解析と耐震設計第 1 巻地震動・動的解析, 技報堂, 2) 菊池ら: 捨石地盤の横方向地盤反力係数, 土木学会第 53 回年次学術講演会, pp.52-53, 1998, 3) 長尾ら: 直杭式栈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, 海洋開発論文集 Vol.24, pp.201-206, 2008, 4) Iai, S. et al : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbor Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990, 5) 小堤ら: 2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1899-1900, 2003, 6) 長尾ら: 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

表-2 各定数の値

Case	a	b	c	d	e	f	g
1	417.8	-1346.5	7468.5	-11.0	42.1	108.8	763.8
2	419.8	-1346.7	7362.2	30.4	-96.6	520.7	776.0
3	572.0	-1841.3	10188.0	18.2	-50.7	966.4	949.0
4	499.5	-1612.7	8270.0	-20.0	69.4	120.1	779.5
5	857.9	-2660.7	14483.0	83.5	-145.7	1504.6	1108.5
6	538.0	-1721.4	9057.1	-14.9	52.9	136.3	782.6
7	590.5	-1771.6	7576.2	-13.9	50.5	95.5	764.7
8	562.6	-1695.4	7504.2	42.0	-123.9	592.1	773.6
9	709.5	-2153.3	10237.0	41.4	-101.3	1788.5	948.7
10	652.0	-2012.3	8333.4	-17.2	63.9	105.1	781.7
11	929.3	-2839.6	14301.0	65.3	-183.4	1413.8	1108.5
12	662.6	-2045.9	9116.5	-15.1	57.3	153.9	782.7

表-3 2次元地震応答解析地盤パラメタ

土層区分	湿潤 密度 (t/m^3)	基準有効 拘束圧 (kN/m^2)	基準初期 せん断 剛性 (kN/m^2)	基準初期 体積剛性 (kN/m^2)	内部 摩擦角 (deg.)	粘着力 (kN/m^2)	
埋立土	上層(水位上)	1.8	70	2.08E+04	5.43E+04	37	0.0
	上層(水位下)	2.0	199	4.50E+04	1.17E+05	37	
原地盤	上層		298	1.80E+05	4.69E+05	41	
	下層	2.0	98	1.80E+05	4.69E+05	35	
捨石 裏込石	2.0	98	1.80E+05	4.69E+05	35	20.0	

(※)共通項目:ポアソン比:0.33, 最大減衰 δ_{max} :0.24

表-4 相関係数

Case	相関係数	Case	相関係数
1	-0.988	7	-0.997
2	-0.998	8	-0.998
3	-0.983	9	-0.987
4	-0.980	10	-0.984
5	-0.981	11	-0.981
6	-0.998	12	-0.998

表-5 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

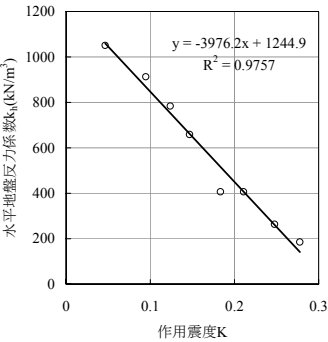


図-2 K と k_h の相関関係 (Case1)

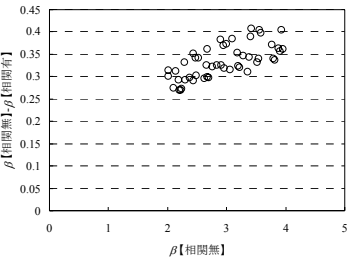


図-3 信頼性指標比較 【 β [無相関]- β [相関有]】

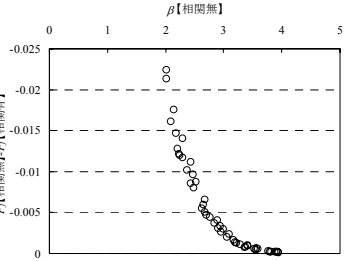


図-4 破壊確率比較 【 P_f [無相関]- P_f [相関有]】