

鋼直杭式栈橋の地震時安全性に対する信頼性評価に関する研究

西谷技術コンサルタント株式会社 正会員 ○山本 和也

中部地方整備局 正会員 岡田 達彦 鳥取大学工学部 フェロー会員 上田 茂

1. はじめに

鋼直杭式栈橋は、複数の鋼管杭を基礎構造とし、その上に鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリートの上部工を設けたものである。港湾構造物の設計には、長年にわたり安全率を用いた確定論的設計法が適用されてきたが、この方法は簡易であるものの構造物の破壊可能性を定量的に制御するものではない。こうした従来の設計法に替わり、確率論を援用してより合理的に構造物の破壊可能性を定量的に制御する方法として提案されているのが信頼性設計法である。そこで、本研究では図1に示す鋼直杭式栈橋を対象に信頼性理論に基づいて地震時の安全性指標および破壊確率を算出し、安全性の評価を行うことにした。

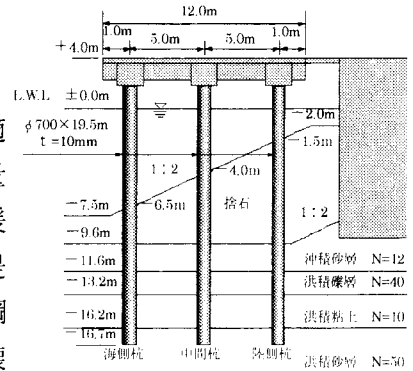


図1 解析に用いる栈橋断面

2. 性能関数の定義

構造物の破壊モードは、一般に作用荷重、材料強度、その他種々の不確定要因の関数となっている。性能関数 Z は破壊モードの生起を定義する式であり、 $Z \leq 0$ のとき破壊モードは生起する¹⁾。本研究では杭式栈橋の地震時における性能照査に、地震時保有耐力法を用いる。従って性能関数は次式で表される。

$$Z = P_a - k_h W = P_a - k_h (\gamma V + q S) \quad (1)$$

ここに、 P_a ：地震時保有耐力（弾塑性解析により各損傷イベントに応じて得られる水平力とする）、 k_h ：設計水平震度、 W ：栈橋の自重および上載荷重、 γ ：上部工材料の単位体積重量、 V ：上部工の体積、 q ：上載荷重、 S ：上部工の面積

本研究で考える破壊モードとしては、一般に地中における鋼管杭の座屈が生じると、発見や補修・補強等が困難であるので、地中における塑性ヒンジの発生（全塑性モーメント）以前を終局状態として設定することが望ましいという理由から、①過半数の杭に杭頭ヒンジが発生した場合（水平力が弾性限度に達した場合）、②すべての杭が杭頭降伏した場合、③すべての杭に杭頭ヒンジが発生した場合、④すべての杭に杭頭ヒンジおよび陸側杭に地中ヒンジが発生した場合の4つの破壊モードについて考える。

3. 設計パラメータの従う確率分布の推定

信頼性設計法では不確定要因を定量的に正しく評価するために、設計パラメータの確率分布を推定する必要がある。本研究では、上部工材料の単位体積重量、上載荷重、地震力に関係する設計震度を求めるための地盤の最大加速度の従う確率分布を推定することにした。上部工単位体積重量は、南ら²⁾により鉄筋コンクリート単位体積重量の実測値から推定された分布を用い、平均値 23.6 kN/m^3 、標準偏差 0.44 kN/m^3 の正規分布に従う。上載荷重は、森屋・長尾ら³⁾によって行われた観測結果から得られた推定分布を用い、平均値 24.599 kN/m^2 、標準偏差 9.217 kN/m^2 の正規分布に従うものとする。最大加速度は、北澤ら⁴⁾によって推定された基盤の最大加速度期待値と再現期間の関係をもとに推定する。解析モデルとした港湾における過去の最大加速度を大きい方から順に取った10個のデータと、その加速度に

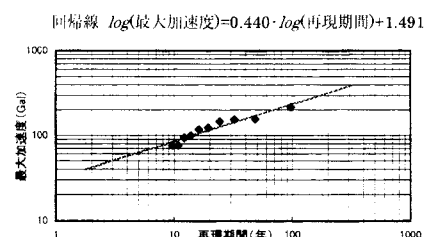


図2 最大加速度と再現期間の関係

対して推定した再現期間から両対数軸上において回帰直線を求めた（図2）。最大加速度は、任意の再現期間に対して回帰式で得られる値を平均値とし、標準偏差 0.046 (Gal) の正規分布に従う。本研究において再現期間は、供用年数50年に対し遭遇確率が0.3以下となるような値として141年を設定し、平均値は2.437となる（実数に直すと

平均値は約 274 Gal)。最大加速度と設計震度との関係は、野田ら⁵⁾によって重力式岸壁について検討されており、この式を杭式栈橋にも適用できることが示されているので、設計震度を求めた。なお、保有耐力に関する因子は、ばらつきをもつことが十分に予測されるが、算定法や解析プログラム等の制限から確定値とした。ただし、確率分布の推定されている上部工単位体積重量および上載荷重については信頼度 50%，75%，95%の値を入力値とし、異なる横方向地盤反力係数 k_H に対する保有耐力を算定し、因子のばらつきが保有耐力に及ぼす影響を検討した。

4. 地震時保有耐力の算定

地震時保有耐力は、弾塑性解析プログラム N - PIER を用いたプッシュオーバー解析により水平力－変位関係を求めて算定する。求めた水平力－変位関係と各破壊モードに対する保有耐力の算定結果の 1 例（上部工単位体積重量，上載荷重ともに信頼度 50%で入力値とし， $k_H=1.5N$ とした場合）を図 3 および表 1 に示す。

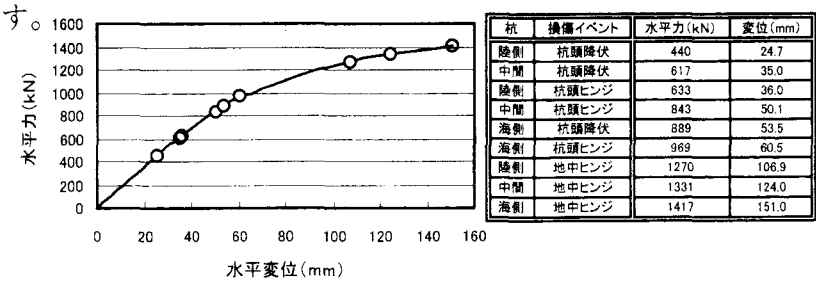


図 3 杭式栈橋の水平力－変位関係と損傷イベント

表 1 保有耐力の算定結果

破壊モード	塑性率	保有耐力(kN)
①	1	843
②	1.07	889
③	1.21	969
④	2.13	1270

5. 安全性指標と破壊確率の算定

破壊確率は、確率変数 $X_1, X_2, \dots, X_n$ の結合確率密度関数を $Z \leq 0$ の領域で、 $x_1 \sim x_2$ に関する n 重積分を行うことによって与えられる。しかし、この多重積分を実施することは困難なため 1 次ガウス近似法を用いた近似計算で算定する。これにより、算定された結果（保有耐力の算定の際に上部工単位体積重量を信頼度 50%とした場合）を表 2 に示す。

表 2 安全性指標と破壊確率の算定結果

横方向地盤反力係数	破壊モード	保有耐力	安全性指標	破壊確率
$k_H=1.5N$	①	843	1.0568	1.45E-01
	②	889	1.4516	7.33E-02
	③	969	2.131	1.65E-02
	④	1270	4.5961	2.15E-06
$k_H=1.0N$	①	837	1.0051	1.57E-01
	②	918	1.699	4.47E-02
	③	978	2.2068	1.37E-02
	④	1255	4.4768	3.79E-06
$k_H=2.0N$	①	848	1.0999	1.36E-01
	②	869	1.2803	1.00E-01
	③	949	1.9621	2.49E-02
	④	1277	4.6516	1.65E-06

6. まとめ

- ①保有耐力に関する因子である上部工単位体積重量と上載荷重，および横方向地盤反力係数を変えて安全性指標および破壊確率を算定し，信頼度が安全性指標および破壊確率に影響を及ぼすことを示した。保有耐力に関する因子のばらつきを考慮して信頼性評価を行うことが必要である。
- ②本研究では上記の要因をパラメータとして信頼性解析を行い安全性指標および破壊確率を求める方法を示したが，今後，実構造物に対するキャリブレーションに基づいて適切な安全性指標および破壊確率を検討する必要がある。

参考文献

1) 星谷勝・石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986
2) 南兼一郎・春日井康夫：鉄筋コンクリート港湾構造物への限界状態設計法の適用，港研資料，1991
3) 森屋陽一・長尾毅：係留施設の信頼性設計における地震時上載荷重，海洋開発論文集，第 19 巻，2003.7
4) 北澤壮介・上部達生・檜垣典弘：沿岸地域における基盤の最大加速度期待値の推定，港研資料，1984.7
5) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，1975