

鋼直杭式横棧橋の非線形復元力特性を考慮した地震応答解析

鳥取大学工学部	正会員	上田 茂
福山市	正会員	○松浦 稔昌
鳥取大学大学院	学生会員	伊藤 甲
鳥取大学大学院	学生会員	石田 誠

1.はじめに

阪神大震災によって神戸港ではいくつかの鋼製棧橋が被災した。その中には棧橋の上部工が 1.5m も海側に変形し、杭頭部および地中部に塑性ヒンジが生じたものがある。本研究では被災した棧橋について棧橋全体を 1 質点系モデルとして扱い、杭頭部の固定条件の変化および斜面の影響を考慮して非線形応答解析を行ったものである。

2.棧橋の荷重変位特性

図-1 に解析を行う対象とする棧橋の断面図および平面図を示す。棧橋は 3 列の直杭で構成される鋼製の横棧橋で、杭の根入れ部に捨石が配置され、背後に重力式ケーソンを有する。

また、図-2 に杭の根入れ部の土の特性を N 値 10 で一定とした C 型地盤として、杭頭部固定および杭頭部自由の条件の下に地盤定数 $k=2.2\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$ から港研方式により杭の横抵抗を計算し、棧橋の荷重変位特性を求めたものを示す¹⁾。

さらに図-3 に解析モデルにおいて陸側から水平力が棧橋に作用した場合と海側から作用した場合の杭の横抵抗の相違を考慮し、杭頭部固定の条件の下に斜面の影響を考慮した棧橋の荷重変位特性²⁾を求めたものを示す。ここで、陸側から水平力が作用した場合は地盤定数 $k=1.6\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$ 、海側から作用した場合は $k=3.3\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$ である。

図-2 から杭頭降伏時のバネ定数を求めると、降伏変位を Y_r 、降伏荷重を F_r として、杭頭部固定の場合は $(Y_r, F_r) = (4.48, 27.9)$ より $K_1 = 6.23\text{tf/cm}$ 、杭頭自由の場合は $(Y_r, F_r) = (6.17, 10.35)$ より $K_2 = 1.68\text{tf/cm}$ となる。同様にして図-3 から、 $k=3.3\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$ の場合は $(Y_r, F_r) = (4.19, 28.85)$ より $K_3 = 6.89\text{tf/cm}$ 、また $k=1.6\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$ の場合は $(Y_r, F_r) = (4.59, 27.94)$ より $K_4 = 6.09\text{tf/cm}$ となり、この値を次の地震応答解析で用いる。

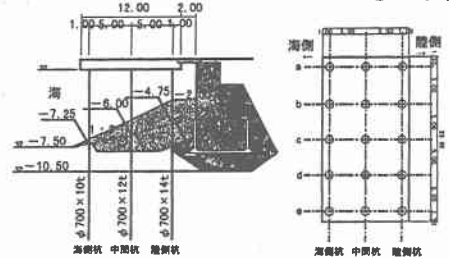


図-1 解析モデルの断面図および平面図

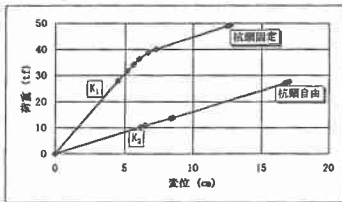


図-2 杭頭の固定条件を考慮した棧橋の荷重復元力特性 ($k=2.2\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$)

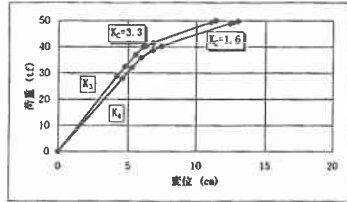


図-3 斜面を考慮した棧橋の荷重変位特性 ($k=3.3\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$, $k=1.6\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2.5}$)

3.棧橋の地震応答解析

非線形復元力特性を有する 1 自由度質点系の運動を考える際、運動方程式は復元力を表す項を変位の関数として次のように表される。

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + F(Y) = -M\ddot{Z} \tag{1}$$

ここに、 M : 上部工の質量 ($=0.171\text{tf}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)、 Y : 杭頭の変位、 C : 粘性減衰定数 (等価線形解析法³⁾より減衰定数 $h=0.03$ 、 $C=2h\sqrt{KM}$ から求める)、 K : バネ定数、 $F(Y)$: 復元力、 \ddot{Z} : 入力する地震の加速度
本研究では棧橋の復元力特性を線形モデル、完全弾塑性モデル、バイリニアモデルの 3 つの場合について考え、杭頭部の固定条件および斜面を考慮してルング・クッタ法⁴⁾で応答解析を行い、その結果を比較検討する。

1. 線形モデル (1-1)

図-4 に示すように、水平変位が海側陸側ともにバネ定数 $K=K_1$ とした場合。

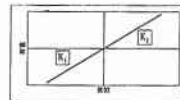


図-4 線形モデル (1-1) の復元力特性

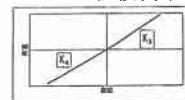


図-5 線形モデル (1-2) の復元力特性

2. 線形モデル (1-2)

図-5 に示すように、水平変位が陸側の時 $K=K_2$ 、海側の時 $K=K_3$ とした場合。

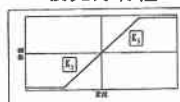


図-6 完全弾塑性モデル (2-1) の復元力特性



図-7 完全弾塑性モデル (2-2) の復元力特性

3. 完全弾塑性モデル (2-1)

図-6 に示すように、変位が線形領域では $K=K_1$ とし、図-2 の杭頭固定条件の降伏点 $(Y_r, F_r) = (4.48, 27.9)$ を越えると復元力は $F_r=27.9\text{tf}$ で一定とする場合。なお (2-1)、(2-2) についても降伏点は同じ値とする。

4. 完全弾塑性モデル (2-1)

図-7に示すように、変位が線形領域でかつ陸側の時 $K=K_1$ 、海側の時 $K=K_2$ とし、降伏点を越えると(2-1)と同様とする場合。

5. 完全弾塑性モデル (2-2)

図-8に示すように、変位が線形領域では $K=K_1$ とし、降伏点を越えると(2-1)と同様であるが、その後のバネ定数は抗頭自由の条件で求めた $K=K_3$ とした場合。

6. バイリニアモデル (3)

図-9に示すように、図-2の抗頭固定条件の荷重変位特性を $K=K_1$ 、 $K=K_2$ の二本の直線で表した場合。なお $K_1=5.49$ tf/cm、 $K_2=1.67$ tf/cmである。

入力地震波はポートアイランドの観測地震波形(E-W成分、K.P-28m)とし、これを図-10に示す。なお時間刻みは0.01(s)である。

4. 解析結果

各復元力特性のモデルにおいて図-10の地震加速度波形を入力し、各モデルにおける応答加速度および応答変位を、線形モデル(1-1)についてはそれぞれ図-11、図-12に、線形モデル(1-1)についてはそれぞれ図-13、図-14に、完全弾塑性モデル(2-1)についてはそれぞれ図-15、図-16に、完全弾塑性モデル(2-2)についてはそれぞれ図-17、図-18に、完全弾塑性モデル(2-2)についてはそれぞれ図-19、図-20に、バイリニアモデル(3)についてはそれぞれ図-21、図-22に示す。

応答加速度について見てみると、線形モデル(1-1)で最も大きく、866(gal)の最大値をとっている。また完全弾塑性モデル(2-1)で最も小さく、179(gal)の最大値をとっている。

一方応答変位について見てみると、完全弾塑性モデル(2-1)で最も大きく、33.1(cm)の最大値をとっている。またバイリニアモデル(3)で最も小さく、11.7(cm)の最大値をとっている。また変位量を時刻歴で見ると、各完全弾塑性モデルやバイリニアモデルでは海側に残留変位が発生する傾向を見ることができる。

以上のように抗頭の上部工を1自由度質点系として各復元力特性モデルにおいて求めた応答変位からは、1.5(m)程度の変形量を見ることはできない。

5. 結論

本研究では栈橋を1質点系のモデルとして、変位が降伏点を越えてからの挙動、水平力の作用する方向が海側であるか陸側であるかによるバネ定数の相違、降伏後の抗頭部の固定条件の変化などを考慮して栈橋の復元力特性をいくつかのモデルに定めて応答解析を行った。その結果海側に残留変位の発生する傾向を見ることができたが、応答変位が1.5(m)程度となるような解析結果を得ることは出来なかった。これは、地震時に栈橋に作用する外力として上部工の慣性力しか考えられておらず、根入れ部の捨石や背後のケーソンの移動に伴う力が考慮されていないことに原因があると考えられる。なお、これらの土圧および抗頭の慣性力を静的外力として栈橋に作用させた解析結果を別途考察する。

参考文献

- 1) 上田 茂、他；杭式栈橋の地震被害に関する一考察、第48回平成8年度 土木学会中国支部研究発表会発表概要集
- 2) 横山 幸満；鋼杭の設計と施工(増補版)、山海堂、昭和49年
- 3) 日本機械学会編；振動工学におけるコンピュータアナリシス、コロナ社、昭和62年

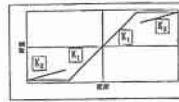


図-8 完全弾塑性モデル(2-2)の復元力特性

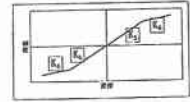


図-9 バイリニアモデル(3)の復元力特性

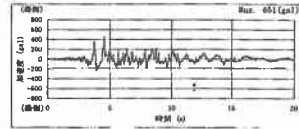


図-10 ポートアイランドの観測地震波(E-W成分、K.P-28m)

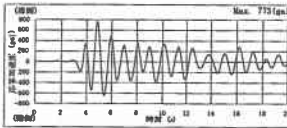


図-11 応答加速度(線形モデル(1-1))

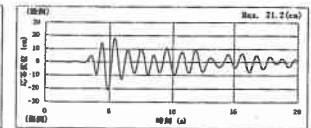


図-12 応答変位(線形モデル(1-1))

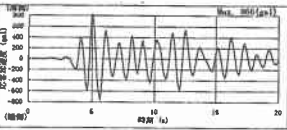


図-13 応答加速度(線形モデル(1-1))

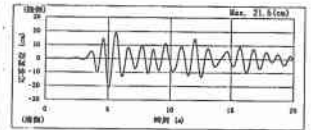


図-14 応答変位(線形モデル(1-1))

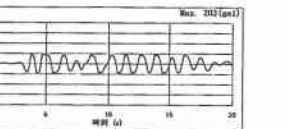


図-15 応答加速度(完全弾塑性モデル(2-1))

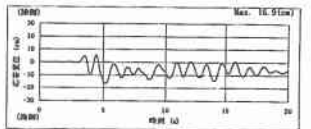


図-16 応答変位(完全弾塑性モデル(2-1))

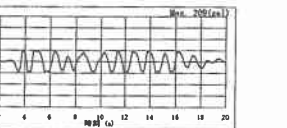


図-17 応答加速度(完全弾塑性モデル(2-2))

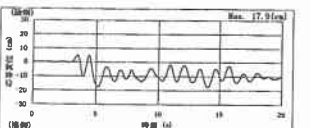


図-18 応答変位(完全弾塑性モデル(2-2))

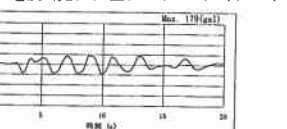


図-19 応答加速度(完全弾塑性モデル(2-3))

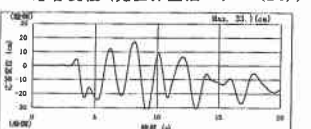


図-20 応答変位(完全弾塑性モデル(2-3))

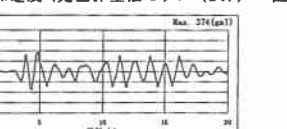


図-21 応答加速度(バイリニアモデル(3))

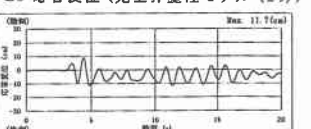


図-22 応答変位(バイリニアモデル(3))