

背後に重力式土留め構造物を持つ鋼直杭式横棧橋の耐震性に関する研究

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・淡路大震災で被災した神戸港T地区の棧橋は図1,図2に示すような鋼直杭3列からなる横棧橋形式であり、背後に重力式土留め構造物のケーソンを持つ。その被災状況は鋼管杭については、海側杭,中間杭に座屈・傾斜が顕著に見られ、特に海側杭の杭頭部でその被害は甚大であった。また、棧橋の上部工では最大で1.5mレベルの海側への変位が生じていた。ケーソンについては沈下や海側への移動及び傾斜が顕著に見られた。このような被災状況から、地震時に棧橋には、棧橋に作用する慣性力の他にケーソンの海側への移動及び杭周辺の捨石の変位に伴い生じる土圧並びに杭周辺の捨石及びケーソンに作用する慣性力が作用したと考えられる。このようなことから、本研究ではその被災棧橋をラーメンにモデル化し、地震時に棧橋には、棧橋に作用する慣性力の他に、ケーソンの海側への移動及び杭周辺の捨石の変位に伴い生じる土圧並びに杭周辺の捨石及びケーソンに作用する慣性力が作用したと考える。そして本研究では有限要素法を用いて被災棧橋の静的解析を行い、その破壊の状態を再現することを目的とする。

2.方法 棧橋の解析モデルは図2に示すように横断方向に海側杭,中央杭及び陸側杭の計3本の杭(杭径は共にφ=700mm,肉厚はそれぞれt=10mm,12mm,14mm,ヤング係数は $E_s=2.1 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ である。)とそれにより支持されるコンクリートスラブ(厚さ0.3m,幅5m,奥行き12m,ヤング係数は $E_c=2.5 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ である。)で構成される棧橋1ラーメンを取り出した29個の要素からなるラーメンの有限要素モデルである。このモデルでは杭の挙動を杭の根入れ部分周辺の地盤の影響を考慮して解析するために、根入れ部分の杭要素の局所座標系による要素剛性マトリックスの成分には、地盤反力パネの効果を表す成分を加えている。つまり、このモデルでは地盤を地盤反力パネによって評価している。またモデルでは棧橋の上部工の合計重量 $W=168\text{tf}$ を節点10,11,12にそれぞれ1/3,1/3,1/3ずつ配分し、また鋼杭の自重(鋼材の単位体積重量 γ_s ; $\gamma_s=7.85\text{tf/m}^3$; 空気中 $\gamma_a=6.82\text{tf/m}^3$; 海水中も考慮している。さらに、杭の仮想固定点を標高-16.7mに設け、そこにラーメンの固定支点を設けている。また被災棧橋が地震時に受けた外力として、上部工に作用する慣性力,ケーソンの移動及び杭周辺の捨石の変位によって生じる土圧並びに杭周辺の捨石及びケーソンに作用する慣性力を想定し、次のようにモデルに作用させる外力を設定する。上部工に作用させる慣性力は、モデルの節点10,11,12に配分した上部工の重量に水平震度 k_h を乗じて求め、それらを図2の+x方向に作用させる。また、土圧と捨石及びケーソンに作用する慣性力を設定する上で必要な地震時の捨石の変位量とケーソンの移動量及び地震時の捨石層中での地震加速度を推定するために表1,表2に示す共に9層からなる神戸港T地区の地盤モデルA(第1層を棧橋の杭の根入れ部分周辺の捨石層をモデル化した層とする。)及び地盤モデルB(第1層を棧橋の背後のケーソンをモデル化した層とする。)を設定した。そして表1,表2に示す両地盤モデルの諸量と兵庫県南部地震のポートアイランドのK.P.-28mで観測された地震加速度波形の東西成分(この地震加速度波形の加速度倍率をいろいろと変化させて両地盤モデルの第9層に入力。)をプログラムSHAKE(水平な地盤からなる表層地盤のせん断振動を重複反射理論により計算するプログラム。)に入力して地盤の地震応答解析を行い両地盤モデルの第1層の中央の変位量及び第1層上面での最大地震応答加速度を求めた(表3に各加速度倍率の地盤の地震応答解析結果を示す。)。なお両地盤モデルの第2層から第9層までの諸量は神戸港T

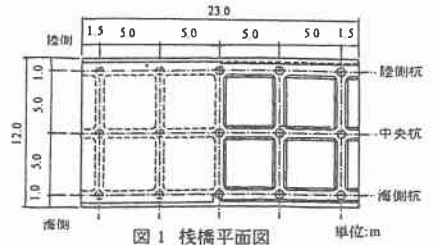


図1 棧橋平面図 単位:m

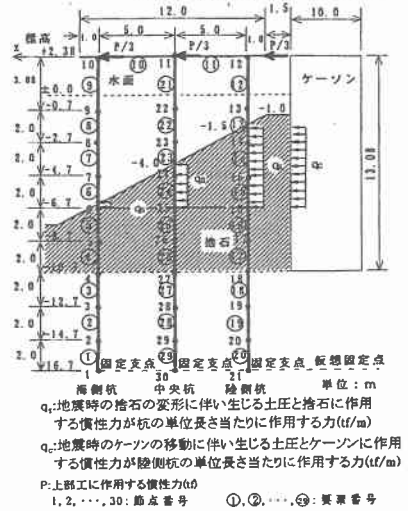


図2 棧橋の解析モデル及び棧橋に作用させる慣性力と土圧(棧橋断面図)

表1 地盤モデルA

層番号	層下の深さ(m)	層厚(m)	土の単位体積重量(γ)(tf/m^3)	土の特性	N値	せん断波速度(V_s)(m/s)
1	-10.7	6.7	2.0	砂質土(捨石)	20	341
2	-12.7	2.0	2.0	砂質土	30	286
3	-14.7	2.0	2.0	粘性土	15	226
4	-16.7	2.0	2.0	砂質土	35	302
5	-23.8	7.1	1.8	粘性土	10	197
6	-25.7	1.9	2.0	砂質土	40	316
7	-29.7	4.0	2.0	粘性土	20	249
8	-37.9	8.2	2.0	砂質土	35	302
9	-	-	2.0	-	50	341

表2 地盤モデルB

層番号	層下の深さ(m)	層厚(m)	土の単位体積重量(γ)(tf/m^3)	土の特性	N値	せん断波速度(V_s)(m/s)
1	-10.7	13.1	2.0	砂質土($\gamma=22$)	50	341
2	-12.7	2.0	2.0	砂質土	30	286
3	-14.7	2.0	2.0	粘性土	15	226
4	-16.7	2.0	2.0	砂質土	35	302
5	-23.8	7.1	1.8	粘性土	10	197
6	-25.7	1.9	2.0	砂質土	40	316
7	-29.7	4.0	2.0	粘性土	20	249
8	-37.9	8.2	2.0	砂質土	35	302
9	-	-	2.0	-	50	341

表3 各地盤モデルの第1層中央での変位量及び第1層上面での最大地震応答加速度

地盤モデル	A			B		
	入力する地震加速度波形状の最大変位量(cm)	層上面の最大地震応答加速度(Gal)	層上面の最大地震応答変位量(cm)	入力する地震加速度波形状の最大変位量(cm)	層上面の最大地震応答加速度(Gal)	層上面の最大地震応答変位量(cm)
0.5	0.108	231	0.4	0.151	173	
0.7	0.162	314	0.5	0.187	207	
1	0.234	403	1.3	0.377	322	
1.7	0.304	511	2.5	0.419	351	
1.8	0.314	523	3.5	0.423	350	
2.2	0.291	500	5	0.445	370	
			5	0.472	398	

ここに地震波を入力する層は地盤モデルA及び地盤モデルB共に第9層である。また入力した地震波形状は兵庫県南部地震のポートアイランドの観測波形(東西成分,K.P.-28m)である。

地区の土質柱状図を基に決定した。そして表 3 に示す地盤モデル A 及び B のそれぞれの第 1 層の最大地震応答加速度を重力加速度 980cm/s² で割って求めた震度と各モデルの第 1 層の中央での変位量との関係を直線回帰式で表した。そしてその式を用いて地盤モデル A 及び B の第 1 層中央での変位量 u_c 及び u_s (変位量 u_c をケーソンの移動量とする。)を震度 0.2,0.4,0.6 について求めた結果 $u_c=0.08,0.22,0.36$ cm, $u_s=0.18,0.48,0.78$ cm となった。そして陸側杭の単位長さ当たりに作用する地震時のケーソンの移動に伴い生じる土圧 q_{st} は、 u_c に地盤反力バネ定数 k_r (k_r は(1)式に捨石の N 値=20 を代入して計算した。)を乗じて求めた。

$$k_r = 0.15N \times B \times 100 \text{ cm} \tag{1}$$

ここに、 k_r は地盤反力バネ定数(kgf/cm),N は地盤の標準貫入抵抗値 N 値,B は杭幅(=70cm)である。また、地震時にケーソンに作用する慣性力が陸側杭の単位長さ当たりに作用する力 q_{st} は高さ 1m × 幅 0.7m (=杭幅) × 奥行き 5m の体積のケーソン(ケーソンの単位体積重量 $\gamma_s=2.0$ t/m³)の重量に水平震度 k_h を乗じて求めた。さらに杭の単位長さ当たりに作用する地震時の捨石の変位に伴い生じる土圧 q_{st} は u_c に k_r を乗じて求め、また地震時に栈橋の杭周辺の捨石に作用する慣性力が杭の単位長さ当たりに作用する力 q_{st} は高さ 1m × 幅 0.7m (=杭幅) × 奥行き 4m の体積の捨石(捨石の単位体積重量 $\gamma_s=2.0$ t/m³)の重量に水平震度 k_h を乗じて求めた。以上のように設定した外力 q_{st} と q_{st} の和を q_c とし、 q_{st} と q_{st} の和を q_s とし、 q_c と q_s の作用範囲及び栈橋の上部工に作用させる慣性力の大きさを次の CASE1,CASE2,CASE3,CASE4 のように想定して各 CASE の栈橋のモデル(図 2 に示す。)の挙動を解析し、被災栈橋の破壊の状態を再現する。

- CASE1:栈橋のモデルの上部工に水平震度 $k_h=0.2,0.4,0.6$ のそれぞれの慣性力を +x 方向に作用させる。
- CASE2:栈橋のモデルの上部工に水平震度 $k_h=0.2,0.4,0.6$ のそれぞれの慣性力を +x 方向に作用させ、さらに $k_h=0.2,0.4,0.6$ に対応する捨石の変位量 $u_c=0.08,0.22,0.36$ cm を用いて求めた $q_{st}=2.5,8$ t/m 及び $k_h=0.2,0.4,0.6$ に対応する $q_{st}=1,2,3$ t/m を標高-1.5m から-7.7m までの捨石中の海側杭,中央杭及び陸側杭に +x 方向に作用させる。

- CASE3:栈橋のモデルの上部工に水平震度 $k_h=0.2,0.4,0.6$ のそれぞれの慣性力を +x 方向に作用させ、さらに $k_h=0.2,0.4,0.6$ に対応する捨石の変位量 $u_c=0.08,0.22,0.36$ cm を用いて求めた $q_{st}=2.5,8$ t/m 及び $k_h=0.2,0.4,0.6$ に対応する $q_{st}=1,2,3$ t/m を標高-1.5m から-7.7m までの捨石中の海側杭,中央杭及び陸側杭に +x 方向に作用させる。

- CASE4:CASE3 の外力に加えて、栈橋のモデルに水平震度 $k_h=0.2,0.4,0.6$ に対応するケーソンの移動量 $u_c=0.18,0.48,0.78$ cm を用いて求めた $q_{st}=4,10,16$ t/m 及び $k_h=0.2,0.4,0.6$ に対応する $q_{st}=1.3,4$ t/m を標高-1.5m から-7.7m までの捨石中の陸側杭に +x 方向に作用させる。

3. 解析結果 CASE1,CASE2,CASE3,CASE4 のように栈橋のモデルに作用させた場合の各 CASE における、モデルの上部工に作用させた水平震度と各杭の杭頭部の垂直応力度及び各杭の地盤内で生じた最大垂直応力度の関係をそれぞれ図 3,図 4,図 5,図 6 に示す。また垂直応力度の正の値は引張り応力度を表し、負の値は圧縮応力度を表す。

4. 考察 全ての CASE において水平震度が増加するに伴って各杭の杭頭部の垂直応力度及び各杭の地盤内で生じた最大垂直応力度の値が増加するが、各杭の杭頭部の垂直応力度が降伏応力度に達する状況から見て、地震時に杭頭部に作用した水平震度は陸側杭では 0.35 ないし 0.4 程度であり、中央杭では 0.45 程度であり、また海側杭では 0.6 程度であると推定される。また各杭の杭頭部における垂直応力度については、どの CASE においても陸側杭の値が海側杭と中央杭の値に比べて大きくなっている。このことより解析結果は栈橋の被災状況である杭頭部での座屈及び傾斜が陸側杭と比較して海側杭及び中央杭で顕著であることをあまりうまく再現していないと考えられる。

5. 結論 本研究では、高橋らは捨石層が杭の横抵抗に与える影響は小さく緩い砂地盤と同じ程度であると示している¹⁾ので、捨石の N 値を低めにとり地盤反力バネ定数 k_r を定めた。そしてその k_r を土圧の設定及び地盤反力バネで地盤を評価した解析モデルの設定に用いて解析を行った。しかし先にも述べたように解析結果は栈橋の被災状況をあまりうまく再現していないので、現在は地盤を地盤反力バネで考慮した解析モデル及び外力の設定の仕方を再検討して解析を行っている。また杭の降伏後の非線形復元力特性を考慮した 1 質点系の栈橋の解析モデルを用いた動的解析も同時に行っている。今後、被災栈橋の地震時の動的現象をよりよく再現するためには、杭の降伏後の非線形復元力特性と地震時のケーソンの移動及び捨石の変位に伴い生じる土圧並びにケーソン及び捨石に作用する慣性力を考慮した多質点の地盤-構造物相互作用系の解析モデルを用いて動的解析を行う必要があると考えられる。また静的及び動的な解析によって被災栈橋の破壊の状態を再現するためには、詳細な現地調査の結果を十分に踏まえて解析に用いる土質定数等の定数を適切に設定することも重要であると考えられる。

[参考文献] 1)高橋 邦夫,壹岐 幸史:杭の横抵抗における捨石層の評価,港湾技術研究所報告,1991.6

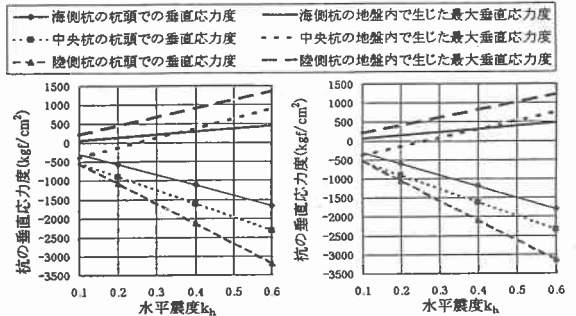


図3 CASE1の水平震度と杭の垂直応力度の関係

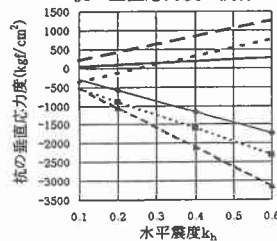


図5 CASE3の水平震度と杭の垂直応力度の関係

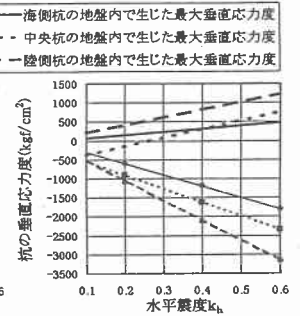


図4 CASE2の水平震度と杭の垂直応力度の関係

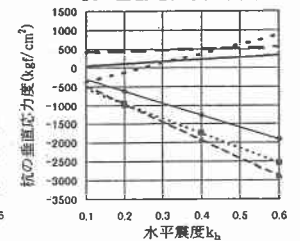


図6 CASE4の水平震度と杭の垂直応力度の関係