背後に重力式土留め構造物を持つ鋼直杭式横桟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地区の桟橋は図１,図２に示すような鋼直杭３列からなる横桟橋形式であり,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,桟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。こような被災状況から,地震時に桟橋には,桟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桟橋をラーメンにモデル化し,地震時に桟橋には,桟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桟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　桟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 $E_s=2.1\times10^7 tf/m^2$ 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 $E_c=2.5\times10^6 tf/m^2$ である。)で構成される桟橋 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,地盤反力バ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バネによって評価している。またモデルでは桟橋の上部工の合計重量 W=168tf を節点 10,11,12 にそれぞれ 1/3,1/3,1/3 づつ配分し,また鋼杭の自重(鋼材の単位体積重量 γ_k; γ_k=7.85tf/m^3:空気中,γ_k=6.82tf/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-16.7 mに設け,そこにラーメンの固定支点を設けている。また被災桟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層を桟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層を桟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

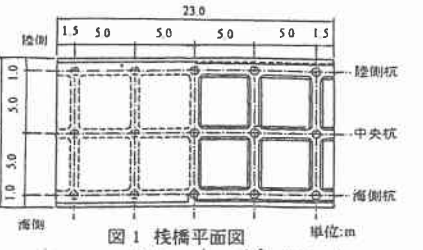

図１　桟橋平面図

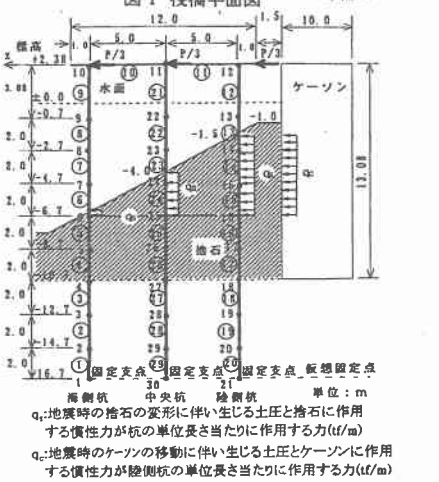

図２　桟橋の解析モデル及び桟橋に作用させる慣性力と土圧（桟橋断面図）

表１　地盤モデルA

層番号	各層下面の標高(m)	層厚(m)	土の単位体積重量(tf/m³)	土の特性	N値	せん断波速度(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	各層下面の標高(m)	層厚(m)	土の単位体積重量(tf/m³)	土の特性	N値	せん断波速度(m/s)
1	-10.7	13.1	2.0	砂質土(ｹｰｿﾝ)	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層の上面での最大地震応答加速度

地盤モデル	A		地盤モデル	B	
入力する地震加速度波形の加速度倍率	層中央の変位量(cm)	層上面の最大地震応答加速度(Gal)	入力する地震加速度波形の加速度倍率	層中央の変位量(cm)	層上面の最大地震応答加速度(Gal)
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	4	0.445	370
			5	0.472	388

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は兵庫県南部地震のポー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_s 及び u_c(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_s=0.08,0.22,0.36cm,u_c=0.18,0.48,0.78cm 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_{cr} は,u_c に地盤反力バネ定数 k_{sr}(k_{sr} 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。

$$k_{sr} = 0.15N \times B \times 100\text{cm} \qquad (1)$$

ここに,k_{sr} 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_{ck} 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 γ_c=2.0tf/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_{sr} は u_s に k_{sr} を乗じて求め,また地震時に桟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_{sk} 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 γ_s=2.0tf/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_{cr} と q_{ck} の和を q_c とし,q_{sr} と q_{sk} の和を q_s として q_c と q_s の作用範囲及び桟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 の桟橋のモデル(図 2 に示す。)の挙動を解析し,被災桟橋の破壊の状態を再現する。

CASE1:桟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:桟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_s=0.08,0.22,0.36cm を用いて求めた q_{sr}=2,5,8tf/m 及び k_h=0.2,0.4,0.6 に対応する q_{sk}=1,2,3tf/m を標高-1.5m から-5.7m までの捨石中の中央杭,陸側杭に+x 方向に作用させる。

CASE3:桟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_s=0.08,0.22,0.36cm を用いて求めた q_{sr}=2,5,8tf/m 及び k_h=0.2,0.4,0.6 に対応する q_{sk}=1,2,3tf/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，桟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=0.18,0.48,0.78cm を用いて求めた q_{cr}=4,10,16tf/m 及び k_h=0.2,0.4,0.6 に対応する q_{ck}=1.3,4tf/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。

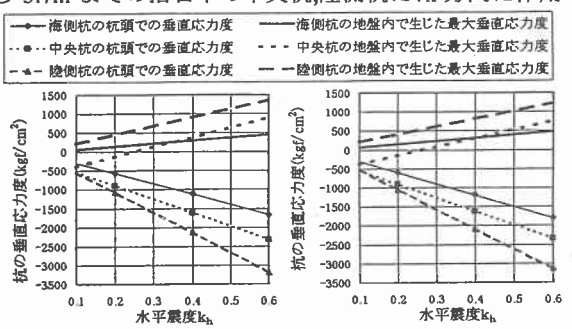

図3 CASE1の水平震度と杭の垂直応力度の関係

図4 CASE2の水平震度と杭の垂直応力度の関係

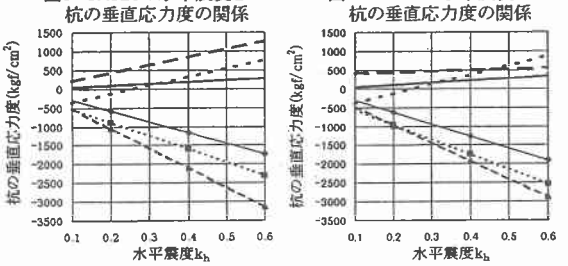

図5 CASE3の水平震度と杭の垂直応力度の関係

図6 CASE4の水平震度と杭の垂直応力度の関係

3.解析結果　CASE1,CASE2,CASE3,CASE4 のように桟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桟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する実験結果を示している[1]ので、捨石の N 値を低めにとり地盤反力バネ定数 k_{sr} を定めた。そしてその k_{sr} 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桟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 質点系の桟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,被災桟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桟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