

矢板式岸壁の控え組杭の弾塑性解析による耐震性検討

(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会 正会員 ○乙志和孝, 辻本和仁, 塩崎禎郎
 正会員 相和明男, 大槻 貢, 武野正和

1. はじめに

港湾分野における岸壁構造の一つとして、控え工に組杭を用いる矢板式岸壁が広く適用されてきた。東北地方太平洋沖地震(2011)以降、巨大地震・津波に対する構造の「ねばり強さ」が求められており、著者らは鋼材の靱性を活用した合理的な設計手法の研究に取り組んでいる。ここでは、矢板式岸壁の控え組杭構造に着目し、現行設計手法で決定された断面に想定以上の地震力が作用した際にどのような挙動を示すかを把握するため、非線形性を考慮した骨組解析モデルを考案し各種設定パラメータについての感度解析を実施した。

2. 解析条件

骨組解析は、鋼材および地盤の非線形性を考慮できる杭基礎の弾塑性解析プログラム NPILAN-SN を用いた。対象構造は、タイ材に生じる張力を杭の曲げ抵抗も考慮して杭の軸方向力も検討する控え組杭式矢板護岸とした(図 1)。解析モデルを図 2 に示す。本構造は、水深-11m 岸壁で図 2 に示す地盤条件で、レベル 1 地震動(耐震性能照査用震度 0.15)に対して設計されたものである。解析は、組杭を鋼材の降伏応力($SKK400:235N/mm^2$)を上限値としたバイ・リニア型の梁要素でモデル化し、水平抵抗については受働土圧を上限値としたバイ・リニア型の地盤ハネで表現した。基本ケースの設定には、以下に示す標準的な設計値とした。地盤特性を勘案して、水平地盤反力係数 $k_h=1500 \cdot N(kN/m^3, N:N \text{ 値})$ として初期剛性を設定した。また、組杭の斜角 $\psi=20^\circ$ を考慮して、押し込み杭・引抜き杭の水平方向地盤反力係数値をそれぞれ 0.5 倍、1.73 倍し補正した。周面摩擦ハネは、最大周面摩擦力 $f_{max}=2 \cdot N \cdot A_s(A_s: \text{杭周面積})$ を上限とし勾配変化点をすべり変位 $\delta_f=10mm$ としたバイ・リニア型でモデル化した。杭先端ハネは、先端支持力 $Q_{max}=300 \cdot N \cdot A_p(A_p: \text{杭先端断面積})$ を上限とし勾配変化点を先端鉛直変位 $\delta_q=0.1 \cdot D(D: \text{杭径})$ としたバイ・リニア型でモデル化した。外力条件については、設計時荷重(鉛直力 $V=558kN$, 水平力 $H=1232kN$) を組杭頭部に作用させることとし、鉛直力 V を一定として水平力 H を次第に大きくするプッシュオーバー解析を実施した。また、非線形性を考慮した各種ハネ等の設定が構造の挙動に与える影響を検証するためパラメトリクスタディによる感度解析を行った。検討ケース一覧を表 1 に記載する。

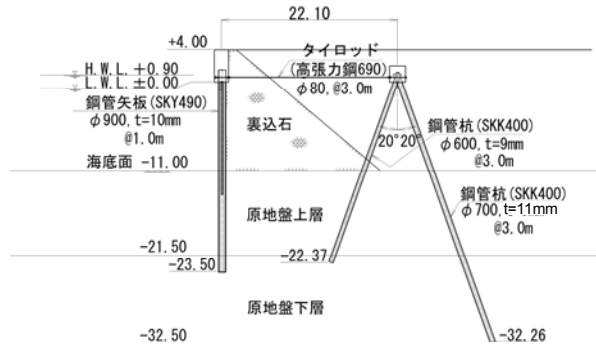


図 1 控え組杭式矢板護岸

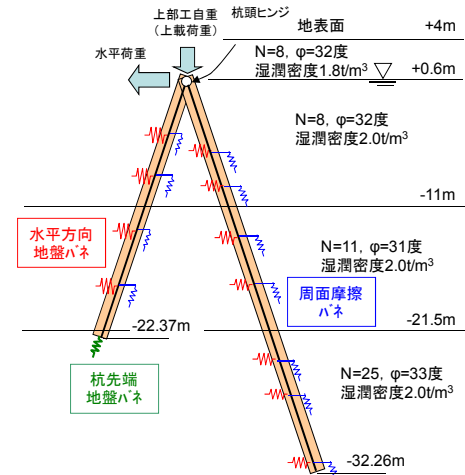


図 2 解析モデル

表 1 解析ケース(解析条件)

	水平地盤反力係数 k_h	杭先端地盤ハネ	杭周面摩擦ハネ
Case1	1500N	$Q_{max}=300NA_p, \delta_q=0.1D$	$f_{max}=2N, \delta_f=10mm$
Case2	1500N	固定	$f_{max}=2N, \delta_f=10mm$
Case3	$1500N \times 2$	固定	$f_{max}=2N, \delta_f=10mm$
Case4	1500N	$Q_{max}=300NA_p, \delta_q=10mm$	$f_{max}=2N, \delta_f=10mm$
Case5	1500N	$Q_{max}=300NA_p, \delta_q=0.1D$	$f_{max}=2N, \delta_f=20mm$

3. 解析結果 (基本ケース)

基本ケース(Case1)における荷重-変位関係を図 3 に示す。設計荷重時 ($H=1232kN$) には、構造としての挙動は弾性範囲に収まっており、杭の最大発生応力は降伏応力値以下であることを確認した。その後荷重を漸増させると、設計荷重(H)の約 2 倍付近で構造降伏が始まり、約 2.5 倍付近で解析が発散した。杭に作用する軸力など精査すると、周面摩擦が上限に達して引抜き限界を超えたことで構造が不安定になったことが確認された。押し込み杭の軸力についても計算上の最大耐力近くに達しており、押し込み・引抜き杭の設計上のバランスは

Key Words ; 組杭, 矢板式岸壁, 耐震, 港湾, 骨組解析

連絡先 ; 〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町 3-2-10 Tel: 03-3669-2437 Fax: 03-3669-1685

良好であると考えられる。押し込み・引抜き杭それぞれに降伏や塑性ヒンジが発生し(図3, Pt.1~4), 両杭に2点ヒンジが生じた際にも組杭構造が直ぐに崩壊することなく更なる荷重負担が可能であることは, 三角トラス形状の本構造が持つ「ねばり強さ」を表していると考えられる。終局状態における杭の状態は, 杭頭下1~4m付近で塑性化に至っていることが確認された。杭に生じる応力に着目すると, 表2に示すように設計荷重時には曲げ応力による成分比率が大きかったが, 終局荷重時には同位置(杭頭より押し込み杭:2.4m, 引抜き杭:2.1m)での軸応力による成分比率が大きくなっていった。

4. 解析結果 (パラメトリックスタディ)

基本ケースに対して, 解析モデルの差異が結果に与える影響について感度解析を行った。Case2は杭下端の境界条件を水平ローラーとしたもの, Case3はCase2の水平地盤バネ値を2倍としたもの, Case4はCase1の杭先端バネの勾配変化点を鉛直変位 $\delta_q=10\text{mm}$ としたもの, Case5はCase1の周面摩擦バネの勾配変化点を $\delta_f=20\text{mm}$ としたものである。それぞれの荷重-変位曲線を図4に示す。Case2では, 設計荷重(H)の約3倍付近で解析が発散した。Case1とは異なり, 押し込み側の杭が最大軸耐力を超えたことで構造が不安定となった。荷重の漸増により押し込み・引抜き杭それぞれに塑性ヒンジが生じたことで(荷重 $H=2800\text{kN}$ 時)荷重-変位曲線の勾配が変化した, 構造が直ぐに崩壊することにはなかった。Case3ではCase1に比べて30%程度の変位が抑制される結果であった。Case4ではCase1に比べて杭先端バネ剛性が6倍程度となっており, 組杭の水平変位が10%程度抑制される結果であった。また, 周面摩擦バネの剛性がCase1に比べて1/2程度としたCase5では, 組杭の水平変位が20%程度増加する結果であった。一連の結果を表3に示す。Case1, 4, 5の比較より, 境界条件の差異により軸応力比率の変動が見られ, 周面摩擦バネが構造挙動に及ぼす影響が比較的高いことを確認した。

Case1を基本として, 杭の斜角 ψ に依存する水平方向地盤バネの補正係数が荷重-変位曲線に与える影響を検証した(図5)。Case1aは補正係数なし, Case1bは杭頭から $1/\beta(\beta:\text{地盤の特性値})$ まで補正係数を考慮したものである。設計荷重時($H=1232\text{kN}$)付近では補正値有無による差異はほとんど見られなかったが, 荷重を漸増させると変曲点付近で差異が見られた。水平挙動は杭頭付近が支配的なためCase1, 1bの差異は微小であった。

5. まとめ

控え組杭式矢板岸壁を対象に, 非線形性を考慮した骨組解析を用いて設計境界条件の感度解析を実施した。組杭に降伏や塑性ヒンジが生じ引抜き時に構造が不安定化しても直ぐには崩壊しない結果であった。また, 各種条件の差異が組杭の荷重-変位曲線に与える影響を確認した。今後は, 過去の被災事例を基に本手法を用いた再現解析を行う予定である。

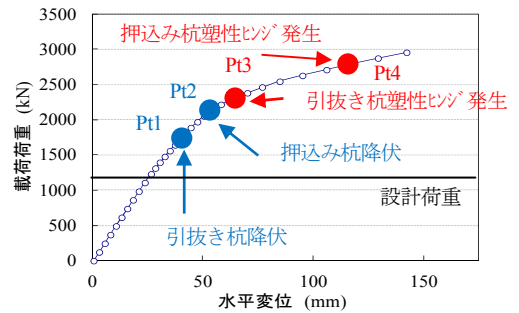


図3 組杭の荷重-変位曲線(Case1)

表2 杭に生じる応力成分(基本ケース)

設計荷重時	押し込み杭	軸応力	66.2	(曲げ応力比)
		曲げ応力	74.6	
終局荷重時	押し込み杭	軸応力	165.2	
		曲げ応力	150.8	
終局荷重時	引抜き杭	軸応力	99.6	
		曲げ応力	259.8	

(単位: N/mm^2)

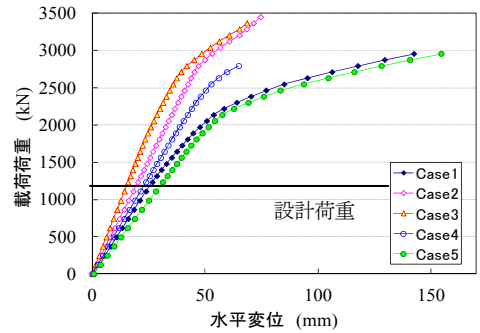


図4 組杭の荷重-変位曲線(全ケース)

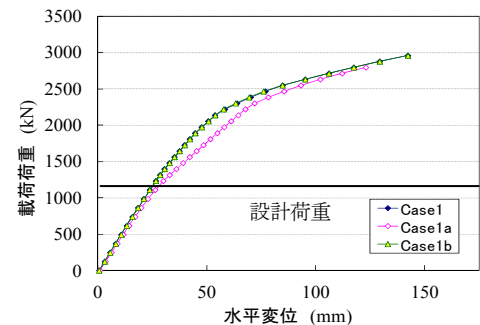


図5 組杭の荷重-変位曲線(全ケース)

表3 解析結果一覧

	杭頭変位 (水平/鉛直)	杭発生応力 (押し込み/引抜き)	杭軸応力比 ($\sigma_N/\sigma_M+\sigma_N$)
Case1	(H)26.6mm	140.8	0.47
	(V) 4.8mm	169.0	0.16
Case2	(H)20.1mm	143.0	0.59
	(V) 2.2mm	142.1	0.26
Case3	(H)15.8mm	133.1	0.52
	(V) 2.0mm	144.4	0.19
Case4	(H)23.7mm	142.8	0.52
	(V) 2.9mm	155.4	0.20
Case5	(H)31.2mm	142.4	0.39
	(V) 5.7mm	187.1	0.11

*杭軸応力比は, 杭に生じる応力に占める軸応力の比率を示す