



栈橋の杭頭剛性と土留めとの境界条件が耐震性能に及ぼす影響に関する基礎的研究

長尾, 毅
佐藤, 俊

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 18:66-73

(Issue Date)

2014-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011444>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011444>



栈橋の杭頭剛性と土留めとの境界条件が 耐震性能に及ぼす影響に関する基礎的研究

A fundamental study on the effect of pile head rigidity and boundary condition between wharf and earth retaining on the seismic performance of pile supported wharves

長尾 毅¹⁾
Takashi Nagao
佐藤 俊²⁾
Masaru Sato

概要：港湾構造物の係留施設の栈橋は、杭頭の剛性を高くしたうえで背後の土留めとは地震時にも荷重伝達が行われない前提で設計が行われるが、実際には土留めが海側に変形すると栈橋上部工に荷重が伝達される場合がある。1995年兵庫県南部地震における栈橋の被災原因としては、土留護岸が大きく海側に変位して渡版を介して栈橋上部工に力が作用したことと、地盤の海側への移動による力が鋼管杭に作用したためと推定されている。このような場合、杭頭の剛性を高くして地中部では剛性を減じるような設計法は適切なものとは言えないことになる。杭頭の剛性を低くして地震時の損傷を杭頭に誘導すれば、地震後の復旧も容易となる可能性がある。このように、杭頭剛性の設定や土留めとの境界条件は慎重に検討する必要がある事項であるにもかかわらず、設計の現場では他の条件を検討することなく一般的な条件が設定されるが、これらの条件を変えた場合の耐震性について検討された事例は皆無である。このため本研究では、栈橋の杭頭剛性や土留めとの境界条件が栈橋の耐震性能に及ぼす影響を解析的に検討した。

キーワード：栈橋, 耐震性能, 地震応答解析, 杭頭剛性

1. 序論

港湾構造物の係留施設のうち、栈橋は杭頭の剛性を高くしたうえで背後の土留めとは地震時にも荷重伝達が行われない前提で設計が行われるが、実際には土留めが海側に変形すると栈橋上部工に荷重が伝達される場合がある。

1995年兵庫県南部地震においては神戸港T栈橋で被災が生じたが、被災原因としては、土留護岸が大きく海側に変位して渡版を介して栈橋上部工に力が作用したことと、地盤の海側への移動による力が鋼管杭に作用したためと推定されている¹⁾。T栈橋においては被災後に鋼管杭の引き抜き調査が行われ、地盤内で座屈が生じていることが確認されている。このような場合、杭頭の剛性を高くして地中部では剛性を減じるような設計法は適切なものとは言えないことになる。杭頭の剛性を低くして地震時の損傷を杭頭に誘導すれば、地震後の復旧も容易となる可能性がある。

このように、杭頭剛性の設定や土留めとの境界条件は慎重に検討する必要がある事項であるにもかかわらず、設計の現場では他の条件を検討することなく一般的な条件が設定されるが、これらの条件を変えた場合の耐震性について検討された事例は皆無である。このため本研究では、栈橋の杭頭剛性や土留めとの境界条件が栈橋の耐震性能に及ぼす影響を解析的に検討した。

2. 検討方法

栈橋の杭頭剛性については、現状では剛結工法のみが採用されている。これに対して、主に建築の分野では、コンクリート充填鋼管構造²⁾³⁾が実用化され、採用実績がある。これは、鋼管の内部にコンクリートを充填することで強度と剛性を経済的に確保することを目的とした構造である。さらに、コンクリートを充填した鋼管杭と鉄筋コンクリート製の基礎を径の小さい鋼管コンクリートで連結することで杭頭回転剛性を低減させ、地震発生時に杭頭が容易に回転することで損傷を軽減する機構を有する半剛接接合工法⁴⁾等の新たな工法の開発も進められている。このため、栈橋の杭頭剛性については、今後新たな工法の適用の可能性が考えられる。

本研究では、杭頭剛性が栈橋の耐震性能に及ぼす影響を検討するため、杭と上部工の接合条件として剛結合とピン結合の2種類を設定した。剛結合は実際の条件であるが、ピン結合を採用した理由は、現時点で係留施設の地震応答解析に最も実績の多い解析コード FLIP⁵⁾が半剛接接合等の新たな杭頭剛性に対応したモデルを適用できないためである。実際にはピン結合は極端な条件であり現場への適用は想定しにくい、実績ある解析コードで杭頭剛性の影響を検証するために設定した条件であり、半剛接接合等の現実的な工法を採用した場合の耐震性能の評価については今後の課題としたい。

図-1 に解析モデルを示す。解析範囲は、水平方向については栈橋上部工を中心とする 200m、鉛直方向は $V_s=300\text{m/s}$ の工学的基盤までとしている。地盤条件は表-1 に示すとおりであり、臨海部の一般的な条件として固有周期や増幅倍率に差が生じるように設定した。なお FLIP では地盤の非線形特性は双曲線モデルを採用しており、せん断強度と初期剛性を与えれば非線形特性は表現できる。表-1 に示したように本研究では各層のせん断強度は内部摩擦角 ϕ より設定しているが、粘着力より設定してもせん断強度が同じであれば地盤特性に本質的な違いは無い。各層の内部摩擦角は、FILP における標準的なパラメータ設定法⁶⁾に従って各層の V_s より相対密度 D_r を求め、 D_r より設定している。

各地盤条件による地盤の周波数伝達関数は図-2 に示すとおりである。case1 が最も地盤固有周期が長く、かつ増幅倍率も大きい条件となっており、case3 は最も地盤条件の良い設定となっている。

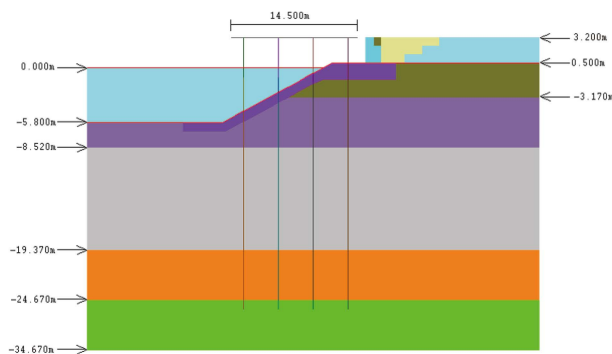


図-1 解析モデル

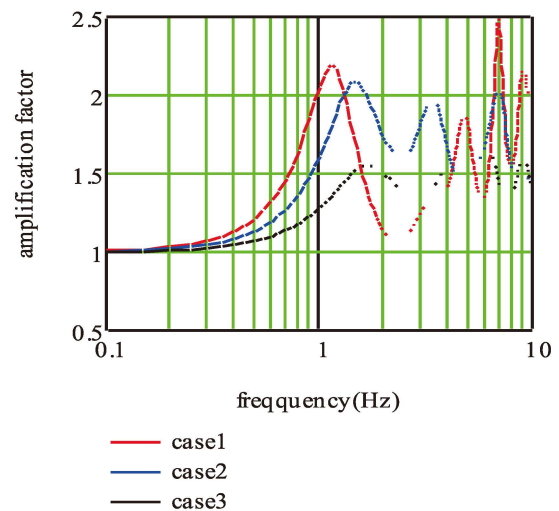


図-2 周波数伝達関数

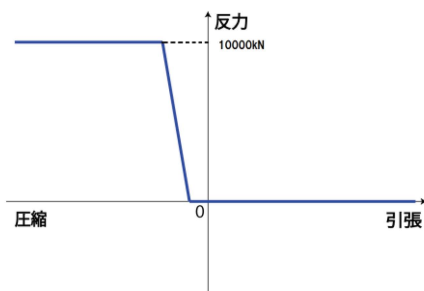


図-3 非線形ばねの特性

表-1 地盤物性

土層名	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	case1		case2		case3	
			V_S (m/s)	ϕ (°)	V_S (m/s)	ϕ (°)	V_S (m/s)	ϕ (°)
Ac1 層	2.7	2.04	90	37.8	90	37.8	120	37.3
As1 層	3.67	2.04	160	38.8	110	38	150	37.3
Av 層	5.35	2.04	140	38	120	37.9	180	37.5
Ac2 層	10.85	2.04	120	37.5	170	38.4	200	37.3
Al1 層	5.3	2.04	190	38.3	190	38.3	230	37.4
As3 層	10	2.04	210	38.5	250	38.8	250	38.8

栈橋の耐震性能に影響を及ぼす別の要素として栈橋と土留めの境界条件が挙げられる。本研究では、一般に設計で想定している両者がフリーな条件（渡版無）、栈橋と土留めの距離が一定値以下となると荷重伝達が行われる条件（渡版接触）、栈橋と土留めを渡版により結合した条件（渡版結合）の3種類の条件を設定した。渡版接触の条件については、非線形バネ要素を導入することでその特性を表現した。非線形バネ特性を図-3に示す。引張の条件では荷重は作用しないが、ある一定の値まで圧縮されると反力が働くモデルとなっている。荷重伝達が生じる圧縮量については約9cmとした。反力の最大値はコンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみに達するモーメントを算出し、その値を参照することで10000kNとした。

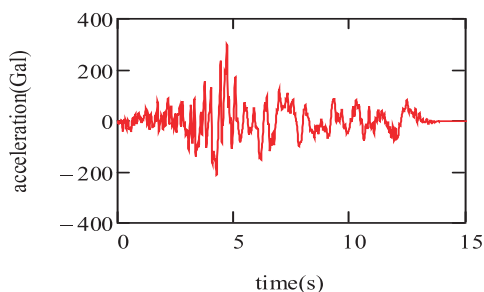
さらに、杭剛性についても表-2に示すように3種類の条件を設定した。杭剛性のcase1は杭頭の剛性を大きくする通常の設定であり、case2、case3は杭頭から杭下端まで剛性を一定にしたモデルとした。杭については非線形梁要素でモデル化し、M- ϕ 履歴関係はバイリニア型モデルとしている。

地震波形は1968年十勝沖地震の八戸波と1995年兵庫県南部地震の神戸波とし、加速度最大値をそれぞれ300Gal、400Galに設定した。最大振幅の違いは、フーリエスペクトルの1次ピークの振幅を概ね揃えることが目的である。図-4に入力波形の時刻歴を、図-5にフーリエスペクトルを示す。八戸波は0.4Hzに、神戸波は0.5Hzに1次のピークがある波形となっている。

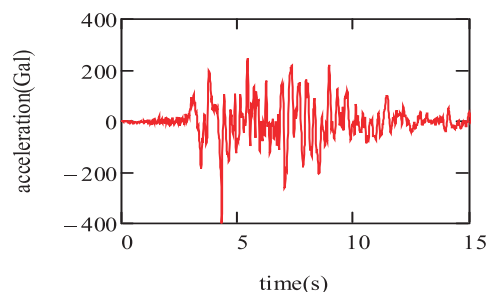
表-2 杭の諸元

単位: mm

	case1		case2		case3	
	直径	肉厚	直径	肉厚	直径	肉厚
重防部分	600	33.7	580	12.7	558	12.7
水中・土中	558	12.7	580	12.7	558	12.7



(a)八戸波



(b)神戸波

図-4 入力地震動

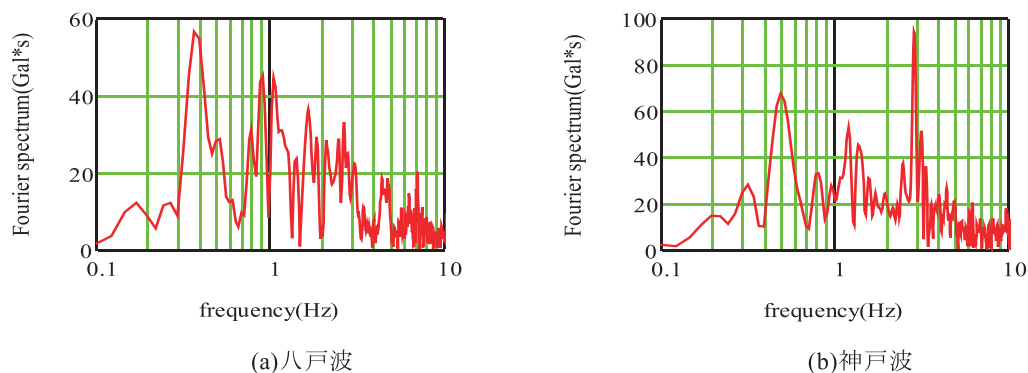


図-5 フーリエスペクトル

3. 検討結果

(1) 杭に生じる断面力

検討ケースのうち、地盤条件 **case2**，杭諸元 **case2**，入力地震波形を八戸波とした場合の海側の杭と陸側の杭に生じる最大曲げモーメントの深度分布を図-6 に示す。図-6 は、解析により得られた各節点における曲げモーメントの最大値をプロットしたものであり、同時刻の曲げモーメントを示したものではない。

基本的な傾向として、杭頭剛結合の場合は杭頭モーメントが最大となり、ピン結合の場合は地中部のモーメントが最大となる。また、海側杭と比較して陸側杭の曲げモーメントが大きい傾向にある。地中部の場合は層境界で最大曲げモーメントが生じる傾向にあり、これは地盤のインピーダンスコントラストの影響で層境界において地盤ひずみが大きくなりやすいことが原因である。地中部の最大曲げモーメント発生点は陸側の方が浅い地点に位置する傾向にある。具体的に曲げモーメントが最大になるのは、海側杭は Av 層と $Ac2$ 層の境界前後で、陸側杭は $As1$ 層と Av 層の境界前後であった。これは、地盤条件に関わらず同じ傾向にあった。栈橋の下部の地盤が土留めに向かって斜面をなしており、地震動を受けると地盤が円弧すべりの変位する。その円弧に沿って地盤ひずみが大きくなることで、このような傾向になったと考えられる。さらに、陸側は海側よりも水平成層状態から遠いので、初期状態からせん断応力が作用している。また、上の層ほど拘束圧が低いので強度が低くなり地盤ひずみが大きくなることで、もう一つの原因であると考えられる。神戸波を入力した結果も同様の傾向であった。なお中間の杭については、海側、陸側の杭の中間程度の曲げモーメントが生じる結果となっていた。

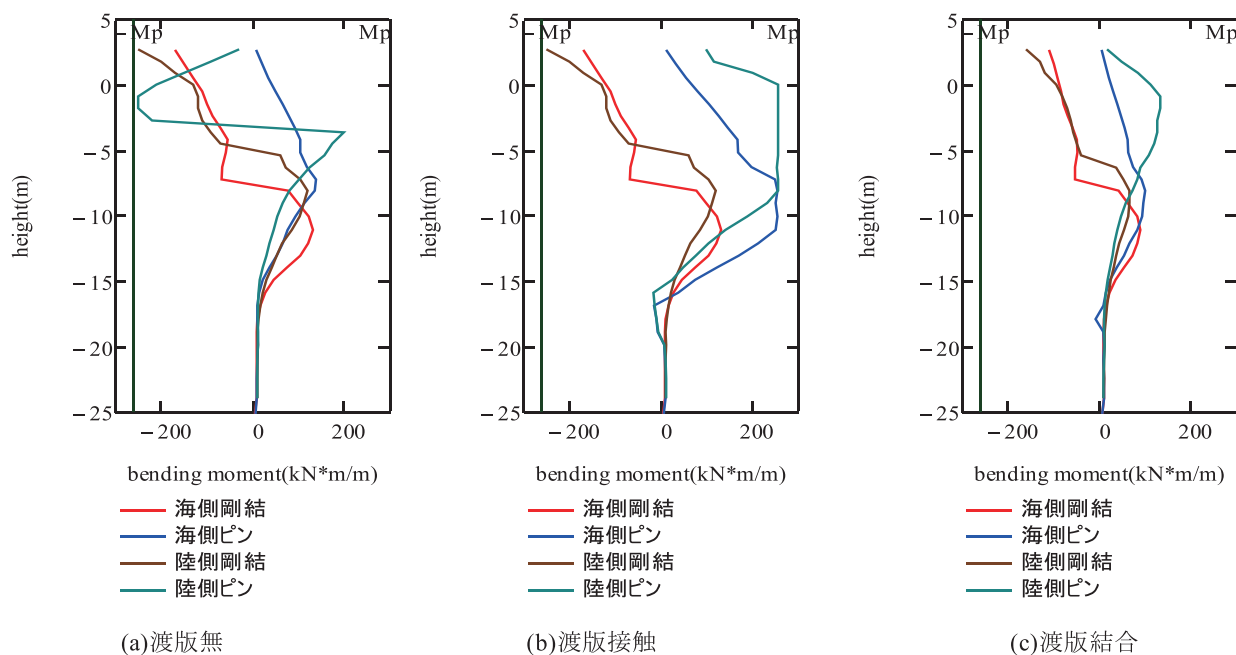
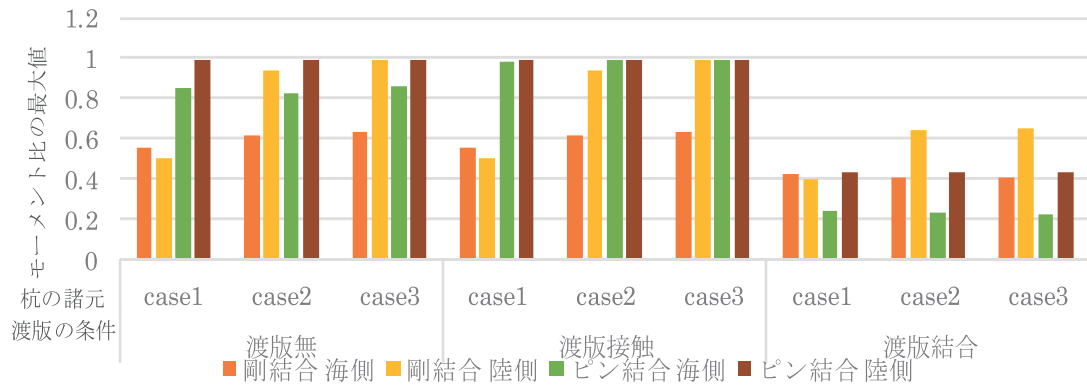
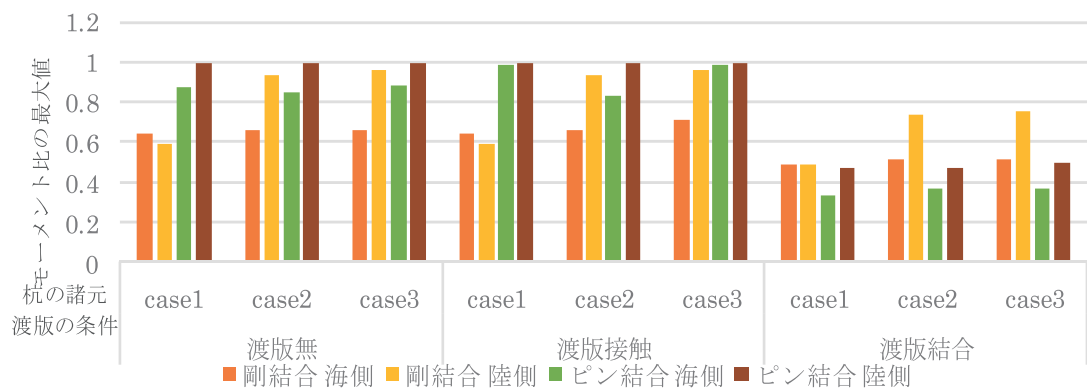


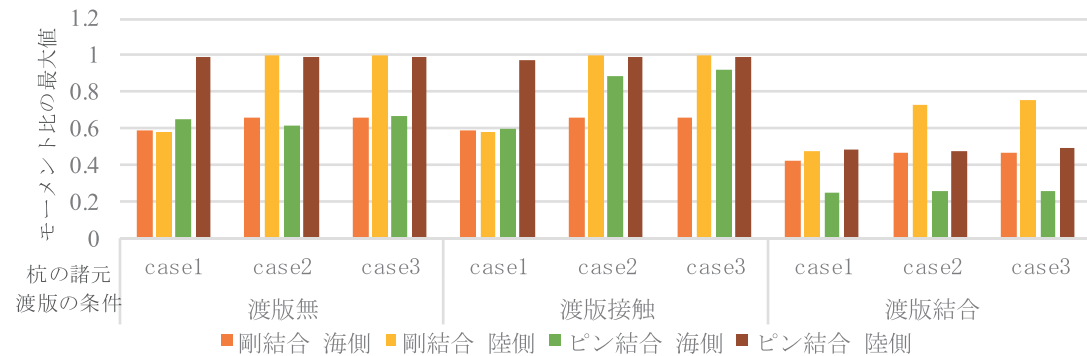
図-6 曲げモーメント深度分布



(a)地盤 case1



(b)地盤 case2



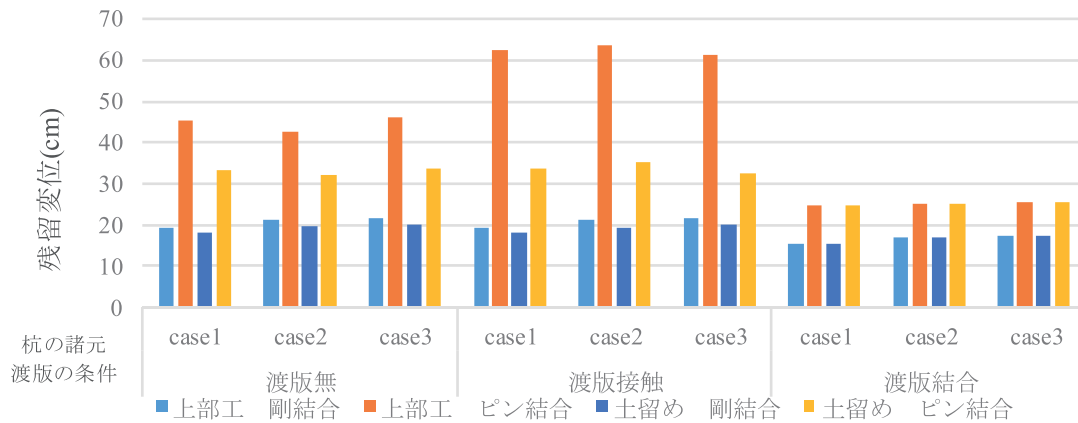
(c)地盤 case3

図-7 モーメント比最大値

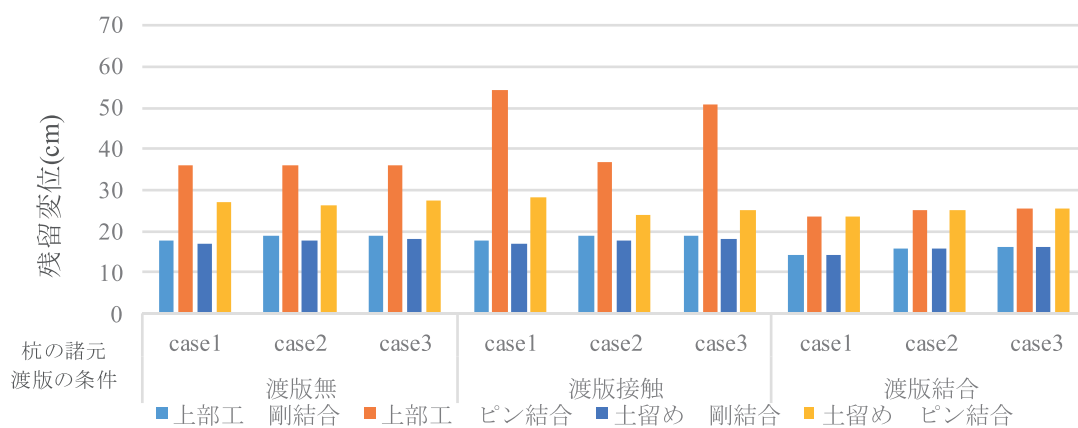
杭の塑性モーメントに対する杭に生じる曲げモーメントの比をモーメント比と定義し、神戸波を入力した結果の最大値を条件別に図-7に示した。図-7より、陸側杭の曲げモーメントが海側と比較して大きい傾向は全ての条件に共通した傾向であることが分かる。条件別に検討すると、渡版無の場合、剛結合とピン結合は同程度のケースがあるが、ややピン結合の方が曲げモーメントが大きいといえる。渡版接触の条件ではピン結合の方が曲げモーメントは大きい。渡版結合の場合、渡版無及び渡版接触と比較して曲げモーメントが小さく、かつピン結合の方が曲げモーメントが小さい傾向がある。これより、渡版無及び渡版接触の条件では、杭頭剛結の方がピン結合と比較して概ね曲げモーメントが小さくなり有利であるが、最も曲げモーメントが小さく有利となる条件はピン結合で渡版結合の条件である。今回の検討範囲では、杭頭剛性と土留めとの境界条件を一般的なものから変化させるほうが有利となる場合があることが分かった。地盤条件による違いと

しては、曲げモーメントが最も大きいのは **case2** であり、曲げモーメントが小さいのは最も地盤条件が良好な **case3** であった。地盤 **case1** は図-2 に示したように地盤の固有周期は最も長いものの、上層の As1 層等のせん断強度が比較的高いことが **case2** と比較して曲げモーメントが小さくなった原因と考えられる。

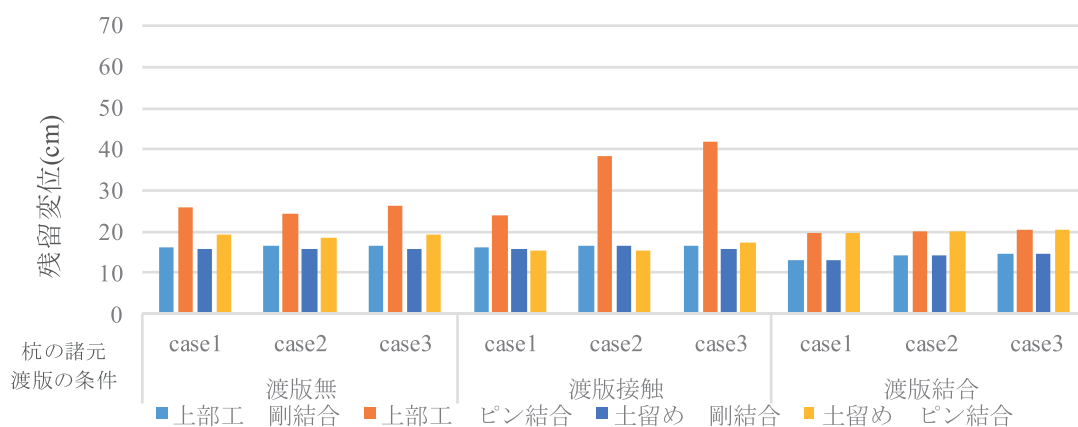
なお図-7 は神戸波に対する結果であるが、八戸波を入力した場合も同様の傾向であった。



(a)地盤 case1



(b)地盤 case2



(c)地盤 case3

図-8 残留変位

(2) 残留変形量

図-8 に神戸波入力の場合における各ケースの残留変形量を示す。剛結合と比較してピン結合の条件では残留変形量が大きい結果となっている。最も残留変形量が大きいのは渡版接触の条件であった。渡版無と渡版結合の結果を比較すると、剛結合の場合は概ね同程度の変形量であるが、ピン結合の場合は渡版結合の条件のほうが残留変形量を抑制できるといえる。地盤条件については、地盤の固有周期の長い順に残留変形量が大きい傾向にある。曲げモーメントに関して最も小さく有利であったピン結合で渡版結合の条件については、剛結合の各条件と比較すると残留変形量は大きいものの、栈橋の耐震性能としては杭に生じる断面力の小さいほうが優れていると判断するべきと考えられる。

4. まとめ

本研究では、栈橋の杭頭剛性や土留めとの境界条件が栈橋の耐震性能に及ぼす影響を解析的に検討した。本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

①杭頭剛性の影響

杭の健全性については、渡版無では剛結合とピン結合は同程度か、ややピン結合の方が曲げモーメントが大きいケースがある。渡版接触ではピン結合の方が曲げモーメントは大きい、渡版結合では、ピン結合の方が曲げモーメントは小さい傾向が見られた。残留変位に対しては、ピン結合の方が大きい傾向が見られた。

②栈橋と土留めの境界条件の影響

杭の健全性に対しては、渡版無、渡版接触では同程度かまたは渡版接触の方がピン結合において曲げモーメントが大きい。一方渡版結合では曲げモーメントが小さい傾向が見られた。残留変位に対しては、どの条件においても剛結合の場合あまり変化しないが、ピン結合の場合は渡版接触が大きい傾向にあった。渡版結合は渡版無と同等かやや小さい傾向が見られた。

③以上をまとめると、渡版無及び渡版接触の条件では、杭頭剛性は高いほうが断面力及び残留変形量の観点で概ね有利であった。一方、渡版結合の条件においては、残留変位はピン結合の方が大きいものの、曲げモーメントはピン結合の方が小さくなり、残留変位の制約が厳しくない条件下においては、ピン結合の方が有利である。今回の条件では残留変位を別にすればピン結合で渡版結合の条件が最も有利である。このように、条件によっては杭頭剛性と土留めとの境界条件を一般的なものから変化させるほうが有利となる場合があることが分かった。

今後は、半剛接などの、より現実的な杭頭剛性を採用した場合の耐震性能について検討する必要がある。

謝辞：本研究の遂行に当たり、パシフィックコンサルタンツ(株)・寺島彰人氏、(株)ニュージェック・曾根照人氏、同僚原直範氏に FLIP 解析についてご教示頂きました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 南 兼一郎, 高橋邦夫, 園山哲夫, 横田 弘, 川端規之, 関口宏二, 辰見ター: 神戸港における横栈橋の被害調査と動的相互作用解析, 第 24 回地震工学研究発表会, pp.693-696, 1997.
- 2) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997.
- 3) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計ガイドブック, 2012.
- 4) 米澤健次, 西村勝尚, 福本義之: 場所打ちコンクリート杭のスマートパイルヘッド工法の事例, 基礎工 40(6), pp.46-49, 総合土木研究所, 2012.
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbor Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 6) 森田年一, 井合進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技術資料 No.869, 1997.

著者: 1) 長尾 毅, 都市安全研究センター, 教授; 2) 佐藤 俊, 神戸大学工学部, 学生

CA FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF PILE HEAD RIGIDITY AND BOUNDARY CONDITION BETWEEN WHARF AND EARTH RETAINING ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF PILE SUPPORTED WHARVES

Takashi Nagao
Masaru Sato

Abstract

Design of pile supported wharf is conducted based on the assumption that load is not transmitted to the framed structure from the earth retaining and bending moment of the pile becomes maximum at pile head. However, validity of the assumption has not been examined thus far. In this study, two dimensional finite element earthquake response analysis modeling pile supported wharf is conducted. As pile head rigidity, both fixed condition and hinged condition were considered. As boundary condition between framed structure and earth retaining, three conditions were considered as follows: independent, load is transmitted when the distance between the framed structure and the earth retaining becomes smaller than a certain value and fixed condition. In addition, three ground condition, three pile rigidity and two seismic wave was considered. The result of the analysis showed that it is not necessarily advantageous to apply the fixed pile head and independent boundary condition. It was suggested that it is better to decrease the pile head rigidity for some conditions.

©2014 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.