

特集

多様化するケーソン工法

報文

底部拡幅型根入れケーソン基礎式栈橋の耐震性評価

長尾 毅* 倉知 禎直**

1 はじめに

本特集の各論「根入れを有するケーソンの港湾構造物への適用」で述べたように、根入れ式ケーソンを港湾構造物に適用する場合、栈橋への適用が有力であり、かつ基礎底部を拡幅することで更に耐震性を高めることが可能となる。ここでは、底部拡幅型根入れケーソン基礎式栈橋の水平載荷実験結果などについて紹介する。

2 水平載荷実験—その1^{1),2)}

図-1に実験概要図を示す。基礎ケーソン部直径 $\phi 6.0$ mを想定し、1/50スケールでラーメン構造の栈橋模型を作成した。図-2に栈橋模型図を示す。模型は、基礎底部まで円形($\phi 120$ mm)の通常タイプと基礎底部が矩形で幅180 mm、奥行き120 mm、高さ90 mmの拡幅①タイプ、矩形で幅240 mm、奥行き120 mm、高さ90 mmの拡幅②タイプの3種類とした。模型地盤は珪砂6号を用いて相対密度が70%となるよう空中落下法で作成した。土槽底面の影響を受けないように基礎底面から土槽底面までの距離を180 mmとし、基礎の土被り厚さを190 mmとした。栈橋の変位および傾斜は水平方向2ヵ所、鉛直方向2ヵ所に変位計を配置して計測した。また、模型底面の地盤反力は、通常タイプは底面に3ヵ所、拡幅①、②タイプは底面に5ヵ所に小型土圧計を設置して計測した。水平荷重は、1 mm/sの変位制御で栈橋模型上部工の中心位置に最大変

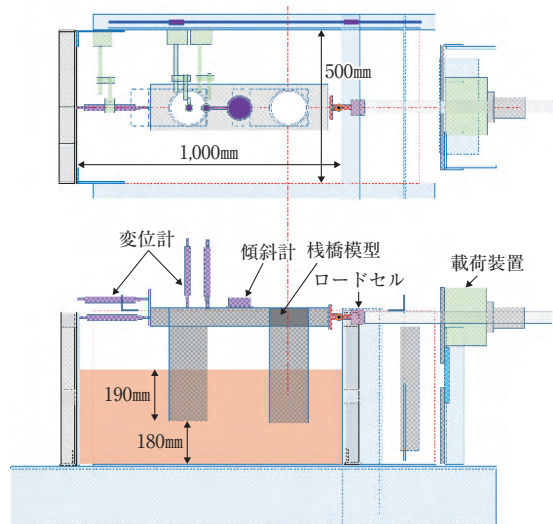


図-1 実験概要図

位20 mmまで載荷した。

図-3に水平変位(変位計②)と載荷重の関係を示す。通常(黒線)タイプでは荷重-変位関係の初期勾配は拡幅①(青線)や拡幅②(赤線)と同程度であるが、微小変位時に勾配が減少し、耐変位性能が低下する。拡幅タイプも水平変位の増加に伴い荷重-変位関係の勾配低下が認められるが、その程度は低く、また低下が発生する変位の値も大きく、拡幅②では10 mm変位まで顕著な勾配低下が認められない。拡幅タイプでは大変位時まで顕著な水平荷重抵抗性能の低下が生じないことが示された。

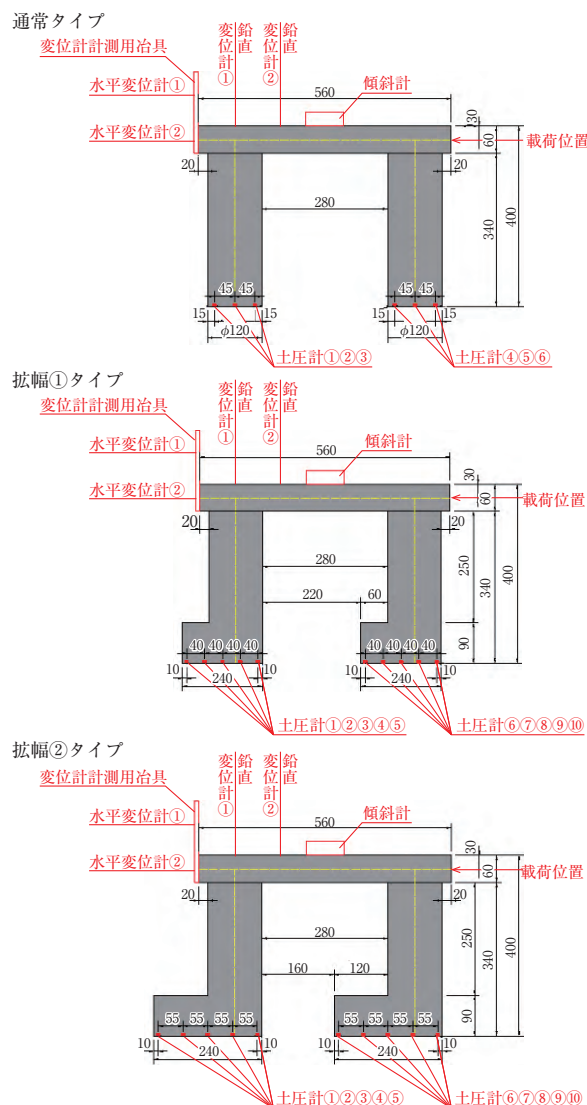


図-2 栈橋模型

* NAGAO Takashi 神戸大学 都市安全研究センター 教授, 博士(工学)
* KURACHI Yoshinao オリエンタル白石(株) 技術本部

神戸市灘区六甲台町 1-1
東京都江東区豊洲 5-6-52

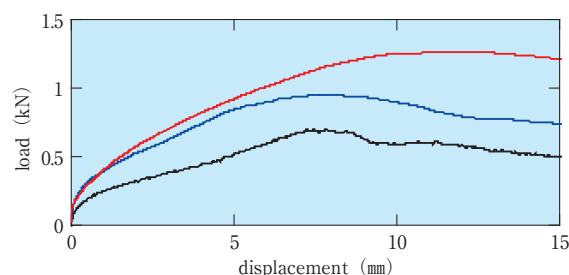


図-3 荷重-変位関係

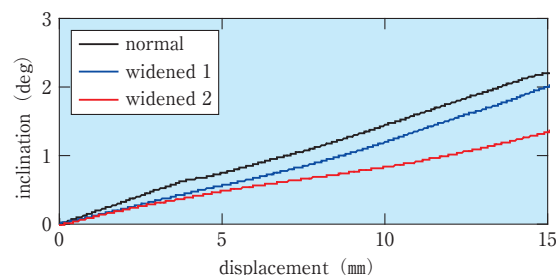


図-4 傾斜角-変位関係

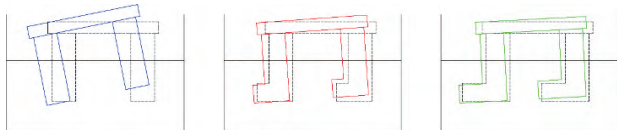


図-5 変位状況

水平荷重の最大値は拡幅②は通常タイプの2倍程度である。図-4には水平変位計のデータをもとに算出した傾斜角と水平変位（変位計②）の関係を示す。同水平変位時の傾斜角は、通常、拡幅①、拡幅②の順に小さく、通常タイプでは傾斜の大きな増加を伴いながら水平変位が進行しているが、拡幅タイプでは傾斜の増加は抑制される。図-5に載荷重が0.69kN時の各栈橋の変位状況を示す。変位は10倍に拡大表示している。変位状況をまとめると、拡幅タイプは通常タイプと比較して水平変位は1/2～1/3倍、傾斜角は1/2倍である。水平変位が6mmの状態は相似則を考慮して実スケールに換算すると2.1mに相当し、岸壁の耐震設計実務で許容される変位量1mを超える値である。よって水平変位が6mm以下の範囲に着目すると、拡幅①と拡幅②では顕著な変形量の違いはないため、拡幅幅としてはそれ以外の基礎幅の1.5倍程度としておけば十分といえる。

3 水平載荷実験—その2^{3), 4)}

このほかの類似の水平載荷実験について紹介する。土槽としては水平載荷実験その1と同じものを用い、栈橋模型は通常と拡幅タイプの2種類とした。模型の詳細は参考文献3), 4)を参照いただきたい。この実験では通常タイプの基礎直径を60mm、拡幅タイプの基礎底面幅を115mmとし、基礎底面に土圧計を設置して鉛直地盤反力分布の特性を把握することなどを主目的とした。

通常タイプの地盤反力分布を図-6に示す。左端の星印が変形が生じる側（以下前面）、右端が荷重載荷側（以下背面）の値であり、双方を直線で結んでいる。凡例は水平荷重の値を示す。直線の交点が回転中心位置である。

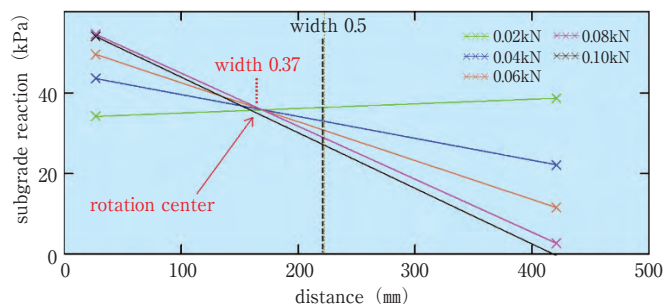


図-6 地盤反力分布と回転中心（通常タイプ）

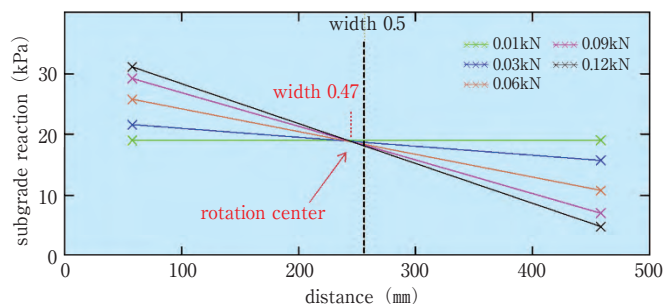


図-7 地盤反力分布と回転中心（拡幅タイプ）

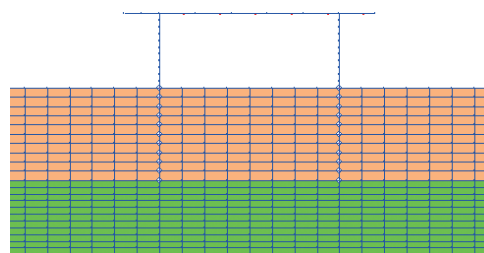


図-8 有限要素メッシュ

回転中心はラーメン構造中心（縦破線，width0.5）より前面寄り（width0.37）にある。拡幅タイプの結果を図-7に示す。拡幅タイプでは初期地盤反力分布が各脚で様ではない。そこで、4つの鉛直圧力の初期値を平均し、各鉛直圧力の値からその初期値平均値を減じた。さらに、前面・背面それぞれの鉛直圧力の値を平均し、その値を各脚の土圧計設置位置の中央に対してプロットした。回転中心が通常タイプよりラーメン構造中心に近い（width0.47）結果となっている。前面の地盤反力に関する腕の長さが長いこと、拡幅タイプの抵抗回転モーメントは通常タイプよりも大きいことが期待できる。このような効果は技術マニュアル⁵⁾では考慮できていない。

4 水平載荷実験—その1の解析による再現¹⁾

水平載荷実験その1を解析コードFLIP⁶⁾による有限要素解析で再現した。地盤は非線形性を考慮したマルチスプリング要素を用い、栈橋模型は線形梁要素を適用している。梁要素は幅を有さない要素であるため、底部拡幅タイプは拡幅部分およびその上部の地盤の重量を基礎部の要素の質量として見込んでいる。栈橋を含む中心部分の有限要素メッシュを図-8に示す。

地盤と構造物の境界条件として、基礎底面以外の部分

報文 底部拡幅型根入れケーソン基礎式栈橋の耐震性評価

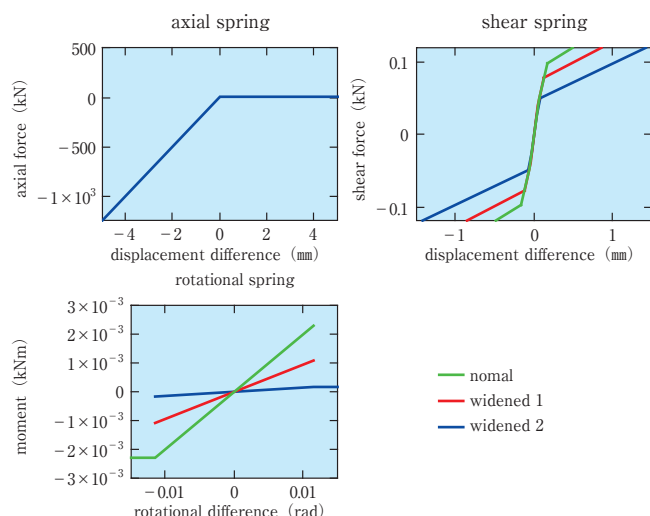


図-9 非線形ばね特性

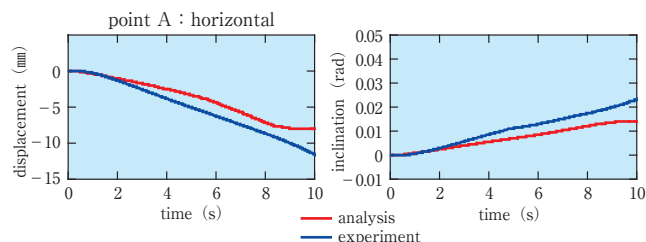


図-10 解析結果(通常タイプ)

には杭-地盤相互作用ばね要素を配置した。これは、地盤ばねを地盤の非線形性に依拠して設定するもので、かつ2次元解析でありながら、栈橋が傾斜するときに基礎周辺を地盤がすり抜ける効果のある程度考慮するものとなっている。

今回の解析で、従来の栈橋の有限要素解析と異なる方法として新たに考慮したのは以下の2点である。

- ① 基礎下端の境界条件：通常の解析では基礎下端は地盤と節点を共有するのが一般的である。しかしその場合、水平載荷に伴って載荷側の基礎が浮き上がるという現象を再現することは困難である。基礎下端で節点が地盤と共有されている場合、基礎下端が浮き上がろうとするときに地盤が基礎と一緒に浮き上がることであり、非現実的な挙動が生じる。さらに、接点共有の場合、特に底部拡幅タイプで期待される回転抵抗モーメントを適切に考慮することはできない。ここでは、軸方向、軸直角方向、回転方向の3つについて非線形性を示すばね要素を配置した。軸方向ばねは上記のとおり、地盤と基礎が剥離する際には荷重伝達が生じない特性とし、軸直角方向は最大静止摩擦力を考慮して設定し、回転ばねは既往の研究⁷⁾に従った。非線形ばね要素の特性を図-9に示す。
- ② 基礎下部の地盤のモデル化：通常の解析では基礎下部の地盤も非線形特性を有するモデルとすることが多い。しかし、ここでは基礎を梁要素としてモデル化しているので、栈橋の重量が基礎下部の地盤に集中荷重として作用する。そのため、地盤の非線形特性が顕著に生じ、地盤応力を適切に考慮できない。よって、基礎下部の地盤(図-8の緑色部分)は線形平面要素と

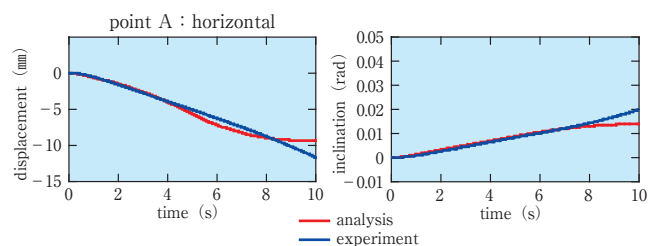


図-11 解析結果(拡幅①タイプ)

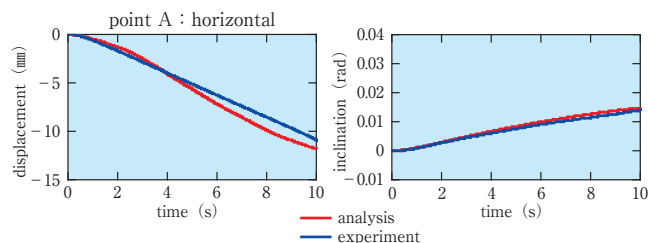


図-12 解析結果(拡幅②タイプ)

してモデル化した。

栈橋上部工の水平変位、栈橋の傾斜角を実験と解析で比較した。図-10に通常タイプ、図-11に拡幅①タイプ、図-12に拡幅②タイプの結果を示す。いずれも解析結果と実験結果はよく一致しており、解析により栈橋の応答を評価できるといえる。

5 おわりに

ここで紹介した底部拡幅型根入れケーソン基礎式栈橋の耐震性や解析におけるモデル化方法などは、技術マニュアル発刊後の新たな知見であり、設計実務や現場への適用が求められることから、技術マニュアルの改訂を進めるなど、本技術の普及に努めていきたい。

参考文献

- 1) T. Nagao, Y. Kurachi : Experimental and Analytical Study on Seismic Performance of Pier with Different Foundation Bottom Width, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 12, No. 5, 2022.
- 2) 長尾毅, 津田葉涼太, 小宅知行, 倉知直植 : 底部拡幅ケーソン基礎式栈橋の基礎幅と地盤反力度に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会, 2021
- 3) T. Nagao : An Experimental Study on the Way Bottom Widening of Pier Foundations Affects Seismic Resistance, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 10, No. 3, 5713-5718, 2020.
- 4) 長尾毅, 山岡理恵, 二宮庸平, 柴田大介 : 底部拡幅ケーソン基礎式栈橋の耐震性に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会, 2020.
- 5) 沿岸技術研究センター, 根入れを有するケーソン工法の技術マニュアル, 平成31年.
- 6) S. Iai, K. Ichii, H. Liu and T. Morita : Effective stress analysis of port structures, Special issue of Soils and Foundations, 38, pp. 97~114, 1998.
- 7) T. Nagao, R. Tsutaba : Evaluation Methods of Vertical Subgrade Reaction Modulus and Rotational Resistance Moment for Seismic Design of Embedded Foundations, Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 11, No. 4, 7386-7392, 2021.