

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04324

研究課題名(和文) 高剛性基礎式栈橋の耐震設計法の開発に関する研究

研究課題名(英文) Study on seismic design of piers with highly rigid foundations

研究代表者

長尾 毅 (Nagao, Takashi)

神戸大学・都市安全研究センター・教授

研究者番号：30356042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：港湾構造物の栈橋の耐震設計法は鋼管杭の基礎を用いた通常の形式に対して確立されたものであり、鋼管杭基礎よりも耐震性が優れていると考えられるケーソン等の高剛性基礎を用いた栈橋については、耐震設計法が確立されていない。高剛性基礎と鋼管杭では剛性の違いが大きいため地震時の栈橋の挙動が異なることに加えて、大地震作用時に杭間を地盤がすり抜ける効果を現在の設計法では十分に考慮できないことなどの理由により、高剛性基礎式栈橋に対して通常の鋼管杭式栈橋を対象に構築された設計法を適用することには問題があると考えられる。

本研究では、室内実験および解析によって、ケーソン基礎等の高剛性基礎式栈橋の耐震性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高剛性基礎式栈橋を現在の設計法で設計すると、基礎の高剛性を適切に考慮できないため、過大な設計となってしまう。これは工費の不適切な増加につながる。さらに、高剛性基礎の耐震設計法は、半世紀近く昔の実験結果を、その合理性を再検証することなく使い続けている項目があり、これも合理的な耐震設計法の構築という観点から問題がある。本研究の成果を活用することにより、高剛性基礎式栈橋の合理的な耐震設計を行うことが可能になる。

研究成果の概要(英文)：The seismic design method for piers of port structures has been established for piers using the steel pipe pile foundation, and a seismic design method has not been established for piers using highly rigid foundations such as caissons, which are considered to be superior in seismic resistance to steel pipe pile foundations. There is a problem in applying the design method constructed for piers with steel pipe pile foundations to those with high rigid foundations; the behavior of the pier during earthquakes differs because of the difference in the foundation rigidity, and the effect of the ground passing through between piles during massive earthquakes cannot be sufficiently considered by the present design method.

In this study, seismic resistance of piers with highly rigid foundations such as caisson foundations was examined by laboratory experiment and analysis.

研究分野：地震工学

キーワード：栈橋 耐震性能 地盤反力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

港湾構造物の岸壁のうち棧橋は、杭径 1m 程度以下の鋼管杭で鉄筋コンクリート製の上部工を支える構造が主流であり、背後の土留からの土圧の影響により大地震作用時には必ず海側への大きな残留変形が生じる。このため大地震を考慮した設計時には地盤変形の影響を考慮する必要があり、棧橋と地盤を一体的にモデル化した 2 次元有限要素法による有効応力解析手法で評価することが一般的である。3 次元の構造を 2 次元でモデル化するために、棧橋の杭は単位奥行き当たりの剛性が等価な剛性の低い連続壁としてモデル化せざるを得ず、実構造物との間に乖離がある。3 次元の構造を忠実にモデル化する 3 次元解析手法の開発も行われているが、研究途上の段階であるため、設計実務への適用の目途は立っていない。

通常の鋼管杭式棧橋と比較して剛性が高いケーソン等の基礎を用いた構造では、高剛性基礎の利点を生かして基礎の配置間隔を広く取るために上述した解析モデルと実構造物の差が看過しえない。また、地盤の大変形時には杭間を地盤がすり抜ける現象が生じる。設計実務の 2 次元有限要素解析においても地盤のすり抜け効果を考慮した解析を行っているものの、現在用いられている解析パラメータは杭の微小変形条件における 2 次元有限要素解析結果をもとにモデル化が行われており、地盤が大変形する条件の実験結果などを再現したものではないために実現象をシミュレート可能なモデルとなっていない可能性がある。実際に高剛性基礎式棧橋の地震時応答を評価すると、杭間の地盤のすり抜けがあまり生じずに基礎が地盤の変形の影響を強く受け、棧橋が地震時に大変形を起こすと判断されて工法として採用されることがほとんどないのが現状である。このため、コストの高い別工法が採用されることとなり、合理的な社会資本の整備という観点で大きな問題であるといえる。さらに、高剛性基礎は 5m 程度の大口径の基礎となるが、通常の 2 次元有限要素解析では基礎をはりモデルでモデル化するため、大口径の基礎周辺の地盤の影響を適切に考慮できない等の問題点がある。

### 2. 研究の目的

上述した背景のもと、単なる研究レベルではなく設計実務への導入促進を目指して、高剛性基礎を有する棧橋の耐震設計法に関係する検討を行うことを目的とする。具体的には以下の通りである。

#### 地盤反力係数の合理的評価

基礎の根入れ部には水平地盤反力が作用するとともに、高剛性基礎を用いた場合は基礎幅が数メートルの諸元となるので、基礎底面に作用する鉛直地盤反力の適切な評価が重要である。このほか、鉛直地盤反力による地震時の回転抵抗モーメントの適切な評価も重要である。これらを設計実務で簡易に評価する手法について検討する。

#### 基礎幅の変化に応じた耐震性能の評価

棧橋の地震時の挙動として、高剛性基礎を用いた場合は、基礎の曲げ変形による降伏などの破壊モードが生じることは考えられない。代わりに、傾斜および滑動という破壊モードが重要となる。数値解析でこれら破壊モードに対する性能を適切に評価する手法を構築するためには、参照すべき実験データを蓄積することが重要である。しかしながら、既往の棧橋構造に対する実験は、基礎を土槽下端に固定して地震時に生じる杭の曲げ変形をモニターすることに主眼が置かれており、高剛性基礎式棧橋の変形挙動として参照することはできない。このため、本研究では、基礎を土槽下端に固定しない条件で、地震時の変形挙動をモニターすることを目的とする。

#### 側方流動作用時の基礎の耐震応答の評価

杭と地盤の相互作用に関しては数多くの実験的・解析的研究が存在するが、そのほとんどは、上部工を支える杭が地震時に微小変形したときの地盤との相互作用を扱ったものである。しかしながら、大地震時には岸壁の背後地盤が数メートルの変形を起こすことが知られており、そのような条件における杭と地盤の相互作用について検討した事例は皆無である。このため、本研究は、杭背後の地盤に大変形を生じさせて杭との相互作用を検討する。

### 3. 研究の方法

#### 地盤反力係数に関する解析的および実験的評価

解析および実験によって地盤の弾性係数、基礎幅と地盤反力係数の関係を検討し、地盤反力係数の評価方法の提案を行う。地盤反力係数としては、水平と鉛直の地盤反力係数を対象とする。解析的検討には弾性応力解を用いた検討と、有限要素法を用いた検討を行う。さらに、実験的検討としては、土槽に地盤と杭模型を設置して側方流動を再現した載荷実験を行い、杭に作用する土圧を計測することによって地盤反力係数の評価を行う。

#### 水平載荷実験による基礎および棧橋の応答評価

側方流動発生時の杭に作用する土圧と地盤のすり抜けを検討するために、土槽の底版上に 2 本の鋼鉄製の模型杭を固定し、底版とは独立した土槽枠をメガトルクモータで水平載荷することにより、土槽内の模型地盤に水平変位を与えた。杭径と杭間隔を変化させた実験を実施する。さらに、棧橋模型を基礎を土槽に固定することなく、地盤上に設置して水平載荷を行うことによ

り、栈橋の変形及び基礎に作用する地盤反力などの評価を行う。基礎幅を 4-10m に変化させた検討により、基礎幅が耐震性能に及ぼす影響を評価する。

#### 4. 研究成果

##### 地盤反力係数の評価

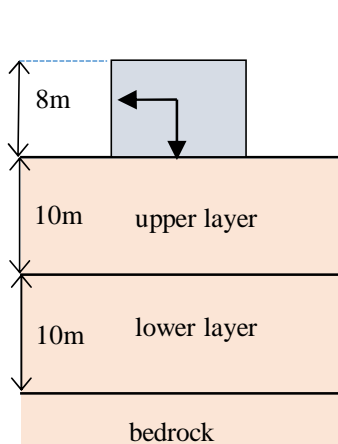


図1 鉛直地盤反力係数

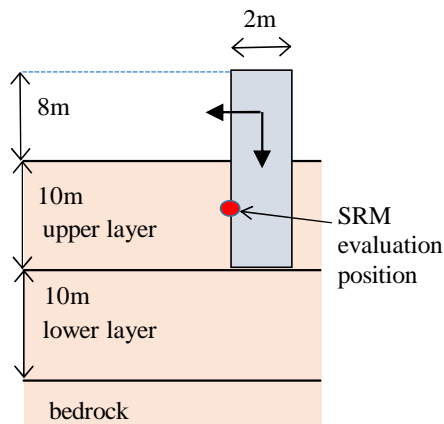


図2 水平地盤反力係数

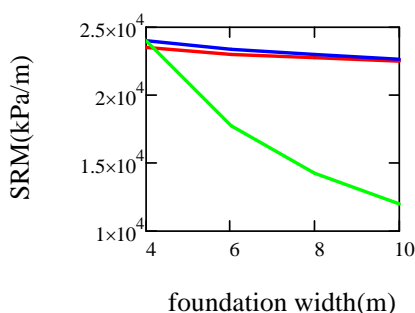


図3 鉛直地盤反力係数

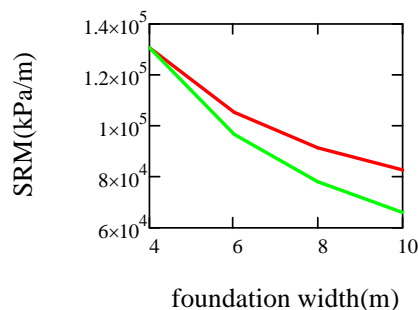


図4 水平地盤反力係数図

図1および図2に示す条件で鉛直および水平地盤反力係数を評価した。地盤の剛性と基礎幅を変化させて解析的に地盤応力と基礎の変位をもとに地盤反力係数を評価し、道路橋示方書の地盤反力係数と比較した結果がそれぞれ図3および図4である。緑線は道路橋示方書による評価結果、赤線及び青線は本研究による評価結果である。鉛直荷重が作用する場合、地表面の応力は水平方向の場所によらず同じだが、地中応力については深さの増加に伴って急激に減少し、幅4mの場合深さ-10m、幅10mの場合は深さ-20mで水平方向の位置によらずほぼ同じ値となる。基礎幅が狭い方が水平方向位置による応力の差が小さいのは、基礎幅が狭いほど応力の重ね合わせの効果が小さいためである。ただし、地盤剛性の深さ依存性のために、地盤反力係数の深さ依存性は比較的小さく、道路橋示方書の式を適用すると、基礎幅が広い場合は地盤反力を過小評価する。一方、水平地盤反力係数については、基礎幅依存性は顕著であり、道路橋示方書の式は比較的解析結果と整合する。

巨大地震に対して耐震性能を満足させるためには、鉛直地盤反力の適切な評価が重要である。道路橋示方書の式を用いると、鉛直地盤反力を適切に評価できないため、過大設計につながる。

##### 載荷実験による耐震性能評価

図5に実験装置概要図を示す。ケーソン基礎径6mの栈橋をモデルとして1/100スケールで栈橋模型を作成した。実験装置は図5に示すように、土槽、栈橋模型、載荷装置、計測装置(水平変位計、鉛直変位計、土圧計、荷重計)から構成されている。ケーソン基礎が土槽壁の影響を受けないように、平面寸法として土槽幅を  $D=500\text{mm}$ 、ケーソン基礎幅を  $B=60\text{mm}$  とし、 $D/B=500/60=8.3$  とした。図6に栈橋模型概要図を示す。栈橋模型はラーメン構造であり、基礎底部まで幅が一定(60mm)のもの(以下、通常タイプ)と、基礎底部を拡幅(基礎下端から高さ45mmの範囲を幅55mm拡幅)したもの(以下、拡幅タイプ)の2種類とした。地盤は上層、下層の2層で構成し、珪砂6号を用いて空中落下法により相対密度がそれぞれ42,77%程度になるように作成した。これはN値としてはそれぞれ5,33に相当する。層厚は上層が100mm、下層が135mmとし、土槽の底版が剛であるために模型基礎下部の地盤変形が拘束されることのないようにした。各種計測装置の設置位置は図-2に示すとおりである。基礎底面の鉛直地盤反力を測定するため、通常タイプの実験では2つ、拡幅タイプの実験では4つの土圧計を設置した。栈橋模

型の変位水平方向と鉛直方向に設置した変位計で計測した。図6に示す位置に水平荷重(変位制御)を作用させ各種項目の測定を行った。以下では栈橋の水平変位として2mm(実スケール換算で2m)程度までの特性を検討する。

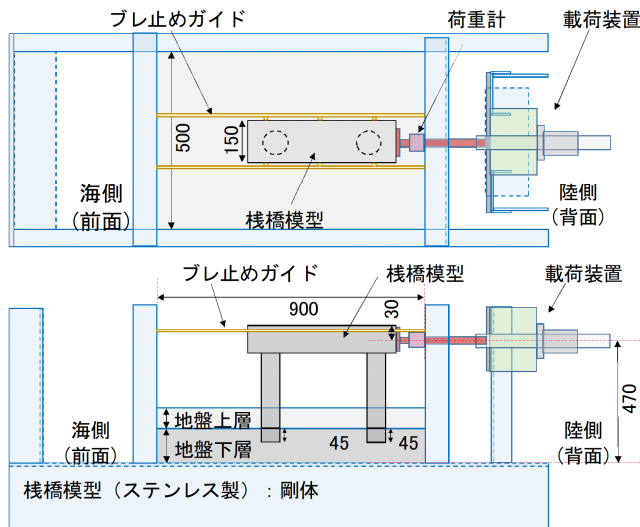


図5 実験装置概要図

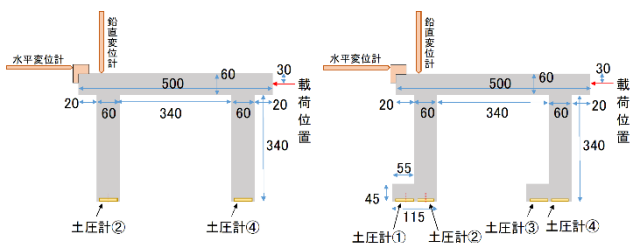


図6 栈橋模型概要図

通常タイプの地盤反力分布を図7(a)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。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(b)に示す。拡幅タイプでは初期地盤反力分布が各脚で一様ではない。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から, 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。このような効果は現在の設計法では考慮できていない。

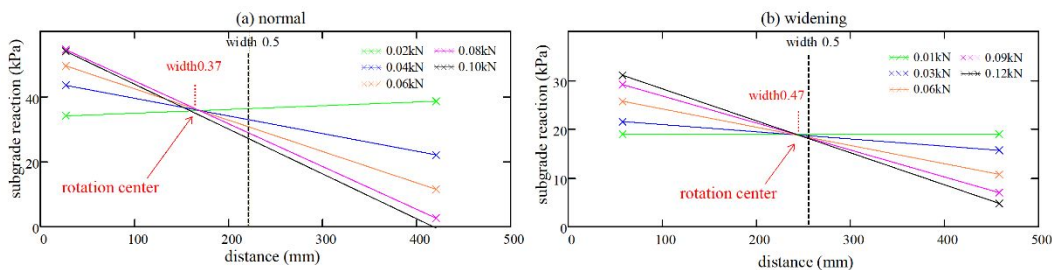


図7 地盤反力分布

図8に水平荷重と水平変位の関係を示す。(a)が実験結果, (b)が実スケールに換算した結果である。荷重-水平変位関係はバイリニア的な関係を示すが, 荷重初期段階で傾斜が生じ, 傾斜が進行して背面の地盤反力がゼロとなり片脚が浮き上がった後に滑動が生じていると考えられる。拡幅タイプは通常タイプと比較して同じ水平荷重に対して水平変位量が1/3~1/4程度に収まる。傾斜変形, 滑動のいずれについても, 拡幅タイプは優れていると考えられる。また, 荷重が大きくなると両者の変形量の差が大きいことから, 震度が大きい範囲(巨大地震相当)では, 基礎底面幅の効果がより発揮されることが考えられる。図9に荷重と鉛直変位の関係を示す。ここで, 鉛直変位がプラスとは栈橋が海側に回転(傾斜)していることを

示している。拡幅タイプは通常タイプと比較して同じ水平荷重に対して回転・傾斜量が小さい結果となっている。

栈橋模型を用いた水平載荷実験から、基礎底面幅の違いにより変形抵抗に違いがあることを確認した。拡幅タイプは、回転中心がラーメン構造中心に近くなるとともに基礎底面反力分布幅が広がるので、モーメント反力が大きくなり、通常タイプに比べて回転抵抗が大きくなる。また、荷重と変位の関係から、拡幅タイプは滑動抵抗性能においても優れる。

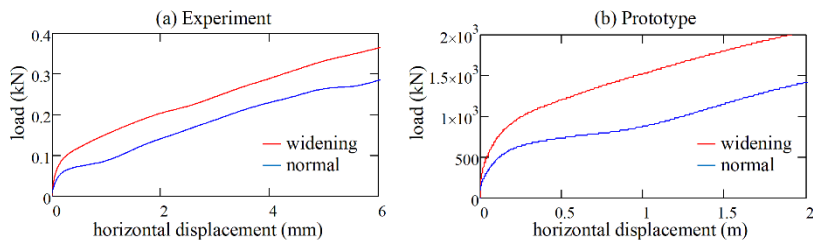


図8 水平荷重と水平変位の関係

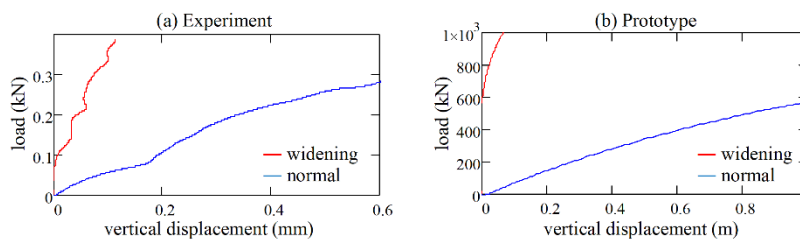


図9 荷重と鉛直変位の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 T. Nagao and D. Shibata	4. 巻 Vol. 9, No. 6
2. 論文標題 Experimental Study of the Lateral Spreading Pressure Acting on a Pile Foundation During Earthquakes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering, Technology & Applied Science Research	6. 最初と最後の頁 5021-5028
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48084/etasr.3217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Chen Jian, O-tani Hideyuki, Takeyama Tomohide, Oishi Satoru, Hori Muneo	4. 巻 258
2. 論文標題 Toward a numerical-simulation-based liquefaction hazard assessment for urban regions using high-performance computing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 105153 ~ 105153
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enggeo.2019.105153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Chen Jian, Takeyama Tomohide, O-tani Hideyuki, Yamanoi Kazuki, Oishi Satoru, Hori Muneo	4. 巻 117
2. 論文標題 Code verification of soil dynamics simulations: A case study using the method of numerically manufactured solutions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers and Geotechnics	6. 最初と最後の頁 103258 ~ 103258
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compgeo.2019.103258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takeyama Tomohide, Tachibana Shinya, Kitanoi Tomoki, Iizuka Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Application of Partitioned Iterative Coupling Approach to Multi-physics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Civil Engineering and Construction	6. 最初と最後の頁 13 ~ 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32732/jcec.2019.8.1.13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nagao T.	4. 巻 10
2. 論文標題 An Experimental Study on the Way Bottom Widening of Pier Foundations Affects Seismic Resistance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering, Technology & Applied Science Research	6. 最初と最後の頁 5713 ~ 5718
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48084/etasr.3590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagao T.	4. 巻 10
2. 論文標題 Effect of Foundation Width on Subgrade Reaction Modulus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering, Technology & Applied Science Research	6. 最初と最後の頁 6253 ~ 6258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48084/etasr.3668	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 柴田大介, 長尾 毅
2. 発表標題 側方流動による地盤変位と杭基礎に作用する土圧に関する水平載荷実験
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中道洋平, 杉江茂彦, 竹山智英
2. 発表標題 粒子法による土水連成解析の定式化と多次元解析による検証
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shibata D. and Nagao
2. 発表標題 Earthquake response of open-type wharf with pneumatic caisson foundation
3. 学会等名 SUSI2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田大介, 長尾 毅
2. 発表標題 側方流動による地盤変位と杭基礎に作用する土圧に関する水平載荷実験
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	竹山 智英  (Takeyama Tomohide)  (00452011)	神戸大学・工学研究科・准教授   (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------