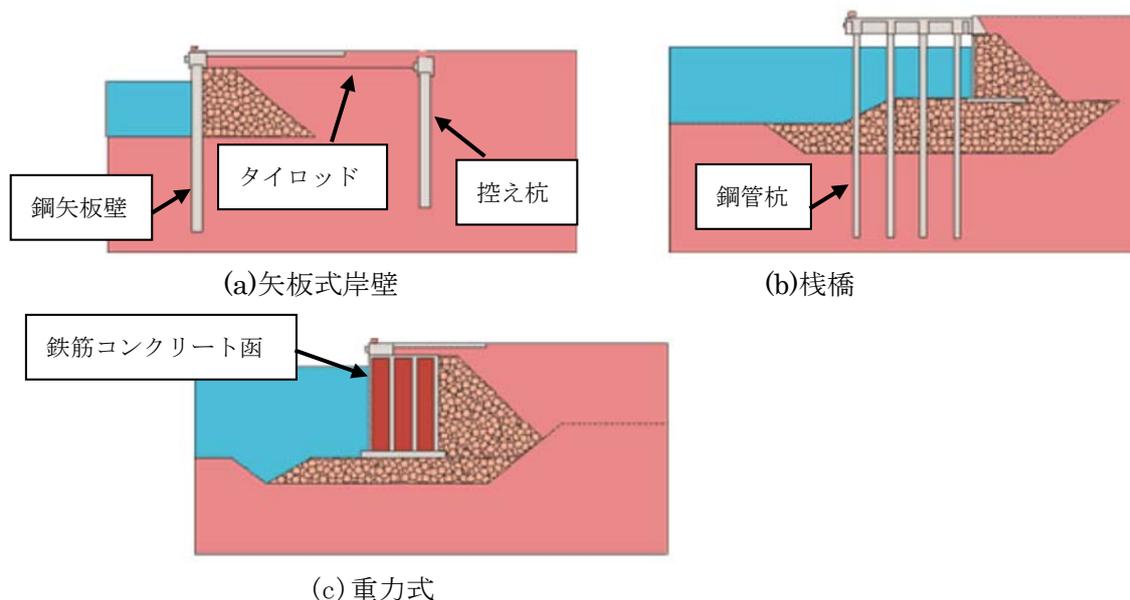


## 底部拡幅型ケーソン基礎式栈橋について

### 1. 背景

港湾構造物の主要な施設である岸壁には様々な構造形式があるが、地盤が軟弱な地点に適しているといわれているものに矢板式岸壁、栈橋がある。矢板式岸壁は鋼矢板で壁を作り、鋼管杭で控え工を製作してこれをタイロッド（鋼製）で結ぶことで壁が海側へ崩れるのを防ぐ構造である。栈橋は、鋼管杭を多数施工して鉄筋コンクリートの上部工を支える構造である。重力式は地盤が比較的良い地点に適しているもので、鉄筋コンクリートの函を海底面に据える形式である。いずれも船舶接岸・荷役活動のために前面水深と背後の地表面との間には高低差があり、大型の船舶接岸を想定すると高低差は 18m以上になることがある。

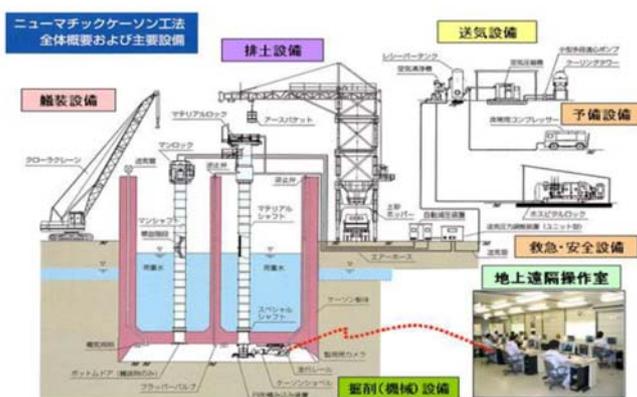


参考図 1（出典：<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/hachinohe/study/f39.html>）

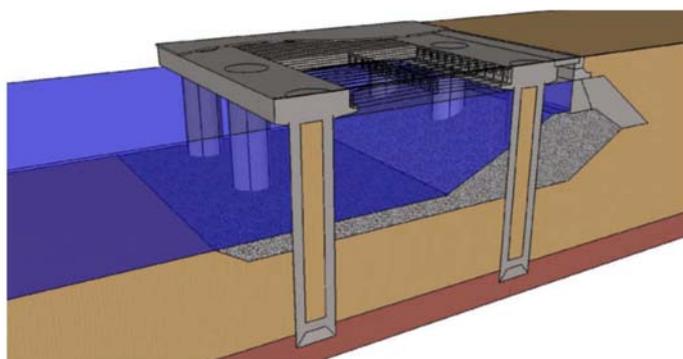
船舶は近年大型化が進んでおり（特にコンテナ船など）、我が国の港湾も大水深の岸壁を整備しないと船舶が諸外国に逃げてしまう危機感にさらされている。大水深岸壁の需要が高まっているとはいえ、岸壁は軟弱地盤上に建設せざるを得ないために、岸壁を設計する際に大水深であればあるほど地震時には耐震性が不足し、いくら工費を投入しても従来の形式では断面が成立しない事態となっている。この点で、地震の影響をほとんど考慮する必要のない韓国などの港湾と比較して我が国の岸壁は極めて不利な状況にある。

耐震性を高めるには岸壁の剛性を高めることが必要である。剛性の高い基礎を作成する工法としてニューマチックケーソン工法があげられる。参考図 2 に示すように、地盤を掘削しながら剛性の高い鉄筋コンクリートの躯体を沈設していく工法である。掘削にあたり地下水の流入などを防ぐために作業スペースは圧気され、無人化機械施工で掘削を進める。メリットとしては剛性の高さ、デメリットとしては工費の高さがあげられる。

ニューマチックケーソン基礎は、港湾の岸壁にはこれまでほとんど用いられてこなかった。しかしながら、上述のように、既存の形式での耐震性確保の限界があることなどから、新たにニューマチックケーソン基礎の岸壁についてもニーズが認められ、2019年3月にはニューマチックケーソンを用いた港湾構造物の技術マニュアル（根入れを有するケーソン工法の技術マニュアル、抜粋添付参照）が刊行される運びとなった。



参考図2 ニューマチックケーソン基礎概念図 出典:オリエンタル白石株式会社 HP)



参考図3 ニューマチックケーソン基礎式栈橋（出典：根入れを有するケーソン工法の技術マニュアル）

当該マニュアルで最も適用性が高いと期待している構造が参考図3に概要を示す栈橋である。通常の鋼管杭栈橋（参考図1(b)）が直径1m程度の鋼管杭を5mピッチ程度で打設するのに対して、ニューマチックケーソン基礎の栈橋は直径5~6m程度のニューマチックケーソン基礎を20mピッチ程度で打設することを想定している。

岸壁の設計では、巨大地震作用時における岸壁の応答を数値計算で評価することが義務付けられている。ニューマチックケーソン基礎の栈橋などを設計して巨大地震時の応答の数値計算を行うと、既存の矢板岸壁や鋼管杭基礎の栈橋などと比較すると耐震性は高いものの、ニューマチックケーソン基礎栈橋においても大きな変形が生じる結果となり、ニューマチックケーソン基礎岸壁の工費の高さをカバーするメリットが見出しにくい状況にある。この問題点を克服し、ニューマチックケーソン基礎の剛性の高さを生かす新しい構造形式を考案した。

## 2. 基本的事項

地震が起こると、構造物には地震荷重が作用する。地震荷重は通常、水平方向の荷重として扱われる。栈橋の杭のような基礎は、この水平荷重に対して、次の2種類の効果で抵抗することが期待されている。

①構造体の剛性（杭などの基礎の固さ、つまり水平荷重に対して大きく曲がらないこと）

②地盤の水平抵抗（水平荷重作用時に倒れてくる杭などの基礎を地盤が支えること）

地盤は通常、地表に近い部分は剛性が低めで、ある程度深い地点で剛性の高い土層が出現する。例えば、高層マンションを建設する際には杭を剛性の十分高い地盤まで打設する必要がある。手抜き工事で横浜のマンションが傾いて社会問題化したのは、杭を十分剛性の高い土層まで打ち込まなかったことが原因である。杭の打ち込み先として目標となるような剛性の高い土層を工学的基盤と呼ぶ。地表から工学的基盤までは、軟弱な地盤が堆積している。地震が発生すると、この軟弱な地盤は地震前よりも、よりいっそう軟弱化することは地震工学の分野では周知の事実である。専門外の方々に説明する際のたとえとしては、地盤はカマボコのようなもの。カマボコは板に付いているもので、板は工学的基盤（地震があっても硬いまま）だが、工学的基盤から地表までは巨大地震作用時にはカマボコのように軟弱になる。

さらに、上述の通り、岸壁の前面と背面の高低差が18mくらいにもなることを考えると、岸壁は常に陸から海へ向かって変形しようとする土の荷重にさらされている（参考：2階建ての住宅の重さは、盛土に換算すると高々70cmくらいのものでしかない。このため、大水深の岸壁は、2階建て家屋の25倍以上の重さの土が海側へ倒れてくるのを支えなければならない）。このため、地震時には、岸壁は特に海側へ強い荷重を受ける状態となり、必ず海側へ変形する。例えば、阪神淡路大震災の際は、重力式岸壁（参考図1(c)）が4m程度以上海側へ変形したことが報告されている。

このため、岸壁の耐震設計では、構造物の断面が破壊しないことと、構造物の変形量がある許容値以下に収まることの2つが求められる。

## 3. 本形式の基本的考え方

背景で述べたように、剛性の高いニューマチックケーソン基礎の岸壁でさえも巨大地震時には大きく変形する計算結果となるのは、水平抵抗の不足にある。上記のように地震時には軟弱地盤の剛性低下が生じ、地盤が基礎を支える水平抵抗は地震前よりも大きく減少する。このために地盤の水平抵抗が不足し、期待できる水平抵抗は地下深い箇所にある地盤の剛性の高い部分からの反力のみであるため、偏土圧の影響を受ける係留施設では地震時に傾斜などの変形が生じてしまう（図1）。上述のカマボコのたとえを用いて説明するならば、カマボコ板の上に剛性の低い木の箸を立てても、剛性の高い鉄の箸を立てても、水平に押せばどちらも倒れてしまうことに相当する。要するに、**通常形式のニューマチックケーソン基礎では、躯体の高剛性が耐震性にほとんど寄与していない。**ケーソン幅を増加させても、慣性力・土圧の増加から耐震性向上に限界があることは自明である。

この弱点をカバーするために、本形式は、支持層上に設置される底部のみ拡幅したものをを用いる（図2）。最下部だけ拡幅した構造にしておき、上部はスリムな形にして掘削を進め、空いた空間は砕石で埋め戻す（図3）。壁体の傾斜を拡幅底版によって抑制する（支持

層からの十分な底版反力（図中の上向き矢印）を期待できる）とともに、残留変形のない支持層の底版幅が広がることで、大きな水平抵抗（図中の右向き矢印）を期待できる。つまり、カマボコ板のうえにつま先立ちで立つのではなく、足の裏をしっかりと板の上に接して立つことで、水平に傾斜しにくい構造にするというのが基本的アイデアである。

拡幅底版のために掘削土量が増えるとともに図3のように埋め戻しが必要になるが、埋め戻しに砕石を用いることで後述するように液状化対策を兼ねることができる。また堤体幅自体を可能であれば通常よりも狭くしてトータルの工費は大幅に増加しないことを狙う。

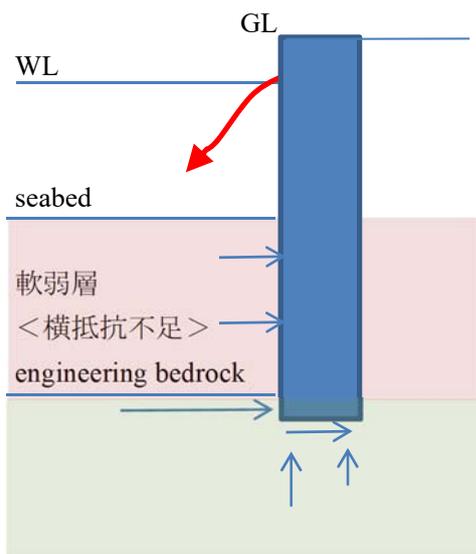


図1 従来の基礎  
傾斜変形してしまう

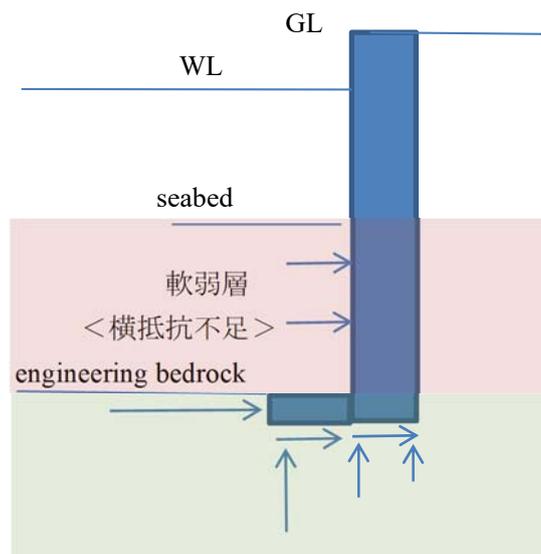


図2 提案する構造  
支持層内の底版により傾斜変形しない

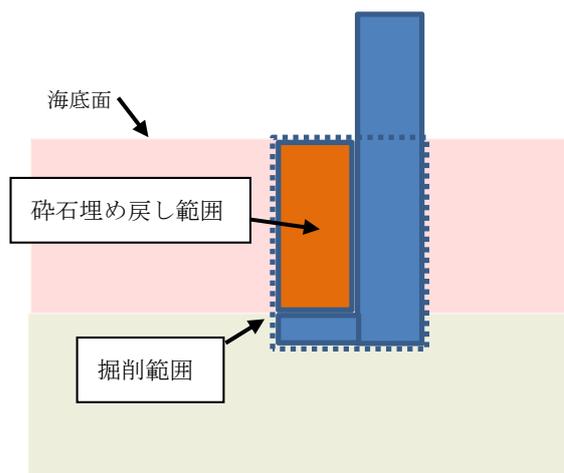


図3 掘削領域

#### 4. 栈橋構造の場合

栈橋構造の場合は、図4—図9のように様々な構造が考えられる。傾斜抑制に重点を置

くか、ロッキング（左右にぐらぐらと揺れて結局は海側に大きく変形してしまうこと）抑制に重点を置かなど目的は異なるため、設計ではどの構造が最も適切かを調べるのが重要となる。円弧滑り的な地盤変形モードに対しては陸側底版が効果的である可能性がある。ただし一般的には、**図4**の形式が最も効果が高いと想定される。

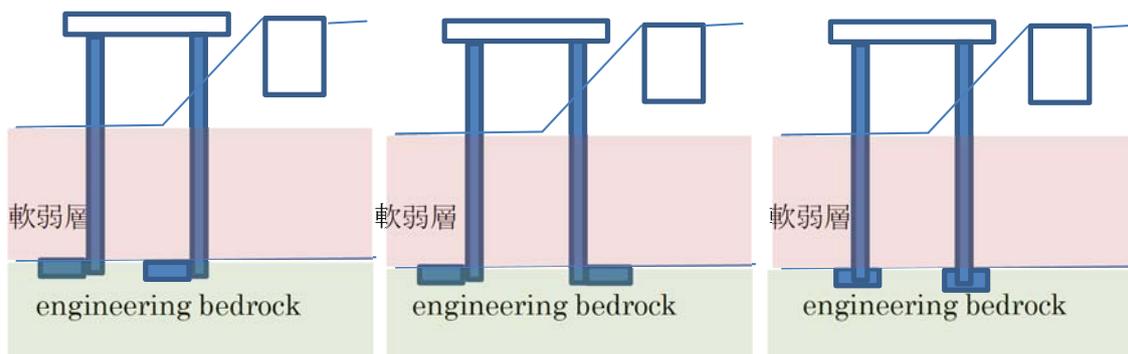


図4 傾斜抑制

図5 ロッキング抑止

図6 ロッキング抑止

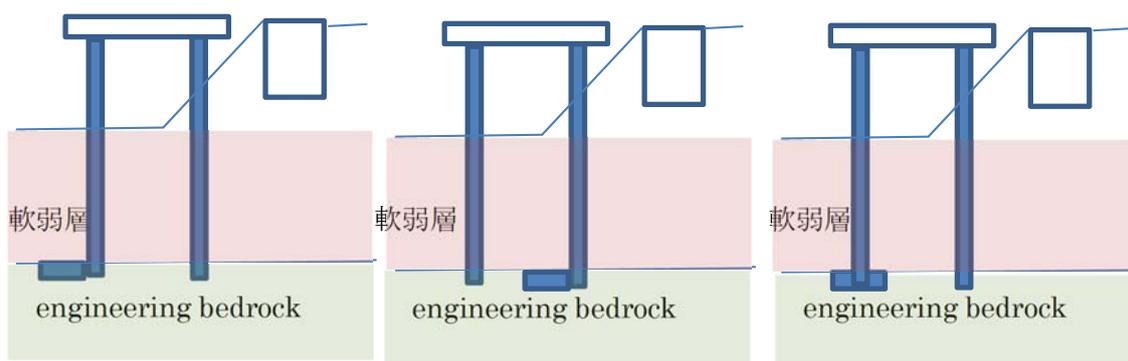


図7 地盤条件良の場合

図8 地盤条件良の場合

図9 地盤条件良の場合

**注意事項：**上記は支持層まで根入れすることを想定した記述となっているが、ケーソン基礎の場合は断面が直径6m程度が標準で、底部拡幅タイプの場合はプラス4m程度が効果を発揮できると考えるので、基礎幅が非常に広いことが特徴で、このため地盤条件次第ではあるが、**必ずしも支持層に根入れする必要はない。例えばN値30程度、場合によってはそれ以下のN値の地盤であっても支持力に問題がなければ断面として成立する可能性が高い。液状化の危険度が低く、比較的N値などの地盤強度に関するパラメータが良好な場合は、その地盤に根入れすることにより場合が多い。工費的にも支持層まで根入れしないことはメリットである。**

## 5. その他の形式への適用

矢板構造の場合、控え杭（通常は鋼管杭）の代わりにニューマチックケーソン基礎を用いることで耐震性の高い構造となると考えられる。重力式構造としてももちろん適用は可能である。

## 6 その他の適用性（既設岸壁の増深）

社会資本ストックの充実により，新設の岸壁の建設以外に，船舶の大型化に対応するために既設の岸壁の増深が計画されることが多い．その場合，増深するためには構造を高強度にする必要があるとともに，新しい技術基準に適合する構造とする必要があり，簡単な補強では要求性能を満足しないことがほとんどである（昔の技術基準で設計された断面はそもそも巨大地震を想定していないため）．そのために非常に高額な地盤改良を実施する必要があるケースも多い（添付参考資料参照）．本形式は，増深へも適用性が高いと考えられる．既設矢板岸壁の増深として，既設の控え杭と本形式を頭部で結合して一体化する（本形式を矢板前面に設置することも考えられる）パターンや，既設栈橋の前面に本形式を設置して増深することなども考えられる．

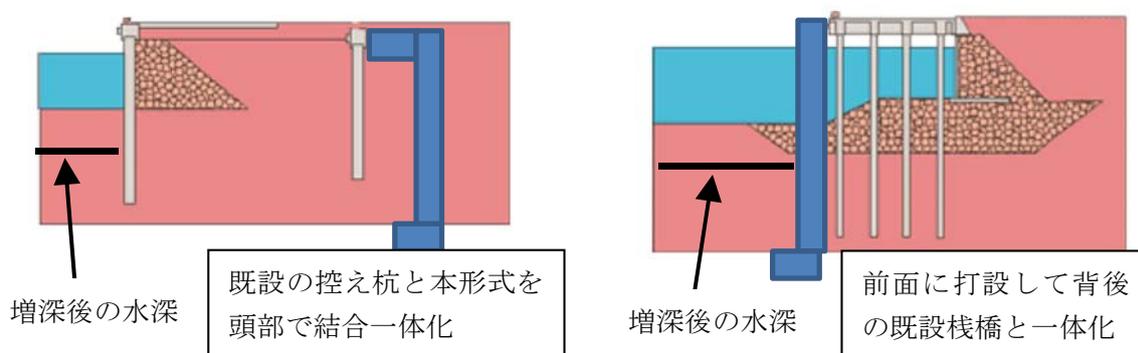


図 10 増深への適用例 (<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/hachinohe/study/f39.html> をもとに修正)

## 7. 底部拡幅型ケーソン基礎の耐震性の数値解析

弾性床上の梁理論を用いて，ケーソン基礎の耐震性を評価した．基礎のみをモデル化しており，地盤の効果はばね反力として反映される．

条件は以下の通り．

根入れ長 20m,  $\phi 6.5\text{m}$ ,  $I=67\text{m}^4$

ケーソン上の  $V=54281\text{kN}$   $H=2.25\times 10^4\text{kN}$   $M=3.658\times 10^5\text{kNm}$

地盤面以下のケーソンの  $V'=7616\text{kN}$

底面の  $k_v=71225\text{kN/m}^3$  側面の  $k_{ch}=5380\text{kN/m}^3$

荷重条件は技術マニュアルの計算例をもとに，より厳しくした（技術マニュアルではあまり大きな地震を対象にした例が示されていないため）．水平地盤反力係数は剛性低下を考慮した想定値で，概略検討として上から下まで一定値．（非線形・上限値考慮して細かく設定することは可能）底版上の土の重量を壁体重量として見込む．底版の重量は今回は無視した．

ケーソン下端には地盤反力による回転モーメントを考慮する．モーメント無視した計算で基礎の傾斜角を算出し，次に傾斜角に応じたモーメントを与えて再計算して，最終的に地盤面での変形が収束するまで繰り返し計算を行った．

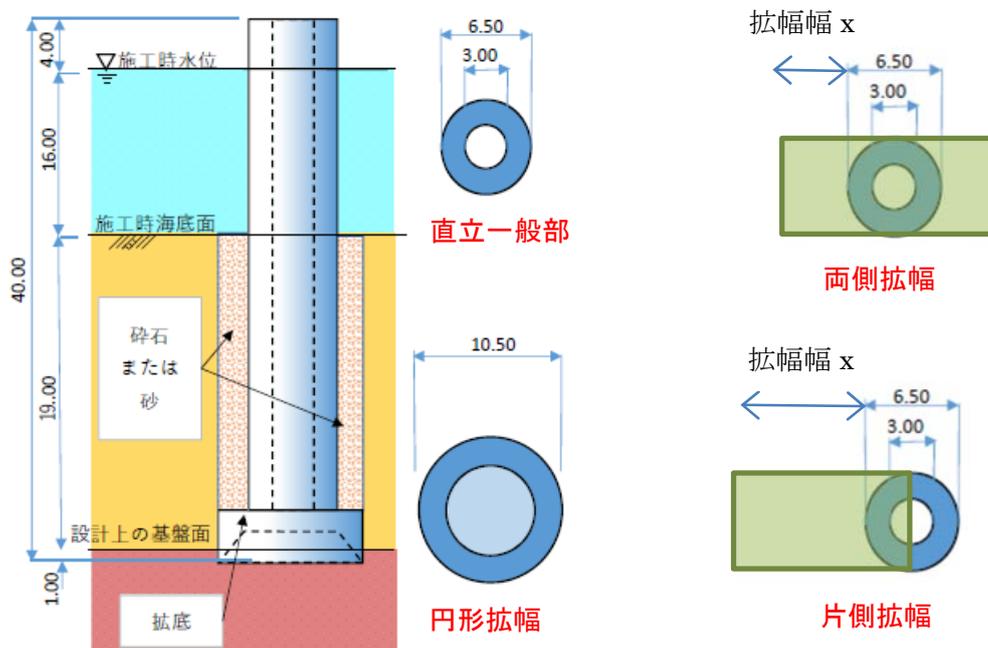


図 1 1 拡幅イメージ

拡幅の仕方として、図 1 1 左のように円形に拡幅する方法と、図 1 1 右下のように片側に拡幅、図 1 1 右上のように両側へ拡幅することが考えられる。3 者について検討した。片側・両側拡幅の場合、拡幅幅の定義は上右図の x である。

円形で拡幅を行う場合は底面の回転抵抗モーメントは

$$M = (V/2 + B^3/12 * k_v * \tan(\theta)) * B \quad (\text{ケーソン 1 本}) \quad (\text{回転中心が陸側端のケース})$$

$$M = (B^3/12 * k_v * \tan(\theta)) * B \quad (\text{ケーソン 1 本}) \quad (\text{回転中心がケーソン中心のケース})$$

片側拡幅の場合は省略。道路橋示方書などの設定に準拠して、ケーソン中心が回転中心のケースで検討を行った。ただしこの場合は、底版上の壁体重量の増加が回転モーメントに寄与しないこととなる。

今回の条件では境界条件が複雑であるため、計算には差分法を用いた。分割は 0.5m ピッチ。差分法の計算のため、上端、下端に 2 つずつの仮想節点を付与した。

同じ傾斜角と仮定した場合、抵抗モーメントを比較すると図 1 2 の通りとなる。横軸は、円形拡幅の拡幅量(round)であり、片側拡幅(one sided)および両側拡幅(rectangular)は掘削土量が円形と同じとなる条件である。図 1 3 参照。片側拡幅が最も抵抗モーメントは大きく、変形量抑止効果大きい。

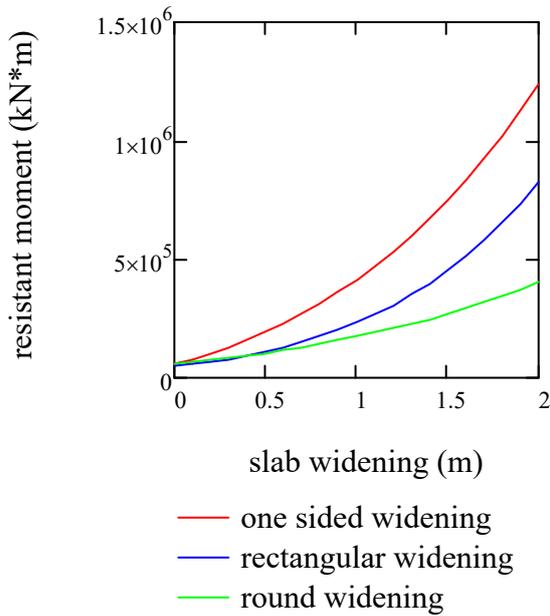


図 1 2 抵抗モーメント

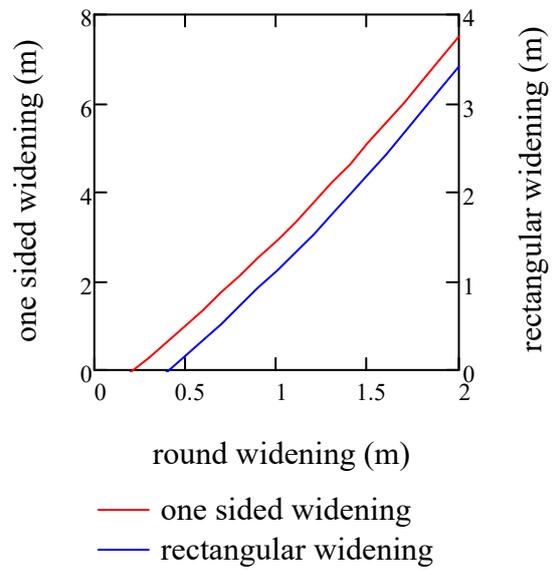
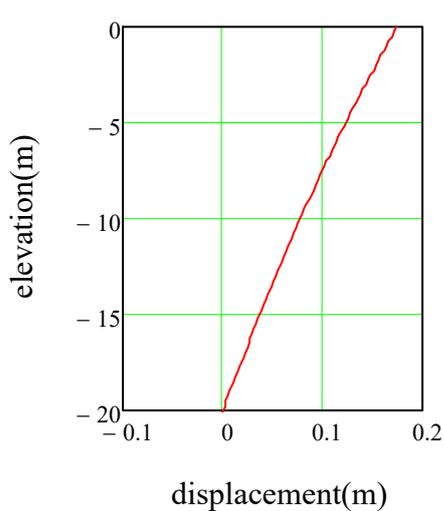


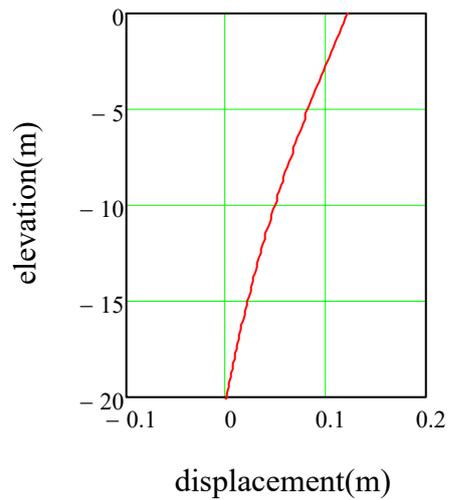
図 1 3 拡幅幅

上述の通り埋め戻しを砕石で行うことにより、液状化対策を兼ねることができるが、その効果は円形拡幅のほうが高いと考えられる。表面積が大きいため。(参考：グラベルドレーン工法：砕石を用いた柱を地盤中に作成することで地震時の過剰間隙水圧を速やかに消散させ、液状化被害を防ぐ工法)

計算結果は以下の通りとなった。

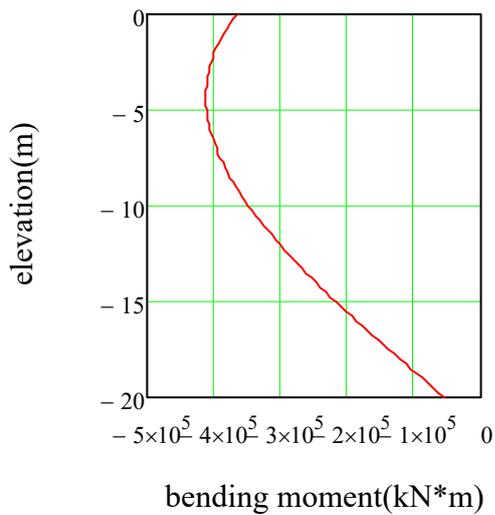


(a)底版拡幅なし

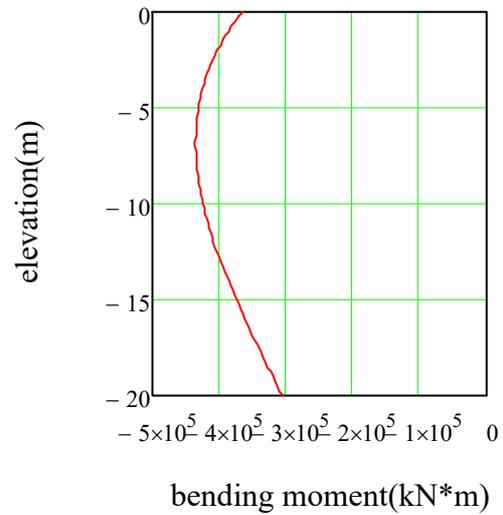


(b)底版片側拡幅 2.93m

図 1 4 変形量



(a)底版拡幅なし



(b)底版片側拡幅 2.93m

図 1 5 曲げモーメント

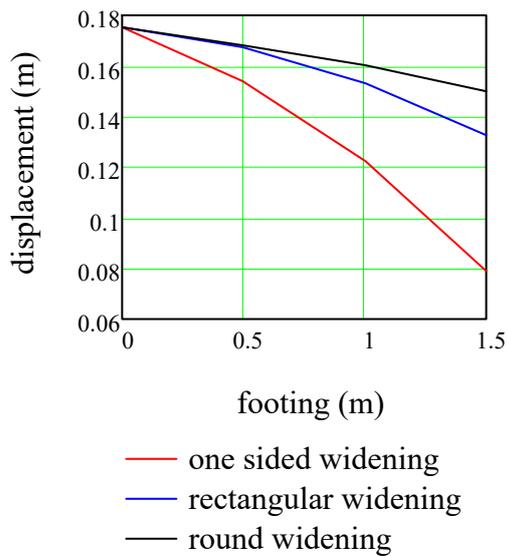


図 1 6 変形量

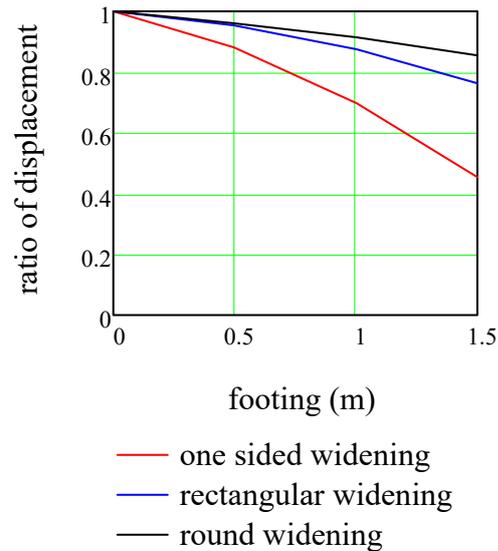


図 1 7 変形量比

図 1 6 は海底面での変形量の比較を示し、図 1 7 は底版拡幅なしの条件に対する海底面変形量の比を示す。横軸は、円形拡幅の拡幅量(round)であり、片側拡幅(one sided) および両側拡幅(rectangular)は掘削土量が円形と同じとなる条件である。今回の検討範囲では、円形拡幅で拡幅幅 1m の場合、変形量低減率は 10%、同じ掘削土量で両側拡幅幅 1.12m では変形量低減率は 12%、同じ掘削土量で底版片側拡幅幅 2.93m では地盤面の変形量は 30%低減した。これは地盤面の変形量の比較であるため、天端の変形量としては大きな差といえる。ただし底版拡幅により断面力(図 1 5 に示した曲げモーメント)はわずかに増加している。

断面力があまりにも大きいと断面が破壊するが、今回程度の断面力の違いであれば配筋量を増やすことで問題なく対応できる。

なお、もとの断面と同じ変形量となる片側拡幅断面の諸元を検討すると、直径 5.5m、拡幅幅 2.1m となる。これにより掘削土量は 15%増となるが、ケーソン面積は 18%減となる。ケーソン費用が全体工事費の 30-40%、掘削土費用が全体工事費の 10-15%であることから、本形式の工費面でのメリットもあるといえる。

#### おわりに

本件は下記の通り特許出願している。

発明等の名称：ケーソン、ニューマチックケーソン工法及び構造物

出願者：国立大学法人神戸大学，オリエンタル白石株式会社

発明者：長尾 毅，小宅 知行，大石 雅彦

出願日：2019年6月28日

出願番号：特願2019-121870