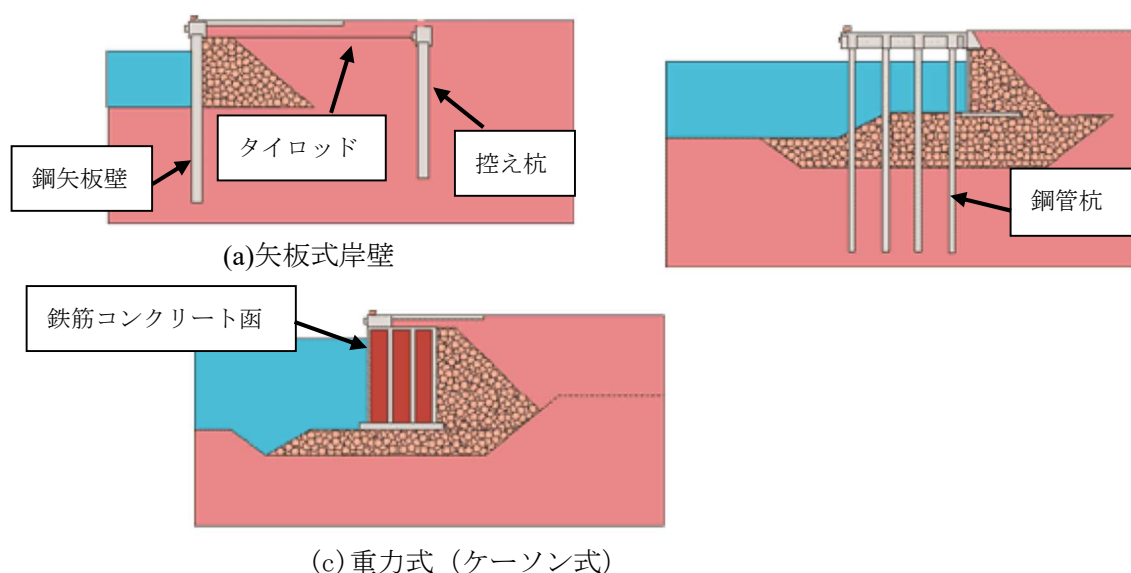


2 重根入れケーソン式岸壁について

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り，代表的なものに重力式岸壁，矢板式岸壁，栈橋がある．重力式は鉄筋コンクリートの函（ケーソン）などを海底面に据える形式，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，杭を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．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．

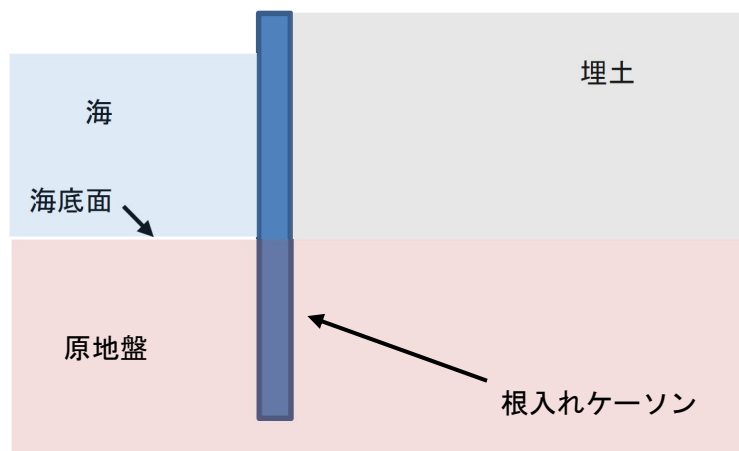
そこで，剛性の高いケーソンを基礎として用い，根入れを有する形式とすることで，軟弱地盤・巨大地震にも適用可能な岸壁とすることが考えられ，2019年3月にニューマチックケーソンを用いた港湾構造物の技術マニュアル（根入れを有するケーソン工法の技術マニュアル）が刊行された．ただし，従来の考え方で根入れを有するケーソン基礎を岸壁に適用したとしても，それだけで有利な構造とはならない．ケーソン基礎は剛性が高いため巨大地震作用時にも曲げ変形は生じないものの，構造形式を工夫しなければ，地盤の変形を抑止することができないためである．これは栈橋形式であっても重力式形式であって

も同じことで、上記技術マニュアルに記載された構造形式のままでは工費の高さをカバーする耐震性を発揮できず、実構造として採用される可能性が低いといえる。そこで、栈橋形式については、基礎の底版部を拡幅する構造を「底部拡幅型ニューマチックケーソン基礎」として考案し、特許を出願した（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，出願番号：特願2019-121870）。当該構造は建設コストの増加を比較的安く抑えながら耐震性を高めたものであるが、基礎は強固な地盤に根入れする必要があるため、大阪湾などの軟弱層が極めて厚く堆積している環境ではやはり工費の面で不利となる場合がある。

2. 本形式の基本的考え方

岸壁の形式のうち、重力式岸壁は重量の大きな壁体を地盤上に設置して地震時の変形に耐えることを目指す構造形式である。しかしながら、通常の重力式岸壁は巨大地震作用時には大きく変形することを避けられない。例えば神戸地震の際は、神戸港のケーソン式岸壁は4～5m 海側へ変位した。その原因は、壁体下部の軟弱地盤が地震時に側方流動を起こしたことにある。すなわち、通常の重力式岸壁は壁体背後の（海底面より上の陸側部分の）地盤が側方に変位することある程度抑止できるが、壁体下部の地盤が流動を起こした場合、壁体は流動する地盤の上に載っているだけなので、地盤とともに海側へ変位してしまう。従って、壁体の一部が地中に根入れされた状態であるならば、壁体下部の側方流動に対しても一定の抑止力を発揮することが期待できる。しかしながら、参考図1(c)の大型のケーソンを、原地盤を掘削して根入れすることは工費的に適用性が低い。

一方、上述の技術マニュアルに位置付けられた参考図2の根入れを有する重力式岸壁についても、巨大地震作用時には大きく変形してしまう。これは上述のように、ケーソン基礎自体には曲げ変形は生じないものの、背面から作用する土圧に耐えることはできず、かつ根入れ部前面からの受働抵抗もほとんど期待できないためである。さらに、根入れを深くすることで、巨大地震時の壁体の回転中心が深くなることから、天端での変形量が大きくなってしまう。参考図2のような、単なる根入れを有する重力式岸壁は、コストは高く、耐震性能は低いという非常に大きな問題を有しているといえる。



参考図2 根入れを有するケーソン式岸壁

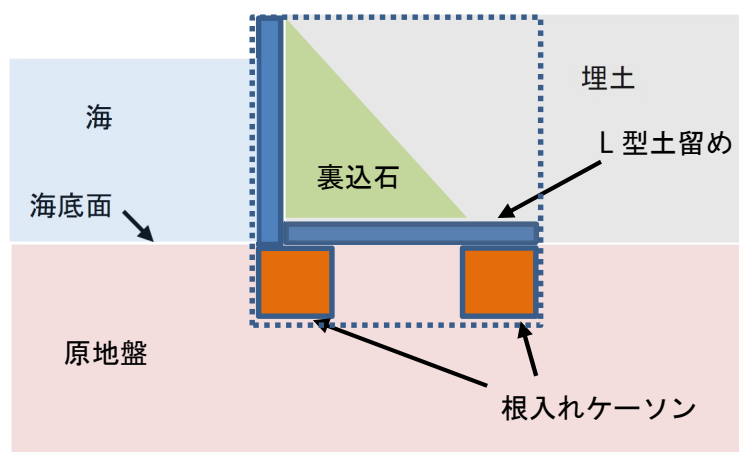


図1 提案する形式（2重根入れケーソン式岸壁）

ただし、根入れを有するケーソン基礎を陸側・海側の2重とし、根入れ深さを浅くするならば、耐震性を高めつつもコストを比較的抑えることが可能となる。即ち、海底面以深に図1のように、比較的幅の狭いケーソン（幅6m程度、高さ4-7m程度）を根入れし、その上にL型の土留め（鉄筋コンクリート製）を固結する構造を2重根入れケーソン式岸壁として考案した。前後の根入れケーソンに挟まれた地盤は拘束されるため、疑似的に破線で囲った壁体が海底面以深に根入れされた構造を構築することができる。海底面より上のL型土留めは、L型ブロック式岸壁として一般的に知られている構造であり、通常4～5m程度の水深の浅い岸壁にのみ適用される。これは、通常のL型ブロック式岸壁は底版（水平部材）、側壁（鉛直部材）ともに厚さが50cm程度の構造を海底面に設置するだけの構造なので、大水深への適用は困難であるためである。大水深条件への適用では、参考図1(c)のようにケーソン式岸壁とすることが一般的である。本形式では、底版、側壁ともに厚さ1m程度の部材とすることで、部材が降伏する（損傷が生じること）ことを防ぎつつ、2重根入れのケーソン基礎と一体化することで仮想的に幅広・根入れを有する壁体（図中の破線で囲まれた範囲）を比較的安価な施工費で構築することを狙うものである。L型ブロック式で一般的な扶壁についても、L型部分が剛体としての挙動を示すことを担保するため、概ね法線方向10mあたり1箇所、幅1m程度のものを設置する。

本形式の特徴は、従来の技術（構造形式）では不可能であった根入れ式の重力式壁体を構築できること、従来の構造形式では耐震性能の向上のために壁体の幅を広げると、施工費用がほぼ壁体幅に比例して増加してしまうのに対して、本形式では底版幅や後述する2重根入れ幅安定のための部分の増加のみで対処が可能と考えられるため、壁体幅の増加程度に対して、通常のケーソン式岸壁よりも工費の増加程度が緩和される可能性が考えられる点にある。すなわち、水深が深く、地震荷重が大きいために、従来の構造形式では壁体の幅を非常に広くする必要がある場合に、本形式は施工費用の面でも有利となる。

なお、根入れケーソンは、圧気により沈設するニューマチックケーソン、圧気を用いないオープンケーソン、陸上で施工したケーソンを海上運搬し、海底地盤を掘削して沈設する設置ケーソン、その他、大口径の杭基礎を密に配置して根入れ部が剛体的に挙動すると考えられるもの等も考えられる。いずれの方法でも耐震性能に違いはなく、現場条件によ

って適切なものを採用すればよい。

3. 構造細目

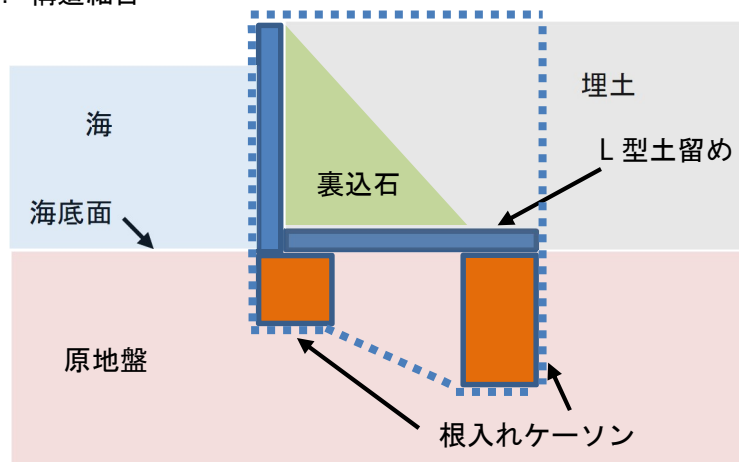


図2 2重根入れケーソンの根入れ深さを変えた場合

後述するように根入れケーソンは4～7m程度の範囲では根入れが深い方が耐震性が高いケースが多いと考えられるが、工費的には根入れ深さは浅い方が有利であることはいうまでもない。そこで、図2のように、2重の根入れケーソンの根入れ深さを変化させることも考えられる。この場合の仮想壁体は破線のように根入れ長の異なる逆台形状となるが、重心が仮想壁体中央よりも陸側に位置することでコストと耐震性能のバランスとしては非常に優れた結果となるケースがあることも想定される。

2重の根入れケーソンはL型土留めを介して連結されるが、地震時の大変形に対しても安定性を保つためには、海側と陸側の根入れケーソンの間に、図3(a)に示すように2つの根入れケーソン間距離を保つような補助ケーソンを設置することも考えられる（図の水平方向に長い着色部、破線は個々のL型土留めを示す）。この補助ケーソンは2重のケーソンの相互距離が変化しないための用心的な設置であり、根入れ深さ、幅は最小でよい。根入れケーソンは法線方向には図3(a)のように連続とすることが耐震性の観点からベストであるが、地盤条件が比較的良好である場合、工費節減の観点からは、法線方向には不連続とすることも考えられる。平面図としては図3(b)のとおりである。

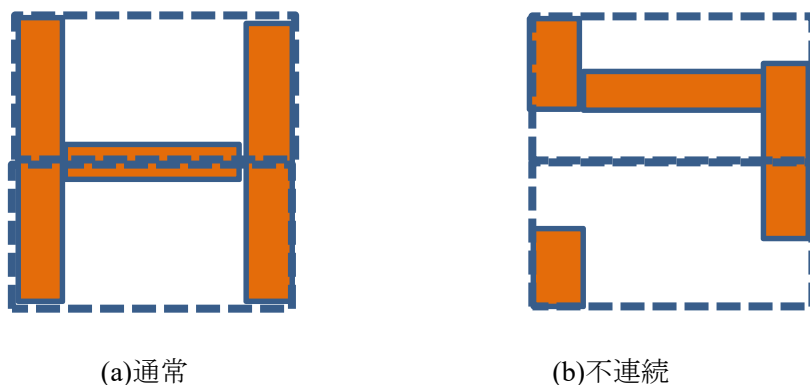


図3 平面図（上から見た図、根入れ基礎部分のみ）

4. 提案する形式の耐震性に関する解析

2重根入れケーソン式岸壁の耐震性を評価するために、2次元有限要素法による地震応答解析を行った。一般的なケーソン式岸壁と本形式をモデル化して耐震性能を比較した。有限要素地震応答解析コードはFLIPとした。FLIPは、現在港湾構造物の地震応答解析において標準的に用いられている解析コードである（参考文献1-2）。地盤条件は岸壁建設地点の地盤条件として、軟弱～良好の範囲で中間的な地盤条件（参考文献3）を設定した。計画水深は近年の船舶の大型化を考慮して-14.5mとした。堤体幅は通常のケーソン、提案する2重根入れ式岸壁のそれぞれについて17m、21.5mとした。この堤体幅は、通常のケーソン式岸壁については、フーチングがある場合、陸側のフーチング上には地盤が存在し、地震時にはこの地盤がケーソンと一体的に挙動すると考えられているため、ケーソン幅にフーチング長さを加えた幅としている。一方、提案する形式の堤体幅は、L型土留めの底版幅としている。通常ケーソン岸壁の解析断面図、ケーソンの断面図（堤体幅21.5mの場合）は図4の通りであり、2重根入れケーソン式岸壁の解析断面図、護岸部の断面図は図5の通り。

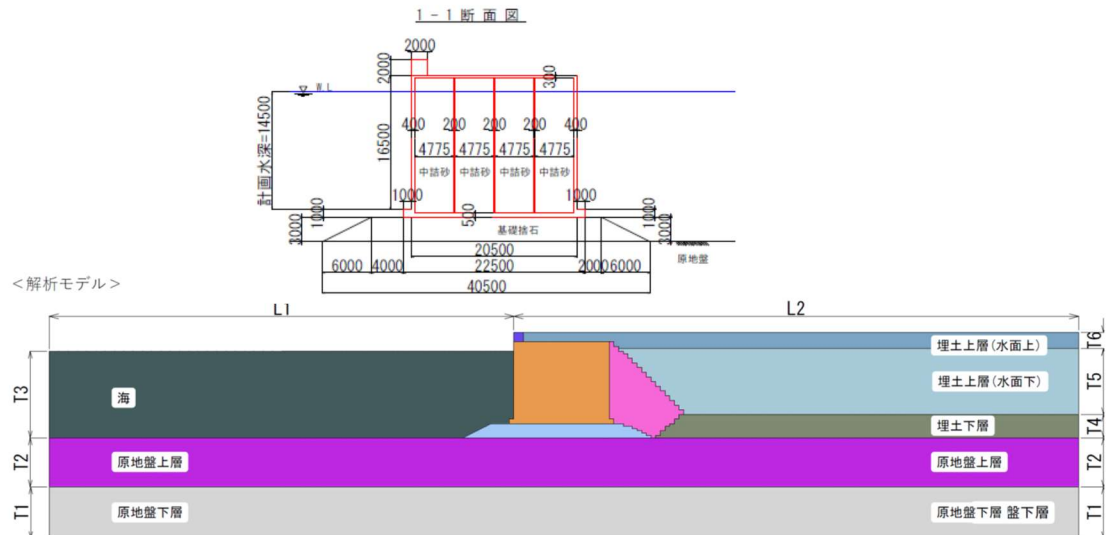


図4 ケーソン式岸壁モデル

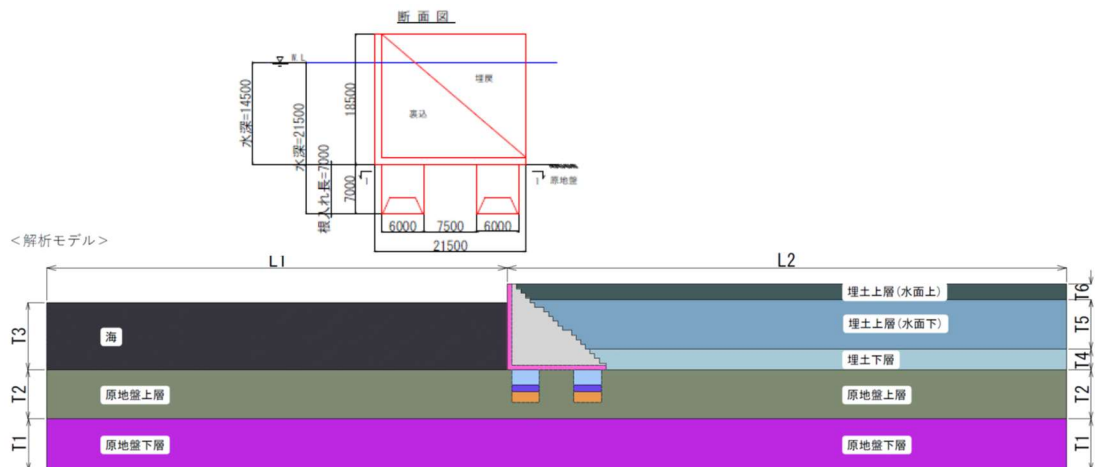


図5 2重根入れケーソン式岸壁モデル

地盤条件は表 1 に示すとおりである。

表 1 地盤条件

土層名称	モデル種類	単位	粘着力	内部 摩擦角	基準 有効拘束圧	初期基準 せん断剛性	初期基準 体積剛性	拘束圧	ポアソン比	間隙率	最大 減衰定数	水の 体積断剛性
		γ (kN/m ³)	C(kN/m ²)	ϕ (°)	σ_{ma} (kN/m ²)	Gma(kN/m ²)	Kma(kN/m ²)	依存性 mG,mK	ν	n	hmax	Kw(kN/m ²)
埋土上層 (水面上)	マルチスプリング	18	0	37	89.8	58320	152089	0.5	0.33	0.45	0.24	2.2E+06
埋土上層 (水面下)		20	0	37	89.8	58320	152089	0.5	0.33	0.45	0.24	2.2E+06
埋土下層		20	0	37	89.8	58320	152089	0.5	0.33	0.45	0.24	2.2E+06
原地盤上層		20	0	38	198.5	72200	188286	0.5	0.33	0.45	0.24	2.2E+06
原地盤下層		20	0	38	279.2	125000	325980	0.5	0.33	0.45	0.24	2.2E+06
裏込石・基礎捨石		20	0	40	98	180000	469412	0.5	0.33	0.45	0.24	2.2E+06

入力地震動は巨大地震時の地震動として、1995 年神戸地震の神戸港における工学的基盤に対する入射地震波とした。地震動時刻歴は図 6 に示すとおりであり、この波形をモデル下端（原地盤下層の下端）に入力した。

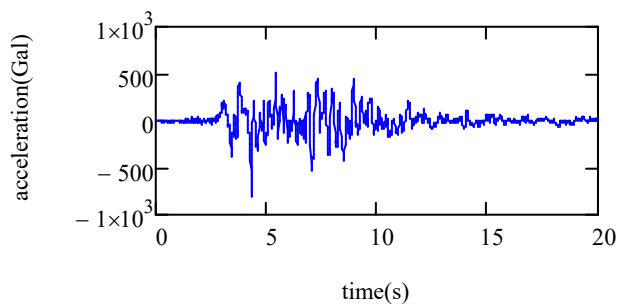


図 6 入力地震動

解析結果を図 7 に示す。横軸は堤体幅、縦軸が変形量であり、2 重根入れケーソン式の根入れ深さ 4m が赤線、根入れ深さ 7m が青線、通常のケーソン式岸壁が緑線である。

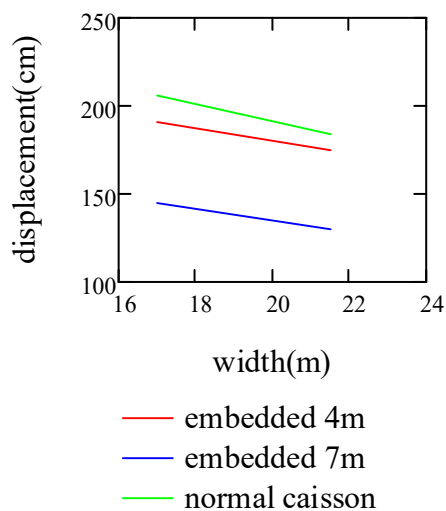


図 7 解析結果

同じ堤体幅の条件で、2重根入れケーソン式岸壁の変形量は通常のケーソン式岸壁と比較して有意に小さく、耐震性が高い。特に根入れ深さ 7m の 2重根入れ式は通常のケーソン式岸壁の変形量の 70%と非常に耐震性が高い。これは本形式の根入れの効果であるといえる。

このように耐震性は高いが、工費の面で非常に高価であれば、結局は他の形式と比較して有利であるとは言えない。そこで上記の条件について、工費の比較を行った。結果を図 8 に示す。横軸は堤体幅、縦軸が建設費用（万円/m；直工費）であり、2重根入れケーソン式の根入れ深さ 4m が赤線、根入れ深さ 7m が青線、通常のケーソン式岸壁が緑線である。施工費は現場の条件によって大きく変化する。2重根入れケーソン式岸壁については、根入れケーソンを据え付け施工する工法を想定している。2重根入れ式・根入れ深さ 7m、通常ケーソン式岸壁、2重根入れ式・根入れ深さ 4m の順に施工費が安価となる。なお、今回対象とした 14m 岸壁の場合は直工費として 2000 万円/m という目安が示されており（参考文献 4）、ここで示した費用は何れも目安より低い工費となっているが、通常耐震強化岸壁は巨大地震作用に対して変形量 1m 以内に収まることが求められるため、仮に地盤条件・地震動が今回の検討と同じ条件であった場合はいずれの形式についても堤体幅をより広げる必要がある。

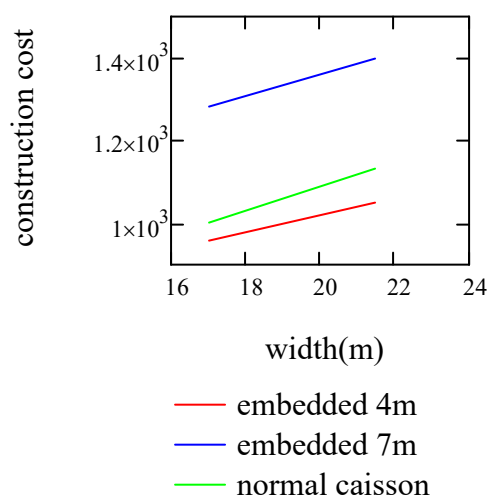


図 8 施工費用

上記の施工費用は変形量が異なる条件を比較しているため、耐震性能に対する施工費用という観点で施工費用を再整理した。まず図 7 の関係より、堤体幅と変形量の関係を線形と仮定して両者の関係を求めた。次に、図 8 の関係より、堤体幅と施工費用の関係についても線形と仮定して、特定の変形量に対する施工費用を概算した。変形量は、150cm と 175cm とした。結果を図 9 に示す。図より、いずれの変形量でも 2重根入れ式岸壁の施工費用は通常のケーソン式岸壁と比較して低く、通常のケーソン式岸壁の 0.88～0.93 倍の施工費用で同じ耐震性の岸壁を施工することが可能である。このように、工費の面でも本形式は適用性が高いことが示された。

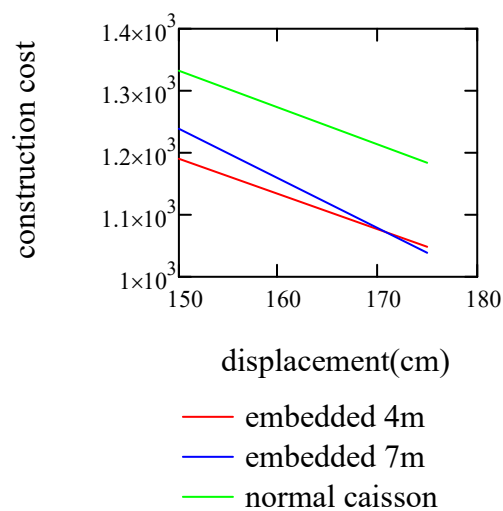


図9 施工費用概算

5. おわりに

本件は以下の通り特許出願している。

発明等の名称：根入れ式岸壁

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，二宮庸平

出願日：令和2年12月4日

出願番号：特願2020-202185

参考文献

- 1) Iai S, Matsunaga Y, Kameoka T. Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility. Soils and Foundations 1992; 32-2: 1-15.
- 2) Iai S, Ichii K, Liu H, Morita T. Effective stress analyses of port structures. Soils Found 1998; Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu earthquake No.2: 97-114.
- 3) 長尾毅，岩田直樹：重力式及び矢板式岸壁のレベル1地震動に対する耐震性能照査用震度の設定方法，構造工学論文集 Vol.53A, pp.339-350, 2007
- 4) <https://www.mlit.go.jp/tec/cost/cost/130821/tokutyo.pdf>