

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06223

研究課題名(和文) 構造物の要求性能照査のための地盤抵抗の粘り強さ指標に関する研究

研究課題名(英文) Study on resilience index of ground resistance for evaluation of required performance of structure

研究代表者

山崎 浩之(Hiroyuki, Yamazaki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・特別研究主幹

研究者番号：10371759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災の経験から、設計外力以上の荷重に対して構造物の「粘り強さ」が求められている。そこで、粘り強さの定量化を目的として、ケーソン式護岸の模型振動台試験結果を動的有限要素解析による数値計算で解析し、地震荷重増大にともなう護岸変位の発達特性と各構造形式の関係を考察した。さらに、防波堤構造物の遠心載荷模型試験結果を対象に剛塑性有限要素法を用いた数値解析を実施し、慣用解析手法でも合理的な評価が可能であることを明らかにした。これらの検討をふまえて、地震荷重に対するケーソン式護岸の構造形式による粘り強さの違いを、基準変位量、基準安全率を定義し、これを用いて定量的に表すことが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：From the experiences of the Great East Japan Earthquake, "resilience" of structure is required against the load exceeding the design. For the purpose of quantifying the resilience, the model shaking table test result of the caisson type revetment was analyzed by numerical calculation using finite element methods, and the relationship between the development characteristics of the seawall displacement according to the increase of the seismic load and each structural form was investigated. Furthermore, numerical analysis using rigid plastic finite element method was carried out on the results of the centrifugal model test of breakwater and revealed that it can be reasonably evaluated by conventional methods. Based on these studies the reference displacement and the reference safety factor were proposed, and it was shown that they could quantitatively express the difference in resilience due to the structural form of the caisson type revetment against the seismic load.

研究分野：地盤工学

キーワード：粘り強さ 護岸 防波堤 安定解析 有限要素法 安全率 模型試験

1. 研究開始当初の背景

首都圏直下地震や東海・東南海地震など震度7以上の極大地震の発生が懸念されている。地震以外でも高波などの構造物に対する外力が強大化しつつある。巨大外力が作用した場合の構造物挙動の重要な着目点として、いわゆる「粘り強さ」がある。これは、東日本大震災を契機として着目されたものである。東日本大震災で、釜石の湾口防波堤は当初その機能を発揮し津波に抵抗していたが、設計以上の津波波高となったときに、比較的短時間で大部分が崩壊した。災害後の検討などを経て、設計荷重以上の外力が作用しても、崩壊までの時間を長くする、あるいは完全には崩壊しない等、構造物に「粘り強さ」が求められるようになった。その後、「粘り強さ」を考慮した防波堤が整備され始めたが、「粘り強さ」の定量化、あるいは工学的な定義が明確にされていないという状況であった。そのため、防波堤や護岸などの設計において、「粘り強さ」を明示的に設計照査に反映できず、「粘り強さ」の定量化が求められていた。

2. 研究の目的

地盤一構造物（護岸、防波堤）を対象として、設計外力以上の荷重が作用した場合の、地盤一構造物のその後の挙動を、設計照査に反映できるようにすることを目的とする。具体的には、設計外力以上の荷重が作用した場合の構造物変位の発生の仕方を、構造形式の違いに関して調べ、構造形式ごとの「粘り強さ」の優劣を明確に評価できる方法を、簡易な方法で提案する。そして、「粘り強さ」を設計照査に反映できるようにし、今後のプロジェクトの安全性やコスト縮減に寄与する。

3. 研究の方法

研究の対象とする地盤一構造物は、沿岸構造物の代表的ものであるケーソン式護岸、防波堤とした。ケーソン式護岸、防波堤を選択した理由は、地震外力、あるいは高波など水平荷重がクリティカルとなる典型的な地盤一構造物だからである。

護岸構造物については、振動台試験装置を用いた、ケーソン式護岸の模型振動台試験を行った。そして、試験結果を静的有限要素法に基づく数値計算、動的有限要素法に基づく数値計算で解析し、振動荷重と変位の発達状況などを考察した。

防波堤構造物については、既に実施されていたケーソン式混成堤の遠心載荷模型試験結果を、剛塑性有限要素法による数値計算で解析した。そして、慣用計算法でも波力作用時の防波堤挙動の解析が可能であることを確認した。

上記の検討を踏まえて、構造形式による粘り強さの違いを定量化するために、地震荷重に対するケーソン式護岸の模型振動台試験結果を対象に、従来の設計法で用いられている震度法に基づく安定解析を行った。そして、

設計外力以上の地震動が作用した場合の、各構造形式の粘り強さの違いを、定量的に表す方法を提案した。

4. 研究成果

(1) 振動台模型試験

試験は、長さ 850mm、高さ 600 mm、幅 360 mm の土槽内に、基盤層、基礎地盤、ケーソン、裏埋めを設けた模型護岸により行った。また水を張らずに、乾燥状態で行った。これは、今回の検討は地震時土圧、慣性力の影響のみに着目して粘り強さの検討を行うことを目的として、他の要因（動水圧、液状化の発生）の影響を排除したことによる。

用いた試料は、飯豊ケイ砂 6 号（土粒子密度  $\rho_s=2.652\text{g/cm}^3$ 、最大乾燥密度  $\rho_{\text{max}}=1.651\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_{\text{min}}=1.328\text{g/cm}^3$ ）である。基礎地盤、裏埋めのいずれも、飯豊ケイ砂を用いて作成し、基礎地盤と裏埋めは  $Dr=50\%$  を目標に作成した。基礎地盤の下の基盤には碎石を用いた。

ケーソン式護岸の粘り強さを、構造形式を変えて、模型振動台試験により調べた。構造形式は、図 1(a) に示すケーソン式護岸を標準タイプとしたケース 1、図 1(b) の腹付けを設けたケース 2、図 1(c) の根入れ構造としたケース 3 の計 3 種類の構造形式である。

計測は、地盤、ケーソンの加速度時刻歴を図 1 に示した各位置、ケーソン変位の時刻歴を計測した。

振動台での加振波は正弦波で 7Hz の振動数で 4 秒 (28 波) 加振した。図 3 に示すとおり、加速度振幅を 50Gal から段階的に 50Gal ずつ増加させる、ステージ載荷で加振を行った。

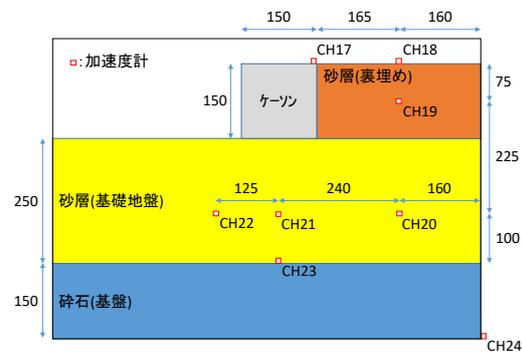


図 1 (a) ケース 1 (unit: mm)

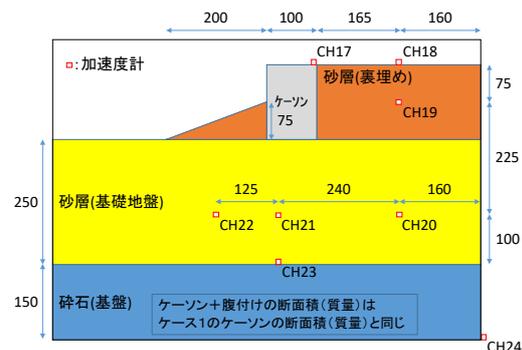


図 1 (b) ケース 2 (unit: mm)

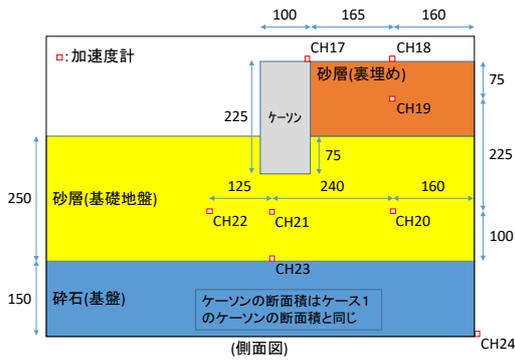


図1(c) ケース3 (unit: mm)

(2) ケーソン式護岸模型振動台試験結果

ケース1~ケース3の各加振加速度と累積滑動変位(水平変位)の関係を図2に示す。変位はケーソン重心位置での変位である。

図2から、いずれのケースも300Gal加振を超えてから変位が大きくなり始めている。しかし、変位の増加の仕方はケースにより異なり、ケース1が最も大きく変位が増加し、腹付けを擁するケース2が増加は最も小さかった。

変位の増加開始が3ケースとも300Gal加振付近である。しかし、設計外力と考えられる300Gal加振以上の加速度が作用した場合にその挙動は大きく異なることが確認できた。そこで、この3ケースを用いて「粘り強さ」の考察を進めた。

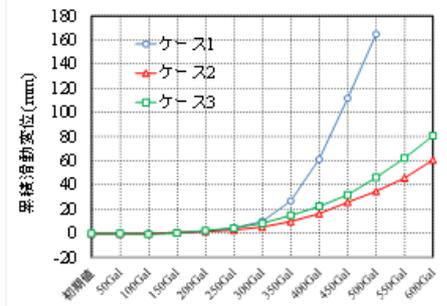


図2 载荷加速度と累積滑動変位(水平変位)

(3) 模型振動台試験結果の静的数値解析

ここでは数値解析によって3つの構造形式について検討する。実験ではケーソン岸壁を加振しているが、数値解析は簡単にケーソンに作用する静的な水平荷重で検討した。

図3に解析で用いたケース2のモデル図を示す。ケーソン背後の裏埋め砂に水平左方向(ケーソン方向)に慣性力を作用させてケーソンの挙動を調べた。砂は双曲線モデルを用い、砕石およびケーソンは弾性体を用いている。なお、ケーソンと砂はジョイント要素を設けており、剥離は考慮していない。自重解析をした後に、ケーソン背後の砂に水平慣性力を作用させる。

図4にケーソン上部前方の水平変位と慣性力の関係図を示す。水平慣性力が0.3g(≒300Gal)ではわずかの差ではあるがケース1が一番水平変位が大きく、ケース3、ケース

2となる。

図5に水平慣性力0.3gのケース2の等価せん断ひずみ(正八面体面上のひずみ)分布を示す。ケース2では腹付け盛土が受働状態となりケーソンの変形に抵抗していることが分かる。

模型振動台試験の実測(図2)と数値解析の結果(図4)を比較すると、発生した水平変位には大きな乖離が見られ、これはケーソンに作用する慣性力などの動的応答が解析で考慮されていないことが原因であると考えられる。そこで事項で示すような動的解析を実施した。

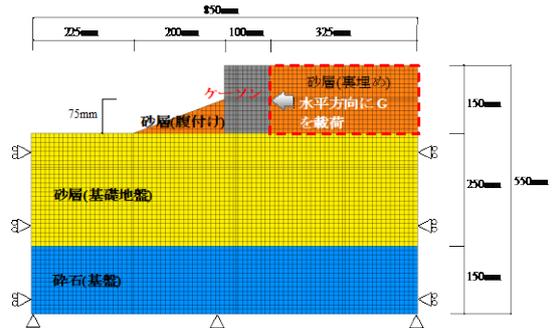


図3 静的数値解析のメッシュ

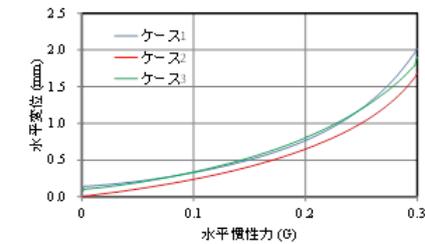


図4 水平変位と水平慣性力の関係

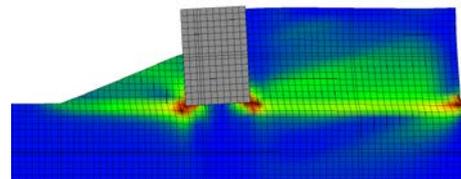


図5 ケース2の等価せん断ひずみ分布

(4) 模型振動台試験結果の動的数値解析

動的数値解析は変位が大きく出た350galの時のみ検討した。

図6に解析で用いたケース2のモデル図を示す。砕石とケーソンは弾性体とし、基礎地盤、裏込め、腹付け砂は双曲線モデルとした。ケーソンと砂はジョイント要素を設けており、剥離(σt)は考慮していない。

図7に一例としてケース1のケーソン上部前方の水平変位の時刻歴を示す。ケース1は実験をほぼ再現できているが、ケース2と3に関しては数値解析の方が少し水平変位が多く発生した。ただ、水平変位量としてはケース2が一番小さく、実験結果を定性的には動的数値解析で表現できた。

図8にケース2の最終の最大せん断ひずみ

コンターを示す。ケース1はケーソンの滑動と転倒が支配的であったが、ケース2では腹付け盛土の影響で変位が抑えられていた。

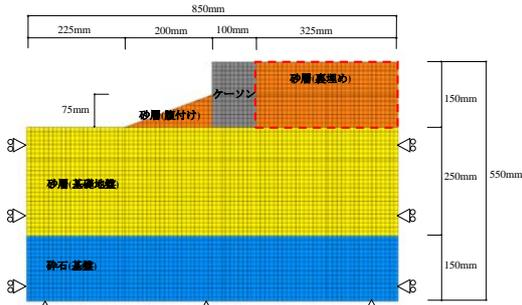


図6 動的数値解析のメッシュ

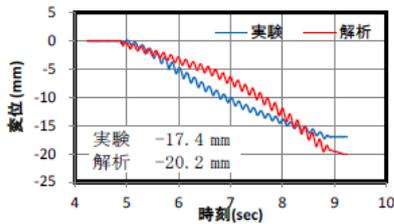


図7 水平変位の時刻歴 (ケース1)

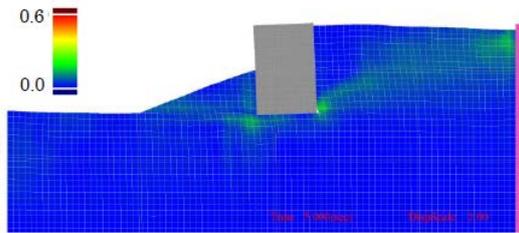


図8 最大ひずみ分布 (ケース2)

(5) 津波に対するケーソン式防波堤の安定性評価

高橋ら (2015) が実施したケーソン式防波堤の遠心模型実験のうち、防波堤の港内外の水位差がケーソンの水平荷重に対する支持力に及ぼす影響と、腹付工が支持力に及ぼす対策効果に関する模型実験について、剛塑性有限要素法を用いた数値解析を実施した。

1) 剛塑性有限要素解析

解析手法に剛塑性有限要素法を使用した。剛塑性有限要素法の特徴には、①構造物の極限状態を直接解析すること、②解析に必要な地盤定数は強度定数のみであること、③弾塑性変形解析のように初期状態 (初期応力) によらずに安定性評価を行えること、④破壊形態は事前に仮定する必要のないこと、があり、簡易で利便性に優れることから実務的な設計問題への適用が期待されている。

2) ケーソン式防波堤の数値解析

高橋らはケーソン式防波堤の津波耐力を調べるために、ケーソンに作用する水圧を変化させる遠心模型実験を実施した。水位差がマウンドのケーソン支持力に及ぼす影響を調べるため、①ケーソン両側水位一定モデル、

②片側水位を上昇した水位差モデル (図9)、の2種類の遠心模型実験を行った。

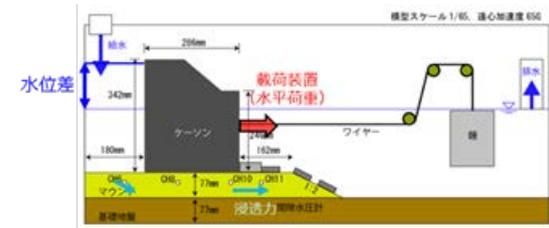


図9 遠心模型実験の水位差モデル

図9の実験に基づき、水位一定モデルをケースA-1、水位差モデルをケースA-2とする。また、ケースA-2では水位差に伴う水圧荷重がケーソン側面および底面に作用するが、マウンドおよび下部地盤では水位差に起因する浸透力が作用する。そこで、浸透力を考慮したモデルをケースA-3とする。

図10に用いた有限要素モデルを示す。

表1に解析より得られた各ケースの極限支持力を示す。水位差の有無によらずに概ね模型試験と整合する結果が得られた。

図11に解析で得られたケースA-3のひずみ速度コンター図を示す。図にはケーソン下部両端からマウンド斜面下部にかけてすべり面が形成され、ケーソン背後のマウンドが荷重の作用方向に押し出されていることが確認できる。数値解析で得られた破壊形態は模型試験とほぼ同様であり、解析結果の合理性が確認できた。破壊形態についてはケースA-1でもほぼ同様の結果となった。

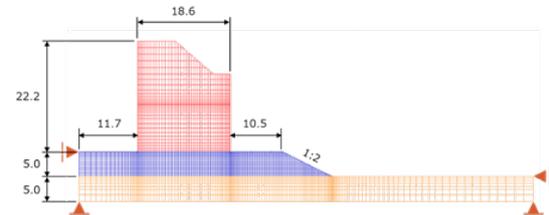


図10 解析モデル (単位: m)

表1 数値解析と模型試験の支持力 (水位差)

	解析結果 (kN/m)	実験結果 (kN/m)
ケースA-1: 水位一定	3,756	3,740
ケースA-2: 水位差あり	3,240	3,144~3,363
ケースA-3: 水位差+浸透力考慮	3,295	3,144~3,363

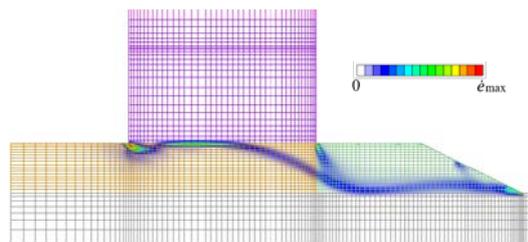


図11 等価ひずみ速度コンター(ケースA-3)

3) 腹付工による防波堤の補強効果



安全率の関係を求める。

図 17 が正規化変位と正規化安全率の関係である。図 17 から、正規化安全率を用いることにより、ケース 1~ケース 3 の構造形式の違いによる、設計荷重以上の外力が作用した場合の変位の発生量、すなわち「粘り強さ」を定量的に評価できることが確認できる。

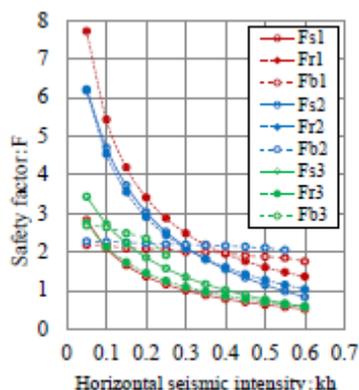


図 16 各ケースの滑動安全率  $F_s$ 、転倒安全率  $F_r$ 、支持力安全率  $F_b$  と震度  $kh$  の関係

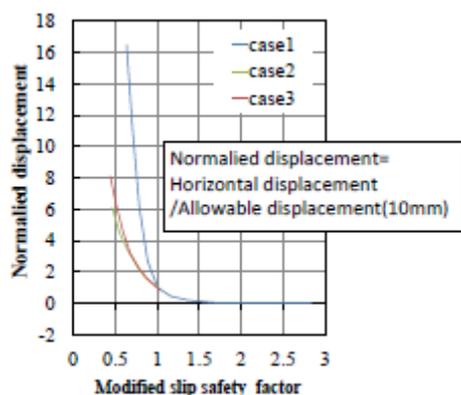


図 17 正規化変位と正規化滑動安全率関係

<引用文献>

①高橋英紀、佐々真志、森川嘉之、高野大樹、松原宗伸、遠山憲二、平田昭博、丸山憲治 (2015)：津波来襲時に発生する防波堤マウンド内の浸透力による支持力低減効果、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol. 71、No. 2、I\_1041-I\_1046

②高橋英紀、佐々真志、森川嘉之、高野大樹、橋爪秀夫、丸山憲治 (2015)：腹付工を含むケーソン式防波堤マウンドの支持力に関する実験と解析、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、Vol. 71、No. 2、I\_1047-I\_1052

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①金田一広、青木 雅路、大塚悟：剛塑性有限要素解析による砂質地盤の寸法効果と傾斜支持力の検討、日本建築学会構造系論

文集、査読有、Vol. 81、No. 728、1665-1671、2016

②水野和憲、前田宗春、大塚悟、小林俊一：擁壁の地震時主働土圧に関する解析的考察、土木学会論文集 A2 (応用力学)、査読有、I\_313-I\_320、2017

[学会発表] (計 4 件)

①山根悠司、大塚悟、山崎浩之、金田一広：ケーソン式防波堤の鉛直傾斜荷重に対する支持力解析、第 52 回地盤工学研究発表会、査読無、2017

②山崎浩之、佐々真志、大塚悟、金田一広：1G 振動台実験による粘り強いケーソン式岸壁の検討、土木学会第 72 回年次講演会、査読無、2017

③山崎浩之、金田一広、大塚悟：粘り強いケーソン式護岸の 1G 振動台実験と数値解析による検討、土木学会年次研究発表会、査読無、2018

④大塚悟、福本豊、山崎浩之、金田一広：津波に対するケーソン式防波堤の安定性評価、国際地盤工学会第 16 回アジア地域会議、査読有、2019

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：支持力推定装置

発明者：金田一広、山崎浩之、大塚悟

権利者：株式会社 竹中工務店、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

種類：特許

番号：2015-207232

出願年月日：2015 年 10 月 21 日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 浩之 (YAMAZKI, Hiroyuki)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 特別研究主幹  
研究者番号：10371759

(2) 研究分担者

金田 一広 (KANEDA, Kazuhiro)

株式会社竹中工務店 技術研究所 研究員  
研究者番号：30314040

大塚 悟 (Ohtsuka, Satoru)

長岡技術科学大学 工学研究科 教授  
研究者番号：40194203