

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82707

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820218

研究課題名(和文) 砕波帯における海浜地盤の動態解明への遠心力場からのアプローチ

研究課題名(英文) Application of centrifuge technique to seashore-soil behaviour in swash zone

研究代表者

高橋 英紀 (Takahashi, Hidenori)

独立行政法人港湾空港技術研究所・その他部局等・その他

研究者番号：60371762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸域の砕波帯や波打帯における海浜地盤の安定性については不明な点が多い。特に地盤工学的な観点から検討された事例は少ない。そこで本研究では、応力依存性の高い地盤を対象に使用される遠心模型実験手法を本問題へ適用した。初めに、限られた装置能力やスペース内で効率的に造波できる装置を開発した。次いで、相似則について検討し、Modelling of models手法による遠心模型実験の有用性を示した。さらに、砕波した波に対する地盤の応答特性を調べた。

研究成果の概要(英文)：The stability of seashore-soil in the swash zone has not been clarified yet. In particular, there are few studies based on the geotechnical view point. In this study, it was attempted to introduce a centrifuge test technique to this problem. First, the new wave generator was developed because the capacity and area of the centrifuge platform were limited. Second, the efficacy of a centrifuge model test was verified under an appropriate similitude law and the modelling of models method. Further, the soil behaviours under breaking waves were investigated and shown.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 水工水理学 波浪 海浜 遠心模型実験 砕波

1. 研究開始当初の背景

沿岸域の砕波帯や波打帯における海浜地盤の安定性を考える上で、流体と表層地盤のみでなく、地盤内部の動態を検討することは重要である。海浜地盤の安定性については、岸沖方向と沿岸方向の流体および地盤の挙動が関連し合っ、複雑なものとなり、国内外問わず古くから研究されてきた。しかしながら、いまだ十分に解明されているとは言い難く、特に、海浜の地盤内部における流体の動きやそれに起因する地盤自体の動きに関する検討はほとんど行われていなかった。その原因の1つとして、海岸工学などの水理学分野から研究されることが多かったことも一要因として考えられる。砕波した波浪の来襲は、海浜の地盤内の間隙水圧をダイナミックに変動させ、海浜地盤の安定性を議論する上で無視できない。このため、地盤工学の観点からのアプローチが必要不可欠であった。

海浜の安定性を検討する手法としては、水理学分野における一般的な手法である水理模型実験や現場実験、既存の水理数値解析などによる方法が挙げられる。しかしながら、従来からの水理模型実験では、地盤内に実物スケールの応力を再現できず、実現象の地盤挙動を再現するのは難しい。また、水理模型実験には多くの時間が必要であり、広範な条件下においてパラメトリックに検討することは難しい現状にあった。現場実験についても同様である。数値解析については、地盤内の間隙水圧の変動特性までを再現することは難しく、既存の解析手法のみで検討を進めるのは困難な状況であった。

2. 研究の目的

背景で述べたように、砕波帯や波打帯での海浜地盤の安定性を実験によって調べる場合、水路を用いた重力場での水理実験などを行うことが一般的であった。しかしながら、重力場の縮尺模型では実物スケールの地盤内応力や間隙水圧を再現することは難しく、地盤内部の状態まで含めた研究は進んでいないのが実状である。

本研究では、応力依存性の高い地盤の問題を対象に使用される遠心模型実験手法を本問題へ適用することを試みた。研究の前半では、流体の挙動を含めて、相似則や遠心模型実験の有効性も確認することを目的とした。後半では、砕波した波に対する地盤の応答特性を調べた。遠心模型実験では、小さな模型であっても遠心力を利用して実物スケールの地盤内応力や間隙水圧を作り出すことができる。また、模型が比較的小さいために、その作製が比較的容易であり、実験条件を変えたパラメトリックな試行実験にも向いている。また、模型縮尺に合わせた遠心加速度を加えることで、流体においてはフルード則

を満たした実験が可能である。過去にも、波と地盤の複合問題を遠心模型実験によって調べた事例もある^{1) 2) 3) 4) 5)}。文献^{1) 2) 3) 4)}は、波と地盤の複合問題に対して遠心模型実験手法を適用した先駆的な研究である。しかし、これらは砕波帯や波打帯での地盤応答問題を検討したものではなかった。また、文献⁵⁾は著者らの一部によって実施された砕波帯と波打帯での研究であるが、相似則が十分に実証されたものではなかった。

研究では、初めに、限られた装置能力やスペース内で効率的に造波できる装置を開発した。次いで、相似則について検討し、Modelling of models手法による遠心模型実験の有用性の検証を行った。さらに、砕波した波に対する地盤の応答特性を調べた。

3. 研究の方法

(1) 造波装置の開発

遠心模型実験装置に搭載した模型や造波装置に遠心力を加えるが、それらを据えるプラットフォームのスペースは限られる。また、スリップリングを介して回転体へ電力を供給するため、使用できる電力容量も限られる。このため、造波装置には容量と寸法の小さなモーターを用いて、コンパクトな設計とすることが必要である。重力場でよく用いられる造波装置は、試料容器上部から造波板（波の進行方向に対して垂直に設置）を作動させるピストン式であるが、造波板の剛性を高めるために躯体重量が増し、大きなモーターも必要となる。本研究では、試料容器側面に防水加工を施した孔を開けてモーターの回転軸を試料容器内部へ通し、カム機構によって造波板を作動させることとした（図1参照）。カム機構で不規則波のような複雑な波形を作ったり、反射波を吸収することは困難であるが、造波装置の機構がシンプルであり、造波板の躯体重量を抑えて小さなモーターと架台で造波することができる。

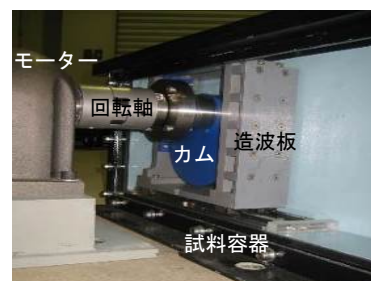


図1 開発した造波装置

(2) 遠心模型実験の有効性の確認方法

上述の造波装置を用いて、波に対する海浜地盤の応答問題への遠心模型実験の適用性を調べた。適用性の検討には、Modelling of models手法を用いた。この手法は、種々の模型縮尺と遠心加速度の組み合わせで実験を

行い、それらの実物換算値が重なることを確認し、実物スケールでの挙動の再現性を想定する方法である。

実験の断面概略図を図2に示す。模型縮尺と遠心加速度を掛け合わせて1/1（実物スケール）となるように、模型縮尺と遠心加速度を設定した。地盤中には間隙水圧計を、水中には水圧計を設置した。地盤材料としては、平均粒径が約2mm（30G）と約3mm（20G）の粒径分布が狭い珪砂を用いた。珪砂を数cmずつ堆積させて、それを軽くタッピングしながら地盤作製を行った。珪砂の粒径や実験上での動水勾配は比較的大きく、地盤内の水の流れはほぼ乱流状態と考えられ、前述のように流体として粘性流体ではなく通常の水を使うことで地盤内の浸透の相似則を満たした。

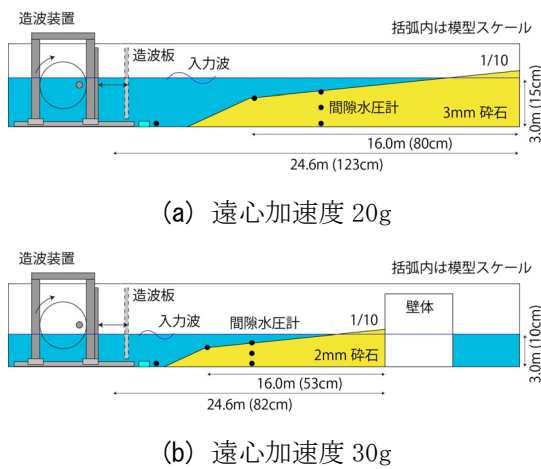


図2 模型実験断面 (Modelling of models)

図3に示した遠心模型実験装置（港湾空港技術研究所所有）に作製した模型を搭載し、所定の遠心加速度を加えて造波を行い、水面変動の撮影や水圧計による計測を行った。なお、水面変動を観察するために、遠心力場でも作動する高速度カメラによる撮影を行った。高速度カメラの撮影速度は1,000フレーム/秒と設定した。遠心力場では遠心加速度に相当した比率で周期を短くする必要があり、水面変動の撮影には高速度カメラが必要であった。



図3 使用した遠心模型実験装置

(3) 地盤の波浪応答特性の検討方法

実験の断面概略図を図4に示す。遠心加

度は40gとし、地盤中には間隙水圧計を、水中には水圧計を設置した。波打帯付近の間隙水圧の挙動を明らかにするため、その付近に多くの水圧計を埋め込んだ。地盤材料としては、平均粒径が1.7~4.8mmの宇部珪砂1号Aを用いた。地盤の作製方法や用いた遠心模型実験装置は、上述の実験と同様である。

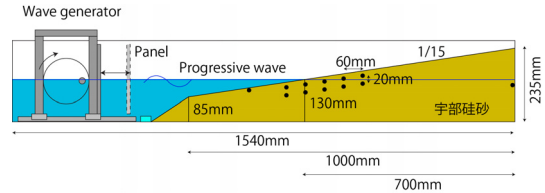


図4 模型実験断面（地盤応答）

4. 研究成果

(1) 遠心模型実験の相似則

地盤や間隙水圧に対する相似則を表1にまとめる。表には、模型の流体として水を用いる場合と粘性流体を用いる場合の相似則を示している。また、表中の N は、模型縮尺比である。地盤挙動の多くは応力や間隙水圧に依存するため、模型に遠心力を加えて実物スケールの応力や間隙水圧を再現することで、地盤挙動（例えば、ひずみ）の相似則も自動的に満足される。

表1 実験相似則の一覧

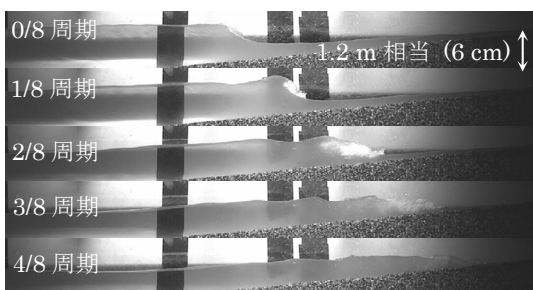
種類	項目	実物	模型（遠心力場）	
			水	粘性流体
実験条件	遠心加速度	1	N	N
	全体寸法	1	$1/N$	$1/N$
	土粒子寸法	1	$1/N$	1
	質量密度	1	1	1
	流体の粘性	1	1	N
地盤応答	水圧, 応力	1	1	1
	動水勾配	1	1	1
	変位	1	$1/N$	$1/N$
	ひずみ	1	1	1
層流	流速	1	$1/N$	1
	伝播時間	1	1	$1/N$
乱流	流速	1	1	$N^{1/2}$
	伝播時間	1	$1/N$	$1/N^{3/2}$

流体の挙動はフルード則に従うこととした。本実験の模型縮尺は1/40 ~ 1/20であり、慣性力に対して粘性力や表面張力を無視しうる範囲である。フルード則での速度の相似比は1となる。水の速度つまり流速に依存する挙動は多く、遠心力場で実験を実施する利点は多いと言える。なお、時間の相似比が1/Nとなるため、地盤挙動の時間の相似比をそれに合わせる必要がある。例えば、波浪に

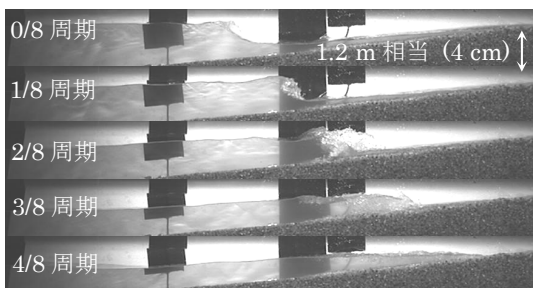
対する地盤内の間隙水圧分布を再現するためには、流体として水を、地盤として乱流状態となる土を用いて、間隙水圧の伝播時間の相似比を $1/N$ とする必要がある。

(2) 遠心模型実験の有効性の確認

実験で得られた水面波形と水圧変動を比較した。これらを図5と図6に示す。図5は遠心加速度 20G 場と 30G 場で撮影した画像であり、1/8 周期毎の水面波形である。実物スケールに換算したことを想定し、ケース S-20 と S-30 の図の寸法を 20 : 30 として表示している。波が砕け、地盤に打ち上げている様子を確認できる。砕波形態としては巻き砕波と砕け寄せ砕波波の中間的なものと観察された。両者の波形を比較すると、いずれの時間においてもほぼ一致していた。また、砕波点付近で発生する流れによって砂粒子の数が漂う現象が見られ、これについても両ケースについて共通に表れていた。



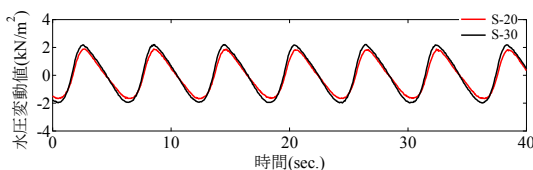
(a) 遠心加速度 20g



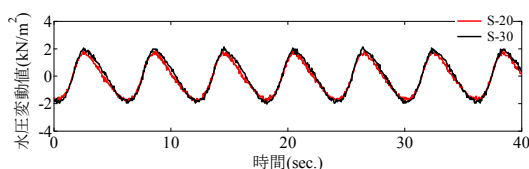
(b) 遠心加速度 30g

図5 水面波形の比較

図6に示した水圧変動は、実物換算で深度 1.1 m と 2.2 m での間隙水圧変動である。これらについてもほぼ一致しており、波の伝播問題だけでなく、波に対する地盤の応答問題に対しても、遠心模型実験の適用性は高いことが確認された。



(a) 実物換算で深度 1.1 m

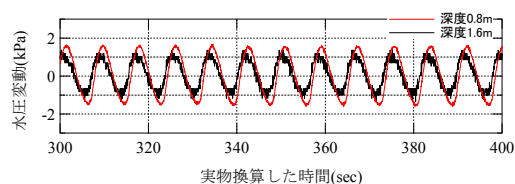


(b) 実物換算で深度 2.2 m

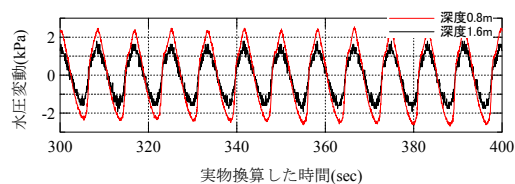
図6 地盤内の間隙水圧の比較

(3) 地盤の波浪応答特性

波高を変化させて計測した地盤内の水圧変動を図7に示す。それぞれ、実物換算で深度 0.8 m と 1.6 m での間隙水圧の変動を示している。各図から分かるように、深部ほど水圧変動量が小さくなっていった。また、波高を大きくするほど、水圧変動が大きくなることが確認できた。



(a) 波高：小さい



(b) 波高：大きい

図7 地盤内の間隙水圧（波高の影響）

図8には、汀線から陸側に -2.4 m, 0.0 m, 2.4 m, 4.8 m での水圧変動を示している。汀線よりも陸側ほど水圧の変動値は小さくなっており、陸側ほど波高が小さくなることと整合性が取れていた。また、陸側ほど位相が遅れており、波の伝播に時間がかかっていることが分かる。汀線から海側の地点 (-2.4 m) では、水圧変動の波形が非線形となっており、砕波による影響が強く出ていた。

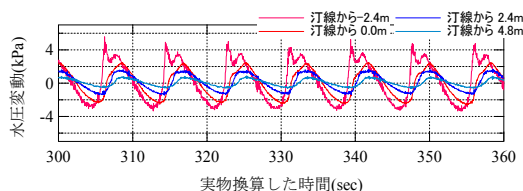


図8 汀線付近の地盤内の間隙水圧

流体の領域と地盤内との水の交換が進んでいる箇所を調べるため、透水係数が小さい珪砂を利用して色素による着色実験を実施した。その結果を図9に示す。汀線付近において青く着色されており、水交換が進んでいた。これは、汀線付近において水圧勾配が大

きくなっていたためと考えられる。

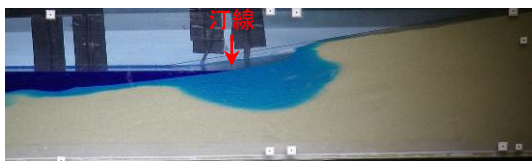


図9 色素による水交換領域の確認

本研究によって、砕波帯や波打帯での海浜地盤の安定性問題について遠心模型実験手法を利用できることが分かった。遠心模型実験の今後の活用に期待される。

<引用文献>

- 1) Sekiguchi, H., Kita, K., and Okamoto, O.: Response of poro-elastoplastic beds to standing waves, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 3, pp. 31-42, 1995.
- 2) Sassa, S. and Sekiguchi, H.: Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 621-638, 1999.
- 3) 馬場慎太郎, 三宅達夫, 金 夏永, 鶴ヶ崎和博: 波・地盤・構造物の新しい実験手法, *海岸工学論文集*, Vol. 49, pp. 1536-1540, 2002.
- 4) 三宅達夫, 角田紘子, 前田健一, 坂井宏隆, 今瀬達也: 津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用, *海洋開発論文集*, Vol. 25, pp. 87-92, 2009.
- 5) 高橋英紀, 小川慧, 早野公敏, 森川嘉之, 二宮裕介: 造粒固化土を利用した人工海浜の波浪安定性に関する遠心模型実験, *海洋開発論文集*, Vol. 26, pp. 687-692, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 高橋英紀, 森川嘉之, 加島寛章: 波打帯における地盤応答問題への遠心模型実験の適用性, *土木学会論文集 B3 (査読有)*, 70 巻, 2014, I_576-I_581.
DOI: 10.2208/jscejoe.70.I_576
- ② 高橋英紀, 森川嘉之, 加島寛章: 波打帯における海浜地盤応答問題への遠心模型実験手法の適用, *地盤工学研究発表会発表講演集*, 49 巻, 2014, CD-ROM.
DOI: 無し

〔学会発表〕(計2件)

- ① 高橋英紀: 波打帯における地盤応答問題

への遠心模型実験の適用性, *海洋開発シンポジウム*, 朱鷺メッセ, 2014 年 6 月 26 日~6 月 27 日

② 高橋英紀: 波打帯における海浜地盤応答問題への遠心模型実験手法の適用, *地盤工学研究発表会*, 北九州国際会議場, 2014 年 7 月 15 日~7 月 17 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 英紀 (TAKAHASHI, Hidenori)
国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
地盤研究領域 主任研究官
研究者番号: 60371762