

地盤工学的利用を考慮した破碎貝殻の強度特性

地盤工学研究室
指導教員

古木 達也
豊田 浩史

1. はじめに

近年、環境保全と経済発展の両立を図った上で持続可能な発展を目指す循環型社会形成に向けた取り組みが活発的に行われており、水産関係業界においても、循環型社会構築に向けた取り組み^{1),2)}が加速している。その水産関係業界で課題となっているのが、魚介類における可食部以外の水産系残滓の処理である。水産系残滓は、水産系副産物あるいは水産系廃棄物と呼ばれており、ホタテやカキ等の貝殻がそれに該当する。特にホタテに至っては、図-1に示す通り、北海道・青森県を中心にホタテ貝の水揚げ量の多くを占めており³⁾、平成26年度のホタテ貝の水揚げ量は、約56万トンにまで及んでいる。このうち、可食部を除いて水産系廃棄物(貝殻)として発生する量は、水揚げ量の約半数となるため、概算で約28万トンにもなる。

我が国では、これらに対する適切な処理方法および有効活用方法が確立されていない。結果として、北海道の漁港等の周辺には、貝殻が野積みになされている状況となっている。また、それに伴い、野積みになされた場所周辺の悪臭や景観悪化等の環境問題が新た

が高く大量にリサイクルできる可能性があることから、建設資材として有効利用する試みが複数実施されている。ホタテ貝殻を実工事への有効利用を目指した試みとしては、ケーソン中詰材⁵⁾、漁港の岸壁の裏込め材⁶⁾等が挙げられる。しかし、これらの利活用方法は砂骨材との混合材やコンクリート骨材の一部であり、量的に抜本的な問題解決には至っていない。野積みになされている貝殻の問題を解決するためには、貝殻を一部ではなく大量かつ有効に利活用を図る方法が求められている。

本研究では、貝殻を有効かつ大量に活用できる地盤工学的利用法を提案することを最終的な目的とし、破碎貝殻で人工地盤を造る場合に、問題となる事項の洗い出しを行う。そのために、今回は破碎貝殻の特異なせん断強度特性を一面せん断試験により把握した。破碎貝殻の粒度特性および密度や堆積角度(異方性)による強度特性への影響について、明らかにするとともに、一般的な砂との相違を明確にするため、豊浦砂についても同様の試験を行い、強度特性の比較を行った。

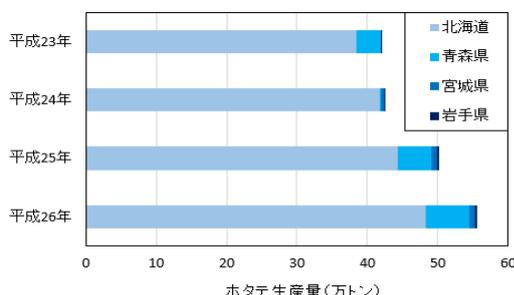


図-1 年度別我が国のホタテ貝の水揚げ量

に発展している。この状況を打開するため、利用方法に関する研究が行われてはいるものの、現時点では模索段階であり、立ち遅れている。

一方、限定的ではあるが貝殻の主成分が炭酸カルシウムである⁴⁾ことや、ホタテ貝殻自体が緻密で強度

2. 試験方法

2.1 試料および供試体作製方法

今回実験で使用した試料は、破碎した貝殻(以下、破碎貝殻)と豊浦砂である。貝殻は、大量に入手が可能な青森県産のホタテ貝殻を用いた。

ホタテ貝殻については、試料として用いるために、試験前に水洗いおよび乾燥などの下処理を行い、その後小型粉砕機で破碎した。このうち、粒径2mm未満の破碎貝殻を試験対象とした。

破碎貝殻の粒度特性を把握するために、土質試験で用いるふるいにより粒度試験(JIS A 1204)を実施した。なお、破碎貝殻の粒度特性を一般的な砂と比較するため、本試験では豊浦砂についても同様の試験を

行った。これらの試料に対する粒度試験結果（粒度加積曲線）を図-2に、また、それぞれの試料をマイクロスコープにて粒子単位で観察したものを写真-1に示した。

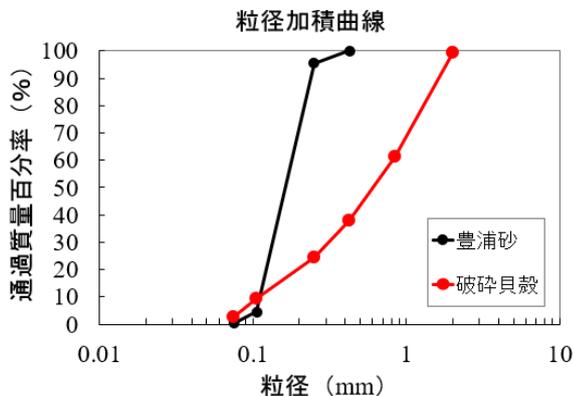


図-2 豊浦砂・破碎貝殻の粒度加積曲線

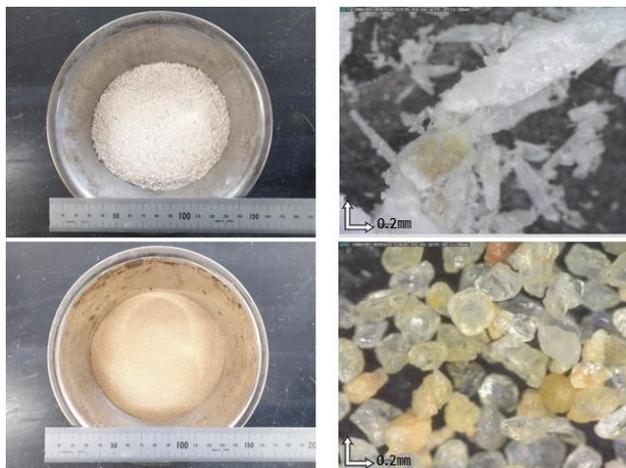


写真-1 今回の試験で用いた豊浦砂・破碎貝殻

表-1に試料の物理的特性を示す。破碎貝殻の粒子密度 ρ_s (g/cm^3)は、砂よりも大きく、最大間隙比 e_{max} 、最小間隙比 e_{min} 、最大粒径についても同様である。

表-1 豊浦砂・破碎貝殻の物理的特性

試料	破碎貝殻	豊浦砂
	粒径2mm未満	
粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.673	2.650
最大間隙比 e_{dmax} (-)	1.528	0.985
最小間隙比 e_{dmin} (-)	0.895	0.656
粒度	最大粒径 (mm)	2.00
	均等係数 U_c (-)	8.40
	曲率係数 U_c' (-)	1.07
	50%粒径 D_{50} (mm)	0.65

今回の試験では、供試体は、空中落下法でせん断箱内に直接試料を空中落下させ、堆積させて作製した。寸法は直径6cm、高さ4cmである。所定の供試体密度が得られるように試料を用意し、質量を量る。この際、密度は破碎貝殻、豊浦砂ともに相対密度で整理した。基準である状態と密な状態それぞれ、豊浦砂は $Dr=60\%$ 、 $Dr=80\%$ 、破碎貝殻は $Dr=38\%$ 、 $Dr=78\%$ とした。

堆積角度による強度特性への影響について明らかにするため、せん断箱を所定の角度で傾けた状態（図-3参照）で試料を堆積させ供試体を作製した。堆積角度 A は、堆積面が水平方向の場合を $A=0^\circ$ と定義し、 $A=-45^\circ$ 、 -22.5° 、 0° 、 22.5° 、 45° である。

また、供試体全体の密度が均一になるように、試料を2層に分けて1層ごとにゴムハンマーでせん断箱を打撃した。この打撃回数は、目標とする密度に応じて調整した。試料をすべて落下させたら、供試体上面を平らに仕上げ、その上加圧板（鉛直ガイドを含む）を載せ、せん断箱を試験機にセットした。

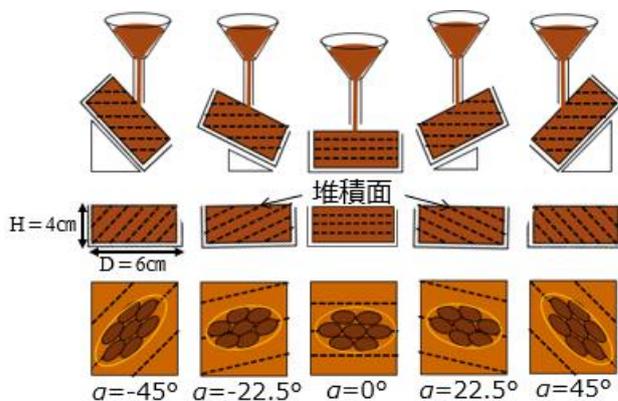


図-3 堆積角度をつける場合の供試体作製方法

2.2 試験過程

この試験は、土の一面せん断試験（JGS 0560）に準じて行った。試験機に供試体が入ったせん断箱をセットした後、予圧密（30kPa）、圧密（ $\sigma_v=50kPa$ 、100kPa、200kPa）、せん断の順で実施した。また、せん断過程では0.2mm/minの速さで下部せん断箱をスライドさせ、せん断変位が7mmに達した時点でせん断を終了した。



図-4 堆積角度別せん断過程概略図

2.3 貝殻試料の繰り返し使用による粒度変化

一面せん断試験では、多量の試料を使用せずに済むなどの理由から、破碎貝殻約 1 kg の範囲内で試料を再使用し、試験を行った。ここで考慮しなければならないことは、試料を繰り返し使用することに起因する試料の粒度変化である。

つまり、一面せん断試験を繰り返し行うことで、粒度が変化するか否かを明らかにし、試験結果の信憑性を確認する必要がある。これを調べるために、まず一面せん断試験を垂直応力 50kPa の下で行い、終了後にせん断箱から試料を取り出し、その試料にて、ふるいによる粒度試験を行う。その後、その試料を再び用いて供試体を作製し、一面せん断試験を垂直応力 100kPa の下で行う。以降は垂直応力 200kPa の場合も同様の手順で行う。ここから、各々の粒度試験の取得データを整理し粒度に変化があるか否かを確かめる。

なお、前提条件として、供試体作製時は前回の試験で使用した破碎貝殻を一度、破碎貝殻が入っているケースに戻し、数分間かき混ぜた上で、必要な分を取り出して再使用しているため、前述の手順と実際の試験手順は、異なっている。

3. 試験結果

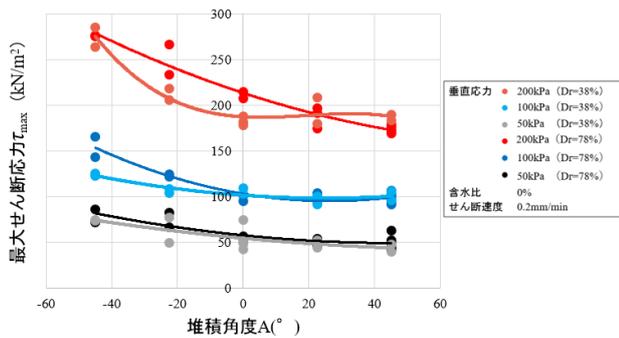


図-5 τ_{\max} -A 関係 (破碎貝殻)

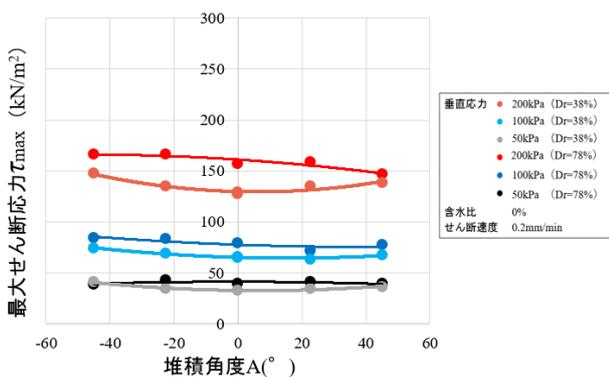


図-6 τ_{\max} -A 関係 (豊浦砂)

図-5、図-6 は、それぞれ密度の異なる豊浦砂と破碎貝殻に対して各垂直応力 σ_v の下で、一面せん断試験の結果より得られた最大せん断応力 τ_{\max} と堆積角度 A との関係を示している。

図-5 は、破碎貝殻の τ_{\max} -A 関係を示したものである。破碎貝殻では密度の大小にかかわらず $A=-45^\circ$ 、 -22.5° のような負の堆積角度によって τ_{\max} が大きくなっており、異方性があり、比較的強度が大きい。ただし、 $Dr=38\%$ の場合、正の堆積角度では、 τ_{\max} が一定となり異方性を確認することができなかったため、特異な異方性があると考えられる。また、 $Dr=78\%$ の場合は、垂直応力が大きくなるほど、負の堆積角度の τ_{\max} の差は徐々に大きくなり、顕著に異方性が現れることがわかった。なお、 $Dr=78\%$ の垂直応力 200kPa においては、 τ_{\max} が最も大きい値を示した $A=-45^\circ$ から 22.5° ずつ、角度を変化させることで τ_{\max} が一定の割合で減少し、最終的に $A=45^\circ$ で最も小さい τ_{\max} を示した。また、密度によらず、あまりせん断強度が変化しないことも興味深い。

図-6 は、豊浦砂の τ_{\max} -A 関係を示したものである。ここから、豊浦砂においても若干の異方性が生じていることがわかる。しかし、図-5、図-6 を比較すると、破碎貝殻のような異方性は豊浦砂には見られない。したがって、破碎貝殻には、特異な異方性が存在すると思えることができる。

次項の図-7 は、各垂直応力の下で一面せん断試験を行った後の破碎貝殻を対象に、ふるいによる粒度試験の結果をまとめたもの(粒径加積曲線)である。これより、破碎貝殻の粒径加積曲線に目立った変化が見られないため、今回の試験で使用した破碎貝殻は、繰り返し使用しても各々の結果には、直接的に影響はないと考えられる。ただし、ふるいや肉眼では確認することができないような微細な摩耗や割れ等が生じている可能性は十分あると考えられる。

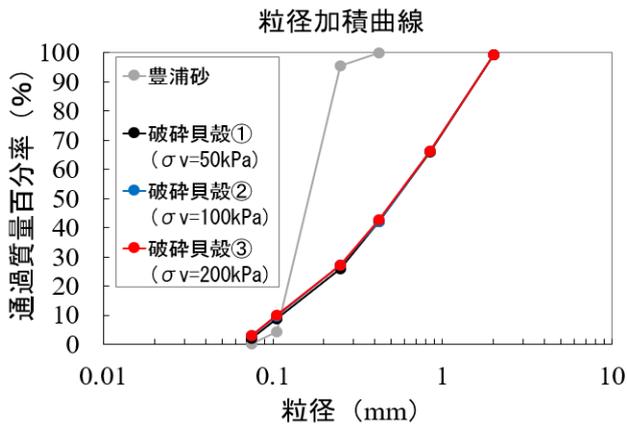


図-7 垂直応力別の粒径加積曲線 (破碎貝殻)

4. まとめ

本研究では、破碎貝殻の特異なせん断強度特性について把握するために、密度や堆積角度などの試験条件の下で一面せん断試験を行った。また、その強度特性を比較するために豊浦砂についても同様の試験を行い、試験結果を通して、破碎貝殻が地盤材料として効果的に利活用できるかを評価した。

以下に、本研究で得られた主な知見をまとめる。

- 豊浦砂と破碎貝殻を比較検討すると、明らかに破碎貝殻には特異な異方性があることが明らかになった。
- 破碎貝殻の場合、せん断強さ $s(=\tau_{max})$ は、密度にかかわらず堆積角度 -45° の時が最も大きい。
- 破碎貝殻は、異方性はあるものの、せん断強度は豊浦砂より大きいため、地盤材料としての利用が可能である。
- 破碎貝殻は、密度による強度差が小さいため、積極的な締固めを必要とせず、利用しやすい地盤材料となる。

5. 今後の展望

本研究で扁平性の大きい粒子で構成される破碎貝殻は、他の試料には見られない特異なせん断特性および異方性があることがわかった。今後は、正と負の堆積角度ではなぜ異方性の傾向が異なるのか、その原因を明らかにするために、破碎貝殻に対して粒子の形状を数値化し、定量的に異方性を評価するな

どして、メカニズムを解明していく必要がある。

また、水を加えて含水比を調整し、供試体を作製した上で、様々な試験条件の下で一面せん断試験を行い、含水比と強度との関係、強度定数との関係を明らかにする。

海岸付近でなく、内陸で大量に使うことを前提にしたとき、塩分を取り除く必要があるため、それにかかる費用対効果および塩分を含むことに起因する地盤への悪影響などについて調べることも地盤工学的利用を考慮する上では必要である。

【参考文献】

- 環境省:漁業系廃棄物の処理について
<http://www.env.go.jp/hourei/11/000083.html>
(2019年12月9日閲覧)
- 産業系廃棄物処理の現状と課題. 出村雅晴. 農林金融. 2004年11月. <https://www.nochuri.co.jp/report/pdf/n0411re4.pdf> (2020年1月15日閲覧)
- 水産庁漁港漁場整備部財団法人漁港漁場村技術研究所:北海道ホタテ貝殻による漁場造成ガイドライン, pp. 2-5, 2007.
- 青森県ほたて流通振興協会:年度別ほたて生産量実績表 <http://www.aomori-hotate.com/> (2020年2月5日閲覧)
- 廣瀬孝, 櫛引正剛, 對馬弘海, 柴田勝司:ホタテ貝殻をフィルターとして用いたFRPの基本的特性, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol. 22, No. 2, pp. 87-92, 2011
- 大野元:ホタテ貝殻のケーソン中詰材への有効活用, 土木学会誌, Vol. 95, No9, p. 27, 2010.
- 平田幸雄, 佐伯公康:水産副産物(貝殻)の裏込材への有効利用に関する基礎的研究(その2) -ホタテ貝殻を混同した砂の内部摩擦角-, 海洋開発論文集, pp. 862-866, 2005.
- 地盤工学会編:土質試験 基本と手引き, pp. 19-21, pp.27-35, pp. 59-61, pp. 121-132, 2012.
- 三田地利之:土質力学入門, pp. 126-134, 2014