

水産系副産物（貝殻）の裏込材への 有効利用に関する基礎的研究（その2） －ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角－

BASIC STUDY ON PRACTICAL USE TO BACK-FILL MATERIAL
OF FISHERY BY-PRODUCT (No.2)

- INTERNAL FRICTION ANGLE OF SAND MIXED WITH SCALLOP SHELL -

坪田幸雄¹・佐伯公康²

Yukio TSUBOTA and Kimiyasu SAEKI

¹ 正会員 工修 (独)水産総合研究センター 水産工学研究所 (〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

² 正会員 工修 (独)水産総合研究センター 水産工学研究所 (〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

In order to use scallop shells of a fishery by-product effectively for the back-fill material of a quay, we are investigating the internal friction angle of the sand which mixed the crashed scallop shells by consolidated-drained tri-axial compression test. In our first report, we checked that the sand which mixed the crashed scallop shells is applicable to back-fill material to some extent. This time we investigated the internal friction angle of the mixture sand which changed kind of both scallop shells and sands. As a result, when the maximum grain size of crashed shell is 5-10mm and the rate of shell mixture is about 25%, the internal friction angle of the sand which mixed the crashed scallop shells is degree the same as sand, and it is thought that we can use the sand which mixed the crashed scallop shells for the back-fill material, although some scallop shells are crushed.

Key Words : Fishery by-product, mixed sand, back-fill, internal friction angle, scallop shell

1. はじめに

水産系副産物である廃貝殻は、ホタテガイが北海道、青森県を中心に約26万トン/年、カキが広島県、宮城県を中心に約24万トン/年（共に推定値）が発生している。ホタテガイなどの加工業者から排出される廃貝殻は、廃棄物の処理及び清掃に関する法律の規定上、産業廃棄物に該当するため、事業者自らが処分する必要がある。しかし、種々の要因から¹⁾、その多くが漁港周辺に野積み

にされているのが現状である。一方、循環型社会形成推進基本法では、廃棄物等のうち有用なものを循環資源と定義しており、循環資源はできる限り循環的な使用（再利用や再生利用等）を行わなければならないとされている。しかし、廃貝殻の有効利用に際しては、付着している有機物の除去や破碎等の前処理にコストがかかる。そのため、大量かつ恒常的に有効利用するには、利用目的の効果が十分に発揮され、他の代替品と同等の効果があることなどを確認する必要が

ある。

そこで、廃貝殻を大量に有効利用する一方策として、漁港の岸壁などの裏込材に利用するための技術開発を行っている。なお、水産基盤整備事業においては、カキ殻、ホタテ貝殻を漁港・漁場施設に使用される再生資源としており、その物理的・化学的・力学的性質等を十分に調査のうえ使用することとされている。また、裏込材は、適切な強度、耐久性および比重を有しているものを選定するものとし、具体的には、内部摩擦角が大きく、かつ、比重の小さいものが望ましいとされている²⁾。

前報¹⁾では、ホタテ貝殻を混合した砂の内部摩擦角を中心に室内試験により検討し、裏込材へ適用できることを、ある程度確認した。本文は、引き続き、ホタテ貝殻および砂の種類組み合わせを変化させた混合砂の内部摩擦角等について室内試験により検討し、ホタテ貝殻を混合した砂のより一般的な適用性を明らかにするものである。

2. 試験方法

試験に使用した砂は、茨城県鹿島産、山口県豊浦産、高知県佐川産の3種類である。ホタテ貝殻（以下、貝殻という）は、青森県陸奥湾産、北海道常呂産の2種類である。なお、鹿島砂および陸奥湾産貝殻は前報と同様のものである。また、常呂産貝殻は土壌改良材用に市販されているものである。試料は、混合する貝殻最大粒径を2種類（5, 10mm）、貝殻混合率（以下、混合率という）を2種類（25, 50%）に変化させ、砂のみのものと併せて、各砂ごとに表-1に示す9種類、計27種類である。このうち、鹿島砂のみ、鹿島砂と陸奥湾産貝殻の混合試料の5種類は前報で報告したものである。さらに、貝殻のみの試料は、貝殻最大粒径10mmについてのみ、内部摩擦角を求めた。

内部摩擦角を求めるための試験は、圧密排水（CD）三軸圧縮試験を行い、圧密圧力は50, 100, 150, 200kN/m²の4種類、供試体寸法は直径5.5cm×高さ11cmである。また、圧密、圧縮時に貝殻の破碎が考えられるため、試験前後における粒度試験を行った。その他、土粒子の密度試験、単位容積質量試験、締固め試験を行った。単位容積質量試験は、ジグギング法のほか、空中落下法（落下高さ50cm）、スプン法（落下高さ0cm）も行った。なお、三軸圧縮試験の供試体は、密度が最もゆるいスプン法で求めた単位容積質量を目標として作製した。

3. 結果および考察

(1) 粒子密度および単位容積質量

使用した砂および貝殻の粒子密度は、各々2.639～2.672 g/cm³、2.639～2.699g/cm³で、ともに通常の砂と大差ない。

図-1に、スプン法による単位容積質量を示す。単位容積質量は、鹿島砂、佐川砂では、貝殻混合率が増加すると小さくなるが、豊浦砂は混合率25%では逆に大きくなり、50%では一定の傾向が得られない。また、豊浦砂、佐川砂に陸奥貝を50%混合したもので、貝殻最大粒径が増加すると大きくなるものの、それ以外では最大粒径の違いによる差はほとんどない。空中落下法、ジグギング法でも、単位容積質量がそれぞれ概ね0.1kg/L、0.2kg/L大きくなるものの、同様の傾向である。

通常、砂よりも粒径の大きな貝殻を混合すると、粒子間の間隙が大きくなり、単位容積質量は減少すると考えがちであるが、今回は異なった結果が得られた。

図-2に、砂および貝殻の粒径加積曲線を示す。粒度分布は、鹿島砂、佐川砂が均等であるのに対し、豊浦砂は粒径が細かく、均一である。そのため、貝殻を混合することで、鹿島砂、佐川砂では大小の球状粒子が詰まっている中に、大きな扁平粒子が混在することとなり、全体の粒子間の間隙が多くなったものと考えられる。一方、豊浦砂では、小さな球状粒子が詰まっている中に、大きな扁平粒子が混在することとなり、元の粒子間の間隙を

表-1 試料の種類

砂	貝殻	貝殻最大粒径 (mm)	貝殻混合率 (%)
鹿島砂	陸奥	砂のみ	
		5	25
			50
		10	25
			50
豊浦砂	常呂	砂のみ	
		5	25
			50
		10	25
			50
佐川砂	常呂	砂のみ	
		5	25
			50
		10	25
			50

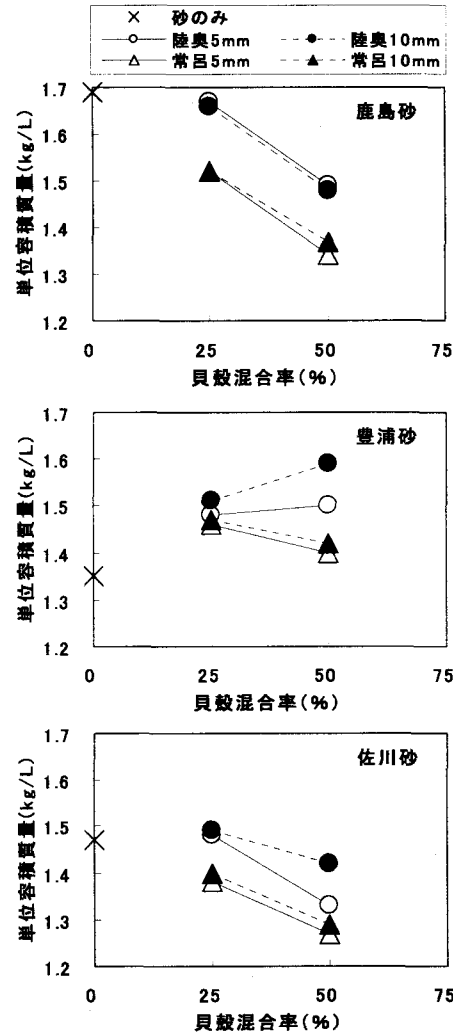


図-1 単位容積質量（スプン法）

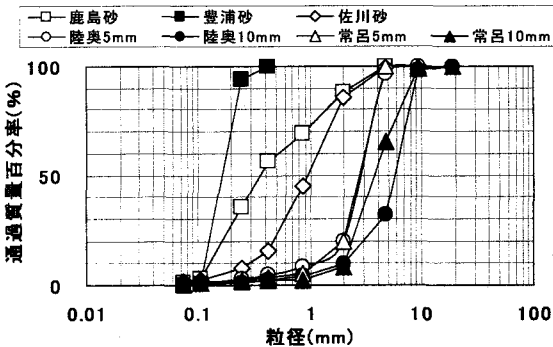


図-2 粒径加積曲線

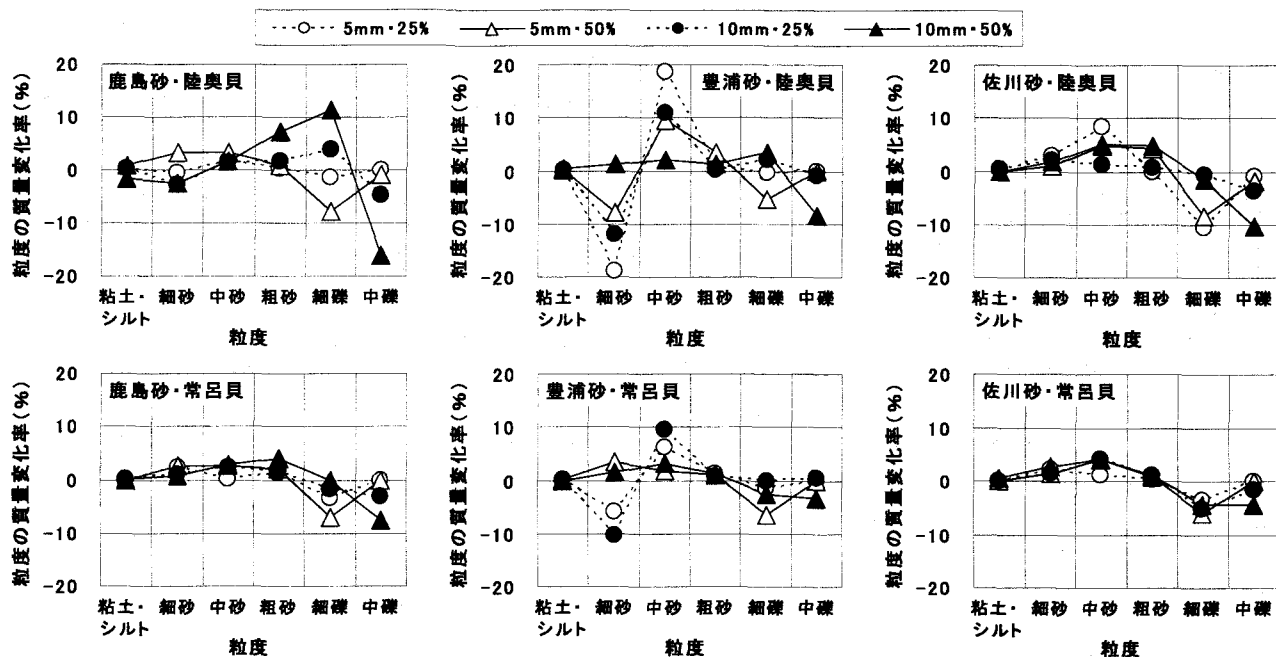


図-3 締固め試験時の貝殻破碎状況

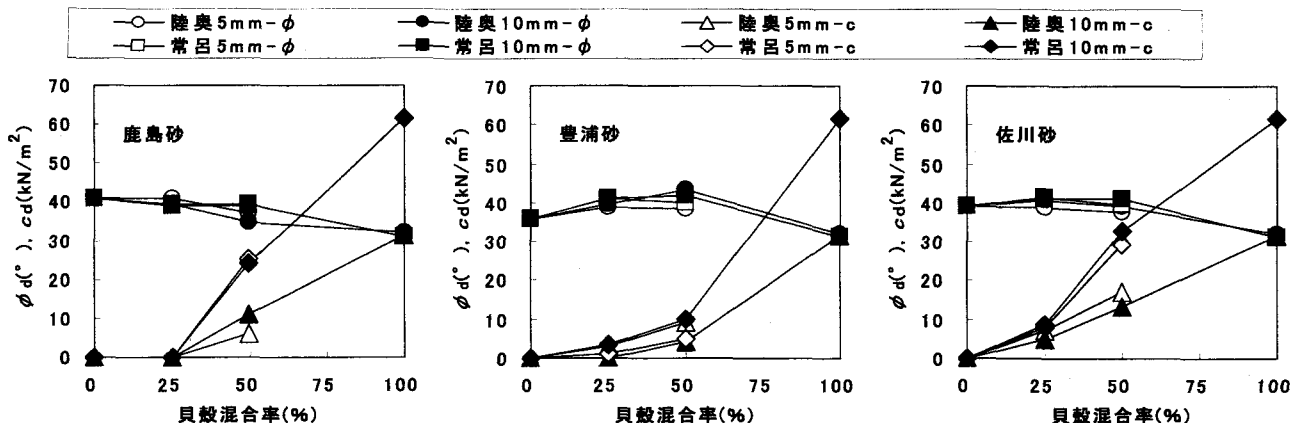


図-4 モール円の破壊包絡線による内部摩擦角 ϕ_d と粘着力 c_d

含めて貝殻に置き換わったことにより、全体の粒子間の空隙が少なくなったものと考えられる。つまり、貝殻を混合することによる単位容積質量の増減は、砂と貝殻の粒度分布に依存するものの、混合率が25%程度であれば、貝殻最大粒径にはあまり影響されないと考えられる。なお、貝殻の種類による差は、貝殻を破碎する工程の違いに起因する貝殻の扁平率などの形状の違いによるものと思われる。

(2) 締固めによる貝殻の破碎

図-3に、締固め試験の前後における各粒度の質量変化率(粒度試験から得られる各粒径間の質量百分率の増分)を示す。各試料ごとに多少のバラツキがあるものの、全体的には次のことがわかる。

- ①粒径2~9.7mmの細礫・中礫分に相当する粒度の貝殻が破碎して減少し、逆に粒径0.075~2mmの細砂~粗砂分が増加している
- ②混合率25%よりも50%の方がより多く減少してお

り、混合率が多くなるとより多くの貝殻が破碎する。

③混合率25%の場合は、貝殻の破碎は砂および貝殻の種類、貝殻最大粒径に関係なく、最大5%程度である。

なお、図-3中央上下の豊浦砂の場合に、中砂が増加し、細砂が減少するという通常考えられない現象が起きている。この内訳は、中砂のうち粒径0.25~0.425mmの粒度が増加し、細砂のうち粒径0.106~0.25mmの粒度が減少している。この原因としては、締固め試験前の粒度は実際の試験に供した混合試料の粒度ではなく、図-2に示した個々の材料の粒度から貝殻混合率により計算上求めたものであり、かつ、豊浦砂の粒度が粒径0.25~0.425mmに偏在しているため、混合試料採取時に試料が十分に均一化していない状態で採取してしまった可能性が考えられる。

(3) 内部摩擦角

図-4に、CD三軸圧縮試験によるモール円の破壊包絡線から得られた内部摩擦角 ϕ_d 、粘着力 c_d と貝殻混

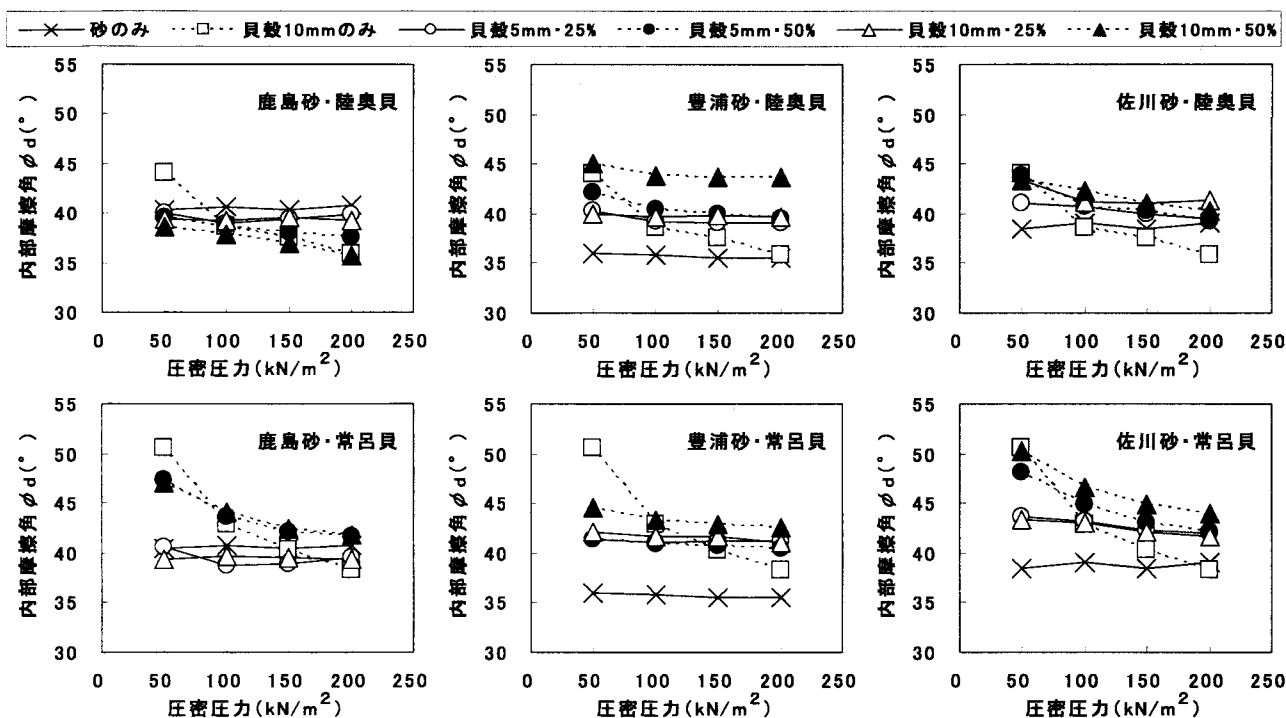


図-5 内部摩擦角（圧密圧力ごとに粘着力=0と仮定）と圧密圧力

合率の関係を示す。図より、次のことがわかる。

- ①混合率50%以上では、比較的大きな粘着力が発生する。
- ②また、混合率50%以上では、砂および貝殻の種類により粘着力の大きさが異なるものの、貝殻最大粒径の差による粘着力の違いはあまりない。
- ③一方、混合率25%では、内部摩擦角は砂と同等、または、それ以上である。
- ④また、混合率25%では、貝殻の種類、貝殻最大粒径

の差による内部摩擦角の違いもほとんどない。

本来、砂は粒状体であり粘着力は発生しないが、貝殻を混合することで、圧密圧力の増加に伴いせん断中に貝殻が破碎し、強度低下が起こり、見かけの粘着力が発生したものと考えられる。

そこで、図-5に、圧密圧力ごとに粘着力 $c_d=0$ と仮定して求めた内部摩擦角 ϕ_d と圧密圧力の関係を示す。図より、次のことがわかる。

- ①内部摩擦角は圧密圧力の増加に伴って減少し、混合

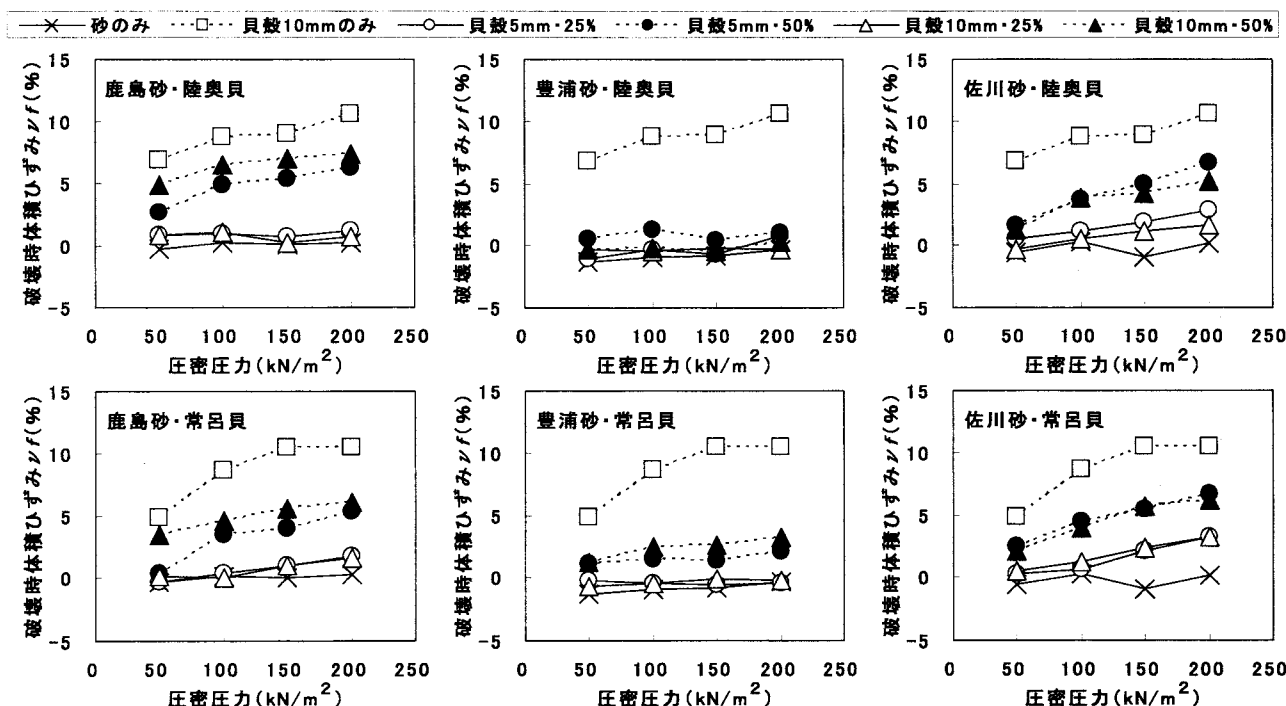


図-6 破壊時体積ひずみ ν_f と圧密圧力

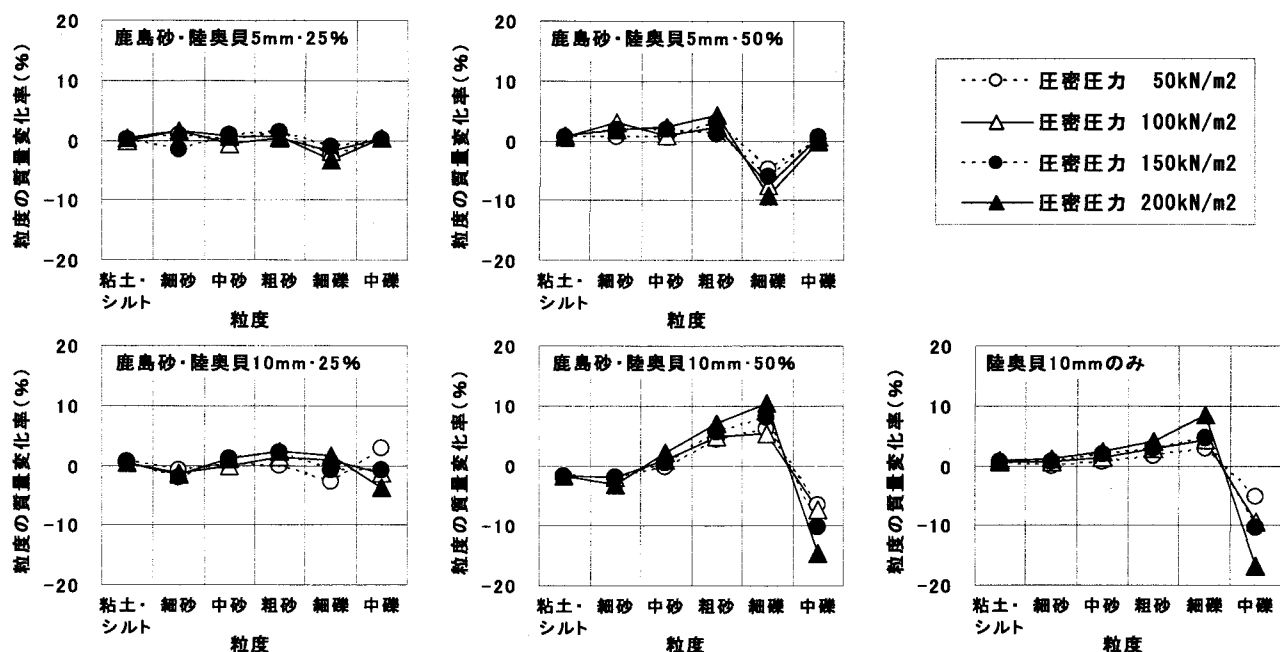


図-7 C D三軸圧縮試験時の貝殻破碎状況

率50%以上ではその減少幅が大きいが、混合率25%ではほとんど変化がない。

②混合率25%では、砂および貝殻の種類、貝殻最大粒径に関わらず、内部摩擦角は砂と同等、または、それ以上である。

次に、図-6に、せん断破壊時の体積ひずみ ν_v と圧密圧力 p の関係を示す(体積ひずみの符号は、正が収縮、負が膨張)。図より、次のことがわかる。

①破壊時体積ひずみは圧密圧力の増加に伴って収縮し、混合率50%以上ではその収縮幅も大きい。

②混合率25%では、砂および貝殻の種類、貝殻最大粒径に関わらず、破壊時体積ひずみは砂と同等、または、たかだか3%程度多めに収縮するだけである。

なお、図は示していないが、圧密過程における体積ひ

ずみは、収縮のみで、値も破壊時の半分程度であるが、ほぼ同様の傾向を示している。

また、図-7に、各圧密圧力ごとのCD三軸圧縮試験の前後における各粒度の質量変化率の一例(鹿島砂・陸奥湾産貝殻)を示す。図から、次のことがわかる。

①圧密圧力および混合率、貝殻最大粒径に関係なく、粒径2~9.7mmの細礫・中礫分に相当する粒度の貝殻が破碎して減少し、それ以下の粒度が増加している

②混合率25%では、貝殻の破碎による粒度変化は、最大でも4%程度である。

③混合率50%以上では、粒度変化は、10%程度以上であり、締め固め試験による破碎と同程度以上である。

なお、他の砂と貝殻の組合せでも、同様の傾向である。

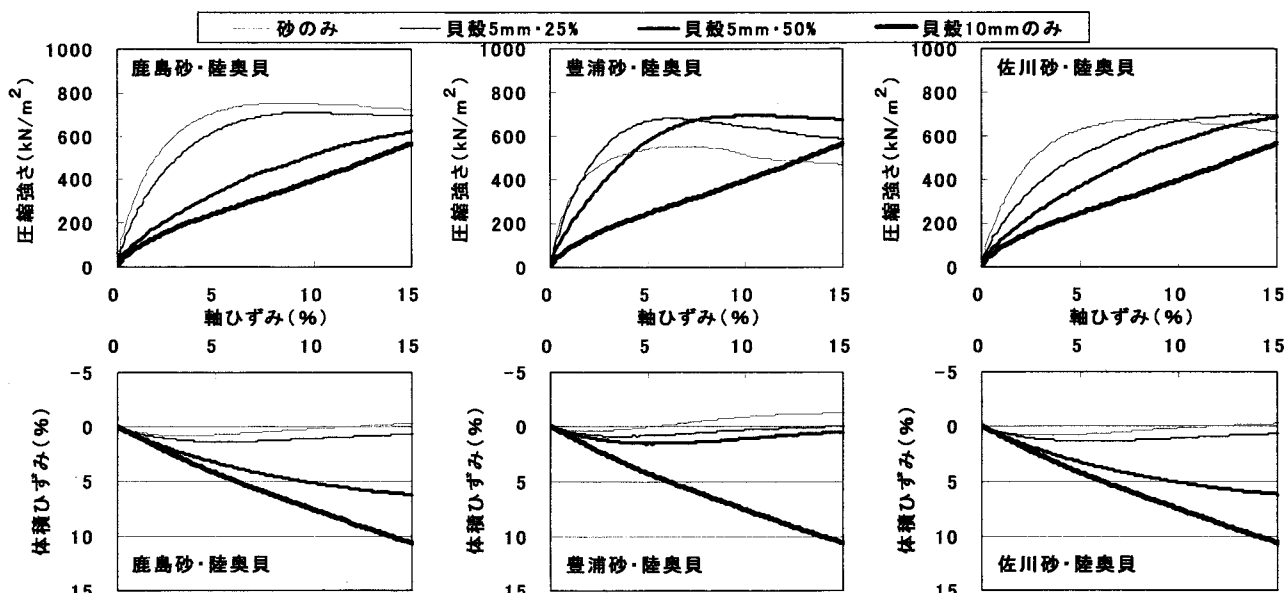


図-8 圧縮過程での圧縮強さ、体積ひずみ～軸ひずみ曲線(圧密圧力=200kN/m²)

これらのことから、砂粒子によって貝殻が破碎されるのではなく、貝殻同士が接触することにより破碎されるものと推察される。すなわち、貝殻混合率50%以上では、扁平で粒径の大きな貝殻同士が接触して破碎する確率が大きくなるのに対し、混合率25%では貝殻よりも粒径の小さい砂粒子が貝殻の周りをクッションのように保護し、貝殻同士が接触、破碎する確率が小さくなるためと考えられる。

(4) 圧縮過程の圧縮強さ、体積ひずみ～軸ひずみ

図-8に、最大粒径5mmの陸奥湾産貝殻を混合した試料について、圧密圧力200kN/m²の場合の圧縮過程での圧縮強さ、体積ひずみ～軸ひずみ曲線を示す(軸ひずみの符号は、正が圧縮)。図から、次のことがわかる。

①圧縮強さ～軸ひずみ曲線は、混合率25%では砂とほぼ同様の形状を示し、軸ひずみ5～10%でピークが現れる。

②しかし、混合率50%以上では、圧縮強さ～軸ひずみ曲線の形状は砂と異なり、ピークが明瞭ではなく、直線的になり、貝殻のみでは、ほぼ直線となる。

③体積ひずみ～軸ひずみ曲線も、混合率25%では砂と同様の形状を示し、軸ひずみ5%程度で収縮から膨張に変化している。

④しかし、混合率50%以上では、体積ひずみ～軸ひずみ曲線の形状は砂と異なり、収縮のみで直線的になり、貝殻のみでは、ほぼ直線となる。

なお、貝殻最大粒径10mmおよび常呂産貝殻を混合した場合も同様の傾向になり、貝殻最大粒径による差はあまり見られなかった。

すなわち、混合率50%以上では、圧縮の進行とともに、貝殻の破碎も継続し、強度が発現しにくくなるものと考えられる。

5. おわりに

貝殻の最大粒径を5～10mm程度に破碎したホタテ貝殻

を混合した砂について、内部摩擦角および貝殻の破碎状況を中心に検討した結果、次のことがわかった。

①単位容積質量は、砂と貝殻の各々の粒度分布に依存するものの、混合率が25%程度以下の場合には、貝殻最大粒径にはあまり影響されない。

②締固め、圧密、圧縮により、貝殻は破碎するが、混合率25%程度以下の場合には、破碎の程度は軽微である。

③混合率25%程度以下の場合には、圧密圧力が増加しても貝殻の破碎が起こりにくく、内部摩擦角も砂と同程度以上である。

つまり、貝殻の最大粒径5～10mm、混合率25%程度以下の場合には、混合した貝殻に若干の破碎が生じるものの、砂と同等以上の内部摩擦角が期待でき、ホタテ貝殻を混合した砂を裏込材へ適用できるものと考えられる。

しかし、同時に、砂と貝殻の混じり方が、単位体積質量、内部摩擦角などに影響することも明らかになった。そのため、実際の施工に際しては、ホタテ貝殻と砂の混合方法について工夫する必要がある。今後は、供試体作製時の材料投入方法が異なる大型CD三軸圧縮試験を実施し、より実用的な施工方法、試験方法の検討を行うこととしている。

謝辞：室内試験の実施に際しては、復建調査設計株式会社の岩根清信氏ほかのご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。また、本研究は「平成16年度水産基盤整備調査委託事業」による研究であることを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 坪田幸雄、佐伯公康：水産系副産物（貝殻）の裏込材への有効利用に関する基礎的研究，海洋開発論文集，VOL. 20，pp. 377-381，2004.
- 2) 水産庁監修：漁港・漁場の施設の設計の手引：(社)全国漁港漁場協会，pp177-178，2003.