

カキ殻を中詰め材とした軽量土嚢を用いた復旧技術に関する基礎的研究

石川工業高等専門学校 重松宏明

1. はじめに

2024年1月1日16時10分、石川県能登半島にある鳳珠郡穴水町の北東42kmを震央として震度7(M7.6、震源深さ16km)の地震が発生した。この地震によって道路や鉄道、橋梁などの社会インフラに多くの被害が出た。石川県河北郡津幡町にある才田大橋も能登半島地震によって被害を受けたインフラの1つで、写真-1に示すように、橋台背面で生じた路面段差によって車両の走行機能が失われ、現在も復旧工事の見通しが立たない。才田大橋には踏掛版（注：橋の両端にある橋と道路が接続する箇所に設けられた鉄筋コンクリート板を言う。道路側の路盤の下は基本的に土や砂利で構成されているため、橋台とは異なり沈みやすくなっている。踏掛版は沈下により路面に生じる段差の影響を最小限に抑える役割がある）が設置されていなかったため、他の橋梁よりも大きな段差が生じた。さらに、この地区は河北潟干拓地で地下水面が地表面に近く、かつ軟弱地盤であることから、震災以前から圧密による沈下問題が指摘されていった。沈下した道路の路面にはオーバーレイ工法による補修が施されているものの、新たに負荷されたアスファルト舗装の荷重によって再び沈下が懸念されるようになった。

以上のような背景から、能登半島地震によって橋台背面で生じた路面段差や従来から指摘されてきた圧密による路面の沈下問題を解決するためには、軽量土工法を活用した迅速な対応が急務である。そこで本研究では、「カキ殻」を中詰め材とした軽量土嚢を用いた復旧技術の構築を検討することにした。石川県では毎年3000t(トン)以上のカキ殻を排出している。魚介類残渣であるカキ殻は県内のリサイクルセンターに設けられたヤードに野積みされ、殻に付着した藻やゴミを



写真-1 橋台背面における段差（才田大橋）

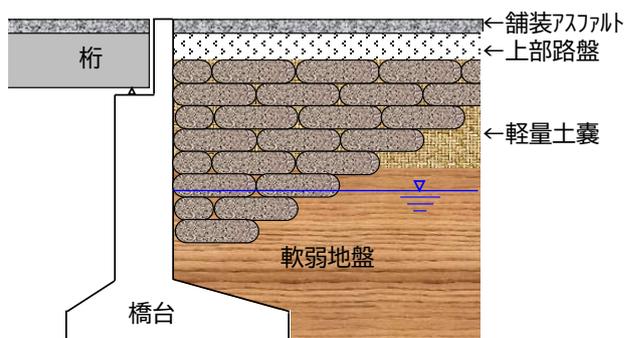


図-1 軽量土嚢を用いた復旧技術の概念図

取り除くため、2~3年の間、雨や天日に曝す。カキ殻は砂や礫のような土砂とは異なり軽量であるため、軟弱地盤上に設置しても、圧密沈下を引き起こすリスクが低い。また、カキ殻の見かけの密度は $0.8\sim 0.9\text{ t/m}^3$ 程度とされているが、適度に砕けば水より若干大きい $1.2\sim 1.4\text{ t/m}^3$ 程度になる。したがって、発泡スチロール(EPS)のような超軽量($0.01\sim 0.03\text{ t/m}^3$)ではないため、地下水上昇に伴う浮き上がりの心配もない。図-1に筆者が考えるカキ殻を中詰め材とした軽量土嚢を用いた復旧技術の概念図を示す。本研究では、カキ殻が軽量土嚢の中詰め材として適用可能か否かを把握するために、カキ殻の破碎性を十分に検討した上で、異なる条件で土嚢の載荷試験を実施した。

2. 実験の概要

(1) 使用材料

本研究で使用するカキ殻は、石川県七尾市中島町のカキ殻を洗浄して空気乾燥させた後、乾燥炉（130℃）内で1週間以上かけて絶乾状態にした。カキ殻をそのままの状態です囊の中詰め材として用いた場合、上載荷重によってカキ殻が大きく破碎し、土囊自体が大きく変形することが予想される。そのため、中詰め材として使用するカキ殻は、予めランマーで破碎し、2種類の粒径に調整したもの（9.5～26.5mm, 2～9.5mm）を使用することにした。また、比較対象の中詰め材として、ポーラスな2種類の材料を準備した。1つは粒径が3mm以下の廃瓦（破碎させた瓦）である。県内のリサイクルセンターより採取した。他の1つは能登半島の珠洲市に堆積する珪藻土の廃材（珪藻土を切り出す際に排出される切りくず）である。

一方、実験に使う土囊袋は、300mm×370mmと、一般に使用される土囊袋（450mm×60mm）よりも小型のものを採用した。実際に破碎させたカキ殻を詰めた土囊袋の様子を写真-2に示す。



写真-2 実験に用いた土囊袋

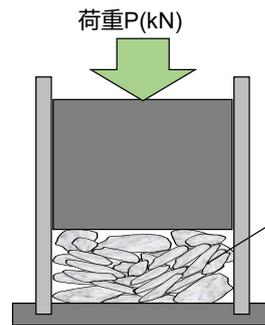


図-2 破碎値試験

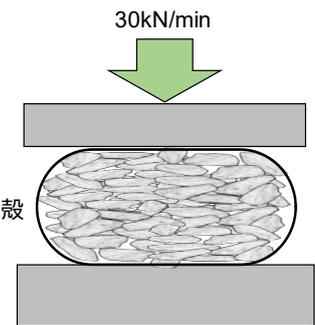


図-3 土囊の載荷試験

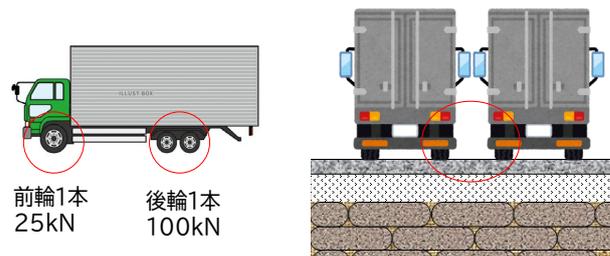


図-4 大型自動車の後輪部の重量

(2) 実験方法

カキ殻が土囊の中詰め材として有効か否かを判断するためには、まずカキ殻自体の破碎性を把握する必要がある。そこで、カキ殻の破碎値試験を実施した。図-2のようにカキ殻をモールド（直径150mm）に詰め、所定の圧縮応力 σ （=荷重P/モールドの断面積A）になるまで静的に荷重をかけて圧縮量を測定した。その後、カキ殻をモールドから取り出し、ふるい分けを行い、所定の σ におけるカキ殻の破碎率と圧縮ひずみ ϵ を求めた。

破碎値試験の結果に基づいて破碎させたカキ殻をそれぞれ中詰め材とした土囊を図-3に示すように載荷試験機に設置し、30kN/minの速度で荷重を上げていく。なお本研究では、土囊袋の破損の有無に関わらず、最大荷重を $P_{max}=200$ kNに設定した。この荷重の大きさは図-4に示すように、道路構造令における大型自動車の後輪部の重量（=200kN）をベースに算定された値である。設計しようとする部材に最も不利な応力が生じるよ

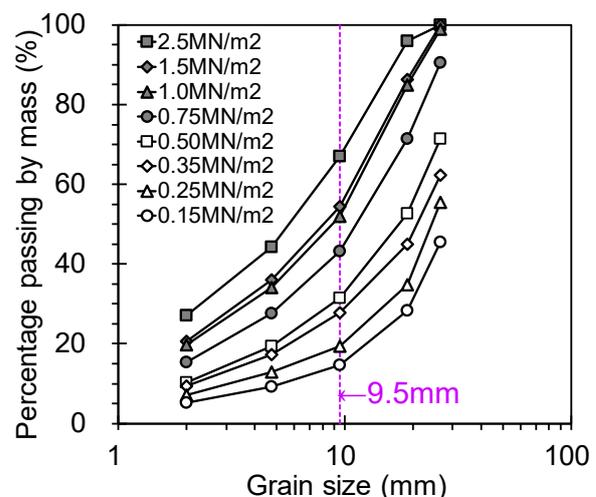


図-5 カキ殻の粒径加積曲線

うに荷重を載荷させる必要がある。載荷の際には、土囊の沈下量を測定し、荷重に対する沈下特性や

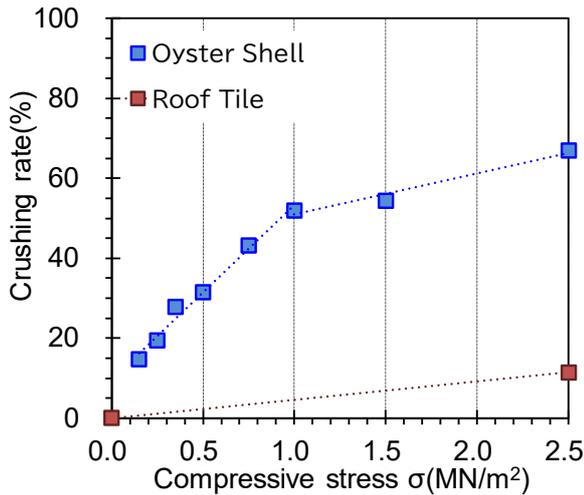


図-6 破砕率と圧縮応力の関係

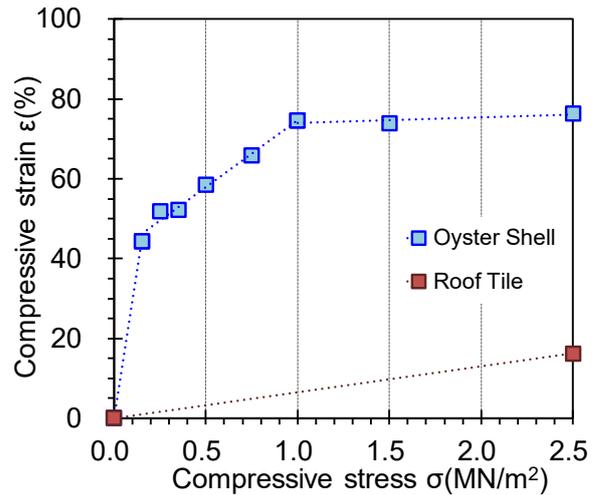


図-7 圧縮ひずみと圧縮応力の関係

土嚢の変形特性（剛性）を調べた。

3. 実験結果および考察

(1) 破砕値試験

先ずカキ殻（Oyster Shell）の破砕性について考察する。破砕値試験後の粒径加積曲線を図-5に示す。本研究では 9.5 mm の通過質量百分率をカキ殻の破砕率と定義した。図より、破砕値試験における圧縮応力 σ が大きくなればなるほど、通過質量百分率に表れる破砕率が高くなることと理解できる。図-6 に破砕率と σ の関係を示す。なお図中には、比較材料として廃瓦（Roof Tile）の結果も併記した（廃瓦は非常に硬質であるため、 $\sigma=2.5\text{MN/m}^2$ のみ実施）。カキ殻は $\sigma=1.0\text{MN/m}^2$ までは比例的に、かつ急激に破砕率は上昇するものの、 1.0MN/m^2 を過ぎると、破砕率の上昇が緩やかになっている。この点を圧縮ひずみ ε で確かめる。図-7 の ε と σ の関係を見てみると、破砕率同様 $\sigma=1.0\text{MN/m}^2$ までは著しい圧縮性を示すものの、それを過ぎると横ばいになり、 ε の増加が全く見られない。これらの点をまとめると、カキ殻は $\sigma=1.0\text{MN/m}^2$ までは著しく破砕して圧縮性も大きい。しかしながら、 1.0MN/m^2 を過ぎると、 σ を増加させても、カキ殻はそれ以上ほとんど圧縮（もしくは破砕）しないことが理解できる。これは今後、カキ殻を建設資材として様々な施工現場で活用していく上で非常に有益な情報となる。

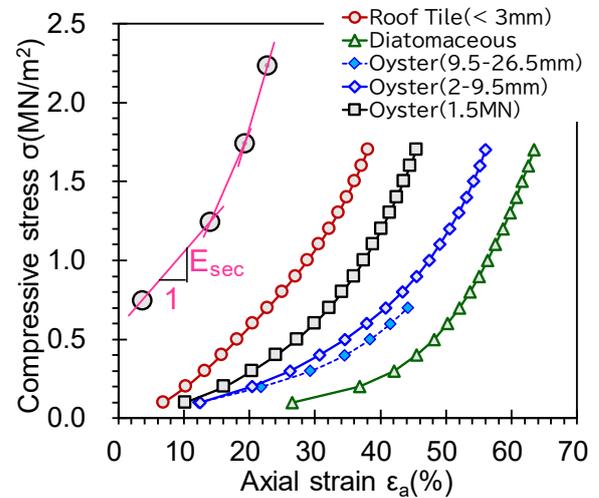


図-8 圧縮応力と圧縮ひずみの関係

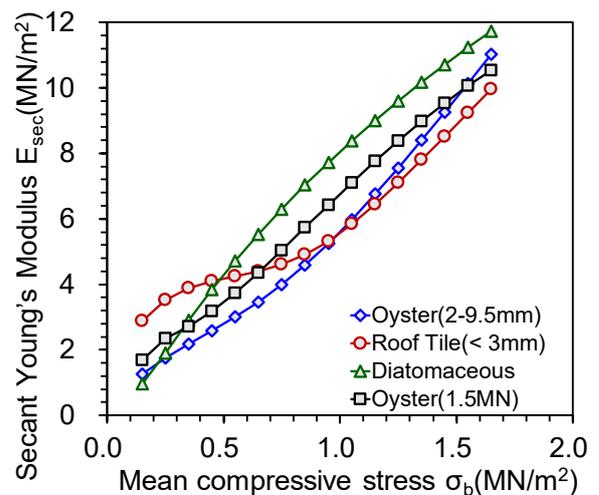


図-9 割線変形係数と平均圧縮応力の関係

(2) 軽量土嚢の載荷試験

図-8 は土嚢の載荷試験から求めた圧縮応力 σ と

圧縮ひずみ ϵ_a の関係を表し、図中には土嚢の中詰め材として、予めランマーでカキ殻を砕いて 9.5~26.5 mm もしくは 2~9.5 mm に粒度調整したものの、破碎値試験用モールドを用いて予め $\sigma=1.5$ MN/m² で破碎させたカキ殻 (Oyster(1.5MN))、そして 3 mm 以下に粒度調整した廃瓦と珪藻土 (Diatomaceous) の結果を示す。 σ - ϵ_a 関係より、すべての材料において ϵ_a の増加に伴って、 σ が著しく増大していく様子が見て取れる。材料ごとに見てみると、 σ - ϵ_a 関係には明瞭な差異が認められる。同一の圧縮応力下で比較すると、廃瓦の圧縮ひずみが最も小さく、次いで Oyster(1.5MN)、Oyster(2-9.5 mm) となっている。同一の圧縮応力下での Oyster(1.5 MN) の ϵ_a は Oyster(2-9.5 mm) もしくは Oyster(9.5-26.5 mm) の ϵ_a よりも低い値となっている。図-8 の結果を集約し、各 σ における ϵ_a をすべて読み取り、これらを図-8 に示すように結んで割線変形係数 E_{sec} を求めた。 E_{sec} は土嚢の変形特性 (剛性) を表す重要な指標となる。図-9 に E_{sec} と平均圧縮応力 σ_b ($=(\sigma_i+\sigma_{i+1})/2$) の関係を示す。図より、 σ_b の初期段階において最も剛性が高かったのは廃瓦であったが、 σ_b が増加するに伴いその傾向は大きく変化していった。最終的には、剛性が最も高くなったのは珪藻土、次いで Oyster(1.5 MN) であった。この要因として、各材料の内部構造や物理特性に起因していると考えられる。特に廃瓦は初期応力において高い剛性を示すものの、硬質なため σ_b が増加しても破碎されにくい。そのため空隙が埋まらず、最終的には他の材料のような剛性の上昇には至らなかったと思われる。これに対して、珪藻土やカキ殻は、元来多孔質材料で多くの空隙が存在しているため、 σ_b の増加に伴っ

て少しずつ破碎され、これに伴って徐々に緻密化していき、最終的に高い剛性を示すようになったのではないかと予想される。

4. おわりに

本研究では、2024 年の能登半島地震によって生じた社会インフラの被害を背景に、軽量土嚢の中詰め材としてカキ殻を活用する復旧技術の構築を目指した。特に、圧密による沈下問題が懸念される河北潟干拓地において、カキ殻の特性を活かした軽量土嚢の有効性を検討した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) カキ殻は圧縮応力 1.0 MN/m² までは著しく破碎して圧縮性も大きい。しかしながら、1.0 MN/m² を過ぎると、カキ殻はそれ以上ほとんど圧縮 (もしくは破碎) しない。
- 2) カキ殻や珪藻土のような多孔質材料は、圧縮応力の増加に伴って徐々に緻密化していき最終的には硬質な廃瓦よりも高い剛性を示すようになる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、一般社団法人北陸地域づくり協会の第 30 回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業 (令和 6 年能登半島地震を契機とした追加助成、2024.10~2025.9) の助成を受けました。末筆ながら、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中井博, 北田俊行: 新編 橋梁工学 (橋梁工学: 第 5 版 改訂・改題), pp21, 2003.