

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13832

研究課題名（和文）緊急輸送道路の早期復旧を目指したステレオ地盤補強材の開発と性能評価

研究課題名（英文）Development of deployable geocell reinforcement for road restoration and its performance evaluation

研究代表者

宮本 慎太郎（Miyamoto, Shintaro）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・講師

研究者番号：60782711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、(1)宇宙構造工学分野における自己展開構造をヒントにしたステレオ補強材の試作、(2)土、補強材、土-補強材の変形強度特性を把握するための材料試験、(3)定点・移動荷重模型実験による補強効果の把握、(4)移動荷重下での地盤変形予測モデルと被災レベルを考慮した性能評価法の開発、を検討した。結果より、展開機能を有する新たな地盤補強材を開発し、その補強メカニズムを明らかにした。さらに、移動荷重下での補強効果を明らかにし、その結果より地盤変形予測モデルと性能評価法の基本的な枠組みを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路の早期復旧や本復旧までを見通した復旧技術の構築は非常に重要であり、急務の課題となっている。そのような中で、本研究は、道路の早期復旧に特化した補強材の開発から、補強効果の把握と性能評価法の構築、被災レベルを想定した有効性の検討までを包含している。さらにセル補強材の補強メカニズムの解明やその移動荷重下での補強効果の評価など、復旧技術の進展、セル補強材の適用性拡大という両方の分野において、新たな知見を提示できると考える。

研究成果の概要（英文）：This research project has conducted four main tasks: (1) development of deployable geocell reinforcement inspired by self-deployable structure in space engineering, (2) laboratory test for clarifying the strength and deformation characteristic of soil, geocell, soil-geocell relation, (3) bearing capacity and moving wheel loading model test for clarifying the reinforcement effect of geocell, (4) development of deformation prediction model of reinforced ground and performance evaluation method considering damage level.

The new ground reinforcement material with a deploying function was developed and its reinforcement mechanism was investigated. The reinforcement effect of geocell under moving wheel load was clarified, and the basic framework of the ground deformation prediction model and performance evaluation method was constructed from the results.

研究分野：地盤工学

キーワード：道路復旧 地盤補強技術 展開式セル補強材 性能評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

被災後の緊急輸送を確実に確保し、迅速に機能させるためには、盛土の早期復旧技術の進展が必要不可欠である。早期復旧技術の現状をみると、土工（盛土の再構築、拡幅等）以外では、大型土のうが最も多く、その他では補強土工や蛇籠・鋼製枠が適用されている。しかし、災害現場特有の制約条件に加えて、土構造物の大型化や二次災害の深刻化により、既往の復旧技術では対応が困難になっている。また、被災レベルは変状や不陸・道路勾配・土砂流入の有無によって異なることから、様々な被災レベルに対応可能な復旧技術が不可欠である。これより、(1) 運搬性や施工性の高い新たな復旧技術の開発、(2) 被災レベルに応じた安定性の確保や性能評価法の確立、(3) 恒久的な使用方法の検討が求められている。

一方で、セル補強材は、運搬性や施工性が高く、中詰め材に現発生地土を使用した際にも安定性を確保できる補強材として注目を集めている。主に基礎地盤、擁壁への適用が試みられており、支持力特性や斜面安定性の把握を行った研究例がみられる。しかし、セルの土中内での変形強度特性や地盤との相互作用が明らかになっていないため、安定性を評価できていない。また、路盤部への適用を検討した例は少なく、特に車両走行下での補強効果が明らかにされていない。支持力特性に加えて移動荷重載荷時の補強効果の検証が不可欠であるといえる。

本研究では、被災道路の早期復旧に適用可能な補強材として、既存のセル補強材と宇宙構造工学分野における自己展開構造を組み合わせたステレオ補強材を試作し、道路復旧への適用性の検証と性能評価法の構築を図る。

2. 研究の目的

本研究では、道路啓開や応急復旧に適用可能なステレオ補強材を新たに開発し、迅速に道路を復旧可能な地盤補強技術の確立を行うことを目的とした。本目的を達成するために、①宇宙構造工学分野における自己展開構造をヒントにしたステレオ補強材の試作、②土、補強材、土-補強材の変形強度特性を把握するための材料試験、③定点・移動載荷模型実験による補強効果の把握、④移動荷重下での地盤変形予測モデルと被災レベルを考慮した性能評価法の開発、の4つを検討した。

3. 研究の方法

① 宇宙構造工学分野における自己展開構造をヒントにしたステレオ補強材の試作

展開構造とは、折り畳んだ収納状態から必要に応じて展開利用可能な構造物を構築する技術である。本研究では、一枚のシートを立体展開してセル構造体を構築する展開式のステレオ補強材（以下、単にステレオ補強材）を提案する。ステレオ補強材は、従来の補強材において構造的弱点になりやすい熱融着部が無く、展開時の展開角度を変化させることで、現場条件に合わせて配置できるものである。ステレオ補強材の試作を行うとともに、展開条件と補強材の三次元形状の幾何学的関係を解析した。

② 土、補強材、土-補強材の変形強度特性を把握するための材料試験

模型実験に使用する土と補強材の材料試験を行った。また、土とステレオ補強材の相互作用を調べるための一面せん断試験を行った。試験では、展開条件の違いを敷設するセル列数の違いとして表現し、セル列数3, 4, 6, 9, 12の5種類とした。一面せん断試験では、ステレオ補強材の展開条件を変化させて補強効果を把握するとともに、PIV解析によって土-補強土系の変形挙動を可視化した。

③ 定点・移動載荷模型実験による補強効果の把握

模型実験によりステレオ補強材を敷設した地盤の変形性・安定性を把握した。模型地盤は被災地盤を想定してゆるめとし、水平地形に加えて、実際の被災状況を想定した傾斜・高低地形に関する検討を行った。主にステレオ補強材の構造の違いに着目し、セルの高さや目合い幅、剛性や摩擦特性を変化させて実験を行った。また、模型実験においてセル補強材およびその周辺地盤の挙動を可視化することで、補強メカニズムの解明を試みた。

④ 移動荷重下での地盤変形予測モデルと被災レベルを考慮した性能評価法の開発

①～③の検討結果を元に、ステレオ補強材を敷設した地盤の性能設計を行う基本的な枠組みを構築する。まずは、水平地形の無補強・補強地盤を対象として、車両の走行回数に応じて地盤の変形を予測する地盤変形予測モデルと車両の通行可能性を考慮して地盤性能を評価する方法を構築した。さらに、地盤変形予測モデルをベースとして、地盤の許容変形量を規定し、通過可能な車両重量と通過回数を評価できる性能評価法を提案した。

4. 研究成果

① 宇宙構造工学分野における自己展開構造をヒントにしたステレオ補強材の試作

一枚のシートを立体展開してセル構造体を構築するステレオ補強材を提案した(図-1)。ステレオ補強材は、短手方向の展開角度 θ と長手方向の展開角度 ω により、展開時の立体形状を調整することができる。本研究では、Neville et al. による展開構造技術に関する検討に習い、セル構造体を構成するユニットセルに対して、立体展開前後のセル形状の変化に関するシミュレーションを行い、展開条件と補強材の三次元形状の幾何学的関係を解析した。また、地盤補強材としての使用を考え、地盤材料の充填性と立体形状に着目し、適切な展開角度条件を考察した。その結果、展開角度が大きくなるほど少ない補強材量で広い面積の補強を可能にすることを示した(図-2)。しかし、展開角度が大きいかほど開口部が小さくなるため、地盤材料の充填性を考えると、 $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $0^\circ \leq \omega \leq 60^\circ$ 程度が適切であることを考察した。

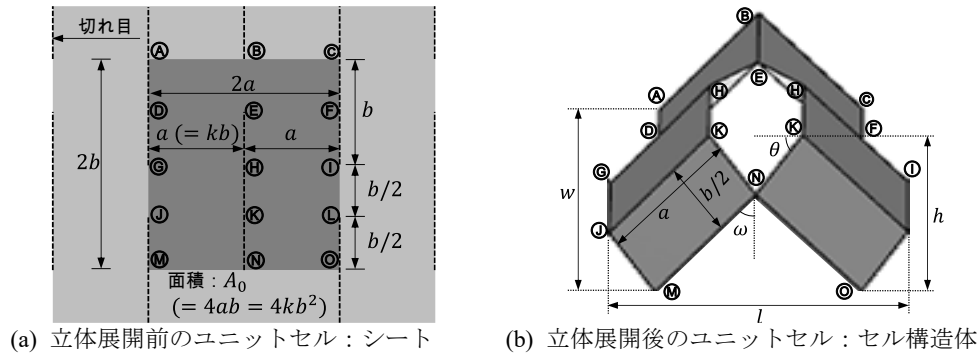


図-1 ユニットセルの立体展開前後の形状変化

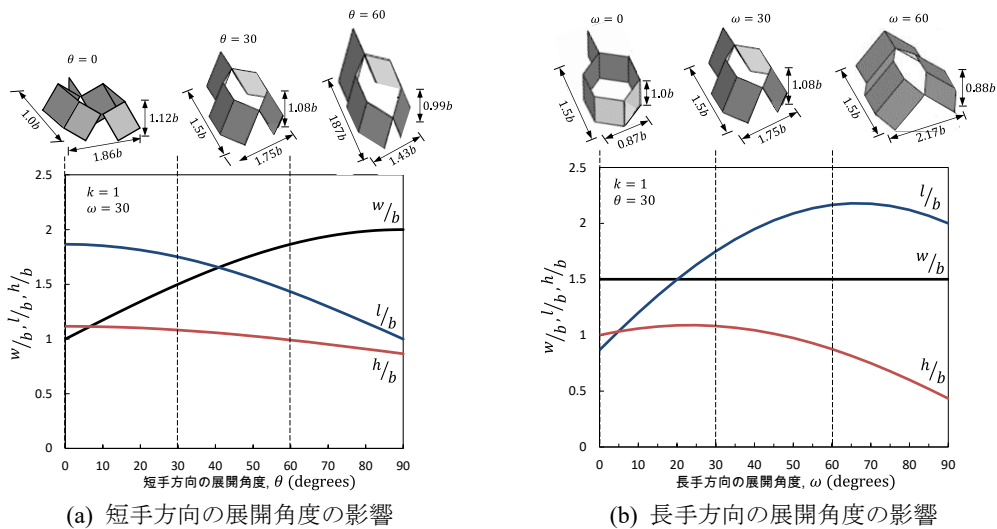


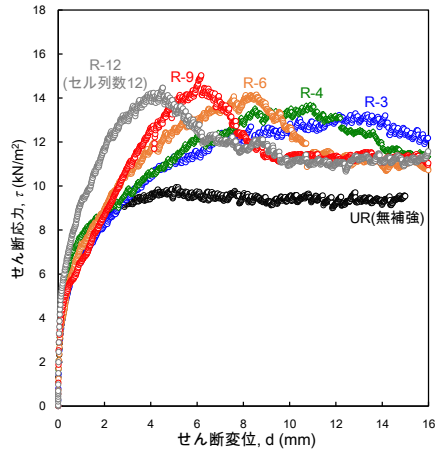
図-2 展開角度とユニットセル寸法の関係

② 土、補強材、土-補強材の変形強度特性を把握するための材料試験

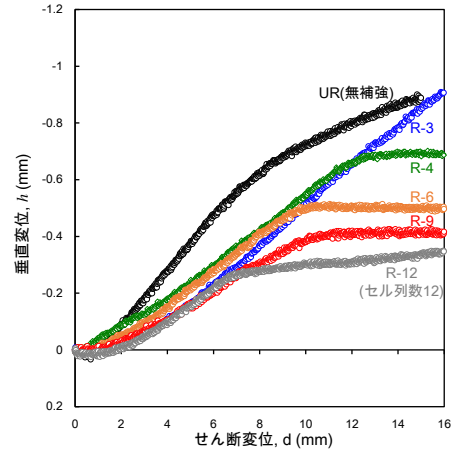
土-セル補強土系のせん断強度を一面せん断試験で調べた結果より、土-セル補強土系のせん断強度は、展開角度が小さいときほど、土のダイレイタンスを拘束することで、高いせん断抵抗が得られることを明らかにした(図-3)。さらに、上下せん断箱の境界および土が充填されたセル同士の境界で、せん断ひずみが生じ、セルで拘束された領域では、せん断ひずみが生じないことをPIV解析より明らかにした(図-4)。土-セル補強土系のピーク時のせん断抵抗を、土の残留時のせん断抵抗角、ダイレイタンス角、セル補強領域の全体に対する割合、ダイレイタンス角がせん断抵抗に寄与する程度を表す係数で表現する評価式を提案した。提案式は、土-セル補強土系のせん断抵抗特性をある程度の精度で再現できることを示した。

③ 定点・移動荷重模型実験による補強効果の把握

平板の鉛直荷重試験と剛性車輪の移動荷重試験を行った。結果より、剛性車輪を用いた移動荷重条件において、ステレオ補強材の地盤補強効果は鉛直荷重、荷重回数、セル高さに依存し、セルの目合いはそれほど影響しない。帯基礎を用いた鉛直荷重条件においても、セルの目合いの影響は小さく、補強効果はセルの高さに強く依存することを明らかにした。さらに、色砂混合砂を用いて模型実験を行い、ステレオ補強材の挙動を可視化した結果より、平板荷重試験と車輪の移動荷重試験の両方において、ステレオ補強材によって、周辺地盤の水平変位が抑制され、補強効果が発揮されることを明らかにした(図-5)。

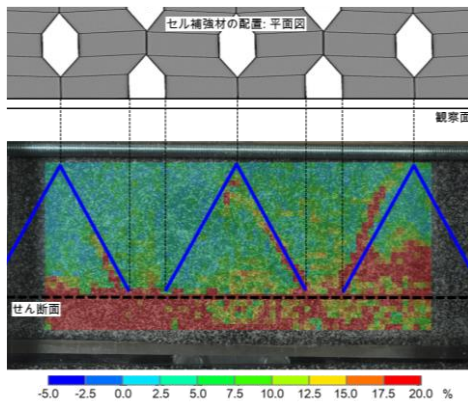


(a) せん断応力 τ とせん断変位 d の関係

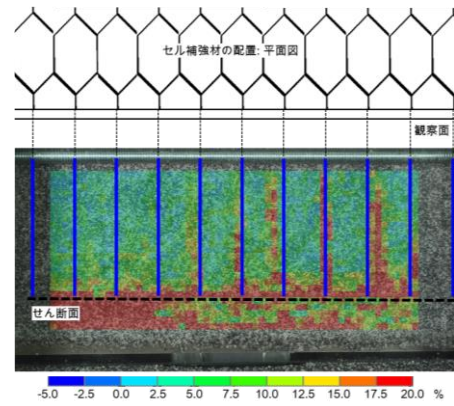


(b) 垂直変位 v とせん断変位 d の関係

図-3 一面せん断試験結果

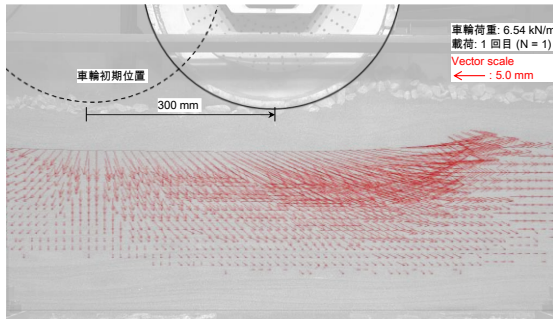


(a) せん断ひずみ分布 (セル列数 3 (R-3))

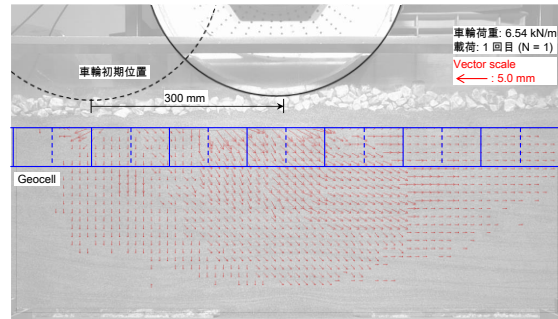


(b) せん断ひずみ分布 (セル列数 12 (R-12))

図-4 一面せん断試験の PIV 解析結果



(a) 変位ベクトル分布 (無補強)



(b) 変位ベクトル分布 (ステレオ補強)

図-5 移動荷重模型実験の PIV 解析結果

④ 移動荷重下での地盤変形予測モデルと被災レベルを考慮した性能評価法の開発

定点・移動荷重模型実験の結果より、車両の通過回数と地盤の変形量の関係を予測するモデルを開発した。本モデルは、地盤反力係数、車両重量、車輪直径、通過回数、フィッティングパラメータを用いて地盤の変形量を予測する近似式である。ステレオ補強材の補強効果を地盤反力係数の増加として評価し、ステレオ補強材の剛性や形状を考慮した評価が可能になっている。本モデルの妥当性を室内模型実験および実大走行実験の結果を元に検証し、車両の通過による地盤の変形を精度よく評価できることを確認した。次に、ステレオ補強地盤の性能設計の基本的考え方を示した。本研究では復旧道路への適用を考えているため、地盤の許容変形量を規定して、通過可能な車両重量と通過回数を評価できる性能評価法を提案した。開発した地盤変形予測モデルから車両の通過回数と地盤の変形量を評価し、その結果を元に許容変形量を満足する車両重量と通過回数の関係の評価ができる。本評価法によって、道路復旧を行う際に、通過可能な車両の重量や回数に応じてステレオ補強材の剛性や形状を決定できる可能性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Miyamoto, S. and Miyata, Y.	4. 巻 Volume 2
2. 論文標題 Visualization of bearing capacity mechanism of geocell reinforced soil foundations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Transportation Soil Engineering in Cold Regions	6. 最初と最後の頁 3-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宮本慎太郎, 宮田喜壽	4. 巻 35
2. 論文標題 繊維混合補強砂の補強メカニズムに関する可視化実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 67-74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5030/jcigsjournal.35.67	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 宮本慎太郎, 宮田喜壽	4. 巻 77
2. 論文標題 道路復旧への適用を想定した展開式セル地盤補強材の構想と補強効果に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集C	6. 最初と最後の頁 118-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejge.77.2_118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮本慎太郎, 宮田 喜壽
2. 発表標題 ジオセル補強地盤の鉛直支持力特性とセル高さの関係
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神田竜弥, 宮本慎太郎, 宮田喜壽
2. 発表標題 ジオセルによる地盤補強効果のメカニズム解明に関する室内模型実験と可視化
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮本慎太郎, 宮田喜壽
2. 発表標題 ジオセル補強地盤の鉛直支持力特性
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大澤佳苗, 宮本慎太郎, 宮田喜壽
2. 発表標題 展開型ジオセルで補強された土の一面せん断特性
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮本慎太郎, 宮田喜壽
2. 発表標題 展開型ジオセル-土系の一面せん断強度特性
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------