

技術報文

突起構造を有するマットレス補強地盤の支持力特性と マットレス補強の最適化に向けた取り組み

九州大学大学院 ○石藏 良平

九州大学大学院 安福 規之

ジオテキスタイル補強土工法普及委員会 横田 善弘

前田工織株式会社 辻 慎一郎

1. はじめに

マットレス補強工法は、軟弱地盤上に構造物を建設するための支持力改善や不同沈下の低減等を目的に広く用いられている¹⁾。盛土等の構造物構築においても、軟弱地盤対策の一つとして適用されている。著者らは、ジオテキスタイルを用いたマットレス地盤補強工法の構造形式に工夫を加えることで、さらなる支持力の改善や液状化対策²⁾となる工法の開発を目指している。これまでに、**図-1**に示すような、盛土直下のマットレスの両端に大型土のうを設置し、碎石層をジオシンセティックスで拘束する新たな構造を提案している。この構造形式は、マットレスの両端に壁式の突起を設けた構造である。壁式の突起は、圧縮性の低い碎石等の礫質土を充填した大型土のうを想定し、両側の壁式の突起の上部にマットレス

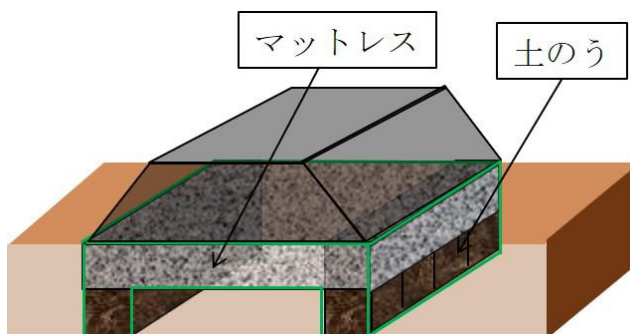


図-1 マットレス補強工法を用いた新たな構造形式

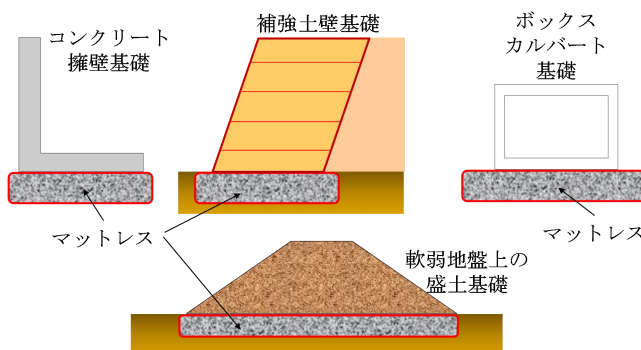


図-2 マットレス補強の適用例⁶⁾⁷⁾

を上載させることにより、マットレスと突起で囲まれた未改良部を一体化させて、上部構造物に対する支持力改善や沈下抑制を期待している。これは、セメント固化処理工法を用いた壁式改良工法³⁾と同様に、マットレス工法などの補強技術を用いて改良部と未改良部の一体化効果を期待したものである。これまでの基礎実験により、壁式の突起とマットレスを分離した構造にすると、マットレス内の中詰め材の緩みが生じにくくなることを明らかにしている⁴⁾。

本報ではまず、盛土荷重に対して、この新たな構造形式により支持力がどの程度改善されるかを検討するためのアルミ棒積層体を用いた簡単な载荷試験の結果を紹介する⁵⁾。次に、マットレス補強工法の設計の高度化に向けた取り組みを紹介する。前述の通り、マットレス補強工法は比較的設計が容易で予想以上の効果が発揮されることから広く普及しているが、設計上の課題が残

されている。例えば、**図-2**はマットレスの適用事例⁶⁾を示したものであるが、上部構造物の載荷幅に対して、どの程度のマットレス幅とすれば適切な支持力改善が見込めるのか？といった基本的な考え方がなく、近年重要な設計課題となっている。この課題を解決するため、載荷幅やマットレス幅を容易に変更して実験が可能なアルミ棒積層体を用いた載荷試験を実施したのでその結果について紹介する。なお、本報の一部は石蔵ら(2020)⁵⁾を再構成したものである。詳細についてはそちらを参照されたい。

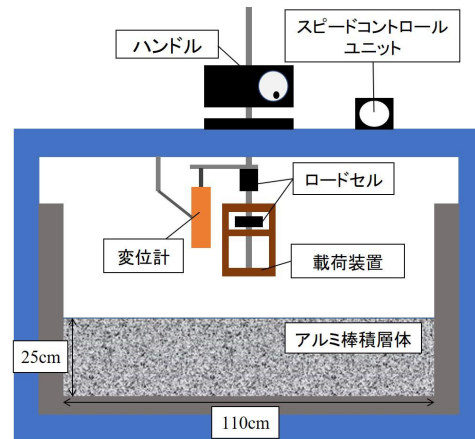


図-3 アルミ棒積層体載荷装置の概念図

2. 土のうによる突起構造を有するマットレス補強地盤の支持力改善効果

(1) 実験概要

図-3にアルミ棒積層体を用いた載荷試験装置の概念図を示す。積層体を用いるアルミ棒は、長さ50mmで、直径が1mmと1.6mmのアルミ棒が重量比で3:2になるように配分した。

表-1および**図-4**に実験条件および載荷部付近の概略図を示す。実験では、幅10.0m、厚さ1.25mのマットレスの1/50スケールの模型を想定し実験を行った。実際に用いられる中詰材の碎石の代わりに長さ50mm、直径2mmのアルミ棒を使用し、ジオテキスタイルの代替に寒冷紗(引張強度17.7kN/m、伸度25.0%程度)を用いた。

マットレスは、厚さ $H=2.5\text{cm}$ 、幅 $B_M=20\text{cm}$ になるように、寒冷紗を横幅5.0cm、長さ45cmにカットし、両端を手縫い糸で縫い、アルミ棒を詰めて作製した。土のうを想定した突起については、突起長さ2.5cmの正方形になるように、寒冷紗を横幅5.0cm、長さ10cmにカットし、両端を手縫い糸で縫い、アルミ棒を詰めて作製した。マットレス幅 B_M が20cmの一定の条件下で、マットレス端部に鉛直方向に土のうを1~3個配置することで、突起の根入れ深さ D_1 を変化させた。本実験では、

マットレスに可能な限り均等に載荷装置からの鉛直荷重を伝達させるため、**図-5**に示すような載積盛土を介して、鉛直載荷を行った。載積盛土には、長さ50mm、直径6mmの真鍮を土木シートで包んだものを5段に重ねたものを使用した。底面が約20cm、上

表-1 実験条件

| Case | マットレス幅 B_M (cm) | 突起 D_1 (cm) |
|------|-------------------|---------------|
| 0 | 20 | 0 |
| 1 | 20 | 2.5 |
| 2 | 20 | 5.0 |
| 3 | 20 | 7.5 |

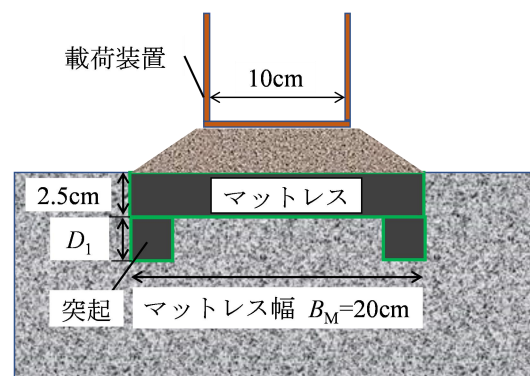


図-4 載積盛土による載荷試験の概略図

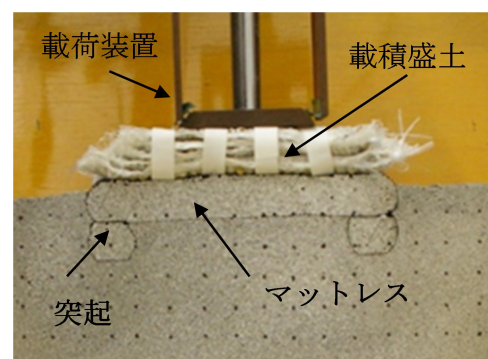


図-5 セットアップの状況 (Case1)

面が約 11cm、高さが約 3cm となるように重ね合わせることで勾配が約 1.0:1.5 の盛土を模擬した。真鍮の総重量は 1.2kg であった。載荷装置により、積載盛土を介して載荷速度 0.1 mm/sec で鉛直変位を作用させ、載荷装置に作用する鉛直荷重および鉛直変位を計測した。

(2) 支持力改善効果

図-6 に各突起長さ D_1 における鉛直荷重 (N) と鉛直変位 (mm) との関係を示す。各ケースともに、鉛直変位の増加に伴い、鉛直荷重が増加する傾向を示した。初期の鉛直荷重と鉛直変位の勾配は各ケースで同程度であったが、マットレス端部に突起を設置したケースの方が、Case 0 と比較して、鉛直荷重の最大値が大きくなっている。また、突起の根入れ長さ D_1 が大きくなるほど、鉛直荷重の最大値が大きくなっており支持力改善効果が期待できる。鉛直変位が 10mm で比較すると、Case 1 は Case 0 の 1.5 倍程度、Case 3 では、2.0 倍程度の鉛直荷重となっている。マットレスの端部に突起を設けることによる支持力改善効果を確認した。

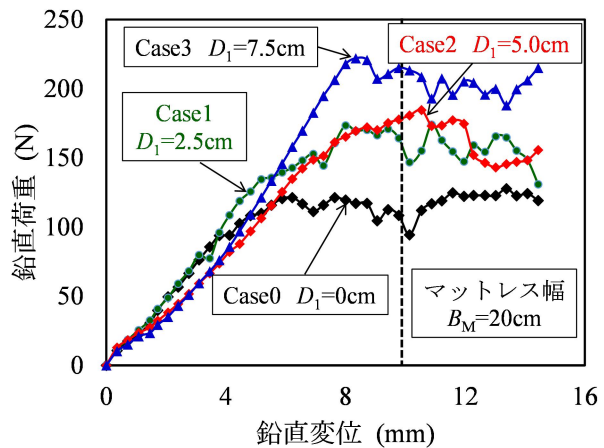


図-6 鉛直荷重と鉛直変位の関係

表-2 実験条件

| Case | マットレス幅 B_M (cm) | B_P / B_M | マットレス厚 H (cm) |
|------|-------------------|-------------|-----------------|
| 1 | 16 | 1.0 | 2.5 |
| 2 | 20 | 0.8 | 2.5 |
| 3 | 26 | 0.62 | 2.5 |
| 4 | 32 | 0.5 | 2.5 |
| 5 | 16 | 1.0 | 5.0 |
| 6 | 20 | 0.8 | 5.0 |
| 7 | 26 | 0.62 | 5.0 |
| 8 | 32 | 0.5 | 5.0 |

3. マットレス幅に着目した補強地盤の支持力特性

(1) 実験概要

本章では、一定の載荷幅に対して、マットレス補強地盤のマットレスの幅や厚さが支持力特性に与える影響を検討するため、アルミ棒積層体を用いた模型実験を実施した。2章で示した同一のアルミ棒積層体および載荷装置を用いた。表-2 および

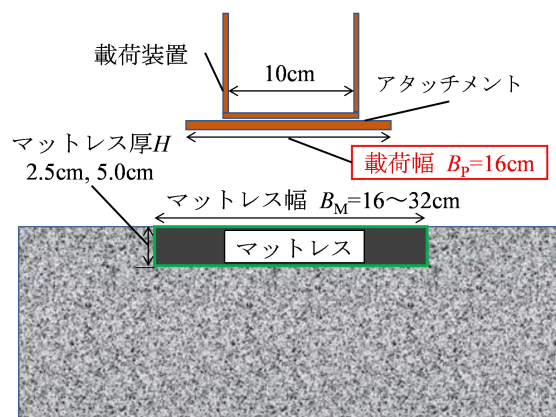


図-7 載荷試験の概略図

図-7 に実験条件および載荷部付近の概略図を示す。マットレスの寸法や形状、作製方法については、2章の条件と統一している。ここでは、マットレス幅 B_M を 16cm から 32cm までの 4 パターン、マットレス厚 H を 2.5cm および 5.0cm の 2 パターンとし、8 パターンの載荷試験を実施した。図-7 に示すように載荷装置にアタッチメントを取りつけることによって、載荷幅 B_P が 16cm の一定条件下で、載荷試験を行った。載荷速度 0.1 mm/sec でマットレス上部から鉛直荷重を作用させ

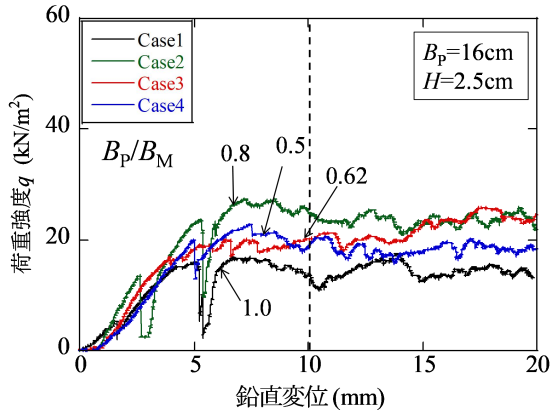


図-8 荷重強度と鉛直変位の関係 ($H=2.5\text{cm}$)

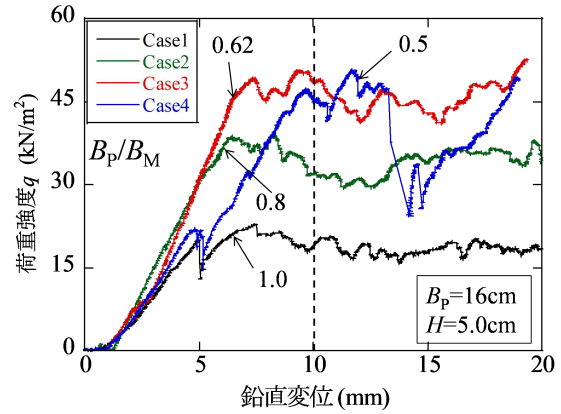


図-9 荷重強度と鉛直変位の関係 ($H=5.0\text{cm}$)

た。載荷幅 B_p に作用する鉛直荷重および鉛直変位を計測した。

(2) 実験結果と考察

図-8 にマットレス厚が $H=2.5\text{cm}$ で一定で、マットレス幅 B_M が異なる場合における荷重強度 $q(\text{kN/m}^2)$ と鉛直変位(mm) との関係を示す。荷重強度 q は、鉛直荷重をアルミ棒積層地盤に対する載荷面の面積（奥行き $5\text{cm} \times$ 載荷幅 $B_p=16\text{cm}$ ）で除した値を意味する。Case 1～Case 4 の結果から、載荷幅一定 ($B_p=16\text{cm}$) の条件下におけるマットレス幅 B_M の影響を比較した。まず、各ケースともに、鉛直変位の増加に伴い荷重強度が増加する傾向を示した。図に示されるように、各ケースいずれにおいても、鉛直変位が $7\sim 8\text{mm}$ 程度までは、荷重強度が増減しながらも増加し続けた。鉛直変位が 10mm での荷重強度を比較すると、マットレス幅と載荷幅の比 B_p/B_M が $0.8, 0.62, 0.5, 1.0$ の順に大きくなっている。載荷幅一定 ($B_p=16\text{cm}$) 下において、Case 2 の $B_p/B_M=0.8$ の条件で、荷重強度が最大である傾向は継続している。すなわち、マットレス厚が $H=2.5\text{cm}$ の条件では、 $B_p/B_M=0.8$ ($B_p=20\text{cm}$) の時に最も大きな支持力（荷重強度）が得られた。

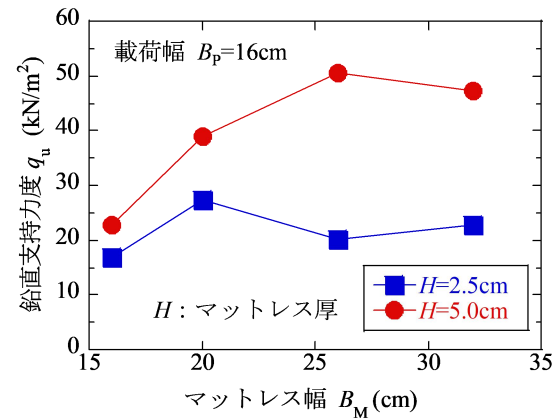


図-10 鉛直支持力度とマットレス幅の関係

図-9 にマットレス厚が $H=5.0\text{cm}$ で一定で、マットレス幅 B_M が異なる場合における荷重強度 $q(\text{kN/m}^2)$ と鉛直変位(mm) との関係を示す。いずれのケースにおいても、鉛直変位が 10mm に到達するまでに、荷重強度は増減しながらも明確なピーク値を示した。鉛直変位が 10mm までの荷重強度を比較すると、マットレス幅と載荷幅の比 B_p/B_M が $0.62, 0.5, 0.8, 1.0$ の順に大きくなっている。載荷幅一定 ($B_p=16\text{cm}$) 下において、マットレス厚が $H=5.0\text{cm}$ の条件では、 $B_p/B_M=0.62$ ($B_p=26\text{cm}$) の時に最も大きな荷重強度が得られた。

本実験結果では、鉛直変位が 10mm （実際の沈下量が約 50cm を想定）までの荷重強度の最大値を鉛直支持力度 q_u とし、各ケースの鉛直支持力度の比較を行った。図-10 にマットレス厚 H ごとにまとめた鉛直支持力度 q_u とマットレス幅 B_M の関係を示す。図に示されるように、同一のマットレス幅 B_M の条件において、マットレス厚 H が大きくなるほど、鉛直支持力度が向上する

ことが示された。特に、マットレス幅 B_M が大きな条件では、マットレス厚 H が 2 倍になると、鉛直支持力度も 2 倍程度向上している。また、載荷幅一定 ($B_P=16\text{cm}$) の条件下において、支持力が効果的に発揮される最適なマットレス幅 B_M が存在し、マットレス厚 H が大きくなるほど、その幅も大きくなることが示唆された。本報では、所定の載荷幅に対するマットレス補強地盤の最適なマットレス幅を決定するための方法について、次章で考察を行った。

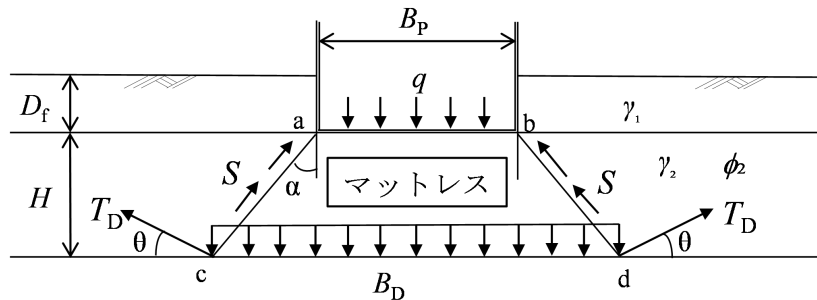


図-11 マットレス基礎の荷重分散の考え方¹⁾⁸⁾

4. マットレス幅の最適化を目指したマットレス補強地盤の支持力度評価の試行

(1) マットレスの現行設計法について

現在最もよく利用されているマットレスの設計法¹⁾⁸⁾の概念図を図-11に示す。載荷幅 B_P の基礎直下にマットレスを設置する場合を考える。根入れ深さを D_f とするとき、荷重強度 q がマットレス内を荷重分散角 α で分散し、厚さ H のマットレス底面に分布圧 p が作用する。このときのマットレスの効果を M_E とすると、次式が成り立つ。

$$qB_P = p(B_P + 2H \tan \alpha) + M_E \quad (1)$$

ここで、中詰め材のせん断効果を S 、ジオグリッドの引き上げ効果を T とすると、マットレス効果 M_E は、次式で表される。

$$M_E = S + T = (\gamma_1 D_f H + \frac{1}{3} \gamma_2 H^2) K_p \tan \phi_2 + 2T_D \sin \theta \quad (2)$$

$$K_p = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi_2}{2}) \quad (3)$$

ここで、 γ_1 ：埋め戻し地盤の単位体積重量、 γ_2 ：中詰め材の単位体積重量、 K_p ：受働土圧係数、 ϕ_2 ：中詰め材のせん断抵抗角、 T_D ：ジオグリッドの設計引張抵抗、 θ ：ジオグリッドの許容伸びに対する変位角を意味する。マットレス底面の分布圧 p とマットレス自重の和とマットレス直下の地盤の許容支持力度との関係から、マットレス厚 H 等の諸元が決定される。このことから、現行設計法では、所定の載荷幅に対するマットレス幅の諸元は決定することができない。先述したように、マットレスは近年、様々な構造物直下の地盤補強に使用されており、構造物の載荷幅に対する最適なマットレス幅を決定できる方法を提案することは、マットレス補強技術の設計の高度化

につながる。

(2) 荷重分散幅に着目したマットレス効果の低減係数の提案

3章で示した荷重試験結果(図-10)から、一定の荷重幅 B_p に対して、支持力が最大となる最適なマットレス幅 B_M が存在することが示唆された。本研究では、マットレスの支持力機構に与えるマットレス幅の影響を反映できる新たな評価方法を提示するため、支持力改善効果として、式(1)の右辺第2項のマットレス効果 M_E に、荷重幅とマットレス幅の関係を考慮できる低減係数 X を乗じることを提案した。

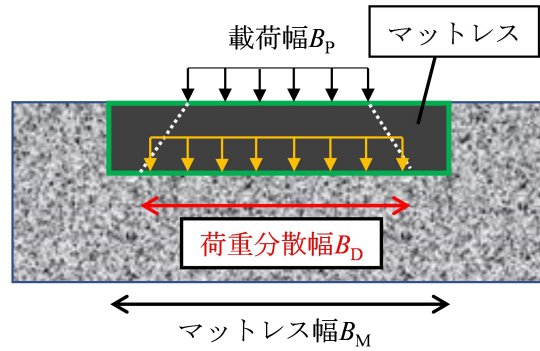


図-12 荷重分散幅とマットレス幅との関係

図-12 にマットレスに荷重強度が作用した場合の荷重分散幅 B_D とマットレス幅 B_M との関係を示す。マットレス上部の荷重幅 B_p に荷重強度が作用する場合、マットレス底面では、実際には下に凸の分布荷重が作用する⁹⁾。これまでに、マットレス底面に作用する分布荷重の積分値とマットレス底面に作用する鉛直荷重の最大値との関係から、マットレス底面での鉛直荷重の影響を受ける有効幅が検討されている¹⁰⁾。本論文では、マットレス上部からの鉛直荷重の影響を受けるマットレス底面の有効幅が荷重分散幅 B_D であるとし、マットレス底面の荷重分散幅 B_D では、マットレス効果 M_E が最大限発揮されると仮定した。このとき $B_M > B_D$ では、 B_D/B_M の割合が占めるマットレス底面幅で、マットレス効果 M_E が発揮されるため、低減係数 X は1以下となる。 $B_M = B_D$ では、マットレス底面幅全域でマットレス効果 M_E が発揮されるため、 X は1となる。 $B_M < B_D$ では、マットレス外の周辺地盤への荷重分散が大きくなるとして、 X は1以下になると仮定した。このような前提のもと、マットレス効果の低減係数 X を次式で定義した。

$$X = 1 - \left| 1 - \frac{B_p + 2H \tan \alpha}{B_M} \right| \quad (0 \leq B_p \leq B_M) \quad (4)$$

低減係数 X を式(1)に組み込むことによって、マットレスの荷重幅 B_p の影響を考慮した新たな支持力式は次式で表される。

$$qB_p = p(B_p + 2H \tan \alpha) + XM_E \quad (0 \leq B_p \leq B_M) \quad (5)$$

(3) マットレス幅の影響を考慮したマットレス補強地盤の支持力の計算事例

前節で示した式(4)および式(5)を用いて、3章で実施した模型実験スケールでの荷重強度 q の計算を行った。支持力計算に用いた各パラメータを表-3に示す。実験に用いた寒冷紗の引張抵抗は、ここでは引張強度の10%であると仮定し、マットレス底面の分布圧 p を 20kN/m^2 、荷重幅 B_p を 16cm で一定として計算した。また、マットレス厚 H (2.5cm 、 5.0cm) と荷重分散角 α (30° 、 45°) を変化させた。各条件で計算した荷重強度とマットレス幅の関係を図-13に示す。マットレス効果 M_E の低減係数 X を1と設定したCase2 ($H=5.0\text{cm}$ 、 $X=1$ 、 $\alpha=30^\circ$) では、マットレス幅 B_M に

よらず荷重強度 q は一定値となる傾向を示した。一方、マットレス効果 M_E の低減係数 X に分布がある条件では、マットレス効果 M_E がマットレス幅 B_M により変化し、式(4)からマットレス幅 B_M に応じた低減係数 X を計算し、式(5)に代入することで荷重強度 q を求めた。Case3 ($H=5.0\text{cm}$, X :分布, $\alpha=30^\circ$)では、Case2と比較して、荷重強度 q がマットレス幅 B_M によらず小さくなったが、低減係数 X に分布を持たせることによって、荷重強度 q が最大となるマットレス幅が存在する結果を示した。また、Case1とCase3との比較から、低減係数 X に分布を持たせた条件においても、マットレス厚 H が大きくなるほど荷重強度は同一マットレス幅において大きくなる傾向を示した。

Case3とCase4との比較から、荷重分散角 α が大きくなるほど、荷重強度 q はマットレス幅 B_M によらず大きくなる傾向を示した。これは、式(5)の右辺第1項に荷重分散角 α が大きく寄与しているためと考える。また、 α の変化は式(4)の低減係数 X にも影響するため、荷重強度 q が最大となる最適なマットレス幅 B_M の値も変化する傾向を示した。今回の計算事例から、マットレス効果の低減係数 X を適切に評価できれば、実験結果が示すような一定の載荷幅 B_p に対して、荷重強度（支持力）が最も大きくなる最適なマットレス幅 B_M を決定することができる可能性が示唆された。今後は、マットレスによる荷重分散効果の影響についてもより詳細な検討を行い、マットレス補強地盤のマットレス敷設幅の最適化の提案を行っていきたい。

5. まとめ

本報では、マットレス両端に土のうによる壁式の突起を設けた新たなマットレス補強技術を紹介し、アルミ棒積層体を用いた載荷試験により、支持力改善に及ぼす突起の影響について検討を行った。また、マットレス補強技術の現行設計法の課題として、所定の載荷幅に対するマットレス幅の最適化の必要性について言及し、設計の高度化に向けた基礎的な取り組みを紹介した。得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 従来のマットレス補強地盤（マットレスのみ）と比較して、マットレス両端に突起を設けた補強地盤の支持力改善効果を確認した。突起の根入深さが大きいほど、より支持力改善効果が向上した。
- 2) アルミ棒積層体を用いた載荷試験により、載荷幅一定の条件下において、荷重強度（支持力）が最も大きくなる最適なマットレス敷設幅が存在することを確認した。またその幅は、マッ

表-3 模型実験の支持力計算に用いたパラメータ

| | |
|--|-------------|
| 載荷幅 B_p (m) | 0.16 |
| マットレス厚 H (m) | 0.025, 0.05 |
| アルミ棒（中詰材）の内部摩擦角 ϕ_2 (°) | 30 |
| アルミ棒（中詰材）の単位体積重量 γ_2 (kN/m ³) | 15 |
| 荷重分散角 α (°) | 30, 45 |
| 寒冷紗の引張強度 T_D (kN/m) | 17.7 |
| 許容伸びに対する変位角 θ (°) | 20 |

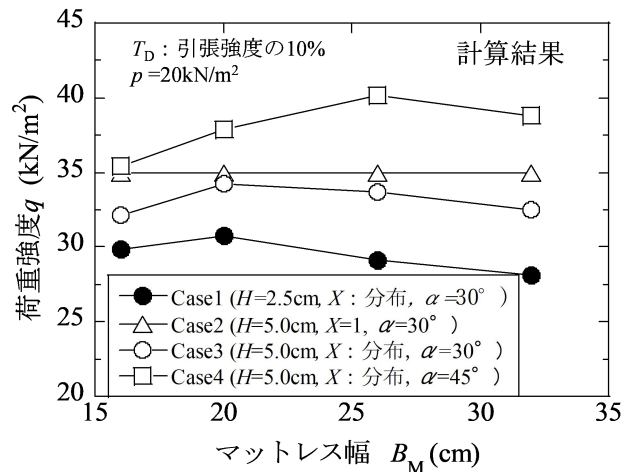


図-13 荷重強度とマットレス幅の関係（計算例）

トレス厚の違いによっても変化することを示した。

- 3) マットレス効果にマットレス敷設幅の影響を反映した補強地盤の支持式を提示し、荷重強度（支持力）の計算事例を示した。提案する考え方によって、マットレスの最適幅を決定できる可能性が示唆された。今後は、マットレス直下の荷重分散などより詳細な検討を行うとともに、最終的には、提案工法（突起構造を有するマットレス補強地盤）に対応した支持力評価方法の提案を行っていく予定である。

最後に、草野陸氏（九州大学大学院修士1年生）にはアルミ積層体を用いた載荷模型実験の実施に尽力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 補強土工法編集委員会：土質基礎工学ライブラリー 29 補強土工法，地盤工学会，pp.341-353,1986.
- 2) 横田善弘，辻慎一郎，和田崇良，小嶋啓介：ジオテキスタイルを用いた新マットレス工法による液状化被害軽減対策，ジオシンセティクス論文集，第35巻，pp. 89-94, 2020.
- 3) 駒延勝広，石藏良平，安福規之，了戒公利：熊本宇土道路における壁式改良工法の盛土沈下抑制効果，土木技術資料，第58巻，5号，pp.54-57, 2016.
- 4) 山本陽生，安福規之，石藏良平，横田善弘，辻慎一郎：ジオグリッドマットレス補強積層体地盤の形式に着目した支持力発現とその評価に関する研究，平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.409-410,2019.
- 5) 石藏良平，安福規之，横田善弘，辻慎一郎：載荷幅に着目した新たなジオグリッドマットレス補強地盤の支持力特性とその評価 ジオシンセティクス論文集，第35巻，pp. 89-94, 2020.
- 6) 三井化学産資株式会社：マットレス工法、
https://www.mitsui-sanshi.co.jp/system/system_1ml01.html
- 7) 前田工織株式会社：マットレス工法、<https://www.maedakosen.jp/products/493/>
- 8) 落合英俊，松下博通，林重徳：硫酸イオンを含む地盤における住宅基礎，土と基礎，第34巻，第6号，pp.45-50,1986.
- 9) N.Yasufuku, H.Ochiai, K.Omine, S.Ohno, K. Kawamata and Y.Tsukamoto, Evaluation of the bearing capacity of geogrid mattress foundations, Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, pp.703-708,1996.
- 10) N.Yasufuku, H.Ochiai and K.Kawamata: Supporting capability of geogrid reinforced soil foundations, Proceedings of sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, pp.905-910, 1998.