

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04250

研究課題名（和文）土砂災害防止に用いる排水用不織布の不均一性と圧縮クリープを考慮した透水係数の評価

研究課題名（英文）Evaluation of hydraulic conductivity considering non-uniformity and compression creep of non-woven drainage fabric used for landslide prevention

研究代表者

河村 隆（Kawamura, Takashi）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：50324231

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：(1)初期条件の不均一性の定量評価：不織布供試体1200枚の不均一性を平均値と標準偏差で評価した。(2)圧縮特性の定量評価：不織布の長期圧縮クリープ特性は、24時間までを一次圧縮、24時間以降を二次圧縮として評価できる。24時間段階荷重圧縮試験において、乾燥と飽和状態の圧縮特性はほぼ同じである。(3)透水係数の定量評価：不織布の初期状態の不均一性によらず、不織布の透水係数は間隙比によって決定できる。一例として、乾燥不織布の圧縮過程における垂直方向透水係数の変化とその分布を決定し、可視化を行った。飽和状態や面内方向透水係数についても同様の手法が適用可能であることが示唆される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の想定を越える豪雨における土砂災害を防止することは喫緊の課題である。盛土内への浸透雨水を速やかに排水するために、土木用不織布が水平排水材として敷設されている。得られた結果に基づけば、圧縮応力が $p=8\text{kN/m}^2$ から $p=553\text{kN/m}^2$ に増加すると、透水係数は1/10程度に減少する。各圧縮応力における垂直方向透水係数の最大値と最小値の比は、約2倍程度であることを示した。これらの結果は、盛土内に浸透する雨水の浸透解析に用いるパラメーター、適切な敷設間隔や配置を決定する設計法の確立や局所的な浸透破壊の対策に必要なものであり、土砂災害防止に繋がる。

研究成果の概要（英文）：(1) Quantitative evaluation of the non-uniformity of initial conditions: The non-uniformity of 1,200 non-woven geotextile specimens was evaluated using the average value and standard deviation. (2) Quantitative evaluation of compression characteristics: The long-term compressive creep characteristics can be evaluated up to 24 hours as primary compression and from 24 hours onwards as secondary compression. In 24-hour incremental loading test, the compression characteristics are almost the same in the dry and saturated conditions. (3) Quantitative evaluation of permeability: Regardless of the non-uniformity of initial conditions, the permeability can be determined by the void ratio. As an example, the change and distribution of the coefficient of water permeability normal to plane of dry non-woven geotextile under vertical stress was determined and visualized. It is suggested that a similar method can also be applied to the saturated condition and the coefficient in the plane.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 土砂災害 排水材 不織布 不均一性 透水係数 間隙比 クリープ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の想定を越える豪雨における土砂災害を防止することは喫緊の課題である。盛土内への浸透雨水を速やかに排水するために、土木用不織布が水平排水材として敷設されている。申請者の検討¹⁾により初期状態(単位面積質量, 初期厚さ)の不均一性が大きいことが分かっており、透水性の評価には材料の不均一性について考慮することが必要である。不織布は空隙が多いため圧縮性が非常に大きく、拘束圧を長期間受け続けると圧縮クリープが発生し、時間の経過とともに間隙比の減少が進行する。盛土内における不織布の排水性能を評価するためには、拘束圧が作用した条件(圧縮応力と載荷時間)における透水係数の評価が必要である。しかし、不織布の透水試験基準(JGS 0931-2009, JGS 0932-2009)では、拘束圧を載荷する標準的な試験装置が定められておらず、圧縮クリープの影響については考慮できない。さらに、不均一性についても考慮されていない。

2. 研究の目的

本研究は、以下の項目を明らかにすることを目的とする。

- 1) 不織布の初期状態の不均一性を定量評価する。
- 2) 一定の拘束圧が長期間作用する不織布の間隙比 e を予測するための式を提案する。
- 3) 面内および垂直方向透水係数 k_h , k_v と e の関係式を求める。
- 4) 2), 3) より、拘束圧によって圧縮された条件下における透水係数の長期予測式を提案する。

3. 研究の方法

1) 初期状態の不均一性の評価と供試体の抽出

試料には室内で保管している気乾状態のспанボンド法ポリプロピレン不織布(表-1)のロール(幅 1.0 m)を用いた、40×40 mm の正方形に切断して供試体 1,240 枚を作製した。その初期状態として、縦横の長さ、質量、初期厚さ h_0 を測定した。初期厚さ h_0 は、JIS, ISO および ASTM の試験基準を参考に作製した装置(図-1)を用いて測定した。そして、単位面積質量 μ_A および初期間隙比 e_0 を算定した。得られた結果に基づいて、平均値と標準偏差を考慮して、長期圧縮試験、透水試験に用いる供試体の抽出を行った。

2) 長期圧縮試験

試験装置の概要: 試験装置の概略を図-2に示す。土供試体と比較して、不織布は間隙が非常に大きいため、小さな荷重でも大きな圧縮変形が生じる。そこで、圧縮変位の測定には非接触のレーザー変位計を使用した。

試験方法および試験条件: 図-2 に示した試験装置に乾燥状態の不織布供試体を設置し、土の段階載荷による圧密試験方法(JIS A 1217:2021)に準拠した重錘レバー式の載荷装置を用いて長期圧縮クリープ試験を実施した。圧縮応力 $p=2 \text{ kN/m}^2$ から載荷を開始し、荷重増加率 $\Delta p/p=1$ 、載荷時間 $t=5 \text{ min}$ で段階的に荷重を増加させ、所定の圧縮応力 $p=4, 8, 34, 69, 553 \text{ kN/m}^2$ に達した後、載荷時間 $t=744 \text{ h}$ (30 日間) の長期圧縮クリープ試験を実施した。

乾燥および飽和状態の不織布供試体に対して段階載荷圧縮試験も実施した。荷重増分比 $\Delta p/p=1$ 、 $p=2 \sim 2,215 \text{ kN/m}^2$ までの 11 段階とし、各載荷段階における載荷時間は $t=24 \text{ h}$ とした。

3) 厚さ制御型の透水試験

上載圧が作用した状態を再現した垂直方向と面内方向の2種類の試験装置を新たに開発した(図-3)。

垂直方向透水試験の概要: 図-3(a)に示すように、有板(開孔率: 約 81%)で不織布供試体を挟んで圧縮することにより、透水試験において不織布に上載圧が作用する状態を再現している。厚さ 10 mm の黄銅板に 4 mm×4 mm および 5 mm×5 mm の孔を規則的に配置したものである。所定の厚さ h のアクリル製スペーサーを供試体の周りに設置して、上下の有孔板で挟んでボルトで締め

表-1 不織布の仕様

	不織布(タフネル EX80)
素材	ポリプロピレン連続長繊維
製法	спанボンド
質量	400 g/m ²
厚さ(測定荷重 2 kPa)	3.0 mm
繊維の密度 ρ_f	0.910 g/cm ³

カタログ値

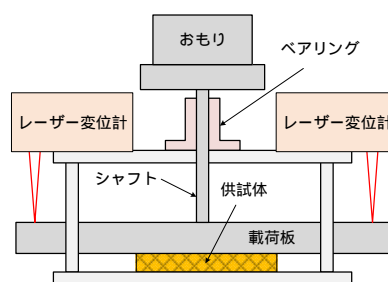


図-1 初期厚さ測定装置

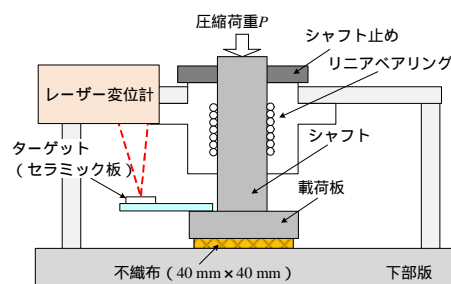


図-2 圧縮試験装置の概要

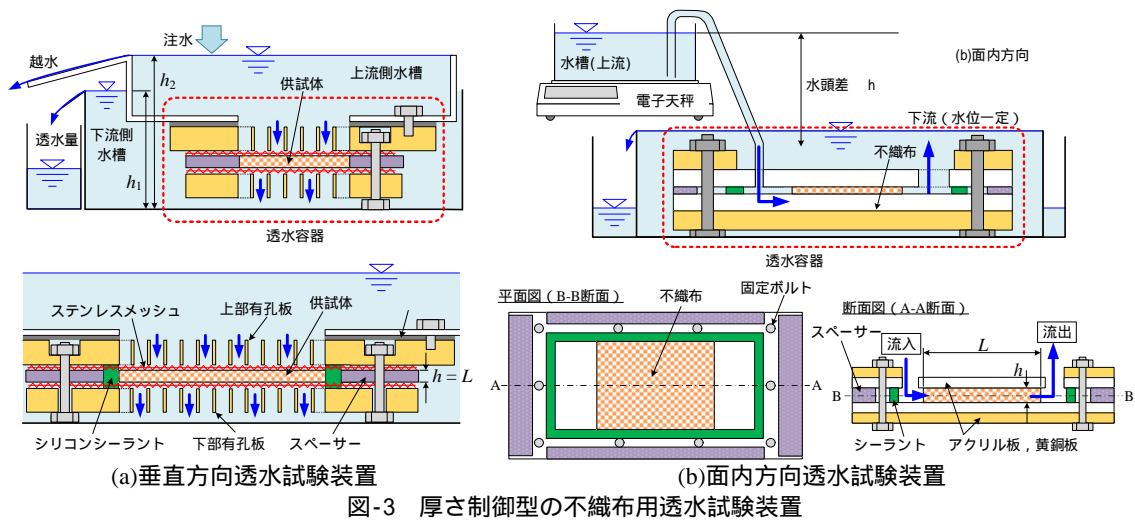


図-3 厚さ制御型の不織布用透水試験装置

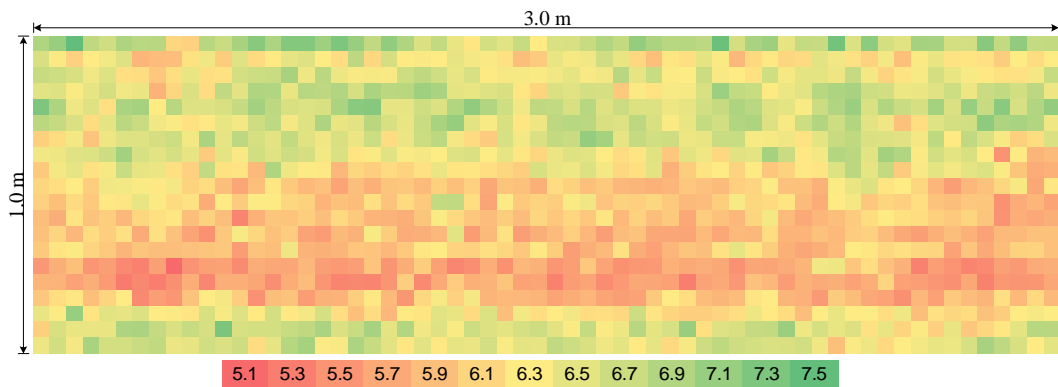


図-4 初期状態の不均一性の一例（初期間隙比）(1.0 m × 3.0 m, n=1,240)

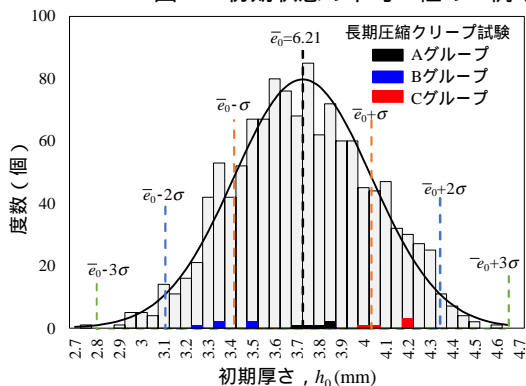


図-5 初期状態における各パラメータの度数分布 (1.0 m × 3.0 m, n=1,240)

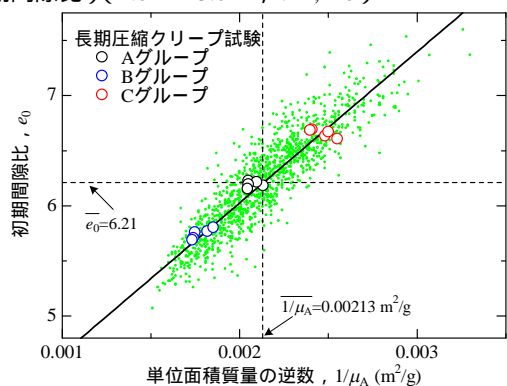


図-6 初期状態における各パラメータの相互関係 (1.0 m × 3.0 m, n=1,240)

て固定することにより、透水試験における供試体の厚さ h (=透水距離 L) を保持した。有孔板の孔への供試体の食い込みと有孔板と供試体の接触部分における透水の阻害を低減するために、供試体の上下にはステンレスメッシュを設置した。試験装置を組み立てた後、供試体の飽和度を高めるための脱気作業を経て、水頭差 10 ~ 50 mm における定水位透水試験を実施した。

面内方向透水試験の概要：図-3(b)に示すように、アクリル板で不織布供試体を挟んで圧縮することにより、透水試験において不織布に上載圧が作用する状態を再現している。所定の厚さ h のアクリル製スペーサーを供試体の周りに設置して、上下のアクリル板で挟んでボルトで締め固定することにより、透水試験における供試体の厚さ h を保持した。供試体の側面を沿った透水を防止するために、シリコンシーラントで止水を行った。試験装置を組み立てた後、供試体の飽和度を高めるための脱気作業を経て、水頭差 50 ~ 150 mm の定水位透水試験を実施した。

4. 研究成果

1) 不織布の初期状態の不均一性の評価

不織布 1,240 枚の初期状態における単位面積質量 μ_A 、初期厚さ h_0 および初期間隙比 e_0 の初期の不均一性を視覚的に示した (図-4)。 μ_A 、 h_0 および e_0 はそれぞれ正規分布となる (図-5)。不織布のロールから一部を切り出した供試体に対して初期状態を測定・算定することにより、不織布ロール全体の μ_A 、 h_0 および e_0 の正規分布を評価できると考えられる。 e_0 と μ_A の相関性は比較的高く、縦横の寸法と質量を測定することにより比較的容易に求められる μ_A の分布を求めることにより、 e_0 の分布を予測できる可能性が示唆される (図-6)。

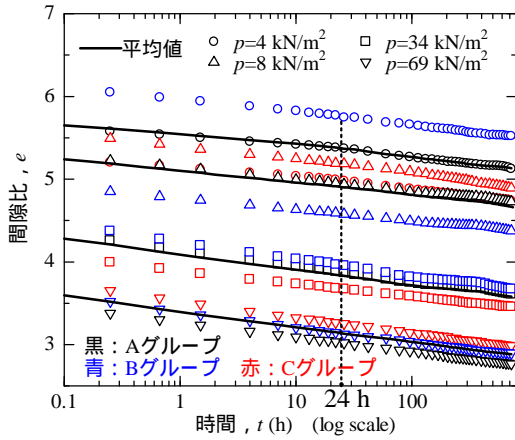


図-7 長期圧縮試験における $e \sim \log t$ 関係の一例

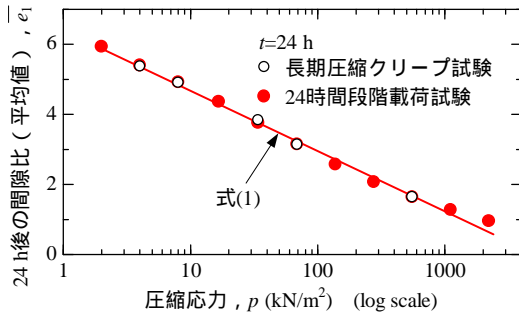


図-8 24時間後における $e \sim \log p$ 関係

2) 不織布の長期圧縮特性の定量評価

長期圧縮試験と24時間段階荷試験から得られた $e \sim \log p$ 関係(図-7)に基づいて、荷重開始から24時間経過後の間隙比の平均値 \bar{e}_1 と圧縮応力 $\log p$ の関係を比較した。長期圧縮試験と段階荷試験によらず、両者の関係は1本の直線関係となり、式(1)で近似することができる(図-8)。

$$\bar{e}_1 = -1.7 \log p + 6.4 \quad (1)$$

24時間以降の間隙比の変化率 $\alpha = (\bar{e}/\bar{e}_1) - 1$ と経過時間 $\log t$ の関係(図-9)は、圧縮応力毎に傾きの異なる直線関係となる。 $\alpha \sim \log t$ 関係の傾き β と $\log p$ の関係は、1本の直線関係となり、式(2)で近似することができる(図-10)。

$$\beta = -0.016 \log p - 0.021 \quad (2)$$

24時間以降の間隙比(平均値) \bar{e} は、24時間までの一次圧縮における間隙比(平均値) \bar{e}_1 と24時間以降の二次圧縮における間隙比(平均値) \bar{e}_2 の和として、圧縮応力 p (kN/m²) と時間 t (d) を変数とする式(3)で表される。

$$\begin{aligned} \bar{e} &= \bar{e}_1 + \bar{e}_2 \\ &= \bar{e}_1 + \bar{e}_1 \alpha = \bar{e}_1 (1 + \alpha) \\ &= (-1.7 \log p + 6.4) \times \{1 + (-0.016 \log p - 0.021) \log t\} \quad (3) \end{aligned}$$

間隙比 e の標準偏差は、荷重開始から徐々に減少し、24時間以降においてほぼ一定値に収束する。24時間以降における e の標準偏差と $\log p$ の関係は、 $p = 82 \text{ kN/m}^2$ を境界とする2直線で近似することができる。24時間以降の長期圧縮クリープにおける間隙比の信頼区間を式(4)、式(5)によって求めることができる(図-11)。

$$p \geq 82 \text{ kN/m}^2 : \sigma = -0.20 \log p + 0.48 \quad (4)$$

$$82 \text{ kN/m}^2 < p : \sigma = -0.0067 \log p + 0.11 \quad (5)$$

式(3)~式(5)に基づいて、信頼区間を考慮した $e \sim \log p$ 関係を示した(図-12)。以上のように、不織布の長期圧縮クリープ特性は、24時間までを一次圧縮(盛土の施工に伴う即時圧縮)、24

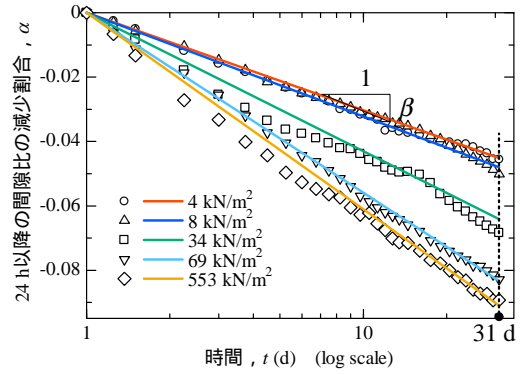


図-9 $\alpha \sim \log t$ 関係

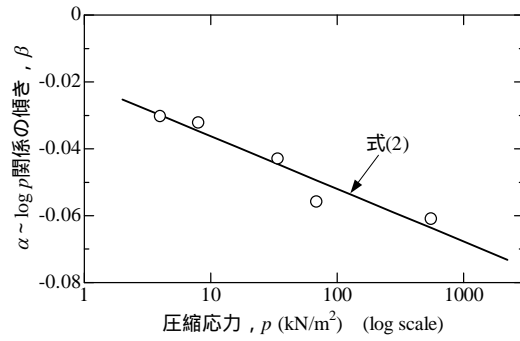


図-10 $\beta \sim \log p$ 関係

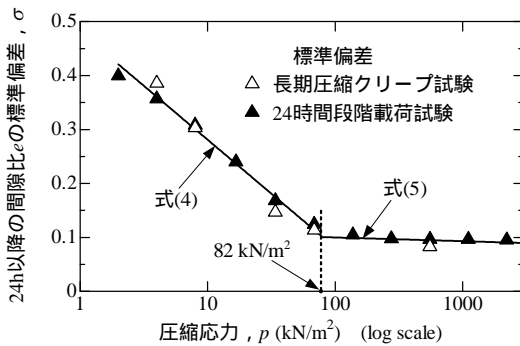


図-11 $\sigma \sim \log p$ 関係

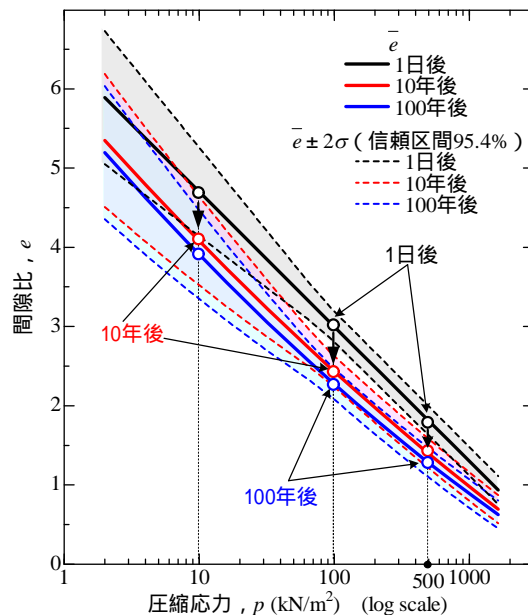


図-12 信頼区間を考慮した $e \sim \log p$ 関係

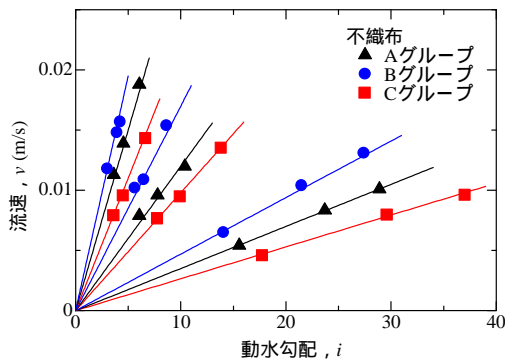


図-13 動水勾配と流速の関係の一例

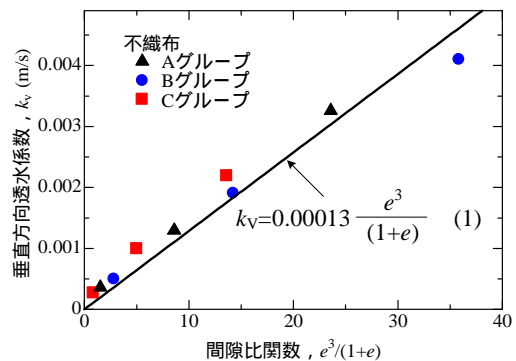


図-14 間隙比関数と垂直方向透水係数の関係

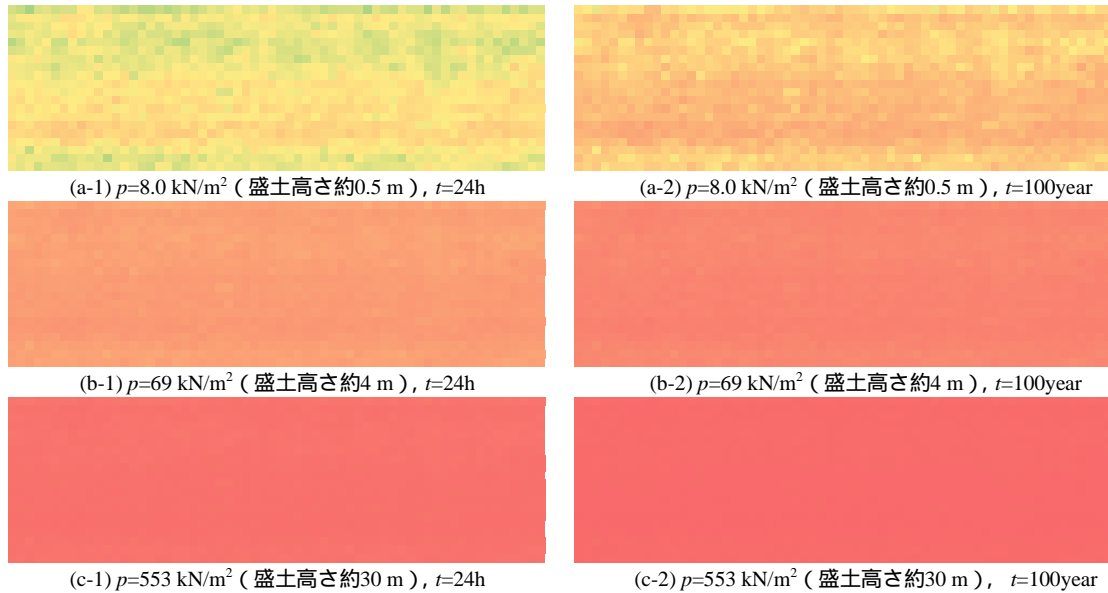


図-15 盛土の施工条件における透水係数の分布の変化の一例 (1.0 m×3.0 m, 乾燥状態)

時間以降を二次圧縮（施工後の長期圧縮）として評価できることを示した。乾燥と飽和状態ともに、圧縮に伴う e の平均値と標準偏差の変化はほぼ同じである。飽和状態における不織布の圧縮特性についても、上記と同様の式を用いて評価することができる。

3) 上載圧下における透水係数の定量評価

ガラスビーズと薄く切断した PVA スポンジを供試体とした透水試験により、新しく開発した垂直方向透水意見装置は、不織布のように透水性が高く薄い供試体に対して、垂直方向透水係数 k_v を評価することができるかと判断されることを示した。

不織布の垂直方向透水試験において、水頭差 10～50 mm 程度未満において、流速 v と動水勾配 i の関係は原点を通る直線となり、厚さ 1～3 mm 程度の非常に薄い不織布の垂直方向透水においてもダルシー則が成り立つ（図-13）。

間隙比関数 $e^3/(1+e)$ と不織布の k_v の関係は、初期状態の不均一性によらず、1本の直線で近似できる。上載圧負荷により圧縮された状態における k_v は、 e のみを用いて推定できる（図-14）。

面内方向透水試験装置についても、薄く切断した PVA スポンジを供試体とした透水試験の結果は、鉛直方向透水試験装置から得られた結果とほぼ同じ値となり、試験装置の有効性が示された。不織布に対する面内方向透水試験を実施することにより、面内方向透水係数 k_H においても、 k_v と同様の評価が可能であることが示唆される。

4) 盛土の施工条件を仮定した透水係数の定量評価

乾燥状態の不織布 (1×3 m) に対して、圧縮過程における透水係数を決定する間隙比の変化とその分布を決定し、可視化を行った（図-15）。

飽和状態や面内方向透水係数についても同様の手法によって決定し、可視化できることが示唆される。

引用文献

- 1) 河村 隆, 梅崎健夫, 田中幹宏: 材料の不均一性を考慮した不織布の段階載荷圧縮特性, ジオシンセティックス論文集, 第 35 巻, pp.185-192, 2020.

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 0件）

1. 著者名 KAWAMURA Takashi、UMEZAKI Takeo	4. 巻 38
2. 論文標題 不織布の初期状態の不均一性を考慮した上載圧下における垂直方向透水特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geosynthetics Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 135 ~ 141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5030/jcigsjournal.38.135	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 INOUE Shun、KAWAMURA Takashi、UMEZAKI Takeo	4. 巻 38
2. 論文標題 STATISTICAL EVALUATION OF COMPRESSIVE CREEP PROPERTIES OF NONWOVEN GEOTEXTILE CONSIDERING NON-UNIFORMITY OF INITIAL CONDITION	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geosynthetics Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 142 ~ 149
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5030/jcigsjournal.38.142	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 河村 隆，梅崎 健夫，井上 駿	4. 巻 37
2. 論文標題 不織布の初期状態の不均一性を考慮した段階載荷圧縮特性の統計的評価	5. 発行年 2022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 105 ~ 112
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5030/jcigsjournal.37.105	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 河村 隆，梅崎健夫，小暮建斗
2. 発表標題 統計的手法を用いた不均一性有する織布の飽和状態における圧縮特性の評価（その1）
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 小暮建斗
2. 発表標題 統計的手法を用いた不均一性を有する不織布の飽和状態における圧縮特性の評価(その2)
3. 学会等名 第59回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 伊藤翔大, 清水風佐, 井上 駿
2. 発表標題 不織布の上載圧下における垂直・面内方向透水係数の評価(その1) - 厚さ制御型の垂直/面内方向透水試験装置の開発 -
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 井上 駿
2. 発表標題 統計的手法を用いた不均一性を有する不織布の圧縮特性の評価(その3)
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 井上 駿
2. 発表標題 統計的手法を用いた不均一性を有する不織布の圧縮特性の評価(その4)
3. 学会等名 第58回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 井上 駿, 加藤直也, 篠原大紀, 宮澤 駿
2. 発表標題 統計的手法を用いた不均一性を有する不織布の圧縮特性の評価(その1)
3. 学会等名 R3年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河村 隆, 梅崎健夫, 井上 駿, 加藤直也, 篠原大紀, 宮澤 駿
2. 発表標題 統計的手法を用いた不均一性を有する不織布の圧縮特性の評価(その2)
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022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
研究 分担 者	梅崎 健夫 (Umezaki Takeo) (50193933)	信州大学・学術研究院工学系・教授 (13601)	

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
---------	---------