

レインガーデンに使用する材料および土壌構造における 浸透性および保水性の評価

小林 紀子 織邊 尚子
童阿瑪 北島 信行

概 要

レインガーデン（RG）は、雨水の貯留・浸透機能を強化した緑地へ雨水を誘導することで一次貯留・地下浸透を促進させる緑地設計であり、雨水の流出抑制および河川や排水路への流出遅延が期待できる。本研究では、雨水の浸透性を高めた2種類の緑化材料を層状に敷設する構造（RG土壌2層構造）の浸透性および保水性を評価するため、2層の土壌層を模擬した上層カラムと下層カラムを組み合わせた2層土壌カラムを用いて通水試験を行った。試験結果より、RG区の透水速度は、対照区に比べ高く、付加水圧により増加する可能性が示された。通水停止から22時間後の体積含水率は、対照区のマサ土に比べRG区に使用された材料では約2倍高いことが明らかとなった。これらの結果から、RG土壌2層構造は浸透性と保水性を兼ね備えることにより降雨時の水の敷地外への流出抑制に寄与することが示唆された。

Evaluating the Infiltration and Water Retention Capacities of Soil Materials and Layered Structures Used in Rain Gardens

Abstract

Rain gardens (RG) are green areas designed to gather surrounding rainwater with enhanced the rainwater storage and infiltration capabilities for promoting temporary storage and groundwater infiltration. This design is expected to reduce rainwater runoff and delay its discharge into rivers and drainage channels. We devised the RG structure, which is a layered structure of two types of soil materials with enhanced the infiltration capacity. In this study, we conducted water flow tests using a two-layer soil column system combining an upper column and a lower column to evaluate the infiltration and water retention capacities of the RG structure. The results showed that the RG treatment exhibited higher infiltration capacity than the control with Masa-do, and additional water pressure seemed to enhance the infiltration rate when a puddle formed on the soil surface. Regarding the volumetric water content 22 hours after water flow ceased, the soil materials used in the RG treatment demonstrated approximately twice higher than the Masa-do used in the control. These findings suggest that the RG structure, combining the infiltration and water retention properties, contributes to reduce rainwater runoff from the site during rainfall event.

キーワード：レインガーデン、土壌構造、浸透性、
保水性、経時変化

§1. 背景

近年、大雨の発生回数の増加が認められ¹⁾、豪雨災害の激甚化・頻発化が懸念されている。特に、地面の大部分が舗装されている都市部では、短時間に激しい雨が降ると雨水の多くは地面に浸透せず排水路へ流入する。その結果、雨水の排水能力を上回り、内水氾濫を引き起こす危険性が高まる。そこで、従来の雨水管、ポンプ場、貯留浸透施設等の整備に加えてグリーンインフラの概念を取り入れた都市計画や緑地整備が注目されている²⁾。グリーンインフラは、自然環境が有する多様な機能を活用して社会における様々な課題解決に活用しようとする考え方であり、生態系を活用した防災・減災機能の発揮だけではなく、生物多様性の保全、インフラの持続可能な整備、都市の快適性の向上、健康の維持・増進、生産性の向上、コミュニティの醸成、景観形成等への多面的な効用が期待されている³⁾。

レインガーデン (RG) は、雨水の貯留・浸透機能を強化した緑地へ雨水を誘導することで一次貯留・地下浸透を促進させる緑地設計であり、グリーンインフラの技術のひとつである。RGにより雨水の流出抑制および河川や排水路への流出遅延効果が期待できる。緑地の雨水貯留浸透機能を強化するRGは、新規および既存緑地の両方に適応可能な技術であることから緑地設計に取り入れやすく、国内において積極的に社会実装が進められている⁴⁾。

当社においても、外構緑地へのRGの実装に取り組んでおり、雨水の浸透性を高めた2種類の緑化材料を層状に敷設する構造(RG土壌2層構造)を開発した(図1)⁵⁾。RG土壌2層構造は、高い浸透性と植物の生育に必要な水分を保持する適切な保水性を兼ね備える植栽基盤土壌と土の締固めによる浸透性の低下が少ない排水層用材料を層状に敷設して構成する。

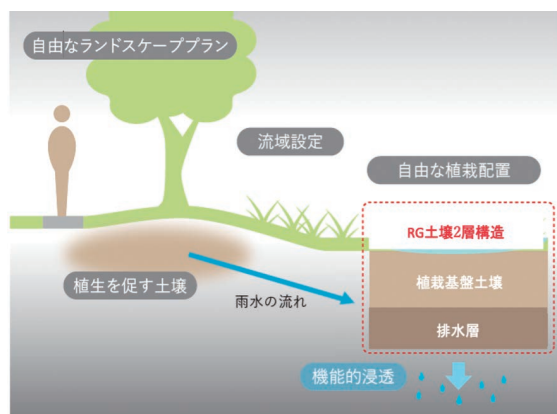


図1 RG土壌2層構造の模式図

これまでにRGを含む緑地を模擬した試験装置を用いてRG土壌2層構造の浸透性について評価を行っている⁵⁾。その結果、一般的な緑化材料であるマサ土と比較して約6倍高い雨水の浸透率であった。さらに、実装した外構緑地においても良好な浸透性を確認している⁶⁾。本研究では、室内試験によりRG土壌2層構造に使用する2種類の材料の特性と構造による浸透性および保水性の機能をマサ土と比較することで評価した。

§2. 材料と方法

2.1 材料

本試験では、RG土壌2層構造として浄水場から発生する土をリサイクルして製造された土壌(土壌A)を植栽基盤土壌に、火力発電所から発生するクリンカアッシュ(CA)を排水層用の材料として使用した。また、比較対照としてマサ土を用いた(図2)。



図2 供試材料の外見的特徴
左：土壌A、中央：CA、右：マサ土

2.2 飽和透水係数

飽和透水係数の測定用に供試体を作成するため、各供試材料は、手のひらで握ると固まる程度に水分調整を行った。その後、φ50 mm円筒に2.5 kgランマーを用いて3層150 mmにて約126 kJ/m³を加えて締め固めた供試体を作成した。本試験における供試体作成時の転圧条件は、施工後の経年劣化を考慮した浸透性の評価を行うため、一般的な屋上緑化等の特殊緑化用の薄層基盤に使用される「人工土壌」を対象とした性能評価試験に用いられる締め固め条件(2.5 kgランマー、100 mmモールド、1層175 mm、約18 kJ/m³を加えて締め固める)⁸⁾と比較して強い転圧条件になるように設定した。供試体を作成後、定水位透水試験を行い、各供試材料の飽和透水係数を算出した。

2.3 通水試験の試験区的设计

RG土壌2層構造の浸透性および保水性を評価するため、図3に示すように2層の土壌層を模擬した上層カラムと下層カラムを組み合わせる試験装置(2層

土壌カラム)を設計した。対照区は上下層マサ土とし、RG区は上層土壌Aおよび下層CAとした。

2.4 2層土壌カラムの作成

土壌カラムの作成には、カラムの高さ200 mmおよび300 mmのφ125円筒の両端に10K、125Aフランジを接着し、一方のフランジにプラスチックネットおよび不織布を接着した容器を用いた（各下層カラムおよび上層カラム）。2.2に示す供試材料の締め固め方法により土壌A、CAおよびマサ土を下層カラムおよび上層カラムへ充填した。2.3に基づき、各材料が充填された上層カラムおよび下層カラムを接続して1本の土壌カラムを作成した。

2.5 通水試験

図3の試験装置を用いて通水試験を実施した。各土壌カラム内に通水し、2層の土壌層を通過する水の浸透性を評価した。通水時のカラムへの通水量は、非常に激しい降雨（50–80 mm/h）の際にRG土壌2層構造部の周辺緑地から雨水が流入することを想定して48 mL/min（想定降雨強度約73 mm/hr、土壌カラムへの想定流入量約235 mm/hr）に設定した。通水試験は、送水ポンプ（7528-10, Yamato Scientific Co., Ltd., JAPAN）を用いて、2時間通水し、通水停止後22時間静置する全24時間の工程とした。チューブポンプの長時間稼働による送水量の変動を考慮し、通水試験前後の貯水タンクの重量差を実際の送水量とした。通水試験中は、雨量計（ECRN-100, Meter Japan, Inc., JAPAN）を用いて土壌カラムの下部より排出さ

れた水量をデータロガー（ZL6, Meter Japan, Inc., JAPAN）に記録した。カラムの透水速度は、5分毎の排出された水量を1分あたりの平均値として算出した。通水試験中、カラム上部の土壌表面上に滞水が発生した際は、滞水発生から通水停止時までの時間の水深を実測し、連続する2点の実測値の差分をその時間の差分で除して1分あたりの滞水速度を算出した。各土壌カラムの土壌水分条件を一定にするため、通水試験を2回連続して行った。1度目の通水試験により土壌カラム中の土壌水分を圃場容水量付近に調整し（予備操作）、2度目の通水試験では雨量計の測定値を用いて透水速度を評価した。また、土壌は乾燥と浸潤により土壌粒子が収縮膨張するため土壌構造の変化が生じる可能性がある⁷⁾ことから、通水回数の増加に従い透水速度の低下が予測された。そこで本試験では、2度目の通水試験後に5日間乾燥期間を設定した試験工程を1サイクルとして3度繰り返し実施することで通水回数の増加に伴う透水速度の変化を評価した。

2.6 土壌の保水性

通水時の水の移動および通水停止後の土壌の保水性を調査するため、各土壌カラムの中央に埋め込んだ土壌水分センサー（EC-5, Meter Japan, Inc., JAPAN）（図3）により通水開始から5日間の各土壌カラム内の体積含水率を計測した。なお、2回目の通水試験開始直前の土壌カラムの体積含水率は、予備操作の通水停止から22時間が経過しており、土壌カラム中の重力水がほぼ排出された状態であるため、見做し圃場容水量として評価に用いた。

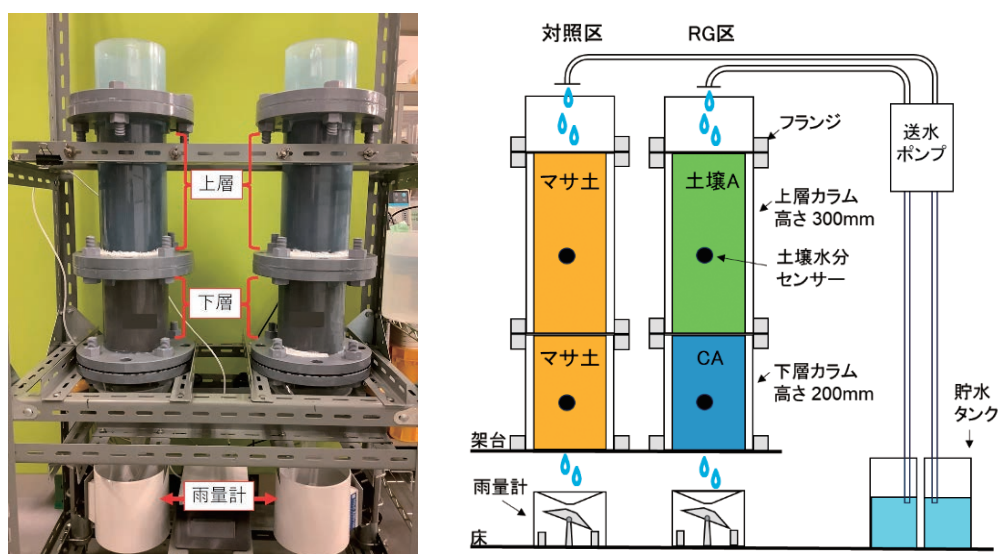


図3 2層土壌カラムを用いた通水試験の概要

§3. 結果

3.1 供試体の飽和透水係数

各供試体の飽和透水係数を表 1 に示す。すべての供試材料は、本試験条件では同程度の飽和透水係数の値を示した。

表 1 供試体の飽和透水係数 (m/s)

材料名	飽和透水係数
土壌 A	5.3×10^{-5}
CA	1.8×10^{-4}
マサ土	8.5×10^{-5}

3.2 滞水状況

通水試験時の実際の送水量を表 2 に示す。後述する計測データの解析は各試験区やサイクルでの送水量を考慮して行った。通水試験時の滞水の水深を図 4 に示す。対照区では、3 サイクルすべてにおいて同程度の顕著な滞水が発生した (図 4A)。通水開始 5 分前後に滞水が発生し、60 分後には水深が 120 mm となり、カラム上部より滞水が流出する恐れがあったため通水を停止した。RG 区では、1 サイクル目は通水開始後 6 分後に発生し、120 分後に 15 mm となった (図 4B)。2 および 3 サイクル目は通水開始 5 分後に滞水が発生し、通水開始 120 分後には各 80 mm および 134 mm であった。

表 2 通水試験時の実際の送水量

サイクル	対照区		RG 区	
	mL/min	mm/min	mL/min	mm/min
1	44	3.6	44	3.6
2	43	3.5	46	3.7
3	40	3.3	47	3.8

すべてのサイクルの各試験区における滞水の水深と滞水速度の関係を図 5 に示す。対照区では、通水後に急激に滞水速度は増加したが約 2 mm/min に収束する傾向が見られた (図 5A)。一方、RG 区では、顕著な滞水が発生した 2 および 3 サイクル目において、通水後に急激に滞水速度は増加したがその後は水深の増加に伴い減少する傾向が見られた (図 5B)。

3.3 透水速度

対照区における通水開始から 5 時間後までの透水速度を図 6A に示す。3.2 で記載した理由より、すべてのサイクルにおいて通水開始 60 分後に通水を停止した。各サイクルの通水停止直前の透水速度は 1 サイクル目では 1.7 mm/min、2 サイクル目では 1.5 mm/min、3 サイクル目では 1.4 mm/min であった。また、すべてのサイクルにおいて、透水速度は通水開始約 30 分後に急激に増加し、通水を停止する 60 分後までに微増した。通水停止後、透水速度は通水停止直前と同程度を維持したが、時間の経過に伴い若干の減少傾向が見られ、カラム上部の滞水が解消する 145 分以降に急激に減少した。RG 区における通水開始から 5 時間後までの透水速度を図 6B に示す。各サイクルの通水試験開始後 60 分時点の透水速度は、1 サイクル目では 3.3 mm/min、2 サイクル目では 2.8 mm/min、3 サイクル目では 2.8 mm/min であり、対照区に比べ RG 区は各サイクルでほぼ 2 倍高い値を示した。また、すべてのサイクルにおいて透水速度は通水開始後約 10 分で急激に増加した。その後、1 サイクル目では通水停止を行う 120 分まで一定になり、2 および 3 サイクル目は通水開始後約 10 分以降 120 分まで増加した。通水停止後、カラム上部の土壌表面上は滞水していたが、透水速度は低下し、それに伴い滞水も解消した。

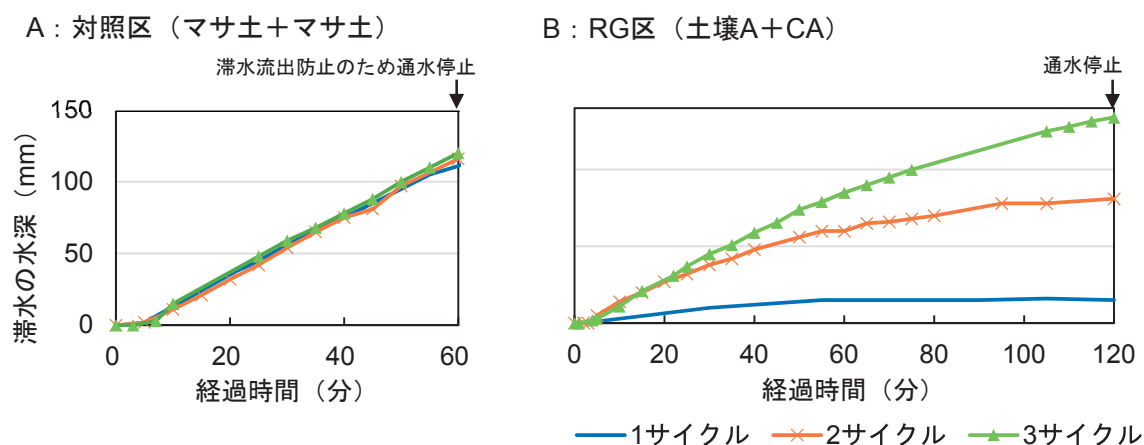


図 4 通水時間と滞水の水深の関係

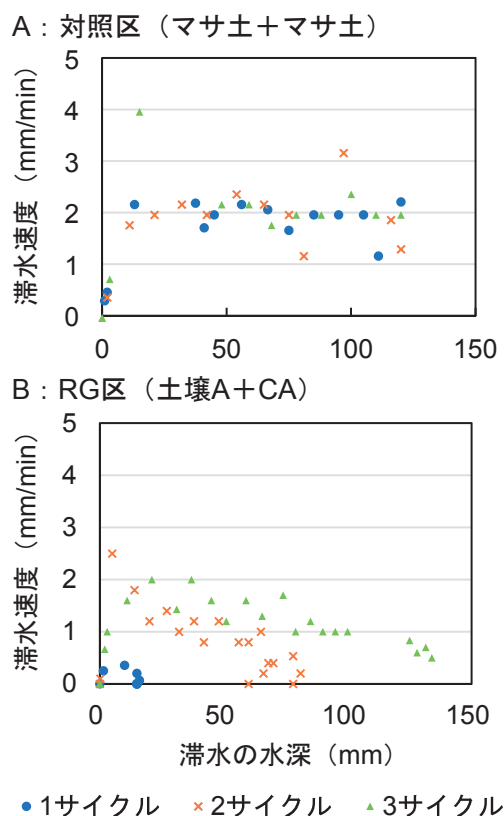


図5 滞水の水深と滞水速度の関係

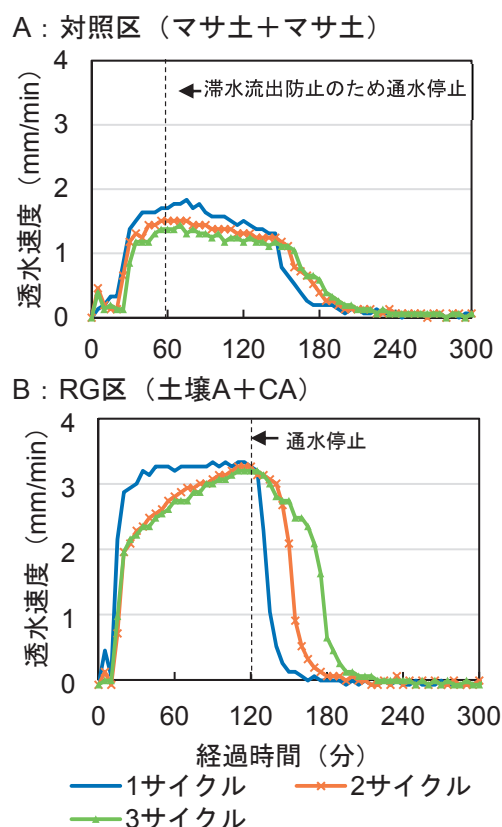


図6 2層土壌カラムの透水速度

3.4 土壌カラム内の体積含水率

すべてのサイクルにおける通水開始から5日分の各土壌カラム中の土壌水分センサーで計測した体積含水率の変化を図7に示す。対照区では、1サイクル目の上層カラムは、通水開始前は30%であり、通水時は31%となり、通水停止5時間後は30%となり顕著な変化は確認されなかったが、それ以降では時間の経過に従い徐々に減少し、通水後5日後は23%となった(図7A)。一方、2および3サイクル目は、通水停止5時間後以降の体積含水率の顕著な変化は確認されず、1サイクル目と異なる傾向が見られた。対照区の下層カラムは、通水開始前は19%であり、通水時に25%に増加し、通水停止5時間後は19%に急激に減少する傾向が見られたが、それ以降では時間の経過に従い徐々に減少し、通水5日後は15%となった。上層と同様に、2および3サイクル目の体積含水率において通水停止5時間後以降の顕著な変化は確認されず、1サイクル目と異なる傾向が見られた。RG区では、1サイクル目における通水開始前の上層カラムは60%を示し対照区の2倍であった(図7B)。また、通水時は60%、通水停止5時間後は60%、それ以降も60%となり5日間の顕著な変化は見られなかった。下層カラムは、通水開始前は36%を示し対照区の1.9倍であった。通水

時は37%、通水停止5時間後は37%、それ以降も38%であり5日間の顕著な変化は見られなかった。2および3サイクル目も同様の傾向を示した。

§4. 考察

4.1 浸透性の比較

供試体の飽和透水係数の比較では、顕著な差はみられなかった(表1)。従って、本結果では長期的な各材料の浸透性は同程度であることが示された。しかし、既往研究⁵⁾やRGを含む緑地の現地観察⁶⁾においてマサ土を使用した緑地とRG土壌2層構造の設置場所では浸透性に明らかな差が報告されている。表層の土壌は不飽和であることから、その時の土壌の体積含水率や乾燥・浸潤履歴などにより浸透性は複雑に変化する⁹⁾。さらに、水の移動性は、土質や飽和-不飽和域の境界面での作用によって変化する^{10,11,12)}ことが知られている。従って、飽和透水係数と併せて、通水試験を行うことにより材料および土壌構造の両面からRG土壌2層構造の浸透性の評価を行った。

通水試験の結果より、すべてのサイクルにおいて対照区に比べRG区の透水速度は高く、RG土壌2層構造の浸透性は高いことが示された。通水回数の増加に伴い透水速度の低下が予測されていたが、対照区にお

いては顕著な変化は確認されなかった。またRG区でも、1サイクル目と比較して2サイクル目では透水速度は低下したが、2回目以降について変化は見られなかった。筆者らの既往研究では、対照区において通水試験時の透水速度は1サイクル目の予備操作と比較し低下することを報告している¹³⁾。本試験では予備操作時に土壌粒子の移動や膨張などによりカラム内の空隙が減少した状態で安定した結果、それ以降の通水では土壌構造の大きな変化は起こらなかったため、本試験内では通水回数による影響が少なかったと推測された。一方、RG区は対照区に比べ土壌構造の安定化が緩やかに進行すると推測された。

本試験では、RG区ではすべてのサイクルにおいて通水中に透水速度の増加が確認された(図6B)。同時に、滞水速度の微減(図5B)も確認されたことから、滞水による付加水压が透水速度の増加に寄与した可能性が考えられた¹⁴⁾。対照区ではすべてのサイクルにおいて滞水の水深が増加しても滞水速度は一定であった(図5A)ことから、材料の種類によって付加水压の透水速度への影響程度が異なることが示唆された。RG土壌2層構造を設計する際、土壌表面の滞水による付加水压を考慮することでRGによる浸透能の向上

につながる可能性が示された。

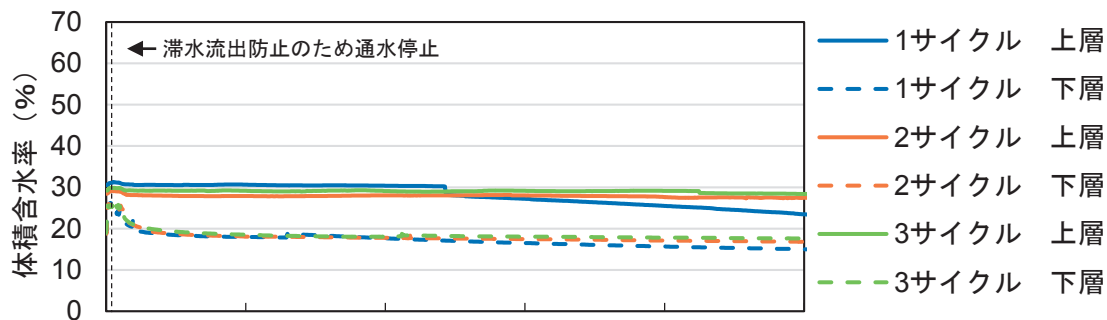
4.2 保水性の比較

各土壌カラムの見做し圃場容水量について、対照区に比べRG区は高い(図7)ことから、土壌AおよびCAは植物の生育に必要な水分を十分に保持できると考えられた。両試験区の上層において、通水停止後5日間の土壌表面からの蒸発による急激な土壌の体積含水率の低下は確認されなかった。これは両試験区ともに植栽しておらず、室内環境下の短期間の試験であったためと考えられた。なお、対照区の下層カラムについて通水後の急激な土壌水分の低下(図7)が確認された要因として、水位差により通水停止後に下層カラム中の重力水が排出されたと考えられた。一方、RG区の下層カラムに充填されているCAは表面や粒子内部に多数の細孔があるため、毛管水として土壌中に水分が保持されていたと考えられた。

§5. 結論

本試験では、RG土壌2層構造に使用する材料とその構造における雨水の敷地外への流出抑制の機能である浸透性と健全な植物の生育に寄与する保水性を評価

A : 対照区 (マサ土+マサ土)



B : RG区 (土壌A+CA)

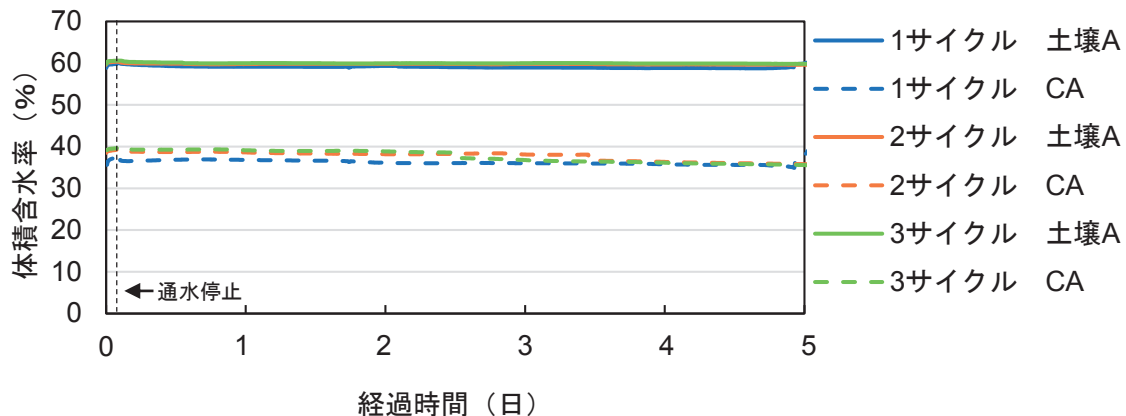


図7 土壌カラム中の体積含水率の推移

した。

通水試験の結果より、RG区の透水速度は、対照区に比べ高く、付加水圧により増加する可能性が示された。見做し圃場容水量は、対照区のマサ土に比べRG区に使用された土壌AおよびCAでは約2倍高いことが明らかとなった。

本試験の結果より、RG土壌2層構造は浸透性と保水性を兼ね備えていると言える。さらに、保水性は植物に必要な水分を土壌中に保持するだけでなく、土壌中へ雨水を一時貯留する機能も期待できる。浸透性と保水性を兼ね備えていることで、より雨水の敷地外への流出抑制の機能を向上させていると考えられた。今後は、実際にRG土壌2層構造を導入したRGにて長期的な浸透性の評価および植物の生育状況の観察を行い、知見を蓄積していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 気象庁：全国（アメダス）の1時間降水量50mm以上、80mm以上、100mm以上の年間発生回数、
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html（閲覧日：2024年7月12日）
- 2) 国交省：海外事例と我が国でのグリーンインフラの取組、
<https://www.mlit.go.jp/common/001267827.pdf>（閲覧日：2024年10月9日）
- 3) 国交省：グリーンインフラ推進戦略2023、
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001629422.pdf>（閲覧日：2024年10月9日）
- 4) グリーンインフラ官民連携プラットフォーム 企画・広報部会：グリーンインフラ事例集、
https://green-infra-pdf.s3.ap-northeast-1.amazonaws.com/R5_%E3%82%AF%E3%82%99%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%95%E3%83%A9%E4%BA%8B%E4%BE%8B%E9%9B%86.pdf（閲覧日：2024年7月9日）
- 5) N. Kitajima, Experimentally based designing of rainwater runoff control for implementing of Rain Garden, Fujita technical research report 57, pp. 71–76, 2021.
- 6) 大和ハウス工業株式会社：「風と太陽と水」をテーマにした大和ハウスグループの研修センター、
https://www.daiwahouse.co.jp/sustainable/eco/products/2022_1.html（閲覧日：2024年10月9日）
- 7) 須藤 清次, 竹中 肇, 安富 六郎, 関東ロームの工学的特性 (I)土壌の挙動と構造, 農業土木研究 別冊, 7, pp. 92–98, 1963.
- 8) 財団法人 都市緑化技術開発機構, 環境共生時代の都市緑化技術 屋上・壁面緑化技術のてびき, 大蔵省印刷局, pp.59, 1999.
- 9) 藤縄克之, 土壌水分特性曲線および不飽和透水係数のヒステリシス表現-多孔体中における不飽和浸透流の研究 (1), 地下水学会誌, 39, 4, pp.299–312, 1997.
- 10) 藤縄克之, 飽和・不飽和多孔体中の熱移動とヒステリシスを伴う浸透流の連成解析, 地下水学会誌, 37, 3, pp. 175–192, 1995.
- 11) 田中健貴, 木下篤彦, 小竹利明, 柴田俊, 山田拓, 松澤真, 伊藤達哉, 地質構造に起因する透水性境界上の浅層地下水位上昇を再現した浸透流解析~ 2011 年台風 12 号による那智川流域での表層崩壊の事例~, 日本地すべり学会誌, 59, 2, pp. 60–66, 2022.
- 12) 森井俊広, 鈴木一兄, 鈴木哲也, 河合隆行, 土のキャピラリーバリアの発現メカニズムと実務展開に向けた可能性調査試験, 新潟大学農学部研究報告, 67, 2, pp. 125–132, 2015.
- 13) 小林紀子, 織邊尚子, 童阿瑪, 北島信行, レインガーデン向け2層土壌構造の土壌水分条件に伴う透水性評価, 第55回日本緑化工学会大会研究交流発表会要旨集:14, 2024.
- 14) 公益社団法人 雨水貯留浸透技術協会, 増補改訂 雨水浸透施設技術指針「案」, 調査・計画編, 雨水貯留浸透技術協会, pp.54–55, 2015.

ひとこと

自然は生態系サービスを通じて私たちの生活を支える多様な機能を担っています。自然との共生を目指すことで、ひとりひとりが豊かさを感じながら生活できる社会を実現できると思っています。今後も自然と生活の調和をはかる研究・技術開発に取り組んでいきます。



小林 紀子