

屋上緑化の雨水流出抑制効果とその評価に関する基礎的研究

多島秀司¹・深川良一²・薮原奈緒子³・湯浅まゆ⁴

¹学生会員 工修 立命館大学大学院 総合理工学専攻(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:gr019023@se.ritsumei.ac.jp

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

³非会員 伊丹産業㈱ (〒664-8510 兵庫県伊丹市中央5-5-10)

⁴学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

人工地盤の構造は浅く排水層を有することから、雨水の浸透特性も自然地盤と異なる挙動を示す。著者らは人工降雨装置により、人工地盤の浸透特性の調査を行った。植生用の緑化基盤を対象とし、土質、層厚を変化させ、降雨の浸透特性および貯留高の検討を行った。

実験の結果、マサ土、黒土ともに貯留高は低く、改良が必要であることが確認された。また、屋上緑化の場合、土壌の厚みが薄く、排水層を有することなどから自然地盤と比較し、浸透能は同等であるが、貯留高は低くなることが確認された。

Key Words : artificial soil, seepage of rainwater, out-flow discharge, swelling capacity of soil

1. はじめに

大気環境の改善等を目的とし、緑化がすすめられている。特に、屋上緑化は都市域での限られた土地で緑地面積を確保しやすいことから、東京都や兵庫県で条例化されるなど、今後その重要性が高まるものと考えられる。

屋上緑化は技術開発が進められるとともに、効果の検証を目的としたモニタリングなどが行われ、建築学、造園学を中心に、多数の報告がなされている。

表-1 に(財)日本建築センターの環境改善のための屋上緑化技術認定基準¹⁾より抜粋した、屋上緑化の環境改善効果を示す。表中の室内環境については実証実験において比較的計測が行いやすく、また、得られた結果に差が生じやすい。例えば、オフィスビルの屋上で緑化してあるところの地表面温度と、緑化していないコンクリート面との表面温度を比較し、断熱効果を検証する例などが該当する。このケースの場合、個々のビルとの関係に重点がおかれるため、屋上緑化がされている場合と、されていない

場合、新工法と在来工法との比較、など相対比較による評価が一般的となっている。

一方、カテゴリーⅢに分類される地域・地区(都市環境)の改善効果に関しては個々のビルとの関係よりも、都市全体としての評価が重要となる。本研究で調査対象とした雨水流出抑制効果に関しては、

表-1 屋上緑化の環境改善効果

I 室内環境
1) 断熱効果
2) 日射の焼け込み低減効果
3) 遮音効果
4) 固体音低減効果
II 屋外環境
1) 照り返し低減効果
2) 滞在空間のクールスポット形成効果
3) 吸音効果
III 地域・地区(都市環境)
1) 雨水流出抑制効果
2) 総合的な熱的環境改善効果
IV 地球環境(CO ₂ 吸収効果等)

個々のビルごとに調査を行うよりも、流出抑制に影響のある要因を調べ、それぞれの効果に対する重み付けを行い、都市全体としての流出抑制を把握する事が有効と思われる。そこで、流出抑制の検証に先立ち、その一部である雨水の貯留効果について、土質や層厚などの違いに着目し検討を行う。

通常、流出抑制について検証する場合、対象とする流域のハイドログラフを作成し、ピーク流量低減率などの検証が行われる²⁾が、屋上緑化に関しては有効降雨の観点から流出抑制を論じた報告は少なく、流出モデルの適用検討なども必要と思われる。そこで、本研究では流出モデルの適用を前提とし、屋上緑化の降雨に対する貯留効果について検討を行う。また、建築物の貯留効果を考える場合、屋上に雨水をプールするなどの代替案も考えられるが、条例化などの影響で今後急速な普及が見込まれる屋上緑化を重要課題として位置付け、調査対象とした。

なお、本論文では条例のように制度上の言葉として用いられる“屋上緑化”の他、屋上に敷かれた土壌、の意味でも慣例に従い“屋上緑化”と表記した。また、“土質”は土の性状を表す際に用い、砂質土か粘性土であるかの違い等を意味し、“土壌”は緑化の基盤となっている土、の意味で用いている。また、“人工地盤”に対比する言葉として“自然地盤”を用い、運動場や公園、畑などの浸透域を想定して用いている。

2. 土壌評価の意義

(1) 土壌へ着目した理由

土壌水分が水循環および気候システムに与える影響の重要性および研究成果、今後の課題については鼎ら³⁾によってまとめられている。本研究では土壌水分が水循環に重要な影響を与える、という研究報告に基づき、屋上緑化に代表される人工地盤と流出抑制との関係に着目をした。雨水の流出抑制についての調査研究は都市型洪水対策だけでなく、土壌水分とも深い関係があるため、水循環および気候システムに対する研究の基礎ともなりうる。

また、人工地盤に着目した理由として、ヒートアイランド緩和を目的として緑化が推進されていること、都市域の限られた土地を緑化するためには人工地盤が効果的であること、などを考慮したためである。

次に、屋上緑化について検討する場合、植生の維持管理が最重要課題と位置付けられることが多い。しかしながら人工地盤の場合、コンクリートの上な

ど土の存在しなかったところに客土をするため、土の特性を知ることが重要となる。特に、透水性は土質によって異なるため、どのような土を客土するか、改良によりどの程度の改善が見込まれるのか等を定量的に調査する必要がある。

(2) 屋上緑化に関する実証実験について

前章でも述べたように、屋上緑化は民間企業などを中心に技術開発が行われ、今後も開発実験や表-1に示したような環境改善効果を検証するモニタリングも続くことが予想される。

梅干野らは屋上緑化が条例される以前より環境改善効果に着目し、屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究を行っている^{例えは4)}。この一連の研究は屋上緑化の先駆的な研究であり、以後の研究の参考ともなっている⁵⁾。しかしながら、屋上緑化の技術開発が進み、多様性も増してきた今日では、実験、検証方法、結果の解釈についても新たな検討が必要と考えられる。

植生が生育している状態でモニタリングを行うと、アルベドや蒸散によるヒートアイランドの緩和効果など、多くの実測データを得ることができる。その一方、植生の多様性や生育環境、実験の行われている時期と植生の年齢など、結果に対する変動要因は非常に多くなる。そのため、植生がない場合とある場合、といった相対比較により評価されることが多い。この場合、相対比較用の標準土壌が存在すれば、得られた結果について一般性の検証も可能となるが、調査目的に応じて様々な形態で比較対照土壌が設定されているケースが多くなっている。特に、土壌水分を調査する場合、気象条件やビルの立地条件などの地理的条件も影響する。

そこで、本研究ではまず植生が生育していない状態で、また地理的条件の影響をうけにくい室内実験において、どの程度の貯留効果が見込まれるのか検討を行った。その際、屋上緑化は構造的に自然の地盤をスケールダウンしたものとは異なるものが多いため、その構造の違いについて着目した。

また、今回の実験により、屋上緑化に関する類似した実証実験を行う際の留意事項についての検討もあわせて行った。

3. 実験方法

(1) 実験概要

土の透水性や保水性は密度によって変化する⁶⁾。そこで、透水性を評価する場合は密度管理が重要と

なる。透水試験に限らず、通常の土質試験においては結果が密度に依存することが多い。その際、相対密度や乾燥密度など、試験に応じた密度管理が行われる。本研究のように植生用の土壌を対象とした透水試験を行う場合、カラムやモールド内の乾燥密度の値だけでは、そのカラム内の土の状態が植生の生育可能であるのか判断しにくい。そこで、密度管理については締固め仕事量と山中式硬度計を用いて作製した供試体を、植生の生育可能な土壌であることの検討を行った上で降雨実験を行った⁷⁾。

試料として用いた土は屋上緑化だけでなく、園芸一般に広く用いられる黒ボク(以下、通称の黒土を用いる)、マサ土、パーミキュライト、パーライトの混合土を試料として用いた。

実験は土粒子密度や最適含水比などの基本物性調査を行った後、降雨実験を行った。得られた供試体を人工降雨装置による模擬降雨に曝し、その質量の変化をロードセルとデータログを用いて計測した。降雨終了後、含水比分布を測定し飽和度の確認を行った。測定の際は3箇所から採取し、雨水がカラム中を流下する際、水道が形成されていないか確認を行った。

物性試験の方法を表-2に示す。降雨実験は降雨時の雨水の浸透特性について、土質、層厚、改良材などを変化させ、影響を調査した。

(2) 土壌の種類と使用材料

a) 土壌の種類

本研究の対象とする土壌はコンクリートやアスファルトなど建築・土木の構造物の表層に設けられる人工地盤⁸⁾である。その中でも、条例化により特に面積の拡大が予想される屋上緑化を主な対象とした。屋上緑化の場合、条例および建築基準法との関連上、面積を確保しつつ荷重を軽減する必要がある。そのため、構造は広く浅い構造が多くなる。土壌については軽量なことが求められる。自然土壌、改良土壌、

表-2 試験方法

物性値	試験方法
最適含水比	締固め試験 (JIS A 1210)
透水係数	定水位透水試験 (JIS A 1218)
粒度分布	粒度分析装置、ふるい分け試験
土壌硬度	山中式硬度計

人工軽量土壌の3種類に分類される⁹⁾。概要を表-3に示す。

本研究では自然土壌と改良土壌を対象とした。表中にもあるように、実際の屋上緑化や庭園などで用いられるだけでなく、屋上緑化のモニタリングや、新規に開発された人工軽量土壌の検証実験比較対照として扱われることが多いことから、これらを実験対象とした。

b) 使用材料

改良土壌において、改良材として用いた試料はパーライトとパーミキュライトである。パーライトとパーミキュライトはどちらも無機質で軽量であることから、屋上緑化などでよく用いられる他、家庭向けの鉢物用にも頻繁に用いられる。パーライトは黒曜石あるいは真珠岩を高温で発砲させたもので、パーミキュライトは蛭石を高温燃焼させたものである。混合比は屋上緑化の施工事例を参考にして、黒土2に対しパーライトおよびパーミキュライトを1の割合で混合した。

黒土は火山灰質高有機質土で保肥性、保水性に優れ、植生用の土壌として広く用いられる。マサ土は風化花崗岩で、西日本を広く被い植生用の客土材としてだけでなく、畑土にもなっている。

本研究ではパーライト、パーミキュライト、黒土は市販のものを試料として用いた。マサ土は滋賀県産のマサ土を使用した。土粒子密度(真比重)を密度試験 JIS A 1202 によって求めた。それぞれ、パーミキュライト 2.52g/cm³、パーライト 0.59g/cm³、マサ土 2.73g/cm³、黒土 2.57g/cm³である。

表-3 屋上緑化に用いられる土壌の種類

	自然土壌	改良土壌	人工軽量土壌
内 容	黒土や真砂土などの自然土壌	軽量化と保水性向上のために自然土壌にパーライトなどの土壌改良材を混入した土壌	パーライトなどの軽量資材を主成分とした自然土壌を含まない軽量土壌(培養土)
適 用	屋上庭園など。駐車場の上の公園などのような管理が容易な人工地盤など	一般的な荷重条件が考慮された屋上緑化、庭園など	荷重条件が厳しい屋上緑化、既存建物の屋上緑化など。テラス、ベランダガーデンにも適す

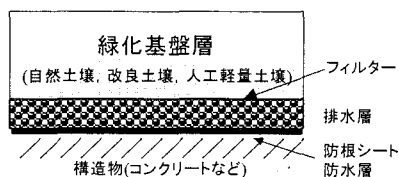


図-1 屋上緑化の一般的な構造

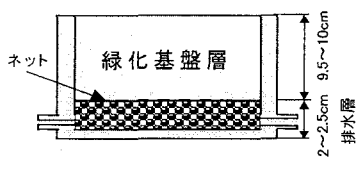


図-2 実験で使用したカラムの構造

(3) 供試体の作製

a) 屋上緑化の降雨実験モデル

屋上緑化の一般的な構造を図-1 に示す。土壌の直下には排水層の目詰まりを防止するフィルターが設置され、その下層には根腐れ防止を主な目的とする排水層が設置される。この排水層は街路樹など他の人工地盤などでも設置されることが多い。通常は透水性の高い砂や砂利などが敷かれ、浸透した雨水が水抜き孔から排出される構造となっている。屋上緑化の場合、排水層には軽量で透水性の高いパーライトなどが敷かれることが多い。排水層の下には防根シートが敷かれ、その下に構造物となる。

降雨実験で用いたカラムは図-1 の構造をモデル化し、緑化基盤層の下に目詰まり防止用のネットを敷き、排水層として軽石を敷き詰めた。断面構造を図-2 に示す。

土壌および排水層の厚さに関しては植生によって必要土層厚は変わってくる。屋上緑化の場合、芝やセダム類のような地被植物が多く用いられ、これらの必要土層厚は 10cm 程度とされている。そこで本研究ではこの 10cm を基本とした。また、層厚の影響を調べるために比較対照として用いた 20cm の土層厚については一般的な草花と低木の必要土層厚さを参考にして作製した。

b) 植生用土壌の作製

これまでも述べたように、透水性および保水性、土壌硬度などは密度によって変化する。特に人工地盤は決められた枠内に詰められるため、実験する際も実際の人工地盤に近い形で評価する必要がある。そこで、締固め仕事量と最大乾燥密度、最適含水比、土壌硬度を参考にして供試体を作製した。土木工学の場合、土の締固めは構造物の安定にとって重要な問題となる。締固め度は含水比に依存し、最も締固める密度を最大乾燥密度といい、その時の含水比を最適含水比という。通常の土木工事では最適含水比付近を施工管理の目安とし、施工現場においては最大乾燥密度が施工の目標とされる。そのため、土質試験の室内試験では最適含水比に調整された試料を用いることが多い。しかしながら土木工事の締固め

試験で得られる最大乾燥密度とその最適含水比では、締固まりすぎため、植生の生育に適した土壌とならないことは既に報告した¹⁰⁾。そこで、締固め仕事量を低減させ、硬度が植生の生育に適すると判断された場合の最適含水比を基準の含水比とすることにした。

植物の生育可能な土壌水分の目安として pF 値で 1.5~2.7 程度とされている¹¹⁾。pF 値は水が土壌に保持されている強さの程度を水頭の常用対数で表した数値で、保水試験などによって得られる。著者らの研究では前述の方法により得られた最適含水比はこの領域に入る事が多くなる。今回試験に用いたマサ土の場合、締固め仕事量を低減させて得られた最適含水比を保水試験結果にあてはめると、pF 値で 2.3 となった。そこで定水位透水試験と降雨実験ではこの最適含水比を目安に試料調整を行うものとした。ただし、黒土などの粘性土は自然含水比が高く、含水比調整が難しい。また、カラムの下に排水層として軽石を敷き詰めたこともあり、実際に降雨実験および透水試験を行った際の乾燥密度は最大乾燥密度よりも低くなる事が多く、最大乾燥密度の 90% 以上を密度管理の基準に定めた。

締固め終了後はカラムの高さと試料の高さが揃うように端面処理を行い、冠水深を持たない構造とした。これは、通常の屋上緑化における花壇の縁は土の流出、飛散防止の他、景観性に配慮して設計され

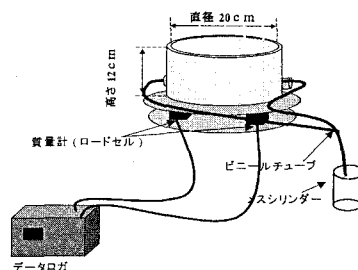


図-3 降雨実験概念図

ることが多く、湛水を目的としているわけではないこと、および根が発達してくると縁よりも土の位置の方が高くなる場合もあることなどから、図-2 に示した構造とした。

(4) 降雨実験

雨水の貯留効果について人工降雨装置を用い、質量変化を計測することによって検証した。降雨装置は大起理化学工業㈱の DIK-6000 を使用した。送水ポンプから吐出した水を手動バルブによって一定の流量に調節し、給水管、連通管内の空気を排除しながら降雨針より雨滴を落下させる仕組みとなっている。降雨針の振動を調節することにより、落下時の滴径も 1.7~3.0mm 程度で調節可能となっている。

人工地盤の中でも屋上緑化は特に土壌厚が薄いため、貯留量は限られる。降雨時の流出抑制を検証する場合、自然もしくは田畑などの構造的な違いを考慮した上で評価することが重要である。特に洪水対策を検討する場合、この違いを無視して流出抑制を検証すると明らかに過大評価となり、防災上危険側の解析となる。

降雨強度については 1 時間 20mm の雨を 3 時間降らせた。これは気象庁が発表する大雨注意を発令する基準となる、時間 20mm 以上、3 時間で 50mm 以上を目安としたためである。

図-3 に示したように排水孔から流出する雨水をメスシリンダーで受けた。これは排水層に水が溜まっているかどうかの確認のために計測している。メスシリンダーに水が溜まっていた場合は排水層内に水が溜まっていたものと考え、降雨終了直後の増加量から排水層内の水を差し引いた。排水層内の水分は排水孔の詰まり具合や移動の際の流出による損失によって正確に求めることが難しい。そこで、予備実験の結果から排水層内に溜まる水は 210g とした。また、ここで溜まった水は図-2 に示した排水層内での貯留水量でもある。

4. 結果と考察

(1) 物性試験

a) 粒度分布

粒度分布は工学分類の上で重要な指標となる。粒度の違いによって透水性も異なり、一般に砂質土の方が粘性土よりも透水性に優れるとされている。

図に示した粒径加積曲線より、黒土は粘土シルト分を多く含み、マサ土は砂分を多く含んだ砂質土であることがわかる。

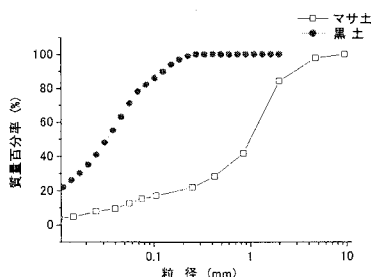


図-4 粒径加積曲線

表-4 最大乾燥密度と硬度

	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	硬度 (mm)
黒土	85	0.75	15
黒B	95	0.63	12
黒P	95	0.59	14
マサ土	13	1.87	11

B:パーミキュライト P:パーライト混合

表-5 透水試験結果

	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	透水係数 (cm/sec)
黒土	1.32	0.71	
黒B	1.06	0.58	8.55×10^{-4}
黒P	1.09	0.60	3.76×10^{-4}
マサ土	1.93	1.75	1.82×10^{-3}

B:パーミキュライト P:パーライト混合

b) 締固め試験と定水位透水試験

植生にとって透水性が高いと土の保水性が低下し、水分不足に陥りやすくなる。一方、透水性が低いと土の飽和度が高くなり、根腐れが生じ易くなる。

一般に透水係数は 1.0×10^{-4} 以上が良いとされる。

また、透水性は植物との関係だけでなく、降雨時の流出抑制にも影響を与えるため防災上も重要な指標となる。

硬度 10~15 を管理目標として予備実験を行い、締固め仕事量は 50 kJ/m^3 とした。締固め試験の結果と山中式硬度計による硬度を表-4 に、透水試験の結果を表-5 に示す。

植生に適する硬度は山中式硬度計で 8~20mm 程度とされる。軟らかすぎると根付きが悪く、硬すぎると根の生育が阻害されるためである。表-4 から、透水試験を行った供試体が植生用土壌の硬度として、適正な領域にあることが分かる。

次に、透水試験の結果と試験を行った際の湿潤密度および乾燥密度を表-5 に示す。黒土の場合、定水位透水試験では検出できなかった。これは図-4 からも分かるように黒土が粘性土を多く含むことによるものと考えられる。黒土にパーライトやパーミキュライトを改良材として混入することで、透水性

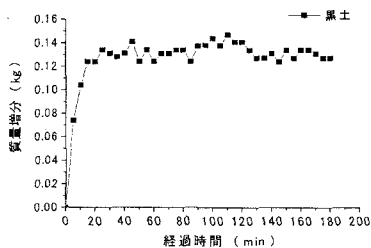


図-5 質量変化 (黒土 10cm)

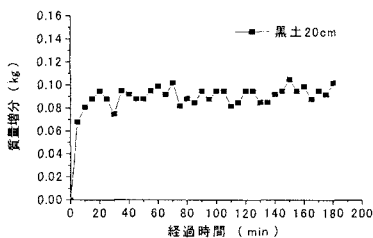


図-6 質量変化 (黒土 20cm)

が改善されることが確認できる。また、砂質土であるマサ土は透水性に優れていることが確認された。

これまでの物性試験により、黒土の透水係数は低いものの、その他の試料の透水係数と硬度試験の結果から、作製した供試体が植生用の人工地盤に近い状態であると判断し、表-4 の最大乾燥密度を降雨実験における管理目標値とした。

(2)降雨実験

降雨実験について土質の違いの観点から結果を整理し、考察を行った。

a) 黒土

黒土の 10cm カラムで行った経過時間と質量変化の関係を図-5 に示す。

降雨開始から 20 分～25 分で質量の増加が収束している。このケースで 2 回実験を行っているが、2 回とも同様の傾向を示した。

30 分以降の降雨は土壌に貯留されず、表面流出となり、本研究で行ったような 3 時間で 20mm の大雨に対し、十分な流出抑制効果が期待できない。そこで、20cm カラムを用いて同様の実験を行った。結果を図-6 に示す。

図に示したように、20cm の場合も 20 分程度で質量増加が収束している。質量の増分については 10cm カラムのときよりも減少しているが、この原因については締固めた際の乾燥密度が高かったことが考えられる。表-6 に湿潤密度と乾燥密度の降雨前後の変化を示す。

表-6 飽和度の変化 (黒土)

	10cmカラム			20cmカラム		
	ρ_t (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Sr	ρ_t (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	Sr
降雨前	1.24	0.68	0.76	1.28	0.72	0.78
降雨後	1.25	0.68	0.78	1.29	0.72	0.81

ρ_t : 湿潤密度, ρ_d : 乾燥密度, Sr: 飽和度

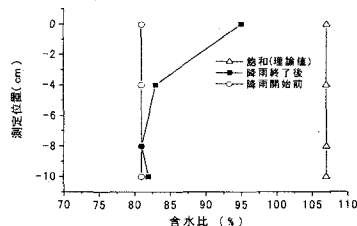


図-7 黒土の含水比分布(10cm)

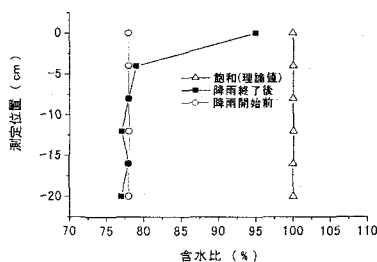


図-8 黒土の含水比分布(20cm)

以上の結果に加え、両方のカラムとも排水孔からの流出が見られなかったことから、20 分で収束した原因は飽和に達したことが原因ではなく、雨水の浸透特性と関係があるものと考えた。そこで、降雨実験終了後カラムを解体し、含水比分布と飽和度の変化を調べた。結果を図-7、図-8 に示す。

図はカラム表面を基準面にとり、カラムの排水層と接する位置をそれぞれ -10cm、-20cm としている。図から分かるように、どちらのカラムも表面付近の含水比が増加しているだけで、4cm より下は -1~+2%程度の差で開始前の状態と大きな変化はない。この結果は雨水が表層の数センチ程度までしか浸透していないことを示している。黒土は微粒子を多く含んだ粘性土であるため降雨によって膨潤し¹²⁾、透水性が低下したものと考えられる。

次に、表-6 に示した飽和度の変化に着目すると、どちらの層厚についても飽和度は 2~3%の増加した程度で降雨終了後も飽和には達していないことが確認できる。

以上の結果より粘性土を多く含んだ黒土は表面流出量が多いため、20mm 以上の大雨に対し、十分な流出抑制効果は期待できないものと考えられる。

表-7 飽和度の変化 (マサ土)

	10cmカラム			20cmカラム		
	ρ_t (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)	Sr	ρ_t (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)	Sr
降雨前	1.91	1.74	0.50	1.88	1.71	0.48
降雨後	1.90	1.73	0.58	1.89	1.72	0.56

ρ_t : 湿潤密度, ρ_d : 乾燥密度, Sr: 飽和度

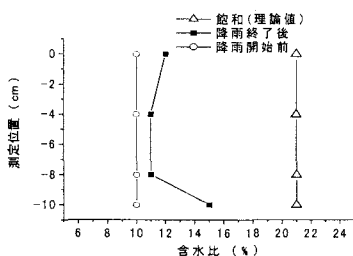


図-9 マサ土の含水比分布 (10cm)

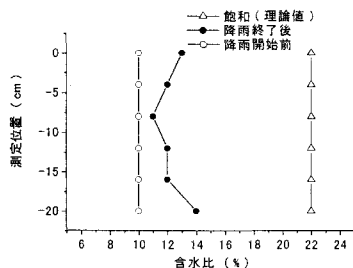


図-10 マサ土の含水比分布 (20cm)

b) マサ土

マサ土で同様の実験を行った。3 時間後の質量変化を調べると 10cm カラムと 20cm カラムの質量増分はそれぞれ 45g と 91g となり、体積の変化に比例し、質量の変化もほぼ 2 倍となった。

しかしながらこの場合も飽和しているわけではなく、飽和度は表-7 に示すようにそれぞれ 58% と 56% である。マサ土は透水性が高いため、排水層を通して流出し、不飽和状態のまま流出が安定化したものと考えられる。

10cm カラム、20cm カラムの 3 時後の含水比分布を図-9、図-10 に示す。また表中には飽和した際の含水比である 21% と 22% をそれぞれ図中に示した。解体作業中の流下などの影響により下層の含水比が高くなっているが、飽和に達するほど水を吸水していないことが分かる。

以上の結果より、マサ土の場合雨水流出を抑制するには層厚を厚くすることが有効であると考えられるが、透水性が高いため排水孔を通しての流出が増加し、長時間の降雨に対しては十分な効果は期待で

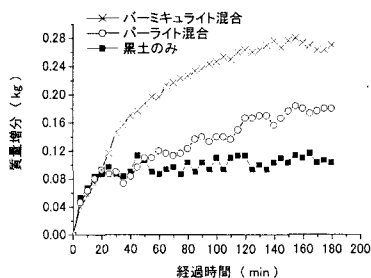


図-11 改良効果の検証

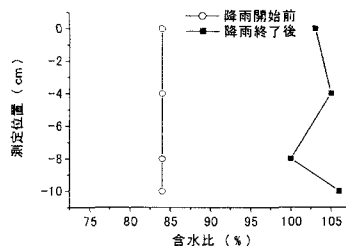


図-12 パーミキュライトの含水比分布

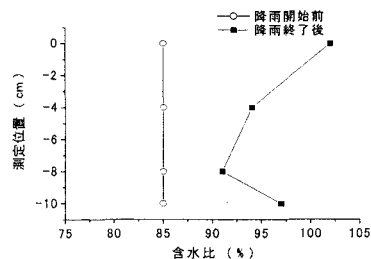


図-13 パーライトの含水比分布

きないものと考えられる。

c) 改良土壌工法

前項までに述べたように、黒土とマサ土をそれぞれ単独で用いた場合、時間 20mm の降雨に対し、十分な流出抑制効果は期待できない。そこで、黒土を基盤材とした改良土壌についても同様の実験を行った。

黒土の場合、パーライトおよびパーミキュライトによる改良により、透水性が高まることを表-5 に示した。しかしながら、黒土の浸透性は膨潤などの影響により、不飽和浸透となることから、飽和度を高めて行う定水位透水試験の結果からでは降雨に対する浸透挙動を把握することが難しい。そこで、黒土にパーライトおよびパーミキュライトを混合し、降雨実験を行った。

図-11 に質量増分と経過時間の関係を示す。なお、パーミキュライトの場合、排水孔からの流出が

確認されているが、漸増の様子を示すため、第3章4節で述べた排水層内の水分補正は行っていない。パーライト、バーミキュライト共に180分間、質量の暫増傾向は続き、改良材の混入に伴う排水性の改善効果が確認された。

図-12、図-13に降雨終了後の含水比分布を示す。黒土のみで行った場合と異なり、降雨が10cmの位置まで浸透していることがわかる。パーライトについては軽量化と、排水性の改善を目的として使用されることが多い。排水性を改善した結果、黒土の層全体で降雨の保水量が増加したものと考えられる。また、バーミキュライトは粒子そのものが吸水するため、パーライトよりも増分が多くなったものと考えられる。

以上の結果より、黒土などの粘性土にはバーミキュライトやパーライトのような排水性を高める改良材を混入することが、雨水の流出抑制に効果的であると考えられる。

(3) マサ土における実験結果と自然地盤との比較

a) Philip 式への適合性

本実験で得られた結果の妥当性を検証するため、Philip 式との適合性について検討する。Philip 式は

$$f_i = \frac{1}{2} s t^{-\frac{1}{2}} + A \quad (1)$$

で表される。ここに、 f_i ：浸透能(cm/min)、 s ：吸収能($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$)、 t ：降雨時間(min)、 A ：定数、を示す。

地表面の浸透能は降雨の初期に高い値を示し、降雨時間 t の経過とともに急速に低下し、最終浸透能に達する。(1)式は浸透速度の時間変化を示した式で、鉛直浸透で浸透初期には実測値との適合性の高い式である¹³⁾。

ここでは浸出水が確認されたマサ土のケースで検討を行う。

図-14は実験値をプロットで、Philip 式による計算値を曲線で示している。図に示したように、実験開始後50分間程度は非常によくあっている。

50分以降は実験値の方が低めになっているが、これはサクションによる吸水力の低い排水層内での貯留が卓越してきたことによるものと考えられる。

b) 野外観測値(自然地盤)との比較

浸透能を実測する方法には散水型、冠水型等があり、計測方法などによって異なる。そこで本研究で

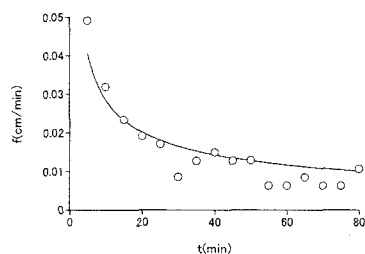


図-14 試験結果の Philip 式への適合性

は都市域を対処とし、冠水深を持たない散水型で行った。藤村らの研究¹⁴⁾と岡らの研究¹⁵⁾を比較対象とした。藤村らは散水型の実験装置を用い、民間の間地、寺社の裸地、運動場、住棟間の芝地、造成地などで浸透能を実測している。それぞれ3箇所の流域で3回ずつ行った結果、1.9~22.2mm/hを計測している。

本研究の場合、図-14より、最終浸透能を0.015cm/minにとると、9mm/hとなり、藤村らの計測結果と近い値となる。藤村らの結果は植生用の土壌は対象とされていないため本研究に比べて浸透能は低くなることが予想されるが、土地利用、土質、得られた結果の範囲などを考慮すると、概ね妥当な結果と考えられる。また、岡らは同様に散水型で市街地の畑、宅地、自動公園における浸透能を測定し、畑での最終浸透能で10mm/hとの結果を報告し、ここでも本研究結果と近い値となっている。

c) 人工地盤の特性

本研究の場合、端面処理によって表面貯留が生じにくくなっている。そのため、マサ土の初期損失と貯留高はほぼ等しいものとして以下の検討を行った。

前項b)で示したように、人工地盤の浸透能は自然地盤とほぼ同等であることが分かる。一方、降雨終了後マサ土の20cmカラムを解体せず、1時間ほど静置した後の質量変化からマサ土部分の貯留高を計算したところ、1.0mm程度となった。

この結果を一般に想定される浸透域での初期損失に比べて低くなっている。例えば福岡らはノンポイント汚染源負荷流出調査の中¹⁶⁾で、浸透域における初期損失を6mm、浸透能を10mm/hとしている。初期損失が低くなるのは屋上緑化の場合、土壌の層厚が10cm~20cmと薄いうえ、排水層を有する構造的な違いに起因するものと考えられる。

b)で示したように、浸透能は自然地盤とほぼ同等であるのに対し、貯留高が低いことが人工地盤の特性として挙げられる。

d) 効果レベルの判断基準

屋上緑化の場合、条例および建築基準法との関係

で緑化基盤材を薄く広く設計する傾向にある。今回示した結果のように薄い場合、浸透域としての貯留効果は期待できない。改良の効果と方法については前章で述べたが、その際の基準について検討を行う。

屋上緑化や他の人工地盤の場合、自然の地盤と同等の貯留高は期待できない。脇岡らは屋根に 0mm、道路に 0.5mm 程度の凹地貯留を与えている。この値と、本研究の結果との比較を行う。

まず、実験結果より透水性の良い砂質土であっても 1.0mm の貯留高が確認できたことにより、表面貯留がなくても 1.0mm の貯留高は期待できる。

次に脇岡らの結果より、道路のような不透透域の凹地貯留で 0.5mm の貯留高が見込めることから、植生による遮断降雨および屋上緑化表面の窪地などで、0.5mm 以上の貯留は期待することができる。

以上のことから、排水層内の貯留水量を含まず、土壌の部分だけでも 1.5mm 以上の貯留効果が考えられる。

5. 実験方法に対する考察

(1) マサ土(砂質土)の計測

本研究では予備実験の結果から、排水孔からの流出が確認されたケースについては 210g 減じて補正を行った。方法でも述べたように、排水層内で溜まる水の量は変動が大きく、マサ土 10cm のケースではほぼ同一の条件で実験を 3 回行ったが、最大で 20g 程度の差が生じた。ゴム管を外した直後の流出や、移動の際、持ち上げた直後の流出など、損失量も大きい。一方排水層を設けないと、実際の屋上緑化と異なってくるほか、土壌中の空気と雨水との置換が起こりにくく、表面流出量が多くなる傾向が見られる。

本研究のように人工地盤を対象とする場合は、直接流出となるため浸出流量と表面流出量を特に区別する必要がない。また、含水比分布の計測中にも雨水の流下は進行する。解体までに 30 分程度要したため、透水係数からは 3cm 程度流下していると予測できる。

透水性の高い砂質土は降雨による流出抑制を評価する場合、降雨中の質量変化をロードセルなどにより、連続的に計測することが効果的であると考えられる。ただし、排水層内に溜まる水の量は変動が大きいので、予備実験による調査が必要となる。

(2) 黒土(粘性土)の計測

黒土の場合は降雨終了後解体し、含水比分布を測

定したことによって得られた情報が大きい。一般に、貯留可能な水の量は層厚に比例するとされている¹⁷⁾が、比例しない場合もあることが確認された。室内で実施する透水試験結果だけでは判断できない。また屋外でライシメータを用いて実験する際も、テンシオメータを複数挿入し、かつ特定の水道が形成されないような配慮が必要である。

(3) 比較対照として用いる際の留意点

土質によって雨水の浸透特性が異なることを示した。排水性の改善効果を検証する場合はパーライトやバーミキュライトを混入した改良土壌を比較対象とするなど、実験目的に応じた土の選択が必要となる。雨水の流出抑制効果を相対比較によって検証しようとする場合、単に植生に適する高有機質土であるからという理由で黒土を標準型として位置付けると、過大評価となる可能性がある。

6. おわりに

土壌水分が環境に与える影響は大きく、アスファルトやコンクリートで覆われた都市部では、人工地盤の重要性も高まることが予想される。しかしながら屋上緑化の貯留効果を過大評価することのないよう配慮する必要がある。

本研究では屋上緑化の雨水流出抑制効果を調べるためにまず、貯留効果について調査を行った。また、貯留効果を調べるにあたり、その調査方法について重点をおきながら実験を行い評価を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- ①砂質土系の透水性の高い人工地盤は層を厚くすることで貯留効果が高まる。
- ②膨潤性を有する粘性土の場合、パーライトやバーミキュライトのように透水性を高める改良材を混入することが効果的である。
- ③土質によって土壌水分の状態は大きく異なるため、屋上緑化の効果を相対比較で検証する場合は、対照とする土の土質や層の厚さ、密度などに配慮する必要がある。
- ④屋上緑化の場合、浸透能 9mm/h となり自然地盤と同等の値となるが、土壌の層厚が薄いため、貯留高は低くなる。

人工地盤の中でも屋上緑化は荷重制限や風による飛散の防止など、設計、維持、管理において制約が多い。しかしながら、土質の違いや改良材の特性などを考慮することで、貯留高を高くすることが可能となる。今回の結論を実際の屋上緑化に反映させる

と、砂質土系は層を厚くする、粘性土系はパーライトなど目的に応じた改良材を加える、などの対策が考えられる。

今後都市域を中心に面積の拡大が見込まれる人工地盤の貯留効果を高めるためには、土壌を定量的に評価し、適切な改良を行うことが必要となる。その結果、雨水の流出抑制の対策工として、より効果的に機能し得るものと思われる。

今後の課題として降雨強度や時間、層厚、湛水可能な構造とするなど、実験条件を変化させることなどがあげられる。また、本研究で用いたマサ土の場合、乾燥に伴うみかけの粘着力の増加により、浸透能が低下する傾向が見られた。乾燥の程度と貯留効果への影響についても調査の必要がある。

次に、実験により得られた結果を基に、流出遅延効果などの検証を行い、流域を対象としたモデルの適用についての検討などがあげられる。その結果、流出抑制に効果のある人工地盤の設計が可能となるものと思われる。

参考文献

- 1) (財)日本建築センター：<http://www.bjc.or.jp/>
- 2) 佐合純造、長谷川正：都市化に伴う流出変化と対策評価手法、土木技術資料、22-6
- 3) 鼎信次郎、沖大幹、虫明功臣：気候システムにおける土壌水分、水文・水資源学会誌、Vol.11, No.5, pp.508-513, 1998.
- 4) 梅干野晃、何江、堀口剛、王革：芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究、日本建築学会計画系論文集、No.462, pp.31-39, 1994.
- 5) (財)都市緑化技術開発機構特殊緑化共同研究会：新・緑空間デザイン技術マニュアル、誠文堂新光社、p.50, 1996.
- 6) 早野美智子、矢橋晨吾、雨宮悠：乾燥密度を考慮した土壌水分諸特性の推定に関する事例的考察、水文・水資源学会誌、Vol.10, No.4, pp.299-307, 1997.
- 7) 多島秀司、深川良一、湯浅まゆ、羽賀浩、勝見武：植生用土壌の供試体作製に関する基礎的研究、環境システム研究、Vol.31, pp.151-158, 2003
- 8) 有田正光編著：地圏の環境、東京電気大学出版局、p.170, 2001.
- 9) 環境共生住宅部品データベース、環境共生住宅審議会、：<http://www.kkj.or.jp/>
- 10) 多島秀司、深川良一、湯浅まゆ、羽賀浩、勝見武：植生用土壌の供試体作製に関する基礎的研究、環境システム研究、Vol.31, pp.151-158, 2003.
- 11) 藤原俊六郎、安西徹郎、小川吉雄、加藤哲郎：土壌肥料用語事典、農山漁村文化協会、p.64, 2002
- 12) 土壌物理研究会編：土の物理学、森北出版、p.97, 1979.
- 13) 松林宇一郎、小野田利宏：冠字型浸透計の浸透特性について、土木学会第41回年次学術講演会、pp.31-32, 1986
- 14) 藤村和正、安藤義久：散字型浸透計による浸透能実測値を用いた都市流域の洪水流出解析、水文・水資源学会誌、Vol.10, No.4, pp.319-328, 1997
- 15) 岡太郎、角屋睦、野口美具：宅地域の雨水浸透と流出特性、京大防災研究所年報、第23号、B-2, 1980.
- 16) 脇岡靖明、古米弘明：都市ノンポイント汚染源負荷流出調査に基づく不透透面堆積負荷流出モデルの検討、土木学会論文集、No.635, VII-20, pp.123-134, 2001.
- 17) 興水肇：建築空間の緑化手法、彰国社、p.21, 1992.

STUDY OF OUT-FLOW DISCHARGE CONTROL FOR ARTIFICIAL SOIL

Shuji TAJIMA, Ryoichi FUKAGAWA, Naoko YABUHARA and Mayu YUASA

Since artificial soil is shallow and has drain phase, seepage of rainwater in artificial soil differs from the natural soil. Authors investigated the seepage of rainwater into the soil from the viewpoint of out-flow discharge control. The experiment was conducted for different types of vegetative soil and for different thicknesses, using rain making equipments. It has been found that at the end of the rainfall, the soil doesn't get saturation because of the factors such as differences in structures and swelling capacity of soils.