

アーバン・グリーンダムプロジェクト (第3報)

杉井 俊夫¹ 吉野 真衣² 広橋 遼樹³

1 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

2 中部大学工学部学生 (現 岐阜大学院生) (同上)

3 中部大学工学部学生 (現 ㈱フジタ) (同上)

本研究は、団粒化技術と植生を融合させた「アーバン・グリーンダムプロジェクト」と題し、その技術効果の検証を継続してきた。第3報となる本報では特に、「表面流出抑制に効果的な条件」と「植生の生育に効果的な条件」という2つの観点から検討を行った。前者(表面流出抑制)については、雨量と気温を考慮した実効雨量の考え方をを用いて、簡便な土中水分量予測モデルを構築している。その際に用いた半減期の工学的意味を明らかにするとともに、構築した予測モデルを用いて流出抑制効果および植生による水環境への寄与について評価した。結果として、(1)透水性の向上は層厚や下層との境界条件に強く影響され、表層地盤の層厚が厚いほど流出抑制効果が高いこと。(2)団粒化処理によって保水性が向上し、土壌からの水分蒸発速度が緩やかになることで、地表面温度の変化が緩和されることが明らかとなった。

Key Words: green infrastructure, rainfall penetration, heat island control, aggregated soils

1. はじめに

著者らは、団粒化技術と緑化の融合を意識し、観測データから流出量の違い、芝生の成長の観点からその融合技術の評価を試みてきた。しかし、特に観測降雨量は観測時期に左右されることから、短期間の観測だけでは十分な効果を評価するには限界がある。そのため、仮想降雨などを考慮したシミュレーションが必要と考えられる。

当初、芝生と団粒化剤の蒸発散を考慮した飽和不飽和浸透解析を計画していたが、解析には土質に関する物性値、蒸発散モデル以外に、葉面積指数や根の深さ分布、気孔抵抗、日射反射量等のパラメータが必要となり、6つのサイトにおける計測には手間がかかる。そこで、今回は定性応答モデルでもある実効雨量を使用することとした。実効雨量は、斜面崩壊予測に用いられ、通行規制雨量などにも使用されている。実効雨量は、観測土中水分量と観測雨量の関係を半減期というパラメータでモデル化することができる。今回は、新たに表層の蒸発にも関係する温度も蓄熱・放熱されることを勘案し、実効温度なるものを新たに提案し検討を行っている。

また、芝生の生育については、これまで定点デジタル画像をもとに、RGBを使ったVAR I指標による植生の活性度を測ってきた。今回、観測終了にともない、カ

ッターリングによる芝生のサンプリング等を使ってTR比による評価を実施している。本研究の結果「表面流出抑制に効果的な条件」と「植生の生育に効果的な条件」

以下、「表面流出抑制に効果的な条件」と「植生の生育に効果的な条件」の観点から団粒化と緑化の効果の評価について報告する。

2. 実証サイトの概要¹⁾

滋賀県米原市柏原に図1に示す6つのサイトが設置してある。表土層(真砂土)と路盤層(再生クラッシャーラン)の層厚や改良の有無は各区画で異なる。現地に気象観測装置が設置されており、降水量や気温等の気象データが得られるとともに、土中には土壌水分センサーを設置しており、土中水分量を計測している。観測期間は、4月1日~7月31日の4か月である。データ管理にはクラウド上でリアルタイムでの遠隔管理を可能とした。

3. 実効雨量と土中水運料予測モデルの構築

表1に示すように計測期間は4か月で、第I~III期に分けている。まず、第I期の降雨により実効雨量(式(1))を算出した。

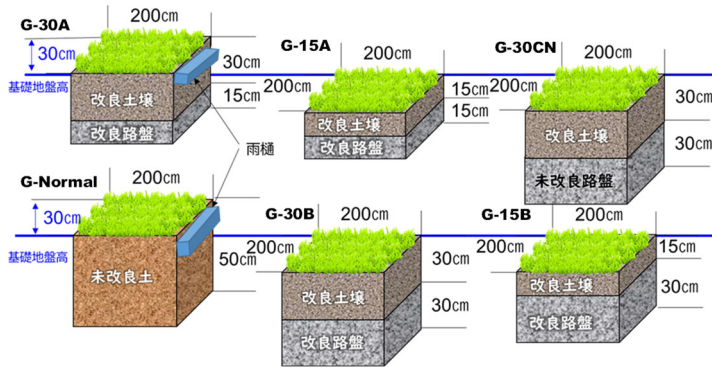


図1 研究サイト

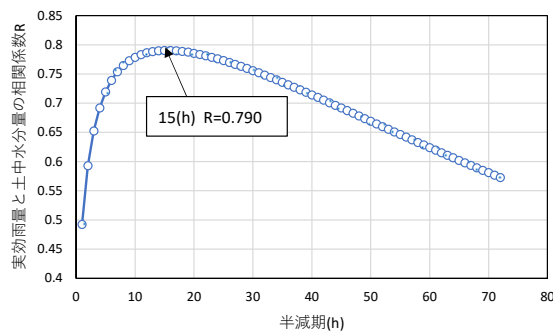


図2 半減期と相関係数(G-30B)

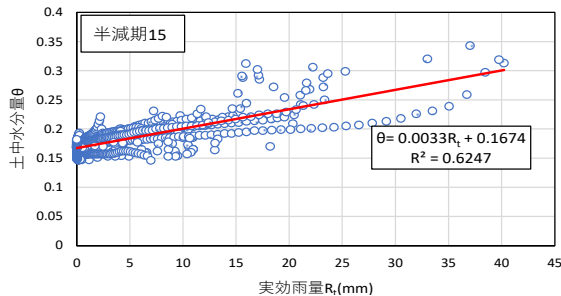


図3 実効雨量と土中水分量(G-30B)

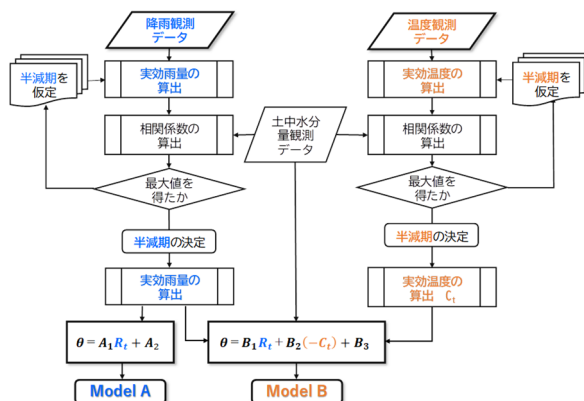


図4 土中水分量予測モデルの構築フロー

表1 サイトの概要

試験区名称	植栽	層	厚さ	材料	改良の有無	備考
①G-30A	コウライシバ	表土層	30cm	まさ土	団粒化	地盤より30cm上っており、5%の傾斜と雨樋、雨量計設置
②G-Normal	コウライシバ	表土層	50cm	まさ土	未改良	地盤より30cm上っており、5%の傾斜と雨樋、雨量計設置
③G-15A	コウライシバ	表土層	15cm	まさ土	団粒化	
④G-30B	コウライシバ	表土層	30cm	まさ土	団粒化	
⑤G-30CN	コウライシバ	表土層	30cm	まさ土	団粒化	
⑥G-15B	コウライシバ	表土層	15cm	まさ土	団粒化	
		路盤層	30cm	RC-40	団粒化	
		路盤層	30cm	RC-40	未改良	
		路盤層	30cm	RC-40	団粒化	

試験区の名称G;芝 数値:表土層厚 A:路盤層厚15cm B:路盤層厚30cm CN:路盤未改良

表2 本検討の流れ

期間	第Ⅰ期 (4/1-5/15)	第Ⅱ期 (5/16-6/28)	第Ⅲ期 (7/1-7/30)
Model A	●(再現構築)	→適用	
Model B		●(再現構築)	→適用

$$R_t = \sum_{n=0}^N (\alpha_n \cdot r_{t-n}) \quad (1) \quad \alpha = 0.5^{\frac{n}{T}} \quad (2)$$

ここに、 R_t : 実効雨量 [mm], r_t : n 時間前の雨量 [mm],

α : 減少係数, T : 半減期 [hour],

θ : 土中水分量 (体積含水率) である。

6つのサイトにおいて半減期を変えて算出した実効雨量と土中水分量の関係の相関係数から最大値となる半減期を決定した。

図3はそのときのG-30Bサイトの土中水分量と実効雨量の相

関係数の変移を表しており、半減期15hとなった。また、図4に

は半減期15時間の場合のG-30Bの土中水分量と実効雨量の相

関を示した。この第Ⅰ期の実効雨量から土中水分量を予測するモ

デルをModel Aとし、表2に示す第Ⅱ期の観測降雨に対して適

用を試みた結果、雨量が少ない時点での適用において整合性を

得ることができなかった³⁾。原因として実効雨量は、斜面安定

で用いられており斜面全体の土中水分量に連関性が高いが、今

回のような浅い層のサイトでは、気温の違いによって生じる地

表面と芝生からの蒸発散が強く影響することが考えられた。そ

こで気温についても降雨と同様、「実効温度」(式(3))を定義し、

式(5)のように実効雨量のモデルと組み合わせることを試みた。

$$C_t = \sum_{n=0}^N (\alpha_n \cdot c_{t-n}) \quad (3) \quad \beta = 0.5^{\frac{n}{T}} \quad (4)$$

$$\theta = B_1 R_t + B_2 (-C_t) + B_3 \quad (5)$$

ここに、 C_t : 実効温度 [°C], c_t : n 時間前の気温 [°C], β : 減

少係数, T : 半減期 [hour], θ : 土中水分量 (体積含水

率), B_1, B_2, B_3 : 推定パラメータ である

このモデルをModel Bと呼ぶ。ここで、実効温度には第

Ⅱ期の気温データを用い、実測値と推定値との誤差が最

小となるときの半減期を最適半減期とし、モデル式のパ

ラメータを決定した(Model AおよびB:雨量のT=15h、

Model B雨量のT=15h、気温のT=9h)。

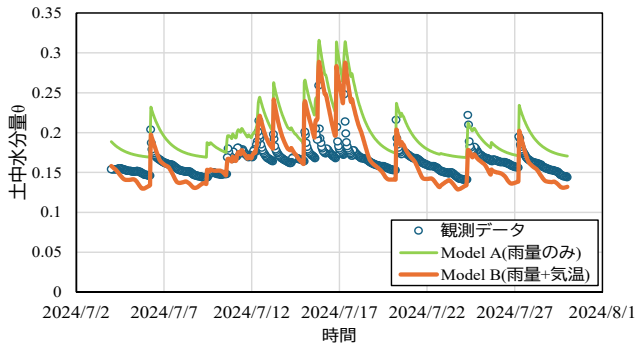


図5 土中水分量予測結果

4. 適用性の評価

第Ⅰ期、第Ⅱ期の観測データを用いて作成したモデルを第Ⅲ期に適用し、土中水分量を予測した。図5に、実効雨量を用いたモデル(Model A)によって推定した土中水分量と気温を考慮したモデル(Model B)によって推定した土中水分量について、実測値との比較結果を示す(Model A : 雨量 $T=15h$, Model B : 雨量 $T=15h$ 、気温 $T=9h$)。

前述したように Model A より推定した土中水分量は少ない水分量で整合性が得られていないが、Model B では予測値と実測値の整合性が向上していることが分かる。これは、芝生直下の浅い層における土中水分は地表面からの蒸発や芝生からの発散による水分量の減少が大きく効いていると考えられる。したがって、実効温度を利用することでモデルの精度が向上し、十分適用可能な結果が得ることができた。

5. 実効雨量と実効温度の半減期について

モデル構築時に得られた実効雨量と実効温度の半減期についてみていく。観測サイトでは、負圧浸入計を用いた現場透水試験(JGS1319)を実施して表層の透水係数を求めており、図6に各サイトの実効雨量の半減期と透水係数、図7に実効温度の半減期と透水係数を示す。図6から実効雨量の半減期が長いほど透水係数が高くなっている。一般的には、透水係数が高いほど排水処理が速くなることから半減期は短くなるが逆の傾向を示した。透水係数のオーダーの差ではないので植生や下層の改良土槽の吸引圧が低くキャピラリーバリアが発生していることが懸念される。一方で、実効温度は、地盤内に温度が蓄積され、減少していくと考えており、実効温度の半減期は、透水係数とは直接の相関性はないことが図7から明らかとなった。

図8には、各サイトの実効雨量の半減期(上部)と実

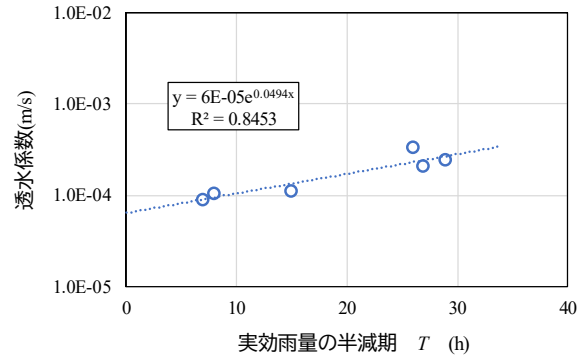


図6 各サイトの実効雨量の半減期と透水係数

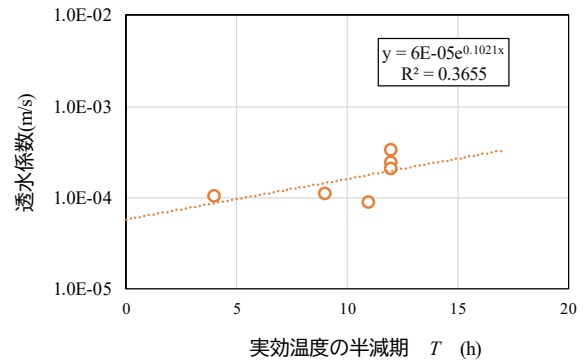


図7 各サイトの実効温度の半減期と透水係数

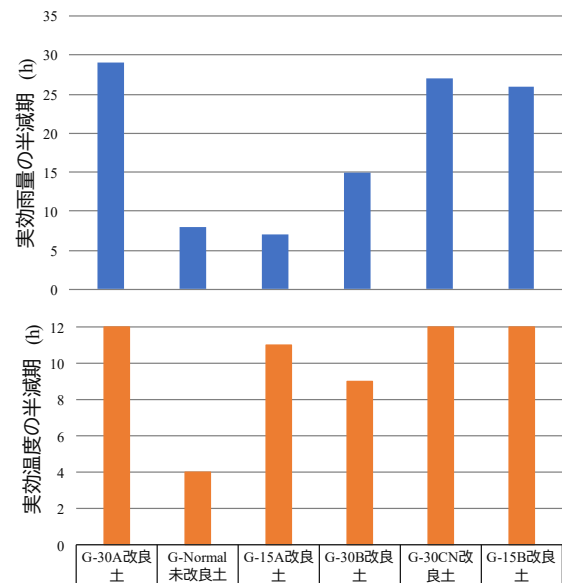


図8 各サイトの実効雨量、実効温度の半減期

効温度の半減期(下部)を示したものである。各サイト名の数字は表層の厚さ(cm)を、AとBは下層の路盤材の厚さAは15cm、Bは30cmを示しており、G-Normalは未改良の真砂土のみ、G-30CNは路盤材のみ未改良であることを示している。

実効雨量の半減期でみると、G-15Aの半減期が最も短く表層、改良路盤層ともに薄く、水が抜けやすく団

粒化の特徴を示している。G-15Bになると路盤層厚が増加して半減期はG-15Aよりも長くなっている。G-30AとG-30Bとは逆の結果となっており、上層厚の違いがキャピラリーバリアに影響していることが考察された。未改良の真砂土のサイトであるG-Normalの透水係数は最も低い、半減期は2番目に短い結果となった。このことから、実効雨量の半減期は、上下層との構成と関係することが分かった。

実効温度の半減期についてみると未改良土のG-Normalが最も短い。このことは、温度の減少が速く、気化する速度が速いことが考えられる。他のサイトは、上層部は団粒化改良した真砂土であり、団粒化の特徴でもある保水性が高くなることで気化する速度が緩やかだと判断できる。

6. 表面流出量の推定と「流出指数」

構築したModel Aにより算出される体積含水率を用いて表面流出量の算出を試みた。現地でのサンプリングにより乾燥密度を計測しており、現場の間隙率が推定できる。また、体積含水率 θ 、間隙率 n 、飽和度 S_r の関係式 $\theta = nS_r$ より、飽和時の体積含水率 θ_s は間隙率に等しくなる($\theta_s = n$)。Model Aで算出される θ が θ_s を超えると流出が始まると仮定して計算を行った。過去に観測された実績雨量と温度(図9)を用いて計算し、G-15Bサイトで計算した予測値を図6に示す。図中の赤線は飽和体積含水率を示しており、この線を超過している時間が表面流出の発生している時間と判断し、流出量を体積含水率と流出時間(h)の積として算出した。図10の実績降雨に加え、仮想的に7日間無降雨後、時間雨量40mmの降雨が30日間降り続くケースについても計算し、比較のため6つのサイトにおける流出量の最大値で各サイトの流出量を除したものを「流出指数」と定義し、結果を図7に示した。「流出指数」(=1)が最も大きいG-30CNサイトでは、下層の再生路盤材(RC40)の団粒化が施されておらず、セメント粉による層境界に薄い不透水層が形成されていることが確認されており、流出量が多くなったと考えられる。

7. 芝生の生育評価

定点デジタル画像をもとにした評価と、芝生をサンプリングしTR比の量結果から比較し植生の生育に寄与する条件を調べることにした。

(1) 定点デジタル画像を用いた評価

定点デジタル撮影を実施し、画像をPhotoshopで

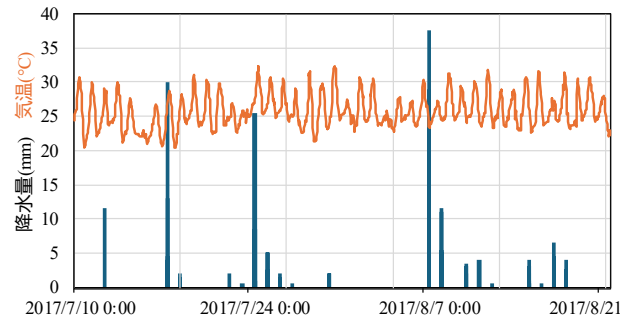


図9 過去に観測された豪雨(2017/7/10~8/21)

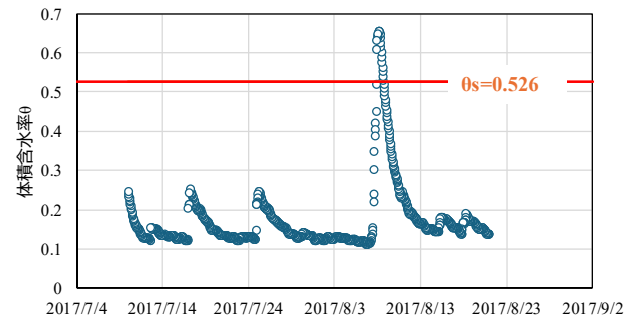


図10 推定された土中水分量の変化(G-30CNサイト)

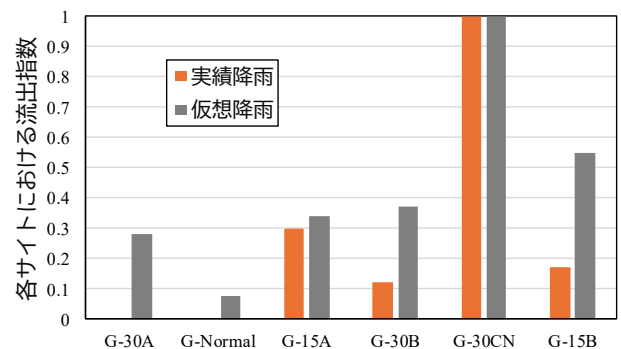


図11 各サイトにおける流出指数

RGBに変換し、VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)を求めた。VARIは式(1)で定義され、VARI値が高いほど、植生の量や活性度が高い傾向を示すことがいわれている。

$$VARI = \left(\frac{\text{Green} - \text{Red}}{\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue}} \right) \quad (6)$$

ここに、Green: 緑色、Red: 赤色、Blue: 青色バンドのピクセル値(ここでは平均値を使用)である

(2) TR比による評価

植物の地上部(Top)と地下部(Root)の重量の比率を指す。地上部と地下部のバランスを測る指標として、植物の健康状態や栽培環境の評価に使われ、式(7)のように

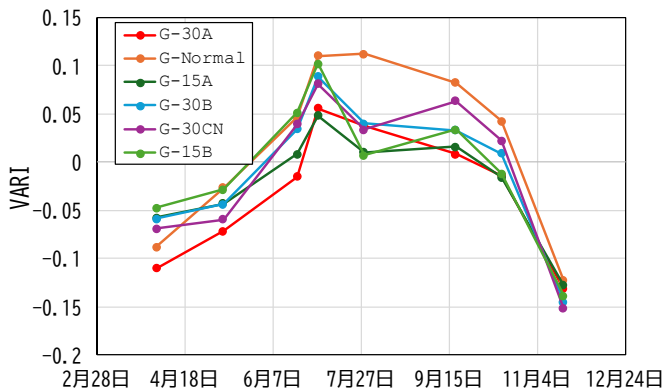


図12 各サイトの VARI 比較

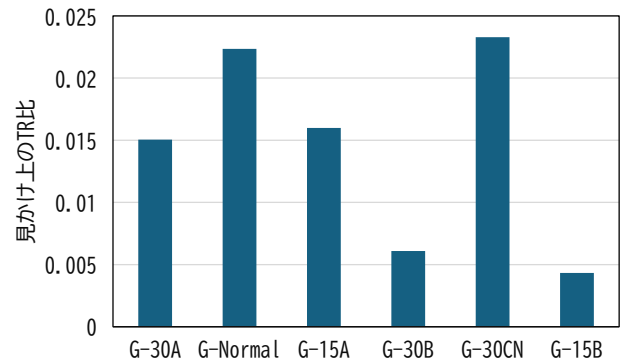


図13 見かけ上のTR比

表3 芝刈り量

	(単位g/4m ²)					
	G-30A	G-Normal	G-15A	G-30B	G-30CN	G-15B
7月29日	96.4	116.3	133.9	85	124.6	215.9
9月19日	125.7	172.5	115.6	101.4	115.8	76.8
10月15日	45.4	67.3	45.6	39.3	36.1	50

定義され、そのTR比が大きいほど(地上部に比べ 地下部が小さい)と植物は不健全であるとされる。

$$\text{TR比} = \left(\frac{\text{芝生の葉や茎の乾燥重量(T)}}{\text{芝生の根や地下茎の乾燥重量(R)}} \right) \quad (7)$$

健全な芝生のTR比(地上部/地下部比率)は、一般的に1以下、理想的には0.5~1.0程度がよいとされている。なお、今回の芝生の葉や茎の乾燥質量は芝刈りを3度行っており、3回の芝刈りの乾燥質量を分子のTOPとしており、見かけ上のTR比として相対的にみる指標とした。

(3) VRAI と相対TR比による芝生の健全度評価

図12に2025年度のVARIの推移結果を示す。VARIの観測結果は、初年度の結果とは異なり、G-Normal(未改良土)のVARIが最も高い、すなわち緑が多く植生の活性度が高い結果が得られた。この傾向は、2年目から得られた傾向でもあった。7月29日には撮影前に芝刈り機を使って2cmまで刈り取っていることもあり、それまで他のサイトと大きな差異がなかったものの、芝を刈った後、G-Normal(未改良土)では、密に芝が残っていたと考えられた。なお、その時の乾燥芝茎の乾燥質量は、表3のとおりである。G-Normal(未改良土)は全体としては高いが、G-15AやG-15Bよりも刈り取り量は多くないことが分かる。

また、G-30CN(路盤未改良)のサイトが、9月15日より、G-Normal(未改良土)のように芝生の活性度が高くなっている。第2報でも報告したが、G-30CN(路盤

未改良)では、根が路盤層に侵入しにくいという結果があったことことから、先に説明した「見かけ上のTR比」を調べ、図13に示した。

「見かけ上のTR比」が大きいと作物は不健全であるといわれ、VARIが高かったG-Normal(未改良土)、G-30CN(路盤未改良)のサイトで「見かけ上のTR比」が高い。このことは、芝生の葉や茎の成長は高いが、根や地下茎の発達が上部に比べて成長していない傾向が考えられる。先のVARIは色彩の変化を敏感に捉える指標であるが、表面状態のみを反映するため、根の発達状況も監視していく必要があることがわかった。

これより、TR比で最も植生が健全な状態であるかつVARIも高いG-30Bを最適改良厚みと判断した。また、G-Normal(土壌厚さ50cm)のVARIが高いのは芝刈り後も芝の密度が高く緑が目立っていたからである。しかし、路盤の厚さ以外同様の条件の場合、路盤の厚い方がVARIは高いが、芝刈り後は値が極めて近づくため芝の生育に影響があり、密度にはさほど影響していないと言える。ここから、土壌厚さが植生の密度、路盤厚さが植生の生育に関与していると推測でき、G-30B(改良土壌30cm、改良路盤30cm)が最適改良厚みと判断された。

6. おわりに

今回の観測結果の分析から、以下の知見が得られた。

- (1) 芝生の植生と地盤の水分量を予測するモデルとして、実効雨量に加えて新たに「実効温度」を定義した。これにより、芝生の生育変化も考慮できる簡便な「雨量・温度モデル」を提案した。
- (2) 「雨量・温度モデル」における半減期の工学的意味を明らかにした。実効雨量の半減期は、上層が厚いほど、またキャピラリーバリアが発生するほど長くなる傾向が示された。一方、実効温度の半減期は、上層の団粒化

による保水性の維持が強く影響するため長くなるのに対し、未改良地盤では最も短くなることが明らかになった。

- (3) 「雨量・温度モデル」を用いて実績降雨と仮想降雨から「流出指数」を定義し評価した。その結果、流出指数が最も大きかったのは、下層の再生路盤材 (RC40) が団粒化されていない G-30CN であった。これは、未改良の碎石に含まれるセメント粉が層境界に不透水層を形成したことが影響していると考えられる。
- (4) VARI の評価では未改良地盤の活性度が最も高い値を示したが、見かけ上の TR 比を考慮すると、地中の根の活性は低いことが明らかになった。植物に良好な生育環境をもたらす条件として、土壌と路盤の厚さが植生の密度に関与していると判断でき、G-30B (改良土壌 30cm、改良路盤 30cm) が最も適している。
- (5) 以上の半減期、流出指数、VARI、TR 比の評価から、防災と環境の両面に最も適したサイトは G-30B (改良土壌 30cm、改良路盤 30cm) であると結論付けられる。したがって、適切な層厚を確保し、上層と下層の両方に団粒化処理を施すことが効果的である。

謝辞：

本研究は、本研究は国土交通省「先駆的な緑化技術開発のための実証調査」からの支援を受けました。関係者各位に、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉井俊夫：団粒化技術と植栽の融合によるアーバン・グリーンダムプロジェクト，都市緑化技術，No. 127，pp. 14-15，2024.
- 2) 吉野真衣、広橋遼樹、杉井俊夫：雨量と気温を考慮した土中水分予測モデルの試み，令和6年度土木学会中部支部研究発表会，III-02，2025.
- 3) 吉野真衣、広橋遼樹、杉井俊夫：芝生を敷設した団粒化改良地盤における土中水分量予測モデル，第60回地盤工学研究発表会，[22-7-1-07]，2025.
- 4) 吉野真衣、広橋遼樹、杉井俊夫：芝生を敷設した団粒化改良地盤における流出量の評価，令和7年度土木学会全国大会，[11AM2-Be-02]，2025.

EFFECT OF AGGLOMERATION ON LAWN GROWTH (Final report on the Urban Green Dam Project)

Toshio SUGII, Mai YOSHINO and Haruki HIROHASHI

This study, titled the 'Urban Green Dam Project', combines granulation technology and vegetation and is conducting ongoing verification of its technical effectiveness. In this third report, we examined two particular perspectives: 'conditions conducive to surface runoff suppression' and 'conditions conducive to vegetation growth'. With regard to the former, we constructed a simple soil moisture prediction model based on the concept of effective rainfall, taking into account both rainfall and temperature. We clarified the engineering significance of the half-life used in the model, and evaluated the surface runoff suppression effect, as well as the contribution of vegetation to the water environment, using the constructed prediction model. The results revealed that (1) improvements in permeability are strongly influenced by layer thickness and boundary conditions with the underlying layer, with thicker surface soil layers exhibiting higher runoff suppression effects, and (2) aggregate formation treatment enhances water retention, slowing evaporation rates of soil moisture and mitigating changes in surface temperature.