

# 都市流出抑制のための地域再生材を用いた 保水浸透性土壌改良手法の開発

佐藤辰郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州大学持続可能な社会のための決断科学センター

比較的安価で地域で調達可能な竹炭を土壌に混入した場合に、どの程度浸透能が向上するかを評価した。竹炭の混合率を0%から30%まで4段階に変化させたマサ土土壌について定水位透水試験を行い、Green-Amptモデルを仮定して土壌の浸透特性（飽和透水係数、サクション）を求めた。竹炭混合率が10%増加する毎に飽和透水係数はおよそ2倍になり、30%まで混合すると無混合の場合と比較してワンオーダー飽和透水係数が増加した。

## 1. はじめに

都市型水害が頻発している。この傾向は地球規模の気候変動と相まって、今後さらに激化すると予想される。しかし、市街化が進んだ都市河川流域では、河川の拡幅、堤防の拡張といった大規模な河川整備による対策が困難な場合が多い。このため、流域全体で保水・浸透・貯留能力を強化し、河道への雨水の流出（写真1）を抑制する取り組みが不可欠である。

流域全体での雨水貯留に向けては、浸透マス、浸透トレンチ等の小規模な雨水貯留施設の整備のほか、学校のグラウンドや公園等の比較的広い敷地を有する場所の地盤を改良し、浸透能を向上させることが注目されている<sup>1</sup>。トース土工など様々な地盤改良技術が開発されてきているものの、一般的に高価で広域的な適用が難しい。近年ではホタテやカキの貝殻を混合して透水性を向上させる試みも始まっている<sup>2</sup>。本研究では竹炭に注目する。

近年西日本の里山地域では竹林（おもにモウソウチク）が拡大しており、里山の荒廃として問題となっている<sup>3</sup>。モウソウチクの生長は樹木の中でも繁殖力が強く、密集して生育して、他の植物に光や空間不足をもたらす。最終的には、ほぼモウソウチクの単一林相となり、水源涵養機能や土砂崩れ防止機能の喪失により、周辺の田畑の荒廃や住宅の地盤劣化を引き起こす。近年、竹を炭化させた竹炭が土壌改良材（透水性・保水性向上や

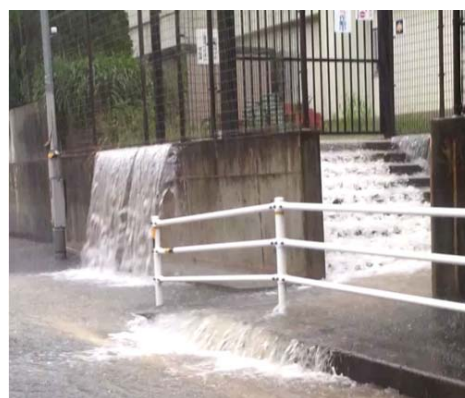


写真1. 小学校からの雨水の流出（平成24年福岡市内）

酸性土壌の中和）として注目されているものの、竹炭を混合した場合の土壌の浸透特性については科学的に明らかにされていない。竹炭を混合することでグラウンド等の浸透能が向上することができれば、地域の竹林の伐採と炭化、竹炭の公園やグラウンドへの混合を通して、地域の水害問題と竹による里山荒廃の問題の2つに貢献することができるかもしれない。

本研究では、比較的安価で地域で調達可能な竹炭を土壌に混入した場合に、どの程度浸透能が向上するかを評価する。具体的には、竹炭の混合率を0%から30%まで4段階に変化させた土壌について定水位透水試験を行い、湿润前線の進行状況から土壌の浸透特性（飽和透水係数、サクション）



写真 2. 実験に用いた福岡県産の竹炭

を求めた。また、Green-Ampt モデルを仮定し、浸透能の時間変化をモデル化し、その程度を検討した。

## 2. 材料と方法

### 対象の土質材料と土壌改良材

九州大学伊都キャンパスのグラウンドのマサ土を対象に竹炭混合による土壌改良効果を評価した。九州大学伊都キャンパスは福岡市西部の糸島半島にあり、キャンパスの大部分は花崗閃緑岩が分布している<sup>4</sup>。表層のマサ化した土壌を改良前の土壌として使用した。

上記土壌に竹炭(写真 2)を混合した。混合率は3段階(無混合を含めると4段階)変化させ、混合率は体積比で10%、20%、30%である。混合した竹炭は福岡県産の孟宗竹を800℃~900℃で焼成したものである。2mm~4mmの粒状炭で、通電性を有する。表乾状態の土質試料に均等となるように十分に混ぜ合わせた。

### 定水位透水試験

土壌の浸透能を測定する古典的方法として、シリンダーインテグレート試験が農学、土壌物理学の分野で用いられている。シリンダーインテグレート試験は土中に打ち込んだ円筒内に湛水して水の浸入速度(インテグレート)を測定する試験である<sup>5</sup>。本研究ではシリンダーインテグレート試験を参考に、改良土を敷き詰めたシリンダー内部に定水位で湛水し、プロファイル水分計の経時変化を捉えることで対象土壌の浸透特性を把握した。

九州大学伊都キャンパスのグラウンドに図1の実験装置を設けた。図1のシリンダー(塩化ビニ

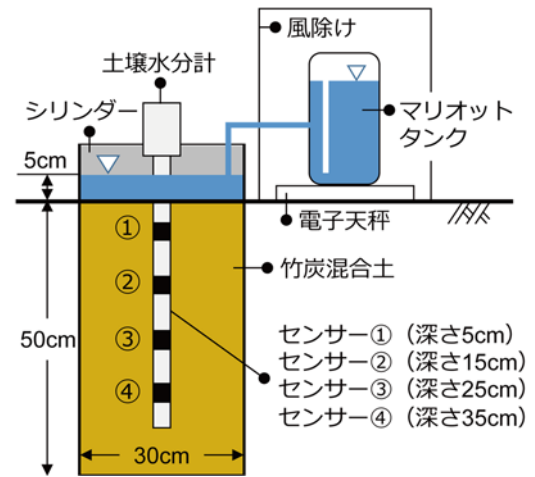


図 1. 実験装置の概要

ール VU 菅, 内径 30cm, 深さ 50cm) を地盤に 4 本埋め込み, それぞれ内部に竹炭の混合率を 4 段階(竹炭無混合と体積比で 10%, 20%, 30%混合したもの)に調整した改良土壌を敷き詰めた。その後, 5kg のタコを 20 回落下させ, シリンダー毎の締め固め度を統一した。次に, オーガーで垂直な孔を空け, 土壌との密着性に留意しながらプロファイル水分計用のアクセスチューブを挿入した。

測定は, シリンダー近傍に電子天秤とマリオットタンクを設置した後, シリンダー内にビニール袋を敷き<sup>6</sup>, 土壌表面から 50mm の水位になるまで水を入れ, 測定開始と同時にビニールを引き抜き, 湿潤を開始した。開始後はマリオットタンクから給水し, 水位を一定(5cm)に保った。アクセスチューブに挿入したプロファイル水分計により, 1 分間隔で出力値(出力電圧)を計測した。今回用いたプロファイル水分計は, Delta-T Devices 社製 PR2/4 プロファイルプローブ(プローブ直径 2.8cm, プローブ長 40cm)である。深さ方向 10cm 間隔に設けられた 4 計測点で, ADR (Amplitude Domain Reflectometry) 法に基づいて土壌水分量を計測する。計測されるのは土壌の誘電率を電圧に変換したものであり, 校正式を用いることで土壌水分量が求まるが, 本研究では後述の通り湿潤前線の進行状況を把握すればよく, 土壌水分量への変換は行わなかった。プロファイル水分計の計測と同時に, マリオットタンクの重量変化を電子天秤で計測した。計測はプロファイル水分計の最深のセンサー(深さ 35cm)の出力電圧上昇が落ち着き, 定常になるまで行った。

## Green-Ampt モデルによる浸透パラメータの推定

改良した土壌の不飽和浸透特性として、本研究では Green Ampt モデルを仮定し、飽和透水係数、および湿潤前線でのサクション水頭を推定した。Green-Ampt モデルでは、鉛直一次元浸透での流速を次式で表現する。

$$v = k \frac{h_0 + Z_f + h_c}{Z_f} \quad (1)$$

ここで、 $v$ ：浸透流速、 $k$ ：飽和透水係数、 $h_0$ ：表面湛水深による水頭、 $Z_f$ ：地表から湿潤前線までの距離、 $h_c$ ：浸潤前線におけるサクション水頭。

(1)式の運動方程式における浸潤流速  $v$  は浸潤前線の進行速度 ( $dZ_f/dt$ ) によって次のように表せる。

$$v = \beta \frac{dZ_f}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $\beta$ ：土壌の有効間隙率。(1)、(2)式より、

$$\frac{\beta}{k} = \frac{1}{Z_f \cdot \frac{dZ_f}{dt}} h_c + \frac{(h_0 + Z_f)}{Z_f \cdot \frac{dZ_f}{dt}} \quad (3)$$

と  $\beta/k - h_c$  の関係式に変形される。ここで、

$$a_i = \frac{1}{Z_{f_i} \cdot \frac{dZ_{f_i}}{dt_i}}, \quad b_i = \frac{(h_0 + Z_{f_i})}{Z_{f_i} \cdot \frac{dZ_{f_i}}{dt_i}} \quad (4)$$

とすると、

$$\frac{\beta}{k} = a_i h_c + b_i \quad (5)$$

となる。つまり、 $a_i$ 、 $b_i$  について最低 2 セットのデータがあれば、 $\beta/k - h_c$  平面に 2 本の直線が引かれ、その交点の座標が対象土壌の  $\beta/k$ 、 $h_c$  として推定される。 $a_i$ 、 $b_i$  を求めるのに必要なパラメータは、 $h_0$ 、 $Z_f$ 、 $dZ_f/dt$  である。

今回の試験は定水位で行ったため、 $h_0$  は定数で 50mm である。また、プロファイル水分計により鉛直方向の 4 点において土壌水分量 (出力電圧) を計測したため、各センサー間の湿潤前線の位置  $Z_f$  (センサー間の中点)、進行速度  $dZ_f/dt$  について実験データが 3 つ得られる。つまり  $\beta/k$  と  $h_c$  の平面上には 3 本の直線とその交点が 3 つあり、今回は 3 交点の平均値を対象土壌の  $\beta/k$ 、 $h_c$  とした。湿潤前線の進行速度は、センサー毎に湿潤前の出力電圧値を 0、飽和状態の値を 1 となるように変換し (相対的な土壌水分量、飽和度と考えられる)、0.9 の値になったときを湿潤前線が到達したと考え、その速度を求めた。この際、計測間隔 1 分のデータをそのまま利用すると、パラメータの推定精度が悪かったため、相対土壌水分量-経過時間のデータを 3 次曲線で近似、補間し、センサー間の湿潤前線の進行時間は秒単位で求めた。

また、室内試験により最小体積含水率  $\theta_r$ 、飽和体積含水率  $\theta_s$  を求めた。本研究では  $\theta_r$  は風乾状態において土壌内に保持される水分量とした。

$$\beta = \theta_s - \theta_r \quad (6)$$

(6)式より、土壌の有効間隙率  $\beta$  を求め、浸透試験で求めた  $\beta/k$  より、飽和透水係数  $k$  を計算した。

## 3. 結果と考察 土壌特性の変化

表 1 に竹炭混合による土壌特性の変化を示す。竹炭混合率が增加すると、最小体積含水率は低下した一方、飽和体積含水率は上昇した。ゆえに有効間隙率が增加する傾向にあった。今回混合した竹炭は粒径 2~4mm の粒炭で、細長い形状をしている (写真 1)。そのため、竹炭と土粒子の間に空隙が生まれやすく、間隙率が大きくなったと考え

表 1. 竹炭混合による土壌特性の変化

竹炭 混合率 (%)	最小 体積含水率 $\theta_r$	飽和 体積含水率 $\theta_s$	有効 間隙率 $\beta$	サクション $h_c$ (mm)	- $\beta/k_s$	飽和 透水係数 $k_s$ (mm/min)
0	0.052	0.223	0.171	88	0.528	0.323
10	0.047	0.247	0.201	235	0.300	0.669
20	0.045	0.243	0.198	113	0.202	0.980
30	0.039	0.285	0.246	60	0.088	2.796

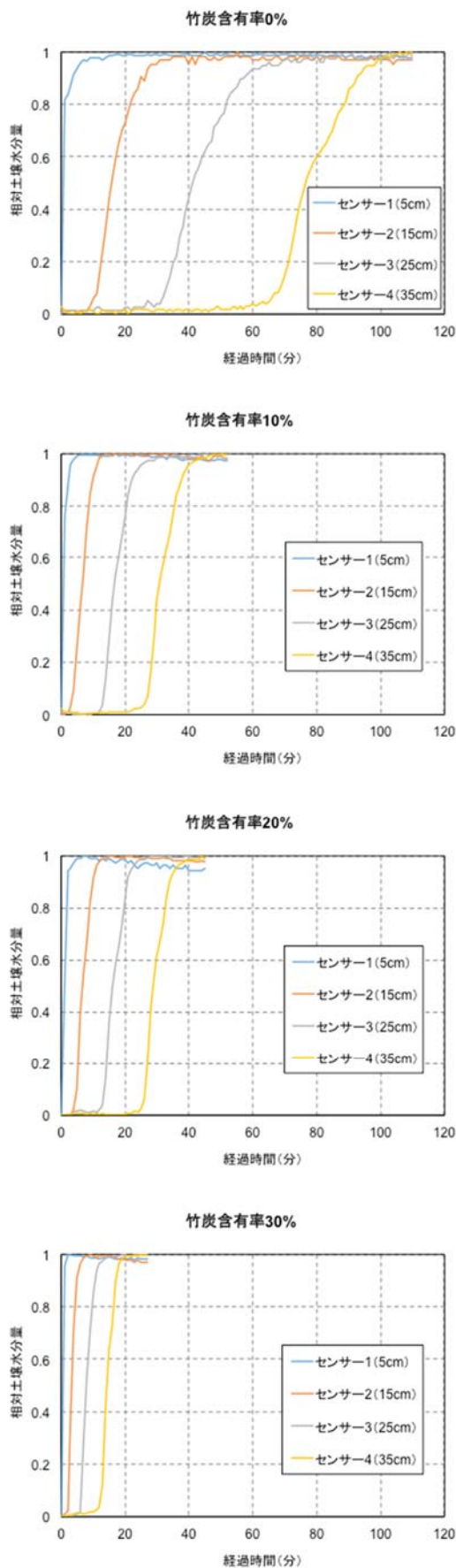


図2. 各竹炭混合条件における浸透状況

られる。また、竹炭は微細な多孔質構造を有し、吸水性が高いと言われている。しかしながら、竹炭が増加しても最小体積含水率は上昇しなかったため、間隙率の増加には、竹炭内部の多孔質構造というより、竹炭と土粒子の間に発生する空隙が主に寄与しているものと考えられる。

### 湿潤前線の進行状況

図2に竹炭の各混合条件における湿潤前線の進行状況を示す。竹炭の混合割合が増加するに連れて、各センサーへの到達時間が短くなった。深さ35cmにあるセンサー4の相対土壌水分量が0.9（本研究における湿潤前線到達の目安）となった時間は、竹炭混合率の低い方から、91分35秒(0%)、36分29秒(10%)、32分55秒(20%)、19分35秒(30%)であった。竹炭を10%混合するだけでも大きく湿潤前線の進行速度が上昇することが分かった。

### $\beta/k - h_c$ の推定

図3は、 $h_0$ ,  $Z_f$ ,  $dZ_f/dt$ に関する各混合条件につき3つの実験データを使って、 $\beta/k - h_c$ 平面上に(5)式の直線を引いたものである。3本の直線の交点が $\beta/k$ と $h_c$ の推定値である(3点の平均が各混合率の代表値)。どの混合条件においても、3つの交点は比較的近い所に集まっており、サクシオンおよび飽和透水係数の深さ方向の変化は少ないと考えられる。

表1に推定した $\beta/k$ , サクシオン $h_c$ , 飽和透水係数 $k$ の値をまとめた。一般的なマサ土の飽和透水係数はおよそ $10^{-2} \sim 10^{-4}$  cm/sec ( $10^{-1} \sim 10^{-2}$  mm/min)で、今回の竹炭無混合のマサ土で推定された透水係数は同程度の値を示し( $10^{-1}$ mm/min), 今回の推定は概ね妥当であると考えられる。竹炭の混合率が高まるにつれて透水係数 $k$ はさらに大きくなった。竹炭が10%増加する毎に透水係数はおよそ2倍になっていった。30%まで混合すると無混合の場合と比較してワンオーダー透水係数が増加した。

竹炭を混合した場合のサクシオンについては、特徴的な挙動を示した。竹炭を混合しない土壌の推定サクシオンは88mmであったが、10%混合すると235mmに高まった。しかし、20%, 30%と



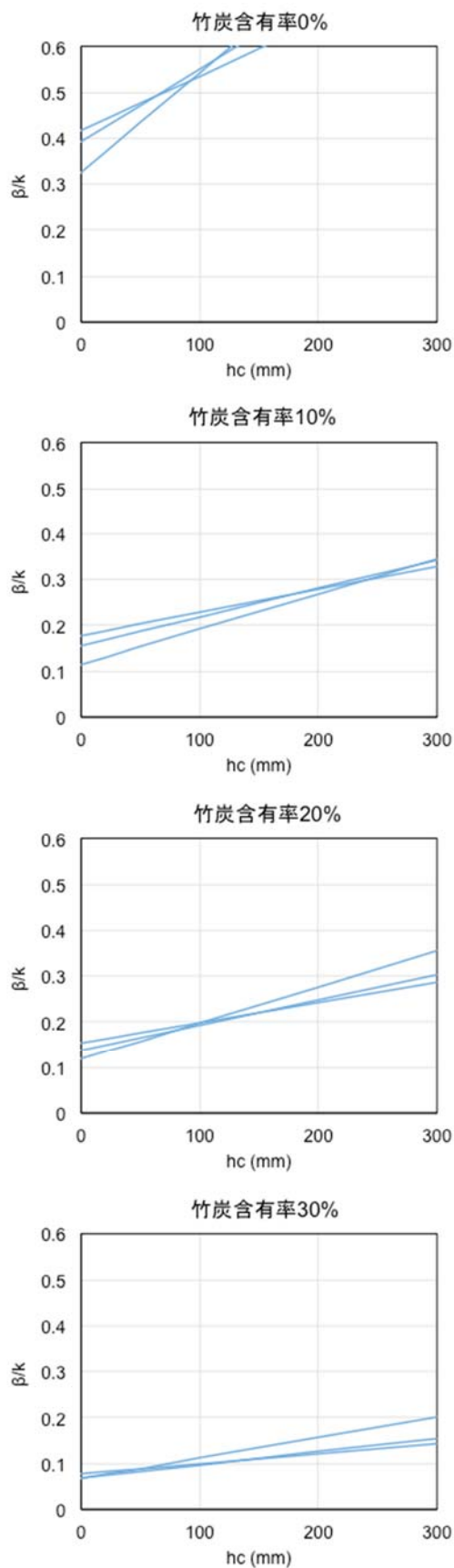


図3.  $\beta/k - h_c$ の推定図  
(3直線の交点の座標が推定値)

混合率が増えるに従い、サクシオンは 113mm, 60mm と減少する傾向が見られた。サクシオンは土壤マトリックスと水との間に働く毛管力に由来するエネルギーであり、含水率に大きく影響することが知られている。また、土粒子間の間隙の形状、つまり土粒子の粒径や粒度分布が関連する。実験前の土壤の含水率は各混合率で大きな差はなく (0.135~0.168)、初期含水率が混合割合を増加させた場合のサクシオン低下に与えた影響は少ないと考えられる。混合割合により、材料の粒度分布等が変化し、10%の混合率で最も毛管力が高まる間隙形状となったことが考えられるが、詳細は今のところ不明である。下記で述べる通り、サクシオンの推定値が過大である可能性があり、推定誤差の範囲でたまたまの傾向を捉えていることも考えられ、今後の課題として、間隙の状態、サクシオンの実測等が必要である。

### 浸透能の時間変化

各混合率について、湿潤前線の進行速度から推定された土壤特性パラメータ (実験で得られた飽和透水係数  $k$ , 有効間隙率  $\beta$ , 初期水分量, サクシオン  $h_c$ ) を用いて、Green-Ampt 理論に基づき地表から土壤への浸透量の時間変化を求めた (図 4)。また、竹炭混合率 30% の場合におけるマリ奥特タンクからの給水量の変化から求めた浸透量の実測値を合わせて示している。浸透量の実測値と Green-Ampt 理論から推定された浸透量の時間変化曲線はよく一致しており、Green-Ampt 理論に基づく本研究の推定は概ね良好であったと考えられる。これはシリンダーにより鉛直 1 次元浸透の仮定が担保されたことが大きいと考えられる。しかし、浸透初期において、実測の浸透量が推定値よりも低い傾向が見られた。浸透初期はサクシオンが浸透能に効いている領域であり、推定されたサクシオンが若干大きいと考えられた。図 5 に浸透量を 1 時間で積算した値を示す。竹炭の混合により地下への浸透量が大きく増加することが分かる。10% の混合でも積算浸透量は 100mm を超え、30% 混合すれば 1 時間に 250mm 以上の浸透が見込める。したがって、竹炭混合土壤の下部に貯留構造を設ければ、近年ゲリラ豪雨として問題となっている 1 時間に 100mm を超える豪雨に対しても表

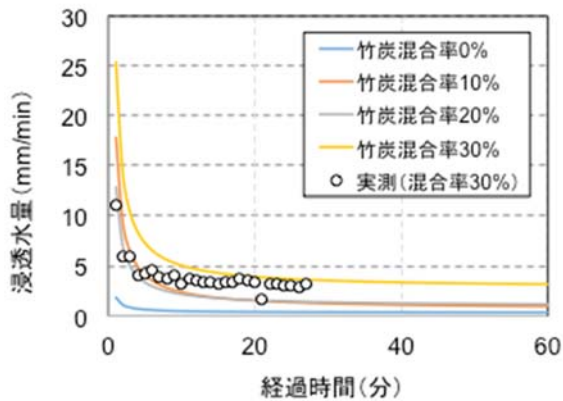


図 4. 浸透量の時間変化

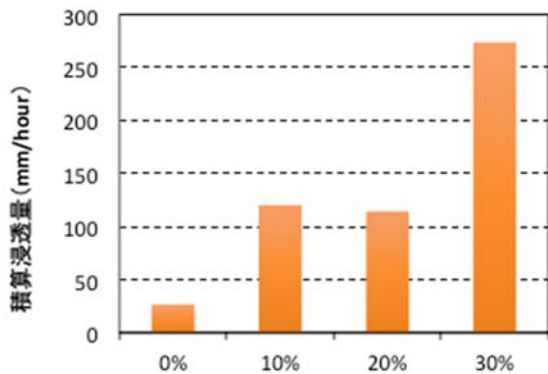


図 5. 各竹炭混合率における浸透量の 1 時間積算値

面流出は抑えることが可能である（中間流出は下部の貯留構造次第）。

#### 4. 結論

本研究では竹炭を混合した得られた知見を以下に示す。

(1) 竹炭を混合すると間隙率が増加し、それは竹炭内部の多孔質構造というより、細長い形状をした竹炭と土粒子の間に発生する空隙が主に寄与しているものと考えられた。

(2) プロファイル水分計により、湿潤前線の進行状況は明瞭に把握でき、竹炭を 10%混合するだけでも大きく湿潤前線の進行速度が増加した。

(3) 竹炭が 10%増加する毎に飽和透水係数はおおよそ 2 倍になっていった。30%まで混合すると無混合の場合と比較してワンオーダー透水係数が増加した。

(4) サクシオンは竹炭を 10%混合すると大きく増加したが、20%、30%と混合率が増加する

と低下する傾向があった。

(5) 浸透量の実測値と Green-Ampt 理論から推定された浸透量の時間変化曲線はよく一致し、得られた飽和透水係数とサクシオンについては概ね妥当な結果であると考えられるが、サクシオンは若干過大である可能性があった。

(6) 竹炭を 10%混合した場合でも 1 時間積算浸透量は 100mm を超え、30%混合すれば 1 時間に 250mm 以上の浸透が見込め、近年問題となっている時間 100mm を超えるゲリラ豪雨にも下部の貯留構造を適切に設置すれば対応可能である可能性が示唆された。

(7) サクシオンの実測による脱水過程のヒステリシスも含んだ土壌水分曲線の作成（より正確な不飽和浸透特性の把握）、グラウンドに適用する場合の支持力の評価、締固めの影響、コストおよび環境影響評価（pH）等が課題である。

#### 5. 謝辞

本研究を進めるにあたって、日本環境計測株式会社の片山博之氏にはプロファイル水分計の計測に当たってアドバイス頂いた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1): 手計太一, 渡辺亮一, 山崎惟義, 乾真寛, 新型人工芝グラウンドの水文気象環境に関する基礎的研究, 土木学会水工学論文集, 第 52 巻, 2008
- 2): 重松宏明, 小田憲一, 樋口恵美子, 高野典礼, 田崎宏, 貝殻混合によるグラウンド表層材の土質改良効果, 土木学会論文 C (地圏工学), 第 68 巻, No. 1, pp138-149, 2012
- 3): 森田洋, 北九州における竹質系バイオマス利活用の取り組み, 生物工学会誌, 89 号, pp210, 2011
- 4): 唐木田芳文, 富田宰臣, 下山正一, 千々和一: 福岡地域の地質, 通商産業省工業地質院地質調査所, 1994
- 5): 土壌物理性測定法委員会編, 土壌物理性測定法, pp168-190, 養賢堂, 1972
- 6): 東條安匡, 田中信寿, 松藤敏彦, 松尾孝之, 埋立廃棄物層の浸透能の現位置測定, 環境工学研究論文集, 第 35 巻, pp11-19, 1998