

団粒化した土の物性と舗装技術への適用

杉井俊夫, 山田公夫, 方 方*, 馬 貴臣**

Application of Aggregated Soils to Pavement Technique

Toshio SUGII, Kimio YMADA, Fang Fang* and Ma Guichen**

Abstract: Nowadays, an interior water inundation is increasing due to a localized torrential downpour. Because the localized torrential downpour increases the load of the rain water inflow into a river, it is important to reduce the amount of surface flow of the ground. Although sand which has a high permeability can make the rainfall permeate into the ground and can decrease a surface flow during a heavy rainfall, it is lacking in a water retentivity. But it is hard for soil which has high retentivity to make the rainfall permeate into the ground because of the low permeability and the occurrence of clogging. High retentive soil is generally a low permeability; however, aggregated material can have high permeability keeping high water retentivity. This paper first presents evaluations of properties of an aggregated soil from point of a particle and a pore size distribution and evaporation rate. Moreover, this aggregated structure was applied to a permeable pavement in order to improve permeability and water retentivity of base course. As a result, it was clarified that permeability and water retentivity are higher than the subgrade of single-grained structure at the time of non-rain and rain.

Keywords : *Unsaturated hydraulic properties, Aggregated soil materials, Permeable pavement*

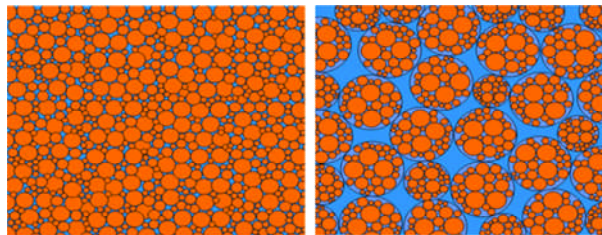
1. はじめに

近年の異常な猛暑や頻発するゲリラ豪雨といった自然災害はいずれも地球温暖化に起因するといわれている。都市化による緑地の減少や浸透能の低下など、我々がそうした条件を自ら作り出していることが懸念されている。これらの問題に対して地盤工学の分野として貢献できる一つとして団粒化による地盤改良の技術がある。土を団粒構造に改良することで、透水特性（保水性、透水性）を向上させることに着目した技術である。土は主に土粒子で形成されているが、複数の土粒子がグルーピングされ、大きな隙間と小さな隙間の構造に変化させることができる。これにより、水の通り易さである透水性が向上する。また、これまで透水性が高い土は、保水性に劣ることが一般的であったが、団粒化によって小さな隙間に保水することで保水性も高くすることができる。さらには、細かい粒子を団粒化することは、水中でも飛散・流出することが少なく、目詰まりも起こしにくい性質に変えることができる。本研究は、そうした団粒化された土の物性変化を調べるとともに、透水性舗装の路盤材料に団粒化技術の適用を試み、現地観測を行った。

* 大学院学生 ** 応用地質株式会社中部支社

2. 単粒構造と団粒構造

自然堆積した土や発生した土は、図1の(a)のように単粒構造を有している。ここに、僅かな水分を含むとサクション（土の吸引圧）の発生により、団粒構造となるが、水分の増加に伴い単粒構造に戻る。本研究では、比較的安定な団粒構造を作り出すために、高分子ポリマーを添加することにより、細かい粒子がまとめられ粒子群を形成させることができる。これにより、図1の(b)のように大きな間隙（マクロポア）を形成しつつ、細かな間隙（マイクロポア）を再構成することができる。



(a) 単粒構造 (b) 団粒構造

図1 単粒構造と団粒構造

3. 団粒化された土の物性

3.1. 団粒構造とその評価法

「土の団粒構造は大きさ、形状の異なる土粒子（一次粒子および二次粒子）が各種の結合状態と配列状態にて組み立てられた立体的構造である」と喜田¹⁾は定義している。土の構造は、①構成土粒子（一次粒子、二次粒子あるいは団粒）、②土粒子間の結合状態に規定される構造の安定性、③土粒子の配列状態に規定される構造の孔隙（間隙）性の3つの要素からなっている。本研究は、特に①構成土粒子と③の孔隙性について評価することとした。

3.2. 団粒化による粒度分布

団粒材料の粒度分布の評価には、(1)乾式団粒分析（砕塊の粒度分布を測定する）と(2)湿式団粒分析（耐水性団粒に適用）に大きく分かれる。本研究では、湿式団粒分析として粒度試験を行った。一般に、0.1mm以上の試料については、水中フルイを用いた Yoder²⁾の方法などがあるが、本研究で扱う試料は0.1mm以下の細粒分を含むため、土の粒度試験（JIS A 1204）の沈降分析を基本に行った。

用いた試料は、実務で利用されている2mm以下のまさ土を用いた。JIS A 1204の沈降分析では、ヘキサメタリン酸ナトリウムといった分散剤を入れて団粒構造をほぐす工程を含むため、団粒化剤としての高分子ポリマーの作用を低減させるおそれがあるので、分散剤を使用していないケースでも実験を行った。その結果を図2.1~2.3に示す。

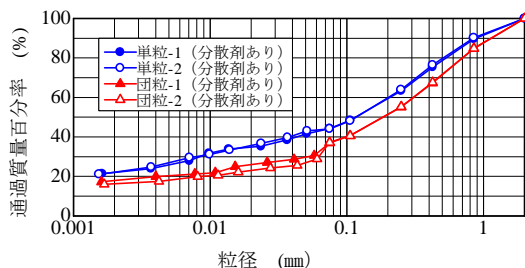


図2.1 分散剤を用いた場合の粒度分布

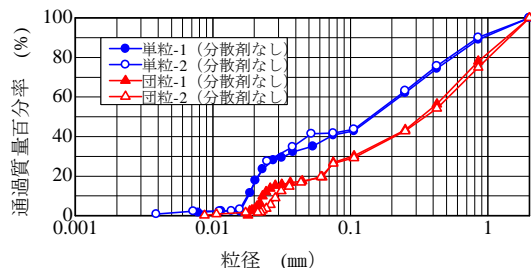


図2.2 分散剤を用いない場合の粒度分布

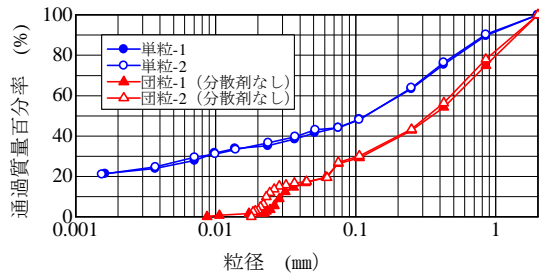


図 2.3 単粒（分散剤添加）、団粒（分散剤なし）の粒度分布

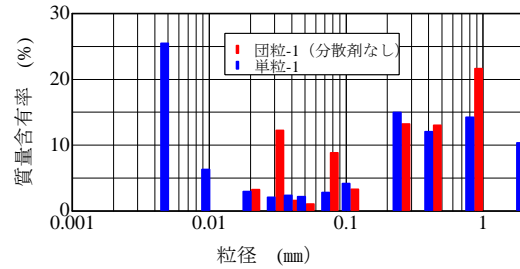


図 3 粒径の違いの含有率

図 2.1 および図 2.2 から団粒化した場合の場合、粒径加積曲線は左にシフトしており、粒径が全体的に大きくなっていることが評価できる。Van Bavel の「平均重量直径 (Mean Weight-diameter, MWD)」¹⁾ や通過質量 10% の有効径などを表 1 にまとめる。粒径では個々の粒径で倍ほど団粒化により大きくなっているが粒径範囲素す均等係数は 1/6 と団粒化することで粒径範囲が狭くなることがわかる。

また、どの大きさの粒径が団粒化するかを見るために、団粒化前と後の粒径の含有率の分布を図 3 に示した。これより、団粒化することで 0.01 mm 以下の粒子（特にシルト分以下）は団粒化により他の粒子と結合してしまうことがわかった。

表 1 団粒化による各種粒径の変化

	MWD, D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (有効径) (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	均等係数	曲率係数
単粒試料土*1	0.13	—	0.085	0.2	133 以上	24 以上
団粒化した試料土*2	0.35	0.025	0.12	0.5	20	1.15

*1: JIS A 1215 の分散剤を添加して計測, *2: 分散剤を使用しない場合での計測

3.3. 団粒化された土の間隙径分布

間隙径分布の計測法には、水銀圧入法などがあるが、計測装置が高価であることや水銀を扱うこと、大きな間隙の測定精度の問題があるため、水分保持曲線から毛管径を利用した間隙径分布の推定を行うこととした。そのため、水分保持曲線を求める土の保水性試験を実施した。

3.3.1. 団粒構造を有する水分保持曲線とモデル化

土の保水性試験(JGS 0151)の水頭法、加圧法及びサイクロメータ法で計測した。保水性試験は表 2 に示す試料を用いて、山砂のみ(単粒構造), 団粒構造を安定させるために混入したセメント固化剤 60kg/m³ 混合と 100kg/m³ 混合(団粒構造)の 3 種類とした。

また、保水性試験の結果である負の圧力水頭の実験データは離散的データであるために、間隙径分布を求める際に、データ間隔の違いにより結果が異なってくる。すなわち、離散的データを補完する水分保持曲線モデルが必要となる。しかし、団粒構造を有する土の水分保持曲線は通常の単粒構造の土のカーブと異なり、複数の階段状になることが得られている³⁾。本研究では、一般的に用いられている van Genuchten model⁴⁾を改良して、団粒構造を有する水分保持曲線モデルを次式のように作成した⁵⁾。

$$Sr = \frac{100 - Sr_1}{\left(1 + \alpha_2 |h_p|^{n_2}\right)^{-1/n_2}} + \frac{Sr_1 - Sr_0}{\left(1 + \alpha_1 |h_p|^{n_1}\right)^{-1/n_1}} - Sr_1 + Sr_0 \quad (1)$$

ここに、 Sr : 飽和度, Sr_1 : ミクロポアによる最大飽和度, Sr_0 : 残留飽和度, α_1, n_1 : ミクロポアによる van Genuchten model のパラメーター, α_2, n_2 : マクロポアによる van Genuchten model のパラメータ

一である。

推定した補完モデルの結果と実験値を図4に示した。図より、今回提案した団粒構造を有する土の水分保持特性曲線をうまく表現することができることがわかる。

表 2 試料の諸量

	山砂のみ	セメント混 含量 60kg/m ³	セメント混 合 量 100kg/m ³
構造	単粒構造	団粒構造	団粒構造
間隙率 n	0.495	0.470	0.468
飽和透水 係数(cm/s)	1.08E-3	1.54E-3	3.73E-4

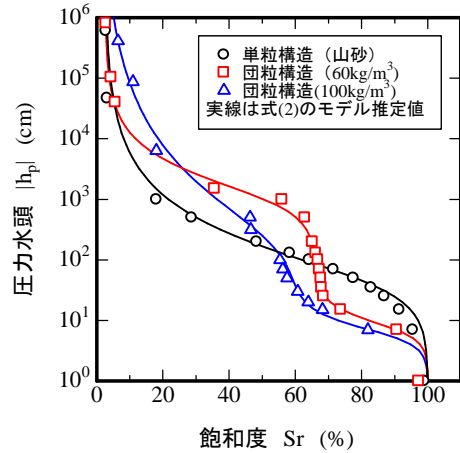


図 4 単粒・団粒構造の水分保持曲線

3.3.2. 水分保持曲線から間隙径分布の算定⁶⁾

間隙径を一つの毛管径 d_m と考えると毛管に発生する負圧 h_p との関係は、次式のようにになる。

$$d_m = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_p} \cdot 10 \tag{2}$$

ここに、 σ : 水の表面張力 (水温 15°C で 73.48(g·cm/s²)), ρ_w : 水の密度, g : 重力加速度である。

また、間隙径 d_m 以下に相当する累積間隙体積率 V_r は飽和度 S_r に等しいと考えることができることから間隙径分布を得ることができる。

3つの水分保持曲線のモデル式(1)と式(2)から累積間隙径分布を求めた。また、等間隔ごとの累積間隙体積率の差から間隙径体積率の分布を算出し、合わせて図5.1, 5.2に示した。

図5.1の単粒構造の場合には間隙径0.03mm程度にピークが一つだけあるのに対して図5.2の団粒構造の場合には2つの間隙径に分かれており、セメント混合量 100kg/m³の団粒化した場合も同様の結果を得ている。図5.2から大きな間隙(マクロポア)は0.24mm程度, 小さな間隙(ミクロポア)は2-5 μ m程度でピークが得られており, 団粒化した供試体の方が間隙径の範囲が集中していることがわかる。

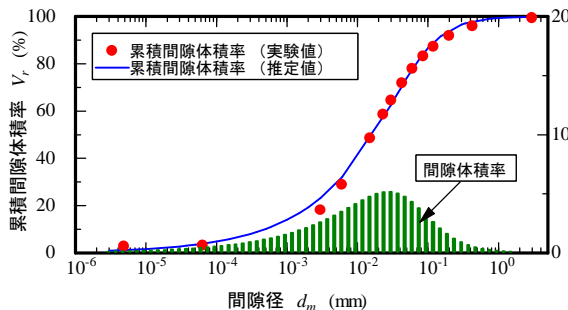


図 5.1 単粒構造土の間隙径分布

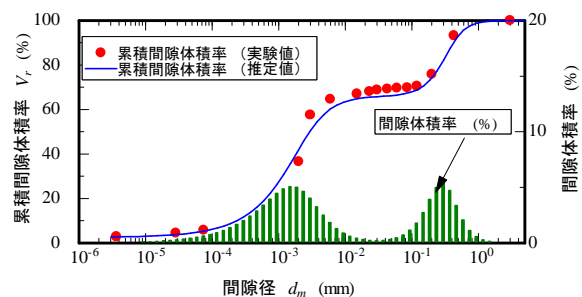


図 5.2 団粒構造土の間隙径分布

3.3.3. 蒸発と表面温度

実際地盤に降られた雨水が地下水を涵養している状況であることに仮定し, 晴天時の土中水の蒸発状

況を把握するために、蒸発試験を実施した。

まさ土をそのまま締め固めた単粒構造試料、および団粒化剤で団粒構造に改良させた試料をポリ容器に入れ、締め固めて、厚さ約 10cm、表面積約 700 cm² の供試体を作成した。上から散水し、十分に飽和させた後、約 5 時間実験室内で自然排水させ、安定させた。図 6 に示すように、供試体の中の 2.5 cm と 7.5 cm に温度センサー（赤）を 2 本と水分センサー（青）を 4 つそれぞれセットした。晴天時の環境を再現するために、室温 30℃ に設定したうえ、さらにヒートランプウオーマーを用いて 6 時間以上照射しながら、計測を行った。また、供試体表面温度をサーモグラフィのカメラで計測した。

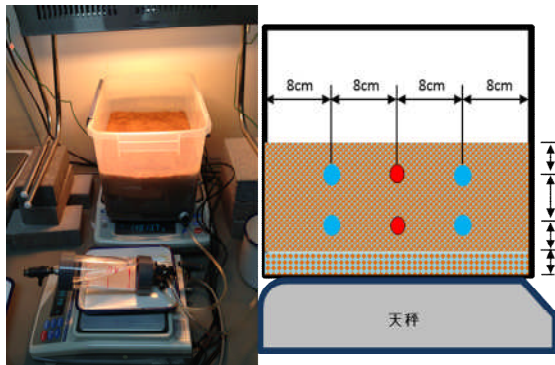


図 6 給水あり照射蒸発

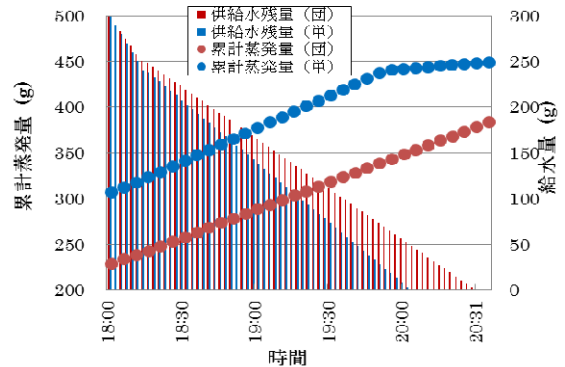


図 7 給水量と蒸発量

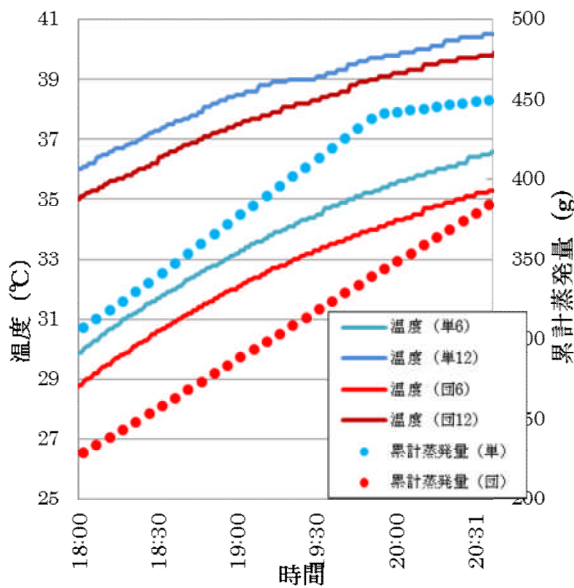


図 8 蒸発温度と水分量

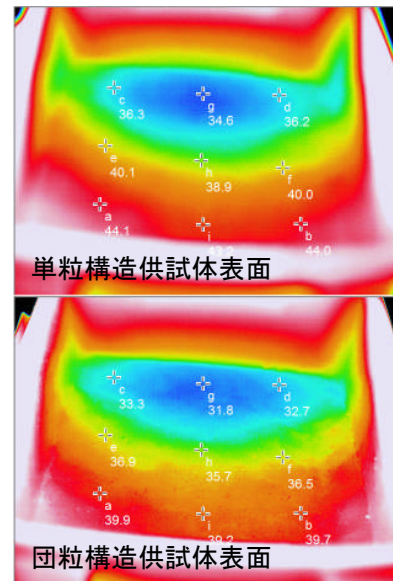


図 9 サーモカメラによる表面温度計測

図 7 に示しているように、団粒構造の供試体の累計蒸発量は単粒構造のそれに終始下回っており、給水も単粒構造より長く続いたことがわかった。それは団粒構造供試体にあるマイクロポア（相対的に小さな間隙）が土中水の蒸発速度を抑制したと考えられる。また、給水終了後、単粒構造供試体の土中水の蒸発速度が低下したことは、供給水が無くなり供試体内部からの蒸発に切り替わったためである。対して、団粒構造の方も 30 分遅れて供給水が無くなったが、同じ速度で蒸発し続けた。マイクロポアに保水された水が蒸発しにくいと考えられる。一方、単粒構造の場合は表面乾燥により、表面で亀裂を誘発したことも蒸発量の速度に影響したものと考えられた。

温度と累計蒸発量の関係は図 8 に示しているように、供試体表面から深さ約 2.5 cm と 7.5 cm の位置において、団粒構造供試体の土中温度は単粒構造より上下いずれも約 2℃ 低いことが分かった。また、団粒構造供試体の上下層の温度差は、土中水が連続的蒸発していることの影響で、ほぼ 5℃ のまま継続していたが、単粒構造のほうでは、温度差が徐々に縮小し、計測終了時までわずか 2℃ ほどの差しか残ってなかった。

サーモカメラを用いて、供試体表面の温度を測定した。図 9 に示しているように団粒構造供試体の表面温度は単粒構造のより 3℃ ほど低いことがわかる。また、照射蒸発試験から、団粒構造を有する供試体は、土中水の蒸発量も蒸発速度も、長期的に温度抑制する能力において、単粒構造に優れていることが考えられる。

4. 透水性舗装における路盤材料への適用

4.1. 透水性舗装の施工および現地観測の概要

舗装とは、一般に現地の地盤の路床面から上を指し、表層（交通荷重の分散、すべり抵抗などの役割）、基層（不陸を補正して路盤荷重を伝える層）、路盤（路床の上設置された碎石等の粒状材料を使用）からなる。現在ある「透水性舗装」および「排水性舗装」は、それぞれ異なり、前者は、雨水を基層を浸透させる水の透過を目的としたもので、後者は表層から入った雨水を不透水層とした基層上で排水するものである。本研究は、前者の「透水性舗装」の効果をより高めるとともに、保水性をも期待できるように路盤を団粒化させることを試みた。大学内に施工された図 10 のように表層のアスファルト舗装を透水性アスファルト舗装を用い、その下を路盤として通常の単粒構造及び団粒構造の 2 面を施工した。それぞれの水分センサー及び内部の吸引圧（負の圧力水頭またはサクション）を計測するテンシオメータを設置、降水量および気温を約 4 か月間計測した。なお、ロガーの故障のため欠測期間の 6 月 25 日～7 月 11 日については気象庁の名古屋観測データ⁷⁾を用いた。

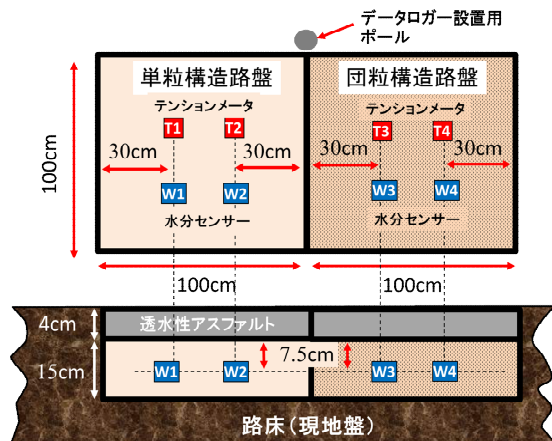


図 10 団粒化路盤試験のセンサー埋設箇所



写真 1 現場写真

4.2. 観測結果

図 11 の降雨量は時間軸でかなり圧縮しているが、時間雨量を表している（拡大図参照）。降雨のイベントにより気温がすぐに低下していることも確認できる。図 12 は、降雨と路盤内設置されたテンシオメータによる圧力水頭を示している。この圧力水頭は土粒子によるメニスカス等による吸引圧を示しており、晴天時であれば水分量が低くなるため、圧力水頭の絶対値 $|h_p|$ が大きくなる（大きな負の水圧が発生する）。こうした観点から図 12 を見ると、無降雨時が長くなると徐々に乾燥して $|h_p|$ が高くなり、

降雨のイベント後、急激に低下していることが説明できる。また、浸透エネルギーの動水勾配（エネルギー勾配）はこの圧力水頭の絶対値 $|h_p|$ に比例することから、改良路盤に浸透する吸引力も高いことが推察できる。図 13 には、降雨量と路盤内の水分量の変化を示す。路盤に雨水が浸透することで水分量が増加するが、降雨が止むと未改良路盤の方が、水分量の減少速度が速い傾向を示している。未改良路盤では路床への排水が高い、または表層からの気化が非常に速いことが、逆に、改良地盤では雨水をゆっくり排水、気化していくことが考えられる。

さらに図 12 と図 13 を比較すると次のようなことがわかる。降雨のイベントがあるとき（10-50 日や 70-90 日、105-120 日など）、圧力水頭 $|h_p|$ の変化は両路盤内とも差も変化もないが、水分量（体積含水率）では、改良路盤の方がゆっくり減少するため、水分量を高いまま保持している。浸透エネルギーとなる圧力水頭 $|h_p|$ が同じであれば、透水性は水分量に依存する透水係数に比例し、水分量の多い改良路盤の方が透水係数が大きく、結果的に透水性が高いといえる。また、降雨のイベントがない時（50-70 日や 80-95 日など）は、改良地盤の方が圧力水頭 $|h_p|$ は増加して浸透エネルギーとなる動水勾配が大きく、やはり雨水の浸透力を高めることがいえる。

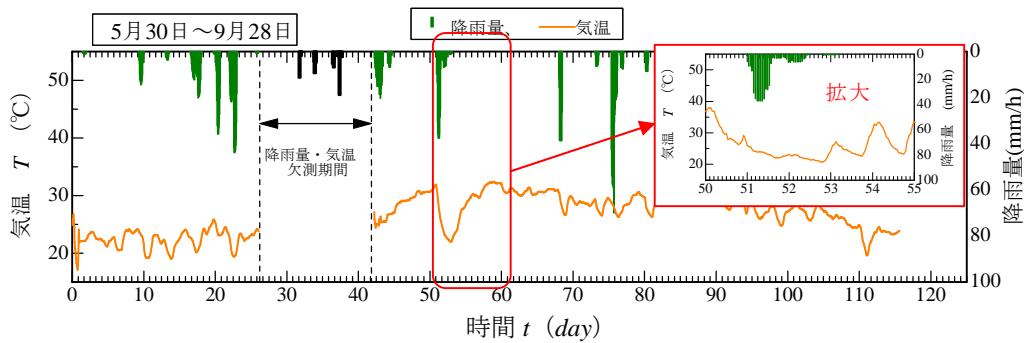


図 11 降雨量と気温

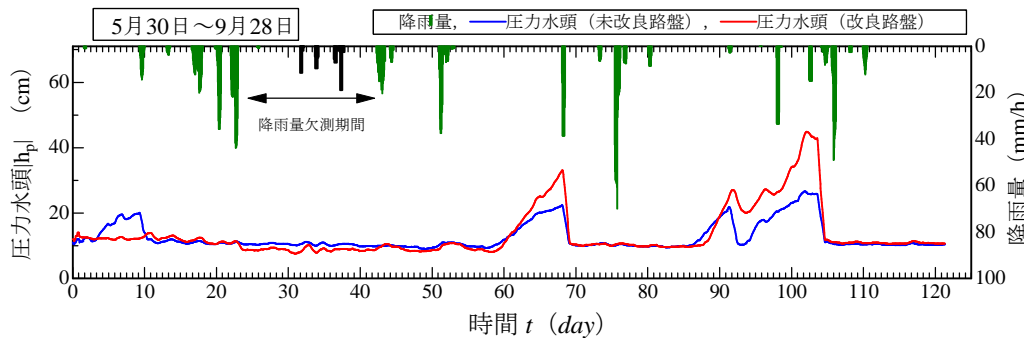


図 12 路盤内の圧力水頭と降雨量

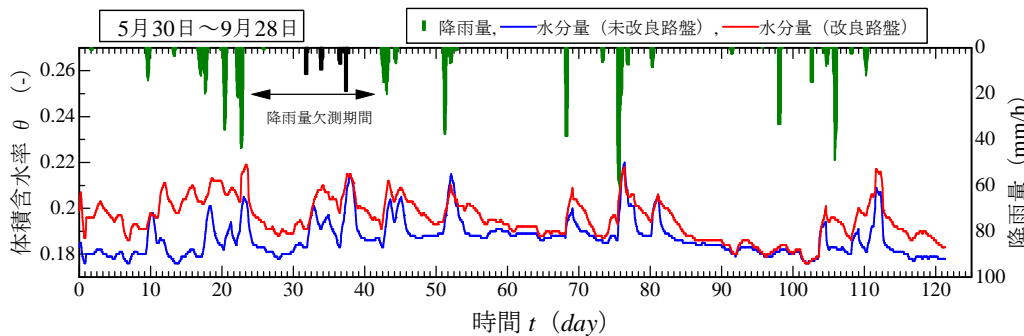


図 13 降雨量と水分量（体積含水率）

5. おわりに

本研究では、団粒化した土の物性評価を行うとともに、その性質を生かして透水性路盤を団粒化させ、観測結果をもとに考察を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 団粒化により、平均重量直径は約 2 倍に大きくなること、また団粒化によりシルト分以下の粒子（約 0.01 mm 以下）は団粒塊として凝集され、粒度分布として計測されなくなる。このことから団粒化した土の浸透水は濁りが無くなる。
- 2) 団粒化した土の水分保持曲線として van Genuchten モデルを改良したモデルを構築することができ、実験値で得られた水分保持曲線をよい精度で表現できることがわかった。
- 3) 提案した団粒構造を有する土の水分保持曲線を使って団粒構造土の間隙径分布を評価することができ、まさ土の単粒構造の場合には間隙径が 0.01-0.1mm を平均に分布するが、団粒化すると 0.24mm と 2-5 μ m 程度を中心とした 2 つの間隙径分布に分かれ、それぞれ透水性、保水性に寄与しているものと考えられた。
- 4) 蒸発試験の結果から、団粒化した土の方が蒸発速度はゆっくりであること、また表面温度が単粒構造の土よりも 3 度ほど低く、表面の亀裂が発生しにくくなり、マイクロポアの水が排水されるために時間が掛かり、蒸発速度および亀裂発生を抑止に影響したものと考えられる。
- 5) 透水性舗装の路盤材料を団粒化することを試み、現場での観測を行った結果、降雨時及び無降雨時において団粒化によって改良した路盤の方が透水性は高いことがいえ、さらに無降雨時に水分を維持している期間が長いため、舗装上面の温度の抑制にも効果が高いことが得られた。

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所 平成 23 年度～24 年度の第 6 部門および科学研究費基盤 B の援助を受け遂行された。舗装の施工にあたっては、株式会社シーマコンサルタントの鹿田昌史氏、東出建設株式会社の東出博之氏のご協力を得ました。また、現地観測データの収集において本研究室 4 年生の伊藤友成君の協力をえました。関係各位に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 喜田大三：土壤構造と湿式粒団分析法，土壤の物理性，2 号，28-33(1960)
- 2) Yoder, R.E. : J. Am. Soc. Agron. Vol. 28, 337(1936)
- 3) Jun Liu and Yu Amemiya : The estimation of Soil Water Retentivity for Soil and Aggregate-Like Soil “Akadama” Mixture, Environ. Control in Biol., 37(1), 21-30(1999)
- 4) van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Am. J., Vol. 44, 892-878(1980)
- 5) 杉井俊夫・方方・鶴留修治：団粒化構造による透水性保水型土系舗装の評価，平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会講演集，241-242(2010)
- 6) 神谷浩二：「空気圧入法」による砂質土の間隙径分布の計測，土木学会論文集．III, Vol. 541, No.35, 189-198(1996)
- 7) 気象庁ホームページ：過去の気象データ検索 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)