

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月30日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360189

研究課題名（和文）団粒化による土の浸透特性を制御した減災・環境対策技術の開発

研究課題名（英文）Development of the disaster reduction and the environmental countermeasure using aggregated soils

研究代表者

杉井 俊夫（SUGII TOSHIO）

中部大学・工学部・教授

研究者番号：90196709

研究成果の概要（和文）：

本研究は、都市の洪水やヒートアイランド対策技術の開発を目的に、土を団粒構造に改良してマクロポア及びミクロポア構造を作り出すことで透水特性（保水性、透水性）を向上させる技術の適用を勘案し、観測および解析的研究を遂行した。その結果、団粒構造を有する土の浸透特性の新たな評価と特性、雨水貯留タンクや透水性舗装の路盤材への適用性、また、交通シミュレーションへの適用といったリアルタイムの浸水予測を行うという数値解析モデルの新たな活用が提示を行った。

研究成果の概要（英文）：

High water retentive soil has 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 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 base course of single-grained structure at the time of non-rain and rain.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	11,300,000	3,390,000	14,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：団粒化，透水性，保水性，透水性路盤，防災，環境

## 1. 研究開始当初の背景

ゲリラ豪雨や巨大地震の発生で我々の生活を脅かす危険度が増し、被害の程度も期間も拡大、長期化してきている。どんどん都市化が進むにつれ、地域の浸透能が低下し、河川への雨水の流入が速く、河川の負荷が大きくなるとともに、排水溝などもすぐに溢れてしまい、東海豪雨などでも名古屋市を始めと

する市街地では内水災害が多く発生した。豪雨の頻度が増加しても現状ではインフラの整備は追いつかず、新たな対応が必要とされている現状にある。

また、自然災害による被災時には2次的被害として水問題がある。2009年山口県防府の豪雨災害では浄水場が浸水して断水となり、住民への給水が必要になった。また兵庫

県南部地震を始めとして災害発生時のトイレの水や防火用の水不足が問題になったことは誰にも記憶されている。現在、各地の都市化に伴い台地を切り開き住宅団地が造成されており、どこでもそうした被災時の水不足は起こりうる問題でもあり、対策を考えていくことが求められている。

## 2. 研究の目的

透水性の高い土は保水力（保水性）が低く、保水力の高い土は透水性が低いと両者は相反する性質と考えられていた。しかし、高分子ポリマーを導入することで団粒化された地盤材料は、透水性も保水性も高い特性を有する技術が開発された。本研究では、これらの技術を利用することによって地盤の不飽和浸透特性を制御することにヒントを得て、地盤への浸透水の促進（浸透能の改善と貯水効果）と抑制（斜面における降雨の遮水）の制御と評価を目的としている。変わりつつあるインフラ整備の考え方の中で、これからの時代に求められる新たな自然災害リスクの減災と環境悪化対策技術を地盤工学の分野から提案するとともに水工学の分野からその効果を評価していくことを狙っている。

## 3. 研究の方法

### (1) 団粒構造の物性評価：

単粒構造と団粒構造の違いを間隙径分布から評価を行うとともに、粒径分布、透水性、保水性、蒸発速度などについて実験を行い物性の評価を行っている。

### (2) 雨水貯留システムへの適用：

学内に雨水貯留タンクを設置し、表層土を団粒構造化することによる蒸発、貯留量、雨水の流出量、水質について観測値と数値シミュレーションによる検討を行っている。

### (3) 透水性舗装における路盤材料への適用：

従来の透水性舗装の機能性をアップすることを目的に、路盤材料を団粒化させることで透水性・保水性の向上について調べた。

### (4) 簡易なりアルタイムの浸水予測：

合流式下水道が整備されている名古屋市では、降雨時における汚水の直接流出が低下するために、河川的环境保全機能が期待され、内水氾濫予測システムの開発と浸水時の交通シミュレーションを試みている。

## 4. 研究成果

### (1) 単粒構造と団粒構造の物性

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オン（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(b)のように大きな間隙（マクロポア）形成しつつ、細かい間隙（ミクロポア）を再構成することができる。

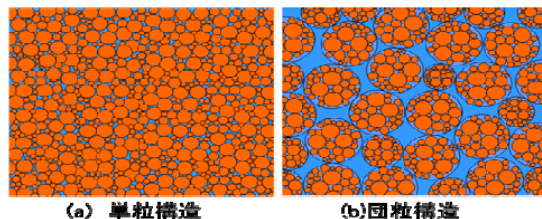


図1 単粒構造と団粒構造

### ① 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（碎塊に適用）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Yoder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い、結果を以下に示す。

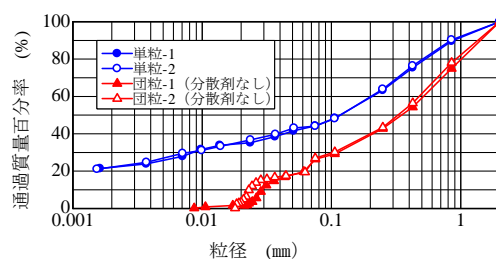


図2 単粒、団粒の粒度分布

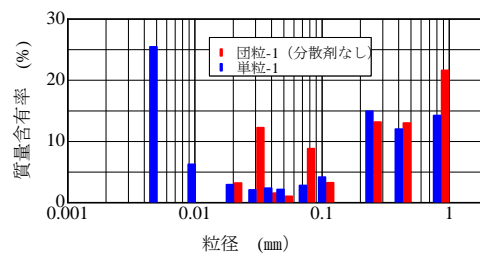


図3 粒径の違いの含有率

団粒化した場合、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。団粒化により、個々の粒径で倍ほど大きくなっているが粒径範囲を示す均等係数 ( $U_c = 133 \rightarrow 22$ ) は  $1/6$  と粒径範囲が狭くなることが得られた。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0.01mm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。

### ② 団粒化された土の間隙径分布

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/m<sup>3</sup> 混合と 100kg/m<sup>3</sup> 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。本研究では、一般的に用いられている van Genuchten model 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。

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

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， $\alpha_1$ ， $n_1$ ：ミクロポアによる van Genuchten model のパラメータ， $\alpha_2$ ， $n_2$ ：マクロポアによる van Genuchten model のパラメータである。

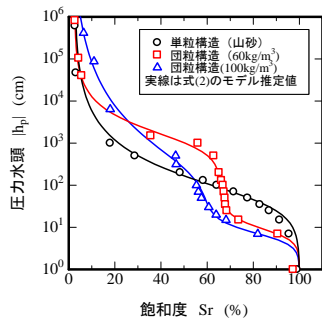


図4 単粒・団粒構造の水分保持曲線

間隙径を毛管径  $d_m$  とすると毛管に発生する負の間隙水圧  $h_p$  との関係は、次式になる。

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

ここに、 $\sigma$ ：水の表面張力（水温 15°C で 73.48 (g·cm/s<sup>2</sup>)),  $\rho_w$ ：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（図 5(a), (b)）を得ることができる。図 5(a) 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(b) 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/m<sup>3</sup> の団粒化した場合も同様の結果を得ている。図 5(b) からマクロポアは 0.24mm 程度、ミクロポアは 2-5 μm 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。

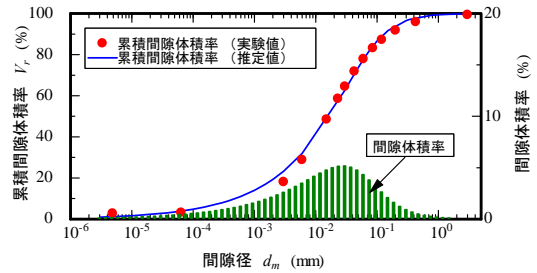


図 5(a) 単粒構造土の間隙径分布

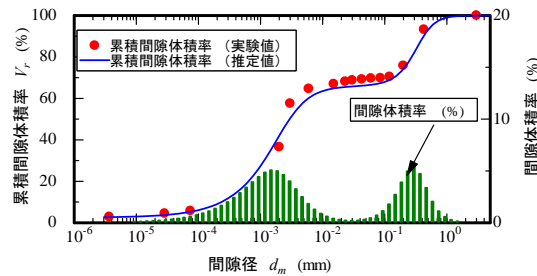


図 5(b) 団粒構造土の間隙径分布

### ③蒸発と表面温度

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、締固めて、厚さ約 10cm、表面積約 700 cm<sup>2</sup> 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つ、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°C 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のカメラで計測した。

図 7 の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。団粒構造にあるミクロポアが土中水の蒸発速度を抑制したと考えられる。ミ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、表面で亀裂を確認しており、蒸発量の速度に影響したものと考えられた。

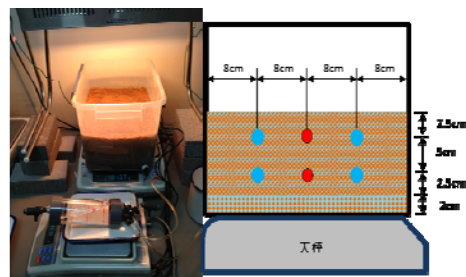


図 6 給水あり照射蒸発

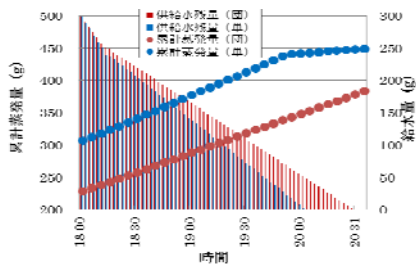


図7 給水量と蒸発量

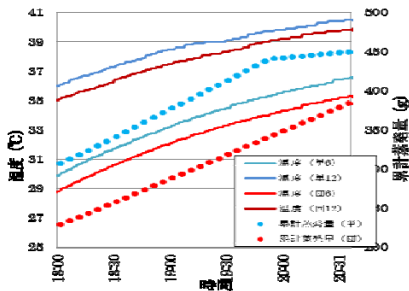


図8 蒸発温度、水分量

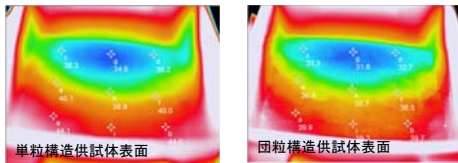


図9 サーモカメラによる表面温度計測結果

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2.5cmと7.5cmの位置において、団粒構造の土中温度は単粒構造より上下いずれも約2°C低いことが分かった。サーモカメラを用いて、供試体表面の温度を測定した結果、図9のように団粒構造供試体の表面温度は単粒構造のより3°Cほど低い。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。

(2) 雨水貯留システムへの適用

① 雨水貯留タンクと観測値

貯留タンクの断面図を図10に、図11は9月19日から21日の水位と降雨量の変化を、図12は水位上昇と累積降雨の差と累積降雨

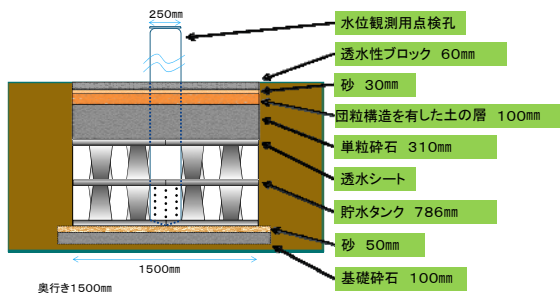


図10 雨水貯留タンク

を比較したグラフである。貯水深と累積雨量の関係は、約7割弱で与えられる。

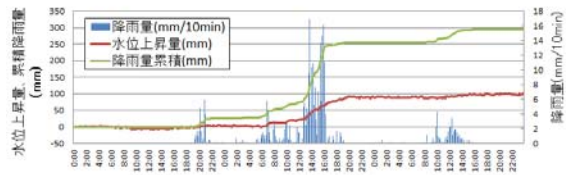


図11 台風15号接近時(9月19日~21日)

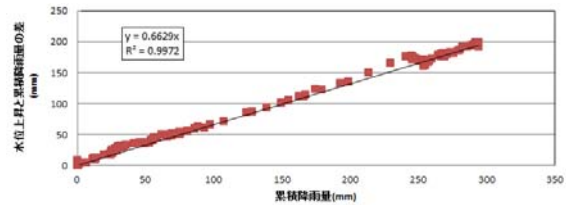


図12 累積雨量と水位上昇量の差との関係

② 降雨パターンの影響

貯留水の水位への降雨パターンの影響について調べるため、不飽和浸透解析によるシミュレーションを行った。図13は解析上で再現したタンク上部の断面図で解析上の境界条件を示す。



図13 解析上表現したタンク上部

流出量(解析値)と水位上昇量(実測値)から、逆解析的に透水性に対する浸透パラメータを推定し、降雨パターンの影響を検討するため、過去の降雨について貯水深の変化についてシミュレーションを行った(図14, 15)。雨水貯留タンクの観測解析から、1)降雨強度で約10mm/h以上で貯水タンクに水が流入すること、2)短期に集中する降雨は、分散した降雨よりも貯水深を上げる効果が少ないこと、3)最も降雨の貯水率が低い集中豪雨型でも概ね3割から4割貯水できること、4)タンク内の水質についても基準を満足していることが明らかになった。

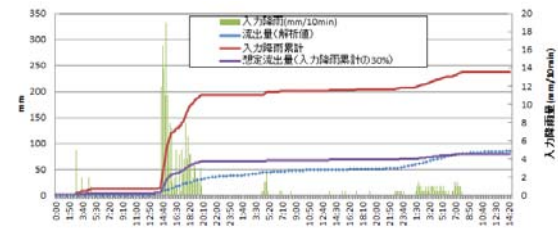


図14 短時間に非常に強い降雨が降った場合(2008年)

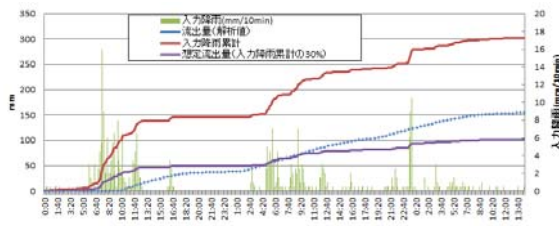


図 15 分散して降雨ある場合のシミュレーション結果 (2010年)

### (3)透水性舗装における路盤材料への適用

#### ①団粒構造透水性路盤の設置

従来の「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 16 のように表層のアスファルト舗装の下の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。

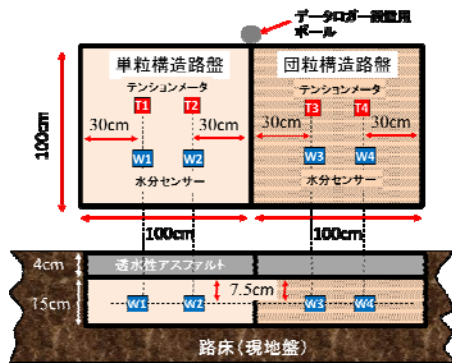


図 16 団粒化路盤試験のセンサー埋設箇所

図 17 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。青線が未改良路盤(単粒構造)、赤線が改良路盤(団粒構造)を示す。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 $|hp|$ 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 17 を見ると、無降雨時が長くなると徐々に乾燥して $|hp|$ 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)は大気圧と圧力水頭の差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 18 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。図

17と図 18 から、降雨のイベントがあるとき、圧力水頭 $|hp|$ 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、水分量が高いまま保持している。

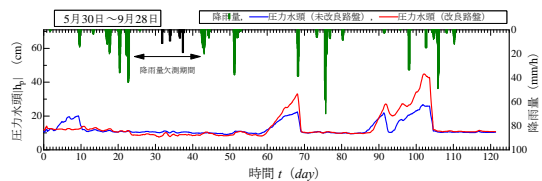


図 17 路盤内の圧力水頭と降雨量

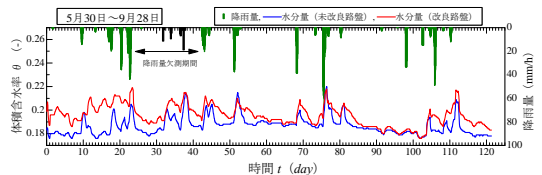


図 18 降雨量と水分量(体積含水率)

浸透エネルギーとなる圧力水頭 $|hp|$ 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も大きく、結果的に透水性が高い。また、降雨のイベントがない時は、改良地盤の方が圧力水頭 $|hp|$ 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。以上のことから、透水性舗装の路盤材料を団粒化することを試み、現場での観測の結果、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。

#### (4)簡易なりアルタイムの浸水予測

①都市域の内水氾濫解析モデルにおいて、氾濫域と下水道システムへの落ち込み流量の設定法について検討し、本検討結果から、落ち込み流量の上限値は500mm/hが適切であることが示された。この値はかなり大きな値であり、下水道・氾濫解析の汎用ソフトにみられる、降雨を直接下水道へ与え、はききれなかった分を氾濫させるというモデル化の妥当性も示されたと考える。

②流出係数は東海豪雨の場合0.9、平成20年8月末豪雨の場合0.7となった。このことから、流出係数は事前の降雨などにより変化する可能性が示唆された。

③都市型水害予測解析システムの結果をリアルタイムの浸水予測に適用するために、計算された最大浸水深と用いた降雨値(時間最大雨量に加工)からなるデータベースを作成し、簡易浸水予測システムを構築した。解析精度に検討の余地はあるが、都市型水害予測解析システムと同程度の精度を有するリアルタイムの浸水予測の可能性が示された。なお、本研究により、物理モデルの結果を用い

て統計モデル構築し、リアルタイムの浸水予測を行うという数値解析モデルの新たな活用が提示できた。

④都市域の水害は、人的被害、経済的被害と共に、交通に対しても被害を生じさせる。土壌の団粒化の効果として、浸水の交通に与える被害を低下させることも考えられる。そこで、本研究では、名古屋市を対象に、3次元のVRソフトであり、都市交通をシミュレーションできるUC-WIN/ROADを用いて、浸水の有無による交通の違いを検討した。その結果、名古屋駅まわりの自動車交通の再現ができ、さらに、浸水が生じた場合の渋滞の様子などが確認された。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① Sugii, T., Yamada, K., Asano, N. and Yamada, Y. : Measurement Method for Hydraulic Properties of Unsaturated Ground using the Dynamic Soil Moisture Distribution Model, Proc. of 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読有, 2013, 印刷中.
- ② 杉井俊夫・山田公夫・馬貴臣・市村和哉: 団粒化した土の物性と舗装技術への適用, 総合工学, 査読無, 第25巻, 2013, pp.39-46. <http://www.isc.chubu.ac.jp/istr/contents/thesis.php>
- ③ 武田 誠・高橋俊彦・長尾佳幸・平山康典・松尾直規: 都市域の内水氾濫モデルの検討と浸水時対策への応用について, 土木学会論文集 B1, 査読有, Vol. 68, 2012, pp. I 1015-I 1020.
- ④ Makoto TAKEDA and Naoki MATSUO: Study on h-VA inundation analysis model considering sewer analysis, APD-IAHR2012, 査読有, 2012.
- ⑤ 杉井俊夫・山田公夫・方方・馬貴臣: 雨水地下貯留タンクの貯水深と降雨強度の関係, 総合工学, 査読無, 第24巻, 36-41, 2012.
- ⑥ 高橋俊彦, 平山康典, 天野玲子, 武田誠, 松尾直規: 浸水実績・降雨記録を用いた機械学習に基づく簡易浸水予測システム, 水工学論文集, 査読有, 55巻, 2011, pp.937-942.

[学会発表] (計11件)

- ① 梅基 哲矢・杉井俊夫・山田公夫: 毛管現象を用いたサイフォン型ドレーンの検討, 土木学会中部支部研究発表会, 2013年3月8日.
- ② 島田嘉樹, 武田 誠, 松尾直規: 浸水の自動車交通に与える影響に関する基礎的研究, 平成24年度土木学会中部支部研究発表

会, 2013年3月8日.

- ③ 杉井俊夫・山田公夫・山田雄太・浅野憲雄: 動態水分分布モデルを利用した不飽和透水特性の評価, 平成24年度不飽和土研究会研究発表会, 2012年9月24日.
- ④ 市村 和哉・杉井 俊夫・山田 公夫・方方: 雨水貯留タンクの貯留深に対する降雨強度への影響, 第47回地盤工学研究発表会, 2012年7月16日.
- ⑤ 方方・杉井俊夫・市村和哉: 雨水貯留タンクの表層土の透水性と貯水深の観測, 土木学会中部支部研究発表会, 2012年3月8日.
- ⑥ 杉井俊夫: 中部大学における雨水地下貯留タンクの観測, 高透水性高保水性化技術の適用に関する研究会, 2011年11月11日.
- ⑦ 杉井俊夫・方方・武田 誠・山田公夫・鶴留修治: 土の団粒構造が及ぼす蒸発時の土壌水分および温度への影響, 土木学会第66回学術講演会, 2011年9月9日.
- ⑧ 長尾佳幸, 武田 誠, 松尾直規: 都市域の内水氾濫解析モデルの検証と適用について, 土木学会第66回年次学術講演会, II-166, 2011年9月9日.
- ⑨ 方方・杉井俊夫: 団粒構造を有する土の透水特性に関する研究, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月6日.
- ⑩ 杉井俊夫・山田雄太: 水分分布の推定を利用した不飽和透水特性の評価, 第46回地盤工学研究発表会, 2011年7月6日.
- ⑪ 武田 誠, 長尾佳幸, 松尾直規: 内水氾濫に対する名古屋市堀川流域の貯留施設の効果に関する検討, 土木学会第65回年次学術講演会, II-016, 2010年9月3日.

[図書] (計1件)

- ① 地盤工学会編 (杉井俊夫 他): 地盤調査の方法と解説 (第7編担当), 地盤工学会, pp.597-603, 2013.

[その他]

新聞報道

- ① 杉井俊夫: 研究現場発一土の団粒化技術で災害対策, 中部経済新聞, エブリデープラス, 2013/2/5
- ② 杉井俊夫: 災害対策など建設の新技術, 中日新聞, 県内版, 2012/10/26

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉井 俊夫 (SUGII TOSHIO)  
中部大学・工学部・教授  
研究者番号: 90196709

(2) 研究分担者

武田 誠 (TAKEDA MAKOTO)  
中部大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50298486