熱環境緩和に対する貯留性ソルパックの 性能評価に関する研究

石田 哲朗¹・肥田野 正秀²・中川 幸洋³

¹正会員 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail:ishida11@toyonet.toyo.ac.jp

²東洋大学研究生(元東洋大学大学院生 工学研究科) (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

³正会員 株式会社テクノソール 執行役員 企画開発担当 (〒107-0052 東京都港区赤坂2-12-33)

保水性舗装の多くは降雨を舗装表面の間隙部分に充填したセメントミルクやスラグなどに吸収させ、その水分の気化熱により温度を下げるものであるが、降雨のない期間が続けば水分の補給が絶たれ、水分を補給する施設を追加すれば工費は多大なものになる。また、降雨を浸透させることによって道路構造が泥弱化することが懸念される。本研究ではこの道路の表層の構造に着目し、これらの問題点の一つの対応策として貯留性ソルパックを用いた路面の表層構造を提案し、その性能を室内試験、長期間に渡る計測を含む数種の野外実験を行って評価し適用性を明らかにした。

Key Words : *water-retaining solpack, heat island phenomenon, conformation of road surface, performance evaluation, moisture evaporation*

1. はじめに

ヒートアイランド現象は1960年代からすでに観測されており、その発生する原因は一般に、①人工廃熱の増加、②地表面の熱容量の増加、③ストリートキャニオンでの地表面長波放射の再吸収、④ビル群による粗度の増加による風速の低下・換気効果の低下などが挙げられる。

そして我々建設技術者が自然の状態の土地を人工的な姿に変えたことも高温化の原因である。都市は舗装道路に覆われ、降雨の多くは地中に浸透することができず河川等へ流れ込む。この都市の平面積の中でかなりの部分を占める道路(東京23区では18.1%)に対しては早くから対策が検討されており、最近ではその成果がニュースで紹介されたりもしている。その一つに保水性舗装があり、舗装面内部のセメントミルクに吸収した雨水の気化熱で路面を冷やす仕組みである。セメントミルクの中に鉱物質微粉体や高分子ポリマーを加える工法が検討されたり、太陽光を反射する顔料やセラミックの微粒子を樹脂に混ぜて舗装表面に塗布する遮熱性舗装の研究開発も行われている¹⁾。

保水性舗装の多くは前述したように、降雨を舗装表面の間隙部分に充填したセメントミルクやスラグなどに吸

収させた水分の気化熱に依存して温度を下げるものであるが、降雨のない期間が続けば水分の補給が絶たれる。晴天が続けば長くても数日しかその効果は期待できない。水分を補給する施設を追加すれば工費は多大なものになる。また、降雨を浸透させる透水性舗装では、路床や原地盤の透水性の大小によって、貯留施設や浸透施設を設けなければならない。これは「特定都市河川浸水被害対策法」の施行(2004年5月)により義務づけられたものであるが、降雨を浸透させることによって路盤・路床の支持力に大きく影響することが懸念され未解明な部分も多く残されている。

本研究ではこの道路の表層の構造に着目し、これらの問題点に対する一つの対策として貯留性ソルパックを路面の表層構造に用いることで、降雨の地下浸透による地盤の強度低下を抑制し、その中詰め材の間隙に降雨を貯留し、庭の地表面、歩道や公園の舗装の表面に水分を循環させるシステム提案した。その性能を気象条件に左右されない室内実験や住宅地の建物や草本などが近くに存在する狭小箇所、歩道や公園を想定した広い敷地での野外実験から評価した結果について論述する。

写真-1 貯留性ソルパック

図-1 土嚢と中詰め材に作用する応力

2. 貯留性ソルパックとその強度

土嚢の有効性は古くからよく知られており、河川の氾濫や土砂災害への緊急対応に広く用いられている。性能表示がない場合には単なる土嚢にすぎないが、これに対してソルパックは土嚢単体の性能を表示した建設資材で、それらの積層体はその性能を明確に評価し設計された構造物として性能表示されている²⁾。このソルパックの上面をメッシュに、側面と底面を止水性のビニールシートで覆ったものを貯留性ソルパックと呼んでいる(写真-1)。上面から浸透した水分は中詰め材の間隙内に貯留され、メッシュ面から自由に水分(水蒸気)の出入りができる。

土嚢と、貯留性ソルパックやソルパックとの違いは、土嚢に中詰め材を入れた後に転圧するか否かにある。土質材料を袋に詰めてその袋を転圧すると袋に張力が生じ、土質材料の土粒子間の接触力を増加させ、袋の破断張力の何十倍もの圧縮耐力を付加させるだけでなく見かけの粘着力をも得られる。この原理はモール・クーロンの破壊規準から説明できる。図-1に示すような二次元土嚢において、長軸に平行な面に主応力 σ_{1f} 、短軸に平行な面に主応力 σ_3 が作用する場合の土嚢単体の破壊強度式を土嚢の中詰め材に内部摩擦角 ϕ を持つ材料を想定して導く。土嚢に外力が作用してより平坦になると袋に張力 T が発生する。この張力 T (単位長さ当り)によって、二次元土嚢の中詰め材には付加的な拘束応力である $\sigma_{a1}=2T/B$ と $\sigma_{a3}=2T/H$ とが、それぞれ作用することになる。この $(\sigma_{1f}+\sigma_{a1})$ と $(\sigma_3+\sigma_{a3})$ の主応力のもとで土嚢の中詰め材がせん断破壊すると次式が得られる。

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + \frac{2T}{B} \left(\frac{B}{H} K_p - 1 \right) \quad (1)$$

ここに、 K_p : 受働土圧係数、 T : 土嚢の引張り強さ、 B : 貯留性ソルパックの幅、 H : 1段当たりの高さである。

式(1)は、次の式(2)の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を持つ材料の破壊時における最大主応力 σ_{1f} と最小主応力 σ_{3f} との間の関係式と同形であることから、

$$\sigma_{1f} = \sigma_{3f} K_p + 2c \sqrt{K_p} \quad (2)$$

粘着力 c は次式で求められる。

$$c = \frac{(T/B) \left\{ (B/H) K_p - 1 \right\}}{\sqrt{K_p}} \quad (3)$$

単に袋で包むだけで内部摩擦角だけを持つ材料が、粘着力と内部摩擦角の両方を有する材料になることが証明された。そして土嚢単体の破壊強度式、言い換えれば貯留性ソルパックの圧縮耐力 F は、その中詰め材が粘着力と内部摩擦角を有する材料ならば、式(1)～式(3)の関係から次式で求められる。

$$F = 2T \left(\frac{B}{H} K_p - 1 \right) L + 2c \sqrt{K_p} BL \quad (4)$$

式中の貯留性ソルパックの幅 B 、奥行き L および1段の高さ H は中詰め材の容積によって定まり、圧縮に伴って変化した転圧前に比べて偏平な形状に変化する。

碎石を中詰め材とする土嚢(40 cm×40 cm×高さ10 cm)を用いた耐圧試験と式(1)による耐荷力の計算結果から($\sigma_{3f}=0$ の場合)、耐荷力は奥行き40 cmの土嚢袋の破断張力480 kgの42倍の20 tにも及んで、実際の実験値は三次元効果も働いて23～29 tにもなったとの報告もある³⁾。この数値は80～100 mの高さの土の重量に相等し、この耐荷力は道路、河川等の土留め壁や構造物の裏込め部の沈下抑制へも利用されており、三宅島の火山災害の応急対策の一環として、のり面の修復工事や土石流から集落を防護するための導流堤の築造工事にも用いられている。

3. 貯留性ソルパックの保水能力

貯留性ソルパックの温度低減効果を室内実験から確かめてみた。中詰め材は、珪砂と碎石(C-30)でそれぞれの乾燥密度 ρ_d は1.62 t/m³、1.86 t/m³であった。実験は空調機を20℃に設定した室内で(湿度は25 %前後)貯留性ソルパックの中詰め材の間隙中に給水し、貯留ソルパックに設置してあるテンシオメータとADRの計測値から飽和したことを確認した後(図-6の横軸上の点を参照)、表面

図-2 室内試験の概略図

図-3 被覆材別の表面温度の変化(貯留性ソルパックなし)

図-4 被覆材別の表面温度の変化(砕石)

図-5 被覆材別の表面温度の変化(珪砂)

図-6 貯留性ソルパック内の水分の蒸発状況と中詰め材の材料としての水分特性曲線との比較

被覆材の開粒アスファルト(色は黒色で、骨材粒径 13 mm, 空隙率23%)と透水板(色は白色に近く、骨材粒径 5 mm, 空隙率は25%, 透水係数 1.0×10^{-2} cm/s)を載せランプ照射によって表面温度を上げた。ランプはビームランプを使用し照射高さは30 cmとした。開粒アスファルトと透水板の近傍にはテンシオメータとADRを設置し圧力水頭と水分量を、表面温度は熱電対を用いて10分間隔で測定した(図-2)。

図-3は貯留性ソルパックを設置しないときの被覆材別の照射時間と表面温度の関係を示す。500分間ほどで表面温度はほぼ最大値(45~52℃)となり、被覆材の色の違いから、両者には約7℃の開きがあることがわかる。

図-4と図-5に中詰め材に砕石と珪砂を用いたときの照射時間による温度変化の関係を示した。中詰め材に関係なく温度の上昇が緩やかになるのは開始から300分間後からで、貯留性ソルパック内の温度は20℃で落ち着いている。図-4の砕石を中詰め材とした場合には、表面温度は図-3の結果と同様に開粒アスファルトの方が高いが、開粒アスファルトが45℃、透水板は38℃とともに7℃ほど低下している。

図-5の中詰め材に珪砂を用いたときには透水板の表面温度は砕石の結果と大差はないが、開粒アスファルトの表面温度は10℃も低くなっていることがわかる。

この室内実験では被覆材表面にビームライトを照射することで乾燥させて表面温度を計測している。この等温状態において貯留性ソルパック内の水分は毛管上昇により生じた吸引圧によって表面から逐次水分が排出される。

図-6には、実験で得られた時間経過とともに変化する吸引圧(負の圧力水頭)と体積含水率の関係を記号(○, △)で表した。実線はそれぞれの中詰め材の水分特性曲線で不飽和土の透水試験として知られている瞬時水分計

測法を用いて求めた⁴⁾。この方法は鉛直一次元の土円柱(直径15 cm)内で浸潤あるいは排水を行い、体積含水率の分布と間隙水圧の経時変化を計測することにより水分特性曲線と不飽和透水係数を同時に得る試験法である。ここに示した結果は太い実線で示したものが土円柱からの排水過程で、蒸発時の水分の移動方向は地表面から大気中へに対して、その方向は反対であるが同様な現象と判断できる。記号(○)で示した珪砂の計測結果は中詰め材の水分特性曲線に沿って変化している。一方、碎石の場合(△)の変化は緩やかで、瞬時水分計測法で得られた水分特性曲線と異なる挙動を示した。当然、材質やその密度などの状態によって含有水分量(一般に、礫→砂→粘土の順に多い)も異なるが、ここでの定常的な室内環境下でも図-4、図-5の表面温度の変化と図-6の水分特性曲線の結果とを加味すれば、透水板の表面温度には中詰め材の影響は少ないが、空隙率の大きい開粒アスファルトに対しては含有水分量の多い珪砂の方が温度低減効果はあると思われる。

また、図-6中の碎石の細い実線は浸潤過程のものである。浸潤過程の曲線の方が排水(蒸発)過程より下方に位置するのは、排水(蒸発)現象は浸潤現象に比べて大きな吸引圧を必要としていることを意味する。なお、土円柱内に貯留性ソルパックのメッシュを挟んで実験を行ったが、介在しないものと曲線に違いは見受けられず、水分特性曲線(蒸発能力)に影響しないことを確かめている。

4. 秤量実験による蒸発度

空気が乾燥していれば水は蒸発する。蒸発する量が多くなるほど温度の低下は大きくなる。しかしながら、自然の気象条件下では蒸発量は一定ではなく常に変動する。貯留性ソルパックを埋設してしまうと、その水分量の変化を計測するのは難しいので、写真-2に示す珪砂を詰めた容器の上に被覆材(開粒アスファルトと透水板)を置き、

写真-2 秤量実験の様子

図-7 秤量実験の供試体部分の断面図

図-8 秤量実験の結果(開粒アスファルト)

図-9 秤量実験の結果(透水板)

温度による影響を受けにくいロードセルを用いて水分量の質量変化を継続して測り、同時に表面の湿度、温度および風速を計測した。図-7に供試体部分の断面図を示す。容器内には貯留性ソルパックと同一の密度の珪砂を詰めてメッシュで表面を覆い、被覆材面からのみ蒸発・浸潤した質量の増減を測定している。この実験を秤量実験と呼ぶ。

図-8に任意に抽出した計測日の開粒アスファルト板を用いた秤量実験結果を示す。蒸発は路面の温度が上昇すると同時に生じている。表面温度は気温よりは高くなるが差は少ない。図-9の透水板においても同様な傾向が見られるが、計測時の気候の違いによるためか一日での蒸発量の分布は異なり、開粒アスファルトは極端な蒸発量を示す時間帯がないのに対して、透水板は正午付近での

図-10 秤量実験の結果と推定式の比較

蒸発量が顕著である。ただし、どちらも一日を通しての積算蒸発量は多いときでも約600 g (0.67 g/cm²)であった。

次に、秤量実験で得られた蒸発度の変化を実際に計測された気象データからどの程度再現できるかを次に示す式(5)と式(6)の算定式を用いて検証した。式(5)はバルク式と呼ばれ⁹⁾、水分気化の際に消費される潜熱輸送量を求めるもので、これを蒸発量に換算した。

$$iE = i \cdot \rho \cdot \beta \cdot C_H \cdot U (q_s - q_a) \quad (5)$$

ここに、 E : 蒸発量 (kg/m²・s)、 i : 水の気化熱 (J/kg)、 ρ : 空気密度 (kg/m³)、 β : 蒸発効率 ($0 < \beta < 1$)、 C_H : バルク輸送係数、 U : 風速 (m/s)、 q_s : 地表面温度に対する飽和比湿 (kg/kg)、 q_a : 大気比湿 (kg/kg) である。

もう一つの式(6)は蒸発式⁹⁾と言われているもので、

$$w = C \cdot v (e_s - e) \quad (6)$$

ここで、 w : 蒸発速度 (g/m²・h・hPa)、 C : 比例定数でこのケースでは8.0を採用、 v : 風速 (m/s)、 e_s : 表面の水蒸気圧 (hPa)、 e : 大気の水蒸気圧 (hPa) である。

図-10に秤量実験から得られた蒸発量と、二つの算定式との結果を比較した。8月中旬の約一週間に渡って計測した結果である。式(5)、(6)とも風速、被覆材表面付近と地表面から1.5 m付近の露点、湿度、温度の気象計測データを用いて、それぞれの式中のパラメータを求めて蒸発量を算定している。必要な秤量実験の積算蒸発量は、算定式の値に対して3~6倍も大きく予想以上に蒸発量は多い。バルク式では0~20時間まで、蒸発式は20~70時間まで蒸発量が負の値を示しているが、被覆材表面の湿度が大気中の湿度より低く計測されると、被覆材表面と大気中の比湿ならびに水蒸気の差が負の値となるためである。これは大気中に存在する水蒸気(水分)が透水板の表面方向(供試体内部)へ移動している状態を示している。野外では放射や風といった外力が働くために、路面直上の風速や湿度を精度よく計測し、理論式から蒸発

写真-3 住宅地での野外実験の状況

(b) 平面図

(a) 断面図

図-11 計測機器の設置位置

量を求めることは難しく、このような気象計測データの条件下でも、実際には貯留性ソルパックからの蒸発量は十分にあることが確かめられた。

5. 住宅地における野外実験での検討

建物や草本などが近くに存在する住宅地での計測は埼玉県東松山市内で行った。そこには三体の貯留性ソルパック(転圧後の寸法縦66 cm、横50 cm、高さ9.7 cm)を埋設した。その上部には、砂層(2.5 cm)と礫層(5.5 cm)で積層し、開粒アスファルト板(30 cm × 30 cm × 5 cm)と透水板(30 cm × 30 cm × 6 cm)をそれぞれ4枚ずつで一組として被覆した。写真-3にその状況を示す。貯留性ソルパックの中詰め材には珪砂を使用した。実際に施工するときの経済面を重視すれば碎石などを用いた方が現実的かも

図-12 計測箇所の日平均気温と降雨量

図-13 計測箇所の被覆材の表面温度と降雨量

しれないが、これまでの結果から珪砂の方が含水量も有効な体積含水率も多いので、性能を確認する上では適していると判断した。計測機器は前章で示した秤量実験の結果を踏まえて日射量計，風速計，雨量計，温湿度計，熱電対による温度計測の気象観測装置に加えて，テンシオメータ，ADR，TDRの土壌水分計測機器を図-11の断面図と平面図のように設置して，貯留性ソルパックならびに周辺地盤の水分特性を計測しながら，1時間の計測間隔で長期的な観測を行うことにした。

設置は2005年8月8日に完了し，その後12 mmの降雨があった。計測機器が安定するまでは放置期間が必要と考え，観測は2005年8月13日から開始し，本論文では2007年3月13日までの継続して計測したデータを用いている。図-12には計測地点の年間降雨量と日平均気温の変化を示した。2006年には一日で120 mm以上の豪雨が二日あったが，年間雨量は1482 mmで我が国の平均値 1907 mmを下回った。また2006年は暖冬で平均気温は前年に比べ2.7℃上昇していた。

図-13に設置した二種類の透水性の被覆材の8月13日の開始時から9月5日までの表面温度，地表面から1.5 mの位置で測定した気温と降雨量を併記した。被覆材の表面温度と気温には約20℃の差がある。この時期には普通

図-14 開粒アスファルトの表面温度と気温の関係

図-15 透水板の表面温度と気温の関係

の舗装表面では60℃を越えることは珍しくないが，計測値は55℃以下であった。

図-14と図-15に計測期間中の開粒アスファルトと透水板の表面温度とそのときの気温の関係をプロットした。開粒アスファルトの方がばらつきはあるが，黒色の開粒アスファルトと白色に近い透水板でありながら表面温度には大きな違いがなく，空隙率など被覆材の構造に影響を受けているのではないかと推察される。

図-16には2005年8月から2006年11月の期間から代表的な透水板の下からの蒸発量を表面温度，気温と表した。蒸発量はその直前付近の降雨量に影響されるが，一年を通じての様子がわかる。このときの蒸発量は図-17に一例を示す貯留性ソルパック内の水分挙動から算出している。貯留性ソルパック内の水分量は，上半分の水分量をADRが，中間から幾分下方の水分量とその周辺の圧力水頭をTDRとテンシオメータにより計測している。また，設置する際に掘削した原地盤の掘削面より下方と，地表面付近にも計測機器を埋設しており，それらの挙動も図示している。図-17の13 mmの降雨があった8月16日には，上層の体積含水率が上昇し降雨が貯留されている。その後，晴天が続くと下降していくが，中間位置の水分が移動するまでには4～5日の時間差がある。当然，水分が減

図-16 透水板の表面温度と水分蒸発量

図-17 降雨による体積含水率の変化

図-18 降雨による圧力水頭の変化

少するに伴い図-13に示した路面の表面温度も上昇していく。

図-18の圧力水頭も、降雨による給水とその後の蒸発作用によって変化している様子がわかる。掘削面より下方に設置したテンシオメータ(圧力水頭)の挙動は晴天が続けば貯留性ソルパックの存在する地表面付近に比べて極端に乾燥が進むが、降雨時には値が負から正に変化し、貯留性ソルパックによって完全に原地盤を密封していないと判断できる。

図-19に貯留性ソルパック内の体積含水率から換算した水分量(蒸発量)と、図-10の秤量実験と同様に二つの算定式から求めた値を示した。実際に蒸発した水分量は

図-19 蒸発量の実測値と推定式の比較(06/8/17-20)

図-20 表面温度と気温(06/8/17-20)

バルク式や蒸発式で算定した値に比べて2~8倍も多く、蒸発潜熱が効果的に働いていることは明らかである。図-20はそのときの表面温度と気温である。晴天が続く前の貯留性ソルパック内の水分量によるが、夏期には80時間の間に2000~2500 g、冬季でも天気の良いときには300~1500 g程度の積算蒸発量が発生していた。

次に、計測期間中における貯留性ソルパック内の水分量の変化を検討してみる。図-21は自然条件下で生じた蒸発時の毛管上昇により生じた吸引圧によって表面から

図-21 貯留性ソルパック内の珪砂の水分特性曲線の変化

写真-4 野外実験の状況

図-22 舗装構造体の説明

水分が排出される現象と、夜間の水分量の移動や降雨時の給水を含んだ圧力水頭と体積含水率の変化である。図中の実線は図-6に示した珪砂の水分特性曲線である($\alpha = 0.0195 \text{ cm}^{-1}$, $n = 1.8917$, $q_s = 0.391$, $q_r = 0.03$)。ここに、 α は限界毛管水頭 ψ_g の逆数、 n はvan Genuchten モデルの定数で比水分容量 $C = d\theta/d\psi$ と関連する⁷⁾。 q_s は飽和したときの体積含水率で q_r は最小含水量である。

図中に示した2005年と2006年の値に分けて、それぞれの実測値に対して同定を行い水分特性曲線のパラメータを求めたところ⁸⁾、有効間隙率($q - q_r$)は0.279から0.283と q_s 、 q_r ともに幾分小さくなりながら、その差である有効間隙率は大きくなる結果を得た。雨水の浸透により土粒子が移動し密度が多少変化していると思われる。また、 $\alpha = 0.0303 \text{ cm}^{-1}$ となり貯留性ソルパック内の限界毛管水頭 $\psi_g = 33 \text{ cm}$ が求められ、室内実験の $1/0.0195 = 51 \text{ cm}$ より低い貯留性ソルパック表面から被覆材表面までの距離はそれよりも短く問題はない。定数 n は7.279で室内実験の $n = 1.8917$ より大きな値となる。言い換えれば、比水分容量 C が大きくなるため曲線形状に違いが生じている。

6. 広い敷地での野外実験による検討

第4章、5章では建物や草本などが近くに存在する住宅地の庭先で、貯留性ソルパック内の水分挙動やその表面を被覆した被覆材の表面温度の変化を計測して、主に季節の移り変わりの中での貯留性ソルパックの性能を評価した。本章では公園や歩道に貯留性ソルパックを路面の表層構造に用いたときを想定して、茨城県つくば市にある建築研究所の敷地内において貯留性ソルパックの有無による舗装構造体を施工し、原位置計測を行った結果から温度低減効果に対して報告する。計測状況を写真-4に示す。設置した舗装構造は東京都の標準歩道(以下、標準型)⁹⁾と貯留性ソルパックを敷設した構造(以下、貯留型)の二種類である。各舗装の被覆材には開粒アスファルトと透水板を使用している。

施工面積は $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} = 1.44 \text{ m}^2$ で(透水板は $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ を16枚)被覆材の違いはあっても、それ以下の構造は同

一なので図-22には開粒アスファルトの両ケースの構造図を示した。標準型の構造は6 cmの砂層の上部に10 cmの礫層(C-30)を積層し、その上に開粒アスファルトと透水板で被覆している。貯留型の構造は透水性のあるソルパック(高さ7 cm)上部に貯留性ソルパック(高さ8 cm)を敷設し、その上に1 cmの砂層を積層させた上に開粒アスファルトと透水板で被覆している。施工は9月6日17時に完了し、計測期間は同日19時から9月24日13時までの18日間で、期間中は9月22日に僅かの降雨があったが、それ以外は晴天か曇りの日が続いた。測定箇所は試験区域

図-23 開粒アスファルトの表面温度と気温の変化

図-24 透水板の表面温度と気温の変化

図-25 開粒アスファルトの温度変化

図-27 標準型（開粒アスファルト）の温度変化

図-26 透水板の温度変化

図-28 貯留型（開粒アスファルト）の温度変化

の気温、被覆材表面と表面から2 cm上ならびに構造体内の温度計測を熱電対を用いて1 時間毎に計測した。試験区域には9月10日の13時から14時の間に降雨量10 mmに相当する散水を行った。それ以外の水分の供給は22日の降水しかない。なお、貯留性ソルパックはその汎用性を考慮して一般の土嚢袋に砕石(C-30)を詰めて振動コンパクターで4回/個の締固めを行い、その底面から側面までを貯留性シートで包むタイプのものを使用した。中詰め材の砕石の含水比は3.5%で、締固め後の乾燥密度は2.0 t/m³であった。

図-23と図-24に計測期間におけるそれぞれ異なる被覆材の表面温度と気温の関係を表し、標準型と貯留型との表面温度の差も併記してある。計測期間中を通して、貯留性ソルパックを用いた貯留型の表面温度は標準型に比べて平均3.0°C低下している。特に日中における温度差が著しい。

データの中から図-23の図中に点線で示した9月9日と9月15日における温度変化について検討する。この二日間は計測期間中において標準型の表面温度が最も高い日と貯留性ソルパックの有無によって最も温度差の生じた日である。図-25に示した開粒アスファルトの9月9日

の値を見ると、標準型に比べ貯留型の表面温度は13時に3.5°C、表面から2 cmの位置では12時に3.4°C低いことがわかる。透水板を用いた場合についても同様で、9月9日の表面温度は10時に5.6°C、表面から2 cmの位置では5.4°C貯留型は標準型に比べて低い。図-26には表層に透水板を使用した9月15日における温度変化を示した。9時において貯留型の表面温度は標準型に比べ6.0°C、表面から2 cm上では6.1°C低く、この値が計測期間中で最も大きな温度差であった。

次に構造体内に設置した熱電対による温度計測結果を見てみる。図-27、図-28には開粒アスファルトを用いた場合の9月9日の標準型、貯留型構造体内の温度の経時変化を示した。構造体内の温度は路面から順に伝わり上昇し順に最高値に達していく様子が確認できる。夕方から夜間にかけては被覆材表面と被覆材底面(直下部)の温度は構造体内より低くなり蓄熱現象が現れている。この温度傾向は翌日の7時頃まで続く。

図-29、図-30に計測期間中最も表面温度差が大きかった9月15日の構造体内の温度変化を示す。透水板の下面(直下部)の温度の上昇がそれ以下のソルパック内の温度とほぼ同一で、9月10日の10 mm/hの散水により5日間が

図-29 標準型(透水板)の温度変化

図-30 貯留型(透水板)の温度変化

経過しても貯留性ソルパック内に貯留された水分によって表面温度の上昇を抑制していると思われる。

7. 結 論

貯留性ソルパックは土壌側面から底面までを遮水した貯水袋であり、袋の拘束により中詰め材を補強し、沈下や支持力に対しても良好な状態を保つ安価で利用価値の多い建設資材である。本研究では、地盤内へ浸透する水の貯留と中詰め材からのサクシオン効果を利用した循環(浸透→貯留→表層供給)型の路面の表層構造を提案し、その性能評価を行い、次に示す知見を得た。

- 1) 室内試験結果から貯留性ソルパックの保水能力が温度低下に及ぼす影響を検証したところ7～10℃低下した。貯留性ソルパックのメッシュ面は毛管上昇を遮ることはない。中詰め材の含有水分量は、礫→砂→粘土の順に多くなると思われるが、施工での強度面や取り扱い安さから砂質土や碎石を用いることが望ましい。
- 2) 野外での秤量実験から求められた蒸発量は算定式の値に対して3～6倍も大きく、被覆材を介しても貯留性ソルパックからの蒸発度は十分にあることが確かめられた。
- 3) 住宅地の庭先で実施した長期に渡る埋設実験から、被覆材の表面温度が60℃を超えるような日はなかったが、材質や空隙率の異なる黒色の開粒アスファルトと白色に近い透水板の表面温度には大きな違いがなかった。ADR、TDRやテンシオメータなどの計測機器のデータから、貯留性ソルパック内の水分挙動ならびに蒸発量が把握できた。晴天が続いた時の中間位置の水分が表面付近へ移動するまでには4～5日間差かかり温度低減効果の継続性に寄与していることが明らかになった。

- 4) 自然条件下での中詰め材の珪砂の水分特性曲線は、不飽和土の分野で認識されているものより比水分容量Cの傾きは大きい。つまり、吸引圧の小さな減少でも容易に水分が移動する形状を示した。限界毛管水頭は33 cmと室内実験の値より低い貯留性ソルパックの設置位置から問題はない。

- 5) 広い面積の敷地で行った野外実験では、実際に東京都標準歩道設計基準の条件下で、その標準型と貯留性ソルパックを使用した貯留型と比較した。結果から路面とその面より2 cm 上の温度は貯留型が標準型に比べ約3.0℃低く、被覆材に透水板を用いた場合には最高で6.0℃低い時もあった。また、貯留性ソルパックによる表面温度の低減効果は10日間も継続した。以上の結果を鑑みて、地表面を熱環境面から緩和するには自然被覆に戻すことが望ましいが、人工的故に快適な環境に慣れ親しんだ生活から昔の土の泥濘や土埃に塗れる生活に戻すことには難しいところもある。本論文で提案した貯留性ソルパックを用いた路面の表層構造は、安価で、強度面に問題はなく、蒸発潜熱の効果も十分に期待できる。歩道、公園や庭先には、すぐにも活用できると考えている。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、日々積み重なる多くのデータを整理して戴いた卒論生諸氏の労苦に対して心から感謝の意を表する。また、前田道路株式会社技術本部 技術課長の越健太郎氏には被覆材を提供して戴くなど色々と便宜をはかって頂いた。ここに記してお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 石井一郎、伊藤修、亀野辰三、岩立忠夫、上田敏：道づくりのソフトサイエンス、p.105、鹿島出版会、2005。
- 2) 佐藤雅宏：協会活動報告、SOLPACK、No.2、p.5、2002。
- 3) (株)テクノソール技術資料、2000。

- 4) 不飽和土地盤の透水性評価に関する研究委員会：不飽和地盤の透水性評価手法ワークショップ '97 不飽和土地盤の透水性評価に関する研究委員会報告書, pp. 52-55, 地盤工学会, 1997.
- 5) 近藤純正：地表面に近い大気の科学 -理解と応用-, pp.140-142, 東京大学出版会, 2000.
- 6) 上田政文：湿度と蒸発 -基礎から計測技術まで-, pp.136-137, コロナ社, 2000.
- 7) 竹下祐二, 河野伊一郎：不飽和浸透特性の推定方法とその適用について, 地盤と建設, Vol.11, No.1, pp.95-113, 1993.
- 8) 石田哲朗：エクセル地盤環境学入門, pp.79-95, インデックス出版, 2005.
- 9) 東京都建設局編：道路工事設計基準, pp.93-104, 財団法人 東京都弘済会, 2006.

THE PERFORMANCE EVALUATION OF WATER-RETAINING SOLPACK FOR MODERATING THERMAL CONDITIONS

Tetsuro ISHIDA, Masahide HIDANO and Yukihiro NAKAGAWA

Many of the water retention pavements lower their temperature by having cement milk or slag placed in the voids on the surface of pavement absorb rainwater and using the vaporization heat. If there is no rainfall for a long period of time, however, no rainwater is supplied. Constructing facilities for supplying water would cost considerably. Infiltration of rainwater is likely to make muddy and structurally weak roads. This study focuses on the road surface structure and proposes a road surface structure using water-retaining Solpack as a solution. The performance of water-retaining Solpack was evaluated in laboratory tests and various field tests including long-term instrumentation, and its applicability was identified.