

貯留性ソルパックを用いた熱環境緩和に配慮したまちづくり

東洋大・工 ○石 田 哲 朗 東洋大(院) 肥田野 正 秀
日大生産工 大 木 宜 章

1. まえがき

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、その発生する原因是、間違いなく人間が使用するエネルギーの増大に伴う廃熱の増加である。

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発熱の原因である。その対策として改めて、太陽エネルギーを吸収するような土地利用を計画しなくてはならず、残り少ない平面積内に緑地や水面を増やす工夫も求められている。

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%)に対しても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も検討されている。太陽熱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⁾。

本研究では、この道路構造に着目している。保水性舗装の多くは前述したように、降雨を舗装表面の隙間部分に充填したセメントミルクやスラグなどに吸収され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れば水分の補給が絶たれる。晴天が続けれ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つ

て道路構造が泥弱化することが懸念され、未解明な部分も多く残されている。これらの問題点に対する一つの対策として、以下に説明する貯留性ソルパックを用いた道路構造を提案し、その適用性について論述する。

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。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、性能表示される²⁾。

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土の隙間に貯留され、この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、その袋を転圧するだけで、袋に張力を生じさせて、中詰め材の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_{3f} 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



写真1 貯留性ソルパック

(転圧前 $B=60 \times L=45 \times H=10 \text{ cm}$, 転圧後 $66 \times 50 \times 9.7 \text{ cm}$)

る。この $(\sigma_{1f} + \sigma_{al})$ と $(\sigma_{3f} + \sigma_{a3})$ 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 :パック材の引張り強さ, 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、式(2)の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の材料の破壊時における主応力 σ_{1f} と主応力 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。

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

以上、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とすれば、式(1)～式(3)の関係から、式(4)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、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×40cm×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)、耐荷力の計算値は奥行 40 cm の

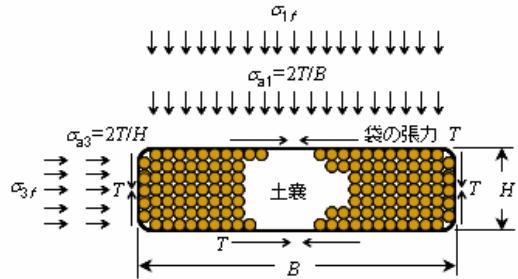


図1 土嚢と中詰め材に作用する応力

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 にもなったとの実験結果もある³⁾。この数値は 80 ～ 100 m の高さの土の重量にも耐え得ることになる。なお、転圧回数は中詰め材によって異なるが、その度合いは動的平板載荷試験による予備試験で簡単に求められる。

3. 秤量実験の結果と算定式との差違

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。土嚢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歩道などの表面に敷設される透水板を置き、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変化を継続して測り、同時に表面の湿度、温度、風速を計測した。これを秤量実験と呼ぶことにする。

実測された水分量の変化との比較には、次に示す式(5)と式(6)の算定式を用いて検証した。

$$tE = \iota \cdot \rho \cdot \beta \cdot C_H \cdot U(q_s - q_a) \quad (5)$$

これは、バルク式と呼ばれ⁴⁾、水分気化の際に消費される潜熱輸送量を求めるもので、それを蒸発量に換算し



写真2 秤量実験

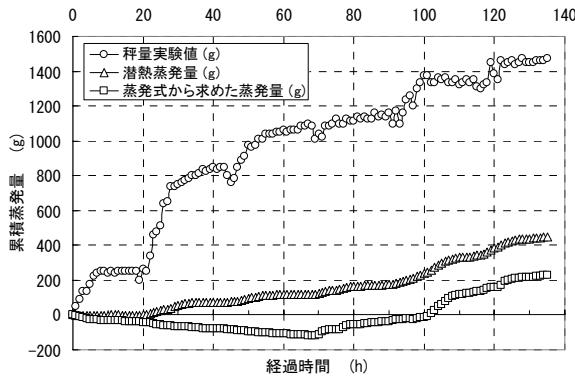


図 2 秤量実験と算定式による蒸発量の比較

た。ここに, E :蒸発量($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), v :水の気化熱(J/kg), ρ :空気密度(kg/m^3), 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 :大気の比湿(kg/kg)である。もう一つは蒸発式⁵⁾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($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{hPa}_a$), 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 :表面の水上気圧(hPa_a), e :大気の水上気圧(hPa_a)である。

図 2 に秤量実験から得られた蒸発量と、前述した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。秤量実験の累計は、算定式の値に対して 3~6 倍も大きく予想以上に蒸発量が多い。特に、野外で路面直上の湿度を精度よく計測することは難しく、理論式から蒸発量を求めることには問題があるとも思われる。ただし結果から、透水板を介しても蒸発潜熱の効果は失われないことが確かめられた。なお、図 2 の結果は、計測中の全データの中では比較的実測値に算定値が近いときの一例である。

4. 野外実験による検討

設置箇所は埼玉県東松山市内で、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)を形成し、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。貯留性ソルパックの中詰め材には珪砂を使用した。秤量実験の結果を踏まえて



写真 3 野外実験の状況

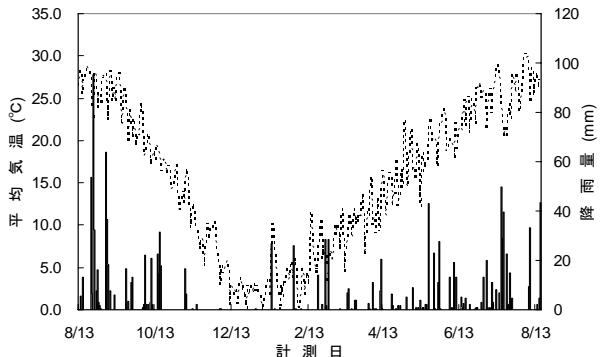


図 3 計測箇所の降雨量と日平均気温

野外実験では、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 の土壤水分計測機器を設置して、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。

写真 3 にその状況を示す。設置は平成 17 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放置期間が必要と考え、観測は 8 月 13 日から開始し現在も継続している。図 3 には計測地点の年間降雨と日平均気温の変化を示した。年間降雨量は 1262 mm で我が国の平均値を下回る。

図 4 に設置した二種類の透水性の路面板の 8 月 13 日の開始時から 9 月 5 日までの表面温度、1.5 m 位置で計測した気温と降雨量を併記した。路面板の表面温度と気温には約 20 °C の差がある。この時期には普通の舗装表面では 60 °C を越えることは珍しくないが、計測値は最高でも 55 °C 以下であった。

このときの貯留性ソルパック内の水分挙動を図 5 と図 6 に示す。貯留性ソルパックの上半分の水分量を ADR が、中間から幾分下方の水分量とその周辺の圧力

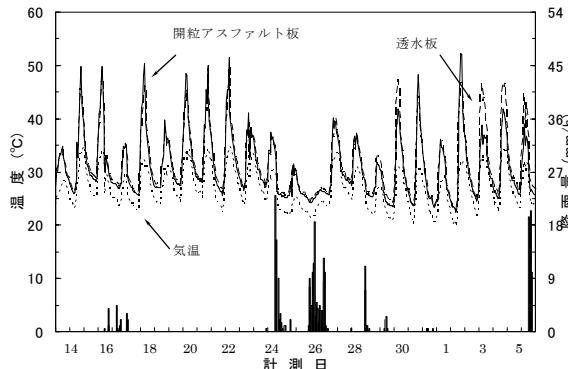


図4 路面の表面温度・気温と降雨量の関係

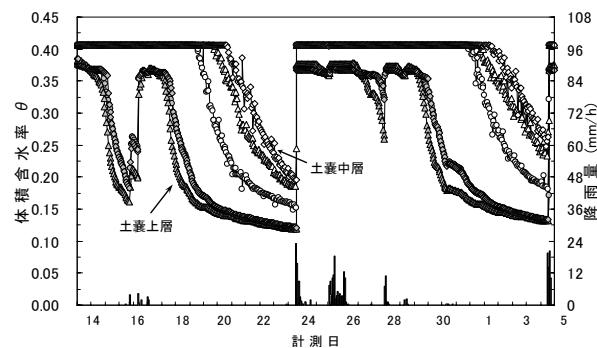


図5 体積含水率の降雨量による変化

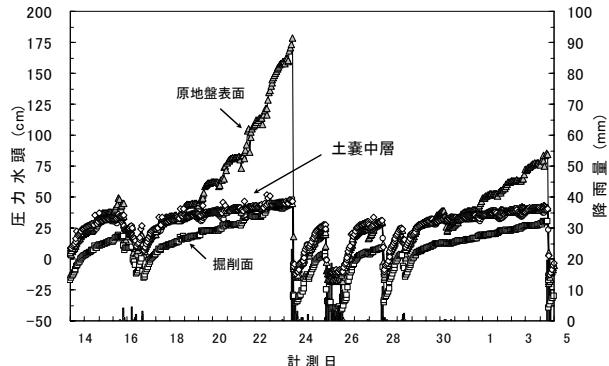


図6 貯留性ソルパックと周辺地盤の圧力水頭

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が埋設してあり、それらの挙動も図示している。図5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 日のタイムラグがある。当然、水分が減少するに伴い図4に示される路面の表面温度も上昇していくことが見て取れる。

図6の圧力水頭(負圧を正值で表示)も、降雨による

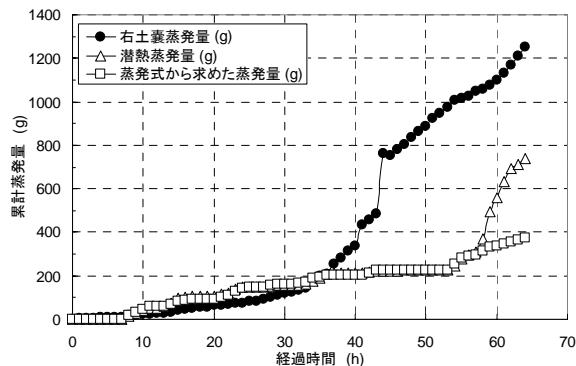


図7 貯留性ソルパックからの蒸発量

給水と蒸発作用によって変化している様子が分かる。掘削面より下方に設置したテンシオメータ(圧力水頭)の挙動も、貯留性ソルパックによって完全に原地盤を密封しているのではなく差異はない。

図7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、秤量実験で説明した算定式から求めたものとを比較した。図2と同様に、実際に蒸発した水分量はかなり多く、蒸発潜熱が効果的に働いていることは明らかである。

5. あとがき

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。今回、報告した貯留性ソルパックを用いた路面の被覆は、建設資材として強度面に問題はなく、安価で、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、すぐにでも活用できることを考えている。今後は、降雨浸透時における路床、路盤材への影響に対して検討を加えていきたい。

6. 参考文献

- 1) 石井一郎, 伊藤修, 龍野辰三, 岩立忠夫, 上田敏, 道づくりのソフトサイエンス, 鹿島出版会, (2005), p.105.
- 2) 佐藤雅宏, 協会活動報告, SOLPACK, No.2, (2002), p.5.
- 3) (株)テクノソール技術資料, (2000).
- 4) 近藤純正, 地表面に近い大気の科学 -理解と応用-, 東京大学出版会, (2000), pp.140~142.
- 5) 上田政文, 湿度と蒸発 -基礎から計測技術まで-, コロナ社, (2000), pp.136~137.