

砕石スラッジを原料とした粒状物の保水性・透水性 歩道舗装材としての適用に関する研究

APPLICATION OF GRANULAR-MATERIAL MADE FROM STONE SLUDGE TO PAVEMENT MATERIAL
WITH WATER-RETENTION AND PERMEABLE FOR PEDESTRAINS

西 元央*・藤井和洋**・吉村範久***・山田 優****

by Motohiro NISHI, Kazuhiro FUJII, Norihisa YOSHIMURA and Masaru YAMADA

1. はじめに

建設工事に伴う建設汚泥、港湾・河川等の浚渫工事に伴う浚渫土および砕石・砕砂の製造過程で発生する砕石スラッジなど、建設に係わる各現場で大量に発生している泥土の有効利用促進が望まれている。

現在実施されている泥土の利用方法は、セメントや石灰などを用いた安定処理、あるいはこれに他の副産物・廃棄物を混合して、土材料として利用しようとするものがほとんどである。しかし、土は建設資材でもっとも安価な材料であるため、泥土の処理土が新材の土より優先的に利用されることは難しい。また、土材料として利用されるべき建設発生土が大量に余っている¹⁾。

泥土からのリサイクル材料を優先して利用してもらうためには、たとえば粒状物にして砕石の代替材にするといった土より付加価値の高い材料にまで改良する必要がある。また、その材料がもつ特徴を活かした利用を考えなければならない。

泥土をセメント固化して破碎した粒状物（以下、泥土固化砕石とよぶ）は、吸水・保水性に優れ、締固めた層はクラッシュランと同等の透水性をもち、路盤材として利用可能な材料である²⁾。この特徴を活かして有効利用ができれば、さらにリサイクルが促進すると予想される。その有効利用用途として透水性能と保水性能を期待する舗装への適用が考えられる。車道の表層への適用は強度的に難しいが、歩道や、公園内の道路や広場など、もっぱら自転車の走行、歩行者および車椅子等の通行に供する「歩道および自転車道等の舗装」（以下、歩道舗装とよぶ）であれば、適用が可能であると予想される。

舗装の構造に関する技術基準では、仕様規定から性能規定に移行し、また環境保全の観点から、各種

廃棄物・副産物からのリサイクル材料の利用を推進し、歩道舗装材についても、廃タイヤ³⁾、家屋廃材・間伐材などのウッドチップ⁴⁾、廃ガラス⁵⁾の適用性が検討されている。泥土固化砕石を歩道舗装の表層材料に使用した場合、「水溜りができない」、「地下水を涵養する」のほか、保水性が高いことから「路面温度の上昇を抑制する」などの快適な歩行・走行や、環境の保全の改善といった機能が期待される。

そのために、各機能を確保するために要求される性能、すなわち透水性、保水性、温度低減効果などについて明らかにする必要がある。また、この舗装の上を、人、自転車、車椅子、あるいは公園内の道路では管理車両が、通行するため、表面の摩耗などの耐久性が懸念される。

そこで、泥土試料として砕石スラッジを用い、それをセメント固化・破碎して粒状物を作製し、その歩道舗装材としての各種性能、従来の歩道舗装材との比較、ホイールトラッキング試験による耐摩耗性などを検討した。

2. 実験に用いた舗装材

2.1 従来使用されている歩道舗装材

実験に用いた従来の歩道舗装材を表1に示す。土系舗装では、バインダとして普通ポルトランドセメントを使用した。土系舗装には、明確な設計法や基準値等がなく、実際の施工に当たっては目標強度を設定している。本研究では、土系舗装の配合については、セメント安定処理路盤材料の配合設計と同様に、適当な量のセメントを加えたマサ土の締固め試験で求めた最適含水比を適用し、6日気中、1日水浸養生の合計7日養生後の一軸圧縮強さが、2MPaおよび3MPa以上になるための2通りのセメント量とした。土系舗装の配合とその強度を表2に示す。

2.2 泥土固化砕石を使用した歩道舗装

泥土試料として砕石スラッジを使用し、既設のプラントで泥土固化砕石を作製した。砕石スラッジにセメント系固化材、ポリマー混和剤および水を加えて混合し、真空下で押し出し成型によって板状に固め、

* 大阪市立大学大学院助手 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138), ** 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻前期博士課程, *** 大阪市立大学工学部環境都市工学科, **** 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻

そのまま1ヶ月間気中養生してクラッシャで破碎して砕石状にした。この粒状物の作製のための配合と、諸物性を表3に示す。それを歩道舗装の表層に使用する場合も、土系舗装と同様に、普通ポルトランドセメントを加え、最適含水比で締固めた。泥土固化砕石を使用した表層材料の配合とその強度を表4に、供試体の状況を写真1に示す。なお、泥土固化砕石の粒度は、透水性と強度を考慮してクラッシャランC-20の中央粒度とした。



写真1 泥土固化砕石を使用した表層材料

表1 実験に用いた従来の歩道舗装の種類と材料

| 舗装の種類 | 表層材料 | 寸法 (mm) | 略号 |
|----------------|--------------------------|------------|-------|
| 加熱アスファルト舗装 | 細粒度アスファルト混合物 | 300×300×50 | 細粒 As |
| 透水性アスファルト舗装 | 開粒度アスファルト混合物 | 300×300×50 | 透水 As |
| セメントコンクリート平板舗装 | 歩道用コンクリート平板 (JIS A 5371) | 300×300×60 | Co |
| セメントコンクリート平板舗装 | 透水性コンクリート平板 (市販品) | 300×300×60 | 透水 Co |
| 土系舗装 | セメント安定処理まさ土 | 300×300×50 | 土系 |

表2 土系舗装表層材料 (セメント安定処理まさ土) の配合と一軸圧縮強さ

| *配合 | | | | ***一軸圧縮強さ (MPa) | 略号 |
|----------|------|------|-----------------------------|-----------------|-----------|
| まさ土 (絶乾) | **水 | セメント | 目標一軸圧縮強さ (7日養生: 6日気中, 1日水浸) | | |
| 100 | 12.1 | 4.7 | 2MPa | 2.77 | 土系 (2MPa) |
| | | 6.3 | 3MPa | 3.90 | 土系 (3MPa) |

*質量比, **最適含水比: 12.1%, *** 7日気中養生

表3 泥土固化砕石の配合と諸物性

| *配合 | | | 泥土固化砕石の諸物性 | | | | |
|-----------|-------------|-------|---------------------------|---------|------------|------------|----------------------|
| セメント量 (%) | ポリマー混和剤 (%) | 水 (%) | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | すり減り減量 (%) | 修正 CBR (%) | **透水係数 (cm/sec) |
| 20 | 2 | 2.1 | 1.89 | 17.7 | 24.2 | 138.0 | 4.1×10 ⁻³ |

*砕石スラッジの湿潤質量に対する, **供試体はE法で作製

表4 泥土固化砕石を使用した表層材料の配合と一軸圧縮強さ

| *配合 | | | ***一軸圧縮強さ (MPa) | | |
|----------|-----|------|-----------------|-------|-------|
| 粒状物 (絶乾) | **水 | セメント | 7日養生 | 28日養生 | 56日養生 |
| 100 | 24 | 2 | 1.46 | 1.92 | 2.07 |
| | | 4 | 1.99 | 2.26 | 2.99 |
| | | 6 | 2.26 | 2.98 | 3.56 |
| | | 8 | 3.06 | 3.62 | 5.08 |
| | | 10 | 3.75 | 4.07 | 6.24 |

*質量比, **最適含水比: 24%, ***気中養生

3. 泥土固化碎石を使用した歩道舗装の性能

3.1 舗装の性能の測定方法

(1) すべり抵抗性

舗装のすべり抵抗性の性能指標として、BPN (British Pendulum Number) を、振り式スキッド・レジスタンステストを用いて測定した。湿潤状態の測定面をゴム製のスライダの縁が滑動するときの抵抗値をBPNで表し、この値が高いほど、すべり抵抗が高いことを示す。

(2) 弾力性

舗装の弾力性の性能指標として、ゴルフボール反発係数 (GB係数) とスチールボール反発係数 (SB係数) を測定した。前者は、質量約45gのゴルフボール (糸巻きタイプ) 後者は質量約67g、直径1インチの鋼球を、いずれも100cmの高さから自然落下させ、それぞれの反発高さを落下高さに対する百分率で表したものである。GB係数の数値が高いほど、衝撃吸収性が低く、SB係数の数値が高いほど、反発弾性が高いことを示す。なお、表1に示す舗装材のほか、公園内の土系歩道、レンガ舗装、樹脂系舗装、天然芝、人工芝についても測定した。

(3) 透水性

舗装の透水性の性能指標としては現場透水試験⁶⁾による浸透水量があり、歩道舗装に透水性能を設定した場合、一般に、300ml/15s以上を目標としている。しかし、本研究では、泥土固化碎石を使用した舗装と土系舗装について、土質試験における変水位透水試験 (JGS 0311) で透水係数を求め、透水性を比較評価した。

(4) 吸水・保水性

舗装の吸水・保水性については、雨天時の吸水による保水量の変化と、吸水した舗装から蒸発水量を求めて評価した。泥土固化碎石を使用した舗装と、土系舗装および透水性コンクリート平板舗装の供試体を屋外に放置し、供試体の質量を測定して単位体積あたりの降雨後の保水量 (mg/cm^3) を求めた。さらに、雨水を吸水した舗装供試体を、10月26日から11月24日 (日中最高気温11.7~24.2℃) まで屋外に放置し、質量を測定して単位体積あたりの蒸発水量 (mg/cm^3) を求めた。なお、その際、雨天時にはシートを被せて吸水を防いだ。舗装供試体のサイズは、泥土固化碎石を使用した舗装と土系舗装では直径10.7cm×高さ5cm、透水性コンクリート平板では幅10cm×奥行10cm×高さ5cmである。なお、粒状物を使用した舗装供試体は、7日養生後の一軸圧縮強さが2~3MPaになるためのセメント量6.8%で作製した。

(5) 路面温度

路面の温度については、K型熱電対を用いて測定

した。舗装供試体の表面から2.5cmの深さに熱電対を埋設し、15分毎の温度をデータコレクタに記録した。路面温度測定実験の概要を図1に示す。なお、アスファルト舗装および泥土固化碎石を使用した舗装については、粗骨材である碎石および泥土固化碎石に熱電対の受感部を埋め込み、セメントペーストで固定した。

(6) 転倒時の安全性

転倒時の安全性については、床の硬さ試験 (JIS A 6519) で転倒時の舗装の硬さを測定して評価した。この試験は人が転倒したときの頭部や身体各部の安全性の指標を求める試験で、ゴム板が置かれた測定点に、20cmの高さから質量3.85kgの頭のモデルを自由落下させ、舗装供試体に衝突したときの鋼製ヘッドに生じる加速度を測定し、加速度 (G) の最大値を硬さとして求める。縦300mm×横300mm×深150mmの型枠に、クラッシュランあるいは泥土固化碎石を最大乾燥密度の締固め度95%になるように締固めて作製した模擬路盤の上面に砂を薄く敷き均し、その上に置いた舗装供試体の硬さを測定した。概要を図2に示す。

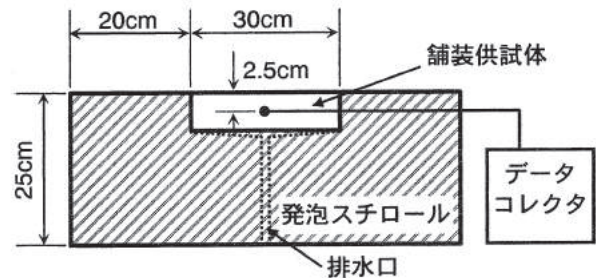


図1 路面温度測定実験の概要

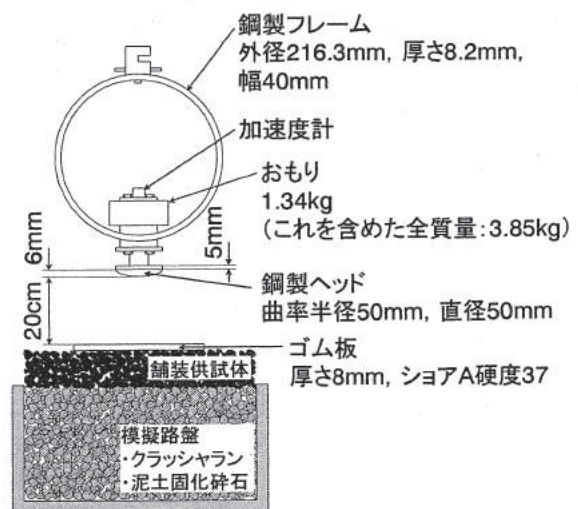


図2 舗装供試体の硬さ測定試験の概要

(7) 耐摩耗性

土系舗装は、アスファルト舗装やコンクリート舗装に比べて舗装表面が摩耗しやすく、耐久性に乏しいといわれている。泥土固化碎石を使用した舗装においても、人、自転車、車椅子、あるいは公園内の道路では管理車両の通行による舗装表面の摩耗が懸念される。そこで、ホイールトラッキング試験機を用いて摩耗試験を行った。

試験装置を写真2に示す。試験輪は直径215mm、最大幅70mmの一輪台車用のタイヤで、摩耗を促進させるために走行方向に対して20°に設置し、供試体中央部を21往復/min (42pass/min) の速度で走行させた。なお、タイヤ接地圧は、公園内道路の場合を想定し、舗装にかかる最大荷重を最大積載量4t以下の管理車両の輪荷重として0.32MPaとした。泥土固化碎石を使用した舗装と土系舗装について、56日間養生した供試体を試験機に取り付け、1000、5000、10000、25000、50000回走行後に供試体の質量を測定し、摩耗による損失率を求めた。

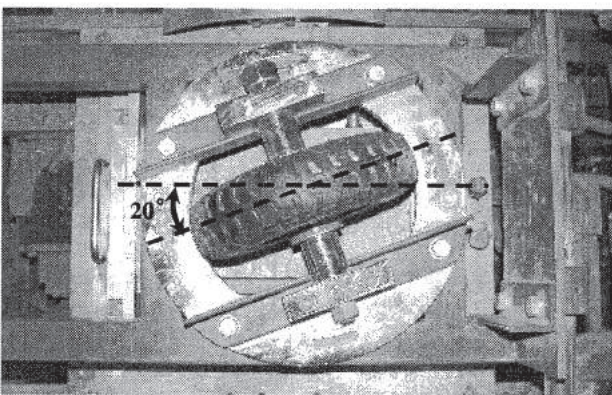
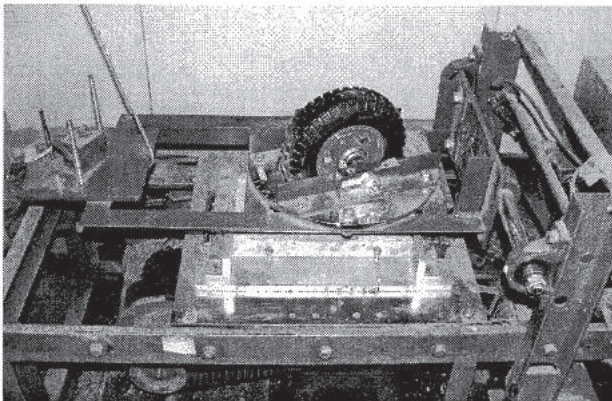


写真2 ホイールトラッキング試験を改良した摩耗試験の概要

3. 2 測定結果

(1) すべり抵抗値

各舗装のBPNを図3に示す。泥土固化碎石を使用した舗装のすべり抵抗値は75程度で、透水性アスファルト舗装や透水性コンクリート平板と同等のすべり抵抗を示した。舗装設計施工指針⁷⁾では湿潤路面で歩行者や自転車がすべりやすさを感じないすべり抵抗の目標値を40以上としており、それを十分に満たしている。写真1からもわかるように、粗い舗装表面の形状が効いている。

(2) 弾力性

各舗装供試体のSB係数とGB係数の関係を図4に示す。泥土固化碎石を使用した舗装では、一軸圧縮強さが高いほど、衝撃吸収性が高く、コンクリート平板やアスファルト舗装並みであるが、反発弾性

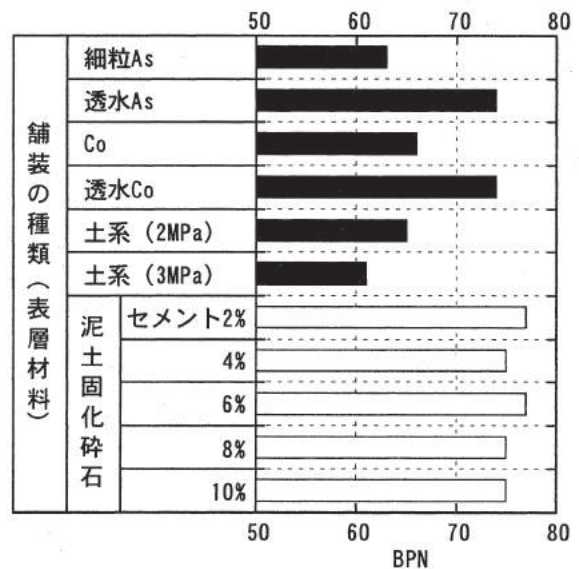


図3 各舗装のすべり抵抗値

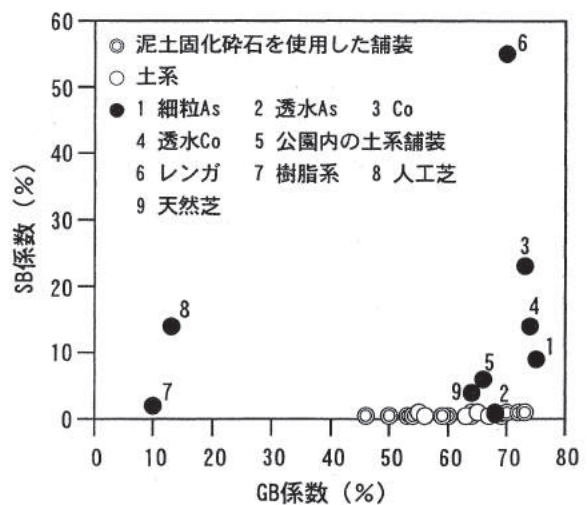


図4 各舗装供試体のSB係数とGB係数の関係

はこれらよりかなり低い。泥土固化碎石を使用した舗装の弾力性は、概ね、土系舗装、透水性アスファルト舗装と同等である。

(3) 透水性

泥土固化碎石を使用した舗装および土系舗装の表層材料の透水係数を図5に示す。泥土固化碎石を使用した舗装の透水性は、土系舗装に比べてはるかに優れていることがわかる。透水性能に着目した車道舗装では、舗装材の目標透水係数を $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 以上に設定する場合が多い。泥土固化碎石を使用した舗装では、セメント量6%以上になると、密になり、透水係数が $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ より低くなったが、十分に透水性能を有しており、透水性の舗装材として実用上問題ないといえる。

(4) 吸水・保水性

泥土固化碎石を使用した舗装、土系舗装および透水性コンクリート平板の降雨時の吸水による保水量の変化を図6に示す。舗装の最大保水量は、24時間水浸後の質量と乾燥質量の差から求めた。泥土固化碎石を使用した舗装は、土系舗装や透水性コンクリート平板に比べて最大保水量が高いことがわかる。また、累積降水量が7.5mm程度で最大保水量に達しており、雨水の吸水性が高いといえる。

泥土固化碎石を使用した舗装、土系舗装および透水性コンクリート平板からの蒸発水量を図7に示す。透水性コンクリート平板では、試験開始から1日目の蒸発水量は高かったが、その後の蒸発水量はかなり低くなった。土系舗装では、蒸発が長く続いているのがわかる。泥土固化碎石を使用した舗装では、初期の蒸発水量は土系舗装に劣るが、試験後半は土系舗装よりも高い蒸発水量で、土系舗装と同様に蒸発が続き、総蒸発水量についても最も高かった。この舗装では、土系舗装以上の気化熱による路面温度の低減が期待できる。

(5) 路面温度

各舗装の路面温度の時刻変化を図8に示す。9月4日、18時から20時にかけて25mmの降雨があった。泥土固化碎石を使用した舗装では、日中の路面最高温度が細粒度アスファルト舗装に比べて 20°C 、土系舗装に比べて 3°C 程度低く、路面温度低減効果が大きいことを示した。路面温度の低減は、泥土固化碎石を使用した舗装に含まれる水の気化熱と、路面の色によるものと考えられる。透水性コンクリート平板と泥土固化碎石を使用した舗装では、ほとんど同じような色をしていたが、 5°C 程度の温度差が現れた。図7に示したとおり、粒状物を使用した舗装のほうが、水分の蒸発性が高いためである。しかし、降雨から日数が経過すると、その効果が小さくなった。

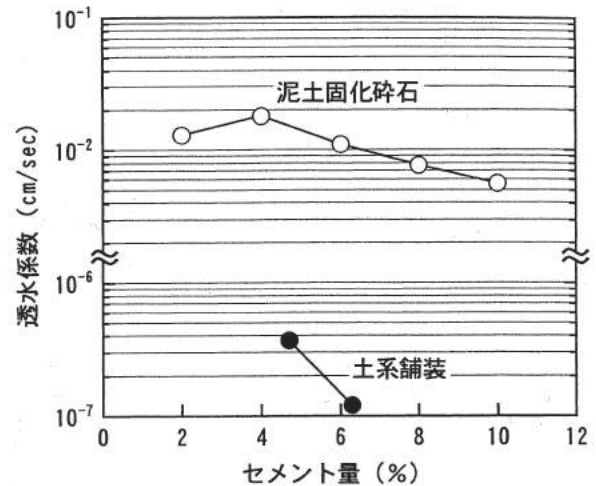


図5 表層材料の透水係数

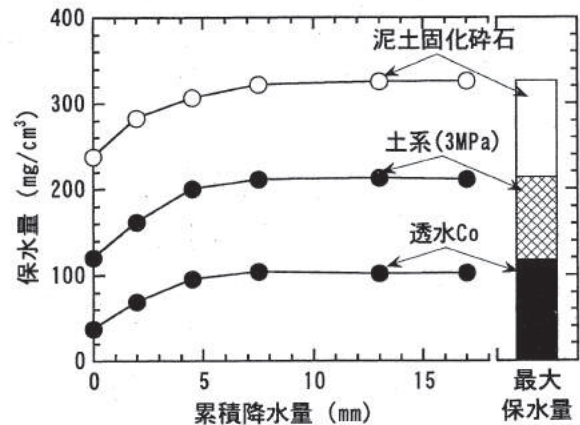


図6 降雨時の吸水による保水量の変化

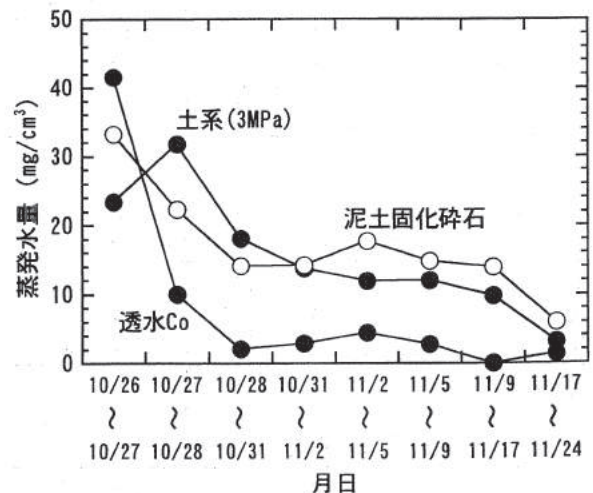


図7 舗装供試体からの蒸発水量の測定例

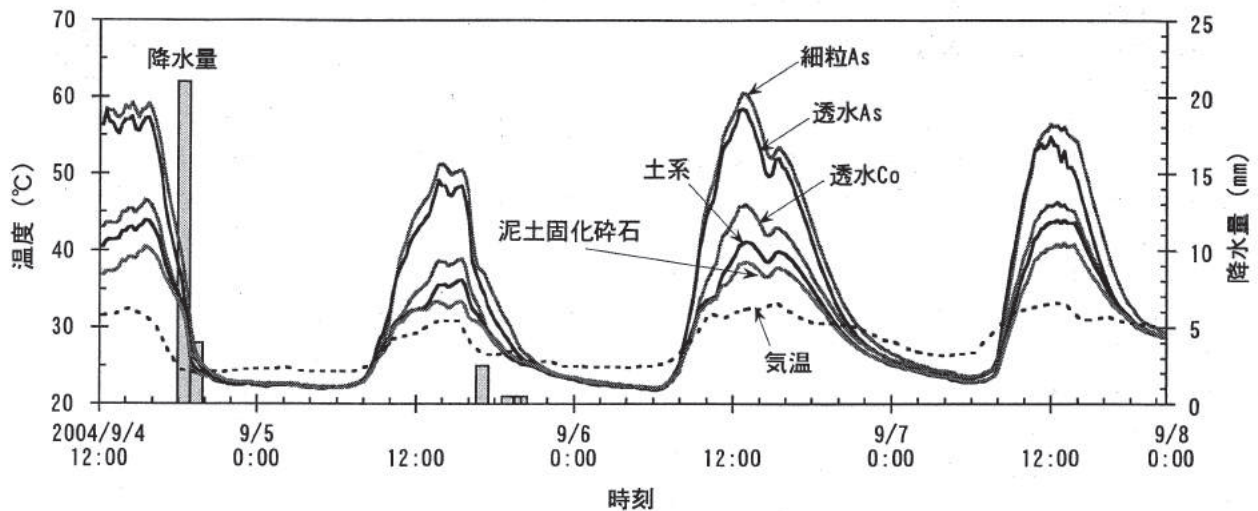


図8 各舗装材の路面温度の時刻変化

(6) 転倒時の安全性

転倒時の舗装の硬さを表5に示す。路盤が泥土固化碎石の場合、最大加速度はわずかだけ小さくなった。泥土固化碎石を使用した舗装と、土系舗装では、

表5 転倒時の舗装の硬さ 単位：G

| 舗装の種類 | 路盤の種類 | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | クラッシュラン | 泥土固化碎石 | |
| 細粒度 As | 138 | 136 | |
| 透水性 As | 122 | 119 | |
| Co | 133 | 133 | |
| 透水 Co | 140 | 136 | |
| 土系 (2MPa) | 83 [7日] | 81 [7日] | |
| | 118 [28日] | 116 [28日] | |
| | 106 [56日] | 94 [56日] | |
| 土系 (3MPa) | 122 [7日] | 121 [7日] | |
| | 126 [28日] | 126 [28日] | |
| | 122 [56日] | 128 [56日] | |
| 泥土固化碎石 | セメント 2% | 69 [7日] | 70 [7日] |
| | | 78 [28日] | 75 [28日] |
| | 4% | 97 [7日] | 92 [7日] |
| | | 91 [28日] | 93 [28日] |
| | | 105 [56日] | 100 [56日] |
| | 6% | 104 [7日] | 98 [7日] |
| | | 113 [28日] | 109 [28日] |
| | | 112 [56日] | 110 [56日] |
| | 8% | 120 [7日] | 117 [7日] |
| | | 122 [28日] | 118 [28日] |
| | | 123 [56日] | 118 [56日] |
| | 10% | 120 [7日] | 118 [7日] |
| 119 [28日] | | 119 [28日] | |
| 126 [56日] | | 123 [56日] | |

() 内は養生日数

セメント量が多いほど、養生が長いほど、最大加速度が高くなる傾向を示した。また、泥土固化碎石を使用した舗装の硬さは、概ね土系舗装と同等であった。

鍋島ら⁸⁾は、歩道舗装において、屋内床材の硬さの範囲を調べ、転倒しても安全な硬さの範囲を55～91Gとしている。一方、「屋内運動場の床の安全性に関する調査研究」によれば、官能試験と運動動作時の硬さの観点から検討した結果、安全な硬さを100G以下としている。本研究では、鍋島らの室内床材の測定結果と、その他の室内床材等の硬さから、転倒しても安全な硬さの範囲を検討した。表6に室内床材等の硬さを示す。タイルカーペットの最大加速度が109Gで、この程度であれば、転倒しても比較的安全であると考えられる。泥土固化碎石を使用した舗装

表6 室内床材等の硬さ

| 室内床材 | 最大加速度 (G) | 備考 |
|-----------------------|-----------|-----|
| 畳 | 55 | 文献8 |
| 体育館床 | 88 | " |
| タイルカーペット | 109 | 文献9 |
| カーペット +アンダーフェルト | 74 | " |
| 塩ビタイル | 142 | " |
| 人工芝 (コンクリート上) | 95 | |
| クッションフロア (コンクリート上) | 94 | |

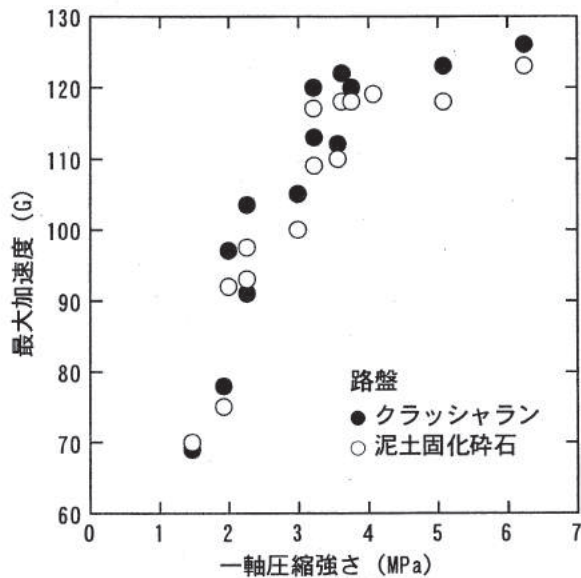


図9 衝撃加速度と一軸圧縮強さの関係

の一軸圧縮強さと最大加速度の関係を図9に示す。泥土固化碎石を使用した舗装では、一軸圧縮強さが概ね3MPa以下であれば、転倒しても比較的安全であるといえる。

(7) 耐摩耗性

摩耗試験の結果を図10に示す。土系(2MPa)と土系(3MPa)の損失率がほぼ同じであった。一方、泥土固化碎石を使用した舗装では、セメント量が少ないほど、損失率が高かったが、セメント量8%と10%では、土系舗装と同様にほぼ同じ損失率を示した。泥土固化碎石を使用した舗装、土系舗装ともに、ある強度以上になると、それぞれの摩耗による損失率はほとんど変化しなくなることが予想される。タイヤによる摩耗は、土系舗装では、タイヤの接地する面が全体的に摩耗したが、泥土固化碎石を使用した舗装では、粒状物の摩耗のほか、粗粒子の剥離がみられた。特にセメント量の少ない場合では、粒子同士の結合が弱いため、損失率が高くなった。今回実験に使用した粒状物では、バインダであるセメント量が6%では不十分で、8%で土系舗装より十分に高い耐摩耗性をもつといえる。

セメント量8%の舗装の衝撃加速度は、転倒しても比較的 안전한硬さの上限を超えるが、土系舗装と同等であり、アスファルト舗装やコンクリートブロックに比べて安全である。

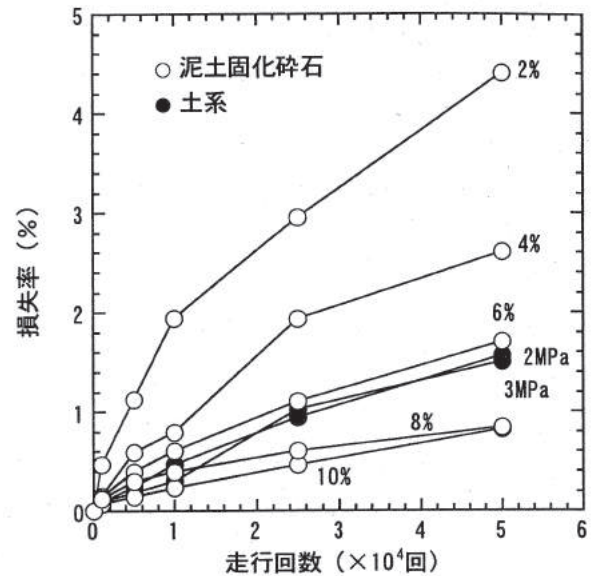


図10 耐摩耗試験における損失率と車輪走行回数
の関係

3. まとめ

以上の研究から得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 泥土固化碎石を使用した舗装のBPNは、75程度で、透水性アスファルト舗装や透水性コンクリート舗装と同等のすべり抵抗を有する。
- (2) 泥土固化碎石を使用した舗装の弾力性は、セメント量により異なるが、概ね、土系舗装、透水性アスファルト舗装と同等である。
- (3) 泥土固化碎石を使用した舗装の透水性は、セメント量6%以上になると、透水係数が $1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ より低くなったが、十分に透水性能を有しており、透水性の舗装材として実用上問題ない。
- (4) 泥土固化碎石を使用した舗装の保水性については、降雨により吸水・保水し、その保水量は土系舗装に比べて高く、蒸発は土系舗装と同様に長期間継続し、その蒸発水量は土系舗装より高い。
- (5) 泥土固化碎石を使用した舗装の日中の路面最高温度は、細粒度アスファルト舗装に比べて 20°C 、土系舗装に比べて 3°C 程度低い。路面温度の低減は、粒状物を使用した舗装に含まれる水の気化熱と、路面の色によるもので、特に気化熱の効果が大きいと考えられる。しかし、日数の経過とともに、その効果は減少する。
- (6) 泥土固化碎石を使用した舗装の転倒時の硬さは、概ね、土系舗装と同等であり、表層材料の一軸圧

縮強さが3MPa以下であれば、転倒しても比較的
安全である。

- (7) 泥土固化砕石を使用した舗装の耐摩耗性は、土系舗装に比べて、今回実験に使用した粒状物では、バインダであるセメント量が6%では不十分で、8%で十分に高い。
- (8) セメント量8%の舗装では、転倒しても比較的
安全な硬さの上限を超えるが、アスファルト舗装や
コンクリートブロックに比べると安全である。

以上から、今回使用した泥土固化砕石では、セメント量8%であれば、透水性、保水性に優れ、路面温度が低く、土系舗装より高い耐摩耗性、転倒してもアスファルト舗装やコンクリートブロックに比べて安全な性能を持った歩道舗装を構築することができる。

【謝辞】

床の硬さ試験の測定にご協力いただいたSRIハイブリッド株式会社の羽嶋宏治氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合建設副産物対策平成16年度版（2004）
- 2) 西 元央・山田 優：泥土固化砕石の路盤への適用性に関する研究，建設用原材料，Vol.13，No.1，pp6-12（2004）
- 3) 神永 均・平井克政・堀 昌幸：廃タイヤゴムチップを利用した景観舗装材の開発，舗装，Vol.33，No.4，pp.20-22（1998）
- 4) 鎌倉世志雄・佐藤清文・馬場 崇：セメントを固化材とした木質系舗装について，第25回日本道路会議論文集，No.09128，（2003）
- 5) 難波 徹・吉村勇夫：廃ガラスびんカレットを使用した薄層カラー樹脂モルタル舗装，舗装，Vol.33，No.5，pp.23-27（1998）
- 6) 日本道路協会：舗装試験法便覧別冊（暫定試験方法），（1996）
- 7) 日本道路協会：舗装設計施工指針，（2001）
- 8) 鍋島益弘・山田 優：高齢者・身体障害者のための歩行者系弾性舗装における適正な硬さの範囲，舗装，Vol.35，No.7，pp.15-19（2000）
- 9) 日本カーペット協会：ゆかを考えるー床材としてのカーペットー（1992）

（2005年3月18日受付 2005年4月6日受理）