

土系舗装体の耐久性と歩き心地に関する研究

佐藤研一¹・三宅秀和²・川上貢³・佐藤雅治⁴

¹正会員 博士(工学) 福岡大学助教授 工学部土木工学科
(〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

²学生会員 福岡大学大学院工学研究科博士課程前期建設工学専攻(同上)

³福岡大学 スポーツ科学部(同上)

⁴上和(株)(〒810-0044 福岡市中央区六本松 4-9-7)

本研究では、土系舗装体の耐久性を検討するために、土系舗装を含む配合と種類の異なる5種類の歩行者系舗装を施工し、摩耗量調査、舗装表面の弾力性調査及び同一材料による室内力学試験により土系舗装体の耐久性の評価を行った。また、現場施工試験を行った場所において、歩行試験及びアンケート調査を行い、土系舗装体の歩き心地の評価を行った。その結果、土系舗装材料は、施工後2ヶ月程度で安定し、凍結融解及び乾湿繰返し作用を受けることにより強度低下が生じることが示された。また、歩行試験の結果から土系舗装は、今回施工した舗装の中では、最も歩行に適しているという評価が得られた。しかし、アンケート調査の結果には、舗装表面の剥離の影響から歩きにくいという悪い評価を得ることもわかった。また、今回の評価法では、樹脂系の舗装が最も良いという結果が得られた。

Key Words : soil pavement, durability, walk feeling, test in-site execution, unconfined compression test, questionnaire

1. はじめに

現在、舗装は、各種用途に応じて多様化している。このうち、公園等で主に用いられる歩行者系舗装は、インターロッキングブロック、自然石、土やガラスカレットなどのさまざまな材料を使用した舗装で、年々増加傾向にあり、遊歩道、園路、散策路、庭園、階段及び広場等で広く用いられている。特に、土系舗装は、経済的にも安価で舗装体の色も自然と融合でき、人にやさしく、歩きやすい舗装とされている。しかし、足への負荷を軽くするために舗装強度を低く設定しているため、摩耗しやすく、環境の変化に伴う耐久性に乏しい舗装である指摘を受けている^{1),2)}。この土系舗装には、未だ設計法、耐久性及び安全性に対する明確な基準はなく、材料特性³⁾と耐久性の関係についても不明点が多く残されているのが現状である。また、舗装体の歩きやすさの評価は、舗装体が有する弾力性が重要な因子であると言われている。しかし、歩行感と弾力性の関係についても、多くの調査が行われてきた^{4),5)}が、未だ試験方法及び評価方法がないのが現状である。そこで本研究では、福岡大学構内に土系舗装を含む5種類の歩行者系舗装の施工を行った。そして、舗装表面の摩耗量や弾力性の経時的な変化の評価を行い、同時に材料の耐久性について室内試験を行った。一方、土系舗装の歩き心地については、施工現場において歩行試験を行い、被験者の足首部位に取り付けら

れた加速度計の計測結果及びアンケート調査から、土系舗装の歩き心地の検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試験施工及び調査概要

施工試験は、**図-1**に示す福岡大学通学用人道に、**表-1**に示す施工及び材料条件に従って、～のタイプの異なる土系舗装と、透水性舗装及び樹脂舗装の5種類の施工を行った。**図-2**にこの舗装の構造を示す。また、この通学用人道は、1日当たり延べ約2220人が通行し、自転車等の通行を制限している。なお、舗装材料の作製には普通ポルトランドセメント、混和剤として無機系硬化剤を使用している。また、区間は標準舗装の表面に摩耗を防ぐため、アクリル系の樹脂をトップコートとして塗布している。

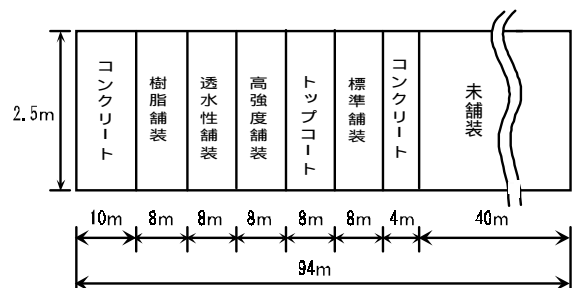


図-1 現場施工試験概要

表-1 施工概要及び条件

区間名	材料	セメント添加量 (kg/m ³)	混和剤 (L/m ³)	表層厚 (cm)	スランブ値(cm)
標準舗装	真砂土	160	18	8	15
トップコート	真砂土	160			
高強度舗装	真砂土	200			
透水性舗装	粒調砂	200			
透水性樹脂舗装	粒調砂, クリスタルビーズ				

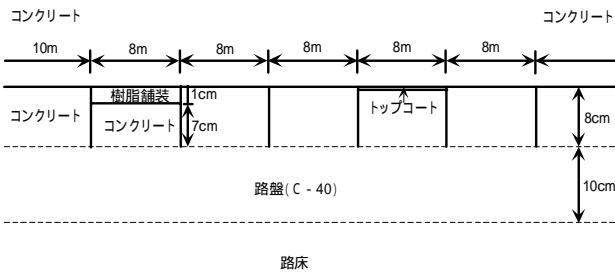


図-2 舗装の構造

施工終了後, 通行を開放し, 舗装体の耐久性について経時的に調査を行った. 舗装表面の摩耗量調査は, 水準測量により舗装体の高低差から沈下量の算出を行った. また, 舗装材料の衝撃吸収性の評価は, GB (ゴルフボール) 反発試験にて評価している.

(2) 土系舗装材料試験の概要

a) 供試体作製方法

今回は現場施工試験の標準舗装と高強度舗装の打設時に, 同一材料をモールド(直径 = 5cm, 高さ h = 10cm)に充填して供試体を作製した. その後, 一定期間の養生後, 一軸圧縮試験により材料特性の評価を行った. 供試体作製条件を表-2 に示す.

表-2 供試体作製条件

土質材料	真砂土
セメント添加量 (kg/m ³)	160, 200
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
混和剤の種類	無機系硬化剤
供試体の大きさ	直径5cm, 高さ10cm

b) 実験方法

土系舗装材料の力学試験は, 材料の耐久性の検討も含め, 気中, 乾湿繰返し及び凍結融解の3つの養生方法で行った. その養生方法の概略を表-3 に示す. 耐久性試験の供試体の養生は, 91日間気中養生を行い強度発現が一定になったものを, 乾湿繰返し及び凍結融解を与えながら7, 28, 56日間行った. また, 一軸強度の比較のため, 同一期間の気中養生した供試体を用いている.

表-3 養生方法の概略

養生の種類	方法	養生日数
気中	供試体をラップで包み20一定の恒温恒湿室で行う	7, 28, 56, 91, 98, 119, 147日
乾湿繰返し	供試体に6, 24時間周期で乾湿を繰返しを与える	91日気中養生後, 7, 28, 56日
凍結融解	供試体に-10で15時間後, 20で9時間を1サイクルとして凍結と融解を繰返しを与える	91日気中養生後, 7, 28, 56日

(3) 歩行試験および解析方法

a) 歩行試験の概要

本研究では, 歩き心地の評価について各舗装体ごと身体が地面より受ける衝撃の分析により検討した. 歩行試験は, 現場施工試験を実施した場所において, 施工直後に表-4 に示す条件のもと, 被験者の足首部位に加速度計を付けて行った. なお, 比較のためコンクリートにおいても歩行試験を行った.

表-4 歩行試験の条件

条件項目	条件
実験場所	現場施工試験を実施した場所
被験者	20代前半の男性3名
被験者歩行状態	靴, 裸足
実験回数	各舗装において試技を3回
接足	右足
実験歩行速度	2m/s ± 5%
サンプリングタイム	2msec

表-5 被験者の条件

被験者	年齢 (歳)	性別	身長 (cm)	体重 (kg)
H	22	男	181	73
K	25	男	165	65
T	22	男	182	75

被験者: スポーツ科学部院生



写真-1 歩行試験の様子

歩行条件として、被験者は、表-5 に示す正しい歩行の訓練を受けているスポーツ科学部院生の男性3名とした。できるだけ再現性を出すために、各舗装体の5m間速度を測定し、 $2.0\text{m/s} \pm 5\%$ の範囲の歩行速度で、成功した試技それぞれ裸足で3回、靴で3回の加速度データを取り出した。よって、検査数としては、一舗装体で9回となった。一般舗装道路は、いろいろな種類の靴で往來することを考え今回は、各被験者ごと普段から履いている靴を用いた。被験者間で靴、靴底の種類は違うが、一被験者では同じ靴で5種類の舗装体を歩いてもらったため、ここで現れたデータは舗装体の違いと考えた。写真-1 に歩行試験の様子を示す。

b) 加速度計の設置方法

写真-2 に加速度計装着の様子を示す。加速度センサーは、被験者の足首部位に両面テープで貼り付けた後、その上からずれないようにテーピングでしっかりと固定した。加速度の検出軸は、X方向（前後方向）、Y方向（上下方向）及びZ方向（左右方向）の3軸であり、有線でパソコンと接続し、その3軸のデータはデジタル保存した。また、X、Y、Z方向の合成値を合成加速度として分析した。

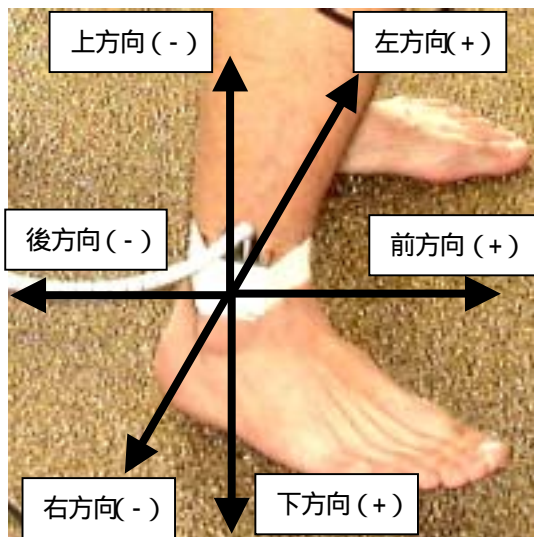


写真-2 加速度計装着の様子

c) 衝撃加速度の分析

歩行の着地直後の衝撃は、関節運動（筋肉の収縮、粘弾性特性）により制動がかかり、衝撃が緩衝されるといわれている。本研究においても、足首部位の加速度波形において着地衝撃の緩衝、すなわち、減衰波形が観測された。よって、この減衰振動⁶⁾の性質から、最大衝撃加速度、固有角周波数、減衰度を算出し、歩き心地の評価のパラメータとした。これら3つのパラメータの示す意味は表-6のように考えられる。

表-6 歩き心地の評価のパラメータ

パラメータ	意味
最大衝撃加速度 $G(\times 9.81\text{m/s}^2)$	各部位の衝撃の強さを示す指標 (足首部位の衝撃度)
固有角周波数 (rad/s)	減衰波形の角周波数であり、低いと強い制動を示す (足首部位の衝撃制動度)
減衰度 (s^{-1})	減衰波形が単位時間における減衰の割合を表し、大きいほど速やかな減衰を示す (足首部位の俊敏度)

d) アンケート調査

運動工学的な評価とは別に、土系舗装に対する歩き心地を調査するため、歩行者へのアンケート調査を行った。このアンケート調査は、現場施工試験を実施した場所で、現場施工試験後3ヶ月経過した後に、本学の通学途中の学生約130名（男女の比率はほぼ同数）に各舗装体を歩いてもらい、歩き心地について直接記入してもらった。調査項目⁷⁾としては、路面の硬さ、足触り、滑りやすさ、アスファルト舗装との比較、色合いの5項目について行い、最後に、歩き心地の良い舗装の順位を1位から6位までつけてもらい評価をした。

3. 結果及び考察

(1) 現場試験結果

a) 舗装体の耐久性の検討

図-3 に水準測量による摩耗量調査の結果を、図-4 にGB反発試験による衝撃吸収性調査の結果を示す。標準舗装は、セメント添加量が他区間より少なく、剥離を防ぐトップコートも塗られていないため、施工後10ヶ月において摩耗量も約1.1cmと大きい。また、GB係数が最も小さく、やわらかい舗装体で、耐久性の望めない舗装体であることがわかる。ここで、2ヶ月目まで土系舗装の摩耗量が多いのは、後述する室内試験の結果から舗装材料の強度が安定するのに、約2ヶ月程度かかるためと考えられる。

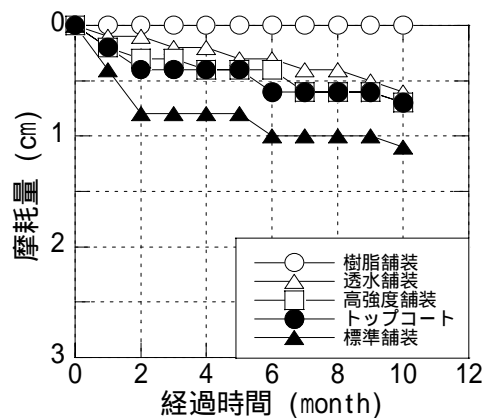


図-3 摩耗量調査結果

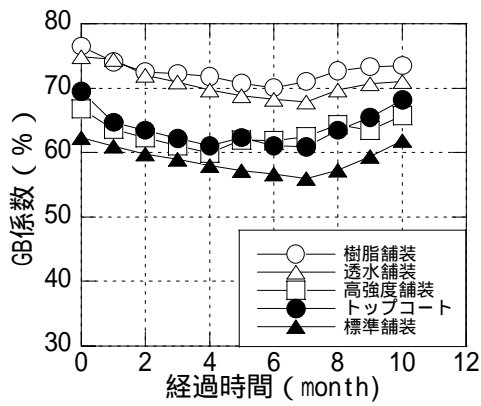


図-4 GB反発試験結果

区間は、トップコートを塗ることにより、標準舗装より摩耗が約半分に防止され、GB係数も大きくなり、舗装体の硬さが増加していることがわかる。区間の透水舗装は、ほぼ一定の割合で摩耗している。樹脂舗装は、ほとんど摩耗せず、GB係数も大きくなり、舗装体の硬さが増加していることがわかる。

b) 舗装表面の観察

写真-3 に標準舗装，写真-4 にトップコート，写真-5 に高強度舗装，写真-6 に透水舗装，写真-7 に樹脂舗装の施工後 10 ヶ月における各舗装体の舗装表面の状況を示す。

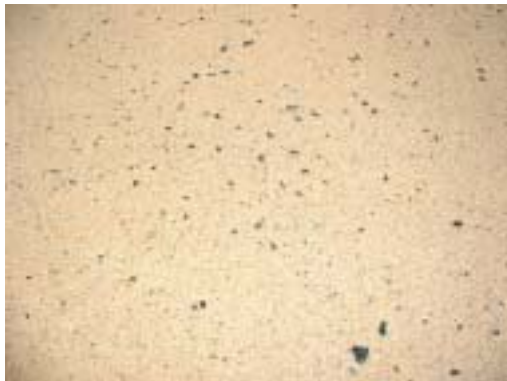


写真-3 標準舗装の舗装表面 (区間)



写真-4 トップコートの舗装表面 (区間)



写真-5 高強度舗装の舗装表面 (区間)



写真-6 透水舗装の舗装表面 (区間)



写真-7 樹脂舗装の舗装表面 (区間)

標準舗装は、最も摩耗していることもあり、細骨材の表面が露出し始めている。トップコートを塗布した区間においては、標準舗装の約半分程度の摩耗があるが、細骨材の表面の露出はほとんど見られない。高強度舗装もトップコートと同様に、標準舗装の約半分程度の摩耗があるが、細骨材の表面の露出はほとんど見られなかった。透水舗装においては、施工初期の摩耗は少なかったが、施工2ヶ月を過ぎると摩耗が顕著に見られるようになり、舗装表面も所々で剥離している。樹脂舗装表面の状況は、施工当時とほとんど変わっていない。これらのことから、標準舗装が最も表面剥離が激しく、摩耗することが観察される。しかし、全ての舗装において、ひびわれは見られなかった。

(2) 室内試験結果

a) 材料特性

図-5 に標準舗装と高強度舗装で使用した舗装材料において、気中養生を行った一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。

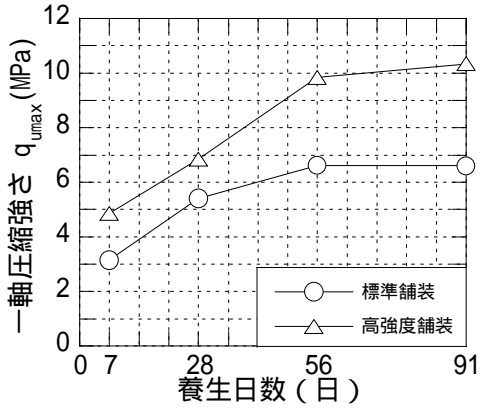


図-5 一軸圧縮強さと養生日数の関係

養生日数が7~56日間は、いずれの材料とも強度の伸びが大きく、56日を過ぎると標準及び高強度舗装とも強度増加がほぼ一定となる傾向を示している。これは、土系舗装材料が、施工後約2ヶ月程度でほぼ安定することを示している。また、高強度舗装は標準舗装に比べ約1.5倍の強度が生じることも明らかになった。

b) 乾湿及び凍結融解を受ける舗装材料の耐久性

土系舗装材料の耐久性の検討は、供試体を91日間気中養生した後、一定期間凍結融解及び乾湿繰返しを行った。図-6 に標準舗装及び、図-7 に高強度舗装の耐久性試験後の一軸圧縮強さを示す。

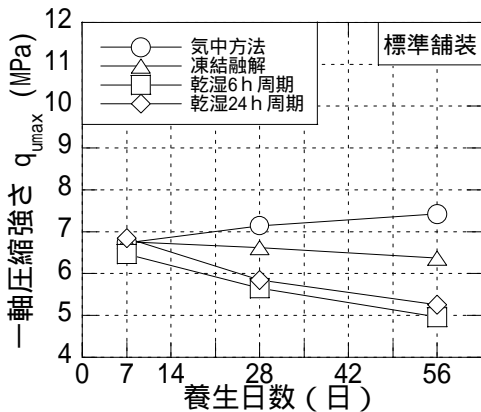


図-6 標準舗装による耐久性試験結果

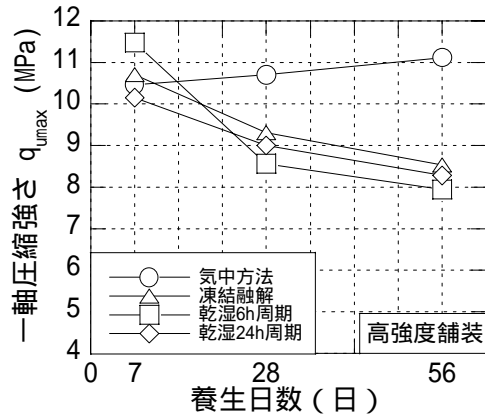


図-7 高強度舗装による耐久性試験結果

いずれの材料ともに、凍結融解及び乾湿繰返しを行った供試体は、気中養生されたものに比べ約2MPa程度の強度低下が見られることがわかる。今回の実験では、乾湿繰返しのほうが凍結融解よりも強度低下が見られた。凍結融解の強度低下が見られなかった理由は、事前養生に伴う供試体内部のセメント水和反応に伴う水分量低下が原因と見られる。また、時間周期による乾湿繰返しの影響は、ほとんど見られなかった。今後、材料の耐久性は、長期にわたる検討を含め現場環境に応じた研究が必要と考えられる。

(3) 歩き心地の検討

a) 加速度の方向性からの評価

図-8, 9 に被験者3人の平均の最大衝撃加速度の結果を、図-10 に最大衝撃の標準偏差グラフを示す。なお、トップコートについては、歩行試験後に舗装体表面にトップコートの塗布を行った。そのため、歩行試験の結果に示していない。

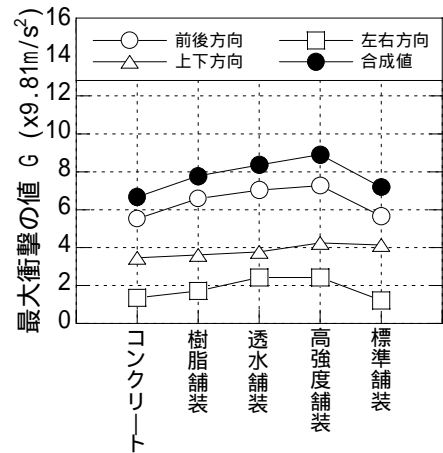


図-8 最大衝撃(靴)

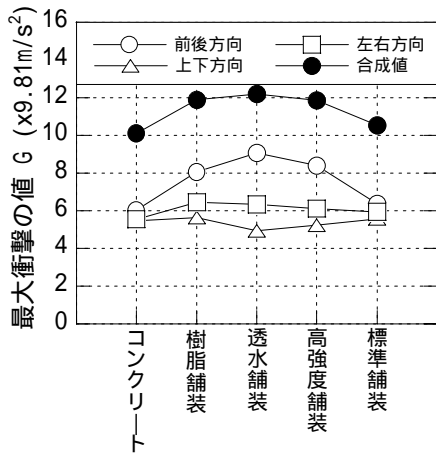


図-9 最大衝撃（裸足）

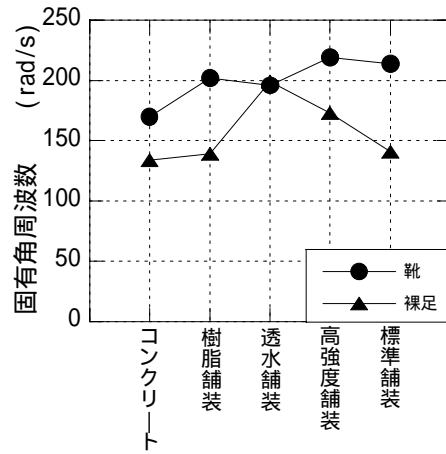


図-11 固有角周波数の結果

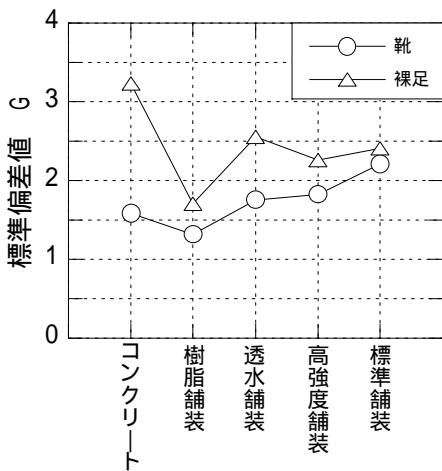


図-10 最大衝撃の標準偏差グラフ

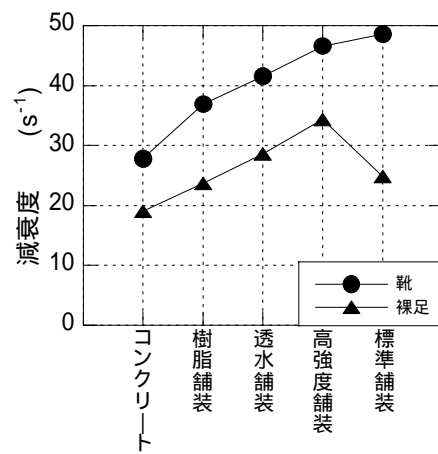


図-12 減衰度の結果

靴の場合、上下及び左右方向の最大衝撃値（G）は、どの舗装においてもほとんど変わらなかった。前後方向の最大衝撃値（G）は、樹脂、透水及び高強度舗装が他の舗装に比べわずかに大きくなった。これは、これらの舗装が他の舗装に比べ滑りにくいのではないかと考えられる。一方、裸足の場合、前後、上下及び左右方向ともに靴の場合と同様な傾向が見られた。また、裸足の場合は、靴の場合に比べ約2倍の衝撃がかかっていた。最大衝撃の標準偏差（図-10）は、靴に比べ裸足の場合、すべての舗装体で標準偏差値が大きかった。このことより、裸足のほうが最大衝撃値のばらつきが大きいことを意味する。特に、コンクリート舗装体の裸足歩行で標準偏差が顕著に大きく、着地の仕方にばらつきがあることがわかる。

b) 合成加速度からの評価

図-11に被験者3人の平均の固有角周波数の結果を示す。靴の場合、コンクリート舗装のみが他の舗装に比べ顕著に低い周波数を示した。このことは、この舗装が、強い制動動作が行われていたことを意味する。これに

対し、土系舗装の標準及び高強度舗装は、高い固有角周波数を示した。これは、コンクリート、樹脂及び透水舗装に比べ制動動作が弱いことを示している。一方、裸足の場合は、全体的に低い固有角周波数を示していることから、靴に比べて強い制動動作が必要であるといえる。図-12に減衰度の結果を示す。靴の場合では、標準及び高強度舗装が、他の舗装体に比べ大きな減衰度を示した。これは、土系舗装が、速やかに次の動作に移れることを示している。また、靴の方が裸足の場合より減衰度が大きいので、靴は、その目的どおり、足を保護し、靴を履いたほうが速い動作に適しているということがいえる。

これまでに示した最大衝撃、固有角周波数及び減衰度の結果から考察すると、土系舗装の標準及び高強度舗装は、他の舗装よりも歩行に適していると考えられる。

c) アンケート調査からの評価

図-13に路面の硬さ、図-14に足触り、図-15に滑りやすさ、図-16にアスファルト舗装との比較、図-17に色合い（色調）の結果を示す。

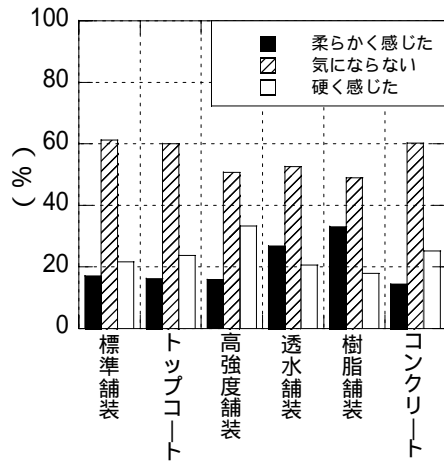


図-13 路面の硬さ

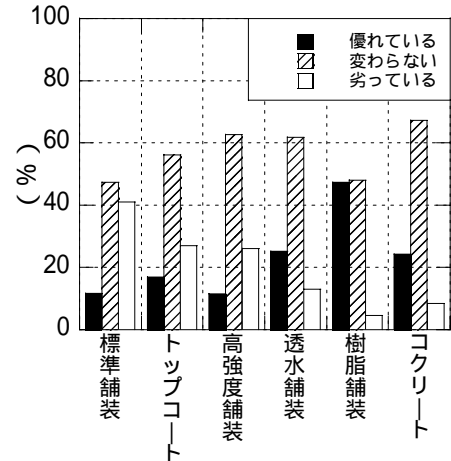


図-16 アスファルト舗装との比較

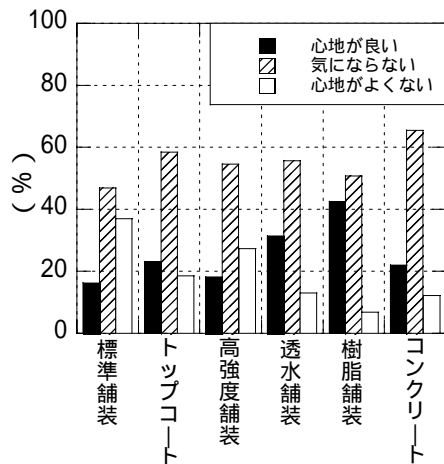


図-14 足触り

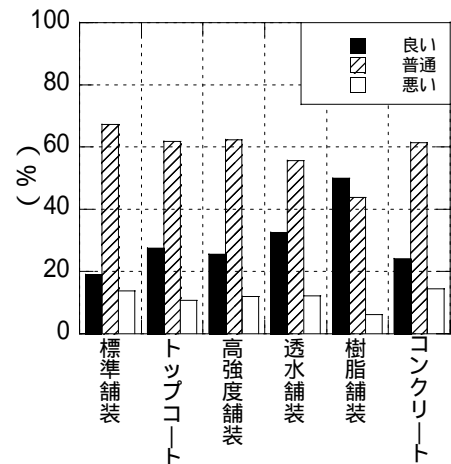


図-17 色合い(色調)

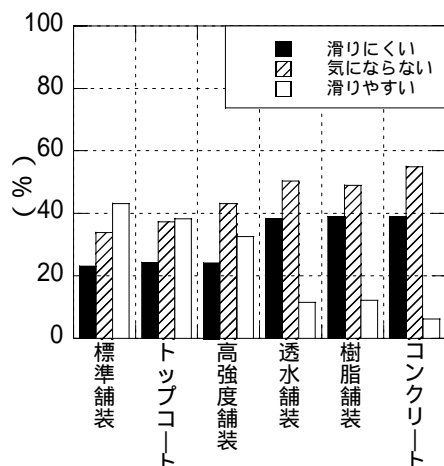


図-15 滑りやすさ

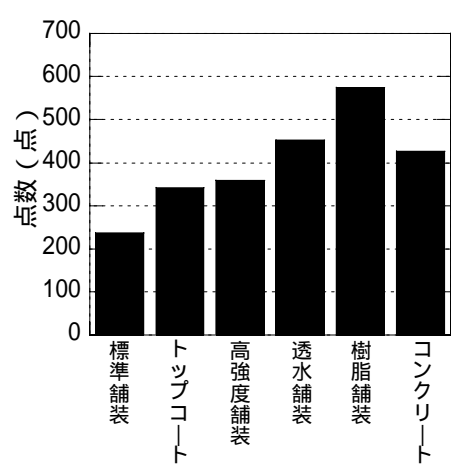


図-18 歩き心地の良い舗装の順位

路面の硬さは、各区間とも半分以上の人が特に気にならないと感じている。その中でも、樹脂舗装が最も柔らかいと感じている人が多かった。しかし、高強度舗装は、硬いと感じている人が多いことがわかる。足触りは、樹脂、透水及びコンクリート舗装で、ほとんどの人

が心地が良い、または、気にならないと感じている。しかし、標準舗装は、心地が良くないと感じている人が多いことがわかる。滑りやすさは、コンクリート、樹脂及び透水舗装で、90%以上の人滑りにくい、または、特に気にならないと感じている。しかし、標準、トップ

コート及び高強度舗装は、滑りやすいと感じている人が多かった。これは、施工を行ってから3ヶ月が経過し、摩耗が生じ舗装表面に砂粒子が見られるために、滑りやすいと感じたと思われる。アスファルト舗装との比較は、樹脂、透水及びコンクリート舗装で、ほとんどの人が優れている、または、変わらないと答えている。その中でも、樹脂舗装は、アスファルト舗装より優れていると答えた人が多かった。一方、標準舗装は、劣っていると思っている人も多かった。色合いは、各区分とも良いから普通となっている。その中でも、樹脂舗装の色合いが良いと感じている人が多かった。次に歩き心地の良い舗装の順位を1~6位までつけ、重み付けを行った結果を図-18に示す。この結果、樹脂舗装が最も歩き心地が良いと感じている人が多かった。しかも、半数以上の人々が樹脂舗装が最も歩き心地が良いと答えた。一方、標準舗装を6位につけた人も半数以上になった。このような結果になったのは、施工後3ヶ月経過していたので摩耗の影響が大きいと思われる。

これまでに示した歩行試験結果とアンケート結果から考察すると、歩行試験の結果から土系舗装は、今回施工した舗装の中では、最も歩行に適しているという評価が得られた。しかし、アンケート調査の結果には、舗装表面の剥離の影響から歩きにくいという悪い評価を得ることもわかった。また、今回の評価法では、樹脂系の舗装が最も良いという結果を得た。

4. 結論

本研究では、土系舗装を含む5種類の歩行者系舗装を施工し、舗装表面の摩耗量や弾力性の追跡調査及び材料の品質管理と室内においては、養生方法の違いにより耐久性の検討を行った。さらに、被験者の足首部位に取り付けられた加速度計を用いた歩行試験と現場アンケート調査を行い、土系舗装を含む歩行者系舗装の歩き心地の検討を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

(1) 土系舗装にトップコートを塗布することにより摩

耗が約半分に防止され、GB係数も大きくなり、舗装体の硬さが増加し耐久性が向上する。また、樹脂舗装は、耐久性もあり、硬い舗装体である。

(2) 土系舗装材料は施工後2ヶ月程度で安定し、凍結融解及び乾湿繰返しを行うことにより強度低下が見られた。今後、施工現場の環境を考慮に入れた検討が必要である。

(3) 歩行試験より、土系舗装の標準及び高強度舗装は、他の舗装よりも歩行に適していると考えられる。しかし、アンケート結果からは、舗装表面の剥離の影響もあり、歩き心地が良くないという評価を得た。このことから、歩き心地は人間の心理面も非常に大きなウエイトをしめているものと思われる。

(4) 耐久性と歩き心地の結果から考えると、樹脂舗装は、摩耗が少なく、耐久性がある歩行者系舗装であるといえる。

参考文献

- 1) 金森功, 高橋章, 齋藤昌之: 樹脂を用いた歩行者系舗装, 第22回日本道路会議論文集, pp. 594-595, 1997.
- 2) 松本光久, 本間政弘, 小橋弘美: コルクを用いた土系舗装, 第23回日本道路会議論文集, pp. 336-337, 1999.
- 3) 大中規行, 佐藤研一, 吉田信夫, 佐藤雅治: 土舗装材料の材料特性と試験施工, 舗装工学論文集第3巻, pp. 183-190, 1998.
- 4) 斎藤弘志, 大道賢, 坂本浩行: 歩行者系舗装の歩きやすさと弾力性に関する一考察, 第23回日本道路会議論文集, pp. 70-71, 1999.
- 5) 鍋島益弘, 山田優: 歩行者系舗装弾性舗装における適正な硬さ範囲について, 第23回日本道路会議論文集, pp. 328-329, 1999.
- 6) 水上憲夫: 自動制御, 朝倉電気工学講座11, pp. 115-119, 1969.
- 7) 黒崎正智, 上藤忠彦, 内田順一: ウッド舗装における利用者ニーズの反映に関する一試行, 第24回日本道路会議論文集, pp. 502-503, 2001.

THE DURABILITY AND WALK FEELING OF SOIL PAVEMENT

Ken-ichi SATO, Hidekazu MIYAKE, Mitsugu KAWAKAMI and Masaharu SATO

The purpose of this research is the durability and walk feeling of soil pavement. The in-site execution and laboratory tests were carried out to investigate the durability of soil pavement materials. The walk feeling of soil pavement has been evaluated by the walk tests and questionnaire survey. The results of laboratory tests indicated that the strength of the pavement materials was stabilized in 2 months after construction. However, the in-site execution test showed that the soil pavements took place the exfoliation of the pavement surface. On the other hand, it was shown that the repetition of dryness and moisture or the action of freeze and thawing reduce the strength of soil pavement material. The walking tests showed that soil pavement was easy to walk. However, the results of a questionnaire were shown that this pavement was the low evaluation in walk feeling for the influence of exfoliation of the pavement surface.