

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 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760330

研究課題名（和文） 雨水浸透下で繰返し交通荷重を受ける車道透水性舗装の力学耐久性の
解明研究課題名（英文） Deformation Characteristics of Permeable Asphalt Pavements under
Repeated Loading

研究代表者

中島 伸一郎 (NAKASHIMA SHINICHIRO)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70346089

研究成果の概要（和文）：

雨水が浸透した状態で交通荷重を受ける透水性舗装の耐久性を明らかにすることを目的として、路床材料の異なる 3 種類の透水性舗装模型を作製し、浸水および非浸水の条件下で繰返し平板載荷試験を実施した。実験の結果、いずれの路床材料のケースも、浸水によって載荷面の塑性変形が 5～6 倍に増大することが確認された。変形メカニズムとして、シルト質土路床の場合は、浸水による路床の剛性低下および塑性変形の増大が原因であると考えられる。一方、砂質土路床の場合は、浸水によって路床に発生した変形が非常に小さいことから、下層路盤の浸水による弱化と圧縮が、載荷面の塑性変形の増大の原因となっていると推測される。

研究成果の概要（英文）：

Permeable asphalt pavements have been used to reduce stormwater runoff from new development. However, considering application of the pavements into heavy traffic roadways, pavement durability is a great concern. In this study, cyclic plate loading tests have been carried out for model pavements simulating permeable asphalt pavements under unsaturated/saturated conditions to investigate the effect of the combination of high saturation degree by seepage water and repeated loading on the long-term deformational behavior of permeable asphalt pavements. From the test results, regarding deformation of a pavement surface, it was confirmed that the permanent deformation of the saturated models was five or six times larger than that of the models with natural water content regardless of subgrade soil type. As a mechanism of the deformational behavior, in the case the subgrade was cohesive soil, large plastic deformation of the subgrade was a major cause. On the other hand in the case the subgrade was sandy soil, compression of the subbase could be a major cause, considering the test result that settlement of subgrade surface was very small and it did not depend on saturation degree.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：地盤工学・舗装工学・岩盤力学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：透水性舗装、力学耐久性、路盤・路床、模型実験

1. 研究開始当初の背景

降雨による雨水を積極的に舗装内に取り込んで貯留・浸透させる透水性舗装は、都市水害抑制策、都市環境改善策のひとつとして期待されている。しかしながら、これを交通量の多い車道に適用する場合、浸透雨水と繰返し交通荷重の作用により路盤・路床が軟弱化し、通常の舗装と比べて短命化することが懸念されている。車道透水性舗装の構造設計は、雨水による路床材・路盤材の力学特性の変化を反映したものでなければならないが、現在までの研究では、力学特性が十分にモデル化されるには至っていない。また、アスファルト混合物層－路盤－路床という、力学特性の大きく異なる材料の積層体である舗装が、雨水浸透と繰返し荷重を受けた際の変形挙動も十分に把握されていないのが現状である。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ本研究では、車道透水性舗装の構造設計手法を確立するための基礎的研究として、舗装模型の繰返し載荷試験を通して、透水性舗装の長期変形挙動とそのメカニズムを明らかにするとともに、その変形挙動を表現しうる数値解析手法の確立を目的とする。舗装模型の繰返し載荷試験では、アスファルト混合物層－路盤－路床からなる実物大に近いサイズおよび構成の模型を使用し、交通荷重を模擬した繰返し平板載荷試験を行なう。

3. 研究の方法

(1) 路床条件および飽和条件を考慮した透水性舗装模型の繰返し平板載荷試験の実施

透水性舗装模型用の土槽を作製する。模型寸法は載荷による荷重の伝達範囲を考慮し、直径1m×高さ1mを想定する。この土槽に路床・路盤・ポーラスアスファルト混合物層からなる透水性舗装模型を打設する。均質な締固めを行なうため土槽は分割構造とする。また、十分な剛性と水密性を有するものとする。

透水性舗装の繰返し平板載荷試験を実施する。載荷条件は、交通荷重を想定し、載荷板直径は30cm、最大荷重49kNの正弦波荷重を1.0Hzで100万回程度載荷することを考える。路床材料については、強度と透水性の異なる3種類の材料、すなわち江戸崎砂(細砂)、霞ヶ浦砂(粗砂)、関東ローム(粘性土)を使用する。路盤材料は、同一の模型を2個ずつ作製し、一方は自然含水状態で、もう一方は路盤以下を飽和させた状態で載荷試験に供する。路盤以下を完全に飽和させた状態

で繰返し載荷を与える本実験の結果は、透水性舗装の現実的な耐久性を与えるというよりもむしろ、路床・路盤の支持力が最も弱いと思われる仮想的な条件での耐久性、つまり耐久性の下限を与えるものという位置づけである。

計測項目は、載荷中の載荷板変位、舗装表面変位、路床土内の土圧・水圧分布である。また、載荷試験終了後には、模型を開削し、舗装各層の最終的な沈下状況を計測する。

実験結果に基づいて、雨水浸透と繰返し交通荷重を受ける透水性舗装の長期変形特性とそのメカニズム、路床材料による変形性状の差異等を把握する。

実験に使用するアスファルト混合物、粒状路盤材および路床材については、飽和・不飽和条件、排水/非排水条件での繰返し三軸試験等を実施する。試験結果に基づき、それらの力学特性をモデル化する。

(2) 模型実験の数値シミュレーションによる検討

模型実験に対する数値解析を実施する。数値解析手法としては、弾塑性有限要素法を想定する。要素実験で得られた舗装各材料の力学特性パラメータを使用する。透水性舗装模型の繰返し平板載荷試験から得られた変形性状および舗装体内の土圧・水圧分布について実験結果と数値解析結果との比較を詳細に行ない、解析手法の検証を行なう。

4. 研究成果

図1に示すような直径1m×高さ1mの鋼製土槽に透水性舗装の模型を作製し、交通荷重を模擬する繰返し平板載荷を与えて、模型の変形の進行、路床面の土圧・水圧の変化などを計測して力学的耐久性を評価した。

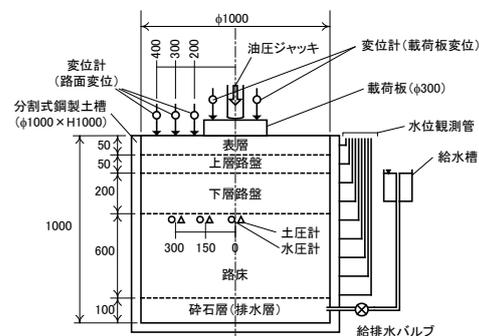


図1 模型および装置の概略図 (単位: mm)

模型は通常のアスファルト舗装と同様に、アスコン層、路盤、路床層で構成される。各

層の層厚と使用材料は表 1、表 2 に示すとおりである。 載荷には直径 30 cm の剛性円板を用い、最大 49kN の正弦波荷重を 1Hz の速さで最大 100 万回与えた。 実験ケースは 3 種類の路床材ごとに非浸水条件と浸水条件の 2 ケースである。 計測項目は、載荷荷重、載荷板変位、路面変位、路床面における土圧と間隙水圧である。

表 1 層厚および使用材料

	層厚	使用材料
表層	50 mm	ポリマー改質アスファルト H 型使用開粒度アスファルト混合物 (13)
上層路盤	50 mm	ポリマー改質アスファルト II 型使用透水性安定処理混合物 (30)
下層路盤	200 mm	クラッシュラン (C-40)
路床	600 mm	① 江戸崎砂 (細砂) ② 霞ヶ浦砂 (粗砂) ③ 関東ローム (シルト)
排水碎石層	100 mm	碎石 (C-40 と川砂を混合したもの)

表 2 路床材料の物性値

	江戸崎砂	霞ヶ浦砂	関東ローム
土粒子の密度 ρ_s [g/cm ³]	2.689	2.706	2.702
最大粒径 D_{max} [mm]	4.75	9.50	2.00
60%粒径 D_{60} [mm]	0.19	0.57	0.03
10%粒径 D_{10} [mm]	0.015	0.255	
最適含水比 w_{opt} [%]	17.0	17.6	72.7
最大乾燥密度 ρ_{dmax} [g/cm ³]	1.737	1.685	0.850
室内 CBR [%]	20	11	2
飽和透水係数 k [cm/s]	3.2×10^{-4}	1.8×10^{-2}	3.3×10^{-9}

図 2 に載荷回数と残留変位の関係を示す。 残留変位とは各載荷サイクルにおいて、荷重がゼロ (除荷) になっても載荷面に残留する沈下量のことをいう。 図より非浸水模型の残留変位は路床材料によらずほぼ同じであり、載荷回数 10^6 回で 10~20 mm である。 一方、浸水模型の残留変位は非浸水模型に比べ、顕著に増加しており、また、同じ載荷回数の時、路床材によって変位量に差が見られる。

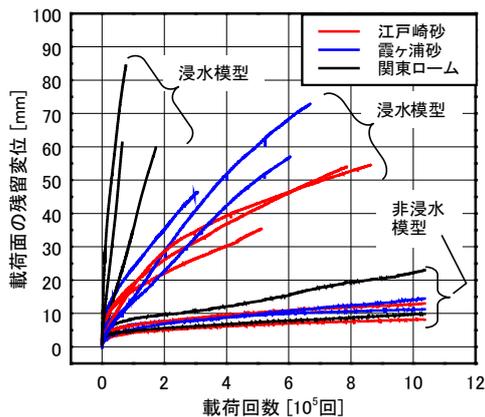


図 2 載荷面における残留変位

図 3 に載荷回数 6×10^4 回時点の残留変位を示す。 今回は、路床材ごと、浸水条件ごとの最大値を示した。 図より、浸水模型の残留変位は非浸水模型の 2 倍以上であり、特に関東

ローム模型では約 10 倍の速さで変位が生じている。 これより、路床および下層路盤の浸水がアスファルト舗装の塑性変形挙動に大きく影響することが確認できた。 また、図 3 で示した浸水模型の残留変位の大小関係は江戸崎砂 < 霞ヶ浦砂 < 関東ロームであるのに対して、表 2 に示した路床土の CBR の大小関係は関東ローム < 霞ヶ浦砂 < 江戸崎砂である。 したがって、同じ載荷回数ごとの載荷面の残留変位と路床材の CBR には強い相関があると言える。

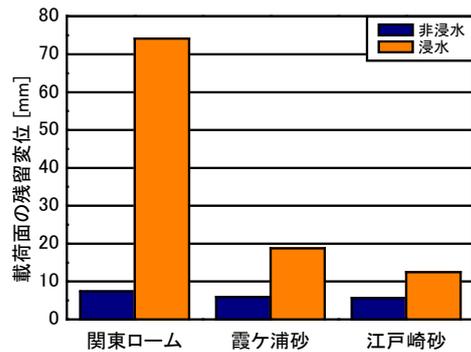


図 3 載荷回数 6×10^4 回時点の残留変位

図 4 に載荷点直下における路床面での土圧の推移を示す。 図中には載荷初期 1000 回までを拡大した図を示す。 図より載荷回数が 10^5 回以降は路床材料によらず土圧がほぼ同じである。 路床面に作用する土圧が同程度であれば、支持力の弱い材料ほど大きく変形するのは当然であり、図 3 に示した各路床材料による残留変形量の差は、これによるものであったと判断できる。 一方、載荷初期は路床材料によって土圧に差が生じている。 支持力の弱い関東ローム模型の土圧は、江戸崎砂や霞ヶ浦砂の模型の 40 %程度である。

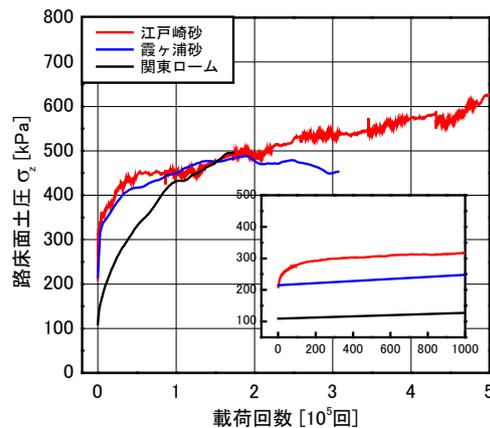


図 4 載荷点直下における路床面の最大土圧の推移

そこで、模型実験の路床面土圧を弾性解析により再現した。 解析結果を載荷中心位置からの距離と鉛直応力の関係として図 5 に示す。

解析モデルは、2次元軸対称モデルとし、アスコン層、路盤、路床の3層構成とした。解析で用いた各層のパラメータを表3に示す。アスコンの弾性係数は、レジリエントモデュラス試験結果を用い、路盤の弾性係数は、文献2)によった。路床の弾性係数は、CBRの10倍の値とした。図5より、各路材料の応力の大小関係が、関東ローム<霞ヶ浦砂<江戸崎砂となっている。図4でも同様の大小関係である。したがって、荷重初期時では弾性的挙動が見られた。

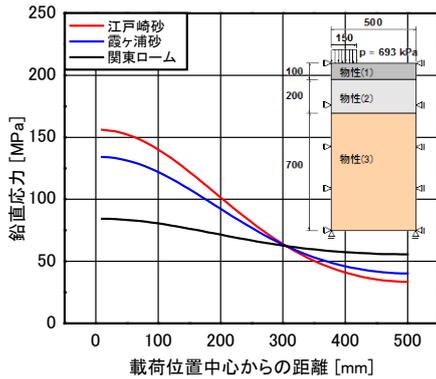


図5 弾性解析による各路床材料の路床面応力

表3 解析パラメータ

使用材料	層厚 [mm]	弾性係数 [MPa]	ポアソン比	密度 [kg/m ³]	
物性(1)	アスファルト混合物	100	1200	0.35	1021
物性(2)	クラッシュラン (C-40)	200	150	0.35	2150
物性(3)	江戸崎砂	700	200	0.35	2689
	霞ヶ浦砂	700	110	0.35	2706
	関東ローム	700	20	0.35	2702

荷重実験終了後、模型を解体する過程で、路面、下層路盤面および路床面の最終的な沈下状況をレーザープロファイラにより測定した。結果を図6に示す。図より、関東ローム路床の場合、下層路盤面および路床面まで大きな変形が伝達されていることがわかる。その最大沈下量は路面の最大沈下量の40~50%に相当する。このことから、関東ローム路床のケースにおける舗装の変形には、路床材の支持力の低さおよび浸水による支持力の低下が大きく影響していると推測される。これに対し、江戸崎砂路床の場合、下層路盤面の沈下量は荷重面の80%程度まで伝達されているのに対し、路床面の沈下は非常に小さく、また、乾燥モデルと浸水モデルとでほとんど差がない。図6(a)より、江戸崎砂路床のケースにおける荷重面の残留変位は、浸水によって大きく増大しているにもかかわらず、その変形は路床面にはほとんど表れていないことになる。このことから、江戸崎砂路床のケースにおける浸水時の舗装の変形は、路床材

の弱化というよりも、下層路盤の圧縮によるものであると推測される。

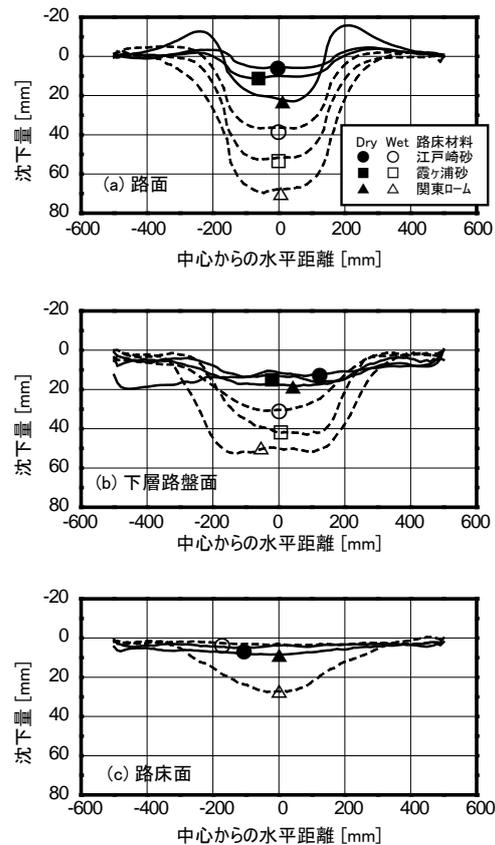


図6 荷重試験終了後の各層沈下形状

図6(b)および図6(c)から下層路盤層の圧縮量を求めたものを図7に示す。図より、分布形状は若干異なるが、江戸崎砂の路盤圧縮量は、関東ローム路床のケースとほぼ同程度である。すなわち、江戸崎砂路床の浸水モデルでの路面の残留沈下は、ほぼ全てが下層路盤層の圧縮によって吸収されているといえる。

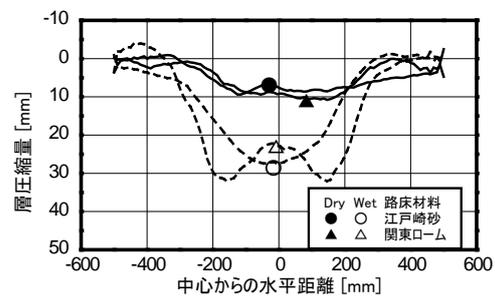


図7 下層路盤層の圧縮量分布

以上の透水性舗装モデル実験において下層路盤以下の浸水が舗装の力学挙動に及ぼした顕著な影響は次のとおりである。

- (1) 路床材料の違いにかかわらず、浸水により荷重面の残留沈下量は大きく増大し

た.

- (2) 実験終了後の開削調査によれば、関東ロームのケースでは、路床面の沈下量は、載荷面の残留沈下量に比例する形で発生した。一方、江戸崎砂のケースでは、浸水により載荷面の残留沈下量は増大したにもかかわらず、路床面の沈下量は、乾燥模型と浸水模型とで差がなかった。
- (3) 浸水模型において載荷点直下の路床面土圧は、路床材料によらず乾燥模型の2倍程度であり、載荷板による載荷圧の50%以上に達した。
- (4) 浸水模型において路床面付近に発生する過剰間隙水圧は作用土圧の1%程度であり、路床材料の強度を著しく減少させるものではないと考えられる。

浸水によるこれらの影響を踏まえると、関東ロームのケースでは、浸水による路床の剛性低下および塑性変形の増大が載荷面の残留沈下量の増大をもたらした可能性が高いが、江戸崎砂および霞ヶ浦砂のケースでは、浸水による路床の軟弱化はほとんど影響せず、下層路盤層が浸水によって弱化し、載荷面直下で圧縮したことが、載荷面の残留沈下量増大のメカニズムであると推測される。

透水性舗装に限らず、舗装の力学耐久性を本研究のような模型実験により検討した例は国内外を問わず稀である。舗装厚や材料、湛水条件などについて、今後、さらにバリエーションをもたせた実験結果を蓄積するとともに、実験結果を再現しうる数値解析を開発することによって、舗装の力学設計に寄与する成果が得られるものと考えている。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

①池田茜・殿村奏・中島伸一郎・清水則一：
繰返し載荷条件下における透水性舗装の力学挙動に関する基礎的検討，第46回地盤工学研究発表会，2011年7月7日，神戸国際会議場（神戸）。

②池田茜・殿村奏・中島伸一郎・清水則一：
繰返し載荷条件下における透水性舗装の変形特性に関する実験的検討，第63回土木学会中国支部研究発表会，2011年5月21日，岡山大学（岡山）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 伸一郎 (NAKASHIMA SHINICHIRO)
山口大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：70346089

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者

清水 則一 (SHIMIZU NORIKAZU)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：70150357

中田 幸男 (NAKATA YUKIO)
山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90274183