

浸水した透水性舗装の変形特性に関する実験

中島 伸一郎¹・小橋 秀俊²・岸田 潔³，木村 亮⁴

¹正会員 博(工) 京都大学次世代開拓研究ユニット (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:s.nakashima@hx7.ecs.kyoto-u.ac.jp

²正会員 博(工) (独) 土木研究所技術推進本部 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

³正会員 博(工) 京都大学工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴正会員 工博 京都大学産官学連携センター (〒615-8520 京都市西京区京都大学桂)

雨水が浸透した状態で繰返し交通荷重を受ける透水性舗装の変形特性を把握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。変形機構として、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。

Key Words : permeable pavement, deformation characteristics, model test, cyclic plate loading

1. はじめに

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¹⁾、都市環境改善策²⁾の1つとして期待されている。しかしながら、これを比較的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³⁾。一方で、透水性舗装を実際の車道に適用した事例は少ないものの、これら既存の施工事例によれば、供用後数年～10年程度経過しても、構造破壊や著しい性能低下は報告されていないのも事実である⁴⁾。

舗装内に水が浸入して湿潤状態となった状態で交通荷重が繰返し加わると、舗装が早期に破壊することは、古代ローマの時代において側溝を設けた道路が建設されていることからわかるように、古くから経験的に知られている⁵⁾。また、地下水位が高い地域で路盤の排水が不十分な場合には、路盤の支持力が減少し過度の沈下を起こしやすいこと、コンクリート舗装では舗装表面の目地やクラックから雨水が浸透すると、交通荷重によって路盤中の細粒分が路面上に噴出し最終的にはコンクリート版の下に空洞ができてしまうこと⁶⁾、寒冷地において冬期に凍結した路床・路盤が、春先の融解により軟弱化して舗装が破壊しやすいこと⁷⁾など、舗装内の過剰な水分が舗装の耐久性に悪影響を及ぼすことは、実路において経験的に良く知られている。

路盤材や路床土の含水状態と力学挙動の関係について

は、要素試験レベルでも研究されている。粒状路盤材^{8),9)}および細粒土^{10)~12)}から粗粒土¹³⁾に至る路床材料に対する繰返し三軸試験によれば、一般に、飽和度が高くなるにつれて含水状態がレジリエントモジュラスに及ぼす影響は大きくなり、飽和度の上昇とともにレジリエントモジュラスは低下する。また、飽和度が高く、かつ透水性が悪い場合には、過剰間隙水圧が上昇し、有効応力が減少するために、塑性変形に対する耐性も弱くなることが明らかにされている。これより、舗装体内の飽和度が上昇した状態で交通荷重を受ければ、路床・路盤において間隙水圧が急激に増加し、材料強度が一時的に急激に減少し弾性変形量の増大、塑性変形量の増大が発生することが考えられる。

以上のような知見に基づけば、雨水浸透による透水性舗装の短命化は容易に想像できる。そのため、従来、透水性舗装の車道への適用には極めて慎重な対応がとられてきたことは当然のことである。しかしながら、現在までのところ、透水性舗装を車道に適用した結果、早期に破損したという実証がないのも事実である。伊藤ほか⁴⁾は、わが国における車道透水性舗装の施工事例と追跡調査結果を分析した。その結果、交通量・路床土質と耐久性との関係について、①軽交通道路の場合には、土質(粘性土・砂質土)を問わず、数年間の供用では構造破壊に至ることはない、②重交通路線の場合であっても、砂質土地盤であれば10年程度供用後も著しい性能(路面、構造とも)の低下は見られない、と総括している。なお、これらの施工事例では、通常の舗装設計と同様に所要T_A

を確保することにより断面設計を行なっている。

雨水浸透による舗装の耐久性への影響が、経験的にも要素試験的にも指摘される中で、透水性舗装の施工事例では目立った性能低下が確認されていないのはなぜか。耐久性に低下を生じるとすれば、どのような断面・材料条件、浸水条件および荷重条件の場合か。耐久性の低下はどのようなメカニズムで発生するのか。これらの疑問を解決することは、車道透水性舗装の適用範囲を明確にし、設計手法や対策法を確立する上で必要不可欠である。

本研究では、表層・路盤・路床からなる透水性舗装の模型に対し、交通荷重を模擬した繰返し平板荷重試験を行なうシステムを構築した。今回は、水の影響に関する基礎的な実験として、下層路盤以下が飽和した状態で繰返し荷重を受けた場合に、舗装の耐久性がどの程度まで低下するかを把握することを目的とした実験を行なった。路盤以下の飽和を保持した状態で繰返し荷重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。舗装厚は固定（等値換算厚にして $T_A = 14 \text{ cm}$ ）とし、路床材料を3種類で変化させた。荷重中の舗装表面の変形や路床面の土圧・水圧を観測するとともに、荷重終了後の各層の沈下形状を測定した。これらの測定結果に基づき、浸水・非浸水による舗装の変形の差異、路床材料の違いが舗装の変形挙動に及ぼす影響を明らかにするとともに、その変形メカニズムについて考察を行なった。

2. 透水性舗装模型実験の概要

(1) 透水性舗装模型

透水性舗装模型は、図-1に示すように直径1000 mm×深さ1000 mmの軸対称円筒模型である。載荷板の直径 D が300 mmであるから、模型は水平および深さ方向に3.3 D の領域を有する。半無限等方弾性体地盤上の円形等分布荷重による圧力球根で考えれば、地盤内鉛直応力 σ_z が荷重圧 p の10%まで減衰するのは、水平・深さ方向に約2 D の領域である。

土槽は、深さ方向に11分割される構造とした。これは、土槽を一体型とした場合、模型各層を締め固める際の高さ管理が難しく、また、土槽壁面付近が締め固め不足となりやすいためである。本実験では、リングごとに投入材料の重量を計測しながら締め固めて行くことにより、深さ方向および水平断面内で密度の均質な模型を作製できるようにした。下層路盤層以深のリングは高さ100 mm、上層路盤層および表層のリングは高さ50 mmである。リングどうしの境界はシーリング剤によって止水し、ボルトにより連結した。

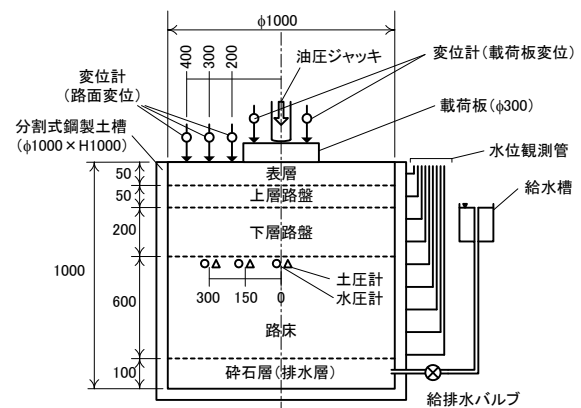


図-1 模型および装置の概略図（単位：mm）

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)

模型は、表層、上層路盤層、下層路盤層、路床層、排水碎石層で構成される。各層の使用材料を表-1に示す。

舗装材料には透水性舗装に一般的なもの^{1), 4)}を使用した。すなわち、表層は高粘度改質アスファルトを使用したポーラスアスファルト混合物、上層路盤層は改質アスファルトを使用した透水性瀝青安定処理混合物、下層路盤層はクラッシュラン (C-40) である。

本実験は、繰返し荷重の路盤・路床への影響を見ることがひとつの目的である。そこで、舗装厚については、荷重が路床面付近にまである程度の大きさで伝達されるように、舗装厚を300 mm (= 1.0 D)とした。半無限等方弾性体地盤上の円形等分布荷重による圧力球根で考えれば、荷重面直下の路床面に作用する鉛直応力は、荷重圧の30%程度である。表層および上層路盤層の厚さは材料の最大粒径を考慮した舗装設計上の最小厚さ (50 mm) とし、残りの厚さ200 mmを下層路盤層とした。等値換算係数¹⁴⁾を用いてこの舗装構成による等値換算厚 T_A を求めると14 cmとなる。さらに、次式により疲労破壊輪数 N を求めれば、路床層のCBRに応じて図-2のようになる。

$$T_A = \frac{3.84 N^{0.16}}{CBR^{0.3}}$$

$$N = \left(\frac{T_A \cdot CBR^{0.3}}{3.84} \right)^{-0.16} \quad (1)$$

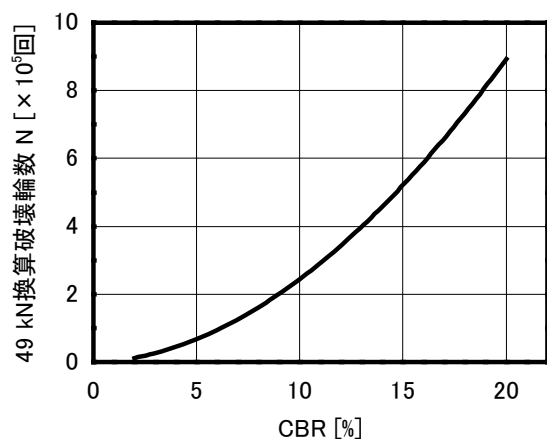


図-2 $T_A=14\text{cm}$ の場合の CBR と疲労破壊輪数との関係

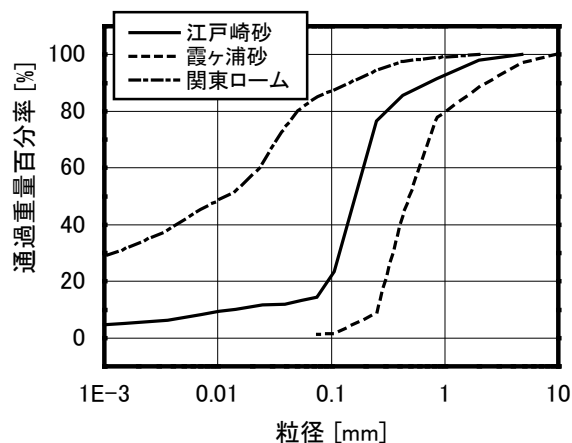


図-3 路床材料の粒度曲線

図より、例えば、 $\text{CBR}=2\%$ で $N=12000$ 回、 $\text{CBR}=10\%$ で $N=240,000$ 回、 $\text{CBR}=20\%$ で $N=900,000$ 回となる。

路床層には強度と透水性の異なる3種類の材料を選択した。すなわち、細粒分を適度に含んで締め固めやすく高い支持力を示す江戸崎砂（細砂）、細粒分が少なく透水性の高い霞ヶ浦砂（粗砂）、支持力が低く透水性も低い粘性土路床材として江戸崎産関東ローム（シルト）である。路床材料の粒度曲線を図-3に、物性値を表-2に示す。

路床層の施工含水比は最適含水比とした。重量と高さを管理しながら各層仕上がり厚10cm（分割式土槽の1リング分）で、6層に分けて締め固めることにより締め固め度95%程度の均質な路床層を施工した。

(2) 試験条件

a) 载荷条件

本実験の载荷条件を表-3に示す。交通荷重をモデル化する場合、輪荷重の移動による地盤内の主応力回転を考慮したほうが、考慮しない場合よりも地盤に発生する残留変形が大きくなることが最近の研究で明らかにされている¹⁵⁾が、本実験では交通荷重を定点载荷によって模擬し、実験ケースによる相対的な変形特性の差異を比較するものとした。载荷荷重については、普通道路における標準荷重である49 kNを最大値とする1.0 Hzの正弦波（荷重制御）で与えることとした。载荷面の形状については円形を仮定し⁶⁾、その直径については、輪荷重 P と接地半径 a に関する経験式⁶⁾ $a [\text{cm}] = 12 + P [\text{tf}]$ に $P = 5 \text{ tf}$ （=49 kN）を当てはめると $a = 17 \text{ cm}$ となるため、この値を参考に $\phi 300 \text{ mm}$ と設定した。実際のタイヤによる荷重を考えれば、等分布荷重を与えたほうが適当であると考えられるが、等分布の载荷が実験上困難なため、本実験では、剛性円板によって载荷を行うこととした。载荷回数については、図-2より、 $\text{CBR}=20\%$ までの範囲における疲労破壊輪数が90万回以下となることから、最大の载荷回数の目安を100万回と設定した。ただし、载荷板に設置した

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 $\rho_s [\text{g/cm}^3]$	2.689	2.706	2.702
最大粒径 $D_{\text{max}} [\text{mm}]$	4.75	9.50	2.00
60%粒径 $D_{60} [\text{mm}]$	0.19	0.57	0.03
10%粒径 $D_{10} [\text{mm}]$	0.015	0.255	
最適含水比 $w_{\text{opt}} [\%]$	17.0	17.6	72.7
最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}} [\text{g/cm}^3]$	1.737	1.685	0.850
室内 CBR $[\%]$	20	11	2
飽和透水係数 $k [\text{cm/s}]$	3.2×10^{-4}	1.8×10^{-2}	3.3×10^{-6}

表-3 载荷条件

载荷形態	円形载荷板を用いた定点繰返し载荷
载荷荷重	0～49 kN
载荷波形	正弦波、荷重制御
载荷速度	1 Hz
载荷板	300 mm 剛性円板
载荷回数	最大 1,000,000 回

表-4 実験ケース

ケース名	路床材料	浸水条件
Case 1	江戸崎砂	非浸水
Case 2	霞ヶ浦砂	非浸水
Case 3	関東ローム	非浸水
Case 4	江戸崎砂	下層路盤面まで浸水
Case 5	霞ヶ浦砂	下層路盤面まで浸水
Case 6	関東ローム	下層路盤面まで浸水

2本の接触式変位計のうちいずれかが計測容量（50 mm）を超えた場合には、その時点で载荷を終了した。

b) 実験ケース

実験ケースを表-4に示す。実験上のパラメータは、路床材料と浸水条件である。路床材料の異なる3種類の模型を2個ずつ作製し、一方は非浸水条件（乾燥模型：作製後、

そのままの模型)で、他方は浸水条件(浸水模型:模型作製後、下層路盤面以下を飽和させた模型)で繰返し載荷実験に供した。

浸水条件での実験に用いる模型は、表層まで打設したのちに、模型最下部の給排水バルブから10cm程度の水頭差を与えながらゆっくりと給水し、最終的には下層路盤面まで水位を上昇させた。水位の上昇には、川砂路床で1週間程度、山砂路床で1ヶ月程度、関東ローム路床で3ヶ月程度の時間を要した。このような浸水方法は、模型内の飽和度を均質に保つための措置であり、実際の透水性舗装における雨水浸透をリアルに再現したものではない。路盤・路床をほぼ完全に飽和させた状態を保持して繰返し荷重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示すわけではない。むしろ路盤・路床の支持力が最も弱いと思われる状態を保持したうえでの耐久性、つまり透水性舗装の力学的耐久性の下限を与えるものであるという位置づけである。

c) 計測条件

基本的な計測項目は、載荷荷重、載荷板変位(2点)、路面変位(3点、載荷中心から200 mm、300 mm、400 mmの位置)、路床面における土圧と間隙水圧(各3点、載荷中心から0 mm、150 mm、300 mmの位置、間隙水圧は浸水模型のみ)であり、これらのデータは動ひずみ測定器を介して20 Hzの速度でパソコンに記録した。

3. 実験結果および考察

(1) 各計測値の計測波形

載荷の進行に伴う荷重、路面変位、路床面土圧・水圧の計測波形の例を図-4に示す。路床材料が江戸崎砂の浸水条件下での実験結果であり、載荷回数100回目付近の計測波形を示している。路面変位の D_0 は載荷板変位を、 D_{200} 、 D_{300} 、および D_{400} は、それぞれ載荷点中心から200、300、400 mm離れた位置の路面変位を表す。また、路床面土圧 σ_z および水圧 u の添え字(0, 150, 300)もそれぞれ中心からの距離を表す。図からわかるように、路面変位および路床面の土圧・水圧の計測波形は、載荷荷重の波形と同期して変動しており、位相のずれは見られない。載荷板変位 D_0 および路面変位 D_{200} 、 D_{300} 、 D_{400} は、載荷荷重の波形に対して若干のピークの遅れが見られるが、これは舗装体の粘性の影響であると考えられる。

(2) 載荷面の変形

載荷板変位の測定結果から、載荷回数と載荷面の残留変位との関係を図-5に示す。図より、路床材によらず、浸水模型の載荷面の残留変位は乾燥模型の5~6倍の速さで増大することがわかる。すなわち、舗装体内が飽和した状態で繰返し荷重を受けると、舗装の塑性変形は著しく増大することがわかった。

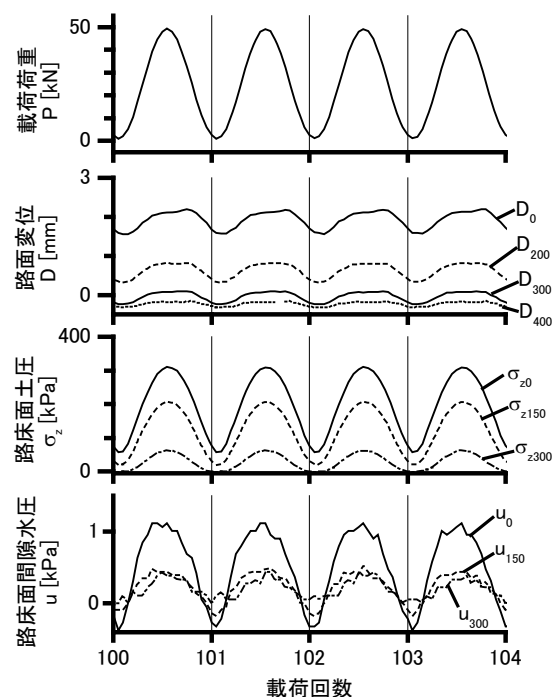


図-4 載荷荷重、路面変位、路床面土圧および路床面間隙水圧の計測波形の例(載荷回数100回目付近)

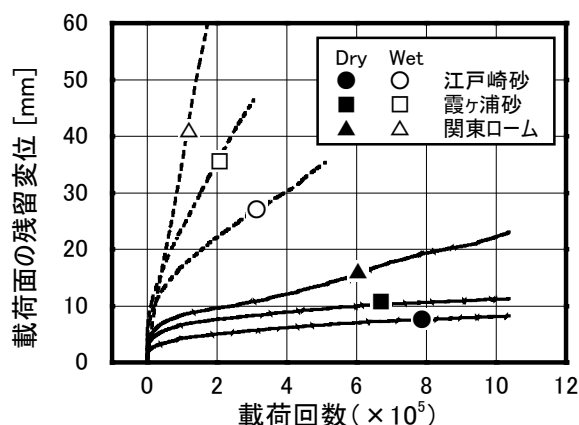


図-5 載荷面の残留変形量の推移

また、乾燥・浸水模型それぞれについて、路床材による残留変位の差異を見ると、表-2に示す路床材のCBRの大小(江戸崎砂>霞ヶ浦砂>関東ローム)に対応した変形が発生していることが確認できる。本実験の舗装断面構成において、江戸崎砂路床(CBR=20%)の設計上の疲労破壊輪数は図-2より $N=8.9 \times 10^5$ 回であり、実験では、この載荷回数における残留変位量は図-5より7.8 mmとなった。そこで、霞ヶ浦砂路床および関東ローム路床の乾燥模型について、残留変位量は7.8 mmとなるような載荷回数を求め、図-2上にプロットすると、図-6になる。図より、想定する破壊モードが必ずしも一致しないので一概には言えないが、路床土のCBRと舗装が破壊に至る載荷回数との関係について、実験結果は設計上のものと概ね整合していることが確認できる。

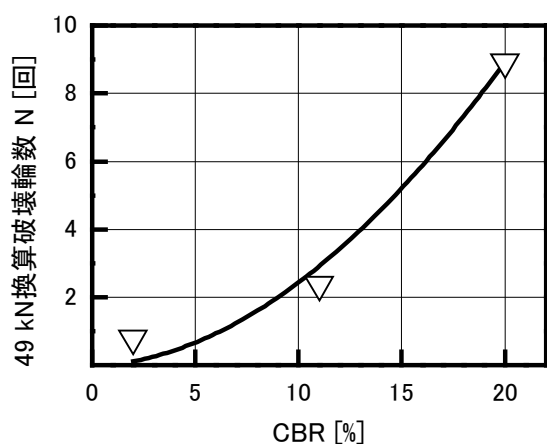


図-6 残留変位 7.8 mm に対応する荷重回数と $T_A = 14$ cm の疲労破壊輪数

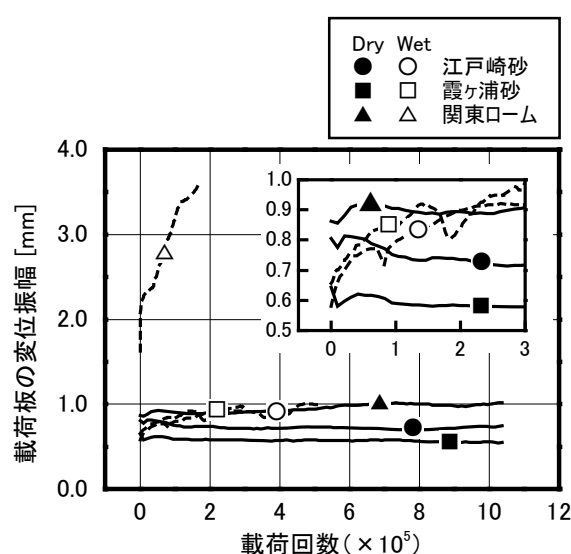
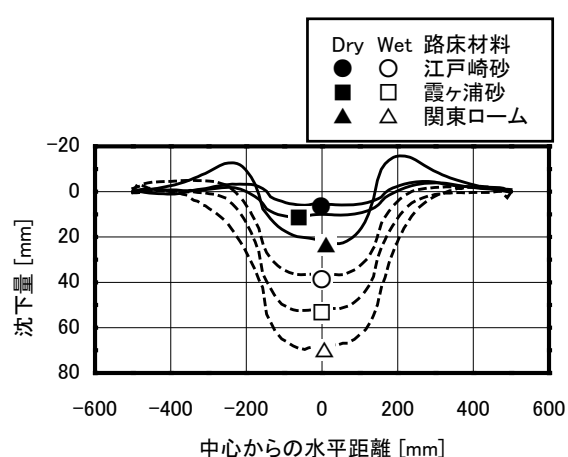


図-7 荷路面の変位振幅の推移

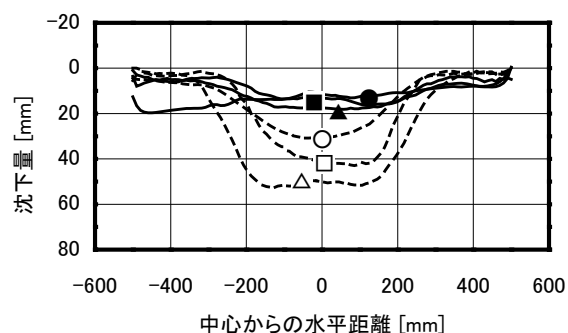
つぎに、荷重回数と荷路面の変位振幅との関係を図-7に示す。図より、関東ロームの浸水模型のみ、変位振幅が荷重回数とともに急激に増大している。一方、他のケースの変位振幅は0.5～1.0 mmの範囲であり、荷重回数による変化は小さい。江戸崎砂および霞ヶ浦砂のケースにおける荷路面の残留変位が浸水によって大きく増大した（図-5）のに対して、弾性変形量である変位振幅が浸水によってほとんど変化していないことは特徴的である。すなわち、浸水による影響が、路床剛性の低下という形では明確に表れていないことになる。ただし、図-7内右上に示す拡大図からわかるとおり、乾燥模型の変位振幅が荷重回数に対して一定もしくは低下傾向にあるのに対して、浸水模型の場合は、荷重初期には乾燥模型と同程度か小さめの変位振幅を示し、その後、増加していく。

(3) 実験終了後の各層変形の状況

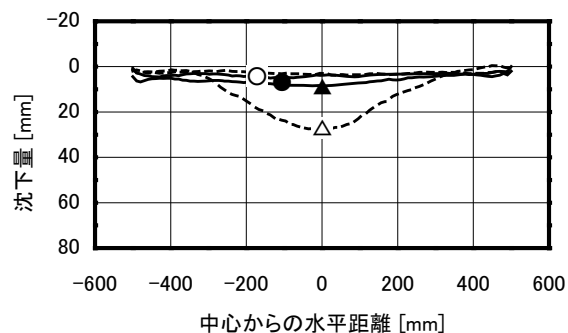
荷重実験終了後、模型を解体する過程で、路面、下層路盤面および路床面の最終的な沈下状況をレーザプロフ



(a) 路面



(b) 下層路盤面



(c) 路床面

図-8 レーザプロファイラによる各層沈下状況の測定結果

ファイラにより測定した。結果を図-8に示す。なお、下層路盤面の測定については、アスファルト混合物層を剥がす際に、碎石の一部が付着した状態で剥がれ、下層路盤面を直接測定することが困難だったため、剥がしたアスファルト混合物層の裏面をジェット水流で洗浄したのちに、その形状を測定することで、間接的に下層路盤面の沈下形状を測定した。また、霞ヶ浦砂の模型は、下層路盤を撤去する際に路床面が容易に乱れてしまうため、沈下状況は測定できなかった。

図-8より、関東ローム路床の場合は、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

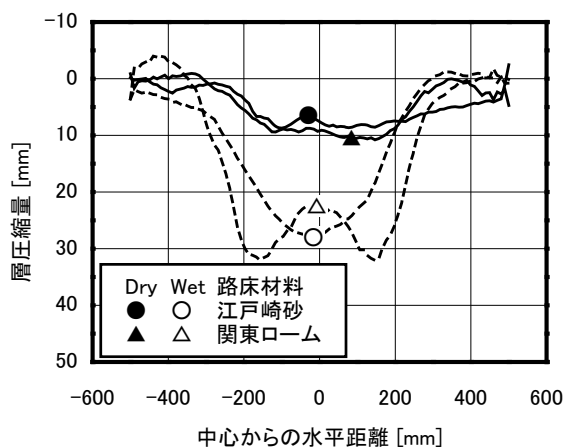


図-9 下層路盤層の圧縮量分布

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載荷面の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、乾燥模型と浸水模型とでほとんど差がない。図-8(a)より、江戸崎砂路床のケースにおける載荷面の残留変位は、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-8(b)および図-8(c)から下層路盤層の圧縮量を求めたものを図-9に示す。図より、分布形状は若干異なるが、江戸崎砂のケースの路盤圧縮量は、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模型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。

(4) 路床面土圧

路床面に設置した土圧計で計測された載荷点直下の土圧振幅の推移を図-10に示す。図より、乾燥模型については、載荷初期に土圧が上昇するが、載荷回数1000回程度でピークを迎え、以降は、実験終了までほぼ一定である。載荷初期の土圧の上昇は、主に層境界の緩みの閉合によると考えられる。一方、浸水模型については、載荷回数とともに一方的に増加しており、乾燥模型とは明らかに傾向が異なる。また、土圧の上昇傾向は路床材料によらずほぼ同じである。

例えば、載荷回数10万回時における乾燥模型と浸水模型の土圧について、載荷板による載荷圧 $p = 693 \text{ kPa}$ （等分布荷重を仮定）を基準として比較すると、乾燥模型の路床面に作用する土圧は載荷圧の30%程度であるのに対し、浸水模型の場合は55%程度となっており、2倍近い土圧が作用していることになる。もし浸水によって路床

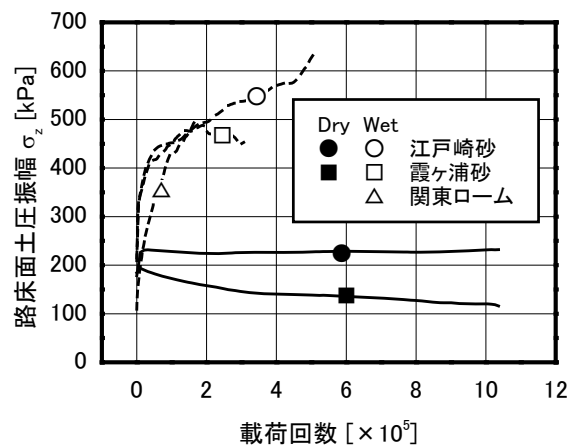


図-10 路床面土圧振幅の推移（載荷点直下）

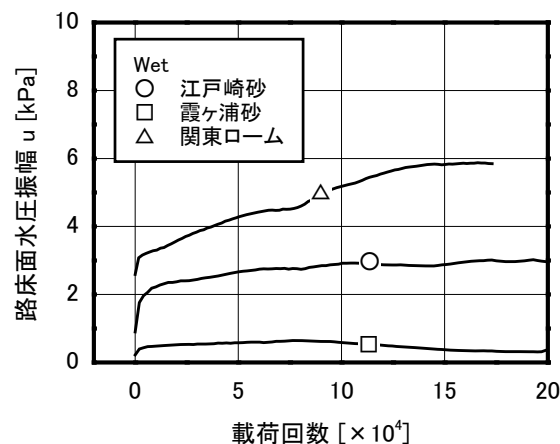


図-11 路床面水圧振幅の推移（載荷点直下）

面が軟弱化し路床剛性が低下するならば、路床面に作用する土圧は減少していくはずである。したがって、載荷回数の増加とともに路床面土圧が増加し、しかも載荷圧の半分以上に達するということは、浸水によって下層路盤が弱化し、載荷板直下を押し抜く形で圧縮が進行したために、載荷圧が分散せず、路床面にダイレクトに作用するようになったと考えるのが適当である。

(5) 路床面水圧

浸水模型は、模型最下部の給排水バルブを閉じた状態で載荷に供するため、模型下方および側方の水理境界条件は非排水である。一方、上方については、ポーラスアスファルト混合物および碎石により構成されるため、排水条件である。このような境界条件の下で繰返し平板載荷を実施した場合、路床内の間隙水圧の変化は、載荷速度と路床の透水係数との関係に依存する。すなわち、載荷速度に対して路床土の透水係数が高ければ、載荷・除荷による間隙水圧はただちに消散するが、透水係数が低ければ間隙水の移動が追いつかず、過剰間隙水圧が蓄積していくことになると考えられる。

浸水模型について、路床面に設置した間隙水圧計で計

測された荷点直下の水圧の振幅の推移を図-11 に示す。図より、荷点直下の路床面で発生する間隙水圧の大きさは、路床材料の透水係数に応じて、関東ローム>江戸崎砂>霞ヶ浦砂の順で大きい。透水係数が 10^{-2} cm/s オーダーの霞ヶ浦砂のケースでは、間隙水圧がほとんど発生せず、また、荷回数増加に対しても漸減の傾向にあることから、1 Hz の荷速度に対して十分な速度で排水していることを示している。透水係数が 10^{-4} cm/s オーダーの江戸崎砂のケースでは、霞ヶ浦砂のケースよりは大きな水圧が発生するものの、荷回数増加に対しては一定である。一方、最も透水係数の低い関東ロームのケースでは、荷初期から霞ヶ浦砂のケースの6倍程度の間隙水圧が発生し、荷回数増加に対して水圧が蓄積していく結果となっており、荷速度に対して排水が追いつかないことを示している。いずれにしても、前節で示したように、路床面には400~500 kPa もの土圧が作用しているのに対し、発生する水圧は関東ロームのケースでも3~6 kPa 程度であり、非常に小さなものである。

(6) 透水性舗装の浸水が変形特性に与える影響

本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。

- 路床材料の違いにかかわらず、浸水により荷面の残留沈下量は大きく増大した。
- 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、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。
- 浸水模型において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、荷板による荷圧の50%以上に達した。
- 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、荷面直下で圧縮したことが、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。

4. おわりに

本研究では、雨水浸透と繰返し交通荷重の作用が、透水性舗装の変形特性に及ぼす影響を把握することを目的として、透水性舗装模型に対する繰返し平板荷試験を

実施した。実験の結果、浸水によって荷面の残留沈下量は著しく増大することが確認された。ただし、冒頭にも記したように、本実験は、下層路盤以下がほぼ完全に飽和したまま繰返し荷を受け続けるという仮想的な条件下での結果であり、舗装断面についても限定的なものであることから、ある舗装断面の耐久性の下限と変形挙動の傾向を示すにすぎないことには注意が必要である。実際の透水性舗装では、断面構成によって路盤や路床に作用する応力は異なり、また、飽和度に応じて材料の力学特性も変化する。さらに、降雨の強度と頻度、路床の浸透性能に応じて、路盤・路床が高飽和度の状態に置かれる時間と頻度も異なる。これらの因子が透水性舗装の力学耐久性に及ぼす影響については、今後の検討課題である。

最後に、本実験のような、下層路盤以下が湛水するような状態がどの程度の頻度で発生するかを、実際の降雨観測記録を用い、簡易計算により例示する。

仮に、下層路盤の厚さが30 cmでその空隙率が10%とすると、下層路盤を満水とするのに必要な降雨量は30 mmである。すなわち、総降雨量が30 mmを超えるような雨があれば、この下層路盤は満水となる可能性が発生する。総降雨量を日降雨量と読み替え、京都地方気象台における45年間(1961年~2005年)の降雨観測記録¹⁰⁾から、日降雨量が30 mmを超える日数をカウントすると3630日(81日/年)である。実際には、路床への浸透があるから、30 mmの雨が降っても、降雨強度が路床の浸透能力を上回らなければ下層路盤は満水になりえない。ここで、降雨強度は日最大10分間降雨量 I_{10} [mm/10min]に代表させることにする。また、路床の浸透能力¹⁾は $q_i = 6000 k K_f$ によって評価する。ただし、 q_i : 路床の浸透能力 [mm/10min]、 k : 路床の飽和透水係数 [cm/s]、 K_f : 比浸透量 [m²/m²] (透水性舗装の場合は $K_f = 0.014 h + 1.287$, h は水頭[m]) である。下層路盤の満水時の水位を $h = 0.3$ m とすれば、路床の飽和透水係数 $k = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ cm/s に対する浸透能力はそれぞれ $q_i = 62, 6.2, 0.6$ mm/10min となる。すなわち、日降雨量が30 mmを超え、かつ、日最大10分間降雨量 $I_{10} > q_i$ を満たすようなイベントが、下層路盤を満水にする降雨条件となる。上述と同様に、京都地方気象台の降雨観測記録を用いてこのような降雨を抽出すると、 $k = 10^{-3}$ cm/s の路床の場合には45年間で378日(9日/年)、 $k = 10^{-4}$ cm/s で3123日(70日/年)、 $k = 10^{-5}$ cm/s で3618日(81日/年)(ただし、10分間降雨観測記録は最小単位が1 mmなので、0.6 mm/10minについては、1.0 mm/10minとしてデータを抽出)となる。

以上の簡易計算結果に基づけば、路床の透水係数が 10^{-3} cm/s を超えるような高透水性の砂質土路床の場合は、設計期間のうち下層路盤が満水となる降雨期間は約2%以下であるが、 10^{-4} cm/s よりも低い場合には20%程度に

まで達することになる。路床の透水係数が低ければ、降雨停止後も路盤内に水が滞留し続ける(透水係数が1オーダー違うと排水時間は10倍)ので、湛水期間はさらに伸びることになる。

謝辞：本研究は科学技術振興調整費の支援によるものである。

参考文献

- 1) 土木研究所：道路路面雨水処理マニュアル（案），土木研究所資料，第3971号，2005。
- 2) 西山哲，大西有三，矢野隆夫：透水性舗装による都市の熱環境改善効果の研究，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol.2，pp.22-28，2007。
- 3) 例えば，佐藤研一，木幡行宏，竹内康，平川大貴：舗装と交通荷重に関する地盤工学（4）路床・路盤の材料・力学特性，地盤工学会誌，Vol.56，No.12，pp.62-72，2008。
- 4) 伊藤正秀，綾部孝之，久保和幸：試験舗装による車道透水性舗装の性能に関する検討，土木学会舗装工学論文集，No.12，pp.91-98，2007。
- 5) 八谷好高，秋元恵一：高地下水位下における空港アスファルト舗装の構造設計，土木学会論文集，No.613/V-42，pp.19-30，1999。
- 6) 竹下春見：新編 道路工学，金原出版株式会社，1936。
- 7) 日本道路協会編：道路土工一排水工指針，pp.158-159，1987。
- 8) Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A: State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, pp.66-75, 2000.
- 9) Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A: State of the art. II: Permanent strain response of unbound aggregates, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, pp.76-83, 2000.
- 10) Seed, H.B., Chan, C.K. and Lee, C.E.: Resilient characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavement. *Proc. First Int. Conf. On Struct. Design of Asphalt Pavements*, 1962.
- 11) Li, D. and Selig, E.T.: Resilient modulus for fine grained subgrade soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No.6, pp.939-957, 1994.
- 12) Drumm, E.C., Reeves, J.S., Madgett, M.R. and Trolinger, W.D.: Subgrade resilient modulus correction for saturation effects, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering and Geoenvironment Engineering*, Vol. 123, No.7, pp.663-670, 1997.
- 13) Jin, M.S., Lee, K.W. and Kovacs, W.D.: Seasonal variation of resilient modulus of subgrade soils, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol.120, No.4, pp.603-616, 1994.
- 14) 日本道路協会編：舗装設計施工指針（平成18年版），2006。
- 15) Momoya, Y., Watanabe, K., Sekine, E., Tateyama, M., Shinoda, M. and Tatsuoka, F.: Effects of continuous principal stress axis rotation on the deformation characteristics of sand under traffic loads, *Design and Construction of Pavements and Rail Tracks - Geotechnical Aspects and Processed Materials-*, pp.77-87, Taylor and Francis, 2007.
- 16) 気象庁HP：http://www.jma.go.jp/.

DEFORMATION BEHAVIOR OF PERMEABLE ASPHALT PAVEMENTS UNDER SUBMERGED CONDITION BY CYCLIC PLATE LOADING TEST

Shinichiro NAKASHIMA, Hidetoshi KOHASHI, Kiyoshi KISHIDA
and
Makoto KIMURA

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.