

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560192

研究課題名(和文)ゲリラ豪雨に対応した次世代型舗装構造の提案

研究課題名(英文)New permeable pavement structure to reduce stormwater runoff

研究代表者

中島 伸一郎(Nakashima, Shinichiro)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70346089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：都市水害を抑制する新しい舗装構造として側面流入型の貯留浸透舗装を提案した。本舗装構造の基本的な水理特性および力学特性を把握するため、路盤材に対する大型透水試験と舗装模型に対する繰返し平板載荷試験を実施した。透水試験の結果、路盤材の透水係数は粒度分布によらずおおむね10-1cm/secであることを明らかにした。舗装模型に対する繰返し平板載荷試験の結果、浸水時には路面のたわみが大きくなるとともに路床面に作用する応力が上昇するが、これは浸水により路盤の剛性が低下することが原因である可能性が高いことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：As a measure to reduce damages in torrential rainfall and urban flood, this study proposes a new permeable pavement, which has inlet surface along the subbase layer. In order to grasp basic hydraulic and mechanical characteristics of this pavement, large scale permeability test for crusher-run material with changing grain size distribution and repeated plate loading test for pavement model under dry and saturated condition were carried out. The permeability of crusher-run material was around 0.1 cm/sec regardless of the grain size distribution. The repeated loading test for pavement model showed that the deflection of pavement surface and the vertical stress on subgrade surface increases due to pavement saturation. These mechanical changes are from degradation of subbase stiffness with saturation.

研究分野：地盤工学

キーワード：ゲリラ豪雨 道路舗装 水理特性 力学特性

1. 研究開始当初の背景

90年代後半より我が国ではゲリラ豪雨や都市水害の問題が顕在化し、道路分野におけるひとつの対抗策として、雨水を舗装内に取り込み原地盤へと浸透させる透水性舗装(図1)の導入が積極的に検討されてきた。ところが、都市面積の30%にも及ぶ車道の透水化は、大きな治水効果が期待されるにもかかわらず、現在までのところ十分な実用化には至っていない。その理由として、力学耐久性、治水性能の正確な評価、空隙詰まりによる浸透性能の低下、路面排水の浸透による土壌・地下水環境への影響の懸念などの課題が挙げられる。

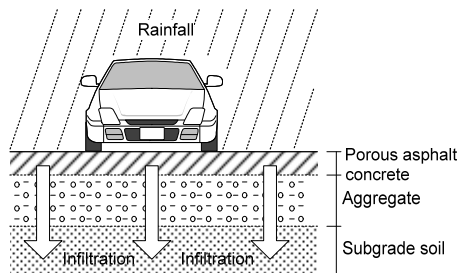


図1 車道透水性舗装の一般的構造

申請者は、上記問題がすべて「透水性舗装は路面に降った雨を全て受け入れる」という構造に起因していることに着目し、解決策として、雨水流入を制御する構造、つまり雨水を選択的に舗装内に取り込むことのできる構造「側面流入型の貯留浸透舗装」を着想した。これは、雨水をいったん側溝に導水し、側面から舗装内に流入させる構造である。側溝底面と舗装への流入孔の位置に高低差を設けることで、初期降雨・少量降雨は下水に排水し、豪雨時に側溝内水位が上昇したときのみ舗装内に流入させることができる。これにより洪水ピークを確実に抑制し、耐久性、維持管理性、環境影響的にも、従来の透水性舗装よりはるかに優れた性能が期待できる。

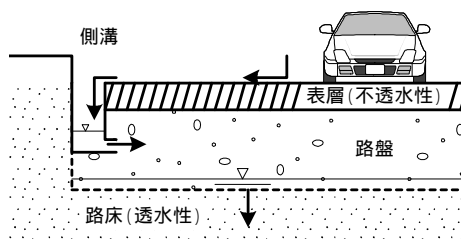


図2 提案する側面流入型の貯留浸透舗装

2. 研究の目的

提案する側面流入型の貯留浸透舗装が、期待通りの治水性能を示すのかどうか、どのような条件で雨水を舗装内に取り込めば、治水上・力学耐久性上で有効であるのかを把握することが本研究の第一目標となる。

治水効果および力学耐久性に関する基礎的特性の把握を目的とし、具体的には次の2点に重点をおいた。

豪雨時の円滑な雨水処理を支配する路盤層の透水特性の把握

路盤以下が浸水した状態で繰返し交通荷重が作用したときの舗装の長期変形特性の把握

3. 研究の方法

(1) 路盤材の透水特性の把握

路盤材の基本的な水理特性を明らかにすることを目的として、粒度を種々に調整した道路用砕石(C40材)に対する飽和透水試験を実施した。使用材料の最大粒径が約40mmと大きく、通常の土質試験用の透水試験器(内径100mm×高さ125mm)は用いることができないことから、内径300mm×高さ500mmで真空脱気可能な大型透水試験装置を新たに製作した(図3)。本装置を用いて動水勾配0.01~1.0、透水時間300時間の条件で定水位透水試験を実施した。砕石試料は、原材料のC-40(つくば産)をふるい分けした後に再合成することにより、JIS規格の粒度範囲(斜線)の上方限界粒度(U)、下方限度粒度(L)および中央粒度(C)の試料を作製した(図4)。

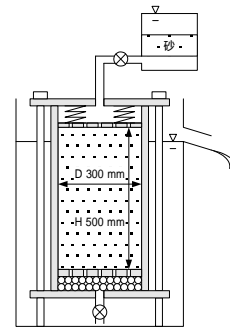


図3 道路砕石用大型透水試験器

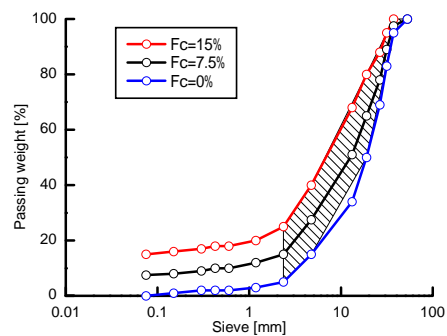


図4 砕石試料の粒度分布

(2) 浸水した舗装の長期変形特性の把握

図5に示すように、円筒形土槽に打設した舗装模型の表面中央に、交通荷重を模擬した円形平板載荷(直径300mm, 49kNの正弦波荷重)を1Hzの速度で繰返し与えた。舗装材料は、実際の舗装と同様に、表層は開粒度アスファルト混合物、上層路盤は透水性安定処理混合物、下層路盤はクラッシャーラン(C-40)、路床はまさ土(宇部産, CBR 27%)である。

載荷は非浸水状態と浸水状態（水位は路盤上面）で交互に2万回ずつ、計10万回与えた。模型の浸水・排水は土槽底部のバルブ操作により約2週間かけて行った。浸水・排水中は載荷を中断した。浸水・排水作業の完了時に静的平板載荷試験を実施し、地盤反力係数 K_{30} を求めた。

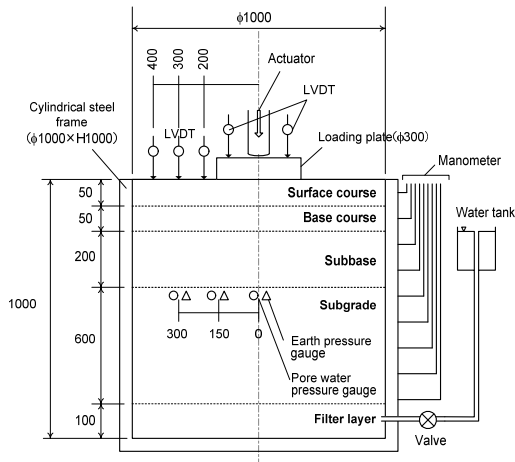


図5 舗装の繰返し平板載荷試験（単位：mm）

4. 研究成果

(1) 路盤材の大型透水試験

図6は、中央粒度の試料に対する透水試験結果であり、試料を真空脱気して飽和させた場合と、装置底面から水頭差を与えて自然飽和させた場合の両者をプロットしている。図より、自然飽和と浸水脱気とで透水係数に差異は見られない。いずれの粒度分布でも同様の結果が得られており、自然飽和でも供試体が真空脱気と同様に十分に飽和していることがわかる。

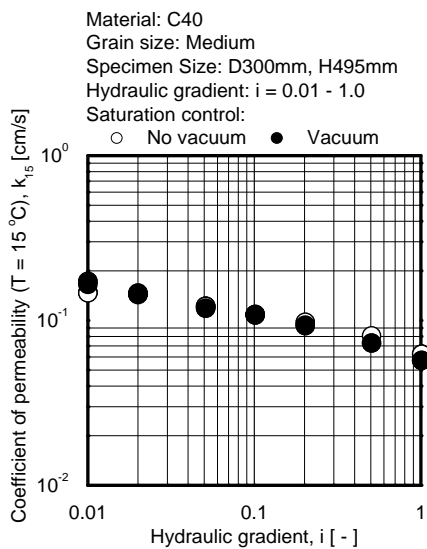


図6 C-40 中央粒度の動水勾配-透水係数関係

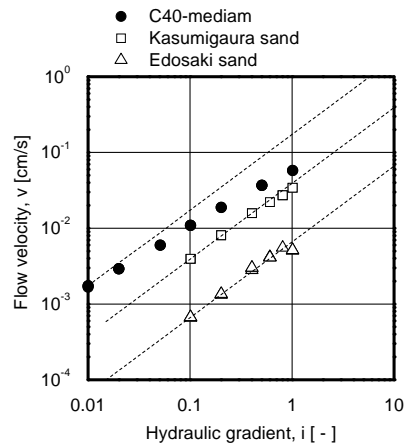


図7 動水勾配と流速の関係

図7は、C-40 中央粒度試料および2種の砂質土（霞ヶ浦砂、江戸崎砂）の動水勾配-流速関係である。図中の破線は両対数グラフにおいて動水勾配 i と流速 v が比例する関係を占める、図より、霞ヶ浦砂および江戸崎砂は動水勾配 $i = 0.1 \sim 1.0$ の範囲で破線上に乗っておりダルシー則に従う。一方、C-40（中央粒度）については、 $i = 0.02$ ですでにダルシー則を示す破線から外れており、動水勾配が大きくなるにつれて破線に対して低下する傾向を示す。供試体内の流れが乱流であると考えられる。

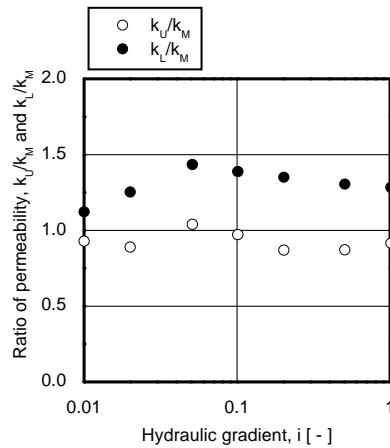


図8 C-40 の粒度と透水係数の関係

図8は、中央粒度の透水係数 k_M に対する、上方粒度の透水係数 k_U と下方粒度の透水係数 k_L の比率を示す。図より、 k_U/k_M は1.0のラインを下回り、 k_L/k_M は1.0のラインを上回る傾向にある。すなわち、細粒分が少ないほど高い透水係数を示す。ただし、最大でも50%程度の差であり透水係数のオーダーが変わるほどではないことが明らかとなった。

図9は、C-40 に対して長時間透水した場合の透水係数の経時変化である。過去に行われた透水試験では時間の経過とともに透水係数は低下する傾向にあったが、この実験では逆に透水係数は上昇した。約200時間後にほぼ定常に落ち着いた。

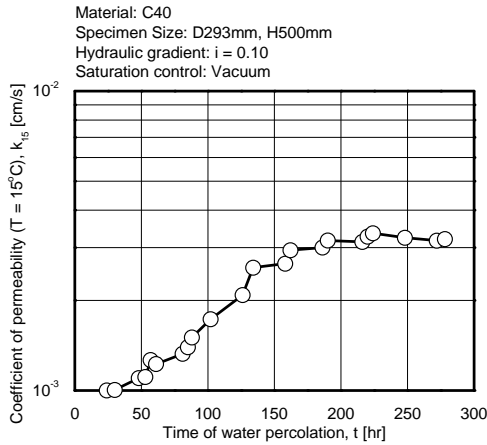


図 9 透水係数の経時変化

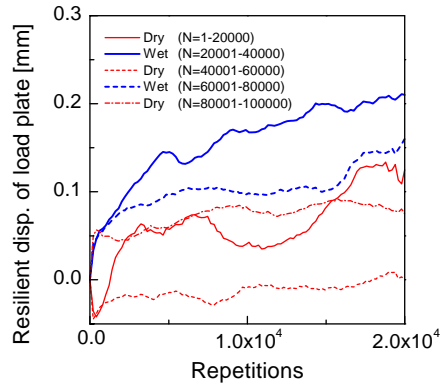
以上の試験から、路盤材の基本的な透水特性が明らかとなった。

- ・ JIS 規格範囲の粒度における C-40 の透水係数は、おおよそ 10^{-1} cm/sec である。JIS 規格の粒度範囲で細粒分が少ないほど透水係数は高い傾向にある。
- ・ 大型透水円筒を用いて試験を行ったが、得られる透水係数は内径 150 mm のものと大差なかった。
- ・ C-40 の場合、飽和方法の差（自然飽和と浸水脱気）の影響は小さい。
- ・ C-40 は動水勾配 0.01 程度でも供試体内の流れは乱流であると推定される。
- ・ 長時間透水した場合の透水係数の変化の原因は不明であるが、水温が影響している可能性がある。

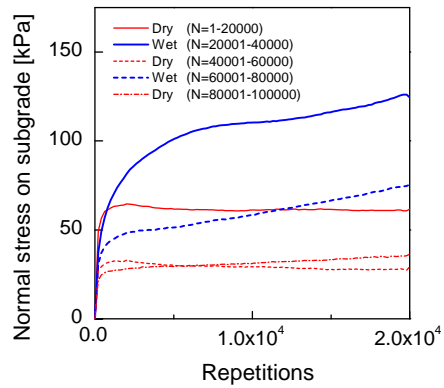
(2) 舗装模型の繰返し平板載荷試験

図 10 は舗装模型の繰返し平板載荷試験による路面変位と路床面土圧の測定結果である。図中の DRY は非浸水状態、WET は浸水状態を表す。路面変位は変位振幅（弾性成分）を示している。図より、路面変位の弾性成分、路床面土圧ともに、非浸水時よりも浸水時のほうが大きな値を示す傾向にある。

図 11 は、繰返し平板載荷試験の前後および浸水/排水前後で実施された静的平板載荷試験の結果である。図より浸水状態での繰返し載荷の前後では地盤反力係数が大きく低下し、それに対応して路床面での土圧が大きく上昇している。また、浸水の前後では地盤反力係数がほとんど変化しないのに対して、排水の前後では地盤反力係数が大きく上昇している。路床面土圧は浸水の前後も排水の前後も同程度に低下する傾向が見られる。



(a) 路面変位の弾性成分



(b) 路床面土圧

図 10 繰返し回数と路面変位，路床面土圧の関係

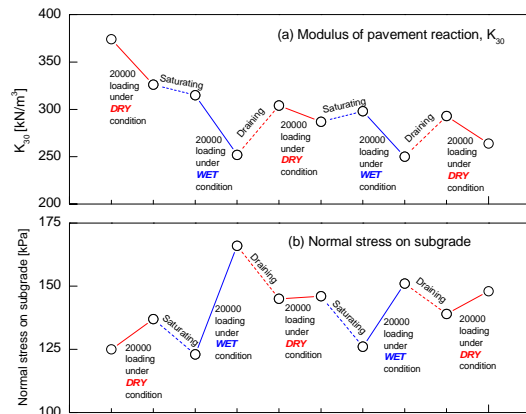


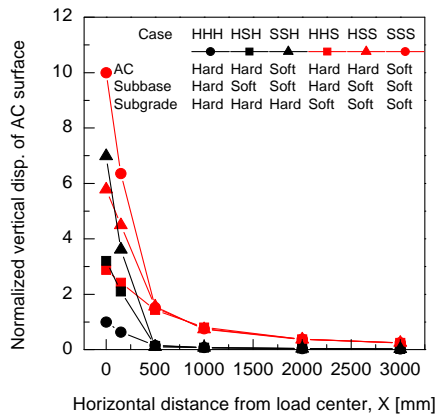
図 11 静的平板載荷試験結果

実験の路面変位および路床面土圧の変化は、飽和度や繰返し載荷による各層の材料特性の変化に由来する。そこで多層弾性解析により弾性係数の変化が変位と土圧に与える影響を検討し実験結果を考察する。解析モデルは表 1 のように、アスコン層、路盤、路床を模擬した半無限 3 層弾性モデルである。弾性係数は 2 種類 ($E_0, 0.1E_0$) のみを用い、全層 E_0 のケースを基本ケースとして、各層に $0.1E_0$ を割り振った。

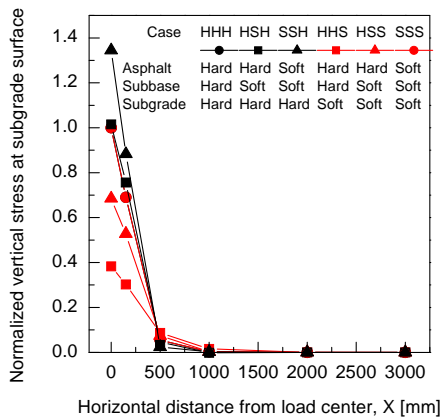
表 1 多層弾性解析のモデルとケース

	Case name					
	HHH	HSH	SSH	HHS	HSS	SSS
1st layer	E_0	E_0	$0.1 E_0$	E_0	E_0	$0.1 E_0$
2nd layer	E_0	$0.1 E_0$	$0.1 E_0$	E_0	$0.1 E_0$	$0.1 E_0$
3rd layer	E_0	E_0	E_0	$0.1 E_0$	$0.1 E_0$	$0.1 E_0$

図 12 は多層弾性解析による路面の鉛直変位と路床面土圧である。変位・土圧ともに基本ケースの荷重点直下の値で規準化している。図 12 (b)より、路盤の弾性係数が低いケースでは土圧が基本ケースを上回る一方、路床の弾性係数が低いケースでは基本ケースを下回ることが確認できる。



(a) 路面変位



(b) 路床面鉛直応力

図 12 多層弾性解析による路面変位と路床面応力

図 13 は解析モデル(半断面)の鉛直方向の圧力コンターである。図 13(b)より路床の弾性係数を低下させたケースでは、等高線の深さ方向への広がりが狭く、アスコンおよび路盤で等高線が密集している。つまり、路床が軟らかい場合には、路面から入力した荷重はアスコンおよび路盤で吸収されてしまい、路床まで伝わりにくくなることを意味している。一方、図 13(c)より、路盤の弾性係数を低下させたケースでは、基本モデルと比較すると深さ方向への等高線の広がりが広い。路盤の弾性係数が低下すると、路面から入力した荷重は路床のより深くまで貫入することになることを示している。

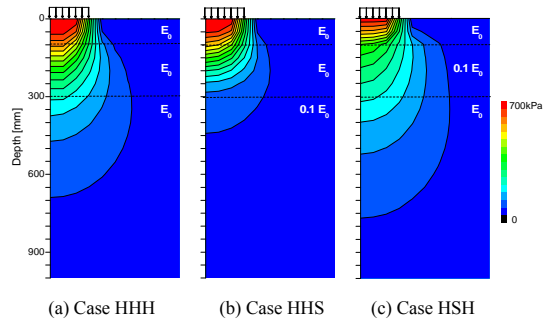


図 13 多層弾性解析による鉛直応力コンター

解析結果に基づいて、路床面土圧の実験結果を解釈すれば、浸水状態での繰返し荷重前後の静的平板荷重試験で路床面土圧が上昇したということは、浸水状態での繰返し荷重により路盤の弾性係数が低下したことになる。また、排水前後の静的平板荷重試験で路面変位が小さくなり、かつ路床面土圧が低下したということは、模型の排水により路盤の弾性係数が上昇(回復)したことになる。

以上の舗装モデルの繰返し平板荷重試験および多層弾性解析により、含水状態および繰返し荷重による舗装の変形特性および荷重伝達機構の変化を把握した。路盤は路床に比べて交通荷重をより大きく直接的に受けるため、浸水による影響が顕著に現れるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

中島伸一郎, 川口雄輔, 清水則一, 繰返し平板荷重試験に基づく透水性舗装の荷重伝達特性, 平成 27 年度土木学会中国支部第 67 回研究発表会, 山口県山口市, 2015/5/22-23.

川口雄輔, 池田茜, 中島伸一郎, 清水則一, 路盤・路床の含水飽和度が舗装の変形特性に及ぼす影響, 査読無, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 大阪府大阪市, 2014/9/10-12.

川口雄輔, 池田茜, 中島伸一郎, 清水則一, 乾燥・湿潤および繰返し荷重による透水性舗装の弱化メカニズムの検討, 査読無, 第 35 回西日本岩盤工学シンポジウム, 長崎県長崎市, 2014/8/23-24.

Kawaguchi, Y., Nakashima, S. and Shimizu, N. Influence of saturation and repeated loading on mechanical behavior of permeable pavement, 査読有, The 12th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP2014), Raleigh, North Carolina, USA, 1-5 June 2014.

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