

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05048

研究課題名（和文）激甚化する水害に対応する道路舗装空間を利用した小規模分散型治水施設の開発

研究課題名（英文）Development of new pavement structure reducing stormwater runoff of roadway

研究代表者

中島 伸一郎（Nakashima, Shinichiro）

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：70346089

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：治水機能を有する新しい舗装構造である側面流入型の貯留浸透舗装を提案するものである。この舗装は豪雨ピーク時にのみ舗装内に雨水を取り込むという選択的な雨水流入を可能としており、確実な水害対策として期待される。本研究では、水理模型実験により提案する舗装構造の治水性能を明らかにするとともに、雨水流入頻度と舗装の力学的耐久性との関係を力学模型実験により検証した。提案構造の側方流入特性を明らかにするため、ガラスビーズを用いた水理模型実験装置を作成し、一定流量条件および一定水位条件で流入実験を実施した。実験の結果、路盤への側方流入の速度は、側溝と路盤との水位差および開口面積に依存することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

透水性舗装に代わる雨水貯留浸透用舗装として、側溝側面から粒状路盤に流入する側面流入型舗装を提案する。この構造は洪水ピーク時のみ選択的に舗装内に雨水を導くものであり、透水性舗装に比べて浸水にともなう舗装の力学耐久性の低下を抑え、確実な洪水ピークカットなどが期待される。本研究では、提案構造の側方流入特性を明らかにするため、ガラスビーズを用いた水理模型実験を作成し、一定流量条件および一定水位条件で流入実験を実施した。実験の結果、路盤への側方流入の速度は、側溝側と路盤側との水位差および開口面積に依存することが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：This study proposes new pavement structure for roadway rainwater runoff control which is expected to be alternative to permeable pavements. The structure collects rainwater to roadside ditch and leads it laterally to granular subbase course through inlets on the wall of the ditch. One expected advantage of this is that it allows inflow only during peak-time of rare big floods such as several-year-return period. We conducted hydraulic model experiments to investigate basic lateral inflow characteristics to granular subbase course. Number of inlet holes on the ditch wall and their locations were varied in the experiment. The results showed that the amount of inflow into the roadbed affects the water table difference. It was also found that grain size of subbase course material affects horizontal permeability because it changes the pore system, but does not significantly affect the ability of the roadbed to store water because the porosity itself does not change.

研究分野：舗装工学

キーワード：雨水貯留浸透施設 透水性舗装 側面流入型舗装 水理特性 力学耐久性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、都市化の進展等に伴う浸透面積の減少により、雨水の流出量が増え、河川や下水道にかかる負担が増加していることに加え、気候変動の影響等により、大雨等が頻発し、内水氾濫が発生するリスクが増加している。そのため、流域治水の一環として、雨水をその場に一時的に貯留・浸透させることで下流への負担を軽減する分散型治水機能の強化が求められている。

舗装分野での雨水管理手法としては、グリーンインフラの観点も含め、雨水を舗装内に取り込み浸透させる透水性舗装(図-1)が検討されてきた。ところが、透水性舗装は舗装内の長期湛水による力学耐久性に懸念が残るとともに、路床の透水性が相当高くない限り、事前の長雨で貯留容量を消費しきってしまい、洪水ピークの際には、貯留できないことになる治水性能上の弱点が指摘される。また、路面の空隙詰まりによる維持管理性の弱点や土壌・地下水汚染リスクなどの課題を抱えており、適用可能な現場は限定的といえる。

そこで本研究では側面流入型舗装を提案する。側面流入型舗装とは豪雨のピーク時のみ舗装内に雨水を取り込む仕組みである。図-2 に側面流入型舗装の概念図を示す。側溝側面にはスリット(流入孔)を設け、側溝内の水位がスリットよりも高くなれば路盤内に流入する。

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、通常の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。また、降雨終了後に側溝内水深が低下すると、路盤内に貯留されていた雨水が側溝に流れ込み流末へと排水する。計画洪水の豪雨ピーク時のみ選択的に舗装内に雨水を流入させる構造である。その結果、舗装内に浸水するのは、例えば数年に1度で、しかも湛水は一時的なため、透水性舗装に比べて力学的耐久性の低下ははるかに少ない。また、豪雨ピーク直前まで貯留容量を確保できるほか、維持管理性や対水質汚染などで優れた性能を発揮すると期待される。

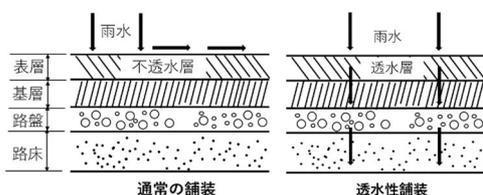


図-1 通常舗装および透水性舗装の排水構造

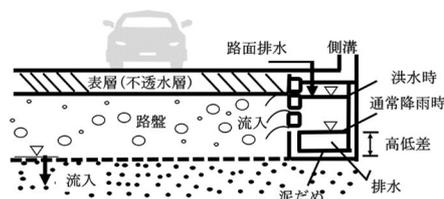


図-2 側面流入型舗装の概念図

2. 研究の目的

側面流入型舗装の実現可能性と構造設計を検討するにあたり最も重要なことは、側溝から舗装内への側方流入をコントロールできるかどうかという点にある。側溝に集まった路面雨水を豪雨時のみ舗装路盤内に貯留する構造を検討する必要がある。そのため本研究では側方流入を模擬した水理模型装置を作成し、装置の性能を確かめるとともに、流入孔を設けた時の側溝から路盤への基本的な透水特性を把握すること、流入孔の開口パターンによる路盤への透水特性の違いを把握すること、路盤に流れる流入量を把握するため、ガラスビーズを路盤に見立てた水理模型実験を実施した。

3. 研究の方法

図-3 は路盤への側方流入を想定した水理模型装置である。アクリル水槽を流入孔板で半分に仕切り、右半分を路盤部、左半部分を側溝部としている。路盤部にはガラスビーズを水槽の縁までパッキングする。側溝部の水は、流入孔板を通して路盤部へと流入する。

路盤を模擬する材料として、粒径 3 mm、6 mm の乾燥したガラスビーズを使用した。パッキング時の空隙率を計測した結果と定水位透水試験結果を表-1 に示す。

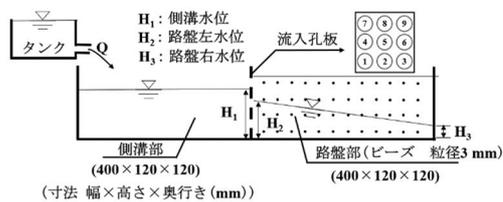
側溝部から路盤部への側方流入を支配する基礎的因子は、流入孔の数と高さ、側溝部から路盤部への水位差、路盤材の透水性である。本研究では、主としてこの影響について焦点を当てた。図-3 に示すように、流入孔板には 3×3 の配置で 9 個の円孔(直径 20 mm)が開けられている。流入孔の開口パターンは表-2 のとおり設定した。

流入条件として、図-3(a)の一定流量条件と、図-3(b)の一定水位条件を考慮した。一定流量条件では、タンクから側溝部への流入量 Q を一定に保つ。一方、一定水位条件では、流入孔を閉じた状態でタンクから側溝部に給水し、側溝部の水位を 105 mm に維持しておき、実験開始とともに表-2 の開口パターンの流入孔を同時に開放して路盤部へと流入させる。

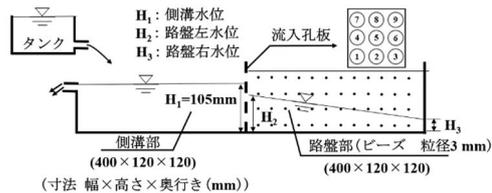
主たる計測項目は側溝部と路盤部内の水位である。実験は動画に記録し、動画から側溝部の水位 H_1 、路盤内の左壁面(流入孔板)での水位 H_2 と右壁面での水位 H_3 を計測した。

一定流量実験でのタンクから側溝部への供給水量 Q は 181 cm³/s とした。これは、側溝水位 H_1 と路盤左水位 H_2 の水位差を 5 mm 以上確保し、側溝に貯まる水が実験装置から溢れずに最後まで測定できるように調節したものである。また、全実験ケースで路盤右水位 $H_3 = 80$ mm

までは側溝が溢れることなく一定流量の給水が可能であったことから、 $H_3 = 80 \text{ mm}$ に達した時点満水状態とみなしてデータ整理を行うこととした。



(a) 一定流量実験



(b) 側溝内水位一定

図-3 水理模型装置の概要

表-1 ガラスビーズの間隙率と透水係数の測定結果

粒径 (mm)	単粒径						複数粒径
	0.115	2	3	4	5	6	
間隙率 (%)	37.9	37.5	38.9	38.9	40.6	39.3	19.7
透水係数 (cm/s)			1.50×10^0			3.72×10^0	

表-2 実験パラメータと水準

パラメータ	水準
(a) 一定流量条件	
流量	$181 \text{ cm}^3/\text{s}$
粒径	3 mm (間隙率 38.9%), 6 mm (間隙率 39.3%)
開口パターン	123456, 1346, 123, 13, 25, 2
(b) 一定水位条件	
側溝水位	105 mm
粒径	3 mm (間隙率 38.9%)
開口パターン	123, 13, 2

4. 研究成果

(1) 一定流量実験

図-4 は、一定流量実験の実験結果の一例として、開口パターン 13 における、側溝水位 H_1 、路盤左水位 H_2 、路盤水位 H_3 の時間変化を示している。この実験では、側溝部に注水を開始してから 4.0 秒で H_2 が上昇を開始し、路盤部内の水面が進行して右端に達したのが 22 秒後、 H_3 が上昇して高さ 80 mm まで達したのが 39.6 秒後であった。図より、 H_1 と H_2 の上昇は、時間に対して線形的で、両者は一定の水位差を保ちながら上昇している。一方、水面が路盤部右端に達してからの H_3 の上昇速度は、 H_1 や H_2 の初期速度に比べて急速で、水位の上昇とともに H_1 、 H_2 の速度に漸近していく傾向が確認できる。

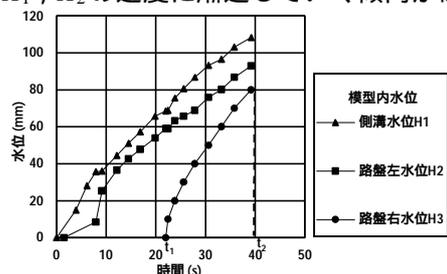
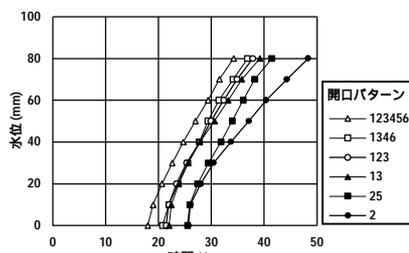
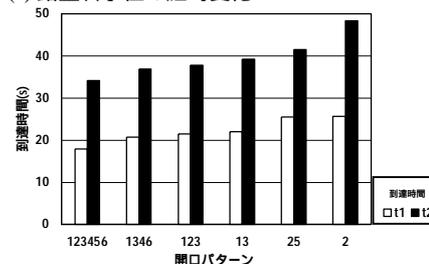


図-4 一定流量実験での模型内水位の経時変化 (開口パターン 13)



(a) 路盤右水位の経時変化



(b) 路盤部右端水位到達時刻 t_1 と満水時刻 t_2

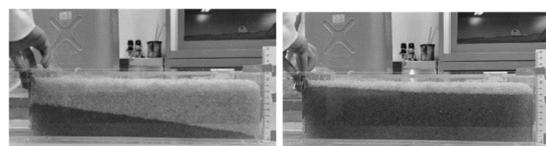


図-5 一定流量実験での路盤内の水面形 (開口パターン 13)

図-6 一定流量実験における路盤右水位 H_3 の経時変化

本研究では、実験条件により異なる側方流入しやすさの指標として、図-4 の横軸に示すように、路盤部内の水面が路盤部右端に到達するまでの時間 t_1 と路盤右水位 H_3 が 80 mm に到達するまでの時間 t_2 に着目して、実験結果を整理することとした。 t_1 および t_2 時点での路盤部の水面はそれぞれ図-5 に示すとおりで、水面形はほぼ直線である。

a) 流入孔別、路盤流入時間と路盤右水位 H_3 の関係

流入孔の数と位置が、路盤部への流入量に及ぼす影響を検討する。図-6(a)は、 H_3 の時間変化である。また、各開口パターンの t_1 、 t_2 を読み取ったものを図-6(b)に示す。図より、開口した流入孔の数が多いほど t_1 が早い。開口した流入孔の数は同じで開口位置が異なるパターンを比べると、開口パターン 25 より開口パターン 13 の t_2 が早い。これは開口パターン 25 の H_1 が 50 mm の高さに達するまで 1 つの流入孔しか流れないためである。

図-7、表-3 は、路盤部右端に水面が到達してから路盤部が満水になるまでの路盤への流入量 cm^3/s をまとめたものである。 Q_1 は $t_1 \sim t_2$ 間に路盤に流れる流入量を、 Q_2 は Q_1 を流入孔の数で除し $t_1 \sim t_2$ 間に流入孔 1 つ当たり路盤に流れる流入量を示す。また平均水位差は $t_1 \sim t_2$ 間の側溝水位 H_1 と路盤左水位 H_2 の水位差の平均を示す。表-3 より、開口パターン 25、13 は $t_1 \sim t_2$ 間

の平均水位差 ($\Delta H = H_1 - H_2$) が大きく、流入量 Q_2 が速い。側溝部から路盤部への側方流入は水位差 ΔH に大きく影響を受けている。

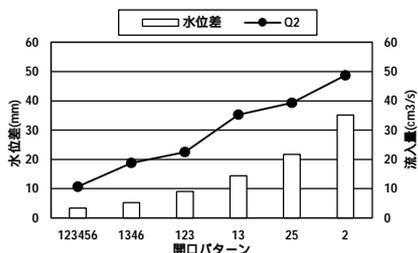


図-7 一定流量実験における側溝部～路盤部左端の水位差 ($\Delta H = H_1 - H_2$) と路盤部の平均流入量

表-3 一定流量実験における路盤部への平均流入量

開口パターンの	Q (cm³/s)	Q ₁ (cm³/s)	Q ₂ (cm³/s)	平均水位差 (mm)
123456	181.1	64.1	10.7	3.4
1346	181.7	75.3	18.8	5.3
123	183.0	67.6	22.5	9.1
25	181.2	78.6	39.3	21.7
13	181.8	70.5	35.3	14.4
2	183.6	48.7	48.7	35.2

Q: タンクからの流量 (cm³/s)

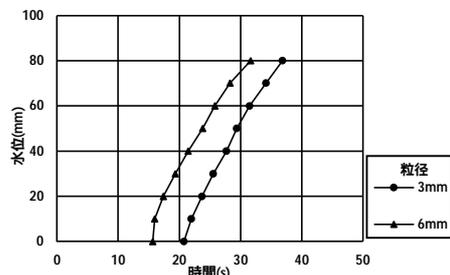
Q₁: t₁-t₂間で路盤に流れる流入量 (cm³/s)

Q₂: t₁-t₂間で流入孔1つ当たり路盤への流入量 (cm³/s)

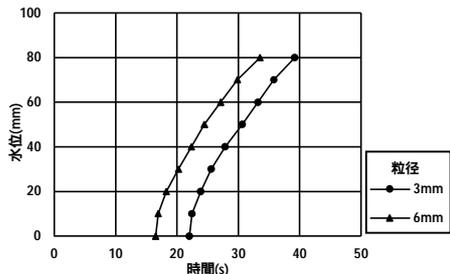
平均水位差: 側溝水位 H₁ - 路盤左水位 H₂ (mm)

b) 粒径別、路盤流入時間と路盤右水位 H₃ の関係

ガラスビーズの粒径 3 mm, 6 mm で実験を行った。開口パターン 1346, 13 の H₃ の経時変化を図-8 に示す。図より、いずれの開口パターンでも、粒径 3 mm より 6 mm のほうが、t₁ は早い。ただし、表-4 に示すように、その後の H₃ の上昇は粒径によらずほぼ一定である。図-9 は路盤部右端に水面が到達した時点での水面形を示している。図より、H₂ は粒径 3 mm に比べて 6 mm の方が低い。粒径が大きいほど間隙径が大きいので側方の透水性は高まるが、間隙率自体は変化しないため、貯留する能力には大きな影響がないといえる。



(a) 開口パターン 1346

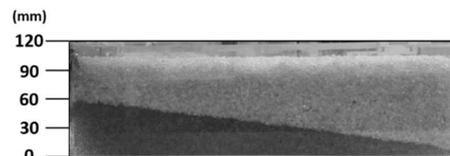


(b) 開口パターン 13

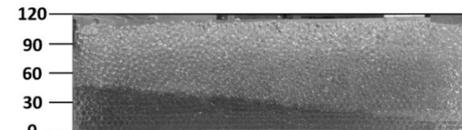
図-8 異なる粒径での路盤右水位 H₃ の経時変化

表-4 粒径を変化させた実験の t₁, t₂

	開口パターン 13		開口パターン 1346	
	粒径 3 mm	6 mm	3 mm	6 mm
t ₁ (s): H ₁ =0 mm	22.0	16.5	20.8	15.7
t ₁ (s): H ₁ =0 mm	22.0	16.5	20.8	15.7
t ₂ -t ₁ (s)	17.2	17.0	16.1	16.0



(a) 粒径 3 mm



(b) 粒径 6 mm

図-9 一定流量実験において路盤右端に水面が到達した時点の水面形 (開口パターン 13)

(2) 一定水位実験

図-10 は、一定水位実験の路盤部の水位の時間変化を示している。図より、水面が各地点の底面まで達する時間は、路盤内の右に行くほど遅くなることは全パターンで共通しているが、そこから水位 80 mm まで水が貯まるのにかかる時間は異なる。貯留時間をまとめると図-11 のとおりである。開口パターン 2 では最も貯留時間が長い路盤左および路盤 100 mm が、開口パターン 13, 123 では貯留時間が他の地点より短くなるように変化していることが確認できる。

一定水位実験における流入孔の数と路盤に流れる流入量に及ぼす影響を検討する。下段の孔列から流入する開口パターンについて、路盤右水位の経時変化を図-12(a)に示す。図より、流入孔の数が増えるにしたがって、t₁ も t₂ も早くなる。ただし、図-12(b)に示すように、流入孔面積の総和が 2 倍, 3 倍になっても、到達時間が 2 分の 1, 3 分の 1 にまで早まるわけではない。

これは、開口パターンに応じて流入時の抵抗が異なるためである。図-13 は H₂ の時間変化を示す。図より流入孔の数が多いほど H₂ の上昇速度は速い。つまり、流入孔の数が多いほど、側溝と路盤左水位との水位差が小さい。その結果、流入量が少なくなり、図-12 で示したように開口面積が 2 倍, 3 倍になっても、到達時間が 2 分の 1, 3 分の 1 にはならなかったといえる。

H₁ と H₂ の水位差と路盤への流入量との関係を図-14 に示す。流入量は流入孔の数で除した値である。図より、いずれの開口パターンも水位差 H₁- H₂ と流入量との関係は同一直線上にある。路盤の流入量は開口面積と水位差を反映する形で流れ込んでいることが確認された。

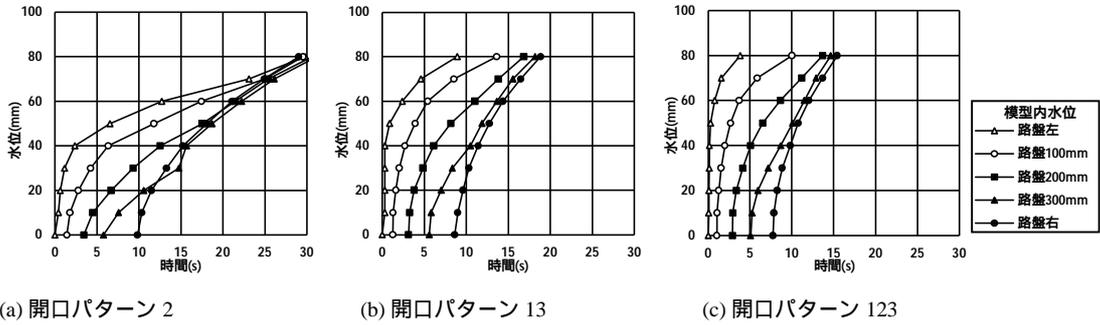


図-10 一定水位実験における模型内水位の経時変化例

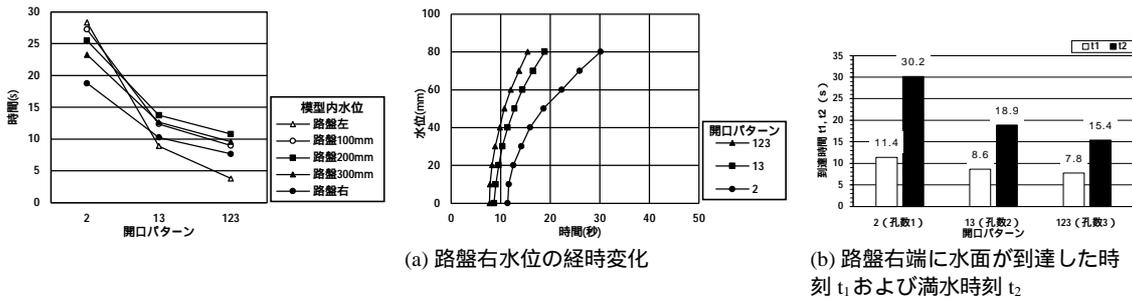


図-11 一定水位実験における貯留時間の比較

図-12 一定水位実験における路盤右水位 H_3 の経時変化

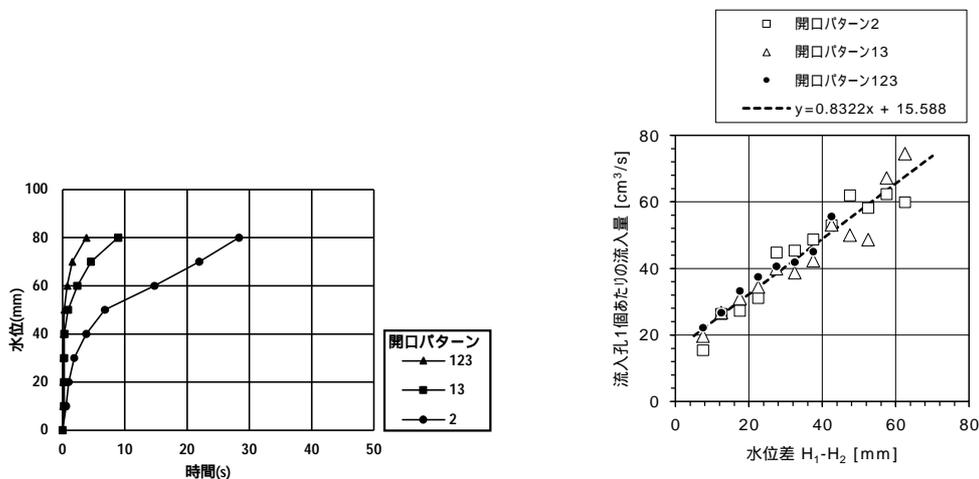


図-13 一定水位実験における路盤左水位 H_2 の経時変化

図-14 一定水位実験における水位差 H_1-H_2 と流入量との関係

(3) まとめ

- 一定流量実験，一定水位実験のいずれにおいても，開口する流入孔の数が増えるにしたがって，側方流入量の総量は増加する一方で，流入孔1個当たりの流入量は減少した．流入孔1個当たりの流入量は，流入孔板を隔てた両側の水頭差に対して，線形的に増加することを確認した．水頭差の観点から，流入孔の数が同一の場合，流入孔を水平方向に配置したほうが，迅速に路盤内に貯留することができるといえる．
- 粒径の異なるガラスビーズで一定流量実験を行った結果，粒径の大きいガラスビーズのほうが水面が早く路盤右端に到達したが，その後の水位上昇速度は小粒径の場合とほぼ同一であった．粒径が大きいほど間隙径が大きいので側方の透水性は高まるが，本実験のガラスビーズは間隙率が変わらないため，貯留能力には大きな影響がなかったといえる．

以上の成果から，側方流入特性に関して基礎的な資料を得ることができた．単粒径のガラスビーズという限定的な路盤条件であるが，側溝と水頭差に応じて側方流入量が定まるという比較的解釈しやすい結果を得た．今後は，現実的な粒状路盤材，路盤の三次元的な広がりなども取り込みながら，側面流入型舗装の治水性能の評価を目指す．また，今回の実験では考慮しなかった重要な因子として，路盤上面の舗装による被覆の問題がある．上面の被覆は路盤内の間隙空気の排気を妨げる結果，気圧が上昇して側溝から路盤への側方流入を阻害する可能性もある．今後はその影響も含めて実験的に検討していく．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 UEKAWA Kazuma, NAKASHIMA Shinichiro	4. 巻 78
2. 論文標題 HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON NEW PAVEMENT STRUCTURE FOR RAINWATER STORAGE IN SUBBASE AND ITS LATERAL INFLOW CHARACTERISTICS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_248 ~ I_255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.78.2_I_248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MIYAKE Yusuke, SHIGEHRO Kazuki, CHAGNAADORJ YanjinIkham, NAKASHIMA Shinichiro	4. 巻 78
2. 論文標題 FUNDAMENTAL EXPERIMENTS ON THE MOVEMENT OF SUBBASE PARTICLES IN PAVEMENT PUMPING	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_256 ~ I_263
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.78.2_I_256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上川一真
2. 発表標題 洪水対策とした側溝から舗装路盤への側面流入に関する模型実験
3. 学会等名 土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島伸一郎
2. 発表標題 路面排水設計のための短時間降雨特性の経年変化
3. 学会等名 土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島伸一郎
2. 発表標題 道路の表面排水施設設計に用いる確率降雨強度の定常性の検討
3. 学会等名 第27回土木学会舗装工学講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関