

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04281

研究課題名（和文）豪雨に対する都市強靱化のためのポーラスコンクリート舗装の雨水流出抑制機能の評価

研究課題名（英文）Evaluation of Runoff Control Function of Porous Concrete Pavement for Urban Resilience to Heavy Rainfall

研究代表者

原田 守博（Harada, Morihito）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：40165030

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、豪雨が頻発し、各地で水害が発生している。特に局地的豪雨は流域面積の小さい都市河川に急激な出水を引き起こすことから、都市域の雨水浸透貯留能力を確保することが急務である。雨水を集め貯留する施設は整備に限界があるため、面的に降る雨をその場で受け止める透水性舗装をいかに普及させるかが喫緊の課題となる。本研究の目的は、POCを用いた透水性舗装の雨水流出抑制効果を水理解析と実物大の大型実験を通して評価することである。検討の結果、本研究の提案する雨水貯留層を備えた透水性舗装システムは、POC層のもつ透水性と貯留性を兼ね備え、時間100mmを上回る豪雨に対して一定の流出抑制効果を発揮することが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動に伴い記録的豪雨が頻発し、各地で未曾有の水害が発生している。豪雨に対する流域の強靱化を図るため、河川の流下能力だけに頼るのではなく、河川と流域が一体になって治水対策を進める「流域治水」の取り組みが求められている。特に流域から河川への雨水流出を抑制することが緊急課題であるが、局地的豪雨に対する従来の流出抑制対策、例えば雨水をオフサイト施設に集め貯留する手法では十分ではなく、面的に降る雨水を透水性舗装などによって面的に処理する必要がある。本研究では、POCを用いた透水性舗装に着目し、浸透流の解析に非線形透水則を用いたモデルを提案することにより、雨水流出抑制効果の定量的評価に成功した。

研究成果の概要（英文）：In recent years, heavy rain has become more frequent, causing flood damage in many areas. In particular, localized heavy rain can cause sudden flooding in urban rivers with small catchment areas, making it urgent to ensure the rainwater infiltration and storage capacity of urban areas. Because there is a limit to the construction of facilities to collect and store rainwater, an urgent issue is how to popularize permeable pavement that can receive rainwater that falls over an area on the spot. The purpose of this study is to evaluate the rainwater runoff suppression effect of permeable pavement using POC through hydraulic analysis and full-scale large-scale experiments. As a result of the study, it was shown that the permeable pavement system with a rainwater storage layer proposed in this study combines the permeability and storage properties of the POC layer, and exerts a certain degree of runoff suppression effect against heavy rainfall exceeding 100 mm per hour.

研究分野：水文学

キーワード：透水性舗装 ポーラスコンクリート 局地的豪雨 雨水流出抑制 流域治水

### 1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動に伴い、台風の強大化や線状降水帯の発生など、過去の気象データでは予測が難しい異常な豪雨が頻発している。特に最近では、1時間降雨量が100mmを超える豪雨が続いていない回数で発生し、各地で記録的短時間大雨情報が繰り返し出されている。局地的豪雨はとりわけ流域面積の小さい中小河川において急激な出水を引き起こす。時間50mmの降雨の発生確率が1/5程度であるのに対して、時間100mmの降雨確率は1/100を超える。こうした激しい気象状況に対応するにはこれまでの雨水対策では不十分であり、流域の地表状態を抜本的に改変する必要がある。すなわち、強雨に対応できる雨水浸透貯留能力を面的に確保することが急務である。ここであえて「面的に」と述べるのは、この規模の強雨となると、雨水を集めて貯留するには莫大な容量の施設が必要となり現実的に難しく、透水性舗装などで面的に処理せざるを得ないと考えられるからである。こうした観点から、地表に降る雨をその場で受け止める透水性舗装を流域全体でいかに普及させるかが、豪雨に対する流域強靱化のための喫緊の課題となる。

### 2. 研究の目的

申請者らは、従来の瀝青材料を中心とした透水性舗装に代わり、耐久性がはるかに高いうえ、透水性がより優る舗装構成として、多孔質なポーラスコンクリート（以下 POC）を用いた透水性舗装の普及を提案してきた。POC 舗装は砕石をモルタルペーストで結合したもので、通常の透水性アスファルト舗装に比べて施工性は劣るものの、極めて大きな透水性と抜群の耐久性を兼ね備えている。一方で、POC 舗装は高い透水能力のため時間100mmの豪雨も難なく浸透させるものの、その透水性の高さゆえに浸透水が舗装から速やかに排出されてしまう可能性がある。そこで今回、舗装下部に雨水貯留層を備えることで、浸透水を一定時間貯留させた後に遅れて排水させる舗装システムを提案する。本研究では、通常の不透水舗装に対し、そうした透水性舗装による流出抑制効果について水理解析を通して評価することを目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 比較検討する舗装状態

本研究において、豪雨に伴う雨水流出状況を比較検討する舗装状態は Case1 ~ Case4 の4種類に分けられる。Case1 は通常の不透水性のアスファルトもしくはコンクリートによる舗装面であり、地表の落ちた雨滴は浸透することなく、斜面の勾配と粗度に従って排水側溝に向かって流下する。この急激な表面流出に豪雨時の浸水や氾濫が引き起こされている。次に、透水性舗装が施された地表面を考え、高い透水能力により雨水はすべて浸透するものとする。浸透水は舗装内部で一時的に地下水を形成し、透水法則のもと動水勾配に従って排水される。透水性舗装には Case2 比較的細粒のアスファルトを用いたものと、Case3 粗粒の砕石を用いた POC によるものがある。前者においては Darcy 則が成り立つと考えられるが、後者では流れが乱流となって非線形な透水則に従うと想定される。したがって両者を分けて検討を行うこととする。特に POC 層の場合は非常に大きな透水性をもつが、それゆえに流出も速やかに生じてしまうことが危惧され、地表面での雨水排除は達成されても、排水路や河川への十分な流出抑制効果は期待できない可能性がある。Case4 は本研究で提案する雨水貯留層を備えた POC 舗装システムであり、透水層の下に雨水が貯留される領域が存在する。POC の高い透水性によって全量浸透した雨水はまず舗装内の貯留層に蓄えられ、水位が上昇して越流した後に初めて排水路へ流出する。これは POC 層の透水機能と貯留機能を併用することをめざしたシステムである。さらに、貯留層に蓄えられた雨水は、降雨終了後に下位の自然地盤に浸漏し、流域の地下水を涵養して健全な水循環の形成に一役買う機能が期待される。これによって雨水貯留層は貯留容量を回復して、次の降雨に備え

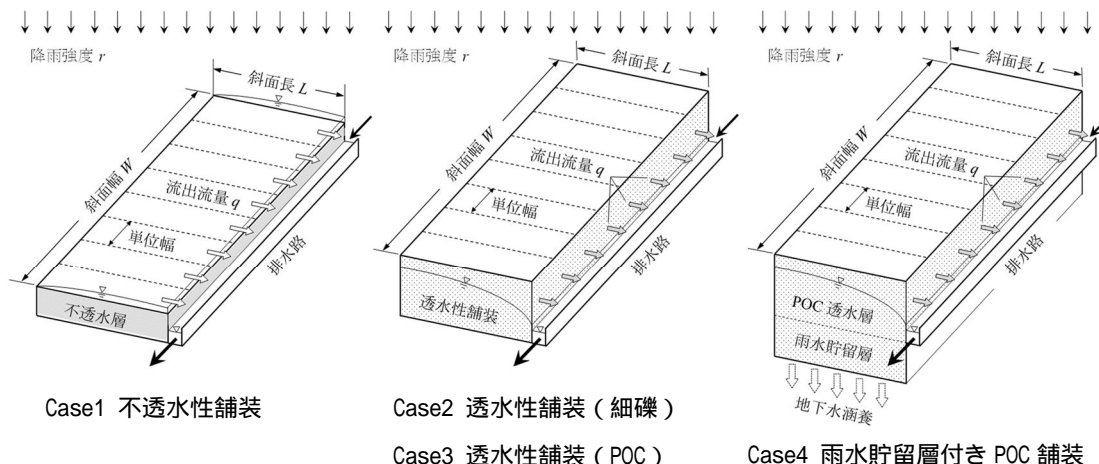


図-1 本研究における雨水流出解析の比較対象路面

ることができる。本研究では、これら Case1 ~ Case4 の3形態4種類の舗装状況について雨水の流出過程を解析し、相互に比較検討する。斜面全体からの流出量は斜面上の単位幅要素からの流出量の和であり、各要素における流れは斜面下方に向けての一次元流れとする。

## (2) 各舗装面における雨水流出解析法

4種類の舗装面における雨水流出の解析方法は以下の通りである。

Case1 不透水舗装：不透水面上を流れる雨水は、等価粗度法に基づき、一次元連続式と Manning 則によって扱われるのが一般的である。方程式の解析は陽解法による差分法によって行なった。

Case2 細粒透水性舗装：透水性舗装における雨水流は、Dupuit-Forchheimer の準一様流の仮定が成立つとして連続式を設定し、透水法則としては Darcy 則を適用した。これは細粒媒体の場合、空隙内の流れは層流であると考えられるからである。

Case3 POC 透水性舗装：舗装媒体が粗粒の POC になると、流れは乱流に遷移し非線形透水則に従うと考えられる。非線形透水則の式形は種々提案されているが、本研究では扱いやすい累乗型とした。流れが完全に乱流の場合、累乗指数は理論的には 0.5 となるが、多孔体中の空隙径は一樣でなく層流と乱流が混在した流れと想像され、指数値は 0.5 ~ 1.0 の範囲にあると考えられる。

Case4 雨水貯留層を備えた POC 舗装：POC 透水層の下に雨水貯留層を設ける舗装であり、浸透流の解析は Case3 と同じである。

なお、解析の境界条件は、一次元流れであることを考慮して、上流端では流入フラックスがゼロの不透水境界、下流端では境界近傍の流量がそのまま流出する自然排水条件と設定した。

本研究で提案する「Case4 雨水貯留層を備えた POC 舗装」では、舗装面から浸透した雨水はまず貯留層に蓄えられ、水深が上昇して貯留層が満水になってから下流へ越流する。流出水の連続式および非線形透水則、上流・下流端の境界条件については Case3 と同様である。なお、越流するまでは浸透水が溜まるだけであるから、貯留層に流れはなく止水域として取り扱った。貯留層の下面を自然地盤に設置することによって層内に溜まった水は降下浸透し、層内の湛水は減少して次の降雨時には貯留機能が回復することを想定している。

## 4. 研究成果

都市公園や商業施設等に設けられる規模の大きい駐車場を想定し、Case1 ~ 4 の舗装を対象に、斜面の雨水貯留量と下流端の排水路への流出量を時間的経過も含めて算出し、相互比較した。

### (1) 解析の諸条件

斜面の諸元は流下方向の長さ  $L=50\text{m}$ 、地表面の勾配  $S_0=1/200$  とし、降雨は  $r=100\text{mm/h}$  の強度で 60 分間降り続くものとした。各舗装面の水理定数は次のように定めた。

Case1：斜面の等価粗度は細礫を骨材とするアスファルト舗装を想定して  $N=0.1$  とした。

Case2：細礫層ではダルシー則が成り立つとして透水係数  $K=1.0\text{cm/s}$ 、空隙率  $n=25\%$  とした。

Case3：POC 層には標準的な 6 号砕石（粒径 5 ~ 13mm）を考える。非線形透水層の定数を  $K'=3.0\text{cm/s}$ 、 $m=0.5$  と設定した。空隙率と底面勾配は同様である。

Case4：舗装の水理特性は POC 舗装 Case3 と同様である。貯留層の厚さ 20cm、空隙率 25% の場合、貯留層底面からの浸透を除くと 50mm の貯留効果をもつと期待される。

### (2) 大規模駐車場における各舗装面からの流出流量の比較

4 ケースの舗装形態について、下流端における単位幅あたりの流出流量の時間変化を解析した結果を図に示す。まず Case1 不透水舗装では、降雨が降り始めて短時間で一定値に漸近している。その値は降雨強度  $r=100\text{mm/h}$  が長さ  $L=50\text{m}$  の単位幅区域に降る場合の総雨量  $13.9\text{cm}^2/\text{s}$  に相当する。すなわち不透水面の場合、雨水は浸透せず、比較的速やかに降雨の全量がそのまま流出することを示す。アスファルト舗装等の Case2 細粒透水性舗装では、流出量は 4 ケースのうちで最少となっている。これは細粒層の透水性が小さいためであり、流出抑制効果が大きいように見える。しかし、降雨はすべて浸透して舗装内に貯留され、水深は 30 分後に最大 40cm に達している。したがって舗装厚さが薄い場合は、雨水は舗装内から地表に溢れ、それ以降は不透水面と同様の流出状況となる。Case3 POC 舗装の場合は、透水性がより大きいため早くから流出し始め、降雨終了時点では  $8.0\text{cm}^2/\text{s}$  と不透水面の場合の 6 割に抑えることができている。しかし、この場合も舗装内水深は最大で 31.5cm に達しており、細礫層と同様に、時間 100mm の雨に対応するためには相当な層厚の舗装が必要ということになる。

最後に、Case4 雨水貯留層付き POC 舗装の場合を見ると、降雨開始後 30 分間は厚さ 20cm、空隙率 25%

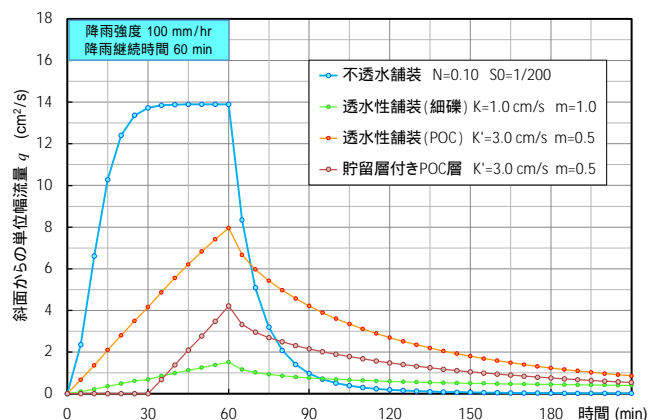


図-2 大規模駐車場の舗装面における雨水流出過程の比較

の貯留層に貯留され、その後に POC 層から流出している。降雨終了時点の流出量は  $4.2\text{cm}^2/\text{s}$  と、不透水面の場合の 3 割に収まっている。舗装内の水深は貯留層を除くと最大で  $18.7\text{cm}$  であり、貯留層を設けることによって、POC 層のみ舗装に比べ、流出量および舗装内水深ともに半減できることが明らかとなった。

### (3) 市街地道路における各舗装面からの流出流量の比較

大規模駐車場の解析から、通常不透水舗装に対して、地表面を透水性にすることによって流出量を大幅に抑えることが可能であると示された。POC 層単体の場合はそれなりの流出量になるが、下部に貯留層を設けることでさらなる抑制効果を実現できることも判明した。しかしながら、時間  $100\text{mm}$  の降雨の流出を抑えるには、透水性舗装 Case2 ~ 4 のすべてで(空隙率 25% の場合)層厚  $40\text{cm}$  程度の舗装が必要となることが示された。この値は舗装面を長さ  $50\text{m}$  とした場合であり、幅  $10\text{m}$  程度の道路面であれば層厚はさらに薄くてよい。そこで、市街地面積の 2 割を占める生活道路と幹線道路についても同様な比較検討を行った。

都市全体における透水性舗装の効果を評価する手始めとして、図-3 に示す街区を抽出し、舗装形態による雨水流出過程の比較を試みた。この街区には幅の異なる A, B, C 3 本の道路がある。街区面積に対する路面の合計面積率は約 26% である。A は幅  $20\text{m}$  の幹線道路、B は幅  $10\text{m}$  の主要道路、C は幅  $5\text{m}$  の生活道路である。これらの道路に不透水舗装または細礫による透水舗装を施工した場合、道幅による斜面からの単位幅流出量  $q(t)$  の差異を比較したものが図-4 である。降雨は確率 1/10 の降雨強度  $60\text{mm/h}$ 、継続時間  $60\text{分}$  を与えた。

図によると、すべての道路において、Case1 では降雨開始後すみやかに流出量が立ち上がるのに対し、Case2 は流出量を緩やかに増加させて流出を抑制できている。しかし降雨が継続するにつれ両者の差は縮まり、降雨終了時点では Case1 に対する Case2 の流出量の比は A で 50%、B で 82%、C で 98% となっている。幅の狭い C では短時間で Case1 に近づき、大きな流出抑制は見込めない。一方、幅の広い A は流出量を半分以下に抑えているが、舗装内の水深は  $20\text{cm}$  を上回り路面に溢水する恐れがある。したがって豪雨が降り続く場合、Case2 には流出抑制が期待できない可能性が高い。路面への溢水を防ぐには、水深を低下させるために POC など透水性の高い舗装が望ましいといえる。

さらに、長時間にわたる豪雨に対応するため、最も幅の広い道路 A に Case1 ~ 4 の舗装を施工した場合について、排水路末端における流出量  $Q(t)$  の変化を比較したものが図-5 である。降雨は確率 1/100、強度  $100\text{mm/h}$  で  $60\text{min}$  継続するとした。図の通り、不透水舗装 Case1 では降雨開始後 20 分で降雨強度に等しい流出量に達している。これに対し、細粒による透水舗装 Case2 では最大流出量を半分以下に抑えることができているが、前述のとおり浸透水が地表に溢れ出る恐れがある。POC 舗装 Case3 では水深こそ小さいが、最大流出量は Case1 に近い値まで上昇している。一方、貯留層付き POC 舗装 Case4 では最大流出量を 6 割程度に抑えつつ、流出抑制機能を



図-3 街区の一例および対象とする路面

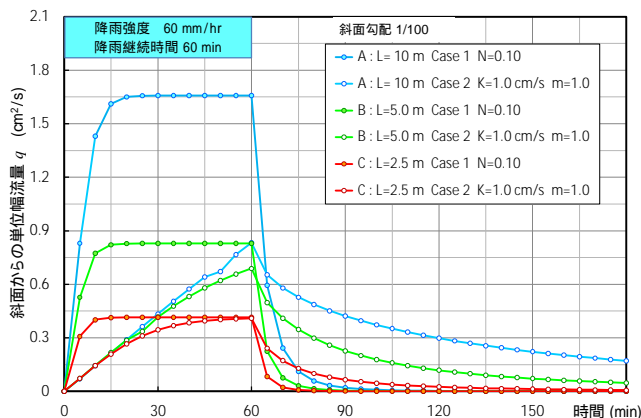


図-4 道路幅による路面からの単位幅流出量の比較

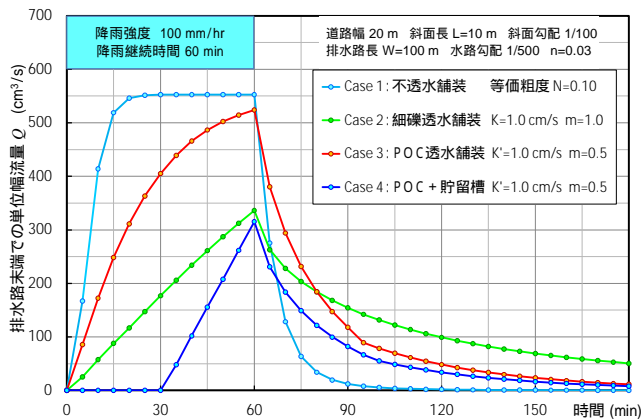


図-5 舗装形態による道路 A の排水路末端の流出量の比較

発揮していることが分かる．貯留槽の雨水は地下水を涵養して水循環の改善にも寄与する．

まとめ：

本研究では不透水路面に対する各種透水性舗装の流出抑制効果を比較し，貯留槽を備えたPOC舗装の優位性を示すことができた．今後は街区内の各道路について詳細な解析を進め，実用化に向け有効性を検討したい．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 原田守博, 小出祥大	4. 巻 27
2. 論文標題 POC透水性舗装における雨水浸透流出過程の水理モデリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 名城大学総合研究所紀要	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 原田守博, シュエ・ジン・ミン・アウン	4. 巻 63
2. 論文標題 雨水貯留層を備えた POC 透水性舗装の流出抑制効果	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 名城大学理工学部研究報告	6. 最初と最後の頁 54-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 シュエ・ジン・ミン・アウン, 原田守博, 久世義直
2. 発表標題 都市街区における透水性舗装の雨水流出抑制効果に関する考察
3. 学会等名 令和5年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 シュエ・ジン・ミン・アウン, 原田守博, 尾崎康介
2. 発表標題 雨水貯留層を備えたPOC透水性舗装の流出抑制効果に関する試算
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023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
---------	---------