

都市型水害防止に資する貯水・排水型の高機能舗装工法

中 川 武 志・松 村 豪・畑 中 重 光

近年では都市部を中心に、「ゲリラ豪雨」による水害やヒートアイランド現象などに関する話題が数多く報告されている。本稿で紹介する工法は、筆者らがこれまで培ってきたポーラスコンクリートに関する一連の技術がこれらの問題解決の一助となることを目指している。すなわち、建物外構、公園、車道・歩道などに高い透水性や貯水機能を付与し、路面下での水流を制御でき、かつ街のアメニティにも配慮した貯水・排水システムを目指している。

キーワード：路面下の貯水、都市型水害、減災、透水性、排水性、ポーラスコンクリート

1. 都市型水害とその対応策の必要性

近年、いわゆる「ゲリラ豪雨」が発生すると、アスファルト舗装等の被覆面積が多い都市部では、雨水が水路や河川に短時間で流入しようとするために溢水・氾濫が生じ、都市型水害が発生することが報告されている^{1), 2)}。このため、都市型水害を防止または低減する総合治水対策を講じた都市づくりが求められている。

対応策の一つとして、高い透水性を有するポーラスコンクリート（以下、POC）により路面または床面を形成することで、その内部での雨水の貯水・排水を可能とし、街区からの雨水の流出遅延効果と流出量の低減効果を付与できる工法を提案する。この工法は、道路、歩道、公園、公共空間、建物外構等を形成する透水性舗装^{3), 4)}であり、表層の意匠に配慮した舗装工法として、常時の都市空間を形成しつつ⁴⁾、豪雨時には雨水を路面下に瞬時にすべて透過して、通行者の安全性を確保できる（写真—1）。また、水路・河川への雨水流入の短時間集中を防止する（貯水・排水）

機能により、都市型水害の防止対策⁵⁾となり得る。

本報では、POC内を水平方向に流れる水の動きの制御技術について行った基礎的検討を紹介する。また、路面または床面を形成したPOC内部での雨水の貯水・排水制御により、雨水の流出遅延効果と流出量の低減効果を付与できる工法を提示する。

2. 路面下における透水性能の評価

（1）透水係数の考え方

POCの透水係数は、これまで、2003年に日本コンクリート工学会（JCI）の規準（案）として提示されている測定方法⁶⁾により、ダルシー則に基づき評価されることが多かった。これは、供試体を容器内で水没させ、供試体を格納した管内を通過する流量及び（流入側と流出側の）水位差から算出される。この測定方法では、供試体を垂直に配置するが、基本的には水平・垂直によらない飽和状態の流れを代表する透水係数となる⁷⁾。

しかし、路面下のPOC内を水平方向に流れる水の場合は、大気に接し、自由水面をもつ水流であり、打設方向の異なる、かつ飽和状態で測定されたPOCの透水係数をそのまま使用できるかどうかは不明である。また、実際の流れに適用するためには、流路の形状・表面性状・勾配、水位等を別途に考慮したシミュレーション法の導入が必要となる。

（2）小型供試体による水平方向の透水実験

自由水面を持つ水平方向の水流に関して使用できる



写真—1 学校構内における施工例（複層 POC）

透水係数または類似のパラメータを見出すため、溝型コンクリート製品の中に POC を打設した試験体中の水流に関する実験を実施した。

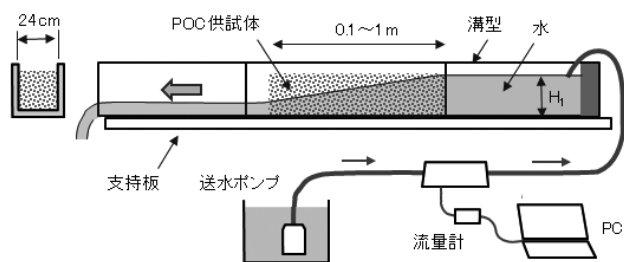
(a) 実験方法

実験では、図—1 に示すように、ポンプを使用して溝型内に水流を形成し、上流側の水位が安定した状態で流量を測定し、下流端の水位も測定した。POC 供試体部は、骨材粒径を 3 種 (2.5 ~ 5 mm, 5 ~ 13 mm, 13 ~ 20 mm) とした。なお、底面の勾配はゼロとし、設計空隙率は 30% とした (共通条件)。

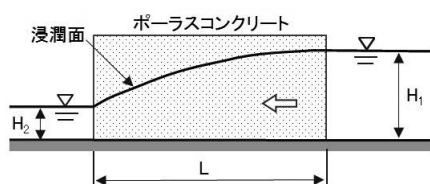
図—2 は、供試体内部の水流を模式的に示したものの⁸⁾であるが、POC 内の水流の上面 (浸潤面) が滑らかな流線となると仮定すると、デュピイの近似仮定から式 (1) の関係が導かれる。

$$k = 2QL / (H_1^2 - H_2^2) \cdot W \quad (1)$$

ここで、 k : 見かけの透水係数 (cm/s), Q : 流量 (cm³/s), H_1, H_2 : 水位 (cm), L : 供試体長さ (cm), W : 流路の幅 (cm)



図—1 POC 内の水流に関する実験



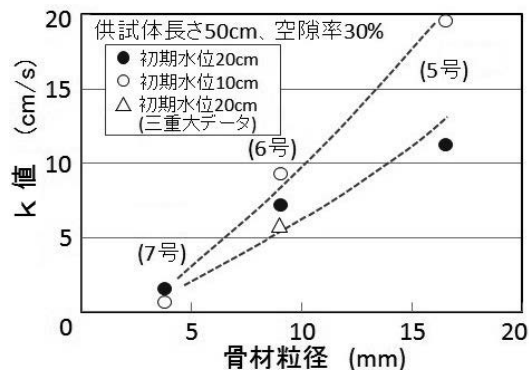
図—2 供試体内部に自由水面 (浸潤面) をもつ水流

(b) 実験結果

本実験では、見かけの透水係数 (以下、 k 値) と POC の平均骨材粒径、供試体長さ、水位等との関係を調べた。図—3 に実験結果の一例を示す。算出された水平方向の k 値は一定値ではなく、次の定性的傾向がある。すなわち k 値は、POC の骨材粒径が大きいほど、また、初期水位 (H_1) が低くなるほど増大する。

水平方向の k 値は、例えば、6 号碎石 (骨材粒径 5 ~ 13 mm), 空隙率 30%, 水位 20 cm で 7 cm/s 程度

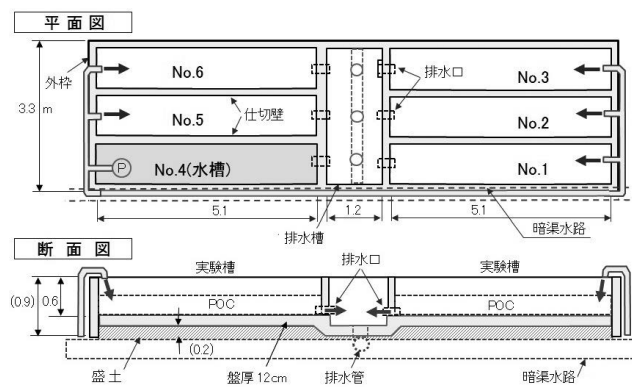
であった。この値は、JCI 基準 (案) 方式で得られた円柱供試体の透水係数 2 ~ 4 cm/s に比べて (2 倍程度) 大きい。この差の原因としては、流路形状及び壁境界の効果の影響も考えられる。今後、式 (1) の適用可能な範囲についてはさらに検討が必要と考えられる。



図—3 k 値と骨材粒径及び水位との関係

(3) 実物大 POC 実験槽における模擬降雨実験

上記の (2) 項に示した実験は、供試体レベルであるのに対し、より実際の施工に近い状況を再現するため、図—4 のような実験槽 (幅 0.9 m) を用い、模擬降雨時の排水状況の確認実験を行った。ここでは、設計空隙率 27%, 骨材粒径 5 ~ 13 mm の POC を打設し、POC 厚さの影響、有孔排水管の布設の影響、路床種別の影響等を調べた。

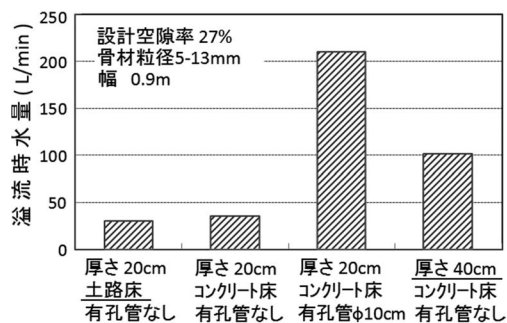


図—4 実物大 POC 排水実験槽

その結果、写真—2 及び図—5 に示すように、約 35 L/min という極めて強いレベルの模擬降雨が、厚さ 20 cm の路面下を、前述の小型供試体と類似した浸潤面をもって流れる状況が確認できた。また、厚さが 2 倍になると溢流時水量 (POC 上面を超える時の水量) は 3 倍程度に増大すること、POC 内に有孔管を布設するときわめて多量の水量を流せることなどが確認された。また、土路床の場合、水量はコンクリート床と同程度であったが、ここで注目された点は、その排水



写真—2 模擬降雨排水実験の状況 (厚さ 20 cm, コンクリート床, 有孔管φ10 cm 布設)



図—5 排水状況の比較結果

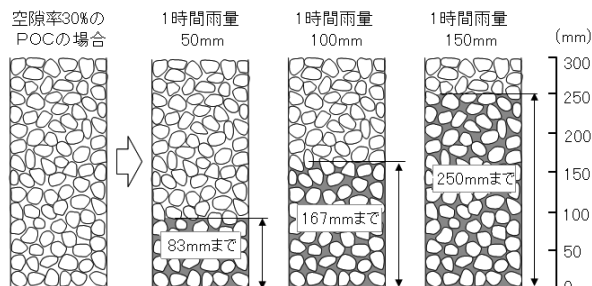
にはいっさい泥水の発生が見られなかったことである。

3. 水害対策としての POC の活用

(1) 路面下における貯水機能

空隙率が 25% 以上で、骨材の平均粒径が 10 mm より大きい POC では、1～5 cm/s 程度の透水係数を期待できる⁴⁾。これは、一般的な透水性アスファルト舗装等の透水係数より 10 倍程度大きい。これにより、降った雨水を速やかに内部へ取り込むことが可能であることから、その適用箇所、面積、厚さ、排水方向、貯水機能等を計画的に設定すれば、POC 舗装を水害対策の一環として機能させることが可能である。

図—6 に、1 時間あたりの雨量と空隙率 30% の POC 内の水位の関係を示す。POC 内の水位は、例えば 1 時間雨量 100 mm (記録的豪雨レベル) の雨が連続 30 分間降った場合、他からの流入及び排出のない



図—6 1 時間あたりの雨量と POC 内の水位の関係 (連続 30 分間降雨の場合)

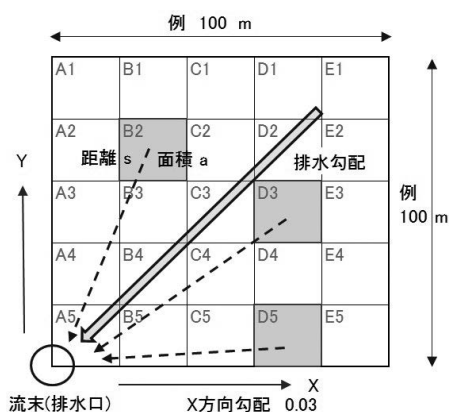
条件で 167 mm となり、200 mm 程度の POC 厚さがあればほぼ内部に貯水できることになる。

(2) 雨水の排水遅延効果の推定

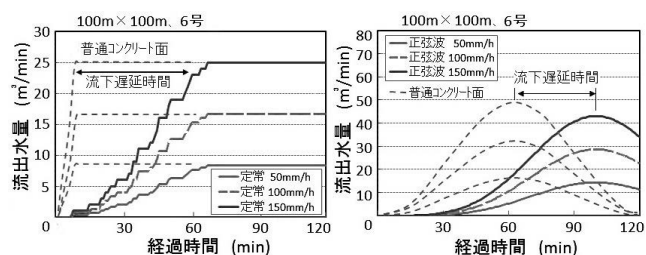
POC 内の水の流速は非透水性のアスファルト舗装表面を流れる水の流速に比べて小さい^{5), 9)} (10 分の 1 程度)。ここでは、市街への降雨時に期待できる雨水の排水遅延効果及び流出量の抑制効果を概算する。

排水曲線は、図—7 に示すように細分割したブロック毎の排水量と到達時間を求め、これを積算すれば概算できる。POC 舗装した領域については、別途得られた下流端の流速 (6 号, 空隙率 30%, 初期水位 20 cm で 6 cm/s 程度、及び水路勾配 0.1 の同条件で 11 cm/s) を便宜的に使用して、流末の排水曲線¹⁰⁾を求めた。一方、非透水性舗装表面の流水の場合は、水路等の設計に用いられるマンニングの式⁹⁾により推定できる。

詳細は割愛するが、図—7 に示すような 100 m × 100 m の領域 (POC 厚さ 20 cm, 空隙率 30%, 勾配が x 方向 0.03, y 方向 0.01) からの排水曲線を試算すると、図—8 のような結果が得られる。すなわち、非透水性舗装と比較して、定常降雨 100 mm/h の場合で 60 分程度の排水遅延効果があると推定された。また、2 時間で 1 周期、100 mm/h 相当の正弦波状降雨波形では、40 分程度の排水ピークの遅延効果と、12% 程度の排水ピークの低減効果が試算された。



図—7 適用領域の排水シミュレーション



(1) 定常降雨

(2) 正弦波状降雨

図—8 排水シミュレーション結果

(3) 都市型水害の状況分析と適用法の検討例

都市型水害の特徴として、(i) アスファルト舗装等の被覆面積が多く、水路・河川に短時間で流出する、(ii) 都市域は低地に多く、溢水・氾濫が生じやすい、(iii) 道路や鉄道、電気、上下水道などのインフラに被害が及びやすい、(iv) 地下道、地下街などの低い場所で、人的被害が発生しやすい、などの傾向がある¹⁾。都市計画に、配置されている洪水調整池や基幹排水路に到達するまでに水害が発生することもあり、道路の特定の区間、またはある区域が一時的に冠水するなどの現象が多発する。

ここで、図-9に示すように、水害の具体的な発生原因と対策方法を考察すると、雨量 100 mm/h 程度にもなるゲリラ豪雨は、通常は排水路の想定雨量を上回るレベルである。また、路面を大量の雨水が流れることにより、排水が短時間に集中するとともに、落ち葉やゴミ等が流され、側溝の流入口を閉塞させ、排水支障も生じる。

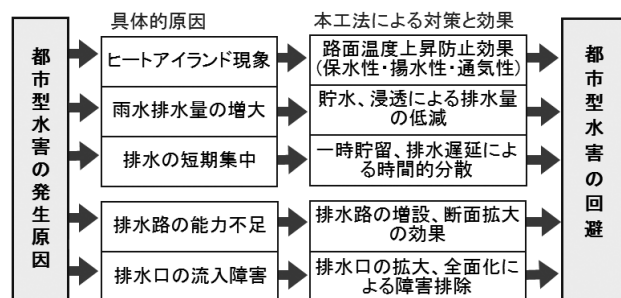


図-9 水害発生 の 具体的原因 と 対策方法

このような水害の防止対策としては、まず雨水の流出量を低減または遅延させること、そして、ヒートアイランド現象そのものの抑止のための路面の温度上昇防止、緑化等の温度低下策が考えられる。

提案工法は、上述のような排水遅延効果により雨水流出を時間的に分散させ、雨水の流入口を全面的にポーラス化することにより閉塞を回避し、貯留効果により雨水の流出量を低減し、加えて、路面温度上昇の防止効果をもつという機能を期待できる。

地盤内で貯水・排水を行う本工法の一例として、歩道の場合の断面構成イメージを図-10に示す。図から容易に理解できるように、本工法では、豪雨の場合も、舗装表面全体から雨水を内部に通水することが可能となり、落ち葉等による排水流入口の閉塞の懸念はほぼ解決される。

POC内では、POCの骨材粒径、空隙率、排水管（有孔管）の有無等を適切に設定することにより、水流を制御できる。また、埋設管は、貯水量の増大目的でも

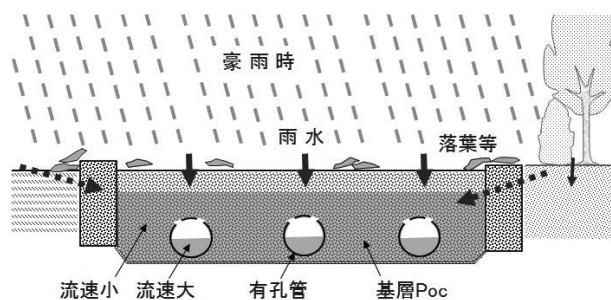
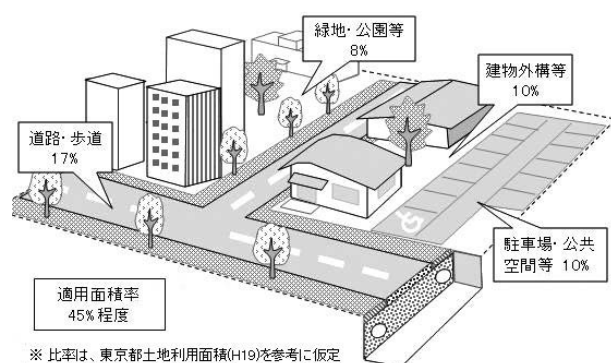


図-10 地盤内で貯水・排水を行う工法の一例（歩道）

設置できる。

図-11に示すように、一般的な都市部において本工法が適用可能な面積の比率を試算すると、45%程度になると推定される。提案工法を表-1のように適用すると仮定した場合、単純計算ではあるが、ゲリラ豪雨の激しさに降った1時間の雨水量の100%を貯留できることになる。



※ 比率は、東京都土地利用面積(H19)を参考に仮定

図-11 街区への適用箇所とその面積比率

表-1 貯水効果の試算

(a) 単純雨量計算の条件 (市街地、1平方キロ試算)			
区分	雨量 mm/h	1時間雨水容積 m ³	持続時間(概略) h
通常	20	20000	48
ゲリラ豪雨	100	100000	1

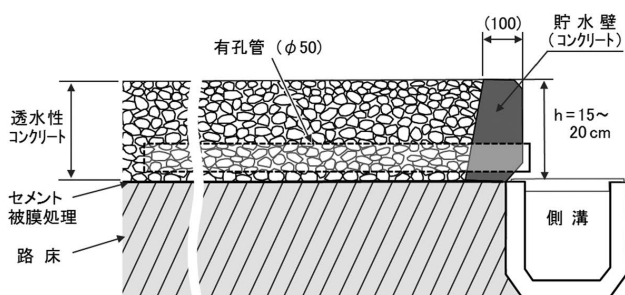
(b) POCによる貯留容量(ゲリラ豪雨対応)				
面積 %	積 m ²	厚さ cm	空隙率※ %	貯水量 m ³
35	350000	40	35	49000
7	70000	100	40	28000
3	30000	200	40	24000
合計	450000			101000

※ 空隙率には布設管容積を含む

筆者らが提案するのは、街区の意匠性にも配慮した複層のPOC構造である⁴⁾。すなわち、路盤材に替えて、基層としてのPOCを敷設し³⁾、その上に、透明な樹脂で結合されたPOCの表層を施工する。表層には他に、小・中粒径セメント系POC、二次製品、土質材料、芝生・人工芝などを用いることもできる。



写真—3 路面下の貯水が可能な駐車場の事例



図—12 駐車場の断面構成

(4) 水害対策を意図した施工事例

写真—3に、駐車場の施工事例を示す。本事例では、路面下の貯水構造による雨水流出抑制及び排水速度の低減による豪雨時の濁水発生防止を意図し、図—12のような断面構成となっている。本事例の他、屋外イベント場を人工芝表層とした事例、工場構内の排水路を透水性コンクリートで形成した事例など、施主の要望に応じた多様な設計・施工事例を蓄積しつつある。

なお、街区の条件、本貯水・排水システムの設計条件を種々変化させた場合の排水シミュレーションについては、現在も検討を継続中である。

4. おわりに

複層ポーラスコンクリートを使用した本工法は、常時の住環境の快適性を向上させるとともに、雨水を瞬時に内部に通し、例えば豪雨時でも街区での溢水を回避する設計も可能となる。また、路面下の流速を通常の舗装路面を流れる速度に比べて大幅に低下させることが可能であり、雨水の排水遅延効果も期待できる。したがって、一定の設計思想をもって建物内外構、歩道、駐車場、公共空間、公園等、都市の様々な箇所に適用

すれば、本工法は、都市整備と都市型水害対策の両面で有効であると考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、三島直生准教授、浦山益郎教授（三重大学大学院工学研究科）、酒井俊典教授、葛葉泰久教授（同生物資源学研究科）のご助力を得た。また、本研究に関して、国交省建設技術研究開発助成制度補助金及び文科省科学研究費補助金 基盤研究（B）を受けた。付記して謝意を表する。

JCM/A

《参考文献》

- 1) 三上岳彦：知りたいサイエンス 都市型集中豪雨はなぜ起こる？、技術評論社、2011.06
- 2) 下水道政策研究委員会浸水対策小委員会（国土交通省）：都市における浸水対策の新たな展開、2005.03
- 3) NETIS、CB-130008-A、ゲリラ豪雨対策用高排水舗装工法（TN ベース）
- 4) 中川武志、畑中重光、三島直生、松村豪：住空間における意匠性に配慮した複層ポーラスコンクリート歩道の施工実験、日本コンクリート工学協会、Vol.46、No.12、pp.20-27、2008
- 5) 畑中重光、酒井俊典、中川武志、三島直生：都市型水害の減災に資する地盤内での水流制御技術の開発研究（その1：水流制御技術に関する基礎的研究）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013.08
- 6) ポーラスコンクリートの設計・施工に関する研究委員会、同報告書、pp.182-185、日本コンクリート工学協会、2003.3
- 7) 増山幸衛、草刈憲嗣、小柴朋広：排水性舗装の透水能力測定法に関する研究、土木学会舗装工学論文集、第6巻、pp.1-10、2001.12
- 8) 松岡元：土質力学、森北出版、pp.32-53、1999.10
- 9) 土木学会水理委員会：水理公式集、pp.88-90、1999.11
- 10) 舗装委員会、舗装設計施工小委員会著：透水性舗装ガイドブック 2007、社団法人日本道路協会、pp.付1-7、丸善、2007

【筆者紹介】

中川 武志（なかがわ たけし）
（株）ファイナルマーケット
代表



松村 豪（まつむら つよし）
（株）川島工業
技術部



畑中 重光（はたなか しげみつ）
三重大学大学院 工学研究科
教授

