

# 雨水浸透による車道透水性舗装の 諸性状変化に関する一考察

森石一志<sup>1</sup>・大西有三<sup>2</sup>・西山 哲<sup>3</sup>・矢野隆夫<sup>4</sup>・小関裕二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 修(工) 大林道路株式会社 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸四丁目 640)

<sup>2</sup>正会員 工博,Ph.D 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 京都大学大学院 准教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 京都大学大学院 技術専門員 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

<sup>5</sup>正会員 博(工) 大林道路株式会社 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸四丁目 640)

透水性舗装は、地下水の涵養を目的として主に歩道に施工されている。一方、その透水機能が近年急増する都市型洪水に対して有効であると認められ、平成16年5月に施行された特定都市河川浸水被害対策法に伴い大型車の交通量の多い車道部への導入が検討され、各地で試験施工が試みられている。しかし、透水性舗装の車道部への適用を図るためには舗装構造の耐久性等の問題を解消する必要がある。特に路盤材については、雨水の浸透により骨材が移動し諸性状が変化するという問題がある。そこで、本論文はその路盤層に着目し、雨水の浸透による性状の変化を実路および室内試験で検証したものである。

**Key Words** : permeable pavement, trial construction, granular materials, FWD, CBR, permeability

## 1. はじめに

道路整備を進めていくうえで、自然環境や生活環境に配慮して行うことは年々重要性を増し、最近の舗装技術についても「環境」の改善や保全に十分配慮した技術が必要となっている。

近年、都市の急激な市街化により、地中への雨水浸透を阻害する人口被覆面が地表面の大半を占めるようになった。このため都市においては雨水を急激に河川や下水道へ流出するため、集中豪雨の際の、都市型洪水が問題となっており、河川流域全体での総合的な治水対策が必要となっている。その対策の一つとして透水性舗装が注目され、種々の検討が行われている<sup>1)</sup>。透水性舗装は、透水性のあるポーラスアスファルト混合物や粒状路盤材料などを使用することより、雨水が舗装表面から混合物層および路盤層を介して路床まで浸透する構造を持つものである。透水性舗装は雨水浸透機能を有するため、降雨時の河川や下水道の雨水処理の負担を軽減でき、都市型洪水抑制効果を持つと考えられている。しかし、舗装体に雨水が浸透することにより、支持力および透水性能が低下するという報告もある<sup>2)</sup>。

既往の研究<sup>3)4)</sup>では、透水性舗装に使用する路盤材料は、供試体を作製し通水を行った場合、使用する材料や粒度

によっては、CBR値が低下するという結果が得られている。CBR値の低下は浸透水によって路盤材中の細粒分が移動し、骨材同士の噛み合わせが変化したためだと考えられている。また、一定量の通水を行うと透水係数も低下する。

そこで著者らは、粒状路盤材に着目し、実路での検証として、軽交通道路に試験施工された車道透水性舗装で、雨水浸透による支持力の経年および経時変化をFWDで検証した。さらに、路盤材の雨水浸透を室内レベルで再現し、雨水浸透による路盤材の支持力変化を修正CBR試験で検証した。

なお、実路での検証は、千葉市が生活道路において試験的に実施した、透水性舗装の追跡調査結果を使用している。

## 2. 実路による粒状路盤材の性状変化の検証

### (1) 試験施工概要

#### a) 施工条件

平成16年に千葉市の市道に施工された軽交通道路の試験舗装構造を図-1に示す。施工箇所は、住宅地で交通量区分としてはN<sub>2</sub>(舗装計画交通量、15以上40未満〔台/日・方向])である。



図-1 舗装構造図

表-1 アスファルト混合物の配合割合と諸性状

試験項目	透水性舗装		標準舗装	
	表層 透水性(13)	基層 透水性As処理(20)	表層 再生密粒(13)	
骨材配合率 %	5号砕石	—	42.0	
	6号砕石	74.5	38.0	
	7号砕石	7.0	—	
	砕砂	8.0	15.0	
	細砂	5.5	—	
	石粉	5.0	5.0	
アスファルト量 (%)				
	4.2	3.6	5.4	
混合物の性状	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.080	2.054	2.405
	理論密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.527	2.548	2.493
	空隙率 (%)	17.7	19.4	3.5
	飽和度 (%)	32.2	26.8	78.1
	安定度 (kN)	4.6	4.2	11.3
	フロー値 (1/100cm)	31	26	34
	残留安定度 (%)	—	—	—
	DS (回/mm)	550	—	—
	透水係数 (cm/sec)	$1.1 \times 10^{-1}$	$1.5 \times 10^{-1}$	—

試験施工は図-1に示すように4つの工区を設けて行われた。4工区は比較対象の表層に密粒度アスファルト混合物を用いた舗装（以下、標準舗装）である。路盤材料の違いが透水性舗装の機能および性状に与える影響を確認するため、1工区および3工区は再生砕石（RC-40）を使用した。2工区の路盤層は二層とし、その構成を上層路盤に再生粒度調整砕石（RM-40）、下層路盤にRC-40を使用した。また、路床の保護状況の違いによる透水性舗装の機能および性状の変化を確認するため、1工区および3工区には遮断層として砂層を設けた。2工区には遮断層を設けていない。

試験施工で使用したアスファルト混合物（以下、アス

表-2 路床の諸性状

試験項目	1工区	2工区	3工区
土質(目視)	砂質土	砂質土	砂質土
含水比 (%)	27.5	25.9	29.7
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.446	1.483	1.489
CBR (%)	3.2	3.8	3.4
透水係数 (cm/sec)	$1.12 \times 10^{-5}$	$9.31 \times 10^{-6}$	$1.85 \times 10^{-5}$

表-3 路盤の諸性状

試験項目	RC-40	RM-40
通過質量百分率 (%)	53	100
	37.5	98.8
	19.0	76.5
	4.75	33.3
	2.36	20.1
	0.425	—
	0.075	—
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.993	1.719
最適含水比 (%)	6.2	16.3
修正CBR (%)	40.3	105
PI	NP	NP
すり減り減量 (%)	22.3	29.4
骨材間隙率 (%)	18.6	—
透水係数 (cm/sec)	$1.29 \times 10^{-3}$	—
現場での締固め度 (%)	1工区	97.8
	2工区	97.6
	3工区	98

コン)の諸性状を表-1に、路床および路盤の諸性状をそれぞれ表-2, 3に示す。

表-1に示すように透水性舗装は、表層に透水性アスコン、1工区の基層に透水性アスファルト安定処理を適用している。一方、標準舗装は、表層に再生密粒度アスコンを使用している。

表-4 各工区の散水量

	1工区	2工区	3工区
散水量 (m <sup>3</sup> )	2.7	1.6	2.9
時間当たりの散水量 (mm/h)	30	30	40

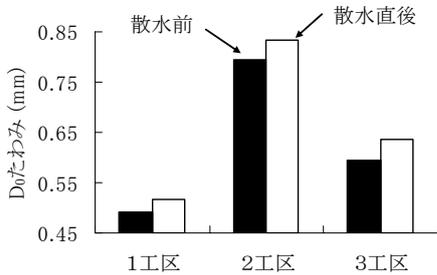


図-2 散水前後のD<sub>0</sub>たわみ量

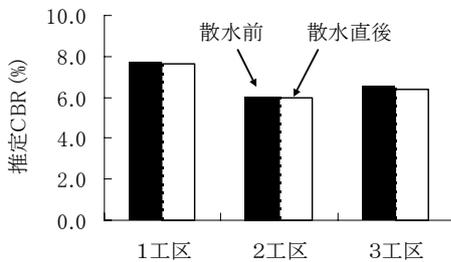


図-3 散水前後の推定される現状のCBR

b) 散水実験

雨水浸透による影響を確認するため散水ヤードを設けた。ヤードの寸法は、横断方向を舗装幅員の5mとし、縦断方向も横断方向と同様の5mとした25m<sup>2</sup>である。また、散水した水を縦断方向にのみ移動させるため、側面は遮水シートを舗装表面から路盤下面まで設置した。ここで設定した散水量は、式(1)で算出される雨水一時貯留可能量とした<sup>5)</sup>。表-4にそれぞれの散水量を示す。

$$S = \sum \frac{H \cdot V}{100} \cdot Fs \quad (1)$$

ここに、S：舗装断面における雨水一時貯留可能量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>)

H：路面単位面積あたりの舗装の体積 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>)

V：各層の空隙率(%)

Fs：有効空隙比（全空隙に対して雨水が実際に入る空隙の比）=0.7

c) 調査手順

雨水浸透による支持力変化を確認するため、散水前、散

水直後、およびその後の任意の時間において FWD による測定を実施した。また、測定位置はヤードの中央部とした。なお、散水直後とは、散水が終了して10～15分後である。

(2) 支持力変化の検証

a) 粒状路盤材の性状変化

図-2に散水前後のD<sub>0</sub>たわみの変化を、図-3に散水前後の推定される現状のCBRの変化をそれぞれ示す。なお、推定される現状のCBRは式(2)で算出した<sup>6)</sup>。

$$\text{現状のCBR(\%)} = \frac{1,000}{D_{150}} \quad (2)$$

ここに、D<sub>150</sub>：載荷中心から150cm位置のたわみ(μm)

散水直後において、たわみに若干の増加が見られた。しかし、図-3に示す散水を行った直後の現状のCBRは変化していない。これは、舗装体内に雨水が介在している場合、路床より上の舗装体で支持力変化が生じていることを示唆する。

b) たわみによる評価

図-4にD<sub>0</sub>たわみの経時変化を示す。2工区のD<sub>0</sub>たわみが、他の工区と比べて大きな値を示している。しかし、散水直後においては、雨水浸透の影響を受けていると思われるたわみの増加が見られるものの、散水前と散水後70時間経過した時点でのたわみに差が見られない。このことより、今回試験施工した箇所の路床においては、雨水浸透の影響を受けていない可能性が示唆される。

c) 逆解析弾性係数による評価

図-2、3から雨水浸透による影響は路床ではなく、その上部で起こっている事が確認された。そこで、雨水が舗装体内に介在している時の逆解析弾性係数を算出した。逆解析には、フリーウェアとして公開されているLMBSを使用した。なお、路床の逆解析は遮断層を含めて行い、アスコン層の弾性係数は、式(3)により20℃の弾性係数に補正した<sup>7)</sup>。2工区の路盤層については、上下層を一層として検討している。

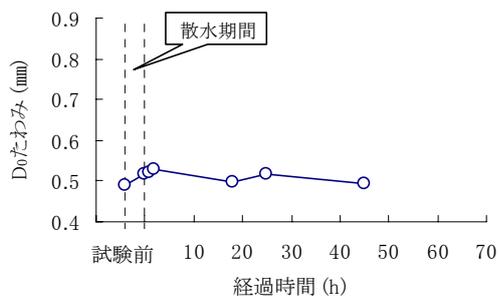
$$E_{as(20)} = E_{as(z)} \times 10^{[-0.0184 \times (20 - T_{ave(z)})]} \quad (3)$$

ここに、E<sub>as(20)</sub>：標準温度20℃のアスコン層の弾性係数 (MPa)

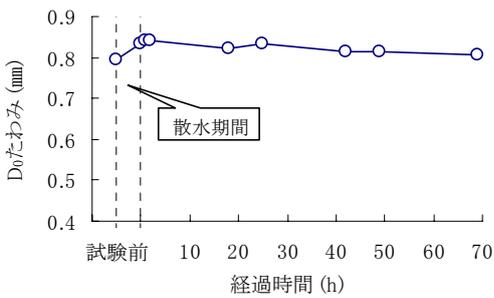
E<sub>as(z)</sub>：T<sub>ave</sub>℃のアスコン層の弾性係数(MPa)

T<sub>ave(z)</sub>：FWD測定時のアスコン層の平均温度(℃)

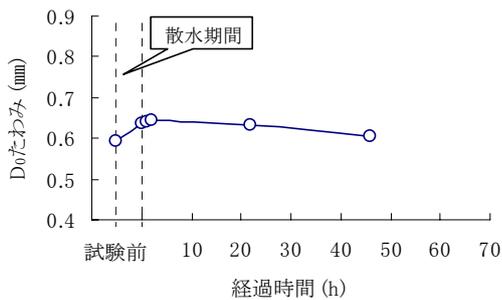
図-5に各層の逆解析の結果を示す。路床の弾性係数は散水前、散水直後、その後において変動していない。しかし、路盤層では変化しており、散水直後に弾性係数は



(a) 1工区



(b) 2工区

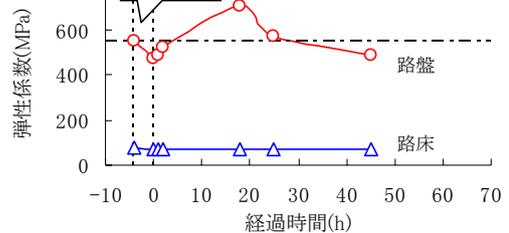
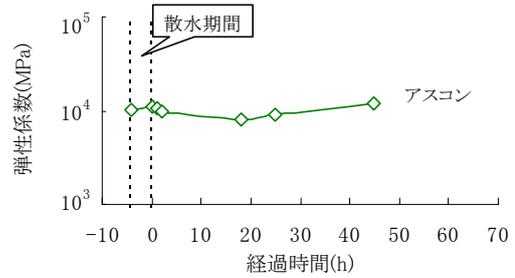


(c) 3工区

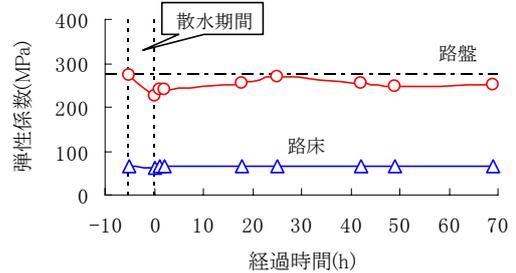
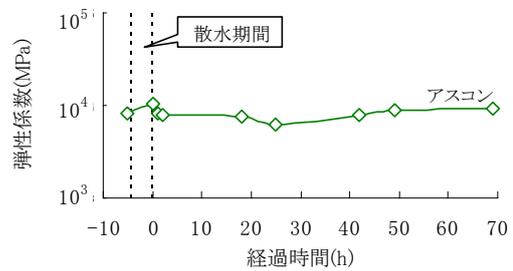
図-4 路床の  $D_0$ たわみ

低下する。その後、1工区では途中で弾性係数が大きくなる結果がみられたものの、2工区および3工区では一度低下した弾性係数が徐々に散水前の値に回復していることが確認できる。2工区は上層と下層で材料が異なるが、1工区および3工区の結果から、下層路盤の RC-40 が大きく影響していると考えられる。また、1工区の散水後18時間経過した時点の弾性係数が増加しているのは、図-4に示す  $D_0$ たわみに若干の変動が見られ、それが原因しているものと考えられるが、実際には不明である。アスコン層はどの工区においても  $10^4$ MPa 程度を示し、散水前、散水直後、その後において変動していない。このことから、透水性舗装の支持力は、舗装体内に雨水が介在している時に支持力が低下するが、その後回復するものの、若干の低下が見られる。このような降雨の繰り返しにより、支持力低下につながる可能性があることを示唆するものである。

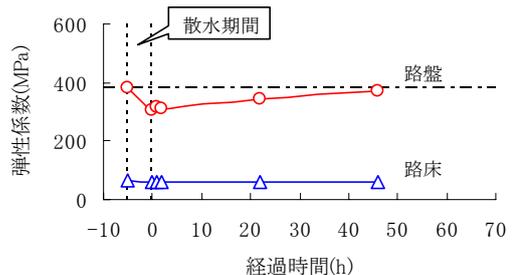
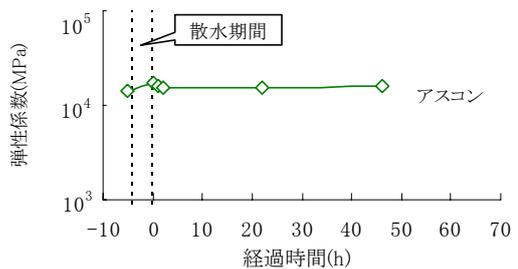
以上の実路における検証より、粒状路盤材が雨水浸透



(a) 1工区



(b) 2工区



(c) 3工区

図-5 路床および路盤層の逆解析弾性係数

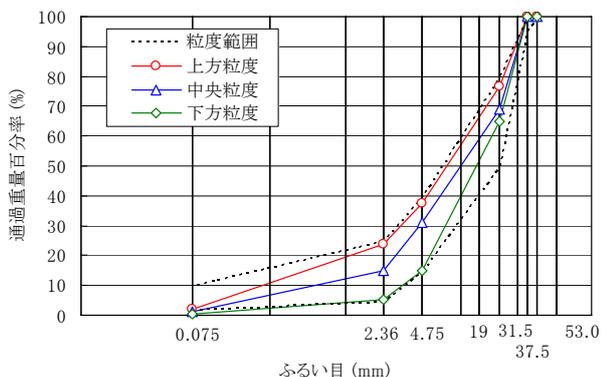


図-6 各粒状路盤材の粒度曲線

による影響を受け、10~70MPa 程度ではあるが弾性係数の低下が確認できた。そこで、雨水浸透による粒状路盤材の性状変化を室内で試みた。

### 3. 室内における粒状路盤材の諸性状の検証

#### (1) 実験概要

##### a) 使用材料

前述したように実路では再生砕石を使用しているが、再生砕石を使用する場合、材料の入手場所や時期によりアスファルト塊およびコンクリート塊の混入率にバラツキがあり、同一性状の材料の入手が困難である。そこで、本研究では道路で通常使用されている切込砕石 (C-40) を用いることとした。その粒度は、図-6 に示すように、規格粒度範囲内で上方・中央・下方粒度の3種類とし、突固めによる粒度変化を想定し、突固め後の粒度を本試験の基本粒度とした。

##### b) 実験項目

通水試験に先立ち、締固めによる粒度変化を確認するため、CBR 試験後の試料でふるい分け試験を行い、供試体作製前の粒度と比較した。

実験項目として、通水による影響を機能性および耐久性に分けて検証した。機能性の検証として、室内透水試験 (以下、透水試験) により透水係数を測定した。また、耐久性の検証は、修正 CBR 試験 (以下、CBR 試験) で支持力を確認した。

##### c) 供試体の作製

供試体は、舗装試験法便覧<sup>8)</sup>の「修正 CBR 試験方法」に準拠し、締固め度が 95% および 100% になるように作製した。

##### d) 試験機構

本研究では、通水による性状の変化を検証するため、CBR 試験器具を改良し、通水作用を受けた状態のまま透水性能および支持力変化の測定を実施した。また、通水中は CBR 試験の水浸養生と同様に、舗装重量として供試体上部に 49N の有孔板を設置した。

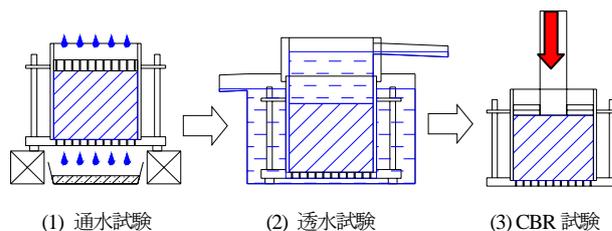
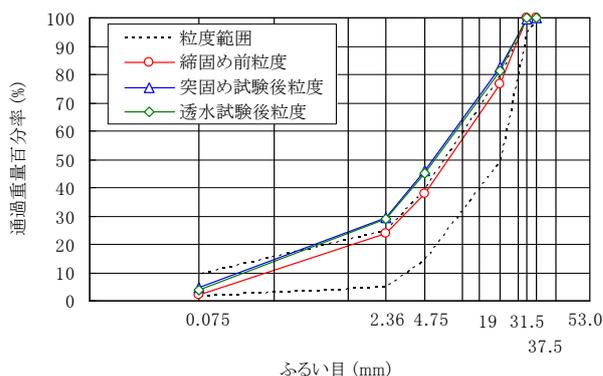
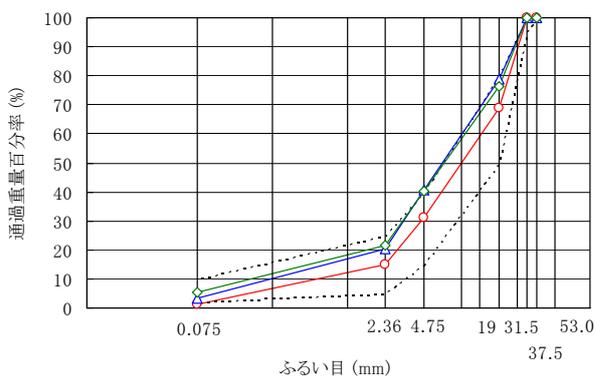


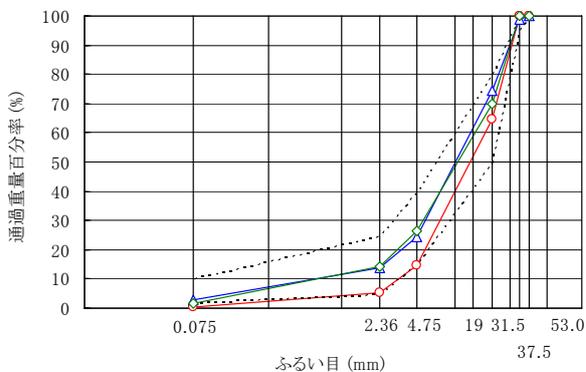
図-7 試験手順



(a) 上方粒度



(b) 中央粒度



(c) 下方粒度

図-8 締め固め後および通水後の粒度変化

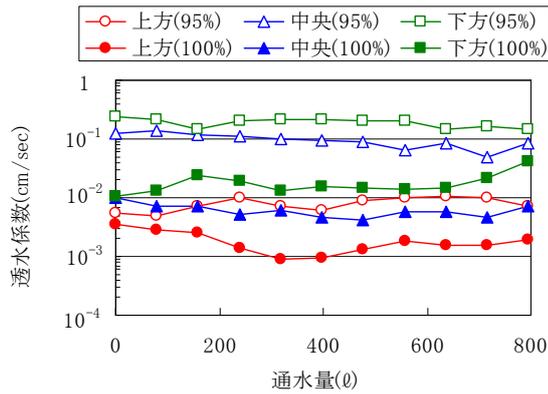


図-9 透水係数の変化

e) 実験手順

試験手順を図-7に示す。まず、通水前の透水性能の確認として透水試験を行い、飽和透水係数を測定した。飽和透水係数は、あらかじめ供試体を水浸させておき、飽和状態にしてから測定を実施した。通水中の透水試験に関しても同様に飽和状態にしてから測定した。支持力変化は、目標とした通水量（年間降水量1,500mmとし、30年分の795l）を通水した後、CBR試験を行い確認した。透水性能は所定の通水量（79.5l）ごとに飽和透水係数を測定し、透水性能の変化を確認した。通水量は、道路路面雨水処理マニュアル(案)<sup>9)</sup>の「舗装材料の水拘束率・貯留率・透水性能測定方法」で設定された、10年確率降雨強度を参考に100mm/hで実施した。また、通水、透水試験、水浸養生中に型枠の有孔底板（φ0.6mm）から落下した骨材を回収した。本実験において、このφ0.6mmの有孔部分を落下した骨材を微粒分と定義し、その微粒分と試験前の供試体重量から間隙比を算出した。微粒分の回収方法は、通水中は有孔底板の下に容器を設置し、流下した水を一度その容器で受け、微粒分を沈殿させてから排水した。また、透水試験中においては、透水試験器の水槽に沈殿した微粒分を回収した。

(2) 実験結果および考察

a) 粒度変化

図-8に締固め前、締固め度100%時の締固め後および通水後の粒度変化を示す。各粒度とも、突固め時の骨材の割れによる粒度変化が確認された。その変化の量は、上方粒度から下方粒度へ行くに従い増加しており、下方粒度が粒径の大きい骨材を多く含むためと考えられる。また、上方粒度では突き固め後にC-40の粒度範囲から外れた。通水により微粒分が流出したが、その量が微少であるため、粒度曲線にほとんど影響しない。

b) 透水性能

図-9に通水量と透水係数の関係を示す。透水係数は締固め度で異なり、締固め度が大きいと透水係数が小さく

表-5 透水係数の変動係数

変動係数	締固め度95%			締固め度100%		
	上方粒度	中央粒度	下方粒度	上方粒度	中央粒度	下方粒度
	0.25	0.27	0.18	0.44	0.27	0.48

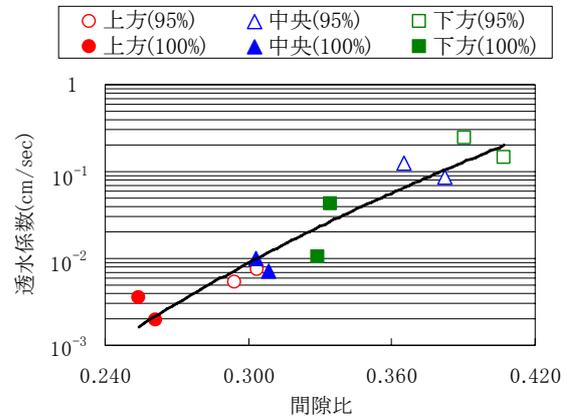


図-10 間隙比と透水係数との関係

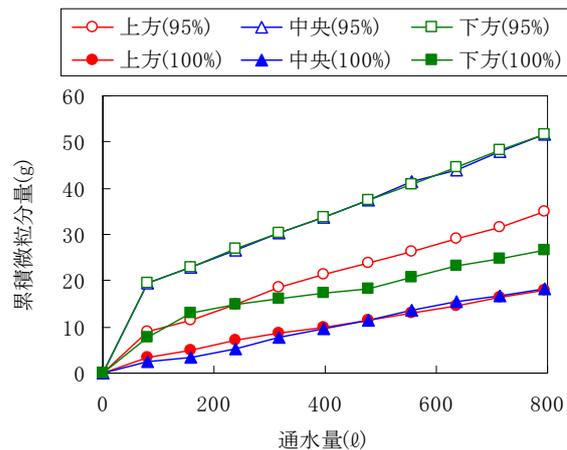


図-11 累積微粒分量の変化

なる。また、同じ締固め度で比較すると、透水係数は上方粒度が最も小さく、下方粒度が最も大きい。通水によって、締固め度95%では下方および中央粒度の透水係数が若干低下し、100%では上方および中央粒度に低下傾向が見られた。また、表-5に示す変動係数から、締固め度100%において、通水中における透水試験結果の変動が大きい傾向を示している。これは締固め度が大きい方が、透水係数が小さいため、変動が大きくなったと考えられるが、通水による微粒分の移動により、連続空隙が変化したためとも考えられる。

図-10に通水前と通水後の間隙比と透水係数との関係を示す。間隙比が大きくなると透水係数も大きな値を示している。したがって透水性能のみを重視した場合、中央または下方粒度が有利である。

図-11に累積微粒分量の変化を示す。締固め度で比較す

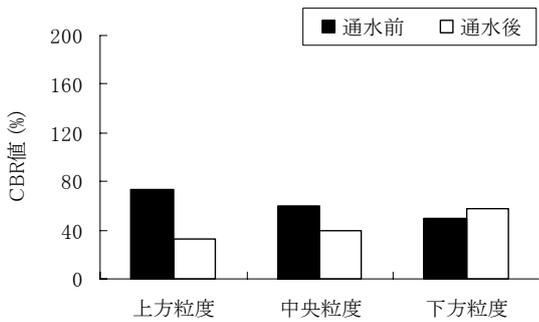


図-12 支持力の変化 (締固め度 95%)

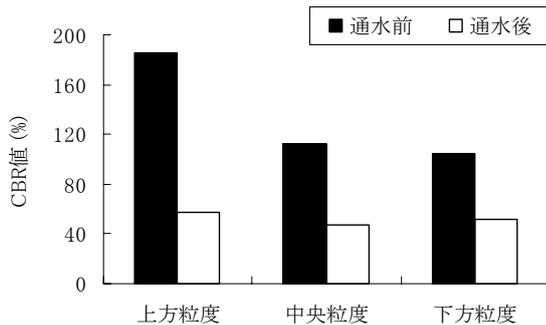


図-13 支持力の変化 (締固め度 100%)

表-6 CBR 値の低下率

	上方粒度	中央粒度	下方粒度
締固め度95%	56	34	—
締固め度100%	69	58	51

ると、締固め度が大きいほど微粒分の流下も少ない。また、各粒度で見ると、上方粒度が他の2粒度より流下が少ない。これらの結果から、微粒分の流下は路盤材中に含まれる微粒分量に関係するのではなく、微粒分が移動しやすい連続空隙を形成する骨材の割合が大きく影響すると判断される。

### c) 支持力変化

締固め度 95% の CBR 試験の結果を図-12 に示す。通水前の CBR 値は上方粒度が最も大きく、次いで中央粒度、下方粒度と小さくなっている。しかし、通水後においては上方粒度の CBR 値が最も小さく、次いで中央粒度、下方粒度と大きくなっている。下方粒度に関しては低下していない。下方粒度は図-11 に示すように微粒分の落下が最も多いにも関わらず、CBR 値は低下していない。これより粒状路盤材の支持力低下は、落下する微粒分の量と無関係であることがわかる。

締固め度 100% の CBR 試験の結果を図-13 に示す。通水前の CBR 値は締固め度 95% の場合と同様に、上方粒度が最も大きく、下方粒度が最も小さい。しかし、通水後の CBR 値はほとんど変わらない。

表-6 に CBR 試験の通水後の低下率を示す。通水後において締固め度 100% の場合、どの粒度でも CBR 値は 50% 以上低下する。締固め度 95% の場合でも、上方粒度は 50% 以上の低下率である。締固め度 100% の上方粒度は低下率が最も大きく、上方粒度は通水による微粒分の移動の影響を最も受けやすいと考えられる。上方粒度の締固め度 100% の供試体は、他の粒度に比べ小さい粒径の骨材を多く含んでいる状態で締固められている。そのため、中央粒度および下方粒度より微粒分のような小さい粒度の骨材の移動が少ないにもかかわらず、支持力に影響したと考えられる。逆に締固め度 95% の下方粒度が増加しているのは、締固め度 95% の下方粒度は、上載荷重の影響で締め固まった可能性がある。一方、上方粒度および中央粒度は、上載荷重の影響より微粒分の流下の影響が大きかった可能性がある。微粒分の流出量が最も多いにもかかわらず、大きな透水係数を維持し、CBR 値の低下も無いことから、今回使用した材料では、透水性舗装の路盤としては下方粒度の締固め度 95% が適していると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、透水性舗装の粒状路盤材に着目し、実路での検証として、軽交通道路に試験施工された車道透水性舗装で、雨水浸透による支持力の経時変化を FWD で検証した。また、路盤材の雨水浸透を室内レベルで再現し、その現象が与える路盤材の性状の変化を修正 CBR 試験で検証した。実路では雨水が舗装体内に介在するときの支持力変化があることが確認できた。室内では、粒度により雨水浸透が支持力に大きく影響することが確認できた。

本研究で得られた主な知見をまとめると次のとおりである。

- 実路での FWD たわみの結果から、雨水が舗装体内に介在すると、粒状路盤材の性状に影響を与える。
- 雨水浸透による影響を受け、支持力が低下した粒状路盤材は、介在する雨水が舗装体内から流出すると、その支持力は回復するものの、若干の低下が見られる。この低下が蓄積され、支持力低下につながるものと考えられる。
- 室内実験の結果から、降雨強度 100mm/h で 30 年間に相当する量を通水しても、粒状路盤材の透水性能の低下はほとんど見られない。ただし、通水による粒状路盤材の微粒分の移動が、供試体内部の連続空隙を変化させることより透水係数を若干変動させたと考えられる。
- 通水前と通水後における CBR 値を比較すると、上方粒度の低下が特に大きいので、透水性舗装の路盤材料選定には粒度が重要である。

## 参考文献

- 1) 質疑応答：透水性舗装の実用化に向けた取組み，舗装，Vol.36. pp.19-20, 2004.
- 2) 鎌田修，清水忠昭，伊藤正秀：車道透水性舗装の耐久性に関する研究，土木学会論文集，pp.91-98, 2005.
- 3) 中西弘光，浅野耕司，川西礼緒奈，高砂武彦：環境に配慮した車道透水性舗装の開発，舗装，Vol.36, pp.10-17, 2001.
- 4) 野田悦郎，遠藤 桂，竹内 康：車道透水性舗装における粒状路盤材の性能に関する一検討，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.1321-1322, 2004.
- 5) 財団法人 先端建設技術センター：環境に配慮した舗装構造設計・施工・維持管理要領（案），2003.
- 6) 財団法人 道路保全技術センター：活用しよう！FWD, 2005.
- 7) 雑賀義夫，阿部長門，姫野賢治，丸山暉彦：FWD から得られる特性値の温度補正に関する検討，舗装，Vol.30, pp.10-15, 1995.
- 8) 日本道路協会編：舗装試験法便覧，1989.
- 9) 独立行政法人 土木研究所：道路路面雨水処理マニュアル（案），2006.

## STUDY ON VARIOUS PROPERTIES CHANGE OF PERMEABLE PAVEMENTS WITH INFILTRATION OF RAIN WATER

Kazushi MORIISHI, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA,  
Takao YANO and Hiroji KOSEKI

The permeable pavements are mainly constructed for the purpose of cultivating ground water and mainly applied on the sidewalk. It was admitted that permeability was effective for flood which increases rapidly in the city. And application on a heavy traffic road is also considered now in regarding to a recent law about control runoff. Therefore, test constructions are tried in various places. However, it is necessary to solve problems, such as durability, to apply permeable pavements to the roadway. Especially, aggregates of granular materials moves by infiltration of rain water and the quality have been changed. This paper verified the quality change of granular materials by the infiltration of rain water.