

車道型透水性舗装と貯留浸透施設の 設計方法に関する検討

三浦康夫¹・中園 裕²・三枝長生³・阿部長門⁴・井上 彰⁵

¹正会員 日本貨物鉄道株式会社 物流システム本部 保全部 グループリーダー (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-13-1)

²正会員 工修 日本貨物鉄道株式会社 物流システム本部 保全部 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-13-1)

³正会員 工博 日本貨物鉄道株式会社 物流システム本部 保全部 部長 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-13-1)

⁴正会員 工博 東亜道路工業株式会社 技術研究所 開発室 室長 (〒300-2622 茨城県つくば市要 315-126)

⁵正会員 東亜道路工業株式会社 技術研究所 開発室 主任研究員 (〒300-2622 茨城県つくば市要 315-126)

着発線荷役方式の鉄道貨物施設のコンテナホームは、着発線は1線あたりの延長が500m以上必要なため、1面のコンテナホームの面積は約1.5～2.0haとなる。このため、舗装表面の雨水処理のために延長方向に排水構造物を造らねばならず、フォークリフトの大きな輪荷重が作用する場合に弱点となりやすい。また、集水された雨水が流域河川や下水道に直接排水されるため都市河川管理者の許可が得られにくいことが問題となる。

そこで、重荷重に耐えうる透水性舗装や貯留浸透施設が必要となってきた。透水性舗装の問題点となる表層材料の耐流動性および据切り抵抗性、透水型路盤の強度及び厚さ設計、貯留浸透施設の設計方法について検討を行い、貨物駅構内に施工した試験舗装で検証を行った。

Key Word : Permeable pavement, Container platform, Permeable well, Storage penetration facilities, Time delay of drainage

1. はじめに

近年のCO₂抑制を含む環境問題の高まりから、荷物の鉄道輸送が見直されてきている。これに対応するため日本貨物鉄道株式会社では、荷物の速達化を図るため、図-1に示すように従来、駅で貨車を切り離し、連結することを前提として配線された貨物駅のスタイルから、コンテナ輸送用のため旅客本線から直接ホームを有する着発線へ列車を引き込んで貨車を切り離さず荷役する、図-2に示すような着発線荷役方式(E&S方式)の導入を積極的に行っている。

貨物鉄道のコンテナホームは、一般的な貨物列車の長さを考慮すれば、着発線1線あたりの延長は500m以上、舗装面積で約1.5～2.0haの舗装が必要となる。このような広大な舗装において雨水を舗装表面のみで処理する場合、長距離にわたり排水構造物を設置しなければならず、フォークリフトのような大きな輪荷重が作用する場合には、その部分が弱点となりやすい。また、舗装の降雨は排水構造物から流域の河川や下水道にほとんど遅れがなく流れ込むため、容量の少ない都市河川や下水道においてはその管理者の許可が得られないことがしばしばある。その場合の対策として、雨水浸透槽や雨水貯

留槽等を設ける場合があるが、いずれも巨大なコンクリート構造物を地下へ設けなければならず、その上面を重荷重車輛が通過する場合には必ずしも合理的な設計とはならない¹⁾。

そこで、透水性舗装や貯留浸透型の構造物を“開発行為の申請を必要とする”5,000m²以上の大規模開発地域に適用する試みが行われるようになってきた。これにより、雨水を舗装体内部の路盤に浸透させ、河川に放流するまでの時間を有意に遅らせ、洪水のピークカットを行う方法が使われるようになってきた。この方法は、地下水を涵養し、多孔質の舗装構造がもたらす騒音低減効果や、雨天時の路面のすべりを抑制し荷役作業の安全性を向上する効果も期待されている。

本稿では、重荷重のフォークリフトのタイヤによる据切り抵抗性を向上させた排水性混合物、貯留浸透型路盤の雨水浸透状態の強度特性および透水性舗装の設計方法を検討した。さらに、貯留浸透施設の設計のための現場浸透試験や設計方法に関する検討を行い、貨物駅構内改良に伴い新設したコンテナホームで、透水性舗装と浸透井戸の現場試験を実施し、ここで提案した透水性舗装や貯留浸透施設の設計方法に関する検証を行った。

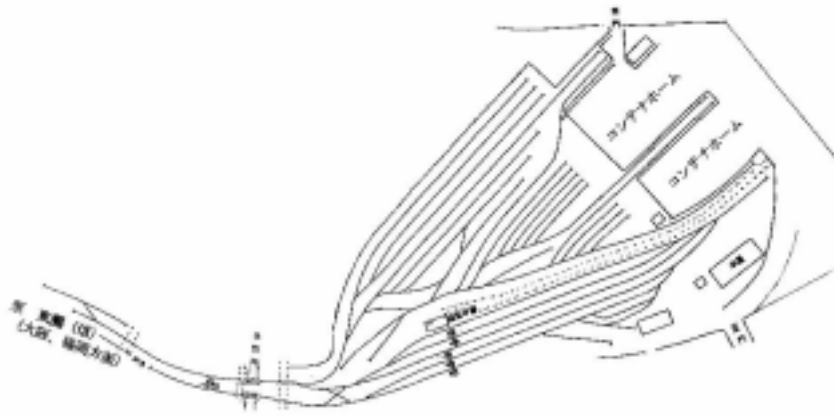


図-1 貨車の解放と連結作業を前提とした貨物駅の例（東海道線神戸港駅）



図-2 着発線荷役駅の例（山陽線神戸貨物（タ））

2. 透水性舗装

(1) 表層用混合物の検討

近年、排水構造物の簡略化を目的とし、排水性混合物を使用した透水性舗装が数多く施工されている。その特性や機能については安全対策だけでなく、騒音の低減効果や、高い透水性が得られてきた。しかし、貨物ヤードにおけるフォークリフトがタイヤの据切りを行うとねじり作用により骨材が飛散するといった現象が問題となり、耐久性の向上が求められている。そこで、筆者らは高粘度バインダに骨材間の付着力を増加させる為に、化学繊維であるビニロン繊維を混合させて、その混合物の特性及び試験施工における排水性舗装の評価について検討を行っている²⁾。

この試験舗装の供用3年後の調査結果では、高温時のダレによる空隙詰まりや骨材飛散が発生していた。更に良い排水性混合物とするために、高粘度バインダにエポキシ樹脂を混入させた耐据切り抵抗性高粘度バインダや改質アスファルト乳剤タイプの骨材被膜剤を開発し、比較検討を行った³⁾。比較検討に用いたバインダの諸元と試験結果を表-1に示す。検討した排水性混合物の骨材配合比を表-2に示す。

従来の排水性混合物と耐据切り抵抗性的高粘度バインダを用いた排水性混合物の動的安定度の比較を図-3に示し、ねじれ抵抗性試験の結果を図-4に示す。このねじれ抵抗性試験は、気温60度の恒温槽で5時間養生し、

表-1 排水性舗装用バインダの諸元

試験項目	単位	高粘度バインダ	耐据切り抵抗性
針入度	1/10mm	54	25
軟化点		90.5	89.0
伸度(15)	cm	100+	36
薄膜加熱	質量変化率	%	0.10
	針入度残留率	%	81.5
引火点		315	313
タフネス	25	N・m	31.2
	40	N・m	1.0
テナシティ	25	N・m	26.3
	40	N・m	0.8
60 粘度	$1 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	100+	測定不能
粗骨材の剥離面積率	%	0	0
低温曲げひずみ(-20)	cm/cm	110	145
密度	g/cm^3	1.025	1.027

* 供試体形状: 20×20×100mm、載荷方式: 2点支持中央載荷

載荷速度: 100mm/分(アスファルトバインダーのみの供試体)

表-2 検討に用いた混合物の骨材配合

項目	密粒度	排水性	
粗骨材の最大粒径(mm)	13	13	
設定空隙率(%)	5.2	17	20
骨材配合(%)	粗骨材	6号碎石	44
		7号碎石	15
	細骨材	S.C	9
		粗目砂	20
		細目砂	8
	フィラー	石粉	4
使用バインダ	改質型	高粘度	高粘度
バインダ量(%)	5.6	5.0	4.8

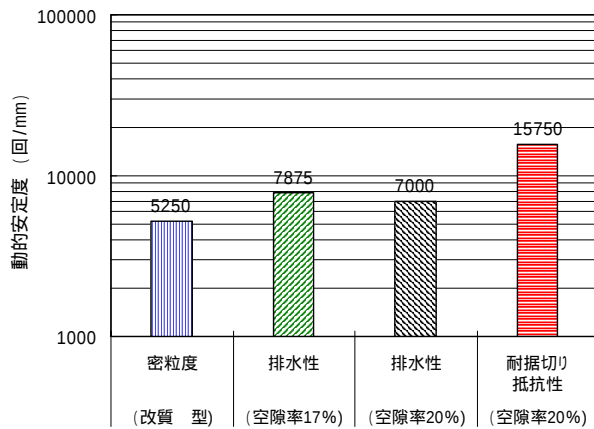


図-3 各種混合物と動的安定度の関係

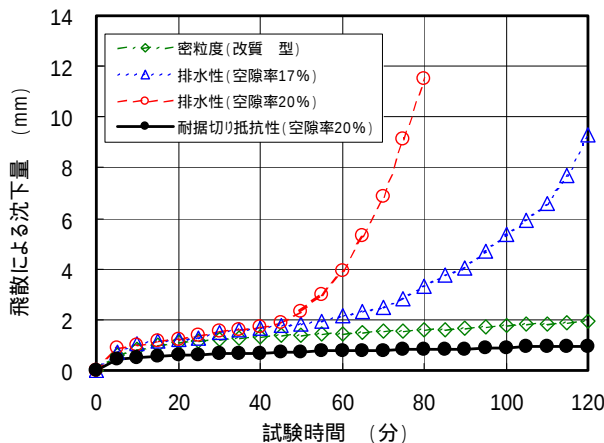


図-4 ねじれ抵抗性試験の結果

室温 60 度の条件で試験を行った。

この据切り抵抗性を向上させた排水性混合物は、動的安定度も高く、ねじれ抵抗に富み、据切りに伴う骨材の飛散や移動量が少なく、改質アスファルト型を使用した密粒度混合物と同等であった。

室内試験結果に基づき、現場施工した結果を以下にまとめる。高粘度 As の排水性混合物+表面保護材(排水性+保護材と略す) 高粘度 As の排水性混合物(排水性と略す)、耐据切り抵抗性排水性混合物(耐据切り抵抗性と略す)の試験舗装結果をまとめる。比較対象は密粒度混合物である。

各試験舗装区間の DF テスターで計測した動的摩擦係数測定曲線を図-5 に示す。排水性混合物に表面保護材を散布した工区では、他の工区に比べ動摩擦係数が小さく、滑りやすいという傾向がある。しかし、貨物ヤード舗装構内における最高速度は 20 km/h 以下と定められているため、ほとんど影響がないものと言える。各工区における MTM によるきめ深さ(SMTD)と透水能力の関係を図-6 に示す。現場透水試験は、1000ml/15 秒以上と規定⁴⁾されていることから両者において高い相関があるものと考えられる。一般に透水性舗装の評価を示す表面の凹凸指標として、MTM のきめ深さと現場透水試験による

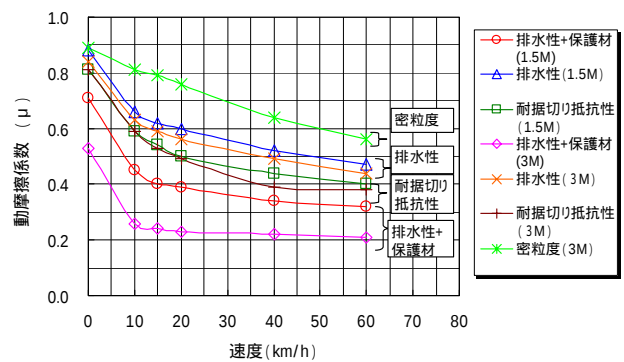


図-5 各種混合物の動摩擦係数の比較

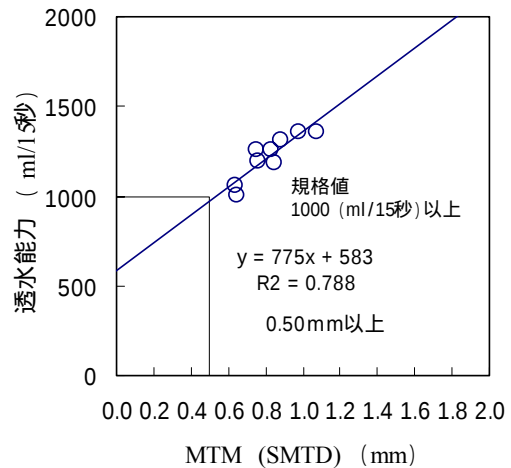


図-6 きめ深さ(SMTD)と透水能力の関係

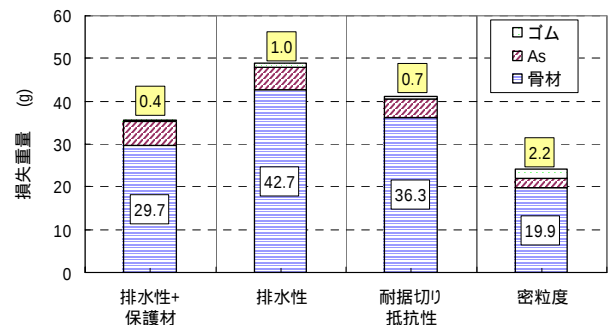


図-7 現場据切り試験による混合物とタイヤの損失量

透水能力が用いられている。MTM によるきめ深さは 0.50mm 以上⁵⁾とされており、これ以下の場合には空隙の目つぶれと評価され、排水性舗装の機能回復が必要となる。

コンテナ荷役用 20ft フォークリフトの後輪を用いて、各混合物上で 10 回の据切りを行った。各工区の現場据切り試験によるアスファルト混合物とフォークリフトのタイヤ損失量の割合を図-7 に示す。この結果、密粒度混合物の表面積が排水性混合物に比べて大きいことから、タイヤの接地面積も大きくなり、タイヤのゴム損失量が多い。砕石の飛散に関しては、密粒度混合物の次に排水性混合物+表面保護材が少ない。これにより、施工後 1.5 ヶ月後の結果であるが、改良した排水性混合物は従来の

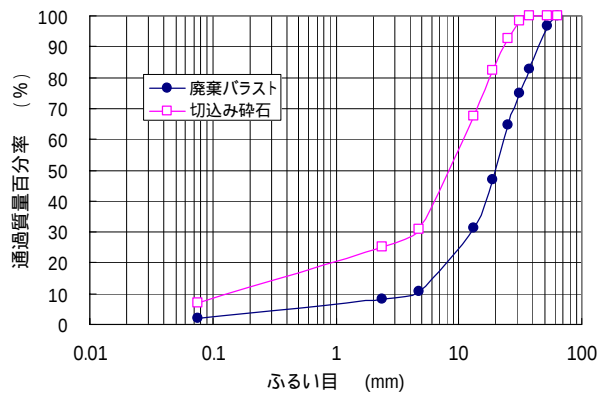


図-8 廃棄バラストと切込み砕石(30)の粒度分布

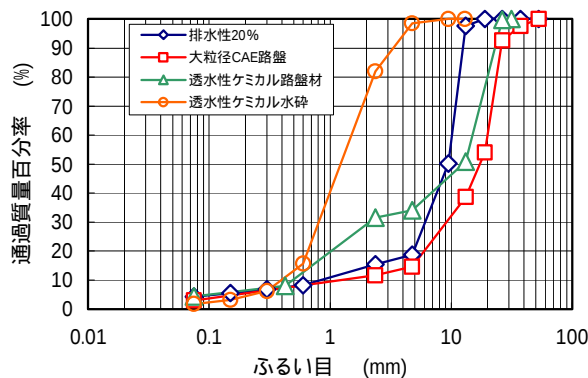


図-9 透水性路盤と排水性舗装（空隙率 20%）の粒度分布

ものに比べ砕石の飛散量が少なく、フォークリフトのタイヤ摩耗量も少なく抑えることができることが判った。

(2) 透水型路盤の検討

透水性舗装を考える場合に、表面排水量を極力減少させ、路床（フィルター層）内に設置した有孔管からの排水量と路床への自然浸透量をほぼ一致させ、表面排水量の 50%を河川や下水道から排水し、残りを舗装下の地盤に浸透させる構造を検討目標とした。一般に、参考文献 6)では路盤排水は 10 日以内に排水度が 50%以下になれば良いとされているので、 t_{50} の算定式の有効間隙率を 40%とし、路盤内の横断勾配を 2%として、設計上必要となる路盤材料の透水係数を算定した。この結果、必要となる透水能力 $3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 以上を目標値とした。

ここでは、貨物駅構内の軌道撤去時に発生する廃棄バラストを有効活用し、再生資源利用促進法(リサイクル法)に準拠した透水性舗装用路盤の検討を行った。廃棄バラストと切込み砕石(30)の粒度分布を図-8に示す。また、高炉で鉄鉱石から銑鉄を生産する時に生成する高炉水砕スラグを用いた透水性路盤についても同様に検討を行った。検討を行った透水性路盤と表層に用いられる排水性舗装（空隙率20%）の粒度分布を図-9に示す。図中の大粒径CAE路盤は廃棄バラスト70%、切込み砕石30%で配合し、セメントとアスファルト乳剤で混合したものであ

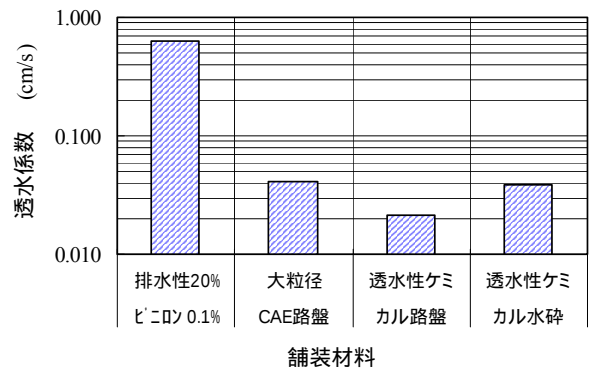


図-10 各材料の透水係数の比較（定水位）

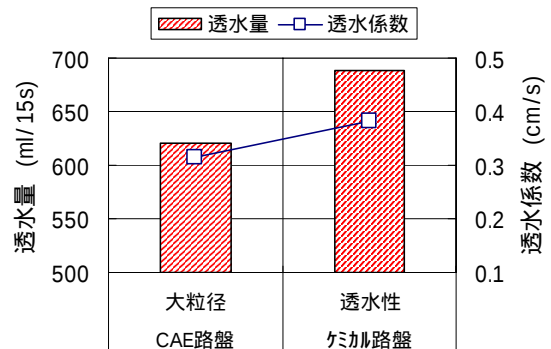


図-11 大粒径CAE路盤と透水性ケミカル路盤の現場透水試験結果

る。透水性ケミカル路盤材は砕石(30)+高炉スラグ+石灰、透水性ケミカル水砕は水砕スラグ+石灰で構成される。

室内で直径150mmのモールドを使用して定水位試験で実施した各路盤材料の透水係数(定水位)を図-10に示す。参考値として排水性混合物(空隙率20%)の透水係数も示した。また、試験舗装における現場透水試験による透水量を図-11に示す。排水性混合物と3種類の路盤材を比較すると、排水性混合物の透水能力はいずれの路盤材の3倍程度を有している。室内の定水位試験と現場透水試験結果より、室内の定水位透水係数は側面を拘束した状態での上下方向透水状態であるが、現場透水試験は路盤材料の違いによって表層内でも下方のみでなく層内を側方に水が流れるため透水量が増加し、現場透水試験結果の透水能力が室内試験と逆転したと思われる。いずれの路盤材料も室内試験で $2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 以上であり、設定した透水係数の目標値を十分に満足している。

繰返し三軸圧縮試験機を用いて、AASHTO T-292⁷⁾に準拠し、透水性路盤の弾性係数を推定した。本試験では不飽和状態と飽和状態のそれぞれについて実施した。復元弾性係数(以下 M_r)の算定は、偏差応力と軸ひずみより求めた。復元弾性係数(以下 M_r)の算定は偏差応力と軸ひずみより式(1)から求めた。主応力と θ とレジリエントモジュラス M_r の関係は 図-12 に示す様な両対数グラフの横軸に主応力と($\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$)を、縦軸にレジリエントモ

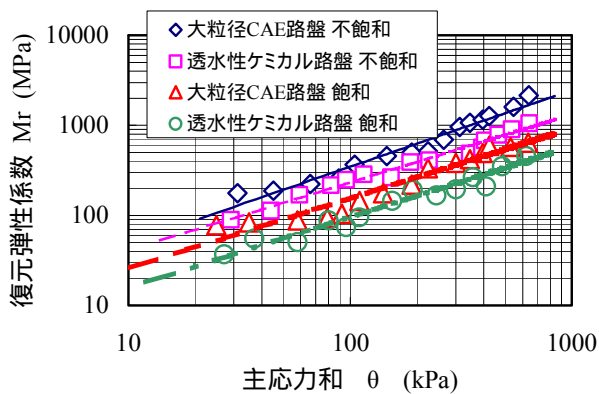


図-12 各路盤材料の主応力と復元弾性係数

表-3 路盤材料の材料係数

材料名	飽和条件	材料係数		相関係数 r^2
		k_1 (MPa)	k_2	
大粒径CAE路盤	不飽和	6.917	0.850	0.957
	飽和	4.754	0.751	0.944
透水性ケミカル路盤	不飽和	7.155	0.755	0.978
	飽和	2.599	0.783	0.949

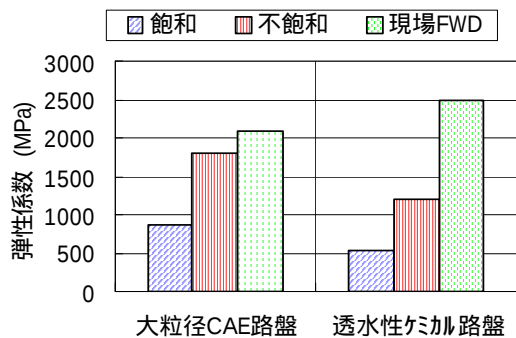


図-13 各試験条件の弾性係数の比較

ジュラス M_r をプロットすることにより、回帰式(式(2))の係数(k_1, k_2)を求める。

$$M_r = \sigma_d / \varepsilon_a \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

ここで、 σ_d : 偏差応力、 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)

σ_1 : 全軸応力 (最大主応力) (kPa)

σ_3 : 拘束応力 (最小主応力) (kPa)

ε_a : 復元軸ひずみ (μm)

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (2)$$

ここで、 M_r : レジリエントモジュラス (MPa)

θ : 主応力と ($\sigma_1 + 2\sigma_3$) (kPa)

k_1, k_2 : 材料定数

図-12より、いずれの路盤材料においても、飽和状態では骨材間隙中の水によって不飽和状態の M_r に比べて低下するが、傾きを示す k_2 はほぼ同一で、切片を示す k_1 の違いのみとなる。飽和と不飽和状態では、飽和状態の弾性係数は不飽和状態の弾性係数の1/2程度の値となり、骨材間隙に満たされた水の影響で弾性係数が低下している。

式(2)より求めた材料係数を表-3にまとめた。さらに、FWD測定結果から求めた弾性係数²⁾と、FWDによる舗装

表-4 室内試験から求めた弾性係数と等値換算係数

構成層	材料など	弾性係数 (MPa)		等値換算係数	
		不飽和	飽和	不飽和	飽和
表層	排水性(高粘度As)	6,000	5,000	1.0	0.9
基層	排水性(改質型)	5,000	4,000	1.0	0.9
上層路盤	大粒径CAE路盤	3,000	1,500	0.65	0.55
下層路盤	切込み碎石(40-0)	1,200	80	0.25	0.20
路床	安定処理や置換えなど	60以上	60以上		

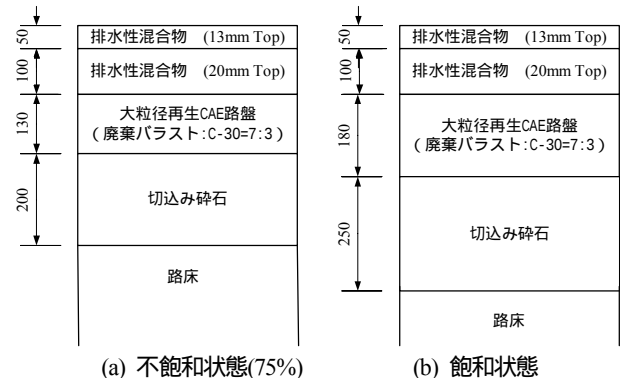


図-14 提案する舗装構造

体に生じる応力レベルの各層の弾性係数を図-13にまとめた。これより、大粒径CAE路盤の M_r の方が透水性ケミカル路盤材よりも大きな値となっている。これは、最大骨材寸法が53mmと32mmの差による噛み合わせなどの影響が表れていると推測される。

FWD 測定から推定した透水性ケミカル路盤材料の弾性係数は、室内試験結果と異なり大粒径 CAE 路盤の弾性係数よりも大きい。これは、FWD 調査が供用開始 1 年 2 ヶ月後に行われたものであり、長期に渡って石灰の固化が進行し、強度増加も進んでいると推測される。

(3) 透水性舗装の設計方法

ここでは、雨水浸透による舗装体内部の飽和及び不飽和状態を考慮した舗装設計方法に関して検討を行った。前述の室内試験結果より、飽和・不飽和時の弾性係数の差が大きいことから、飽和状態においては弾性係数及び等値換算係数の低減が必要である。そこでここでは提案する材料層の弾性係数と等値換算係数の、飽和による低減結果を表-4 にまとめた。

この設計事例で検討した舗装構成を図-14 に示す。ここでは、路床上部に安定処理もしくは置換えを 400mm するもので、路床の弾性係数が 60MPa(設計 CBR=6)となる条件とする。1 年当たり 12ft フォークリフト交通量 37、8 千回とする(10 年間の 49kN 換算輪数で 605 万輪程度、C 交通レベル)。

図-14 に示した不飽和時の舗装構成を基準に、多層構造解析によりひずみを求めると、標準の弾性係数では浸透水がない状態の許容可能年数 1.28 年、弾性係数を低減した飽和時の許容可能年数 0.56 年である。

降雨による路盤などが飽和状態となる条件が年間 25%(90 日)とすると、 $1.28 \times 7.5 + 0.56 \times 2.5 = 11.0$ とな

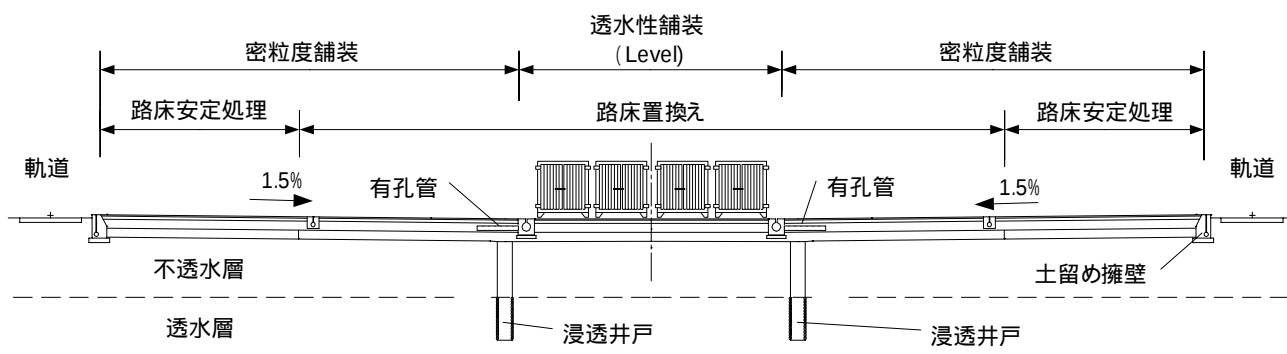


図-15 コンテナホームに適用した透水性舗装と貯留浸透施設の断面図

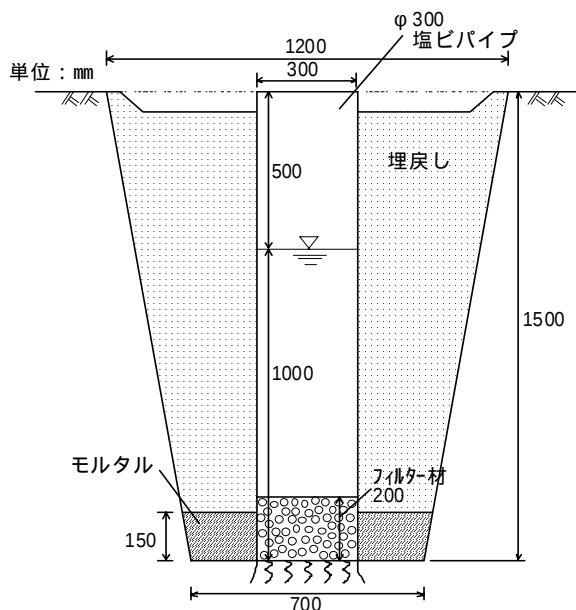


図-16 現場浸透試験（注水法）

る。このため、設計年数 10 年に対して、11 年間は許容可能となる。常に飽和状態とした場合の舗装構成は、図中の(b)の結果となり、1/4 程度飽和した場合に比べ路盤層の厚さで 100mm 厚くなる。

飽和及び不飽和時の舗装状態における弾性係数や等値換算係数にて低減（安全側）で検討すると、透水性舗装の舗装設計を行うことができる。等値換算係数を用いた設計方法では、表-4 で示したように等値換算係数を 10～15%低減して考えればよい。以下に示すように C 交通、設計 CBR=6 の等値換算厚（ $T_A=28$ cm）を満足する舗装構成は同等な構造である。

不飽和時： $T_A=5*1.0+10*1.0+13*0.65+20*0.25=28.45$

飽和時： $T_A=5*0.9+10*0.9+18*0.55+25*0.20=28.40$

3．貯留浸透施設の設計例

ここでは、図-15 に示すようにコンテナ置場には透水性舗装を設計し、荷役箇所にはフォークリフトの運用上密粒度混合物を使用した。密粒度混合物の表面を流れる水に関しては円型排水路に集水され、集水桝から密粒度

混合物下面の開粒型路盤やクラッシャーランで置換えした路床上部で貯留し、その後路床面からの浸透や浸透井戸による浸透構造を検討した。

鉄道構造物等設計標準（土構造物編）⁸⁾によると、路盤排水工における雨水の排水設備までの流達時間は一般に 10 分とされている。雨水流出量 Q_1 (m^3/sec) は式(3)で求めることができる。

$$Q_1 = \frac{1}{3.6 \times 10^6} I \times C \times A \quad (3)$$

ここに、I: 降雨強度 (mm/h)

C: 流出係数

A: 集水面積 (m^2)

ここで、本設計箇所の連続降雨時間 $t=10$ 分間の降雨強度 I は 132.4mm/h で、連続降雨時間 $t=1$ 時間の場合の設計降雨強度は 22.0mm/h である。本設計箇所におけるコンテナホームの集水面積は 16,200 m^2 、流出係数はアスファルト舗装であるので C は 0.90 とする。コンテナホームの流出量を Q_1 とした場合、以下ようになる。

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times 132.4 \times 0.9 \times 16,200 \\ &= 0.536 \text{ (} m^3 / s \text{)} = 1930 \text{ (} m^3 / hr \text{)} \end{aligned} \quad (4)$$

(1) 現場試験

コンテナホームを新設する予定箇所の地盤の現況を把握するために、雨水浸透施設技術指針（案）⁹⁾に定められているボーリング孔を利用した注水法による現場透水試験と、図-16 のような直径 300 の塩ビパイプを使った現場浸透試験で地盤面の検討を行った。この両者の透水・浸透試験は、地盤面の浸透量が多いと考えられたので、水頭を維持するために必要な浸透流量を測定する注水法によった。

現場浸透試験結果を表-5 にまとめた。この場合に、掘削面と舗装施工を考慮した路床整形転圧後の浸透試験も実施した。この結果から、礫や砂系の材料に関しては $10^{-2}cm/s$ 以上を確保でき、礫・砂系地盤面では転圧によって透水能力が 45%程度に低下した。さらに、粘性土が

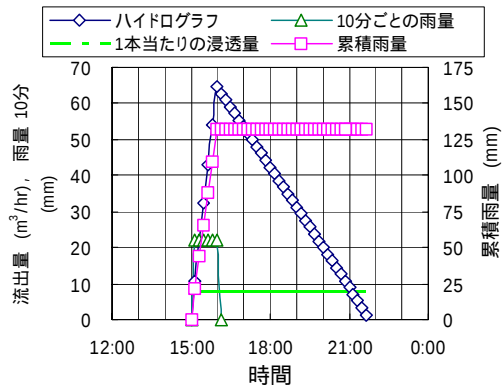


図-17 設計箇所の貯留浸透によるハイドログラフ

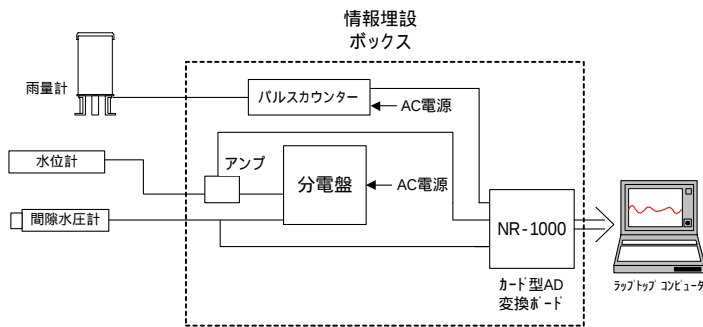


図-18 現場で設置した計測装置のフロー図

存在する場合には、砂や礫の空隙に粘性土がからむため透水能力が1オーダー以上小さい結果となった。

(2) 設計浸透量

ここでは、技術指針（案）における“設置施設の基準浸透量”を算定するための“試験施設の終期浸透量”と“試験施設の比浸透量”を以下の方法で求めた。

試験施設の終期浸透量は、現場透水試験で得られた注水流量とする。また、試験施設の比浸透量は施設規模（試験施設の直径）地下水位の条件が同指針の適用範囲外であるが、同指針における算定式から求めることとする。

浸透施設の基準浸透量は、地盤の透水係数と浸透施設の形状、設計水頭をパラメータとする式(5)より算出した。

$$Q_f = Q_t / K_t \times K_f = K_0 \times K_f \quad (5)$$

ここに、 Q_f ：基準浸透量（浸透施設 1m，1 個または 1m² 当たりの m³/hr）

Q_t ：試験施設の終期浸透量（m³/hr）

K_t ：試験施設の比浸透量（m²）

K_f ：設置施設の比浸透量（m²）

K_0 ：土壌の飽和透水係数（m/hr）

円筒ます、側面および底面浸透面、0.2m 直径 1m のとき、 K_f は式(6)より得られる。

$$K_f = aH^2 + bH + c \quad (6)$$

ここで、 H ：設計水頭（m）

D ：施設直径（m）

表-5 現場透水試験及び現場浸透試験結果

項目	現場透水試験	現地浸透試験		
試験法	ボーリング孔内注水-定常法	土研法(注水-定常法)		
深度GL-m	5~7	0.5(掘削後)	0.5(転圧後)	1.5
土質	砂礫	礫混じり砂	礫混じり砂	礫混じり粘土砂
透水係数(cm/s)	3.33×10^{-2}	1.13×10^{-1}	5.33×10^{-2}	1.37×10^{-3}
透水係数(m/h)	1.20	4.07	1.92	0.05

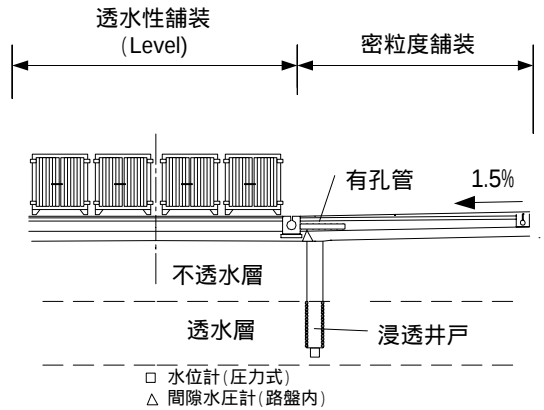


図-19 現場に埋設した計測装置

$$a : 0.475D + 0.945$$

$$b : 6.07D + 1.01$$

$$c : 2.570D - 0.188$$

ここでは、井戸の直径 D を 0.5m とし、上記の $a=1.18$, $b=4.05$, $c=1.10$ で、現場透水試験による設計水頭 $H=1.27$ の場合、比浸透量 K_f は 8.15 m² となり、基準浸透量 Q_f は 9.78 m³/h・個となる。

これに関して、安全率を考慮するための影響係数は地下水に関して 0.9、目詰まりに関して 0.9 を適用すると、浸透井戸 1 本当たりの単位設計基準浸透量は 7.92 m³/h・個となる。この場合、浸透井戸 45 本によって 356m³/h（0.099m³/s）の浸透速度となる。舗装対象面積に対する降雨強度 I による設計雨水流出量 Q は 1930m³ となるので、舗装体に貯留された雨水は、5.5 時間かけて地下 5m の深さの透水層に浸透する事となる。設計降雨強度の 132.4mm/h($t=10$ min)の降雨があった時のハイドログラフを図-17 に示す。図中の緑線が浸透井戸 1 本当たりの設計浸透量であり、ハイドログラフの上部の三角形の範囲が舗装体に貯留している雨水量とその貯留時間となる。

4．現場試験による検証

(1) 現場に設置した機器

コンテナホーム周辺の雨量と舗装体内及び浸透井戸の水の流れを把握するために図-18 に示す機器を、図-19 の浸透井戸周辺の位置に埋設した。雨量計は、口径

200mm の受水口から集水された雨が 0.5mm 毎に雨量計内部の転倒樹が転倒し、その転倒動作によってパルス信号が出力される(太田計器製作所製)。このパルスを実数カウンタにてカウントし、データレコーダ(NR-1000)にてデータを収集した。電位差による圧力センサーは、計測器周辺に水分(含水)がない場合(不飽和状態)では、データの検出ができない場合がある。

このため、雨水の浸透による路盤中に発生する間隙水圧を計測するために圧力式間隙水圧計(コーナシステム(株))を使用した。

(2) 浸透量の検証

ここでは、鋼管の下部 1m に管の側面からの浸透も可能とするために開口率 6%のスリットを用いた浸透井戸を設置した。

アスファルト混合物の平均温度、雨量と浸透井戸の水位、下層路盤底面の間隙水圧に関して図-20 に示す。

雨量は7月10日0時から7時までの7時間の連続雨量で 199mm を記録している。この間の天気は、梅雨前線による集中豪雨もしくはくもりの状態であった。本箇所の 10 分間の連続雨量で 23mm (132mm/h) が設計降雨量であるが、この 10 分間の最大雨量の記録では 19mm に達している。

浸透井戸内の碎石詰めと中空のものでは、中空は降雨量の増加に伴う水位の増加が遅いが瞬間的には碎石詰めよりも高い水位となる。碎石詰めの場合には浸透量の増加によって急激に水位が上昇するが、浸透量が一定のため洪水をピークカットし、水位低下まで長時間にわたる。

路盤下面の間隙水圧に関しては、この変化量が 9.81kPa (0.1kgf/cm^2) で 1.0m の水位に相当する。舗装は表基層 10cm、大粒径路盤層 26cm、置換え層 30cm であるため、路盤中の設計貯留可能量は式(3)で得られた $1930\text{m}^3/\text{h}$ の 55%の $1060\text{m}^3/\text{h}$ である。この雨量の結果と図-21 のハイドログラフから、舗装表面の降雨量が浸透井戸からの排水量より多いため 7/10 の 0:00 ~ 4:30 までの 4.5 時間は透水型路盤に貯留されている事になり、最大 $45\text{m}^3/\text{s}$ (貯留可能量の 76%)となっている。

路盤中の間隙水圧は、設計上 5.89 kPa (0.06kgf/cm^2) 以上の値が出力されるときは、雨水が舗装表面から overflow することになる。しかし最大貯留時の結果では、3.2kPa までしか上昇しておらず、最大貯留量の 54%で大粒径路盤中の中間程度までしか貯留されていないことがわかる。この水収支量の違いは、浸透井戸の他に置換え層下面などからも地盤に浸透したと考えられる。

路盤中の間隙水圧とアスファルト混合物の平均温度から、路盤中が雨水浸透によって貯留及び浸透している間は、アスファルト混合物の温度がほとんど上昇せず、降雨終了後 1 日間は路面温度が上昇せず、舗装体の温度低下効果に寄与している。

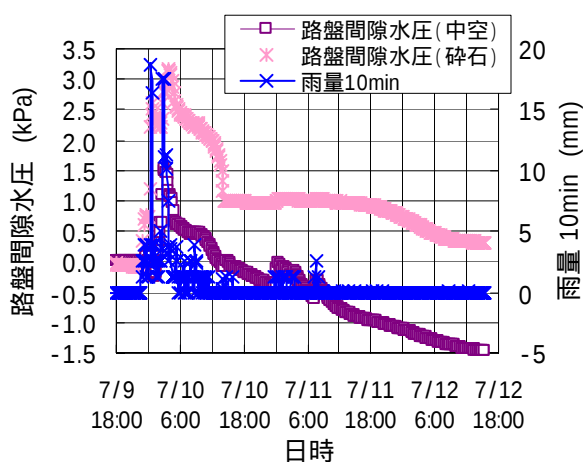
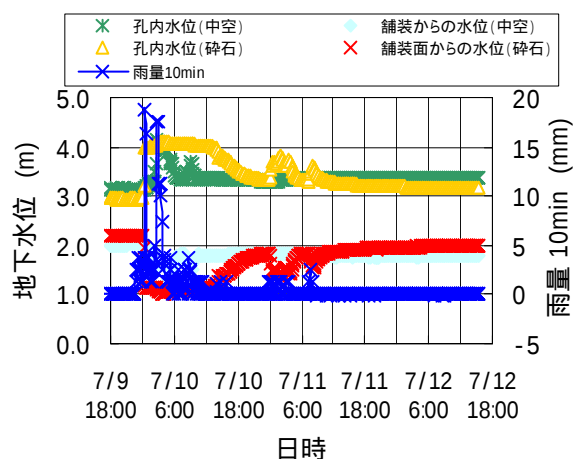
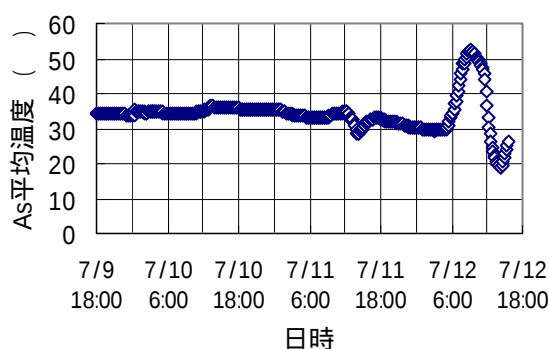


図-20 混合物の平均温度、雨量と浸透井戸の水位、路盤中の間隙水圧の関係

(3) まとめ

雨量のハイドログラフと浸透井戸の水位の関係を図-21 に示す。この結果より、中空式井戸はハイドログラフのピークから 20 分の遅れでピークに達しているが、碎石詰め井戸は 3 時間のピークの遅れがあり、洪水ピークの遅延やピークカットに効果がある。

浸透式井戸の透水量係数と貯留係数に関しては、最上ら¹⁰⁾の方法によって以下のように求めた。式中の δS は浸透井戸の地下水位の低下量(cm)である。

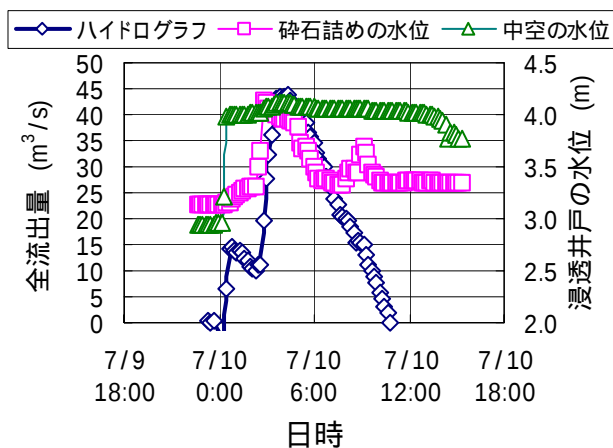


図-21 ハイドログラフと浸透井戸の水位の関係

浸透量を示す透水量係数 T は、

中空タイプ

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\delta s} = \frac{2.30 \times 795.6}{4\pi \times 15} = 9.71 \quad \text{cm}^2/\text{s}$$

砕石詰めタイプ

$$T = \frac{2.30Q}{4\pi\delta s} = \frac{2.30 \times 795.6}{4\pi \times 69} = 2.11 \quad \text{cm}^2/\text{s}$$

透水層の貯留を示す貯留係数 S は、

中空タイプ

$$S = 2.25T \left(\frac{t}{r^2} \right)_{S=0} = 2.25 \times 9.71 \times 0.02 = 0.437$$

砕石詰めタイプ

$$S = 2.25T \left(\frac{t}{r^2} \right)_{S=0} = 2.25 \times 2.11 \times 0.0008 = 0.004$$

これらより、井戸の形式の違いによる透水量係数は砕石詰めタイプが中空タイプの 1/4 の能力しかないが、ここで観測された設計貯留量の 74% 程度の雨量にも透水性舗装及び浸透式井戸は問題なく機能しており、ここで提案した透水性舗装の厚さ設計および貯留浸透施設の設計方法で問題はない。

5. まとめ

以下に、透水性舗装及び貯留浸透施設の設計並びに現場試験結果に関してまとめる。

- 1) 表層の排水性混合物に関しては、据え切り抵抗性を増加させた排水性混合物や既往の排水性混合物に表面保護材(0.4l/m²)を散布したものが良い。
- 2) 密粒度混合物に比べ排水性混合物は、フォークリフトのタイヤとの接地面積が小さく、タイヤの摩耗によるゴムの損失量は少ない。
- 3) 開粒度型路盤における骨材間隙(20~30%)に飽和した状態の弾性係数は、不飽和時の 1/2 程度の値となる。

- 4) 透水性舗装の厚さ設計において、飽和状態を加味し低減した弾性係数を用いて解析を行い、年間の飽和状態の比率を考慮したダメージ解析により舗装厚を算出するか、等値換算係数を低減した T_A 法により算出すると良い。
- 5) 礫混じり砂に関しては、透水係数が 10⁻²cm/s 以上確保できるが、掘削のみとその後の整形・転圧後の透水係数は、約 1/2 に低下する。このため、施工時の状況を踏まえた現場浸透試験を行う必要がある。
- 6) 礫混じり砂に粘性土が混じっている地盤では、透水能力を期待できない。
- 7) 設計雨量に近い 19mm/10 分の雨量に対しても、浸透井戸は十分に機能し、透水性舗装の路盤と砕石詰め浸透井戸の組み合わせでは、洪水流の遅れを 3 時間程度確保する事ができる。
- 8) 舗装面の雨量から既設排水量及び浸透量の水収支が路盤貯留量となるが、路盤中の間隙水圧は路盤貯留量と同様な傾向を示しており、設計的に問題ない事が観測された。
- 9) 透水性舗装の路盤に雨水が貯留されている状態では、約 1 日間にわたって、アスファルト混合物の路面温度の上昇を抑制することができる。

ここでは、排水効果の高い透水性舗装と浸透井戸を用いた排水構造物を検討し、施工を行った。この結果、中空の浸透井戸と井戸内に砕石を充填した浸透井戸を比較した結果、中空のものは浸透速度が速いために洪水のピークカット機能を十分に果たせず、砕石を充填したものはこの機能を確保できることがわかった。

今後、都市部での大規模舗装施設の排水構造物の設計を行う際には、表層にフォークリフトのタイヤの据え切り抵抗性を高めた排水性舗装を用いた透水性舗装と浸透井戸を施工することで、流域河川への影響を軽減する手法として実用に供することが確認できた。なお、本施工事例は供用開始からまもなくであり、引き続き経過を観察する予定である。

【参考文献】

- 1) 日本貨物鉄道株式会社：貨物設備アスファルト舗装の設計補修の手引き、2000.3
- 2) 丸子晃弘、阿部長門、三浦康夫、町屋千加志：大型車輛のすえ切り抵抗性を向上させた排水性混合物について、第 55 回土木学会年次学術講演会、-58, pp.115-116, 2000.10.
- 3) 遠藤孝司、後藤雅明、樋口貴裕：ディストリビューターで撒布する排水性舗装の保護強化材料について、第 24 回日本道路会議、一般論文集©, No.9118, pp.236-237, 2001.10.
- 4) 社団法人日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説、pp.61, 平成 13 年 7 月。

- 5) 七五三野茂, 小川澄, 川村和将: 高速道路におけるアスファルト舗装のテクスチャーの特徴とすべり摩擦への影響, 舗装, Vol.32, No.6, pp.9-14, 1997 年.
- 6) (社)日本河川協会: 流域貯留施設等技術指針(案), 増補版, 平成 5 年 5 月.
- 7) Standard Specification for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing, AASHTO T-292, : Resilient Modulus of Unbound Granular Base / Subbase Materials and Subgrade Soils, Washington, D. C., AASHTO, 1994.
- 8) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物編, 丸善, 1992. 10.
- 9) (社)雨水貯留浸透技術協会編: 雨水浸透施設技術指針(案) 調査・計画編, 2000. 1.
- 10) 最上武雄監修: 透水—設計へのアプローチ, 土質工学基礎業書, 鹿島出版会, 1977.7 .

EXAMINATION ON THE DESIGN METHOD OF THE ROADWAY TYPE PERMEABLE PAVEMENT AND THE STORAGE PENETRATION FACILITIES

Yasuo MIURA, Hiroshi NAKAZONO, Yoshimichi SAIGUSA, Nagato ABE and
Akira INOUE

Generally, the area of the container yard pavement becomes 1.5 ~ 2.0ha, length of arrival and departure lines of the railway freight facilities is necessary over 500m. Therefore, it is changeable to the case in which it deals with rain water of the pavement surface and case in which it must make drainage structure in the extension direction and in which large wheel load like the forklift works with the weak point.

Permeable pavement and storage penetration facilities of the heavy wheel load correspondence were required in order to solve these problems. Then, flow property resistance of the surface course material as a problem of permeable pavement, strength of permeable subbase course and thickness design, design method of the storage penetration facilities were examined, and the verification was carried out in the experimental pavement installed in the container platforms.