

水砕スラグを利用した透水性舗装の路床、路盤に関する実験的研究

Experimental Study On The Subbase And Subgrade Of Permeable Paving That Utilized Water Granulated Slag

久野晃弘[†] 建部英博^{††}
Akihiro KUNO Hidehiro TATEBE

Abstract : The purpose of this reserch is the application to the roadway of permeable paving that have water infiltration and water retention. These realization enable to foster ground water, to activate of a plant, to reduce of cummer season road surface temperature, to reduce the burden of a drainage facility of sewerage etc. It assumed that nature puts closer it to the water circulation that has basically. Reason that permeable paving was not adopted to a roadway until the present, when an infiltration rain water entered in a subbase, a subgrade and be because it was thought that pavement destroys it by a traffic load. Water granulated slag occurs as a by-product,when a pig iron is manufactured. Demonstrate the latent hydraulic property that is the characteristic by an alkal stimulation medicine,and an improvement subbase, a subgrade are prepared. It has without causing a strength decrease even if depend on the infiltration of water and that have the sufficiennt permeability. And examination is being added from dynamic,physical orasite experiment about whether this material is able to apply to a roadway as permeable paving.

1. 序論

1-1 はじめに

近年、都市域では地表の半分以上がコンクリート、アスファルトの不浸透面で覆われ、残りの浸透域である公園の裸地・草地や民家の庭などもその表面が踏み固められている。このように都市開発による地表面の変化は保水、浸透や蒸発散に大きな影響を与えて、水環境は以下のような現象を引き起こしている¹⁾。

- ①降雨の流出時間短縮、洪水のピーク流量の増大
- ②河川の平常時流量減少、水質、景観などの悪化
- ③都市の熱環境の悪化
- ④植生・地中生態系の悪化

1-2 排水性舗装²⁾

近年、車道に適用されるようになった排水性舗装は、降雨を表層内に浸透させ、基層上の遮水層であるタックコートを通して排水溝、さらには下水処理場、都市河川へ排水する構造であり、利点として以下のようなことが挙げられる。

交通安全面では

- ・降雨時におけるタイヤと路面の摩擦係数の確保
 - ・ハイドロプレーニングの防止
 - ・降雨時の水跳ね、水しぶきの減少
 - ・降雨時の視界の確保
 - ・夜間降雨時にライト反射光の減少・視認性向上
- 騒音の低減対策として
- ・エアポンピング音の抑制
 - ・車のエンジン音の吸収

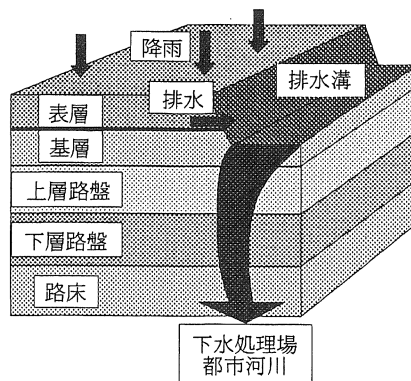


図1 排水性舗装の仕組み

[†]愛知工業大学 建設システム工学科 (豊田市)

^{††}愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

1-3 透水性舗装

駐車場や歩道に施工されている透水性舗装は、降雨を表層から路盤、路床に浸透、保水させる構造になっている。舗装体内に雨水を浸透させることにより、排水性舗装で得られる利点だけでなく、水循環に対する問題が解消され、以下の効果が得られる。

- ・地下水の涵養（地盤沈下の抑制、地下水の貯留）
- ・植生、地中生態の改善（街路樹の育成、土壌の酸欠防止、地中温度の上昇抑制）
- ・雨水の直接流出の抑制（都市河川の氾濫防止、下水道の負担軽減、公共水域の汚濁軽減、排水施設の負担軽減・省略）
- ・夏季路面温度の低下（ヒートアイランド現象の抑制）

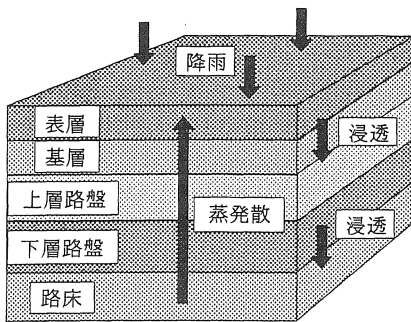


図 2 透水性舗装の仕組み

1-4 研究目的

透水性舗装が車道にも適用できるようになると、本来自然が持っている水循環に近づけることができると考えられる。

透水性舗装が車道に対してはあまり採用されていない理由は、雨水の浸透により路盤や路床の支持力が低下し、輪荷重に耐えられず舗装が破壊すると考えられているからである。

銑鉄を製造する際、副産物としてできる水砕スラグを利用し、特性である潜在水硬性をアルカリ性刺激剤によって発揮させ、水の浸透に対しても強度低下を起こしにくい材質を作製する。透水性舗装の改良路床や路盤として適用できるか検討を加えた。

2. 配合

2-1 使用材料

2-1-1 水砕スラグ

粒径 0.074~4.75mm のガラス質の砂状スラグであり、特性として潜在水硬性を有している。

2-1-2 生石灰

水と反応を起こすと強アルカリ性となり、アルカリ刺激剤としてスラグ中のガラス質部を溶解させる。

2-1-3 ローラミル

水砕スラグを微粉碎したものであり、水砕スラグの潜在水硬性の再結晶を促進させる。

2-1-4 碎石

粒径 9.5~20mm の硬質砂岩を砕いたものを路盤の骨材として使用する。

2-2 配合決定

ケミカル水砕、路盤は表 1 に示す配合で今後の研究に用いることにした。

表 1 配合表

ケミカル水砕（改良路床、下層路盤）

配合比 (%)	水砕スラグ	生石灰	ローラミル
	95.0	: 2.5	: 2.5
含水比 (%)	11.0		

ケミカル路盤（上層路盤）

配合比 (%)	ケミカル水砕	碎石 (9.5~20mm)
	40.0	: 60.0

3. ケミカル水砕、路盤の力学的評価

3-1 支持力の評価

アスファルト舗装要綱では上層、下層路盤に対して表 2 のように品質規格値が定められている⁹⁾。

表 2 品質規格

使用する位置	工法・材料	品質規格
上層路盤	水硬性流度調整 鉄鋼スラグ	修正 CBR80 以上
下層路盤	鉄鋼スラグ	修正 CBR30 以上

水砕スラグを用いたケミカル水砕、路盤が規格値を満たす養生日数、養生条件、締固め方を求めるために CBR 試験を行った。

供試体は 3 層で突き固め回数を 17、42、92 回と変化させて作製し、締固め方による CBR の変化を測定した。養生日数は 4、7、14、30 日の空中養生とした。また、養生条件による CBR の変化を比較するため、空中養生後に水中養生を行ったものについても行った。

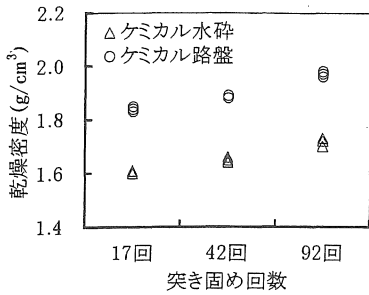


図3 突き固め回数－乾燥密度の関係

図3はケミカル水砕、路盤の突き固め回数による乾燥密度の変化を示す。

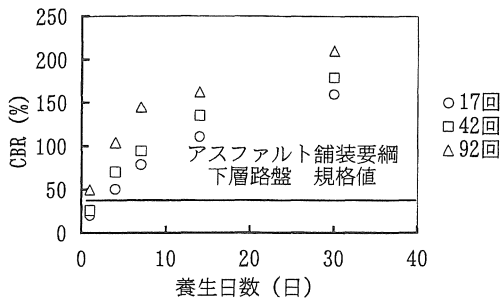


図4 締め固め、養生日数による CBR(ケミカル水砕)

図4に示すように下層路盤の規格値 修正 CBR30%以上をケミカル水砕は 92 回突き固め(乾燥密度 1.71 g/cm³程度)において養生 1 日で満たす。突き固め回数 17 回(乾燥密度 1.60g/cm³程度)と締め固めが少なくとも 3 日の養生で規格値を十分に満たした。

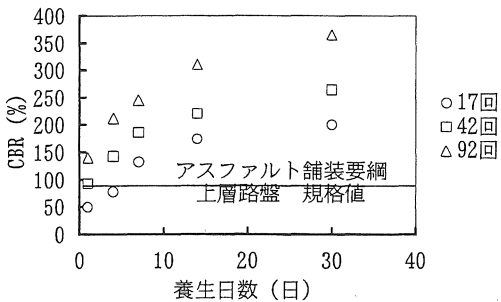


図5 締め固め、養生日数による CBR(ケミカル路盤)

ケミカル路盤についても 42 回突き固め(乾燥密度 1.88g/cm³程度)において養生 1 日で上層路盤の規格値 修正 CBR80%を十分に満たした。

ケミカル水砕、路盤ともに締め固めが少なくとも長期間養生をすれば CBR は上昇するため問題ない。養生期間がない場合においても十分に締め固

めれば施工直後でも上層を施工することができる。空中養生と水中養生による養生条件を変化させて比較を行った。

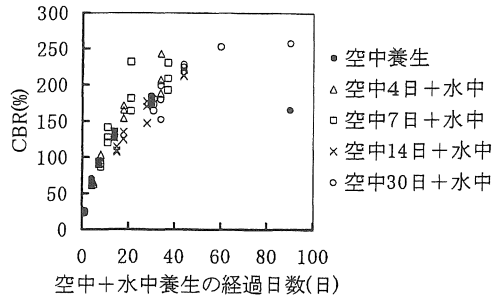


図6 養生条件の変化による CBR(ケミカル水砕)

図6に示すようにケミカル水砕は空中養生後に供試体を水中に浸水させた直後は CBR が 10%程度低下するが、養生日数が長くなると水中養生を行ったものは空中養生の CBR より大きくなる。これは供試体を水中に入れることで潜在水硬性を起こさず残存している生石灰が反応を起こし、結合しているガラス質部分を溶解し、時間の経過と共に再結晶するためと思われる。

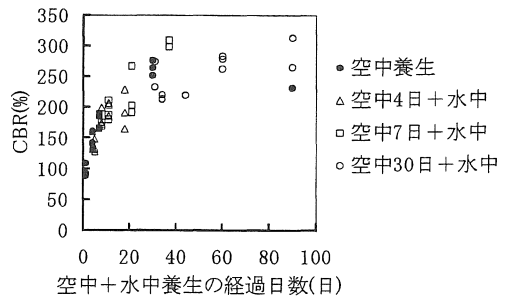


図7 養生条件の変化による CBR(ケミカル路盤)

図7に示すようにケミカル路盤についても同様な CBR の変化が現れた。

空中養生のみを行った供試体は 30 日以降の CBR の上昇がみられない。これは反応熱や蒸発散によって供試体内の水が奪われ、潜在水硬性に必要な水を失ったためである。よって、養生方法を常に最適含水比に近い状態にしておけば、図5、6に示すように大きな CBR が得られる。

3-2 寒冷地での施工の可能性の評価

路床、路盤が凍結融解を繰り返す寒冷地において雨水を浸透、保水を目的として用いるケミカル水砕、路盤が適用できるか検討を加えた。

ケミカル水砕、路盤ともに 3 層 42 回突き固めで供試体を作製した。供試体は空中 4 日養生後、水中に浸けた状態で -23°C 程度で凍結させた後、20~30°C の水の中で約 8 時間かけて融解する。凍結融解繰り返し回数は 1、3、7、10 回と変化させた。

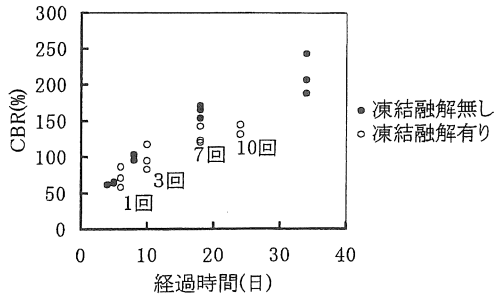


図 8 凍結融解による CBR の変化(ケミカル水砕)

潜在水硬性を起こすには水が必要であるため、凍結している間は水が氷となるため反応がとまっていると考えられる。凍結している日数を差し引いたものを経過時間として図 8 に示す。凍結融解を繰り返すたびに凍結融解をしなかったものより CBR が低下している。

凍結融解によって結合した粒子間の水は膨張し結合を破壊するが、ケミカル水砕、路盤は時間が経つと共に潜在水硬性によって破壊による支持力の低下以上に CBR が増していく。これらを考慮に入れると寒冷地での施工についても問題ない。

3-3 剛版としての評価 (ケミカル路盤)

剛性が高いコンクリート版は碎石路盤と比較すると下層に伝える単位面積当たりの荷重が小さくなり、全体の舗装厚を薄くすることができる。

ケミカル路盤はコンクリートのように養生日数が長くなるほど剛性になるため、コンクリート版の代わりとして用いることができるかどうかを判断する。一般にコンクリート舗装の設計に用いられる曲げ試験を用いて引張りに対する強度を養生日数、板厚を変化させて測定した。

供試体は板厚を変化させて乾燥密度 1.9g/cm³程度に締め固めた。養生期間別の供試体は養生を 4、7、14、30 日空中養生と変化させ、板厚を 5cm とした。板厚別においては 14 日空中養生で板厚を 2.5~10cm と変化させた。

図 9 に示すように曲げ強度は CBR と同様に養生期間が経過するとともに強度が上昇したが、日数 30 日においても 0.25MPa 程度までしか強度が上昇しなかった。

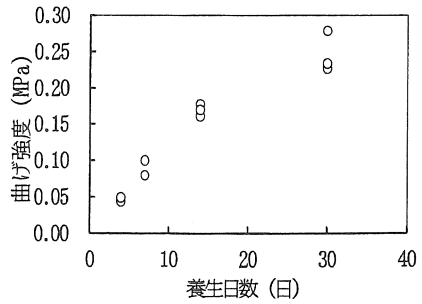


図 9 曲げ強度の変化 (養生日数別)

図 10 は板厚による強度変化を示す。板厚が厚くなることによる強度上昇はあまりなかった。

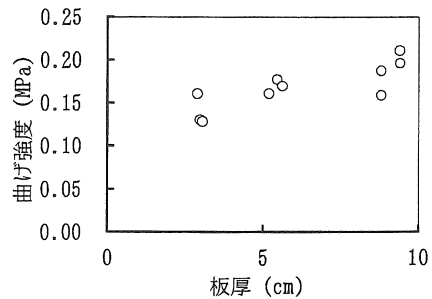


図 10 曲げ強度の変化 (板厚別)

コンクリート舗装では曲げ強度の規格値を 4.5MPa としている。ケミカル路盤がコンクリートと同様の規格値を満たすことが困難なため、コンクリート版としての考え方で適用することは難しいと思われる。

4. ケミカル水砕、路盤の物理的評価

4-1 空隙の機能

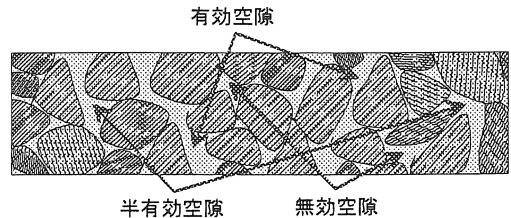


図 11 空隙の概略図

- ・有効空隙：透水、保水の寄与する空隙
- ・半有効空隙：透水には寄与しないが、保水に寄与する空隙
- ・無効空隙：透水、保水に寄与しない空隙

空隙には図 11 に示すように有効空隙と半有効空隙、独立空隙があり、混合物によって各空隙の比率が異なるため、同じ空隙率を有していても透水係数が異なる。より正確に混合物の機能性を評価するためには有効空隙と半有効空隙を足した連続空隙率によって評価が行われることが多い⁴⁾。

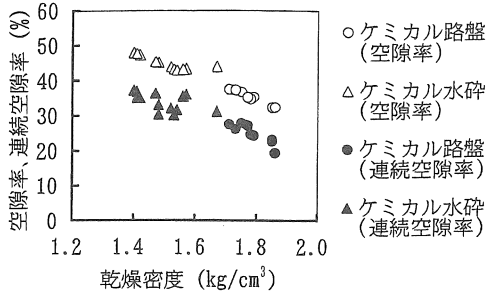


図 12 各材料の空隙率と連続空隙率の変化

図 12 はケミカル水砕、路盤の空隙率、連続空隙率と乾燥密度の関係を示す。ケミカル路盤はアスファルト舗装要綱における上層路盤の規定値（修正 CBR80 以上）を空中養生 4 日で満たす乾燥密度（ 1.8g/cm^3 ）において空隙率 35%程度あり、ケミカル水砕は下層路盤の規定値（修正 CBR30 以上）を空中養生 4 日で満たす乾燥密度（ 1.5g/cm^3 ）において空隙率 45%程度と非常に大きく、連続空隙率はともに空隙率の 7、8 割も占めていた。透水に寄与する連続空隙率の比率が多いため透水能力は非常に大きいことが予想される。

4-2 透水能力に対する評価

ケミカル水砕、路盤が透水性舗装の改良路床・路盤としてその程度の透水能力があるかどうかを検討するため、定水位透水試験により測定を行った。

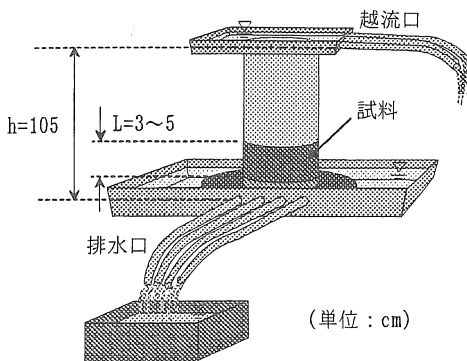


図 13 定水位透水試験器の概略図

ケミカル水砕、路盤は空隙率が大きいため、乱流 ($Re \geq 1$) となる。動水勾配が大きくなると透水係数は小さくなり安定する⁵⁾ため、本実験では図 13 に示すように水頭差を 105cm、供試体の長さを 3~5cm と動水勾配を大きくして行った。実験で得られた透水係数 k を実際の動水勾配 ($i=1$) で換算して排水可能降雨量を求めた。

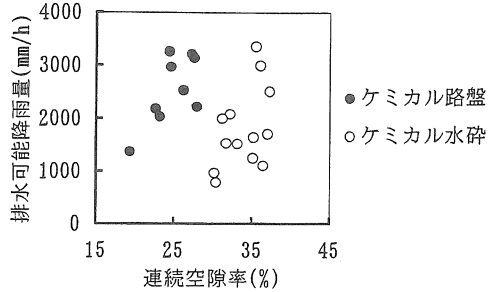


図 14 排水可能降雨量と連続空隙率の関係

図 14 に示すようにケミカル路盤は連続空隙率 25%（乾燥密度 1.8g/cm^3 ）において時間排水可能降雨量 2000mm/h 以上あり、ケミカル水砕は連続空隙率 30%（乾燥密度 1.5g/cm^3 ）において時間排水可能降雨量 1000mm/h 以上だった。なお、実験での動水勾配は実際の舗装での動水勾配と比べるとはるかに大きな値であるため、実験で得られる透水能力より実際の舗装の方が大きくなる。

また、強度を満たす養生期間を短くするため、十分に締め固めても一般の設計に用いられている 50mm/h を満たす十分な透水能力がある。

4-3 保水能力に対する評価

透水性舗装では路盤、路床までが降雨の浸透域となるため、貯留効果が期待される。現在、すでに施工されている透水性舗装の路盤に利用されている砕石路盤とケミカル水砕、路盤の貯留能力を比較する。

ケミカル水砕、ケミカル路盤と通常の砕石路盤 (C-30) の供試体を 3 層 42 回突きで締め固めて作製した。供試体を 14 日空中養生後に水浸し連続空隙を水で満たした後、空中に放置し、時間の経過ごとに保水量を測定し、水が空隙を占有している割合を求めた。それぞれの供試体の空隙率はケミカル路盤 30%、ケミカル水砕 40%、砕石路盤 33% だった。実験期間は冬季におけるもので、放置状態の気温は 10°C 以下のである。

図 15 に示すように、どの供試体も空中に放置後数時間は排水量が多く、砕石路盤 (C-30) は空隙を水が占める割合が 30%程度まで低下した。ケミカル路盤、水砕では数時間経過しても 70、60%程

度と碎石路盤(C-30)に比べると、かなり多くの水が空隙を満たしていた。約 10 日経過後、碎石路盤(C-30)の水の空隙占有率は 0%となったが、ケミカル路盤、水砕は 40%程度と保水能力の差が大きく出た。

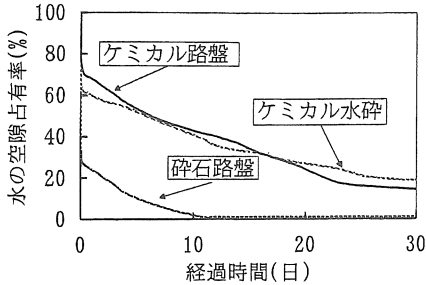


図 15 各種材料の保水能力 (冬季)

冬季においては、降雨による水の補給がなくても、ケミカル路盤、水砕は空隙中に 1 ヶ月以上の間、保水していることが分かった。

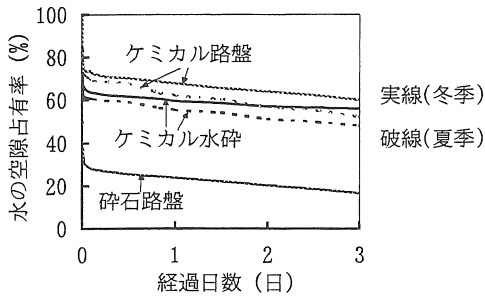


図 16 夏季と冬季における保水能力の比較

夏季は日中 30°C 以上に気温が上昇したため、気温が 10°C 程度までしか上昇しない冬季と比較すると蒸発散により供試体内の水は減少しやすくなり、図 16 に示すようにケミカル水砕、路盤ともに約 2 倍のはやきで低下していった。

ケミカル水砕に比べるとケミカル路盤の方が保水量の低下が早いのは、碎石の最大粒径が大きく透水能力が高いためである。

以上のことより、透水性舗装の路盤、路床にケミカル路盤、水砕を用いることで貯留機能、流出機能が期待できる。

4-4 夏季路面温度の低下に対する評価

都市域で気温の上昇をもたらす要素として、降雨が短時間のうちに流出するため、都市では蒸発散量が少ないと考えられる。また、アスファルトは、熱伝導率の大きいと同時に熱容量も大きいので、土などと比べて早く太陽熱を吸収し蓄熱する。

透水性舗装の路盤に保水能力が優れているケミ

カル水砕、路盤を用いることで、蒸発散量を増加させ、熱環境の改善を図ることが出来るか、透水性舗装と排水性舗装、芝地において水を散布後の表面温度の変化を測定し比較した。

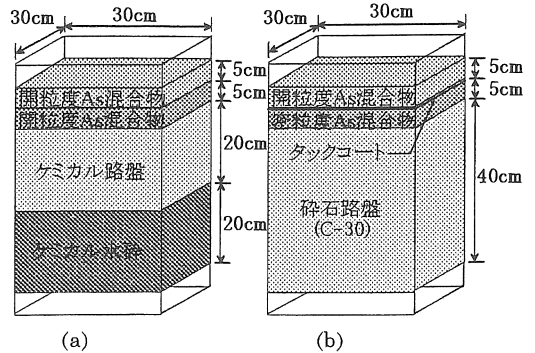


図 17 供試体概略図

透水性舗装の供試体は図 17(a)に示すように、下層路盤にケミカル水砕を厚さ 20cm、上層路盤にケミカル路盤を 20cm となるように締固めた。基層、表層には開粒度アスファルト混合物をそれぞれ 5cm となるように作製する。

排水性舗装の供試体は図 17(b)に示すように、路盤に碎石路盤(C-30)を厚さ 40cm となるように締固めた。基層には密粒度アスファルト混合物を厚さ 5cm 敷き、基層以下に水が浸透しないように防水層としてタックコート (PK-4) を基層上に規定量 (0.6 ㏍/㎡) を散布し、基層面上から排水するようにする。表層には開粒度アスファルト混合物を 5cm となるように作製する。

透水性舗装・排水性舗装に用いた開粒度アスファルト混合物の透水能力は 10° オーダー以上と非常に大きい。

供試体の空隙を水で満たすように水を十分浸透させた後、測定場所周辺に一樣に 50mm 程度の水を散布した。2 つの供試体と芝地の表面温度と気温を時間の経過と共に測定した。

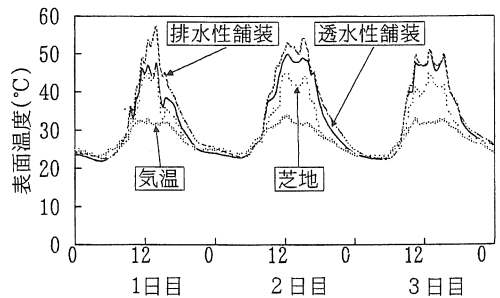


図 18 各種表面温度の変化

水を散布後、1日目は排水性舗装と透水性舗装の温度差は日中2時頃に10℃と最も大きくなり、透水性舗装の表面温度は芝地と同じ程度であった。2日目は差が5℃程度となり、3日目には透水性舗装と排水性舗装の温度差は1℃程度とほぼ一緒となった。これは、排水、蒸発散による舗装内の水面が低下し蒸発散による潜熱の効果が低下したためと思われる。

ケミカル路盤における水の空隙占有率は水散布後から3日目で70%から60%へ低下するため、例えばケミカル路盤の舗装厚が20cmとすると3日間の間に14mmの雨が降れば、潜熱の効果が回復し、夏季気温を低下させることが出来ることになる。

路盤部、改良路床部にケミカル路盤、水砕を用いた透水性舗装の大きな路面温度の低下は都市部での熱環境の改善に大きな効果があると思われる。

5. 構造設計

5-1 路床の改良

一般に次のような場合に交通条件と舗装の構成から必要な路床の支持力を算定し路床の構築を行う。

- ① 路床の設計 CBR が 3 未満の軟弱地盤の場合
- ② 路床の排水や凍結融解に対する対応策をとる必要がある場合
- ③ 舗装の仕上がり高さが制限される場合
- ④ 路床を改良した方が経済的な場合

その地点の CBR は路床面以下 1m までの各層の CBR を用いて、次式によって求める値とする。

$$CBR_m = \left(\frac{h_1 CBR_1^{1/3} + h_2 CBR_2^{1/3} + \dots + h_n CBR_n^{1/3}}{100} \right)^3 \dots (1)$$

CBR_m : m 地点の CBR

CBR₁、CBR₂、…CBR_n : m 地点の各層の CBR

h₁、h₂、…h_n : m 地点の各層の厚さ

h₁ + h₂ … + h_n = 100 (cm)

ケミカル水砕を改良路床材として用いる。ケミカル水砕の CBR は CBR 試験で 42 回締固め、空中 4 日養生の条件で得られた 91.6% を用いた。

現地盤 CBR 3% の軟弱地盤においてもケミカル水砕を 20cm 置換すると、式(1)より CBR_m を 8.7% 程度まで引き上げることができる。

5-2 等値換算係数の推定

本研究で開発したケミカル水砕、路盤は舗装の

改良路床や路盤として用い、アスファルト舗装要綱において等値換算係数は上層路盤が 0.55、下層路盤が 0.25 と記されている。

ケミカル水砕、路盤は品質規格をはるかに上まるため、等値換算係数も大きくなると推測できる。

路盤、路床材の弾性係数 E と CBR には次のような関係⁶⁾がある。

$$E = 100 \times CBR \dots (2)$$

弾性係数と等値換算係数の換算式⁶⁾を用いて、各材料の推定弾性係数から等値換算係数を推定した。

$$a_n = 0.313 \times \log A + 0.616 \quad (A: E/10^4 \{kgf/cm^2\}) \dots (3)$$

実験で得られたケミカル路盤、水砕の CBR と式(2)、(3)を用いて、養生期間による等値換算係数の変化を推定すると表 3 のようになる。

表 3 養生日数と等値換算係数の関係

	ケミカル路盤		ケミカル水砕	
	弾性係数	a _n	弾性係数	a _n
1 日	9670	0.61	2400	0.42
7 日	18020	0.69	9160	0.60
30 日	26370	0.75	17880	0.70

5-3 設計例

- ・交通量区分：C 交通（8 トン 輪荷重に対応可能）
- ・路床の設計 CBR：3%
- ・ケミカル水砕（CBR 80%{7 日}）の改良厚 20cm

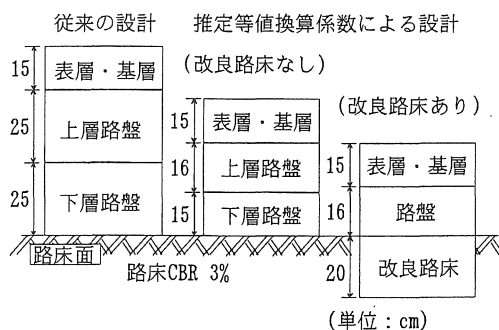


図 19 設計断面

図 19 に示すように従来の等値換算係数と推定の等値換算係数を用いた設計断面とでは、舗装厚が 19cm も異なる。ケミカル水砕を改良路床に用いると舗装断面は路床面から 31cm と従来の等値換算係数と比較すると 34cm も薄くすることが可能となる。

ケミカル路盤、水砕ともに月日が経過するほど強度を増すため力学的にも十分であり、舗装断面

も薄くなるため都市部で断面に制限がある場所においても有効である。また、舗装施工厚を薄くすると施工費の削減にもなり経済性に優れている。

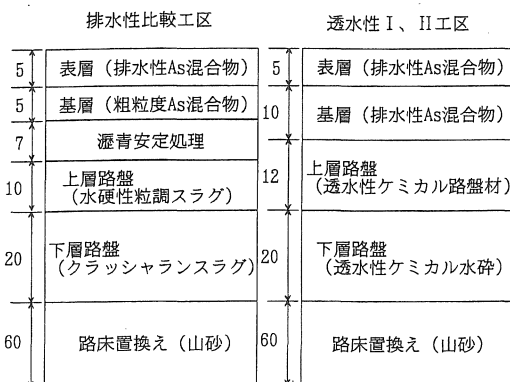
6. 試験施工

6-1 施工概要

工事箇所：主要地方道半田常滑線 半田市板山町
 施工規模：面積 1012m² (延長 110m、幅員 9.2)

6-2 設計条件

交通量区分：C交通 (8トン輪荷重に対応可能)
 路床の設計 CBR：路床 0%
 → 路床改良後 8%



(単位：cm)
 透水性ケミカル路盤材の骨材
 I 工区 再生コンクリート、II 工区 天然碎石

図 20 舗装断面

6-3 路面状況

ケミカル水砕、路盤を用いた透水性舗装の透水 I、II 工区と排水性舗装の比較工区を施工直後と供用 1 年後で比較を行う。

舗装表面にクラックや流動は 3 工区にわたって確認できず、供用 1 年後においても路盤に支持力の低下はないと思われる。

供用 1 年後の 3 工区のわだち掘れ量をプロフィールメータを用いて測定した。表 4 に示すように比較工区が透水 I、II 工区に比べ大きめの傾向である。しかし、供用 1 年後においても走行性には問題が生じない程度のわだち掘れ量である。

表 4 横断形状測定結果 (mm)

	施工直後	供用 1 年後
透水 I 工区	0.6	2.0
透水 II 工区	1.0	1.5
比較工区	1.7	4.1

6-4 現場透水量

現場定水位透水試験 (上層路盤)

透水 I、II 工区におけるケミカル路盤の透水能力を施工直後、供用 1 年後に測定する。

表 5 上層路盤の推定透水係数

	推定透水係数 (cm/s)	
	施工直後	供用 1 年後
透水 I 工区	2.88 × 10 ⁻³	3.56 × 10 ⁻³
透水 II 工区	2.21 × 10 ⁻³	8.65 × 10 ⁻⁴

表 5 に示すように供用 1 年後の測定は、透水 I 工区が 10⁻³、透水 II 工区が 10⁻⁴ のオーダーであり、ともに施工直後と比較すると透水能は低下しているが特に大きく変化していないといえる。

7. 結論

- ケミカル水砕、路盤ともに非常に短い養生期間で規格値を満たす CBR を得ることができる。また、寒冷地における凍結融解の繰り返しに対しては強度低下は小さく施工上は問題ない。

- ケミカル水砕、路盤は一般に利用される碎石路盤 (C-30) と比較しても、空隙が多く透水性舗装の路盤としての十分な透水能力を持っている。また、保水能力も優れているため、夏季においては蒸発潜熱によって路面温度の低下させ、都市部での熱環境の改善に大きな効果が期待できる。

- ケミカル路盤を用いた透水性舗装は、供用 1 年後においても透水能力を十分に確保しており、支持力の低下やひびわれはなく、C 交通に対しては十分に耐えることができた。また、ケミカル路盤の骨材に再生コンクリートを用いても強度的に問題ないため、スラグやコンクリートがらのリサイクルの点からみても有効かつ低コストの舗装が可能と考えられる。

(参考文献)

- 1) 新井正：都市の水文環境、共立出版、1987。
- 2) 水と舗装を考える会：よくわかる透水性舗装、山海堂、1997。
- 3) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、1992。
- 4) 日本道路協会：排水性舗装技術指針(案)、1988。
- 5) 大川秀雄、原富雄、穂刈浩三：排水性舗装の排水挙動、pp.26-31、舗装、1992。
- 6) 太平工業(株)名古屋支店：全段面透水性舗装調査報告書、2000。

(受理 平成12年3月18日)