

橋面舗装の切削残存層を再利用する乳剤浸透工法の効果と最適仕様に関する研究

交通工学研究室 19108688 和田悠太

1. はじめに

我が国における一般的な道路橋は、コンクリート床版上にアスファルト層の橋面舗装を施工している。コンクリート床版に雨水等が浸水すると劣化や損傷が促進されるため、床版と橋面舗装の境界面には、床版に対する浸水防止を目的とした防水層が設けられる。この防水層は、橋面舗装の打換工事時に再施工されるが、橋面舗装よりも寿命が長い場合、耐用年数を迎える前に撤去されることが問題点として指摘されている。加えて、橋面舗装の撤去時にバックホウの使用によって、床版表面に引掻き傷等の損傷が生じることも問題視されている。橋面舗装の打換工事では、最初に橋面舗装を 20 mm 程度残存させて切削するが、この切削残存層を補強して不透水性を改善することができれば、不透水の間層として再利用が可能で、防水層と床版に損傷を与えないことに加えて、施工に要する工費および工期の縮減に寄与できる。

既往の研究により、橋面舗装の打換時における切削残存層にアスファルト乳剤を浸透させることで、不透水の間層として活用可能であることが確認されている。この成果を踏まえ、本研究では、乳剤浸透工法を適用する場合の、実用性の観点から最も有効かつ効率的な仕様について検討した。アスファルト乳剤の物性や塗布量、塗布方法について着目し、乳剤浸透工法によって発現する性能の差異について考察した。本研究では、物性の異なる 3 種類の高濃度改質アスファルト乳剤を使用し、乳剤浸透工法が切削残存層の不透水性および塑性変形抵抗性や破壊抵抗性といった力学的特性に及ぼす影響について評価した。

2. 切削残存層の損傷再現

本研究を進めるにあたって、切削残存層の損傷度合について指標を設定し、これを再現した供試体を作製する必要がある。既往研究では、供用年数約 30 年の高架橋から切削残存層のサンプルを採取し、この損傷度合について分析した。この結果、切削残存層には目視できるひび割れ等の損傷だけでなく、長期供用を起因とした骨材とアスファルトの接着性低下等といった目視できない損傷も存在していることが判明したため、損傷の指標には空隙率を使用することとした。本研究においても、この既往研究の評価を参考にして空隙率を損傷の指標とすることにした。

採取した切削残存層について測定した結果、基層は最大骨材粒径が 13 mm の密粒度混合物、即ち密粒 (13) であり、空隙率は 6.5 % と測定された。本研究では、空隙率 6.5 % を上回る損傷が生じている橋面舗装を想定して、空隙率 7.5 % を切削残存層の損傷度合の基準値として設定した。空隙率 7.5 % の供試体を作製するために用いた骨材配合を表-2.1 に、骨材粒度を表-2.2 に、骨材粒度曲線を図-2.1 にそれぞれ示す。バインダーにはストレートアスファルト 60/80 を使用した。

表-2.1 供試体の骨材配合

材料名称	6号	7号	粗砂	細砂	石粉	StAs
配合率 (%)	35.0	25.0	20.0	13.0	7.0	5.5

表-2.2 供試体の骨材粒度

粒径 (mm)	0.075	0.15	0.3	0.6	2.36	4.75	13.2	19
通過質量百分率 (%)	6.7	7.9	11.8	25.4	42.1	60.9	98.5	100

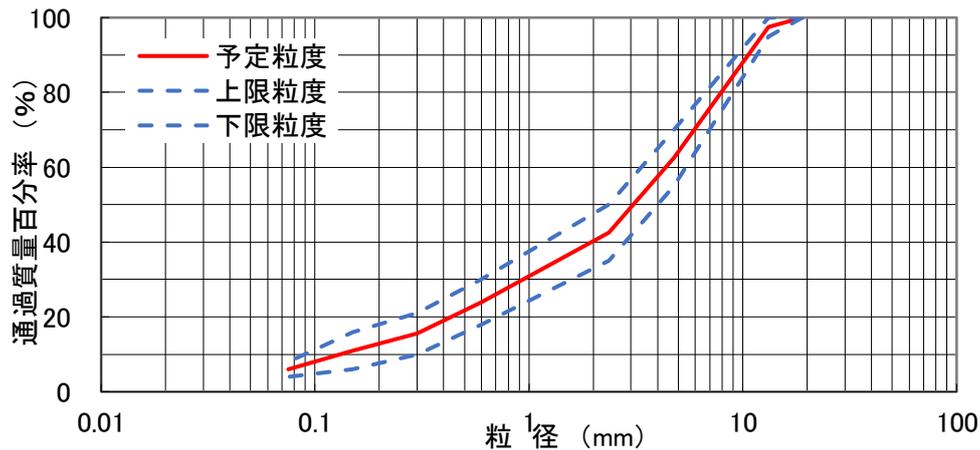


図-2.1 供試体の骨材粒度曲線

3. 使用したアスファルト乳剤

残存層の損傷を補修するための乳剤は、不透水の間層として再利用することを踏まえて、通常よりも高度な浸透性や物性が要求される。したがって、本研究で使用する乳剤としては、それらが期待できる高濃度改質アスファルト乳剤に着目した。高濃度改質アスファルト乳剤の種類や性状を調査した結果、本研究の要求性能に期待ができて、物性の異なる3種類の乳剤（乳剤A、B、C）を選定した。

この3種類の乳剤の分解が完了するまでの速度および力学的性状といった基本事項について、表-3.1に示す。また、各性能の物理的意味合いを表-3.1以下に示す。乳剤Aはエングラードが高いことから、浸透性が低いものの粘性が高く、アスコン内部の空隙に対して高度な密閉効果が期待できる。乳剤Bは軟化点とタフネスおよびテナシティが他の乳剤より高く、塗布したアスコンの塑性変形抵抗性と疲労抵抗性に対する寄与が期待できる。しかし、即時分解ができず、施工効率性に適しないと判断されるため、以降の検討では使用しないこととした。乳剤Cは粘性が低いものの浸透性が最も高く、アスコンの微細な空隙にまで浸透することが期待できる。これに加えて、乳剤Cは針入度が非常に小さいことから硬い性能を有しており、塗布したアスコンの力学的性能を向上させる効果が期待できる。これらの物性値の差異が、切削残存層に対してどのような影響を与えるのかを比較検討した。

表-3.1 使用した乳剤の性状比較

性能項目	一般的な乳剤	乳剤A	乳剤B	乳剤C
エングラード (25°C)	1~6	10	6	4
蒸発残留分 (%)	50以上	67	67	54
針入度 (25°C) (1/10mm)	60~150	68	88	23
軟化点 (°C)	—	51.5	62	56
タフネス (25°C) (Nm)	—	7.7	11	7.3
テナシティ (25°C) (Nm)	—	4.1	6.1	0
分解速度 (目視)	徐々に分解	即時分解	徐々に分解	即時分解

- ① エングラー度：粘性を表す指標であり，値が小さいほど浸透性が高い．つまり，残存層の損傷に浸透しやすく，密閉効果が期待できる．
- ② 蒸発残留分：全容積に対する水が揮発した後の残留成分の割合であり，値が大きいほど密閉効果が期待できる．
- ③ 針入度：硬さを表す指標であり，値が小さいほど力学的特性の向上に期待できる．
- ④ 軟化点：バインダーが柔らかくなる温度を表す指標であり，値が高いほど，塑性変形抵抗性の向上が期待できる．
- ⑤ タフネス：バインダーの把握力を表す指標であり，値が高いほど，塑性変形抵抗性・疲労破壊抵抗性の向上が期待できる．
- ⑥ テナシティ：バインダーの粘着力を表す指標であり，値が高いほど，塑性変形抵抗性・疲労破壊抵抗性の向上が期待できる．

4. 乳剤浸透工法による不透水性の改善効果

4.1. 評価方法

乳剤は切削残存層に塗布することで，アスコン表面のひび割れを閉塞しつつ内部の空隙を充填し，アスコンの不透水性を改善するものと考えられる．このため，切削残存層を模した供試体に乳剤を塗布して加圧透水試験を実施し，長期供用時における不透水性の観点での乳剤浸透工法の最適仕様について検討した．加圧透水試験は，加圧した水をアスコン供試体に透水させてその透水量を測定し，算出される透水係数からアスコンの長期的な不透水性を評価する試験である．

試験に用いる供試体は，切削残存層を模した円筒形アスコンの上部に所定量の乳剤を塗布し，乳剤分解後に透水性のアスコン上層を舗設することで作製した．作製した供試体のイメージを図-4.1に，供試体の仕様を表-4.1にそれぞれ示す．基準値の設定を目的として，乳剤を塗布しない切削残存層を模した供試体に加えて，新規基層を模した供試体も使用した．

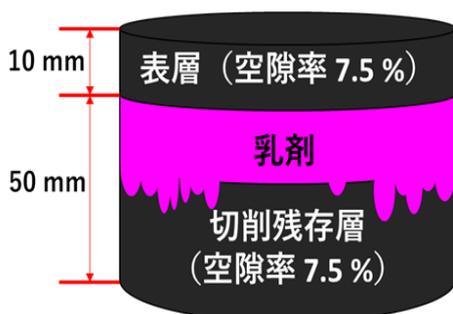


図-4.1 加圧透水試験用供試体

表-4.1 加圧透水試験用供試体の仕様

項目	仕様
供試体の寸法(mm)	表層：Φ100×10 切削残存層：Φ100×50
空隙率(%)	表層：7.5 切削残存層：7.5
乳剤の塗布量(l/m ²)	標準量(A：1.2，C：1.5) 2倍量(A：2.4，C：3.0) 標準2回(標準量を重ね塗り)

4.2. 試験結果および考察

本試験による試験結果を図-4.2に示す．透水係数が大幅に低下しており，不透水性が大きく改善することが見込まれる．また，乳剤の塗布量が増すことで，新設のアスコン層に相当する，またはそれ以上の不透水性まで改善することが確認できる．このことから，乳剤浸透工法によって長期供用に適した不透水性を確保することが可能であると判断できる．上層舗設時における高熱が乳剤を融解し，再び切削

残存層と表層内部の空隙に乳剤が充填されることで不透水なアスコン層が形成されたため、透水係数が大幅に低下したと考えられる。

乳剤の種類による違いでは、乳剤 A よりも乳剤 C のほうが、不透水性の改善効果が大きいものと評価できる。乳剤 C は浸透性が高いことから、より微細な空隙にも充填されるため、融解した乳剤による不透水性が大きくなると考えられる。

また、標準の2倍量の乳剤を塗布した条件よりも、標準量を2回塗布した条件のほうが不透水性の改善効果が大きいと判断できる。前者は1回にまとめて2倍量を塗布するが、後者は1回目に塗布した標準量の乳剤が分解して膜となり、その後に標準量の乳剤を重ね塗りするため、切削残存層の表面に残留するアスファルト分が多くなると考えられる。つまり、多量の残留アスファルト分が舗設熱によって融解するため、その分だけ表層内部の空隙が乳剤で閉塞され、より不透水性が向上すると想定される。

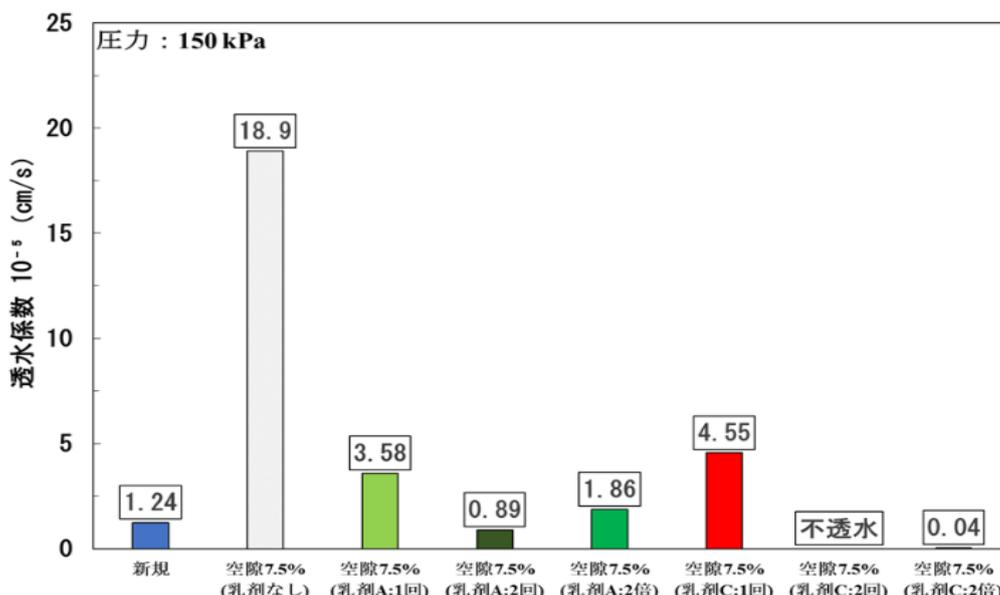


図-4.2 加圧透水試験の結果

5. 乳剤浸透工法が塑性変形抵抗性に及ぼす影響

5.1. 評価方法

乳剤浸透工法を適用することで、切削残存層表面のアスファルト量が著しく増加する。このことから、高温時において切削残存層の表面は流動的になり、塑性変形抵抗性を低下させることが想定される。しかし、表-3.1 より、乳剤 C においては針入度が小さく硬いことから、力学的特性への寄与が期待できる。したがって、乳剤浸透工法適用後における切削残存層の塑性変形抵抗性の影響が、低下または改善のいずれの傾向に及ぶのかは未知である。このため、高濃度改質アスファルト乳剤を塗布した場合の、高温時における切削残存層の塑性変形抵抗性に及ぼす影響について、WT 試験によって評価した。WT 試験は、供試体表面の中央部に一定の輪荷重を保有した試験用車輪を規定回数だけトラバース走行させ、動的安定度 DS およびわだち掘れ深さを測定する試験である。

乳剤浸透工法を適用した切削残存層の再現供試体を作製し、WT 試験によって動的安定度 DS とわだち掘れ深さを測定した。塑性変形抵抗性について比較検討した。再現供試体のほかに、基準値の設定として乳剤を塗布しない新規の基層に相当する空隙率 3.5 % の供試体、および切削残存層を模した供試体の2種類を作製して比較検討した。供試体の仕様について、表-5.1 に示す。

表-5.1 WT 試験での供試体の仕様

項目	仕様
供試体の寸法 (mm)	300×300×50
空隙率 (%)	新規舗装 : 3.5 切削残存層 : 7.5
乳剤 A, C の塗布量 (ℓ/m ²)	標準量 (A : 1.2, C : 1.5) 2 倍量 (A : 2.4, C : 3.0)

5.2. 試験結果および考察

往復走行回数とわだち掘れ深さの関係を図-5.1 に、各供試体条件に対する動的安定度の結果を図-5.2 に示す。乳剤を塗布していない切削残存層を基準に考えると、標準量の乳剤を塗布してもわだち掘れ深さに大きな変化はない。しかし、塗布量を2倍にすることでわだち掘れ深さが大きくなる。この傾向は動的安定度の値にも表れており、乳剤の塗布量が増えることにより小さくなっている。乳剤の塗布によってアスコン表面のアスファルト量が大幅に増加することで、高温環境下で表面付近のアスコンが軟化し、わだち掘れ深さやその増加程度が大きくなったものと考えられる。

動的安定度に着目すると、標準量の乳剤 C を塗布した条件において、動的安定度の低下はみられない。また、塗布量を増やすことによる低下の度合いも乳剤 A より小さい。前節で示した通り、乳剤 C は硬く、力学的特性の向上を期待できる物性を有している。これによる補強効果が、先述した乳剤塗布による塑性変形抵抗性の低減効果と相互作用したことで、動的安定度の低下を抑制したものと考えられる。

以上のことから、塑性変形抵抗性の観点において、塗布量はなるべく標準量から増やさず、針入度が小さな硬い性状を有する乳剤を使用することが望ましいと評価する。

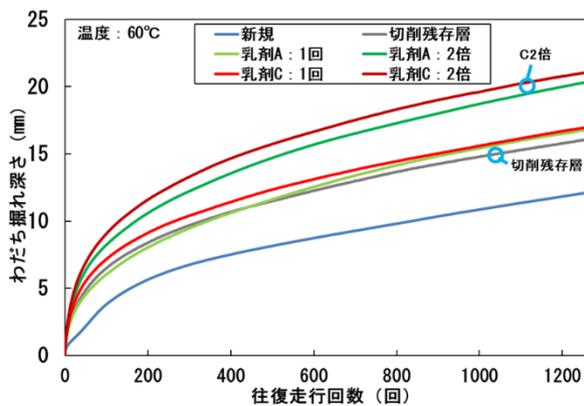


図-5.1 わだち掘れ深さの結果

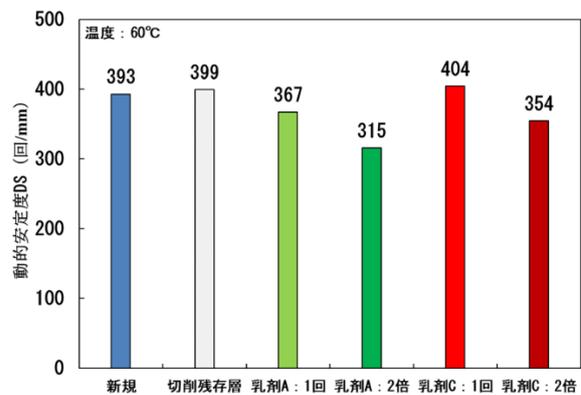


図-5.2 動的安定度 DS の結果

6. 乳剤浸透工法が破壊抵抗性に及ぼす影響

6.1. 評価方法

乳剤浸透工法を適用することで、切削残存層内部の空隙が乳剤で満たされ、破壊抵抗性が向上することが考えられる。高濃度改質アスファルト乳剤を塗布することによる切削残存層の破壊抵抗性に及ぼす影響について、静的曲げ試験によって評価した。静的曲げ試験は、アスコンの曲げ強度および破壊時におけるひずみを測定し、アスコンの破壊抵抗性について評価する試験である。

供試体は、空隙率および厚さについて切削残存層を再現し、試験条件に応じた種類および塗布量の乳剤を塗布した。再現供試体のほかに、基準値の設定として乳剤を塗布しない新規の基層に相当する空隙率 3.5 %の供試体、および切削残存層を模した供試体の 2 種類を作製して比較検討した。供試体の仕様について、表-6.1 に示す。

また、乳剤施工面に該当する位置は諸条件に伴い、圧縮応力および引張応力の両方が発生し得ることが判明している。このため、供試体の設置は乳剤施工面を上面に設置して圧縮応力を再現する条件と、下面に設置して引張応力を再現する条件の 2 種類を用意した。供試体が最大荷重を上回って破断するまで荷重を実施して、荷重と変位量を測定し、得られた値から曲げ強度と破壊時ひずみを算出する。

表-6.1 供試体の仕様

項目	仕様
供試体の寸法 (mm)	300×100×20
空隙率 (%)	新規舗装 : 3.5 切削残存層 : 7.5
乳剤の塗布量 (ℓ/m^2)	標準量 (A : 1.2, C : 1.5) 2 倍量 (A : 2.4, C : 3.0)

6.2. 試験結果および考察

図-6.1 に破壊時における曲げ強度の結果を、図-6.2 に破壊時ひずみの結果を示す。曲げ強度は乳剤の有無によって、明確な差異が生じなかった。一方で、破壊時ひずみは乳剤を塗布することで大きくなっている。よって、乳剤による力学的特性への補強効果が発揮されて、切削残存層の破壊抵抗性が向上していると判断できる。塗布した乳剤が切削残存層の空隙を満たすことで見かけ上の密度 (= 質量 / 体積) が向上したことが、破壊抵抗性に寄与したと考えられる。

破壊時ひずみは乳剤施工面を上にした場合の方が、下にした場合の方よりも大きい。このことから、乳剤施工面は圧縮応力に対する抵抗性の方が大きいと評価できる。この原因として、供試体の中立軸の変動に伴うひずみ分布の変化が考えられる。乳剤を塗布することで、乳剤施工面側の密度が大きくなり、中立軸も同じ方向側へと移動することが想定される。これに伴ってひずみ分布も変動したことで、乳剤施工面を上にした方が、破壊時ひずみが大きくなったと考えられる。

また、乳剤の塗布量を増やすことで、破壊時ひずみは乳剤を塗布しない条件程度にまで小さくなる。つまり、乳剤塗布量が増すことで切削残存層の破壊抵抗性が低下すると評価できる。これもまた、供試体の中立軸の変動が原因であると考えられる。2 倍量の乳剤塗布条件では、切削残存層内部の空隙に入りきらない乳剤が表面に残留すると想定される。このため、乳剤面側の供試体の密度が、標準量の乳剤塗布条件よりも小さくなり、中立軸が供試体中央寄りに移動すると思われる。したがって、乳剤塗布量が増すことで、破壊時ひずみの増加量が低下したと考えられる。

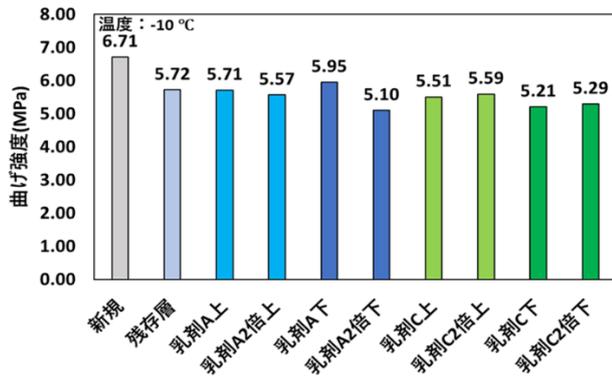


図-6.1 曲げ強度の結果

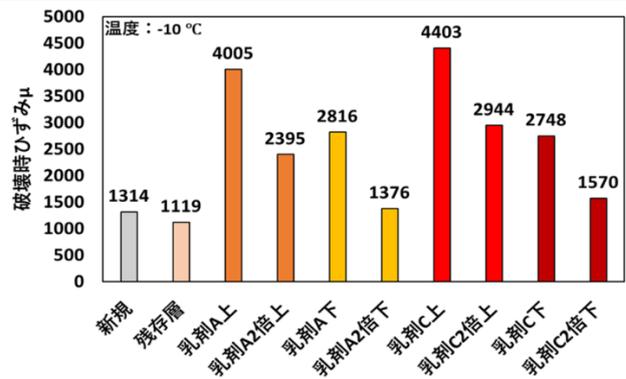


図-6.2 破壊時ひずみの結果

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ①乳剤浸透工法によって、切削残存層の不透水性が改善する。ここで、高浸透な乳剤の使用、塗布量および塗布回数の増加によって改善硬化の向上が期待できる。
- ②乳剤浸透工法によって、切削残存層の塑性変形抵抗性が小さくなる。また、塗布量が増すことで更に塑性変形抵抗性が低下する。一方で、硬い乳剤の使用で、塑性変形抵抗性の低下を抑制できる。
- ③標準量の乳剤塗布によって、切削残存層の破壊抵抗性が向上する。ただし、塗布量が増すことで破壊抵抗性の補強効果が低下する。
- ④以上のことと実施工の観点から、乳剤浸透工法は、硬く浸透性に優れる乳剤を使用し、塗布量は標準量に留めることが最も有効である。