



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高速道路におけるポーラスアスファルトの導入効果の検証と基層の脆弱化に関する研究
Author(s)	高橋, 茂樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第6902号
Issue Date	2013-12-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r6902
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/54681
Type	doctoral thesis
File Information	Shigeki_Takahashi.pdf



「高速道路におけるポーラスアスファルトの導入効果の検証と
基層の脆弱化に関する研究」

高 橋 茂 樹

論文題目

「高速道路におけるポーラスアスファルトの導入効果の検証と 基層の脆弱化に関する研究」

目 次

第1章 序論

1.1	研究の背景	1
1.2	研究目的と論文構成	2
1.3	用語の定義	4

参考文献

第2章 ポーラスアスファルト導入の背景

2.1	高速道路舗装における技術的課題	6
2.2	諸外国におけるポーラスアスファルトの開発と導入状況	16
2.3	国内におけるポーラスアスファルトの導入	19
2.4	高速道路における導入検討	20
2.5	第2章のまとめ	22

参考文献

第3章 「高機能舗装」の本格導入に向けた検討と導入効果

3.1	「高機能舗装」の適用拡大	26
3.2	耐久性確保に向けた取組み	28
3.3	導入効果の検証	42
3.4	第3章のまとめ	55

参考文献

第4章 「高機能舗装」の導入に伴う基層の損傷

4.1	損傷の発生形態と傾向の分析	58
4.2	圧裂試験による損傷度判定	67
4.3	開削調査による損傷実態の解明	72
4.4	第4章のまとめ	81

参考文献

第5章 損傷実態を踏まえた対応策

5.1	補修箇所を選定方法	83
5.2	使用材料および混合物	96
5.3	雨水の浸透対策	113
5.4	第5章のまとめ	120

参考文献

第6章 結論

6.1	研究成果の総括	123
6.2	今後の展望と課題	125

謝辞

第1章 序論

1.1. 研究の背景

高速道路において、舗装路面はお客様との唯一の接点と言われ、古くからその重要性が認識されてきた。無論、一般道でも同じ話が言えるのだが、高速走行を行うことを目的に作られる道路では、その路面状態が高速道路利用者の安全性や快適性に与える影響が非常に大きいことは周知の事実である。

我が国の高速道路においては、高度経済成長とともに急増する利用者台数と、過積載車両を含む大型貨物交通の伸びに伴い、ひび割れやわだち掘れに代表される舗装の損傷が進行した。特に、東名高速道路をはじめ全国各地の重交通路線では、「W わだち」と呼ばれる激しい流動わだち掘れが深刻な状態となった¹⁾。これにより、供用後早期の舗装修繕とこれに伴う工事渋滞が頻発しただけでなく、高速走行する車両の操縦安定性に悪影響を与え、雨天時のスリップ事故が多発し、ついには社会問題化する状態に至った²⁾³⁾。

当時、日本道路公団（JH）では、アスファルトの種別変更や混合物の配合粒度の見直し等、舗装に関する様々な取組みを行い⁴⁾、流動わだち掘れの抑制に努めてはいたが、大きな効果を上げるには至らなかった。しかしながら、道路管理者として、多発する交通事故を前にあらゆる方策を講じるべきと考え、1989年、ついにポーラスアスファルトの試験施工に着手することにした。

ポーラスアスファルトは、英国の空港舗装において、湿潤路面で離発着する航空機のハイドロプレーニング現象によるスリップ事故の発生防止対策として開発・導入され⁵⁾、1970～80年代に掛けては、欧州各国で脚光を浴び、高速道路への使用が始まった⁶⁾。日本では、東京都が1987年に国内初の車道への適用を都内の環状7号線で行っている⁷⁾。

JHでも、1989年に東北道（本宮IC～二本松IC間）で我が国の高速道路では初の試験施工を実施したのを皮切りに⁸⁾、1991～1993年に掛けて、全国の交通事故多発箇所に試行的な導入を行った。その後、これら試行箇所の追跡調査で、ポーラスアスファルトが大変優れた耐流動性と雨天時の劇的な交通事故抑制効果を有することが確認できた。その結果を踏まえ、JHでは、より安全で快適な路面を提供すべく、ポーラスアスファルトに「高機能舗装」という名称を付して、1998年に全面採用する決定を下した。

ポーラスアスファルトが様々な利点を有することは、欧米でも十分認識されていたが、その使用とともに耐久性の課題も明らかになってきた⁹⁾。日本においても、初期に施工されたポーラスアスファルトでは短期間で骨材飛散を生じた事例があったが、国内のバインダーメーカ各社が、骨材間の接着力を高めた、高粘度改質アスファルトの開発に成功、これを採用することで、飛躍的に耐久性が向上した¹⁰⁾。

これにより、ポーラスアスファルトの全面採用に目処が立ったのだが、もう1点、ポーラスアスファルトの導入には重要な課題があった。それは、ポーラスアスファルトの中に浸透する雨

水に対する懸念であった。アスファルト舗装の中には絶対に水を入れてはいけない、というのは舗装体の長期耐久性を確保する上で基本中の基本であり、この観点から見れば、ポーラスアスファルトというのは、まさに掟破りの存在であった。欧州では、ポーラスアスファルトの中に水分が存在する点を考慮し、ポーラスアスファルトについては、他のアスファルト混合物より厳しい剥離抵抗性を有することとし、湿潤状態での室内試験評価基準を設ける国もあった^{11) 12)}。日本でも同様の観点から、高速道路の技術基準である設計要領に、骨材品質の規定を厳しくしたり、混合物の剥離抵抗性の基準を設けたりと、その導入に合わせポーラスアスファルトの耐久性を確保すべく技術基準を改定した¹³⁾。また、基層用混合物の配合粒度を見直し、空隙率の小さい密実な混合物に変更することで、基層の耐水性を向上させた^{14) 15)}。欧米では、このように、ポーラスアスファルトの導入に併せ、その基層に用いる混合物の耐水性を向上させる対策を講じた事例を見たことはない。

これらの対策を講じた上で、JHでは高速道路の路面（表層）に全面採用したのだが、あまりに優れた事故低減効果と走行快適性から、新規に建設する路線だけでなく、供用中の路線にもできるだけ早くこの「高機能舗装」を導入すべしとの方針が出された。そのため、限られた予算内で全国的高速道路網を早急に高機能舗装化するためには、表層のみの切削オーバーレイを行い、既設の密粒舗装を高機能舗装に切替する手法に頼らざるを得ない状態になった。新設する道路であれば、当然基層を新しい配合粒度の混合物で施工を行った上に高機能舗装を舗設するため、雨水の浸透対策を講じた舗装を構築できる。しかし、供用中の高速道路においては、高機能舗装化を急ぐ余り、既設の、つまり密粒混合物を表層に用いていた時代の基層を存置したまま、その上に高機能舗装を載せる状況となった。その結果、高機能舗装を全面採用した数年後、密粒表層を切削オーバーレイにて高機能舗装に切替した現場から、早期に路面に損傷が発生する事例が報告され始めた。

このように、高機能舗装の導入に際し、耐久性の確保に関する取組みを行ったにもかかわらず、早期に基層からの損傷が発生し、導入後に再び補修工事を行うケースが増加してきた。そのため、原因の究明と対策の検討が急務となり、これが本研究を実施する背景となった。

1.2. 研究目的と論文構成

1.2.1. 本研究の目的

本研究の内容は2つに大別される。ひとつは、「1.1 研究の背景」に記載したように、日本の高速道路におけるポーラスアスファルトについて、この舗装が有する各種機能や供用性状を、10年間に渡る全国的な追跡調査結果を基に、導入効果として総括的に検証したものである。ポーラスアスファルトは、欧米各国で先行開発され使用実績を挙げてはいるが、耐久性に対する課題から、現時点で積極的に採用している国はオランダ以外になく、他国では複数ある表層用混合物の一つという位置付けで、その効果も限定的である^{9) 16) 17)}。これに対し、日本では、高温多湿・重交通というアスファルト舗装にとって非常に過酷な環境条件を有する国でありながら、こ

の舗装を全面的に採用し、湿潤路面の交通事故低減を代表とする大変優れた導入効果を得ることができた。また、耐久性についても、一部の積雪寒冷地の高速道路を除き、既設の密粒表層と比べ全く遜色のないレベルの表層用混合物として開発導入することができた。このことは、世界に類を見ない誠に画期的な成果であり、胸を張るべき技術開発であったと言える。

もうひとつは、高速道路の表層に「高機能舗装」と称してポーラスアスファルトを導入後、脆弱化が急速に進行している高機能舗装下面の既設基層混合物について、現地での損傷実態と照合しつつ、損傷原因の究明を行ったものである。また、供用中の高速道路の開削調査を行い、高機能舗装を導入した区間でポンピングが多発している箇所の下層の滞水状態と、雨水の浸透経路を明らかにし、アスファルト舗装の長期耐久性確保に向け、今後講じるべき対策を提案するものである。

本研究では、世界で最もポーラスアスファルトの採用に成功した日本の高速道路技術者の一員として、導入効果とその持続性について検証を行い、総括的な評価として国内初のまとめを行っている。一方で、全面採用に邁進した事業者であるが故に直面した課題も実直に述べ、この舗装を導入する際の留意点を提示することで、ポーラスアスファルトを検討する国や道路関係機関に対し信頼ある助言を行う上で、有用な知見をまとめることを前半部分の研究目的とした。

また、高速道路において安全かつ快適な路面を提供しつつ、舗装の長期耐久性を確保するため、ポーラスアスファルトの内部を浸透する雨水による、基層混合物のはくり・脆弱化に着目した損傷実態の把握と原因の究明を行い、有効な対策を検討・提案することを、後半部分の目的としている。これは、将来必要となる技術開発に対するニーズを発信することにもつながり、今後の舗装技術の発展に対し、非常に有意義なことと考えている。

1.2.2. 本論文の構成

第1章は、まず序論として、主に本研究の背景と目的を述べる。次に、**第2章**から**第3章**までを前半部分として、ポーラスアスファルトを導入する以前の我が国の高速道路舗装における課題と対応について**第2章**で紹介した。併せて、諸外国を含めたポーラスアスファルトの開発の歴史と日本における技術開発、1991～1993年に掛けて全国的に試行導入を行った際の供用性状についても記載する。

引続き、**第3章**では、高機能舗装と称して全国の高速道路に全面採用するにあたり議論となった、耐久性確保に向けた様々な取組みについて述べるとともに、10年間に渡る追跡調査の結果を基に、交通事故の低減効果や排水・減音機能あるいは耐久性について、長期的な検証を行う。

第4章以降が本研究の後半部分である。まず**第4章**では、高機能舗装の導入に伴い顕在化し始めた、雨水の浸透による既設舗装の基層混合物の損傷実態について、全国の高速道路からの事例収集と損傷発生箇所からの試料採取・室内試験の結果を基に、損傷の特徴や要因について分析を行う。次に、高機能舗装を導入する際に、その直下の層として雨水の浸透の影響を受ける既設の基層混合物が、高機能舗装化に耐えうるか事前に調査する手法と評価指標の立案を行う。また、この評価手法に基づき、日本の高速道路において最も過酷な気象・交通条件を有する関東地域の

アスファルト舗装を調査した結果を考察し、その現況を評価する。さらに、舗装内部に発生している損傷実態を明らかにすべく、供用中の高速道路の舗装を開削し、高機能舗装を導入した箇所の下層がどのような状態になっているか、密粒舗装区間との比較を通じ、雨水の浸透経路やこれによる舗装各層の脆弱化の状況を詳細に調査する。

第5章では、これまでの研究で判明した高機能舗装化に伴う損傷実態と、この舗装特有の課題を踏まえ、効率的な補修を計画するために、また舗装体の長期耐久性を確保するためにはどのような対策を講じるべきか、という技術提案を行う。これに関し、本研究では、管理事務所が実施している日常点検データを活用した補修範囲の選定手法を立案するとともに、補修時に使用する材料や混合物の工夫、雨水の浸透を抑制する方法について、研究開発を行い、その期待できる効果の有効性を、具体的な試験結果を付して述べる。

最後に第6章として、以上の結果をまとめ、本研究から得られた結論を示すとともに、今後の展望と課題について述べるものである。

1.3. 用語の定義

ポーラスアスファルトは、「高機能舗装」以外にも「排水性舗装」あるいは「低騒音舗装」といった呼び名があり、また、海外においても、「Porous Asphalt」の名称のみならず「Drain Asphalt」や「Pervious Macadam」といった呼び名が使われることもある。そのため、用語の統一が難しいのだが、本論文では、諸外国及び国内導入の初期段階を記述する際には、一般名称として土木学会でも使用している「ポーラスアスファルト」を用語として採用した。また、高速道路（JH）においては、当初は「排水性舗装」と呼んでいたが、1998年に全面採用を決定した以降、交通事故や交通騒音の低減等、高い機能性を有する舗装という意味合いを打出す目的で「高機能舗装」という呼称を使用している。そのため、本論文では、JH（現在はNEXCO）が日本の高速道路の表層に用いたポーラスアスファルトを示す場合には、その時点に寄らず基本的に「高機能舗装」として表現することにした。

参考文献

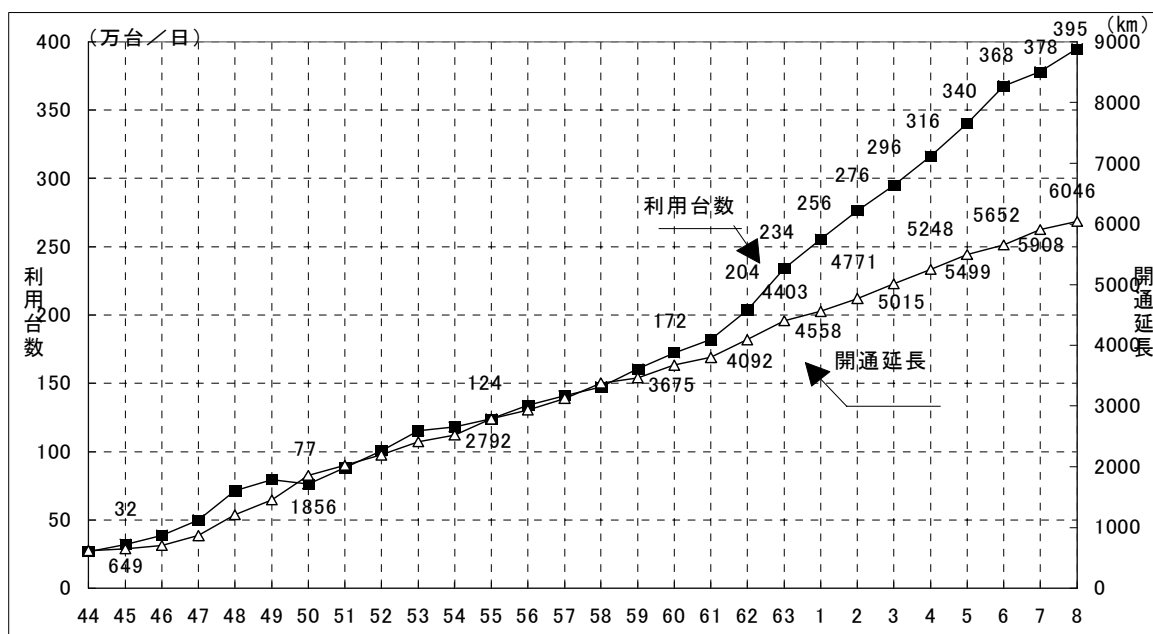
- 1) 高速道路調査会：アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書，1976
- 2) 土屋雅彦，岩田久志：舗装修繕工法の実態分析，試験所報告(1986 年度)，pp. 55-74，日本道路公団試験所，1987
- 3) 第 118 回国会：予算委員会第八分科会第 2 号議事録，1990
- 4) 日本道路公団：設計要領第一集舗装編，1992
- 5) Szatkowski W. S. and Brown J. R. : Design and Performance of Pervious Wearing Course for Roads in Britain 1967-1976, Highways and Road Construction International, 1977
- 6) Nicholls J.C. : Review of UK Porous Asphalt Trials, TRL Report 264, Transport Research Laboratory, Crowthorne, 1996
- 7) 達下文一，森尚之，阿部博：低騒音舗装の試験施工と結果（上），舗装，pp. 3-8，1988
- 8) 渡辺幸二，神谷誠，中村研：東北自動車道における排水性舗装，舗装，pp. 4-9，1989
- 9) (財)高速道路技術センター：高機能舗装に関する海外技術導入報告書（L C P C 招聘講演会記録），1999
- 10) 村山雅人，伊藤達也，羽入昭吉，菅野 宏：高粘度改質アスファルト開発経緯と研究開発の現状，改質アスファルト第 21 号，pp. 8-19，2003
- 11) Khalid H. And Perez Jimenez F.K. : Performance Assessment of Spanish and British Porous Asphalt, Proc. Performance and Durability of Bituminous Materials Symposium, University of Leeds, pp 137-157, 1994
- 12) Nicholls J.C. : European Standards for Test Methods on Asphalt Mixtures, Proc. 3rd European Symposium on Performance and Durability of Bituminous Materials and Hydraulic Stabilised Composites, Leeds, pp 679-698, 1999
- 13) 日本道路公団：設計要領第一集舗装編，1999/2004
- 14) 高橋茂樹，菅野勝一，本松資朗：高機能舗装化に伴う基層用混合物の検討，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp. 22-23，2001
- 15) 川村和将，高橋茂樹，菅野勝一：J H における高機能舗装化に伴う下層部の滞水対策，舗装，pp. 16-21, 2002
- 16) (財) 高速道路調査会：排水性舗装に関する欧州調査報告書，1991
- 17) (財)高速道路技術センター：高機能舗装に関する海外技術導入報告書（オランダ DW W 及びデルフト工科大学招聘講演会記録），2005

第2章 ポーラスアスファルト導入の背景

2.1 高速道路舗装における技術的課題

2.1.1 利用車台数の伸びと流動わだち掘れの深刻化

我が国初の高速道路である名神高速道路では、1963年（昭和38年）の開通後5年間は実交通量が計画交通量に達しない状況であったが、1968年に初めてこれを越して以降、急激な交通量の伸びを見せ始めた。それ以来、図2-1に示すように、高速道路の開通延長に併せ利用者台数も年々増加し、1983年（昭和58年）以降は、利用車台数が開通延長を上回る伸びを見せ始めた。この年の高速道路における日平均走行台距離は、約73百万kmと1969年の東名高速全線開通時の5.7倍となり、1987年にはついに1億台km/日に達した¹⁾。これは、1960年代後半から急増した自動車保有台数の伸びとも合致した傾向であり、舗装の耐久性に大きな影響を及ぼす大型車交通量に関してみても、国内の貨物輸送量が1955年度から1988年度までの間に、輸送トン・キロで5.9倍、輸送トン数では7.4倍の伸びを示し、総輸送量の約91%を自動車交通が担う状況となった²⁾。



(注) 利用台数は年度数値である。

図2-1 高速道路の開通延長と利用台数の推移

このような中、陸上貨物輸送の増大を受けトラックの大型化も進められてきたが、1980年代頃からは過積載による通行車両も目立つようになり、大型車交通量の伸びに従い、高速道路の舗装においては、流動わだち掘れが大きな問題となってきた。流動わだち掘れが最初に問題になったのは東名高速の開通後であったが、それ以降も各地で開通する高速道路の多くでこの問題が生じる状態となった。

わだち掘れ量の大きな路面では、写真 2-1 に示すような、「W わだち」と呼ばれる大型車の複輪形状の流動が発生し、高速道路利用者にとっては車線変更をする度にハンドルが取られるような不安定な操縦を強いられる状態であった。道路管理者にとってもこのような大きなわだち掘れは看過できないものであり、路面管理基準に定めている、わだち掘れ量 25mm という補修目標値に達する前に、主に表層の切削オーバーレイによる補修を行うが、暫くすると再び大きな流動わだち掘れが生じてしまい、補修を繰り返すという状況になっていった。



写真 2-1 Wわだち掘れの発生例

図 2-2 は、1980 年代までの主要路線の修繕延長と、表層の補修間隔を耐用年数として表したグラフだが、これを見ると、高速道路の平均的な表層の耐用年数は 7～8 年程度であったことがわかる³⁾。また、図 2-3 には、大型車混入率が 6 割弱にも達する東名高速における 1980 年代までの補修履歴を示すが、補修を繰り返している箇所が多く、特に大型車の多い走行車線においては土工部で、その 4 割以上が 2 回以上補修を行っていることがわかる⁴⁾。

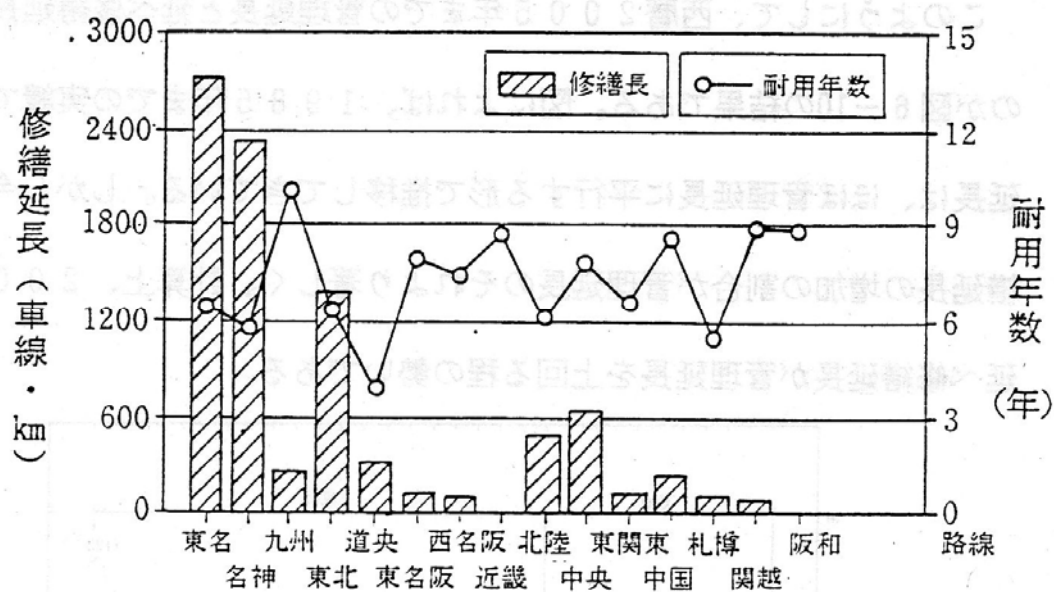


図 2-2 主要路線の修繕量と表層の耐用年数

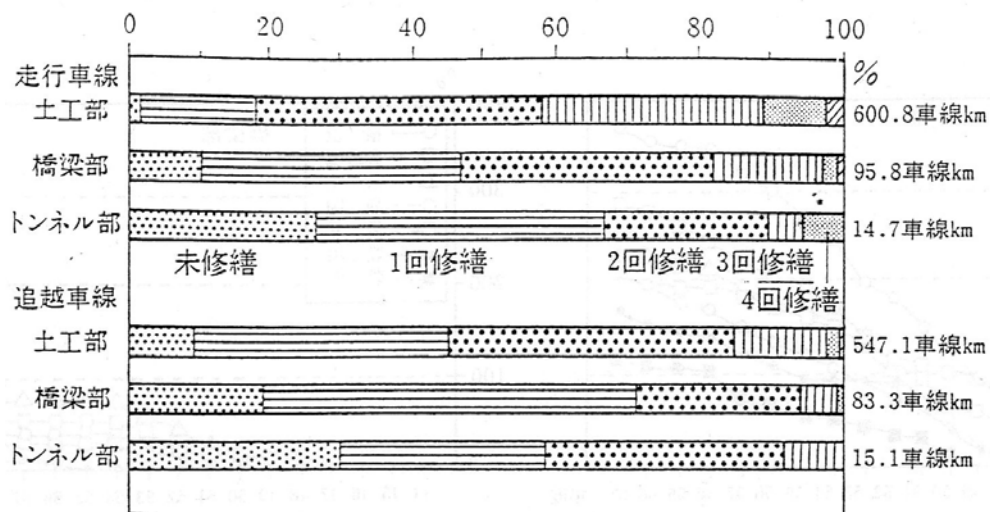


図 2-3 東名高速における舗装の修繕回数

東名高速とともに日本の大動脈を担う名神高速においては、建設時の舗装が交通量の急激な伸びに対応できず、これまで2～3層のオーバーレイにより舗装厚を増やした区間があるが、そこで発生した流動わだち掘れの開削調査結果を見ると、アスファルト舗装の流動は表面的なものに留まらず、深さ方向に3～4層以上にも渡って発生していたことが判明した(写真2-2、図2-4)。



写真 2-2 流動わだち部の開削断面の例

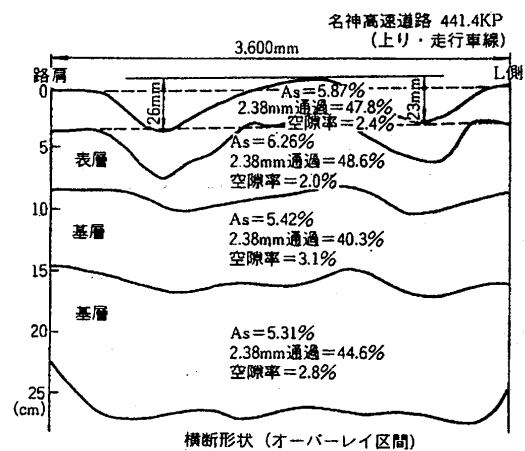


図 2-4 開削調査によるわだち掘れの形状例⁵⁾

2.1.2 交通事故の急増

高度経済成長とともに、急速にその波が押し寄せた我が国のモータリゼーションは、一方で交通事故の増加という問題をもたらし、1970年に過去最多の16,765人の交通事故死者数を記録、その後の9年間で8,466人にまで低下したものの、再び上昇し、平成に入る頃には年間1万人以上の交通事故死者数を毎年保持する状態となった⁶⁾。この状況は、第二次交通戦争という言い方で社会問題視されることとなり、当時の総務省に設けられた交通対策本部からは、非常事態宣言が出され、様々な交通事故防止対策が講じられることになった。

高速道路においても例外ではなく、図2-5に示すとおり、総事故件数や総事故率、死傷事故件数や死傷事故率も1980年代を通じ（昭和55年頃から平成初期に掛けて）、増加の一途を辿り、ついには国会やマスコミ報道でも取り上げられるようになり、交通事故の増加に加え、「わだち掘れによりハンドルが取られやすい」「雨の日のスリップ事故多発」といった問題が指摘されるようになった⁷⁾。

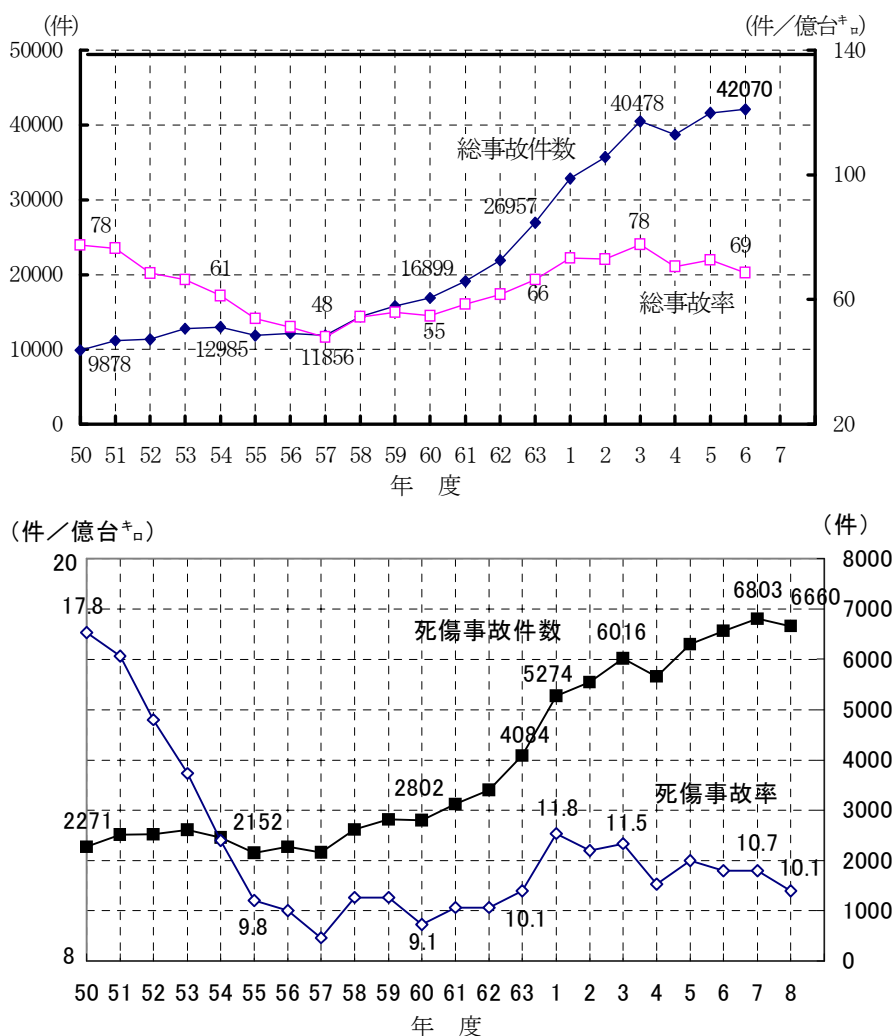


図2-5 高速道路における交通事故の発生状況（1997年 JH調査）

このわだち掘れに関しては、日本道路公団（JH）においても、様々な調査・分析が行われてきた。図 2-6 は、1980 年代後半に、東名高速のサービスエリア 2 箇所で行われた道路利用者に対するアンケート調査の結果⁸⁾であるが、高速道路に関する苦情全体の第 2 位として舗装路面の状態の悪さが上げられており、中でもわだち掘れの酷さに対する苦情が最も多いことがわかる。同じ時期に大型車を運転するプロドライバーに対して行った別の調査結果⁸⁾からも、気になる路面状態として、路面のわだち掘れとそこに発生する雨天時の水溜りを挙げる声が全体の約 45% を占めていた。

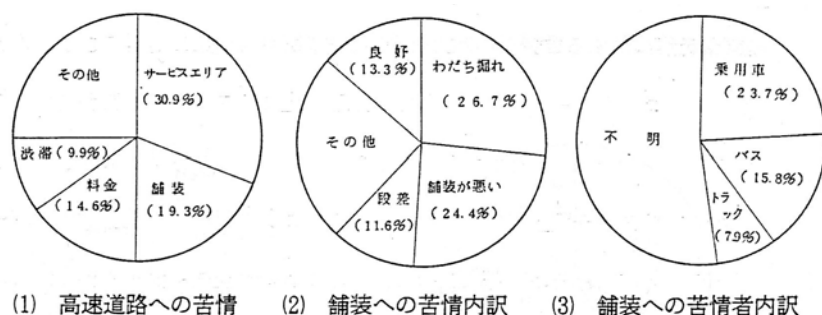


図 2-6 高速道路利用者へのアンケート調査結果

一方、交通事故の原因分析を行った中では、例えば 1991 年に高速道路上で発生した死亡事故を調べると、雨天時に発生していた事故が 46%もあることがわかった（図 2-7）。

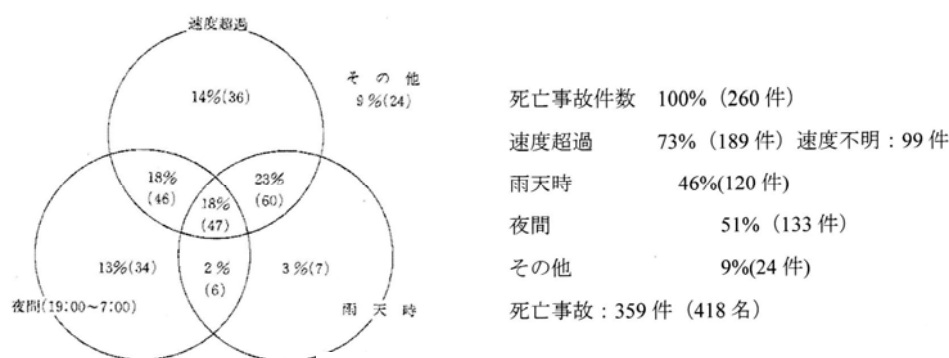


図 2-7 高速道路における死亡事故の発生状況⁹⁾

また、図 2-8 は、1985 年から 8 年間に渡り、死亡事故発生時の路面状態を調べたものだが、これを見ると、湿潤時の路面上で発生した事故が、かなりの割合を占めていたことがわかる¹⁰⁾。

更に詳細な分析として、1991 年の事故データを用い、路面が乾燥状態の時と湿潤状態の時を比較し、道路

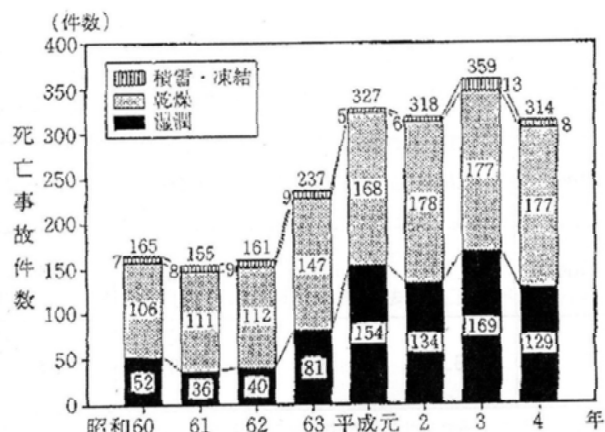


図 2-8 路面状態別の死亡事故件数

線形との関係を調べたダイアグラムを図 2-9 および図 2-10 に転記する。この結果から、湿潤路面では、特に反方向点～右カーブで、かつサグや下り勾配の条件が重なる箇所事故が起りやすいことがわかってきた。

このような調査結果から、交通事故が発生しやすい状況を整理し、多面的な対策を立案し有効と思われるものは現地で実施することになった。また、わだち掘れに関しても、直接的な事故との因果関係は明らかになっていないが、これを抑制することは舗装の補修サイクルを伸ばすだけでなく、車両の操縦安定性やスリップ事故の防止にも効果が期待できることから、舗装における重点課題として取組みを行うこととした。

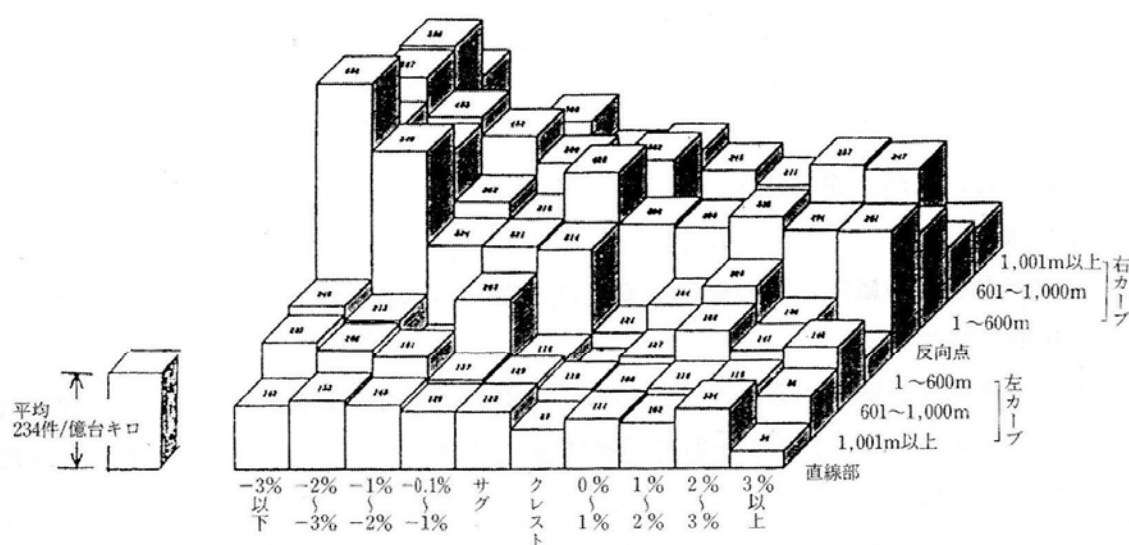


図 2-9 路面湿潤時の線形要素と事故率の関係

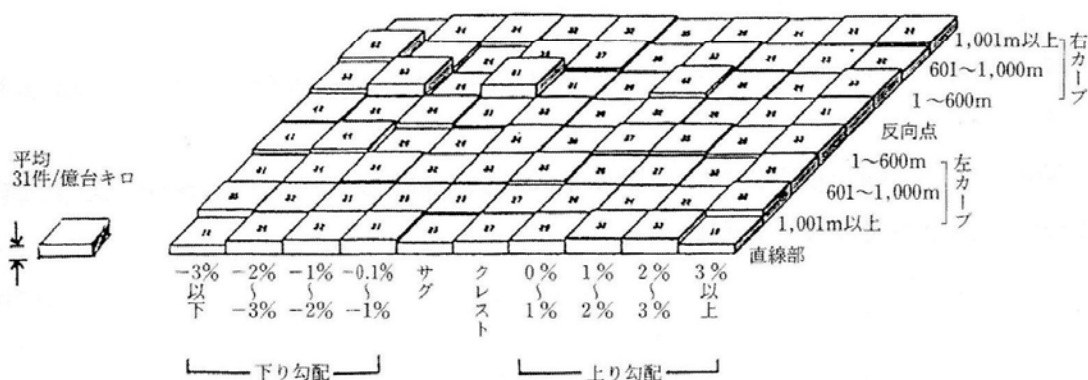


図 2-10 路面乾燥時の線形要素と事故率の関係

(上下図とも 1993 年 JH 調査)

2.1.3 わだち掘れ対策

年々深刻化する高速道路のわだち掘れに対し、道路管理者は様々な対策を講じてきた。ここでは、高機能舗装を導入する以前に行われてきた取組みをまとめて見た。表 2-1 には、JH の技術基準である設計要領において、その改訂の度に追加されてきたわだち掘れ対策を示した。

表 2-1 設計要領の変遷

改訂時期	主な改訂内容（流動わだち掘れ対策に関するもの）
1975. 7	・ 開通区間の追跡調査結果を踏まえ、軸重の算出方法や舗装厚の設計曲線を見直し ・ 表層混合物について、耐流動性が必要な温暖地と、耐摩耗性が必要な寒冷地を設定し、気象条件により、異なるアスファルト舗装の損傷形態に応じた対策を図ることにした
1983. 4	・ 10 t 軸換算係数の再見直し。地域区分に摩耗地を設定
1992. 4	・ 地域条件に応じたアスファルト種別および混合物の配合粒度の使い分け ・ ホイールトラッキング試験の実施と動的安定度の設定

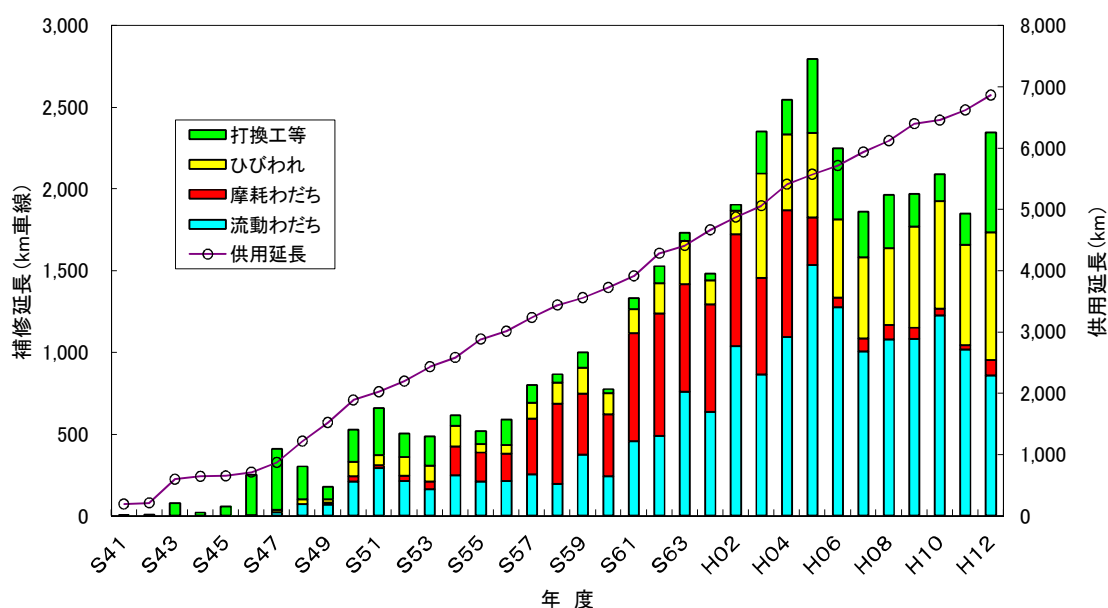


図 2-11 高速道路における舗装の補修理由の推移

1975 年に改訂された設計要領では、我が国初の高速道路である名神高速において、供用後の早期にひび割れにより、舗装の打換補修が多発（図 2-11 の S46～S51 頃）したことの反省と大型車の走行実態を踏まえ 10ton 軸換算係数を 1.1 と大幅に引上げ、激しい交通荷重に耐えられるような舗装構造を設計することにした（これに関しては、その後も引続き 1980 年まで東名高速に設置した軸重計のデータ取得を行なったところ、以降の規制強化等による過積載車両の減少が見られるようになり、この分析結果を基に 1983 の改訂では現行の換算係数 0.85 に改められている）。

また、この設計要領改訂から、アスファルト舗装の混合物を設計するに当っては、日本全国を、年平均気温が 14℃以上の「温暖地」、年平均気温が 14℃未満でかつ別途制定されていた雪氷マニュアルに示す寒冷地を除く地域を「一般地」、残りを「寒冷地」と 3 つに区分し、マーシャル供試体の突固め回数を、温暖地の重交通路線（大型車 1,500 台/日/一方向以上）では 75 回、それ以外は 50 回と明示した。これに関しては、東名高速における顕著な流動わだち掘れと、一部区間ではブリージングも発生したことを受け、その後に建設が進められていた高速道路では、必要に応じマーシャル供試体の突固め回数を 50 回から 75 回に増やし、重交通路線のアスファルト量を若干少なめに設定する対応が図られており、この方針を設計要領に反映したものである。

この他、寒冷地用の表層混合物については、一般地で使用している最大粒径 13mm に加え、20mm のタイプを追加し、その場合の表層厚は、最大粒径と一層施工厚の関係より、5cm と決められた（最大粒径 13mm の表層厚は 4cm）。これに関しては、札幌オリンピックに合わせ建設が進められていた道央道（札幌～千歳）で、当時ドイツ等で耐摩耗用混合物として評価されていたグースアスファルトを当初検討していたところ、1970 年に当時の JH 試験所で完成した回転式舗装試験機によるタイヤチェーンを用いた摩耗試験の結果、高速道路に使用してきた密粒混合物でも堅固な骨材を用いて最大粒径を 20mm と大きくし細骨材量を修正することで、耐摩耗性を向上されることが判り、この知見を基に設計要領に追加されたものである。20mm タイプの表層は東北道等でも使用されており、夏場の流動わだち掘れや路面のすべり摩擦に懸念のあったグースアスファルトに代わる積雪寒冷地の表層用混合物として、日本の高速道路に用いられるようになった。

1983 年に改訂された設計要領では、全国で開通した高速道路の路面状態を基に、地域区分を一般地域と摩耗地域の 2 つに改め、その境は 10 年平均最大積雪深 0.3m とした（この時の設計要領図には、路床の凍結融解に対する地域区分も併記されている）。また、マーシャル供試体の突固め回数とアスファルト種別は、一般地域の重交通路線（大型車 3,000 台/日/一方向以上に変更）のみ 75 回突きで針入度 60/80 とし、それ以外は 50 回突きで 80/100 とされた（この時代までのアスファルトは 80/100 が主流だった）。

1990 年に粉塵の発生が社会問題化していたスパイクタイヤの製造・販売が禁止されたことで、それまで大きな課題となっていた摩耗わだち掘れは激減した（図 2-11 の H6 以降）が、一方、夏場に発生する流動わだち掘れについては激しさを増し、全国の高速道路で深刻化していた。そのような中、JH では、1991 年に全国規模でアスファルト舗装の損傷調査を行い、その実態を基に現地で発生しているわだち掘れを 3 種類に区分した。一つは流動によるもの、もう一つは流動と摩耗が両方あるもの、最後にもつぱら摩耗が主体の箇所である。この結果を整理すると、それまでの設計要領による地域区分では摩耗地域とされていた箇所でも流動わだち掘れが大幅に進行している実態が浮かび上がってきた。

この全国調査の結果を受け、1992 年の設計要領改訂では、地域区分を「一般地域」「準摩耗地域」「摩耗地域（北海道のみ）」の 3 つに改めて見直すとともに、表層用混合物に従来よりも耐流動性の高い混合物「タイプ A」を追加した。これに伴いそれまでの表層用混合物も、若干粒度を

修正し「タイプB」「タイプC」と命名された。これらは、2.36mm通過量が多くなると混合物の耐流動性が低下するという室内試験の結果を踏まえた設計要領への反映であった。

また、わだち上での雨天時のスリップ事故対策として、初めてギャップ粒度の混合物「タイプG」も加えられた。このタイプGについては、1974年に中国道（美弥～小月）で試用して以来、研究と実績を重ね開発したものであり、すべり摩擦と流動に対する優れた抵抗性を持ち、事故率の高い線形の厳しい（曲線半径700m以下、または縦断勾配・3%を超える）箇所へ適用を図った。事実タイプGを導入した箇所では流動わだち掘れが少なく、その効果が発揮されたが、その後に準摩耗地域へ展開したところ、深刻なひび割れが発生した。これは配合上空隙率が高くなることで生じた問題と思われたが、その後に配合粒度を修正したり改質アスファルトを使用したり工夫を凝らしたが、抜本的な対策が見つからないうちに高機能舗装が全面採用となったことで、やや中途半端な形で導入が終わってしまった。但し、ギャップ粒度の持つ優れた耐流動性は大いに注目すべきものであり、JHおよびその後民営化された各高速道路会社（NEXCO）において、開発を進めた、砕石マスタックやハイブリッド舗装等、最近展開を図っている混合物は、全てギャップ系に分類されるものである。

この他、1992年の設計要領では、マーシャル供試体の突固め75回突きを適用する範囲を拡大したり、表層に初めてホイールトラッキング試験を導入し、混合物の耐流動性を確保する指標として、表2-2に示す動的安定度（DS）の目標値を設定したのも特筆すべき変更点であった。

表2-2 動的安定度の目標値

交通区分*		一般地域	準摩耗地域	摩耗地域
軽交通量	1,500台未満	800	500	—
中交通量	1,500～3,000台	1,000	800	—
重交通量	3,000～15,000台	1,200	1,000	—
超重交通量	15,000台以上	3,000～5,000		—

* 交通量は初年度大型車交通量であり、単位は台/日/一方向

** DSが1,500程度まではストレートアスファルトを、超重交通区分には改質アスファルトを原則とする。

JHでは、ホイールトラッキング（WT）試験機を1970年頃から研究目的で使用しており、初期には英国の道路試験所（TRRL）が開発し北海道大学で改良した試験機が使われていたが、1975年以降はJHの試験所が新たに製作した試験機を用いて評価している（写真2-3）。



写真2-3 WT試験の状況

この試験による動的安定度の評価に加え、ストレートアスファルトについては、一般地域の重交通路線に対し、従来なかった40/60の針入度が使われることとなり、また、超重交通路線においては改質アスファルトの本格導入が始まった（これ以外の一般地域と全ての準摩耗地域は60/80、摩耗地域

は全て 80/100)。

タイヤのラジアル化による舗装への負荷の増加や大都市近郊の重交通路線における深刻な渋滞等も加わり、舗装を取り巻く情勢が厳しさを増す中、様々な流動わだち掘れ対策が講じられたのが、この年の設計要領改訂であった。なお、2008 年以降は高機能舗装を全面展開したことで、それ以外の表層用混合物を使用する機会は殆どなくなったが、この 1992 年の設計要領改訂以降にも東北道・北陸道・中国道および名神高速の 4 路線 167 箇所におけるわだち掘れの追跡調査が行われており、現行の設計要領では、この結果を基に交通量区分と DS の目標値を修正した内容が記載されている。

以上述べた、表層に使用するアスファルト種別や混合物の種類以外にも、流動わだち掘れ対策として、初期わだち掘れの問題があった。これは、建設工事とは異なり、工事中は車線規制を行い、工事完了後は直ちに交通開放を行う必要がある供用路線の補修工事に見られる特有の課題であり、特に重交通路線では、補修工事中の車線規制に伴う交通渋滞が発生しやすく、工事が終われば直ちに車線規制を撤去することを求められるも、舗設したアスファルト舗装の温度が十分低下しないうちに交通開放すると、見る見るうちに流動わだち掘れが生じるという深刻なジレンマに陥る状況にあった。

JH では、1981 年に全国各地の高速道路における補修工事の実態を調査した所、新規に建設した路線では供用 1 年後のわだち掘れ量が平均で 6mm 程度であるのに対し、補修工事を行った場合には、同じく 1 年後のわだち掘れ量が 11mm と約 2 倍になっていることが明らかになり、補修後の表層の耐用年数に大きな影響を与えていることが明白であった。そのため、工事終了後の交通渋滞が生じる場合はあるものの、早期に再補修を行う事態を避けることの方が重要であり、結果的には補修工事の回数とこれに伴う交通渋滞を減らせることから、交通開放温度として路面温度 40℃ という規定を定めることになった。

2.1.4 交通事故対策

第二次交通戦争と呼ばれた交通事故急増の時代、JH としては 1989 年に「交通安全緊急対策本部」を設置し、1991 年度からは「交通安全施設等整備事業に関する緊急措置法」に基づく政府の施策計画に併せ、『高速自動車国道等における交通安全対策に関する五箇年間の事業計画』をスタートさせた。当時の高速道路における交通事故の特徴としては、事故分析の結果、以下の点が挙げられた。

① 走行速度超過は死亡事故件数の原因の約 4 割を超えている

② 夜間の死亡事故率は昼間の約 3 倍

③ 雨天時の死亡事故率は晴天時の約 4 倍

④ 高速道路上での事故発生率は全国の全道路の 1 / 10

⑤ 交通事故死亡者のうち約 7 割がシートベルトの非着用者

⑥ 全事故件数の 23 % が全延長の 2 % の区間に集中している

これらの特徴を踏まえた様々な検討が行われ、例えば、速度超過対策として、下り勾配のカーブ区間における注意喚起標識等の設置や中分突破事故を防ぐための強化型防護柵の導入、夜間の視認性向上を図る目的で、区画線や路上照明の整備を行う等々の対策が講じられることになった。また、舗装路面における溝切りの実施も雨天時の交通事故低減に効果を発揮した。これは、雨水の滞水しやすいサグや反方向点等において、密粒舗装の路面を道路横断方向に 4~5cm 程度の幅で溝切りを行うことで、路面に溜まる表面水を排除し、スリップ事故防止を期待する工法であるが、全国 101 箇所を実施前後の交通事故データを集計してみると、この溝切りによる湿潤路面時の事故件数が大きく減少していることが確認され、路面排水の重要性を改めて認識することとなり、これが高機能舗装の導入を図る一つの背景となった¹¹⁾。

2.2 諸外国におけるポーラスアスファルトの開発と導入状況

混合物中に大きな空隙率を有し、その中に雨水を一旦浸透貯留させることで、雨天時の路面滞水を抑制できるポーラスアスファルトは、1950 年代に英国で開発されたのがその始まりである。この混合物は、英国では **Pervious macadam** と呼ばれ、道路舗装としてではなく、空港の滑走路において雨天時の航空機離着陸の際に問題となっていたハイドロプレーニング現象の抑制対策として試用された記録がある。道路では、1967 年に初のポーラスアスファルト試験施工区間が **Wycombe** バイパスに設けられた¹²⁾。その後、英国の幹線道路を管轄する道路庁 (**Highway Agency**) と道路研究機関である **TRRL** (後の **TRL**) による研究開発を踏まえ、1994 年に交通省が発行する技術基準である "The Design Manual for Roads and Bridges" に表層用混合物として記載された¹³⁾。

これに類似する混合物として、米国で用いられてきた **Open Graded asphalt Friction Course (OGFC)** があり、こちらの方は 1930 年代から開発が始められたが、空隙率は一般的なポーラスアスファルトが 20% 程度であるのに対し 8~16 % と低く、この空隙率では混合物の中を雨水が浸透することはできない。OGFC は舗装の厚さが 20mm と薄く、路面のすべり摩擦抵抗の確保を主目的として湿潤路面におけるスリップ事故防止対策として使用されてきた。連邦道路局 (**FHWA**) としては、それまでの使用経験を基に 1974 年この OGFC の設計手順を定めている¹⁴⁾。

フランスもポーラスアスファルトに早くから取り組みを行ってきた国の一つであり、1960 年代

から実道での試用が始まり，1977年には延長 1km に及ぶ本格的な試験施工が開始された（空隙率 20%で舗装厚は 4cm）．道路舗装としては伝統的な Hot Rolled Asphalt が依然主流である英国とは異なり，フランスでは 1984 年頃からポーラスアスファルトが一気に流行し始め，1987 年には国内の高速道路および国道の約 50%でポーラスアスファルトが導入されるに至った¹⁵⁾．

その他の欧州各国でも，表 2-3 に示すように，1970～80 年代に掛けて続々とポーラスアスファルトの広まりを見せたが，スペインでは従来の密粒混合物に比べ，その高い空隙率から耐久性に懸念のあるポーラスアスファルトの評価方法として，既存のロサンゼルス試験機を活用し骨材のすり減り減量を評価する，カンタブロ試験を考案し，その簡便さから日本を含め世界各国でポーラスアスファルトの配合試験に採用されている¹⁶⁾．

表 2-3 欧州主要国におけるポーラスアスファルトの導入時期

時期	開発状況
1950 年代	英国の空港滑走路で初試用される
1960 年代	英国の車道で初の試験施工 (1967) フランスでポーラスアスファルトの開発が始まる
1970 年代	ベルギー (1970)，オランダ (1972)，フランス (1977) で試験施工開始 スイスでも滑走路で試用される (1972)
1980 年代	スペイン (1980)，オーストリア (1984)，ドイツ (1986) で試験施工開始 高速道路では，ベルギー (1981)，フランス (1983)，イタリア (1986) で初の試験施工

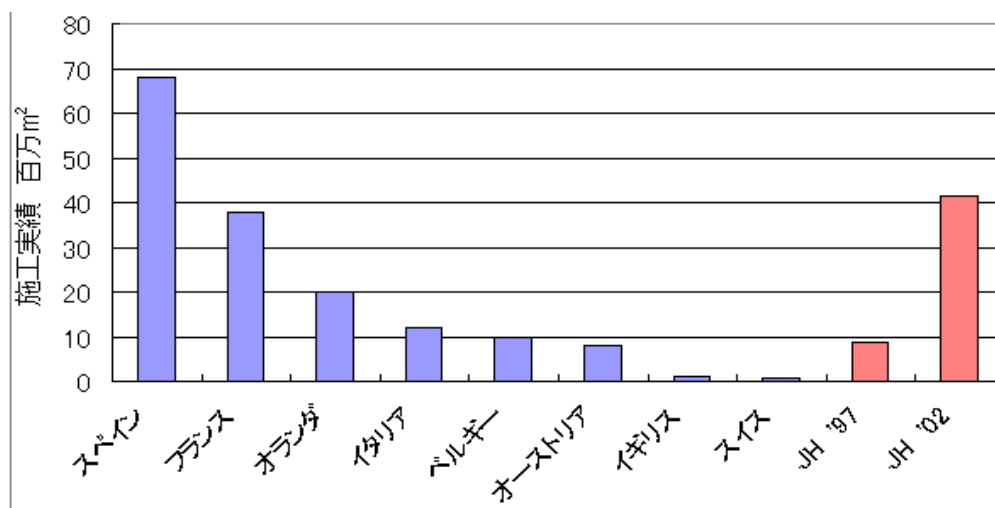


図 2-11 欧州主要国におけるポーラスアスファルトの施工実績
(1997 年時点 JH 調べ)

その後，欧州では多くの国でポーラスアスファルトの本格的な採用が行われ，1997 年時点ではスペインとフランスが積極的に採用していたことが判る（図 2-11）．

ポーラスアスファルトを導入した各国では、湿潤路面におけるハイドロプレーニング現象の発生防止、水はねの抑制や、夜間のレーンマークの視認性向上等を期待し、これらの効果を挙げている一方、懸念される混合物の耐久性に関しても、工夫を行ってきた。例えば、ドイツではポーラスアスファルトに用いるバインダーとして、ゴム系あるいは樹脂系の改質材（SBR、SBS、EVA 等）を4%程度添加した改質アスファルトを使用することに加え、アスファルト量を増加させる目的で舗装用の繊維も使用している。他国でも概ね似た状況にあり、特に重交通路線では改質アスファルトを採用し、その改質材としては、高温域の耐流動性から低温域のひび割れ抵抗性までアスファルトの性状を強化できる SBS が主流となっている。日本でもこの頃にはポーラスアスファルトの研究が盛んに行われるようになり、欧米への調査団の派遣等を通じた情報収集も行われ、採用に向けた取組みに生かされることになった¹⁷⁾。

このように、他のアスファルト混合物にはない機能が評価され、広まりを見せてきたポーラスアスファルトだったが、1990年代に入り、欧州ではこの舗装が平地部から山岳部の道路に拡大するに従い、幾つかの課題が挙げられるようになった。フランスにおいては、冬期の道路管理上における問題が議論となり、年間の降雪日数50日を越える区間への適用を行わない方針が打出された¹⁸⁾。その理由は、ポーラスアスファルトは熱伝導率の関係で路面の温度低下が大きく、密粒舗装に比べ路温が0.5℃程度低くなるため、路面への積雪が溶けにくい傾向になること、また、凍結防止剤がポーラスアスファルトの混合物内に浸透・流出してしまうことで、その効果が低下するというものであった¹⁹⁾²⁰⁾。また、オーストリアにおいては、チロル地方の中心都市インスブルックとイタリアのドロミテ側を結ぶ高速道路のブレンナー峠付近において、冬期のチェーン通行によるポーラスアスファルトの骨材飛散が問題となった。日本においても、この冬期の路面管理と舗装の耐久性という点で、欧州と同様の懸念が抱かれていたが、その実際は第3章で後述することとする。

以上の課題から、フランスを始め、ポーラスアスファルトに積極的だった国々は採用の拡大に慎重な姿勢を取ることとなり、近年はポーラスアスファルトよりも耐久性の高い、ドイツで開発された碎石マスチック混合物を表層に好んで使用する傾向にある。但し、オランダだけは現在でもポーラスアスファルトを積極的に採用しており、日本と並びこの舗装に関しては世界のリーディングカントリーとして、実績を積み重ね研究開発に勤しんでいる。オランダが一貫してポーラスアスファルトを標準的な表層用混合物として位置付けている理由としては、交通事故対策よりもむしろ交通騒音の低減効果に期待する所が大きい。オランダの道路行政を管轄する運輸水利省（Ministerie van Verkeer en Waterstaat）によれば、自国の特徴として、狭い国土に多数の幹線道路網があり、主要道路の交通量が非常に激しく、沿線の環境問題として自動車騒音が取り立てられていることが、ポーラスアスファルトを全面的に採用する理由であるとしている²¹⁾。そのため、ポーラスアスファルトに関する研究も盛んであり、下層に11/16mmの単粒度碎石を使用し、上層に4/8mmの小粒径碎石を用いた二層式のポーラスアスファルト（Twinlay）を開発し、自動車の走行速度に寄らずタイヤからの発生音の低減効果を高めている²²⁾。

2.3 国内におけるポーラスアスファルトの導入

ポーラスアスファルトが国内で初めて車道に施工されたのは、東京都の環状7号線（1987年）である²³⁾。それ以前の1970年代から、歩道における透水性舗装として、同じ混合物が都内で使用され始め、これは、雨天時の水溜りの防止や地下水涵養が目的であった。近年注目されている保水性舗装や遮熱性舗装等、環境に関する技術は、東京都土木研究所（現、土木技術支援・人材育成センター）がリードしてきており、ポーラスアスファルトに関しても先駆的な存在である。なお、東京都の場合は、沿道の環境対策として導入を行っていることから、その名称を「低騒音舗装」としている。

高速道路においては、1989年に東北道（本宮～二本松）で初の実道試験を実施している。当時の呼び名は排水性舗装であり、この試験では、密粒やギャップ粒度混合物で使用されていた改質アスファルトが使用されたが、翌年に施工された北陸道（西山～柏崎）では、チェーン等による損傷が懸念される地域であったことから、当時まだ珍しい高粘度改質アスファルトが開発・試用された。

欧米ではストレートアスファルトを用いたポーラスアスファルトもいまだに珍しくはないのだが、日本の高温多湿な気象条件と重交通あるいはチェーン等の装着といった交通特性から、従来の舗装用に製造されていた改質アスファルトでは高速道路における耐久性確保が難しいことが試験工区の追跡調査結果から判明した。この課題に対して、国内のバインダーメーカーでは、更に改質材の添加量の多い高粘度改質アスファルトが本格的に開発され始めた²⁴⁾。このことが、ポーラスアスファルトの耐久性を飛躍的に高め、全面採用するに至った大きな要因であり、また欧米にはない日本独自で開発した技術で、世界でも稀に見るポーラスアスファルトの成功を収めることができた重要なポイントとなった。本論では、第3章「高機能舗装の本格導入」で詳しく述べることにする。

2.4 高速道路における導入検討

2.4.1 試行導入の概要

JHでは、高速道路にポーラスアスファルトの導入を検討するに当たり、過去二年間の試験施工を通じた知見を基に、混合物の暫定的な配合設計法と施工方法を記載した「排水性舗装施工要領（案）」を1991年に作成し、これに基づき、この年から1993年に掛けて全国の高速道路で試行検討を行った。検討対象として選定した区間は、東北道から九州道までの計15路線で107箇所にあんだ。1箇所当りの舗設延長は100～900mと短い、地域条件として設計要領で区分される一般地域と準摩耗地域を、交通量については軽交通から重交通まで、幅広い条件を網羅していた。これらの箇所については、配合粒度や使用材料の実績を把握し、これを基に「排水性舗装設計施工要領（案）」を1994年に発行するとともに、施工後の追跡調査を実施し、隣接する密粒舗装との比較で供用性状の分析評価を行った。

2.4.2 供用性状の調査結果

1991～1993年に掛けての試行導入箇所の追跡調査結果を以下に記載する。

まず、わだち掘れについてであるが、図2-12にはポーラスアスファルト（以下、高機能舗装）と密粒舗装の施工後5年間で比較した結果を地域別に示している。これを見ると、一般地域における高機能舗装のわだち掘れは48ヶ月時点で平均7mm程度と密粒（約11mm）に比べ非常に低い値に留まっている事が判る。積雪寒冷地域においては冬期のチェーン規制により高機能舗装のわだち掘れ進行量は一般地域より大きいものの、密粒と同等以下には収まっている。

次に、高機能舗装の透水機能の経年変化を追跡した結果を図2-13に示すが、一般地域では透水時間の低下は少ないが、積雪寒冷地域では、タイヤチェーンによる骨材飛散の影響で透水機能の低下が顕著に現れていることが判った。

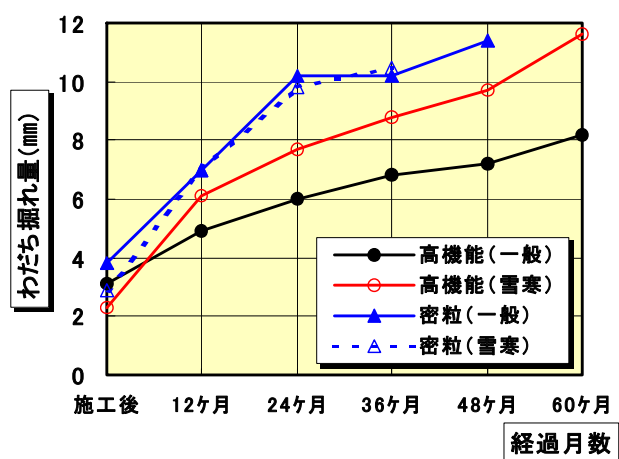


図2-12 試行箇所のわだち掘れの推移

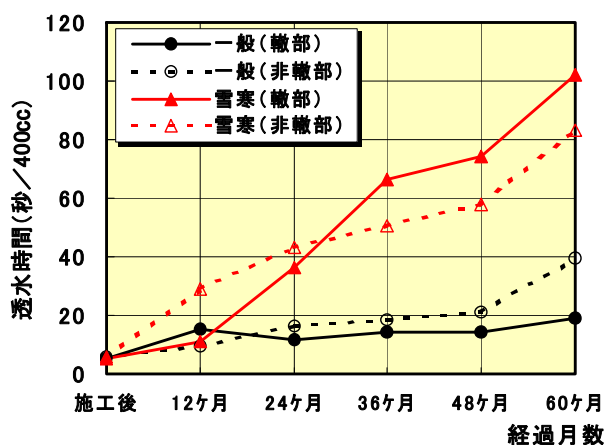


図2-13 試行箇所の現場透水時間の推移

表 2-4 には、最も注目されていた交通事故の低減効果を示した。これは、1989 年度～1992 年度に高機能舗装を施工した箇所で、施工前の 1 年間の総事故件数が 6 件/km 以上、かつ雨天時の事故がそのうち 50%以上を占めるという、いわゆる事故多発地点の交通事故データを調査した結果であり、対象は 36 箇所あった。これを見ると、高機能舗装施工前 1 年間の総事故数が 425 件あったのが、施工後 1 年間では 137 件と 68%も減少していた。このうち雨天時に限って見ると、事故件数は 78%も減少していることが判明した。また、平面線形の良い直線部であっても高機能舗装施工後の事故件数が大きく低下している点は驚きを持って評価された。

表 2-4 試行箇所における高機能舗装の事故低減効果

	調査 箇所数	延長 (km・車線)	総事故件数			雨天時の事故件数		
			施工前	施工後	増減	施工前	施工後	増減
全 体	36	25.0	425	137	(-68%) ▲288	350	77	(-78%) ▲273
* 直線部	9	5.3	81	26	(-68%) ▲55	59	8	(-86%) ▲51

*) 直線部とは、平面曲線半径が 5,000m以上（換算含む）の箇所である。

ここでは、雨天時の 1 年間の事故件数が 59 件から 8 件に減少した。

すべり抵抗については、写真 2-4 に示す J H 試験研究所（現、高速道路総合技術研究所。以下、NEXCO 総研）が保有する大型の測定車を用いた湿潤路面上でのすべり摩擦係数 μ (80) で評価しているが、異なる舗装区間での実測結果を図 2-14 に示す。これを見ると、高機能舗装は、それまで事故多発区間に用いられてきたギャップ舗装と同じく、高いすべり摩擦を確保していることが確認された。



写真 2-4 すべり摩擦測定車

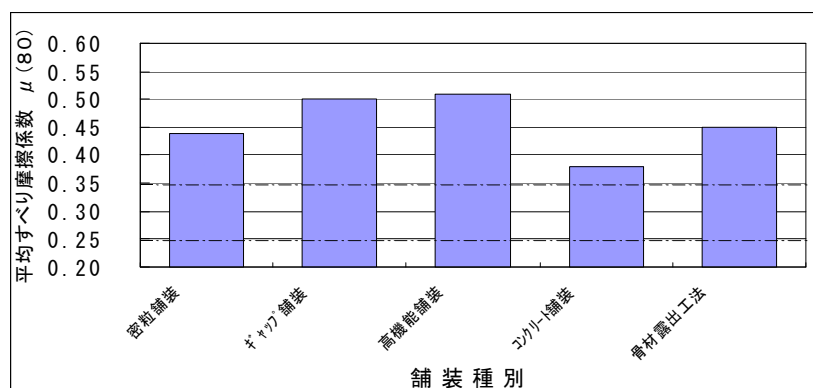


図 2-14 舗装種別によるすべり摩擦の違い

最後に騒音低減機能であるが、高機能舗装は凹凸のある路面（粗いマクロテクスチャー）と混合物内部の空隙により、交通騒音の発生源の一つである車両のタイヤと路面の間に挟まれた空気が破裂することで生じるタイヤ発生音を大きく減少させることが、諸外国を含め過去の経験から知られているが、この試行箇所での測定結果を図 2-15 に示す。これによると、多少のばらつきはあるものの、隣接する密粒舗装区間と比べ、路肩部での測定で概ね 3dB 程度の交通騒音の低減機能があり、3 年程度までその効果が持続できていることが確認された。なお、この 3dB の低減効果とは、交通量が半減、あるいは音源からの距離が 2 倍になるか、または、高さが約 1.5m のしゃ音壁を設置したのと同等の効果に相当する。

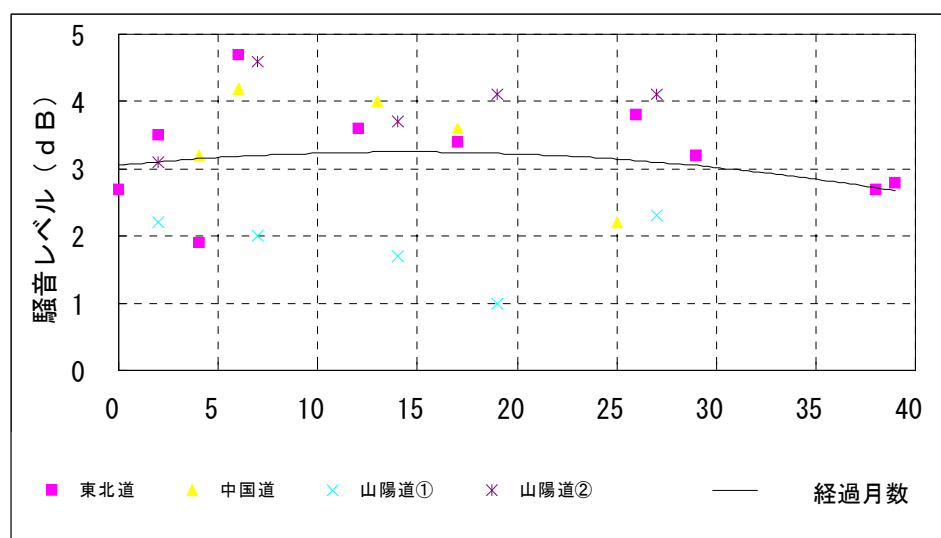


図 2-15 密粒舗装と比較した高機能舗装の減音効果

以上が、全国で実施した試行箇所の追跡調査結果であり、耐流動性やすべり摩擦が従来の密粒舗装よりも高く、透水や騒音低減機能について、積雪寒冷地では経年的な低下が見られるものの、概ね良好な結果が得られた。また、最大の注目点であった交通事故対策としての有効性は、期待以上の効果が得られていることが判明した。

2.5 第 2 章のまとめ

日本の高速道路において、ポーラスアスファルトを導入した背景としては、以下の点が挙げられる。

- 1) 高速道路の利用台数、特に過積載車を含む大型車の増大とともに、路面に見られる流動わだち掘れが顕著になり、舗装の修繕回数が増加する問題が深刻化した。
- 2) 同じ時期、交通事故も増加の一途を辿り、第二次交通戦争と呼ばれるほどに社会問題化した。また、高速道路の利用者からも、わだち掘れでハンドルが取られる、あるいは雨の日にスリップしやすいという苦情が多く寄せられた。

- 3) 高速道路管理者は、交通事故対策の一環として、アスファルト種別や混合物粒度の変更等、わだち掘れの抑制に努めていたが、大きな成果を上げるには至らなかった。
- 4) そこで、欧州を中心に広まっていた、ポーラスアスファルトに着目し、高速道路における試用を検討することにした。

このような中、1991年から全国の高速道路において大規模なポーラスアスファルト（高機能舗装）の試行導入が始まり、これらの追跡調査の結果、以下の供用性状が確認できた。

- 1) 高機能舗装のわだち掘れ進行量は、密粒舗装と比べ 1/2 程度であり、耐流動性に優れた混合物であることが確認できた。
- 2) 透水機能や騒音低減機能についても、少なくとも施工後数年間に渡り持続性が発揮できていることが確認できた。
- 3) ただし、積雪寒冷地においては、冬期のタイヤチェーン使用により、わだち掘れ量が大きくなり、また透水機能の早期低下も見られた。
- 4) 最も重要な交通事故の低減機能については、高速道路で非常に大きな効果を発揮することが確認できた。
- 5) すべり摩擦に関しても、他の舗装路面に比べ高い値が得られた。

以上、幾つかの課題はあるものの、概ね良好な結果が得られたことから、高速道路の事故多発区間において、それまで使用してきたギャップ舗装のひび割れが問題視され始めてきたこともあり、これに代わってポーラスアスファルトを「高機能舗装」の呼び名で積極的に採用する方針が打出された。

また、この試行導入を通じ判明した技術的課題に対しては、引続き研究開発を進めていくことになった。これに関しては、次章で詳しく述べることにする。

参考文献

- 1) (財) 高速道路調査会：世界の高速道路，pp. 158-164，1990.
- 2) 建設省道路局監修，道路経済研究所道路交通経済研究会編集：道路交通経済要覧平成元年度版，pp. 80-89，1990
- 3) 土屋雅彦，岩田久志：舗装の修繕工法の実態分析，日本道路公団試験所報告(1986年度)，pp. 54-74，1987
- 4) (財) 高速道路調査会：東名高速道路(改築) 重交通路の舗装に関する検討報告書，pp. 26-29，1990
- 5) 吉岡正道他：名神・東名における舗装の流動対策の一手法，日本道路公団技術情報 No. 90，pp. 39-43，1987
- 6) 国土交通省道路局ホームページ：道路整備効果事例集，道路関連データ，2004 年度版日本の道路（出典元資料 警視庁），2012
- 7) 第 118 回国会：予算委員会第八分科会第 2 号議事録，1990
- 8) (財) 高速道路調査会：舗装の評価に関する研究報告書(3)，pp. 103-105，pp. 170，1988
- 9) 渡辺真吾：高速道路における交通事故と安全対策(下)，高速道路と自動車，Vol. 36, No. 5，pp. 47，1993
- 10) 渡辺真吾：高速道路における交通事故と安全対策(上)，高速道路と自動車，Vol. 36, No. 4，pp. 23，1993
- 11) 竹本恒行：環境負荷低減対応型の舗装機能に関する基礎的研究，学位論文，pp. 3-23，2010
- 12) Szatkowski W. S. and Brown J. R. : Design and Performance of Pervious Wearing Course for Roads in Britain 1967-1976, Highways and Road Construction International, 1977.
- 13) The Department of Transport: Design Manual for Roads and Bridges Vol. 7, Department of Transport, 1994
- 14) NCHRP: Open-Graded Friction Courses for Highways, National Co-Operative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice Number 49, 1978
- 15) Combelles F., Faure B., Lucas J. and Verhée F. : L'expérience française, Journal ROUTE et des AERODROMES, Spécial printemps, pp. 11-19, 1990
- 16) Khalid H. and Perez Jimenez F.K. : Performance assessment of Spanish and British Porous Asphalt, Proc. Performance and Durability of Bituminous Materials Symposium, University of Leeds, pp. 137-157, 1994.
- 17) 藤波督，原山猛夫：排水性舗装に関する欧州調査結果，高速道路と自動車，Vol. 33, No. 12，pp. 64-72，1990
- 18) SETRA: NOTE D' INFORMATION, ENROBES DRAINANTS, CHAUSSEES DEPENDANCES, 100, pp. 1-10, 1997
- 19) Köster H., Drainasphalt: VSS-Forschungsauftrag Nr. 10/82, IVT (Institut

- Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau) Nr. 85, 1990
- 20) Nicholls J.C.: Review of UK Porous Asphalt Trials, TRL Report 264, Transport Research Laboratory, Crowthorne, 1996
- 21) 日本道路公団技術部道路技術課：平成 15 年度海外技術導入講演会より，2005
- 22) Bochove G.G.: Twinlay, a New Concept for Porous Asphalt, Proc. Eurasphalt & Eurobitume Congress, pp. E&E. 7.187, 1996
- 23) 達下文一，森尚之，阿部博：低騒音舗装の試験施工と結果（上），舗装，pp.3-8，1988
- 24) 村山雅人，伊藤達也，羽入昭吉，菅野 宏：高粘度改質アスファルト開発経緯と研究開発の現状，改質アスファルト第 21 号，pp.8-19，2003

第3章 「高機能舗装」の本格導入に向けた検討と効果の検証

3.1 「高機能舗装」の適用拡大

1991 年～1993 年に掛けて全国の 15 路線で試行導入を行った高機能舗装（当時の呼び名は排水性舗装）の追跡調査結果から、交通事故対策として非常に優れた効果を発揮することが期待できたことを受け、JHでは、この舗装をサグや反向点および右カーブの追越区間で事故多発地点となっている箇所へ積極的に導入していくこととした。また、交通事故対策は、交通量の多い路線から実施することが重要かつ効果的との考え方から、交通量（全車）が 20,000 台/日以上 of 区間から適用することとした。

ただし、橋梁部については、この時代、まだ床版防水工が施工されていなかったことから、高機能舗装を採用した場合の雨水の床版への浸透と、特にそれによるコンクリート床版の劣化損傷を懸念し、適用範囲から除外した。また、積雪寒冷地での耐久性やフランス等で指摘されている冬期路面の管理上の課題が確認不十分として、雪氷対策上問題とならない箇所に適用を限定していた。

この間にも、交通事故の低減効果については、継続的な調査が行われており、2008 年時点で再度、降雨時の交通事故の多い箇所（調査対象 213 箇所）における高機能舗装導入前後 1 年間の比較して見たところ、図 3-1 に示すところ、降雨時の交通事故が約 85%も減少しており、ここでも非常に優れた効果が発揮されていることが確認できた。

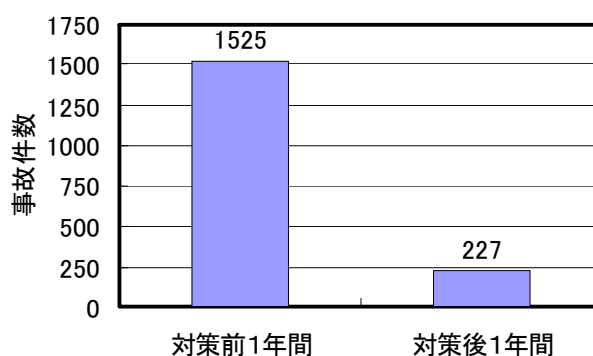


図 3-1 高機能舗装導入前後の事故件数の比較

また、高機能舗装施工後どの程度の期間、この事故低減効果が持続するのか、という点を全国 110 箇所の追跡調査で見たが、図 3-2 に示すように、施工直後の 1 年間のみに限定されるのではなく、5～6 年を経てもなお、施工前に比べ低い事故率に留まっていることが確認された。

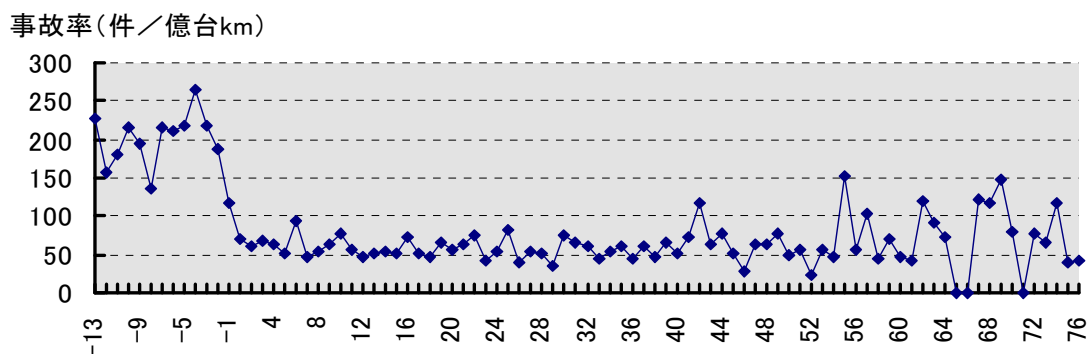


図 3-2 高機能舗装の事故低減効果の持続性

以上の結果を踏まえ、高機能舗装が高速道路の走行安全性に大きく寄与し、また、雨天時の水はね抑制や夜間時のレーンマーク視認性の向上など、走行時の快適性も大幅に向上でき、事実、施工した区間の交通事故を低減し、利用者から走りやすいとの好評を博していることから、1998年、高速道路の表層用混合物として、ついに全面的に採用することを決定し、対外的なPRを行うことを目的に、JHにおけるその名称を「高機能舗装」とすることにした。

なお、特殊箇所での扱いは以下の通りとした。

- 1) 従来、橋梁部の床版防水は、表層（4 cm）およびレベリング層（3.5 cm）という構成のアスファルト舗装で行う思想で設計していたが、高機能舗装になった場合、レベリング層のみで防水することとなり、その効果が大幅に低下する。そのため、橋梁部に高機能舗装を行う場合は、床版防水工をレベリング層下面に必ず施工する。
- 2) 鋼床版上はたわみがコンクリート床版より大きく、たわみにより追従性の高い混合物で設計しているが、まだ高機能舗装での実績がないことから、試験施工を通じ、供用性状を確認しながら展開を図っていく。
- 3) これまでの施工実績から、積雪寒冷地における課題や疑問点として以下の事項が挙げられている。
 - ・一般地域に比べてわだち掘れ進行量が大きい。
 - ・チェーンや除雪作業に起因すると思われる機能低下が早い。
 - ・降雪初期段階から路面が白くなりやすい。
 - ・気温が低い場合、除雪作業が困難な傾向がある。
 - ・凍結防止剤を散布した直後は高空隙のため塩分濃度が小さくなる懸念がある。そのため、これらの課題の解決を目的とした試験施工を実施し、早急に路面管理方法を確認する。なお、その間は暫定的に空隙率を低めに設定し、耐久性を確保した配合などを検討することとする。
- 4) トンネル内の舗装については、トンネル内の視環境に関する実験結果を踏まえ、照明効果に与える影響を検討後に、採用を行う。
- 5) 軟弱地盤など沈下が予想される箇所で高機能舗装を施工した場合、舗装体内から雨水を排水することが出来ないため、暫定舗装期間はこれを使用せず、軟弱地盤の沈下収束時に完成断面とする際に、高機能舗装を適用する。
- 6) SA・PA内の駐車場舗装についても、雨天時の水はね防止等、利用者サービスの向上を図る目的で高機能舗装を適用するが、大型車駐車マスについては、油もれによるカットバック、トラックの長時間駐車に伴う舗装の変形などの損傷が懸念されるため、半たわみ性舗装とする。

この本格的な導入を前に、使用する材料や配合、舗装構造の検討を行い、高機能舗装の耐久性確保に向けた対策を講じた上で、全国的な展開を開始することにした。

3.2 耐久性確保に向けた取組み

3.2.1 骨材

a) 摩耗わだち掘れ（骨材飛散）対策

密粒に代表される連続粒度の混合物とは異なり，使用骨材の約 8 割を粗骨材が占める高機能舗装では，混合物の耐久性を確保する上で，これまで以上に粗骨材の品質が重要となる．特に，粗骨材同士が点接着となることから，交通荷重下での骨材の割れを防ぎ，また，冬期のタイヤチェーンによる骨材飛散に抵抗する観点から，骨材の材料規定のうち，すりへり減量を重視した検討を行った．

図 3-3 は，1997 年度の高速道路における舗装工事で使用された骨材のすりへり減量の実績である．ほとんどが 20%以下で，平均では 12.7%であった．図 3-4 は，すりへり減量とラベリング摩耗量の関係を示している．このデータはすべて同一空隙率で作成した供試体を用いた室内試験の結果であるが，すりへり減量が大きい粗骨材を用いると，混合物のラベリング摩耗量も比例的に増加する傾向が得られた．したがって，高機能舗装の課題であるタイヤチェーンに対する損傷を抑えるには，すりへり減量の小さい粗骨材を用いることが重要であり，この知見を踏まえ，すりへり減量の規定値を，従来の 30%以下から 20%以下に変更することにした．この規定値の設定に関して，従来の密粒混合物ではラベリング摩耗量として 0.7 cm^2 以下を目標値としており，これを満足する値として，図 3-4 の回帰直線から，高機能舗装に用いる場合は，粗骨材のすりへり減量を 20%以下に設定することで，密粒舗装と同等の耐摩耗性が確保できることを期待した．

さらに，摩耗の影響の大きい積雪寒冷地域においては，すりへり減量 15%以下の粗骨材を用いることで，耐摩耗性をより改善できるが，これを満足する粗骨材の入手が不可能な地域もあるため，この 15%は基準値とせず，望ましい値という表現を付した．

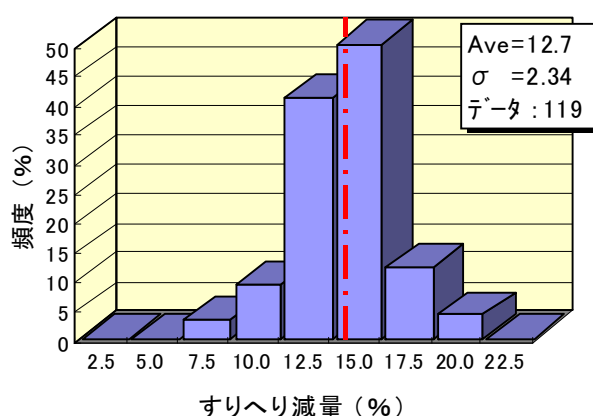


図 3-3 使用骨材実績（すりへり減量）

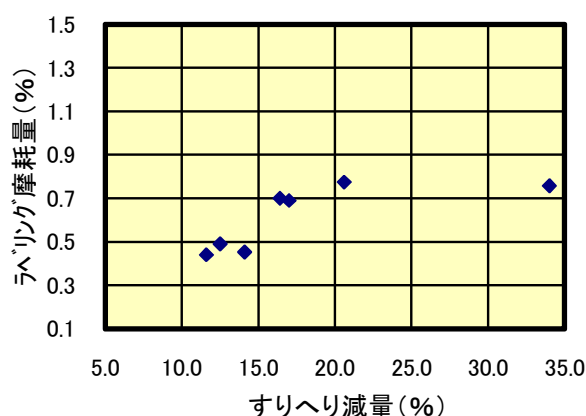


図 3-4 すりへり減量と摩耗わだち掘れの関係

b) 機能性の確保

既往の研究結果から、粗骨材の形状は高機能舗装の機能性に影響を及ぼすことが判っており、混合物の貯留排水能力や騒音低減機能を確保するため、粗骨材の形を示す指標である細長・偏平石含有量について、検討を行った。

JHの舗装工事で、1997年度に高機能舗装用混合物に使用した細長・偏平石含有量のデータを図3-5に示す。平均値5.0%，最大値15.9%となっており、従来の基準値25%に比べると、実態として、かなり良質な粒径の材料が使用されていることから、基準値を15%以下に見直しを図った。これは、1990年代初めから試行導入を進めてきた中で、高機能舗装には立方体に近い粗骨材を使用すべきとの声に答える形で、全国の採石場では整粒機やバーマックの破砕機が次々に導入され、製品としても通称「特6」といわれる粒形の良い6号砕石が、通常の6号とは別単価で市場に出回り始めたことを反映した結果であった。

なお、細長・偏平石含有量と透水係数の関係については、図3-6に示すとおり、明確な関係は認められないが、細長・偏平石含有量が10%以下となると透水係数が大きくなる傾向が得られた。

また、骨材のみをマーシャルランマーで突固めし、その粒度変化(破砕状況)を調べたところ、細長・偏平量とこの破砕率には、非常に高い相関が見られた(図3-7)。

これは通念通り、細長・偏平な骨材ほど交通荷重により破砕し細粒化しやすいことを示している。以上の結果を踏まえ、JHの技術基準である設計要領には、「現地における粗骨材入手事情によっては、細長・偏平石含有量10%以下の材料を用いることが望ましい。」と記述することにした。

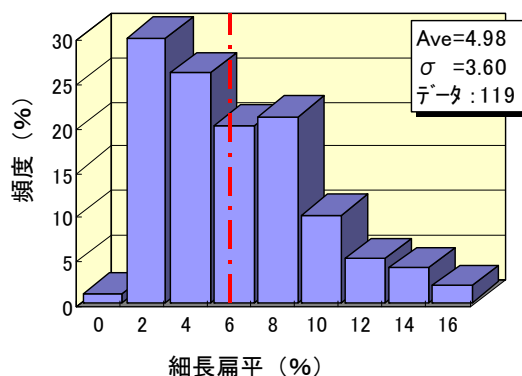


図3-5 使用骨材実績(細長・偏平量)

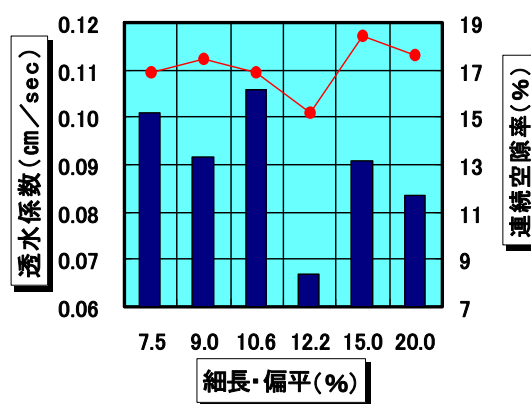


図3-6 細長・偏平量と透水係数の関係(定水位)

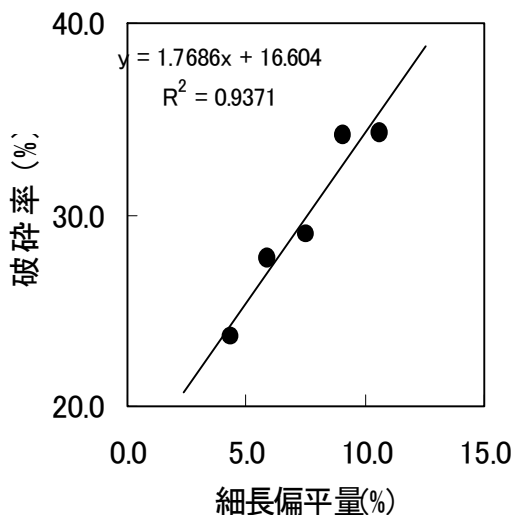


図3-7 細長・偏平量と骨材破砕率の関係

3.2.2 バインダ

第2章で述べたように、高機能舗装の導入に合わせ、国内のバインダメーカーから、それまでの改質アスファルトの接着力を大きく高めた高粘度改質アスファルトが製造されるようになり、高機能舗装の最大の課題であった耐久性の確保が期待できるようになった。しかしながら、全国的な展開を図るには、積雪寒冷地域における冬期低温下での耐久性にまだ懸念があり、事実、試行採用した路線のうち、北陸道など一部ではチェーン規制時の骨材飛散が発生していた。そのため、さらに接着力を高めたバインダを開発する必要がある一方、従来の試験法ではその評価が適切に行えない、という問題点も明らかになったため、試験法の開発も行うこととした。

高機能舗装は、高空隙率で粗骨材量が8割以上を占める配合のため、使用するアスファルトの性能が舗装の耐久性に大きな影響を持つ。この高機能舗装用として開発された高粘度改質アスファルトは、改質材である熱可塑性エラストマ（SBS：スチレン－ブタジエーン－スチレン共重合体、以下、ポリマ）の添加量が、従来の改質Ⅱ型などに比べると非常に多く、そのミクロ構造も全く異なる改質アスファルトである。すなわち、写真3-1に示すように、バインダ中の主骨格を形成する連続相は、改質Ⅰ型やⅡ型ではアスファルトであるのに対し、高粘度改質アスファルトではポリマ自身がそれを形成している。

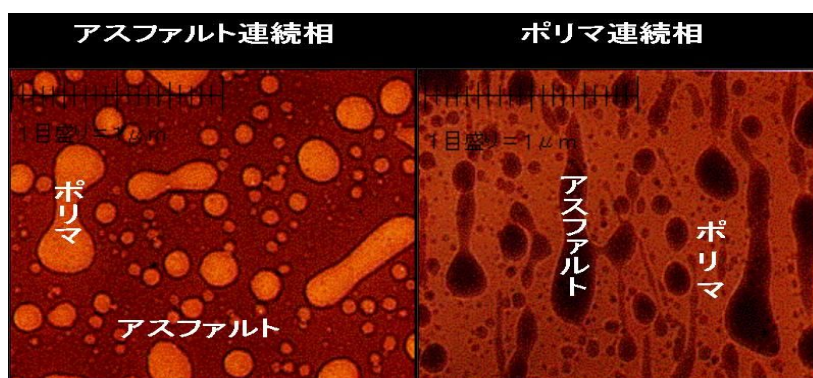


写真 3-1 改質アスファルトの顕微鏡写真

このようにミクロ構造が従来の改質アスファルトとは異なる、高粘度改質アスファルトの性能を評価する方法は、従来の改質アスファルトおよびストレートアスファルトなどに採用されてきた物理試験だけでは、その適用範囲に限界があり、必ずしも混合物性状や供用性状を適切に評価できないことが課題として挙げられていた¹⁾。写真3-2に、その代表的な問題例として指摘されている、タフネステナシティ試験を示す。

この写真でわかるように、改質Ⅱ型までのアスファルト連続相では正常な試験ができるが、高粘度改質アスファルトのようにポリマ連続相へと相転換したバインダは、ポリマの凝集力が非常に強いため、試験中に試料を引き抜く際、テンションヘッドから試料が剥がれてしまい、真値が測定できないという問題があった。

改質Ⅱ型

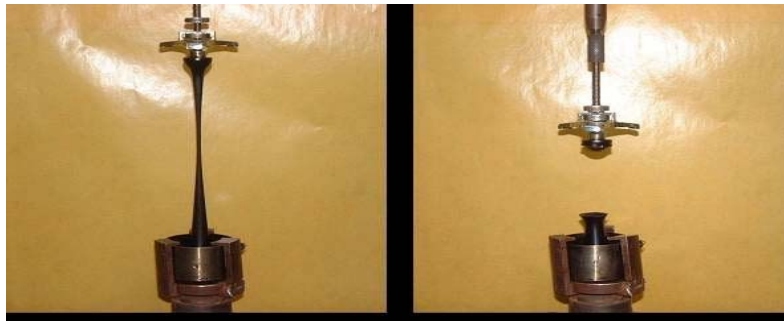
高粘度改質アスファルト
(テンションヘッドから試料が剥脱)

写真 3-2 タフネス・テナシティ試験の様子

このような強度と伸びを測定する方法としては、引張り試験あるいは曲げ試験が一般的である。アスファルトの場合、これらの物性は低温で測定され、低温引張りでは、米国の SHRP 計画で立案された DTT(Direct Tension Test)²⁾ などがあるが、再現性などの測定精度に難点があるため、比較的測定が簡便で、再現性の優れた曲げ試験の採用を検討することにした。

バインダの曲げ試験とは、羊羹状の供試体を作製し、写真 3-3 に示すような状態でバインダ単体による曲げ試験を行い、その結果得られる特性値を評価するものである。試験条件は表 3-1 に示すとおりである。

表 3-1 バインダ曲げ試験の試験条件

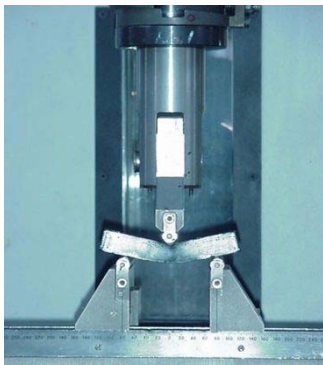


写真 3-3 バインダ曲げ試験状況

項 目	試 験 条 件
供試体寸法(mm)	長さ 120×幅 20×厚さ 20
スパン長(mm)	80
載荷速度(mm/min)	100
載荷方式	2 点支持中央載荷
養生時間(h) [※]	5 時間以上

[バインダ曲げ試験の特性値]

記録された変位—荷重曲線より、最大荷重およびその時の変形量を求め、式(1)、式(2)より最大曲げ応力および最大曲げひずみを算出する。

$$\text{最大曲げ応力 } (\sigma) = \frac{3 l}{2 b h^2} \cdot P \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{最大曲げひずみ } (\varepsilon) = \frac{6 h}{l^2} \cdot d \quad \text{式 (2)}$$

ここに、
 b : 供試体の幅 (mm)
 h : 供試体の厚さ (mm)
 l : 供試体支点間長さ (mm)
 P : 最大荷重 (N)
 d : 最大荷重時の変形量 (mm)

この試験から得られる特性値としては、次に示す2種類の指標を設定した。

- ・曲げ仕事量 (MPa)
 - = 最大曲げ応力×最大曲げひずみ
- ・曲げスティフネス (MPa)
 - = 最大曲げ応力／最大曲げひずみ

曲げ仕事量は、最大荷重に達するまでの応力とひずみの積（曲げ仕事量）である。曲げ仕事量は、改質アスファルトが曲げ破壊するのに要するエネルギー量であり、バインダが有する強度と変形追従性の双方を同時に評価できると考えられる。すなわち、曲げ仕事量が多いバインダは破壊エネルギーが大きく、それが小さいバインダはわずかのエネルギーで破壊するといえる。舗装用バインダとしては、当然、このエネルギーの大きいものが望まれる。

曲げスティフネスは、最大荷重に達するまでの応力とひずみの比であり、曲げ仕事量の逆数で表される。曲げスティフネスは、一般的な意味では、“かたさ”というような感じの言葉として使われるものであるため、低温域のバインダの脆さを表す指標であると考えられる。すなわち、低温域で曲げスティフネスが小さいバインダは、低温でも柔軟性(伸び)を有しているため破壊しにくく、それが大きいバインダは脆いため破壊しやすいといえる。舗装用バインダとしては、低温域でも柔軟性のあるこの値の小さいものが望まれる。

この曲げ試験に加え、数多くのバインダ性状試験を実施し、混合物性状との関係について検討したところ、低温(-20℃)で行うバインダ単体の曲げ試験の有効性が確認された²⁾。

次に、この統一条件下で市販バインダの曲げ試験を行うとともに、同一骨材・配合で作成した最大粒径13mmの高機能舗装用混合物(目標空隙率20%)を用いて、骨材飛散抵抗性と関連のあるカンタプロ試験を実施した。なお、改質Ⅱ型を含めた評価を行うため、カンタプロ試験の試験温度は0℃とした。

この結果、図3-9に示すように、改質Ⅱ型、一般用高粘度、寒冷地用高粘度と、ポリマ添加量が増えるに連れ、曲げ仕事量は大きく、また、スティフネスは小さくなり、カンタプロ損失率は低下したことから、従来から改質

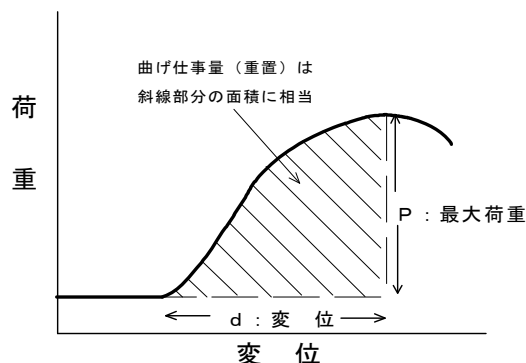


図3-8 曲げ仕事量の定義

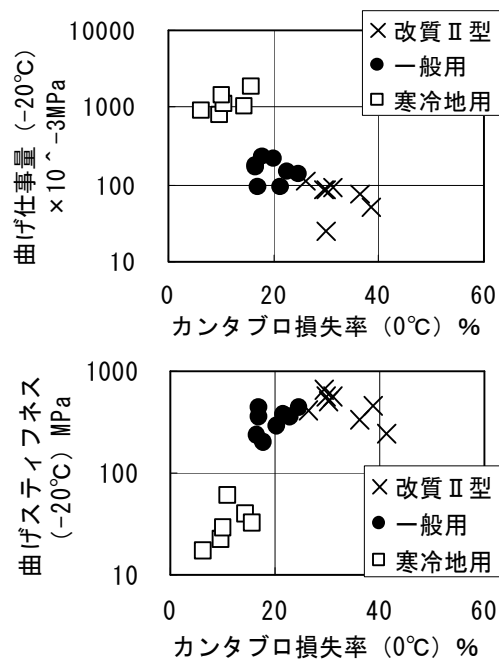


図3-9 カンタプロ損失率と曲げ仕事量及びスティフネスの関係

アスの評価に用いられてきたタフネス・テナシティ試験等に比べ、曲げ試験は混合物性状との相関性が高く、また一義的な関係にあることがわかった³⁾。

次に、室内試験で得られた結果の確認および、改質アスファルトの性能と高機能舗装の供用性状の関係を調べるため、NEXCO 総研が所有する回転式舗装試験機による走行試験（以下、シミュレータ試験）を実施した。ここで表層に使用したバインダは、ベースのストレートアスファルトに添加するポリマ量を変化させて作成した5種類のモデルバインダであり、混合物は前述の室内試験と同様の配合で作成した。シミュレータ試験は、高温時（約 50℃）の流動試験と低温時（0℃）のチェーンによる摩耗試験の2条件で実施した。

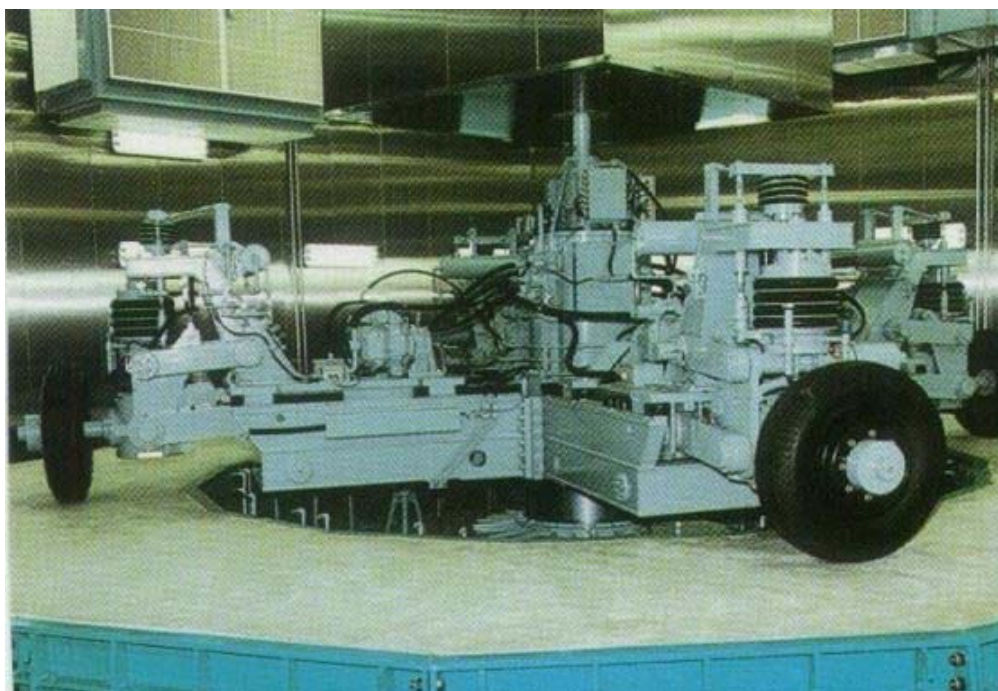


写真 3-4 回転式舗装試験機（シミュレータ）

このシミュレータ試験で得られた、バインダ種別および曲げ試験の値と、発生した流動わだち掘れ量との関係を図 3-10 に、摩耗わだち掘れ量との関係を図 3-11 に、それぞれ示す。これにより、流動・摩耗ともにポリマ量が増加するに従い、表層混合物の耐久性が向上し、また、室内試験同様、曲げ試験の結果とも関係が強いことがわかった。今回の試験では、低温での曲げ試験値は、耐摩耗性だけでなく耐流動性にも関係が見られた。これは、市販の高粘度や今回作成したモデルバインダに使用されているポリマ(SBS)が持つ特性により、添加量の増加に伴いバインダの低温脆性が改善されると同時に、高温域での粘弾性も増す作用があるためと思われる。

以上、これまでその性状を適切に評価できなかったポリマ添加量の多い改質アスファルトについて、低温での曲げ試験を行うことで、その性状の把握が可能となり、高機能舗装用混合物の性状との相関性が高いことから、改質アスファルトを適切に評価するとともに、高機能舗装の耐久性を高めるために必要なバインダ性状を明らかにすることができるようになった。

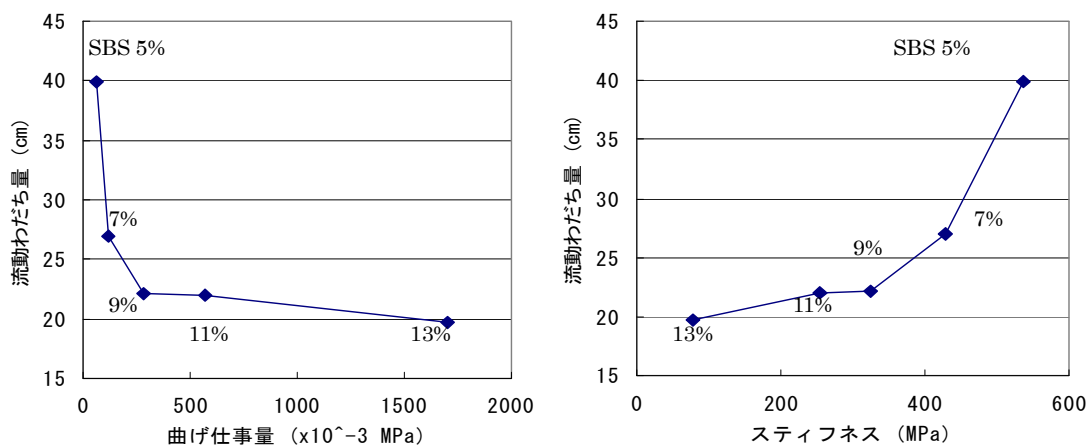


図 3-10 シミュレートによる流動わだち掘れと曲げ仕事量及びスティフネスの関係

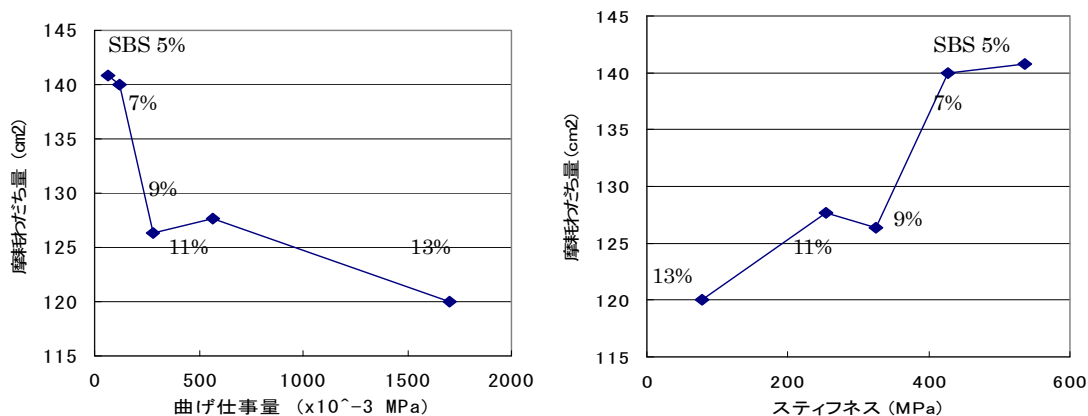


図 3-11 シミュレートによる摩耗わだち掘れと曲げ仕事量及びスティフネスの関係

また、このバインダの曲げ試験は、図 3-12 に示すように、改質Ⅱ型以上の市販改質アスファルトの性状の違いも評価できることがわかった。

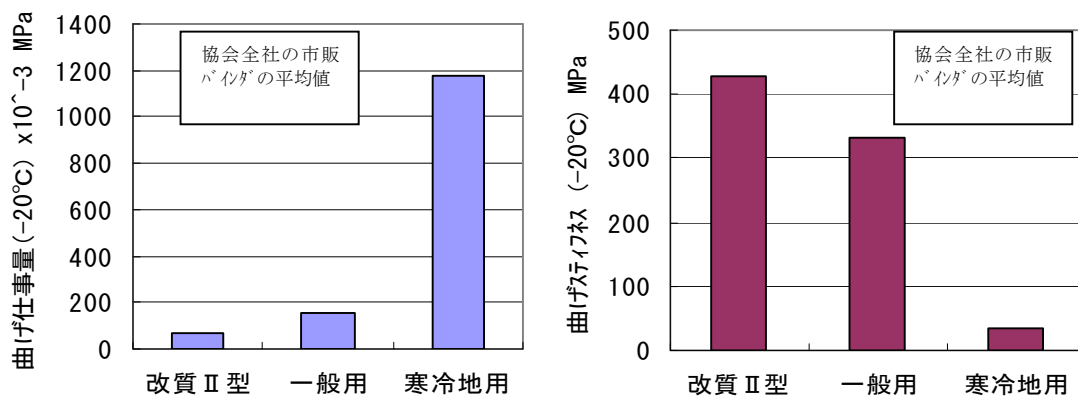


図 3-12 市販改質アスファルトのグレードと曲げ仕事量及びスティフネスの関係

これらの検討成果を踏まえ、改質アスファルトの性状評価に、バインダの曲げ試験法を採用するとともに、高機能舗装に使用する高粘度改質アスファルトと、寒冷地用の高粘度改質アスフ

アルトの規格を設計要領に定め、後述する地域区分に応じて、この２種類を使い分けることで、耐久性の確保を図ることとした。

表 3-2 高機能舗装用バインダの品質規格⁴⁾

項 目	試験法	高粘度改質アスファルト	
		一般用	寒冷地用
針入度 (25℃) 1/10 mm	JISK2207	40以上	
軟化点 ℃	JISK2207	80以上	
薄膜加熱質量変化率および針入度残存率 %	JISK2207	0.6以下および65以上	
曲げ仕事量 (20℃) ×10 ³ Mpa		100以上	750以上
曲げスティフネス (20℃) Mpa		450以下	80以下

3.2.3 混合物

a) 地域区分の設定

高機能舗装の導入初期段階では、舗装体としての耐久性と確保可能な空隙率とのバランスから、空隙率 20%を目標とし全国一律の配合諸元で設計・施工していたが、積雪寒冷地における耐久性確保の観点から、目標空隙率を 17%程度とする混合物を設定するとともに、その適用する地域についても 10 年間平均最大降雪深 1.0m 以上の地域で適用することとした（図 3-13）。また、目標空隙率を 17%に設定している積雪寒冷地の混合物について、北海道、東北、北陸における施工実績を元に粒度範囲の見直しも行った。

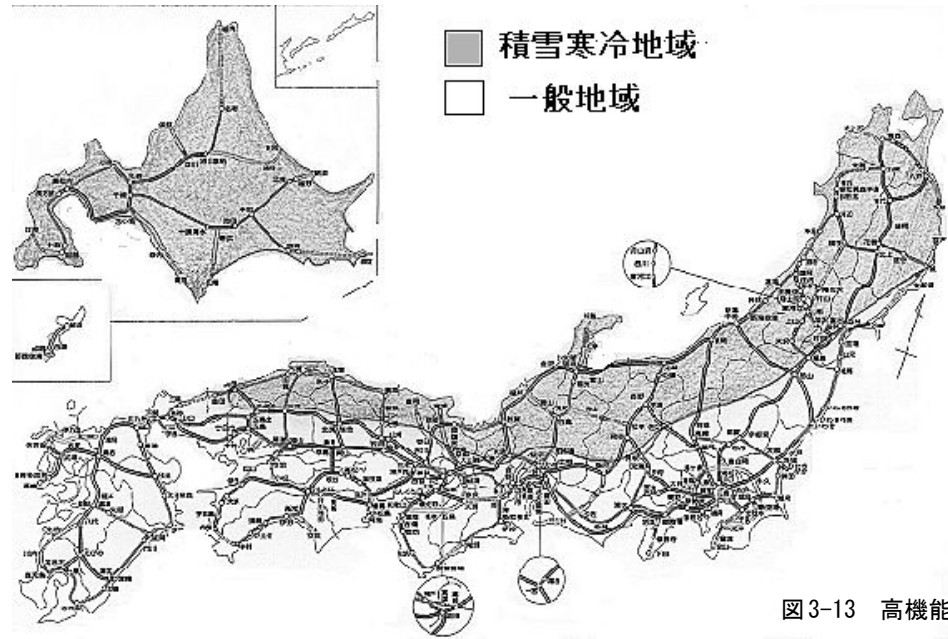


図 3-13 高機能舗装の配合設計の地域区分⁵⁾

b) 基層用混合物の見直し

基層用混合物は、従来の密粒混合物を表層としていた時代には、直接雨水にさらされることがなかった。しかし、高機能舗装用混合物を表層の標準混合物としたことで、基層用混合物についても、表層を浸透してくる雨水の影響が懸念される状態になったことを受け、混合物の剥離抵抗性や水密性を強化する必要性が生じた。これに関し、室内試験の結果、空隙率が小さくなるに従って透水係数が小さくなる傾向が確認されたことから、基層用混合物の空隙率、飽和度、骨材間隙率などのバランスが取れた配合とするため、配合基準の見直しを行った。表 3-3 は、基層のマーシャル試験基準値を示しており、高機能舗装を表層に用いる場合は空隙率を低くした基層用混合物を採用することにした。

表 3-3 基層用混合物のマーシャル基準値⁵⁾

項 目	基 層	
	密粒舗装用	高機能舗装用
安定度 kN (kgf)	6 (600) 以上	
フロー値 1/100cm	15~40	
空隙率 %	3~6	3~5
飽和度	65~80	70~85
水浸マーシャル残留安定度 % 60℃ 48 時間	75 以上	
マーシャル基準密度に対する 現場締固め度 %	96 以上	

なお、混合物の水密性を向上させるには設計空隙率を小さくすれば良いが、空隙率が小さい混合物は、交通荷重によるオーバーコンパクションにより流動しやすくなる傾向があると言われている。この点を検証するため、NEXCO 総研の回転式舗装試験機を用い、基層の動的安定度（以下、DS）を変化させた際の表層の流動わだち掘れ量を検討した。この試験結果から、図 3-14 に示すように、DS の高い高機能舗装を表層に使用しても基層の耐流動性が不十分な場合、層全体のわだち掘れ量が大きくなることがわかった⁶⁾。つまり、高機能舗装本来の耐流動性を発揮させるためには、基層部にある程度の耐流動性を確保する必要がある。この検討結果を踏まえ、高機能舗装を用いる場合の基層用混合物は、水密性を高めると同時に、所定の耐流動性を確保するため、これまでの配合実績を考慮し、DS を 1,000 回/mm 程度以上を確保することを配合設計時の目標にした。

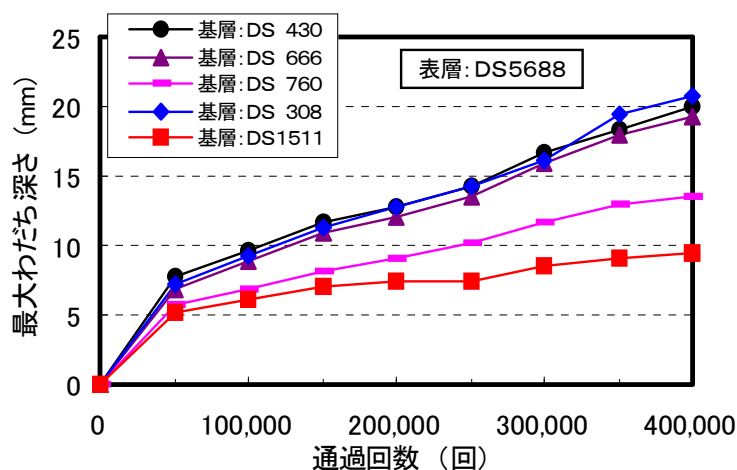


図 3-14 基層の DS と流動わだち掘れの関係

3.2.4 舗装構造の見直し

高機能舗装は雨水を表層内に貯留しその下層面を流下させるため、今まで以上に下層に用いる混合物には高い水密性が求められる。図 3-15 は、下層用アスファルト混合物の水密性を評価するため、マーシャル供試体で行った加圧式透水試験（JIS A 1218 準拠³⁾：圧力 500KPa）の結果⁶⁾である。これにより、混合物の空隙率と透水係数の間には相関関係があり、下層の水密性を向上させるためには設計空隙率を小さくすることが有効であることがわかる。この知見を踏まえて、適用箇所別に高機能舗装の下層に用いる混合物の検討した結果を以下に述べる。

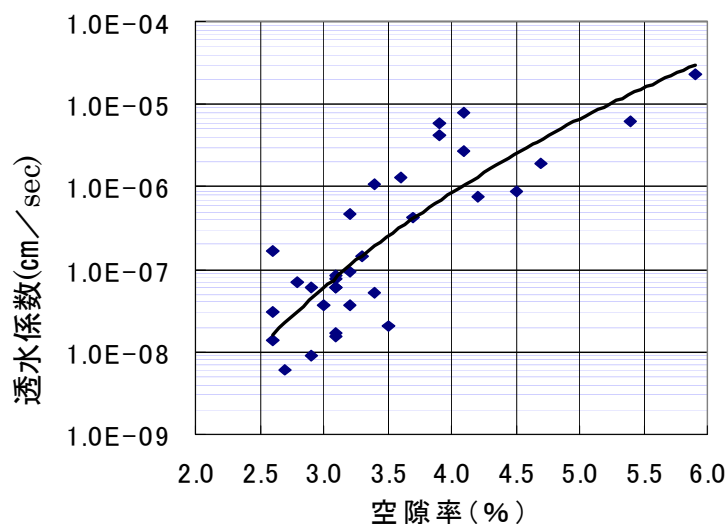


図 3-15 アスファルト混合物の空隙率と透水係数の関係

a) 土工部

3.2.3 節で述べたとおり、JHでは平成 11 年 7 月の設計要領改訂版⁵⁾ から土工部において高機能舗装を用いる場合は、表 3-3 に示す水密性を高めた基層用混合物を適用することになっている。

b) 橋梁部

① 防水対策の必要性

高速道路の橋梁で最も多いコンクリート床版は、その破壊形態として、車両の繰返し载荷による押抜きせん断疲労が多く、特に、雨水等の水分がひびわれに浸透した場合、浸透水のポンピング作用によるコンクリートのすりみがき現象が加わり、その疲労強度は、乾燥状態の 1/10～1/100 に低下することがわかってきた⁷⁾。

そのため、橋梁全体の耐久性を向上させるためには、床版への水分の浸透を防止することが重要であると考え、JHでは1994年以降、床版全面に防水層を施工する方針を打ち出した。ここで防水層とは、防水シートや吹付樹脂などの防水材と接着材で構成されるものである。

橋面舗装については、車両の走行性や安全性を確保することや床版を交通荷重や気象作用から保護するという重要な役割を持つ。従来の橋面舗装は表層にも密粒混合物を使用し、床版への水分の浸透を防水層とともに抑制していた。しかし、表層に高機能舗装を採用したことにより、図 3-16 に示すように防水効果を持つ層はレベリング層のみとなったことから、床版への水分の浸透量が増加することが懸念された。

そのため、橋梁部の舗装には土工部より高い防水機能が求められ、また高機能舗装採用後も床版上の舗装が従来と同等以上の防水効果を保持するために、レベリング層にはこれまでの混合物より水密性に優れた混合物種別の選定が必要となった。

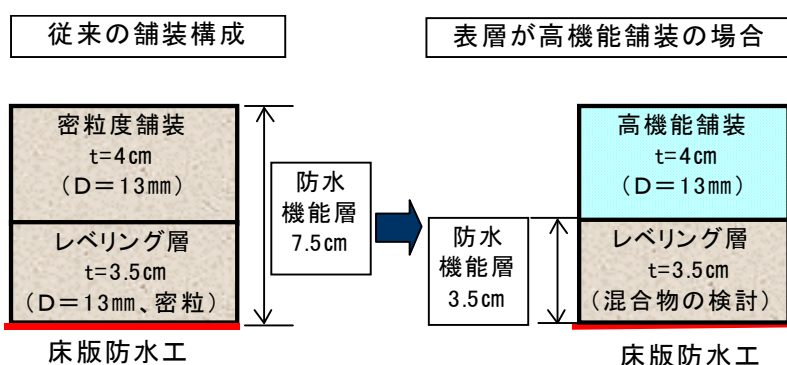


図 3-16 橋梁部の舗装構成

② 混合物種別の検討

この高機能舗装下のレベリング層に要求される性能を持ちうる混合物として、碎石マスチックアスファルト混合物（以下、SMA）に着目し検討を行なった。

SMA は、ドイツで耐摩耗対策用として開発されたもので、表 3-4 に示すように粗骨材量が 70～80%、石粉が 8～13%程度を占める不連続粒度の加熱アスファルト混合物である。粗骨材量が密粒度混合物に比べて多いため、粗骨材の噛み合わせ効果から耐流動性が期待できる一方、図 3-17 に示すとおり、粗骨材間隙部分を、細骨材・アスファルト・石粉・繊維で形成される多量のマスチックモルタル分により充填することで、空隙率を小さく設定できるため、ドイツで評価されている耐摩耗性に加え、たわみ追従性や水密性にも優れている混合物である⁸⁾。

表 3-4 各種混合物の比較

混合物種別	SMA (13mm)	密粒混合物	高機能舗装
使用アスファルト	ストレートアスファルト or 改質アスファルト	ストレートアスファルト or 改質アスファルト	高粘度改質 アスファルト
添加材	植物繊維等	無	無
2.36mmpass	20～35	35～50	10～21
74 μ mpass	8～13	4～8	2～7
空隙率	2～4%	3～5%	20%
アスファルト量	6.5%程度	5.8%程度	5.0%程度
石粉量	10%程度	5%程度	4%程度
動的安定度 (回/mm)	1,000～1,500 (ストアス)	500～1,000 (ストアス)	3,000以上 (高粘度)

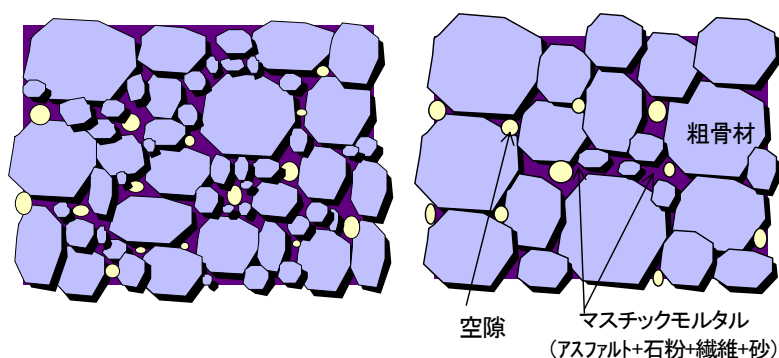


図 3-17 密粒混合物と SMA の構造模式図

そこで、SMA の防水効果を検証するため、加圧式透水試験（JIS A 1218 準拠）を実施し、SMA と密粒混合物の透水係数を比較した結果⁹⁾を図 3-18 に示す。図中の供試体は、いずれも最大粒径 13mm のマーシャル供試体であり、SMA のアスファルト量は 6.7%（空隙率 3.0%）、密粒混合物は 5.5%（空隙率 5.0%）である。設定できる空隙率が違うことから、透水係数は明らかに SMA の方が小さく、供試体厚さが 3cm と薄いものでも密粒度混合物より有利であることから、SMA を採用することで水密性を向上させることが期待できる。

また、橋梁上の舗装においては床版の変形に対応できるよう、混合物にはたわみ追従性も求められる。このたわみ追従性の評価には、2点支持1点载荷方式の曲げ試験（舗装試験法便覧 3-7-5）で評価を行った。図 3-19 は低温時（-10℃）における混合物の曲げ破断ひずみの試験結果¹⁰⁾であるが、SMA は標準の基層混合物にくらべ、良好なたわみ追従性を有していることがわかる。

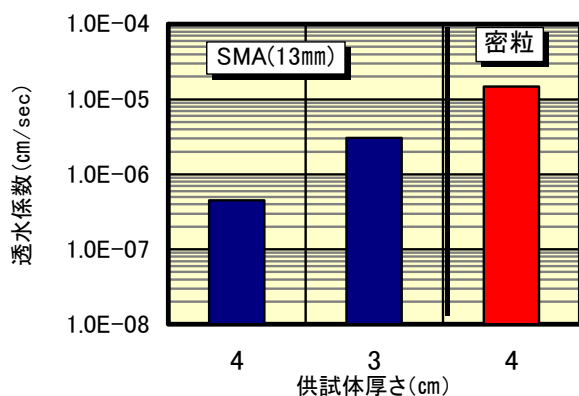


図 3-18 混合物種別と透水係数⁹⁾

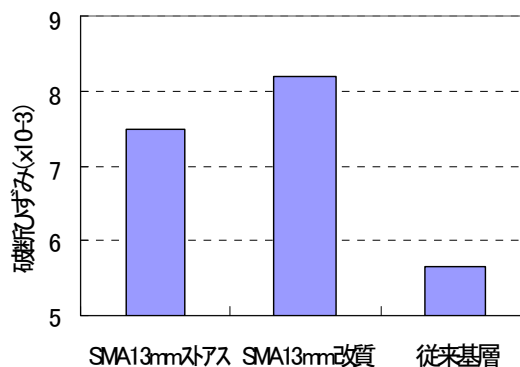


図 3-19 混合物種別と曲げ破断ひずみ¹⁰⁾

③ 層厚の検討

橋面舗装の設計厚は 7.5cm (内、表層厚 4 cm) であるが、実際は床版の不陸によりレベリング層厚を 3.5cm 確保できない部分が存在することが多い。この場合、施工も困難であるし防水効果も著しく低下する恐れがあることから、SMA の現地適用性を検討するため、全国 15 箇所の橋梁上において試験施工を行なった際、異なるレベリング層厚を設定し、現場での施工性と品質に与える影響を検討した。

その結果、舗装厚が薄くなると、混合物の温度低下が急激に早くなり、転圧時にタイヤローラーに混合物が付着し、舗装表面の剥がれが生じたり (写真 3-5)、所定の締固め度を得ることが非常に困難なケースが報告された (図 3-20)¹¹⁾。

そこで、この試験施工の結果を踏まえ、床版の仕上りが最も高くなる部分でも従来のレベリング層の設計厚 3.5cm を確保できるよう、新設橋梁のレベリング層厚を 6cm に変更することにした。



写真 3-5 レベリング層における混合物の引擦り

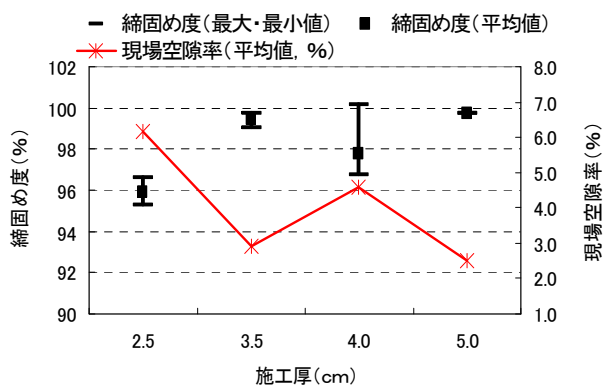


図 3-20 SMA (13mm) の施工厚と締固め度・空隙率¹¹⁾

C) トンネル等その他区間

高速道路のトンネル内などで用いられている連続鉄筋コンクリート版（以下、CRC）をベースとしたコンポジット舗装では、表層のリフレクションクラック発生防止と、表層が高機能舗装になったことによる CRC への雨水の浸透防止を目的とし、CRC 上に中間層を設けることとした。

このコンポジット舗装の中間層に求められるリフレクションクラックの抑止効果について、試験を行なった結果を図 3-21 に示す。

これは、回転式舗装試験によりリフレクションクラック発生のシミュレーション試験（下層部に高弾力性舗装を設置し、軸荷重 2.5 トン、走行速度 10km/h、路温 0℃の条件で実施）を行ったもので、基層部の混合物種別ごとのリフレクションクラックが発生した通過走行輪数を示している。この試験中、基層なしと基層（3cm）についてはポットホールの発生も確認された。混合物種別に着目すると SMA やグース混合物（いずれも 2cm 厚）は標準の基層混合物より舗装厚が薄いにもかかわらずクラックの発生が遅く、クラック以外の損傷も発生しなかったことから、リフレクションクラックの防止効果があることがわかった。なお、前述の SMA 試験施工の検討結果を踏まえ、コンポジット舗装の中間層に求められる性能を現場で確実に発揮させるためには、最大粒径 13mm で厚さ 4 c m の SMA を採用することにした。

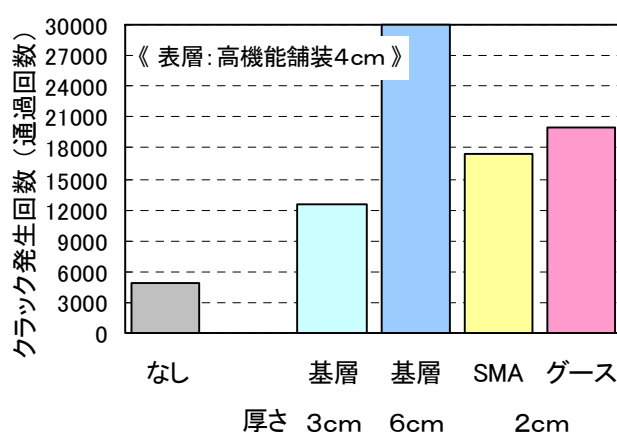
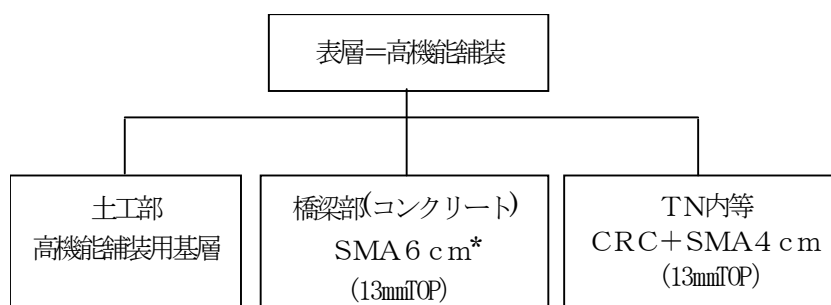


図 3-21 基層部の混合物種別とクラック発生回数⁶⁾

以上、道路構造物に応じて、高機能舗装を適用する際の舗装構成をまとめると、以下のようになる。



* 鋼床版はグースアスファルト 3.5cm

3.3 導入効果の検証

先に述べた各種の対策を講じた上で、高機能舗装を、高速道路の標準混合物として表層に全面採用したが、その効果について、長期追跡調査の結果を踏まえ、以下に検証を行った。

3.3.1 走行安全性および快適性の向上

高機能舗装は、従来の表層用混合物とは異なり、混合物中に有する高い連続空隙率により、雨水を路面から舗装内に浸透させることが可能であり、そのため雨天時の高速走行で問題となっていたスモークングによる後続車両の視認性の悪化や、ハイドロプレーニングによる操縦安定性の消失とスリップ事故の発生に対し、大幅な状況の改善を図ることができる。欧州でもその効果は評価されており、例えば、英国では、密粒舗装区間に比べ、排水性舗装区間では、トラックの背後 3m の高さで、スモークングを 90～95% も低減することが、TRL の調査で報告されている¹²⁾。また、路面の凹凸（マクロテクスチャー）の大きさから、すべり抵抗が高く、また、車両の前照灯の光が路面で乱反射することで、夜間走行時でもレーンマークが見やすく、対向車からの反射も抑えられるため、走行安全性だけでなく運転のしやすさ（走行快適性）の向上にも大きく貢献する舗装であることが知られている。

a) 視認性の向上と滞水の抑制

「第二次交通戦争」と呼ばれ、多発する交通事故が社会問題化した頃、日本の高速道路における交通事故データ（1998 年分）を分析した結果、以下の特徴が判明した。

- ・ 夜間の死亡事故率は、昼間の約 4 倍
- ・ 雨天時の死亡事故率は、晴天時の約 4 倍

また、密粒舗装を使用していた時代に、高速道路利用者に東名高速の海老名 SA で、大型車を運転するプロドライバーにアンケート調査を行った結果（1986 年）を図 3-22 に示すが、わだち掘れが発生している道路でのハンドル操作の不安定感と、水たまりによる視認性の低下とスリップ事故への不安が、舗装に対する不満の半数弱を占めていたことがわかる¹³⁾。

1998 年以降、高機能舗装を標準的な表層工として展開し始め、全国の高速道路の約 40% の路面が高機能舗装となった 2001 年度末時点で同様の調査を行っているが、舗装に対する意見として上位を占めたものは、わだち掘れに対する不満と（30%）、高機能舗装化の要望（18%）であった。

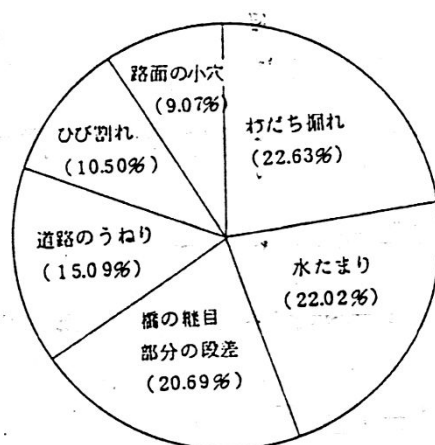


図 3-22 気になる路面の状態
(ドライバーへのアンケート結果)

この他、当時 JH で実施していた「道路モニター」の評価もあり、その結果を図 3-23 に示す。これは、毎年 20 名程度の高速道路利用者にモニターになってもらい、そのモニターが高速道路を利用した際に感じた意見や要望等を報告してもらうものである。この調査でも、わだち掘れ (20%) に加え、雨天時の路面滞水 (20%) と視認性 (11%) に対する不満が多かった¹⁴⁾。

写真 3-6 は、手前側が高機能舗装を施工した区間、奥側が従来の密粒舗装区間だが、両者には、雨天時の路面滞水やスモーキングの発生で歴然とした差があり、道路利用者からは、高機能舗装化の要望が強く寄せられていた。

運転手を悩ませていた雨天時の視認性について、高機能舗装を施工した際の効果を検証した事例が幾つかあるが、ここでは、水はねの程度を実験で比較した調査結果を紹介する。これは、京奈和道路建設時に試験走路に高機能舗装と密粒舗装を舗装し、その路面上に人工的に水膜を作り、総重量 20 トンの大型貨物車走行時の水跳ね状況をビデオ撮影した実験である (写真 3-7)¹⁵⁾。

この解析によれば、水跳ねが生じた最小水膜厚さは、走行速度によって変化した。時速 80km/h 以上になると、密粒舗装の場合、路面に水膜厚さが計測されない程度の湿潤路面でも水跳ねが観測されたが、高機能舗装では 0.5~1.0mm 以上の水膜がないと水跳ねが生じない結果となった。

路面に生じる水膜は、視認性のみならずスリップ事故にも大きな影響を与える。過去の実験結果を元に考察を行った文献¹⁶⁾によれば、タイヤ摩耗率 80% の車両で、時速 100km/h で走行した際、路面の水膜が 1.2~1.5mm あると、ハイドロプレーニングによる横すべりまたは縦すべりが発生するとしている。

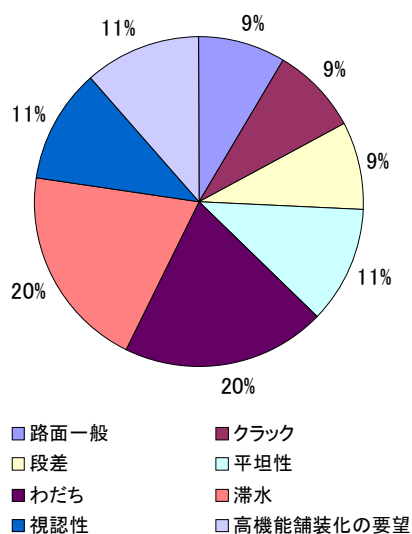


図 3-23 道路モニターの声（舗装関連）



写真 3-6 雨天時の視認性の違い
(手前が高機能舗装、奥が密粒舗装)



写真 3-7 水跳ね実験の様子

また、図 2-14 で、舗装種別によるすべり摩擦の違いを示したが、密粒舗装に比べすべり摩擦抵抗が大きい高機能舗装は、80km/h 走行の場合で車両の制動停止距離が約 10m 短くなる計算結果もある。

さらに、雨天時に生じる路面上の水膜（浮き水）について検討を進める。路面排水型の表層である密粒舗装の場合、仮に道路勾配がなければ、降雨直後から浮き水が発生するが、高機能舗装の場合は、混合物の空隙中に一旦雨水を蓄え、貯めた雨水を排出することになる。この排水機能を計算するには、雨水が舗装体内を飽和するまでの「貯留量」と「流出量」に分け、これらを別々に算出する必要がある。

まず、高機能舗装において浮き水を出さずに貯留できる降雨量を、次式を用いて算出する。

$$\frac{r}{10} = \frac{\lambda D f_s}{100}$$

r : 降雨量(mm), λ : 空隙率(%), D : 舗装厚(cm)
 f_s : 全空隙率に対し、雨水が実際に入る空隙の割合（貯留有効空隙比*）
 ※ f_s 値は、既往の研究¹⁷⁾を参考に 0.5 と仮定

また、流出量の算出に関しては、高機能舗装の場合、空隙径が大きい流れは乱流となり、透水係数はダルシー則（ $v = k i$ ）のような動水勾配に対して一定値とはならないことが知られている¹⁾。その場合、動水勾配と平均流速の関係は、個々の舗装に対し固有の定数（ α , β ）を用いて、 $i = \alpha v + \beta v^2$ で表される。その結果、透水係数は、

$$k = \frac{1}{\alpha + \beta v} \text{ で表され、透水係数と動水勾配の関係は、 } k = \frac{2}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta i}}$$

で与えられ、動水勾配によって一定値にはならない。この固有定数（ α , β ）は、舗装体内を水平方向に流す透水試験により求めることができ、ここでは各混合物の室内透水試験の値を用いて計算をした。なお、流出量の算出には次式を用いた。

$$\frac{L r_e}{3600 \times 10} = D k i$$

L : 排水距離(cm), r_e : 降雨強度(mm/h)

上記の理論計算値を検証するため、自動降雨装置を用いた大型供試体による実測試験を行った¹⁸⁾。表 3-5 に示す 7 種類の供試体を用意し、まず、乾燥状態の供試体を勾配 0% で静置し、貯水量を測定し、次に、空隙内が飽和し浮き水が発生する降雨強度を把握した（写真 3-8）。ここで、計算と実験で得られた双方の値の比較を行い、その関係を見るため、貯留量（勾配 0%）を図-3-24（左）に、絶対量が大きく比較のし易い勾配 6% での流出量を図 3-24（右）に示す。

表 3-5 降雨実験の供試体条件

No	粗骨材種	空隙率	舗装厚	勾配
①	6号(13-5mm)	15%	4cm	0% 2% 4% 6%
②		17%		
③		20%		
④		23%		
⑤		20%	5cm	
⑥	6号单粒(13-8mm)	17%	4cm	
⑦	小粒径(10-5mm)	20%		



写真 3-8 浮き水発生時の実験供試体

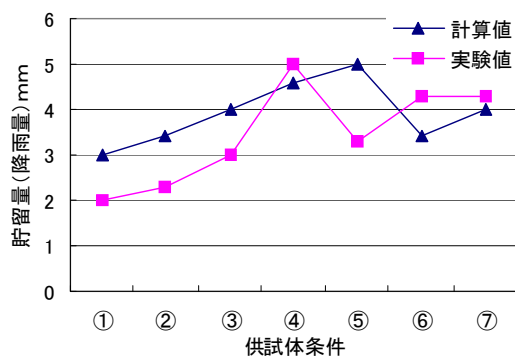


図 3-24 高機能舗装の貯留量と流出量（計算値と実験値の比較）

これより両者には、単粒化⑥や小粒径⑦でバラツキはあるが、全体としては相似形に変化していることがわかる。

この流出量の測定値を、2車線幅（排水距離 7m）に換算し、時間当りの降雨強度として表し、排水距離と浮き水の発生しない限界降雨量の関係を試算した（図 3-25）。計算からは、車線数に係わらず舗装体に貯留可能な雨量は変化しないが、排水可能な流出雨量は舗装の排水距離（幅員）の増加とともに減少する試算となり、この傾向は現地での観察結果と概ね合致したことから、本計算式の妥当性が言える。

前述の降雨実験から、例えば高速道路の標準的な横断勾配である 2% では、2 車線が高機能舗装の場合、図 3-25 から浮き水の出ない降雨強度は、7～8mm/h 程度となるが、これを日雨量で表すと、表 3-6 に示す関係から、概ね 30mm 位の降水量のある日に相当することがわかる。年間の降雨日数は全国平均で 120 日強、そのうち日雨量が 30mm を超える日は、年間で 20 日弱である（図 3-26）。

つまり、機能低下が生じていない新設の高機能舗装の場合、年間の雨天日のうち 100 日程度は、降雨時の路面に水膜が発生することを防ぐことが期待できると考えられ、このことが、高機能舗装が高速道路での走行安全性と快適性に寄与できる大きな要因と思われる。

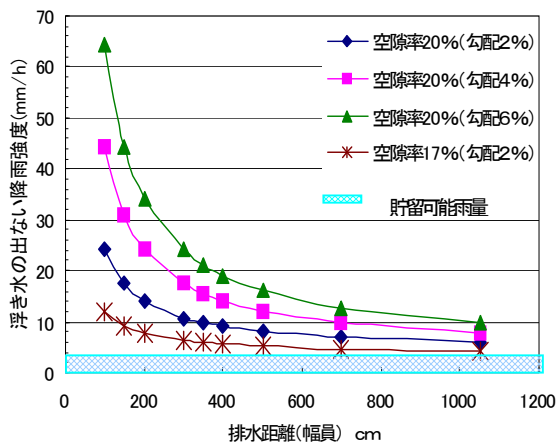
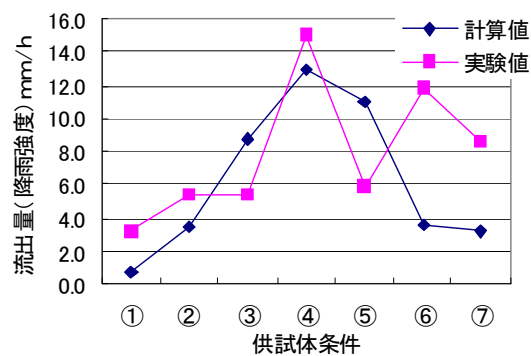


図 3-25 浮き水の発生限界（降雨実験での試算結果）

表 3-6 時間雨量と日降雨量の関係（気象庁）

雨の強さ	時間雨量	日雨量
微雨	1mm以下	5mm以下
小雨	1～5mm	5～20mm
並雨	5mm～10mm	20mm～50mm
大雨	10mm～20mm	50mm～100mm
豪雨	20mm以上	100mm以上

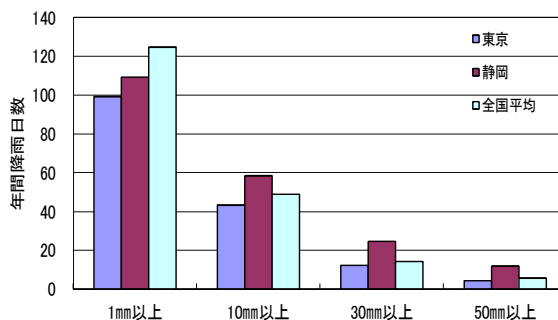


図 3-26 年間降雨日数と日降雨量（気象庁）

b) 騒音低減効果

道路交通騒音の発生源は、エンジン音や車両走行時の風切り音など幾つかあるが、路面とタイヤの溝の間に閉じこめられた空気が圧縮破裂する際に発生するエアポンピングノイズもその一つである。高機能舗装の場合、タイヤが路面に接する際、圧縮する空気は舗装の空隙に逃げることで、エアポンピングノイズに起因する騒音の低減が可能となる。この特性は多くの研究で証明されているが、高機能舗装を導入した区間における実測データからも、交通騒音の低減効果が報告されている。図 3-27 は、密粒舗装区間との比較で、タイヤからの発生音を周波数分析したデータであるが、人間の聴覚に最も敏感な周波数と言われる 1 kHz 帯において、最大で 5 dB 程度の音圧レベルを低減していることがわかる。

東北道や山陽道で実施した現地調査では、路肩部での交通騒音を測定したところ、高機能舗装区間は、隣接する密粒舗装区間に比べ、2～5 dB (A) 程度の減音効果があることが確認され、この効果は、道路交通騒音の予測式に基づいて換算すると、交通量が約 1/2～1/3 に減少した場合、あるいは遮音壁の高さを 2m 嵩上げした場合に相当するものである¹⁹⁾。

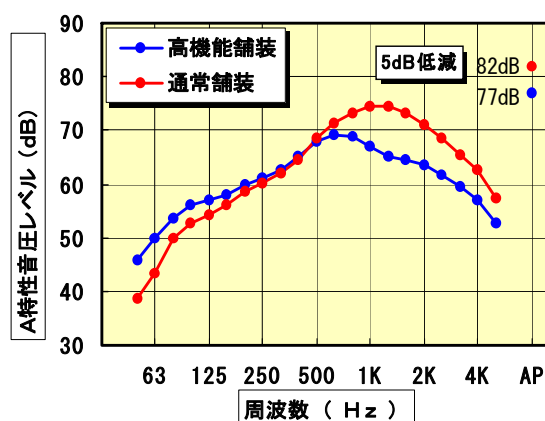


図 3-27 舗装種別による交通騒音特性の違い

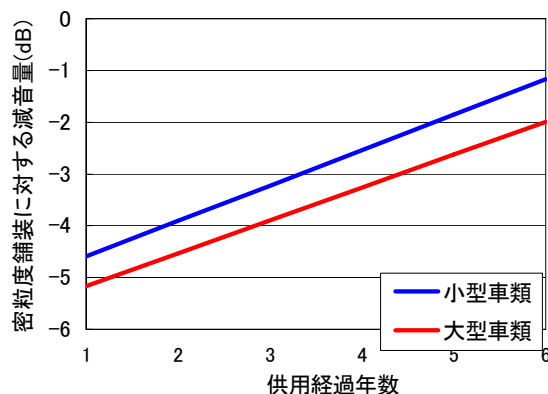


図 3-28 高機能舗装の減音効果の
予測式（日本音響学会）²¹⁾

しかしながら、この優れた減音効果は、高機能舗装の空隙が土砂粉塵等で閉塞する、あるいは車両走行に伴いタイヤと接するわだち部表面の空隙が潰れることに伴い、減少していくことも明らかになった。図 3-28 は、全国的高速道路で施工した高機能舗装区間における追跡調査データを基に、日本音響学会で作成された高機能舗装の減音効果の予測式^{20) 21)}であるが、車種に関係なく供用年数の経過とともに、減音効果は薄れていくことが読み取れる。

騒音低減機能のみならず、排水機能についても同様に経年低下することが、全国で実施した追跡調査の結果から分かっており、その主要因である空隙詰まりを回復する試みも行われてきた。

具体には、図 3-29 に示す高压洗浄車（高压水+吸引方式）を用いて、土砂粉塵等の空隙詰まり物質を除去する方法であり、各地の高速道路での洗浄試験と回復効果の評価、洗浄車の改良を繰返してきたが、以下の結論を得ている²²⁾。

- ・洗浄を実施する箇所の気象・交通条件によって、得られる機能回復効果は大きく異なる。例えば、積雪寒冷地では、摩耗による舗装表面の空隙潰れと、シルト分のように細かい空隙詰まり物質が多いため、機能回復が難しい。
- ・空隙詰まり物質は、舗装表面に近いほど除去しやすく、下部にいくほど除去しづらい。また、路肩部は大きな効果が期待できるが、騒音低減や浮き水の抑制上最も重要となるわだち部は、空隙詰まり物質が繰返し交通で圧密されており、洗浄効果が薄い。

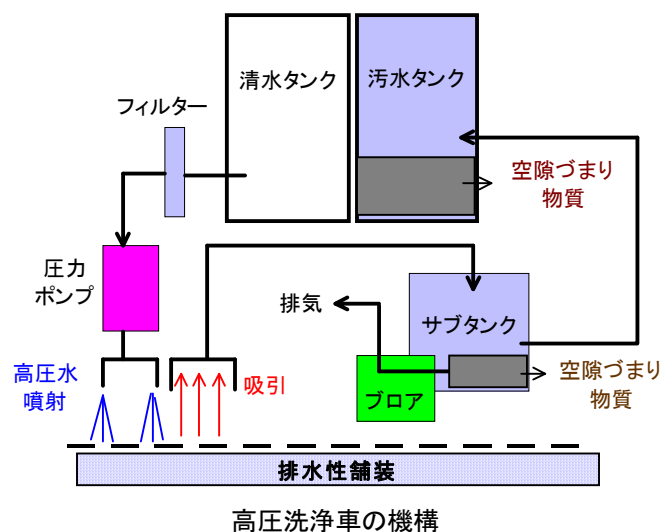


図 3-29 空隙詰まりを除去する高圧洗浄車の仕組み

このように、幾つかの機能面では経年低下が見られるが、一方、高機能舗装を導入した目的である交通事故の低減効果には持続性があることが全国の高速度道路で実施した追跡調査から確認できたことから、交通事故対策として採用している高機能舗装では、機能回復作業を行う必要性は少ないと考える。なお、本件に関しては、第 5 章で改めて詳細に述べることにする。

c) 冬期路面管理

欧州で問題視されている排水性舗装（高機能舗装）の冬期路面管理については、積雪寒冷地を有する日本の高速道路に導入する際にも幾つかの懸念事項があった。その代表的な内容を以下に列記する。

- ① 高機能舗装は、密粒度舗装に比べて、路面温度が低いのではないか？
- ② また、密粒度舗装に比べて積雪時間が長いのではないか？（早く積雪し融け残りが多いのではないか？）
- ③ 凍結防止剤の効果が期待できないのではないか？

そこで、これらの実態を明らかにするため、全国の高速道路において冬期路面実態調査を実施した。本調査は、道央道（札幌）から九州道（八幡）までの14地域の土工部で実施したもので、以下に、調査で得られた主な知見を示す^{2,3)}。

1) 路面温度

図3-30は、降雪時に同一箇所において高機能舗装および密粒度舗装の路面温度を測定した結果である。1℃以上の温度帯（プラスの温度帯）では、温度差のバラツキが大きい。高機能舗装で0.5～1℃低め、全体では高機能舗装で0.2℃低め（ほとんど差がない）となっている。

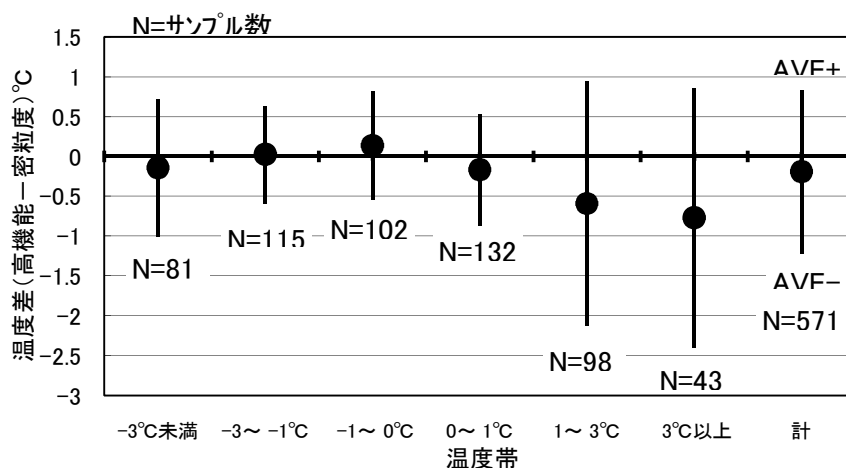


図3-30 温度帯別の路面温度差（密粒－高機能）＜降雪時／土工部＞

2) 路面状態

表3-7および表3-8は、隣接する高機能舗装と密粒舗装において、同じ降雪時に発生した路面状態をクロス集計した結果である。表の右上側は、高機能舗装の方が密粒舗装に比べて路面状態が悪化（路上雪氷が進行）した頻度を示し、左下は高機能舗装の路面状態の方が良好であった頻度を示す。また、太枠内は同一の路面状態が発生した頻度を示す。

表 3-7 路面状態クロス集計（わだち部）

わだち部		高機能舗装									
		乾燥	湿潤	シャーベッ ト	白シャーベ ット	新雪	粒雪	圧雪	氷膜	氷板	総計
密 粒 度 舗 装	乾燥	33							悪化		33
	湿潤	1	297	23							321
	シャーベット		11	87		1		1			100
	白シャーベット		3	1	8						12
	新雪		5			21					26
	粒雪						28				28
	圧雪		5	2				39			46
	氷膜		10	1	1		2		9		23
	氷板	良好		1			1		10	4	16
	総計	34	331	115	9	22	31	40	19	4	605

表 3-8 路面状態クロス集計（非わだち部）

非わだち部		高機能舗装									
		乾燥	湿潤	シャーベッ ト	白シャーベ ット	新雪	粒雪	圧雪	氷膜	氷板	総計
密 粒 度 舗 装	乾燥	34							悪化		34
	湿潤	2	247	18	11	4					282
	シャーベット		9	49	10	4		2		1	75
	白シャーベット		4	3	52	2				2	63
	新雪		1	2	8	38		2		2	53
	粒雪	良好					38				38
	圧雪				1		1	30			32
	氷膜		4	4					4		12
	氷板			1		1			3	11	16
	総計	36	265	77	82	49	39	34	7	16	605

この路面状態の観察比較から、降雪時の路面状態は密粒舗装と高機能舗装の 8～9 割が同一路面状態であり、必ずしも高機能舗装で悪化しているとは言えない。また、わだち部では高機能舗装で良好な路面の出現が目立つが、非わだち部では路面の悪化が目立ち、見た目に白く映ることがある、ということが判明した。

3) すべり摩擦係数

図 3-31 は、路面状態別のすべり摩擦係数を、NEXCO 保有の大型すべり試験車により測定した結果である。本測定は、すべり測定用の冬タイヤ（スタッドレス）を用いて、速度は概ね 50 km/h で 100%制動により実施した。測定結果を見ると、圧雪を除く全ての路面で高機能舗装区間のすべり摩擦係数が大きくなっている。なお、圧雪状態では、摩擦係数は雪とタイヤの間の値であり、舗装種別の違いには影響していない。また、氷膜では湿潤と同様に高機能舗装の路面凹凸が有効に機能し、高いすべり摩擦係数を確保している。つまり、高機能舗装は、見た目の路面は白くても、密粒舗装に比べてすべり摩擦係数が高いことが判明した。

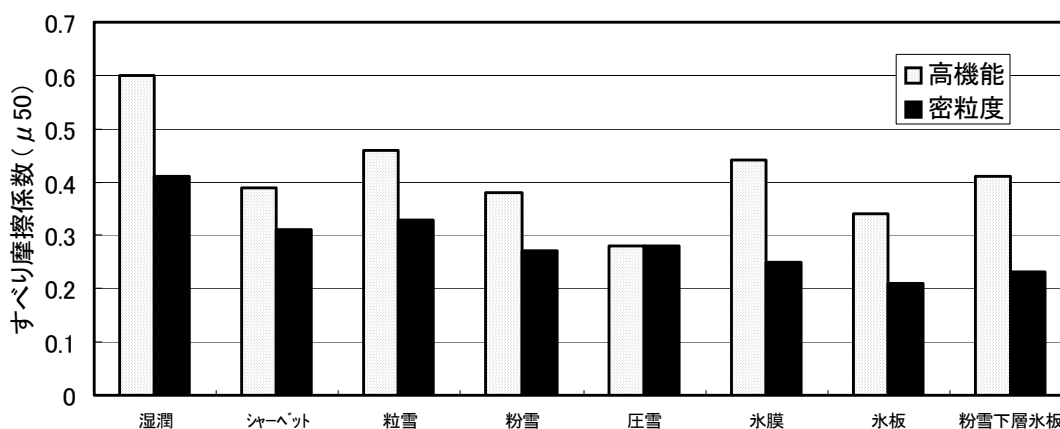


図 3-31 雪氷路面状態別のすべり摩擦係数 (N=159)

4) 凍結防止剤の効果

図 3-32 は、凍結防止剤を散布してから残留塩分濃度の時間変化を整理したものである。高機能舗装は密粒舗装に比べ残留塩分濃度の低下が遅く、固形剤の場合、高機能舗装上では路面水が少ないため固形剤がなじむまで時間がかかり、散布直後は低濃度であるが、20 分後には濃度が同程度となることが判った。また、近年主流となっている湿塩散布についても、固形剤と同様の傾向を示すことが確認された。

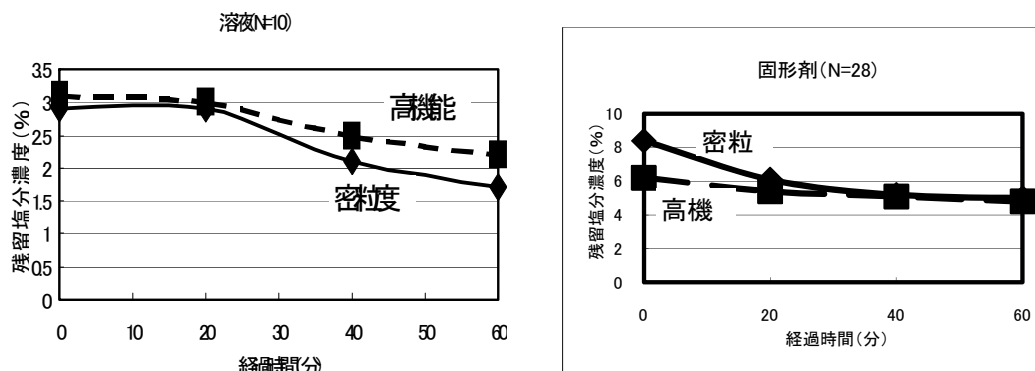


図 3-32 残留塩分濃度の比較

以上の調査結果から、従来の舗装（密粒舗装）と高機能舗装の冬期路面特性上の相違点をまとめると、次のとおりとなる。

- ① 路面温度は、全体平均で 0.2℃高機能舗装が低めであるが、プラス温度帯での差が主であり、冬期路面管理上は大きな違いはない。
- ② 路面状態の出現頻度には殆ど差がない。
- ③ 凍結防止剤の残留塩分濃度も殆ど差がない。
- ④ 高機能舗装は路面凹凸があるため、多少の凍結路面でも密粒舗装に比べて高いすべり摩擦係数を確保できる。

これらを踏まえた結論としては、路面積雪の多い積雪寒冷地では従来の管理手法で殆ど問題ないものと考えられ、一方、比較的温暖な地域では、非わだち部を中心に密粒舗装区間に比べ路面が白く見えることが有るが、この場合も路面のすべり摩擦係数は密粒舗装より高く確保されているため、交通事故に関する懸念はないと言える。

なお、交通事故に関しては、更に別の観点からの検証も行っており、積雪路面での制動停止距離について、従来の密粒舗装と高機能舗装を比べてみたが、図 3-33 に示すように、積雪路面では高機能舗装の停止距離が 10m 短いことが確認された。これは、高機能舗装は路面が白く見えても、路面の凹凸や路面水が少ないため、従来の舗装よりすべりにくくなっていることの証明であり、図 3-31 に示したすべり摩擦係数の高さとも一致する結果であった。

図 3-34 には、密粒舗装を高機能舗装に置き換えた場所における雪氷路面での事故の増減を示した。比較の方法は、高機能舗装導入の前後 1 年間の事故件数を比べたものだが、高機能舗装に改良した区間（1,043 km）での雪氷路面事故件数は、178 件から 117 件へ減少しており、減少率は 34%であった。

これらの調査を通じ、フランス等で指摘されている冬期路面の管理上の課題は、日本の高速道路では特段問題が見られず、逆に、高機能舗装は、雨天時のみならず、雪氷路面での交通事故削減

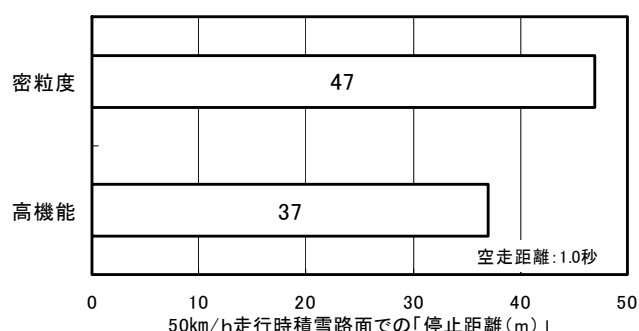


図 3-33 舗装種別による積雪路面での停止距離の違い

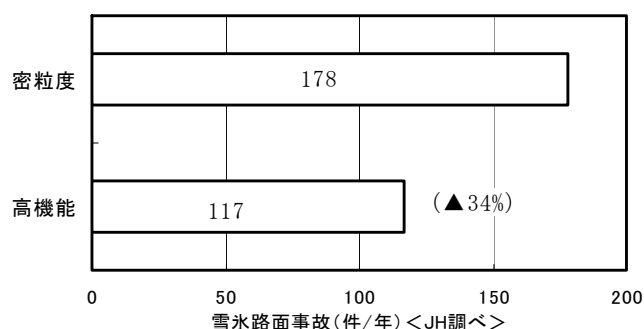


図 3-34 舗装種別と雪氷路面での交通事故件数

減にも寄与していることが確認できた。雪氷路面においても、タイヤのグリップ力を低下させる原因は路面の水分であることが知られており、これを積極的に排除する高機能舗装は、冬期路面の安全対策にも大きく貢献していると考えられる。また、本調査の結果から、日本の高速道路においては、高機能舗装を導入した場合も、特別な冬期路面管理は必要ないことが判明した。

3.3.2 わだち掘れの低減

第2章で述べたように、高速道路の舗装では、大型車交通量の伸びとともに、わだち掘れの発生が深刻化していたが、舗装の補修量も年々増大することとなった。図3-35には日本の高速道路における年度別の舗装補修の推移を示すが、1980年代(S55～H01)には補修理由のほとんどが流動または摩耗によるわだち掘れであることがわかる。摩耗わだち掘れについては、スパイクタイヤの禁止に伴い激減し、1990年代の中頃までにほぼ解消されたが、流動わだち掘れの問題は依然深刻であった。

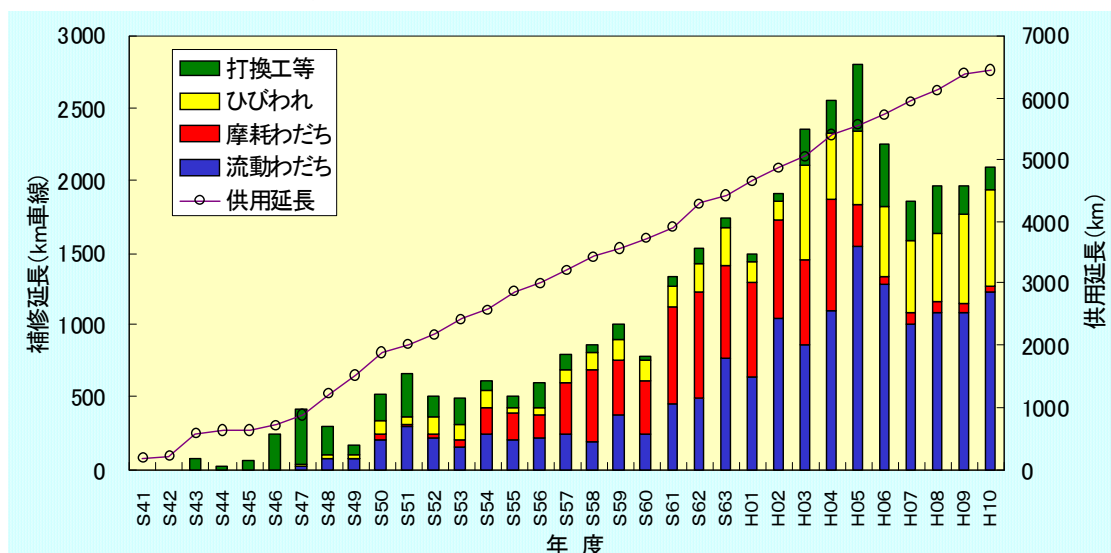


図 3-35 補修延長と補修理由の推移

高機能舗装は、従来の連続粒度アスファルト混合物とは異なり、混合物の8割以上を占める粗骨材(6号砕石)によりその骨格構造を成すことから、骨材間の噛み合わせ効果が高く、交通荷重による変形を生じにくい特徴を有する。これに加え、高機能舗装用に日本で開発された高粘度改質アスファルトの接着力と高温時の粘性により、流動わだち掘れが発生しにくく、その効果が期待されていた。

1991～1993年に掛けて、事故多発箇所に試行的に導入した高機能舗装の追跡調査により、隣接する密粒舗装区間と、わだち掘れ量の比較を行った結果を図3-36に示す。調査の実施箇所はすべて供用中の路線であったため、施工直後の初期わだち掘れが3～4mm程度生じてはいるが、その後の経年的な増加を比較してみると、密粒舗装(図では「通常舗装」と表記)が2mm弱の年

間進行量であるのに対し、高機能舗装では、その半分程度の進行量に留まっている。また、施工後5年間で一旦打ち切りしていた追跡調査を施工10年後に再度行い、その時点でまだ補修のされていない全国17か所の高機能舗装区間のデータを基に長期供用性状の評価を行ったところ、**図3-37**に示すように、わだち掘れの伸びは少なく、全国平均で年間約1mm程度の進行量であった²¹⁾。日本の高速道路における路面管理基準では、舗装の補修目標値はわだち掘れ量の場合25mmとされており、十分なわだち掘れ抵抗性を有する混合物であることが実証された。

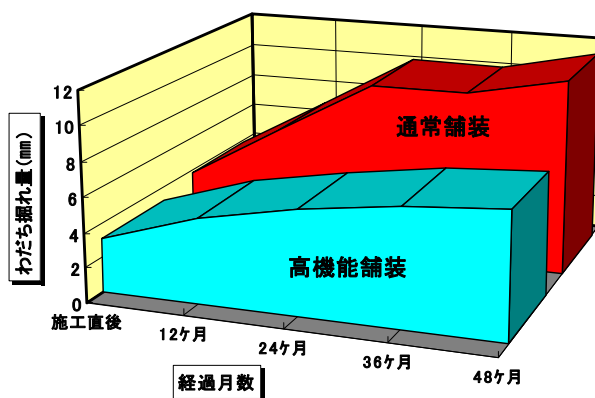


図 3-36 舗装種別とわだち掘れ量の比較

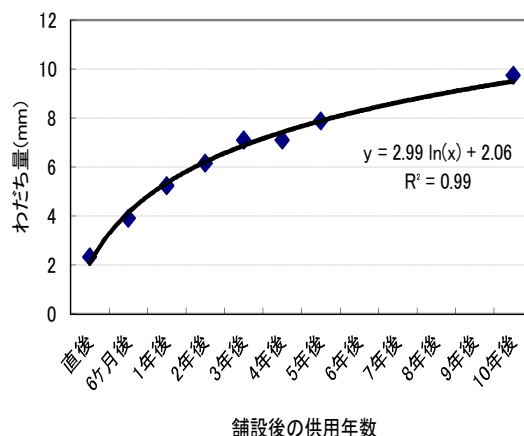


図 3-37 高機能舗装のわだち掘れ量の推移

この耐流動性に優れた混合物を表層に全面採用することで、それまでの舗装における大きな課題であったわだち掘れは、年々減少傾向となった。**図3-38**は、路面性状測定車による全国の高速道路におけるわだち掘れの発生分布であるが、1989年(H1)時点では、最頻値で約10mm、それ以上の深いわだち掘れも多く発生していたのが、高機能舗装の広まりとともに年々その状況は改善され、2002年(H14)には、最頻値が6~7mmとなり、分布のピークがシフトするとともに、20mmを超えるようなわだち掘れはほぼ見られなくなる状態までになった。

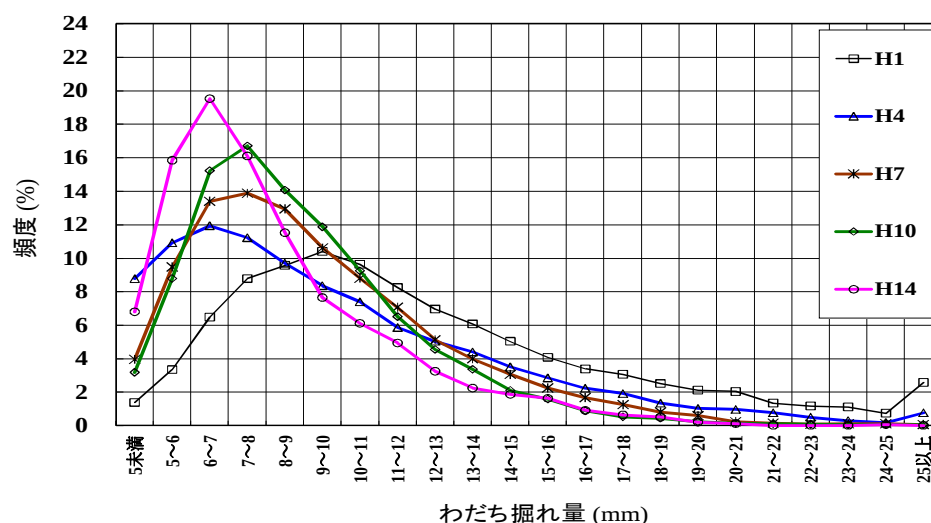


図 3-38 わだち掘れ量の頻度分布の年度推移

これに伴い、表層の補修回数も減り、その寿命についても、前述の1991～1993年に掛けて試行的に導入した高機能舗装のうち調査可能な69か所について、その後の状況を確認したところ、一般地域では約6割が10年を経ても補修を必要としない状態を保っていることが判明した（図3-39）。空隙率が非常に大きく、機能性は優れるが耐久性に難があると懸念されていた高機能舗装だが、平均で8～10年の補修サイクルと言われていた密粒舗装と比べて同等以上の寿命が発揮されていることが確認された。

一方、冬季のチェーン使用がある積雪寒冷地の状況を見ると、図3-40に示すように、施工後7年を経過すると半数以上は補修されている状況であった。図3-41には舗装種別毎に比較したわだち掘れ量の一例を示すが、これは大雪によるチェーン規制が多発した冬の前後を挟んで測定した結果であり、高機能舗装が、密粒舗装に比べ、チェーンに対する摩耗抵抗性には劣ることを示している。高機能舗装を採用前に交通事故対策として用いられていたギャップ舗装も、摩耗わだち掘れ量が多くなっており、連続粒度の密粒舗装に比べ、高機能舗装やギャップ舗装といった不連続粒度混合物は、骨材間を満たすアスファルトモルタル分が少なく点接着の状態になることで、チェーンラベリングを生じやすいことが、室内試験の結果から知見として得られていたが、実路においても同じ傾向であることが判明した

24）

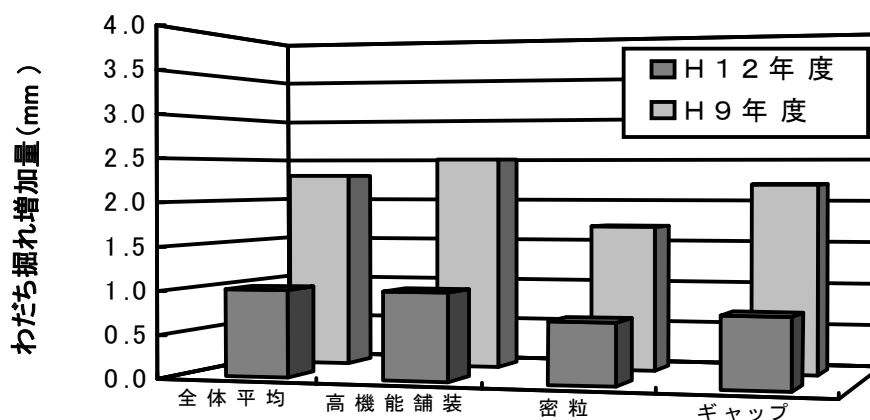
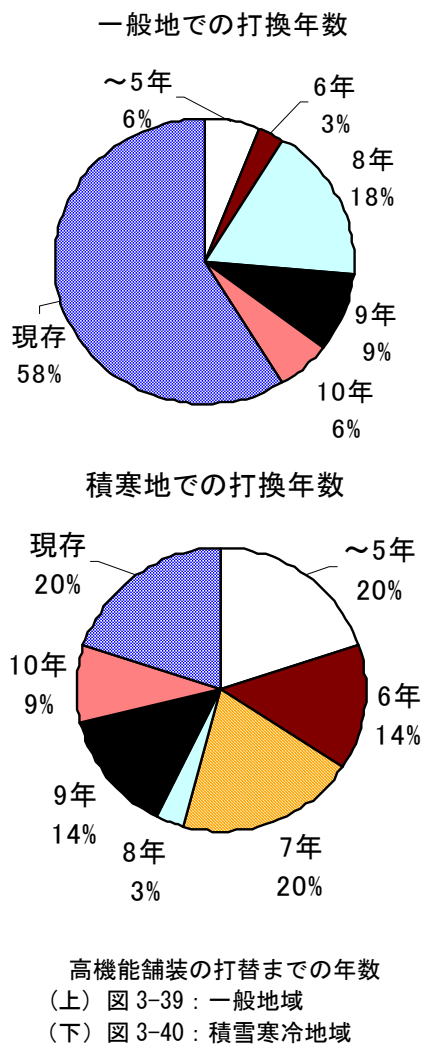


図3-41 舗装種別による摩耗わだち掘れ量の違い

3.4 第3章のまとめ

日本の高速道路に、ポーラスアスファルトを「高機能舗装」と称し、本格的に導入する上で、以下に示す様々な取組みが行われ、その結果として、非常に優れた導入効果を得ることができた。

- 1) 高機能舗装用混合物の耐久性を確保するため、その主要材料である、粗骨材やバインダに求める品質が検討され、規格値が示された。
- 2) 雨水の浸透に対する備えとして、基層混合物の見直しと、導入箇所の道路構造に応じた舗装構成が検討され、橋梁部やトンネル内の下層には、SMAを採用することで、橋梁床版やCRC版の保護が行われた。
- 3) 高速道路において、高機能舗装の交通事故低減効果は非常に大きく、その効果の長期的な持続性も確認できた。
- 4) 高機能舗装の導入効果としては、交通事故の低減のみならず、雨天時の視認性など、走行快適性の向上が挙げられる。また、交通騒音の低減効果も実証された。ただし、これらの機能性は経年低下するものであり、機能の回復は難しい。
- 5) 欧州で課題としていた冬季の路面管理上の問題点は、日本の高速道路においては懸念する必要のないことが判り、従来の密粒舗装に比べ、雪氷路面においても交通事故の低減効果はあることも判明した。
- 6) 高機能舗装は、耐流動性が高く、それまでの大きな課題であった、わだち掘れの低減に寄与することが確認できた。ただし、冬季のチェーン使用が多い積雪寒冷地域における耐久性には劣る結果となった。

参考文献

- 1) 田中正義, 高橋知里, 羽入昭吉: 改質アスファルトの評価方法に関する一検討, 第 23 回日本道路会議一般論文集, pp74~75, 1999
- 2) Asphalt Institute: Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing Superpave, Series No.1 (SP-1), 1994
- 3) 本松資朗, 高橋茂樹, 上坂憲一, 羽入昭吉: 改質アスファルトの性能評価と混合物性状の関係について, 第 31 回石油・石油化学討論会, 2001
- 4) 日本道路公団: 設計要領第 1 集 舗装編, 2004 年改訂版
- 5) 日本道路公団: 設計要領第 1 集 舗装編, 1999 年改訂版
- 6) 高橋茂樹, 菅野勝一, 本松資朗: 高機能舗装化に伴う基層用混合物の検討, 第 56 回土木学会年次学術講演会論文集 V, pp. 22-23, 2001
- 7) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, 第 9 回コンクリート工学年次公演会論文集, pp. 627-632, 1987
- 8) 井上武美: SMA の我が国における展開, 舗装, No. 8, pp. 4-10, 2000
- 9) 七五三野茂, 佐藤正和, 皆方忠雄: 砕石マスチックアスファルトの床版防水層への適用性に関する検討, 舗装, No. 10, pp. 15-20, 1999
- 10) 高橋茂樹, 皆方忠雄, 大野滋也, 佐藤正和: 砕石マスチックの橋梁部における適用性, 日本道路公団試験研究所報告, 第 37 巻, pp. 22-31, 2000
- 11) 高橋茂樹, 大野滋也, 本松資朗: SMA の橋梁レベリング層への適用性について, 土木学会舗装工学論文集, 第 6 巻, pp77-83, 2001
- 12) Nicholls J.C: Review of UK Porous Asphalt Trials, TRL Report 264, Transport Research Laboratory, Crowthorne, 1996
- 13) (財) 高速道路調査会: 舗装の評価に関する研究報告書(3), pp. 103-105 & 170, 1988
- 14) (財) 高速道路調査会: 舗装の路面管理基準に関する検討報告書, pp. 6-7, 2004
- 15) 近藤升, 高野, 河野: 水膜厚さの違いによる高機能舗装の水はねについて, 第 24 回日本道路会議一般論文集, 2001
- 16) 建設省土木研究所道路研究室: 路面性状と走行特性に関する調査報告書, pp. 5-8, 1974
- 17) 大川秀雄ほか: ポーラスアスファルト研究会発表資料, pp. 22-29, 1992
- 18) 高橋茂樹, 大野滋也, 本松資朗: 高機能舗装の排水特性に関する研究, 第 24 回日本道路会議一般論文集, 2001
- 19) (社) 日本道路協会: 道路環境整備のための手引き, pp. 44-56, 1976
- 20) 三山敬, 紺野義仁, 山本稔: 道路交通騒音の新予測手法に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol. 36, 1999
- 21) 近藤升, 大西博文, 石川賢一: 排水性舗装の経時および累積交通量による騒音低減効果の変化について, 日本音響学会論文集, 1999

- 22) 日本道路公団試験研究所舗装研究室：高機能舗装の技術動向，（財）高速道路技術センター
平成 15 年度現場代理人講習会テキスト，2003
- 23) 渡辺亨，斉藤辰哉，吉江誠吾：高機能舗装の冬季路面特性に関する研究，高速道路と自動車
第 43 巻 第 1 号，pp. 32-38，2000

第4章 「高機能舗装」の導入に伴う基層の損傷

4.1 損傷の発生形態と傾向の分析

ポーラスアスファルトを「高機能舗装」と称し、高速道路の路面（表層）に全面採用するに当たり、耐久性を確保すべく、第3章で述べた様々な工夫を施したが、あまりに優れた事故対策効果から、新規に建設する路線だけではなく、供用中の路線にもできるだけ早く高機能舗装を導入すべきとの方針が出された。そのため、限られた予算内で全国的高速道路網を早急に高機能舗装化するためには、表層のみの切削オーバーレイを行い、既設の密粒舗装を高機能舗装に切替する手法に頼らざるを得ない状態になった。新設の道路であれば、当然基層を新しい配合粒度の混合物で施工を行った上に高機能舗装を舗設するため、雨水の浸透対策を講じた舗装構成を構築できるが、供用中の高速道路においては、高機能舗装化を急ぐ余り、既設の、つまり密粒混合物を表層に用いていた時の基層を存置したまま、その上に高機能舗装を載せる状況となった。その結果、高機能舗装を全面採用した数年後、密粒表層を切削オーバーレイで高機能舗装に切替した現場から、早期に路面に損傷が発生したという事例が報告され始めた¹⁾。

最初にこの損傷が報告され始めたのは、名神、東名、中央道の3箇所からで、表4-1に示すように、いずれも早ければ既設の表層を高機能舗装に更新したわずか半年から2年の間に、わだち部の側方に大きな流動が発生するという現象が見られた。

表 4-1 高機能舗装化後の損傷発生事例

路線名	事務所名	高機能 施工時期	損傷時期	損傷状況	損傷原因	補修方法
名神	栗東(管)	H9.6	H9.7	クラック発生箇所、表層の切削オーバーレイにより高機能化したところ、1ヶ月後に外側線内側に局所的な大規模わだち(10cm)発生	表層の高機能には問題見られず。基層はコア採取できないほどに剥離脆弱化	損傷区間について基層より10cmの切削オーバーレイ。その後は問題なし。
東名	御殿場(管)	H9.秋	H11.8	外側線内側に局所的なわだち発生	基層部の剥離脆弱化と思われる	損傷区間について基層より10cmの切削オーバーレイの予定
中央道	大月(管)	H11	H12.7	路肩部を中心に流動やくぼみが発生	基層部の剥離脆弱化と思われる	緊急補修済(詳細アソグ予定)

これを受け2000年、全国的なヒアリング調査を行ったところ、各地で類似の損傷が発生した事例があることが判明した。この時の調査で全国から寄せられた高機能舗装に関する損傷報告が248件あり、幾つかの視点で分析を行った。

まず、損傷の発生箇所であるが、土工部が88%と圧倒的な割合を占め、橋梁部は全体の8%、トンネル内の舗装は1%に過ぎなかった。この道路構造別の損傷形態を調べると、図4-1に示すとおり、土工部では、局部的に舗装が側方に大きく壊れたような流動わだち掘れ（以下、局部流動と呼ぶ）が最も多く、次いでポットホールとこれも局所的なひび割れが主な損傷となっているのに対し、橋梁部では全報告件数の2/3以上をポットホールが占めており、異なる傾向となった。

次に地域別に見ると、夏季の高温多湿期が長い地域においては、局部流動やポットホールが目立ち、一方、積雪寒冷地においては、冬季のチェーンによるラベリングによる損傷の割合が多くなっている傾向にあった（図4-2参照）。

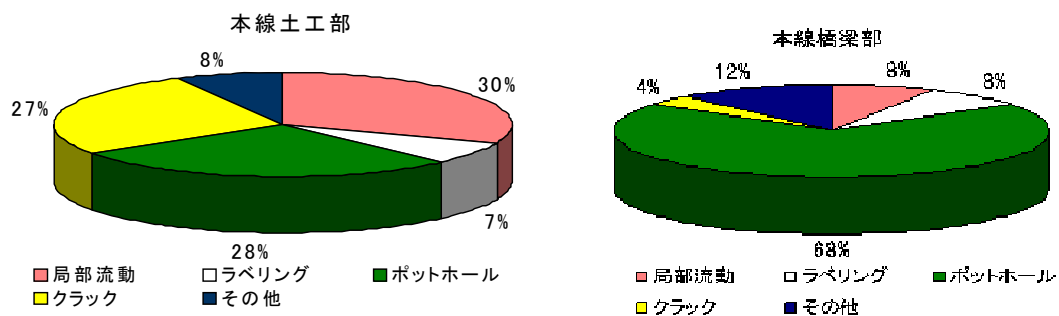


図 4-1 高機能舗装化後の損傷事例の発生傾向（道路構造別）

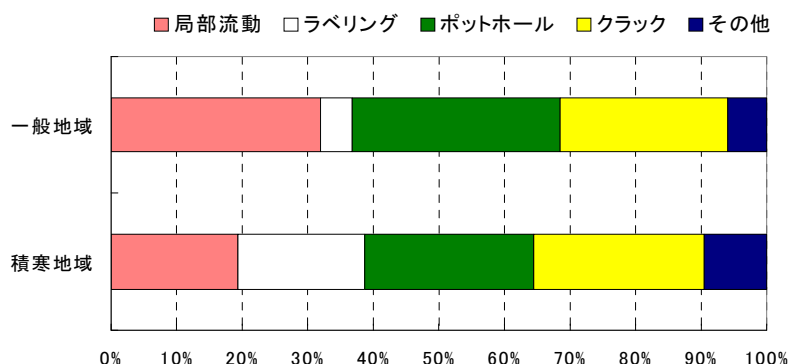


図 4-2 高機能舗装化後の損傷事例の発生傾向（地域別）

ここで、ラベリングについては、密粒表層の時代から存在していた課題であり、高機能舗装の場合は路肩に粗骨材が飛散し堆積するため、写真 4-1 のように目につきやすいが、飛散の状況を調べ、骨材が破砕している場合は、すり減り減量の少ない粗骨材を、粗骨材が抜け落ちている場合は、接着力のより強い寒冷地用高粘度改質アスファルトを、それぞれ使用することで、ある程度の効果が期待できたため、対策は講じやすかった。



写真 4-1 高機能舗装のラベリング



写真 4-2 骨材飛散の状況（左：粗骨材の破壊、右：粗骨材の抜け落ち）

また、ラベリングは冬季に限定された損傷であることから、これ以外の主な損傷形態について、発生時期を調べることにした。その結果、図 4-3 に示すとおり、局部流動およびポットホールについては、夏季に発生が集中する傾向にあった。

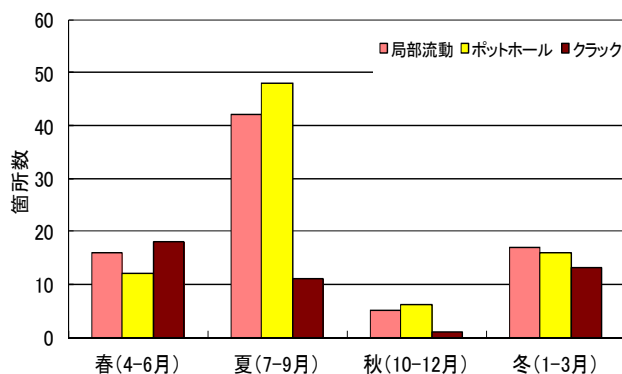


図 4-3 高機能舗装化後の損傷発生時期



写真 4-3 局部流動の例

局部流動というのは、写真 4-3 に示すような、わだち部から外側にアスファルト混合物が押し出されたような流動変形であるが、ポットホールとは違い、このような損傷は密粒舗装にはあまり見られなかった形態である。

この局部流動は、既設の密粒表層を高機能舗装に替えてから非常に短い期間で発生することが多く(図 4-4)、ラベリングのように使用年数が経つにつれて徐々に損傷が目立ってくるものとは、明らかに傾向が異なっていた(図 4-5)。

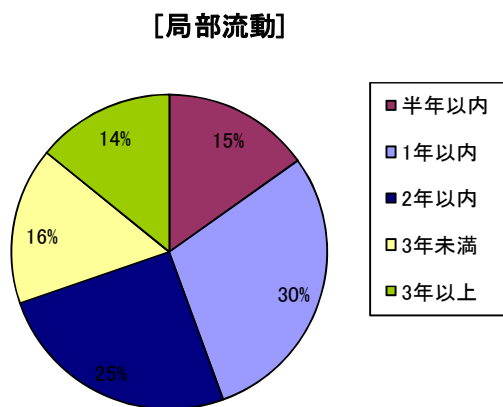


図 4-4 局部流動の発生までの年数

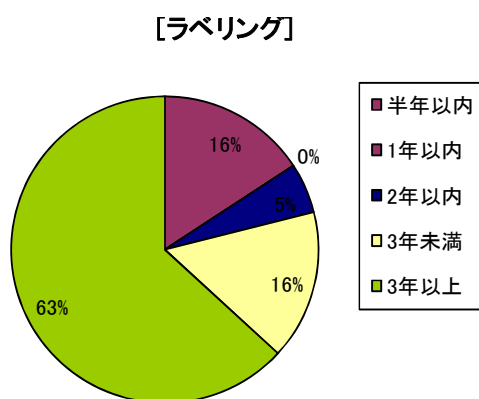


図 4-5 ラベリングの発生までの年数

図 4-6 は、供用年数と損傷箇所との関係を調べた結果を示したものであるが、供用 30 年を超える古い路線での損傷が目につく。一方では、10 年以内の路線における発生件数も多いが、この 2/3 以上が、東京外環道の半地下部（掘割区間）における湧水発生箇所の損傷と、東名の大井松田～御殿場間の改築事業で別線ルートを構築した登り勾配区間の損傷で占めていた。

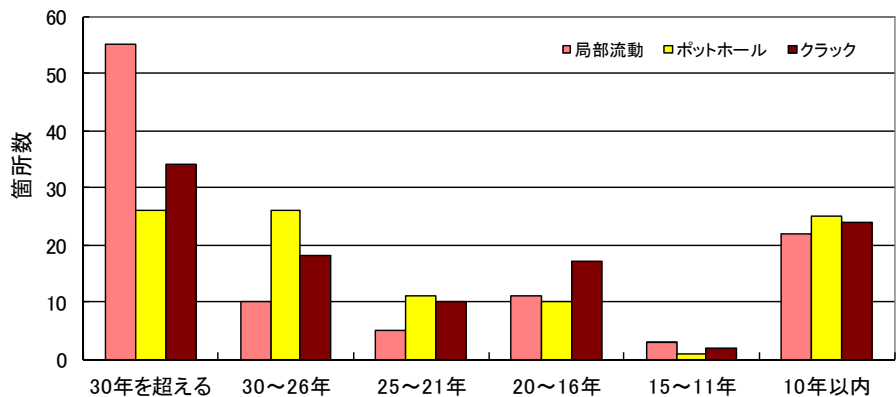


図 4-6 高機能舗装化後に損傷発生した箇所の供用年数

表 4-2 には、高機能舗装化を行った直後に多数の損傷が報告された路線を示すが、一方向の交通量が 3 万台以上の重交通路線の損傷が非常に多く、全報告件数の 8 割近くを占めていた。

表 4-2 高機能舗装化後に損傷が多発した路線

損傷多発路線一覧						
路線名	多発区間	供用年数	交通量(一方向)	損傷件数	局部流動関連	主な損傷種別
東名	大井松田～沼津	31年	4～5万台	68	41	登坂車線の局部流動多発
	蟹江～弥富	25年	4万台			(連続高架部)
東名阪	四日市東～鈴鹿	30年	3.5万台	25	3	ポットホール多発
東京外環	大泉～和光	6年	3.5万台	18	2	ポットホール多発(掘割区間)
京葉道路	船橋～武石	20～34年	6万台	15	8	
西名阪	ほぼ全線	31年	3～5万台	13	2	ポットホール多発
東北道	佐野藤岡～鹿沼	28年	4万台	11	1	チェーンによる骨材飛散
関越道	東松山～花園	20年	5万台	11	4	クラック多発
関越道	練馬～川越	29年	5.5万台	10	3	クラック多発
名神	八日市～栗東	36年	4.5万台	7	3	
九州道	大宰府～久留米	25～27年	4～5万台	7	0	ポットホール多発
中央道	上野原～勝沼	23～31年	3～4万台	5	5	
平均経年数		26(28)	片側3万以上	190	72	全体の約4割が局部流動絡み
損傷総数(全国)				248	91	
表中の路線が全体に占める割合(%)				77	79	

以上、これらの高機能舗装化を行った区間で発生している損傷は相当数あり、早急に原因を解明し対策を講じる必要に迫られた。また、ヒアリングの結果、大部分の損傷は、施工した高機能舗装（表層）ではなく既設の基層から発生していることも判り、供用路線で、既設の密粒混合物の表層を高機能舗装で置き換えた箇所を調査対象とし、何らかの損傷が発生した現場から基層をコア採取し、室内試験を実施することにした。

この、高機能舗装の直下にある基層混合物を対象とした調査は、北海道から九州までの全国の

高速道路, 計 368 箇所で行われた. またコアは, 高機能舗装に損傷が発生している場所の基層と, 路面に異常が生じていない隣接部 (以下, 健全箇所) の基層からそれぞれ採取することにした.

しかし, 現地で**写真 4-4**に示すような局部流動が発生した箇所の直下でコア採取を試みると, 表層の高機能舗装には異常がないものの, 基層部で大きな流動が生じており, また, **写真 4-5**に示すように, 基層混合物が痩せ細り消失し掛かっていたり, 完全に土砂化し, コアが採取できないという信じがたい状況が多かった.

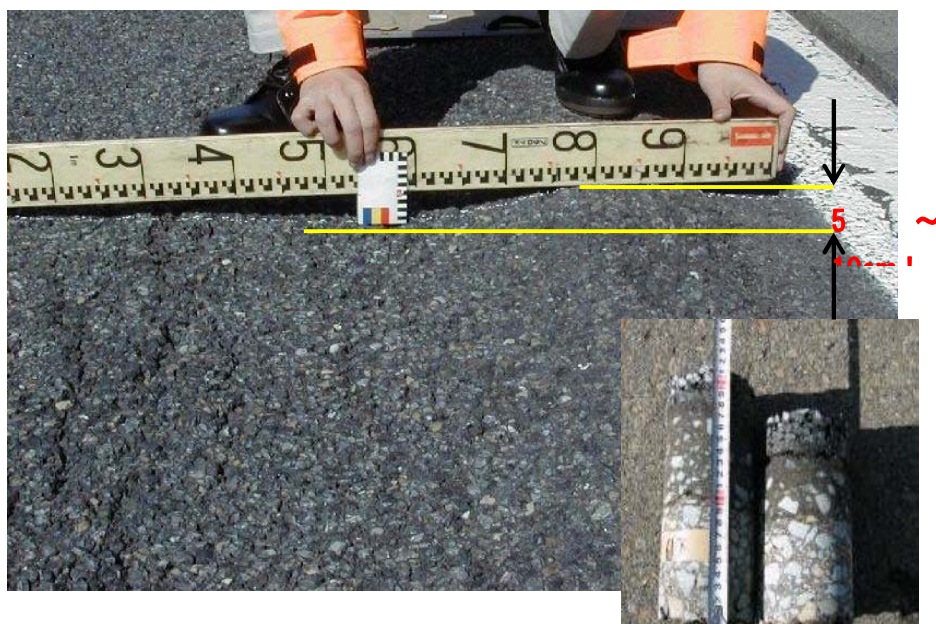


写真 4-4 局部流動の発生状況



写真 4-5 基層混合物の剥離状況

また, **写真 4-6**のように, 路面が亀甲状にひび割れ, 土砂が噴出している場所を開削してみると, 基層混合物 (**写真 4-7**では, 高機能舗装をオーバーレイで施工しているのので, 直下の層は古い密粒表層になるが) は, アスファルトが抜け落ち, 茶色に乳化していた. また, その下層は土砂化し, 細粒分が抜けガサガサの状態であったことから, 路面に噴出した土砂は, 交通荷重によるポンピング現象であることが確認された.



写真 4-6 高機能舗装のポンピングの例

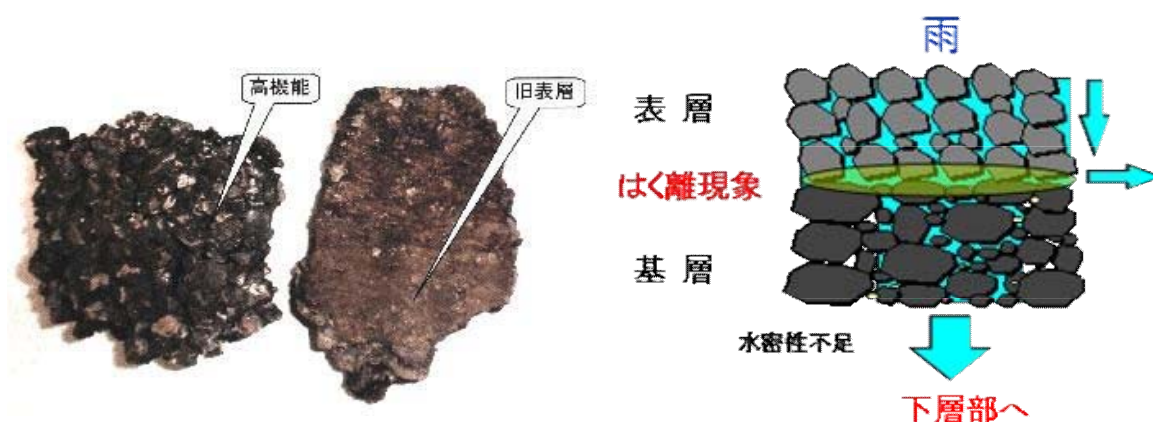


写真 4-7 ポンピング発生箇所の混合物の状況

図 4-6 剥離の発生イメージ

このように、局部流動や亀甲状のひび割れとポンピングが発生している箇所では、基層混合物が採取できないほど脆弱化していたため、その場合は、わだち部と外側線の間でコアリングを行った。現地の観察より、これらの損傷は、図 4-6 に示すような、雨水が高機能舗装の中を浸透し、その下層にある基層混合物のアスファルト分を乳化・流出させ土砂化に至らしめる、はくり現象が原因と推測し、この点を検証するため、採取コアを用いたマーシャル試験を標準養生と水浸養生（60℃、48hrs）で行い、採取コアのマーシャル安定度と、残留安定度で評価を行った。なお、コアの厚さが異なる場合は、表 4-3 により試験で得られた安定度を、舗装試験法便覧²⁾にある厚さ 63.5mm 相当に換算し評価している。

また、混合物の剥離しやすさの程度を評価する目的で、マーシャル試験後の供試体をほぐし、静的はく離試験法（JHS201）に従い 100 g の試料を用い、80℃の温水に 30 分間浸した後のアスファルト被膜の面積から、剥離面積率を求め、これも評価の目安として考察を行った。

表 4-3 マーシャル安定度の厚さ補正

供試体厚さ(mm)	25.4	27.0	28.6	30.2	31.8	33.3	34.9	36.5	38.1	39.7	41.3	42.9	44.4	46.0	47.6	49.2	50.8
修正係数	5.56	5.00	4.55	4.17	3.85	3.57	3.33	3.03	2.78	2.50	2.27	2.08	1.92	1.79	1.67	1.56	1.47
供試体厚さ(mm)	52.4	54.0	55.6	57.2	58.7	60.3	61.9	63.5	64.0	65.1	66.7	68.3	71.4	73.0	74.6	76.2	
修正係数	1.39	1.32	1.25	1.19	1.14	1.09	1.04	1.00	0.96	0.93	0.89	0.86	0.83	0.81	0.78	0.76	

このような方法で、64の管理事務所の協力のもと、全国の35路線でコア採取を行い、マーシャル試験および静的はく離試験を実施した。そのデータを各種の条件別に分類し、評価をまとめたものを以下に示す。

最初に、路面に現れた損傷形態毎に結果を整理したものであるが、図4-7に示すように、切取りコアを用いた標準マーシャル安定度は、局部流動の発生箇所を除いて、健全箇所と各損傷箇所の間あまり差がなく、損傷度の評価が困難であることがわかる。一方、残留安定度と剥離面積率については、健全箇所に比べ各損傷箇所の値が悪い傾向が見られ、特に、局部流動が発生した箇所の水浸養生後の安定度（および残留安定度）が非常に低い値であり、剥離面積率も際立って大きいことがわかる（図4-8）。これは、現地の基層混合物が、前述のように、脆弱化し、アスファルトも流出していることと合致する。

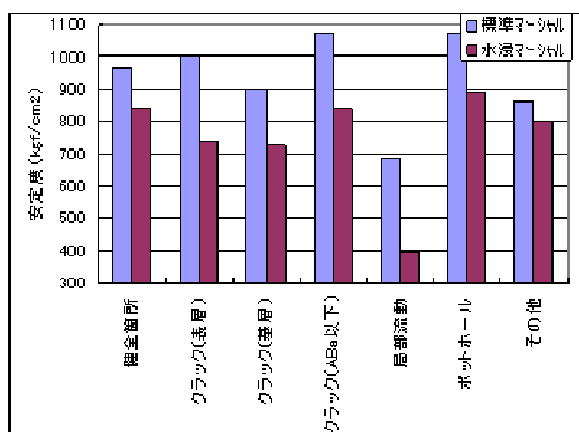


図4-7 損傷形態と切取りコアの安定度

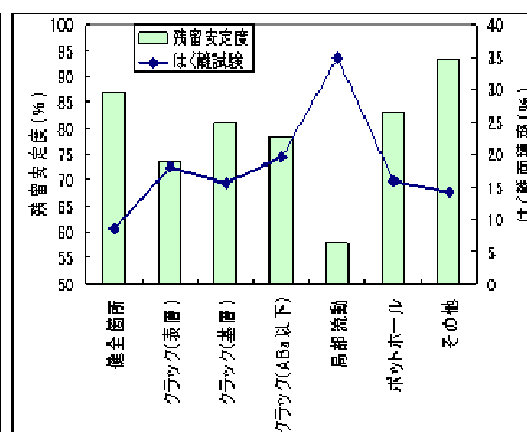


図4-8 損傷形態と切取りコアの耐水性

また、発生している損傷を、形態ではなく、路面と採取コアの状態から損傷度合として分類したところ、図4-9に示すように、水浸マーシャル安定度（または残留安定度）と剥離面積率との関係性が見られたことから、以下の分析については、耐水性の指標である、残留安定度と剥離面積率の2項目を用いて考察を行うことにした。

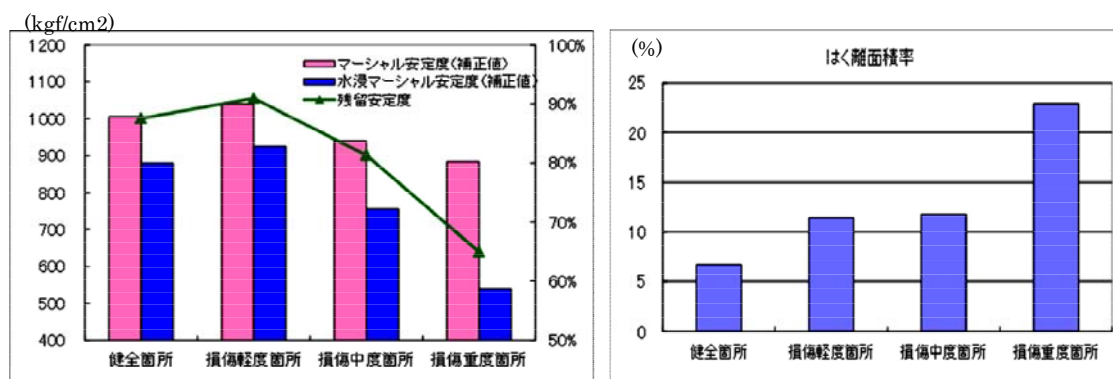


図4-9 損傷度合いと各種指標との関係

1) 地域性

図 4-10 は、地域による基層の健全度の違いを調べたものであるが、一般地域では損傷箇所の残留安定度と剥離面積率が健全箇所よりも悪くなっているのに比べ、積寒地域では健全箇所と損傷箇所の差が小さいことがわかる。アスファルト混合物の剥離による損傷は、温度が高いほど促進されることが、一般地域での損傷度の方が大きい要因と推定される。

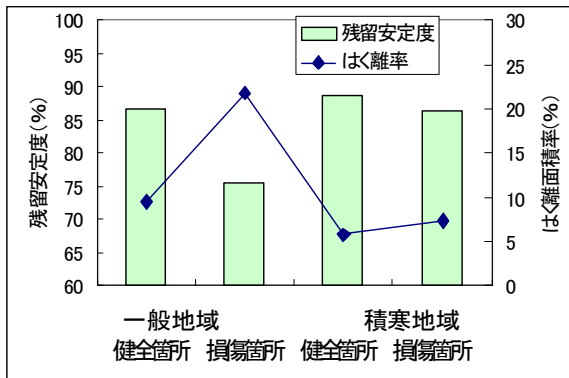
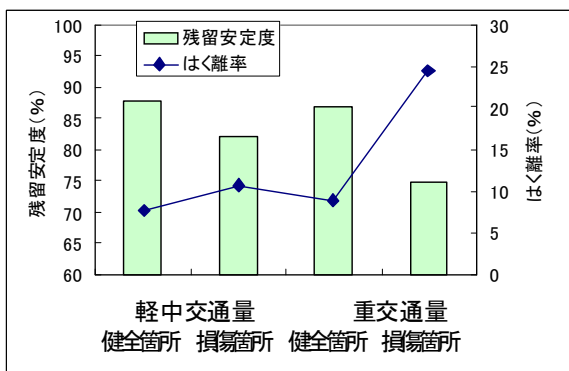


図 4-10 地域区分と基層の耐水性

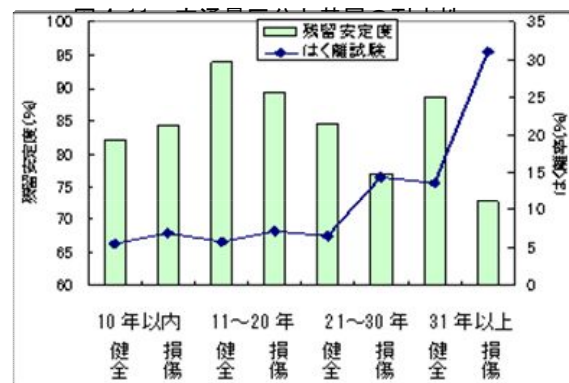
2) 交通量

図 4-11 は、交通量が基層の健全度に与える影響を見たものであるが、重交通路線の方が損傷箇所の基層の性状(耐水性)が悪化していることがわかる。これにより、温度とともに、交通量も基層の損傷を促進する要因であると思われる。



3) 経年数

図 4-12 は、供用年数と基層性状の関係をみたものである。本来は基層の経過年数との比較が望ましいが、基層の履歴が不明な箇所が多いことから供用年数で分析を行った。これによると、供用 20 年を超えると損傷箇所の耐水性の低下が目立ちはじめ、供用 31 年以上の路線では健全箇所でも剥離率が高く、基層の性状(耐水性)が全体的に悪化していることがわかる。



4) 高機能舗装化による影響

高機能舗装化が基層の性状に与える影響を見るために、既に高機能舗装化した区間と、密粒舗装区間の、ともに健全箇所における基層の状況を比較した (図 4-13)。

これを見ると、残留安定度・剥離率ともに、高機能舗装化した区間の方が悪い値を示しており、雨水等の浸入により基層混合物の耐水性が悪化している傾向が伺える。

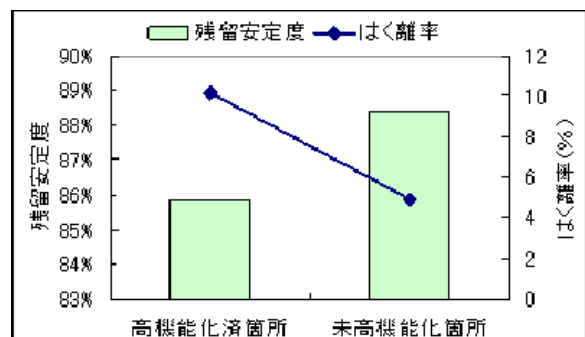
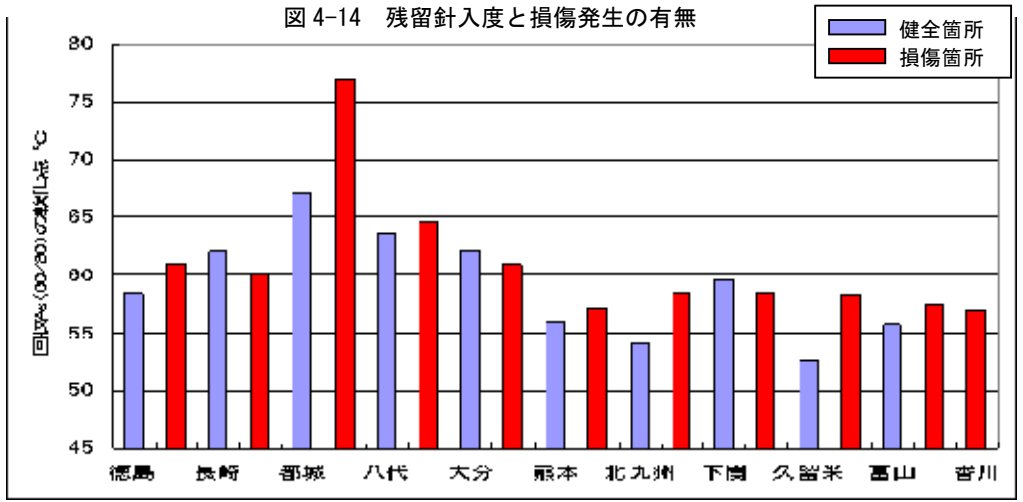
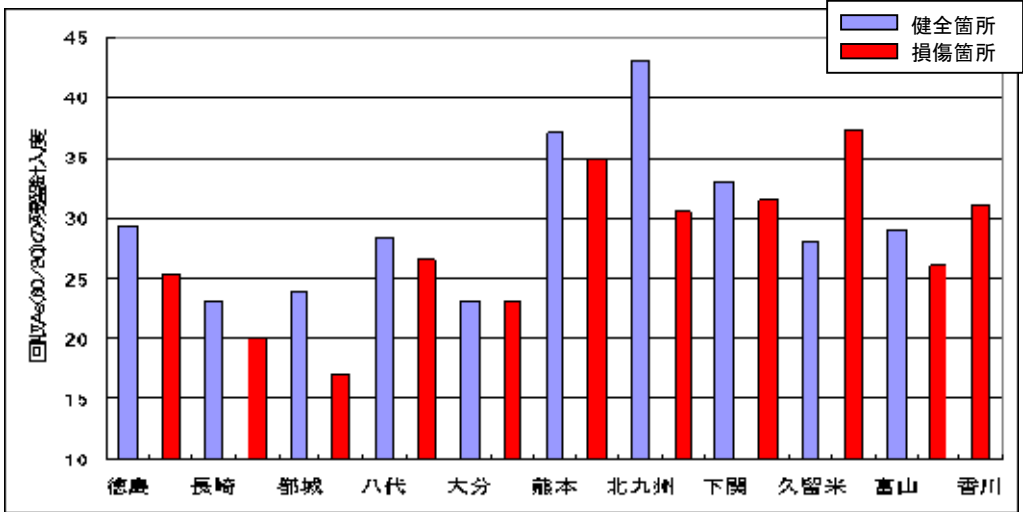


図 4-13 表層種別と基層の耐水性

5) 回収アスファルトの性状と基層性状の関係

以上、マーシャル試験および静的はく離試験の結果を基に考察を述べたが、経年的な劣化という観点から、採取した基層混合物のコアからアスファルトを回収し、針入度と軟化点も調査して見た。その結果を図-4-14、4-15に示すが、供用年数や地域区分・交通量の各条件との関係性が薄かったことから、現場毎に健全箇所と損傷箇所の違いを比較した。



この結果をまとめると下表のようになり、残留針入度や軟化点と損傷度の関係性は不明瞭であり、アスファルトの劣化が主な損傷要因とは考え難い。

健全箇所と損傷箇所のアスファルト性状	針入度	軟化点
試験値で5以上の差がある（有意差が見られる）	3 現場	3 現場
試験値で5未満しか差がない（誤差の範囲）	6 現場	7 現場
健全箇所と損傷箇所の性状が逆転している	1 現場	なし

以上、高機能舗装の直下にある基層混合物の耐水性に着目した調査結果をまとめると、下表の

ような傾向が明らかになった。

1) 地域・交通量区分

	重交通路線	軽中交通路線
一般地域	損傷箇所の耐水性の低下が激しい	損傷箇所の耐水性が低下している
積寒地域	損傷箇所の耐水性がやや低下	損傷箇所の耐水性がやや低下

2) 供用年数（基層履歴）

	健全箇所	損傷箇所
10 年以内	基層の耐水性に大きな問題は見られない	
11～20 年		
21～30 年	基層の耐水性に大きな問題は見られない	基層の耐水性が低下している
31 年を超える	基層の耐水性がやや低下	基層の耐水性の低下が激しい

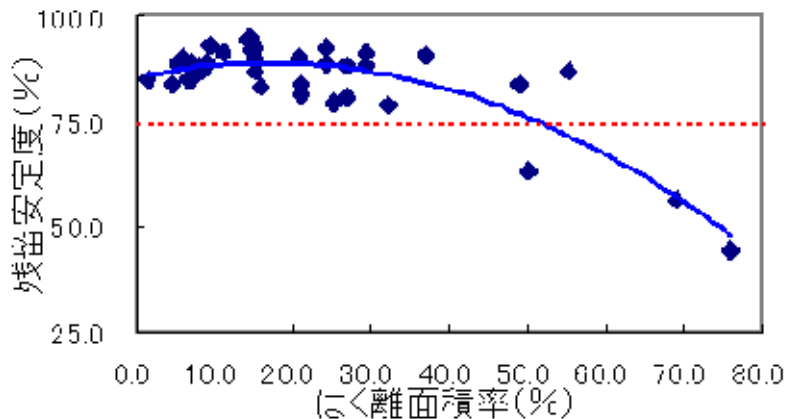
この傾向は、繰り返し交通荷重と温度というアスファルト混合物の剥離を促進させる 2 つの要素が重なる条件下にある基層混合物が、厳しい環境下におかれ、高機能舗装化をきっかけに、損傷を引き起こすことを意味している。新設の工事では、空隙率を小さくし水密性を高めた高機能舗装用基層を用いているのに対し、供用路線では、密粒時代の既設基層を残し傷んだ表層のみを切削し、高機能舗装をオーバーレイする方法が主流であるため、長年の交通履歴を受け脆弱化しやすい状態にあった基層混合物が、表層が高機能舗装になったことで一気に雨水の影響を受けやすくなり、早期損傷につながったと言える。

以上、高機能舗装の中を浸透した雨水が基層に深刻な影響を及ぼしていることが判明したため、基層の耐水性をより精度良く評価できる手法を検討するとともに、下層の状態を詳細に把握すべく、幾つかの現場で開削調査を行い、アスファルト安定処理を用いている上層路盤や、粒度調整碎石を用いた下層路盤、更には、その下の路床にまで、雨水の浸透や、これによる脆弱化が生じているかどうか、検討を進めることにした。

4.2 圧裂試験による損傷度判定

4.2.1 新たな指標の検討

アスファルト混合物の耐水性評価には、従来から水浸マーシャル安定度試験（JHS-202）が用いられてきたが、非常に剥離しやすい（現地ではほとんど使われることのない）骨材を用いないと、その基準値である残留安定度 75%を下回らないことが、アスファルト被膜のはく離試験（JHS-201）のとの関係から判明した。図 4-16 に示すように、水浸マーシャル安定度試験から得られる残留安定度は、感度の良い判定が難しいことが判る。



これ以

外の評価

図4-16 アスファルト被膜のはく離試験と水浸マーシャル試験の相関性

方法としては、水浸ホイールトラッキング試験（舗装試験法便覧別冊 3-1-2T）が知られているが、現地からの採取試料で試験を行うことは困難である。供用路線で高機能舗装化を計画する際には、既設の基層混合物の耐水性に問題がないか、事前調査により確認することが、4.1節で述べたような、高機能舗装の施工後に発生する損傷を防ぐために重要となる。そこで、既設の基層混合物の耐水性を感度良く評価できる手法を検討することにした。

まず、マーシャル試験は、その円弧状のモールドにより供試体側面を包み込むため、多少強度の落ちた供試体でも載荷時に変形しながら安定度が得られるので、試験値の差が出にくい、と考え、治具が棒状であり供試体とは点接触となるため、健全な供試体と脆弱なものとの試験値の差がより明確に出やすい、圧裂試験を候補とした。マーシャル試験では、剥離抵抗性の評価は困難として、圧裂強度で評価する修正ロットマン試験を提案している過去の文献や、他の研究事例からも、圧裂試験の方が耐水性評価試験として有望と考えられた。



写真 4-7 圧裂試験の状況

次に、アスファルトの剥離現象が、温度が高くなるに従い発生しやすい事実に着目した。ここで、試験温度を上げていくと、アスファルトが軟化し供試体が載荷前に変形、あるいは試験中に変形しやすくなり、強度が著しく低下することから、試験温度はその懸念がない範囲で 25℃と高く設定した。圧裂試験後の供試体破断面を観察したところ、水浸養生および試験温度を 5℃とした場合は、試験により粗骨材の割れは発生するが、アスファルトの剥離は確認できなかった。一方、25℃で養生・試験を行った時には、供試体破断面に粗骨材の割れは発生しておらず、剥離が見られたことから、評価試験条件としては、25℃の圧裂試験が望ましいと思われた。

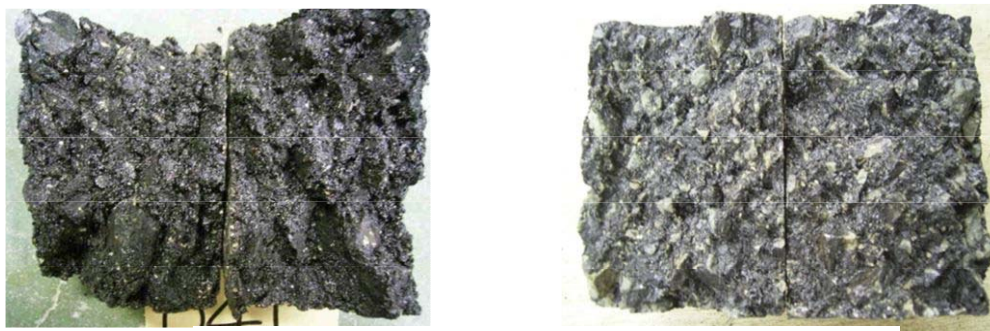


写真 4-8 圧裂試験後の供試体 (左: 5℃、右: 25℃で実施)

また、現地の剥離現象は、輪荷重の載荷と除荷の繰返し作用に伴う表層と基層の界面の揉まれと、それに伴う水の動き（水圧の変化）と考えられることから、圧裂試験を行う前に、恒温槽による水浸養生ではなく、水温 60℃繰返しの加圧により、剥離を促進させる手法を考案した。

ここで、写真 4-9 に示す加圧装置を作製し、現地からの切取り供試体をゴムスリーブで包み、鉛直方向の透水圧と側圧が供試体に加わるようにし、使用する水温を 60℃に保てるヒーターを装備した。

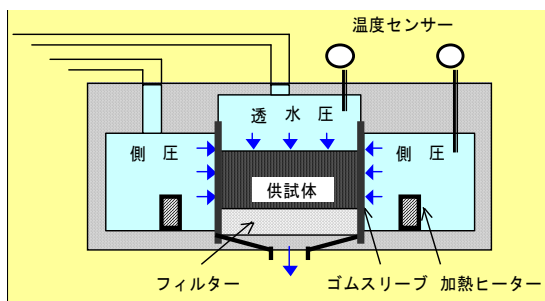


写真 4-9 加圧透水試験機

その後、この透水圧と側圧を、幾つか変化させ、最も剥離促進効果がある条件を検討した。その結果は図 4-17 に示すとおり、透水圧を変動させ、側圧は一定にした条件（図中の透水圧変動）で、供試体の剥離の進行が大きくなり、残留圧裂強度の低下も最も大きくなった。

また、加圧剥離促進養生時間を 2, 4, 6 時間と変化させて見たが、図 4-18 に示すとおり、4 時間を超えると残留圧裂強度の低下度合が鈍ることから、促進時間は 4 時間とした。以上の結果を踏まえ、表 4-4 に示す加圧剥離促進の養生条件を決定した³⁾。

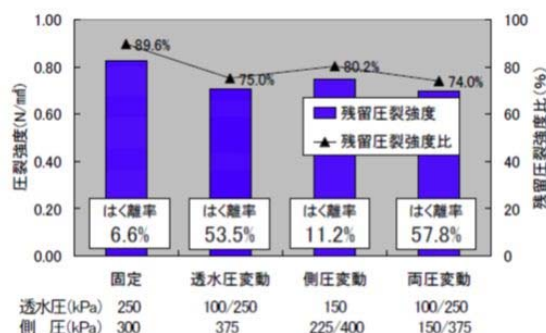


図 4-17 加圧剥離促進条件の比較 (透水圧)

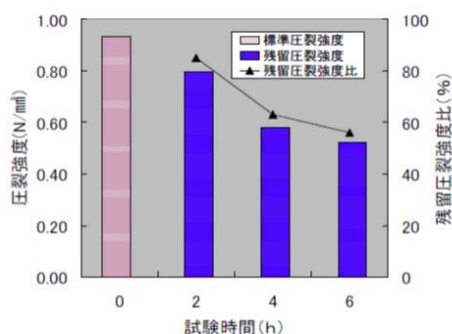


図 4-18 加圧剥離促進条件の比較 (促進時間)

表 4-4 加圧剥離促進の養生条件

項 目	設 定 値	備 考
透水圧	100, 250kPa	各 5 分で 1 サイクル
側圧	375kPa	最大透水圧の 1.5 倍
水温	60℃	透水・側圧水とも
試験時間	4 時間	10 分×24 サイクル

4.2.2 評価基準値の検討

既設基層混合物の剥離抵抗性を評価するためには、混合物の耐水性を判断する基準値が必要であり、加圧による剥離促進を行わない圧裂強度（以下、「標準圧裂強度」と）、加圧剥離促進養生後の圧裂強度（以下、「残留圧裂強度」）、および、この比（以下、「残留圧裂強度比」という3つの指標を用いて、その検討を行った。ここで、高機能舗装化後に局部流動などの損傷が生じた現場（図 4-19 の凡例に示す（高））と、密粒舗装の現場（同（密））において、何れも目視では損傷の見られない箇所の現場切取り供試体を用いて、圧裂試験を実施した。その結果を図 4-19 に示すが、図中にプロットした塗り潰しマークは、圧裂試験後の供試体破断面に剥離が見られたもので、白抜きマークは剥離が見られなかったものである。この試験において、供試体破断面の剥離の有無および、標準圧裂強度と残留圧裂強度の関係から、危険エリアを示した。まず、残留圧裂強度比 80%以下のものには供試体破断面に剥離が見られたため、これを剥離損傷が生じる危険性があるエリアとした。次に、残留圧裂強度比が 100%あっても、残留圧裂強度が 0.78N/mm^2 以下になると、供試体破断面に剥離が見られたことから、この残留圧裂強度を危険エリアの境に設定した⁴⁾。

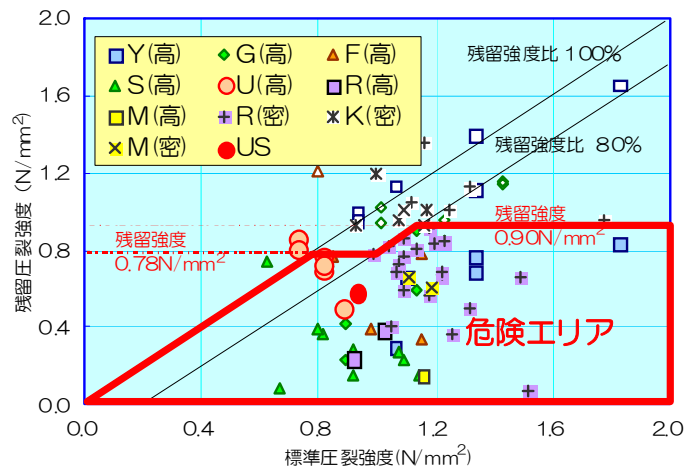


図 4-19 切取りコアによる圧裂強度の分布と判定基準

4.2.3 採取コアによる基層の評価

高速道路においては、4.2.2 節で提案した評価方法に従い、供用路線で高機能舗装を使用する際、既設の基層混合物からコアを採取し、前述の促進養生を用いた圧裂試験により基層の耐水性を評価している。関東地域においても、2007 年からこの手法により得られた圧裂強度の値をも

って既設の基層打換の必要性を判断しているが、2011 年までのデータで、その傾向を分析してみた。

図 4-20 に、関東地域的高速道路 163 区間で採取した基層混合物の圧裂試験結果を示す（図のプロットは 1 区間最低 3 個のコアの圧裂強度の平均値）。これらは、補修工事を行う箇所において行う事前調査の一環として非わだち部からコア採取したものであり、補修の必要がない健全な区間のデータは含まれていない。これら試験データを全体としてみれば、調査区間の約半数は前節提案した危険エリア内に分布していることが判る。

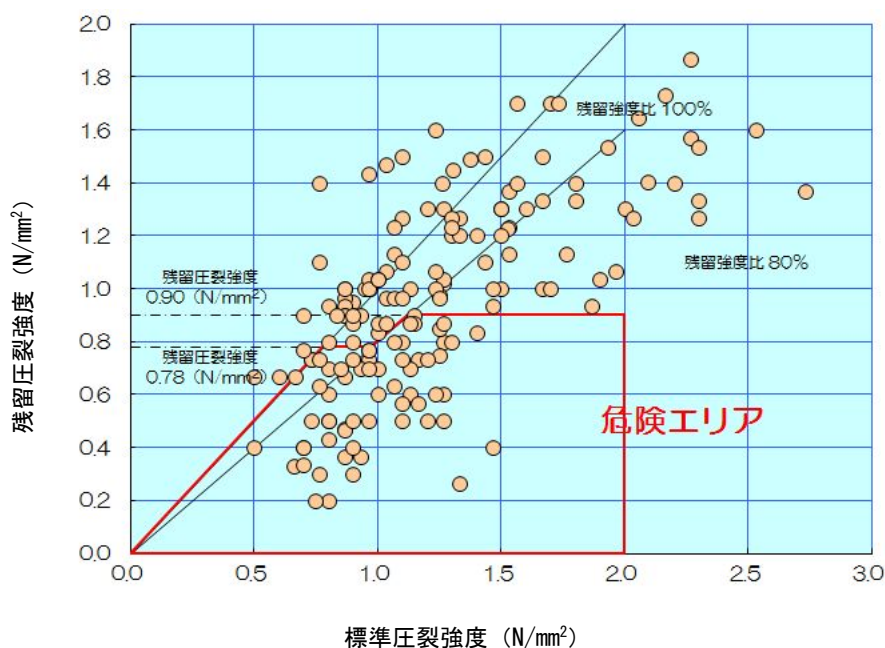


図 4-20 関東地域的高速道路から採取したコアの圧裂強度分布

次に、これらのデータを幾つかの条件別に分類し比較してみる。まず、図 4-21 には地域別に分けた値を示すが、標準・残留圧裂強度ともに、積雪寒冷地域の方路線の方が若干高い値であるが、それほど差異はなく、残留圧裂強度は 0.8 N/mm^2 程度の平均値であることから、基層の耐水性は十分とは言えない。これは、設計要領上、積雪寒冷地域に区分される路線があるとはいえ、関東地域においては、夏季に高温多湿となる気候はほぼ共通しており、基層からの損傷が発生しているような路線は総じて供用年数が長く、大型車交通量も多いという特徴があり、関東エリア内での地域性はあまり大きくないと考察できる。

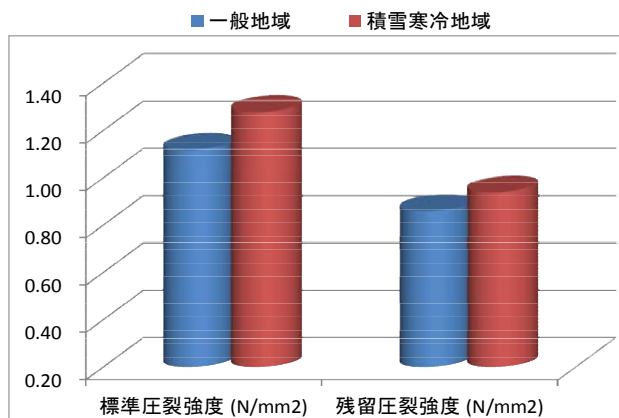


図 4-21 地域区分による圧裂強度の違い

もうひとつの分類は、表層の舗装種別による基層の耐水性の違いである。この結果を図 4-22 に示すが、ここで特徴的なのは、標準圧裂強度で見ると、高機能舗装区間の基層の値が非常に低くなっているが、残留圧裂強度を見ると、密粒舗装区間の基層も同じ程度に低い値を示している点である。全国的に見れば、図 4-13 や第 5 章（図 5-25）で後述するように、表層が密粒舗装の場合は、基層への雨水の浸透が少なく、高機能舗装を採用した区間に比べ、基層の耐水性はそれほど低下していないのが一般的な傾向である。しかし、関東地域の高速道路においては、密粒舗装が残っている区間であっても、基層から採取したコアを加圧透水試験により剥離促進させると、耐水性が急激に低下する傾向にあることがわかった。これは、既設の表層のみ密粒舗装を高機能舗装に更新すると、それまで一見問題がなく、まだ使用可能なように見えた既設の基層混合物が、雨水の浸透を機に急激な耐水性の低下を生じ、高機能舗装化後の早期に破壊に至る懸念が大きいことを示唆していると考えられる。

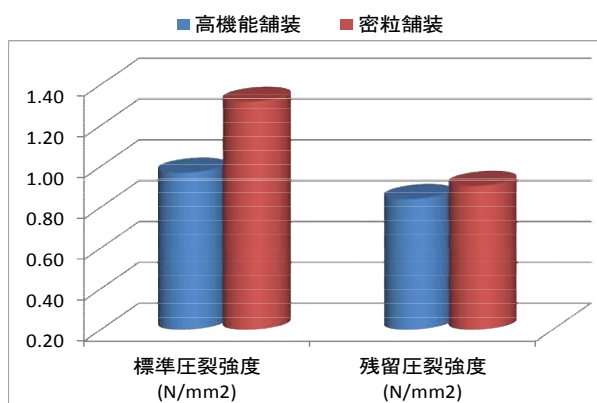


図 4-22 表層種別による圧裂強度の違い

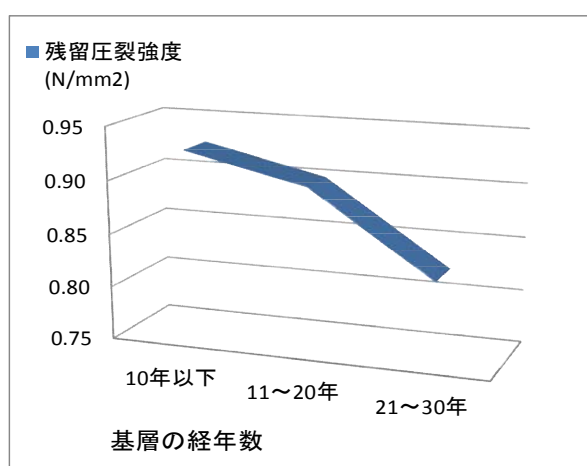


図 4-23 基層の経過年数と残留圧裂強度

このような傾向が関東地域の高速道路に見られる理由として、先ほど述べた供用年数が考えられるが、この観点で、基層の経年数の着目し、試験データを分類したものが図 4-23 である。これを見ると、基層混合物の使用年数が 20 年を超えると、混合物の耐水性（残留圧裂強度）は急激に低下する傾向にあり、関東地域の高速道路は総じてこのような路線が多いという特徴が、例えば、密粒舗装を表層に使い続けてきた場合であっても、基層混合物の耐久性は徐々に低下している要因と考えられ、このような状況において、既設の基層を存置したまま高機能舗装を採用することは、損傷発生リスクが非常に高い補修方法だと言える。

4.3 開削調査による損傷実態の解明

ここまでは、高機能舗装を採用した箇所が発生した損傷について、その原因を解明すべく、コアを採取し、室内試験による評価を行った結果を基に論じてきたが、さらに、下層（舗装内部）の損傷状況を詳細に把握するため、実路における開削調査を実施した。

4.3.1 調査箇所の選定

開削調査は、現地の舗装がどのようにして脆弱化しているのか、その原因だけでなくメカニズムを調べるに最も有効な調査手法であるが、長時間の交通規制を伴うため、供用中の高速道路で実施することは容易ではない。しかし、雨水の浸透経路や下層混合物の脆弱化の実態を解明することは、有効な対策方法を立案する上で大変重要であると考え、実施箇所を限定して行うこととした。

調査対象としては、開通から20年近く経過している長野道の盛土および切土区間において、高機能舗装によく見られるポンピングが発生している箇所を選定した。その際、軟弱地盤や構造物の裏込め部等を避け、舗装以外の影響のない箇所で調査を実施することにした。表4-5に開削実施箇所の履歴を示し、各工区の現況路面を写真4-10に示す。

表 4-5 開削箇所の舗装

調査箇所	舗装構成	日交通量	開通 (供用年数)	補修履歴	現状
A工区 (盛土)	表層 4cm 基層 6cm アスファルト 12cm 粒状路盤 18cm	約2万台/ 1方向・ 2車線	H5.3 (19年)	H10に表・基層を打換し、H17の補修時に表層に高機能舗装を採用。 H22に再度部分打換。	わだち掘れが15-20mm程度発生。一部にポンピングあり
B工区 (切土)	表層 4cm 基層 6cm アスファルト 12cm 粒状路盤 18cm	約2万台/ 1方向・ 2車線	H5.3 (19年)	H9に表・基層を打換し、H17の補修時に表層に高機能舗装を採用。 H22に再度部分打換や応急補修を実施。	わだち掘れは10mm以下だが、ポンピングが多発している状況



写真 4-10 開削調査箇所の路面状況（左：A工区、右：B工区）

4.3.2 調査の方法

A工区は、高機能舗装区間でポンピングが発生している箇所と、その隣接部にはまだ密粒舗装が表層に残っている区間もあったので、これを合わせて開削調査を行い下層の状態を確認することとした。また、B工区については、高機能舗装区間の中で、路面にポンピング等の損傷が発生している箇所とそうでない箇所を比較した。調査は、写真 4-11 に示すように、カッターを用いてアスファルト層を切断撤去し、その断面の目視観察を行い、その後、下層路盤の試料を採取し、室内試験により物性値の比較を行った。

現場での観察内容としては、各層の変形、ひび割れ状況、雨水の浸透とそれに伴う混合物の細粒分流出や脆弱化の有無、層間の接着性等に着目した。なお、本調査の計画は、過去に他機関で実施された道路や空港の開削調査の方法を参考に立案したものである^{5) 6)}。



写真 4-11 開削調査の作業状況

4.3.3 調査の結果

今回の開削調査で得られた知見を以下に示す。

- ① 写真 4-12 は、A工区でアスコン全層を撤去し、下層路盤を露出させた様子であるが、ポンピングが発生している箇所の直下は、その周囲とは異なり、下層路盤面に粗骨材が多く集まっている状況であった。表 4-6 に、A工区で採取した路盤材の粒度を示すが、密粒舗装区間や高機能舗装区間でもポンピングが発生していない箇所

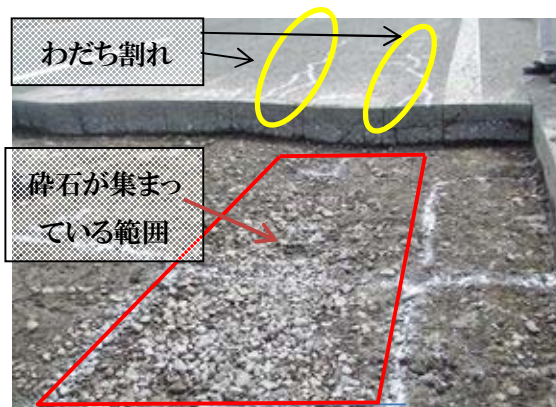


写真 4-12 ポンピング発生個所の路盤状況

所の下層路盤材の粒度はほぼ同じであるのに対し、このポンピングが発生しているわだち部（OWP）の下層路盤は、礫分が非常に多く、細粒分が少ないことがわかる。当該箇所においては、アスコンは7年前に全層打換されており、開削断面を見てもそれほど脆弱化していないことから、ポンピングにより下層路盤の微粒分が路面に噴出し、粗骨材が取り残された状態になっている、と考えられる。

表 4-6 A工区の下層路盤材の粒度試験結果

採取位置 粒度分布	密粒舗装区間			高機能舗装区間		
	路肩	OWP	BWP	路肩	OWP	BWP
礫分(2mm以上) (%)	80.8	78.2	79.0	76.6	92.6	79.8
砂分(75 μ m～2mm) (%)	12.6	13.8	11.7	13.2	4.6	11.7
シルト分(5～75 μ m) (%)	5.5	4.5	5.0	7.5	1.8	5.0
粘土分(5 μ m以下) (%)	1.1	3.5	3.8	2.7	1.0	3.5

また、この部分の下層路盤内には、写真 4-13（左）に示すように、多量の水が含まれており、いわゆる「膿んだ」状態であった（R I 計による含水比計測の結果では、A工区の下層路盤は、平均で 4～5%程度の含水比であったが、ポンピング直下では約 6.9%だった）。

B工区においても、ポンピング発生箇所直下の下層路盤は水分が多く（R I 計の含水比は、周囲が 6～7%に対し、最も高い所では 9.1%）、周囲の路盤材は明るい茶色であるのに、ポンピング直下は鼠色に変色していた（写真 4-13（右）参照）。



写真 4-13 ポンピング発生箇所の路盤滞水
（左）A工区 （右）B工区

② これら下層路盤に含まれている水は、どこから浸入してきたのか。ポンピングが発生している箇所は、路面に亀甲状のひび割れが発達していることが多く、このひび割れを通じて、下層の微粒分が、通過車両による繰返し載荷時の垂直圧力により噴出し、その体積減少分が路面沈下として現れるため、このひび割れから雨水が下層へと浸透することは容易に想像できる。

しかし、それ以外にも、雨水の浸透経路は存在することが、本調査で明らかになった。

B工区のポンピング発生個所を開削したところ、アスコン層と下層路盤面の間に隙間が確認できる箇所があった。

そこで、**写真 4-14** に示すように、センターライン上にある縦施工目地に着色水を流し込んだところ、通常は高機能舗装の空隙を伝わり、表層の中を着色水が道路勾配に従い流れるだけであるのが、ポンピングが発生している箇所では、この着色水が、アスコン層の下を通して出てきた（**写真 4-15** 参照）。



写真 4-14 施工目地への着色水の流し込み



写真 4-15 ポンピング発生個所の水みち

つまり、施工目地から浸入した雨水が、アスコン底面と下層路盤の層境に隙間があるところを流れ、下層路盤内に滞水したことがわかる。このB工区は、**写真 4-10（右）**に示すように左カーブの切土区間である。この場合、地山からの地下水等あれば、道路勾配の低い路肩側に水が集まることが想像されるが、当該現場では、勾配上流側の右わだち部にばかりポンピングが頻発している状況であった。センター

ライン上に設けられた施工目地から雨水が浸入したことが、その道路勾配の下流側直近に位置する右わだち部の路盤を脆弱化させ、ポンピングが発生した直接の原因となっていることが明らかになった。

高速道路の建設時においては、フィニッシャーを2台並べ全幅員を同時に舗設するホットジョイント工法を用いるとともに、縦施工目地の位置を各層毎にずらすことで、施工目地部の密実性を確保しているが、供用後に補修工事を行う際は、車線規制内での施工を行わざるを得ないことから、センターラインや側帯脇に施工目地が揃ってしまい、また、その付近は施工端部となるため混合物の十分な締固めが難しい。今回の開削調査では、路面のひび割れに加え、この施工目地からの雨水の浸透があり、その付近のアスコンや粒状路盤に異常を来している箇所が見られた。これは、新千歳空港⁶⁾や九州道⁷⁾等の現地調査でも明らかになっており、こういった箇所から雨水が舗装体内へ浸入することで、アスファルト混合物の剥離や粒状路盤の細粒分の流出が引き起こされていると推察できる。

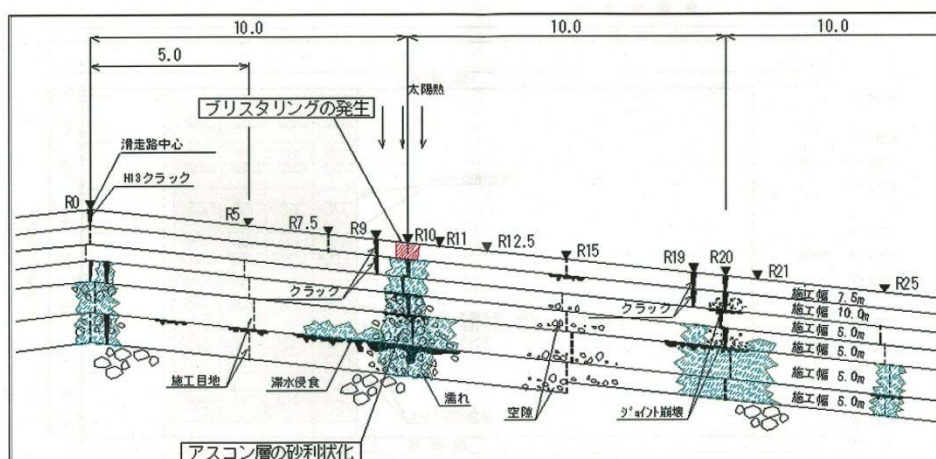


図 4-24 施工目地部の雨水浸透とアスファルト層の細粒分流出に関する調査例⁶⁾

- ③ 今回の調査でポンピングが発生している箇所の開削断面を観察すると、写真4-16に示すような、アスベース層の下部に骨材間が緩み水分の滞留しやすい個所が存在した。また、わだち部直下のアスベースにも同様の緩みが見られる箇所があった（写真 4-17の赤丸部分）。これは、路面が健全な個所の混合物には見られなかった現象である。



写真 4-16 ポンピング直下のアスベースの緩み



写真 4-17 わだち部のアスベースの緩み

写真 4-18 は、A 工区において事前に採取したコアの状況であるが、表・基層間および基層とアスベースの間で、層間が切れていることに加え、アスベースの下部が破碎されている様子がわかる。今回の開削断面の状況と合わせると、恐らく、上の写真に示すような状態の箇所からコアを採取したものと思われる。何故、アスベースの下部が緩んでいるのかは、今後詳細な検討が必要だが、下層路盤の滞水箇所に接しているアスベース混合物が剥離することや、脆弱化し支持力が



写真 4-18 開削箇所の事前採取コア

低下した下層路盤が交通荷重を受ける際に変形することで、アスコン下面に大きな曲げ応力が発生し、その繰返しにより混合物に緩みが生じてくるのではないかとと思われる。

- ④ 次に、ひび割れからの浸透水がアスコンの層間接着に与える影響も明らかになった。

写真 4-19 は、外側線に沿って発生しているひび割れ部の開削断面を写したものである。レーンマークはアスファルト舗装との色や材質の違いから、ひび割れが発生することが多いが、ここから浸透した雨水が、舗装の層境を水平方向に流れている様子が伺える。当該箇所の舗装は、過去に表・基層の厚さ 10 c m を同時に補修しており、



写真 4-19 外側線のひび割れからの浸透水

一方、アスベースは既設のままである。よって、ひび割れからの浸透水は、基層とアスベースの境、つまり切削面を流れていることを意味する。

当該箇所のアスコン層を切出し観察したところ、表・基層とアスベースの層間は完全に切れており、補修工事の際に切削面へ散布したアスファルト乳剤は残っていなかった（写真 4-20）。



写真 4-20 層間接着力が消失されたアスファルト舗装

この他にも、開削箇所において切出したアスファルト層にハンマーで打撃を加えると、右の写真に示すように、混合物中における凝集破壊ではなく各層間で剥がれるものが多かった。

過去に名神高速で行われた調査でも、路面に亀甲状ひび割れが発生している箇所で開削を行い、その断面を調べたところ、アスコンの層間に隙間が見られた写真が報告されている⁸⁾。

以上の事より、これまで乳剤で接着していると考えられてきたアスコンの層間接着力は、ひび割れからの浸透水によって徐々に低下し、長期的には付着切れを起こすことがある実態が確認できた。



- ⑤ A工区においては、密粒舗装と高機能舗装の2箇所で開削調査を行ったが、両者を比較したところ、下層路盤から試料採取した土質試験の結果に一部違いが見られた。

表 4-7 A工区の下層路盤材の土質試験結果

採取位置	密粒舗装区間			高機能舗装区間		
	路肩	OWP	BWP	路肩	OWP	BWP
自然含水比 (%)	2.0	4.2	3.7	5.1	4.3	4.3
液性限界 (%)	NP	30.4	35.0	28.8	34.3	36.2
塑性限界 (%)	NP	13.4	15.5	17.3	16.8	17.7
塑性指数 (%)	NP	17.0	19.5	11.5	17.4	18.5

ここで、表 4-7 に示す物性値を見ると、車道部（走行車線）の下層路盤材にそれほどの違いはないが、路肩部の材料は大きく異なっている。両区間の距離は 200m しか離れておらず、同じ建設工事で施工した盛土区間であり、しかも下層路盤材は、仮設のソイルプラントで混合・出荷していることから考えても、建設段階で異なる材料で施工したとは考えられない。開通後も下層路盤の補修履歴はないことから、19 年間の供用期間中に物性値が変化したものと考えざるを得ない。なぜ路肩部の材料のみ違いを生じたのか疑問であるが、一つの要因として、当該区間は、写真 4-10（左）に示すように路肩勾配であるため、雨水が浸透すれば自然、路肩部に集まりやすく、また、高機能舗装区間の方が路面からの雨水が下層に浸透しやすいという条件にはなっている。路肩部は交通荷重を受けないので、下層に滞水があってもポンピングが発生することはない。表 4-6 に示す路盤材の粒度分布を見ても、密粒舗装区間と高機能舗装区間に大きな差はないが、雨水の浸透・滞水のしやすさには違いがあることから、含水比や塑性指数の値にはその差が表れている可能性がある。

4.4 第4章のまとめ

「高機能舗装」の本格導入に伴い発生した損傷について、採取コアを用いた試験や現地での開削調査を通じて、実態の把握を行うとともに、脆弱化が見られる基層混合物について耐久性の評価手法を立案し、脆弱化の実態を解明した。以下に、ここで得られた知見をまとめる。

- 1) 供用中の高速道路において、既設の表層（密粒混合物）を高機能舗装に切替した場合に、早期に損傷が発生するケースが見られるようになった。調査の結果、局所的な流動やひび割れを生じ、ポットホールに至る損傷形態が夏場に多く発生する傾向があり、損傷箇所では基層混合物の剥離が甚だしく、高機能舗装には問題はなくとも、この基層の脆弱化が元となり路面までの損傷が生じることが分かった。
- 2) この損傷形態は、夏期に高温多雨となる地域の供用年数の長い重交通路線で、多く発生する傾向にあり、これは、アスファルト混合物が剥離する条件に符合する。そのため、基層混合物の損傷度を判定する際には、剥離抵抗性に着目した試験が有効であり、60℃の温水を用いた加圧透水によりアスファルト混合物の剥離を促進させた後に圧裂試験を行い、その圧裂強度で評価する方法が最も良いと考え、評価基準を定めた。
- 3) 一方、積雪寒冷地域における高機能舗装の損傷は、冬季のタイヤチェーン等による摩耗（ラベリング）が多く、1) 2) で述べた一般（温暖）地域に多発する損傷が表層を高機能舗装に打換した後の早期に発生しやすいのとは異なり、経年数と共に次第に表層の骨材飛散が進行するものであり、基層の損傷は少ない。
- 4) 2) に示す条件に合致する地域の高速道路においては、密粒舗装区間であっても、基層混合物の耐久性は経年的に低下しており、表層を高機能舗装に更新することをきっかけに、雨水の浸透により急激に脆弱化し、早期に破壊に至る可能性が大きい。
- 5) 密粒舗装が路面排水であるのに対し、高機能舗装の場合は、雨水は表層内を浸透し基層上を道路の縦横断勾配に従い路肩に設置する排水工まで流下する。この際に、雨水に接する基層混合物の上面から剥離が進行すると考えられてきたが、今回開削調査を行った結果、ひび割れや施工目地から下層路盤にまで雨水が浸透し、ポンピングの原因となっている場合もあることが確認できた。
- 6) また、下層路盤に滞水や脆弱化が見られる箇所では、アスベースの下面に混合物の緩みが生じている場合が多く、今後、下層路盤とアスコンの界面に着目し、詳細な調査を行う必要がある。
- 7) 従来のアスファルト乳剤による各層間の接着力が長期的に保持されているかは懐疑的であり、本開削調査により、ひび割れ等からの浸透水が、アスファルト混合物の層間接着力を消失させている実態が明らかになった。

参考文献

- 1) 川村和将, 高橋茂樹, 菅野勝一: J Hにおける高機能舗装化に伴う下層部の耐水対策について, 舗装誌, Vol. 37 No. 3, pp. 16-21, 2002
- 2) 舗装試験法便覧, 日本道路協会
- 3) 本松資朗, 神谷恵三, 松本大二郎, 山田 優: 既設基層混合物のはく離抵抗性の評価方法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第9巻, pp. 73-79, 2004
- 4) 設計要領第1集舗装編, 日本道路公団, pp. 73-79, 2004
- 5) 丸山記美雄: アスファルト舗装の疲労寿命予測と力学的設計手法の構築に関する研究, 学位論文, 2009
- 6) 阿部隆二, 岳本秀人, 衛藤謙介: 新千歳空港舗装体の劣化原因調査および対策工法の検討, 土木学会舗装工学論文集, 第8巻, pp. 261-272, 2003
- 7) 本松資朗, 出雲真仁, 風戸崇之: 高機能舗装 I 型に於ける車線縦継目の止水の重要性について, 土木学会第 67 回年次学術講演会, pp. 771-772, 2012
- 8) 高速道路ネットワークの長期保全計画に関する検討会, 中日本高速道路,
<http://www.c-nexco.co.jp/corp/construction/maintenance/longtermplan.html>, 2009
- 9) 高橋茂樹, 吉野公朗, 早川泰史, 原田秀一, 砂金克明: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクトー検討の概要ー, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp. 835-836, 2013
- 10) 高橋茂樹, 吉野公朗, 早川泰史, 原田秀一, 砂金克明: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクトー調査結果ー, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp. 837-838, 2013

第5章 損傷実態を踏まえた対応策

前章で、高機能舗装に特徴的な損傷形態を調査で明らかにし、その原因を考察したが、本章では、これを踏まえた技術的対応策について述べる。ここでの着目点は、大きく以下の3点である。

- ① まず最初に、補修すべき個所の選定方法に関する課題を述べ、その対応策を提案する。
- ② 次に、雨水の浸透によるアスファルトの剥離という損傷原因に対し、抵抗性の大きい材料および混合物の使用を提案するとともに、交通事故対策としての効果を保持しつつ、下層への雨水浸透を防ぐ新たな表層用混合物の開発について述べる。
- ③ 前章に述べた開削調査で明らかになった、施工目地からの雨水浸透を防止する材料の開発と工法の提案

5.1 補修箇所の選定方法

5.1.1 現行の補修基準

道路舗装は永久構造物ではなく、供用期間中に、部分的な補修あるいは打換による更新を繰返しながら、使用される。そのために、道路管理者は、舗装の供用性状をどの程度に保つべきかを念頭に、補修を行うための管理基準をそれぞれ定めている。高速道路においても、安全性や走行快適性の観点から、あるいは舗装の構造体としての耐久性の観点から、高速道路舗装として有すべき性能に関していくつかの指標を用いて定めており、それを路面管理を行うための基準（目標値）として維持管理業務で運用している。表5-1に示すこの目標値は、舗装の損傷を表す各指標が、この値に達するまでに補修を行うことが望ましいことを示すものである。これらの補修目標値は、道路維持修繕要綱（日本道路協会）¹⁾に示されている、維持修繕要否判断の目標値を準用したものであり、基本的にはNEXCOが管理する全国的高速道路・一般有料道路の全てに一律の目標値を適用している。

表5-1 現行の路面管理基準（補修目標値）

管理指標	わだち掘れ	すべり 摩擦係数	平坦性	段差	ひび割れ率
高速自動車国道 自動車専用道路	25mm	μ (80) 0.25	IRI 3.5mm	20/30mm*	20%

*橋梁の取付部/横断構造物の取付部

供用中の高速道路の舗装が、この路面管理基準に照らし合わせ、どの程度の供用性状にあるか、路面性状測定車により2～3年毎に、路面に発生しているわだち掘れやひび割れ、平坦性の実態を計測することで把握を行うとともに、経年的な進行量を予測し、修繕時期を見越した費用の計上と補修計画に活用している。しかし、近年の高速道路では、以前の表層に用

いられてきた密粒舗装に比べ、耐流動性に優れる高機能舗装を採用しているため、わだち掘れは減少し、ひび割れ率や平坦性を見ても、路面管理基準（補修目標値）に達するものは非常に少なくなっている。

図 5-1～図 5-3 には、NEXCO 東日本で最も交通量の多い関東地域で平成 21 年度に実施した路面性状測定の結果を示す。高速道路本線における全舗装資産のうち、補修目標値に達している箇所は、わだち掘れはわずか 0.1%，ひび割れは 1.2%，平坦性の指標として用いている IRI（国際ラフネス指数）は 1.3%と、いずれもわずかな割合に留まっている。これは、全国的に見ても同じ傾向にあり、この計測データからは、一見、高速道路の路面は非常に良好な状態にあるように見受けられる。しかし、毎年実施している舗装の補修工事の量は決して減ってはならず、NEXCO 発足以来の関東地域の実績を見ると、年間で 80～120 万 m²程度の補修面積で推移しており、補修費用も減っていない。また、図 5-4 に示すように、関東地域においては、管内 5,455 車線 km（平成 23 年度末時点）の路面のうち 7 割近くを占める高機能舗装の補修サイクルが、密粒舗装に比べ短くなってきているという実態もあり、ここに大きなギャップが存在している。

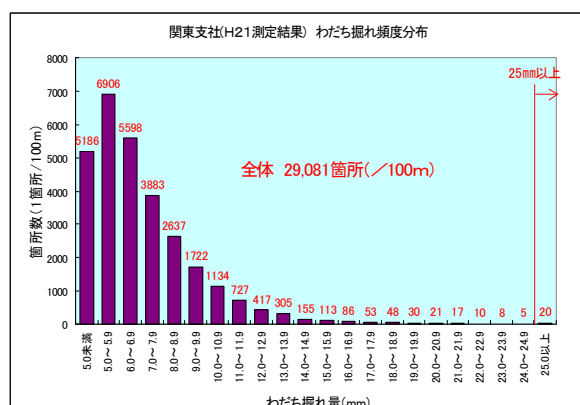


図 5-1 路面性状測定車によるわだち掘れ計測結果の例

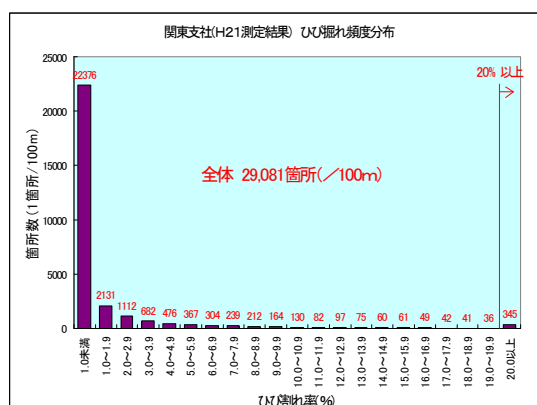


図 5-2 同測定車によるひび割れの計測結果の例

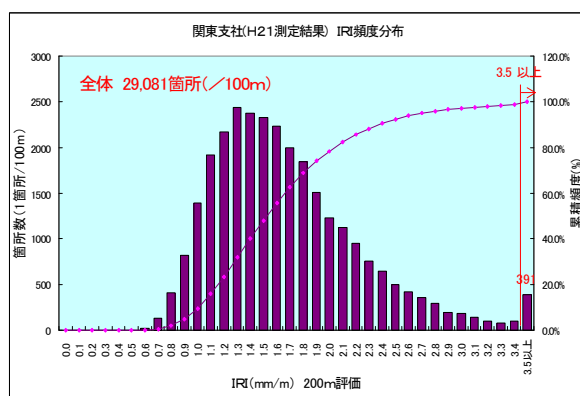


図 5-3 同測定車による平坦性の計測結果の例

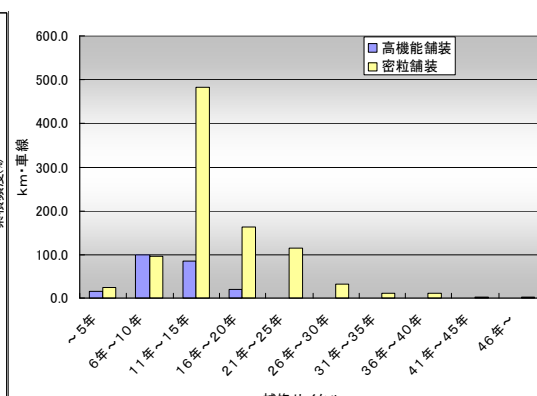


図 5-4 表層種別と補修サイクルの比較

また、東北地域においても、密粒舗装が主体であった時代に補修要因の約8割を占めていたわだち掘れは大きく減少したが、これに代わってひび割れの発生による補修が増加しており、全補修対象箇所78%がひび割れによるものとなっている。また、平成18～19年度までは補修箇所の8割は表層のみの補修であったが、平成20年度以降になると、基層からの補修が約半数となっており、補修面積（施工延長）に目立った変化はなくとも、補修費用が増加している実態がある。

現地の管理事務所において、舗装の補修が必要な箇所を選定する際には、前述の路面性状測定車による計測結果をベースに検討を行う。しかし、実際の路面に何らかの損傷が発生し、技術者判断としては補修すべきと思われる箇所の計測データをチェックすると、補修目標値には全く達していない、という問題が近年急増している。そのため、現地の事務所では、路面の観察状況や利用者からの苦情等も含め、総合的に要補修箇所を判断せざるを得ない状況となっている。この原因を考察するに、高機能舗装特有の損傷形態が大きく影響していると考えられる。密粒舗装を表層に用いていた期間は、例えば、IC間全体に渡って、大きなわだち掘れが発生していたり（写真2-1）、ある程度の延長でひび割れが発生している区間がある（写真5-1）、といった損傷形態が主流であった。一方、高機能舗装の場合、このような損傷はあまり顕著ではなく、主な損傷形態としては、局所的な流動（写真4-3）やポンピングを伴うひび割れ・沈下（写真4-6）、ポットホール、といった、いずれも小規模な範囲で損傷が発生し、それが点在する（後に、その箇所が急増する）という特徴が見られる。図4-1に示したとおり、高速道路で発生した高機能舗装の損傷形態は、冬季のタイヤチェーンによるラベリングを除けば、そのほとんどが、局所的な損傷であることがわかる。また、NEXCOのある地域で、同じような経年数を有する路面を比較して見たところ、密粒舗装区間におけるポットホールの発生密度が0.3箇所/kmであったのに対し、高機能舗装を用いた区間では1.3箇所/kmと、4倍以上も多く発生しているという報告もある。



写真5-1 高速道路におけるひび割れ発生例

前述の局所的な損傷について、路面性状測定車による評価との関係を検討した。図 5-5 に、路面性状測定車の計測データから得られるひび割れ率の算出方法を示す。はじめに、車両に搭載された撮影装置で路面を撮影し、メッシュ法により、ひび割れ部のメッシュ個数をもって対象ひび割れ面積を算出する。路面管理基準の指標として採用しているひび割れ率は、この算出方法において、（面状ひび割れ面積＋線状ひび割れ面積×0.3＋パッチング面積）／調査対象面積）として計算される値である。ここで、線状ひび割れとはメッシュ内に 1 本存在するものを、面状ひび割れとはメッシュ内に 2 本以上存在するものをいう。線状ひび割れの場合、重みとして 0.3 を乗じ、100m を評価長として平均値で表す²⁾。

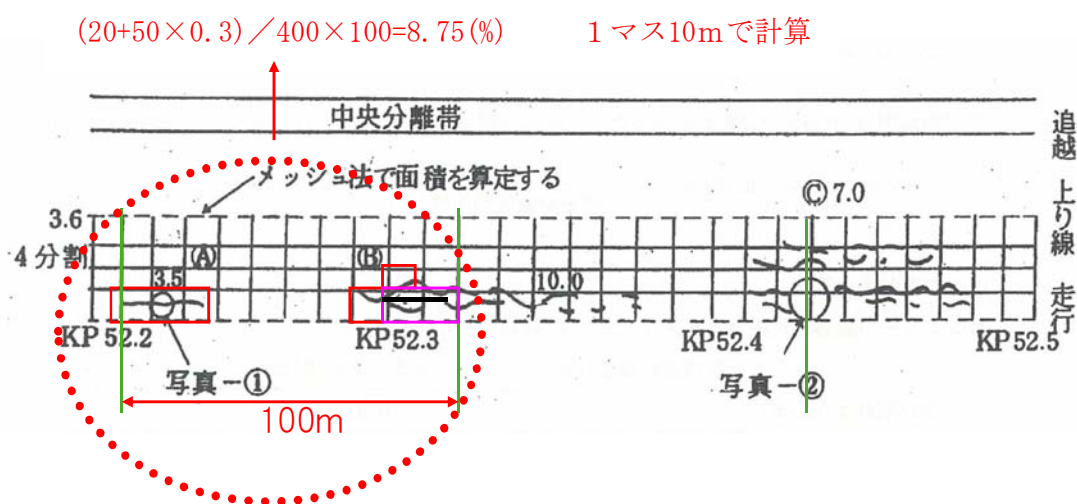


図 5-5 ひび割れ率の算出方法²⁾

わだち掘れ量や平坦性（IRI）についても、ひび割れ率同様、100mまたは 200mの測定延長を評価長とした平均値として表す。しかし、ある程度の延長に渡り、同一種類の損傷が連続する密粒舗装においては、損傷実態を把握できていたこの評価方法は、高機能舗装に対しては、損傷の発生形態が異なることから、局所的に路面性状が劣悪であっても、周辺部に異常がない場合、評価長としている 100m区間で見ると平均化され、さほど大きな値とならない、という問題が浮かんできく。表 5-2 にその一例を示すが、評価長を従来の 100mとした場合には、ひび割れ率は最大でも 15%未満であるが、評価長を 10mと短く区切って算出した場合には、補修目標値である 20%を上回る箇所が多く点在することがわかる。高機能舗装の場合、わだち掘れは発生しにくいのであまり問題とはならないが、局所的な沈下や、橋梁ジョイントを含めた構造物と土工部の境に発生しやすい段差についても、平坦性の評価長を変えると、補修目標値を超える箇所数が随分異なってくることがわかる。これが、現地で実際に損傷を確認し補修を行うべきと考える技術者と、路面性状測定車による評価結果が一致しない最大の原因であり、高機能舗装の場合に、顕著に見られる問題と言えよう。

表 5-2 評価長による路面性状測定結果の違い

ひび割れ率(100m平均)	5.4									
ひび割れ率(10m平均)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.3	37.5
ひび割れ率(100m平均)	9.7									
ひび割れ率(10m平均)	0.0	0.8	5.3	0.0	1.5	12.8	14.8	15.8	27.0	19.3
ひび割れ率(100m平均)	6.6									
ひび割れ率(10m平均)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.3	22.5	0.0
ひび割れ率(100m平均)	14.6									
ひび割れ率(10m平均)	0.0	0.0	0.0	12.5	30.5	5.3	50.0	21.0	19.3	7.8

もうひとつ、現地の管理事務所から寄せられる声が、高機能舗装の場合は、損傷が発生するまでの時間が短い、という指摘である。舗装の補修工事を計画する際、事前調査を行い、路面性状測定車も踏まえて、要補修箇所を選定するのだが、工事前には異常がなかった場所でも、工事中に新たに損傷が発生するケースが多い、という意見である。最近、NEXCO 東日本では、舗装工事の工期を2年程度とするものが多いが、例えば、工事の1年目に補修を行った箇所の隣接部で翌年損傷が発生する（1年目に異常はなかった）という事例が最近よく聞かれる。

また、積雪寒冷地においては、冬から春先にかけて舗装の損傷が多発するという実態も報告されている。図 5-6 は、NEXCO 長野管理事務所管内の路面損傷の発生報告数を月別に表したグラフであるが、年度により報告数に差はあるものの、損傷の発生時期としては、1～4月に掛けて特に多くなる傾向が見られる。

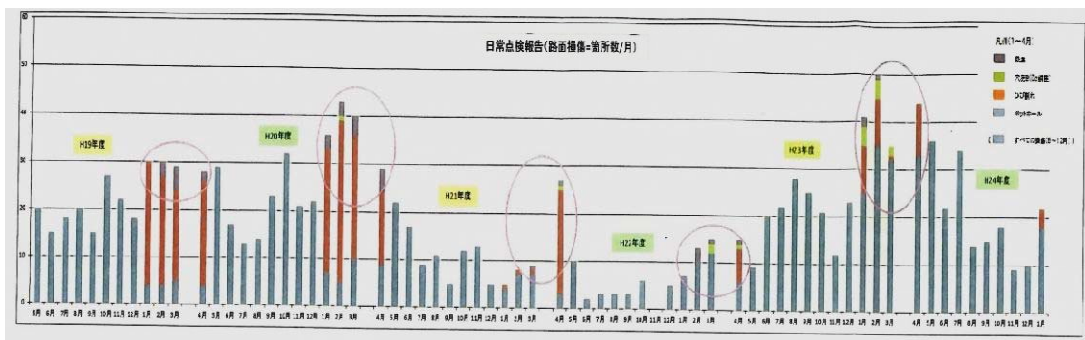


図 5-6 積雪寒冷地における高速道路路面の損傷発生数の季節変動

このように、高機能舗装は、密粒舗装のように経年的に路面性状が漸次悪化していくのとは異なり、短期間に突然損傷が発生し出すという特性が見られるが、現況の路面性状測定車による調査は、80km/h の高速走行で計測ができる車両を使用してはいても、高速道路の管理延長が非常に長いため、全ての路面を網羅するには、2～3 年毎の調査間隔となっており、高機能舗装の損傷実態を十分把握することが難しい状況にある。これもまた、路面性状測定の結果が補修箇所を選定に上手く活用できない要因となっている。そこで、本研究では、これ以外の点検手法として、現地の管理事務所です定期的に実施している日常点検で得られるデータの活用ができないかを検討することにした。

5.1.2 点検データの活用

NEXCO の道路点検には、日々あるいは毎週実施している日常点検、毎年あるいは数年に一度実施する定期点検、異常気象時や地震の際に行う緊急点検がある。このうち、舗装に関しては、日常点検とは、交通量によって頻度は異なるが毎週 1～数回程度、車上からの目視による路面調査を行うことを指し、路面性状測定車による調査は定期点検として位置付けられている。この車上から行う日常点検には、以下の長所があると考えている。

- ・全ての管理事務所が、全路線について行う点検であり、全ての舗装資産を観察網羅している
- ・毎週実施しており、点検頻度が高いため、異常個所の早期発見ができる
- ・各管理事務所には点検管理者が常駐しており、同じ技術者が管内を調査している。また、その評価方法は点検要領に定められており(表 5-3 参照)、点検結果のバラツキは少ない
- ・車上からの目視調査であるため、周囲と比べ局所的に損傷や異常がある箇所が点検結果で報告されやすい
- ・特別な調査測定機器を必要とせず、点検費用が安価である。また、点検記録は、システム上に保存されており、集計や分析が可能である

表 5-3 保全点検要領に示す評価基準³⁾ (アスファルト舗装分を抜粋)

5-1 判定の標準(舗装)

表 5-1-1 判定の標準(舗装)(1/2)

(注) 数値はおおまかな目安を示している。

対象 舗装 箇所	点検 項目	点検部位	点検の種別	判定の標準		
				A/A	A1-A2	B
舗装	舗装	アスファルト舗装 コンクリート舗装	①ポットホール・穴あき・はがれ	□陥凹 20mm 以上かつ延 20cm 以上の陥凹のはがれ等がある。	□A/A に当てはまらない陥凹のはがれ等	—
			②陥凹・ポットホール・舗装の目地部・陥凹・ひび割れ	□陥凹の表層はがれなどに、著しい陥凹があり、ハンドルが刺さったり、走行車両が激しくバウンドする場合。 □陥凹表層部において、20mm 程度以上の陥凹がある。 □陥凹表層部・切盛部において、30mm 程度以上の陥凹がある。	□陥凹表層部において、10mm 程度以上 20mm 程度未満の陥凹がある。 □陥凹表層部・切盛部において、10mm 程度以上 30mm 程度未満の陥凹がある。	—
			③おだもれ	□陥凹におだもれがあり、ハンドルが刺さったり、走行車両が激しくバウンドする場合。 《※考慮》25mm 程度以上	□A/A に当てはまらない陥凹のおだもれ。 《※考慮》16mm 程度以上 25mm 程度未満	—
			④ひび割れ	□陥凹にポットホール・はがれ等の発生につながるひび割れが発生している場合。 □舗装本体の性状につながる大きなひび割れが発生している場合。 《※考慮》ひび割れ率 20% 程度以上	□A/A に当てはまらない陥凹のひび割れ。 《※考慮》ひび割れ率 10% 程度以上 20% 程度未満	—
			⑤陥凹の凹凸・コルゲーション	—	□陥凹の凹凸が大きく、乗り心地が悪い。 □コルゲーション(凹凸)の量が 30mm 以上	□陥凹の凹凸が認められる。 □コルゲーション(凹凸)の量が 10mm 以上 30mm 未満
			⑥陥凹・坑・くぼみ	□陥凹に陥凹・坑・くぼみがあり、ハンドルが刺さったり、走行車両が激しくバウンドする場合。	□A/A に当てはまらない陥凹の陥凹・坑・くぼみ	—
			⑦路面性状の劣化	—	□おだもれ部分に陥凹・坑・くぼみがある。	—
			⑧路面性状の劣化	—	□陥凹・坑・くぼみ部分に陥凹・坑・くぼみがある。	—
			⑨ポテンシャル	□陥凹に陥凹・坑・くぼみの発生が認められ、かつ、陥凹・坑・くぼみの発生が認められる。	□陥凹に陥凹・坑・くぼみの発生が認められる。	—
			⑩アスファルト・コンクリート舗装の目地部	□ポットホールに陥凹・坑・くぼみがある場合は、①の判定による	□陥凹の陥凹が大きく、あるいはアスファルト・コンクリート舗装の目地部に陥凹・坑・くぼみの発生が認められる。	□A/A に当てはまらない陥凹の陥凹
			⑪目地の破損	—	□目地の破損・陥凹・坑・くぼみの発生が認められる。	—
			⑫サベリ・車輪の磨下	—	—	—
			⑬路面性状の劣化	—	—	—

凡 例
① 異常等がある場合には、判定を「C」(悪化)とし、陥凹・坑・くぼみの調査を行う。

図 5-7 日常点検結果の報告様式（NEXCO 東日本）

現在、この日常点検の結果は、管理事務所内において、どの道路資産をいつ補修すべきかという検討に使用されているが、本研究では、これらの点検データを、路面性状調査に加え、要補修箇所を選定手法としてさらに活用できないかという視点で、舗装の損傷発生数と補修実態との関係性について、分析と評価を試みた。

5.1.3 点検データの分析評価

(1) 対象地域の概要

管理事務所が実施している日常点検のデータを用いて、どのような評価が可能であるかを検討するため、関東地域の 1 事務所分の点検データをサンプルとし、分析を行うこととした。

分析対象とした事務所は首都圏の 3 路線を管理しており、表 5-4 に示すとおり、総道路延長は 64.9km である。供用年数が長い路線が多く、管内のほとんどが、既に高機能舗装となっている。また、直近 5 年間における舗装の補修サイクルは約 10 年だが、供用年数が長い路線の方が補修サイクルが短い傾向にある。また、図 5-8 に示すように、近年は、基層や上層路盤（アスベース）までの補修を必要とする箇所が増加しており、特に横浜横須賀道路において、表層からアスベースまでの 3 層を打換する箇所が目立ってきている実態がある。

表 5-4 分析対象とした事務所が管理する高速道路

路線	延長	車線延長	車線数	供用年数	高機能舗装化率			補修年数 (前5年平均)
					H20	H22		
						全体	ASのみ	
第三京浜道路	16.6km	97 km・車線	6車線	約45年	94.2%	95.9%	96.1%	8.8年
横浜新道	11.3km	49.1 km・車線	6車線 4車線	約50年 (拡幅部 約15年)	91.8%	93.1%	100.0%	8.0年
横浜横須賀道路	32.8km	113.2 km・車線	4車線 2車線	約30年 約20年 約2年	91.7%	92.1%	96.8%	14.5年
横浜横須賀道路 金沢支線	4.2km	14.3 km・車線	4車線	約20年	54.7%	54.7%	70.3%	12.9年
全体	64.9km	273.6 km・車線	－	－	90.7%	91.8%	96.0%	10.4年

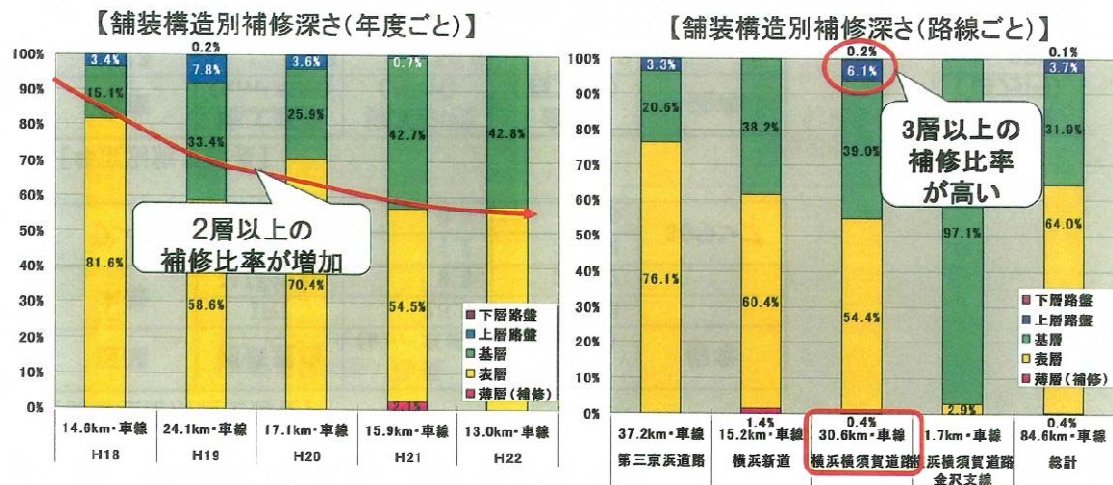


図 5-8 分析対象とした事務所の舗装補修実態

本検討では、事務所に記録が残されている、2001 年 4 月から 2011 年 10 月の 10.5 年間分の日常点検データと、1994 年度から 2011 年度までの補修履歴を使用し、全てのデータは 10m を単位長として整理した。また、以下の検討では、点検データのうち、最も報告数が多い損傷形態であるポットホールのみを対象とした場合と、表 5-5 に「分析対象」として示す損傷項目を使用する場合、2 通りの分析を試みた。

表5-5 分析対象とする点検データの種類

点検データの種類		分析対象	
損傷項目	形態の詳細	する	しない
わだち掘れ	ある区間で全体的に発生		●
	局所的な盛り上がり・コブ	●	
	亀甲状クラックも発生	●	
	沈下も発生	●	
	ポットホール化	●	
ひび割れ	ある区間で全体的に発生		●
	横断クラック		●
	縦断クラック		●
	亀甲状	●	
	ポンピングを伴う	●	
	沈下を伴う	●	
	ポットホール化	●	
	局所的な盛り上がり・コブ	●	
その他	ポンピング	●	
	沈下の発生	●	
	局所的な盛り上がり・コブ	●	
段差			●
滞水			●
縦断凹凸 /コルゲーション	分合流部、延長の長いもの		●
	局所的なもの	●	

これに関し説明を加えるが、ある区間全体に渡り発生しているようなわだち掘れやひび割れは、路面性状測定車で測定されるので、本検討では検討の対象から外しており、また、単発的な横断あるいは縦断クラックは、シール材の注入等による処理で賄われることが多く、段差修正や滞水対策等も小規模保全工事での対応となる場合が多いため、除外している。

一方、表 5-5 で分析対象とした項目は、単純な路面のキズに留まらず、基層以下の混合物の劣化や脆弱化が懸念される損傷形態であることから、「重度損傷」と表現し用いることにした。

基本道路区間を 10m とした場合、今回の分析に使用した総サンプル数は約 5.1 万点あり、日常点検記録にあるポットホールが発生個数は 885 件、重度損傷は 435 件であった。

表 5-6 に、分析区間の概要を示す。これを見ると、ポットホールや重度損傷の発生状況は IC 間で違いがあることがわかる。また、表 5-7 には、ポットホールの発生個数の比を、車線別および道路構造別に示し、管内の車線・道路構造延長比と比較したものであるが、同表から、ポットホール発生割合は、走行区分に関しては走行車線（第一走行車線、第二走行車線の両方を含む）で高く、道路構造では土工部での発生割合が高いことがわかる。

表5-6 各IC間の点検データ（その1）

	自	至	IC自	IC至	延長	上下線	走行区分	大型車交通量	サンプル数	サンプル数 高機能 仮定あり	PH発生 個数	重度損傷 発生個数	PH発生 個数/km	重度の損 傷発生個 数/km
横浜新道	起点	保土ヶ谷	0	0.6	0.6	上り線	1走	3,435	402	463	9	3	15.0	5
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	保土ヶ谷	常盤台出口	0.6	1.5	0.9	上り線	1走	6,856	685	803	25	8	27.8	8.88889
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	常盤台出口	峰岡	1.5	1.9	0.4	上り線	1走	4,523	91	251	2	1	5.0	2.5
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	峰岡	星川	1.9	2.61	0.71	上り線	1走	6,143	656	695	7	1	9.9	1.40845
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	星川	藤塚	2.61	4.31	1.7	上り線	1走	5,409	1,321	1,327	27	12	15.9	7.05882
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	藤塚	新保土ヶ谷	4.31	4.61	0.3	上り線	1走	5,409	243	243	2	0	6.7	0
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	新保土ヶ谷	今井	4.61	5.81	1.2	上り線	1走	6,467	1,026	1,026	54	17	45.0	14.1667
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	今井	川上	5.81	7.41	1.6	上り線	1走	5,466	1,379	1,379	50	18	31.3	11.25
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	川上	上矢部	7.41	9.31	1.9	上り線	1走	5,546	1,685	1,716	63	34	33.2	17.8947
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	上矢部	戸塚終点	9.31	12.59	3.28	上り線	1走	4,708	654	933	29	17	8.8	5.18293
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
第三京浜道路	玉川	京浜川崎	0	2.1	2.1	上り線	1走	3,566	2,001	2,148	13	6	6.2	2.85714
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	京浜川崎	都筑	2.1	7.7	5.6	上り線	1走	4,323	5,784	5,899	106	41	18.9	7.32143
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	都筑	港北	7.7	10.7	3	上り線	1走	5,339	3,468	3,468	35	16	11.7	5.33333
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	港北	保土ヶ谷	10.7	16	5.3	上り線	1走	6,652	6,468	6,544	72	45	13.6	8.49057
							2走							
						下り線	1走							
							2走							
	保土ヶ谷	終点	16	16.5	0.5	上り線	1走	6,652	259	414	1	1	2.0	2
							2走							
						下り線	1走							
							2走							

表 5-6 各 IC 間の点検データ（その 2）

	自	至	IC 自	IC 至	延長	上下線	走行区分	大型車交通量	サンプル数	サンプル数高機能仮定あり	PH発生個数	重度損傷発生個数	PH発生個数/km	重度の損傷発生個数/km
横浜横須賀道路金沢支線	釜利谷TB	堀口能見台	1.21	3.11	1.9	上り線	1走 追	4,030	800	1,079	36	28	18.9	14.7368
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	堀口能見台	並木	3.11	4.2	1.09	下り線	1走 追	1,935	128	485	15	8	13.8	7.33945
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
横浜横須賀道路	新保土ヶ谷	起点	0	1.2	1.2	上り線	1走 追	20,254	1,132	1,132	20	8	16.7	6.66667
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	起点	狩場	1.2	1.6	0.4	下り線	1走 追	20,254	303	303	11	7	27.5	17.5
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
	狩場	狩場JCT	1.6	1.8	0.2	上り線	1走 追	5,470	103	103	1	0	5.0	0
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	狩場JCT	別所	1.8	4.41	2.61	下り線	1走 追	5,470	1,568	1,604	31	12	11.9	4.5977
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
	別所	日野	4.41	8.91	4.5	上り線	1走 追	5,290	2,359	2,406	41	7	9.1	1.55556
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	日野	港南台	8.91	10.61	1.7	下り線	1走 追	5,040	695	695	5	1	2.9	0.58824
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
	港南台	釜利谷JCT	10.61	12.81	2.2	上り線	1走 追	5,307	1,136	1,289	10	5	4.5	2.27273
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	釜利谷JCT	朝比奈	12.81	14.71	1.9	下り線	1走 追	5,879	1,536	1,536	3	1	1.6	0.52632
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
	朝比奈	逗子	14.71	20.3	5.59	上り線	1走 追	4,808	3,858	4,170	54	27	9.7	4.83005
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	逗子	横須賀	20.3	22.6	2.3	下り線	1走 追	4,586	1,519	1,667	32	17	13.9	7.3913
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
	横須賀	衣笠	22.6	27.8	5.2	上り線	1走 追	3,324	4,192	4,199	85	86	16.3	16.5385
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	衣笠	佐原	27.8	29.7	1.9	下り線	1走 追	1,705	1,192	1,325	46	8	24.2	4.21053
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							
	佐原	浦賀	29.7	32.9	3.2	上り線	1走 追	286		1,280	0	0	0.0	0.0
						下り線	1走 追							
						上り線	1走 追							
	浦賀	馬堀海岸	32.9	33.98	1.08	下り線	1走 追	62		432	0	0	0.0	0.0
						上り線	1走 追							
						下り線	1走 追							

表 5-7 ポットホールの発生状況

車線	損傷比率	延長比	道路構造	損傷比率	延長比
走行	79.9%	59.1%	土工部	77.5%	68.9%
追越	20.1%	40.9%	橋梁部	18.9%	27.4%
			TN内	0.9%	3.8%

表 5-8 重度損傷の発生状況

車線	損傷比率	延長比	道路構造	損傷比率	延長比
走行	88.5%	59.1%	土工部	91.7%	68.9%
追越	11.5%	40.9%	橋梁部	6.9%	27.4%
			TN内	1.4%	3.8%

表5-8には、「重度損傷」の発生個数の比を、車線別および道路構造別に示し、管内の車線・道路構造延長比と比較したものであるが、こちら、追越車線に比べ走行車線での発生割合が高く、道路構造で見ると土工部での発生割合が高いことがわかる。

(2) 点検データの結果と補修実態の関係

前節で述べたように、舗装の日常点検データを調べると、IC間で損傷の発生数にかなりの違いがあることが判る。この事実を踏まえ、日常点検の結果と、実際の補修履歴との関係を検証して見た。

繰り返しになるが、これまで補修箇所を選定は、路面性状測定車の測定データを基に、表 5-1 に示す路面管理基準に照し合せ、わだち掘れやひび割れ率等の指標が補修目標値に達するかどうかで判断しており、日常点検のデータは、パッチングやシールといった局所的な小補修の実施判断に用いられてきた。そのため、日常点検の結果は、補修工事の実施個所を選定に、直接的な活用はされていないが、点検で損傷が多数報告されている区間は、そうでない区間に比べ、舗装の健全性が低いことを表しているとすれば、補修が必要と判断し工事を行った実績も多いのではないかという仮説を立て、その検証を行うことにした。

ここで、今回の分析に使用した、過去 18 年間の補修履歴から、同一箇所を 2 回以上補修を繰り返した面積を当該 IC 間の車線面積で除した値を「再補修比率」と表現することにした（「再補修比率」100%とは、全面積を 2 回打換した状態に相当する）。また、補修回数に寄らず、基層以深を打換した面積を当該 IC 間の車線面積で除した値を「基層補修率」と表現し、この値との比較も行った（「基層補修率」100%とは、全ての舗装面積を基層まで打換した状態である）。なお、点検報告数に加え補修履歴においても、同一 IC であっても上り線と下り線で大きな差異が生じていたことから、上下線それぞれの補修実態との比較を行うことにした。

まず、「重度損傷」に該当する点検報告数と「再補修比率」の関係を、3路線の全IC間を通して調べてみたが、図5-9に示すように、両者にはそれほどの相似性は見られない。次に、「重度損傷」と「基層補修率」についても、同様に比べたところ、図5-10に示すとおり、相似性が強く、車線キロ当たりの重度損傷数が多いIC間は「基層補修率」が高い傾向にあることが読み取れた。

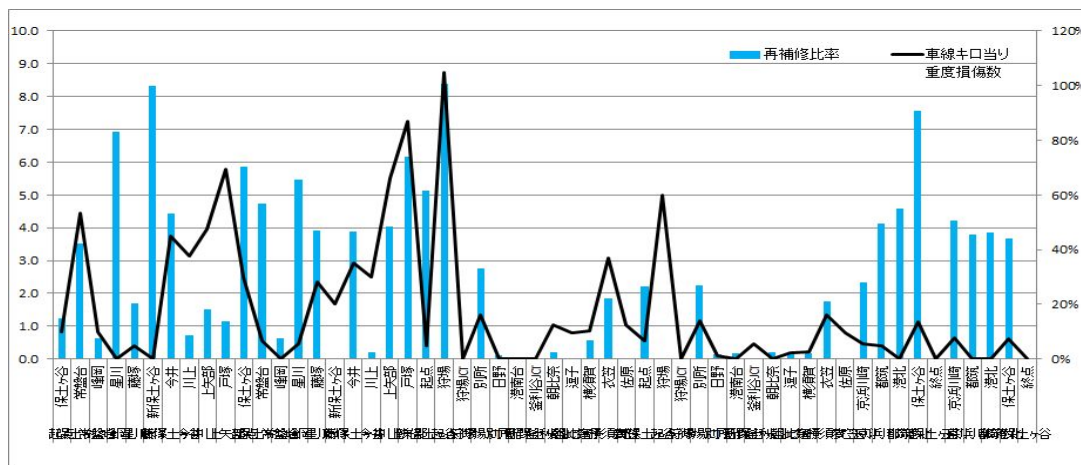


図5-9 重度損傷数と再補修比率の関係

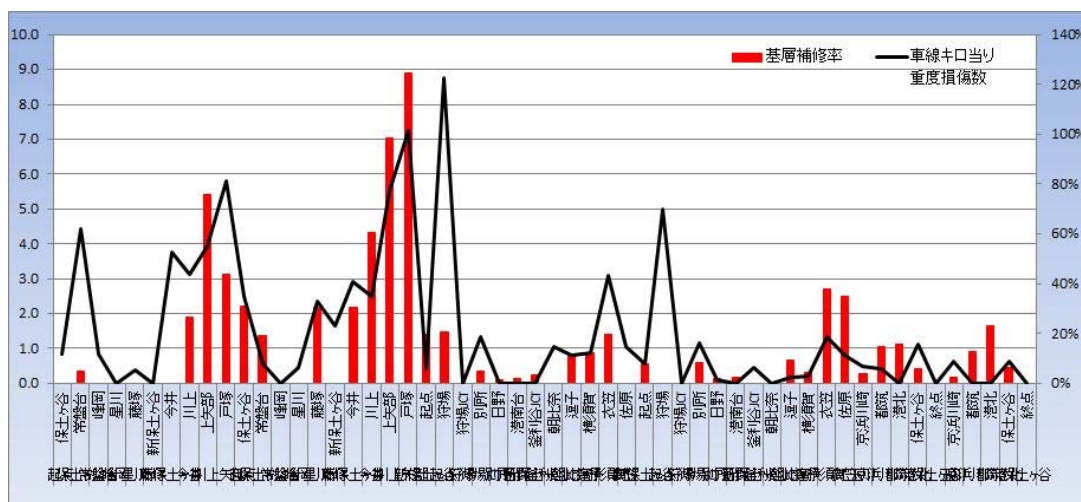


図5-10 重度損傷数と基層補修率の関係

これは、「重度損傷」と定義した損傷形態は、単なる路面の損傷ではなく、4.1節で述べた高機能舗装を採用してから顕著に見られる基層の脆弱化が主な原因であるため、補修時には損傷している基層を含めた打換補修を行うことが多く、必然的に点検データと補修履歴の両者には関連性があるということが、得られた結果の背景となっていると考える。

図5-11に示す左右の図を比べても、表層のみの補修実績も含まれている「再補修比率」よりは、基層からの打換実績のみをカウントした「基層補修率」の方が、重度損傷数との関係性が高いことが伺える。

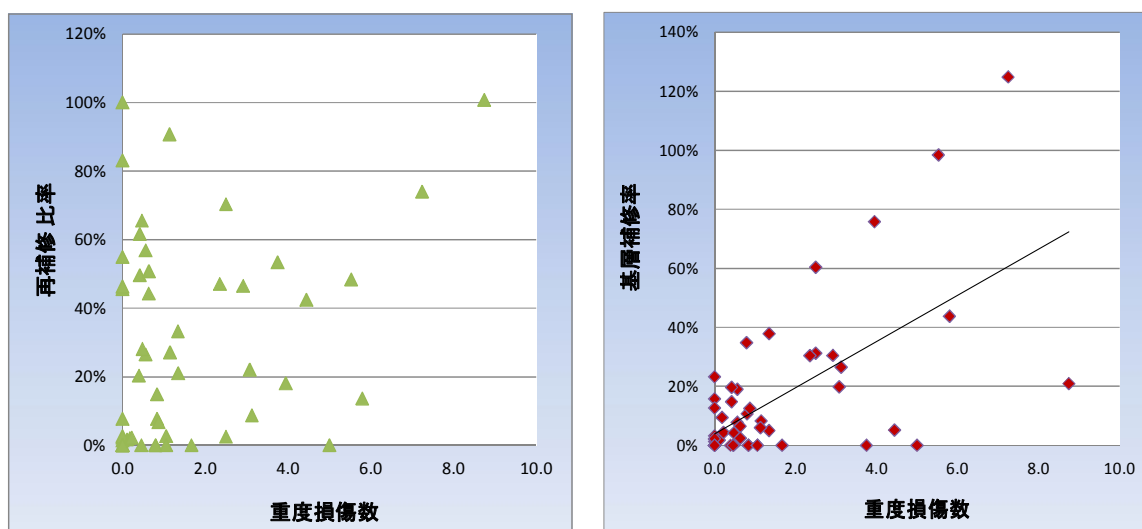


図 5-11 (左) 再補修比率と重度損傷数の関係 (右) 基層補修率と重度損傷数の関係

現状の道路管理においては、日常点検で路面の損傷が発見・報告されると、まずは各管理事務所に常駐しているグループ会社がパッチング等の応急的な処置を行っており、この日常点検データをもって、ただちに舗装会社に別途発注する補修工事の実施判断を行っているわけではない。しかし、従来から補修工事の対象箇所の選定根拠としてきた路面性状測定データでは把握しきれない局所的な損傷が高機能舗装化に伴い急増しており、日常点検の結果を、表 5-1 に示す現行の路面管理基準に加えることで、基層からの補修を優先的に行うべき区間を効率的に抽出できると考えている。

なお、高機能舗装の場合は、局所的な損傷が発生し、それが漸次、点群化してくる傾向にあるため、スポット的に補修箇所が選定される状態になりがちである。しかし、現実の補修を考えると、あまりに短い延長では機械施工が困難となり、補修工事が非効率になるとともに、品質の確保もできなくなる懸念があることから、施工性を考慮した一定区間長を補修工事の基本単位として設定し、その中で損傷発生箇所がある割合に達した段階を要補修時期とする、といった現実的な判断が必要となる。その際には、今回の分析に加え、舗装の破壊確率に基づく評価を取り入れ、要補修段階を決定すべきと考える。

なお、このように選定した補修箇所において、深さ方向をどの層まで補修対象とすべきかについては、4.2.3 節で述べた採取コアを用いた圧裂試験の結果による混合物性状と、既往の研究成果⁴⁾であるFWDによる舗装のたわみ測定の結果から判断すればよい。

5.2 使用材料および混合物

次に、補修対象箇所を選定した後は、どのような材料と混合物を使用し補修を行うべきかを検討する。その際には、既設のアスファルト舗装がどのような原因で損傷したかを踏まえ、対策

を講じることが、補修後の再発防止と舗装の耐久性確保に重要となるため、以下に具体的方策を述べる。

5.2.1 材料（骨材・バインダ・剥離防止剤）

第4章で述べたように、供用路線において高機能舗装化後に損傷が発生した箇所を調査すると、基層混合物に剥離現象が確認されることが多いことから、損傷発生の大きな要因として、使用骨材の剥離抵抗性の低さが考えられる。

アスファルト混合物における剥離というのは、避けては通れない課題であり、骨材にとっては一般的にアスファルトより水の方が馴染みやすいという材料の基本物性に基づくものである。この剥離現象が何故起こるかというメカニズムについては諸説あるが、ここでは代表的なものとして、①界面張力と②電位差について述べる。

①は、骨材とアスファルトの間には界面張力が働いており、ここに水が介在すると同じく互いの間に張力が作用する。ここで右図に示すように、接触角 θ と呼ばれる、水とアスファルトの間に働く界面張力が 90° より大きいと、骨材からアスファルトが剥れるとされているものである（図5-12）。

また②は、多くの骨材は、骨材の表面がマイナスに帯電しており、水が浸入すると電気的にプラスである水素イオンが骨材に引き付けられ、アスファルトが剥されるというものである（図5-13）。

剥離現象は、密粒舗装を表層に用いていた時代においても、ポットホールや剥れ等の損傷発生の要因として、留意されてきたところであり、設計要領にも1960年代から、剥離の懸念がある場合は、剥離試験により確認を行うことが記載されている。

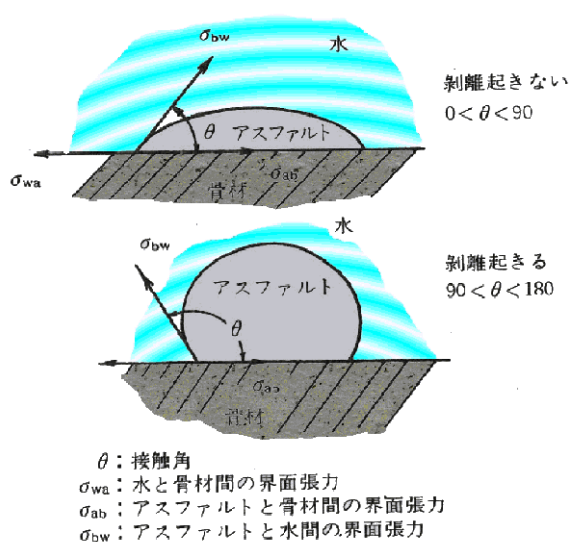


図5-12 剥離のメカニズム（界面張力）

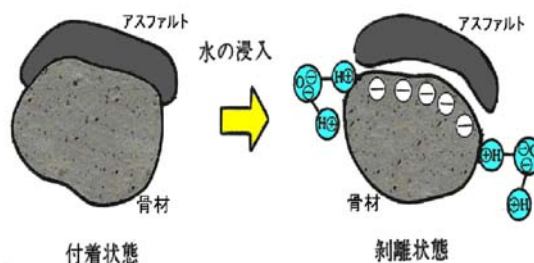


図5-13 剥離のメカニズム（電位差）

また、これに関する研究も行われており、剥離は、骨材とアスファルトの馴染みの程度により、石質でいえば、**表 5-9** で分類されている岩種のうちシリカ含有量の多い酸性岩はアスファルトとの馴染みが悪いことが知られている（**図 5-14** も参照）。しかし、剥離しやすい岩種と認識されている安山岩も産地によっては異なる性質もあり、例えば、2000 年～2010 年の

東北地域の舗装工事 207 件の実績では、後述するアスファルト被膜のはく離試験で評価したところ、安山岩を使用した 67 工事のうち 14 工事で剥離抵抗性が低い状況にあったが、アスファルトとの馴染みが良いと言われ国内で最もアスファルト舗装用骨材として用いられている砂岩

を使用した場合でも、74 工事中 12 工事で剥離抵抗性が低い骨材であったことが判っており、岩種区分のみで単純評価することは難しい。

そこで、設計要領の解説文には「初めて使用する骨材及び過去の使用実績や調査などから、剥離抵抗性に問題のある骨材については、アスファルト被膜の剥離試験を実施し、剥離抵抗性を確認しなければならない」と記載しており、高機能舗装の全面採用に伴い、アスファルト混合物が雨水の影響を受けやすくなったことで、剥離抵抗性の評価方法と、その目安となる値を検討することにした。

第 4 章で述べたように、水浸マーシャル試験（JHS-202）と骨材自体の剥離抵抗性を評価するアスファルト被膜のはく離試験（JHS-201）では、試験結果の関連性が低いため、現地で発生しているはくり現象との相関関係が比較的良好といわれる水浸ホイールトラッキング試験（舗装試験法便覧 3-7-4）の結果（以下、水浸 WT 剥離率）と、アスファルト被膜のはく離試験（JHS-201）の結果（以下、剥離面積率）の関係を調べた。

表 5-9 岩種の分類とシリカ含有率

シリカ含有率									
95%		66%		52%		45%		30%	
産 状	鉼 物 酸性 石英+長石 +雲母	長石 + 雲母+輝石	中 性 角閃石 雲母+輝石	塩 基 性 長石+輝石	超塩基性 長石+ かんらん石				
深 成 岩 (地下深所でゆ っくり冷却)	花 崗 岩	閃 緑 岩	はんれい岩	かんらん岩	大↑ 鉼物粒径 ↓ 小				
半 深 成 岩 (やや深所 で冷却)	石 英 斑 岩	ひ ん 岩	輝 緑 岩						
火山(噴出)岩 (地表で冷却)	石英粗面岩 流 紋 岩	安 山 岩	玄 武 岩						

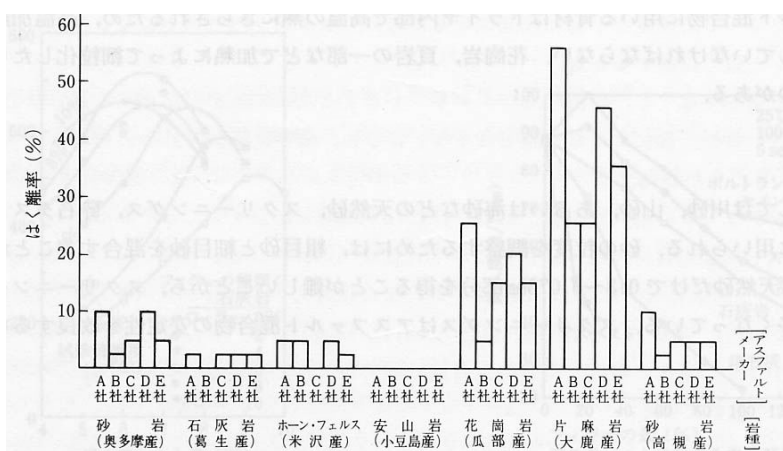


図 5-14 岩種や産地と剥離のしやすさの一例

ここで、剥離しやすさの異なる様々な粗骨材を用意し、まず初めに、試験法に従い、アスファルトでコーティングした粗骨材を 60℃の水中に 30 分間浸水させた後、写真 5-2 に示すように、アスファルトが剥がれた部分の面積を、「剥離面積率」として算出する。次に、これらの粗骨材を用いてアスファルト混合物を作製し、水浸ホイールトラッキング試験を行ったところ、両者の間には、図 5-15 に示すとおり、高い相関関係が見られた。



写真 5-2 剥離試験後の粗骨材

この水浸 WT 剥離率が 5%以下のものは、剥離抵抗性に問題がないと一般にいわれていることから⁵⁾、本実験で得られた関係式より、この 5%に対応する剥離面積率を 15%と求めた。

このことから、初めて使用する骨材および過去の使用実績や調査などから、剥離抵抗性に問題がある骨材については、アスファルト被膜のはく離試験を実施し、剥離面積率が 15%以上の場合には、水浸ホイールトラッキング試験を実施することとし、水浸 WT 剥離率が 5%以上であれば、使用骨材の変更または、剥離対策（消石灰、剥離防止剤等の使用）を行うこととした。

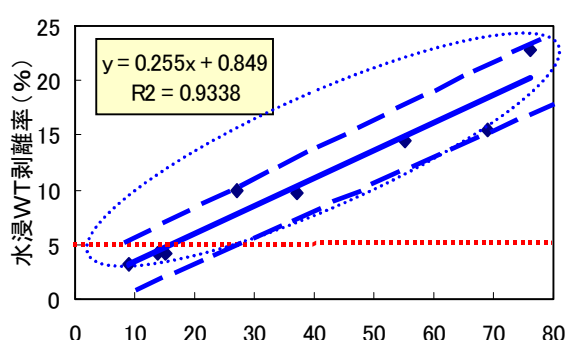


図 5-15 水浸 WT 剥離率と剥離面積率の関係¹⁾

ここで、現地の骨材事情を考えると、必ずしも近傍に良質の原石山がある訳ではないのだが、今後、高速道路の経年的な劣化・老化が進む一方、保全予算あるいは規制時間等の制約は大変厳しくなっており、大規模な補修はますます困難になると予想されることから、舗装工事を行う際には、耐久性を十分確保した混合物を使用すべきとの考えを優先した。

建設工事であれば、仮設プラントを設置し、骨材も短期間に大量に使用することから、ある程度は自由に選定・入手できる条件が整っているため、近傍に規定値を満足できる骨材がなければ、遠方から良質の骨材を運搬・使用している（長期的な視野に立てばコスト面でも有利と考える）。しかし、開通後の補修工事では、骨材の使用量も少なく定置プラントからの出荷になるので、建設工事のような対応は困難であるため、近傍の使用可能な定置プラントの骨材がいずれも剥離抵抗性に問題がある場合には、消石灰や近年市販されるようになった剥離防止剤等による対策を行うことにしている。

この剥離試験の義務化前、2000 年度～2004 年度の東北地域の舗装補修工事は 81 件あったが、剥離対策を行った工事はわずか 2 件しかなく、一方、使用骨材の試験結果を見ると、剥離面積率が 30%を超えるものが 6 件存在していた。これに対し、剥離対策が設計要領に定め

られた 2005 年度以降の工事 107 件を見ると、うち 14 件（率にして全体の 15.6%）の工事において、剥離防止剤あるいは改質アスファルトの使用実績が記録されている。

関東地域における 2005 年度～2008 年度の工事記録を調べると、補修工事数 66 件のうち、剥離防止剤の添加が 31 件で、改質アスファルトへの変更が 17 件であった。

ここで、剥離対策による効果の違いを、これら東北・関東の工事データで調査したところ、**図 5-16** に示すように、剥離防止剤を添加するよりも、アスファルト種別を変更する方が、混合物の剥離抵抗性が大きく向上することがわかる。

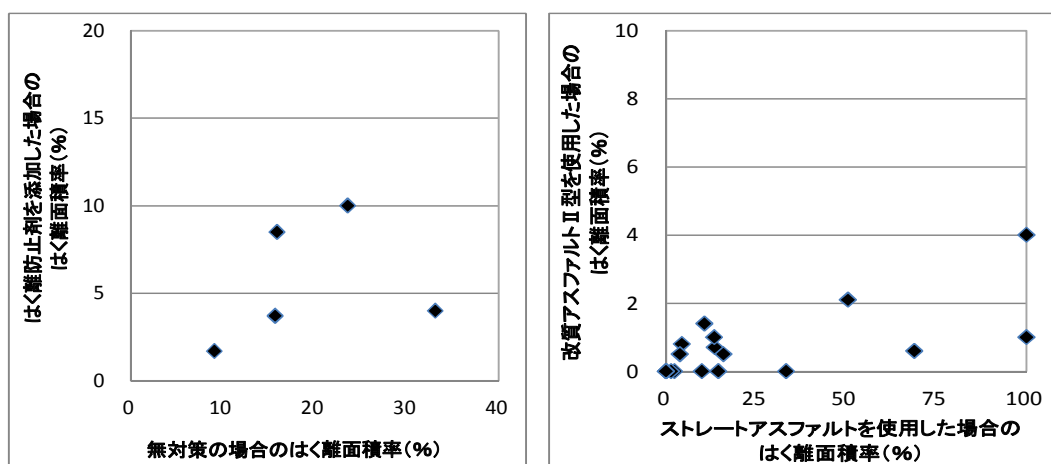


図 5-16 剥離対策の効果の違い（左：剥離防止剤の有無、右：ストアスと改質アスファルト）

図 5-17 にも、関東地域で行われた 2009 年度～2011 年度の補修工事の配合検討時の記録をまとめて見たが、ストレートアスファルトと改質アスファルトそれぞれの試験結果の頻度分布から、後者の方が剥離抵抗性が高くなっている。

以上、剥離試験を義務化することで、剥離抵抗性が非常に低い骨材で基層混合物を製造し、高機能舗装の直下に使用することを避けることができるようになった。また、改質アスファルトを基層に用いることで、混合物の剥離抵抗性を大きく向上させることができることから、東北地域よりも気象・交通条件の厳しい関東地域の高速道路においては、基層混合物に改質アスファルトを全面的に採用する合理性が高いと考える。これは、混合物の耐水性を改善すると同時に、流動わだち掘れに対する抵抗性も大きく向上することになるため、重交通路線を多く抱える地域においては、改質アスファルトを使用するメリットが特に大きいと考える。

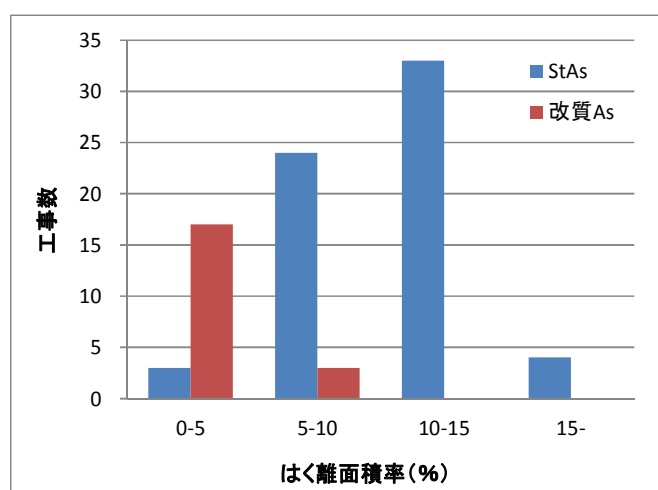


図 5-17 アスファルト種別と剥離面積率（工事実績分布）

5.2.2 混合物

第 4 章で述べたように、高速道路の基層混合物は、供用履歴が長く経年劣化が進んでいる場合が多く、その上の表層を高機能舗装にすることで、雨水の浸透により基層混合物の剥離が急激に促進され、早期に基層からの損傷が発生するという傾向が、近年多くみられる。そのため、NEXCO では、表層の更新を行う際は、5.1 節に記載した事前調査を行い、既設の基層混合物に剥離抵抗性が不足している場合には、表層だけでなく基層もこれに合わせ打替えを行う方針を打ち出している。近年、関東地域では、舗装の補修を行うほぼ全ての箇所が表・基層ともに補修対象となっており、気象・交通条件がそれほど厳しくない東北地域においても、2006 年度の工事実績では表層のみの補修が全体の 80%であったのが、2008 年度になると基層以深からの補修が約 50%を占めるようになってきている。

その際の基層混合物は、設計要領に示す水密性を高めた混合物を用いることで、高機能舗装を浸透してくる雨水に対する剥離抵抗性を高めているが、さらなる対策として、以下の 2 点を提案する。

- ・ SMA の土工部への採用
- ・ 新たな表層用混合物の開発

前者については、第 3 章で述べた SMA（碎石マスティックアスファルト混合物）が有する水密性の高さに着目し、橋梁部に加え、土工部にも使用するというものである。アスファルト量が多いことで、基層用混合物よりもコストはやや高いが、第 4 章で述べたように、剥離に起因する損傷の発生は一律ではなく、地域区分・大型車交通量・経年数の 3 条件に大きく依存することが明らかである。このことから、これら 3 条件に合致するような路線、つまり、気温の高い夏期が長く続く地域にあり、重交通で供用年数が長い路線においては、高機能舗

装を用いた場合に、基層からの損傷の発生リスクが大きいため、表 5-10 に示すように、基層用混合物に比べ、低めの目標空隙率を設定でき耐水性に優れる、SMAを基層に用いることは合理的であり、これにより舗装の耐久性を保持することができる。逆の言い方をすれば、全国で同じ基層混合物を用いた場合には、剥離を促進する条件に合致する路線では、その舗装寿命が短くなるのは自明の理である。

現在の設計要領には、土工部の基層混合物としては 1 種類に統一されているが、高機能舗装化に伴う舗装の損傷実態を鑑みれば、雨水の浸透に最も影響を受ける基層混合物は、路線条件により、SMAとの使い分けを行うことを提案する。

表 5-10 基層用混合物と SMA の粒度および目標空隙率の違い

ふるい目の開き (mm)	ふるい通過質量百分率 (%)	
	基層用混合物	碎石マスチック アスファルト混合物
26.5	100	
19.0	95～100	100
13.2	70～90	95～100
9.5	60～83	
4.75	42～67	30～50
2.36	30～53	20～35
0.6	15～30	
0.3	9～22	13～20
0.15	4～14	
0.075	3～7	8～13
目標空隙率 (%)	3～5	2～3

続いて、もう一つの提案である、新たな表層用混合物の開発について述べるが、その開発経緯について記しておきたい。

高機能舗装を、高速道路の標準的な表層用混合物として採用した後、長期的な供用性状の検証を行うべく、10 年間に渡る追跡調査を実施したことは第 3 章で述べたが、その中で以下の事実が知見として得られた。

- ① 高機能舗装の排水機能は、経年低下する。
- ② 一方、交通事故の低減効果には、経年的な変化はあまり見られない。
- ③ 高機能舗装路面のすべり摩擦は、密粒舗装に比べ高い状態を保持している。

まず、図 5-18 には、高機能舗装の排水機能の評価指標である現場透水試験の結果を示す。図中の凡例に示す「全平均」とは、冬季にタイヤチェーンによる摩耗を受け、空隙詰まりが発生しやすい、積雪寒冷地域を含めたデータであり、年々、単位水量(400cc)の透水に時間を要するようになることがわかる。一方、タイヤチェーンの影響が少ない一般地域においては、施工5年後までは透水時間の変化は緩やかであるが、10年後に測定したところ、良好な排水機能を有しているものから、ほぼ不透水となっているものまで、その状態は場所毎に大きく異なっていた。

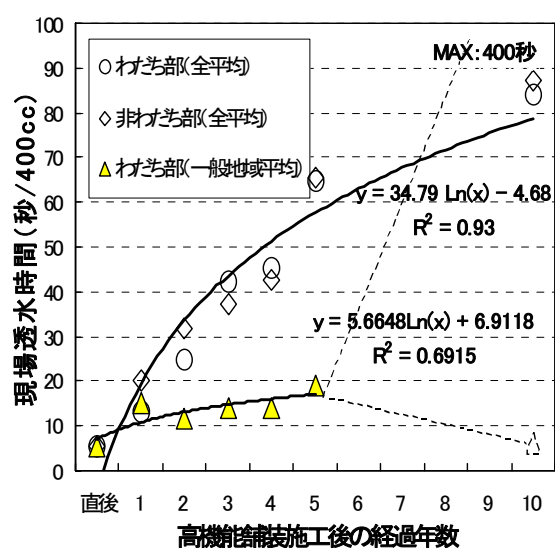


図 5-18 排水機能の経年低下

他の混合物とは異なり、混合物中の高い空隙率により排水機能を有することが、雨天時のスリップ事故やハイドロプレーニング現象の抑制に寄与する理由と思われていた高機能舗装であるが、全国的高速道路の交通事故多発区間における追跡調査からは、施工後の経年数に伴い交通事故が漸増するといった傾向は見られていない(図 5-19)。

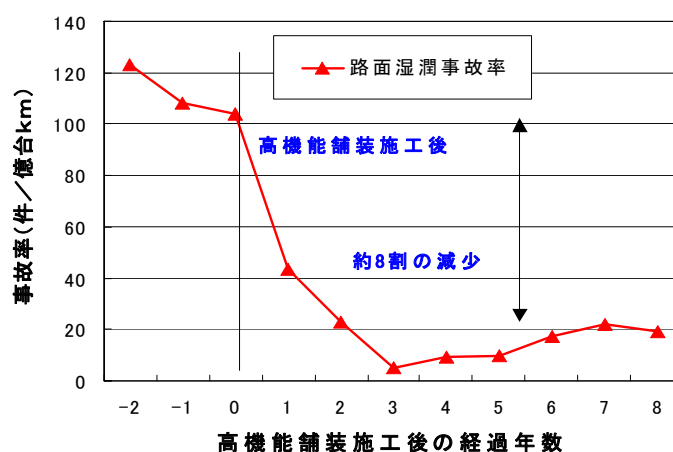


図 5-19 高機能舗装の交通事故低減機能の経年変化

つまり、排水機能が低下しても、それが交通事故の発生に直接的に関係していない、という実態が浮かび上がってきた。排水機能以外に、雨天時の交通事故に関係する要因としては、路面のすべり摩擦抵抗が知られているが、これを調査した結果を図 5-20 に示す。

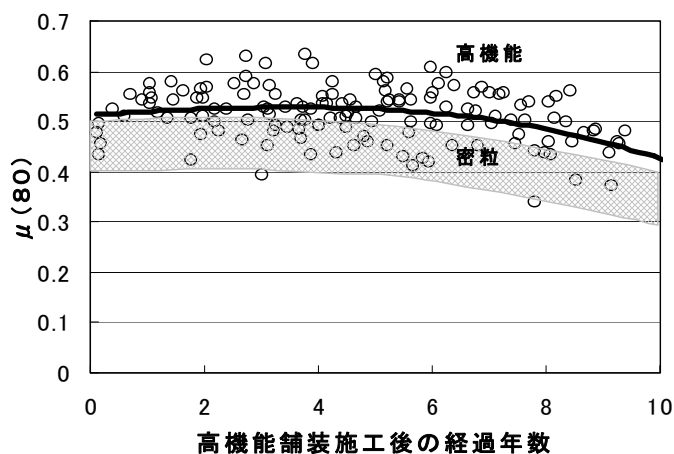


図 5-20 表層種別とすべり摩擦抵抗の経年変化

これは、NEXCO 総研所有のすべり摩擦測定車（写真 2-4）で測定したデータであるが、舗装種別に寄らず、供用中の走行車両による舗装表面の骨材の磨耗により、すべり摩擦係数は低下し始める傾向はあるものの、高機能舗装は、施工直後のみならず、長期に渡り、密粒舗装に比べ高いすべり摩擦抵抗を示すことが実証された。

この追跡調査の結果、高速道路における雨天時の交通事故を抑制するためには、排水機能よりも路面のすべり摩擦抵抗が大きく寄与していることがわかった。すべり摩擦抵抗には、路面のマクロテクスチャとマイクロテクスチャの両方が重要であることが、過去の研究から知られているが、高機能舗装はこのマクロテクスチャが非常に大きい混合物である。英国で標準的な表層用混合物として用いられているホットロールド・アスファルト混合物や、ドイツで表層用混合物として開発され近年多くの国で採用されている SMA も、マクロテクスチャが大きい混合物であり、高機能舗装同様、湿潤路面上でのスリップ事故防止に有効であることはよく知られている。

そこで、高機能舗装の表面部分（混合物の上部）はそのまま、内部は SMA のように密実化した混合物ができれば、交通事故低減機能を有したまま、下層への雨水の浸透を防止できるようになると考え、これを開発目標に掲げ検討を開始した（図 5-21）。

ここで、SMA について若干説明を加える。SMA は、第 3 章でも述べたように、ドイツで開発されたアスファルト混合物であるが、ドイツおよび他国では表層用混合物として用いられている⁶⁾。しかし、日本の高速道路においては、アスファルトモルタル量が非常に多いにもかかわらず耐流動性に優れるという SMA の特徴に着目し、高機能舗装を導入する際に問題視していた、橋梁部のレベリング層やトンネル内に導入を考えていたコンポジット舗装の中間層に適用できないか研究を行い、配合粒度の見直し等を行い、ドイツの SMA をアレンジした混合物として使用している（表 5-11 参照）。

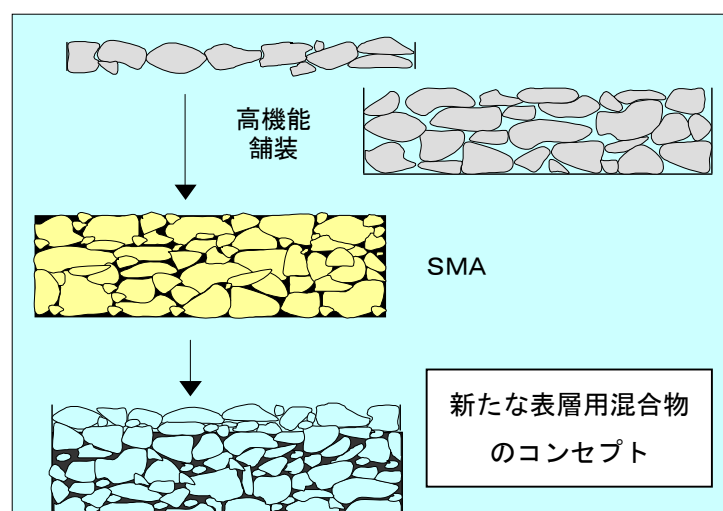


図 5-21 新たな表層用混合物の開発コンセプト

表 5-11 ドイツの SMA と日本の高速道路で使用している SMA の違い

	ドイツで開発された SMA ⁶⁾	JH でアレンジした SMA
表面外観		
主な適用箇所	表層	コンポジット舗装の中間層 橋面舗装のレベリング層
特徴	- 粗骨材が多く、表面(テクスチャ)が粗いため、すべり抵抗性と耐流動性に優れる。 - アスファルトモルタルの量が多いことから、耐摩耗性やひび割れ抵抗性にも優れている。	- 粗骨材が多く、その噛合せ効果により、耐流動性に優れる。 - アスファルトモルタルの量が多く、ひび割れ抵抗性にも優れている。また、これを転圧時にブリージングさせることで、高い水密性が得られる。

図 5-21 に示す SMA というのは、より水密性に優れる表 5-11 に示す JH 型の SMA をイメージしており、下層への雨水浸透防止を目的とした場合、この混合物の方が適していることは言うまでもない。

ドイツで開発された SMA の優れた混合物性状は、各国で注目されているが、スイスにおいては隣国であるにもかかわらず、SMA はそれほど広まっておらず、その理由を、フランス語圏である Vaud 州の道路局で技術者および舗装研究者に対しヒアリングしたところ、スイスではドイツのような良質な骨材の産地がなく、SMA に期待される耐久性等のパフォーマンスが得られにくい、という見解を有していた。また、スイスでは、これに類似するものとして「マクロラフ」と呼ぶ混合物を独自に開発しており、高速道路を含めた幹線道路の表層に使用していることがわかった。日本においても、国土の複雑な地層構造や造山期の年代から見て、骨材事情はそれほど良いものではないため、このスイスで開発・使用されているマクロラフに着目し、新たな表層用混合物の研究に着手することにした。

図 5-22 に、混合物の配合粒度を示すが、スイスで開発されたマクロラフの粒度範囲を見ると、JH が日本の高速道路でレベリング層として使用するためにアレンジした SMA と高機能舗装の中間的な範囲に位置していることがわかる。

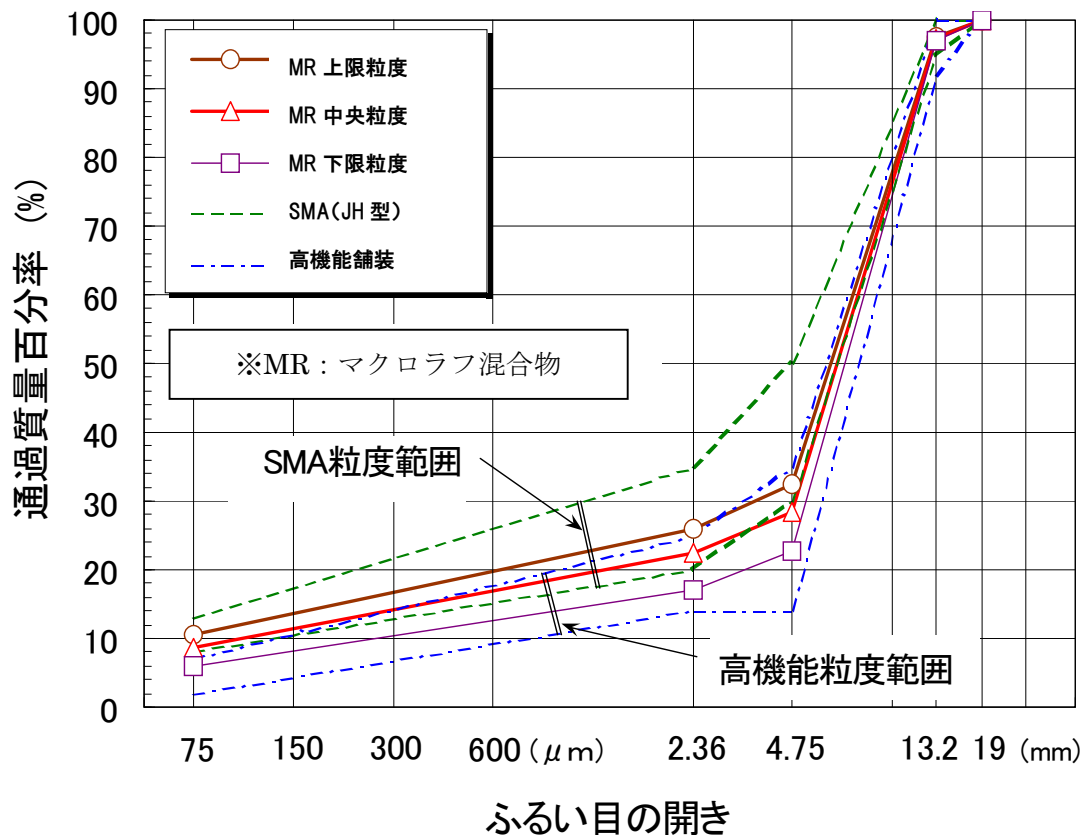


図 5-22 マクロラフ混合物の粒度曲線

ここで、マクロラフの上限・中央・下限、それぞれの粒度において、混合物を作製し、その供試体の断面と表面を観察したところ、写真 5-3 に示すとおり、上限粒度では混合物内部は密実であるが表面にはアスファルトモルタル分が浮き上がり、路面となる表層に用いた場合、所定のすべり摩擦抵抗が確保できないと思われた。また、下限粒度においては、混合物の内部にも空隙が多く存在し、雨水の浸透が懸念される状態であった。一方、中央粒度においては、混合物の内部は密実でありながらも表面のテクスチャは確保できており、図 5-21 に示すような、表面部分は高機能舗装に近く、内部は SMA のように密実な混合物ができる可能性があると思われた。そこで、この予備検討の結果を踏まえ、中央粒度付近の混合物について、詳細な試験評価を行うことにした。

予備検討を通じ、写真 5-3 のような混合物の変化は、4.75mm 通過量が大きく影響していることが推測できた。この通過量が 30% を超えると、混合物表面のテクスチャが確保できなくなり、一方、30% より小さくするに従い、高機能舗装同様、混合物内部に空隙を有するようになることから、粒度の設定としては、4.75mm 通過量を 30% に固定し、2.36mm 以下の通過量の影響を見ることにした。表 5-12 に、以降の検討に用いた 4 種類の合成粒度を示す。なお、表中の②～④は、フィラー (0.075mm 以下) の量を変化させたものである。

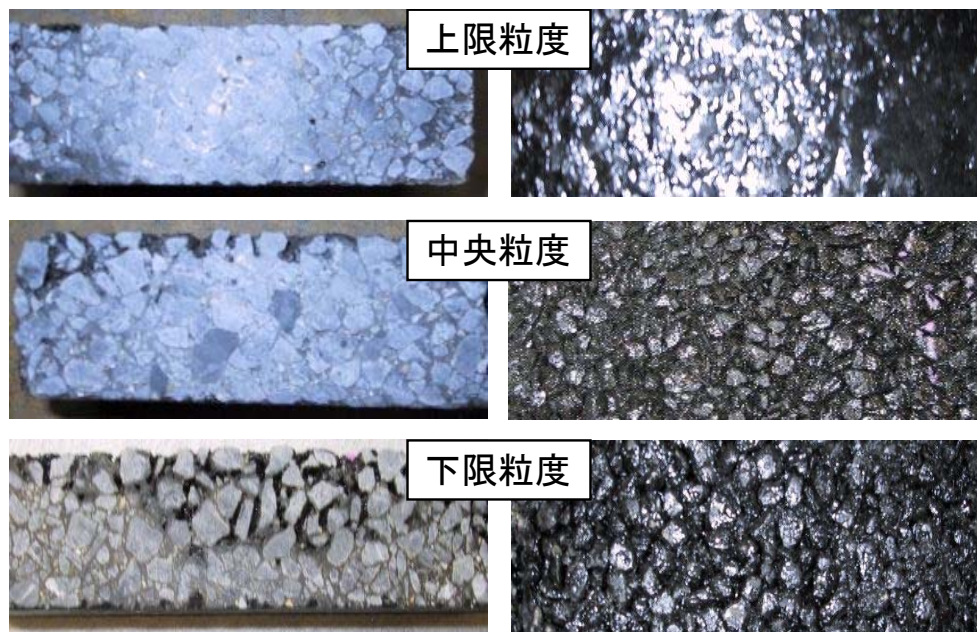


写真 5-3 マクロラフ混合物の粒度の違い

表 5-12 新たな混合物を検討した合成粒度

ふるい目	粒度①	粒度②	粒度③	粒度④
19.0mm	100	100	100	100
13.2mm	97.5	97.4	97.4	97.4
4.75mm	31.9	29.9	29.9	30.0
2.36mm	24.6	23.5	23.9	24.6
0.6mm	20.1	15.1	16.6	18.7
0.3mm	17.2	12.4	14.3	16.7
0.15mm	12.7	10.4	12.6	15.2
0.075mm	9.7	8.0	9.8	12.0

これら4種類の配合に2種類のアスファルトを組合せ、高速道路の表層用混合物として、要求される性能として以下の点があり、これらの性能を満足するかどうか、室内試験で評価を行った。

- 1) 路面のテクスチャ（混合物のキメ深さ）とすべり摩擦抵抗
- 2) 流動わだち掘れに対する抵抗性
- 3) 骨材飛散抵抗性
- 4) 摩耗わだち掘れに対する抵抗性

また、下層への雨水の浸透防止の観点から、加圧透水試験を行うとともに、橋梁やコンポジット舗装に使用する場合に必要となる、たわみ追従性を、2点支持中央載荷の曲げ試験で評価することにした。

まず、1) のテクスチャについては、図 5-22 に示す上限粒度に近づけた場合には問題となるが、中央粒度付近で作成した混合物では、すべり摩擦抵抗の基準値である BPN で 60 以上あるいは、DF テスターで 0.35 (μ 80) を確保できることがわかった。また、耐流動性についても、改質アスファルト II 型あるいは高粘度改質アスファルトを用いれば、その評価基準であるホイールトラッキング試験で、高機能舗装の場合の目標値である DS $\geq$ 3,000 を問題なく上回ることがわかった。

次に、高機能舗装の耐久性を表す指標として用いられている、カンタブロ試験を行った結果を、表 5-13 示すが、標準（室温）および低温（-20℃）で実施したいずれも基準値である損失率 20% を大きく下回る結果となった。特に、骨材把握力の大きい高粘度改質アスファルトではなく、改質アスファルト II 型を使用した場合でも、試験条件の厳しい低温下でカンタブロ損失率が低く、これは、マクロラフが、高機能舗装のような粗骨材同士が点接着となる混合物ではなく、表面のテクスチャは粗いものの、内部は密実な結合であることから、混合物の高い耐久性が得られている結果と考えられる。

表 5-13 検討した混合物とカンタブロ損失率の結果

バインダ	混合物粒度	AS量 (%)	実測空隙率 (見掛け)%	カンタブロ損失率 (%)	
				標準	低温
改質 II 型	①	5.9	2.9	4.3	9.7
		6.2	2.3	3.9	7.4
	②	5.8	2.4	4.9	12.1
		6.1	2.4	5.5	9.4
	③	5.8	2.6	5.2	7.9
		6.1	2.4	5.3	8.6
	④	5.9	2.4	4.1	7.0
		6.2	2.3	2.6	7.5
高粘度	①	5.5	2.8	1.7	4.7
		5.8	2.4	1.9	5.2
	②	5.6	3.6	3.5	5.7
		5.9	3.1	3.7	4.8
	③	6.0	3.0	2.9	5.8
		6.3	2.6	1.8	5.9
	④	5.8	3.1	2.6	5.7
		6.1	2.7	2.1	4.0

この混合物の特徴を考えれば、高機能舗装の弱点である、冬期のタイヤチェーンによる骨材飛散（摩耗わだち掘れ）に対しても、マクロラフ混合物は高い抵抗性を有する期待が持てるが、この評価を、クロスチェーンを用いたラベリング試験で行った結果を、図 5-23 に示す。

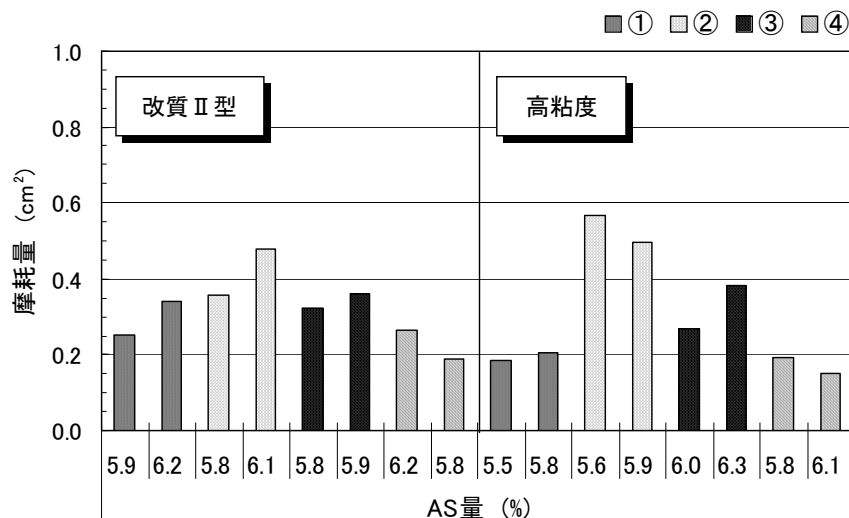


図 5-23 検討した混合物とラベリング試験の結果

この図から、NEXCO がラベリング試験の基準値として設定している、試験後の供試体表面の摩耗量 1.1 cm^2 以下を十分満足していることがわかる。

以上の試験結果から、マクロラフは、粒度範囲を中央付近に設定すれば、日本の高速道路の表層用混合物としての性能を規定している各種の評価試験項目をクリアできることがわかった。

さらに、新たな表層用混合物の開発目標に掲げている、下層への雨水の浸透防止効果を調べるため、加圧透水試験を実施した。その結果を、図 5-24 に示すが、配合粒度により若干の差異はあるが、最適アスファルト量（OAC）で混合物を作製すれば、不透水を目安となる 1×10^{-7} の透水係数を得ることは可能であり、OAC+0.3%のアスファルト量に増やせば、すべての配合粒度で不透水の混合物になることがわかった。

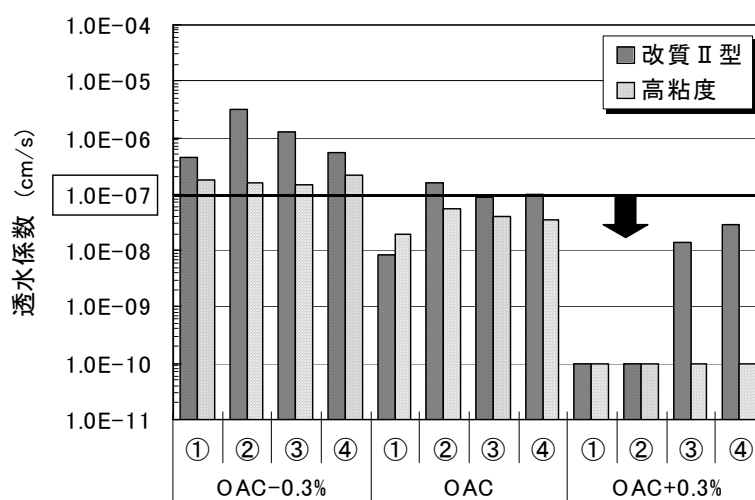


図 5-24 検討した混合物とか加圧透水試験の結果

また、表 5-14 には、-10℃における供試体の曲げ試験を実施した際に得られた、破壊時の強度とひずみを記載するが、鋼床版舗装に適用するアスファルト混合物の基準である、曲げ破断ひずみで 6×10^{-3} 以上を上回る結果であり、橋梁上への適用性や、下層にひび割れがある場合のリフレクションクラック抑制効果も十分期待できる性能を有する混合物であると思われる。

表 5-14 検討した混合物と 3 点曲げ試験 (-10℃) の結果

バインダ	混合物粒度	AS量 (%)	曲げ強度 (N/mm ²)	ひずみ (cm/cm)
改質Ⅱ型	①	5.9	10.6	8.90E-03
		6.2	10.1	7.80E-03
	②	5.8	9.3	7.60E-03
		6.1	9.3	8.04E-03
	③	5.8	9.0	8.00E-03
		6.1	9.4	9.00E-03
	④	5.9	10.5	9.00E-03
		6.2	10.3	7.50E-03
高粘度	①	5.5	13.6	1.22E-02
		5.8	14.1	1.21E-02
	②	5.6	12.8	1.11E-02
		5.9	14.2	1.19E-02
	③	6.0	13.8	1.06E-02
		6.3	14.1	1.07E-02
	④	5.8	13.4	1.22E-02
		6.1	12.8	1.22E-02

以上、室内試験において表層用混合物としての高い評価が得られたことから、札幌道を皮切りに、全国的高速道路 8 路線 21 箇所における試験施工を行い、雨天時の交通事故対策としての機能を確保しつつ耐久性を大きく高めた「高機能舗装Ⅱ型」として、NEXCO の設計要領化に記載されるに至った。表 5-15 に関東地域の工事で使用した高機能舗装Ⅱ型用混合物の配合実績を記載するが、このデータからも、骨材飛散抵抗性に優れ（カンタプロ損失率が少ない）、耐流動性が高く（動的安定度が大きい）、雨水を下層に通さない混合物であることがわかる。

表 5-15 高機能舗装Ⅱ型用混合物の配合実績

年度	OAC(%)	現場配合粒度(%)									空隙率(%)	骨材間隙率(%)	飽和度(%)	残留安定度(%)	ｶﾝﾀﾌﾟｰﾙ損失量(%)	動的安定度(回/mm)	透水係数(cm/S)
		19.0	13.2	9.50	4.75	2.36	0.60	0.30	0.15	0.075	かさ						
H19	5.3	100.0	96.1	—	35.2	24.3	18.9	15.4	12.7	10.4		18.6	65.0	91.2	—	11,900	—
	5.8	100.0	98.6	76.7	30.0	23.5	19.4	16.3	11.7	9.2	2.8	19.0	68.4	—	2.0	4,731	—
	5.6	100.0	98.7	78.7	34.6	24.8	20.4	17.3	12.6	10.0	3.1	18.8	67.0	—	1.9	5,409	—
	5.6	100.0	96.2	—	35.5	25.9	19.6	17.1	12.8	10.8		19.1	65.7	92.3	4.6	8,625	—
H20	5.3	100.0	96.8	68.4	32.4	25.4	17.8	15.3	13.0	10.3	3.3	—	63.9	95.4	4.0	7,583	不透水
	5.6	100.0	98.6	76.1	35.3	25.2	18.3	15.3	12.5	10.0	2.6	—	67.4	90.9	2.3	8,750	不透水
	5.3	100.0	97.1	—	34.6	25.6	20.3	15.2	12.0	10.4		—	67.3	94.9	4.3	7,058	不透水
	5.4	100.0	97.9	—	34.5	25.3	20.5	16.6	12.3	10.3	3.2	—	65.6	90.8	—	6,109	不透水
H21	5.4	100.0	95.9	—	37.9	25.3	16.8	14.3	11.9	9.1	6.5	18.6	65.1	90.7	3.3	6,340	不透水
	5.3	100.0	98.0	—	35.5	24.0	19.2	16.0	11.6	10.0		18.2	65.4	91.2	3.8	6000以上	—
	5.3	100.0	97.3	—	33.9	25.0	19.2	15.5	12.0	9.5	6.3	18.3	65.6	94.1	3.8	7,534	不透水
基準値											2～4	21以下	62～70	75以上	6.0以下	3,000以上	1.0×10 ⁻⁷ 以下

この高機能舗装Ⅱ型については、それまでの高機能舗装（以下、Ⅰ型）では、写真 5-4 に示すような、冬季の路面の摩耗が激しく、その適用が難しかった北海道でいち早く全面採用された。



写真 5-4 除雪作業による高機能舗装Ⅰ型の摩耗と骨材飛散状況



写真 5-5（左）除雪車の排雪板と（右）高機能舗装Ⅰ型の残存厚

北海道の高速道路においては、チェーン装着率は低く、その影響による骨材飛散はあまり見られない。一方、スパイクタイヤの禁止以降、冬季の多重事故が発生したこともあり、北海道においても雪氷路面の完全除雪を求められるようになり、除雪時には写真 5-5（左）に示すような鉄製の排雪板を使用した舗装路面の露出作業が頻繁に行われるようになった。その際、テクスチャの大きな高機能舗装Ⅰ型は、この排雪板で引っかかり、一冬期目から多量の骨材飛散が発生し、施工時に設計厚 4cm で舗装した表層が、供用 7 年後の調査結果⁷⁾では、写真 5-5（右）に示すように、最大で残層僅か 0.5cm、平均でも残層 1.5cm 程度（2.5cm の摩耗）という非常に激しい削込みが生じ、ついには、写真 5-4（右）に示すような基層が露出する状況にまで深刻化した。

これに対し、高機能舗装Ⅱ型の場合は、Ⅰ型に比べ表面テクスチャが小さいことから、除雪車による削込みが少なく、導入後はこのような問題はかなり改善されている。

この他にも、直接の降雨にさらされにくいトンネル内では、高機能舗装Ⅰ型ほどの排水機能を必要としないため、この表層に使用することにした。高速道路のトンネル内は、コンポジット舗装構造を採用しているが、高機能舗装Ⅱ型は、Ⅰ型に比べ、連続鉄筋コンクリート舗装版に生じるマイクロクラックを路面に上げないためのリフレクションクラック抑制効果が大きい点も、採用のメリットの一つであると考え。リフレクションクラックを発生させないことは、冬季の路面管理で散布する凍結防止剤を、連続鉄筋コンクリート舗装版内に浸入させないことにつながり、過去に発生した連続鉄筋コンクリート舗装のパンチアウトの原因であった鉄筋の腐食を防止する効果も期待できると考えている。

また、高機能舗装Ⅱ型の優れたラベンリング試験やカンタブロ試験の結果を踏まえれば、冬季のタイヤチェーンによる骨材飛散に悩まされていた、本州の積雪寒冷地域的高速道路に導入した場合、耐久性の課題は大幅に解消されると思われる。

さらには、高機能舗装Ⅰ型の最大の課題であった、雨水の浸透による基層混合物の剥離を促進してしまうという点について、高機能舗装Ⅱ型の場合、密粒舗装と同様に雨水は表面排水され、表層内部への浸透はない。そのため、基層の脆弱化とそれによる舗装の損傷を抑制することができる。この点を検証した現地データを図5-25に示す。これは、表層が現在も密粒舗装のままである箇所（図中のグループ①）と、高機能舗装Ⅰ型を導入した後、数年前に表層を高機能舗装Ⅱ型で更新した箇所（グループ②）、新設道路の表層に高機能舗装Ⅰ型を用い現在もその状態にある箇所（グループ③）、という3種類の異なる条件の現場から、それぞれの基層混合物のコア採取し、加圧透水試験による剥離促進後に圧裂試験を行った結果である。

これを見ると、密粒舗装が存置されている現場は総じて基層の残留圧裂強度が高く、高機能舗装Ⅰ型のままの現場の基層は耐水性が低下していることが伺える。しかし、高機能舗装Ⅰ型を途中で高機能舗装Ⅱ型に置換したグループ②の現場では、グループ③に比べ基層の残留圧裂強度はやや高く、このことから、表層を途中で高機能舗装Ⅱ型にしたことで雨水の浸透がなくなり、基層の耐水性低下に歯止めがかかったことが示唆される。このことは、高機能舗装Ⅱ型がその開発目標を満足する混合物であることが、室内試験のみならず、実際施工された現地のデータからも立証されたものと考えている。

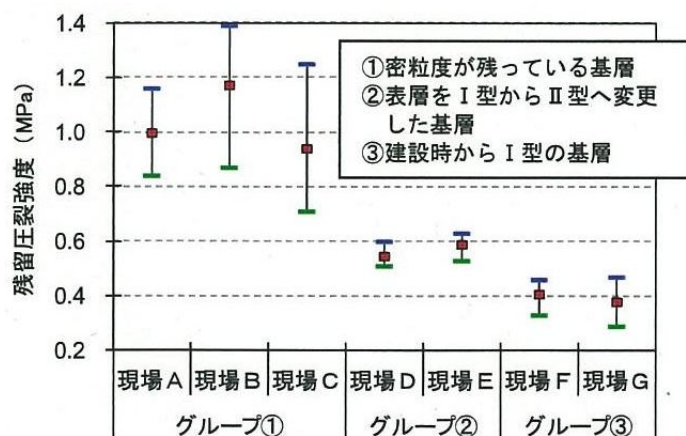


図 5-25 表層種別が基層の耐水性に及ぼす影響

5.3 雨水の浸透対策

4.3 節で述べた開削調査の結果から、下層混合物の脆弱化の原因となる雨水の浸透経路として、以下の2点を挙げることができる。

- ① 舗装補修時に車線間にできる施工目地からの浸透
- ② 舗装のひび割れ等、表層面から下層混合物内部への浸透

5.3.1 施工目地からの雨水浸透対策

まず、①についてであるが、高速道路を建設する段階においては、各層間の施工目地を15cm程度ずらし設計するよう設計要領に定められており、また、舗設の際も、例えば施工幅員が広い場合にはフィニッシャーを2台使用するホットジョイント工法を採用するなど、施工目地が弱点とならないような配慮を施している。しかし、供用後に舗装の補修が必要となった際には、工事を実施するためには交通規制を実施せねばならず、これは施工に必要な車線だけを一時的に閉鎖すること、また、隣接する複数の車線の舗装が一度に損傷・破壊することはないこともあり、補修工事を重ねるうちに、自然と車線間には縦断方向に施工目地ができることになる。

このような補修を長年続けていくうちに、通常の場合、レーンマーク直下にコールドジョイントができることが多く、ここから雨水が舗装内部に浸透していくことになる。

2011年に東日本大震災が発生した際、被災地域にある高速道路では、この縦施工目地が地震の外力により大きく引き離され亀裂となる被害が顕著に表れた（写真5-6 参照）⁸⁾。



写真 5-6 施工目地部に発生した縦断亀裂（東日本大震災）

また、高機能舗装区間でポンピングが発生した箇所においては、4.3 節で述べた開削調査では、施工目地から路盤への雨水の浸透が見られたが、他の現場からも、補修工事で切削を行った際に観察して見ると、写真5-7に示すような隣接車線との境界付近の路盤面が、隣接車線からの染み出し水で湿潤状態にあり、施工目地に沿ってひび割れが発生している事例が報告されており⁹⁾、これは、単に大地震によって“たまたま”引き起こされた例外的な損傷と捉えるべきではなく、

常時にあっても、施工目地の直下では雨水の浸透による舗装の耐久性低下が生じやすい、と考えるべきである。

そこで、施工目地部の強化方法として、図 5-26 に記載する段切りおよび隣接車線との層間接着力の強化を提案する。

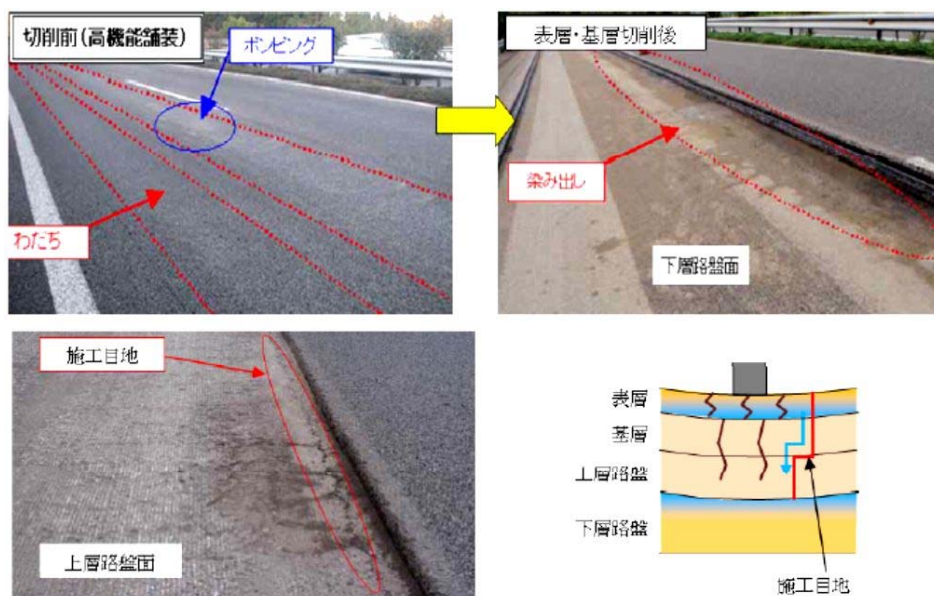


写真 5-7 施工目地部からの染み出し水とひび割れが発生した路盤⁹⁾

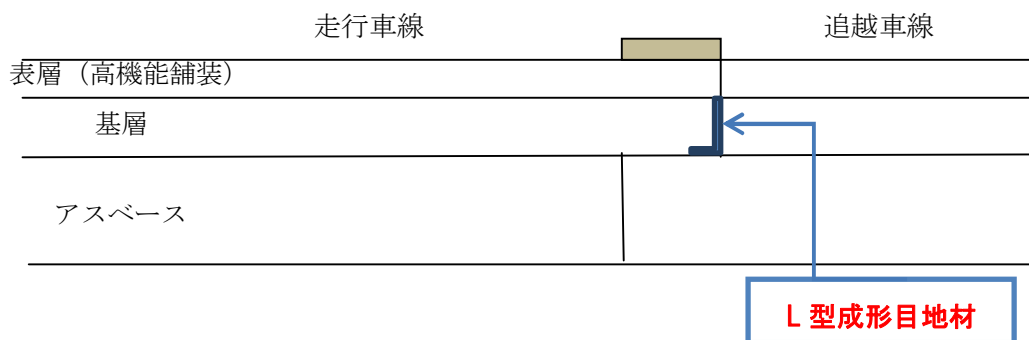


図 5-26 縦施工目地の強化方法

まず、建設工事のように、舗装各層の施工端部の位置をずらす「段切り」を、補修段階でも行うことで、施工目地の位置が揃わないようにして、雨水が直接、路盤面に浸入することを防止する。高速道路の場合、表層に高機能舗装を用いているため、表・基層間で段切りを行っても、雨水は施工目地以外からも基層面へ浸透するため、この深さ位置での段切りは意味が薄い。よって、施工目地の位置は、基層とアスベースの境で行うこととする。そのためには、補修工事を行う際の交通規制の位置を、各層の施工に応じ、隣接車線を通行する車両の支障とならない範囲で変える必要があるが、センターラインのレーンマーク幅に合わせ

15 c m分の交通規制位置を張り出すことは、路肩が広い走行車線側へずらすのであれば、対応可能な現場は多いと考える。

次に、切削後、舗設を行う前に、隣接車線の側面に塗布しているアスファルト乳剤を、より接着力の高い成形目地材を貼り付け、コールドジョイントの接着力を改善し、雨水浸透対策とすることを提案する。

現在市販されているアスファルト系成形目地材は、橋面舗装を施工する際に使われており、橋梁の地覆や縁石上に予め貼り付け、そこに加熱アスファルト混合物を舗設した際に、熱溶解し、地覆等に密着、そこからの雨水の浸透を防止する、というものであるが、接着性が弱く、切削面には貼り付けが

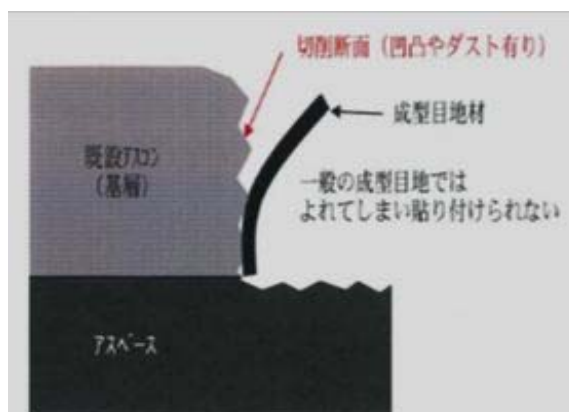


図 5-27 既存の成形目地材の問題点

できないという問題がある（図 5-27 参照）。また、材料としてやや硬めのアスファルトを使用しているため、加熱アスファルト混合物が目地材に触れることで柔らかくなるが、完全に溶解するものではない（目地材の芯部が溶け残りする状態）。

そこで、筆者らは、このアスファルト系成形目地材を切削断面に貼り付けできるよう、材質や形状を改良し、これによりコールドジョイントを一体化させるとともに、雨水の浸透を遮断する効果を期待した。

具体の検討に当たっては、以下の工夫を施すことで、切削断面にも使用可能な材料開発を行った。

1. 切削断面に設置しやすいよう、形状をL型にした。
2. 既設の舗装面とより密着しやすいよう、アスファルトの軟化点を低くし、舗設する混合物の熱で溶けることで、隣接車線との間に十分な接着力を発揮できるようにした。



写真 5-8 切削断面用アスファルト止水テープの形状

ここで、切削目地を密着するための性能として、(i) 接着性（剥がれない）と (ii) 止水性（雨水を下層に浸透させない）の2つの性能を設定した。

(i) 接着性

写真 5-9 に示すように、アスファルト混合物を半分にした供試体間に、母材となるアスファルトテープと、比較用に従来から切削断面に使用しているアスファルト乳剤（PK-4）をそれぞれ貼付け、または塗布し、せん断試験を実施した。図 5-28 は、せん断試験の結果であるが、アスファルト乳剤は、破壊時のせん断強度は大きいですが、追従性がなく、供試体に変位を与えるとすぐに破断してしまった。一方、今回開発したアスファルトテープは、供試体の変位に対する追従性に非常に優れ、試験中に供試体が分離することがなかった。



写真 5-9 せん断試験の実施状況

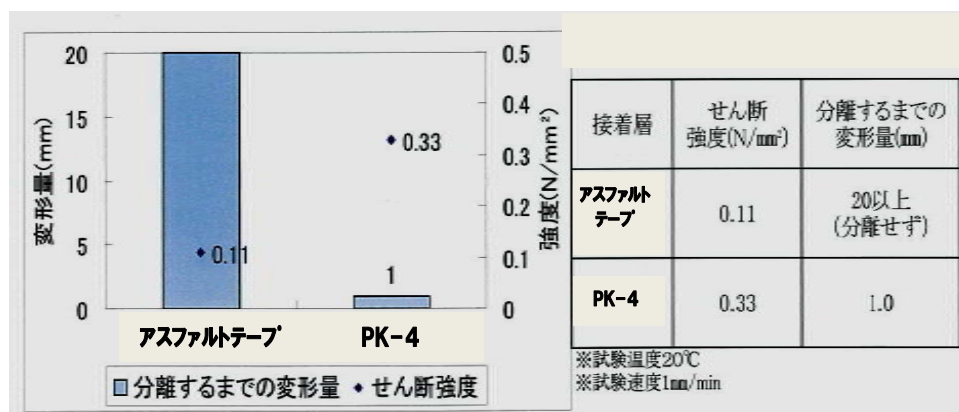


図 5-28 せん断試験の試験結果

もう一つ、接着性を評価するために、写真 5-10 に示す直接引張試験も実施した。その結果を図 5-29 に示すが、せん断試験同様、アスファルトテープは、供試体の変位に対する追従性に優れていることがわかった。

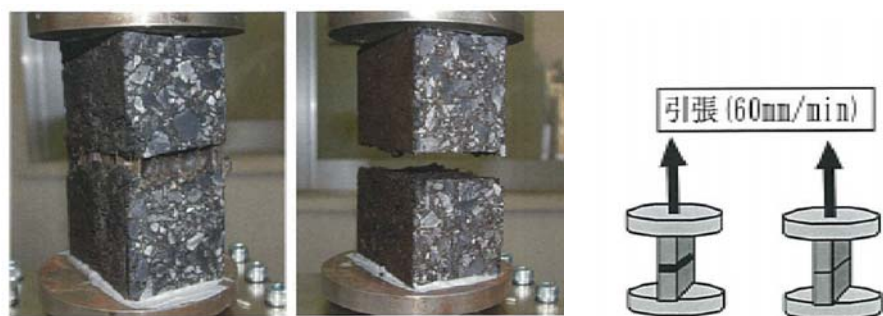


写真 5-10 引張試験の実施状況

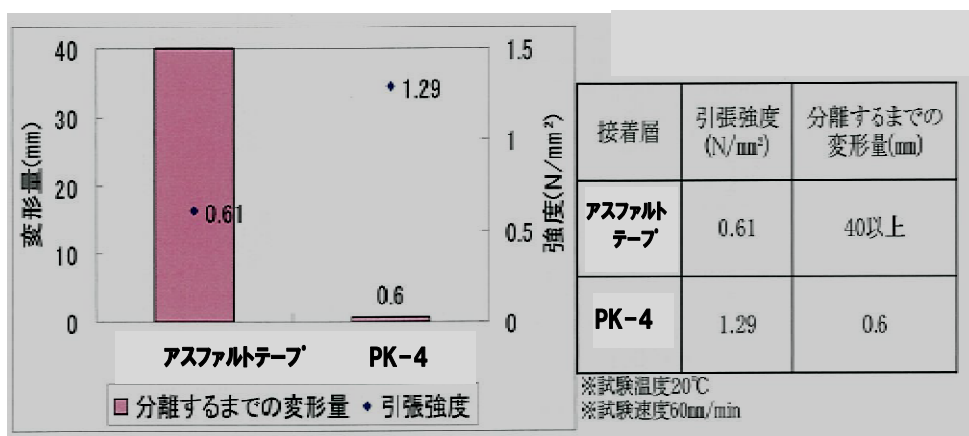


図 5-29 引張試験の試験結果

以上の試験結果から、今回開発した材料は、施工目地の動き（冬季・夏季の開閉）に対する追従性に非常に優れており、接着後の経年的な目地の開きに対する懸念が少ないと思われる。

（ii）止水性

施工目地の接着強化に必要なもう1つの観点の止水性能である。この評価については、写真 5-11 に示すように、マーシャル供試体を半分に切断し、その切断面をアスファルトテープと乳剤で接着させたコアを用いて、加圧透水試験を行うこととした。

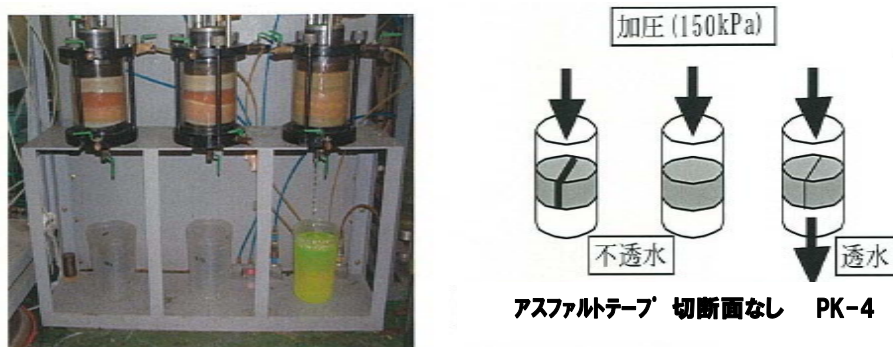


写真 5-11 加圧透水試験機を用いた止水性評価試験の実施状況

その試験結果を図 5-30 に示すが、乳剤を塗布しただけでは止水効果は殆どなく、
 接着させたコアは透水してしまったが（写真 5-8 右側のモールドからは、蛍光着色水
 が透水し、ビーカーに溜まっている様子が見える）、アスファルトテープを用いて接
 着させると、切断していないコア同様に透水は見られなかった。

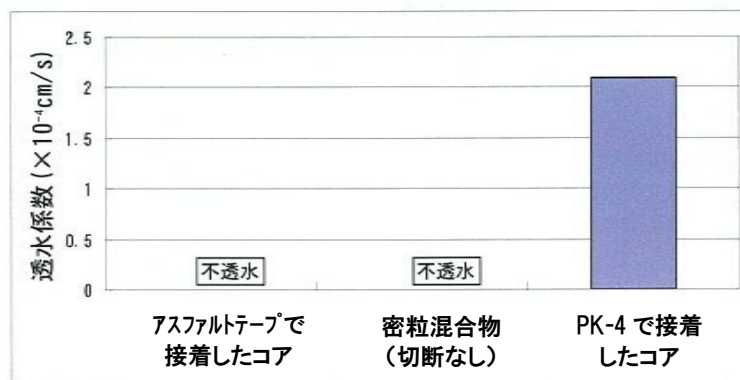


図 5-30 止水性評価試験の試験結果

これらの室内評価試験で、接着性と止水性の効果が得られたことから、管理事務
 所の駐車場において、実際の切削断面に、このアスファルト止水テープを張付した後、
 舗設を行い、その施工中に、フィニッシャーでテープが剥がれないか等の確認試験を
 行ったが、問題なく施工できた（写真 5-12）。



写真 5-12 切削断面にアスファルト止水テープを貼付け、舗設を行っている様子

この舗設確認試験を行った後、切削目地部分からコアを採取し、前述の加圧透水試験を行った。この試験では、市販のアスファルト系成形目地材も比較のために使用したが、成形目地材の場合は、切削断面との接着が悪く、既設舗装との境に隙間が残り透水する場合があった。一方、使用材料を柔らかくした L 型止水テープは、既設舗装との密着が良いため、不透水あるいはほとんど透水しない結果が得られた。

以上のように、切削断面にも貼付可能な材料を開発することで、従来の乳剤塗布に比べ、隣接車線との接着性やそこからの止水性を格段に向上させることができた。

これにより、縦施工目地の段切りと本工法を併用することで、雨水の浸透による下層の脆弱化を防ぐとともに、施工目地が構造上の弱点にならないよう、対策を講じられると考えている。また、この L 型止水テープを切削断面に貼付けすることで、段切りする際に懸念されていたリフレクションクラックの発生を抑制する効果もあると期待している。

5.3.2 表層面から下層混合物内部への浸透

次に、②についてであるが、下層の混合物内部への雨水の浸透を防止する手法として、基層上での遮水工法がある。通常、表層と基層の間（基層面）には、アスファルト乳剤を散布しており、表層が高機能舗装の場合には接着力を高めたゴム入り乳剤（PKR-T）が、また、補修工事を行う際には、乳剤の分解速度を速め、フィニッシャーや混合物を搬入するダンプトラックのタイヤへの乳剤の付着を抑制する改質乳剤（PKM-T）が用いられているが、下層への雨水浸透を抑制できる材料の開発が行われており、これを基層面に散布する遮水型工法が NEXCO 総研と（社）日本アスファルト乳剤協会の間で共同研究が進められている¹¹⁾。これに関する研究報告によれば、基層上に数種類の遮水型工法を用い、その上に高機能舗装を舗設した供試体上を、NEXCO 総研所有の回転式舗装試験機にて走行試験を実施し、その後に各供試体の観察を行い基層混合物の剥離発生状況を比較したところ、図 5-31 に示すように、遮水型工法の有効性が認められた結果となった。

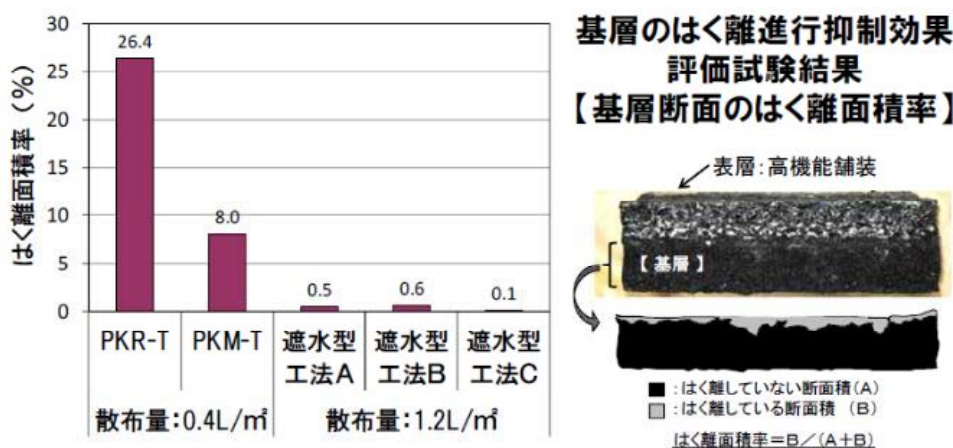


図 5-31 遮水型工法とタックコートの比較例¹¹⁾

これら3種類の遮水型工法は、2005年度に関東地域の高速道路において試験施工が行われた。実施個所の交通量は約2.3万台/日/一方向であり、施工7年後までの追跡調査では、従来の乳剤工法の場合、車両通過位置（わだち部）の表基層の界面において、若干剥離の兆候が見られ始めたのに対し、高濃度改乳剤を用いた遮水型工法を採用した工区の採取コアには異常はなかった¹²⁾。層間接着性を評価する直接引張試験や、基層混合物の剥離抵抗性を評価する圧裂・加圧透水試験の結果では、まだ各工区に大きな差異は見られていないが、今後、施工10年目の追跡調査も計画されていることから、その結果を待ち最終的な評価を行いたい。

5.4 第5章のまとめ

高機能舗装を使用する場合、その損傷の発生形態が、それまで表層に使用していた密粒舗装とは大きく異なることから、従来の路面管理手法では損傷箇所や要補修箇所の抽出が上手くできない課題が生じている。そこで、本研究では、高機能舗装の損傷形態の特徴を踏まえ、局所的な路面の変状を把握しやすい手法を提案した。

また、補修する際には、損傷の再発防止の観点で、使用する材料特性を定める必要があり、その基準を定めるとともに、併せて、基層に使用するバインダを剥離抵抗性の高い種別に変更する対策を講じた。これに加え、高機能舗装の優れた供用性状を保持しつつも、下層の剥離を抑制できる新たな表層用混合物を開発した。

さらには、開削調査などで明らかになった、施工目地からの雨水の浸透経路を遮断する方法を提案した。以下に、本章のまとめを記載する。

- 1) 高機能舗装を用いた高速道路は局所的な損傷が多発する特徴を有しており、また、健全な状態から損傷の発生に至るまでの時間が短いため、従来の路面性状測定による調査では、損傷実態の把握が難しくなっている。
- 2) 現地の管理事務所が実施する日常点検は、局所的な路面異常箇所の検出がしやすく、その実施頻度から、都度発生する損傷を迅速に把握できるため、高機能舗装に適した路面管理手法である。
- 3) この日常点検による損傷報告データ数と舗装の補修履歴について分析を行ったところ、各路線やIC間において、損傷の発生しやすさには違いがあることが判明した。このような分析は、損傷の発生しやすい条件とその要因の究明にも有用である。
- 4) 「重度損傷」の発生数が多いIC区間は、実際に基層までの補修を行っている割合が比較的高く、現地で基層からの補修を優先的に行う区間を選定する際に、日常点検データを活用することは非常に有効な手法となる。
- 5) 高機能舗装の下層となるアスファルト混合物は、剥離抵抗性の高い骨材やアスファルトを使用することが重要であり、その基準をアスファルト被膜の剥離試験と水浸ホイールトラック試験で定めた。

- 6) NEXCOが管理する高速道路の中で、夏期の温度と降水量、交通履歴（供用年数）という、剥離の進行に強い影響を及ぼす条件が揃う関東地域の高速道路においては、4.2.3節で述べたとおり、密粒舗装区間であっても、基層混合物の耐久性は低下しており、高機能舗装化をきっかけに、基層が急激に脆弱化し破壊に至る懸念が大きい。そのため、関東地域においては、2009年度より基層に使用するバインダとして改質アスファルトを標準採用しているが、その効果と妥当性を、舗装工事の実績データを用いて評価した。
- 7) これまでの高機能舗装の供用性状をモニタリングした結果、透水機能は経年低下するものの、その高いすべり摩擦抵抗により、路面湿潤事故の低減効果は長期に渡り発揮されていることを踏まえ、高機能舗装に類似した路面テクスチャを確保しつつ、雨水の浸透を許さない混合物の開発に成功し、実用化することができた。
- 8) 第4章で述べた開削調査で、路盤への雨水の浸透経路が明らかになった。これを遮断する目的で、補修工事においても建設工事と同じような各層の縦施工目地の位置をずらす段切りを行うとともに、既存のアスファルト系成形目地材を改良し、切削断面に貼付けることを考案した。これにより、隣接車線間の接着力強化と、そこからの雨水の浸透を抑制し、下層の脆弱化を防ぐことが可能となり、これは、ポンピングの発生防止や舗装の長期耐久性を確保する上で、極めて必要な対策であると思われる。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978.
- 2) 東日本高速道路㈱：NEXCO 試験方法 第2編アスファルト舗装関係試験方法 試験法 226 「路面のひび割れ測定方法」，pp. 17-21，2011.
- 3) 東日本高速道路㈱：保全点検要領 構造物編，pp. 43，2006.
- 4) 神谷恵三，風戸崇之：高速道路舗装の損傷評価方法に関する研究，土木学会舗装工学論文集第13巻，pp. 171-178，2008.
- 5) 多田宏行：橋面舗装の設計と施工，鹿島出版会，pp. 68，1996.
- 6) 井上武美：SMA の我が国における展開，舗装，No. 8，pp. 4-10，2000.
- 7) 山口清人，豊田邦男，村田信之：高機能舗装の損傷分析と耐久性のある混合物を目指して，舗装，No. 9，pp. 8-14，2006.
- 8) 黒田尚士，金子謙一郎，高橋茂樹，鈴木睦基：高速道路の舗装における被災形態の特徴と復旧方針について，土木学会第67回年次学術講演会，pp. 39-40，2012.
- 9) 本松資朗，出雲真仁，風戸崇之：高機能舗装Ⅰ型に於ける車線縦継目の止水の重要性について，土木学会第67回年次学術講演会，pp. 771-772，2012.
- 10) 綿谷茂，田口克也，高橋茂樹：施工目地からの雨水浸透対策の提案，第30回日本道路会議一般論文集，2013.
- 11) 松本大二郎，加藤 亮，佐藤正和，神谷恵三：遮水性材料を併用した高機能舗装の基層部損傷抑制効果に関する一考察，土木学会論文集E 1 (舗装工学)，Vol. 67, No. 3，pp. I-129-135，2011.
- 12) 大場拓也，長内圭太，高橋茂樹：供用7年経過した遮水型排水性舗装の追跡調査結果，第30回日本道路会議一般論文集，2013.

第6章 結論

6.1 研究成果の総括

本論文は、日本の高速道路で課題となっていた湿潤路面の交通事故に対し、ポーラスアスファルトを表層に用いることで得られた非常に優れた効果を、10年に渡る長期供用性の追跡調査データを基に、様々な面から総括的な検証を行っている。一方では、雨水の浸透により脆弱化する基層の損傷実態を明らかにし、ポーラスアスファルトを使用する場合の長期耐久性の確保に必要な対策の提案を行ったものである。

本研究で得られた成果を、章ごとにまとめ、以下に記載する。

第1章では、本研究の背景と目的として、交通量の増大に伴い顕著に生じた激しい流動わだち掘れと、社会問題化した交通事故の急増の解決を図るため、優れた耐流動性を有し雨天時のスリップ事故防止に寄与するポーラスアスファルトを導入する中で、早期に基層から損傷が発生する事例が見られ、技術的な課題が残されていることを示した。

第2章から本論を成すが、ここでは、まず、従前行われてきた流動わだち掘れや雨天時の事故対策を紹介するとともに、諸外国を含めたポーラスアスファルトの開発の歴史と、日本における技術開発を紹介した。また、1990年代初期に行われたポーラスアスファルトの試行導入区間において追跡調査を行い、この混合物が、従来、高速道路の表層に用いられてきた密粒舗装と比べ、耐流動性やすべり摩擦抵抗に優れ、交通事故の低減に大きな効果を発揮することが確認できたことを述べた。

第3章では、ポーラスアスファルトを「高機能舗装」の名称で日本の高速道路に全面採用した効果を、初期性状だけでなく、その持続性についても評価をまとめた。また、混合物の耐久性を確保する上で重要な、材料や混合物性状の規定値と、導入箇所の道路構造に応じた舗装構成の工夫を述べた。さらには、欧州で問題視されていたポーラスアスファルトの冬季路面管理について、実道における調査結果を基に、日本の高速道路においては、特段の問題はないことを明らかにした。以下に導入効果の検証結果をまとめて記載する。

- 1) 高速道路において、高機能舗装による交通事故低減効果は非常に大きく、その長期的な持続性も確認できた。また、雪氷路面においても交通事故の低減効果が確認できた。
- 2) 一方、排水機能（雨天時の視認性）や交通騒音の低減効果については、経年低下することが判明した。
- 3) 高機能舗装は、耐流動性が高く、それまでの大きな課題であった、わだち掘れの低減に寄与することが確認できた。表層の打換年数においても、10年以上の耐久性が期待できるが、冬季のチェーン使用が多い積雪寒冷地域では耐久性には劣る結果となった。

第4章では、高機能舗装の導入に伴い発生した損傷について、原因の特定を行うとともに、脆

弱化が見られる基層混合物について耐久性の評価手法を立案し、脆弱化の実態を解明した。ここに、主要な知見を列記する。

- 1) 供用中の高速道路において、既設の表層（密粒舗装）を高機能舗装に打換した場合に、早期に損傷が発生する事例が見られるようになったが、これらの多くは夏場に発生する傾向にあることが判った。また、損傷個所では基層混合物の剥離が甚だしく、高機能舗装には問題はなくとも、この基層の脆弱化に起因して路面までの損傷が生じることが判明した。
- 2) この損傷は、アスファルト混合物の剥離によるものであり、基層混合物の損傷判定には、剥離抵抗性に着目し、60℃の温水による加圧透水後に圧裂試験を行い、評価する方法が良い。
- 3) 夏期に高温多雨となる地域の、供用年数の長い重交通路線においては、密粒舗装区間であっても、基層混合物の耐久性は経年的に低下しており、表層を高機能舗装に更新することをきっかけに、雨水の浸透により急激に脆弱化し、早期に破壊に至る可能性が大きい。
- 4) 開削調査を行った結果、ポンピングが多発している高機能舗装区間では、施工目地からの浸透水が下層路盤に滞水し、これが損傷の原因になっている場合があることが確認できた。
- 5) また、路面のひび割れから浸透した雨水が、アスファルト混合物の層間接着力を消失させている実態も明らかにした。

第5章では、第4章で論じた高機能舗装の採用に伴う様々な技術的課題に対し、実務的な対応の提案を行った。ひとつめは、高機能舗装区間で発生している損傷形態が、それまで表層に使用していた密粒舗装区間とは大きく異なることから、従来の路面管理手法では損傷個所や要補修箇所の抽出が上手くできない課題を述べた。併せて、高機能舗装の損傷形態の特徴を踏まえた新たな路面管理指標の考え方も提言した。次に、舗装を補修する際に損傷の再発防止の観点で重要となる使用材料の基準を示すとともに、基層に使用するバインダの種別変更の提案とその有効性を示した。また、高機能舗装の優れた供用性状を保持しつつも、基層の剥離を抑制できる混合物の開発を詳細に述べた。最後に、雨水の浸透対策として期待できる方法を開発し、その有効性を示した。ここでの主要な結論を、以下に示す。

- 1) 高機能舗装を用いた区間では局所的な損傷が多発する特徴があり、また、健全な状態から損傷の発生に至るまでの時間が短いため、従来の路面性状測定による調査では、高機能舗装区間の損傷実態の把握が難しい。
- 2) これに対し、現地の管理事務所で実施している日常点検は、局所的な路面異常箇所の検出がしやすく、その実施頻度から、都度発生する損傷を迅速に把握できるため、高機能舗装に適した路面管理手法である。
- 3) また、過去の点検で損傷が多数報告されているIC間は、実際に基層からの打換工事を多く行っているという関連性が見られ、補修を優先すべき個所を選定する際に、日常点検デー

タを活用することは、大変有用であることが判った。これは、道路管理者として、資産の健全性を確保するとともに、限られた原資を効果的に投資する上で、非常に有効な手法となる。

- 4) 高機能舗装の基層となるアスファルト混合物は、剥離抵抗性の高い骨材やアスファルトを使用することが必要であり、特に、温度と交通履歴という、剥離の進行に強い影響を及ぼす条件が揃う地域の高速道路の舗装においては、この点が耐久性確保に重要である。
- 5) 高機能舗装の供用性状をモニタリングした結果、透水機能は経年低下するものの、その高いすべり摩擦抵抗により、路面湿潤事故の低減効果は長期に渡り発揮されていることが判明した。この点を踏まえて、高機能舗装に類似した路面テクスチャを確保しつつ、雨水の浸透を許さない混合物の有用性を認識し、開発に成功・実用化することができた。これにより、今後は、事故低減効果を保持しつつも、地域や路線特性を踏まえ、複数の表層用混合物を適材適所で使い分けることが可能となった。
- 6) 開削調査で明らかになった高機能舗装区間の損傷実態を踏まえ、施工目地の接着力強化を図る材料と使用方法を開発した。これは、雨水の浸透経路を遮断し、下層混合物の脆弱化を防ぐ有効な手法と期待できる。

6.2 今後の展望と課題

本研究では、我が国の高速道路における長年の課題であった交通事故とわだち掘れの発生については、ポーラスアスファルトを表層に導入することで、これら課題の解消ができた。しかし、その優れた効果を持続発揮させる上で、基層混合物の剥離抵抗性の向上と、雨水の浸透対策を講じアスファルト舗装の長期耐久性を確保することが非常に重要であることを論じた。さらには、ポーラスアスファルトを導入した区間の現地調査を踏まえ、その損傷形態が従前の密粒舗装とは異なるため、補修箇所を選定方法（補修基準）を見直す必要があることも述べた。

これに関し、本研究の延長線上に進めるべき重要テーマを、以下に記載したい。

① 新たな補修基準の策定

第5章で述べたとおり、ポーラスアスファルトを用いた高速道路に生じる損傷形態は、現行の路面管理基準では把握困難であり、局所的な損傷が点在化する特徴を踏まえた、新たな指標を追加すべきである。本研究では、その一つの提案として、全管理事務所が定期的実施している目視による路面点検のデータを活用する方法を検討した。この他にも、従来から使われてきた路面性状測定車のデータを評価長を短くして用いる方法や、損傷が生じ始める兆候と思われる路面沈下を、路面形状や加速度により捉える手法も一考の価値がある。同時に、いずれの手法であっても、それだけでは十分でなく、補修基準として考えるためには、機械施工に必要な一定の長さ（補修単位長）の中で、どの程度の損傷が発生した時点で補修工事を行うべきかという観点が必要となる。これについては、この補修

単位長の中の舗装が一瞬に破壊することではなく、徐々に損傷が発生し出すという現実を踏まえれば、発生（破壊）確率という観点で論じるべきであり、これに関する研究を行い、ポーラスアスファルトに適した路面管理手法と補修基準を立案する必要がある。

② 新材料の開発と剥離対策の推進

第4章で述べたように、本研究では路面に損傷が発生している箇所の開削調査を行い、雨水の浸入経路とこれによる下層の脆弱化が進行している部位が明らかになった。この結果を踏まえ、第5章では、施工目地部の接着力強化を段切りと目地材で行う方法を提案するとともに、基層面での遮水工法を紹介した。加えて、今回実施した開削調査の結果を踏まえると、各層間の接着力の強化も重要であり、そのためには従来用いてきたアスファルト系乳剤よりも層間接着力を長期に渡り確保できる材料を開発する必要があると考える。これにより、層間を流れる雨水の抑制を図り、下層混合物の脆弱化を防ぐことができると期待する。

また、剥離損傷が発生しやすい地域においては、基層に加えアスベースにも剥離対策を講じる必要がある。例えば、2005～2010年度の実績で、関東地域の高速道路の補修工事のうち半分近くがアスベースからの打換を含む状況にあり、こういった地域では、剥離対策の対象をアスベースにまで広げる意義は大きいと思われる。

さらには、第4章で述べた開削調査で確認された、下層路盤の滞水や脆弱化とアスベース混合物の緩みについて、今後、詳細な調査を行い、下層路盤の支持力やアスベースの破壊のメカニズムと、舗装構造体への影響を研究し、これに基づいた舗装の長期耐久性の向上を図る具体の有効策を示していく必要がある。

この他、本研究では、如何に雨水の浸透を防止するか、浸透した場合に備え混合物の剥離抵抗性を高めておくか、に着目し論じてきたが、骨材は親水性が強くアスファルトを離しやすい、という根本的な性状に対し、親油性が勝るようなバインダが見つければ、剥離損傷の問題は飛躍的に改善できるはずである。この観点での技術開発は、今後、大いに挑戦する価値があると考えている。

もう1点、第5章に記載した高機能舗装Ⅱ型には、交通事故対策としての機能を有しつつも下層へ雨水を浸透させないというメリットがあり（図6-1参照）、この表層の適用範囲の拡大も図るべきである。



図6-1 高機能舗装Ⅰ型と同Ⅱ型の模式断面図と排水構造の違い

これに向けた取組みの一環として、排水機能が高機能舗装Ⅰ型に比べどの程度かを評価する調査が行われており、それによれば、高機能舗装Ⅱ型の場合、雨天時の浮き水の発生は、密粒の３倍遅いが、高機能舗装Ⅰ型の１/３程度だったという観察報告がある。高機能舗装Ⅱ型を導入した区間の交通事故の推移を調査している地域もあるが、今のところ高機能舗装Ⅰ型との差異は見られないという報告もある。

このような現地での実証データを基に、全国の高速道路の舗装を、複数の混合物でどのように使い分けることが、安全・快適な路面を提供し、維持修繕膳費用を最小化する上で最善なのかを議論し、方針決定する必要がある。

③ 補修設計法の構築

最後に、設計法に関する研究の必要性を述べることにする。我が国のアスファルト舗装の設計は、従前からＴＡ法が用いられている。ＴＡ法は、路床の支持力（ＣＢＲ）との１０ｔ換算軸数（大型車の計画交通量）から、必要舗装厚を算出するものであり、米国のASSHOがテストコースでの走行試験を基に提案した設計法を、ＪＨでは名神・東名に適用した結果を踏まえ一部を見直しして使用してきた。この経験的な設計法は、カタログ的に舗装の必要断面を求めることができる簡便なものであるが、使用する混合物の物性に基づくものではない。例えば、バインダや配合粒度を変更すると、室内試験では疲労破壊回数が大きく異なるにもかかわらず、ほとんどのアスファルト混合物の等値換算係数は同一であり、ＴＡ法ではその違いが評価できないという問題がある。

補修方法を検討する場合、下層の損傷状態を踏まえ必要な舗装構成を構築し、また、耐久性を高めるために疲労破壊しにくい材料を用いることが重要であるが、現行のＴＡ法ではこういった検討ができない。高速道路の建設初期段階では、その時点で供用性状は予測できず、カタログ式に舗装構成を決定するＴＡ法のメリットは大きかった。しかし、現在は、高速道路の供用実績とともに、舗装の劣化・損傷や補修実態が見えてきている時代に入ってきている。今後の補修計画においては、使用する材料や混合物の物性を適切に反映し、既設の舗装の残存耐力を適切に評価した上で、最適な舗装構成を検討できる設計手法が強く求められている。

アスファルト舗装の設計においては、多層弾性理論等による設計法もあるが、これらの前提となる破壊モデルや破壊基準式は、その妥当性がまだ十分実証されていないという大きな課題がある。筆者らが今回行った開削調査では、供用期間中の交通履歴に加え、様々な現地調査とアスファルト混合物および路盤や路床材料の試料採取も行っている。今後は、これらの試験結果を基に、日本の高速道路における実際の損傷形態を踏まえた、新たな設計法の立案にも挑戦したいと考えているところである。

謝辞

本論文の取りまとめに当りましては、北海道大学大学院工学研究科 石川達也教授に終始懇切丁寧な御指導を賜り、また、同工学研究科の田中洋行教授、萩原亨教授にも御助言を頂きました。ここに、厚く御礼申し上げます。

また、このような素晴らしい機会を与えて頂きました、北海道大学大学院工学研究科 三浦清一名誉教授および、パキスタン国で私と共に長期専門家活動をされ帰国後も様々な御助言を頂きました溝渕優様には、感謝の言葉ありません。お二方の御支援、心より感謝申し上げます。

本論文は、筆者が携わってきた、ポーラスアスファルト時代の舗装について、これまで行ってきた研究や現場調査で得られた知見を基に、その成果をまとめたものです。振り返れば、そのきっかけは、英国への留学と、その後のスイス国EMP Aでの研究が始まりであり、その間に師事した、故 J.G.Cabrera 教授と、Dr. Manfred Partl 氏をはじめとする、素晴らしい人々との出会いが今も思い出され、帰国後を含め、このような舗装の研究機会を与えてくれた日本道路公団（当時）・東日本高速道路㈱には深く感謝しております。

日本では、一旦高い評価を得られたものは、適用範囲を超えてもなお広がり、その後、問題が生じると、極端な反動を伴い否定される、といった傾向が見られることがあります。本論文の研究テーマであるポーラスアスファルトについても、そのような両極端な扱われ方をされる帰来もありますが、得られた効果をしっかり評価しつつ、それを発揮し続けるためには何が必要か、という視点でその先の研究開発を行っていくことの重要性を感じています。

今後も、この研究成果に満足することなく、いまだ数多く存在する様々な技術的課題に対し、現場に軸足を置いた中で、誠実に取り組んでいくことが、これまで私を支えて下さった方々への一番の恩返しではないかと思うとともに、これからの舗装技術の発展や後進の人材育成にも貢献できれば、この上ない喜びです。

最後に、本研究は、多くの方々からの励ましや御支援のもとにできたものであり、ここに感謝の意を表し、謝辞の結びとさせていただきます。

2013 年 11 月

高橋 茂樹