

## ステンレス繊維入りアスファルト混合物の特性に関する研究

### The studies of characteristic a permeable asphalt compound that mixed the stainless steel fiber.

川口大輔†  
Daisuke KAWAGUCHI

建部英博††  
Hidehiro TATEBE

Abstract : Permeable pavement is the one of developed drainage pavement. But permeable pavement makes it applicable to the roadway, has problems have to solve because it consists of unusual structure different from usual pavement. It is bearing capacity decrease below base and gap's buried asphalt compound. A solution exists about a bearing power decrease. However, there is not an effective solution to gap's buried a permeable pavement. Therefore, pavement that happened gap's buried is curing execute new pavement. I perceived it to a binder course's problem in this report, we propose an asphalt compound that mixed stainless steel fiber ordinariness is used to fiber reinforcement of concrete, and evaluates it's quality by Marshall stability test, Constant pressure test and Bending Strength test.

#### 1. 序論

##### 1.1 はじめに

昭和30年代より発展してきたアスファルト混合物やセメントコンクリートによる道路舗装は、快適な交通を可能にすることで物流その他日本経済に多大な貢献をしてきた。アスファルト混合物による道路舗装が急速に普及した要因として、作業の簡便性や早期の交通開放が可能であるという点が挙げられるが、その構造が水密性であるが故に雨水等の現地地盤への浸透を不可能にし、近年問題視され始めた都市部でのヒートアイランド現象や地中生体の悪化を招いている。また、舗装表面に排水されない雨水等が溜まることで発生する、ハイドロプレーニング現象による車両交通事故や夜間交通車両によるライトの乱反射なども重要な問題である。

##### 1.2 排水性舗装

近年、車道に排水性舗装が適用されつつある。これは表層部に開粒度アスファルト混合物を用いることにより雨水等を浸透させ、基層部直上に設けたタックコートなどの不透水層を用いて排水溝や都市河川へと排水する構造であり、従来の舗装に比べ舗装表面に雨水等が滞留しにくい状況となり、以下のような利点を舗装に持たせることができる。

- ・降雨時におけるタイヤと路面の摩擦係数確保
- ・ハイドロプレーニング現象の防止
- ・水跳ねの減少、防止
- ・降雨時の視界の確保
- ・夜間降雨時の路面表示の視認性向上
- ・夜間降雨時のライト反射光の減少
- ・エアポンピング音の抑制
- ・車両のエンジン音の吸収

問題点として、砂や埃によって開粒度アスファルト混合物の空隙が詰まってしまい、雨水等を浸透させることができなくなる現象である目詰まりが挙げられるが、これに対しては高圧水による洗浄やバキューム等の方法で対処が可能である。

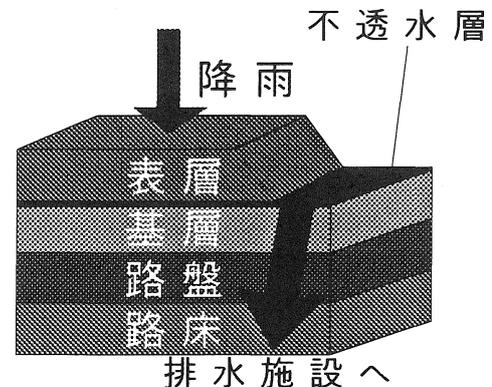


図1 排水性舗装構造図

† 愛知工業大学 建設システム工学科 (豊田市)

†† 愛知工業大学 土木工学科 教授 (豊田市)

### 1.3 透水性舗装

透水性舗装は排水性舗装を発展させた舗装であるということができる。構造的な特徴としては、開粒度アスファルト混合物を表層部だけでなく基層部にも使用することで降雨を表層から基層、さらには路盤、路床を通し現地地盤に直接還元することができる舗装である。このような特殊な構造を持つことにより、排水性舗装の利点に加え以下のような利点を舗装に持たせることができる。

- ・地下水の涵養
- ・地中生態の改善
- ・地盤沈下の抑制
- ・都市河川の氾濫防止
- ・排水施設の軽減、または省略
- ・夏季路面温度の低下
- ・街路樹等の養生

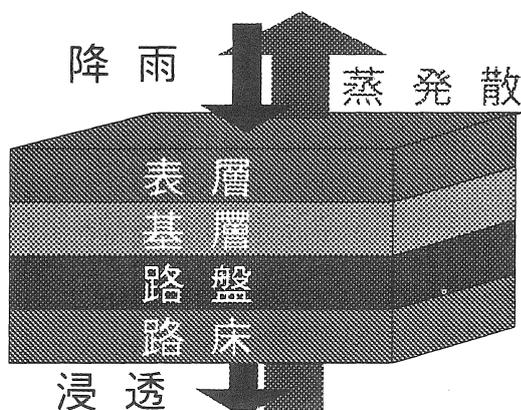


図2 透水性舗装構造図

### 1.4 透水性舗装の問題点

透水性舗装は、従来の舗装や排水性舗装には無い利点を備えている優れた舗装であるが、路盤部以下にまで雨水を通すという従来の舗装にはない特殊な構造を持つため、雨水の浸透による路盤・路床部の支持力低下や、ゴミ、埃による表層部の目詰まり、交通荷重による表層・基層部の空隙の目潰れといった問題点が存在する。路盤・路床部に対しては水砕スラグ等による改良も検討されており、また、表層部の目詰まりは排水性舗装と同様に高圧水による洗浄やバキュームによる吸引などで解決は可能であるとされている。目潰れとは、骨材を結合しているアスファルトモルタルが交通荷重の影響や夏季の温度上昇による軟化で移動し、空隙が潰れ、通水能力の低下や舗装のわだち掘れなどを起こす現象であるが、有効な解決策が提示されておらず、これに対する補修は切削オーバーレイによる打ち直しに限られており、修繕にコストがかかるため車道には適用されず、未だ試験舗装の段階である。

### 1.5 研究目的

透水性舗装は、従来の舗装や排水性舗装に比べ様々な利点を持つ優れた舗装である。しかし、前述のような問題点が存在することで一般車道への適用は余り行われていない。本研究では、一般車道にも透水性舗装を適用するため、アスファルト混合物層の目潰れ（クリープ現象）特に補修が困難である基層部の目潰れに着目し、これを防止するためアスファルト混合物にステンレス繊維を混入し、骨材の移動を抑制することで問題を解決でき得ると思え、その効果を各種試験によって評価し目つぶれ防止の可能性について検討した。

### 1.6 使用材料

アスファルト混合物に混入するステンレス繊維は、セメントコンクリートに繊維補強材として用いられているステンレス繊維を用いた。利用されているステンレス繊維の中から、アスファルトのクリープ現象である骨材の移動を抑制し、アスファルト混合物の変形への形抵性を増す効果を期待して、両端部が耳掻き状のもの（以下 Rst）と軸部が波状のもの（以下 Nst）の2種類を採用した。使用したステンレス繊維を図3に示す。また、アスファルト混合物の骨材の配合は表1に示すアスファルト舗装要綱による開粒度舗装の標準配合に従った。また使用したアスファルトは、表2に示す改質アスファルトを用いた。これは開粒度アスファルト混合物が高い透水性を要求されるため、空隙が多く必要とされ、骨材間の接触点が通常の密粒度アスファルト混合物に比べて少なくなり、大きな粘着力を持つ改質アスファルトを用いる必要があるからである。使用したアスファルトの特徴は、併記したストレートアスファルトよりも非常に高い粘度を持ち、耐流動性、耐磨耗性に優れたアスファルトと考えられる。

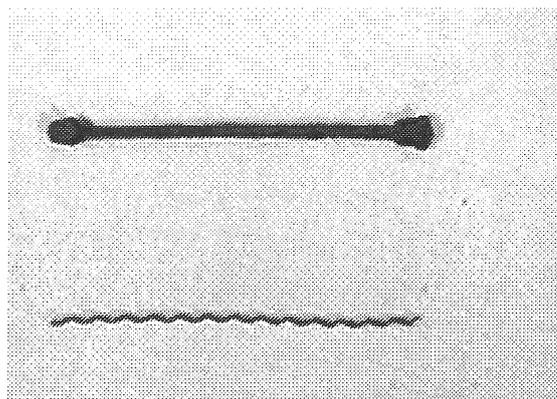


図3 使用したステンレス繊維

上側：Rst 下側：Nst

表1 骨材配合

ふるい目寸法(mm)	通過重量百分率(%)	舗装要綱より(%)
13.2	100	90~100
9.5	41.5	—
4.75	20.5	11~35
2.36	15.5	8~25
0.6	10.5	5~17
0.3	7.5	4~14
0.15	5.5	3~10
0.074	4.5	2~7

表2 使用したアスファルトの性質

項目	改質As	ストレートAs
針入度(1/10mm)	49	60~80
軟化点(°C)	84.6	44~52
伸度(cm)	78	100以上
引火点(°C)	310	260以上
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.024	1.000以上
60°C粘度(Poise)	542000	1000

2. マーシャル安定度試験

2.1 試験目的

マーシャル安定度試験は現在我が国で最も広く用いられている安定度試験であり、試験室での配合設計や現場での品質管理等に用いられている。試験図を図4に示す。この試験は直径10.5cm、高さ6.35cmの円筒形供試体を60°Cの温水に30分程度浸し、分速5cmの速さで直径方向に荷重を加え供試体が破壊するまでに示す最大荷重(安定度)を測定するものである。表3に排水性舗装等に用いられている開粒度アスファルトについてのマーシャル安定度試験の基準値を示す。本研究では過去の研究結果より求められたアスファルト量3.5%を一定とし、ステンレスを混入したことによる特性の変化を調べるため、ステンレス量を0、1、2%と変化させてこの試験を行った。

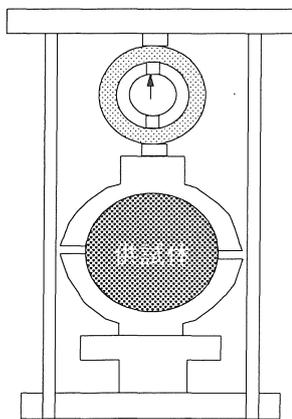


図4 マーシャル安定度試験図

表3 開粒度アスファルト混合物の基準値

項目	基準値
安定度(kN)	4.9以上
フロー値(1/100mm)	20~40(目標値)
空隙率(%)	15以上

2.2 試験結果

表3より、アスファルト舗装要綱に定められた安定度の基準値は4.9kN以上である。この基準値を満たす締固め回数を求めるため、Rst、Nst混入の各配合共に締固め回数を50回から150回まで25回毎に変化させてまた混入するステンレス量を1%、2%と変化させて試験を行い、ステンレス繊維を混入したことによるアスファルト混合物の特性の変化について検討した。

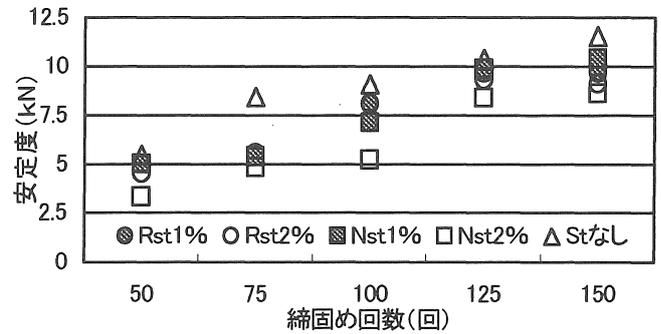


図5 安定度-締固め回数

図5より締固め回数の増加と共に安定度は増していくが、同一締固め回数ではステンレス繊維の混入量の増加と共に安定度は減少していくという結果が得られた。ステンレス繊維を混入した供試体が安定度の基準値を満たすためにはステンレス繊維を加えない供試体に比べ多く締固めなければならない。これはステンレス繊維が締固めのエネルギーに抵抗するため供試体が十分に締固まらず、密度が低くなるため安定度が低くなると考えられる。混入するステンレス繊維量の増加と共に所定の安定度を満たすために必要な締固め回数は増加するといえる。また、繊維別で見ると同じ締固め回数においてはRst混入の供試体がNst混入の供試体よりもやや高い安定度を示した。

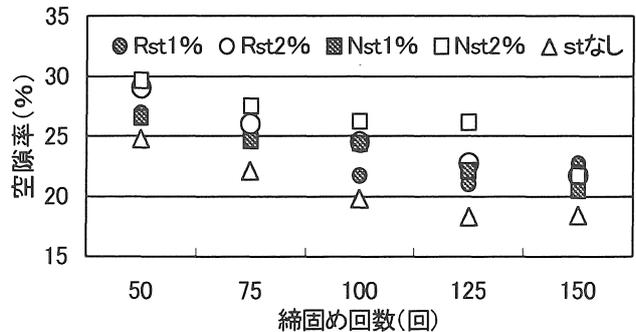


図6 空隙率-締固め回数

図 6 に空隙率と締固め回数の関係を示す。Rst、Nst 共にステンレス混入なしの供試体よりも高い空隙率を示した。また Rst 混入供試体よりも Nst 混入供試体は高い空隙率を示し、締固め回数を多くしても高い空隙率を保つことができる。またステンレス量の増加と共に空隙率は増していき、いずれも基準値 15%以上を満足する。

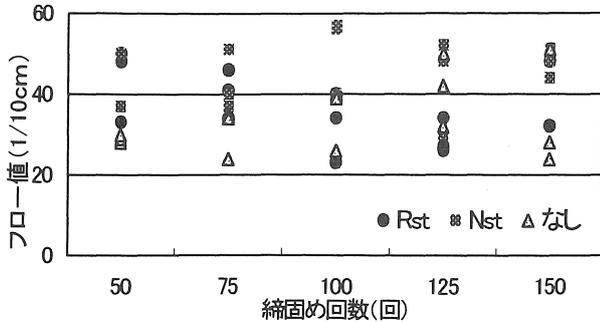


図 7 フロー値 - 締固め回数

図 7 にステンレス繊維 1%混入のフロー値と締固め回数の関係を示す。フロー値とはマーシャル安定度試験において供試体が最大荷重を示すときの変形量のことであるが、アスファルト舗装要綱によれば開粒度アスファルト混合物はフロー値が 20~40 であることが望ましいとされている。各配合の供試体とも概ねこの範囲に収まっていると考えられる。

以上の結果より、混入するステンレス量を増やしても、締固め回数を多くすれば安定度は高くなるといえるが、マーシャル安定度試験での 50 回の締固め回数で現場での 10 トンの締固め重機を用いた 2~3 回の転圧に相当し、締固め回数を多く必要とする配合では現場での転圧が困難になり、非常に作業性を損なってしまう。そこで最も少ない締固め回数で安定度の基準値を満足し、空隙率、フロー値の基準値を満たすステンレス繊維 1%混入の配合を採用し、以降の試験を行った。

### 3. ホイールトラッキング試験

#### 3.1 試験目的

ホイールトラッキング試験は車道での高温下の交通車両によるわだち掘れをシュミレートさせ、アスファルト混合物の耐流動性を評価するものである。アスファルト混合物の流動抵抗性についてはマーシャル安定度試験によりある程度は評価できるが、ホイールトラッキング試験は実際に車輪を走行させることで直接的に流動抵抗性を評価できる方法である。

本研究では、ステンレス繊維を混入した供試体に直径 20cm 幅 2.5cm の試験輪を用い、載荷荷重を 0.6MPa としてホイールトラッキング試験による繰り返し荷重を載荷し、繰り返し荷重に対するアスファルト混合物の目潰れ変形への抵抗性を検討した。試験図を図 8 に示す。これは試験温度 60°C の条件

で 30×30×5cm の板状供試体に試験輪を直接走行させ、その繰り返し荷重により供試体を示す沈下量を測定するものである。

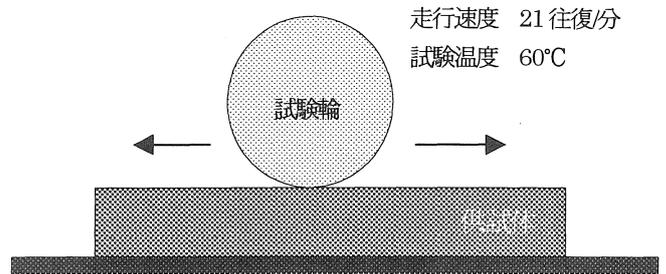


図 8 ホイールトラッキング試験図

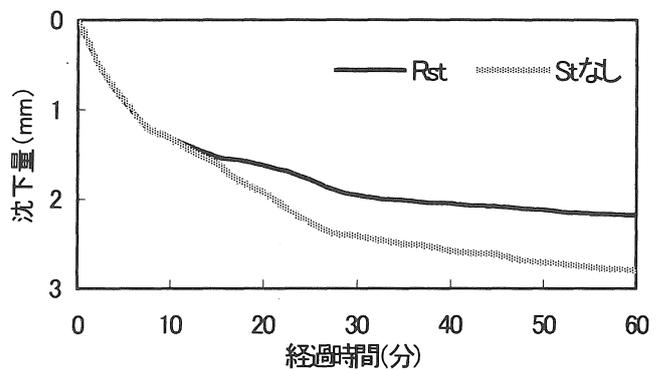


図 9 沈下量 - 経過時間

#### 3.2 各供試体の沈下量

過去の研究結果より得られたホイールトラッキング試験結果を図 9 に示す。これはホイールトラッキング試験における供試体の沈下量と経過時間の関係を示したものである。試験は試験温度 60°C の条件で 1 時間車輪走行でおこなったが、ステンレス繊維混入なし供試体と Rst 混入供試体で測定された沈下量に徐々に差が生じ、試験終了時にはステンレス混入なしの供試体で 2.8mm、Rst 混入の供試体で 2.2mm の沈下量が得られた。ステンレス繊維を混入することにより沈下量が減少し流動抵抗性は増大したと考えられる。従って、繰り返し荷重によるアスファルト混合物の変形への抵抗性は、ステンレス繊維を混入すると増大するものと考えられる。

#### 3.3 動的安定度による評価

動的安定度 (DS) とは単位変形量当りの車両の通過回数のことを指す。一般にホイールトラッキング試験では沈下量ではなく、DS を用いて耐流動性を評価する。DS を求める式を以下に記す。

$$DS = \text{走行速度} \times 15 / (d_{60} - d_{45}) \quad (\text{回/mm})$$

$d_{60}, 45$  : 60 (45) 分経過時の変形量

上記の式を用いて各供試体の DS を求めたところ、ステンレス繊維混入なし供試体で 3200 回/mm、Rst 混入供試体で 5500 回/mm であった。これは 1mm の変形を起こすのに必要な車輪走行回数を表しており、ステンレス繊維混入なし供試体では 3200 回の走行で 1mm の変形を生じるのに対し、Rst 混入供試体は 5500 回の走行に耐えることができる。ステンレス繊維を混入することにより、繰り返し荷重の荷重に対して変形が起りにくくなるという結果が得られた。

4. 恒圧試験

4.1 試験目的

アスファルトに特有の性質として速度の速い荷重には抵抗し、遅い荷重には追従するという粘性の特性が挙げられる。このためアスファルト舗装に目潰れの発生する要因として、低速荷重載荷時の変形への抵抗性が重要と考えられる。マーシャル安定度試験により決定した、ステンレスなし、Rst1% 混入、Nst1% 混入の各配合の供試体について、恒圧荷重を同時間載荷し、その変形量を測定することで目潰れ（クリープ現象）に対する抵抗性を検討した。試験図を図 10 に示す。

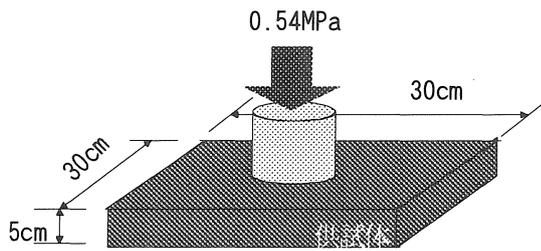


図 10 恒圧試験図

4.2 各種供試体の変形量

マーシャル安定度試験により決定した配合を基に 30×30×5cm の板状供試体を各配合についてそれぞれ作成し、室温 20°C の条件で 5 トン輪荷重換算で求められた 0.54MPa の圧力を、直径 10cm の貫入棒を用いて長時間与えつづけ、その変形量を測定することで各配合の供試体の低速荷重によるアスファルト混合物の目潰れ変形への抵抗性を評価した。

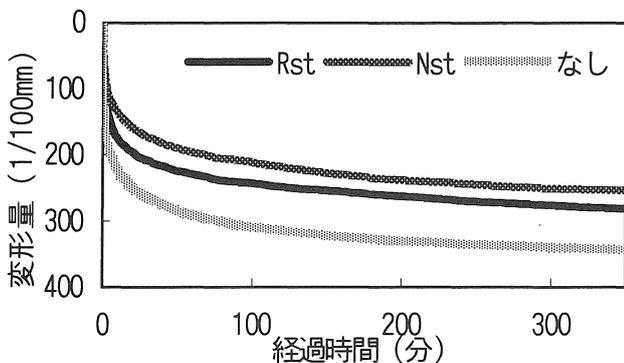


図 11 変形量 - 経過時間

図 11 は各供試体の恒圧荷重載荷後の経過時間と変形量の関係を示したものである。各供試体共に載荷開始直後の変形量に差は見られないが、経過時間と共に徐々に変形量に差が生じ、6 時間後にはステンレス混入なしの供試体で約 3.5mm、Rst、Nst 混入の供試体で約 2.5~2.8mm の変形量が得られ、同圧、同時間の荷重載荷後においてステンレス繊維を混入した供試体はステンレス繊維を混入しない供試体よりも変形量が少ないという結果が得られた。この結果より、室温 20°C の条件下ではステンレス繊維を混入した供試体は低速荷重による変形に対する抵抗性が増したものと思われる。また、Rst 混入の供試体よりも Nst 混入の供試体の方が変形に対する抵抗性が高いといえる。

4.3 高温恒圧試験

アスファルトは高温であるほど変形を起こしやすい性質を持つ。従ってアスファルト混合物が変形を起こす要因として、荷重の載荷速度の他に荷重載荷時のアスファルト混合物の温度が考えられる。そのため室温 20°C での恒圧試験だけでは目潰れ抵抗性を評価するのは不十分である。そこで水温を一定に保つことのできる恒温水槽を用い、試験温度を夏季路面温度を想定した 60°C に設定し、マーシャル安定度試験での供試体を用い、供試体が供試体の温度が試験温度に達するまで水槽に浸した後に恒圧試験を行い、その変形量を測定することで高温時のステンレス繊維入りアスファルト混合物の目潰れ抵抗性を評価した。図 12 に試験図を示す。尚、載荷荷重は恒圧試験で用いた 0.54MPa の 1/10 の 0.05MPa を用いた。これはアスファルト混合物が高温で脆くなっているため、供試体が破壊してしまうのを防ぐためである。使用した供試体及び載荷する荷重が異なるため、室温 20°C での恒圧試験と直接の比較はできないが、ステンレス繊維を混入しない、通常の開粒度アスファルト混合物の供試体との比較を行うことで、ステンレス繊維を混入した事による高温での恒圧荷重に対する抵抗性の評価を行った。

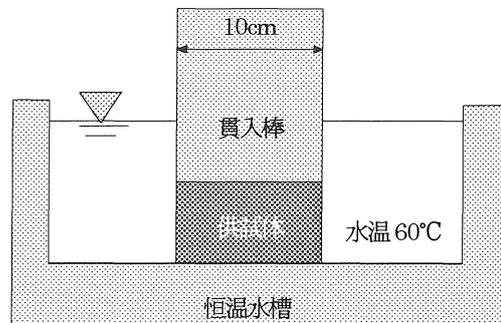


図 12 高温恒圧試験図

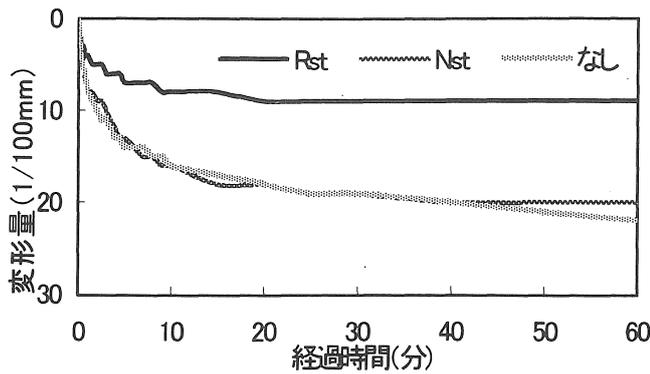


図 13 変形量 - 経過時間 (60°C)

図 13 は試験温度 60°Cでの各供試体の変形量と経過時間の関係を示したものである。一定荷重を載荷し、その経過時間ごとの変形量を測定したが、ステンレス混入なしの供試体と Nst 混入供試体は 1 時間載荷後で約 0.2mm の変形が見られたのに比べ、Rst 混入の供試体は約 0.1mm の変形に留まった。Nst 混入の供試体は、20°Cでの低速荷重に対する変形への抵抗性は増大するが、高温時での変形への抵抗性はステンレス混入なしの供試体とほぼ同程度であった。一方、Rst 混入の供試体は 20°Cでの恒圧荷重に対する変形への抵抗性は、Nst にはやや劣るが、夏季路面を想定した高温時での変形への抵抗性はステンレスなし供試体、Nst 混入供試体よりも大きな値を示した。これは 20°Cでの恒圧試験ではステンレス繊維はアスファルトとの付着力で恒圧荷重に対する抵抗性を発揮していると考えられ、Rst に比べ表面積の大きな Nst はアスファルトとの付着面積が大きくなり、高い抵抗性を示す。一方アスファルトが軟らかくなり変形を生じやすくなる 60°Cでの恒圧試験ではアスファルトとの付着力ではなく、骨材とステンレス繊維とのかみ合わせで恒圧荷重に対する抵抗性を発揮していると考えられ、形状が棒状である Nst は大きな抵抗性を発揮できないが、両端部が耳掻き状である Rst は、その耳掻き状の突起部が骨材間に挟まれ、骨材と一体となり変形への抵抗を増していると考えられる。以上の結果より、Rst を混入したアスファルト混合物は、夏季においても変形による目潰れを起こしにくいと考えられる。

5. 通水試験

5.1 試験目的

透水性舗装の基層部の目潰れを問題にする場合、低速荷重による変形量の大小だけではなく、通水能力の変化も検討して目潰れ抵抗性を評価しなくてはならない。空隙の目潰れは通水能力の低下を招くからである。そこで室温 20°Cでの恒圧試験で使用した 30×30×5cm の板状供試体に、恒圧荷重の載荷前と載荷後において図 14 のように現場通水試験を行

い、通水能力の変化から各供試体の目つぶれ抵抗性を評価する。

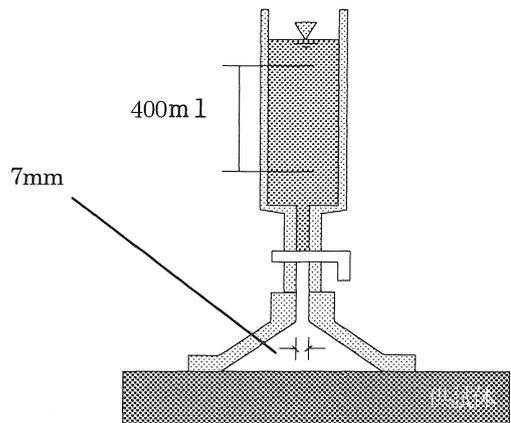


図 14 通水試験図 (6 時間載荷後)

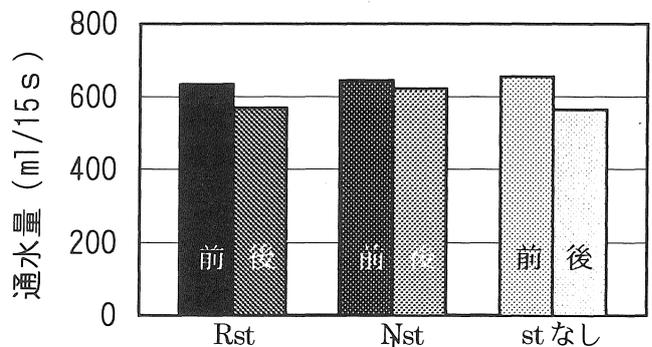


図 15 通水能力の変化

5.2 試験結果

開粒度アスファルト混合物のように高空隙率を有し、また空隙寸法の大きな物体は、空隙が屈曲していることが多く、通過した水が乱流となり、ダルシーの法則が適用できないので正しい透水係数を求めることができない。そこで一般的に行われている現場通水試験を行い、15 秒間当りの通水量を測定することで、品質管理、及び目詰まり程度の確認を行った。

図 15 は道路公団式現場通水量試験機を用いて測定した各配合の供試体の 15 秒間当りの通水量を表したものである。2 本並んだグラフのうち左側が荷重載荷前、右側が 6 時間載荷後の通水量を表す。恒圧荷重載荷前後において、通水能力はステンレス混入なしの供試体が 13%の低下、Rst 混入の供試体が 10%の低下、Nst 混入の供試体が 5%の低下が発生し、ステンレス繊維を混入しない供試体に比べ、ステンレス繊維を混入した供試体の透水能力の低下割合は少ないという結果が得られた。ステンレス繊維を混入した効果として、目潰れの発生による空隙潰れが起きにくくなり、透水能力は低下しにくいといえる。

6. 曲げ試験

6.1 試験目的

以上の試験結果より、ステンレス繊維を混入したアスファルト混合物は繰り返し荷重及び低速荷重に対して変形を生じにくく、目潰れに対する抵抗性が高いことが判明したが、実際に透水性舗装が車道に施工された場合、通行荷重による圧縮の力だけではなく、舗装のたわみによる曲げ引張りの力も受けることになる。そこで各配合の供試体について曲げ試験を行い、ステンレス繊維を加えたことによる曲げに対する抵抗性の変化を検討した。試験は図 16 に示すようにスパン 21cm の 2 点載荷で試験を行った。

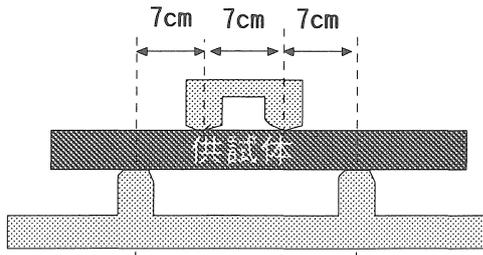


図 16 曲げ試験図

6.2 荷重速度別の曲げ強度の評価

アスファルト混合物は荷重速度によってその強度を変える性質がある。本研究ではステンレス混入なし、Rst 混入、Nst 混入の各配合について荷重速度を 1、3、5、15mm/min と変化させて曲げ試験を行った。尚、試験は室温 20°C の条件で 30 × 10 × 5cm の板状供試体を使用した。



図 17 最大曲げ強度 - 荷重速度

図 19 は各配合の供試体の最大曲げ強度と荷重速度の関係を示したものである。各供試体とも荷重速度と共に最大曲げ強度は増加していくが、Rst 混入供試体、Nst 混入供試体共に荷重速度を変化させてもステンレス混入なし供試体の最大曲げ強度と同程度の値を示した。室温 20°C での曲げ強度ではステンレス繊維を混入した効果は得られないといえる。

6.3 高温曲げ試験

高温恒圧試験と同様にアスファルトに変形を及ぼす要因である試験温度に着目し、恒温水槽を用いて 60°C での曲げ試験

を行い、夏季路面を想定した高温曲げ試験を行った。これは曲げ試験で用いたものと同じ供試体を使用し、試験温度のみを変化させた曲げ試験である。試験に使用した荷重速度は供試体の自重による変形を考慮して 15mm/min に統一した。

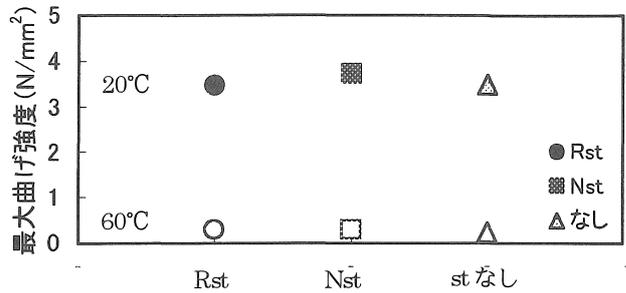


図 18 温度別最大曲げ強度

図 18 は荷重速度 15mm/min での各配合別の室温 20°C と高温 60°C の最大曲げ強度を示したものである。図中白抜きで示したグラフが高温 60°C での最大曲げ強度を示している。各配合の供試体共に 60°C 高温での最大曲げ強度は室温 20°C での最大曲げ強度に比べて低い値を示した。また、高温 60°C での曲げ試験はステンレス混入なしの供試体と Rst、Nst 混入の供試体でほぼ同程度の最大曲げ強度を示しており、ステンレス繊維を混入しても高温下での曲げ強度に影響は見られない。

7. 結論

Nst 混入のアスファルト混合物は室温の条件下ではステンレス繊維混入なしの通常の開粒度アスファルト混合物に比べ、高い恒圧変形への抵抗性を示すが、夏季等で路面温度が高くなるとステンレス繊維を混入した効果が見られなくなる。Rst 混入のアスファルト混合物は、室温では Nst にはやや劣るが通常の開粒度アスファルト混合物よりも恒圧変形、及び繰り返し変形に強く、夏季等で路面温度が高くなると Nst 混入のアスファルト混合物よりも高い恒圧変形への抵抗性を示す。また通水能力も保持されやすい。以上の結果より Rst を混入したアスファルト混合物を車道基層部に適用することにより、懸念されている基層部の目潰れは軽減され、透水性舗装の車道への適用は可能であると思われる。ただしステンレス繊維を混入しない、通常の開粒度アスファルト混合物に比べ、締固めを多くする必要がある。

<参考文献>

- 川口基弘・建部英博：鋼繊維入り透水舗装の強度について、第 50 回土木学会年次学術講演会
- アスファルト舗装要綱：日本道路協会
- 透水性舗装ハンドブック：日本道路建設業協会
- よくわかる透水性舗装：水と舗装を考える会

(受理 平成13年 3 月 19 日)