

# NAT試験より算出したエネルギー量による 排水性舗装用混合物の疲労耐久性評価

神下竜三<sup>1</sup>・青木康素<sup>2</sup>・小瀬詠理<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (一財)阪神高速道路技術センター調査研究部

<sup>2</sup> 技術部技術推進室

## 要約

阪神高速道路の設計基準では、ポーラスアスファルト混合物のバインダにポリマー改質アスファルトH型（以下、H型という）を用いることを標準とし、長期耐久性が特に望まれる場合はポリマー改質アスファルト高耐久H型（以下、高耐久H型という）を採用してもよいと規定している<sup>1)</sup>。しかし、既往の検討において、高耐久H型の初期性能はH型と比べて高いが、曲げ疲労試験による疲労破壊回数の低下度合は高耐久H型のほうが速い場合があり、長期間供用すると両者の優劣が逆転する可能性があることが報告されている<sup>2)</sup>。本検討では、室内劣化を考慮した改質H型と高耐久H型を用いた排水性舗装用混合物のNAT試験を実施し、試験データを基に算出したエネルギー量より、各混合物の疲労耐久性を評価した。

キーワード: NAT試験, エネルギー量, 疲労耐久性, ポリマー改質アスファルト

## 1. はじめに

従来から使用されているポリマー改質アスファルトH型（以下、H型）に対して、ひび割れ抵抗性やわだち掘れ抵抗性を向上させたポリマー改質アスファルト高耐久H型（以下、高耐久H型）が開発されており、阪神高速道路においては平成18年度に12号守口線の舗装補修工事で試験施工を行い、隣接するスパンで高耐久H型と改質H型を施工し、両者の耐久性を検証している。

試験施工実施から8年後に実施した路面性状調査では、高耐久H型を施工した箇所、改質H型を施工した箇所ともに良好な路面性状であった。一方で、高耐久H型の初期性能はH型と比べて高いが、曲げ疲労試験による疲労破壊回数の低下度合は高耐久H型のほうが速い場合があり、長期間供用すると両者のひび割れ抵抗性の優劣が逆転する可能性があることが報告されている<sup>2)</sup>。

ひび割れ抵抗性を評価する方法として、曲げ疲労試験があるが、試験が終了するまでに時間を要し、データの蓄積が容易ではない。そこで筆者らは、疲労によるひび割れを簡易的に評価することを目的に、NAT (Nottingham Asphalt Tester) を用いた間接引張試験（以下、NAT試験）を用い、NAT試験で定義される初期ひずみと水平破壊回数より、疲労耐久性の評価を行っており、その結果の一部については過年度に報告した<sup>3)4)</sup>。

本検討では、これまでに得られた結果に加えて、

高耐久H型の製造時や舗設時における熱劣化、および長期供用後の劣化作用を受けたアスファルト混合物の疲労耐久性を評価するために、室内劣化させたバインダを用いた評価試験を実施した。

さらに、得られたNAT試験結果よりエネルギー量を算出し、室内劣化を考慮したH型と高耐久H型の疲労耐久性を評価した。

## 2. 材料条件

### (1) 使用材料

本検討で使用した材料はH型は6社、高耐久H型は5社の計11材料である。アスファルト材料メーカーと使用材料の一覧を表-1に示す。使用アスファルト量はアスファルト種類に関係なく5.0%に統一した。これらの材料を使用して排水性舗装用混合物を作製し、NAT試験によるひび割れに対する疲労耐久性評価を行った。

表-1 使用材料

	メーカー ①	メーカー ②	メーカー ③	メーカー ④	メーカー ⑤	メーカー ⑥
H型	材料A	材料B	材料C	材料D	材料E	材料F
高耐久型	材料L	-	材料J	材料I	材料H	材料G

## (2)劣化条件

本検討で考慮したアスファルト混合物の劣化条件を表-2に示す。TFOT試験は舗装調査試験法便覧<sup>5)</sup>に準拠し、厚さ3mm程度の試料を163°Cで5時間加熱することにより劣化バインダを作製した。PAV試験はバインダを薄膜状で加圧加熱することで供用時の劣化を再現するもので、本検討では供用後7年の実路採取コアから抽出したバインダの針入度が11~24(1/10mm)と報告されていることから<sup>6)</sup>、針入度試験が30(1/10mm)以下となるようにPAV実施時間を48時間に設定した。



写真-1 NAT試験機の外観

## 3. NAT試験方法

### (1)概要

NAT (Nottingham Asphalt Tester) は写真-1に示す試験機で、アスファルト混合物の荷重に対する変位データを比較的簡便かつ精度よく測定することを目的に、Nottingham大学で開発されたものである<sup>7)</sup>。NATは応力制御での間接引張試験機であり、載荷荷重を空気圧で載荷し、載荷に伴う供試体の変位は変位計により測定する。

試験条件を表-3に示す。NAT試験では、①ステイフネス特性、②疲労特性、③永久変形特性を測定できるが、本研究では長期耐久性を評価するため、疲労特性の測定を実施した。

表-3 間接引張試験 (NAT) 試験条件

項目	内容
試験温度	10, 20, 25°C
供試体寸法	直径100mm, 厚さ50mm
荷重載荷時間	120ms (1.33Hz相当)
設定応力	300kPa

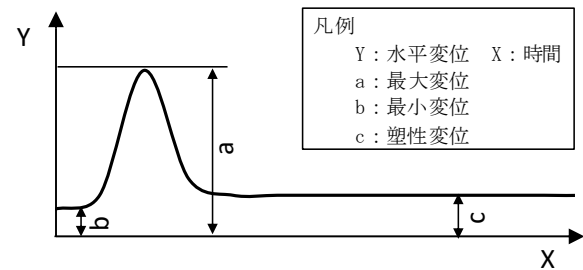


図-1 水平変位量の計測

### (2)水平方向ひずみの算出

NAT試験機で測定できる変位は垂直変位と水平変位があるが、本検討では予備試験により優位性が確認された水平変位を用いることにした。

水平変位の模式図を図-1に示す。NAT試験機は一定の載荷回数時における水平変位を記録していることから、本検討では、NAT試験機より得られた水平変位を供試体直径で除すことで水平方向ひずみを算出した。水平方向ひずみは式(1)のとおり、水平変位を供試体直径で除した値に機械の特性から決定された補正係数を考慮して算出した。

$$\varepsilon = \left( \frac{2\Delta H}{\Omega} \right) \times \left( \frac{1+3\nu}{4+\pi \times \nu - \pi} \right) \quad (1)$$

ここに、

$\Delta H$  : 各載荷回数での全水平変位

$\Omega$  : 供試体直径

$\nu$  : ポアソン比

### (3)水平破壊回数の定義

NAT試験により計測される水平変位量と載荷回数の関係を図-2に示す。繰返し荷重を載荷させることに伴い、アスファルト混合物の変位が示す挙動が弾性域から塑性域に変化する状況が確認できる。本検討では、弾性域と塑性域の境界を示す変曲点を水平破壊回数と定義した。

表-2 劣化条件

劣化条件	想定している劣化状態	バインダ劣化方法
未劣化	室内作製状態	-
TFOT	アスファルトプラント製造時および舗設時の熱劣化	舗装調査・試験法便覧 A046
TFOT後+PAV	TFOTによる劣化に加えて、5~10年供用された状態	舗装調査・試験法便覧 A046 (加圧時間は48時間)

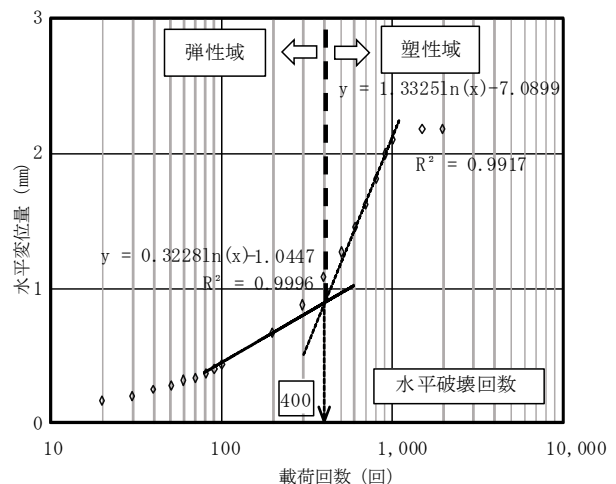


図-2 水平破壊回数の算出

#### (4) 初期ひずみの定義

既往の報告では、アスファルト混合物の初期状態を表す指標として初期ひずみを定義し、破壊回数との関係を両対数グラフにプロットし、疲労耐久性を評価している<sup>3)</sup>。本検討で実施するエネルギー量による評価方法の妥当性を確認するため、既往の疲労耐久性評価方法との関係性についても確認することとした。

初期ひずみは、供試体の初期の水平方向のひずみを表し、載荷回数104回までの水平変位量より式(2)に基づき算出した。初期ひずみと試験温度には相関があり、試験温度が低いほど、混合物の剛性が大きくなり変形しにくくなることで、初期ひずみが小さくなる傾向となる。

#### (5) エネルギー量算出方法

NAT試験機は、図-3に示す例のように、繰返し荷重の応答に対して、特定の載荷回数時における水平変位を記録している。そこで、記録されている水平変位データから、式(1)を用いて水平方向ひずみを算出し、図-4に示すように1回の載荷での応力とひずみからなる面積を単位エネルギー量として計算した。さらに、得られた単位エネルギー量を基に、その間の記録されていない載荷回数におけるエネルギー量を推定し、各載荷回数時における単位エネルギー量を足し合わせることで総エネルギー量とした。

図-5に示すように、NAT試験から得られた水平破壊回数時における総エネルギー量を水平方向破壊エネルギー量（以下、エネルギー量という）として算出し、各材料の疲労耐久性を評価した。

### 4. 試験結果

#### (1) H型と高耐久H型の全体の傾向

NAT試験より得られたデータを基に、初期ひずみ、水平破壊回数およびエネルギー量を算出し、各劣化条件におけるH型と高耐久H型の関係性を評価することとした。算出した各データより、H型と高耐久H型の疲労耐久性の優劣を明らかにするため、初期ひずみ-水平破壊回数の関係図と水平破壊回数-エネルギー量の関係図を作成した。NAT試験結果を図-6に示す。

初期ひずみは、NAT試験の荷重作用に対するアスファルト混合物の初期状態の変形程度を示しており、試験温度が高いほど、初期ひずみが高い傾向を示す。さらに初期ひずみ-水平破壊回数の関係より、試験温度が低く、初期ひずみが小さい条件において、大きな水平破壊回数を示す傾向であった。ここで、全体の傾向を確認するために、全測定結果の概ね中央値に位置する初期ひずみ1000 $\mu$ m時の水平破壊回数に着目し、バインダの室内劣化に伴う水平破壊回数の低下度合を確認するため図-7に示すようにH型に対する高耐久H型の優位性を水

平破壊回数の倍率として整理した。初期ひずみに着目すると、全体の傾向としてはH型よりも高耐久H型の水平破壊回数は多く、高耐久H型の疲労耐久性が高いことを確認できた。バインダの室内劣化に伴う影響は、TFOTのみの劣化条件では水平破壊回数の明確な低下は認められないものの、TFOT+PAV48hによる劣化条件では、H型と高耐久H型ともに水平破壊回数が低下していた。

$$\Delta H_0 = TD_{100av} - MD_{60av} \quad (2)$$

ここに、

- $\Delta H_0$  : 初期ひずみを算出するための全水平変位
- $TD_{100av}$  : 載荷回数100回から104回までの全水平変位の平均値
- $MD_{60av}$  : 載荷回数60回から64回の水平変位の最小値の平均値

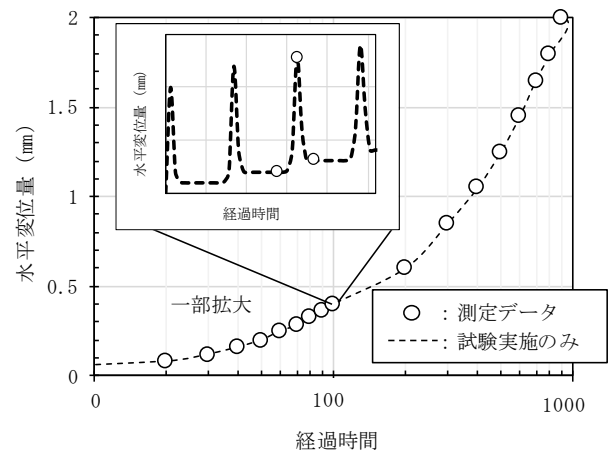


図-3 経過時間に対する水平変位の例

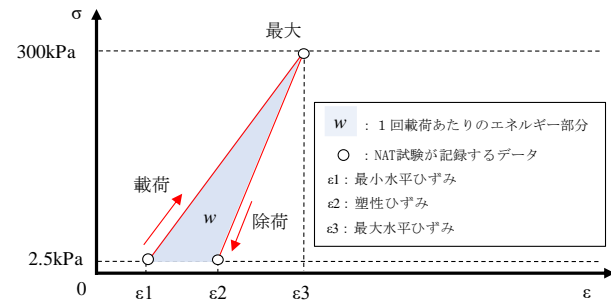


図-4 単位エネルギー量算出のイメージ

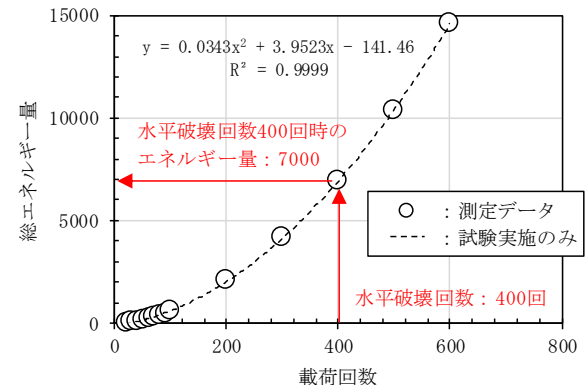


図-5 水平破壊回数によるエネルギー量算出の例

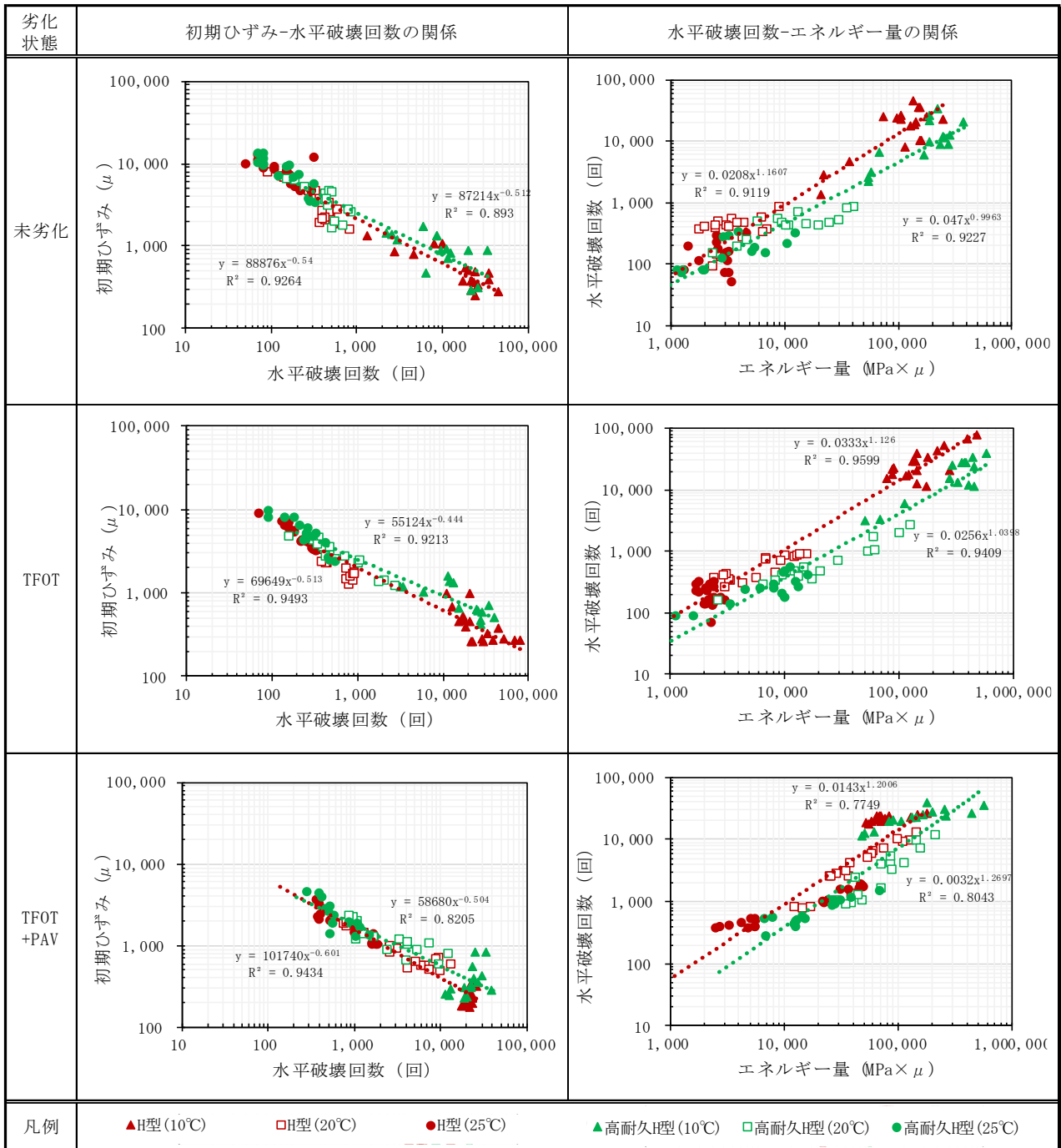


図-6 NAT 試験結果 (H型と高耐久H型の結果比較)

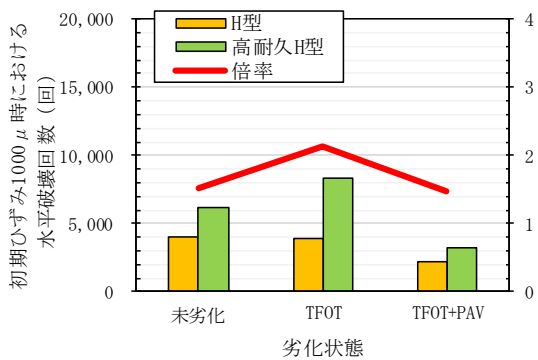


図-7 初期ひずみ 1000 μ 時の水平破壊回数

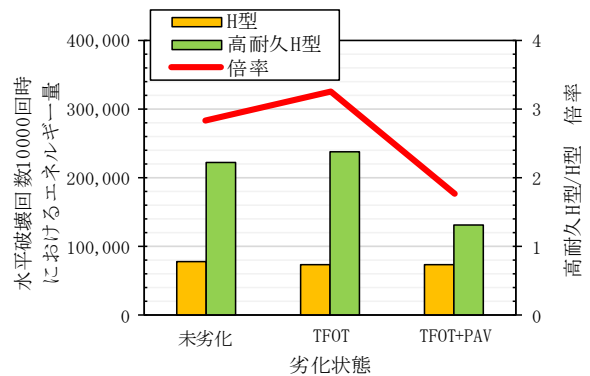


図-8 水平破壊回数 10000 回時のエネルギー量

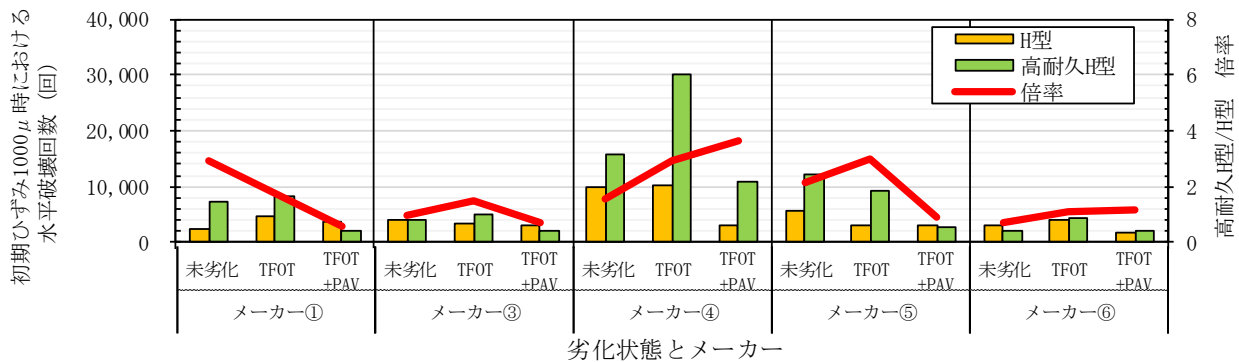


図-9 メーカー間の比較（初期ひずみ 1000 μm 時における水平破壊回数）

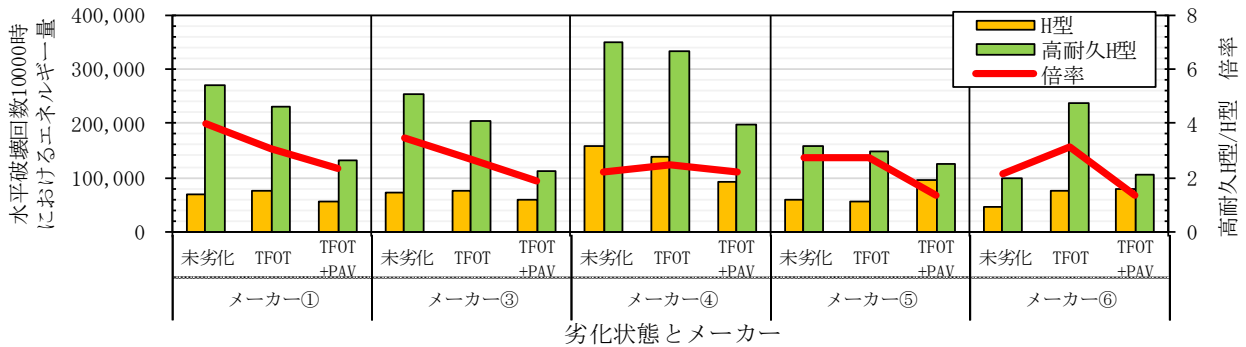


図-10 メーカー間の比較（水平破壊回数 10000 回時におけるエネルギー量）

次に、図-6の水平破壊回数-エネルギー量の間においても、全測定結果の概ね中央値に位置する水平破壊回数10000回時におけるエネルギー量に着目し、バインダの室内劣化に伴うエネルギー量の変化について図-8に示すようにH型に対する高耐久H型の優位性をエネルギー量の倍率として整理した。同一の破壊回数に着目すると、H型よりも高耐久H型がより多くのエネルギー量がアスファルト混合物を破壊するために必要となることが明らかとなった。バインダの室内劣化に伴う影響は、TFOTのみの劣化条件では明確な関係性は認められないものの、TFOT+PAV48hによる劣化条件では、H型と高耐久H型ともにエネルギー量が低下しており、劣化に伴って高耐久H型の優位性が低下している状況が確認できた。図-6の結果より、エネルギー量による評価は、初期ひずみ-水平破壊回数による評価よりも、バインダ種類が異なることによる差異が大きく、評価しやすいこと、図-7と図-8の結果より、エネルギー量による評価は、既往で報告した方法よりも、H型と高耐久H型の差異をより明確に示すこと、さらに、バインダの室内劣化によって高耐久H型のH型に対する優位性が低下することが示唆され、過去の試験施工結果と同様の傾向が確認できた。

## (2) H型と高耐久H型のメーカー間の比較

次に、H型と高耐久H型についてメーカー間のひび割れ抵抗性を確認した。全体の傾向を確認した方法と同様に、各メーカーの結果において初期ひずみ1000 μm時の水平破壊回数を図-9に、水平破壊回数10000回時におけるエネルギー量を図-10に示す。なお、メーカー②では高耐久H型の結果が存在しな

いため、ここでは除外している。

初期ひずみ-水平破壊回数の結果において、メーカー③やメーカー⑥は高耐久H型の疲労耐久性がH型よりも下回る結果となった。各メーカーは研究開発によって、H型よりも高耐久H型の疲労耐久性を向上させていると考えられるため、この結果は、メーカーの技術開発の方向性と乖離する結果である。さらに、メーカー④の水平破壊回数が突出して高い等、同一種類のアスファルト材料であるにも関わらず、メーカー間で水平破壊回数が大きく異なることを確認した。

水平破壊回数-エネルギー量の未劣化状態の結果では、すべてのメーカーにおいて高耐久H型はH型よりも疲労耐久性に優れる結果が確認できた。その一方でTFOT+PAVの劣化を考慮すると、ほとんどのメーカーでH型に対する高耐久H型の優位性が低下する傾向が確認できた。

以上のNAT試験結果より、エネルギー量を考慮した評価方法は、初期ひずみ-水平破壊回数による既往の評価方法よりも、バインダ間の性能差をより明確に捉えられることから、疲労耐久性を適切に評価できる可能性を見出すことができた。

## (3) 温度域と疲労耐久性の関係

水平破壊回数-エネルギー量による評価方法によって、異なる温度域の疲労耐久性を評価した。図-6に示す各近似曲線より、水平破壊回数10000回を基準とし、1000回時（高温側）におけるエネルギー量を比較した結果を図-11に、同様に100000回時（低温側）の結果を図-12に示す。本試験では10℃、20℃、25℃と限られた温度域での結果であることに留意する必要があるが、未劣化状態の結果に着

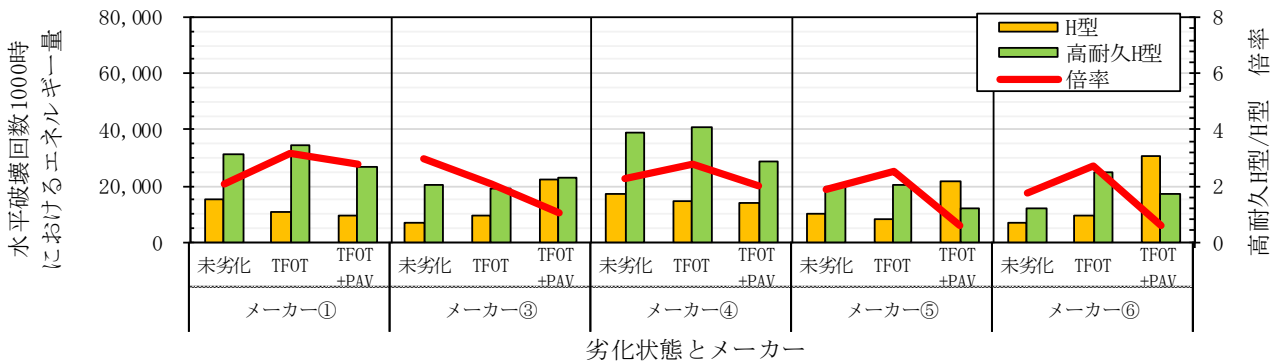


図-11 水平破壊回数 1000 回時におけるエネルギー量（高温側）

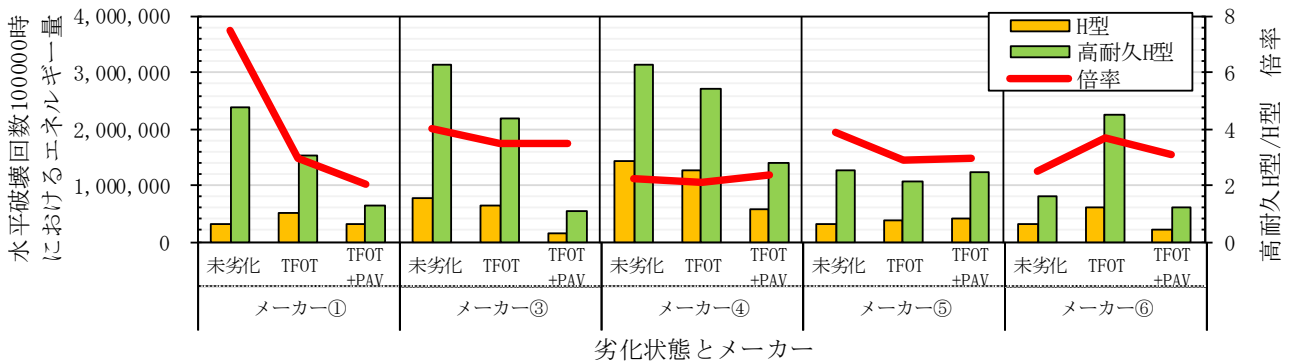


図-12 水平破壊回数 100000 回時におけるエネルギー量（低温側）

目すると高耐久H型はH型よりもエネルギー量が高く、低温側ではさらに高い優位性が認められる。一方、バインダの劣化を考慮すると、H型に対する高耐久H型のエネルギー量の低下度合が大きく、H型に対する高耐久H型の優位性が低下する傾向を示した。特に、図-11におけるメーカー⑤とメーカー⑥では、TFOT+PAVの劣化を考慮すると、H型と高耐久H型の優劣は逆転しており、このことは既往の報告と同様の結果である<sup>2)</sup>。

## 5. まとめ

本検討ではNAT試験より得られるデータよりエネルギー量を算出し、バインダの室内劣化を考慮したH型と高耐久H型の疲労耐久性を評価した。本検討結果をまとめると以下のとおりである。

- ・ NAT試験結果の分析に、エネルギー量による評価を取り入れることで、既往の初期ひずみ-水平破壊回数による評価方法よりも疲労耐久性を適切に評価できる可能性を見出すことができた。
- ・ エネルギー量により、未劣化状態の疲労耐久性を比較すると、すべてのメーカーにおいて、H型に対する高耐久H型の優位性が確認できた。
- ・ TFOT+PAVによる室内劣化を考慮すると、H型に対する高耐久H型の優位性が低下する傾向が示唆された。

本検討では、NAT試験によって、疲労によるひ

び割れ抵抗性の評価方法に関する検討を実施した。アスファルト混合物の長期的な耐久性を向上させるためには、ひび割れ抵抗性のほかに、耐流動性やはく離抵抗性の向上も必要である。今後も高耐久材料を使用したアスファルト混合物の性状（流動・ひび割れ・はく離）を適切に評価する方法の確立に向けた検討を継続し、舗装の高耐久化によってライフサイクルコストの低減に寄与したいと考えている。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社：設計基準第3部構造物設計基準（土構造物編）第4編舗装，2016.1.
- 2) 岡本信也，石井亜也加，木下孝樹，幸田正裕：供用劣化を受けたポーラスアスファルト混合物の力学特性評価，第31回日本道路会議論文集，2015.10.
- 3) 松下麗菜，青木康素，谷口惺，関上直浩：NATを用いたポリマー改質アスファルト混合物の疲労耐久性評価，土木学会第73回年次学術講演会講演概要集，V-695，2018.8
- 4) 谷口惺，西岡勉，青木康素，松下麗菜，：間接引張試験（NAT）に基づくポーラスアスファルト混合物の疲労耐久性評価，舗装，2018.10.
- 5) 社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2019.3.
- 6) 平戸利明，村山雅人，高橋茂樹，姫野賢治：長期供用された高速道路で用いたアスファルトの気象劣化現象に関する調査結果，土木学会論文集E1（舗装工学），Vol.70，2014.
- 7) 岩間将彦：Nottingham Asphalt Tester(NAT)によるアスファルト混合物の評価方法，アスファルト，Vol58，No231，2015.