

ホイールトラッキング試験における 復元変形挙動の測定と永久変形解析

村山雅人¹・竹内康²・姫野賢治³

¹正会員 博(工) 東亜道路工業株式会社 技術研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市要 315-126)

²正会員 博(工) 東京農業大学 地域環境科学部 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘一丁目 1-1)

³フェロー会員 工博 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日一丁目 13-27)

ホイールトラッキング試験中の供試体中央部の復元変形量を 63ms の間隔で測定可能な装置を考案した。この装置を用い、使用材料や配合の異なる数種類のアスファルトコンクリートについて測定を実施し、ホイールトラッキング試験中の復元変形挙動が測定可能なこと、そしてアスファルトコンクリートの種類に応じて復元変形挙動が異なることを確認した。さらに、この復元変形量の経時データは、使用材料および配合がアスファルト混合物の塑性変形特性に及ぼす影響を評価および解析するために有用な情報になると考え、得られたデータを利用して、舗装標準示方書に記載されているアスファルト混合物の永久変形解析方法による結果と測定結果を比較検討し、解析モデルの妥当性と課題について示した。

Key Words : wheel tracking test, recoverable deformation, permanent deformation analysis

1. はじめに

ホイールトラッキング試験(以下、WT 試験)は、わが国においてアスファルトコンクリートの塑性変形抵抗性を評価するための標準的室内試験方法として既に定着しており、その有効性は一般に認められているところである。

WT 試験の評価は、一般に試験時間 45~60min の 15min 間の変形量を基に供試体の塑性変形抵抗性を表すことで行われている。しかし、試験の間中、供試体は往復走行する試験輪の直下で一時的に変形するものの、試験輪通過後その変形は復元し、変形と復元を繰り返しながら永久変形量の増加が生じて行くものと考えられる。また、この復元変形挙動は、アスファルトコンクリートを構成するアスファルトや骨材などの使用材料の性状ならびにそれら材料の配合割合によって異なると予想される。しかしながら、WT 試験においてこの復元変形挙動を実際に測定した例は見られない。

筆者らは、WT 試験における復元変形の挙動を測定することで得られる変形量の経時データは、骨材やバインダなどの使用材料および配合がアスファルトコンクリートの塑性変形特性に与える影響を評価および解析するために有用な情報になると考えた。そこで、ホイールトラッキング試験中の供試体中央部の復元変形量を 63ms の間隔で測定可能な装置を考案し、バインダの種類や骨材

配合およびバインダ量の異なる数種類のアスファルトコンクリートに対して測定を試みた。

また舗装標準示方書¹⁾では、アスファルト舗装のわだち掘れ深さの照査方法として、アスファルトコンクリートの永久変形解析と路床の永久変形解析を解説している。このうち、アスファルトコンクリートの永久変形解析法は、牛尾²⁾によって提案されたクリープ変形解析法で、WT 試験や曲げ試験などの各種実測データによるクリープ曲線を用いて長時間載荷に伴う永久変形量を算出するものである。しかし、この方法による検証例は少なく、様々な実測データによる更なる検討が期待されている。

そこで本研究では、考案した WT 試験用復元変形量測定装置を用いて測定した、材料や配合の異なるアスファルトコンクリート供試体の復元変形挙動について考察するとともに、測定した復元変形量および永久変形量の経時データを用いてアスファルトコンクリートの永久変形解析を実施し、解析モデルの妥当性と課題について検討した。

2. 考案した復元変形量測定装置の概要

WT 試験では供試体上面を試験輪が往復走行するため直接上面の変形量を測定することはできない。そこで、供試体の下から表面の変位を測定する方法を採った。

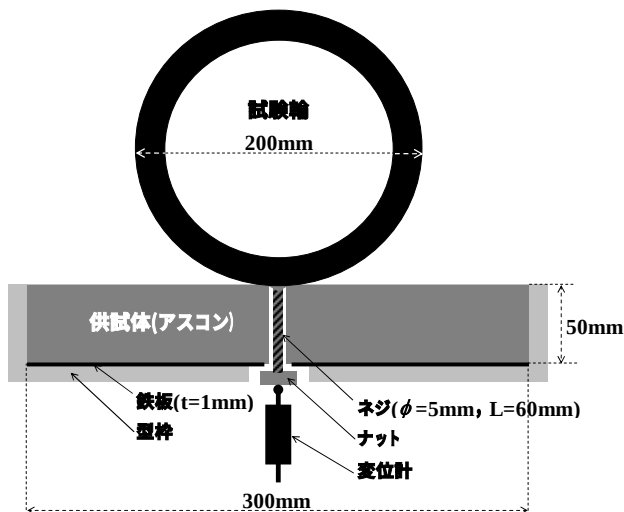


図-1 考案した復元変形量測定装置の概略図



写真-1 ネジとナット



写真-2 ナットと変位計の接触状況

本装置は、既存のWT試験機に取り付けるものである。よって、WT試験自体の測定方法は舗装試験法便覧に準拠しており何ら変更点はない³⁾。

図-1に、考案した復元変形量測定装置の概略図を示す。以下に、本装置と測定方法の要点を記す。

1) 供試体表面変位量の測定

変形量の測定位置は供試体中心とした。測定間隔は63msとし、60minの試験時間に渡って継続記録した。

2) 供試体の加工

表面変位量を下側から測定するために、WT試験用の供試体(300×300×50mm)の中央をφ6mmのボール盤で削孔し、その孔にφ5mm、長さ60mmのネジを挿入した。ネジの頭部(φ10mm)はエポキシ接着剤を用いて供試体表面に固定した。このネジが測定ピンとなる。

3) 型枠への供試体のセット

底板の中央にφ30mmの孔を開けた型枠を作製し、その中に中央にφ10mmの孔を開けた1mm厚の鉄板を入れ、その上に供試体を置いた。その後、供試体底面から突き出しているネジにナットを装着した。写真-1に使用したネジとナットを示す。

4) WT試験機への供試体のセット

WT試験機に取り付けた下部変位計と供試体底部のナットの底面が接するように供試体をセットした。

写真-2にナットと変位計の接触状況を示す。

5) 測定

WT試験開始とともに63msの間隔で変位計の変位量を

表-1 実験に用いたアスファルトコンクリートの配合設計結果

種 類 (略記)		密粒度 (M)	ポーラス (P)	
項 目				
使用バインダ(配合設計時)		ストレート アスファルト 60/80	ポリマー 改質アスファルト H型	
粗骨材の最大粒径	(mm)	13	13	
バインダ量	(wt.%)	5.2	4.8	
空隙率	(vol.%)	5.3	20.2	
バインダ容積率	(vol.%)	11.8	9.3	
骨材容積	(vol.%)	82.9	70.5	
密度	(g/cm ³)	2.371	1.992	
骨材配合率 (wt.%)	粗骨材	6号砕石	38	83
		7号砕石	19	0
	細骨材	スクリーニングス	13	0
		粗目砂	17	12
		細目砂	8	0
	フィラー	石灰石粉	5	5
骨材のふるい通過質量 百分率 (wt.%)	13.0mm	98.8	97.3	
	4.75mm	62.0	20.0	
	2.36mm	41.7	16.7	
	0.6mm	24.9	9.7	
	0.3mm	16.4	7.6	
	0.15mm	9.5	5.7	
	0.075mm	6.1	4.2	

記録装置に自動記録した。なお、最終変形量が15mm程度と大きい場合でもネジの影響を受けることなく供試体表面は均一な変形を生じていることを確認した。

3. 実験

考案した復元変形量測定装置を用いて、配合の異なるアスファルトコンクリートの供試体やゴム版に対してWT試験中の復元変形挙動の測定を実施した。

表-1に、実験に用いたアスファルトコンクリートの配合設計結果を示す。これを基本とし、バインダの種類やバインダ量を変えた実験を行った。

表-2に、使用したバインダの種類と基本性状を示す。表には、各バインダの粘弾性の特徴を記した。

これまでに、2つの実験シリーズを実施した。

以下に、各シリーズの目的と内容を示す。

シリーズ1： バインダの種類の違いや骨材粒度の違いが測定結果にどのように現われるかを捉えるために実施したものである。

密粒度アスファルトコンクリート(13)(以下、密粒度)とポーラスアスファルトコンクリート(13)(以下、ポーラス)について測定を行った。密粒度についてはバインダとして3種類を用いた。比較としてゴム版についても測定を行った。

表-3に、シリーズ1の供試体の内容とWT試験から得た変形率RDを示す。

表-2 使用したバインダの種類と基本性状

種 類 (略記)	ストレート アスファルト 60/80 (St)	セミブローン アスファルト AC-100 (B)	ポリマー改質 アスファルト II型 (II)	ポリマー改質 アスファルト III型 (III)	ポリマー改質 アスファルト H型 (H)	レジン改質 アスファルト (Re)
試験項目						
軟化点 (°C)	49.5	60.0	60.5	75.0	91.0	61.5
60℃粘度 (MPa・s)	0.1	1.2	1.5	54.0	100以上	3.1
針入度 (1/10mm)	69	50	52	49	51	14
伸度@15℃ (cm)	100以上	100以上	100以上	100以上	100以上	0
密度(g/cm ³)	1.032	1.035	1.029	1.027	1.025	1.03
改質方法あるいは改質材	-	ブローイング	SBS	SBS	SBS	石油レジン
WT試験の測定温度(60℃)における粘弾性の特徴	粘性体	ほぼ粘性体だが、Stより粘性が大きい 粘性→St<B	粘性と弾性(ゴム弾性)の両方の性質を有するが粘性が優っている	粘性と弾性(ゴム弾性)の両方の性質を有する ゴム弾性→II<III	粘性と弾性(ゴム弾性)の両方の性質を有するがゴム弾性が優っている ゴム弾性→III<H	粘性と弾性の両方の性質を有するが弾性が優っている

表-3 シリーズ1の供試体の内容と変形率RD

種 類	St-M	B-M	II-M	H-P	ゴム版(90)
項 目					
骨材粒度の種類	密粒度			ポーラス	材質:シリコン系 ショア硬度:90(60℃)
使用バインダ	St	B	II	H	
通常のWT試験による変形率RD (mm/min)	0.0740	0.0067	0.0060	0.0020	0

表-4 シリーズ2の供試体の内容と変形率RD

種 類	St-M			Re-M			III-M		
	St-M(-)	ST-M	St-M(+)	Re-M(-)	Re-M	Re-M(+)	III-M(-)	III-M	III-M(+)
項 目									
骨材粒度の種類	密粒度								
使用バインダ	St			Re			III		
バインダ量 (%)	OAC-1%	OAC	OAC+1%	OAC-1%	OAC	OAC+1%	OAC-1%	OAC	OAC+1%
通常のWT試験による変形率RD (mm/min)	0.0220	0.0740	0.1680	0.0060	0.0067	0.0220	0.0033	0.0060	0.0160

シリーズ2： 密粒度においてバインダの粘性あるいは粘弾性やバインダ量の違いがどのような結果を示すかを見るために最適アスファルト量(OAC) -1.0%, OAC, OAC+1.0%とアスファルト量を変化させた供試体について試験を実施した。バインダには粘弾性の異なる3種を用い、バインダの違いについても検討した。

表-4に、シリーズ2の供試体の内容とWT試験から得た変形率RDを示す。

4. 実験結果と考察

(1) シリーズ1の結果と考察

a) 全試験時間のプロットについて

図-2に、試験時間60min間の復元変形量のプロットを示す(曲線が重なるためH-Pはプロットしていない)。データ数が1種類について57000点強と多いため、変形量と測定時間の関係は帯状に観察される。帯状曲線の上側は、測定位置に試験輪がある場合であり、WT試験で得られる変形量曲線と同意である。下側は、変形が復元していることを示している。

b) 試験開始初期の挙動について

図-3に、試験開始から試験輪3往復分の復元変形曲線を示す。図中の直線は近似曲線である。ゴム版は、変形-

復元はあるが近似曲線の傾きが0であり、永久変形が生じない。St-Mは、近似曲線の傾きが大きく残留変形量の累積が混合物の永久変形となることがうかがえる。

c) 試験終盤の挙動について

図-4に、試験終了前の試験輪3往復分の復元変形曲線を示す。この時点では変形が進行し、混合物の流動変形抵抗性の違いが変形量のレベルに現れている。

図-5に、図-4より求めた復元変形量 δ を示す。ここで、 δ =曲線の頂点の平均値-曲線の底点の平均値とした。変形率RDの値が小さく、流動変形抵抗性の高いB-M、II-M、H-Pのそれぞれの δ を比較すると、II-MやH-PはRDが小さいに関わらず、 δ はB-Mより大きい値となっており、軟らかいのに流動変形抵抗性が高いことを示している。これは、セミブローンとポリマー改質のゴム弾性の違いが現れていると考えことができ、このような材料特性がアスファルト混合物に及ぼす影響を本測定方法で評価できる可能性を示唆している。

(2) シリーズ2の結果と考察

図-6～図-8に、St-M、Re-M、III-Mの試験終了前の試験輪3往復分の復元変形曲線を示す。また、図-9に、図-6～8より求めた復元変形量 δ を比較して示す。

3種類の供試体ともアスファルト量が多くなると δ が大きくなり、少なくなると小さくなっている。このこと

から、アスファルト量が少ないと硬い混合物となることがわかる。これは、 δ がアスファルト量に大きく影響されていることを示している。

III-M は、RD が小さいにもかかわらず St-M と同程度の δ となっており、これもバインダのゴム弾性のため、軟らかいのには塑性変形性抵抗性が高いことを示している。

Re-M は脆すぎて割れ易く現実的には使用できないが、石油レジンに改質材に用いて弾性を極度に高めたバインダを使用しており、硬い性状を有しているといえる。試験結果は、いずれのアスファルト量においても Re-M のほうが St-M や III-M より δ が小さくなり、硬い混合物となっていることがわかる。

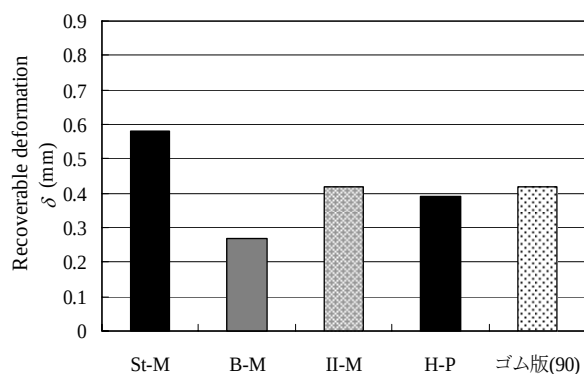


図-5 シリーズ 1 の復元変形量の比較

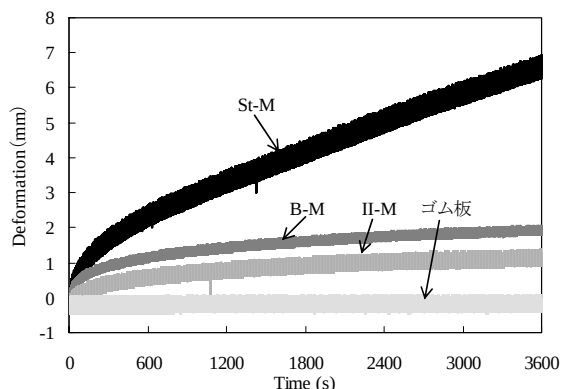


図-2 シリーズ 1 の試験時間 60min 間の復元変形量曲線

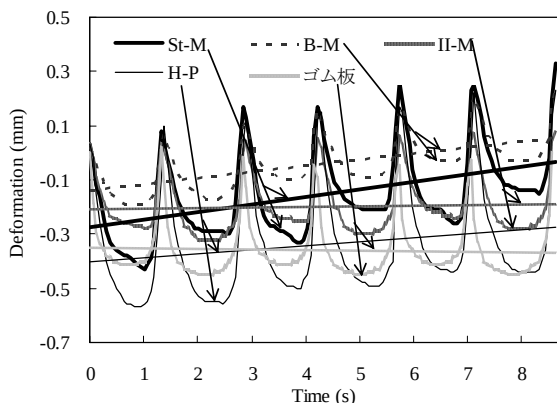


図-3 シリーズ 1 の試験開始から 3 往復の復元変形量曲線

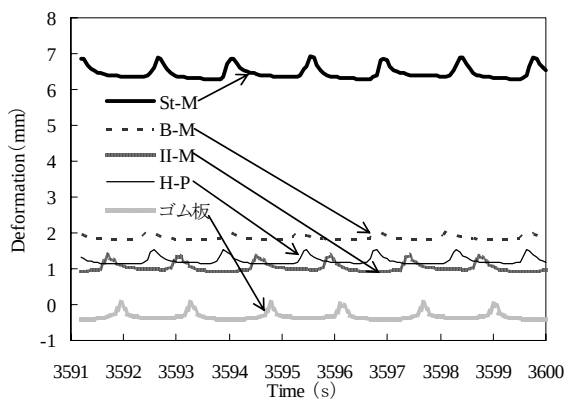


図-4 シーリーズ 1 の試験終了前 3 往復の復元変形曲線

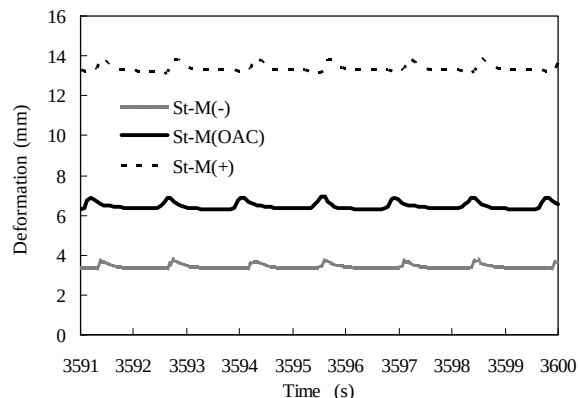


図-6 St-M の試験終了前 3 往復の復元変形量曲線

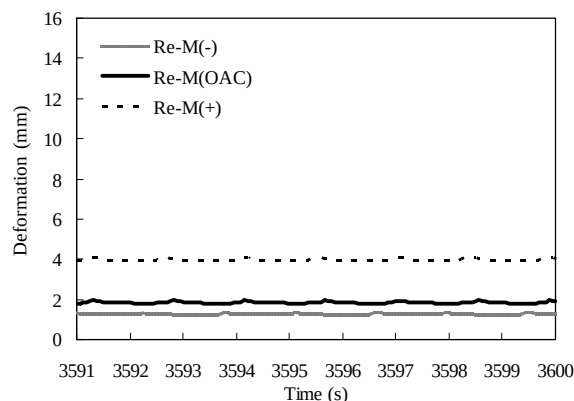


図-7 Re-M の試験終了前 3 往復の復元変形量曲線

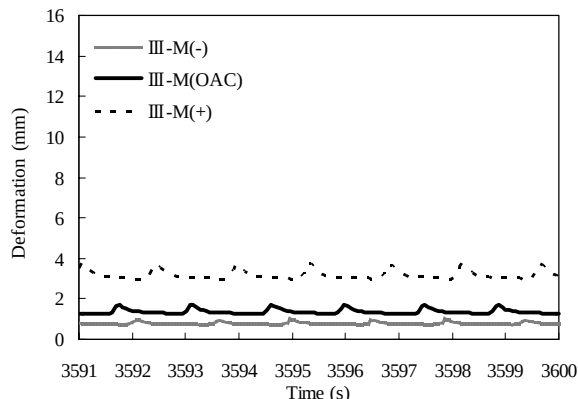


図-8 III-M の試験終了前 3 往復の復元変形量曲線

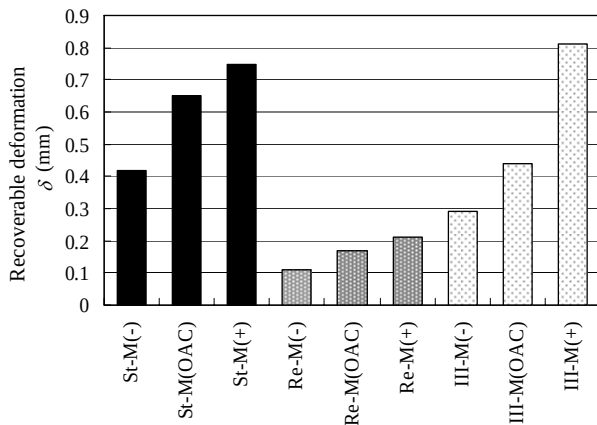


図-9 シリーズ2の復元変形量の比較

5. 永久変形解析

(1) 解析方法

アスファルト舗装に作用する1回あたり交通荷重による永久変形量は微小であるが、これが累積することでアスファルト舗装にはわだち掘れが生じ、最終的には破壊に至る。

牛尾²⁾は、アスファルトコンクリートに繰返し作用する短時間荷重の交通荷重の累積荷重時間から、長時間荷重時のアスファルトのスティフネス(S_{bit})を求め、図-10に示すように、 S_{bit} を横軸、ホイールトラッキング試験や曲げクリープ試験等の各種力学試験結果から求めたアスファルトコンクリートのスティフネス(S_{mix})を縦軸にとったクリープ曲線を提案した。そして、短時間荷重時のアスファルトコンクリートのスティフネスを $S_{mix,D}$ 、短時間荷重を累積した長時間荷重時の S_{bit} から図-10により求まるスティフネスを $S_{mix,\eta}$ としたとき、式(1)からアスファルトコンクリートの永久変形量(ΔH_{As})が求まることを示した。なお、 δ は $S_{mix,D}$ を弾性係数としたときに求まるアスファルトコンクリートの弾性圧縮変形量である。

$$\Delta H_{As} = \frac{S_{mix,D}}{S_{mix,\eta}} \times \delta \quad (1)$$

本研究では、実験より測定した復元変形量を δ とした。 $S_{mix,D}$ は、図-11、12に示すように三次元FEM(3DFEM)⁵⁾によって求めた車輪接地部中心での変形量と弾性係数の関係から求めることとした。なお、車輪接地部中心での変形量を δ とした。

$S_{mix,\eta}$ を求めるにあたり、短時間荷重の累積荷重時間 t は、牛尾の研究成果に従い式(2)によって求めた。なお、式中の w は、解析期間において任意の温度が継続する時間の割合を表す係数であり、WT試験のように一定温度に保った状態であれば、解析期間における値は $w=1.0$ となる。また、車輪が変位測定部のピン(ネジ)頭部を通過する時間 t_w は、荷重条件が表-5に示す通りであり、車輪の往復時の走行速度がストローク端部と中央部では多少異なるということを加味し0.30sとした。

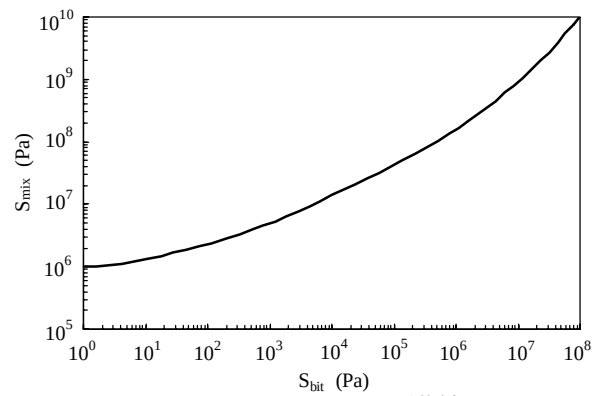


図-10 $S_{bit} \sim S_{mix}$ クリープ曲線

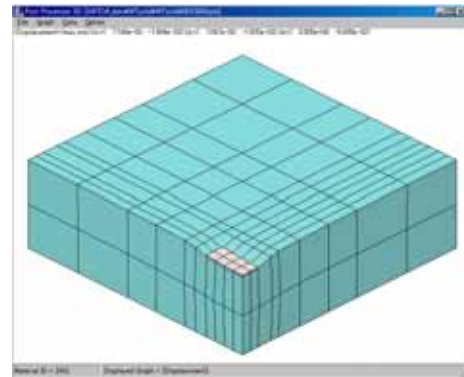


図-11 3DFEMによる感度解析

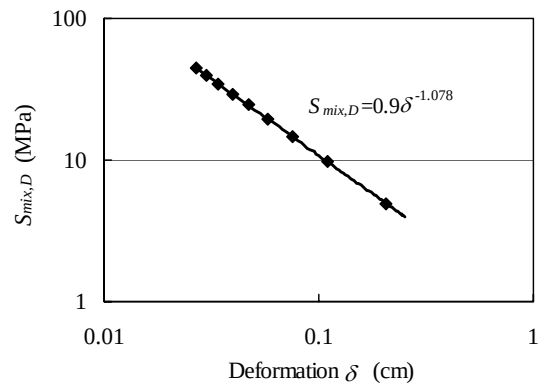


図-12 3DFEMによる感度解析結果

表-5 WT試験荷重条件

項目	値
車輪幅 (cm)	5.0
接地面積 (cm ²)	10.2
接地長さ (cm)	2.04
ストローク (cm)	23.0
速度 (往復/min)	21
測定ピン(ネジ)頭直径 (cm)	1.0

$$t = w \times N \times t_w \quad (2)$$

ここに、 w : 温度履歴換算係数

N : 荷重回数

t_w : 車輪が一回通過するときの荷重時間(s)

次に、式(2)によって求めた累積荷重時間 t から、長時間荷重時のアスファルトのスティフネス S_{bit} を式(3)にしたがい算出し、図-10のクリープ曲線から S_{bit} に対応する

アスファルトコンクリートのスティフネス S_{mix} を求めた。この S_{mix} が $S_{mix,\eta}$ に相当することになる。なお本研究では、 η_T に表-2 に示した 60℃ 粘度を使用した。ただし、H 型の 60℃ 粘度は 100MPa・s として計算した。

$$S_{bit} = 3 \times \eta_T \cdot \frac{1}{t} \quad (3)$$

ここに、 η_T : T ℃ でのバインダの粘度(Pa・s)

T : 任意の温度(℃)

基本的にアスファルト混合物の永久変形特性を検討する場合には、任意の温度での粘度を実測するのが望ましいと考えられるが、粘度が既知の温度からシフトファクター a_T を用いて任意の温度での粘度を求めることができる。

シフトファクター a_T は、ある固有の温度 T_s を基準とし、この温度から任意の温度 T でのアスファルトの粘度を求めるために用いられる。このとき固有の温度 T_s には、どのアスファルトでも同程度の粘度を示すときの温度が採用され、 T_s は等粘度温度あるいは等コンシステンシー温度と呼ばれる。牛尾⁴⁾は、過去の計測データを参考とし、 $T_{R\&B}$ - 8.5℃ が等コンシステンシー温度であり、 $\eta_{T_s} = 1 \times 10^4$ Pa・s であることを示した。そして式(4)、(5)により任意の温度、載荷時間での S_{bit} 算出方法を提案した。

$$S_{bit} = 3 \times \eta_{T_s} \cdot \frac{a_T}{t} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \log a_T &= \frac{-C_1(T - T_{R\&B} + 8.5)}{C_2 + (T - T_{R\&B} + 8.5)} \\ C_1 &= -2.0836 \cdot PI + 24.7532 (T < T_{R\&B} - 8.5) \\ C_1 &= -0.8527 \cdot PI + 8.2789 (T > T_{R\&B} - 8.5) \\ C_2 &= C_1(0.7609 \cdot PI + 10.9185) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 T : 任意の温度(℃)

T_s : ある固有の温度(℃)

η_{T_s} : T_s ℃ でのアスファルトの粘度(Pa・s)

a_T : シフトファクター

C_1, C_2 : 針入度指数 PI を変数とする定数

$T_{R\&B}$: 軟化点(℃)

本研究では、バインダの性状と骨材粒度が変わった場合に本解析方法がどの程度追従できるかを検討するために、シリーズ1およびシリーズ2のOACでの実験結果に対し永久変形解析を実施することとした。

(2) 解析結果と考察

a) 永久変形量の推定

表-6 に解析条件を示す。なお、復元変形量 δ は試験開始時から終了時までの復元変形量の平均値であり、 $S_{mix,D}$ は δ と図-12 を用いて求めた値である。

図-13 に式(3)により求めた S_{bit} を用いた永久変形量の解

表-6 解析条件

項目 種類	$S_{mix,D}$ (MPa)	δ (mm)	t (s)	PI	$T_{R\&B}$ (℃)
St-M	20.31	0.554	756	-0.542	49.5
B-M	52.38	0.230	756	1.029	60.0
II-M	30.93	0.375	756	1.228	60.5
III-M	32.94	0.035	756	3.557	75.0
Re-M	78.91	0.016	756	-1.194	61.5
H-P	26.00	0.441	756	5.742	91.0

表-7 最終的な永久変形量と S_{bit} の関係

項目 種類	S_{bit} (Pa)	Simulation (mm)	Measured (mm)
St-M	43.3	6.93	6.80
B-M	519.5	3.01	2.01
II-M	649.4	2.67	1.26
III-M	23376.6	0.61	1.72
Re-M	1342.0	2.51	1.94
H-P	43290.0	0.44	1.51

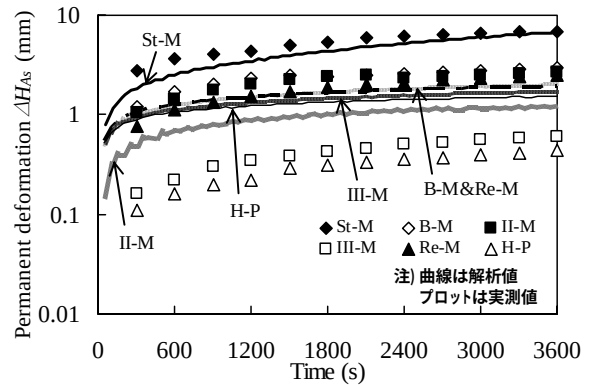


図-13 実測データのみを使用した解析結果

析結果 ΔH_{As} と実測結果の関係を示す。なお、表-6 の t は最終的な累積載荷時間であり、解析においては式(2)載荷回数に伴う t の変化を考慮した。

B-M と Re-M の実測結果は殆ど重なっているため “B-M&Re-M” と表記すると、実測結果は St-M > B-M&Re-M > III-M > H-P > II-M の順で永久変形量が小さくなっていった。図-13 は縦軸を対数軸としているため、各結果がばらついて見えるが、表-7 にも示したとおり最終的な永久変形量は St-M が約 7mm でその他の結果は 1~2mm の範囲にある。この結果に対し、式(3)による解析結果は軟化点が非常に大きなバインダを用いている III-M, H-P 以外のものは概ね良好な一致をみた。

表-6, 7 に示したように δ , $S_{mix,D}$, S_{bit} は実測値あるいは実測値を基に算出した値を用いている。また、式(1)からわかるように、 $S_{mix,\eta}$ が大きく見積もられるに従い ΔH_{As} は小さくなる。そのため、図-10 から求まる $S_{mix,\eta}$ の大小が解析結果に反映することになる。つまり、III-M, H-P の ΔH_{As} が実測結果よりも小さくなったのは、実測値から求めた S_{bit} に対応する図-10 の $S_{mix,\eta}$ が期待された値よりも大きくなっているためであるといえる。

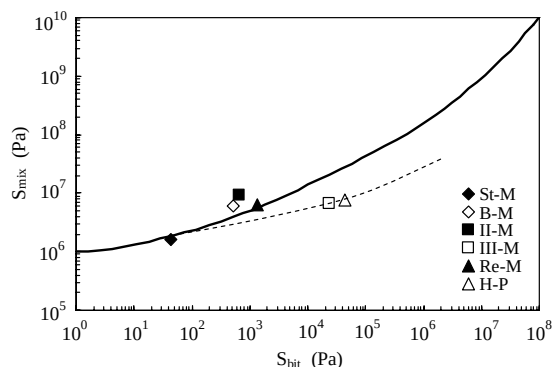


図-14 実測結果から逆算した S_{bit} と S_{mix} の関係

表-6, 7 の δ , $S_{mix,D}$ および実測した永久変形量を ΔH_{As} に代入し、次式(6)により実測結果と解析結果が一致するときの $S_{mix,\eta}$ を算出し、 S_{mix} と S_{bit} の関係をクリープ曲線内にプロットした。これを図-14 に示す。

$$S_{mix,\eta} = \frac{S_{mix,D}}{\Delta H_{As}} \times \delta \quad (6)$$

この図からもわかるように、III-M, H-P の結果は、他のバインダの結果に比べてクリープ曲線から乖離していることがわかる。また牛尾は、クリープ曲線を作成する際に「 S_{bit} が 10^5 近傍以上のデータは、密粒度アスファルトコンクリートのみを用いた結果である」と述べていることからわかるように、軟化点が高い高粘度なバインダを使用したアスファルトコンクリートあるいはポーラスアスファルトコンクリートに対して図-10 のクリープ曲線を適用することは難しいものと考えられる。

これらのことより、軟化点の高い高粘度なバインダを使用したアスファルトコンクリートに対してクリープ曲線を用いた永久変形解析を行うためには、クリープ曲線を新たに作成する必要があるものと考えられる。そのためには、様々な温度条件、配合条件でデータを蓄積する必要があるが、本研究において提案した試験装置は任意の温度条件で実施できることから、クリープ曲線作成に寄与できるものと考えられる。

b) シフトファクター a_T の適用性

式(5)のシフトファクター a_T の適用性を確認するために、60°C での各バインダの a_T を算出した。式(5)からわかるように、 a_T は温度変化だけでなく、バインダの種類の変化にも対応しており、針入度指数 PI と軟化点 $T_{R\&B}$ でバインダの特徴が説明できる場合には有効なツールとなる。今回の実験は、試験温度は 60°C で固定していたため温度変化に対する確認はできないため、式(5)の a_T がバインダの変化にどの程度対応できるかを検討することとした。これを表-8 に示す。

基本的に a_T はストレートアスファルトを中心に求められたものであるため、表-8 では St-M での a_T を基準とし

表-8 S_{bit} を式(5)から求めた場合の解析結果

項目 種類	a_T	Normalized Shift Factor Na_T	$S_{bit}(StAs)$ (Pa)	$S_{bit}(StAs) * Na_T$ (Pa)
St-M	0.0317	1.00	43.3	43.3
B-M	0.2180	6.87	—	297.4
II-M	0.2414	7.61	—	329.2
III-M	3.0943	97.50	—	4220.9
Re-M	0.2237	7.05	—	305.1
H-P	46.0432	1450.84	—	62807.0

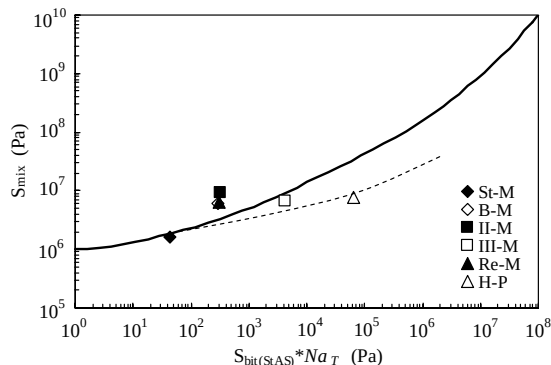


図-15 正規化 a_T から求めた $S_{bit}(StAs) * Na_T$ と S_{mix} の関係

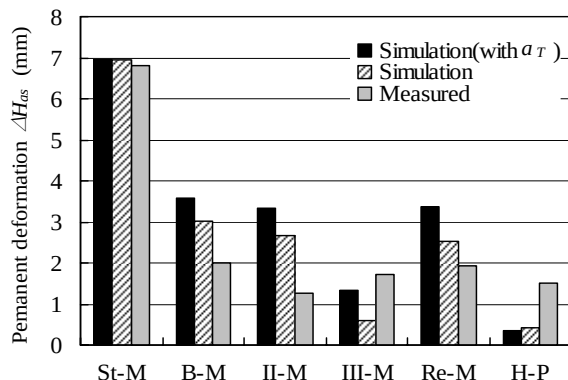


図-16 载荷終了時の永久変形量の比較

て各バインダの a_T を正規化した。そして正規化した a_T を表-8 の S_{bit} に乗じたものが最右列の値である。そして、図-14 と同様に $S_{bit}(StAs) * Na_T$ と実験結果から逆算した S_{mix} の関係をプロットしたのが図-15 である。これらの結果からわかるように、正規化した a_T を用いて計算した $S_{bit}(StAs) * Na_T$ は、表-7 に示す実測結果 S_{bit} よりも概して小さくなる傾向にあるが H-P では逆に大きくなっていた。これは、H 型は極端に軟化点が高く、式(5)の定数 C_1 の場合分け計算の影響が大きく出たためである。また図-15 より、 a_T を用いて算出した ΔH_{As} は、H-P を除き実測データを用いたものよりも大きく算出されるであろうことが推察される。

そこで、表-8 で求めた $S_{bit}(StAs) * Na_T$ を用いて载荷終了時の ΔH_{As} を算出し、 a_T による S_{bit} 低下の影響について検討した。これを図-16 に示す。この結果より、H-P 以外では実測データのみを用いて算出した ΔH_{As} よりも大きくなっているが、その差は 0.5~1.0mm 程度であることがわかる。

また、改質 H 型の結果に着目すると、 a_T を用いた場合に III-M の ΔH_{As} は実測値に漸近しているのに対し、H-P の ΔH_{As} は更に実測値から乖離する結果となった。このこと

より、今回の実験で使用したバインダの範囲内であれば、 a_T は密粒度アスファルトコンクリートの永久変形量を予測するのに実用上問題は無いものと考えられるが、ポーラスアスファルトコンクリートに対しては永久変形量を過小評価することになるため、慎重な検討が必要になるものと考えられる。また、改質アスファルトを用いたアスファルトコンクリートの永久変形予測を精度良く行うためには、等コンシステンシー温度 T_S と a_T の関係を再度検証する必要があるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、既往の WT 試験機に取り付けた復元変形量測定装置を用いて使用バインダや配合の異なるアスファルトコンクリートの復元変形挙動を測定するとともに、いくつかの測定結果に永久変形解析を適用して解析結果と実測結果を比較検討した。

本研究で得られた結果を以下にまとめて示す。

- 1) 本測定方法により WT 試験における復元変形挙動の測定が可能である。WT 試験におけるアスファルトコンクリートの変形は、通説どおり残留変形量の累積によって生じていることが確認された。
- 2) ポリマー改質アスファルトは、セミブローンやレジン改質より復元変形量が大きく軟らかい材料である。しかし、永久変形量は小さくなっており、ゴム弾性の効果が現われているといえる。
- 3) 本測定結果に、バインダとアスファルトコンクリートのスティフネスに基づく永久変形解析を適用し、変形量の推定を行った結果、III 型と H 型を除く密粒度では実測と計算結果に良好な一致を見た。
- 4) スティフネスに基づく永久変形解析をポーラスアスファルトコンクリートなど密粒度ではないアスファルトコンクリートに適用する場合は、新たなクリープ

曲線の作成が必要である。

- 5) III 型や H 型といった高粘度かつ高軟化点バインダでは、等コンシステンシー温度 T_S と a_T の関係を再検証する必要がある。

7. おわりに

本研究から、高粘度な改質アスファルトやポーラスアスファルトコンクリートなどの特殊粒度の永久変形量予測には、バインダの新たな評価方法の検討およびクリープ曲線の作成が必要になることがわかった。筆者らは、アスファルトコンクリートのクリープ曲線の作成には、本装置による温度を変化させた復元変形挙動の測定が有効と考えている。

しかしながら永久変形予測には、混合物の粒度、バインダの劣化などの内的要因や交通量、気象などの外的要因との関係を把握する必要がある。今後も、さまざまな条件で測定を実施し、データを蓄積するとともに、アスファルトコンクリートの永久変形量予測手法の確立に向けて検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 土木学会舗装工学委員会：舗装標準示方書，pp.65-67，2007.
- 2) 牛尾俊介：アスファルト舗装のわだち掘れ予測方法に関する研究，土木学会論文報告集，No.323，pp.151-163，1982.
- 3) 日本道路協会：舗装試験法便覧 4 版，pp.539-555，1992.
- 4) 牛尾俊介：アスファルトの工学特性（第 2 報），広い温度領域に適用される粘度式について，石油学会誌，第 23 巻，第 6 号，pp.376-384，1980.
- 5) 西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，土木学会舗装工学論文集，第 5 巻，pp.115-124，2000.

MEASUREMENT OF RECOVERABLE DEFORMATION BEHAVIOR OF ASPHALT MIXTURE USING THE WHEEL TRACKING TEST AND PERMANENT DEFORMATION ANALYSIS

Masato MURAYAMA, Yasushi TAKEUCHI and Kenji HIMENO

The Wheel Tracking Test (WTT) is already established as a standard test method to evaluate the plastic deformation resistance of the asphalt mixture and its effectiveness has been generally accepted, in Japan. Obtained data from recoverable deformation measurement using the WTT will provide very useful information for the permanent deformation predication of the asphalt mixture.

In this paper, a measurement method of recoverable deformation behavior using the WTT is described and obtained data of several asphalt mixtures are shown. Next, a permanent deformation analysis method based on stiffness of binder and the mixture shown in “Standard specification for pavements-2007” is applied to these obtained data. The calculated results are compared with the measured results. Then, compatibility and issues on the analysis model are described.