# 重荷重の低速走行によるアスファルト混合物層の ひずみ推定方法

桃谷尚嗣 1 · 関根悦夫 2 · 真鍋和則 3 · 中菌 裕 4

<sup>1</sup>正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

<sup>2</sup>正会員 博(工) (財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

<sup>3</sup>正会員 工修 東亜道路工業(株) 技術研究所 第四研究室 (〒300-2622 茨城県つくば市要 315-126)

<sup>4</sup>正会員 工修 日本貨物鉄道(株) 関東保全技術センター(〒116-0003 荒川区南千住 4-1-1)

鉄道貨物駅のコンテナヤードでは多層弾性解析による理論設計方法を用いて,大型荷役機械の重荷重に対応したアスファルト舗装の設計を行っている.一般的に重荷重下では路床の永久変形がクリティカルとなることから,現在の設計方法では主に路床の破壊規準に着目している.しかしながら実物大試験を行った結果,特に低速走行時において,アスファルト混合物層には多層弾性解析で推定した値よりもはるかに大きいひずみが生じることが明らかとなった.本研究では,走行速度,タイヤ接地圧分布および層間のすべりがアスファルト混合物層のひずみに与える影響を検討し,これらの影響を考慮することで実務上十分に高い精度で大型車両の低速走行時におけるアスファルト混合物層のひずみを推定する方法を示した.

**Key Words**: container yard, asphalt pavement, heavy wheel, real scale test, strain

#### 1. はじめに

鉄道貨物駅のコンテナヤードではコンテナの大型化と荷役作業の効率化に対応するため、大きな輪荷重を持つ大型の荷役機械を導入している。そこで、コンテナヤードのアスファルト舗装では多層弾性解析による理論設計方法を用いて大型荷役機械の重荷重に対応した設計を行っている 1)、2)、一般的に道路のアスファルト舗装の設計を理論設計方法によって行う場合、アスファルト混合物層の疲労破壊および路床の永久変形に対する破壊規準式では標準荷重を 49 kN としているが 3)、4)、貨物コンテナヤードにおける大型荷役機械の最大輪荷重は 400 kN~500 kN に達する。このようにコンテナヤードのアスファルト舗装には一般的な道路舗装の10倍にも達する非常に大きな輪荷重が作用するが、このような重荷重に対して多層弾性解析を適用することの妥当性については、これまで十分な検討が行われていなかった。

一方, Asphalt Institute (AI) の破壊規準式によれば、アスファルト混合物層の疲労破壊に対する破壊規準式では基層下面の引張りひずみの-3.291 乗, 路床の永久変形に対する破壊規準式では路床上面の圧縮ひずみの-4.477 乗で許容載荷輪数が低減する. すなわち、荷重の大きい領域では基層下面の引張ひずみよりも路床上面の圧縮ひずみがクリティカルになることから、現在のコンテナヤード

のアスファルト舗装では、主に路床の破壊規準に着目した設計が行われている。しかしながら、実際にはアスファルト混合物層のひび割れや流動に起因する破壊形態も見られることから、アスファルト混合物層の変形についても十分な検討を行っておく必要があった。

アスファルト混合物層の変形特性は温度や載荷速度の 影響を受ける5.多層弾性解析を用いて理論設計方法を適 用する場合は、季節の温度を考慮した弾性係数を用いる が、載荷速度の影響については通常、定量的には考慮さ れていない. 航空機を対象とした研究によれば、走行速 度が増加するとアスファルト混合物層のひずみが低減す るため、疲労寿命が長くなることが指摘されているが<sup>6</sup>、 コンテナヤードではその反対に、10 km/h 程度の低速で大 型荷役機械が走行するため、アスファルト混合物層のひ ずみが大きくなり, 疲労寿命が短くなる可能性が懸念さ れる. 一方, 大型荷役機械の場合, アスファルト混合物 層の厚さがタイヤ接地幅および接地長に対して相対的に 薄くなるため、接地面積が基層のひずみに与える影響が 大きくなる<sup>7)</sup>. さらに、タイヤ接地圧分布については多層 弾性解析では一般的に等分布荷重とするが、実測された 結果によるとタイヤ接地面内では必ずしも等分布とはな らないことから<sup>8)</sup>,解析における分布荷重の適切な設定方 法についても検討する必要があった.

以上の点をふまえ、本研究では試験舗装において FWD

試験,繰返し載荷試験および大型車両の走行試験を行うとともに、大型荷役機械の現地走行試験を行い、重荷重下におけるアスファルト舗装の変形特性について検討を行うこととした。特に走行速度およびタイヤ接地圧分布がアスファルト混合物層のひずみに与える影響について定量的な検討を行い、これらの影響を考慮することで、大型車両の低速走行時におけるアスファルト混合物層のひずみを推定する方法について考察を行った。

# 2. 試験舗装の概要

図-1 に示す試験舗装において、繰返し載荷試験および 大型車両の低速走行試験を行った. 試験土槽は長さ7m, 幅 3.5 m, 深さ 2.5 m であり, アスファルト混合物層の厚 さを 10cm とした. 表層 (5 cm) は密粒度アスファルト混 合物,基層(5 cm)は粗粒度アスファルト混合物とした. なお, 仕上がり厚さは試験舗装Aが12.5cm, 試験舗装B が 10.8 cm となり、試験舗装 A の方がやや厚くなった. 路床は締固め度 95%の礫質砂を用いた. 試験舗装は路盤 に厚さ 55 cm の粒度調整砕石を用いた「試験舗装 A」と 厚さ25 cm のセメント安定処理を用いた「試験舗装B」 の2種類とした.アスファルト混合物層の施工後にコア により採取した供試体について、舗装試験法便覧<sup>9</sup>に示さ れた試験方法による密度および圧裂強度を表-1に示す. また、路盤および路床の材料特性を表-2に示す、路盤お よび路床は締固め密度比が95%となるよう、振動ローラ により転圧した. なお、セメント安定処理はセメント 3.1%, フライアッシュ 1.8 %をクラッシャラン等に加え た上層路盤用の材料であり、締固め密度比 94.8%におけ る7日後の一軸圧縮強さは3.27 N/mm<sup>2</sup>であった.

基層下面(深さ 8.6 cm)には図-2 に示す配置で、アスファルト混合物用のひずみゲージ(東京測器研究所製: PMFLS、ゲージ長 60mm)を各試験舗装に14 枚ずつ埋設した。使用したひずみゲージは表面が樹脂でコーティングされており、所定の位置に設置した状態でアスファルト混合物を締め固めることで、アスファルト混合物とひずみゲージが固着することが確認されている。また、試験中には熱電対によりアスファルト混合物層の温度を測定した。なお、試験舗装は屋内に構築されており、直射日光の影響は受けない。

#### 3. FWD 試験におけるひずみの推定

## (1) 静的逆解析による弾性係数の推定

舗装および路床の弾性係数を推定するために, FWD 試験を行い, 静的逆解析を行った. FWD 試験では載荷板(直径300 mm)の中心をひずみゲージ No.4 の直上に設置し, 載荷荷重は49 kN, 78 kN, 98 kN の3 段階とした. FWD

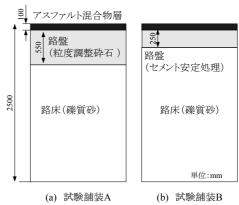


図-1 試験舗装の断面図

表-1 アスファルト混合物の密度および圧裂強度 (a) 表層(密粒度アスファルト混合物)

温度(℃)	供試体密度 (g/cm³)	圧裂強度 (N/mm²)
5℃	2.286	3.88
20℃	2.289	1.32
40°C	2 300	0.31

#### (b) 基層(粗粒度アスファルト混合物)

温度(℃)	供試体密度 (g/cm³)	圧裂強度 (N/mm²)
5℃	2.319	2.66
20℃	2.302	1.01
40°C	2.300	0.21

表-2 路盤および路床の材料特性

	路盤 (粒度調整砕石)	路盤 (セメント安定処理)	路床 (礫質砂)
均等係数 U。	72.0	48.4	13.0
土粒子の密度 G <sub>s</sub> (g/cm³)	2.710	2.623	2.664
最大乾燥密度 ρ <sub>dmax</sub> (g/cm³)	2.312	2.226	1.938
最適含水比 w <sub>opt</sub> (%)	5.4	6.4	11.9

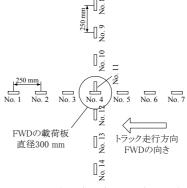


図-2 ひずみゲージの配置(平面図)

試験で得られた舗装表面のたわみの最大値の分布を図-3 に示す. たわみ量は試験舗装 A の方が大きく, 載荷荷重に対してほぼ線形の関係でたわみ量も大きくなった. FWD試験における荷重および変位波形の例(試験舗装 A, 載荷荷重 98 kN)を図-4 に示す. 変位は荷重よりやや遅

れて生じるが、荷重および変位の生じている時間はともに 30 ms (0.03 秒) であり、同程度であった.

舗装表面のたわみ形状から拡張ベイズ法による静的逆 解析 10)により推定した弾性係数を表-3 に示す、路盤の弾 性係数はセメント安定処理を用いている試験舗装 B の方 が高いが、表基層および路床については試験舗装 A と B で概ね同程度であった、また、載荷荷重による弾性係数 の違いは見られなかった. なお, 逆解析で推定された表 基層と路床の弾性係数は試験舗装AとBでやや差があっ たが、同時期に同様の方法で構築していることから、表 基層については試験舗装AとBの平均値を用いることと し、路床については路床構築時に小型 FWD 試験で得られ た弾性係数 11) が試験舗装 A, B ともに 70MN/m² 程度であ ったことを考慮して、静的順解析に用いる弾性係数は表 -4 の通りとした、この値は、後述する繰返し載荷試験、 トラック走行試験にも適用した. なお, 順解析における 表基層(アスファルト混合物層)の弾性係数については 式(1)により、各試験時の温度に対して補正した<sup>12)</sup>.

$$E_{as(20)} = E_{as(7)} \times 10^{(-0.0184 \times (20-7))}$$
 (1)

ここで  $E_{as(20)}: 20$ °Cにおけるアスファルト混合物層の弾性係数  $E_{as(7)}: T(^{\circ}$ C)におけるアスファルト混合物層の弾性係数

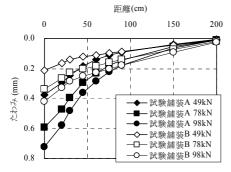


図-3 FWD 試験による舗装表面のたわみ

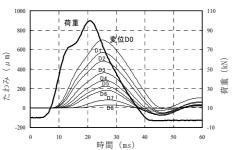


図-4 FWD 試験の荷重・変位波形例 (試験舗装 A, 98 kN)

表-3 静的逆解析により推定した弾性係数

弒	delivable	弹性係数(MN/m²)			n/a		
験	載荷 荷重	表基層	v=0.35	路盤	路床	路面温度	基層 温度
舗	(kN)	温度補	20℃	v=0.4(A)	v=0, 45	(°C)	(°C)
装		正前	補正	v=0. 25 (B)		, -,	, -,
	49.71	5040	7420	290	72	28.1	29.1
Α	77.54	5220	7880	272	74	28.0	29.6
	96.99	5000	7920	284	70	29.3	31.0
	49.75	5380	8240	3600	104	29.1	30.1
В	78.59	5800	8820	3600	100	28.6	29.9
	98.15	5380	8320	3440	96	29.0	30.3

なお, 試験舗装は室内にあるため, 舗装表面と基層の 温度はほぼ同じであり, 解析では表基層を一体とした.

## (2) FWD 試験における基層下面のひずみの推定

FWD 試験における基層下面のひずみ波形の例 (試験舗装 A, 載荷荷重 98 kN) を図-5 に示す. 重錘は予備載荷を含め,合計 4 回落下させている. はじめに載荷板を接地させた際のひずみが観測され,その後の重錘の落下に伴って動的な応答を示している. 重錘を落下させる度に,わずかに残留ひずみが生じるが,動的なひずみの応答は予備載荷を除く3回の落下でほぼ同じであった. 基層下面のひずみは載荷板直下のゲージ No. 4 で引張,載荷板外側のゲージ No. 3 および No. 5 は圧縮であった. なお,ひずみの生じている時間は0.1 秒程度であり,図-4 に示した荷重や変位と比較すると、3 倍程度時間が長い.

試験舗装 A について, FWD 試験で得られた基層下面のひずみの実測値(最大値)と解析値の比較を図-6 に示す. はじめに多層弾性解析 (GAMES) を行ったところ, 解析ひずみは実測ひずみよりも大きくなることがわかった. これについては, 直径 30 cm の載荷板を等分布荷重に置き換えていることが原因と推定された. そこで, FEM (Nastran) により載荷板を直径 30cm, 厚さ 3cm の鉄製円形載荷板として図-7 のようにモデル化した解析を行っ

表-4 順解析に用いた弾性係数とポアソン比

試験舗装	層名	材料名		ポアソン 比	
	表基層	アスファル混合物	5300	0.35	
Α	路盤	粒度調整砕石	280	0.4	
	路床	礫質砂	70	0.45	
	表基層	アスファル混合物	5300	0.35	
В	路盤	セメント安定処理	3500	0.25	
	路床	礫質砂	70	0.45	

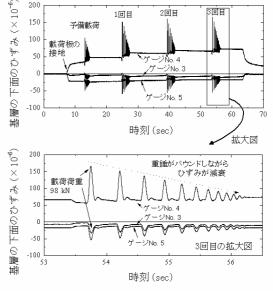


図-5 基層のひずみ波形例 (試験舗装 A, 98 kN)

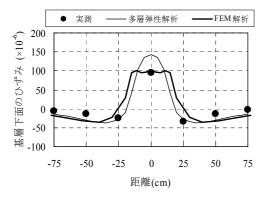


図-6 実測値(最大値)と解析値の比較

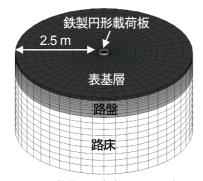


図-7 FWD の載荷板を考慮した FEM 解析モデル

た. このように載荷板の剛性を考慮することで、実際により近い接地条件となるが、載荷板中心部直下のひずみは等分布荷重を与えた場合よりも小さくなり、実測値と高い整合性が得られることがわかった. なお、FEM においても等分布荷重を与えると多層弾性解析の結果とほぼ一致することを確認している. 一方、舗装表面の変位については多層弾性解析で0.74 mm、FEM で0.72 mm であり、載荷板の剛性の影響はわずかであり、実測値の0.72mmと概ね同程度の変位であった.

以上の結果より、FWD 試験時における舗装のたわみを 推定する場合は等分布荷重による多層弾性解析で概ね問 題ないと考えられるが、基層のひずみを推定する場合は、 載荷板の剛性の影響による接地圧分布の違いを正しく考 慮する必要があると考えられる.

### 4. 繰返し載荷試験におけるひずみの推定

# (1) 試験方法

試験舗装 A において、図-8 に示すゴム載荷板を用いた 繰返し載荷試験を行った. ゴム載荷板の形状は大型荷役 機械のタイヤ接地面を考慮して、50 cm×50 cm の正方形 とし、厚さは 10 cm とした. ゴム硬度はホイールトラッ キング試験に用いるゴムタイヤと同程度 (ゴム硬度約 80) とした. 荷重振幅は 55 kN, 105 kN, 155 kN, 205 kN, 255 kN の 5 段階とし、載荷方法は繰返し載荷 (正弦波:1 Hz, 5 Hz, 10 Hz) および一定荷重 (10 分間) とした.

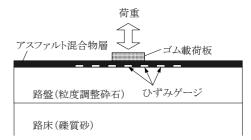


図-8 ゴム載荷板による繰返し載荷(試験舗装A)

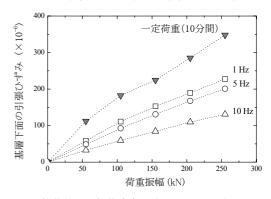


図-9 載荷荷重・載荷速度と基層下面のひずみの関係

#### (2) 繰返し載荷試験の結果

載荷荷重(荷重振幅)とゴム載荷板中央部直下の基層 下面の引張ひずみの関係を図-9に示す. 基層下面のひず みは大型荷役機械の最大輪荷重に相当する 250kN (タイ ヤ1輪あたり)程度の重荷重に対しても、荷重に対して ほぼ線形の関係にあることが確認された. その一方, 基 層のひずみは載荷時間(載荷周波数)の影響を強く受け、 載荷周波数が1Hzの場合は10Hzの場合よりも約1.7倍, 一定荷重(10分間)の場合は、10Hzの場合よりも約2.7 倍大きくなることがわかった. 荷重振幅 205 kN の場合を 例として, 実測値と多層弾性解析におけるひずみ分布の 比較を図-10に示す. なお, 多層弾性解析に用いたアスフ アルト混合物層の弾性係数は表-4をもとに式(1)から試 験時の基層温度 21.5℃で補正して 7500 MN/m² とした. 多 層弾性解析により得られたひずみは載荷周波数 10Hz と 5Hz の中間程度の値となった. このように、載荷速度の 速い FWD の逆解析から推定した弾性係数を用いて多層 弾性解析を行うと、載荷周波数が 1Hz 程度となるような 低速載荷時のひずみを過小評価することがわかった.

一方、繰返し載荷時における載荷荷重(荷重振幅)とアスファルト舗装表面の変位の関係を図-11 に示す. なお、アスファルト舗装表面の変位はゴム載荷板端部から 2cm 離れた位置で測定している. アスファルト舗装表面の変位は基層のひずみと同様に、荷重に対してほぼ線形に増加することがわかった. ただし、変位は5 Hz, 1 Hz, 一定荷重(10 分間)と載荷時間が長くなるに従ってやや大きくなるが、基層のひずみとは対照的に10 Hz の場合に最も大きくなった. これは、試験土槽の共振周波数(約11Hz)に近付いたためであると推測される. ただし、基

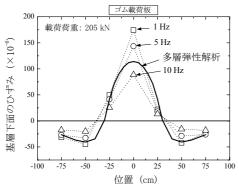


図-10 基層下面のひずみ分布

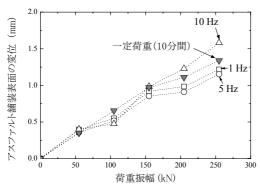


図-11 アスファルト舗装表面の変位

層のひずみと比較して、アスファルト舗装の変位に対する載荷速度の影響は小さかった.

以上の結果から、基層のひずみと舗装表面の変位は大型荷役機械に相当する重荷重下においても、載荷速度が一定であれば荷重に対して概ね線形の関係にあることから、実務設計における多層弾性解析の適用は妥当であると判断できるが、特に低速走行時の基層のひずみを推定する際には、速度の影響を考慮した弾性係数を用いる必要があると考えられる。

# (3) 載荷時間を考慮した基層のひずみの推定方法

載荷時間(載荷速度)の影響を考慮するためには、厳密には慣性力と粘性を考慮した動的解析が必要である. しかしながら、低速時については準静的な条件となり慣性力の影響は無視してよいと考えられるため、載荷時間を考慮した弾性係数(スティフネス)を求めることで、線形弾性解析においてもある程度の精度で基層のひずみが推定できると考えられる. そこでレジリエントモジュラス試験と FWD 試験の結果から、アスファルト混合物層の載荷時間依存性について検討した結果を適用し 13、式(2)のように補正した弾性係数を用いて、載荷時間を考慮して基層のひずみを推定することを試みた.

$$E_1 = E_0 (t_1/t_0)^a$$

$$a = 0.0095T + 0.0559$$
(2)

ここで $E_0$ : 基準となる弾性係数 (FWD の弾性係数)  $E_1$ : 補正した弾性係数 (スティフネス)

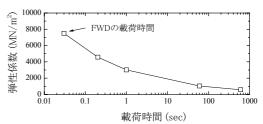


図-12 載荷時間と弾性係数(スティフネス)の関係

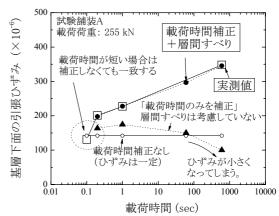


図-13 載荷時間を補正した解析結果と実測値の比較

to: 基準となる載荷時間 (FWD の載荷時間)

t<sub>1</sub>: 実際の載荷時間 a: 温度の補正係数

T:アスファルト混合物層の温度 ( $^{\circ}$ C)

載荷時間を補正した弾性係数(スティフネス)を図-12 に、載荷時間を考慮して補正した弾性係数を用いた多層 弾性解析の結果を、「載荷時間のみを補正」として図-13 に示す. 実測値は載荷時間が長くなると, 基層下面の引 張ひずみは増加するが、弾性係数を低下させる方法では、 載荷時間が長い、すなわちスティフネスが小さい場合に 基層のひずみが反対に低下してしまうことがわかった. これは、多層弾性解析では各層の境界面を連続としてい るため、アスファルト混合物層の弾性係数が低下して路 盤の弾性係数に近づくと、舗装を積層された板構造とし て考えた場合、路盤の影響により基層下面のひずみが生 じにくくなるためであると推察される. 現実には路盤と アスファルト混合物層が完全に固着して一体の板構造と して挙動するとは考えにくいことから、GAMES におい て、基層と路盤の境界面に「層間すべり」を適用するこ ととした  $^{14}$ . GAMES の層間すべりは第 i 層と i+1 層の間 ですべりが発生する場合を式(3)でモデル化する.

$$(1 - \alpha_i) \{ u_r^i(h_i) - u_r^{i+1}(0) \} = \alpha_i \beta_i \tau_{rz}^i(h_i)$$
(3)

ここに、 $\alpha_i$ は「すべり率」で、0が完全付着、1に近づくほど摩擦が0に近づく、 $\tau^i_{r_i}(h_i)$ はi番目とi+1番目間のせん断応力である。また、 $\alpha_i$ が無次元となるように、 $\beta_i$ は式 (4) の通りとしている。なお、bは複数の荷重が作用している場合の最大載荷半径である。

$$\beta_i = b * \left( \frac{1 + \nu_i}{E_i} + \frac{1 + \nu_{i+1}}{E_{i+1}} \right)$$
 (4)

ここでは基層と路盤の間のすべり率0.4と仮定した. そ の結果、図-13に示したように、載荷時間が短く、アスフ アルト混合物層のスティフネスが大きい場合は、層間す べりの影響は比較的小さいが、載荷時間が長く、アスフ アルト混合物層の弾性係数が小さい場合には層間すべり を考慮することで基層の引張ひずみも大きくなるという 実測値と同様の結果が得られ、その値も実測値と高い整 合性を示した. すなわち, 層間すべりを考慮することで, 多層弾性解析において基層のひずみの載荷速度依存性を 合理的に表現できることがわかった.

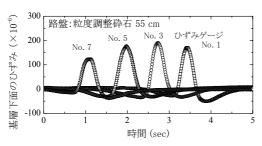
なお、基層と路盤の間のすべり率については今後、要 素試験等により、定量的な検討を行う必要がある.また、 低速走行時の載荷時間を考慮したスティフネスの定式化 についても、今後要素試験等による定量的な検討を行う 必要があると考えられる.

## 5. 大型車両の走行試験におけるひずみの推定

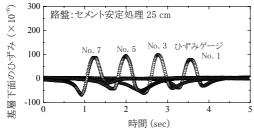
#### トラック走行試験

試験舗装Aおよび試験舗装Bにおいて、トラックの走 行試験を行った. トラック走行試験で得られた荷重波形 の例(輪荷重(複輪) 60.9 kN) を図-14 に示す. 走行速 度は荷役機械が低速で走行する状況を考慮し、0.6m/s (2.2 km/h)とした. 基層下面のひずみはタイヤの走行に伴い, 圧縮→引張→圧縮の順で生じ、ひずみが生じている時間 は 0.5~1 秒程度であった。また、走行試験ではトラック に鉄板を積載することにより輪荷重を変化させた.

輪荷重と基層下面の引張ひずみの関係を図-15に示す. 基層の引張ひずみは、路盤にセメント安定処理を用いた



試験舗装 A(輪荷重 60.9 kN)



(b) 試験舗装 B (輪荷重 60.9 kN) 図-14 トラック走行試験における基層のひずみ波形の例

試験舗装Bの方が、路盤が薄いにも関わらず小さかった。 これは、基層のひずみに対して、路盤の剛性の影響が大 きいためであると考えられる. 一方, 面積が一定のゴム 載荷板の場合とは異なり、輪荷重に対して基層のひずみ は線形には増加せず、緩やかな増加となることがわかっ た. これは、図-16に示すように、輪荷重が大きい場合に 接地面積が大きくなるためであると考えられる. また, タイヤ接地圧分布については完全な等分布ではなく、中 央部付近の接地圧が周辺部よりも高くなることがわかっ た. なお、タイヤ接地面積および接地圧は感圧紙(富士 フィルム製プレスケール)を用いて測定した.

#### トラック走行試験におけるひずみの推定

トラックのタイヤとゴム載荷板の比較のために、鉄板 積載時(輪荷重(複輪)60.9 kN)のタイヤ接地面と同じ 形状(幅 240 mm×接地長 220 mm) のゴム載荷板を用い た繰返し載荷試験を行い、トラック走行時の基層のひず みと比較した(図-17). 図-17中の,多層弾性解析の結果 については、FWD の静的逆解析による弾性係数を用いて 層間すべりを考慮しない「補正なし」と、走行速度を考 慮して載荷時間を1秒として式(2)により補正した弾性 係数を用いて、さらにすべり率を考慮した「載荷時間補 正+層間すべり」について示した. その結果,「載荷時間 補正+層間すべり」については、ゴム載荷板の1Hzの場 合の結果と高い整合性を示したが、トラック走行試験に おけるひずみは解析値よりさらに 1.5 倍程度大きい値で あった、すなわち、トラック走行試験では、基層のひず みが大きく、載荷時間と層間すべりを考慮するだけでは、 基層のひずみを推定できないことがわかった.

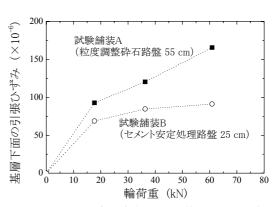


図-15 トラック走行試験における基層の引張ひずみ



輪荷重 17.7 kN 輪荷重 36.3 kN 輪荷重 60.9 kN (輪荷重は複輪. 色が濃い部分の圧力が高い.)

図-16 感圧紙により測定したタイヤ接地面積と接地圧

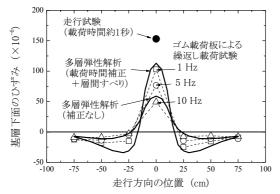


図-17 トラック走行とゴム載荷板による基層のひずみ

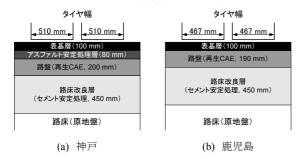


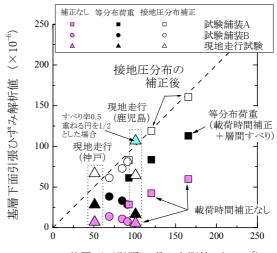
図-18 現地走行試験箇所の舗装断面

表-5 FWD 試験の静的逆解析による弾性係数(MN/m²)

	アスファルト層 (20°C補正値)	路盤 (再生 CAE)	路床
神戸	表基層:6480 As 安定処理:5510	4950	路床改良:1660 原地盤:185
鹿児島	9520	5120	路床改良: 2300 原地盤: 225

一方、貨物コンテナヤードにおいても大型荷役機械の走行試験を行ってひずみを測定した。現地の舗装断面を図-18に示す。「神戸」については上層路盤のアスファルト安定処理層の下面、「鹿児島」については基層の下面にひずみゲージを埋設した。使用した荷役機械の輪荷重(複輪)は「神戸」が286kN、「鹿児島」が262kNであり、走行速度は10km/hとした。なお、現地走行試験箇所の舗装においてもFWD試験の結果から静的逆解析を行い、表-5に示すように舗装と路床の弾性係数を推定した。

走行試験および現地走行試験における基層(またはアスファルト安定処理層)のひずみの実測値と解析値の比較を図-19に示す。はじめに、FWD試験の静的逆解析の結果をそのまま用いた「載荷時間補正なし」、載荷時間と層間すべりの影響を考慮した「等分布荷重(載荷時間補正+層間すべり)」で検討を行った。しかしながら、走行試験で測定されたひずみは解析で推定された値よりも大きく、特に路盤の剛性の高い試験舗装 B や現地走行試験の結果では実測値と解析値の乖離が大きくなることがわかった。その原因として、図-16に示したように、タイヤの中心部の接地圧が高いことが影響していると考え、多層弾性解析においても等分布荷重ではなく、接地圧の分



基層下面引張ひずみ実測値 (×10<sup>-6</sup>)

図-19 走行試験における実測値と解析値の比較

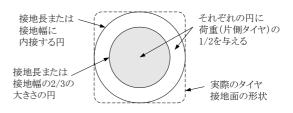


図-20 タイヤ接地圧分布を考慮した分布荷重のモデル化

布を考慮した荷重を用いることとした. ここでは図-16 に示したタイヤ接地圧をもとに、図-20 に示すように、タイヤ接地面に内接する円と、その 2/3 の大きさの円を中心が一致するように重ね合わせ、それぞれに輪荷重の 1/2 ずつを与える方法で圧力分布を単純化した. 実測ではタイヤ接地面中心部の接地圧が 1 MN/m² 程度であったのに対し、等分布荷重の接地圧は約 0.6 MN/m² であったが、接地圧分布を考慮した場合は中心部で約 1.1 MN/m² となり、実測値された接地圧と同程度になった.

接地圧分布を考慮した解析を行った結果,載荷時間,層間すべり,接地圧分布を考慮することで,実測値のひずみの傾向を合理的に表現できることがわかった.特に試験舗装 B や現地走行試験についてはこれらの影響が大きくかった.なお,現地走行試験の「鹿児島」については,すべり率 0.4,重ね合わせる円の半径を 2/3 とした方法では実測値よりもややひずみが小さかったが,すべり率 0.5,重ね合わせる円の半径を 1/2 とすることで,より実測値に近付く結果となった.このように,すべり率や接地圧分布は、基層のひずみの推定値に対する感度が高いので,今後は客観的な指標により適切な値を設定するための試験方法等を検討する必要がある.

### 6. まとめ

試験舗装および現地における試験の結果,以下に示す知見が得られた.

- ・大型荷役機械の重荷重下においても、輪荷重と基層下面のひずみの関係はほぼ線形となることから、重荷重用のアスファルト舗装の設計に多層弾性解析を用いることは妥当であると判断できる。
- ・FWD 試験時の基層のひずみは、FWD の静的逆解析に より求めた弾性係数を用いて、載荷板の剛性を考慮し た解析を行うことにより、適切に推定できる.
- ・ 載荷速度が遅い場合にはアスファルト混合物層のスティフネスが低下するため、解析に用いる弾性係数を補正した上で層間すべりを考慮しないと基層のひずみを正しく推定できない. ただし、載荷速度が速くスティフネスが大きい場合には層間すべりの影響は小さい.
- ・空気タイヤにおいて中央部の接地圧が高い場合は、等 分布荷重による解析値よりも基層のひずみが大きくな るため、基層のひずみを適切に推定するためには接地 圧分布を考慮しなければならない。
- ・走行速度、層間すべり、タイヤ接地圧分布を適切に考慮しなければ、多層弾性解析を用いて大型車両の低速 走行時におけるアスファルト混合物層のひずみを正し く推定することができない。また、一般的な速度の場合についてもこれらの影響を考慮することで、基層の ひずみの推定精度が向上すると考えられる。

今後の課題として、層間すべりおよび接地圧分布を客観的な指標で求める方法を検討する必要がある。また、低スティフネス状態においては、アスファルト混合物層は疲労破壊よりも流動が卓越するという研究結果 15)等を考慮すると、低速走行時に適用するアスファルト混合物の疲労破壊規準については、十分な検討が必要である。

謝辞: GAMES において層間すべりを考慮した多層弾性解析を行う際の考え方について、東京電機大学の松井邦人教授に御指導をいただいた. ここに感謝の意を表する.

## 参考文献

1) 上浦正樹, 丸山暉彦, 姫野賢治, 阿部長門: 鉄道貨物ヤー

- ドにおけるアスファルト舗装設計に関する研究, 土木学会 論文集, No.520/V-28, pp.47-54, 1995.8
- 2) 日本貨物鉄道株式会社: 貨物設備アスファルト舗装設計補 修の手引き, 2000.12
- (社)日本道路協会:舗装の構造に関する技術基準・同解説,
   2001.7
- 4) (社)日本道路協会:舗装設計施工指針(平成18年版), 2006.2
- 5) 笠原篤, 菅原照雄: アスファルト混合物の動的応答に関する研究, 土木学会論文報告集, 第215号, pp.75-83, 1973.7
- 6) 坪川将丈,八谷好高,董勤喜:航空機走行速度を考慮した空港アスファルト舗装の疲労寿命,土木学会第57回年次学術講演会,V-439,pp.877-888,2002.9
- 7) 桃谷尚嗣, 関根悦夫, 守屋秀海: 模型実験による貨物コンテナヤード舗装の変形特性に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第10巻, pp.45-52, 2005.12
- 8) 宇佐美裕次, 姫野賢治, 中村俊行:自動車のタイヤ接地圧 分布特性の測定に関する研究, 土木学会第50回年次学術講 演会, V-247, pp.494-495, 1995.9
- 9) (社)日本道路協会:舗装試験法便覧,pp.568-580, 1988.11
- 10) 屠偉新,丸山暉彦,高橋修:拡張ベイズ法による舗装弾性 係数の逆解析に関する基礎的研究,土木学会舗装工学論文 集,第1巻,1996.12
- 11) 穴沢秀昭, 関根悦夫, 桃谷尚嗣, 阿部長門: 小型 FWD を 用いた多層地盤の剛性評価の検討, 土木学会第58回年次学 術講演会第5部, pp.1375-1376,2003.9
- 12) 雑賀義夫,阿部長門,姫野賢治,丸山暉彦:FWDから得られる特性値の温度補正に関する検討,舗装,1995.9
- 13) 阿部長門, 関根悦夫, 桃谷尚嗣:室内試験と FWD 試験によるアスファルト混合物の弾性係数の比較, 土木学会第58 回年次学術講演会, V-685, pp.1367-1368,2003.9
- 14) 松井邦人,董勤喜,小澤良明,山峯明哲:層間すべりを考慮した軸対称弾性多層構造の解析,土木学会舗装工学論文集,第5巻,pp.122-129,2002.12
- 15) 姫野賢治,渡辺隆,丸山暉彦:低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究,土木学会論文集,第366号, V-4, pp.143-151,1986.2

# EVALUATION OF STRAIN IN ASPHALT MIXTURE LAYER UNDER LOW-SPEED HEAVY WHEEL LOADING

# Yoshitsugu MOMOYA, Etsuo SEKINE, Kazunori MANABE and Hiroshi NAKAZONO

In the current design of asphalt pavement in freight container yard, theoretical design method based on multi-layered elastic analysis is applied. Fatigue criteria of subgrade generally become critical under the heavy wheel loads, however, considerable large strain observed in asphalt mixture layer in real scale tests. In this study, the effect of strain rate, slide between layers and tire contact pressure on the strain in asphalt mixture layer was discussed. It was concluded that the strain in asphalt mixture under low-speed heavy wheel loading is properly obtained by multi-layered elastic analysis, when the effect of strain rate, slide between layers and tire contact pressure appropriately considered.