

多層弾性理論に基づいた定量的なわだち掘れ量の推定方法に関する検討

ニチレキ株式会社 技術研究所 正会員 ○後藤 洋平
同上 正会員 上野 貞治
同上 正会員 黄木 秀実

1. 概要

国土交通省より令和3年7月、超重交通道路のライフサイクルコストの削減と舗装修繕工事に伴う渋滞損失の低減を図ることを目的に、新たな舗装技術が公募された¹⁾²⁾。公募では、表-1に示す4つのリクワイヤメントが設定されており、特に①耐久性では使用目標年数を25年と設定し、供用25年後のひび割れ率が40%、わだち掘れ量が40mmに達しないことを要求している。

ここで、舗装設計便覧に記載されている経験に基づく設計手法であるTA法や多層弾性理論を用いた理論的設計手法は、疲労ひび割れを舗装の破壊と定義しており、わだち掘れ量は定量的な推定方法が確立されていない現状である。

そこで、多層弾性理論に基づいた定量的なわだち掘れ量の推定方法の確立を目的に、新たな推定式の導出および現道での妥当性の評価を行った。本稿では、その内容について述べる。

2. わだち掘れ量の推定

2-1 新たな推定式

表層に生じているわだち掘れは、舗装各層（アスファルト混合物層・路盤・路床）に生じるわだち掘れ量の総和として現れている。つまり、交通荷重が作用した際の各層の永久変形量の総和が表層のわだち掘れ量といえる。ここで、舗装設計プログラムVESYSによれば、永久ひずみ量 ϵ_p は材料ごとの力学特性値（以下、材料定数）に応じて、式(1)で表すことができる³⁾。

ただし、表層は太陽光や風雨などにより温まりやすく冷めやすい、下層は熱が伝達するまで時間を要するため温まりにくく冷めにくいことから、舗装は1日の間で深さ方向に温度勾配が生じている。そのため、わだち掘れ量の推定には、舗装の材料定数に加え、深さ方向の温度勾配も考慮する必要がある。

以上のことを踏まえ、層ごとの温度の違いを反映させたわだち掘れ量の推定式を式(2)のように導出し、その総和を累積わだち掘れ量とした⁴⁾。

$$\epsilon_p = \alpha N^\beta \epsilon_e \cdots \text{式(1)}$$

$$R_{T_m} = \sum_{i=1}^n \left[\alpha_{i,T_m} \left(N \cdot \frac{\gamma_{T_m}}{100} \right)^{\beta_{i,T_m}} \epsilon_{e_i} \cdot h_i \right] \cdots \text{式(2)}$$

ϵ_p :永久ひずみ量, ϵ_e :弾性ひずみ量, α, β :材料定数, N :通過輪数(回),
 R :わだち掘れ量(mm), h :層厚(mm), T :温度条件[1~m], i :層数[1~n], γ :温度条件の割合(%)

2-2 わだち掘れ量の算出

国土交通省の公募への提案内容を例として、わだち掘れ量の算出方法とその結果について詳述する。

(1) 舗装構成

提案した舗装構成を表-2に示す。施工方法は表層～基層の3層切削OLとし、新たに開発した革新的改質アスファルト混合物を適用した。

表-1 国交省公募のリクワイヤメント

リクワイヤメント		内容
①	耐久性	輪荷重5.75tを想定した嵩上げ無しで舗装の耐久性を向上させる技術
②	短時間での施工	従来と同等もしくは少ない時間で施工・交通開放が可能である技術
③	LCC抑制	従来技術と比較してLCCが同等もしくは抑制される技術
④	再生利用	再生利用が可能である技術

表-2 舗装構成

材料		厚さ (cm)
アスファルト 混合物層	革新的改質アスファルト混合物 B	5
	革新的改質アスファルト混合物 A	5
	革新的改質アスファルト混合物 A	7
	As安定処理	11
路盤	粒度調整碎石	10
	クラッシャーラン	15
路床 (CBR=12)		-

キーワード わだち掘れ量, 構造設計, 理論的設計法, 多層弾性理論

連絡先 〒329-0413 栃木県下野市柴 2 7 2

ニチレキ株式会社 技術研究所 TEL0285-44-7111

(2) 温度条件の設定

舗装各層の温度は、舗装設計便覧に記載されている式(3)を用いて設定した。なお、対象は温度依存性のあるアスファルト混合物層とし、推定部は各層の中央部、月平均気温には日平均気温の直近5年平均を用いた。また、設定した温度条件数に応じて後述する材料定数を多く設定することになるため、便宜上25℃以下を20℃、25.1～35.0℃を30℃、35.1～45.0℃を40℃の3区分に整理した。その結果、表-3に示す4条件が得られた。

表-3 設定した温度条件

条件	温度 (°C)				割合 (%)
	表層	中間層	基層	As安定処理	
A	20	20	20	20	58.3 (7/12ヶ月)
B	30	30	20	20	8.3 (1/12ヶ月)
C	30	30	30	30	25.0 (3/12ヶ月)
D	40	30	30	30	8.3 (1/12ヶ月)

表-4 設定した材料定数

材料	20°C		30°C		40°C	
	α	β	α	β	α	β
表層	6.1341	0.0787	4.4417	0.1151	3.2816	0.1452
中間層	7.9316	0.1031	6.0397	0.1271	2.5663	0.1692
基層	7.9316	0.1031	6.0397	0.1271	2.5663	0.1692
As安定処理	36.4054	0.0754	8.4625	0.1996	3.0005	0.3675
路盤	0.0116	0.284	0.0116	0.284	0.0116	0.284
路床	0.01208	0.238	0.01208	0.238	0.01208	0.238

$$M_p = M_a \left[1 + \frac{2.54}{z+10.16} \right] - \frac{25.4}{9(z+10.16)} + \frac{10}{3} \cdots \text{式(3)}$$

 M_p : 月平均舗装温度 (°C) , M_p : 月平均気温 (°C)
 Z : 温度を推定しようとしている点の
表層上面からの深さ (cm)

(3) 材料定数の設定

材料定数は、Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) を用いた Dynamic Modulus 試験 (以下、DM 試験) および Flow Number 試験 (以下、FN 試験) により設定した⁵⁾。なお、FN 試験の載荷圧は輪荷重 5.75t (公募の設定条件) を想定した 0.70MPa とし、路盤・路床については同試験での測定が困難なため、文献値⁶⁾に補正係数を乗じた値を採用した。結果は表-4に示すとおりである。

表-5 GAMES の解析条件

項目	条件
弾性係数	アスファルト混合物層: DM試験の測定値 路盤・路床: 舗装設計便覧より引用
ポアソン比	舗装設計便覧より引用
路床厚	100cm (舗装設計便覧記載の標準)
層間すべり率	表層～基層: 0 (接着) As安定処理～路床: 0.99 (未接着)
載荷条件	輪荷重: 5.75t (56.35kN) 載荷半径: 11.3cm 載荷位置: ±16cm

(3) 舗装各層に生じる弾性ひずみ量の算出

弾性ひずみ量は、多層弾性理論に基づく舗装構造解析プログラム「GAMES」を用いて、表-5に示す解析条件で算出した。

(4) 累積わだち掘れ量の推定結果

材料定数、弾性ひずみ量から、式(2)を用いて温度条件ごとにわだち掘れ量を算出した。なお、通過輪数は、舗装設計便覧に記載されている疲労破壊輪数 (交通量区分 N7: 35,000,000 回/10 年) を、リクワイヤメントで設定されている 25 年に換算した 87,500,000 回/25 年とした。算出結果は表-6に示すとおりであり、25 年後の累積わだち掘れ量を 9.1mm と推定した。

表-6 わだち掘れ量の算出結果

層構成		わだち掘れ量 (mm)			
		条件A	条件B	条件C	条件D
アスファルト混合物層	革新的改質アスファルト混合物 B	0.093	0.151	0.000	0.275
	革新的改質アスファルト混合物 A	0.290	0.613	0.819	0.725
	革新的改質アスファルト混合物 A	0.503	0.436	1.246	1.138
	As安定処理	0.194	0.198	0.850	0.749
路盤	粒度調整碎石	0.025	0.016	0.031	0.024
	クラッシュラン	0.052	0.034	0.064	0.050
路床 (CBR=12)		0.131	0.091	0.155	0.126
累積わだち掘れ量 (mm)		9.1			

3. 推定したわだち掘れ量の妥当性

2022 年 10 月、実道にて現場実証試験を実施し、同年 11 月および翌年 2 月に施工直後・供用 3 ヶ月後の路面性状を調査した。その結果、わだち掘れ量の変化は、3 ヶ月間で平均 0.6mm、最大 1.6mm であり、同供用時の気象データを用いて算出した 3 ヶ月間の推定わだち掘れ量 0.8mm と大差ない結果が得られた。したがって、提案した推定式によりわだち掘れ量を定量的に推定できることが示唆された。

4. おわりに

現道での供用状況と推定値の比較を引き続き行い、本検討結果の妥当性を検証していくとともに、その推定精度の更なる向上に努めていく所存である。

【参考文献】

1)白尾ら：超重交通に対応する長寿命舗装技術の導入促進について，アスファルト No.238，pp.4-7，2022.12
2)上田ら：「超重交通に対応する長寿命舗装技術」に関する新技術導入の取組み，道路建設 No.795，pp.36-39，2022.11
3)公益社団法人土木学会：舗装工学ライブラリー7 舗装工学の基礎，p.76，2012
4)後藤：革新的改質アスファルトを用いた経験的力学設計による長寿命舗装技術，道路建設 No.795，pp.52-53，2022.11
5)宮城ら：AMPT を用いたアスファルト混合物の動弾性係数|E*|と塑性変形抵抗性の関係の検討，土木学会第 72 回年次学術講演会 V-008，2015
6)竹内ら：土質材料の違いを考慮した路床の永久変形に関する研究，土木学会舗装工学論文集 第 14 巻，pp.1-8，2009