

高速道路に適した舗装わだち掘れモデルの開発

Development of a pavement rutting model suitable for Japanese Expressways

北見工業大学工学部	○学生員	富山 和也 (Kazuya Tomiyama)
北見工業大学工学部	正 員	川村 彰 (Akira Kawamura)
北見工業大学工学部	正 員	白川 龍生 (Tatsuo Shirakawa)
日本道路公団試験研究所舗装研究室	正 員	熊田 一彦 (Kazuhiko Kumada)

1. はじめに

近年、既設構造物の維持管理、補修が重要視されている中で、高速道路の舗装においては、わだち掘れが補修工事の一要因となっている。そのため、道路管理者側の視点から、わだち掘れの発生原因と経年変化、補修技術、改良型の舗装材料などの学術報告が数多くなされている。しかし、わだち掘れの進行メカニズムやその性状について言及したものは数少ない。

一方、道路利用者側の視点から見た場合、わだち掘れが車の操安性に及ぼす影響については数多く報告されているが、乗り心地に及ぼす影響についてはあまり報告されていない。

本研究は、北見工業大学が日本道路公団試験研究所と進めている「(1)わだち掘れが乗り心地に及ぼす影響、(2)進行のメカニズムとその性状に関する研究」の第一歩となるものである。研究目的は高速道路に生じるわだち掘れの形状を定量的に把握することであり、わだち掘れを簡易な関数で単純化することを試みた。そして、設計したわだちモデルと実形状との適合性を検討した。

2. わだち掘れの発生傾向

2.1 使用データ

実際のわだち掘れ形状（以下、「実形状」とする）のデータに関しては、2003年に得られた日本国内の高速道路におけるわだち掘れデータのうち比較的データ量の多い路線（車線数：2車線、延長：約3000m/車線）のデータを使用した。

2.2 わだち掘れ深さの頻度分析

図-1に実形状データを得た路線のわだち掘れの頻度を示す。今回用いたデータのわだち掘れ深さの平均は8.5mm程度、このうち全体のおよそ70%が10mm以下であり、20mmを超えるわだち掘れは1%程度であった。熊田らの報告によると、1998年以降全国的に高機能舗装が採用されてきたことにより、わだち掘れ深さ10mm以上の頻度は減少傾向にあるが、8mm以下の頻度は増加傾向にある。したがって本路線の傾向は近年のわだち掘れの動向に見合ったものと考えられる。

2.3 わだち掘れの実形状分析

図-2に使用路線の横断プロファイル形状の一例を示す。データは1m毎に測定されたものであり、道路の外側端を高さの基準とし、測定における横方向のサンプリ

ング間隔は0.1mである。道路幅員は3.5mであり、車線の中央を横軸の原点とした。図-2よりわだち掘れは原点を中心に左右およそ1mのところに発生しており、放物線状であることが窺える。次節以降で実形状を簡易な関数でモデリングし、実形状とわだち掘れモデル（以下、「モデル」とする）との適合性を検討する。

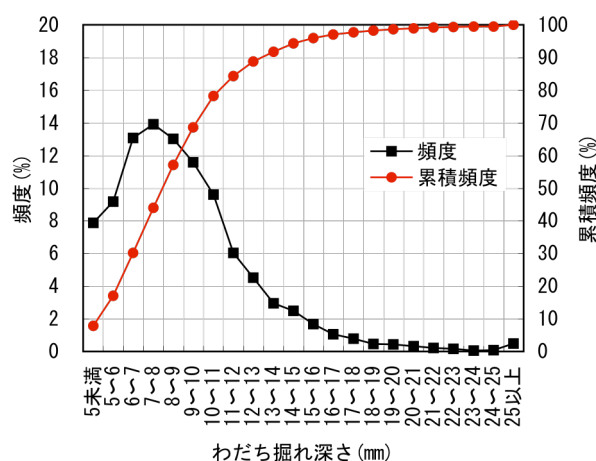


図-1 わだち掘れの頻度

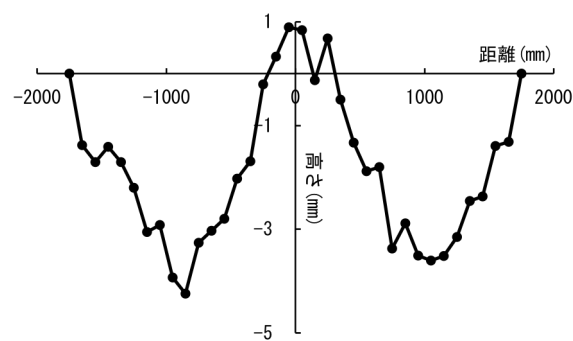


図-2 横断プロファイルの一例
(わだち掘れ深さ5mm)

3. わだち掘れのモデリング

3.1 使用関数

実形状が放物線状であることを上述したが、図-2を見る限りモデリングに使用できるであろう関数としては、三角関数や2次関数、4次関数などが考えられる。

ところで、わだち掘れをモデリングする上で重要な変数としては、わだち掘れの「深さ」「幅」「発生位置」があげられるが、これらの条件を満たし、さらに左右独

立してわだち掘れを変化させられること、かつ容易に理解・再現されることが必要である。そこで、本研究では上記の要件を満たす関数として、2 次関数の頂点の移動や放物線の幅の変更が容易にできる、という特徴に着目し、2 次関数を用いてモデルの設計を試みた。

3.2 2 次関数によるモデリング

モデリングに使用する 2 次関数の基本形を式(1)に示す。

$$y=a(x-p)^2+q \quad (1)$$

ここで、

y : 高さ (mm)

x : 距離 (mm)

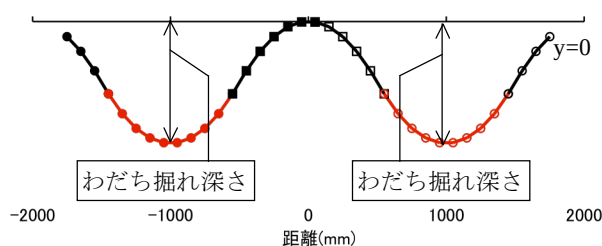
a : わだち掘れを表すパラメータ

p : わだち掘れの発生位置 (mm)

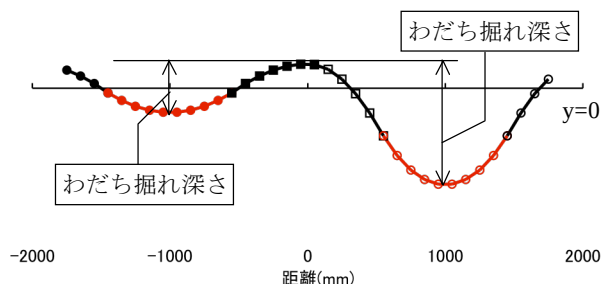
q : わだち掘れの深さ (mm)

なお、パラメータ a については式(8)～(13)で後述する。また、設計条件を以下のように仮定する。

- ・実形状と同様に車線の中央を $x=0$ mm とし、高さの基準は実形状に合わせて変更可能なように、 $x=0$ mm の点の高さを基準にする。この二つを合わせて基準点とする。基準点は図-3 (a) に示す放物線 CL(CR)の頂点である。
- ・わだち掘れ深さは図-3(a)に示す放物線 CL と放物線 L1、放物線 CR と放物線 R1 における頂点の鉛直距離であり、発生位置は ± 1000 mm の点とする。
- ・モデルは図-3 に示すように 4 つの放物線から構成し、変曲点は距離が ± 500 mm と ± 1500 mm の位置とし、変曲点の高さはわだち掘れ深さの 1/2 の点である。



(a) わだち掘れ深さ



(b) 左右独立わだち掘れ深さ

図-3 わだち掘れモデル

図-3(b)はわだち掘れ深さが左右独立している場合で、さらに基準点を y 軸上正の方向に移動させたものである。なお、サンプリング間隔、車線幅員は任意に設定可能であるが、実形状に合わせてサンプリング間隔 0.1m、車線幅員 3.5m とした。

上記の仮定を踏まえ、わだち掘れ深さを r とし図-3 に示す放物線をそれぞれ式で表すと次のようになる。

$$CL : y=a_{cl}x^2 \quad (-500 \leq x \leq 0) \quad (2)$$

$$CR : y=a_{cr}x^2 \quad (0 < x \leq 500) \quad (3)$$

$$L1 : y=a_{l1}(x+500)^2-r \quad (-1500 \leq x < -500) \quad (4)$$

$$L2 : y=a_{l2}(x+2000)^2 \quad (-2000 \leq x < -1500) \quad (5)$$

$$R1 : y=a_{r1}(x-500)^2-r \quad (500 < x \leq 1500) \quad (6)$$

$$R2 : y=a_{r2}(x-2000)^2 \quad (1500 < x \leq 2000) \quad (7)$$

ここで、

$$a_{cl} = \frac{-r/2}{(-500)^2} \quad (8)$$

$$a_{cr} = \frac{-r/2}{(500)^2} \quad (9)$$

$$a_{l1} = \frac{r/2}{(-500+1000)^2} = \frac{r/2}{500^2} \quad (10)$$

$$a_{l2} = \frac{-r/2}{(-1500+2000)^2} = \frac{-r/2}{500^2} \quad (11)$$

$$a_{r1} = \frac{r/2}{(500-1000)^2} = \frac{r/2}{500^2} \quad (12)$$

$$a_{r2} = \frac{-r/2}{(1500-2000)^2} = \frac{-r/2}{500^2} \quad (13)$$

本章以降、左右独立してわだち掘れを考えるために、基準点より左側 ($x < 0$) を LWP(Left Wheel Path)、右側 ($0 < x$) を RWP(Right Wheel Path)、として区別する。

4. わだち掘れモデルの適合性

前節までにわだち掘れの傾向を分析し、2 次関数によりわだち掘れをモデリングできることを仮定した。本章では、設計したモデルの妥当性を検証するため、実形状と比較、検討した。

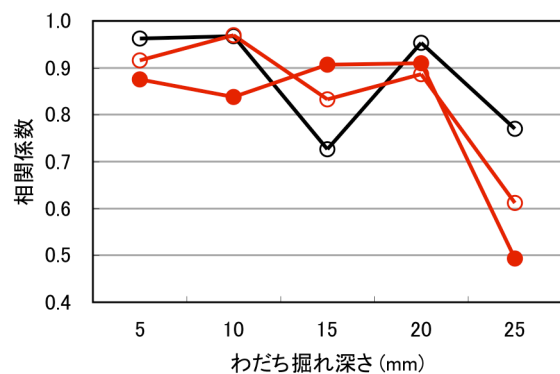
4.1 比較断面

モデルと実形状の比較に際して、測定路線より得られたわだち掘れデータを 1mm 間隔でわだち掘れ深さ毎に分類し、5mm・10mm・15mm・20mm・25mm の各わだち掘れ深さでそれぞれ 3 断面（断面 A・断面 B・断面 C）を抽出した。なお、本検討においては、図-3(a)及び図-3(b)に示すように、各側線における最大値と最小値の差をわだち掘れの「深さ」と定義する。

4.2 相関係数を用いた比較

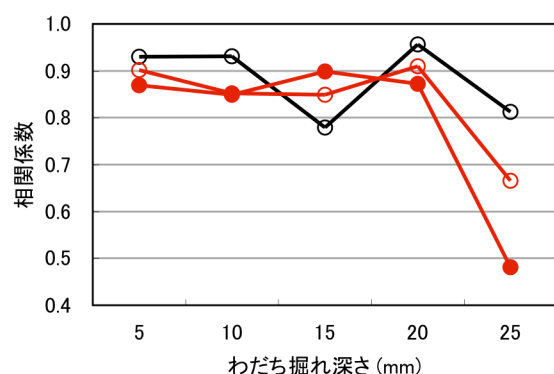
モデルと実形状でサンプリング間隔が等しいことから、同一距離における高さによって相関係数を用いた比較が可能である。形状を比較する際の基準点高さは実形状の基準点高さである。わだち掘れ深さは実形状の LWP と RWP のうち深い側の値であり、モデルは実形状に合わ

せてわだち掘れ深さを調整した。相関係数を用いた比較は、わだち掘れ深さを与える wheel path のみの比較（深さ別比較）と、断面全体での相関を調べた比較（断面比較）を行なった。図-4 (a) では深さ別比較の相関係数を、図-4 (b) では断面比較の相関係数をそれぞれ示す。



—○— 断面A —○— 断面B —●— 断面C

(a) 深さ別比較



—○— 断面A —○— 断面B —●— 断面C

(b) 断面比較

図-4 相関係数による比較

4.3 わだち掘れの傾きによる比較

わだち掘れ深さを与える 2 点を直線で結んだ時、直線のなす傾きの絶対値を「わだち掘れの傾き」と定義する（図-5）。傾きを求めることにより、基準点に依存することなく、わだち掘れの幅と歪み具合を比較することが可能である。

図-6 にモデルと実形状のわだち掘れ深さごとの傾きを示す。

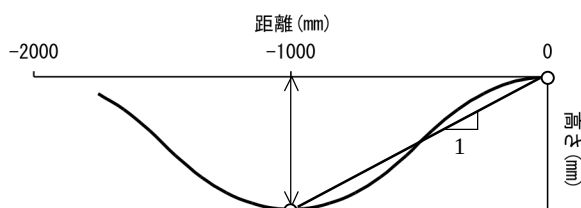


図-5 わだち掘れの傾きの定義

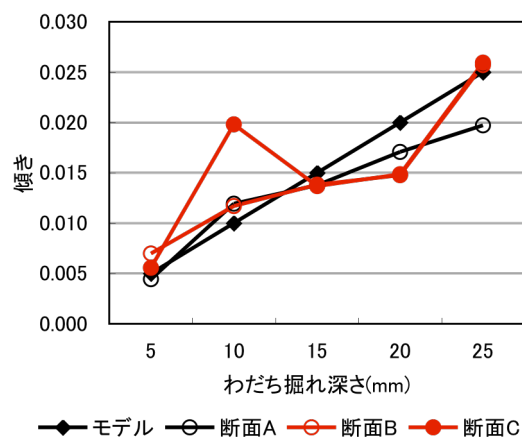


図-6 わだち掘れの傾きによる比較

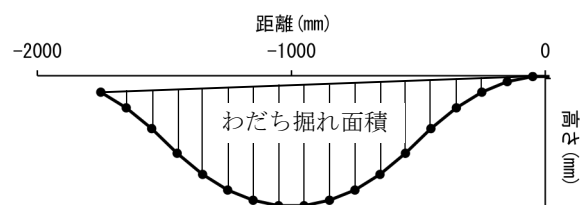
4.4 わだち掘れ面積による比較

基準点と車線の外側端を結んだ直線と舗装面に囲まれた部分を「わだち掘れ面積」と定義する（図-7 (a)）。

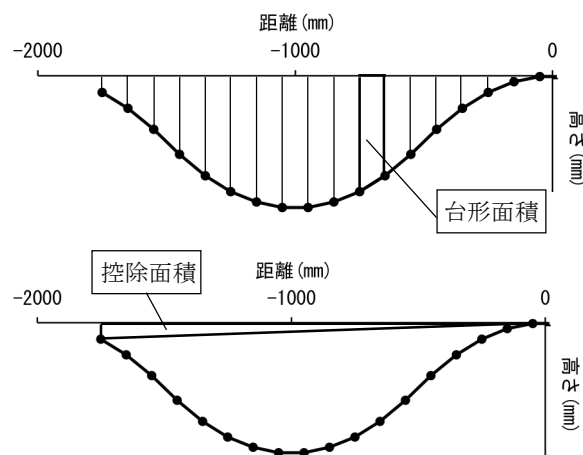
面積の算出にはサンプリング間隔ごとに分割した図形を台形に近似し台形の面積を求め、それらを合計し、控除面積として三角形の面積を差し引いた（図-7 (b)）。

わだち掘れが車の走行安全性に及ぼす影響として、降水時にわだち掘れ部分にたまった水によるハイドロプレーニング現象があげられるが、わだち掘れの面積は断面の単位長さあたりにたまりうる水の最大量を表す重要な指標となる。

図-8 にモデルと実形状のわだち掘れ深さごとの面積を示す。



(a) わだち掘れ面積の定義



(b) わだち掘れ面積の算出

図-7 わだち掘れ面積

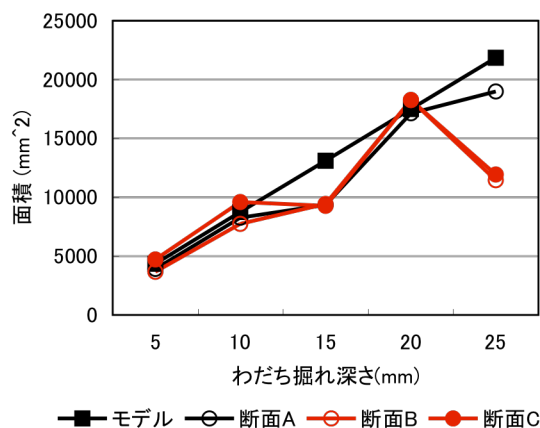


図-8 わだち掘れ面積による比較

4.5 比較結果

(1) 相関係数による比較結果

図-4 よりわだち掘れ深さ 15mm 断面 A とわだち掘れ深さ 25mm を除き、高い相関が得られた。また、深さ別比較と断面比較において大きな傾向の違いはなかった。このことから LWP と RWP でわだち掘れ深さを独立して変更可能なモデルとして設計することが可能である。

25mm のわだち掘れでは高い相関が得られなかったが、図-1 のわだち掘れ頻度をみると、25mm のわだち掘れはごく僅かであり、この場合局所的な破損であると捉えることができるが、測定機器の誤差による影響も考慮する必要がある。このため、わだち掘れ深さ 25mm のモデルに関してはより多くの実形状と比較を行ない、別の関数を用いて設計するなどの検討が必要である。

(2) わだち掘れの傾きによる比較結果

図-6 より比較した断面においてわだち掘れ深さを与える 2 点間の水平距離にはばらつきが多いことがうかがえるが、モデルと実形状の傾きに大きな差は見られなかった。また、わだち掘れ深さ 15mm 未満では実形状の方がモデルより傾きが大きく、わだち掘れ深さ 15mm 以上ではモデルの方が傾きが大きい傾向を示した。

(3) わだち掘れ面積による比較結果

図-8 よりわだち掘れ深さ 15mm とわだち掘れ深さ 25mm を除き、モデルと実形状の面積に大きな差はない。わだち掘れ深さ 15mm においてもわだち掘れ深さ 25mm においても実形状の面積はモデルより小さく、全体として実形状の面積がモデルの面積より極端に大きくなることはなかった。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- ・ わだち掘れ深さは高さが最大の点と最小の点の鉛直距離であり、車線中央を基準とし±1000mm の位置に発生している。

- ・ 2 次関数を用いて設計したわだち掘れモデルは、わだち掘れ深さ 25mm を除き適合性のよい結果が得られた。深さ 25mm のわだち掘れは本研究で実形状の測定に用いた路線においてごく僅かであり、局所的な破損と捉えることができるが、測定機器の誤差による影響も考慮する必要があるため、今後多くのサンプルと比較した上で、再度モデルの適合性を検討する必要がある。

- ・ モデルと実形状の比較から高速道路に生じるわだち掘れは概ね 2 次関数状に進行しており、わだち掘れ深さ 15mm を境に形状に変化が表れていることがわかる。因果関係は明確ではないが、わだち掘れの進行メカニズムを知る上でわだち掘れ深さ 15mm が重要な値になる可能性が窺える。

- ・ 本研究においてモデルと実形状の比較に用いたわだち掘れ断面は特定の一路線から抽出した 3 断面であるが、比較的簡易な関数でわだち掘れのモデリングが可能であることを示した。

6. 今後の課題

わだち掘れのモデリングに際して、モデルを構成する関数の選択肢は数多くある。高次の関数になるにつれ特定の断面における適合性は高くなるが、数式は複雑になり容易に理解・再現し難いものになる。本研究では比較的簡易な関数を組み合わせることによって、わだち掘れをモデリングし高い頻度で発生するわだち掘れにおいて高い相関を得ることができた。このモデルを用いてわだち掘れが車の乗心地に及ぼす影響と進行のメカニズムを解明することが今後の課題とされる。

謝辞

本研究に必要な高速道路の横断プロファイルの測定にあたり、日本道路公団の関係各位にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 熊田，神谷，佐藤：高速道路におけるわだち掘れ測定データの分析，土木学会第 59 回年次学術講演概要集 第 V 部，pp.1213～1214，2004。
- 2) 山之口，丸山：「超」・舗装学入門 アスファルト舗装修繕技術 続・舗装学のすすめ・A から Z まで，山海堂，1997。
- 3) Simpson.A.L.：Characterization of Transverse Profile；Transportation Research Record，No.1655，pp.185～191,1999。