

わだち掘れ測定データの解析法に関する研究

阿部頼政*・飯野忠雄**

本論文は、自動測定装置によるわだち掘れ深さ測定データを、定量的に解析する方法を提案し、首都高速道路に適用した応用例をいくつか示すものである。この種の測定データは、膨大な量の蓄積があるが、従来、定量的な解析に用いられることはほとんどなかった。著者らは、これらのデータと補修履歴をつきあわせ、わだち掘れ量が供用年数ごとに統計的分布をすることを明らかにして、経年変化、将来予測などを得ている。

Key Words : asphalt pavement, rutting depth, automatic measuring device, statistical distribution

1. はじめに

わが国の舗装が維持修繕の時代に入ったと言われるようになって久しいが、この間、新設舗装の延長は伸び悩む一方で、自動車保有台数は急激に伸びてきた。必然的に道路は混雑の度を深めるようになり、生活環境の高度化志向もあいまって、維持修繕のレベルアップに対するニーズが高まってきている。

舗装の維持修繕を計画するにあたって最も重要なポイントとなるのは、舗装の破損状況を的確に把握することである。交通量の少なかった時代には、交通を遮断して調査することが当然とされていたが、現在ではしだいに困難になってきている。特に交通量の多い首都高速道路では、調査のために交通をストップすることはほとんど不可能に近い。

路面性状自動測定装置は、以上のような背景をふまえて開発され、かつ実用化されてきたものである。通常の車両と一緒に走行しながら測定できる便利さから広く利用されるようになったが、測定データの活用という点から見ると、必ずしも十分とは言い難い。現在、路線全体の把握、補修計画、破損状況の相対比較などに使用されているが、最も大きな問題は、定量的な解析にあまり使用されていないことであろう。この原因は、1区間100m（首都高速道路ではジョイント間）を1個の値で代表させていること、それでもデータ数が膨大になること、各種の誤差が含まれることなどいろいろ考えられるが、いずれにしろ、舗装技術にとって貴重な情報を放置している可能性があることは否めない。

著者らは、数年前からこのデータの解析に着手し、1990年の国際会議「The Bearing Capacity of Roads

and Airfields」にその一部を発表した¹⁾。しかし、この時点までの研究では、解析が目的で路面調査を依頼したこと、10m単位のアウトプットを使用したこと、測定区間の補修量が毎年一定であると仮定したことなど、種々の特殊条件が付随し、汎用性には乏しかった。

本論文は、その後の研究も含めて研究着手以来の成果を総括するもので、首都高速道路公団が毎年定期的に調査してきたデータを主に使用している。高架橋上の舗装という特殊性はあるものの、わだち掘れに対する考え方、データの解析法、解析結果の活用方法など、本研究はそのまま一般道路にも適用できるものと著者らは考えている。

2. わだち掘れ深さの測定方法

路面性状自動測定装置は、通常の車両と同等の速度で走行しながら、ひびわれ、わだち掘れ深さ、縦断方向の凹凸を同時に測定するものである。昭和60年に建設技術評価制度の認可を受け、調査機関が4社になったこと、一般国道で定期的に採用されるようになったことなどから現在は広く利用されている。

わだち掘れ深さの測定原理は走行しながら路面横断方向にレーザー光線を照射したり、光束を投影したりしてこれをカメラで撮影し、横断方向凹凸による線像の歪みからわだち掘れ深さを計測しようとするものである。4社とも測定原理は似通っているが、線像の作り方、カメラの種類など、それぞれ少しずつ異なっている。

3. 測定誤差の検討

(1) 誤差の種類

時速数10kmで走行しながら測定する装置に完全さを求めるのはそもそも無理な話であり、そこには種々の誤差が含まれる。まず第1に、開発時に許された測定誤差 ± 3 mmがある。これは、真のわだち掘れ深さと測定値との

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科
(〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8)

** 正会員 首都高速道路公団 前常任参与

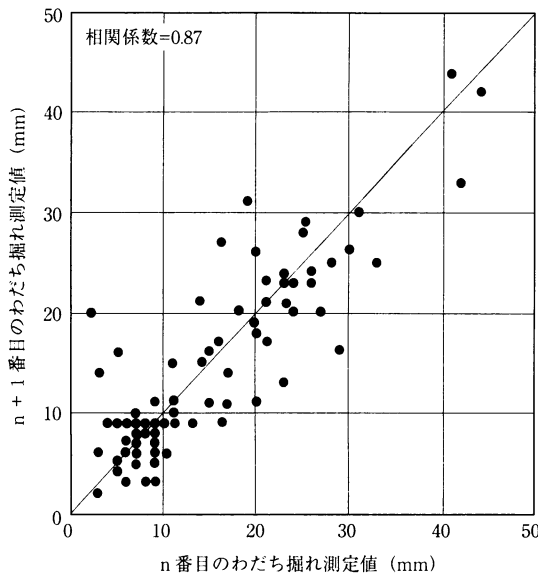


図-1 10mずらしたデータの相関

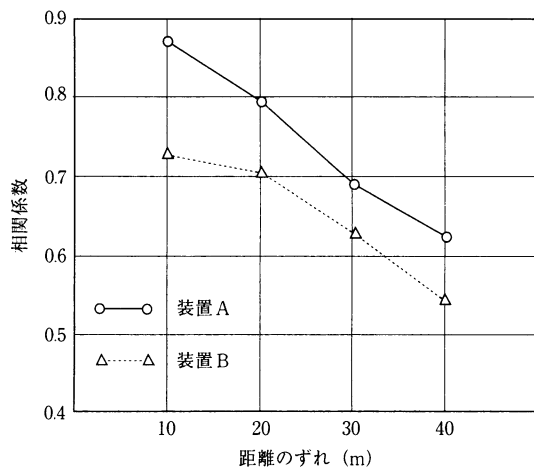


図-2 距離のずれと相関係数の関係 (Data 100)

間にこの程度の誤差は許すとするもので、この背景には、これ以上精度を上げることは技術的に可能であっても、開発のコストが莫大になるばかりでなく年月がかなりかかるという事情があった。第2に考えられる誤差は「距離のずれに伴う誤差」である。測定車に取り付けられた距離計本体の誤差、そして、道路の線形や交差点などの影響で生ずる誤差、さらには道路台帳との整合性を調整する段階で発生する誤差などがある。第3には、「測定装置間の誤差」がある。現在稼働している測定装置はすべて検定を受けているものの、測定値に差が出てくることは避けられない。また、同一測定装置であっても、キャリブレーションの状態が常に一定とは限らないため、やはりそれなりの誤差が生ずることになる。

以上のうち、本章では「距離のずれに伴う誤差」と「測定装置間の誤差」を検討することにする。なお、実験に用いた路線は都道環状7号線である。

(2) 距離のずれに伴う誤差

わだち掘れ深さは5mごと、あるいは10mごとに測定

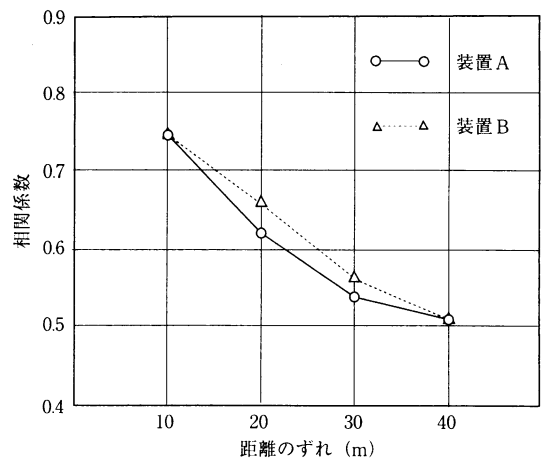


図-3 距離のずれと相関係数の関係 (Data 1360)

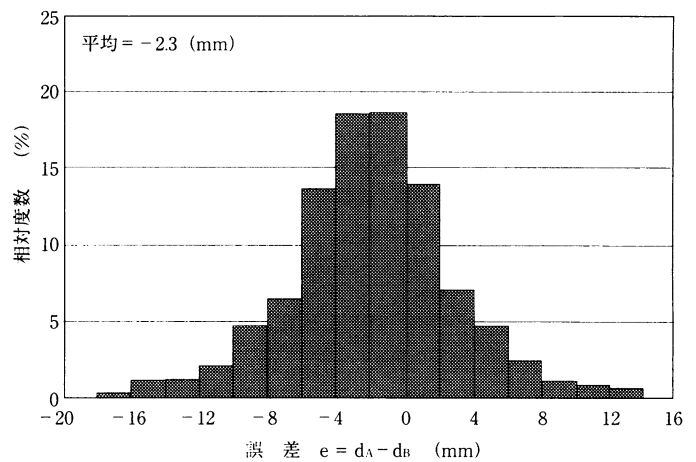


図-4 装置間の誤差

することが可能である。一般には、これらの測定値をもとに100m単位の平均値で報告されるが、ここでは10mごとの測定値を使用して距離のずれによる誤差の検討を行う。

図-1は、距離のずれが少ないと思われるデータ、すなわち測定開始地点から最初の100個のデータ(区間距離1km)を用いて、 n 個目の測定値と $n+1$ 個目の測定値との相関を見たものである。これは、距離の10mのずれがあったとき、もとのデータをどの程度反映するかという尺度になると判断することができよう。図-1の場合、相関係数は0.87でかなり強い相関のあることがわかる。同様の方法で、それぞれ20m、30m、40mずれた場合の相関係数を装置A(A社の測定装置)、装置B(B社の測定装置)について図-2に示した。いずれの装置でも、距離のずれが大きくなっていったが、装置間の差も歴然としている。

図-3には、全区間約1360個の測定値について同様の解析を行った結果を示した。この場合、相関係数の値に装置間の差はほとんどない、すなわち、区間を限定してミクロに見れば、装置間の差はあるが、マクロ的には、

同様の精度で測定していると考えてよからう。

(3) 測定装置間の誤差

装置Aと装置Bで同一路線を測定し、1360個ずつのデータをそれぞれ1:1で比較したところ相関係数は0.67となった。これは、全く同一条件で測定しても装置が異なればこの程度の相関しか得られないことを示している。

次に、装置A、装置Bによる測定値をそれぞれ d_A 、 d_B として両者の誤差 $e = d_A - d_B$ を計算し、 e の分布を図-4に示した。ほとんど正規分布に一致する形状となっているが、分布の中央が $e = 0$ ではなく、マイナス側にずれていることは明らかである。このずれは、平均値で2.3mmだけ d_A が d_B より小さいことから生じているものであり、装置Aは装置Bより低めの値をアウトプットすることを意味している。真値がいずれにあるかは不明であるが、この2.3mmという「片寄り」は、装置開発時に許容された ± 3 mm以内の誤差範囲には一応入っている。

以上、2種類の装置で測定した値の誤差に関して検討してきたが、現実には種々の装置がiriみだれて稼働しているため、さらに複雑な誤差が混入してくるものと思われる。

4. 測定データの特徴

首都高速道路公団では、昭和60年以来、毎年全線の路面性状を測定し、その結果をデータバンクに蓄えてきた。全データを使用すると繁雑になるので、以下においてはこのうち首都高速道路1号線下り車線の最近4年間（昭和62年、63年、平成元年、2年）のデータを例にとり、解析を進めることにする。

路面性状調査を実施する目的は、当該路線の実態把握、補修優先順位の策定などいろいろあるが、長期的には、舗装破損の経年変化を知り、将来の補修計画、技術開発を立案することに大きな比重がかかってくる。わだち掘れ深さの経年変化を知るには、通常、同一地点を毎年測定する方法がとられる。本研究のデータにこの方法をあてはめ、プロットした結果の数例を図-5に示す。ジョイント番号116~118の舗装には右上がりの傾向が見られるが隣接するNo.114~116、No.118~120の舗装の経年変化はとらえようがない。すべての地点において同様のプロットを実施した結果は、右上がりだと判断される場合がどちらかという人多そうであるという傾向がつかめただけであった。すなわち、自動測定装置で得られたわだち掘れ深さのデータから、通常の方法で経年変化をとらえることは、きわめて困難であると結論せざるをえない。

この点をさらに確認するために、測定年度間のわだち掘れ深さの差をとって検討する。たとえば、平成元年の

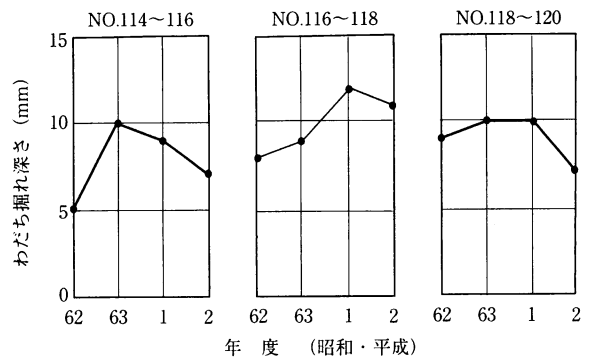


図-5 わだち掘れ深さの経年変化

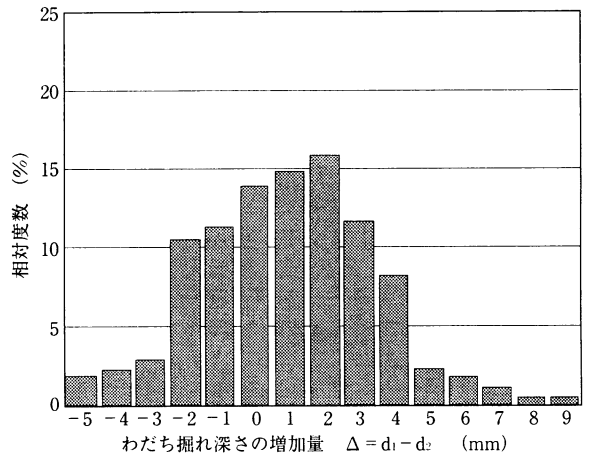


図-6 測定年度間のわだち掘れ深さの差

測定値を d_1 、昭和63年の測定値を d_2 とし、両者の差 $\Delta = d_1 - d_2$ として、 Δ の度数分布をとると図-6のようになる。わだち掘れが年々進行するならば、 Δ はすべて正になるはずであるが、図-6で明らかとなり、負になる（わだち掘れ深さが減少する）割合が30%に及んでいる。また、測定装置の開発にあたって許容された誤差 ± 3 mm以内に入る値が全体の95%を占めている。なおこの傾向は昭和62年と昭和63年のデータ、平成元年と平成2年のデータを比較しても同様である。以上のことから、自動測定装置でわだち掘れ深さを毎年測定しても、単純な解析では経年変化を得ることができないことは明らかであろう。

5. 新しい解析法の提案

(1) 基本的考え方

わだち掘れ深さの進行は、一般に、年間何mm増加するとか、経年変化にともなう予測式でとらえられることが多い。しかし現実には、全く同一条件で施工された舗装でも、わだち掘れ深さの進行を様々であることが広く認識されている。すなわち、わだち掘れ深さの進行を決定論的に取り扱うことの無理は承知しながらも、便宜的に決定論を採用してきたと言えよう。

著者らの提案する方法は、このわだち掘れ深さの進行

を確率論的にとらえようとするものである。「破壊強度や破壊までの時間は、その測定値の変動が大きく、確定値とは見なしがたいものであり、統計的な量として定義されるべきものである」²⁾とする考え方は、金属材料の分野ではすでに定着しているが、破壊のメカニズムは異なるものの、アスファルト舗装のわだち掘れ深さにも同様の性質があると著者は考えている。

なお、測定値の統計的解析には、データ数の多いことが必要欠くべからざる条件として挙げられる。自動測定豊富なデータは、このような解析にあたって大きなメリットとなり、本研究はそれを積極的に活用しようとするものである。

首都高速道路1号線下り（江戸橋I.C.～入谷ランプ、浜崎橋I.C.～羽田ランプ）の延長は約19kmである。舗装を1m単位の供試体と見なせば、供試体の数は約19,000個となり、これらの供試体が毎日繰り返し载荷を受けているものと考えれば、この路線全体を一大実験場と見なすことができよう。わだち掘れに影響する因子は、交通荷重の量と質、材料、舗装構成等いろいろあるが、ここでは「補修後の経年」のみを対象として取り出し、他の因子はすべて同一と仮定して解析することにする。

(2) 使用データとその処理法

a) 路面性状データ

1号線下り車線の路面性状測定値のうち、昭和62年、63年、平成元年、2年のわだち掘れ深さ測定値を使用した。このように4回の測定値を同列に扱ったのは、いずれの年の測定値が正確か判断できないこと、測定年に固有の片よりを軽減したいこと、さらにはデータ数が多いほど統計的解析では信頼性が高まることなどによる。また、走行車線、追越車線の区別はせず、これも同列に扱った。

調査機関からの報告書には、ジョイント区間ごとに平均値、最大値が記載されているが、以下、前者をデータA (Average)、後者をデータM (Maximum) と呼ぶことにする。なお、本解析に使用したデータ数はそれぞれ約4000個である。

b) 補修履歴

データバンクから当該区間それぞれの補修年月を読みとり、測定年月と対比させて供用年数を判定した。ここで、供用年数1年とは、補修後に夏季を1回経過したということを意味し、2年目以降もこれに準じている。

c) データの処理

供用年数ごとに分類したデータから、次に測定値1mmごとの度数を算定したが、この算定にあたってはジョイント間距離（以下区間距離と称する）による重みづけを実施した。これは区間距離に大きな差（15m～240m）があるにもかかわらずデータA、データMとも1個の代

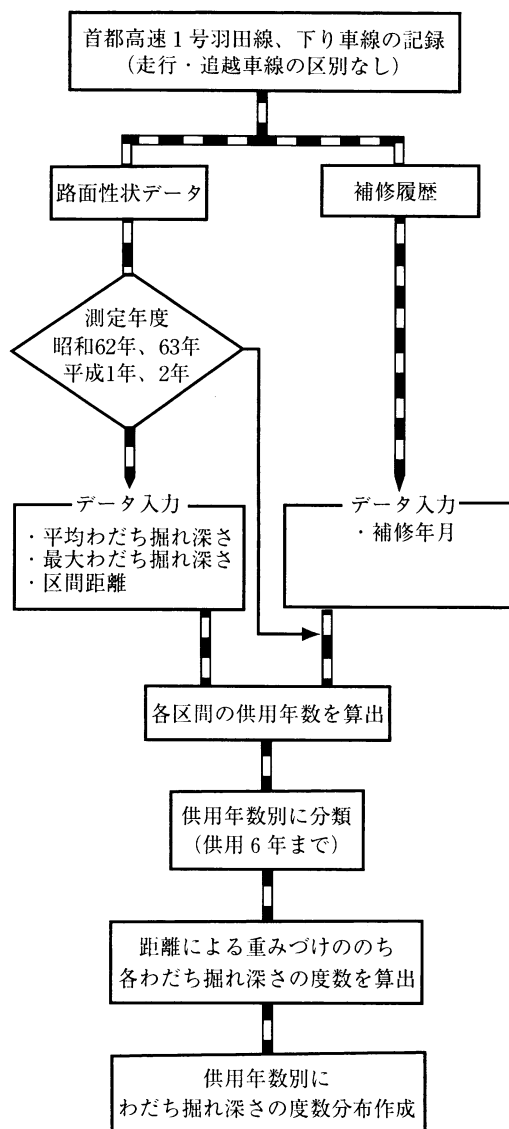


図-7 データ処理フローチャート

表値で表されていることを補正するためであり、一路線を数多くの試験片と見る基本方針に沿うものでもある。この方法によれば、例えば区間距離90mでわだち掘れ深さ5mmという1個のデータは、区間距離30mで5mmというデータの3個分に相当することになる。なお、次章以下の考察にあたっては、度数はすべて相対度数で示すためこの処置は表面には現れない。

図-7には解析法の概要をフローチャートで示した。

(3) 経年別わだち掘れ深さの分布

図-8は、供用1年の舗装について、わだち掘れ深さごとに相対度数を示したものである（データA）。補修後1年経過すればわだち掘れ深さは何mmと確定することが無理であることは言うまでもなく、わだち掘れ深さは広い範囲に分布する。この分布を対数正規曲線で近似させると、図の実線のようになり、分布形状を的確に表現していることがわかる。これをさらに確認するために対数確率紙にプロットした結果を図-9に示す。直線回帰

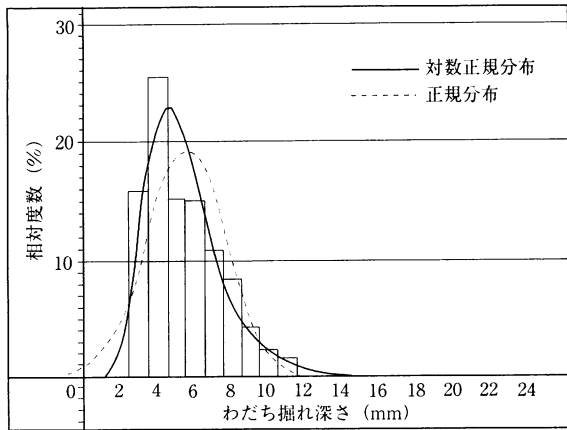


図-8 供用1年のわだち掘れ深さの分布

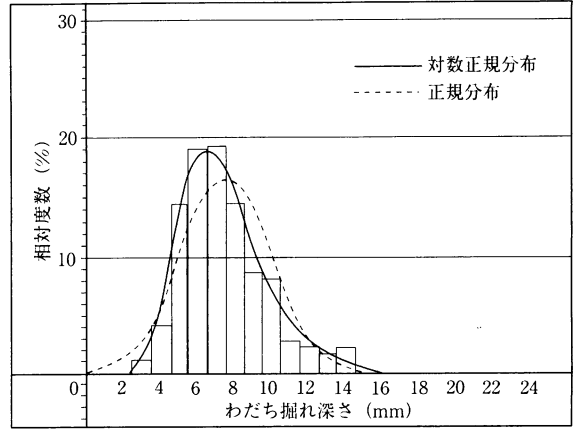


図-11 供用3年のわだち掘れ深さの分布

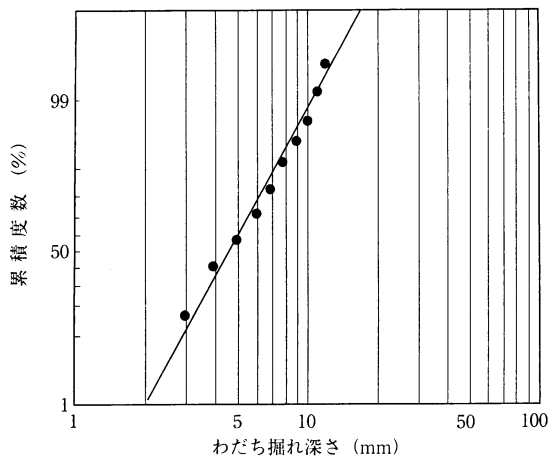


図-9 対数確率紙

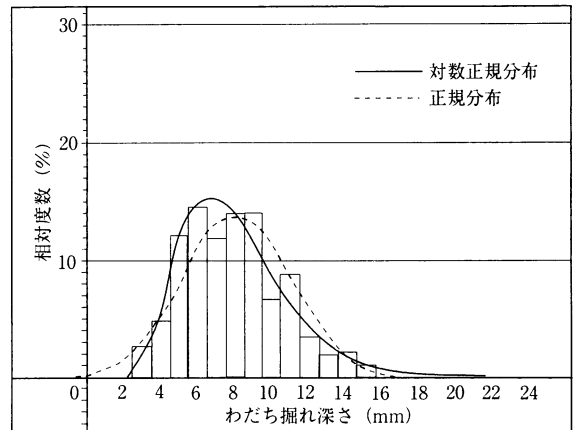


図-12 供用4年のわだち掘れ深さの分布

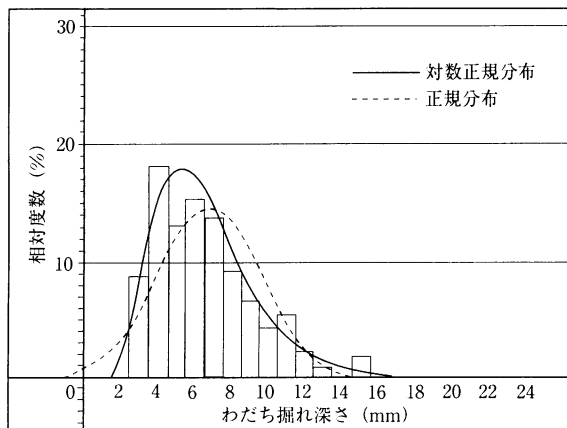


図-10 供用2年のわだち掘れ深さの分布

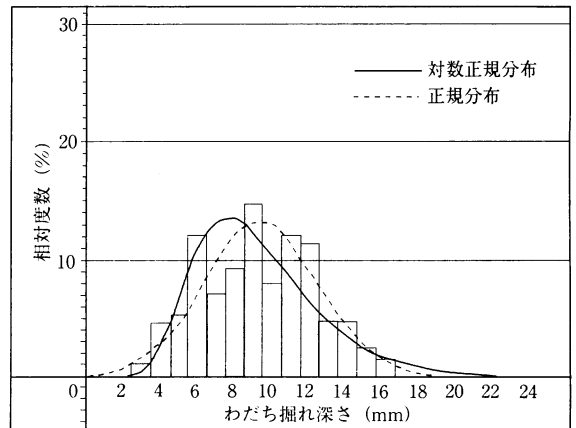


図-13 供用5年のわだち掘れ深さの分布

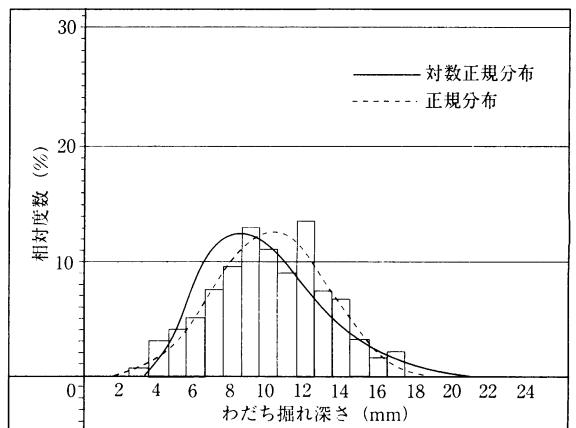


図-14 供用6年のわだち掘れ深さの分布

できることから、図-8の分布形状が対数正規型であることは明らかであろう。

さきに述べた金属材料の分野では、疲労寿命の分布は対数型であることが知られているが、わだち掘れ深さの分布も同様の形状を示すということは、非常に興味深いものがある。なお、図-8には正規分布とした場合の曲線を点線で示したが、この場合、実体とかけ離れていることは言うまでもない。

使用2年～6年のデータについても同様に解析し、図-10～図-14に示した(データA)。年数を経るにし

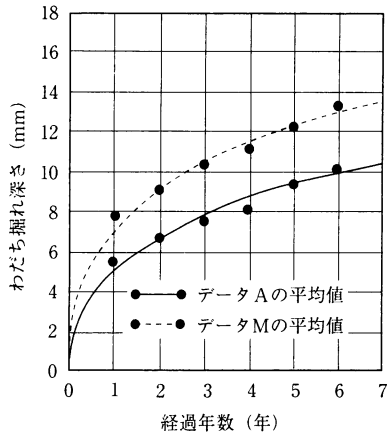


図-15 わだち掘れ深さの経年変化

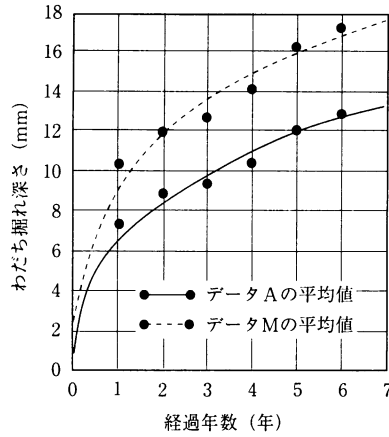


図-16 わだち掘れ深さの経年変化

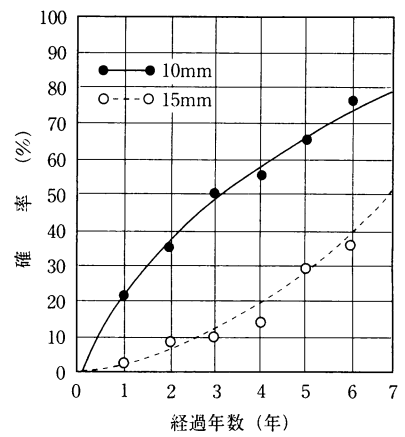


図-17 わだち掘れ深さが10mm・15mmを超える確率

たがって、分布全体が右方に動き、山の形も鋭いものから鈍いものへと変わっていく。これは、わだち掘れが年々進行すること、確定値がますますつかみにくくなっていくことを示していると思われる。

一方、分布の型は対数正規型から正規型へ徐々に移っている。このことは、載荷回数の少ないうちは典型的な破壊の進行を示すが、載荷回数が多くなってくると偶然誤差の影響が支配的になってくることを表しているものと思われる。

(4) わだち掘れ深さの経年変化

図-10～図-14に示した分布のそれぞれの平均値を用いて、わだち掘れ深さの経年変化を図-15に示した。なお、データMを使用した場合でも図-10～図-14と同様の傾向が見られたが、分布の図は省略し、ここではその平均値による経年変化だけを図-15にプロットした。

わだち掘れは、最初の1年目に5mm（データMでは8mm）となり、2年目以降は年間1mm（データMでも1mm）の割合で進行していく、同一地点を毎年測定しても経年変化を得るのは困難であることを先に第4章で述べたが、このように年間進行量が測定精度以下であることから判断しても当然の結果といえることができる。

以上の解析により、わだち掘れ深さの経年変化は得られたが、図-15の各線はあくまで各年毎のデータの平均値を用いた結果であって、その背後には幅広い分布があることをあらためて付け加えておきたい。

6. 解析結果の応用

(1) 確率80%でみた経年変化

図-15に示した経年変化は、わだち掘れ深さの平均値が年々どのように進行していくかを表している。このように平均値のみでみる場合、その値より低くなる確率も高くなる確率も、ほぼ50%ずつと考えることができよう。この確率をずらして、80%とした場合の経年変

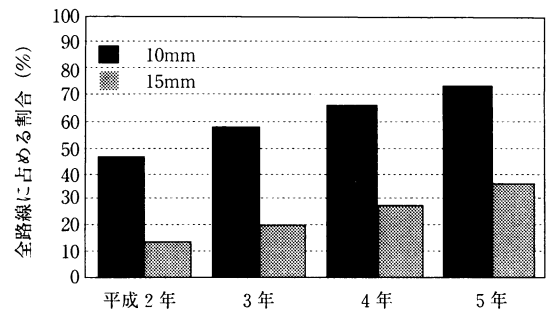


図-18 わだち掘れ深さが10mm・15mmを超える割合（予測）

化を図-16に示す。この図で、例えば横軸の5年に着目するとデータMの線から縦軸の16mmが読みとれるが、これは供用5年でわだち掘れ量が16mm以内である確率が80%（16mmを超える確率が20%）となることを意味している。供用年数ごとの分布がわかっているならば、このようなとらえ方をすることもできるという一例である。

(2) 10mm, 15mmを超える確率の推移

将来の補修計画を策定する場合、最も必要とされるデータは、わだち掘れの大きいものがどの程度あるかということであろう。実際の修繕では当該区間の平均的なわだち掘れ深さよりも、最大値で判断されることが多いと思われるので、ここではデータMを使用する。

データMで作成した経年ごとの分布（データAによる図-10～図-14と同様のもの）から、例として10mm, 15mmを超える確率を経年ごとに求めてプロットすると図-17のようになる。この図は、例えば横軸の5年に着目すると、供用5年の舗装のうち、わだち掘れ深さ10mmを超える確率は65%、15mmを超える確率は30%ということの意味している。図で明らかなように、10mmを超える確率は最初の1～2年で増加が著しいが（曲線が上に凸）、15mmを超える確率は4～5年頃から増加が著しくなる（曲線が下に凸）ようである。

(3) 10mm, 15mmを超える割合の将来予測

図-17の確率と各区間の経年数, 延長から, 将来の各年度ごとに10mm, あるいは15mmを超える延長が全路線に占める割合を予測することが可能である. 図-18にその計算結果を示す. 図には, 同様の手法で計算した平成2年度の予測値も参考までに示したが, 予測値の45% (10mmを超える割合), 13% (15mmを超える割合) に対し, 実際値はそれぞれ44%, 10%であった.

図で明らかなように, 1号線下り全体の10mm, 15mmを超える割合は年々増加していくが, これは補修が行われないとして計算した割合である. 逆に言えば, 現状を維持するために必要な補修延長を図から算出することも可能である.

(4) 今後の課題

首都高速道路公団のわだち掘れに関する補修要否の判定基準は20mmであるが, これは人力による測定値を対象としたものである. 自動測定では, わだち掘れの大きい小さいは無視し, 機械的に等間隔で測定するため, 全体的に測定値は前者よりかなり小さい値となる.

本研究はわだち掘れ深さ測定値を定量的に解析する方法を提案し, その応用例をいくつか示したが, 現場に適用するには, ここに述べた測定方法による差だけではなく, 様々な角度からの調整が必要であると考えられる. 今後の研究課題とする.

7. ま と め

本研究で得られた成果は以下のとおりである.

- (1) 距離のずれ, 測定装置の相違などから生ずる測定誤差を実験的に示した.
- (2) 自動測定装置でわだち掘れ深さを毎年測定しても, 従来のようなまとめ方では経年変化を得るのが困難であることを具体的に示した.
- (3) わだち掘れ深さの経年変化を求めるにあたり供用年数ごとにグループ分けして解析する方法を提案した.
- (4) わだち掘れ深さは, 経年ごとに一定値をとると

するのではなく, 統計的に分布すると考えた方が合理的であり, かつ実態に沿っていることを明らかにした.

- (5) わだち掘れ深さの経年変化を, 分布の平均値, 80%値などで示せることを明らかにした.
- (6) わだち掘れ深さが10mm, 15mmを超える確率が供用年数に応じて推移していく状況を示した.
- (7) 将来, 補修の対象となる可能性のある量 (10mm, あるいは15mmを超える量) の予測ができることを示した.
- (8) 以上の成果により, 自動測定装置で測定されたデータは, 種々の誤差は含まれるものの, 定量的な解析に十分耐え得るものであることを明らかにした.

謝 辞

本研究は, 首都高速道路公団のデータバンクシステムがあつてはじめて成立したと言える. システムの構築や運用, そして煩雑な補修履歴の記録など, 多勢の方々の汗の結晶を使わせていただいた. 本研究のデータ解析にあたっては, 全路線を並行して進めてきたが, 膨大なデータの処理に悪戦苦闘したのは, この数年の間に卒業していった日本大学理工学部土木工学科阿部研究室の, 約100名に及ぶ卒業生諸君であった. また, 本研究の初期には東京都土木技術研究所の阿部忠行氏に, まとめにあたっては日本大学理工学部土木工学科助手の関口英輔君に御協力いただいた.

以上の方々に, 深甚なる感謝の意を表する次第である.

参 考 文 献

- 1) Abe, Y. et al: The Development of Pavement Acquisition System and Rehabilitation Strategy for Heavy Roads in Tokyo. Proc. of The Third BCRA, pp.995~1003, 1990.
- 2) 横堀武夫: 材料強度学, p. 3, 技報堂, 1966.

(1993.4.20受付)

A STUDY ON THE NUMERICAL ANALYSIS OF RUTTING DEPTH DATA

Yorimasa ABE and Tadao IINO

This paper describes the use of rutting depth data measured by automatic high speed devices. This kind of devices was developed in 1985 by four different firms. Though enormous data have been acquired since then, they have not been used for numerical analysis. The authors have been trying to find the method of rational treatment of these data and have come to the following conclusions from the analysis of Metropolitan Expressway.

- (1) Rutting depth values at a certain service period cannot be determined as one value, but should be treated as they are statistically distributed.
- (2) Future rutting depth and volume of rehabilitation required can be roughly estimated.
- (3) Rutting depth data measured by automatic devices can be used for numerical analysis according to the method described in this paper.