

土 木 研 究 所 報 告

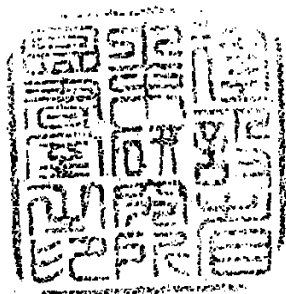
第 135 号

体積変化をともなう直交異方性弾塑性理論とその適用……………飯田隆一…(1)

二次元傾斜荷重に対する地盤支持力の計算図表……………駒田敬一…(27)

路面のすべり抵抗に関する研究 (1)

—— 一般路面のすべりについて ——……………市原 薫…(37)



昭和 44 年 8 月

建 設 省 土 木 研 究 所

体積変化をともなう直交異方性弾塑性理論とその適用

(昭和43年10月)

飯 田 隆 一*

Theory of Orthotropic Elasto-plasticity with Volume Change and its Applications

(October 1968)

by Ryuichi Iida

Synopsis:

This report presents the new theory of orthotropic plasticity, especially about the relations between the increments of plastic strains and stresses and the criterion of yielding on the orthotropic elasto-plastic bodies with volume changes. Based on these theories, this paper presents the solutions by finite element method, and the applications to sands, rockfill materials, soft rocks, and foundation rocks.

要 旨

体積変化をともなう直交異方性体について、塑性ひずみ増分と応力との関係と降伏条件について新しい提案を行ない、それにもとづいた弾性領域を含めた有限要素法による解法について述べ、これを砂、フィル材料、軟岩、岩盤等に適用する方法について述べたものである。

キーワード (塑性理論, 有限要素法)

目 次

1. まえがき.....(2)	扱い.....(13)
2. 従来の理論に対する検討.....(2)	[1] 塑性ひずみ増分と応力との関係.....(13)
3. 塑性ひずみ増分と応力との関係.....(3)	[2] 各種試験方法に対応した降伏条件.....(13)
4. 降伏条件.....(5)	[3] ひずみ硬化.....(15)
[1] Nadai の正八面体応力説.....(5)	8. 体積変化をともなう直交異方性弾塑性材料の
[2] Hencky のせん断ひずみエネルギー説.....(6)	取り扱い.....(16)
[3] Nadai の解釈を拡張した直交異方性体の	9. 岩盤の力学的取り扱い方に対する検討.....(19)
降伏条件.....(6)	[1] 岩盤のモデルパターン.....(19)
[4] Hencky の解釈を拡張した直交異方性体の	[2] 岩盤の力学的取り扱い方法 (1).....(19)
降伏条件.....(6)	[3] 岩盤の力学的取り扱い方法 (2).....(21)
[5] 塑性ポテンシャル関数と降伏条件式が同一であると見なすことにより求められる降伏	10. 体積変化をともなう直交異方性弾塑性体の剛
条件.....(7)	性マトリクス (2)——降伏条件が摩擦説にもと
[6] 降伏条件.....(7)	づく場合.....(21)
[7] ひずみ硬化.....(8)	11. 岩盤内の節理, キレットを直交異方性弾塑性体
5. 異方性弾塑性体の有限要素法による解法.....(9)	として取り扱う方法による解法.....(23)
[1] 剛性マトリクス.....(9)	[1] α_{2g} なる要素の取り扱い方法.....(23)
[2] 応力計算.....(11)	[2] α_{3g} なる要素の取り扱い方法.....(24)
6. 体積変化をともなう直交異方性弾塑性体の剛	[3] α_{1g} なる要素の取り扱い方法.....(24)
性マトリクス (1)——降伏条件式がエネルギー	12. 岩盤全体を直交異方性弾塑性体として取り扱
説にもとづく場合.....(11)	う方法による解法.....(24)
7. 体積変化をともなう等方性弾塑性材料の取り	13. あとがき.....(26)

* ダム部ダム構造研究室長

1. まえがき

近年ダム等の巨大な構造物の建設が相次いで行なわれ、その設計技術が進歩するにつれ、これらの構造物の安定性は主として基礎の安定性に支配されることが明らかとなってきた。このため基礎を構成する土、砂、軟岩、岩盤等のその力学的特性に応じた数値的な取り扱いの必要性が急激に高まりつつあるが、これらの材料はいずれも非弾性的な動きを示しており、弾性体としての取り扱いでは不充分であると考えられている。

これらの材料のうち、土、砂については比較的低い応力で破壊が生ずるので、破壊ないし限界支持力の推定に塑性理論が用いられてきたが、軟岩および岩盤では非弾性的な動きが生じた後も、かなりの耐荷力を有するので、近似的に弾性体として取り扱うか、あるいは土などにおける限界支持力の理論が用いられてきた。

これらの材料の破壊機構については、未だ不明な点が多いので、直接破壊ないし限界支持力を求めることは問題があるにしても、非弾性的な領域を含めての応力分布を推定し得るならば、現在の設計技術は一段と進歩し得ると思われる。

これらの材料が非弾性的な動きを示す原因としては、砂とかフィルタイプダムのフィル材料では粒子間のすべりと考えられるし、軟岩の場合には粒子間の結合力を失わない範囲内でのすべりと考えるのが妥当であり、岩盤の場合には節理、キレツ面でのすべりと考えられている。一方、金属材料における塑性理論では、結晶体または結晶粒内の分子間のすべりにより塑性変形は生ずると考えられている。

このように考えると、金属材料の塑性変形と砂、フィル材料、軟岩、岩盤等での非弾性的な動きとは、すべりを生ずる際の個々の素子は、一方は結晶を構成する分子であり、他方は砂、フィル材料の粒子であったり、あるいは節理、キレツで囲まれた岩石であり、その大きさはかなり異なっているが、いずれも構成している素子間のすべりであるという点では類似した現象であると言える。

このように考えるならば、われわれの取り扱い砂、フィル材料、軟岩、岩盤等についても、問題を巨視的に見るならば、塑性理論と類似した取り扱いが可能となるはずであり、この種の問題を取り扱い得る新しい塑性理論が必要となってくる。たまたま電子計算機が利用されるに至り、有限要素法が開発され、これによりかなり複雑な塑性理論も計算可能となったので、この種の理論的検討を以下に述べることにする。

2. 従来の理論に対する検討

一般に塑性理論は

- (i) ひずみ増分と応力との関係
- (ii) 降伏条件式を満足するような応力の増分
- (iii) 平衡条件

の三つを満足するように解が求められる。このうち平衡条件は有限要素法を用いる場合には仮想仕事の原理により自動的に満足されるので、(i)と(ii)が問題となる。

まず、(i)について考察する。金属材料の塑性理論はHill¹⁾によりほぼ体系化されているが、ひずみの増分についてはReussの式が用いられ、塑性領域においては体積変化は考えられていない。

一方、土質力学の分野ではDruckerとPrager²⁾がMisesの降伏条件に従う場合に $\partial J_2' / \partial \sigma_{ij} = \sigma_{ij}'$ であることに着目した塑性ポテンシャルの考え方を

$$f(J_2', \sigma) = 0 \dots \dots \dots (1)$$

なる降伏条件の場合にも拡大し得ると仮定して、体積変化をとまう塑性理論を提案し、これを土の崩壊に適用することを試みた。すなわち、ひずみ増分と応力の関係として

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda = \left(\frac{\partial f}{\partial J_2'} \frac{\partial J_2'}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma_{ij}} \right) d\lambda \\ = \left(\frac{\partial f}{\partial J_2'} \sigma_{ij}' + \frac{1}{3} \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right) d\lambda$$

なる関係を用いているが、この場合に体積変化は

$$d\epsilon_{ii}^p = \frac{\partial f}{\partial \sigma} d\lambda \dots \dots \dots (2)$$

となり、降伏条件がMohr-Coulombの説に従うときは

$$f = J_2'^{1/2} - (\alpha\sigma + k)$$

にて表わされる。ここに α は内部摩擦角 ϕ の関数とし、 k は粘着力 C と ϕ の関数とする。このとき

$$\partial f / \partial \sigma = -\alpha$$

となり、圧縮力が作用したとき膨脹が生ずることになる。これは土の破壊を取り扱うときは、破壊近くで膨脹が生ずるので、特におかしい仮定とは言いがたいが、破壊以前の非弾性的な動きを解析する場合には矛盾した仮定となる。また、この仮定にもとづくときは内部摩擦角が大きくなるほど体積変化は大きくなる。しかし軟岩等では固結度が高いほど内部摩擦角は大きくなるが、塑性的な体積変化は小さくなるのが一般である。また、岩石、コンクリート等も(1)式に示す降伏条件に従う³⁾とされているが、これらの材料が塑性領域で(2)式に示す体積変化を示すか否かについては裏付けられていない。

要するにMisesの塑性ポテンシャルが(1)式に示す降伏条件に従う材料にも拡張し得るという考えは、破壊以前の非弾性的な動きを解析する場合には、数学的な仮

定にすぎず、実験データに裏付けられた考え方とは言い得ない。

一方、星埜博士は弾性理論では二つの弾性常数が存在することから類推して、主ひずみ増分と応力増分の関係として

$$d\epsilon_i = \frac{d\sigma}{3V} + \nu/2 \cos\left\{\omega - \frac{2\pi}{3}(i-1)\right\} \frac{d\tau_{oct}}{3U}$$

$$i = 1, 2, 3$$

なる関係を提案している⁴⁾。ここで、 V, U はエネルギーの関数としている。この考え方では体積変化は

$$d\epsilon_{ii} = \frac{d\sigma}{V}$$

となり、体積変化を降伏条件と直接関係づけていないので、自由度の多い考え方ではあるが、異方性体に発展させる場合に難点が多い。

そこで、体積変化をとまらぬ弾性理論を考えるに当ってひずみの増分と応力の関係をどのように仮定すべきか、また、この関係を与える係数にどの程度の自由度を与えることが可能であるかについて数学的に検討を加えておく必要がある。

(ii) の降伏条件について言えば、金属材料では Mises の説が用いられているが、土質力学では一般に Mohr-Coulomb の説または (1) 式が用いられている。しかし岩石、コンクリート等の脆い材料では (1) 式の方がより一般性があるとされており、土などではこれを立証する実験が困難であること、および (1) 式は Mises の説を含むものであることを考えるならば (1) 式が最も一般性のあるものと考えてさしつかえない。

また、金属材料においては形の変化によるひずみ硬化は考えられているが、土質力学においてはひずみ硬化は考えられていない。しかし、体積変化を考慮した塑性体においては、形の変化によるひずみ硬化の他に体積変化によるひずみ硬化を考えた方がより一般性があると考えられる。

以上のような観点から、以下塑性ひずみ増分と応力との関係と降伏条件について検討を加え、新しい異方性弾性理論を提案し、直交性を有する場合について異方性弾性理論と組み合わせた有限要素法による解法を述べることにする。

3. 塑性ひずみ増分と応力との関係

一般に弾性理論においては塑性ひずみの増分と応力との関係として Reuss の式

$$d\epsilon_{ij}^p = \sigma_{ij}' d\lambda \dots\dots\dots (3)$$

が用いられている。これは

$$d\epsilon_{ii}^p = \sigma_{ii}' d\lambda = 0$$

であるから、明らかに体積変化がない場合に成立するのである。(3) 式を変形すると

$$d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^{p'} + \delta_{ij} d\epsilon^p$$

であるが、体積変化がない場合には $d\epsilon^p = 1/3(d\epsilon_{ii}^p) = 0$ であるから

$$d\epsilon_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^{p'} = \sigma_{ij}' d\lambda$$

となる。そこで

$$d\epsilon_{ij}^{p'} = \sigma_{ij}' d\lambda \dots\dots\dots (4)$$

とすると、 $d\epsilon_{ii}^{p'} = 0$ であるから (4) 式は体積変化がある場合にも成立するとしても矛盾しない。

この仮定は弾性ひずみについては

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij}'}{2G} \dots\dots\dots (5)$$

なる関係式が成立しており、この式ときわめて類似した形を示しており、さらに体積変化がないとした場合には、Reuss の式と同一なものになるから妥当なものであると考えられる。

さて、異方性体の弾性理論を考えるに当って、異方性体の弾性理論においては、一般化した Hooke の法則として

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x^e \\ \epsilon_y^e \\ \epsilon_z^e \\ \gamma_{yz}^e \\ \gamma_{zx}^e \\ \gamma_{xy}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

としている⁵⁾。これを参考にして (4) 式をさらに一般化して

$$\begin{pmatrix} d\epsilon_x^{p'} \\ d\epsilon_y^{p'} \\ d\epsilon_z^{p'} \\ d\epsilon_{yz}^{p'} \\ d\epsilon_{zx}^{p'} \\ d\epsilon_{xy}^{p'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \sigma_z' \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} d\lambda \dots\dots\dots (7)$$

として表わすことにする。異方性弾性体の場合には体積変化は

$$\begin{aligned} \epsilon_{ii}^e = & (C_{11} + C_{21} + C_{31})\sigma_x + (C_{12} + C_{22} + C_{32})\sigma_y \\ & + (C_{13} + C_{23} + C_{33})\sigma_z + (C_{14} + C_{24} + C_{34})\tau_{yz} \\ & + (C_{15} + C_{25} + C_{35})\tau_{zx} + (C_{16} + C_{26} + C_{36})\tau_{xy} \end{aligned}$$

にて表わされるから

$$d\epsilon_{ii}^p = (a_1\sigma_x' + a_2\sigma_y' + a_3\sigma_z' + a_4\tau_{yz} + a_5\tau_{zx} + a_6\tau_{xy}) d\lambda \dots\dots\dots (8)$$

と仮定すると

$$\begin{aligned} d\epsilon_{ii}^p = & (a_1\sigma_x' + a_2\sigma_y' + a_3\sigma_z' + a_4\tau_{yz} + a_5\tau_{zx} + a_6\tau_{xy}) d\lambda \\ & + (\sigma_1 + a_7 + a_8)\sigma d\lambda \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} d\epsilon_x^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_z^p \\ d\epsilon_{yz}^p \\ d\epsilon_{xz}^p \\ d\epsilon_{xy}^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + \frac{1}{3}a_1 & a_{12} + \frac{1}{3}a_2 & a_{13} + \frac{1}{3}a_3 & a_{14} + \frac{1}{3}a_4 & a_{15} + \frac{1}{3}a_5 & a_{16} + \frac{1}{3}a_6 & \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \\ a_{21} + \frac{1}{3}a_1 & a_{22} + \frac{1}{3}a_2 & a_{23} + \frac{1}{3}a_3 & a_{24} + \frac{1}{3}a_4 & a_{25} + \frac{1}{3}a_5 & a_{26} + \frac{1}{3}a_6 & \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \\ a_{31} + \frac{1}{3}a_1 & a_{32} + \frac{1}{3}a_2 & a_{33} + \frac{1}{3}a_3 & a_{34} + \frac{1}{3}a_4 & a_{35} + \frac{1}{3}a_5 & a_{36} + \frac{1}{3}a_6 & \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \sigma_z' \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \\ \sigma \end{pmatrix} d\lambda \quad (9)$$

さて、 $d\epsilon_{ii}^p = 0$ であるから

$$\begin{aligned} & (a_{11} + a_{21} + a_{31})\sigma_x' + (a_{12} + a_{22} + a_{32})\sigma_y' \\ & + (a_{13} + a_{23} + a_{33})\sigma_z' + (a_{14} + a_{24} + a_{34})\tau_{yz} \\ & + (a_{15} + a_{25} + a_{35})\tau_{xz} + (a_{16} + a_{26} + a_{36})\tau_{xy} = 0 \end{aligned}$$

ここで

$$\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z' = 0$$

なることを考慮すれば

$$\left. \begin{aligned} a_{11} + a_{21} + a_{31} &= a_{12} + a_{22} + a_{32} = a_{13} + a_{23} + a_{33} \\ a_{14} + a_{24} + a_{34} &= a_{15} + a_{25} + a_{35} = a_{16} + a_{26} + a_{36} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

なる関係が成立することになる。

(9) 式から塑性ひずみエネルギーの変化を求めると

$$\begin{aligned} dW^p &= [a_{11}\sigma_x'^2 + a_{22}\sigma_y'^2 + a_{33}\sigma_z'^2 + 2a_{44}\tau_{yz}^2 + 2a_{55}\tau_{xz}^2 \\ &+ 2a_{66}\tau_{xy}^2 + (a_{12} + a_{21})\sigma_x'\sigma_y' + (a_{23} + a_{32})\sigma_y'\sigma_z' \\ &+ (a_{31} + a_{13})\sigma_z'\sigma_x' + (a_{14} + 2a_{41})\sigma_x'\tau_{yz} \\ &+ (a_{15} + 2a_{51})\sigma_x'\tau_{xz} + (a_{16} + 2a_{61})\sigma_x'\tau_{xy} \\ &+ (a_{24} + 2a_{42})\sigma_y'\tau_{yz} + (a_{25} + 2a_{52})\sigma_y'\tau_{xz} \\ &+ (a_{26} + 2a_{62})\sigma_y'\tau_{xy} + (a_{34} + 2a_{43})\sigma_z'\tau_{yz} \\ &+ (a_{35} + 2a_{53})\sigma_z'\tau_{xz} + (a_{36} + 2a_{63})\sigma_z'\tau_{xy} \\ &+ 2(a_{45} + a_{54})\tau_{yz}\tau_{xz} + 2(a_{56} + a_{65})\tau_{xz}\tau_{xy} \\ &+ 2(a_{64} + a_{46})\tau_{xy}\tau_{yz} + \sigma(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y \\ &+ a_3\sigma_z + a_4\tau_{yz} + a_5\tau_{xz} + a_6\tau_{xy})] d\lambda \quad \dots\dots(11) \end{aligned}$$

が得られる。

Love は弾性体の場合には断熱変化 (エネルギーの変化がない) のときはひずみエネルギーの変化は完全微分形でなければならないとして、(6) 式において

$$C_{rs} = C_{sr}$$

としている⁵⁾。しかし、塑性変形の場合にはエネルギーの変化はあるので、これと同様な方法により (7) 式の対称性を引き出すことはできない。

さて、次に直交異方性体について考察する。直交異方性体の場合には x 軸、 y 軸、 z 軸の周りに 180° 回転しても塑性ひずみエネルギーの値は変えないはずであるから、 τ_{yz} 、 τ_{xz} 、 τ_{xy} のそれぞれを一次の形で含む項の係数はすべて 0 とならなければならない。すなわち

$$\begin{aligned} a_{14} + 2a_{41} &= 0, & a_{15} + 2a_{51} &= 0, & a_{16} + 2a_{61} &= 0, \\ a_4 &= 0 \\ a_{24} + 2a_{42} &= 0, & a_{25} + 2a_{52} &= 0, & a_{26} + 2a_{62} &= 0, \\ a_6 &= 0 \\ a_{34} + 2a_{43} &= 0, & a_{35} + 2a_{53} &= 0, & a_{36} + 2a_{63} &= 0, \\ a_6 &= 0 \\ a_{45} + a_{54} &= 0, & a_{55} + a_{65} &= 0, & a_{64} + a_{46} &= 0 \end{aligned}$$

しかし、物理的に考えて a_{rs} と a_{sr} との符号が異なることは考えがたいので、

$$\begin{aligned} a_{14} &= a_{15} = a_{16} = a_{24} = a_{25} = a_{26} = a_{34} = a_{35} = a_{36} \\ &= a_{41} = a_{42} = a_{43} = a_{45} = a_{46} \\ &= a_{51} = a_{52} = a_{53} = a_{54} \\ &= a_{55} = a_{61} = a_{62} = a_{63} = a_{64} = a_{65} \\ &= 0 \end{aligned}$$

以上から

$$\begin{pmatrix} d\epsilon_x^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_z^p \\ d\epsilon_{yz}^p \\ d\epsilon_{xz}^p \\ d\epsilon_{xy}^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + \frac{1}{3}a_1 & a_{12} + \frac{1}{3}a_2 & a_{13} + \frac{1}{3}a_3 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \\ a_{21} + \frac{1}{3}a_1 & a_{22} + \frac{1}{3}a_2 & a_{23} + \frac{1}{3}a_3 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \\ a_{31} + \frac{1}{3}a_1 & a_{32} + \frac{1}{3}a_2 & a_{33} + \frac{1}{3}a_3 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3}(a_1 + a_2 + a_3) \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \sigma_z' \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \\ \sigma \end{pmatrix} d\lambda \quad \dots\dots(12)$$

となり、この場合の塑性ひずみエネルギーの変化を求めると

$$dW^p = [a_{11}\sigma_x'^2 + a_{22}\sigma_y'^2 + a_{33}\sigma_z'^2 + 2a_{41}\tau_{yz}' + 2a_{55}\tau_{xz}' + 2a_{66}\tau_{xy}' + (a_{12} + a_{21})\sigma_x'\sigma_y' + (a_{23} + a_{32})\sigma_y'\sigma_z' + (a_{31} + a_{13})\sigma_z'\sigma_x' + \sigma(a_1 + a_2 + a_3)]d\lambda \quad (13)$$

最後に等方性体について考察する。等方性体の場合には塑性ひずみエネルギーの変化は不変量で表わされなければならない。この場合、(13)式は応力の二次式であるから

$$dW^p = \left\{ \frac{A}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 + B(\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_z'^2 + 2\tau_{yz}^2 + 2\tau_{xz}^2 + 2\tau_{xy}^2) \right\} d\lambda \quad (14)$$

と表わされるとすると

$$\begin{aligned} a_1 &= a_2 = a_3 = A \\ a_{11} &= a_{22} = a_{33} = a_{44} = a_{55} = a_{66} = B \\ a_{12} &= a_{21} = a_{23} = a_{32} = a_{13} = a_{31} = 0 \end{aligned}$$

となり、

$$\begin{aligned} d\epsilon_x^p &= \left(B + \frac{A}{3} \right) \sigma_x' + \frac{A}{3} \sigma_y' + \frac{A}{3} \sigma_z' + A\sigma \\ &= B\sigma_x' + A\sigma \end{aligned}$$

となるから

$$\begin{pmatrix} d\epsilon_x^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_z^p \\ d\epsilon_{yz}^p \\ d\epsilon_{xz}^p \\ d\epsilon_{xy}^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B & 0 & 0 & 0 & 0 & A \\ 0 & B & 0 & 0 & 0 & A \\ 0 & 0 & B & 0 & 0 & A \\ 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \sigma_z' \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} d\lambda \quad (15)$$

となる。ここで $B=1$, $A=0$ としたのが Reuss の式である。なお、Hill は直交異方性体の塑性ひずみ増分と応力の関係として

$$\begin{pmatrix} d\epsilon_x^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_z^p \\ d\epsilon_{yz}^p \\ d\epsilon_{xz}^p \\ d\epsilon_{xy}^p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G+H-H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & H+F & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x' \\ \sigma_y' \\ \sigma_z' \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} d\lambda \quad (16)$$

なる関係を用いている⁹⁾。これは (12) 式において $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ とし、 $a_{12} = a_{21}$ として (10) 式の条件をさらにきびしくして

$$\begin{aligned} a_{11} + a_{21} + a_{31} &= a_{12} + a_{22} + a_{32} \\ &= a_{13} + a_{23} + a_{33} = 0 \end{aligned}$$

としたものと一致する。

4. 降伏条件

一般に金属等の延性のある単結晶、多結晶においては、降伏条件として Mises の説

$$J_2' = \frac{1}{2}(\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_z'^2 + 2\tau_{yz}^2 + 2\tau_{xz}^2 + 2\tau_{xy}^2) = k^2 \quad (17)$$

が用いられている。これは

(i) この種の材料においては実験結果と比較的良好一致すること

(ii) 降伏条件を不変量により表現する必要があることの二つの理由から用いられている。

一方、岩石等の脆い単結晶、多結晶においては必ずしも (17) 式は実験結果と一致するとは言えず、Nadai は

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= f(\sigma) \quad \text{ただし、} \bar{\sigma}^2 = 3J_2' \\ \text{あるいは} \quad f(J_2', \sigma) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

とした降伏条件が適用し得るとしている¹⁰⁾。また、コンクリートの破壊条件についても、伊東氏の研究によれば、(18)式に従うといわれている¹¹⁾。

このようにみると、(18)式はその一部に(17)式を含んだものであるから、等方性体の降伏条件は(18)式の形で表わされるものとして、以下考察を進めることにする。

さて、(18)式の等方性体の降伏条件を拡張して異方性体の降伏条件を求めるに当って、(18)式の物理的な解釈を検討する必要がある。これらの降伏条件に対し物理的な解釈を試みたものとして代表的なものは Nadai の正八面体応力説と Hencky のせん断ひずみエネルギー説である。

[1] Nadai の正八面体応力説

三つの主応力に対して同じ角をなす方向の方向余弦は

$$l = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad m = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad n = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

この方向の直応力は

$$\sigma_{oct} = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma$$

この方向に直交する平面内に働く表面力は

$$p_{n1} = \sigma_1 l = \frac{\sigma_1}{\sqrt{3}}, \quad p_{n2} = \sigma_2 m = \frac{\sigma_2}{\sqrt{3}}, \quad p_{n3} = \sigma_3 n = \frac{\sigma_3}{\sqrt{3}}$$

この平面に働くせん断応力を τ_{oct} とすると

$$\begin{aligned} \sigma_{oct}^2 + \tau_{oct}^2 &= p_{n1}^2 + p_{n2}^2 + p_{n3}^2 \\ \tau_{oct}^2 &= \frac{1}{3}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \sigma^2 \\ &= \frac{1}{3}\{(\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2\} \\ &= \frac{1}{3}(\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_3'^2) = \frac{2}{3}J_2' \end{aligned}$$

すなわち Nadai の解釈によれば, (18)式は

$$\left. \begin{aligned} \tau_{oct} &= f(\sigma_{oct}) \\ \text{または } f(\tau_{oct}, \sigma_{oct}) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

と表わされることになる。

〔2〕 Hencky のせん断ひずみエネルギー説
弾性体において

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ &= \frac{1}{E} [\sigma_x(1+\nu) - \nu(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)] \\ &= \frac{1}{E} [\sigma_x'(1+\nu) + (1-2\nu)\sigma] \\ &= \frac{1}{2G} \sigma_x' + \frac{1-2\nu}{E} \sigma \end{aligned}$$

であるから弾性ひずみエネルギーは

$$\begin{aligned} 2W &= \sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \sigma_z \epsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx} + \tau_{xy} \gamma_{xy} \\ &= \frac{1}{2G} [\sigma_x \sigma_x' + \sigma_y \sigma_y' + \sigma_z \sigma_z' + 2\tau_{xy}^2 + 2\tau_{yz}^2 + 2\tau_{zx}^2] \\ &\quad + \frac{1-2\nu}{E} \sigma (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \\ &= \frac{1}{G} J_2' + 3 \frac{1-2\nu}{E} \sigma^2 \end{aligned}$$

いま, 体積変化によるひずみエネルギーを W_B , 形の変化によるひずみエネルギーを W_S とすると

$$W_B = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \sigma^2, \quad W_S = \frac{1}{2G} J_2'$$

となる。ゆえに Hencky の解釈によれば, (18)式は

$$f(W_S, W_B) = 0 \dots\dots\dots (20)$$

と表わされることになる。

〔3〕 Nadai の解釈を拡張した直交異方性体の降伏条件

Nadai の正八面体応力説にそのまま異方性を付与することは困難である。そこで降伏条件は塑性ひずみ増分と応力との関係を示す係数となんらかの関係を有するはずであるとの前提に立ち, 異方性体ではひずみ主軸と応力主軸とは一致しないことに着目して, 発生する塑性ひずみ増分の正八面体ひずみ増分により降伏条件を表わすことを試みてみよう。

直交異方性体においては(12)式から

$$\begin{aligned} d\epsilon_x^p &= \left[a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z' \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3}(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \right] d\lambda \\ d\epsilon_y^p &= \left[a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z' \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3}(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \right] d\lambda \\ d\epsilon_z^p &= \left[a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z' \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3}(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \right] d\lambda \\ d\epsilon_{xy}^p &= a_{44}\tau_{xy} d\lambda, \quad d\epsilon_{xz}^p = a_{55}\tau_{xz} d\lambda, \quad d\epsilon_{yz}^p = a_{66}\tau_{yz} d\lambda \end{aligned}$$

で表わされる。これから正八面体直ひずみ増分は

$$d\epsilon_{oct}^p = \frac{1}{3} (d\epsilon_x^p + d\epsilon_y^p + d\epsilon_z^p)$$

さて, (10)式から

$$a_{11} + a_{21} + a_{31} = a_{12} + a_{22} + a_{32} = a_{13} + a_{23} + a_{33}$$

なる関係があり, さらに $\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z' = 0$ であるから

$$\begin{aligned} d\epsilon_{oct}^p &= \frac{1}{3} (a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) d\lambda \\ \left(\frac{1}{2} d\gamma_{oct}^p \right)^2 &= \frac{1}{3} [(d\epsilon_x^p)^2 + (d\epsilon_y^p)^2 + (d\epsilon_z^p)^2 \\ &\quad + 2(d\epsilon_{xy}^p)^2 + 2(d\epsilon_{xz}^p)^2 + 2(d\epsilon_{yz}^p)^2] \\ &= \frac{1}{3} [(a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z')^2 \\ &\quad + (a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z')^2 \\ &\quad + (a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z')^2 \\ &\quad + 2a_{44}^2\tau_{xy}^2 + 2a_{55}^2\tau_{xz}^2 + 2a_{66}^2\tau_{yz}^2] \\ &\quad \times (d\lambda)^2 \end{aligned}$$

となる。そこで

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{3} (a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \\ I_2 &= \frac{1}{2} [(a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z')^2 \\ &\quad + (a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z')^2 \\ &\quad + (a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z')^2 \\ &\quad + 2a_{44}^2\tau_{xy}^2 + 2a_{55}^2\tau_{xz}^2 + 2a_{66}^2\tau_{yz}^2] \end{aligned} \dots\dots\dots (21)$$

とおき, (18)式を

$$f(I_2, I_1) = 0 \dots\dots\dots (22)$$

と書き改めれば, Nadai の説を直交異方性体に拡張したものとなすことができる。

〔4〕 Hencky の解釈を拡張した直交異方性体の降伏条件

Hencky のせん断ひずみエネルギー説にそのまま異方性を付与する場合には降伏条件は弾性領域における異方に支配されることになる。しかし, 前項と同様に降伏条件は塑性領域における異方に支配されると考える方が素直であると考えられる。そこで Hencky の説を拡張して異方性体の降伏条件を求めるに当って, 降伏条件は塑性領域におけるせん断ひずみエネルギーの増分と体積変化ひずみエネルギーの増分に関係するとして求めてみよう。

$$\begin{aligned} dW^p &= \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \\ &= [a_{11}\sigma_x'^2 + a_{22}\sigma_y'^2 + a_{33}\sigma_z'^2 + 2a_{44}\tau_{xy}^2 \\ &\quad + 2a_{55}\tau_{xz}^2 + 2a_{66}\tau_{yz}^2 + (a_{12} + a_{21})\sigma_x'\sigma_y' \\ &\quad + (a_{23} + a_{32})\sigma_y'\sigma_z' + (a_{13} + a_{31})\sigma_x'\sigma_z'] d\lambda \\ &\quad + \sigma(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) d\lambda \end{aligned}$$

となるから,

$$K_1 = (a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \sigma$$

$$\begin{aligned}
 K_2 = & a_{11}\sigma_x'^2 + a_{22}\sigma_y'^2 + a_{33}\sigma_z'^2 \\
 & + 2a_{44}\tau_{xy}^2 + 2a_{55}\tau_{xz}^2 + 2a_{66}\tau_{yz}^2 \\
 & + (a_{12} + a_{21})\sigma_x'\sigma_y' + (a_{23} + a_{32})\sigma_y'\sigma_z' \\
 & + (a_{31} + a_{13})\sigma_x'\sigma_z' \\
 & + (a_{12} + a_{21})\sigma_x'\sigma_y' + (a_{23} + a_{32})\sigma_y'\sigma_z' \\
 & + (a_{31} + a_{13})\sigma_x'\sigma_z' \dots\dots\dots (23)
 \end{aligned}$$

と置き, (18)式を

$$f(K_2, K_1) = 0 \dots\dots\dots (24)$$

と書き改めれば, Hencky の説を直交異方性体に拡張したものを見出すことができる。

[5] 塑性ポテンシャル関数と降伏条件式とが同一で

あると見なすことにより求められる降伏条件

以上述べた Nadai の説, Hencky の説のような物理的な解釈ではないが, 数学的な仮定として塑性ひずみ増分が塑性ポテンシャルの変分として表わされるという説が用いられている。すなわち

$$\begin{aligned}
 d\epsilon_x^p &= h \frac{\partial g}{\partial \sigma_x} df, \\
 d\epsilon_y^p &= h \frac{\partial g}{\partial \sigma_y} df, \\
 d\epsilon_z^p &= h \frac{\partial g}{\partial \sigma_z} df, \\
 d\gamma_{yz}^p &= h \frac{\partial g}{\partial \tau_{yz}} df, \\
 d\gamma_{xz}^p &= h \frac{\partial g}{\partial \tau_{xz}} df, \\
 d\gamma_{xy}^p &= h \frac{\partial g}{\partial \tau_{xy}} df
 \end{aligned} \dots\dots\dots (25)$$

このような塑性ポテンシャル $g(\sigma_{ij})$ が存在する場合に塑性ひずみエネルギーの増分は

$$\begin{aligned}
 dW^p &= \sigma_x d\epsilon_x^p + \sigma_y d\epsilon_y^p + \sigma_z d\epsilon_z^p \\
 &\quad + \tau_{yz} d\gamma_{yz}^p + \tau_{xz} d\gamma_{xz}^p + \tau_{xy} d\gamma_{xy}^p \\
 &= h \left(\sigma_x \frac{\partial g}{\partial \sigma_x} + \sigma_y \frac{\partial g}{\partial \sigma_y} + \sigma_z \frac{\partial g}{\partial \sigma_z} \right. \\
 &\quad \left. + \tau_{yz} \frac{\partial g}{\partial \tau_{yz}} + \tau_{xz} \frac{\partial g}{\partial \tau_{xz}} + \tau_{xy} \frac{\partial g}{\partial \tau_{xy}} \right) df
 \end{aligned}$$

となる。

さて, 塑性ひずみエネルギーの増分は(13)式から明らかのように σ_{ij} の二次の斉次関数である。したがって, 上式から明らかのように $g(\sigma_{ij})$ は σ_{ij} の二次の斉次関数となる。 $g(\sigma_{ij})$ が σ_{ij} の二次の斉次関数である場合には

$$\begin{aligned}
 \sigma_x \frac{\partial g}{\partial \sigma_x} + \sigma_y \frac{\partial g}{\partial \sigma_y} + \sigma_z \frac{\partial g}{\partial \sigma_z} + \tau_{yz} \frac{\partial g}{\partial \tau_{yz}} \\
 + \tau_{xz} \frac{\partial g}{\partial \tau_{xz}} + \tau_{xy} \frac{\partial g}{\partial \tau_{xy}} = 2g(\sigma_{ij})
 \end{aligned}$$

$$\therefore dW^p = 2hg(\sigma_{ij})df$$

$$\begin{aligned}
 g(\sigma_{ij}) &= \frac{1}{2h} \frac{d\lambda}{df} [a_{11}\sigma_x'^2 + a_{22}\sigma_y'^2 + a_{33}\sigma_z'^2 \\
 &\quad + 2a_{44}\tau_{xy}^2 + 2a_{55}\tau_{xz}^2 + 2a_{66}\tau_{yz}^2
 \end{aligned}$$

となる。この $g(\sigma_{ij})$ が (25)式を満足するためには

$$a_{12} = a_{21}, a_{23} = a_{32}, a_{31} = a_{13}, a_1 = a_2 = a_3 \dots\dots\dots (27)$$

なる関係が必要となってくる。

すなわち, 塑性ポテンシャルが存在するためには, 偏差塑性ひずみ増分と偏差応力との関係を示す (7) 式が対称となる他, 塑性体積変化については等方性を示さなければならないことになる。言い換えれば体積変化をともなう異方性塑性体においては, 塑性ポテンシャルが存在するのは非常に限定された条件においてであると言い得る。

さて, Mises の説に従う場合に

$$\partial J_2' / \partial \sigma_{ij} = \sigma_{ij}'$$

なる関係があることから, 降伏条件を

$$f(\sigma_{ij}) = 0$$

としたとき

$$g(\sigma_{ij}) = f(\sigma_{ij}) \dots\dots\dots (28)$$

と仮定されることがある。Hill によれば⁸⁾, この仮定は未だ実験的には確認されていないが, この仮定を導入すると, 解の唯一性等が公式化されるので, 数学的にはしばしば用いられている。

この仮定は Prager らにより土質力学にも導入されているが, 2節にも述べたように, Mises の降伏条件に従う場合には問題ないが, (18)式の降伏条件に従う場合には実験結果と一致しないものがある。さて, 塑性ポテンシャルが存在するとし, (28)式が仮定し得るとすると

$$f(\sigma_{ij}) = g(\sigma_{ij}) \propto dW^p$$

となり, この取り扱いには Hencky の説を拡張した(23), (24)式に(27)式の制約を加え, さらに K_1 と K_2 の関係を一義的に固定したものとなる。

この説は体積変化をともなわない塑性体の場合には

$$a_1 = a_2 = a_3, dW^p = 0$$

となるから, (7)式に対して対称性を付与するだけで, 比較的制約の少ないものとなるので, かなり用いられており, Hill は直交異方性の塑性ひずみ増分として(16)式で与えられた場合に(26)式に従って

$$\begin{aligned}
 F(\sigma_y - \sigma_x)^2 + G(\sigma_x - \sigma_z)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 \\
 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{xz}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1
 \end{aligned}$$

といている。

[6] 降伏条件

以上従来塑性理論において用いられてきた降伏条件に対する3種の説にもとづいて, 異方性体での降伏条件を求めてみたが, Hencky の説と塑性ポテンシャルと降伏条件式と等しいとした説とは一致したが⁵⁾, Nadai の説は

一致しなかった。

この点について考察を加えてみよう。Hencky の説および塑性ポテンシャルと降伏条件式とが等しいとした説は明らかに蓄積される塑性ひずみエネルギーとの関係で降伏条件式を求めている。これに対し、Nadai の説はひずみエネルギーには着目してはいない。むしろ正八面体応力は、直応力、せん断応力とも不変量として表わされるので、等方性体の場合に降伏条件は不変量で表わされるから、降伏条件式を正八面体応力で表示することを試みたと解すべきであろう。また、Nadai の説は降伏条件は正八面体の直応力とせん断応力とで与えていることは摩擦論的な立場に当たっていると解するのが妥当であろう。

このように Hencky の説および塑性ポテンシャルの説はエネルギー論の立場に立っているに対し、Nadai の説は摩擦論的な立場に立っているために、降伏条件を異方性体に拡張した際に相違が現われたものと考えられる。

さて、単結晶体、多結晶体に対する現在の塑性理論はエネルギーに着目した考え方で体系化されている。したがって、コンクリート、軟岩等固結した材料の塑性的な変形を取り扱うときは、エネルギーに着目した降伏条件を用いた方がよいと考えられる。しかし、フィル材料、岩盤等の個々の粒子間が摩擦により結びつけられているものは摩擦説にもとづいた降伏条件を用いた方がよいと考えられる。

固結した材料の降伏条件として、(23), (24)式を用いることは問題はないが、個々の粒子間が摩擦により結びつけられている材料の降伏条件として(21), (22)式をそのまま用いることは少し検討を要する。すなわち、正八面体の直応力とせん断応力との関係は最もすべりやすい面を規定したものでなく、正八面体応力が不変量表示されることに着目して、Tresca の最大せん断応力説の簡略式として Nadai の説を考えた方がより妥当性をもつと考えられる。一方異方性体においては降伏条件は不変量により表示される必要はない。したがってフィル材料、岩盤、砂等の個々の粒子間が摩擦により結びつけられている材料の異方性の場合の降伏条件はより一般的な形で

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}) = 0$$

として表現し、各すべりやすい面でその方向性に着目した降伏条件を与えていく方がよいと考えられる。もちろん、砂、フィル材料のようにすべり方向がはっきりと規定し得ず、等方性体として取り扱うべきものについては、不変量表示する必要があるから、Nadai の説は簡略式として意味をもってくるが、この場合には(23), (24)式と同等の式となってくるので、(23), (24)式を代用してもさしつかえない。

ここで注意すべきことは、体積変化がない場合には

$$a_1 = a_2 = a_3 = 0$$

となり、

$$K_1 = 0$$

となるため、(24)式は(17)式を異方性体に拡張したものとなる。これをさけるために、

$$K_1 = b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z$$

として、 b_1, b_2, b_3 は a_1, a_2, a_3 とは別に選び得るとする必要がある。

以上を要約すると

- (i) 砂、フィル材料等の個々の粒子は摩擦力で結びつけられているが、等方性体として見なし得る材料に対しては、簡略式として

$$K_1 = (b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z) \sigma$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & a_{11} \sigma_x'^2 + a_{22} \sigma_y'^2 + a_{33} \sigma_z'^2 \\ & + 2a_{44} \tau_{yz}^2 + 2a_{55} \tau_{zx}^2 + 2a_{66} \tau_{xy}^2 \\ & + (a_{12} + a_{21}) \sigma_x' \sigma_y' + (a_{23} + a_{32}) \sigma_y' \sigma_z' \\ & + (a_{31} + a_{13}) \sigma_z' \sigma_x' \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$f(K_1, K_2) = 0 \quad (30)$$

を降伏条件式とする。

- (ii) コンクリート、軟岩等の固結した材料に対しては(29), (30)式を降伏条件式とする。

- (iii) 岩盤等の個々の粒子は摩擦力で結びつけられていて、すべりやすい方向がその方向性に応じて設定し得るときは、降伏条件式としては一般的には

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}) = 0 \quad (31)$$

として表わし、個々のすべりやすい面に対し、その方向に対応して降伏条件式を設定するものとする。

[7] ひずみ硬化

ひずみ硬化には一般に塑性ひずみエネルギーの関数として表わされるという方法と等値塑性ひずみ (equivalent plastic strain) の関数として表わされるという方法とが用いられている。すなわち、前者は

$$f(\sigma_{ij}) = F(dW^p)$$

とし、後者は

$$f(\sigma_{ij}) = H(d\bar{\epsilon}^p)$$

ただし、 $(d\bar{\epsilon}^p)^2 = \frac{2}{3} [d\epsilon_{ij}^p \cdot d\epsilon_{ij}^p]$

とする方法である。等方性体では

$$F' = \partial H'$$

なる関係があり、 F, H の関数形を適当に設定することにより、いずれを用いるも同じ結果が得られる。

しかし、異方性体においては降伏条件における Nadai の説と Hencky の説との差のように差が現われる。

この二つの考え方に対しては、前項の考察からも明らかのように、摩擦説にもとづく降伏条件を考えると、ひずみ硬化は各粒子間のすべり移動量に関連して生

ずると考えるのが妥当な考えであり、このすべり移動量を塑性ひずみで表わし、ひずみ硬化を塑性ひずみの関数形として表わすのが妥当性のある考え方であろう。等値塑性ひずみは等方性体において、塑性ひずみを不変量として表わすために用いられたものであり、異方性体においてはすべりが生ずると考えられる面でのすべり移動量、すなわち塑性ひずみの関数として考えるべきであろう。この点については岩盤の解法のところで具体的に論ずることにして、ここでは簡単のためにひずみ硬化を塑性ひずみの不変量化したものの関数として表わしておくことにする。

また、一方エネルギー説にもとづく降伏条件を考えるときは、当然ひずみ硬化は塑性ひずみエネルギーの関数として表わすのが妥当性ある考え方であろう。

ここで注意すべきことは、体積変化を許さない塑性変形の場合には不変量化した塑性ひずみは等置塑性ひずみのみであり、塑性ひずみエネルギーは塑性せん断ひずみエネルギーのみであるが、体積変化を許す塑性変形の場合には、これらの他に体積変化塑性ひずみおよび塑性体積変化ひずみエネルギーが生じてくることである。

この場合に、ひずみ硬化を形の変化と体積変化とを含んだ不変量化した塑性ひずみまたは塑性ひずみエネルギーの関数として表わす方法も考えられるが、体積変化のある塑性体として取り扱おうとしている砂、フィル材料、岩盤等では、形の変化によって粒子間の接触面の状況が変化するに反して、体積変化によって粒子間のかみ合いが変化する可能性があり、また軟岩等では形の変化によって結合力は大きく変化しないが、体積変化によって結合力が変化する可能性がある。このように形の変化と体積変化とはひずみ硬化が現象的に異なった形で現われる可能性があるのを、

$$\left. \begin{aligned} (d\bar{\epsilon}_s^p)^2 &= \frac{2}{3} \{ d\epsilon_{ij}^p \cdot d\epsilon_{ij}^p \} \dots\dots\dots (32) \\ (d\bar{\epsilon}_B^p)^2 &= 9 \{ d\epsilon^p \}^2 \end{aligned} \right\}$$

とし、あるいは

$$\left. \begin{aligned} dW_s^p &= [a_{11}\sigma_x'^2 + a_{22}\sigma_y'^2 + a_{33}\sigma_z'^2 \\ &\quad + 2a_{44}\tau_{yz}^2 + 2a_{55}\tau_{xz}^2 + 2a_{66}\tau_{xy}^2 \\ &\quad + (a_{12}+a_{21})\sigma_x'\sigma_y' + (a_{23}+a_{32})\sigma_y'\sigma_z' \\ &\quad + (a_{31}+a_{13})\sigma_x'\sigma_z'] d\lambda \\ dW_B^p &= \sigma(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) d\lambda \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

として、ひずみ硬化を
体積変化によるものを

$$H_1(f d\bar{\epsilon}_B^p) \text{ または } F_1(f dW_B^p)$$

とし

形の変化によるものを

$$H_2(f d\bar{\epsilon}_s^p) \text{ または } F_2(f dW_s^p)$$

とする。

以上を前項に求めた降伏条件と組み合わせると

- (i) 砂、フィル材料等の個個の粒子は摩擦力で結びつけられているが、等方性体と見なし得る材料に対しては、簡略式として

$$f(K_1, K_2, F_1(f dW_B^p), F_2(f dW_s^p)) = 0 \dots\dots\dots (34)$$

を降伏条件式とする。

- (ii) コンクリート、軟岩等の固結した材料に対しては、(34)式を降伏条件式とする。

- (iii) 岩盤等の個個の粒子は摩擦力で結びつけられていて、異方性を示す材料に対しては

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}, H_1(f d\bar{\epsilon}_B^p), H_2(f d\bar{\epsilon}_s^p)) = 0 \dots\dots (35)$$

を降伏条件式とする。

5. 異方性弾性体の有限要素法による解法

後述するように塑性理論を有限要素法に適用する場合に、異方性弾性体の有限要素法による解法を知っておく必要がある。そこで、これについて以下簡単に述べることにする。

一般に有限要素法は

- (i) 各要素の剛性マトリクスを求める。([K])
- (ii) 各要素の変位変換マトリクスを求める。([a])
- (iii) 剛性マトリクスと変位変換マトリクスとから剛性集積マトリクスを求める。([a]^T[K][a])
- (iv) 剛性集積マトリクスの逆マトリクスを求め、各節点の変位を求める。
- (v) 各節点の変位から各要素のひずみと相対変位とを求める。
- (vi) 各要素の相対変位から各要素の応力を求める。

の6段階の手続から成っている。このうち、(i)と(vi)以外は一般の等方性体の場合と全く同一の手続で行ない得るので(i)と(vi)についてのみ述べることにする。

[1] 剛性マトリクス

まず剛性マトリクスについて述べる。また、ここでは二次元問題についてのみ述べることにする。

- (1) 異方性弾性体における矩形要素の剛性マトリクス

異方性弾性体における Hooke の法則は二次元問題では

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} C_{11}' & C_{12}' & C_{13}' \\ C_{21}' & C_{22}' & C_{23}' \\ C_{31}' & C_{32}' & C_{33}' \end{bmatrix} \{\epsilon\} \dots\dots\dots (36)$$

で表わされる。Love によれば²⁹⁾ 断熱変化の場合に、

〔C'〕は対称マトリクスとなるが、これを塑性理論に拡張して使う場合には非対称の方が利用しやすいので、以下非対称のまま用いることにする。

さて、パターンとしてはひずみをと

$$\varepsilon_x = m + \frac{2y}{b}n,$$

$$\varepsilon_y = p + \frac{2x}{a}q,$$

$$\gamma_{xy} = r$$

とする。すなわち

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} 1 & 2y/b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2x/a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ n \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

このとき剛性マトリクスは

$$[K_r] = \frac{i}{4ab}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{4}{3}b^2C_{11}' - ab(C_{13}' + C_{31}') + a^2C_{33}' & -\frac{2}{3}b^2C_{11}' + ab(C_{13}' + C_{31}') - a^2C_{33}' \\ -\frac{2}{3}b^2C_{11}' + ab(C_{13}' + C_{31}') - a^2C_{33}' & \frac{4}{3}b^2C_{11}' - ab(C_{13}' + C_{31}') + a^2C_{33}' \\ abC_{21}' - a^2C_{23}' - b^2C_{31}' + abC_{33}' & -abC_{21}' + a^2C_{23}' + b^2C_{31}' - abC_{33}' \\ \frac{2}{3}b^2C_{11}' - ab(C_{13}' - C_{31}') - a^2C_{33}' & -\frac{4}{3}b^2C_{11}' + ab(C_{13}' - C_{31}') + a^2C_{33}' \\ abC_{21}' - a^2C_{23}' + b^2C_{31}' - abC_{33}' & -abC_{21}' + a^2C_{23}' - b^2C_{31}' + abC_{33}' \\ abC_{12}' - b^2C_{13}' - a^2C_{23}' + abC_{33}' & \frac{2}{3}b^2C_{11}' + ab(C_{13}' - C_{31}') - a^2C_{33}' & abC_{12}' - a^2C_{32}' + b^2C_{13}' - abC_{33}' \\ -abC_{12}' + b^2C_{13}' + a^2C_{32}' - abC_{33}' & -\frac{4}{3}b^2C_{11}' - ab(C_{13}' - C_{31}') + a^2C_{33}' & -abC_{12}' - b^2C_{13}' + a^2C_{32}' + abC_{33}' \\ \frac{4}{3}a^2C_{22}' - ab(C_{23}' + C_{32}') + b^2C_{33}' & abC_{21}' + a^2C_{23}' - b^2C_{31}' - abC_{33}' & \frac{2}{3}a^2C_{22}' + abC_{23}' - abC_{32}' - b^2C_{33}' \\ abC_{12}' - b^2C_{13}' + a^2C_{32}' - abC_{33}' & \frac{4}{3}b^2C_{11}' + ab(C_{13}' + C_{31}') + a^2C_{33}' & abC_{12}' + b^2C_{13}' + a^2C_{32}' + abC_{33}' \\ \frac{2}{3}a^2C_{22}' - ab(C_{23}' - C_{32}') - b^2C_{33}' & abC_{21}' + a^2C_{23}' + b^2C_{31}' + abC_{33}' & \frac{4}{3}a^2C_{22}' + ab(C_{23}' + C_{32}') + b^2C_{33}' \end{bmatrix} \quad (37)$$

となる。

このとき剛性マトリクスは

$$[K_r] = \frac{i}{2(a_jb_k - a_kb_j)} \begin{bmatrix} C_{11}'b_k^2 - (C_{13}' + C_{31}')a_kb_k + C_{33}'a_k^2 & -C_{11}'b_jb_k + C_{13}'a_kb_j + C_{31}'a_jb_k - C_{33}'a_ja_k \\ C_{21}'a_jb_k - C_{23}'a_ja_k - C_{31}'b_jb_k + C_{33}'a_kb_j & -C_{11}'b_jb_k + C_{13}'a_jb_k + C_{31}'a_kb_j - C_{33}'a_ja_k & C_{12}'a_jb_k - C_{13}'b_kb_j - C_{32}'a_ja_k + C_{33}'a_kb_j \\ C_{11}'b_j^2 - (C_{13}' + C_{31}')a_jb_j + C_{33}'a_j^2 & -C_{12}'a_jb_j + C_{13}'b_j^2 + C_{32}'a_j^2 - C_{23}'a_jb_j & C_{22}'a_j^2 - (C_{23}' + C_{32}')a_jb_j + C_{33}'b_j^2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

となる。

(2) 異方性弾性体における三角形要素の剛性マトリクス

三角形要素の頂点の座標を (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , (x_k, y_k) とする。いま、

$$a_j = x_j - x_i, \quad b_j = y_j - y_i$$

$$a_k = x_k - x_i, \quad b_k = y_k - y_i$$

とする。三角形要素のとき自由度は 3 であるから、パターンとして

$$\varepsilon_x = m,$$

$$\varepsilon_y = n,$$

$$\gamma_{xy} = p$$

とする。すなわち

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} m \\ n \\ p \end{bmatrix}$$

〔2〕 応力計算

次に各節点の相対変位から応力を求める計算について述べる。

(1) 矩形要素の場合

いま、各節点の相対変位を〔V〕とすれば、応力〔σ〕は

$$[\sigma] = [G_e][V]$$

$$[G_e] = \frac{1}{2ab} \begin{bmatrix} (b-2y)C_{11}' - aC_{13}' & -(b+2y)C_{11}' + aC_{13}' & (a-2x)C_{12}' - bC_{13}' & (b+2y)C_{11}' + aC_{13}' & (a+2x)C_{12}' + bC_{13}' \\ (b-2y)C_{21}' - aC_{23}' & -(b+2y)C_{21}' + aC_{23}' & (a-2x)C_{22}' - bC_{23}' & (b+2y)C_{21}' + aC_{23}' & (a+2x)C_{22}' + bC_{23}' \\ (b-2y)C_{31}' - aC_{33}' & -(b+2y)C_{31}' + aC_{33}' & (a-2x)C_{32}' - bC_{33}' & (b+2y)C_{31}' + aC_{33}' & (a+2x)C_{32}' + bC_{33}' \end{bmatrix} \quad (39)$$

にて表わされる。

(2) 三角形要素の場合

$$[G_e] = \frac{1}{a_j b_k - a_k b_j} \begin{bmatrix} b_k C_{11}' - a_k C_{13}' & -b_j C_{11}' + a_j C_{13}' & a_j C_{12}' - b_j C_{13}' \\ b_k C_{21}' - a_k C_{23}' & -b_j C_{21}' + a_j C_{23}' & a_j C_{22}' - b_j C_{23}' \\ b_k C_{31}' - a_k C_{33}' & -b_j C_{31}' + a_j C_{33}' & a_j C_{32}' - b_j C_{33}' \end{bmatrix} \quad (40)$$

となる。

6. 体積変化をともなう直交異方性弾塑性体の剛性マトリクス (1)

—降伏条件式がエネルギー説にもとづく場合—

さて、降伏条件が(34)式で表わされ、塑性ひずみ増分と応力との関係が(12)式で表わされる場合の剛性マトリクスを述べてみよう。

降伏条件式は(34)式から

$$f(K_1, K_2, F_1(f dW_B^p), F_2(f dW_S^p)) = 0$$

であり、塑性領域ではこの関係を満足していなければならぬ。降伏条件を微分した式を満足するような応力の増分が現われなければならない。

ここで、

$$\begin{aligned} dW_B^p &= \sigma(a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) d\lambda \\ dW_S^p &= [a_{11} \sigma_x'^2 + a_{22} \sigma_y'^2 + a_{33} \sigma_z'^2 \\ &\quad + 2a_{44} \tau_{xy}^2 + 2a_{55} \tau_{xz}^2 + 2a_{66} \tau_{yz}^2 \\ &\quad + (a_{12} + a_{21}) \sigma_x' \sigma_y' + (a_{23} + a_{32}) \sigma_y' \sigma_z' \\ &\quad + (a_{13} + a_{31}) \sigma_x' \sigma_z'] d\lambda \\ &= 2K_2 d\lambda \end{aligned}$$

であるから

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial K_1} dK_1 + \frac{\partial f}{\partial K_2} dK_2 \\ + \left[\frac{\partial f}{\partial F_1} \cdot F_1' \cdot \sigma (a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) \right. \\ \left. + \frac{\partial f}{\partial F_2} \cdot F_2' \cdot K_2 \right] d\lambda = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dK_1 &= (b_1 d\sigma_x + b_2 d\sigma_y + b_3 d\sigma_z) \sigma \\ &\quad + (b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z) d\sigma \\ &= \left\{ b_1 \sigma + \frac{1}{3} (b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z) \right\} d\sigma_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left\{ b_2 \sigma + \frac{1}{3} (b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z) \right\} d\sigma_y \\ &+ \left\{ b_3 \sigma + \frac{1}{3} (b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z) \right\} d\sigma_z \\ dK_2 &= \frac{1}{2} \{ (a_{11} \sigma_x' + a_{12} \sigma_y' + a_{13} \sigma_z') \\ &\quad + (a_{11} \sigma_x' + a_{21} \sigma_y' + a_{31} \sigma_z') \} d\sigma_x' \\ &+ \frac{1}{2} \{ (a_{12} \sigma_x' + a_{22} \sigma_y' + a_{32} \sigma_z') \\ &\quad + (a_{21} \sigma_x' + a_{22} \sigma_y' + a_{23} \sigma_z') \} d\sigma_y' \\ &+ \frac{1}{2} \{ (a_{13} \sigma_x' + a_{23} \sigma_y' + a_{33} \sigma_z') \\ &\quad + (a_{31} \sigma_x' + a_{32} \sigma_y' + a_{33} \sigma_z') \} d\sigma_z' \\ &\quad + 2a_{44} \tau_{xy} d\tau_{xy} + 2a_{55} \tau_{xz} d\tau_{xz} + 2a_{66} \tau_{yz} d\tau_{yz} \\ &= \frac{1}{6} \{ (4a_{11} - a_{12} - a_{21} - a_{13} - a_{31}) \sigma_x' \\ &\quad + (2a_{12} + 2a_{21} - 2a_{22} - a_{23} - a_{32}) \sigma_y' \\ &\quad + (2a_{13} + 2a_{31} - a_{23} - a_{32} - 2a_{33}) \sigma_z' \} d\sigma_x \\ &+ \frac{1}{6} \{ (-2a_{11} + 2a_{12} + 2a_{21} - a_{13} - a_{31}) \sigma_x' \\ &\quad + (-a_{12} - a_{21} + 4a_{22} - a_{23} - a_{32}) \sigma_y' \\ &\quad + (-a_{13} - a_{31} + 2a_{23} + 2a_{32} - 2a_{33}) \sigma_z' \} d\sigma_y \\ &+ \frac{1}{6} \{ (-2a_{11} - a_{12} - a_{21} + 2a_{13} + 2a_{31}) \sigma_x' \\ &\quad + (-a_{12} - a_{21} - 2a_{22} + 2a_{23} + 2a_{32}) \sigma_y' \\ &\quad + (-a_{13} - a_{31} - a_{23} - a_{32} + 4a_{33}) \sigma_z' \} d\sigma_z \\ &\quad + 2a_{44} \tau_{xy} d\tau_{xy} + 2a_{55} \tau_{xz} d\tau_{xz} + 2a_{66} \tau_{yz} d\tau_{yz} \end{aligned}$$

いま

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\partial f}{\partial K_1} \left\{ b_1 \sigma + \frac{1}{3} (b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z) \right\} \\ &+ \frac{1}{6} \frac{\partial f}{\partial K_2} \{ (4a_{11} - a_{12} - a_{21} - a_{13} - a_{31}) \sigma_x' \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (2a_{12} + 2a_{21} - 2a_{22} - a_{23} - a_{32})\sigma_y' \\
& + (2a_{13} + 2a_{31} - a_{23} - a_{32} - 2a_{33})\sigma_z' \} \\
P_2 = & \frac{\partial f}{\partial K_1} \left\{ b_2\sigma + \frac{1}{3}(b_1\sigma_x + b_2\sigma_y + b_3\sigma_z) \right\} \\
& + \frac{1}{6} \frac{\partial f}{\partial K_2} \{ (-2a_{11} + 2a_{12} + 2a_{21} - a_{13} - a_{31})\sigma_x' \\
& + (-a_{12} - a_{21} + 4a_{22} - a_{23} - a_{32})\sigma_y' \\
& + (-a_{13} - a_{31} + 2a_{23} + 2a_{32} - 2a_{33})\sigma_z' \} \\
P_3 = & \frac{\partial f}{\partial K_1} \left\{ b_3\sigma + \frac{1}{3}(b_1\sigma_x + b_2\sigma_y + b_3\sigma_z) \right\} \\
& + \frac{1}{6} \frac{\partial f}{\partial K_2} \{ (-2a_{11} - a_{12} - a_{21} + 2a_{13} + 2a_{31})\sigma_x' \\
& + (-a_{12} - a_{21} - 2a_{22} + 2a_{23} + 2a_{32})\sigma_y' \\
& + (-a_{13} - a_{31} - a_{23} - a_{32} + 4a_{33})\sigma_z' \} \\
P_4 = & 2a_{44} \frac{\partial f}{\partial K_2} \tau_{yz} \\
P_5 = & 2a_{55} \frac{\partial f}{\partial K_2} \tau_{zx} \\
P_6 = & 2a_{66} \frac{\partial f}{\partial K_2} \tau_{xy}
\end{aligned}$$

.....(41)

とおくと

$$\begin{aligned}
& P_1 d\sigma_x + P_2 d\sigma_y + P_3 d\sigma_z + P_4 d\tau_{yz} + P_5 d\tau_{zx} + P_6 d\tau_{xy} \\
& + \left[\frac{\partial f}{\partial F_1} \cdot F_1' \cdot \sigma (a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \right. \\
& \left. + 2 \frac{\partial f}{\partial F_2} \cdot F_2' \cdot K_2 \right] d\lambda = 0
\end{aligned}$$

となる。さて弾性領域では

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}' & C_{12}' & C_{13}' & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}' & C_{22}' & C_{23}' & 0 & 0 & 0 \\ C_{13}' & C_{23}' & C_{33}' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^e \\ \varepsilon_y^e \\ \varepsilon_z^e \\ \gamma_{yz}^e \\ \gamma_{zx}^e \\ \gamma_{xy}^e \end{pmatrix}$$

.....(42)

とすると

$$\begin{aligned}
d\varepsilon_x^e &= d\varepsilon_x - d\varepsilon_x^p \\
&= d\varepsilon_x - \left\{ (a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z') \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{3}(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \right\} d\lambda
\end{aligned}$$

であるから

$$\begin{aligned}
Q_1 &= P_1 C_{11}' + P_2 C_{12}' + P_3 C_{13}' \\
Q_2 &= P_1 C_{12}' + P_2 C_{22}' + P_3 C_{23}' \\
Q_3 &= P_1 C_{13}' + P_2 C_{23}' + P_3 C_{33}' \\
Q_4 &= 2P_4 C_{44}' \\
Q_5 &= 2P_5 C_{55}' \\
Q_6 &= 2P_6 C_{66}'
\end{aligned}$$

.....(43)

$$\begin{aligned}
S &= Q_1(a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z') \\
&+ Q_2(a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z') \\
&+ Q_3(a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z') \\
&+ \frac{1}{3} [P_1(C_{11}' + C_{12}' + C_{13}') \\
&+ P_2(C_{12}' + C_{22}' + C_{23}') \\
&+ P_3(C_{13}' + C_{23}' + C_{33}')](a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \\
&+ Q_4 a_{44} \tau_{yz} + Q_5 a_{55} \tau_{zx} + Q_6 a_{66} \tau_{xy} \\
&- \frac{\partial f}{\partial F_1} \cdot F_1' \cdot \sigma (a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \\
&- 2 \frac{\partial f}{\partial F_2} \cdot F_2' \cdot K_2 \dots\dots\dots(44)
\end{aligned}$$

とすれば

$$\begin{aligned}
S d\lambda &= Q_1 d\varepsilon_x + Q_2 d\varepsilon_y + Q_3 d\varepsilon_z \\
&\quad + Q_4 d\varepsilon_{yz} + Q_5 d\varepsilon_{zx} + Q_6 d\varepsilon_{xy} \\
d\sigma_x &= C_{11}'(d\varepsilon_x - d\varepsilon_x^p) + C_{12}'(d\varepsilon_y - d\varepsilon_y^p) \\
&\quad + C_{13}'(d\varepsilon_z - d\varepsilon_z^p)
\end{aligned}$$

であるから

$$\begin{aligned}
R_1 &= C_{11}'(a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z') \\
&\quad + C_{12}'(a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z') \\
&\quad + C_{13}'(a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z') \\
&\quad + \frac{1}{3}(C_{11}' + C_{12}' + C_{13}')(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \\
R_2 &= C_{12}'(a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z') \\
&\quad + C_{22}'(a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z') \\
&\quad + C_{23}'(a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z') \\
&\quad + \frac{1}{3}(C_{12}' + C_{22}' + C_{23}')(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \\
R_3 &= C_{13}'(a_{11}\sigma_x' + a_{12}\sigma_y' + a_{13}\sigma_z') \\
&\quad + C_{23}'(a_{21}\sigma_x' + a_{22}\sigma_y' + a_{23}\sigma_z') \\
&\quad + C_{33}'(a_{31}\sigma_x' + a_{32}\sigma_y' + a_{33}\sigma_z') \\
&\quad + \frac{1}{3}(C_{13}' + C_{23}' + C_{33}')(a_1\sigma_x + a_2\sigma_y + a_3\sigma_z) \\
R_4 &= 2C_{44}' a_{44} \tau_{yz} \\
R_5 &= 2C_{55}' a_{55} \tau_{zx} \\
R_6 &= 2C_{66}' a_{66} \tau_{xy}
\end{aligned}$$

.....(45)

とおけば

$$\begin{aligned}
d\sigma_x &= C_{11}' d\varepsilon_x + C_{12}' d\varepsilon_y + C_{13}' d\varepsilon_z - R_1 d\lambda \\
&= \left(C_{11}' - \frac{R_1 Q_1}{S} \right) d\varepsilon_x + \left(C_{12}' - \frac{R_1 Q_2}{S} \right) d\varepsilon_y \\
&\quad + \left(C_{13}' - \frac{R_1 Q_3}{S} \right) d\varepsilon_z - \frac{R_1 Q_4}{S} d\varepsilon_{yz} \\
&\quad - \frac{R_1 Q_5}{S} d\varepsilon_{zx} - \frac{R_1 Q_6}{S} d\varepsilon_{xy}
\end{aligned}$$

となるから

$$\begin{pmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{yz} \\ d\tau_{zx} \\ d\tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}' - \frac{R_1 Q_1}{S} & C_{12}' - \frac{R_1 Q_2}{S} & C_{13}' - \frac{R_1 Q_3}{S} & -\frac{R_1 Q_4}{2S} & -\frac{R_1 Q_5}{2S} & -\frac{R_1 Q_6}{2S} \\ C_{12}' - \frac{R_2 Q_1}{S} & C_{22}' - \frac{R_2 Q_2}{S} & C_{23}' - \frac{R_2 Q_3}{S} & -\frac{R_2 Q_4}{2S} & -\frac{R_2 Q_5}{2S} & -\frac{R_2 Q_6}{2S} \\ C_{13}' - \frac{R_3 Q_1}{S} & C_{23}' - \frac{R_3 Q_2}{S} & C_{33}' - \frac{R_3 Q_3}{S} & -\frac{R_3 Q_4}{2S} & -\frac{R_3 Q_5}{2S} & -\frac{R_3 Q_6}{2S} \\ -\frac{R_4 Q_1}{S} & -\frac{R_4 Q_2}{S} & -\frac{R_4 Q_3}{S} & C_{44}' - \frac{R_4 Q_4}{2S} & -\frac{R_4 Q_5}{2S} & -\frac{R_4 Q_6}{2S} \\ -\frac{R_5 Q_1}{S} & -\frac{R_5 Q_2}{S} & -\frac{R_5 Q_3}{S} & -\frac{R_5 Q_4}{2S} & C_{55}' - \frac{R_5 Q_5}{2S} & -\frac{R_5 Q_6}{2S} \\ -\frac{R_6 Q_1}{S} & -\frac{R_6 Q_2}{S} & -\frac{R_6 Q_3}{S} & -\frac{R_6 Q_4}{2S} & -\frac{R_6 Q_5}{2S} & C_{66}' - \frac{R_6 Q_6}{2S} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\epsilon_z \\ d\gamma_{yz} \\ d\gamma_{zx} \\ d\gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (46)$$

となる。(46)式を塑性領域における各応力状態において求め、これを(36)式に対応するものとして有限要素法に適用すれば計算し得る。

7. 体積変化をともなる等方性弾塑性材料の取り扱い

われわれが取り扱う材料のうち、体積変化をともなる等方性弾塑性体として取り扱った方がよいと考えられるものとして

- (i) フィルタイプダムのフィル材料
- (ii) 砂
- (iii) 土
- (iv) 岩石自身が軟らかく非弾性的な性質を示し、キレツの存在の影響の少ない等方性軟岩

等である。このうち、土については2節にも述べたように破壊応力がきわめて小さい上に間隙水圧の影響が著しく、さらには化学的な現象も働くので、この種の取り扱いにより解決し得ると考えることは問題あると考えられるが、他の材料については、ある程度進んだ取り扱いが可能となると考えられる。

4節にも述べたように、前記材料のうち(i)～(iii)は降伏条件式もひずみ硬化関数も、摩擦論的な考えに立てて設定すべきであり、(iv)はエネルギー論的な考えに立てて設定すべきであると考えられる。

しかし、等方性体の場合には降伏条件式もひずみ硬化関数もいずれの考え方に立つとも相違は現われないので、(34)式に示す降伏条件を用い、前節に示す解法を用いることにする。

さて、これらの材料については一般に三軸圧縮試験、一面せん断試験、二面せん断試験等により、破壊試験が行なわれ、破壊時の粘着角 C と内部摩擦角 ϕ が求められている。このようにして求められた C, ϕ は破壊に対するものであるから、弾性領域から塑性領域に移行する条件を与える降伏条件を求めるためには、これらの試験に際してとられた応力—ひずみ曲線から定める必要が

ある。

しかし、一般にはこれらの材料はかなり低い応力から応力—ひずみ曲線は曲がっていて、はっきりした降伏点を示さないことが多い。このため、われわれはこの種の取り扱いをするに当って、応力—ひずみ曲線のある程度モデル化し、降伏点と降伏点以後の応力—ひずみ曲線を表現し得るひずみ硬化関数を設定する必要が生じてくる。

このようにして降伏点に対する C, ϕ が求められたとする。この C, ϕ は当然試験方法により異なってくるはずである。そこで以下、塑性ひずみ増分と応力との関係および降伏条件、ひずみ硬化について検討を加えることにする。

[1] 塑性ひずみ増分と応力との関係

等方性体の場合に(15)式から明らかなように

$$a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{44}=a_{55}=a_{66}=1$$

$$a_1=a_2=a_3=k$$

$$a_{12}=a_{21}=a_{23}=a_{32}=a_{31}=a_{13}=0$$

となる。なお、この k の値については応力—ひずみ曲線、応力—体積変化曲線より定めるものとする。

[2] 各種試験方法に対応した降伏条件

三軸試験、一面せん断試験、二面せん断試験等により降伏点が必要とされ、直応力とせん断応力との間に

$$\tau_{\alpha\beta} = C + \sigma_{\alpha} \tan \phi \quad (47)$$

の関係があったとする。等方性体の場合にはこれを不変量で表わす必要がある。この場合に降伏条件式を不変量で表わす方法として二つある。すなわち一つは Tresca の最大せん断応力説と同じように、せん断応力と直応力の関係が最も悪くなる面ですべりが生ずるとして不変量化する方法と、もう一つは Mises の説と同じように(18)式で表わされるところの方法である。

この場合に、われわれの取り扱う材料については未だ十分に実験的には確かめられていない。しかし降伏条件を不変量で表わす場合に、後者の方が式ははるかに簡単になり、さらに岩石、コンクリート等では(18)式に示す

降伏条件式に合う試験結果の方が多いことから考えて、降伏条件式は(18)式の形で表わされると仮定する。

(1) 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験では

$$\sigma_2 = \sigma_3$$

Mohr の円が包絡線に接する点では

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin \phi$$

$$\tau_{\alpha\beta} = -\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \cos \phi$$

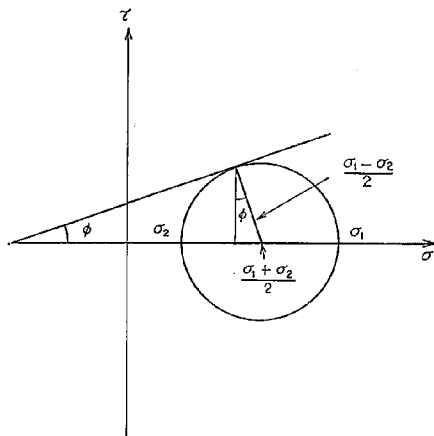


図-1

これを(47)式に代入して

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos^2 \phi &= 2C \cdot \cos \phi + \{(\sigma_1 + \sigma_2) \\ &\quad - (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \phi\} \sin \phi \\ \sigma_1 - \sigma_2 &= 2C \cdot \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_2) \sin \phi \\ \sigma_2 &= \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \sigma_1 - 2C \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \\ \sigma &= \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{(3 - \sin \phi) \sigma_1 - 4C \cdot \cos \phi}{3(1 + \sin \phi)} \\ \sigma_1' &= \frac{4}{3} \frac{\sigma_1 \sin \phi + C \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} \\ -\sigma_2' &= \sigma_3' = -\frac{2}{3} \frac{\sigma_1 \sin \phi + C \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} \\ \therefore J_2' &= \frac{1}{2} (\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_3'^2) \\ &= \frac{4}{3} \left(\frac{\sigma_1 \sin \phi + C \cdot \cos \phi}{1 + \sin \phi} \right)^2 \\ \sigma_1 &= \frac{3(1 + \sin \phi) \sigma + 4C \cdot \cos \phi}{3 - \sin \phi} \\ \therefore J_2' - 12 \left(\frac{\sigma \sin \phi + C \cdot \cos \phi}{3 - \sin \phi} \right)^2 &= 0 \dots\dots\dots (48) \end{aligned}$$

となる。

(2) 一面せん断試験および二面せん断試験

せん断試験において σ_x , τ_{xy} はそれぞれせん断面の垂直応力およびせん断応力であるとする。この他 σ_y が存在するはずであるが、これは明らかに τ_{xy} と関係があるはずである。一般にせん断試験においては集中応力が生じ、 σ_y , τ_{xy} は一様な分布をしていない。そのため集中応力を考慮して降伏条件を求めることはきわめて困難な問題で、むしろここで述べる有限要素法を用いた弾塑性解により、三軸圧縮試験結果との対比を検討すべき問題であろう。この点についての詳細な検討は今後の研究にゆずるとして、ここでは近似的な扱いとして、静定化した取り扱いについて述べることにする。

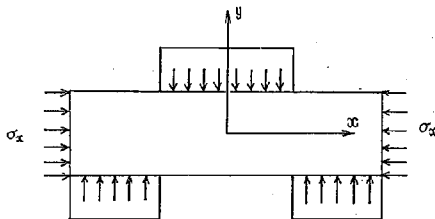


図-2 二面せん断試験

一般に τ_{xy} は弾性領域においては表面で0で放物線分布をしているとされている。また、 σ_y についてもかなり複雑な分布をしていると考えられる。しかし、ここでは静定化して、 τ_{xy} は断面内に一様に分布していると仮定し、 σ_y は τ_{xy} に比例すると仮定する。しかるとき σ_x , σ_y , τ_{xy} , 以外は0と考えるから、

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y) = \frac{1}{3} (\sigma_x + \alpha \tau_{xy}) \\ \sigma_x' &= \frac{1}{3} (2\sigma_x - \alpha \tau_{xy}) \\ \sigma_y' &= -\frac{1}{3} (\sigma_x - 2\alpha \tau_{xy}) \\ \sigma_x'' &= -\frac{1}{3} (\sigma_x + \alpha \tau_{xy}) \\ \therefore J_2' &= \frac{1}{2} (\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_x''^2 + 2\tau_{xy}^2) \\ &= \frac{1}{18} [4\sigma_x^2 + \sigma_x^2 + \sigma_x^2 + (\alpha^2 + 4\alpha^2 + \alpha^2 + 18) \tau_{xy}^2 \\ &\quad + (-4\alpha - 4\alpha + 2\alpha) \tau_{xy} \sigma_x] \\ &= \frac{1}{18} [6\sigma_x^2 - 6\alpha \sigma_x \tau_{xy} + (6\alpha^2 + 18) \tau_{xy}^2] \\ &= \frac{1}{3} [\sigma_x^2 - \alpha \sigma_x \tau_{xy} + (\alpha^2 + 3) \tau_{xy}^2] \\ &= \frac{1}{3} [(\sigma_x + \alpha \tau_{xy})^2 + 3\tau_{xy}(\tau_{xy} - \alpha \sigma_x)] \end{aligned}$$

降伏時には

$$\tau_{xy} = C + \sigma_x \tan \phi$$

であるから

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{1}{3} [\sigma_x + \alpha(C + \sigma_x \tan \phi)] \\ &= \frac{1}{3} [(1 + \alpha \tan \phi) \sigma_x + \alpha C] \\ \sigma_x &= \frac{1}{1 + \alpha \tan \phi} (3\sigma - \alpha C) \\ \tau_{xy} &= C + \frac{\tan \phi}{1 + \alpha \tan \phi} (3\sigma - \alpha C) \\ &= \frac{1}{1 + \alpha \tan \phi} (C + 3\sigma \tan \phi) \\ J_2' &= \frac{1}{3(1 + \alpha \tan \phi)^2} \\ &\quad \times [(3\sigma - \alpha C + C\alpha + 3\sigma \alpha \tan \phi)^2 \\ &\quad + 3(C + 3\sigma \tan \phi)(C + 3\sigma \tan \phi - 3\alpha \sigma + \alpha^2 C)] \\ J_2' - 3\sigma^2 - \frac{1}{(1 + \alpha \tan \phi)^2} [9\sigma^2 \tan^2(\tan \phi - \alpha) \\ &\quad + 3\sigma C \{(\alpha^2 + 2)\tan \phi - \alpha\} + C^2(1 + \alpha^2)] = 0 \\ &\quad \dots\dots\dots (49)\end{aligned}$$

となる。

〔3〕 ひずみ硬化

ひずみ硬化の現われ方として次の5通りが考えられる。

- (i) ひずみ硬化により粘着力 C のみが変化する場合
- (ii) ひずみ硬化により内部摩擦角 ϕ のみが変化する場合
- (iii) ひずみ硬化により C と $\tan \phi$ が一定の比で変化する場合
- (iv) 粘着力 C が塑性的な形の変化によりひずみ硬化を生じ、内部摩擦係数 $\tan \phi$ が塑性体積変化によりひずみ硬化を生ずる場合
- (v) 粘着力 C が塑性体積変化によりひずみ硬化を生じ、内部摩擦係数 $\tan \phi$ が塑性的な形の変化によりひずみ硬化を生ずる場合

これら5通りの考え方に対する降伏条件式を考えるに当って簡単のために

$$F(dW^p) = F_1(dW_B^p) + F_2(dW_S^p)$$

と書くことにする。

さて、(i)の場合について考察してみよう。一般に金属等の体積変化がなく Mises の説に従う材料の降伏条件としては

$$J_2' = \{F_2(dW_S^p)\}^2$$

なる式が用いられている。したがってひずみ硬化により粘着力 C のみが変化するという考え方は、金属材料等のひずみ硬化の考えを拡張したものと見て得る。この場合、金属材料の降伏条件から類推して、ひずみ硬化は塑性せん断ひずみエネルギーの変化が主役を演ずるものと考えられる。この場合の降伏条件式は C, ϕ が三軸圧縮試験より求められたときは

$$J_2' - \frac{12}{(3\sec \phi - \tan \phi)^2} [\sigma \tan \phi + F(dW^p)]^2 = 0$$

となる。これを K_1, K_2 で表わせば、 $b_1 = b_2 = b_3 = 1/3$ とすれば、

$$K_2 - \frac{12}{(3\sec \phi - \tan \phi)^2} \times [1/\sqrt{K_1} \tan \phi + F(dW^p)]^2 = 0 \dots\dots (50)$$

となる。なお、 $F(0) = C$ とする。

また C, ϕ がせん断試験により求めたときは

$$K_2 - 3K_1 - \frac{1}{(1 + \alpha \tan \phi)^2} [9K_1 \tan^2(\tan \phi - \alpha) + 3\sqrt{K_1} \{(\alpha^2 + 2)\tan \phi - \alpha\} F(dW^p) + \{F(dW^p)\}^2(1 + \alpha^2)] = 0 \dots\dots (51)$$

となる。

次に(ii)について考察しよう。この考え方はフィルタイブダムのフィル材料についての試験結果¹⁰⁾ によるとせん断摩擦係数は空隙率により変化しているが、これに対応するものといえる。これらの試験はいずれも粘着力 C はきわめて小さいので、粘着力がひずみ硬化を受けているか否かははっきりしない。

これらの試験結果は、せん断摩擦係数と空隙率とが関係づけられていることから考えて、塑性体積変化ひずみエネルギーが主役を演ずるものと考えられる。

この場合の降伏条件式は C, ϕ が三軸圧縮試験により求められているときは

$$K_2 - \frac{12}{\{3\sqrt{1 + [F(dW^p)]^2} - F(dW^p)\}^2} \times [1/\sqrt{K_1} F(dW^p) + C]^2 = 0 \dots\dots (52)$$

となる。なお、 $F(0) = \tan \phi$ とする。

また C, ϕ がせん断試験により求められているときは

$$K_2 - 3K_1 - \frac{1}{\{1 + \alpha F(dW^p)\}^2} \times [9K_1 \cdot F(dW^p) \{F(dW^p) - \alpha\} - 3\sqrt{K_1} \cdot C \{\alpha - (2 + \alpha^2)F(dW^p)\} + C^2(1 + \alpha^2)] = 0 \dots\dots (53)$$

(iii)は(i)と(ii)とを組み合わせた考え方、 C と $\tan \phi$ とが比例して変化すると考えたものである。この場合の降伏条件式は C, ϕ が三軸圧縮試験により求められているとき

$$K_2 - \frac{12\{F(dW^p)\}^2}{\{3\sqrt{1 + [F(dW^p)]^2} - F(dW^p)\}^2} \times [1/\sqrt{K_1} + C']^2 = 0 \dots\dots (54)$$

となる。なお、 $F(0) = \tan \phi, C' = C/\tan \phi$ とする。

また C, ϕ がせん断試験により求められているときは

$$K_2 - 3K_1 - \frac{F(fdW_B^p)}{[1 + \alpha F(fdW_B^p)]^2} \\ \times [9K_1 \{F(fdW_B^p) - \alpha\} \\ - 3\sqrt{K_1} \cdot C' \{ \alpha - (2 + \alpha^2) F(fdW_B^p) \} \\ + C'^2 F(fdW_B^p) (1 + \alpha^2)] = 0 \quad \dots\dots\dots (55)$$

となる。

(iv)は(ii)と同様に(i)と(ii)を組み合わせたものであるが、これら5通りの考え方の中では物理的にも数学的にも考えやすいものである。すなわち物理的には前述したように粘着力のひずみ硬化に対しては塑性せん断ひずみエネルギーの変化が主役を演じ、せん断摩擦係数のひずみ硬化に対しては塑性体積変化ひずみエネルギーの変化が主役を演ずると考えられることからみて理解しやすい考え方であり、数学的には f_s' はせん断ひずみエネルギーに比例し、 σ^2 は体積変化ひずみエネルギーに比例することから考えても、この考え方は理解しやすいものである。

この場合の降伏条件式は C 、 ϕ が三軸圧縮試験により求められているときは

$$K_2 - \frac{12}{\{3\sqrt{1 + [F_1(fdW_B^p)]^2} - F_1(fdW_B^p)\}^2} \\ \times [\sqrt{K_1} \cdot F_1(fdW_B^p) + F_2(fdW_S^p)]^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (56)$$

また C 、 ϕ がせん断試験により求められているときは

$$K_2 - 3K_1 - \frac{1}{[1 + \alpha F_1(fdW_B^p)]^2} \\ \times [9K_1 \cdot F_1(fdW_B^p) \{F_1(fdW_B^p) - \alpha\} \\ - 3\sqrt{K_1} \{ \alpha - (2 + \alpha^2) F_1(fdW_B^p) \} \\ \times F_2(fdW_S^p) + \{F_2(fdW_S^p)\}^2 (1 + \alpha^2)] = 0 \quad \dots\dots\dots (57)$$

となる。

なお、 $F_1(0) = \tan \phi$ 、 $F_2(0) = C$ とする。

(v)は(iv)とは逆の組み合わせを考えたもので、このような場合は数学的にも物理的にも考えがたいものである。

この場合の降伏条件式は C 、 ϕ が三軸圧縮試験により求められているときは

$$K_2 - \frac{12}{\{3\sqrt{1 + [F_2(fdW_S^p)]^2} - F_2(fdW_S^p)\}^2} \\ \times [\sqrt{K_1} \cdot F_2(fdW_S^p) + F_1(fdW_B^p)]^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (58)$$

となる。なお、 $F_2(0) = \tan \phi$ 、 $F_1(0) = C$ とする。

また、 C 、 ϕ がせん断試験により求められているときは

$$K_2 - 3K_1 - \frac{1}{[1 + \alpha F_2(fdW_S^p)]^2} \\ \times [9K_1 \cdot F_2(fdW_S^p) \{F_2(fdW_S^p) - \alpha\} \\ - 3\sqrt{K_1} \{ \alpha - (2 + \alpha^2) \times F_2(fdW_S^p) \} F_1(fdW_B^p)] = 0$$

$$+ [F_1(fdW_B^p)]^2 (1 + \alpha^2)] = 0 \quad \dots\dots\dots (59)$$

となる。

8. 体積変化をとまなう直交異方性弾塑性材料の取り扱い

われわれが取り扱う材料のうち、体積変化をとまなう直交異方性弾塑性体として取り扱った方がよいと考えられるものとしては堆積状況により方向性を有すると考えられる岩石、キレツの影響がほとんどない堆積性岩盤等である。

この場合にはエネルギーに着目した降伏条件を用いるのが妥当と考えられる。

係数としては a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 a_{23} 、 a_{31} 、 a_{32} 、 a_{33} 、 a_{44} 、 a_{55} 、 a_{66} 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 の18個ある。これらの係数の定め方について検討を加えよう。

4節に述べたように、もしこの種の材料の降伏条件が蓄積された塑性ひずみエネルギーの関数として表わされるとするならば、体積変化塑性ひずみエネルギーの変化 dW_B^p は

$$dW_B^p = \sigma(a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) d\epsilon$$

であるから、

$$K_1 = \sigma(b_1 \sigma_x + b_2 \sigma_y + b_3 \sigma_z)$$

が体積変化塑性ひずみエネルギーに関連をもつものである必要があり、このためには

$$\frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3} \quad \dots\dots\dots (60)$$

でなければならない。しかし、体積変化がない場合、すなわち、 $a_1 = a_2 = a_3 = 0$ のときは体積変化塑性ひずみエネルギーは存在しないことになり、

$$f(W_S^p, W_B^p) = 0$$

なる降伏条件はあり得ないことになり、

$$W_S = F_2(fdW_S^p)$$

なる降伏条件しかあり得ないことになる。しかし硬岩、コンクリート等は塑性体積変化があるか否かは明らかでなく、また、あったとしてもきわめてわずかであると考えられているが、降伏条件は $f(W_S^p, \sigma) = 0$ なる降伏条件に従うと考えられている。このような場合に対応するために、 b_1 、 b_2 、 b_3 は a_1 、 a_2 、 a_3 とはなんらかの関係は有するが別に定め得るものとして、以下論を進めることにする。

前節にも述べたように、降伏条件を求める試験としては、三軸圧縮試験とせん断試験とがある。このうち、せん断試験は部分的に集中応力が生じ、応力分布が一様でないため、近似的な降伏条件式しか設定し得ないので、三軸圧縮試験について論を進めることにする。

降伏条件は塑性ひずみエネルギーの関数として表わされ、前節に示した

$$K_2 - \frac{12}{(3 - \sin^2 \phi)^2} (\sqrt{K_1} \sin \phi + C \cdot \cos \phi)^2 = 0$$

が異方性体にもそのまま成立するものとする。

ここで、 x 方向に軸圧縮力を加えた三軸圧縮試験と、 y 方向に軸圧縮力を加えた三軸圧縮試験と、 z 方向に軸圧縮力を加えた三軸圧縮試験とを行なったとする。

いま、 x 方向、 y 方向、 z 方向に軸圧縮力を加えた場合の軸圧縮応力をそれぞれ σ_x , σ_y , σ_z とし、側圧をそれぞれ p_x , p_y , p_z とする。

x 方向に軸圧縮力を加えた場合には

$$\sigma_y = \sigma_z = p_x$$

$$\therefore \sigma = \frac{1}{3}(\sigma_x + 2p_x)$$

$$\sigma_x' = \frac{2}{3}(\sigma_x - p_x) \quad \sigma_y' = \sigma_z' = -\frac{1}{3}(\sigma_x - p_x)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$K_1 = \frac{1}{3}(\sigma_x + 2p_x) \{b_1 \sigma_x + (b_2 + b_3) p_x\}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{1}{2} \left[\frac{4}{9} a_{11} + \frac{1}{9} a_{22} + \frac{1}{9} a_{33} - \frac{2}{9} (a_{12} + a_{21}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{9} (a_{23} + a_{32}) - \frac{2}{9} (a_{31} + a_{13}) \right] (\sigma_x - p_x)^2 \\ &= \frac{1}{18} [4a_{11} + a_{22} + a_{33} - 2(a_{12} + a_{21}) + (a_{23} + a_{32}) \\ &\quad - 2(a_{31} + a_{13})] (\sigma_x - p_x)^2 \\ &= \frac{1}{18} [6a_{11} - 3a_{12} - 3a_{13} - 2(a_{11} + a_{21} + a_{31}) \\ &\quad + (a_{12} + a_{22} + a_{32}) + (a_{13} + a_{23} + a_{33})] \\ &\quad \times (\sigma_x - p_x)^2 \end{aligned}$$

さて、(10)式から

$$K_2 = \frac{1}{6} [2a_{11} - a_{12} - a_{13}] (\sigma_x - p_x)^2$$

となる。

$$\begin{aligned} \therefore (2a_{11} - a_{12} - a_{13}) (\sigma_x - p_x)^2 - \frac{72}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \\ \times \left[\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_x + 2p_x) \{b_1 \sigma_x + (b_2 + b_3) p_x\} \sin \phi \right. \\ \left. + C \cdot \cos \phi \right]^2 = 0 \dots \dots \dots (61, a) \end{aligned}$$

同様に y 方向に軸圧縮力をかけた三軸圧縮試験では

$$\begin{aligned} (2a_{22} - a_{21} - a_{23}) (\sigma_y - p_y)^2 - \frac{72}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \\ \times \left[\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_y + 2p_y) \{b_2 \sigma_y + (b_3 + b_1) p_y\} \sin \phi \right. \\ \left. + C \cdot \cos \phi \right]^2 = 0 \dots \dots \dots (61, b) \end{aligned}$$

z 方向に軸圧縮力をかけた三軸圧縮試験では

$$(2a_{33} - a_{31} - a_{32}) (\sigma_z - p_z)^2 - \frac{72}{(3 - \sin^2 \phi)^2}$$

$$\begin{aligned} \times \left[\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_z + 2p_z) \{b_3 \sigma_z + (b_1 + b_2) p_z\} \sin \phi \right. \\ \left. + C \cdot \cos \phi \right]^2 = 0 \dots \dots \dots (61, c) \end{aligned}$$

いま x, y, z 方向の一軸圧縮降伏応力をそれぞれ $\sigma_{x,c}$, $\sigma_{y,c}$, $\sigma_{z,c}$ とすると、(61)式において p_x, p_y, p_z を 0 とし

$$\begin{aligned} 2a_{11} - a_{12} - a_{13} &= \frac{72}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \\ \times \left(\sqrt{\frac{b_1}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \\ 2a_{22} - a_{21} - a_{23} &= \frac{72}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \\ \times \left(\sqrt{\frac{b_2}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}} \cos \phi \right)^2 \\ 2a_{33} - a_{31} - a_{32} &= \frac{72}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \\ \times \left(\sqrt{\frac{b_3}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{z,c}} \cos \phi \right)^2 \end{aligned} \dots \dots \dots (62)$$

と表わされることになる。

さて、(62)式は三つの方程式であるが、この中には a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{22} , a_{23} , a_{31} , a_{32} , a_{33} の 9 個の未知数が含まれている。そこで、なんらかの制約を加える必要がある。

ここでまず第一に考えられることは、Hill が異方性塑性理論において行なっているように、

$$a_{12} = a_{21}, \quad a_{13} = a_{31}, \quad a_{23} = a_{32}$$

とし、さらに

$$a_{11} + a_{21} + a_{31} = a_{12} + a_{22} + a_{32} = a_{13} + a_{23} + a_{33} = 0$$

とする方法である。この仮定を設けた場合には

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(a_{12} + a_{13}) \\ &= -\frac{24}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \left(\sqrt{\frac{b_1}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \\ a_{22} &= -(a_{12} + a_{23}) \\ &= -\frac{24}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \left(\sqrt{\frac{b_2}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}} \cos \phi \right)^2 \\ a_{33} &= -(a_{13} + a_{23}) \\ &= -\frac{24}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \left(\sqrt{\frac{b_3}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{z,c}} \cos \phi \right)^2 \end{aligned} \dots \dots \dots (63)$$

$$\begin{aligned} \therefore a_{12} + a_{13} + a_{23} &= \frac{-12}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \\ \times \left(\left(\sqrt{\frac{b_1}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\sqrt{\frac{b_2}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}} \cos \phi \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\sqrt{\frac{b_3}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{z,c}} \cos \phi \right)^2 \right) \\ a_{12} &= \frac{-12}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \left[+ \left(\sqrt{\frac{b_1}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\sqrt{\frac{b_2}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}} \cos \phi \right)^2 \\
 & - \left(\sqrt{\frac{b_3}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \Big\} \\
 a_{13} = & \frac{-12}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \left\{ \left(\sqrt{\frac{b_1}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \right. \\
 & - \left(\sqrt{\frac{b_2}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}} \cos \phi \right)^2 \\
 & + \left. \left(\sqrt{\frac{b_3}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \right\} \\
 a_{23} = & \frac{-12}{(3 - \sin^2 \phi)^2} \left\{ - \left(\sqrt{\frac{b_1}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \right. \\
 & + \left(\sqrt{\frac{b_2}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}} \cos \phi \right)^2 \\
 & + \left. \left(\sqrt{\frac{b_3}{3}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}} \cos \phi \right)^2 \right\}
 \end{aligned}
 \tag{64}$$

(63), (64) 式において b_1, b_2, b_3, C, ϕ は未知である。これらの求め方について検討を加えることにする。

軸圧縮応力が側圧より大きいときは、(62)式を(61)式に代入することにより、

$$\begin{aligned}
 \sigma_x - p_x &= \frac{\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_x + 2p_x) \{b_1 \sigma_x + (b_2 + b_3) p_x\} \tan \phi + C}{\sqrt{\frac{b_1}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}}} \\
 \sigma_y - p_y &= \frac{\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_y + 2p_y) \{b_2 \sigma_y + (b_3 + b_1) p_y\} \tan \phi + C}{\sqrt{\frac{b_2}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}}} \\
 \sigma_z - p_z &= \frac{\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_z + 2p_z) \{b_3 \sigma_z + (b_1 + b_2) p_z\} \tan \phi + C}{\sqrt{\frac{b_3}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}}}
 \end{aligned}
 \tag{65}$$

なる関係が成立する。さて、いま

$$\begin{aligned}
 \tan \phi_x &= \frac{\tan \phi}{\sqrt{\frac{b_1}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}}} \\
 \tan \phi_y &= \frac{\tan \phi}{\sqrt{\frac{b_2}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}}} \\
 \tan \phi_z &= \frac{\tan \phi}{\sqrt{\frac{b_3}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}}} \\
 C_x &= \frac{C}{\sqrt{\frac{b_1}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}}} \\
 C_y &= \frac{C}{\sqrt{\frac{b_2}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{y,c}}}
 \end{aligned}
 \tag{66}$$

$$C_z = \frac{C}{\sqrt{\frac{b_3}{3}} \tan \phi + \frac{C}{\sigma_{x,c}}}$$

とおくと、

$$\begin{aligned}
 \sigma_x - p_x &= \sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_x + 2p_x) \{b_1 \sigma_x + (b_2 + b_3) p_x\} \tan \phi_x + C_x \\
 \sigma_y - p_y &= \sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_y + 2p_y) \{b_2 \sigma_y + (b_2 + b_3) p_y\} \tan \phi_y + C_y \\
 \sigma_z - p_z &= \sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_z + 2p_z) \{b_3 \sigma_z + (b_1 + b_2) p_z\} \tan \phi_z + C_z
 \end{aligned}
 \tag{67}$$

となる。ここに $C_x, C_y, C_z, \tan \phi_x, \tan \phi_y, \tan \phi_z$ はそれぞれ x, y, z 方向に軸圧縮力を加えた場合に、三軸圧縮試験結果を縦軸に軸圧縮応力と側圧との差を、横軸に

$$\sqrt{\frac{1}{3}} (\sigma_x + 2p_x) \{b_1 \sigma_x + (b_2 + b_3) p_x\}, \dots\dots$$

をとりプロットした時のこれらの点を結ぶ直線の縦軸と交わる点の座標とこう配を示しており、粘着力と内部摩擦係数に類似したものである。

いま、 b_1, b_2, b_3 を求めるに当って、まず、 b_1, b_2, b_3 を適当に仮定し、たとえば $b_1 = b_2 = b_3 = 1/3$ に仮定して、試験結果を(67)式に従ってプロットして、 $C_x, C_y, C_z, \tan \phi_x, \tan \phi_y, \tan \phi_z$ を求める。しかるとき、(66)式から

$$\frac{C}{\tan \phi} = \frac{C_x}{\tan \phi_x} = \frac{C_y}{\tan \phi_y} = \frac{C_z}{\tan \phi_z} = C_0
 \tag{68}$$

であるから

$$\begin{aligned}
 \sqrt{\frac{b_1}{3}} + \frac{C_0}{\sigma_{x,c}} &= \frac{1}{\tan \phi_x} \\
 \sqrt{\frac{b_1}{3}} &= \frac{1}{\tan \phi_x} \left(1 - \frac{C_x}{\sigma_{x,c}} \right)
 \end{aligned}$$

すなわち

$$\begin{aligned}
 \sqrt{\frac{b_1}{3}} &= \frac{1}{\tan \phi_x} \left(1 - \frac{C_x}{\sigma_{x,c}} \right) \\
 \sqrt{\frac{b_2}{3}} &= \frac{1}{\tan \phi_y} \left(1 - \frac{C_y}{\sigma_{y,c}} \right) \\
 \sqrt{\frac{b_3}{3}} &= \frac{1}{\tan \phi_z} \left(1 - \frac{C_z}{\sigma_{x,c}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{69}$$

により b_1, b_2, b_3 が求められる。かくして求められた b_1, b_2, b_3 を用いて試験結果を(67)式に従ってプロットし、 $C_x, C_y, C_z, \tan \phi_x, \tan \phi_y, \tan \phi_z$ を求め直す。これを用いて再び(69)式により b_1, b_2, b_3 を求める。この計算を反復して、試験の精度の範囲内で、さしつかえないまで繰り返す。

ここで注意すべきことは (68) 式の関係である。(68) 式は降伏条件として

$$K_2 - \frac{12}{(3 - \sin \phi)^2} (\sqrt{K_1} \sin \phi + C \cos \phi)^2 = 0$$

が異方性体にも適用し得るとして数学的に求められたもので、実際に確かめられていない。このことは (68) 式の関係が実際に満足されるか否かによって、この降伏条件式の妥当性を検討することが可能である。

さて、かくして b_1, b_2, b_3 が定まり、これに対応して $C_x, C_y, C_z, \tan \phi_x, \tan \phi_y, \tan \phi_z$ が定まると、 $C/\tan \phi$ が定まる。

一方、 $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}, a_{33}$ はその絶対値が問題ではなく、相対的な値が問題であるから

$$a_{11}(3 - \sin \phi)^2 = 24 \sin^2 \phi \left(\sqrt{\frac{b_1}{3} + \frac{C_0}{\sigma_{y,c}}} \right)^2$$

$$\therefore \sin \phi = \frac{3\sqrt{a_{11}}}{2\sqrt{6} \left(\sqrt{\frac{b_1}{3} + \frac{C_0}{\sigma_{y,c}}} + \sqrt{a_{11}} \right)}$$

$$= \frac{3\sqrt{a_{11}} \tan \phi_x}{2\sqrt{6} + \sqrt{a_{11}} \tan \phi_x}$$

すなわち

$$\left. \begin{aligned} \sin \phi &= \frac{3\sqrt{a_{11}} \tan \phi_x}{2\sqrt{6} + \sqrt{a_{11}} \tan \phi_x} \\ &= \frac{3\sqrt{a_{22}} \tan \phi_y}{2\sqrt{6} + \sqrt{a_{22}} \tan \phi_y} \\ &= \frac{3\sqrt{a_{33}} \tan \phi_z}{2\sqrt{6} + \sqrt{a_{33}} \tan \phi_z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (70)$$

となるから、 a_{11}, a_{22}, a_{33} のうちいずれかを 1 とすれば、 $\sin \phi$ が定められ、これから $C, \tan \phi$ が定められる。

以上から (63), (64) 式から $a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}$ が求められる。

次に a_{44}, a_{55}, a_{66} について考察する。いま、 yz 平面内で y, z 軸に 45° をなす方向に α 軸を、 zx 平面内で z, x 軸に 45° をなす方向に β 軸を、 xy 平面内で x, y 軸に 45° をなす方向に γ 軸をとる。すなわち、 α, β, γ の x, y, z 軸に対する方向余弦は

	α	β	γ
x	0	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
y	$1/\sqrt{2}$	0	$1/\sqrt{2}$
z	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	0

となる。この α, β, γ 方向に一軸圧縮試験を行ない、それぞれの方向の降伏一軸圧縮応力をそれぞれ $\sigma_{\alpha,c}, \sigma_{\beta,c}, \sigma_{\gamma,c}$ とする。しかるとき、 α 方向の一軸圧縮試験では

$$\sigma_x = 0, \sigma_y = \sigma_z = \frac{1}{2} \sigma_\alpha, \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0, \tau_{xy} = \frac{1}{2} \sigma_\alpha,$$

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_\alpha, \sigma_x' = -\frac{1}{3} \sigma_\alpha, \sigma_y' = \sigma_z' = \frac{1}{6} \sigma_\alpha$$

$$K_1 = \frac{1}{3} \sigma_\alpha \left\{ \frac{1}{2} (b_2 + b_3) \sigma_\alpha \right\} = \frac{1}{6} (b_2 + b_3) \sigma_\alpha^2$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \left(a_{11} \cdot \frac{1}{9} + \frac{1}{36} a_{22} + \frac{1}{36} a_{33} - \frac{1}{9} a_{12} + \frac{1}{18} a_{23} \right.$$

$$\left. - \frac{1}{9} a_{13} + \frac{1}{2} a_{44} \right) \sigma_\alpha^2$$

$$= \frac{1}{72} [4a_{11} + a_{22} + a_{33} - 4a_{12} + 2a_{23} - 4a_{13} + 18a_{44}] \sigma_\alpha^2$$

$$= \frac{1}{8} (a_{11} + 2a_{44}) \sigma_\alpha^2$$

$$\frac{1}{8} (a_{11} + 2a_{44}) = \frac{24}{(3 - \sin \phi)^2}$$

$$\times \left(\sqrt{\frac{b_2 + b_3}{6}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{\alpha,c}} \cos \phi \right)^2$$

$$a_{44} = -\frac{1}{2} a_{11} + \frac{96}{(3 - \sin \phi)^2}$$

$$\times \left(\sqrt{\frac{b_2 + b_3}{6}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{\alpha,c}} \cos \phi \right)^2$$

$$a_{55} = -\frac{1}{2} a_{22} + \frac{96}{(3 - \sin \phi)^2}$$

$$\times \left(\sqrt{\frac{b_3 + b_1}{6}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{\beta,c}} \cos \phi \right)^2$$

$$a_{66} = -\frac{1}{2} a_{33} + \frac{96}{(3 - \sin \phi)^2}$$

$$\times \left(\sqrt{\frac{b_1 + b_2}{6}} \sin \phi + \frac{C}{\sigma_{\gamma,c}} \cos \phi \right)^2$$

.....(71)

により a_{44}, a_{55}, a_{66} が求められる。

a_{11}, a_{21}, a_{31} については三軸圧縮試験における塑性領域での体積変化を測定することにより求められる。

以上 $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, C, \phi$ が求められれば 6 節に述べた方法により計算し得る。

9. 岩盤の力学的取り扱い方に対する検討

元来、岩盤には節理、キレツ等が存在しており、このため岩盤内の力の伝わり方、変形状態等は弾性体とはかなり異なっていることは岩盤の実測資料より明らかにされており¹¹⁾、また、これらの特性を定性的に裏づける実験的研究も行なわれている¹²⁾。

岩盤の力学的特性がその内部に存在する節理、キレツによるのであるならば、岩盤内に存在する節理、キレツの状態に応じていくつかのモデルパターンを考え、その特徴に応じた力学的な取り扱いを検討する必要がある。

〔1〕 岩盤のモデルパターン

現在までの岩盤の節理、キレツの調査によると、多くの場合節理、キレツは三つの卓越した方向を示しており、これらはそれぞれ直角またはそれに近い角度で交わっている場合が多い。そこで岩盤に対し図-3 に示す 5 種のモデルパターンを考えることにする

〔2〕 岩盤の力学的取り扱い方法 (1)

図-3 に示した 5 種類のモデルパターンに対する力学

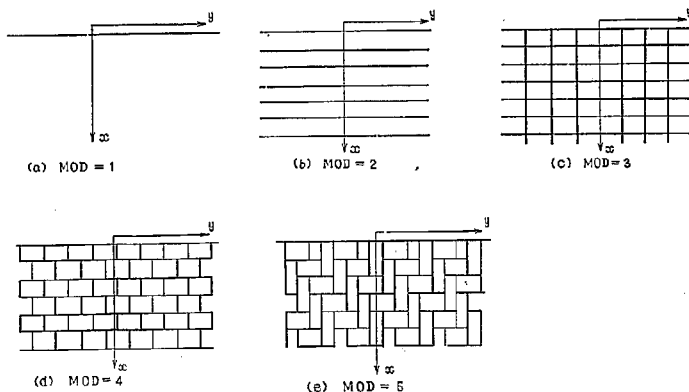


図-3 岩盤のモデルパターン

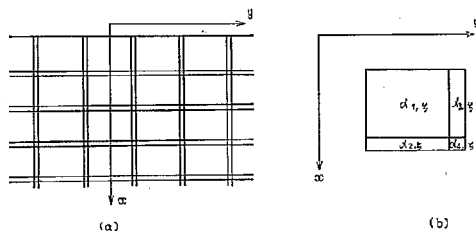


図-4

的取り扱いとして、まず第一に考えられることは、図-4 (a)に示すような矩形要素から成る構成を考え、その要素には図-4 (b)に示すようなサフィックスを付け $\alpha_{1,g}$ なる要素は岩片を表わし、 $\alpha_{2,g}$ なる要素は y 軸に平行なキレツを表わし、 $\alpha_{3,g}$ なる要素は x 軸に平行なキレツを表わすものとする。 $\alpha_{1,g}$ なる要素は弾性体としての取り扱いを行ない、 $\alpha_{2,g}$ 、 $\alpha_{3,g}$ なる要素は直交異方性弾塑性体としての取り扱いを行なう方法である。

この方法においては $\alpha_{2,g}$ 、 $\alpha_{3,g}$ なる要素は表-1に示すような条件で異なった状態に移行していくと考えればよい。

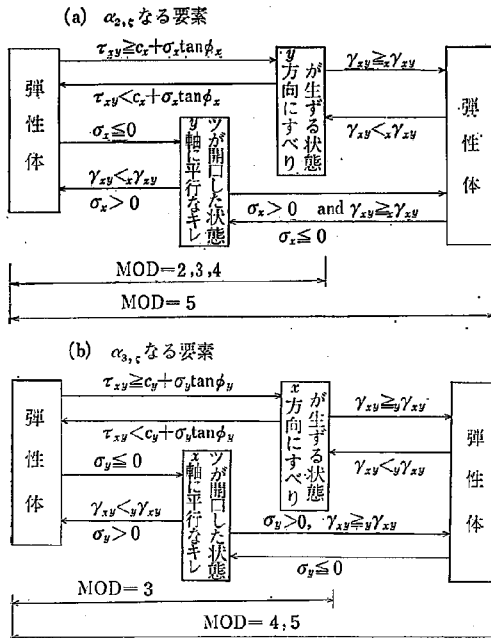
この方法は直観的にも図-3に示したモデルパターンとよく対応し、岩盤の特性をよく表現し得る方法であるが、実際に有限要素法を適用する上で、次の点で難点がある。

- (i) 図-4 (a)に示すように要素を分割すると、力の作用点近くの応力変化の著しいところでは計算精度を上げるために細かな要素をとる必要があるが、キレツを x 、 y 軸に平行にするために、矩形要素をとる必要があり、このため応力変化の少ないところまで細かに要素をとることになり、節点数が多くなる。

- (ii) 更に図-4 (b)に示すように、一つの要素を岩片を表わすものと、 x 軸、 y 軸に平行なキレツを表わすものとに分割するために節点数が著しく増加する。
 (iii) その上 $\alpha_{2,g}$ 、 $\alpha_{3,g}$ なる要素は弾塑性体として取り扱うために、繰り返し計算が必要となる。
 (iv) さらにすべりを $\alpha_{2,g}$ 、 $\alpha_{3,g}$ なる要素に集めるために、ある程度のすべりでもひずみとしては著しく大きくなり、微小変形論の適用が問題となりやすく、これを回避するためには繰り返し計算の回数が増加する。
 (v) $\alpha_{2,g}$ 、 $\alpha_{3,g}$ なる要素は偏平な形にするので、剛性マトリクス、変位変換マトリクスの形が他の要素と著しく異なり、逆マトリクスを解く上で誤差が生じやすい。

以上のような欠点を有するために、この方法は岩盤の力学的性質を表わす上では優れているが、現段階では計算時間を著しく要する反面、計算精度は思わしくない結果が得られる可能性が強く、現状では単純な問題に対し、格子間隔を荒くとして、節理の方向、節理のパターンに対応した力学的特性を定性的に検討するという程度に利用するのが限度であろう。

表-1 各種の状態の移行関係



[3] 岩盤の力学的取り扱い方法(2)

前項に述べた方法は、要素を岩片を表わす要素と、節理、キレツを表わす要素とに分け、これにより岩盤の力学的性質を表現しようとしたものであるが、もう一つの方法として、個個の要素に節理、キレツですべりが生ずる特性を付与する方法が考えられる。すなわち、鉄等の多結晶体における塑性変形は個個の結晶粒がばらばらな方向に結びつき、これらの結晶粒内での分子間のすべりにより生じ、結晶粒がばらばらな方向に向いているために等方性を示すと考えられていることを思い浮べるならば、岩盤のようにある程度そろった方向に節理面、キレツ面が存在する場合には、異方性弾塑性理論により近似的な取り扱いが可能となると考えられる。

この方法はある程度の大きさを有する岩片を分子と同等に見なすので大まかな方法であるが、岩盤の力学的性質が問題となるダムなどの巨大な構造物の基礎においてはこのような取り扱いは許されると考えられる。

この方法は前項に述べた方法の欠点のうち、両のみは共通した欠点として残るが、他はすべて解決するので、かなり複雑な問題も節点間隔を細かくしても計算し得る利点を持っているが、計算過程において $x=\text{const.}$ の面での y 方向のすべりによる変位と、 $y=\text{const.}$ の面に

おける x 方向のすべりによる変位とが、いずれもせん断ひずみ γ_{xy} として取り扱われるので、両者の分離が困難であるという欠点をもっている。したがって図-3(b)の $\text{MOD}=2$ などのパターンは取り扱いが困難であり、このため前項に述べた方法により各モデルパターンの特性および節理、キレツの方向による特性の差を明らかにし、本項に述べる方法との対比を行ない、それにもとづいて実際の問題に対しては本項に述べる方法を適用すべきであると考えられる。

前項、本項とも直交異方性弾塑性を示す要素を用いるが、これらについてはいずれも不連続面によるすべりを考えているので、摩擦説にもとづいた降伏条件を用いた解法を用いる必要がある。そこで次節に摩擦説にもとづいた降伏条件を用いた場合の解法について述べる。

10. 体積変化をともなう直交異方性弾塑性体の剛性マトリクス(2)

—降伏条件が摩擦説にもとづく場合—

4節において岩盤等降伏条件が摩擦説にもとづくと考えられる場合には、降伏条件式は(35)式により表わされることを述べた。

岩盤の場合に $x=\text{const.}$ あるいは $y=\text{const.}$, $z=\text{const.}$ の面におけるすべりとこれらの面に直交する方向の塑性的な体積変化を考える必要がある。これらの面における塑性的な形の変化によるひずみ硬化は異なるはずであるから、ひずみ硬化関数はそれぞれの面により分けて考える必要がある。また、岩盤のように三つの直交する面における塑性的な変形を摩擦論的に考える場合には、偏差直応力による塑性的な変形は考えなくてもよいから、

$$a_{11}=a_{22}=a_{33}=a_{12}=a_{21}=a_{23}=a_{32}=a_{13}=a_{31}=0$$

とする。

まず $x=\text{const.}$ の面におけるひずみ硬化について考察してみる。

この面での体積変化は明らかに

$$d \varepsilon_B^p = a_1 \sigma_x d\lambda$$

であり、この面での形の塑性的な変化による等値塑性ひずみの増分は

$$(d \varepsilon_B^p)^2 = \{ (a_{33} \sigma_x)^2 + (a_{66} \tau_{xy})^2 \} (d\lambda)^2$$

であり、これによるひずみ硬化関数としては

$$\text{体積変化に対して } H_1(\int d \varepsilon_B^p)$$

$$\text{形の変化に対して } H_2(\int d \varepsilon_S^p)$$

が考えられてくる。これと同様なひずみ硬化関数は $y=\text{const.}$, $z=\text{const.}$ の面にも考えられてくるから、一括して書くと、

$x = \text{const.}$ の面において

体積変化によるひずみ硬化関数として

$${}_x H_1(f dx \bar{\epsilon}_B^p)$$

形の変化によるひずみ硬化関数として

$${}_x H_2(f dx \bar{\epsilon}_S^p)$$

$y = \text{const.}$ の面において

体積変化によるひずみ硬化関数として

$${}_y H_1(f dy \bar{\epsilon}_B^p)$$

形の変化によるひずみ硬化関数として

$${}_y H_2(f dy \bar{\epsilon}_S^p)$$

$z = \text{const.}$ の面において

体積変化によるひずみ硬化関数として

$${}_z H_1(f dz \bar{\epsilon}_B^p)$$

形の変化によるひずみ硬化関数として

$${}_z H_2(f dz \bar{\epsilon}_S^p)$$

となる。ただし

$$dx \bar{\epsilon}_B^p = a_1 \sigma_x d\lambda$$

$$dy \bar{\epsilon}_B^p = a_2 \sigma_y d\lambda$$

$$dz \bar{\epsilon}_B^p = a_3 \sigma_z d\lambda$$

$$(dx \bar{\epsilon}_S^p)^2 = \{ (a_{55} \tau_{xx})^2 + (a_{66} \tau_{xy})^2 \} (d\lambda)^2$$

$$(dy \bar{\epsilon}_S^p)^2 = \{ (a_{66} \tau_{xy})^2 + (a_{44} \tau_{yz})^2 \} (d\lambda)^2$$

$$(dz \bar{\epsilon}_S^p)^2 = \{ (a_{44} \tau_{yz})^2 + (a_{55} \tau_{zx})^2 \} (d\lambda)^2$$

.....(73)

とする。これらのひずみ硬化を考えた場合に降伏条件式は

$$\begin{aligned} f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}, {}_x H_1(f dx \bar{\epsilon}_B^p), \\ {}_x H_2(f dx \bar{\epsilon}_S^p), {}_y H_1(f dy \bar{\epsilon}_B^p), {}_y H_2(f dy \bar{\epsilon}_S^p), \\ {}_z H_1(f dz \bar{\epsilon}_B^p), {}_z H_2(f dz \bar{\epsilon}_S^p)) = 0 \dots (74) \end{aligned}$$

と表わされる。(74)式にて降伏条件が表わされる場合の解法を検討しよう。塑性領域では(74)式を満足しながら応力の増分は現われるから、

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} d\sigma_x + \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} d\sigma_y + \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} d\sigma_z \\ + \frac{\partial f}{\partial \tau_{yz}} d\tau_{yz} + \frac{\partial f}{\partial \tau_{zx}} d\tau_{zx} + \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} d\tau_{xy} \\ + \left[\frac{\partial f}{\partial {}_x H_1} \cdot {}_x H_1' \cdot a_1 \sigma_x + \frac{\partial f}{\partial {}_y H_1} \cdot {}_y H_1' \cdot a_2 \sigma_y \right. \\ \left. + \frac{\partial f}{\partial {}_z H_1} \cdot {}_z H_1' \cdot a_3 \sigma_z \right. \\ + \frac{\partial f}{\partial {}_x H_2} \cdot {}_x H_2' \cdot \sqrt{(a_{55} \tau_{xx})^2 + (a_{66} \tau_{xy})^2} \\ + \frac{\partial f}{\partial {}_y H_2} \cdot {}_y H_2' \cdot \sqrt{(a_{66} \tau_{xy})^2 + (a_{44} \tau_{yz})^2} \\ \left. + \frac{\partial f}{\partial {}_z H_2} \cdot {}_z H_2' \cdot \sqrt{(a_{44} \tau_{yz})^2 + (a_{55} \tau_{zx})^2} \right] d\lambda \\ = 0 \end{aligned}$$

$$d\sigma_x = C_{11}' d\epsilon_x + C_{12}' d\epsilon_y + C_{13}' d\epsilon_z$$

$$= C_{11}' d\epsilon_x + C_{12}' d\epsilon_y + C_{13}' d\epsilon_z$$

$$- \frac{1}{3} (C_{11}' + C_{12}' + C_{13}') (a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) d\lambda$$

であるから、いま

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} C_{11}' + \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} C_{12}' + \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} C_{13}' \\ Q_2 &= \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} C_{12}' + \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} C_{22}' + \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} C_{23}' \\ Q_3 &= \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} C_{13}' + \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} C_{23}' + \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} C_{33}' \\ Q_4 &= 2 \frac{\partial f}{\partial \tau_{yz}} C_{44}' \\ Q_5 &= 2 \frac{\partial f}{\partial \tau_{zx}} C_{55}' \\ Q_6 &= 2 \frac{\partial f}{\partial \tau_{xy}} C_{66}' \end{aligned} \right\} \dots (75)$$

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{3} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma_x} (C_{11}' + C_{12}' + C_{13}') \right. \\ &\quad + \frac{\partial f}{\partial \sigma_y} (C_{12}' + C_{22}' + C_{23}') \\ &\quad + \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} (C_{13}' + C_{23}' + C_{33}') \left. \right\} \times (a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) \\ &\quad + Q_4 a_{44} \tau_{yz} + Q_5 a_{55} \tau_{zx} + Q_6 a_{66} \tau_{xy} \\ &\quad - \frac{\partial f}{\partial {}_x H_1} \cdot {}_x H_1' \cdot a_1 \sigma_x - \frac{\partial f}{\partial {}_y H_1} \cdot {}_y H_1' \cdot a_2 \sigma_y \\ &\quad - \frac{\partial f}{\partial {}_z H_1} \cdot {}_z H_1' \cdot a_3 \sigma_z \\ &\quad - \frac{\partial f}{\partial {}_x H_2} \cdot {}_x H_2' \cdot \sqrt{(a_{55} \tau_{xx})^2 + (a_{66} \tau_{xy})^2} \\ &\quad - \frac{\partial f}{\partial {}_y H_2} \cdot {}_y H_2' \cdot \sqrt{(a_{66} \tau_{xy})^2 + (a_{44} \tau_{yz})^2} \\ &\quad - \frac{\partial f}{\partial {}_z H_2} \cdot {}_z H_2' \cdot \sqrt{(a_{44} \tau_{yz})^2 + (a_{55} \tau_{zx})^2} \end{aligned}$$

.....(76)

とおくと

$$\begin{aligned} Q_1 d\epsilon_x + Q_2 d\epsilon_y + Q_3 d\epsilon_z + Q_4 d\epsilon_{yz} \\ + Q_5 d\epsilon_{zx} + Q_6 d\epsilon_{xy} - S d\lambda = 0 \\ \therefore d\lambda = \frac{1}{S} (Q_1 d\epsilon_x + Q_2 d\epsilon_y + Q_3 d\epsilon_z + Q_4 d\epsilon_{yz} \\ + Q_5 d\epsilon_{zx} + Q_6 d\epsilon_{xy}) \dots (77) \end{aligned}$$

となる。いま

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{1}{3S} (C_{11}' + C_{12}' + C_{13}') (a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) \\ R_2 &= \frac{1}{3S} (C_{12}' + C_{22}' + C_{23}') (a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) \\ R_3 &= \frac{1}{3S} (C_{13}' + C_{23}' + C_{33}') (a_1 \sigma_x + a_2 \sigma_y + a_3 \sigma_z) \\ R_4 &= \frac{2}{S} C_{44}' a_{44} \tau_{yz} \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} R_5 &= \frac{2}{S} C_{55}' a_{55} \tau_{xx} \\ R_6 &= \frac{2}{S} C_{55}' a_{55} \tau_{xy} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (78)$$

とすれば

$$\begin{aligned} d\sigma_x &= C_{11}' d\epsilon_x + C_{12}' d\epsilon_y + C_{13}' d\epsilon_z \\ &\quad - R_1(Q_1 d\epsilon_x + Q_2 d\epsilon_y + Q_3 d\epsilon_z) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\quad + Q_4 d\epsilon_{yz} + Q_5 d\epsilon_{zx} + Q_6 d\epsilon_{xy}) \\ &= (C_{11}' - R_1 Q_1) d\epsilon_x + (C_{12}' - R_1 Q_2) d\epsilon_y \\ &\quad + (C_{13}' - R_1 Q_3) d\epsilon_z \\ &\quad - \frac{1}{2} R_1 Q_4 d\gamma_{yz} - \frac{1}{2} R_1 Q_5 d\gamma_{zx} - \frac{1}{2} R_1 Q_6 d\gamma_{xy} \end{aligned}$$

となるから

$$\begin{pmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{yz} \\ d\tau_{zx} \\ d\tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}' - R_1 Q_1 & C_{12}' - R_1 Q_2 & C_{13}' - R_1 Q_3 & -\frac{1}{2} R_1 Q_4 & -\frac{1}{2} R_1 Q_5 & -\frac{1}{2} R_1 Q_6 \\ C_{12}' - R_2 Q_1 & C_{22}' - R_2 Q_2 & C_{23}' - R_2 Q_3 & -\frac{1}{2} R_2 Q_4 & -\frac{1}{2} R_2 Q_5 & -\frac{1}{2} R_2 Q_6 \\ C_{13}' - R_3 Q_1 & C_{23}' - R_3 Q_2 & C_{33}' - R_3 Q_3 & -\frac{1}{2} R_3 Q_4 & -\frac{1}{2} R_3 Q_5 & -\frac{1}{2} R_3 Q_6 \\ -R_4 Q_1 & -R_4 Q_2 & -R_4 Q_3 & C_{44}' - \frac{R_4 Q_4}{2} & -\frac{1}{2} R_4 Q_5 & -\frac{1}{2} R_4 Q_6 \\ -R_5 Q_1 & -R_5 Q_2 & -R_5 Q_3 & -\frac{1}{2} R_5 Q_4 & C_{55}' - \frac{R_5 Q_5}{2} & -\frac{1}{2} R_5 Q_6 \\ -R_6 Q_1 & -R_6 Q_2 & -R_6 Q_3 & -\frac{1}{2} R_6 Q_4 & -\frac{1}{2} R_6 Q_5 & C_{66}' - \frac{R_6 Q_6}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\epsilon_z \\ d\gamma_{yz} \\ d\gamma_{zx} \\ d\gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (79)$$

が得られる。これを (36) 式に対応するものとして有限要素法に適用すれば計算し得る。

11. 岩盤内の節理，キレツを直交異方性弾塑性体として取り扱う方法による解法

9 節にも述べたように，この方法は各要素を $a_1, \zeta, a_2, \zeta, a_3, \zeta, a_4, \zeta$ なる四つの要素に分け， a_1, ζ は岩片を表わし， a_2, ζ は y 軸に平行な節理，キレツを表わし， a_3, ζ は x 軸に平行な節理，キレツを表わし， a_4, ζ は節理，キレツの交点を示すものとして解析する方法である。このため， a_1, ζ なる要素は弾性体として取り扱えばよいが， $a_2, \zeta, a_3, \zeta, a_4, \zeta$ なる要素は直交異方性弾塑性体として取り扱う必要が生じてくる。

以下，これらの要素の取り扱い方法について検討を加えることにする。

[1] a_2, ζ なる要素の取り扱い方法

a_2, ζ なる要素については，表-1からも明らかなように， y 方向へのすべりと， y 軸に平行したキレツが開く場合について検討すればよい。

(i) y 方向へのすべりが生ずる場合，

この場合には

$$\begin{aligned} a_{44} &= a_{55} = 0, \quad a_1 = a_2 = a_3 = 0, \quad a_{66} = 1 \\ xH_1(f d x \bar{\epsilon}_B^p) &= yH_1(f d y \bar{\epsilon}_B^p) = yH_2(f d y \bar{\epsilon}_S^p) \\ &= xH_1(f d x \bar{\epsilon}_B^p) = xH_2(f d x \bar{\epsilon}_S^p) = 0 \end{aligned}$$

なお， y 軸に平行な節理，キレツでの粘着力を C_x ，内部摩擦係数を $\tan \phi_x$ とすれば，降伏条件は

$$f = \tau_{xy}^2 - (\sigma_x \tan \phi_x + C_x)^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (80)$$

にて表わされる。また，ひずみ硬化については，7 節に述べたように 5 通りの考え方があるが，おのおのについて

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad f &= \tau_{xy}^2 - [\sigma_x \tan \phi_x + xH_2(f d x \bar{\epsilon}_S^p)]^2 = 0 \\ &\quad xH_2(0) = C_x \\ \text{(ii)} \quad f &= \tau_{xy}^2 - [\sigma_x + xH_2(f d x \bar{\epsilon}_S^p) + C_x]^2 = 0 \\ &\quad xH_2(0) = \tan \phi_x \\ \text{(iii)} \quad f &= \tau_{xy}^2 - [(\sigma_x + C_x') + xH_2(f d x \bar{\epsilon}_S^p)]^2 = 0 \\ &\quad xH_2(0) = \tan \phi_x \\ &\quad C_x' = C_x / \tan \phi_x \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (81)$$

なお，(ii) は (i) と一致し，(vi) は (iii) と一致する。

これらの降伏条件のうち，いずれかをとり， xH_2 を適当に仮定すれば，(79) 式より解が求められる。

(2) a_2, ζ にて表わされる節理，キレツが開く場合
この場合には σ_x も τ_{xy} も存在しないから，降伏条件式としては

$$f = \tau_{xy}^2 + \sigma_x^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (82)$$

となる。また係数は

$$a_{55} = 1, \quad a_1 = 1, \quad a_{44} = a_{33} = a_2 = a_3 = 0$$

とする。

このような変形においてはひずみ硬化は考えられないし，以後のひずみ硬化もこの状態にはいった前と後では現象的にも連続性はなくなるので，この状態にはいった時点で $xH_1(f d x \bar{\epsilon}_B^p)$ ， $xH_2(f d x \bar{\epsilon}_S^p)$ と $f d x \bar{\epsilon}_B^p$ ， $f d x \bar{\epsilon}_S^p$ を 0 とし，この状態から別の状態にはいった時点から， $xH_1(f d x \bar{\epsilon}_B^p)$ ， $xH_2(f d x \bar{\epsilon}_S^p)$ ， $f d x \bar{\epsilon}_B^p$ ， $f d x \bar{\epsilon}_S^p$ ，

を考えていく必要がある。

〔2〕 α_3, ξ なる要素の取り扱い方法

α_3, ξ なる要素については、表-1からも明らかなように、 x 方向へのすべりと、 x 軸に平行したキレツが開く場合について検討すればよい。

(1) x 方向へのすべりが生ずる場合

この場合にも前項の(1)の場合と同様に

$$a_{44}=a_{55}=0, \quad a_{11}=a_{22}=a_{33}=0, \quad a_{55}=1$$

とし、

$$\begin{aligned} xH_1(f d x \bar{e}_B^p) &= xH_2(f d x \bar{e}_S^p) = yH_1(f d y \bar{e}_B^p) \\ &= xH_1(f d x \bar{e}_B^p) = xH_2(f d x \bar{e}_S^p) = 0 \end{aligned}$$

とする。なお、 x 軸に平行な節理キレツでの粘着力を C_y 、内部摩擦係数を $\tan \phi_y$ とすれば、ひずみ硬化がない場合の降伏条件は

$$f = \tau_{xy}^2 - (\sigma_y \tan \phi_y + C_y)^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (83)$$

にて表わされる。なお、ひずみ硬化を考えるとときは(81)式に類似した3通りの降伏条件式を考えることができる。すなわち、

$$(i) \quad f = \tau_{xy}^2 - [\sigma_y \tan \phi_y + yH_2(f d y \bar{e}_S^p)]^2 = 0$$

$$yH_2(0) = C_y$$

$$(ii) \quad f = \tau_{xy}^2 - [\sigma_y \cdot yH_2(f d y \bar{e}_S^p) + C_y]^2 = 0$$

$$yH_2(0) = \tan \phi_y$$

$$(iii) \quad f = \tau_{xy}^2 - [(\sigma_y + C_y') \cdot yH_2(f d y \bar{e}_S^p)]^2 = 0$$

$$yH_2(0) = \tan \phi_y$$

$$C_y' = C_y / \tan \phi_y$$

.....(84)

(2) α_3, ξ にて表わされる節理、キレツが開く場合
この場合には σ_y も τ_{xy} も存在しないから、降伏条件式としては

$$f = \tau_{xy}^2 + \sigma_y^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (85)$$

となる。また係数は

$$a_{55}=1, \quad a_2=1, \quad a_{44}=a_{55}=a_1=a_3=0$$

とする。ひずみ硬化については前項(2)に示したのと同様である。

〔3〕 α_4, ξ なる要素の取り扱い方法

α_4, ξ なる要素については、本節〔1〕項、〔2〕項に述べた取り扱いの他、 x 方向のすべりと y 方向のすべりが同時に生ずる場合と、 x 軸に平行な節理、キレツと y 軸に平行な節理、キレツが同時に開口する場合との二つの取り扱いが必要となる。

(1) x 方向と y 方向のすべりが同時に生ずる場合
この場合にも

$$a_{44}=a_{55}=0, \quad a_{11}=a_{22}=a_{33}=0, \quad a_{55}=1$$

とし、ひずみ硬化がない場合の降伏条件は

$$\begin{aligned} f &= \tau_{xy}^2 - (\sigma_x \tan \phi_x + C_x)^2 \\ &\quad + [\tau_{xy}^2 - (\sigma_y \tan \phi_y + C_y)^2] = 0 \quad \dots\dots\dots (86) \end{aligned}$$

にて表わされるが、ひずみ硬化を考えるとときは、(81)、

(83) 式と同様に3通りの降伏条件式を考えることができる。すなわち、

$$(i) \quad f = [\tau_{xy}^2 - \{\sigma_x \tan \phi_x + xH_2(f d x \bar{e}_S^p)\}^2]^2 + [\tau_{xy}^2 - \{\sigma_y \tan \phi_y + yH_2(f d y \bar{e}_S^p)\}^2]^2 = 0$$

$$\text{ただし、} xH_2(0) = C_x, \quad yH_2(0) = C_y$$

$$(ii) \quad f = [\tau_{xy}^2 - \{\sigma_x \cdot xH_2(f d x \bar{e}_S^p) + C_x\}^2]^2 + [\tau_{xy}^2 - \{\sigma_y \cdot yH_2(f d y \bar{e}_S^p) + C_y\}^2]^2 = 0$$

$$\text{ただし、} xH_2(0) = \tan \phi_x, \quad yH_2(0) = \tan \phi_y$$

$$(iii) \quad f = [\tau_{xy}^2 - \{(\sigma_x + C_x') \cdot xH_2(f d x \bar{e}_S^p)\}^2]^2 + [\tau_{xy}^2 - \{(\sigma_y + C_y') \cdot yH_2(f d y \bar{e}_S^p)\}^2]^2 = 0$$

$$\text{ただし、} xH_2(0) = \tan \phi_x, \quad yH_2(0) = \tan \phi_y,$$

$$C_x' = C_x / \tan \phi_x, \quad C_y' = C_y / \tan \phi_y$$

.....(87)

(2) x 軸に平行な節理、キレツと y 軸に平行な節理、キレツが同時に開口する場合、

この場合には $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ともに存在しないから、降伏条件式としては

$$f = \tau_{xy}^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (88)$$

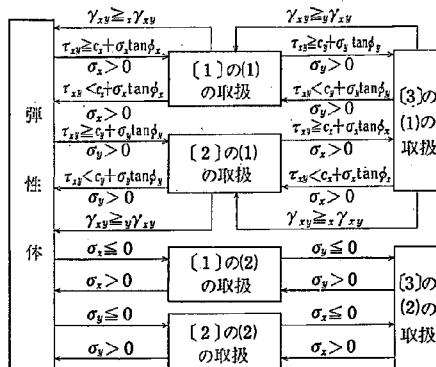
となる。また、係数は

$$a_{55}=a_1=a_2=1, \quad a_{44}=a_{55}=a_3=0$$

とする。ひずみ硬化については〔1〕の(2)に述べたのと同様である。

以上、 α_4, ξ なる要素は本節〔1〕の(1)、(2)、〔2〕の(1)、(2)、〔3〕の(1)、(2)に述べた状態が生ずるが、各状態の移行関係を表に示せば表-2のごとくである。

表-2 α_4, ξ なる要素の各種の状態の移行関係



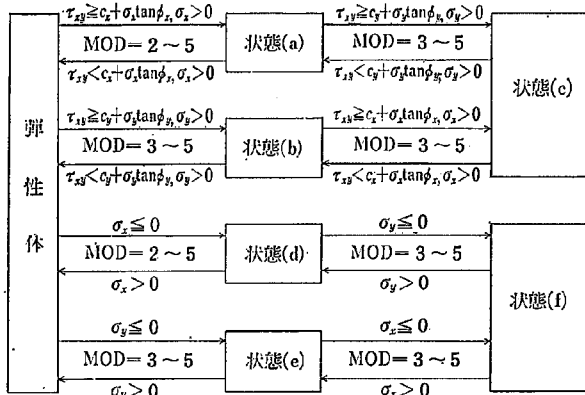
12. 岩盤全体を直交異方性弾塑性体として取り扱う方法による解法

この方法による解法は、前節に述べた各種の取り扱いを組み合わせることにより、計算し得る。それぞれの場合の係数のとり方、降伏条件式のとり方を表示すれば、表-3のごとくであり、各種のモデルパターンとそれぞ

表-3 係 数 お よ び 降 伏 条 件

状態	係 数	降 伏 条 件			
		ひずみ硬化がない場合	Cのみひずみ硬化する場合	ϕ のみひずみ硬化する場合	Cと $\tan \phi$ とが一定の比でひずみ硬化する場合
(a)	$a_{66}=1$ $a_{44}=a_{55}=0$ $a_1=a_2=a_3=0$	$\tau_{xy}^2 - (\sigma_x \tan \phi_x + C_x)^2 = 0$	$\tau_{xy}^2 - [\sigma_x \tan \phi_x + x H_2(\int dx \bar{\epsilon}_S^p)]^2 = 0$ $x H_2(0) = C_x$	$\tau_{xy}^2 - [\sigma_x \cdot x H_2(\int dx \bar{\epsilon}_S^p) + C_x]^2 = 0$ $x H_2(0) = \tan \phi_x$	$\tau_{xy}^2 - (\sigma_x + C_x')^2 [x H_2(\int dx \bar{\epsilon}_S^p)]^2 = 0$ $x H_2(0) = \tan \phi_x$ $C_x' = C_x / \tan \phi_x$
(b)	$a_{66}=1$ $a_{44}=a_{55}=0$ $a_1=a_2=a_3=0$	$\tau_{xy}^2 - (\sigma_y \tan \phi_y + C_y)^2 = 0$	$\tau_{xy}^2 - [\sigma_y \tan \phi_y + y H_2(\int dy \bar{\epsilon}_S^p)]^2 = 0$ $y H_2(0) = C_y$	$\tau_{xy}^2 - [\sigma_y \cdot y H_2(\int dy \bar{\epsilon}_S^p) + C_y]^2 = 0$ $y H_2(0) = \tan \phi_y$	$\tau_{xy}^2 - (\sigma_y + C_y')^2 [y H_2(\int dy \bar{\epsilon}_S^p)]^2 = 0$ $y H_2(0) = \tan \phi_y$ $C_y' = C_y / \tan \phi_y$
(c)	$a_{66}=1$ $a_{44}=a_{55}=0$ $a_1=a_2=a_3=0$	$\{\tau_{xy}^2 - (\sigma_x \tan \phi_x + C_x)^2\}^2$ $+ \{\tau_{xy}^2 - (\sigma_y \tan \phi_y + C_y)^2\}^2 = 0$	$\{\tau_{xy}^2 - [\sigma_x \tan \phi_x + x H_2(\int dx \bar{\epsilon}_S^p)]^2\}^2$ $+ [\tau_{xy}^2 - \{\sigma_y \tan \phi_y + y H_2(\int dy \bar{\epsilon}_S^p)\}^2]^2 = 0$ $x H_2(0) = C_x$ $y H_2(0) = C_y$	$\{\tau_{xy}^2 - [\sigma_x \cdot x H_2(\int dx \bar{\epsilon}_S^p) + C_x]^2 + [\tau_{xy}^2 - \{\sigma_y \cdot y H_2(\int dy \bar{\epsilon}_S^p) + C_y\}^2]^2 = 0$ $x H_2(0) = \tan \phi_x$ $y H_2(0) = \tan \phi_y$	$\{\tau_{xy}^2 - (\sigma_x + C_x')^2 [x H_2(\int dx \bar{\epsilon}_S^p)]^2\}^2$ $+ [\tau_{xy}^2 - (\sigma_y + C_y')^2 \times \{y H_2(\int dy \bar{\epsilon}_S^p)\}^2]^2 = 0$ $x H_2(0) = \tan \phi_x$ $y H_2(0) = \tan \phi_y$ $C_x' = C_x / \tan \phi_x$ $C_y' = C_y / \tan \phi_y$
(d)	$a_{66}=1, a_1=1$ $a_{44}=a_{55}=a_2=a_3=0$	$\tau_{xy}^2 + \sigma_x^2 = 0$			
(e)	$a_{66}=1, a_2=1$ $a_{44}=a_{55}=a_1=a_3=0$	$\tau_{xy}^2 + \sigma_y^2 = 0$			
(f)	$a_{66}=1, a_1=a_2=1$ $a_{44}=a_{55}=a_3=0$	$\tau_{xy}^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 0$			

表-4 各状態の移行関係



れの場合の移行関係を表に示せば、表-4のごとくである。

なお、MOD=4 の場合には $y=\text{const.}$ の面のキレツは互い違いになっているので、ある程度すべりを生ずると、すべりは生じなくなる。本節で述べる方法によるときは、 $x=\text{const.}$ の面で y 方向に生ずるすべりも、 $y=\text{const.}$ の面で x 方向に生ずるすべりも、せん断ひずみ γ_{xy} として表わされるので、両者を分離し得ない。このため、前節に述べた方法のように、キレツを表す要素のせん断ひずみがある値に達するとすべりが停止するとすることはできないので、この面でのすべりによるひずみ硬化が、すべりにより急激に増加するようにすればよい。すなわち

$$\nu H_2(f d_y \bar{\epsilon}_S^p) = a_y (f d_y \bar{\epsilon}_S^p)^n + k_y \quad \dots\dots\dots (89)$$

として、 n を大きな正数にとればよい。

同様に MOD=5 の場合には、 $y=\text{const.}$ の面のキレツも、 $x=\text{const.}$ の面のキレツも互い違いになっているので、

$$\left. \begin{aligned} \nu H_2(f d_y \bar{\epsilon}_S^p) &= a_y (f d_y \bar{\epsilon}_S^p)^n + k_y \\ x H_2(f d_x \bar{\epsilon}_S^p) &= a_x (f d_x \bar{\epsilon}_S^p)^m + k_x \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (90)$$

として、 n, m を大きな正数にとればよい。

13. あとがき

以上、体積変化をとまなう直交異方性弾塑性体について、新しい理論を展開し、これにもとづいた有限要素法による解法を述べ、これらを体積変化をとまなう等方性体、直交異方性体、岩盤等への適用方法について述べてきた。

現在、これらの解法に対する電子計算機によるプログラムを作製中であり、これらのプログラムが完成した後には、これらの計算結果についても報告したいと考えている。

最後に、この研究を進めるに当って、土木研究所長福岡正巳氏、ダム部長伊東茂富氏、東京大学教授岡本舜三氏より、全般にわたり種種御教授をいただき、また有限変位の問題については東北大学教授佐武正雄氏より御教授をいただいた。これらの諸氏に深く感謝する次第である。

参考文献

1. R. Hill: "The Mathematical Theory of Plasticity"
2. D. C. Drucker and W. Prager: "Soil mechanics and plastic analysis or Limit Design" Quart. Appl. Math. 10
3. 伊東茂富:「組合せ応力下におけるコンクリートの強度について」土木研究所報告 Vol. 100, 1959 Jan.
4. 星 塾 和:「土の力学における塑性の基本理論と三軸試験への適用」土木学会論文集 No. 21
5. A. E. H. Love: "A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity" p. 99
6. R. Hill: "The Mathematical Theory of Plasticity" p. 320
7. A. Nadai: "Theory of Flow and Fracture of Solid Bodies" p. 231
8. R. Hill: "The Mathematical Theory of plasticity" p. 50
9. A. E. H. Love: "A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity" p. 99
10. 吉川五生, 遠山武羅夫:「魚梁瀬ロックフィルダム」発電水力 No. 76
上野 男, 楠本 明:「長野ロックフィルダム」発電水力 No. 93
11. 「岩盤力学」土木学会 p. 77
12. 林 正夫:「ひびわれ性基盤の応力伝播の機構に関する考察」電研技術報告 土木 63007(1963)

二次元傾斜荷重に対する 地盤支持力の計算図表

(昭和44年2月)

駒 田 敬 一*

Bearing Capacity Calculation Diagrams for Shallow Foundations with Inclined Load in the Two Dimensional Ground

(February 1969)

by Keiiti Komada

Synopsis:

The bearing capacity of surface foundations under inclined loads in the two dimensional weightless soil is calculated and the bearing capacity factors in term of q/c are shown in figures for practice.

The resultant bearing capacity is obtained from the sum of the following analytical solution based on Kötter's equation and the minimum passive earth resistance due to the soil weight, derived from Sokolovski's numerical solution.

要 旨

二次元領域にある地盤の表面に傾斜荷重が作用する場合の地盤支持力を塑性論にもとづいて計算し、上載荷重と地盤の粘着力をパラメータとして支持力係数を実用に便ように図表化した。

支持力式の誘導は地盤の自重を無視した塑性解と、地盤の自重と内部摩擦角とによって生ずる付加支持力の和として求めた。前者は Kötter の方程式の解析解から、後者は Sokolovski の数値解を利用した。

キーワード (浅い基礎, 傾斜荷重, 地盤支持力)

目	次
1. まえがき.....(1)	[2] 地盤の自重による付加支持力.....(3)
2. 傾斜荷重に対する極限支持力.....(2)	[3] 合算支持力.....(4)
[1] 地盤の自重を無視した場合の 極限支持力.....(2)	3. あとがき.....(5)
	表.....(8)

1. まえがき

構造物の基礎底面から地盤に伝わる荷重は、地震時には偏心と傾斜を伴う。橋台や擁壁などでは、常時においても偏心傾斜荷重の状態になっている。このときの地盤支持力は、中心鉛直荷重に対する値より小さい。したがって地盤支持力に対する基礎の安定計算は、偏心傾斜荷重状態に対して行なうのであれば、危険側の結果を得ることになる。

偏心荷重の取り扱いに関しては、荷重の偏心量に応じて基礎幅を低減した仮想の基礎幅 (これを有効載荷幅と称する) に対する中心荷重として処理する

G. G. Meyerhof¹⁾の方法が一般に用いられている。

傾斜荷重に対する地盤支持力に関しては、

G. G. Meyerhof²⁾, Brinch Hansen³⁾, E. De Beer⁴⁾などの研究があって、それぞれに実用公式が提唱されている。わが国には、Terzaghi のすべり面と類似の仮定をして求めた岡本⁵⁾の方法および円弧すべり面法を適用して求めた立石⁶⁾の方法などがある。

本文では、支持力式の誘導にさいしては、塑性論に基づく従来の支持力式におけると同様に、地盤の自重を無視して得られる塑性解と、地盤の自重と内部摩擦角とによって生ずる付加支持力との和として、支持力を算定した。塑性解は、二次元塑性論の基礎方程式である Kötter の方程式の解析解から求め、付加支持力には Sokolovski の数値解の結果を利用した。

傾斜荷重に対する支持力計算においては、鉛直荷重に対する計算と異なって、地盤に粘着力が存在する場合に

* 前橋造橋渠係基礎研究室主任研究員、現建設地方建設局第二設計
国道工事事務所大正出張所長

は、所定の傾斜角に対する地盤の支持力は、上載荷重の大きさによって変るため、鉛直荷重に対する支持力式におけるように、一般的に粘着力項、上載荷重項および自重項（基礎傾項）の3つの項の和として計算することはできない。そこで本文では、上載荷重と地盤の粘着力の比をパラメーターとして扱い、これに対する合成支持力係数を算定し、実用に供するため図化した。これらの数値は、地盤の自重を無視するならば二次元の厳密解であり、これによっていろいろな組み合わせの上載荷重と粘着力を有する地盤における荷重傾斜と地盤支持力との関係を知ることができる。また基礎底面での滑動の問題も、荷重傾斜が増大した限界の場合の破壊問題として、地盤支持力と同じ範ちゆうの問題として取り扱うことができる。

2. 傾斜荷重に対する極限支持力

(1) 地盤の自重を無視した場合の極限支持力

地盤のせん断定数を c および ϕ 、上載荷重を q とし、基礎の根入れ部分と地盤との間に摩擦は存在しないものとする。また地盤は自重のない非圧縮性体であると仮定する。

地盤の自重がない場合、Kötter-Massau の方程式⁷⁾は次のように書かれる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \cot \phi \cdot \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{\partial S_1} + \frac{\partial \phi}{\partial S_1} &= 0 \\ \frac{1}{2} \cot \phi \cdot \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{\partial S_2} - \frac{\partial \phi}{\partial S_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで図-1に示すように、

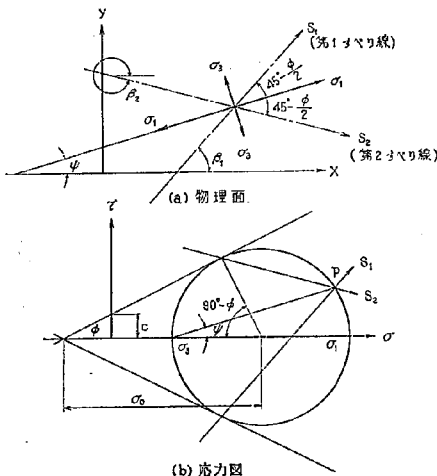


図-1

σ_0 : 塑性平衡状態にある地盤中のある一点の応力状態を示すモールの応力円⁷⁾の中心と破壊包絡線の交点との距離, $\sigma_0 = c \cdot \cot \phi + 1/2(\sigma_1 + \sigma_2)$ (t/m^2)

ϕ : 第1主応力の方向と水平面とのなす角 (ラジアン)

S_1, S_2 : 第1および第2すべり面に沿う長さ (m)

c : 粘着力 (t/m^2)

ϕ : 内部摩擦角 (度)

q : 上載荷重 (t/m^2)

傾斜荷重をうける地盤および上載荷重下の地盤がそれぞれ塑性平衡状態にあるとき、図-2に示すような2つの三角形の塑性域が形成される。

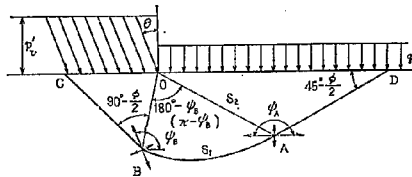


図-2

地盤材料の自重を考慮していないので、上載荷重下の三角形の塑性域 DAO および傾斜荷重下の三角形の塑性域 OBC 内の応力状態はそれぞれ等しい。したがって、おのおのの領域内の応力状態を点 A および点 B のそれぞれで代表させる。これらの点の応力状態を表わすモールの応力円の中心と破壊包絡線の交点との距離をそれぞれ σ_{0A} および σ_{0B} とする。

点 A から点 B まですべり線 S_1 に沿う積分を考える。

(1)式より

$$\frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{\partial S_1} + 2 \tan \phi \frac{\partial \phi}{\partial S_1} = 0$$

ついで、変数分離をして点 A から点 B まで積分すると、

$$\int_A^B \frac{1}{\sigma_0} d\sigma_0 = -2 \tan \phi \int_A^B \frac{\partial \phi}{\partial S_1} dS_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore \sigma_{0B} = \sigma_{0A} \cdot e^{2(\alpha - \phi_B) \tan \phi} \dots\dots\dots (3)$$

モールの応力円より明らかに

$$\sigma_{0A} = \frac{c \cdot \cot \phi + q}{1 - \sin \phi} \dots\dots\dots (4)$$

であるから(3)式と(4)式とから

$$\sigma_{0B} = \frac{c \cdot \cot \phi + q}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\alpha - \phi_B) \tan \phi} \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。

基礎底面に作用する応力は、荷重の傾斜角を θ とするとき、図-3の点 SP の座標で示される。

荷重の鉛直および水平成分をそれぞれ p_v' および p_h' とすれば、図-3から明らかのように、次の関係が得られる。

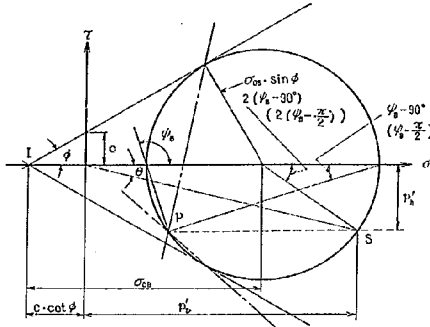


図-3

$$\begin{aligned}
 p'_d &= \sigma_B [1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\phi_B - \pi/2)] - c \cdot \cot \phi \\
 &= c \cdot \cot \phi \left[\frac{1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \right. \\
 &\quad \times e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi} - 1 \Big] \\
 &\quad + q \cdot \frac{1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi} \\
 &= c \cdot N_{ev} + q \cdot N_{qv} \dots \dots \dots (6)
 \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned}
 N_{ev} &= \cot \phi \left[\frac{1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \right. \\
 &\quad \times e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi} - 1 \Big] \\
 N_{qv} &= \frac{1 + \sin \phi \cdot \cos 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi}
 \end{aligned}$$

また

$$\begin{aligned}
 p'_h &= \sigma_B \cdot \sin \phi \cdot \sin 2(\phi_B - \pi/2) \\
 &= c \cdot \cot \phi \cdot \frac{\sin \phi \cdot \sin 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi} \\
 &\quad + q \cdot \frac{\sin \phi \cdot \sin 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi} \\
 &= c \cdot N_{eh} + q \cdot N_{qh} \dots \dots \dots (7)
 \end{aligned}$$

ここに

$$\begin{aligned}
 N_{eh} &= \cot \phi \cdot \frac{\sin \phi \cdot \sin 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi} \\
 N_{qh} &= \frac{\sin \phi \cdot \sin 2(\phi_B - \pi/2)}{1 - \sin \phi} \cdot e^{2(\pi - \phi_B) \tan \phi}
 \end{aligned}$$

基礎底面と地盤との間のせん断定数を地盤のそれと同じく c および ϕ とすると、基礎底面で滑動しないための極限の傾斜角に対する第1主応力と水平面とのなす角 ϕ_B は、モールの応力円の考察から、 $(3/4)\pi + \phi/2$ となる。したがって、(6)、(7)式の計算は、 $\pi/2 \leq \phi_B \leq (3/4)\pi + \phi/2$ について行なえばよい。

まず $c \neq 0$ のとき、(6)、(7)式を書き換えて次のとおり表す。

$$\begin{aligned}
 p'_d &= c \cdot \left[N_{ev} + \frac{q}{c} \cdot N_{qv} \right] \\
 &= c \cdot N_v \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

ここに

$$N_v = N_{ev} + \frac{q}{c} \cdot N_{qv} \dots \dots \dots (9)$$

および

$$\begin{aligned}
 p'_h &= c \cdot \left[N_{eh} + \frac{q}{c} \cdot N_{qh} \right] \\
 &= c \cdot N_h \dots \dots \dots (10)
 \end{aligned}$$

ここに

$$N_h = N_{eh} + \frac{q}{c} \cdot N_{qh} \dots \dots \dots (11)$$

 また $c=0$ の場合には

$$p'_d = q \cdot N_v \dots \dots \dots (12)$$

$$p'_h = \tan \theta \cdot p'_d \dots \dots \dots (13)$$

N_v は、 $c \neq 0$ のとき粘着力と上載荷重に関する合成支持力係数で、 q/c を変えて作成した値を図-4~8に示す。

また $c=0$ の場合には $N_v = N_{qv}$ となり、このときの N_v の値を図-9に示す。

p'_d の計算式において、 $c \neq 0$ の場合には荷重の傾斜角 θ と第1主応力の方向と水平面とのなす角 ϕ_B との関係が決まらないので、 ϕ_B を仮定し p'_h と p'_d の計算を行ない、荷重の傾斜は、

$$\tan \theta = \frac{p'_h}{p'_d} = \frac{N_h}{N_v} \dots \dots \dots (14)$$

なる逆算によって求める。図-4~8はこのような方法で作成したものである。なお図中の1点鎖線は基礎が底面で滑動する限界を示すものである。支持力係数の数値は表-1に示す。

〔2〕地盤の自重による付加支持力

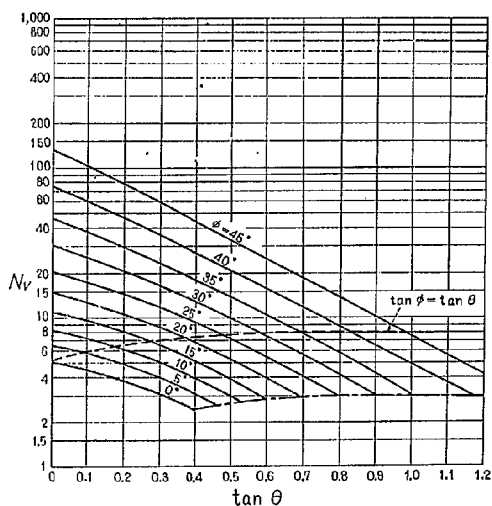
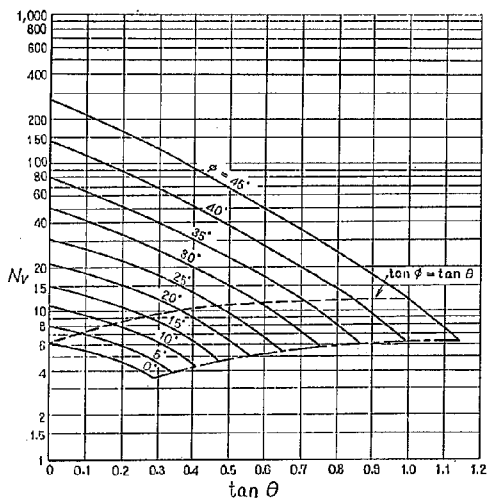
地盤の自重をも含めた二次元支持力の正解は、Kötter の方程式の数値解または図解にまたなければならない。このような方法はあまりにも非実用的であるため、一般には地盤の自重を無視した場合の塑性解と自重による付加支持力との和として、実用的に支持力を算定する。この場合付加支持力の計算には、地盤の自重を無視した場合の塑性解におけるすべり線とは無関係のすべり線を用い、最少のすべり抵抗力として付加支持力を計算するのが一般である。Terzaghi や Meyerhof も同じ考え方にしたがって、付加支持力を算定し、支持力係数 N_r を求めた。

ここでは、Sokolovski の自重のあるクサビの極限釣合い方程式から求めた文献の数表を図化し、図-4~9と組み合わせて実用的に使用することとする。

自重による鉛直付加支持力を p_v'' とすると、

$$p_v'' = \frac{1}{2} \gamma B N_r \dots \dots \dots (15)$$

$$p_h'' = \frac{1}{2} p_v'' \tan \theta \dots \dots \dots (16)$$

図-4 $N_v(c \neq 0, q=0)$ のときを求めるグラフ図-5 $N_v(q/c=1)$ のときを求めるグラフ

で表わされる。

ここに γ : 地盤の単位体積重量 (t/m^3)

B : 基礎の有効載荷幅 (m)

N_v の計算図は図-10 に示す。

〔3〕 合算支持力

同じ傾斜に対して、(8)式と(15)式とを組み合わせると極限支持力を求める。

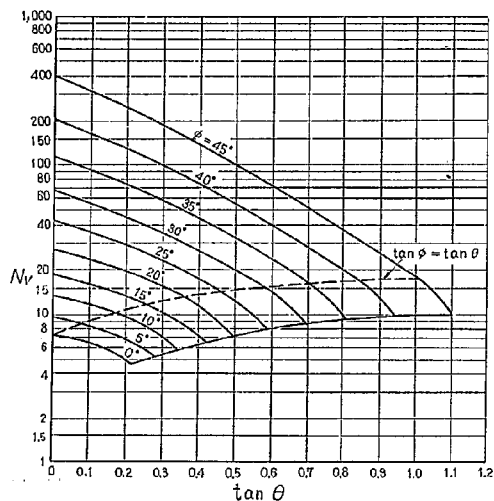
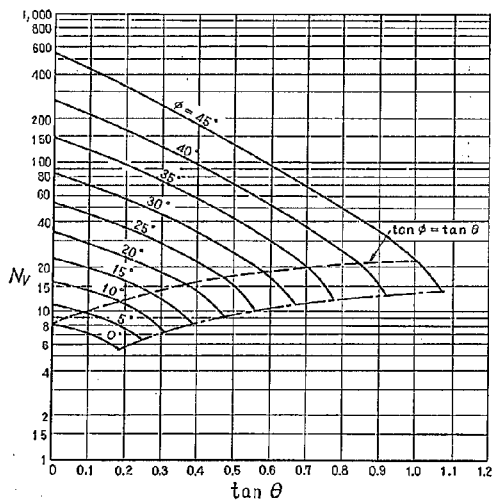
すなわち $c \neq 0$ のとき

$$q_s = q_s' + q_s''$$

$$= cN_v + \frac{1}{2} \gamma B' N_v \dots\dots\dots (17)$$

$$q_h = q_s \cdot \tan \theta \dots\dots\dots (18)$$

となる。また $c=0$ のときには、(12)式と(15)式とを組み合わせると、

図-6 $N_v(q/c=2)$ のときを求めるグラフ図-7 $N_v(q/c=3)$ のときを求めるグラフ

$$q_v = q_v' + q_v''$$

$$= qN_v + \frac{1}{2}tBN_r \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$q_h = q_v \cdot \tan \theta \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。ここに

q_v : 傾斜荷重に対する鉛直極限支持力 (t/m^2)

q_h : 上の載荷状態のときの水平力 (t/m^2)

B' : 基礎の有効載荷幅 (m) ただし、 $B' = B - 2e$

ここに B は基礎幅、 e は荷重の偏心距離

γ : 土の単位体積重量 (t/m^3)

θ : 荷重の傾斜角 (度)

3. あとがき

本文は、傾斜荷重に対する二次元地盤支持力の実用計

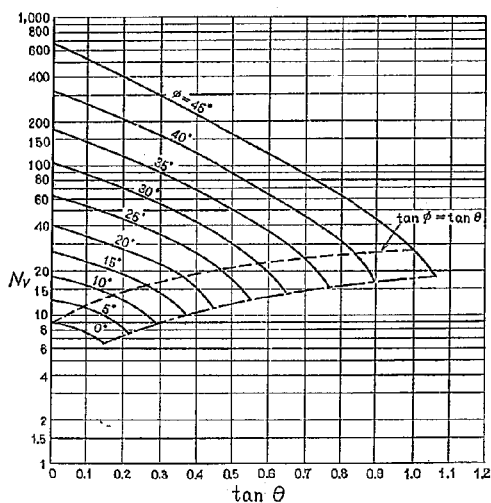


図-8 $N_v (q/c=4 \text{ のとき})$ を求めるグラフ

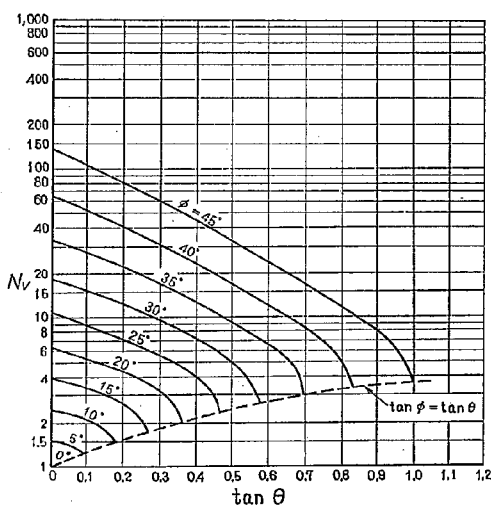
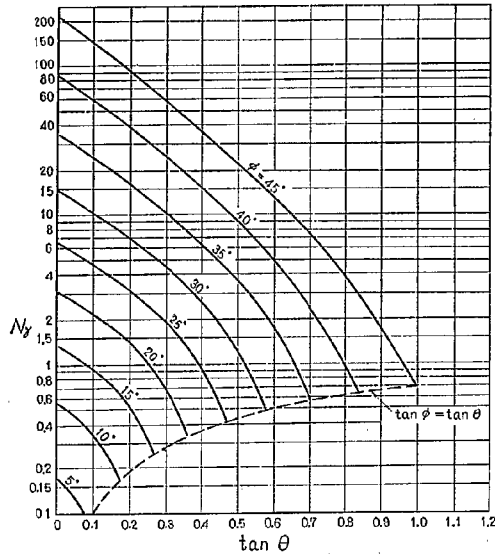


図-9 $N_v (=N_{q0}, \text{ただし } c=0 \text{ のとき})$ を求めるグラフ

算のための図表を示したものである。傾斜荷重に対する地盤支持力の計算には、理論的にも実験的にも研究すべきことが多い。たとえば、根入れ層の横抵抗の取り扱い、三次元支持力に対する形状係数の問題、あるいは、塑性解と自重による付加支持力の重ね合わせ結果が Kötter の方程式の数値解に対しどの程度の誤差を有するかの検討

などである。

なお本文の方法を、本州四国連絡橋調査の地盤支持力計算⁷⁾に適用したことを付記し、あわせて御指導いただいた土木研究所長福岡正巳氏、基礎研究室長吉田巖氏に感謝の意を表する。

図-10 N_y を求めるグラフ (Sokolovski による)

参考文献

1. G. G. Meyerhof: "The Bearing Capacity of Foundations under Eccentric and Inclined Loads" Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng. (1953)
2. 同上
3. J. Brinch Hansen: "A General Formula for Bearing Capacity" Bulletin No. 11, The Danish Geotechnical Institute (1961)
4. E. De Beer: "Grundbruchberechnungen schräg und ausmittig belasteter Flachgründungen" VDI-Z. 105 Nr. 9, Nr. 11 & Nr. 15 (1963)
5. 岡本舜三: 「地震時における土の支持力と土圧力について」土と基礎, 20 (昭32)
6. 立石哲郎ほか: 「傾斜偏心荷重を受ける帯状基礎の支持力に関する研究」選研報告, 12-1 (1962)
7. G. de Josselin de Jong: "Statics and Kinematics in the Failable Zone of a Granular Material" Waltwan, Delft (1959)
8. ソコロフスキイ原著, 星塾, 佐藤訳: 「土のような粒状体の力学」オーム社 (昭39)
9. 土木学会, 本州四国連絡橋技術調査委員会: 「本州四国連絡橋技術調査報告書」(昭42年7月)

表-1 支 持 力 係 數 表

$\phi(^{\circ})$	$\phi_B(^{\circ})$	$q/c=0$			$q/c=1$			$q/c=2$			$q/c=3$			$q/c=4$			$q/c=5$		
		N_v	N_h	$\tan \theta$	N_v	N_h	$\tan \theta$	N_v	N_h	$\tan \theta$	N_v	N_h	$\tan \theta$	N_v	N_h	$\tan \theta$	N_v	N_h	$\tan \theta$
0	90	5.142	0.000	0.000	6.142	0.000	0.000	7.142	0.000	0.000	8.142	0.000	0.000	9.142	0.000	0.000	10.142	0.000	0.000
	100	4.732	0.342	0.072	5.732	0.342	0.060	6.732	0.342	0.051	7.732	0.342	0.044	8.732	0.342	0.039	9.732	0.342	0.035
	110	4.209	0.643	0.153	5.209	0.643	0.123	6.209	0.643	0.104	7.209	0.643	0.089	8.209	0.643	0.078	9.209	0.643	0.070
	120	3.594	0.866	0.241	4.594	0.866	0.189	5.594	0.866	0.155	6.594	0.866	0.131	7.594	0.866	0.114	8.594	0.866	0.101
	130	2.919	0.985	0.337	3.919	0.985	0.251	4.919	0.985	0.201	5.919	0.985	0.167	6.919	0.985	0.142	7.919	0.985	0.124
	135	2.571	1.000	0.389	3.571	1.000	0.280	4.571	1.000	0.219	5.571	1.000	0.180	6.571	1.000	0.152	7.571	1.000	0.132
5	90	6.489	0.000	0.000	8.057	0.000	0.000	9.624	0.000	0.000	11.192	0.000	0.000	12.760	0.000	0.000	14.327	0.000	0.000
	100	5.866	0.477	0.081	7.379	0.518	0.070	8.892	0.560	0.063	10.405	0.602	0.058	11.919	0.643	0.054	13.432	0.685	0.051
	110	5.111	0.869	0.170	6.558	0.945	0.144	8.005	1.021	0.128	9.452	1.097	0.116	10.900	1.173	0.108	12.347	1.249	0.101
	120	4.265	1.135	0.266	5.638	1.234	0.219	7.011	1.334	0.190	8.348	1.433	0.171	9.757	1.532	0.157	11.130	1.632	0.147
	130	3.378	1.252	0.371	4.673	1.362	0.291	5.969	1.471	0.246	7.264	1.581	0.218	8.560	1.690	0.197	9.855	1.800	0.183
	137.5	2.718	1.238	0.455	3.956	1.346	0.340	5.194	1.456	0.280	6.432	1.563	0.243	7.670	1.671	0.218	8.905	1.779	0.200
10	90	8.375	0.000	0.000	10.816	0.000	0.000	13.288	0.000	0.000	15.759	0.000	0.000	18.231	0.000	0.000	20.702	0.000	0.000
	100	7.391	0.667	0.090	9.694	0.785	0.081	11.997	0.902	0.075	14.300	1.020	0.071	16.603	1.137	0.069	18.907	1.225	0.066
	110	6.293	1.179	0.187	8.402	1.386	0.165	10.512	1.594	0.152	12.621	1.802	0.143	14.731	2.010	0.136	16.840	2.218	0.132
	120	5.120	1.493	0.292	7.022	1.756	0.250	8.925	2.020	0.226	10.828	2.283	0.211	12.731	2.546	0.200	14.633	2.810	0.192
	130	3.946	1.597	0.405	5.642	1.878	0.333	7.338	2.160	0.294	9.034	2.441	0.270	10.730	2.723	0.254	12.426	3.004	0.242
	140	2.843	1.501	0.528	4.344	1.766	0.407	5.845	2.031	0.347	7.347	2.295	0.312	8.848	2.560	0.289	10.349	2.825	0.273
15	90	10.977	0.000	0.000	14.918	0.000	0.000	18.859	0.000	0.000	22.800	0.000	0.000	26.741	0.000	0.000	30.682	0.000	0.000
	100	9.497	0.942	0.099	13.042	1.194	0.092	16.587	1.447	0.087	20.131	1.699	0.084	23.676	1.952	0.082	27.221	2.204	0.081
	110	7.880	1.612	0.205	10.992	2.044	0.186	14.103	2.476	0.176	17.215	2.908	0.169	20.326	3.340	0.164	23.438	3.772	0.161
	120	6.236	1.978	0.317	8.907	2.508	0.282	11.577	3.038	0.262	14.248	3.568	0.250	16.919	4.098	0.242	19.590	4.629	0.236
	130	4.667	2.049	0.439	6.917	2.598	0.376	9.168	3.147	0.343	11.418	3.696	0.324	13.669	4.244	0.311	15.919	4.793	0.301
	140	3.259	1.866	0.573	5.132	2.366	0.461	7.005	2.866	0.409	8.879	3.366	0.379	10.752	3.865	0.360	12.625	4.365	0.346
20	142.5	2.940	1.788	0.608	4.727	2.267	0.479	6.515	2.746	0.421	8.303	3.225	0.388	10.090	3.740	0.367	11.878	4.183	0.352
	90	14.835	0.000	0.000	21.234	0.000	0.000	27.634	0.000	0.000	34.033	0.000	0.000	40.433	0.000	0.000	46.832	0.000	0.000
	100	12.499	1.350	0.108	18.048	1.841	0.102	23.598	2.332	0.099	29.147	2.823	0.097	34.696	3.315	0.096	40.246	3.806	0.095
	110	10.076	2.234	0.222	14.744	3.047	0.207	19.412	3.860	0.199	24.079	4.673	0.194	28.747	5.486	0.191	33.414	6.300	0.189
	120	7.732	2.651	0.343	11.546	3.616	0.313	15.361	4.580	0.298	19.175	5.545	0.289	22.989	6.510	0.283	26.803	7.475	0.279
	130	5.602	2.655	0.474	8.641	3.621	0.419	11.680	4.587	0.393	14.719	5.553	0.377	17.758	6.520	0.367	20.797	7.486	0.360
145	140	3.781	2.338	0.618	6.158	3.189	0.518	8.534	4.040	0.473	10.910	4.891	0.448	13.287	5.742	0.432	15.663	6.593	0.421
	145	3.004	2.094	0.697	5.098	2.856	0.560	7.191	3.617	0.503	9.285	4.379	0.472	11.379	5.414	0.452	13.472	5.903	0.438

表-1 つ づ き

$\phi(^{\circ})$	$\phi_B(^{\circ})$	$q/c=0$			$q/c=1$			$q/c=2$			$q/c=3$			$q/c=4$			$q/c=5$		
		N_o	N_h	$\tan \theta$	N_o	N_h	$\tan \theta$	N_o	N_h	$\tan \theta$	N_o	N_h	$\tan \theta$	N_o	N_h	$\tan \theta$	N_o	N_h	$\tan \theta$
25	90	20.721	0.000	0.000	31.383	0.000	0.000	42.045	0.000	0.000	52.707	0.000	0.000	63.370	0.000	0.000	74.032	0.000	0.000
	100	16.938	1.974	0.117	25.836	2.895	0.112	34.734	3.815	0.110	43.633	4.736	0.109	52.531	5.657	0.108	61.429	6.577	0.107
	110	13.220	3.153	0.239	20.384	4.623	0.227	27.548	6.094	0.221	34.713	7.564	0.218	41.877	9.034	0.216	49.042	10.504	0.214
	120	9.803	3.610	0.368	15.374	5.293	0.344	20.945	6.977	0.333	26.516	8.660	0.327	32.087	10.343	0.322	37.658	12.026	0.319
	130	6.852	3.488	0.509	11.047	5.115	0.463	15.242	6.742	0.442	19.438	8.368	0.431	23.633	9.995	0.423	27.828	11.622	0.418
	140	4.455	2.964	0.665	7.533	4.347	0.577	10.610	5.729	0.540	13.688	7.111	0.520	16.765	8.494	0.507	19.843	9.876	0.498
	147.5	3.033	2.415	0.796	5.448	3.540	0.650	7.863	4.666	0.593	10.277	5.792	0.564	12.692	6.918	0.545	15.106	8.044	0.533
30	90	30.140	0.000	0.000	48.541	0.000	0.000	66.943	0.000	0.000	85.344	0.000	0.000	103.745	0.000	0.000	122.147	0.000	0.000
	100	23.799	2.970	0.125	38.539	4.685	0.122	53.279	6.400	0.120	68.020	8.115	0.119	82.760	9.830	0.119	97.500	11.545	0.118
	110	17.906	4.564	0.255	29.244	7.198	0.246	40.582	9.833	0.242	51.920	12.468	0.240	63.258	15.103	0.239	74.596	17.738	0.238
	120	12.777	5.026	0.393	21.154	7.928	0.375	29.532	10.830	0.367	37.909	13.732	0.362	46.286	16.634	0.359	54.663	19.536	0.357
	130	8.581	4.672	0.545	14.535	7.370	0.507	20.489	10.068	0.491	26.443	12.765	0.483	32.397	15.463	0.477	38.351	18.160	0.474
	140	5.351	3.820	0.714	9.441	6.025	0.638	13.531	8.230	0.608	17.620	10.435	0.592	21.710	12.640	0.582	25.800	14.846	0.575
	150	3.024	2.746	0.908	5.770	4.331	0.751	8.515	5.916	0.695	11.261	7.502	0.666	14.007	9.087	0.649	16.753	10.672	0.637
35	90	46.124	0.000	0.000	79.421	0.000	0.000	112.717	0.000	0.000	146.014	0.000	0.000	179.311	0.000	0.000	212.607	0.000	0.000
	100	34.994	4.643	0.133	60.498	7.894	0.130	86.001	11.145	0.130	111.504	14.396	0.129	137.007	17.646	0.129	162.511	20.897	0.129
	110	25.250	6.834	0.271	43.931	11.618	0.264	62.611	16.403	0.262	81.292	21.188	0.261	99.972	25.973	0.260	118.653	30.758	0.259
	120	17.250	7.210	0.418	30.329	12.259	0.404	43.408	17.308	0.399	56.487	22.357	0.396	69.565	27.405	0.394	82.644	32.454	0.393
	130	11.072	6.421	0.580	19.825	10.918	0.551	28.578	15.414	0.539	37.330	19.910	0.533	46.083	24.407	0.530	54.836	28.903	0.527
	140	6.588	5.029	0.763	12.201	8.550	0.701	17.814	12.072	0.678	23.427	15.593	0.666	29.040	19.114	0.665	34.653	22.635	0.653
	150	3.545	3.463	0.977	7.027	5.889	0.838	10.509	8.314	0.791	13.991	10.739	0.768	17.473	13.164	0.753	20.955	15.598	0.744
40	90	75.314	0.000	0.000	139.511	0.000	0.000	203.707	0.000	0.000	267.904	0.000	0.000	332.100	0.000	0.000	396.297	0.000	0.000
	100	54.542	7.639	0.140	101.508	14.049	0.139	148.075	20.458	0.138	194.841	26.868	0.138	241.608	33.278	0.138	288.374	39.688	0.138
	110	37.497	10.711	0.286	69.961	19.699	0.282	102.426	28.687	0.280	134.890	37.675	0.279	167.354	46.662	0.279	199.818	55.650	0.279
	120	24.366	10.767	0.442	45.812	19.802	0.432	67.253	28.836	0.429	88.704	37.871	0.427	110.150	46.906	0.426	131.596	55.940	0.425
	130	14.850	9.135	0.615	28.310	16.800	0.593	41.771	24.465	0.586	55.231	32.131	0.582	68.692	39.796	0.579	82.152	47.461	0.578
	140	8.373	6.816	0.814	16.399	12.535	0.764	24.425	18.254	0.747	32.451	23.973	0.739	40.477	29.692	0.734	48.503	35.410	0.730
	150	4.259	4.472	1.050	8.834	8.224	0.931	13.408	11.976	0.893	17.982	15.728	0.875	22.556	19.481	0.864	27.130	23.223	0.856
45	90	133.877	0.000	0.000	268.754	0.000	0.000	403.631	0.000	0.000	538.508	0.000	0.000	673.385	0.000	0.000	808.262	0.000	0.000
	100	91.758	13.478	0.147	184.516	26.955	0.146	277.275	40.433	0.146	370.033	53.911	0.146	462.792	67.389	0.146	555.550	80.866	0.146
	110	59.600	17.860	0.300	120.200	35.733	0.297	180.800	53.599	0.296	241.400	71.465	0.296	302.000	89.331	0.296	362.601	107.198	0.296
	120	36.528	16.978	0.465	74.056	33.957	0.459	111.584	50.935	0.456	149.113	67.914	0.455	186.641	84.892	0.455	224.169	101.871	0.454
	130	20.957	13.618	0.650	42.915	27.236	0.635	64.872	40.855	0.630	86.830	54.473	0.627	108.787	68.091	0.626	130.744	81.709	0.625
	140	11.100	9.606	0.865	23.200	19.211	0.828	35.300	28.817	0.816	47.400	38.422	0.811	59.500	48.028	0.807	71.601	57.693	0.805
	150	5.290	5.953	1.126	11.579	11.916	1.029	17.869	17.874	1.000	24.158	23.832	0.987	30.448	29.790	0.978	36.737	35.748	0.973
45	157.5	2.744	3.744	1.364	6.488	7.488	1.154	10.232	11.233	1.098	13.977	14.977	1.072	17.721	18.721	1.056	21.465	22.465	1.047

二次元傾斜荷重に対する地盤支持力の計算図表

路面のすべり抵抗に関する研究(1)

— 一般路面のすべりについて —

(昭和44年2月)

市 原 薫*

Studies of Skidding Resistance on Road Surfaces (1)

— Ordinary Road Surfaces —

(February 1969)

by Kaoru Ichihara

Synopsis:

This paper reports about variation of skidding resistance coefficient between automobile tire and road surface, concerned with various kinds of pavement and running conditions, using mainly market rubber tire.

Main contents, 1st general discussion of skidding between road surface and tire. 2nd theoretical analysis between skidding resistance and vehicle movement when vehicle was braked. 3rd measuring methods for skidding resistance and details used for our measurement. 4th analysis of various skidding resistance coefficients measured in our research. 5th correlation between temperature, vehicle speed and skidding resistance. 6th minimum requirement value of skidding resistance coefficient of road surfaces. 7th countermeasure for skid on road surfaces.

要 旨

自動車タイヤと路面の間のすべり抵抗について、主として現用のタイヤゴム質のものについて、各種道路および走行条件に対するすべり摩擦係数値の変化について論じた。まず路面とタイヤの間のすべりに関する一般論を紹介し、次いで制動時におけるすべり抵抗と車両運動の関係の理論解析を行なった。またすべり抵抗の測定法について述べ、特に本研究に用いた測定機構について述べた。更に本測定で得られた各種のすべり摩擦の実測値を解析し、特にすべり摩擦係数の温度および速度に対する相関関係を見出した。最後に路面のすべり摩擦係数の基準限界値を見出し、また路面のすべり対策についても述べた。

キーワード (路面, すべり抵抗, 摩擦係数, タイヤ, 制動, 車両運動, すべり対策)

目 次

1. 序 論.....(3)	(1) タイヤ用のゴム.....(9)
[1] 路面すべりに関する研究の目的.....(3)	(2) タイヤ構造と圧力分布.....(10)
[2] 本研究の立場.....(3)	(3) トレッド模様(トレッドパターン).....(10)
2. 路面とタイヤの関係.....(4)	[3] 路面の性質.....(11)
[1] タイヤのすべり現象.....(4)	(1) 路面の種類.....(11)
(1) タイヤのすべり抵抗とすべり摩擦の関係.....(4)	(2) 骨材の性質.....(11)
(2) タイヤのすべり摩擦の定義.....(4)	(3) 結合材の性質.....(11)
(3) ゴムの摩擦機構.....(6)	3. 制動時におけるすべり抵抗と車両運動.....(11)
[2] タイヤの性質.....(9)	(1) 直線走行とすべり.....(11)

* 道路部長, 工博

(1) 縦すべり摩擦係数による制動停止距離の計算	(12)	[4] 走行速度および温度とすべり摩擦係数	(43)
(2) 縦すべり摩擦抵抗の左右の差	(15)	(1) 速度と摩擦係数	(43)
[2] 曲線部走行とすべり	(17)	(2) 温度と摩擦係数	(45)
(1) 曲線部走行時のつり合い	(17)	(3) 温度および速度と摩擦係数の相関式	(46)
(2) 走行中制動した場合	(17)	(4) 高速走行時のハイドロプレーニング	(49)
[3] 路側のすべり抵抗と走行の安全性	(19)	[5] 横すべり角と横すべり力	(53)
4. 路面のすべり抵抗測定法	(19)	[6] 路面の粗度とすべり摩擦の関係	(54)
[1] 室内試験装置	(19)	[7] 舗装の種類とすべり摩擦係数	(56)
(1) 一定引張力方法	(19)	(1) コンクリート舗装について	(56)
(2) 一定速度方法	(20)	(2) アスファルト舗装について	(57)
(3) 振子式方法	(21)	(3) エメリー等骨材接着舗装	(58)
(4) その他の方法	(21)	[8] 季節変化とすべり摩擦係数	(58)
[2] 現場測定装置	(21)	[9] 路面の凍結とすべり摩擦係数	(59)
(1) 減速度法	(21)	[10] 仮設鉄板路面のすべり摩擦係数	(60)
(2) 制動停止距離法	(22)	6. すべり摩擦係数の基準値および路面のすべり対策	(60)
(3) トレーラー法(縦すべり法)	(23)	[1] すべり摩擦係数の基準値	(60)
(4) 横すべり抵抗法	(25)	(1) すべり摩擦係数の統一基準について	(60)
[3] 本報告の試験に用いたすべり摩擦測定装置	(26)	(2) すべり摩擦係数の限界値の決定	(61)
(1) 本体	(27)	[2] 路面のすべり対策	(66)
(2) すべり抵抗測定装置	(27)	(1) 道路のすべりと事故の関係	(66)
(3) 計測記録装置	(28)	(2) 一般的なすべり対策	(67)
(4) 載荷および制動操作盤	(28)	(3) コンクリート舗装のすべり対策	(70)
(5) 散水装置	(29)	(4) アスファルト舗装のすべり対策	(70)
(6) その他の付属装置	(29)	(5) 仮設鉄板のすべり対策	(70)
5. 路面のすべり抵抗の実測値とその諸性質	(29)	(6) ハイドロプレーニング対策	(71)
[1] 主要路面のすべり抵抗の実測値	(29)	7. む す び	(72)
(1) コンクリート舗装のすべり摩擦係数	(29)	別 表	
(2) アスファルト舗装のすべり摩擦係数	(31)	(1) コンクリート舗装の経年変化(温度変化, 季節変化の影響)を主とした測定結果	(76)
(3) すべり止め舗装のすべり摩擦係数	(31)	(2) アスファルト舗装の経年変化(温度変化, 季節変化の影響)を主とした測定結果	(90)
(4) 九州地建管内の主要道路のすべり摩擦係数	(32)	(3) すべり止め舗装の効果を主とした測定結果	(112)
(5) 特殊路面のすべり摩擦係数	(32)	(4) 地建管内道路のすべり摩擦係数の現況	(132)
(6) ゴムの種類別すべり摩擦係数	(32)	(5) 特殊路面のすべり摩擦の測定結果	(139)
[2] すべり摩擦に関係する諸要因	(32)	(6) ゴムの種類別のすべり摩擦を主とした測定結果	(144)
(1) タイヤ条件	(32)		
(2) 路面条件	(34)		
(3) 制動条件	(39)		
[3] 乾燥と湿潤によるすべり摩擦係数の変化	(41)		
(1) 乾燥路面のすべり摩擦係数	(41)		
(2) 湿潤路面のすべり摩擦係数	(42)		

1. 序 論

〔1〕 路面すべりに関する研究の目的

道路と自動車走行の関係を考えた場合、その間に働く力は路面と自動車タイヤの間のすべり抵抗力である。この自動車走行とすべり抵抗力との関係は3つの状態に分けて考えることができる。

第1には自動車が行走を開始し、加速し、そして走行抵抗に打勝って速度を維持するためには、エンジンからでる動力を車輪に伝え、タイヤ表面と路面との間のすべり抵抗の反力によって駆動力とすることである。特に走行開始時には大きな駆動力を必要とするので、路面とタイヤの間に大きいすべり抵抗を必要とする。路面が凍結したり、積雪があった場合等にはすべり抵抗が特に減少するので、こう配等走行抵抗の大きい場合には駆動できないこともある。また普通の路面上であっても急に加速したした場合（レース用自動車等）はやはりすべり抵抗が不足してスリップを起し十分加速できない場合がある。このように路面とタイヤの間のすべり抵抗はまず自動車の走行に必要なものである。

第2に自動車は走行中横方向の外力を受けることが多い。曲線部を走行する場合の遠心力は最も典型的なものであり、その外路面の横断こう配による重力の分力としての横方向力、風による横方向力等がある。更にハンドル操作による、タイヤ方向と車両方向および進行方向とのなす角の違いによる横方向力がある。このように自動車が方向性を維持するためには各種の横方向力に抵抗するタイヤと路面の間の横すべり抵抗が必要である。

第3には制動停止に必要なすべり抵抗である。走行を終って制動停止する場合の外に、走行中交差点の信号等外部の要求により停止したり、また障害物が発生したり、自己の不測の事態等により危険を感じて急停止を必要とする場合がある。これらの制動停止の良否は直接危険とつながり、事故の原因となるので、特に重要な問題である。近年自動車走行の量と速度の両面での増大ともなっており、自動車事故はますます増大しているが、これらの事故の大部分は何らかの形で、直接または間接に路面とタイヤの間のすべりの問題を含んでいる。米英その他各国における過去30年間の交通事故の分析結果を見ると、路面がぬれているときの事故の約25%、雪氷路面上の事故の50%が路面のすべりやすさを直接の原因として発生したといわれている。

以上のように、路面のすべり抵抗の問題は自動車の走行にとって始動、走行、操向および制動停止のあらゆる場合について必要なものであり、またそれは最も交通事故と関係するものでもある。

タイヤと路面の間のすべり抵抗については、これまで

にも各種の立場から多くの人が調査研究している。特に高分子化学の立場からタイヤゴムの性質を主にした研究が多く、実測値については各国の実情に応じた範囲の測定値の発表を主にしている。わが国においても、昭和12年に土木試験所の島田八郎技師が、路面の統および横すべり摩擦抵抗におよぼす路面種別とその性状の影響について発表しているのを始め、以後各種の研究発表が行なわれている。しかしこれらの研究の多くは、特定な状況における定性的な傾向を表わすものが多く、各種の気象状況を通じて、統一された基本となるようなものが乏しい。

この意味で、わが国において現在主として使用されているタイヤと路面の間のすべり抵抗を測定し、検討して、すべり抵抗に大きい影響をおよぼす因子と、その影響の程度を解析し、更にすべり抵抗の面より見た事故対策として考慮すべき事項、すべり抵抗係数を一定値以上に確保するための対策等を検討する。更に最もすべり抵抗係数が小さくなる凍結、積雪路面のすべりについても実測し、その対策を検討する。最後にこれらを総合してわが国において、各種の舗装面が、各種の気象条件下で確保すべきすべり抵抗係数の基準値およびすべり対策としてとるべき標準を確立しようとするものである。

〔2〕 本研究の立場

路面とタイヤの間のすべり抵抗は各種の要因によつて影響され非常に複雑である。

第1に考えなければならないのはタイヤの問題である。タイヤの構造およびその性質であり、更にタイヤを構成する各材料の性質が問題になる。すなわちタイヤの剛性、表面形状、トレッド模様、圧力分布、圧力および荷重の変化による応力分布の変化状況、トレッドゴムの性質等である。トレッドゴムについては粘着力およびヒステリシス特性が最も重要であるが、これらの性質が外力（大小、方向、すべり率等）、温度、水分、きょう雑物および接する路面の状況等によってどのように変化するかを明らかにしなければならない。

第2に考えなければならないのは路面の問題である。現在舗装に実用されている、または今後使用される可能性のある各種の路面について検討する必要がある。すなわち舗装体の配合、粒度、表面の粗度、結合材の種類と性質、骨材の種類と性質、更にこれらの舗装が施工された状況、その後の交通量と荷重強度、経年変化、気象作用の影響および測定時の表面温度、水分、きょう雑物の状況等を検討しなければならない。

第3にはタイヤと路面の相関運動状況である。接地面の大小、荷重強度およびその分布、相対すべり速度および変化率の状況等を検討しなければならない。

これらのおおのの要因の影響を検討した後、更に各種

要因の組み合わせ状況における影響を検討して始めて、路面とタイヤの間のすべり抵抗は明らかになるのである。これらの各種要因については、いずれの一つをとり上げて也是非常重要な問題であり、複雑な現象を呈するものである。そして今までも多くの人人によって、そのおのおの的定性的、定量的なものについての研究がなされてきた。しかしあまりにも要因が多く、現象が複雑なために、これらを総合した形のものになかなか得られていない。

そこで本研究に当っては、道路交通工学の立場に立つて、わが国の現実の道路と自動車走行の条件下における、すべり抵抗の基準と対策を決定することを目的とし、実際にわが国で最も多く使用されている標準的なタイヤを使用し、実際に交通に供されている舗装面について、通常起りうる気象状況の範囲で、しかも走行すべり抵抗が問題となる走行状態で実測した値を中心にして解析したものである。たとえばタイヤと路面の間の縦すべり抵抗係数は相対速度の変化とともに複雑な変化を示し、 $0.01 \sim 1.5 \text{ km/h}$ 程度の速度のときに最大値に達することが明らかにされているが、 1.5 km/h は交通上あまり問題になる速度ではないので、この速度付近での検討は行なわず、 20 km/h 以上 100 km/h 以下での検討を主として行なった。

なお本研究で特に強くとりあげたのは、(1)路面のすべり抵抗係数と温度および速度の関係、(2)路面の凍結とすべり抵抗係数の関係、(3)路面のすべり抵抗係数の基準値の作成である。(1)の路面すべり抵抗係数と温度の関係については、一部の人のによって早くより研究されていたが、その他の大部分の実測では測定したときの温度条件を入れていないものが多い。しかし本研究の結果によると、わが国で測定した場合、夏季の高温時に測定した値と、同じ路面を冬季に測定した場合では20~50%にもおよぶ差がでている。また路面のすべり抵抗と速度の関係について、本研究で取り扱う速度範囲 $20 \text{ km/h} \sim 100 \text{ km/h}$ においては、一般に乾燥状態のすべり抵抗係数は速度の影響は少ないが、湿潤状態では速度の増大とともに、すべり抵抗係数は相当減少する。これらの関係についても、定性的な調査結果は発表されているが、^わ、^わ、^わ定量的な相関基準がない。(2)の路面の凍結とすべり抵抗係数の関係は、最近新しく生じた問題であって、冬季の安全交通を確保するためには非常に大切な問題である。しかも路面に凍結が生じた場合のすべりの問題は、舗装面の性質とはほとんど無関係に、氷雪の問題として考える必要がある。最後に(3)としてこれらの解析結果を総合して、路面のすべり抵抗係数として採用すべき基準値の提案を行なうものである。

2. 路面とタイヤの関係

[1] タイヤのすべり現象

(1) タイヤのすべり抵抗とすべり摩擦の関係

路面とタイヤの間のすべり抵抗を論ずるに当って、まずその基本となるものを明らかにしておかなければならない。その第1はすべり抵抗とすべり摩擦抵抗の関係である。一般にタイヤが路面に接して運動している場合、車両はタイヤの接触面において何らかの抵抗を受ける。タイヤが自由に回転している場合の抵抗がころがり抵抗であり、タイヤがすべっている状態の抵抗がすべり抵抗である。タイヤのすべり抵抗は主としてタイヤと路面の間のすべり摩擦抵抗であるが、その外にタイヤのトレッド模様と路面凹凸との噛み合いによる抵抗、路面の突起物がタイヤ材を切裂くような抵抗等があり、測定条件によってはタイヤ前方に散在する物質(じんあい、水分、雪氷等)による走行抵抗も加わることがある。しかもタイヤゴムの半コロイド状態をしているため、いわゆる固体のすべり摩擦状態とは同一ではない。

しかしタイヤのすべり抵抗の大部分を構成するものはすべり摩擦抵抗であり、普通の走行速度においてはゴムを一応弾性体とみなすことができる。特にすべり抵抗を荷重と抵抗係数に分けて考える場合、この抵抗係数はすべり摩擦係数とほとんど同様の性格のものとなり、すべり摩擦係数と同様な概念で解析してゆくことが便利である。

以下本報告においてはタイヤと路面の間のすべり摩擦係数は、すべり抵抗係数を意味するものとして取り扱う。

(2) タイヤのすべり摩擦の定義

タイヤと路面のすべり摩擦係数について論じる場合の定義を以下に明らかにしておく。

(i) 縦すべり摩擦係数

タイヤが進行方向と同一方向に回転しているときに、このタイヤに制動力を加えるとタイヤの接地面に進行方向に逆方向の摩擦力が生じる。制動力が十分大きい場合はタイヤは完全にロックされ、路面に対するタイヤ表面のすべり率は100%となる。このときのすべり摩擦抵抗とタイヤ荷重との比を縦すべり摩擦係数という。実際に定速走行しながら、試験タイヤを完全ロックして縦すべり抵抗を測定した場合は図-2.1のようになる。この図で最初のa部分はいわゆる静止摩擦に近い状態の、係数値が大きいところであるが、瞬間的であるので縦すべり摩擦抵抗には入れないことにする。また制動時間が長い場合には図-2.2のごとくタイヤトレッドが焼け切れて、縦すべり摩擦抵抗は順次減少する。制動をしたまま発進し、速度を次第に高め次いで停止すると図-2.3のようになる。一般路面の摩擦係数を論ずる場合にこれらの要素を入るとは複雑になるので、本研究では制動中の走行速

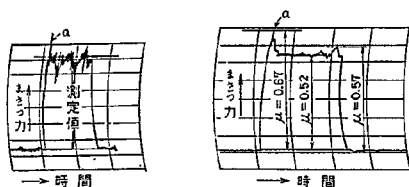
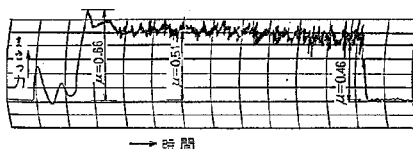
図-2.1 a
通常摩擦測定図図-2.1 b
低速 (5km/h) 時の摩擦係数

図-2.2 連続制動と摩擦力の関係

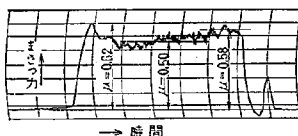


図-2.3 静止摩擦とすべり摩擦の関係

度は一定とし、制動時間は抵抗力の変化の少ない1秒程度を標準とし、その間の摩擦抵抗力の平均値から摩擦係数を計算することにする。制動が完全でない場合、または特殊な機構をつけた場合等で試験タイヤが完全にロックせず、試験車の対路面速度と試験タイヤの回転速度に差のある場合をすべり率のあるすべり摩擦状態といい、すべり率を次式で表す。

$$\text{すべり率} = \frac{\text{試験車の対路面速度} - \text{タイヤの回転速度}}{\text{試験車の対路面速度}}$$

そして、すべり率何%における縦すべり摩擦係数と呼ぶことにする。

(ii) 横すべり摩擦係数

タイヤが進行方向と同一方向に、自由に回転しているときに、タイヤ面に直角方向の外力が働いて、タイヤを横に移動させようとする、タイヤの接地面において、これに抵抗する力が働く、これを横すべり摩擦といい、この横すべり摩擦抵抗力の輪荷重に対する比を横すべり摩擦係数という。

自動車は曲線部を走行している場合、車輪には遠心力による横方向が働き、これに抵抗してタイヤと路面の間に横すべり抵抗力が働くのである。この場合タイヤの回転方向と横すべりの方向とは90°の角度をなしている。一般にタイヤの回転方向と進行方向が図-2.4のごとく

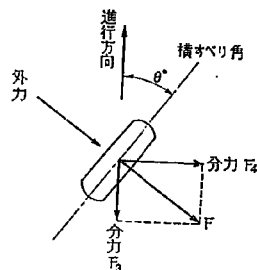


図-2.4 横すべり摩擦係数

θ° の角度をなして走行している場合タイヤの回転面に直角の方向に横すべり抵抗が働く。この場合の抵抗係数を横すべり角 θ° の場合の横すべり摩擦係数という。横すべり摩擦係数と横すべり角の関係は図-2.5のようであり、横すべり角の増大とともに摩擦係数も増大し、ある角度以上は一定値となる。この横すべり角と横すべり摩擦係数との関係は単にタイヤゴム表面と路面との性質によるものだけでなく、むしろタイヤ本体の剛性に関する面が大きいのと考えられる。一方横すべり摩擦係数の最大値は横すべり角が大きくなったところで起こる。横すべり角90°の場合を考えると、タイヤゴム面の路面に対するすべり状態は、本質的に縦すべり摩擦の場合と同様であると考えられる。ただタイヤ本体の剛性による変形、接地面の形状、トレッドの方向の違いがあるので全く同じではない。

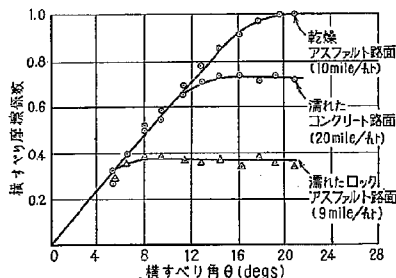


図-2.5 横すべり角と横すべり摩擦係数

(iii) 制動時の横方向のすべり

縦すべり摩擦、横すべり摩擦の定義は前述のとおりであるが、混同されやすい問題に制動時の横方向のすべりがある。タイヤが進行方向に対して θ° の角度をなして、自由に回転しながら進んでいる場合、タイヤ面に直角に横すべり摩擦抵抗が働くのは前述のとおりである。この状態でタイヤを制動するとタイヤには図-2.6のごとく進行方向に反対方向の抵抗が働くようになる。この抵

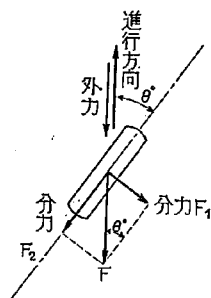


図-2.6 斜めタイヤを制動したときのすべり摩擦抵抗

抗は縦すべり摩擦係数であり、接地パターンが異なるので、いわゆる縦すべり摩擦抵抗値とは少し異なるが、本質的には同様である。したがってこの状態でのタイヤ面に直角の方向の摩擦抵抗力は $F \cdot \sin \theta$ となる。この $F \cdot \sin \theta$ と、横すべり角 θ のときの横すべり摩擦係数は全然別のものであって、一般に $F \cdot \sin \theta$ は横すべり摩擦係数に比してはるかに小さい値である。実際にベンオッシュロに表われた横すべり摩擦係数と $F \cdot \sin \theta$ の関係を図-2.7に

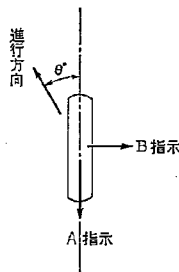


図-2.7 (a) 斜め進行と摩擦抵抗測定方向

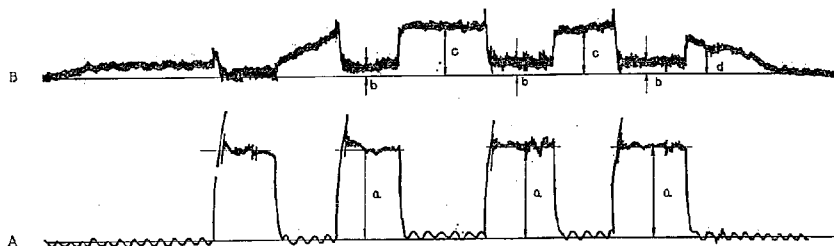


図-2.7 (b) 斜め進行時のすべり摩擦抵抗

(3) ゴムの摩擦機構

摩擦現象については古くより論じられ、2つの固体間の摩擦抵抗力は接触面積には関係なく、圧力に比例するとされている。そして摩擦抵抗力と圧力との比を摩擦係数とよんでいる。この摩擦係数は物質に固有の数値であり、また静止摩擦係数はすべり摩擦係数よりも大きいと考えられている。

タイヤと路面の間のすべり摩擦についてもほぼ同様に考えられるが、詳細に見るとゴムの場合相当複雑な現象を呈するのである。これらの性質について、各種の文献にもとづき、本研究の解析に必要な範囲について述べる。

ゴムの摩擦の原因は主として付着によって起こるせん断変形とヒステリシス損失と凝集力である。これら

は更に次のごとく考えられる。

- (i) 付着によって起こるせん断変形の摩擦
ゴムが他の物質と接している状況は図-2.8のとおりで

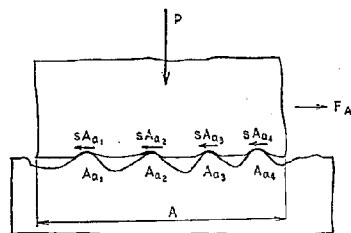


図-2.8 ゴム表面の付着力によるすべり抵抗

ある。巨視的には A なる面積で接触して P なる圧力を受けている場合、これを引くに要する力を F_A とする。これを顕微鏡的に見ると、実際は $A_{a1}, A_{a2}, A_{a3}, \dots$ なる小面積の凸起部の集合体 A_a で接触していることになる。この真に接触している区域でゴムと固体表面との間に分子間力が働いて付着力が生ずることになる。 F_A はこの付着力による結合をせん断破壊するだけの外力を必要とする。その力は真の接触面積に比例し、そのときの比例定数を s とすると

$$F_A = \sum s A_{ai} = s A_a \quad (2.1)$$

垂直圧力を P とすると

$$A_a = CP^m \quad (2.2)$$

金属などの場合には、その物質が降伏点をもち、そのときの応力が y であるとする、 $C=1/y, m=1$ となる。

$$\therefore A_a = \frac{P}{y} \quad (2.3)$$

摩擦係数を f_A とすると

$$f_A = \frac{s A_a}{P} = \frac{s}{y} \quad (2.4)$$

Schallmach⁹⁾ によると理想弾性体でなめらかな表面の場合には $m < 1$ 、球がなめらかな表面におしつけられた場合は $m = 2/3$ である。そしてゴムは張力のかかったとき明確な弾性係数をもたないが、ある圧力範囲では圧縮に対して弾性的で $m < 1$ となるが、微視的な表面あらさのために $m > 2/3$ となる。球形の凹凸のある表面に対しては $m = 0.89$ といひ、また 0.87 ともいっている。ここでは一応 $m = 2/3$ とすると

$$f_A = \frac{s A_a}{P} = \frac{s C P^{2/3}}{P} = s C P^{-1/3} \quad (2.5)$$

したがって f_A は荷重 P に無関係ではないことになる。この実験例を図-2.9⁹⁾、図-2.10⁹⁾ に示す。また P が一定の場合は f_A は A_a に比例し、 A_a が増大するにしたがって f_A は大きくなる。これは付着力に関するかぎり、粗な表面よりもなめらかな表面の方が f_A が大きいことを表わしている。実験的にもガラス等のなめらかな表面でゴムスライダーを用いた場合 f_A が 2.5 にも達すると報告されている。これは乾燥路面のすべり摩擦係数はオーブングレイドのものよりも密粒のものの方が大きいこ

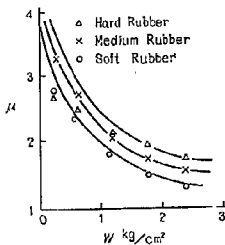


図-2.9 圧力と摩擦係数 (Schallmach)

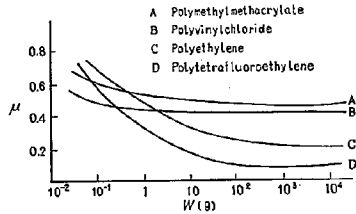


図-2.10 圧力と摩擦係数 (Shooter, Tabor)

とも一致している。また摩擦係数が往々 1.0 以上になることも一致している。

(ii) 付着による摩擦とすべり速度との関係

ゴムの最大摩擦係数は、すべり速度の小さいところで起こり、静止点 (静止摩擦係数) では起こらないといわれている。これについて Foster¹⁰⁾ は図-2.11 のような実験結果を発表している。図-2.11 によると摩擦係数は速度の増加とともに増大し、最大値に達し、なおも速度が増大すると、こんどは小さくなってゆく。この摩擦係数が最大になる速度はゴムの性状、路面性状、圧力などに影響される。しかし摩擦係数が最大になる速度は大体 1 インチ/秒 ≈ 0.1 km/h のオーダーであって、われわれが道路走行上問題にする速度とはあまり関係がなく、静止摩擦と考えるとよい範囲である。

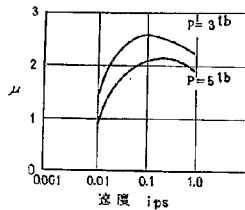


図-2.11 速度と摩擦係数 (Foster)

(iii) 付着による摩擦と温度との関係

ゴムブロックがすべりを起こしているときの定常状態の温度は次のように考えられている。⁹⁾

$$T = T_0 + \beta(f_A \cdot V \cdot P) / (\alpha \cdot d \cdot A_a) \quad (2.6)$$

ここで T_0 ははじめ $V=0$ のときの温度、 d は機械的仕事量と熱カロリーの変換係数、 α はゴムブロックと路面との間の熱遷移率、 β は路面の比熱および熱伝導に関する定数、 A_a は真の接触面積である。上式に $A_a = C \cdot P^{2/3}$ を代入すると

$$\Delta T = (\text{Const} \cdot f_A \cdot V \cdot P^{1/3}) / \alpha \quad (2.7)$$

となる。式(2.7)によると、 $\Delta T \propto f_A$ 、 $\Delta T \propto V$ 、 $\Delta T \propto 1/\alpha$ となり P にはあまり影響されないことになる。ここで kummer と Meyer は 0.5 インチ/秒 (0.05 km/h) までの小さいすべり速度では温度上昇は無視できて、摩擦抵

抗に影響をあたえない。しかし1.0フィート/秒(1.0km/h) ぐらになると f_A はぐっと下って、ゴムの融点に達すると摩擦係数 f_A は最低値にまで下る。これらの関係を示す実験として図-2.12, 図-2.13がある。このように温度と摩擦係数の関係も、速度が大きくなるにしたがって低下し、われわれの考えている速度範囲では低下した状態なので、それほど急激な変化はないと考えられる。

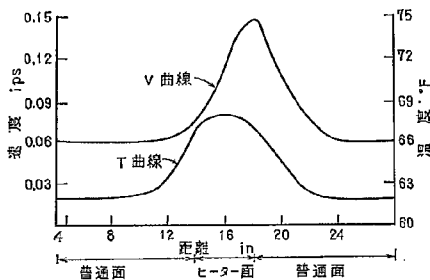


図-2.12 温度とすべり速度 (Meyer)
(一定引張り力)

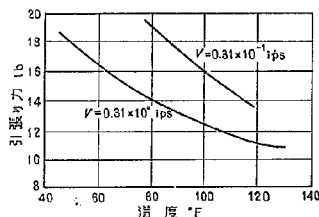


図-2.13 温度とすべり抵抗 (引張り力)(Meyer)

しかしまた温度とすべり摩擦の関係は、高分子材料の温度による性質の変化の問題がある。King と Tabor⁽¹¹⁾ はポリメタクリル, ポリエチレン, ケル-F, テフロン のすべり面の温度と摩擦係数の関係を求め、図-2.14 のような結果を得ている。同様に Flom と Porile⁽¹²⁾ はテフロンについて 図-2.15 のような結果を得ている。これらによると高分子材料は常温の範囲内でも転移点をもち、その付近で著しい変化を示すことが考えられる。しかも転移点温度および変化性状は材質によって非常に複

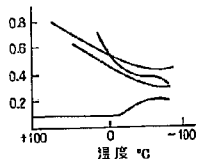


図-2.14 温度と摩擦係数 (King, Tabor)

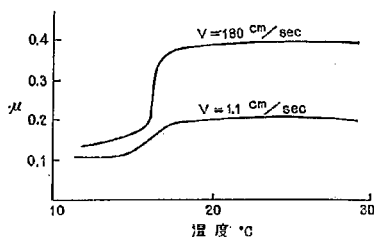


図-2.15 温度と摩擦係数 (Flom, Porile)

雑に異なる。これらについてはタイヤゴム材として種々の高分子化合物が使用されるので今後大いに検討する必要がある。

(iv) ヒステリシス損失による摩擦

ゴムの表面が十分に潤滑されていて、波状の表面をすべる場合、付着によるせん断抵抗は 0 となる。しかしゴムが種々変形し復元する場合、その間にヒステリシス損失が起る。このヒステリシス損失に相当する力がヒステリシス損失による摩擦力 F_B である。したがってヒステリシスによる摩擦力はゴムのヒステリシス値と、ゴムが受ける変形量(路面の微視的凹凸)とに比例する。これらの状況を図-2.16 に示す。Tabor⁽¹³⁾ はこのときのヒステリシス摩擦係数は球のころがり抵抗係数と等しいと考えて次のごとくした。

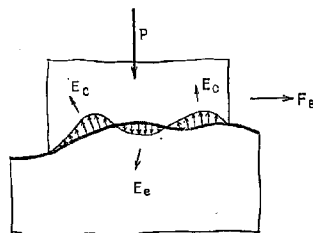


図-2.16 ゴム表面のヒステリシスによるすべり抵抗

$$f_B = f_n = \text{Const} \times P^{1/3} \dots \dots \dots (2.8)$$

ここで真の接触面の平均圧力を P_a とすると

$$P_a = \frac{P}{A_a}, A_a = CP^{2/3}, \therefore f_B = \text{Const} \times P_a \dots \dots \dots (2.9)$$

上式の Const は E_{in} (単位距離あたりの入力エネルギー) $\times r$ (ヒステリシスによって起こる損失) で表わされる。

$$\therefore f_B = r \cdot E_{in} \cdot P_a \dots \dots \dots (2.10)$$

Tabor は実験的にゴムの場合 $f_B = 1.4 \times 10^{-4} P_a - f_B = 3 \times 10^{-4} P_a$ の範囲であることを確かめた。これを図-2.17 に示す。

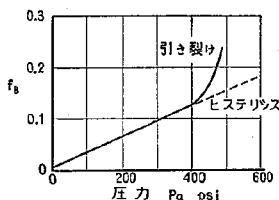


図-2.17 圧力とヒステリシス摩擦 (Tabor)

したがって真の接触面の平均圧力が 400 ポンド/平方インチ以上になると、いかに良好な湿潤面でも付着せん断力や凝集力抵抗が働いてくると思われる。そして図-2.17 からわかるようにヒステリシスのみによる摩擦係数のオーダーは 0.1 前後であって、路面が非常にすべりやすくなった時の極限値がこのあたりから考えられる。

(v) ヒステリシス損失による摩擦とすべり速度

ヒステリシスによる摩擦の原因となっている変形による損失 γ は速度の変化によっても変らないとされている。したがってヒステリシスによる摩擦係数は速度に無関係と考えられる。しかしすべり速度が異なると変形速度が異なり、変形による損失 γ も異なる。ということも一部ではいわれているが、定量的にはは握されていない。

(vi) ヒステリシス損失による摩擦と温度の関係

湿った状態では温度が下がると摩擦係数は増大することが Moyer⁽¹⁴⁾, Giles and Sabey⁽¹⁵⁾, Stegemann⁽¹⁶⁾ 等によって報告されている。その原因として考えられるのは、一つにはゴムの堅さが変化することであり、また一つには水の表面張力の変化によるとも考えられる。そして親水性のゴムが疎水性のゴムに比べて摩擦係数が大きいともいわれている。しかしいづれにしても現在までのところ明確な説明は得られていない。

(vii) 凝集力を破壊するための摩擦力

路面上の鋭い突起がタイヤゴムを切るような場合、タイヤゴムの凝集力に抵抗してこれを破壊することがある。この場合タイヤゴムのもつ凝集力に相当する摩擦力が働くことになる。しかし実験的な推定によっても、この抵抗力は全体の摩擦力の 2% をこえないといわれている。⁹ 本研究において、穴あき鋼板上のすべり摩擦係数の測定において、穴の部分でタイヤゴムの多量に切り取りながらも、摩擦係数は小さかったことも一致している。

(viii) すべり摩擦機構の実験

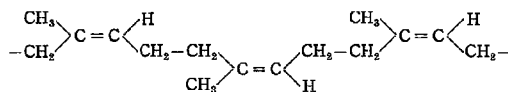
上述のようにゴムの摩擦の原因は、主として付着力によって起るせん断抵抗による摩擦係数 f_A と、ヒステリシス損失によって起る摩擦係数 f_B と、凝集力を破壊する

ための摩擦係数 f_C とからなっている。そして実際の路面上では、乾燥状態では付着による f_A が大部分である。湿潤状態では f_B が主要な部分となる。しかし実際に湿潤状態といえども f_B だけで摩擦抵抗をもっている場合は少なく、 f_A と f_B とからなり、その比率が異なるだけである。そして f_C は特定の条件の場合にのみ問題になり、一般の場合はあまり大きい要素にはならない。

(2) タイヤの性質

(1) タイヤ用のゴム

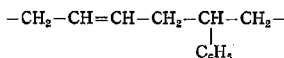
現在自動車のタイヤに使用されているゴムには天然ゴムと合成ゴムの二種類がある。天然ゴムはパラゴム樹からとれた乳状分泌物ラテックスを加工して得られたものである。化学的にはイソプレンの重合した鎖状高分子物質で次のような分子構造になっている。



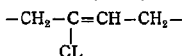
天然ゴム (ポリイソブレン)

常温では強い弾性を示すが、加熱すると約 120°C で軟化し始め、250~300°C で分解する。加硫するとこの性質はいくぶん向上するが、根本的には変らない。

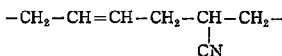
合成ゴムには天然ゴムと全く同じ分子構造をもつイソブレンゴムの外 SBR (ブナS), NBR (ブナN), CR (ネオブレン), IIR (ブチルゴム) 等がある。主要なものの分子構造を示すと次のごとくである。



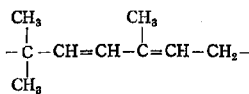
SBR (ブナS)



CR (ネオブレン)



NBR (ブナN)



IIR (ブチルゴム)

これらの合成ゴムは天然ゴムと非常によく似た分子構造であり、性質もほぼ同様であって、耐熱温度は 100~200°C (普通 160°C) であり、加硫されることも同様である。しかも実際にタイヤとして使用する場合は、天然ゴムと合成ゴムを混合使用している外に、カーボンブラック、プロセスオイル等を添加する。したがって実用のタイヤは各種のゴム質の種類と配合割合、添加物の種類

と量によって多種多様のものが作られている。ゆえに実用のタイヤゴム質は大体皆同じ性質であるが、詳細に検討すると各社の製造方法によって性質は異なると考えられる。

タイヤゴム質のうちすべり摩擦に関係のあるものは、まずヒステリシス特性である。ヒステリシス特性の大きいものはどすべり抵抗は大きい。またタイヤゴムのかたさも関係してくる。ゴムのかたさは局部圧力の大きさを決定する因子であり、トレッドゴムがかたいほど接地面における接触面積が小さくなり、そのため局部圧力は大きくなり、ヒステリシスによるすべり抵抗は増加する。

タイヤゴムの転移点、融点もすべり摩擦に影響がある。乾燥路面ですべる場合のトレッド温度は 200°C 以上になるものと推定されており、この時ゴムが解けていることは黒いスキッドマークから明らかである。したがってゴムの熱的性質、およびすべり面の温度がすべり摩擦係数に影響をおよぼし、すべり面の温度はすべり面の性状の外に外気温度、路面温度の影響を受けると考えられる。

(2) タイヤ構造と圧力分布

自動車用タイヤの標準的な断面形状を図-2.18に示す。タイヤは一般に内部に空気を入れ、タイヤ表面の圧力分布はタイヤ内圧に等しく一様になるように考えられている。しかしカーカスのある側面下部はどうしても接地圧が多少大きくなる。またプライ数、コードのタイヤ横断面となす角等のカーカス構造は横すべり角の小さいときの横すべり摩擦係数には関係するが、縦すべり摩擦係数にはあまり関係しない。最近のレースタイヤ等はトレッド部分の幅を特に広くして、平均圧力を小さくし、摩擦係数を大きくするようにしてある。

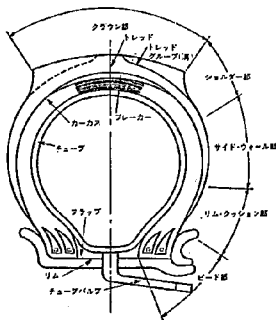


図-2.18 タイヤの標準断面図

(3) トレッド模様 (トレッドパターン)

タイヤが路面に実際に接触する部分はトレッドであり、タイヤのすべり摩擦はトレッドと路面のすべり摩擦

といってもよく、トレッドゴムの性質およびパターンがすべり摩擦に最も重要な関係をもつ。

トレッドパターンはタイヤの路面に対するすべり摩擦係数を大きくする目的と、走行中車両の振動をなるべく少なくする目的との二つをもっている。車両の振動を少なくするためにはなるべく平滑な面がよい。一方トレッドパターンがすべりに対してどの程度有効であるかは路面のあらさ、および路面のよごれによって大いに異なる。湿潤の場合に平滑な路面では、模様つきタイヤが絶対にすぐれているが、あらくてざらざらした路面では平滑タイヤは模様つきタイヤと同等あるいはそれ以上のすべり抵抗を示す。乾燥路面では平滑タイヤの方が接触面積が大きいので、常に模様つきタイヤより高いすべり抵抗を示す。したがって湿潤時の排水性をよくしたり、よごれた路面 (砂利道を含む) での走行性をもたせるために、ある程度トレッド模様のあるものがよい。実際にはこれらの目的を考慮してスモースタイヤ、リブタイヤ、ラグタイヤ、グリップタイヤ、スノータイヤ等が作られている。これらを写真-2.1に示す。

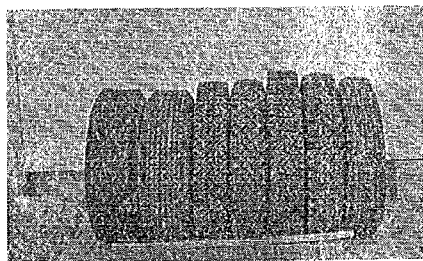


写真-2.1 各種タイヤのトレッド模様

左より	レースタイヤ	2本
	スパイクタイヤ	2本
	スノータイヤ	2本
	リブタイヤ	1本

スモースタイヤは完全に表面が平滑なタイヤで特殊の試験車、軽便車等にのみ使用されている。リブタイヤは乗用自動車をはじめ最も普通に使用されているものであって、排水性もよくしかも接地面は連続しているため、車両の振動を少なくする効果がよい。ラグタイヤはトラック等重荷重でいくぶん乗心地を悪くしてもよいが、悪路でも十分けん引力を保つ必要がある場合に使用される。グリップタイヤはジープ等を使用されるもので、悪路でのけん引力を保つことを第一の目的として、なお乗心地性も保つように作られたものである。スノータイヤは図-2.19のようなトレッドパターンをもったもので、トレッドの突出した面と雪面の間の摩擦抵抗の他に、トレッドの溝に入った雪のせん断抵抗を大きく利用するように考えられたものである。完全なラグ型の場合には溝の

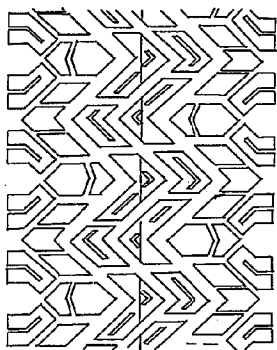


図-2.19 スノータイヤのトレッド模様

中の前後の雪のつながりがなくて雪がこわれやすく、前後方向の摩擦抵抗が小さく、また横方向のすべり抵抗も小さい。完全なリブ型の場合には溝の中の雪はこわれにくく横方向に対する抵抗はいくぶん大きい、前後方向に対するせん断抵抗が小さい。したがってラグとリブをかね合わせたような斜めパターンがよい。この外氷雪上で使用するスパイクタイヤ、およびタイヤチェーンをつける方法も行なわれている。

〔3〕 路面の性質

(1) 路面の種類

路面の性質はすべり摩擦に大きい影響をあたえる。まず路面の種類として次のようなものがある。(1)コンクリート舗装面、(2)アスファルト舗装面、(3)ブロック舗装面、(4)簡易舗装面、(5)土砂路面、(6)仮設路面、(7)氷雪路面、(8)その他特殊路面。これらのうちコンクリート舗装路面およびアスファルト舗装路面は現在最も普通の路面である。ブロック舗装は古い型式の舗装であって平坦性も悪く、最近はあまり使用されないようになった。ブロック舗装はすべり摩擦係数が大きいように錯覚されがちであるが、それは歩行者または牛馬に対して足がかりを与えるに過ぎず、走行中の自動車タイヤに対しては何ら好影響を与えない。簡易舗装路面は表面の性質よりもむしろ舗装体の強度と耐久性の分類であって、表面はアスファルト舗装面の一種と考えてよく、すべりを論ずる場合特別に分けて考える必要もないと思われる。土砂路面も近時道路の舗装が進展してきたので、特に論ずるほどのこともないが、路肩および路側帯に車が侵入した場合の安全性を論ずるのに必要になってくるので、この意味での土砂路面のすべり摩擦を考えることにする。仮設路面は工事中的の仮道等に対する検討であって、特に大きい意味をもつものではない。氷雪路面は舗装の種類にかかわらず、その面上に氷雪があった場

合、非常にすべり摩擦係数が小さくなるので十分検討しなければならない。その他特殊路面としてすべり摩擦係数の大きい骨材(エメリー、シリカサンド等)をエポキシ樹脂で接着したすべり止め路面についても検討する必要がある。

一般にこれらの舗装の種類とすべり摩擦係数については一定の関係はなく、どの種類の路面でもその組成、材料の性質等によって非常に良好なすべり摩擦係数をもつ場合と、そうでない場合とがある。コンクリート舗装とアスファルト舗装では、両者の間にすべり摩擦係数についてはあまり差がないようである。ただアスファルト系の舗装の方がすべり摩擦係数の分布範囲が広く、すべりにくいものからすべりやすいものまでであることは明らかである。

(2) 骨材の性質

舗装混合物は骨材と結合材よりなっている。しかも構成比は骨材が大部分を占めるので、舗装のすべり摩擦を支配する大きい要素となる。骨材の種類、粒径、形状、かさ、摩耗特性および化学組成などは、直接影響をもつ重要な性質である。鉱滓や砂岩はすべり止め骨材として一般に良好である。石灰岩は摩耗に対して弱くしかも平滑に摩耗するのでよくない。粗骨材と細骨材の比の摩擦係数との関係については一定した結論は得られない。しかし粗骨材と細骨材の合計したものの舗装表面に占める面積比の大きいものがすべり摩擦係数も大きいことは明らかである。骨材粒の形状も路面のすべりにとって非常に重要な要素であり、ざらざらしたサンドペーパー状の路面に仕上げるためには、個々の骨材粒がとがって角張っているのがよい。骨材が最初にとがって角張っていると同時に、交通や気象作用に対して抵抗性をもち、その形状を長く維持できることも必要である。摩耗するときにも平滑になるのではなく、常に表面にとがった形状を残しながら摩耗するような骨材がよい。骨材の化学組成も舗装のすべりに影響があると考えられているが、その状況はまだ明らかではない。

(3) 結合材の性質

結合材として考えられるのはアスファルトとセメントペーストである。結合材としてのアスファルトは湿潤の場合にはすべり摩擦係数は小さくなる。フラッシュしたアスファルト舗装面は極端にすべり摩擦係数が小さい。コンクリート舗装においても、富配合のものは湿潤時すべり摩擦係数が小さくなる。

3. 制動時におけるすべり抵抗と車両運動

〔1〕 直線走行とすべり

自動車が直線部または直線にほぼ近い状態の道路を走行中、危険を感じて制動した場合、自動車は路面とタイ

ヤの間の縦すべり摩擦抵抗によって減速し、停止する。

一方道路構造においては走行中常に確保しなければならない視距として、十分な制動停止距離を計算している。すなわち直線部走行において問題になるのは縦すべり摩擦係数と制動停止距離の関係である。縦すべり摩擦係数と制動停止距離の関係は単なる視距の外に、車両が路側に逸脱する場合の安全性、事故の場合の制動停止距離と当初速度の関係の解明などにも重要である。

更にタイヤと路面の間の縦すべり摩擦抵抗に左右の差がある場合、車両は回転して停止することになる。実際には回転を始めると運転者はブレーキをゆるめるとか、ハンドルを切るなど何らかの操作を行なうので複雑な現象を呈するが、事故の原因となるので重要な問題である。

(1) 縦すべり摩擦係数による制動停止距離の計算

道路走行中の自動車の制動停止距離はすべり摩擦係数から計算されることは明らかである。しかし、すべり摩擦係数の状況があまり明らかでなかったため、今までほとんどすべり摩擦係数は制動中一定とした簡単な計算によって制動停止距離を計算していた。その結果計算された制動停止距離は正確さに欠けるため、道路の構造の基準の算定等安全側のものについては使用されていたが、交通事故のスリップの解析等にはあまり適当ではなかった。今回速度とすべり摩擦係数の相関が得られたので、これらを利用した一般的な制動停止距離の計算について述べる。

(i) すべり摩擦係数を一定とした制動停止距離の計算

一般に自動車の走行状態における力のつり合いは次のようになる。

$$P = \nu W = \left\{ \mu_r + i + (1 + \varepsilon) \frac{\alpha}{g} \right\} W + \mu_l \cdot F \cdot V_a^2 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\therefore \nu = \mu_r + i + (1 + \varepsilon) \frac{\alpha}{g} + \frac{1}{W} \cdot \mu_l \cdot F \cdot V_a^2 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで P は自動車のけん引力、 ν はけん引状態における摩擦係数、 W は自動車の重量、 μ_r はころがり摩擦係数、 i は道路の縦断こう配、 α は自動車の加速度、 ε は自動車の回転部分相当量を自動車の重量 W に換算した係数、 μ_l は空気抵抗係数、 F は自動車の前面投影面積、 V_a は自動車と空気の相対速度である。

自動車の制動を加えた場合は、 P の代わりに制動抵抗 $R = -f \cdot W$ が働くことになる。したがって式(3.1)において νW の代わりに $-f \cdot W$ を入れると

$$-f = \mu_r + i + (1 + \varepsilon) \frac{\alpha}{g} + \frac{1}{W} \cdot \mu_l \cdot F \cdot V_a^2 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで $V_a = V$ とし、 f 、 μ_r 、 μ_l は速度に関係なく一定として制動停止距離 S を計算すると式(3.3)より

$$\alpha = \frac{dv}{dt} = -\frac{g}{(1 + \varepsilon)} \cdot \left(f + \mu_r + i + \frac{1}{W} \times \mu_l \cdot F \cdot V^2 \right)$$

これを2回積分すると

$$S = \frac{(1 + \varepsilon) W}{g \cdot \mu_l \cdot F} \cdot \log \sqrt{1 + \frac{\mu_l \cdot F \cdot V^2}{(\mu_r + f + i) W}} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

実用的に制動中は $\varepsilon = 0$ 、 $\mu_r = 0$ とし、縦断こう配はないとすると式(3.3)は次のようになる。¹³⁾

$$S = \frac{W}{g \cdot \mu_l \cdot F} \cdot \log \sqrt{1 + \frac{\mu_l \cdot F \cdot V^2}{(\mu_r + f + i) W}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

実際の自動車に対する空気抵抗率を計算すると表-3.1のようになる。

表-3.1 自動車の空気抵抗率

車 種	μ_l	F (m^2)	W (kg)	空気抵抗率 $= \mu_l \cdot F \cdot V^2 / W$					
				30km/h	40	50	60	70	100
国産中型乗用車	0.0025	2.2	1,500	0.003	0.006	0.009	0.013	0.018	0.037
大型トラック	積載	0.0045	5.1	10,000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.011
	空車	0.0045	5.1	5,000	0.004	0.007	0.012	0.017	0.023
大型バス	0.0035	6.7	12,000	0.002	0.002	0.005	0.007	0.010	0.020

μ_l : 空気抵抗係数 F : 自動車の前面投影面積 W : 自動車の重量
空気抵抗率 ($\mu_l \cdot F \cdot V^2 / W$) はすべり摩擦係数 f に相当するものとなる。

表-3.1の値に対して路面のすべり摩擦係数は0.8~0.3程度の範囲にあるため、最悪の条件でも空気抵抗はすべり摩擦抵抗の約10%であり、普通5%以下の影響しか与えない。したがって低速の場合および空気抵抗係数の小

さい車の場合には、制動停止距離の計算に当って空気抵抗を考える必要はない。ただ走行中の抵抗を考える場合は、自動車のころがり抵抗との比較となり、ころがり抵抗は一般の舗装道路上では0.01~0.025であるから、

30~40km/hの低速の範囲では影響は小さいが、70km/h以上となると空気抵抗の方が大きくなるので非常に重要な問題となる。

更に簡単にして最も普通に用いられている制動停止距離の計算は式(3.2)において $\mu_r=0$, $i=0$, $e=0$ とし、空気抵抗も考えないものとする

$$-f = \frac{a}{g}, \therefore a = \frac{d^2 s}{dt^2} = -f \cdot g \quad (3.5)$$

(3.5)を積分して制動停止距離をだすと

$$S = \frac{V_0^2 - V^2}{2g \cdot f} \quad (3.6)$$

完全に停止するまでの距離は

$$S = \frac{V_0^2}{2g \cdot f} \quad (3.7)$$

実用計算上 V を km/h, S を m 単位で表わし, $g=9.8$ m/sec² とすると

$$S = \frac{V^2}{254 \cdot f} \quad (3.8)$$

これが最も普通に用いられている式である。¹⁸⁾

いま表3.1の中型乗用車が70km/hから制動をかけた場合について、(イ)空気抵抗を考慮した制動停止距離を式(3.4)より計算すると $S=62.4$ m となる。(ロ)空気抵抗を考えない、しかも摩擦係数一定の式(3.8)によって計算すると $S=64.3$ m となり、空気抵抗を考慮しない場合約1.9m、3%制動停止距離が長くなる。

(ii) 摩擦係数を速度の一次関数とした制動停止距離の計算

すべり摩擦係数を一定にした計算の外、すべり摩擦係数を速度の一次関数として表わすことができる。また速度とすべり摩擦係数の正確な相関式は得られないが、主要な速度に対する摩擦係数は得られている場合もある。道路構造令解説¹⁹⁾の視距に関する計算に用いている速度と摩擦係数の関係は図3.1のとおりである。この図において速度と摩擦係数の相関を一次式の組み合わせ ABCD と考えることができる。このように速度と摩擦係数の関係を一次式または一次式の組み合わせとして計算する場合について考える。

ここで相関一次式を次のとおりとする。

$$f = av + b \quad (3.9)$$

f はすべり摩擦係数, v は速度, a, b は常数である。また速度と摩擦係数の関係は(3.5)より

$$a = \frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -g \cdot f \quad (3.10)$$

(3.9)を(3.10)に代入すると

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -g \cdot a \cdot v - g \cdot b = -(a'v + b') \quad (3.11)$$

ここで $a' = g \cdot a$, $b' = g \cdot b$ とする。(3.11)より

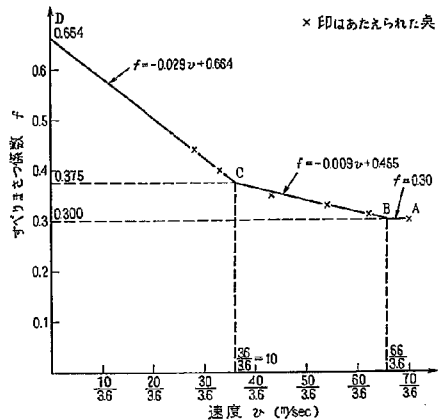


図3.1 速度とすべり摩擦係数(湿潤)道路構造令解説の数値による

$$\int \frac{1}{a'v + b'} dv = - \int dt$$

$$\therefore \log(a'v + b') = -a't + C_1$$

$$\therefore a'v + b' = C_2 e^{-a't}$$

$$v = \frac{1}{a'} (C_2 e^{-a't} - b') \quad (3.12)$$

$t=0$ のとき $v=v_0$ とすると

$$v_0 = \frac{1}{a'} (C_2 - b')$$

$$\therefore C_2 = a'v_0 + b' \quad (3.13)$$

(3.13)を(3.12)に代入すると

$$v = \frac{1}{a'} \{ (a'v_0 + b') e^{-a't} - b' \} \quad (3.14)$$

$$e^{-a't} = \frac{a'v + b'}{a'v_0 + b'} \quad (3.15)$$

$$\therefore t = -\frac{1}{a'} \cdot \log \left(\frac{a'v + b'}{a'v_0 + b'} \right) \quad (3.16)$$

式(3.14)において $v = ds/dt$ であるから

$$S = \int \frac{1}{a'} \{ (a'v_0 + b') e^{-a't} - b' \} dt$$

$$= -\frac{1}{(a')^2} (a'v_0 + b') e^{-a't} - \frac{b'}{a'} t + C_3 \quad (3.17)$$

$t=0$ のとき $S=S_0$ とすると

$$C_3 = S_0 + \frac{1}{(a')^2} (a'v_0 + b') \quad (3.18)$$

(3.15)(3.16)(3.18)を(3.17)に代入すると

$$S = -\frac{1}{(a')^2} (a'v + b') + \frac{b'}{(a')^2} \log \left(\frac{a'v + b'}{a'v_0 + b'} \right)$$

$$+ S_0 + \frac{1}{(a')^2} (a'v_0 + b')$$

$a' = g \cdot a$, $b' = g \cdot b$ としてもとにもどせば

$$S - S_0 = \frac{1}{g \cdot a} \left\{ (v_0 - v) + \frac{b}{a} \log \left(\frac{av + b}{av_0 + b} \right) \right\} \quad (3.19)$$

(3.19)より単一の一次関数の場合、全制動停止距離 S は

$$S = \frac{1}{g \cdot a} \left\{ v_0 + \frac{b}{a} \log \left(\frac{b}{av_0 + b} \right) \right\} \dots\dots\dots (3.20)$$

図-3.1のような一次関数の組み合わせの場合

$$S = \sum S_i = \sum \left\{ \frac{1}{a_i \cdot g} \left\{ v_{i,0} - v_{i+1,0} + \frac{b_i}{a_i} \times \log \left(\frac{a_i v_{i+1,0} + b_i}{a_i v_{i,0} + b_i} \right) \right\} \right\} \dots\dots\dots (3.21)$$

これらの式を用いて図-3.1の70km/hよりの制動停止距離を計算すると $S=54.4\text{m}$ となる。これを70km/hに対する摩擦係数を0.30とし、これを一定として式(3.8)によって計算すると $S=64.0\text{m}$ となり、速度減による摩擦係数の増加を考慮しない場合約10.0m、19%制動停止距離が長くなる。

(iii) 摩擦係数を速度の二次関数とした制動停止距離の計算

一般に湿潤路面の摩擦係数は速度の二次関数として表わされることが明らかである。この場合の計算は次のようになる。

まず速度と摩擦係数の相関式を次のとおりとする

$$f = av^2 + bv + c \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2s}{dt^2} &= \frac{dv}{dt} = -g \cdot f \\ &= -(g \cdot a \cdot v^2 + g \cdot b \cdot v + g \cdot c) \\ &= a'v^2 + b'v + c' \dots\dots\dots (3.23) \end{aligned}$$

ここで $a' = -a \cdot g$, $b' = -b \cdot g$, $c' = -c \cdot g$ である。

$$\therefore \int \frac{1}{a'v^2 + b'v + c'} dv = \int dt \dots\dots\dots (3.24)$$

ここで $a'v^2 + b'v + c' = 0$ の判別式の正負が問題になるが、湿潤路面の場合一般に判別式は負になるので、負として解くと式(3.24)より

$$\frac{1}{a'} \int \left(v + \frac{b'}{2a'} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{D'}{2a'} \right)^{-\frac{1}{2}} dv = \int dt$$

ここで $D' = \sqrt{4a'c' - b'^2}$ である。

$$\therefore \frac{2}{D'} \tan^{-1} \left(\frac{2a'v + b'}{D'} \right) = t + C_1 \dots\dots\dots (3.25)$$

$$\begin{aligned} \tan \left\{ \frac{D'(t + C_1)}{2} \right\} &= \frac{2a'v + b'}{D'} \\ \therefore v &= \frac{D'}{2a'} \tan \left\{ \frac{D'(t + C_1)}{2} \right\} - \frac{b'}{2a'} \dots\dots\dots (3.26) \end{aligned}$$

$t=0$ で $v=v_0$ とすると

$$C_1 = \frac{2}{D'} \tan^{-1} \left(\frac{2a'v_0 + b'}{D'} \right) \dots\dots\dots (3.27)$$

式(3.26)より

$$\begin{aligned} S &= \frac{D'}{2a'} \left\{ \tan \left\{ \frac{D'(t + C_1)}{2} \right\} dt - \frac{b'}{2a'} \int dt \right\} \\ \therefore S &= \frac{1}{a'} \log \left\{ \cos \frac{D'(t + C_1)}{2} \right\} - \frac{b'}{2a'} t + C_2 \dots\dots\dots (3.28) \end{aligned}$$

$t=0$ で $S=S_0$ とすると

$$C_2 = S_0 + \frac{1}{a'} \log \left(\cos \frac{D'C_1}{2} \right) \dots\dots\dots (3.29)$$

完全に停止するまでの時間 t は式(3.26)において $v=0$ として得られる。

$$\begin{aligned} \frac{D'(t + C_1)}{2} &= \tan^{-1} \left(\frac{b'}{D'} \right) \\ \therefore t &= \frac{2}{D'} \tan^{-1} \left(\frac{b'}{D'} \right) - C_1 \dots\dots\dots (3.30) \end{aligned}$$

式(3.28)に(3.27)(3.29)(3.30)を代入して計算すると

$$\begin{aligned} S - S_0 &= \frac{1}{a'} \log \left\{ \frac{\cos \cdot \tan^{-1} \left(\frac{2a'v_0 + b'}{D'} \right)}{\cos \cdot \tan^{-1} \left(\frac{b'}{D'} \right)} \right\} \\ &\quad - \frac{b'}{a'D'} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{b'}{D'} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{2a'v_0 + b'}{D'} \right) \right\} \dots\dots\dots (3.31) \end{aligned}$$

ここで $S_0=0$, $a' = -a \cdot g$, $b' = -b \cdot g$, $c' = -c \cdot g$ とすると

$$\begin{aligned} S &= -\frac{1}{ag} \left\{ \log \left[\frac{\cos \cdot \tan^{-1} \left(\frac{-2av_0 - b}{D} \right)}{\cos \cdot \tan^{-1} \left(\frac{-b}{D} \right)} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{b}{D} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{-b}{D} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{-2av_0 - b}{D} \right) \right\} \right\} \dots\dots\dots (3.32) \end{aligned}$$

ここで $D = \sqrt{4ac - b^2}$ である。

今もし判別式が正になる場合は式(3.24)において

$$\frac{1}{a'v^2 + b'v + c'} = \frac{1}{(\alpha - \beta)} \left(\frac{1}{v - \alpha} - \frac{1}{v - \beta} \right)$$

とおきかえて積分を行えばよい。その結果は次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} S &= \log \left(\frac{\alpha - \beta}{v_0 - \beta} \right) - \frac{1}{\alpha - \beta} \left\{ \alpha \log \left\{ \frac{(v_0 - \alpha)(\alpha - \beta)}{-(v_0 - \beta)\alpha} \right\} \right. \\ &\quad \left. - \beta \log \left\{ \frac{(\beta - \alpha)}{\beta} \right\} \right\} \dots\dots\dots (3.33) \end{aligned}$$

ここで $\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ である。

ここでコンクリート舗装、湿潤時の二次相関式を

$$f = 0.000105t^2 + 0.00002vt - 0.0111t + 0.000056v^2 - 0.0117v + 1.19$$

とし、いま路面温度 $t=20^\circ\text{C}$ の場合について計算すると

$$f = 0.000056v^2 - 0.0113v + 1.01$$

これをさきの式(3.32)に代入して、初速度70km/hに対する制動停止距離を計算すると、 $S=32.1\text{m}$ となる。これに対し70km/hのときのすべり摩擦係数は上述の二次式より計算して $f=0.493$ とし、これを従来の摩擦係数一定の方法で計算すると $S=39.0\text{m}$ となる。速度減による摩擦係数の増加を考慮しない場合は、実際に近い二次相関式によって計算した場合に比べて約7.0m、21%制動停止距離が長くなる。

(iv) 制動停止距離計算法の実用

各種のすべり摩擦係数による制動停止距離の計算法に

ついて述べたが、これらの計算例を表-3.2に示す。この表によると摩擦係数を一定とした場合と、二次相関式によった場合とでは、その差は5~20%に達し、走行速度が大きいものほどその差は大きい。一般に湿潤状態にあるときは速度による摩擦係数の変化率は大きいので、二次相関式によって計算すべきであるが、乾燥状態では速

度による摩擦係数の変化率は小さいので、特に二次式を用いる必要はなく、摩擦係数を一定とした従来の単純計算でよい。

更に湿潤状態では基本的に摩擦係数は速度に二次相関することは明らかであるが、実際の制動時に摩擦係数がどのように変化するかは更に検討する必要がある。

(2) 縦すべり摩擦抵抗の左右の差⁽ⁱⁱ⁾

路面のすべり摩擦係数が場所によって異なる場合、当然自動車は左右のタイヤで異なる抵抗を受けることになる。この場合の運動は次のとおりとなる。

(i) 前後方向の運動

式(3.5)より

$$\alpha = -f \cdot g$$

$$\therefore \frac{W}{g} \cdot \alpha = \frac{W \cdot l_2}{2l} \cdot f_{f-l} + \frac{W \cdot l_2}{2l} \cdot f_{f-r} + \frac{W \cdot l_1}{2l}$$

$$\times f_{r-l} + \frac{W \cdot l_1}{2l} \cdot f_{r-r}$$

$$= \frac{W \cdot l_2}{2l} (f_{f-l} + f_{f-r}) + \frac{W \cdot l_1}{2l} (f_{r-l} + f_{r-r})$$

.....(3.34)

ここで W は車両の全重量、 f はすべり摩擦係数、 l は重心よりの距離で図-3.2のとおりである。式(3.34)より車全体の前後方向の運動は、左右のすべり摩擦係数が異なる場合はその平均値のすべり摩擦係数が働いた場合と同様の運動をする。

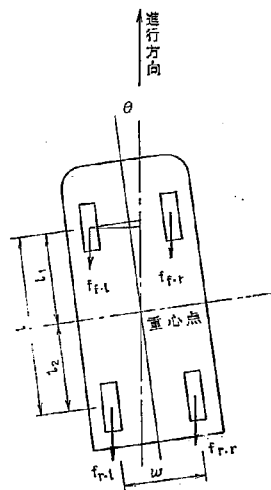


図-3.2 左右のすべり摩擦係数が異なる場合の車の運動

(ii) 左右方向の運動

左右のすべり摩擦係数が異なった場合でも、特に横方向の外力が作用しないかぎり、車両は左右方向の運動は

表-3.2 各種条件に対する制動停止距離

1) 道路構造令・湿潤状態の制動停止距離

走行速度	摩擦係数 f	制動おくれの距離 $0.694V$	制動中の距離 $V^2/254 \cdot f$	合計の距離
70km/h	0.30	49m	64m	113m
62	0.31	43	49	92
60	—	—	—	—
54	0.33	38	35	73
46	0.35	32	24	56
40	—	—	—	—
33	0.40	23	11	34
28	0.44	19	7	26
20	—	—	—	—

2) 普通コンクリート舗装、湿潤、路面温度 20°C の制動停止距離

走行速度	摩擦係数 f	摩擦係数一定の制動停止距離 $V^2/254 \cdot f$	2次式を用いた制動停止距離	減少率
70km/h	0.49	39.0m	32.1m	18%
62	—	—	—	—
60	0.54	26.2	21.9	16
54	—	—	—	—
46	—	—	—	—
40	0.65	9.7	8.4	13
33	—	—	—	—
28	—	—	—	—
20	0.81	1.9	1.8	5

3) 舗装面のすべり摩擦限界値を、30°C、60km/h、湿潤で0.4としたときの制動停止距離

走行速度	摩擦係数 f	摩擦係数一定の制動停止距離 $V^2/254 \cdot f$	2次式を用いた制動停止距離	減少率
70km/h	0.36	53.6m	41.9m	22%
62	—	—	—	—
60	0.40	35.4	28.1	20
54	—	—	—	—
46	—	—	—	—
40	0.51	12.4	10.4	16
33	—	—	—	—
28	—	—	—	—
20	0.66	2.4	2.1	13

しない。したがって路面のすべり摩擦係数の差だけでは車両の左右方向の運動は起こらない。

(iii) 回転運動

図-3.2の状態に車両があるとした場合の、回転のつり合いは次式のとおりとなる。

$$\begin{aligned} J_s \frac{d^2\theta}{dt^2} = & f_{f,l} \frac{W \cdot l_2}{2l} \left(l_1 \sin \theta + \frac{w}{2} \cos \theta \right) \\ & + f_{f,r} \frac{W \cdot l_2}{2l} \left(l_1 \sin \theta - \frac{w}{2} \cos \theta \right) + f_{r,l} \frac{W \cdot l_1}{2l} \\ & \times \left(-l_2 \sin \theta + \frac{w}{2} \cos \theta \right) + f_{r,r} \frac{W \cdot l_1}{2l} \\ & \times \left(-l_2 \sin \theta - \frac{w}{2} \cos \theta \right) \dots\dots\dots (3.35) \end{aligned}$$

これを積分すると

$$\begin{aligned} \left(\frac{J_s}{2} \right) \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = & f_{f,l} \frac{W \cdot l_2}{2l} \left(-l_1 \cos \theta + \frac{w}{2} \sin \theta \right) \\ & + f_{f,r} \frac{W \cdot l_2}{2l} \left(-l_1 \cos \theta - \frac{w}{2} \sin \theta \right) + f_{r,l} \frac{W \cdot l_1}{2l} \\ & \times \left(l_2 \cos \theta + \frac{w}{2} \sin \theta \right) + f_{r,r} \frac{W \cdot l_1}{2l} \\ & \times \left(l_2 \cos \theta - \frac{w}{2} \sin \theta \right) + C \end{aligned}$$

$t=0$ のとき、 $\theta=0$, $d\theta/dt=0$ とおくと

$$\begin{aligned} C = & f_{f,l} \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} + f_{f,r} \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} - f_{r,l} \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} \\ & - f_{r,r} \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} = \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} (f_{f,l} + f_{f,r} - f_{r,l} \\ & - f_{r,r}) \dots\dots\dots (3.36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{d\theta}{dt} = & \left\{ \frac{2}{J_s} \left\{ f_{f,l} \frac{W \cdot l_2}{2l} \left(-l_1 \cos \theta + \frac{w}{2} \sin \theta \right) \right. \right. \\ & + f_{f,r} \frac{W \cdot l_2}{2l} \left(-l_1 \cos \theta - \frac{w}{2} \sin \theta \right) \\ & + f_{r,l} \frac{W \cdot l_1}{2l} \left(l_2 \cos \theta + \frac{w}{2} \sin \theta \right) \\ & + f_{r,r} \frac{W \cdot l_1}{2l} \left(l_2 \cos \theta - \frac{w}{2} \sin \theta \right) \\ & \left. \left. + \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} (f_{f,l} + f_{f,r} - f_{r,l} - f_{r,r}) \right\} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (3.37) \end{aligned}$$

式(3.37)の〔 〕の中を X とおきかえると

$$t = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\sqrt{X}} \dots\dots\dots (3.38)$$

また X を変形すると次のようになる。

$$\begin{aligned} X = & \frac{2}{J_s} \left\{ \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} \cos \theta (-f_{f,l} - f_{f,r} + f_{r,l} + f_{r,r}) \right. \\ & + \frac{W}{2l} \frac{w}{2} \sin \theta (f_{f,l} \cdot l_2 - f_{f,r} \cdot l_2 + f_{r,l} \cdot l_1 - f_{r,r} \cdot l_1) \\ & \left. + \frac{W \cdot l_1 \cdot l_2}{2l} (f_{f,l} + f_{f,r} - f_{r,l} - f_{r,r}) \right\} \end{aligned}$$

道路上で左右の摩擦係数は異なるが、前後は同じであるとするとき $(f_{f,l} + f_{f,r} - f_{r,l} - f_{r,r}) = 0$ となる。したがって式(3.38)は次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} t = & \int_0^\theta \frac{d\theta}{\left\{ \frac{2}{J_s} \cdot \frac{W}{2l} \cdot \frac{w}{2} \sin \theta (f_{f,l} \cdot l_2 - f_{f,r} \cdot l_2 \right. \\ & \left. + f_{r,l} \cdot l_1 - f_{r,r} \cdot l_1) \right\}^{1/2}} \\ = & \frac{1}{\left\{ \frac{2}{J_s} \cdot \frac{W}{2l} \cdot \frac{w}{2} (f_{f,l} \cdot l_2 - f_{f,r} \cdot l_2 + f_{r,l} \cdot l_1 \right. \\ & \left. - f_{r,r} \cdot l_2) \right\}^{1/2}} \int_0^\theta \frac{d\theta}{(\sin \theta)^{1/2}} \dots\dots\dots (3.39) \end{aligned}$$

式(3.39)を実際のトラックおよび乗用車について計算したものが図-3.3である。この図によると左右のすべり摩擦係数の差が0.15(約30%)の場合、乗用車では1.5秒程度で15°回転することになるが、トラックでは2.2秒で15°回転することになる。60km/hで走行した場合の制動停止時間は3秒程度であるので、完全に停止するまでには乗用車で30°以上、トラックで25°程度回転することになる。

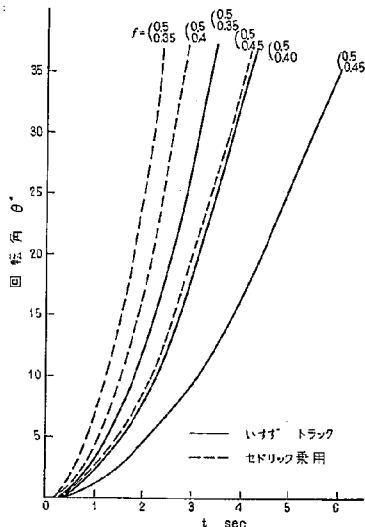


図-3.3 車種別回転角度

これら道路上のすべり摩擦係数の左右の差を測定することはなかなか困難であるが、今までに得られた実測値を中心に解析すると次のようになる。コンクリート舗装面の左右の差はいずれの舗装についてもあまり見られない。特殊なものを除いて左右の差は5%以内である。5%程度の差は建設した時のばらつきおよび測定の誤差範囲内と考えられる。

アスファルト舗装面ではいろいろの問題があるようである。まず首都高速道路については、建設直後には左右

の差は表われていないが(別表-2.4)通行開始より1年後の測定(別表-2.7)では右側が全体的に小さくなっている。その差は10~30%, 平均20%程度の差がでている。舗装直後に差がないのは大宮~吹上間(別表-3.13)でも同様である。17号線の岡部町の試験舗装(別表-2.8)はあまり左右の差は表われていないが、全体的にはいくぶん右側が小さい。千葉市宮野木の簡易試験舗装(別表-2.16)では左側が大きくなったり、右側が大きくなったりして非常にばらばらになっている。簡易舗装のために舗装面が均一でないことをよく表わしている。名阪国道のものは交通開始後あまり経過していないときの測定値なので左右の差は小さく、大体10%以内である。次に土木研究所のアスファルト試験走路であるが、数多くの測定のいずれもたいした左右の差はなく、大体5%以内である。これは走行車両が少ないために、車両による研摩圧密が少なく、気象による風化が均等に行なわれているためであると考えられる。東京都内の道路のように幅員が広く、車線区分が明瞭でなくて、車両が比較的自由に走行している所ではやはり左右の差は見られない。ただ4号線の東京都内では(別表-3.3)場所的なばらつきが大きく、特に摩擦係数の低下した所で大きく30%に達している。これが事故の原因となっていると考えられる。曲線部分は直線部分に比べて右側が小さい(別表-3.4)。これは曲線部ではやはり多くの車両が中央部を走行するためと考えられる。

これらを総合するとコンクリート舗装では左右の差はあまりない。アスファルト舗装では、まず舗装直後には左右の差はないが、走行車両による研摩圧密が影響するので路面上で左右の踏み回数に差のあるような所では、年月の経過と共に差が大きくなる。余裕のある車線区分道路とか、地方部往復2車線道路で中央線のない所、曲線区間等で差が大きい。反対に余裕のない車線区分道路とか、広幅員で自由に走れる道路、交通の特に少ない道路では差は少ない。

左右の差は5%程度までは建設および測定のばらつきと考えられる。アスファルト舗装の場合走行車の影響をうけて10%程度まではやむをえないようである。20%の差が表われているような道路は一部に限定されており、他の原因と重なって事故を起こす危険があるので注意を要する。30%の差が表われている地点はそれのみでも事故に関連しているようである。

(2) 曲線部走行とすべり

(1) 曲線部走行時のつり合い

質量 M の自動車が半径 R の曲線部を速度 V で走行する場合には、自動車は MV^2/R なる遠心力をうける。これに対してタイヤと路面の間の横すべり摩擦係数を f とすると、タイヤに $M \cdot f \cdot g$ なる横すべり摩擦抵抗が働

いてつり合って走行することができる。遠心力が更に大きくなって $M \cdot f \cdot g$ より大きくなった場合には横方向にすべり始める。曲線半径の小さい部分には普通横断面こう配 i を付けており、そのこう配のために $i \cdot M \cdot g$ なる横方向力が働くことになる。このとき $(f+i)g \geq V^2/R$ の間は走行中遠心力による横すべりは起こらず安全である。しかしこの場合の f は最大横すべり摩擦係数であって、横すべり角の小さい値に対する横すべり摩擦係数ではない。

実際に曲線部を走行中は速度および半径に応じた外向の遠心力から片こう配による内向の横方向力を差引いただけの横力が働くことになり、この力に対応する横すべり角だけの横すべりは起こっていることになる。普通の走行状態ではこの横力は $0 \sim 0.15g$ 程度であり、¹⁹⁾ それに応じた横すべり角は $0 \sim 3^\circ$ 程度である。横すべりを起こしていない普通の走行状態であっても自動車は上述のように $0 \sim 3^\circ$ 程度外方にすべりながら前進していることになる。しかしこれは運転手がその角度だけ内方にハンドルを切ることによって容易に補正され、実際にはあまりすべっていることも感じないのである。したがって合成横力が最大横すべり摩擦抵抗より大きくなったとき始めて危険であり、横すべりすることになる。一方曲線部走行中の自動車の横力(遠心力から片こう配を差引いたもの)は走行の快適性の面から 0.15 程度に制限されているため、路面の最大横すべり摩擦係数が雪氷その他特殊の事情によって 0.15 以下に落ちないかぎり走行上は安全である。

(2) 走行中制動した場合

曲線部を走行中に制動した場合、自動車は切線方向にすべすることは明らかである。この場合自動車の回転角速度を無視すると図-3.4のとおりとなる。図において制動停止距離 x は制動時の速度 V と路面の摩擦係数 f から容易に計算される。横断こう配はないものとしてスリップした車が走行車線の中心からはずれる距離 d は次のとおりとなる。

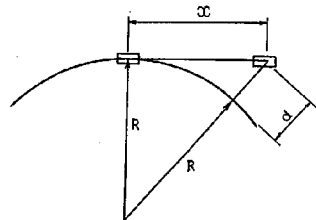


図-3.4 曲線部の偏走

$$d = (R^2 + x^2)^{1/2} - R = \left(R^2 + \frac{V^4}{4g^2 f^2} \right)^{1/2} - R \quad \dots\dots\dots (3.40)$$

これを 40km/h, および 60km/h について計算したものが図-3.5である。普通の状態ではこの偏走距離は車線幅 (3.0~3.5) に比してそれほど大きくないが、摩擦係数が特に小さくなったとき、半径の小さいときおよび走行速度が大きいたときには大きくなる。

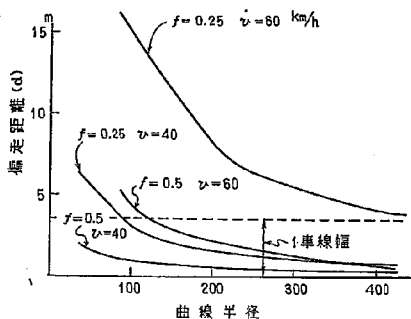


図-3.5 道路状態と偏走距離

一方直線路の横断こう配に原因する偏走は加藤氏の解²¹⁾によると、まずこう配に原因する偏走を進行方向 (X 方向) と横断方向 (Y 方向) に分け、X 方向に対する抵抗係数を $C \cdot f$, Y 方向に対する抵抗係数を $K \cdot f$ とし、 $C : K = dX/dt : dY/dt$, $C^2 + K^2 = 1$, タイヤの主すべり摩擦係数を f , 横断こう配を i とすると

$$Y = \frac{1}{2} i g t^2 - \frac{i f}{(i^2 + f^2)^{3/2}} \left[\frac{1}{2} (i^2 + f^2) g t^2 - V \right. \\ \left. \times \left\{ f + (i^2 + f^2)^{1/2} \right\} t \right] \\ - \frac{i f^2 V}{(i^2 + f^2)^{3/2}} \left\{ (\log e \{ (i^2 + f^2) g t - f V \}) \right. \\ \left. \times \left[t - \frac{f V}{(i^2 + f^2) g} \right] - t \log e \{ V (i^2 + f^2)^{1/2} - f V \} \right\} \quad (3.41)$$

$$t = \frac{f V \{ f + (i^2 + f^2)^{1/2} + f^2 V + f V (i^2 + f^2)^{1/2} \}}{(i^2 + f^2) \{ f + 2 f^2 V + (i^2 + f^2)^{1/2} \} g} \quad (3.42)$$

となっている。式(3.41)の計算結果の一例は図-3.6のとおりである。式(3.40)の d から式(3.41)の Y を引いたものが実際に偏走する長さになる。 Y の値はかなり大きく、実際の道路上では $(d-Y)$ はほとんど 0 になる。

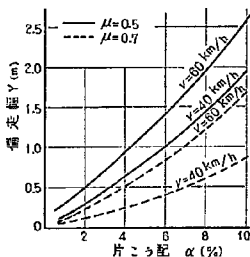


図-3.6 横断こう配と偏走

さきの計算において横断方向のすべり摩擦係数を $K \cdot f$ として考えたが、一方タイヤが回転しているときの最大横すべり摩擦係数はほぼ f に等しい。したがって一般に $K \cdot f < f$ である。この関係を実測したのが図-3.7, 図-3.8である。²²⁾ この実験では測定車は進行方向に進みながら、測定輪のみを θ° だけ傾け、その状況で制動した場合と制動しない場合の抵抗を記録した。記録は図-3.8

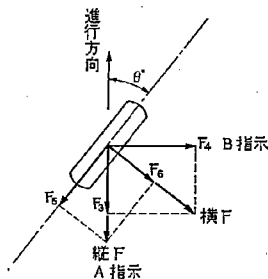


図-3.7 斜め方向のすべり

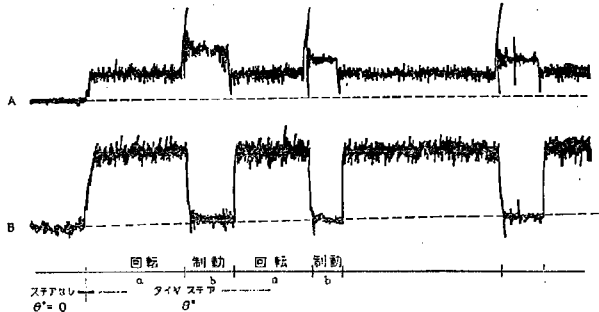


図-3.8 斜め方向すべりの抵抗値

のとおりである。これよりタイヤ方向およびタイヤに直
角方向の摩擦係数を計算すると図-3.9のとおりとなる。
ここで制動時の横抵抗係数 μ_x は回転時の横抵抗係数 f
に比してはるかに小さいことがわかる。すなわち制動時
(ロック)には自動車は小さい横力をうけても容易に偏
走することをあらわしている。曲線部を走行中制動した
場合事故を起こしやすいのはこの原因による。

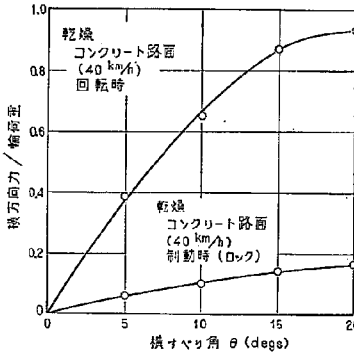


図-3.9 斜め方向すべりの抵抗係数

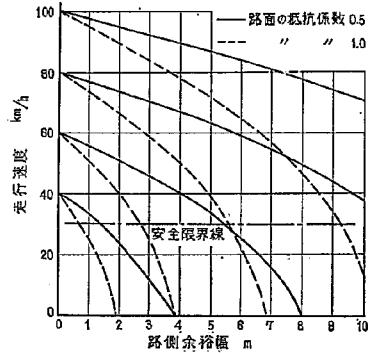
[3] 路側のすべり抵抗と走行の安全性

道路には走行の安全のために路肩幅がとられている。
その状況は道路の種類によって異なり、高級道路の場合
この幅は大きく、低規格の道路では小さい。普通この
余裕は走行中の側方余裕と、道路側方を見通しのため
であると考えられている。しかしその外に、もし何らかの
原因で自動車が側方に偏走した場合の安全性のためにも
役立つのである。統計資料^{(23),(24)}によると自動車は逸脱
する角度は道路方向に対してほとんど $10^\circ \sim 30^\circ$ であ
って、 15° が最も多い。すなわち自動車は 15° の角度で路
肩部分を通過する間に路側部表面のすべり抵抗によって
減速されるのである。

路側余裕幅を W 、偏走角を 15° とすると路側部分の
走行距離は $S = W / \sin 15^\circ$ となる。一方すべての場合の
速度と距離の関係は $S = (V_0^2 - V^2) / 2g \cdot f$ である。したが
って路側部分をすべって路側端に達したときの速度は
次のとおりである。

$$V = \left(V_0^2 - \frac{2 \cdot g \cdot f \cdot W}{\sin 15^\circ} \right)^{1/2} \quad (3.43)$$

(3.43)の計算の一例は図-3.10のとおりである。図にお
いて安全限界線とは、この速度で自動車が障害物等に衝
突した場合乗員は負傷はするが死亡にはいたらない大体
の限界線であって、自動車の設計技術者が一応の目標と
しているものである。この図からも明らかなように路側
の制動効果はかなり大きく、特に路側表面のすべり摩擦
係数を大きくした場合その効果は非常に顕著であって、

図-3.10 路側余裕幅と速度の関係 (偏走角 15°)

道路の規格に応じて十分安全な構造とすることが可能で
ある。

更に実際の道路では余裕幅と同時に片うち配を付し、
しかも残留する速度に対し適切な防護柵を設置するなら
ば道路に対する走行の安全性を定量的に確保することが
できると考えられる。この意味で路側余裕幅部分の構造
についてはすべり摩擦抵抗を十分検討して設置すべきで
ある。

4. 路面のすべり抵抗測定法

路面とタイヤゴムの間のすべり摩擦を測定する装置を
大別すると (1) 模型のゴム片を用いた室内試験装置と
(2) 実物のタイヤを用いた現場測定装置に分けられる。

[1] 室内試験装置

室内試験装置はゴムのすべり摩擦に関する定性的な研
究に使用される場合が多く、タイヤメーカーおよびゴム
関係研究所等で用いられている。摩擦係数を調べる方法
には普通次の四種がある。(1)一定引張力方法、(2)一
定速度方法、(3)振子式方法、(4)その他特殊な方法で
ある。

(1) 一定引張力方法

この方法は図-4.1のようにゴムブロックスライダーの
摩擦抵抗に重力が打ち勝つようにする。特別の場合には

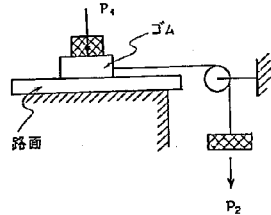
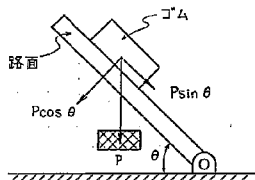


図-4.1 一定引張力方法

図-4.2のように傾斜面を用いてもよい。傾斜面の場合は傾斜角の $\tan$ が摩擦係数を表わす。ただしこれらの場合全にはゴムスライダの速度変化は小さく、慣性力は事実上無視している。一般にこれらの試験片はゴムスライダを使用するが、試験片に実物タイヤを使用し、ジャッキで荷重をかけて、路面に相当する板の方を引張る方法も行なわれている。



(3) 振子方式法²⁹⁾

これはエネルギー保存の法則を用いたもので、試験室でも道路でも手軽に路面の相対的な摩擦係数を測る方法である。ゴムのスライダをもつ振子を所定の高さから振りおろし、振子が路面をこすって振り上がる高さを読み取る方式である。しかしこのとき摩擦の定常状態は得られないからこの値はあくまで相対値である。この方法はスリップして走っているタイヤのトレッドエレメントの状況に依っている。振子方式でよく知られているのは英国の道路研究所が開発した Portable skid resistance tester である。写真-4.4にこの装置を示す。この試験器の測定値は約30mphの速度のときのタイヤのすべり特性とほぼ一致するといわれている。路面は常に湿潤状態にして測定する。この装置を使用した場合の大体の測定値の目安は表-4.1のとおりである。

(4) その他の方法

以上の外試験室で使用されているものに、写真-4.5、写真-4.6のようなものがある。写真-4.5はフランスの道路橋梁研究所で使用されているものであるが、図の右側の測定輪の制動トルクおよび回転速度を読みとるようになっている。写真-4.6³⁰⁾はペンシルバニア大学の回転試験機であり、回転輪に制動をかけその時の抵抗値を読み取るようになっている。更に写真-4.7³¹⁾はスノーデンの標準すべり抵抗試験装置であり、標準路面または試験タイヤのキャリブレーションに用いられている。原理は前述の定速度法に準ずるものである。

〔2〕現場測定装置

道路上でのすべりの現象は非常に複雑であるので、単なる定性的な室内試験や、一定の現場試験だけでは正確な状況をは握することは困難であり、目的に応じた種種の測定装置が考案されている。これを便宜的に測定の原理によって大別してみると、(1)減速度法、(2)制動停止距離法、(3)トレーラー法、(4)横すべり抵抗法法となる。

(1) 減速度法

この方法は自動車に適当な加速度計を乗せればよく、特別な試験車を必要としないので簡便である。ある速度で走行している自動車に制動をかけ、全輪をロックしてすべるときの減速度を加速度計(減速度計)で測定する。装置が簡単で安価であり、試験も単純であるが、急制動をするため他の交通の妨げになる。また得られた結果が試験車の全輪の平均値であり、試験車の特性が入りやすく、空気抵抗の影響も入っているなどの欠点がある。

試験車特性の影響の一つは、試験車は制動時に前下がりになるので、試験車に取りつけた減速度計は実際の前後方向の減速度の外に前下がりになった角度だけの重力の分力に相当する指示を加えた値を表わすことになる。

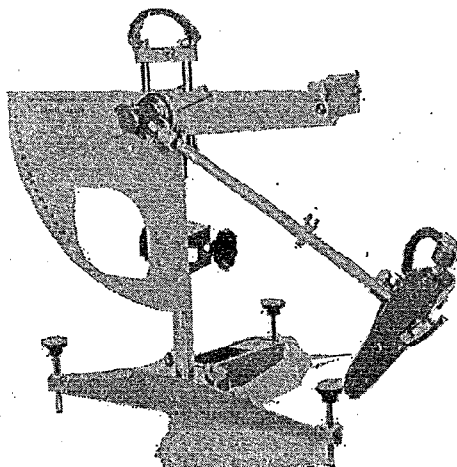


写真-4.4 振子型すべり摩擦測定装置 (英国)

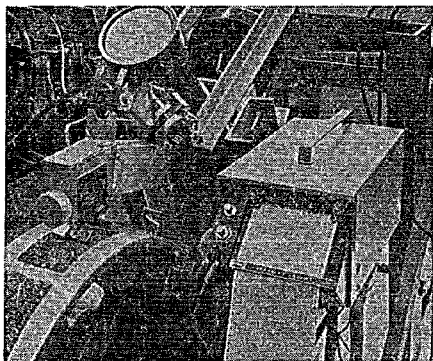
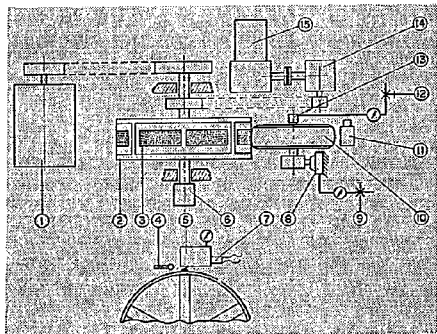
表-4.1 ポータブルテスターによる所要すべり抵抗記録値 (英国 R. R. L.)

分類	現場状況	ぬれた路面すべり抵抗	すべり抵抗標準
A	非常に困難な場所: (1) ロータリー (2) せまい道路で半径500フィート以下の曲線 (3) 坂道1/20またはそれ以上で距離100ヤード以上 (4) せまい道路で信号灯間近	65以上	良好: 高速走行でも必要条件を満たすべり事故を繰り返さないようなところ。
B	一般的必要条件すなわちAおよびC分類に該当しない道路または状態	55以上	一般的に申し分ない: 道路が遭遇する最も困難な状態を除いてすべての条件にかなった所
C	容易な位置、すなわち直線道路でなだらかなこう配とカーブで交差点がなく、特別条件(混交交通特に緊急状態を起す危険)のない所	45以上	順調な状態の場合だけ申し分ない
D	全般的場所	45以下	すべる可能性もある

※ 外見上なめらかな細かい表面性状の道路におけるなめらかなタイヤの車輪には適当なすべり抵抗がないことがわかる。そのような道路のために、ぬれた状態のもとで、すべりによる困難な後援がないことを保証するため、また事故研究が行なわれるべきである。



写真-4.5 摩擦およびすべり摩擦測定装置 (フランス)

写真-4.6 (a) 摩擦およびすべり摩擦測定装置
(ペンシルバニア大学)写真-4.6 (b) 摩擦およびすべり摩擦測定装置
(ペンシルバニア大学)

摩擦係数 f の代りに $(f \cdot \cos \theta + \sin \theta)$ を表わし、ほぼ $\sin \theta$ だけの誤差が生ずることになる。ここで θ は制動したときの車体の傾斜角である。この影響は試験車として用いる自動車の性質によって異なるので、個々の試験車について補正を加えなければならない。通常の自動車

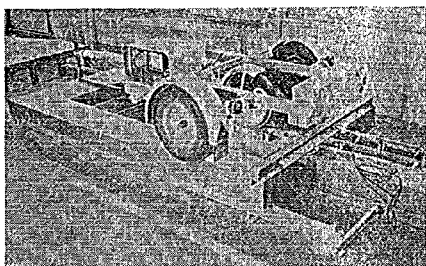


写真-4.7 標準すべり抵抗測定台 (スウェーデン)

に対する補正係数は0.95程度である。空気抵抗の影響については第2章で述べたが、特に高速でないかぎりあまり影響はないと考えてよい。この方法は試験車が完全に停止するまで制動を続ける必要がないので制動停止距離法に比べていくぶん有利である。

わが国で用いられている減速度計およびその測定記録の一例は写真-4.8、図-4.4のとおりである。米国で用いられているものにはタブレー減速度計その他いろいろある。タブレー減速度計は制動時間中の最大の減速度が目盛に示されるもので、刻々の減速度を記録する機構はもっていない。

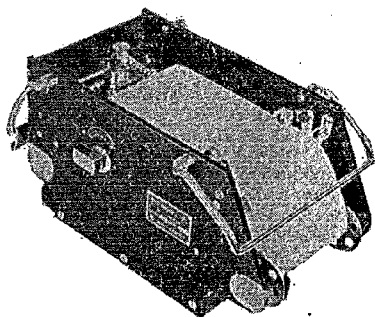


写真-4.8 ポータブル加速度計

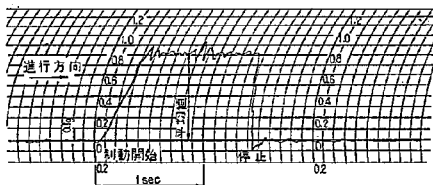


図-4.4 加速度計記録例

(2) 制動停止距離法

この方法も任意の自動車を使って測定できるので便利である。自動車が制動を開始してから完全に停車するま

での距離を測って路面のすべり摩擦係数を算出する方法である。路面のすべり摩擦係数と制動停止距離の関係式は第3章で述べたが、一般に制動停止距離法では式(3.7)(3.8)で計算される場合が多い。この場合空気抵抗、回転抵抗を無視する外に、すべっている間の摩擦抵抗力は常に等しいと考えたものである。乾燥時は比較的正しい係数値が得られるが、湿潤時には問題がある。更にこの方法は停止するまで制動を続けなければならないので、特にすべりやすい路面での試験が危険であり、他の交通の妨げにもなる。精度の低い理由は上記の外に第一に制動開始地点がはっきりしないことである。制動開始地点とスキッドマークの始点とは同一ではなく、スキッドマークの着き方も路面によって異なる。このための手段として制動開始と同時に制動灯の点灯と連動して路面にチョークをたたきつけて制動開始地点を明確にしたリ、ノズルからインクを路面に噴き出させ、そのノズルを電接時計と電磁石によって左右に振らせ、路面上に自動車の位置と時間との関係を画いてゆく方法もこころみられている。第2の問題点は制動開始時の速度(初速度)を正確に測定しにくいことである。しかも制動開始時の速度はすべり摩擦係数を計算する場合に2乗項として効くために全体の精度に大きく影響するのである。

(3) トレーラー法(縦すべり法)

トレーラー法は自動車に特別の測定車輪をけん引して、この測定輪に制動をかけ、そのときのけん引力を測定するものである。他の交通の妨げとなることが少なく、安全に試験を行なうことができる。路面を人工的に湿潤にする場合には、試験車輪の通過する幅だけの散水でよい。摩擦係数の計算に当っては、普通自由のけん引して、そのけん引力を測定する装置の場合、制動するとけん引軸に引張りと同時にモーメントが働き図-4.5より $N \cdot a = F \cdot r$ となり、 $N = F \cdot r / a$ なる揚力が働いている。ゆえにすべり摩擦係数 f は次式のとおりである。

$$f = \frac{F}{W - \frac{r}{a} F} \dots\dots\dots (4.1)$$

各地、各国でいろいろの装置が使用されているが主要なものをあげると次のとおりである。

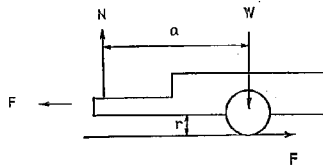


図-4.5 縦すべり状況

(i) 土木研究所中型すべり試験車

被けん引式の測定輪を中型バスに内蔵してお

り、輪重は荷重ブロックを適当に載荷して変えるようにしている。写真-4.9は外観である。散水装置も備えている。



写真-4.9 土木研究所中型すべり試験車

(ii) 建設省型すべり試験車

被けん引式の測定輪を中型バスに内蔵しており、輪重はエアシリンダーを通じて行なう。測定輪の制動はディスクブレーキによって行ない、このときの回転トルクを読み取るようになっている。その構造を図-4.6に示す。

(iii) 英国道路研究所型²⁹⁾

写真-4.10に示す。簡易な装置であり100mphの速度まで測定できる。

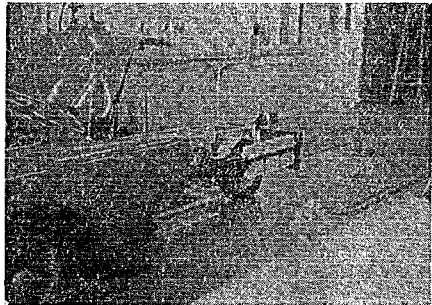


写真-4.10 トレーラー型すべり試験車(英国)

(iv) スウェーデンのすべり試験車³⁰⁾

写真-4.11に示す。トラックの床下に取りつけられた



写真-4.11 スウェーデンのすべり試験車

(viii) ドイツのすべり試験車

写真-4.15に示す。一輪トレーラーですべり率は100%のみで変えられない。試験時以外には試験車輪を油圧ジャッキで持ち上げておくことができる。なおこの外にスノーデン式トレーラー型のものを輸入して使用しているのは先に述べたとおりである。

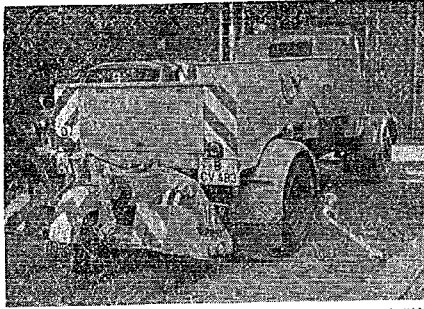


写真-4.15 ドイツのすべり試験車 (ベルリン工科大学)

(4) 横すべり抵抗力法

横すべり抵抗力法は試験車の走行方向に対して測定輪がある角度をなすようにし、このときの測定輪に加わる力のタイヤ回転面に直角な成分を測定して横すべり摩擦抵抗力とするものである。精度がよく、タイヤの摩耗や発熱が少ないので比較的長い区間を連続的に測定するこ

とができ、定速走行状態で測定できるので交通に与える障害が少ないことなどの利点があるが、測定装置がやや高価となり、測定値(横すべり摩擦係数)の標準化が困難なことなどの欠点がある。主要な測定装置をあげると次のとおりである。

(i) すべり測定用トレーラー No.1²⁸⁾ (土木研究所 島田式)

1937年土木試験所の島田技師は日本で始めてすべり測定車を製作し、各種の舗装面について測定した。これは図-4.7のような構造のものであって、縦すべり摩擦と横すべり摩擦の両方が測定できるようなものであった。

(ii) すべり測定用トレーラー No.2 (土木研究所)

写真-4.16に示す。大型の自動車でけん引するトレー

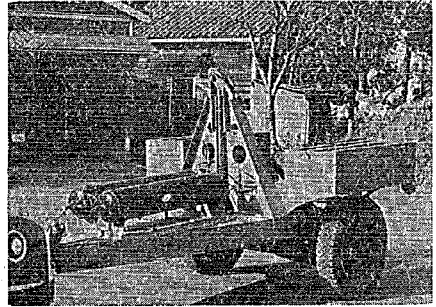
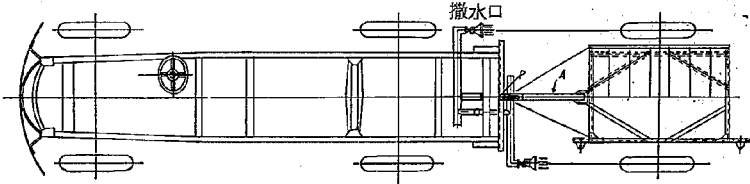


写真-4.16 横すべり測定用トレーラー (土木研究所)

(a) 縦すべり測定状態



(b) 横すべり測定状態

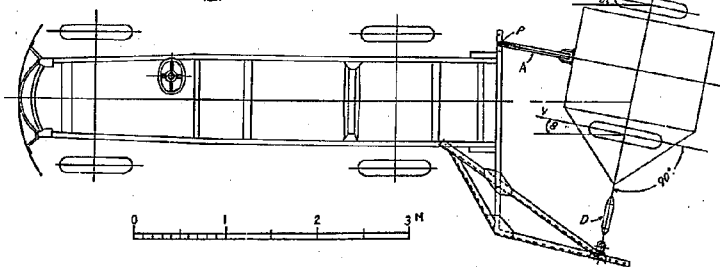


図-4.7 島田式すべり測定車

ラー型のものであって、走行中に圧縮空気によってトレーラーの左右輪を左右対称にトゥインに操向することができる。操舵角(横すべり角)は $0 \sim 35^\circ$ の範囲で可変である。トレーラーの両輪に制動をかけることによって縦すべり摩擦抵抗を測定することもできる。力の測定は抵抗線歪計を用いて電気的に行なわれる。試験速度はトレーラーの走行安定性の面から約 80km/h が最高である。この装置は取り扱いがやかかいであるので現在はあまり用いられていない。

(iii) 大型すべり試験車(土木研究所)

大型試験車に各種のすべり測定装置が着けられており、縦すべり摩擦抵抗、 $0 \sim 35^\circ$ の横すべり角の横すべり摩擦抵抗およびすべり率 $0 \sim 100\%$ の縦すべり摩擦抵抗が測定できるようになっている。本報告はこの試験車で実測した値を解析したものであって、装置については4.[3]で詳しく述べる。

(iv) 日本道路公団すべり試験車

写真-4.17に示す。トラックに装着したもので、縦すべり横すべり共に測定可能である。

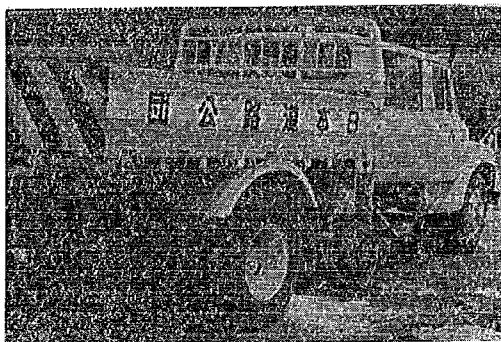


写真-4.17 日本道路公団すべり試験車

(v) 北大横すべり試験車

図-4.8に示す。横すべりのみ測定可能である。

(vi) 英国の横すべり試験車²³⁾

写真-4.18に示す。走行中に試験車輪を操舵すること

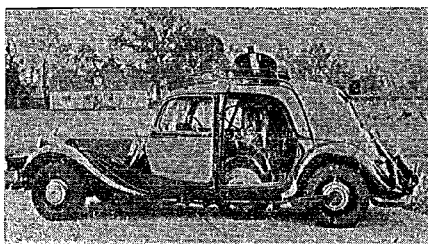


写真-4.18 英国の横すべり試験車

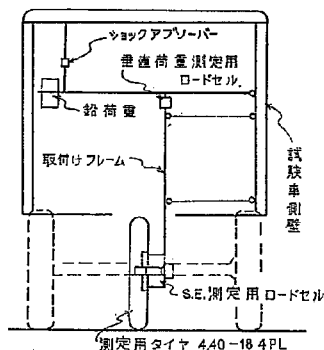


図-4.8 北大横すべり試験車

ができ、通常 20° の横すべり角で測定する。横方向力は油圧に変換され、ブルドン管に取り付けたペンを動かす。通常 30mph で測定し、 50mph まで測定可能である。

(vii) ストラドグラフ(フランス)²²⁾

シトロントラックに装備されており、走行中に試験車輪を 15° の角度に操舵することができる。測定速度は 40km/h 、横方向力は油圧ダイナモメーターによる直読式である。

[3] 本報告の試験に用いたすべり摩擦測定装置

本研究に用いた大型すべり試験車は土木研究所道路部道路研究室において、大型バスを改造してすべり測定装置を着けたもので、1957年に製作され、その後1966年にすべり率測定装置が付加されたものである。測定種類は縦すべり摩擦抵抗の外、横すべり抵抗およびすべり率のある縦すべり抵抗が測定できるようになっている。もちろん乾燥、湿潤の両方の測定が可能である。外観は写真-4.19のとおりであり、構造は図-4.9

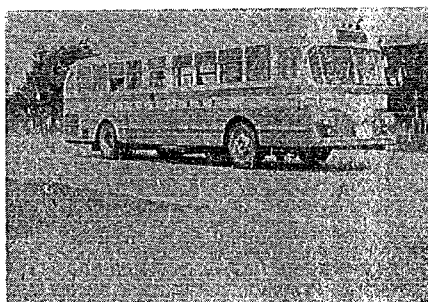


写真-4.19 大型すべり試験車(土木研究所)

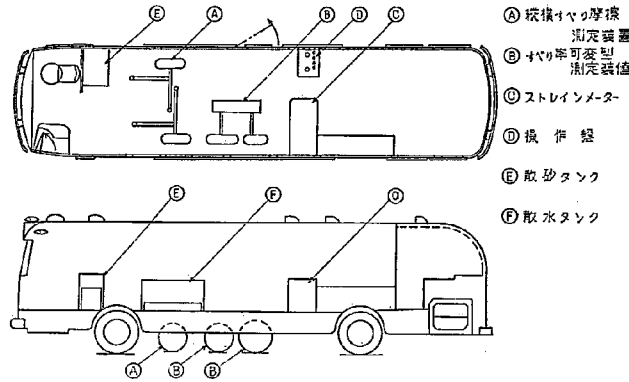


図-4.9 大型すべり試験車一般図

のとおりである。

(1) 本体

試験車本体はニッサンUDバスを使用したもので全幅2,450mm, 全長10,890mm, 自重10tである。リアエンジンで空気バネ懸架となっている。エンジン出力は230HP, 最高速度は120km/hである。

(2) すべり抵抗測定装置

すべり抵抗測定装置は2組からなっており, 1組は縦すべりおよび横すべり測定用であり, 他の1組はすべり率のある縦すべり測定用である。

(i) 縦すべりおよび横すべり測定装置

この装置は図-4.9のA部分に相当する。左右一對の測

定輪があり, これはおのおの独立しており別個の条件で測定できるので, 左右同時に測定したり, また異なった要素のものを同時に測定することもできる。細部の構造は図-4.10のとおりである。まず輪重の調節は空気圧で行なうようになっている。図-4.10の⑩の載荷シリンダーに空気圧を加えると⑩のロッドを通して⑩'のロッドに載荷される。載荷を除くのは⑩の載荷シリンダーの空気をぬけばよい。使用しないときは更に⑨のワイヤを引いて試験車輪をつり上げる。縦すべり抵抗を測定する場合には測定輪のブレーキドラム②を制動するとタイヤはロックされる。このときすべり抵抗によるタイヤの回転力はアクセル⑧に伝えられる。この回転力は次いで④④'

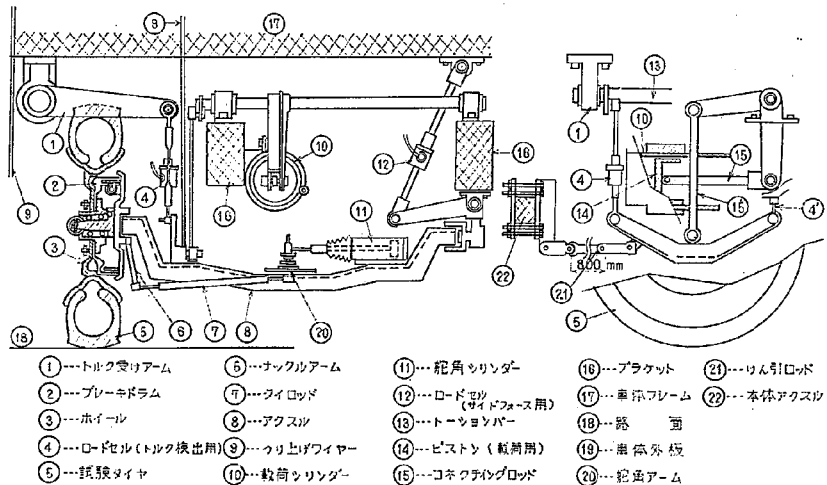


図-4.10 縦・横すべり測定機構

の圧縮および引張応力となり、④のストレインゲージに感応することになる。このとき④④'のナーの力はトーションバー⑬で結合され吸収される。またタイヤの前後方向の力はフリージョイントをもつロッド②で保たれるようになっている。したがってすべり抵抗によるタイヤの回転モーメントと④④'のモーメントとは等しくなり、タイヤ接地部のすべり抵抗力とストレインゲージ④の応力は比例する。

横すべり摩擦抵抗を測定する場合载荷は縦すべりの場合と同様である。タイヤは⑦のタイロッドを引いて適当な横すべり角度をつける。角度の調整は⑫の舵角アームに舵角に応じたノックピンが入るようになっており(5°~35°の7段階)このノックピンを入れた上で⑪の舵角シリンダー(空気圧)を操作すると⑦のタイロッドが所定の角度に応じた移動をするようになっている。横すべり抵抗力はアクスル⑬を通じて⑫のストレインゲージで測定されるようになっている。したがってストレインゲージ⑫に現れる力は $F \cdot \cos \theta$ に比例したものとなる。(Fは横すべり抵抗力, θ は横すべり角度)

(ii) すべり率のある場合の縦すべり測定装置

この装置は図-4.9のB部分に相当する。細部の構造は図-4.11のとおりである。図-4.11において①は縦すべり摩擦を測定する試験車輪であり、②は走行速度(タイヤ回転速度)の基準となる基準輪である。この両輪は⑥の変

速部と⑦のクラッチを介して連結されている。基準タイヤの摩擦抵抗力は試験タイヤの摩擦抵抗力に比して相当大きいように調整しておく。したがって走行中基準輪は常に路面上に密着してすべりは起らない。変速部で両輪の回転比率を適当に変え、それだけ試験輪がすべることになる。このとき試験輪のシャフトにつけられた④のトルクメーターで回転モーメントを測定し、タイヤ面のすべり摩擦抵抗を計算する。輪荷重は⑪の载荷シリンダーで行ない、⑨のロードセルで測定する。この装置はタイヤにすべり率のある場合の縦すべり摩擦抵抗の測定の外に、スパイクタイヤ、タイヤチェーン等の起動抵抗、回転しながらの側動抵抗等の測定にも用いられる。

(3) 計測記録装置

この装置は図-4.9のC部に相当する。各測定輪から得るストレインゲージコードをバス室内のストレインメーターを通してペンオシロに書かせるようになっている。

(4) 载荷および制動操作盤

図-4.9のD部に相当し、図-4.12のとおりである。载荷、制動はいずれも空気圧を利用して行ない、操作は電気スイッチで行なうようになっている。横すべり角もこの操作盤で設定し、試験終了後のタイヤ引揚用モーターの操作もこの盤で行なう。

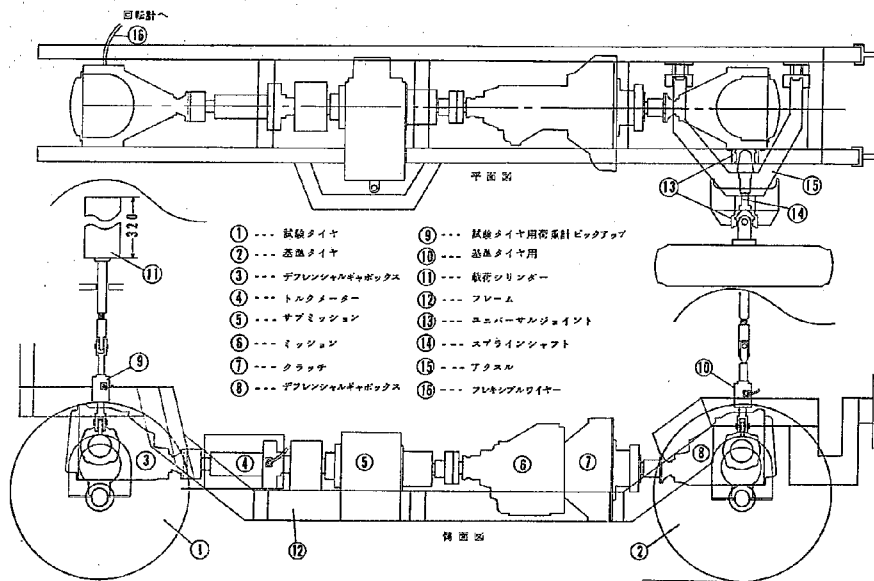


図-4.11 すべり率測定機構

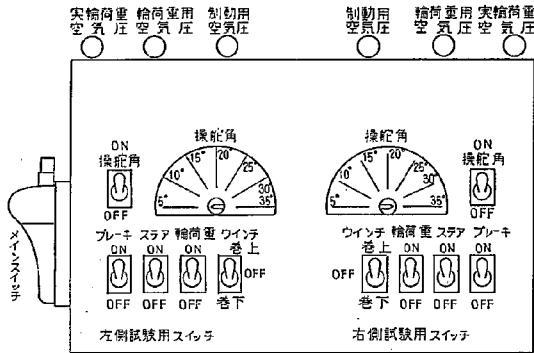


図-4.12 载荷および制動操作盤

(5) 散水装置

バス車内に水タンク2個を備えている。容量約400ℓである。吸水および散水共に付属のギヤーポンプで行なう。散水ノズルは各測定輪の前方におのおの1組ついており、操作は車内で行なう。水タンクの容量が小さいので大区間の測定には散水車を同行して測定を行なう。

(6) その他の付属装置

その他の付属装置として補助エンジン(17HP)1基を載せており、エアーコンプレッサー、水ポンプの回転に使用する外に発電にも用いる。砂、塩化物等の薬剤散布用ホッパーもある。付属品としてキャリブレーション用リング、タイヤ温度計および表面温度計をもっている。

5. 路面のすべり抵抗の実測値とその諸性質

(1) 主要路面のすべり抵抗の実測値

(1) コンクリート舗装のすべり摩擦係数

コンクリート舗装のすべり摩擦係数は主として別表1に示されているが、その外別表2～別表4の中にも特殊な状態のものが示されている。別表1によるとコンクリート舗装面のすべり摩擦係数は大体1.0～0.5、主として0.8～0.6の範囲にある。乾燥状態のものに比べて湿潤状態のものは常に小さい。また高速で測定したものは、低速で測定したものより小さい値となっている。外気温および路面温度との関係を見ると、温度の高いときの方が摩擦係数は小さいようである。最も摩擦係数の大きいのは別表-1.4、1.5の冬季コンクリート舗装面である。反対に最も摩擦係数の小さいのは別表-1.1、1.8の夏季舗装面である。別表-1.4～1.8は土木研究所の試験道路上のほぼ一定したコンクリート舗装面を、約2年間にわたって、同じ測定要領で計ったものであって、その数値は広い範囲にわたっており、路面のすべり摩擦係数は条件によって大きく変化することを表わしている。

別表-2.4～2.7は首都高速道路のすべり摩擦係数であるが、この中に千代田トンネル内のコンクリート舗装のものが示されている。別表-2.4は7月末の通行開始直前の測定値であるが、レイタンス、じんあい、高温の3条件が重なったためか0.3という非常に小さい値を示している。別表-2.5では通行車両のためじんあい除去され、レイタンスも一部取り去られたため0.5と良好になっている。別表-2.6は4月の測定で路面温度も低いため更に摩擦係数は大きくなり0.6～0.7と良好である。しかし別表-2.7、3.10では非常に小さくなり最小値は0.2になっている。このときは千代田トンネル内の

上り合流点では、すべりによる事故を多発している。現地を調査した結果ではトンネル内の漏水により常に舗装面が湿潤に保たれており、また漏水が側壁、天井等の厚いコンクリート層を通過する時に、コンクリート中に遊離しているカルシウム分を溶解して路面上に沈殿させていたことが明らかになった。これらの状況を写真-5.1～5.6に示す。この対策として首都高速道路公団では①比較的に沈殿物の少ない所に対しては塩酸を50kg/100m²散

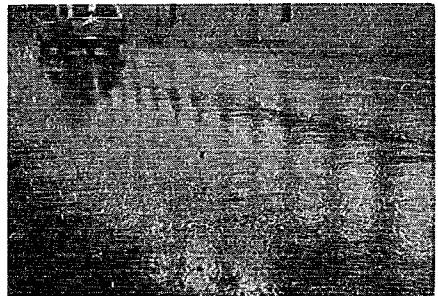


写真-5.1 最もすべりやすい区間



写真-5.2 最もすべりやすい区間

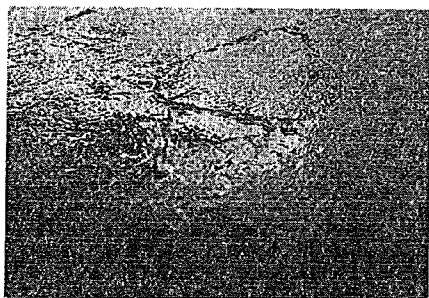


写真-5.3 最もすべりやすい区間（割れ目から地下水が滲出している）

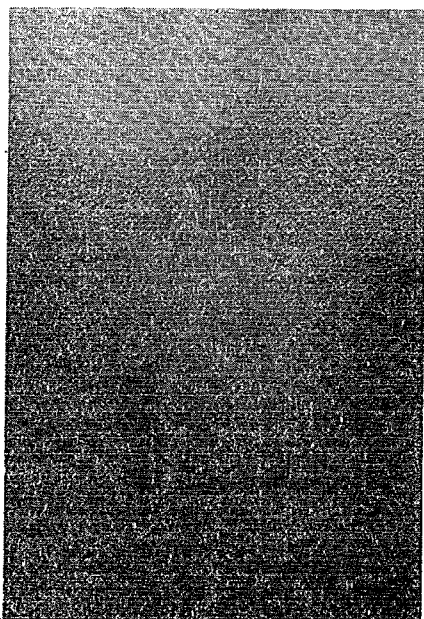


写真-5.4 天井にも沈殿物が見える

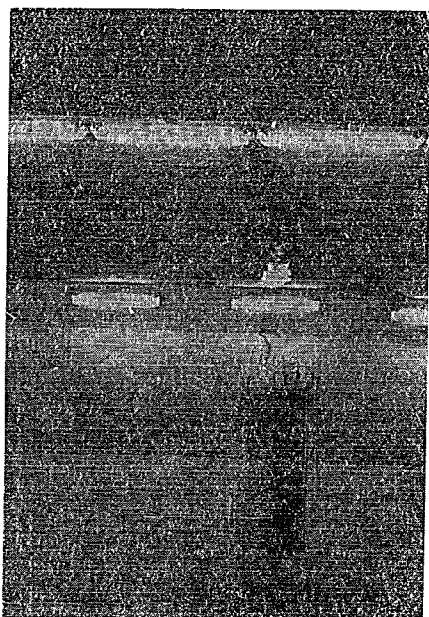


写真-5.5 天井、側壁の沈殿物



写真-5.6 普通の路面

布して洗い流す。②沈殿物の多い所はエポキシ樹脂下塗 0.5kg/m^2 、上塗 1.3kg/m^2 を行ない、エメリー（径 2.5mm 以下）を 5kg/m^2 散布接着させた。また比較のため③エポキシ樹脂下塗 0.5kg/m^2 、上塗 1.3kg/m^2 を行ない、エメリー（径 2.5mm 以下）およびシンパール（径 $5.0\sim 2.5\text{mm}$ ）を $60\%:40\%$ の比率で混合散布し接着させた。施工後の測定値は別表-3.11のとおりである。塩酸で洗った面は、他の良好なコンクリート舗装面と同じ係数値となった。エメリー接着面は良好なコンクリート舗装面より更に良好で、湿潤時 50km/h で 0.8 という非

常によい状態になった。エメリー単独のものと、エメリーとシンパールを混合使用したものの差はほとんどないが、わずかにエメリー単独使用のものが良好である。すべり止めに施工した路面の状況を写真-5.7～5.8に示す。このようにトンネル内のコンクリート舗装で潤水のある所は特に注意しなければならない。

別表-2.18は名阪国道のすべり摩擦係数であり、この中に関トンネルおよび加太トンネル内のコンクリート舗装面のすべり摩擦係数が示されている。共に乾燥状態で係数は十分大きい、湿潤状態のものはやや小さい。



写真-5.7 ニメリー舗装面

一般にコンクリート舗装はトンネル内のものがすべりやすいので特に注意が必要である。

(2) アスファルト舗装のすべり摩擦係数

各種のアスファルト舗装のすべり摩擦係数を別表-2.1～2.32に示した。アスファルト舗装は一般にコンクリート舗装に比べて摩擦係数は小さいように考えられがちであるが、表より明かなように、最近の良好に施工されたアスファルト舗装はコンクリート舗装と同等か、またはそれ以上に大きい摩擦係数を持っている。ただフラッシュしたり、シーラコート層を作って十分に骨材を圧入しなかったような舗装では特別に摩擦係数が小さくなる。またアスファルトの配合率の多い混合物も比較的すべり摩擦係数は小さい。

別表-2.1～2.3, 2.30, 2.31 は名神高速道路の摩擦係数である。夏季に小さく、冬季に大きいのはコンクリート舗装の場合と同様である。首都高速道路の摩擦係数を別表-2.4～2.7に示す。乾湿、温度、速度の影響については他のものと同様である。

別表-2.8～2.15は国道17号線の岡部町の試験舗装の摩擦係数である。舗装の種類は別表-2.8に表わしてありとおり多種多様であるが摩擦係数にはあまり差がない。摩擦係数の差は舗装の種類によるもの(最大20%)よりも季節別の差の方(平均40%)がはるかに大きくなっている。表中No.24が最も摩擦係数が小さい。次いでNo.13, No.14, No.15, が少し小さいようである。これらはいずれもアスファルト量の多いものであり、アスファルトの配合率(空隙および比表面積を考慮した上で)の多いものがすべりやすくなっている。No.3～6はいわゆるゴム混入アスファルトである。ゴムを混入したために、特に摩擦係数が大きくなった状況は見られない。

簡易舗装の試験舗装での測定値は別表-2.16である。この中で特に摩擦係数が小さくなっているのはSAM(A)およびAEM(B)である。共にアスファルトの使用量が多く、シーラコートも $10/m^2$ 以上散布している。現地を見てもフラッシュしたあとは十分認められる。反対に摩擦係数が大きいのはデックシールおよびSAM

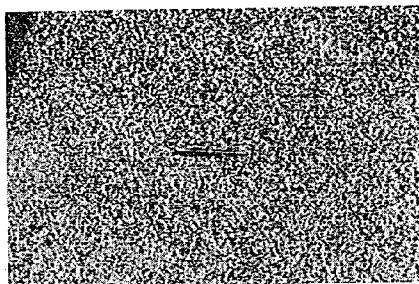


写真-5.8 ニメリーとシノパールの舗装

(B)であって、SAM(B)はシーラコートのないものである。現地を見てもフラッシュのない比較的スムーズな表面が摩擦係数は大きい。

第3京浜道路、名阪国道の摩擦係数は別表-2.17, 2.18, 2.28, 2.29に示してある。第3京浜の湿潤時の摩擦係数が0.4より小さいのはよくない。実際にも降雨時にときどきスリップ事故を起こしている。名阪国道のものは普通程度である。

土木研究所の試験走路のアスファルト舗装のすべり摩擦係数を別表-2.19～2.27に示す。乾湿、走行速度、温度の影響の傾向は他の舗装と同様であるが、高速道路等に比べて全体的に摩擦係数は大きい。これは一般道路に比べて走行台数が非常に少なく、走行車によって表面が研摩されたり、アスファルト合材が圧密されることがないためと思われる。

別表-3にも各種のアスファルト舗装のすべり摩擦係数を示しているが、良好なアスファルト舗装の摩擦係数は夏季、湿潤、60km/hで0.6程度であり、普通0.55～0.5程度が多い。条件(アスファルト量、骨材質)の悪いものでも0.45以上はある。

(3) すべり止め舗装のすべり摩擦係数

近時交通事故の増大と共にすべり止め舗装が大きく取り上げられ、全国いたる所にすべり止め舗装と称するものが施工されるようになった。これらの舗装の摩擦係数を実際に測定した結果が別表-3である。別表-3.1は4号線の福島一盛岡間の主要すべり止め舗装と、その前後に接した普通の密粒アスコンとの比較測定である。湿潤状態のデータがないので十分ではない。

甲府市内20号線ですべり止め舗装の比較試験を行なった結果を別表-3.2に示す。トベカ、ストレートアスファルト、ガムファルト、ポリベープ、RAセメントのいずれの舗装も同じ数値であって、湿潤50km/hで約0.65となっている。この場合すべり止め舗装の効果は特に表われてはいない。しかし路面温度 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ を考慮すると、湿潤、50km/hで0.65という摩擦係数は良好であり、トベカおよびストレートアスファルトによる舗装が

すべり対策上十分使用できることを示している。

17号線三国峠北側に施工したすべり止め舗装の比較試験結果を別表-3.6, 3.7に示す。この場合摩擦係数はトベカ、密粒アスコン、ギャップ型アスコンとわずかながら順次大きくなっているが、密粒アスコンとギャップ型の差はほとんどないと言ってよい。しかも全体的に摩擦係数は小さく施工がすべり対策上十分でないと思われる。

首都高速道路の摩擦係数は別表-2.4, 2.6, 2.7にある。表においてオープングレイド、グースアスファルトおよび密粒アスコンの三者を比較すると、いずれの場合にもオープングレイドと密粒アスコンの差はほとんどない。グースアスファルトは逆に湿潤状態では0.37~0.39と小さくなっている。アスファルト配合量が多いので考えられることであるがなお十分検討する必要がある。別表-3.10, 3.11は5.1(1)(1)で説明したが、高級すべり止め舗装の効果を測定したものである。

(4) 九州地建管内の主要道路のすべり摩擦係数

別表-4は九州地建管内の主要道路のすべり摩擦係数を測定した結果である。乾湿、速度および温度との相関は他のものと同様であるが、舗装の種類と係数値の明瞭な相関は得られていない。一般的にすべり止め舗装(No.16, 18, 19, 29, 122等)の摩擦係数は普通路面と比べて大きくない。ただ10号線宗太郎峠のすべり止め舗装は別表-3.40のとおり、かなり効果的であることがわかる。

(5) 特殊路面のすべり摩擦係数

舗装路面以外の特殊な路面の摩擦係数も問題になることがあるので2, 3測定した。

別表-5.1~5.9は仮設道路用鋼板の摩擦係数である。一般に鋼板は乾燥状態においては比較的摩擦係数は大きく安全であるが、湿潤状態になると急に小さくなるので十分注意しなければならない。しかし板に適当に加工することによりかなり良い成果を得ることが明らかになった。別表-5.10は路面に砂を散布した場合の摩擦係数である乾燥時に特に摩擦係数が低下している。

(6) ゴムの種類別すべり摩擦係数

ゴムの種類の相異による摩擦係数の差を知るための実験の結果は別表-6のとおりである。別表-6.1より現在市販されているタイヤの種類による摩擦係数の差はあまり大きくない。しかし別表-6.2より、今後使用されるかもしれない各種のものを考えると、ゴムの種類によっては摩擦係数が相当低下するものがあるので十分検討しなければならない。

(2) すべり摩擦に係る諸要因

前節の結果からも明らかのように、路面のすべり摩擦

係数は測定条件によって非常に変化する。一方ゴムのすべり摩擦状態における機構については2.で述べた。そこで本節においては摩擦係数に影響を及ぼす要因について検討し、そのうちの主要なものについては更に次節以降で詳しく検討することにする。

(1) タイヤ条件

(i) タイヤのゴム質

すべり摩擦機構から見るとゴム質は付着せん断抵抗、ヒステリシス損失および凝集力のいずれにも関係するので、タイヤのゴム質がすべり摩擦係数の大きい要因であることは当然である。ゴム質によって摩擦係数が異なることは図-2.9で述べたとおりであり、同様の実験を英国の道路研究所でも行っており、その結果は図-5.1²⁾のとおりである。これらの結果を見ると一般にゴム質はかたいものの方が摩擦係数は大きいようである。

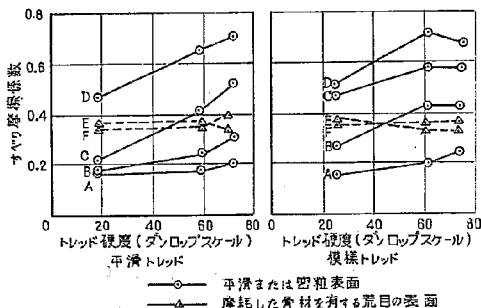


図-5.1 トレッドゴムのかたさとぬれた表面でのすべり抵抗 (英国)

ゴムの種類によっても摩擦係数が異なるのは当然である。さらに述べた図-2.10, 2.14に示すとおりであり、英国道路研究所の実験結果は図-5.2²⁾のとおりである。土木研究所の実験結果は別表-6.2のとおりであり、ブリヂストン社の実験結果は表-5.1のとおりである。ゴムの

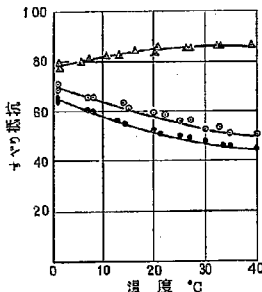


図-5.2 種類のタイヤゴムと荒目の表面を持つアスファルト路面との間のすべり抵抗と温度との関係 (英国)

表-5.1 ゴム質と摩擦係数

(その1) スキッドレジスタンステスターによる試験 (ブリヂストン社)

ゴム質 A: NR 配合
 B: SBR "
 C: SO "
 D: BR "
 E: IIR "

ゴム質	名神用アスコン		密粒アスコン		すべり止め工法アスコン		粗面コンクリート		平滑コンクリート	
	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
A	112	48	108	47	101	47	103	67	95	68
B	94	47	95	47	92	45	99	69	91	71
C	106	57	106	57	98	58	106	81	97	76
D	102	32	92	32	97	32	94	49	88	56
E	100	70	100	71	97	76	113	95	97	82

(その2) スキッドレジスタンステスターと

スキッドパッド実車による試験

ゴム質 A: SO 配合
 B: SO+BR 配合 A
 C: " B
 D: SO+Hi-Styrene 配合
 E: NR 配合

ゴム質	スキッドレジスタンス テスター	スキッドパッド実車	
		すべりはじめ	すべりの限界
A	49	0.36	0.47
B	43	0.36	0.48
C	39	0.36	0.43
D	46	0.37	0.45
E	44	0.35	0.42

種類が摩擦係数に影響するのはゴムの弾性, 付着せん断力, 凝集力の外に温度変化による性質の変化が大きく関係している。すべり面は発熱によってかなりの高温になり, そのためにゴムの一部がはく離または融解して路面に付着する場合がある。したがってゴムの融点, 軟化点もすべり摩擦に関係する。またゴムの種類によって親水性のものと排水性のものがあり, 湿潤時の試験ではその影響もあるようである。現在わが国で実用に供されている乗用車のタイヤはほとんどすべて合成 S.B.R. タイヤであり, トラック, バス等に使用されているのは主に天然ゴムタイヤである。この両者を比較したものは表-5.1, および別表-6.1 のとおりでありあまり差はない。しかし別表-6.2 を見ると今後使用が予想される BR (ポリブタジエンラバー) 混入合成ゴムはすべり特性が悪く, 特に BR 混入率が多くなるにしたがってすべり摩擦係数が減少すると考えられるので十分注意する必要がある。³⁾ ま

た別表-6.2より英国製ポータブルテスターの試験片による摩擦係数はわが国の一般タイヤ用ゴムのいずれのものよりも小さいことが明らかになった。その差は10~20%に達し, 湿潤で高温のときにその差は大きい。

(ii) トレッドパターン (路面模様)

タイヤ表面のトレッドパターンがすべり摩擦に係るのは, 主として湿潤時である。タイヤに適当な排水 (集水) 用の溝を作っていないと, 接触面全体に水が分布して摩擦抵抗を低下させる。適当な排水溝があった場合はそこに水が集まり, 真の接触面は少量の水の皮膜が残るだけとなり, 摩擦抵抗もそれほど低下しない。乾燥時にはむしろ平滑なトレッド面の方が摩擦抵抗が大きいことは先に述べたとおりである。

駆動時の摩擦抵抗は少し状況が異なる。駆動時の中でも一般の車両が平坦な舗装面で駆動を開始するときにはさきに述べたとおりであるが, 路面に凹凸がある場合で駆動時の低速走行のときは路面の凹凸とトレッドパターンの凹凸とが噛み合って抵抗を大きくすることもある。特に砂利道等ではこの傾向が強く, タイヤのトレッドが一種のキャピラの突起のような作用をする。このような所ではラグタイプまたはグリップタイプのトレッドの方が大きい抵抗をもつ。また泥ねいに近い所ではトレッドの突起によって抵抗を大きくする外に, タイヤが空転した場合タイヤと地面の間にあって潤滑の作用をしているやわらかい泥土を取除き, 摩擦抵抗力を増大して駆動力を大きくするためにグリップタイプまたはアースムーバタイプ (ラグタイプ) のトレッド模様の方が大きい抵抗力をだす。

積雪上で制動または駆動する場合の摩擦抵抗は単なるタイヤ面と雪面との摩擦抵抗の外に, トレッドの溝に入った雪のせん断抵抗を大きく利用する。完全なラグ型の場合には溝の中の前後の雪のつながりがなくて雪がこね

れやすく、したがって前後方向の摩擦抵抗が小さく、また横方向のすべり抵抗も小さい。完全なリプ型の場合には溝の中の雪はこわれにくい、前後方向のせん断抵抗が少ない。したがってラグとリブとをかね合わせたような斜めパターンのものがよい。これがいわゆるスノータイヤである。スノータイヤの外にチェーンを巻き付けてすべり抵抗を大きくしようとしたものとか、スパイクを着けたものもある。

トレッドパターンは上述のような効果があるので、逆にトレッドが摩耗した場合はそれだけ効果が小さくなり、摩擦抵抗に影響を及ぼすことになる。その影響の程度はなかなかむづかしいが図-5.3、5.4にブリヂストン社で行なった実験結果の一例を示す。

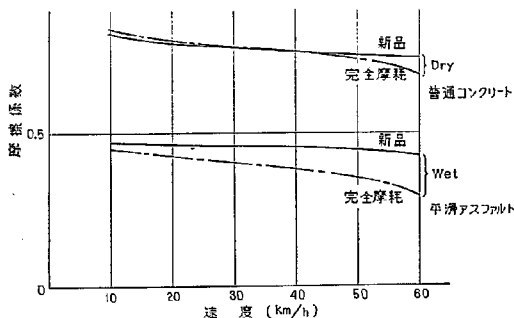


図-5.3 タイヤ摩耗による摩擦係数の変化(ブリヂストン社)

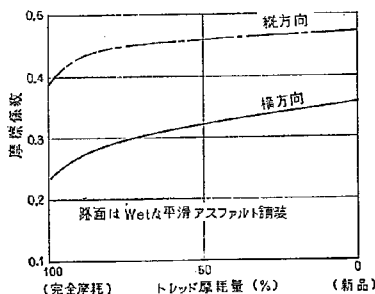


図-5.4 トレッド摩耗量と摩擦係数
(ブリヂストン社)

(iii) タイヤ内圧および接地圧

タイヤの内圧が変化した場合当然接地圧も変化し、摩擦係数は変化する。まず縦すべり摩擦係数についてはタイヤ内圧が増加すると接地面積が減少し、摩擦面の接地圧力が増大する。摩擦面の単位圧力が増大すると、さきに述べた一般論により付着せん断抵抗が減少し、摩擦係数が小さくなる。しかし湿潤路面の場合には排水の問題

があり、排水上は単位圧力の大きい方が有利なのであまり顕著な差は認められない。

横すべり摩擦係数については、横すべり角の小さい間の横すべり摩擦係数は、接地面の摩擦力よりもタイヤ自体のねじり抵抗の影響の方が大きい。したがってタイヤ内圧が増大すると一般にタイヤの剛性は増大し、横すべり摩擦係数は増大する。しかし最大横すべり摩擦係数はほぼ縦すべり摩擦係数と等しいので、タイヤ内圧が増大すると最大横すべり摩擦係数は減少する。これらの関係を図-5.5に示す。湿潤路面の場合もタイヤ内圧が増大すると、横すべり摩擦係数は増大するが、最大横すべり摩擦係数は排水性と付着せん断力の関係で増大する場合も、しない場合もある。

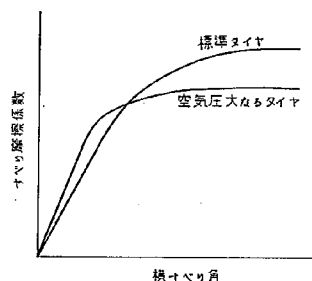


図-5.5 タイヤ内圧とすべり摩擦係数

(iv) 輪荷重およびタイヤの形状

輪荷重が増減してもタイヤ内圧が変化しない範囲では縦すべり摩擦係数はあまり変化しない。しかし横すべり角のある横すべり摩擦係数は一般に輪荷重の増大と共に減少する。これは輪荷重が増大すると接地付近のタイヤがやや扁平となり、横方向の剛性が減少するためと考えられる。タイヤの大きさはあまり摩擦係数には関係しない。しかしタイヤの横断形状は横剛性に関係するので、横すべり摩擦係数に関係してくる。タイヤの太さやタイヤ内径との比も横剛性に関係し、横すべり摩擦係数を変化させる。

(v) ラジアルタイヤ

最近タイヤの高速走行特性を良好にするためにラジアル方向のカーカスを使用したラジアルタイヤが一部に使われている。ラジアルタイヤは横断面の剛性が強いので先に述べた考えと同様に横すべり摩擦係数が大きい。この状況を図-5.6に示す。

(2) 路面条件

(i) 路面および舗装の種類

路面の種類によって摩擦係数は異なる。一般に舗装し

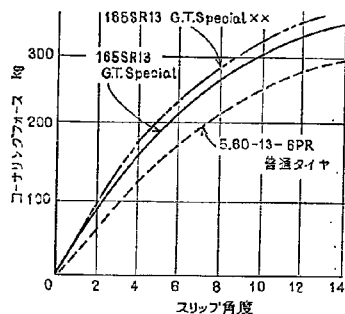


図-5.6 ラジアルタイヤのコーナーリングフォース
G. T. Special は横浜ゴムレイヨン90度
カーカスラジアルタイヤ
G. T. Special ××は横浜ゴムナイロン
70度カーカスラジアルタイヤ

た路面の摩擦係数が一番大きいことは明らかである。別表の実測値をまとめると表-5.2のようになる。冰雪路面上の摩擦係数の小さいのはゴムと氷の摩擦係数が小さいためであって、これはよく知られている。砂利道上の摩擦係数は舗装面よりやや小さい。鉄板の仮設路面の摩擦係数は小さく、特に湿潤時に小さい。

表-5.2 路面の種類別のすべり摩擦係数の範囲

路面の種類	摩擦係数の範囲	
	乾 燥	湿 潤
コンクリート舗装	1.0~0.5	0.9~0.4
アスファルト舗装	1.0~0.5	0.9~0.3
砂 利 道	0.6~0.4	—
銅 板 等	0.8~0.4	0.5~0.2
積 雪 路 面	—	0.5~0.2
氷 路 面	—	0.2~0.1

舗装面の摩擦係数について、舗装の種類はすべり摩擦係数の決定的要素でないことは別表の実測値からも明らかである。どんな種類の舗装でもその組成、表面あざさ、対摩耗性などによって、すべり摩擦係数が大きい場合も、小さい場合もある。セメントコンクリート舗装と瀝青系舗装の比較でもあまりはっきりした差違はなく、瀝青系舗装の方が摩擦係数の分布の範囲が広くになっている。

湿潤時の摩擦を主として考えると、摩擦抵抗の大部分は骨材とタイヤの間の摩擦であるので、なるべく結合材量を少なくして、骨材が多く表面に表われるようにした舗装がよい。ゴム混入アスファルトを使用した舗装はすべり摩擦の面で普通のアスファルト舗装より多少すぐれているといわれている。しかしこれもゴム混入アスファルトの材質そのものの原因ではなく、間接的に表面の骨

材組成が良好になったためであると考えられる。

ブロック舗装の摩擦係数が特に大きくないことは、単位面積当たりの圧力が大きくなることから容易に説明される。

(ii) 骨材の性質

舗装面のすべり抵抗を負担するのは主として骨材であるため、骨材の性質は摩擦係数に重要な関係がある。骨材の種類に応じた摩擦係数の変化を図-5.7~5.10に示す。鉾津や砂岩、安山岩等はすべり止め骨材として良好であり、特にエメリーおよびシリカサンドはすぐれたすべり止め効果を表わす。一方石灰岩は摩耗に弱く、摩耗した場合平滑になるのですべりの原因となる ことが多

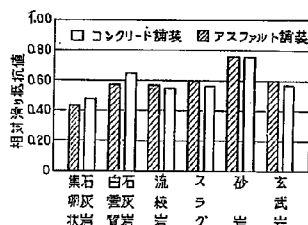


図-5.7 舗装の種類別、岩種別によるすべり抵抗値 (J. W. Shope)

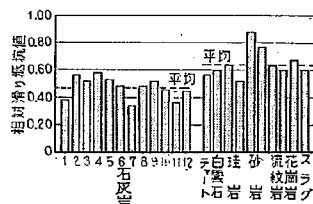


図-5.8 アスファルト舗装の岩種によるすべり抵抗値 (J. W. Shope)

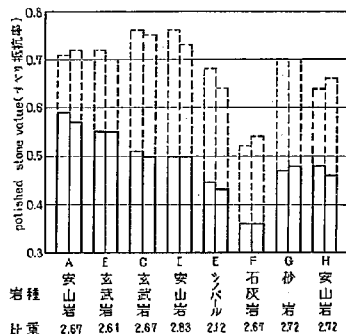


図-5.9 岩種別摩耗試験結果 (北海道大学)
(点線は摩耗前、実線は摩耗後)

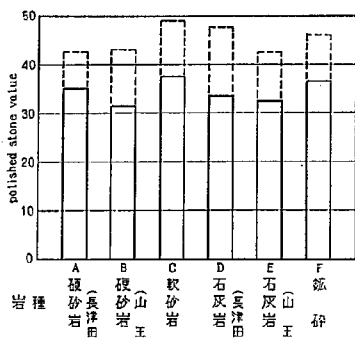


図-5.10 岩種別摩耗試験結果(土木研究所)
(点線は摩耗前、実線は12時間摩耗後)

い。このように骨材の摩耗性がすべりに影響するのは明らかであって、摩耗が少なく、特に摩耗しても平滑にならないものがよい。骨材の化学組成も一部すべりに影響すると思われるがあまり明かではない。

骨材の粒度についてはいろいろの意見があるが、まだはっきりした結論は得られていない。しかし普通の走行速度(80km/h以下)の状態では、路面の凹凸がゴムとの摩擦に影響する大きさは1mmより小さい所にあると考えられる。一方ハイドロプレーニングを起こすような高速走行(80km/h以上)または特に水膜の厚い場合には数mmまでの凹凸がすべり摩擦に影響すると考えられる。したがって骨材の粒度配合が直接すべりに関係するとは言えない。

(iii) 結合材の性質

結合材の種類はすべりに関係する。セメントペーストおよびアスファルトのすべり摩擦係数は別表-3.1, 3.2のとおりであり、それを表-5.3に示す。共にすべり摩擦係数は小さく、むしろすべりやすい原因となっていると考えられる。しかしセメントペーストはアスファルトペーストに比してやや摩擦係数は大きい。これがセメントコンクリート舗装の摩擦係数の範囲がせまい原因であると考えられる。アスファルトペーストの湿潤時の摩擦係数は非常に小さく、したがって瀝青の種類による差も少ないと考えられる。夏季高温ときすべり抵抗は瀝青物のかたさ(軟化点)にも関係する。アスファルト舗装がコンクリート舗装に比して路面温度の上昇にともなう摩擦係数の低下率がやや小さいのはこのためではないかと考えられる。

結合材の摩擦係数が小さいので、舗装の摩擦係数は、結合材の量、特に舗装表面の結合材量が多くなると摩擦係数は減少する。フラッシュしたり、シーコートを行なって十分骨材を圧入しなかったアスファルト舗装がす

表-5.3 結合材のすべり摩擦係数

測定路面	速度 km/h	摩擦係数		路面温度		摘 要
		乾燥	湿潤	乾燥 °C	湿潤 °C	
アスファルトペースト	20	0.538	0.309	12.8	11.5	41年 11月4日 晴
	40	0.480	0.111			
	60	0.447	0.073	14.0	11.8	
セメントペースト	20	0.513	0.339	11.5	11.5	41年 11月16日
	40	0.475	0.302			
	60	0.519	0.234	11.5	11.5	
アスファルトペースト	20		0.321		11.5	41年 11月16日
	40		0.180			
	60		0.142		11.5	
セメントペースト	20		0.457		11.0	41年 11月16日
	40		0.392			
	60		0.274		11.3	

べりやすいのはこのためである。フラッシュしないまでも重交通に圧密されたアスファルト舗装は摩擦係数が小さくなる。コンクリート舗装でもセメント量が多過ぎるとすべりやすくなる。特に仕上に当って表面にレイタンス、セメントペーストが多く残らないようにしなければならない。

(iv) 路面のあらさ

路面のあらさがすべり摩擦係数に關係することは十分考えられる。しかしこの場合の路面のあらさは高速走行時のハイドロプレーニングに關係する大きい凹凸と、普通の走行時のすべり摩擦に關係する微小凹凸に分けて考える必要がある。

普通走行時の摩擦係数に關係する路面あらさの測定法については一般には砂迹大法、立体視法、水透過法およびベルリン大学の機械的方法等があり、これらの測定値とすべり摩擦係数との種種の相関が得られている。

一方大きい凹凸は(1mm以上)普通走行時にはあまり摩擦係数の増大には役立たない。これは先に述べたゴムのすべり特性から明らかである。しかしこれらの大きい凹凸は路面の排水性という点で意味がある。一般に凹凸のある路面の方がタイヤ接地面の排水がすみやかである。凹凸があれば接地面は多くの部分に分割されるので水はその谷間に逃げやすくなり、水膜の厚い場合でも凸部は良好なすべり抵抗を示すことになる。この効果は平滑タイヤで顕著であるが、トレッドパターンのある場合はタイヤ自身が接地面を分割し、排水路をもつのであまり影響はない。

アスファルト舗装のオープングレイドと密粒度との比較は実測値を見ても普通の速度ではあまり差は認められない。しかしエメリー、シリカサンド等を使用して微小

な粗面仕上げを行なった舗装は最も摩擦抵抗が大きい。

(v) 路面の異物

路面の異物はすべり抵抗を減少させる。鉱物質のじんあいほころの作用をして摩擦抵抗を減少し、泥土等は湿潤時に潤滑作用をする。また油脂、タイヤのゴムの粉などもすべりの原因となる。降雨の始めにすべりやすいのはこれらの原因による。

別表-5.10 には舗装面上に砂が散布された場合の摩擦係数の実測値を示す。この結果は図-5.11, 5.12 のとおりである。いずれも砂の量の増大とともに摩擦係数は低下し、特に乾燥時の低下率が大きい。³²⁾ 砂の量が 400~500g/m² になると摩擦係数は一定となり、湿潤路面の最低値程度になる。

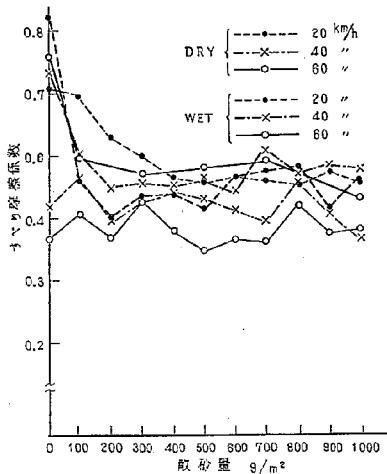


図-5.11 大型道路試験車による結果

雪氷のある路面については別に報告する。レーンマーク等路面表示を塗布した部分のすべり抵抗は湿潤時に小さくなる。

(vi) 乾燥と湿潤

湿潤路面の場合摩擦係数が小さくなるのは周知の事実である。これについては次節で述べる。

(vii) 温度および季節による変化

夏季と冬季で同一路面でも摩擦係数が異なることはよく知られている。冬季の摩擦係数は夏季に比べてかなり大きい。この原因は温度の影響と、季節による路面状態の変化の二つが考えられる。普通の気温の範囲では温度の上昇と共に摩擦係数は低下する。しかしアスファルト舗装ではこの傾向がやや少ない。それは高温になるとアスファルトが軟化するためであると考えられる。温度の影響は摩擦面でタイヤのゴムが焼け、または融解するた

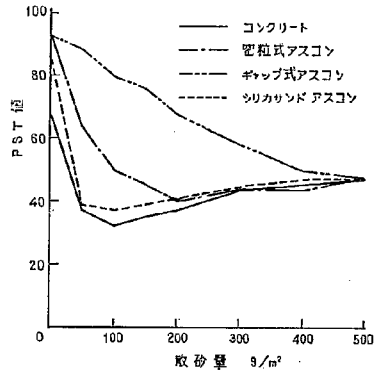


図-5.12 (a) ポータブルテスターによる結果 (乾燥)

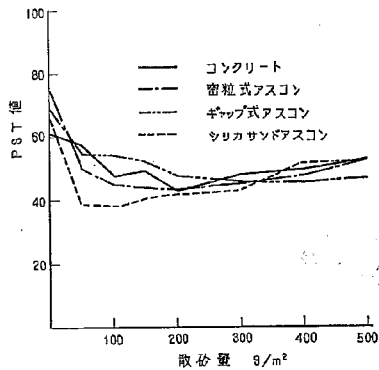


図-5.12 (b) ポータブルテスターによる結果 (湿潤)

めおよびタイヤゴムの性質の変化によって生ずるものである。温度が上昇すると摩擦面の温度も高くなり、ゴムが融解しやすくなる。また温度が上昇すればタイヤゴムのヒステリシス損失が減少し摩擦抵抗が小さくなる。一般に温度の影響は低温領域で大きく、高温 (40°C 以上) ではほとんどなくなる。すべり速度の特に小さい場合および平滑で湿潤な面の場合等では温度の影響は小さい。諸外国の実験結果を図-5.13, 5.14に示す。³²⁾

季節によって摩擦係数が変化する原因の大部分は温度であるが、温度の外にもいわゆる季節によって摩擦係数が異なる場合がある。アスファルト舗装等では交通車両によって舗装が圧密され、平滑になる場合がある。この現象は気温の高い時に多い。逆に交通および自然の気象によってはく離され粗面となるのは冬季に多く見られる。その結果同一温度であっても春と秋では摩擦係数は

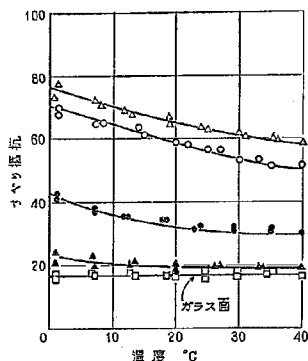


図-5.13 舗種の路面におけるすべり抵抗と温度 (英国)

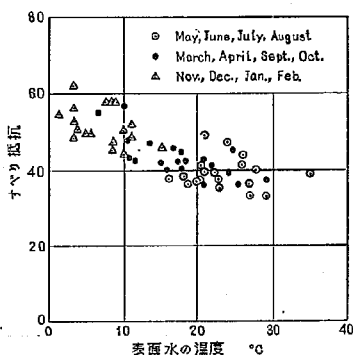


図-5.14 温度および季節変化とすべり抵抗 (英国)

異なり、一般に春の方が大きい。雨期と乾期の区別のある所では、雨期の方がすべり抵抗が大きい。それは雨期には路上の異物が洗い流されて少なくなるためである。

(viii) 経年変化

舗装面の摩擦係数は年月と共に変化し、通常いくぶん小さくなる。年と共に摩擦係数が減少するのは気象作用と交通作用によるが、主として交通作用による影響が大きいと考えられる。一つは重交通によって舗装体が圧密され平滑化することであり、一つは交通によって摩耗し平滑になることである。したがって経年変化は舗装の種類および組成と使用骨材の種類によって影響が異なる。良質な舗装で良質な骨材を使用したものは経年変化は少ないが、フラッシュしやすいアスファルト舗装や、平滑になりやすい骨材を使った舗装はその影響が大きい。

舗装の経年変化を知るための試験として各種の促進摩耗試験機が考案されている。²³⁾ 写真-5.9は英国道路研究

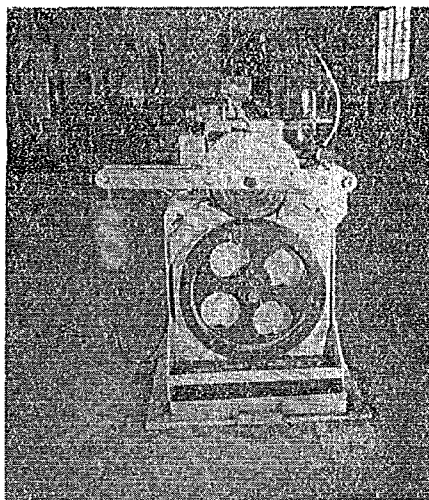


写真-5.9 骨材の促進摩耗試験機 (英国)

所型試験機であり、主として骨材の摩耗試験に使用される。写真-5.10(a)はベルリン大学の促進摩耗試験機であり、大型コアー面を写真-5.10(b)のように摩耗する。骨材、混合材、現地切り取り片いずれでも試験できる。写真-5.11はペンシルバニア大学の平盤促進摩耗試験機であり、現地舗装を切取って試験することができる。写真-5.12はスイス、チューリッヒ工科大学の促進摩耗試験



写真-5.10(a) 試験片摩耗試験機 (ベルリン工科大学)

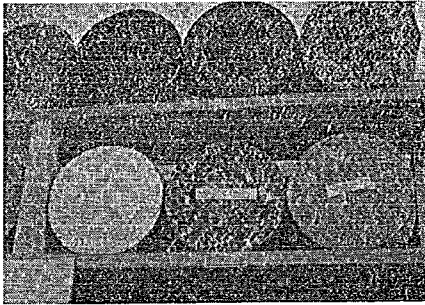


写真-5.10 (b) 摩耗試験後の試験片
(ベルリン工科大学)

機であって、試験機を現地の舗装上に置いて舗装体を切取ることなく試験できる。

経年変化のための促進摩耗試験は骨材の試験では十分であるが、正確には舗装体の試験を実施する必要がある。

(3) 制動条件

(i) 速度とすべり摩擦係数

タイヤと路面の間のすべり摩擦係数は速度の増加と共に減少する。最大摩擦係数は静止に近い低速の所で得られる。乾燥路面では速度の増大と共にわずかに減少し40km/h程度ではほぼ一定となる。湿潤路面では速度の増大と共に摩擦係数は大きく減少する。水膜の厚い場合には高速になるとハイドロプレーニング現象を生じ、更に抵抗係数は低下する。速度と摩擦係数の相関関係については更に次節で論ずることにする。

(ii) 駆動と制動

摩擦係数は自動車が駆動する場合と、制動する場合と共に働くことになる。方向は逆方向である。制動時の摩擦係数は一般に論じられているものであり、主としてタイヤがロックしたときの路面とタイヤの間の摩擦係数をいう。駆動時の摩擦係数は静止している車が発進するときのものであり、また走行中の車が加速するためおよび外からの抵抗(空気抵抗等)に対応するためにタイヤと路面の間に働く抵抗である。したがって駆動時の摩擦係数は静止摩擦(非常に低速な場合のすべり)に近い状態での摩擦であり、係数値は最も大きい。

道路に雪氷がある場合の駆動摩擦はやや趣を異にする。一般に雪氷上で駆動する場合、タイヤと路面の状況が良好な場合(摩擦係数が特に大きい場合)は舗装面上の駆動と同時に考えることができる。しかし雪氷上での

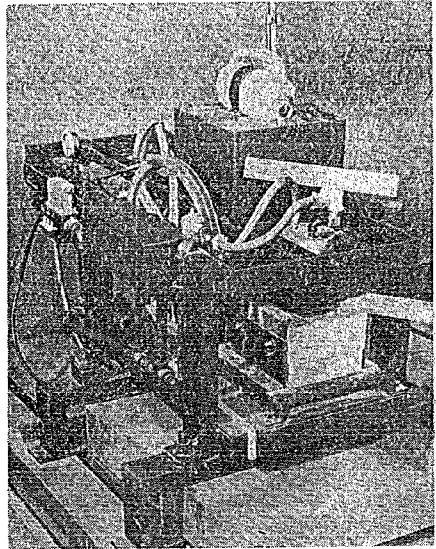


写真-5.11 平盤促進摩耗試験機
(ペンシルバニア大学)

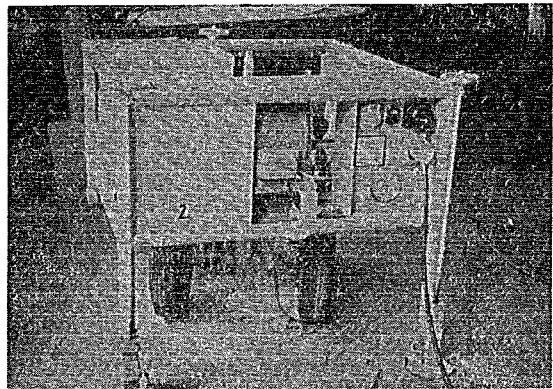


写真-5.12 路上促進摩耗試験機(スイス)

摩擦係数が小さくなると、どうしても駆動時にタイヤの一部空転を伴うようになり摩擦係数もかなり小さくなる。更に空転がはなはだしい場合は摩擦係数は非常に小さいものとなる。一方雪氷上ではタイヤのトレッド模様も大きく摩擦に影響を及ぼし、チェーン等の効果は前述の駆動時一部空転しているときに特に大きい。これらの状況を図-5.15に示す。⁴⁾ なお雪氷上の問題については別途詳しく報告するつもりである。

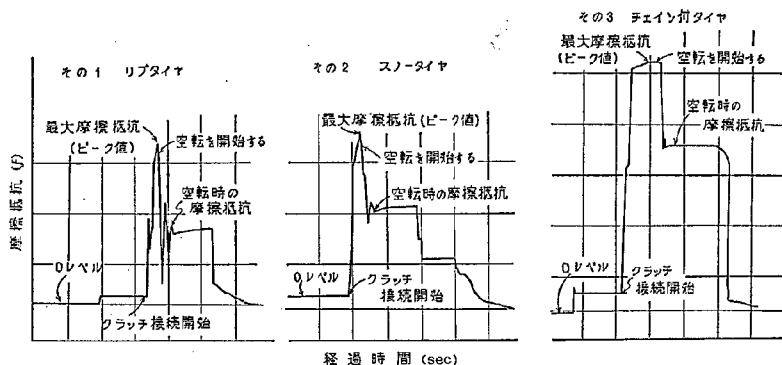


図-5.15 雪氷上の駆動時の摩擦係数

(iii) 縦すべりと横すべり

すべりの種類として縦すべりと横すべりがあることは先に述べた。すべり摩擦係数もこの種類に応じて異なることは当然である。特殊な場合を除いて横すべり摩擦係数は縦すべり摩擦係数よりいくらか小さい。更に横すべり角の小さい場合は更に小さくなる。その関係は図-2.5に示した。横すべり角のある場合の横すべり摩擦は路面とタイヤの接触面の摩擦の外にタイヤのねじれの影響も加わっており、タイヤの剛性とすべり角に比例した抵抗となる。角度のある横すべり摩擦と、ロックして斜めにすべった場合の摩擦とは全然定義が異なることについては図-3.9で述べた。

(iv) すべり率および制動操作

タイヤが自由に路面上をころがっている場合はすべり率は0であり、完全にロックされたときはすべり率100%である。普通の制動状態ではすべり率は0と100%の中間状態にある。摩擦係数はすべり率に応じて変化し20%前後のとき最大になる。これらに関する資料は図-5.16²⁵⁾~5.21²⁶⁾のとおりである。したがって実際に走行

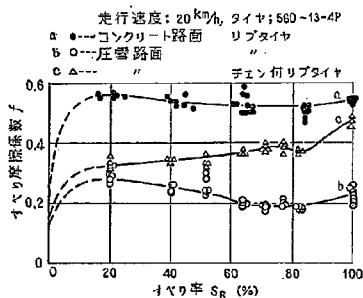


図-5.16 すべり率と摩擦係数 (土木研究所)

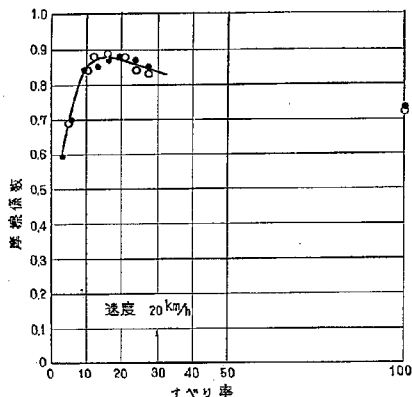


図-5.17 すべり率と摩擦係数 (20km/h, リブタイヤ, 湿潤アスファルト)

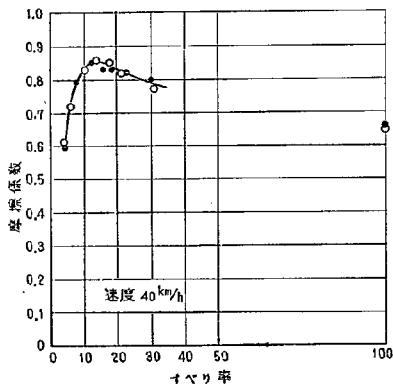


図-5.18 すべり率と摩擦係数 (40km/h, リブタイヤ, 湿潤アスファルト)

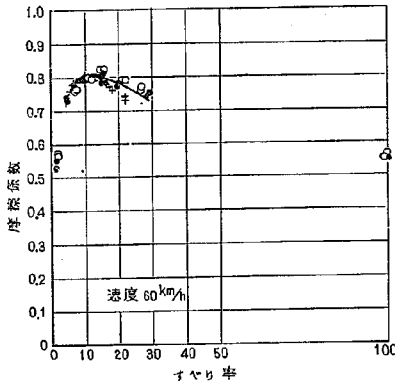


図-5.19 すべり率と摩擦係数 (60km/h, リブタイヤ, 湿潤アスファルト)

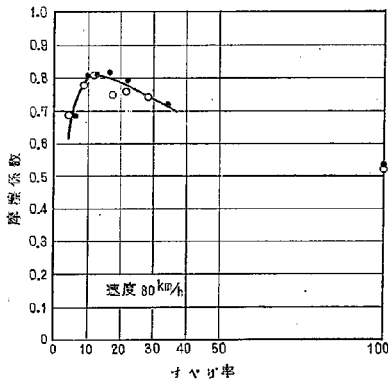


図-5.20 すべり率と摩擦係数 (80km/h, リブタイヤ, 湿潤アスファルト)

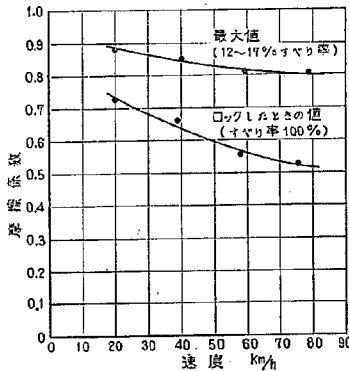


図-5.21 摩擦係数と速度 (リブタイヤ, 湿潤アスファルト)

中制動した場合の自動車と路面のすべり摩擦係数は制動操作にも関係し、急にロックしたままの制動よりもポンピングブレーキ（ブレーキペダルを断続的に何回も踏んでロックしつゝゆるめたりすること）とか同調ブレーキ（自動車のピッチング周期と同調するようにポンピングブレーキを行なうこと）などによって平均摩擦係数は大きくなる。これらの機能を機械的に制動装置の一部に付与することは今後の課題であり、特にすべり率10～20%の制動操作ができれば、制動効果を十分発揮すると共に横すべりも起きないので非常に安全になる。

実際の自動車の制動効果は以上の外に各車輪の荷重と制動力のバランスが必要である。バランスが悪いと一部の車輪はロックしてすべり率100%となり、他の車輪は十分制動されないことがある。この場合自動車には回転力が働くと同時に合計摩擦抵抗力も小さくなる。

〔3〕乾燥と湿潤によるすべり摩擦係数の変化

乾燥路面と湿潤路面ではすべり摩擦係数の状況は全く異なる。乾燥路面の摩擦係数は付着せん断抵抗を主とし、これにヒステリシス損失の抵抗を加えたものである。湿潤路面は水分のために付着せん断抵抗が妨げられ、全体的なすべり摩擦係数は小さくなる。この水分による付着せん断抵抗の減少の割合が種々の要因によって大きく変化するので、ここに問題が生ずることになる。

(1) 乾燥路面のすべり摩擦係数

乾燥時の摩擦係数は主としてタイヤのゴム質によって左右され、路面および走行速度による差は少ない。普通路面の乾燥時のすべり摩擦係数は別表からも明らかなように大体0.7～0.9の範囲にある。この範囲内で温度が低いときは摩擦係数は大きく、0°C付近になると1.0前後の値が得られる。30°C以上では温度の影響はなくなる。速度が増大すると摩擦係数はいくぶん減少するが40km/h以上はほとんど変化はない。特に高速(100km/h以上)になると逆に摩擦係数はいくぶん増加する傾向がある。

乾燥路面で摩擦係数が大きいのは表面の平滑な舗装である。図-5.22、5.23²⁷⁾は建設省の直轄技術研究会で全

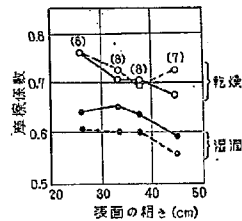


図-5.22 セメントコンクリート舗装の表面あらさと摩擦係数との関係

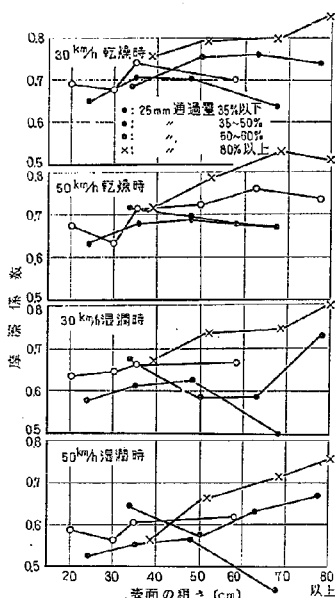


図-5.23 アスファルトコンクリート舗装の表面あらさと摩擦係数

国内的に調査した結果である。この図の表面あらさは細砂(0.3mmを通過し0.15mmに止まる粒径のもの)を一定量(30cm³)路面に盛り、これをストレートエッジでほぼ円形に路面の凹部を埋めるように広げた場合の砂の広がりやを円の直径で表わしたものである。この図によるとコンクリート舗装では表面あらさと摩擦係数の間にははっきりした関係は見られないが、アスファルト舗装ではあらい面ではいくぶん摩擦係数は小さい。

これはゴムの接触圧力とせん断抵抗の関係からも了解される。乾燥路面で摩擦係数が小さいのは、表面の粗な場合の外、路面のよごれが問題となり、じんあいの多い路面で小さくなることはさきに述べた。

(2) 湿潤路面のすべり摩擦係数

湿潤路面のすべり摩擦係数は乾燥路面のものより小さい。湿潤路面のすべり摩擦係数は接触面の排水性が一番重要な問題となる。排水性の特に良好な場合はほぼ乾燥時の摩擦係数と等しい値となり、場合によっては乾燥時の摩擦係数より大きい値となることもある。(別表-2.16~2.24, 別表-3.11参照)

湿潤時の排水性に関係するものはタイヤトレッドと路面性状の両方にある。タイヤトレッドの影響も大きく、フラットなタイヤおよび摩耗したタイヤは摩擦係数は小さい。図-5.4によるとトレッドの摩耗が80%以下のとき

は湿潤時のすべり摩擦には大きい影響は与えないようである。しかし高速になってくるとトレッドの深さの影響は更に大きくなる。この状況を図-5.24に示す。⁵³⁾ 湿潤路面では排水性としてトレッドパターンが影響するのですべりの方向も問題となり、一般に縦すべりよりも横すべり(最大値)摩擦係数が小さくなる。しかし適当な横すべり角(10~20°)の場合にはかえって排水性が良好でより大きい係数値が得られることもある。

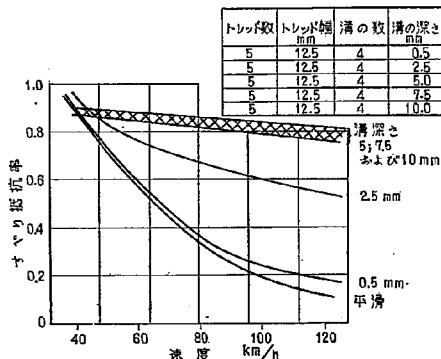


図-5.24 トレッド深さと高速すべり(ダンロップ社)

路面のあらさと摩擦係数の関係は排水性を考慮すると、あらい路面の方が一般には良好である、これを図-5.25⁵⁴⁾に示す。しかし実際には排水性の大部分はタイヤトレッドで行なわれるので路面あらさにはあまり関係しない。図-5.22, 図-5.23によるとコンクリート舗装ではいくぶん平滑な路面が摩擦係数が小さくなっているが、アスファルト舗装ではあまりはっきりした関係は得られていない。しかし水膜が厚くなった場合および速度が大きくなった場合は路面のあらさは大きくすべり摩擦係数に影響する。

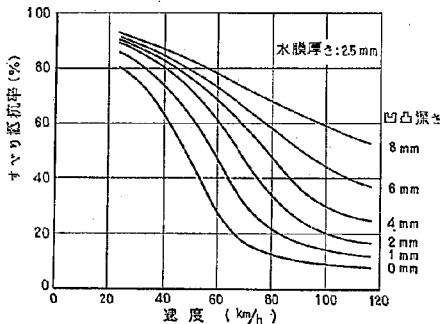


図-5.25 路面凹凸と高速すべり(ダンロップ社)

湿潤時の摩擦係数は更に温度の影響を受け、温度の上昇と共に係数値は減少し、40°C程度からはほぼ一定となる。また速度の影響も大きく、速度の増大と共に摩擦係数は減少する。

〔4〕 走行速度および温度とすべり摩擦係数

路面条件、タイヤ条件を一定にした場合摩擦係数は速度と温度の関数となると考えられる。逆にある路面のす

べり摩擦係数実測値は速度と温度の補正をしなければ他の摩擦係数値と比較することはできない。土木研究所の試験走路で測定したデータを中心に速度および温度とすべり摩擦係数の相関を求めた結果は次のとおりである。

(1) 速度と摩擦係数

速度が大きくなると摩擦係数が小さくなることは明らかである。その状況を実測値から図-5.26～5.32⁽⁴⁾、⁽⁴⁾、⁽⁴⁾

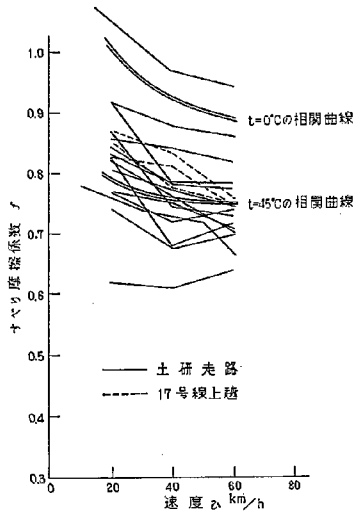


図-5.26 速度と摩擦係数(乾燥, コンクリート舗装)

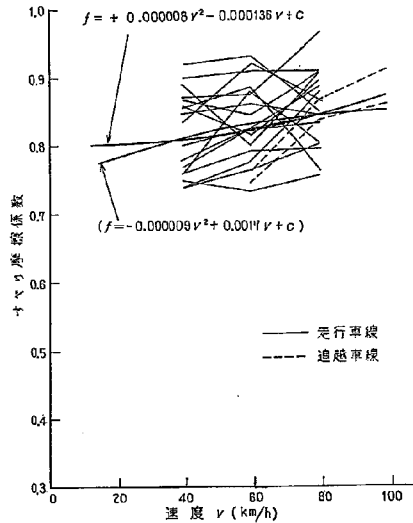


図-5.28 速度と摩擦係数(乾燥, 名神, アスファルト)

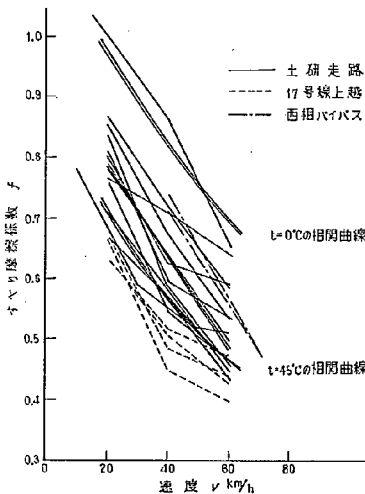


図-5.27 速度と摩擦係数(湿潤, コンクリート舗装)

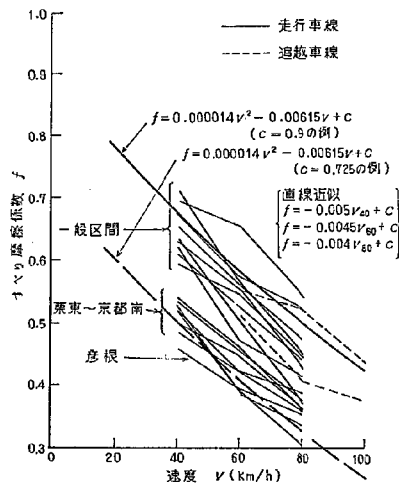


図-5.29 速度と摩擦係数(湿潤, 名神, アスファルト)

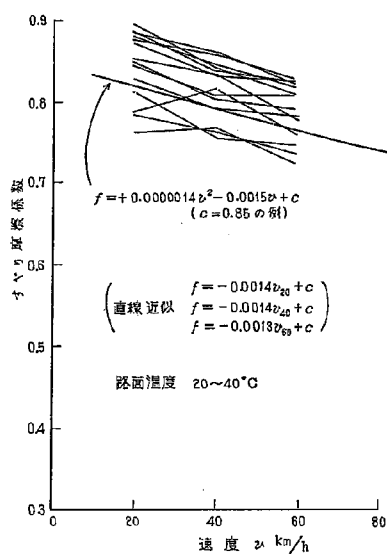


図-5.30 速度と摩擦係数 (乾燥, 17号線, アスファルト)

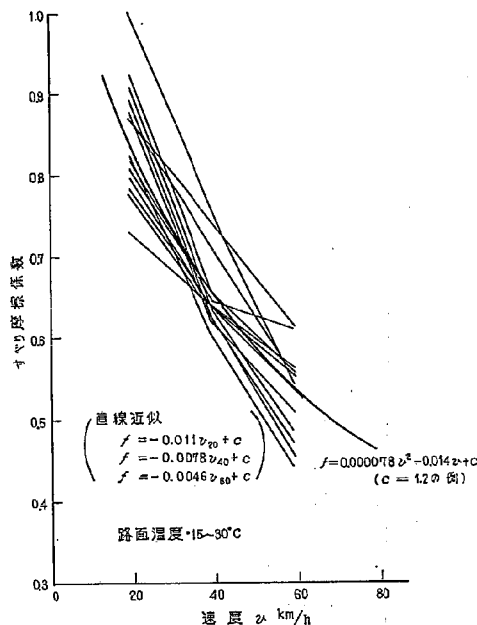


図-5.31 速度と摩擦係数 (湿潤, 17号線, アスファルト)

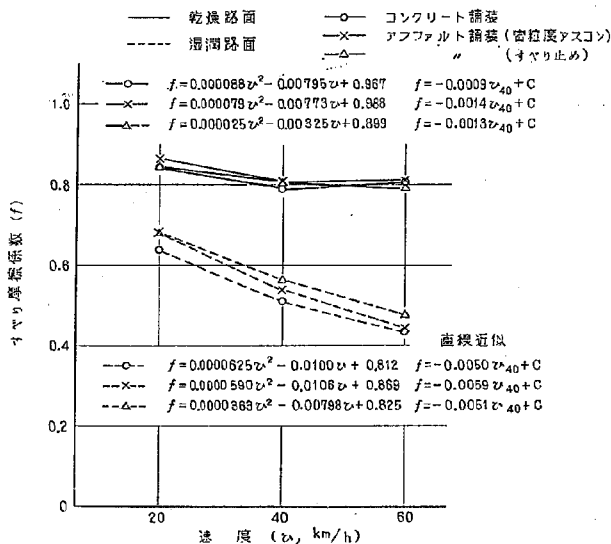


図-5.32 速度と摩擦係数 (路面種類別平均値, 九州地建管内)

に示す。しかも速度と摩擦係数は一次比例でないことも推定できるので二次式として解析した。得られた回帰相関式はおおのの図中に書いてあるとおりである。図中のおおのの速度の増大につれて摩擦係数が低下することは明らかであるが、しかも図-5.26、図-5.27では数多くの線が幅広い範囲に分散している。これは路面状況、タイヤ状況の外に温度の影響が大きいと考えられる。これに反して図-5.28、5.29、5.30、5.31は温度の差があまりないので比較的狭い範囲に分布している。

舗装面の状況によってこれらの相関式は当然異なってくるものであり、一般に粗な路面では相関曲線の傾斜が小さくなることは先に述べたとおりである。この問題については今後の研究にまづこととし、本報告で取り上げた相関は現在実際に最も多く使用されている路面について解析したものである。

(2) 温度と摩擦係数

諸外国の資料によっても²⁾すべり摩擦係数は温度に影響されることは明らかであるが、定量的にはなかなか決

定しにくいものである。別表のわが国の測定結果からも温度の影響があることは明らかである。しかしすべり摩擦に影響する温度は外気温であるか、タイヤ温度であるか、または路面温度であるかが問題である。図-5.33はタイヤ温度とすべり摩擦係数の関係を実験した結果である。図-5.33(a)は昭和40年11月1日に行なった2つの実験の結果である。まず試験タイヤを恒温槽に入れて100°Cに加熱し、これを取り出して摩擦係数を測定したものである。第1回の実験×印では温度の低下と共にいくぶん摩擦係数は上がっているようであるが、その差は50°Cで0.05程度、すなわち1°Cにつき0.001であり、ほとんど影響ないと考えてよい。第2回目の○印の実験ではむしろ高温の時の方が摩擦係数が大きくなっている。ゴムの性質上十分ありうることであるが、実用の70~80°Cの所ではあまり影響がないと考えてよい。更に昭和40年11月18日および11月24日には同様の実験を行なった。その結果が図-5.33(b)(c)である。この場合もあまり明瞭な関係は得られなかった。図-5.34は人工的に

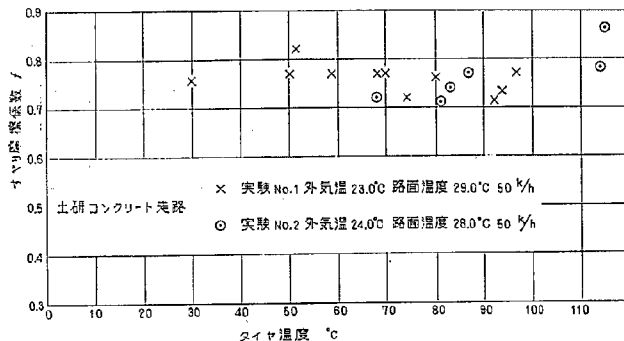


図-5.33 (a) タイヤ温度と摩擦係数 (タイヤを加熱したもの, 昭和40.11.1)

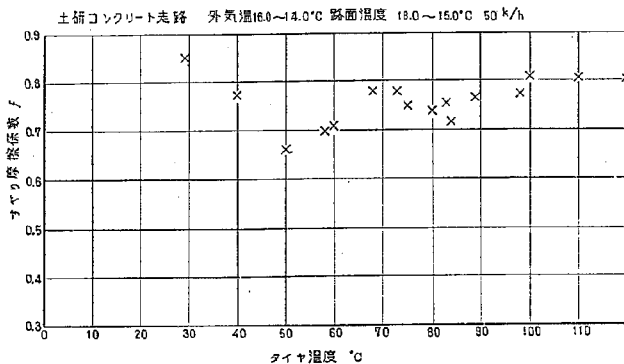


図-5.33 (b) タイヤ温度と摩擦係数 (タイヤを加熱したもの, 昭和40.11.18)

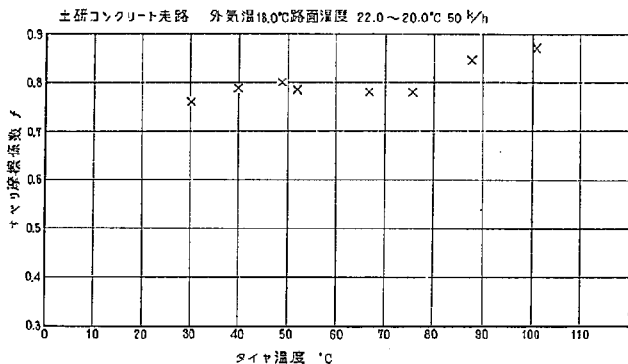


図-5.33 (c) タイヤ温度と摩擦係数(タイヤを加熱したもの, 昭和40.11.24)

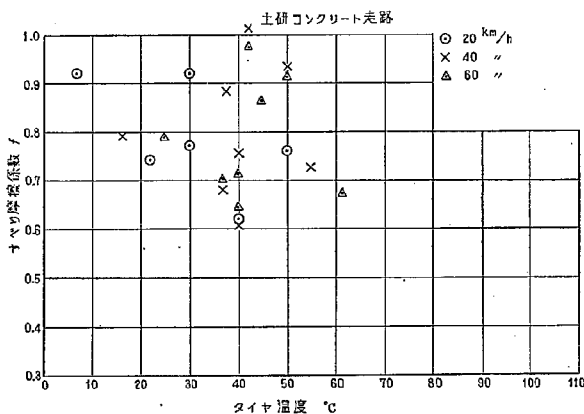


図-5.34 タイヤ温度と摩擦係数(一般観測値, 昭和40年~41年)

タイヤ温度を変化させたものではなく、一般的なすべり測定を行なった後タイヤ温度を測定記録したものである。この場合にもタイヤ温度と摩擦係数の間にはあまり相関はないようである。以上を総合して40℃~100℃の範囲におけるタイヤ温度はあまりすべり摩擦係数には影響しないと考えてよい。100℃以上の場合はこの実験からは明らかではないが、特別の場合以外は起り得ない状況であり、傾向としてはすべり摩擦係数が大きくなる安全側にあるようであるので、ここでは問題にしないことにする。一方40℃以下の場合には制動前のタイヤ温度は一般に外気温と路面温度に相関する。外気温と路面温度のいずれがすべり摩擦係数に関係するかについては、外気温と路面温度は大体一致しているので、いずれをとっても大差はないと考えられる。しかし実際は摩擦を起しているのはタイヤと舗装面の間であり、日光の直射を

受けている所と日陰部分では温度の影響にも差があるので、結局路面温度をとることとした。ここで路面温度と摩擦係数の相関を単独にとりあげるのは困難であるので、速度との重相関でとりあげることにした。

(3) 温度および速度と摩擦係数の相関式

前節までの考え方の下に路面温度と速度と摩擦係数の相関をうるために土木研究所の試験走路で連続観測を行なった。その結果は別表-1のとおりであり、それをまとめたものが図-5.35, 5.36上の点である。更にこれらの資料を解析して得られた相関式は次のとおりである。

コンクリート舗装, 乾燥路面について

$$f = 0.000139t^2 + 0.00003v - 0.0113f + 0.000050v^2 - 0.0036v + 1.11 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

コンクリート舗装, 湿潤路面について

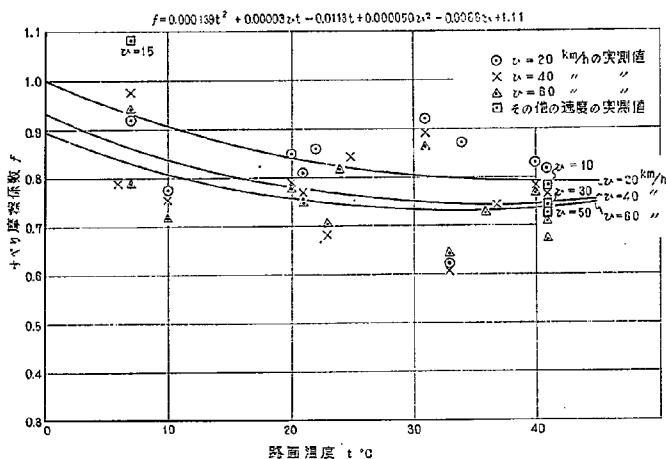


図-5.35 すべり摩擦係数相関図(乾燥, コンクリート)

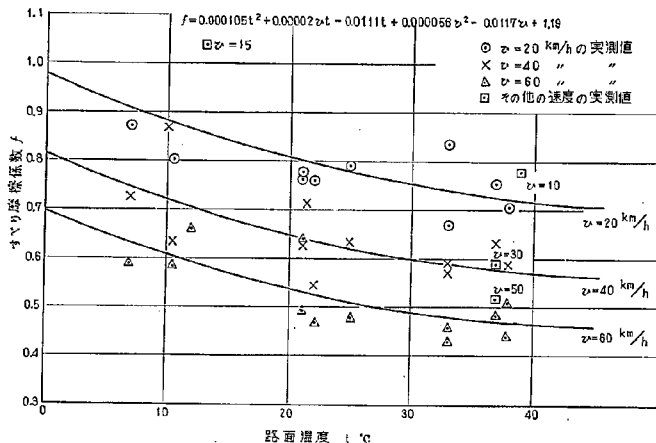


図-5.36 すべり摩擦係数相関図(湿潤, コンクリート)

$$f = 0.000105t^2 + 0.00002vt - 0.0111t + 0.00056v^2 - 0.0117v + 1.19 \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

ここで f は路面のすべり摩擦係数, t は測定中の路面温度, v は制動時の速度である。この得られた式と与えたデータとの残差は乾燥路面について 0.083, 湿潤路面について 0.064 である。この相関式を $v=20$, $v=40$, $v=60$ km/h のものについてえがくと図-5.47, 5.48上の曲線となる。この測定に使用したタイヤは SBR 合成ゴムのブリヂストン, リブタイヤ, 640-15, 4PR, 空気圧 25 ポンドのものである。トレッド面は新品またはこれに近い状態のものを使用した。もちろん制動時の速度は初

速度ではなく、制動中も一定に保って実験したものである。

(1) 速度と摩擦係数の相関の解析

(a) 乾燥路面について

式(5.1)から $\partial f / \partial v$ を求めると

$$\frac{\partial f}{\partial v} = -(0.0066 - 0.00003t) + 0.0001v \quad \dots\dots\dots(5.3)$$

$t=0^\circ\text{C}$ の場合

$$\frac{\partial f}{\partial v} = -0.0066 + 0.0001v \quad \dots\dots\dots(5.4)$$

したがって $v=66$ km/h で $\partial f / \partial v = 0$ となる。

$t=40^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\frac{\partial f}{\partial v} = -0.0054 + 0.0001v \dots\dots\dots (5.5)$$

したがって $v=54\text{km/h}$ で $\partial f/\partial v=0$ となる。

一般に乾燥路面については速度の摩擦係数に対する影響はわずかであるが式(5.3)のとおり、速度の増加と共に減少し60km/h前後で0となる。ここで20, 40, 60, 80km/hに対する速度と摩擦係数の変化の近似式を求めると

$t=0^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\left. \begin{aligned} f_d &= -0.0046v_{20} + c \\ f_d &= -0.0026v_{40} + c \\ f_d &= -0.0006v_{60} + c \\ f_d &= +0.0014v_{80} + c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.6)$$

$t=40^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\left. \begin{aligned} f_d &= -0.0034v_{20} + c \\ f_d &= -0.0014v_{40} + c \\ f_d &= +0.0006v_{60} + c \\ f_d &= +0.0026v_{80} + c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.7)$$

これを総合すると路面温度が低く、速度の低い所では直線のこう配は $-0.0026 \sim -0.0014$ であり、路面温度が上昇し速度が大きくなるにつれて、直線のこう配は小さくなり、更に路面温度が高くなり、高速になると直線のこう配はわずかではあるが正になる。しかし全体的に摩擦係数の変化値は小さく、ほとんど変化はないと考えてもよい。ただ路面温度が 0°C に近く、しかも走行速度が40km/hより小さい場合は、比較的大きい摩擦係数値が得られるので注意しなければならない。

(b) 湿潤路面について

式(5.2)から $\partial f/\partial v$ を求めると

$$\frac{\partial f}{\partial v} = -(0.0117 - 0.00002t) + 0.00011v \dots\dots\dots (5.8)$$

$t=0^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\frac{\partial f}{\partial v} = -0.0117 + 0.00011v \dots\dots\dots (5.9)$$

したがって $v=100\text{km/h}$ で $\partial f/\partial v=0$ となる。

$t=40^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\frac{\partial f}{\partial v} = -0.0109 + 0.00011v \dots\dots\dots (5.10)$$

この場合もほぼ100km/hで $\partial f/\partial v=0$ となる。ここで20, 40, 60, 80km/hに対する速度と摩擦係数の近似式を求めると

$t=0^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\left. \begin{aligned} f_w &= -0.0095v_{20} + c \\ f_w &= -0.0073v_{40} + c \\ f_w &= -0.0051v_{60} + c \\ f_w &= -0.0029v_{80} + c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.11)$$

$t=40^{\circ}\text{C}$ の場合

$$\left. \begin{aligned} f_w &= -0.0087v_{20} + c \\ f_w &= -0.0065v_{40} + c \\ f_w &= -0.0043v_{60} + c \\ f_w &= -0.0021v_{80} + c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.12)$$

これらを総合すると、路面の温度が低く、速度の低い所では直線のこう配は大きく、最大 -0.01 程度となり、温度が高くなり、速度が大きくなると順次こう配は小さくなっていく。40km/hでは大体 -0.007 程度であり、60km/hでは -0.0045 程度である。80km/hでは更に小さくなり、100km/hでは変化しなくなることになるがこれらの高速については名神のデータを中心に次の(iii)で述べる。

(ii) 温度と摩擦係数の相関の解析

(a) 乾燥路面について

式(5.1)から $\partial f/\partial t$ を求めると

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0.000278t + 0.00003v - 0.0113 \dots\dots\dots (5.13)$$

t は $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 、 v は $10 \sim 100\text{km/h}$ の範囲とすると式(5.13)より

$$\frac{\partial f}{\partial t} \div 0.000278t - 0.0113 \dots\dots\dots (5.14)$$

すなわち乾燥路面では、すべり摩擦係数に対する温度の影響は、温度の低い所では路面温度 1°C 増大することにより、摩擦係数は約0.01減少する。この傾向は温度の上昇と共に小さくなり、 40°C 付近では温度の影響はほとんどなくなる。

(b) 湿潤路面について

式(5.2)から $\partial f/\partial t$ を求めると

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0.00021t + 0.00002v - 0.0111 \dots\dots\dots (5.15)$$

$t=0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 、 $v=10 \sim 100\text{km/h}$ の範囲とすると式(5.15)より

$$\frac{\partial f}{\partial t} \div 0.00021t - 0.0111 \dots\dots\dots (5.16)$$

すなわち湿潤路面ではすべり摩擦係数に対する温度の影響は、ほぼ乾燥の場合と同様であり、温度の低い所では路面温度 1°C 増大することにより摩擦係数は約0.01減少する。この傾向は温度の上昇と共に小さくなり、 50°C 付近では温度の影響はなくなる。

(iii) 相関式の適用性について

さきに述べた温度および速度と摩擦係数の相関式は、土木研究所の試験走路のコンクリート舗装部分を継続観測して得られた結果である。実際の道路上で継続観測することはなかなか困難であり、更にアスファルト舗装の場合季節変化(フラッシュ、アスファルトの軟化等)の影響も入ってくると思われる。

本相関式の適用性を検討するため、各地で観測した結果を一表にまとめてみた、その結果は表-5.4, 5.5のと

表-5.4 温度、速度とすべり摩擦係数の相関 (乾燥時)

速度 km/h	土 研 コ ン ク リ ー ト 舗 装		名神高速道路 アスファルト $t=36^{\circ}\text{C}$	17号線上越 アスファルト $t=15\sim 35^{\circ}\text{C}$	九州地建 $t=15\sim 40^{\circ}\text{C}$
	$t=0^{\circ}\text{C}$	$t=40^{\circ}\text{C}$			
20	$f_d = -0.0046v + c$	$f_d = -0.0034v + c$	$f_d = +0.0002v + c$	$f_d = -0.0015v + c$	40km/h $\left\{ \begin{array}{l} f_d = -0.0009v + c \\ \text{コンクリート} \\ f_d = -0.0014v + c \\ \text{アスファルト} \\ f_d = -0.0013v + c \\ \text{すべり止め} \end{array} \right.$
40	$f_d = -0.0026v + c$	$f_d = -0.0014v + c$	$f_d = +0.0004v + c$	$f_d = -0.0015v + c$	
60	$f_d = -0.0006v + c$	$f_d = +0.0006v + c$	$f_d = +0.0008v + c$	$f_d = -0.0015v + c$	
80	$f_d = +0.0014v + c$	$f_d = +0.0026v + c$	$f_d = +0.0011v + c$	$f_d = -0.0015v + c$	

表-5.5 温度、速度とすべり摩擦係数の相関 (湿潤時)

速度 km/h	土 研 コ ン ク リ ー ト 舗 装		名神高速道路 アスファルト $t=36^{\circ}\text{C}$	17号線上越 アスファルト $t=15\sim 35^{\circ}\text{C}$	九州地建 $t=15\sim 40^{\circ}\text{C}$
	$t=0^{\circ}\text{C}$	$t=40^{\circ}\text{C}$			
20	$f_w = -0.0095v + c$	$f_w = -0.0087v + c$		$f_w = -0.0109v + c$	40km/h $\left\{ \begin{array}{l} f_w = -0.0050v + c \\ \text{コンクリート} \\ f_w = -0.0059v + c \\ \text{アスファルト} \\ f_w = -0.0051v + c \\ \text{すべり止め} \end{array} \right.$
40	$f_w = -0.0073v + c$	$f_w = -0.0065v + c$	$f_w = -0.005v + c$	$f_w = -0.0078v + c$	
60	$f_w = -0.0051v + c$	$f_w = -0.0043v + c$	$f_w = -0.0045v + c$	$f_w = -0.0046v + c$	
80	$f_w = -0.0029v + c$	$f_w = -0.0021v + c$	$f_w = -0.004v + c$		

おりである。

まず乾燥路面について、式(5.1)は土研のコンクリート試験走路で得られた相関であるが、これを他の場所および他種の舗装と比べたものが表-5.4である。比較しやすいように二次式ではなく各速度における直線近似式で表わした。おのおのの式は必ずしも同一とは言えないが、いずれも速度項に対する係数値は小さく、速度による係数値の変化はほとんどないことを表わしている。

湿潤路面については表-5.5のとおりである。表において温度と速度の等しい所の係数値は大体同様であり、式(5.2)は土研のコンクリート走路のみでなく、他の場所の舗装、しかもアスファルト舗装にも適用して良いと考えられる。ただしこれらの実験式の適用範囲は温度 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、速度 $20\sim 80\text{km/h}$ の範囲であり、舗装面は現在わが国で普通に実用に供されている舗装面についてである。特に 60km/h 付近を見るとほとんどいずれの場合も $0.0045\sim 0.005$ であり、 60km/h 前後の換算ではすべての舗装を通じて簡単に $-0.005v$ として換算してもさしつかえないと考えられる。

(4) 高速走行時のハイドロブレーニング

われわれが普通に論じている湿潤状態は散水車で散水して湿潤路面を作り、摩擦係数を測定したものである。ハイドロブレーニングはタイヤが厚い水の層の上を高速で通過するとき、一種の水上スキーのような現象を起すことであって、いままでも航空機の着陸の場合に問題とされていた。一般道路上では 100km/h 以上というような高速走行はあまりないので問題とされなかったが、

高速自動車道の出現により、ハイドロブレーニングが道路のすべりに関係してくるようになったのである。ここでは主として諸外国の資料について述べる。

まずハイドロブレーニングとは自動車の水の多い湿潤路面を走行する場合、タイヤにブレーキをかけると、タイヤと路面の間にはくさび状の水膜が存在し、このためにタイヤが実際の路面と接触する長さはそれだけ短くなる。図-5.37(a)はこのときの接触面の断面を示しており、タイヤの接触面は三つの領域に分れている。領域aは連続したくさび状の水膜、領域bでは水膜はタイヤの溝によって分断あるいは遮断されている。領域cでは水膜はぬぐい取られて、タイヤと路面は完全に接触している。

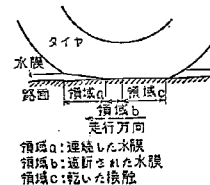


図-5.37 (a) 部分ハイドロブレーニング状態

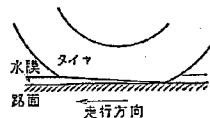


図-5.37 (b) 完全ハイドロブレーニング状態

このそれぞれの領域の大きさは水膜の厚さばかりでなく、タイヤのトレッド面、路面の状態および走行速度に関係する。水膜が薄い場合領域aの範囲は非常に小さくなり、領域cの範囲が大きくなる。水膜が厚いときには領域cがまずなくなり、次いで領域bも存在しなくなり、タイヤと路面の間の全面に水膜が存在するようになる。すなわちタイヤは路面から離れ、水によって完全に支えられる 図-5.37(b)、この状態をハイドロプレーニングという。

W. B. Horne と T. J. W. Leland^{(43),(44)}は航空機タイヤを中心にして研究し、高速走行時のタイヤ下部の水の層の流体動圧力の揚力分力 $F_{V.s}$ がタイヤの垂直力 F_V に等しくなるとハイドロプレーニングを起すとして次式を作った。

$$F_V = F_{V.s} = \frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

$$\therefore V = \sqrt{\frac{F_V}{A} \cdot \frac{2}{C \cdot \rho}} \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

式(5.18)で $F_V/A = p$ とすると

$$V = \sqrt{\frac{2}{C} \cdot \frac{p}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

ここで A はタイヤの接触面積、 V は速度、 ρ は密度、 C は浮力係数である。NASA のラングレイの試験走路では写真-5.13および図-5.38のような水噴射式装置により実験を繰り返し、図-5.39のような結果を得た。図-5.39の結果を用いて(5.19)の係数を決めると次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} V &= 10.35 \sqrt{p} \quad (\text{マイル/h, ポンド/平方インチ}) \\ V &= 16.656 \sqrt{p} \quad (\text{km/h, ポンド/平方インチ}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.20)$$

ここで(1)タイヤ路面間の平均支持圧力はタイヤ内圧にほぼ等しい。(2)流体の密度は水の密度とする。(3)流

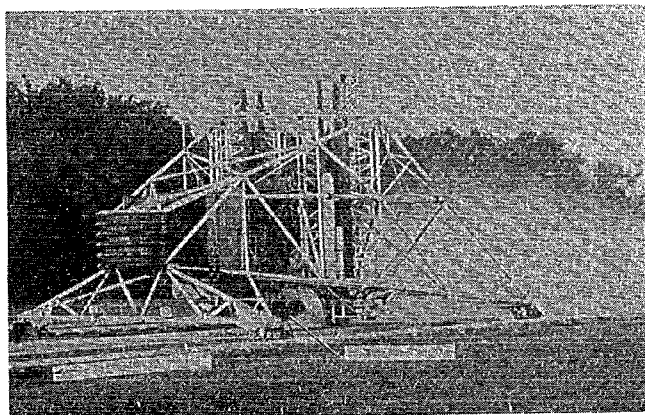


写真-5.13 ハイドロプレーニング実験装置 (NASA)

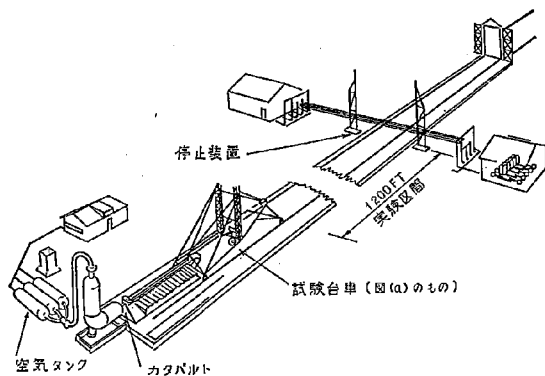


図-5.38 同実験装置の構成図 (NASA)

体によっておおわれた路面上のタイヤに働く流体力学的揚力係数は0.7とする。(4)タイヤと路面間にはハイドロプレーニングを起すにたる十分な水膜が存在する。以上の条件の下に式(5.20)は成立することに注意しなければならない。式(5.20)によると、普通タイヤの内圧を20~30psiとして80~90km/hでハイドロプレーニングを起す可能性があることになる。

また W. E. Meyer⁽⁴⁵⁾ は同様に

$$F = 2 \cdot h \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{r}{a} \cdot V^2 \quad \dots\dots\dots (5.21)$$

$$\therefore V = \sqrt{\frac{F}{2 \cdot h \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{r}{a}}} \quad \dots\dots\dots (5.22)$$

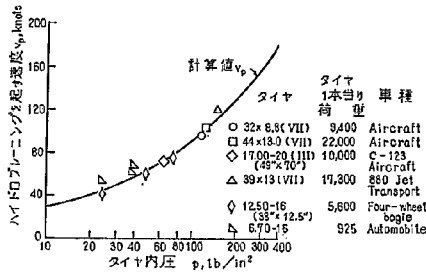


図-5.39 ハイドロプレーニング実験値 (NASA)

式(5.22)においては $F=1.2 \times a \cdot b \cdot p$ (1.2 はタイヤカーカスの荷重負担による割増し) とすると,

$$V = \sqrt{0.6 \cdot \frac{1}{h \cdot \rho} \cdot \frac{a^2}{r} p} \quad (5.23)$$

また $a^2 = 2 \cdot r \cdot h$ とすると

$$V = \sqrt{1.2 \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (5.24)$$

ここで h は水膜の厚さ, b はタイヤの接地幅, a はタイヤの接地長, r はタイヤの半径である。

Meyer の実験では 7.50—14 の乗用車用タイヤで, 空気圧 24psi の場合 30 マイル/時 で浮上がり始め, 完全に滑走するには水膜の厚さを 1mm とすると 200 マイル/時以上の速度が必要であるとしている。

更に Horne と Upshur T. Joyner⁽⁴⁷⁾ は水膜の厚さを一定にした試験装置で実験を行ない図-5.40, 図-5.41の

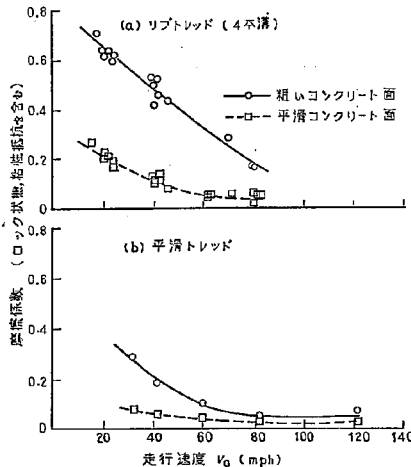


図-5.40 速度と摩擦係数 (水深 0.04 インチ, 6.50—13 乗用車タイヤ, 輪重 835 ポンド, タイヤ内圧 27 ポンド/平方インチ, W. B. Horne dv. T. Jeyner)

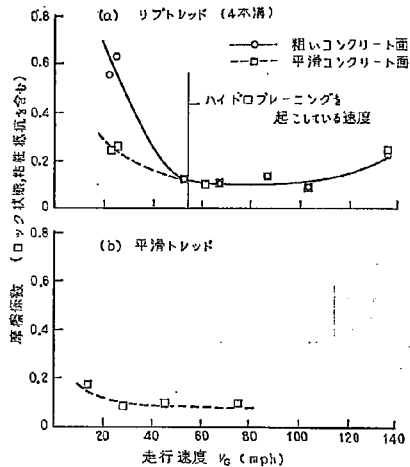


図-5.41 速度と摩擦係数 (水深 0.3 インチ, 6.50—13 乗用車タイヤ, 輪重 835 ポンド, タイヤ内圧 27 ポンド/平方インチ, W. B. Horne dv. T. Jeyner)

結果を得ている。図において平滑コンクリート面とは, 特にコテで平らに仕上げたものであり, あらいコンクリート面はサンドブラスト仕上げであるが, われわれが普通に扱っている道路面はあらいコンクリート面に相当すると思われる。この図からも明かなようにハイドロプレーニングを起す速度はタイヤトレッドが平滑であるか, 水膜の厚さが 0.3 インチ (7.5mm) のときには比較的明瞭であるが, リブトレッドで水膜が 0.04 インチ (1.8mm) の場合には非常に高速でないと起らないと考えられる。これは先の Meyer の報告とも一致する。

Charles J. Coven と Nicholas M. Trivisonno⁽⁴⁸⁾ は液体中をタイヤが沈降するときの速度について各種実験を行ない, 走行速度と沈降深さとの関係からハイドロプレーニング速度を計算した。

まず走行中液体がタイヤに与える上向圧力は

$$P_H = \frac{\rho \cdot b \cdot V^2 \cdot R \cdot \lambda}{3 \cdot g} \quad (5.25)$$

ここで λ は形状係数であり

$$\lambda = \sqrt{\left(\frac{L_c}{2R}\right)^2 - \left(\frac{H}{R}\right)^2} + \frac{2H}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{L_c}{2R}\right)^2} - \frac{L_c}{2R}$$

一方沈降深さと圧力の関係の実験式は

$$P_H = 700 - \frac{0.560}{L_c} \cdot H^{0.285} \cdot V \quad (5.26)$$

ここで P_H はタイヤに働く上向圧力, ρ は水の密度, b はタイヤ幅, R はタイヤの半径, L_c はタイヤの接触長さ, H は水深, g は重力の加速度, V は走行速度であり, 単位はインチおよびマイル/時である。この式(5.25)

(5.26)を等しいとおいて V と H の関係を得る。得られた結果の一部は表-5.6~5.8のとおりである。この結果によると普通の状態ではドロブレーニングが起るのは水深0.1インチで226マイル、水深0.3インチで140マイルとなり、先の Horne and Jeyner の実験結果に比し

て高速でないと起らなく、Meyer の推定に近い値になっている。

これら各種の実験結果とわが国の名神高速道路（別表-2.30）谷田部の高速自動車試験場（別表-1.30）等の湿潤状態のものを比較してみると図-5.53の値（水深0.04

表-5.6 速度と摩擦係数 (Coven-Trivisonno) スムースタイヤ、あらい路面

粘性係数 η cp	水 深 In	ドロブ レーニング を起す速度 mph	摩 擦 係 数					60mph での制動停止距離 Ft
			20 mph	40 mph	60 mph	80 mph	100 mph	
0.914	0.1	206	0.581	0.435	0.318	0.229	0.164	275
	0.3	127	0.545	0.371	0.234	0.128	0.043	330
	0.5	103	0.523	0.334	0.184	0.068	0	379
	1.0	78	0.485	0.226	0.096	0	0	526
1.57	0.1	194	0.579	0.431	0.311	0.222	0.155	282
	0.3	120	0.541	0.363	0.223	0.116	0.028	334
	0.5	98	0.517	0.322	0.169	0.048	0	399
	1.0	74	0.480	0.258	0.084	0	0	543
5.00	0.1	146	0.568	0.401	0.274	0.176	0.101	296
	0.3	92	0.512	0.313	0.158	0.037	0	411
	0.5	75	0.483	0.262	0.091	0	0	572
	1.0	59	0.427	0.166	0	0	0	∞

表-5.7 速度と摩擦係数 (Coven-Trivisonno) 模様つきタイヤ、スムース路面

粘性係数 η cp	水 深 In	ドロブ レーニング を起す速度 mph	摩 擦 係 数					60mph での制動停止距離 Ft
			20 mph	40 mph	60 mph	80 mph	100 mph	
0.914	0.1	226	0.591	0.451	0.334	0.254	0.194	267
	0.3	140	0.561	0.399	0.270	0.172	0.090	302
	0.5	114	0.544	0.369	0.231	0.125	0.040	327
	1.0	85	0.512	0.314	0.158	0.037	0	409
1.57	0.1	217	0.589	0.447	0.333	0.247	0.185	264
	0.3	135	0.558	0.393	0.262	0.162	0.084	308
	0.5	110	0.540	0.363	0.223	0.110	0.029	337
	1.0	84	0.508	0.307	0.149	0.027	0	405
5.00	0.1	170	0.576	0.425	0.305	0.214	0.145	282
	0.3	110	0.539	0.361	0.220	0.112	0.025	349
	0.5	92	0.519	0.325	0.173	0.055	0	387
	1.0	72	0.490	0.275	0.107	0	0	497

表中、粘性係数0.914は24°Cの水の状態、1.57は4°Cの水の状態、5.00は泥土の多い水の場合の数値である。

表-5.8 速度と摩擦係数 (Coven-Trivisonno) スムースタイヤ、スムース路面

粘性係数 η cp	水 深 In	ドロブ レーニング を起す速度 mph	摩 擦 係 数					60mph での制動停止距離 Ft
			20 mph	40 mph	60 mph	80 mph	100 mph	
0.914	0.1	198	0.579	0.431	0.311	0.221	0.155	275
	0.3	122	0.541	0.366	0.226	0.119	0.032	330
	0.5	100	0.519	0.325	0.173	0.055	0	385
	1.0	76	0.480	0.258	0.085	0	0	544
1.57	0.1	181	0.573	0.420	0.298	0.198	0.135	287
	0.3	114	0.536	0.355	0.228	0.102	0.013	349
	0.5	93	0.510	0.310	0.154	0.032	0	415
	1.0	71	0.472	0.244	0.066	0	0	685
5.00	0.1	118	0.544	0.369	0.230	0.125	0.040	328
	0.3	79	0.490	0.275	0.107	0	0	483
	0.5	66	0.458	0.218	0.032	0	0	883
	1.0	52	0.414	0.142	0	0	0	∞

インチ)および表-5.6の水深0.1インチに対する値は大体一致している。したがって普通湿潤状態に対する更に高速時の推定も容易である。しかし水の層の厚い場合のハイドロプレーニングについては、ここにあげた各種の研究結果の相互間にも相当の差があるので簡単に結論は得られない。ただ水の層が厚くなるほどハイドロプレーニングを起こす速度は小となり、一定速度の場合水の層が厚くなるほど摩擦係数は次第に小さくなることは明らかである。

(5) 横すべり角と横すべり力

タイヤは自由に回転しながら、進行方向に対してタイヤの方向が θ° の角度をなしているときの、そのタイヤ面に直角方向の抵抗力を角度 θ° のときの横すべり摩擦係数という。一般に横すべり角が増大するにつれて横すべり摩擦係数も増大し、ある角度以上になるとはや横すべり摩擦係数は増大しなくなる。この関係はさきに示した図-2.5のとおりである。ここで横すべり摩擦係数の最大値はその状態(路面およびタイヤ)における縦すべり摩擦係数にほぼ等しいと考えられる。一方横すべり角と横すべり摩擦係数の関係は主としてタイヤの剛性によって支配されると考えられるが、これらに関する実測値は図-5.42～図-5.46のとおりである。図-5.42は昭和34年に機械試験所のテストコース(コンクリート舗装)において得られたもので、タイヤはリブタイヤ6.00-16である。図より横すべり摩擦係数率 $P=f/\theta \approx 0.05$ であり、横すべり摩擦係数が最大となる角度(以下飽和角という)は 10° 前後であった。図-5.43, 5.44は同じく昭和34年に横浜バイパス(コンクリート舗装)で行なわれたもので、使用タイヤは同じく6.00-16, 6PR ラグタイヤである。横すべり摩擦係数は低速の場合いくぶん小さい値と

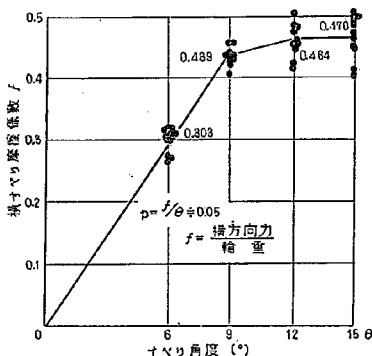


図-5.42 横すべり角度と横すべり摩擦係数との関係
場所: 機械試験所テストコース
(コンクリート路面)
タイヤ: リブタイプ

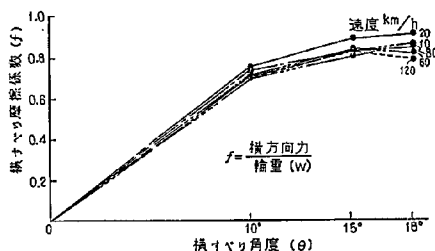


図-5.43 横すべり角度と横すべり摩擦係数
(乾燥路面, ラグタイヤ)

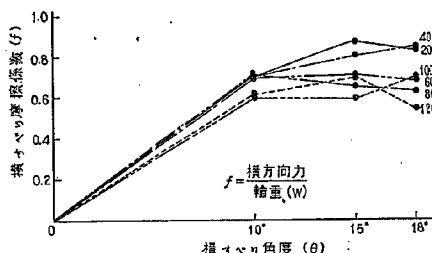


図-5.44 横すべり角度と横すべり摩擦係数
(湿潤路面, ラグタイヤ)

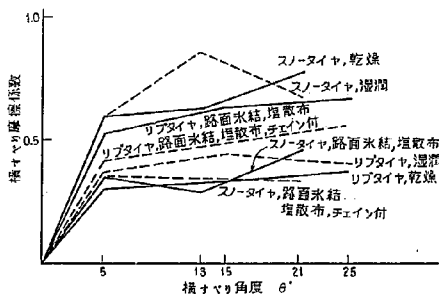


図-5.45 横すべり角と横すべり摩擦係数
(密粒アスコン, 20km/h)

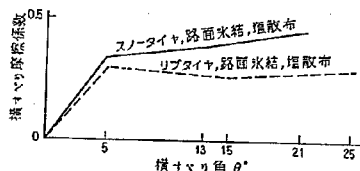


図-5.46 横すべり角と横すべり摩擦係数
(コンクリート舗装, 20km/h)

なっている。そして乾燥時にはその差は小さく、湿潤のとき大きい。これらは5.〔4〕の速度と摩擦係数の関係について述べたことが原因と考えられる。図-5.43, 5.44より横すべり摩擦係数率 $P=0.06$ となり、飽和角は 10° である。図-5.45は昭和37年に箱根バイパスのアスファルト舗装について行なった実験であり、図-5.46は同じく昭和37年に山中湖畔のコンクリート舗装について行なったものである。特殊条件での実測であるのでかなりばらつきがあるが $P=0.06\sim0.1$ となっている。図-5.47は昭和40年に土木研究所の試験走路で実験したものである。6.00—16, リブタイヤ4PR, 速度40km/hのものである。この場合 $P=0.08$ であり、飽和角は 15° 程度である。さきに示した図-2.5の英国道路研究所のものは $P=0.055$ である。しかし飽和角は路面状況に依り $5\sim20^\circ$ となっている。これらを総合すると普通乗用車程度のタイヤの横すべり摩擦係数率 P は $0.05\sim0.10$ の範囲であり、タイヤの剛性が強い場合に大きく、また走行速度の小さいときに大きい。最大横すべり摩擦係数は最大縦すべり摩擦係数にほぼ等しいものである。したがって最大横すべり摩擦に対するすべり角度(飽和角)は摩擦係数の大きいほど大きくなる。

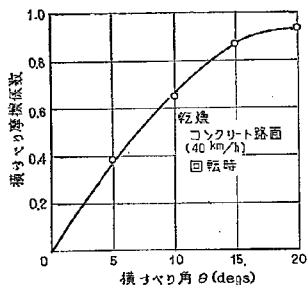


図-5.47 横すべり角と横すべり摩擦係数 (土研, 走路)

横すべり摩擦係数と輪重との関係は図-5.48のごとく輪重が増大すると摩擦係数は減少する。一方タイヤ内圧が増大した場合は横すべり摩擦係数率 P は増大する。

〔6〕路面の粗度とすべり摩擦の関係

路面の粗度とすべり摩擦係数の関係は非常に密接ではあるが、実際には相当複雑である。前述の一般論で述べたように、すべり摩擦抵抗のうちの接着せん断抵抗は路面が平滑であるほど抵抗は大きくなる。一方タイヤゴムのヒステリシスによる抵抗は凹凸の多い方が大きい。しかしこの場合ヒステリシスのために必要な路面の凹凸は 0.1mm 以下のオーダーであると考えられている。一方湿潤の場合には凹凸の大きい方が排水効果が良いので、摩擦抵抗も大きく、この傾向は速度が大きくなる

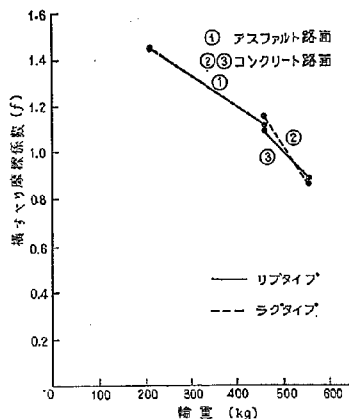


図-5.48 横すべり摩擦係数と輪重との関係 (乾燥路面, タイヤ内圧35psi)

につれて顕著に表われる。

これらを総合して実際の数値を見ると、肉眼的な大きさの凹凸 (1.0mm 以上) については乾燥状態では平坦な路面は横すべり摩擦係数は大きく、湿潤状態では平坦な路面も凹凸のある路面もほぼ摩擦係数は等しいようである。さきに示した図-5.22, 5.23で見るとコンクリート舗装, アスファルト舗装共に乾燥時の摩擦係数は大体表面が平坦になるほど大きくなっている。しかし湿潤時はコンクリート舗装では平坦になると摩擦係数は減少している。アスファルト舗装では湿潤時も一般に路面が平坦になるほど摩擦係数は増大しているが、一部のものは平坦になった場合摩擦係数が低下している。摩擦係数が低下したものは主として合材の組成で 25mm 通過量が50%以下のものすなわち粗粒アスコンが主であって、この場合の平坦さはフラッシュによる真の平滑な状態が含まれていると考えられ、肉眼的な平坦さと同時に微小な凹凸 (0.1mm 以下) もなくなったものと考えられる。

以上の結論として乾燥状態では平坦なものほど摩擦係数は大きい。湿潤状態では微小凹凸量の多いものほど摩擦係数は大きい。湿潤時高速になると微小凹凸が一定の場合更に大きい凹凸のある方が摩擦係数は大きい。ただこれらの凹凸量と摩擦係数の相関値についてはいろいろ研究されているがまだ確定したものはない。

これらすべり摩擦に影響する路面の凹凸の測定方法もいろいろあるが以下これについて述べる。⁴⁹⁾

(1) 砂拡大による方法、この方法は英国道路研究所をはじめ各国の舗装関係者の間で広く用いられている方法で、粒度の均一な比較的小さい粒子の砂の一定量を舗装面上に置き、これをストレートエッジで広げ、拡大し

て作られた円形の直径で表示するもの³⁷⁾または平均厚さ(h =砂体積/拡大面積)で表示するもの³⁹⁾がある。
(図-5.49 参照)したがって直径の小さいもの、平均厚さの大きいものほど路面は粗である。

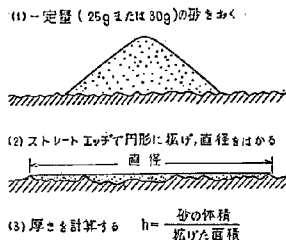


図-5.49 砂拡大によるあらさ測定法

(2) ダイヤルゲージを利用した方法、ダイヤルゲージを足付き直線定規に沿って移動させ、舗装表面の凹凸を記録するものである。

(3) フランス式マイクロプロファイルグラフ³⁹⁾ ダイヤルゲージ方法を改良したものがこの方法である。その構造原理を図-5.50に、記録例を図-5.51に示す。

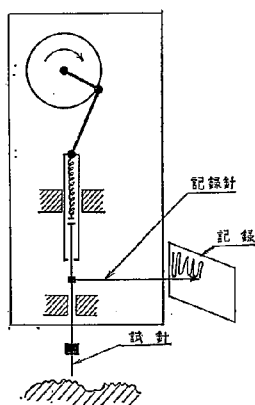


図-5.50 フランス式マイクロプロファイルグラフ



図-5.51 同上記録例

(4) カーボン紙を使った押型方法、カーボン紙を調査する道路の表面に置き、交通を通して押型をとる方法である。

(5) 立体視による方法、立体写真によって凹凸状態の等高線を入れたうえで、一定面積内の凹凸量とか、一

定断面の凹凸量などを計算する。最も正確であるが、手数も多く要する。写真-5.14にその装置を示す。

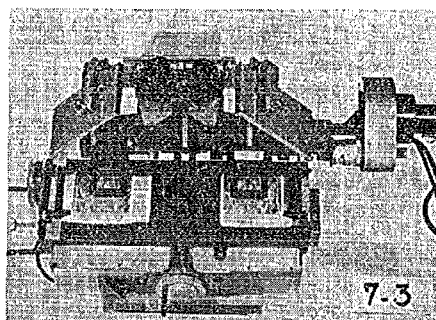


写真-5.14 立体視による路面凹凸測定装置

(6) 切断面を拡大する方法、舗装面を型取りし、合成樹脂などで模型的に作られたものを切断して拡大視する。凹凸量の外突起先端の角度およびその状況などを見ることができ。

(7) 透水性測定による方法、湿潤状態の舗装面とすべり摩擦の関係は、タイヤが接した場合の排水性に大いに関係する。この状況に類似した性質の測定法として、図-5.52に示すようなゴムの接触面を持った円筒より、水が透出する速さを測定する方法がとられている。

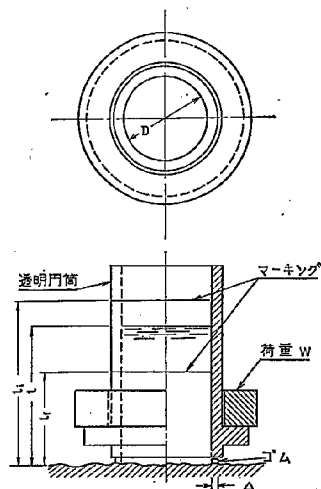


図-5.52 透水性測定方法

(8) 表面水の流出状況測定による方法、舗装面のあらさの測定ではないが、あらさに関連した湛水の程度を知るため、表面水の流出速さを測定する方法も行なわれ

ている。

〔7〕 舗装の種類とすべり摩擦係数

現在行なわれている道路舗装では、その種類によってすべり摩擦係数が一方的に決定されることはない。反対に同一種類の舗装であっても、配合および材質に応じてすべり摩擦係数は広い範囲にわたっている。しかし乾燥時のすべり摩擦係数はいずれの種類のものでも、いずれの配合、材質のものであっても0.5よりは大きく、安全走行上問題はない。湿潤時の摩擦係数の主要部を構成するのは、主として舗装表面の骨材の質と面積率であると考えられる。配合によってどのような骨材表面が得られ、その骨材がどのような性質のものであるかが最も重要な問題である。

(1) コンクリート舗装について

別表によるとほとんどのコンクリート舗装の湿潤時の摩擦係数は60km/hに換算して0.45～0.8の範囲にあり、

更にこれを路面温度35°Cに換算するとほとんど0.45～0.55の範囲となる。すなわちコンクリート舗装のすべり摩擦係数は測定条件が同一であればほぼ同一値となり、配合および材質その他表面状態の良否による差は0.1程度である。これは別表-3.32のセメントペーストのすべり摩擦係数からも推定される。すなわち普通骨材のみの良好な路面で得られると考えられる摩擦係数0.6程度のものに対して0.2のすべり摩擦係数をもつセメントペーストの部分が何パーセントあるかということになり、これらの現況は表-5.9のとおりである。

一般に他の条件を同一として、舗装表面の組成から合成摩擦係数を計算すると次のようになる。

$$f = \sum (m_i \times f_i) \dots\dots\dots (5.27)$$

ただし f は全体の摩擦係数、 f_i は表面を相成する1単位のすべり摩擦係数、 m_i はその組成の表面積に占める比率である。いま舗装が結合材と骨材の2種類で組成されて

表-5.9 各種路面のすべり摩擦係数の標準状態換算値
(湿潤状態, 大型道路試験車, リブタイヤ)

舗装種別	場 所	測 定 値			標 準 換算係数	摘 要
		速 度	摩擦係数	路面温度		
コンクリート	17号小出	60	0.52	24.0	0.48	標準状態は60 km/h 35°C とする。
	17号堀之内	60	0.43	22.4	0.38	
	土研走路	60	0.46	33.0	0.45	
	名阪、関トンネル	50	0.58	13.0	0.43	
	名神、蟬丸トンネル	60	0.47	25.5	0.44	
	名神、山科バスストップ	60	0.60	37.5	0.60	
	西湘バイパス	40	0.71	30.0	0.59	
アスファルト	17号上越	60	0.54	16.5	0.46	
	ギ ャ ッ プ 型	60	0.57	16.5	0.49	
	密粒アスコン	60	0.61	15.0	0.52	
	プレコート	60	0.62	29.5	0.60	
	ガムファルト	60	0.49	35.0	0.49	
	ポリベープ	60	0.51	40.0	0.52	
	修正トベカ	60	0.45	34.0	0.45	
	シート	60	0.56	37.0	0.56	
	アスファルト	60	0.42	36.0	0.42	
	名神大垣	60	0.53	35.0	0.53	
	山科	60	0.39	38.0	0.40	
	茨木	60	0.53	39.0	0.54	
	首都高速	50	0.49	37.0	0.49	
	グー	50	0.63	36.0	0.58	
	ス	50	0.65	32.0	0.59	
	密粒	50	0.66	32.0	0.60	
	オーブン	50	0.65	32.0	0.59	
	トベカ	50	0.65	33.0	0.59	
	ガムファルト	50	0.64	17.0	0.51	
	ストレート	50	0.62	10.0	0.44	
	ポリベープ	50				
	RAセメント	50				
	名阪国道	50				
	アスコン	50				
	すべり止め	50				

いるとし、結合材の配合比を体積で p とすると

$$f = p^{2/3} f_c + (1 - p^{2/3}) f_g \quad \dots\dots\dots (5.28)$$

ここで f_c はセメントペーストのすべり摩擦係数、 f_g は骨材のすべり摩擦係数である。舗装体の配合比と表面占有比は、材料の性質が異なる場合、一般には2/3乗には比例しないのでその係数を k とすると

$$f = k \cdot p^{2/3} \cdot f_c + (1 - k \cdot p^{2/3}) f_g \quad \dots\dots\dots (5.29)$$

k は結合材の付着力を考えると1.0よりいくぶん大きい数字と考えられる。

これらの式を用いて実際のコンクリート舗装面のすべり摩擦係数を試算してみると、 $f_c = 0.2$ 、 $f_g = 0.55$ 、 $k = 1$ として、一般の配合範囲 $p = 0.1 \sim 0.15$ では

$$f_{0.1} \div 0.47, f_{0.15} \div 0.45 \quad \dots\dots\dots (5.30)$$

これらの数値は実測値とほぼ一致している。

これらを総合すると、コンクリート舗装の場合、結合材の多少によるすべり摩擦係数の差は比較的小さい。しかし何らかの事情によって特に富配合のものを作った場合すべり摩擦係数は当然式(5.29)によって減少する。また舗装の仕上げるとき表面にモルタルまたはレイタンスの層が残ると部分的に非常に富配合のものとなり、上述によって摩擦係数は低下する。

乾燥時の摩擦係数も60km/h、35°Cに換算すると、大体一樣に0.6~0.7の範囲となる。これは上述の考えの下に、セメントペーストの標準状態で摩擦係数が0.4であることから説明される。したがってコンクリート舗装で標準湿潤時の摩擦係数が0.45より小さくなるような舗装は特別に大きい欠陥があるか、または多くの欠陥が重なった場合のみである。

(2) アスファルト舗装について

アスファルト舗装のすべり摩擦係数はコンクリート舗装に比べて広い範囲にわたっている。これは別表-3.31によるとアスファルトのみのすべり摩擦係数が湿潤時0に近いことに原因している。しかし普通に施工されたものの湿潤時摩擦係数はコンクリートの場合とほぼ等しく標準状態で(60km/h、35°C)0.4~0.6程度であり、その範囲はやや大きい。別表-2.8~2.15は土木研究所が17号線岡部町で行なった各種配合の比較試験である。別表-2.8においてNo24のアスファルト10.15%混合のものだけは特に摩擦係数が小さくなっているが、これを除くと最大0.9、最小0.78で大部分のものが0.8前後であり、これを標準状態に換算すると0.47となる。この中にはゴム混入アスファルト等特殊のものもあるがその差はあまりない。同様に結合材の種類による差を測定したものが別表-3.2(20号線甲府市内)である。これら各種の舗装のすべり摩擦係数はほとんど一樣に0.65程度であり、これを標準状態に換算すると0.6となり一樣に大変良好な舗装といえる。結合材の使用量がいずれも4.8%と比較

的少ないことがすべり摩擦上好な結果となっていると考えられる。別表-3.14~3.30は17号線上越管内のアスファルト舗装のすべり摩擦係数である。標準状態に換算するといずれも0.45前後である。一部0.5以上のものがあるが舗装の種類はプレコート、シートアスファルト、ガムファルト、密粒アスコン、修正トベカと多種であり、結合材や舗装の種別よりも、設計配合の良否が原因ではないかと考えられる。

別表-2.4、2.6、2.7は首都高速道路のすべり摩擦係数の測定値である。これらの表において密粒アスコン、オーブングレイドおよびグースアスファルトを比較してみる。別表-2.4では密粒アスコンとオーブングレイドはいずれも0.45前後でほとんど等しい。別表-2.6では0.76で標準換算でも0.65と良好であるが両者の差はなく、むしろ密粒アスコンの方が良好である。別表-2.7では夏季のため最もすべり摩擦係数は小さくなっているが、密粒アスコンとオーブングレイドの間に明らかな差は認められない。グースアスファルトはやや小さくなっている。同様な状況は別表-2.18の名阪国道の舗装においても見られる。

別表-2.16は千葉市宮野木で行なわれた各種簡易舗装試験のすべり摩擦係数である。この舗装は各種配合の外にシールコートの有無もあり、表面性状は多種多様である。測定された摩擦係数も50km/hで大きいものは0.65~0.7と良好であるが、普通で0.5~0.6であり、特に小さいものは0.3~0.2となっている。これを標準状態に換算すると良好な路面は0.5~0.55、普通路面は0.35~0.45、悪い路面は0.1~0.15となる。もちろん0.1~0.2の路面は完全にフラッシュした状態である。

アスファルト舗装の配合とすべり摩擦係数の関係についても、コンクリート舗装の場合と同様に考えると式(5.29)と同様にして次式が得られる。

$$f = k \cdot p^{2/3} \cdot f_a + (1 - k \cdot p^{2/3}) \cdot f_g \quad \dots\dots\dots (5.31)$$

ここで f_a はアスファルトペーストのすべり摩擦係数である。式(5.31)に $k = 1$ 、 $f_a = 0.1$ 、 $f_g = 0.55$ 、 $p = 0.05 \sim 0.12$ を入れて計算すると

$$f_{0.05} \div 0.49, f_{0.12} \div 0.44 \quad \dots\dots\dots (5.32)$$

これらの数値は実際に測定して得られるすべり摩擦係数値とほぼ一致しており、結合材の多少によるすべり摩擦係数の範囲は広いことを表わしている。

これらを総合すると、いわゆるすべり止め舗装と称してオーブングレイドなものにしたり、ゴム混入等特殊なアスファルトを使用してもその効果はあまりなく、良好に施工された普通のアスコンと同様である。アスファルト舗装の摩擦係数値の範囲は広く、良好なものはコンクリート舗装よりも大きい係数値をもつが、小さいものは特別に小さくなるものがある。普通に施工されたアス

ファルト舗装の中にも配合等（粒度およびアスファルト量、シーコート等）の原因によってすべり摩擦係数が小さくなるものがあるので注意しなければならない。

アスファルト舗装の乾燥時のすべり摩擦係数は全体に大きく、標準換算にて0.5～0.8程度であって安全走行上問題はない。これはアスファルトのみの乾燥時の摩擦係数が0.4であることから了解される。ただアスファルト舗装は気温、気象によって性状が変化するので同一舗装であっても、気温気象によって摩擦係数が変化することに注意しなければならない。

(3) エメリー等骨材接着舗装

すべり止め舗装の一種としてエメリー、シリカサンド等を骨材とし、高級接着剤（エポキシ樹脂等）によって舗装表面に接着または混合舗設する工法がある。この工法の効果は最も大きく別表-3.11の首都高道路においては⁵¹⁾B種（エメリー使用）で0.84～0.86、C種（エメリー、シノパール混合）で0.79～0.81と良好であり、これを標準状態に換算しても0.65程度で良好である。別表-3.29は17号線でシリカサンドをエポキシ樹脂で混合舗設したものであるが0.8と良好であり、標準換算でも0.6と良好である。

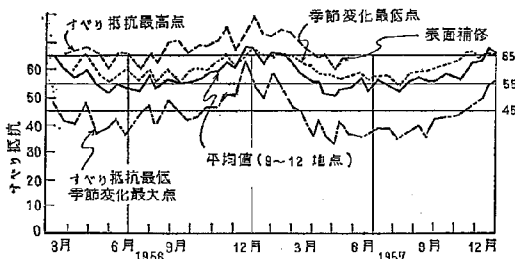


図-5.53 すべり抵抗の季節変化（2週間に1回の測定）

更に別表-3.33, 3.34, 3.35もこれら骨材の接着舗装の測定値である。いずれも良好な結果を得ている。別表-4.1～4.4は九州地建管内の主要国道の測定結果である。一般道路のすべり摩擦係数値は舗装工種のかんにかかわらず種々変化しているが別表-3.40の10号線宗太郎峠部分のすべり止め舗装は明らかに大きい係数値を表わしている。エメリー等良質の骨材を主とした舗装の係数値が大きいことがわかる。

これらを総合して、良質の骨材（エメリー等）を完全に接着した場合の、標準状態のすべり摩擦係数は0.6程度であり、普通の骨材（砂岩等）を完全に接着した場合の標準状態のすべり摩擦係数は0.55程度と考えられる。ただこれらの舗装は工費が高く、しかも耐久性に乏しい欠点があり、タイヤの摩耗に対してもよくないので、特に危険な場所のにのみ施工すべきである。

〔8〕 季節変化とすべり摩擦係数

舗装は表面の摩耗および圧密作用について気象の影響を受ける。したがって季節によって温度差によるすべり摩擦係数の変化の外に、同一温度の場合であっても表面の状態は異なり、すべり摩擦係数も違ってくる。実際にすべり摩擦係数のうち温度の影響部分と季節の影響とを

区別することは不可能であって、統計的に温度の影響として処理された以外のものを季節による影響と考えることにする。図-5.53は英国道路研究所で発表⁵²⁾された季節による変化を示すものである。しかしこの中には温度の影響も含まれていることに注意しなければならない。図-5.54は土木研究所の試験走路のコンクリート舗装の経年変化の測定値およびそれを温度補正したものである。温度補正した結果はほとんど0.45となり、あまり季節のみによる影響はないと考えられる。図-5.55は同じく土木研究所の試験走路のアスファ

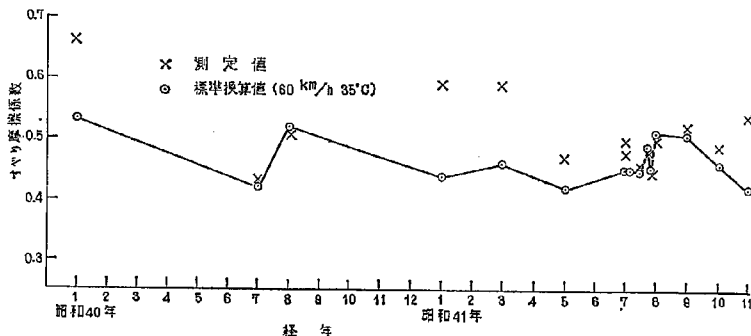


図-5.54 すべり摩擦係数の季節別変化（土研走路、コンクリート舗装、湿潤）

舗装の経年変化の測定値および温度補正值である。観測期間が短いので結論はでないが、さきのコンクリート舗装に比較して温度以外に季節の影響はあると思われる。図-5.56は17号線岡部町の試験舗装の測定値であるが、やはり温度以外の季節の影響はあると思われる。これらアスファルト舗装の両者は共に5月、6月、7月頃の換算値が最も大きく、8月、9月が小さくなっている。

以上を総合するとすべり摩擦係数は温度補正をしない季節変化ではもちろんアスファルト、コンクリート舗装共に冬季に大きく夏季に小さい。しかし温度補正をした後ではコンクリート舗装はあまり季節の影響はないが、アスファルト舗装は季節の影響を受け、春に大きく夏より初秋にかけて小さいと考えられる。この外実際の道路では季節によって一定の環境条件の影響をうけることもあり、たとえば雨期と乾期とでは、雨期の方がすべり抵

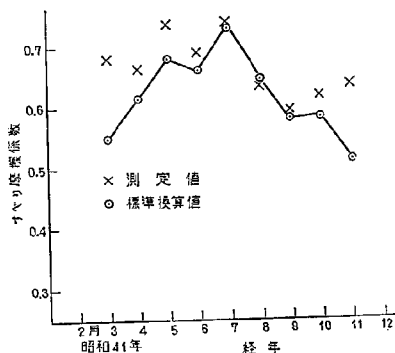


図-5.55 すべり摩擦係数の季節別変化 (土研走路、アスファルト舗装、湿潤)

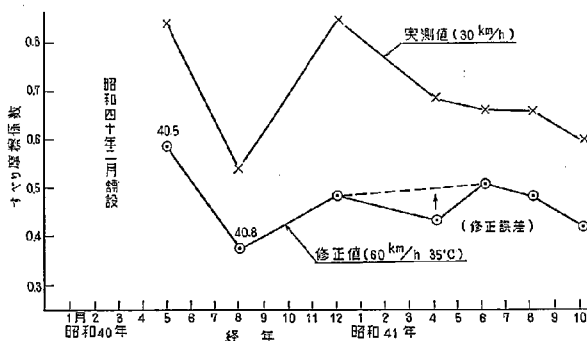


図-5.56 すべり摩擦係数の季節別変化 (17号線岡部町アスファルト舗装10箇の平均値、湿潤)

抗が大きい。これは油脂、じんあいなどの量が雨期には洗い流されて少ないためである。

[9] 路面の凍結とすべり摩擦係数

路面に積雪があったり、表面水が凍結したりした場合に、その路面のすべり摩擦係数は舗装面本来のものと全く異なり、完全に積雪または凍結状況に左右される。氷雪路面のすべり摩擦係数の詳細については次回に報告するが、主要な範囲をあげると表-5.10のとおりである。表の示すごとく、氷結した平滑面のすべり摩擦係数は0.1前後であり、完全に平滑な場合は0に近くなることもある。また新雪が薄く平滑に圧密されたときにも0.1～0.15になる。冬季間最も多く普通に見られる圧雪がやや平滑になったり、または氷盤状になったものは大体0.2～0.3のすべり摩擦係数をもっている。積雪が古くなってザラメ状になったものは0.3～0.5の摩擦係数になるが、これはすべり摩擦係数のみではなく、堆雪による走行抵抗が含まれている。良好に摩擦材(チップ、砂等)

表-5.10 氷雪路面のすべり摩擦係数

状 態	すべり摩擦係数値	速 度
氷～氷盤	0.1～0.2	30～40km/h 平滑な氷または新雪は0.1以下になることもある。
新雪、氷に近い圧雪	0.2～0.25	
普通の雪	0.25～0.30	
ざらめ雪、解け始めた雪	0.30～0.40	
積雪上に塩化物散布	0.35～0.45	
積雪上に砂散布	0.20～0.30	
積雪上に砂、塩化物混合散布	0.30～0.50	

を散布した氷雪面の摩擦係数は0.3～0.4程度である。また氷雪上に少量の塩化物を散布すると摩擦係数は0.4前後に上昇することも観測されている。^{(22),(23)} もちろん多量の塩化物を散布するか、加熱して氷雪を全部融解してしまえば本来の舗装面がでて摩擦係数も0.4～0.6と向上するのは当然である。

〔10〕 仮設鉄板路面のすべり摩擦係数

別表-5より明らかなように、一般に鉄板のすべり摩擦係数は小さい。平鋼板の摩擦係数は60km/h、乾燥時で0.49であり、湿潤時は0.19と小さい。縞鋼板(図-5.57)とか円形突起鋼板(図-5.58)はある程度良好であるかのように考えられるが、実測値は60km/h、湿潤で0.21, 0.27と共に小さい。この程度の係数値では一般道路用としては危険であり、事故の原因となっていたのも当然である。これらのすべりやすい鋼板に対しアスファルトコンクリートを舗設したり、シリカサンド等の対摩擦材を接着したもの摩擦係数値は普通に大きいというまでもない。図-5.59のように鋼板に穴をあけたものでもなお0.27と係数値が小さいことはゴムのすべりの一般論から十分考えられるものはあるが、注意を要することである。

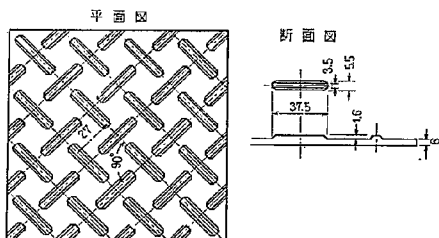


図-5.57 縞 鋼 板

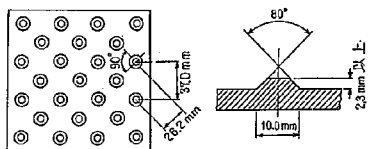


図-5.58 円形突起鋼板

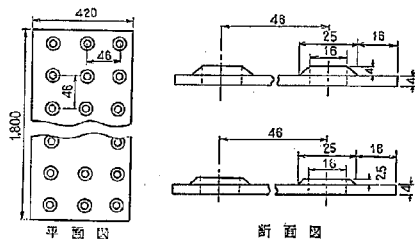


図-5.59 穴あき鋼板

一方铸铁板の摩擦係数は0.45と良好である。これは鋳造したために表面の組成全体に微小凹凸ができているためと考えられるが、更にその表面形状(図-5.60)にも

原因していると考えられる。別表-5.9のS鋼板も図-5.61のような表面模様を使用しているが、鋼板であるが0.43とかなり良い係数値を得ている。

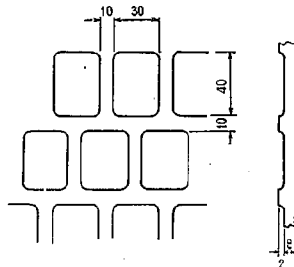


図-5.60 铸鉄覆工板

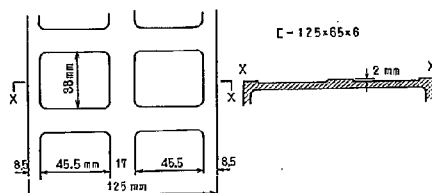


図-5.61 S 鋼 板

今後鉄板のすべりについては表面材の組成について検討すると共に、表面模様についても検討する必要がある。それによって十分すべり摩擦係数の大きい仮設路面用鉄板を作ることができると考えられる。

6. すべり摩擦係数の基準値および路面のすべり対策

〔1〕 すべり摩擦係数の基準値

これまで述べたようにすべり摩擦係数は諸種の要因によって複雑に左右され、なかなか定量的には握しにくいものである。しかし自動車の安全走行を確保する上から路面のすべり摩擦係数を一定の値以上に保つということは絶対に必要である。この意味でわが国においてもすべり摩擦係数の基準値を決定する必要がある。

すべり摩擦係数の基準値は二つの面より決定されると考えられる。一つはすべり摩擦係数を表わす、統一した基準の決定であり、次いでこの基準の下に走行性との関連において安全を確保できる限界値の決定である。

(1) すべり摩擦係数の統一基準について

すべり摩擦係数に影響する諸要因については、測定条件を統一する必要がある。この統一基準によって測定できないものについては換算して条件を合わせなければなら

らない。

(1) 制動状態については最大のすべり摩擦係数を得るすべり率(20%前後)も考えられるが、実用上は100%制動(完全ロック)を使用すべきである。

(2) すべり方向は縦すべり摩擦と横すべり摩擦の二つがあるが、横すべり摩擦係数の場合最大横すべり摩擦抵抗を得る横すべり角度が一定でなく、また測定機械が複雑になる。反面タイヤ路面の形状的要素を除くと最大横すべり摩擦抵抗は縦すべり摩擦抵抗とほぼ等しい。これらを考慮して縦すべり摩擦係数を基準にすべきである。

(3) 制動中の速度は一定にすべきであり、わが国の場合一般の道路については60km/hが適当であると考えられる。60km/hの速度が得られない場合は、5.で述べた方法によって換算すべきである。この場合数種の速度について実測し統計解析して60km/hに換算すべきであるが、簡単には式(5.2)すなわち $f = 0.000105v^2 + 0.0002v - 0.0111 + 0.000056v^2 - 0.0117v + c$ によって換算してもよい。更に簡便を要するときは $f_{60} = -0.005v_{60} + c$ によって近似換算しても大差はない。しかし20~30km/hの測定値から換算する場合は式(5.2)によるべきである。

(4) 路面状態はもちろん湿潤状態で測定すべきである。じんあいの有無も大いに影響するが、その程度を定量的には握ることが困難であるので特にじんあいを置かない普通の状態で測定することを標準とする。また湿潤状態としての水膜の厚さも大きい問題であるが、普通の降雨と普通の路面こう配を想定して、普通の散水車で十分に散水した直後の状態を標準とする。

(5) 温度および季節による影響は相当大きいので、これについては絶対に統一しなければならない。今までの各種すべり摩擦に関する議論がなかなかまとまらなかったのは温度の要因を統一しなかったためであると考えられる。しかし季節の影響は5.[8]で述べたように温度の影響を除外するとそれ程大きいものではなく、また現在定量的には握りにくいので一応考えないことにする。温度についてはすべり摩擦係数が小さくなる高温部を標準にすべきであり、わが国の夏季路面温度は日中で30~40°C程度であるので35°Cを標準としたい。また35°C付近では摩擦係数に対する路面温度差の影響もほとんどなくなっている为好都合である。もちろん35°Cの時のみで測定することは不可能であるので任意の温度で測定し、その測定値を式(5.2)によって換算すべきである。

(6) タイヤの状態については、最も普通に使用されるものを標準とすべきである。現在乗用車にはSBR合成ゴムが使用され、トラック、バス等には天然ゴムが使用されているが、それらのすべり摩擦係数の差はほとんどないので、SBRを主とした合成ゴムのリブタイヤを標

準としてよい。

(2) すべり摩擦係数の限界値の決定

道路のすべり摩擦係数の限界値を決定する場合の基準は二つある。一つは道路の幾何構造設計との関係であり、他の一つは事故との関係である。

(i) 道路の幾何構造との関係

現在一般に使用されている幾何構造の中で計算^{(9),(54)}の基準となっているすべり摩擦係数は縦方向60km/h、湿潤で0.32程度であり、横方向は0.15である。実際の道路のすべり摩擦係数がこの数値よりいくらかでも大きい場合、道路構造としては安全設計といえる。しかしそれは同時に安全率1.0であって、安全のための余裕はあまりないことになるので、限界値はこれよりも大きくすべきである。

道路構造でまず縦すべり摩擦が問題となるのは視距の決定である。視距 $S = v \cdot t + \frac{v^2}{2g}$ なる式によっている。ここで $v \cdot t$ の項は制動遅れの間に走る距離であり、 $\frac{v^2}{2g}$ はいゆるすべりながら停止するまでに必要な距離である。ここで t と f が問題になるわけであるが、構造令⁽⁹⁾では安全側をとって $t = 2.5$ 秒とし f は速度に応じて上述の0.3~0.4をとって計算している。一般に緊張して急制動を行なう場合は t は0.7秒程度でよく、2.5秒は相当の余裕があり、ここに安全率が含まれていると考えられる。しかし実際の運転者はこの余裕と路面のすべり摩擦の余裕とを加味して、制動を行なう場合路面とタイヤの間のすべり摩擦係数を100%使用しないで(完全ロックの制動ではなく、ブレーキドラムですべての状態で)停止する。もちろん緊急の場合はロック制動をすることは当然である。これらの状況を実際に走行している車両について調査した結果が表-6.1のとおりである。この調査は晴天時のものであり雨天ではいくぶん小さくなると考えられる。

一方追突の状況を考えてみると、追従走行している車の場合、後車は前車の制動を見て自分も制動停止する。制動停止距離はほぼ等しいと考え、追従間隔は制動遅れの間の走行距離である。通常の最小車頭間隔⁽⁵⁵⁾は30km/hで8~18m、60km/hで18~30mであるので、前車の後部から後車の前部までの間隔は5~25mである。これを時間に換算すると制動遅れとしての余裕は0.6~1.6秒となる。したがって第一義的には追突とすべりとは関係ないが、実際の走行では後車は必ず制動遅れがある。何らかの原因で制動遅れが余裕時間より大きくなった場合、運転者はより強くブレーキを踏んで制動停止距離を小さくしようとする。表-6.1からもわかるように、普通制動して0.3g以上の減速度が加わると人間は非常な不快を感じる。前車の制動は通常これより小さいと考えられる。したがって危険な場合、後車の用いる路面のすべり

表-6.1 発進、停止時の加減速度の頻度

加減速度 g	国 電		都 電		地下鉄		官 用 車		タクシー		バ ス	
	発 進	停 止	発 進	停 止	発 進	停 止	発 進	停 止	発 進	停 止	発 進	停 止
0.01												
0.02												
0.03												
0.04											1	
0.05	1										1	1
0.06	2		3	3							2	1
0.07	1	1	1			2			2		4	1
0.08	8	1	4	6	1	2	2		2	2	3	5
0.09	2	1	3						2	1	3	1
0.10	4	2	5	2	5		2		5	2	10	4
0.11		1			3	2	2		6	1	12	9
0.12	1	1	2	4	3		3		8	3	6	10
0.13	1			2			1		4	1	4	15
0.14					1		3		10	3	9	20
0.15				1			2		5	2	6	5
0.16				2			2		3	5	10	19
0.17							6			3	3	15
0.18							2		7	2	5	16
0.19							2		4	5	2	7
0.20							4		4	3	5	11
0.21							1		5	1		9
0.22							3		3	6	3	6
0.23							1		3	1	1	1
0.24							2		3		3	6
0.25							1		4	1		3
0.26									3	2	2	
0.27									1	1		3
0.28							1		6	3		3
0.29									3	1		1
0.30							1		1	4		1
0.31									1	1		
0.32										1		
0.33												
0.34												
0.35												
0.36									1			
0.37												
0.38							(1)					
0.39							(1)					
0.40												

(注) () は急ブレーキ

摩擦係数と前車の用いる適当な摩擦係数との差が安全に影響するものである。路面の摩擦係数を 0.45、前車の適当な減速度を $0.3g$ とすると、両車の制動距離の差は $S = V^2 / (254 \times 0.30) - V^2 / (254 \times 0.45)$ となり、 $S = V \cdot t / 3.6$ より $4 \sim 15m$ 、 $0.5 \sim 0.9$ 秒の余裕がでることになる。そしてこれに走行車両間の時間間隔を加えると余裕の合計は $1.1 \sim 2.5$ 秒となり十分安全である。

これらを総合すると視距に関係する一般の制動停止の場合、路面の摩擦係数は構造計算の数値よりいくらか大きくしておく必要がある。一方追突を考えた場合は普通制動（乗心地を害しない範囲の減速度、 $0.3g$ 程度）との差が大きいかほど安全であり、0.45 あれば十分と考えられる。

(ii) 事故との関係

路面がすべりやすい状態にある場合、事故の原因となることはよく知られている。事故の原因の中にすべりの要素が含まれていることは非常に多い。しかし反面すべりのみが原因で起った事故は比較的少ないのである。これらの状態を表-6.2³⁾に示す。走行車にとって必要なすべり摩擦は制動時、駆動時および横推力を受けた時が主であって、普通走行中はほとんど必要としない。したがって事故は路面がすべりやすくなると同時に、何らかの他の原因が重なってはじめて起こることになる。逆にいうとブレーキを踏まなかった事故を除くと、事故は常にすべり摩擦が関係していることになる。摩擦係数が大きいと、事故を防止できないまでも、損害を小さくすることができる。

表-6.2 道路欠陥別事故率

欠陥種類	事故件数	比率 (%)	道路欠陥のみの比率 (%)
欠陥なし	17,610	82.5	—
見通し不良	1,732	8.1	46.3
すべりやすい	1,145	5.4	30.6
凹凸破損	436	2.0	11.6
工事	354	1.6	9.5
水たまり、ぬかるみ	76	0.4	2.0
計	21,353	100.0	100.0

表-6.3は土木研究所で実測した各種道路の縦すべり摩擦係数のうち事故と関係のあるものを集めたものである。この表の中でまずすべりが事故に結びついたのはコンクリート舗装のうち首都高速道路の千代田トンネル内である。供用開始前は摩擦係数が 0.3 であった。これは単なる舗装面の性質の外に、じんあい、レイタンス等があったと思われるが、十分大きいとは考えられない。その後時間の経過および温度の低下のために摩擦係数は

0.30→0.50→0.64と順次上昇してゆき、道路交通も安全であった。しかし40年8月の測定では0.2と非常に小さくなった。現場は丁度合流点付近なので追突、接触等の事故が多発した。摩擦係数 0.2 は氷に近い状態である。この原因は漏水によるカルシウム分の沈殿であり、その対策については 5. で述べたが、処理後は摩擦係数もそれぞれ 0.52~0.84 となり事故も起こらなくなった。この状況を図-6.1に示す。

17号線の上越管内、芝原地区でも事故が多発した。現地は曲線区間があるため、事故の原因がすべりのためか、曲線のためかを判別するために、付近の直線区間のすべり摩擦をも同時に測定した。その結果すべり摩擦係数は曲線区間で 0.66 であり、直線区間では 0.77 であった。問題の地点は直線部分よりいくらか摩擦係数は小さいが、係数値は十分に大きく、事故の原因は曲線線形のためであると考えられる。

17号線上越管内の四十日地区の事故多発地点については、同じような直線道路の路面で、事故の少ない部分は摩擦係数が 0.59 であるのに対して、事故多発地点は平均で 0.45 であり、部分的には 0.33~0.41 と小さくなっている。

名神高速道路でも一部事故が多発して問題になったのは京都東〜京都南間⁴⁾であり、摩擦係数も 60km/h、湿潤で他の区間が 0.5~0.6 と良好であるのに比して、0.4 前後であり部分的に 0.4 より小さくなっている。

追突による事故が問題になった例は 4 号線の東京都内である。交差点の手前で追突事故が多いので、原因がすべりによるものか、あるいは無理な運転によるものかを知るために測定した。その結果、摩擦係数は 0.28~0.60 で大部分は 0.45 以上であったが、ところどころ 0.4 以下の所が表われており、すべり摩擦係数も十分大きくないことがわかった。

同様に 14 号線の京葉道路入口（東京側）でも追突事故が問題になった。測定の結果摩擦係数は 0.41~0.48 程度であり、特に下り方向は 0.42~0.41 となった。追突事故の原因がすべりのみにあるとも考えられないが、0.42~0.41 はやや小さい値である。

仮設路面の鉄板についても、初期の平鋼板、縞鋼板の場合には事故の発生率が多かったが、その後改良型の K 鉄板、S 鉄板等が使用されるようになってからは特に事故多発の傾向は見られなくなった。この場合も 60km/h の摩擦係数 0.4~0.45 が限界の一つと考えられる。

これらの状況を総合してみると、普通の路面の摩擦係数は、夏季、湿潤、60km/h で 0.45 以上であり、0.5 以上あれば十分安全である。事故に関係する路面のすべり摩擦係数は 0.40~0.45 程度であると思われる。摩擦係数が 0.35 より小さくなった場合は事故の原因は路面のす

表-6.3 事故と関係のあるすべり摩擦係数値

舗 装 種 類	場 所	速度	湿潤摩擦係数	路面温度	測定月日	事 故 と の 関 係
コンクリート	17号小出地区	80	0.47	23.5	40. 7.21	事故なし
"	首都高速千代田トンネル	60	0.30	—	39. 7.30	供用開始直前
"	"	"	0.50	—	39. 9.15	
"	"	50	0.64	13.0	39. 4. 7	
"	"	"	0.20	27.0	40. 8.18	事故多発
"	"	"	0.52	12.6	40.11.30	塩酸洗い, 事故急減
"	"	"	0.84	12.3	"	エメリー接着, 事故急減
"	"	"	0.79	11.9	"	エメリー, シノパール接着, 事故急減
アスファルト	首都高速 1 号 線	60	0.43	—	39. 7.30	供用開始直前
"	"	50	0.75	25.0	40. 4. 7	
"	密 粒	60	0.49	—	39. 7.30	供用開始直前
"	"	50	0.77	24.0	40. 4. 7	
"	名 神 小 牧〜一 宮	60	0.66	35.5	41. 9. 2	事故なし
"	" 関 原〜彦 根	"	0.58	35.5	"	
"	" 彦根〜八日市	"	0.39	39.5	"	
"	" 山 科	"	0.39	36.0	41. 8.31	やや事故多し
"	"	"	0.42	35.5	"	
"	" 京都南〜茨木	"	0.53	35.5	41. 9. 1	事故なし
"	4 号 線 東 京 都	50	0.28~0.60	26.0	40. 7.15	交差点手前, 追突事故多し
"	14 号	"	0.41~0.48	31.0	40. 9.27	追突事故あり
"	17 号 上 越, 芝 原	30	0.66	31.0	40. 7.20	曲線事故多発地点
"	"	"	0.77	25.0	"	直線事故なし
"	17 号 上越, 四十日	60	0.59	25.0	40. 7.21	直線事故なし
"	"	"	0.35~0.51	31.0	"	直線事故多し
仮 設 路 面	平 鋼 板	60	0.19	—	38.12.	事故発生
"	竊 穴 あ き 鋼 板	"	0.21~0.27	—	39.10.	
"	K 型 鋳 鉄 板	"	0.45	15.0	41.12.22	比較的良好
"	S 型 鉄 板	"	0.40	—	"	
氷 雪 路 面			0.1 ~0.3			普通の氷雪面
"			0.3 ~0.45			良好に処理された氷雪面

べりのみにあると考えられてもやむをえない。一般に走行上良好な道路では0.4より大きければよいが、線形の悪い所とか、追突の危険の多い所では0.45以上ないと安全とはいえないようである。

(iii) 諸外国の限界値

イギリスでは早くより路面のすべり摩擦係数の限界値の規定が作られている。一部数値の改変があったが現在

使用されているものは表-6.4のとおりである。イギリスは元来横すべり摩擦を標準としており、限界値も横すべり摩擦によって表示されているが、ほぼ同数値の縦すべり摩擦係数値としてよいと考えられる。

米国では各州で限界値を制定して運用している。その状況は表-6.5のとおりである。これに対して最近全国を統一した限界値を設定すべきであると考え、HRB を中

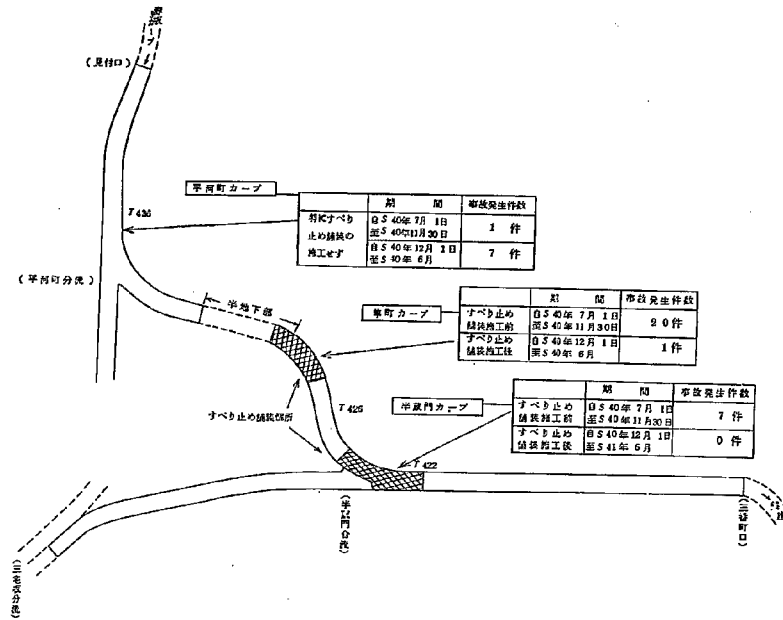


図-6.1 千代田トンネル内交通事故発生図 (上り線)

表-6.4 提案されている横すべり摩擦係数 (イギリス)

区分	場所種別	30マイル/時の速度で平滑タイヤ、 湿潤路面上での横すべり摩擦係数	代表的すべり抵抗の標準
A	以下のような最も問題のある場所 (i) ロータリー (ii) 規制のない道路で半径500フィート (150m) 以下の曲線部 (iii) 5%またはそれ以上のこう配が300フィート (90m) 以上続くこう配部 (iv) 規制のない道路の信号交差点への進入路	0.55以上	良好 高速交通に対する要求を満足しその道路で すべりによる事故が繰り返されることが、 最も好ましくない場合
B	一般条件すなわち 道路およびその他の条件が、AまたはCに含まれないもの	0.5以上	一般的には十分 道路上で遭遇する最も困難な状態のほとんど すべてに合致する
C	問題のない場所 こう配、曲線ともゆるやかで交差点がなく、 特に異常な状態を発生させる可能性のない直線道路	0.4以上	良好な状況下においてのみ十分
D	何らかの保証のある場所 非常に低速交通か交通量が少ないという原因 のために事故分析の結果では通常の危険度を 越えていないことがわかっている道路	0.4以下	スリップする可能性あり

表-6.5 各州別すべり摩擦限界値(米国)

州名	トレーラー型すべり試験車		制動停止距離法		英国振子試験器
	SN	V (mph)	SDN	V _r (mph)	BPN
Arkansas	—	—	—	—	45
Connecticut	—	—	43	30or40	—
Florida	—	—	40	40	—
Georgia	—	—	—	—	50
Kentucky	—	—	45	30	—
Louisiana	—	—	—	—	55
Maryland	—	—	47	40	—
Michigan	40	40	—	—	—
Mississippi	40	40	40	—	—
New York	32	30	—	—	—
N. Carolina	—	—	45	—	—
Pennsylvania	40	35	—	—	—
Tennessee	40	40	—	—	—
Texas	35	40	—	—	—
Virginia	35	40	40	40	—
Recommendation	37	40	46	40	60

心に検討した結果は表-6.6のとおりである。⁵⁷⁾ この表で Skid Number とは摩擦係数を100倍したものである。

西ドイツ、ベルリン大学の Beckmann 氏はすべり摩擦の限界値は、湿潤時の事故発生数の全事故数に対する比率で考えるべきであり、図-6.2の境界部付近に設定すべきであるとしている。わが国ではまだこの形での解析結果は得られていないが、十分検討する必要がある。

一方オランダでは全国の道路網に対する摩擦係数の分布とその経年変化を調査しており、一応 50km/h で 0.5 を標準と考え、これに不足する所を改良していった。その状況は図-6.3のとおりである。

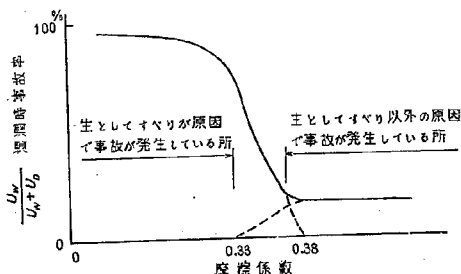


図-6.2 摩擦係数と湿潤時事故発生率

(iv) わが国の限界値の提案

以上(i)(ii)の条件を総合し⁵⁸⁾(iii)の諸外国の数値も考慮した結果、わが国の路面のすべり摩擦係数の限界値を表-6.7のごとく提案したい。

表-6.6 (a) すべり摩擦係数限界値 (案, 米国 HRB)

平均走行速度 V(mph)	すべり値	
	SN ^b	SN ₄₀ ^c
0	60	—
10	50	—
20	40	—
30	36	31
40	33	33
50	32	37
60	31	41
70	31	46
80	31	51

1. ASTM E-274 の測定法による。
2. SN^b は平均走行速度での測定値。
3. SN₄₀ は 40mph の速度での測定値。
4. すべり値 (Skid Number) はすべり摩擦係数を 100倍したもの、他も同様。

表-6.6 (b) すべり摩擦係数限界値 (案, 米国 HRB)

平均走行速度 V(mph)	すべり値 SN ₄₀	制動停止距離法 SDN ₄₀	英国振子試験器 BPN	手押し式試験器 DTN
30	31	39	50	35
40	33	41	55	40
50	37	46	60	45
60	41	51	65	50
70	46	57	—	—
80	51	64	—	—

1. ASTM E-249 のゴム材使用。
2. 制動停止は ASTM の規定による。
3. 振子型は ASTM E-303 による。

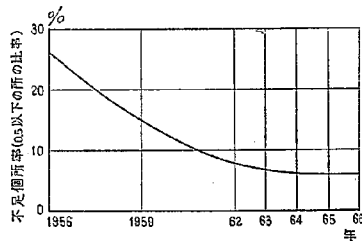


図-6.3 すべり摩擦係数不足箇所の推移 (オランダ)

[2] 路面のすべり対策

(1) 道路のすべりと事故の関係

路面のすべり摩擦係数が減少すると、走行の自由を失ない、走行不能になるかまたは事故を起こすようになる。

表-6.7 路面のすべり摩擦係数の限界値 (提案)

道路の種類	最小摩擦係数	条件
一般道路	0.40	路面温度35°C 60km/h, 湿潤
同上。氷雪のある場合および仮道	0.35	
線形の悪いところ (こう配, 曲線) 交差点, 分合流点	0.45	
同上。氷雪のある場合および仮道	0.40	

走行不能は特に摩擦係数の小さいときであって、氷雪上の発進時等で見られるものである。事故に関連するすべり摩擦の問題は(1)縦すべり摩擦係数と制動停止の問題、(2)左右の摩擦係数の差と制動時の車両の回転、(3)前後輪の摩擦係数の差と制動時の首振り運動、(4)横すべり摩擦係数と車両の横方向偏走、および操舵性等があり、しかもこれらの2つ以上が組み合わされて事故が発生している場合が多い。

また事故は道路条件の絶対的な理由のみで発生することは非常にまれで、多くの場合道路条件と運転者の人間工学的条件が重なっているのである。これらの状況を各種の資料を中心に検討すると次のようになる。表-6.8, 6.9は英国の資料の一部である。これによると路面のすべりが関係した事故の全事故に対する比率は約16%であり、更に湿った路面上ですべりが関係した事故は約24%となっている。わが国の資料について見ると、表-6.10は国道1号線において特別に調査したものであるが、すべりが原因と考えられるものが25%に達している。さきの表-6.2は東京都内の事故統計によったものであるが、すべりが原因となっている事故は約5.4%である。更に表-6.11⁵⁹⁾を見るとすべりが第一原因となっている事故は1~5%であり、すべりが原因の一部となっている事故は1~10%と考えられる。これらを総合するとすべりが原因となっている事故は場所によって異なるが0~25%程度であり、わが国ではすべりが第1原因となっている事故は2~5%程度であると考えられる。しかしすべりが原因の一部となっている事故は10~25%と考えられる。

表-6.8 英国における人身事故と路面のすべり (1958年)

路面状態	路面のすべりが関係した事故の件数	人身事故の全件数	路面のすべりが関係した事故の割合 (%)
乾燥	12,730	153,740	8
湿潤	19,200	71,970	27
雪氷	6,190	8,490	73
計	38,120	234,200	16

表-6.9 英国における道路形態とすべりによる事故との関係 (1954年の重大事故)

道路形態	ぬれた路面上における事故	
	すべりに関係した事故件数	すべりに関係した事故の全事故に対する割合 (%)
曲線	1,030	40
見通しのきかない屈曲	220	40
丘陵	760	33
ロータリー	50	30
Y交差	150	26
T交差	810	26
その他の交差	60	22
直線	1,220	20
十字路	400	17
合計	3,990	24

これらの統計は事故調査に当たった人の主観が多く左右し、実際には事故のほとんどすべてはすべりの影響をうけ、すべり摩擦係数が多い場合は事故は防止できないまでも、損害を少なくすることができたと考えられる。したがって事故を防止する上からは路面のすべり摩擦係数はできるだけ大きい方がよいが、舗装工事費、舗装工法等にも限界があり、道路構造および自動車運転の標準に適合した前節の基準値以上を確保することが望ましい。

(2) 一般的なすべり対策

自動車の道路路面に対するすべり対策としては(1)運転技術、(2)制動機構、(3)タイヤおよび付属物、(4)路面の性状のおおのについて検討すべきであり、これらが総合されて始めて完全なすべり対策ができることになる。ここではまず自動車に関係する(1)(2)(3)について述べる。

(1) 運転技術、運転技術は直接すべり摩擦係数に関係するものではなく、むしろ事故との相関として考えるべきものである。まず自動車の横方向のすべり抵抗は2. [1](2)で述べたようにタイヤ回転時には大きく、ロックすると急に小さくなるので、偏走をさける必要が大きい場合には運転者はなるべくロック制動をしないように注意しなければならない。曲線部においても同様に雪氷上においてもロック制動したために横すべりして事故を起こすことが多いのである。

縦すべり摩擦についても5. [2](3)で述べたようにタイヤと路面の相対速度差が小さい場合摩擦係数は大きく、完全すべりの状態になると小さくなる。また同じ完全すべりの状態であっても5. [4]で述べたように走行

表-6.10 道路条件と事故原因の関係

事故原因	前方不注意	徐行違反	追越不適	わき見運転	進路変更	スピード違反	右左折不適	直前横断	安全運転不徹底	右側通行	信号無視	白紙	その他	計
道路条件														
工事中の標識照明の不備						1								1
工事中の交通量多し	1			1	1		1						3	7
砂利道その他路面の凹凸													2	2
局部的舗装面の破損			1										3	4
スリップしやすい路面	7	25	3	1	4	5	2	2	5	2		1	16	73
幅員の急な変化	1					1							5	7
路肩の状態不良、軟弱													1	1
路肩の状態不良、肩落													2	2
運転をげん惑させるような自然条件													1	1
見通し悪し(昼間)	2	5	3			1	2			1			4	18
見通し悪し(夜間)	1	1	2	1			1		1	1			5	13
急カーブ	2	13	7			3	1	1		5		1	14	47
急こう配	1	4	3			1	1			1			7	18
長大な直線区間	4	1	8	4	2	2	1	1				3	8	34
道路標識の不備		2	3		1	1	1			1			1	10
駒止め、ガードレールの破損不備			1										1	2
区画線の不備	1	1							1				2	5
駐車(合法)	5	1	9		1	2		1				1	10	30
駐車(非合法)		2						2					3	7
危険標示の不設置	2	1				1						1	3	8
合 計	27	56	40	7	9	18	10	7	7	11		7	91	290

(注) 昭和35年9月10日～同年10月9日までの1カ月間

国道1号線多摩川大橋から尾張大橋に至る間

表-6.11 すべりが原因の事故の全事故に対する比

道 路 種 別	年 度	すべりが第1原因である事故率	すべりが原因の一つに入っている事故率
全 国 事 故	38年	6,765/517,513=1.3%	
名 神	38～40年	3.0%	
一 般 有 料	36年	27/649 =5.4%	
横 浜 新 道	35～38年	2/268 =0.7%	29/268=10.8%
京 葉 道 路	—	0 0	5/441= 1.2%
箱 根 新 道	37～38年	5/128 =3.9%	15/128=11.7%
真 鶴 道 路	35～38年	2/120 =1.7%	
湘 南 道 路	—	0 0	
参 宮 道 路	—	0 0	
阪 奈 道 路	34～38年	44/175 =25%	

速度が増大するにつれて摩擦係数は小さくなり、この現象は特に湿潤状態の場合に著しい。したがって高速走行している場合、最初はあるべくロックしないように制動することが必要である。急制動を要する場合でもポンピングブレーキ等（ブレーキペダルを連続的に何回も踏んで急激に車輪のロックと無制動を繰り返すこと）を行なうのもよい。また特に高度の技術として同調ブレーキ（自動車のビッチング周期と同調するようにポンピングブレーキを踏むこと）も効果的である。

(2) 制動機構、自動車の制動機構が完全であることは何よりもまず必要である。ブレーキドラムの中ですべるようなものはもちろん十分制動はできない。前後左右のブレーキが不均等であったりすると回転および偏走を起す。左右のブレーキが均等でなければならないことは自明であるが、前後の関係も重要である。一般に前輪よりも後輪のブレーキのきき方がよい場合、ブレーキを順次強く踏むと後輪の方が先にロックし、ロックすると急に横方向のすべり抵抗が減少するので後輪が横移動を始め（尻振り現象）、ついには自動車は1回転することがある。

更に高級な制動として要求されるのは100% ロックでない機構である。これは構造的になかなか困難で現在まだ達成されていないが、前述のポンピングブレーキを行なうような機構については一部実験が行なわれている。

(3) タイヤおよび付属物、タイヤによってすべり摩擦係数が異なることは当然である。これらタイヤのゴム質路面模様等についてはさきに述べた。ここではこれら

実際のタイヤのすべり効果について述べる。まず普通の舗装路面については現在最も広く一般に使用されているリブタイプのタイヤが最も良い。表-6.12に示すように製造会社のゴム質および路面模様による差はほとんど見られない。

路面が雪氷におおわれた場合は普通のリブタイヤではすべり摩擦係数が小さくなるのでスノータイヤ、タイヤチェーンまたはスパイクタイヤ等を使用しなければならない。これらについては別途報告する予定である。

(4) 路面標示および特殊路面、各種の路面標示は一般にペイントを使用して行なう。ペイント面の湿潤時のすべり摩擦係数は非常に小さく0に近いので、すべり事故の原因となりやすく、特に注意しなければならない。特に幅広くペイントを塗布する必要のある場合は（横断歩道のゼブラ模様等）耐摩擦材を混合したペイントを使用すべきである。

ペイントとは反対に、センターラインの代わり等にチャッターバー、特殊ブロック等を使用する場合がある。これらのためにその部分だけすべり抵抗が大きくなる場合もやはりよくない。特にセンターラインの場合その上で制動して、左右の抵抗差によって車両が対向車線方向に回転するので危険である。

(5) 路面のよぐれ、舗装面にじんあい等が多い場合すべり摩擦係数が減少することは明らかである。特によぐれた面が湿潤になった場合最もすべりやすくなるので注意すると同時に常に路面は清浄に保つようにしなければならない。単なるじんあいではなく別表-3.10のよう

表-6.12 各種タイヤのすべり摩擦係数値

種 別	速 度	乾 燥 状 態			湿 潤 状 態		
		20km/h	40km/h	60km/h	20km/h	40km/h	60km/h
コンクリート舗装	ブリヂストン	0.797	0.748	0.759	0.743	0.580	0.517
	ヨコハマ	0.710	0.701	0.698	0.655	0.556	0.489
	グッドイヤー	0.718	0.707	0.704	0.661	0.580	0.469
	オールシーズン	0.732	0.692	0.734	0.684	0.582	0.516
	トヨー	0.708	0.703	0.680	0.674	0.592	0.502
	ダンロップ	0.740	0.728	0.704	0.669	0.592	0.521
アスファルト舗装	ブリヂストン	0.746	0.748	0.774	0.779	0.684	0.588
	ヨコハマ	0.704	0.716	0.659	0.725	0.724	0.549
	グッドイヤー	0.712	0.735	0.689	0.795	0.664	0.607
	オールシーズン	0.714	0.703	0.733	0.790	0.689	0.581
	トヨー	0.717	0.727	0.704	0.787	0.703	0.599
	ダンロップ	0.721	0.702	0.684	0.742	0.681	0.582

に舗装面にカルシウム分等が沈殿するような場合は(トンネル内等)非常に摩擦係数が低下(0.2以下にもなる)するので早急に除去しなければならない。

雪氷路面も十分注意しなければならないがこれについては別途報告する。

(3) コンクリート舗装のすべり対策

普通のコンクリート舗装のすべり摩擦係数は5.〔7〕より35°C、60km/h、湿潤状態で0.45~0.55の範囲にある。一方セメントペーストのみのすべり摩擦係数は別表-3.31より標準状態で0.2前後である。最も良質な骨材と考えられるエメリーを接着した路面のすべり摩擦係数は0.65程度でありシリカサンド使用の場合0.6程度である。その他の普通骨材は0.55~0.5程度と考えられる。これらに対し5.〔6〕で述べた合成摩擦係数の観念を合わせて考慮すると、コンクリート舗装のすべり摩擦係数は0.2~0.6の範囲にあり、普通の状態で0.45~0.55である。

したがって0.55より大きいすべり摩擦係数が必要な場合は普通のコンクリート舗装は適当ではなく、シリカサンド、エメリー等の特殊骨材の使用または接着を考えなければならない。0.45~0.55程度の摩擦係数で十分の場合は普通のコンクリート舗装でよい。

一般にコンクリート舗装は工価、配合、経年変化等による摩擦係数の変動は比較的小さい。摩擦係数決定の大きい要因は骨材質と考えられ、骨材質が軟らかく、平滑に摩耗するものはよくない。結合材の多少による係数値の差は比較的小さい。しかし何らかの事情によって特に富配合のものを作った場合係数値は当然減少する。また舗装の仕上げのとき表面にモルタルまたはレイタンスの層のこると部分的に非常に富配合のものとなり、すべり摩擦係数値はセメントペーストの0.2に近づくので十分注意しなければならない。一方はうき目等で特に粗面に仕上げても長期的には特に摩擦係数の増大は期待できない。

すべり止め対策としてコンクリート舗装面に格子状またはリング状のすじを入れる場合があるが、その効果はブロック舗装と同様走行時にはあまり期待できない。特にすじの中に水分、じんあいなどが滞留すると降雨の始めとか、冬季積雪凍結時には、逆に悪い影響を及ぼすのであまりよくない。

コンクリート舗装が経年的に特にすべりやすくなるのは、特に悪い骨材を使用した場合か、外的原因(よごれ、付着等)による場合が多い。カルシウム分が沈殿付着した場合の対策についてはさきに述べた。

(4) アスファルト舗装のすべり対策

普通のアスファルト舗装のすべり摩擦係数は標準状態で0.4~0.6であって、コンクリート舗装とほぼ等しいが

範囲はやや大きい。アスファルトペーストのみの摩擦係数は別表-3.30よりほとんど0に近い。エメリー接着路面の摩擦係数が0.65、シリカサンドで0.6、普通骨材で0.55~0.5程度であることはコンクリート舗装で述べた。これらに5.〔6〕の合成摩擦係数の観念を合わせて考慮すると次のようになる。

アスファルト舗装のすべり摩擦係数は非常に広い範囲にわたっており0.0~0.6の間にある。良好に施工され、維持されているアスファルト舗装の中には摩擦係数が0.5~0.6のものは別表からも数多く見られる。一方摩擦係数が0.4より小さくなった所も数多く、特にフラッシュしたり、シールコートの過量等のため表面がアスファルトでおおわれて摩擦係数が0に近くなった舗装も多い。

アスファルト舗装はコンクリート舗装に比して湿潤時に結合材(アスファルト)の摩擦係数が全く期待できないのが欠点であるが、一方結合材の混入量はコンクリート舗装(310kg/m³として約13%)に比して少ない(4~12%)のが長所であり、コンクリート舗装よりも大きい摩擦係数のものが得られるのもここに原因があると考えられる。アスファルト舗装の配合とすべり摩擦係数の関係については数多くの実験研究が行なわれているが、いまだに決定的な結論は得られていない。これはアスファルト量の外に骨材表面積、空隙体積率等の問題があるからであろう。ただ舗装表面のアスファルト量が多い場合すべり摩擦係数が小さくなることは明らかであるので、十分な強度(支持力、耐久性)をもちながら最もアスファルト量の少ない配合とすることが望ましいと考えられる。アスファルト量を少なくするためには粒度配合を検討すると同時に、定着力の大きい結合材の使用が考えられる。ゴム混合アスファルトは定着力が大きく、また感温性が少ないのですべり止め舗装用には適当である。その外にも定着力の大きい高分子重合物の使用が考えられる。

アスファルト舗装の場合もすべり特性の良い骨材を使うことが望ましいのは当然である。

アスファルト舗装の仕上げにシールコートを行なう場合はほぼ慎重に施工しないと表面がアスファルトでおおわれるのですべりやすくなる。シールコートには十分量の骨材の圧入を行なわなければならない。アスファルト舗装がフラッシュした場合も早急に骨材を散布圧入すると、表面の過剰なアスファルトを加熱して取り除いたり、軽油でとったり、軽油処理した碎石を散布する方法がある。またフラッシュまでに至らないでもすべりやすくなった舗装面を加熱して骨材を圧入する方法も一部で行なわれ(図-6.4)²⁰⁾効果をあげている。

(5) 仮設鉄板のすべり対策

鉄板等の仮設路面も別表-4に示すように湿潤時には摩

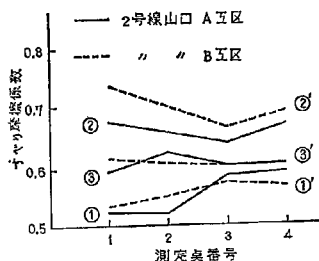


図-6.4 (a) アスファルト舗装, 骨材圧入効果
(①は施工前, ②は施工直後,
③は2ヵ月後)

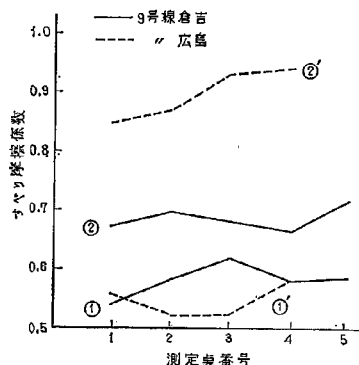


図-6.4 (b) アスファルト舗装, 骨材圧入効果
(①は施工前, ②は施工直後)

摩擦係数が非常に低下するので注意しなければならない。標準状態で平鉄板の摩擦係数が0.2より小さくなる外に、鋸鋼板等簡易な模様つき鉄板の摩擦係数も0.2~0.3とかなり小さい。しかし良好なものは0.4以上のものもあるので十分検討して使用しなければならない。特に高速走行(70km/h以上)する所とか、急制動、操舵等の多い仮設路面に使用する鉄板は特にすべり特性の良好なものを選ぶか、できれば表面に耐摩擦材を接着することが望ましい。鉄板表面にコンクリート、またはアスファルトコンクリートを舗装することも行なわれるが、これはそれぞれの舗装体本来のすべり摩擦係数となるので問題はない。

(6) ハイドロブレイニング対策

湿潤時のすべり摩擦係数は速度の増大と共に減少し、ある速度以上になるとタイヤは完全に水によって支持され、すべり摩擦係数はほとんど働かないハイドロブレイニング状態になる。

ハイドロブレイニングを起こさないための対策として

は速度、タイヤ特性、水膜厚、路面特性の4つがある。

高速になるほどハイドロブレイニング状態に近づくので、危険な場合は何よりも速度を低下させることが第1である。普通路面で水膜の厚い場合フラットタイヤで80km/h、リブタイヤで100~120km/hでハイドロブレイニングを起こし始める。

タイヤ特性としてはまず空気圧が関係する。空気圧が高いほどハイドロブレイニングを起こす速度は大きくなるので、ハイドロブレイニングを起こすおそれのある状態に対してはなるべく高圧のタイヤを使用することを考慮すべきである。次にタイヤ表面のトレッド模様に関係し、特にトレッド深さが最も重要であり、トレッドの浅いほどハイドロブレイニングを起こしやすく、摩耗したフラットタイヤは最も危険である。

水膜の厚さもハイドロブレイニングの重要な原因であり水膜が厚いほどハイドロブレイニングを起こしやすい。

路面特性もハイドロブレイニングに関係し、一般に粗な凹凸の多い面ほどハイドロブレイニングを起こしにくい。特に必要の場合は人工的に舗装表面に写真-6.1, 6.2のような溝切りを行なう場合もある。

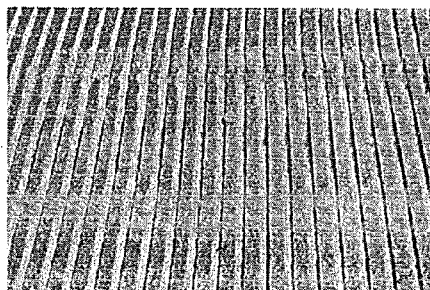


写真-6.1 ハイドロブレイニング対策の溝
(1/4"×1/4", 1" 間隔)



写真-6.2 ハイドロブレイニング対策の溝
(1/8"×1/8", 3/8" 間隔)

7. む す び

以上で述べたように路面のすべり摩擦係数は自動車の運動、特に制動状態における車両運動に密接な関係をもつものであり、すべり摩擦係数の実態を定量的に明らかにすることによって、走行の安全を確保することができる。

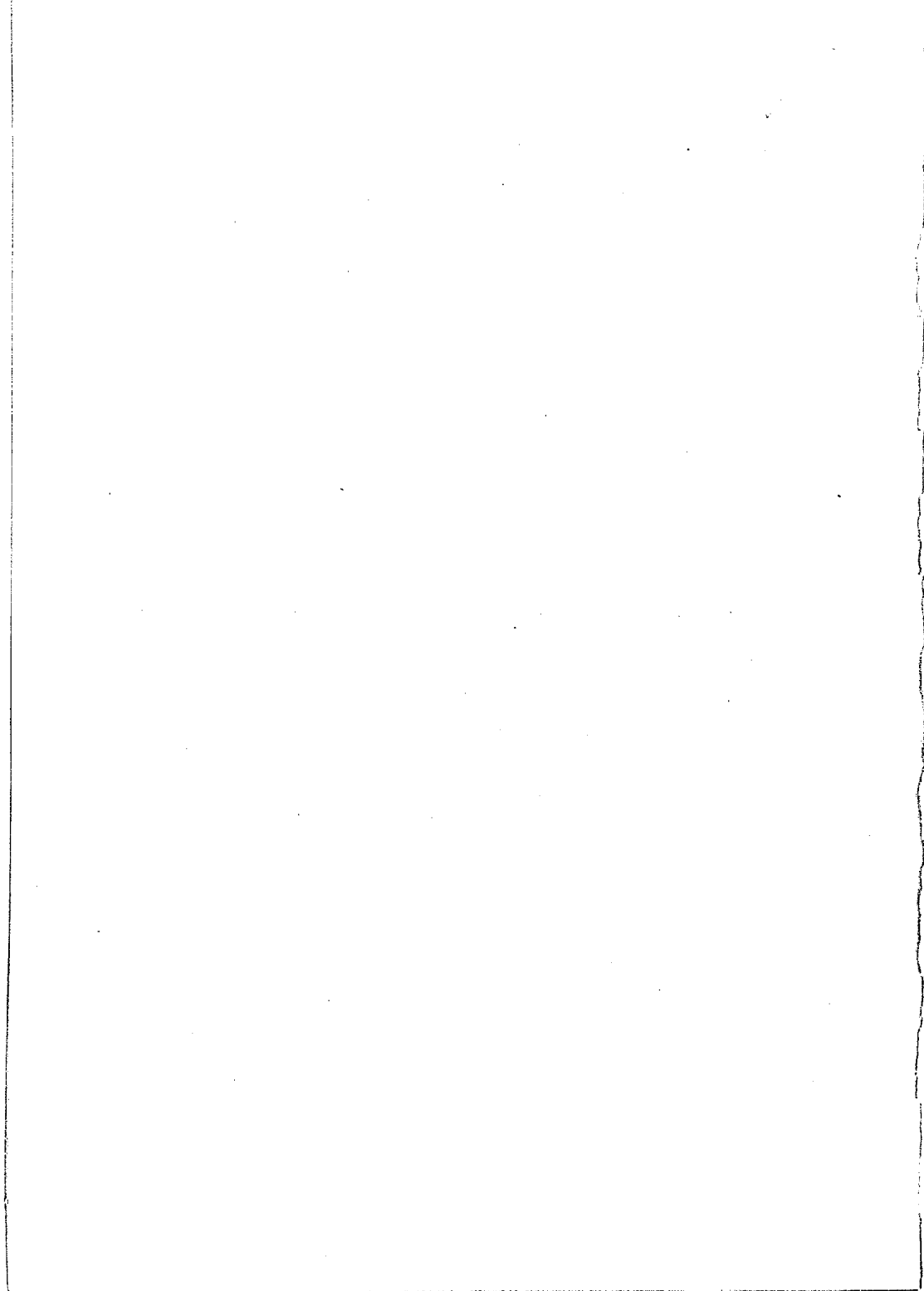
本研究の結果によると、路面のすべり摩擦係数は路面状態の外各種の要因によって大きく変化する。特に係数値が小さくなるのは、舗装体としては平滑摩耗性の骨材を使用した場合および結合材を特に多量に使用した場合である。外的要因としては、湿潤路面であり、路面温度が高く、走行速度の大きい場合に係数値は小さくなる。この係数値の小さくなった状態すなわち湿潤、35°C、60km/hでの縦すべり摩擦係数の基準限界値として、普通の道路区間0.4、危険な道路区間0.45とすれば、施工上も可能であり、走行の安全も確保できるので、この値をわが国の路面のすべり摩擦係数の基準値として提案するものである。なお測定条件が異なる場合の換算方法についても規定した。

路面のすべり摩擦における今後の問題点は厚い水膜のある場合の高速走行時にハイドロプレーニングを起こすことである。また完全なハイドロプレーニングには至らないまでも、高速時にすべり摩擦係数が減少することは本研究の結果明らかであり、これらの現象を解明して、その対策を確立することが今後の重要課題であると考えられ、引続き研究を進めたいと考えている。

参 考 文 献

1. G. M. Barteney and Z. E. Styran: "Effects of type of rubber, temperature and degree of crossing on the friction properties of elastomers"
2. "Road Safety" Road Research Laboratory.
3. R. A. Moyer: "Skidding characteristics of road surfaces" H. R. B. Bulletin. 348.
4. R. A. Moyer: "Skid resistance measurements with a New Torque Device" H. R. B. Bulletin 348.
5. R. A. Moyer: "California skid tests with butyl rubber tires" H. R. B. Record No. 28.
6. Kummer and Meyer: "Rubber and tire friction" Eng. Research Bulletin, B-80, (1960) The Penna. State Univ.
7. W. Kummer: "Unified theory of rubber and tire friction" Eng. Research Bulletin B-94, (1966) The Penna. state Univ.
8. Schallamach: "Load dependence of rubber friction" Proc. Phys. Soc. 65 B, (1952) London.
9. K. V. Shooter and D. Tabor, Proc. Royal Soc. B65, (1952)
10. Foster: "Friction of rubber at low sliding velocities" M. S. thesis Department of Mechanical Engineering Penna. State Univ. (1961)
11. R. F. King and D. Tabor, Proc. Royal Soc. B66, (1953)
12. D. G. Flow and N. T. Porile, Nature 175, (1955)
13. Tabor D.: "Mechanism of rolling friction" Philosophical Magazine (7)-43, (1952)
14. Moyer, R. A.: "Skidding characteristics of automobile tires on roadway surface and their relation to highway safety" Iowa Eng. Experiment Station, Bull. 120, (1934)
15. Giles, C. G. et al: "A note on the problem of seasonal variations in skidding resistance" Proc. Ist. Int. Skid Prevention Conf.
16. Stegemann, W.: "Rutsicherheit" Bull. Phoenix Gummiwerke, Hamburg W. Germany, (1953)
17. 米谷・渡辺・毛利:「交通工学」国民科学社
18. 伊吹山四郎:「道路交通工学」金原出版社
19. 高野務:「道路構造令解説」日本道路協会発行
20. 市原薫:「路面のすべり摩擦係数と事故との関係」交通工学 1巻4号
21. 加藤晃・小野弘:「道路に原因するスリップ事故の理論解析」第6回日本道路会議論文集
22. 市原薫:「タイヤの制動時の横方向すべりと道路構造」土木技術資料 7巻10号
23. 枝村俊郎:「防護柵の設置基準と設計荷重合理化のための統計的調査報告」土木研究所資料
24. 枝村俊郎:「ガードフェンスの最適設計」土木技術資料 8巻10号
25. Giles C. G.: "Some laboratory methods for the investigation of skidding problems" First Int. Skid Prev. Conf. Proc. Part II, (1959)
26. H. W. Kummer: "Research equipment for the study of rubber friction and skid resistance" Joint Road Friction Program, No. 11, July (1966) The Pennsylvania state University.
27. 「技術委員会報告書—路面のすべり委員会」第13回国際道路会議、東京、(1967) 常設国際道路会議協会
28. 島田八郎:「路面の縦及び横滑り摩擦抵抗に及ぼす路面種別と其の性状に就て」土木試験所報告 第

- 40号, (昭和12年12月)
29. Giles C. G.: "Some European methods for the measurement of skidding resistance" First Int. Skid Prev. Conf. Proc. Part I. (1959)
 30. Auto-Products AB Ltd: "BV 6 Runway and pavement tester" "BV Runway and road friction tester" "BVBS Road friction tester" Marketing publications of Export Division. Stockholm, Sweden. (1962)
 31. 市原薫, 小野田光之: 「タイヤゴムの種類別すべり摩擦係数」道路, (1967年7月号)日本道路協会
 32. 市原薫, 薄口忠, 小野田光之: 「散砂路面のすべり摩擦係数(路面上の砂がすべり抵抗に及ぼす影響について)」土木技術資料 10巻7号, (昭和43年7月)
 33. 市原薫「各国の路面すべりに関する研究の現況」道路, (1969年2月号)日本道路協会
 34. 市原薫, 金泉昭, 小野田光之: 「雪氷路面の駆動時のすべり摩擦係数」土木技術資料 10巻10号, (昭和43年)
 35. 金泉, 平野, 三鬼: 「半制動すべり摩擦測定機の試作」土木技術資料 10巻9号, (昭和43年)
 36. Gosta Kullberg: "Method and equipment for continuous measuring of the coefficient of friction at incipient skid" H. R. B. Bulletin 348. (1962)
 37. 「第16回直轄技術研究会報告一舗装のすべりとすべり止め工法に関する研究」土木技術資料, (昭和37年2月号)
 38. B. J. Albert: "Reifen und Aquaplaning" Internationales Colloquium über Strassengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, (1968) Technische Universität Berlin.
 39. W. Hofferberth: "Verbesserter Kraftschluß der Reifen auf nassen Strassen" Internationales Colloquium über Strassengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, (1968) Technische Universität Berlin.
 40. 市原薫: 「すべり摩擦係数の温度および速度との関係について」土木技術資料 8巻10号
 41. 市原薫: 「高速道路におけるすべり摩擦係数の問題点について」高速道路と自動車, (昭和41年12月)
 42. 谷本誠一, 七宮康暢: 「舗装路面のすべり摩擦係数について(管内主要一般国道における)」(昭和43年度)九州地建直轄技術研究会
 43. Horne Walter B. and Leland Trafford J. W.: "Influence of tire tread pattern and runway surface condition on braking friction and rolling resistance of a modern aircraft tire" NASA TND-1376, (1962)
 44. Walter B. Horne and Robert C. Dreher: "Phenomena of pneumatic tire hydroplaning" NASA TND-2056, (1963)
 45. 「ハイドロプレーニングに関する文献集」土木研究所資料 第408号, 土木研究所, 道路研究室
 46. W. E. Meyer: "Some results of research on skid control" FISITA, Tenth International Automobile Technical Congress.
 47. Walter B. Horne and Upshur T. Joyner: "Pneumatic tire hydroplaning and some effects on vehicle performance" SAE International Automotive Engineering Congress, (1965)
 48. Charles J. Coven and Nicholas M. Trivisonno: "Hydroplaning effects in tire friction" The B. F. Goodrich Company Research Center. (April 23, 1965)
 49. 市原薫: 「路面の凹凸」(昭和43年7月)技術書院
 50. "Glissance" Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers Ponts et Chaussées.
 51. 市原薫: 「首都高速道路のすべり摩擦係数について」高速道路と自動車, 9巻2号, (昭和41年2月)
 52. 市原薫, 小野田光之: 「昭和39年度に測定した路面のすべり摩擦係数について」土木技術資料, 7巻7号
 53. 小山, 高橋, 川井: 「塩化カルシウムの砂を散布した場合の水結路面のすべり抵抗について」北海道土木試験所報告, 128号
 54. "A policy on geometric design of rural highways" AASHO.
 55. 吉田滋: 「道路および交通条件の自動車走行速度と交通量におよぼす影響について」第7回日本道路会議論文集
 56. 「交通事故特性の研究」科学警察研究所資料 第43号
 57. H. W. Kummer and W. E. Meyer: "Tentative skid-resistance requirements for main rural highways" National Cooperative highway research program report 37, HRB, (1967)
 58. 市原薫: 「路面のすべり摩擦係数と事故との関係」交通工学 1巻4号
 59. 「交通事故対策に関する調査報告書」(昭和40年3月)高速道路調査会
 60. 福永典次: 「ヒーターブレーナーによるすべり止め工法について」第20回建設省技術研究会



別 表

(1) コンクリート舗装の経年変化(温度変化, 季節変化の影響)を主とした測定結果

表-1.1 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線三国峠東京側

道路研究室

測定月日 S 39. 6. 19

測定条件 コンクリート舗装の測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート路面 縦すべり	30	0.56	0.45	0.51						
	40	0.54	0.45	0.50		0.34	0.34			
	45				0.54	0.39	0.47			
同 上 横すべり		横すべり 20°			横すべり 20°					
	30	0.59	0.58	0.59						
	40	0.60	0.57	0.59		0.51	0.51			
	45				0.61	0.51	0.56			

表-1.2 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 上越国道17号線小出地区

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 21 小雨

測定条件 コンクリート舗装の比較的新しいものの測定

試験車 大型道路試験車

(S 39. 9. 10 舗設)

主要結果 速度変化による係数変化がよく表われている

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	10				0.72	0.72	0.72			
	40				0.55	0.60	0.58	22.0	25.0~23.5	23.5~28.5
	60				0.52	0.51	0.52			
	80				0.45	0.48	0.47			

表-1.3 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線三国峠(東京側)

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 22 霧

測定条件 コンクリート舗装の測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	30		0.77					20.0	20.8	33.1
	50		0.63							(一部65.0)

表-1.4 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 1. 13

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	15				1.0	1.07	1.04	9.5	13.5	左右 15.0
	40				0.86	0.88	0.87			12.0
	60				0.68	0.63	0.66	6.0	10.0	11.0
同上, 加速度計による測定 (ウイリスジープ) (グリップタイヤ)	15						0.85			
	40						0.81			
	60						0.77			

表-1.5 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 1. 14

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	15	1.01	1.14	1.08				7.0	8.0	
	40	0.93	1.01	0.97				終了後		
	60	0.91	0.97	0.94				5.2	5.8	左右 50.0 42.0
同上, 加速度計による測定 (ウイリスジープ) (グリップタイヤ)	15			0.89						
	40			0.83						
	60			0.81						

表-1.6 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 3. 9

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
(タイヤ種別, アスファルト舗装追加)
(タイヤ種別の差は表われていない。)

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装 ブリヂストンタイヤ (左車輪)	20	0.84		0.84				試験前 10.0	12.0	12.0
	40	0.87		0.87						
	60	0.85		0.85						
同 上 ヨコハマタイヤ (右車輪)	20		0.84	0.84				10.0	12.0	10.0
	40		0.98	0.98						
	60		0.92	0.92						
アスファルト 舗 装 ブリヂストンタイヤ (左車輪)	20	0.91		0.91						
	40	0.84		0.84				試験終 了時 11.0	15.0	58.3
	60	0.81		0.81						
ヨコハマタイヤ (右車輪)	20		0.87	0.87						
	40		0.91	0.91						
	60		0.78	0.78				11.0	17.5	41.0 (最大92.0)

表-1.7 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 5. 8

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

(タイヤ種別, アスファルト舗装を追加した)

試験車 大型道路試験車

(左右の差はタイヤ種別のみが原因か, 左右測定之差が不明)

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装 ブリヂストンタイヤ (左車輪)	20	0.94		0.94				22.0	23.0	24.0
	40	0.91		0.91				22.0	23.0	33.8
	60	0.76		0.75				22.0	23.0	43.5
同 上 ヨコハマタイヤ (右車輪)	20		0.69	0.69				22.0	23.0	23.0
	40		0.65	0.65				22.0	23.0	30.3
	60		0.52	0.52				22.0	23.0	37.5
アスファルト舗装 (アスコン アスファルト %)	20	0.77		0.77				(22.0)	(25.0)	(45.0)
	40	0.86		0.86				(22.5)	(28.0)	(55.0)
	60	0.77		0.77				23.0	31.0	66.0
同 上 ヨコハマタイヤ (右車輪)	20		0.70	0.70				(22.0)	(25.0)	(40.0)
	40		0.68	0.68				(22.5)	(28.0)	(45.0)
	60		0.62	0.62				23.0	31.0	51.0

表-1.8 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 6

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート	20	0.63	0.61	0.62	0.67		0.67	29.0	33.0	40.0
	40	0.64	0.59	0.61	0.57		0.57			
	60	0.68	0.60	0.64	0.43		0.43			

表-1.9 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 27

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	10			0.78			0.78	31	乾燥	乾燥
	30			0.74			0.59		41.0	35.0 ~61.0
	50			0.72			0.52		湿潤	湿潤
	60			0.67			0.51		40.0 ~34.0	41.0

表-1.10 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 9. 27

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート	20	0.93	0.90	0.92						
	40	0.89	0.86	0.88				25.5	31.2	30.0~45.0
	60	0.87	0.85	0.86						

表-1.11 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 11. 1

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

タイヤ温度が変化した場合の摩擦抵抗の変化を見るもの。

主要結果 タイヤ温度と摩擦係数の明瞭な関係は得られない。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗装 タイヤ内圧 33.4 ポンド 平 均	50	0.71						23.0	29.0	92.0
		0.75								
		0.68								
		0.75								
		0.68								
平 均	50	0.71						23.0	29.0	94.0
		0.73								
		0.70								
		0.77								
		0.73								
平 均	50	0.82						23.0	29.0	80.0
		0.82								
		0.72								
		0.77								
		0.68								
平 均	50	0.76						23.0	29.0	97.3
		0.75								
		0.68								
		0.84								
		0.82								
平 均	50	0.75						23.0	29.0	69.0
		0.77								
		0.89								
		0.79								
		0.72								
平 均	50	0.66						23.0	29.0	69.0
		0.77								
		0.77								

表-1.11 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
平 均	50	0.82 0.72 0.72 0.62 0.70 0.72						24.0	29.0	74.5
(タイヤ圧 29.8 ポンド) 平 均	50	0.85 0.80 0.71 0.80 0.69 0.77						24.0	29.0	59.0
平 均	50	0.89 0.87 0.67 0.71 0.71 0.77						24.0	29.0	68.5
平 均	50	0.89 0.85 0.71 0.62 0.76 0.77						24.0	29.0	49.5
(タイヤ圧 28.0 ポンド) 平 均	50	0.80 0.89 0.87 0.87 0.69 0.82						22.0	28.7	52.5
(タイヤ圧 27.0 ポンド) 平 均	50	0.85 0.73 0.76 0.73 0.69 0.75						23.0	27.8	30.0
タイヤ交換 (タイヤ圧 41 ポンド) 平 均	50	0.80 0.80 0.78 0.80 0.71 0.78						24.0	27.8	114.0
平 均	50	0.80 0.89 0.85 0.89 0.87 0.86						24.0	27.8	118.0
平 均	50	0.73 0.76 0.78 0.76 0.82 0.77						24.0	27.8	87.0
平 均	50	0.76 0.73 0.73 0.82 0.67 0.74						24.0	27.8	83.2

表-1.11 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
平 均	50	0.70 0.79 0.75 0.64 0.72						24.0	27.8	68.0
タイヤ圧 30ポンド (常温時タイヤ圧 26ポンド)	50	0.66 0.79 0.66 0.73 0.71						24.0	27.8	81.0
平 均										

表-1.12 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 11. 17

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 セドリックススタンド

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コ ン ク リ ー ト	20			0.86 0.84 0.84 0.78				15.0	18.8	20.0
	40			0.75 0.75 0.72 0.70						
	60									

表-1.13 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 40. 11. 18

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

タイヤ温度が変化した場合の摩擦抵抗の変化を見るもの。

主要結果 タイヤ温度と摩擦係数の明瞭な関係は得られない。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート舗装 上り方向 (タイヤ圧 42ポンド)	50	0.81 0.84 0.81 0.81 0.79 0.81						16.0	18.0	120.0
平 均										
(タイヤ圧 42ポンド)	50	0.86 0.81 0.79 0.81 0.77 0.81						16.0	18.0	110.0
平 均										

表-1.13 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
平 均	50	0.86 0.79 0.79 0.84 0.79 0.81						16.0	18.0	100.0
(タイヤ 圧 32ポンド) 平 均	50	0.84 0.75 0.69 0.79 0.84 0.78						16.0	18.0	98.0
平 均	50	0.77 0.75 0.79 0.81 0.71 0.77						16.0	18.0	89.0
(タイヤ 圧 29.5ポンド) 平 均	50	0.71 0.84 0.77 0.75 0.71 0.76						16.0	18.0	83.0
平 均	50	0.75 0.73 0.75 0.69 0.77 0.74						16.0	18.0	80.0
(タイヤ 圧 27ポンド) 平 均	50	0.77 0.69 0.77 0.79 0.75 0.75						16.0	18.0	75.0
平 均	50	0.72 0.71 0.75 0.75 0.64 0.71						15.0	17.8	60.0
(タイヤ 圧 27.0ポンド) 平 均	50	0.75 0.77 0.69 0.71 0.66 0.72						15.0	17.8	84.0
平 均	50	0.75 0.66 0.64 0.60 0.66						15.0	17.8	50.0
平 均	50	0.64 0.84 0.64 0.73 0.66 0.70						15.0	18.0	53.0

表-1.13 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
平 均	50	0.84 0.88 0.60 0.75 0.79 0.79						16.0	18.0	40.0
(タイヤ圧 25ポンド) 平 均	50	0.79 0.90 0.69 0.75 0.75 0.78						16.0	18.0	73.0
(タイヤ圧 23ポンド) 平 均	50	0.86 0.88 0.86 0.79 0.85						13.8	15.0	29.0
平 均	50	0.88 0.73 0.81 0.69 0.77 0.78						13.8	15.0	68.0

測定場所 土研, 試験走路

表-1.14 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 40. 11. 24

測定条件

コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
タイヤ温度が変化した場合の摩擦抵抗の変化を見る
もの。

主要結果

タイヤ温度と摩擦係数は明瞭な関係が得られない。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装 (タイヤ圧 42ポンド) 左 車 輪 加 熱 平 均	50	0.90 0.87 0.88 0.84 0.87 0.87	0.98 0.94 0.94 0.82 0.82 0.90					17.8	22.0	左 101.0 右 18.5
平 均	50	0.90 0.87 0.87 0.80 0.85						(18.0)	(22.0)	左 88.0 右 20.0
(タイヤ圧 28.5ポンド) 平 均	50	0.87 0.80 0.82 0.71 0.78 0.78	1.02 0.94 0.90 0.96					(18.0)	(22.0)	左 76.0 右 29.0
平 均	50	0.83 0.78 0.83 0.76 0.78 0.78						18.5	21.8	左 67.0 右 32.0

表-1.14 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
平 均	50	0.83 0.83 0.78 0.73 0.80 0.79	0.91 0.91 0.89 0.89 0.90							左 52.0 右 28.0
(タイヤ 圧 26ポンド) 平 均	50	0.84 0.83 0.81 0.78 0.76 0.80								左 49.0 右 31.0
平 均	50	0.77 0.84 0.82 0.71 0.80 0.79	0.84 0.88 0.77					18.5	20.0	左 40.0
平 均	50	0.80 0.67 0.78 0.82 0.74 0.76						18.0	19.5	右 30.0

表-1.15 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 1. 18

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.883	0.954	0.919				6.0	7.0	7.0~25.0
					0.868	0.875	0.871	5.0	7.0	10.0
	40	0.800	0.777	0.788				6.0	6.0	7.0~25.0
					0.800	0.646	0.723	5.0	7.0	10.0
	60	0.796	0.777	0.786				6.0	7.0	7.0~25.0
					0.600	0.576	0.588	5.0	7.0	10.0

表-1.16 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 3. 2

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート舗装 (左側車線)	20	0.785	0.871	0.828	0.785	0.834	0.810			
	40	0.618	0.745	0.682	0.562	0.633	0.578			
	60	0.667	0.767	0.717	0.513	0.559	0.536			
コンクリート舗装 (右側車線) (表面が土でよごれている ので左側も測定した。 標準車線)	20	0.713	0.821	0.767	0.795	0.916	0.855			
	40	0.690	0.755	0.722	0.631	0.725	0.678			
	60	0.690	0.784	0.737	0.520	0.549	0.534			

測定場所 土研, 試験走路

表-1.17 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 41. 3. 28 曇

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.757	0.785	0.771				9.0	10.5	40.0
	40	0.719	0.785	0.752	0.768	0.840	0.804	10.0	10.5	13.0
	60	0.703	0.725	0.714	0.622	0.636	0.629	9.0	10.5	40.0
					0.605	0.573	0.589	10.0	10.5	13.0

測定場所 土研, 試験走路

表-1.18 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 41. 5. 2 (雨降り)

3日 (乾 燥)

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
主要結果

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.757	0.731	0.744				20.0	24.0	22.0~52.0
	40	0.676	0.683	0.679	0.757	0.768	0.762	20.0	22.0	26.0
	60	0.681	0.725	0.703	0.514	0.580	0.547	20.0	23.0	22.0~52.0
					0.486	0.453	0.469	20.0	22.0	26.0

測定場所 土研, 試験走路

表-1.19 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 41. 5. 25

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
雨降り (散水せず)
主要結果

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20				0.744	0.781	0.762			
	40				0.701	0.718	0.709	16.0	21.0~21.5	左右共
	60				0.647	0.635	0.641			18.5~20.0

測定場所 土研, 試験走路

表-1.20 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 4

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
主要結果

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.83	0.86	0.845						
	40	0.77	0.80	0.785				18.0	20.0	18.5
	60	0.78	0.77	0.775						

表-1.21 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 5 (夜)

試験車 大型道路試験車

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定、特に夜間(午後11時)に測定した。

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート	20	0.902	0.714	0.808	0.787	0.773	0.780	乾 17.2	乾 20.8	
	40	0.839	0.707	0.773	0.597	0.663	0.630	湿	湿 21.0	
	60	0.799	0.694	0.746	0.521	0.469	0.495	17.6		

表-1.22 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 6

試験車 大型道路試験車

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.857	0.857	0.857	0.794	0.789	0.791	乾 20.0	乾 22.0 ~25.3	
	40	0.839	0.843	0.841	0.642	0.626	0.634	湿	湿 25.0	
	60	0.827	0.811	0.819	0.496	0.461	0.478	21.5		

表-1.23 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 18

試験車 大型道路試験車

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.882	0.825	0.854	0.882	0.792	0.837	乾 28.0	乾 34.0 ~ 37.0	
		0.882	0.858	0.870	0.882	0.792	0.837			
		0.914	0.858	0.886	0.851	0.825	0.838			
	平均			0.870			0.837			
	40	0.756	0.726	0.741	0.599	0.594	0.596	湿	湿 28.2	33.0
		0.725	0.759	0.742	0.567	0.627	0.597			
		0.788	0.715	0.751	0.599	0.528	0.563			
	平均			0.745			0.586			
	60	0.819	0.792	0.806	0.504	0.429	0.467	28.2	33.0	
		0.693	0.715	0.704	0.441	0.363	0.402			
	平均			0.725	0.676	0.536	0.500			
				0.728			0.457			

測定場所 土研, 試験走路

表-1.24 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 7. 21 (午前10時~12時)

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装	20	0.829	0.803	0.816	0.798	0.803	0.801			
		0.859	0.835	0.847	0.768	0.770	0.769			
		0.859	0.803	0.831	0.768	0.770	0.769			
	平均			0.831			0.780	乾	乾	乾
	40	0.768	0.899	0.833	0.737	0.609	0.673	27.9	39.7	60.0~65.0
		0.823	0.706	0.767	0.675	0.578	0.626			
		0.737	0.770	0.753	0.645	0.546	0.595			
	平均			0.784			0.631	湿	湿	湿
	60	0.798	0.803	0.801	0.553	0.353	0.453	28.5	36.8	36.0~35.0
		0.798	0.706	0.752	0.553	0.417	0.485			
		0.675	0.835	0.755	0.553	0.449	0.501			
	平均			0.769			0.486			

表-1.25 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 7. 21 (午後1~3時)

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート	20	0.859	0.786	0.822	0.737	0.692	0.714			
		0.859	0.755	0.807	0.706	0.692	0.699			
		0.859	0.818	0.838	0.737	0.692	0.714			
	平均			0.822			0.709	乾	乾	
	40	0.798	0.755	0.776	0.645	0.598	0.621	29.0	40.9	
		0.706	0.818	0.762	0.553	0.566	0.559			
		0.798	0.723	0.760	0.614	0.535	0.574			
	平均			0.766			0.584	湿	湿	
	60	0.829	0.692	0.760	0.491	0.346	0.418	29.5	38.0	
		0.675	0.629	0.652	0.491	0.409	0.450			
		0.737	0.692	0.714	0.491	0.440	0.465			
	平均			0.708			0.444			

表-1.26 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線二居トンネル

測定月日 S 41. 6. 8 晴

試験車 大型道路試験車

測定条件 トンネル内コンクリート舗装の状況を知るための測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装 セメント 320kg/m ³ S 37 年 施 工	20				0.553	0.611				
					0.663	0.590				
					0.675	0.708				
	平均				0.630	0.636	0.633			
	40				0.522	0.521				
					0.571	0.486				
					0.522	0.486				
	平均				0.538	0.498	0.518	12.7	12.0	
	60				0.399	0.521				
					0.493	0.486				
					0.461	0.451				
	平均				0.451	0.486	0.469			

表-1.27 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越虫野

測定月日 S 41. 6. 9 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 コンクリート舗装の経年変化の測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗装 S 38 年 施工 セメント 320kg/m ³	20	0.860	0.902		0.725	0.694		乾	乾	
		0.798	0.972		0.632	0.694				
		0.810	0.868		0.558	0.694				
	平均	0.823	0.914	0.868	0.638	0.694	0.665			
	40	0.872	0.868		0.479	0.416				
		0.798	0.833		0.399	0.486				
		0.737	0.888		0.448	0.472		湿	湿	
	平均	0.802	0.863	0.833	0.442	0.458	0.450			
	60	0.829	0.715		0.479	0.403				
		0.798	0.702		0.368	0.437				
		0.675	0.833		0.307	0.382				
	平均	0.767	0.750	0.759	0.385	0.407	0.396			

表-1.28 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越小出地区

測定月日 S 41. 6. 9 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 コンクリート舗装の経年変化の測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗装 S 39 年 施工 セメント 320kg/m ³	20	0.829	0.902		0.675	0.729		乾	乾	
		0.737	0.902		0.645	0.694				
		0.829	0.902		0.614	0.694				
	平均	0.798	0.902	0.850	0.645	0.706	0.675			
	40	0.645	0.888		0.430	0.500				
		0.829	0.798		0.430	0.521				
		0.645	0.868		0.522	0.521		湿	湿	
	平均	0.706	0.851	0.779	0.461	0.514	0.487			
	60	0.583	0.798		0.430	0.486				
		0.798	0.833		0.430	0.403				
		0.614	0.868		0.430	0.445	0.438			
	平均	0.665	0.833	0.749						

表-1.29 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越堀之内町

測定月日 S 41. 6. 9 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 コンクリート舗装の経年変化の測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗装 S 40 年 施工 セメント 320kg/m ³	20	0.798	0.888		0.706	0.680		乾	乾	
		0.786	0.833		0.614	0.590				
		0.829	0.833		0.645	0.555				
	平均	0.804	0.851	0.828	0.655	0.608	0.632			
	40	0.860	0.798		0.565	0.541				
		0.768	0.868		0.583	0.416				
		0.737	0.833		0.479	0.472		湿	湿	
	平均	0.788	0.833	0.811	0.542	0.476	0.509			
	60	0.798	0.833		0.451	0.451				
		0.675	0.833		0.399	0.430				
		0.645	0.694		0.448	0.361				
	平均	0.706	0.787	0.746	0.436	0.414	0.425			

表-1.30 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 谷田部高速自動車試験場

測定月日 S 42. 4. 20~24

測定条件 高速すべり測定, 水膜は大型車輪でとばされている。

試験車 大型道路試験車

主要結果 高速ではかなり低下している。

道路舗装種別		走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
			左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗装 B.S リブ古品タイヤ 4月21日	タイヤ 庄 32#	80	0.641	0.648		0.230	0.161		19	乾燥 26°C	水厚
		100	0.566	0.679			0.108		~		右 1~2mm
		117	0.626	0.608			0.143		21°C	湿潤 17°C	左 5~8mm
	タイヤ 庄 26#	80	0.706	0.715		0.221	0.245		19	乾燥 26°C	水厚
		100	0.596	0.696		0.157	0.189		~		右 1~2mm
		111	0.706	0.715		0.110	0.169		21°C	湿潤 17°C	左 5~8mm
	タイ ヤ 32#	80	0.735	0.761		0.292	0.342		17	湿潤 20.5	左30mm右10
		100	0.689	0.761		0.245	0.248		~	~	27. 7
		110	0.720	0.780		0.199	0.229		17.5°C	21.0°C	27. 7
	タイ ヤ 26#	60	0.689	0.695		0.413	0.404		17	湿潤 20.5	左 右
		80	0.668	0.786		0.280	0.346		~	~	29. 9.
		100	0.683	0.767		0.230	0.216		17.5°C	21.0°C	30. 10.
		115	0.668	0.747			0.259				29. 9.
	タイ ヤ 20#	80		0.760			0.320		17	湿潤 20.5	31. 11.
		100		0.740			0.289		~	~	34. 14.
		112		0.740			0.201		17.5°C	21.0°C	32. 12.
コンクリート 舗装 B.S リブ中古タイヤ 4月20日	タイ ヤ 26#	40	0.640	0.643		0.493	0.496				
		95	0.678	0.689		0.277	0.221				
コンクリート 舗装 B.S リブ古品タイヤ 4月21日	タイ ヤ 20#	80	0.647	0.722		0.210	0.209		19	乾燥 26°C	左 右
		100	0.695	0.688		0.210	0.301		21°C	湿潤 17°C	0.5 0.5

(2) アスファルト舗装の経年変化(温度変化, 季節変化の影響)を主とした測定結果

表-2.1 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 名神高速自動車道京都南～大津

道路研究室

測定月日 S 38. 5.

測定条件 アスファルト舗装の測定, 開通直前の状態

試験車 大型道路試験車
 タイヤ圧 27ポンド
 輪重 320kg

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥		湿 潤		温 度		
		縦	横	縦	横	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	40	0.50	0.57	0.49	0.33			
	60	0.55	0.60	0.45	0.31			
	80	0.54	0.45	—	—			

表-2.2 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 名神高速道路, 関ヶ原

道路研究室

測定月日 S 39. 2. 6

測定条件 アスファルト舗装の測定(供用開始前)

試験車 大型道路試験車
 タイヤ圧 26ポンド
 タイヤ荷重 290kg

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥(縦)			湿 潤(縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20			1.10						
	45			0.94						
	50			1.10						
	55						0.73	+3.0		
	60			1.12			0.91	~		
	65						0.89	+4.0		
	70						0.91			
	120			1.02						

表-2.3 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 名神高速自動車道京都南～大垣

道路研究室

測定月日 S 39. 8. 13 晴

測定条件 アスファルト舗装の測定

試験車 大型道路試験車
 タイヤ圧 26ポンド
 輪重 370kg

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥(縦)			湿 潤(縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装 大垣 安心町～揖斐川 供用前少しよれた面	80	上り		0.54						
関ヶ原 養老サービスエリア 仮供用中骨材砂岩	80	下り		0.50						
関ヶ原 インター 供用中, 骨材砂岩	80	下り		0.53						

表-2.3 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
彦根 片川〜多賀サービスエリア 骨材石灰岩	80	下り		0.52						
八日市〜栗東 菩提寺パーキングエリア 骨材砂岩	80	下り		0.54						
山科バスストップ 最初の舗装、砂岩	80	下り		0.50						
山科〜深草 砂岩	80	下り		0.51						

表-2.4 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 首都高速道路

測定月日 S 39. 7. 30

道路研究室

測定条件 首都高速道路の経年変化を知るための測定

試験車 大型道路試験車

主要結果 左右の差はあまりない。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
1号線平和島付近 オーブングレイド	40	0.48	0.48	0.48	0.50	0.43	0.47			
	60	0.50	0.49	0.50	0.43	0.42	0.43			
同 上	40	0.54	0.51	0.53	0.50	0.45	0.48			
密粒アスコン	60	0.45	0.40	0.43	0.49	0.48	0.49			
4号線代官町付近 オーブングレイド	40	0.52	0.50	0.51	0.47	0.48	0.48			
	60	0.51	0.55	0.53	0.49	0.48	0.49			
同 上	40	0.48	0.48	0.48	0.49	0.53	0.51			
密粒アスコン	60	0.49	0.52	0.51	0.40	0.42	0.41			
4号線千代田トンネル コンクリート舗装	40				0.33	0.32	0.33			
	60				0.31	0.28	0.30			
4号線赤坂トンネル サルビアシム舗装	40			0.42						
1号線中央管理所前 アスファルトすべり止め工	60			0.56						

表-2.5 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 首都高速道路

測定月日 S 39. 9. 15

道路研究室

測定条件 首都高速道路の経年変化を知るための測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
4号線千代田トンネル コンクリート舗装	60						0.50			
4号線赤坂トンネル サルビアシム舗装	60			0.50						

表-2.6 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 首都高速道路

道路研究室

測定月日 S 40. 4. 6~7

測定条件 首都高速道路の経年変化を知るための測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
1号線平和島付近 オープングレイド	30			0.88				17.0	21.0	18.0~28.0
	30						0.865	17.0	25.0	18.0~22.0
	50			0.92				17.0	21.0	18.0~28.0
	50						0.75	17.0	25.0	18.0~22.0
同 上 密粒アスコン	30			0.90				18.0	27.0	18.0~28.0
	30						0.94	16.0	24.0	18.0~22.0
	50			0.95				18.0	25.0	18.0~28.0
	50						0.77	16.0	24.0	18.0~22.0
4号線代官町付近 オープングレイド	30			0.84				17.0	20.0	
	30						0.76	17.0	22.0	
	50			0.84				17.0	20.0	
	50						0.64	17.0	22.0	
同 上 密粒アスコン	30			0.80				17.0	20.0	40.0
	30						1.00	18.0	21.0	22.0
	50			0.89				17.0	20.0	40.0
	50						0.81	18.0	21.0	22.0
4号線千代田トンネル コンクリート舗装	30			0.84				12.0	13.0	50.0
	30						0.70	15.0	13.0	22.0
	50			0.95				12.0	13.0	50.0
	50						0.64	15.0	13.0	22.0
4号線赤坂トンネル サルビアシム舗装	30			0.81				13.0	14.0	31.0
	30						0.46	16.0	12.0	31.0
	50			0.85				13.0	14.0	31.0
	50						0.54	16.0	12.0	31.0
1号線中央管理所前 アスファルトすべり止め工	30			0.81				17.0	26.0	
	50			0.87				17.0	26.0	

表-2.7 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 首都高速道路

道路研究室

測定月日 S 40. 8. 18~19

測定条件 首都高速道路の経年変化を知るための測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
グース可 1号線下り No.1137~No.1151	50	0.83	0.77	0.80				32.0	38.2	35.3
					0.42	0.35	0.39	33.5	38.0	36.0
密粒アスコン 1号線下り No.1446~No.1454	50	0.88	0.80	0.84				33.0	44.0	
					0.42	0.32	0.37	32.5	40.0	
オープングレイド 1号線下り No.1465~No.1471	50	0.84	0.60	0.72				32.5	40.5	
					0.52	0.46	0.49	30.8	36.5	

表-2.7 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
オーブングレイド 1号線上り No.1465~No.1474	50	0.82	0.76	0.79	0.74	0.46	0.60	31.0 32.5	42.0 37.0	↑ 中 間 ↓ 42.2 ↓ 41.8 33.3 41.8
密粒アスコン 1号線上り No.1446~No.1454	50	0.66	0.64	0.65	0.65	0.40	0.53	31.5 32.0	44.0 38.2	
グース良好 1号線上り No.1234~No.1252	50	0.88	0.65	0.77	0.44	0.29	0.37	31.0 32.0	44.0 37.0	
すべり止め舗装 1号線上り管理所前 No.1001~No.1004	50	0.83	0.72	0.78	0.61	0.39	0.50	34.0 33.2	46.0 35.3	
コンクリート 千代田トンネル下り入口	50	0.87	0.77	0.82	0.44	0.33	0.39	30.5 31.5	30.1 27.7	
コンクリート 千代田トンネル下り分岐点	50	0.78	0.59	0.69	0.35	0.28	0.32	30.8 25.8	28.5 25.9	↑ 中 間 ↓ 62.5 34.1
コンクリート 平河町ルーパー下り	50	0.74	0.73	0.74	0.51	0.37	0.44	29.1 —	28.2 —	
サルビアシム 赤坂トンネル下り	50	0.85	0.83	0.84	0.34	0.29	0.32	31.9 31.5	31.0 30.7	
オーブングレイド 赤坂トンネル新宿側下り No.4377~No.4369	50	0.82	0.66	0.74	0.57	0.43	0.50	33.2 33.2	44.5 38.1	
サルビアシム 赤坂トンネル上り	50	0.77	0.74	0.76	0.43	0.37	0.40	32.2 31.2	31.5 30.5	
コンクリート 千代田トンネル入口上り	50	0.65	0.65	0.65	0.28	0.22	0.25	31.2 31.5	30.0 27.8	
コンクリート 千代田トンネル上り 霞ヶ関分岐点	50	0.66	0.63	0.65	0.24	0.20	0.22	31.0 29.8	29.8 27.3	↑ 中 間 ↓
コンクリート 千代田トンネル上り 霞ヶ関よりとの合流点	50	0.59	0.56	0.58	0.22	0.18	0.20	— —	— —	
コンクリート 千代田トンネル出口上り	50	0.66	0.58	0.62	0.47	0.36	0.42	30.3 29.2	29.0 28.5	

表-2.8 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

道路研究室

測定月日 S 40. 5. 11

測定条件 アスファルト舗装の種類別係数を得るため、39年度試験舗装

試験車 大型道路試験車

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
No. 1 T23 AS8.15 F8.00 碎石	30	1.04	1.06	1.05	0.87	0.86	0.86	11.0~ 14.0	乾 燥	乾 燥
No. 2 40~60 AS8.45 F8.00 碎石	"	1.09	1.03	1.06	0.87	0.89	0.88		11.0~	13.5 ~
No. 3 ポリ3% AS8.45 F8.00 碎石	"	1.01	1.02	1.02	0.80	0.83	0.81		13.0	18.0
No. 4 ゴム2.5% AS8.45 F8.00 碎石	"	1.04	1.04	1.04	0.82	0.86	0.84			
No. 5 ゴム5.0% AS8.45 F8.00 碎石	"	1.02	1.03	1.03	0.81	0.91	0.86		湿 潤	湿 潤
No. 6 ゴム3% AS8.45 F8.00 碎石	"	1.04	1.00	1.02	0.78	0.89	0.83		10.5~	12.5 ~
No. 7 D24 AS5.00 F7.50 碎石	"	1.02	1.04	1.03	0.80	0.87	0.84		11.5	18.0
No. 8 T21 AS8.45 F8.00 碎石	"	1.00	0.98	0.99	0.78	0.87	0.83			
No. 9 D22 AS5.95 F7.50 碎石	"	1.01	0.94	0.97	0.76	0.81	0.79			
No.10 T24 AS8.30 F10.00 碎石	"	0.98	1.00	0.99	0.76	0.86	0.81			
No.11 D21 AS5.55 F6.00 碎石	"	1.05	1.01	1.03	0.78	0.86	0.82			
No.12 T22 AS7.85 F10.00 碎石	"	0.99	1.00	1.00	0.73	0.88	0.80			
No.13 D23 AS5.90 F6.00 碎石	"	0.96	0.95	0.95	0.76	0.84	0.80			
No.14 T23 AS8.15 F8.00 碎石	"	0.96	1.03	1.00	0.72	0.84	0.78			
No.15 T12 AS8.75 F10.00 玉砕	"	0.97	1.04	1.00	0.72	0.84	0.78			
No.16 T11 AS8.45 F8.00 玉砕	"	1.00	1.04	1.02	0.76	0.81	0.78			
No.17 D13 AS5.85 F6.00 玉砕	"	1.00	1.01	1.00	0.77	0.87	0.82			
No.18 D11 AS6.75 F6.00 玉砕	"	0.99	1.02	1.00	0.78	0.86	0.82			
No.19 T14 AS7.95 F10.00 玉砕	"	1.02	0.98	1.00	0.80	0.85	0.82			
No.20 一 般 AS6.50 F7.50 玉砕	"	0.99	0.89	0.94	0.83	0.87	0.85			
No.21 D12 AS6.35 F7.50 玉砕	"	0.94	0.97	0.96	0.81	0.86	0.83			
No.22 D14 AS6.55 F7.50 玉砕	"	0.99	1.07	1.03	0.78	1.03	0.90			
No.23 D14 AS6.55 F7.50 玉砕	"	0.97	0.95	0.96	0.75	0.85	0.80			
No.24 T13 AS10.15 F8.00 玉砕	"	0.91	0.95	0.93	0.63	0.80	0.71			

但し AS はアスファルト混入%

D は密粒アスコン

F はファイラー混入%

碎石 は安山岩碎石

T はトベカ

玉砕 は川砂利碎石

表-2.9 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

道路研究室

測定月日 S 40. 8. 25~26 (夜間測定)

測定条件 アスファルト舗装の種類別係数を得るため。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト試験舗装	30							乾	乾	乾
No. 1		0.88	0.81	0.85	0.59	0.52	0.56			
2		0.77	0.83	0.80	0.63	0.46	0.55			
3		0.85	0.84	0.85	0.59	0.49	0.54			
4		0.82	0.73	0.78	0.61	0.48	0.55	25.0	26.0	25.2
5		0.82	0.76	0.79	0.61	0.51	0.56			
6		0.89	0.79	0.84	0.61	0.48	0.55	測定終了時		
7		0.77	0.72	0.75	0.59	0.53	0.56			
8		0.70	0.82	0.76	0.59	0.53	0.56	24.0	25.8	60.6
9		0.71	0.82	0.77	0.55	0.44	0.50			
10		0.74	0.71	0.73	0.56	0.48	0.52			
11		0.74	0.64	0.69	0.59	0.50	0.55	湿	湿	湿
12		0.69	0.60	0.65	0.53	0.46	0.50			
13		0.71	0.62	0.67	0.52	0.47	0.50	測定開始時		
14		0.65	0.83	0.74	0.51	0.45	0.48			
15		0.75	0.65	0.70	0.48	0.41	0.45	24.0	24.0	50.0
16		0.69	0.73	0.71	0.59	0.47	0.53			
17		0.76	0.60	0.68	0.55	0.50	0.53	測定終了時		
18		0.66	0.62	0.64	0.52	0.50	0.51			
19		0.66	0.61	0.64	0.59	0.53	0.56			
20		0.69	0.64	0.67	0.54	0.53	0.54	23.7	23.5	29.8
21		0.75	0.60	0.68	0.55	0.48	0.52			
22		0.62	0.62	0.62	0.60	0.53	0.57			
23		0.64	0.60	0.62	0.58	0.47	0.53			
24		0.64	0.57	0.61	0.42	0.31	0.57			

表-2.10 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

舗装研究室

測定月日 S 40. 8. 25~26

測定条件 大型道路試験車との比較

試験車 ポータブルスキッドテスター

主要結果 よく比例している。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト試験舗装										
No. 1							50.6	36.0	40.0~45.0	
2							56.0			
3							53.0			
4							55.0			
5							55.0			
6							54.0			
7							55.0			
8							55.0			
9							48.0			
10							57.0			
11							49.0			
12							55.0			
13							48.0			
14							49.0			
15							51.0			
16							54.0			
17							52.0			
18							52.0			
19							55.0			
20							49.0			
21							49.0			
22							51.0			
23							51.0			
24							—			

表-2.11 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

測定月日 S 41. 4. 4

測定条件

アスファルト舗装の種類別係数を得るため。
アスファルト舗装の車道中央と路側部のすべり抵抗
差、降雨中の測定である。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト試験 No. 舗装	1				0.72	0.72	0.72	測定開始時 8.0	11.0	10.0
	2				0.73	0.70	0.71			
	3				0.71	0.67	0.69			
	4				0.72	0.67	0.69			
	5				0.72	0.68	0.70			
	6				0.66	0.64	0.65	測定終了時 8.0	11.0	13.5
	7				0.69	0.64	0.66			
	8				0.72	0.67	0.69			
	9				0.69	0.64	0.66			
	10				0.70	0.65	0.67			
	11				0.63	0.59	0.61			
	12				0.68	0.65	0.67			
	13				0.64	0.62	0.63			
	14				0.64	0.62	0.63			
	15				0.67	0.67	0.67			
	16				0.69	0.68	0.68			
	17				0.67	0.67	0.67			
	18				0.65	0.67	0.66			
	19				0.70	0.70	0.70			
	20				0.66	0.68	0.67			
	21				0.66	0.64	0.65			
	22				0.66	0.65	0.65			
	23				0.66	0.68	0.67			
	24				0.66	0.64	0.65			

表-2.12 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

測定月日 S 41. 4. 5

測定条件

アスファルト舗装の種類別係数を得るため。
アスファルト舗装の車道中央よりと路側部のすべり抵抗
差

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト試験 No. 舗装	1	0.81	0.77	0.79				測定開始時 9.0	16.5	9.0
	2	0.84	0.74	0.79						
	3	0.81	0.76	0.79						
	4	0.80	0.75	0.77						
	5	0.81	0.73	0.77						
	6	0.80	0.74	0.77				測定終了時 12.0	21.0	37.0
	7	0.80	0.77	0.78						
	8	0.77	0.72	0.74						
	9	0.77	0.76	0.76						
	10	0.79	0.76	0.77						
	11	0.78	0.74	0.76						
	12	0.76	0.74	0.75						
	13	0.77	0.73	0.75						
	14	0.76	0.72	0.74						
	15	0.75	0.70	0.72						
	16	0.79	0.74	0.76						
	17	0.77	0.73	0.75						
	18	0.77	0.73	0.75						
	19	0.79	0.75	0.77						
	20	0.76	0.75	0.75						
	21	0.72	0.71	0.71						
	22	0.75	0.75	0.75						
	23	0.78	0.74	0.76						
	24	0.73	0.67	0.70						

表-2.13 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 5

測定条件 試験舗装の経年変化

試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 No. 1	30			0.840			0.677			
				0.844			0.666			
				0.853			0.670			
				0.816			0.678			
				0.787			0.692			
				0.868			0.651			
				0.834			0.624			
				0.862			0.651			
				0.807			0.637			
				0.812			0.673			
				0.789			0.576			
				0.838			0.637			
				0.829			0.591			
				0.781			0.626			
				0.802			0.627			
				0.812			0.681			
				0.815			0.630			
				0.820			0.640			
				0.803			0.661			
				0.802			0.658			
				0.780			0.666			
				0.796			0.653			
				0.770			0.636			
				0.731			0.639			

表-2.14 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

道路研究室

測定月日 S 41. 8. 10

試験車

測定条件 試験舗装の経年変化

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト No. 1	30			0.866			0.661			
				0.919			0.642			
				0.868			0.678			
				0.843			0.670			
				0.838			0.678			
				0.863			0.684			
				0.840			0.620			
				0.769			0.656			
				0.823			0.638			
				0.854			0.692			
				0.812			0.606			
				0.806			0.655			
				0.786			0.621			
				0.761			0.650			
				0.796			0.663			
				0.833			0.679			
				0.767			0.670			
				0.824			0.652			
				0.783			0.684			
				0.765			0.656			
				0.763			0.659			
				0.813			0.656			
				0.758			0.643			
				0.753			0.589			

表-2.15 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県岡部町

道路研究室

測定月日 S 41. 10. 31

測定条件 試験舗装の経年変化

試験車 大型道路試験車

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト No. 1	2			0.726			0.564			
	3			0.735			0.584			
	4			0.738			0.554			
	5			0.706			0.567			
	6			0.717			0.577			
	7			0.695			0.577			
	8			0.699			0.540			
	9			0.695			0.567			
	10			0.692			0.538			
	11			0.684			0.567			
	12			0.715			0.535		22°C	
	13			0.714			0.596			
	14			0.662			0.542			
	15			0.684			0.567			
	16			0.674			0.575			
	17			0.637			0.593			
	18			0.647			0.565			
	19			0.658			0.586			
	20			0.702			0.592			
	21			0.694			0.577			
	22			0.664			0.575			
	23			0.673			0.584			
	24			0.692			0.571			
				0.653			0.568			

表-2.16 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 千葉市宮野木試験舗装

道路研究室

測定月日 S 40. 11. 25 雨

測定条件 各種簡易舗装のすべり摩擦係数値測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
AE 2 P (B) I	20				0.83	0.93	0.88			
	40				0.66	0.66	0.66	13.0	13.0	測定前
	50				0.39	0.70	0.55			12.5
同 上 II	20				0.84	0.96	0.90			
	40				0.70	0.68	0.69			測定後
	50				0.67	0.66	0.67			21.0
CA 1 P (A) I	20				0.73	0.73	0.73			
	40				0.62	0.55	0.59			
	50				0.50	0.66	0.58			
同 上 II	20				0.78	0.80	0.79			
	40				0.63	0.65	0.64			
	50				0.54	0.55	0.55			

表-2.16 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
CA1M (A)	I	20			0.72	0.70	0.71			
		40			0.51	0.42	0.47			
		50			0.40	0.53	0.47			
同 上	II	20			0.73	0.71	0.72			
		40			0.57	0.54	0.56			
		50			0.54	0.55	0.55			
STM (B)	I	20			0.68	0.73	0.71			
		40			0.43	0.48	0.46			
		50			0.44	0.44	0.44			
同 上	II	20			0.70	0.76	0.73			
		40			0.55	0.56	0.56			
		50			0.52	0.40	0.46			
AE1M (A)	I	20			0.70	0.79	0.75			
		40			0.52	0.61	0.57			
		50			0.54	0.48	0.51			
同 上	II	20			0.87	1.03	0.95			
		40			0.74	0.72	0.73			
		50			0.69	0.66	0.68			
STM (A)	I	20			0.77	0.79	0.78			
		40			0.58	0.64	0.61			
		50			0.50	0.55	0.53			
同 上	II	20			0.70	0.83	0.77			
		40			0.59	0.50	0.55			
		50			0.62	0.51	0.57			
AE1P (B)	I	20			0.77	0.93	0.85			
		40			0.61	0.66	0.64			
		50			0.56	0.53	0.55			
同 上	II	20			0.80	0.84	0.82			
		40			0.61	0.70	0.66			
		50			0.54	0.64	0.59			
AE2P (A)	I	20			0.77	0.81	0.79			
		40			0.58	0.56	0.57			
		50			0.56	0.51	0.54			
同 上	II	20			0.79	0.83	0.81			
		40			0.63	0.62	0.63			
		50			0.56	0.66	0.61			
CTM (B)	I	20			0.72	0.79	0.76			
		40			0.62	0.54	0.58			
		50			0.58	0.42	0.50			
同 上	II	20			0.73	0.80	0.77			
		40			0.58	0.58	0.58			
		50			0.50	0.46	0.48			

表-2.16 (つづき)

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
STP (A) I	20				0.75	0.82	0.79			
	40				0.71	0.68	0.70			
	50				0.56	0.59	0.58			
同 上 II	20				0.77	0.77	0.77			
	40				0.64	0.68	0.66			
	50				0.56	0.62	0.59			
STP (B) I	20				0.85	0.95	0.90			
	40				0.73	0.81	0.77			
	50				0.66	0.59	0.63			
同 上 II	20				0.79	0.93	0.86			
	40				0.59	0.67	0.63			
	50				0.54	0.68	0.61			
AE 2M (B) I	20				0.87	1.01	0.94			
	40				0.71	0.72	0.72			
	50				0.71	0.57	0.64			
同 上 II	20				0.84	0.93	0.89			
	40				0.67	0.66	0.67			
	50				0.58	0.66	0.62			
CA 2P (A) I	20				0.80	0.83	0.82			
	40				0.56	0.52	0.54			
	50				0.52	0.51	0.52			
同 上 II	20				0.81	0.85	0.83			
	40				0.65	0.69	0.67			
	50				0.58	0.68	0.63			
AE 1M (B) I	20				0.62	0.80	0.71			
	40				0.39	0.49	0.44			
	50				0.39	0.33	0.36			
同 上 II	20				0.61	0.54	0.58			
	40				0.43	0.37	0.40			
	50				0.37	0.34	0.36			
SAM (A) I	20				0.34	0.33	0.34			
	40				0.53	0.27	0.40			
	50				0.15	0.18	0.17			
同 上 II	20				0.38	0.33	0.36			
	40				0.28	0.24	0.26			
	50				0.17	0.22	0.20			
AE 1P (A) I	20				0.76	0.68	0.72			
	40				0.62	0.53	0.58			
	50				0.58	0.51	0.55			
同 上 II	20				0.80	0.82	0.81			
	40				0.62	0.61	0.62			
	50				0.60	0.51	0.56			

表-2.16 (つづき)

道 路 鋪 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
CA2M (A)	I	20			0.70	0.77	0.74			
		40			0.58	0.57	0.53			
		50			0.50	0.40	0.45			
同 上	II	20			0.73	0.79	0.76			
		40			0.67	0.67	0.67			
		50			0.56	0.57	0.57			
SAP (B)	I	20			0.79	0.86	0.83			
		40			0.62	0.66	0.64			
		50			0.52	0.59	0.56			
同 上	II	20			0.78	0.84	0.81			
		40			0.56	0.66	0.61			
		50			0.50	0.51	0.51			
SAM (B)	I	20			0.85	1.02	0.94			
		40			0.69	0.69	0.69			
		50			0.62	0.62	0.62			
同 上	II	20			0.93	1.12	1.03			
		40			0.70	0.93	0.82			
		50			0.64	0.90	0.77			
SAP (A)	I	20			0.80	0.84	0.82			
		40			0.67	0.66	0.67			
		50			0.62	0.46	0.54			
同 上	II	20			0.75	0.83	0.79			
		40			0.61	0.58	0.60			
		50			0.58	0.75	0.67			
CA1P (B)	I	20			0.75	0.95	0.85			
		40			0.62	0.66	0.64			
		50			0.54	0.57	0.56			
同 上	II	20			0.83	0.93	0.88			
		40			0.57	0.67	0.62			
		50			0.33	0.57	0.45			
CTM (A)	I	20			0.75	0.76	0.76			
		40			0.66	0.58	0.62			
		50			0.54	0.59	0.57			
同 上	II	20			0.72	0.74	0.73			
		40			0.53	0.48	0.51			
		50			0.48	0.44	0.46			
デックシール	I	20			0.86	1.00	0.93			
		40			0.74	0.67	0.71			
		50			0.73	0.68	0.71			
同 上	II	20			0.88	1.10	0.99			
		40			0.74	0.85	0.80			
		50			0.69	0.75	0.72			

表-2.16 (つづき)

道 路 舗 装 種 別		乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度			
		速度	左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
AE2M (A)	I	20				0.71	0.69	0.70			
		40				0.56	0.49	0.53			
		50				0.37	0.31	0.34			
同 上	II	20				0.88	0.92	0.90			
		40				0.70	0.76	0.73			
		50				0.64	0.59	0.62			

SA	: ストレートアスファルト			ℓ / 100m ²
AE1	: アスファルト乳剤その1			
AE2	: アスファルト乳剤その2			本体
CA1	: カットバックスアスファルトその1			302~323 64~76
CA2	: カットバックスアスファルトその2			444~558 91~107
ST	: ストレートタール			313~349 84~91
CT	: カットバックタール			291~325 —
P	: 滲透式			326~363 91~103
	(A)	シールコートなし	O	7.8% 91~100
	(B)	シールコート	S	7.3 110
M	: 混合式			5.0 91
	(A)	粗粒式	C	4.7 89~93
	(B)	密粒式	F	5.0 99
I	は路盤I種類			CTC 102
II	は路盤II種類			AE1F 8.3
				AE2F 7.9
				CTF 5.0
				SAC 6.6
				STC 5.1
				SAF 10.9
				STF 7.0

表-2.17 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 第3京浜道路

道路研究室

測定月日 S 41. 1. 26~28

測定条件 開通 (40. 12. 19) 直後の状態を測定した車線別の変化。シノパールの変化を求める。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿润(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装路面										
密粒アスコン %	40									
アスファルト %										
第1車線				0.89				5.0	8.0	左
第2車線				0.85						5.0~
第3車線				0.81						
第1車線	60			0.77						右
第2車線				0.83						8.0
第3車線				0.85						
第1車線	80			0.83						
第2車線				0.83						
第3車線				0.77						

表-2.17 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装路面	40									
シノパール										
アスファルト										
第 1 車 線				0.79						
第 2 車 線				0.83						
第 3 車 線				0.85						
%										
第 1 車 線	60			0.78						
第 2 車 線				0.82						
第 3 車 線				0.74						
%										
第 1 車 線	80			0.88						
第 2 車 線				0.87						
第 3 車 線				0.93						
%										
アスファルト舗装	40									
密粒アスコン										
アスファルト										
第 1 車 線							0.38	7.0	8.0	左右共 8.0~
第 2 車 線							0.39			
第 3 車 線							0.50			
%										
第 1 車 線	60						0.32			
第 2 車 線							0.35			
第 3 車 線							0.36			
%										
第 1 車 線	80						0.41			
第 2 車 線							0.44			
第 3 車 線							0.39			
%										
アスファルト舗装	40									
シノパール										
アスファルト										
第 1 車 線							0.50			
第 2 車 線							0.49			
第 3 車 線							0.50			
%										
第 1 車 線	60						0.38			
第 2 車 線							0.41			
第 3 車 線							0.41			
%										
第 1 車 線	80						0.35			
第 2 車 線							0.29			
第 3 車 線							0.33			
%										

表-2.18 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 名阪国道

道路研究室

測定月日 S 41. 3. 10

測定条件 アスファルト舗装の測定

試験車 大型道路試験車

新しいもの、すべり止め効果、一部コンクリート

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 久我～関インター間 (アスコン)	50	0.73	0.70	0.72	0.67	0.60	0.64	11.0	15.0 17.0	— 17.0
久我インター関トンネル間 (すべり止め舗装)	45	0.73	0.70	0.72	0.64	0.60	0.62	11.5	12.0 14.0	— 17.0
関トンネル内 (コンクリート舗装)	50	0.88	0.84	0.86	0.61	0.54	0.58	10.5	12.5 14.5	— 17.0
向井～板屋インター間 (すべり止め舗装)	50	0.77	0.76	0.77	0.64	0.60	0.62	7.0	9.0 10.0	— 17.0
板屋～中在家インター間 (アスコン)	50	0.78	0.72	0.75	0.67	0.59	0.63	9.0	11.5 13.5	— 17.0
加太トンネル内 (コンクリート舗装)	50	0.88	0.89	0.89	0.47	0.48	0.48	16.0	19.5 21.5	— 17.0
加太トンネル～伊賀インター (すべり止め舗装)	50	0.82	0.80	0.81	0.70	0.54	0.62	13.0	18.0 20.0	— 17.0
五月橋～山添インター間 (トベカ)	50	0.76	0.70	0.73	0.57	0.48	0.53	14.0	23.0 25.0	— 17.0
山添インター～遅瀬川間 (トベカ)	50	0.76	0.67	0.72	0.51	0.51	0.51	11.5	20.0 22.0	— 17.0
遅瀬川橋面 (すべり止め舗装)	50	0.60	0.54	0.57	0.54	0.51	0.53	11.5	20.0 22.0	— 17.0

表-2.19 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研、試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 3. 2

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 (アスコン)	20	0.816	0.901	0.858	0.847	0.956	0.901			
	40	0.689	0.744	0.716	0.702	0.736	0.719			

表-2.20 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 3. 28 曇—小雨

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 (アスコン)	20	0.757	0.785	0.771				9.0	10.0	40.0
					0.822	0.876	0.849	8.0	9.5	11.0
	40	0.703	0.785	0.744				9.0	10.0	40.0
					0.703	0.725	0.714	8.0	9.5	12.0
	60	0.730	0.755	0.742				9.0	10.0	40.0
					0.686	0.683	0.684	8.0	9.5	14.0

表-2.21 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 5. 2 (雨降り) 3日 (乾燥)

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 (アスコン)	20	0.741	0.786	0.763				20.0	24.0	22.0~52.0
					0.811	0.846	0.828	20.0	23.0	26.0
	40	0.649	0.683	0.666				20.0	24.0	22.0~52.0
					0.719	0.762	0.740	20.0	23.0	26.0
	60	0.686	0.743	0.714				20.0	24.0	22.0~52.0
					0.665	0.665	0.665	20.0	23.0	26.0

表-2.22 路面すべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 5. 25

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定
雨降り (散水せず)

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装	20				0.868	0.939	0.903			
	40				0.759	0.857	0.808	16°C	21.0 ~ 21.5	左右共
	60				0.754	0.718	0.736			18.5~20.0

表-2.23 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 6

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装	20	0.839	0.876	0.857	0.969	0.876	0.922	乾 21.0	乾 26.0	
	40	0.737	0.725	0.731	0.818	0.814	0.816	湿	湿	
	60	0.719	0.679	0.699	0.726	0.657	0.691	21.5	26.0	

表-2.24 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 5 (夜)

測定条件 コンクリート舗装の経年変化を知るための常時測定,
特に夜間(午後11時)に測定した。

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト	20	0.805	0.835	0.820	0.896	0.875	0.885	乾 17.2	乾 20.5	
	40	0.742	0.707	0.729	0.766	0.778	0.772	湿	湿	
	60	0.748	0.752	0.750	0.689	0.649	0.669	17.2	20.6	

表-2.25 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 18 晴

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装	20	0.788	0.825	0.806	1.008	1.056	1.032	乾 28.5	乾 40.0	
		0.756	0.825	0.791	1.040	1.089	1.064			
		0.756	0.825	0.791	1.040	1.089	1.064			
	平均			0.796			1.054			
		0.756	0.726	0.741	0.851	0.792	0.821	湿 28.0	湿 32.0	
		0.725	0.726	0.725	0.882	0.792	0.837			
		0.756	0.726	0.741	0.788	0.825	0.806			
	平均			0.736			0.821			
		0.725	0.726	0.725	0.756	0.726	0.741			
		0.756	0.715	0.736	0.756	0.715	0.736			
		0.756	0.660	0.708	0.756	0.726	0.741			
	平均			0.724			0.739			

表-2.26 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 21 (午前10~12時)

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装	20	0.921	0.867	0.894	0.890	0.835	0.862	乾	乾	乾
		0.890	0.867	0.878	0.890	0.899	0.894			
		0.859	0.770	0.814	0.890	0.899	0.894			
	平均			0.862			0.883	28.3	41.0	60.0~65.0
		0.798	0.738	0.768	0.859	0.770	0.814			
		0.737	0.803	0.770	0.829	0.770	0.800			
	40	0.706	0.770	0.738	0.829	0.770	0.800	28.6	36.6	36.0~35.0
				0.759			0.805			
		0.798	0.770	0.784	0.737	0.642	0.689			
	平均	0.737	0.770	0.753	0.706	0.642	0.674			
		0.645	0.770	0.707	0.737	0.642	0.689			
				0.748			0.684			

表-2.27 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 7. 21 (午後1~3時)

測定条件 アスファルト舗装の経年変化を知るための常時測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装	20	0.859	0.818	0.838	0.890	0.786	0.838	乾	乾	
		0.859	0.818	0.838	0.921	0.849	0.885			
		0.798	0.818	0.808	0.859	0.818	0.838			
	平均			0.828			0.854	29.0	41.7	
		0.798	0.692	0.745	0.737	0.661	0.699			
		0.798	0.755	0.776	0.737	0.661	0.699			
	40	0.706	0.661	0.683	0.675	0.692	0.683	29.5	34.0	
				0.734			0.694			
		0.798	0.629	0.713	0.706	0.566	0.636			
	平均	0.706	0.692	0.699	0.675	0.629	0.654			
		0.737	0.629	0.683	0.675	0.629	0.654			
				0.698			0.647			

表-2.28 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 第3京浜道路

測定月日 S 41. 8. 12, 13

測定条件 アスファルト舗装の車種別(交通量別)経年変化を求めるもの。

試験車 大型道路試験車

主要結果 あまり明瞭ではない。

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト コンクリート	40							乾燥	乾燥	当日の交通量 第1車線 480台/h 第2車線 629台/h 第3車線 147台/h
	第1車線			0.961			0.583	37.5~	50.5~	
	第2車線			0.970			0.583		53.0	
	第3車線			0.997			0.767	35.5		
	60							湿潤	湿潤	
	第1車線			1.013			0.370			
	第2車線			0.982			0.439	34.0~	35.5~	
	第3車線			0.950			0.585	35.5	45.0	
	80									
	第1車線			1.025						
	第2車線			1.045						
	第3車線			0.996						
シノパール入 アスファルト コンクリート	40							乾燥	乾燥	
	第1車線			1.061			0.618	37.5~	50.5~	
	第2車線			1.017			0.669		53.0	
	第3車線			0.932			0.735	35.5		
	60							湿潤	湿潤	
	第1車線			0.887			0.447			
	第2車線			0.967			0.517	34.0~	35.5~	
	第3車線			0.861			0.558	35.5	45.0	
	80									
	第1車線			1.034			0.395			
	第2車線			0.960			0.381			
	第3車線			0.975			0.391			

表-2.29 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 第3京浜道路

測定月日 S 42. 4. 17

測定条件 アスコンとシノパールの経年比較

試験車 大型道路試験車

主要結果 あまり差は見られない。

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト コンクリート	40									10°C
	第1車線						0.407			
	第2車線						0.474			
	第3車線						0.526			
	60									
	第1車線						0.328			
	第2車線						0.363			
	第3車線						0.472			
	80									
	第1車線						0.268			
	第2車線						0.313			
	第3車線									
シノパール入 アスファルト コンクリート	40									10°C
	第1車線						0.434			
	第3車線						0.498			
	60									
	第1車線						0.351			
	第3車線						0.423			
	80									
	第1車線						0.290			
	第3車線									

表-2.30 名神高速自動車道のすべり摩擦係数

測定区間	舗装種別	走行 速度	すべり摩擦係数		外気温		路面温度		測定年月日
			乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	
小牧～一宮 (184～185)	アスファルト	40	0.869	0.696	30.5°C	31.0°C	44.3°C	35.8°C	乾燥測定 S 41.8.30 湿潤測定 S 41.9. 2
	"	60	0.874	0.664					
	"	80	0.963	0.542	30.0	30.6	44.8	35.5	
	"	(100)		(0.462)					
一宮～大垣 (164～165)	アスファルト	40	0.748	0.632	30.5	31.0	44.5	38.0	
	"	60	0.731	0.559					
	"	80	0.752	0.430	30.8	32.0	44.7	37.5	
	"	(100)		(0.350)					
大垣～関ヶ原 (156～157)	アスファルト	40	0.737	0.658	30.8	33.0	44.1	38.5	
	"	60	0.763	0.563					
	"	80	0.800	0.474	31.9	31.0	44.2	37.0	
	"	(100)		(0.394)					
関ヶ原～彦根 (146～147)	アスファルト	40	0.773	0.677	31.2	31.0	38.7	36.0	
	"	60	0.822	0.578					
	"	80	0.830	0.523	31.2	30.5	39.2	35.5	
	"	(100)		(0.443)					
彦根～八日市 (118～119)	アスファルト	40	0.858	0.462	30.5	33.5	35.4	41.0	
	"	60	0.815	0.392					
	"	80	0.894	0.304	29.3	32.0	36.0	38.0	
	"	(100)		(0.224)					
八日市～栗東 (84～ 85)	アスファルト	40	0.735	0.716	28.2	33.0	36.3	42.0	
	"	60	0.775	0.569					
	"	80	0.879	0.449	31.0	32.0	36.5	41.0	
	"	(100)		(0.369)					
栗東～大津 (68～ 69)	アスファルト	40	0.767	0.524	26.6	33.5	29.8	42.5	
	"	60	0.822	0.422					
	"	80	0.847	0.358	28.3	34.0	29.7	42.2	
	"	(100)		(0.278)					
大津トンネル内	コンクリート	40	0.784	0.567	25.5	27.5	25.8	25.5	
蟬丸トンネル内	コンクリート	60	0.832	0.470	25.5	29.5	26.0	25.5	
京都東～京都南 (57.6 付近) オーバーレイ	アスファルト	40	0.759	0.528	39.5	31.5	40.1	39.0	乾燥湿潤 共に S 41.8.31
	"	60	0.791	0.388	30.0	32.0	41.5	36.0	
	"	80	0.791	0.337	35.0	31.5	44.3	39.0	
	"	(100)		(0.257)					
京都東～京都南 (57.6 付近)	アスファルト	40	0.759	0.489	30.0	31.5	37.5	37.0	
	"	60	0.879	0.424	30.0	32.0	39.5	35.5	
	"	80	0.801	0.386	35.0	31.5	41.5	37.0	
	"	(100)		(0.306)					
京都東～京都南 (56.5～55.9) 曲線部	アスファルト	40	0.801	0.522	34.0	30.0	39.5	35.5	
	"	60	0.824	0.392	32.0	31.0	38.5	36.0	
	"	80	0.885	0.352	34.0	31.0	44.0	34.5	
	"	(100)		(0.272)					

表-2.30 (つづき)

名神高速自動車道のすべり摩擦係数

測 定 区 間	舗 装 種 別	走 行 速 度	すべり摩擦係数		外 気 温		路 面 温 度		測定年月日
			乾 燥	湿 潤	乾 燥	湿 潤	乾 燥	湿 潤	
山科バスストップ	コンクリート	km/h			°C	°C	°C	°C	乾燥湿潤 共に S 41.8.31
		40	0.710	0.734	34.0	31.0	38.0	36.5	
	"	60	0.885	0.598	32.0	31.0	39.6	37.5	
京都南～京都東 (54.2 付 近)	アスファルト	40	0.896	0.537	33.0	30.0	40.2	30.8	
	"	60	0.909	0.455	34.0	31.5	41.0	31.7	
	"	80	0.906	0.378	37.0	28.5	47.6	30.5	
	"	(100)		(0.298)					
京都南～京都東 (54.8 付 近) 橋 面	アスファルト	40	0.854	0.503					
	"	60	0.885	0.450					
	"	80	0.759	0.365	—	28.5	—	28.2	
	"	(100)		(0.285)					
京都南～京都東 (54.8 付 近)	アスファルト	40	0.833	0.541	33.0	30.4	42.0	32.0	
	"	60	0.917	0.436	34.0	30.5	43.5	32.5	
	"	80	0.864	0.361	37.0	28.5	47.5	29.5	
	"	(100)		(0.281)					
京都東～京都南 (56.5～55.9) 曲線部	アスファルト	60	0.744	0.556	32.0	—	41.5	—	
	"	80	0.837	0.524					
	"	※100	0.858	0.440	35.0	—	42.0	—	
京都南～京都東 (54.2 付 近) 追 越 車 線	アスファルト	60	0.759	0.514	32.0	—	38.0	—	
	"	80	0.868	0.409					
	"	※100	0.906	0.378	34.0	—	38.0	—	
京都南～茨 木 (43～ 44)	アスファルト	40	0.847	0.613	33.0	30.5	42.5	35.8	乾燥湿潤 共に S 41.9. 1
	"	60	0.860	0.527					
	"	80	0.843	0.439	33.0	30.6	41.7	35.0	
	"	(100)		(0.359)					
茨 木～豊 中 (22～ 23)	アスファルト	40	0.866	0.637	33.2	31.0	43.6	37.0	
	"	60	0.843	0.506					
	"	80	0.906	0.369	34.0	31.4	43.2	34.0	
	"	(100)		(0.289)					
豊 中～尼ヶ崎 (8～ 9)	アスファルト	40	0.889	0.628	33.0	33.0	41.8	37.0	
	"	60	0.801	0.472	—	32.0	—	37.3	
	"	80	0.906	0.411					
	"	(100)		(0.331)					
尼ヶ崎～西 宮 (4～ 5)	アスファルト	40	0.917	0.597	32.6	32.8	41.5	39.0	
	"	60	0.927	0.548					
	"	80	0.847	0.443	33.0	31.2	42.3	38.7	
	"	(100)		(0.363)					

但し () 内の 100km/h に対する摩擦係数は推定値、※印は実測値

測定場所 名神高速自動車道

表-2.31 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 42. 2. 14, 15

試験車 大型道路試験車

測定条件 名神道路の経年変化

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 小 牧 ← 一の宮	40 60 80						0.510 0.438 0.382	6.0°C	6.5°C	
一の宮 ← 大 垣	40 60 80						0.489 0.406 0.366			
大 垣 ← 関ヶ原	40 60 80						0.509 0.440 0.398			
関ヶ原 ← 彦 根	40 60 80						0.535 0.476 —	6.0	6.5	
彦 根 → 八 日 市	40 60 80						0.579 0.450 0.373	3.0	8.0	
八 日 市 → 栗 東	40 60 80						0.545 0.433 0.352			
栗 東 → 大 津	40 60 80						0.467 0.373 0.353			
大津トンネル内 (コンクリート)	40						0.409			
蟬丸トンネル内 (コンクリート)	60						0.346			
京都東インター、オーパ レィ, KP57.6	40						0.415			
京 都 東 → 京 都 南	40 60 80						0.455 0.385 0.303			
京 都 南 ← 京 都 東	40 60 80						0.409 0.335 0.281	10	6	

表-2.32 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 中央道西桂試験舗装

道路研究室

測定月日 S 42. 11.

測定条件 舗装種類の差を知るため

主要結果 交通に未供用区間であるので、交通後の変化は不明である。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 密 粒 (安山岩)	40 60 80			0.856 0.724 —			0.699 0.532 0.493		乾 燥 23~ 25°C	
密 粒 (砂 岩)	40 60 80			0.822 0.884 0.858			0.741 0.626 0.557			
ギャップ型 (砂 岩)	40 60 80			0.781 0.728 0.710			0.735 0.599 0.524			
ギャップ型 (安山岩)	40 60 80			0.750 0.751 0.733			0.725 0.599 0.508		湿 潤 16~ 20°C	
シリカサンド	40 60 80			1.038 0.981 1.007			0.751 0.659 0.533			
グ ー ス	40 60 80			0.922 0.901 0.891			0.798 0.760 0.672			

(3) すべり止め舗装の効果を主とした測定結果

表-3.1 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道4号線福島～盛岡間

道路研究室

測定月日 S 40. 3. 2~3

試験車 大型道路試験車

測定条件 各種すべり止め舗装の効果測定

主要結果 花巻、福島は差があるが他は差がない。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)		湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度 タイヤ温度
花巻市宮の目									
散布式碎石 5~10mm	50	リブタイヤ		0.76					
ガムファルト、プレコート	"	スノータイヤ		0.92					
同 上	50	リブタイヤ		0.63					
密粒アスコン	"	スノータイヤ		0.71					
胆沢郡前沢町20人町									
デックシール	50	リブタイヤ		0.70					
	"	スノータイヤ		0.84					
同 上									
密粒アスコン	50	リブタイヤ		0.78					
	"	スノータイヤ		0.86					
一の関市山目									
散 布 式	50	リブタイヤ		0.75					
	"	スノータイヤ		0.97					
同 上									
密粒アスコン	50	リブタイヤ		0.76					
	"	スノータイヤ		0.78					
大 衡 村									
シリカサンド、RA	50	リブタイヤ		0.84					
セメント	"	スノータイヤ		0.90					
同 上	"	リブタイヤ		0.82					
密粒アスコン	50	スノータイヤ		0.84					
仙台バイパス									
ポリベープ	50	リブタイヤ		0.93					
	"	スノータイヤ		1.06					
同 上									
密粒アスコン	50	リブタイヤ		0.91					
	"	スノータイヤ		1.05					
岩沼バイパス									
シリカサンド、RA	50	リブタイヤ		0.88					
セメント	"	スノータイヤ		0.98					
同 上									
密粒アスコン	50	リブタイヤ		0.92					
	"	スノータイヤ		1.02					
福 島 市									
スラリーシール	50	リブタイヤ		0.84					
	"	スノータイヤ		0.86					
同 上									
密粒アスコン	50	リブタイヤ		0.62					
	"	スノータイヤ		0.74					

表-3.2 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道20号線甲府市内竜王町バイパス入口

道路研究室

試験車 大型道路試験車
タイヤ圧27ポンド測定月日 S 40. 5. 18~20
測定条件 各種アスファルト舗装の効果測定

(すべり止め舗装の効果測定)

主要結果 種類別の差は見られない。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
トベカ	30		0.93	0.93	0.89	0.71	0.80	20.0	30.0	測定前 18.0
	30							23.0	40.0	
	50	1.05	0.93	0.99	0.71	0.54	0.63	20.0	42.0	
	50							23.0	36.0	
ガムファルト アスファルト 4.8% ファイラー 5.7% アスファルト容積 11.0%	30	0.95	1.13	1.04	0.81	0.80	0.81	20.0	31.0	測定後 50.0
	30				0.81	0.80	0.81	23.0	35.0	
	50	0.92	0.92	0.92	0.73	0.58	0.65	20.0	42.0	
	50				0.73	0.58	0.65	23.0	32.0	
ストレートアスファルト アスファルト 4.8% ファイラー 5.0%	30	1.03	0.91	0.97	0.88	0.74	0.81	20.0	30.0	
	30				0.88	0.74	0.81	23.0	36.0	
	50	0.97	0.81	0.89	0.72	0.60	0.66	20.0	40.0	
	50				0.72	0.60	0.66	23.0	32.0	
ポリベープ アスファルト 4.8% ファイラー 5.7%	30	0.97	0.84	0.91	0.86	0.74	0.80	20.0	30.0	
	30				0.86	0.74	0.80	23.0	36.0	
	50	0.96	0.83	0.90	0.72	0.58	0.65	20.0	36.0	
	50				0.72	0.58	0.65	23.0	32.0	
RAセメント アスファルト 4.8% ファイラー 5.7%	30	0.94	0.91	0.92	0.85	0.80	0.82	20.0	32.0	
	30				0.85	0.80	0.82	23.0	37.0	
	50	0.95	0.89	0.92	0.66	0.65	0.65	20.0	40.0	
	50				0.66	0.65	0.65	23.0	33.0	

表-3.3 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道4号線東京都内

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 15~16

測定条件 夜間測定 (23時30分~3時30分)

試験車 大型道路試験車

交差点手前で追突事故が多いので測定した。

片側2~3車線の広い所である。

主要結果 特に小さいとは考えられない。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
より東京方面 No. 1 (舗装種別)	50	0.82	0.82	0.82				28.0	27.5	27.0
					0.39	0.40	0.40	25.7	25.8	38.0~
					0.42	0.28	0.35	27.0	26.0	33.0
					0.30	0.28	0.29	25.0	25.0	
平 均				0.82						
No. 2	50	0.64	0.78	0.71				28.0	27.7	31.0
					0.49	0.40	0.45	25.0	25.8	38.0~
					0.49	0.56	0.53	24.8	24.6	33.0
					0.46	0.48	0.47	26.3	26.0	
平 均				0.71						
No. 3	50	0.71	0.70	0.71				27.5	27.1	45.0
					0.39	0.35	0.37	24.5	25.5	38.0~
					0.42	0.44	0.43	25.0	25.4	33.0
							0.40			
平 均				0.71						

表-3.3 (つづき)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
No. 4 平 均	50	—	—	—	0.53 0.39 0.49	0.52 0.56 0.44	0.53 0.48 0.47 0.49	25.3 26.0 24.0	25.8 25.7 24.5	38.0~ 33.0
下り草加方向 No. 1 平 均	50	0.78	0.78	0.78	0.46 0.44 0.53	0.48 0.52 0.44	0.47 0.48 0.49 0.48	27.0 25.2 25.0	26.8 25.8 24.8	38.0
No. 2 平 均	50	0.78	0.82	0.80	0.46 0.53 0.53	0.54 0.50 0.44	0.50 0.52 0.49 0.50	27.0 25.0 26.1	26.3 25.8 25.6	40.0 38.0~ 33.0
No. 3 平 均	50	0.82	0.74	0.78	0.49 0.60 0.53	0.50 0.50 0.52	0.50 0.55 0.54 0.53	26.5 24.8 24.8	26.5 25.2 25.0	47.0 38.0~ 33.0
No. 4 平 均	50	0.75	0.65	0.70	0.46 0.42 0.49	0.44 0.41 0.45	0.45 0.42 0.47 0.45	27.2 25.2 26.3	27.0 25.8 25.5	45.0 38.0~ 33.0

表-3.4 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 上越国道17号線芝原地区

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 20

測定条件 アスファルト舗装部分の測定

試験車 大型道路試験車

危険部の原因を調査するため。

主要結果 危険の原因は線形と考えられる。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装 曲 線 部 分 半 径 50m	15	上り 0.86 下り 0.77	0.82	0.84	上り 0.91 下り 0.82	0.72	0.82	乾燥時 29.0	乾 39.0	30.0 ~ 54.0
		0.81 下り 0.72	0.91	0.84 0.84	0.68 下り 0.71	0.61	0.65			
	30	上り 0.81 下り 0.72	0.81	0.81	上り 0.68 下り 0.71	0.61	0.65	湿潤時 25.0 ~ 28.0	湿 31.0	27.5 ~ 30.0
		0.72	0.80	0.76 0.79	0.63	0.67 0.66	0.66			
	50	上り 0.72	0.70	0.71						
同 上 曲 線 部 分 半 径 30m	15	上り 0.88 下り 0.82	0.78	0.83	上り 0.80 下り 0.82 0.84	0.64	0.72			
		0.82	0.85	0.84	0.72 0.84	0.74	0.78 0.75			
	30	上り 0.78 下り 0.87	0.75	0.77	上り 0.72 下り 0.77	0.57	0.65			
		0.87	0.72	0.80 0.78	0.54	0.66 0.65	0.66			
	40	上り 0.63	0.75	0.69						

表-3.4 (つづき)

道路舗装種別	走行速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 曲線部分	15	上り 0.88 下り 0.84	0.82 0.89	0.85 0.86	上り 0.85 下り 0.87	0.82 0.83	0.84 0.84	乾燥時 29.0 湿潤時 25.0 ~ 28.0	乾 39.0 湿 31.0	乾 30.0 ~ 54.0 湿 27.5 ~ 30.0
	30	上り 0.82 下り 0.78	0.83 0.84	0.83 0.81 0.82	下り 0.78	0.76	0.77 0.77			
	50	上り 0.81	0.89	0.85	上り 0.53	0.55	0.57			

表-3.5 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 上越国道17号線四十日地区

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 21 大雨

測定条件 アスファルト舗装の測定

試験車 大型道路試験車

危険部の原因を調査するため。

主要結果 事故多発路面はすべり摩擦係数が小さいことがわかる。

道路舗装種別	走行速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装 普通路面(事故の少ない所)	10				上り 0.87 下り 0.88	0.78 0.83	0.83 0.86 0.84	22.0	24.0	25.0
	40				上り 0.71 下り 0.72	0.66 0.64	0.69 0.68	23.0	27.0	31.0
	60				上り 0.61 下り 0.62	0.56 0.56	0.59 0.59 0.59			
アスファルト舗装 事故多発路面	10				上り 0.89 下り 0.84	0.77 0.78	0.83 0.81 0.82			
	40				上り 0.58 下り 0.66	0.55 0.60	0.57 0.63 0.60			
	60				上り 0.35 下り 0.51	0.41 0.50	0.38 0.51 0.45			

表-3.6 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線三国峠北浅貝地区

道路研究室

測定月日 S 38. 8. 12

測定条件 各種アスファルト舗装の効果測定(経年変化)
試験舗装区間、しゅん功直後

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
トベカ舗装 密粒アスコン	30						0.60			
	10						0.64			
	30						0.62			
ギャップ型 すべり止め工	10						0.78			
	30						0.70			

表-3.7 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線三国峠北、浅貝地区

道路研究室

測定月日 S 39. 6. 16~19

測定条件 各種アスファルト舗装の効果測定(経年変化)
(試験舗装区間・S38. 11月舗完)

試験車 大型道路試験車

主要結果 左右の差が大きいので一般的な解析には用いず、相対比較にのみ用いる。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
トベカ舗装	10	0.62	0.42	0.52	0.70	0.44	0.52			
	30	0.54	0.37	0.46	0.50	0.32	0.41			
密粒アスコン	10	0.61	0.43	0.52	0.70	0.45	0.58			
	30	0.56	0.39	0.48	0.51	0.36	0.44			
ギャップ型すべり止め工	10	0.63	0.47	0.55	0.63	0.46	0.55			
	30	0.54	0.43	0.49	0.54	0.39	0.47			
トベカ舗装	横すべり 20°				横すべり 20°					
	10	0.44	0.54	0.49	0.62	0.46	0.54			
	30	0.54	0.37	0.46	0.50	0.32	0.41			
	55	0.59	0.53	0.56						
密粒アスコン	10	0.47	0.55	0.51	0.57	0.49	0.53			
	30	0.55	0.51	0.53	0.51	0.48	0.50			
	55	0.65	0.54	0.60						
ギャップ型すべり止め工	10	0.53	0.56	0.55	0.50	0.42	0.46			
	30	0.61	0.53	0.57	0.60	0.48	0.54			
	55	0.65	0.57	0.61						

表-3.8 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線三国峠北、浅貝地区

道路研究室

測定月日 S 40. 7. 22 小雨

試験車 大型道路試験車

測定条件 各種アスファルト舗装の効果測定(経年)
主要結果 ギャップ型は経年的に悪くなることを示す。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装										
ギャップ型 (新)	20		0.81					20.0	22.0	21.0 ~ 35.0 (一部53.0)
〃 (旧)	20		0.68							
密粒アスコン	20		0.77							
トベカ	20		0.72							

表-3.9 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道14号線一之江橋東京側

測定月日 S 40. 9. 27

道路研究室

測定条件 アスファルト舗装の測定

試験車 大型道路試験車

オーバークレイ後追突事故が多発したので。

主要結果 少し小さいがそれほど悪くはない。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装 (ト ベ カ)	50	上り 0.94 下り 0.95	0.94 0.93	0.94 0.94				25.0 ~ 26.0	36.0	26.5 ~ 60.0
	50				上り 0.48 下り 0.42	0.48 0.41	0.48 0.42 0.45	25.2	31.0	31.0

表-3.10 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 首都高速道路

測定月日 S 40. 7. 5

道路研究室

測定条件 首都高速道路4号線のトンネル付近がすべりやすくなったので状況を測定した。降雨による自然湿潤

試験車 大型道路試験車

主要結果 非常にすべりやすい路面である。(カルシウムの影響)

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗 装 4号線下り方向一霞ヶ関										
千代田トンネル入った所	40				0.35 0.39 0.37	0.33 0.36 0.36	0.34 0.38 0.36			
霞ヶ関方向に分岐した所	40				0.55	0.44	0.50			
三宅坂合流点先(ルーバーの下) 4号線上り方向 新宿→羽田	40				0.29 0.44	0.26 0.36	0.28 0.40 0.34			
千代田トンネル入口	40				0.40 0.24	0.41 0.18	0.41 0.21 0.31			
平河町ルーバー下	40				0.31 0.24	0.30 0.23	0.31 0.24 0.27			
半蔵門合流点手前	40				0.22 0.24	0.28 0.26	0.25 0.25 0.25			
半蔵門合流点部分	40				0.11 0.19	0.22 0.20	0.17 0.20 0.18			
千代田トンネル 羽田側出口付近					0.37 0.37 0.40	0.33 0.33 0.38	0.35 0.35 0.39 0.36			

表-3.11 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 首都高速道路

道路研究室

測定月日 S 40. 11. 30

測定条件 首都高速道路, 4号線トンネル部分すべり対策の効果を知るため。

試験車 大型道路試験車

主要結果 エメリーの効果がよく表われている。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート 舗装 千代田トンネル内上り 霞ヶ関合流点の先	50							13.0	乾燥 12.3	15.0
A 種 対 策 1 回			0.88		0.57					~
2 回			1.02		0.59					
			0.86		0.65					
3 回			0.86		0.57				湿潤 11.5	25.0
			0.99		0.59					
			0.99		0.63					
平 均			0.91		0.57					
			0.91		0.57					
			0.91	0.93	0.61		0.59			
同上地点 B 種 対 策	50		0.94		0.86			13.0	乾燥 12.5	15.0
			0.91		0.84				湿潤 11.7	~
			0.83	0.89	0.88		0.86			25.0
同上地点 C 種 対 策	50		0.86		0.84			13.0	乾燥 12.7	15.0
			0.83		0.84				湿潤 11.8	~
			0.96	0.88	0.75		0.81			25.0
同上地点 普通コンクリート路面 (無処理, 良好路面)	50		0.96		0.48			13.0		15.0
			1.02		0.46					~
			0.91		0.48					25.0
			1.02		0.36					
			0.99		0.46					
			0.91	0.97	0.42		0.44			
コンクリート 舗装 千代田トンネル内, 上り 霞ヶ関合流点付近	50		0.91		0.54			13.0	乾燥 13.1	15.0
A 種 対 策			0.78		0.50				湿潤 12.6	~
			0.86	0.84	0.50					25.0
			0.75		0.54					
			0.91		0.52					
同上地点 B 種 対 策	50		0.80		0.88			13.0	乾燥 12.8	15.0
			0.72		0.75				湿潤 12.3	~
			0.78	0.77	0.88		0.84			25.0
同上地点 C 種 対 策	50		0.88		0.78			13.0	乾燥 12.5	15.0
			0.78		0.78				湿潤 11.9	~
			0.80	0.82	0.80		0.79			25.0
同上地点 普通コンクリート路面 (良好路面, 無処理)	50		0.75		0.52			13.0		15.0
			0.80		0.54					~
			0.70	0.75	0.50		0.52			25.0

但し A種対策とは、塩酸 50kg/100m² を散布し散水して洗い流したもの。B種対策とは、エポキシ樹脂下塗り 0.5kg/m², 上塗り 1.3kg/m² 骨材エメリー径 2.5以下のものを5kg/m² 散布。C種対策とは、エポキシ樹脂下塗り 0.5kg/m², 上塗り 1.3kg/m² 骨材エメリー 60%, シノパール (径 5~2.5mm) 40%のものを 5kg/m² 散布。

表-3.12 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道13号線山形管内

道路研究室

測定月日 S 41. 2. 27

測定条件 すべり止め舗装の効果

試験車 トヨタライトバン
スノータイヤ
チェーンなし

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
ガラコート入りすべり止め工	30			0.70				±0.0		
のぞきトンネル付近				0.75						

表-3.13 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線埼玉県大宮一吹上間

道路研究室

測定月日 S 41. 4. 4

測定条件 アスコンの舗設直後のすべり抵抗値を得るため(2月未完)

降雨中の測定である。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト	20				0.84	0.85	0.85	10.5	12.0	14.0
コンクリート	40				0.73	0.67	0.70	"	"	"
	60				0.60	0.64	0.62	"	"	"

表-3.14 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線三国峠北測

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 7 曇

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の効果測定

試験車 大型道路試験車

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト舗装	20	0.788	0.824		0.748					
		0.759	0.857		0.818					
		0.818	0.824		0.788					
ギャップ型	平均	0.788	0.835	0.812	0.785		0.785	乾	乾	
S 39 年 施 工	40	0.818	0.791		0.642			13.0	22.0	
		0.759	0.692		0.672					
		0.759	0.725		0.613					
	平均	0.779	0.736	0.757	0.642		0.642	湿	湿	
								12.0	16.5	
	60	0.788	0.692		0.526					
		0.730	0.725		0.555					
		0.818	0.725		0.526					
	平均	0.779	0.714	0.746	0.536		0.536			

表-3.15 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線三國峠北側

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 7 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 密粒度アスコン S 38 年 施工部分	20	0.905	0.758		0.672					
		0.759	0.725		0.788					
		0.788	0.791		0.730					
	平均	0.817	0.758	0.788	0.730		0.730	乾	乾	
								13.0	22.0	
	40	0.818	0.791		0.642					
		0.864	0.791		0.642					
	平均	0.831	0.791	0.816	0.642		0.642	湿	湿	
	60	0.818	0.725		0.584					
		0.788	0.725		0.526					
		0.759	0.758		0.584					
	平均	0.786	0.736	0.762	0.565		0.565	12.0	16.5	

表-3.16 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線三國峠北側

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 7 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の効果測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 ギャップ型 S 40 年 施工	20	0.788	0.824		0.758					
		0.759	0.778		0.758					
		0.759	0.804		0.818					
	平均	0.769	0.802	0.785	0.779		0.779	乾	乾	
								13.0	22.0	
	40	0.788	0.758		0.642					
		0.759	0.791		0.642					
	平均	0.701	0.791		0.642		0.642	湿	湿	
	60	0.749	0.780	0.765	0.642					
								12.0	16.5	
		0.759	0.692		0.642					
		0.642	0.758		0.496					
		0.759	0.791		0.526					
	平均	0.720	0.747	0.734	0.555		0.555			

表-3.17 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線、上越火打道路

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 7 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の効果測定
主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 (苗場スキー場前) ギャップ型 S 40 年 施工 アスファルト 6.5% 石 粉 13.0%	20	0.876			0.837					
		0.876			0.905					
		0.876			0.876					
	平均	0.876		0.876	0.872		0.872	乾	乾	
								12.0	19.0	
	40	0.847			0.712					
		0.847			0.712					
	平均	0.876		0.857	0.730		0.718	湿	湿	
	60	0.857			0.718					
								12.0	16.5	
		0.818			0.572					
		0.818			0.496					
		0.847			0.584					
	平均	0.828		0.828	0.551		0.551			湿
										20.0

表-3.18 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越元橋道路

測定月日 S 41. 6. 7 曇

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20	0.876			0.876					
		0.876			0.759					
ブレ コ ー ト		0.876			0.788					
	平均	0.876		0.876	0.808		0.808	乾	乾	
S 40 年 施 工	40	0.876			0.689					
		0.818			0.602					
アスファルト 9.0%		0.847			0.654			湿	湿	湿
	平均	0.847		0.847	0.648		0.648	湿	湿	湿
石 粉 9.1%	60	0.818			0.584			12.0	15.0	20.0
		0.818			0.672					
		0.818			0.584					
	平均	0.818		0.818	0.613		0.613			

表-3.19 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越、元橋道路

測定月日 S 41. 6. 7 曇

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20	0.876			0.934					
		0.829			0.923					
密 粒 ア ス コ ン		0.829			0.923					
	平均	0.845		0.845	0.927		0.927	乾	乾	
アスファルト 6.5%	40	0.788			0.613			12.0	19.0	
		0.818			0.172					
石 粉 12.2%		0.818			0.672					
	平均	0.808		0.808	0.652		0.652	湿	湿	湿
		0.847			0.537			12.0	15.0	20.0
		0.788			0.572					
		0.788			0.572					
	平均	0.808		0.808	0.560		0.560			

表-3.20 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越二居道路

測定月日 S 41. 6. 8 晴

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト、すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20	0.921	0.937		0.890	0.833				
		0.921	0.937		0.798	0.916				
S 39 年 施 工		0.921	0.972		0.860	0.937				
	平均	0.921	0.949	0.935	0.849	0.895	0.872	乾	乾	
シートアスファルト	40	0.829	0.902		0.688	0.659		19.0	33.0	
		0.890	0.868		0.675	0.659				
		0.829	0.902		0.706	0.659		湿	湿	湿
	平均	0.849	0.891	0.870	0.690	0.659	0.674	19.0	33.0	

表-3.21 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線, 上越三保道路

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 8 晴

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20	0.921	0.895		0.829	0.833		乾	乾	
		0.860	0.833		0.847	0.937				
ガムファルト	平均	0.798	0.798		0.847	0.939				
		0.860	0.842	0.851	0.841	0.902	0.872	22.2	31.5	
S 40 年 施 工	40	0.847	0.868		0.768	0.784		湿	湿	29.5
		0.860	0.798		0.737	0.763				
アスファルト 5.5%	平均	0.829	0.798		0.675	0.763				
		0.845	0.821	0.833	0.725	0.770	0.748	23.0		
石 粉 9.5%	60	0.829	0.833		0.565	0.729				
		0.829	0.798		0.583	0.625				
	平均	0.829	0.833		0.540	0.659				
		0.829	0.821	0.825	0.563	0.671	0.617			

表-3.22 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線三保道路

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 8 晴

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20	0.798	0.833		1.044	0.972		乾	乾	35.0
		0.829	0.902		0.982	1.041				
密粒アスコン	平均	0.768	0.833		0.970	1.006				
		0.798	0.856	0.827	0.999	1.006	1.003	24.5		
S 40 年 施 工	40	0.829	0.798		0.737	0.777		湿	湿	33.0
		0.737	0.798		0.737	0.798				
アスファルト 6.5%	平均	0.798	0.798		0.737	0.763				
		0.788	0.798	0.793	0.737	0.779	0.758	25.0		
石 粉 14.0%	60	0.768	0.798		0.614	0.521				
		0.768	0.763		0.491	0.576				
	平均	0.798	0.798		0.491	0.555				
		0.778	0.786	0.782	0.532	0.551	0.541			

表-3.23 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越神立道路

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 8 晴

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗 装	20	0.872	0.868		0.952	0.937		乾	乾	34.5
		0.878	0.868		0.921	0.937				
ポリベープ	平均	0.860	0.972		0.872	0.854				
		0.870	0.903	0.886	0.915	0.909	0.912	2.0		
S 40 年 施 工	40	0.817	0.833		0.553	0.694		湿	湿	35.0
		0.860	0.833		0.614	0.659				
アスファルト 6.5%	平均	0.798	0.902		0.645	0.659				
		0.825	0.856	0.840	0.604	0.671	0.637	21.5		
石 粉 13.0%	60	0.860	0.833		0.491	0.521				
		0.798	0.819		0.461	0.521				
	平均	0.798	0.833		0.430	0.486				
		0.819	0.828	0.824	0.451	0.509	0.485			

表-3.24 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越塩沢第二

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 6. 8 午後晴

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 S 40 年 施工 修正トベカ	20	0.890	0.857		0.933	0.857		乾 26.0	乾 44.0	
		0.933	0.844		0.921	0.857				
		0.921	0.791		0.890	0.791				
	平均	0.913	0.831	0.873	0.915	0.835	0.875			
アスファルト 8% 石 粉 11.8%	40	0.860	0.824		0.645	0.593		湿 26.0	湿 40.0	
		0.890	0.791		0.645	0.593				
		0.829	0.791		0.614	0.613				
	平均	0.859	0.803	0.831	0.635	0.599	0.617			
	60	0.860	0.758		0.583	0.461				
		0.860	0.758		0.571	0.474				
		0.737	0.692		0.503	0.474				
	平均	0.819	0.736	0.777	0.552	0.470	0.511			

表-3.25 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越四十日

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 6. 8 午後晴

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 シートアスファルト S 37 年 砂利使用施工	20	0.768	0.791		0.829	0.791		乾 24.5	乾 40.0	
		0.768	0.758		0.860	0.738				
		0.768	0.725		0.921	0.824				
	平均	0.768	0.758	0.763	0.870	0.784	0.827			
	40	0.798	0.758		0.663	0.560		湿 23.5	湿 34.0	
		0.798	0.725		0.645	0.627				
		0.798	0.725		0.663	0.560				
	平均	0.798	0.836	0.767	0.657	0.549	0.603			
	60	0.737	0.725		0.528	0.395				
		0.737	0.725		0.522	0.395				
		0.737	0.692		0.479	0.349				
	平均	0.737	0.714	0.726	0.503	0.379	0.445			

表-3.26 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越5日町

道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定月日 S 41. 6. 8 午後晴

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 修正トベカ S 40 年 施工	20	0.829	0.890		0.921	0.923		乾 24.5	乾 40.0	
		0.860	0.857		0.909	0.909				
		0.798	0.857		0.872	0.857				
	平均	0.829	0.868	0.849	0.901	0.896	0.899			
アスファルト 8.0% 石 粉 13.0%	40	0.768	0.804		0.632	0.659		湿 23.5	湿 34.0	
		0.879	0.824		0.583	0.659				
		0.737	0.890		0.583	0.593				
	平均	0.778	0.839	0.809	0.599	0.637	0.618			
	60	0.860	0.791		0.430	0.461				
		0.663	0.725		0.430	0.461				
		0.860	0.857		0.565	0.496				
	平均	0.794	0.791	0.793	0.475	0.473	0.474			

表-3.27 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 17号線上越大和町

測定月日 S 41. 5. 9 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 シートアスファルト S 39 年 施工	20	0.908	0.937		0.786	0.833		乾 21.7 湿 20.0	乾 24.5 湿 22.4	開始時 22.5
		0.890	0.902		0.860	0.833				
		0.860	0.833		0.768	0.833				
	平均	0.886	0.890	0.888	0.805	0.833	0.819			
	40	0.921	0.833		0.614	0.659				
		0.890	0.833		0.706	0.625				
		0.786	0.902		0.725	0.590				
	平均	0.866	0.856	0.861	0.682	0.625	0.653			
	60	0.798	0.868		0.491	0.416				
		0.798	0.833		0.503	0.403				
	平均	0.798	0.833		0.522	0.416				
		0.798	0.845	0.821	0.505	0.412	0.459			

表-3.28 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 17号線上越十日町

測定月日 S 41. 6. 9 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト 舗装 修正トベカ アスファルト 80% 石 粉 13.0%	20	0.921	0.937		0.829	0.694		乾 20.5 湿 19.8	乾 25.0 湿 23.0	
		0.921	0.937		0.860	0.763				
		0.798	0.868		0.810	0.833				
	平均	0.880	0.914	0.897	0.833	0.763	0.798			
	40	0.909	0.819		0.663	0.625				
		0.860	0.833		0.626	0.590				
		0.768	0.868		0.626	0.625				
	平均	0.846	0.840	0.843	0.638	0.613	0.626			
	60	0.890	0.833		0.491	0.437				
		0.798	0.798		0.503	0.416				
	平均	0.798	0.833		0.491	0.416				
		0.798	0.821	0.810	0.495	0.423	0.459			

表-3.29 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定場所 17号線上越堀之内 (すべり止め工)

測定月日 S 41. 6. 9 曇

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルト, すべり止め舗装の効果測定

主要結果 良好である。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
すべり止め 舗装 エポキシ樹脂 シリカサンド 混合接着	30	0.860	0.902		0.768	0.833		21.7	23.0	
				0.881			0.805			

表-3.30 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 17号線上越国道
試験車 大型道路試験車

測定年月日 S 42. 7. 25~28

測定条件 舗装の種類別すべり摩擦係数

付表 上越国道管内 舗装種類

主要結果

測定場所	乾湿別 速度		乾			湿			潤		
	20km/h	40km/h	60km/h	路面温度	外気温度	20km/h	40km/h	60km/h	路面温度	外気温度	
1	0.818	0.784	0.773	40°C~45°C		0.785	0.595	0.533	22.0°C	22.0°C	
2	0.840	0.772	0.829	40°C~45°C		0.824	0.638	0.628	25.7°C	24.5°C	
3	0.835	0.767	0.829	40°C~45°C		0.843	0.710	0.595	25.9°C	24.0°C	
4	0.801	0.829	0.842	40°C~45°C		0.828	0.689	0.576	27.0°C	25.5°C	
5	0.818	0.824	0.812	40°C~45°C		0.822	0.613	0.595	29.0°C	23.0°C	
6	0.858	0.868	(50km/h)0.823	40°C~45°C		0.779	0.647	0.570	27.8°C	28.0°C	
7	0.835	0.818		40°C~45°C		0.754	0.596		28.7°C	27.0°C	
8	0.852	0.818	0.829	40°C~45°C		0.792	0.685		28.0°C	27.0°C	
9	0.829	0.796	0.881	40°C~45°C		0.780	0.608	0.582	29.0°C	26.0°C	
10	0.922	0.817	0.891	34.0°C	30.0°C	0.734	0.640	0.413	33.0°C	30.5°C	
11	0.907	0.907		39.5°C	34.0°C	0.728	0.506		37.0°C	31.5°C	
12	0.888	0.833	0.870	40.0°C	34.0°C	0.595	0.513	0.431	37.5°C	31.0°C	
13	0.919	0.901	0.847	40.0°C	35.0°C	0.690	0.570	0.456	38.0°C	31.0°C	
14	0.966	0.914	0.895	41.0°C	36.0°C	0.678	0.570	0.462	39.5°C	32.5°C	
15		0.888	0.882	40.5°C	35.0°C	0.700	0.551		41.0°C	32.5°C	
16	0.957	0.896	0.939	40.0°C	35.5°C	0.705	0.571	0.483	41.0°C	33.0°C	
17	0.960	0.919	0.882	39.5°C	34.0°C	0.732	0.636	0.449	43.0°C	33.5°C	
18	0.945	0.895	0.882	44.0°C	36.0°C	0.711	0.544	0.449	40.0°C	32.5°C	
19	0.934	0.870	0.913	44.0°C	35.5°C	0.721	0.590	0.454	41.0°C	33.5°C	
20	0.951	0.852	0.866	43.5°C	35.5°C	0.735	0.512	0.494	40.0°C	34.0°C	
21	0.908	0.851	0.858	40.5°C	34.0°C	0.665	0.552	0.425	39.0°C	34.0°C	
22	0.920	0.870	0.839	42.0°C	37.0°C	0.692	0.630	0.544	39.0°C	32.0°C	
23	0.926	0.883	0.869	42.5°C	35.0°C	0.636	0.572	0.448	37.0°C	31.5°C	
24	0.913	0.864	0.914	39.0°C	34.0°C	0.617	0.563	0.473	37.0°C	33.0°C	
25	0.920	0.827	0.901	41.5°C	35.0°C	0.685	0.557	0.491	39.0°C	33.0°C	
26	0.888	0.833	0.869	36.0°C	35.0°C	0.642	0.527	0.443	35.5°C	34.0°C	
27	0.851	0.788	0.839	36.0°C	35.5°C	0.685	0.571	0.456	37.5°C	34.5°C	
28 I	0.865	0.783	0.820	36.0°C	37.5°C	0.698	0.597	0.462	36.5°C	34.5°C	
28 II	0.880	0.801	0.839	36.0°C	35.0°C	0.645	0.596	0.445	36.5°C	34.5°C	

測定場所	舗装種類	施工年度
1	修正トベカ密粒 ギャップ型	※昭和38年
2	密粒度ギャップ型	39
3	..	40
4	プレコート	40
5	密粒アスコン	40
6	..	39
7	..	39
8	ガムファルト	40
9	密粒アスコン	40
10	..	※39
11	ポリベープ	40
12	密粒アスコン	40
13	修正トベカ	40
14	..	40
15	..	40
16	..	40
17	..	40
18	..	41
19	..	40
20	..	41
21	修正トベカ	37
22	修正トベカ	40~41
23	..	39
24	..	39
25	修正トベカ	40
26	コンクリート	38~39
27	..	40
28(1)	..	39~40
28(2)	..	40

※ 特殊型舗装
.. 同一舗装

路面のすべり抵抗に関する研究(1)

表-3.31 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

測定月日 S 41. 11. 4, 11. 16 夜 道路研究室

試験車 大型道路試験車

測定条件 アスファルトのみのすべり摩擦係数

(B. S. リブタイヤ640-16-4P)

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルトペースト	20			0.538			0.309	9.0 ~ 6.0	14.0 ~ 12.0	11月4日夜 測定
	30			0.489			0.159			
アスファルト(針入度80-100)	40			0.480			0.111			
	50			0.467			0.069			
	60			0.447			0.073			
と石粉を1:1に混合し舗設したもの	20						0.321			11月16日夜 測定
	40						0.180			
	60						0.142			

表-3.32 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

測定月日 S 41. 11. 4, 11. 16 夜 道路研究室

測定条件 (B. S. リブタイヤ 640-16-4p)

試験車 大型道路試験車

セメントペーストのすべり摩擦係数

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
セメントペースト	20			0.513			0.389	9.0 ~ 6.0	11.5	11月4日夜 測定
	30			0.472			0.368			
(セメントのみ水混合舗設)	40			0.475			0.302			
	50			0.501			0.247			
	60			0.519			0.234			
w/c = 0.5	20						0.457	7.1	11.0 ~ 11.3	11月16日夜 測定
	40						0.392			
	60						0.274			

表-3.33 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

測定月日 S 41. 11. 8 道路研究室

測定条件 各種接着式すべり止め舗装の効果測定

試験車 大型道路試験車

主要結果 モルタルのみの所は小さい。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
シリカサンド 1.25mm	20			0.659			0.642	19°C	乾燥 18.0 ~ 22.0 湿潤 23.5	
	40			0.579			0.575			
	60			0.524			0.442			
シリカサンド 2.5mm	20			0.713			0.659			
	40			0.664			0.609			
	60			0.581			0.487			
エメリー 1.25mm	20			0.809			0.795			
	40			0.628			0.729			
	60			0.564			0.613			
エメリー 5.0mm	20			0.767			0.971			
	40			0.665			0.707			
	60			0.589			0.615			
マイシールモルタル 上にシリカサンド 0.5mm	20			0.840			0.665			
	40			0.686			0.518			
	60			0.578			0.426			
マイシールモルタル	20			0.798			0.384			
	40			0.635			0.329			
	60			0.542			0.279			

表-3.34 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 6号線 金町バイパス 新葛飾橋

道路研究室

測定月日 S 41. 12. 21

試験車 大型道路試験車

測定条件 すべり止め舗装の効果測定

560-13-6 P リブタイヤ

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
散布式 (硬質砂岩 5~10mm) タックコート s.t. as 80-100 0.86/m ² { プレコート碎石 5~10mm } 石 粉 96% アスファルト 2% 14kg/m ² 0.01m ³ /m ²	20	0.844	0.831	0.838	0.645	0.646	0.646	乾燥 5.2~ 6.0°C 湿潤 6.1~ 7.0°C	6.0°C	
	40	0.744	0.711	0.728	0.572	0.572	0.572			
	60	0.763	0.738	0.751	0.527	0.554	0.541			
散 布 式 (軟質砂岩) 同 上	20	0.799	0.785	0.792	0.617	0.646	0.632			
	40	0.726	0.701	0.714	0.499	0.535	0.517			
	60	0.772	0.738	0.755	0.554	0.545	0.550			
粗粒度混合式 (硬砂岩) 5m/m 100 2.5 20~30 0.074 2~4 s.t. As 80~100 5~6%	20	0.799	0.766	0.783	0.654	0.701	0.678			
	40	0.753	0.720	0.737	0.481	0.526	0.504			
	60	0.772	0.738	0.755	0.499	0.545	0.522			
粗粒度混合式 (軟質砂岩) 同 上	20	0.781	0.748	0.765	0.681	0.701	0.691			
	40	0.699	0.692	0.696	0.617	0.618	0.618			
	60	0.699	0.692	0.696	0.645	0.628	0.637			
モルタル混合式 (川砂) 5m/m 100% 2.5 90~100 0.6 60~90 0.15 5~2.5 0.074 3~8 s.t. As 80~100 8~9%	20	0.817	0.803	0.810	0.772	0.766	0.769			
	40	0.781	0.748	0.764	0.654	0.674	0.664			
	60	0.799	0.785	0.792	0.563	0.535	0.549			
モルタル混合式 (シリカサンド) 同 上	20	0.835	0.821	0.828	0.536	0.526	0.531			
	40	0.808	0.794	0.801	0.436	0.434	0.435			
	60	0.690	0.674	0.682	0.345	0.323	0.334			
ディツクシール (川砂) 10m/m 100% 5 85~100 2.5 65~85 0.6 25~50 0.3 15~33 0.15 5~20 0.074 3~8 ディツクバインダー A 800 7~8%	20	0.826	0.812	0.819	0.781	0.757	0.769			
	40	0.817	0.785	0.801	0.572	0.600	0.586			
	60	0.781	0.757	0.769	0.481	0.517	0.494			
ディツクシール (シリカサンド) 同 上	20	0.862	0.831	0.847	0.726	0.720	0.723			
	40	0.772	0.757	0.765	0.608	0.609	0.609			
	60	0.708	0.683	0.796	0.508	0.480	0.494			
一般アスコン舗装 (橋梁外)	20	0.853	0.831	0.842	0.635	0.637	0.636			
	40	0.799	0.766	0.783	0.463	0.425	0.444			
	60	0.763	0.738	0.751	0.399	0.397	0.398			

表-3.35 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路, シリカサンド (マイシール)

道路研究室

測定月日 S 41. 12. 26

試験車 大型道路試験車

測定条件 シリカサンド接着舗装の効果測定

(560-13-6P リブタイヤ)

主要結果 摩擦係数は大きい。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
シリカサンド接着 (鋼板上に接着した)				0.765			0.757	4.0°C	6.8°C	
				0.668			0.722	~	~	
マイシール 1.4 kg/m ²				0.690			0.724	7.0°C	8.2°C	
珪砂 (1.2m/m 以下) 2 kg/m ²				0.689			0.612			

表-3.36 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 41. 12. 26

試験車 大型道路試験車

測定条件 すべり止め舗装の効果測定

(560-13-6P, リブタイヤ)

主要結果 摩擦係数は大きい。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
アスファルト	20			0.760			0.699	4.0°C	6.8°C	
コンクリート	40			0.717			0.701	~	~	
すべり止め舗装	60			0.739			0.629	7.0°C	8.2°C	
(鋳物鉄板上に舗設)	80			0.759			0.625			
長 津 田 ア ス フ ァ ル ト コ ン ク リ ー ト 舗 装	No. 9	20 40 60					0.657 0.579 0.586	18°C ~ 19°C	19°C	
	No. 10	20 40 60					0.651 0.566 0.557			
	No. 13	20 40 60					0.649 0.565 0.557			
	No. 14	20 40 60					0.627 0.564 0.527			
	No. 15	20 40 60					0.702 0.568 0.527			
	No. 16	20 40 60					0.720 0.527 0.557			
	No. 11	20 40 60					0.727 0.601 0.527			
	No. 12	20 40 60					0.712 0.593 0.527			

表-3.37 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 246号線 長津田試験舗装

道路研究室

測定月日 S 41. 9. 21 晴

試験車 大型道路試験車

測定条件 各種すべり止め比較舗装の経年の測定 (第1回舗装直後)

主要結果

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
ア ス フ ァ ル ト コ ン ク リ ー ト 舗 装	No. 5	20 40 60					0.742 0.613 0.557	18~ 19°C	19°C	
	No. 6	20 40 60					0.742 0.628 0.557	"	"	
	No. 7	20 40 60					0.763 0.632 0.557	"	"	
	No. 8	20 40 60					0.736 0.619 0.527	"	"	
	No. 3	20 40 60					0.730 0.645 0.557	"	"	
	No. 4	20 40 60					0.731 0.634 0.557	"	"	
	No. 1	20 40 60					0.680 0.575 0.557			
	No. 2	20 40 60					0.674 0.607 0.586			
	No. 9	20 40 60		0.707 0.668 0.682			0.642 0.566 0.532			
	No. 10	20 40 60		0.699 0.688 0.687			0.669 0.578 0.495			
	No. 13	20 40 60		0.698 0.665 0.666			0.657 0.565 0.511			
	No. 14	20 40 60		0.700 0.679 0.694			0.641 0.565 0.528			
	No. 15	20 40 60		0.721 0.717 0.653			0.641 0.553 0.418			
	No. 16	20 40 60		0.752 0.740 0.697			0.677 0.564 0.445			
	No. 11	20 40 60		0.747 0.735 0.698			0.660 0.542 0.414			
	No. 12	20 40 60		0.750 0.708 0.723			0.675 0.544 0.413			
	一般舗装	20 40 60		0.801 0.728 0.652			0.650 0.526 0.422			

246 号 線 長津田試験舗装配合表

路番 面号	12	11	16	15	14	13	10	9	2	1	4	3	8	7	6	5	
粗 骨 材	硬 砂 岩									石 灰 岩							
細 骨 材	川 砂		ス ク リ ー ニ ン グ ス				川 砂										
粒 度	密 粒 度				開 粒 度								密 粒 度				
最粒 大径	15 mm										5 mm			15 mm			
フ イ ラー %	規 定 量 8 %		規 定 量 8 %		規 定 量 5 %				7 %	5 %	7 %	5 %	14 %	12 %	8 %	6 %	
ア ル ス ト フ ァ %	5.5 %	5.8 %	5.5 %	5.8 %	4.0 %	3.7 %	3.7 %	4.0 %	4.0 %	4.0 %	4.3 %	4.3 %	6.8 %	6.8 %	5.8 %	5.8 %	
東 京	480 m														30m		沿 道
															60m		

表-3.38 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 246号線 長津田試験舗装

道路研究室

測定月日 S 41. 11. 11~12 晴

試験車 大型道路試験車

測定条件 各種すべり止め比較舗装の経年的測定 (第2回測定)

主要結果

道 路 舗 装 種 別		走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
			左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
ア ス フ ア ル ト コ ン ク リ ー ト 舗 装	No. 5	20 40 60			0.714 0.683 0.785			0.597 0.513 0.442	乾燥 13.0 ~ 13.5°C	乾燥 14.0 ~ 15.0	
	No. 6	20 40 60			0.725 0.698 0.709			0.566 0.485 0.416			
	No. 7	20 40 60			0.755 0.737 0.723			0.626 0.539 0.459			
	No. 8	20 40 60			0.787 0.727 0.747			0.640 0.504 0.406	湿潤 17.0 ~ 20.0	湿潤 18.0 ~ 21.0	
	No. 3	20 40 60			0.741 0.701 0.658			0.618 0.516 0.414			
	No. 4	20 40 60			0.742 0.678 0.731			0.631 0.523 0.435			
	No. 1	20 40 60			0.690 0.663 0.642			0.598 0.499 0.380			
	No. 2	20 40 60			0.686 0.664 0.651			0.595 0.504 0.406			

表-3.39 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 1号線 西湘道路

道路研究室

測定月日 S 41. 6. 27

試験車 大型道路試験車

測定条件 各種すべり止め舗装の比較

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾燥(縦)			湿潤(縦)			温度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
1号線 大磯 オープングレイド	40			0.775			0.494		33.0°C	
	70			0.835						
北浜 オープン	40			0.695			0.741			
	70			0.826						
西湘道路 オープン	40			0.685			0.782			
	70			0.734						
西湘道路 細粒	40			0.798			0.732			
	70			0.992						

表-3.40 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 九州, 国道10号線

道路研究室

測定月日 S 42. 9. 2

試験車 大型道路試験車

測定条件 すべり止め舗装の比較試験

主要結果 湿潤時明瞭な差がでている。

No.	普通路面 (As)		すべり止め路面		温度 (°C)		摘 要
	40 km/h	60 km/h	40 km/h	60 km/h	路面	外 気	
A	0.515		0.713		43.5	35.0	No. 62 付近
B	0.386		0.455		37.5	31.0	No. 45 付近
D	0.399		0.618		"	"	"
E	0.553		0.637		40.0	33.0	山 碑
F	0.556		0.654		"	"	"
G	0.552		0.641		"	"	"
H	0.504		0.641		"	"	"
I	0.491		0.572		"	"	"
J	0.540		0.625		"	"	エメリー
K	0.519		0.629		"	"	"
L	0.487		0.629		"	"	"
M	0.529		0.556		"	"	山 碑
N		0.396		0.476	44.0	35.0	エメリー
O		0.385		0.437	"	"	山 碑
P		0.419		0.490	"	"	"
Q		0.356		0.474	"	"	"
R		0.392		0.559	"	"	"
S		0.417		0.575	"	"	"
T		0.392		0.555	"	"	"
U		0.501		0.580	"	"	"
V		0.383		0.609	"	"	"

(注) No. E~V は宗太郎すべり止め区間。

測定値はいずれも湿潤時のすべり摩擦係数である

(4) 地建管内道路のすべり摩擦係数の現況

表-4.1 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 九州, 国道3号線

道路研究室

測定月日 S 42. 3. 4~6

測定条件 地建管内の実状調査

試験車 大型道路試験車

主要結果

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度(°C)		備 考
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
1	As すべり止め	S 40			(50) 0.528			42. 3. 4
2	Co	S 36	0.601	0.469		14.5	15.0	
3	"	S 40	0.724	0.616	(50) 0.599	13.5	15.0	
4	"	S 31	0.633	0.498		15.5	15.0	
5	"	S 35		0.490	0.442	14.5	13.0	
6	As 密粒度アスコン	S 39	0.843	0.621	0.533	14.5	13.5	
a	"	S 39		0.675	(55) 0.604	14.5	13.0	
7	As すべり止め	S 40	0.812	0.692	(50) 0.657	13.5	13.5	
8	As 密粒度アスコン	S 34	0.933	0.690		14.5	14.0	
9	"	S 40	0.843	0.638	0.497	14.5	15.0	
10	"	S 38		0.693	(50) 0.551	14.5	15.0	
b	"	S 32		0.631	(50) 0.559	15.0	15.0	
11	"	S 32		0.613	0.551	14.5	14.0	
12	"	S 39		0.625	(50) 0.532	14.5	14.0	
13	"	S 32	0.777	0.641	0.523	14.5	15.0	
14	"	S 32	0.726	0.599	0.532	16.2	17.0	
15	"	S 40		0.709	0.473	16.0	14.0	
16	As すべり止め	S 40		0.599	0.570	14.0	13.0	
c	As 密粒度アスコン	S 36	0.810	0.641	0.498	14.5	14.0	
17	"	S 38	0.901	0.701	0.557	15.0	14.0	
18	"	S 40		0.743	0.641	15.0	14.0	
19	"	S 41	0.962	0.760	0.616	15.0	15.0	
20	Co	S 33		0.582	0.532	15.0	15.0	
d	As 密粒度アスコン	S 37		0.751	0.641	14.8	15.5	
d'			0.878	0.667		15.0	15.5	
e	As 密粒度アスコン	S 37	0.912	0.768	0.650	15.5	15.0	
21	"	S 36		0.667	0.616	14.5	14.0	
22	"	S 36		0.641	0.582	14.0	15.0	
23	As 密粒度アスコン	S 37	0.785	0.641	0.506	14.5	15.0	42. 3. 5

表-4.1 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度(°C)		備 考
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
24	Co	S 34	0.726	0.633	0.557	11.5	13.0	42. 3. 5
25	As 密粒度アスコン	S 36	0.733	0.608	0.532	11.0	13.0	
26	"	S 37	0.798	0.679	0.590	12.0	12.0	
27	Co	S 40	0.798	0.720	0.612	10.0	13.0	
28	"	S 40	0.842	0.676	0.520	12.5	13.0	
29	As 密粒度アスコン	S 41	0.821	0.703		13.5	14.0	
30	Co	S 29	0.702	0.559		13.5	13.5	
31	修正トベカ	S 33	0.841	0.657	(50) 0.559	14.5	15.0	
32	As すべり止め	S 41	0.772	0.580	0.586	14.2	14.0	
33	"	S 41	0.782	0.621	0.559	13.5	12.0	
34	As 密粒度アスコン	S 35	0.763	0.595	0.453	14.0	13.0	
35	"	S 35	0.730	0.593	0.438	15.0	12.0	
36	Co	S 29	0.785	0.657	0.511	15.5	14.0	
37	"	S 34	0.767	0.698	0.548	15.0	13.0	
38	As 密粒度アスコン	S 40	0.794	0.630	0.493	17.0	12.5	
39	"	S 41	0.774	0.596	0.508	16.0	13.0	
40	As すべり止め	S 41	0.801	0.586	0.534	14.5	12.0	
41	"	S 41	0.819	0.622	0.534	15.0	12.0	
42	As 密粒度アスコン	S 40	0.801	0.650	0.542	12.5	12.8	
43	As すべり止め	S 40	0.809	0.676		15.5	13.2	
44	"	S 40	0.819	0.676		15.5	13.0	
45	Co	S 39	0.862	0.668	0.634	9.0	7.0	42. 3. 6
46	"	S 33	0.828	0.676	0.609	9.0	7.0	
47	"	S 35	0.779	0.626	0.609	10.0	7.0	
48	"	S35~36	0.691	0.659	0.558	8.5	7.0	
48'	"	S 39	0.829	0.668	0.583	11.5	8.0	
49	"	S 34	0.736	0.649	0.616	13.8	8.5	
50	As すべり止め	S 41		0.690		12.0	9.0	
51	As 密粒度アスコン	S 40	0.899	0.765	0.578	18.2	10.0	
52	"	S 40	0.827	0.686	0.560	18.5	10.3	
53	"	S38~39	0.837	0.712		18.0	11.5	
54	"	S 37	0.852	0.722	0.620	18.0	12.0	
55	"	S37~38	0.740	0.630	0.557	19.0	12.0	

表-4.1 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		備 考
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
56	As 密粒度アスコン	S 37	0.749	0.612	0.493	19.5	12.5	42. 3. 6
57	"	S 33~34	0.657	0.516	0.440	19.5	12.5	
58	As すべり止め	S 41		0.715		19.5	13.3	
59	Co	S 34	0.715	0.591	0.524	21.5	13.5	
60	As 密粒度アスコン	S 34~35	0.698	0.649	0.499	21.0	13.5	
61	"	S 34~35	0.682	0.557		20.5	12.5	
62	"	S 40	0.806	0.649	0.475	20.2	13.0	
63	As すべり止め	S 38	0.698	0.582	0.512	20.0	13.0	

注 () 内はスピードである。

表-4.2 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 九州, 国道10号線

道路研究室

測定月日 S 42. 8. 29~31

測定条件 地建管内の実状調査

試 験 車 大型道路試験車

主要結果 湿潤時摩擦係数

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
1	As 密粒度アスコン	S 40	0.580	0.419	0.388	34.5	33.5	
2	Co	S 34~36	0.476	0.425	0.387	34.5	34.5	
3	As 密粒度アスコン	S 23	0.525	0.459	0.400	36.5	33.0	
4	Co	S 28	0.609	0.502	0.409	36.5	33.5	
5	"	"	0.557	0.450	0.375	38.0	35.0	
6	As 密粒度アスコン	S 31		0.533	0.387	39.0	33.5	
7	"	"	0.599	0.496	0.393	42.0	34.0	
8	"	S 41	0.612	0.478	0.387	41.5	35.0	
9	"	S 34	0.648	0.486	0.401	40.0	34.0	
10	"	S 39			0.486	44.0	35.5	
11	"	"		0.560	0.421	41.0	33.5	
12	"	S 38			0.427	42.0	35.0	
13	"	"	0.631	0.465		43.5	36.0	
14	"	"		0.441	0.355	43.5	34.5	
15	"	"		0.625	0.413	48.0	37.5	
16	As すべり止め	"		0.460	0.361	44.0	39.0	
17	As 密粒度アスコン	"	0.682	0.568		43.5	37.0	

表-4.2 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
18	As すべり止め	S 40			(50km/h) 0.392	46.0	37.5	
19	"	S 41			(50km/h) 0.347	40.0	35.5	
20	As 密粒度アスコン	S 39			0.398	40.0	35.0	
21	As スラリー	S 40			0.329	41.0	35.0	
22	As オープン	S 41			0.419	39.5	35.0	
23	"	S 42			0.388	40.0	34.5	
24	As 密粒度アスコン	S 37		0.469	0.359	39.0	34.5	
25	"	S 36		0.545	(50km/h) 0.446	41.0	36.5	
26	Co	S 35	0.714	0.527	0.425	40.0	37.0	
27	"	S 34	0.552	0.440	0.338	35.5	34.5	
28	"	S 39	0.604	0.506	0.408	41.5	37.5	
29	As すべり止め	S 40		0.476	0.430	39.5	34.0	
30	Co	S 38			0.427	28.2	30.0	
31	As 密粒度アスコン	S 36		0.576	0.428	41.5	33.5	
32	"	S 36		0.364	0.329	39.5	34.5	
33	"	S 37			(50km/h) 0.413	40.0	33.5	
34	"	S 40			0.418	43.0	35.5	
35	"	"		0.539	0.456	42.5	35.5	
36	"	"			0.404	42.5	36.0	
37	"	"		0.520	0.456	39.5	33.0	
38	"	"			0.383	35.0	34.0	
39	"	"	0.721	0.582	0.464	50.5	37.5	
40	"	S 37			0.434	46.5	35.5	
41	"	"		0.527	0.329	46.5	33.5	
42	Co	"	0.789	0.609	0.501	43.5	36.0	
43	As 密粒度アスコン	S 39		0.644	(55km/h) 0.471	42.0	34.0	
44	"	"		0.561	0.462	43.5	35.0	
45	"	S 40		0.567	0.500	46.0	35.0	
46	"	S 39	0.723	0.561	0.475	45.0	33.0	
47	"	S 40	0.734	0.578	(50km/h) 0.489	43.0	32.0	
48	"	"	0.684	0.557	0.331	46.0	34.0	
49	"	S 41		0.381	0.322	48.5	34.5	
50	"	"		0.530	0.421	45.0	33.0	

表-4.2 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
51	As 密粒度アスコン	S 40	0.724	0.557	0.463	43.5	33.5	
52	"	S 41	0.669	0.567	0.426	42.5	33.5	
53	"	S 40	0.601	0.548	0.440	39.5	32.0	
54	"	"	0.675		0.520	41.5	33.0	
55	Co	S 34	0.583	0.451		37.0	32.5	
56	"	"	0.650	0.491		37.5	32.5	
57	"	S 36	0.637	0.469		36.0	33.0	
58	"	S 37	0.614	0.539	0.403	37.0	33.5	
59	As 密粒度アスコン	S 40	0.716	0.539	0.420	41.0	34.0	
60	"	S 41		0.566	0.522	42.5	34.5	
61	"	"		0.602	(55km/h) 0.539	31.5	33.0	
62	"	S 40	0.788	0.596		43.0	34.5	
63	"	S 40			0.584	43.5	34.5	
64	As スラリーシール	S 41		0.629	0.518	44.5	36.0	
65	As 密粒度アスコン	S 34			(55km/h) 0.634	43.5	36.0	
66	Co	S 33	0.681	0.561	0.471	42.0	35.0	
67	As 密粒度アスコン	S 40	0.514	0.403	(60km/h) 0.343 (70km/h) 0.334	44.0	35.5	
68	"	S 39	0.599	0.518		39.5	34.5	
69	"	S 41		0.429	0.373	45.0	36.0	
70	"	S 40	0.790	0.620	0.504	49.5	36.0	
71	"	"	0.718	0.539	(60km/h) 0.490	47.5	36.5	
72	"	S 39	0.740	0.529	0.489	45.5	36.5	
73	"	S 40	0.748	0.633	0.548	49.0	37.5	
74	"	"	0.769	0.583	0.513	47.5	35.5	
75	"	"	0.721	0.573	0.470	49.0	34.0	
76	"	"	0.686	0.582	0.470	45.0	32.0	
77	"	"	0.718	0.595	0.474	50.0	34.5	
78	"	"	0.757	0.604	0.480	39.0	32.0	
79	Co		0.664	0.518	0.458	39.5	34.0	
80	As 密粒度アスコン	S 40	0.739	0.543	0.424	51.0	36.0	
81	"	"	0.770	0.483	0.461	41.5	35.5	
82	"	S 35	0.784	0.679	0.602	44.0	34.0	

表-4.2 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
83	As 密粒度アスコン	S 35	0.784	0.643		43.0	35.0	
84	"	S 34	0.598	0.384	0.356	44.5	34.5	
85	Co	S 33		0.589	0.465	43.0	32.5	
86	"	"		0.469	0.337	42.5	36.0	
87	"	"	0.672	0.440	(60km/h) 0.391 (55km/h) 0.412	41.5	35.0	
88	"	"	0.597	0.502	0.393	40.5	35.0	
89	"	S 34	0.651	0.489	0.433	41.0	35.0	
90	Co	S 29	0.482	0.525	0.440	40.5	35.0	
91	As		0.580	0.493	0.479	42.5	35.0	
92	Co	S 29		0.450	0.397	40.0	35.0	
93	As		0.608		0.346	42.3	33.5	

表-4.3 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 九州, 国道34号線

測定月日 S 42. 9. 4

道路研究室

測定条件 地建管内の実状調査

試 験 車 大型道路試験車

主要結果 湿潤時摩擦係数

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
94	As 密粒度アスコン	S 35	0.582	0.464	0.429	35.0	32.5	
95	"	"	0.587	0.497		35.5	33.5	
96	Co	S 36		0.511	0.433	34.5	33.0	
97	"	"		0.521	0.428	36.0	34.0	
98	"	"	0.679	0.581	0.467	35.5	33.0	
99	As		0.556	0.489	0.395	36.5	34.0	
100	As		0.513	0.446	0.367	37.5	34.0	
101	As 密粒度アスコン		0.604	0.456	0.383	37.5	35.0	
102	"	S 27	0.525	0.419	0.410	37.5	33.5	
103	"	S 35	0.470	0.369		36.5	34.0	
104	Co	S 30	0.585	0.479	0.429	38.5	35.0	
105	"	S 33	0.607	0.465	0.392	37.5	36.0	
106	"	S 32	0.597	0.461	0.414	37.5	34.0	
107	"	S 33	0.613	0.474	0.444	37.5	35.0	
108	As		0.552	0.427		36.5	35.0	

表-4.3 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
109	Co	S 33	0.524	0.477	0.412	39.5	34.0	
110	"	S 34	0.642	0.529	0.458	39.0	35.0	
111	"	"	0.655	0.506	0.458	38.0	36.0	
112	"	"	0.722	0.539	0.492	35.0	33.5	
113	"	S 35	0.685	0.575	0.447	37.0	35.0	
113'	"	"	0.634	0.548	(55km/h) 0.533	38.5	34.5	
114	As 密粒度アスコン	S 38			0.401	40.0	33.0	
115	"	S 41	0.726	0.593	0.492	40.5	32.5	
116	Co	S 32	0.741	0.562	0.470	39.0	33.0	
117	"	S 33	0.651	0.547		36.5	34.0	
118	"	S 39		0.580	0.453	37.0	34.0	
119	"	S 31	0.708	0.505	0.468	39.5	34.0	
120	As 密粒度アスコン	S 36	0.754	0.615	0.561	37.5	34.0	
121	Co	S 31	0.672	0.553	0.488	38.0	34.0	
122	As すべり止め	S 40		0.499		34.5	33.0	
123	As ワービット	S 34			0.335	35.5	32.0	
124	As 密粒度アスコン	S 40		0.628	0.423	37.5	33.0	
125	"	S 37		0.565	0.437	37.5	33.0	
126	"	S 38	0.652	0.566	0.428	35.5	32.0	
127	"	S 35		0.544	0.400	36.0	32.5	
128	"	S 34	0.677	0.525		36.0	32.0	
129	"	S 31		0.498	0.391	35.0	33.0	
130	"	S 34	0.602	0.466		37.5	32.0	
131	As すべり止め	S 41	0.691	0.557		36.0	32.0	
132	As 密粒度アスコン	S 33	0.630	0.437		33.0	32.0	

表-4.4 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 九州, 国道35号線

測定月日 S 42. 9. 5

道路研究室

測定条件 地建管内の実状調査

試 験 車 大型道路試験車

主要結果 湿潤時摩擦係数

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
133	Co	S 35	0.585	0.480	0.405	37.0	39.0	
134	As 密粒度アスコン	S 40	0.667	0.515	0.386	37.5	37.0	

表-4.4 (つづき)

測定 番号	道 路 舗 装 種 別	施 工 年 度	摩 擦 係 数 (湿潤)			温 度 (°C)		摘 要
			20km/h	40km/h	60km/h	路 面	外 気	
135	As 密粒度アスコン	S 40	0.651	0.552	0.453	41.5	36.5	
136	Co	S 37			0.400	38.5	36.0	
137	〃	S 34	0.614	0.470	0.358	41.0	36.0	
138	As 密粒度アスコン	S 41			(50km/h) 0.404	43.0	36.0	
139	〃	S 37	0.510	0.351		44.0	36.5	
139'	タビサブル	S41~42			(55km/h) 0.349	44.0	36.5	
140	As 密粒度アスコン		0.561	0.335		41.0	36.0	
62	すべり止め			0.641		43.5	35.0	
A	As			0.515		43.5	35.0	
A	すべり止め			0.713		〃	〃	
B'	As			0.546		37.5	31.0	
C	〃			0.539		39.5	34.0	

(5) 特殊路面のすべり摩擦の測定結果

表-5.1 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 38. 12.

測定条件 縞鋼板, 平鋼板の測定

 試験車 大型道路試験車
 タイヤ圧 24ポンド
 輪重 520kg

主要結果 湿潤時には摩擦抵抗が小さくなる

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縞)			湿 潤 (縞)			赤土に水をかけた状態 (3~5 mm)	
		左	右	平均	左	右	平均	平均	
平 鋼 板	15 40 60			0.57 0.59 0.49			0.18 0.19 0.19	0.10 0.08 —	
縞 鋼 板 1.6mm の高さ 37.5mm×3.5mm	15 40 60			0.80 0.61 0.51			0.24 0.19 0.21	0.17 0.15 —	
横 す べ り 10°									
平 鋼 板	15 40 60			0.37 0.41 0.67			0.19 0.21 0.17	0.03 0.04 —	
縞 鋼 板	15 40 60			0.47 0.64 0.62			0.36 0.33 0.32	0.10 0.08 —	
横 す べ り 20°									
平 鋼 板	15 40 60			0.49 0.31 0.43			0.15 0.34 0.08	0.04 0.00 —	
縞 鋼 板	15 40 60			0.62 0.42 0.66			0.29 0.25 0.22	0.10 0.04 —	

表-5.2 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路, 穴あき鋼板 (新)

道路研究室

測定月日 S 39. 10. 15~22

測定条件 仮設道路用の穴あき鋼板の効果をj知るために測定した。新しいもの。

試験車 大型道路試験車

主要結果 湿潤時には摩擦抵抗が小さくなる。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥		湿 潤		温 度		
		縦	横	縦	横	外気温	路面温度	タイヤ温度
穴あき鋼板 (穴φ16mm 高さ4mm) 新しいもの 横 10° 横 20°	15	0.58	0.48 0.57	0.32	0.38 0.33			
	40	0.50		0.27				
横 10° 横 20°	60	0.49	0.46 0.59	0.27	0.33 0.26			
横 10° 横 20°			0.47 0.58		0.32 0.22			

表-5.3 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S 39. 10. 15~22

測定条件 穴あき鋼板との比較のために測定した。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥		湿 潤		温 度		
		縦	横	縦	横	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート舗装 横 10° 横 20°	15	0.50	0.47 0.53	0.54	0.49 0.40			
	40	0.50		0.40				
横 10° 横 20°	60	0.41	0.44 0.51	0.32	0.48 0.40			
横 10° 横 20°			0.46 0.55		0.46 0.39			

表-5.4 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路, 穴あき鋼板
(古いもの)

道路研究室

測定月日 S 39. 10 15~22

測定条件 穴あき鋼板の突出穴のエッジを4mmのものにグラインダーをかけ2.5~3.0mmになったものを測定した。
主要結果 係数値は小さい。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥		湿 潤		温 度		
		縦	横	縦	横	外気温	路面温度	タイヤ温度
穴あき鋼板 (穴φ16mm 高さ2.5~3.0mmけずったもの) 横 10° 横 20°	15	0.55	0.40 0.45	0.29	0.35 0.33			
	40	0.50	0.40 0.46	0.21	0.32 0.30			
横 10° 横 20°	60	0.48	0.40 0.44	0.20	0.30 0.29			

測定場所 土研, 試験走路

表-5.5 路面のすべり摩擦係数測定値

道路研究室

測定月日 S 39. 10. 15~22

測定条件 穴あき鋼板との比較のためにとった。

試験車 大型道路試験車

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥		湿 潤		温 度		
		縦	横	縦	横	外気温	路面温度	タイヤ温度
コンクリート舗装 (鋼板, 湿潤) (グラインダーをかけたもの との比較)	15	0.52		0.54				
	40	0.50		0.40				
	60			0.33				
同 上 (鋼板, 乾燥) (グラインダーをかけたもの との比較)	15	0.46						
	40	0.45						

表-5.6 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 国道17号線三国峠, 浅貝地区

道路研究室

測定月日 S 39. 6. 19

測定条件 砂利道の測定を行った。

試験車 大型道路試験車

山地部砂利道, 浮砂利あり

主要結果

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
砂 利 道	10	0.44	0.41	0.43						
	30	0.44	0.41	0.43						

表-5.7 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路 (鋳物鉄板)

道路研究室

測定月日 S 41. 12. 22

測定条件 鋳物鉄板のすべり止め効果測定

試験車 大型道路試験車

(560-13-6Pリブタイヤ)

主要結果 他の鋼板よりは摩擦係数が多い。

道路舗装種別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
鋳物鉄板 (久保田鉄工)	20			0.596			0.661	9.0 ~ 11.5	14.0 ~ 16.3	
	40			0.658			0.537			
	60			0.661			0.448			
	70			0.660			0.441			
		泥土を散布し, その上に散水したもの						9.0 ~ 10.0	7.5	
	20						0.581			
	40						0.553			
	60						0.385			
	70						0.396			

表-5.8 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路 (凸型鋼板)

道路研究室

測定月日 S 41. 12. 22

測定条件 鋼板に突起をつけ, すべり止め用として製作したものの効果測定

試験車 大型道路試験車

(560-13-6P リブタイヤ)

主要結果 湿潤時の摩擦係数が小さい。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
凸 型 鋼 板 (八 幡 製 鉄)	20			0.601			0.397	9.0 ~ 11.5	14.0 ~ 16.3	
	40			0.642			0.314			
	60			0.694			0.269			
	70			0.695			0.260			
	泥土を散布し、その上に散水したもの。									
	20						0.383	9.0 ~ 10.0	7.5	
	40						0.342			
	60						0.257			
	70						0.237			

表-5.9 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土木研究所管内

道路研究室

測定月日 S 42. 6

測定条件 仮設鋼板のすべり摩擦

試験車 大型道路試験車

主要結果 全体に比較的良好である。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
S 鋼 板 チェッカープレート	20			0.812			0.694	乾 27.0	乾 30.0	
	40			0.744			0.611	湿 28.0	湿 28.0	
	60			0.698			0.428			
S 鋼 板 珪 砂 接 着	20			0.868			0.777	乾 27.0	乾 30.0	
	40			0.824			0.746	湿 28.0	湿 28.0	
	60			0.846			0.706			
S 鋼 板 放 電 加 工	20			0.917			0.674	乾 28.0	乾 35.0	
	40			0.852			0.538	湿 30.0	湿 30.0	
	60			0.835			0.433			
I 型 コンポジットデッキ (コンクリート詰)	20			0.817			0.725	乾 28.0	乾 36.0	
	40			0.766			0.606	湿 27.5	湿 33.0	
	60			0.777			0.595			

表-5.10 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研走路, 中央道西桂

道路研究室

測定月日 S 42.

測定条件 砂を散布したときの摩擦係数の低下状況

試験車 大型道路試験車

ポータブルスキッドテスター

主要結果

その1 すべり摩擦係数値一覧表(乾燥)

散砂量 (g/m ²)	すべり摩擦係数値			路面温度 (°C)	P S T 値				路面温度 (°C)			
	20km/h	40km/h	60km/h		A	B	C	D	A	B	C	D
0	0.820	0.733	0.757	40	68.0	93.4	92.6	86.6	25	13.5	16.5	23
50					36.8	63.0	88.2	38.8	24.5	15	18	23.5
100	0.559	0.602	0.597	44.5	32.4	50.0	79.8	37.0	25	16	18	21.5
150					35.4	45.6	75.8	38.8	25	16.5	18	24
200	0.501	0.549		35	37.6	40.0	67.6	41.2	26	17	18	21
300	0.534	0.554	0.570	35	44.0	40.0	58.2	44.6	25	18.5	18	21
400	0.538	0.550		30	45.4	44.1	49.6	46.8	25	19	18	21
500	0.513	0.560	0.580	35	47.2	47.6	47.6	47.6	25	19.5	19	21
600	0.567	0.540		40	47.2		45.4		24		19	
700	0.574	0.609	0.590	40	53.6		45.2		24		20.8	
800	0.580	0.571		41	54.0		46.8		24		21.2	
900	0.513	0.584		41	51.4				23.5			
1,000	0.560	0.577	0.529	40	50.6		53.4		23		21	
路面の種類	コンクリート				コンクリート	密粒式アスコン	ギャップ式アスコン	シリカサンドアスコン				
路面のあらさ	31.5				39.25	53.0	26.3	—				
場所	土研				土研	西桂						

その2 すべり摩擦係数値一覧表(湿潤)

散砂量 (g/m ²)	すべり摩擦係数値			路面温度 (°C)	P S T 値				路面温度 (°C)			
	20km/h	40km/h	60km/h		A	B	C	D	A	B	C	D
0	0.709	0.517	0.465	32.5	61.2	74.6	68.6	65.4	22.5	13	16.5	23
50					56.8	49.6	54.6	38.4	22	〃	18.2	22.5
100	0.686	0.569	0.506	33	47.6	45.0	53.8	37.6	21.5	14	17	22
150					39.4	43.6	52.4	40.4	〃	14.8	16	20
200	0.630	0.492	0.465	31	43.2	43.2	47.6	42.0	21	16.5	16	20
300	0.599	0.529	0.528	30.5	48.4	45.2	45.8	43.2	20.5	17.2	16.8	19
400	0.566	0.541	0.477	34	48.8	47.6	45.8	51.8	19	15.5	19	18.5
500	0.558	0.531	0.446	32	52.4	52.8	47.2	52.2	〃	15	17.5	19
600	0.564	0.512	0.465	32	54.0		48.8		〃		18	
700	0.557	0.490	0.459	32	57.0				〃			
800	0.551	0.553	0.518	30	59.6				18.5			
900	0.571	0.505	0.472	29	64.4				〃			
1,000	0.558	0.463	0.477	30	65.2				〃			
路面の種類	コンクリート(土研)				コンクリート	密粒式アスコン	ギャップ式アスコン	シリカサンドアスコン				
路面のあらさ	31.5				39.25	53.0	26.3	—				

(6) ゴムの種類別のすべり摩擦を主とした測定結果

表-6.1 路面のすべり摩擦係数測定値

測定場所 土研, 試験走路

道路研究室

測定月日 S

測定条件 各社のタイヤの比較試験である。

試験車 大型道路試験車

主要結果 特に大きい差は見られない。

道 路 舗 装 種 別	走行 速度	乾 燥 (縦)			湿 潤 (縦)			温 度		
		左	右	平均	左	右	平均	外気温	路面温度	タイヤ温度
コン ク リ ー ト 舗 装	ブリヂストン	20		0.797			0.743	乾 24.0	乾	
		40		0.748			0.580	湿 22.5	湿	31.4
		60		0.759			0.517		31.5	
	ヨ コ ハ マ	20		0.710			0.655	乾 20.7	乾	
		40		0.701			0.556	湿 21.7	湿	28.5
		60		0.698			0.489		27.6	
	グッドイヤー	20		0.718			0.661	乾 27.8	乾	
		40		0.707			0.580	湿 19.7	湿	34.2
		60		0.704			0.469		23.1	
	オ ー ツ	20		0.732			0.684	乾 19.5	乾	
		40		0.692			0.582	湿 20.6	湿	26.8
		60		0.734			0.516		22.8	
	ト ー ヨ ー	20		0.708			0.674	乾 19.5	乾	
		40		0.703			0.592	湿 19.4	湿	25.5
		60		0.680			0.502		21.0	
	ダンロップ	20		0.740			0.669	乾 19.0	乾	
		40		0.728			0.592	湿 20.2	湿	26.4
		60		0.704			0.521		21.9	
ア ス フ ァ ル ト 舗 装	ブリヂストン	20		0.746			0.779	乾 24.0	乾	
		40		0.748			0.684	湿 22.5	湿	34.4
		60		0.774			0.588		31.3	
	ヨ コ ハ マ	20		0.704			0.725	乾 20.6	乾	
		40		0.716			0.724	湿 21.5	湿	30.0
		60		0.659			0.549		27.0	
	グッドイヤー	20		0.712			0.795	乾 27.1	乾	
		40		0.735			0.664	湿 19.1	湿	35.5
		60		0.689			0.607		25.0	
	オ ー ツ	20		0.714			0.790	乾 19.9	乾	
		40		0.703			0.689	湿 20.4	湿	28.3
		60		0.733			0.581		22.9	
	ト ー ヨ ー	20		0.717			0.787	乾 19.0	乾	
		40		0.727			0.703	湿 19.0	湿	27.3
		60		0.704			0.599		21.0	
	ダンロップ	20		0.721			0.742	乾 19.3	乾	
		40		0.702			0.681	湿 20.8	湿	27.6
		60		0.684			0.582		21.7	

測定場所 土木研究所, 鋪装低温室

試験車 ボータブルスキッドテスター

表-6.2 路面のすべり摩擦係数測定値

測定条件 ゴムの種類別温度別変化を知るため

測定月日 S 41. 10

道路研究室

主要結果 ポリブタジシンゴムを多く入れると低下する

		湿 潤 状 態										乾 燥 状 態									
		0°C		10°C		20°C		30°C		40°C		0°C		10°C		20°C		30°C		40°C	
ゴムの種類	温度	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数	ポータブル 実測値	摩擦係数
(I) ハンクリート	英 国 製	74	0.862	69	0.790	68	0.775	65	0.733	60	0.666	110	1.475	105	1.382	96	1.222	98	1.257	86	1.048
	B・T	85	1.033	77	0.906	77	0.906	73	0.850	72	0.832	105	1.382	111	1.493	102	1.322	111	1.493	93	1.257
	P・S	74	0.862	77	0.906	77	0.906	67	0.765	66	0.753	105	1.382	113	1.530	104	1.368	108	1.437	95	1.205
	ヨ コ ハ イ	76	0.892	80	0.954	81	0.968	79	0.938	78	0.921	103	1.342	103	1.342	101	1.310	101	1.310	94	1.185
	1	82	0.985	87	1.065	85	1.033	80	0.954	78	0.921	107	1.420	112	1.511	112	1.511	107	1.420	103	1.342
	2	77	0.905	83	1.000	84	1.019	85	1.033	77	0.906	106	1.400	109	1.457	105	1.382	110	1.475	104	1.368
	3	75	0.875	77	0.906	72	0.832	70	0.802	68	0.775	105	1.382	108	1.435	95	1.205	104	1.368	96	1.222
	4	80	0.954	80	0.954	78	0.921	75	0.875	68	0.775	105	1.382	114	1.550	105	1.385	111	1.493	104	1.342
	5	80	0.954	83	1.000	79	0.938	75	0.875	70	0.802	105	1.382	111	1.493	100	1.290	101	1.310	98	1.257
	6	72	0.832	83	1.000	78	0.921	74	0.862	70	0.802	109	1.457	110	1.475	105	1.382	107	1.420	97	1.237
(II) アスファルト	英 国 製	84	1.018	80	0.954	75	0.875	73	0.850	67	0.765	106	1.400	111	1.495	102	1.322	109	1.457	100	1.290
	B・T	81	0.968	79	0.938	75	0.875	72	0.832	69	0.790	105	1.382	106	1.400	92	1.150	104	1.368	95	1.205
	P・S	79	0.938	72	0.832	74	0.865	70	0.802	68	0.775	101	1.310	106	1.400	90	1.115	96	1.222	93	1.167
	ヨ コ ハ イ	73	0.850	60	0.666	50	0.543	49	0.530	48	0.519	113	1.530	108	1.437	95	1.205	94	1.185	93	1.167
	1	71	0.828	62	0.695	58	0.643	55	0.608	56	0.617	107	1.420	113	1.530	112	1.511	115	1.575	99	1.277
	2	73	0.850	63	0.710	58	0.643	59	0.657	55	0.608	111	1.493	110	1.475	109	1.457	111	1.493	104	1.368
	3	72	0.832	70	0.802	60	0.666	60	0.666	60	0.666	100	1.290	100	1.290	100	1.290	111	1.493	97	1.237
	4	77	0.906	75	0.875	67	0.765	66	0.752	65	0.735	105	1.382	104	1.368	107	1.420	112	1.511	100	1.290
	5	75	0.875	73	0.850	68	0.775	67	0.765	67	0.765	100	1.290	106	1.400	108	1.437	105	1.382	103	1.342
	6	66	0.753	59	0.658	52	0.565	52	0.565	52	0.565	105	1.382	107	1.420	101	1.310	109	1.457	98	1.257
(II) アスファルト	英 国 製	75	0.875	62	0.695	56	0.617	57	0.630	57	0.630	108	1.437	113	1.530	103	1.343	111	1.493	102	1.322
	B・T	77	0.906	65	0.733	60	0.666	60	0.666	58	0.643	105	1.382	105	1.382	104	1.368	105	1.382	98	1.257
	P・S	78	0.921	67	0.765	58	0.643	59	0.657	56	0.617	107	1.420	107	1.420	103	1.342	112	1.511	102	1.322
	ヨ コ ハ イ	72	0.832	61	0.672	57	0.630	56	0.617	55	0.608	111	1.493	112	1.511	105	1.382	115	1.575	103	1.342
	1	70	0.802	61	0.672	57	0.630	59	0.657	54	0.595	106	1.400	109	1.457	99	1.277	110	1.475	98	1.257
	2	65	0.733	58	0.643	55	0.608	55	0.608	52	0.565	102	1.322	108	1.437	98	1.257	108	1.437	94	1.185
	3																				
	4																				
	5																				
	6																				

路面のすべり抵抗に関する研究 (1)

表-6.2 (つづき)
ポータブルテスト用試験片

記 号	ゴ ム 種 類	使 用 目 的
英 国		ポータブルテスター用
B ・ T	NR (天然ゴム)	トラックタイヤ
B ・ P	SBR (合成ゴム)	乗用車タイヤ
Y ・ 1	〃 (普通のSBR)	} 市販の一般タイヤ
Y ・ 2	〃 (油展SBR)	
Y ・ 3	〃 (〃 〃)	
Y ・ 4	〃 (ハイスBRブレンド 50/50)	} 最近のタイヤの傾向
Y ・ 5	〃 (OE BR 〃 65/35)	
Y ・ 6	〃 (ローシスBR 〃 70/30)	
Y ・ 7	〃 (OE BR 〃 70/30)	} ここ1~2年に変化していくと予想されるもの
Y ・ 8	〃 (〃 〃 60/40)	
Y ・ 9	〃 (〃 〃 50/50)	
Y ・ 10	〃 (〃 〃 40/60)	

体積変化をともなう直交異方性弾塑性理論と
その適用

飯田隆一

要 旨

体積変化をともなう直交異方性体について、塑性ひずみ増分と応力との関係と降伏条件について新しい提案を行ない、それにもとづいた弾性領域を含めた有限要素法による解法について述べ、これらを砂、フィル材料、軟岩、岩盤等に適用する方法について述べたものである。

キーワード (塑性理論, 有限要素法)

二次元傾斜荷重に対する地盤支持力の計算図
表

駒田敬一

要 旨

二次元領域にある地盤の表面に傾斜荷重が作用する場合の地盤支持力を塑性論にもとづいて計算し、上載荷重と地盤の粘着力をパラメータとして支持力係数を実用に必要なように図表化した。

支持力式の誘導は地盤の自重を無視した塑性解と、地盤の自重と内部摩擦角とによって生ずる付加支持力の和として求めた。前者は Kötter の方程式の解析解から、後者は Sokolovski の数値解を利用した。

キーワード (浅い基礎, 傾斜荷重, 地盤支持力)

路面のすべり抵抗に関する研究 (1)

—— 一般路面のすべりについて ——

市原 薫

要 旨

自動車タイヤと路面の間のすべり抵抗について、主として現用のタイヤゴム質のものについて、各種道路および走行条件に対するすべり摩擦係数値の変化について論じた。まず路面とタイヤの間のすべりに関する一般論を紹介し、次いで制動時におけるすべり抵抗と車両運動の関係の理論解析を行なった。またすべり抵抗の測定法について述べ、特に本研究に用いた測定機構について述べた。更に本測定で得られた各種のすべり摩擦の測定値を解析し、特にすべり摩擦係数の温度および速度に対する相関関係を見出した。最後に路面のすべり摩擦係数の基準限界値を見出し、また路面のすべり対策についても述べた。

キーワード (路面, すべり抵抗, 摩擦係数, タイヤ, 制動, 車両運動, すべり対策)

Report of The Public Works Research Institute Ministry
of Construction Vol. 135, August 1969

Theory of Orthotropic Elasto-plasticity with Volume Chang and its Applications

Ryuichi Iida

Synopsis:

This report presents the new theory of orthotropic plasticity, especially about the relations between the increments of plastic strains and stresses and the criterion of yielding on the orthotropic elastoplastic bodies with volume changes. Based on these theories, this paper presents the solutions by finite element method, and the applications to sands, rockfill materials, soft rocks, and foundation rocks.

Report of The Public Works Research Institute Ministry
of Construction Vol. 135, August 1969

Bearing Capacity Calculation Diagrams for Shallow Foundations with Inclined Load in the Two Dimensional Ground

Keiiti Komada

Synopsis:

The bearing capacity of surface foundations under inclined loads in the two dimensional weightless soil is calculated and the bearing capacity factors in term of q/c are shown in figures for practice.

The resultant bearing capacity is obtained from the sum of the following analytical solution based on Kötter's equation and the minimum passive earth resistance due to the soil weight, derived from Sokolovski's numerical solution.

Report of The Public Works Research Institute Ministry
of Construction Vol. 135, August 1969

Studies of Skidding Resistance on Road Surfaces (1) —Ordinary Road Surfaces—

Kaoru Ichihara

Synopsis:

This paper reports about variation of skidding resistance coefficient between automobile tire and road surface, concerned with various kinds of pavement and running conditions, using mainly market rubber tire.

Main contents, 1st general discussion of skidding between road surface and tire. 2nd theoretical analysis between skidding resistance and vehicle movement when vehicle was braked. 3rd measuring methods for skidding resistance and details used for our measurement. 4th analysis of various skidding resistance coefficients measured in our research. 5th correlation between temperature, vehicle speed and skidding resistance. 6th minimum requirement value of skidding resistance coefficient of road surfaces. 7th countermeasure for skid on road surfaces.

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction

Vol. 135, August 1969

CONTENTS

1. Ryuichi Iida
Theory of Orthotropic Elasto-plasticity with Volume Change
and its Applications(1)
2. Keiiti Komada
Bearing Capacity Calculation Diagrams for Shallow Foundations
with Inclined Load in the Two Dimensional Ground(27)
3. Kaoru Ichihara
Studies of Skidding Resistance on Road Surfaces (1)
—Ordinary Road Surfaces—(37)