

粗骨材の形状特性がアスファルト混合物の 変形現象に及ぼす影響

THE INFLUENCE OF SHAPE PROPERTIES OF CRUSHED STONE AGGREGATE
ON DEFORMATION PHENOMENON OF ASPHALT MIXTURE

佐野正典*

By Masanori SANO

This paper deals with shape properties of crushed stone aggregate in asphalt mixture. It presents a method that determines the shape of aggregate quantitatively. Also in this paper, the configuration of coarse aggregate in asphalt concrete is examined using an image analysis system. Majority of stones consisting of coarse aggregate in asphalt pavement compacted by a roller are oriented at the angle of less than 30° from the horizontal plane. Using a flakey shape of crushed stone is grown Dynamic Stability by the Wheel-Trucking Test. And outdoor experiments by Trucks are made for confirmation of the Wheel-Trucking Test results. In conclusions, the coarse aggregate lined up in horizontal direction shows advantage of deformation phenomenon of asphalt pavement. Therefore, flakey shape aggregate is the best shape for asphalt mixture if it is arranged with the angle almost horizontal.

Keywords : asphalt mixture, coarse aggregate, shape, deformation

1. まえがき

アスファルト舗装道路にはわだち掘れ現象が生じている。中でも、過剰な交通量の単路部や交差点付近に多い。これは過積載交通車両数の増加、車両の走行方向の一定性、定位走行などに起因する。路面の凹凸が著しい箇所では、不快な走行に加えて車両の安全走行上において重大な支障をきたす要因となる。

舗装の流動・変形現象には、このような車両特性による外的要因もさることながら、アスファルト自身の物性に依存する内的要因が大きく関与していると考えられる。いま、設計どおりの良好なアスファルト混合物が施工された場合でも、供用中には疲労あるいはクリープによる変形が生じる¹⁾。すなわち、アスファルト混合物の変形現象は、アスファルトの鋭敏な感温性と、これに基づく粘弹性の性質から、避けることができない問題である。これに対処するためアスファルトに樹脂あるいはゴムなどの特殊な添加剤を混入した幾多の品質改良の研究がなされてきた²⁾。しかし、この改質アスファルトには脆性を伴う場合があること、さらに混合時や施工時には

高粘度になるなどの欠点があり、適切な改良法が見出される段階までには至っていない³⁾。

アスファルト混合物の変形現象は、熱可塑性材料のアスファルトを締結材とすることから、その骨格構造をなす骨材の幾何学的形状およびその配置、配向などの特性は重要な因子であると考えられる。これに適用される良好な骨材の性質とは、適当な付着性状、耐久性、硬度等を保持していることなどであり⁴⁾、さらに形状については角張った立方体が好ましく、うすべらな石片は有害骨材と判断されている^{5), 6)}。

舗装用碎石の有害とされる形状の寸法あるいは許容含有量については日本工業規格、日本道路協会、日本道路公団などで規格化されている^{5)~8)}。いずれの規格においても幾分の相違はあるものの、すべてに共通してうすべらな石片を含まないこととしている。しかし通常の舗装用碎石は破碎機械の特性や岩石の性質からさまざまな形状を有して供給されており、この碎石中には規定以上に偏平な碎石が数%~数十%含有されている。

一方、現場の骨材管理に現行の規格が運用されることはない。その背景として、骨材の形状の分類が事実上かなり困難であること、骨材粒形の判定が技術者の主觀に依存する傾向が大きいこと、さらに骨材寸法の測定や

* 正会員 近畿大学講師 理工学部土木工学科
(〒577 東大阪市小若江3-4-1)

管理上の繁忙性などが起因しているといえる。

偏平な骨材が有害とされるのは骨材の割裂破碎による強度低下の促進⁹⁾、内部摩擦角の低下¹⁰⁾、さらに偏平な骨材や細長い骨材は大きな粒子の骨材が混入することとなり好ましくない¹¹⁾などの報告がある。また、骨材形状の相違は混合物の空隙率の多少に影響を与える¹²⁾とされ、これらは仕上がった舗装の弱点につながるといわれている⁸⁾。しかし、骨材形状に関するこれらの要因を的確に示した研究報告はない。また、建設用碎石の形状の定義、形状不良とされる骨材の許容量の規準などに関するわが国の規定はまだ統一されていない。加えて偏平骨材が有害骨材と判断されるに至った具体的な資料は著者の知る限りでは見当たらない。

本研究はアスファルト舗装の変形現象に及ぼす骨材形状の特性を明らかにしようとしたものである。

まず、立方形碎石、偏平形碎石を大別して分類するため、定量的な形状指標の提案を試みた。次に種々の形状をなす粗骨材のアスファルト混合物中での配向状態を画像処理から調べ、粗骨材の形状特性とアスファルト混合物の変形特性との関係を調べた。

なお、室内実験の結果をふまえ、屋外でのトラック車両による円形走行試験を実施して、比較検討を行った。

2. 粗骨材の形状規格

わが国の舗装用碎石骨材の規格はASTM規格を参考にして（アメリカが砂利を、日本が碎石を多く使用することの相違を考慮して）決められ、以後40年大幅な修正や変更もなく現在に受け継がれている¹³⁾。日本道路協会・アスファルト舗装要綱（以下舗装要綱と記す）、日本道路公団・土木工事共通仕様書（以下仕様書と記す）の骨材規格のうちの有害骨材の粒形に関する規定は表—1

表—1 有害骨材の規定^{5),6)}

機 関	骨 材 の 粒 形 規 定	有害量(%)	備 考
アスファルト舗装要綱 (日本道路協会)	骨材粒子を包む直方体の最大長さと最小長さの比が5以上とき、うすっぺらで細長い骨材であるとする。	10以上	表面・裏層用アスファルト混合物に適用。 5mmふるいの残留分に適用。
日本道路公団共通仕様書 (日本道路公団)	細長い石片とは、幅に対する長さの比が3以上のもの、うすっぺらな石片とは厚さに対する幅の比が3以上ものであるとする。	25以上	5mmふるいの残留分に適用。

表—2 粒形規定適用による骨材の分類結果

	標準 石		備 考
	規定寸法に該当しない骨材の含有量	規定寸法に該当する骨材の含有量	
アスファルト舗装要綱 (日本道路協会) a:c=5:1	94 %	6 %	5mm 残留の同試料(744g)についての測定結果
日本道路公団共通仕様書 (日本道路公団) b:c=3:1	85 %	15 %	

1に示すとおりであり、それぞれ独自の寸法規定を設けている^{5),6)}。両者の有害な骨材の形状（うすっぺら）規定は骨材寸法のうちの前者が長径(a)と短径(c)，後者が中間径(b)と短径(c)の比によって示されている。

この規定に無関係で、すなわち視覚判定で5mm以上の粒形を分類すると偏平と判定される骨材が50%以上含有されていることがわかった。

四分法によって、さらに5mmふるいに残留した骨材にこの規定を適用した結果を表—2に示した。両者の許容含有量はそれぞれ10%，25%であるから本結果はいずれもその許容範囲内にある。しかし両規定の判断の差に含まれる形状、すなわち舗装要綱では合格であるが仕様書では不合格となる形状が約7~10%程度発生することがわかった。この形状寸法および許容含有量の相違については松野⁸⁾らも指摘している。いずれの規格が好みいか、定かでないことは衆知のとおりである。しかし、この形状規定が相違することは、碎石の生産者、活用者にとって不便なことといえ、統一された規定が好ましいと考えられる。

3. 粗骨材の形状の判定と指標

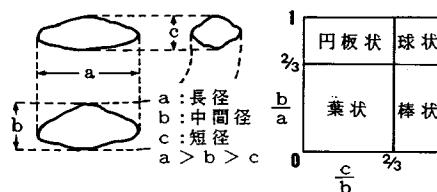
(1) 視覚による判定と選別

舗装用碎石（硬質砂岩）4, 5, 6, 7号骨材から、それぞれ四分法を繰り返して、その最終粒数1500粒程度について図—1(a)に示すa, b, cの骨材寸法($a > b > c$)箇所を測定し、各種の形状係数¹⁴⁾を算出した。

現状では骨材の複雑な形状を明確に定義づける条件はない。そのため、本実験では12名の視覚による判定によって碎石骨材の粒形を角張った立方体（以下方形石と記す）と偏平体（以下偏平石と記す）の形状に分類した。この判定結果から、選別者により幾分異なるものの粒数で約66%，重量比で約40%（搬入時までのままで、5mmふるいを用いない場合）が偏平形状であることがわかった。そして、肉眼により偏平石と判断される骨材の寸法（方形石と偏平石との境界）は6号碎石の場合で、 $c \leq 5\text{mm}$ ， $a \geq 7\text{mm}$ の特性値をもつことがわかった。

(2) 骨材の形状指標と定義

a) 骨材の形状値



(a) (b)
図—1 骨材粒形の表現¹⁴⁾

一般に、複雑な粒形の形状表現方法が図-1(a) の Heywood, Zing などの方法^{8), 15)}で示されることよく知られている。現行の舗装要綱や仕様書に示される道路用碎石の骨材寸法の計測方法はこれに準じたものと考えられる。

この両示方書では有害形状以外の粒形について特に規定したものはない。また、各種の形状係数は 2 要素で骨材形状を表現する関係上、形状を的確に分類したりすることができない。さらに種々の骨材形状の外観上の表現は図-1(b) のように示される^{9), 14)}。この場合、同じような粒形をしている骨材同士でもその適合範囲が広いために国内からこの形の差異を推定することはできない。

著者は統一的な骨材形状の定義、定量的な形状の分類、形状判定の判断誤差の解消、図中からの形状の推定、などを容易に判断する目的から、骨材が保持する 3 要素の寸法によりその形状表示方法を以下のような形状値で示すことを試みた。

一般に、通常の形状係数を示す算定式では骨材粒形を的確に図示することはできない。そこで、Krumbein の球形率¹⁴⁾を Heywood の偏平度¹⁵⁾で除すと次式となり、図-2 に示すような粒形の表現が可能となる。

$$K_s = \sqrt[3]{c^4 / (a^2 \cdot b^2)}$$

ただし、 $(a \geq b \geq c)$

この K_s を骨材形状値とした。これと偏平度とには図-2 の関係がある。式中の長径 (a) と中間径 (b) が等しい値（理論上は正方形）にあるとき曲線（以下形状曲線と記す）は図中の実線となる。 a および b 値に差が生じる（長方形）ほど、いわゆる細長い（棒状）骨材になるほど形状曲線は図中の破線へ移行する。うすっぺらな石片（板状）は K_s 値が小さくなるから下方へ移動することになる。このように、3 要素の寸法で骨材形状を表示すると粒形の比較が容易であり、骨材形状を判断したり、大別する場合の指標になると考えられる。

任意に抽出した骨材を視覚判定により偏平石と方形石に大別すると同時に、この骨材の寸法を測定した。實際

の骨材から算出した粒形は長径 (a) と中間径 (b) が近い値にあるから、測定値は図-2 の中の形状曲線（実線）に沿って点在する。破線の曲線に接近している骨材ほど細長い形状である。また、この形状値 (K_s) は骨材の粒の大小に無関係で立方体（サイロ状）ほど大きく、逆に偏平体（ボタン状）になるほど小さくなるから、これに視覚判定の結果を導入して、図中の形状が異なる点を定めた。そしてこれを形状分類点 (K_y) とした。この値は $K_y = 0.25$ であり、便宜上これより大きな値を有する形状の骨材を方形石、小さな値の骨材（板状）を偏平石として定義した。この分類点の骨材寸法比は概して $a : b : c = 4 : 2 : 1 \sim 3 : 2.5 : 1$ であった。分類点の K_y 値は視覚的な判断に依存するためやや変動すると思われるが、視覚判断差の領域内に存在する骨材の K_y 値の誤差範囲は 0.01 ~ 0.03 程度であり大きく相違することはないと考えられる。これらのこととは、形状の境界域を定量的に定義づけておくことができると同時に、図中からも骨材の形状をある程度想定して判断することが可能になると考えられる。

b) 有害骨材の形状範囲

両示方書に規定された有害骨材の寸法比（2 要素）を骨材形状値 (K_s) で判断すると、有害となる形状領域は図-3 に示すとおりとなる。双方の有害形状の判断領域は相違している。一般に供給される碎石形状の中に、規定に該当するような細長い石片の骨材は少ない。したがって、うすっぺらな石片の規定で両者を比較すると、舗装要綱よりも仕様書の方が厳しい寸法規定となる。しかし、許容含有量は逆に舗装要綱の方が厳しい規定を与えているといえる。形状分類点と仕様書のうすっぺらな石片の規定とは近似していた。実際の碎石中にはこの両者の差付近に多量の偏平石が存在することからみれば、仕様書はかなり厳しい規定といえるが、許容量は大きく緩和されている。

他方、視覚的見地を主とした場合の偏平の印象は視覚判定の結果に示したように長径 (a) と短径 (c) に依

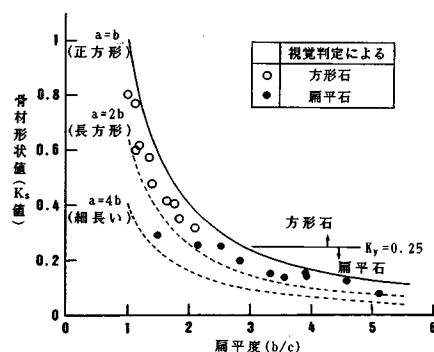


図-2 骨材形状値による骨材粒形の表現

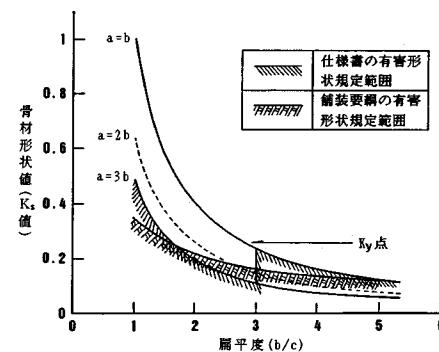


図-3 有害骨材形状の規定範囲

存する。これに対して機械的に分類する場合は次節のとおり中間径 (b) と短径 (c) による方が簡便で能率的である。このことは舗装要綱と仕様書の骨材寸法の測定箇所が相違する原因となったであろう背景を推察することができる。

なお、7号砕石は粒径が細かく形状係数の b 値、 c 値が近似しており、したがってその多くが方形領域に分布していた。

4. 骨材の選別と供試体の作製

(1) 骨材形状分類機の試作と骨材の選別

偏平石を多量に準備する目的から視覚判定 ($K_s = 0.25$) の結果を資料として、隙間間隔 5 mm の遊星運動機構を備えた骨材の形状を分類する特殊な機械（骨材形状分類機と記す）と、さらに直径 7.5 mm 寸法の円形状の目を有するふるいを作製した。

骨材形状分類機は写真—1 に示すように上部の円形状の鉄製板（円盤）と下部の遊星運動の駆動部とで構成されている。円盤は偏心機構であると同時に、一方向に 1/60 の勾配で傾斜している。その円周部分には高さ 5 mm の帯状の隙間を施して鉛直板（円周上で三点支持した）を装着した。

円盤上に投入された個々の骨材は円盤の左右運動で安定状態になると同時に、骨材の高さ（短径）が 5 mm 未満の偏平体と直方体（5 mm 寸法）の骨材はその隙間から外部へ排出される。円盤内に残留する骨材が方形石である。この方形石中に短径 5 mm 以上で偏平石とみられる骨材はほとんど存在しなかった。通過骨材中には骨材寸法の a , b , c が近似した、いわゆる直方体に近い形の細骨材が混入しているため、これをさらに 7.5 mm 目のふるいによってふるい分け、これに残留した骨材を偏平石とした。ふるい目は従来の網ふるいが正方形の目であるため、その対角線寸法が大きくなる。したがって、 a 値、 b 値が 7 mm 未満の骨材を除去する目的から直径 7.5 mm の円形状の目とした。

このふるい目寸法 ($b=7.5 \text{ mm}$, $c=5 \text{ mm}$) と規定 ($a=3 b$, 13 mm 以上の骨材は実存する) の条件から形状値を算出すると $K_s=0.28$ であり、視覚判定の $K_s=0.25$ と近似していた。骨材形状分類機を使用した場合の偏平石の排出量（含有量）は重量比で 51 % であった。機械分類と視覚で判定した結果（50 %）とは類似しているといえる。

大別した形状の分布は 6 号砕石の骨材粒度（13~5 mm）のうち方形石は最大粒径が 9 mm 以上に、偏平石は 9 mm 以下に多く分布している傾向がみられた。すなわち骨材の生産過程での特性から、偏平に破碎された骨材は寸法がやや小さいといえる。しかし、形状の分類に関しては良好な結果を示したことから、本研究での形状の分類はこの両者を併用する方法とした。また、屋外実験用骨材も同様にして偏平石および方形石の骨材を準備した。

なお、この分類方法は一般に供給される骨材形状の調査、管理、分類などに関する簡単な手法としても参考になると考えられる。

(2) 配合設計と供試体の作製

アスファルト混合物中の粗骨材の粒形の性状を把握するには、統一された形状の骨材を用いた方が定性的に把握しやすいと考えられる。しかし、アスファルトと骨材の付着性、骨材寸法と硬度、粗骨材と細骨材との配合関係など実際上の現象に言及して論じようとした場合には現場施工上よく使われる骨材を用いた方がよいと判断された。そのため 6 号粗骨材は図—2 の形状分類点 (K_s) を指標として、形状分類機とふるいを併用した方法で碎石の幾何形状を 2 種類に大別して研究を進めた。しかし、この選別するときの機械性能やさまざまな形状により、分類した形状は必ずしも厳格に分類されているわけではなく、相互の粒形区分の中に数 % の異質な形状のものが混入している場合もあった。

骨材の配合設計は舗装要綱に準じたが、方形石と偏平石の配合割合は実験目的に対して変化させた。この場合、骨材形状が異なっても同比重であるから配合設計上の粗骨材含有量は全配合種類に共通して同重量となる。しかしその粒数は表—3 に示すとおり大きく相違している。中でも、両者が同重量の場合、偏平石は方形石の約 2~3 倍の粒数となる。このことは、混合物の空隙率に多少を生じたり、骨材の比表面積の相違による所要アスファルト量に変化をもたらす。そのうえ、混合物中での骨材間隔、配向状態などにも影響を生じ、ひいては変形現象

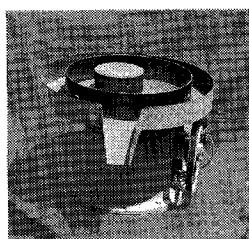


写真-1 骨材形状分類機

表-3 骨材の重量配合比と粒数の相違

骨材配合	重量比 (%)		単位重量当たり粒数比	
	方形石	偏平石	方形石	偏平石
100/0	97	3	1	0.03
70/30	70	30	1	1.08
標準	61	39	1	1.76
50/50	50	50	1	2.62
0/100	8	92	1	14.30

を生じる不良な混合物につながると考えられる。そのため、骨材形状の相違による設計アスファルト量の推移と空隙率の変化を調べた。

骨材形状が異なるときのマーシャル安定度試験（以下M試験と記す）においては、特に供試体の作製時と載荷時で骨材の方向が大きく異なるためばらつきが多くあった¹⁶⁾。同一条件の供試体5個、合計100個のM試験結果は図-4に示すとおりである。粗骨材が方形石および偏平石で統一された場合、後者は前者に比較して設計アスファルト量で0.3%，空隙率で0.6%多く生じている。このことは、前述の粒数の相違に起因する骨材の付着面積の増大、骨材形状の相違から生じる空隙の差異、M試験の打撃式締固め特性などに影響されるものと考えられる。

ここで、骨材形状を無視して設計アスファルト量を求めるとき、骨材の配合設計は重量法に依存しているため5.5%程度となる。しかし本実験に準備した骨材粒径は方形石が9mm以上に、偏平石は9mm未満に多く存在し、骨材の粒径と形状が均一化しているため空隙率あるいは比表面積の相違とアスファルト量には影響が生じると考えられた。特にM試験とWT試験では粗骨材量が数倍異なること、締固め方法やM試験に伴ったばらつき、さらに骨材形状の特性を把握する実験目的などから、本実験でのアスファルト含有率は双方の骨材形状に対し適切な含有量を知ることから5.0, 5.5%の2種類とした。使用したアスファルトは針入度60/80である。

ホイールトラッキング試験用（以下WT試験と記す）供試体の締固め度はM試験用供試体の密度と同一になるように設計した。また、供試体作製時のヘラの方向や使用回数は骨材の角度や配置に影響を与えることが判明した。そこで、実験目的から試料投入直後のヘラの特性を利用して骨材が種々の角度をもつように突き固め、その後同一条件下においてローラコンパクタで締め固めた。試験条件は舗装要綱に準じて、60°C, 5.5kgf/cm²で行った。

一方、現場アスファルト混合物については既設のアスファルト舗装（東大阪市本庄、大阪中央環状線打換工事）の竣工直後および供用後のものを切削して試料とした。

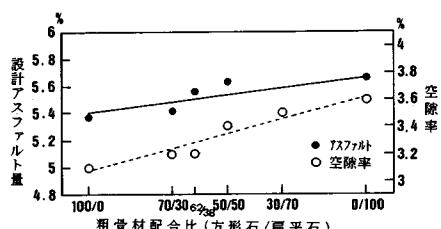


図-4 設計アスファルト量および空隙率の変化

5. 粗骨材の形状とその配向特性

(1) 転写処理による骨材の形状と配向の測定

供試体内に分散する粗骨材はさまざまな方向性を有して配置されている。切断面に露出する平面状の骨材の傾き角度の状態は画像処理結果から測定できるがその形（細長い石片か方形状の石片か）を判別することは、現状のプログラムでは（短径の位置を決定できないため）まだ対応できない。そのため、混合物中の粗骨材の配向、配置状態をM試験用供試体の中央部を切断してその断面内で調べた。方形石／偏平石の混合比が0/100, 60/40, 80/20配合と標準（搬入時状態の骨材）の4種類の混合物について偏平石、方形石の形状の種類と配置状態を紙面に転写して測定した。

実際の切断面に現われた骨材は任意箇所で切断されたものである。方形石が端部で切断されたときは偏平石と判断されることもあるが、一般に方形石と判断される骨材はどの切断面を取っても方形に近い。これに反して、偏平石では切断面に骨材の平面が直立状態にある場合は方形石として露出することもある。また、方形石に近い偏平形状の骨材は切断面によっては方形と判断されることもある。すなわち偏平石は実際よりも少なめに評価されることになる。しかし、切断面のアスファルトを溶解し、露出した骨材の形状を観察した結果からは、この現象が測定結果に与える影響は非常に少ないものであると判断した。したがって本実験ではこの現象は生じないとして測定することにした。

切断面内に存在する偏平石の長径方向の大半は載荷面と同方向、すなわち供試体作製時の打撃面に平行であることがわかった。この転写処理では正確な骨材の長径方向を知ることはできない。しかし、切断面内に存在する全偏平石中、偏平石の長径が平行に近く配向していた骨材量は0/100配合で82%，60/40配合で65%，80/20配合で36%を占め、偏平石含有量が多いほど平行な配列になる傾向を示した。逆に、方形石が増加するほど混合物中の偏平石は方形石間で鉛直方向に配向される可能性の強いことが判明した。さらに、舗装要綱に示される試料投入後のヘラによる突き固めは偏平石を鉛直に配置させる可能性の大きいことがわかった。このことは一般的の粗骨材（70/30配合程度）を用いる場合、特に試料の締固め方法に注意する必要性を示している。

(2) 画像処理による骨材の配向角度の測定

混合物中の粗骨材の配置、配向状態を知るために、WT試験用供試体（30×30×5cm）の中央部を縦横断方向に切断した。切断面内の高さ4cm、幅6cm内（映像中心部と端部の精度が同等になる範囲）に点在する骨材の長径軸が水平軸（供試体作製時の底面を基準とする）

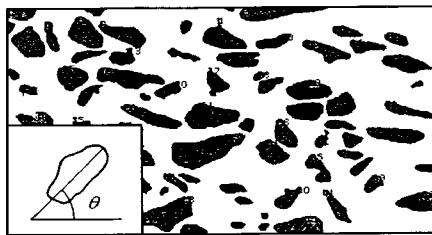


図-5 切断面の画像処理

となす鉛直角度を画像処理により測定した。そしてこの角度を骨材の配向角度と定義した。粗骨材輪郭部分を鮮明に映像させて高精度な測定値を得るために、骨材を白色塗料で塗装した。この測定断面を静止画像として取り込みパーソナルイメージアナライズシステムを用いて、個々の骨材がもつ長径の長さと図-5に示す角度、面積、個数等を測定した。測定対象の粗骨材は長径 4.5 mm 以上とし、これ未満の骨材は細骨材とみて自動的に削除した。また、おののの骨材の長径が左右方向に同じ傾きにある場合は同一配向角度として測定した。画像処理面積は粗骨材の寸法と処理精度の関係から定めた。この場合、長径の長さおよび角度の精度はそれぞれ 1/100 cm, 1/60 度程度であるが、三次元の空間に位置する個々の骨材自体がどの方向で切断されたのかが重要な点となる。すなわち、測定面に現われた骨材の最大径の方向と水平軸とがなす傾きで骨材の配向角度を知ることになるので、立方体に近い骨材あるいは凹凸の激しい形状の骨材では、それが置かれた状態で骨材自身がもつ最大径の方向と切断面に現われている長径方向の角度が相反する場合が生じ、真の骨材配向角度が得られないことも考えられる。しかし、同一切断箇所で左右に二分された骨材（表裏の状態になった場合）の配向角度の測定、さらに同一切断面の供試体で測定箇所が異なる場合の配向角度の分布の傾向が類似していた¹⁷⁾ことから、以後の実験では切断部中央を測定箇所とすることとした。

なお、一混合物に対する粗骨材の配向角度は計測範囲内の角度分布からの平均角度とした。

6. 混合物中の粗骨材の配向角度

アスファルト混合物中の粗骨材の配向角度はその作製方法、骨材形状の相違などにより異なるものと考えられる。そのため M 試験用、WT 試験用の供試体について、画像処理から配向角度を求めた。

同一条件の骨材配合比を有する M 安定度試験用供試体は 10 個準備し、その中央部を直徑方向に沿って切斷した。供試体切斷面上の測定範囲内に存在する 30~40 個の粗骨材の配向角度分布を配合比ごとに平均した結果が図-6 である。供試体作製時にヘラで突固めをしない

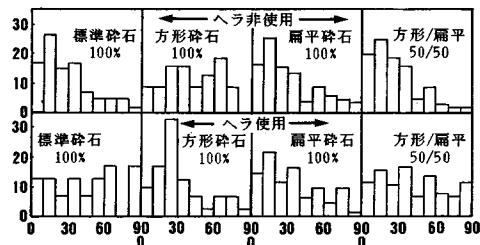


図-6 骨材形状の相違と配向角度分布 (M 試験)

場合の標準石（搬入時の骨材）、偏平石、方形石／偏平石配合種の三者は底面に対して 35 度以内に 70 % 以上が存在し、骨材はほぼ平行に近い状態に配置される。これに反してヘラを使用した場合の粗骨材は底面に鉛直な方向に配向される傾向にあることを示している。中でも、標準配合あるいは方形／偏平 (50/50) 配合のものはこの傾向が顕著であり、方形石間に位置する偏平石がヘラの作用で鉛直方向に配置されやすいことを示している。この現象とは逆に、方形石は打設時に種々の角度に分散されているが、ヘラの作用で回転性の角度の変化を生じたり、投入状態のままで底面に対して安定方向になる傾向が強いといえる。このことは M 試験、WT 試験などにおける測定値のばらつきの原因となるので供試体作製時のヘラの使用方法には十分な注意を払う必要があろう。

一方、WT 試験用アスファルト混合物中の車輪走行箇所に存在する粗骨材の配向角度はその走行前と後において当然相違するものと推察される。この走行の影響による骨材角度の変化過程での状況を究明する必要性はあるが、走行中に発生する角度の変化を測定することはきわめて困難である。さらに、一供試体中でも測定箇所が異なれば角度の分布状態も異なる。これらのことから、混合物中の骨材の配向角度の測定は試験後の車輪走行部直下に対して行った。この結果は図-7 に示したが、ローラコンパクタによる締固めの後の粗骨材の 70~80 % はすでに 40 度未満の角度に配向されていることがわかる。同一条件の供試体の試験後は 80~90 % を示しており、車輪走行直下では骨材が水平方向に倒れることを意味している。これに比較して故意に水平方向に配向した場合ではこの現象は少なく、逆に鉛直に配向した場合は骨材が転倒する結果を示している。

他方、現場でのローラ転圧による粗骨材は図-8 のおり施工直後、供用後の両者ともに水平方向すなわち安定した状態に配向されている。ただ、供用後の 30 度未満の角度に増加傾向が認められたが、これが交通車両の影響に起因するものかどうかは今回の両試料の採取箇所が異なっていたため、明言することはできない。

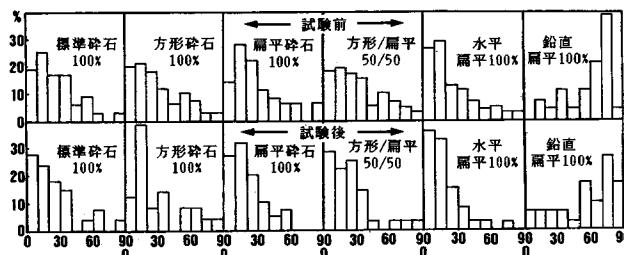


図-7 骨材形状の相違と配向角度分布 (WT 試験)

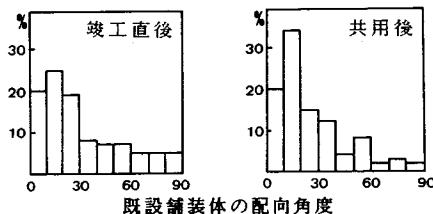


図-8 既設舗装体内的骨材の配向角度分布

7. 混合物の変形特性

(1) 粗骨材の配向角度の変化と変形量

供用中に生じる粗骨材の配向角度の変化と混合物の変形量との関係を知る目的から、同一配合条件の混合物中の骨材に可能な限り角度を付けるため、三層の打設方法を採用した。すなわち骨材の水平角度を多くする場合は一層ごとに手動ランマーを用いて骨材が水平方向に配向されるように軽打し、逆に鉛直角度を多く要求する場合にはヘラの作用方向とその回数で調整し打設した。いずれの場合も三層打設後にローラコンパクタで締め固めた。

同一供試体の車輪非走行箇所を試験前 (θ_3)、車輪走行箇所を試験後 (θ_1) として、それぞれの切断面の骨材の平均配向角度を測定した。試験前後の配向角度差が供用中に生じた骨材の変化状態とみなして、これを骨材の変化係数として算出した。

測定用の骨材配合比は方形石と偏平石が 70/30, 50/50 を採用した。前者の配合はほぼ標準石の場合と類似している重量配合比であるが粒数としては方形石と偏平石がほぼ半々で混合されている。後者の配合は重量比において等しいが方形石に対して偏平石は約 2.6 倍程度（粒径により 2~3 倍）の粒数を有している。

骨材の変化係数と試験最終時（60 分）における変形量（以下最大変形量と記す）との関係を図-9 に示した。変化係数の減少に比例して変形量は増加の傾向を示している。すなわち、混合物中の骨材の配向角度が変形現象に影響していることを示している。70/30, 50/50 の配合種別の平均変化係数はそれぞれ 0.99, 0.87 を示し、

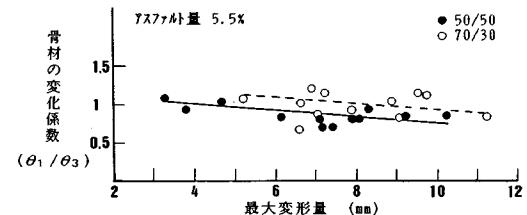


図-9 骨材の変化係数と変形量との関係

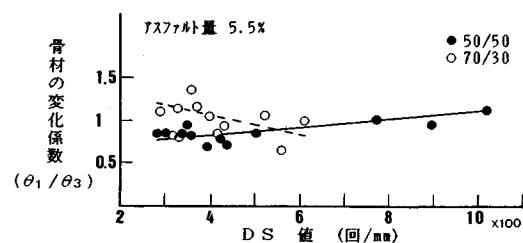


図-10 骨材の変化係数と DS との関係

骨材角度の変化は前者が後者より少ないことを意味し、好ましい骨材配合といえる。しかし反面、その変形量の範囲は前者が 5~11 mm、後者が 3~10 mm で、5 mm 未満の変形量には 50/50 の配合が多い。これは、方形石の場合はたとえ骨材の状態が変化していても切断面には方形石として露出している関係上、一骨材の粒形内の切断箇所が異なってもその配向角度の測定値には相応の変化が生じていないと考えられる。そのため変化係数が大きく（変化が少なく）現われているものと判断される。偏平石ではこの現象は少ないものといえる。この係数と変形量に関する両骨材種の傾向は類似していた。このことはいずれの骨材種であろうと混合物の締結材がアスファルトで支配されている以上、変形するものであることを意味している。しかし、この変形量の多少は骨材の形状の特性で補うことが可能であることも示している。また、この相関関係は 10 % 程度のわずかな骨材角度の変化でも大きな変形量を生じる可能性があることを示している。

骨材の変化係数と動的安定度（以下 DS 値と記す）には図-10 の関係がある。骨材に変化が生じない変化係数 1.00 付近の偏平石は高 DS 値を呈しているのに対して方形石は小さな DS 値である。このことは、45~60 分時点の変形率が異なることに起因する。すなわち、偏平石は一度水平方向に移動した後には動じにくく、逆に方形石はわずかであるが絶えずその角度が変化するものと考えられる。これらのことから、偏平石を建設当初から、より水平方向（安定方向）に施工することが可能となれば耐変形現象に効果的な結果をもたらすものと考えられる。

(2) 粗骨材の形状と動的安定度

一般に、DS 値は変形量がほぼ安定した 45~60 分に生じた変形率で表示される。しかし、同一条件で作製したアスファルト混合物の場合、同値の DS 値を得ることは少ない。逆に、同 DS 値を得た場合でもその最大変形量は異なることが多い。これはその骨格構造である骨材の形状特性やその配向角度あるいは骨材のかみ合わせなどに起因するものと考えられる。そのため、同一配合条件の 12 枚の試験片のおののおのについて 45 分、60 分の変形量を独自に測定した。

粗骨材形状が異なる 3 種類とアスファルト量の相違 2 種類についての WT 試験を行った。混合物の配合設計は重量設計に依存しており、粗骨材の形状は無視されているから、この結果は図-11 に示すとおりとなる。研究目的から骨材の配向角度に変化をもたせて作製した関係上、通常の試験結果以上にばらついている。この結果は同 DS 値を得ても最大変形量は異なり、逆に最大変形量が同値でも DS 値にはばらつきが生じる可能性があることを示している。

変形量と骨材の平均配向角度の関係は図-12 に示すとおりである。画像処理段階での粗骨材の露出形状の状態や粒数などに伴う不均一性の誤差要因を加味すれば、

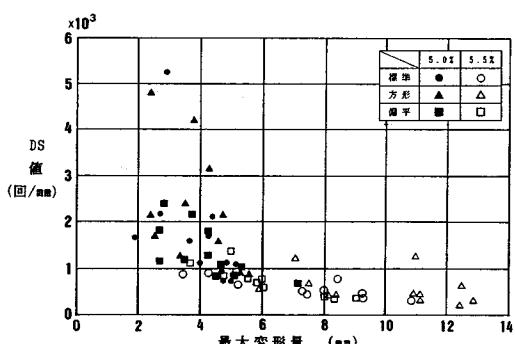


図-11 DS 値と最大変形量との関係

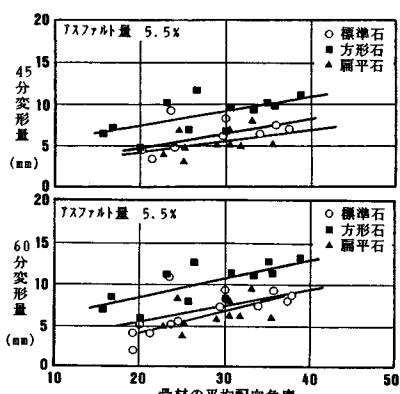


図-12 変形量と骨材の平均配向角度との関係

変形量と平均配向角度には一次的な関係があるといえる。これはアスファルト量が異なっても同傾向であるが、アスファルト量のわずかな相違でもその勾配差は大きい¹⁸⁾。このことは適切なアスファルト量を選択する必要性を促している。そして大きな変形量を呈する骨材の形状は方形石であることがわかった。また、球形骨材の変形量が著しく大きい¹⁹⁾ことから、骨材の形状としては複雑な立方体（方形石）よりも低面積の大きな偏平形状の骨材が水平方向に配置された場合は安定性がある粒形といえよう。

次に、この 45、60 分の変形量-配向角度の関係式から DS 値を算出したものが図-13 である。標準石、方形石の両者における DS 値に対しては骨材の配向角度の影響は少ない。また、3 種類の骨材形状ともに水平方向に配向されるほど高 DS 値になる傾向を示している。中でも偏平石が水平状態に近く配向された場合は大きな DS 値となり、舗装混合物として有利になることが判明した。しかも、配向角度が 20~25 度では標準石の約 2~4 倍の DS 値を得る。また、30 度では骨材種による差異ではなく三者ともに近似している。さらに、35 度以上になるとこれらとは逆に方形石が有利となる。すなわち、偏平骨材を多量に用いた場合には骨材の大半が水平に配置されるため、荷重の分散効果等が促進され好結果を与えるものといえ、鉛直方向になるほど不利であることを示唆している。

一方、現場の竣工直後での角度は 28 度、供用後 25 度であり、ローラ転圧のもとでの平均角度は概して 30 度程度で施工される。これらのことから、注意深い施工の下で偏平骨材が小さな角度を得た場合には好ましい結果であることを示している。

8. 屋外円形走行試験による形状特性の検討

室内実験の結果を現場に反映させて比較検討すること

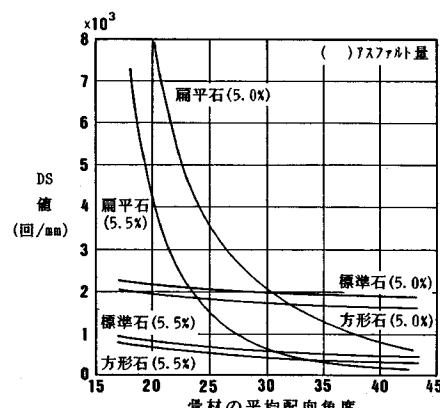
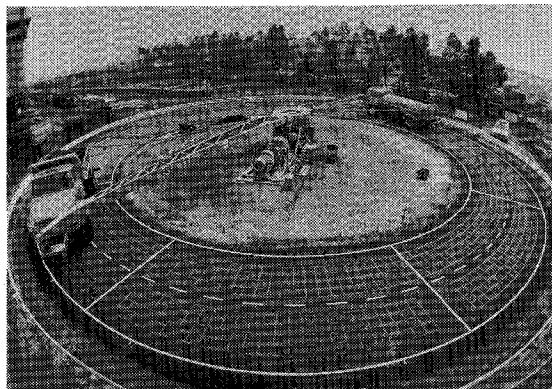


図-13 DS 値と骨材の平均配向角度との関係



荷重車総重量	13.6 tf
輪荷重前輪（単輪）	1.8 tf
輪荷重後輪（複輪）	5.0 tf
タイヤの空気圧	6.5 kg/cm ²
走行速度	5~15 km/h

写真-2 円形走行試験場全景

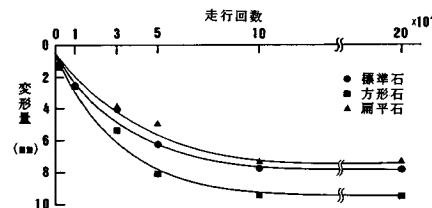


図-14 車両の走行回数と舗装体の変形量との関係

は、実用に供する場合に重要なことである。そのため、写真-2に示す装置と試験条件のもとでの車両走行試験を実施した。

粗骨材の形状は標準石、方形石、偏平石の3種類とした。舗装は同一条件のスラグ路盤上²⁰⁾におののの形状ごとのアスファルト混合物を舗装厚5cm、長さ2m、幅4mにわたって施工した。本実験は粗骨材の準備量の都合から、短距離の試験区間でしか行えなかったが、実際の舗装状態での比較資料を得ることはできた。

トラック車両の走行回数と車輪走行部（内輪部、外輪部）の平均変形量の関係は図-14のとおりである。変形量は小さい順に偏平石、標準石、方形石で、これは室内実験の結果と一致している。しかし、いずれの形状種の舗装面にも共通したわだち掘れの軌跡が発生した。

準備した骨材の粒径は先に述べたように偏平石は全般的に小さく方形石が大きい。混合物の変形現象に粒径の大小は大きく影響することから、方形石と同等寸法の偏平石を準備することが可能となれば、さらに有利な結果が期待できるものと思われる。

また、本実験路から切削、採取した試料からの観察結果からは骨材の剝離、割裂破碎、ひびわれなどの現象は

みられなかった。

9. 結論

現状のアスファルト舗装のわだち掘れ現象は幾多の複雑な要素の集積から生じている。本研究はアスファルト混合物に発生する変形性状を、粗骨材の形状の観点から論じた。しかし、石質の相違による割裂破碎、剝離現象、舗装のひびわれの有無、加えて厳密に形状統一された場合の効果、粗・細骨材の関係など、今後究明しなければならない問題も多く残されている。

しかしながら、本研究結果からは次のことを明らかにすることことができた。

(1) アスファルト混合物中の粗骨材が同一形状で占有された場合、混合物の変形量が少ない形状の粗骨材は偏平石、標準石、方形石の順であった。この傾向は円形走行試験の結果とも一致していた。

(2) 舗装要綱や仕様書に示される有害骨材形状の規定に該当する骨材粒形に関して、本結果からは骨材の割裂破碎など、有害要因に挙げられる問題点に顕著な現象はみられなかった。このことはアスファルト混合物に適した骨材形状および許容含有量などについてさらに検討してみる必要性があると考えられる。

(3) 骨材の配向角度と混合物の変形量とには密接な相互関係があることがわかった。特に、偏平石が25度未満の水平に近い状態に配向された場合には高DS値を示した。このことは、偏平石を注意深い施工技術下において、より水平状態に近く配向することが重要である。一方、方形石のみで占めた場合は流動しやすい現象がみられ、むしろ変形を促進させるという現象が生じた。

(4) 画像処理による骨材の配向角度の測定結果から、室内作製でのアスファルト混合物中の70%程度の粗骨材は40度未満であるが、現場におけるローラ転圧のもとでは30度未満に配向されることがわかった。この傾向は偏平骨材を用いた舗装の施工性に対して好ましい結果を与えるものと考えられる。

(5) 粗骨材の形状を定量的に表示する方法を提案したが、これは骨材の形状を定義、調査、分類する場合などの指標になると考えられる。また、骨材形状分類機は骨材の形状調査、分類上の簡便な方法として一助を成すと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、神戸大学教授西勝先生からは貴重な助言を賜った。屋外円形走行実験においては（株）神戸製鋼所、河端薰氏、佐藤康文氏、スラグ・建材部の方々、さらに日本舗道（株）、富田暢昭氏をはじめ関西支店の方々の懇切な協力を賜った。また、データ整理にあたり、本学大学院生難波克

巳君（現・兵庫県）、橋本栄一君の助力を受けた。なお、本研究は当研究室の卒業生諸君の労に負うところが大きい。ここに記して、関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牛尾俊介：アスファルト舗装のわだち掘れ予測方法に関する研究、土木学会論文報告集、No. 323, p. 151, 1982.
- 2) 太田健二：改質アスファルトの特性、アスファルト、Vol. 22, No. 118, 1979.
- 3) 日本アスファルト協会：特集号、アスファルト、Vol. 30, No. 155, p. 30, 1988.
- 4) 山之口浩：アスファルト混合物用碎石について、舗装、Vol. 4, No. 2, 1969.
- 5) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、昭和 36, 42, 53 年版。
- 6) 日本道路公団：土木工事共通仕様書、昭和 59 年。
- 7) 日本規格協会：JIS ハンドブック、土木・建築。
- 8) 松野、ほか：アスファルト舗装に関する試験、建設図書、pp. 27~34.
- 9) 南雲、ほか：アスファルト舗装に関する試験、山海堂、p. 62.
- 10) 筑瀬：不良な骨材のアスファルト混合物について、アスファルト、9巻、49号。
- 11) 竹下春見：道路工学、金原出版、p. 172.
- 12) Kalcheff, I.V. and Tunniclief, D.G. : Effects of

crushed stone aggregate size and shape on properties of asphalt concrete, Proc. A.A.P.T., pp. 453~483, 1982.

- 13) 日本アスファルト協会：特集号、アスファルト、Vol. 30, No. 155, p. 34, 1988.
- 14) 岡田・六車：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、p. 99.
- 15) 井伊谷鋼一：粉体工学ハンドブック、朝倉書店、p. 55, 1965.
- 16) 佐野・水野・難波：マーシャル安定度試験に関する一考察、土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、p. 86, 昭和 62 年。
- 17) 佐野・水野：アスファルト混合物中の粗骨材の配向特性について、土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集、第 5 部、昭和 61 年。
- 18) 佐野・水野：アスファルト混合物中の骨材の配向角度と動的安定度について、土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、p. 92, 昭和 62 年。
- 19) 佐野・水野：アスファルト混合物中の粗骨材の形状特性について、土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、昭和 59 年。
- 20) 佐藤・西・橋本：走行試験にもとづく鉄鋼スラグ路盤材の等値換算係数に関する一考察、土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部、昭和 62 年。

(1988.7.19・受付)