

## 【ノ ー ト】

## 道路用細骨材の硬さの評価

AN EVALUATION OF THE HARDNESS PROPERTY OF FINE  
AGGREGATE IN ROAD CONSTRUCTION

井 上 武 美\*

By Takemi INOUE

## 1. 目 的

筆者は、さきに道路用細骨材の硬さの材質試験の方法を以下のように提案した<sup>1)</sup>。

「細骨材の硬さは、破碎かつ摩耗しにくい特性で、現象としては粒径、粒形および粒度の変化の少ないものと考えて、粒径群の物理特性がほぼ等しい標準材料とその粒度を選定して、破碎と摩耗を現象的に同程度受けるような試料量と試験時間を、摩耗球の径ごとに求めた。

また、硬さの評価方法は、試験前後の粒度変化として表示できるとした。この結果から試験方法は、簡易、迅速および適合性を考慮して、次のように決めた。

- ・試験機はダブル試験機を使用
- ・摩耗球は径 25 mm の耐摩耗陶器球を 4 310 g
- ・試料は基準粒度 (2.5/1.2 mm : 1.2/0.6 mm : 0.6/0.3 mm = 1 : 1 : 1 重量比) にしたものを 1 740 cm<sup>3</sup>
- ・試験時間は 60 分
- ・評価値は  $FDR$  (= 試験後の  $FD$ /試験前の  $FD$ , ここで  $FD$  は試料の 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 および 0.074 mm ふるいの通過重量百分率の和を示す)

この提案は、以下に示す最近の道路用細骨材の実情に対応できるように考えたからである。

- ・天然骨材資源、特に川砂の不足が顕著で、道路用細骨材は各種砂で補われあるいは補おうとしていること。
- ・資源の有効利用の観点から、産業副産物や廃棄物を骨材として使用しようとするのが活発に検討されていること。
- ・これら各種材料の使用可否の判断では、使用実績のある材料との照合が一般的であるが、上記材料の場合で特に問題となる材質規定の硬さは、その試験方法が存在せず、経験的かつ定性的判断に頼ってきたこと。

- ・硬さに問題のある材料を使用した場合の弊害が、加

熱アスファルト混合物の場合、製造時での細粒化とダスト量の増加、施工時での細粒化がみられ、さらに供用中での細粒化による混合物の性状悪化が懸念されること。

しかし、提案した試験方法を実際の場合に運用してみた結果、硬さの材質試験が簡易、迅速を意図したにもかかわらず細骨材の固有粒度によっては基準粒度を得るのに相当の時間を要したり、さらには、俗にいう細砂では基準粒度を得ることができないなどの欠点が見られた。

そこで、固有粒度 (採取、搬入された細骨材から 2.5 mm ふるい 残留分を除去しただけの試料粒度) のままを試料として同一の硬さ試験が実施できて、しかもこの評価値から基準粒度での評価値が推定できれば、この欠点は補えるようになる。

この点を満足した結果が得られると、硬さ試験は 2 通りの評価値が出てくるが、両者の相関関係が得られているので、試験方法はいずれを選択してもどちらか一方の硬さ評価値で表示できるので、実用上問題は生じない。

逆に、この結果から、道路用細骨材は数種の砂を混合して混合物の所要粒度に適合させて使用しているのが実情なので、このおのおのの材料の選択判断や評価および合成した細骨材の評価が可能となる。

本報告は、さきに提案した道路用細骨材の硬さ試験方法を、上述の点について補完し、その適用を発展させようとしたものである。

## 2. 提案した試験方法の考察

固有粒度での硬さ試験方法は、試料粒度を固有粒度とする以外は、硬さの材質試験方法と同一を考える (細骨材の代表的粒径群以外も含めた固有粒度、すなわち、ほぼ細骨材全体を検討すると考えたので、「硬さの材質試験方法」とここでは称し、評価値は材質試験方法と區別して  $FDR_m$  とする)。

この場合、同じ細骨材から得られるそれぞれの硬さ評

\* 正会員 日本舗道 (株) 技術研究所

価値間の関連には、試料粒度が異なるので当然粒度を示す特性項が含まれると予想される。この粒度の特性項に何を選定したらよいかを以下のように考えた。

骨材の破碎一般論は、後述するように、あるエネルギーに対してどのような粒度変化が生じるかを扱っていて、この変化は、破碎エネルギーが一定の場合には、骨材の強さに相当する特性と最初の骨材粒度とに左右されることがわかっている。そこで、提案した硬さの材質試験方法が、この粒度特性項が固定された場合に、この破碎一般論にあてはまるということが考察できれば、この特性項が材質試験での評価値(FDR)と材料試験での評価値(FDR<sub>m</sub>)との相関を得るうえで適切な粒度の特性項と推察されるだろうと考えた。

(1) 破碎の一般論

骨材特性を含めた破碎の一般式<sup>2)</sup>は以下のようになる。骨材特性は、各粒子に均一に分布し、粒径変化に必要なエネルギーは平均的に消費されると仮定し、また、粒子は簡単のために球形を考えると、各種粒径が混合している材料を粒径零とするに必要なエネルギー U は式(1)となる。

U = 6 M / ρ · Σ p<sub>i</sub> · E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub> .....(1)

ここで、M: 材料の総量 ρ: 材料の比重

p<sub>i</sub>: 粒径 d<sub>i</sub> の粒子量の総量に対する割合

E<sub>i</sub>: 粒径 d<sub>i</sub> の粒子を粒径零とするに必要な単位面積当りのエネルギー量

いま、考察を進めるにあたって必要なのは、あるエネルギー消費後の粒度であり、これは、各種粒径 d<sub>i</sub> に対する p<sub>i</sub> の確率の最大値を考えることになり、式(2)が得られる。

p<sub>i</sub> = α exp β · E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub> .....(2)

ただし、α, β は定数

ここで、Σ<sub>i=0</sub><sup>D<sub>0</sub></sup> p<sub>i</sub> = P<sub>0</sub> から、

α = (P<sub>0</sub> · β) / (exp β · E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub>) - 1 .....(3)

ここで、D<sub>0</sub> は材料の任意粒径で、最大粒径を考えると P<sub>0</sub> = 100 である。

E<sub>0</sub> は D<sub>0</sub> を粉砕するに要するエネルギーで骨材特性に影響される。

式(3)を式(2)へ代入すると式(4)となる。

p<sub>i</sub> = P<sub>0</sub> · β · (exp β · E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub>) / (exp β · E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub>) - 1 .....(4)

したがって、任意の粒径 d<sub>i</sub> の通過割合 p<sub>i</sub>' は式(5)となる。

p<sub>i</sub>' = Σ<sub>i=0</sub><sup>d<sub>i</sub></sup> p<sub>i</sub> = (P<sub>0</sub> · β) / (exp β · E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub>) - 1 × ∫<sub>0</sub><sup>E<sub>i</sub>/d<sub>i</sub></sup> (exp β E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub>) d(E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub>)

= P<sub>0</sub> · (exp β E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub>) - 1 / (exp β E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub>) - 1

exp β E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub> ≧ 1, exp β E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub> ≧ 1 なので1を無視して = P<sub>0</sub> exp -β (E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub> - E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub>) .....(5)

一方、粒径変化を受けた材料の粒度は、式(6)として一般には整理できることがわかっている。

p<sub>i</sub>' = P<sub>0</sub> (d<sub>i</sub> / D<sub>0</sub>)<sup>n</sup> = P<sub>0</sub> exp -n ln (D<sub>0</sub> / d<sub>i</sub>) ... (6)

ここで、n は破碎エネルギー、材料種類および材料粒度による定数である(ただし、P<sub>0</sub>, p<sub>i</sub>, D<sub>0</sub>, d<sub>i</sub> は前出と同意である)。

式(5)の一般性を式(6)との対応から吟味してみる。

式(5)と式(6)を等値して、n = β · τ と置くと式(7)が得られる。

E<sub>0</sub> / D<sub>0</sub> - E<sub>i</sub> / d<sub>i</sub> = ln (1 / d<sub>i</sub>)<sup>τ</sup> - ln (1 / D<sub>0</sub>)<sup>τ</sup> .....(7)

式(7)から、τ が E<sub>0</sub>, E<sub>i</sub>, d<sub>i</sub> および D<sub>0</sub> の関数であり、これは式(6)の n の定数の意味に相当することがわかるので、したがって、式(5)は一般性を有す破碎の式といえる。

(2) 硬さの材質試験方法の吟味

提案した硬さの材質試験方法では、任意粒径 D<sub>0</sub> は、試料粒度を基準粒度としたことで、消費エネルギー E<sub>i</sub> は、陶器球の量および試験時間を一定としたことで、いずれも定数となる。

したがって、この場合は粒度変化を任意粒径 d<sub>i</sub> での通過割合 p<sub>i</sub>' で示せることになり、この p<sub>i</sub>' は骨材種類による特性値 E<sub>0</sub> の関数である。

ここで、E<sub>0</sub> は D<sub>0</sub> 粒径の粒子を粉砕するのに要するエネルギーであるので、骨材種類ごとに異なり、骨材の結晶間結合強度や結晶内破壊抵抗等に相当するものとみなせる。この骨材特性は硬さの支配的因子であるので、通過割合 p<sub>i</sub>' は材料種類による硬さの評価値に相当する(なお、このような考えは、ロサンゼルスすりへり試験(JIS A1121)や骨材破碎試験(BS-812)などの評価値表現に適用されている)。

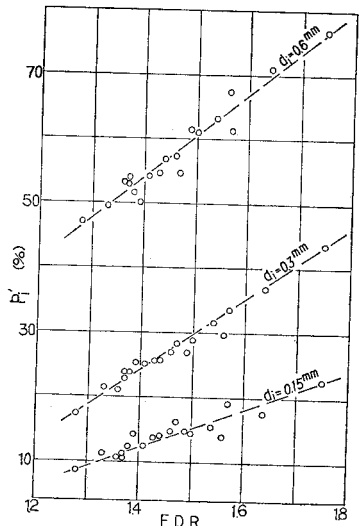


図-1 p<sub>i</sub>' と FDR との対応

以上より、提

案した硬さの材質試験方法を破碎一般論で吟味するには  $p_i'$  と  $FDR$  とを比較すればよい。

図-1 に  $d_i=0.15, 0.3$  および  $0.6$  mm での  $p_i'$  と硬さの材質評価値  $FDR$  との対応関係を、19 試料の実験結果について示した。図より、 $FDR$  は骨材特性を示しており、しかも  $p_i'$  より、より全体的に骨材特性を示す評価方法と考察された。

### 3. 新しく提案する試験方法

#### (1) 硬さの材料評価値と材質評価値との関係

硬さの材料試験方法と材質試験方法の相違は、試料粒度が異なっているだけであり、これを破碎一般論からみると、任意粒径  $D_0$  のみが異なっていることに相当する。したがって、 $FDR_m$  と  $FDR$  との相関関係を求めるには、この  $D_0$  を粒度の特性項として考慮すればよいと考えられた。

ここでは、任意粒径  $D_0$  を固有粒度の代表値という意味で粒度の 50% 通過径にとることとした。なお、この  $D_0$  は式 (5), (6) の関係から、両対数座標に記した粒度からとった値とし、 $D_{50}$  と表示する。

$FDR$  がわかっている各種細骨材 75 種について、硬さの材料試験を実施して  $FDR_m$  を求めた。

この結果を  $D_{50}$  をパラメーターにして整理したものが図-2 で、 $FDR$  と  $FDR_m$  との関係は式(8)となった。

$$\frac{FDR_m - 1}{FDR - 1} = 1.23 D_{50} - 0.21 \dots\dots\dots (8)$$

図にはばらつきがあり、この理由として  $D_{50}$  だけで固有粒度を代表させることに無理があり、粒度を有する以上、少なくとも 2 つの特性値で表わすことが必要と考えた。ここでは、材質試験では粒径の変化が少ないと考えて、0.3 mm 径以下は試験粒度に含めていないが材料試験の固有粒度は、まちまちでしかもこの粒径群も含んでいるので、この点の影響は当然考えられる。

そのため、これを考慮した特性項として  $FD_m$  (固有

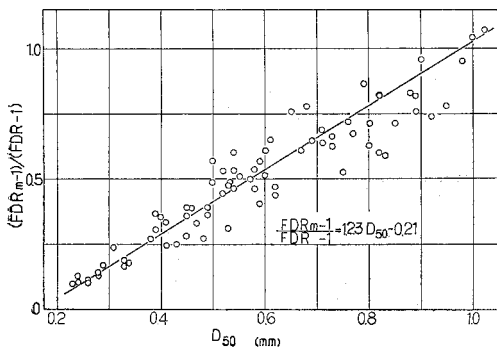


図-2  $FDR$  と  $FDR_m$  との関係

粒度の 0.3, 0.15 および 0.074 mm ふるいの通過重量百分率の和) も加えて考えてみた。

ここで  $FD_m$  も粒度の特性に加えたのは、以下に示す既往の結果<sup>3)</sup> を考慮し、さらに評価方法の統一も考えたためである。

細骨材 90 種と高炉水滓 20 種について、硬さの材料

試験を実施した結果は、図-3 のごとく  $FDR_m$  と  $\log FD_m$  にプロットすると、 $FDR=1.60$  の境界線が求まった。この  $FDR=1.60$  は、細骨材の使用実績と加熱アスファルト混合物の特性への影響からみて、材質試験評価値の使用限界値と考えられた。したがって、図-3 は多少問題もあったものの、細骨材の材料選択の判断となり得て、 $FD_m$  は固有粒度の特性項となっていたからである。この境界線は式 (9) である。

$$FDR_m = 1.86 - 0.38 \log FD_m \dots\dots\dots (9)$$

図-2, 3 の結果から、式 (8) で  $FDR=1.60$  とした場合に求まる  $FDR_m$  は式 (9) と同値のはずであるので、これらを等しいと置くと  $FDR_m$  が消去されて式 (10) が求まる。

$$FD_m = 10^{(2.59 - 1.94 D_{50})} \dots\dots\dots (10)$$

この結果から、 $FDR$  と  $FDR_m$  の関係式 (8) が、固有粒度の特性項の  $FD_m$  と  $D_{50}$  に式 (10) の関係がある場合に成立していると考えられることができる。

いま実験材料の  $FD_m$  と  $D_{50}$  の関係をみると 図-4 のようになっている (図には式 (10) を実線で記入している)。したがって、

図-2 のばらつきは図-4 のばらつきによるものとして式 (8) に  $FD_m$  を補正項として含めると式 (11) が得られた。

$$\begin{aligned} \frac{FDR_m - 1}{FDR - 1} &= 0.81 \\ &D_{50} - 0.22 \log \\ &FD_m + 0.36 \\ &\dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

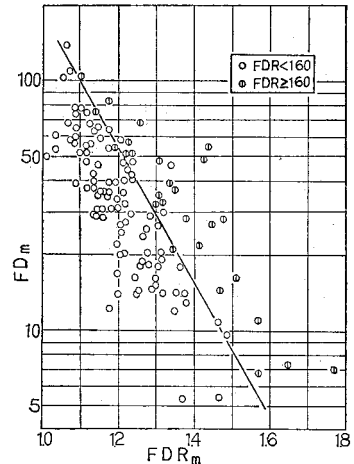


図-3  $FDR_m$ - $FD_m$  による限界値

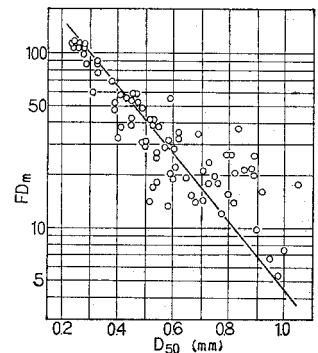


図-4 固有粒度の  $D_{50}$  と  $FD_m$  の実際

## (2) 実験式の検討

硬さの材料評価値と材質評価値との関係として得られた実験式(11)の適合性を、実側値との照合でみると、実測値の計算値に対する比が90~110%に入るものが全体のほぼ70%, 80~120%に入るものが全体の90%以上となっている(なお、適合性が一番悪い場合は72%と127%とである)。この適合性をみると、固有粒度を2特性値で表示しているのみで、粒径間の材質の差や粒形の相違も含まれている点を考慮すると、式(11)は実用上ほぼ満足のいく関係式と判断された。

次に、実験式の意味とその適用範囲を検討してみる。

まず硬さ評価値の定義から、 $FDR=1$ であれば、 $FDR_m$ も1となるはずであり、これは式(11)より明らかである。また、硬さの材質試験( $D_{50}=0.9$ mm,  $FD_m=0$ に相当する)の粒度では、 $FDR_m \approx FDR$ が期待され、このことは式(11)の右辺が1の場合で、これは $FD_m=2.6$ の場合に得られる。この $FD_m=2.6$ は、ほぼ $FD_m=0$ とみなせるため、この関係も式(11)は満足しているといえよう。なお、実験式の適用範囲は実験の範囲も考慮して、 $D_{50}=0.22\sim 1.05$ mm,  $FD_m=5\sim 200$ の場合の固有粒度の場合とする。

材料試験結果からの材質試験評価の推定値( $\widehat{FDR}$ )は、ほぼ2割程度の誤差、すなわち、 $0.8 FDR_m + 0.20 < \widehat{FDR} < 1.2 FDR_m - 0.2$ の範囲で推定可能である。

## (3) 硬さの材料試験方法

新しく提案する硬さの材料試験方法は、試料粒度を固有粒度とする以外は、すべて硬さの材質試験方法と同一とする。ただし硬さの評価値は材質試験の場合と区別して $FDR_m$ とし、固有粒度の特性項として $D_{50}$ と $FD_m$ を求めておくこととする。また、本試験方法は $D_{50}=0.22\sim 1.05$ mm,  $FD_m=5\sim 200$ の場合にのみ適用し、材質評価の推定値を式(11)より求めることとする。

## 4. 硬さ評価値の適用

硬さの材料試験方法を決め、材質評価値との関連が得られたので、硬さ試験方法は補完され、統一がとれたことになった。この結果、各種細骨材の選択の判断と硬さ評価が可能となる。この適用例として加熱アスファルト混合物用細骨材の場合を考えてみる。

混合物の標準配合<sup>4)</sup>で、密粒度、細粒度アスコンなどを連続型とし、密粒度ギャップ、細粒度ギャップアスコンなどをギャップ型と称すと、各種配合粒度に共通して適合する細骨材の粒度は表-1となり、これから $D_{50}$

と $FD_m$ が計算できる。

加熱アスファルト混合物用細骨材として使用実績のある $FDR$ およびアスファルトモルタルの混合物性状の変化を検討した結果<sup>1),2)</sup>では、 $FDR$ でみた使用限度は、現在のところ1.60と考えている。

この $FDR=1.60$ と表-1の $D_{50}$ と $FD_m$ を式(11)へ代入すると $FDR_m$

の最大値は、連続型で1.35、ギャップ型で1.18が求まる。これらの値が硬さの材料試験の評価値からみた加熱混合物用細骨材の使用限度として推定できる。また、この細骨材の硬さ評価値 $FDR_m$ が混合物の特性に及ぼす影響ということで、一部室内検討を、加熱アスファルト混合物の破壊への影響<sup>3)</sup>とセメントモルタルの摩耗抵抗への影響<sup>4)</sup>とを実施し、ほぼ定性的に考えられる傾向に適合した結果を得ている。

しかし、これらの値の妥当性も含めて、実際の舗装の場合の観察を今後検討してゆく必要があると考えている。

## 5. まとめ

道路用細骨材の硬さについて、材質評価と材料評価間の関係を実験的に求めて、硬さ試験方法を補完、発展させた。

### 参考文献

- 1) 井上武美：道路用細骨材の強硬さ試験方法の提案，土木学会論文報告集 No. 250 pp. 133~136 1976.6.
- 2) F. Moavenzadeh, W.H. Goetz: Application of statistical mechanics to analysis of degradation of aggregate, Highway Research Record No. 51, pp. 112~123.
- 3) 井上武美ほか：道路用細骨材の硬さ評価の考察，道路建設，No. 346, pp. 41~46 1976.11.
- 4) アスファルト舗装要綱，昭和50年版，日本道路協会，pp. 60~61.
- 5) 井上武美ほか：細骨材の硬さが加熱混合物に及ぼす影響について，道路建設，No. 358, pp. 46~51, 1977.11.
- 6) 井上武美ほか：舗装用コンクリートと砂の硬さが異なるモルタルの摩耗試験，セメント技術年報 31, pp. 345~348. 昭和52年。(1977. 9. 5・受付)

表-1 加熱アスファルト混合物用細骨材の粒度範囲

項目	配合種類	
	連続型	ギャップ型
通過重量百分率 (%)	ふるい目の開き (mm)	
	2.5	100
	0.6	48~72
	0.3	16~45
	0.15	11~33
0.074	0~15	0~15
$D_{50}$ (mm)	0.35~0.65	0.20~0.39
$FD_m$	27~93	54~141

(注) 各配合につき、粒度範囲に1%の余裕をみて、7号砕石は5-2.5mm粒徑をすべてまかない、その2.5mm通過分は25%、石粉の0.074mm通過分は100%。また、細骨材は2.5mm残留分が零と仮定して、2.5mm通過率を100%として整理した場合を示している。