

# 粗骨材の粒度の標準の数式解析と 粒度規格の評価に関する研究

沼田 晋一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 西日本工業大学教授 土木工学科 (〒800-0394福岡県京都郡苅田町新津1633)

コンクリートに用いる粗骨材の粒度の標準について、数式的意義を考察した。規格に示される粒度の範囲の算術平均をベースにFuller式から導入されたTalbot式の指数のx値を求め、これを数式化した。この結果、日米の粒度規格の基準となるTalbot指数は、最密充填式の指数 $x=0.5$ よりも大きな値であった。

「粒度の標準」の規定は、Talbotが提示した標準粒度よりも大粒の量が少なく小粒のものが多く分布であることが数式で説明された。更に、粒度の範囲の設定に関する法則性を説明することができた。

粒度を規定する試験ふるいについては、粗骨材の最大寸法と最大粒径の関係その他から、新たなふるい寸法を追加導入しシステム化を図ることを提案した。

**Key Words :** *grading requirements for coarse aggregate, Talbot's formula, Talbot's standard grading, exponent value of Talbot' formula, range limit of grading, relative sieve*

## 1. はしがき

コンクリートの配合は、所要の性能及び作業に適するワーカビリティをもつ範囲内で、単位水量をできるだけ少なくするようこれを定めるのが、大原則である。このように定めたコンクリートは、所要の性能及び作業に適するワーカビリティを満足する範囲で、最小の空隙量、すなわち最大の固体量をもつことになる。固体量(絶対容積)は、セメント等の粉体、細骨材及び粗骨材からなる。

粉粒体からなる固体物の充填率が最大となる粒度構成については古くから多くの研究がなされてきた。特に、骨材(細粗骨材)の粒度構成については多くの論議がなされている。しかし、仮に粉粒体全体の理想的な粒度構成が存在したとしても、粉体成分の単位量はコンクリートの所要の性能及びワーカビリティによって変化するから、骨材単独で理想粒度を決定できないことは明らかである。

細骨材及び粗骨材の粒度については、「粒度の標準」が経験などに基づき規格に定められている。粒度の規格に適合している細骨材と粗骨材の場合、コンクリート中の両者の配合比率は、一般には試し練りによって定め、骨材全体としての粒度が定まるのである。

それでは、「粒度の標準」の規格はどのように定められ

ているのであろうか。また、古典的理想粒度の式などどのような関係があるのであろうか。

この論文は、粗骨材の「粒度の標準」の構成について、主として土木学会「コンクリート標準示方書(以下、示方書と呼ぶ)【施工編】とASTM C 33の規定を中心に日米規格を対比しながら検討し、数式的意味を探索したものである。

## 2. 粒度構成の基本と規格との関係

### (1) 用いる粒度式、記号など

骨材のふるい分け試験には網ふるいが用いられるが、我が国や米国ではその目開き寸法が $150\mu\text{m}$ のものを基準にして、公比2あるいはそれに近い目開き寸法のものを等比級数的に増大させたものを逐次組み合わせた一連の試験ふるいを用いるのを原則とし、必要に応じて、その相隣ふるいの間に位置する大きさのものも使用している。

骨材の粒度は、細骨材、粗骨材ともふるいの残留百分率または通過百分率で示される。しかし、公比2の相隣ふるいの間に留まったものの百分率、すなわち粒群ごとの百分率で示すことも行われる。

したがって、粗骨材の場合、細粗骨材の分級点 $d_0$ (現在では日米とも、目開き寸法で $4.75\text{ mm}$ )を基準にして、ふるいの目開き寸法で表示した骨材の最大粒径は分級点

$d_0$ との関係を公比2を基に次式のN-1で示すことにする。  
また、N-1を粒群数と呼ぶことにする。

$$\frac{D}{d_0} = 2^{N-1} \quad (1)$$

次に、最適粒度あるいは望ましい粒度の骨材については過去多くの研究がなされてきた。この内特筆すべきは、Fuller及びThompson(1907)が提唱したもので、セメント骨材からなる粉粒体の最密粒度を放物線曲線としたFuller式である<sup>1)</sup>。75 $\mu$ m以下の量が7%以上存在するときの任意の寸法dの通過百分率pは、骨材の最大粒径Dとの間に、次式で $x=0.5$ とした場合が最密充填を得るとした。

$$p = \left( \frac{d}{D} \right)^x \times (100) \quad (2)$$

しかし、このFuller曲線の粒度は一般に細かい部分が不足しているので、コンクリートが荒々しくなることが当初から指摘されている<sup>2)</sup>。この修正の一つとしてd/Dの指数0.5の代わりに任意の指数xを用いた式<sup>3)</sup>、あるいはセメント量を除いた骨材だけのBolomeyの修正式<sup>4)</sup>(1925)、充填特性に着目したPlumの粒群一定比率の式<sup>5)</sup>、Weymouthの粒の干渉論による粒度式<sup>6)</sup>などが提唱されたが、粒度の規格に直接反映したものはなかった。

式(2)は、現在でも米国では粗骨材の粒度を論ずる場合には次式のように修正して、Talbotの式と呼ばれている<sup>7)</sup>。

$$p = \frac{d^x - d_0^x}{D^x - d_0^x} \times (100) \quad (3)$$

式(3)は、式(2)において細粗骨材の分級点 $d_0$ 以上の粗骨材部分を取り出し、この点をFuller曲線の座標原点に置換して当てはめたものである。

次に、示方書では粗骨材の最大寸法が用語とともに定義されているが、骨材全部が通過しなければならない最小のふるいの大きさの用語は定められていない。ASTM C 125<sup>8)</sup>およびACI 116<sup>9)</sup>では、maximum size of aggregateとnominal maximum size of aggregateが定義されている。前者は「骨材の全部が通過しなければならない最小のふるいの目開き」と定義され、後者の定義は「骨材の全部が通過可能な最小のふるいの目開き」とされ必ずしも全量通過する必要はなく、前者の大きさによって5~15%の範囲で存在することが許容されている。前者は、ASTMや示方書などに規定されている「粒度の範囲」で通過百分率100%となる起点のふるいの大きさである。我が国の

「粗骨材の最大寸法」はnominal maximum size of aggregateに対応している。

この論文では、maximum size of aggregateに対応する寸法を「骨材の最大粒径」(記号Dとする)と定義する。さらに、粗骨材の最大寸法には記号 $\bar{D}$ を用いることにする。

## (2) Talbotの「標準粒度」と「粒度の標準」

示方書やASTMなどに規定される粗骨材の「粒度の標準」の粒度の範囲は、骨材の供給者及び使用者の両者の立場から無理のない範囲で、多くの実験、経験を基に実用的に定められている。

粗骨材が粒群に分けてあるときは、Talbotが提示した「標準粒度」に最も近くなるように、これらの割合を定めることを吉田徳次郎博士は推奨している<sup>10)</sup>。吉田が「コンクリート及び鉄筋コンクリート施工方法」(昭和31年2月)を著した当時の試験ふるいの規格は、日米ともほぼ同じであった。この著書にはその表-29にTalbotの標準粒度が記載されているが、当時は我が国は昭和24年制定の示方書が運用されていた。紙数の関係でこれらの再録は割愛するが、吉田の著書の問題点の一つは、呼び寸法15mmの取扱いと考える。Talbotが標準粒度を提案したときのふるいは、TylerふるいやUS標準ふるいの5/8 in.(それぞれ、目開き寸法15.85 mm及び15.90 mm)でなく1/2 in.(それぞれ、目開き寸法13.34 mm及び12.70 mm)であるので、これは当時の我が国の目開き寸法の15.9 mm(5/8 in.相当)でなく12.7 mm(1/2 in.相当)に修正しなければならないと考えた。

我が国で呼び寸法15 mmを12.7 mmでなく15.9 mmの目開き寸法を用いるようになった経緯は筆者には分からないが、現在まで日米のこの取扱いは異なって現在に至っている。

試験ふるいは、国や時代によって用いるその目開き寸法が異なるので、この論文では特に断らない限り、呼び寸法でなくふるいの目開き寸法で示すことにする。また、12.7 mmの目開き寸法は我が国では使われていないが、呼び寸法15 mmを当時の15.9 mmでなく12.7 mmとみなし得るときは呼び寸法13 mmと呼ぶことにする。なお、この論文では、式(2)の指数xをFuller指数、式(3)の指数xをTalbot指数と呼ぶことにする。

次に、Talbotの標準粒度はどのように定められたか考察してみる。

吉田の著書のTalbotの標準粒度に関連して、式(3)を計算してみる。著書中の多少の計算ミスあるいは誤印刷を除いて、呼び寸法10 mm( $d=9.52$  mm)の場合以外では、この標準粒度と計算値は完全に一致している。標準粒度は式(3)による9.52 mm残留百分率よりも多くしてある。筆者が試算してみると、9.52 mmふるい残留百分率だけは式(3)の $d=9.21$  mmのときの計算値を9.52 mmふるい残留百分

率として計上したものに相当している。こうすれば、表と完全に一致した。このことは呼び寸法15 mmの最大寸法を15.9 mmの目開き寸法とすれば全体が一致せず、12.7 mmとすれば一致するので、この目開き寸法は12.7 mmであることも判明した。

Talbotの標準粒度は、粗骨材の最大寸法によっては、当時の示方書は勿論、現行のASTM C 33, 米国開拓局のコンクリートマニュアル、示方書「施工編」・「ダム編」などに示された「粒度の標準」の粒度範囲の算術平均の粒度からかなり離れている。

粗骨材の最大寸法 $\bar{D}$ が最大粒径 $D$ と一致する場合、示方書の「粒度の標準」の粒度の範囲の平均値を式(3)によってその $x$ 値を逆算すると、殆どの場合、 $x > 0.5$ となっている。換言すれば、粒度の範囲の規定は、Talbotの標準粒度を直接適用していないことが分かった。

これは「粒度の標準」に示される粒度の範囲が5%刻みで表示されていることの影響以外に、規格制定時に想定された粒度の基準が、通常の単位セメント量については、骨材の最密充填でなくコンクリートの材料分離を含むワーカビリティを考慮して、 $x > 0.5$ となる実用的な標準を示したためであろう。

開拓局コンクリートマニュアル(1975)及び示方書「ダム編」には粗骨材の粒度の範囲を粒群で表示している。また、ACI 211.1-91<sup>11)</sup>の「マスコンクリートの配合」に示される粗骨材の最大寸法が呼び寸法50 mmを超える場合の粗骨材は、伝統的なTalbot式を用い、砂利には $x=0.5$ 、碎石には $x=0.8$ を用いることを推奨している。しかし、ACI 207.1R-87<sup>12)</sup>「マスコンクリート」ではこの理論式は単なる目安としてしか評価しておらず、施工の實際を鑑み大粒の粒群の骨材量を減じた開拓局の粒度、すなわち指数 $x$ の値が上記ACIに示した値よりも小さい粒度を推奨している。

### 3. 基本粒度と中心粒度の解析作業

#### (1) 解析手法の概要

それでは、現行の示方書「施工編」及びASTM C 33では、どのような粒度形式を骨格として「粒度の標準」が定められているのであろうか。Talbotの標準粒度に代わるこの仮想的な粒度を基本粒度と呼ぶことにする。Talbotの標準粒度は、過大粒、すなわち粗骨材の最大寸法よりも大きな粒や、過小粒、すなわち細粗骨材の分級点である呼び寸法5 mm以下のものを含んでいない。よって、基本粒度にも過大粒・過小粒は存在しない。一方、過大粒・過小粒を含む「粒度の標準」では、過大粒と過小粒の間に上述の基本粒度がどのような形式で構成しているかは不明であるが、この間の粒度を中間粒度と呼ぶことにす

る。いま、「粒度の標準」の粒度範囲の算術平均を中心粒度と呼ぶ。中心粒度から過大粒・過小粒を取り除いたものが中間粒度であるが、その控除方法にはいく通りかが考えられるので、基本粒度を中間粒度から求めることは簡単でない。また、現実の「粒度の標準」は、年代とともに試験ふるいの網の目の目開きが変化したり、粒度範囲が5%刻みであること、あるいはひょっとしては粒度範囲の設定に誤りがあったりして、その中心粒度はあるべき姿の中心粒度と若干の食い違いを内包している。

ここでは、以上のことを考慮して、仮想的とも言うべき中心粒度と基本粒度とを「粒度の標準」に微かに存在する情報から解析して、次のステップで探求してみた。これが本論文の主題である。

- ① まず、生データである「粒度の標準」の粒度範囲にいくつかの解析条件を設定した。
- ② 粒度範囲の算術平均を第1次中心粒度とした。
- ③ 第1次中心粒度から過大粒・過小粒を取り除いて 中間粒度だけを3種類の方法で抽出し、それぞれ、Talbot式の粒度・粗粒率と指数を計算した。
- ④ 第1次中心粒度その他の粗粒率を基準にして、③の各粗粒率を粗骨材の最大寸法ごとに対比して、最適と思われる中間粒度の抽出方法の組合せを選択した。このシリーズを第1次基本粒度とした。
- ⑤ 第1次基本粒度のTalbot指数を数式でモデル化した。
- ⑥ 指数 $x$ のモデル式を用いて、第2次基本粒度を定めた。
- ⑦ この基本粒度に「粒度の標準」中の過大粒・過小粒の粒度範囲の算術平均を組み合わせて、第2次中心粒度を構築した。
- ⑧ 第2次中心粒度をFuller式で次のように分けてモデル化した。

過大粒の $x$ 値のモデル式

過小粒(度)の $x$ 値のモデル式

中間粒(度)の $x$ 値のモデル式

- ⑨ 上記のモデル式による中間粒度は第1次中心粒度に対する再現性が悪いので、第1次基本粒度を探求すべき基本粒度として決定した。
- ⑩ この基本粒度に⑧の過大粒・過小粒のモデル粒度を組み合わせて、これを探求する中心粒度とした。
- ⑪ 抽出された基本粒度と中心粒度によって、「粒度の標準」の粒度範囲を評価した。

#### (2) 中心粒度と基本粒度算出の前提条件

「粒度の標準」に示される粒度は、骨材の骨組みとなる最大寸法 $\bar{D}$ から細粗骨材の分級点 $d_0$ までの「中間粒度」に「過大粒」と「過小粒(度)」が許容されて存在する。粗骨材の最大寸法 $\bar{D}$ よりも大きい粒の最大値すなわち最大粒径 $D$ の取扱いは、現行の規格では日米ともまちまちでモデル化が困難である。これが解析上の第一の問題点である。

中心粒度から過大粒・過小粒を取り除いた中間粒度だけのものが基本粒度である。すなわち中心粒度から代表的「中間粒度」を如何に抽出するかが第二の問題点として存在する。

まず、第一の検討点は次のように考えた。示方書「設計編」9.3(1)<sup>13)</sup>によれば、鉄筋のあきは粗骨材の最大寸法の4/3倍以上を要求している。ACI 318R-95の3.3.2(c)及び7.6の規定<sup>14)</sup>でも同様である。これらの現行規格で、 $D > 4\bar{D}/3$ となる粗骨材の最大寸法をもつ粒度には次のものがある。このような粗骨材は最大粒径が鉄筋のあきよりもかなり大きくなり、コンクリートを打ち込むときに鉄筋のあきを材料分離を起こさずに通過させることが困難となるおそれもある。

示方書：40～5 mm( $D/\bar{D}=1.41$ 倍), 20～5 mm(1.39倍),  
10～5 mm(1.68倍)  
ASTM：25～5 mm(1.5倍), 13～5 mm(1.52倍)

これは施工の信頼性に懸念があると考えた。

ふるいの目開きが日JISの場合は、40～5 mm及び20～5 mmの粗骨材はこの問題がなく、 $D/\bar{D}=4/3$ 未満であった。

ところが、現行JISでは50.8 mm→53.0 mm, 38.1 mm→37.5 mm, 25.4 mm→26.5 mmとなったために問題が生じたのである。我が国の粗骨材の10～5 mmの場合は、呼び寸法13 mm( $d=13.2$  mmのJISのふるい)の規定がないため粒度規格の最大粒径は呼び寸法15 mm( $d=16.0$  mm)となっている。米国では25～5 mm及び13～5 mmの大きさの粗骨材に対して、それぞれ呼び寸法30 mm及び15 mmが準備されていない。これがこの問題を起こしている。

この対策として、呼び寸法50 mmと25 mmのふるいについてはふるいの目開きを米国流にそれぞれ50.0 mmと25.0 mmとしても解決するが、粗骨材の最大粒径を最大寸法の1.4倍程度までは施工上許容できるとすれば上述の問題の大半は無視できる。

しかし、呼び寸法13 mmのふるい( $d=13.2$  mm)を導入しなければ、10～5 mmの大きさの粗骨材についてはこの問題は解決しない。これを導入すれば、10～5 mmの粗骨材についても最大粒径は最大寸法の1.39倍となる。

以下に述べる「粒度の標準」の解析では、 $p=100\%$ となる最大粒径 $D$ を最大寸法のほぼ1.4倍以下となるように試験ふるいを導入して、粒度規格の体系を修正して検討することにした。すなわち、この解析では、土木学会の規定には呼び寸法13 mmを、ASTMには30 mmと15 mmの呼び寸法を導入することにした(いずれも目開き寸法はJISによる)。

第二の問題点は、中心粒度から基本粒度から抽出する方法である。基本粒度の選定は、後々の基本粒度の解析結果に影響を及ぼすので慎重でなければならない。

中心粒度から、過大粒・過小粒を除去して基本粒度を求める方法に、次のI, IIの考え方とこれから派生するIIIの方法の3通りの類型がある。

- I 粒度の標準の粒度の範囲の平均値である第1次中心粒度を中間粒度の範囲だけにそのまま適用する方法
- II 上記の中心粒度をベースに、過大粒・過小粒の分だけ中間粒度の値を按分補正する方法
- III IとIIの粒度の平均値

上記の検討を行うに当たっては、まず、日米の試験ふるいがほぼ同じであった頃の規格を用いて試算し、さらに現行規格について計算した。この旧規格を表-1に示し、その注記に現行規格までの改訂事項を示した。なお、この表では提案した粗骨材の最大粒径の制限は適用していない。またコンクリートの配合設計では粗骨材の粗粒率は考慮しないのが一般的であるが、Long et al.<sup>15)</sup>は粗骨材の粗粒率の代表値も配合表に示しているの、示方書の中心粒度及びTalbotの標準粒度の粗粒率と共に示す。

古い規格を検討に加えた理由は、次のことによる。この15年間にISOの試験ふるいが導入されて、基準となるふるいの目開き寸法が日米かなり違った値になってきた。しかし、JIS、土木学会及びASTMの「粒度の標準」の粒度の範囲の値があまり修正されずに現在に至り、かつ、呼び寸法が日米同じであってもふるいの目開きは全く異なる値を採っているのが現状である。たとえば、呼び寸法が25 mmの場合のふるいの目開きは、我が国では26.5 mmであるのに対してASTMでは25.0 mmを採用している。また、我が国では「粒度の標準」を示方書の改訂の度に骨材事情の変化などに合わせて修正して、日米の対比が困難となったのである。

### (3) 第1次基本粒度の算出とモデル化

表-2及び表-3は、それぞれ旧規格(表-1)及び現行の規格の粒度の範囲の算術平均である第1次中心粒度から、過大粒・過小粒を含まない基本粒度の通過百分率 $p$ を、それぞれI, II及びIIIの方法によって求め、これに対して式(3)を次のように変形して、Talbot指数 $x$ を求めた。

$$(d/d_0)^x - p(D/d_0)^x = 1-p$$

Talbot指数 $x$ は、任意の $p(100\% \geq p \geq 0\%)$ に対して、 $x=0$ 以外にも正の解が存在するのが一般である。表-2及び表-3をみると、粗骨材の最大寸法が呼び寸法で15 mm(すなわち15.9 mmあるいは16.0 mm)の土木学会の粗骨材の $x$ 値については、 $x=0$ 以外の解は極めて小さいかあるいは負の解しか存在しない。 $d=9.50$  mm(9.52 mm)における粒度の範囲は $p=40\sim 70\%$ である。そこで、Talbot式の正の解が存在

表-1 示方書(昭和52年版, 一部昭和24年版抜粋)及びASTM C 33-71aの「粒度の標準」の規定

規格		旧JSCE (昭24)	JSCE & ASTM	JSCE & ASTM	JSCE	JSCE & ASTM	JSCE & ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM'
ふるいの 目開き 寸法 d(mm)	粗骨材の最大 寸法 $\bar{D}$ (mm)	76.2 (80)	50.8 (50)	38.1 (40)	31.7* (30)	25.4 (25)	19.1 (20)	15.9* (15)	12.7# (13)	9.52* (10)	9.52# (10)
	骨材の 最大粒径 寸法 $\bar{D}$ (mm)	101.6	63.5	50.8	38.1	31.7* 38.1#	25.4	19.1	19.1	15.9*	12.7#
当時	(参考)現行										
101.6	106	100									
76.2	75.0	95-100									
63.5	63.0		100								
50.8	53.0(50.0#)		95-100	100							
38.1	37.5	40-75		95-100	100						
31.7	32.0			100	95-100						
25.4	26.5(25.0#)		35-70			100# 100* 95-100					
19.1	19.0	20-40		35-70	40-75		100	100	100		
15.9	16.0		10-35*			30-70*		90-100		100	
12.7	13.2(12.5#)		10-30#			25-60#			90-100		100
9.52	9.50	5-15		10-30	10-35		20-55	40-70	40-70	85-100*	85-100
d <sub>0</sub> 4.76	4.75	0-5	0-5	0-5	0-10	0-10	0-10	0-15	0-15	0-40	10-30
2.38	2.36	0	0	0	0-5	0-5	0-5	0-5	0-5	0-10	0-10
1.19	1.18				0	0	0	0	0	0	0-5
0.59	0.600										0
㊸中心粒度のFM		8.04	-	7.29	7.17	-	6.61	6.36	6.36	5.83	5.81
㊹ENR-book <sup>15)</sup> のFM		8.00	7.70	7.30	-	7.00	6.60	-	6.37	-	5.83
㊺Talbot標準粒度のFM		7.93	7.58	7.24	-	6.94	6.61	-	6.38	-	-

\*印は土木学会の, #印はASTMの規定. ASTMには $\bar{D}=31.7$  mmおよび $15.9$  mmのふるいは規定されておらず, JSCEには $12.7$  mm(現行 $13.2$  mm, 以下呼び寸法 $13$  mmとする)のふるいが規定されていない.

\*印の特記として次のことがある. 昭和49年度の示方書改訂によりASTMと異なる「粒度の範囲」に改訂したものや(粗骨材の最大寸法 $\bar{D}=25.4$  mmの場合は,  $31.7$  mmふるいの導入によって昭和31年版の最大粒径が $38.1$  mmから変更された), その後, 現在までに改訂されたものがある. すなわち, 呼び寸法 $\bar{D}=50$  mmの場合の $d=16.0$  mmの粒度の範囲は平成8年版では $10-30\%$ に戻り, さらに呼び寸法 $\bar{D}=10$  mmの $d=9.52$  mmの粒度の範囲は平成3年版から $90-100\%$ に改訂されて現在に至っている).

する範囲を試算すると,  $p=40\sim 58.5\%$ であった.  $p=58.7\sim 70\%$ の区間は妥当な解がないことが分かった. Talbot式を適用する観点からは, 土木学会の $15\sim 5$  mmの取扱いは妥当とは言えない.

また, 表-2及び表-3のI, II, IIIの基本粒度の候補について, 土木学会が規定している $d=16.0$  mmにおける $x$ 値は, いずれの場合もその他のものに比べて全て異常に大きな値である. この場合も「粒度の範囲」の規定が妥当とは言えない.

以上のことから, 表-2及び表-3の検討に当たっては,  $16.0$  mmが関係するデータは解析からは外すことにした.

表-4及び表-5は, それぞれ表-2及び表-3の粗粒率の一覧である. 表-4のTalbot標準粒度の粗粒率は吉田の著書から計算したものであるが, 先述の標準粒度の計算要領と食い違いがある場合は修正し, また表にないものは, 計算して載せた. 表-5のTalbot標準粒度の粗粒率は, 試験ふるいの目開き規格が変更になっているので, 計算値

を載せた.

表-4及び表-5とも, ㊺のTalbot標準粒度の粗粒率は, ㊸の中心粒度及び㊹のENR<sup>15)</sup>の粗粒率と $\bar{D}=20$  mmの呼び寸法の場合のみは一致するが, これよりも大きな最大寸法では小さくなり, 最大寸法が小さくなれば大きくなっている. すなわち基本粒度の粗粒率としては, Talbot粒度と違ったものを期待している. 一方, ㊸の中心粒度の粗粒率と㊹のENRの粗粒率とはほぼ一致している.

それで, I~IIIの過大粒・過小粒のない場合の基本粒度の選定方法を評価するのに, ㊸の過大粒・過小粒を含む中心粒度の粗粒率を表のI~IIIの値と対比した. 適切な粗粒率は, 粗骨材の最大寸法が変われば基本粒度の選定方法も変化する傾向を示す. すなわち,  $\bar{D}=40\sim 80$  mmの呼び寸法の粗骨材ではIの方法,  $\bar{D}=20\sim 30$  mmの呼び寸法ではIIIの方法,  $\bar{D}=13$  mmではIIの方法となる.  $\bar{D}=10$  mmの場合は理論上は $FM=6.00$ であるので同じくIIの方法となる.

表-2 3通りの第1次基本粒度候補の通過百分率 $\bar{p}$ 及びTalbot指数 $x$ の計算値  
示方書(昭和52年版)及びASTM C 33-71a

\*JSCE #ASTM

d (mm)	JSCE(昭和24年)			JSCE & ASTM			JSCE & ASTM		
	$\bar{D}=76.2$ (80)			$\bar{D}=50.8$ (50)			$\bar{D}=38.1$ (40)		
	Iの方法	IIの方法	IIIの方法	Iの方法	IIの方法	IIIの方法	Iの方法	IIの方法	IIIの方法
	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$
76.2	100 -	100 -	100 -	-	-	-	-	-	-
50.8	-	-	-	100 -	100 -	100 -	-	-	-
38.1	57.5/0.618	60.5/0.515	59.0/0.567	-	-	-	100 -	100 -	100 -
31.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.4	-	-	-	52.5/0.700	55.3/0.594	53.9/0.647	-	-	-
19.1	30.0/0.614	31.6/0.560	30.8/0.587	-	-	-	52.5/0.595	55.3/0.481	53.9/0.539
15.9	-	-	-	22.5*/1.081	23.7/1.023*	23.1*/1.052	-	-	-
12.7	-	-	-	20.0#/0.855	21.1/0.801#	20.5#/0.830	-	-	-
9.52	10/0.732	10.5/0.694	10.3/0.711	-	-	-	20.0/0.643	21.1/0.582	20.5/0.615
4.76	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -
FM	8.03	7.98	8.00	-	-	-	7.28	7.24	7.26
N-1	4.001			3.416			3.001		

d (mm)	JSCE			JSCE & ASTM			JSCE & ASTM		
	$\bar{D}=31.7^*$ (30)			$\bar{D}=25.4$ (25)			$\bar{D}=19.1$ (20)		
	Iの方法	IIの方法	IIIの方法	Iの方法	IIの方法	IIIの方法	Iの方法	IIの方法	IIIの方法
	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$
38.1	100 -	100 -	100 -	-	-	-	-	-	-
31.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.4	57.5/0.791	62.2/0.562	59.8/0.679	100 -	100 -	100 -	-	-	-
19.1	-	-	-	-	-	-	100 -	100 -	100 -
15.9	-	-	-	50.0*/0.219	54.1*/0.993	52.0*/1.108	-	-	-
12.7	-	-	-	42.5#/0.791	45.9/0.661	44.2#/0.706	-	-	-
9.52	22.5/0.702	24.3/0.602	23.4/0.651	-	-	-	37.5/0.729	41.7/0.476	39.6/0.601
4.76	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -
FM	7.21	7.14	7.17	-	-	-	6.63	6.58	6.60
N-1	2.735			2.416			2.005		

d (mm)	JSCE			ASTM		
	$\bar{D}=15.9^*$ (15)			$\bar{D}=12.7^{\#}$ (13)		
	Iの方法	IIの方法	IIIの方法	Iの方法	IIの方法	IIIの方法
	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$	$\bar{p}_1/x_1$	$\bar{p}_2/x_2$	$\bar{p}_3/x_3$
15.9	100 -	100 -	100 -	-	-	-
12.7	-	-	-	100 -	100 -	100 -
9.52	55.0/0.167	62.9/0(無解)	59.0/0(無解)	55.0/1.450	62.9/0.730	59.0/1.087
4.76	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -
FM	-	-	-	6.45	6.37	6.41
N-1	1.740			1.416		

表-3 3通りの第1次基本粒度候補の通過百分率 $\bar{p}$ 及びTalbot指数 $x$ の計算値  
示方書(平成8年版)および現行ASTM C 33-93

d (mm)	JSCE						ASTM						JSCE & ASTM					
	$\bar{D}=53.0 (50)$						$\bar{D}=50.0 (50)$						$\bar{D}=37.5 (40)$					
	Iの方法		IIの方法		IIIの方法		Iの方法		IIの方法		IIIの方法		Iの方法		IIの方法		IIIの方法	
	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$
53.0	100	-	100	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50.0	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	100	-	-	-	-	-	-	-
37.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	100	-
31.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26.5	52.5	0.713	55.3	0.608	53.9	0.660	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.0	-	-	-	-	-	-	52.5	0.696	55.3	0.589	53.9	0.643	-	-	-	-	-	-
19.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52.5	0.615	55.3	0.498	53.9	0.356
16.0	20	1.163	21.1	1.106	20.5	1.137	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-	-	-	20	0.848	21.1	0.793	20.5	0.823	-	-	-	-	-	-
9.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	0.656	21.1	0.595	20.5	0.628
4.75	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
FM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.28	-	7.24	-	7.26	-
N-1	3.480						3.396						2.981					

d (mm)	JSCE						JSCE						ASTM					
	$\bar{D}=31.5\# (30)$						$\bar{D}=26.5\# (25)$						$\bar{D}=25.0 (25)$					
	Iの方法		IIの方法		IIIの方法		Iの方法		IIの方法		IIIの方法		Iの方法		IIの方法		IIIの方法	
	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$
31.5	100	-	100	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26.5	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	100	-	-	-	-	-	-	-
25.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	100	-	-
19.0	57.5	0.792	62.2	0.564	59.8	0.680	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16.0	-	-	-	-	-	-	50	1.091	54.1	0.876	52.0	0.985	-	-	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42.5	0.780	45.9	0.608	44.2	0.693
9.50	22.5	0.707	24.3	0.607	23.4	0.657	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.75	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
FM	7.21	-	7.14	-	7.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N-1	2.729						2.480						2.396					

d (mm)	JSCE & ASTM						JSCE						ASTM					
	$\bar{D}=19.0 (20)$						$\bar{D}=16.0 (15)$						$\bar{D}=12.5 (13)$					
	Iの方法		IIの方法		IIIの方法		Iの方法		IIの方法		IIIの方法		Iの方法		IIの方法		IIIの方法	
	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$	$\bar{p}_1$	$x_1$	$\bar{p}_2$	$x_2$	$\bar{p}_3$	$x_3$
19.0	100	-	100	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16.0	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	100	-	-	-	-	-	-	-
12.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	100	-	-
9.50	37.5	0.737	41.7	0.483	39.6	0.660	55	0.139	62.9	0(無解)	58.9	0(無解)	55	1.587	62.9	0.849	58.9	1.223
4.75	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
FM	6.63	-	6.58	-	6.60	-	-	-	-	-	-	-	6.45	-	6.37	-	6.41	-
N-1	2.000						1.752						1.396					

表-4 過大粒・過小粒を含まない3通りの基本粒度候補の粗粒率（昭和52年版示方書及びASTM C 33-71a）

規格	JSCE (昭24)	JSCE & ASTM	JSCE & ASTM	JSCE	JSCE	JSCE & ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM
中央粒度選定の類型 $\bar{D}$ (mm)	76.2	50.8	38.1	31.7	25.4	19.1	15.9	12.7	9.52	9.52
Iの方法(過大粒・過小粒なし)	8.03	-	7.28	7.21	-	6.63	6.45(x=0.167)	6.45	5.80	5.80
IIの方法(過大粒・過小粒なし)	7.98	-	7.24	7.14	-	6.58	6.37(x=0)	6.37	6.00	6.00
IIIの方法(過大粒・過小粒なし)	8.00	-	7.26	7.17	-	6.60	6.41(x=0)	6.41	5.90	5.90

参考：示方書の中心粒度その他のFM値

㊸中心粒度(過大粒・過小粒あり)	8.04	-	7.29	7.17	-	6.61	6.36	6.36	5.83	5.81
㊹ENR <sup>15)</sup> 値(過大粒・過小粒あり)	8.00	7.70	7.30	-	7.00	6.60	-	6.37	5.83	5.83
㊺標準粒度(過大粒・過小粒なし)	7.93	7.58	7.24	7.12	6.93	6.61	6.53	6.38	6.06	6.06

表-5 過大粒・過小粒を含まない3通りの基本粒度候補の粗粒率（平成8年版示方書及びASTM C 33-93）

規格	JSCE	ASTM	JSCE & ASTM	JSCE	JSCE	JSCE	JSCE & ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM
中央粒度選定の類型 $\bar{D}$ (mm)	53.0	50.0	37.5	31.5	26.5	25.0	19.0	16.0	12.5	9.50	9.50
Iの方法(過大粒・過小粒なし)	-	-	7.28	7.21	-	-	6.63	6.45(x=0.139)	6.45	5.80	5.80
IIの方法(過大粒・過小粒なし)	-	-	7.24	7.14	-	-	6.58	6.37(x=0)	6.37	6.00	6.00
IIIの方法(過大粒・過小粒なし)	-	-	7.26	7.17	-	-	6.60	6.41(x=0)	6.41	5.90	5.90

参考：示方書の中心粒度その他のFM値

㊸中心粒度(過大粒・過小粒あり)	-	-	7.29	7.17	-	-	6.61	6.36	6.36	5.80	5.81
㊹ENR <sup>15)</sup> 値(過大粒・過小粒あり)	7.70	7.70	7.30	-	7.00	7.00	6.60	-	6.37	5.83	5.83
㊺標準粒度(過大粒・過小粒なし)	7.63	7.57	7.23	7.12	6.98	6.93	6.61	6.53	6.38	6.06	6.06

$\bar{D}=15$  mmの呼び寸法の場合は、「粒度の標準」からの信頼できる情報が得られないが、傾向からしてIIまたはIIIの選定方法となる。

選択された方法の粗粒率でみると、粗骨材の最大寸法が変われば基本粒度の選定方法も変化している。すなわち、 $\bar{D}=40\sim 80$  mmの呼び寸法の粗骨材ではIの方法、 $\bar{D}=20\sim 30$  mmの呼び寸法ではIIIの方法、 $\bar{D}=13$  mmではIIの方法となる。 $\bar{D}=10$  mmの場合は理論上はFM=6.00であるので同じくIIの方法となる。

$\bar{D}=15$  mmの呼び寸法の場合は、「粒度の標準」からの信頼できる情報が得られないが、IIまたはIIIの選定方法となる。

このように選定された第1次基本粒度を表-2及び表-3のTalbot指数xで評価してみる（ただし、 $d=15$  mmの呼び寸法を除く）。信頼できるデータは、粗骨材の最大寸法 $\bar{D}$ が20 mm以上の呼び寸法の場合とみなし、 $\bar{D}=13$  mm及び15 mmについては別途考慮することにした。すなわち、 $\bar{D}=13$  mmの粗骨材の場合はかなり違った傾向を示し、 $\bar{D}=15$  mmではデータの信頼性が乏しいからである。

表-6 寸法位置数(n-1)とTalbot指数x

n-1	xの平均値			標準偏差	データ数 両表総数
	表-2の値	表-3の値	平均	平均	
3	0.618	-	0.618	-	1
2	0.629	0.648	0.639	0.040	5
1	0.657	0.658	0.657	0.039	7

$$\text{寸法位置数 } n-1 = \frac{\log(d/d_0)}{\log 2} \quad (4)$$

したがって、データ数は両方の表で20個ある。このうち、粗粒率の計算にリンクするx値は $d=10, 20$ 及び $40$  mmの呼び寸法の11個のデータである。

ここで、当該の寸法dは、寸法位置数n-1を式(4)のように定義し、これを用いて示す。選定されたx値を表-6でみると、I、II、IIIの方法の最小値でも最大値でもない。適度のx値が選定されている。

表-6のn-1と表-2及び表-3の平均x値の関係をn-1=2と1について求めると、式(5)の関係をj得る。

$$x=0.677-0.020(n-1) \quad (5)$$



表-7 式(5)のTalbot指数xでモデル化した第2次基本粒度p及び規格(平成8年度示方書・ASTM-93)の中心粒度との差

規格	JSCE	ASTM	JSCE & ASTM	JSCE	JSCE	ASTM	JSCE & ASTM	JSCE	ASTM	
D (mm)	53.0	50.0	37.5	31.5	26.5	25.0	19.0	16.0	12.5	
d (mm)	x	p 差	p 差	p 差	p 差	p 差	p 差	p 差	p 差	
53.0	0.607	100								
50.0	0.609	95.5	100							
37.5	0.617	75.2	78.8	100						
31.5	0.622	64.4	68.2	85.8	100					
26.5	0.627	54.8 +2.3	57.4	73.1	85.0	100				
25.0	0.629	51.8	54.3 +1.8	69.1	80.6	94.6	100			
19.0	0.637	38.9	40.8	52.0 -0.5	60.7 +0.9	71.3	75.4	100		
16.0	0.642	31.9 +11.9	33.4	42.7	49.8	58.6 +6.6	62.0	82.3	100	
13.2	0.648	24.9	26.1	33.4	39.0	45.9	48.6	64.5	77.5	
12.5	0.649	23.1	24.2 +4.2	31.0	36.2	42.6	45.1 +0.9	59.9	72.9	
9.50	0.657	14.9	15.6	20.0 ±0	23.4 ±0	27.5	29.2	38.8 -0.8	47.2 -15.7	
4.75	0.677	0	0	0	0	0	0	0	0	
基本粒度の類型		I	I	I	III	III	III	III	II	II
粗粒率 FM		7.71	7.64	7.28	7.16	7.02	6.96	6.61	6.55	6.37

個々のx値による回帰式では、相関関係はあまりよくないが、式(5)と同様な関係を得た。

式(5)をn-1=3に外挿しても、そのx値は表-6のデータ数1個のx=0.618と0.001しか大きくない。よって、この式は汎用的に適用可能と考えた。この粒度分布ではx値は一定でなく、寸法の小さな部分の通過百分率pが大きくなっていることを意味する。Talbotも標準粒度としてd=9.52 mmの部分で $\sqrt{9.52/9.21}=1.017$  倍多くしたが、式(5)による値はそれ以上に多くなる。またx値も0.5よりも大きいことも明確となった。

$\bar{D}=13$  mmの粗骨材では、d=9.52 mm(9.50 mm)、すなわちn-1=1.416(1.396)における式(5)の計算値x=0.649(0.649)よりもはるかに大きい値の0.805(=(0.730+0.849)/2)が、表-2及び表-3として示されている。どちらが妥当かはコンクリートの実験を行わないと不明であろう。規格の値を信頼すれば、式(5)よりもx値を1.24倍増加させる必要がある。 $\bar{D}=15$  mmの場合も同様である。 $\bar{D}=20$  mm未満の呼び寸法でもなるべくデータに忠実になるよう、x値を粒群数N-1に応じて式(5)よりも増加させる計算も行い式(6-1)及び(6-2)を得た。

$$x=[0.677-0.020(n-1)], N-1 \geq 2.0 \quad (6-1)$$

$$x=[1.80-0.40(N-1)][0.677-0.020(n-1)], N-1 \leq 2.0 \quad (6-2)$$

しかし、 $\bar{D}=20$  mm未満のx値の推定は、表-2及び表-3の基本粒度の計算方法によって大幅に異なること、式(6-2)のx値で通過百分率を計算しても式(5)による場合よりもp=0.9~1.7%しか小さい結果を与えないことから、ここで

は、式(6-1)及び(6-2)よりも式(5)の方が $\bar{D}=20$  mm未満を含む全区間に適用できるとした。これをモデル化した第2次基本粒度とした。

#### (4) 第2次基本粒度と第1次基本粒度の対比

上記の解析の結果、「粒度の標準」に示される粒度の内、過大粒・過小粒を含まない基準となる粒度は、前節でI, II, IIIの粒度の候補から最も適当と思われた第1次基本粒度を式(5)でモデル化したものが第2次基本粒度である。ただし、D=16.0 mmについてはIIを選定した。この式を用いて、日米の現行規格を対比したのが表-7である。D=16.0 mm及びd=16.0 mmについては、規格値と大きな乖離(乖離)があるのは当然である。

表-7のx値は、16.0 mmに係わるデータを全て排除して考察すると、ASTMのD=50.0 mmにおけるd=12.5 mmのp=4.2%以外は表-3の第1次基本粒度候補の内の最適とした選定方法のx値と±2.5%以内にある(x=-0.5~2.3)。

#### (5) 過大粒・過小粒を含む第2次中心粒度

規格の粒度の範囲は、粗骨材の最大寸法 $\bar{D}$ と最大粒径Dが一致せず、最小粒径も $d_0$ (呼び寸法5 mm)以下となっていて過大粒・過小粒を含む。また、これらの規定では最大粒径が粗骨材の最大寸法の4/3を超えるものもある。ここでは最大粒径Dと粗骨材の最大寸法 $\bar{D}$ の関係を、先前提条件に従い、最大粒径Dを修正した。

すなわち、25~5 mm(ASTM)、13~5 mm(ASTM)及び10~5 mm(土木学会)の粗骨材の最大粒径Dは、それぞれ37.5 mm、19.0 mm及び16.0 mmであるが、これをそれぞれ31.5 mm、16.0 mm及び13.2 mmに制限する。

表-8 過大粒・過小粒を含む第1次中心粒度 (Talbot暫定基本粒度の中間粒度+規格の過大粒・過小粒量の平均値) 及び規格の粒度の範囲(現行規格)

過大粒・過小粒の量: 斜体

規格	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM
d 最大寸法 $\bar{D}$ (mm)	53.0	50.0	37.5	37.5	31.5	26.5	25.0	19.0	19.0	16.0	12.5	9.50	9.50
d (mm) 最大粒径D(mm)	63.0	63.0	53.0	50.0	37.5	31.5	31.5☆	26.5	25.0	19.0	16.0☆	13.2☆	12.5
63.0	100	100											
53.0	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	-	100										
50.0	90.7	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	-	100									
37.5	71.4	74.9	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	100								
31.5	61.2	64.8	81.5	81.5	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	100	100						
26.5	52.1 <i>35-70</i>	54.5	69.4	69.4	78.6	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	-	100					
25.0	49.2	51.6 <i>35-70</i>	65.6	65.6	74.6	87.5	<i>97.5</i> <i>95-100</i>	-	100				
19.0	37.2	38.8	49.4 <b>35-70</b>	49.4 <b>35-70</b>	56.1 <i>40-75</i>	66.0	69.7	<i>95.0</i> <i>90-100</i>	<i>95.0</i> <i>90-100</i>	100			
16.0	30.3 <b>10-30</b>	31.4	40.6	40.6	46.1	54.2 <b>30-70</b>	57.4	74.1	74.1	<i>95.0</i> <i>90-100</i>	100		
13.2	23.7	24.8	31.7	31.7	36.1	42.5	45.0	58.1	58.1	67.8	-	100	
12.5	21.9	23.0 <b>10-30</b>	29.5	29.5	33.5	39.4	41.7 <b>25-60</b>	53.9	53.9	63.8	<i>95.0</i> <i>90-100</i>	-	100
9.50	14.2	14.8	19.0 <i>10-30</i>	19.0 <i>10-30</i>	21.6 <i>10-35</i>	25.4	27.0	34.9 <i>20-55</i>	34.9 <i>20-55</i>	41.3 <b>40-70</b>	56.8 <i>40-70</i>	<i>95.0</i> <i>90-100</i>	<i>92.5</i> <i>85-100</i>
4.75 ( <i>d<sub>0</sub></i> )	2.5	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	5.0 <i>0-10</i>	5.0 <i>0-10</i>	5.0 <i>0-10</i>	5.0 <i>0-10</i>	5.0 <i>0-10</i>	7.5 <i>0-15</i>	7.5 <i>0-15</i>	20.0 <i>0-40</i>	20.0 <i>10-30</i>
2.36	0.5	0	0	0	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	2.5 <i>0-5</i>	5.0 <i>0-10</i>	5.0 <i>0-10</i>
1.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5 <i>0-5</i>
D/d <sub>0</sub> の粒群数 N-1	3.729	3.729	3.481	3.396	2.981	2.729	2.729	2.480	2.480	2.000	1.752	1.475	1.396
FM	7.76	7.69	7.33	7.33	7.15	7.02	6.96	6.63	6.63	6.50	6.34	5.80	5.81
中間粒度の類型	I	I	I	I	III	III	III	III	III	III	II	II	-

☆はASTMの, ★は土木学会の最大粒径を, 規格から変更した試案。

過大粒・過小粒を含む暫定の中心粒度としては, まず, 規格に示される過大粒・過小粒の粒度の範囲の平均値を粒度に先に割り振り, その後, 表-7の第2次基本粒度の通過百分率を過大粒・過小粒の量だけ補正して中間粒度 $\bar{D}$ ~ $d_0$ の区間に割り振った。

この粒度を表-8に示す。

#### (6) 第2次中心粒度のモデル化と基本粒度の決定

Talbot変換した中間粒度をもつ表-8の中心粒度を数式化することを試みる。表-8をみれば容易に分かることだが, 粗骨材の最大寸法が呼び寸法で50 mmと25 mmの場合は, 我が国では $d=16.0$  mmにおける粒度の範囲の規定が米国では12.5 mmとなっている。ここでは日米の規格のこの違いは自分そのまま認しておく。

モデルの式としては, 後々の計算の便宜から最大粒径 $D$ を考慮したFuller式を採用した。

ただし, 計算に当たっては, 式(1)の粒群数 $N-1$ 及び $v$

(4)の寸法位置数 $n-1$ を用いて整理した。

この計算作業は, 中心粒度の粗骨材の最大寸法が同じでも最大粒径の違う場合の規格を特性化するのに有効である。

表-9は表-8からFuller指数 $x$ を計算した結果である。

表-9の解析結果から次のことが言える。

#### a) $\bar{D}$ ~ $D$ の過大粒

粒度の許容範囲は粗骨材の最大寸法が $\bar{D}=25$  mm以上の呼び寸法では95~100%,  $\bar{D}=25$  mm未満では90~100%で $\bar{D}=10$  mmのみ90~100%または85~100%である。この場合の $x$ 値は, 許容範囲のほかに粗骨材の最大寸法 $\bar{D}$ と最大粒径 $D$ の位置関係の影響を受ける。

$x$ の平均値 $\bar{x}$ とその値が $\bar{D}$ ~ $D$ の間に位置する寸法 $D'$ は次の通りである。

$$\begin{aligned} \bar{D}=25 \text{ mm 以上の場合: } & \bar{x}=0.117, D'=0.803D \\ \bar{D}=20 \text{ mm の場合: } & \bar{x}=0.171, D'=0.699D \\ \bar{D}=15 \text{ mm 以下の場合: } & \bar{x}=0.237, D'=0.776D \end{aligned}$$

表-9 表-8の過大粒・過小粒を含む第1次中心粒度のFuller指数のx値  
 $(p=(d/D)^n, N-1=\log(D/d_0)/\log 2, n-1=\log(d/d_0)/\log 2)$

規格		JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	
d	$\bar{D}$ (mm)	53.0	50.0	37.5	37.5	31.5	26.5	25.0	19.0	19.0	16.0	12.5	9.50	9.50	
	D (mm)	63.0	63.0	53.0	50.0	37.5	31.5	31.5*	26.5	25.0	19.0	16.0*	13.2*	12.5	
(mm)	n-1	N-1	3.729	3.729	3.480	3.395	2.981	2.729	2.729	2.480	2.396	2.000	1.752	1.475	1.396
63.0	3.729	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53.0	3.480	0.146	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50.0	3.396	0.422	0.110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37.5	2.981	0.649	0.557	0.073	0.088	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31.5	2.792	0.708	0.626	0.393	0.443	0.145	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26.5	2.480	0.753	0.701	0.527	0.575	0.694	0.146	-	-	-	-	-	-	-	-
25.0	2.396	0.767	0.716	0.561	0.608	0.723	0.578	0.110	-	-	-	-	-	-	-
19.0	2.000	0.829	0.790	0.687	0.729	0.850	0.822	0.714	0.154	0.187	-	-	-	-	-
16.0	1.752	0.871	0.845	0.753	0.791	0.909	0.904	0.819	0.594	0.672	0.298	-	-	-	-
13.2	1.475	0.921	0.892	0.826	0.863	0.976	0.984	0.918	0.779	0.850	1.067	-	-	-	-
12.5	1.396	0.939	0.909	0.845	0.881	0.995	1.008	0.946	0.822	0.892	1.073	0.208	-	-	-
9.50	1.000	1.032	1.010	0.966	1.000	1.116	1.143	1.092	1.026	1.088	1.276	1.085	0.156	0.284	
4.75	0.000	1.427	1.427	1.529	1.567	1.450	1.583	1.583	1.743	1.804	1.868	2.133	1.575	1.663	
2.36	-1.009	-	-	-	-	1.334	1.424	1.424	1.525	1.563	1.769	1.927	1.740	1.797	
1.18	-2.009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.563	

☆はASTMの最大粒径を, ★は土木学会の最大粒径を, 規格から変更した案を適用. 斜体は過大粒・過小粒.

したがって, 個々の過大粒のx値は次のようにして計算した.

$$x = \frac{x'}{D'} \cdot \frac{\bar{D}}{D} \quad (7)$$

この計算結果は次のようになる.

$$\bar{D}=25 \text{ mm 以上の場合: } x=0.146\bar{D}/D$$

$$\bar{D}=20 \text{ mm の場合: } x=0.245\bar{D}/D$$

$$\bar{D}=15 \text{ mm 以下の場合: } x=0.305\bar{D}/D$$

b)  $d_0$ 以下の過小粒

$d=4.75, 2.36$ 及び $1.18 \text{ mm}$ の通過量については,  $x=1.4 \sim 2.1$ の範囲にある.

粗骨材の最大寸法が $\bar{D}=12.5 \sim 53.0 \text{ mm}$ における過小粒については $N-1$ との相関が認められ,  $4.75 \text{ mm}$ 通過量,  $2.36 \text{ mm}$ 通過量のx値については, それぞれ次の関係がある.

$$\begin{aligned} x_s &= 2.49 - 0.295(N-1), & \text{相関係数 } \gamma &= 90\% \\ x_{2.36} &= 2.32 - 0.320(N-1), & \text{相関係数 } \gamma &= 91\% \end{aligned} \quad (8)$$

$1.18 \text{ mm}$ 通過量のx値についてはデータは殆どないが, もし算出するとすれば,  $4.75 \text{ mm}$ に対する値の95%となる. しかし,  $\bar{D}=9.5 \text{ mm}$ の粗骨材の過小粒については, その

関係が明瞭でない. これは幅広い粒度の許容範囲の算術平均をモデルの代表値として選んだことに無理があったのかも知れない. ここでは,  $\bar{D}=9.5 \text{ mm}$ の場合は  $d=4.75 \sim 1.16 \text{ mm}$ の一連のデータから $x=1.7$ を一律に採用する.

c)  $d_0$ 以上 $D$ 以下の中間粒

骨材機能が本質的に支配されるのはこの区間である. 粗骨材の最大寸法が $\bar{D}=16.0 \text{ mm}$ と $12.5 \text{ mm}$ の場合はFuller指数 $x$ がやや大きい傾向を示す. これは前節のTalbot指数を増大させたことに起因すると考えられる.

よって, 概念の域を出ないが,  $\bar{D}=19.0 \text{ mm}$ 以上の粗骨材では,  $d$ または $n-1$ ごとにほぼ一定の傾向を示す. しかし,  $d \geq 31.5 \text{ mm}$ ではデータ数が少なく, ばらつきも大きい.  $\bar{D}=19.0 \text{ mm}$ 以上の粗骨材について計算したx値の平均値と標準偏差を参考に示す.

$d=9.50 \text{ mm}, n-1=1.000$	$x=1.056 \pm 0.063$
$d=12.5 \text{ mm}, n-1=1.396$	$x=0.915 \pm 0.063$
$d=13.2 \text{ mm}, n-1=1.475$	$x=0.890 \pm 0.068$
$d=16.0 \text{ mm}, n-1=1.752$	$x=0.795 \pm 0.107$
$d=19.0 \text{ mm}, n-1=2.000$	$x=0.774 \pm 0.064$
$d=25.0 \text{ mm}, n-1=2.396$	$x=0.659 \pm 0.087$
$d=26.5 \text{ mm}, n-1=2.480$	$x=0.650 \pm 0.095$
$d=31.5 \text{ mm}, n-1=2.792$	$x=0.543 \pm 0.149$
$d=37.5 \text{ mm}, n-1=2.981$	$x=0.603 \pm 0.065$
$d=50.0 \text{ mm}, n-1=3.396$	$x=0.422$ (1個のデータ)

$d$ が大きい場合も $n-1$ と $x$ とは相当な相関関係があるとみなされるが, データ数が少ないので信頼性に乏しい.

表-10 過大粒・過小粒を含む場合のFuller式でモデル化した中心粒度と現行「粒度の範囲」の修正試案

規格	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM
d	53.0	50.0	37.5	37.5	31.5	26.5	25.0	19.0	19.0	16.0	12.5	9.50	9.50
(mm)	63.0	63.0	53.0	50.0	37.5	31.5	31.5★	26.5	25.0	19.0	16.0★	13.2★	12.5
x	N-1	3.729	3.729	3.480	3.396	2.981	2.792	2.792	2.480	2.396	2.000	1.752	1.475
63.0	100	100											
53.0	100	100											
50.0	97.9	-	100										
37.5	95-100		100										
31.5	90.8			100									
26.5	71.5	74.5	96.5	96.9	100								
25.0	61.2	64.5	80.3	80.6	97.9	100	100						
19.0	52.1	54.3	68.4	68.6	80.2	97.9	-	100					
16.0	49.3	51.4	64.7	64.9	76.0	88.6	97.4	-	100				
13.2	37.0	38.6	48.7	48.8	57.2	66.8	70.3	94.3	95.0	100			
12.5	30.3	31.6	40.0	40.1	47.0	54.9	57.8	73.6	73.9	95.7	100	100	
9.50	20-40	24.7	31.3	31.4	36.8	43.0	45.3	57.7	57.9	68.6	-	100	100
4.75	23.7	22.9	29.0	29.1	34.1	39.9	42.0	53.6	53.8	64.5	94.3	-	100
2.36	22.0	22.9	29.0	29.1	34.1	39.9	42.0	53.6	53.8	64.5	94.3	-	100
1.18	14.2	14.8	18.7	18.8	22.1	25.8	27.2	34.7	34.8	41.8	55.3	93.2	93.8
粗粒率	7.75	7.69	7.33	7.32	7.15	7.01	6.97	6.64	6.62	6.48	6.33	5.83	5.80

過大粒：式(7)によるFuller指数； 中間粒：表-7の値を過大粒・過小粒の分量だけ補正したもの；  
 過小粒： $x_{s}=2.49-0.295(N-1)$ ,  $x_{2.5}=2.32-0.320(N-1)$ ,  $x_{1.2}=0.95x_s$ 。ただし、 $D=9.5\text{mm}$ では $x_s=x_{2.5}=x_{1.2}=1.70$ とする。  
 ☆印：現行ASTMでは、それぞれ37.5 mmおよび19.0 mmである。 ★印：示方書(平成8年版)では16.0 mmである。

ここでは、データ数が十分にある $d=26.5\text{mm}$ 以下について整理し、 $d>26.5\text{mm}$ は整理結果を外挿することにした。この関係は次式のようなのである。

$$x=1.330-0.281(n-1), \text{ 相関係数 } \gamma=99\% \quad (9)$$

けれども、中間粒度に関する上式の適用は、データに対する忠実度がかなり劣る。

すなわち、表-3の計算において、たとえば $\bar{D}=53.0\text{mm}$ などは粗粒率の計算は不可能であった。式(5)は粗粒率の計算が可能な粒度だけでTalbot指数を求め、表-7を完成させた。この表の $\bar{D}=53.0\text{mm}$ の $d=26.5\text{mm}$ における式(5)による粒度は $p=54.8\%$ であって、表-3の中心粒度Iの $p=52.5\%$ よりも2.3%大きかった。一方、式(9)によるFuller指数を用いた粒度は $p=57.8\%$ と計算され、これから過大粒・過小粒を控除した中間粒度は $p=60.8\%$ となり、表-3よりも8.3%も増大している。表-3で粗粒率が計算できた場合(たとえば $\bar{D}=37.5\text{mm}$ )も同様に(乖)離が大きいく。

したがって、表-7の第2次基本粒度をTalbotの標準粒度に代わって探求してきた「基本粒度」とした。

よって、過大粒・過小粒と組み合わせる中間粒度としては、基本粒度である表-7の値を適用することにした。上述の関係を用いて、中心粒度をFuller粒度でモデル化して計算してみる。

計算に当たっては、過大粒ではa)の式(7)、中間粒は表-7の値、過小粒ではb)の式(8)の $x$ 値を用いた。

これが表-10である。

表-10は、Talbotの標準粒度を修正した表-7の基本粒度を中間粒度に適用し、日米の規格に従った過大粒・過小粒の許容量をモデル化して組み合わせた中心粒度である。

この表には、表-8に示した「粒度の範囲」の規格値に相当する粒度の範囲を、中心粒度が規格の粒度幅の中間になるように変更して示してある。規格値が変更になった箇所は太肉の数字で示す。

中間粒度で変更された部分は、16.0 mm( $d$ 及び $\bar{D}$ )に係わる全てとASTMの50~5 mmの $d=12.5\text{mm}$ 及び土木学会・ASTMの40~5 mmの粒度の $d=19.0\text{mm}$ の箇所であった。

表-11 中心粒度のFuller指数に対する粒度の範囲のFuller指数の比rの値

規格	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	JSCE	ASTM	
d	$\bar{D}$	53.0	50.0	37.5	37.5	31.5	26.5	25.0	19.0	19.0	16.0	12.5
	D	63.0	63.0	53.0	50.0	37.5	31.5	31.5 $\ddagger$	26.5	25.0	19.0	16.0 $\ddagger$
	N-1	3.729	3.729	3.480	3.396	2.981	2.792	2.792	2.480	2.396	2.000	1.752
53.0	0~2.41											
50.0		0~1.95										
37.5			0~1.44	0~1.63								
31.5					0~2.41							
26.5	0.55-1.61					0~2.41						
25.0		0.54-1.58					0~1.95					
19.0			0.60-1.67	0.60-1.68	0.64-1.64			0~1.80	0~2.05			
16.0	0.77-1.35					0.48-1.75					0~2.39	
12.5		0.71-1.29					0.59-1.60					0~1.79
9.50			0.72-1.37	0.72-1.38	0.70-1.53			0.56-1.52	0.57-1.52	0.69-1.59	0.60-1.55	
4.75	0.84~	0.84~	0.91~	0.85~	0.69~	0.73~	0.73~	0.76~	0.78~	0.87~	0.79~	
2.36					0.78~	0.81~	0.81~	0.81~	0.82~	0.85~	0.89~	

4. 「粒度の標準」の粒度の範囲の検討

表-10に示した粒度の許容範囲について考察する。最初は巨視的な考察を行い、続いて解析的考察を行う。

過大粒については、最大粒径と最大寸法との関係のシステム化により最大粒径を変更したものがあるが、粒度の許容範囲については変更していない。この内、 $\bar{D}=9.5$  mmについては日米間に考え方の相違が若干みられるが、これは以下の過小粒で述べる。

過小粒については、 $\bar{D}=9.5$  mmの場合以外は問題点はない。過小粒の粒度の範囲をp=0~5%となるまで寸法を規制してゆく建前をもつのであれば、我が国の $\bar{D}=9.5$  mmについてはd=1.18 mmまで粒度の範囲を示すべきであろう。一方、ASTMでは、 $\bar{D}=9.5$  mmのd=4.75 mmにおける粒度の許容範囲が10~30%になっている。これは細粗骨材の分級点を4.75mmとして計算するTalbot式が適用できないことを意味し、細粗骨材を呼び寸法5 mmで分けて示す方配合の作成もかなりの作業が必要となる。 $\bar{D}=9.5$  mmの粗骨材を使用するときだけ、細骨材との分級点を $d_0=2.36$  mm(2.5 mm砂)に移行させるのであろうか。規格制定の前提条件が著者には理解できない。

中間粒の「粒度の標準」の規定については、巨視的な考察は困難であるので若干の解析的検討を行う。日米の規格に示されている粒度の許容幅には次のものがある。これらは、所要の品質のコンクリートが得られ骨材の製造・管理が実用的に可能な範囲で定められていることは言うまでもない。

このような許容幅の設定にどんな法則性があるを解析的に調べてみた。表-10に記した中心粒度と粒度の許容範囲にFuller式を適用して、Fuller指数xを計算し、さらにこの許容範囲のx値を中心粒度のx値で除した値rを示したのが表-11である。

すなわち、中心粒度のFuller指数を $\bar{x}$ 、粒度の許容範囲の下限及び上限のそれを、それぞれ、 $x_L$ 、 $x_U$ とした場合は、この比rは次のように表す。

$$r_L = \frac{x_L}{\bar{x}}, \quad r_U = \frac{x_U}{\bar{x}} \quad (10)$$

表-11から次のことが言える。

- i) 過大粒の粒度の範囲の下限について：  
 粒度の許容範囲が「95-100%」の場合の下限のx値の比 $r_L$ の平均は2.03で、「90-100%」の場合は2.01である。全体を通じて、この比の平均は $r_L=2.02$ で1.44~2.41の範囲に存在している。逆に言うと、この比が $r_L=2.0$ 程度となるように、下限を90%あるいは95%となるように定めていることが判明した。
- ii) 過小粒の粒度の範囲の上限について：  
 「0-5%」の許容範囲の上限の比の値は、寸法dに関係なく、 $r_U=0.78\sim 0.91$ 、平均0.84であった。「0-10%」の上限の比は、 $r_U=0.69\sim 0.78$ の間にあり、平均値は0.74であった。また、「0-15%」の上限では $r_U=0.79$ 、0.87とほぼ「0-5%」の場合の値と同じであった。したがって、この比が $r_U=0.78$ 以上では「0-5%」とするか「0-15%」とするか条件をみて決定していると考えられ、 $r_U=0.78$ を下回る場合は「0-10%」を選ぶことになっていると考えてよい。
- iii) 中間粒度の粒度の範囲の上限・下限について：  
 下限の $r_L$ と上限の $r_U$ の比 $\alpha=r_U/r_L$ の値は、次のようである。

表-12 粗骨材の最大寸法とふるい寸法dの相対的位置：(n-1)/(N-1)(%)及び粒度範囲の規定位置

粗骨材最大寸法D(mm)	粒群数N-1	ふるい寸法 d (mm)											中間粒度の規定の箇所数
		150	106	75.0	53.0	37.5	31.5	26.5	19.0	16.0	13.2	9.50	
16.0	1.75									100	84	57	1
19.0	2.00							100	88	74	50	1	
26.5	2.48						100	81	71	(59)	40	1	
31.5	2.73					100	91	73	64	54	37	1	
37.5	2.98				100	92	83	67	59	49	33	2	
53.0	3.48			100	86	78	71	57	50	(42)	29	2	
75.0	3.98		100	87	75	69	62	50	44	37	25	3	
106	4.48	100	89	78	67	61	55	45	39	(33)	22	3	
150	4.98	100	90	80	70	60	55	50	40	35	30	4	

囲い数字は土木学会の規定箇所。( )内はASTMの規定箇所(ただし、d=12.5 mm)

許容幅	箇所数	αの範囲	平均α
20%	4	1.76~1.91	1.85
25%	1	2.19のみ	2.19
30%	2	2.32~2.57	2.45
35%	8	2.57~2.94	2.76
40%	1	3.65のみ	3.65

αのばらつきを考慮して試算すると、αと粒度の範囲の幅には次のような関係がある。しかし、α=2.9~3.5の間はデータがないので粒度範囲の幅を当てはめることができなかつた。

α=1.7~2.0	20%
α=2.0~2.25	25%
α=2.25~2.9	30%
α=3.5~4.0	35%
α>4.0	40%

中間粒度の「粒度の範囲」を規定している箇所は、粗骨材の最大寸法が37.5 mm以上は2箇所、これよりも小さな粗骨材は1箇所である。昭和24年制定の示方書(試験ふるいは現行に変更)を併せて考えると次のような規則性がある(表-12参照)。

a) 中間粒度の規定箇所の数は、N-1=3未満は1箇所、N-1=2.98(≒3)以上3.98(≒4)未満は2箇所、N-1=3.98(≒4)以上4.98(≒5)未満は3箇所、N-1=4.98(≒5)以上は5箇所である。

b) 規定箇所の位置は、次のようである。

- ① N-1=2以下はその位置は常にd=9.5 mmである。  
その理由はd=9.5 mmにて、相対寸法位置= $(n-1)/(N-1) > 50\%$ となるからである。
- ② その他は、相対寸法位置=100%を「規定箇所数+1」で等分する値に近い試験ふるいの相対寸法位置= $(n-1)/(N-1)$ である。

しかし、この②のルールに沿わないものがある。その一つは呼び寸法15mmをd=13.2 mmでなくd=16.0 mmとした場合である。D=26.5 mmの場合、1箇所規定であるので

(n-1)/(N-1)=50%に最も近い寸法としなければならない。これはd=13.2 mmであるが、土木学会にはこの試験ふるいは規定されていない。ASTMではd=12.5 mmが導入されているので、これで規定している。d=16.0 mmの相対位置はd=9.5 mmの相対位置よりも離れているので、d=13.2 mmを導入しなければd=9.50 mmを規定しなければならない。D=53.0 mm及び106 mmの場合も同様な問題がある。

D=31.5 mmの場合は上記の主旨からすると、d=13.2 mmの導入が不可能ならば16.0 mmで規定するのが筋であるが、d=19.0 mmで規定されている。d=13.2 mmを導入しなければd=16.0及び9.50 mmの2箇所て例外的に規定することも考えられる。

## 5. 基本粒度・中心粒度の最大寸法と粗粒率の関係

表-7の基本粒度及び表-10の中心粒度における粗骨材の最大寸法Dと粗粒率FMの関係性を調べた。粗骨材の最大寸法Dは粒群数N-1に変換して、式(11)及び式(12)を得た。

$$\text{基準粒度： } N-1=1.52(FM-5.38) \quad \gamma=99.4\% \quad (11)$$

$$\text{中心粒度： } N-1=1.33(FM-5.13) \quad \gamma=99.5\% \quad (12)$$

中心粒度は過大粒・過小粒を許容範囲内で含んでいる。一般の粗骨材はこのような粒度であるから、この関係を用いれば、ふるい分け試験から等価最大寸法とも言うべきDの値を求めることができる。

式(12)を粗骨材の最大寸法によって表示すると次式のようなになる。

$$\log(D/d_0)=0.400(FM-5.12) \quad (13)$$

$$d_0=4.75 \text{ mm とすれば,} \\ FM=2.50 \cdot \log(23.8D) \quad (14)$$

コンクリートの配合設計では、細骨材率、単位粗骨材容積あるいは単位水量は粗骨材の最大寸法の影響を大きく

く受ける。したがって、式(13)の関係から換算最大寸法を求めれば、粗骨材の実積率を知ることによって、単位水量等の指標をより正確に推定できる可能性がある。

N-1=3未満 筒所数1  
 N-1=3以上4未満 筒所数2  
 N-1=4以上5未満 筒所数3

## 6. まとめ

本研究の内容及び成果を要約すると次の通りである。

(1) 過大粒の最大粒径 $\bar{D}$ と最大寸法 $\bar{D}$ との間に数値的關係がないので、 $\bar{D}/\bar{D} < 1.4$ 程度に制限することを提案し、これによって解析した。

また、 $d=13.2$  mmの試験ふるいを導入する。

(2) 「粒度の標準」に対応する基本粒度は次の $x$ 値をもつ式(3)で表される。

$$x=0.677-0.020(n-1)$$

ここに、 $n-1 = \lceil \log(\bar{D}/d_0) \rceil / \log 2$

(3) 「粒度の標準」の中心粒度は、上式を中間粒度に、下記の $x$ 値を用いたFuller式を過大粒・過小粒にしたものである。

過大粒( $D > \bar{D}$ )のFuller指数 $x$ は次の通りである：

$$\begin{aligned} \bar{D} \geq 25.0 \text{ mm} & \quad x=1.46\bar{D}/D \\ \bar{D}=19.0 \text{ mm} & \quad x=0.245\bar{D}/D \\ \bar{D} \leq 16.0 \text{ mm} & \quad x=0.305\bar{D}/D \end{aligned}$$

過小粒( $d \leq d_0$ )のFuller指数 $x$ は次の通りである：

$$\begin{aligned} d=4.75 \text{ mm} & \quad x_s=2.49-0.295(N-1) \\ d=2.36 \text{ mm} & \quad x_{2.5}=2.32-0.320(N-1) \\ d=1.18 \text{ mm} & \quad x_{1.2}=0.95x_s \end{aligned}$$

ただし、 $\bar{D}=9.50$  mmの場合は、 $x=x_s=x_{2.5}=x_{1.2}=1.70$ とする。

(4) 「粒度の標準」の上下限幅とその指定する寸法位置は次のようである：

過大粒については、中心粒度のFuller指数 $\bar{x}$ と下限粒の指数 $x_L$ との比が $r_L=x_L/\bar{x}=2.0 \pm 0.5$ 程度となるように、95~100%あるいは90~100%を選定している。

過小粒については、上限粒のFuller指数 $x_U$ との比を $r_U=x_U/\bar{x}$ とするとき、この値は以下のように定められている。

$r_U \geq 0.78$ のとき：0~5%または0~15%

$r_U < 0.78$ のとき：0~10%

中間粒の粒度範囲の設定筒所数に関しては、

と定められており、その設定位置 $d$ は中間粒度の範囲を100%とするとき、これを「設定筒所数+1」で等分する相対寸法位置 $= (n-1)/(N-1)$ に最も近い寸法 $d$ である。ただし、 $(n-1)/(N-1) < 50\%$ のときは $d=9.50$  mmの位置とする。

なお、上下限の許容幅の決定方法は明らかにできなかったが、上下限のFuller指数の比の $\alpha=r_U/r_L$ と設定幅には、次の関係があった。

$\alpha=1.7 \sim 2.0$	許容幅 20%
$\alpha=2.0 \sim 2.25$	25%
$\alpha=2.25 \sim 2.9$	30%
$\alpha=3.5 \sim 4.0$	35%
$\alpha > 4.0$	40%

(5) 中心粒度の最大寸法 $\bar{D}$ とその粗粒率 $FM$ の間には

$$\log(\bar{D}/d_0) = 0.400(FM - 5.12)$$

の關係が見い出された。

(6) 今回の解析結果からは、現行の「粒度の標準」の一部には再検討すべきものが見出された。

すなわち、粒度の範囲とその設定位置であるふるいの寸法である。

## 参考文献

- Fuller, W.B. and Thompson, S.E.: The Law of Proportioning Concrete, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 59, pp.67-143, 1907.
- Wig, R.J., Williams, G.M. and Gates, E.R.: Strength and Other Properties of Concrete as Affected by Materials and Methods of Preparation, *Technical Paper No.58*, National Bureau of Standards, 1916.
- 藤井眞透：骨材の最大密度の粒度に就て、内務省土木試験場報告第三十七号抜粋，1934頃
- Vanuat, M. et Papadakis, M.: *Contrôle et essai de ciments, mortiers, bétons*, Eyrolles, pp.284 (referred from the paper of Bolomey, J.), 1961.
- Plum, N.M.: The Predetermination of Water Requirement and Optimum Grading of Concrete, *Building Research Studies No.3*, Danish National Institute of Building Research, 1950.
- Weymouth, C.A.G.: Effect of Particle Interference in Mortars and Concrete, *Rock Product No.36(2)*, pp.26-30, 1933.
- Smith, M.R. and Gordon, M.K.: Concrete Technology and Aggregate Production for St. Lawrence Seaway, *Journal of ACI*, No.56-24, pp.361-376, 1959.

- 8) ASTM C 125-96 *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate*, ASTM, 1996. 土木学会, pp.108, 1996.
- 9) ACI 116R-90 *Cement and Concrete Terminology*, ACI, 1990.
- 10) 吉田徳次郎: コンクリート及び鉄筋コンクリート施工方法, 丸善株式会社, pp.134-135, 1956.
- 11) ACI 211.1-91 *Mass Concrete Mix Proportioning*, ACI, 1991.
- 12) ACI 207.1R-87 *Mass Concrete*, ACI, 1987.
- 13) コンクリート標準示方書 [設計編] (平成8年制定), (1998.11.6 受付)
- 14) ACI 318-95 *Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*, ACI, 1995.
- 15) Long, D., Gordon C., Peck C.F. and Benjamin J.R.: *Design Mix Manual for Concrete Construction, Engineering News-Record Book*, McGraw-Hill Book Co., pp.6, 1982.

## AN ANALYTICAL STUDY ON GRADING REQUIREMENTS FOR COARSE AGGREGATE AND THEIR EVALUATION

Shinichi NUMATA

The author reviewed the significance of numerical formula concerning the constitutions of grading requirements for graded coarse aggregate. Exponent values of Talbot's formula were calculated from the averages of various grading limits specified in both the JSCE and ASTM standards. The exponents that might be a basis for building up the standards' requirements are found counted on being larger than 1/2. It is also able to explain with the equation thus established that the grading requirements shall be more in large sizes and less in small sizes than Talbot's standard gradings modified from his original formula having the exponent of 1/2. Rules are found how to specify the points of sieves that limit the ranges of grading and how to choose the ranges of grading in the standards. Adding new sieves of size considers a new systematic series of the test sieves to improve the relationship between the nominal maximum size and maximum size of aggregate.