

66 2 試料混合による粒度規制の手順について

土木試験所 宗 好 秀
 " 山 野 隆 康
 " 坂 田 資 宏

ま え が き

粒度の異なる土質材料を混合して使用することにより、構造物の安定度を高め、かつ施工能率を増進させるという積極的な工法が、最近本道でも用いられるようになってきた。しかし混合材料に対する物理、力学的性質を、室内土質試験によつて判定する場合、必ず行なわなければならないのが試料混合であるが、粗粒の砂利などを大量に扱うとき、供試体個々の粒度を正確に規制するのは困難なものである。この種の悩みは、筆者らだけのものではないはずであるが、具体的な手順を解説した文献も見あたらないように思う。ここに、筆者らがフィルダム築堤材料の試験にあたり、最近発案した手法を紹介し、諸兄のご批判を仰ぎたいと考える。なお記述を簡単にするため、含水比や加積通過率など、百分率で示される値はすべて小数位のまま用いることにする。

1 混合の手順

図66-1の粒径加積曲線で、Aを細粒材料、Bを粗粒材料、Cを混合材料とし、いずれも現場で実際に使用するものの粒度とする。A、B両試料の粒度試験はすでに終了しているものとし、Cに対しては、0.074mmフィルに対する通過率だけが、規制条件として与えられていることにする。以下手順に従つて列記する。

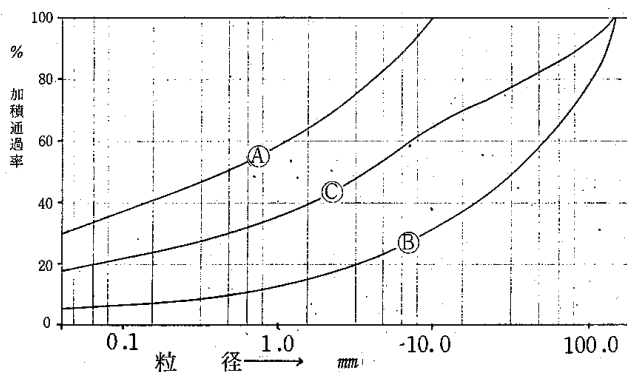


図 66 - 1

(イ) 規制条件を満足させるための混合比を、次式から求める。

$$n = \frac{P_{0.074A} - P_{0.074C}}{P_{0.074C} - P_{0.074B}} \dots (1)$$

n : 混合比, A, B両試料の乾燥重量を W_{SA} , W_{SB} で表わせば

$$n = \frac{W_{SB}}{W_{SA}} \dots (2)$$

また C 試料中に占める B 試料の率は

$$\frac{W_{SB}}{W_{SA} + W_{SB}} = \frac{n}{1 + n} \dots (3)$$

$P_{0.074A}$, $P_{0.074B}$, $P_{0.074C}$: それぞれ A, B, C 各試料の, 0.074mm フルイに対する通過率

(1)式の証明

図 66-2 は, A 試料 (AA') 100g と, B 試料 (BB') 300g を混合し, 計 400g の C 試料 (AC_1, C_2, C_3) を調製した場合の関係を模式化したものである。C 試料に対する任意の粒径 $d\text{mm}$ についての通過率 P_{dc} は, 同様の記号を A, B に与えることにより

$$P_{dc} = \frac{P_{dA} + nP_{dB}}{1+n} \dots\dots\dots (4)$$

これから(1)式が得られる。

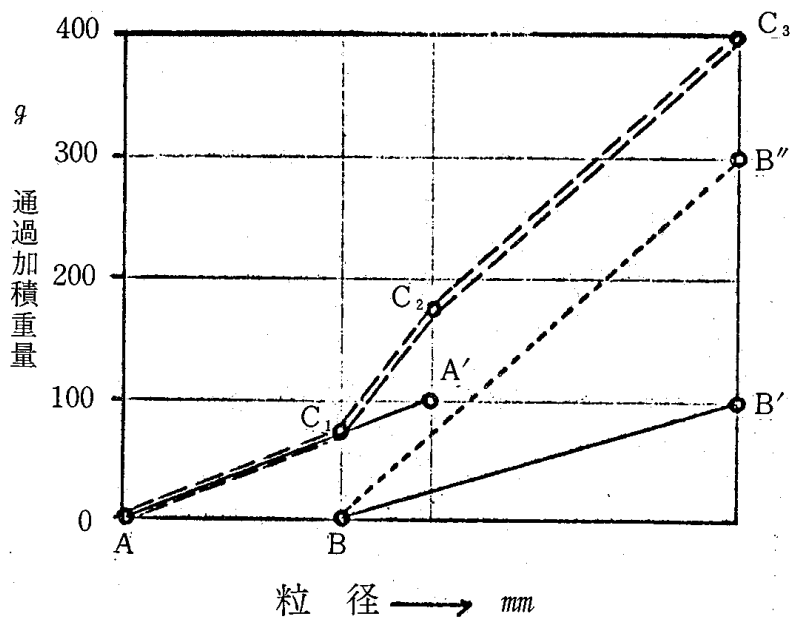


図 66-2

(a) (4)式を用いて $P_{4.76c}$, $P_{9.52c}$, $P_{19.1c}$ などを計算し, 粒径加積曲線を描いてみる。そして規制条件である $P_{0.074c}$ の妥当性を吟味する。

(b) A, B 両試料を 4.76mm フルイでふるい, 通過部分の含水比を測定する。これらを $A_{4.76}$, $B_{4.76}$ 試料と名づける。

w_A : $A_{4.76}$ 試料の含水比

w_B : $B_{4.76}$ 試料の含水比

$A_{4.76}$, $B_{4.76}$ 両試料を, 所定の比率で混合したものを $C_{4.76}$ 試料と名づける。同様の意味で $C_{9.52}$, $C_{19.1}$... も用いる。

A, B 両試料のうち 4.76 mm フライにとどまる部分は、水洗いしながらふるい分け、各粒径ごとに区分して水浸させておく。

(二) A_{4.76} 試料を試験内容に応じて適当量取り出し、その重量を測定する。

W_A : A_{4.76} 試料の湿潤重量

(三) 次式により、A_{4.76} 試料に対応する B_{4.76} 試料の重量を求め、計量、混合して C_{4.76} 試料を調整する。

$$W_B = nW_A \frac{1 + w_B}{1 + w_A} \cdot \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}} \quad \dots \quad (5)$$

W_B : B_{4.76} 試料の湿潤重量

C_{4.76} 試料の重量は次式で示される。

$$W_C = W_A + W_B \quad \dots \quad (6)$$

W_C : C_{4.76} 試料の湿潤重量

(5)式の証明

A 試料の乾燥重量 W_{SA} で、A_{4.76} 試料の乾燥重量 $W_{4.76SA}$ を除した値が $P_{4.76A}$ であるから

$$W_{4.76SA} = P_{4.76A} W_{SA}$$

同様に

$$W_{4.76SB} = P_{4.76B} W_{SB}$$

両者の比を求め、(2)式の関係を用いて

$$\frac{W_{4.76SB}}{W_{4.76SA}} = n \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}} = \frac{W_B (1 + w_A)}{W_A (1 + w_B)} \quad \dots \quad (7)$$

これを变形して(5)式が得られる。

(二) C_{4.76} 試料の含水比を次式により求め、実測値と照合する。

$$w_C = \frac{w_A + n \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}} w_B}{1 + n \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}}} \quad \dots \quad (8)$$

w_C : C_{4.76} 試料の含水比

(8)式の証明

A_{4.76}, B_{4.76} 試料の中に含まれている水分の重量を $W_{4.76wA}$, $W_{4.76wB}$ とすれば

$$w_A = \frac{W_{4.76wA}}{W_{4.76SA}}, \quad w_B = \frac{W_{4.76wB}}{W_{4.76SB}}$$

であるから

$$w_c = \frac{W_{4.76wA} + W_{4.76wB}}{W_{4.76sA} + W_{4.76sB}} = \frac{w_A + \frac{W_{4.76sB}}{W_{4.76sA}} w_B}{1 + \frac{W_{4.76sB}}{W_{4.76sA}}}$$

上式に(7)式を入れて(8)式が得られる。

C4.76 試料が調製されれば、JIS A1210 の突固め試験をはじめ、細粒土に対して通常行なわれる力学性試験はすべて実行可能である。しかし、フィルダムのような重要構造物の安定解析にあたっては実際に使用される材料の粒度に、なるべく近似した粒度の試料を用いて諸試験を行ない、その結果を設計数値に反映させる必要がある。よつて次の作業を続行する。

(b) C4.76 試料に、(a)項で分離したレキを混合し、所定の最大粒径をもつ試料を調整するのであるが、A、B 両レキ分の岩質や粒形にあまり差異がない場合、および A のレキ分がごく少量の場合は、B のレキ分だけを混合用に採択してさしつかえない。実際には、このような例が大部分と思われるので、以下の記述では、B のレキ分だけを使用するものとして解説する。

(a) レキを混合する際は、表面乾燥内部飽和状態にしなければならない。よつて(a)項で水浸した 4.76 mm 以上のレキから、適宜代表試料を描出し、JIS A1110 に基づく吸水率および比重を測定しておく。

m : C4.76 試料に混合するレキの吸水率 (平均値)

(i) C4.76 試料は、通常、気乾状態になつており、三軸試験や透水試験に用いるためには、レキ混入に先だつて、所定の含水比になるよう注水と養生をしなければならない。注水量は次式から求める。

$$\Delta W_w = \frac{W_c (w'_c - w_c)}{1 + w_c} \dots\dots\dots (9)$$

$$W'_c = W_c + \Delta W_w \dots\dots\dots (10)$$

ΔW_w : 所要注水量

W_c : (6)式で求めた C4.76 試料の湿潤重量、もしすでに、突固め試験などの分を除いてあればその残量

w_c : (8)式による C4.76 試料の含水比、または当該時点における実測含水比

w'_c : ここで目的とする含水比

W'_c : C4.76 試料の注水後の湿潤重量

(9)式の証明

C4.76 試料の乾燥重量を $W_{4.76s}$, その含有水分の重量を $W_{4.76w}$ とすれば

$$w'_c = \frac{W_{4.76w} + \Delta W_w}{W_{4.76s}} = w_c + \Delta W_w \frac{1 + w_c}{W_c}$$

これを変形して(9)式が得られる。

(x) (a)項で触れた C9.52 , C19.1 の各試料は、次のように定義することもできる。すなわち(a)項で描いた粒径加積曲線において、最大粒径を 9.52 mm としたときの試料が C9.52 であり、同じく 19.1 mm としたときの試料が C19.1 である。

次式によつて混入すべきレキの重量を求め、それぞれの試験にふさわしい粒度の試料を調整する。たとえば、三軸圧縮試験ならば C19.1 , 大型透水試験ならば C50.8 といった工合にである。

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{9.52-4.76} &= \frac{P_{9.52} - P_{4.76c}}{P_{4.76c}} \cdot \frac{W'_c}{1+W'_c} (1+m) \\ \Delta W_{19.1-9.52} &= \frac{P_{19.1c} - P_{9.52c}}{P_{4.76c}} \cdot \frac{W'_c}{1+W'_c} (1+m) \\ &\vdots \\ \Delta W_{50.8-38.1} &= \frac{P_{50.8c} - P_{38.1c}}{P_{4.76c}} \cdot \frac{W'_c}{1+W'_c} (1+m) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} W'_{9.52c} &= W'_c + \Delta W_{9.52-4.76} \\ W'_{19.1c} &= W'_{9.52c} + \Delta W_{19.1-9.52} \\ &\vdots \\ W'_{50.8c} &= W'_{38.1c} + \Delta W_{50.8-38.1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$\Delta W_{9.52-4.76}$: $C_{9.52}$ 試料を作るため $C_{4.76}$ 試料に混入すべきレキの湿潤重量 (表乾状態)
 $\Delta W_{19.1-9.52}$: $C_{19.1}$ 試料を作るため $C_{9.52}$ 試料に混入すべきレキの湿潤重量 (表乾状態)
 $\Delta W_{50.8-38.1}$: $C_{50.8}$ 試料を作るため $C_{38.1}$ 試料に混入すべきレキの湿潤重量 (表乾重量)
 $W'_{9.52c}, W'_{19.1c}, W'_{50.8c}$: それぞれ $C_{9.52}, C_{19.1}, C_{50.8}$ 試料の湿潤重量

(11)式の証明

いま任意の粒径加積曲線 1 個について考えるものとし、次のように記号の定義を与える。

P_1 : 任意に選んだ粒径 1 に対する通過率

W_{1S} : 粒径 1 が最大粒径となるように調製した試料の乾燥重量

同様に P_2, P_3, W_{2S}, W_{3S} を定義する。なお $P_1 < P_2 < P_3$ とする。また試料全体の乾燥重量を W_S とする。よつて

$$P_1 = \frac{W_{1S}}{W_S}, \quad P_2 = \frac{W_{2S}}{W_S}, \quad P_3 = \frac{W_{3S}}{W_S}$$

であるから

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{W_{2S} - W_{1S}}{W_{1S}} \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{P_3 - P_2}{P_1} = \frac{W_{3S} - W_{2S}}{W_{1S}} \dots\dots\dots (14)$$

(13), (14)式を変形すれば、(11)の第 1 および第 2 式と同一内容のものになる。

(ii) 各試料の含水比は次式により計算できるから、供試体成形時の飽和度などを予じめ推定し、適切な試験方法を計画する。

$$\begin{aligned}
 w'_{9.52c} &= \frac{P_{4.76c}}{P_{9.52c}} w'_c + \left(1 - \frac{P_{4.76c}}{P_{9.52c}}\right) m \\
 w'_{19.1c} &= \frac{P_{4.76c}}{P_{19.1c}} w'_c + \left(1 - \frac{P_{4.76c}}{P_{19.1c}}\right) m \\
 &\vdots \\
 w'_{50.8c} &= \frac{P_{4.76c}}{P_{50.8c}} w'_c + \left(1 - \frac{P_{4.76c}}{P_{50.8c}}\right) m
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

(15)式の証明

$C_{19.1}$ 試料の場合を描出して解説する。

$$\frac{W'_{19.1c}}{1+w'_{19.1c}} = C_{19.1} \quad \text{試料の乾燥重量}$$

$$\frac{W'_{9.52c}}{1+w'_{9.52c}} = C_{9.52} \quad \text{試料の乾燥重量}$$

であるから

$$\begin{aligned}
 \frac{W'_{19.1c}}{1+w'_{19.1c}} &= \frac{W'_{9.52c}}{1+w'_{9.52c}} \cdot \frac{P_{19.1c}}{P_{9.52c}} \\
 1+w'_{19.1c} &= \frac{P_{9.52c} (1+w'_{9.52c})}{P_{19.1c}} \left(1 + \frac{W'_{19.1c} - W'_{9.52c}}{W'_{9.52c}}\right) \\
 w'_{19.1c} &= \frac{P_{9.52c} (1+w'_{9.52c}) - P_{19.1c}}{P_{19.1c}} \\
 &\quad + \frac{P_{9.52c} (1+w'_{9.52c}) (W'_{19.1c} - W'_{9.52c})}{P_{19.1c} W'_{9.52c}}
 \end{aligned}$$

$W'_{19.1c} - W'_{9.52c} = \Delta W_{19.1-9.52}$ を上式に入れて

$$\begin{aligned}
 w'_{19.1c} &= \frac{P_{9.52c}}{P_{19.1c}} w'_{9.52c} \\
 &\quad + \frac{\Delta W_{19.1-9.52} P_{9.52c} (1+w'_{9.52c}) - W'_{9.52c} (P_{19.1c} - P_{9.52c})}{W'_{9.52c} (P_{19.1c} - P_{9.52c})} \\
 &\quad \quad \quad \frac{P_{19.1c} - P_{9.52c}}{P_{19.1c}}
 \end{aligned}$$

上式の右辺第2項には、(11)の第2式を変形して得られる m の値を含んでいる。よつて(15)の第2式が求ま

る。

2 適用例

42年度に試験依頼を受けたTダムの不透水性用土は、細粒材料と粗粒材料を混合する格好の事例であつた。すなわち、しや水性に富む細粒土と、締固め密度やせん断強さの面で優位性を示す。粘板岩の風化レキを組み合わせることにより、両者の利点を兼ね備えた材料に仕上げようとするものである。担当開建では、多角的な調査試験を企画し、鋭意実施に移していたが、たまたまその一部を当研究室に依存することとなり、42年12月、試料搬入を行なつた。本文では、三軸圧縮試験にあつて筆者らが行なつた試料調整の計画を、前項の提案に対する計算例として記述する。

(1) 与えられた細粒材料および粗粒材料は、それぞれ図66-3のA、Bで表わされる粒度のものであつた。そして混合材料Cに対する規制条件は、

$$P_{0.074C} = 0.15$$

と示されていた。

$$P_{0.074A} = 0.21 \quad , \quad P_{0.074B} = 0.05$$

を(1)式に入れて

$$n = \frac{P_{0.074A} - P_{0.074C}}{P_{0.074C} - P_{0.074B}} = \frac{0.21 - 0.15}{0.15 - 0.05} = 0.60$$

混合材料中に占める粗粒材料の率は

$$\frac{n}{1+n} = \frac{0.60}{1+0.60} = 0.38$$

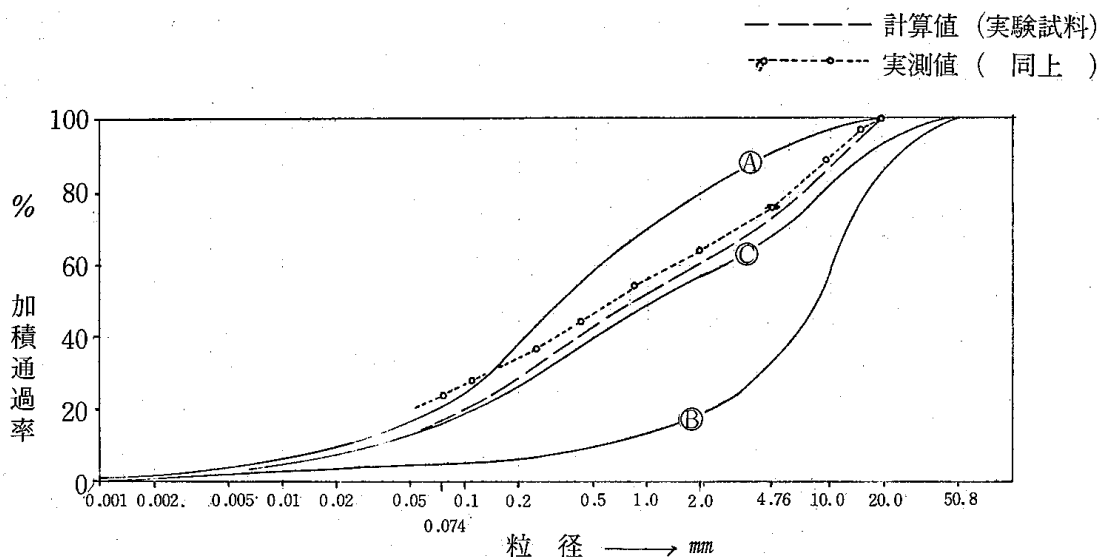


図66-3 Tダム築堤材料に対する適用例

(2) (4)式によりC試料の各粒径に対する通過率を計算する。結果は図66-3のとおりであるが、うち3例を次に示す。

$$P_{4.76C} = \frac{P_{4.76A} + nP_{4.76B}}{1+n} = \frac{0.90 + 0.60 \times 0.31}{1+0.60} = 0.68$$

$$P_{9.52C} = \frac{P_{9.52A} + nP_{9.52B}}{1+n} = \frac{0.96 + 0.60 \times 0.55}{1+0.60} = 0.81$$

$$P_{19.1C} = \frac{P_{19.1A} + nP_{19.1B}}{1+n} = \frac{1.00 + 0.60 \times 0.84}{1+0.60} = 0.94$$

(イ) $A_{4.76}$, $B_{4.76}$ 試料を作製して含水比を測定した結果

$$w_A = 0.072$$

$$w_B = 0.025$$

を得た。

(ロ) 三軸圧縮試験に用いる供試体は、直径 100 mm 高さ 220 mm であり、試料に混入するレキの最大粒径は 19.1 mm とした。試験に用いる $A_{4.76}$ 試料は

$$W_A = 20.0 \text{ (kg)}$$

(ハ) (5)式により W_B を求め $C_{4.76}$ 試料を調製した。すなわち、

$$P_{4.76A} = 0.90, \quad P_{4.76B} = 0.31$$

であるから

$$\begin{aligned} W_B &= nW_A \frac{1+w_B}{1+w_A} \cdot \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}} \\ &= 0.60 \times 20.0 \times \frac{1+0.025}{1+0.072} \times \frac{0.31}{0.90} = 3.95 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

$$W_C = W_A + W_B = 20.0 + 3.95 = 23.95 \text{ (kg)}$$

(ニ) (8)式より $C_{4.76}$ 試料の含水比を求める。

$$w_C = \frac{w_A + n \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}} w_B}{1 + n \frac{P_{4.76B}}{P_{4.76A}}} = \frac{0.072 + 0.60 \times \frac{0.31}{0.90} \times 0.025}{1 + 0.60 \times \frac{0.31}{0.90}} = 0.064$$

これを実測したところ $w_C = 0.070$ であつた。

(ホ) A , B 両試料に含まれている 4.76 mm 以上のレキは、ほぼ同質であつたので、混合用のレキはすべて B 試料から採取することにした。

(ヘ) B 試料に含まれているレキの吸水率を実測し

$$m = 0.024$$

を得た。なお比重(表乾)は 2.55 であつた。

(i) $C_{4.76}$ 試料に対する三軸圧縮試験を別途行なつてあつたが、そのときの初期含水比は 2.77% であつた。よつてこれと統一するために、目的含水比を

$$w'_c = 0.277$$

とし、(9)式から求まる水量を加えて養生した。

$$\Delta W_w = \frac{W_c (w'_c - w_c)}{1 + w_c} = \frac{23.95 \times (0.277 - 0.064)}{1 + 0.064} = 4.79 \text{ (kg)}$$

(10)式により

$$W'_c = W_c + \Delta W_w = 23.95 + 4.79 = 28.74 \text{ (kg)}$$

(x) (11)式により、 $C_{4.76}$ 試料に混入すべきレキの重量を求める。

$$\begin{aligned} \Delta W_{9.52-4.76} &= \frac{P_{9.52c} - P_{4.76c}}{P_{4.76c}} \cdot \frac{W'_c}{1 + w'_c} (1 + m) \\ &= \frac{0.81 - 0.68}{0.68} \times \frac{28.74}{1 + 0.277} \times (1 + 0.024) \\ &= (0.81 - 0.68) \times 33.891 = 4.41 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{19.1-9.52} &= (P_{19.1c} - P_{9.52c}) \times 33.891 \\ &= (0.94 - 0.81) \times 33.891 = 4.41 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

(12)式から

$$\begin{aligned} W'_{19.1c} &= W'_c + \Delta W_{9.52-4.76} + \Delta W_{19.1-9.52} \\ &= 28.74 + 4.41 + 4.41 = 37.56 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

(y) (15)式を用いて $C_{19.1}$ 試料の含水比を計算する。

$$\begin{aligned} W'_{19.1c} &= \frac{P_{4.76c}}{P_{19.1c}} w'_c + \left(1 - \frac{P_{4.76c}}{P_{19.1c}}\right) m \\ &= \frac{0.68}{0.94} \times 0.277 + \left(1 - \frac{0.68}{0.94}\right) \times 0.024 = 0.207 \end{aligned}$$

これに対する実測結果は平均 0.208 (観測個数 8 個, 標準偏差 0.010) であつた。

以上の手順を経て調製した $C_{19.1}$ 試料を用い、非圧密非排水方式の三軸圧縮試験を行なつた。試験終了後一部の供試体を解きほぐし、粒度分析を行なつた結果は図 66-3 の点線のようにあつた。同図鎖線は計算値である。実測値が計算値を上回つているのは、供試体締めめや圧縮破壊の過程で、粘板岩の風化レキが細粒化したためかと思われる。

あ と が き

現場で実際に使用される土質材料の粒度が示されていても、室内試験にあつては、そのうちのある粒径以下を抽出して、供試体成形に用いなければならないことが多い。その際、実験の信頼度を高めるためには、個々の供試体に用いる試料の粒度や含水比を、各試験種目を通じて統一的に規制する必要がある。大粒径の混合試料を扱うときなど、とくにこれが重要となる。これらの要求にこたえるため、試料調製の手順を規準化してここに提案した。なお、細、粗両試料に含まれるレキを区別して混合する場合の諸計算も、同様な手法により数式化できると思うが、実用上今回は、岩質や粒形を近似したものとして扱い、細粒材料中のレキ分は粗粒材料に含まれるレキでおきかえる計算法をとつた。

本文の適用性については、今後とも実例に基づいて検討していくつもりである。