

III-1

土の収縮常数試験方法の試験順序について

九州大学工学部 正員 松本 錬三

1. まえがき

土の収縮常数試験方法(JISA1209-1969)の4・2試験順序のうち、4・2・2に「このサラの試料を、土が暗色から明色になるまで空気乾燥する。つぎに110℃で一定重量になるまで炉乾燥して重量をはかる。なわサラだけの重量は別にはかっておく。水銀をサラにあふれるほど入れ、ガラス板をサラの上部にしっかり押しつけながらずらして余った水銀をとり去り、残った水銀の体積をメスシリンダーではかる。これを湿潤土の体積 V とする。」とある。これについて土質工学会論土質試験法(1969年版)の解説にはp.124最下行からp.125の上から2行にわたり「JISの順序どおりに実験を行なうと、土を炉乾燥したのちサラの重量と容量をはかるような感じになるが、サラの容量と重量は内面にグリセリンまたはワセリンを塗って試料を入れる前にはかるのがよい。」と述べられている。ここで問題としてとりあげたのは、サラの重量と容量とを測定する手順についてである。すなわち、サラの重量と容量とをはかる手順としては、土質試験法の解説にあるように2つあることになる。ここでは、土を炉乾燥したのちサラの重量と容量をはかる手順をJISの手順と呼び、サラの内面にグリセリンまたはワセリンを塗ったすぐあとでサラの重量と容量をはかる手順を解説者の手順と呼ぶことにする。この手順の違いが収縮常数におよぼす影響などについて比較検討してみたので報告する。

2. 試験順序の検討

サラの重量と容量とをJISの手順では炉乾燥後にはかり、解説者の手順では炉乾燥前すなわち練合わせた試料をサラに入れる前にそれらをはかることになる。もし、炉乾燥後に炉乾燥土がサラに全く付着せず、サラのグリセリンまたはワセリンが炉乾燥供試体に全く付着しない場合は、あとで2・2～2・4で述べるように2つの試験順序のどちらを選ぶかは試験者の勝手であって、両者はともにJISの定義どおりの収縮常数を求めることができる。しかし、この試験中にしばしば起こるように、(1)サラの中に炉乾燥土の微量が残った場合、(2)サラのグリセリンまたはワセリンの一部が炉乾燥供試体に付着する場合は、上記の試験順序の違いによって供試体の含水比および収縮常数の値が異なってくる。以下にこれらを検討してみよう。初めに(1)の場合を検討する。

2・1 供試体の含水比

いま、サラの中に付着した炉乾燥土の微量の重量を ΔW_5 、その体積を ΔV_0 とする。供試体の含水比はそれぞれつぎのようである。

$$\text{JISの定義による含水比} \quad w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\text{JISの手順による含水比} \quad w_j = \frac{W_w}{W_s - \Delta W_5} \times 100 (\%) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\text{解説者の手順による含水比} \quad w_e = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%) \quad \cdots \cdots (3)$$

したがって、供試体の含水比の測定については、(1)～(3)式からわかるように解説者の手順が正しい。しかし、サラの中に炉乾燥土が全く残らず、炉乾燥供試体にグリセリンが全く付着しない場合は、(2)式で $\Delta W_5 = 0$ であるから、 $w = w_j = w_e$ となり、試験順序の違いによる含水比の差はなくなる。

2・2 収縮限界

$$\text{JIS の定義による収縮限界 } W_s = W - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} (\%) \quad \text{----- (4)}$$

$$\text{JIS の手順による収縮限界 } W_{sj} = W_j - \left\{ \frac{(V - \Delta V_0) \gamma_w - (V_0 - \Delta V_0) \gamma_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 \right\} = W_j - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 \right\} (\%) \quad \text{----- (5)}$$

$$\text{解説者の手順による収縮限界 } W_{se} = W - \left[\frac{(V - (V_0 - \Delta V_0)) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right] (\%) \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 V : 供試体の湿潤土の体積 V_0 : 供試体の炉乾燥土の体積
 γ_w : 水の単位体積重量 その他の記号は 2・1 に同じ

つぎに、(4)~(6)式の 3 つの収縮限界を比べてみよう。

$$W_{sj} - W_s = \left[W_j - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 \right\} \right] - \left[W - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} \right]$$

上式に (1), (2) 式を入れると

$$\begin{aligned} W_{sj} - W_s &= \left[\frac{W_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 \right\} \right] - \left[\frac{W_w}{W_s} \times 100 - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} \right] \\ &= \frac{100}{W_s - \Delta W_s} [W_w - V \gamma_w + V_0 \gamma_w] - \frac{100}{W_s} [W_w - V \gamma_w + V_0 \gamma_w] \\ &= \frac{100}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [W_w W_s - V W_s \gamma_w + V_0 W_s \gamma_w - W_w \Delta W_s + W_w \Delta W_s + V \Delta W_s \gamma_w - V_0 \Delta W_s \gamma_w + V_0 \Delta W_s \gamma_w] \quad \because \gamma_w = 1 \\ &= \frac{100 \Delta W_s}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [V_w - V + V_0] \quad \text{----- (7)} \quad \because W_w = V_w \gamma_w \end{aligned}$$

一般に湿潤土の体積 V は図-1 に示すように $V = V_a + V_w + V_s$ で表わされ、供試体の気泡はクッションを敷いたかたい面にサウを打ちつける操作で、供試体から全部脱出したものとする、 $V = V_w + V_s$ と考えてよい。この関係を (7) 式に

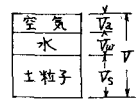


図-1

$$\text{入れると、} W_{sj} - W_s = \frac{100 \Delta W_s}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [V_0 - V_s] \quad \text{----- (8)}$$

(8)式において $W_s - \Delta W_s > 0$ であり、そして一般に $V_0 > V_s$ である。たとえば、1969年版土質試験法 p.128, 図表-2・8・1 の測定番号1の例によると、

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \gamma_w} = \frac{20.90}{2.72 \times 1} = 7.68 \text{ cm}^3 \quad V_0 = 14.6 \text{ cm}^3 \quad \therefore V_0 > V_s$$

したがって、 $W_{sj} > W_s$ である。つぎに、(5)式と(6)式とから

$$\begin{aligned} W_{sj} - W_{se} &= \left[W_j - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 \right\} \right] - \left[W - \left\{ \frac{(V - V_0 + \Delta V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} \right] \\ &= \left[\frac{W_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s - \Delta W_s} \times 100 \right\} \right] - \left[\frac{W_w}{W_s} \times 100 - \left\{ \frac{(V - V_0 + \Delta V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} \right] \\ &= \frac{100}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [W_w - V \gamma_w + V_0 \gamma_w] - \frac{100}{W_s} [W_w - V \gamma_w + V_0 \gamma_w - \Delta V_0 \gamma_w] \quad \because W_w = V_w \gamma_w, \gamma_w = 1 \\ &= \frac{100}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [V_0 W_s - V W_s \gamma_w + V_0 W_s \gamma_w - V_w W_s + V_w \Delta W_s + V \Delta W_s \gamma_w - V_0 \Delta W_s \gamma_w + V_0 \Delta W_s \gamma_w + \Delta V_0 W_s - \Delta V_0 \Delta W_s] \\ &= \frac{100}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [\Delta W_s (V_w - V + V_0 - \Delta V_0) + \Delta V_0 W_s] \end{aligned}$$

上式において前と同様に $V = V_w + V_s$ と考えると

$$W_{sj} - W_{se} = \frac{100}{W_s (W_s - \Delta W_s)} [\Delta W_s (V_0 - V_s - \Delta V_0) + \Delta V_0 W_s] \quad \text{----- (9)}$$

(9)式において、 $W_s - \Delta W_s > 0$ 、また ΔV_0 は微量であるから $V_0 - V_s - \Delta V_0 > 0$ と考えてよい。

$$\text{すなわち } W_{sj} > W_{se} \quad \text{したがって} \quad W_s < W_{sj} > W_{se} \quad \text{----- (10)}$$

つぎに、 W_s と W_{se} とを比べてみよう。

$$\begin{aligned} W_s - W_{se} &= \left[W - \left\{ \frac{(V - V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} \right] - \left[W - \left\{ \frac{V \gamma_w - (V_0 - \Delta V_0) \gamma_w}{W_s} \times 100 \right\} \right] \\ &= \frac{100 \gamma_w}{W_s} [- (V - V_0) + V - (V_0 - \Delta V_0)] \\ &= \frac{100 \gamma_w \Delta V_0}{W_s} \quad \text{----- (11)} \end{aligned}$$

すなわち $W_s > W_{se}$ したがって (10) 式は $W_{sj} > W_s > W_{se}$ となる。

つぎに、 W_{sj} と W_{se} のうちどちらが W_s に近い値かを検討してみよう。(11)式と(8)式とから

$$(w_s - w_{se}) - (w_{sj} - w_s) = \frac{100 \delta_w \Delta V_0}{w_s} - \frac{100 \Delta w_s}{w_s (w_s - \Delta w_s)} [V_0 - V_s] \\ = \frac{100}{w_s (w_s - \Delta w_s)} (\Delta V_0 w_s - \Delta V_0 \Delta w_s - \Delta w_s V_0 + \Delta w_s V_s) \quad \because \delta_w = 1$$

ここで $\frac{w_s}{V_0} = \frac{\Delta w_s}{\Delta V_0}$ とすると, $w_s \Delta V_0 = V_0 \Delta w_s$ であるからこの関係を上式に入れて

$$(w_s - w_{se}) - (w_{sj} - w_s) = \frac{100}{w_s (w_s - \Delta w_s)} (V_0 \Delta w_s - \Delta V_0 \Delta w_s - \Delta w_s V_0 + \Delta w_s V_s) \\ = \frac{100 \Delta w_s}{w_s (w_s - \Delta w_s)} (V_s - \Delta V_0) \quad \text{----- (12)}$$

(12)式において $w_s - \Delta w_s > 0$, $V_s - \Delta V_0 > 0$ であるから $(w_s - w_{se}) > (w_{sj} - w_s)$ といえる。すなわち w_{se} よりも w_{sj} が w_s に近い値であることがわかる。

以上に検討したように、収縮限界 w_s を求めるとき、微量の炉乾燥土がサラの中に付着し、サラのグリセリンまたはワセリンが炉乾燥供試体に付着しない場合は、JISの手順が解説者の手順よりまさっているといえる。炉乾燥土がサラに全く付着しない場合は、(8)式と(9)式とにおいて $\Delta V_0 = 0$, $\Delta w_s = 0$ とおけるから $w_s = w_{sj} = w_{se}$ の関係を得る。したがって、この場合はどちらの手順で収縮限界を求めても、JISの定義どおりにこれを求めることができる。

2・3 収縮比

$$\text{JIS の定義による収縮比} \quad R = \frac{w_s}{V_0 \delta_w} \quad \text{----- (13)}$$

$$\text{JIS の手順による収縮比} \quad R_j = \frac{w_s - \Delta w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} \quad \text{----- (14)}$$

$$\text{解説者の手順による収縮比} \quad R_e = \frac{w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} \quad \text{----- (15)}$$

ここに w_s , V_0 , δ_w , Δw_s , ΔV_0 の記号の意味は 2・1, 2・2 で説明したとおりである。

(13)~(15)式で表される3つの収縮比を比べてみよう。

$$R - R_j = \frac{w_s}{V_0 \delta_w} - \frac{w_s - \Delta w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{w_s (V_0 - \Delta V_0) - V_0 (w_s - \Delta w_s)}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{\Delta w_s V_0 - \Delta V_0 w_s}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{\Delta V_0 V_0 (\frac{\Delta w_s}{\Delta V_0} - \frac{w_s}{V_0})}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w}$$

ここで $\frac{\Delta w_s}{\Delta V_0} = \Delta \delta_d$, $\frac{w_s}{V_0} = \delta_d$ とおくと, $R - R_j = \frac{\Delta V_0 V_0 (\Delta \delta_d - \delta_d)}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{\Delta V_0 (\Delta \delta_d - \delta_d)}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} \quad \text{----- (16)}$

(16)式において $V_0 - \Delta V_0 > 0$ であるから

$\Delta \delta_d > \delta_d$ の場合は $R > R_j$, $\Delta \delta_d = \delta_d$ の場合は $R = R_j$, $\Delta \delta_d < \delta_d$ の場合は $R < R_j$

$$\text{つぎに,} \quad R_e - R_j = \frac{w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} - \frac{w_s - \Delta w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{\Delta w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} \quad \text{----- (17)}$$

(17)式において $V_0 - \Delta V_0 > 0$ $\therefore R_e > R_j$

$$\text{つぎに,} \quad R_e - R = \frac{w_s}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} - \frac{w_s}{V_0 \delta_w} = \frac{w_s V_0 - w_s V_0 + w_s \Delta V_0}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{w_s \Delta V_0}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} \quad \text{----- (18)}$$

(18)式において $V_0 - \Delta V_0 > 0$ $\therefore R_e > R$

以上の関係から $R \geq R_j$ の場合は $R_e > R \geq R_j$ であり, $R < R_j$ の場合は $R_e > R < R_j$ となる。

そこで R_e と R_j のうちどちらが R に近い値かを(16)式と(18)式で検討しよう。

$R_e > R > R_j$ の場合

$$(R_e - R) - (R - R_j) = \frac{w_s \Delta V_0}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} - \frac{\Delta V_0 (\Delta \delta_d - \delta_d)}{(V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{\Delta V_0 V_0 \delta_d}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} - \frac{\Delta V_0 V_0 (\Delta \delta_d - \delta_d)}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} = \frac{\Delta V_0 V_0 (2\delta_d - \Delta \delta_d)}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \delta_w} \quad \text{----- (19)}$$

(19)式において $2\delta_d > \Delta \delta_d > \delta_d$ の場合は $(R_e - R) > (R - R_j)$

$2\delta_d = \Delta \delta_d > \delta_d$ の場合は $(R_e - R) = (R - R_j)$

$2\delta_d < \Delta \delta_d > \delta_d$ の場合は $(R_e - R) < (R - R_j)$

しかるに、この試験では一般に $2\delta_d = \Delta \delta_d$ とか、あるいは $2\delta_d < \Delta \delta_d$ とかいうことは生じないと考えてよい。したがって $2\delta_d > \Delta \delta_d > \delta_d$ すなわち $(R_e - R) > (R - R_j)$ だけが生ずると考えられる。よって、 R_e よりも R_j が R に近い値であることがわかる。

$R_e > R < R_f$ の場合

$$(R_e - R) - (R_f - R) = (R_e - R) + (R - R_f) = \frac{w_s \Delta V_0}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \bar{w}} + \frac{\Delta V_0 V_0 (\Delta V_d - V_d)}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \bar{w}} = \frac{V_0 \Delta w_s}{V_0 (V_0 - \Delta V_0) \bar{w}} \quad \text{----- (20)}$$

(20)式において $V_0 - \Delta V_0 > 0$ であるから $(R_e - R) > (R_f - R)$, したがってこの場合も R_e よりも R_f が R に近い値であることがわかる。もし、サラに炉乾燥土が全く付着しない場合は、(16)式と(17)式において、 $\Delta V_0 = 0$, $\Delta w_s = 0$ とおけるから $R = R_f = R_e$

以上に検討したように、収縮比 R についても収縮限界 w_s と同様に、微量の炉乾燥土がサラの中に付着している場合は、JIS の手順が解説者の手順よりまさっているといえる。

2・4 グリセリンの1部が炉乾燥供試体に付着し、サラの中に炉乾燥土が付着しない場合

炉乾燥供試体に付着したグリセリンの重量を Δw_{sg} , その体積を ΔV_{sg} とする。

$$\text{JIS の手順による含水比} \quad w_{fg} = \frac{w_w}{w_s + \Delta w_{sg}} \times 100 \quad (\%) \quad \text{----- (21)}$$

$$\text{解説者の手順による含水比} \quad w_{eg} = \frac{w_w}{w_s} \times 100 \quad (\%) \quad \text{----- (22)}$$

$$\text{JIS の手順による収縮限界} \quad w_{sj} = w_{fg} - \left\{ \frac{(V - V_0) \bar{w}}{w_s + \Delta w_{sg}} \times 100 \right\} \quad (\%) \quad \text{----- (23)}$$

$$\text{解説者の手順による収縮限界} \quad w_{se} = w - \left[\frac{(V - (V_0 + \Delta V_{sg})) \bar{w}}{w_s} \times 100 \right] \quad (\%) \quad \text{----- (24)}$$

$$\text{JIS の手順による収縮比} \quad R_j = \frac{w_s + \Delta w_{sg}}{(V_0 + \Delta V_{sg}) \bar{w}} \quad \text{----- (25)}$$

$$\text{解説者の手順による収縮比} \quad R_e = \frac{w_s}{(V_0 + \Delta V_{sg}) \bar{w}} \quad \text{----- (26)}$$

これらの式を用いて 2・2 , 2・3 と同様に検討した結果は $w_{se} > w_s > w_{sj}$, $(w_{se} - w_s) > (w_s - w_{sj})$, また $\frac{w_s}{V_0} \geq \frac{\Delta w_{sg}}{\Delta V_{sg}}$ の場合は $R \geq R_j > R_e$, $\frac{w_s}{V_0} < \frac{\Delta w_{sg}}{\Delta V_{sg}} < 2 \frac{w_s}{V_0}$ の場合は $R_j > R > R_e$, $(R_j - R) < (R - R_e)$, したがって、グリセリンの1部が炉乾燥供試体に付着した場合も JIS の手順が解説者の手順よりまさっているといえる。炉乾燥供試体にグリセリンが全く付着しない場合は $w_s = w_{sj} = w_{se}$, $R = R_j = R_e$

3. サラに付着する水銀

解説者の手順によると、試料をサラに入れる前にサラの重量と容量をはかることになる。サラの容量は水銀ではかるから、水銀の微量がサラに付着して残るおそれがある。水銀の比重は大きいから、もし水銀の微量がサラに付着すると、サラの重量は前に測定した重量とは変わった値になる。したがってサラの容量測定後に再びサラの重量をはかってこれを確かめる必要を生ずる。しかるに JIS の手順では炉乾燥後にサラの重量と容量をはかるから、水銀でサラの容量をはかったときたとえサラに水銀の微量が付着していても問題はない。この点でも JIS の手順は解説者の手順よりまさっている。

4. あとがき

旧土質試験法、いわゆる赤本の解説も1969年版土質試験法と同様に、ここであいう解説者の手順と同じ手順が述べられている。そのため赤本の解説に対し筆者は JIS の手順で行なうのが妥当であることを述べた¹⁾。しかし、赤本の解説者と1969年版の解説者とは別人であるのに、このたがも JIS の手順より解説者の手順がよいとして推せんされている。ここでとりあげた問題点はまことに小さいことであるが、土質工学会発行の土質試験法は権威ある指導書として重視されているから、妥当でない手順が普及することにはゆるがせにできない。土の収縮常数を求める試験順序を検討した理由もそこにある。終りに式の誘導については九州大学 鬼塚克忠氏の援助を受けた。ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 松本 鎌三：土の粒度および物理試験に関する JIS の問題点，土質工学会第10回シンポジウム，p.52，昭和40年10月