

混合土の稠度試験に関する一考察

坂 田 資 宏*

ま え が き

土の物理性を表わす試験の中で、稠度は重要な位置を占めるものであり、どのような目的で行なわれる土質試験においても、ピートなど特殊な土質は別として、通常かならず測定されている。

これらの試験は、乱した試料について行なうものであり、自然状態やある特定の締固めをした場合の、力学的性質を直接反映するものではないが、圧縮やせん断変形に対する抵抗力、さらには透水性および、土自体の組成を間接的に表現するものと考えられ、土の分類上、古くから用いられている。

当研究室では1959年に発足して以来、かんがい用アースダムの用土調査を行なっているが、各地区の土取場から搬入されてくる試料について、かならず一度は液性塑性などの稠度試験を実施している。しかし、液性限界が30%以下になるようなシルト質～砂質のものについては、試験が比較的困難となる。例えばJISA 1205に規定される液性限界試験においては、0.42 mm フルイ通過の試料に注水してよく練り返し、真ちゆう製の皿上に均したのち、ヘラを用いて静かにみぞを切るのであるが、このみぞがなかなか思うように切れないのである。また、よしんばみぞだけは鋭利な刀物などを用いて切れたとしても、わずかに数回の上下動でたちまち滑動してしまい、25回相当の含水比を求めることは困難になるのである。この場合の滑動は、両側の試料がみぞの中心に向かって逐次崩壊してくるのではなく、皿と試料の接触面に形成された水膜が原因となって、全試料を一気に滑らせてしまうのである。JISA 1206の塑性限界もシルト質～砂質の試料については、操作が面倒となり個人誤差が入りやすく、測定値のバラつきもおおのずから多くなる。そこでこれを楽にしかも正確に測定することを目的として、Dos Santos の混合土に関する一般式を応用することを思いつき、とりあえず上式の信頼度を確かめる実験を行なった。またこれに関連して粒度や稠度など物理試験の測定値から、突固め試験の結果を類推する Rowan-Davidson の式についても照合してみた。実験は1961年中に終了しており、両式が北海道のアースダム用土につい

ても、適用できそうであることがわかっていたのであるが、これを実際に利用することもないまま今日に至った。しかし資料をいたずらに筆者のもとに眠らせておくことも無為に過ぎると思い、ここに発表するものである。

実 験 要 領

試料は札幌開発建設部管内野花南地区〔芦別市字野花南〕の用土6ヶと、旭川開発建設部管内十勝岳地区〔上富良野町字日進〕のもの6ヶを用いた。前者は主として第3紀に属する泥岩などが風化堆積したものであり、後者は十勝岳などの噴火によるヨウ結凝灰岩の残積風化したもので

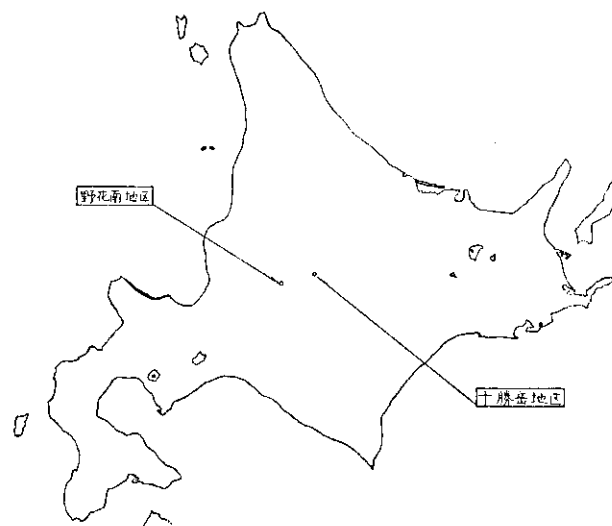


図-1

表-1 地山状態の含水比および密度

	試 料 名	含 水 比 (%)	密 度 (g/cm ³)
十勝岳地区	A-23	23.1	1.47
	B-31	28.8	
	C-32	24.7	
野花南地区	A-21	22.6	1.48 1.45
	A-22	27.6	
	C-26	28.8	
	ホ-29	31.9	

* 特殊土壁開発研究室（用土班）技官

ある。試料は土層確認のために掘った縦穴（地表下 0.5～1.7 m）から採取したものである。

試料調整は JISA 1201 に基づき、充分気乾のうえ行なった。ちなみに地山状態での密度と含水比を表-1 に示す。両地区とも堆積土層内には、10～31.7 mm のレキが混っているが、本文でとりあげている 12 点では比較的少なかった。なお各種稠度の測定をはじめ、突固めや粒度などの試験はすべて JIS に拠った。

Dos Santos の一般式¹⁾に対する検討

Dos Santos は、液性限界 (W_L)、塑性限界 (W_P)、塑性指数 (I_P)、収縮限界 (W_S)、線収縮 (L_S)、現場含水当量の 6 種の性質について、次式の関係が成立するものとしている。〔ただしこの実験では、現場含水当量を省略した。〕

$$K = \frac{A_1 a_1 K_1 + A_2 a_2 K_2 + A_3 a_3 K_3}{A_1 a_1 + A_2 a_2 + A_3 a_3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- K : 混合土の性質
 $K_1 K_2 K_3$: それぞれ混合される土の性質
 $A_1 A_2 A_3$: それぞれ混合される土の重量百分率
 $a_1 a_2 a_3$: (2) 式で定義される定数

$$a = \frac{\sum y}{100 n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに

- y : 土の粒度曲線において各フルイの大きさに対する通過百分率 (0.075 mm, 0.15 mm, 0.30 mm, 0.59 mm, 1.20 mm, 2.4 mm)
 n : フルイの種類の数 (6 ケ)

(2) 式の計算にあたっては、フルイの大きさを 0.075～2.4 mm にとることにしてあるが、簡略法として a 値は、0.42

mm フルイに対する通過百分率で表わしてもよいとされている。しかしこの実験では、混合以前にすべての試料を 0.42 mm フルイでふるうことにしておいたので、(2) 式にしたがうのは無意味であると判断した。そこで次式により a 値を決定した。

$$a = \frac{\sum y'}{100 n'} \quad \dots\dots\dots (2)'$$

ここに

- y' : 土の粒度曲線において 0.42 mm フルイに対する通過百分率を 100% としたときの、次の各粒径に対する通過百分率 (0.005 mm, 0.01 mm, 0.02 mm, 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.42 mm)
 n' : 採択した y' のケ数 (7 ケ)

前述のように筆者は、測定困難な未知の K を、既知の K_1 と 2 者の混合土について測定した K_2 とから推定しようとしているのであるから、実際には (1) 式を次のように変形して用いるのが便利である。

$$K = K_2 + (K_2 - K_1) u \cdot v \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに

- u : 混合した 2 試料の重量比で
 $u = \frac{K_1 \text{ を示す試料の重量}}{K \text{ を求めようとする試料の重量}}$
 v : 混合した 2 試料の a 値の比で
 $v = \frac{K_1 \text{ を示す試料の } a \text{ 値}}{K \text{ を求めようとする試料の } a \text{ 値}}$

しかし、本文では 2 試料混合の場合の信頼度を検証しようとしているのであるから、次の形で使用することにした。

$$K = \frac{A_1 a_1 K_1 + (100 - A_1) a_2 K_2}{A_1 a_1 + (100 - A_1) a_2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

上式で A_1 を変数と考えれば、 A_1 と K の関係は二次曲線

表-2 混合試料の重量百分率

目標混合比	十勝岳 A-23: A-24	十勝岳 B-31: B-27	十勝岳 C-32: C-33	野花南 A-21: A-22	野花南 C-26: C-25	野花南 ホ-30: ホ-29
0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100
10 : 90	9.95:90.05	9.82:90.18	9.93:90.07	9.97:90.03	10.10:89.90	9.83:90.17
20 : 80	19.91:80.09	19.67:80.33	19.88:80.12	19.94:80.06	20.18:79.82	19.69:80.31
30 : 70	29.89:70.11	29.56:70.44	29.84:70.16	29.93:70.07	30.23:69.77	29.59:70.41
40 : 60	39.85:60.15	39.50:60.50	39.82:60.18	39.92:60.08	40.27:59.73	39.53:60.47
50 : 50	49.85:50.15	49.37:50.63	49.81:50.19	49.91:50.09	50.28:49.72	49.51:50.49
60 : 40	59.86:40.14	59.50:40.50	59.82:40.18	59.92:40.08	60.27:39.73	59.53:40.47
70 : 30	69.87:30.13	69.55:30.45	69.84:30.16	69.93:30.07	70.24:29.76	69.58:30.42
80 : 20	79.91:20.09	79.66:20.34	79.88:20.12	79.94:20.06	80.17:19.83	79.69:20.31
90 : 10	89.96:10.04	89.81:10.19	89.93:10.07	89.97:10.03	90.10: 9.90	89.82:10.18
100 : 0	100:0	100:0	100:0	100:0	100:0	100:0

表—3 各粒径に対する通過百分率

粒 径 (mm)	十勝岳 A-23	十勝岳 A-24	十勝岳 B-31	十勝岳 B-27	十勝岳 C-32	十勝岳 C-33	野花南 A-21	野花南 A-22	野花南 C-26	野花南 C-25	野花南 ホ-30	野花南 ホ-29
0.42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	79	72	81	73	79	72	92	94	90	92	95	92
0.1	62	53	68	53	63	58	87	86	77	81	88	77
0.05	47	47	63	42	54	48	70	75	61	70	78	63
0.02	39	37	54	31	43	44	54	59	42	53	66	49
0.01	33	32	50	24	36	39	43	48	31	43	58	37
0.005	24	21	43	18	26	30	32	34	23	33	49	29
計 (y)	384	362	459	341	401	391	478	496	424	472	534	447
$a = \frac{\sum y}{100n}$	54.9	51.7	65.6	48.7	57.3	55.9	68.3	70.9	60.6	67.4	76.3	63.9
G_s	2.62	2.61	2.60	2.59	2.65	2.58	2.75	2.74	2.67	2.71	2.75	2.76

で表わされる。

試料の組合わせは野花南で3組と、十勝岳で3組の計6組とし、 A_1 を0~100%の間で11種にとったので、都合66組の混合を行なった。〔表-2〕混合作業を絶乾状態で行なうことは困難であり、目標混合比のとおりにはできなかったが、その差はいずれも1%以下である。また混合時の含水比は3~6%であった。この計算過程と、各試料の比重を表-3に示す。実験はすべて供試体10ヶ以上の平均とし、その差が5%以上あったときは、かならずやりなおすことにした。

混合試料の性質について、(4)式による計算値と実測値を対比させたのが表-4である。目標混合比が100:0の欄に記された数値は、それぞれの試料の個有の性質を示すものである。

塑性指数は $I_P = W_L - W_P$ で与えられ、 I_P と W_L の関係からは、A. Casagrandeの作った塑性図²⁾により、土の分類名や圧縮性に関する大体の性質を知ることができる。表-4の数値を塑性図上に記したのが図-2~図-7である。計算値と実験値の塑性図上における開きは、3%以下である。図-3や図-6など、 W_L 、 I_P ともに大きな差をもつ組合わせでは、比較的良好一致しているように見えるが、開きの平均値は他となんら異なるところがない。しかしこのことはすべての実験値が大まかにではあるが、A線に沿う事実とあわせて興味ぶかい現象と思う。

一方最近4カ年間に扱ったアースダム用土281試料について、(2)'式による a 値のひん度を求めたところ、図-8のようになった。すなわち a 値は45~80%に集中し、標準偏差は10%程度であった。

この場合

$$|K_1 - K_2| < 20\%, \quad |a_1 - a_2| < 20\%$$

の範囲では、(4)式における a 値の影響を無視しても、実用上さしつかえなく、その誤差も3%以下である。よって(4)式は次のように書くことができる。

$$K = K_2 + (K_1 - K_2) \cdot \frac{A_1}{100} \dots\dots\dots (4)'$$

同様な理由により(3)式も $v=1$ とおいてよい。

収縮限界については、もっともよく一致した例を図-9に、その逆を図-10に示した。6ヶの組合わせを通じて誤差の最大は、3.6%であり、その算術平均は2.7%となっている。線収縮についても同様な組合わせをえらんで図示した。〔図-11・図-12〕誤差の最大は2.4%算術平均は1.8%であった。

Rowan-Davidson の式³⁾ に対する検討

前項で取扱った12試料のうち、7試料については突固め試験を行なった。稠度試料に含まれる最大粒径が、0.42mmであるのに対して、突固めのそれははるかに大きく〔この実験では十勝岳のもの4ヶが2.0mmで、野花南のもの3ヶが4.8mmとなっている。〕かならずしも一定とはならないので、この間の相関を論ずるためには、当然粒度の因子をそう入しなければならない。そこでRowan-Davidson は次のように $A \cdot B$ の指標を含む2式を提唱している。

$$\tau_{d \max} = \frac{r_w (104 - 0.67 I_P)}{W_S \left(\frac{B}{A} - 1 \right) + \frac{100}{R}} \quad (\text{g/cm}^3) \dots\dots (6)$$

$$W_{\text{opt}} = W_S \frac{B}{A} + 0.33 I_P - 4 \quad (\%) \dots\dots\dots (7)$$

表-4 混合土の性質に関する計算値と実験値の比較表

(註) 上段は計算値, 下段は実験値

試料 目標 混合比	十勝岳 A-23:A-24			十勝岳 B-31:B-27			十勝岳 C-32:C-33			野花南 A-21:A-22			野花南 C-26:C-25			野花南 ホ-30:ホ-29		
	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)
0 : 100	31.8	24.5	7.3	24.7	3.3	28.0	23.2	4.8	28.9	0	34.2	27.1	7.1	30.8	1.7	30.8	1.7	30.8
	31.8	24.5	7.3	24.7	3.3	28.0	23.2	4.8	28.9	0	34.2	27.1	7.1	30.8	1.7	30.8	1.7	30.8
10 : 90	32.3	24.7	7.6	25.4	3.2	30.7	23.9	6.8	29.1	1.0	34.7	27.4	7.3	30.8	1.9	34.8	24.0	10.8
	33.8	26.7	7.1	26.9	3.2	32.5	23.8	8.7	28.8	1.8	34.0	27.0	7.0	27.2	3.5	35.0	23.3	11.7
20 : 80	32.9	24.9	8.0	26.0	3.0	33.3	24.6	8.7	29.2	1.9	35.2	27.7	7.5	30.8	2.2	34.6	24.0	10.6
	33.8	27.8	6.0	29.3	2.0	34.0	24.4	9.6	32.2	0.8	35.0	27.2	7.8	30.9	2.0	33.8	24.1	9.7
30 : 70	33.4	25.1	8.3	26.7	2.9	35.7	25.2	10.5	29.4	2.8	35.7	27.9	7.8	30.8	2.4	34.4	24.1	10.3
	35.0	27.7	7.3	28.7	2.8	35.8	25.3	10.5	31.7	1.5	37.0	29.0	8.0	29.4	3.5	32.8	23.3	9.5
40 : 60	33.9	25.3	8.6	27.3	2.8	38.0	25.8	12.2	29.6	3.6	36.2	28.2	8.0	30.8	2.7	34.2	24.1	10.1
	36.8	29.3	7.5	30.4	2.7	32.8	25.5	7.3	27.6	2.5	37.0	29.4	7.6	28.8	4.0	33.0	23.7	9.3
50 : 50	34.5	25.5	9.0	28.0	2.6	40.2	26.4	13.8	29.7	4.4	36.7	28.5	8.2	30.8	2.9	34.0	24.2	9.8
	35.4	25.0	10.4	29.2	2.7	38.0	25.3	12.7	28.1	4.3	36.0	25.7	10.3	29.5	3.3	33.0	24.8	8.2
60 : 40	35.0	25.7	9.3	28.6	2.5	42.2	26.9	15.3	29.8	5.2	37.2	28.8	8.4	30.9	3.1	33.8	24.3	9.5
	36.0	23.9	12.1	28.9	3.4	40.8	26.5	14.3	30.3	5.0	35.0	25.9	9.1	30.0	2.3	33.0	24.1	8.9
70 : 30	35.5	25.8	9.7	29.2	2.4	44.2	27.4	16.8	30.0	5.9	37.7	29.1	8.6	30.9	3.4	33.6	24.3	9.3
	36.2	24.8	11.4	29.4	3.2	43.6	27.0	16.6	30.0	5.9	36.0	27.2	8.8	30.1	2.5	32.0	24.4	7.6
80 : 20	36.0	26.0	10.0	29.9	2.2	46.0	27.9	18.1	30.1	6.6	38.2	29.3	8.9	30.9	3.6	33.4	24.4	9.0
	36.8	25.6	11.2	30.0	3.2	44.0	27.3	16.7	30.1	6.3	36.2	25.8	10.4	31.1	2.0	32.0	22.9	9.1
90 : 10	36.5	26.2	10.3	30.5	2.1	47.7	28.4	19.3	30.2	7.2	38.7	29.6	9.1	30.9	3.9	33.2	24.4	8.8
	37.2	25.2	12.0	29.4	3.6	46.2	31.0	15.2	33.1	5.5	36.4	27.1	9.3	33.0	1.5	33.2	24.8	8.4
100 : 0	37.0	26.4	10.6	31.1	2.0	49.4	28.8	20.6	30.3	7.8	39.2	29.9	9.3	30.9	4.1	33.0	24.5	8.5
	37.0	26.4	10.6	31.1	2.0	49.4	28.8	20.6	30.3	7.8	39.2	29.9	9.3	30.9	4.1	33.0	24.5	8.5

(十勝岳 A-23 : A-24)

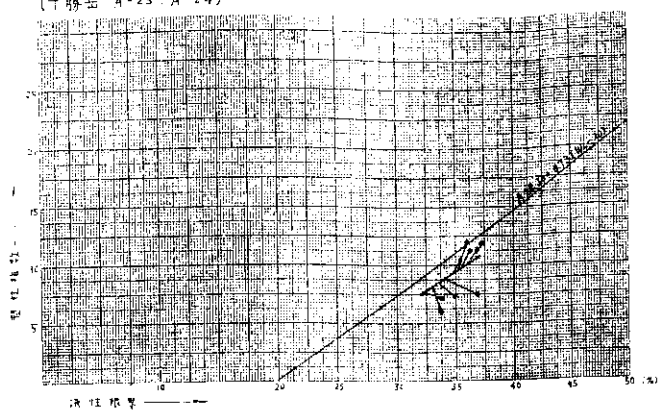


図-2

(野花南 A-21 : A-22)

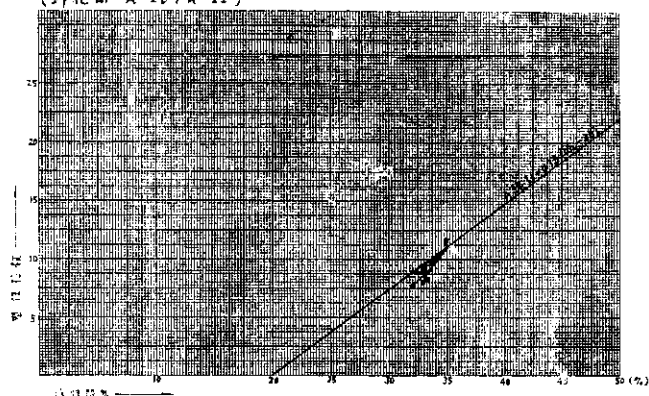


図-5

(十勝岳 B-31 : B-27)

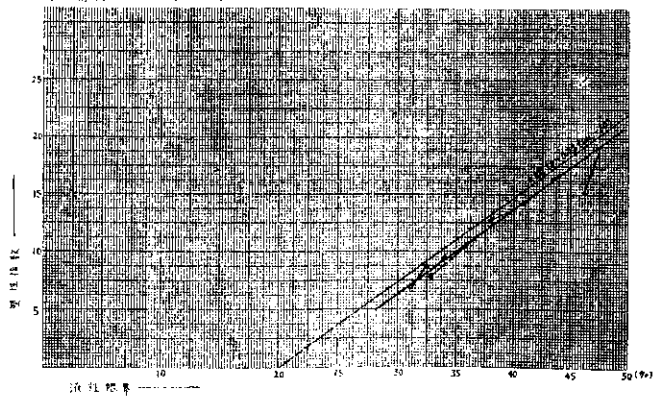


図-3

(野花南 C-26 : C-25)

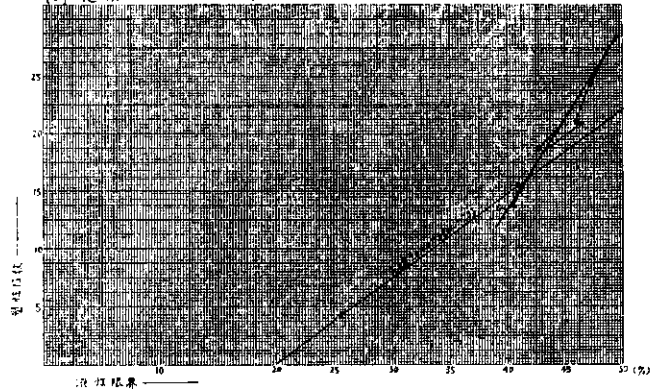


図-6

(十勝岳 C-32 : C-33)

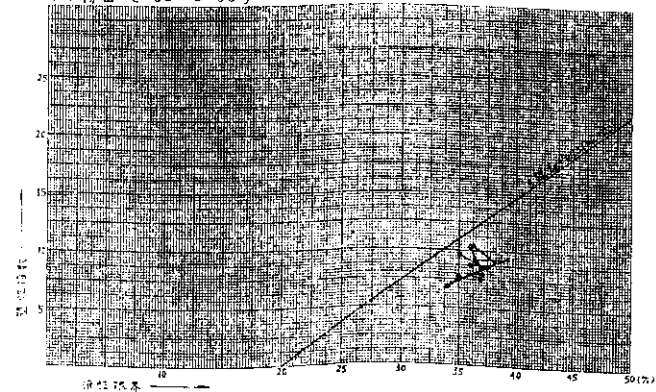


図-4

(野花南 C-30 : C-29)

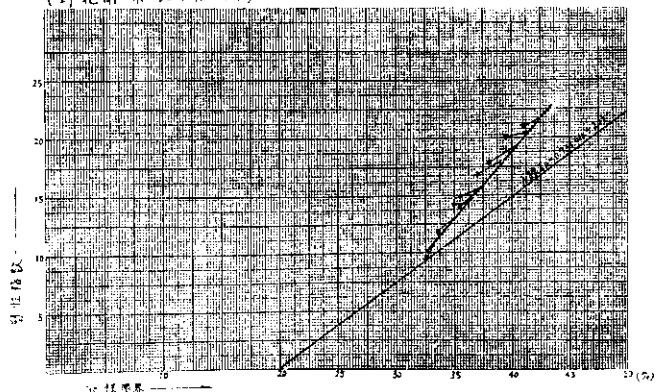


図-7

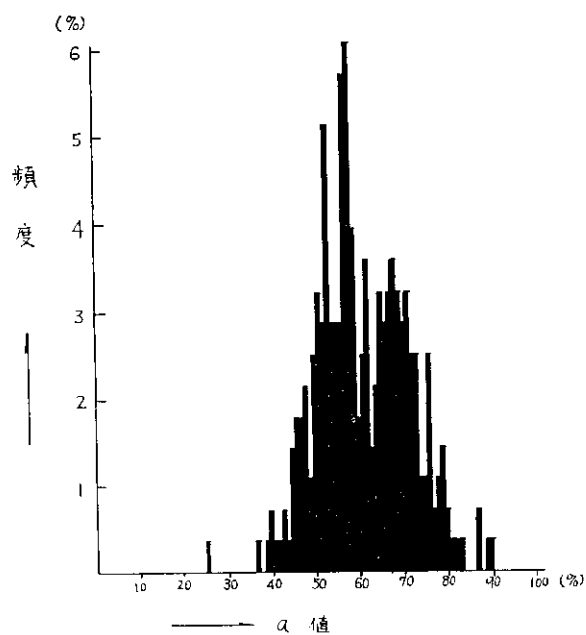


図-8

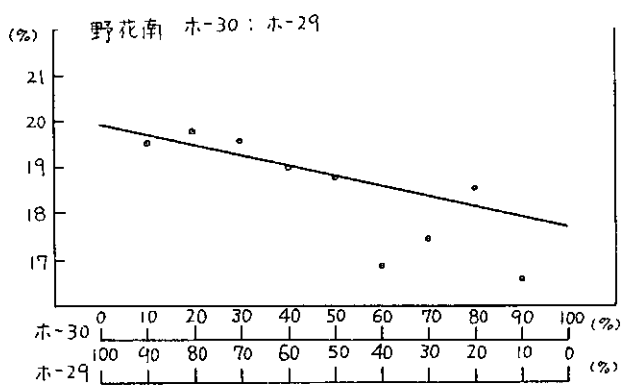


図-9

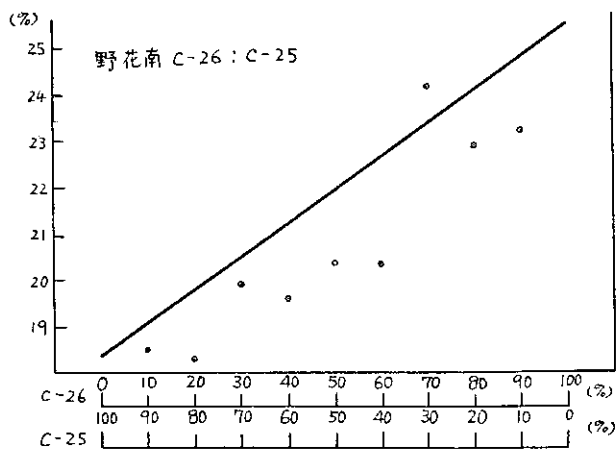


図-10

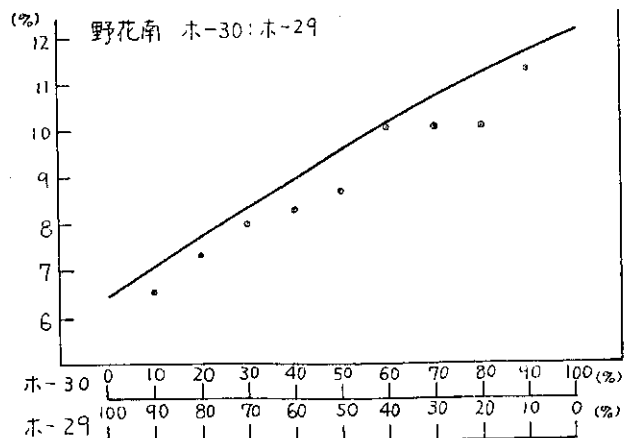


図-11

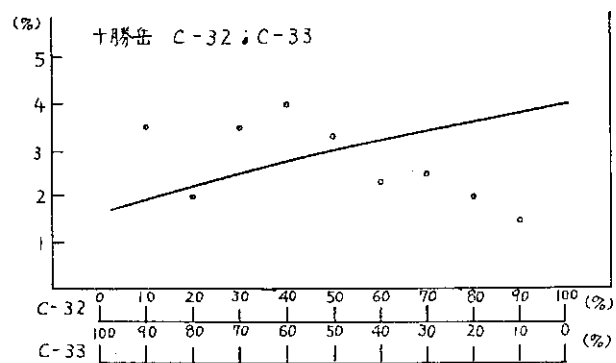


図-12

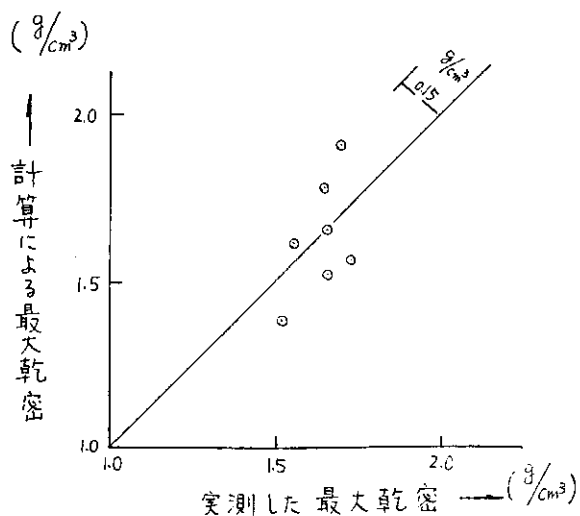


図-13

ここに

$\gamma_{d\max}$: 突固め試験による最大乾燥密度

W_{opt} : 突固め試験による最適含水比

γ_w : 水の単位体積重量

R : 収縮比で土粒子の比重を G_s とすれば

$$G_s = \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{W_s}{100}}$$

なる関係がある。

A: 4.8 mm フリ通過土の重量百分率

B: 0.42 mm フリ通過土の重量百分率

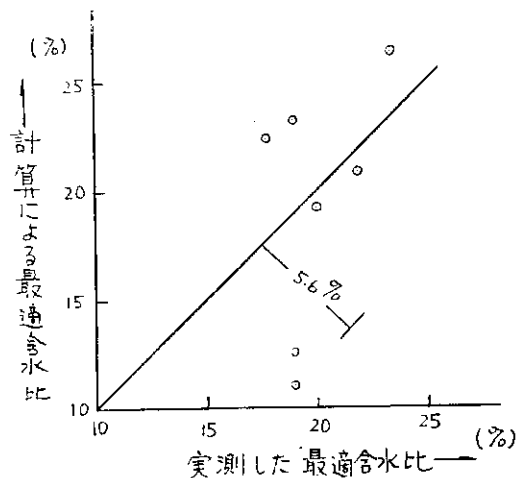


図-14

実験値と (6), (7) 式による計算値の比較を図-13, 図-14に示す。両者ともかなりのバラつきはあるが、一応式の成立を肯定できると思う。 $\gamma_{d\max}$, W_{opt} の誤差の最大値は、それぞれ 0.22 g/cm^3 , 7.9% で、同じく算術平均は 0.12 g/cm^3 , 4.0% であった。稠度試験は個人差の入る余地も多く、熟練者により充分入念に行なわれれば、これらの誤差は減少するかもしれないが、筆者らが通常行なっている程度の精

度では、おおざっぱな類推をするのに用いるのがせいぜいというところである。また $\gamma_{d\max}$ がよく一致している試料では、 W_{opt} もまた精度が高く、逐次精度の落ちてゆく試料順が、 $\gamma_{d\max}$ と W_{opt} の両者に共通する傾向がある。

あ と が き

Dos Santos の一般式を、2 試料混合の場合に限定し、道内におけるアースダム用土を用いてその検証を試みた。その結果、 W_L , W_P , I_P については、塑性図上で 3% 程度の誤差を許容するならば、(4)' 式のような直線式で混合率 (A_1) と、合成稠度 (K) の関係を表わせることがわかった。また、突固め試験における最適状態を、物理試験結果から類推しようとする Rowan-Davidson の式についてもチェックを行なった。

本道の土については、この種の比較試験がほとんどなされていないので、今後はアースダム用土に限らず、各種の土に試みるとおもしろいと思う。最近フィルタイプダムの施工には、ストックパイル方式を利用して積極的な材料混合を行なう例がでてきた。したがって Dos Santos や Rowan-Davidson 式をさらに発展させ、混合土のしや水能力を類推できるようにすれば、非常に有意義である。

最後にこの実験の企画や考察にあたり、始終指導をいただいた当研究室山野技官にお礼申しあげる。また百日余にわたる実験を熱心に手伝っていただいた、故佐藤佑君に対し感謝の意をささげたい。

参 考 文 献

- 1) 三木五三郎・山内豊総: 土質安定の理論と実際. p.-82, オーム社.
- 2) 土質試験法解説 (第1集) 改訂版, p.-60.
- 3) 三木五三郎・山内豊総: 土質安定の理論と実際. p.-53, オーム社.