

アースダムの設計施工における土質試験値の適用と施工管理について

沢 田 敏 男 *
今 尾 昭 夫 *
酒 井 信 一 *

まえがき

アースダムの設計施工に当たり、用土の粒度分析をはじめ、透水、セン断などいろいろな室内試験を行ない、そのデータに基づいて設計や施工計画が立てられるが、この際一番問題となる試験結果の検討や、これらの結果を設計施工上にいかに適用するか、またこれに基づきなされなければならない現場施工管理の問題につき、述べてみたい。

なお、この試験研究には、農林省東条川農業水利事業所安政アースダムの築堤用土を用いているが、同事業所の船木支所長、木村勇技官および芝田精一技官から、ご助力いただいたことを感謝する。

I. 土 質 試 験

実施した土質試験の種類は、試土 A, B につき、粒度分析、突き固め試験、塑性・限界試験、透水試験、および三軸圧縮試験である。このうち粒度分析と突き固め、塑性・液性限界試験は、JIS の方法により、透水試験器は、本研究室で製作した内径 10 cm 高さ 6.37 cm の鉄製円筒形で、上下にポーラーストーンをソウ入して水密のフタをし、任意の水頭がかけ得るようにした装置で行なっている。また三軸圧縮試験は、東京プラント製で、 $\phi=60$ mm, $L=150$ mm の Test Piece がセットできる拘束圧室をもつ試験機で行ない、すべて非圧密—急速セン断の方法をとった。これらの試験結果は、つぎの通り

表-1-1 4.8 mm 以下

試土	粒 度 試 験				10% 粒 径 (mm)	60% 粒 径 (mm)	均等係数	L.L. (0.4 mm 以下)	P.L. (0.4 mm 以下)	P.I. (0.4 mm 以下)	比 重	突き固め試験	
	レキ分 (%)	砂 分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)								最適含水比	最大乾燥密度
A	9.48	36.42	23.90	30.20	0.0010	0.110	110.0	43	23	20	2.721	16.40%	1.779
B	17.70	54.30	14.20	13.80	0.0025	0.670	268.0	39	26	13	2.724	15.90	1.794

表-1-2 20 mm 以下

試土	粒 度 試 験				比 重	突き固め試験	
	レキ分 (%)	砂 分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)		最適含水比	最大乾燥密度
A	21.80	31.30	20.90	26.00	2.721	13.80%	1.840
B	49.91	33.19	8.60	8.30	2.724	11.10	1.924

*京都大学農学部

表-1-3 原 土

試土	粒 度 試 験				比 重	最大粒径 (mm)
	レキ分 (%)	砂 分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)		
A	28.40	28.70	19.20	23.70	2.721	40.0
B	68.50	20.70	5.80	5.00	2.724	50.0

(注) 上表において、試土 A は農林省安政アースダムのコア用土、試土 B は堤体用土に予定されている。

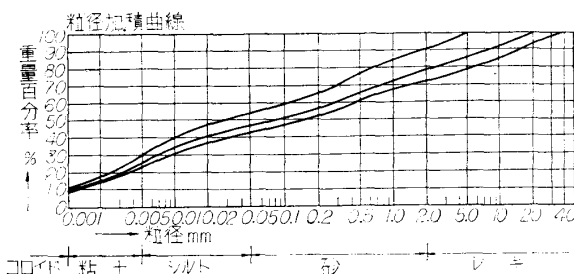


図-1-1 試 土 A

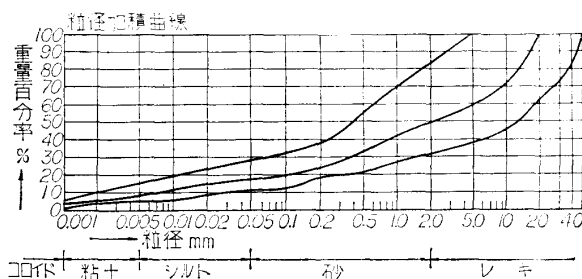


図-1-2 試 土 B

である。

1. 試土 A, B の組成および物理的性質
2. 粒径加積曲線 (図 1-1, 2)

3. 土の透水試験 (4.8 mm 以下)

$w-r_d, k$ 関係曲線 (図 1-3, 4) および r_d-k 関係

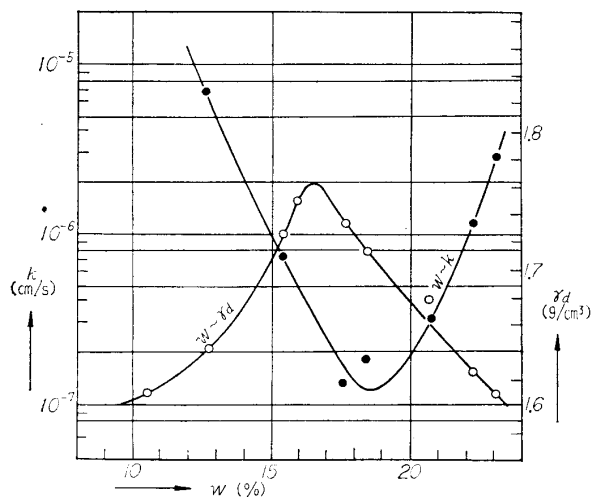
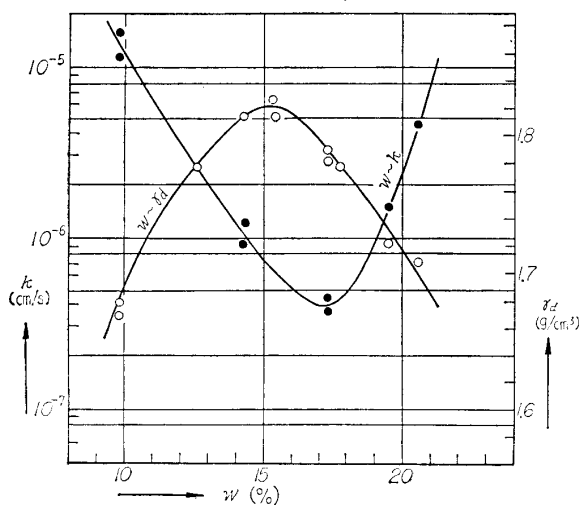
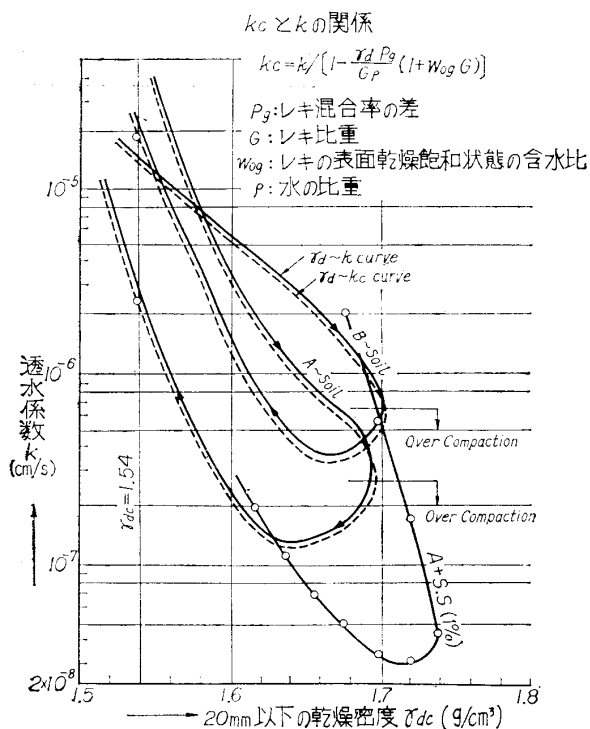
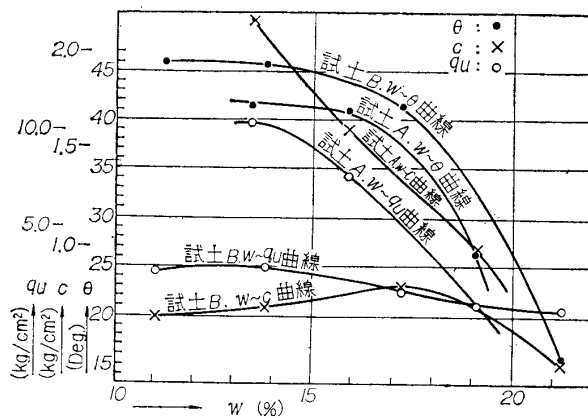
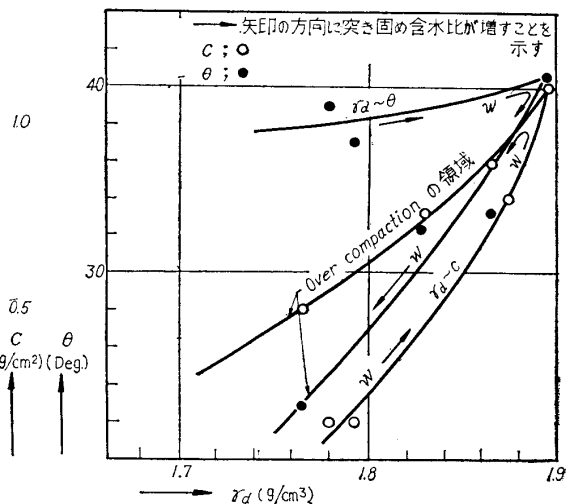
曲線 (図 1-5)

4. 三軸圧縮試験

試土 A, B 4.8 mm 以下の $w-\theta, c, q_u$ 関係曲線 (図 1-6) 試土 B, 20 mm 以下飽和土の $r_d-\theta, c$ 関係曲線 (図 1-7)

5. レキ混入土と細土との r_d の相関関係 (図 1-8)

報 文・論 文

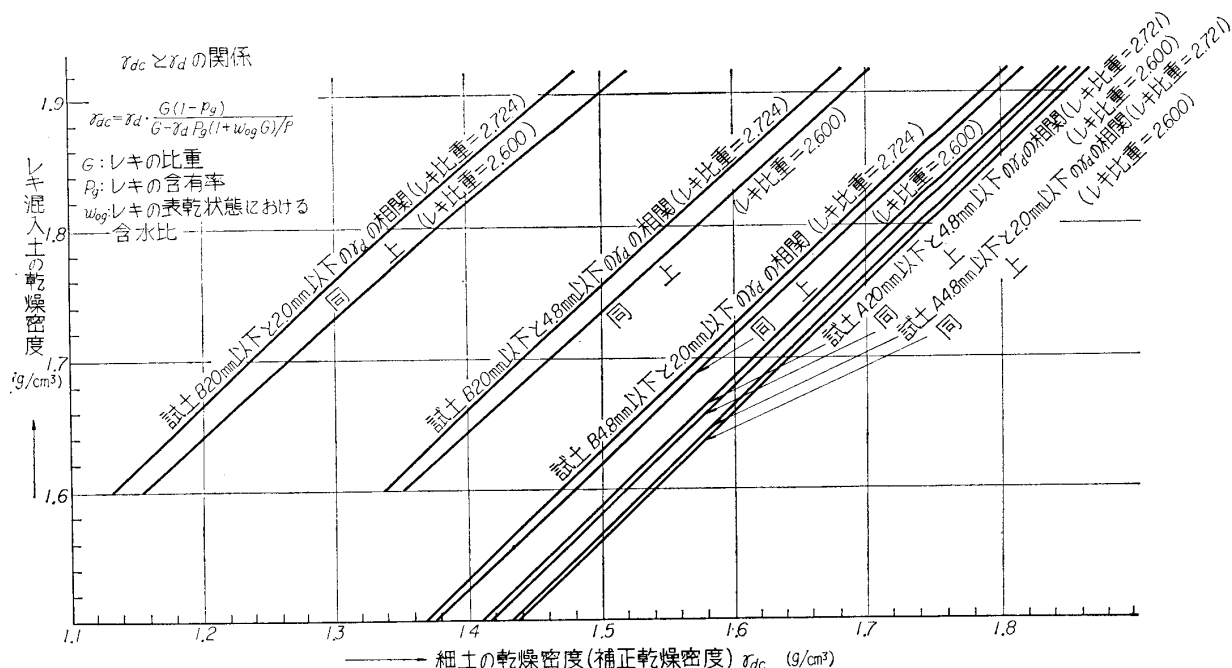
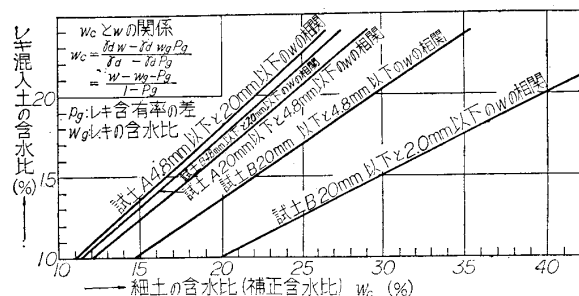
図-1-3 試土 A 4.8 mm 以下の $w \sim \gamma_d, k$ 関係曲線図-1-4 試土 B 4.8 mm 以下 $w \sim \gamma_d, k$ の関係曲線図-1-5 試土 A, B における細土の $\gamma_d \sim k$ 相関関係図-1-6 試土 A, B 4.8 mm 以下の $w \sim \theta, c, q_u$ 関係曲線図-1-7 試土 B 20 mm 以下飽和土の $\gamma_d \sim \theta, c$ 関係曲線6. レキ混入土と細土との w の相関関係 (図 1-9)

II. 土質試験値の適用と施工管理について

アースダムの設計施工にあたり、用土の物理、力学的試験を行ない、そのデータに基づいて設計や施工計画が立てられているが、この際一番問題となるところの試験値の適用や現場調整による施工管理について、注意事項を述べてみる。

(1) 突き固め試験値の適用について

築堤用土で重視される二大性質は、力学的強さと透水性であるが、この性質はともに、土の乾燥密度と含水比により、大きく左右される。一般に、同一組成の土においては、乾燥密度の大きいほど強度は大となり、また透水性は減少する傾向をもつものである。そこで、突き固め試験を行ない、含水比と乾燥密度との関係を求め、最大乾燥密度を得るための最適含水比を知ろうとするのであるが、これらの値は、同一の土質に対しては、突き固めの方法や、与える仕事量によって異なり、また突き固め方法および細土の組成が同じでも、レキ分の混入率により変化する。この関係を導けば、次のようである。

図-1-8 試土 A,B におけるレキ混入土と細土との r_d の相関関係図-1-9 試土 A,B におけるレキ混入土と細土との w の相関関係

$$r_{dc} = r_d \cdot \frac{G(1-P_g)}{G - r_d P_g (1 + w_{og} G) / \rho}$$

あるいは

$$r_d = \frac{1}{\frac{(1-P_g)}{r_{dc}} + \frac{(1+w_{og} G) P_g}{G \rho}} \quad \dots (1)$$

ただし

 r_d : レキ分の混入率が P_g (絶乾重量比の小数であらわしたレキ分) だけ多い土の乾燥密度 r_{dc} : レキ分が P_g だけ少なく、それ以外は同じ組成の土の乾燥密度 G および w_{og} : レキの比重および表面乾燥飽和状態の含水比 ρ : 水の密度

上式を用いて、試土 A,B 各 2.0 mm 以下、4.8 mm 以下および 20 mm 以下のそれぞれ乾燥密度の相関関係を求めれば、図 1-8 に示すとおりである。たとえば、試土 B 20 mm 以下のレキの混入土と、同 2.0 mm 以下の細土との関係を求めると、 $P_g = 0.4991$ であるから、20 mm 以下のレキの混入土の $r_d = 1.9 (\text{g/cm}^3)$ に対し、細土の $r_{dc} = 1.460 (G = 2.724)$ ないし $1.498 (G = 2.600)$

となる。ただしこの場合、(1) 式における $(w_{og} G)$ の値は、1 に比して小さいので無視した。またこれについて、Walker, Holtz の理論式

$$r_d = \frac{1}{\frac{(1-P)}{r_{d1}} + \frac{(1+w_2 G_2) P}{G_2 r_w}} \quad \dots (1)'$$

ただし

 r_d : 混合後の乾燥密度 G_2 : 粗粒の比重 P : 粗粒(レキ)の混合率 w_2 : 粗粒の含水比

r_{d1} : 土のみの乾燥密度 r_w : 水の単位体積重量を用いて計算しても、同じ結果を得る。しかし上式において、 w_2 を単に粗粒(レキ)の含水比としているが、厳密に言えば、筆者の定義したように、表面乾燥飽和状態の含水比を採用すべきである。

次に、レキ混入率の差による含水比の変化も、次式で示される。

$$w_c = \frac{w - w_g \cdot P_g}{1 - P_g}$$

あるいは

$$w = w_c - P_g (w_c - w_g) \quad \dots (2)$$

ただし

 w : レキ分を P_g だけ多含した土の含水比

w_c : レキ分が P_g だけ少なく、それ以外は同じ組成の土の含水比 (すなわち、含水比 w なるレキの混入土から、レキ分 P_g だけを除いた土の含水比)

 w_g : 含水比 w なる土中のレキの含水比

この (2) 式を用いて、試土 A,B の各 2.0 mm 以下、4.8 mm 以下および 20 mm 以下のそれぞれ含水比の相関関係を求め、図 1-9 に示してある。この場合、(2) 式

報 文・論 文

の $w_g \cdot P_g$ の値は w に比して小さいので無視した。

以上のようなことから、突き固め試験結果を施工管理に適用する場合、現場の築堤土と試験用土とのレキ含有率の差に基づく乾燥密度や含水比の値を、(1), (2) 式によって補正し検討すること、および上述のように、含水比と乾燥密度の関係が、突き固め方法によって異なってくるので、現場の締め固め用施工機械、転圧回数、まき出し厚さなどと、標準突き固め試験の結果との関連をつけるため、いわゆる現場調整試験が肝要となる。

(2) 透水試験値の適用について

透水度は、上述のように、乾燥密度によって大きく左右される。かつ乾燥密度が同じでも、こね返されて土粒子の分散度が違ってくれば、透水度も変化する。その理由は透水係数 (k) を示す次式において¹⁾、

$$k = c \frac{1}{\nu} t^2 P_s, \quad t \equiv \frac{P_s}{S} \dots\dots\dots (3)$$

ただし

c ; 間ゲキ形状係数 ν ; 動粘性係数
 P_s ; 有効間ゲキ率 S ; 有効内面積
 t ; 浸透水の径深

土粒子の分散による S の増加と、 c および P_s の減少が生起するためである。それゆえに、**突き固めに当り Over Compaction され、土粒子の分散が促進された状態にある土の k は、そうでない状態の土の k に比し、 r_d が同一でも、非常に小さい値を示すものである。**また k の極小値が、最大乾燥密度よりもずれ、やや後方で起こることが認められる。たとえば、表 1-1 に示す土の透水試験結果を整理すると、図 1-3, 4, 5 に示すようになり、この突き固めにおける最適含水比の前後において、同じ r_d に対応する k の値が異なっている。また図 1-5 のうち、A+s.s(1%) の $r_d \sim k$ 曲線は、試土 A に、リグニン系上質安定剤（リグニンスルホン酸カルシュームに、約 20% の重クロム酸ナトリウムを添加したもの、日曹 K K 製）を、重量比で 1% 混入し、透水試験器にテン充、3 日間 20°C 前後で湿潤養生ののち、透水試験を行なった結果であるが、 k は不混入の A~Soil に比し、数分の 1 以下に減少している。これは明らかに、本土質安定剤の特性の一つである土粒子に対する分散能の効用と考えられる²⁾。

以上の事柄から、透水試験値の適用に当たっては、現場含水比が多くて、Over Compaction になりやすいことを考慮し、これが $r_d \sim k$ の関係にいかに関与するかを見きわめておかなければならない。

次にレキの混入率が、透水度に影響する問題がある。これは、細土が同じでもレキ分の多少により、突き固め効果（同一エネルギーに対する密度や分散度の増加割合）が異なることや、レキの混入による有効浸透断面の変化

が、起こることなどである。これらの問題については、愛知用水公団牧尾ダムのコア用土につき、行なわれた守谷氏らの実験研究³⁾ があるが、この研究からも、ある適当な範囲までのレキ混入率の増加は、透水度の減少に役立ち、一定限度を越えると、急に増加することがわかる。なお、レキ混入率の変化 P_g により、細土の乾燥密度の変化や、土粒子の分散がないとしても、透水係数は、次式でもって補正されなければならない。

$$k_c = k \left[1 - \frac{r_d P_g}{G \rho} (1 + w_{og} G) \right] \dots\dots\dots (4)$$

ただし

k_c ; 透水係数 k をもつレキ混入土より、レキ分が P_g だけ少ない土の透水係数（その他は(1), (2) 式参照）

以上のことから、試験用土と現場用土との間に、レキ分の混入率が異なる場合（透水試験は、モールドの寸法、突き固めなどの関係から、4.8 mm 以下の土で行なう場合が多い）、試験値の補正検討が必要となる。図 1-5 においては、現場用土が 20 mm 以下であるとして、試土 A, B 以下の土の試験値 k を、(4) 式によりそれぞれ補正した k_c と、これに対応する 2.0 mm 以下の乾燥密度 r_{dc} （この補正値 r_{dc} は、図 1-3, 4 と図 1-8 の関係から求められる）との関係を、図示してある。本図の施工管理への適用例として、たとえば最適含水比より多い状態で、締め固められた現場築堤土（試土 A, B 共 20 mm 以下とみなす）の 2.0 mm 以下の乾燥密度が、 $r_{dc} = 1.54$ であった場合、この状態の現場締め固め土 A, B は、それぞれ $k_c = 2.5 \times 10^{-6}$ および $k_c = 1.9 \times 10^{-5}$ cm/s くらい（over compaction の領域）の値をもつ、ということがわかる。また逆に、所要の k を得るための r_{dc} が求まるから、透水度に対する締め固め管理の基準が、得られたことになる。

(3) セン断試験値の適用について

築堤用上の強さは、内部摩擦角 (θ) と粘着力 (c) によって、代表される。そしてこれらの値は、同一組成の土でも、乾燥密度により異なり、また r_d が同じでも、含水比（～飽和度）の大小と、over compaction による土粒子分散度のいかんによって、著しく異なってくる。たとえば、表 1-2 に示す試土 B について、当初含水比を変えて、同じエネルギーで突き固めを行ない（そうすれば、透水試験の場合と同様に、乾燥密度の違う——また含水比が多くなれば Over Compaction された状態の——Test piece が得られる）、その後、モールドに詰めたまま透水させ、飽和に近い状態として、三軸圧縮試験（非圧密—急速セン断試験）を行なった結果、図 1-6, 7 に示すような、それぞれ r_d に対応する θ, c の関係を得た。このことから θ と c の変化する傾向が違ふこ

とが、 r_d が同じであっても、over compaction された状態と、そうでない状態とでは、ずいぶん異なる値をとることがわかる。すなわち、この突き固め状態における最適含水比 ($w=14.4\%$) 近くまでは、 w の増加に伴い、 θ, c ともに増大するが、その度合は、 θ よりも c の方が著しい。また突き固めときの w が増加し、Over Compaction される領域に入れば、 θ, c ともに減少するが、その傾向は、 θ が急激で、 c の方は緩である。したがって、図 1-7 に示すように、**Over Compaction** された領域と、そうでない状態とでは、同じ r_d に対応する θ, c の値が異なり、かつ θ は、**Over Compaction** されて急減するが、 c の方は、やや増大する傾向を示している。もちろん、このような傾向は、土の種類によって、大きく変化することに、注意しなければならない。以上の事柄から、実施工による締め固めが、どのような状態で行なわれるか、また行ない得る可能な方法手段などを十分考慮して、実際の状態を代表する試験値の θ, c を採用し、設計上に適用しなければならない。

(4) 安政アースダム A, B 用土における θ, c および k 値の採用と施工管理について

上記各頃で述べた本アースダム用土の試験結果、ならびに考察から、試土 A はコア用土として、また試土 B はサヤ土、抱き土などの築堤用土として、適当と考える。そこで、試土 A, B を用土とした場合、所要の θ, c, k を得るために、つぎの基準で施工管理することが必要である。

試土 A (コア用土)

	乾燥密度	含水比
施工時 2.0 mm 以下	$r_{A2.0} \geq 1.55$	$w_{A2.0} \leq 22.5\%$
施工時 4.8 mm 以下	$r_{A4.8} \geq 1.60$	$w_{A4.8} \leq 20.5\%$
施工時 20 mm 以下	$r_{A20} \geq 1.68 \sim 1.70$	$w_{A20} \leq 18.0\%$

試土 B (コア以外の築堤用土)

	乾燥密度	含水比
施工時 2.0 mm 以下	$r_{B2.0} \geq 1.50$	$w_{B2.0} \leq 25.0\%$
施工時 4.8 mm 以下	$r_{B4.8} \geq 1.62$	$w_{B4.8} \leq 20.5\%$
施工時 20 mm 以下	$r_{B20} \geq 1.87$	$w_{B20} \leq 14.0\%$

以上のような基準で、築堤用土の施工管理が実行されれば、堤体各部の透水係数 k の値 (主として鉛直方向の透水係数に相当する)、および飽和度 90% 以上になった場同の内部摩擦角 θ 、粘着力 c の値として、以下の数値が期待できると考えられる。

試土 A (コア部)

透水係数 $k_{A20} \leq 2.5 \sim 4.0 \times 10^{-6}$ cm/sec

試土 B (コア以外の堤体部)

透水係数 $k_{B20} \leq 1.0 \sim 2.0 \times 10^{-4}$ cm/sec

内部摩擦角 $\theta_{B20} \leq 30^\circ$

粘着力 $c_{B20} \leq 0.5$ kg/cm²

ただし上記の各値は、一応試土 A, B 共 20 mm 以下を用土とした場合の値である。そこで、試土 A の原土は、20 mm 以上のレキ分が少ないので問題がないが、試土 B の原土は、20 mm より大きいレキを、40% 近くも含有するので、これに対する現場調整試験を行ない、特に上記の r_{dB} , w_B , k_B など (θ_B と c_B についてはそう心配はなく、安全側の値である) の補正が必要と考える。

参 考 文 献

- 1) 沢田敏男：“渗透水の流動に関する研究”農土研 Vol. 18 No. 2
- 2) 沢田敏男, 酒井信一, 今尾昭夫：“リグニン系土質安定剤の 2,3 の効用について (I)”土と基礎 No.39. 1960
- 3) 守谷正博：宇梶文雄：“粗な粒子を含んだ土の締め固めについて”土と基礎 No. 32. 1959

太 田 尾 副 会 長 外 務 省 参 事 官 に 転 出

副会長太田尾広治氏は昭和 36 年 1 月 23 日付在アラブ連合共和国 日本国大使館 参事官任命の発令があり、2 月 10 日正午羽田発空路カイロへ赴任せられた。同氏の学会に寄せられた多大の御尽力に感謝し会長以下多数有志が羽田にお見送り申し上げた。