

講座

土の透水試験 (その 2)

河 上 房 義*

前号の内容

1. まえがき
2. 実験室内における透水試験の原理
3. 土の透水性に影響する主な因子
4. 実験室における透水試験の方法

5. 現場における透水試験

(1) 現場透水試験の概要

土の透水係数を求めるには、前述したように現場から採取した試料について、実験室内で適当な透水試験を行うのが一般であるが、これらの方法によつて求めた土の透水係数は、試料が現場にあるまゝの状態ではないために、自然状態の地盤の透水係数とは異なる。その主な理由は

- (a) 試料の大きさが実際の地盤に較べて著しく小さいので、試料が実際の地盤の性質を代表するものでなかつたり、あるいは実際の地盤の中には小さな試料の中には見られないような亀裂や通水の径路が存在することもある。
- (b) 採取した試料が圧縮されているため、透水性が実際の地盤より低い。
- (c) 試料の含水比が実際の地盤と異なるために、自然の通水の径路が塞がれたり、試料中に気泡が入り、透水を妨げることもある。
- (d) 実験に用いる水と地下水とは、化学的性質が異なることなどである。

従つて、(i) 貯水池底やダム基礎内の透水、(ii) 地下の排水、(iii) 地下水など、土質工学上の諸問題の解決には、自然のまゝの地盤の透水係数を測定する必要があるが生じる。

一般に行なわれる現場透水試験には

- (a) 地下水位以下まで達する井戸から水を汲出し、井戸から離れた観測用ボーリング孔内の地下水位の下降を測定し、透水係数を求める方法
- (b) 地下水位より上の地盤中に掘った井戸に水を注入し、井戸から離れた観測用ボーリング孔内の地下水位の上昇を測定し、透水係数を求める方法
- (c) 地下水位以下まで達する単一のボーリング孔から水を汲出し、孔内の水位の回復を観測して透水係

数を求める方法

- (d) 地下水位より上の地盤中に穿った単一のボーリング孔中に水を注入し、孔内の水位または水圧を一定に保つような、単位時間の注入量から透水係数を算定する方法

などが用いられる。

(2) 地下水位以下に達する井戸から水を汲出し、地下水位の低下を観測する方法

この試験方法はティエム (Thiem) の s 法として知られるもので、その原理は図-14 に示す。すなわち地

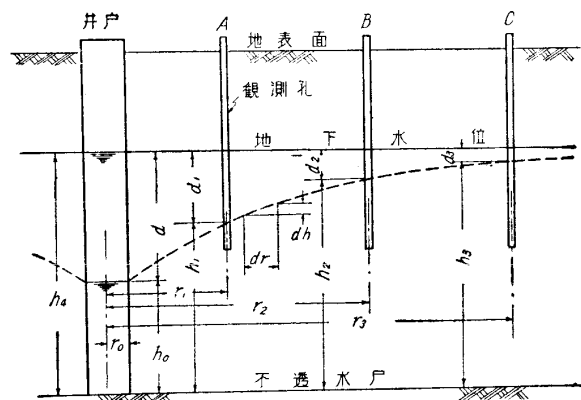


図-14

下水面下の透水性土層 (厚さ S) を貫いて、不透水層に達する井戸 (径 15 cm 以上で有孔ケーシングを入れる) を穿ち、更にこの井戸の中心を通る線上に 3 コ以上の観測用ボーリング孔を設ける。観測孔には径 30~37 mm の鋼管のケーシングを用い、ケーシングの先端は汲出し前の地下水面より少くとも $S/10$ 以上深くまで達せしめる。また、井戸に最も接近した観測孔の位置は、井戸の中心から $S/2$ 以上離し、他の孔はそれから更に $S/2$ の倍数ずつ隔てて設ける。

試験は次の順序で行う。

- (a) 井戸および観測孔内の水位を測定して記録する。
- (b) 井戸内から一定の割合 (特別の場合を除き 200~250 l/min 位が適当) で水を汲出し、井戸内へ浸透する水流が定常状態になるまで観測する。すなわち井戸および観測孔内の水位が一定になれば、水流は定常状態に達したと考えられる。また半対数方眼紙に各観測孔の r と d (図-14 参照) との関係を画き、これが 1 つの直線上にあればよい (図-15)。

* 東北大学教授

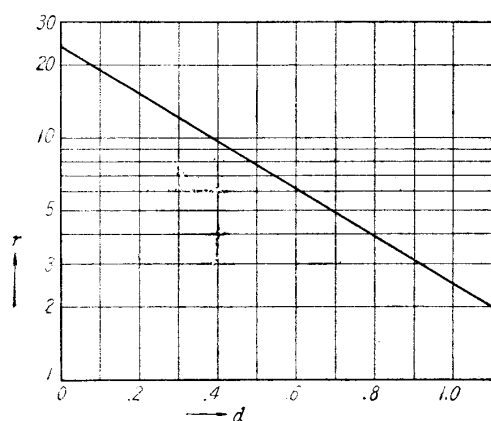


図-15

観測孔内の水位は、汲出しの当初、変化が大きい間は 15 min 毎に、後には 30 min 毎に記録する。

- (c) 2つの観測孔と井戸の中心との距離を r_1, r_2 ; 各観測孔内の不透水層の上面からの水位を h_1, h_2 とすると、ダルシーの法則は次式で表わされる。

$$Q = 2\pi r h k \frac{dh}{dr}$$

上式より

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{pr}{r} = \frac{2\pi k}{Q} \int_{h_1}^{h_2} h dh$$

$$\therefore k = \frac{Q \cdot \log_e r_2/r_1}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} = \frac{2.3 Q \cdot \log r_2/r_1}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \quad (20)$$

ここに k : 透水係数 (cm/sec)

Q : 単位時間の汲出し量 (cm³/sec)

この方法では地下水の流れはほぼ水平方向に生じるので、(20)式で求めた透水係数は水平方向のものである(異方性の地盤の場合)。

また図-14において、A孔を試験井戸の縁まで近づけ、B孔は汲出しの影響を受けない位置まで遠ざけると、(20)式は次のようになる。

$$k = \frac{Q \cdot \log_e r_4/r_0}{\pi(h_4^2 - h_0^2)} = \frac{2.3 Q \cdot \log r_4/r_0}{\pi(h_4^2 - h_0^2)} \quad (21)$$

ここに r_0 : 井戸の半径

r_4 : 汲出しの影響の及ぶ最大距離

d : 井戸内の水位の降下 (cm)

h_4 : 地下水位から不透水性地盤に至る深さ (cm)

$h_0 = h_4 - d$ (cm)

(21)式を用いると、 r_4 が判定できれば、観測孔を掘らなくても、透水係数の近似値を求めることができる。普通の地盤では $r_4 = 150$ m と仮定すればよい。仮に r_4 が 1/2 または 2 倍、すなわち 75 m または 300 m になったとしても、透水係数の誤差は $\pm 10\%$ 以内である。

前掲の(20)式は井戸が不透水層まで達することが条件であるが、透水性土層の厚さ S が大きい時や、既設の井戸を利用する場合には、井戸が透水性土層の途中で止

まることもある。この場合は、井戸に近い観測孔の位置を井戸の中心から少くとも S 以上離し、また各観測点には 2 本ずつの孔を穿つ。その中 1 本は不透水層に達せしめ、他の 1 本は地下水位の下に $S/10$ 位入れ、この 2 本の観測孔内の水位低下を平均して、各観測点の地下水位の降下量とすればよいとされている。

(3) 地下水位より上の地盤中に掘った井戸に水を注入し、地下の定常流の上面を観測する方法

この方法の原理は図-16に示すように、地下水で飽和

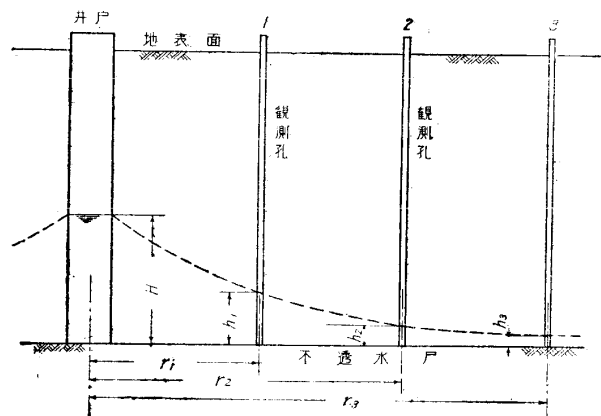


図-16

されていない地盤を貫いて不透水層に達する径 15 cm 以上の井戸を穿つ。この井戸の中心を通る線上に 3 ケ以上の観測用ボーリング孔を、不透水層に達するまで降す。地盤の透水係数は次のようにして求める。

- (a) 各観測孔の下の不透水層の上面の深さを測る。

- (b) 井戸の中に一定の割合で水を注入しながら、各観測孔の水位を観測する。観測は 15 min 毎に行う。井戸の中心から観測孔までの距離 r と、観測孔内の水深 h との関係を、各観測孔について半対数方眼紙に図示(前掲図-15に準じる)して、これらが 1 直線上にあれば水流は定常状態に達したと考えられる。

- (c) 透水係数は次式によつて計算される

$$k = \frac{Q \cdot \log_e r_3/r_2}{\pi(h_2^2 - h_3^2)} = \frac{2.3 Q \cdot \log r_3/r_2}{\pi(h_2^2 - h_3^2)} \quad (22)$$

ここに k : 透水係数 (cm/sec)

Q : 単位時間の注入水量 (cm³/sec)

r_2, r_3 : 井戸の中心から観測孔までの距離

h_2, h_3 : 観測孔内の水深 (cm)

この方法も(2)の方法と同じく、水平方向の透水係数を与える。この方法を適用できるのは、井戸内の水深 H (図-16 参照) が 10 m 以下、従つて土層の厚さも 25 m 以下であることが必要である。

(4) 地下水面下に達する単一の井戸から水を汲出し、井戸中の水位の回復を測定して透水係数を求める方法

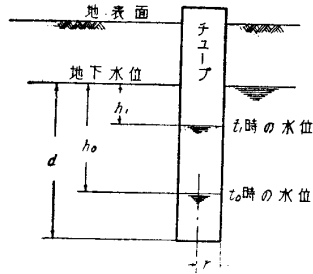
この種類に属する方法には、いわゆる

- (a) チューブ法
(b) ピエゾメーター法
(c) オーガー孔法

がある。

(a) チューブ法

この方法は地下水位が比較的浅い時に用いられる。図



図—17

—17のように、径 20 cm 位の鋼管(チューブ)を、その外周に隙間が生じないように地盤の中に設置する。次にこの管内の水を汲出し、管の下端と地下水位との中間の適当な位置に達せしめると、管

$$k = \frac{\pi r^2 \cdot \log_e h_0/h_1}{E(t_1 - t_0)} = \frac{2.3 \pi r^2 \cdot \log h_0/h_1}{E(t_1 - t_0)} \quad (23)$$

ここに k : 透水係数 (cm/min)

E : 係数 (cm)

r : 管の半径 (cm)

E は管の径と深さによつて定まる係数で、表—1 の如くである。

表—1. E の値 (cm)

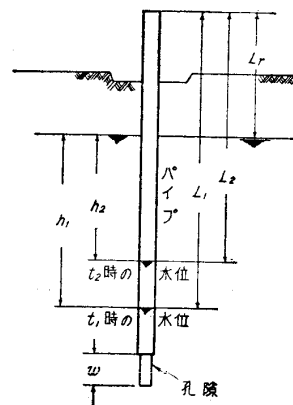
深さ 直径 = $\frac{d}{2r}$	管 (チューブ) の径 (2r cm)						
	2.5	5.1	7.6	10.2	12.7	15.2	20.3
1						39.6	53.1
2					33.2	39.4	52.9
3				26.2	33.0	39.4	52.6
4			19.6	26.2	32.8	39.2	52.1
5			19.6	25.9	32.8	38.9	51.8
6		13.0	19.3	25.9	32.6	38.6	51.6
7		13.0	19.3	25.6	32.2	38.6	51.3
8		13.0	19.1	25.6	32.2	38.4	51.0
10		12.7	19.1	25.2	31.8	37.9	
12	6.4	12.7	18.8	24.9	31.5		
15	6.1	12.5	18.3	24.6			
25	5.8	11.7	17.3				
40	5.3	10.2					
60	4.8						
100	3.8						

この方法を適用するには、管の外周が緊密に土に接合し、管の外壁に沿つて水が流れないことが必要である。また管の下端附近の土は、できるだけ乱されない状態を保たねばならない。この部分の土の表面がこね返されると、地下水が管内に流入することを妨げるので、試験の前に管内の水を数回全く汲出し、管の下端附近の土の間デキを洗い出すようにしておくといふ。

この方法では水流は管の下端において上向きに生じるので、異方性の地盤の鉛直方向の透水係数を測ることができる。

(b) ピエゾメーター法

この方法は地盤の深い位置の透水係数の測定に用いられる。図—18 に示すように、径 2.5~5 cm の薄肉の管を

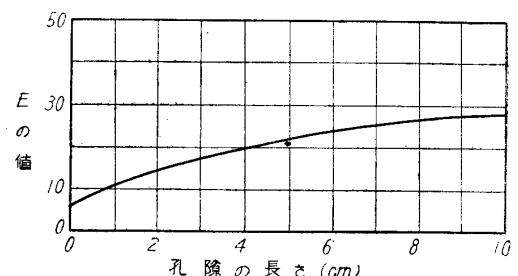


図—18

土中に浅く打込み、管の内径よりやや細目のオーガーで、管の内部の土を掘出す。オーガーが管の下端より更に約 10 cm 深くまで達した後、管を下に押込む。この操作を反復して管を地下水位以下の必要な深さまで入れた後、更にその下に長さ約 10 cm の孔隙を穿つ。このようにしてパイプを地盤の中に挿入すると、透水係数を測定しようとする地盤の土が圧縮されないで、正しい透水係数を求めることができる。

管の設置が終れば、管内の水を全く汲出し、孔隙の内面を清掃する。この操作を数回くり返した後、管中の水位が一定の高さだけ(図—18 における h_1 から h_2 まで)上昇する時間 ($t_2 - t_1$) sec をストップウォッチで測る。水位の上昇は管中に錘をつけた絶縁銅線を垂下させ、この一端と管の間にミリアンメーターと電源を挿入し、管中を水面が上昇して銅線の下端に達し、回路が閉塞される時刻を測つて求める。

透水係数は前掲の (23) 式によつて求められる。径 2.5 cm の孔隙に対する E の値は図—19 に示す。また



図—19

径 5 cm、長さ 10 cm の孔隙については、次式を用いて透水係数を求めることができる。

$$k = \frac{1,689 \log_e [(L_1 - L_r)/(L_2 - L_r)]}{t_2 - t_1}$$

$$= \frac{1,689 \log_e h_1/h_2}{t_2 - t_1} \quad (24)$$

ここに ($t_2 - t_1$) : 水位が h_1 から h_2 に上昇するに要する時間 (sec)

k : 透水係数 (cm/hr)

また実用上の目的から、(24) 式を更に簡単にした次式も用いられる。

$$k = \frac{3,378(L_1 - L_2)}{(t_2 - t_1)(L_1 + L_2 - 2L_r)} \quad (25)$$

(c) オーガー孔法

この方法はポストホール形オーガーによつて、地下水

位以下まで掘降したボーリング孔を利用する極めて簡単な方法で、その原理は図-20の如くである。これは地下水位が浅い時適用される。

オーガー孔が透水性地盤を通して不透水層にまで達していると、数学的に正確に解析できるが、オーガー孔が不透水層に達せず、途中で止まる場合（地下水位下に穿たれた孔の深さを d とする）でも、 d に対するオーガー孔の半径 r の比 (r/d) が判れば、次式によつて計算される。もし r/d が大きければ、地盤の下方に不透水層が存在しない場合でも、この式によつて透水係数の近似値を求めることができる。

$$k = 0.617 \frac{r}{sd} \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (26)$$

ここに Δh : オーガー孔内の水深 h の点において Δt 時間内に上昇する水位

s : (27) 式によつて与えられる函数

$$s = \cos \frac{\pi h}{2d} \frac{K_1(\pi r/2d)}{K_0(\pi r/2d)} - \frac{1}{3^2 \cos \frac{\pi h}{2d}} \frac{K_1(3\pi r/2d)}{K_0(3\pi r/2d)} + \frac{1}{5^2 \cos \frac{\pi h}{2d}} \frac{K_1(5\pi r/2d)}{K_0(5\pi r/2d)} - \dots \quad (27)$$

$$K_0(x) = - \left\{ \left[0.5772 + \log_e \frac{x}{2} \right] \left[1 + \frac{x^2}{2^2(1)^2} + \frac{x^4}{2^4(1.2)^2} + \frac{x^6}{2^6(1.2 \cdot 3)^2} + \dots \right] \right\} + \left\{ \frac{1}{(1)^2} \frac{x^2}{2^2(1)} \right\} + \left\{ \frac{1}{(1.2)^2} \frac{x^4}{2^4} \left(1 + \frac{1}{2} \right) \right\} + \left\{ \frac{1}{(1.2 \cdot 3)^2} \frac{x^6}{2^6} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) \right\} + \dots \quad (27 a)$$

$$K_1(x) = \left\{ \left[0.5772 + \log_e \frac{x}{2} \right] \left[\frac{x}{2} + \frac{x^3}{2^3 \cdot 1 \cdot 2} + \frac{x^5}{2^5 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots \right] \right\} + \frac{1}{x} - \left\{ \frac{x}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \right) \right\} - \left\{ \frac{1}{1 \cdot 1 \cdot 2} \left(\frac{x}{2} \right)^3 \left(1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \right) \right\} - \left\{ \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3} \left(\frac{x}{2} \right)^5 \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{6} \right) \right\} - \dots \quad (27 b)$$

また図-21を利用して S を求めれば、これらの煩雑な計算を省略して(26)式を容易に実用できる。

オーガー孔の直径は 10~15 cm のものを用い、その深さは地下水面より直径の 10 倍以上深くまで達せしめる。オーガー孔を穿った後放置して孔内の地下水位を測定し、更に地下水位以下の孔の深さ d を測る。次に孔内の水を 2~3 回全く汲出し、孔の内面を清掃する。その後孔内の深さの異なる数カ所において、水位回復の速度

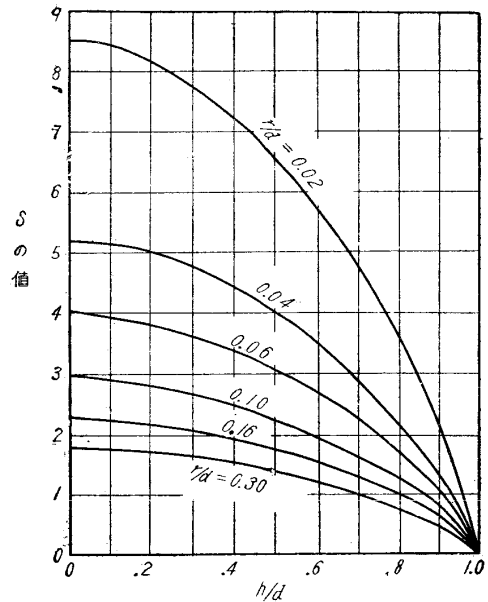


図-21

$\Delta h/\Delta t$ (cm/min または cm/sec) 測定する。水位回復の速度は 1 min. の間における水深の変化を、フックゲージと投光器を用いて測定する。この方法では、オーガー孔内への水流は殆んど水平方向であるから、異方性地盤における水平方向の透水係数を求めることができる。

(5) 地下水面より上の地盤に穿ったボーリング孔

中に、一定の水位または水圧を保つように水を注入しながら透水係数を求める方法

この種の方法についての考案はいろいろあるが、その1つを述べれば次の如くである。図-22のように、直径 7.5~15 cm、長さ 150 cm の鋼管に、地盤の粒度に応じて 4~10 mm の孔を多数穿つたものをケーシングの先端に用いる。このケーシングを地盤の中にジェットなどによつて打込み、その下部には砂利を厚さ約 15 cm 落とし込む。その上に径 2.5~3 cm の観測管を置く。

ケーシング内に一定の割合で水を注入し、管内の水位を有孔部分の上縁より上に保たしめる。管内の水深は 5 min 毎に測定し、連続 3 回の測定値が一定であるか、その差が 5 cm となるまで続ける。ケーシング内に直接水を注入する時は水位の観測は観測管内で行い、また注水を観測管を通じて行う時は水位の観測は観測管の外において行う。

地盤の透水係数は次式で計算できる。この計算に必要な係数 c_u , c_s の値および区域の決定は、図-22~

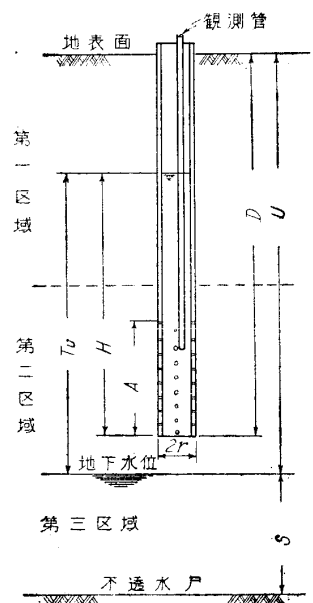


図-22

24 の如くである。

第1区域において

$$k = \frac{Q}{c_u r_e H} \quad (28)$$

第2区域において

$$k = \frac{2Q}{\left[\left(c_s + 4 \frac{r_1}{r_e} \right) r_e \right] [T_u + H - A]} \quad (29)$$

第3区域（地下水面以下）において

$$k = \frac{Q}{\left(c_s + 4 \frac{r_1}{r_e} \right) r_e H} \quad (30)$$

但し (28)～(30) 式において

k : 透水係数 (cm/sec)

Q : 単位時間の注入水量 (cm³/sec)

H : 孔中の水深 (cm)

A : ケーシングの有孔部分の長さ (cm)

r_1 : ケーシングの外側の半径

r_e : ケーシングの有効半径

$$r_e = r_1 \times \left(\frac{\text{ケーシングにあけた孔の面積の合計}}{\text{ケーシングの有孔部分の外側の面積}} \right)$$

c_u : 不飽和材料についての係数

c_s : 飽和材料についての係数

T_u, S, U, D : 図-22 参照

この方法は十分締つていない土については誤差が大きい、注意深く行えばこの種の試験の中、最も適当な値が得られるといわれる。地盤の材料の粒度が粗く、粒子が均等であれば一層良い結果が得られる。

主なる参考文献

- (1) A. S. T. M. Special Technical Publication No. 163 "Symposium of Permeability of Soils" June 1954.
- (2) A. S. T. M. "Procedures for Testing Soils" July 1950.
- (3) Muskat, M ; The Flow of Homogeneous Fluids through Porous media, p. 55~120 & 258~286.
- (4) U.S.B.R. ; Earth manual, p. 229~266. June 1951.
- (5) Lambe, T.W. ; Soil Testing for Engineers, MIT, 1951.
- (6) Spangler, M.G ; Soil Engineering, p. 131~142, 1951.

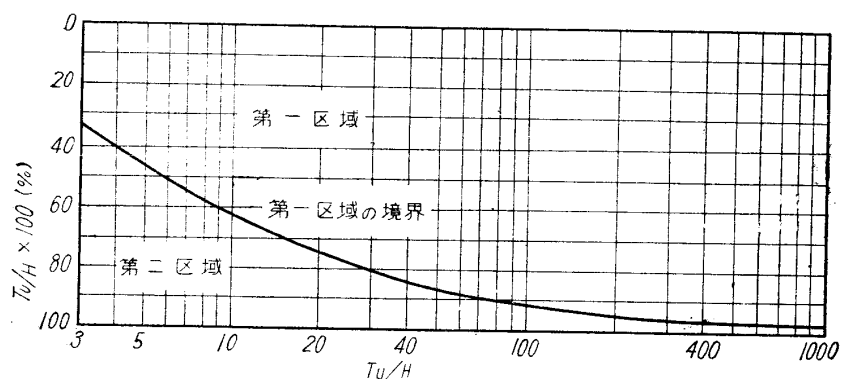


図-23

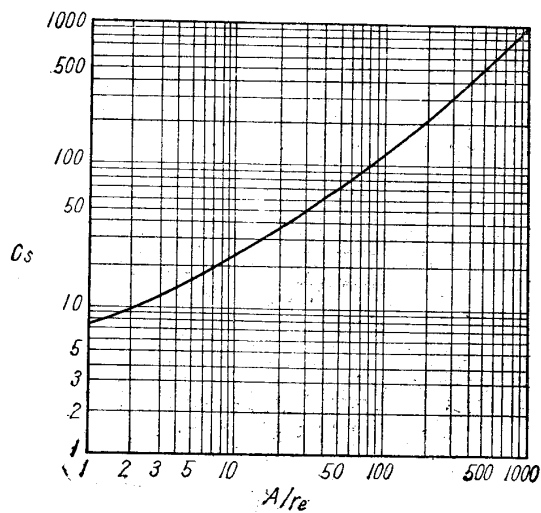
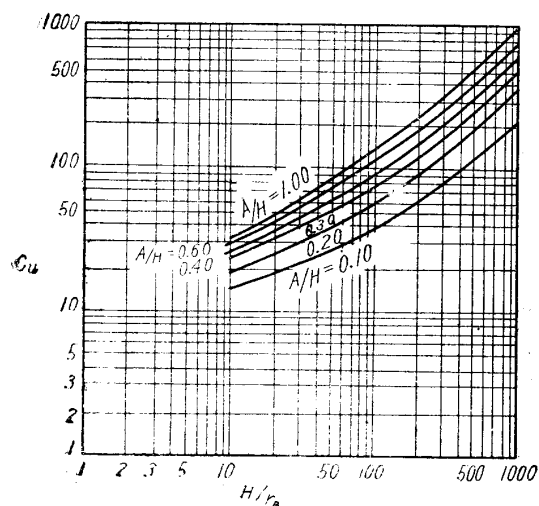


図-24