

干拓堤防のパイピングについて

農林省農業土木試験場 なか 中 じま 島 やす 保 じ 治

1. 概 説

パイピングについては従来二つの型に分類されている。すなわち Subsurface erosion (地下侵食) と, Heave (ふくれ上がり), である。しかし干拓堤防の内部浸透によって起こるパイピングは, この二つの型のいずれにも属さない。そこで著者はこのようなパイピングを, Internal erosion (内部侵食) の型としてこれに加え, 干拓堤防の腹付盛土に起こるパイピングに関して実物について実験を行なった。

パイピングによる破壊は土木工学上, 最も重要な事象の一つに数えられており, これが生ずる条件とその危険を予防する特別な注意が 19 世紀以来行なわれてきている。

すなわちハーツァ (Harza), ペック (Peck), ミドルブルックス (Middlebrooks), カサグランデ (Casagrande), ら多くの学者によって室内実験や実物実験が研究されてきたが, 實際上応用しうる完全な実用式は確立されておらず, 土質工学上非常に立ち遅れているのが現状である。

現段階においては Subsurface erosion に対する ブライ (Bligh) レーン (Lane) との実際に実物で行なった実験係数を使用した実用式が代表的なものとされているにすぎない。したがってこれらの係数を干拓堤防の Internal erosion に対しても用いなければならない現状にあったので実情にそくさない場合が非常に生じているのである。ひるがえってわが国においては, この種の研究に関係あるものを求めると 1954 年沢田氏が「浸透水の流動に関する研究」において粘土質の土について, 土質の種類および同一土質においても, 締固めの程度によって限界傾度の異なることを示し, 土粒子間の摩擦力および粘着力を無視して誘導せられたテルツェギの理論式は実際には砂土の浸出面についてのみ適用可能であることを述べている。また富士岡氏は 1957 年『土壌中の浸透に関する研究』において, 土壌中の鉛直降下浸透における負圧発生機構とその原因を明らかにした。1958 年八幡氏はホ (圃) 場を対象とする研究の「浸透の継続による砂層の成層分化について」において, 通水初期の流

量ティ減の主因は気泡粒に富む浸透性の低い砂層の内部に生成分化するところにあることを示唆している。また田町氏は高田, 田中, 渡辺各氏との共同研究「干拓堤防の保全と漏水について」において, 干拓堤防の漏水現象を, (i) 浸透漏水, (ii) 貫孔漏水, (iii) 間ゲキ漏水, (iv) 空ドウ (洞) 現象, に四分類し, (ii) 貫孔漏水の項においても, もし空ゲキが細小であればポイセリー (Poiseuille) の法則が適用され, 厳密に言えば, ハーゼン (Hagen) が指摘しているように運動のエネルギーを与えるための活力の補正項としても v^2 (速度の 2 乗) に比例する項目を付加する必要があるかもしれない」と予言している。またさらに空ゲキが大きくなれば通常の管路としての公式が適用されると考えられるとも述べている。また赤井氏は盛土材料の内部摩擦角と浸出面付近の斜面傾度を考慮に入れた実用式を発表している。なお, 世界史上における浸透性の土中を通る水の流れについての歴史的過程については省略するがダルシー (D'Arcy) の理論に一致しない公式, および彼の方法の応用限界については, プリンツ (Prinz) (1923) が実験から誘導したプリンツの表によって明確であり, ダルシーの法則には適用限界があるという科学的根拠を有する事実がある。

以上のような理由から, 著者は干拓堤防のように砂質土によって盛土された場合について考え, パイピングに関係する諸因子として土粒子間の摩擦力および粘着力のみならず, 浸透圧力の砂中内部への伝達状態が, 砂層より粒子間ゲキ内の空気が容易にぬけるか否かによって違うこと, また間ゲキの占める割合や間ゲキの大きさや連続状態で異なるということと, かかる場合において, 空気のみによる圧力の伝達よりも空気と水との共存による方が強いこと, またかかる浸透状態下においては, 土中に成層分化の現象をきたすことを明らかにした。したがってテルツェギの理論式は完全に飽和した状態か, または飽和状態に近い土中を水が定常浸透する時にのみ成立するものである。しかし, 干拓堤防のように干満の差を生じる構造物においては, 非定常浸透の状態が常時生ずるから, これを明らかにするため, 実際現象における場合について, 長期観測 (約 6 カ年) と実物実験を実施してその結果を再び室内モデル実験にも移して見て, 理論

式を検証し、実用式を導いたのである。そしてこれらの結果を利用して実際に笠岡湾干拓堤防などに応用し成功をおさめたものである。

2. 実験方法について

19 世紀以来の実験の結果、室内実験では実用に供する係数の値は求めがたいことが、テルツァギやベックらによって明らかにされているので、まず現象を明らかにする基礎実験を行ない、ついで実物実験を行ない、つぎにこれを室内モデル実験に移す方法をとった。実験方法は基礎実験について、パイピングを発生した既設堤防と、起こしていない既設堤防の長期観測を行ない、その結果の解析を用いて、笠岡湾において実物実験を第 2 段階として行ない、これがパイピングによって破壊に至るまでを観測した。つぎにこれを室内モデル実験に移して検証した。モデル実験の詳細については省略するがモデル実験の全般を通じて相似則を全て満足しているとはいえないが、追求する事象がモデル実験においても一応得られたと考える。

3. 実験成績

3.1 基礎実験について

(1) 図-1, 乾燥した砂をゆるく軟弱粘土上に置き水を浸透させることによって④沈下させついでこの水を⑤脱水する。この過程で砂は自然収縮, 崩壊, キレツを生じ, 局部的に負圧が発生する。

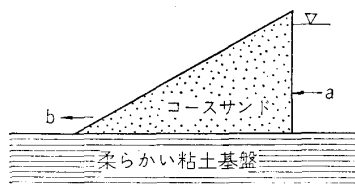


図-1

(2) 図-2, 砂をつめた円錐形ガラス容器に定水頭で浸透流を起こし, コックから空気をソウ入すると, 気泡 A は浸透流より早い速度で A' に脱出する。

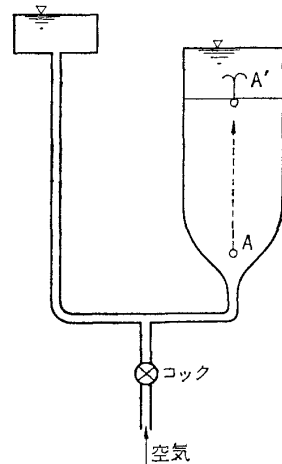


図-2

(3) 図-3, A B C D E は水が空気との混合状態で浸透する時の間ゲキの発達過程を示す。D 図においては間ゲキが横に大きく生じ, この間に間ゲキ圧層を生じて砂を上下に分離した形を示す。E 図は, 間ゲキが逐次発達した大間ゲキ内では土粒子が単独に浸透圧の影響により回転運動を起こし, このような間ゲキがつながって, パイピングを起こす状態を示す。また表層は気泡の脱出過程においてボイ

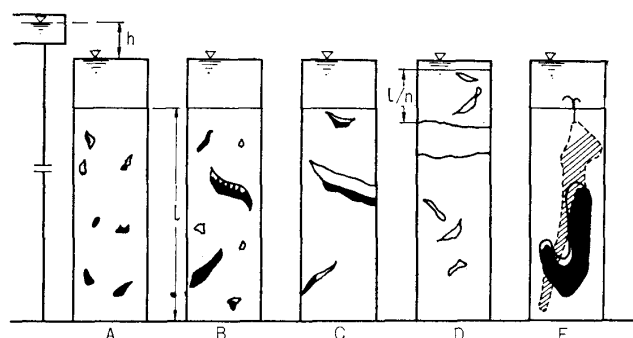


図-3

ルを起こしクイックサンドの状態を呈する。

(4) 図-4, 5 はテルツァギとベックの完全飽和状態で行なった実験を検証したものであるが, 著者は砂中に前述のように気泡を混合して実施した。測定装置についてはピペット分析装置を利用し, とくに精密に計測できるよう考慮した。この場合, 水頭をある一定の間で上下してふたたびもとの定位置で測定するという方法を繰返したところ, 限界傾度は逐次ある一定の所まで大きく変化していった。

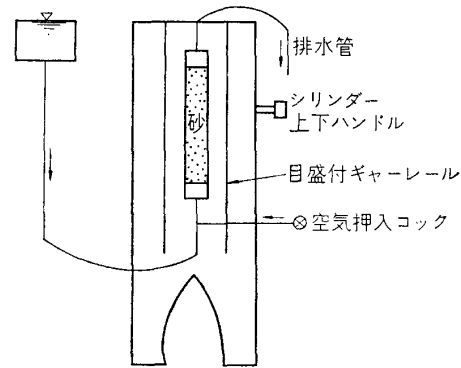


図-4

(5) 図-6 は 19 世紀の末以来なされた実験方法である。この結果はサージレリアブスキー (Serge Leliavsky) の報告による次の一般的結論と一致する。

(i) 垂直パイプは水平パイプよりも砂を吹き出す

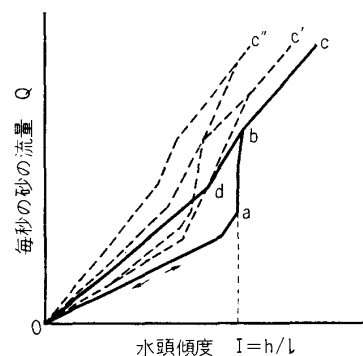


図-5

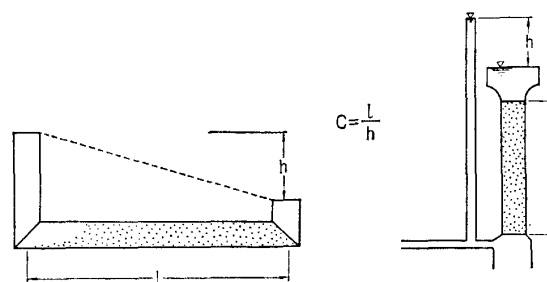


図-6

のに、より高い速度を一般に必要とした。

(ii) 垂直パイプでは、係数 C の限界値は安全であると仮定されたブライ (Bligh) のものよりはるかに小さかった。

(iii) 水平パイプの実験結果では、 C の値は近似的な結論といえども得ることはできなかった。

(iv) C の値は浸透の破壊的作用に抵抗する土の性質が唯一の要素でないと疑うようになった。水平パイプに関する実験結果の差を調べてみると土の性質によるだけではなく、主として実験器具および方法によって異なることを知った。

またブレスホードラッセル (Beresford Russel), モーレイ (Morley), パーカー (Parker) の実験結果は非常に不一致である。

3.2 既設堤防のパイピング発生個所の長期観測値および実物実験による観測値

表-1

表-2 表-3	阿知須干拓 No. 2+70~No. 45 区間	1951.5~ 1952.11
表-2 表-3	笠岡干拓A号断面、高潮位 +4.20 m でパイピングが発生する箇所	1954.4~ 1956.3
表-2 表-3	笠岡干拓B号実験断面 実物による破壊実験の最初のパイピングが発生した時の実測値	1956.2

表-2

No.	位置	真比重	現場乾燥度 (仮比重)	間ゲキ率 n (%)	透水係数 k (cm/sec)	現場含水比 w (%)
1	No. 2+70	2.65	1.92	27.5	4.5×10^{-3}	11.11
	7	2.69	1.81	32.7	6.3×10^{-3}	13.63
	30	2.69	1.83	32.0	4.5×10^{-3}	8.70
	36+70	2.67	1.78	34.5	7.3×10^{-3}	8.70
	41	2.67	1.50	43.8	2.0×10^{-2}	9.89
	45	2.67	1.89	29.2	2.7×10^{-3}	9.89
2	A 号	2.65	1.41	47.0	1.7×10^{-2}	11.0
3	B 号	2.65	1.41	47.0	1.7×10^{-2}	14.1

表-3

No.	位置	H	L	H/L	$\frac{(1-p) \times (r_s - r_w)}{(r_s - r_w)}$	C	L/H	備考
1	No. 2+70	1.20	8.54	0.141	1.190	8.43	7.11	ボイルナシ
	7	2.50	14.49	0.172	1.137	6.61	5.79	ボイルナシ
	30	2.70	11.40	0.236	1.149	4.86	4.22	ボイルナシ
	36+70	2.70	11.40	0.236	1.094	4.63	4.22	ヤヤボイル
	41	2.80	11.40	0.245	0.938	3.82	4.07	ボイル著し
	45	2.50	10.10	0.247	1.182	4.78	4.40	ボイルナシ
2	A 号	1.70	12.00	0.142	0.859	6.05	7.05	
3	B 号	2.10	15.00	0.140	0.859	6.14	7.14	

$$\text{ただし } C = \frac{L}{H} (1-p) (r_s - r_w) / r_w$$

$$p = \frac{n}{100}$$

3.3 パイピングを発生していない既設堤防の観測値 (児島湾干拓他4地区省略)

3.4 検証のためのモデル実験

表-4, および 図-8 に示す。

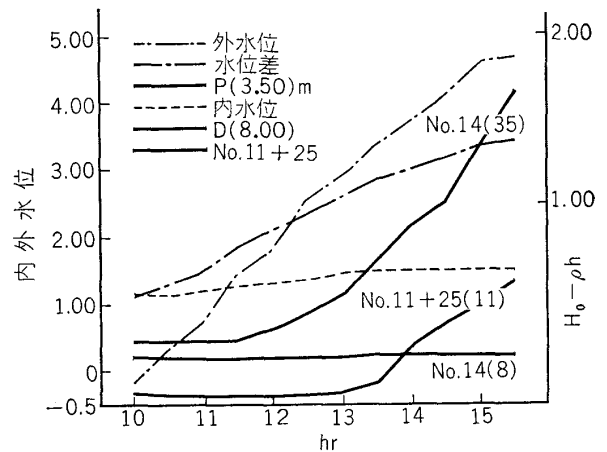


図-7 間ゲキ圧水の測定 (笠岡干拓堤防)

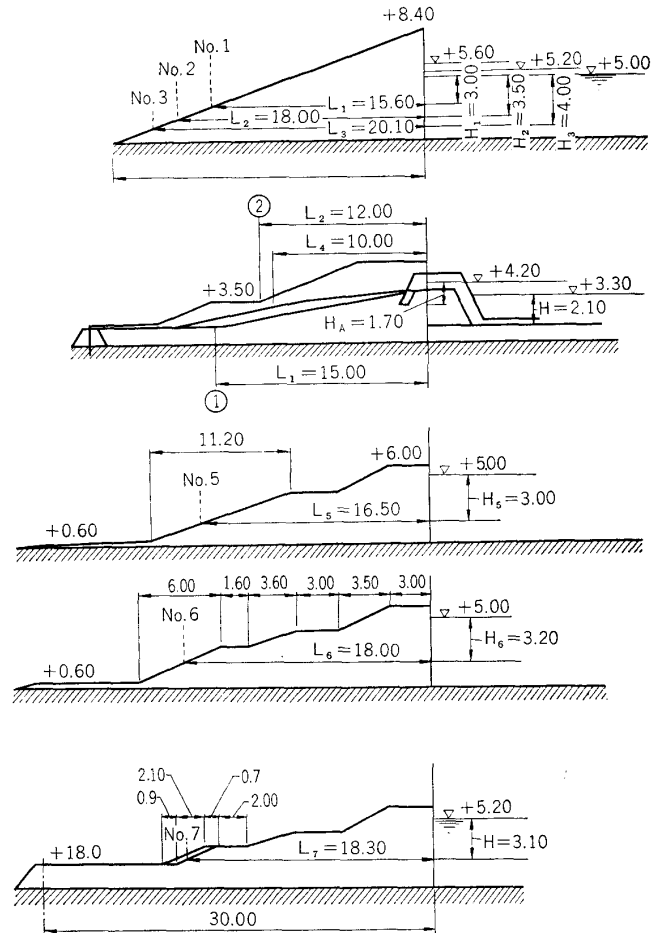


図-8

表-4

No.	r_s	k	n (%)	H (m)	L (m)	C_e	C_n	E	CE (%)
1	2.65	5×10^{-2}	40	3.0	15.6	5.20	5.10	-0.10	-1.96
2	2.65	"	40	3.5	18.0	5.14	5.10	0.04	0.78
3	2.65	"	40	4.0	20.1	5.02	5.10	-0.08	-1.57
4	2.65	"	46	1.7	10.8	6.35	6.29	0.06	0.95
5	2.66	1.75×10^{-3}	43	3.0	16.5	5.50	5.58	-0.08	-1.43
6	2.66	"	43	3.2	18.0	5.60	5.58	-0.02	-0.36
7	2.66	"	43	3.1	17.3	5.58	5.58	0.00	0.00
5'	2.66	"	43	2.9	16.2	5.58	5.58	0.00	0.00
①	2.65	1.7×10^{-2}	47	2.1	15.0	7.14	6.97	0.17	2.44
②	2.65	"	47	1.7	12.0	7.05	6.97	0.08	1.15

(注) C_e係数の実測値 C_n著者の実験係数
 E $C_e - C_n$ (実測値との誤差) CE誤差の比

4. 考察と実用式の誘導、および応用の方法

前節に示した 表-2, 3 から阿知須堤防においては, No. 30~No. 36+70, および No. 41~No. 45 の間に限界傾度が存在していることがわかる。したがって, いまテルツァギの限界傾度式において, 間ゲキ水圧の発生を考えてみた場合,

$$I_f = \frac{(1-p)(r_s-r_w)-4u}{r_w}$$

実際の限界傾度 (I_f) が上式で求められた値と一致しなければならない。しかるに実測した間ゲキ水圧をそれぞれ代入して計算しても一致しない。一致するためには $4u$ よりももっと大きな値 X が要求される。すなわち概説で述べたように他の多くの因子が影響しているためである。そこで上式を

$$I_f = \frac{(1-p)(r_s-r_w)-X}{r_w}$$

なる形に改め,

$$x = \frac{X}{(1-p)}$$

とおけば

$$I_f = \frac{(1-p)(r_s-r_w)-x(1-p)}{r_w} = \frac{(1-p)(r_s-r_w+x)}{r_w} \dots\dots\dots (a)$$

なる式を得る。この形の式において未知数 x 以外の各値を, すなわち阿知須堤防における各観測個所の土質試験値 p , r_s , および海水の単位重量 r_w , 浸透路長 L , 水頭 H (表-2, 3, 参照) を代入して計算し x の項に求まるそれぞれの値を $\bar{x}_n$, で示すと 表-5 のとおりである。

表-5

測 点	$\bar{x}_n$
No. 30	$\bar{x}_1=1.30$
No. 36+70	$\bar{x}_2=1.27$
No. 40	$\bar{x}_3=1.19$
No. 45	$\bar{x}_4=1.28$

この結果から限界傾度を示す時の x 値について考察すると次の関係のあることがわかる。

すなわち No. 30~No. 36+70 の地点の土質状態はほぼ同一であるから

$$\bar{x}_1 > x > \bar{x}_2 \quad \text{すなわち,}$$

$$1.30 > x > 1.27$$

No. 41 と No. 45 は間ゲキ率が著しく違うから,

$$\bar{x}_3 < x, \quad \bar{x}_4 > x, \quad \text{すなわち,}$$

$$1.19 < x, \quad 1.28 > x$$

の3通りに考えられる。

つぎにこの結果をさらに決定的に求めるために笠岡干拓における高潮位 +4.20 m で限界傾度に達する実験断

面より x の値を求めてみると, 表-2, 3 から

$$x = x_a = 1.34$$

またつぎに破壊実験の結果 (表-2, 3) から求めてみると

$$x = x_b = 1.35$$

となる。したがって上述の不等式と上記等式を p , r_s , r_w を既知数として満足すべき x 値を求めるために種々な解析を行なった結果, つぎに述べるような方法で近似的に解明された。すなわち流速を v , 動水傾度を I で表わすと, 乱流の特性式は,

$$v = \beta I^m$$

となり, β は係数, m は 0.45~0.6 の範囲のべき数である。

透水層を通る浸透は本質的には流線運動でこの流れの基本方程式は

$$v = \alpha I^{m'}$$

で $m' \approx 1$ である。これに対応するテルツァギの限界傾度を示す理論式は

$$I_f = (1-p)(r_s-r_w)/r_w$$

であるから上述の乱流方程式にあてはめて考えると

$$I_f = i_s \left\{ \frac{(1-p)(r_s-r_w)}{r_w} \right\}^n \dots\dots\dots (1)$$

ただし $n = \frac{1}{m}$ i_s は係数

で示すことが可能であることが考えられる。したがって乱流特性式の m の値を近似的に 平均値 0.5 にとるとき, 上式の n の値は 2 となる。いま $n \approx 2$ とするとき, 上式は前述の解析を進めた理論式と一致せねばならぬ性質のものである。ゆえに

$$I_f = i_s \left\{ \frac{(1-p)(r_s-r_w)}{r_w} \right\}^2 = (1-p)(r_s-r_w+x)/r_w$$

において上式を検証するため, 限界傾度における実験値 x を代入して係数 i_s の値を求めると

$$i_s \approx 0.2$$

と種々の x 値に対してほぼ一定値が求められる。このことから本式が実際上も一応成立することがわかる。ゆえに限界傾度は

$$I_f = 0.2 \left\{ \frac{(1-p)(r_s-r_w)}{r_w} \right\}^2 \dots\dots\dots (A)$$

で示すことができ, また逆に x は,

$$x = \frac{r_s-r_w}{r_w} \left\{ r_w - 0.2(1-p)(r_s-r_w) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

と示すことができる。そこで今, (2) 式から求めた x 値と上述した実測上の x 値, x_a , x_b , の各値とを比較したものを 表-6 に示して検討してみると, それぞれ(2)式から求めた値は実際の現象と合致していることがわかる。すなわち土質状態がほぼ同一と見なされる $\bar{x}_1 \sim \bar{x}_2$

表—6

$\bar{x}_n$	x
$\bar{x}_1=1.30$	1.30
$\bar{x}_2=1.27$	1.30
$\bar{x}_3=1.19$	1.35
$\bar{x}_4=1.28$	1.27
$x_a=1.34$	1.35
$x_b=1.35$	1.35

区間に存在する限界傾度を示すときの x 値は 1.30 と想定され、 $\bar{x}_1$ 付近の地点では、 $\bar{x}_1 \geq x$ でボイルが発生寸前の形、すなわち一部には発生しているが全体的には発生しておらず、 $\bar{x}_2$ 付近においては $\bar{x}_2 < x$ で発生しており、 $\bar{x}_3$ 付近の地点においては著しいボイル現象が見られ、また $\bar{x}_4$ 付近では $\bar{x}_4 > x$ でボイルが発生していない。すなわちパイピングが発生している区間の状態は、それぞれの値が事象との一致を示している。また $\bar{x}_3$ と $\bar{x}_4$ を比較すると間ゲキ率の大小が x 値に非常に関係することを明らかにしている。さらにこれらを立証するために行なった実物実験の結果による x 値の、 x_a 、 x_b の値などもほとんど全く (2) の理論値と一致している。(x_a の地点の実験断面は、潮位がこれ以上上昇する時は危険であり、実際に観測中、1955 年 9 月と 12 月、2 回にわたって高潮時 +4.40 で 2 カ所パイピングにより決壊した。)

よって以上の結果から干拓堤防においては従来の方法によるよりも合理的に限界傾度を求めうることが判明したため、これらを再び室内実験に移して模型によって検証した。この一つの目的は相似性を究明し、これを実際に応用するため、結果はある程度明らかにすることができた。(表—4)

結論として、いま

$$r_p = r_w + x$$

と前記 (A) 式に代入し

$$I_f = (1-p)(r_s - r_p)/r_w \dots\dots\dots (B)$$

なる一般式の形を得、本式は (A) 式と等式であり、 r_p は

$$r_p = r_s - 0.2(1-p) \frac{(r_s - r_w)^2}{r_w}$$

で求めることができる。

また他の場合の限界傾度式が (1) 式である程度示される可能性があることも推定される。

つぎに実用上簡単に限界傾度水頭 H に対する安全な水平浸透路長 L を求める式を示すと

$$L = C_n \cdot H \cdot F$$

ここに C_n は著者の実験係数で、前記 (A) または (B) 式から

$$C_n = 5 \{ r_w / (1-p)(r_s - r_w) \}^2$$

である。また F は安全率で一般に

$$F = 1.3 \sim 1.5$$

である。

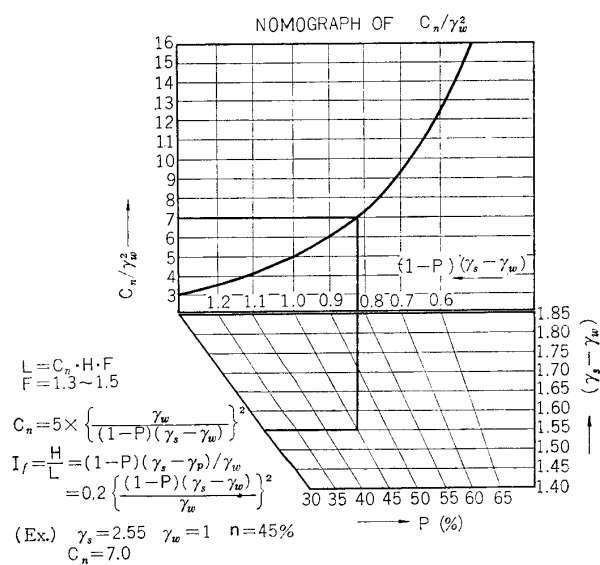
つぎに計算を簡単にするために C_n を求めるノモグラフを示し使用上の例題をあげて稿を終る。

〔例〕 前述した笠岡干拓堤防の必要限界路長 L を求めると、 $p=0.45$ 、 $H=4.1$ 、 $r_s=2.65$ 、 $r_w=1.02$ ノモグラフから

$$C_n / r_w^2 = 6.3 \quad \therefore C_n = 6.3 \times 1.02^2 = 6.56$$

$$F = 1.3 \text{ とすれば}$$

$$L = 6.56 \times 4.1 \times 1.3 \approx 33 \text{ m}$$



ノモグラフ

討

論

八木則男 (京都大学)

当然、堤防内では間ゲキは不飽和になっていると思いますが、そのような不飽和土における間ゲキ圧の問題はどのように扱っておられますか。

中島保治 (発表者・農業土木試験場)

堤防内の浸透は非定常浸透でありまして、満潮時には飽和状態に近くなり、干潮時には不飽和状態に近くなります。その状態におきまして、間ゲキ水圧がどのように

変化するかという理論的な指標はまだつかんでおりませんが、それらが空ドウ（洞）の発達に影響を及ぼす因子であるということは考えております。

八木（京大）

間ゲキの空気圧についてはいかがでしょうか。

中島（発表者）

水といっしょに空気があると、それが浸透して行く場合の圧力の伝達状態は、水だけで浸透するより強くなる、そのように考えております。

八木（京大）

伝達状態だけが大きくなるのですか。それとも圧力の絶対値が大きくなるのですか。

中島（発表者）

それは、ちょっとわかりません。空気が入りますと間ゲキ水圧測定に誤差を生じてきます。実際の堤防で、八郎潟でもずいぶん間ゲキ水圧計を入れて測定したのですが、なかなかご質問にお答えできるような事象をつかむことができませんでした。

八木（京大）

不飽和土の間ゲキ圧に 対しまして、ビショップ（Bi-shop）の α 理論というのがありますが、あのような α の値が出ましたか。

中島（発表者）

やっておりますが、個々につきましては、まだ解析の段階です。

網干寿夫（広島大学）

こういった浸透による破壊というものは、いわゆるパイピングとかボイリングとかいう事で説明されておりますが、ボイリングというふうにある部分が全体的に浸透水圧で持ち上げられるというような問題につきましては、割合理論的計算にも乗りやすいわけです。一方、パイピングというのはボイリングと区別して考えるとすると、セン(穿)孔作用とか部分的には弱い所に水が集中して流れる、そのために孔が掘られて行くものと考えられるわけですが、これがいったいどこで起こるかとい

う事は、地盤の不均一性に関係し、地盤の弱い所に集中するわけですから、理論に乗りにくいのではないかと。非常に確率的要素が強く、土のごく部分的な性質というものに左右される面が多いのではないのでしょうか。そういう点で一般論として、パイピングの問題はかなり扱いがむずかしいと思うのですが、二つの現象を区別して考えるということについて、どのようにお考えでしょうか。

中島（発表者）

二つを区別するというのは、何と何の区別でしょうか。

網干（広島大）

いわゆるボイリングとパイピングとです。

中島（発表者）

ボイリングと私どもで申しておりますのは、結局浸出面の噴き出し、これをボイリング、発生したものをボイルというふうに呼んでおります。全体的にふくれ上がってくるもの、たとえば上に粘土層があって下に透水層があり、そこに浸透水がきた場合に地盤の全体的な盛り上がりができる、これをヒープというふうにテルツァギの分類どおりに扱っております。

網干（広島大）

ここでパイピングと書いてあるのは何をいうのでしょうか。

中島（発表者）

この論文で取扱っているのは、正確には Internal erosion（内部侵食）でございます。パイピングという言葉はアメリカで使っているようです。ところが日本では、これを貫孔作用と訳して通俗的な言葉になっておりますので、一応パイピングという言葉を使ったのです。そのパイピングはアメリカでは Subsurface erosion（地下侵食）と Heave（ふくれ上がり）に分類しておりますが、しかし、私はこれに Internal erosion を加えてパイピングという、と一番最初の書き出しにお断わりしております。しかし、パイピングという言葉は欧州では通用せず、干拓堤防の場合は Internal erosion を使います。