

# 堤内地の塩分分布

—木曾川河口付近—

西畑勇夫\*  
野村正徳\*\*

**要 旨** 木曾川河口部における堤内地の塩分分布の実態を知り、ろう水、塩害等に対する対策を樹立するための基礎資料を得る目的で、木曾川河口部の三重県木曾岬村において現地調査を行ない、河川堤防および堤内地の塩分浸透に関する二、三の特性を明らかにしたほか、その浸透量の検討を行ない、この地区の塩害に対しては堤防構造の強化、適当な潮遊び、ならびに除塩用水が有効であることをのべたものである。

## 1. まえがき

長大河川の河口部には沖積層の発達するものが多いが、最近これらの沖積層における地盤沈下がいちじるしいことや、河口付近河道の掘削、しゅんせつなども原因して、海水が内陸深く浸入する現象が見られ、河水に水源を求める工業用水や農業用水、その他用水に、塩分が過度に混入する問題が所々に発生している。

木曾川水系においても、塩水遡上の問題、および沿岸農地の塩害の問題が大きくなってきており、北伊勢工業用水の塩分混入問題とか、木曾川、長良川に添う河口部農地の塩害などがあげられ、これらは水資源開発の上でも大きな問題である。

このため、木曾川河口部における堤体および堤内耕地の塩分分布について、その実態を把握し、塩害に対処すべき糸口を見出すため、木曾川河口部に存在する三重県木曾岬村を主体として、その堤体内部および農地における塩分の分布調査を行なったので、その結果から推測できる二、三の特性、ならびに塩水の浸透量につき検討した結果を報告する。

## 2. 調査計画ならびに調査方法

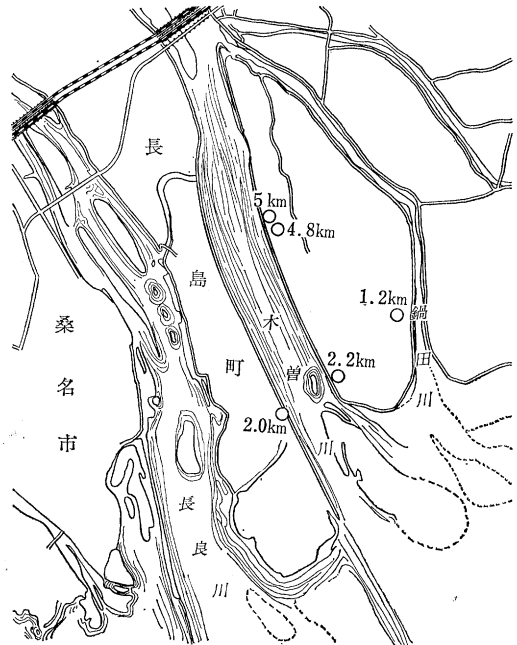
### (1) 調査地点の選定

#### a) 堤体調査地点

木曾川河口部は、昭和34年9月の伊勢湾台風による被害が激甚で、その復旧事業が行なわれた結果、海岸堤防および河川堤防は、その様相が一変し、旧態を留めている所が少なく、また復旧堤防はきわめて強化され、かつ、前、後のり面はコンクリートで、天端もアスファルトで被覆されている関係で、この復旧堤防を調査の対象とすることは適当でないので、図-1に示すように派川鍋田川の堤防を選ぶこととした。

この堤防は、伊勢湾台風による被害が軽微で残存した在来堤防であり、そのまま補修した堤防であるが、伊勢湾台風以前と大きく変化した条件は、派川鍋田川が分派

図-1 木曾川下流平面図



\* 正会員 工博 名古屋大学教授 土木工学科

\*\* 正会員 名古屋大学助手 同

口と河口で締切られ、現在では潮汐の侵入を見なくなった点である。しかし、河口部は常時においては、マイターゲートによって締切られており、潮汐の満干に応じて、20~30 cm 程度の水位変化が見られるほか、年間の最高、最低の水位差は約 1.0 m 程度である。

#### b) 堤内地の調査地点

図-1 に示すように、上記の堤体調査断面と対応させたほか、鍋田川、木曾川の沿岸につき、水稻の塩害状況と照合して、調査断面を選定した。塩害は、伊勢湾台風災害復旧後の強化新堤防の堤内地においても、所々に発生している。

### (2) 調査計画

一般に堤内地に塩水が侵入する経路は

- ① 海水侵入区域の用、排水樋門などから直接流入する。
- ② 堤体および堤体基盤から浸透する。
- ③ 風送される。

以上が考えられるが、これを区分して調査することは容易でないので、本調査ではこれらをつくめた実態を調査することとし、つぎの計画とした。

塩害地、無塩害地の比較調査は、水稻のある夏期に行ない、一般の堤内地における土壌の塩分分布状態は冬期に行なうこととした。調査断面は、現地と照合して、夏期には、木曾川左岸測点 2.2 km, 4.8 km, 5.0 km, 右岸測点 2.0 km の 4 断面、鍋田川右岸では測点 4.2 km, 5.2 km, また冬期には、鍋田川右岸 1.2 km, 木曾川右岸 2.0 km をそれぞれ選んだ。なお、堤体内部土砂の塩分調査は、堤内地の調査と別に行なった。

### (3) 調査方法

試料採取は、堤防では図-2 に示すように採取点を選び、表面より鉛直方向に、ハンドオーガーにより大体 1.0 m ごとに採取可能な深さまで土砂試料を採取し、あわせて地下水も採取した。また堤内農地においても、ハ

ンドオーガー、またはシンウォールサンプラーにより、表面から鉛直方向に 10 cm, 50 cm, 100 cm, 150 cm の深さで採取した。

定量分析は、採取試料を熱沸処理し、ろ過した溶液につき塩素イオンについては、 $K_2CrO_4$  5% 溶液を指示薬として、 $AgNO_3$  溶液で滴定し、ナトリウムイオンについては燐光分析を行なって定量することとした。ナトリウムイオンについては、農薬等による塩素イオンの増加もあり、両者をあわせて考察する必要があると考えたためである。

一部の試料で試験紙により pH 調査も実施した。

## 3. 調査結果

### (1) 堤内地における調査結果

木曾岬村の地形特性は、ほとんどが標高 0 m 以下で、田面標高は -50~-100 cm である。土性は表面より 20 cm 深までは有機質を多量に含むシルト質粘土であり、それに続く 20~100 cm 深の層は沈泥層であり、土質はシルト質粘土で、所々にあしの腐植物が混り、硫化水素で黒色を呈する土が存在する。60~100 cm 深より下の層は、細中砂が多くなり、粗砂だけのところも見られ、この層の厚さは 14~16 m となっている。細中砂層の下はシルト質粘土の厚い層をなしている。

この地域で、昭和 38 年 8 月と同 39 年 1 月に調査を実施した。夏期調査では堤防のり先より 10 m, 40 m, 70 m の距離を原則とし、塩害地点、無塩害地点を調査し、冬期は堤防のり先より大体 15 m 間隔に 160 m まで調査した。夏期と冬期では現地の状態に差がある。その概要を述べると、夏期には稲作が行なわれているが、8 月においてはほとんど落水され、地下水位は地表より 10~20 cm 深のところにあった。また、堤防のり先よりほぼ 150 m 以内の地域に、塩害により水稻が枯死、消滅しているところが所々に見受けられた。

図-2 堤内塩分調査断面図

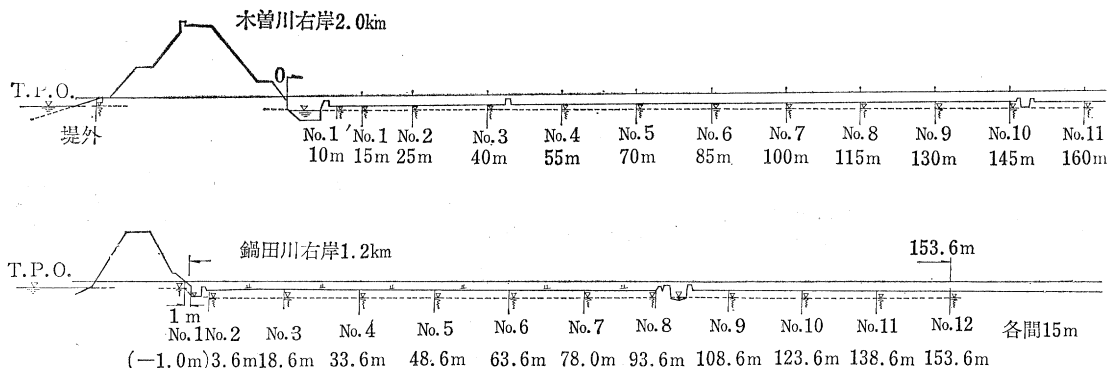
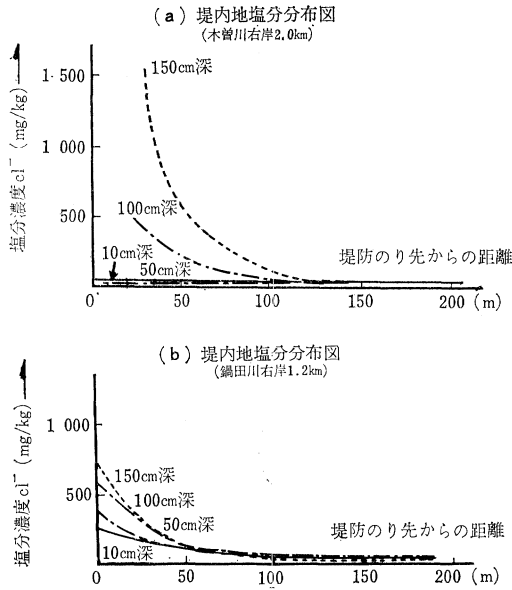


図-3



冬期には、所々に畝立が行なわれ、その表面には蒸発作用により塩分が析出しており、地下水位は地表より40~60 cm のところに存在したなどである。

これらの各試料(夏期 26 個, 冬期 186 個)を分析した結果の概要はつぎのとおりである。

a) 河川堤防法線に直角方向の堤内地土壌の塩分濃度分布は、堤防から遠ざかるにつれて、下層部(100 cm 深以下)では指数関数分布状に減少している(図-3 参照)。

b) 表層部の塩分濃度分布は、直線分布またはきわめてゆるやかな指数関数分布状と推察される(図-3 参照)。

c) 堤内地の塩分分布形状は、外水の塩分濃度のほか堤体断面および潮遊びの状態によっても相当影響を受けると推察される(図-2, 3 参照)。

d) 水稻の塩害が発生している地点では、表層において塩素イオンが 500~1500 ppm 存在し、多いところでは 2500 ppm におよんでいた。

これは、一般に水稻と塩分の関係において、塩分濃度 2000 ppm 以上が塩害を発生させると考えられ、またその試験結果が示されている<sup>1)</sup>ものと比較して、塩分濃度としては少ない値を示している。本調査の結果では、2000 ppm 以上の塩分濃度を示したものは粘土質の土壌のみであったが、この相違の原因は、調査時期が落水後であること、および当地区の表層土は砂質に富む土質が多いことなどが考えられる。そのうえこの調査における塩分の検出方法が、厳密な検討のためには十分でないこともあげられる。なお、生物化学として、 $\text{Na}^+$  または  $\text{Cl}^-$

と水稻の成育の直接の関係はあまり明らかではないようである。

塩分濃度の値については今後の調査により検討する予定であるが、本報告においては、今回の調査結果をそのまま用いることにする。

e) 塩害の発生地点では、 $(\text{Na}^+/\text{Cl}^-)$  の値が無塩害地点のその値よりやや大きい結果を得たが、全般的には、 $\text{Na}^+$  と  $\text{Cl}^-$  の数はほぼ 1:1 に存在すると考えられる。図-4 はその組成をグラム原子量の比で表わした分布図であり、そのピークは食塩の比とほぼ一致する。この結果から当地区では、 $\text{Cl}^-$  濃度で塩分濃度を推定しても、大きな誤りはないと思われる。

f) pH は、平均値 5.8 を軸とする正規分布に近似した分布をなしている(図-5 参照)。

図-4  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  頻度図  
[mg/kg]・総数 323

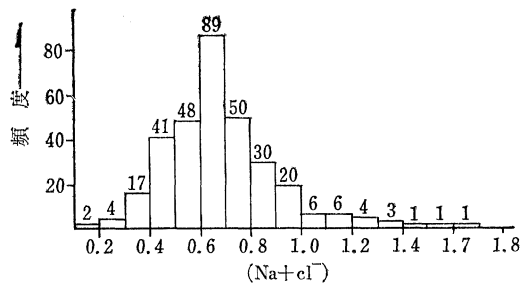
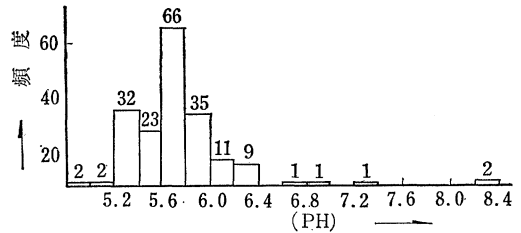


図-5 pH 頻度分布図  
総数 185



## (2) 堤体内の調査結果

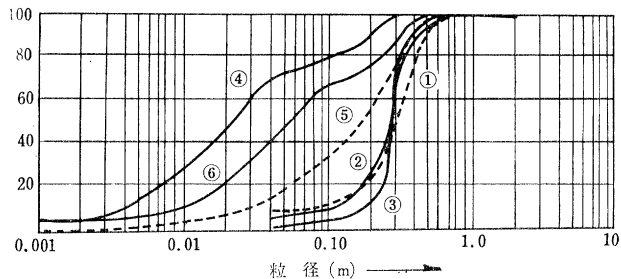
在来の形態を保つ鍋田川右岸 1.2 km 付近の河川堤防における調査の結果は、つぎのようである。

a) 堤防土砂の粒度分布を見ると、 $D_{60}=0.32\sim0.36$  mm でその粒度の変化は割合少ない(図-6 参照)。

b) 浸潤線より上部の堤体上にふくまれる塩分は、全般的にみてほぼ一様で、その値は 6.0~12.0 ppm 程度と見られる(図-7 参照)。

c) 浸透水の塩分濃度は、堤内側外水の塩分濃度よりかなり高い濃度を示している。また、堤外側外水の塩分濃度が一時的に低くなっても、堤体内には濃度の高い塩水が残留すると考えられる。

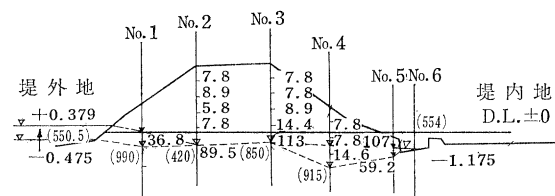
図-6 粒 度 曲 線



- ① 鍋田川(右岸1.2km)堤頂より5.6m深
- ② 同 堤頂より2.0m深
- ③ 長良川 堤頂より2.0m深
- ④ 同 堤頂より5.0m深
- ⑤, ⑥ 木曾岬水田土壌面より20cm深

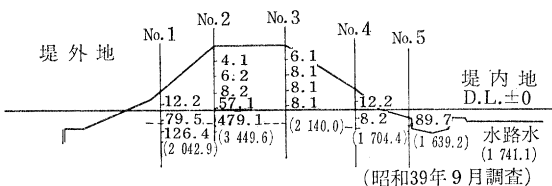
図-7

(a) 鍋田川右岸 1.2km 断面

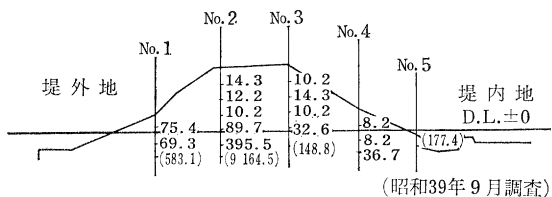


注：数字は土砂中の塩分濃度(P.P.m.)  
 (数字)は浸透水の塩分濃度(P.P.m.)  
 ..... 昭和39年6月調査による浸透水位  
 - - - - - 昭和39年9月調査 " " "

(b) 鍋田川右岸 (1.2km-100m) 断面



(c) 鍋田川右岸 (1.2km+100m) 断面



4. 堤内農地土壌における塩分分布と浸透

この調査からは、土壌中の厳密な塩分を知り得たものとはいえないが、堤内地における塩分分布の傾向を示すものとして、その分布形が一般的に指数関数、および直線で示されると仮定すると、その一般式は、

$$m_s = m_{sc} + (m_{so} - m_{sc}) \cdot e^{-Kx} \dots (1)$$

$$m_s = -Ax + B \dots (2)$$

ここに、 $m_s$ ：単位試料中の塩素イオン濃度 (mg/kg)  
 $m_{sc}$ ：各地域における一定塩素イオン濃度

(mg/kg)

$m_{so}$ ：堤防のり先における塩素イオン濃度 (mg/kg)

$x$ ：堤防のり先からの距離 (m)

$A, B, K$ ：定数

分析結果より、最小自乗法で各層に対する係数を求めた結果はつぎのようになった。

a) 木曾川右岸 2.0 km 断面

$$\left. \begin{aligned} m_{s10} &= -0.034x + 40.4 \\ m_{s50} &= -0.023x + 48.4 \\ m_{s100} &= 25 + 648e^{-0.0357x'} \\ m_{s150} &= 32 + 1538e^{-0.0419x''} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここに、 $x' = x - 15$

$x'' = x - 25$  とする

b) 鍋田川右岸 1.2 km 断面

$$\left. \begin{aligned} m_{s10} &= 16 + 237e^{-0.024x} \\ m_{s50} &= 14 + 351e^{-0.034x} \\ m_{s100} &= 15 + 574e^{-0.038x} \\ m_{s150} &= 16 + 730e^{-0.043x} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

以上の調査結果からみて、堤内地土壌における深さ150 cm までの塩分濃度は、堤防のり先より大体 100~150 m で、各層とも一定値に減少すると考えられる。

堤内地の地下水の塩分濃度の水平方向の変化については、この調査において、概括的には堤防から遠くなると次第に減少する様子がうかがえるが、その詳細は今後の調査、研究に待ちたい。

海岸地下水の問題については、図-8 のような模型化された地層状態に対する、速水・国司・田中の三氏の研究<sup>2)</sup>がある。この研究によれば水平透水層の被圧地下水の基本方程式(連続方程式)としてつぎの式が与えられている。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{k}{\kappa} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} - \frac{k'}{H\kappa h} (\zeta - H_0) \dots (5)$$

ここに、 $k$ ：透水層の透水係数

$k'$ ：半不透水層の透水係数

図-8 地層模形図

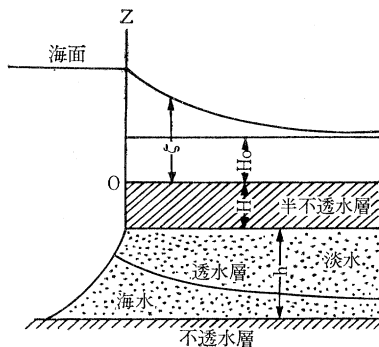
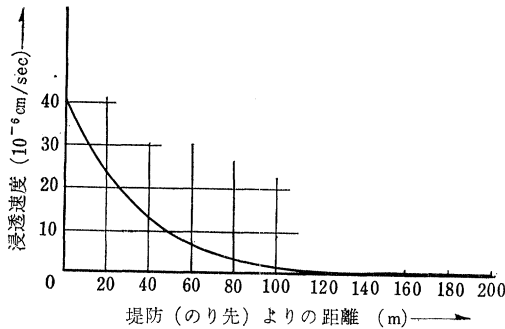


表-1 圧力水頭および浸透速度

堤防(のり先)より距離(m)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
圧力水頭(m)	52.00	38.06	27.86	20.39	14.93	10.93	8.00	5.86	4.29	3.14	2.30	1.23	0.66	0.35	0.19	0.10
浸透速度(10 <sup>-6</sup> cm/sec)	42.48	31.10	22.76	16.66	12.20	8.93	6.54	4.79	3.50	2.57	1.88	1.00	0.54	0.29	0.16	0.08

図-9 浸透速度分布図



$\kappa$ : 定数  $\kappa = (\alpha\beta g)$

[ただし  $\alpha$  = 透水層砂礫の圧縮率]

$\zeta$ : 圧力水頭

すなわち、地表には厚さ  $H$  なる半不透水層があり、その下に厚さ  $h$  なる透水層が続き、その下は不透水層に接し、地下水は被圧状態にあるもので、 $Z$  軸を鉛直上方にとるとき、半不透水層上面における圧力水頭を  $Z = \zeta$ 、海面は  $Z = \zeta_0 (> H_0)$  にあり、各地層は水平であるとしたものである。なお、 $H_0$  は地表の湛水深である。

式(5)の解は

$$\zeta - H_0 = \zeta, \quad k/\kappa = K, \quad k'/Hch = b$$

とおき、初期条件として  $t=0$  で  $\zeta_1 = 0$

境界条件として

$$t > 0, x = 0 \quad \text{で} \quad \zeta_1 = A \text{ (定数)}$$

$$t > 0, x \rightarrow \infty \quad \text{で} \quad \zeta_1 = 0$$

を与えて

$$\zeta_1 = \frac{Ax}{2\sqrt{\pi K}} \int_0^t t^{-3/2} \exp\left(-m^2 Kt - \frac{x^2}{4Kt}\right) dt \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{ただし, } m^2 = \frac{b}{K}$$

また  $t \rightarrow \infty$  のときは

$$\zeta_1 = A \exp(-mx) \quad \dots\dots\dots(7)$$

が与えられている。

これを鍋田川右岸 1.2 km 断面に適用すると、前述の調査結果より、水稻栽培期中の湛水深を  $H_0$  とし、表層のシルト粘土層(半不透水層)の厚さ  $H = 60$  cm, 細中砂層(透水層)の厚さは、この付近の地質調査の結果から  $h = 15$  m となる。また、 $\zeta_0$  には7月中の鍋田川の平均水位が  $-38$  cm, 堤内地盤標高を  $-100$  cm とすると、 $\zeta_0 = 62$  cm となり、これらを式(7)に代入して  $\zeta_1$  を求めれば、半不透水層を下から上に浸透する速度  $w$  は、

次式で与えられる。

$$w = \frac{k'}{H} \zeta_1 \quad \dots\dots\dots(8)$$

この場合、粒度試験の結果を参考として、透水層の透水係数  $k = 5.6 \times 10^{-3}$  cm/sec, 半不透水層の透水係数  $k' = 4.9 \times 10^{-5}$  cm/sec と仮定し、地表面における湛水深  $H_0 = 10$  cm とし式(7), 式(8)より、圧力水頭および浸透速度を求めると表-1 のようになる。

表-1 より見ると、鍋田川においても堤防のり先より、ほぼ 200 m にわたって浸透水の浸出を見る結果となり、その浸透量は平均値として、1 ヶ月間に約 180 mm の水深となる。この浸透水が前述の式(4)の第3式にしたがう塩分濃度をもって浸出すとすると、平均して約 280 ppm の濃度になり、塩分の蓄積を防止する対策が必要であることが考えられる。なお、堤防に近接する区域では、浸透量もその含有塩分も相当大きいことになる。

ことに、当地域では8月以降は非かんがい期に入り、地表の湛水がない状態におかれ、したがって  $H_0 = 0$  とすると、その浸出量は平均として1 ヶ月約 210 mm 深となる。

### 5. 堤体内の塩分浸透

#### (1) 土質

鍋田川の堤防につき図-7の測定 No. 2 における試験につき土質試験を行なった結果は、表-2 のとおりである。

表-2 鍋田川右岸 1.2 km 堤防土質試験

堤頂よりの深さ(m)	密度(g/cc)	含水比(%)	乾燥土重量(g/cc)	間げき比(e)
1~2	1.523	11.60	1.364	0.9566
3~4	1.703	16.14	1.466	0.8062
4.5~5.5	1.825	35.19	1.350	0.9629

#### (2) 透水係数および透水中の塩分

図-6 より、堤体土砂の 10% 粒径  $D_{10} = 0.0075$  cm として、Hazen 式から透水係数を求めると、 $k = 0.0056 \sim 0.0084$  cm/sec を得、現地における建設省の調査を参考としても、この堤防土砂の透水係数は  $10^{-3}$  cm/sec の次数と考えられる。また、表-2 によってもその間げき比はかなり大きい値であり、したがって、動水勾配が大

きいときには、相当多量の浸透が予想される<sup>9)</sup>。

さらに、この鍋田川堤防においては、外水位の変化が少なく、かつ緩慢であるので、この堤防の浸透流は定常流と考えてよいであろう。ただし、堤体内の地下水の塩分濃度は、堤内側潮遊び水路の水よりも相当高い塩分濃度を示し、堤外側の外水の塩分濃度が一時的に低くなっても、堤体内地下水の塩分は残留するように考えられる。

これらから、浸透水のうちのり先の潮遊び水路に捕えられるものは、その水で希釈され、他は堤内地に向うにつれ、浸透量の減少のうゑに地表水により、次第にその濃度を低下するもののように考えられるが、その実態はなお検討を要する。

## 6. む す び

以上、主として木曾川河口部鍋田川の堤防、およびその堤内地における調査により、その塩分分布の特性の一部を知ることができた。

この結果を考察するに、塩分を持つ外水は、堤体およびその基盤を通じて堤内地に浸透するが、その浸透量は、外水位と堤内地盤高の差が大きいほど増加し、また、外水の塩分濃度が高いほど浸透水の塩分濃度も高くなる。ただし、調査の結果では、堤内地土壌の塩分濃度は堤防から遠ざかるにつれて減少し、およそ 150 m で一定値に近づくが、これは当然外水位と地盤高の差、透水層の状態によって伸縮するものと考えられる。

仮に、浸透水の塩分濃度が指数関数的に減少してゆくものとし、また、鍋田川のごとく外水位と地盤高の差が小さい場合について見ても、その浸透量はかなり大きく、かつ範囲も広く、農地としては常に塩分の蓄積を防がねばならない。

したがって、海岸付近で、かつ地盤の低い農地で、下層に透水層が存在するところでは、常に塩害の発生が懸念される。

かかる塩害に対処するには、つぎの諸点が有効と考え

られる。

1) 堤内農地表面には湛水させ、しかもなるべく湛水深を大きくする。非かんがい期においても湛水が許されるならばいっそう有効である。

2) 客土により地盤面を上げることの有効性はいうまでもない。

3) 潮汐の侵入区域の河川堤防、ならびに海岸堤防では、可能な限り浸透水を減少せしめる構造とする。このためには、堤防の表のり面護岸、止水矢板の施工、堤防裏小段の増強などが有効であることが確かめられている<sup>1)</sup>し、この調査の結果からも、堤防裏小段の拡幅強化が有効であることが認められる。

4) 堤防裏の潮遊び水路を整備し、その通水能力を大きくすること、および常に通水することが有効であり、また、なるべく深い水路が有効と考えられる。

5) 外水に接する水門、樋門などからの堤内側へのろう水を防止すること。

以上の諸点が総合的に実施されるならば、塩分の浸透は相当に軽減されるであろう。しかしながら、木曾川河口付近のように地盤が透水性砂質よりなる場合には、上記の対策が行なわれても、なお、地盤を通じて塩分の浸透が行なわれるので、これに対しては、年間を通じ計画的に適当な量の用水を、適当な時間間隔に導入し、排除する除塩用水が必要であり、有効であると考えられる。

この調査にあたり、建設省木曾川下流工事事務所長 長尾 精氏をはじめ職員諸氏のご援助を頂いたことを付記し感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) アルス土木工学大講座 13「灌漑排水」p. 380
- 2) 速水頌一郎・国司秀明・田中要三：地盤沈下による海岸地下水の変動と塩害について、防災研究所報告第3号(1950)。
- 3) Karl Terzaghi and Ralph B. Peck: Soil Mechanics in Engineering Practice, pp. 44~45.
- 4) 赤井浩一・稲田 裕：淀川堤防のろう水調査、土木学会誌 Vol. 48, No. 5 pp. 64~70

## 出 版 案 内

COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL I (1958)	B 5 判 147 頁 実費 250 円	(送 料 共)
COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL II (1959)	B 5 判 122 頁 " 300 円	( " )
COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL III (1960)	B 5 判 125 頁 " 500 円	( " )
COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL IV (1961)	B 5 判 122 頁 " 700 円	( " )
COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL V (1962)	B 5 判 160 頁 " 1 200 円	( " )
COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL VI (1963)	B 5 判 130 頁 " 1 000 円	( " )
COASTAL ENGINEERING IN JAPAN, VOL VII (1964)	B 5 判 150 頁 " 1 200 円	( " )

申込先・振替東京 16828