

水替え掘削時に発生した橋台基礎地盤のパイピングに関する解析

Analysis of Piping in the Subsoil of a Bridge
Abutment during Excavation with Dewatering

田 中 勉 (たなか つとむ)
神戸大学助教授 農学部農業工学科

尾 崎 叡 司 (おさき えいじ)
神戸大学教授 農学部農業工学科

1. ま え が き

都市計画街路の一環として建設された一級河川 I 川の道路橋において、水替え掘削時に橋台基礎地盤中にパイピングが発生した¹⁾。本地点は層状堆積地盤からなっており、砂礫地盤の上部に透水係数の小さな砂質シルト層が載っている。現場の状況および解析結果から判断すると、橋台底版底面まで掘削した時点において上部砂質シルト層が浸透破壊に対して限界に近い状態にあり、そこへ橋台を構築することにより浸透流に偏流が生じ流速が速められパイピングが生じたものと考えられる。このパイピングによって橋台は最終的に最大で約 10 cm 沈下した。

橋台前面の護岸工事の途中であったが、パイピングの発生要因である水替えを止め、矢板囲いの水位が自然水位に戻された。水替えの停止によって橋台の沈下が止まり安定したが、橋台基礎地盤はパイピングによってかなり緩んだ状態になっており不安定であると考えられたので薬液注入によって安定化された。

本事例に関して、FEM 浸透流解析を行い、掘削地盤のボーリングに対する安定性について検討を行った。以下にその結果について述べる。

2. 地盤のモデル化

本地点は、琵琶湖南部に広がる沖積平野の一面にあたり、琵琶湖へ注ぐ諸河川によって運積された堆積物より形成された低地にあたる。本橋梁は、両側 2 車線、幅員 20 m の道路橋であり、川幅は 10 m である。橋台は逆 T 式鉄筋コンクリート構造で左右岸にあり、幅員が長いことから上下流 2 基に分割されている。橋台基礎地盤の掘削および橋台の構築は、鋼

矢板 (Ⅲ型) を用いた自立式土留め工による半川締切りにより左岸側から行われた。仮設鋼矢板位置図を図-1 に示す。

本道路橋の計画時点で道路中心線付近においてなされた左右岸各 1 本のボーリング結果によると、橋台底版付近には砂礫が現れることが予想された。この場合、掘削地盤は、ほぼ砂礫の均一地盤となるが、本橋梁はこの条件に対して設計されている。鋼矢板の根入れ長は土圧と矢板の剛性によって決められている。したがって、鋼矢板 (Ⅲ型) の長さは比較的長く 9.8~10.0 m となっている (計算では 9.8 m を用いた)。矢板天端の標高は T.P. 91.500 m である。掘削底面のボーリングに対する安定性はこの条件に対して検討されている。道路協会の方法²⁾ により、安全率 F_s は $F_s = 4.48 (>1.5)$ となるので、ボーリングに対しても十分安全であると判定された¹⁾。しかしながら、4 基の橋台のうち左岸下流側の 1 基について、橋台底版付近に予想と反する地層が現れ、上述のように施工中にパイピングが生じた¹⁾。

パイピングによって沈下を起こした左岸下流側橋

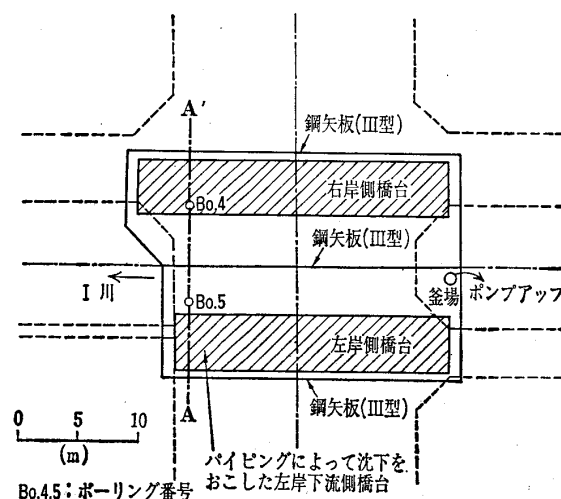


図-1 仮設鋼矢板位置図

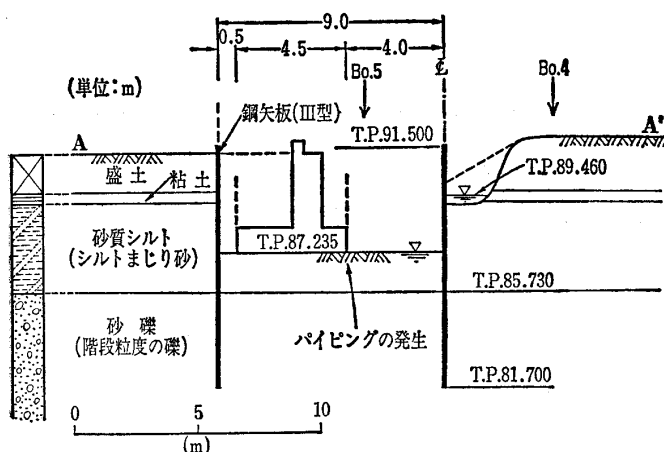


図-2 水替え掘削時にパイピングが発生した橋台基礎地盤のモデル化 (左側が左岸)

台の基礎地盤は、ボーリング結果および現場の状況から、図-2のようにモデル化することができる。ここでは、モデル地盤の特徴について述べる。

2.1 地層構成

地層は傾斜していると考えられるが¹⁾、矢板左(岸)側地盤のボーリングがなされていないので地層のつながりが判然としない。したがって、ここでは地層は水平であると仮定した。掘削地盤表面の標高は T.P. 87.235 m、上層(砂質シルト)と下層(砂礫)の境界の標高は T.P. 85.730 m である。上層(砂質シルト)の上部には盛土層があり、これら2層の境界の標高は T.P. 89.640 m である。地下水位は後述するように砂質シルト層中にあると考えられるので(2.4節参照)、最上層の盛土は浸透流解析においては関係しない。

2.2 下部不透水性境界

下部不透水性境界は確認できず、ここでは十分深いものと仮定した。このように不透水層の位置が未確認の場合には、計算流量の精度の点から原地下水位から掘削幅と等しい値の深度に仮想不透水層を設けて考えればよいとされている³⁾。ここでは、この事柄を考慮した上で、より正確を期するため原地下水位から掘削幅の2倍に等しい値の深度に仮想不透水層を設けた。

2.3 地盤の左右側面境界

地盤の左右は無限と考えるが、境界を設けることによってその影響があまり出ないように、掘削地盤の中心線から両側へそれぞれ掘削幅の6倍の大きさの所に地盤の左右側面境界を設けた。

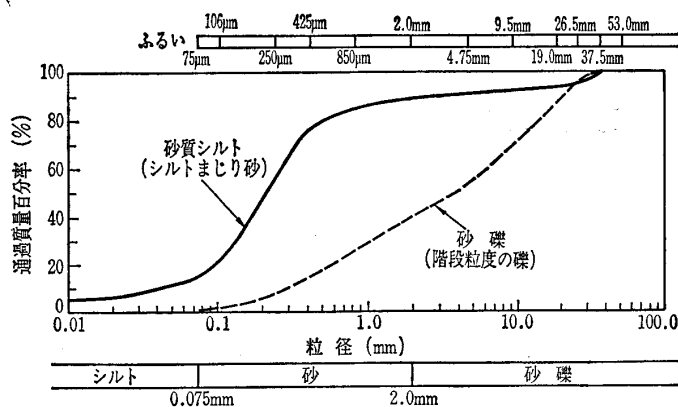


図-3 地盤試料の粒径加積曲線

表-1 地盤試料の物理的性質および透水係数

	上層(第二層)	下層(第一層)
	砂質シルト (シルトまじり砂)	砂 礫 (階段粒度の礫)
G_s	2.659	2.657
U_c	7.02	21.84
$D_{50}(\text{mm})$	0.219	3.87
$e_{\max}$	1.093	—
$e_{\min}$	0.561	—
$k_{15}(\text{cm/s})$	0.463×10^{-2}	2.82×10^{-2}
$\gamma'(\text{gf/cm}^3)$	$0.935 (D_r=60\%)$	1.171

2.4 矢板の左右地盤内の地下水位

矢板の左右地盤内の地下水位として、ここでは次の三つの水位：(1)河川水位 T.P. 89.46 m、(2)ボーリング結果による地下水位 T.P. 87.94 m ~ T.P. 89.60 m (調査時点が異なるが平均すると T.P. 88.84 m (河川水面下 0.62 m))、および(3)水替え停止後約1日経過時点の矢板囲い内回復水位 T.P. 88.90 m (河川水面下 0.56 m) を考えることができる。

しかしながら、パイピングを起こしているときの地下水位は測定されておらず不明である。ここではこれら三つの水位の中で最も高い(危険側の)値である河川水位を矢板左右地盤内の地下水位と仮定した(図-2参照)。また、最も危険側の仮定を行い、矢板囲い外の左右地盤内の地下水位を固定とし、地盤の左右側面境界(2.3節参照)において全水頭を一定(静水圧分布)とした。すなわち、浸透流の回込みによる矢板左右地盤内の地下水位の低下は考えない。

2.5 地盤構成材料の物理的性質および透水係数

問題の地盤について、試料を採取し物理的性質、および透水係数を求めた。その結果を表-1 および図-3に示す。表-1において、 G_s は土粒子の比重、

U_e は土の均等係数, D_{50} は土の平均粒径, $e_{\max}$, $e_{\min}$ は土の最大, 最小間隙比, k_{15} は 15℃ 時の透水係数, γ' は土の水中単位体積重量である。掘削地盤の上下層はボーリング結果ではそれぞれ砂質シルト, 砂礫となっているが, 粒度試験の結果 (図-3) は, それぞれ, 細砂主体のシルトまじり砂, ならかな粒径加積曲線をもった階段粒度の礫となった。また, 表-1 からわかるように, 上層 (砂質シルト) の透水係数は下層 (砂礫) の透水係数のおよそ 1/6 倍となっている。

3. 掘削地盤中の浸透流解析と掘削地盤のボーリングに対する安定性

3.1 橋台構築前の状態における掘削地盤中の浸透流解析

図-4 に示すような橋台構築前の状態における掘削地盤中の浸透流について FEM 解析を行った。解析では Desai & Abel (デサイ・アーベル)⁴⁾ が使用した 4 個の CST 要素よりなる四辺形要素を用いた。図-5 注1) に要素分割図を示す。FEM 解析によって得られた流速ベクトルを図-6 に, 流線網を図-7 に示す。矢板囲い内の流速ベクトルの方向 (図-6 参照), 流線網の形状 (図-7 参照) から, 矢板囲い内の地盤はほぼ一次元上昇浸透流に近い状態にあることがわかる。

3.2 橋台構築前の状態における掘削地盤のボーリングに対する安定性

(1) 一層 (均質) の仮定 ここでは, 「層状堆積地盤を, その平均水中単位体積重量に等しい水中単位体積重量をもつ一層 (均質) 系地盤であると仮定すること」を, 「層状堆積地盤を一層 (均質) と仮定すること」と表現することにする^{注2)}。本掘削地盤は二層系であるが, これを一層 (均質) と仮定する。掘削地盤が均質の場合, ボーリングに対する安全率 F_s の評価法には一般的に次の二つの方法がある^{2), 5)}。

$$(i) \text{ 第一法: } F_s = \frac{2D\gamma'}{H\gamma_w} \dots\dots\dots (1)$$

$$(ii) \text{ 第二法: } F_s = \frac{(D_1 + 2D)\gamma'}{H\gamma_w} \dots\dots\dots (2)$$

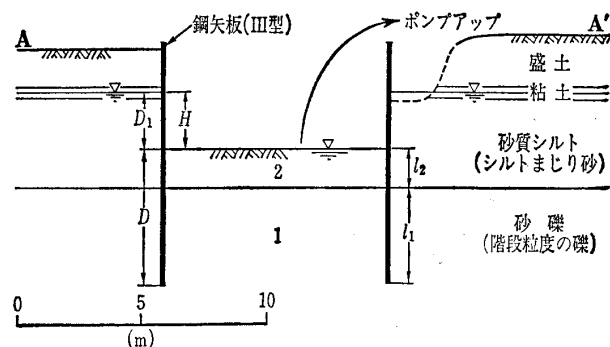


図-4 二層系地盤の浸透破壊問題

ここに, 記号 (図-4 参照) は,

D : 矢板の根入れ長

D_1 : 掘削地盤表面 (開削場内地下水面) から矢板囲い外部の地盤中の地下水面までの距離

H : 矢板前後の水位差

γ' : 地盤材料の水中単位体積重量

γ_w : 水の単位体積重量

である。これらの式は, 均質地盤に関するものであり, 本掘削地盤のような二層系地盤に適用する場合, 地盤を一層 (均質) と仮定することになる。本掘削地盤の場合, 上下層の水中単位体積重量が実験からわかっているので, γ' を二層の平均水中単位体積重量 γ'_{av} と等置する。すなわち,

$$\gamma' = \gamma'_{av} = \frac{\gamma'_1 l_1 + \gamma'_2 l_2}{l_1 + l_2} = 1.107 \text{ gf/cm}^3 \dots\dots\dots (3)$$

とする。ここに, 図-4 に示すように下層砂礫 (階段粒度の礫) 層を第 1 層, 上層砂質シルト (シルトまじり砂) 層を第 2 層とする。このようにして本掘削地盤を一層 (均質) と仮定した場合, 安全率 F_s は,

$$(i) \text{ 第一法: } F_s = 5.51 \dots\dots\dots (4)$$

$$(ii) \text{ 第二法: } F_s = 6.61 \dots\dots\dots (5)$$

となる。計算では次の諸量を用いた。

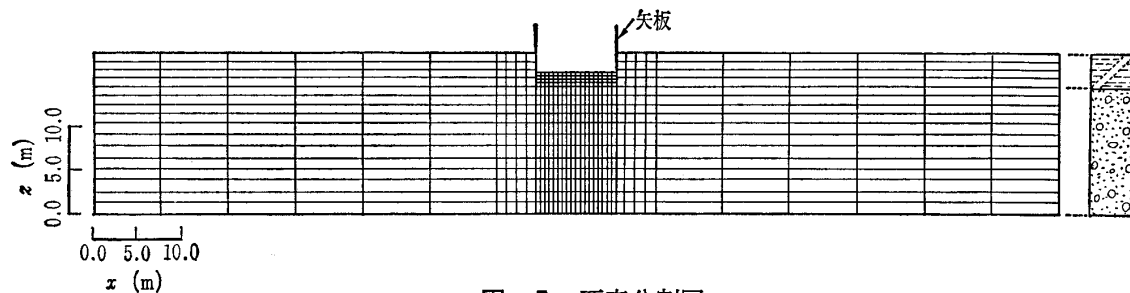
$$D_1 = 2.225 \text{ m}, D = 5.535 \text{ m}, H = 2.225 \text{ m}$$

$$l_1 = 4.030 \text{ m}, l_2 = 1.505 \text{ m}$$

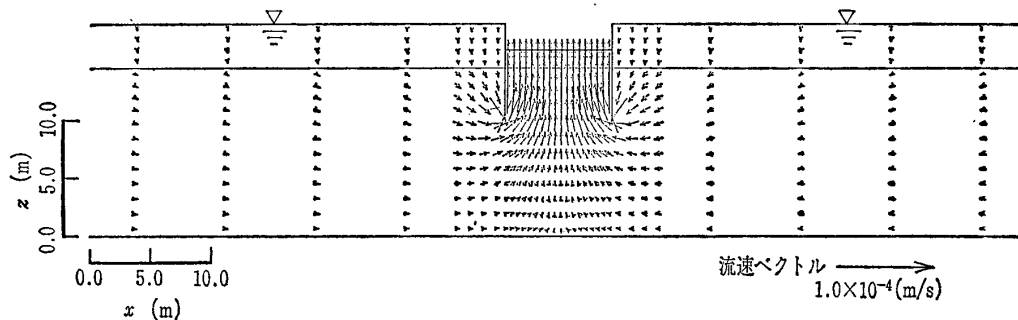
このようにして, (1), (2) 式によると本掘削地盤はボーリングに対して十分安全となる。現実には地盤がクイックサンドに近い状態にあったと考えられることから, 本例のような場合, 地盤を一層 (均質) と

注1) 図-5 および後で示す図-6 ~ 9 では, 図-2 に示すモデル地盤のうちで, 浸透流の解析領域のみを示している。

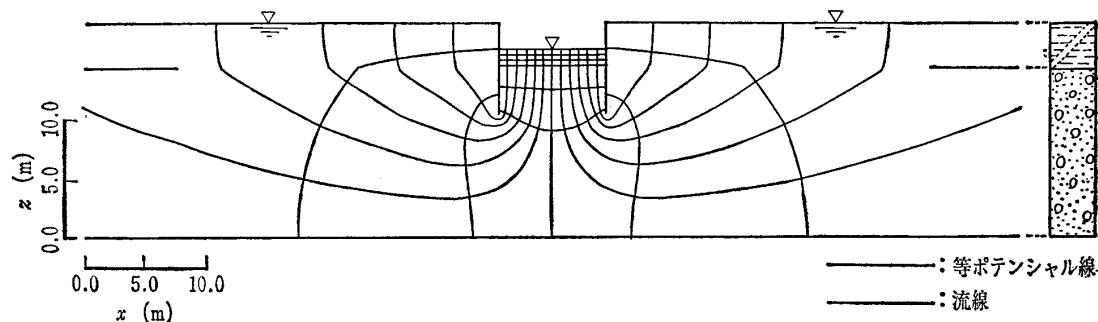
注2) 一層 (均質) 地盤の浸透破壊問題においては, 浸透破壊に対する安全率の算定において透水係数が関係してこない。したがって, 浸透破壊問題の一層 (均質) の仮定においては, 水中単位体積重量についてのみ考える。



図—5 要素分割図



図—6 水替え掘削地盤中の浸透流（流速ベクトル）



図—7 水替え掘削地盤中の浸透流（流線網）

仮定して一層系地盤として安全率を算定する方法には問題があると考えられる。

層状堆積地盤の浸透破壊問題に関する考察から明らかなように、地盤が層からなる場合、限界水頭差の点からみて一層（均質）の仮定が不合理となる場合がある⁹⁾。一次元問題について考えると次の事柄が言える。

「上層の透水係数が下層のそれより小さいと、水頭損失が主に上部層で起こり、それに応じて上層の土粒子に上向きに働く力（浸透力）が大きくなる。このような場合、地盤にかかる水位差が大きくなると、下層は安定していても上層がボイリングを起こすこととなる⁹⁾。このような地盤を一層（均質）と仮定してボイリングに対して検討した場合、限界水頭差を正しい値より大きく算出することとなり、限界水頭差の点からみて不合理となり危険となる⁷⁾。」本掘削地盤は、ちょうどその場合にあたり、地盤の層構成、すなわち、各層の単位体積重量および透水係数の値を考慮にいれ詳しく解析する必要があると

考えられる。

(2) 二層系地盤 問題の地盤を二層系地盤と考え地盤の層構成、すなわち、各層の単位体積重量および透水係数の値を考慮にいれ詳しく解析する。ここでは、建設省土木研究所の方法^{9),10)}と層状堆積地盤の浸透破壊理論を適用する方法⁶⁾について述べる。

(i) 建設省土木研究所の方法 二層系地盤で上層の透水係数が下層のそれより低い場合は建設省土木研究所の方法により検討することができる。この方法は、透水係数の比で根入れ長を換算し単層地盤化して計算する方法であるが、2層の境界点における力の釣り合いを考慮しており、著者らの分類法によると、実質的には二層地盤の浸透破壊理論であると考えることができる。

参考文献10)の解説にしたがって計算を進めると、矢板壁下端付近の安全率 $F_s^{(1)}$ は、

$$F_s^{(1)} = 7.12$$

となり、二層の境界での安全率 $F_s^{(2)}$ は、

$$F_s^{(2)} = 2.60$$

となる。本例の場合は、 $F_s^{(2)}$ が採用され、問題の二層地盤のボーリングに対する安全率は2.60となる。このようにして、前述の(1)の場合よりもより実際的な値を示している。

本方法による計算をより詳しくみると、 $\frac{D}{2}$ 幅のプリズム（テルツァーギの破壊土塊）の水平断面に作用する過剰間隙水頭の平均値 h_a が、本例のような場合にはFEM解析より小さく見積られていることがわかる。この理由として、①仮締切り矢板の外側地盤内の地下水位を固定としたため、二層地盤の下層が解析上、被圧に近い状態になっていること、②矢板囲い内の幅が比較的狭く、掘削地盤内への浸透流の集中が生じていることなどが考えられる。

(ii) 層状堆積地盤の浸透破壊理論を適用する方法

本掘削地盤を一次元層状堆積地盤と仮定して、その浸透破壊問題について考える。層状堆積地盤（ n 層系）の浸透破壊理論⁶⁾を適用する場合、各層（ $j=1, 2, \dots, n$ ）の透水係数 k_j 、層厚 l_j 、水中単位体積重量 γ_j' および、矢板下端部における過剰間隙が必要となる。地層を下から上へ第1層、第2層、……、第 n 層とすると、浸透破壊に対する安全率 F_s は次のように定義することができる⁶⁾。

$$F_s = \min \left\{ \frac{h_c^{(m)}}{h} ; m=1, 2, \dots, n \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$h_c^{(m)} = \left(p + \sum_{j=m}^n \gamma_j' l_j \right) \frac{\sum_{j=1}^n \frac{l_j}{k_j}}{\sum_{j=m}^n \frac{l_j}{k_j} \gamma_w} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$h_c^{(m)}$: 第 m 層の下端で限界となると仮定した場合の仮想的な限界水頭差

p : 押えフィルターの有効上載圧

である。本掘削地盤の場合は二層系（ $m=1, 2$ ）であり、 $p=0$ であるので、 $h_c^{(m)}$ の値は(7)式から、

$$h_c^{(1)} = 6.126 \text{ m}, \quad h_c^{(2)} = 2.026 \text{ m}$$

となる。矢板下端部位置における過剰間隙水頭 h は、FEM浸透流解析から $h=1.355 \text{ m}$ （矢板下端部位置の水平断面における過剰間隙水頭の平均値）とした。したがって、(6)式から、

$$F_s = 1.50 \dots\dots\dots (8)$$

となり、掘削地盤は限界に近い状態にあったことがわかる。

3.1節で述べたように、矢板囲い内の地盤はほぼ一次元浸透流に近い状態にあり、ここで用いた一次元浸透流の仮定が適用できることがわかる。

(3) 上部層における動水勾配 前述したように、矢板囲い内の地盤は一次元浸透流状態と考えることができる。一次元浸透流問題では、均一砂の場合、テルツァーギの限界動水勾配 $i_c \left(= \frac{\gamma'}{\gamma_w} \right)$ が実際の破壊時動水勾配とよく合うことが知られている¹¹⁾。FEM浸透流解析の結果によると、矢板囲い内の地盤の上部層においては動水勾配はほぼ鉛直上向きでありその大きさ i_z もほぼ一定であり、 $i_z = 0.618 \sim 0.626$ である。上層の砂質シルトのクイックサンドに対する安全率 F_s は、

$$F_s = \frac{i_c}{i_z} = 1.51 \sim 1.49 \dots\dots\dots (9)$$

となる。この結果からも矢板囲い内の地盤の上部層は限界に近い状態にあったことがわかる。

3.3 橋台構築後の状態における掘削地盤中の浸透流

橋台構築後の状態における掘削地盤中の浸透流についてFEM解析を行った。ここでは、橋台底版の底面を不透水面として取り扱った。解析によって得られた流速ベクトルを図-8に、流線網を図-9に示す。図-8からわかるように流速ベクトルは、方向が橋台つまさき付近に向き、大きさがその付近で非常に大きくなっている。また、図-9からわかるように流線が橋台つまさき付近に集中し流線網がその付近で込み入っている。このように橋台の構築により浸透流が橋台つまさき付近に集中し流速が大きくなっていることがわかる。

FEM浸透流解析による橋台つまさき付近での上向きの動水勾配は、大きいところで $i_z = 1.128$ であり、この土の限界動水勾配（ $i_c = 0.935$ ）を越えている。このことから、橋台の構築により、まず橋台のつまさき付近の地盤がボーリングをおこし、下部のパイピングへと進行していったものと考えられる。

仮締切り矢板外側地盤内の地下水位は2.4節で述べたように実際より大きく見積っているため、橋台つまさき付近での上向きの動水勾配 i_z は実際にはもう少し低い値になると考えられる。

3.4 橋台の沈下の原因

このように解析結果から、問題の橋台は次のような原因で沈下したのと考えられる。橋台底版の底

面まで掘削した時点において、上層砂質シルト地盤は浸透破壊（クイックサンド）に対して限界に近い状態にあったものと考えられる。そこへ橋台を構築することにより、浸透流に偏流が生じ浸透流速が速められ、土粒子の移動（パイピング）が生じたものと考えられる。このように、橋台を構築することに伴って、基礎地盤中の浸透流に流況の変化が生じ、浸透破壊に対して危険となる場合があることがわかる。今後、掘削地盤の浸透破壊に対する安定性に関しては、構造物を構築しない状態におけるボーリングに対する安定性だけでなく、構造物を構築した状態における安定性（水替え構築中の短期的な安定性）についても配慮する必要があると考えられる。

4. ま と め

水替え掘削時において橋台基礎地盤にパイピングが発生した。本地点は層状堆積地盤から成っており、問題の地盤は砂礫層の上に透水係数の小さな砂質シルト層が載っている。本掘削地盤に関して、橋台構築前、後における FEM 浸透流解析を行った。その結果を用いて掘削地盤のボーリングに対する安定性について検討を行った。そして、次のような結論を得た。

(1) 橋台底版の底面まで掘削した時点において上層砂質シルト地盤が浸透破壊（クイックサンド）に

対して限界に近い状態にあり、そこへ橋台を構築することにより浸透流に偏流が生じ浸透流速が速められパイピングが生じたものと考えられる。

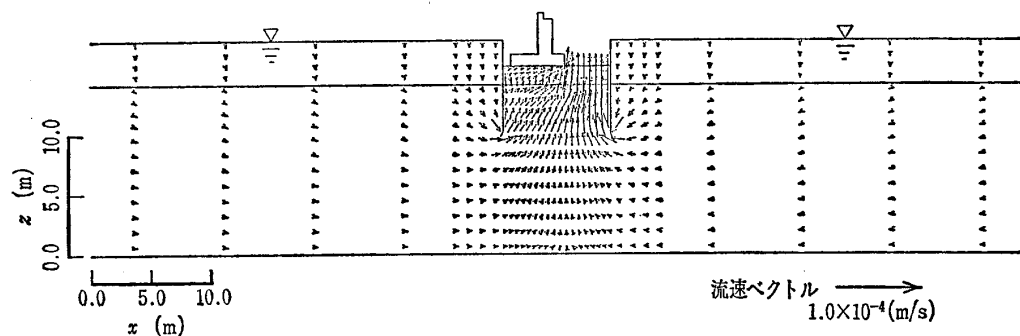
(2) 本例のように上部に透水係数の小さな層が載っている場合、構造物を構築しない状態におけるボーリングに対する安全率が 1.5 より大きくても、構造物を構築したときに偏流を生じパイピングを生じる可能性がある。

(3) 掘削地盤の浸透破壊に対する安定性に関しては、構造物を構築しない状態におけるボーリングに対する安定性だけでなく、構造物を構築した状態における安定性（水替え構築中の短期的な安定性）についても配慮すべきである。

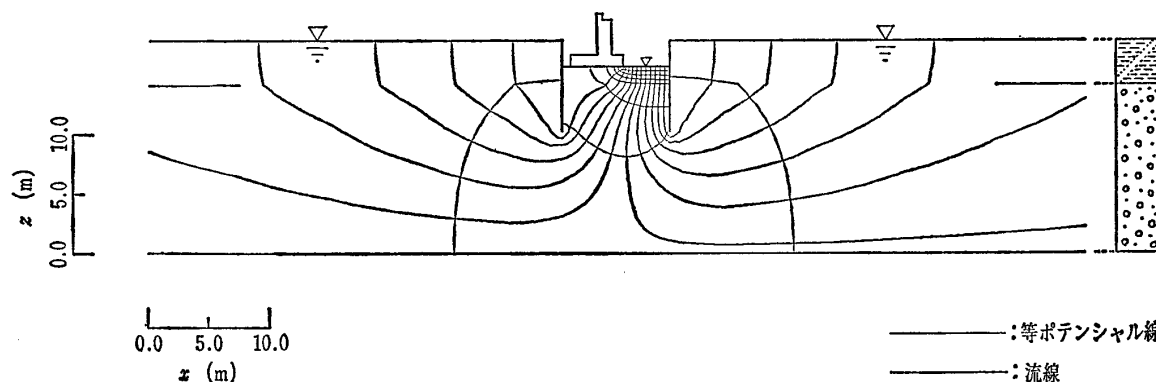
(4) 層状堆積地盤の浸透破壊問題においては、とくに上部に透水係数の小さな層があると、一層（均質）の仮定が不合理となり危険となる場合がある。今回報告した事例はちょうどその場合にあたり、地盤の層構成（各層の水中単位体積重量および透水係数）を考慮にいれ詳しく解析する必要がある。

(5) 建設省土木研究所の方法によると、二層系地盤の安定性を、層構成を考慮にいれて、容易に評価することができる。

(6) 本例のような一次元浸透流の仮定が成り立つ地盤の場合、著者らが提案した層状堆積地盤の浸透



図—8 橋台構築後の掘削地盤中の浸透流（流速ベクトル）



図—9 橋台構築後の掘削地盤中の浸透流（流線網）

破壊理論を用いると、正確に地盤の安定性を評価することができる。ただ、本手法を用いる場合、矢板下端付近における過剰間隙水圧の大きさを FEM 浸透流解析などの手法を用いて正確に求める必要がある。

付記 浸透流解析方法について

ここでは、鉛直二次元断面の浸透流解析を行ったが、実際的には、三次元浸透流問題として取り扱う必要があると考えられる。三次元浸透流問題として解析した場合、水流は開削場内へ収束し地盤の浸透破壊に対する安定性はさらに低下するものと考えられる^{5), 12)~15)}。ただ、問題の地点は地層が急激に変化していると考えられるが、ボーリングの数が少ないので三次元的な地盤構成が不明瞭である。今回の場合には、三次元的に解析を行い地盤の安定性を検討することは不可能であると考えられる。したがって、ここでは鉛直二次元断面の浸透流特性についてのみ考察を行った。

参 考 文 献

- 1) 田中 勉・尾崎勲司：水替え掘削時における橋台基礎地盤のパイピング発生事例，土と基礎，Vol. 39, No. 12, pp. 23~28, 1991.
- 2) 日本道路協会編：道路土工一擁壁・カルバート・仮設構造物工指針，日本道路協会，pp. 205~207, 1977, および pp. 240~242, 1987 (改訂版).
- 3) 山村和也・鈴木音彦：土と水の諸問題，鹿島出版会，pp. 109~116, 1977.
- 4) C.S. デサイ・J.F. アーベル 著 (山本善之訳)：マトリックス有限要素法—基礎理論とその応用—，科学技術出版社，pp. 136~138, pp. 224~228, p. 497, 1974.
- 5) 光成高志・落合正水：ボーリング検討式の適用限界について，第21回土質工学研究発表会，pp. 1649~1650, 1986.
- 6) 田中 勉：層状堆積地盤の浸透破壊理論と限界状態の簡易計算法の提案，土と基礎，Vol. 36, No. 8, pp. 45~51, 1988.
- 7) 田中 勉・長谷川高士：二，三層系砂柱を一層（均質）と仮定することの合・不合理性——次元上昇浸透流による砂柱の破壊に関する理論的研究(4)——，農業土木学会論文集，第95号，pp. 72~78, 1981.
- 8) 沢田敏男・長谷川高士・田中 勉：一次元二層系砂柱の浸透破壊問題——次元上昇浸透流による砂柱の破壊に関する理論的研究(2)——，農業土木学会論文集，第89号，pp. 48~54, 1980.
- 9) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室編：掘削土留め工設計指針(案)，土木研究所資料，第1816号，pp. 6~24, pp. 39~52, 1982.
- 10) 土木学会トンネル工学委員会編：トンネル標準示方書(開削編)・同解説，技報堂，pp. 88~96, 1986.
- 11) 田中 勉・吉良八郎・長谷川高士：一層系（押エフィルタなし）の浸透破壊実験—層状堆積の砂柱の浸透破壊に関する実験的研究(I)—，農業土木学会論文集，第110号，pp. 87~99, 1984.
- 12) 伊藤 洋・佐藤邦明：開削工事に伴う地下水流れの三次元特性に関する検討，土と基礎，Vol. 32, No. 5, pp. 11~15, 1984.
- 13) 西垣 誠・梅田美彦・上山一彦：地盤掘削におけるボーリング，パイピング現象の2, 3の考察，土と基礎，Vol. 37, No. 6, pp. 69~74, 1989.
- 14) 三浦均也・高治一彦・古川美典・今福 守：橋梁下部仮締め切り工のボーリングに対する安定性解析，第27回土質工学研究発表会，pp. 2005~2008, 1992.
- 15) 三浦均也・今福 守・高治一彦・古川美典：橋梁下部仮締め切り工のボーリングによる破壊事例，第27回土質工学研究発表会，pp. 2009~2012, 1992.

(原稿受理 1992. 7. 1)