

掘削形状と二層地盤の影響を考慮したボーリング検討式の提案

PROPOSING OF A CHECKING EQUATION FOR BOILING
CONSIDERING OF THE EFFECTS OF THE EXCAVATION FORM AND THE TWO LAYERS GROUND

中野正則*、石田雅博**、加藤秀章***

Masanori NAKANO, Masahiro ISHIDA, Hideaki KATO

*建設省土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室長 (〒305 茨城県つくば市旭一番地)
**建設省土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室 研究員 (同 上)
***建設省土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室 (同 上)

It is important to check the stability for boiling when an earth retaining wall is executed in sand. However, boiling failures are sometimes occurred in spite of the Terzaghi's checking equation shows safe. This is because of that the Terzaghi's checking equation doesn't consider the influence of the difference of the excavation form and the two layers ground. Therefore the modified checking equation for boiling considering of these effects is proposed.

Firstly, the osmotic flow analysis is executed to find the influence of the difference of the excavation form and the two layers ground. Secondly, the modified coefficients to Terzaghi's checking equation are proposed. Thirdly, this modified equation is applied to some excavated cites. The modified equation shows better result than original equation.

Key Words: boiling, excavation, osmotic flow analysis, retaining wall

1. はじめに

砂地盤のような透水性の高い地盤において、遮水性の土留め壁を用いて掘削工事を行う場合、ボーリングに対する安全性を検討する必要がある。特に、都市部では地盤沈下抑制のための地下水の揚水規制により、地下水がかつてより高いこと、また、地下空間の積極的な活用により、掘削工事が大規模、大深度化していることから、ボーリングに対する安全性が、さらに重要になってきている。

ボーリングの代表的な検討方法としては、Terzaghiの方法と限界動水勾配の方法がある。

Terzaghiの方法は、土留め壁の下端に水位差の半分に相当する平均過剰間隙水圧が発生し、これに対して根入れ長の1/2に相当する掘削側地盤の崩壊幅分の土の有効重量が抵抗すると考える方法である。

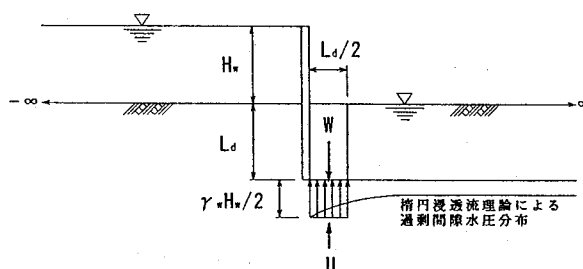
限界動水勾配の方法は、動水勾配が限界動水勾配に達するとボーリングが発生するとしているが、流線の考え方については定説がない。また、流線の長さを根入れ長の2倍とすれば、Terzaghiの方法と同じ結果となる。

道路土工指針¹⁾などの基準類では、Terzaghiの方法を採用し、安全率を1.2～1.5に設定しているものが多い。また、二層系地盤に対しては、透水係数比で根入れ長を換算して単層地盤化した土木研究所の方法²⁾を採用して

いるものもある³⁾。

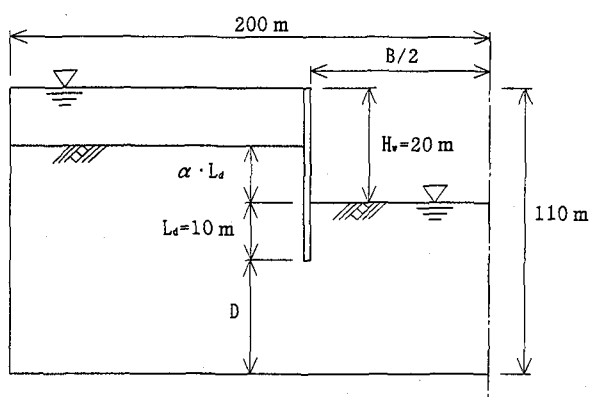
しかしながら、Terzaghiの方法では所定の安全率を確保しているにもかかわらず、ボーリングが発生する事例があることが指摘されている⁴⁾。図-1に示すようにTerzaghiの方法は、背面地盤および掘削幅を無限とし、二次元で浸透流理論を解いたものに基づいており、また透水係数の一様な一層系地盤を対象としている。

したがって、ボーリングの発生した原因としては、施工時に地盤が緩められたことなども考えられるが、Terzaghiの方法では考慮していない要因が影響し、設計



H_w : 水頭差 (m)
 L_d : 根入れ長 (m)
 γ : 水の単位体積重量 (tf/m³)
 W : 土の有効重量 (tf/m²)
 U : 過剰間隙水圧 (tf/m²)

図-1 Terzaghi理論の概念図



α : 背面地盤高さに関するパラメータ
B : 掘削幅 (m)

図-2 鉛直二次元および軸対称モデル

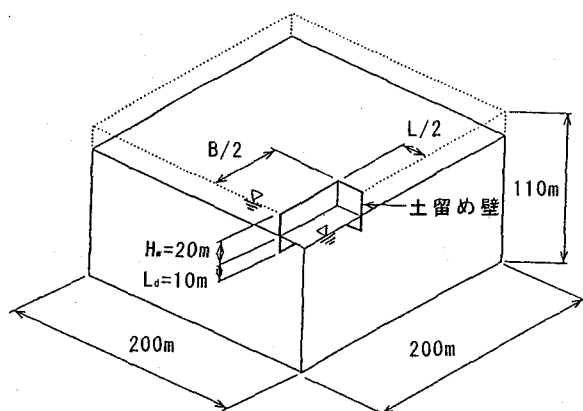


図-3 三次元モデル

において想定した以上にボイリングに対して危険であったことが考えられる。

そこで、本研究では、二次元および三次元モデルによるFEM浸透流解析を行い、掘削幅、掘削平面形状、二層系地盤の影響を試算し、Terzaghiの手法に対する修正係数を提案する。

2. 解析方法

検討は、FEM浸透流解析を用いて行った。過去に土木研究所で行われたボイリングに関する実験⁵⁾では、実験値から推定した水圧のコンター図と理論式がよく一致しており、飽和した砂質土で層流状態の浸透流を扱う場合には、FEM浸透流解析により十分な精度でシミュレ

表-1 一層系地盤解析ケース

記号	解析ケース (m)	Ld との関係
水頭差 Hw	20	—
根入れ長 Ld	10	—
背面地盤高 $\alpha \cdot L_d$	0, 10, 20	$\alpha = 0, 1, 2$
透水層厚 D	5, 20, 80	$D/L_d = 0.5, 2, 8$
掘削幅 B	10, 20, 40, 80	$B/L_d = 1, 2, 4, 8$

表-2 二層系地盤解析ケース

記号	解析ケース (m)	Ld との関係
水頭差 Hw	20	—
根入れ長 Ld	10	—
背面地盤高 $\alpha \cdot L_d$	0, 10, 20	$\alpha = 0, 1, 2$
透水係数比 K	0.5, 2.0, 5.0, 10.0	—
上層厚 du	2.5, 5.0, 7.5	$du/L_d = 0.25, 0.5, 0.75$
透水層厚 D	80	$D/L_d = 8$
掘削幅 B	80	$B/L_d = 8$

表-3 三次元モデル解析ケース

記号	解析ケース (m)	Ld との関係
水頭差 Hw	20	—
根入れ長 Ld	10	—
背面地盤高 $\alpha \cdot L_d$	0	$\alpha = 0$
掘削幅 B	10, 20, 40, 80	$B/L_d = 1, 2, 4, 8$
掘削長 L	10, 20, 40, 80, 160, 250	$L/L_d = 1, 2, 4, 8, 16, 25$

ートできると考えられる。

解析モデルは、①溝型掘削をモデル化した鉛直二次元モデル、②立坑掘削をモデル化した軸対象モデル、③二層系地盤を考慮した鉛直二次元モデル、形状の違いを試算するための④三次元モデルの4種類とした。

図-2および図-3に各解析モデルの概要を示す。また、表-1～表-3に解析ケースを示す。解析は、掘削側と掘削背面側の水頭差を20m、根入れ長を10m、土の単位体積重量 $\gamma_t = 1.9 \text{ tf/m}^3$ 、一層系地盤の透水係数 $k = 5.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ とし、背面地盤の高さ ($\alpha = 0 \sim 2$)、根入れ下端から不透水層までの深さ ($D/L_d = 0.5 \sim 8.0$)、掘削幅 ($B/L_d = 1.0 \sim 8.0$)、掘削長 ($L/L_d = 1 \sim 25$) および上層の透水係数 (k_1) と下層の透水係数 (k_2) の比である透水係数比 ($K = 0.5 \sim 10$) をパラメータとした。

3. 解析結果

3.1 過剰間隙水圧

一層系モデルについて、今回の解析による平均過剰間隙水圧(U)とTerzaghiの平均過剰間隙水圧($H_w/2$)との比を縦軸に、掘削幅を根入れ長で無次元化した値(B/L_d)を横軸として、両者の関係を図-4に示した。ここで、平均過剰間隙水圧は土留め壁先端の深さで根入れ長の半分の範囲での過剰間隙水圧の平均値とした。

二次元モデルと軸対称モデルともに平均過剰間隙水圧は掘削幅により大きく変化し、掘削幅が狭くなるとその値は大きくなり $H_w/2$ を越える値を示す。逆に、背面地盤高さが高いとき(α が大)、あるいは、土留め壁下端からの透水層厚が小さいとき(D/L_d が小)は過剰間隙水圧は小さくなる傾向を示す。

一方、軸対称モデルでの平均過剰間隙水圧は二次元モデルに比較してかなり大きな値を示している。

これらのことから、平均過剰間隙水圧を $H_w/2$ で設定するTerzaghiの方法は、必ずしも安全側にはならないといえる。また、掘削幅の小さい立坑形状の土留めでは過剰間隙水圧が非常に大きくなることがわかる。

二層系地盤では透水係数比 K ($=k_2/k_1$ 、 k_1 : 上層地盤での透水係数、 k_2 : 下層地盤での透水係数)により地下水の流れは大きく異なる。ここでは、土留め壁下面(以下、下層という)と土層の層境(以下、上層という)での過剰間隙水圧に着目し、 $\alpha=0$ のときの透水係数比と過剰間隙水圧 U^* の関係を図-5示す。ここで、 U^* は下層では根入れ長の半分の範囲での平均過剰間隙水圧を $H_w/2$ で無次元化したものであり、上層では掘削面で0、土留め壁下端で $H_w/2$ の線形分布であるものと仮定して求めた平均過剰間隙水圧を $H_w/2 \cdot d_w/L_d$ で無次元化したものである。

透水係数比 K の値により U^* の値は異なり、 $K > 1$ の領域では下層に比較して上層の過剰間隙水圧が大きい値を、 $K < 1$ の領域では逆の傾向を示している。これは、ボーリング破壊に対して $K > 1$ のときは上層での危険性が高く、逆に $K < 1$ では下層での危険性が高いといえる。また、一層系地盤($K=1$)と比較すると $K > 1$ の領域では U^* は大きくなっているものの $K < 1$ では $K=1$ の場合に比較して U^* は小さい値を示している。

これより、二層系地盤でのボーリングの安定性の検討は $K > 1$ のときは上層で、 $K < 1$ のときは下層あるいは一層系地盤として検討すればよいと考えられる。

また、掘削形状の違いを検討するために実施した一層系地盤における三次元解析の結果を図-6および図-7に示す。図-6は、掘削形状が溝形状、図-7は立坑形状の場合の場合であるが、どちらも隅角部での過剰間隙水圧が大きく、隅角部から離れるに従って減少することがわかる。しかし、二次元状態になる点、つまり過剰間隙水圧の分布が隅角部からの距離に無関係に一樣となる点を明確に示すことはできなかった。

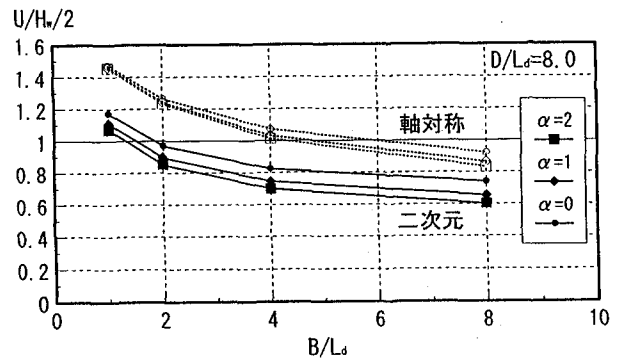


図-4.1 平均過剰間隙水圧と掘削幅の関係 ($D/L_d=8.0$)

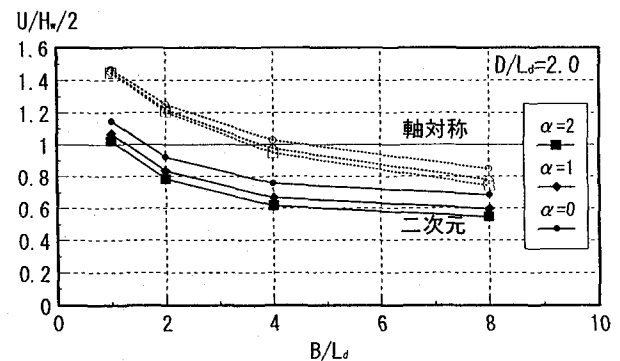


図-4.2 平均過剰間隙水圧と掘削幅の関係 ($D/L_d=2.0$)

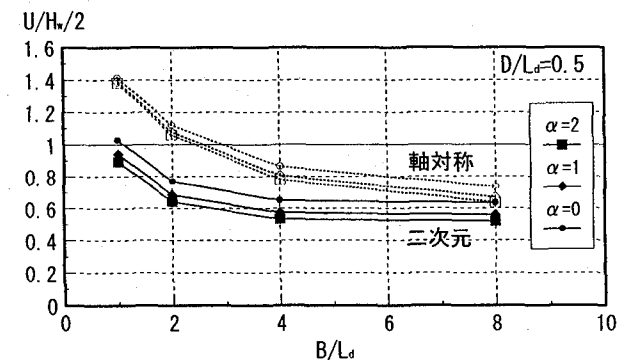


図-4.3 平均過剰間隙水圧と掘削幅の関係 ($D/L_d=0.5$)

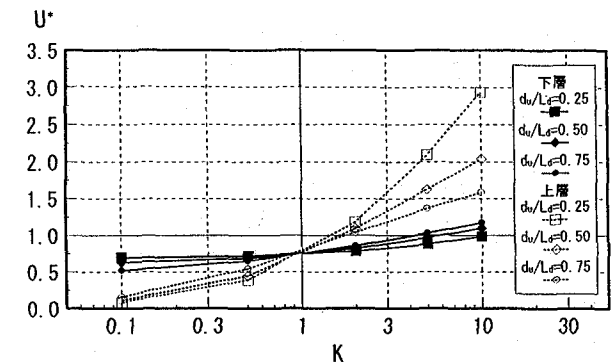


図-5 透水係数比と過剰間隙水圧の関係

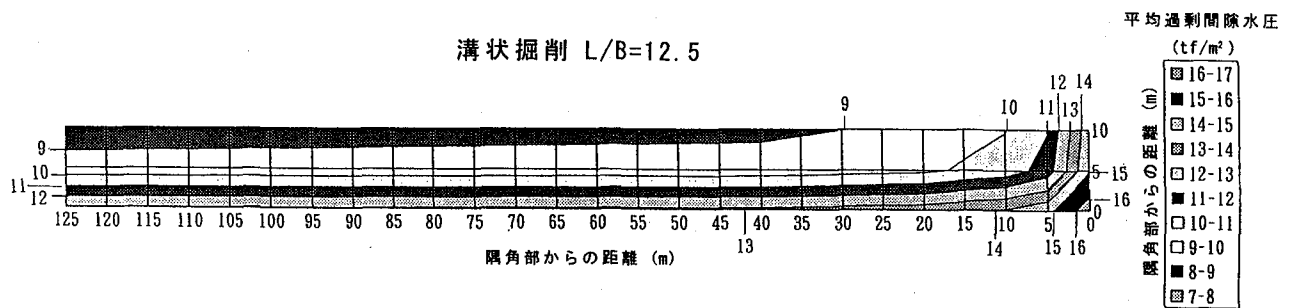


図-6 三次元解析の過剰間隙水圧分布（溝形掘削）

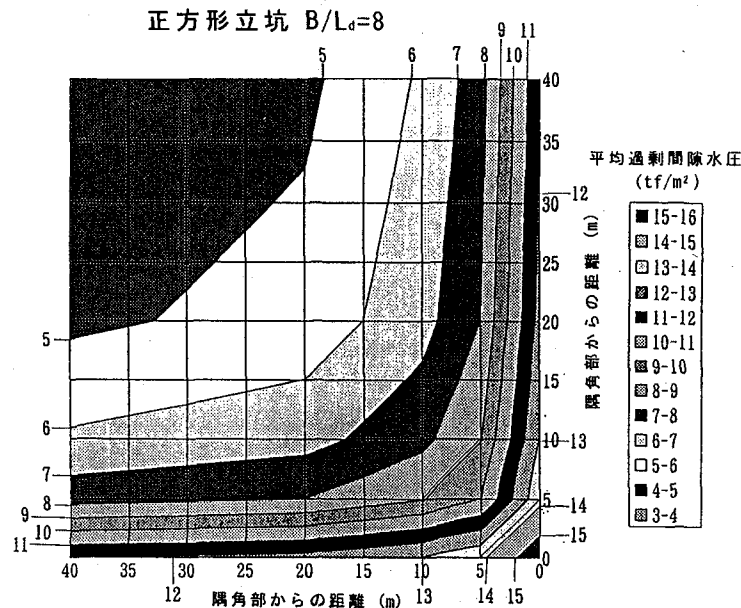


図-7 三次元解析の過剰間隙水圧分布（立坑掘削）

4. 安定計算式の提案

4.1 検討方法

砂地盤におけるボーリングの基本式はパラメトリックスタディで得られた過剰間隙水圧を包含するような関数で設定する。

ボーリングに対する安全率は、式 (1) で表される。

$$F_s = W/U \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 一層系地盤の場合、および二層系地盤で $K < 1$ の場合（下層地盤底面での検討）

$$W = \gamma \cdot L_d \quad \dots\dots\dots (2)$$

土留め壁下端位置での過剰間隙水圧を h_a ($=H_w \cdot \gamma_w/2$) とすると、崩壊幅 $L_d/2$ 位置での過剰間隙水圧 h_b は、楕円浸透流理論から $h_b \approx 0.57h_a$ となるため、平均過剰間隙水圧は、台形分布と仮定すれば式 (3) で表される。

$$U = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \frac{1.57 \cdot H_w \cdot \gamma_w}{4} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2) 二層系地盤で $K > 1$ の場合（上層地盤底面での検討）

$$W = \gamma \cdot d_u \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$U = \kappa_3 \cdot \frac{H_w \cdot \gamma_w}{2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 F_s ; ボーリングに対する安全率

W ; 土の鉛直方向有効重量 (tf/m²)

U ; 層下面に作用する過剰間隙水圧 (tf/m²)

γ ; 土の有効重量 (tf/m³)

L_d ; 土留め壁の根入れ長 (m)

d_u ; 上層厚 (m)

H_w ; 水位差 (m)

γ_w ; 水の単位体積重量 (tf/m³)

κ_1 ; 掘削幅に関する補正係数

κ_2 ; 土留め平面形状に関する補正係数

κ_3 ; 二層系地盤の層厚、透水係数比に関する補正係数

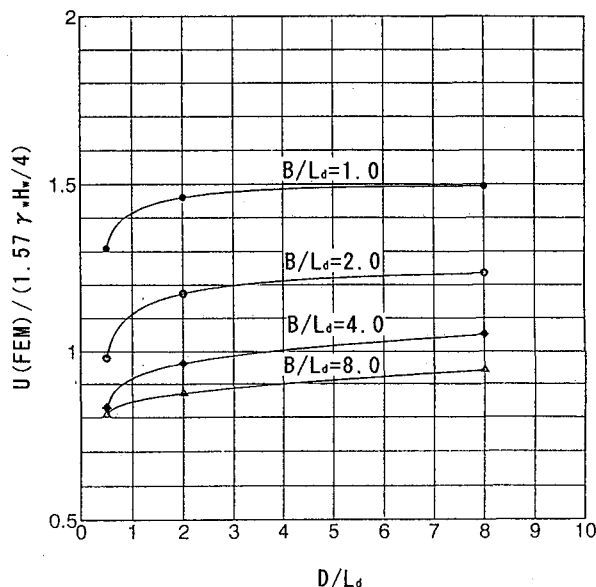


図-8 透水層厚と過剰間隙水圧比の関係

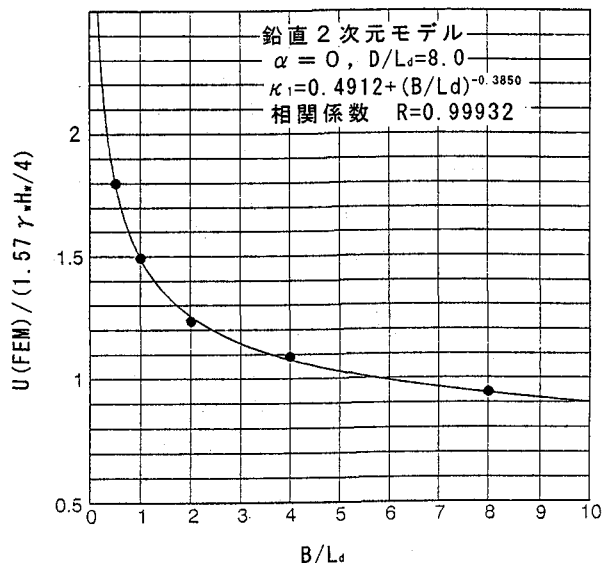


図-9 過剰間隙水圧に対する掘削幅の影響

4.2掘削幅に関する補正係数 κ_1 の検討

一層系地盤における土留め壁先端での平均過剰間隙水圧の値は、掘削側と背面側の地盤高さに関する α と掘削幅 (B/L_d) および透水層の土留め壁先端からの厚さ (D/L_d) の3つのパラメータが影響する。

α については、背面側地盤が高いほど土留め壁下端位置での過剰間隙水圧は小さくなり、また、Terzaghi式においても背面地盤高さと掘削側地盤高さが同じ ($\alpha = 0$) 状況で設定されているので、安全側を考慮して $\alpha = 0$ の場合について考える。

透水層の土留め壁下端からの厚さ (D/L_d) の影響を検討するために、FEM解析から求められた平均過剰間隙水圧 ($U(\text{FEM})$) を楕円浸透流理論から求めた平均過剰間隙水圧 ($1.57H_w \cdot \gamma_w / 4$) の比で無次元化したものを図-8に示す。この図は、掘削幅の影響を内部パラメータ (B/L_d) として示している。この図から、 D/L_d が2以上となると、過剰間隙水圧の変化に与える影響が少なくなることがわかる。また、土留め壁先端からの透水層厚が小さくなると、過剰間隙水圧の値も小さくなり安全側となるので、 D/L_d による影響は考慮しないものとして、 $D/L_d = 8$ の場合のみを用いて以下の検討を実施した。

$\alpha = 0$ 、 $D/L_d = 8$ の場合について、掘削幅の影響 (B/L_d) による過剰間隙水圧の変化を図-9に示す。この図から、 B/L_d と過剰間隙水圧の比が次式で近似できる。

$$\kappa_1 = 0.49 + (B/L_d)^{-0.4} \dots \dots \dots (6)$$

よって、この κ_1 を式 (3) に適用することとする。

なお、式 (3) では平均過剰間隙水圧を $1.57 \cdot H_w \cdot \gamma_w / 4$ としているが、 $H_w = 20\text{m}$ 、 $L_d = 10\text{m}$ で B および D を無限長

とした場合の楕円浸透流理論による過剰間隙水圧を崩壊幅で積分して平均した値は 7.082tf/m^2 となる。したがって、 B および D が無限長の場合、理論解と台形分布により簡略化した平均過剰間隙水圧の比は次のようになる。

$$\begin{aligned} h_u / (1.57 \cdot H_w \cdot \gamma_w / 4) \\ = 7.082 / (1.57 \cdot 20 \cdot 1.0 / 4) = 0.902 \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

ここに、 h_u ；平均過剰間隙水圧 (tf/m^2)

よって、掘削幅が十分広い場合には $\kappa_1 \approx 0.9$ であると考えられることから、式 (6) の κ_1 の下限値を0.9とする。

4.3平面形状に関する補正係数 κ_2 の検討

軸対称モデルと二次元モデルの区分を決定するために、三次元モデルの解析結果と比較した。まず、溝形掘削について三次元モデルと二次元モデルによる過剰間隙水圧 (ΣU_3 および ΣU_2) を比較したのが図-10である。これによると、隅角部からの距離が30m付近で両解析モデルの合計過剰間隙水圧はほぼ近似している。一方、正方形立坑について三次元モデルと二次元モデルを比較すると、図-11に示すように隅角部からの距離が大きくなっても両モデルの値は一致しなかった。したがって、正方形立坑のように隅角部を有する場合には、二次元モデルに対する修正係数が必要となる。

図-12に、一層系地盤二次元モデルに式 (6) の κ_1 を適用して求めた過剰間隙水圧の合計値と、軸対象モデルで得られた過剰間隙水圧の合計値の比を示す。

この図から、 κ_2 を1.25とすれば、軸対称モデルの過剰間隙水圧を式 (3) でほぼ安全側に設定できると考えられる。したがって、 κ_2 は次式によるものとする。

$$\kappa_2 = 1.0 \quad (\text{溝形掘削}) \dots \dots \dots (8-1)$$

$$\kappa_2 = 1.25 \quad (\text{立坑掘削；隅角部がある場合}) \dots \dots (8-2)$$

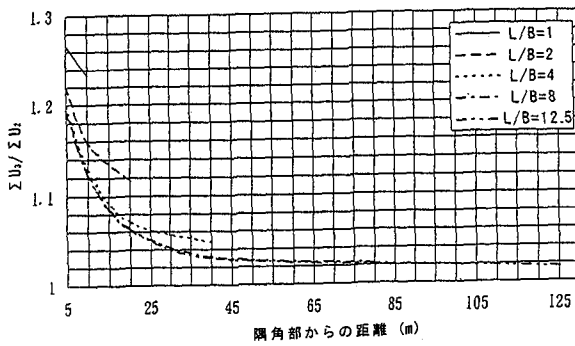


図-10 三次元モデルと軸対称モデルの比較
(溝形掘削)

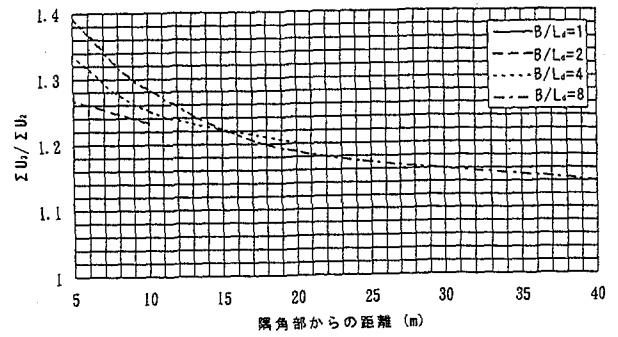


図-11 三次元モデルと鉛直二次元モデルの比較
(正方形立坑)

4.4 二層系地盤に対する補正係数 κ_3 の検討

透水係数比 $K > 1$ の場合 (下層の透水係数が上層よりも大きな場合) は、均質地盤よりも危険側となる。図-13に透水層厚比 (d_u/L_d) が 0.25, 0.50, 0.75 の場合の、透水係数比 K と過剰間隙水圧の関係を示す。なお、それぞれの透水層厚に対して、 $a + K^b$ の近似を行った結果を図中に示した。これを透水層厚比 (d_u/L_d) の関数として整理して次式を得た。

$$a = -1.107759 + 1.0100221(d_u/L_d) \dots\dots\dots (9-1)$$

$$b = 0.2115149 - 0.0212682(d_u/L_d) \dots\dots\dots (9-2)$$

よって、これを簡略化して κ_3 は次のようになる。

$$\kappa_3 = (-1.1 + d_u/L_d) + K^{0.2} \dots\dots\dots (10)$$

なお、FEM浸透流解析結果では、上層の透水係数が小さい地盤では、上層下面の間隙水圧分布は土留め壁から離れた領域でも土留め壁近傍とほぼ同一の間隙水圧が発生していることから、式 (3) の崩壊幅を考慮した平均過剰間隙水圧は用いず、土留め壁位置での過剰間隙水圧を用いることとして式 (5) によるものとした。なお、一層系地盤の過剰間隙水圧算定式と二層系地盤で $K > 1$ の場合の算定式は $K = 1$ 付近で連続性がとれていない。これは、 $K = 1$ 付近の過剰間隙水圧分布を一概に数式で表すのは困難であるため、安全側を考慮して $H_w/2$ の一様分布と仮定したためである。したがって、二層系地盤と見なした方が安全側となるが、設計実務への適用を考えると二層系地盤と見なす K の範囲を設定する必要があるだろう。

5. 施工事例との比較

ここでは、84件の掘削に対して提案式を適用し、従来の方法と比較した。図-14は提案式とTerzaghiの方法による安全率を比較したものである。表-4および表-5に示すようにTerzaghiの方法では、安全率が1.5以上であるにも関わらず、10例でボーリングまたは軽微なパイピングが発生している。これに対して提案式では、ボーリングが発生した事例の安全率は1.0付近に分布し、事例

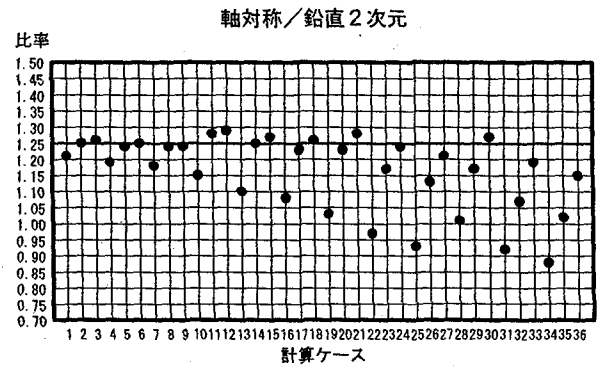


図-12 二次元モデルと軸対称モデルの違い

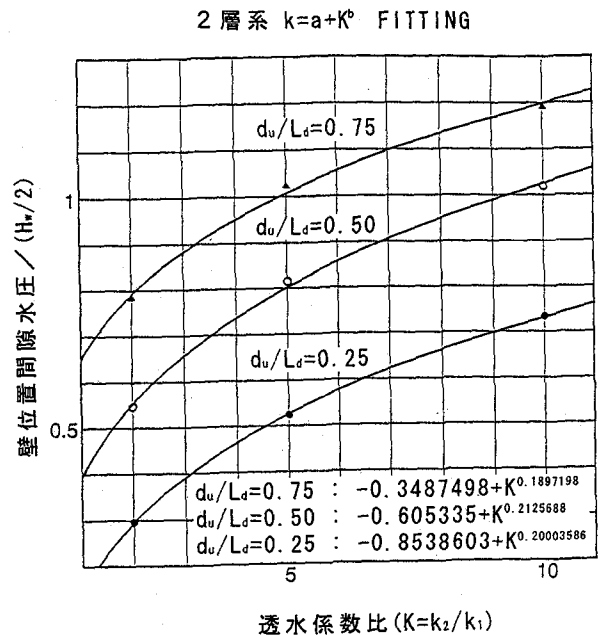
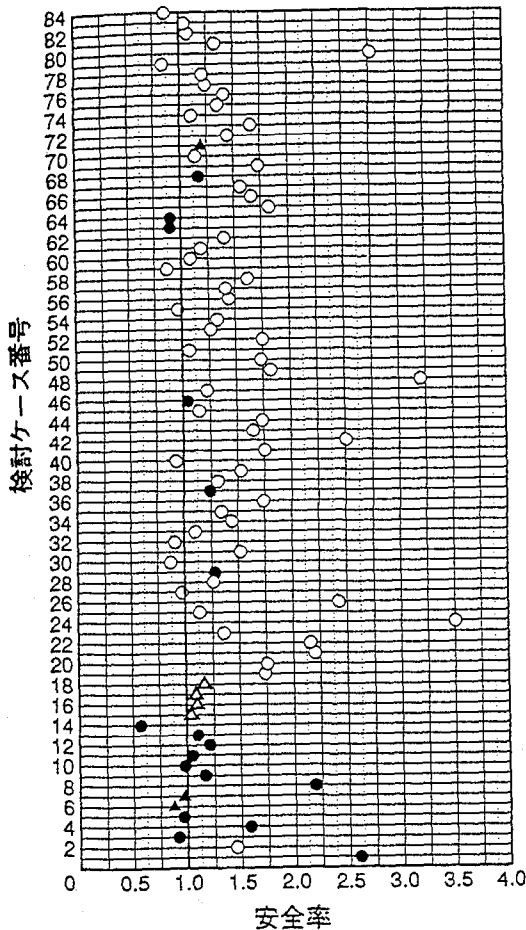
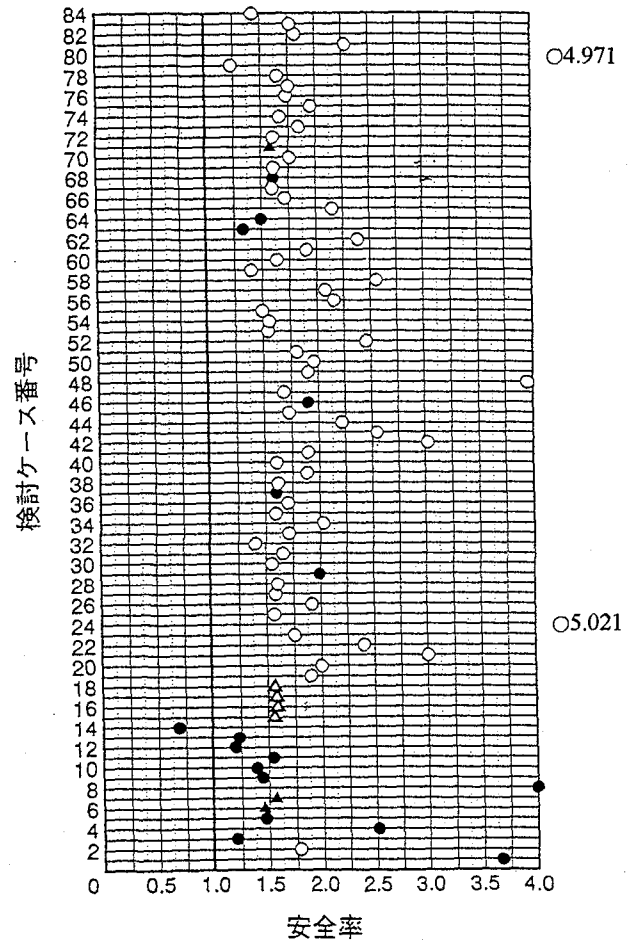


図-13 透水係数比と過剰間隙水圧の関係

提案式による安全率



Terzaghi式による安全率



- ボイリング発生
- ▲ 軽微なパイピング
- △ 発生の可能性大
- 無し

図-14 提案式とTerzaghi式の安全率の比較

表-4 提案式の安全率と被害の関係

	$F_s < 1.5$	$F_s > 1.5$
被害無し(△, ○)	40	24
ボイリング発生(●)	17	3
軽微なパイピング(▲)		

表-5 Terzaghi式の安全率と被害の関係

	$F_s < 1.5$	$F_s > 1.5$
被害無し(△, ○)	5	59
ボイリング発生(●)	10	10
軽微なパイピング(▲)		

1,4,8を除いて15を下回る。事例1,4,8で安全率が大きい値を示しているにも関わらずボイリングが発生しているのは、壁体をプレボーリング工法もしくはウォータージェット併用で施工しており、地盤を緩めたことが原因であると考えられる。

6. まとめ

FEM浸透流解析によりパラメトリックスタディーを行った。この結果、土留め壁下端面での過剰間隙水圧は掘削幅、平面形状の影響を大きく受け、Terzaghiの $H_w/2$

では必ずしも安全側にはならないことが示された。また、二層系地盤では透水係数比により浸透流は大きく異なり、特に上層の透水係数が下層に比べて小さいときはボイリング破壊の危険性が高くなることが示された。

本研究では、これらの結果をもとに、掘削幅、平面形状、二層系地盤の影響を補正係数として取り込んだ安定計算法を提案し、現場のデータに適用した。この結果、ボイリングを起こした事例の安全率は、提案式によると $F_s=1.0$ 近辺の値となり、提案式の妥当性が示された。

また、提案式によって $F_s=1.5$ で設計すれば、ボイリ

ングに対して十分な安全性を確保できると考えられる。

しかし、土留め壁の施工にあたっては、振動騒音を防止する目的でプレボーリング工法やウォータージェット工法を用いることが多く、このような場合には、本来水の浸入を防止すべき目的の土留めに水径を設けることになり、これが原因でボーリング、パイピングが発生する危険性が高くなる。したがって、ボーリングが予測されるような地下水位の高い砂地盤で土留めを施工する場合には、施工法に注意を払うことは忘れてはならない。

参考文献

- 1) 道路土工 擁壁・カルバート・仮設構造物工指針，日本道路協会，1987
- 2) 浅沼秀弥、山本洋司、越川裕：掘削土留め工設計施工指針（案），土木研究所資料第1816号，1982
- 3) トンネル標準示方書（開削編）・同解説，土木学会，1986
- 4) 三浦均也、今福守、高治一彦、古川美典：橋梁下部仮締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
- 5) 塩井幸武、山本洋司：クイックサンド現象に関する調査，土木研究所資料第1746号，1981

（1995年9月18日受付）