

# 砂質地盤における掘削底面の安定性評価

中部電力㈱ 電力技術研究所 土木研究室 正会員 木村 正孝  
 同 上 正会員 ○尾畑 和彦

## 1. まえがき

地下水位の高い砂質地盤での山留め、仮締切工事における根切りの進行過程では、水頭差による浸透破壊現象（ポイリング・パイピング等）に対する掘削底面の安全性評価が重要となる。

砂質地盤のポイリングに対する算定式としては、Terzaghi, Kochina, 河野・久保田などの提案式がよく知られている。これらの算定式はいずれも均質地盤を対象としたものであるが、実際の現場では均質地盤としてのモデル化が困難な不均質地盤に遭遇することが多い。このような不均質地盤でのポイリング現象については報告例も少なく、そのメカニズムも明らかでない。

このため、砂質地盤中に粘土層のような難透水層がある場合の浸透破壊現象の検討を目的として、モデル材料による室内土層実験、モデル材料の低拘束圧三軸圧縮試験およびその結果を用いた室内土層実験結果の数値シミュレーションを実施したので報告する。

## 2. 室内土層実験

### 2-1 実験の概要

#### (1) 実験装置と地盤作成材料の物理特性

土層による浸透破壊実験は、図2-1に示すように高さ60cm、長さ100cm、奥行き20cmの亚克力製水槽に、山留めを模擬した地盤を作成した。地盤作成のモデル材料として透水層に珪砂4号、難透水層に豊浦標準砂、珪砂7号、シリカパウダーを用いた。各材料の物理特性を表2-1に、粒径加積曲線を図2-2に示す。

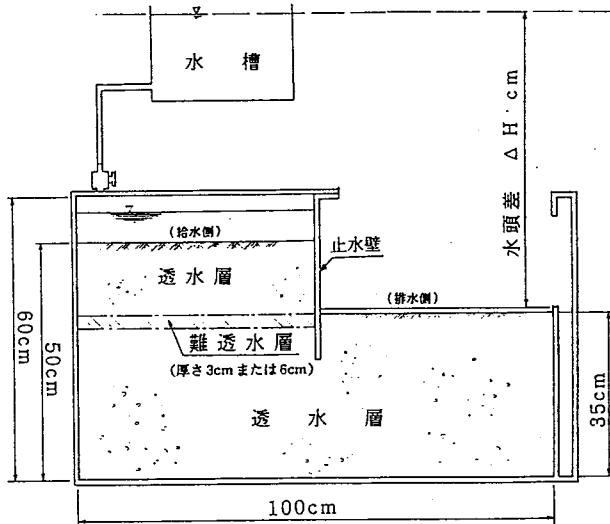


図2-1 実験装置

表2-1 各材料の物理特性

項目	珪砂4号	豊浦	珪砂7号	シリカパウダー (C-2)
比重 $G_s$	2.632	2.644	2.645	2.705
炭分 (%)	0.34	0	0	0
砂分 (%)	99.61	99.75	70.8	30.0
シルト分 (%)	0.05	0.25	29.2	64.0
粘土分 (%)				6.0
最大粒径 (mm)	4.76	0.84	0.84	0.19
60%径 $D_{60}$ (mm)	1.00	0.22	0.125	0.061
30%径 $D_{30}$ (mm)	0.64	0.17	0.066	0.033
10%径 $D_{10}$ (mm)	0.48	0.135	0.024	0.012
均斉係数 $U_c$	2.08	1.63	5.2	5.1
曲率係数 $U'_c$	0.853	0.97	1.45	1.49
最大密度 $\rho_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.613	1.645	1.587	1.803
最小密度 $\rho_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.332	1.326	1.132	1.113
最大間隙比 $e_{max}$	0.977	0.994	1.337	1.430
最小間隙比 $e_{min}$	0.805	0.607	0.667	0.687
透水係数 $K$	$4.7 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$2.6 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$

#### (2) 実験の手順

##### ア. 地盤の作成

透水層および難透水層を所定の相対密度になるように気乾材料を用いて作成し、材料間の空気が水に置き換わる程度のゆっくりした速さ（10cm/時）で土層下部より水道水を給水し、水槽側（給水側）の地表面で約7cmの水深を確保した状態で20時間以上放置し飽和させた。（図2-3）

イ. 排水側の水位低下

次に給水側の水位が変化しないように水槽から給水しながら排水側より排水し、給水側と排水側の水位が約3cmの水頭差で間隙水圧がほぼ一定になった状態（定常状態）で間隙水圧を測定する。  
 このような排水作業を排水側の水位を下げきる（排水側水深1cm）まで繰返した。

ウ. 給水側の水位上昇

その後、給水側の水位を同じ間隔（約3cm）で上昇させ、ボイリングの発生が認められるまで継続した。  
 なお、実験における計測は、地盤中および止水壁近傍の間隙水圧と排水側の浸透流量である。図2-3に土層中に埋設した間隙水圧計の位置関係を示す。

(3) 実験ケース

実験は透水層（珪砂4号）および難透水層の相対密度（ $D_r=50\%$  と  $70\%$  の2種）と難透水層に使用する材料を変えて9ケース実施した。（表2-2）

表2-2 実験ケース一覧表

難透水層	珪砂4号		豊浦標準砂		珪砂7号	シリカパウダー
	$D_r=70\%$	$D_r=50\%$	$D_r=70\%$		$D_r=70\%$	$D_r=70\%$
透水層	均一層		t=3cm	t=6cm	t=3cm	t=3cm
珪砂4号 $D_r=50\%$	—	NO 2 (CAL 2)	NO 3 (CAL 3)	NO 5 (CAL 5)	NO 6 (CAL 6)	NO 8 (CAL 8)
珪砂4号 $D_r=70\%$	NO 1 (CAL 1)	—	NO 4 (CAL 4)	—	NO 7 (CAL 7)	NO 9 (CAL 9)

注1) t: 難透水層の厚さ  
 注2) ( ) は解析ケース

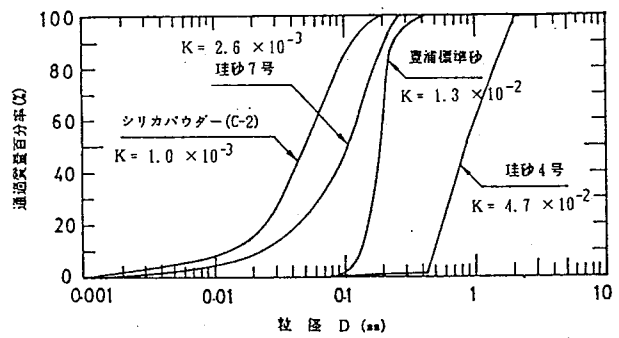


図2-2 各材料の粒径加積曲線

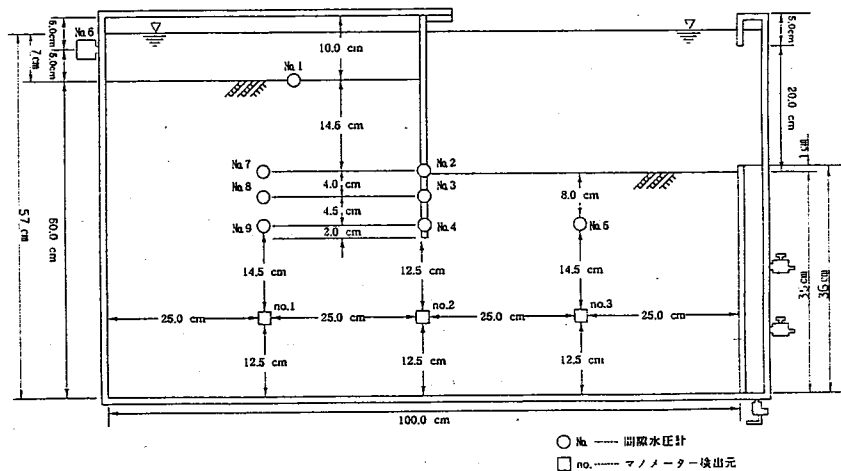


図2-3 間隙水圧計の埋設位置

2-2 ボイリングの判定基準

ボイリングの発生について数値的に明確にされた文献はない。そこで今回の実験では「ボイリングが発生すると地盤の構成が破壊され、間隙水圧が一時的に消散する」と仮定し、止水壁先端の間隙水圧が水頭差の増加に追従せず、一時的に低下する現象が最初に認められた時点をもボイリングの発生とした。

2-3 実験結果のまとめ

透水層の相対密度が $Dr=70\%$ を例として、ボーリング発生時の水頭差と難透水層の透水係数の関係を図2-4に示した。なお、図にはボーリングの判定規準のうちTerzaghiの方法および限界動水勾配による方法(Terzaghiの理論式)により求めたボーリング発生時の水頭差を併記した。実験結果を要約すると、

- ① 難透水層の透水係数とボーリングの発生水頭には、相関性が認められること。
- ② 透水層の相対密度差( $Dr=50\%, 70\%$ )がボーリングの発生に与える影響は少ないことが判った。

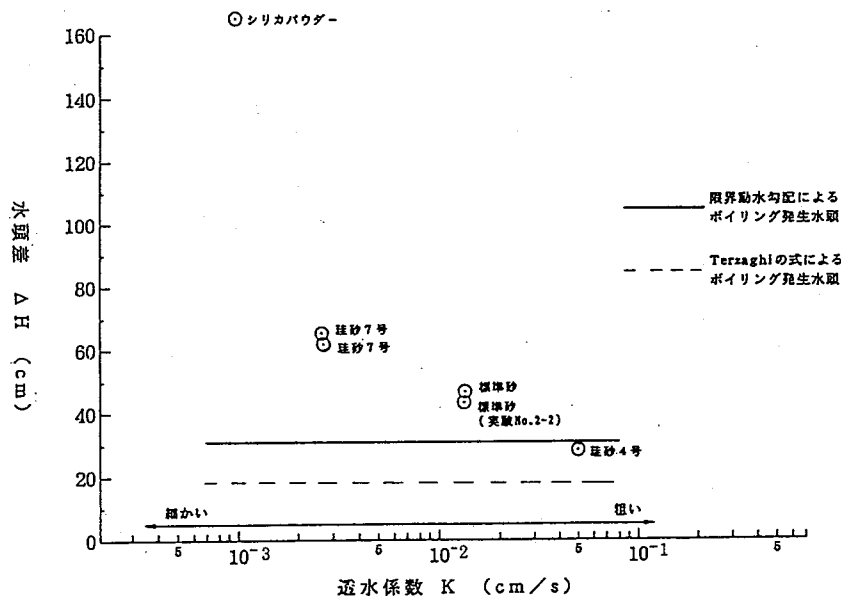


図2-4 難透水層の透水係数とボーリング発生時の水頭差  
(難透水層の層厚3cm, 透水層の相対密度 $Dr=70\%$ )

### 3. 数値解析の入力用物性値決定のための三軸圧縮試験

#### (1) 試験の目的

今回の室内試験のような低い拘束圧下にある砂質土の強度特性を、通常の試験機による拘束圧(最小で $0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度)で求めた値でそのまま適用できるか否かは未解明な問題である。そのため低拘束圧( $\sigma_3=0.02\sim 2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ )用の三軸圧縮試験機を試作し、入力用物性値を求めた。

#### (2) 試験結果

拘束圧7ケースの試験(CD試験)を実施した結果、低拘束圧下の内部摩擦角 $\phi$ が若干大きくなる傾向があるが、通常での拘束圧と大きな差異がないことが判った。

- 拘束圧 ..... $0.02, 0.04, 0.06, 0.1, 0.3, 1.0, 2.0$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
- 物性値 .....変形係数、初期接線勾配、破壊時内部摩擦角、初期間隙比  
圧縮指数、膨潤指数、透水係数

なお、三軸圧縮試験では求められない圧縮指数、膨潤指数は、低拘束圧での等方圧密試験から求めた。

### 4. 数値シミュレーション

#### (1) 浸透破壊現象のモデル化

止水壁の下をまわる浸透流と地盤の安定問題では、ある限度内の水頭差であれば止水壁付近の土砂は安定であるが、水頭差が次第に大きくなるとある時点でまず流量が急激に増大する。これは浸透流によって地盤が緩み、その結果、透水係数が大きくなるためである。続いて止水壁の掘削底面側で土砂が持ち上がり、土砂と水が止水壁の下をまわって吹き出し局所破壊が生じる。以上をフローで示すと図4-1のようになる。

(2) 解析の流れ

数値シミュレーションは、応力・変形を考慮した2次元の浸透流解析（FEM）により実験を模擬して次のように分けて、14ケース実施した。（図4-2）

- ① 初期応力解析（非連成解析；応力・変形みの解析）
- ② 浸透破壊解析（連成解析） 排水側水位低下および給水側水位上昇

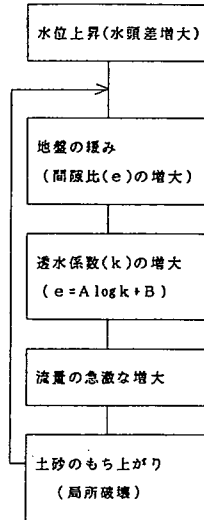


図4-1 浸透破壊のフロー

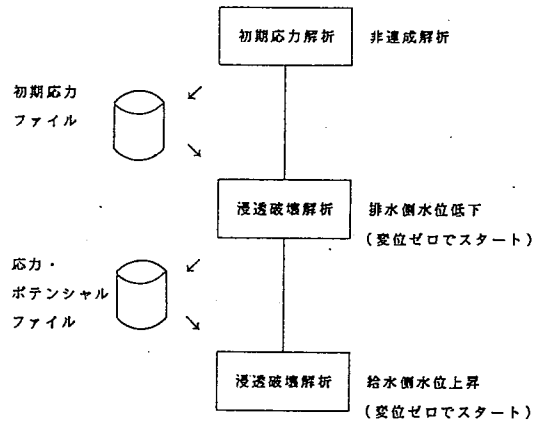


図4-2 解析方法

(3) 物性値および強度定数

解析は、Cam-Clay モデルの弾性域構成式としての非線形弾性で初期応力解析を行い、浸透破壊解析でも同一の構成式を採用した。（4-1式）

$$E = \frac{3(1+e)(1-2\nu)}{\kappa} \sigma_m \dots\dots\dots (4-1式)$$

ここに、

- E ; ヤング係数    e ; 初期間隙比
- ν ; ポアソン比    κ ; 膨潤指数
- σ<sub>m</sub> ; 平均主応力

また、破壊判定および（破壊）安全率の計算のために、次の強度定数が必要となる。

①粘着力（C）

②内部摩擦角（φ）

（破壊）安全率は、(σ, τ) 平面において { (σ<sub>1</sub> + σ<sub>3</sub>) / 2, 0.0 } から Mohr - Coulomb の破壊抱絡線に垂らした線の長さ と Mohr の応力円の半径との比で定義したものであり、この安全率が1未満になった場合を破壊とした。（図4-3）

(4) 初期条件および境界条件

ア. ポテンシャルの初期条件および境界条件

ポテンシャルの初期条件は図4-4のとおりであり、境界条件は、図4-5のようにまず排水側水位を低下させ、次に給水側水位を上昇させた。

イ. 変位の境界条件

図4-6に初期応力解析の変位の境界条件を示す。また、浸透破壊解析では止水壁付近を給水側で鉛直ローラー、排水側で完全固定とした。

(5) 荷重条件

初期応力解析では、荷重として物体力を考慮し水中重量により自重解析した。また、浸透破壊解析では、水位変化に伴い水の重量を荷重として作用させた。

$$SF = \frac{2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

ここに、

- SF : 局所安全係数
- C : 粘着力
- $\phi$  : 内部摩擦角
- $\sigma_1$  : 最大主応力
- $\sigma_3$  : 最小主応力

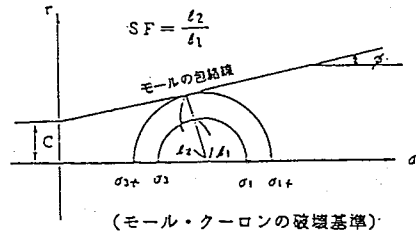


図4-3 破壊判定と局所安全係数

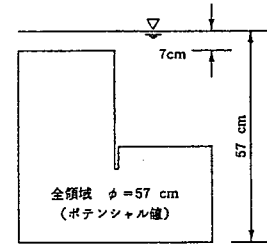
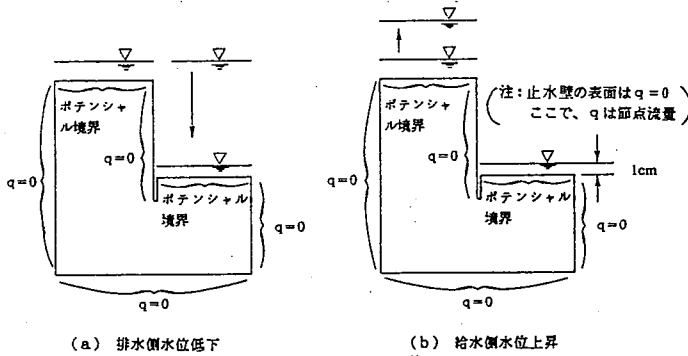


図4-4 ポテンシャルの初期条件



(a) 排水側水位低下

(b) 給水側水位上昇

図4-5 ポテンシャルの境界条件

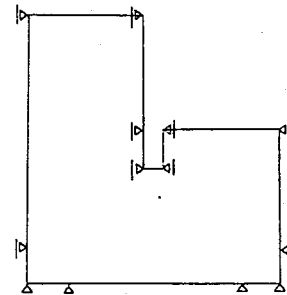


図4-6 初期応力解析の変位の境界条件

5. 解析結果

(1) 解析例

室内実験の均一層(透水層および難透水層とも珪砂4号)、相対密度  $D_r=70\%$  に対応する解析ケースCAL1の結果を例として示す。図5-1~5-2に給水側水位上昇の解析結果のうち、最終ステップ(水頭差=42cm)での安全率図(破壊領域図)および流速図(ポテンシャル分布を併記)を示す。図5-1の破壊領域は、安全率が1.0を下回った要素を示しており、止水壁先端部と止水壁付近の排水側に集中して存在し、止水壁付近の給水側の要素の安全率は大きくなっている。図5-2のポテンシャルは給水側領域の下端の鉛直座標を0.0 cmとした場合の全水頭である。

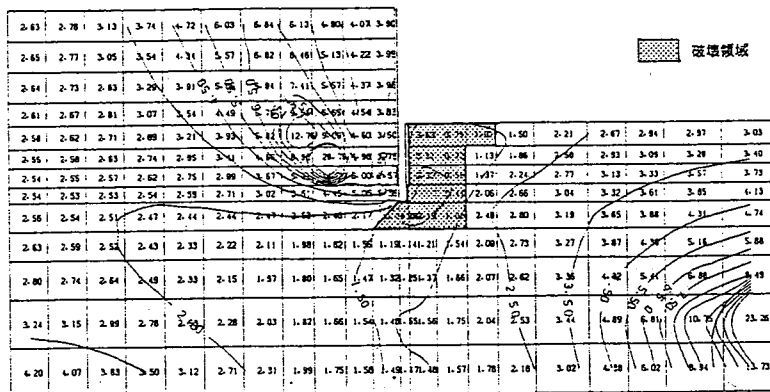


図5-1 安全率図(均一層、 $D_r=70\%$ )

給水側水位上昇時(3cmを7回) 給水側水位 78cm、排水側水位 36cm

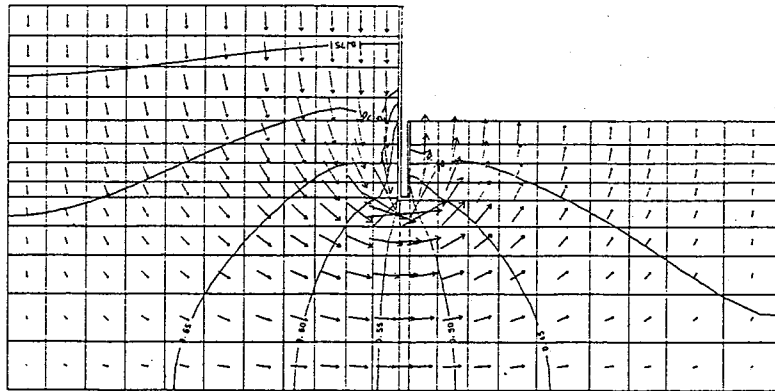


図5-2 流速図(均一層、 $Dr=70\%$ )

給水側水位上昇時(3cmを7回) 給水側水位 78cm、排水側水位 36cm

(2) ボイリング発生時の水頭差

解析のいずれのケースにおいても破壊は、まず最初に止水壁先端部で生じ、徐々に拡大して最終的には排水側地表面に達した。ボイリング発生をどの時点とするかは種々考えられるが、ここでは破壊領域が排水側地表面に達した時をボイリング発生として、実験結果と比較したのが表5-1である。表には図5-3に示すように止水壁から1番目および2番目の要素のボイリング発生時の水頭差を併記している。

表5-1 ボイリング発生時の水頭差一覧表  
(単位: cm)

難透水層	透水層の 相対密度	ボイリング発生時の水頭差		
		解析値①	解析値②	実験値
珪砂4号	70%	30 ~ 33	36 ~ 39	29, 42
	50%	27 ~ 30	33 ~ 36	29, 37
標準砂	70%	33 ~ 36	39 ~ 42	47, 44
	50%	30 ~ 33	36 ~ 39	41, 48
珪砂7号	70%	48 ~ 51	57 ~ 61	69, 73
	50%	45 ~ 48	54 ~ 57	62, 65
シリカパウダー	70%	75 ~ 78	96 ~ 99	165
	50%	72 ~ 75	87 ~ 87	126, 150

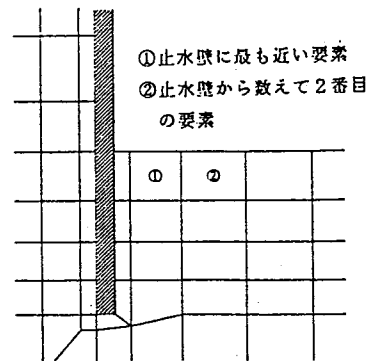


図5-3 止水壁近傍の要素

(3) 実験値と解析値の比較

透水層の相対密度が $Dr=70\%$ の解析結果を「難透水層の透水係数とボイリング発生時の水頭差」で整理し、実験結果に併記したのが図5-4である。実験と解析を比較すると、

- ① 均一層の場合は実験と解析は良く一致を示している。
- ② 難透水層が存在する場合は解析の方が小さな水頭差でボイリングが発生している。特に、難透水層の透水係数の値が小さいほどこの傾向が顕著である。
- ③ また、実験と解析のボイリング発生の定義が異なるので直接的な比較はできないが、難透水層の存在によるボイリング発生の抑止効果は両者ではっきりと確認できる。

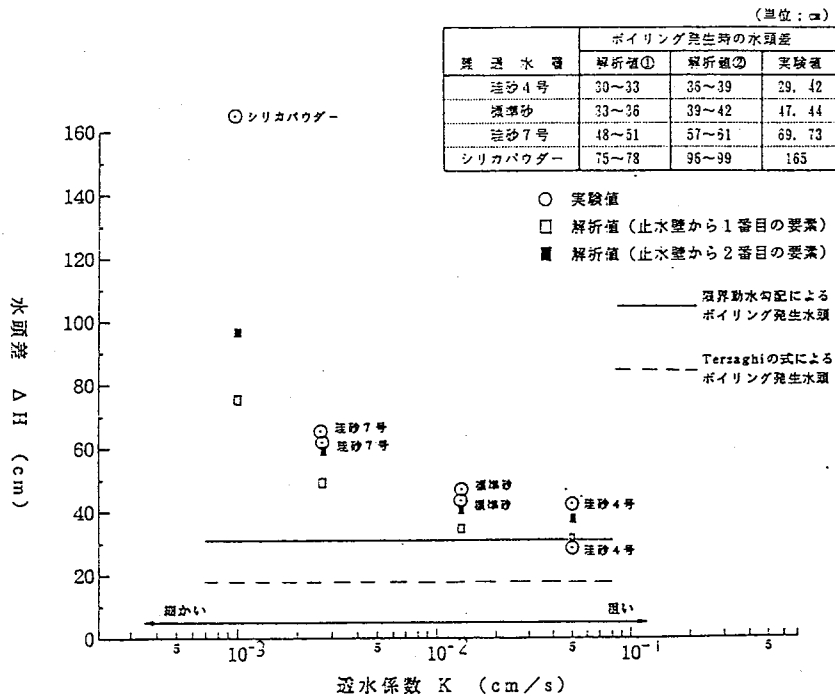


図5-4 難透水層の透水係数とボーリング発生時の水頭差  
(難透水層の層厚3cm、透水層の相対密度 $D_r=70\%$ )

(4) 結果の考察

ア. 均一層の場合の解析結果と実験値の差異

解析と実験は良く一致しており、均一層の場合は数値シミュレーションが実験を定性的に模擬できていると考えられる。しかしながら、実験と解析時の排水側の流出流量を比較した場合、実験時の流量が解析値の約6倍となっており、解析に用いた透水係数が実際の1/6倍であったことが明かとなった。

イ. 難透水層が存在する場合の解析結果と実験値の差異

解析ケースのCAL7(難透水層が珪砂7号、相対密度 $D_r=70\%$ )を例にとり、間隙水圧と水頭差のグラフ(図5-5~5-8)をみると、難透水層の存在により実験と解析の差異が大きくなっている。また実験では、水頭差の増加に間隙水圧が追従していない。このことは解析に比べ実験の方が難透水層と透水層の透水係数の比が大きいことを示唆している。この点を確認するため、解析ケースCAL7の条件で定常浸透流解析を実施した結果、難透水層の透水係数が約10倍で実験結果と一致した。

したがって解析での流量を実験値に近付けるためには、透水係数(k)を次のように変更する必要がある。

- ① 透水層のkを大きくする。
- ② 難透水層のkを小さくする。
- ③ 透水層のkを大きくして、難透水層のkを小さくする。

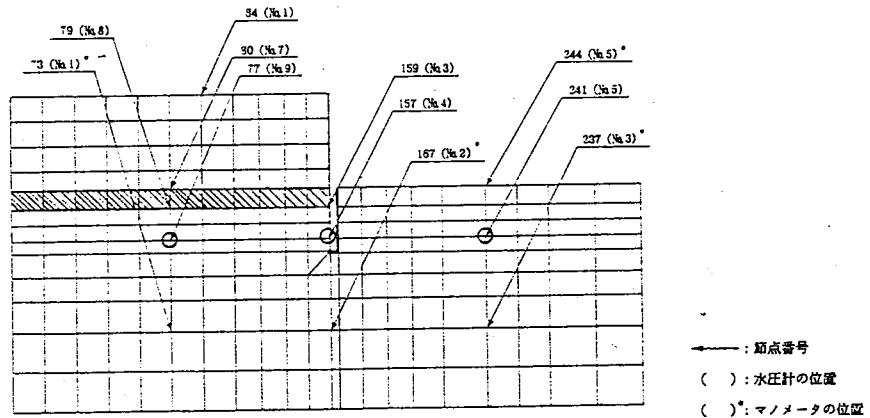


図5-5 実験における水圧観測点と節点番号図

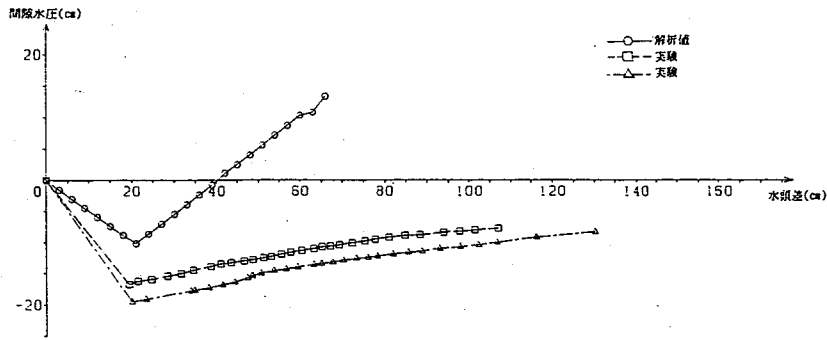


図5-6 間隙水圧～水頭差 (CAL 7 間隙水圧計NO.9 節点番号 77)

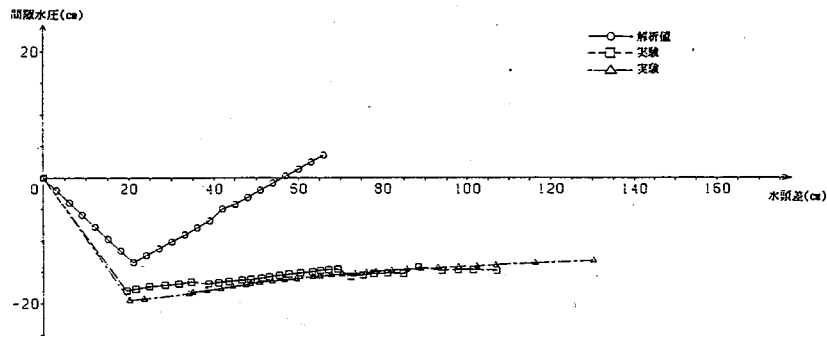


図5-7 間隙水圧～水頭差 (CAL 7 間隙水圧計NO.4 節点番号157)

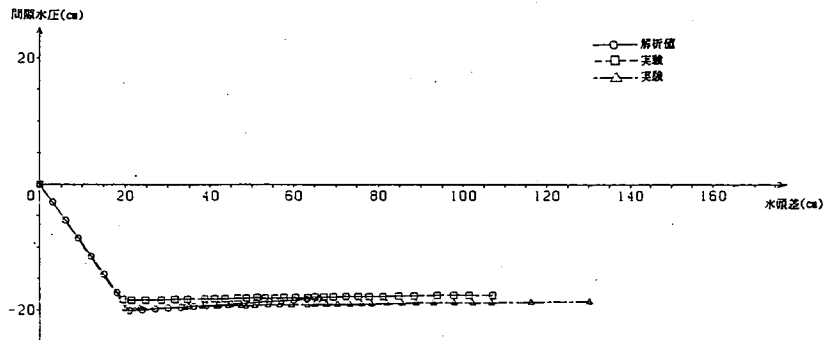


図5-8 間隙水圧～水頭差 (CAL 7 間隙水圧計NO.5 節点番号24)

## 6. あとがき

本研究により得られた知見を列挙すると、

① 応力・変形を考慮した浸透流解析(連成解析)により、実験結果をシミュレートするという当初の目的に対して、定性的には満足する結果が得られた。特に、難透水層の存在によるボイリングに対する抑止効果をはっきりと確認できた。

② ボイリング発生時の水頭差を実験と解析と比較すると、均一層の場合は良く一致したが、難透水層の透水係数が小さくなるほど、解析の方が小さい水頭差でボイリングが発生した。(計算としては安全側)

以上の知見から、今後の検討事項としては、

① 実験と解析では流量にかなりの差があるため、解析に用いた透水係数をさらに検討する必要がある。特に、難透水層が存在する場合は、間隙水圧と水頭差のグラフにおいて実験と解析で差異があるため、この原因を追及する必要がある。

研究を進めるに当たり、実験および数値シミュレーションの手法、結果の評価等に関しては、名古屋大学・浅岡教授ならびに電中研・我孫子研究所、野崎、中川主査研究員にご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。