

流線網の求め方の実例とそれらの問題点

さい とう じ ろう
齊 藤 二 郎*
ふじ わら とし 夫**
藤 原 紀 夫**

1. ま え が き

締切り工事・地下掘削工事などの土構造物工事においては、必ず浸透流の問題が生じる。浸透流とは“自由水の動き”の意であり、これの検討とは具体的には、流出量・ボーリング・止水壁の根入れ・揚圧力・集水位置の選定などを意味する。このためには、まず流線網を描くことが必要となる。

流線網の求め方としては、試行スケッチ (Trial and error) 法・砂モデル実験・電気アナログ法・リラクゼーション (Relaxation) 法・有限要素法・ヘルシュウ (Hele-Shaw) モデルなどがある。以下に、これらの方法で求めた流線網の実例を示しながら、その得失についてもふれてみたいと思う。

一般に、流線網といえはそうであるが、これから示す実例においても、流れは定常状態の層流を仮定している。したがって、流線網は揚水開始直後の非定常状態や、地盤がレキ層などで乱流を生じる場合のものではないことに注意してほしい。

2. 試行スケッチ法

試行スケッチ法とはホルヒハイマー (Forchheimer) の図解法とも呼ばれ、まず与えられた境界条件をもとに、初めはごく大ざっぱなスケッチをして、試行法によって修正を加えてゆく方法である。この具体的な手順については他の文献¹⁾などにも詳しく述べられているので、ここでは省略する。

図-1 は実際に施工された二重締切り工事のために、試行スケッチ法で求められた流線網である。この流線網を用いて、流出量・ボーリングなどの検討を行なっている。下流側の水位が地表面下 7.00 m の所にあるのはウェルポイントによって、この位置まで地下水位を下げることの意味している。また、締切り壁体内部の水流は、最初から無視して考えている。流線と等ポテンシャルラインが直交しなかったり、境界条件の取り方が不明確であったりする不備も見られる。本図の例で理解されるように、試行スケッチ

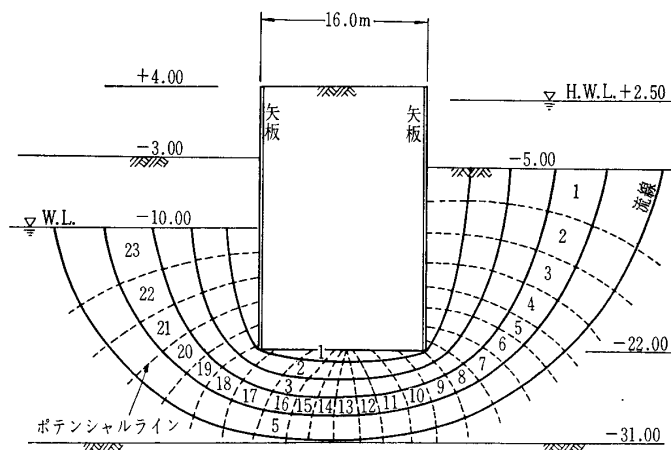


図-1 試行スケッチ法による流線網

法による流線網は手軽に描ける利点を有するが、その反面、解析者の個人差が大きくでる。しかし、概略の検討には十分その役目を果たすことができる。

3. 砂モデル実験

砂モデル実験で流線網を求めるには、まず境界条件を満足するような形に砂を詰め、これに浸透水流を生ぜしめる。着色水を流して流線を、マノメーター (水位管) で水頭値を測定する。これらによって、流線網を描くことができる。

写真-1, 2, 3 に二重締切り矢板壁の流線の写真を示す。これらは締切り水深を 15 cm, 矢板の根入れを 7.5 cm と

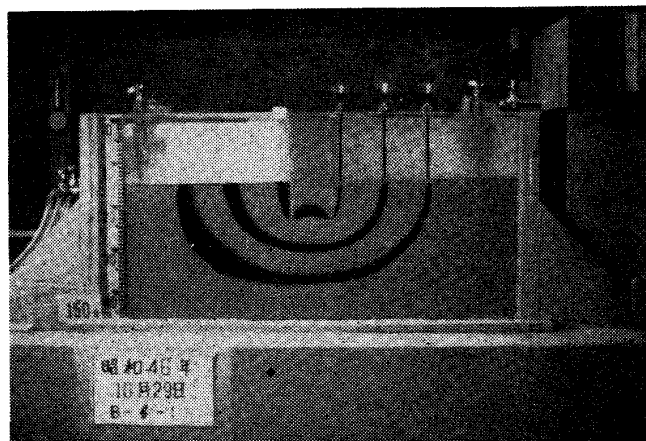


写真-1 砂モデル実験による流線 (幅 9 cm)

* 大林組技術研究所次長

** 大林組技術研究所研究員

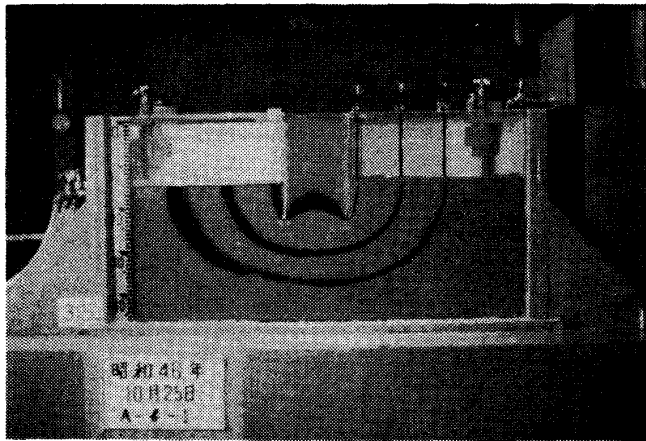


写真-2 砂モデル実験による流線 (幅 15 cm)

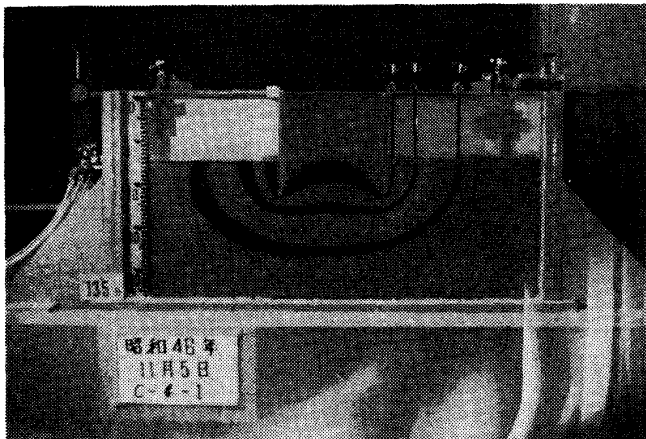


写真-3 砂モデル実験による流線 (幅 24 cm)

一定に保ち、締切り幅をそれぞれ 9 cm, 15 cm, 24 cm と変化させた場合のものである。実験そうは前面を透明アクリル板で作った木製の箱で、その内のり寸法は深さ 48 cm, 幅 100 cm, 奥行き 40 cm である。止水矢板の模型としてはブリキ板 (厚さ 0.8mm) を、地盤は標準砂を用い、その透水係数は 1.7×10^{-2} cm/sec であった。流線は矢板の根入れ先端部分に集まり、壁体内では扇状に広がり、上に凸なきれいな曲線となってみられる。

この方法の利点は、モデルを比較的容易に造ることがで

き、また考え方も比較的簡単であることである。一方、欠点は多層地盤を作ることが困難であること、水面を地中にとる場合などには毛管水帯の影響が大きくでることなどである。

4. 電気アナログ法

定常状態の地下水の流れと導電体を流れる電気の流れは、同じラプラス (Laplace) の方程式で示される。電気アナログ法とは、水頭・水頭コウ配・透水係数をそれぞれ、電圧・電位コウ配・電気伝導度に対応させて解く方法である。ラプラスの方程式は数学的に共役な調和関数 $\phi(x, y)$ および $\psi(x, y)$ が存在し、 $\phi(x, y) = \text{const}$ の曲線は $\psi(x, y) = \text{const}$ の曲線の直交軌跡である。したがって、等ポテンシ

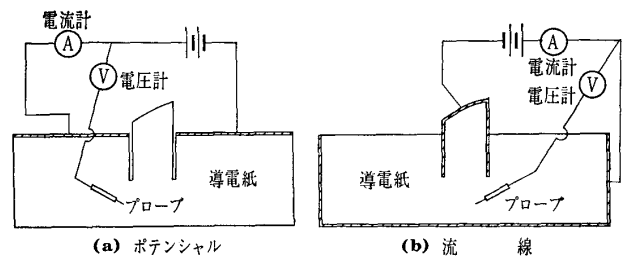


図-2 電気アナログ法の結線図



写真-4 電気アナログ法の実験状況

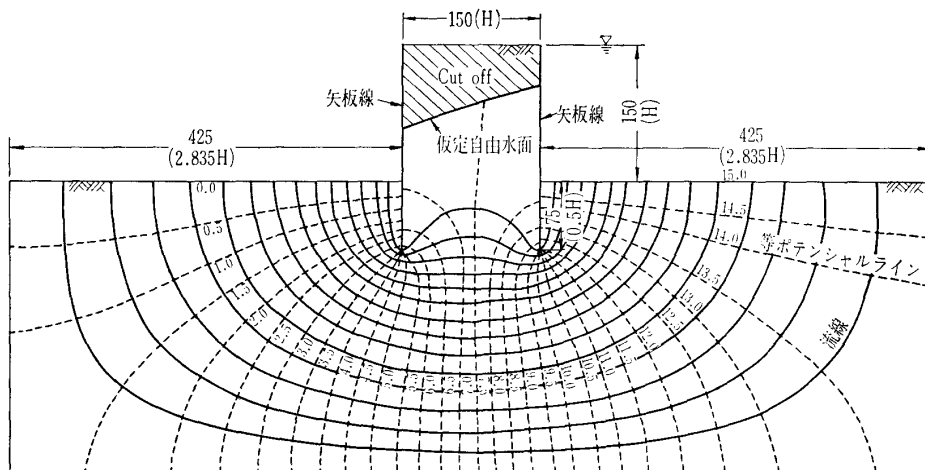


図-3 電気アナログ法による流線網 (その1)

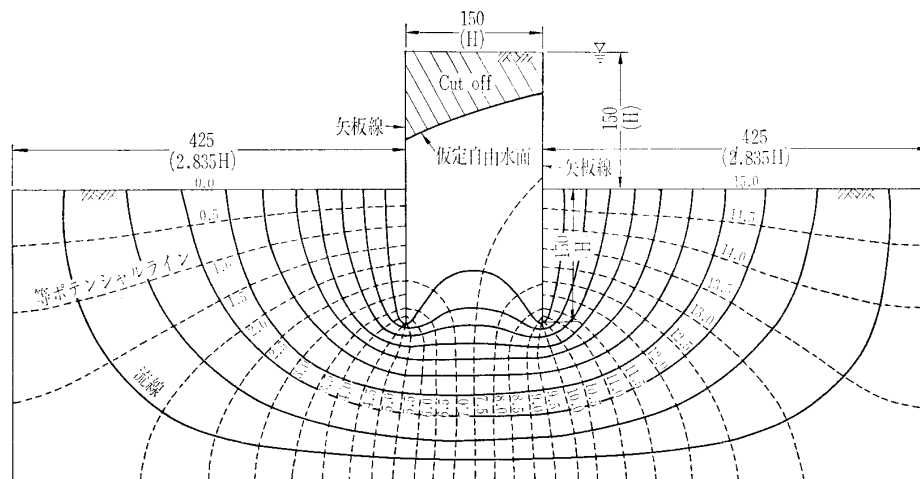


図-4 電気アナログ法による流線網 (その2)

ャルラインを求める境界条件を全く逆にして結線すれば、流線が求まる。図-2に二重締切り矢板の等ポテンシャルラインと流線を求める結線図を示す。写真-4に実験中の状況を示す。

図-3, 4は電気アナログ法によって求めた二重締切り矢板の流線網である。締切り壁内部の自由水面は、最初少し上方に不透水面として仮定し、この面で測定されるポテンシャルが位置ポテンシャルになるように切り取ってゆく。

一般に、二次元問題の解析には、導電体として導電紙を、三次元問題の場合には、寒天を用いることが多い。多層地盤を作るには、導電紙の場合には細孔をあけ、寒天の場合には塩分濃度を変えるなどすれば可能である。

電気アナログ法は比較的簡便で精度の良い方法であるが、この項の最初に述べたように、定常状態しか解析できない欠点がある。

5. リラクゼーション法

リラクゼーション法とは考える領域を適当な間隔の格子

に切り、これらの格子点における水頭値を、ラプラスの方程式を満足するある関係式によって解くものである。まず、境界上に既知の水頭値を与え、その他の格子点に第一次近似値を与える。つぎに、すべての格子点に対し、ラプラスの方程式を満足する格子点水頭間の関係式によって、新しい水頭を計算する。これを繰返すことによりよりよい近似値にまで計算を進める。もちろん、流線も電気アナログ法の項で述べたと同じ考え方で求めることができる。

図-5に解析領域の格子分割図を示す。この図をもとに電算プログラムを組んだ。図-6, 7に一重締切りと二重締切りの解析結果を示す。二重締切りの壁体内部の自由水面は水平な不透水層を仮定し、この不透水層での水頭値が位置ポテンシャルに等しくなるようにする。通常は、この不透水層を上下流の水頭差の中央にもってくれば十分である。試みに、この不透水層の位置を種々変化した場合の解析も行なってみたが、これによる流線網全体に与える影響はごくわずかであった。

この解析方法では、境界条件・地層などが大きく変わる

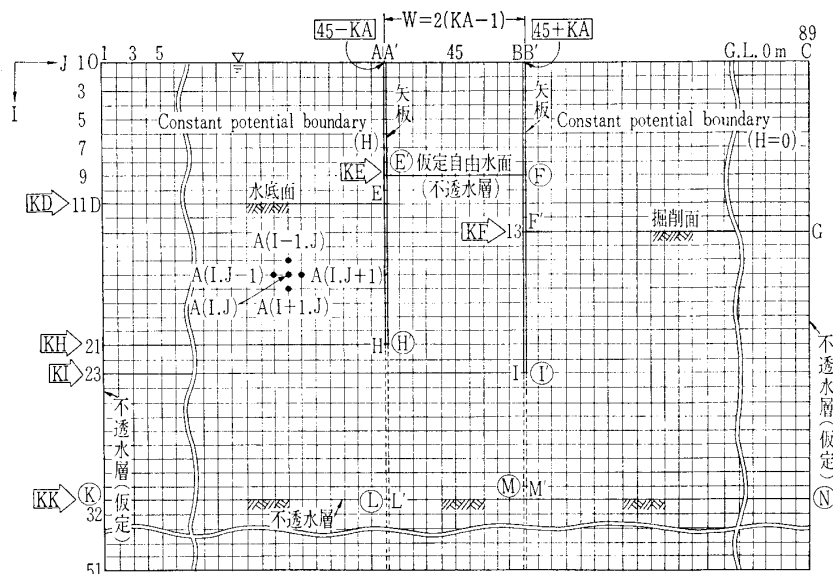


図-5 リラクゼーション法の格子分割図

資料-207

場合には別のプログラムを組み直す必要があるのが欠点である。

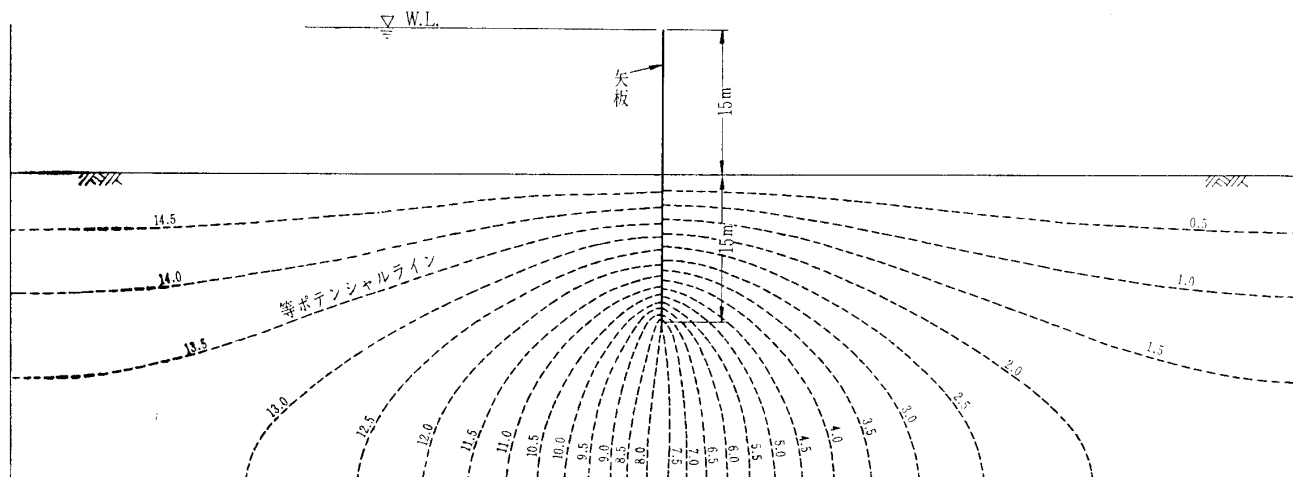


図-6 リラクゼーション法による等ポテンシャルライン（一重締切り）

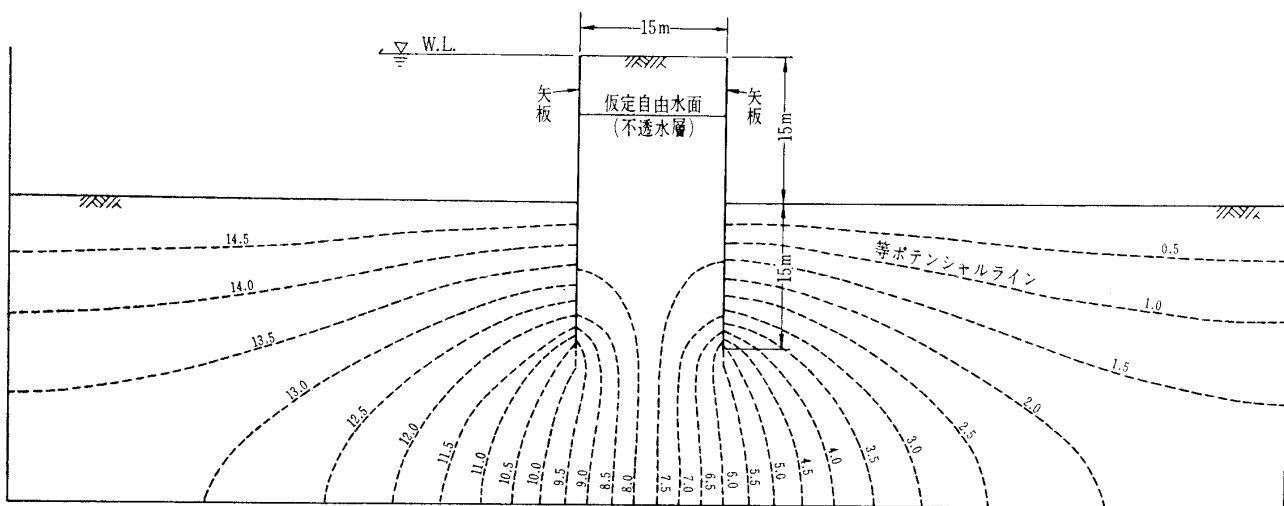


図-7 リラクゼーション法による等ポテンシャルライン（二重締切り）

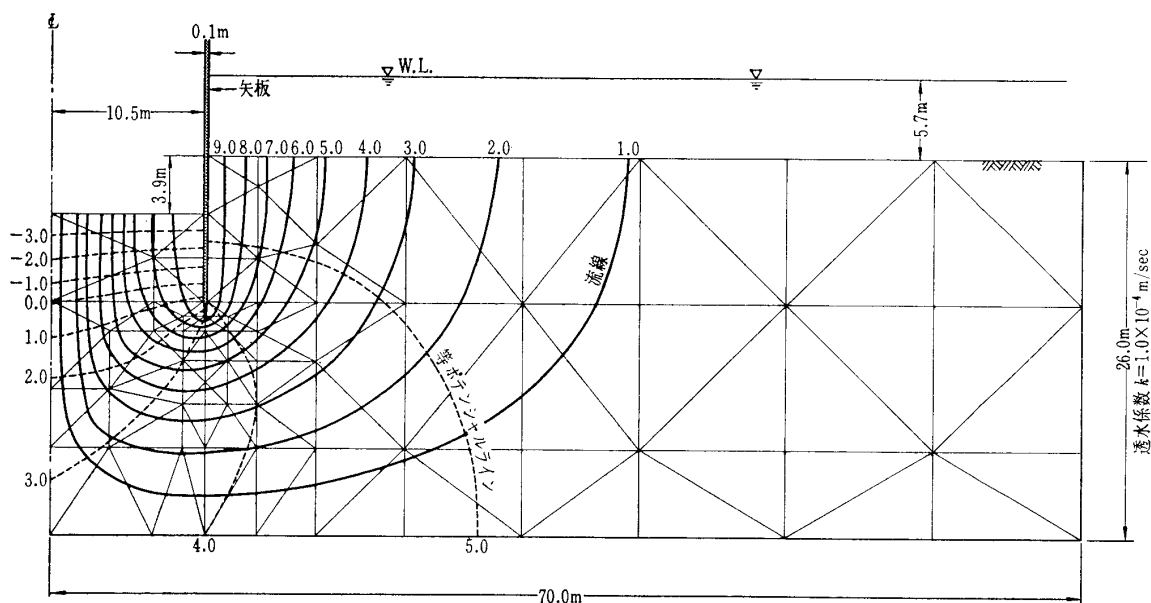


図-8 有限要素法による流線網（円形締切り）

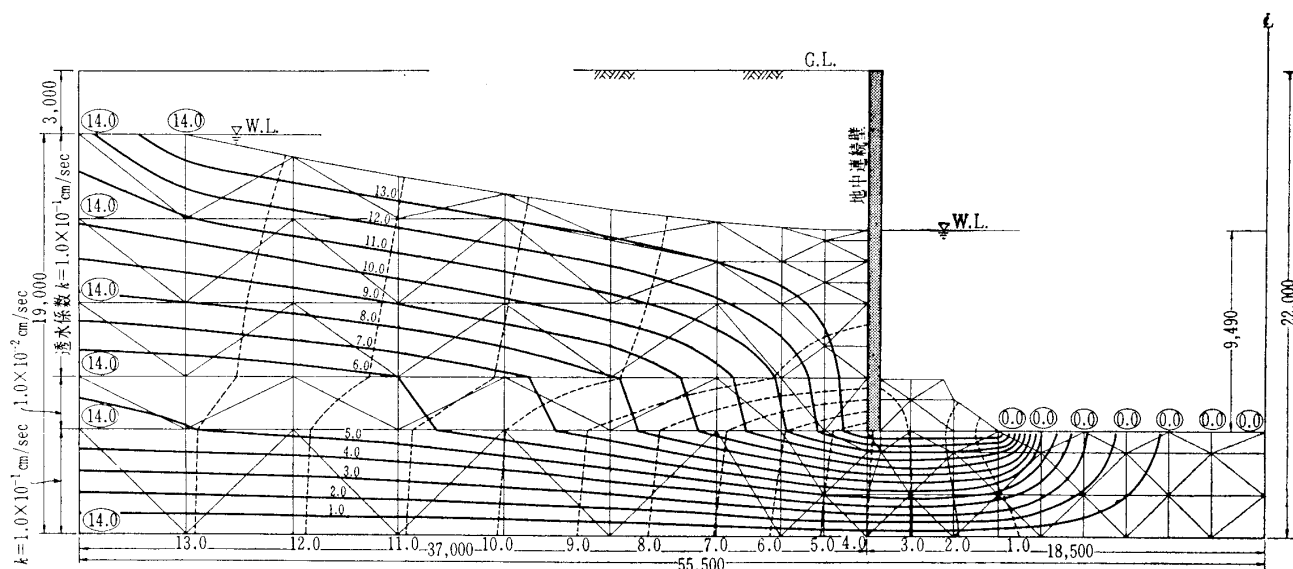


図-9 有限要素法による流線網 (地下街掘削)

6. 有限要素法

浸透流・熱流などの問題はいずれも、準調和微分方程式を支配方程式とする物理問題である。上述したラプラスの方程式は準調和微分方程式の特別な場合である。

有限要素法によって、浸透流・熱流などの問題を解析する場合には、弾性問題を解く場合と異なって、ある汎関数を、ある領域内で最小にする問題として公式化する。これらの基礎理論の概要と電算プログラムの組立て手順については、既に発表^{2), 3)} してあるので、ここでは解析例についてのみ述べる。

図-8に円形締切り矢板壁(直径 21.0 m, 矢板根入れ 10.9 m, 締切り水深 5.7 m)の流線網を示す。もちろん、軸対称問題として解析している。

図-9は地下街(幅 40 m, 深さ 17 m)の掘削完了時点の流線網である。解析領域は左右の対称性を考慮して、左半分の領域を考えた。境界条件は図中に示すとおりであるが、左端の境界は不透水層でなく、静水圧分布すると考えている。また、自由水面(水位低下曲線)は5回の繰返し計算によって求めた。

解析例で理解されるように、有限要素法は解析領域が複雑な場合や異方・異質地盤、軸対称問題に対してなんら特別の考慮を必要とせず、同じプログラムで解析することができる利点がある。また、筆者の開発したプログラムを用いれば、流線網をプロッターで自動図化させることができる。

7. む す び

実際の浸透流を検討する場合には、解析以前の問題とし

て、解析条件の決定に悩まされる。すなわち、透水係数の決定、地盤のモデル化、地下水位の位置、潮汐などによる水位変動、二次元解析でよいのか、などである。とくに、流出量の算定においては、透水係数の推定精度がそのまま流出量の算定に影響してくる。われわれの経験したところでは、揚水試験と現場近くの工事例からの推定が、一番確かな透水係数を与えてくれるようである。

流線網が解析的に正確に求まったとしても、必ずしも現実の状態を示しているとは限らない。また、流線網が現実の状態を正確に示して求まったとしても、これを用いて、流出量・ボーリング・根入れ・揚圧力などの検討をするのも、熟慮を要することがらである。流出量については、砂モデル実験では測定した流出量から、電気アナログ法では電流量から、有限要素法では計算される流速から、直接算出することもできる。

最後に、ここに示した解析例のある部分は、日大理工学部最上・酒井両先生のご指導を受けていた卒論学生、関口栄悟・高久静夫・関山健一君の卒業研究として実施してくれたものである。また、電算プログラムの開発にあたっては、当社(大林組)機械計算室の太田・徳永両氏からご援助いただいた。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宇野尚雄：土質工学における図解法の使い方 5. 流線網の図解法，土と基礎，Vol. 21, No. 2, 1973
- 2) 斉藤・藤原：有限要素法による浸透流・熱流などの解析(定常・非定常)，第8回土質工学研究発表会，1973
- 3) 斉藤・藤原：有限要素法による浸透流・熱流などの解析(定常・非定常)，大林組技術研究所報，No. 7, 1973
- 4) 斉藤・藤原：二重締切り矢板壁の浸透流について，第7回土質工学研究発表会，1972

(原稿受理 1973.5.12)