

九州大学工学部 正会員 樽木 武
九州大学工学部 学生員 楊 勲 得
九州大学工学部 学生員 〇徳 好 慎 一

1. まえがき. トンネル湧水問題は、従来、有限要素法あるいは環元有限要素法による二次元解析が行なわれてきた。しかし、実際のトンネル地山では三次元湧水状態にあり、二次元解だけでは、十分説明できない性質を示すものと推定される。そこで、横 180 cm 、縦 100 cm 、高さ 60 cm の実験装置を造り、砂中にトンネル模型を作成して、三次元トンネル湧水実験を行うとともに、有限要素法による解析値を求め、それらと従来の二次元解及び実験値とを比較検討する中から、三次元湧水効果を明らかにするものである。

2. 解析法概説. 三次元湧水問題の基礎式は、周知の如く次式で与えられる。すなわち、

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \rho \omega = 0$$

ここに、 $H = P/\rho\omega + Z$ (水頭)、 P ; 圧力、 Z ; 基準面からの高さ、 ω ; 流体の単位体積重量

k_x, k_y, k_z ; x, y, z 各方向の透水係数

上記基礎式から有限要素法による定式化を行って、本題の解析を行ったが、その詳細については文献¹⁾に述べられているので、ここでは省略する。また計算にあたっては、四面体要素を単位要素とし、六面体または、五面体をブロックとした自動分割手法を導入したが、基本ブロックは、二種類の切り方を考え各々の計算値を平均してブロックの浸透性マトリックスとした。また浸潤面の追跡は、著者等が二次元湧水問題において開発した類似放物線法²⁾を活用した。

3. 実験概要. 実験装置は図-1に示すとおりである。すなわち、トンネルを作りその直径を 10 cm とし、周囲は 0.6 mm の金網で被い、トンネル周辺の砂地山は、三層に分けて詰め、各層毎にバイブレーターをかけたのち、水締めを行った。底板には、計 31 個のピエゾメーターを配した。トンネルの下部には、蛇口を設け、その部で、流量も測定できるようにになっている。また砂地山と水槽との間は、地山の崩壊を防ぐ為に、 0.6 mm の金網を張った。実験では、トンネルの長さ、 20 cm 、 40 cm 、地山の幅 80 cm 、 120 cm および地山の高さを 50 cm 等とすること4ケースを考え、各々の水位を 21 cm 、 31 cm 、 40 cm 、 50 cm 、 55 cm と変化させて行った。透水試験の結果、砂の透水係数は、 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度であった。またデータの整理に際しては、ほぼ定常状態に達したとみなされる15分から25分までの間における3回の測定結果を平均して観測値とした。

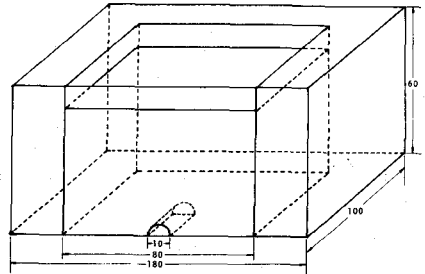


図-1

4. 解析結果. 解析は、トンネルの下部が直接不透層でトンネルの直径が 20 cm のモデルに対して行ない、地山を右図の如く、 Y 方向に $IY=1$ --- 5 と4分割し、 X 方向に $IX=1$ --- 8 と7分割した。ここでは、主に Y 断面についての三次元自由水面、湧水点と

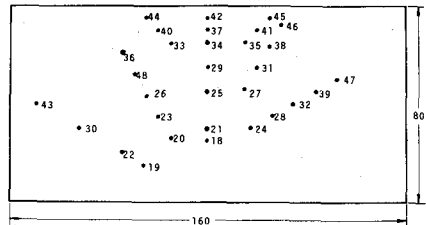
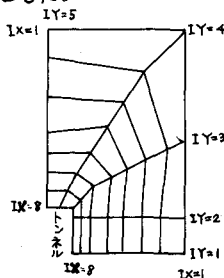


図-2

二次元解のそれらとを比較するものである。まず解析上の自由水面の収斂状況等を示そう。すなわち、各断面の自由水面に關しては、 $IY=1$ 断面が最も低く、 $IY=2, 3$ 断面で高くなり、 $IY=4, 5$ 断面と再び低くなるが、図-3はこれらのうち、 $IY=1$ 断面の自由水面形を描いたものである。自由水面形は、最初の仮定から、1回目、2回目---7回目(最終)について、プロットされているが、3回目までの計算でほとんど収束していることがわかるであろう。次に、 $IY=4$ の断面に(図-4)についての三次元解の自由水面とCasagrandeの二次元解とを比較したが、三次元の自由水面が二次元に比較して上昇していることがわかるであろう。特に、湧出点およびその近傍において両者の差異が大きい。湧出点は、三次元の場合二次元解のそれの3倍にも上昇している。 IY 各断面間で比較すれば、トンネル切端前面の自由水面が、側面より高くあらわれ、また、切端および側面の合流領域で、最も高いものとなるが、なお、側面において $IY=1$ 断面では、ほぼ三次元解と二次元解は一致する。(図-5)

5. 実験結果および考察

まず、三次元解析解の妥当性を吟味するため、トンネルの長さが20cm、地山の幅が80cmの場合の実験結果と三次元解を対比すれば表1のとおりである。すなわち、ポテンシャルについて、各ピエゾメーターによる測定値とこれに対応する計算値とを比較すれば、トンネル近傍での両者の差異は、15%程度であり、さらに上流側の点では、4~8%であった。また、湧出量に關しては、計算値が2995%であるのに対し、実験値は3345%をえた。両者の差異は約10%である。計算上のモデル分割の粗さおよび砂モデル実験上の精度を考えると、これらの差異は、納得のいくものであり、三次元解析解の妥当性を十分認めることができる。つぎにトンネルの長さとし地山の幅の組み合わせでえられる4ケースに關して各々の場合の水位を5とおり変化させたときの流量測定値を示せば表2のとおりである。トンネルの長さおよび地山の幅を固定し、それぞれのケース毎に、固定境界水深 H_0 を21cmより順次増大すれば、流量は当然のことながら増加するが、その最大増大率を与える境界水深、ケース1、3では $H_0=31$ cmと40cm、またケース2、4では $H_0=40$ cmと50cmの間にあることがわかる。おそらく最大増大率は、湧水の湧出線状態と非湧出線状態の境目近傍にあるものと解釈でき、このことを考え合わせると上述の結果は、それぞれのケースにおける湧水の二状態の分岐点を与える水深に關して示唆するものであろう。

参考文献

- 1) O.C ツィエンキーヴィッツ : マトリックス有限要素法 培風館, 1972, pp.172~173.
- 2) 橋本武, 楊 勳得, 松隈 宣明: 不圧流れの湧出と推定法 九サ大工学集報 第49巻1号, 1976.

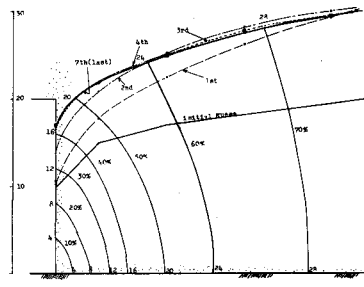


図 3. 3次元解析による自由水面の収斂状況($IY=1$ 断面)

図-3

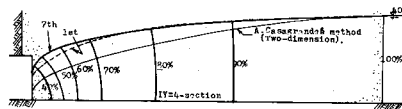


図-4

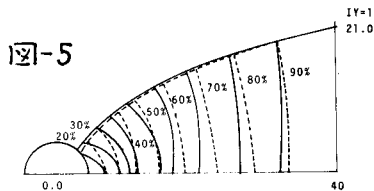


図-5

項目	(1)実験値	(2)計算値	(1)-(2), %
No. 27	151.8	181.3	16.3
28	156.0	185.6	15.9
29	160.0	190.8	15.7
31	178.2	193.8	8.0
34	184.2	200.3	8.0
38	192.3	201.2	4.8

ケース	トンネルの長さ H=21cm	地山の幅 B=31cm	湧出量 Q (cm³/min)
1	20	80	3345
2	20	120	1050
3	40	80	3920
4	40	120	1980

表1および表2