

III-271 地下水の影響を考慮したトンネルの安定解析

佐藤工業^(株) 正会員 中村 創、秋山伸一、篠川俊夫、山本松生

1. はじめに

東京をはじめとする大都市では地下構造物の建設地点が深くなりつつある。大都市の地盤は地下水を多量に含んでいることが多いため、このような構造物を設計する場合、建設に伴う地下水挙動の変化や構造物に及ぼす地下水の影響といった地下水に関わる問題が無視しえなくなっている。こうした背景から、ここではトンネルなどの地下空洞を対象として地下水の影響を取り入れた安定解析法¹⁾を示す。さらに止水注入による地下水挙動の変化とトンネル安定性の変化について解析した結果について述べる。

2. 解析手法

ここに示す解析手法はFEMによって定式化された地盤の浸透流解析および応力・変形解析から成り立っている。浸透流解析²⁾では、地盤の飽和および不飽和領域を対象としており、定常状態の地下水流れを扱う。この解析から地下水位の低下量や間隙水圧の分布などが求められる。一方、応力・変形解析では、浸透流解析から得られる間隙水圧を外力として扱うことで地盤の変形や有効応力などが求められる。

解析の手順は、通常のトンネル掘削解析と同様に、掘削前と掘削後の状態を分けて解析を行う。まず、掘削前に地下水の流れがなければ静水圧を考慮した初期応力解析を行う。続いて掘削後は空洞の壁面に沿って有効応力と間隙水圧が解放されるとともに、地下水が空洞に向かって流れ込むことから、浸透流解析およびこの結果を用いた応力・変形解析を行う。

3. 解析モデルと結果

地下水位の低下を抑制するための方法のひとつに止水注入がある。ここではトンネルの周囲に注入域を設けた時の解析を行い、止水注入によって地下水の流れやトンネルの安定性がどのように変化するかを調べる。解析の対象は図1に示すように一様地盤の地下50mに位置する半径8mの円形トンネルである。解析に用いる諸定数を表1に示す。なお、トンネルの掘削前には地下水面は地表面上にあるものとする。解析では注入域の厚さを3m, 5m, 7m、またヤング係数を500kgf/cm², 1000kgf/cm², 2000kgf/cm²と変えて行った。

まず、図2に浸透流解析から求められた地下水位を示す。注入域の厚さが3mの場合、地下水位は8.9m低下するのに対し、厚さが7mになると低下量は5.1mと4割程度減少することがわかる。一方、厚さが5mと7mの場合を比較すると低下量の間には大きな差は見られない。したがって地下水位低下量は注入域の厚さが増すにつれて一定量に収束するものと考えられる。

次に、浸透流解析から求められたトンネル周辺の間隙水圧の分布を図3に示す。間隙水圧は注入域の外側で静水圧に近い分布を示す。

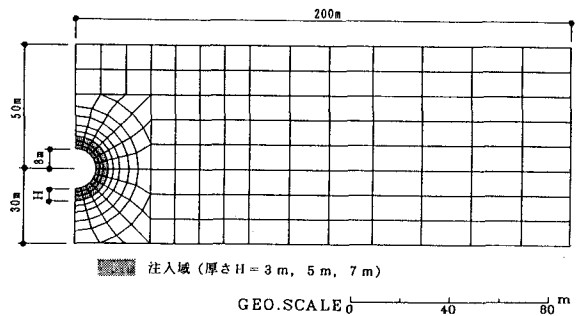


図1 解析モデル

表1 物性値

	地 盤	注 入 域
飽和単位体積重量(gf/cm ³)		1.9
間隙比		0.9
自然含水比(%)		25
ポアソン比		0.35
粘着力(kgf/cm ²)		0
内部摩擦角(°)		35
ヤング係数(kgf/cm ²)	500	500, 1000, 2000
透水系数(cm/sec)	1×10 ⁻³	1×10 ⁻⁵

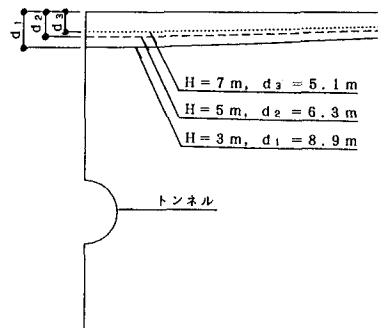


図2 地下水位低下量

一方、注入域の内部で間隙水圧は同心円上に分布し、しかも外側の地盤と比べて急激に変化する。また、このような注入域内部の間隙水圧の変化は、注入域が薄いと急激であり厚さが増すにつれて次第に緩やかになる様子がわかる。これらのことから、有効応力はトンネル周辺に注入域付近で大きく変化すると考えられる。

図4には応力・変形解析で求められた応力からMohr-Coulombの降伏条件に基づいて算出したトンネル周辺の安全率を示す。まず注入域のヤング係数が地盤と同じ 500kgf/cm^2 の場合を見ると、安全率が1.0以下の降伏領域は注入域の厚さに拘らず3ケースとも注入域の外側に同じ程度に広がっている。一方、注入域内部に着目すると、注入域の厚さが増すほど安全率も向上することがわかる。続いて注入域のヤング係数が 1000kgf/cm^2 、 2000kgf/cm^2 の場合を見て行くと降伏領域は次第に減少し注入域に集まることわかる。これは注入域の剛性が増加することにより周辺地盤の変形が拘束される結果、安全率が向上するためである。また注入域のヤング係数が 500kgf/cm^2 から 1000kgf/cm^2 へ変化する時には降伏領域は大きく減少して、 1000kgf/cm^2 から 2000kgf/cm^2 へ変化する時には大きな減少を示さない。すなわち、降伏領域の減少は注入域の剛性が増加するにつれて次第に収束するものと考えられる。止水注入の設計では降伏領域を取り囲むように注入域を設定する³⁾ことが望まれるが、こうした考え方に基づく、注入域では厚さが7mの場合には 1000kgf/cm^2 、また5mの場合には 2000kgf/cm^2 のヤング係数が必要である。

4. おわりに

止水注入の設計は軸対称の円筒モデル⁴⁾などによる理論解析を用いて行われることもあるが、地盤と構造物をどのようにモデル化するかが問題になる場合がある。一方、ここで示した解析手法では地盤と構造物を忠実にモデル化できるため理論解析と比べるとより定量的な解析が可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 秋山・中村他:地下水を考慮した大深度地下空洞の安定解析, 第1回トンネル工学研究発表会, 153-158, 1991
- 2) 赤井・大西・西垣:有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文報告集, 264, 87-96, 1977
- 3) 島田・佐藤・多久:最先端技術の薬液注入工法, 理工図書, 1989
- 4) 足立・田村:高圧湧水下のトンネル工における水抜工の効果と注入域の適正規模, 土木学会論文報告集, 280, 87-98, 1978

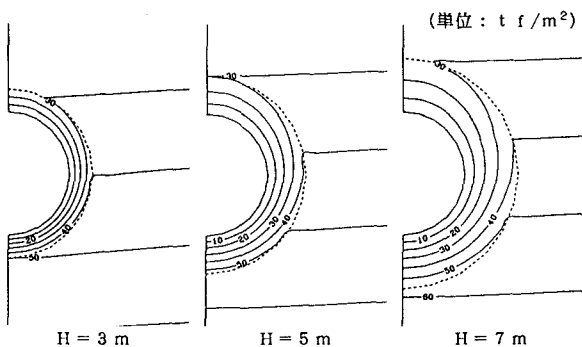


図3 トンネル周辺の間隙水圧

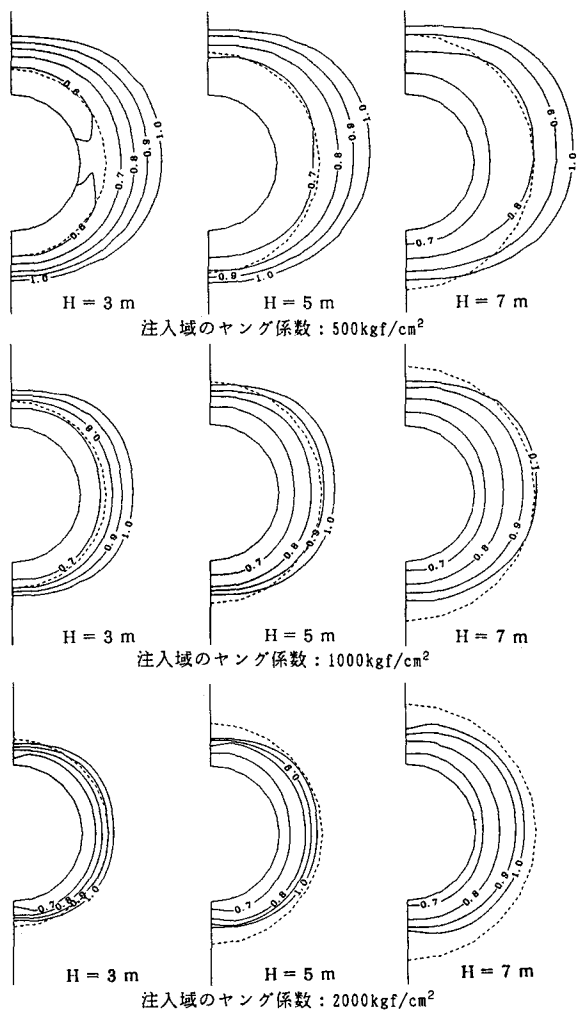


図4 トンネル周辺の安全率