

(12) 軟岩中に掘削された立坑における周辺岩盤内の間隙水圧変化に対する一考察

大成建設(株) ○ 大 津 宏 康
亀 村 勝 美
下 茂 道 人

1. はじめに

近年、NATM工法の普及とともに、空洞掘削時の岩盤挙動について原位置計測、数値解析の両面から様々なアプローチが試みられている。その結果、空洞完成時の安定性は、切羽近傍の岩盤挙動に支配されていることが明らかとなった。切羽周辺岩盤の力学的挙動は、切羽進行という3次元効果を無視しては考えられず、これを考慮した解析手法^{1), 2)}により数値シミュレーションが試みられている。

一方、空洞周辺岩盤の水理学的挙動については、空洞の安定性に直接影響しないこともあって、十分な検討が成されていない。しかしながら、水の影響を受けやすい岩盤中の空洞の掘削時安定性や、長期安定性を検討するに当たっては、掘削に伴う水理学的挙動を把握することが必要である。

本論文では、第三紀泥岩を対象とした原位置試験³⁾において得られた立坑掘削時の地下水挙動に関するデータについて検討を加えるとともに、掘削の影響を考慮した水理学的挙動の解析手法について述べる。

2. 実験概要

実験施設の概要を、図-1に示す。計測用横坑は、地表面下約80m（地下水位下約40m）の深度にある。立坑（ $\phi = 2\text{m}$ ）掘削に先立ち、所定の位置に22個の間隙水圧計（使用範囲0～10kgf/cm²、精度±1%以下）を埋設し立坑掘削時の間隙水圧変動を計測した。

計測坑からのチェックボーリングおよび掘削時の観察から、空洞周辺の岩盤は卓越した亀裂のないほぼ均質な泥岩（新第三紀、C₁級）からなることが確認された。岩石の平均的な物性は、 $G_s = 2.51$ 、 $e = 1.25$ 、 $V_p = 1.8 \sim 2.1\text{ km/s}$ であり、透水試験の結果は、 $1.2 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$ （計測坑J. F. T.）、 $1.6 \sim 4.8 \times 10^{-7}\text{ cm/s}$ （室内試験）であった。また原位置での平板載荷試験結果および室内三軸試験結果より得られた変形係数は $E_b = 3,000 \sim 10,000\text{ kgf/cm}^2$ であった。

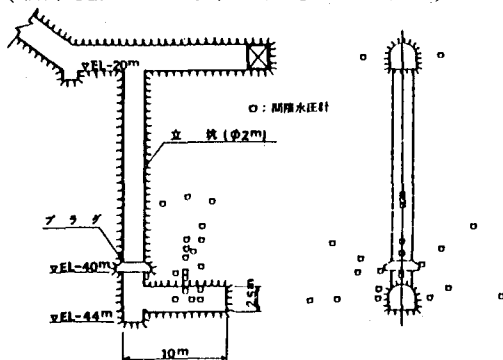


図-1 実験施設

3. 初期間隙水圧分布

図-2に、立坑掘削前の地山内間隙水圧分布を、鏡像法⁴⁾を用いた三次元浸透流解析結果とともに示した。この結果より、以下のように考察される。

- ① 初期間隙水圧分布は、計測坑の影響を受けて想定される静水圧より約2kgf/cm²低下しているが、解析結果に比べても約1kgf/cm²程度低くなっている。
- ② EL-33.0mレベルの間隙水圧は、それ以下のレベルの水圧に比較して圧力の低下傾向が顕著であることから、この領域の透水性は他の領域に比べ良好であるものと推定される。

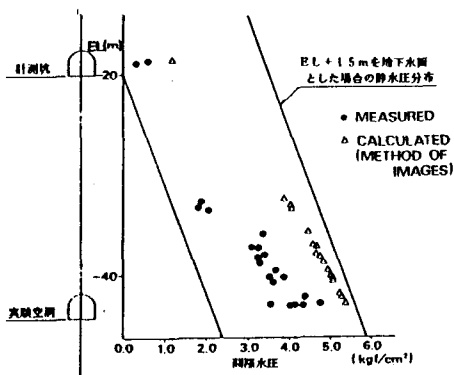


図-2 初期間隙水圧分布

- ③ 初期の間隙水圧は計測坑の影響を受けて低下しているが、均質場を想定した解析結果よりも低いことから、計測坑掘削前の状態から既に、岩盤内の間隙水圧分布は、静水圧以下の状態であったことが推定される。

4. 立坑掘削時の間隙水圧分布

立坑は、図-3に示すように1.1m/dayのほぼ一定の速度でEL-40.4m(掘削長20.4m)まで掘削し、その後、約8日間掘削を停止した。

立坑掘削停止後の安定間隙水圧が、ほぼ定常状態にあるかどうかを確認するために、図-4に示す解析モデルを用いて、鏡像法による三次元浸透流解析を行なった。

この解析結果と実測値の比較を、図-5に示した。同図に示すように、切羽レベル(EL-40.0m)および切羽後方1D(EL-38.0m)では実測値と解析結果は、ほぼ近似していることから、この領域の間隙水圧は定常状態に到っているものとみなされる。

これに対して、EL-33.0mレベルの間隙水圧は、均質場を想定した解析結果と比較して、初期状態と同様に約1.0~1.5 kgf/cm²低くなっている。このことより、EL-33.0mレベルは、解析モデルにおいて想定している均質場と異なり、計測坑および立坑の影響を強く受ける透水性の良好な領域であることが推定される。

次に、立坑掘削時の経時の間隙水圧変動について検討した。図-6、図-7に立坑掘削時の間隙水圧変化を示した。同図に示すように、立坑周辺の間隙水圧は、切羽の進行に伴い低下する。この間隙水圧の変動を誘発する要因として、次の2つが想定される。

① 掘削に伴う水理境界の変化

② 掘削に伴う地圧解放

現実の岩盤内の間隙水圧変動は、この両因子の結合により生じるものと考えられるが、この両因子の内、いずれの因子が支配的であるかを検討するために、以下の解析手法を用いて、立坑周辺の間隙水圧変動について数値シミュレーションを実施した。すなわち、掘削に伴う水理境界の変化による影響の検討には浸透流解析を適用し、また、掘削に伴う地圧解放による影響の検討には、応力-浸透連成解析を適用した。

解析は、解析対象が岩盤内の横坑から掘削される立坑という三次元的構造系であり二次元のモデル化は困難である。

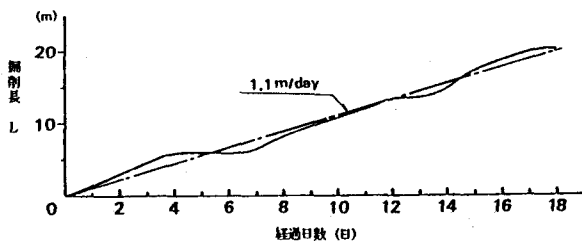


図-3 立坑の掘削状況

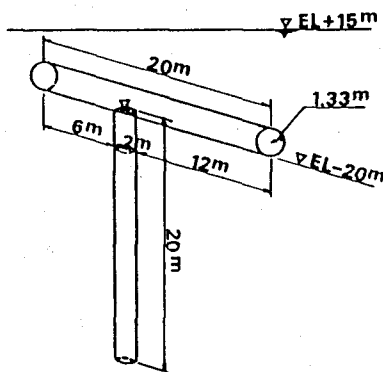


図-4 解析モデル

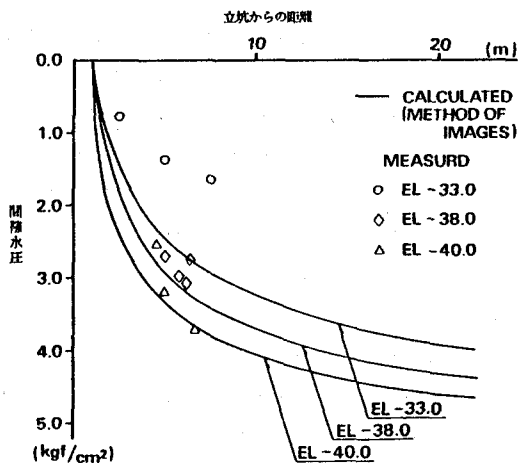


図-5 立坑周辺の間隙水圧分布の比較

したがって、立坑掘削に伴う周辺岩盤内の間隙水圧の定性的挙動を把握するために、図-8に示す解析モデルを用いて、軸対称逐次掘削解析を行なった。

解析に用いる物性値は、前述の原位置試験、室内試験結果に基づき、以下のように設定した。

透水係数 $k = 3.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

変形係数 $E = 5.000 \text{ kgf/cm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.35$

比貯留係数 $S_s = 3(1-2\nu)/E = 1.8 \times 10^{-5} \text{ 1/m}$

解析結果については、解析の目的が実測値との定量的な比較ではなく、立坑掘削に伴う周辺岩盤内の間隙水圧挙動の定性的比較であるので、図-6, 7に示すように間隙水圧変化の内、掘削に伴う間隙水圧変動量を全変動で正規化した値 ($\Delta P/P_t$) と、切羽と計器の相対位置との関係で整理した。

図-9に、EL-33.0mレベルの切羽位置と正規化した圧力変動比(以下圧力変動比と称する)の関係を示した。この結果より、実測値においては、切羽前方約1.5Dの時点から圧力は急激に変化し始め、計器増設深度を切羽が通過する時点で、全変動量の約90%が終了している。しかもこの傾向は、立坑からの距離による時間的ずれが少ない。これに対して、数値解析結果は実測値に比べて、ゆるやかな変化になっており、応力-浸透流解析では、切羽通過時に約20%、浸透流解析では約50%の圧力変動が生じていない。これらの解析結果の相異は、浸透流解析では、水理境界の変動に伴う岩盤内の貯留効果による時間遅れであるのに対して、応力-浸透流解析では、切羽周辺での平均主応力 σ_m の増加による間隙水圧変動の遅れであることによる。このような実測値と解析値との差異は、前述のようにEL-33.0mレベルの透水性が他の領域に比べてきわめて高いことに起因するものと考えられる。したがって、この計測結果は、水理境界の変動の影響を強く受けているものと考えられる。

図-10, 図-11にそれぞれEL-38.0mおよびEL-40.0mの切羽位置と圧力変動比の関係を示した。両地点とも切羽の到達深度が計器埋設位置から前方へ3D進行せず停止しているため、掘削の停止後1日までの間隙水圧変動量を掘削による全変動量 P_t として正規化した。

これらの実測結果は、EL-33.0mの結果と異なり切羽前方での急激な間隙水圧変動は認められず、切羽到達時の変

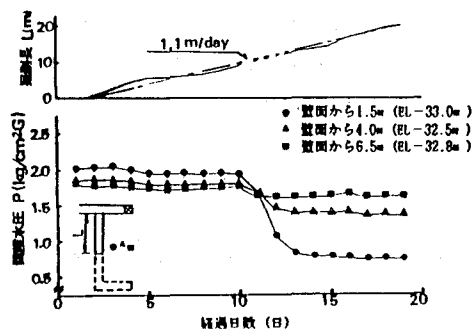


図-6 立坑掘削時の間隙水圧変動 (EL-33.0m 付近)

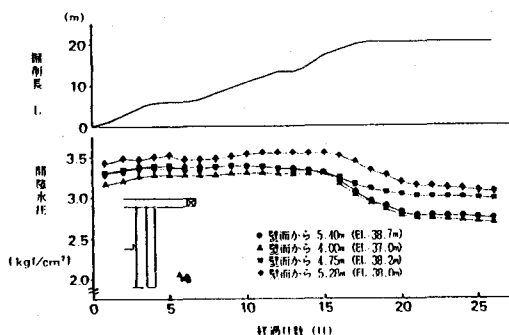


図-7 立坑掘削時の間隙水圧変動 (EL-38.0m 付近)

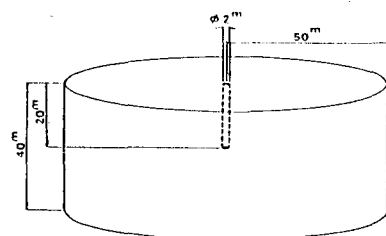


図-8 解析モデル

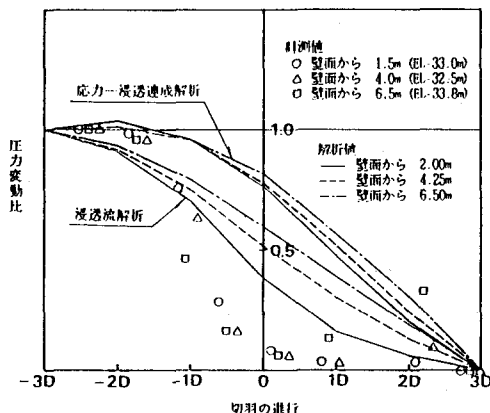


図-9 切羽位置と圧力変動比の関係 (EL-33.0m 付近)

動量はバラツキがあるがいずれの結果とも全変動量の50%以下になっている。一方、浸透流解析結果では、掘削に伴う間隙水圧変動は切羽到達前からあらわれ直線的な変化を示す。これに対して、応力-浸透連成解析結果では、間隙水圧変動は実測結果に比較的近いモードで、切羽到達前後での変動がもっとも大きくなっている。すなわち、立坑周辺の間隙水圧挙動は切羽の進行と次のような関係にあると考えられる。

- ①切羽の進行に伴う水理境界の変化による排水過程で、間隙水圧は低下するが、切羽の近傍では地圧解放により平均主応力 σ_m が増加するためこの間隙水圧変動が妨げられる。
- ②掘削に伴う間隙水圧変動量の大部分は、切羽通過後平均主応力 σ_m の変動が小さくなるにつれて、排水過程において生じる。

5. ま と め

地下深部に岩盤内に掘削された立坑周辺の間隙水圧挙動の計測結果について示すとともに、従来の解析手法との比較により以下のような点を明らかにした。

- ①局所的に透水係数の良好な領域を除いて、立坑周辺岩盤内の地下水挙動は、三次元的な流れを考慮した解析により、かなりの精度で予測可能である。
- ②立坑の掘削に伴う周辺岩盤内の間隙水圧変動は、水理境界の変化のみならず地圧解放による応力変化の影響を大きく受けることが、応力-浸透連成解析、浸透流解析結果との定性的比較により示された。

今後、岩盤掘削に伴う地下水挙動について、原位置計測と解析の両面からより詳細な検討を加えていきたい。

6. 参 考 文 献

- 1) 大西、岸本、"トンネル切羽進行の影響を近似的に考慮した2次元有限要素解析"、トンネルと地下、1980.12月
- 2) 亀村、平野、竹田、里、"切羽進行を考慮したトンネルの解析と実際"、第27回土質工学シンポジウム、1982
- 3) 亀村、下茂、立石、大津、"泥岩内小空洞における注水加圧実験(その2、岩盤内の地下水挙動について)"、第38回土木学会年次学術講演会、1983
- 4) 木村、下茂、立石、"鏡像法を用いた三次元浸透流解析"、第16回土質工学研究発表会、1981

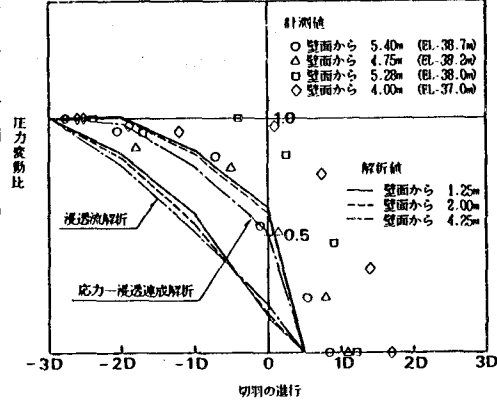


図-10 切羽位置と圧力変動比の関係 (EL-38.0m 付近)

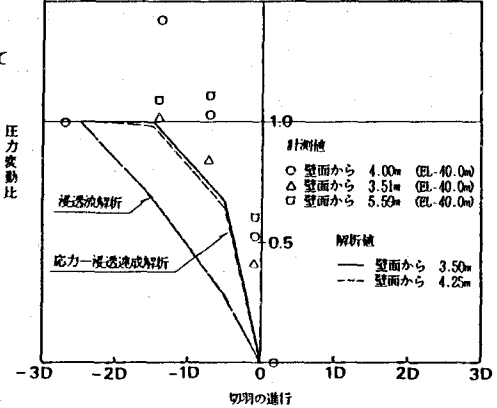


図-11 切羽位置と圧力変動比の関係 (EL-40.0m 付近)

(12) A Study on the Change of Pore Pressure
around the Shaft Excavated in the Soft Rock

Hiroyasu Ohtsu

Katsumi Kamemura

Michito Shimo

Mechanical and hydraulic behavior of rock mass due to tunnel excavation is very important because of its engineering impact. Recently mechanical behavior of rock mass has been taken up so far with the development of field measurement and numerical analysis. However, a study for hydraulic behavior of rock mass in this process seems insufficient.

In this paper we have examined in-situ test results around the shaft excavated in the soft rock and have compared them with the results of numerical analysis.

The followings are concluded.

- 1) Groundwater distribution around the shaft is fairly close to the results of three dimensional analysis.
- 2) The change of pore pressure due to shaft excavation in the soft rock is strongly affected by the stress change due to excavation. Especially that of pore pressure near the face is relatively small in the range of total change because of increase of mean principal stress σ_m .