

(16) 堆積軟岩における空洞掘削に伴う地下水流動特性評価に関する検討

大成建設株式会社	正会員	大津	宏康
同 上	正会員	○ 瀧	治雄
同 上	正会員	亀村	勝美

A Study on the Estimation of Groundwater-flow Characteristics due to Caverns Excavation in Sedimentary Soft Rock

Hiroyasu Ohtsu,	Taisei Corporation
Haruo Taki,	Taisei Corporation
Katsumi Kamemura,	Taisei Corporation

Abstract

Recently, because of the advancement of numerical analysis technique, the new method considering interaction between porewater pressure and soil skeleton, has been focussed as the rational method of evaluation to design underground structures constructed in sedimentary rock.

Especially while considering excavation problems, external force is evaluated by the pre-existing stress value, which consists of complex combination of stress components. And the evaluation of released force due to excavation heavily depends on whether structure is modelled by a two dimensional field or a multi-dimensional field.

From these view points of analysis, this paper described that the actual excavational procedure due to excavation of large-scale shaft in sedimentary soft rock, causes serious difference of response of porewater pressure and effective stress.

1. はじめに

近年、数値解析技術の進歩により、地下水流動特性の評価手法として、間隙水と地盤・岩盤の変形との連成効果を考慮した、いわゆる応力・浸透連成解析¹⁾が設計レベルにおいても適用されつつある。トンネル、空洞等の地下構造物建設においては、掘削に伴う構造系の変化および応力解放という作用外力の複雑性から、地下水流動特性を詳細に検討する上で、応力・浸透連成解析は最適な手法であると考えられる。

ところで、掘削問題においては、作用外力となる掘削解放力の応力成分が、二次元場と三次元場では大きく異なるものと思われる。しかしながら、このような作用外力の成分の相違が、間隙水と地盤・岩盤の変形との連成効果に及ぼす影響については、十分な議論がなされていない。

そこで、本報告においては、堆積軟岩を対象として、軸対称応力・浸透連成解析による逐次掘削解析を実施し、二次元平面ひずみ場の解析結果との比較により、空洞掘削に伴う間隙水と岩盤の変形の連成効果に関して検討を加える。

2. 解析条件

二次元平面ひずみ場と軸対称場での掘削応答に関する比較検討の対象として、図-1に示す大深度立坑(φ10(m)×100(m))の掘削問題を取り挙げ、それぞれの場のモデルに対して、応力・浸透連成解析を適用する。本検討の目的は、切羽の進行に伴う間隙水圧応答および岩盤の応力状態の推移について検討するものである。そこで、議論を簡素化するために、通常的设计検討において用いられるロックボルト、吹付コンク

リート等の支保部材は考慮せず、素掘状態での解析とする。なお、軸対称場との比較を行う二次元平面ひずみ場の解析モデルとして、立坑深度39(m)レベルの水平断面を選定する。

解析において設定した掘削過程を、図-2に示す。1サイクルにおける掘進長を4(m)とし、掘削を1時間、その後の排水放置期間を11時間とする。このサイクルを25回繰り返し、立坑深度100(m)レベルを最終切羽位置とする。なお、掘削は非排水条件下で行うこととする。

また、解析用物性値は、間隙水と岩盤の変形との連成効果が生じる範囲の堆積軟岩を想定し、表-1に示す値を設定した。ここに、岩盤の構造骨格の応力・ひずみ関係としては、最も単純な線形弾性体を仮定した。

3. 解析結果および考察

軸対称逐次掘削解析における、立坑深度39(m)レベルの立坑周辺での応力および間隙水圧の経時変化を、図-3に示す。ここで、応力状態の推移に関しては、体積応力成分とせん断応力成分の変動について注目するために、体積応力成分については平均主応力 σ_m および平均有効主応力 σ'_m 、せん断応力成分については正八面体せん断応力 τ_{oct} を用いた。

間隙水圧は、切羽到達前から低下傾向を示し、切羽通過直後の排水放置期間に急激な低下を示す。この急激な低下は、掘削解放力の作用および切羽通過による水理学的な境界条件の変更(圧力水頭0)によるものである。その後、切羽が遠ざかるにつれてゆるやかな低下傾向を示し、定常状態に達する。これに対し、正八面体せん断応力 τ_{oct} は、切羽到達前から増加傾向を示し、切羽通過時の応力解放により急激な増加を示す。その後、切羽が遠ざかるにつれて増分量は小さくなるが、全体的に微増する傾向を示す。

一方、平均主応力 σ_m および平均有効主応力 σ'_m は、切羽到達前においては、切羽の接近に伴う間隙水圧の低下量が平均有効主応力 σ'_m の増加量とほぼ同程度であるため、平均主応力 σ_m はほとんど変化しない。その後、切羽の通過により、平均主応力 σ_m は急激な低下を示すが、間隙水圧の低下量が顕著であるために、平均有効主応力 σ'_m は増加傾向を示す。さらに、次ステップの掘削により、間隙水圧がわずかではあるが上昇するため、平均有効主応力 σ'_m は一旦急激に低下する。その後、切羽の進行

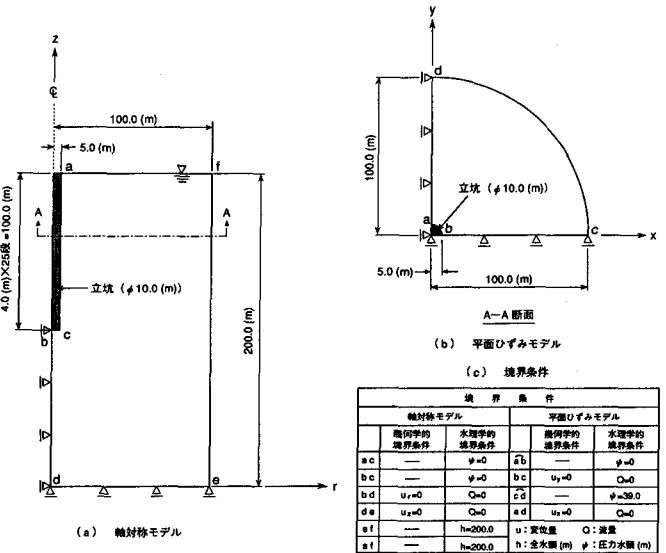


図-1 解析モデル図

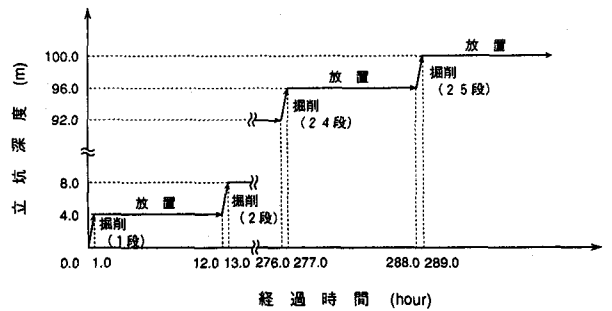


図-2 掘削過程

表-1 岩盤物性値

E (kg/cm ²)	5000.0
ν	0.33
σ_1 (kg/cm ²)	0.0
γ (t/m ³)	2.0
C (kg/cm ²)	13.0
ϕ (°)	35.0
k (cm/sec)	1.0×10^{-6}
K ₀	1.0

および排水に伴う間隙水圧のゆるやかな低下傾向により、平均主応力 σ_m と平均有効主応力 σ'_m は、ほぼ同じ値に収束する傾向にある。

このように、間隙水圧と平均有効主応力 σ'_m は密接な関係にあり、その変動が顕著な範囲は、着目深度に対して、切羽が前後10(m)の範囲にある場合に限定されている。また、正八面体せん断応力 τ_{oct} に関しては、その定義より、間隙水圧と全く独立な変化傾向を示すが、その変動範囲は間隙水圧と同様に、着目深度に対して、切羽が前後10(m)の範囲にある場合に限定されている。

ただし、この変動範囲は、岩盤の透水特性および間隙水の排水期間に関わる施工速度（掘進速度）により、大きく変化するものと考えられる。したがって、通常の応力解析において、切羽の進行を二次元場において評価するために用いられる特性曲線²⁾は、間隙水圧の変動を考慮した有効応力解析においては、一意的に定まらないこととなる。

一方、二次元平面ひずみ場の解析結果における、立坑深度39(m)レベルの立坑周辺での応力および間隙水圧の経時変化を、図-4に示す。二次元平面ひずみ場での円孔モデルにおける掘削問題を考えた場合、弾性体理論に基づけば、空洞への作用外力すなわち掘削解放力は、せん断変形のみを受け持たれ、体積応力の増分は0となる。したがって、材料のダイレタンシー効果を見捨てるならば、外力変動に伴う間隙水圧応答はなく、間隙水と岩盤の変形との連成効果が極めて小さい場合に相当する。

図-4に示す二次元平面ひずみ場での解析結果においても、上述の理論が示唆する通り、掘削解放力が1ステッ

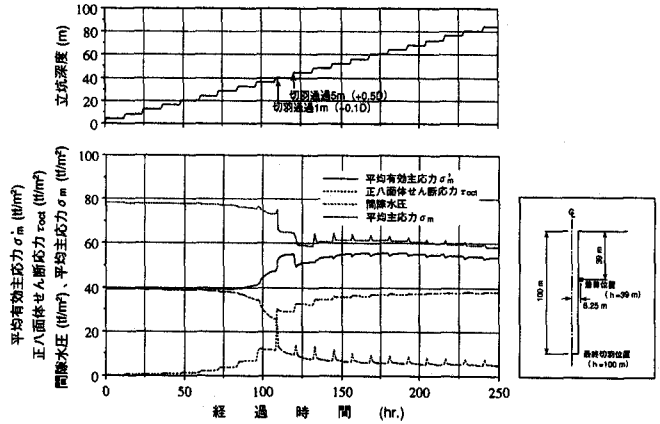


図-3 応力および間隙水圧の経時変化
(立坑深度39(m)レベル)

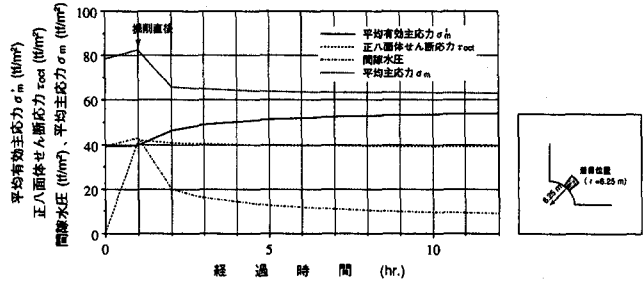


図-4 二次元平面ひずみ場における応力および
間隙水圧の経時変化

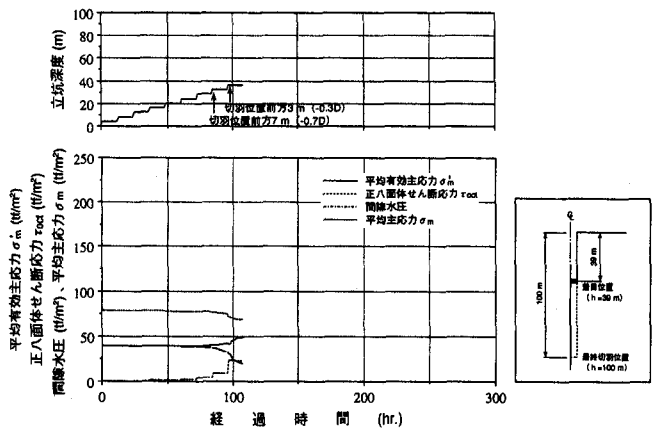


図-5 掘削される要素の応力および間隙水圧の
経時変化 (着目位置：立坑深度39(m)レベル)

プで作用しかつ掘削直後の変形はせん断変形が卓越するため、間隙水圧の応答は微小であり、正八面体せん断応力 τ_{oct} の変動のみが顕著になる。その後の排水過程での挙動は、正八面体せん断応力 τ_{oct} がほとんど変化せず、全応力がほぼ一定の条件の下で、間隙水圧が低下し、それに伴い平均有効主応力 σ_m' が増加する傾向を示すのみである。

このように、二次元平面ひずみ場と軸対称場の解析結果における、応力および間隙水圧応答は、切羽通過後の経時変化のモードについては近似しているが、切羽到達前後の応答および切羽通過後の経時変化の応答速度に関しては有意な相違が生じている。

この相違は、二次元平面ひずみ場においては、掘削解放力は断面内方向のみに作用し、切羽の接近に伴う影響を評価できないことによるものである。そこで、掘削される要素の応力および間隙水圧の変動に着目することにより、二次元場と切羽進行を考慮した軸対称場における掘削解放力の相違について、さらに検討を加える。

図-5～図-7に、それぞれ掘削深度が40(m),60(m),80(m)に到達した場合に掘削される要素の間隙水圧および応力の経時変化を示す。これらの図に示すように、掘削される要素の正八面体せん断応力 τ_{oct} および平均有効主応力 σ_m' は、初期応力状態に比較して有意な変化を伴う。このため、これらの応力に基づき算定される掘削解放力は、初期応力状態から算定される掘削解放力とは大きく異なることとなる。さらに、このような掘削解放力の相違に加えて、切羽周辺の間隙水圧および有効応力の分布に関しても、前述のように、初期応力状態から有意な変化が生じている。したがって、掘削に伴う

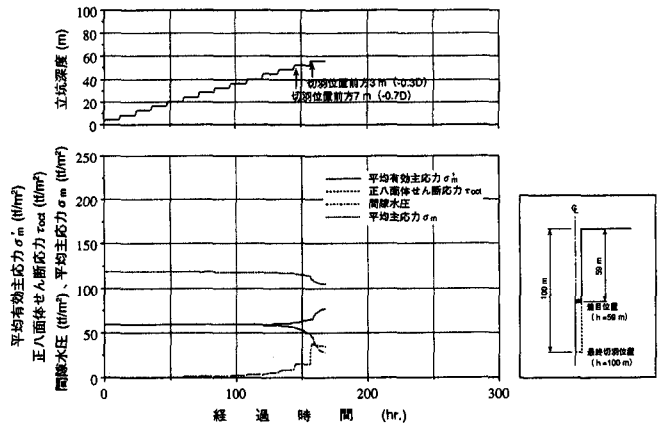


図-6 掘削される要素の応力および間隙水圧の経時変化（着目位置：立坑深度59(m)レベル）

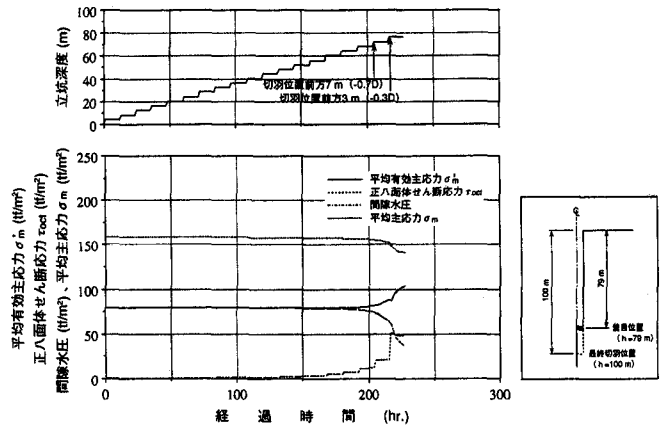


図-7 掘削される要素の応力および間隙水圧の経時変化（着目位置：立坑深度79(m)レベル）

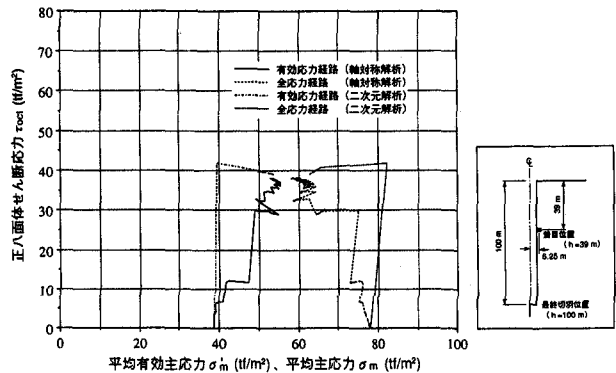


図-8 軸対称場および二次元平面ひずみ場における応力経路

間隙水圧および有効応力の応答を評価する上では、逐次掘削による切羽進行の影響を考慮することが不可欠となる。

このような作用外力すなわち掘削解放力の成分の相違が、間隙水と岩盤の変形との連成効果に及ぼす影響に関する課題は、図-8に示す二次元平面ひずみ場と軸対称場の応力経路の比較からも明かとなる。同図に示すように、二次元平面ひずみ場と軸対称場での有効応力経路は全く異なったものとなる。特に、岩盤材料の破壊規準として、Mohr-ColoumbあるいはDrucker-Pragerの破壊規準のように、有効応力比に支配される規準を想定した場合、二次元平面ひずみ場の解析結果においては、掘削直後が最も危険な状態になるのに対し、軸対称場の解析結果においては、掘削後の最終定常状態が最も危険な状態となる。この相違は、逐次掘削による切羽進行の影響を考慮するか否かによるものである。逐次掘削過程を評価することがより実現象に近いと仮定した場合、二次元平面ひずみ場の解析より得られる有効応力経路は、掘削直後の正八面体せん断応力 τ_{oct} を過大評価し、実現象とは全く異なる応力経路を追跡していることとなる。

ただし、この有効応力経路の比較において、掘削後の最終定常状態における応力状態は、二次元平面ひずみ場と軸対称場の解析結果ではほぼ一致する傾向にある。したがって、掘削後の最終定常状態のみに限定すれば、二次元平面ひずみ場のモデル化においても評価可能となる。

4. おわりに

本検討は、岩盤の構造骨格として線形弾性体を仮定し、均質でかつ $K_0 = 1.0$ という理想的な堆積軟岩を対象としたものであるが、応力・浸透連成解析を用いた二次元平面ひずみ場と軸対称場の掘削解析より、以下に示す知見が得られた。

- 1) 二次元平面ひずみ場においては、掘削に伴う有効応力の応答がせん断応力成分のみに限定されるのに対し、軸対称場においては、せん断応力成分のみならず、体積応力成分の応答も無視し得ない。
- 2) 逐次掘削過程を考慮した場合、切羽到達前までに、間隙水圧および有効応力は、初期応力状態に比較して全く異なった応力状態となる。
- 3) 二次元平面ひずみ場においては、掘削解放力が初期応力に基づき算定されるのに対し、逐次掘削過程を考慮した場合、2) の結果より、切羽における掘削解放力は初期応力に基づく掘削解放力とは異なる作用荷重となる。
- 4) 3) の結果、二次元平面ひずみ場と軸対称場での有効応力経路には、有意な相違が生じる。

以上より、空洞掘削に伴う間隙水と岩盤の変形の連成効果を評価する場合、作用外力のモデル化によっては、実現象から全くかけ離れた連成効果を発現させる危険性がある。したがって、応力・浸透連成解析を適用する際には、作用外力およびその作用外力に対する間隙水圧および有効応力の応答を十分に検討した上で、適切な荷重系および構造系のモデル化が必要となる。

参考文献

- 1) 大西有三、村上毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析、土木学会論文報告集 第298号、pp.87～96、1980。
- 2) 亀村勝美、平野逸雄、竹田直樹、里優：切羽進行を考慮したトンネルの解析と実際、第27回土質工学会シンポジウム講演集、pp.55～60、1982。