

(67) トンネル掘削に伴う周辺岩盤の変形挙動と物性変化

清水建設(株) ○ 福田 和 寛
 三菱金属(株) 齋 藤 茂 幸
 動力炉・核燃料開発事業団 青 山 成 夫

1. はじめに

トンネルを掘削することによって誘起される岩盤内の種々の力学挙動と物性変化を計測し、空洞の安定性と密接な関係にある空洞周辺に発生するゆるみ域の大きさとその程度を調査することによって、岩盤の劣化や透水性の変化が、どのような機構で発生するのか明らかにしようとした。トンネル掘削に伴う岩盤の変形やゆるみ域の発生といった岩盤の力学的変化を把握するために、トンネル掘削の前後に孔内載荷試験を行い、掘削時に周辺岩盤の応力とひずみの変化を計測した。周辺岩盤の透水性の変化は、トンネル掘削の前後に透水試験を実施し、透水係数の変化から評価した。

2. 計測位置の概況

計測の対象とした調査坑は、地表下約340mの凝灰角礫岩中に掘削した。計測位置の坑道配置、観測された割れ目の分布、測定孔の配置、計測対象坑道の掘進実績等をまとめて、図-1に示す。

測定孔は、計測の対象としたC坑道掘削前に、既設のA坑道より、これも既設のB坑道と平行に、C坑道位置までボーリングした。孔内載荷試験と透水試験を実施し、測定孔内に応力とひずみの変化をモニタする計測機器を設置した後、C坑道を掘削し、この時の掘削に伴う岩盤挙動を測定した。また、C坑道掘削終了後、再度、孔内載荷試験と透水試験を行い、C坑道掘削前の結果と比較することで、岩盤の物性変化を調べた。計測の対象としたC坑道は、発破工法によって、まず、幅2.3m、高さ2.45mの矩形断面で全長を掘削し、次にA坑道に対し奥部側を幅4.3mまで、また、上部を高さ4.15mまで拡大した。

計測位置周辺の凝灰角礫岩は、室内試験結果によると、一軸圧縮強度が250kg/cm²程度であり、また、透水

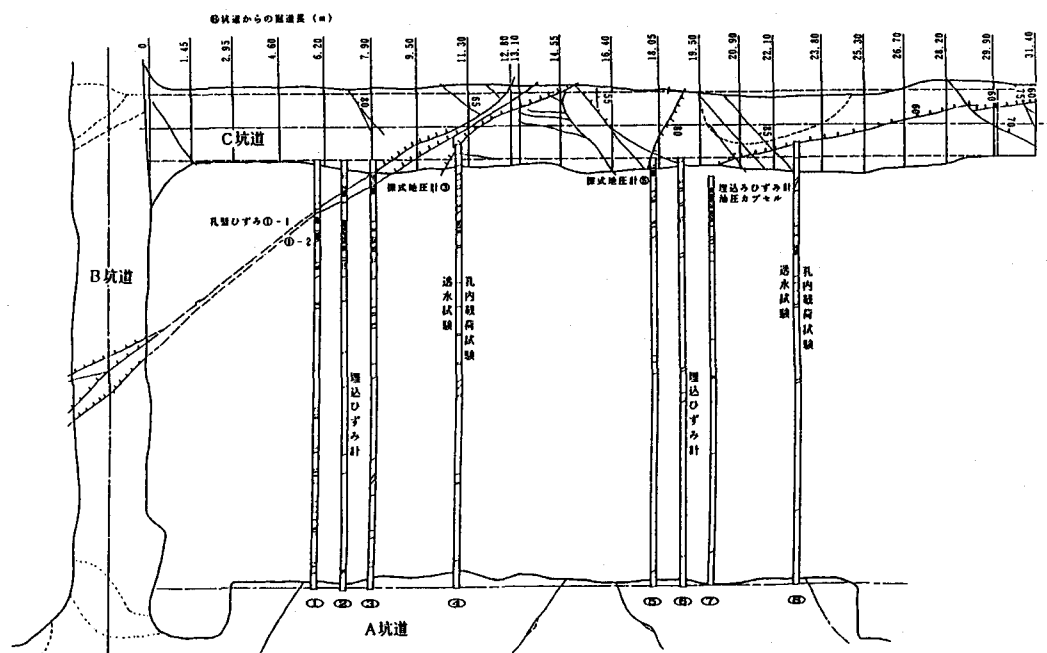


図-1 計測位置の概況

係数は $2.5 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 以下と難透水性を示す。坑道壁とボーリングコアの観察結果によると、同所には、図-1中に示したように、B、C坑道を横切る小断層と、その他不規則な割れ目がかなり分布していた。

3. トンネル周辺の応力状態

地下岩盤内にトンネルを掘削した時に、周辺の岩盤内に誘起される応力状態を理解するために、弾塑性軸対称モデルを用い、FEMにより数値実験を行った。

モデルでは、岩盤の破壊条件として、クーロンの式と引張強度の組合せを考え、岩盤は、破壊強度点に達するまでは弾性的に挙動し、破壊後は非弾性的なせん断変形が生じると共に、体積の膨張が生じ、残留強度まで応力が低下するものと仮定した。計算に当たっては、調査坑を等断面積の円形空洞で近似し、初期地圧として深度340mのかぶり圧に等しい 85kg/cm^2 の応力が作用する場合の空洞周辺の応力分布を求めた。比較のために、計算は、弾性状態と空洞近くに破壊域の発生する弾塑性状態の2つの場合について行った。弾塑性状態を描出するために用いた岩盤の変形、強度特性は以下のようである。

ヤング率 $E = 5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

ポアソン比 $\nu = 0.2$

粘着力 $C = 12.0 \text{ kg/cm}^2$

内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$

弾性計算に用いた変形特性も、上記と同一である。

図-2に、計算の結果得られた空洞壁から0.4m離れた空洞に平行な位置の応力分布を示す。弾性状態(図-2(a))の場合、坑道切羽の前方において、空洞の直径方向の応力成分 σ_r と接線方向の応力成分 σ_θ の両者に、先行圧と呼ばれる圧縮状態が生じている。これが、切羽位置を通過し、切羽後方に到ると、 σ_θ ではさらに大きな圧縮状態となるが、 σ_r では応力解放による著しい応力低下が生じることがわかる。

切羽後方の坑道周辺に塑性域の生じる弾塑性状態の場合(図-2(b))には、破壊の生じていない切羽前方部分に、弾性状態の場合と同様、先行圧が見られるが、応力の上昇量は弾性状態に比べ大きくになっている。さらに、切羽後方の壁面近傍に生じた塑性域内では、地圧変化は弾性的場合と全く異なり、 σ_θ 、 σ_r の両地圧成分とも大きく解放されてしまう。

4. 掘削に伴う応力とひずみの変化

(1) ひずみ変化

用いたひずみ計は、市販のコンクリート用小型ひずみセンサーをボアホール中の数点に埋設したもので、計測対象の調査坑壁面に垂直方向、すなわち、ボアホール軸方向のひずみ成分を計測した。

②孔(図-1参照)のひずみ計で得られた測定結果を、図-3に示す。図の横軸にはC坑道掘進切羽位置のB坑道からの距離を、縦軸にはそれぞれの位置におけるひずみ変化量をとっている。C坑道から0.9m離れたひずみ計2-2は、C坑道掘削開始時から大きな変動を示した。2-2の設置位置は断層部分に当たることから、掘削により断層に変位が生じたものと考えられる。2-2の結果に現れた階段状の不連続な挙動は、破壊した岩盤中で応力再配分のある時に生じやすいものである。C坑道から3m離れたひずみ計2-4では、C坑道の切羽接近に伴い先行圧に対応する圧縮状態が現れ、切羽通過後には、応力解放に伴う伸びが生じ、

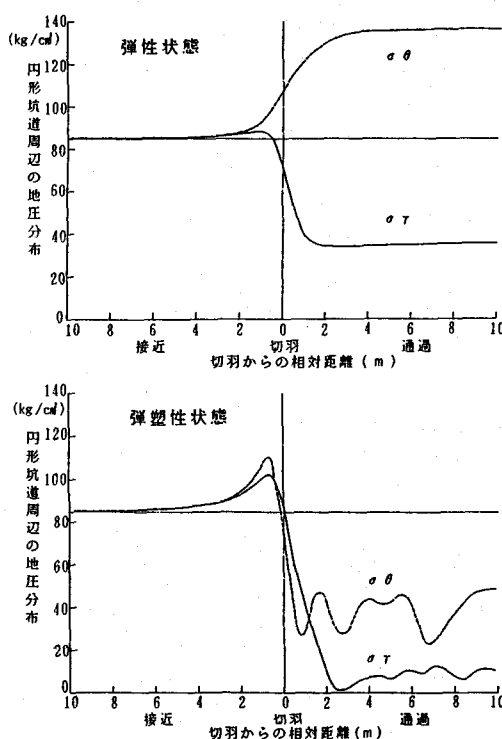


図-2 円形空洞周辺の応力分布

速やかに安定に向かっている。これは、破壊の生じていない弾性的な岩盤に特徴的な挙動と考えられる。

(2) 地圧変化

岩盤内の地圧変化の測定には、楔式地圧計・油圧カプセルと呼ぶ2種の地圧計を用いた。

図-4に、楔式地圧計の測定結果を示す。測定した地圧成分は鉛直方向で、図-2の σ_θ に相当する。測定結果③は、C坑道掘進開始とともに地圧の低下を示し、切羽が測定点を通過するとはば一定値に落ち着いており、数値解析で予想された先行圧の存在が認められない。これは、楔式地圧計③が断層際に設置されていたため、坑道掘進に伴い断層が動き、地圧が一方的に解放されてしまったことによるものと考えられる。測定結果⑤は、C坑道掘進に伴い、数値解析結果の弾塑性状態と予想されたように、切羽の接近によって先行圧に相当する地圧上昇が現れ、切羽通過をともに急激な応力解放を示した。この地圧計は、C坑道から0.15mと非常に近接した位置に設置したので、切羽通過時の発破で計測不能となってしまった。いずれにせよ、地圧計設置点は、坑道掘削によるゆるみ域（破壊域）に入ったことは確実である。

油圧カプセルでは、C坑道の掘進から拡大までの5ヶ月にわたる地圧変化をモニタすることができた。図-5に最も大きな地圧変化の現れたC坑道拡大時の測定結果を示す。切羽の接近に伴う若干の圧縮状態の発生と、切羽通過後の地圧低下が捉えられており、これは数値解析結果の弾塑性状態に近い変化傾向で、C坑道から1.15m離れた油圧カプセル埋設地点までゆるみ域となったものと考えられた。

5. 掘削前後の物性変化

トンネル掘削に伴い誘起される岩盤の物性面の変化を調べるために、孔内載荷試験と透水試験を実施した。

(1) 孔内載荷試験

試験には、ボアホールジャッキ型の載荷装置を用いた。合計12点で載荷試験を行ったが、図-6に、試験で得られた代表的な応力-変位線図を示す。

C坑道掘削前の地山状態の岩盤で得た結果では、割れ目部分で、若干変形しやすく残留ひずみの大きくなる傾向は見られたが、著しく変形性の異なる結果はなく、地山状態の岩盤がかなり均質な変形特性を有することがわかった。

C坑道掘削後の変化を見ると、C坑道から0.2mと近接した位置でも割れ目のない岩盤部分では、図-6(a)に示すように変化が少なく、C坑道掘削が周辺の構成岩石の変形性に与えた影響は非常に小さいものと

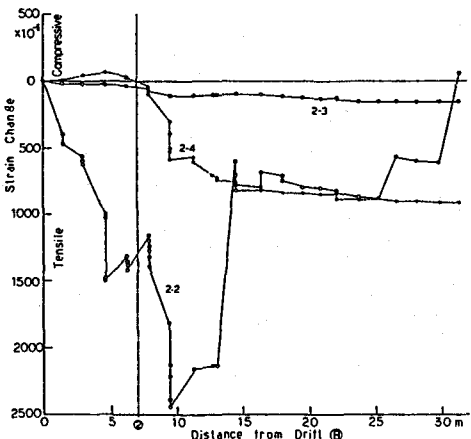


図-3 ひずみ変化の計測結果

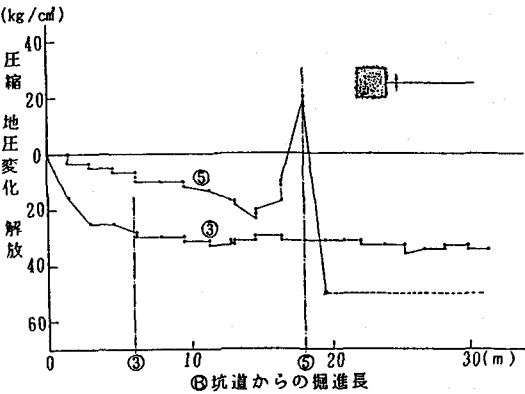


図-4 楔式地圧計の計測結果

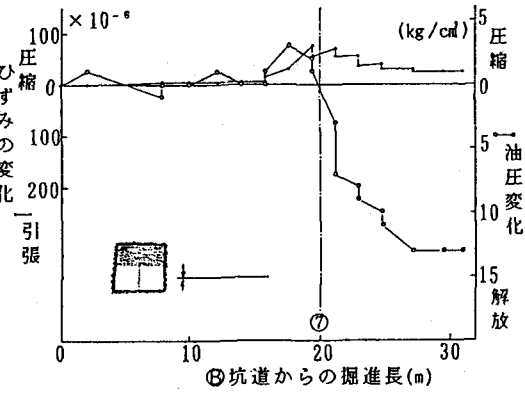


図-5 油圧カプセルの計測結果

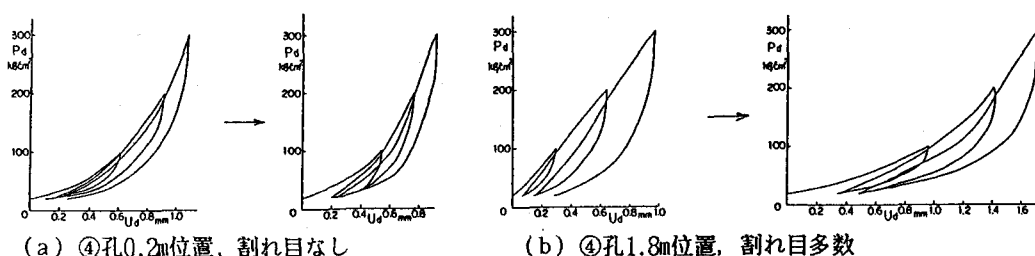


図-6 孔内载荷試験結果の代表例

考えられる。一方、割れ目部分では、C坑道からの距離に関係なく、図-6 (b) に示すような大きな変化が見られ、岩盤が割れ目部分で大きく劣化していることがわかる。この劣化は掘削の影響とは考えにくく、坑道掘削期間中に割れ目部分が吸湿等により物理化学的な変質を受けたことが原因であると推測される。

(2) 透水試験

透水性の測定は、ダブルパッカを用いた注入圧力10kg/cm²の定水圧注入法で、C坑道掘削前後に、測定孔④、⑧ (図-1参照) の合計6点において行った。

C坑道掘削前に行った試験の結果によると、割れ目のない部分の透水係数は、 $3.3 \times 10^{-9} \sim 4.2 \times 10^{-10}$ cm/secという小さな値で、同所のボーリングコアを用いた室内試験結果とほぼ一致している。ところが、C坑道掘削前の地山状態であっても、割れ目の密集部分では逸水により計測不能で、比較的割れ目の多い部分でも、透水係数は 10^{-7} cm/sec程度と、割れ目のない部分よりも2ケタ以上も大きな値を示し、透水性が既存の割れ目の影響を大きく受けていることがわかった。

C坑道掘削前後の透水性を比べると、④孔の場合、C坑道から0.65~1.65m 区間では、C坑道の掘削によって既存の割れ目が開口したせいか、C坑道掘削前には、 9.4×10^{-6} cm/secだったものが、C坑道掘削後には測定不能となった。⑧孔の0.6~1.6m区間では、既存の割れ目は1本しか観察されていないが、透水係数は 3.3×10^{-9} cm/secから 2.7×10^{-8} cm/secまで1ケタ変化している。ところが、既存の割れ目がない岩盤部分では、0.9~1.9m区間でも透水係数に変化は見られない。また、C坑道から2m以上離れると、既存の割れ目の有無に係わらず、掘削の前後で透水係数に変化は現れていない。従って、今回の試験では、坑道掘削により、その壁面近傍では、既存の割れ目が存在すればその影響で透水性は増大するが、既存の割れ目がなければ空洞壁より1m程度離れば透水性に変化は現れず、さらに、2m程度以上離れると、既存の割れ目の有無に関係なく、岩盤の透水性は空洞掘削の影響を受けなかったと言えよう。

6. トンネル掘削に伴う周辺岩盤のゆるみ

掘削に伴い周辺の岩盤内に誘起された応力とひずみの変化の計測結果によると、岩盤はマスとしては、数値解析で予想された弾塑性状態に近い挙動を示した。空洞掘削の前後で透水性の変化した範囲を考慮すると、力学的に非弾性的な挙動を示し、透水性の増大するいわゆるゆるみ域は、掘削に伴い空洞の周囲1m程度の範囲に発生しているものと考えられた。ところが、孔内载荷試験の結果を見ると、空洞壁から0.2m位置においても割れ目のない岩盤部分では掘削前後で変形性に変化は現れておらず、この部分の岩石が塑性化したものとは考えにくい。また、周辺岩盤の地圧挙動にも物性変化にも、既存の割れ目に関連するような変化のみが顕著であった。したがって、当該位置のように、かぶり深さから予想される地圧状態に比べ構成岩石の強度が十分大きい場合には、ゆるみは構成岩石の塑性化によって生じるのではなく、岩盤内に含まれる既存の割れ目の動きや劣化によって発生するものと思われ、割れ目の存在がゆるみ発生に大きな役割を果していることが理解できた。

(67) Mechanical Behaviors and Property Changes of Rock
induced by Tunnel Excavation

Kazuhiro FUKUDA
Shimizu Construction Co., Ltd.

Shigeyuki SAITO
Mitsubishi Metal Corporation

Shigeo AOYAMA
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

In the process of tunnel excavation, surrounding rock mass is partly degraded by stress concentration and/or blasting. This degraded region which we tentatively called a "relaxed zone", has close relation to the stability of tunnels. For the purpose of clarifying the relaxing mechanism of the rock mass, we carried out the borehole jack tests and permeability measurements before and after the excavation and monitored the mechanical behavior of rock during the tunneling processes.

As the result of these tests and measurements, it was shown that in the jointed parts of rock mass, mechanical behaviors and properties of rock were affected remarkably by the existing joints, while in the intact parts of rock without joints, their properties remained constant through the processes of tunneling. Therefore it would be concluded that the joints should play a great role for the occurrence of the relaxed zones around the tunnel.