

堆積軟岩中に掘削して13年経過した地下空洞周辺のゆるみ・風化領域調査
Research of the Loosened and weathered zone around underground cavity
excavated in sedimentary soft rock after the lapse of thirteen years

吉川和夫*, 宇野晴彦**, 伊藤晋*, 高倉望*
Kazuo Yoshikawa, Haruhiko Uno, Susumu Ito and Nozomu Takakura

Mechanical long-term stability of underground excavation is mostly evaluated based on the data taken during the construction or in a few years followed. When the future use of the underground is deemed, it is important the characteristics of the rock around underground cavity are predicted based long-term data.

In this research, an indoor test and an in-situ test were carried out, on the underground laboratory (STUD) built in sagamihara city, for the purpose of evaluating the Loosened and weathered zone around underground cavity after the lapse of thirteen years. According to the results, it was predicted that the loosened zone around the underground cavity is generated approximately three meters from the wall face of the cavity, and the weathered zone around the underground cavity was not confirmed.

Keywords : underground cavity, long-term stability, sedimentary soft rock, Loosened, weathered

1. はじめに

1980 年後半から 1990 年始めにかけて、首都圏の地価高騰を引き金にして、生活施設、交通・物流施設、貯蔵施設、生産施設等の都市機能を地下に移転しようとする大深度地下開発に注目が集まった。大深度地下開発はバブル崩壊とともに一旦衰退したが、平成 12 年 5 月に「大深度地下利用法」が成立し、大深度地下は再び注目を浴びるようになった。大深度地下開発は法的にも整備され、将来、首都圏の大深度に地下鉄や道路を構築することが多くなり、地下構造物の建設が構造物周辺岩盤に与える影響を長期的に評価する技術の重要性も増してくると思われる。このような社会的背景のもと、地下構造物の長期的な安定性を評価するためには、施工後の坑道周辺岩盤のゆるみや風化が岩盤の力学特性に及ぼす影響を把握することが重要となる。しかし、大深度地下に構造物を構築するための設計・施工技術は向上しているものの、構造物構築後の長期的な安定性については未解明な部分が多いため、定量的な評価が行われていないのが現状である。

そこで、本報告は、首都圏西部に掘削された大深度地下空間実証実験場を利用して、大深度地下空間での課題の 1 つである時間とともに変化する坑道周辺岩盤のゆるみ・風化状況を調査したものである。具体的には、原位置において弾性波速度・電気検層等の調査を行うとともに、採取されたコアを用いて室内試験を実施した。これらのデータと掘削直後（平成 3 年実施）に取得された測定データとの比較を行い、時間経過が坑道周辺岩盤に及ぼす影響を評価した。

キーワード：地下空間、長期安定性、堆積軟岩、ゆるみ、風化

* 正会員 東急建設株式会社 営業推進本部 土木エンジニアリング部
** 正会員 東電設計株式会社 技術開発本部

2. 研究目的

本研究では、平成元年に掘削を開始した大深度地下空間実証実験場（以後地下空間実験場と呼ぶ）を利用して、掘削直後の坑道周辺岩盤の既存調査結果（平成3年実施）と今回実施した調査結果（平成13年実施）を比較し、長期間経過した坑道周辺岩盤の力学的安定性を評価することを目的とする。

3. 地下空間実験場と地質状況

地下空間実験場とは、首都圏西部に『ジオトラポリス構想』（図-1）と呼ばれる大深度地下開発の夢を実現するために、設計・施工に関する技術から安全性や快適性などの環境技術までのさまざまな技術を実証するために構築された大深度地下施設である¹⁾。

地下空間実験場は、相模川から約500m離れた神奈川県相模原市郊外の段丘地に位置している（図-2）。形状は、断面積 60 m^2 ($10\text{ m} \times 6\text{ m}$)、深度50mの立坑および延長35mの形状を変化させて掘削した横坑からなる（図-3）。地下空間実験場は、1989年11月に掘削を開始し、立坑および横坑周辺の力学的・水理学的研究を進めながら1992年9月に掘削が終了している。

当サイトの地質は、地表から関東ローム層（立川ローム層：層厚7m程度）、砂礫層（最大粒径1m以上の新鮮な礫を含む田名原礫層：層厚5m）、風化礫層（粘性化した風化礫を主とする座間丘陵礫層：層厚9m）、泥岩層（上総層群：泥岩）である。試験を実施した泥岩層は、第三紀鮮新世後期の堆積岩と推定されており、厚さ1~15cm程度の細~中粒の砂層および径1~5mmのスコリア・軽石からなる厚さ5cm未満のスコリア層が狭在している。泥岩は、砂質塊状でよく固結しており（一軸圧縮強度2.5~8.0MPa）、貝化石片や炭化物、軽石粒を含んでいる。

地下空間実験場の施工は、透水性の高い風化礫層が存在する座間丘陵層下部までの延長24mをソイルセメントの柱列式土留壁と切梁支保工により掘削し、それ以深（横坑を含める）は、TOP工法と呼ばれる吹付コンクリートと大型ベアリングプレートとを有するロックボルトにより土留壁および坑道壁面の安定を図りながら掘削した。掘削は、一次掘削（深度36mまで）と二次掘削（深度36m~50mおよび横坑）の2回に分割し、機械掘削による方法で立坑および横坑を構築した。深度36mで分割した理由は、深度50mの掘削前の諸データを取得するためである（試験横坑を構築）。これまでに、実験場を利用して、地下の力学・水理特性、環境特性、および地震特性等の研究を進めてきた。

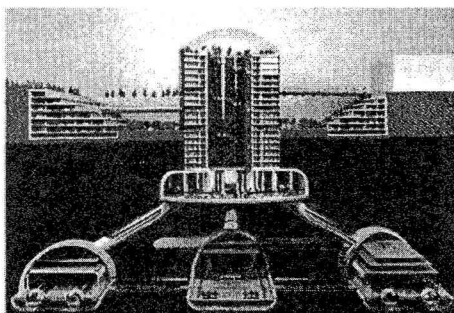


図-1 ジオトラポリス構想

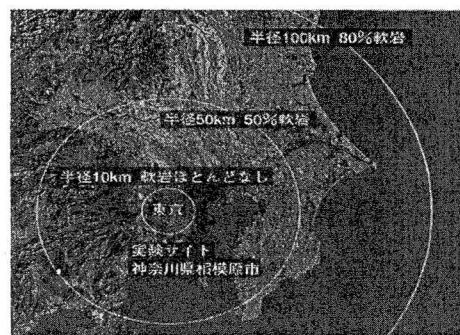


図-2 位置図

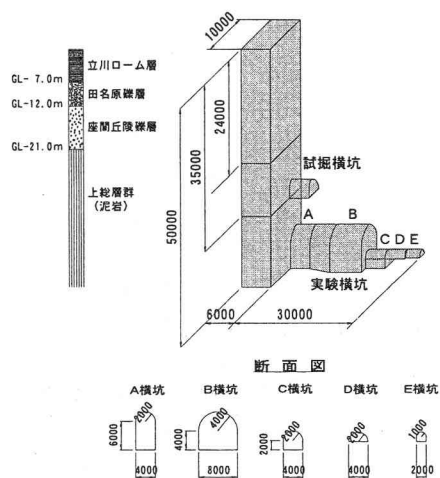


図-3 大深度地下実験場

4. 調査方法

坑道周辺岩盤のゆるみ・風化領域を把握するための調査として、深度 50m にある C 横坑から水平方向にボーリング掘削（Y-1 調査孔：削孔径φ100、延長 11.2m）を行い（図-4）、ボーリング孔を利用した原位置試験として、電気検層、速度検層、音波検層、採取された岩石コアを用いた室内試験として、含水比試験（自然状態）、土粒子の密度試験、超音波速度試験、比抵抗測定を実施した。表-1 に試験の一覧およびその試験方法を示した。

超音波速度試験および比抵抗測定は、原位置で採取された岩石コアの状態が変化しないように保管しておき、試験室にて直径 50mm、高さ 50mm に成形し、弾性波速度、比抵抗値を測定した。

速度検層および電気検層は、地盤工学会基準に従い実施した。速度検層は、ダウンホール法（測定間隔：50cm）より、坑道壁面の吹付モルタルをはがした状態で坑道壁面に P、S 波を発生させ、ボーリング内に設置した受信器により地盤を伝播した速度を測定した。電気検層は、ノルマル法（測定間隔：25cm、50cm、100cm）により、ボーリング内の通電電極と電位電極間の電位から比抵抗値を測定した。音波検層は、測定間隔 5cm として、ボーリング孔内の音波発信器と受信器間の速度を測定した。

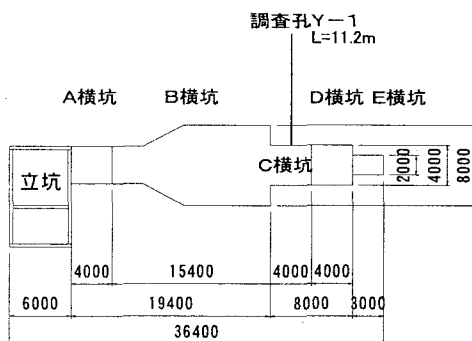


図-4 調査孔位置図

表-1 実施試験一覧

	試験	試験方法
室内試験	土粒子の密度試験	JIS A1202
	湿潤密度試験	JIS A1225
	含水比試験	JIS A1203
	超音波速度試験	—
	比抵抗測定	—
原位試験	速度検層	地盤工学基準（JGS-1122）
	電気検層	地盤工学基準（JGS-1121）
	音波検層	—

5. 測定結果

5.1 コア観察結果

Y-1 調査孔のコア観察結果より、所々にパミス、貝殻および粗粒を含むが、全体的には均質な泥岩（浅部：0～3m 付近、深部 9～11m 付近）および砂質泥岩（中間部 3～9m 付近）が堆積した構造である。表層部から 3m 区間の泥岩は、RQD が 20% と小さく、掘削の影響を受けているものと思われる。採取されたコアの亀裂表面の風化は認められないが、割れやすく棒状～片状を呈する。

5.2 室内試験結果

浅部の泥岩部、中間の砂質泥岩部、深部の泥岩部を対象として、自然状態での含水比試験、湿潤密度試験、土粒子の密度試験、超音波速度試験、比抵抗測定を実施した結果を図-5～7 に示す。

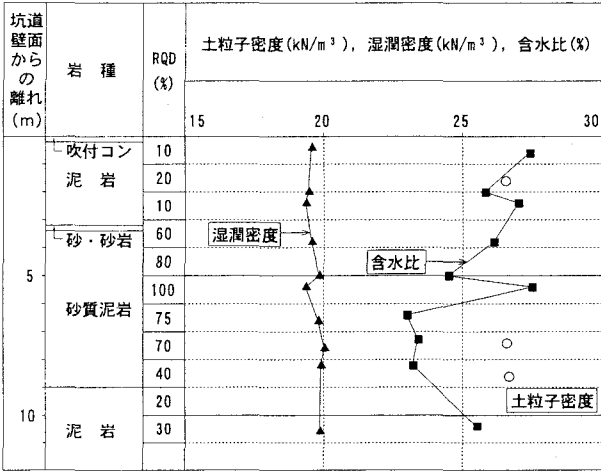
含水比は、23～28%（飽和度に換算するとほぼ 100%に近い状態）の範囲にあり、坑道壁面付近の泥岩部で高く、深度が深くなる砂質泥岩部で小さくなる傾向を示す。湿潤密度は、19.2～20.0kN/m³ に分布し、坑道壁面付近の泥岩で小さく、中間の砂質泥岩部で高くなる傾向にある。土粒子の密度は、岩種により明瞭な違い（26.5～26.7kN/m³）は見られなかった。坑道壁面付近の泥岩部では、中間の砂質泥岩部に比べて、湿潤密度が小さく、含水比が高い値を示す。これは、坑道壁面付近の泥岩部で坑道掘削に伴う空隙がより多く存在し、その空隙中には水が多く存在していること示唆している。

弾性波速度（有効土被り圧における三軸超音波試験）は、P 波速度：2.0～2.2km/sec、S 波速度：0.9～1.0km/sec の範囲にある。P 波速度に着目すると、坑道壁面付近において、弾性波速度が低下する傾向にある。

これは、岩盤内に坑道掘削に伴う空隙が存在し、弾性波速度が低下しているものと考えられる。

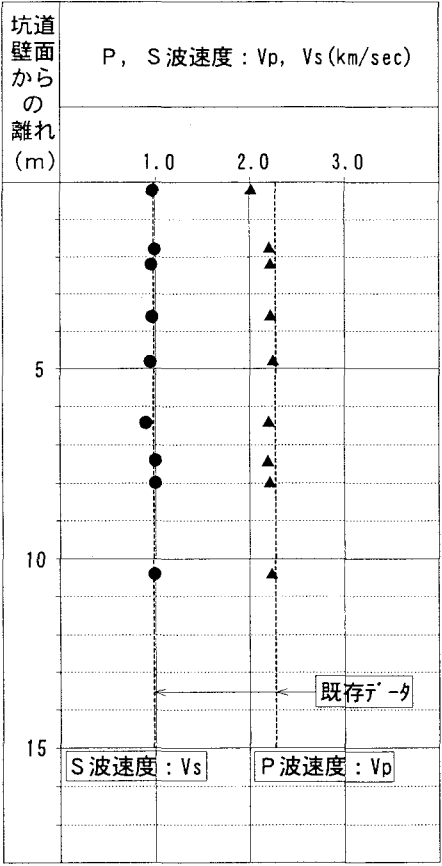
比抵抗値は、 $12.0 \sim 20.1 \Omega \cdot m$ の範囲にあり、坑道壁面付近で比抵抗値が小さい傾向を示す。含水試験、湿潤密度試験の結果を含めて総合的に判断すると、坑道壁面では、坑道掘削により発生した空隙が存在し、その空隙は水で飽和された状態にあり、この水の存在により坑道壁面で比抵抗値が小さくなっているものと推定される。

以上の室内試験結果をまとめると、坑道壁面では、坑道掘削に伴う空隙が存在し、その空隙は水で飽和された状態にあるため風化は認められなかった（コア観察結果）。



○：土粒子の密度 ▲：湿潤密度（自然状態） ■：含水比（自然状態）

図-5 物理試験結果（室内試験）



●, ▲：実測値（平成14年）
点線：既存データ（平成3年実施）
図-6 超音波速度試験（室内試験）

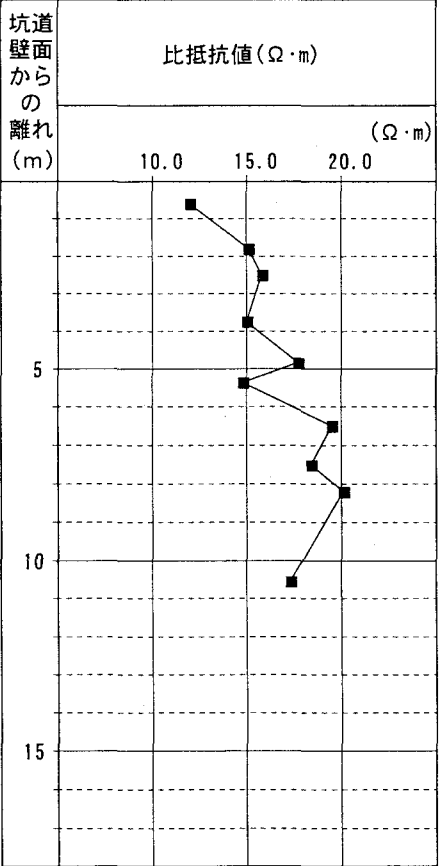


図-7 比抵抗測定（室内試験）

5.3 原位置試験結果

原位置（Y-1 調査孔）における電気検層、速度検層、音波検層の結果を図-8, 9 示す。

極間隔を 25cm, 50cm, 100cm の 3 ケースについて実施した電気検層結果を図-8 に示した。比抵抗値は、室内試験同様、坑道周辺に近づくに従い小さくなる傾向にある。原位置で得られた比抵抗値（10～20 $\Omega \cdot m$ ）は、室内試験で得られた結果とほぼ一致し、風化領域は存在しないものと考えられる。深度 8.0～9.0m 区間では、粗粒分を多く含有しているために周辺地盤と比べて比抵抗値が増加している。

ダウンホール法による速度検層結果を図-9 に示した。P 波速度、S 波速度はそれぞれ 3.5km/sec, 0.9km/sec で、特に P 波速度が一般的な泥岩に比べて大きな値を示した。この結果の妥当性を確認する目的で、同じ調査孔を利用して 5cm 間隔で音波速度試験を実施した（図-9）。音波速度は、2.0～2.3km/sec の範囲の分布し、一般的な泥岩の弾性波速度に近い値を示した。音波検層は、ボーリング孔周辺の弾性波速度と測定するものであるが、ボーリング掘削の影響を考慮してもダウンホール法による速度検層で得られた P 波速度は速すぎる。この理由として、現時点では、Y-1 調査孔近傍にあるロックボルトや吹付モルタルを伝わり弾性波速度が速くなったものとする。

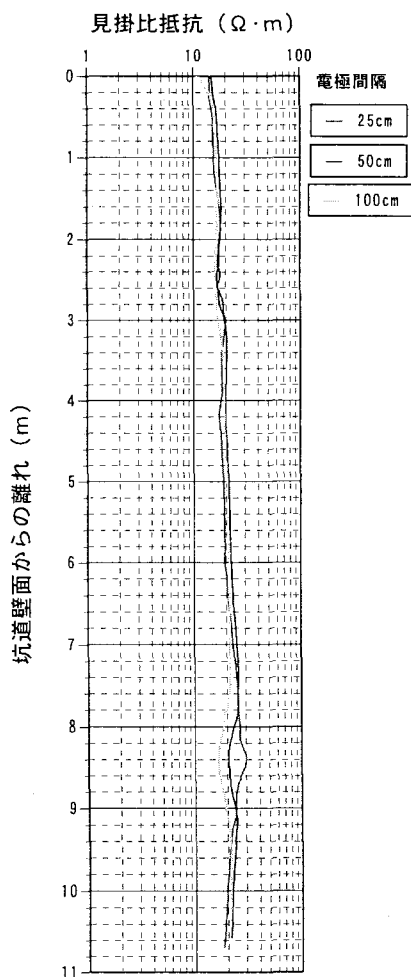


図-8 電気検層結果（原位置試験）

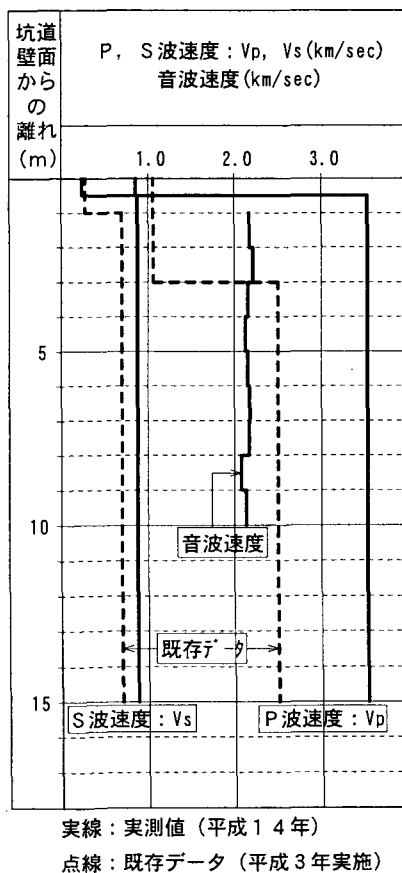


図-9 速度検層結果、音波検層結果（原位置試験）

6. 考察（坑道周辺岩盤の現状および既存データとの比較）

坑道掘削開始から約 13 年が経過し、坑道周辺岩盤の現状をこれまでに述べた室内試験結果および原位置試験結果から考察した。また、坑道周辺岩盤が坑道掘削直後と比べてどのように変化したかを既存データ（掘削直後の平成 3 年に実施した室内試験：超音波速度測定、原位置試験：速度検層）と比較することにより（図-6, 9）、掘削開始後 13 年経過した時点での坑道周辺岩盤の長期安定性の評価を行った。ただし、平成 3 年に実施した超音波速度測定結果は、測定データが少ないため代表的な値を示した。ここで、ゆるみ領域を弾性波速度および比抵抗値が低下する領域と定義する。

＜坑道周辺岩盤の現状＞

- ①坑道周辺岩盤はほぼ飽和状態にあり、風化領域は発生していない（室内試験結果より）。
- ②室内試験結果より、坑道掘削に伴うゆるみ領域が発生しており（湿潤密度試験、超音波速度試験、比抵抗測定）、その領域は水で満足された状態にある。比抵抗値および弾性波速度の低下位置から判断すると、その領域は坑道から 2～3m 程度と推測される。ただし、その範囲は、その他の試験結果を踏まえて総合的に評価する必要がある。
- ③原位置試験結果より、比抵抗値が坑道周辺で低下しており、その範囲は室内試験同様 2～3m の範囲と推測される。速度検層結果（P 波速度 3.5km/sec, S 波 0.9km/sec）は、既存データによる測定結果（P 波速度 2.0km/sec, S 波 0.7km/sec）と比べて速い結果が得られた。この値を検証する目的で音波検層を実施した。測定結果は約 2.2～2.3 km/sec と既存データの測定結果および室内試験結果の P 波速度とほぼ一致する。以上のことから、速度検層結果は、別の伝達物を伝わった可能性があり、弾性波速度が低下する領域の範囲を推定することはできなかった。

＜既存データ（平成 3 年実施）との比較＞

- ①室内で実施した超音波速度測定結果より、坑道周辺で弾性波速度の低下が見られるものの、坑道周辺岩盤全体としては、弾性波速度（P 波速度 2.0～2.2km/sec, S 波 0.9km/sec）の著しい変化は認められず、坑道周辺岩盤は安定した状態にあると推測される。
- ②原位置で実施した速度検層結果は、別の伝達物を伝わって測定された速度と考えられるため、坑道の安定性評価に利用することができなかった。この結果を検証する目的で実施した音波速度測定結果を見ると、坑道周辺岩盤での著しい変化は認められず、現在、坑道周辺岩盤は安定した状態にあるものと思われる。

7. おわりに

堆積軟岩を対象として、長期間経過した坑道周辺岩盤のゆるみ・風化状況を調査し、時間経過が坑道周辺岩盤に及ぼす影響を評価した。その結果、①コア観察結果より、坑道周辺岩盤には風化領域は存在しない、②坑道壁面から約 2～3m に範囲でゆるみ領域が存在している可能性がある、③平成 3 年に実施した結果と比較して、坑道周辺岩盤の力学特性には大きな変化はなく、現在は安定した状態にある、との結果が得られた。今後は、これらの調査結果を踏まえた岩盤の長期安定予測に反映していきたいと考えている。

8. 参考文献

- 1) 越智健三, 壺内達也：大深度地下開発フィールド実験－STUD プロジェクトについて－, 地下空間利用シンポジウム'93, 土木学会, pp.79-88, 1993.