

ボアホールジャッキ試験を用いた変形係数と初期応力の解析

川崎地質株式会社 ○相澤 穂高, 大泉 涼

1. はじめに

(1) 背景

トンネル等の地下構造物を設計・施工する際には、岩盤の変形係数や初期応力を把握することが重要である。これらの情報は設計・施工の安全性や経済性に直結するため、精度の高い測定が求められる。従来、初期応力を測定する方法は、水圧破碎法や円錐孔底ひずみ法等が適用されてきた。そこで、坑道内での作業性や測定の簡便性に優位性のあるボアホールジャッキ試験により、変形係数と初期応力を取得する手法を開発した。

(2) 目的

川久保ほか(2020)¹⁾、川久保(2022)²⁾では、ボアホールジャッキ試験を用いた新しい初期応力測定手法が提案されており、従来の手法よりも効率よく初期応力を評価できることが示されている。また、川久保ほか(2022)³⁾において、異方性理論を用いた変形係数の解析法が提案されている。これらの研究を基に、当社保有のボアホールジャッキ試験機(KKTシステム)を改良して適用することで、初期応力を測定する技術を構築した。

本論では、KKTシステムを用いた変形係数と初期応力の測定および解析手法について、実際に現場で測定したデータとその解析結果とともに報告する。

2. 変形係数・初期応力の測定および解析

(1) 測定手法

ボアホールジャッキ試験は、JGS3532 2012に適用される地盤の変形係数を測定する、等変位方式の孔内载荷試験である⁴⁾。この試験に適合するKKTシステムにジャイロセンサーを搭載したことにより、どのような方向のボーリング孔においても、载荷方向を方位・傾斜・回転の3つの要素で設定できるシステムに改良した。現場測定では、所定の深度までゾンデを降下させた後、ゾンデの上部に搭載したジャイロセンサーで载荷方向を設定し孔内载荷試験を行う。载荷方向については、同じ深度において、0°、45°、90°、135°の計4方向計測することを基本とする(図-1)。

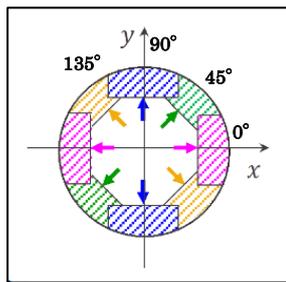


図-1 4方向の载荷

(2) 解析手法

①初期応力の解析

測定したデータから初期応力 p_0 を推定する。岩盤をボーリングで削孔した時には、岩盤に加わる応力の影響で孔壁は変形する。そのため、試験開始直後は、ボーリング

掘削前の初期状態に戻る段階といえる。一定の圧力を加えると、初期状態に戻り、変位と圧力のグラフの傾きは概ね一定になる(図-2)。この状態は、岩盤に作用している応力に対抗し、変形している段階である。グラフの傾きが直線に変化する点が、初期応力と载荷圧力が等しいと言える。4方向の初期応力 p_0 を求めることで、岩盤の最大・最小主応力と作用角度を求めることができる。

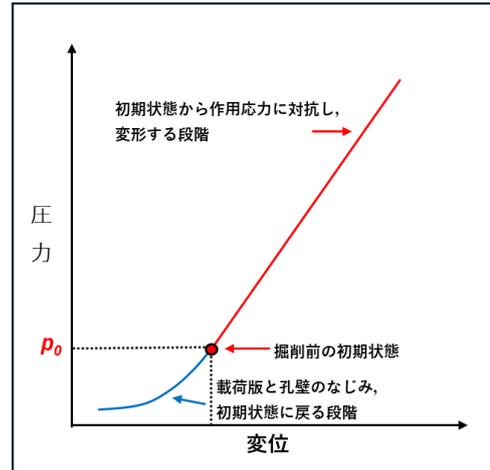


図-2 初期応力 p_0 イメージ

解析には以下の式を用いる¹⁾。

$$p_0 = A_1(\alpha)\sigma_1 + A_2(\alpha)\sigma_2 \quad \dots\text{式-1}$$

ここに、

p_0 : 初期応力, A_1, A_2 : 応力感度係数,
 σ_1, σ_2 : 岩盤の最大・最小主応力, α : σ_1 の作用角度

②異方性理論を用いた変形係数の解析

孔内载荷試験を岩盤で複数回行ったとき、変形係数や弾性係数のデータに差がみられることがあり、解析ではこれらのデータの差はばらつきとして処理されてきた。しかし岩盤は、層理、片理、節理などの構造的な異方性を持つ場合が多い。4方向で変形係数を測定し、異方性解析することで変形係数測定の精度向上が見込まれる。解析には以下の式を用いる³⁾。

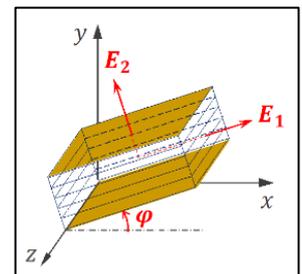


図-3 異方性パラメータ

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta u} = \frac{1}{r} \cdot \Psi(E_1 \cdot E_2 \cdot \varphi) \quad \dots\text{式-2}$$

ここに、

K : 地盤反力係数, Δp : 圧力増分, Δu : 変位増分,
 r : ボーリング孔半径,

$\Psi(E_1 \cdot E_2 \cdot \varphi)$: E_1, E_2, φ によって得られる関数(図-3)

3. 解析結果

宇都宮市周辺に分布する新第三紀中新世大谷層（火山礫凝灰岩、大谷石）を対象に、当社保有のKKTシステムを用いて2度の变形係数と初期応力の測定を行った。その解析結果を下記に示す。

(1) 2023年12月

GL-22.35m, 23.25m, 24.00mの3深度で試験を実施した。試験の結果を図-4に示す。变形係数の異方性解析において、 E_1/E_2 はいずれの深度も1.2程度と小さい値を示した。応力については、最大・最小主応力の方向にやや差がみられるものの、概ね北西-南東方向が最大主応力であるという結果が得られた。

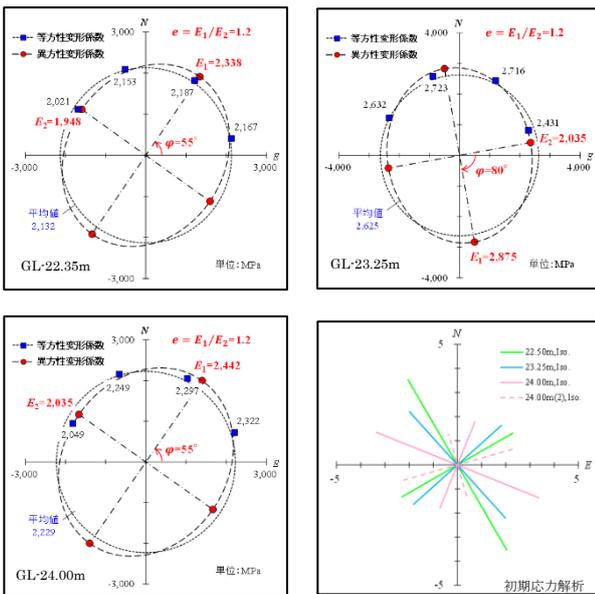


図-4 変形係数・初期応力解析 (2023年12月)

(2) 2024年4月

試験はGL-25.8m, 26.6mの2深度で実施した。図-5に試験の結果を示す。

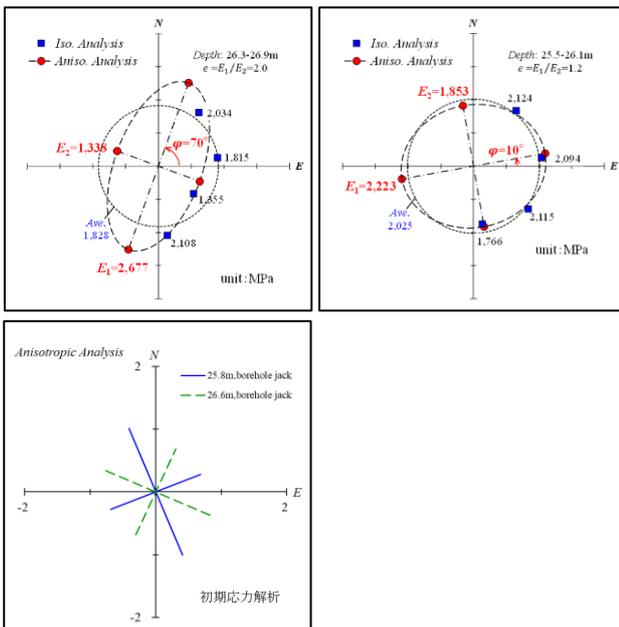


図-5 変形係数・初期応力解析 (2023年12月)

变形係数については、GL-26.6mのデータについては E_1 、 E_2 の差が大きい結果となったが、GL-25.8mのデータでは大きな差がみられなかった。応力については、2023年12月のデータ同様に、概ね北西-南東方向が最大主応力であるという結果が得られた。

4. 今後の展望、EDZの評価

ボアホールジャッキ試験を用いた初期応力の測定では、従来の手法より効率的に初期応力 p_0 を測定することが可能になった。異方性変形係数の測定・解析と合わせることで、大深度トンネルの地山評価や地層処分における地下坑道でのEDZ評価への適用が期待される(図-6)。今後も、大深度での計測が可能なKKTシステムの開発や、変形係数・初期応力測定に関する測定・解析手法の研究を続けていく予定である。

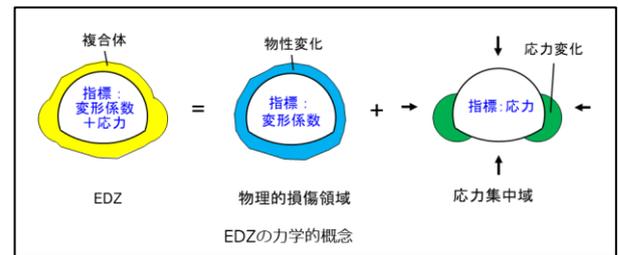


図-6 EDZの評価

5. 謝辞

本手法による原位置試験および解析において、安藤ハザマの川久保昌平氏には多大なご指導を賜りました。ここに感謝申し上げます。

《引用・参考文献》

- 川久保昌平, 村上祐治, 長澤寛和, 谷和夫: ボアホールジャッキ試験による新たな岩盤初期応力の評価理論の提案, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 76, 2020.
- 川久保昌平: ボアホールジャッキ試験による岩盤応力測定法, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, III-03, 2022.
- 川久保昌平, 大野宏和, 松井裕哉, 富樫陽太, 谷和夫, 加藤猛士: ボアホールジャッキ試験による異方性岩盤のヤング率解析法, 地盤工学ジャーナル, 17巻(2022)3号, 2022.
- 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説—二分冊の2—, 第8編 載荷試験, pp. 661-696, 丸善, 2013.