

フード付掘削機でのグリッパー載荷試験の試み GRIPPER LOADING TEST IN HOODED TUNNEL EXCAVATION MACHINE

大里 祥生*・里 優*・飯星 茂*

Yoshio OSATO, Masaru SATO and Shigeru IIHOSHI

In tunneling with the TBM, the loading test with the main grippers are often conducted to estimate the deformability of the rock mass. In this study, loading tests with grippers of a hooded tunnel excavation machine were performed. The elastic moduli of the rock mass were estimated from the loading-displacement curves based on the finite element analysis. The Young's moduli of the rock mass obtained from the gripper loading tests were discussed by comparison with the laboratory test results and the elastic modulus evaluated from the rock displacements measured with an extensometer. The gripper loading test is useful in that the elastic properties of the rock mass can be approximately estimated without disturbing the tunnel excavation processes.

Keyword: gripper loading test, tunnelling, modulus of deformation, in-situ test,
tunnel excavation machine, ground displacement.

1. はじめに

TBMに代表される機械掘削では、事前の地質調査や前方探査などのほかに、掘削中の機械データから地山特性を調べる事が可能である。筆者らは、既に供用中であったフード付トンネル掘削機の、シェル本体に装備されているグリッパーを用いて載荷試験を行い、地山のヤング率を求めることを試みた。グリッパー載荷試験では、グリッパージャッキを地山に押し当て、そのときの圧力と変位の関係を得る。そのため、本試験は、孔内載荷試験や平板載荷試験のスケールを大きくしたものと捉えることができ、岩盤の弾性定数を求めることができる。また、節理などの不連続性やゆるみなどの不均質性を包含した、トンネル周辺地山全体のマクロな変形特性を把握することが可能である。

本掘削機のグリッパーは、一般的な一般的なTBMのメイングリッパーとは異なり、円筒形をした8つのグリッパーがシェル上に分散して配置されている。このため、本報告では二次元弾性FEM解析に基づき、載荷試験によって得られた圧力～変位曲線の傾きから地山の剛性を算定した。また、得られた値を他の試験結果と比較検討し、グリッパー載荷試験結果の妥当性を検討した。なお、試験を行ったトンネルは、水平な地層を形成する堆積岩中に掘削されており、かぶり厚は約50mである。試験区間における切羽は主に泥岩質で、砂岩との互層が一部で観察されている。

* 正会員 大成建設(株)技術研究所

2. グリッパー載荷試験

2.1 グリッパー載荷試験方法

試験に用いた掘削機は、直径 5.5m、長さ 9.1m の自走式フード付トンネル掘削機（シールドタイプ+ロードヘッダー型掘削機）である。この掘削機は地山が良好な場合、前胴の姿勢保持ジャッキと可動ソリジャッキ、後胴のグリッパージャッキを地山に張り出してロードヘッダーで掘削し、グリッパー反力がとれない地山の悪い場合にはシールドジャッキを用いて前進する。ロードヘッダーや各ジャッキの制御は、オペレーターが運転席で地山の状況に合わせて自由に設定可能となっている。図-1 に、試験を実施した掘削機のグリッパー部断面を示す。

グリッパー載荷試験とは、グリッパージャッキの張り出し時にその変位と圧力を計測し、地山の剛性を調べようとするものである。本掘削機は既に供用中であり、グリッパージャッキに変位計を組み込むことが不可能であった。そのため、グリッパージャッキシリンダーに流入する油の流量を計測し、それをシリンダー断面積で除した値をグリッパーの変位とした。グリッパー載荷試験は、図-2 に示すようにグリッパー用の油圧系統にバイパスを設け、そこに流量計と圧力計を接続し、出力をX-Yレコーダに記録することにより行った。試験は、数ヶ所のトンネル断面で上半4つ（図-2 中、No.1,2,7 及び 8）のグリッパージャッキを張り出して実施した。試験手順は、計測機器をセットした後、グリッパージャッキ圧を約 50kgf/cm² (面圧 4.3kgf/cm²) まで加圧し、ジャッキ変位がほぼ停止するのを確認した後、350kgf/cm² (面圧 30kgf/cm²) まで加圧することとした。

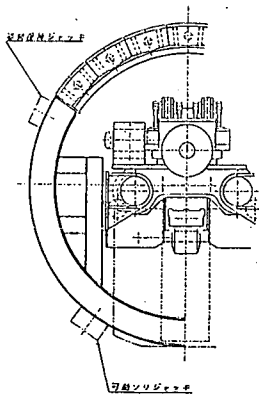


図-1 掘削機の断面図

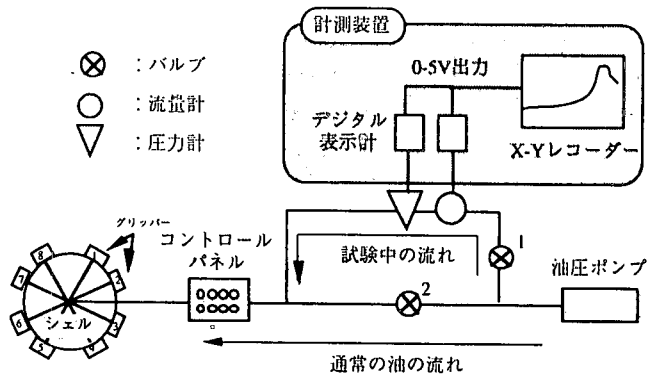


図-2 グリッパー載荷試験時の油圧の流れ

2.2 グリッパー載荷試験結果

図-3 に、トンネル掘削中の 6 断面（A～F）におけるグリッパー載荷試験の結果を示す。同図には、各曲線の傾きであるジャッキの面圧力(σ_{test})／変位(u_{test})の値も併せて示した。各曲線のストローク長さは、載荷した 4 つのジャッキストローク長さの平均である。この図より、以下のことがわかる。

- ①各曲線とも $\sigma_{test}=5\text{kgf/cm}^2$ を加えてもジャッキが直ちに張り出されることはなく、ジャッキピストンに摩擦力があることがわかる。
- ② $\sigma_{test}=5\text{kgf/cm}^2$ で圧力を保持しているときのジャッキストロークの増加は、ジャッキが地山に接するまでの距離と、ほとんど圧力を加えること無しに閉じる亀裂の変位の和になっていると考えられる。
- ③曲線 E は、他の試験結果と異なる形を示しており、2 つの変曲点がみられる。これは、孔内載荷試験

を軟質岩地盤において行った場合などでも観察されるものであり、文献⁹⁾によれば一次変曲点の荷重強度を P_0 、二次変曲点を P_y (降伏圧) と称している。 P_0 は載荷板のなじみが終了し、あるいは応力解放を受けた壁面が掘削前に近い状態に戻った点、 P_y は地盤が弾性状態を過ぎて次第に破壊が生じ始めた点と考えられている。したがって、地山のヤング率は一次変曲点と二次変曲点の間の傾きをもとに算定することとした。なお、 P_y は曲線 B, F にも見られた。

- ④曲線 E が波を打ったような曲線になっているのは、ストロークの計測値が4つのジャッキストロークの平均値であり、それぞれのジャッキが接する地山の状況に違いがあるためと考えられる。

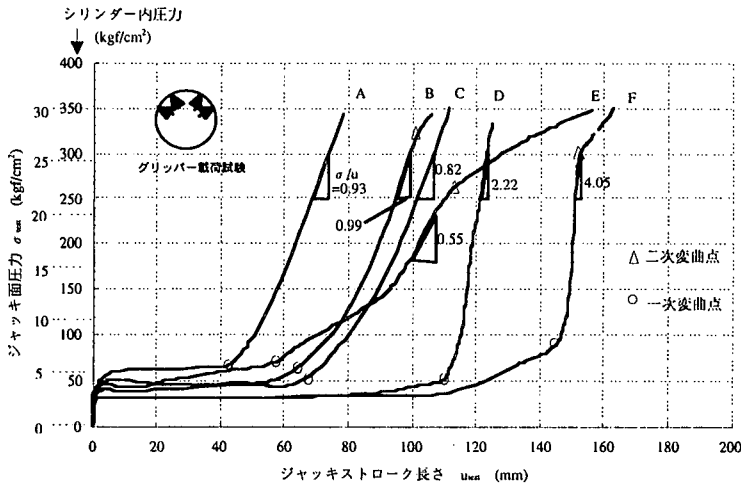


図-3 グリッパー載荷試験結果

2.3 ヤング率の算定

地山のヤング率を算定するために、二次元弾性 FEM 解析を行った。解析では、等方均質な地盤を仮定し、トンネル内壁からグリッパー位置に圧力 ($\sigma_{sim}=30\text{ kgf/cm}^2$) を与えたときの、その位置で生じる変位 (u_{sim}) を求め、これとヤング率 E との関係を得る。グリッパー載荷試験によって求められた圧力～変位曲線の傾き (σ_{test}/u_{test}) と、解析結果を比較することで地山のヤング率を推定する。

解析領域はトンネル直径の約 20 倍とし、平面ひずみ問題とした。解析条件を表-1 に、解析モデルを図-4 に示す。グリッパーの位置には剛性の高い板を当てて一様な圧力を加えた。また境界条件は、掘削機のシェルが地盤に接している領域の xy 変位を拘束し (図-4 中、 $\triangle$ の位置)、解析領域の上下面を y 方向拘束、左右を x 方向拘束とした。

解析の結果、ヤング率 ($E=10,000\text{ kgf/cm}^2$)、ポアソン比 ($\nu=0.4$) のときの σ_{sim}/u_{sim} の値は $52.4\text{ kgf/cm}^2/\text{cm}$ であった。これより、式(1)の関係を得ることができる。

$$E=K(\sigma_{sim}/u_{sim}) \quad K=190 \text{ (cm)} \dots\dots\dots (1)$$

この式に、グリッパー載荷試験から得られた面圧力 (σ_{test}) / 変位 (u_{test}) の値を代入し、各試験断面での地山変形係数を算定した。結果を表-2 に示す。

表-1 FEM 解析条件

解析条件	設定値
材料モデル	二次元弾性
問題特性	平面ひずみ問題
トンネル半径	5.52(m)
解析領域	100×50(m) 半断面
要素数	816
接点数	2537
ヤング率(5case)	10,000 (kgf/cm ²)
ポアソン比 (3case)	0.4
グリッパー 載荷圧力	30 (kgf/cm ²)

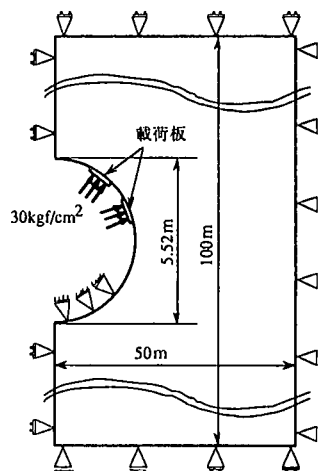


図-4 解析モデル

表-2 各断面での地山変形係数や岩石試験結果

計測断面	A	B	C	D	E	F
$\sigma_{rcs}/(u_{rcs} \cdot 0.1)$ (kgf/cm ² /cm)	9.3	9.9	8.2	22.2	5.5	40.5
算定された地山ヤング率 (kgf/cm ²)	1,767	1,881	1,558	4,218	1,045	7,695
針貫入試験による一軸強度換算値 (kgf/cm ²)	20	-	33	40	37	48
採取岩石の一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)				140		115
採取岩石のポアソン比						0.42
採取岩石のヤング率 (kgf/cm ²)				62,000		31,000
一点式地中変位計測の実施		○				
調査ボーリングコアでのヤング率 (kgf/cm ²)			5,000 ~ 20,000			

3. グリッパー載荷試験結果の考察

3.1 他の試験結果との比較

表-2 には、算定した地山ヤング率とあわせて、一軸強度試験結果、事前調査ボーリング結果、針貫入試験結果を示した。表からわかるように、グリッパー載荷試験で求めたヤング率は、一軸試験、ボーリング調査結果でのそれに較べてかなり小さい。これは、グリッパー載荷試験が、掘削によりゆるんだ領域や種々の不連続面の影響を含めた巨視的な地山の剛性を求めていることに一因があると考えられる。文献⁹⁾によると、ゆるみ領域と非ゆるみ領域の剛性には1 オーダー以上の大きな差があると報告されているが、今回の載荷試験で求めたヤング率も同様な結果となっている。ただし、地山のグリッパー接地面は、平板載荷試験などと異なり表面仕上げや整形することは困難なため、平板載荷試験などと較べると得られるヤング率にばらつきがあると考えられる。

3.2 地中変位計測結果との比較

断面 B 近傍では、左側スプリングライン上に長さ 1.95m の一点式地中変位計²⁾を設置して、切羽進行に伴う地中変位を計測した。計測結果を図-5 に示す。ここではその変位計測結果を、円孔を有する二次元弾性体での円孔周辺の変位理論式³⁾に代入して、地山のヤング率を推定し、グリッパー載荷試験により得ら

れたものと比較する。

いま、力学的に平衡な無限弾性体に半径 $r=r_i$ の円孔を考え、境界条件が $r=r_i$ において $\sigma_r=\sigma_t=\sigma_o$ の等方圧状態と仮定すると式(2)、(3)が得られる。なお、 $a=r_i/r$ とする。

$$\sigma_r = \sigma_o(1-a^2) \dots\dots\dots (2) \qquad \sigma_t = \sigma_o(1+a^2) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、次のように定義して、

$$\overline{\sigma_r} = \sigma_r - \sigma_o \dots\dots\dots (4) \qquad \overline{\sigma_t} = \sigma_t - \sigma_o \dots\dots\dots (5)$$

円孔中心から半径 r での微小要素の r 方向ひずみを求めると、式(6)となる。

$$\frac{dw_r}{dr} = \frac{1}{E}(\overline{\sigma_r} - \nu\overline{\sigma_t}) = -\frac{\sigma_o}{E}a^2(1+\nu) \dots\dots\dots (6)$$

最終的に、半径 r での変形量は式(7)となる。

$$w_r = -\frac{1+\nu}{E}\sigma_o\int_r^\infty\left(\frac{r_i}{r}\right)^2dr = -\frac{1+\nu}{E}\sigma_o\frac{r_i^2}{r} \dots\dots\dots (7)$$

地中変位は、切羽から 0.2 D (D : トンネル直径) 離れた位置で計測開始している。図-6 の弾性特性曲線⁴⁾に基づけば、変位計が捉えた変位は掘削による全変位量の約 1/3 である。従って、計測区間における掘削による全変位量は $w=0.7\text{mm} \times 3=2.1\text{mm}$ と推定される。

式(7)に、かぶり厚 50 m より初期応力 (σ_o) = 10 kgf/cm²、ポアソン比 (ν) = 0.4、TBM 半径 (r_i) = 276 cm、変位計の長さ + r_i (r_e) = 195 + 276 = 471 cm、推定された全変位量 (w) = 2.1 mm を代入すると、ヤング率 (E) が式(8)より求められる。

$$E = -\frac{1+\nu}{w}\sigma_or_i^2\left(\frac{1}{r_i}-\frac{1}{r_e}\right) = -\frac{1+0.4}{0.21} \times 10 \times 276^2 \left(\frac{1}{276}-\frac{1}{471}\right) = 7,618 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \dots\dots\dots (8)$$

以上のように、地中変位から算定されたヤング率は、グリッパー載荷試験のヤング率より若干大きい値であるものの、ほぼオーダー的に等しいことがわかる。

グリッパー載荷試験結果よりヤング率を求める際には、グリッパーが装備されているシェルを剛体と仮定しているが、実際には載荷によりシェルが変形している可能性がある。また、ジャッキストロークを油の流入量で計測しているが、油圧管路や油自身が加圧により変形し、ストロークの変位に相当する油量より多くの流入が計測されている可能性がある。これらの変位が計測値に含まれているため、見かけ上、グリッパー載荷試験によるヤング率が低く算定されていることが考えられる。さらに、本試験では載荷時の応力～変位関係を用いてヤング率を算定しているが、このときの変位には載荷面と地山のなじみや、地山表面部の凹凸のつぶれなどが含まれていると考えられ、これもヤング率を低く見積もらせていると考えられる。

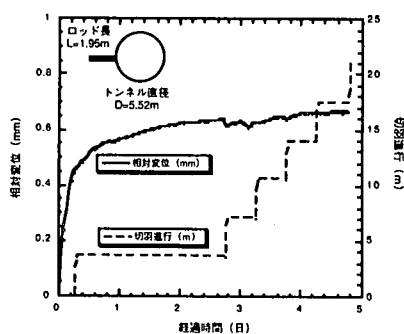


図-5 地中変位計測結果

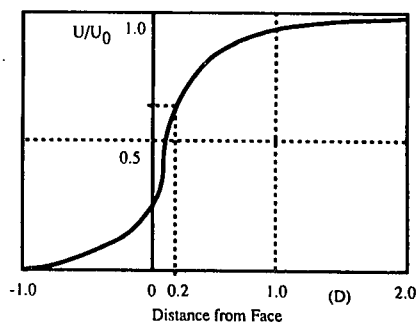


図-6 弾性特性曲線⁴⁾

4. まとめ

本報告では、フード付トンネル掘削機でグリッパー載荷試験を実施し、地山のヤング率に相当する値を求め、その値の妥当性、試験の適用性を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) グリッパー載荷試験は、平板載荷試験や孔内載荷試験のように精度の高い計測結果は得られないものの、施工を妨げず、簡易な計測装置で実施可能であり、トンネル周囲の岩盤のヤング率を把握するには有効な試験法である。
- (2) グリッパー載荷試験によるヤング率は、岩石試験や地中変位計測から求めた値と比較することにより、ほぼ妥当な値であることが確認できた。

本試験は使用中の掘削機を一部改良して行ったものであるが、無負荷でグリッパーを張り出した場合の摩擦力や、油圧系統の変形、シェルの変形性などを調査することができず、ヤング率の算定にあたって誤差を生む要因となった。また、載荷時だけでなく除荷時の変形も計測しておく必要を感じた。これらの知見は、今後のTBMでのグリッパー載荷試験などに反映していきたい。また、今後は詳細な地質調査とともに、グリッパー載荷試験結果を支保工の設計などにも役立てていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：孔内載荷試験法の現状と課題 -指針化の試み-，昭和63年
- 2) 大里・里・飯星：トンネルにおける簡易岩盤計測器機の開発，第27回岩盤シンポジウム，pp.301-305，1996.
- 3) A.R.Jumikis；Rock Mechanics, Trans Tech Publications，pp.217-220，1979.
- 4) 里・亀村：切羽の進行を考慮したトンネルの二次元平面ひずみ弾塑性解析，第15回岩盤シンポジウム，pp.150-153，1983.