

TBM のグリッパーを利用した岩盤試験法の検討

西松裕一¹・前原雅幸²・古賀 明³

¹正会員 工博 東京大学名誉教授

²正会員 東京電力(株)神流川水力建設所 (〒370-16 群馬県多野郡上野村大字勝山 212-1)

³正会員 (株)奥村組 東京支社 土木設計部 (〒134 東京都江戸川区西葛西 7-12-6)

トンネルをTBMで施工する場合、TBMに装備されているグリッパーの変位量と荷重を正確に計測することが出来れば、施工中にトンネル周辺の岩盤の変形特性を連続して把握することができる。本研究はTBMのグリッパーによる載荷と同様な条件を設定し、その試験結果と標準的な平板載荷試験結果との相互比較を行い、その適応性を検討した。その結果、グリッパーによる岩盤試験法は平板載荷試験結果を補完できる可能性のある試験法であることがわかった。

Key Words : rock deformability test, modulus of elasticity, TBM, gripper jack

1. はじめに

近年、揚水式発電の大容量化に伴い、水圧管路が落差の大きい長距離の斜坑となる傾向にある。このため、斜坑部のパイロットトンネルを安全で急速に施工するためにTBMが採用されることが多くなってきた。水圧管路の鉄管は、周辺岩盤に荷重を分担させる構造として設計されており、岩盤の変形特性の大小により、鉄管の厚さが異なり、建設コストに与える影響は多大なものとなっている。このため、通常パイロットトンネルの掘削完了後、平板載荷試験や弾性波探査を行って周辺岩盤の変形特性の精度の良い予測に努めている。現実には、パイロットトンネル内で平板載荷試験を数多く実施することは経済的にも工程的にも制約が多く、数ヶ所の平板載荷試験結果から水圧管路周辺岩盤の変形特性を設定せざるを得ない。

パイロットトンネルをTBMで施工する場合、TBMに装備されているグリッパーは平板載荷試験と同じ様に剛板を介して岩盤を加圧しており、加圧時の荷重と変位を正確に計測することができれば、岩盤の変形特性を把握できる可能性がある。掘進中に得られるグリッパー載荷のデータを利用できれば、パイロットトンネル掘削完了後に平板載荷試験を実施する必要がなくなり経済的にも工程的にもメリットが大きいものになると思われる。しかも、TBM前部で岩盤の変形特性が掘進中に連続的に得られるため、弱層部対策など施工管理するうえでも有益である。

以上のことから、グリッパーを用いて岩盤の特性を推定する方法には多くの利点があり、過去に試みられた例^{1),2)}はあるが、現在のところ標準的な平板載荷試

験による結果との関連性は明らかになっていない。グリッパーはあくまでTBMの自重あるいは推力を支えるための装置であり、標準的な平板載荷試験とは載荷装置および載荷方法において異なり、同程度の信頼できる載荷試験データを得ることはむずかしく、多くの課題があると考えられる。

本研究は、TBMのグリッパーによる載荷と同様な条件を設定して実施した試験結果と、標準試験法である平板載荷試験による結果との相互比較を行い、グリッパーによる岩盤試験法の適応性を示すものである。

2. TBM グリッパーの機能と岩盤試験法としての問題点

(1) TBM グリッパーの構造と機能

図-1に葛野川発電所の水圧管路のパイロットトンネルの掘削に使用されるTBMの鳥瞰図を示す。このTBMは、カッターヘッド、前胴および後胴とからなり、前胴にはフロントグリッパー、後胴にはメイングリッパーが装備されている。通常、メイングリッパーをトンネル壁面に張り出し、これを反力受けとしてスラストジャッキで推力を与え掘進する。スラストジャッキの1ストローク分の掘進が終了すると、フロントグリッパーを張り出しメイングリッパーを除荷した後、スラストジャッキを縮め後胴部を前方に引寄せ、以後これを繰り返すことにより、順次前方に掘進する。

図-2にフロントグリッパー部の横断面の構造を示す。フロントグリッパーは4ヶ所にX字状に設置されている。各グリッパーはスキンプレートと一体化さ

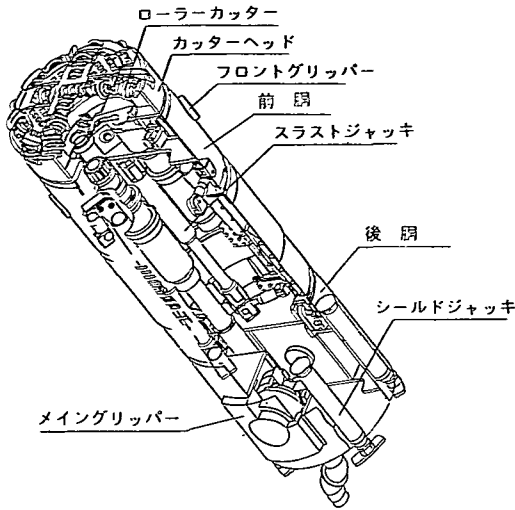


図-1 TBMの鳥瞰図

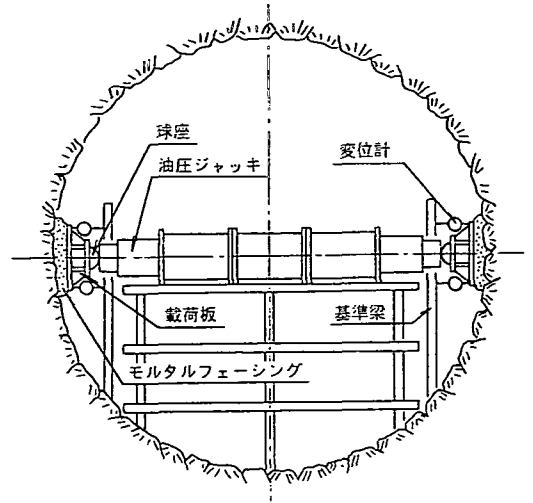


図-3 平板載荷試験の装置

さらに、掘削壁面とスキンプレートとは 30 mm 程度のクリアランスがあり、そこに掘削時に発生するスライムが充填され、載荷時にグリッパーの載荷面が直接岩盤に接触していない可能性がある。また、スライムが充填されていない場合においても、掘削壁面にはローラーカッターによる 1~2 mm 程度の溝が生じており、載荷面が全て岩盤に接触していない。

(2) 平板載荷試験法との差異

標準的な平板載荷試験法³⁾の概要を示し、グリッパーによる載荷法との異なる条件について述べる。

図-3 に一般の平板載荷試験の装置を示す。ジャッキには球座を装備し、 $\phi 30$ cm の円形載荷板で均等な変位を与えるようにする。さらに壁面を整形した上、モルタルでフェーシングする。載荷方法は荷重階を 3~4 段階ずつ区分し、載荷・除荷を繰り返しながら増加させ、最大荷重でさらに 3 回程度繰り返す。載荷速度は 0.5 MPa/分が標準で、通常試験終了まで 3~4 時間を要する。最大載荷圧力は設計荷重を基にして決められるが、葛野川発電所の水圧管路においては、9 MPa 程度になる。

岩盤の変位量は、基準梁からの変位量を 1/100~1/1000 mm の精度で正確に計測される。また、岩盤の弾性係数は荷重と変位の関係から 3. に示すブーネスキの解から求められる。しかし、これは平坦な半無限地盤を対象としており、トンネル内で実施する載荷試験では無限地盤内の円孔として円周方向の拘束効果による影響が生じる。 $\phi 30$ cm 程度の平板ではトンネル径に比べて載荷板の直径が小さいので、影響が小さいとして通常は無視されるが、直径が大きくなると、

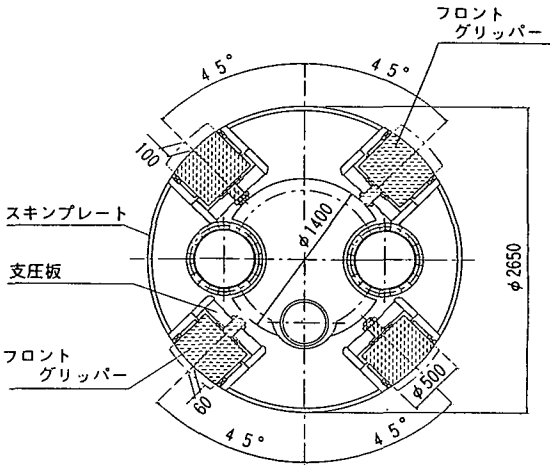


図-2 フロントグリッパーの構造

れた底部を支圧板としたボックス内に格納されている。グリッパーはそれぞれ独立に作動するが、通常 4 基を同時に数秒以内で最大荷重まで一気に載荷する。載荷能力は TBM および後続設備の重量から決定されるが、載荷時に岩盤をいためないように面圧が 5~6 MPa 以下になるように、載荷面の寸法は可能な限り大きく設定される。外径 2~3 m 程度の TBM では載荷面の直径 40~50 cm 程度となる。載荷面の形状は円形ではあるが、トンネル掘削径に合わせて周方向は曲面になっている。また、TBM の回転を防止し安定性を良くするために、グリッパーに球座は設けていない。したがって、TBM の中心がトンネルの中心からずれると偏心載荷となる。

表-1 平板載荷試験とTBMグリッパー載荷の比較

項目	平板載荷試験	グリッパー載荷	検討方法		
			平調板載荷試験を利用した	材料模型試験機を利用	数有限要素法による
地盤形状	平坦 (半無限地盤)	円弧 (無限地盤)			○
繰返し載荷回数	4回	1回	○		
載荷速度	0.5MPa/分	瞬時	○		
フェーシング	有	無	○		
載荷板の寸法	φ30cm	φ45~ φ60cm	○		
載荷荷重	9MPa~	5~6MPa	○		
スライム	無し	有り		○	
偏心載荷	無し	有り		○	

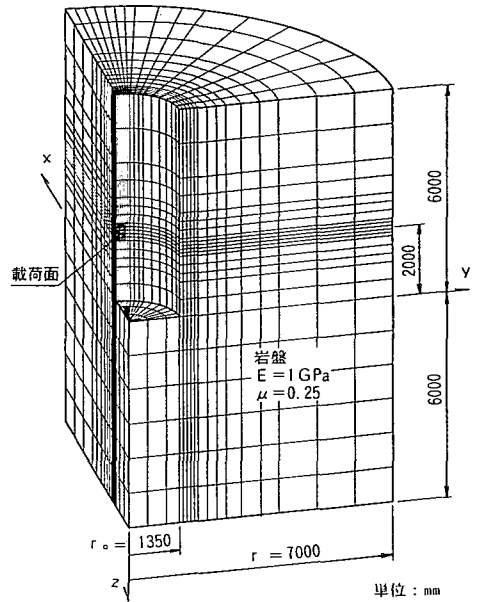


図-4 解析モデルの全体形状

影響は大きくなり無視できなくなるとされる。

以上のことから、グリッパー試験を実用化するにあたり、平板載荷試験と異なる条件について、その影響程度を予め検討しておくことが必要である。表-1は本地点における各試験条件の異なる項目とその検討方法をまとめたものである。

3. 三次元 FEM によるブーゼンスクの解の補正

(1) 解析目的

一般に平板載荷試験から岩盤の弾性係数を求めるときには、ブーゼンスクの解を基にした式(1)が用いられる。

$$E = \alpha_b \frac{(1-\mu^2) \Delta F_0}{2a \Delta \delta_0} \quad (1)$$

ここに、

E : 岩盤の弾性係数 (Pa)

α_b : 載荷板の形状に依存した影響係数

正方形 : $\alpha_b = 0.88$

円 : $\alpha_b = 1.00$

μ : 岩盤のポアソン比

$2a$: 載荷板の1辺の長さあるいは円の直径 (m)

ΔF_0 : 荷重増分 (N)

$\Delta \delta_0$: 変位増分 (m)

式(1)は半無限体の表面に荷重が作用した時の弾性理論解であり、トンネル坑内での載荷試験に適用すると、円形トンネルの円周方向の拘束効果による影響を受けて、岩盤の変位がより小さくなり、式(1)で求め

た弾性係数は大きめに評価される。したがって、トンネル坑内で載荷試験をする場合には式(1)を補正する必要がある。さらにフロントグリッパーの位置は切羽からトンネル直径以下の距離となるため、切羽の影響にも配慮する必要がある。ここでは有限要素法(FEM)による三次元の弾性解析を行い、ブーゼンスクの解と比較することより補正係数を決定する。

(2) 解析モデル

トンネルの直径($2r_0$)を葛野川発電所の水圧管路のパイロットトンネルの計画断面に合わせて2.7mとし、対称条件から切羽を有する円形トンネルの1/4をモデル化する。図-4に解析モデルの全体形状(節点数6655, 要素数5712)を示す。載荷面の位置は切羽から2.0m後方の地点である。岩盤は、弾性係数1GPa, ポアソン比0.25の均質な弾性体とした。載荷面への荷重は、 x 方向に強制変位 $Ux = \Delta \delta_0 = 1$ cmで与えた。境界の変位は、 x 方向では $y-x$ 面、 y 方向では $x-z$ 面、 z 方向では $z = \pm 6.0$ mの面で、 r 方向では $r = 7.0$ mの面で拘束されている。

(3) 解析結果及び補正係数の算定

パイロットトンネルの坑壁をフロントグリッパーで載荷する場合の岩盤の変形係数推定式は、式(1)のブーゼンスクの解に新たな補正係数 α を付加して、次のように表される。

$$E = \alpha \cdot \alpha_b \frac{(1-\mu^2) \Delta F_0}{2a \Delta \delta_0} \quad (2)$$

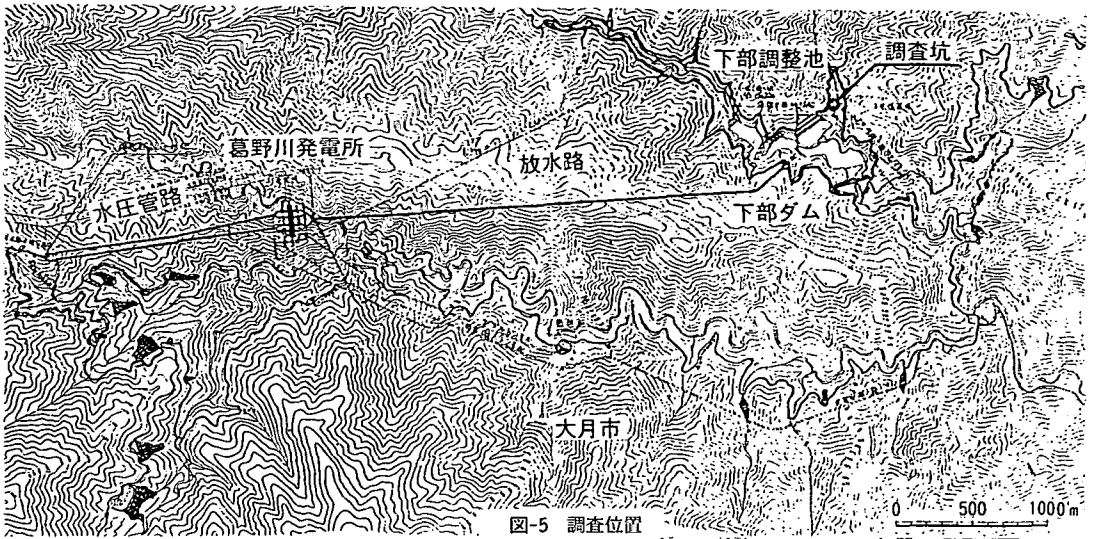


図-5 調査位置

表-2 解析ケースと α の算定結果

CASE		1	2	3
載荷板寸法 2a (cm)		30	50	50
a/r_0		0.11	0.19	0.19
切羽		無	無	有
補正係数	α	0.80	0.77	0.76
	α^* (CASE1を基準)	1.00	0.96	0.95

α : 半無限地盤上の載荷からトンネル円周面載荷への補正係数

ここで、 α は FEM 結果より得られた $\Delta F_0/\Delta \delta_0$ を式 (2) に代入することにより求める。ただし、ここでは載荷面を正方形と仮定しており、 $\alpha_b=0.88$ を用いている。表-2 に各解析条件と α の算定結果を示す。なお、CASE 1 は平板載荷、CASE 2 および CASE 3 はフロントグリッパーによる載荷を想定している。

CASE 2 と CASE 3 はほぼ同じ値であり、載荷位置が切羽から 2m 程度離れていれば切羽による影響はほとんど無いと判断される。また、一部要素分割の影響も含まれると考えられるが、CASE 1, 2 の比較から、 a/r_0 の比が大きくなるに従い、 α が小さくなる傾向が認められる。ただし $2a=50$ cm のグリッパーと $2a=30$ cm の平板とによる差は小さい。

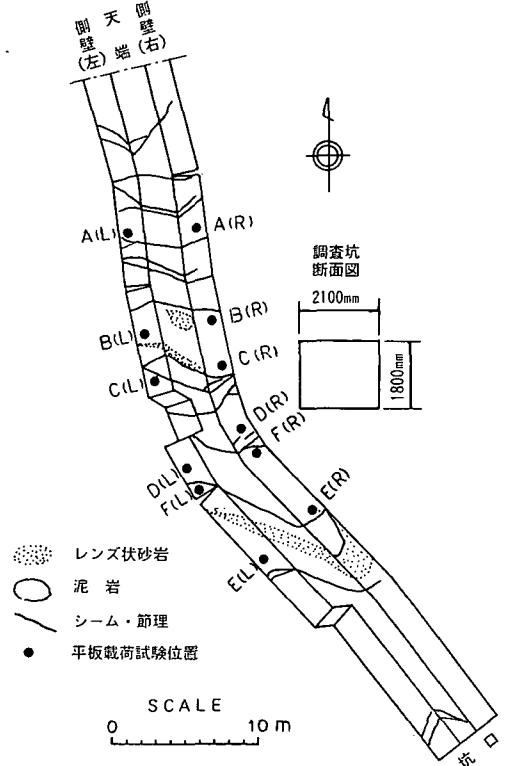


図-6 試験地点

4. 調査坑を利用した平板載荷試験

(1) 試験内容

表-1 に挙げた検討項目の大半は原位置の試験で確認することが望ましいが、事前に TBM で施工する

表-3 試験条件

場所	試験日	寸法 cm	フェーシング 状態 (有効面積)	荷重 MPa	載荷速度 MPa/分	繰返し 回数
A	1日目	φ45	有 (100%)	6 9 9	0.5 0.5 3.0	4 4 4
	2日目	φ45	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
	3日目	φ30	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
B	1日目	φ45	ほうき目 (90%)	6 9 9	0.5 0.5 3.0	4 4 4
	2日目	φ45	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
C	1日目	φ45	ほうき目 (90%)	6 9 9	3.0 3.0 0.5	10 10 1
	2日目	φ45	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
D	1日目	φ30	有 (100%)	6 9 12 15 15	0.5 0.5 0.5 0.5 3.0	1 1 1 3 1
	2日目	φ45	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
	3日目	φ60	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
E	1日目	φ45	凹凸 (50%)	6 9 9	0.5 0.5 3.0	4 4 4
	2日目	φ45	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1
F	1日目	φ45	ほうき目 (90%)	6 9 9	1.5 1.5 0.5	10 10 1
	2日目	φ45	有 (100%)	6 9	0.5 0.5	1 1

のと同程度の円形トンネルを掘削することは困難である。そこで、山梨県の葛野川発電所の下部ダム計画地域の調査坑(図-5)を利用して繰返し載荷回数、載荷速度、フェーシングの状態、載荷板の寸法、最大荷重に着目して平板載荷試験を行った。当地点の地質は、白亜紀～古第三紀の小仏層群に属し、CM～CH級の砂岩・泥岩の互層で、φ30 cmの平板載荷試験によると接線弾性係数 E_t で10 GPa～20 GPaである。

本来、岩盤が均質であれば、試験条件が異なるたびに試験位置を変えて載荷試験を行い、相互に比較すれば良い。しかし、調査坑内の岩盤は均一ではなく、試験位置がわずかに異なるだけで、岩盤の変形特性も異なることが予想され、上記の着目した項目による影響を抽出することは極めて困難と判断された。そこで、同一地点でいくつかの異なる載荷条件の試験を行うことにした。ただし、フェーシング状態や載荷板の寸法

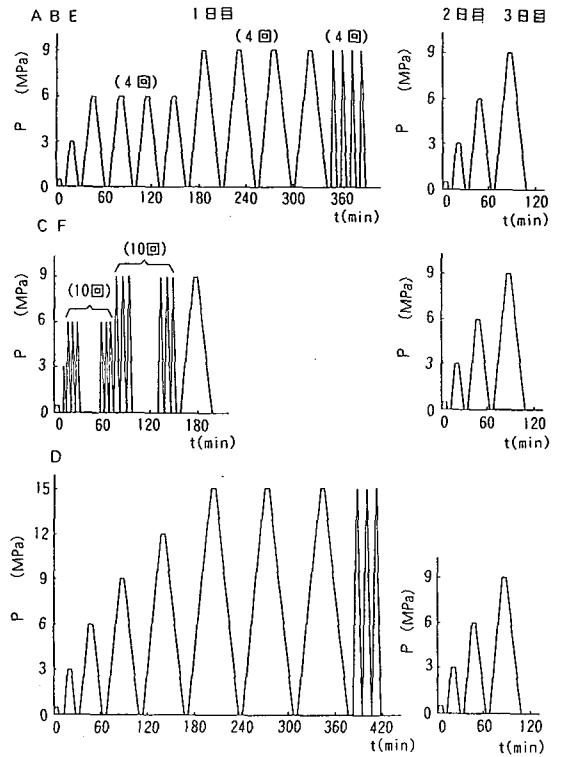
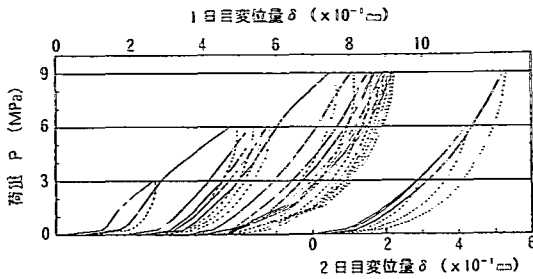


図-7 載荷パターン

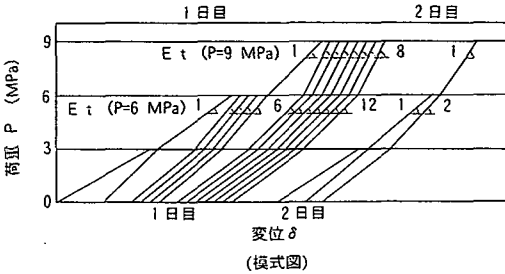
を変えて試験を行う場合、後から行った試験は、当然前に行った試験の影響を受けている。このため、荷重履歴の影響を分析したうえで、各項目の比較検討を行うことにした。

図-6に調査坑内の試験地点を示す。試験地点は破砕帯、及びレンズ状の砂岩の存在しない位置であるA～Fの6ヶ所を選定した。なお、各地点で左右2ヶ所の試験を行っている。表-3、図-7にA～Fの各試験地点における試験条件、及び載荷パターンを示す。なお、載荷面の岩盤はいずれも凹凸1～2 cm程度になるまで整形した後、速硬性のモルタルを用いて2～3 cmの厚さで標準的なフェーシングを行っている。

A地点の1日目はφ45 cmの載荷板で標準的なフェーシングを行い、標準的な載荷速度(0.5 MPa/分)でグリッパーの最大圧力(6 MPa)まで4回繰返した後、次に水圧管路の設計圧力(9 MPa)まで4回繰返し、更に同じ圧力で急速な載荷速度(3 MPa/分)に変えて4回繰返す。2日目は、全く同じフェーシング状態で標準的な載荷速度で載荷を行う。ただし、最大圧力での繰返し載荷は行っていない。3日目は、載荷板の寸法をφ30 cmに変えて、2日目と同じ方法で載荷を行う。



(A (R) 実測図)



(模式図)

図-8 荷重-変位曲線

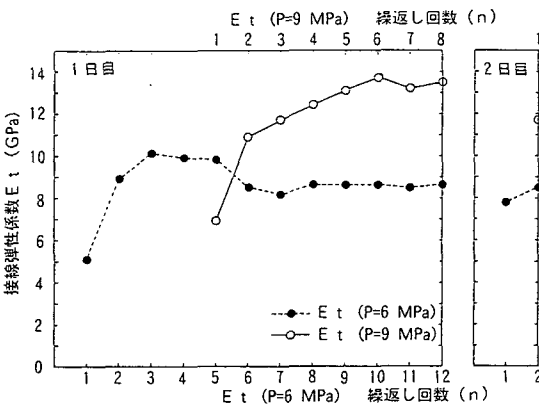


図-9 A(R)における E_t と繰返し回数 (n) の関係

B地点の1日目は、モルタルフェーシング面に人工的に深さ2mm、幅1mmの溝(ほうき目)を10mm間隔につけ、接触面積を90%に減じている。これはTBMで掘削した時に、トンネル壁面に生じるローラーカッターによる溝を模擬したものであり、岩盤をこの状態まで整形することが困難なため、モルタルフェーシング面で代用した。2日目は溝をフェーシングと同じ速硬性のモルタルで埋め戻して標準的な荷重速度で荷重を行う。他の地点の2日目は全てこれと同じ条件での荷重である。

C地点の1日目は、B地点と同じフェーシング状態であるが、圧力6MPa、及び9MPaにおいて、おのの荷重速度3MPa/分で急速に10回繰返した後、荷重速度0.5MPa/分で1回繰返す。D地点の1日目

は、φ30cmの荷重板で標準的なフェーシングを行い、荷重速度0.5MPa/分で階段状に1.5MPaまでの荷重をする。2日目はφ45cm、3日目はφ60cmに変えて、他の地点の2日目と同様な方法で行う。E地点の1日目は、モルタルフェーシング面に深さ2mm、幅5mmの溝を10mm間隔につけ、接触面積を50%(凹凸)に減じている。他の条件は、A、B地点と同様である。F地点の1日目は、C地点と同様な条件であるが、荷重速度を1.5MPa/分としている。

以上より、繰返し回数、荷重速度、荷重の影響については、各地点の1日目の試験結果から、フェーシングの影響については、B、C、E、F地点の1日目と2日目の比較から、寸法の影響については、A地点の2日目と3日目、及びD地点の1日目、2日目、3日目の比較から、それぞれの分析を試みるものである。

(2) 荷重履歴の影響

各パラメータをどの圧力レベルで比較することが妥当かを判断するために、変形特性の荷重履歴による変化を検討する。図-8に、一例としてA地点の右側(A(R))における荷重-変位曲線、及びこれの模式図を示す。他の地点においても、これとほぼ同様な曲線を呈している。図-9にA地点の圧力6MPaレベルと9MPaレベルの E_t と、繰返し回数の関係を示す。ここで、6MPaレベルの E_t とは加圧時の3~6MPa間の荷重-変位曲線の直線部分の勾配を指し、9MPaレベルの E_t とは6~9MPa間の直線部分の勾配を指す。

圧力9MPaレベルに着目した場合、その圧力で繰返し荷重を行った時は、繰返しに伴い、 E_t は増加傾向にある。しかし、翌日に荷重した時の E_t は前日の最終の値よりも15%程度減少している。一方、圧力6MPaに着目した場合、その圧力で繰返し荷重を行った時には繰返し回数に伴い E_t は増加するが、圧力9MPaまで加圧した後(繰返し回数6回目以降)の E_t は減少している。翌日に荷重した時には E_t はさらに減少しているが、2回目で増加しており、前日の最終状態とほとんど同じ値となっている。

以上のように、繰返し荷重の圧力レベルが着目した圧力レベルより大きくなると、 E_t が小さくなる傾向にあることから、繰返し回数の影響を比較する時には繰返し荷重が最大値である圧力9MPaレベルの E_t に着目することにした。また、翌日に荷重した時の E_t は、圧力6MPaレベルの場合に2回目で前日の最終状態に近づくことから、フェーシング、寸法の影響など翌日に行った試験結果と比較する時には、圧力6MPaレベルの E_t に着目することにした。

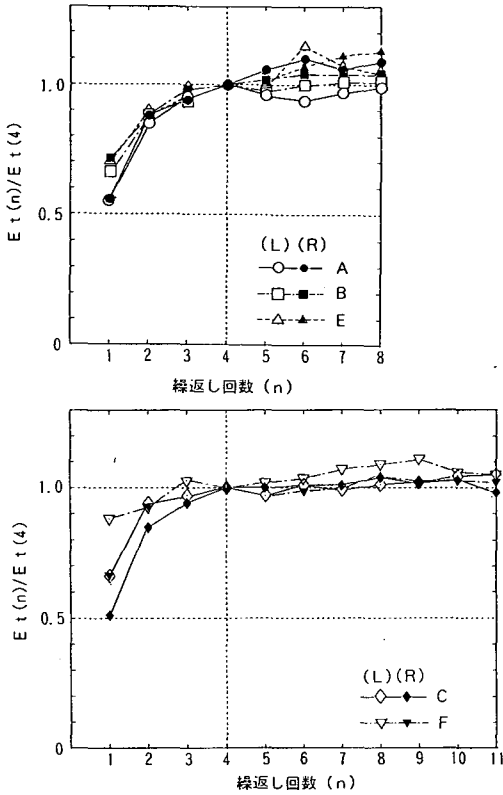


図-10 $E_t(n)/E_t(4)$ と繰返し回数(n)の関係

(3) 繰返し荷重, および載荷速度の影響

図-10に各地点の圧力9 MPaレベルの E_t と、繰返し回数の関係を示す。なお、縦軸は4回目の E_t に対する比を表している。A, B, E地点においては、4回目までは標準載荷, それ以降は急速載荷であり, C, F地点においては10回目まで急速載荷で、11回目が標準載荷である。

同図より、繰返し回数に伴い E_t は増加傾向にあるが4回目以降の増加割合は少ない。4回目を基準とすると、1回目は51~88%, 2回目は85~94%, 3回目は94~103%, 5回目以降は94~115%の範囲である。したがって、 E_t を評価するためには、標準的な平板載荷試験と同様に4回程度の繰返しが必要である。

また、A, B, Eにおいては4回目と5回目, C, Fにおいては10回目と11回目の E_t の差はほとんどない。すなわち、4回目以降においては標準の6倍程度の載荷速度で試験を行っても影響は少ないと判断できる。

(4) フェーシングの影響

図-11に、標準的なフェーシングをした時を基準とした E_t とフェーシング状態の関係を示す。

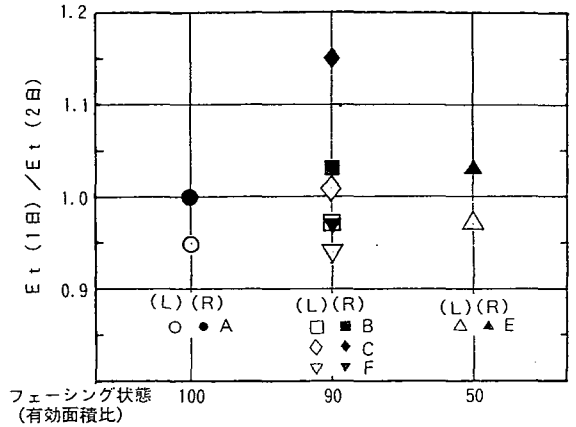


図-11 E_t とフェーシング状態の関係

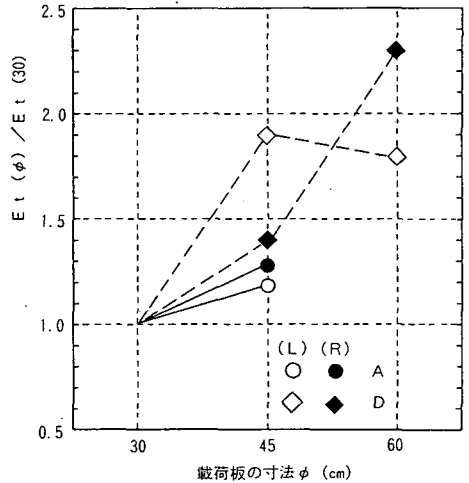


図-12 E_t と載荷板の寸法の関係

A地点では1日目及び2日目においても載荷面と岩盤との間はモルタルで標準的なフェーシングを行っているが、B, C, F地点では1日目に、フェーシング面に深さ2 mmの溝をつけて接触面積を90%に、E地点では接触面積を50%に減少させている。2日目には溝を通硬性のモルタルで埋めて、接触面積を100%としている。なお、各試験とも圧力6 MPaレベルに着目し、1日目は最終繰返し載荷時、2日目は2回目の繰返し載荷時の値を採用している。また、各フェーシング状態の E_t は、接触面積を100%として算定している。

同図より、凹凸の差が2 mm程度であれば、接触面積が50%程度に減少しても影響は少ないと考えられる。

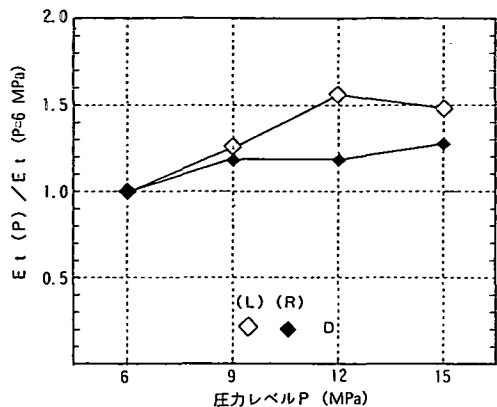


図-13 Et と圧力レベルの関係

(5) 寸法の影響

図-12に、 $\phi 30$ cmの荷荷板を基準とした E_t と荷荷板の寸法の関係を示す。ここでは、各試験とも圧力6 MPaレベルの最終繰返し回数時の E_t を採用している。

同図より、A地点では $\phi 45$ cmの E_t は $\phi 30$ cmの1.2~1.3倍となっている。D地点では $\phi 45$ cmの E_t は $\phi 30$ cmの1.4~1.9倍、同じく $\phi 60$ cmは $\phi 30$ cmの1.8~2.3倍となっている。荷荷試験後、各試験地点で採取したボーリングコアを観察した結果、各コアとも2~10数cm間隔で亀裂が生じていた。特に地表から数cmの部分はいずれも礫状化しており、岩盤が地表付近でゆるんでいることが伺える。A地点においては、(L)と(R)の亀裂の状態に大きな差異は認められなかったが、D地点においては、(R)の亀裂の間隔が深さ45 cm以深で広がっているのに対し、(L)の亀裂の間隔は深さ30 cm以深で狭くなっている傾向であった。

以上のことから、荷荷板の寸法が大きくなるほど、より広い範囲の岩盤の特性が得られ、地表付近の岩盤がゆるんでいる場合には、 E_t は大きくなる傾向にあると判断できる。

(6) 荷重の影響

図-13はD地点における圧力6 MPaを基準とした E_t と各圧力レベルの関係を示す。なお E_t は、着目した圧力レベルを2回目に通過した時の値としている。同図より圧力9 MPaは、圧力6 MPaの1.19~1.26倍となっている。他の地点の試験結果もほぼ同じ値である(図は省略)。

このように、圧力レベルにより E_t は異なるため、グリッパー最大圧力は設計圧力レベルの9 MPaまで能力を増大させることが望ましい。

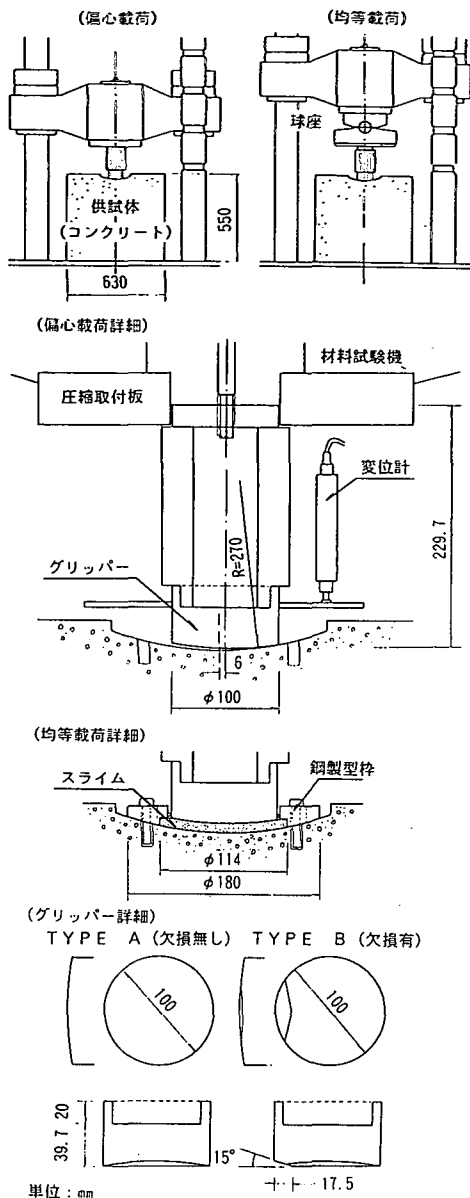


図-14 試験装置

5. 材料試験機を利用した模型グリッパー試験

(1) 試験内容

調査坑を利用した荷荷試験では判定が困難なスライム、偏心荷荷等の影響について1/5の模型グリッパーを用いた室内試験により検討した。試験装置を図-14に示す。試験対象とする模擬岩盤は材令28日の圧縮強度24 MPa、弾性係数18.9 GPaのコンクリートで作成し、コンクリート供試体表面のグリッパーと接する部分のトンネル横断面方向にはトンネル相当半径

表-4 試験内容及び結果

ステップ	グリッパー	接線弾性係数 E_t (GPa)				
		均等載荷			偏心載荷	
		スライム厚さ (mm)			スライム厚さ (mm)	
		0	2.5	5.0	10.0	5.0
1	A	① 18.9				
2	A	④ 11.1		③ 3.8 ⑤ 3.8		
	B	② 11.8		⑥ 3.4		
3	A	⑨ 5.1 ⑩ 5.1	⑩ 3.8		⑫ 2.2	⑦ 2.0
	B	⑧ 4.9		⑬ 2.8		
		⑭ 4.5				

○: 試験順序

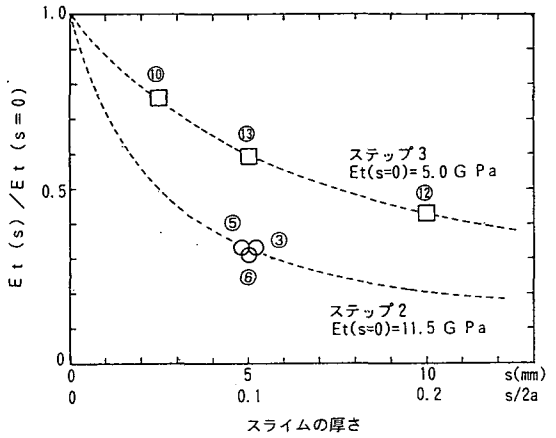


図-15 E_t とスライムの厚さの関係

27 cm の曲面状に仕上げている。グリッパーの直径は 10 cm とし、載荷面の縦断面の形状はトンネル壁面と同じ曲面である。なお、実際のグリッパーは TBM の掘進に対し抵抗を小さくするため、前方の端部を切落し、有効接触面積比を 93.5% にしている。したがって、欠損部の無い TYPE. A と欠損部の有る TYPE. B の 2 種類のグリッパー模型について比較試験することにした。

グリッパーで均等載荷をする時には、材料試験機の球座を介して載荷する。偏心載荷をする時は材料試験機に直接取付け、グリッパーの回転を拘束し、また供試体の曲面の中心を TBM とトンネルのクリアランス相当の 6 mm ずらして行う。スライムの影響を検討する時には、供試体に固定したリング状の鋼製型枠の内側にスライムを敷き詰めてから載荷する。これは実際の TBM とトンネル壁面の間に充填されているスライムの充填状態を模擬したものである。本試験のスライムは TBM の施工現場において掘削時に発生した凝灰岩のくり粉を使用し、各試験のスライムの品質を統一するために、粒径 2 mm 以下、含水比 15% に調整した。

表-4 に試験内容と結果を示す。 E_t は 4 回の繰返し載荷における荷重～変位曲線の 2～4 回の接線勾配の平均値とし、グリッパーを $\phi 10$ cm の平板としてブーゼンスクの解から求めている。最初の載荷 (均等載荷 ①) において、圧力 12 MPa で 4 回目の荷重を保持している間に、微細な亀裂の発生に起因すると思われる荷重の低下が認められた。そこで載荷 ②以降においては、最大圧力を 8 MPa とした。各載荷の 4 回の繰返し荷重～変位曲線は直線性を有し、これらの値はほぼ一定の値を示しており、異常は認められなかった。しかし、均等載荷 ②、④の E_t は ①より小さく、偏心載荷 ⑦の後の均等載荷 ⑧、⑨、⑩、⑭の E_t は、②、④

よりさらに小さい。ただし、⑧と⑭、⑨と⑩の差は微小である。すなわち、均等載荷中の供試体の性状はほぼ同一と考えられるが、偏心載荷を行うと性状は変化している。偏心載荷は供試体に接している面積が片側に集中するため、大きな圧力が生じ、①で生じたと思われる亀裂がさらに進展した可能性が考えられる。そこで、供試体の性状が同一とみなせる範囲で載荷試験順に 3 ステップに区分し、同一ステップ内での比較を行うことにした。

(2) グリッパーの形状の影響

表-4 の均等載荷 ①とほぼ同時に行った $\phi 10$ cm \times 20 cm のコンクリートの一軸圧縮試験から求めた E_t は 18.7 GPa で、均等載荷 ①の結果とほぼ同じ値となっている。また、ステップ 2 と 3 において TYPE. A と B の差異は小さい。なお、TYPE. B の値は、ブーゼンスクの解に欠損部を除いた有効接触面積と等価な円の半径を求めて修正した値を用いている。

以上のことから、載荷面が曲面をなし、一部に欠損があっても、ブーゼンスクの解を適用できると思われる。

(3) スライムの影響

図-15 に均等載荷における E_t とスライムの厚さの関係を示す。なお、縦軸はスライムが無い時の供試体の E_t に対する比を表している。

ステップ 2 において、スライムの無い供試体の E_t は平均 11.5 MPa である。この時、スライムの厚さが 5.0 mm (実規模で 25 mm) になると E_t は 30～35% に算定される。ステップ 3 においては、スライムの無い供試体の E_t は 5.0 GPa である。この時、スライムの厚さが 2.5 mm で、 E_t は 76%、5.0 mm で 59%、10.0 mm で 43% となり、スライムが厚くなるほど E_t は小さく算定される。

またステップ2と3の比較から、供試体の Et が異なれば、スライムの厚さが同じでも低減率は異なる。すなわち、スライムの存在により、弾性係数は小さめに評価され、その値はスライムと岩盤の弾性係数の比及び、スライムの厚さにより変化すると予想される。したがって、今後実際に発生するスライムの特性や付着状況を把握するとともに、できるだけスライムを除去する方法を検討することが必要と考えられる。

(4) 偏心荷の影響

表-4の⑦と⑩を比較すると偏心させて荷重した時の結果は、均等荷重と比べて低下しているのが認められる。

偏心荷重は、供試体に接触している部分が片側に集中するため、半円形状の荷重板での試験に近い状態と考えられる。偏心荷重時の接触部の形状は、岩盤の弾性係数や荷重の大きさにより変化することが予想され、さらなる検討が必要と思われるが、TBMの偏心量をできるだけ小さくするように制御してから荷重することが望ましい。

6. まとめ

TBMのグリッパーによる荷重と同様な条件を設定した試験の結果と標準的な平板荷重試験による結果との相互比較を行った。その結果、今回の試験対象となった弾性係数が10 GPa程度の岩盤であれば、グリッパーの荷重時にできる限りスライムを除去し、グリッパーの偏心を無くせば標準的な岩盤試験法から求められる Et と同程度の試験結果が得られる見通しが立てられた。

以下にその結果を要約する。

- (1)円形トンネル内のグリッパーによる荷重試験から弾性係数を求める算定式は、ブーネスクの解に三次元FEMの結果から得られる補正係数を組み込めば適用することができる。
- (2)岩盤の Et の値は、繰返し荷重回数に伴い増加する傾向があり、通常の平板荷重試験と同様に4回程度のくり返し荷重が必要である。
- (3)4回程度の繰返し荷重を行えば、荷重速度を標準速度の6倍程度に速くしても、岩盤の Et に与える影響はほとんど無かった。したがってTBMの掘進工程に影響を与えないで試験を行うために急速荷重を行っても Et の評価は可能と思われる。
- (4)掘削壁面に凹凸が有り、荷重面の接触面積が50%程度に減少しても、凹凸の差が2 mm程度であれば Et に与える影響はほとんど無かった。したがって、はく離等により大きな凹凸が生じない限り、掘削

壁面のフェーシングを行わなくても試験は可能と思われる。

(5)荷重板の寸法が $\phi 45$ cm の場合の Et の値は、標準的な寸法である $\phi 30$ cm の場合と比べて、1.2~1.9倍に大きく評価された。

(6)設計圧力範囲における荷重試験では、圧力が大きくなる程 Et の値は大きくなり、一定値に収束する傾向がある。したがって、グリッパーの荷重能力を増大させ、試験時には設計圧力まで荷重することが望ましい。

(7)スライムの存在により Et は小さく評価され、その値はスライムと岩盤の弾性係数の比、およびスライムの厚さにより変化することが予想された。今後、実際に発生するスライムの特性や付着状況を把握するとともに、スライムを除去する方法も検討することが必要と思われる。

(8)グリッパーの荷重軸がトンネル中心より30 mm 偏心すると、均等に荷重した時と比べて、弾性係数は小さく評価される。したがって、トンネル中心からの偏心量をできるだけ小さくするようにTBMを制御して試験を行うことが望ましい。

本研究は東京電力(株)から(社)日本トンネル技術協会に委託された「TBMを使用した掘削の合理化技術に関する研究」の一環としてとりまとめたものである。現在、東京電力(株)葛野川発電所建設工事で施工中の水圧管路においてTBMのグリッパーの最大面圧を10 MPaまで増大し、さらにウォータージェットによるスライム除去装置を装備したうえで、岩盤試験を行っている。今後試験結果を分析し、グリッパー試験が簡易岩盤試験法の一つとして適応できるかを検証していく予定である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、(社)日本トンネル技術協会水路トンネル特別小委員会の各位には、貴重な御助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Watanabe, K., Sunamichi, M. and Kajiyama, T.: Tunnel Excavation with TBM-Pilot Machine on AKIHA No. 3 Hydropower Station, 7th Int. Congress on Rock Mech, ISRM, Aachen, pp. 1023-1028, 1991.
- 2) 磯野龍昭, 林崎信男, 高野辰雄: TBM 導坑先工法の試験施工—秋田自動車道 湯田第2トンネル—, トンネルと地下, 第26巻4号, pp. 15-25, 1995.
- 3) 土木学会: 厚位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—, 1987.

(1996.2.8 受付)

ON THE ROCK DEFORMABILITY TEST
USING GRIPPER JACKS MOUNTED ON THE TUNNEL
BORING MACHINE

Yuichi NISHIMATSU, Masayuki MAEHARA and Akira KOGA

In case of a rock tunnelling by using the TBM, the modulus of elasticity of rock can be estimated at every advance with instrumentation of load and stroke of gripper jacks mounted on the TBM. This paper presents results of analytical and experimental studies on applicability of a rock deformability test using gripper jacks, comparing the standard plate loading test with a plate loading test under the same condition as a gripper is pressed on rock surface. On the basis of these analyses and experiments, it is revealed the possibility of a rock deformability test using gripper jacks of TBM to substitute the standard plate loading test.