

# 地山特性曲線を求める手段としての孔内載荷試験

梨本 裕\*・高森貞彦\*\*・今田 徹\*\*\*

トンネル支保の妥当性、合理性を検討する上で、支保工に作用する荷重(支保工)と地山変位との関係を表す地山特性曲線がしばしば使用されている。しかし、有用性が認められているにもかかわらず、その求め方についてはあまり議論されていない。

本研究では、孔内載荷試験の過程で除荷と載荷が同時に行われ、トンネル掘削と似た応力経路を辿ることに着目した。トンネル掘削と孔内載荷試験を模擬した模型実験を実施し、地山特性曲線を求める手段としての孔内載荷試験の有用性を検討した。その結果、孔内載荷試験の除荷曲線が地山特性曲線として利用できる可能性のあることを明らかにした。

**Key Words** : ground characteristic curve, borehole loading test, model experiment

## 1. はじめに

トンネル支保の妥当性について検討する場合、例えば、支保工の剛性や設置時期の適否を判定するような場合、支保工に作用する荷重(支保圧)と地山変位との関係を表す地山特性曲線<sup>1)</sup>が利用される。これは Fenner-Pacher 曲線とも呼ばれ、標準支保パターン<sup>2)</sup>がまだ作成されていない低強度地山におけるトンネルの設計方法を確立するために必要不可欠であると言われている。しかし、有用性が認められているにもかかわらず、それを求める方法についてはあまり議論されていないようである。

地山特性曲線を試験結果として直接求めることが困難なため、室内試験、岩盤せん断試験、平板載荷試験などの結果から間接的に求めているのが現状であるが、それがどれだけ信頼できるものなのか疑問のままである。

室内試験はコアサンプルが得られない場合が多く、得られても試験結果が地山の物性を代表する値になるか保証はない。岩盤せん断試験などは準備や試験装置が大掛かりになる上に、長大な線状構造物であるトンネルの建設に有用かつ十分なデータを得ることが容易ではないため、実施されることは少ない。

一方、孔内載荷試験<sup>3)</sup>はボーリング孔の壁面に圧力を作用させ、載荷・除荷を繰り返し、地山特性曲線と同じような圧力-地山変位曲線を求めるものである。上記の試験と比較して手軽に原位置で実施できる利点を持っており、変形特性だけではなく、粘着力や内部摩擦角を推定することも可能である。

しかも、この試験は閉じた地山壁面全周に作用する圧

力を変化させて地山に変位を生じさせているという点でトンネル掘削と良く似ている。トンネル掘削は結果的に地圧の解放を伴い、空洞壁面に作用している圧力の除荷過程と見なすことができるからである。トンネル掘削が地圧の解放を伴う行為であるのに対し、孔内載荷試験は地圧の解放後の行為であるという違いはあるが、両者の共通点に注目する必要があると考えられる。

本研究では、トンネル掘削と孔内載荷試験を模擬した模型実験を実施し、地山特性曲線を求める手段として孔内載荷試験がどれだけの適用性を有しているか検討する。ただし、地山は等方等質であり、かつ、初期地圧は等方一様に分布し、かつ、掘削断面形状は円であるという軸対称条件が成立する場合を想定する。“地山特性曲線の利用の勧告”<sup>4)</sup>に「軸対称条件の仮定は非常に厳しいものであるが、多くの実際問題に適用することができ、数少ないパラメータで支保工の設計および内圧変位量の推定を行うことができる。」と書かれているように、トンネル問題では、このような検討モデルの理想化・簡略化が有効である場合も少なくないと考えられる。

## 2. 模型実験

### (1) 実験の目的

模型実験では、円形土槽中央部の内圧用プレッシャーバッグと外周部の外圧用プレッシャーバッグにより土槽内の地山材料を初期地圧状態にして、内圧の除荷・載荷を繰り返し、内圧用プレッシャーバッグと地山の接触面の変位(トンネル壁面の地山変位に対応)と内圧の関係を表す曲線を求める。図-1に円形土槽とプレッシャーバッグの規模と配置を示す。初期地圧の状態を出発点とし、内圧を除荷して得られる除荷曲線は地山特性曲線に対応すると考えられる。そして、内圧を0まで除荷した後、内圧を載荷して得られる載荷曲線と再び内圧を除荷して得られる除荷曲線は孔内載荷試験で得られる曲線に対応す

\* 正会員 前田建設工業(株) 土木設計部  
(〒102 千代田区富士見 2-10-26)

\*\* 前田建設工業(株) 土木設計部

\*\*\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科

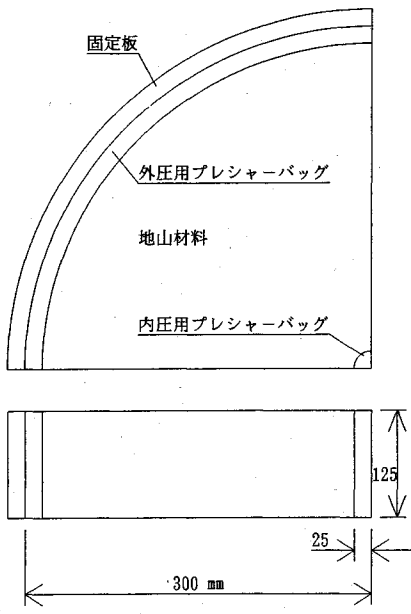


図-1 円形土槽とプレッシャーバッグ

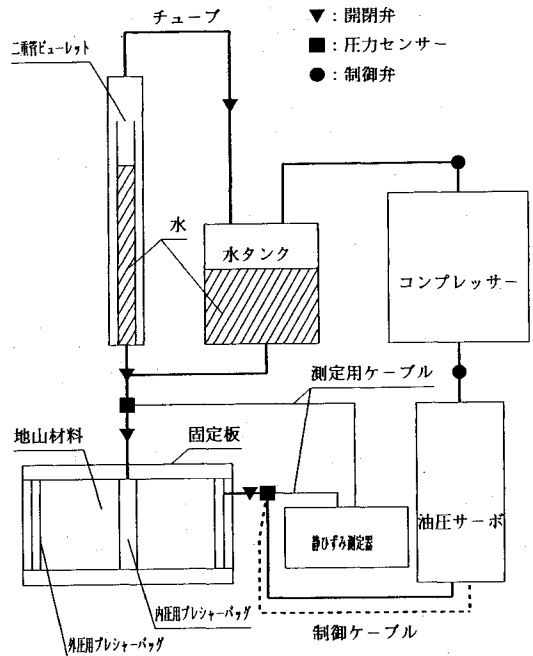


図-2 実験装置全体システム

ると考えられる。実験で得られる除荷・載荷・再除荷曲線を比較して、地山特性曲線を求める試験法として孔内載荷試験がどれだけの適用性を有しているか検討する。

### (2) 実験装置と手順

図-2に実験装置全体システムを示す。このシステムにより、次の手順に従って実験を行った。

- ① 手練りと機械練りにより地山材料を混合する。
- ② 内圧用プレッシャーバッグを後で挿入するために、円形土槽の中央に型枠を設置する。
- ③ 地山材料と固定板の間の摩擦をなくすため、テフロンシートを土槽内底部に2枚敷く。
- ④ 地山材料を5層に分けて円形土槽に詰め込み、突き固める。
- ⑤ 地山材料の上にテフロンシートを2枚敷き、上部固定板を設置する。
- ⑥ 型枠を除去し、内圧用プレッシャーバッグを挿入する。
- ⑦ 内圧用と外圧用のプレッシャーバッグを所定の初期地圧まで載荷する。載荷は1ステップ0.05 kg/cm<sup>2</sup>とし、内圧と外圧を一致させながら行う。
- ⑧ 外圧を固定したまま、内圧の除荷・載荷を繰り返す、内圧用プレッシャーバッグ内の水量の変化と内圧を測定する。
- ⑨ 各実験終了後、上部固定板を取り外し、土壌硬度計(貫入試験法的一种)により、実験供試体が均一に締め固められたかどうかをチェックする(貫入読取り値は実験No.1で2.40~2.50、実験No.2で2.65~3.00と、位置によるバラツキも供試体によるバラツキも小さかった)。

### (3) 地山材料とその特性

硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを70:21:9の重量比で混合したものを地山材料とした<sup>5)</sup>。これはKarlsruhe大学で開発されたもので、物性値は締め固め圧あるいは単位体積重量に大きく依存するため、任意に変化させることが可能で、しかも、再利用も可能であるという特徴を持っている。しかし、最大の特徴は水を使用しないで地山材料として利用できる点にある。低強度の地山を人工的に作るうとして水を使用すると、実験中に脱水する恐れがある。今回は、地山特性曲線を求めた後、続いて載荷、再除荷を行うので、脱水によって物性が途中で変化することは避けなければならない。そこで、この地山材料を選択した。

図-3に一軸圧縮試験結果を示す。弾性係数、一軸圧縮強度、単位体積重量は締め固め圧とともに大きくなり、次第に収束する傾向を示すようになる。一軸圧縮強度は締め固め圧が4 kg/cm<sup>2</sup>以下のとき締め固め圧にほぼ比例する。

図-4に三軸圧縮試験結果を示す。粘着力は一軸圧縮強度などと同様の傾向を示し、締め固め圧が2~4 kg/cm<sup>2</sup>の範囲内にあるとき、締め固め圧とともに大きくなる。内部摩擦角は締め固め圧の変化に対して一定の傾向を示さず、5°程度のバラツキの中に入っており、締め固め圧によってほとんど変化しないと見なすことができる。

なお、これらの試験は1試料につき3供試体とした。

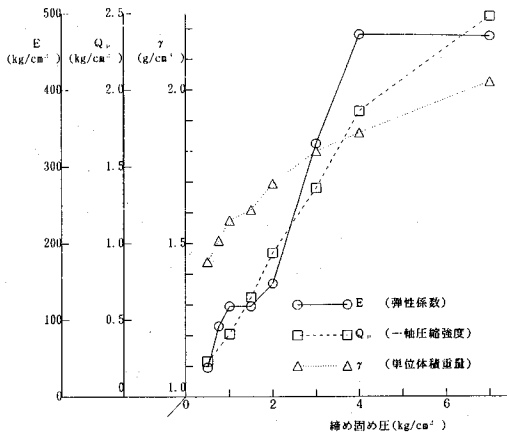


図-3 一軸圧縮試験結果

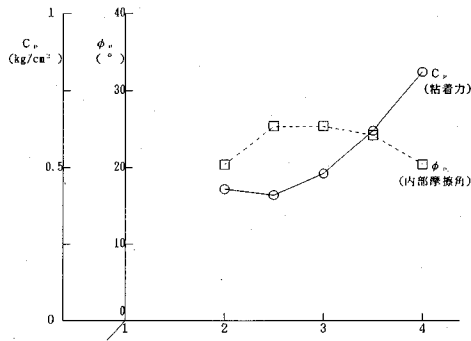


図-4 三軸圧縮試験結果

表-1 実験ケース

実験No	締め固め圧	初期地圧	内圧の除荷・載荷
1	2	2	2→0→2
2	2	2	2→0→2→0
3	2	1	1→0→2→0
4	2	2	2→0→2→0

(kg/cm<sup>2</sup>)

#### (4) 測定項目と方法

内圧用と外圧用のプレッシャーバッグの圧力はひずみゲージ型圧力センサーにより測定した。

地山変位は内圧用プレッシャーバッグ内の水量の変化を重管ビューレットで読取り、これを換算して求めた。

ただし、ゴム製であるプレッシャーバッグの張力の影響が無視できないので、内圧用プレッシャーバッグをフリーの状態にして内圧と水量の変化の関係を求め、実験結果を補正した。

#### (5) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。実験 No.1 では初期地圧の状態から内圧を 0 kg/cm<sup>2</sup> まで除荷した後、初期地圧まで載荷した。No.2 と No.4 では更に 0 kg/cm<sup>2</sup> まで除荷した。No.3 では初期地圧を締め固め圧より小さく設

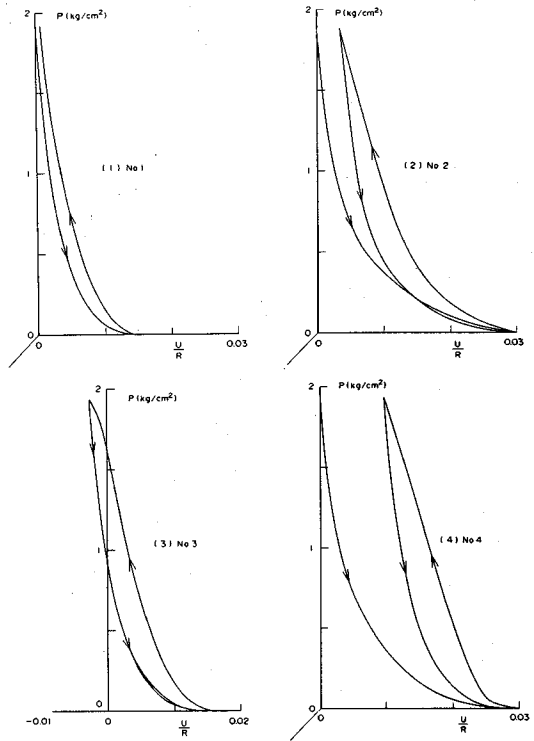


図-5 平行移動前の除荷・載荷・再除荷曲線

定し、初期地圧の状態から内圧を 0 kg/cm<sup>2</sup> まで除荷した後、初期地圧を越えて締め固め圧まで載荷し、更に 0 kg/cm<sup>2</sup> まで除荷した。

#### (6) 実験結果

実験で得られた除荷・載荷・再除荷曲線を図-5 (1) ~ (4) に示す。ここに、P: 内圧, U: 地山変位, R: 孔の半径である。

実験 No.4 を除いて除荷曲線と載荷曲線は良く似た形状になっており、それ以上に除荷曲線と再除荷曲線は良く似た形状になっている。このことは、図-6 (1) ~ (4) に示すように、載荷曲線と再除荷曲線を、内圧が初期地圧と一致するとき変位が 0 になるように、平行移動させるとより明確になる。除荷曲線は地山特性曲線に対応し、載荷曲線と再除荷曲線は孔内載荷試験で得られる曲線に対応する。したがって、孔内載荷試験の除荷曲線(本実験の再除荷曲線に対応)を地山特性曲線として利用することができると思われる。

しかし、実験 No.4 のように両者の差異が大きい場合がある。このような場合には差異を推定して除荷曲線を補正する必要があると考えられる。両者の差異が大きいかどうかは、図-6 によれば、除荷曲線と載荷曲線の差異から判断できると考えられる。すなわち、この差異が大きい場合には除荷曲線と地山特性曲線の差異も大きく、前者が小さい場合には後者も小さいと考えられる。

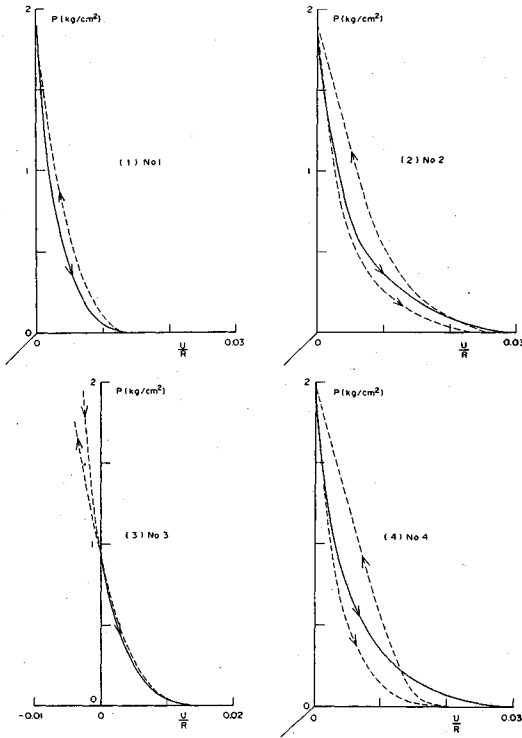


図-6 平行移動後の除荷・載荷・再除荷曲線

したがって、除荷曲線と載荷曲線の差異が大きい場合には、さらに載荷と除荷を繰り返し、除荷時の曲線の繰り返しによる形状変化の傾向を把握して、地山特性曲線を推定・作成する必要があると考えられる。

### 3. 内圧が初期地圧より小さい除荷・載荷・再除荷曲線と地山特性曲線

実験で得られた各曲線の物性値を推定し、各曲線の近似性を定量的に検討する。ここでは、載荷曲線と再除荷曲線は、図-6に示すように、内圧が初期地圧と一致するとき変位が0になるように平行移動させた曲線を対象とする。そして、応力履歴が無視できると考え、除荷曲線と同様の初期地圧の状態を曲線の始点と見なす。

#### (1) 各曲線の物性値と推定方法

各曲線の物性値を推定するために、まず、以下の仮定を設けて、内圧と地山変位の関係を表す解析解を導く。

- ① 地山は等方等質で、平面ひずみ状態にあり、トンネルと見なしている内圧用プレッシャーバッグの断面は円形で、初期地圧は等方一様に分布する。
- ② 地山の応力-ひずみ関係は図-7に示すようになる。すなわち、応力がピーク強度以下るとき、地山は弾性体として挙動し、ピーク強度に達すると、地山の耐荷能力は残留強度まで急激に低下し、その後は一定を保つ。
- ③ ピーク強度時と残留強度時のモール円の包絡線は、

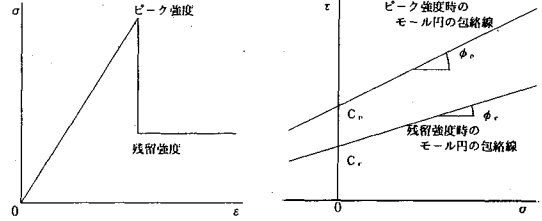


図-7 応力-ひずみ関係

図-8 モール円の包絡線

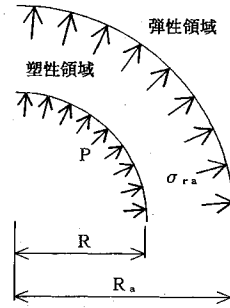


図-9 内圧と塑性領域

図-8に示すように直線になり、式(1)と式(2)で表される。

$$\tau = C_p + \sigma \cdot \tan(\phi_p) \dots \dots \dots (1)$$

$$\tau = C_r + \sigma \cdot \tan(\phi_r) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\tau$ :せん断強度

$\sigma$ :垂直応力

$C_p$ :ピーク強度時の粘着力

$\phi_p$ :ピーク強度時の内部摩擦角

$C_r$ :残留強度時の粘着力

$\phi_r$ :残留強度時の内部摩擦角

地山の自重による物体力を無視すれば、トンネル中心から $r$ の距離の点において、弾性領域と塑性領域のいずれでも、式(3)のつり合い方程式<sup>9)</sup>が成立する。

$$d\sigma_r/dr + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\sigma_r$ :地山の半径方向の応力

$\sigma_\theta$ :地山の円周方向の応力

塑性領域内の応力は式(2)を満足するので、式(4)が成立する。

$$\sigma_\theta = \eta \cdot \sigma_r + Q_r \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $Q_r = 2C_r \cos(\phi_r) / (1 - \sin(\phi_r))$

$$\eta = (1 + \sin(\phi_r)) / (1 - \sin(\phi_r))$$

式(4)を式(3)に代入すると、式(5)が得られる。

$$r \cdot d\sigma_r/dr + (1 - \eta)\sigma_r - Q_r = 0 \dots \dots \dots (5)$$

式(5)を $r=R$ で $\sigma_r=P$ という境界条件の下に解くと、式(6)が得られる。

$$\sigma_r = \lambda \cdot Q_r \{ (r/R)^{\eta-1} - 1 \} + P (r/R)^{\eta-1} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $\lambda = 1/(\eta - 1)$

表—2 各曲線の物性値

	No 1		No 2			No 3			No 4		
	除荷	再除荷	荷	再除荷	再除荷	荷	再除荷	再除荷	荷	再除荷	
E (t/m <sup>2</sup> )	5570 (0.62)	3440 (2.53)	3180 (5.0)	1920 (0.68)	3930 (1.24)	2280 (0.82)	1880 (1.31)	2280 (1.08)	2990 (0.61)	1810 (0.45)	4110 (1.37)
C <sub>r</sub> (t/m <sup>2</sup> )	1.5 (2.53)	3.8 (2.53)	5.0 (5.0)	3.4 (0.68)	4.7 (0.94)	1.3 (1.31)	1.7 (1.31)	1.4 (1.08)	4.4 (0.61)	2.0 (0.45)	2.7 (0.61)
φ <sub>p</sub> (°)	25.0 (0.70)	17.5 (2.1)	21.0 (14.5)	26.5 (1.26)	22.0 (1.05)	19.0 (0.84)	16.0 (1.1)	18.5 (0.97)	28.0 (1.50)	42.0 (1.50)	35.5 (1.27)
Q <sub>p</sub> (t/m <sup>2</sup> )	4.7 (2.21)	10.4 (2.21)	14.5 (14.5)	11.0 (0.76)	13.9 (0.96)	3.6 (1.25)	4.5 (1.25)	3.9 (1.08)	14.6 (0.62)	9.0 (0.62)	10.5 (0.72)
C <sub>r</sub> (t/m <sup>2</sup> )	1.5 (2.53)	3.8 (2.53)	1.7 (1.7)	2.4 (1.41)	1.6 (1.04)	1.3 (1.31)	1.7 (1.31)	1.3 (1.00)	1.1 (1.82)	2.0 (1.82)	0.6 (0.55)
Q <sub>r</sub> (t/m <sup>2</sup> )	4.7 (2.21)	10.4 (2.21)	4.9 (4.9)	7.8 (1.59)	4.8 (0.98)	3.6 (1.25)	4.5 (1.25)	3.6 (1.00)	3.7 (2.43)	9.0 (2.43)	2.3 (0.62)

R: トンネル (掘削) 半径

P: トンネル壁面に作用する支保圧 (P < σ<sub>0</sub>)

σ<sub>0</sub>: 初期地圧

図—9 に示すように、弾塑性境界の半径を R<sub>a</sub> とし、弾塑性境界面に塑性領域から半径方向に作用している応力を σ<sub>ra</sub> とすると、r > R<sub>a</sub> の弾性領域内の応力は、弾性理論<sup>7)</sup>により式 (7) と式 (8) で表される。

$$\sigma_r = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_{ra})(R_a/r)^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 + (\sigma_0 - \sigma_{ra})(R_a/r)^2 \dots\dots\dots (8)$$

r = R<sub>a</sub> の弾塑性境界の弾性領域側では式 (1) を満足しなければならないので、σ<sub>ra</sub> は式 (9) で与えられる。

$$\sigma_{ra} = (2\sigma_0 - Q_p)/(1 + \xi) \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{ここに、} Q_p = 2C_p \cos(\phi_p)/(1 - \sin(\phi_p))$$

$$\xi = (1 + \sin(\phi_p))/(1 - \sin(\phi_p))$$

式 (6) で r = R<sub>a</sub> としたときの σ<sub>r</sub> は式 (9) の σ<sub>ra</sub> と等しくなければならないので、R<sub>a</sub> は式 (10) で与えられる。

$$R_a = R \{ (\sigma_{ra} + \lambda \cdot Q_p) / (P + \lambda \cdot Q_p) \}^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

r = R<sub>a</sub> の弾塑性境界の変位 U<sub>a</sub> は弾性理論<sup>8)</sup>により式 (11) で与えられる。

$$U_a = R_a (\sigma_0 - \sigma_{ra}) (1 + \nu) / E \dots\dots\dots (11)$$

ここに、E: 地山の弾性係数

ν: 地山のポアソン比

弾性領域が弾塑性境界で U<sub>a</sub> だけ内空に向かって変位し、塑性領域がその体積を変えずに内空に向かって押し出されると考えると<sup>8)</sup>、トンネル壁面の地山変位 U は式 (12) で与えられる。ただし、塑性領域が発生しない場合には式 (13) で与えられる。また、ここでは、内空に向かう変位を正とする。

$$U/R = 1 - \{ (R_a/R - U_a/R)^2 - (R_a/R)^2 + 1 \}^{1/2} \quad (P \leq \sigma_{ra} \text{ のとき}) \dots\dots (12)$$

$$U/R = (\sigma_0 - P)(1 + \nu) / E \quad (P \geq \sigma_{ra} \text{ のとき}) \dots\dots (13)$$

次に、各曲線を n 個の点で表現し、それぞれの点の P と U を P<sub>m</sub> と U<sub>m</sub> とする。そして、以下の手順に従って曲線の物性値を推定する。ただし、P<sub>1</sub> と U<sub>1</sub> は曲線上

表—3 模型実験結果から推定した物性値 (平均値) と一軸・三軸圧縮試験結果

	模型実験の物性値			一軸・三軸 圧縮試験結果
	除荷	載荷	再除荷	
E (t/m <sup>2</sup> )	3510	2260	3440	1470
Q <sub>p</sub> (t/m <sup>2</sup> )	9.4	8.7	9.4	9.4
C <sub>p</sub> (t/m <sup>2</sup> )	3.1	2.7	2.9	4.3
φ <sub>p</sub> (°)	23.3	25.5	25.3	20.4

の弾性限界 (塑性領域が発生し始める点) に対応する値とする。

- ① σ<sub>0</sub> と ν を設定する。
- ② P<sub>1</sub> と U<sub>1</sub> を式 (13) に代入して E を求める。
- ③ φ<sub>p</sub> を仮定する。P<sub>1</sub> = σ<sub>ra</sub> であるから、式 (9) により、φ<sub>p</sub> に対応して C<sub>p</sub> が与えられる。
- ④ C<sub>r</sub> を仮定する。このとき、内部摩擦角は変化しないと考え、φ<sub>r</sub> = φ<sub>p</sub> とする。
- ⑤ P<sub>m</sub> を式 (10) ~ (12) に代入して得られる U を U\* とする。
- ⑥ 式 (14) に示すように、U\* と U<sub>m</sub> の残差の二乗和 S を計算する。

$$S = \sum (U^* - U_m)^2 \dots\dots\dots (14)$$

⑦、③から⑥を S の最小値 S<sub>min</sub> が求まるまで繰り返す。S<sub>min</sub> に対応する物性値が求める値である。

(2) 各曲線の物性値

上記の方法により、各曲線の物性値は表—2 に示すように推定される。( ) 内の値は除荷曲線の物性値との比を表す。ただし、今回は、S<sub>min</sub> を求めるときに、φ<sub>p</sub> は 0.5°、C<sub>r</sub> は 0.1 t/m<sup>2</sup> ずつ変化させていった。

表—3 に模型実験の各曲線から推定された物性値の平均値と試験結果を示す。両者は一致しているとは言えず、弾性係数は前者の方が後者よりもかなり大きくなっている。そして、粘着力は後者の方が大きく、内部摩擦角は前者の方が大きくなっている。模型実験用供試体と一軸・三軸圧縮試験用供試体とは、大きさと形状が異なるため、同じ圧力で締め固めてもその効果は異なると考えられる。模型実験用供試体の物性値としては、実験結果の圧力-変位曲線を逆解析して推定した値の方が試験結果よりも信頼できると考えられる。なお、この表の一軸圧縮強度 Q<sub>p</sub> は粘着力と内部摩擦角による計算値である。

各曲線の物性値の差異が明確になるように表—2 を図化したものが図—10 である。再除荷曲線と除荷曲線の物性値の差異は、どの実験においても、そして、どの物性においても、載荷曲線と除荷曲線のそれよりも小さくなっている。最大でも実験 No. 4 の C<sub>r</sub> の 45% であり、実験 No. 3 においてはすべて 8% 以下に収まっている。したがって、除荷曲線の物性値を推定するためには、載荷曲線よりも再除荷曲線を利用すべきであり、その方が精度が高いと考えられる。すなわち、孔内載荷試験によ

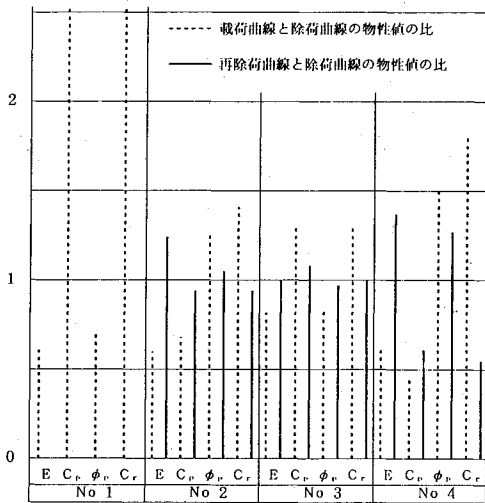


図-10 各曲線の物性値の比較

り地山特性曲線を求める場合、あるいは、地山特性曲線の物性値を推定する場合、除荷曲線（実験では再除荷曲線に対応する）を求め、これを利用すれば良いと考えられる。

#### 4. 内圧が初期地圧より大きい載荷曲線と地山特性曲線

トンネル掘削は孔内載荷試験の除荷に対応すると考えられる。そして、多くの場合、支保圧は初期地圧よりも小さい。しかし、地山特性を孔内載荷試験で把握しようとするとき、載荷曲線を利用するのが一般的である。しかも、強度特性に関しては内圧が初期地圧よりも大きい部分に着目している。ここでは、その是非を検討する。ただし、内圧が初期地圧より大きい載荷曲線も、応力履歴が無視できると考え、除荷曲線と同様に初期地圧の状態を始点とする。

##### (1) 載荷時の支保圧と地山変位の関係を表す解析解

$P > \sigma_0$  で載荷時の塑性領域内の応力は、 $\sigma_r > \sigma_\theta$  であると同時に式 (2) を満足するので、式 (15) が成立する。

$$\sigma_\theta = (\sigma_r - Q_r) / \eta \quad \dots\dots\dots (15)$$

式 (15) を式 (3) のつり合い方程式に代入すると、式 (16) が得られる。

$$r \cdot d\sigma_r / dr + (1 - 1/\eta) \sigma_r + Q_r / \eta = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

式 (16) を  $r=R$  で  $\sigma_r=P$  という境界条件の下に解くと、式 (17) が得られる。

$$\sigma_r = \lambda \cdot Q_r \{ (r/R)^{1/\eta-1} - 1 \} + P (r/R)^{1/\eta-1} \quad \dots\dots\dots (17)$$

図-9と同様に、弾塑性境界の半径を  $R_{a2}$ 、この境界面に塑性領域から半径方向に作用している応力を  $\sigma_{ra2}$  とするとき、弾塑性境界の弾性領域側では式 (1) を満足しなければならないので、 $\sigma_{ra2}$  は式 (18) で与えられる。

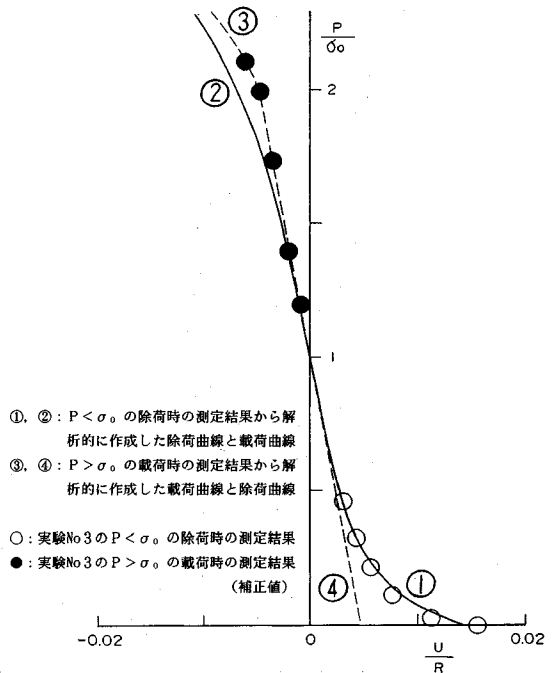


図-11 除荷曲線と載荷曲線

$$\sigma_{ra2} = (2\xi \cdot \sigma_0 + Q_r) / (1 + \xi) \quad \dots\dots\dots (18)$$

式 (17) で  $r=R_2$  としたときの  $\sigma_r$  は式 (18) の  $\sigma_{ra2}$  と等しくなければならないので、 $R_{a2}$  は式 (19) で与えられる。

$$R_{a2} = R \{ (\sigma_{ra2} + \lambda \cdot Q_r) / (P + \lambda \cdot Q_r) \}^{-1/\lambda} \quad \dots\dots\dots (19)$$

また、弾塑性境界の変位  $U_{a2}$  は弾性理論により式 (20) で与えられる。

$$U_{a2} = R_{a2} (\sigma_{ra2} - \sigma_0) (1 + \nu) / E \quad \dots\dots\dots (20)$$

塑性領域がその体積を変えずに地山側に向かって押し付けられ、弾性領域が弾塑性境界で  $U_{a2}$  だけ地山側に向かって変位すると考えると、トンネル壁面の地山変位  $U$  は式 (21) で与えられる。ただし、塑性領域が発生しない場合には式 (22) で与えられる。また、ここでは、地山側に向かう変位を正とする。

$$U/R = \{ (R_{a2}/R + U_{a2}/R)^2 - (R_{a2}/R)^2 + 1 \}^{1/2} - 1 \quad (P \geq \sigma_{ra2} \text{ のとき}) \dots\dots\dots (21)$$

$$U/R = (P - \sigma_0) (1 + \nu) / E \quad (P \leq \sigma_{ra2} \text{ のとき}) \dots\dots\dots (22)$$

##### (2) 除荷曲線と載荷曲線

実験 No. 3 の測定結果に基づき、内圧  $P$  をパラメータにして解析的に作成した除荷曲線と載荷曲線を図-11 に示す。

ここに、  
 曲線①：内圧が初期地圧よりも小さい ( $P < \sigma_0$ ) 除荷時の測定結果から 3.(1) に示した方法で物性値を推定し、これ (表-2 に示した物性値と同じ)

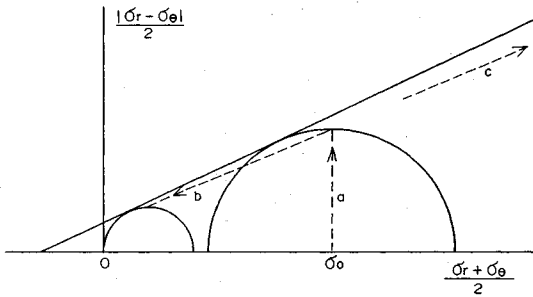


図-12 除荷時と載荷時の応力経路

を用いて式 (9)~(13) により作成した  $P < \sigma_0$  の除荷曲線 (実線)

曲線②: 曲線①と同じ物性値を用いて式 (18)~(22) により作成した  $P > \sigma_0$  の載荷曲線 (実線)

曲線③:  $P > \sigma_0$  の載荷時の測定結果から 3. (1) に示した方法と同様の方法で物性値を推定し, これを用いて式 (18)~(22) により作成した  $P > \sigma_0$  の載荷曲線 (破線)

曲線④: 曲線③と同じ物性値を用いて, 式 (9)~(13) により作成した  $P < \sigma_0$  の除荷曲線 (破線)

換言すると, 実線は  $P < \sigma_0$  の除荷時の測定結果から解析的に作成した  $P < \sigma_0$  の除荷曲線 (曲線①) と  $P > \sigma_0$  の載荷曲線 (曲線②) である。破線は  $P > \sigma_0$  の載荷時の測定結果から解析的に作成した  $P > \sigma_0$  の載荷曲線 (曲線③) と  $P < \sigma_0$  の除荷曲線 (曲線④) である。また, ○は実験 No. 3 の  $P < \sigma_0$  の除荷時の測定結果そのものである。●は実験 No. 3 の  $P > \sigma_0$  の載荷時の測定結果を結んで載荷曲線を作成し, これを内圧が初期地圧と一致するとき変位が 0 になるように平行移動させた曲線上の点である。

破線と実線と比較すると, 内圧が初期地圧に近い値のとき, 両者は良く一致している。しかし, 内圧がその他の値のときには両者の間に差異が見られる。その差異は  $P > \sigma_0$  の載荷曲線よりも  $P < \sigma_0$  の除荷曲線において大きくなっている。このことは, 内圧が初期地圧よりも大きい載荷時の測定結果に基づいて内圧が初期地圧よりも小さい除荷時の地山挙動を予測するのは適当ではないことを示していると考えられる。

初期地圧の状態から内圧を除荷していくとき, 地山の平均応力は, 塑性化するまで図-12 の直線 a のように一定を保つが, 塑性化後は除荷に伴い直線 b のように小さくなっていく。一方, 初期地圧より大きい内圧を載荷していくときには, 塑性化後の平均応力は, 直線 c のように大きくなっていく。平均応力が小さくなっていく過程と大きくなっていく過程とは同じ塑性領域でも異なる変形・強度特性を發揮することが考えられる。図-11 の塑性領域が発生していると見なせる部分での破線

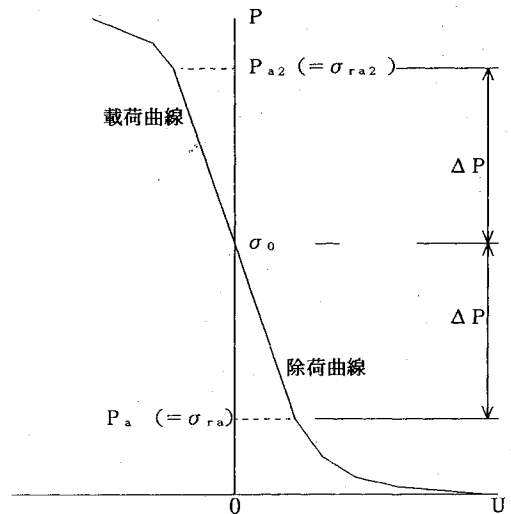


図-13 除荷曲線と載荷曲線の2つの折れ曲り点

と実線の差異はこのことに一因があると考えられる。

また, 式 (21) と式 (22) は, 内圧が初期地圧より大きい載荷時に初めて塑性領域が発生する場合を想定して誘導している。今回の実験では初期地圧の状態から内圧を一度  $0 \text{ kg/cm}^2$  まで除荷しており, この除荷時に塑性領域が発生している。この過程で応力が再配分されるので, 同じ内圧に対する場合でも, その後の載荷時の円周方向の地山応力  $\sigma_\theta$  は, 除荷を経験しない載荷時のそれとは異なると考えられる。すなわち, 低強度地山においては, 内圧が初期地圧より大きい処女載荷時と除荷後の再載荷時とは地山挙動が異なると考えられる。上記の破線と実線の差異はこのことにも一因があると考えられる。

以上より, トンネルの設計に必要な強度特性を孔内載荷試験により推定する場合, 内圧が初期地圧より大きい載荷曲線を利用するのは適当ではないと考えられる。

### (3) 初期地圧の推定

孔内載荷試験結果から弾性係数以外の地山特性を推定するためには, 初期地圧の把握が必要不可欠である。この初期地圧が同じ孔内載荷試験により地山特性と同時に推定できればこれに越したことはない。

3. (1) と 4. (1) で設定した地山モデルでは, 除荷曲線において塑性領域が発生し始める内圧  $P_a$  は式 (9) の  $\sigma_{ra}$  と一致し, 載荷曲線において塑性領域が発生し始める内圧  $P_{a2}$  は式 (18) の  $\sigma_{ra2}$  と一致する。したがって, 両者の間には式 (23) で表される関係がある。

$$\begin{aligned} P_a + P_{a2} &= \sigma_{ra} + \sigma_{ra2} \\ &= (2\sigma_0 - Q_p) / (1 + \xi) + (2\xi \cdot \sigma_0 + Q_p) / (1 + \xi) \\ &= 2\sigma_0 \dots \dots \dots (23) \end{aligned}$$

式 (23) によれば, 図-13 に示すように, 除荷曲線と

載荷曲線の2つの折れ曲り点に対応する内圧の平均値は初期地圧 $\sigma_0$ と一致し、 $P_{a2}$ と $\sigma_0$ の差は $\sigma_0$ と $P_a$ の差と等しくなる。このことから、初期地圧も孔内載荷試験結果から推定可能であると考えられる。なお、図-13は式(12)、(13)、(21)、(22)により作成できる除荷曲線と載荷曲線をモデル化したものである。

しかし、図-11では、除荷曲線と載荷曲線の2つの折れ曲り点に対応する内圧の平均値は初期地圧 $\sigma_0$ と一致しない。載荷曲線が折れ曲る内圧 $P_{a2}$ と $\sigma_0$ の差は、除荷曲線が折れ曲る内圧 $P_a$ と $\sigma_0$ の差よりも大きくなっている。塑性領域が発生した後は応力が再配分されるため、内圧および半径方向の地山応力 $\sigma_r$ が $\sigma_0$ と等しくなったときには、円周方向の地山応力 $\sigma_\theta$ は $\sigma_0$ に戻っていないと考えられる。これが上記の平均値と初期地圧 $\sigma_0$ が一致しない原因になっていると考えられる。

今後、応力再配分の影響を補正する方法を検討する必要があると考えられる。また、ボーリング孔の削孔時に塑性領域が発生するような地圧の解放を許さないセルフボーリングタイプの孔内載荷試験装置の開発が望まれる。

## 5. ま と め

本研究では、トンネル掘削と孔内載荷試験を模擬した模型実験を実施し、内圧(支保圧)の除荷・載荷を繰り返して、トンネル壁面の地山変位と支保圧の関係を表す曲線を求めた。そして、除荷曲線は地山特性曲線に対応し、載荷曲線と再除荷曲線は孔内載荷試験で得られる曲線に対応すると考え、地山特性曲線を求める手段としての孔内載荷試験の有用性を検討した。この結果、次のことが言えると考えられる。

- ① 除荷曲線と載荷曲線は比較的良く似た形状になり、それ以上に除荷曲線と再除荷曲線は良く似た形状になる。
- ② 孔内載荷試験の除荷曲線(本実験の再除荷曲線に対応)を、内圧が初期地圧と一致するとき変位が0になる

ように平行移動させれば、地山特性曲線として利用することも可能である。

- ③ 地山特性曲線の物性値を孔内載荷試験により推定する場合、載荷曲線よりも除荷曲線を利用すべきである。
- ④ 内圧が初期地圧よりも大きい( $P > \sigma_0$ )載荷時の地山特性と、内圧が初期地圧よりも小さい( $P < \sigma_0$ )除荷時のそれは、異なる可能性が高い。トンネルの設計に必要な物性値を推定する場合には、 $P > \sigma_0$ の載荷曲線ではなく、 $P < \sigma_0$ の除荷曲線を利用する必要がある。
- ⑤ 初期地圧を推定する手段として孔内載荷試験を利用することも可能である。

謝辞：今回の実験に使用した人工地山材料に関して貴重なご教示をいただいた九州大学工学部江崎哲郎教授に深く謝意を表します。そして、実験にご協力いただいた前田建設工業(株)土木設計部員桜井氏と東京都立大学4年生(1991~1992年の実験時)古高氏に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 谷本親伯：NATMにおける情報化施工、土と基礎、30-7(294)、pp.63~70、1982.7.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳トンネル編)・同解説。
- 3) 武内俊昭・大橋武一郎：孔内載荷試験による応力-変位曲線の降伏点位置に関する考察、応用地質調査事務所年報、No.4、1982.
- 4) Gesta, P. : Recommendations for Use of Convergence-Confinement Method (Tunnels et Ouvrages Souterrain No.73, Janvier-Fevrier 1986).
- 5) 江崎哲郎・蔭 宇静・三谷泰浩・亀田伸裕：深部に位置する不連続性岩盤の挙動に関する実験的研究、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.147~151、1991.
- 6) 土質工学会：堆積軟岩の工学的性質とその応用、土質基礎工学ライブラリー30、pp.192.
- 7) 同上：同上、p.194.
- 8) 同上：同上、p.196.

(1992.4.23 受付)

## STUDY ON DETERMINATION OF GROUND CHARACTERISTIC CURVES BASED ON BOREHOLE LOADING TEST

Yutaka NASHIMOTO, Sadahiko TAKAMORI and Toru KONDA

Ground characteristic curve for the relationship between load on tunnel support (supporting load) and ground displacement has been often used to evaluate the appropriateness and rationality of tunnel support. Though the curve is regarded as useful, however, few studies have been made so far as how to obtain it.

In this study, attention has been given to the fact that loading and unloading occur simultaneously during borehole loading tests, showing stress paths similar to those during tunnel excavation. Model experiments, which simulate tunnel excavation and borehole loading test, were conducted, and the usefulness of borehole loading test in determining ground characteristic curve was considered. As a result, it has been confirmed that unloading curve obtainable from borehole loading test can be regarded as ground characteristic curve if it is modified so that displacement becomes zero when inner pressure is equal to initial ground pressure.