

III-272 孔内載荷試験による地山特性曲線の作成

前田建設工業(株) 正会員 梨本 裕 高森 貞彦
 東京都立大学 正会員 今田 徹

1. はじめに

トンネル支保の妥当性について検討を行う場合、地山特性曲線がよく利用される。地山特性曲線を試験結果として直接求めることは困難なため、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、その求め方には検討の余地があると考えられる。室内試験はコアサンプルが得られない場合が多く、得られても実験室における値であり、地山の物性を表している保証はない。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は容易ではないため、実施されることは少ない。これらの試験に対して孔内載荷試験は手軽に原位置で実施できる利点を持っており、変形特性ばかりでなく、粘着力や内部摩擦角を求めることも可能である。しかも、この試験の過程で地山はトンネル掘削と似た応力経路を辿る。地山特性曲線の作成に必要な物性値を推定するには現行の試験方法の中では孔内載荷試験が最も有効であると考えられるので解析的な検討を試みた。

2. 地山モデルと孔内除荷・載荷曲線の作成方法

地山が等方等質で、初期地圧が等方かつ一様に分布し、ボーリング孔内の載荷部近傍は軸対称平面ひずみ状態にあると仮定する。また、弾性域地山の強度降伏条件と塑性域地山の降伏応力条件が式(1)と式(2)で表され、 $f_1 > 0$ のとき地山は線形弾性体として挙動し、 $f_1 = 0$ になると地山の支保能力は残留強度まで急激に低下し、その後は一定を保つと仮定する。

$$f_1 = 2C_p \cos(\phi_p) + (\sigma_r + \sigma_\theta) \sin(\phi_p) - |\sigma_r - \sigma_\theta| = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$f_2 = 2C_r \cos(\phi_r) + (\sigma_r + \sigma_\theta) \sin(\phi_r) - |\sigma_r - \sigma_\theta| = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 σ_r : 半径方向応力, σ_θ : 円周方向応力, C_p, ϕ_p : ピーク強度時の粘着力, 内部摩擦角,
 C_r, ϕ_r : 残留強度時の粘着力, 摩擦角

このような条件の下では、地山を緩める前に孔内除荷あるいは載荷を開始できた場合、載荷応力と孔壁変位の関係は、Kastnerの応力解と弾性理論を適用すると、塑性領域が発生しているとき式(3)、発生していないとき式(4)で与えられる。ただし、体積膨張は無視できるものとする。この場合の除荷時の応力-変位曲線をタイプI、載荷時のそれをタイプIIと呼ぶ。

$$U = \{(R_a + U_a)^2 - R_a^2 + R^2\}^{1/2} - R \quad \dots(3) \quad U = R(P - \sigma_0)(1 + \nu) / E \quad \dots(4)$$

ここに、 P : 載荷応力, U : 孔壁変位(半径方向正), R : 孔半径, R_a, σ_{ra}, U_a : 弾塑性境界の半径, 半径方向応力, 変位, E, ν : 地山の变形係数, ポアソン比, σ_0 : 初期地圧

塑性領域が発生するのは除荷時は $P < \sigma_{ra}$ 、載荷時は $P > \sigma_{ra}$ のときであるが、この σ_{ra} と R_a は除荷時と載荷時とでは次のように異なる。

$$\begin{aligned} \text{除荷時: } \sigma_{ra} &= (2\sigma_0 - Q_p) / (1 + \xi) & R_a &= R \{(\sigma_{ra} + \lambda Q_r) / (P + \lambda Q_r)\}^\lambda \\ \text{載荷時: } \sigma_{ra} &= (2\xi\sigma_0 + Q_p) / (1 + \xi) & R_a &= R \{(\sigma_{ra} + \lambda Q_r) / (P + \lambda Q_r)\}^{-1-\lambda} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} Q_p &= 2C_p \cos(\phi_p) / (1 - \sin(\phi_p)) & \xi &= (1 + \sin(\phi_p)) / (1 - \sin(\phi_p)) \\ Q_r &= 2C_r \cos(\phi_r) / (1 - \sin(\phi_r)) & \lambda &= (1 - \sin(\phi_r)) / 2 / \sin(\phi_r) \\ U_a &= R_a (\sigma_{ra} - \sigma_0)(1 + \nu) / E \end{aligned}$$

削孔して地山を緩めた後に載荷していく場合には、応力再配分が複雑になるので理論解を導き出すことは困難である。ここでは、弾性理論解とFEM的な数値解析手法を組合せて計算する。一次元同心円に要素分割し、 $f_1 < 0$ になる要素が発生したとき、その要素において平均応力と主応力方向を変えずに $f_2 = 0$ を

満足するように再配分応力を求め、これを全体系に作用させる。再配分は変形係数を変えずに超過応力が許容値以下になるまで繰り返す。一度緩んだ要素が $f_2 < 0$ になるときに同様に応力再配分する。削孔後載荷前の各点の応力はKastnerの応力解を使用し、これを出発点とする。この場合の応力-変位曲線をタイプⅢと呼ぶ。

3. 孔内除荷・載荷曲線と地山特性曲線

図-1(1)(2)に孔内除荷・載荷曲線を示す。ただし、タイプⅠ、Ⅱの曲線は初期地圧時の変位を0、タイプⅢの曲線は削孔後の変位を0としている。

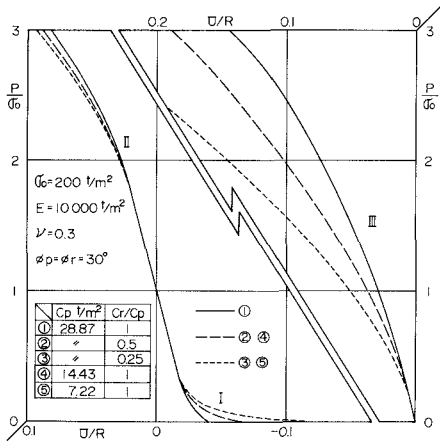


図-1(1) 孔内除荷・載荷曲線(1)

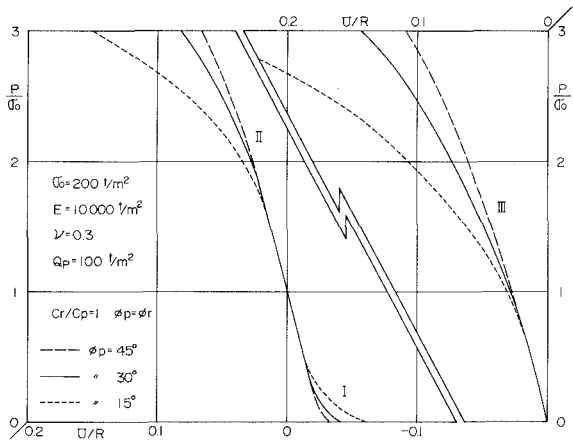


図-1(2) 孔内除荷・載荷曲線(2)

図-1(1)は $\phi_r = \phi_p$ かつ ϕ_r が一定の場合に強度低下の大きさ (C_r / C_p) および強度低下がないときの C_p の値が曲線に及ぼす影響を表している。この図の曲線で注目すべき点は次の二つである。一つはタイプⅠとⅡの曲線の折れ曲り点の応力はピーク強度と初期地圧で決まるのに対し、タイプⅢのそれは残留強度のみで決まるという点である。もう一つは②と④、③と⑤の曲線がどのタイプでもほとんど同じであるという点で、これは曲線が強度低下があるときには残留強度に支配され、ピーク強度の影響をほとんど受けないことを示している。また、図-1(2)は強度低下がなく、一軸圧縮強度が一定の場合に C_p と ϕ_p の組合せが曲線に及ぼす影響を表しているが、組合せによって曲線が異なることが分かる。

従って、孔内載荷試験によって得られたタイプⅡ、Ⅲの載荷曲線から、 $\phi_r = \phi_p$ であれば C_r 、 ϕ_r と E が推定でき、 C_p は直接推定できなくても $C_p = C_r$ としてしまえば、タイプⅠの除荷曲線をほぼ正確に作成できることになる。除荷曲線の孔半径をトンネル半径に置き換え、式(5)に示すように塑性領域の自重を載荷応力に付加すれば地山特性曲線に変換できる。

$$P_i = P + (R_a - R) \gamma \dots (5)$$

ここに、 P_i : 支保圧、 γ : 地山の単位体積重量
 このようにして作成した地山特性曲線も図-2に示すように除荷曲線同様 C_p の影響をほとんど受けない。最小支保圧とこれを与える変位もほとんど同じである。

4. おわりに

以上より、孔内載荷試験は地山特性曲線の作成に非常に有効であると考えられる。本研究を進めるにあたりご指導をいただいた応用地質(株)武内俊昭技師長に深く感謝いたします。

<参考文献> 1)土質工学会：堆積軟岩の工学的性質とその応用 2)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

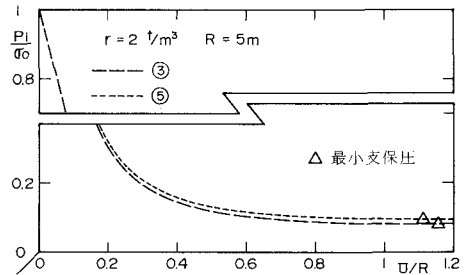


図-2 地山特性曲線