

# 空洞周辺の地盤内応力推定に関するゆるみ土圧式の拡張手法の提案

九州大学大学院 学○杉本 知史 F 落合 英俊  
九州大学大学院 正 安福 規之 学 川村 顕大

## 1. はじめに

近年、都市部における高度な地下利用の要求に対し、空洞同士の近接施工を行う事例が多数存在している。近接施工時の地盤変状あるいは既設構造物への影響を推定する際は、一般に地表面を含めた地盤内変位あるいは空洞上に作用する土圧が計測されている。しかしながら将来的に、地盤内応力変化の計測技術が進歩することが期待される中、これを定量的に予測、評価することは観測施工上、有用になりうるものと考えられる。そこで本報告では、空洞周辺の地盤内応力の変化に着目した地盤変状の推定を目的とし、Terzaghi のゆるみ土圧式に基づいた、極限平衡状態における空洞断面収縮時の地盤内応力変化を定量的に評価する手法を提案する。

## 2. 従来のゆるみ土圧式と拡張手法の考え方

Terzaghi は乾燥砂を用いた降下床実験を行い<sup>1)</sup>、空洞掘削時の断面収縮に伴う周辺地盤の力学的挙動を明らかにしている。そこで、空洞側方から天端深さまでは仰角  $45^\circ + \phi/2$  の方向に、天端深さから地表面までは鉛直方向にすべり線が生じ、地盤内にアーチ作用が発現すると考え、空洞上方に作用する平均鉛直土圧を定義している。一方、村山らは同様の降下床実験より、Terzaghi が示したすべり線内に挟まれる範囲に、「一次領域」「二次領域」「静止領域」と称する三つの領域の存在を指摘した<sup>2)</sup>。

本研究では、Terzaghi のゆるみ土圧式の考え方に村山らの考え方を取り入れた上で、各領域内に作用する地盤内応力を推定する手法を提案している。村山らが提唱した考え方にある、一次領域の高さをゆるみ高さ  $z^*$  と表現することで、図1のようなモデル化を図っている。ただし以下では、地表面の上載荷重と地下水は考慮しないものとする。また本報告では、「一次領域」「二次領域」内を対象とする。

一次領域内の鉛直応力分布  $\sigma'_{v1}$  を  $z$  のみの関数とし

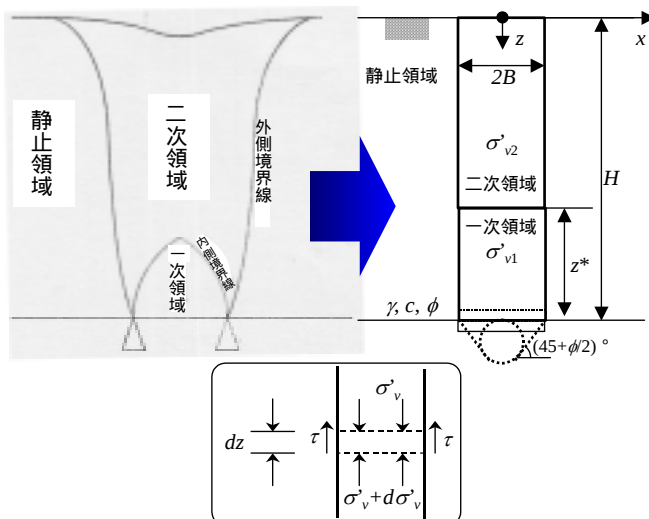


図1 村山らの考え方のモデル化

て、図1に示す土要素の力の釣り合いから、

$$2B \cdot \gamma dz = 2B \cdot d\sigma'_{v1} + 2\tau \cdot dz$$

$$= 2B \cdot d\sigma'_{v1} + 2(c + K_{h1}\sigma'_{v1} \tan \phi) dz \quad (2)$$

が得られ、これを整理して境界条件  $z=H-z^*$ ,  $\sigma'_{v1}=0$  のもとで積分すると、

$$\sigma'_{v1}(z) = \frac{B\gamma - c}{K_{h1} \tan \phi} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{K_{h1} \tan \phi}{B} (z + z^* - H) \right\} \right] \quad (3)$$

となる。ここで、一次領域内での側圧係数は  $K_{h1}$  と定義している。

次に式(3)について、水平方向の分布を表現するために変数  $x$  を導入することを考える。今ここに新たな地盤内応力の分布関数  $\sigma'_{v1}(x, z)$  を導入する。この関数は種々の関数形を取りうると思われるが、式(3)を参考に、

$$\sigma'_{v1}(x, z) = f_1(x) \cdot g_1(z) \quad (4)$$

というような積の形を取るものと仮定する。ここで  $g_1(z)$  は、

$$g_1(z) = 1 - \exp \left\{ -\frac{K_{h1} \tan \phi}{B} (z + z^* - H) \right\} \quad (5)$$

であることが一意に定まる。 $f_1(x)$  は実験結果<sup>3)</sup>に基づいて、すべり面上のせん断力の影響が降下床中央寄りほど小さくなるものと仮定すれば、 $z$  一定のもとでの  $\sigma'_{v1}(x, z)$  は、上に凸な二次放物線で表される。 $f_1(x)$  を以下のような式で定義する。

$$f_1(x) = -\lambda_1 x^2 + \xi_1 x + \eta_1 \quad (6)$$

ただし、 $\lambda_1 > 0$  である。ここで、未知係数  $\lambda_1$ 、 $\xi_1$ 、 $\eta_1$  を算定するため、以下に示す仮定を設ける。

$\sigma'_{v1}(x, z)$  は  $z$  軸に対称な分布とする。

空洞上の全土圧は Terzaghi のゆるみ土圧の合力に等しい。

$x=0$  ではせん断応力は生じない。

これらの条件から、

$$\sigma'_{v1}(x, z) = (-\lambda_1 x^2 + \eta_1) \cdot \left[ 1 - \exp\left\{ -\frac{K_{h1} \tan \phi}{B} (z + z^* - H) \right\} \right] \quad (7)$$

が得られる。ただし、

$$\lambda_1 = \frac{3}{B^2} \left[ -\frac{B\gamma - c}{K_{h1} \tan \phi} + \frac{\gamma(z + z^* - H)}{1 - \exp\left\{ -\frac{K_{h1} \tan \phi}{B} (z + z^* - H) \right\}} \right] \quad (8)$$

$$\eta_1 = \frac{\gamma(z^* + z - H)}{1 - \exp\left\{ -\frac{K_{h1} \tan \phi}{B} (z + z^* - H) \right\}} \quad (9)$$

二次領域内の鉛直応力分布  $\sigma'_{v2}$  も同様に、

$$\sigma'_{v2}(x, z) = (-\lambda_2 x^2 + \eta_2) \cdot \left[ 1 - \exp\left\{ -\frac{K_{h2} \tan \phi}{B} \cdot z \right\} \right] \quad (10)$$

が得られる。ただし、

$$\lambda_2 = \frac{3}{B^2} \left[ -\frac{B\gamma - c}{K_{h2} \tan \phi} + \frac{\gamma z}{1 - \exp\left\{ -\frac{K_{h2} \tan \phi}{B} \cdot z \right\}} \right] \quad (11)$$

$$\eta_2 = \frac{\gamma z}{1 - \exp\left\{ -\frac{K_{h2} \tan \phi}{B} \cdot z \right\}} \quad (12)$$

上記式(7)、式(10)の計算では、地盤の材料特性を表す単位体積重量  $\gamma$ 、粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$ 、幾何学パラメータであるすべり面間の長さ  $2B$ 、土被り高さ  $H$ 、ゆるみ高さ  $z^*$ 、加えて各領域内の側圧係数  $K_{h1}$ 、 $K_{h2}$  を要する。

### 3. ゆるみ高さと同圧係数の定義

本研究におけるゆるみ高さ  $z^*$  の考え方は、図1に示す一次領域をより簡便に表現するためのパラメータである。既往の実験結果<sup>4)</sup>に基づいて、本研究が対象としている極限平衡状態では、土被り高さによらずゆるみ高さが概ね一定となると仮定し、空洞直径  $D$ 、地盤の材料定数  $\gamma$ 、 $\phi$  の三つをパラメータとする以下の式で表されるものと定義した。

$$z^* = \frac{D}{2} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (13)$$

Terzaghi のゆるみ土圧式では、側圧係数  $K_h$  を経験的に1程度とすることとしているが、本提案では各領域に対し、個別に与える諸量とする。まず、二次領域

### 5. おわりに

本報では、Terzaghi のゆるみ土圧式と村山らの考え方に基づいた、空洞断面収縮時の地盤内応力の変化に関する推定式を提案した。一次領域、二次領域を対象とした考え方を示したが、次報では静止領域も含めた地表面から空洞天端深さまで全領域を対象とした推定手法を提案する。

【参考文献】1) Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, New York, pp66-75, 1943. 2) 村山ら：アーチ作用のメカニズムとトンネル土圧について、第26回地盤工学研究発表会講演集, pp.417-420, 1971. 3) 川村ら：小型応力測定装置の降下床実験への適用と地盤内挙動の推定, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, pp.249-250, 2004. 4) 杉本ら：拡張した空洞膨張論による地盤内応力変化の推定手法の妥当性検証, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, pp.171-172, 2004.

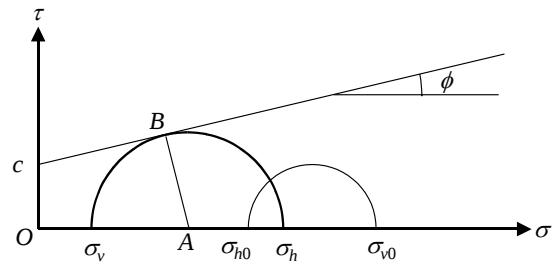


図2 一次領域内の応力変化

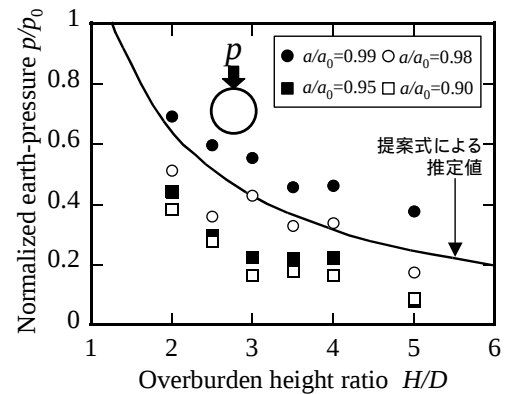


図3 空洞天端上の鉛直土圧と土被り高さとの関係

の側圧係数  $K_{h2}$  は、既往の模型実験結果<sup>3)</sup>より観察される二次領域の剛体的挙動から、静止状態と同様にみなすことができると仮定し、Jaky 式により表すものとする。一方、一次領域では図2にモールの応力円で示す変化が生じたと仮定する。これらより、 $K_{h1}$ 、 $K_{h2}$  は次のように定義する。

$$K_{h1} = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad K_{h2} = K_0 = 1 - \sin \phi \quad (14)$$

### 4. 提案式と実験結果との比較

式(7)、式(10)および式(13)、式(14)を用いて空洞天端上の鉛直土圧と土被り高さとの関係を示したものを図3に示す。プロットは実験結果<sup>3)</sup>であり、 $a/a_0$  は空洞収縮前後の半径の比を表す。土被りが増すほど初期土圧で正規化した鉛直土圧は小さくなる傾向を推定式で表現していることが分かる。しかしながら、上記の計算結果は実験結果の下限值とは、土被り比が小さい範囲で乖離したものとなっている点は、村山らの考え方のモデル化やゆるみ高さの考え方が大きく影響しているものと考えられる。