

円形空洞変形時における地盤内塑性域の範囲と土圧分布推定に関する一考察

九州大学大学院 学○杉本知史 フェロー 落合英俊 正 安福規之
九州大学大学院 正 中島通夫 学 川村顕大

1. はじめに

都市部での地下利用開発が進展する中、浅層地盤内に円形空洞を掘削する事例が国内でも多数存在するが、その近接施工による周辺地盤や既設構造物への影響について、不明な点が多く存在している。そのため、施工時には計測管理が重要な手段とされており、事前に施工区間内の注意箇所を予測することは重要とされている。このような影響にかかわる要因の一つとして、空洞の内空変位によって生ずる周辺地盤の塑性域の存在（あるいは、地盤のゆるみ）が知られている。そこで本報告では、比較的浅い地盤内に存在する円形空洞の断面収縮にともなう生ずる周辺地盤の塑性域に注目し、拡張した空洞膨張論によって塑性域範囲および地盤内応力の定量的な推定手法を提案するとともに、対象とした模型実験、有限要素法による数値解析より得られた結果をもとに、本手法から得られた結果の妥当性について、検討を行っている。

2. 空洞膨張論とその拡張手法

一般的な空洞膨張論¹⁾では、空洞周りに等方圧が作用する一次元問題を取り扱っている（図1）。この理論を本研究が対象としている浅層地盤内の円形空洞の収縮問題に適用する場合、空洞に作用する応力が深さ方向で異なるため、何らかの処理が必要となる。本研究では空洞周囲を複数箇所（これを「セグメント」と称する）に分割することによって、空洞周囲に作用する土圧と空洞の変形量を適宜与えることを可能とした。このことは現実起こりうる挙動をよりよく表現する上で、有利と考えられる。これを著者らは「分割法」と称し、セグメント毎に空洞膨張論を適用して計算を行っている。

この分割法は、図2に示すように空洞外周および周辺地盤を複数のセグメントに n 等分に分割し、各々の範囲に対して離散化した初期空洞内圧、内空変位を与える方法である。ここで、初期空洞内圧 p_i ($i=1\sim n$) は各セグメント中点の位置に作用する土被り圧を、内空変位は図2に示すような変形挙動を仮定した際の各セグメント両端長さの平均 $\bar{x}_i$ ($i=1\sim n$) と収縮後の空洞半径 a との差分を、それぞれ各セグメントに対して与えている。式示すと以下のように表される。

$$p_i = \gamma z_{ci} \cdots (1) \quad \bar{x}_i = (x_i + x_{i+1})/2 \cdots (2)$$

（ただし、 z_{ci} は地表面から各セグメント外周の中点までの鉛直距離、 x_i 、 x_{i+1} はそれぞれ空洞収縮前の両端長さを表す。）よって、空洞全体の半径は収縮前後で $a_0 \rightarrow a$ に変化するが、各セグメントにおいては $\bar{x}_i \rightarrow a$ に変化する。こうして得られる見かけの初期半径をもとに、各セグメントに与えた初期空洞内圧、内空変位に対応する弾塑性境界面の位置を決定し、弾性域・塑性域内の各応力分布を空洞膨張論により計算している。この算定方法を、拡張した空洞膨張論と称している。詳細は参考文献を参照されたい。表1に今回用いたパラメータとその値を示す。

3. 拡張した空洞膨張論の妥当性に関する検証

本報告では、先に述べた拡張した空洞膨張論の妥当性を検証

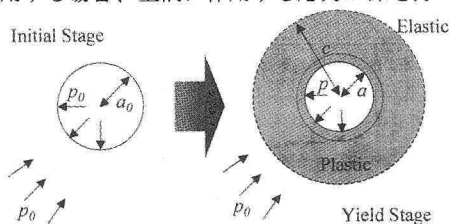


図1 空洞膨張論の概念図（空洞収縮時）

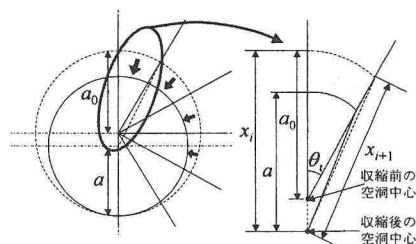


図2 分割法の定義

表1 本報告で用いたパラメータ

幾何条件			材料定数		
初期空洞半径(m)	a_0	0.055	ヤング率(kPa)	E	5500.0
収縮後空洞半径(m)	a	0.05	ポアソン比	ν	0.30
分割数	n	6	粘着力(kPa)	C	0.10
土被り高さ(m)	H	0.4	内部摩擦角(deg)	ϕ	20.0
			ダイレーション角(deg)	φ	5.0
			単位体積重量(kN/m ³)	γ	19.6

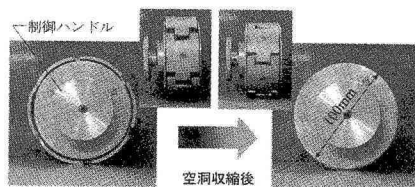


図3 空洞模型収縮の様子

するため、この理論解析と同様な状況を再現することを目的とした有限要素法による数値解析（コードは PLAXIS）、および図3に示す均一な半径方向への変形が可能な空洞模型と川村らが開発した応力測定装置²⁾を用いて行った2次元模型実験を行った。

これらの結果をそれぞれ解析値、実験値、空洞膨張論より得られる結果を計算値と称し、比較した結果の一例が図4である。これは、空洞の内空変位と作用する応力との関係を正規化量で表したものであり、(a)が空洞天端に作用する鉛直応力、(b)が空洞側方中央に作用する水平応力に関するものである。(a)に関しては、初期状態から内空変位が生じた直後の間に急激な応力の減少を三者ともよく表しており、いわゆる「落とし戸実験」で得られる緩み土圧に相当するものと考えられる。一方(b)では、計算値と解析値が同様の傾向は示しているものの、実験値とは大きくかけ離れている。この位置で空洞膨張論による理論解析および数値解析が模型実験の挙動の再現に至っていないのは、粒状体の挙動を連続体のモデルで表現し得ないためと考えられる。本紙では明示していないが、実験結果のみに注目した場合も実験のケース毎で応力変化に差異が生じていることから、この位置での応力変化の挙動は複雑であり、より精度の良い実験方法を検討する必要があるとも考えられる。

また図5は、各セグメントに条件を与えて計算した際の、弾塑性境界線とこれらを平滑化して連ねた曲線を示したものである。塑性域が形成される範囲が、水平方向の幅では概ねよい一致を示しているものの、地表面に近づくに従い大きな差異が生じている。これは、本手法で自由境界面を考慮しておらず、その影響が加味されていないためと考えられる。

図6は、空洞に外接する矩形断面状に作用する法線方向の応力分布を示した結果である。これらの分布は、各セグメントに所定の条件を与え計算した後に、該当する範囲の応力分布を重ねて表示したものである。空洞天端深さの水平断面に作用する鉛直応力は、初期土被り圧を1とした場合、概ね0.5~0.8減少しており、同様の現象が空洞側方部でも生じている。また本手法の目的の一つであった、深度方向に向かって現れると考えられる土被り高さの影響も、空洞側方に作用する水平応力分布に現れていることが確認できる。合わせて示した数値解析の結果との整合性も、天端および下部深さで比較的良好一致を示している。

4. まとめ

本報告では、拡張した空洞膨張論を用いた空洞断面収縮時の周辺地盤内の塑性域および応力分布の推定を行った。本手法では自由境界面の存在を考慮していないため、空洞近傍での適用に限れば、ある程度の精度を持って推定が可能であると判断された。今後はこの手法と落とし戸モデルを組み合わせる方法について、検討を進める予定である。

【参考文献】1) Hai-Sui Yu: "Cavity Expansion Method in Geomechanics", Kluwer Academic Publishers, pp1-94, 2000, 2) 川村ら, "アルミ棒を用いた2次元積層体内の応力測定装置の開発とその適用", 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, pp949-950, 2003

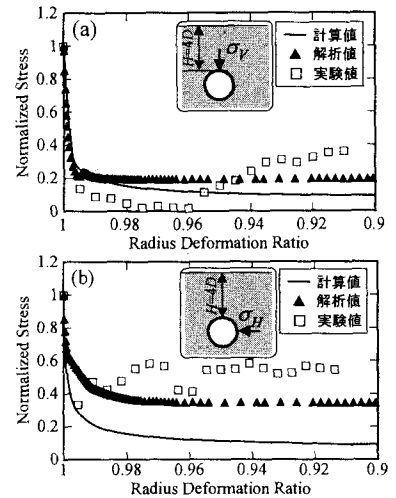


図4 空洞断面収縮に伴う作用応力の変化

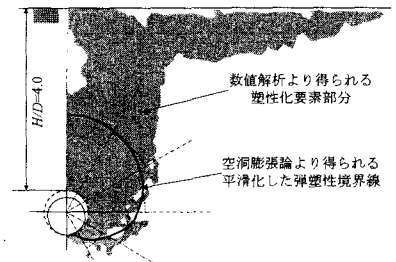


図5 塑性域範囲推定に関する比較

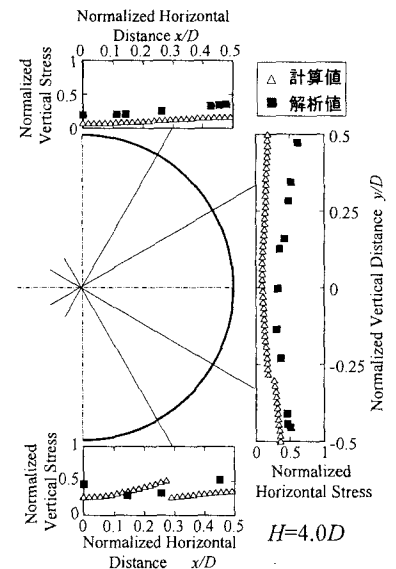


図6 空洞外周の矩形断面に作用する法線応力分布