

岩盤空洞の不安定現象の進行に関する検討

宇都宮大学 学生会員 ○楠 祐規
 宇都宮大学 正会員 清木 隆文

1. はじめに

岩盤内にある無支保の地下空間が経年劣化などの原因により、構造的に不安定な状態となり、天盤の欠落や残柱の崩壊に繋がり、最悪の場合地下空間そのものの倒壊が懸念される。不安定になる要因としては、残柱と言われる掘削の際に天盤を支えるために残した柱に作用する荷重が挙げられる。本研究では、残柱が破壊した観察事例を参考にし、有限差分法による解析ソフトFLAC3D(Itasca 社製, Fast Lagrangian Analysis of Continua three-Dimensional)を用いて、残柱と地下空洞を3次元的に再現し、残柱の破壊進行と残柱の破壊による地下空洞の応力の再配分の変状を明らかにし、次なる変状の予測を試みることを目的とする。

2. 残柱の破壊進行の再現

2.1 残柱の再現

残柱の再現として、実際に破壊した残柱の情報から材料特性(表-1)と厚さを設定し、残柱部分が境界条件の影響を受けないように天盤と底版を配置し、自重解析後に柱を掘削し、図-1の解析モデルを作成した。天盤幅は、残柱間の幅が約10mであったことから距離を二等分して区切られる天盤の面積分に相当する地盤を負担していると考えた。

2.2 残柱の破壊進行

残柱において、応力集中が最も大きい場所は残柱の上部の四つの隅角部であり、この隅角部から残柱の破壊が始まり、残柱の中心部に伝わることで残柱全体の崩壊に繋がりことから、上部隅角部を強制的に強度低下させた。解析結果から、上部の破壊させた場所から中心部に向かって引張応力が大きく作用していた。(図-2(a))さらに、引張応力が大きい範囲を破壊させると、中心部に向かって引張応力がさらに大きく作用していく様子が確認された(図-2(b))。このことから、残柱の高さ中央部では、剥離が生じ、中央部に向かって細くなっていくと考えられる。また、この作業を繰り返し、破壊を進行させていくと、残柱の上部13mまで破壊した

ところで、図-3のように柱残柱の中心部が降伏した。この解析結果から、残柱は上部の四つの隅角部が破壊すると、中心部に向かって引張応力が大きくなっていき、それに伴って剥離が生じる。この剥離の進行が残柱中央部に達することで、残柱自体が降伏し、崩壊する可能性が確認された。

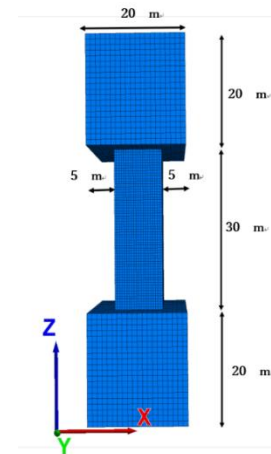


図-1 残柱の再現モデル

表-1 解析における材料特性

静体積弾性係数 K (MPa)	1.38×10^3
静せん断弾性係数 G (MPa)	0.91×10^3
粘着力 C (MPa)	2.10
内部摩擦角 ϕ (°)	30
引張強度 σ_t (MPa)	1.08
密度 ρ_t (kg/m ³)	1.77×10^3

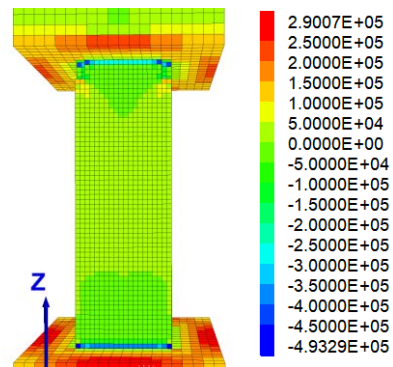


図-2(a) 隅角部を破壊させた残柱の最大主応力(Pa)

キーワード 残柱の再現モデル 残柱の破壊進行 地下空洞の応力配分

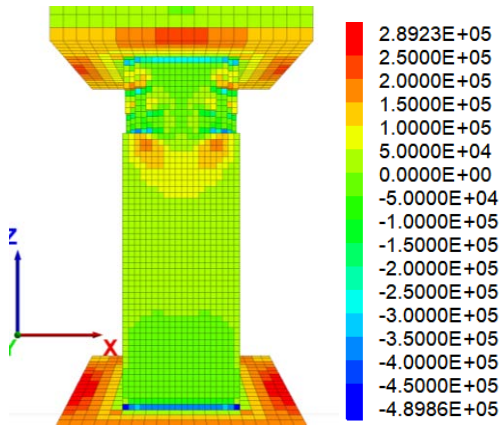


図-2 (b) 破壊を進行させた残柱の最大主応力(Pa)

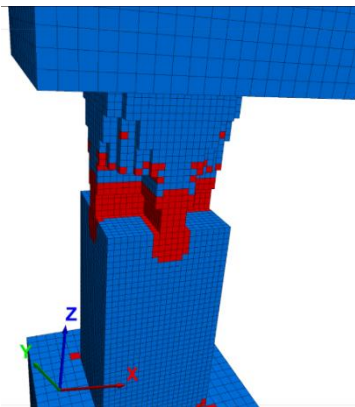


図-3 残柱の降伏状態(赤色が降伏箇所)

3. 地下空洞の残柱の破壊による応力の再配分

地下空洞の再現は、残柱が崩壊した地下空洞の事例をもとに、大きさ 100m×80m×100m、天盤厚さを 50m において 11 本の残柱を含む地下空洞の再現モデルを作成した。解析過程は残柱モデルと同様である。参考にした事例では、地上水平面に対して低い傾斜の断層が存在し、その断層と交わる残柱が 2 本崩壊している。さらに、残柱が崩壊する前後の画像データから、残柱 1 本に脆弱部が多く見られ、脆弱部がある残柱を残柱 A とし、断層と交わっている残柱を残柱 B として、残柱 A、B の降伏状態における周囲の応力状態の再現解析を行った。

3.1 残柱の崩壊による周囲の応力状態の解析

まず、断層が存在しない場合に残柱 1 本が降伏した時の周囲の状態を確認するために、断層が存在しない空洞のモデルにおいて残柱 A の脆弱部は粘土化している事から粘土質の引張強度 σ_t を物性値として採用した。残柱 A が降伏するまでの過程で、周囲の残柱の状態を確認したところ、周囲の隅角部の降伏が拡大していた。これは、残柱 A の降伏により、周囲の残柱に天盤の負担面積の増加したことによるものであるといえる。さらに、前章で述べたように隅角部の破壊から、周囲の

残柱も破壊が進行していくと推定される。

3.2 断層の存在による残柱の応力状態

本研究で参考にした不安定現象の事例では残柱 A に隣接する残柱 B が、他の残柱より早く破壊している。これを残柱 A の降伏に伴って天盤の負担面積の増加した際、残柱 B が低傾斜角の断層の存在により、残柱 B は他の残柱より強度が弱かったため崩壊したと仮定し、解析の結果を図-4(赤色は降伏箇所、緑色は引張状態箇所)に示す。引張強度の低下を断層の角度を 10° として鉛直方向の大きさを用いた。

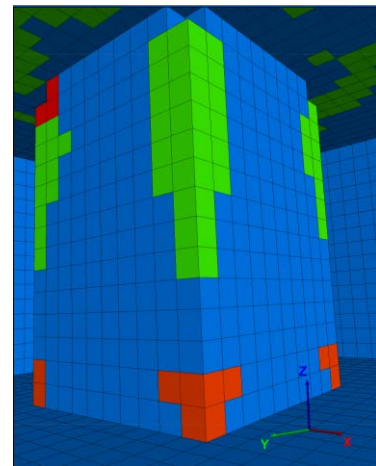


図-4 残柱 A の降伏時における残柱 B の降伏状態

赤色の降伏箇所が隅角部に集中していることから、残柱 B の崩壊は低角断層による強度の低下が要因であると結論づけた。

4. まとめ及び今後の課題

残柱モデルは、残柱の隅角部が破壊した場合、中心部に向かって引張応力が集中する傾向を示した。破壊が進行すると、残柱の表面剥離が生じ、中央部が細くなり、荷重によって残柱が降伏すると結論づけた。また、残柱の崩壊により隣接する残柱が負担する天盤面積が増加した残柱から崩壊が進行していくと予測した。さらに、脆弱部や断層の存在が地下空洞の残柱の崩壊に影響していると確認された。さらに、対象空洞の断層傾斜角の影響を考慮するケーススタディで確認する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 柴原信雄, 粘性土の引張せん断特性(圧密の影響), 長野工業高等学校紀要・第 16 号, 1968.
- 2) 大坪孝太郎, 高葉悠, 清木隆文, 残柱の破壊機構に着目した大谷地下採石地下空間の健全性評価, 第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2011