

(30) 大規模地下空洞掘削時における変形挙動の寸法効果

Scale Effect in the Deformation Behavior of Large Underground Excavations

蔡 明*・宇野 晴彦**

Ming CAI and Haruhiko UNO

Abstract — Reliable deformation analysis is indispensable in the design and construction practice of large underground excavations. The FEM analyses of about 20 pump-storage power houses are reviewed in the present study and it is found that the effective moduli used in the deformation analysis are different from those obtained from the in-situ plate loading tests. Tentative relationships are found between the effective moduli and the size of the excavations, which show the scale effect. Distinct element method is applied in the present study to investigate the mechanism which governs the scale effect, and it is found that the opening and frictional slip of joints are the main factors which affect the scale effect of underground excavations.

1. はじめに

近年、地下空洞の規模は、技術の進歩に伴い大きくなりつつあり、大規模地下空洞の設計・施工に当たっては、岩盤の変形挙動を精度良く予測することが必要不可欠となっている。大規模空洞掘削に先がけて空洞周辺に調査坑を掘削し、現位置試験での初期地圧レベルの除荷時の弾性係数を岩盤の代表的な弾性係数として評価することもあるが、直接、このような弾性係数を用いてFEM解析を行った場合、予測解析での変位が実測値の変位と一致しないとの報告もある。既往、国内では約30地点の揚水式地下発電所が建設されており、計測結果から抽出された岩盤挙動を説明し得る挙動解析結果が報告されているが、この時の岩盤物性は調査段階で実施される平板载荷試験から求められた弾性係数と異なる場合が多い。その原因の一つとしては、岩盤の等価弾性係数が寸法効果を有するためと考えられる。そこで、本研究では、これらの結果に基づき、実際の変位挙動を説明し得る解析時の等価弾性係数と空洞の寸法との関係を調べた。その結果として、空洞の寸法が大きくなるのに伴い、上述の等価弾性係数が小さくなる傾向が認められた。さらに、地下空洞掘削時における寸法効果のメカニズムを検討するため、個別要素法DEMによる解析結果を観測値と見な

し、FEMによる逆解析を行い、岩盤の等価弾性係数を求めた。その結果、掘削断面が大きくなるのに伴う節理などの不連続面のすべり・開口が原因となり、解析的にも寸法効果が表れることを確認した。

2. 大規模地下空洞の等価弾性係数

既往の地下発電所空洞の調査、設計、施工に当たっては、調査坑規模の空洞で原位置岩盤試験を行い、施工時の岩盤挙動を計測し、リアルタイムでのフィードバックによる情報化施工が行われている。しかし、空洞掘削終了時の計測変位結果を説明できる岩盤の等価弾性係数は、当初調査坑で行われた平板载荷試験結果と異なることが多く、工学的に興味深いものである。ここでは、このような視点から、既設地下発電所地下空洞での等価弾性係数を調べ、試験値の持つ意味合いを明確にした上で、地下空洞掘削解析の周辺岩盤のマクロな物性値の寸法効果について検討を行った。

今回検討した地下発電所は約20地点であり、資料は、主に《電力土木》(旧《発電水力》)、発電所の工事誌、公表された研究論文等(例えば、[1]、[2])から収集した。以下の文章中の用語の定義としては、 E_0 は原位置調査坑(幅2~2.5m、高さ2.5~3m)における平板载荷試験結果から求めた除荷時の弾性係数の平均値であり、 E は

* 正会員 工博 東電設計(株)技術開発本部

** 正会員 工修 東電設計(株)技術開発本部

空洞最終掘削状態の岩盤挙動の実測値を説明し得るFEM解析に与えた等価弾性係数(変形係数)である。

図-1に土被りと岩盤の弾性係数の関係を示す。地下発電所の土被りが深くなるのに伴い、いずれの岩盤の弾性係数も大きくなる傾向を示している。この図において、 E 、 E_0 と土被りの相関関係式は直線回帰すると次式により表すことができる。

$$\begin{aligned} E &= 0.04285 \cdot (H) - 1.329 & (r=0.652) \\ E_0 &= 0.08459 \cdot (H) - 5.443 & (r=0.766) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 H は土被り(地表からの深度m)、 E と E_0 の単位はGPaである。

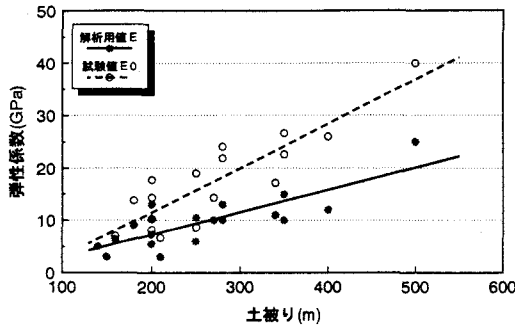


図-1 既設地下空洞の岩盤弾性係数と土被りの関係

次に、 E/E_0 の比率と空洞軸方向長さの関係を図-2に示す。ここでは、各発電所毎に岩種などの地質条件が異なるため、地下空洞掘削終了時の挙動解析に使われた等価弾性係数 E を、調査坑での平板載荷試験の平均値 E_0 を基準として正規化した等価弾性係数と空洞寸法の関係について示した。図によれば、空洞の長さが長くなるのに伴い、 E/E_0 の比率は小さくなる傾向を示している。 E/E_0 の比率と空洞軸方向長さの回帰式は次の式で与えられる。

$$\frac{E}{E_0} = 1.404 - 0.1765 \cdot \ln(L) \quad (r=0.539) \quad (2)$$

ここで、 L は空洞軸方向の長さ(m)である。

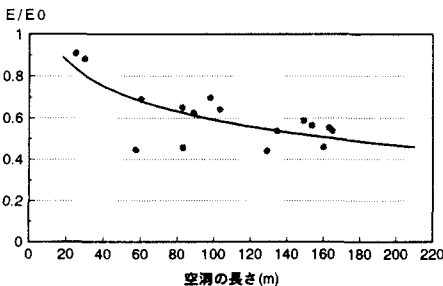


図-2 既設地下空洞岩盤 E/E_0 の比率と空洞長さの関係

図-3に E/E_0 の比率と空洞の見かけ断面積(幅×高さ)の関係を示す。空洞の掘削断面積が大きくなるのに伴い、 E/E_0 は小さくなる傾向が認められる。これは、断面

積が大きくなるのに伴い岩盤のゆるみ領域が広がり、空洞周辺岩盤の変形が大きくなるためと考えられ、寸法効果の原因としては、節理などの不連続面の存在によるものと考えられる。すなわち、空洞の寸法が異なることにより、地圧の解放量・不連続面の境界条件も異なり、その結果、節理のすべり量、開口量および新たに発生する節理の数が異なって、見かけの弾性係数に影響を与えるものと考えられる。比率 E/E_0 と空洞の見かけ面積(幅×高さ)の回帰式は次の式で与えられる。

$$\frac{E}{E_0} = 1.537 - 0.137 \cdot \ln(S) \quad (r=0.421) \quad (3)$$

ここで、 S は空洞の見かけ断面積(m^2)である。

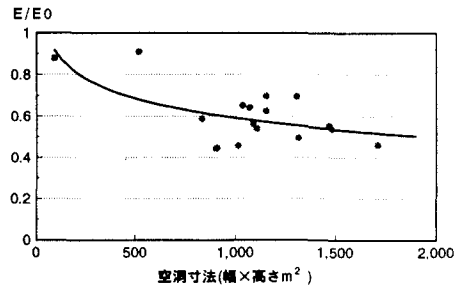


図-3 E/E_0 と空洞断面寸法(見かけ面積)の関係

以上に示した地下空洞の等価弾性係数は、空洞掘削終了時岩盤の変形に対応するものであるが、1地点での掘削挙動においても、途中の掘削ステップに応じて逆解析で求めた等価弾性係数に寸法効果が現れている。例えば、図-4は、今市地下発電所地点における掘

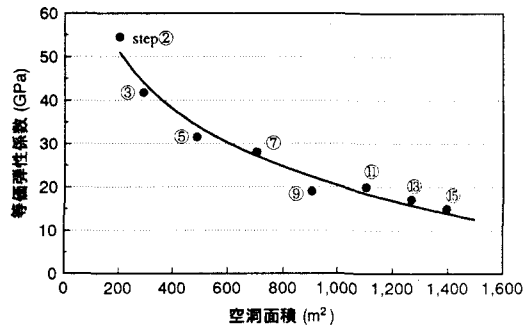


図-4 今市地下発電所施工時掘削断面積と等価弾性係数の関係

削ステップ2、3、5、7、9、11、13、15(ほぼ等間掘削ベンチで最終は15)の等価弾性係数と空洞断面積の関係である。掘削が進行するに伴い、空洞周辺岩盤の等価弾性係数は低減していく傾向が認められる。

3. 個別要素法解析による空洞寸法効果の検討

空洞周辺岩盤の変形特性は、図-3と図-4に示すよ

うに、掘削規模による寸法効果を有するものである。岩盤は、節理などの不連続面を多数内在しており、節理の存在は、岩盤の変形特性に大きな影響を与え、寸法効果の最大の原因と考えられる。これらの寸法効果のメカニズムを解明するためには、節理の開口、せん断すべりなどの変形モードを陽な形で表現できる個別要素法(UDEC)^[3]は有効な手段と考えられる。

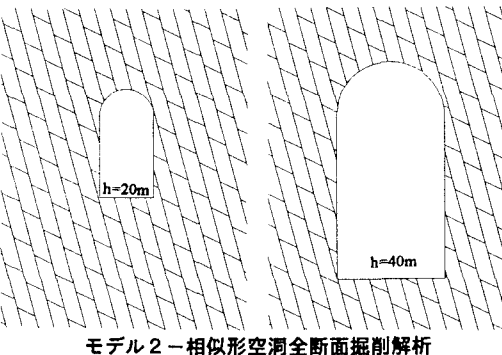
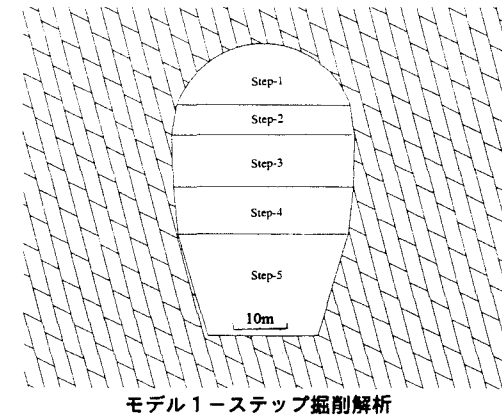


図-5 UDEC解析モデル

a. 解析モデル

UDEC解析モデルを図-5に示す。モデル1の空洞規模は、幅34m、高さ54mであり、掘削は5ステップを考慮した。モデル2は高さ(h)と幅の比率を2とし、相似形なかまぼこ型空洞(h=10、20、30、40m)4ケースを、全断面掘削で解析した。両モデルのモデル領域は、幅300m、高さ373mである。解析には、図中の二組の節理群を考慮した。図-5に示す基本ケースは、卓越節理群の傾斜角度が75°、節理間隔は2.82mであり、共役する不連続節理群の傾斜角度は27°、節理間隔は5.0mとした。初期応力は、 $\sigma_x = -113 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_y = -125 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\tau_{xy} = -3.3 \text{ kgf/cm}^2$ である。岩石の弾性係数は $E = 55.1 \text{ GPa}$ 、ポアソン比を0.23とした。なお、節理面のせん断特性は、Mohr-Coulomb破壊条件により表現している。

b. 逆解析による岩盤の等価弾性係数

ここでは、ある掘削段階のUDECによる解析結果を、岩盤変位の実測値と見なし、連続体解析のFEM逆解析により岩盤の等価弾性係数を求めて寸法効果の評価を行った。逆解析に採用した収束基準は、両者の空洞壁面の単位節点変位量(壁面に均等に配置した変位計測点の変位の平均値)が一致することである。

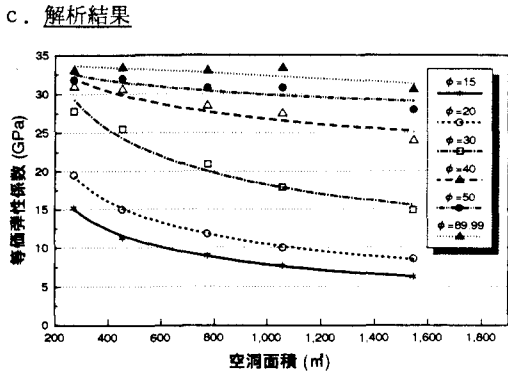


図-6 等価弾性係数と空洞面積の関係(ϕ の影響)

図-6に、モデル1での卓越節理群の傾斜角度75°、共役節理群の傾斜角度27°において、 $K_h = 25 \text{ GPa/m}$ 、 $K_s = 12.5 \text{ GPa/m}$ 、 $c = 0.2 \text{ MPa}$ を与えた場合の節理面の摩擦角度 ϕ をパラメータとした空洞等価弾性係数と空洞面積の関係を示す。 ϕ が小さい場合には、節理の滑りによる塑性変形成分が大きくなるため、空洞の寸法が大きくなるのに伴い、等価弾性係数は低い値を示す。 ϕ が大きい場合には、弾性変形が主な変形成分となるため、健全な寸法効果は現れない。

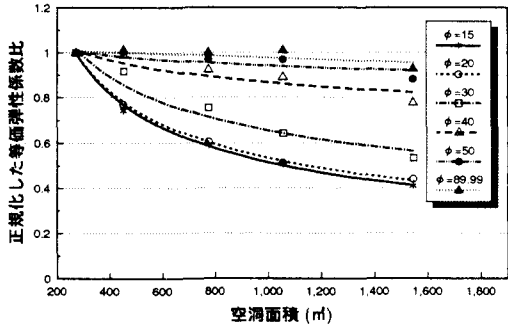


図-7 正規化した岩盤の等価弾性係数比と空洞面積の関係(ϕ の影響)

図-7は、上述した解析結果を最初の掘削断面(Step-1)の等価弾性係数で正規化した等価弾性係数比と空洞面積の関係を示したものである。これは、節理の塑性変形による顕著な寸法効果を示す結果となった。

図-8に、モデル1での節理特性に、 $\phi = 30^\circ$ 、 $c = 0.2 \text{ MPa}$ 、 $K_h = 25 \text{ GPa/m}$ を与え、 K_h/K_s の比率をパラメータ

とした解析結果を示す。この図によれば、 K_n/K_s の比率が大きい場合には、せん断バネ係数は小さく、節理が変形し易いため、岩盤の等価弾性係数は小さくなる傾向を示す。図-9には、各比率での最初の掘削断面(step-1)の等価弾性係数で正規化した等価弾性係数比と空洞寸法の関係を示したが、寸法効果の度合いは、 K_n/K_s の比率にあまり依存しない結果となっている。

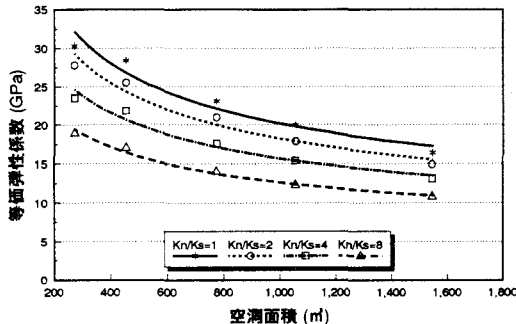


図-8 岩盤の等価弾性係数と空洞面積の関係(K_n/K_s 比率の影響)

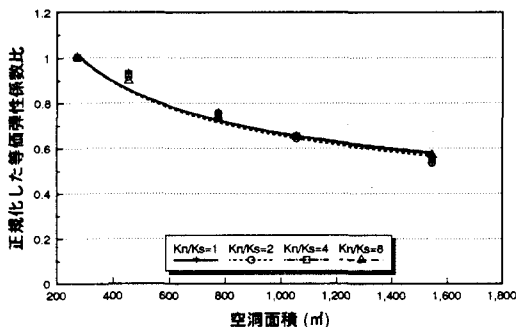


図-9 正規化した岩盤の等価弾性係数比と空洞面積の関係(K_n/K_s 比率の影響)

図-10に、モデル1の空洞形状において、卓越節理群の傾斜角度を75°、45°、15°とし、節理特性を $K_n=25\text{GPa/m}$ 、 $K_s=12.5\text{GPa/m}$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $c=0.2\text{MPa}$ とした

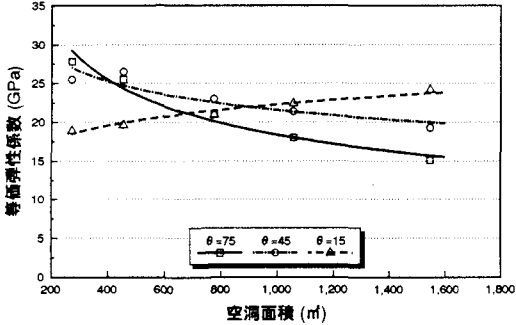


図-10 卓越節理群方向の影響(モデル1)

場合の岩盤の等価弾性係数と空洞面積の関係を示す。

モデル1では、掘削ステップが進むことにより空洞の形状(高さとの比)が変化する。解析結果では、卓越節理群の傾斜角度が高い場合には、空洞断面積が大きくなるのに伴い等価弾性係数は減少する傾向を示すが、卓越節理の傾斜角度が低い場合には、掘削ステップの進行に伴う空洞断面積の増加に対して、等価弾性係数も増加する傾向を示す。

先にも述べたように、モデル1の場合、掘削に伴って空洞形状が変化するため、この形状変化の影響を除いた相似形のモデル2により同様のパラメータの解析を実施した。図-11にその結果を示す。

相似形で断面変化したモデル2では、図-10に示した結果と異なり、すべての卓越節理方向において、等価弾性係数は空洞の断面積が大きくなるのに伴い低減する傾向が見られる。これは、図-3に示す既設空洞掘削終了時の等価弾性係数と空洞寸法関係の傾向と一致する。空洞断面積と等価弾性係数の関係は、断面が相似形であれば、節理方向には依らず、空洞断面積が大きくなれば、等価弾性係数は低下する傾向が認められた。しかし、空洞形状が変化する施工中などの空洞においては、節理方向と空洞形状の変化により一義的な傾向を示さないことも確認された。

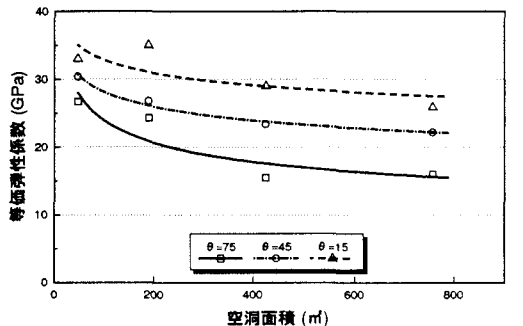


図-11 空洞掘削終了時等価弾性係数と空洞寸法の関係(モデル2)

図-12と図-13に、解析結果の一例として、モデル1の節理開口変位とせん断変位分布を示す。節理の力学特性は $K_n=25\text{GPa/m}$ 、 $K_s=12.5\text{GPa/m}$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $c=0.2\text{MPa}$ で、卓越節理群の傾斜角度は75°である。図によれば、掘削断面の増加に伴い、節理の開口・せん断変位量が大きくなっており、空洞の等価弾性係数に寸法効果が現れるものと考えられる。

4. まとめ

既設地下発電所大規模地下空洞周辺岩盤の等価弾性係数には、寸法効果が認められ、大空洞のマクロな岩盤の等価弾性係数は、小規模空洞のマクロな岩盤の弾

性係数と異なるものと考えられる。また、空洞掘削終了時のマクロな等価弾性係数と調査坑平板載荷試験結果から得られた弾性係数の比率は、空洞規模と相関性を持つことが認められた。そして、これらの相関関数は対数関数で表現することができた。

個別要素法を用いて検討を行った結果、大規模地下空洞変形挙動の寸法効果に及ぼす主要因としては、不連続面の開口・せん断変形および方向分布などが挙げられる。既往の空洞逐次掘削の実績では、掘削が進んで空洞断面が大きくなるのに伴い、マクロな弾性係数は小さくなる傾向があり、これを今回の検討で解析的に表現することができた。しかし、この傾向は一義的ではなく、節理の方向、空洞形状によっては、空洞

の寸法が大きくなるのに伴いマクロな弾性係数は大きくなる場合も有り得ることを確認した。今後、これらのメカニズムを現場計測を含め、さらに解明し、大規模地下空洞建設における合理的設計、施工に役に立てて行きたいと考える。

5. 参考文献

[1] 御牧陽一、今市地下発電所の設計、電力土木、No. 173、p.24-38、昭和56年7月。
[2] 前島俊雄、伊東雅幸、蛇尾川揚水発電所地下発電所空洞の設計と施工実績について、電力土木、p.25-35、1991.5。
[3] UDEC-Universal Distinct Element Code, Itasca Consulting Group Inc., 1992.

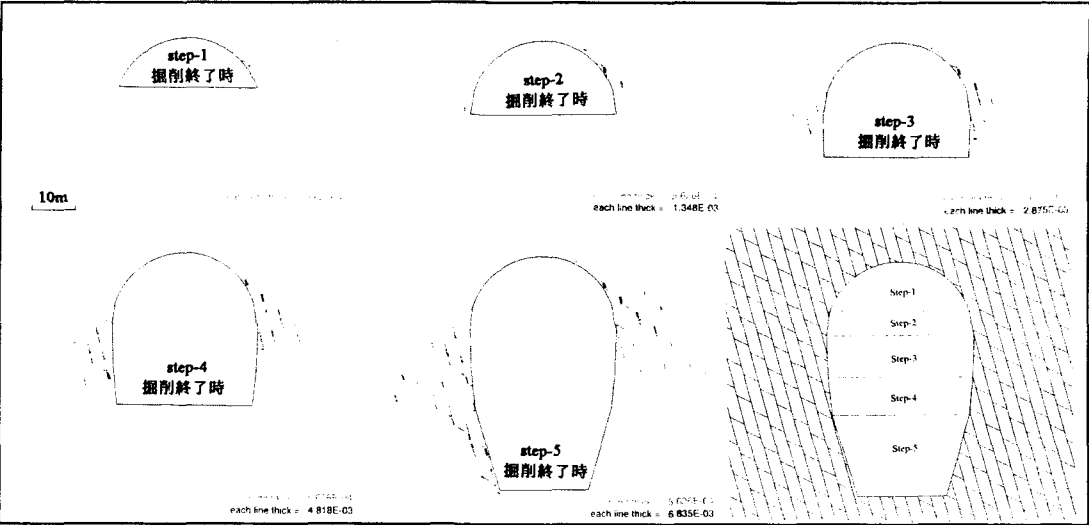


図-12 節理の開口変位(単位m)分布

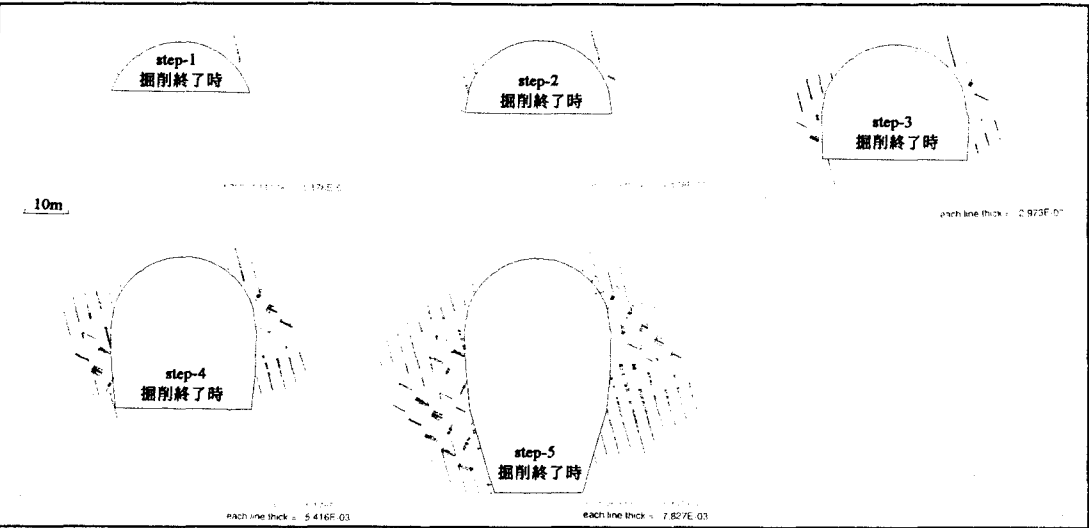


図-13 節理のせん断変位(単位m)分布