

(株) 青木建設 技術本部研究所 正会員 ○國村省吾
 正会員 池尻 健
 正会員 孫 建生
 正会員 永井哲夫

1. はじめに

PS アンカーは、掘削に伴う不連続性岩盤の補強において非常に有効であることが実際の施工を通してよく知られており、大規模地下空洞を建設する場合に主たる支保工として利用されている。しかし、その補強効果を定量的に十分評価する方法が現段階ではない。そこで本研究では、国内外の既設大規模地下空洞における事例解析を行い、PS アンカーの導入力の評価に関する現状を把握し、そのモデル化について考察する。なお、ここで導入力とは設計アンカー力のことを示し、緊張力とは区別して取り扱っている。

2. 実測結果から見た導入力

国内の既設揚水発電所地下空洞における24の事例解析結果から、ひずみ比（側壁ひずみ／岩盤限界ひずみ）と支保内圧比（支保内圧／岩盤一軸圧縮強度）の関係をまとめると、図-1に示すように両者の間には良い相関が見られる¹⁾。ここで、側壁ひずみは空洞の最大内空変位（または2×岩盤変位）を側壁高さで除したものの、支保内圧は空洞側壁におけるPS アンカーの導入力をその設置面積で除したものとそれぞれ定義している。この図から、支保内圧つまりPS アンカーの導入力は、岩盤の力学特性、空洞の規模および岩盤の巨視的変位により評価できることが分かる。

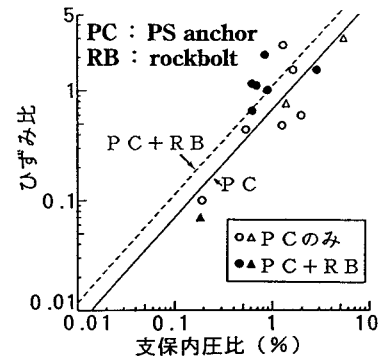


図-1 支保内圧比とひずみ比の実測結果

3. 設計における導入力の評価の現状

国内の既設揚水発電所地下空洞におけるPS アンカーの導入力の設計には、主に円弧すべり、スリップラインおよび直線すべりなどの極限平衡法が採用されている。それに対して、連続体的手法（弾塑性理論解析およびNATM）や不連続体的手法（キープロック）などの解析的手法は近年になり若干用いられるようになってはいるものの実績は少ない²⁾。一方、国外の大規模地下空洞におけるそれを分類すると解析的手法と経験的手法に大別できる。前者では、主としてHoek & Brownの経験的破壊基準を用いた岩盤と支保の相互作用解析法、後者では、Cordingらの経験則による方法やRMRシステムまたはQシステムなどに代表される岩盤分類法がそれぞれよく用いられている。

極限平衡法やNATMにおいては、無支保の岩盤を対象としたFEMによる応力解析の結果をもとに、すべり面またはロックアーチの位置や大きさが仮定される。そして、このようにして定めたすべり面やロックアーチに対して、極限平衡法の各手法やTalobreの式を用いて導入力が求められる。このとき、PS アンカーはその導入力と等価な外力として取り扱われている。

Cordingらの経験則による方法は、天端および側壁部を安定させるのに必要な支保内圧と空洞の掘削幅および高さの関係に基づき支保の設計を行うものである。ここで適用される関係式は、世界中の地下発電所空洞における26の事例解析結果³⁾（図-2）をもとに得られている。いま、前述の国内の既設揚水発電所地下空洞にお

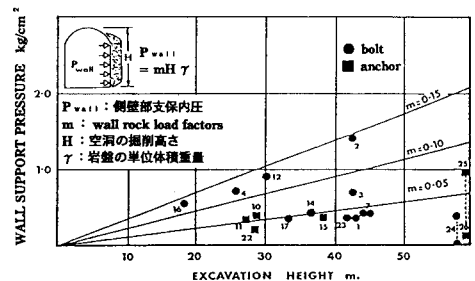


図-2 掘削高さと支保内圧 (by Cording³⁾)

る事例について、側壁部の支保内圧と空洞の掘削高さの関係を同様にすると図-3のようになる。これらの図を比較すると、**wall rock load factors (m)** に関して、その範囲は同等であるものの平均値は国内の方が国外に比べて2倍程度大きくなっていることが分かる。このことは、支保内圧が空洞の規模のみでは十分評価できないことを意味している。この理由として、空洞周辺岩盤の諸特性などを考慮していないことが挙げられる。

RMR システムや **Q** システムにおいては、不連続面に関する数個のパラメータにより岩盤を評価して分類し、それに応じた標準支保パターンが選定される。例えば、後者の場合、岩盤の評点 (**Q** 値) と支保内圧の関係は図-4に示すようになっており⁴⁾、支保内圧は不連続面が岩盤の特性に及ぼす影響を考慮して定められている。

岩盤と支保の相互作用解析法としては、主に弾塑性理論解析が用いられており、その代表的なものに **Kastner** の理論解(式(1))を用いる方法がある。この種の方法においては、岩盤の力学特性および支保内圧と掘削に伴う空洞の壁面変位の関係を誘導しているものの、支保内圧が岩盤の力学特性とは独立して取り扱われている²⁾。

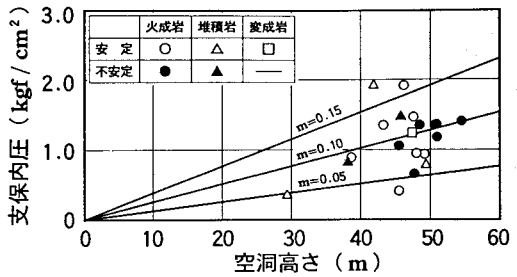
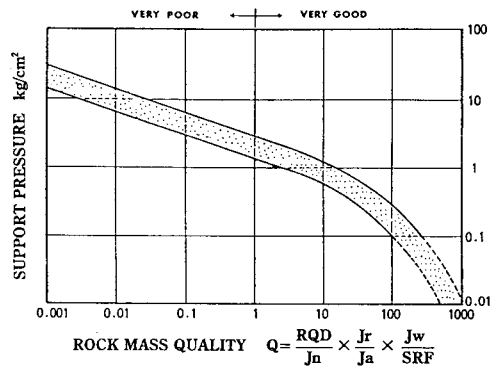


図-3 掘削高さと支保内圧(国内)

図-4 岩盤の評価と支保内圧⁴⁾

$$u(p_i) = \frac{1+\nu}{E} \left\{ p_o - \frac{2p_o - \sigma_r}{2+\lambda'} \right\} R_o \left\{ \frac{2(p_o \lambda' + \sigma_r)}{(2+\lambda')(\lambda' p_i + \sigma_r)} \right\}^{2/\lambda'} \quad \dots (1)$$

$$\sigma_r = 2C_r \cos \phi_r / (1 - \sin \phi_r)$$

$$\lambda' = (1 + \sin \phi_r) / (1 - \sin \phi_r) - 1$$

4. PS アンカーのモデル化に関する考察

既設大規模地下空洞における施工実績や実測結果を分析すると、支保内圧つまり **PS** アンカーの導入力は、岩盤の力学特性との相関性を考慮して定められるべきであることが分かった。しかし、その設計に適用されている手法においては、一般に **PS** アンカーはその導入力と等価な外力として考えられ、岩盤の力学特性とは独立して取り扱われている。つまり、**PS** アンカーを岩盤とは独立にモデル化している。

以上のことから、**PS** アンカーの導入力を定量的に正しく評価するためには、そのモデル化を適切に行わなければならないこと、そのとき支保内圧と岩盤の相互作用を何らかの形で評価することが重要であることが分かった。

【参考文献】

- 1) 永井哲夫・國村省吾・池尻 健: 不連続性岩盤内空洞の支保工としてのロックボルトおよびアンカーの評価方法, 第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.356-360, 1993.
- 2) 永井哲夫・孫 建生・國村省吾・池尻 健・櫻井春輔: 不連続性岩盤におけるPSアンカーの補強効果の評価について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.31-36, 1994.
- 3) Cording, E.J., Hendron, A.J. and Deere, D.U.: Rock engineering for underground caverns, Proc. Sympo. on Underground Chambers, ASCE, Phoenix, pp.567-600, 1972.
- 4) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J.: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, Vol.6, pp.189-236, 1974.