

III-304 内圧変動を受ける空洞の安定性に関する検討

清水建設 正 ○熊坂博夫・石塚与志雄・八田敏行  
正 木下直人・小野勇司

**1.はじめに** 最近、圧縮空気貯蔵施設<sup>1) 2)</sup>や高圧ガス貯蔵施設<sup>3) 4)</sup>など地下空洞に気体を高圧で貯蔵する技術が検討されている。圧縮空気等を浅い深度に気密性のあるライニング材で密閉する貯蔵方式では、空洞内が圧力変動し、周辺岩盤には繰り返し応力が生じる。1日1回の圧力変動が生じるとすれば、20年では約7000回、50年では約18000回の繰り返し回数となる。従って、長期間の繰り返し応力が及ぼす空洞周辺岩盤の安定性を評価する必要がある。また、ライニング材としてスチールを用いた場合<sup>4)</sup>は、スチールに生じる歪みが、設計上重要であり、繰り返し応力による空洞の変形量の予測が必要となる。ここでは、岩石・岩盤の疲労特性を考慮して、空洞内の圧力変動による疲労特性から安定性を評価する方法について検討したので報告する。

**2.岩石・岩盤の疲労特性** 岩盤の疲労特性については、まだ十分な試験データが得られていない。数回～数十回の載荷試験が平板載荷試験や孔内載荷試験で行われている程度である。従って、ここでは岩盤の疲労特性が岩石の疲労特性に類似すると仮定して、疲労破壊、変形特性のモデル化を行う。

岩石の疲労特性試験<sup>5) 6)</sup>によれば、岩石の疲労強度特性は、図-1に示されるようなS-N曲線で表せ、応力比Sと繰返し回数Nの関係が、次式で近似できる。

$$S = a + b \log N \quad (1)$$

岩石・岩盤の疲労強度は、拘束圧( $\sigma_3$ )に依存する。従って、応力比Sは、拘束圧の影響を考慮して次式のように静的強度( $\sigma_1 - \sigma_3$ )で正規化する。

$$S = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

ここで、静的強度は、モール・クーロンの規準である次式を用いる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2C \cos \phi + \sin \phi (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

岩石の疲労による変形特性は、図-2に示されるように、定常領域では、繰返し回数の増加にともない歪み増分量は減少する。この関係は、次式で表現できる。

$$\dot{\epsilon} = c N^d \quad (4)$$

ここで、cはSの関数で、実験結果を基に次式の様仮定する。

$$\log c = e + f \cdot S \quad (S > S_{LIM}) \quad (5)$$

ただし、疲労限界 $S_{LIM}$ 以下では歪み増分は生じない。

2次元の円孔における弾性体の問題で、圧力変動が一定であるとき、Sは一定となる。このため、岩盤は、Ni回に対する疲労強度Sfを式(1)より求め、作用応力による応力比Sが、 $S > Sf$ のとき、疲労破壊すると考える。一方、疲労を考慮すると歪み増分や疲労破壊による応力再配分があり、繰返し回数が増えると( $\sigma_1 + \sigma_3$ )が変化し、応力比Sは一定とならない。ここではマイナーの累積損傷則により疲労破壊を判定する。

**3.解析検討例** 2次元円孔の平面歪み問題を例として検討する。空洞の半径を5mとし、初期地圧は50kgf/cm<sup>2</sup>等方とする。力学定数は、弾性係数E=40000kgf/cm<sup>2</sup>、ポアソン比 $\nu=0.25$ 、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ 、一軸圧縮強度 $q_u=100\text{kgf/cm}^2$ とする。岩盤の疲労強度については、1万回で強度が0.6に低下するとしてa=1.0, b=-0.1とする。また、体積歪みの増分に対しては岩石試験の結果を基にd=-0.92, e=-3.70, f=2.48と仮定する。

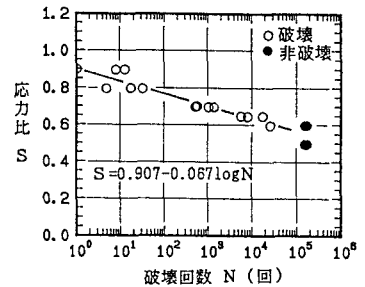


図-1 岩石のS-N曲線

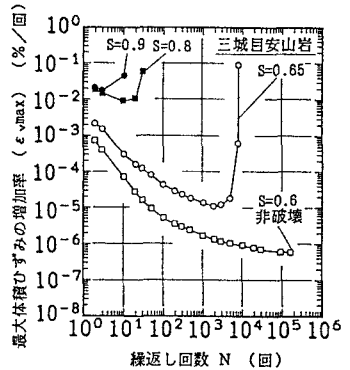


図-2 岩石の繰返し回数と歪み増分の関係

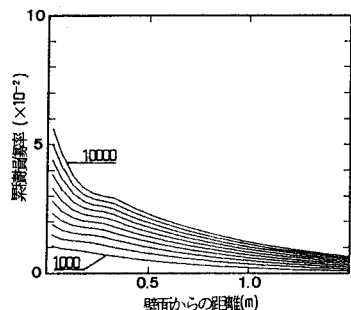


図-3 壁面からの累積損傷率分布

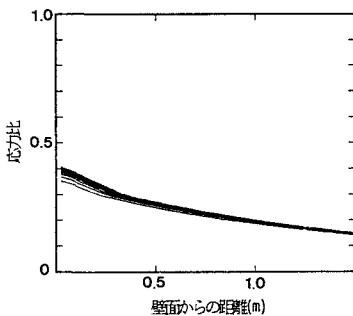


図-4 壁面からの応力比分布

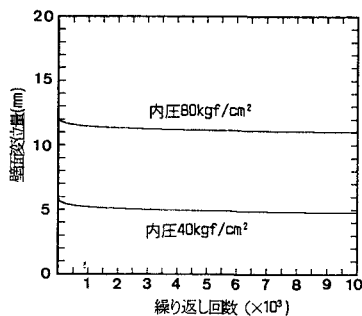


図-5 繰り返し回数と壁面変位量

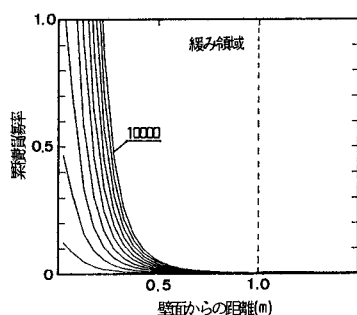


図-6 壁面からの累積損傷率分布

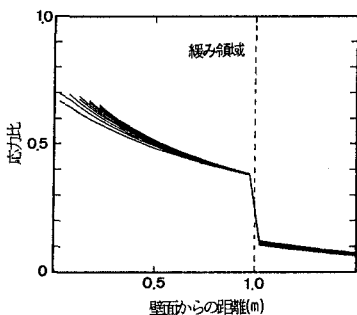


図-7 壁面からの応力比分布

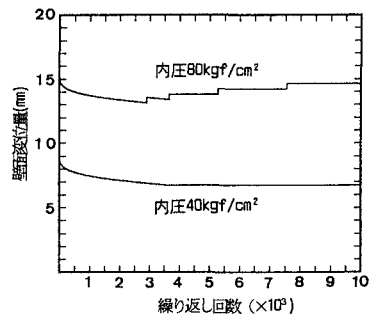


図-8 繰り返し回数と壁面変位量

なお、疲労限界  $S_{LIM}$  は 0.3 とした。一方、岩盤の疲労破壊以後は、破壊による剛性低下を考慮して  $Bf = E/100$ ,  $\nu = 0.49$  とした。内圧変動は、40~80kgf/cm<sup>2</sup> とし、空洞周辺の変位、応力は、疲労による体積歪み増分を考慮した弾性解による多重リングとして解析を行った。

**4. 解析結果と考察** 図-3, 4, 5 に壁面からの累積損傷率、応力比  $S$  の分布及び変位量の推移を示す。繰り返し回数が増加すると、累積損傷率や応力比  $S$  が増加する。一方、空洞壁面の半径方向変位は、1 回目の内圧 80kgf/cm<sup>2</sup> を作用させたときに一番大きく変形し、その後、徐々に内空側に変形が戻る。これは、疲労による体積歪み増加を考慮したためである。

実際の空洞掘削においては、空洞周辺に緩み域が発生する。この緩み域の影響を考慮するため、最初の内圧を 80kgf/cm<sup>2</sup> になるまで、緩み域は、変形係数  $D = E/2$  とし、それ以後  $E$  に戻ると考えて解析する。ただし、緩み域は壁面より 1m とした。図-6, 7, 8 に解析結果を示す。図より、緩み域を考慮すると空洞周辺の応力比  $S$  が増加し、約 3000 回で疲労破壊が生じる。変形も疲労破壊以前は空洞内側に増えてくるが、疲労破壊以後は、最大内圧 80kgf/cm<sup>2</sup> 作用時は、外側へ変形が徐々に増加することがわかる。

**5. おわりに** 空洞内の圧力変動による安定性を評価するため、岩盤の疲労特性を考慮した検討を行った。空洞周辺の緩み域が疲労の影響を大きくすることが分かった。ただし、今回のモデルは、岩盤の疲労特性の一部を考慮しただけであり、十分なモデルとは言えない。また、原位置岩盤の疲労強度、変形特性に関するデータはほとんど無いのが現状である。そのため、今後、岩石、岩盤の疲労特性を解明し、モデル化を改良するとともに、原位置試験によりその特性を明らかにする必要がある。

**参考文献** 1) 豊川：圧縮空気貯蔵ガスタービン発電システム，清水建設土木クォーターリー，NO. 81, pp. 82 ~85, 1989 . 2) 土木学会：圧縮空気貯蔵発電システム (CAES) と土木技術 (その現状と技術課題)，1990. 3) 小野：高圧気体の岩盤内貯蔵技術を導入，清水建設土木クォーターリー，NO. 88, pp. 85 ~89, 1990 . 4) 小野：岩盤内ライニング式高圧気体貯蔵施設の概要，土木施工, vol. 31. 10, 1990. 5) 石塚，他：載荷周波数が各種岩石の疲労特性に与える影響，第 25 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1069~1072, 1990. 6) 石塚，他：繰り返し荷重を受ける各種岩石の疲労変形特性，土木学会第45回年次学術講演概要集Ⅲ - 228, pp. 492~493, 1990.