

内圧を受ける岩盤空洞の変形・破壊挙動に関する検討

Mechanical Behavior around Underground Rock Cavern during Inner Pressure Loading

大西豪昭*・石島洋二**・安斎俊樹***・福田和寛****

Hideaki OONISHI, Yoji ISHIJIMA, Toshiki ANZAI and Kazuhiro FUKUDA

In operation of the CAES-G/T pilot plant at Kamisunagawa, cyclic internal air-pressure (4-8MPa) is loaded to the underground compressed air storage cavern. This paper describes the mechanical behavior around the cavern and compares the theoretical elasto-plastic analysis and laboratory tests using a hollow cylinder model.

Key Words : rock behavior, inner pressure loading, elasto-plastic analysis, hollow cylinder model, CAES-G/T

1. はじめに

上砂川 CAES-G/T (圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン発電) パイロットプラントにおいて、圧縮空気地下貯槽に 8MPa までの空気圧を順次载荷し、8MPa-4MPa の载荷・除荷を繰り返す実証試験を実施した。貯槽は掘削によって周辺に塑性域の発生する条件下に建設されたため、塑性域の囲まれた空洞に内圧を载荷・除荷する場合の岩盤挙動に関する貴重な計測データが得られた。そこで、この岩盤挙動の特徴に基づき弾塑性解析を行うと共に、2 種類の室内模型実験を行い、内圧を受ける岩盤空洞の変形・破壊挙動に関する検討を行った。

2. 砂川 CAES-G/T 実証試験における岩盤挙動の特徴

地下貯槽は、図-1 に示すように、岩盤空洞内に分割された覆工版を設置し、その内面にゴムシートを張った構造で、覆工版は内圧作用時に目地部が開口し、内圧を岩盤が 100% 負担する構造となっている。

初期地圧測定結果によると、建設地点の初期応力状態は、その大きさが約 11MPa で、ほぼ土被り圧に等しい等方応力場である。ボーリングコアの自然状態の一軸強度は 20MPa 程度であるので、この岩盤中に空洞を掘削すれば空洞周辺にゆるみ域が発生することが考えられる。

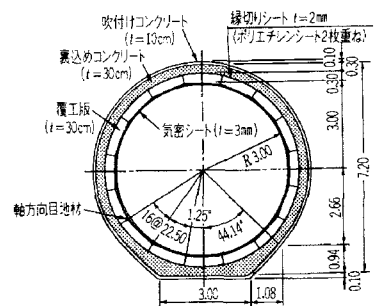


図-1 地下貯槽の断面構造諸元

貯槽の掘削に先立って空洞壁から 1 m 奥に設置した埋設ひずみ計から、掘削時と加圧試験時の両方の計測結果が得られている。図-2 に示すように、掘削時には空洞半径(r)方向の軸ひずみは 4000μ を越える大きな伸びを示し、空洞周辺にゆるみ域が形成されているのは確実である。これに対し、8MPa の内圧载荷時には 1 m 奥の r 方向の軸

* 電源開発株式会社 エンジニアリング事業部

** 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

*** 北海道大学大学院修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻

**** 工博 清水建設株式会社 土木事業本部

3. 内圧を受ける岩盤空洞の応力履歴と二方向載荷試験

応力状態は、初期地圧 σ^∞ と岩盤の強度（圧縮強度 σ_c ）の大小関係により、次のようになる。

- 空洞に内圧 p を負荷すると、 σ_θ は減少し σ_r は増大する。内圧 p が小さい間は、岩盤は至る所、弾性状態にな

るが、 σ_θ が最大主応力、 σ_r が最小主応力という関係は維持される。内圧 p が大きくなると、やがて σ_r が最大主応力、 σ_θ が最小主応力となるような領域が現れ、内圧 p がさらに大きくなると、この領域が拡大する。内圧 p が限界に達すると、空洞壁が破壊し、内圧のさらなる増加とともに、破壊域が空洞奥に向かって広がる。発生する破壊は、次に示すように、初期地圧 σ^∞ と岩盤の強度（圧縮強度 σ_c ）の大小関係によって異なる。

- 1) $2\sigma^\infty < \sigma_c$ のとき：引張破壊が生じ、破壊域は全て引張破壊によりもたらされる（図-4a2）。
- 2) $2\sigma^\infty > \sigma_c$ のときせん断破壊が生じる可能性がある（図-4b2）。一度、せん断破壊が生じれば、内圧 p の増加とともにせん断破壊のみが発生する。引張破壊も生じ得る。いずれの破壊が起こるかは、岩石の力学的特性（特に、空洞掘削時に破壊した領域内の岩石の力学的特性）によって決まる。

そこで、掘削時に破壊した岩石が内圧 p の作用の下で示す力学的挙動を、二方向载荷試験で実験的に調べた。

二方向载荷試験とは、空洞掘削時に受ける応力変化に対応した1回目载荷をし、つぎに空洞が内圧を受けるときの応力変化に対応して2回目载荷をする（図-5 参照）ものである。供試体側面の前後にフラットジャッキを配置し、対の反力板をジャッキの外側に固定して中間主応力を载荷する。2回载荷時には反力板の内部に収められた供試体

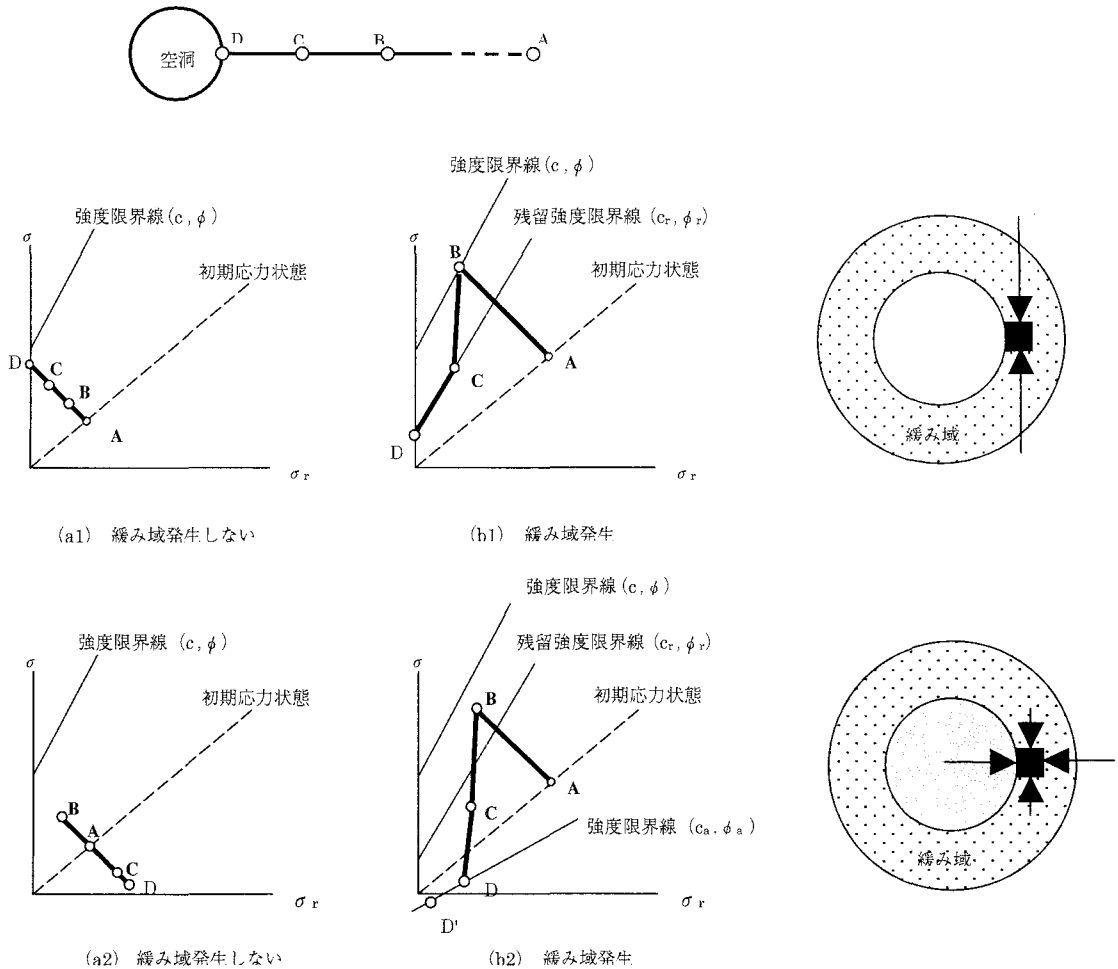


図-4 空洞岩盤が受ける応力履歴 (a1),(b1)は空洞掘削時、(a2),(b2)は内圧载荷時

を反力枠ごと 90° 回転させる。1 回目载荷で供試体は破壊しているが、供試体は反力枠の内部に収められているので、この回転で供試体が崩れる心配はない。供試体を上述のように設置した後、1 回目载荷はフラットジャッキで中間主応力を 3MPa に保ち、最大主応力を増加させ、供試体が最大強度点を越えて残留強度状態に達したところで载荷を止め、除荷した。除荷後、反力枠ごと供試体を 90° 回転、再び 1 回目载荷同様に 2 回目载荷を行った。

図-6 に示すように、1、2 回目载荷時のいずれにおいても、载荷時と除荷時の線図の傾きはほぼ同じであり、载荷応力が小さい間は弾性的に挙動することが確認された。ただし、1 回目载荷時に供試体が受けた損傷を反映して、最大圧縮強度 (σ_c) は、1 回目载荷より 2 回目の方が低い。また、ヤング率 (E) も、低下している。破壊以降のダイラタンシーの程度を表す塑性ひずみの比 $f = \epsilon_{3p} / \epsilon_{1p}$ は、1 回目载荷と 2 回目とでほとんど変わらない。

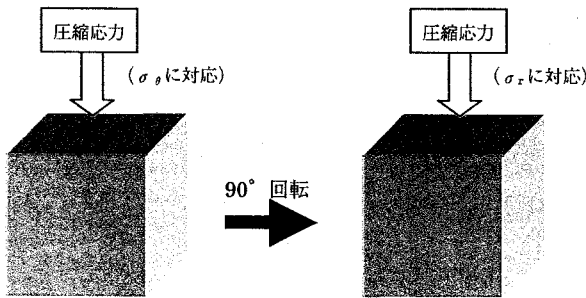


図-5 二方向载荷試験

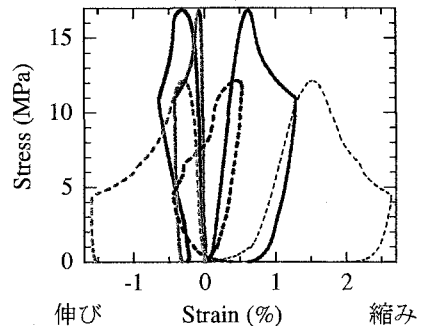


図-6 二方向载荷試験結果(実線: 1 回目载荷, 破線: 2 回目载荷)

4. 応力履歴を考慮した弾塑性解析による内圧空洞の変形・破壊特性の検討

地山状態の岩盤をヤング率 E_0 、ポアソン比 ν_0 の等方弾性体とし、初期地圧は大きさが p^∞ の等方圧状態と仮定する。地山岩盤の強度特性をモールクーロン式で表すと、そのときの強度パラメータは次のようである。

$$\begin{aligned} \text{破壊強度} & \quad c, \phi \\ \text{残留強度} & \quad c_{res}, \phi_{res} \end{aligned}$$

空洞を掘削するとき、応力状態が破壊条件を満たせば、直ちに残留強度状態になり、その後は、残留強度状態を保ちながら塑性ひずみが増加する。塑性域では、ひずみは次の関係を満たす。

$$\epsilon_{3p} = -f \cdot \epsilon_{1p} \quad (4.1)$$

ここに、 ϵ_{3p} : 最小主ひずみ成分、 ϵ_{1p} : 最大主ひずみ成分、 f は定数で、実験的に求めることができる。

空洞の掘削時に塑性化した領域では、岩盤が損傷を受けているために、 r 方向のヤング率 E_r は地山状態の岩盤のヤング率 E_0 より小さくなり、また強度定数 c も小さくなる。 θ 方向のヤング率は E_0 のままなので、地山状態の岩盤では等方性でも、破壊領域内の岩盤は異方性を示す。圧縮強度は地山状態よりも小さくなるが、破面は地山状態のときとは独立に発生するため、内部摩擦角は地山状態の場合と変わらず、強度特性はモールクーロン式で表され、強度パラメータは次のように仮定できる (図-7 参照)。

$$\text{破壊強度} \quad c_a = 0.8c, \phi_a = \phi$$

以上の岩盤の力学的性質については、前節の二方向载荷試験で得られた知見に基づいている。

空洞壁が内圧を受けると、空洞壁の応力成分 σ_θ は、掘削時点では圧縮であるが、空洞に負荷する圧力が増加するにつれて、減少し、ついには引張に変わる。この値が引張強度を越えれば引張破壊が発生する。空洞に作用する

圧力がさらに増加するにつれて、引張破壊領域が空洞壁から奥に向かって拡大する。この過程における応力状態は no-tension 解析法により決めることができる。

ここでは、次節で示す厚肉円筒模型試験を対象に計算を行った。

空洞掘削後の応力条件下では、空洞周囲には塑性域が発生する。図-7①は、このときの応力状態を示したものである。空洞に負荷する圧力が $P=4.25\text{MPa}$ になったときに、空洞壁が引張破壊し、圧力の増加につれて引張破壊域が奥に向かって拡大する。引張破壊域は掘削時のせん断破壊域の中に含まれている。したがって、内圧を負荷したとき、新たなせん断破壊は発生しない。内圧が 8MPa になったときの応力状態は図-7②に示すとおりである。空洞周囲の引張破壊域内の応力は一軸圧縮状態になっている。引張破壊域の先端では、引張強度以下の引張応力が発生している。それより奥では、掘削前にはほぼ一致した応力状態になっている。

圧力が $P=1.31\text{MPa}$ にまで低下したとき、空洞壁がせん断破壊する。圧力がこれより下がるにつれて、せん断破壊域が急激に拡大し、圧力が 0 になったとき、せん断破壊域は空洞掘削後のそれと同じになり、応力状態も掘削後のそれに一致する(図-7参照)。

この計算で得られた圧力-空洞壁面変位線図を図-8に示す。線図を見ると、圧力を負荷する過程では、途中で引張破壊が生じ、それが圧力の増加とともに拡大していることを反映して、線図は折れ曲がり、やや上に凸の形状になる。圧力除荷時の最初の下がり始めに対応する線図は、全領域が弾性的に挙動することを反映して載荷開始時の線図と平行であるが、圧力が 0 に近づくとき折れ曲がり、 0 のとき僅かな残留変位が生じる。この結果、加圧・除荷に対応した1サイクルの線図はループを描くことになる。

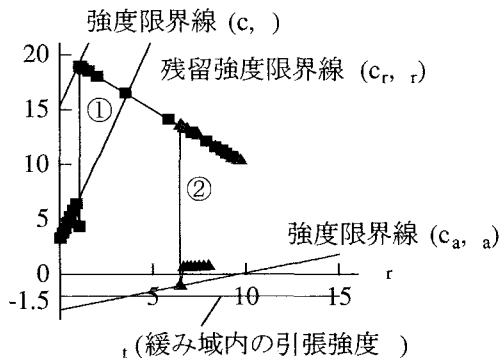


図-7 外圧 10MPa 、内圧 8MPa の時の応力状態

- ①は空洞掘削後、および圧力を除いたときの応力状態
- ②は圧力を 8MPa まで負荷したときの応力状態

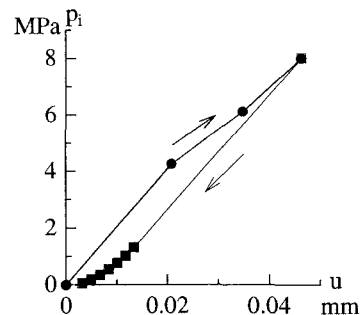


図-8 内圧を負荷・除荷する時の内圧-空洞壁変位線図 (外圧 10MPa 、内圧 8MPa)

5. 厚肉円筒模型試験による内圧空洞の変形・破壊挙動の検討

岩盤空洞が内圧を受けるときに示す変形挙動や周辺岩盤に引き起こされる破壊の様子を模型試験によって調べた。空洞を含む岩盤の模型として厚肉円筒形供試体を用意し、この供試体の表面に初期地圧相当圧力(外圧)を加え、試験終了時まで同じ状態を保ち、次に、供試体の円孔内に圧力(内圧)を繰り返し負荷した。外圧は、それにより孔周辺にゆるみ域を形成すると思われる圧力まで負荷した。試験は孔壁にひずみゲージを貼り付け周ひずみを計測した。本試験では支笏溶結凝灰岩を使用した。岩石の諸物性値は以下の通りである。

表-1 負荷圧力と載荷速度

供試体番号	外圧 (MPa)	内圧 (MPa)	内圧の載荷速度 (MPa/min)
G 1	7.8	4~8	4 (1~5 回目)、1 (6~10 回目)
G 2	約 8	約 4~8	2.5 (3~8 回目)

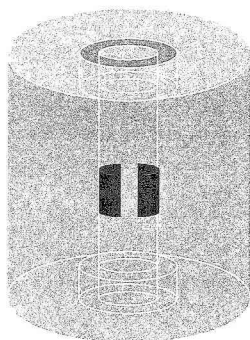


図-9 厚肉円筒形供試体
(ひずみゲージは孔の中央に貼り付けた)

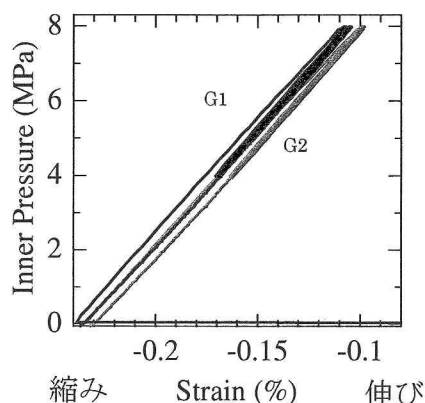


図-10 厚肉円筒形供試体孔壁周ひずみの変化

第1回目の載荷以降の載荷・除荷線図はループを描いている。繰返し載荷・除荷の後、内圧が0になると、両方の径変化とも、最初の値に戻っている。これは、内圧の負荷により孔周囲に大きな塑性変形が生じなかったことを示唆している。載荷試験終了後に供試体の断面を観察したところ、亀裂は孔周囲に限定されていた。図-11 は、孔周囲の拡大写真である。孔壁に対して $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の角度で傾斜する亀裂が各1本、孔壁から出ているのが認められる。この亀裂は傾斜から判断すると、外圧の負荷時に入ったせん断亀裂と推測される。また、この亀裂の途中を一端とする孔壁に対して 70° 前後傾いた亀裂も認められる。これは引張亀裂である可能性がある。そうだとすれば、この亀裂は8MPaの内圧を負荷する過程で入ったと考えられる。外圧は載荷試験中一定に維持されており、内圧の繰返し載荷過程において供試体内に破壊が発生したとしても(孔周囲の)局所に限定されたことを示している。

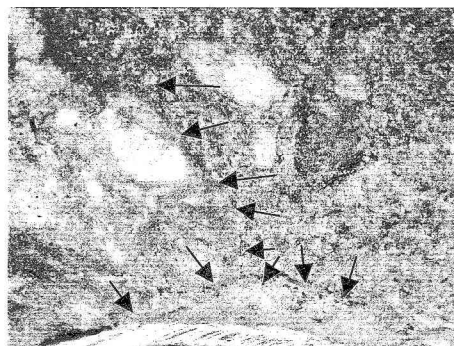


図-11 供試体孔周囲の顕微鏡写真

6. まとめ

実証試験で観察された変位やひずみの挙動は、掘削時に発生したゆるみ域でも内圧に対し岩盤が弾性的に挙動し、この部分が直交異方性弾性体としてモデル化できるとした、応力履歴を考慮した弾塑性解析モデルの解析結果とはほぼ一致した。また、室内模型実験でも、これを裏付けるような掘削時のゆるみ域内の岩盤の変形・破壊特性に関する知見が得られた。

上砂川 CAES-G/T 実証試験は経済産業省が(財)新エネルギー財団に委託して実施されたものである。本報告作成にあたっては、多くの関係者のご協力を頂きました。ここに謝意を表します。