

ライニング方式圧縮空気貯蔵における岩盤の安定性に関する検討

石 塚 与志雄
(技術研究所)八 田 敏 行
(技術開発本部)熊 坂 博 夫
(技術開発本部)木 下 直 人
(技術研究所)小 野 勇 司
(技術開発本部)若 林 成 樹
(技術研究所)

§ 1. はじめに

経済の発展と生活水準の向上に伴い、電力需要は今後とも増大することが予想されている。電力の供給は、石油供給の不確実性、世界的な反原発運動、地球環境問題などのために、将来にわたって安定的な供給力を確保することは容易ではない情勢にある。今後とも、電力の安定的な供給を確保していくためには、『電力貯蔵』により電力負荷の平準化を図り、電力設備の利用率を向上させていく必要がある¹⁾²⁾。

電力貯蔵方式¹⁾²⁾には、既に多くの実績がある揚水発電の他に海水揚水発電、圧縮空気貯蔵発電、超電導エネルギー貯蔵、新型電池、フライホイール発電などがあり、技術の実証や研究が行なわれてきている。揚水発電は、100万KWを超える大規模な電力貯蔵技術として確立しているが、将来的には経済的な地点が減少するなどにより立地が難しくなることが予想されている。その中で、圧縮空気貯蔵によるガスタービン発電(CAES—GT: Compressed Air Energy Storage—Gas Turbine)は都市近傍での分散型中規模(数十万KW級)の電力貯蔵発電として注目されている。

世界初のCAESはドイツのフントルフ発電所であり、1979年に営業運転を始めている。最大出力は27万KW、圧縮空気貯蔵は地下岩塩層に設けられ、15万 m^3 が2基である。またアメリカでは、アラバマ州マッキントッシュにおいて地下岩塩層に貯槽容積53万 m^3 を有するCAESが1991年秋に竣工予定になっている。その他、イタリア、ルクセンブルクなどでも計画されている。日本においても、1990年よりCAESの建設に必要な地質、地盤や設計上の調査とともに、気密性確保や周辺環境への影響評価などの検討が行なわれ始めている。

これまで建設されたCAESは、いずれも地下岩塩層内である。岩塩層は火成岩などよりも緻密で、空隙も極めて少なく気体を透過しにくいなど、圧縮空気貯蔵に有利な特性を有している。日本にはこのような地層が存在

しないため、地下の岩盤空洞に圧縮空気を貯蔵することになる。海外においては岩盤空洞を利用した天然ガスの高圧気体貯蔵技術の開発が³⁾⁴⁾行なわれているが、日本では貯蔵技術の検討・調査が始まったばかりで、設計手法が整備されていないのが現状である。

本論文では、まずCAES—GTの概要を説明し、ライニング方式CAESの岩盤安定性、ライニング材に関する技術課題を整理し、設計の考え方とフローについて議論する。つづいて、ライニング方式CAESにおける岩盤の安定問題として、内圧に対する設置深度の検討と繰返し内圧に対する周辺岩盤の疲労を考慮した安定解析について議論し、初期地圧、疲労強度および緩み領域が空洞の安定性に与える影響を検討する。

§ 2. CAES—GTの概要と技術課題

2.1 圧縮空気の貯蔵方式

発電出力30万KWで、20～80気圧の圧縮空気を貯蔵するためには、20～50万 m^3 の貯槽容量が必要となる。高圧空気の貯蔵方式として、①地上貯蔵方式、②海底貯蔵方式、③地下貯蔵方式の3方式が考えられている。地下貯蔵方式は、地盤条件により岩塩空洞貯蔵、帯水層貯蔵、岩盤空洞貯蔵に分けられる(図—1参照)。また、岩盤空洞貯蔵は気密性保持の方法により、地下水圧で封じる水封方式とライニングにより気密性を確保するライニン



•1: 変圧方式も可能であるが、一般に定圧方式

•2: 定圧方式も可能であるが、一般に変圧方式

図—1 地下貯蔵方式の分類

グ方式に分けられる。これらの方式には、水置換により空気をほぼ定圧で供給する定圧方式と変圧で供給する変圧方式とがある。概要図を図-2に、各貯蔵方式の特徴を表-1に示す。

岩塩層貯蔵は既述のように既に実績があるが、日本には岩塩層が存在しないため立地不可能である。また、帯

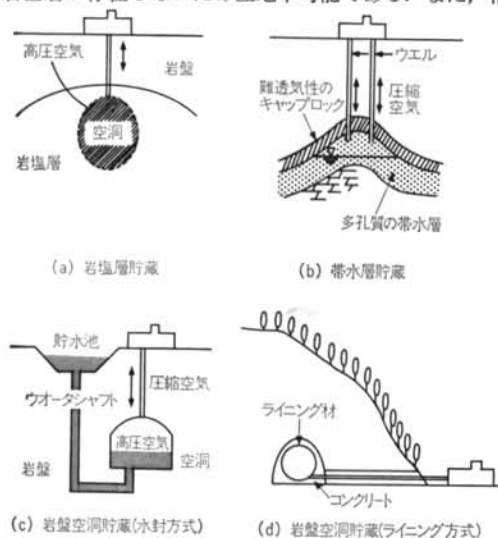


図-2 地下貯蔵方式の概念図

水層中に圧縮空気を押し込んで貯蔵する帯水層貯蔵は立地制約が極めて大きい。そのため、日本においては岩盤空洞貯蔵の実現性の可能性が高い。

2.2 岩盤空洞貯蔵方式と技術課題

(1) 水封方式

水封方式は、地下水圧で圧縮空気の漏洩を防ぐ方法である。貯蔵圧が低い(0.5~10気圧)石油やLPGの岩盤貯蔵は既に多くの実績があるが、CAESで必要となるような高圧(40気圧以上)での実績はない。40気圧の圧縮空気を貯蔵する場合、貯槽の設置深度は地下水面より400m以上必要となる。設置深度を浅くすると貯蔵圧が低下し、大きな容積が必要となり不経済になる。このため、設置深度はガスタービンの使用圧も考慮して400~600mで検討されている。また、貯蔵効率を考慮して地上に貯水池を設け、水による置換(水置換方式)によって貯蔵空気の全量を使用する定圧方式を採用するのが一般的である。水封方式の技術課題としては、

- ①大深度での地下水による気密性確保の方法
- ②水置換方式によるシャンペン現象の解明と対策
- ③空洞の大深度化と空洞の大規模化に伴う建設時の空洞の安定性

項 目	岩 塩 層 貯 蔵	帯 水 層 貯 蔵	岩 盤 空 洞 貯 蔵	
			水 封 方 式	ライニング方式
1. 貯槽構築方法	岩塩層まで削孔し、水を循環することにより岩塩を溶かし貯槽とする	帯水層の中に圧縮空気を押し込み、貯蔵する	岩盤を掘削し、吹き付けロックボルト等で補強し貯槽とする(コンクリート覆工なし)	岩盤を掘削し、コンクリート等の覆工または素掘りの状態でライニング材を構築して貯槽する
2. 気密性保持方法	岩塩の難透気性により気密性保持	帯水層上部のキャップロック(難透気性)により気密性保持	地下水圧により気密性保持	鋼板、ゴム、プラスチック等のライニング材で気密性保持
3. 設置深度および立地	岩塩層があればよいが、一般に深度500~1,000mで深い 日本では対象地盤はない	背斜構造の帯水層があればよいが、一般に深い立地上の制約が多い	地下水圧で漏洩を防止するため、設置深度は深い 立地の制約は比較的少ない	一般に設置深度は浅い立地の制約は比較的少ない
4. 圧力供給方法	一般に変圧方式であるブライン(塩水)による置換方法も可能であるが、貯蔵圧と設置深さの関係で難しい	地下水と置換のため、定圧方式 貯蔵空気の全量を使用できるが、長期貯蔵の場合、地下水中に空気が溶け込み、ロスが大きい	設置深度が深いため、一般に水置換方式による定圧方法 貯蔵空気の全量を使用できるが、置換水の確保が必要	貯槽設置深度が浅く、水による置換ができないため、変圧方式 貯蔵空気の全量を使用できない
5. 実績	ドイツ(フントルフ等)で実用化、アメリカ(アラバマ)で建設中、ソ連で検討中	イタリア(セスタ)で実証中、アメリカ(ピッツフィールド)で試験中	アメリカ(ソイランド等)で計画、ルクセンブルク、フランス等で検討中	CAESでは実績がないが、スウェーデンで高圧ガスの実証プラント有り(圧力150~300気圧)

表-1 CAESの貯蔵法による特徴と比較

等が挙げられる。シャンペン現象とは、圧縮空気の貯蔵時に高圧空気により置換水を貯槽から地上の貯水池へ戻す際に、高圧下で水に溶解した空気がウォーターシャフト上部(図-2(c)参照)で圧力が低くなったときに気泡となって発生して流量を増加させ、過渡流動を起こす現象であり、最悪の場合は貯水池へブローアウトする可能性もある。

(2)ライニング方式

ライニング方式(図-2(d)参照)は鋼板、プラスチック、ゴム等で気密性を保ち、内圧を高圧水路鉄管のようにライニング材で負担させたり、岩盤だけで負担させる方法である。また、深部軟岩を対象として、地下水圧、地圧を利用してライニング材(覆工)の荷重負担を小さくする方式(立坑・拡幅空洞方式)も電力中央研究所で検討されている。岩盤にだけ荷重を負担させる方法が最も経済的であるが、まだ実貯槽の建設はもちろん設計方法も確立されていないのが現状である。

CAESでの実績はないが、天然ガスをライニング方式で高圧貯蔵する方法がスウェーデンで検討され、ゲレングスベルグで原位置実験が行われた(1988年)⁴⁾。構造は図-3に示されるように、ライニング材、コンクリート、排水パイプから成っており、設計概念は以下のようである。

- ①内圧はすべて周辺岩盤が負担する
- ②ライニング材で気密性を確保する
- ③貯槽周辺の地下水を排水し、ライニング材には貯槽

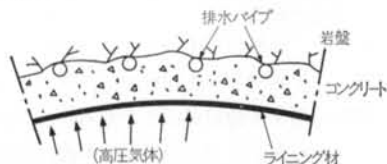


図-3 ライニング方式貯槽の構造

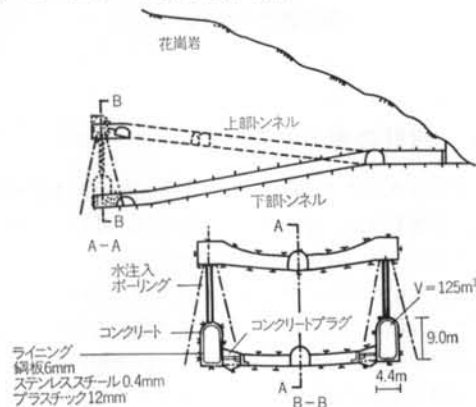


図-4 ゲレングスベルグ原位置実験の断面図

の外側から水圧を作用させない

図-4は原位置実験の断面図(貯槽は円筒状の形状)であり、厚さ6mmのスチール(炭素鋼)について、16.5MPaまでの加圧および繰返し載荷試験が行われた。なお、実験地点の岩盤は花崗岩であり、RQDは80~85、Q値は14~27、初期地圧は鉛直方向で $\sigma_0=1.4$ MPa、水平断面内で $\sigma_1=2.5$ および $\sigma_3=1.3$ MPaである。計測は、図-5に示すような岩盤内変位計に加えて、岩盤とコンクリート間に小型変位計を設置して、空洞壁面に沿う変位、内空変位およびライニング材の変形などが測定された。

内圧0.0~16.5MPaで100回の繰返しを行なった際の

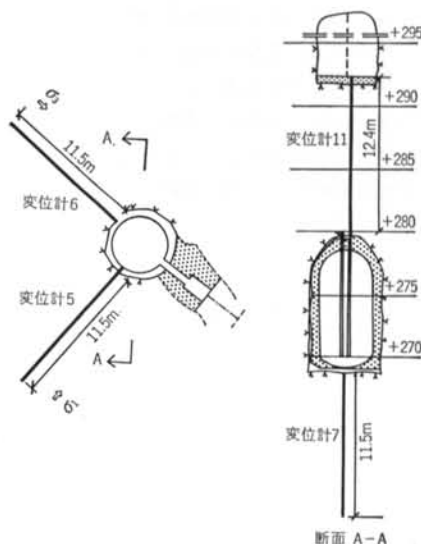


図-5 岩盤内変位計の設置位置

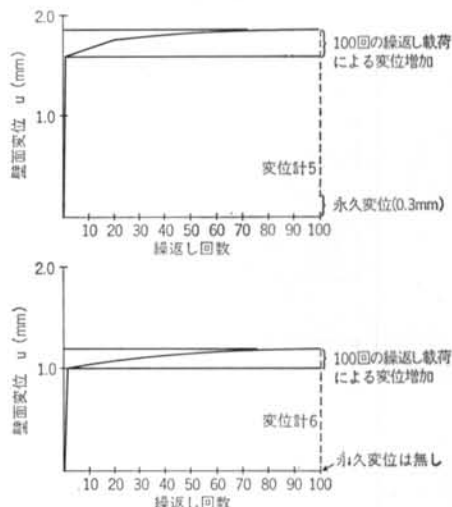


図-6 繰返し載荷による壁面変位の増加

貯蔵方式	対象岩盤	深度	空気圧とのバランス	空洞の安定性検討項目			
				建設時の安定性	最大内圧作用時の安定性	内圧変動による安定性	長期の安定性
水封方式	硬岩	大	地下水圧	○	—	—	○
ライニング方式	軟岩～硬岩	中	岩盤	○	○	○	○
立坑・拡張空洞方式	軟岩	大	地圧+覆工	○	△	△	○ or △

(△：覆工の設計)

表一 2 圧縮空気貯蔵方式と安定性検討項目

岩盤内変位の推移を図一 6 に示す。繰返しに伴い変位は徐々に増加していく。変位計 5 では約 20 回までの繰返しの影響が大きく、20～40 回の繰返しで約 80% の変位増加が生じている。一方、変位計 6 では一様な変位増加傾向であり、60 回で約 80% の変位増加が生じている。また、変位計 5 では除荷後の変位が回復しない永久変位が約 0.3mm 生じている。両者の差は、岩盤の不連続性（変位計 5 に直交する方向に卓越）の影響と推定されている。また、空洞周辺からの排水量は圧力の増大とともに徐々に増加（12～15 l/min）し、100 回繰返した後では 50 l/min まで増加する。これは、繰返し载荷により空洞周辺が緩

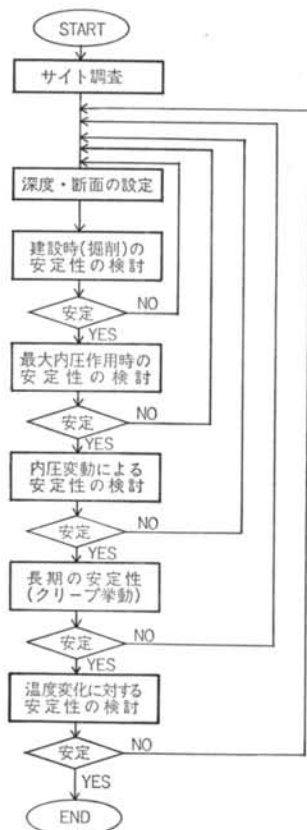
んだ影響と推定される。このように、100 回の繰返しでも岩盤疲労が変形、排水に影響を与えている。

CAES—GT では 1 日 1 回の圧力変動が生じるため、20 年では約 7,000 回、50 年では約 18,000 回の繰返し回数となる。最大内圧も 80 気圧と非常に大きくなる。また、地質条件も硬岩から軟岩までが立地の対象となる。そのため、ライニング方式における岩盤の安定性に関する課題としては、建設時の安定性に加えて、以下の点が挙げられる。

- ①最大内圧作用時の空洞の安定性（アップリフトによる地表、空洞への影響など）
- ②内圧変動が及ぼす空洞の安定性（岩盤の疲労破壊、変形）

水封方式、ライニング方式および立坑・拡張空洞方式の特徴と空洞の安定性検討項目を整理すると表一 2 のようになる。

一方、気密性保持のために設置されるライニング材については、ライニング材の選定とともに高内圧に対する気密設計法が課題となる。特に、ライニング材として鋼板を用いた場合は、岩盤の局所的な変形（亀裂の開口）によりコンクリートにクラックが発生し、その近傍における鋼板の破断に対する検討が必要となる。この場合、スチールに生じる応力やひずみの振幅値が設計上重要であり、繰返し応力による空洞の変形量（疲労変形）や岩盤亀裂の開口の評価が課題となる。



図一 7 安定性の検討フロー

§ 3. 設計の考え方とフロー

ライニング方式 CAES の空洞の安定性は、①岩盤の強度、②変形係数、③深度（初期地圧）、④貯蔵内圧の大きさおよびその変動幅などの関係で決まる。

岩盤に内圧を負担させるライニング方式では、§ 2. で記したように最大圧が作用したときの空洞安定性や、繰返し応力が作用する場合の安定性および変形特性（ライニング材の伸び特性と係わる）が設計上の要点である。設計検討の手順を考えると、以下のようになる（図一 7

に検討フローを示す)。

- ①建設地点の現地調査・試験により、地質、地下水、初期地圧状況等を把握する。
- ②貯蔵容量、敷地状況等から空洞の規模・形状、配置を設定する。これにより設置深度を仮定する。
- ③掘削時の空洞の安定解析を行なう。安定が確保できないときには、形状や設置深度を再検討する。
- ④最大内圧作用時の空洞の安定性を検討する。安定性に問題があるときには、形状・設置深度を再検討する。
- ⑤内圧変動作用時の安定性を検討する。疲労による変形量、破壊領域により空洞の安定性またはライニング材の伸び等問題が生じる場合には、形状や設置深度を再検討する。
- ⑥空洞周辺のクリープ挙動を検討する。空洞の安定性やライニングの変形に問題が生じる場合には、形状や設置深度を再検討する。
- ⑦温度変化に対する安定性を検討する。熱応力により空洞の安定性、ライニング材の変形に問題が生じる場合には支保、ライニングを再検討する。

(1)建設時の空洞の安定性

通常のトンネルや地下空洞と同様、①変形量、②塑性領域の有無あるいはその範囲、③支保の設計などを行なう。ライニング式 CAES の場合には、これらに加えて岩盤疲労の検討やライニング材の仕様の決定のために、次の項目についても検討しなければならない。

- ④空洞周辺の応力状態（最大応力や最小応力の値、その方向など）
- ⑤緩み域、塑性領域の範囲、強度低下、変形係数の低下状態

(2)最大内圧作用時の空洞の安定性

内圧を岩盤が負担するライニング方式では、最も高い内圧が作用した場合を想定して、以下の観点から安定性の検討を行なう必要がある。

- ①空洞全体の安定性
- ②地表への影響
- ③隣接トンネルへの影響
- ④ライニング材の変形量

内圧が作用すると岩盤の強度、初期地圧の大きさが相互に関連して、空洞周辺には圧縮応力ばかりでなく、引張応力も発生する場合がある。この場合、岩盤は既存の亀裂や節理などの不連続性のために引張りには抵抗しないことから no-tension 解析による検討も必要となる。

(3)内圧変動時の空洞の安定性

CAES の稼働により空洞周辺岩盤の応力状態も変動

し、岩盤の疲労が問題となる。疲労により破壊領域が次第に広がり、メンテナンス等で減圧すると最悪の場合には空洞の安定性を確保できなくなるとも予想される。また、ライニング材に生じる繰返し応力の疲労設計を行なうために、岩盤の変形量の把握が必要となる。このため、ライニング方式では次の項目について検討する必要がある。

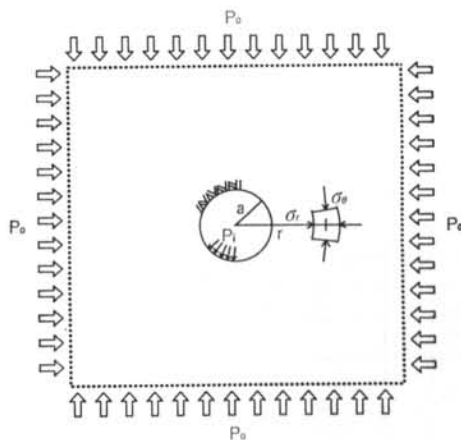
- ①岩盤の疲労特性を考慮した安定性の評価
- ②繰返し回数、応力の振幅の大きさ等を与条件として、空洞の安定性や変形量、変位振幅、緩み域の増大を予測すること

(4)クリープに対する長期の安定性

空洞の長期的な安定性を確保するためには、岩盤の時間的な力学挙動であるクリープ現象を把握する必要がある。一般に、最大載荷応力を同一とした場合の繰返し載荷による疲労と一定応力下のクリープでは、疲労寿命の方が短い⁵⁾⁶⁾。そのため、ライニング方式 CAES では長期の安定性は(3)で述べた疲労で長期の安定性が決定される。

(5)温度変化に対する安定性

圧縮空気の入出に伴い貯槽内の温度は変動し、長期的には上昇していく。初期の地温からの温度差により熱応力が岩盤、ライニング部に発生するようになるため、熱応力に対する安定性の検討が必要となる。この場合の課



図—8 解析モデル

岩盤等級	変形係数 $D(\text{GPa})$	弾性係数 $E(\text{GPa})$	せん断強度 $C(\text{MPa})$	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	軸圧縮強度 (MPa)
A-B	5.0	8.0	4.0	60.0	29.9
C _H	3.5	6.0	3.0	47.5	15.4
C _M	1.25	2.75	1.5	37.5	6.1
C _L	0.5	1.5	1.0	26.5	3.2

表—3 岩盤等級と物性値

題は、圧縮空気貯蔵時の温度変化の予測である。

§ 4. 岩盤等級と CAES 設置深度

前述の検討フローに従い、日本における一般的な岩盤を対象とし、ライニング方式の CAES の建設時および最大内圧作用時の空洞安定性について検討する。

4.1 検討条件と解析モデル

検討に用いる解析モデルを、以下のように設定する。

- ①空洞形状は、図-8に示すように直径6mの円形空洞で、二次元平面ひずみ状態と仮定する。
- ②岩盤の力学特性は、電中研方式の岩盤分類（A-B, C_H, C_M, C_L）⁷⁾を参考にして、表-3のように設定する。
- ③初期地圧は、貯槽の設置深度を600m以浅と想定し、初期地圧 P_0 をそれぞれ1, 2, 4, 8, 12 MPaと設定する。

4.2 建設時の安定性の検討

建設時の安定性を評価するため、無支保の場合の空洞壁面における半径方向変位と塑性領域を、P. Egger の弾塑性理論解⁸⁾を用いて求めた結果を表-4に示す。

岩盤等級A-Bでは塑性領域は発生せず、各深度においても弾性状態である。C_H, C_M, C_Lは、それぞれ初期地圧8, 4, 2 MPa以上で塑性領域が生じている。

CAESの空洞建設を考える場合、繰返し応力による岩盤の疲労の影響が問題となることや、ライニングを施工する場合一時無支保状態となることより、塑性域はなるべく小さくすることが望ましい。したがって、今回は塑性領域が20cm以下を（スチール）ライニング方式が適

岩盤等級	初期地圧 (MPa)				
	1	2	4	8	12
A-B	0.05	0.09	0.19	0.37	0.56
	塑性域無し	塑性域無し	塑性域無し	塑性域無し	塑性域無し
C _H	0.06	0.12	0.25	0.50	0.78
	塑性域無し	塑性域無し	塑性域無し	0.02	0.19
C _M	0.13	0.27	0.56	1.38	2.54
	塑性域無し	塑性域無し	0.17	0.74	2.54
C _L	0.25	0.51	1.39	4.96	11.17
	塑性域無し	0.20	1.12	2.66	3.98

上段：変位量(cm)，下段：塑性域(m)

表-4 掘削による壁面変位と塑性領域

している範囲と設定する。今回の解析では、表-4中で網掛けで示した領域が塑性領域が20cmを超える部分（C_Mで初期地圧8 MPa以上、C_Lで初期地圧4 MPa以上の深度）となり、今回の検討ではCAES建設の対象とならない。

4.3 最大内圧作用時の空洞の安定性

弾性体に初期地圧 P_0 が等方に作用する場合、内圧 P_i が $P_i > 2P_0$ のとき空洞周辺に引張応力が生じる。したがって、最大内圧を $P_i = 8$ MPa とすると、初期地圧が4 MPa以上の深度のとき引張応力は発生しない。

内圧作用時の空洞壁面の応力は、半径方向応力 σ_r が P_i 、接線方向応力 $\sigma_\theta = 2P_0 - P_i$ となる。 P_i が4~8 MPaで変動すると、最大主応力は初期地圧 P_0 によって以下のように変化する。

- ① $P_0 > 8$ MPa では $P_i = 4$ MPa のとき、 σ_θ で生じる
- ② $P_0 < 8$ MPa では $P_i = 8$ MPa のとき、 σ_r で生じる
- ③ $P_0 = 8$ MPa では最大主応力の大きさは同じとなり、

内圧の変動により $\sigma_r \rightarrow \sigma_\theta \rightarrow \sigma_r$ と回転する

このように、最大、最小主応力の方向が初期地圧、内圧で回転するため、内圧に対する安定性を議論する場合は注意を要する。

初期地圧 P_0 が4 MPa以下のとき、内圧が高くなると円周方向応力 σ_θ が引張応力状態となる。最大内圧が作用したときの空洞壁面変位を、no-tension解析（岩盤を弾性体とした）により求めた。その結果を表-5に示す。また、岩盤等級C_Mについて内圧とno-tension領域(no-tension解析で得られる引張りに抵抗しえない領域)との関係および内圧と変形量の関係を、それぞれ図-9, 10に示す。

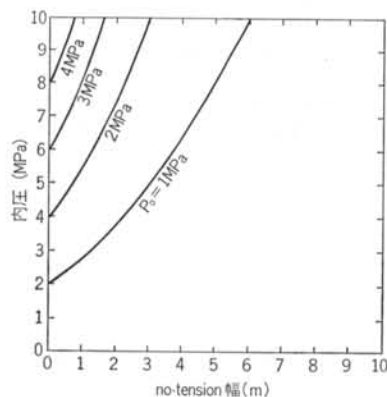
表-5より、no-tension領域は岩盤等級によらず初

岩盤等級	初期地圧 (MPa)		
	1	2	4以上
A-B	0.59	0.47	0.38
	4.9	2.2	引張応力無し
C _H	0.79	0.63	0.50
	4.9	2.2	引張応力無し
C _M	1.72	1.37	1.09
	4.9	2.2	引張応力無し
C _L	3.15	2.51	2.00
	4.9	2.2	引張応力無し

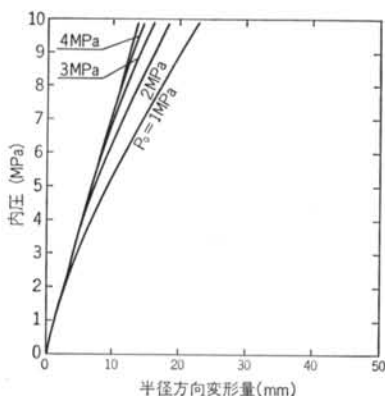
上段：変位量(cm)，下段：no-tension領域(m)

表-5 $P_i = 8$ MPa 作用時の壁面変位と no-tension 領域

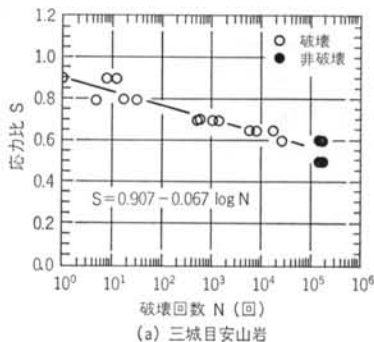
期地圧（深度）により決まることが分かる。これは、no-tension 解析において岩盤を弾性体としているためである。また、深度が浅い $P_0 = 1 \text{ MPa}$ では、最大内圧 $P_i = 8 \text{ MPa}$ のとき no-tension 領域は約 5 m とかなり大きく、場合によっては隣接空洞や地表への影響を検討する必要がある。また、no-tension 領域が発生すると空洞壁



図—9 内圧と no-tension 領域幅の関係



図—10 内圧と壁面変位の関係



図—11 各種岩石の S-N 曲線

面の変形は no-tension 領域が発生しない場合に比べ大きくなる（図—10参照）。no-tension 領域では、空洞近傍の応力状態は一軸圧縮（面外応力を考えれば二軸）状態になっている。C_M、C_L（表—5 で網掛けを施した部分）では内圧が一軸圧縮強度を超えており、no-tension 領域でかつ圧縮破壊している領域が存在することになり、変形が大きく生じると予想される。このため、弾性解析で引張応力が発生すると予想される場合には、no-tension 解析を行なって壁面変位を評価し、ライニング材の設計に反映させる必要がある。

§ 5. 繰返し内圧に対する貯槽空洞の安定性

岩盤の疲労特性については、藤原ら⁹⁾ が動的荷重載荷装置を用いて繰返しせん断荷重を作用させた原位置岩盤試験を実施し、強度が静的強度に比べて約 23% 低下することを報告している例はあるが、殆ど検討されていないのが現状である。本論文では、岩盤の疲労特性は岩石の疲労特性と類似すると仮定して、疲労破壊・変形特性のモデル化を行なう。

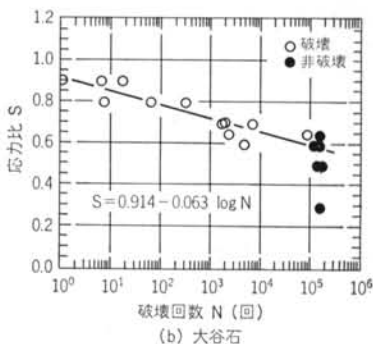
5.1 岩盤の疲労特性のモデル化と解析フロー

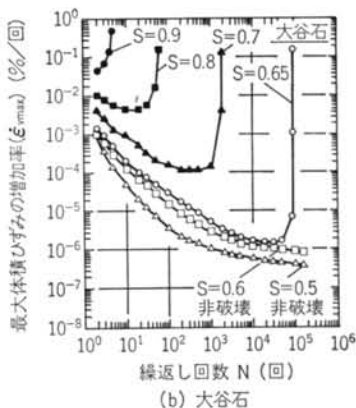
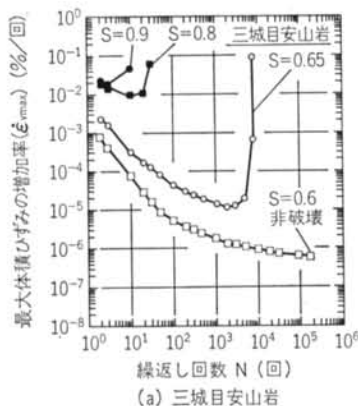
(1) 疲労破壊

三城目安山岩（一軸圧縮強度 $\sigma_c = 104 \text{ MPa}$ ）および大谷石（ $\sigma_c = 12.9 \text{ MPa}$ ）の気乾状態で一軸圧縮下の疲労試験（繰返し回数約 10 万回）で得られた S-N 曲線¹⁰⁾を図—11 に示す。各岩種とも応力比 S （静的強度に対する比）と繰返し回数 N の関係は片対数グラフ上で線形となり、次式で近似できる。

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

岩石の疲労強度は、静的強度を基準として 1 万回疲労強度は 0.64～0.66、10 万回疲労強度は 0.57～0.60 に低下する。S-N 曲線は拘束圧（ σ_3 ）、含水状態の影響を受





図—12 体積ひずみの増加率 ($\dot{\epsilon}_{max}$) と繰返し回数の関係
け、拘束圧が作用すると疲労による強度低下は小さくなる。また、飽和状態では強度低下が著しくなる⁵⁾⁶⁾。

岩盤の疲労強度は σ_3 に依存するため、応力比 S は σ_3 の影響を考慮して、次式のモール・クーロン破壊規準から求まる静的強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ で正規化する。

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

$$S = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) \quad \dots\dots(3)$$

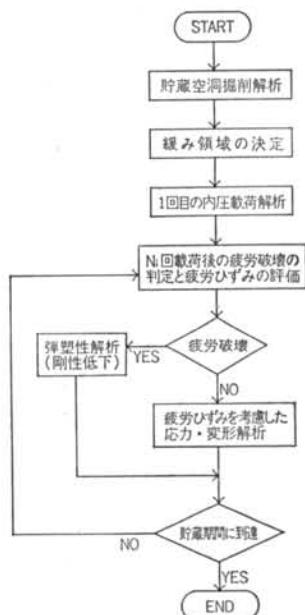
ここで、 C :せん断強度、 ϕ :内部摩擦角

繰返し内圧による疲労破壊の判定は、次のように行なう。ある応力状態 (σ_1, σ_3) で N_i 回繰返されたとする、式(2)から $(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ を計算し、応力比 S (式(3))を求める。応力比 S から、疲労破壊に至る繰返し回数 N_f を式(1)で評価し、損傷率 $N_i/N_f \geq 1.0$ のとき破壊と見なす。疲労変形や破壊による応力再配分により空洞周辺の応力状態が変化するため、応力比 S は変化していく。ここでは、各応力毎に損傷率を計算し、マイナーの線形累積損傷則(各応力レベル $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots$ の応力が単独で繰返されたときの疲労寿命を $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots$ としたとき、各レベルの繰返し応力が $n_1, n_2, \dots, n_i, \dots$ 回加えられたとすると、各レベルの疲労損傷を $n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_i/N_i, \dots$ と考え、これらの和で累積疲労損傷を定義し、1.0 となったときに破壊すると考える)により線形に損傷率を重ね合わせて繰返し中の累積損傷率を評価し、疲労破壊を判定することにした。

なお、疲労破壊以後は、破壊による剛性低下を考慮した弾塑性解析(弾性係数を1/100に、ポアソン比を0.49)とする。

(2)疲労変形

疲労変形は、図—12に示すように繰返しの増加に伴って、1回当たりの繰返しに対するひずみ増分が減少していく¹¹⁾。本論文では、定常領域におけるひずみ増分を両対数グラフ上で線形と仮定して、次式で近似する。



図—13 岩盤の疲労を考慮した解析フロー

$$d(\epsilon_{max})/dN = cN^d \quad \dots\dots(4)$$

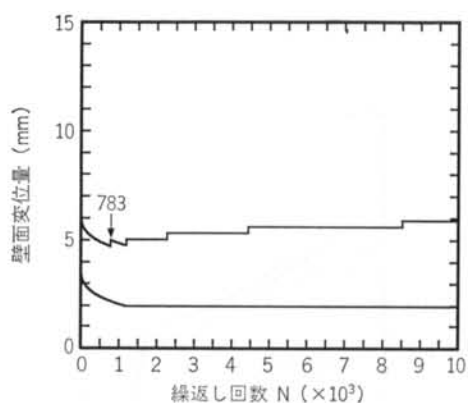
ここで、 c は载荷応力比 S に依存するため、実験結果から c を S の関数として次のように仮定する。

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

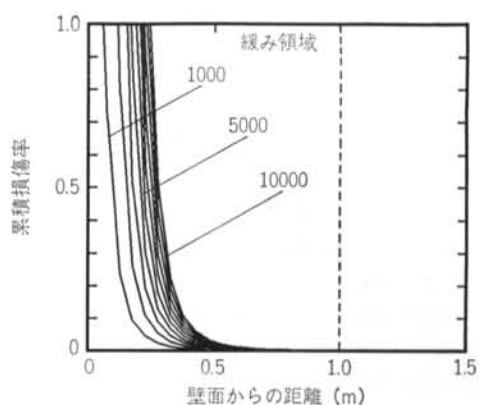
ただし、疲労変形・破壊が生じない応力限界である疲労限界 S_{LIM} 以下では、ひずみ増分は生じない。

(3)空洞周辺の緩み領域の変形性

掘削により空洞周辺の岩盤が緩み、岩盤の変形係数 D は健全部より低下する¹²⁾¹³⁾。内圧が作用すると、緩み領域内の変形性が健全部より大きくなる。そのため、1回目の載荷では緩み領域の弾性係数を D (平板載荷試験¹⁴⁾ で求まる変形係数)とし、2回目以降は健全部とも弾性係数 E (平板載荷試験の接線または割線弾性係数)を解

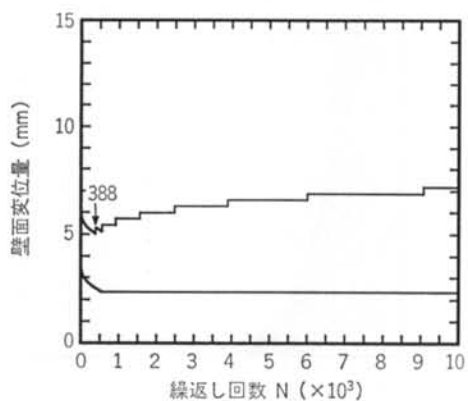


(1) 壁面変位量-繰返し回数関係

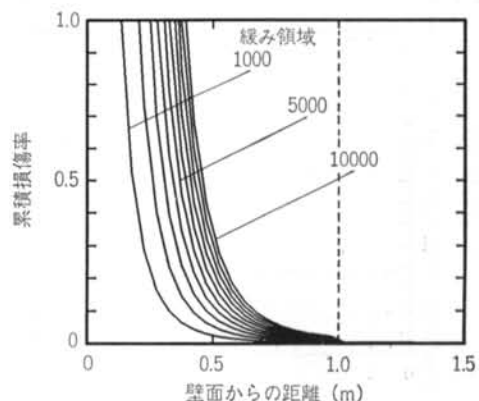


(2) 累積損傷率の分布

(a) 10^4 回で0.60の強度低下($S=1.0-0.10 \log N$)

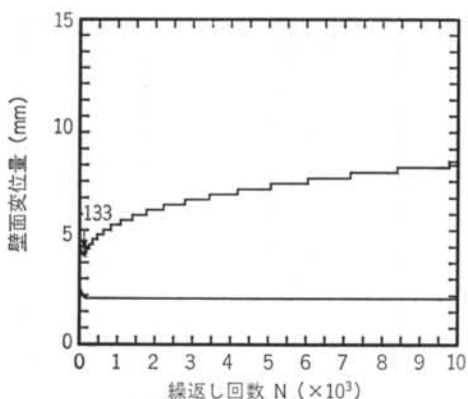


(1) 壁面変位量-繰返し回数関係

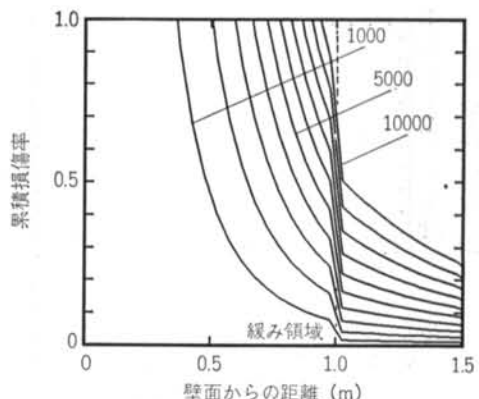


(2) 累積損傷率の分布

(b) 10^4 回で0.50の強度低下($S=1.0-0.125 \log N$)



(1) 壁面変位量-繰返し回数関係



(2) 累積損傷率の分布

(c) 10^4 回で0.30の強度低下($S=1.0-0.175 \log N$)

図-14 疲労強度が壁面変位、破壊進展に与える影響 (C_H)

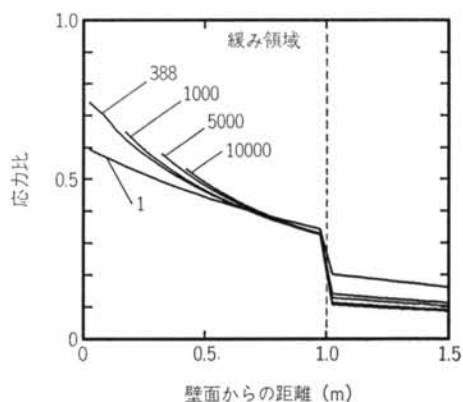
析に用いる。このように、緩み領域の変形性状を考慮することにより、内圧の繰返し作用に対する変形を精度よく評価することができる。

(4) 岩盤の疲労特性を考慮した解析フロー

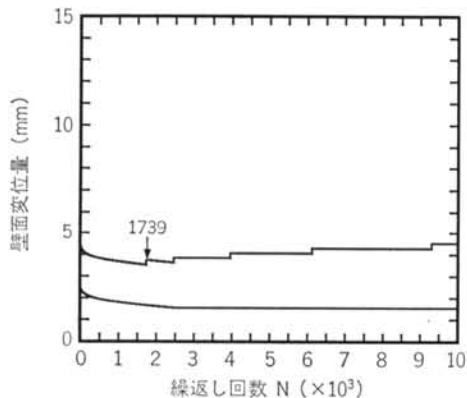
上述した岩盤の疲労破壊・変形性および掘削による緩み領域を考慮したライニング式圧縮空気貯蔵の空洞安定性の解析フローは、図一13のようになる。各ステップは以下のようである。

- ① 貯蔵空洞の掘削解析 (§ 3. 参照)
- ② 掘削による緩み領域の決定
- ③ 1 回目内圧载荷の解析 (緩み領域の変形係数を $D < E$ として解析)
- ④ 繰返し内圧解析。疲労破壊の判定と疲労ひずみの評価。マイナー則による線形累積損傷則により疲労破壊を判定し、疲労破壊と判定された場合には剛性低

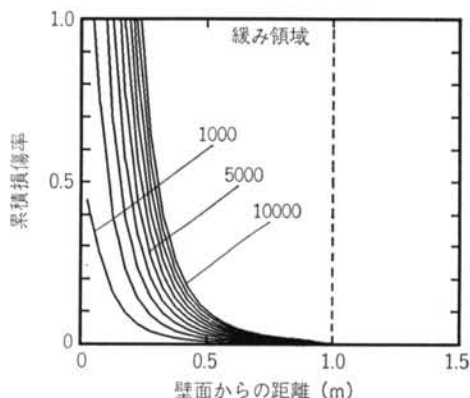
下させた弾塑性解析を実施。疲労破壊しないと判定された場合には、疲労による累積ひずみによる応力



図一15 繰返しによる応力比分布の変化

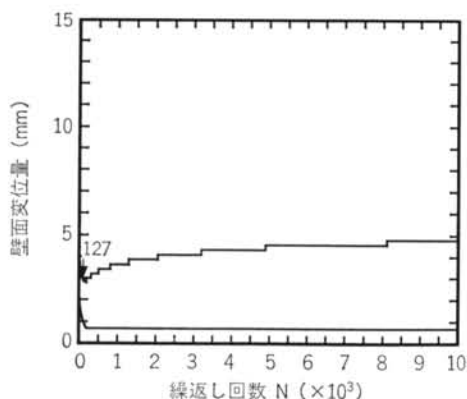


(1) 壁面変位量—繰返し回数関係

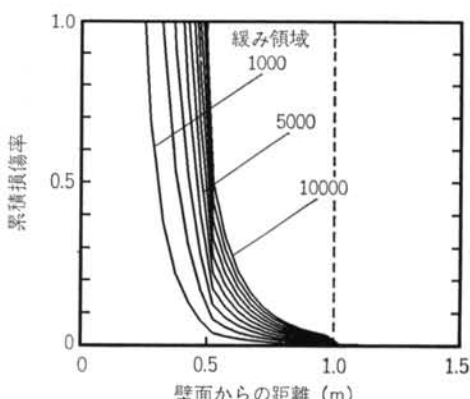


(2) 累積損傷率の分布

(a) 初期地圧 8MPa



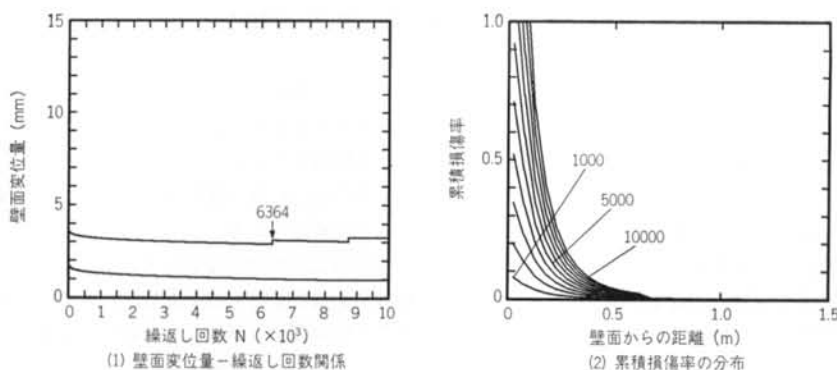
(1) 壁面変位量—繰返し回数関係



(2) 累積損傷率の分布

(b) 初期地圧 12MPa

図一16 初期地圧が壁面変位、破壊進展に与える影響 (A—B)



図—17 緩み領域が無い場合の壁面変位、破壊進展 (A—B, $P_0 = 8 \text{ MPa}$)

・変形の計算

⑤貯蔵期間に達するまで④ステップの解析を実施

5.2 解析結果

§ 4. と同様の二次元円孔 (直径 6 m) の平面ひずみ問題として検討する (図—8)。岩盤の静的力学定数は § 4. の岩盤等級 (表—3 参照) と同じとするが、疲労破壊・変形に関するパラメータは岩盤のデータが無い場合、岩石試験結果を基に仮定することにした。疲労変形パラメータは、体積ひずみの増分に対しては岩石試験の結果を基に $d = -0.92$, $e = -3.70$, $f = 2.48$ と仮定し、疲労限界 S_{LIM} は 0.3 とする。疲労強度のパラメータは、1 万回の繰返し強度が静的強度の 0.50 に低下する場合 ($S = 1.0 - 0.10 \log N$) を基本にして、①疲労強度特性の影響、②初期地圧の影響、③緩み領域の影響の 3 ケースについて解析を行なった。なお、掘削による緩み領域は壁面から 1 m と仮定した。

内圧変動は 4 ~ 8 MPa とし、疲労による体積ひずみ増分を考慮した弾性解による多重リング (1 リング 5 cm) で空洞周辺岩盤をモデル化して、1 万回载荷の解析を行なった。

(1) 疲労強度特性の影響

岩盤等級 C_H、初期地圧が 8 MPa で、疲労強度が 1 万回で 0.6, 0.5 および 0.3 に低下する場合の 3 ケースの解析結果を図—14 (繰返しに伴う壁面変位の推移と空洞周辺の累積損傷率の分布) に示す。図中の数字は、疲労破壊が発生する回数である。また、1 万回後の破壊領域は各々 25, 40, 95 cm である。強度低下が 0.6 では、破壊発生回数が 783 回で破壊領域も 25 cm であるのに対して、強度低下が 0.3 では 133 回で破壊が発生し、破壊領域も 95 cm となる。このように、疲労強度が解析結果に大きな影響を与える。

壁面変位の推移は、破壊が生じるまでは体積ひずみの

増加を考慮しているため空洞内部に変位するが、疲労破壊が生じると外側に変位が増加するようになる。強度低下の割合を 0.5 にした場合の応力比の分布を図—15 に示す。内圧変動開始から疲労破壊が生じる (388 回) までは、壁面の応力比は増加していく。破壊が生じると、破壊領域の増加に伴い外側に応力分布が移行し、破壊領域が広がっていく。

(2) 初期地圧の影響

図—16 に、初期地圧 8 MPa と 12 MPa の場合 (岩盤等級 A—B) の壁面変位の推移と累積損傷率の分布を示す。8 MPa では 1739 回で疲労破壊発生に対して 12 MPa では 127 回で破壊するようになるが、このケースでは初期地圧 12 MPa でも破壊領域は 45 cm と小さく、かつ最大変位の値も小さいため空洞の安定性には問題ないものと推定される。

(3) 緩み領域の影響

上記の初期地圧 8 MPa の場合で、緩み領域を考慮しない場合を図—17 に示す (図—16(a) と比較)。緩み領域を考慮しない場合の破壊発生回数は 6364 回と破壊領域は 10 cm であり、疲労による破壊、変形はほとんど問題にならない。このように、緩み領域の有無が解析結果に大きな影響を与えるため、疲労解析では緩み領域の取り扱いが重要な問題になる。

§ 6. 結論

本論文では、まずライニング方式 CAES に関連して貯槽となる岩盤空洞の安定性、ライニング材に関する技術課題を整理し、設計の考え方とその手順を議論した。岩盤の安定性に関しては、建設時の安定性に加えて次の点が重要課題として挙げられる。

①最大内圧作用時の空洞の安定性

②内圧変動が及ぼす空洞の安定性

最大内圧作用時には、岩盤の強度、初期地圧の大きさに関連して、空洞周辺には圧縮応力ばかりでなく、引張応力も発生する場合がある。岩盤を引張りに抵抗しないとして no-tension 解析を行なった結果、初期地圧が 1 MPa (深度 40~50m) の場合には no-tension 領域が 5 m とかなり大きくなる。また、空洞壁面の変位も大きくなる (C_L 級岩盤では 3 cm 以上)。そのため、引張応力が発生すると予想される場合には no-tension 解析を行なって空洞変位を評価し、ライニングの設計に反映させる必要がある。

次に、岩石試験結果を基として岩盤の疲労破壊 (S-N 曲線をマイナーの線形累積損傷則でモデル化) と変形特性 (繰返し回数とひずみ増分の関係でモデル化) を定式化し、内圧変動に対する空洞の安定解析方法を提案した。この解析方法を用いて、疲労破壊、初期地圧および

緩み領域が破壊領域、空洞変位に与える影響を調べた。

その結果、岩盤等級が C_H でも疲労強度が 10⁴ 回で 0.30 に低下する場合には、破壊領域とともに空洞周辺岩盤の変位も大きくなる。また、緩み領域の有無が解析結果に大きな影響を与える。このため、内圧変動の影響を議論する上では、岩盤の疲労破壊特性、緩み領域の取り扱いが極めて重要となる。

今回示した岩盤に疲労を考慮したモデルは、岩石の試験結果を基にしたものである。これまで、原位置岩盤の疲労特性に関する試験データはほとんど無いのが現状である。そのため、今後は原位置岩盤の疲労試験などによりその特性を明らかにし、モデル化に反映させていく必要がある。また、今回の解析は岩盤を連続体と仮定したが、ライニング材の設計においては岩盤の局所的な変形 (亀裂の開口) が重要となるため、岩盤の不連続性を考慮した解析も必要となる。

<参考文献>

- 1) 土木学会エネルギー土木委員会編: "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—" 土木学会 (1990年)
- 2) 今永隆: "電力貯蔵と CAES の概要" エネルギーレビュー 第11巻, 第5号 (1991年) pp. 4~10
- 3) T. Lindbo, H. Sandstedt & P. Karlsson: "Storage of Natural Gas in Lined Rock Cavern—Pilot Plant" Proceedings of International Conference on Storage in Rock Cavern (1989) pp. 367~370
- 4) 小野勇司: "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, No. 10 (1990年) pp. 49~53
- 5) 石塚与志雄・安部透・児玉淳一: "繰返し荷重を受ける花崗岩の疲労特性に関する研究" 清水建設研究報告 第50号 (1989年) pp. 45~54
- 6) Y. Ishizuka, T. Abe & J. Kodama: "Fatigue Behaviour of Granite under Cyclic Loading" Proceedings of ISRM International Symposium on Static and Dynamic Considerations in Rock Engineering (1990) pp. 139~146
- 7) 菊地宏吉・斎藤和雄・楠建一郎: "ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について" 大ダム No. 102, 103合併号 (1983年)
- 8) 日本トンネル技術協会編: "海峡連絡鉄道の技術に関する文献調査報告書" 日本トンネル技術協会 (1979年) pp. 17~59
- 9) 藤原義一・日比野敏・駒田広也・金川忠・中川加明一郎・石田毅・新孝一: "動的せん断試験による原位置岩盤の動的力学特性と強度特性" 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 (1984年) pp. 157~162
- 10) 石塚与志雄・安部透・中谷篤史: "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発表講演集 (1990年) pp. 1069~1072
- 11) 石塚与志雄・安部透・中谷篤史・東側豊二・河村精一: "繰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回年次学術講演会講演概要集, III—228 (1990年) pp. 492~493
- 12) 日本トンネル技術協会編: "トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書" 日本トンネル技術協会 (1982年) p. 133
- 13) 石塚与志雄・斎藤章: "岩盤掘削に伴う空洞周辺の緩み、物性変化について" 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, III—355 (1988年) pp. 752~753
- 14) 土木学会岩盤力学委員会: "原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—" 土木学会 (1983年)