

重泥水による岩盤の漏気防止法に関する室内実験

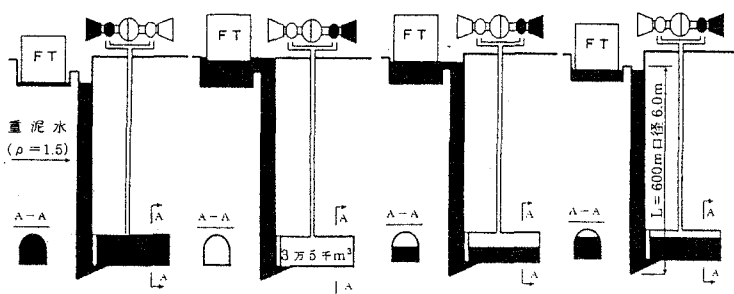
Laboratory Test on Air Tightness in Rocks using Weighted Bentonite Slurry

○ 成田俊幸* 林 正夫 ** 西村 宏之*** 木下 立也***
Tosiyuki Narita, Masao Hayasi, Hiroyuki Nisimura and Tatuya Kinosita

Advanced CAES is conceptually considered based on the material property of bentonite slurry which makes impermeable mud cakes for water and air pressure at sink holes around the rock surface in CAES tank. The stable and weighted hydrostatic pressure achieves high power CAES by Barite(BaSO_4). Self-remedial sealing of mud cake was confirmed not only by laboratory test but also by in-situ rock chamber test at 5MPa slurry pressure. This report describes the self-sealing phenomena in time series in high-pressure filter Press tester and the self-sealing in special series by three dimensional plastic of model CAES tunnel in laboratory.

1. まえがき

CAES は 定容積方式が欧米の岩塩空洞で実現している。日本では岩塩がないので硬岩か軟岩で設計、しかも都市での電力貯蔵のためには、止水と気密と高エネルギー貯蔵の3つの特性を天然に兼備した重ベントナイト泥水を用い、室内での高压逸泥試験を目詰め粒子入り泥水で行い、液密の圧力を超過する気密も可能で液密と気密を繰り返すと漏れたピンホールが自己修復される現象を見出した。この知見はその後、神岡での現地試験で追認された。この室内実験は高压逸泥試験(60気圧)とプラスチック模型実験からなる。高压逸泥試験は自己修復の時間的な効果を、プラスチック模型実験は空間的な自己修復機能の効果に関する知見を得るのに有効であった。



24 : 00 発電終了 6:00 圧縮空気貯蔵終了 12:00 発電中 18:00 発電中
(燃料タンク: FT)

図-1 CAEA発電状況図

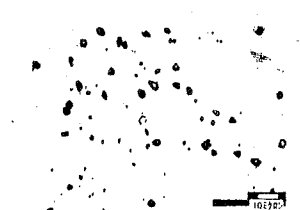


写真-1 ベントナイト泥水のゲル化状況(ベントナイトがゲル化し数ミクロン直径の連鎖ブロックを形成した状況:共集点レーザー顕微鏡による) [(株)レーザーテック]

2. 実験に用いた材料

ベントナイト泥水の配合は表－1に示すように増粘剤として、ベントナイトを用い。清水の中にベントナイト(ケゲルVo；ナリハベントナイト)を24時間放置して膨潤させ、増粘剤(ドリスカル)と分散剤(SSMA)を添加した後、加重材としてバライト(比重4.30)を混合しアルカリ剤・防腐剤を添加さらに蒸発防止剤としてパラフィン溶液を使用した。

3. 逸泥試験による液密と気密

1) 液密と気密の試験方法

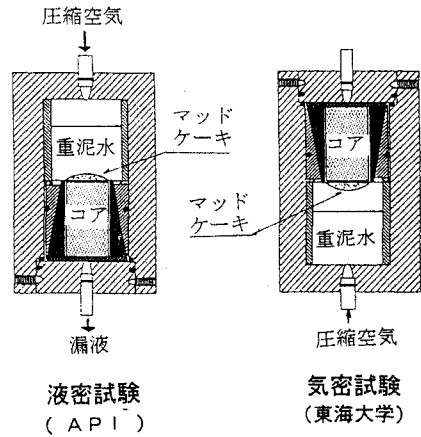
ベントナイト泥水の逸泥防止性能を6MPaで確認するためアメリカ石油協会(API)による図－2のフィルタープレスをを用いた試験を行った。コアは酸化アルミを固めた人造の多孔性コアであり透水係数は $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ のものを脱気し用いた。図－2の左のように、圧縮空気により重泥水を加圧し下部から排出される逸泥量を、測定し液密状態を確認した。その後 図－2の右のようにフィルタープレスを天地逆転し、下より圧縮空気を圧入しすでに液密状態で出来上っているマッドケーキを乱さずに気密試験を行う方法を開発した。そしてマッドケーキの気圧により漏洩のないことを確認した。

2) 液密と気密の繰り返し試験¹⁾

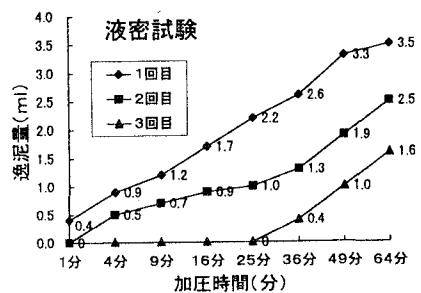
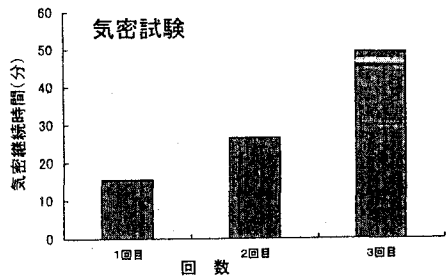
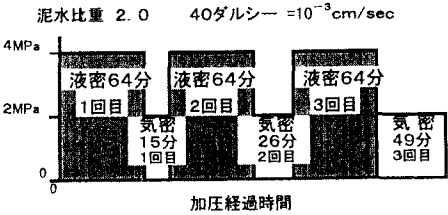
実際のCAESの運転状況は液密と気密の繰り返しとなることを模擬し、最初コアを液密しマッドケーキの成長につれ逸泥量が小さくなることを図－3のように時間の2乗則によって逸泥量がしだいに減少していくことを確認した。

表－1 重泥水の配合表

材料	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2
清水	100	100	100	100	100
基材(ml)					
ベントナイト	8.5	8.2	8.0	8.0	8.0
増粘材(g)					
ドリスカル	0.20	0.20	0.20	0.15	0.10
増粘材(g)					
SSMA	0.50	0.45	0.20	0.10	0.05
分散材(g)					
バライト	183.3	136.3	89.2	56.3	22.8
加重材(g)					
消石灰	0.10	0.16	0.16	0.10	0.10
アルカリ材(g)					
HCHO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
防腐剤(g)					
流動パラフィン	少量	少量	少量	少量	少量
蒸発防止					
全体容量(ml)	145	135	125	115	107



図－2 フィルタープレス試験



図－3 液密の繰り返し回数と逸泥量及び気密時間の関係

4. トンネル CAES 模型による液密と気密

トンネル CAES 模型をアクリルで作成して実際の CAES 運転状況を定性的に模擬した状態で 3 次元的な目詰まり効果を観察した。写真-2 にはトンネル CAES 模型実験の状況を示し 4 m 上から送泥管を経由し下の模型に重泥水圧を作用させた。写真-3 にはトンネル模型の側壁と頂点にあけた 18 個のピンホール(1mm-6 箇所・2mm-12 箇所)の内 1 箇所のピンホールの噴出した泥水の放物線を示している。

1) 液密試験における圧力変位

トンネル型模型に重泥水を圧入した。図-4 の内、上の液密のグラフにおいて注入後 1000~1500 秒間にかけて漏液したことを示している。ピンホールから噴出する泥水は最初漏液の数が多く時間とともに数が少なる傾向が一般的に観察され噴出孔はあちらこちらに移動する現象が一般的であった。あるピンホールに着目すると噴出した漏液は時間とともに量が減少しついには漏洩が停止する。その後、時間において別のピンホールから噴出する現象が一般的であった。最後にはトンネル模型から逸泥は全面的に停止した。すなわちまず重泥水で液密したときには時間とともに約 2100 秒までの間はピンホールから泥水噴出が随所が発生し、それらが個々に漏れが止り 2100 秒を過ぎてから目詰りが完了したと思われるので液密圧は急に上昇しその後 0.68MPa あたりに安定な液密状態に達した。その時点で漏液はまったく認められない状態になっていた。

2) 気密試験

トンネル型 CAES 内の気密確認のために圧縮空気をコンプレッサによって送気管を経由して圧入した。写真-4 にはトンネル型模型の横断面における圧縮空気の容積が増えていく 3 つの段階を示している。液密試験終了後にこの気密試験を行った。液密完了後 2 時間において図-2 の下半分に示す気密試験を開始した最初から 140 秒の間では液密状態を表わしており、その後コンプレッサを駆動し重泥水をトンネル内で押し下げる気密試験に移った。この状態は先に示した写真-4 の被圧水面低下の状態に対応している。模型に開けた 18 個のピンホールはどれも目詰りが完全に効いており 0.09MPa 前後の気密圧が維持されていたので気圧を低下させ実験は終了した。

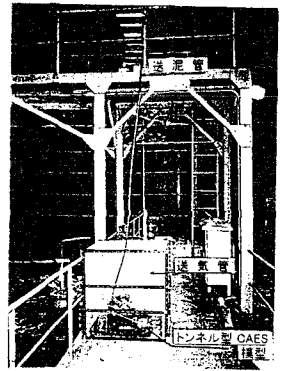


写真-2 模型実験状況

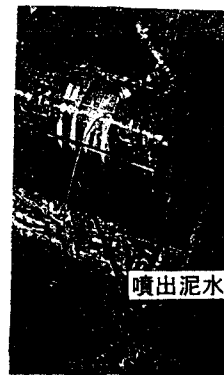


写真-3 噴出泥水

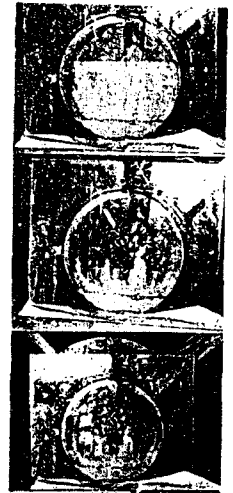


写真-4 被圧水面状況

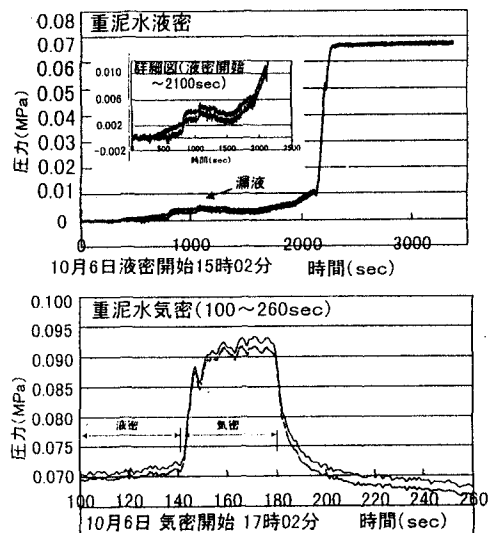


図-4 液密試験・気密試験

5. 目詰め材料による液密と気密の効果

1) 液密

目詰め材料効果(Loss Control Material, LCM)[表-2]の効果を確認した。まず LCM 1 号は表-2 に示すように粒径が 1.7mm 以下の目詰め材料の配合であるので細かいピンホールを目詰めし液密を促る目的で使用した。LCM 1 号をベントナイト 7% 溶液に混合し 6% を最初にトンネル CAES 模型に注入し、そのつぎに送泥管を経由して重泥水を注入した。この注入手順によりピンホールに注入した、ピンホールから最初は溶液が噴出していたが、さきに述べたようにその噴出は少ない別の個所から漏れを繰り返しながら漏液が止り液密性が確保された。図-5 の上部は液密試験の圧力変化を示す最小は漏液が噴出するたびに液圧は変動しているがその漏液の数が次第にへり、450 秒あたりから漏液が少なくなり、液圧が上昇した。約 600 秒において液密 0.11MPa の圧力水準に達した。

2) 気密試験

その気密試験は液密試験終了後、2 日経過したのち、気密試験を開始し液密圧 0.11MPa をこす気密圧を作用させたところ、瞬間的に 0.16MPa に達したが、その直後漏気し気圧が 0.11MPa に瞬時に低下したがその後は気密が安定した。すなわち漏気が瞬時にして液密にもどり LCM が泥水の中のピンホールに向け流動を起こし瞬時に目詰めし液密が完了しその後さらに瞬時に圧縮空気に耐える 0.11MPa の水準に達した。以上の漏気発生直後、瞬時の液密その直後の気密の回復の現象は目詰め粒子による液密と気密の自己修復性を示している。その状態においては写真-4 のように液面が低下したのでシャンペン現象の発生が懸念されたので圧縮空気をコンプレッサーの気密栓を開放し急遽気圧を低下させた、図-5 の気密はその経過である

3) 気密状態中の圧力変動

図-6 の(1)~(4)は気密状態中の液圧の変動を示しており、圧力変動の周期を観測すると 3 つの周期成分が認められる。

- (1)短周期約 5 秒程の圧力波が有りほぼ常時発生している
- (2)中周期 20 秒・長周期約 40 秒程の波動がときどき見られる

表-2 LCM の割れ目の閉塞可能幅²⁾

	第 1 粒子の D90	見かけ 比重	閉塞可能な亀裂幅
1 号	1.2mm	1.40	1.7mm
3 号	2.8mm	1.46	4.3mm
5 号	4.8mm	1.30	6.2mm

- 1) 主材(第 1~第 4 粒子)は軽量骨材、助材は板状のフェノール樹脂とフレーク状の蛭石
- 2) 主材の粒径比 第 1:第 2:第 3:第 4=1:0.4:0.1:0.05
- 3) 最適 LCM 添加濃度 6~18%

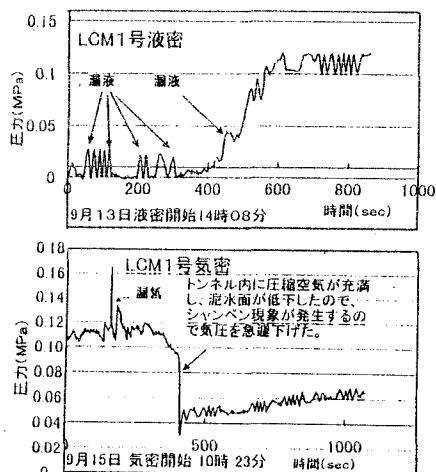


図-5 液密試験・気密試験

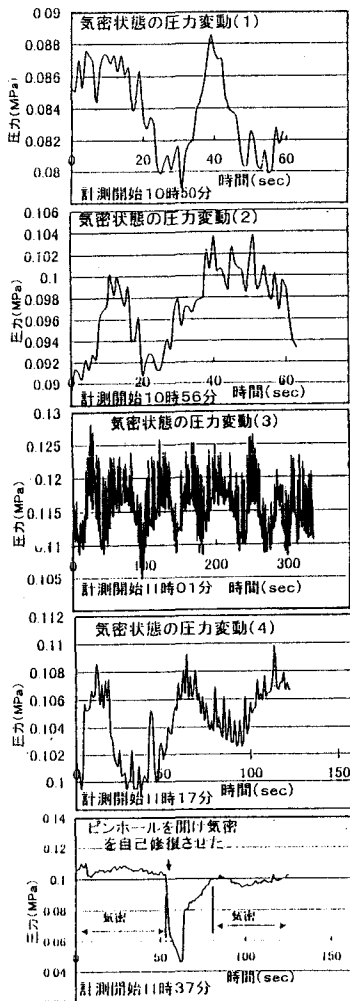


図-6 気密状態の圧力

6. マッドケーキの発達について

1) 実験を終了した模型を解体すると逸泥した 18 個のピンホールの内にはマッドケーキが 6 個のピンホールに認められ写真-5 に見られる大きさのマッドケーキが発達した。

2) 6 個のマッドケーキのうち 1 つは顕著に大きなマッドケーキであつた。

3) ドーム型 CAES 模型写真-6 においても模擬的な岩の割れ目長さが 60cm の場合について口径 5 mm(2 箇所)・4mm(3 箇所) のピンホールを設け、液密試験を行った。その結果ドームの底に LCM1 号を注入したが漏液が多く液密せず、次に LCM3 号でも液密せずピンホールの口径 4~5mm に対しては LCM5 号(主な軽量骨材粒子 4.8mm)を注入した場合において初めて液密した。この液密に当たっては予め混合した LCM 溶液を重泥水によって下から押し上げる状態で液密が行われることを確認した。このドーム型 CAES の気密を 18 日間維持して気密実験し、ドーム内に 0.21MPa の気密実験を行った、気密性は確保され実験を終了した。この事はトンネル CAES 模型がアクリル厚 5 mm 間のピンホールを漏洩経路としたのに比べドーム型 CAES 模型写真-6 に示したように長さ 60cm の細孔(内径 4mm・5mm)を漏洩経路としたので、ドーム型の場合は漏洩経路の長さがトンネル模型に比べ著しく長いので、目詰め効果が容易に発揮されたと考える。

4) ドーム型模型を解体しマッドケーキの発達を調べたところ写真-7 に示すように見つけられなかった。この効果の理由は

①逸泥経路が著しく長いのでその経路の間で楔作用と、ベントナイト泥水の強力な吸着作用の効果が極めて大きくマッドケーキを発生させる逸泥を生じなかった

②LCM 混合液と重泥水の比重差を分離して目詰め実験を行ったので重泥水によるマッドケーキが発生する余地がなかった

③ LCM の粒径が適切であった。

今後の課題

1) 断層破碎帯を模擬した模型による、目詰め効果の実験。

2) CAES 模型に地下水が存在する模型実験。

3) 立孔と CAES タンクを全体とした水理系圧力波の発生機構の調査。

結論

1) 重泥水による CAES システムは目詰り効果に関しては信頼のある自己修復機能を有している。

2) 目詰り効果を確実にするには、最初目詰り粒子を混合した軽いベントナイト泥水を CAES タンクに注入し、その下から重い重泥水で加圧する方式が効果的である。

謝辞 今回の実験に当たり計測において(株)共和電業 坂田光児氏及び嘉成幸一氏の指導に謝意を表します

参考文献

- 1) 林 正夫・西村宏之・本多宏造・小川真澄・成田俊幸・河野正和 “重泥水により作動する高出力 CAES に関する物性の基礎実験” 第 10 回 岩の力学国内連合シンポジウム論文集 pp.275~280 1998.1
- 2) 西村 宏之 “最近の逸泥防止剤について” 石油技術協会誌 第 57 巻第 5 号 pp 82~86
- 3) H.C.H.Darley Georgy R.Gray Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids 1991 Gulf

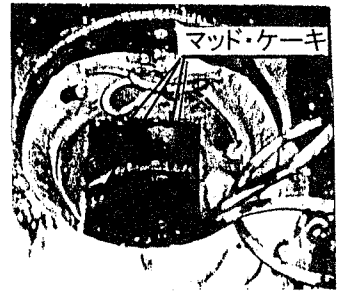


写真-5 マッドケーキ

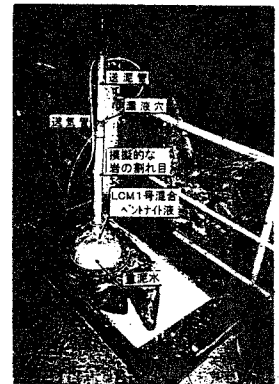


写真-6 ドーム型CAES模型

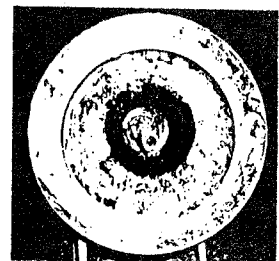


写真-7 ドーム型CAES底部