

重泥水の諸物性から見たエネルギー貯蔵と免震設計への利用可能性

PRELIMINARY FEASIBILITY STUDY ON WEIGHTED MUD FOR ENERGY STORAGE AND SEISMIC FREE SYSTEMS

○林 正夫*

Masao HAYASHI

西野宏之**

Hiroyuki NISHINOI

坂田光児***

Koozi SAKATA

陳 明****

CHEN Ming

ABSTRACT

Weighted mud will be useful from the points of view of engineering properties which are apparent specific gravity, viscosity, impermeability in the fissured rock, long term stability of gel pressure and dampings of wave propagation and vibration. The properties will be developed especially for CAES plant and for the seismic free structural system on the ground in the severe seismicity.

1. 目的 従来、石油鉱業において重泥水が用いられ^{1) 2) 3) 4)} 土木工事でも連続地中壁やシールドトンネルに用いられて来た⁵⁾。筆者らはその高比重・粘性・遮水性・波動や振動の吸収性等の物性に着目し予備的な実験を行い、その応用の一つとしてCAESを例に利用可能性を展望してみた。

2. 重泥水のCAESへの利用の展望

- 1) 高比重と遮水性：重泥水によるプレストレスコンクリートタンク^{6) 8)} (図1) (別にシールド連続地中壁¹⁰⁾と重泥水で作動する高出力のCAES発電⁷⁾ (別に貯水池の漏水対策)
- 2) 大浮力と粘性：浮揚免震型の発電所/変電所/電気溶鉱炉/人工島の空港施設⁷⁾ (別に免震構造物)
- 3) 高比重・遮水性・大浮力・粘性を総合利用：CAES付きの免震浮揚型重要構造物

3. 重泥水の物性

3.1 重泥水の定義 石油鉱業では加重材を意識的に加えた泥水はすべて重泥水と呼ぶが、エネルギー貯蔵や免震性では地盤の安定性に関係が深いので、地盤の単位体積重量の80%程度以上とする。例えば軟岩サイトでは平均単位体積重量が1.75なら、重泥水とはほぼ1.40以上とし、加重材を加える場合の外、現地土で沙と粘土の配合調整による場合も含めるものとする。

3.2 重泥水の比重調整 重泥水はベントナイト泥水をベースとし、増粘剤・分散剤等の他に加重材を加えるのが一般である。比重調整に用いる加重材の要件とし高い真比重、親水性、低反応性、粉碎が容易、耐腐食性、低磨耗性、無毒、安価、大量入手可能などを考慮し、バライト(BaSO₄, 比重4.3)石灰岩、酸化鉄等の内、バライトが多く用いられている。比重2.0の重泥水の配合ですでに2年間以上安定なゲル圧を立坑内で実証した例は既報^{6) 10)}がある。写真1は反射型電子顕微鏡で見たベントナイト水に囲まれたバライトを示している。

3.3 重泥水の粘性 バライト粉末を沈殿させず安定に維持するには増粘剤を加える。重泥水に剪断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を作用させると粘性係数 μ に比例し反作用としての剪断応力 τ が発生する。この粘性係数 μ は $\dot{\gamma}$ に非線形に関係しており(図2)重泥水の粘性曲線の割線勾配で定義される。また流動開始時の抵抗は粘性曲線中で縦軸との切片で定義されており降伏値 Yield Valueと呼んでいる。管路内を流動する重泥水は粘性応力 τ が剪断歪み速度 $\dot{\gamma}$ に応じて発生し圧力損失²⁾となる。図3には管径50cmと1.0mで、水と各種の比重の

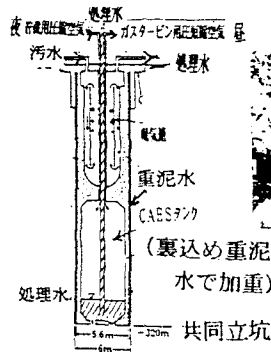


写真 1 重泥水の電子顕微鏡写真
加重材のバライトBがベントナイト水
の内に懸濁している (比重2.0)

—東海大、金属工学部・宮本氏による—

図1 水質浄化とCAES

*東海大工学部 **テルナイト(株) ***共和電業(株) ****利根地下技術(株)

管径 1.8m のときの圧力損失

管径 600mm

1.8m 間隔

層流域

乱流域

$\Delta P = \text{Poiseuille 則}$

$\Delta P = \text{Fanning 則}$

管径 1m の場合 (実測)

— 1000 L/s

- - 10000 L/s

... 100000 L/s

管径 50cm の場合 (実測)

- - 1000 L/s

- □ - 10000 L/s

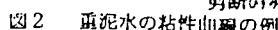
- ○ - 100000 L/s

管径 50cm のときの圧力損失

泥水比重

3.4 重泥水の濾水性（目詰まり効果）

止水性を調べる浚泥試験器は多孔質のコア川(図4)、ガラスピース川、岩盤の割れ目模擬川などが工夫されている。数10気圧の高圧脱透水試験も行なわれている。重泥水によって初期透水係数が 10^{-2} 乃至 10^{-3} cm/sec程度の高透水性コアに数分で2乃至3mmの泥壁が 10^{-8} cm/secの遮水膜として形成され、その薄い膜で60気圧の高落差に耐えていることが判る。近似的に1/2乗則で外挿して見ると表1に示したように1.7時間で透水係数は 10^{-9} 、1日で 10^{-10} cm/secに達する傾向になる。今後、実際の岩盤の割れ目を模擬したり、実岩盤での実験を行なう機会が来るだろう。



遮水機能実験 図4 高圧脱水試験器 (API)



初期透水係数
が 10^{-2}cm/s の
多孔性コア

初期透水係数が
 10^{-2} cm/s
 のコ7に重
 泥水が60
 気圧で作
 用した後の
 透水係数
 0分: 4×10^{-2} cm/s
 1.74分: 7×10^{-9} cm/s
 30分: 4×10^{-10} cm/s
 700分: 7×10^{-11} cm/s

高圧脱水中の透水係数の変化の解析
 持続圧 p での漏水量 Q は時間 t の $1/2$ 乗に比例すると近似でき

$$Q = at^{1/2} + b$$

$$dQ/dt = 0.5 \ a t^{-0.5}$$
 一方、流速 v は断面積を A とすると

$$V = dQ/A \quad (1)$$
 また、ダルシーの法則が成り立つとし
 水頭 H 、滲水長さ l 、密度 ρ なら

$$v = kH/l = k(P/p)/l = dQ/A \, dt$$

$$k = (dQ/dt) / (pA/\rho l)$$

$$= 0.5 \ (a t^{-0.5}) \ l \rho / pA$$

$$A = 5 \text{ cm}^2, \ l = 4 \text{ cm}, \ p/p_0 = 6000/1 \text{ cm}$$
 の場合の
 実験の解析結果を表 1 に示した。

3.5 重泥水のゲル圧の長期測定

地中に圧力容器を設けるには鋼製ではコストが高いが、重泥水の深さに応じた裏込め溝内のゲル圧によってコンクリート容器を加圧すれば、経済的なプレストレスタンクが築造可能と考えたわけだが、この考えの妥当性を実証する第一段階は1993年からの大和市近郊の既存水没立坑（利根地下技術（株））を利用し、都市型CAES研究会*を組織して実施したことである。ベントナイトの超微粒子の電解質の溶液にパラライトの粗い粒子が懸濁できるのは電気化学的の溶液中のイオン相互間の静電作用であり、さらにパラライトの粗い重微粒子が懸濁できるのは3次元的な網目構造を構成する繊維的な連結要素も加味される必要がある。第1報⁹⁾にその説明は記述したのでここでは省略するが、長期にこの懸濁が維持されることが筆者の着想の裏付けとなるので、1年を経過した時点での第2報¹⁰⁾に引き続き、2年半を経過した時点での第3報を図5に示す。その結果は重泥水は沈澱しないでゲル状態の静圧力が深さに応じて作用すること、ややゲル化が進行した分だけ圧力低下が認められることと、攪拌するとゲル圧を回復可能なことなどを基本的に実証できた段階である。今後も継続して計測するとともに、重泥水を少し補充する効果を確かめる第二次段階の実験も計画している。実用化には機械的あるいは化学的な維持管理技術が逐次実証されることになる。

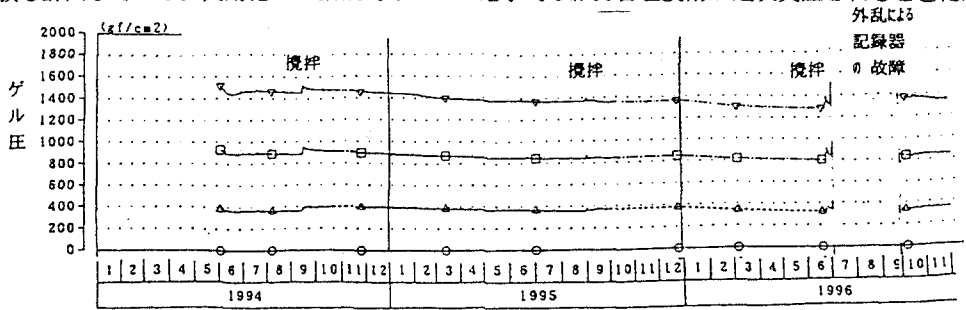


図5 重泥水のゲル圧の経時変化（深さ9m、直径15cmの鉄管内での4深度での水平方向の圧力）

3.6 重泥水中と水中での超音波の減衰性の比較

- 1) 測定法：重泥水中での波動減衰の周波数特性を調べる手がかりとして88kHzの超音波の場合について水の場合と比較した。実験には光電製作所の超音波測定器（図6）により指導を受けて実施した。送受信の水深は20cmで、水道水温度は14度c、重泥水温度は15度cないし16度cであった。
- 2) 重泥水中での超音波伝播速度（図7） 距離30cmと40cmの区間で、水の場合は1428m/sec、比重1.4の重泥水の場合は1538m/sec、比重2.0の重泥水の場合も1538m/secであった。

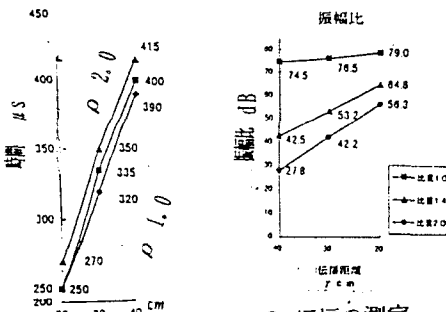
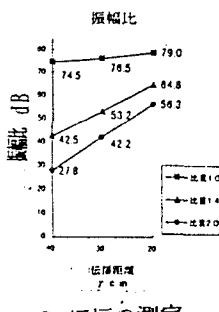


図7 速度の測定



8 振幅の測定

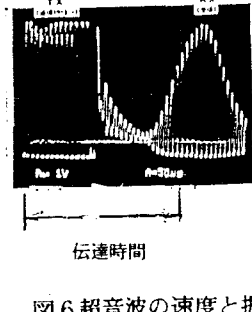
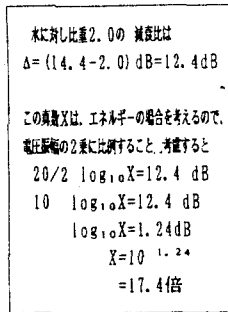


図6 超音波の速度と振幅の測定

* 都市型CAES研究会（1993-1995）は 東洋建設・住友建設・利根地下技術とで大和1号1994年（深度24m）建造法・耐圧性・気密性の実験に成功した⁸⁾。ついで、つくば1号1995（深度100m）を同様の目的で工技院資源環境研究所と大林組も参加し10気圧以下でのCAESの性能確認に成功し解散した。その後は通産省補助事業とし1995年から（財）エンジニアリング振興協会地下センターに継承されつくば1996年号とし、高压ガス保安法特別審査に合格し20気圧の圧力容器を建造し実験中である（三菱化工機助

3) 超音波の距離減衰特性 (図8) 超音波伝播を距離20cm, 30cm, 40cmに受信器を置き水中の場合と重泥水 (比重1.4と2.0) の場合を比較した結果、距離30cmと距離40cmの間においてのエネルギー減衰率は水との比較において比重1.4の重泥水の場合は7.4倍、比重2.0の場合は17.4倍であった。この距離減衰は重泥水内のベントナイト電解質溶液中のコロイド周辺のブロックが粗密波を受けた時の粘弾性的なエネルギー吸収とバライト微粒子に粗密波が当たった時のエネルギーの散乱などが影響していると思われる。今後、周波数による波動エネルギー吸収と散乱について伝播距離との関係で実験を行なう予定である。

3.7 水と重泥水での浮体の振動特性の比較

- 1) 小型振動台上の模型: 2軸の電磁式振動台の上に矩形容器 (底面積 A_0 :455x263mm) を乗せ、その中に水か重泥水 (比重 ρ が1.4と2.0) を入れ、さらに浮体 (底面積 A_f :280x185mm, 重量:3,230 gr) を浮かべ、正弦波加振とスイープ加振を上下と水平に行い、それぞれ周波数応答を求めた。
- 2) 矩形容器を短辺方向に水平加振した場合の水平加速度応答 (図9) は水の場合は理論的予測 (ポテンシャル流れでのスロッシング固有周期) の1次 (1.26Hz) と2次 (2.22Hz) 付近で実験の応答も増幅している。重泥水の場合は1次だけが水の場合の半分1/2程度増幅し、2次は増幅していない。また1次固有振動数の約3倍の3.5Hzでの応答は0.2倍以下となっている。いずれにしても重泥水の場合は水にくらべ揺れがかなり少ない。相似的に考えて見ると実物が100m角規模のプールならスロッシングの固有振動数は0.11Hz以下の低振動と予測できその3倍以上の振動数領域 (実地震の主な加振領域) では浮体振動はかなり軽減されよう
- 3) 浮体の上下動: まず浮体の自由上下振動を浮体を下に押し沈め強制的に喫水を深くした後、負荷を瞬間的に解除することで、浮体の浮き上がりが発生させ自由振動させた (図10) その振動減衰を対数減衰と仮定して求めた減衰定数を図中に示す。自由振動数は最初11Hz程度だったものが、振動の後半では0.61Hzに変化している。これは浮体振動により移動する流体の慣性力の影響と考える。つぎに底部上下加振により2Hzから40Hzまで正弦波スイープによる応答 (図11) は倍率1.0であり、入力と浮体応答の位相差もなく共振も認められない。これは底部上下加振では流体も同時に加振されるので、浮力も変動するので、前記の浮体への瞬間入力後の自由振動とは異なる振動形態である。
- 4) 今後、重泥水の粘性係数の周波数依存性を解明し、応答解析法を研究する道を辿ることになる。

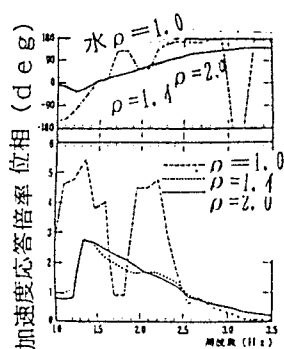


図9 浮体の水平振動

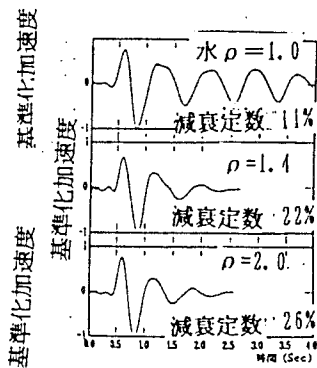


図10 浮体の自由振動波形 (上下)

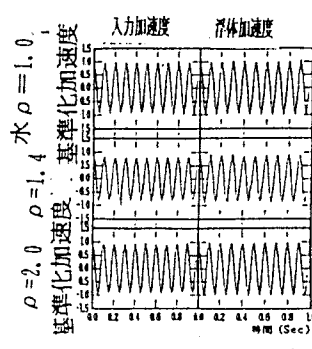


図11 浮体の加速度応答倍率 (上下)



写真3 振動台上のモデル (内外の容器)

4. 重泥水のエネルギー貯蔵と免震設計への利用構想

4.1 重泥水のゲル圧でプレストレスするCAESタンク付き超深層曝気活性汚泥法下水処理^{6) 8)}

長期にゲル圧が維持管理できると目詰まり効果も複合し 鋼製より経済的な圧力タンクができるだろう。とくに内水氾濫時の初期雨水貯留と兼用できる図12のECO CAESは防災と環境と経済に貢献できる。

4.2 重泥水を作動流体として利用する高出力CAES^{7) 10)}

水に比べ2倍の高比重でしかも重泥水の目詰まり効果を期待できると簡易覆工で高出力のCAESが山地 (図13) や臨海で可能になる。

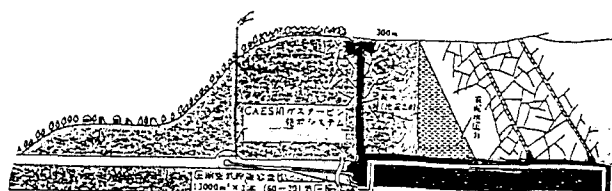
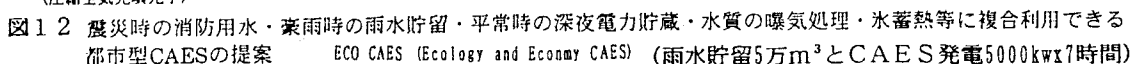
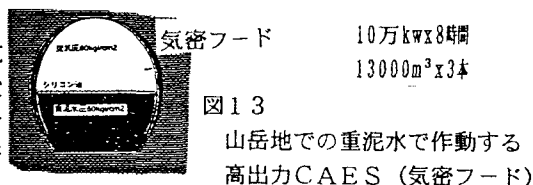


図14 (左)
人工島の浮揚式
空港施設に併設
した39万kw
CAES発電所



5. 結論 重泥水は都市の防災と環境とエネルギーに新しい打開の道を拓くだろう。

6. 謝辞 重泥水を水没地下タンクの建造に利用する着想実験と解析に東海大・日大・金沢大の方々、大和1号1994年とつくば1号1995年の都市型CAES研究会、さらに引き継いだ江ノ島リニア振興協会のつくば1996年号の実験さらに後続の課題探策のなど数多くの方々の指導と協力の一端を示させて頂いたことを付記し厚くお礼申し上げます。

7) 参考文献1) 沖野文吉”ボーリング用泥水”技報堂、1981、2) Darley H. C. H., and Gray C. R., Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Gulf publishing company, 1988、3) 作井技術研究会、(田中彰一他・石油技術協会)”逸泥の原因と対策”, 1980、4) 平岡成明”連続地中壁の安定液”(山海堂、1991、5) 西村宏之”最近の逸泥防止材料について”、石油技術協会布誌、57-5、1992、PP480-485、6) 林正夫・森田晃弘・西野宏之・富樫嗣彦”重泥水を長期に沈蔵させず安定なゲルとして利用する材料の設計と実証実験”-軟岩での都市型CAESタンクのプレストレスへの応用-第26回岩盤力学に関するシンポジウム、1995、7) 林正夫”海上空港での多機能型の電力貯蔵構想-圧縮空気貯蔵ガスタービン発電-、第71回海洋工学懇談会、1996年4月26日、横須賀、8) 林・堀・熊谷・荻須・矢部・西村宏之”深部軟質岩盤での水没立坑にコンクリートタンクを沈設し、重泥水で裏込めしプレストレスする都市型CAESタンクの理論と実験(第8回国際岩盤力学国際会議 8th ISRM CONGRESS, PP 575-578, 1995、9) 大森・飯塚・太田・林”都市型CAESの周辺軟岩盤の安定性に関する数値解析”第30回土質工学研究発表会、第3分冊、1995、pp1200-1212、10) 林正夫”防災と環境とエネルギーに7つの複合価値を秘めた大深度立坑型の圧縮空気貯蔵-ガスタービン発電”、第40回地盤工学シンポジウム、基調講演、1995、11) 機械工学便覧A3-pp135、日本機械学会、