

(65) 重泥水を長期に沈澱させず安定なゲル圧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—

林 正夫（東海大）・○森田晃弘（東海大）、西村宏之（ルネサス）、富樫嗣彦（ルネサス）

Hayashi M. Morita A. Nishimura H. Togashi T.

"Long Term Gel Pressure of Heavy Mud for Prestressing the CAES Tank in Deep Soft Rock"

Abstract : Urban CAES tank in deep soft ground is proposed as submerged deep shaft excavation, settlement of submerged open caisson made of concrete and then prestressing the concrete wall induced by gel pressure of heavy mud for long term which has been designed and tested in 2m and 9m deep shaft. The tests of gel pressure of heavy mud were stable for 6 months.

1 はしがき 水没立坑にコンクリート円筒を沈設し裏込め溝に重泥水を充填し下半部をCAESタンクとし、余地となる上半部を水質浄化に独立して共同利用する図1の案をかねて提案してきた。^{2), 3), 4)} 将来は火力発電所の稼働率向上になる二種兼用のCAESも考えられる。ここでは圧縮構造の覆工の提案^{2), 3)}の裏付けとしての重泥水の実験の中間報告を行う。

2 CAESタンクの重泥水のゲル圧分布の役割り（表1と図3）：HWLあたりの加圧を主目的とする。

3 重泥水のゲル圧の微視的なメカニズム

ここで重泥水のゲル圧とは、電解質のペントナイト水に比重4.30バルト BaSO₄の微粒子を増粘剤・分散剤・アルカリ剤とともに混合し、ミクロン級・サミクロン級の微粒子群が相互に電気2重層で反発力と吸引力を発生しさらに高分子のイオンも加勢し3次元的な網目構造を形成し、結合水・半結合水・自由水で加重材であるバ

表1 重泥水圧方式の地下圧力タンク（提案）^{2), 3)}

原理	副次効果
重泥水のゲル圧によって、長期に覆工に安定なプレストレスを与える	緩み領域を押し戻し、不測の不連続面・異方土圧・未知な長期クリープ等に流体圧を未然に対処できる。不測の透水部を未然に重泥圧でグラウトできる。

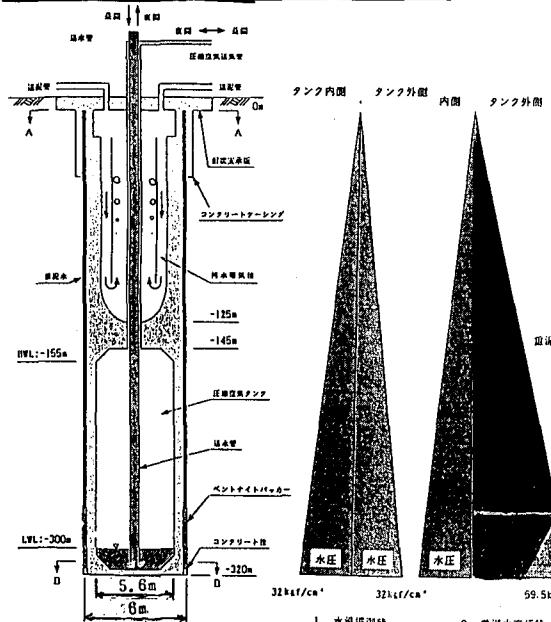


図1 下部3,000kWx14h発電CAESタンク/4本と上半部8万人/4本下水処理タンクの共用システム概念

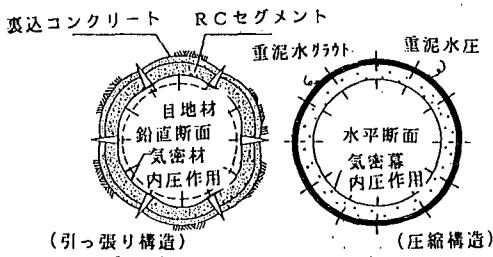


図2 従来のCAESタンク（左）と提案のCAESタンク（右）の概念

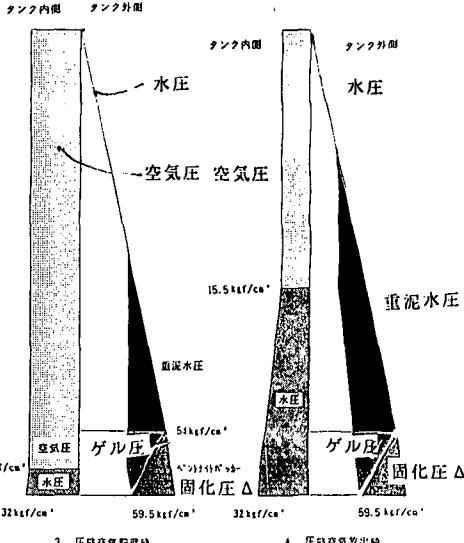


図3 重泥水頭下のゲル圧によるコンクリート円筒のプレストレス(下半部)

ライトをとり囲み、移動を拘束した平衡な密な状態（写真1-3参照）での粘性的な流体圧を言う。

ベントナイトを水に対し増加させた配合では結合水の割合が高くなり、自由水の割合が減少するので凝固化しがれ圧は低下する（図11の△）。従来のベントナイト泥水は比重が1.05ないし1.10程度で水没掘削中の壁の安定と割れ目の目詰め効果に着目して低比重・低粘性が基本要件であった。また加重材としての従来の重泥水は石油掘削時にガス噴出事故を応急的に阻止するため閉塞に利用されたが、構造材として長期に安定なゲル材として設計する発想はなく、ましてゲル圧を長期に計測した例は見当たらないようである。

4 重泥水の調合の基本要件

超微粒子が懸濁状態を維持できる電気化学的な理論は溶液中のイオン相互間の静電作用である。その溶液中のイオンの活動度を算出する静電場の理論がDebye-Hückelらが独立に編みだした理論を基本とし⁵⁻⁷⁾

1) 電解質内の重微粒子の反発力を吸引力よりやや強くするが、それらの影響範囲はオングストロームのオーダーでの空間力であり、ミクロンオーダーの重微粒子を支えるには別な相互力が必要と考えられる。

それは重微粒子の骨格に3次元的な網目構造を与えるための纖維的な安定な連結要素であろう。

2) 一般にベントナイトの微粒子は、アルミナ八面体のイオンAl⁺⁺⁺が占める位置の一部分が電荷の低いMg⁺⁺によって同じ型で置き換えられているため、正電荷が不足していて全体としては負に帯電している。

この釣り合い上、負電荷は微粒子の界面に分布している正イオンNa⁺によって中性に平衡していることになる。

3) 水溶液内の微粒子界面の+のイオンは水溶液中に拡散しようとし、水中に分散している-の電子に引き付けられている。このように不安定な状態で微粒子の表面は電気2重層に拡散した+のイオンの雲ができている。この+のイオンの電荷の大きさがツエータ電位であり、吸着している陽イオンの種類と量によって左右される。

4) ベントナイト粒子が反発しあって安定に分散しているためには微粒子間の反発力が微粒子間の吸引力より大きくなくてはならない。この反発力はゼエーター電位の大きさできまる。

5) 重泥水の懸濁が長期に安定なゲル圧を与えるために重微粒子を分散状態おくことが要件で

- a 重いパラライト微粒子の平均径を小さく比表面積を大きくし反発力を強くする。
- b ベントナイト濃度を高め微粒子平均距離を狭くする。
- c 電解質を加え反発力を減らし平均距離を狭くする。
- d ポリマを増粘剤として加え微粒子骨格に絡ませる。
- e これらの条件が調整できない時には凝集し微粒子がさらにくっつき巨大粒子を形成し分離・沈殿する。

6) 都市でのCAESなら大深度工事の環境対策として地盤沈下を未然に防ぐ受動土圧として重泥水比重を堆積軟岩の単位体積重量1.8ないし2.0程度にする。

5 重泥水の作泥

1) 作液・ポンプ輸送が可能な粘度

分散剤には広い範囲のpH（アルカリ側）の値で効き多価の陽イオンの存在下でも分散効果のある低分子量

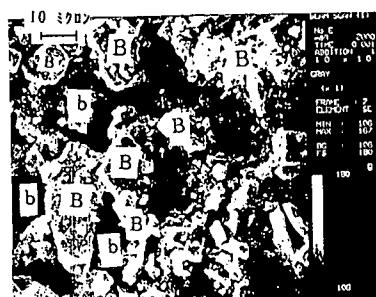


写真1 重泥水の反射式電子顕微鏡写真 倍率2000倍
(撮影 東海大工学部金属工学科 宮本泰男氏)
B: 重泥水
b: カリナ水

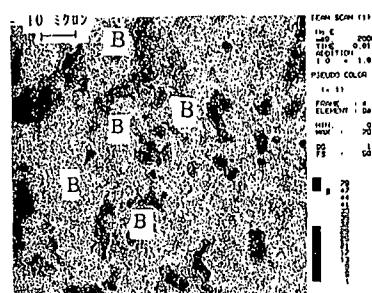


写真2 重泥水の化学成分分析による B成分の検出
灰色の部分（反射式電子顕微鏡写真による）

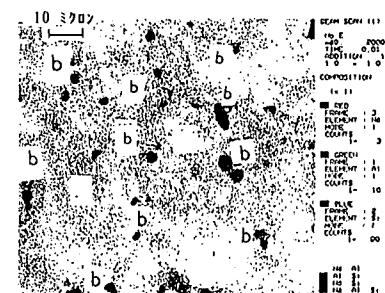


写真3 重泥水の化学成分分析による ベントナイト水の検出
b 黒い点の部分（反射式電子顕微鏡写真による）

のスルファン化ステレン 無水マレイン酸共重合体 S S M A (Na塩)を用いた。

2) 長期にわたり 加重材が沈降しない安定な粘性を与えることが、通常のペントナイト泥水と違った技術になる。重微粒子であるパライトから溶出している Ca^{++} とか Mg^{++} 等のアルカリ土類金属の作用で、ペントナイトの水和反応が抑制されパライトの沈降が起こり易いことを予備実験で見出した。そこでアルカリ土類金属によっても水和反応が抑制されず十分に活性を有するペントナイトを選択し、さらに分解や腐敗につよい高分子ポリマー やアクリルアミドメチルロパンスルファン酸 A M P S を少量用いて、それらの総合効果によって重微粒子の沈降をおこさせないことに成功した(表2、図6)

3) 粘性に関する回転粘度特性(図4と図5)をまず、作泥直後に計り、せん断速度が速い場合には図7でどのアルカリ剤も同じ程度の粘性を示すが遅い場合には水酸化カルシウム/炭酸ナトリウムに水酸化ナトリウムの混合物を加えた場合等の粘性は水酸化ナトリウムを加えた場合の粘性よりやや高い程度であるが、図8の50度Cで14日養生後にせん断クリープを測った場合には、水酸化カルシウム添加の泥水のせん断クリープの回復は少く安定で、また別な試験として

4) 遊離水の試験を2リットルのポリ瓶中で実施した表2の比較試験の結果でも、水酸化カルシウムの場合が表3のように6ヶ月後で優れていることが判った。

5) 造壁性(濾水が30ml/7kgf/cm²で停止する性能)低分子のスチレンスルファン酸/無水マレイン酸共重合体 S S M A を少量添加し重泥水が壁に着きできたケークから濾過してくる水を7kgf/cm²の圧力差で30ml以下に抑えられることを確認した。

6) 腐敗防止

重泥水が腐敗すると物性が変わったり酸性ガスを発生して鋼管を腐食させる懼がある。これを防止するため泥水に若干の防腐剤を添加した。

7) 腐食防止

水酸化ナトリウムと水酸化カルシウムにより、PHを10.5ないし11.0に調整し、鋼管の腐食対策とした。

8) チキソロピーの利用

微粒子の反発力を活性化するため振動をあたえたり変位を与えてし分散させることで品質を維持管理できる。

9) 作泥手順

水にペントナイトを膨潤させこれにS S M A とA M P S を加えてゆっくりと混ぜ合わせる。次ぎにパライトを加え十分に混合後に、最後にアルカリでPHを調整する。

6 重泥水の配合の比較試験(表2)の内容

1) ハミトンミキサで作泥直後に粘性測定(

2) 1昼夜室温に静置しラボスターで5分混ぜ、50度Cで粘性を測定した

3) ガラス容器に重泥水を密封し50度Cで2週間養生。

4) 2週間後に、遊離水の比重測定

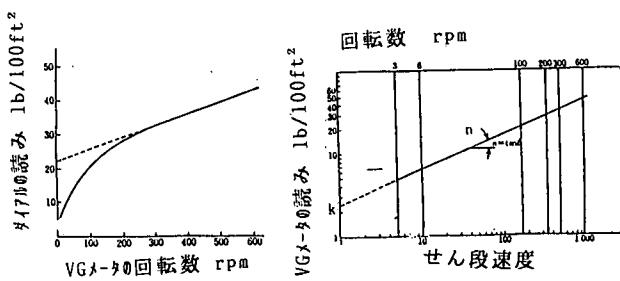


図4 VGメータによる測定

図5 Power Lawによるレオグラム

表2 重泥水の性能比較試験の組成

No.	PENTAVIO (%)	SSMA (%)	DRIISCAL (%)	N & P (S.G.)
1	7.0	-	-	1.8
2	6.5	0.2	-	1.8
3	6.0	0.2	0.3	1.8
4	7.0	0.2	0.2	1.8
5	6.0	0.2	0.1	1.8
6	7.0	0.3	0.25	1.8
7	7.0	0.3	0.3	1.8
8	6.0	0.3	0.2	1.8
9	5.0	-	-	2.0
10	6.0	0.2	-	2.0
11	6.0	0.2	0.25	2.0
12	7.0	0.2	0.15	2.0
13	4.0	0.2	0.05	2.0
14	7.0	0.3	0.2	2.0
15	7.0	0.3	0.25	2.0
16	8.0	0.3	0.15	2.0

図6 下部比重
上部比重

図6 比重2の重泥水の分離試験

表3 遊離水量のPH調整用アルカリ剤依存性

アルカリ剤	遊離水量	
	3ヶ月後	6ヶ月後
水酸化ナトリウム	7.5 Vol%	10.1 Vol%
水酸化カルシウム	3.6 Vol%	4.0 Vol%
水酸化ナトリウムと 炭酸ナトリウムの混合物	6.2 Vol%	6.9 Vol%

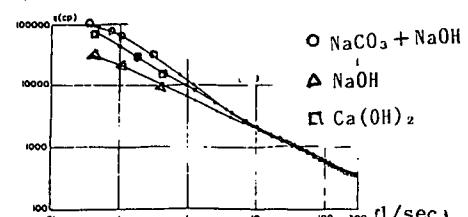
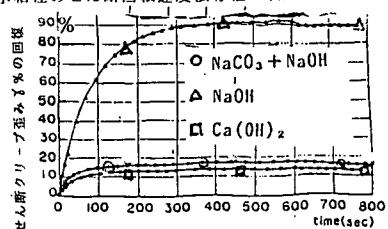


図7 重泥水に添加したPH調整剤による重泥水粘性的せん断回転速度依存性(作泥直後)

図8 重泥水のPH調整剤の違いによる回転粘度計でのせん断クリープ歪みの回復曲線(作泥14日後)



5) ラボスターで5分混ぜ50度Cで粘性測定(図4,5,7,8,9)

6) 重泥水による鋼材の腐食につき4130鋼について
A P I 試験法で50度Cで腐食減量を求めた結果、
0.004mm/yの腐食速度との結果を得た。この値は評
価基準0.15mm/yに比べ十分に小さく問題はない。

7) その他流動特性、遊離水量、P H調整試験。

結論として、表4の重泥水配合が選ばれた。

7 パッカーマテリアルに要求される設計条件

重泥水方式のプレストレスの設計概念(図3)を満足
させるため重泥水の下部にパッカーマテリアルを配置する。

1) 裏込め溝深部ではより上部の重泥水を支持する
ゲル強度を有し、上部の重泥水と流体置換しない材料

2) 重泥水のゲル圧によるプレストレス荷重はCAES
タンクの天井部で最大で、より下に向かって低下させ壁に
過大な荷重がしない材料(図3)。

3) CAESタンク底盤の揚圧力は重泥水が流れ込むと浮力が加わる。そこでパッカーマテリアルが止水できる
必要で、この材料は水・ペントナイト・合成粘土・
分散剤・アルカリ剤・アルカリ金属塩・防腐剤を混合
し調合できる。

この低比重のペントナイトパッカーマテリアルは高粘性を
与える必要から、回転粘度計から求めた10分後のゲル値
が80lb/100ft²以上になることを目安とした。

8 ゲル圧・固化圧に関する2層構造のカラムテスト。
流体置換が発生しない2層構造のゲル圧の着想実験を
2mのプラスチック管(直径15cm)の内で行った。

下半部にパッカーマテリアルペントナイト水b、その上
に仕切りの合成樹脂板を入れた後 上部に重泥水Bを
充填した。直径15cm、長さ200cmの透明円筒状の容器
30cmおきに5ヶの圧力センサーで計測した。

1) 重泥水のゲル圧の予備測定では(図10と図11)
ゲル圧は大気圧で変動するが上半部の重泥水は沈澱
も固化もなく、深さに比例しゲル圧を維持可能で、
上半部の重泥水圧は500時間にわたり安定であり流
体置換は発生せず基本的に設計概念は実現可能と考えた。

2) 下半部のパッカーマテリアルペントナイト水bは時間
につれゲル圧が低下し次第に凝固圧(△)に変化した

つまり図3の設計概念は実現可能なことが判った。
今後、ゲル圧を自在に制御できる方法を研究したい。

表4 選択された重泥水の配合

配合比	L	1.80	2.00
セメント	w/t	9.0	4.5
SSMA	w	0.2	0.2
DENSICAL	w	0.05	0.05
硝石灰	w	0.06	0.08
STYRENE	v/o	0.05	0.05
PE-SE	w/t	132.9	183.3
出来上がり量	L	134.4	145.9
600	rpm	240	265
300	w	151	170
200	w	114	132
100	w	70	81
8	w	11	11.5
A V	(cp)	123	142.6
P V	(cp)	65	109
Y V	(lb/100ft ²)	60	67
G E L	w	5.7-1.5-22	9-19
A P I 水	(w/v 30ml)	7.6	7.8
P H		11.0	11.1

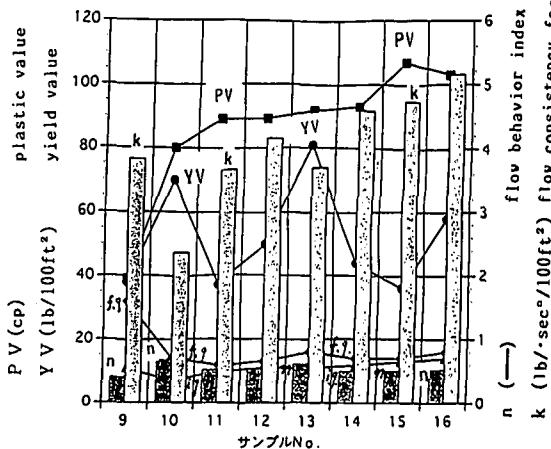


図9 重泥水の各種粘性特性の比較

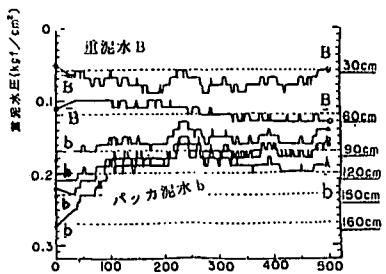


図10 重泥水(上部)とパッカ泥水(下部)
のゲル圧の経時変化(2mカラムで予備実験)

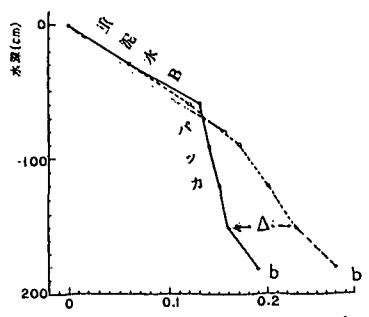


図11 重泥水とパッカ泥水のゲル圧の深さ方向の
変化(図10のゲル圧の経時変化)

9 重泥水とパッカーのゲル圧の9mカラムテスト

現地実験は大和市所在の利根地下技術（株）

敷地1隅で既存水没立坑（150m内径鋼管）で共和電業の円盤状土圧計と水圧計によって、東洋建設・住友建設と施工実験も兼ね共同研究した。

1) 重泥水 a 重泥水Bのゲル圧の等方性の実証：鉛直圧と水平圧を図12とで比較した結果流体の基本性質である等方性が確認できた。 b 重泥水のゲル圧の深さ方向分布：重泥水Bのゲル圧は6ヶ月間ほぼ安定で深さに比例する。ややゲル圧が長期に低下傾向にあるのは粘性が増加するためであり今後配合設計を精密化する研究を継続する。

2) 上が重泥水B、下が軽泥水bの2層構造ゲル圧の測定 a 両者の境界部は仕切り材にペントナイト粉を投入した後に、上半部に重泥水を充填した。

この場合、境界部の粉に下と上からそれぞれ吸水され低比重のペントナイトパッカ b側は高濃度化が顕著にゲル圧が低下した（図13の△）。今後は上部重泥水B側は下半部の粘性抵抗が十分に増加するのを待ってから上の重泥水を充填する方法がよい。

3) 結論として2層構造の長期のゲル圧は流体置換を発生せず提案した設計法は基本的に是認できる。

10 重泥水封方式の硬岩でのトンネル型CAESタンクもさきに提案²⁾したが実証実験に入りたい。

11 結び 1) CAES用立坑円筒は裏込に重泥水を充填し長期に安定な圧力容器にできる可能性がある。

2) 比重2の重泥水中の比重4.3のパライト微粒子はペントナイト水に密に混合され、微粒子間は電解質溶液の電気2重層とのイオン群と平衡し、結合水と非結合水に捕捉されゲル状の流体圧を発生している模様である。

3) 重泥水のゲル圧は十分長期に安定と実証されれば硬岩CAES・揚水発電・燃料貯蔵・軟弱地盤上の浮体構造物等にも利用可能になろう。今後、長期安定特性に関する電気化学的な微視的試験法も研究したい。

12 謝辞 この実験は産学の実証研究の成果であり、コロイド化学に関し、東京理科大北原文雄・筑波大古沢邦夫・東海大松田恵三の諸先生（化学）、電子顕微鏡撮影に関し東海大宮本泰男先生（金属）、カラムテストに関し東洋建設・住友建設・利根地下技術・共和電業の諸氏、重泥水の積年の実験に関し日大大学院久野・神野・大森、東海大大学院立木・嘉成・田村ら多くの学生諸氏に厚く感謝します。

13 参考文献

- 1) 林 正夫 “エーキューミドル兼用発電の圧気貯蔵－ガスタービン発電の実現性の予測” 土木学会論文集、412、III-12, 1989
- 2) 林 正夫 “都市の水質浄化と圧気電力貯蔵－ガスタービン発電の共用システム” 土と基礎、1993-12、PP 7-8
- 3) 林 正夫 “水質浄化と深夜電力貯蔵に共用の小型CAES構造、大深度地下利用の地盤シンポジウム、土質工学会、1993
- 4) 林 正夫 “7つの複合価値を秘めた水質浄化事業における圧縮空気貯蔵” 月刊下水道、17-9、1994-6特集号
- 5) 沖野文吉 “ボーリング用泥水” 技報堂、1981 6) 土質工学会“粘土の不思議” 1986
- 7) Darley George,H.C.H,R.Gray "Compositional Properties of Drilling and Completion Fluids, Gulf Publication company, 1988 8) Mitchel James,K."Fundamentals of Soil Behavior, University of California,Berkley,John Wiley and Sons,1993
- 9) 北原文雄・古沢邦夫 “分散・乳化系の化学” 工学図書、1991

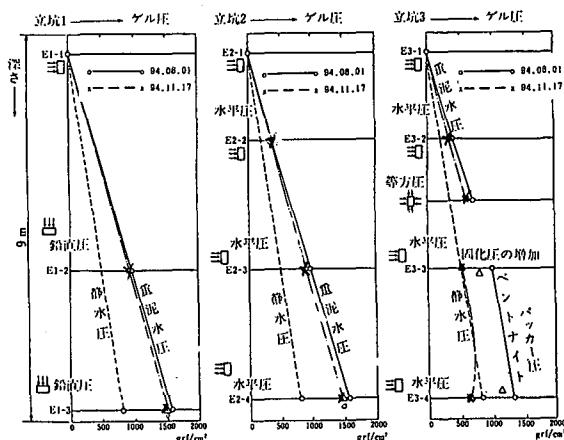


図12 9mカラムでの重泥水とベントナイトパッカーのゲル圧

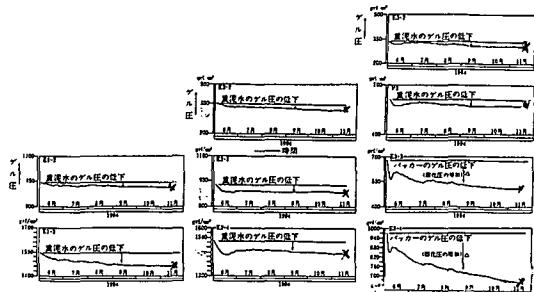


図13 重泥水とパッカ用ペントナイト泥水のゲル圧の低下
(固化圧の増加)