

注入材料としての粘性土の利用について

AN EXPERIMENTAL STUDY ON UTILIZATION
OF COHESIVE CLAY FOR GROUTS

岩田元恒*

By Mototsune Iwata

1. まえがき

深層砂礫層に止水グラウチングを施し、その砂礫層上にフィルダムを築造した例としては、Serreponcon, Mattmark 等数々ある。この場合、注入材料の一部として、ローカルクレーを使用しているが、これは粘土に含まれる粘土鉱物のチクソトロピーを利用したものである。

さて、深層砂礫層の深部にまで遮水壁をつくる技術が開発されたのは比較的新しいことで、それまで河床砂礫層が深過ぎるという理由で見捨てられてきたダムサイトも相当あり、わが国にもこのような例がある。最近は良好なダムサイトも次第に少なくなっているので、わが国にあるいわゆるローカルクレーが、はたして注入材料の一部として経済的に利用が可能であるか否かを検討することは意義あることと考えられる。

わが国のローカルクレーとしては、ローム質の粘性土が多く、それに含まれる粘土鉱物としては、加水ハロイサイトあるいはアロフェンといったものであるから活性がよい。したがって安定したグラウトを得るために一つの方法としては、ベントナイトの添加が考えられよう。

一方、このような粘性土を大量に使用するには、その「ときほぐし」が問題である。粘土の「ときほぐし」に超音波を利用して成功した例¹⁾が報告されているが、大量に現場で使用する場合を考えると、経済的に採算が合わない。ソイルセメントの分野では、粘性土の「ときほぐし」について、柳場・川村の研究²⁾がある。その方法は、もちろん「乾式ときほぐし」である。しかし、注入材料として使用する場合には、材料をミルク状にして取扱うため、乾式粉碎よりも湿式粉碎の方が便利で、設備の点からも経済的である。また乾式の場合には、粘土の自然含水比、湿式の場合には混合水の比率により、とき

ほぐし効果が変動するが、湿式粉碎では粘土の自然含水比に応じて混合水を加減し、全体として水比を一定に保つことが可能であるので、製品の管理面からも利点がある。

本文は、栃木県今市市郊外より採取した関東ロームについて、注入材料として利用する場合に、どのような配合が適当であるか、またその効率的な「ときほぐし」はいかにすべきか等に関する実験的考察を行なったものである。

実験の順序としては、まず粘性土の気乾試料を 4760 μ フルイであるい分け、この -4760 μ 試料にベントナイト、セメント、水を各種比率で加えミキシングして供試体を作成し、それについて透水試験、強度試験を行なった。さらに伏流水を考慮した場合の室内注入試験を実施し、注入材料としての物理的価値を確かめた。

次に、気乾およびふるい分けをしない自然試料の機械的湿式粉碎による「ときほぐし」を実施し、これと気乾して 4760 μ フルイであるい、高速ミキサにかけた場合の「ときほぐし」とを対比して前者の効果を実験的に明らかにした。「ときほぐし」機械としては、ドラムウォッシャー式モデル実験機を作成し実験を行なったものである。

2. 注入材料の配合について

(1) 配合理論

沖積層にグラウチングをして止水効果を期待する場合には、① 沖積層の空げきをあますところなく填充し得るようグラウトはブリージングを生じないものであること、② 無限に広い沖積層に対して、注入をある範囲で止めるため、グラウトは適当な時間でゲル化すること、③ 注入された時、河床の伏流水等で流失しないために、グラウトは注入直後でもある程度のせん断抵抗を保持す

* 正会員 東京電力(株) 工務部水路課長

ること。

グラウトは、以上のような条件を満足する必要がある。このため ①, ② に対しグラウトは、ゾルの状態における水量を内部に保持したまま、適当な時間経過後はそのままゲル化する必要があり、③ では、グラウトは当初よりある外力（すなわち降伏値）以下では、流動しないようなものでなければならぬ。すなわち①, ② に対しては、チキソトロピー性の流体（ゾル）であり、③ では降伏値をもつ非ニュートン流であればよい。これをレオロジーの面からいえば Burgers, Scott Blair (1949) のいう Thixotropic plastic fluid behavior を示す流体ということになる。

図-1 は、後述する配合材料で、

$$\frac{C}{L+B+C} = 30\%, \quad \frac{B}{L+B} = 30\%, \quad \frac{W}{L+B+C} = 2.5$$

(ここで L: ローム, B: ベントナイト, C: セメント, W: 水) の配合のグラウトを回転粘度計により測定したものである。

図で明らかなように、回転数と指度（トルク）の関係が上向きの湾曲線で、グラウトは明らかにチキソトロピー性塑性流体挙動を示しており、かつ降伏値は、時間とともに増加していく。このようにグラウトが明らかにチキソトロピーを示す原因是、粘土に含まれる粘土鉱物の影響である。粘土鉱物は、粘土粒子の $-2\text{ }\mu$ より含まれ始めるといわれ、水中においてわずかではあるが負に荷電する。これは、その結晶格子間の陽イオン（カチオン）の解離のためである。

この粘土鉱物のサスペンションの中に電解質が入って

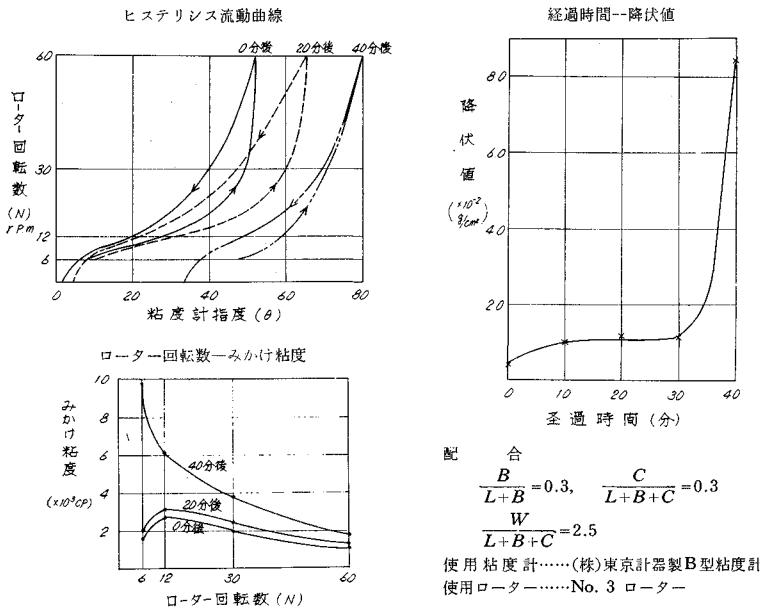


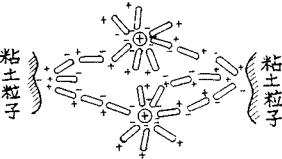
図-1 粘土・セメントグラウトの流動特性

くると、図-2 に示すような連鎖ができるといわれ、この結果サスペンションは、ゾルよりゲルに移行する。ゲルは、激しい振とうを加えると再びゾルとなるが、この現象がチキソトロピーである。

粘土鉱物がカチオンを解離する容量は、その種類によって異なり、単位重量当りのこのカチオン交換容量は、モンモリロナイト

(粘土ハンドブック (昭42) p. 128 より)

図-2 水分子と陽イオンとで橋渡しされた粘土粒子



で 0.6~1.0 mm 当量、ハロサイト類で 0.06~1.0 mm 当量と報告³⁾されている。そしてこの CEC が多ければ多いほど表面活性が大きく、コロイド的性質が著しくなる。したがって、グラウトとして使用する粘土の粘土鉱物の CEC の低い場合には、コロイド的性質を増す意味でモンモリロナイトを主成分とするベントナイトを添加することは、一つの方法である。

一方、セメントを水に投入した場合には、金属イオンとして K^+ , Na^+ および Ca^{++} が検出されることについては、すでに種々の報告があるが、CEC をもった粘土のサスペンションにセメントを投入すれば明らかにゲルとなる。この場合 K^+ , Na^+ は図-2 の \oplus の位置に付くと考えてもさしつかえないと思われるが、 Ca^{++} に関しては、そのすべてがこの位置に付くと判断することには、多少問題があろうかと思われる。

図-3 は、図-1 で示した配合試料を 28 日養生したものについて X 線回折をした結果である。図-3 では、

セメント水和物におけると同様、Alit (一般的には C_3S) は減少しているが、セメント水和物の X 線回折で 4.90 \AA 附近に見られる $Ca(OH)_2$ がこれには現われていない。これはソイルセメントの分野においても見られる現象である。したがって、ソイルセメントの場合と同様の見方をすれば、 Ca^{++} がすべて図-2 の \oplus の位置に付くと考えるのには多少無理があり、やはり一部は $Ca(OH)_2$ となって、粘土鉱物の層間に吸着されているものもあり、また reten-tion 反応をしているものもあると考えることができよう。

次に粘土鉱物より粒子の大きい一次鉱物は、グラウトに対しては物理化学的な意味を持たず、グラ

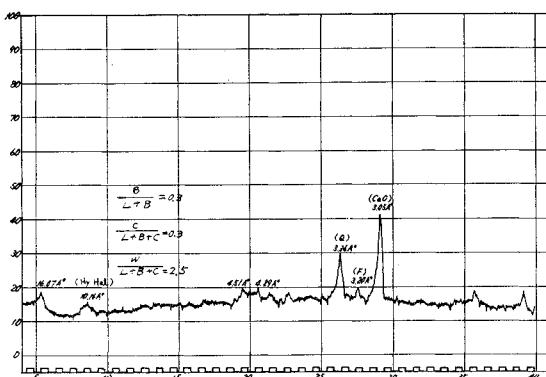


図-3 28日養生試料X線回折線

ウトの增量材としての経済的意味があるだけである。これらの粒子は、粒径および比重と、グラウトのその時点における降伏値との関連で、ある粒子は静止し、ある粒子は沈降を開始する。たとえば、粒子の比重を2.5とした場合、図-1のグラウトの初期の降伏値に対しては、概算0.1mmまでの粒子は、懸濁したまま静止しているものと考えられる。

次に混合ミキサの回転数であるが、図-1で明らかなように粘度計の回転速度の増加は、見掛けの粘性を減少させるために、ミキサの回転速度は早ければ早いほど、グラウトは注入しやすくなることがわかる。注入時の見掛けの粘性は、多過ぎれば注入は不可能となるが、Métrot(1951)は、プレパクトフローコーンで16秒以上は、注入が不可能であることを実証している。

配合順序としては、粘土+ベントナイト+水をミキシングし、その後でセメントを投入すべきである。なぜならば、水量を保持した状態でジルからゲルに移る場合は、電解質が図-2のように位置するためには、粘土鉱物を水分子で十分膨潤させた後に、電解質が入って行かなければならぬ。粘土+ベントナイト+セメント+水を同時に混合する場合には、粘土鉱物が水で膨潤する前に電解質とむすび付いてしまう結果、チキソトロピーが著しく弱められる。表-1は、混合方法の違いによる流動性の変化を立証した著者の実験⁴⁾である。なお、ベントナイトとNaClの混合方法の相違による分散液の粘性の違いについては、橋爪の報告⁵⁾がある。以上のように配合については、前述の順序に従って行なう必要があり、以下本文はこれにしたがって配合試

表-1 ミキシング方法とフロー値

セメント	ベントナイト	水	フロー値 (プレパクト)	ミキシング方法	備考
3	1	6	10.5	同時混入	140 rpm ミキナ
3	1	6	∞	別途混入	使

使用セメント：日本セメント製、グラウト用セメント(5000プレーン)
使用ベントナイト：豊順洋行製、穂高

験を行なったものである。

(2) 配合材料および配合方法、その他

ローム：粘性土としては、栃木県今市市付近の関東ロームを使用した。このX線回折は図-4で、基準粒度は図-5に示すごとくである。

日本列島には、関東ローム層と同様な火山灰層が日本各地に広く分布しているが、これら的一次鉱物としては、石英、シソ輝石、普通輝石、角閃石、火山ガラス、カンラン石、磁鉄鉱等であり、また粘土鉱物としては、アロフェン、加水ハロイサイト等である。そして火山灰の降下年代の新しいものは、アロフェンに富み、古いものはハロイサイトに変化しているといわれる。実験に用いた今市ロームは、一次鉱物としては、石英、磁鉄鉱、角閃石が認められ、粘土鉱物としては、X線回折では加水ハロイサイトが、また電子顕微鏡では一部アロフェンが認められた。

実験では、このロームを気乾し4760μフルイの通過

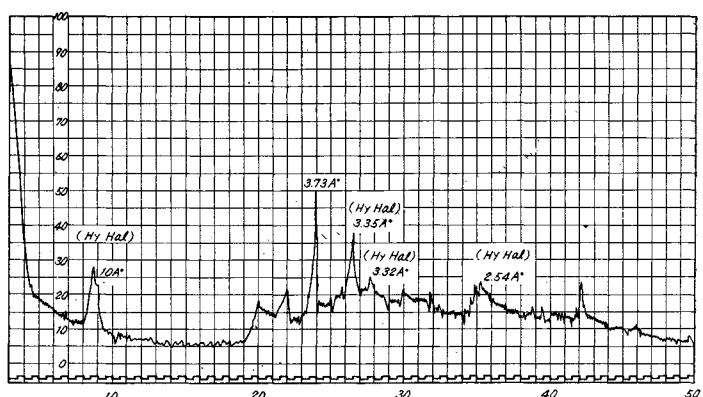


図-4 使用関東ロームのX線回折線

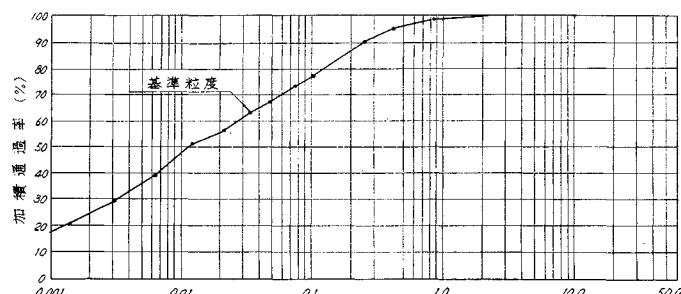


図-5 使用ロームの基準粒度

分に対して行なった。なお、実験に先立って乾燥比重を測定し、実験におけるロームの重量は、この乾燥重量をもととしたものである。

ペントナイト：国峰社化、クニゲルVI(250#)を使用した。これはモンモリロナイトを主成分として、その他石英、長石類を含んでいる。

セメント：小野田普通ポルトランドセメントを使用した。

その他：2.(1)の理論にしたがいミキサは、なるべく高速回転のものとし、1000 rpm のものを使用した。配合順序は、粘土+ペントナイト+水でミキシングし、次にセメントを投入ミキシングすることとした。この場合はおのののミキシングタイムは3分とした。またブリージングの測定には、1000 cc メスシリンドーを使用した。

(3) 配合試験 I (水比を一定とした場合のブリージング特性)

図-6は、水比 ($W/L+B+C$) を一定(ここでは4)とし、セメント比 ($C/L+B+C$) およびペントナイト比 ($B/L+B$) の変化に対するブリージングを示したものである。

これによると、ペントナイトで置換する量が増加するにしたがい、同一セメント比に対してはブリージングは減少する。また、セメント比が減少すればブリージングは減少する傾向であるが、ペントナイト比30%の場合には、セメント比の50%および30%に対するブリージングの減少は、他のペントナイト比のものに比べてわずかで、これ以上セメント比を減少してみても、ブリージングを減少することがむずかしいことを示している。すなわち、水量が多くて、図-2のように水量をすべて内部に保持することができない状態となっている。

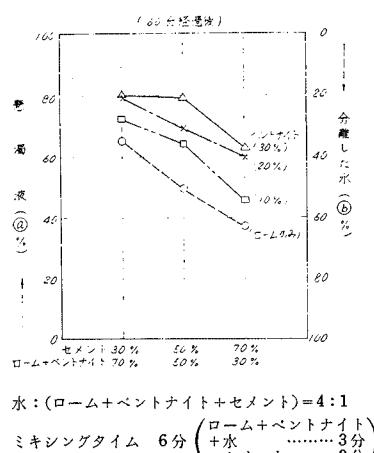


図-6 注入材料の配合比とブリージングの関係

(4) 配合試験 II (セメント比を一定、水比を変えた場合のフロー値およびブリージング特性)

(3)の試験より、セメント比 ($C/L+B+C$) を30%とし、水比 ($W/L+B+C$) を種々に変えて、水量がフロー値とブリージングに与える影響を試験したのが図-7、図-8である。図-8では、2.(3)で述べたように、水比の減少に対しブリージングが減少することがわかるが、図-7のプレバクトフロー値では、2以下の水比に対しては、フロー値の変動が激しく、ペントナイト比30%の場合には、2.(1)で述べたプレバクトフロー値での注入限界の16秒を超える部分が出てくる。図-7、図-8では、水比は2~2.5、ペントナイト比は20~30%が適当であるように考えられる。

(5) 透水ならびに一軸圧縮強度試験

配合は表-2に示す6種類とした。前述の配合試験ではペントナイト比 ($B/L+B$)、セメント比 ($C/L+B+C$)、水比 ($W/L+B+C$)について行なったが、実際の

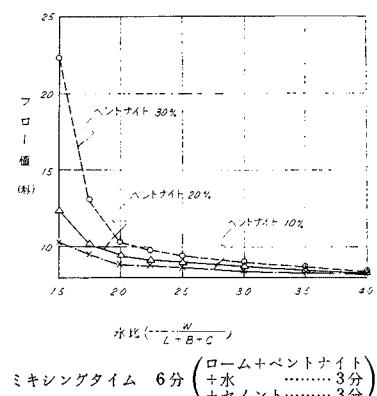


図-7 水比とフロー値の関係 (セメント比 30%)

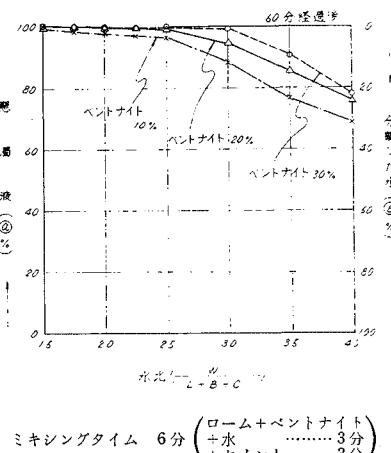


図-8 水比とブリージングの関係 (セメント比 30%)

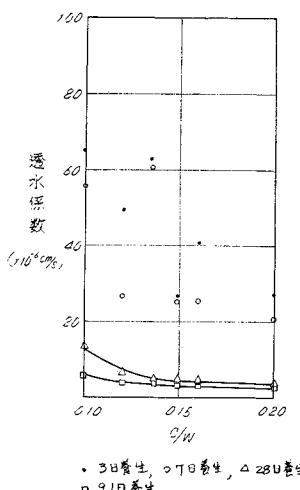
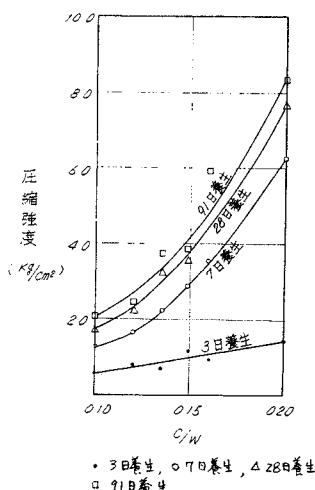
表-2 配合表

No.	ローム+ペントナイト (L+B) (C) (W)	セメント ・水比 (C/W)	ペントナイト比 $\left(\frac{B}{L+B}\right)$	セメント比 $\left(\frac{C}{L+B+C}\right)$	水比 $\left(\frac{W}{L+B+C}\right)$
1	1 : 0.3 : 2	0.15	0.1	0.23	1.54
2	1 : 0.3 : 2.5	0.12	0.2	0.23	1.92
3	1 : 0.3 : 3	0.1	0.3	0.23	2.31
4	1 : 0.4 : 2	0.2	0.1	0.29	1.43
5	1 : 0.4 : 2.5	0.16	0.2	0.29	1.79
6	1 : 0.4 : 3	0.13	0.3	0.29	2.14

場合は $(L+B) : C : W$ の表示が一般には便利であるので、この比率を基準として上記ペントナイト、セメント、水の各比を算出した。

供試体は上記配合でミキシングした試料を、直径 7.5 cm、高さ 15 cm のモールドに 2 層に分けて流し込み、モールドの外面を各層ごと 100 回程度木槌でたたいてセットし、48 時間後にキャッピングを行ない水中養生した。養生日数は 3 日、7 日、28 日、91 日とし、これに対し透水試験および強度試験を実施したのが表-3、表-4 である。なお、表-3、4 の数値を C/W で整理したものが、図-9、10 である。図-10 では、 C/W の増加に伴い圧縮強度は増加し、7 日養生以上で、この傾向は顕著である。また図-9 で、透水係数も C/W の増加に伴い減少の傾向が見られ、91 日養生のものは、すべて 10^{-6} のオーダーを示している。

さて沖積層にフィルダムを造る場合に、基礎の bearing power は、砂礫の骨組構造に依存し、グラウトへの期待は止水効果のみである。したがって、その強度は特に大きいものを要求されない。むしろグラウトの圧縮強度が大きく、したがって、その弾性係数が砂礫層の弾性係数と違いがありすぎることは、一部コアーのみその上にのる、ゾーン型フィルダムのような場合を考えると、

図-9 C/W と透水係数の関係図-10 C/W と一軸圧縮強度の関係表-3 透水係数 ($\times 10^{-6} \text{ cm/s}$)

配合 No.	3 日	7 日	28 日	91 日
1	26.5	25.3	4.94	2.69
2	49.3	26.9	6.61	3.85
3	65.0	55.4	13.8	5.81
4	26.8	20.6	3.32	3.09
5	40.8	25.8	4.52	3.75
6	63.3	60.6	4.96	3.87

表-4 一軸圧縮強度 (kg/cm^2)

配合 No.	3 日	7 日	28 日	91 日
1	1.13	2.90	3.59	3.85
2	0.73	1.68	2.26	2.46
3	0.55	1.28	1.77	2.02
4	1.42	6.29	7.64	8.31
5	0.98	3.55	5.17	5.92
6	0.75	2.23	3.22	3.73

構造的に好ましいことではない。河床砂礫の弾性波速度 (V_P) は、大体 $1.0 \sim 2.5 \text{ km/s}$ の範囲であるが、2. (4) で述べた適良配合の範囲に入る。

$$\frac{W}{L+B+C} = 2.5, \quad \frac{B}{L+B} = 0.3, \quad \frac{C}{L+B+C} = 0.3$$

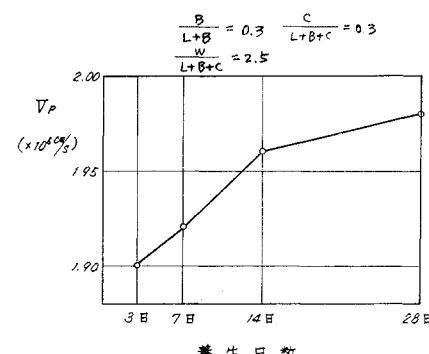
のグラウトで、養生日数ごとの弾性波速度 (V_P) 測定結果は、図-11 で河床砂礫にほぼ一致している。

(6) 室内注入試験

室内注入試験は、河床砂礫に伏流水がある場合、前記の配合試料で行なう注入が、止水グラウトとしての効果を発揮するか否かを見るために行なわれた。使用グラウトの配合は、(5) に示した No. 6 配合である。

a) 実験水槽

図-12 に示すように、水槽 ($90 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$) の中を 2 列の平鋼 ($9 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) の格子 (c.t.c. 47.5 mm) で仕切り、この平鋼の格子の内側にステンレス金網 (1 mm メッシュ) およびパンチングメタルを張り $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ のモールドをつくり、モールドの中央に注入装置を設

図-11 供試体の養生日数と V_P の関係

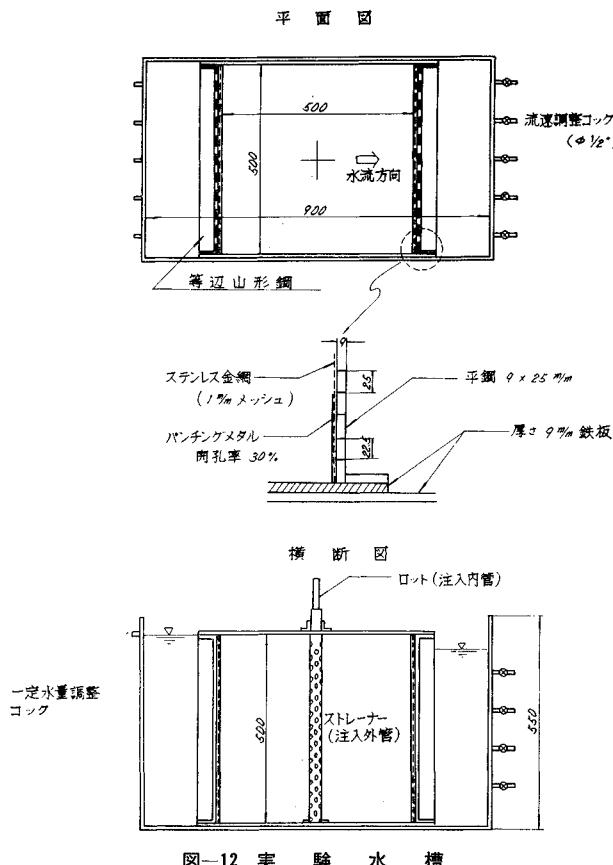
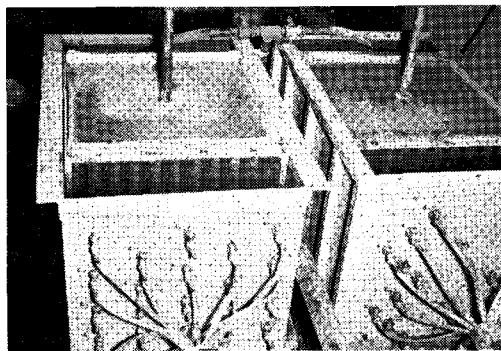


図-12 実験水槽



砂礫をモールドに投入し、上部にパラフィンを流し込んだ所

写真-1 実験水槽

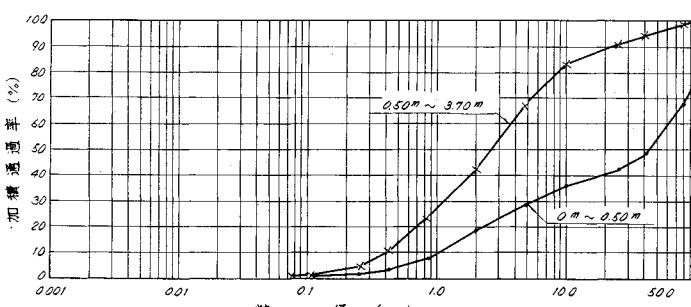


図-13 採取地点砂礫の粒度分布

置した。モールドの中には、あらかじめ調整した砂礫を填充した。

b) 填充砂礫

填充砂礫は、栃木県鬼怒川の中岩ダム上流の砂洲より採取した。砂礫採取地において、径 85 mm のボーリングおよびツボ掘りを行ない粒度試験を行なった結果は、図-13 のごとくである。

試験結果では、地表より 50 cm までの層は、その 60% が粒径 20 mm 以上のもので、最大粒径は 200 mm であり、模型地盤をつくる上から砂礫の均質な填充がきわめて困難で、かつ層も薄いので、0.5 m ~ 3.7 m までの層の粒度分布を注入対象の砂礫層とした。この単位体積重量は、 1688 kg/m^3 である。填充にあっては、モールド内でこのような単位体積重量が再現できるように砂礫材料より 212.5 kg をとり、これを 2 層に分けてモールドに投入し、それぞれの層に対し突固めを行ない、最後に水締めをして容器内にセットした。なお、上蓋と試料の間の空げきをなくし、なじみを良くするために試料の上部には、厚さ 1 cm 程度のパラフィンを流し込み上蓋を閉じた。

c) 注入ならびに流速調整の方法

注入装置の注入管は、図-14 のような二重管式ストレーナーを用いた。注入方法は、内管だけ少しづつ上げながらグラウトを手押しポンプで注入した。

流速の調整は、モールド内(図-15 B)に砂礫材料を填充した後、A室に一定量の給水を行ない、C室からの排水量をコックにより調整し、A室～C室の動水勾配を一定に保つようにした。

d) 試験経過

試験は、7日および3日養生の2種類について行なった。いま、7日養生のものについて述べると、まず A、C 室の水頭差を 0.6 cm に保つ。この場合、注入前における流量は 26 cc/s で、試料内の流速は $1.04 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。ダルシーの法則を適用すると、モールド内の透水係数は $8.67 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ となる。

注入は、No. 6 溶液を用い、圧力を 0.8 kg/cm^2 として注入を開始し、15 分

後下流左側上部よりグラウト液がもれだした。注入を終了したのは、さらに2分後である。このような状態で7日間の養生を行なった。3日養生のものについても同様な方法で行なったが、これを対比すると表-5になる。

e) 透水試験

7日および3日養生をした試料について注入効果を見るために、図-16のような装置で透水試験を行なった。この場合、注入試験用ストレーナーは、養生期間を経過

してから抜きとり、新たに透水試験用ストレーナーをそう入した。

透水係数の算出⁶⁾結果は、表-6のとおりである。すなわち、 10^{-1} オーダーの透水係数が3日目では 10^{-3} に、7日目には 10^{-4} に変わっている。

f) 固結状況

固結状況は、写真-2、写真-3のとおりであり、固結範囲は、表-7のごとくである。

表-5 模型地盤の状態および注入結果

	7日養生	3日養生
流量 (cc/s)	26.0	24.0
流速 ($\times 10^{-3} \text{cm/s}$)	10.4	9.88
水頭差 (cm)	0.6	1.4
模型地盤の透水係数 ($\times 10^{-1} \text{cm/s}$)	8.67	3.43
注入量 (cc)	22,500	19,000
注入圧力 (kg/cm ²)	0.8	1.7
注入時間 (分)	17	21

表-6 透水係数

養生日数	測定ガラス管の読み (cm)	時間 (sec)	H (cm)	Q (cc/s)	K (cm/s)
7日	5~10	133.5	148	4.06	3.88×10^{-4}
	10~15	140.5	143	3.86	3.81×10^{-4}
	15~20	150.4	138	3.61	3.70×10^{-4}
	20~25	166.6	135	3.26	3.46×10^{-4}
	25~30	195.0	128	2.78	3.07×10^{-4}
3日	10~20	96.5	138	11.24	1.15×10^{-3}
	20~30	104.8	128	10.35	1.14×10^{-3}
	30~40	116.7	118	9.30	1.11×10^{-3}
	40~50	133.5	108	8.13	1.06×10^{-3}
	50~60	159.5	98	6.80	9.81×10^{-3}

表-7 固結範囲

	7日養生	3日養生
固結周囲長	上部 C_1	144 cm
	中部 C_2	148 cm
	下部 C_3	127 cm
平均	$\frac{C_1 + 2C_2 + C_3}{4}$	141.8 cm
直 径 换 算		45.16 cm
断 面 積 積		1 600.95 cm ²
固結土体積		80 047.5 cm ³
全 体 積 積		125 000 cm ³

図-14 注入管

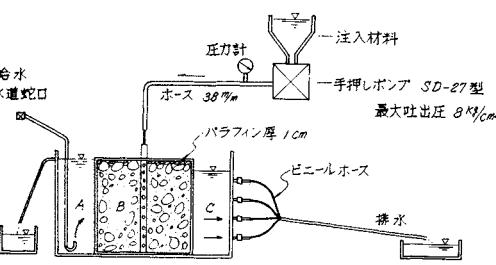


図-15 注入装置

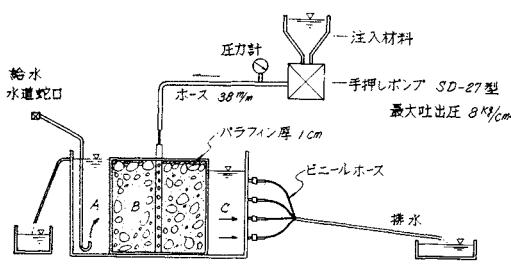
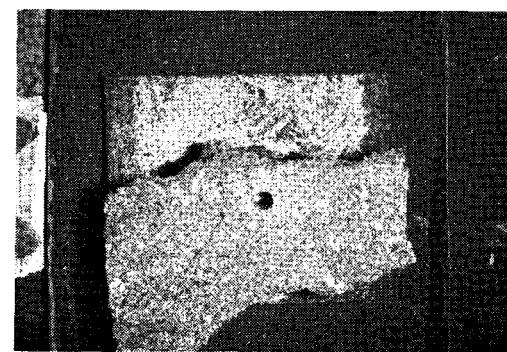


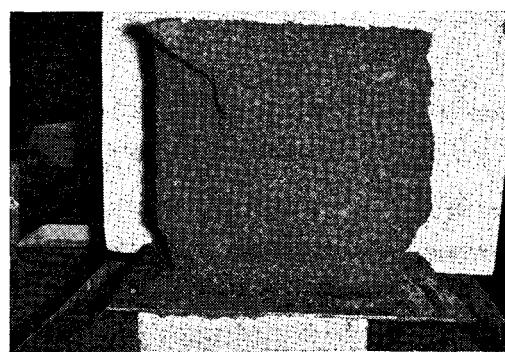
図-16 透水試験装置



水流 → 上から見た所

(その 1)

写真-2 固結状況 (7日養生)



(その 2)

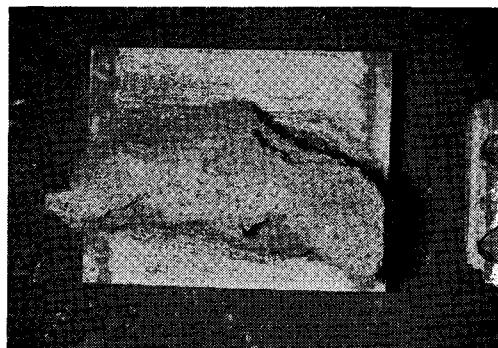
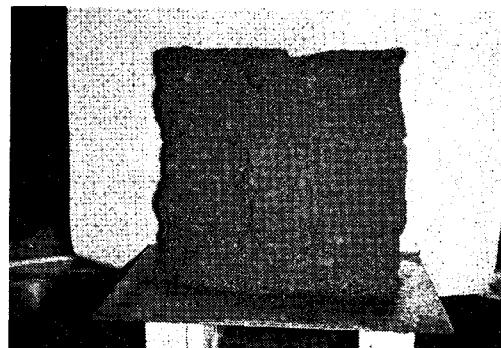


写真-3 固結状況(3日養生)



写真でわかるように、上下流方向にはグラウト溶液が行きわたっているが、これと直角な側面では、中央約1/3を残し溶液は流失してしまっている。

模型地盤の透水係数は、平均 10^{-1} であるが、両側部は砂礫が直接鉄板と接触しているため、この部分の透水係数は、局部的に高く流速が早くなっている点と、また注入圧力に制限があったためと考えられ、とにかく、2.(1)で述べたようにグラウトの降伏値以上の外力(図-1によると $f_y \approx 0.01 \text{ g/cm}^2$)が、この部分に作用したものと考えられる。

写真で、3日養生のもののが7日養生のものに比しグラウト効果が悪いと思われる原因是、養生日数の不足から強度が不足し、試料を取り出す際にくずれたものである。また実験でつけた水頭差は、7日養生のもので0.6cm、3日養生のもので1.4cmであったが、これは地下水水面勾配1.2/100および2.8/100ということで、実際の河床水面勾配から見れば、安全側である。

3. 機械的ときほぐし試験

(1) 試験装置

粘性土「ときほぐし」装置として、図-17、写真-4のごときドラムウォッシャー式のモデル実験機を作製した。この粉碎機は、ドラムウォッシャー内にローム、水、鋼球を投入し、ドラムを回転させ、ローム、水、鋼球の落下する衝撃により粉碎するメカニズムである。

(2) 粉碎試験

試験方法は、採取した関東ロームをふるい分けせずにそのまま用い、水比(W/L)2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5に対し、それぞれ回転数を40, 50, 60, 70 rpmおよび回転時間を1, 2, 3分として試験を行なった。

粉碎効果をチェックするため、粉碎されたロームにつ

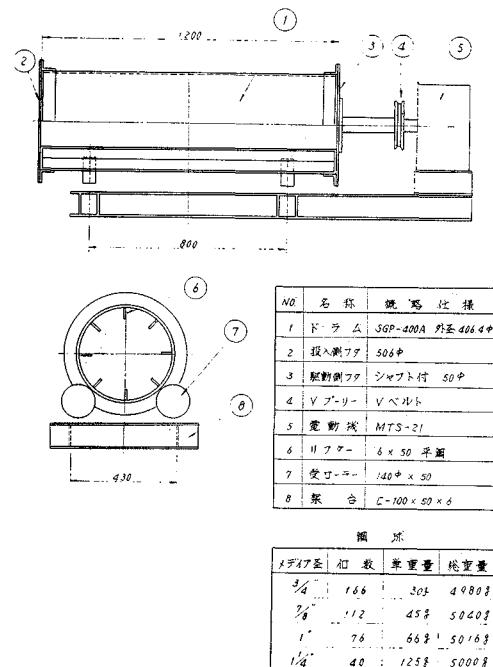


図-17 ときほぐし実験機

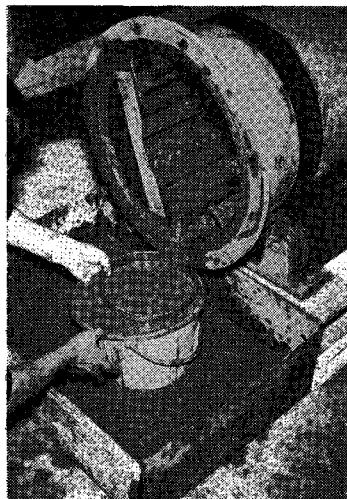
いて4760μ, 840μ各フルイの残留率を測定した。表-8は、この結果をまとめたものである。

a) 粉碎時間の粉碎効果に与える影響

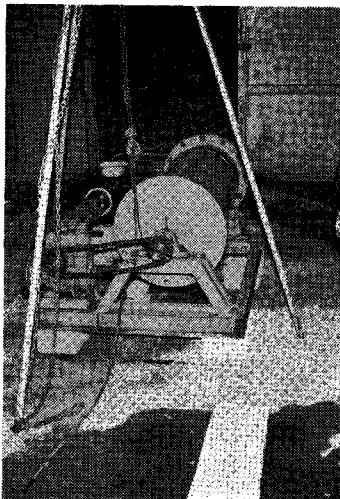
表-8より粉碎時間と残留率(+4760μ)を取り出し、その相関関係を表わしたもののが図-18である。図-18によると粉碎時間が短いほど、残留率およびそのバラツキの範囲が大きくなっている。

b) 粉碎回転数の粉碎効果に与える影響

回転数についても同様に表-8からプロットすると、図-19の粉碎回転数と残留率の相関関係が示される。図-19によると60 rpmで残留率は最も少なく、バラツキの範囲も比較的小さい。これに対し、さらに回転数の多い70 rpmの場合には、残留率が多くなりバラツキ



(その1)



(その2)

写真-4 ときほぐし実験機

表-8 残留率 (+4760 μ, +840 μ)

水比	回転時間(min)	4760 μ フルイ残留率(%)				840 μ フルイ残留率(%)			
		40 rpm	50 rpm	60 rpm	70 rpm	40 rpm	50 rpm	60 rpm	70 rpm
2 20000 g	1 10000 g	12.0	16.0	12.2	18.0	29.1	40.5	32.8	29.8
	2	5.8	9.8	5.0	4.6	24.4	24.2	21.4	15.0
	3	2.4	5.4	3.1	2.6	22.5	19.1	15.1	13.5
2.5 21429 g	1	8.4	10.0	8.5	14.7	23.6	31.5	28.5	35.8
	2	4.3	5.5	3.9	4.4	21.3	13.5	18.5	17.3
	3	1.9	2.5	2.5	1.9	14.3	11.6	12.9	10.0
3 22500 g	1	7.0	9.8	4.8	4.7	12.1	25.8	12.3	15.7
	2	2.0	3.1	2.4	2.9	12.0	9.8	11.8	11.6
	3	1.2	1.8	1.9	1.8	7.1	7.1	9.5	7.3
3.5 23333 g	1	9.4	9.2	4.7	4.5	12.1	19.6	10.4	17.7
	2	3.7	2.9	2.3	2.1	9.1	7.5	10.1	6.1
	3	3.0	0.6	1.4	1.4	8.0	6.9	7.3	3.2
4 24000 g	1	9.2	4.9	4.3	6.3	20.1	13.9	18.7	18.1
	2	5.1	3.8	3.1	2.4	17.7	10.2	12.8	14.3
	3	3.0	1.4	2.1	1.9	13.8	6.1	6.7	9.8
4.5 24545 g	1	11.3	8.1	7.4	8.5	26.2	20.7	15.7	15.8
	2	4.6	4.2	2.8	3.3	14.1	18.9	9.5	12.3
	3	2.6	2.4	2.3	2.1	8.0	14.8	8.5	8.2

の範囲も大きくなる。

c) 水比の粉碎効果に与える影響

水比と残留率に関して、回転時間ごとに表-8 からプロットすると、図-20 のごとくなる。この図より大体の傾向とし、水比が 3~4 の間が粉碎効果がよいようである。

(3) 粉碎試験とミキシング試験との比較

前記試験より、粉碎回転数 60 rpm が粉碎効果としては最も良い機械的条件と認められるので、粉碎時間を 3 分として各水比に対しこの条件で粉碎試験を行なった。この結果が表-9 である。なお、前記 2. の配合試験

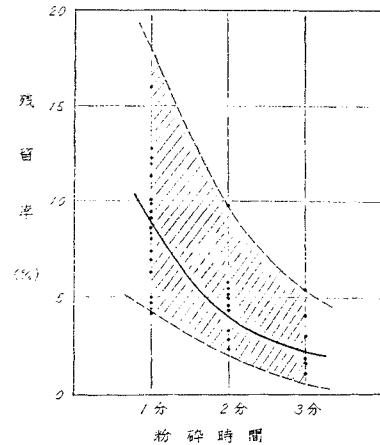


図-18 粉碎時間と残留率 (+4760 μ) の関係

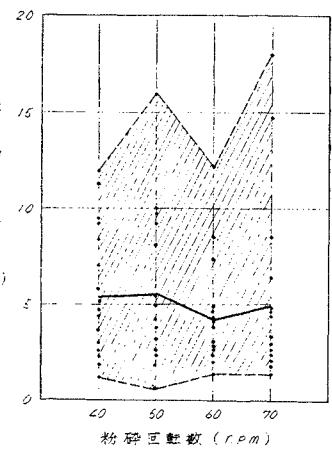


図-19 粉碎回転数と残留率 (+4760 μ) の関係

は、-4760 μ のロームをペントナイトで一部置換して水に投入し、3 分間のミキシングを行なったものを対象としたが、高速ミキサによる「ときほぐし」の効果を、この粉碎試験による効果と対比させるために、新たに水と -4760 μ のロームを配合比で 2:1~4.5:1 まで変化させて 3 分間ミキシングし、この粒度試験を行なった。表-10 はこの結果である。これを DN 値 (Disintegration Number) で比較した。

$$DN = \frac{\Sigma (\text{加積残留率})}{100}$$

表-9 および表-10 より DN は、表-11 のごとくなり、これを図示すると図-21 となる。

図-21 より、水比 (W/L) が 2.5~4.5 内であれば、この粉碎試験による「ときほぐし」効果は、2. (3) のミキシングの場合を上まわり、かつ、水比が 3.5~4 の間が最も粉碎効果の良いことを示している。

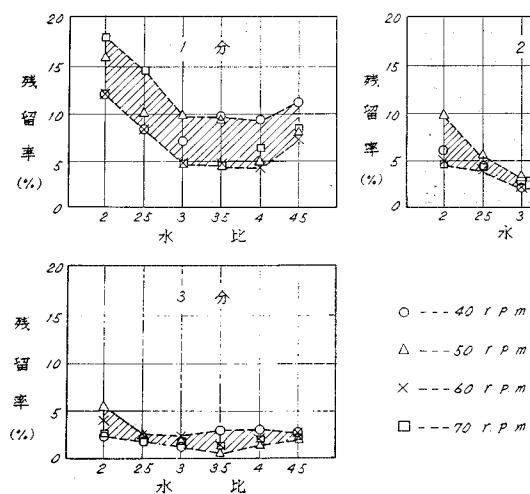


図-20 水比と残留率の関係

表-9 粉碎試験結果

水比	2:1	2.5:1	3:1	3.5:1	4:1	4.5:1	基準粒度
フロー値	9.47	8.85	8.66	8.53	8.39	8.26	
粒加速度試験通過率%	4760 μ	97.2	97.9	98.3	98.7	98.1	98.0
	2000 μ	93.8	95.3	96.1	97.6	96.8	96.6
	840 μ	85.5	87.1	89.3	93.1	92.9	92.0
	420 μ	78.1	80.0	81.8	86.4	86.5	85.1
	250 μ	69.0	71.1	72.7	76.9	77.6	75.8
	105 μ	56.8	57.2	58.8	62.4	62.2	61.2
	74 μ	52.9	53.1	54.4	56.7	57.1	56.2
							73.4

表-10 ミキシング試験結果(混合時間3分)

水比	2:1	2.5:1	3:1	3.5:1	4:1	4.5:1	ミキシング前の資料
フロー値	9.98	9.08	8.72	8.57	8.45	8.35	
粒加速度試験通過率%	2000 μ	91.3	93.1	93.4	94.8	95.2	95.4
	840 μ	80.3	82.2	82.6	85.4	86.2	86.6
	420 μ	75.8	77.2	78.0	81.1	81.9	82.3
	250 μ	70.0	71.4	72.2	75.6	76.9	77.2
	105 μ	59.0	60.0	60.7	63.7	64.5	64.7
	74 μ	55.8	56.2	57.0	59.9	60.7	60.9
							21.3

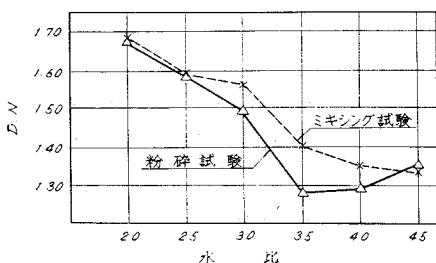


図-21 水比とDN値の関係

さて、2.(5)に示した6種の配合のうち、2.(4)で示した良好な配合範囲、すなわち、 $B/L+B$ が20~30%、 $C/L+B+C$ が30%以下、 $W/L+B+C$ が2.0~2.5に入る試料は、No. 3とNo. 6である。

表-11 D N 値

水比	D N		基準粒度
	粉碎試験	ミキシング試験	
2:1	1.67	1.68	
2.5:1	1.58	1.59	
3:1	1.49	1.56	
3.5:1	1.28	1.40	
4:1	1.29	1.35	
4.5:1	1.35	1.35	

この場合、二つの試料とも W/L は4.3弱である。今、この湿式粉碎によって「ときほぐし」を行なった粘土を用いて、No. 3またはNo. 6配合のグラウトをつくる場合には、効率の良い W/L が3.5付近でときほぐし、それからこれに不足水量とベントナイトを混入し3分間、さらにセメントを加えて3分間、計6分間のミキシングを行なえば良いわけである。なお、2.(5)の6種の配合のグラウトは、気乾試料を4760 μフルイでふるい分け、これに直接ベントナイトと水を混入してミキシングしたものであるから、2.(3)で行なった粘土(-4760 μ)と水だけをミキシングする手数を省いている。しかしながら、このように粘土と水のみを混合しての「ときほぐし」を省略した方法を用いても、2.(6)e)で述べたように、グラウトとしての物理的効果が十分あるので、高速ミキサによる場合と比べ、より効果のある湿式機械的粉碎方法で3分以上の時間をかけて粘土をあらかじめときほぐしてから混合したグラウトは、さらに高い価値を発揮することは明らかである。

4. む す び

わが国では、河川の仮締切工事の際、ベントナイトとセメントの混合液を用いて、河床砂礫の止水グラウチングを行なった工事報告は、しばしば見受けるが、粘土セメントグラウチングの実施の例はあまり聞かない。これは、手数をかけず簡単に使用できるようなチクソトロピック粘土が、適当に分布していないという地質的な特性に起因しているものと思われる。しかしながら、沖積層をグラウト処理して、その上にダムを築造する場合のように、大量に注入材料を使用する時には、注入材料の一部としてローカルクレーを使用することは、経済的な意味からぜひ必要であろう。

本文は、工事上種々な面から問題が多く、しかも広く分布している関東ロームのうち今市ロームを取り上げ、これが注入材料として使用の可能性を論じたものである。

実験結果では、このロームにベントナイト、セメント、水を適正な比率で混合すれば、十分安定したグラウトをつくることが可能であり、かつ、その物理的性質も満足すべき結果を与えている。また、問題となるこのような粘性土の経済的「ときほぐし」に関しては一つの方法を示したものである。

さて、この今市ロームを使用したグラウトの配合比が、他の関東ロームにも適用できるか否かの問題であるが、粘土セメントグラウトで、物理化学的に重要な役割を果たす粘土に含まれる粘土鉱物に関しては、本文 2.(2) で述べたようにロームでは、アロフェンまたは加水分離イサイトで、その CEC は、2.(1) で述べたごとく単位重量当り 0.06~0.1、一方モンモリロナイトは 0.6~1.0 ミリ当量である。また、実験に使用したベントナイト(クニゲル VI) は、モンモリロナイト成分が 60~70% である。

いま、ロームの $-2\text{ }\mu$ がすべて粘土鉱物であると仮定すると、この実験で行なったようにクニゲル VI を 10% 幅でロームと置換することは、CEC で言えば、ロームの $+2\text{ }\mu$ を $-2\text{ }\mu$ で 36% 以上の幅で置換した結果と

等しくなる。したがってこの実験でベントナイトの適当な置換量を 20~30% としたことは、CEC を大幅に変え、表面活性を粘土に与えることになるので、今市ローム以外のロームに対しても、このグラウトの配合は基準となるものと考えられる。

おわりに、この研究にあたって東京電力(株)常務取締役 水越達雄博士より種々貴重なご示唆をいただいたこと、また実験に際しては、東京電力(株)今藤健征君および日本特殊土木羽賀照郎君の絶大な協力を得たことに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) H・カンプフォール(斎藤・福住共訳):“地盤注入”, pp. 274~276, 鹿島出版会, 昭 44.
- 2) 梶原重正・川村満紀:“ソイルセメントの原材料としての粘性土のときほぐしについて”, 土木学会論文集, 第 155 号, 1968, 7.
- 3) 須藤俊男:“粘土鉱物”, p. 147, 岩波全書, 1968, 4.
- 4) 岩田元恒:“深層砂砾層へのグラウト注入材としての粘土”, 発電水力, No. 97, 1968, 11.
- 5) 橋爪一生:“ベントナイト誌 No. 5”, p. 23, 京大農編.
- 6) 矢作文弥:“現場透水試験”, p. 10, 電力中央研究所技術研究所業務資料土木 60009, 昭 36.

(1971.4.15・受付)