

(1) グラウトスラリーの高分散化／高浸透性のための 角砕砕と分散剤添加の方法

日本基礎技術㈱	○寺戸 康隆
西松建設技術研究所	松井 健一
	原田 耕司
電気化学工業㈱	小菅 啓一

Method of making Colloidal grout slurries with high dispersibility and permeability
by means of circulation mixing & grinding accompanied with addition of dispersing agents

Yasutaka TERADO,	Japan Foundation Engineering Co., Ltd.
Kenichi MATSUI,	Nishimatsu Construction Co., Ltd.
Koji HARADA	Nishimatsu Construction Co., Ltd.
Keiichi KOSUGE,	Denki Kagaku Kogyo Kabushiki Kaisha

Abstract

Today, there is a constant need for high grade permeable suspension grouts with long term durability which can be applied for soil injection and rock foundation grouting, in case of construction of the deep underground space, water front region etc.. High permeability of the grouts through pores of the foundation actually means high dispersibility of the grout slurry.

Both physical or mechanical dispersion method i.e. means of using mixers and chemical dispersion method i.e. means of adding dispersing agents are very important to make the grout slurries to highly dispersed ones. Usually the Colcrete high speed mixers operating at 1500 to 2000 r.p.m. are used for high dispersion of cement grouts. But, high dispersion by this method is insufficient against such suspension slurries as clay, slaked lime, silica fume and other micro materials which have lots of micro grains with submicron size. Such slurries made up by that method cannot permeate through voids of the particles of the soil, for aggregation forces among submicron grains of the grout materials become very strong and abundant aggregation grains with far more large grain size than initial ones are built. The most adequate dispersion method of the above mentioned slurries including submicron grains is to use grinding device or mill together with steel or ceramic balls, accompanied with adding dispersing agents mainly due to decreasing the viscosity of the dispersed slurries.

Authors have been studied mixing and grinding methods in the process of development of a new high grade permeable suspension grout which is composed of silica fume and slaked lime, and succeeded in a very permeable non-cement suspension grout with long term which is called "SILICA LIME". According to the experiments, it appeared that permeability depended on groutability ratio regarding the size of formation particles and the grout grains (not initial grains but slurry aggregation grains).

1. まえがき

今日、ジオフロント、ウォーターフロント等の開発のために地盤・岩盤注入におけるグラウト材に長期耐

久性の高浸透性懸濁型グラウトが希求されている。高浸透性はグラウトスラリーの高分散化と相通じる。

従来、グラウトスラリーの分散化のための混合攪拌方法は物理的・機械的分散方法としてミキサーが、化学的分散方法として分散剤の添加が併用された。ミキサーは攪拌効率向上のため従来型の低・中速（150～600rpm）のパドルミキサーから最近の中央プラント内蔵の渦流・せん断力型高速のコロイダルミキサー（1500rpm以上）までが使用され、分散剤は一部で高性能分散剤が使用されている。

しかし、1 μ m未満のサブミクロン大の微粒子材料およびこれを含む材料を混合攪拌する場合、比表面積が著しく大きいこと等による粒子間の強い凝集力の発生により、スラリー中に粗大な凝集粒子（粒径は20～50 μ mオーダー）が形成され、これが土粒子間や亀裂空隙への浸透を阻害するため微粒子材の一次粒子径のグラウトビリティ比から想定される浸透性は確保されない結果となる。この場合、たとえコロイダルミキサーで混合攪拌してもこの粗大な凝集粒子をもとの微粒の粒子径オーダーまで分散（すなわち解砕）することは難しい。もちろん、分散剤による化学的分散だけでは凝集力に抗すすべもない。そのため、浸透性に優れた超微粒子セメントは工場での分級過程で1 μ m未満の粒子はカットされており、これによって通常のパドルミキサーによる混合攪拌でも容易にスラリーの粒度分布は1～10 μ m間におさまリ、高浸透性がもたらされている。この際の粒度調整が普通セメントの10倍に近い材料コストをもたらしている。

一方、従来のセメントグラウトの注入プロセスの中に湿式細粒化装置を組み込むことにより、普通セメントグラウト（配合：W/C=1～2.28, 5～90 μ m, 平均粒径20 μ m）を0.5～15 μ m（平均粒径2～3 μ m）オーダーの微粒で懸濁性の良いスラリーを製造し、軟岩の微小亀裂や砂礫層中の細砂層に注入してルジオン値を5Lu以下限界圧力を0.5kgf/cm²以上まで改良したダムの基礎処理例がある^{1)・2)・3)}。これらの例では、グラウトの混合攪拌工程に粉砕機（ミル）を導入したことに大きな特徴がある。また、粉砕および解砕・分散化のために媒体としてスチールビーズ（カットワイヤー）、ガラス玉などのボールを使用していることも大きな特徴である。

注入の分野では粉砕あるいは解砕の技術は必ずしも一般的でないが、粉体工業の分野では汎用的であり、均一な超微粒の塗料、顔料、染料、薬品、電子工業用セラミックス等の製造上必須の技術となっている⁴⁾。

筆者らは長期耐久の高浸透性懸濁型グラウトとして、超微粒非晶質シリカであるシリカフェームに着目しこれに反応材として元来微粒子である消石灰を混合し、高分散化の方法に解砕システムを選びこれに適性分散剤を併用することによって、非セメント系無機質長期安定性の高分散化低粘性超微粒子グラウトスラリーの製造法および注入方法を開発した。このグラウトをシリカライムと称している。この材料の開発に伴う実験によって上述の微粒子スラリーの解砕方法と砂地盤への浸透性の関係について知見を得たので、その一端をここに報告する。

2. 解砕による微粒子スラリーの高分散化

図-1はダム基礎グラウティング技術の変遷の概要を示したものである。グラウトスラリーの物理的あるいは機械的分散を図る混合攪拌設備については、ヨーロッパおよび英連邦諸国では古くから（30数年以前から）1500rpm以上の高速回転のいわゆるコロイダルミキサーが分散プラントでも使用されていた。反面、日本では比較的最近になって中央プラント方式では混合プラントに英国から直輸入したコルクリートミキサー（コロイダルミキサー）が内蔵されるようになり、中央プラント方式を採用する現場ではこれによってグラウトスラリーの効率的な混合攪拌が行えるようになった。しかし、分散プラントでは依然として低・中速（150～600rpm）のパドルミキサーが使用されているのが現実である。一方、前述したように特に電源開発㈱のダム現場では1980年代後半から特殊ミル（マイクロミル）をミキシングプラントに組み込み、高分散化によってもたらされた懸濁性が良く浸透性の良い微粒子セメントスラリーを注入してきている。

これらの例は普通セメントを粉砕することにあるが、筆者らが開発研究してきた材料は一次粒子はもともと（超）微粒であるが、スラリーにすると凝集力によって粗大な凝集粒子ができるため、粉砕でなく解砕す

ることによってグラウタビリティの上でより適切な微粒のスラリーを作成することにある。

このための解砕方法については粉体工業の分野で行われている方法^{(4)・(5)}を参考にして当該材料に適した解砕および分散剤添加の仕方を見出した。

使用する解砕機あるいは分散機の構造は粉砕機(ミル)と同様であるが、目的が解砕にあるので適用上の仕様に違いがある。

図-2は解砕・分散機による解砕時間とスラリーの粒径の模式的関係を示す。

解砕はスラリー中の凝集した粒子を粉砕エネルギーで解きほぐし一次粒子に近い粒径まで分散させることにあり、凝集粒子の細粒化あるいは分散化は媒体(メディア)となるボールの材質、使用量および粒径、攪拌機の型式、回転数および攪拌時間等に依存する。ボールの材質は鋼球、ガラス玉セラミックボール等があり、分散化能力だけでみると質量の大きい鋼球が最も優れている。ボール径は目標とする分散粒径に近い径のものを使用するのが分散化能力が高い。攪拌時間は長いほど分散化能力が高く粒径の偏差も小さくなる。ただし分散化・微粒化が進むと粘性が増すので攪拌に支障がない程度でできるだけ少量の分散剤を添加する。

上記ファクターの組み合わせによって所要の粒径と粒度分布が確保される。

3. シリカライムの浸透性および注入試験

シリカライムは前述したように、筆者らが開発してきた超微粒のシリカフュームと元来微粒子である消石灰を混合し、解砕と分散剤併用技術により高浸透性化した非セメント系無機質長期安定性の高分散化低粘性超微粒子グラウトスラリーである⁽⁶⁾。

同材料は元来微粒であるためスラリー中の粒子の凝集が避けられず、これが浸透性を阻害するため、凝集粒子の分散化が混合攪拌上の大きな課題であった。結局、高度の分散化をはかるためには現況の汎用システムでは最適とされる(超)高速のコロイダルミキサーでは不十分で解砕方式に依らざるを得なかった。

試験では標準砂等の模型地盤へのグラウトの浸透および注入試験を行い、使用したスラリーの物性(液温、密度、フロー値、粘性、ブリージング)および粒度分布の関係を把握した。

図-3は注入試験装置であり、事前に模型地盤(Φ300mm、高さ400mmと200mm)

ダム施工	7-25L コンクリート車製	大型コンクリート 全盛、 700打設	大型コンクリート 全盛、 500打設	RCD 工法車製	RCD 工法全盛
対象岩盤	土質基礎 盤岩	凝岩 土質基礎	軟岩 土質基礎	軟岩・中硬岩 不透水地盤	軟岩・中硬岩 不透水地盤・亀裂 空洞・開口集
注入工法	off 引込工法 ステージ工法	ステージ工法 (車道式)	ステージ工法 (車道式)	二重管方式 工法 ステージ工法(孔口噴射式)	二重管方式 工法 ステージ工法(孔口噴射式)
注入設備 (ミル)	分散方式	中央方式	中央方式	電動攪拌機 圧力・流量 制御	電動攪拌機 圧力・流量 制御
注入設備 (ポンプ)	定吐出量型	定吐出量型	可変容量型 高圧ポンプ	定吐出量型 (制御付き)	定吐出量型 (制御付き)
注入設備 (ミキサー)	低速攪拌機	低速攪拌機	中速攪拌機	高速攪拌機 (中央方式 内蔵)	高速攪拌機 (中央方式 内蔵)
注入圧力	低圧～中圧	高圧	中圧～低圧	中圧～低圧	中圧～低圧
注入材料	セメント・セメント ペースト	セメント ペースト	凝集全盛 凝集全盛	材料見直し 超微粒子C 超微粒子C 超微粒子C	超微粒子C 超微粒子C 超微粒子C
施工管理		中央内押法 確立(建設指 示)	中央内押法 確立(建設指 示)	定吐出量型 圧力管理 針	定吐出量型 圧力管理 針
周辺分野				地下ダム 地下ダム	地下ダム 地下ダム
	昭和20年 (1945)	昭和30年 (1955)	昭和40年 (1965)	昭和50年 (1975)	昭和60年 (1985)

図-1 岩盤注入の技術の変遷の概要

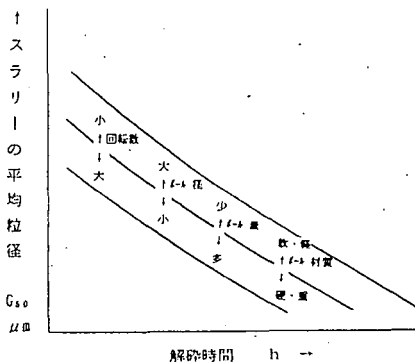


図-2 解砕によるスラリー粒径と各種の要素の関係

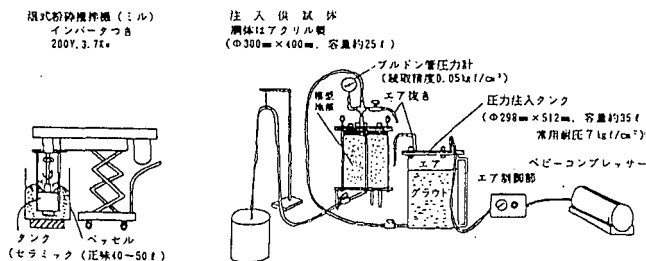


図-3 注入試験装置

の乾燥密度、水締めしたのちの間隙率と相対密度を測定したのち透水試験を行い透水係数と限界圧力を求めた。引き続き同一ラインで限界圧力内での注入試験を行った。注入は全断面の静的加圧方式とした。下方加圧と上方加圧の両方を行った。上方加圧の場合はアップリフトが働き、より低圧の注入となった。

一方、図-4に示すような装置で流下方式によりグラウトの浸透性を測定した。これは現場でも簡易に測定でき、浸透速度とグラウトスラリーの粒度分布との相関をつかんでおけば、粒度分析装置がなくてもグラウトビリティ比から平均粒径が推定できる。この装置では速度水頭が働いたため、厳密な透水係数は求められないが、位置水頭を一定にしておくことで横並びはできる。使用した注入材料および模型地盤の粒度分布を図-5に示す。微粒の材料は一次粒子の粒度を示す。解砕に当たってはA剤とB剤の一部を前添加し、解砕後は粘性を低下させるため残りのB剤を後添加した。表-1は解砕した各種スラリーについてのφ50mmの豊浦標準砂模型地盤の浸透性試験結果を示す。解砕機は三井鉱山のハンディミルHM-5(5.5kw、処理量40ℓ)を使用した(図-6)。回転数は900rpm、解砕ボールはΦ3mmのハイアルミナボールを7.7kg(3.5ℓ)仕様した。

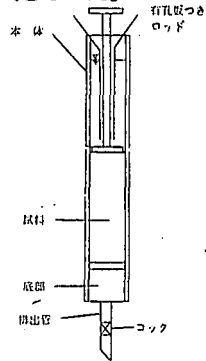


図-4 簡易浸透性試験装置

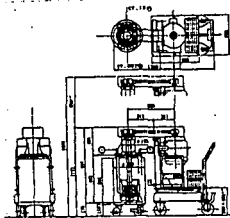


図-6 三井鉱山HM-5型ハンディミル

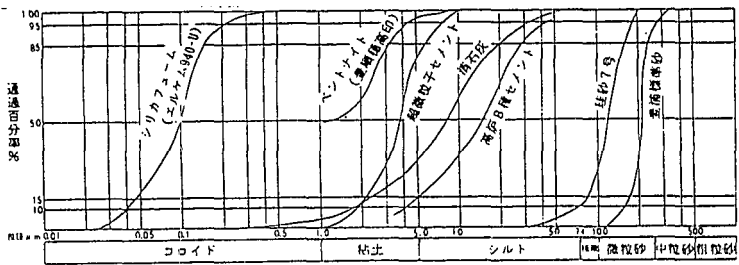


図-5 注入材料および模型地盤の粒度分布

結果をみると、配合を濃くする場合、同様の浸透性を確保するには解砕時間がより長くなること、浸透性には主に粒径と粘性が関係し、平均粒径(D_{50})が7.0μm程度以下で、かつ粘性が6.0cP程度以下にあればスラリーが供試体を完全に通過することが分かる。

表-2はΦ300mmの標準砂模型地盤に対するシリカライムの注入試験結果である。今回は上方加圧方式をとっている。透水試験の有効注入圧力は0.05kgf/cm²とした。最初の予備試験では0.1kgf/cm²(動水勾配=5.6)以上かけると地盤の浮き上がり傾向にあったので、これ以下に抑えた。グラウトの有効注入圧力は0.2kgf/cm²で行い、全断面の浸透が果たされた。間隙率は40%前後にあり、Φ50mmの浸透性試験の時よりも締まった状態にあった。グラウト到達時点の累計注入量は間隙率をグラウトスラリーが置換した量に匹敵した(ブリージング率は水比300%が0%水比200%が6.7%であった)。試験に供したスラリーの粘性(B型回転粘度計)は5.5cPと6.0cP、平均粒径(D_{50})は6.3μmと6.8μmであった。

以上の結果から、解砕機と分散剤の併用により砂地盤への高浸透が図れる高分散化低粘性超微粒子グラウトスラリーの製造およびこのスラリーの注入が実現されたが、ストックしないで連続して製造したスラリー

表-1 シリカライムの浸透性(模型地盤: Φ50mmの標準砂、解砕機: HM-5型)

ケース	水比 W/X	解砕 時間 分	スラリーの物性値			水の浸透性		スラリーの浸透性	
			密度 g/cc	粘性 cP	粒径 D_{50} μm	時間 分-秒	浸透速度 v cm/s	時間 分-秒	浸透率
1	300	10	1.16	10.6	6.85	2-04	6.7×10^{-4}	-	17%
2	300	30	1.16	5.5	6.30	1-56	7.5×10^{-4}	1-07	100%
3	200	30	1.23	-	7.71	1-39	8.8×10^{-4}	1-19	100%
4	200	30	1.23	6.4	7.84	2-06	6.9×10^{-4}	-	89%
5	200	45	1.23	6.0	6.82	2-03	7.1×10^{-4}	3-28	100%
6	100	10	1.37	-	10.69	2-10	6.7×10^{-4}	-	0%
7	100	30	1.37	-	8.49	2-09	6.7×10^{-4}	-	40%
8	100	60	1.37	-	6.74	2-02	7.1×10^{-4}	-	100%
コククリート ミゲラ	300	60	1.16	-	-	1-30	9.7×10^{-4}	-	11%

(備考)

【解砕機】 三井鉱山HM-5型(5.5kw, 900rpm, 59×76×4φ3mm 7.7kg)

【混合方式】 粉体同時混合(混合比) シリカフェーン: SF: 消石灰(C)=1:1、(水比) W/(SF+C)

【分散剤】 前添加: A剤 0.25%, B剤 2.0%, 後添加: B剤 2.0%, LEL 減速 B剤の 前添加

【模型地盤】 豊浦標準砂: 乾燥密度 $\gamma_s = 1.46 \text{ g/cm}^3$ 、間隙率 $n = 45\%$ 、相対密度 $D_r = 0.45$

試料質量: 250g、試料高さ: 8.7cm

を地盤にどの程度の流量で連続して注入できるかどうか現場に適用する場合のポイントである。

表-3は実機レベルの解砕機として連続供給が可能な三井鉱山のVM-5型(22kw)を使用して製造したシリカライムの浸透性試験結果である。

材料配合と解砕機の回転数は表-1
表-2の試験と同様としたが、ボールはΦ2.3mmのスチールボールを80ないし85kg使用した。Φ50mmの浸透性試験では粘性が10cP未満(B型粘度計)でかつ平均粒径(D₅₀)が6.5μm未満の場合完全浸透した。処理流量は3段階で比較したが流量を下げスラリーの滞留時間を長くすると平均粒径は更に小さくなるが、反面分散化が進んで粘性が増大する。浸透のためには粘性は10cP未満を確保する必要があり、その分分散剤を増やすことになる。表-4は表-3の結果をグラウタビリティ比の関係で示したものである。表-3の粒度分析はマイクロトラックで測定しており(図-7)、表-1と表-2がレーザ回折による。両者では分布形態が異なり、マイクロトラックでは粗粒分が目に出ており、グラウタビリティ比が小さめ目になる。しかし、平均粒径(D₅₀)はほぼ変わらない。

4. まとめ&あとがき

グラウト用に微粒子材料をスラリーにする場合、粗大な凝集粒子の発生で浸透性が阻害される。この凝集粒子を分散し浸透性を改善するためには、材料の混合攪拌方法を解砕方式により、かつ分散化に伴う粘性増を分散剤で調整する方法が合理的であることが分った。材料の一次粒子の微粒子性を生かす上でも好ましい。図-8に実施工用のシステム図を示す。

【参考文献】

1) 山中 敦・伊藤尚敬(1986): セケ宿ダム軟岩部のグラウティングについて, ダム技術Vol. 4-4, pp. 88
2) 藤野浩一(1987): 軟岩凝灰岩の基礎処理 - 屈足ダムの事例 - 大ダムNo. 120, pp. 1-17
3) 瀧本純也(1990): 只見川ダムの新工法による基礎処理について - ベントナイト混入コンクリート地中壁およびWMCグラウティング - 大ダムNo. 132, pp. 1-23
4) 田中謙次(1990): セラミックス原料の微粉砕, 粉体と工業Vol. 22, No. 11, pp. 41-47
5) 山下忠洋(1984): 攪拌型粉砕機と応用機械, 日本材料学会粉研シンポジウム講演集
6) 寺戸康隆・寺本勝三ほか(1994): 新しいグラウト材の研究開発(その3), 土木学会第49回年次学術講演会講演要集, pp. 90-91

表-2 シリカライムの注入試験結果(模型地盤: Φ300mmの標準砂, 解砕機: VM-5型)

ケース	水比 w/w	解砕機 回転 数 r/min	スラリーの物性値			模型地盤の透水性			スラリーの注入実績			
			密度 ρ g/cc	粘性 μ cP	粒径 D ₅₀ μm	間隙率 n % 相対密度 Dr	水頭 h cm	単位 流量 ℓ / 分	透水係数 k cm/s	圧力 h m	到達時間 終結時間 分・秒	注入速度※ 終結注入量 ℓ / 分 累計量 ℓ
1	300	30	1.16	5.5	6.30	39.2 0.89	50	2.23	1.9・10 ⁻²	200	3-00 24分経過後終了	3.89 0.13 10.6・
2	200	45	1.23	6.0	6.82	40.9 0.77	50	1.84	1.6・10 ⁻²	200	3-30 22-20	1.66 0 8.45

(備考) ※ 注入速度は本表ではグラウトが到達するまでの注入速度をいう。

【解砕機】 三井鉱山VM-5型(5.5kw, 900rpm, 7.7kg)

【混合方式】 粉体同時混合(混合比) シリカ-L SF: 消石灰CH=1:1, [水比] W/(SF+CH)

【分散剤】 前添加:A剤 0.25%, B剤 2.0%, 後添加:B剤 2.0%

【模型地盤】 豊浦標準砂: 試料重量: 20.4kg, 試料高さ: 7×11 ... 18.0cm, 7×12 ... 18.5cm

乾燥密度 γ: 7-11 ... 1.60g/cm³, 7-12 ... 1.56g/cm³

表-3 連続解砕によるシリカライムの浸透性(模型地盤: Φ50mmの標準砂, 解砕機: VM-5型)

ケース	水比 w/w	処理 流量 l/分	スチール ボール kg	スラリーの物性値			水の浸透性			スラリーの浸透性	
				液温 ℃	密度 ρ/gcc	粘性 η/cP	時間 分-秒	浸透速度 v/cm/s	時間 分-秒	浸透率 %	浸透率 %
1	200	11	80	22	1.22	8.3	1-51	7.8×10 ⁻²	—	—	43 %
2	200	6	85	26	—	9.5	1-40	8.7×10 ⁻²	2-20	100 %	—
3	200	3	85	29	—	42.0	1-50	7.9×10 ⁻²	—	—	76 %
3'	200	3	85	—	—	9.6	1-44	8.4×10 ⁻²	1-46	100 %	—

(備考) 【解砕機】 三井鉱山VM-5型(22kw, 900rpm, 7.7kg) Φ2.3mm

【混合方式】 粉体同時混合(混合比) シリカ-L SF: 消石灰CH=1:1, [水比] W/(SF+CH)

【分散剤】 前添加:A剤 0.25%, B剤 2.0%, 後添加:B剤 2.0%, 注: ※ B剤 更に 2.0%追加。

【模型地盤】 豊浦標準砂: 乾燥密度 γ: 1.46g/cm³, 間隙率 n=45%, 相対密度 Dr=0.45

試料重量: 250g, 試料高さ: 8.7cm

表-4 連続解砕におけるシリカライムの粒度特性と浸透性の関係

ケース	水比 w/w	処理 流量 l/分	スチール ボール kg	スラリーの粒度特性			グラウタビリティ比		Φ50mm浸透性試験	
				G ₁₀	G ₂₅	G ₅₀	D ₁₀ G ₁₀	D ₅₀ G ₅₀	浸透率 %	浸透速度 v/cm/s
1	200	11	80	6.73	14.9	21.1	11.4	7.6	43	—
2	200	6	85	6.53	14.8	20.9	11.5	7.7	100	6.2×10 ⁻²
3	200	3	85	4.68	13.9	20.1	12.2	8.0	100	8.2×10 ⁻²

(備考) 標準砂の粒度特性: D₁₀=160μm, D₅₀=170μm

浸透率 α = 浸透量 / 供試体長, 浸透速度 v = 浸透量 / 浸透時間

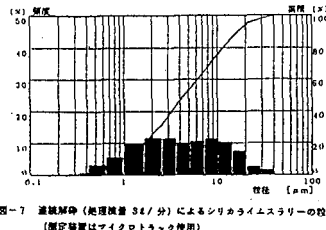


図-7 連続解砕(処理流量 3 l/分)によるシリカライムスラリーの粒度分布(測定装置はマイクロトラック使用)

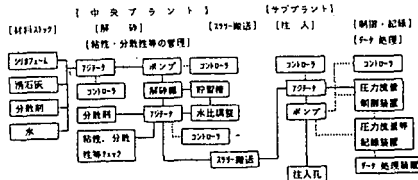


図-8 シリカライム工法グラウティングシステム図