

ISSN 0386-5878

009

土木研究所資料第3063号

土木研究所資料

耐久性地盤注入材料利用技術マニュアル (案)

平成4年3月

建設省土木研究所
地質化学部地質研究室

「Copyright © (1992) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted,
nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

耐久性地盤注入材料利用技術マニュアル (案)

地質研究室 室長 中村 康夫
研究員 佐々木 靖人
藤井 厚企

要 旨

近年開発されつつある耐久性地盤注入材料について、基本性能や耐久性能に関する標準的な材料試験方法、地盤の調査方法、現地注入試験方法、実地盤中での耐久性の推定方法、設計施工方法、維持管理方法などの利用技術をマニュアル化したものである。

キーワード：地盤注入材料，地盤注入工法，耐久性

まえがき

地盤注入工法は、時間の経過とともに固結する材料を地盤に注入して地盤の固化や不透水化を計る工法である。本工法で用いる注入材料は、大きく溶液型と懸濁型の2種類に分けられ、地盤への浸透性が要求される場合には一般に溶液型の注入材料が用いられる。

溶液型の注入材料においては現在、緊急止水等の場合を除いて原則的に水ガラスを主体とした材料のみ使用が認められている。水ガラスは溶脱などによって注入効果が低下するため、溶液型の材料を用いた地盤注入工法は一般に仮設的な工事に用いられる。しかし近年、管路や水ぎわ構造物周辺の維持管理、地下構造物の輻輳する中での再掘削や長期間にわたる工事、液状化防止など耐震性に関する工事、あるいは地下空間の利用など、溶液型の注入材料に対しても耐久性が望まれる事例が見られるようになった。一方、耐久性を期待する材料（耐久性地盤注入材料）が最近幾つか開発され、注入材料のカタログ等においても耐久性は性能の一項目として取り上げられている。ところが注入材料の耐久性については現在のところ確立された定義がないだけでなく、注入された地盤の耐久性についての調査例自体も非常に少ないのが現状である。

地盤注入工法における注入固化体の耐久性は、注入材料のみではなく、地盤・材料・工法等の複合的要因によって決定されるものである。したがって耐久性が必要とされる地盤注入工事においては、施工者が各現場に応じて劣化条件を勘案して耐久性を判定する必要がある。また、経時的な監視を行い、予測のずれに対処出来る体制も必要である。すなわち、地盤注入工法に耐久性を求める場合、従来考慮の必要のなかった多くの項目について調査検討が要求されることになる。

本マニュアル（案）は、上記の点を踏まえ、耐久性を必要とする地盤注入工法を施工する際に考慮すべき項目、すなわち、注入材料や注入固化体の耐久性についての考え方・注入材料の耐久性試験法・地盤の調査法・劣化の予測法・維持管理方法等の基本的な項目や留意点について整理したものである。ただし注入固化体の耐久性に関する施工例や現地実験例はきわめて乏しく、耐久性の調査・試験方法も今後の研究に待たれる部分が大きい。その意味で本マニュアル（案）は、マニュアルというよりもむしろ注入材料の耐久性に関する一つの考え方を提示した技術資料と捉える必要がある。しかし従来この種のマニュアルが全くないこと、また、新しい材料も積極的に活用していくことが重要であるとの観点から、あえてマニュアル形式とし、ここに示すものである。今後、注入材料の耐久性試験例や施工例の増加によって技術や経験が蓄積され、本マニュアル（案）がより洗練、充実されていくことを期待している。

なお本資料は、建設省の総合技術開発プロジェクト『建設事業への新素材・新材料利用技術の開発』の中の小テーマ「新地盤材料の地中構造物への利用技術の開発」（地質研究室担当）の成果をとりまとめたものである。本資料中の試験の一部は（社）日本薬液注入協会で実施された。また、本資料作成にあたっては本プロジェクトの各委員、ならびに小林茂敏地質化学部長をはじめ関係者の方々に有益な御助言をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表する。

目 次

まえがき

1. 総 則	1
1.1 目 的	1
1.2 適用範囲	2
1.3 用語の定義	4
2. 耐久性判定の調査計画	5
2.1 計画一般	5
3. 注入材料の性能試験	7
3.1 注入材料の耐久性を左右する要因	7
a. 地盤との化学反応	8
b. 地下水との化学反応	8
c. ゲル自体の長期的化学構造変化	8
d. 力学的作用	11
e. 乾湿変化	12
f. 温度変化	13
g. 微生物による分解	13
3.2 基本性能試験	14
a. 粘性試験およびゲルタイム試験	14
b. 比重試験	21
c. pH 試験	21
d. 強度試験用供試体および透水試験用供試体の作製法	24
e. 一軸圧縮試験	31
f. その他の強度試験	31
g. 室内透水試験	31
h. 安全性試験	31
3.3 耐久性試験	37
a. 密封養生試験	37
b. 水中養生試験	40
c. 透水養生試験	43
d. 水交換養生試験	47
e. 飽和土養生試験	50
f. 温度促進試験	53
g. 乾燥湿潤試験	55
h. 凍結融解試験	58
i. クリープ試験	61
j. 繰返し圧縮試験	64
3.4 材料性能試験結果の整理	67

4. 地盤の調査	73
4.1 注入材料の劣化要因に関する地盤調査	73
a. 土質および地下水サンプリング	74
b. 土質および地下水試料の化学分析	74
c. 流向流速測定	74
d. 現場透水試験	76
e. 地盤の変形や振動の測定	77
f. 直接観察	77
5. 現地注入試験	78
5.1 現地注入試験の目的	78
a. 注入形態の把握	78
b. 地下水条件の変化の把握	79
c. 地盤の強度や変形性の変化の把握	79
5.2 現地注入試験の方法	80
5.3 現地注入試験における調査項目	81
a. 注入前の調査	81
b. 注入中および注入後の調査	81
6. 耐久性の推定	84
6.1 劣化形態の推定	84
a. 注入固化体表面からの劣化	85
b. 注入固化体内部の劣化	89
6.2 劣化速度の推定	90
a. 劣化速度の測定例	91
b. 温度効果の測定例	93
c. 水質効果の測定例	95
d. 流速効果の測定例	97
e. 注入形態効果の測定例	98
f. 寸法効果の測定例	99
7. 設計, 施工および施工管理	101
8. 維持管理	102
8.1 注入後の調査	102
8.2 追加工事	102
引用文献	103
参考資料1 注入材料	105
参考資料2 注入工法	121
巻末資料1 注入材料リスト	161
巻末資料2 注入工法リスト	193

1. 総則

1. 1 目的

本マニュアル（案）は、注入材料および注入固化体の耐久性を把握するための標準的な手法を定めることを目的とする。

（解説）

地盤注入工法は、時間の経過とともに固化する材料を地盤に注入することによって地盤の固化、不透水化を計る工法である。本工法において用いられる水ガラス系の注入材料は溶脱などによる注入効果の劣化現象を有しているため、一般に仮設的な工事に用いられるが、近年、耐久性を有する注入材料（耐久性地盤注入材料）が幾つか開発されてきている。耐久性地盤注入材料を用いることにより建設の合理化が期待される工種としては下記のものと考えられる。

- ・大規模地下空洞などの地下空間利用
- ・液状化防止を含む軟弱地盤改良
- ・埋設構造物の維持管理
- ・地下構造物の輻輳する中での再掘削や長期間にわたる工事
- ・軟岩のダムサイトなどセメントグラウトが浸透し難い岩盤の改良 など

しかし注入材料の耐久性については現在のところ確立された定義がなく、注入された地盤の耐久性についての調査例も少ない。地盤注入工事における注入固化体の耐久性は、材料の性質のみによって決定されるものではなく、地盤・材料・工法の複合的要因を充分考慮して判断すべきである。したがって耐久性が必要とされる地盤注入工事においては、注入材料自体の耐久性の把握、地盤や地下水などの劣化条件の把握、注入状況の把握などにより、各現場に応じて独自に劣化条件を勘案して耐久性を判定する必要がある。また、経時的な監視による維持管理も必要である。しかしながら現状ではこれらに関する試験方法や解析方法は標準化されておらず、用いる手法によって大きく結果が異なる場合が多い。

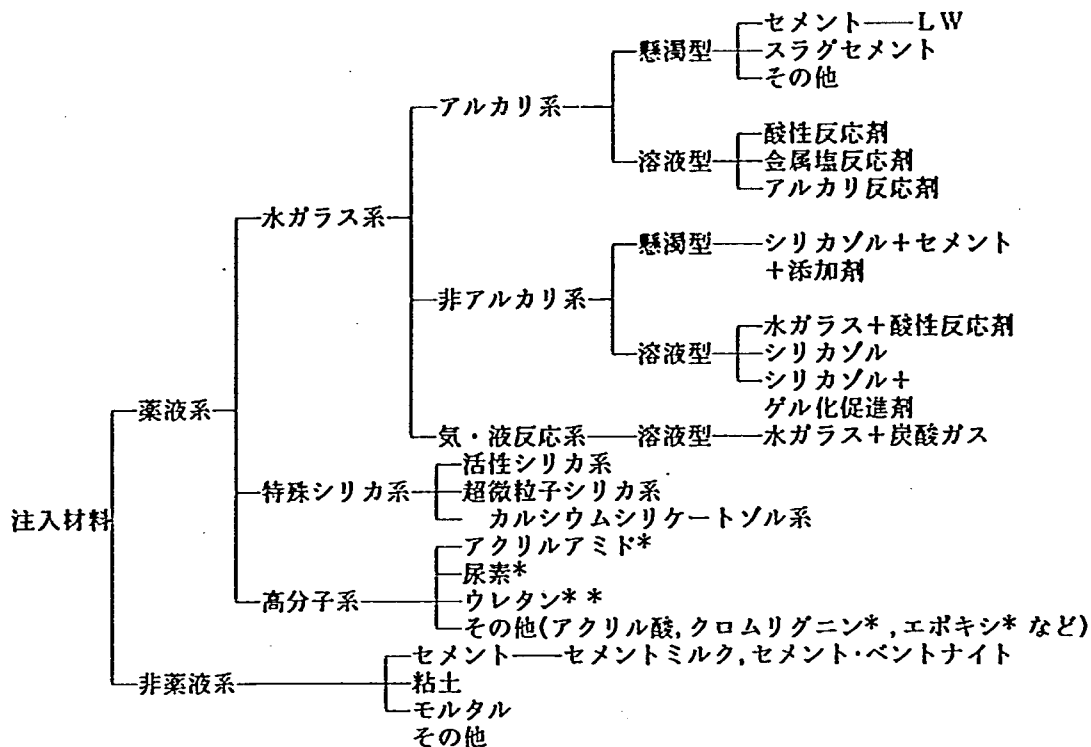
本マニュアル（案）は、以上の点に鑑み、耐久性地盤注入材料の有効利用による建設工事の合理化を目的として、耐久性地盤注入を施工する際に考慮すべき項目、すなわち、注入材料や注入固化体の耐久性についての考え方・注入材料の基本性能や耐久性試験法・地盤の調査法・劣化の予測法・維持管理方法等の基本的な項目や留意点を整理し、その標準的な方法の提案を目的とするものである。

1. 2 適用範囲

本マニュアル（案）は、耐久性地盤注入材料、およびこれを用いた地盤注入工法、工種に適用する。

（解説）

地盤注入材料の種類を図－1.2.1に示す。この中で、耐久性地盤注入材料は、懸濁型注入材料のほか、水ガラス有機系、シリカゾル、活性シリカ、超微粒子シリカ、カルシウムシリケートゾルを用いたもの等である。注入材料の種類と基本性能については参考資料1で述べる。また、注入材料の組成については巻末資料1にその主剤、反応剤などの概略を示す。

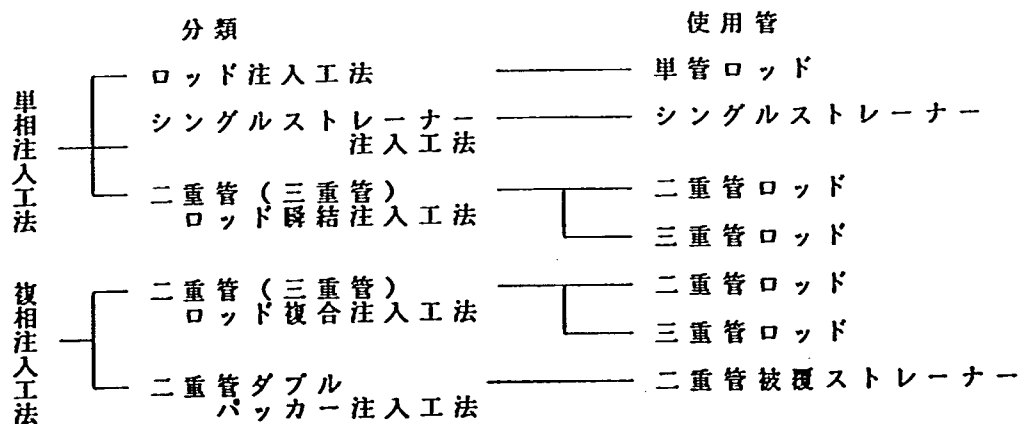


* 現在用いられていない。

** 緊急時のみ使用可。

図－1.2.1 注入材料の種類（現在使用禁止のものも含む。文献1）を一部改変）

本マニュアル（案）が適用される地盤注入工法は図－1.2.2に示すとおりである。これらの特色については参考資料2で述べる。また、地盤注入工法のリストを巻末資料2に示す。



図－1.2.2 地盤注入工法の種類

本マニュアル（案）が適用される工種は次に示すとおりである。ただし、以下の工種でも特に耐久性を必要としない場合には、本マニュアル（案）は適用されない。また、このほかにも耐久性を要すると判断される工事を施工する場合には、本マニュアル（案）による検討を必要とする。

- a. 地盤補強（液状化防止を含む）
- b. 止水壁（底盤止水を含む）
- c. 管路周囲の止水や空洞充填
- d. ダムのグラウチング
- e. トンネルのグラウチング

1. 3 用語の定義

本マニュアル（案）に用いる主な用語を以下のように定義する。

用 語	定 義
地盤注入工法	地盤改良工法の一つで、時間の経過とともに固結する材料を、原則として地盤を大きく攪乱しない程度の圧力で地盤に注入して地盤の固化や不透水化を計る工法。
注入材料	地盤注入工法において、地盤に注入する材料。セメントなどの粒子を含むものを懸濁型注入材料、含まないものを溶液型注入材料という。
耐久性	注入後、規定された期間以上にわたり所定の注入効果を維持し得るのに必要な材料性能。
浸透注入	土粒子配列を変えることなく地盤の間隙に注入材料が均質に注入されること。
割裂注入	注入材料が地盤中に板状あるいは脈状に不均質に注入されること。
注入固化体	注入材料を地盤へ注入することによって形成された固化体。
ホモゲル	注入材料のみからなる固化体。
サンドゲル	注入材料を土に浸透注入させた固化体。
主剤	水ガラスなど、注入材料の主成分となる材料。
反応剤	主剤と反応する副成分であり、硬化剤、遅延剤、助剤などに分けられる。
水ガラス	珪酸ナトリウム ($m \text{Na}_2 \cdot n \text{SiO}_2$) をいう。水ガラスは、JIS K 1408 でその材質を規定されており、注入材料に用いられるのは、3号水ガラス、2号水ガラス、グラウト用水ガラスなどである。
ゲルタイム	注入材料がゲル化するまでの時間。本マニュアルでは粘性が100 cP以上となるまでの時間と規定している。
溶脱	ゲル化した注入材料が経時的に水の中に溶解・拡散すること。

（解説）

耐久性の定義において、「規定された期間」とは、注入目的により異なるが、ここでは一般に数ヶ月～数年以上をさす。耐久性は、強度耐久性（静的および動的な強度の耐久性）、変形耐久性（埋設管の沈下など構造物の長期的な変形に追従出来る耐久性）、透水耐久性（透水性の改良効果の耐久性）、および安全耐久性（材料の長期的溶脱や化学変化による周辺環境や人体等への影響に関する安全性の耐久性）などに分けられる。

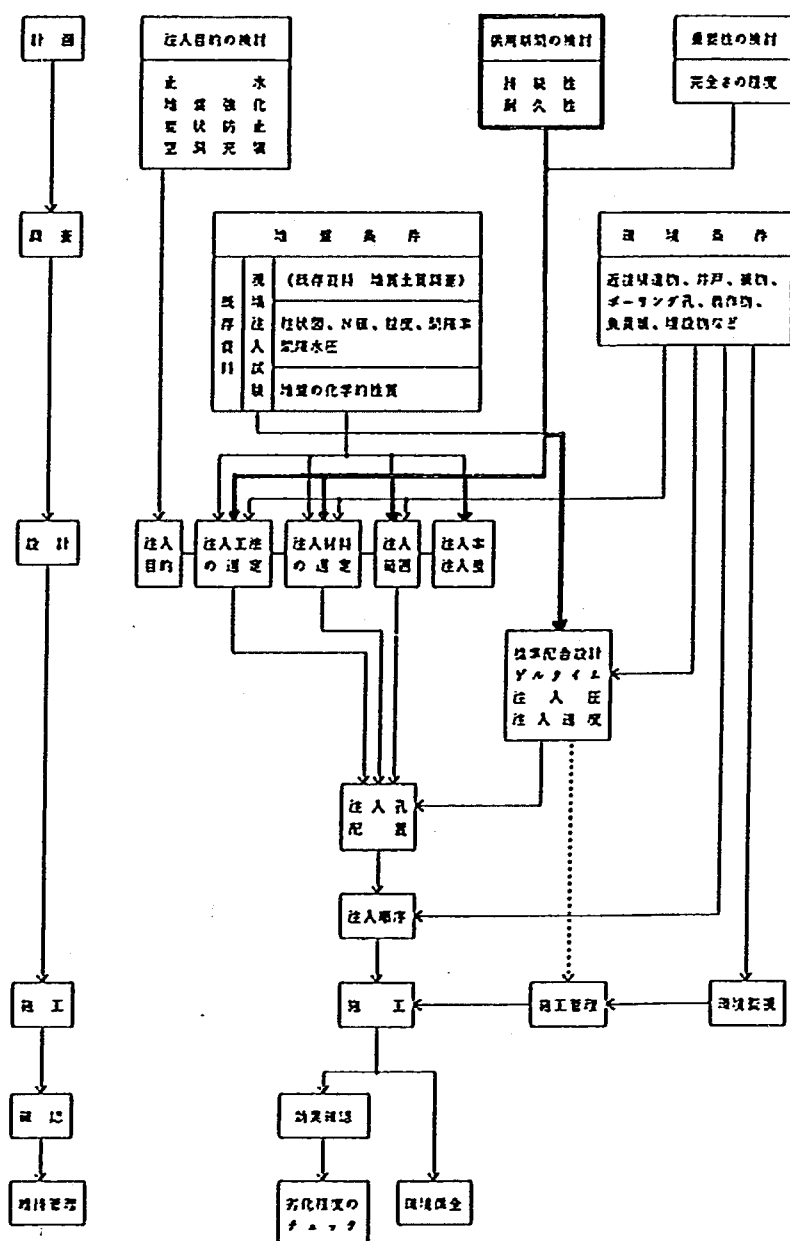
2. 耐久性判定の調査計画

2.1 調査計画一般

耐久性判定のための調査計画は、原則として注入材料・施工法等を決定する前に策定するものとする。

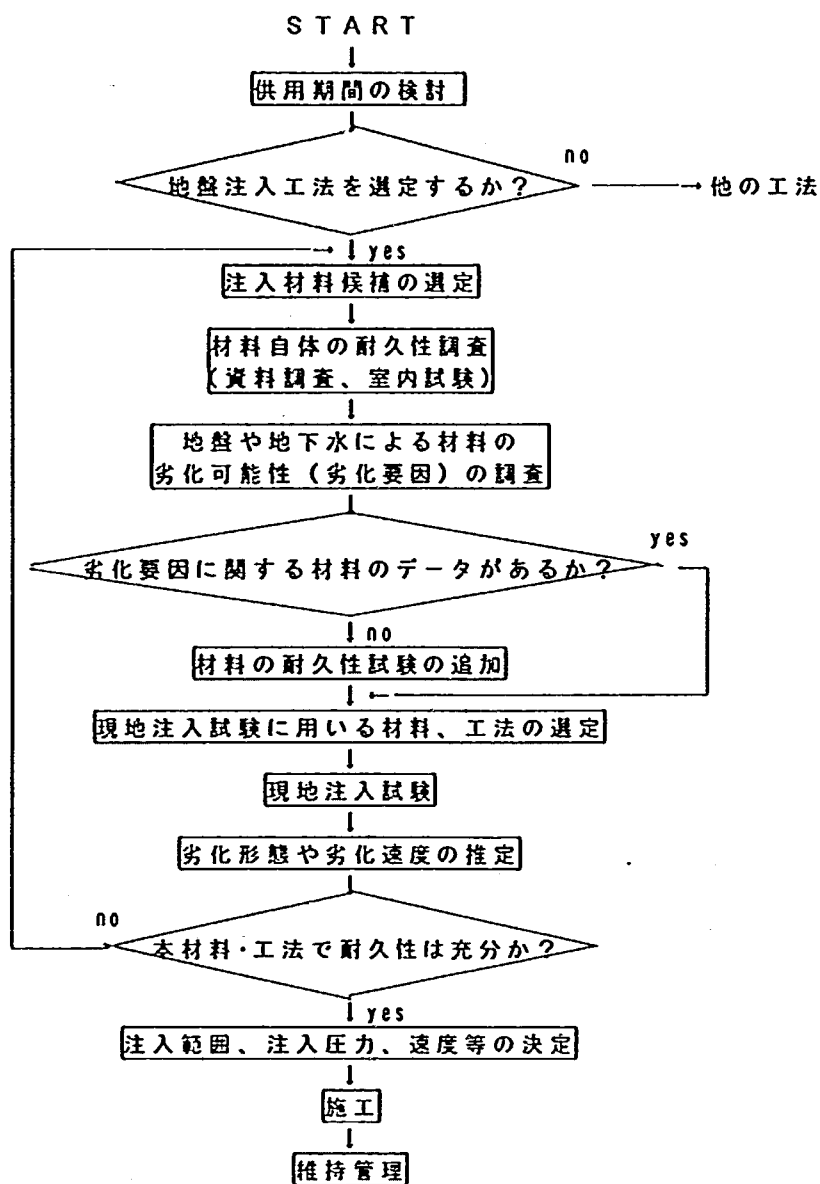
(解説)

地盤注入工事全体の流れの一例を図－2.1.1に示す。同図に示されるように、耐久性は注入工法、注入材料、注入範囲、注入率、注入量などの選定に直接かわるので、耐久性判定のための調査計画は、原則として注入材料・施工法等を決定する前に開始する必要がある。



図－2.1.1 地盤注入工事の流れの一例

図－2.1.2 は耐久性地盤注入の調査の流れの一例である。供用期間および地盤注入工法が決定された後、材料候補の選定と性能の調査、試験を開始する。並行して耐久性にかかわる地盤の調査を行い、必要な材料および工法を選定する。その後、現地注入試験によって劣化速度の推定を行うとともに、注入範囲や注入圧力など具体的な注入条件を決定する。



図－2.1.2 耐久性地盤注入の調査の流れの一例

3. 注入材料の性能試験

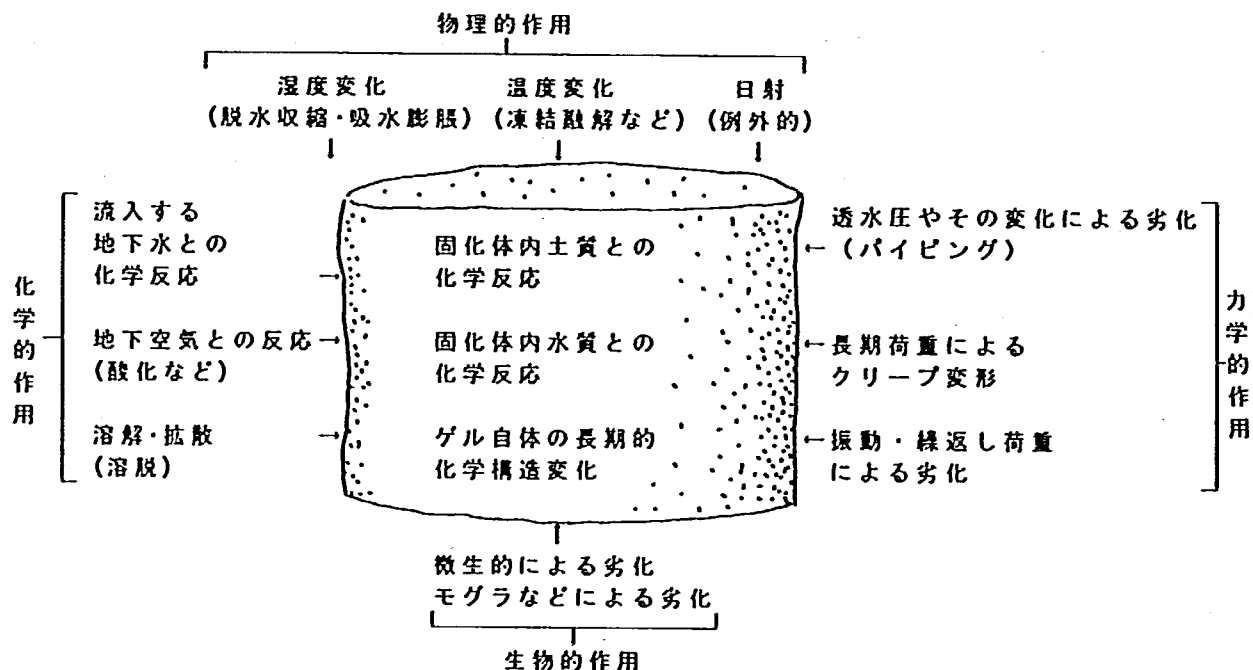
本章では、注入材料に関する基本性能および制御された条件下（室内）における注入材料の耐久性を検討するための試験について述べる。下記の試験項目は基本的に地盤や施工法の影響を含まない注入材料そのもの、あるいはサンドゲルについての性能試験を基本に選定している。特に、標準的な耐久性試験は従来ほとんどなく、本マニュアル（案）で初めて整備したものが多い。

3. 1 注入材料の耐久性を左右する要因

注入に先立ち、現場環境下において注入材料の耐久性を左右する要因を整理し、個々の要因の影響について検討する。

（解説）

注入固化体の耐久性を左右する要因は、図－3.1.1に示すとおりである。同図に示すように耐久性を左右する要因は大きく内的な作用と外的な作用に分けられる。内的な作用は閉鎖系において進行し得る劣化要因で、化学的作用が主体である。外的な作用は注入固化体外部からの影響に起因する劣化要因であり、物理的作用・化学的作用・生物的作用・力学的作用など多様である。内的な作用のみであれば室内試験である程度耐久性が推定できるが、外的な作用が多い地盤条件では、地盤の調査や現地注入試験による耐久性の確認が重要となり、耐久性の推定は複雑になる。



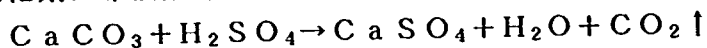
図－3.1.1 注入固化体の耐久性を左右する要因

注入材料の耐久性を左右する要因として、次のようなものがある。

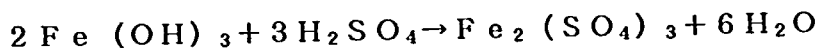
a. 地盤との化学反応

注入材料の耐久性を左右する物質として、貝殻 (CaCO_3)・可溶性金属塩・沸石・有機酸 (フミン酸) 等の固結阻害物質の存在が挙げられる。

硬化剤に希硫酸等を含む場合、貝殻の混入する地盤では次の反応が起こる。



また、同様の材料において黄鉄鉱等の可溶性金属塩が地盤に含まれると、次の反応が生じる。



セメント系注入材料については、セメントの水和過程で発生する水酸化カルシウムと腐植土に含まれる有機酸の一種であるフミン酸 ($\text{C}_{78}\text{H}_{52}\text{O}_5(\text{COOH})_8(\text{OH})_7(\text{CO})_2$) が反応し、石灰フミン酸石けんが析出して水和反応の進行を阻害する。これらは固化を阻害するものであり、いわゆる耐久性とは多少趣を異にするが、一旦固化したゲルに対して地盤中の特定の物質がなんらかの影響を与える可能性も考えられるので、注意が必要である。このような劣化要因に関して本マニュアル (案) では、飽和土養生試験等を提案した。

b. 地下水との化学反応

地下水が注入材料の耐久性を左右する場合として、特定イオン、酸性水やアルカリ性水など固結を阻害する水の存在、地下水の流れによる溶解拡散 (溶脱) 作用が挙げられる。特定イオン、酸性水やアルカリ性水などは、固結を阻害するだけでなく、ゲルタイムを変化させたり、ゲルの長期耐久性に影響を及ぼすと考えられる。これらは注入材料の種類によって大きく異なるので、注入材料毎に個別に試験する必要がある。

一方、地下水の流れによるゲルの溶脱は水ガラス系のほとんどの注入材料に認められる。水ガラス系における溶脱は脱アルカリに伴って未反応の SiO_2 が溶出するもので必ずしも地下水との反応とは言えないが、溶出の速度は地下水の存在下で促進される。溶脱は、①ゲルの化学的溶解、②溶解物質 (主にイオン) の物理的拡散、という2段階の過程を経て行なわれると考えられる。溶解速度はゲルの表面積、ゲルと接する水の水質、温度等に支配され、溶解物質の拡散速度は地下水の流速や地盤の間隙形状、温度等に支配される。したがって溶脱速度はゲルの存在形態・温度・水質・流速・地盤の間隙形状などの相乗効果によって決定され、非常に複雑である。溶脱を測定する既存の試験としてゲルの溶出試験²⁾や各種の水中養生実験がある。しかし両試験とも、供試体に接する水の流速を制御出来ない、あるいは供試体の寸法効果が考慮出来ないなど、地盤中での溶脱速度を直接推定するものではなく相対的な溶脱性を試験するものである。そこでこのような劣化要因に関して本マニュアル (案) では透水養生試験を、また、これの簡易な試験として水交換養生試験等を提案した。また溶脱に対する流速や注入固化体の寸法の影響について実験例を示した (7章参照)。

c. ゲル自体の長期的化学構造変化

ゲルの長期的化学構造変化が注入材料の耐久性を左右する場合として、収縮 (シネリシス)、吸水膨潤、化学分解等が挙げられる。収縮はゲルの結合の進行とともに水分がゲルから排除される過程で生じる。したがって、ゲル自体は必ずしも強度低下するとは限らず、ゲルの結合強化によって強度上昇が生じる場合もある³⁾⁻⁶⁾。本マニュアル (案) 作成に

伴う耐久性試験結果（図－3.1.2～3.1.5。①液は水ガラス系有機、②液は特殊水ガラス系（コロイダルシリカ）、③液は高分子系（アクリル酸塩））によると、密封状態の100日養生で数倍もの強度増加を示す材料もあった（図－3.1.2～3.1.3）。しかし収縮による体積変化はひび割れの発生や空隙の増大およびそれに伴う強度低下や透水性上昇を引き起こす場合がある。たとえば耐久性試験結果によると、水ガラス系の注入材料（図中①②液）は密封状態の25日養生で1～2%、100日養生で3～4%の重量減少を生じる（図－3.1.4）。このときの透水係数は25日養生で2倍近くになる（図－3.1.5）。これらのホモゲル材料の体積減少は密封状態の100日養生で4～13%に及ぶ。したがって割裂注入の場合には地盤や構造物とゲルの境界部にゲル体積の一割程度の厚さの間隙脈が発生し得ることを示している。地圧が大きければこの間隙は閉塞されるが、比較的浅い部分での注入においては、間隙脈が保存される可能性がある。

吸水膨潤は、高分子系の注入材料等で認められている。膨潤に伴い、強度低下が生じる可能性がある。サンドゲルの耐久性試験結果によると、ある高分子系注入材料（図－3.1.2～3.1.5の③液）において、水中養生条件の100日養生で約3～6%の体積増加が認められた。したがって透水性は時間とともに低下する傾向にあるが、このときの一軸圧縮強度は1日強度の20～40%に低下した。これは長期的な化学変化も含んだ値であるので、上記の試験のみでは強度低下量が必ずしも吸水膨潤のみによって生じているとはいえないが、密封状態100日養生のサンドゲルやホモゲルに大きな膨張や強度低下が認められないことから、強度低下に吸水膨潤現象が関与している可能性が考えられる。

化学分解は、注入材料の化学構造変化によって長期的に物性が変化して劣化するものである。この現象の確認には精密な化学分析などが必要とされるので、具体的な例は乏しいが、収縮を含め化学構造変化による物性変化の影響については、ゲルを長期間密封状態で養生した後に試験することなどによって把握出来る。なお、これらの劣化要因に関して本マニュアル（案）では、密封養生試験、水中養生試験等を提案した。

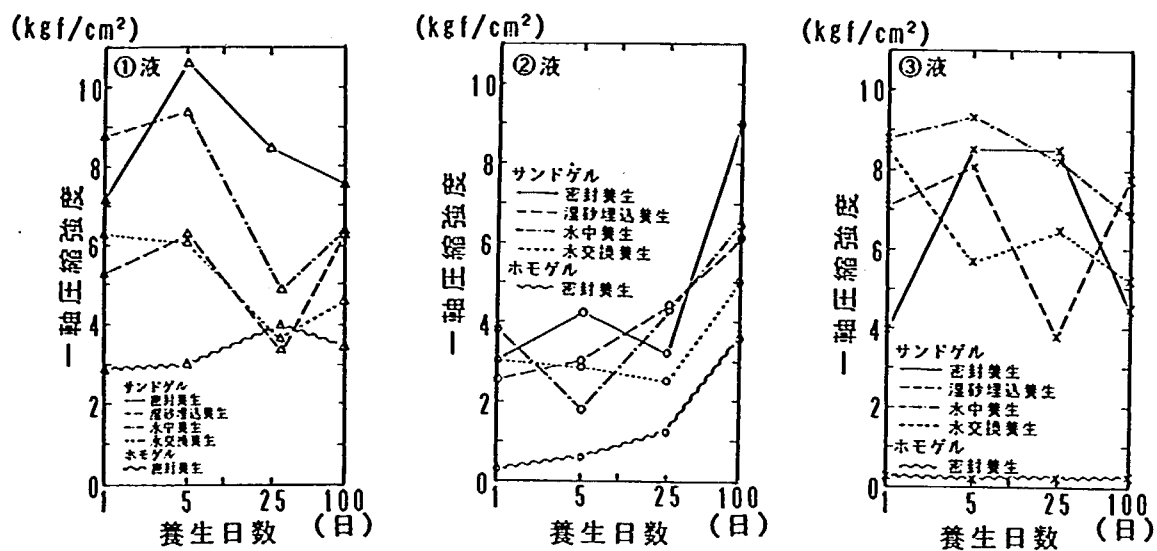


図-3.1.2 各種長期養生試験における養生日数と一軸圧縮強度

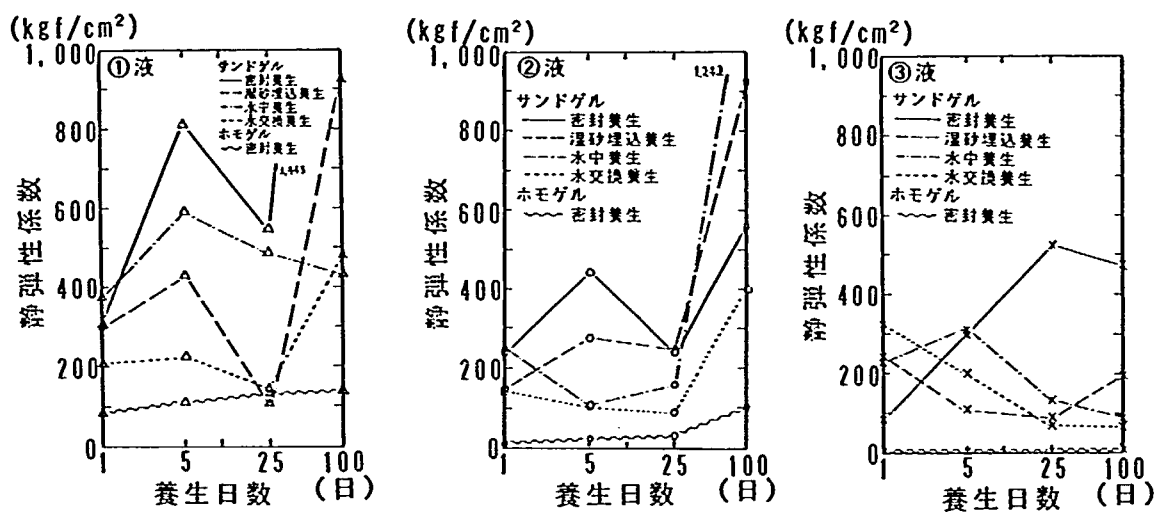


図-3.1.3 各種長期養生試験における養生日数と静弾性係数

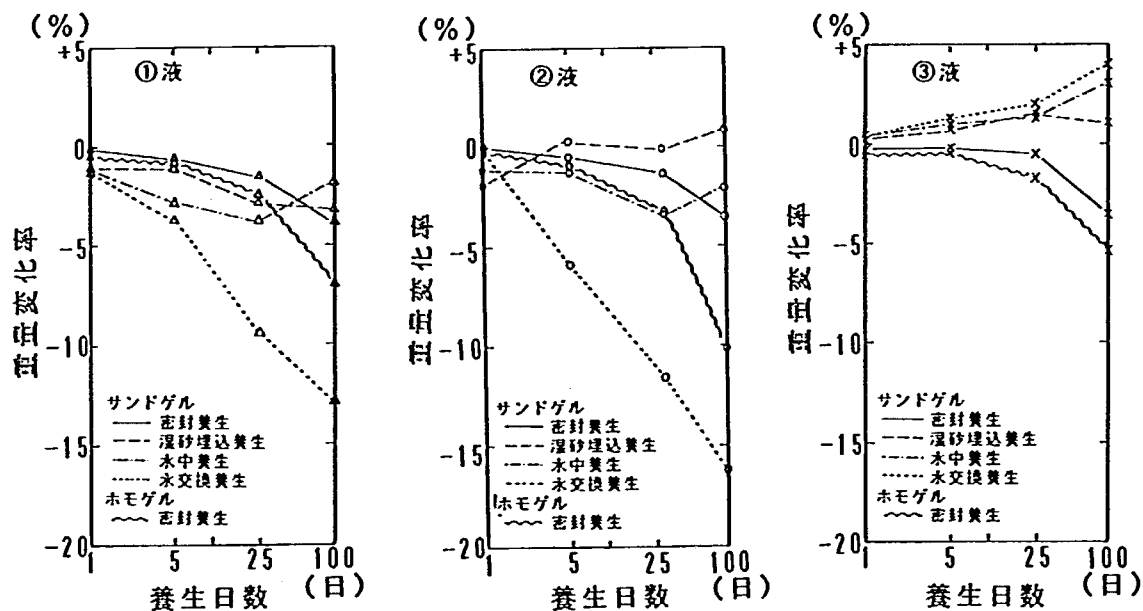
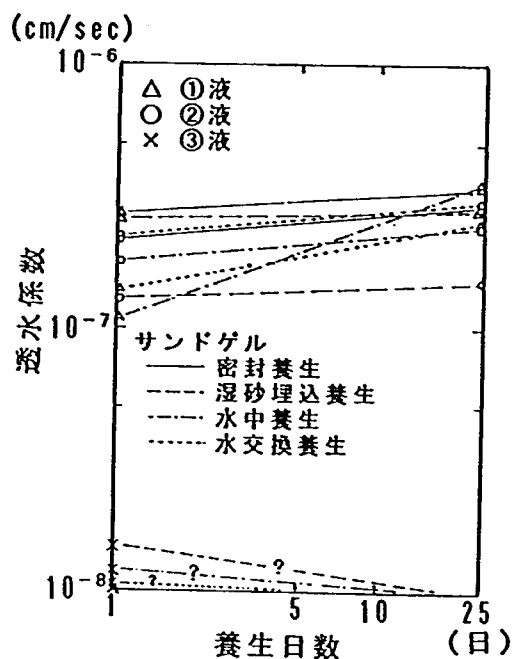


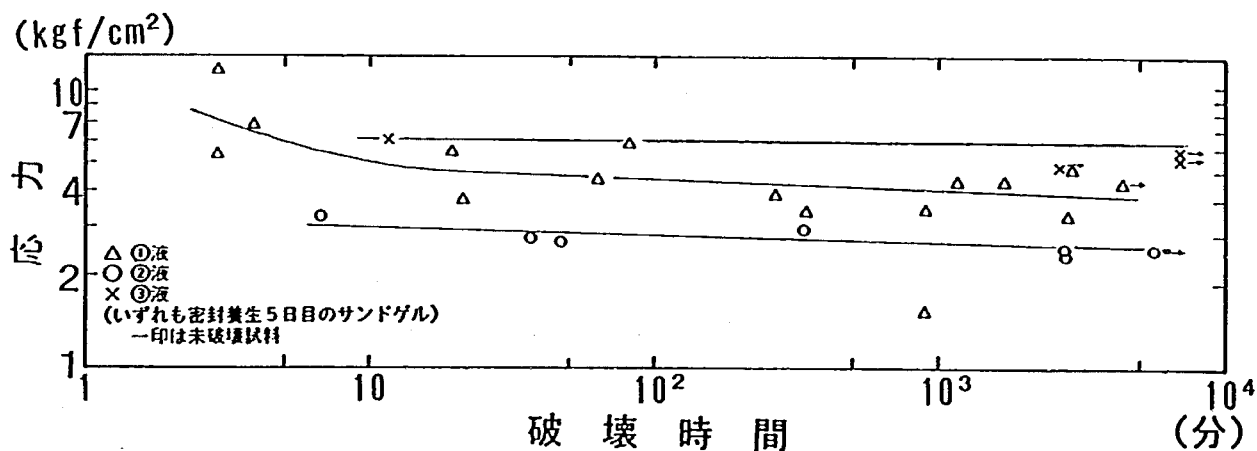
図-3.1.4 各種長期養生試験における養生日数と重量変化率



図－3.1.5 各種長期養生試験における養生日数と透水係数

d. 力学的作用

力学的作用が注入材料の耐久性を左右する場合として、静的なクリープ、動的な地震動・交通振動・水圧や空気圧の変化等が挙げられる。クリープ試験結果によると（図－3.1.6）、破壊までの荷重時間と応力は両対数グラフ上でほぼ直線で近似され、一般に破壊応力は荷重時間とともに非常にわずかながら（荷重時間10倍毎に強度2～4%）低下する傾向がある。尿素系注入材料および水ガラス系注入材料のサンドゲルでの試験例⁷⁾によると、尿素系注入材料のクリープ破壊強度は、一軸圧縮試験において応力歪み曲線が直線関係から外れる部分（弾性限界点）の強度とほぼ一致し、一方水ガラス系注入材料のクリープにおいては、一軸圧縮強度の60～70%で破壊を生じている。また同試験では、クリープ破壊荷重より低い荷重でしばらく荷重した後に一軸圧縮試験を行なうと、変形係数は3.5倍に、強度は初期の一軸圧縮強度の1.5倍程度に増加するとしている。筆者らの試験においても同様の強度増加現象が認められており、圧密とそれに伴うゲルの構造変化（脱水等）が生じていると思われる。



図－3.1.6 クリープ試験における応力と破壊時間の関係

一方、動的荷重については試験例が乏しい。0.3 Hz の繰返し一軸圧縮試験結果によると（図-3.1.7）、載荷繰返し数が増加するにつれ破壊強度が低下する。強度の低下率はクリープ試験よりも高い値を示し、載荷繰返し数10倍毎に破壊強度は10～20%程度低下する。

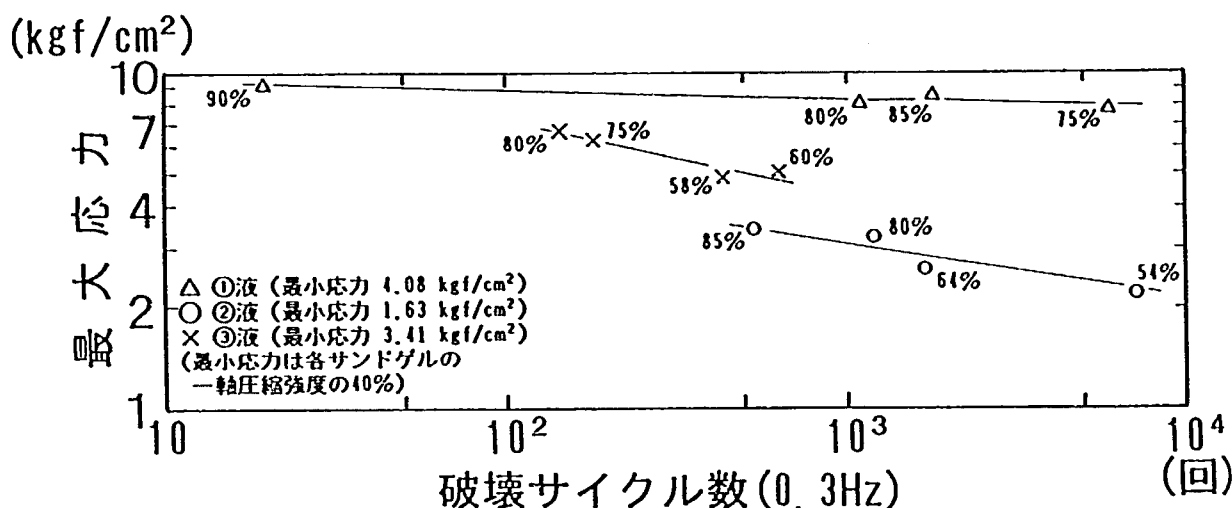


図-3.1.7 繰返し圧縮試験における最大応力と破壊サイクル数

侵食作用も力学的な劣化作用の一種である。注入材料は、降雨等による地表侵食を受けることはほとんどないと考えられるので、一般に問題となるのは地中侵食、すなわちパイピング等である。パイピングの試験法については、フィルダムのコア材料に用いる土質材料について室内で⁸⁾、あるいはダム基礎軟岩について現場で⁹⁾試験が試みられているが、確立された手法はない。特に問題となるのは、構造物と注入固化体の境界である¹⁰⁾。パイピングは、そのまま放置すれば経時的に進行するため、注入固化体に対してもパイピングに対する耐久性が必要である。構造物との境界部に注入を行なっても、その注入が充分でなければ、間隙率や浸透性が高く粘着力が不足するので、注入固化体はパイピングの進行を防ぐことが出来ず破壊される場合がある。特に、割裂注入においてゲルの収縮が生じ連続性の高い間隙脈が形成されると、パイピングが促進されることが考えられる。

パイピングは水による力学的劣化作用であるが、圧気シールド工法において過剰な空気圧が作用する場合などは、空気による力学的劣化作用といえる。埋設構造物との境界など透気しやすい部分に沿って高圧の空気が上昇し、上部の道路が陥没した例もあり、注意が必要である。なお、これらの劣化要因について本マニュアル（案）では、クリープ試験、繰返し圧縮試験等を提案した。

e. 乾湿変化

乾湿変化による劣化作用として、地下水変動、降雨の影響、漏水の影響等が挙げられる。通常、注入材料は地盤中に存在するため、乾湿の影響を受けることは少ないと考えられる。しかし、注入材料は一般に多量の水を含んでおり、乾燥することによって大きな物性変化を生じると考えられるため、地表付近の場合はこれを考慮する必要がある。また、前述のようにゲルの中には吸水膨潤を生じるものがあるが、乾燥と吸水を繰り返すことにより強

度等が低下することがある。この現象は岩石、特に軟岩においては、スレーキング現象として広く認められており、幾つかの試験法も考案されている。本マニュアル（案）ではこれを参考に、乾燥湿潤試験を提案した。

f. 温度変化

温度変化による劣化作用として、地熱による化学変化の促進、地表付近における凍結融解等が挙げられる。注入材料の反応速度は温度の関数であり温度の微妙な相違によってゲルタイム・固化後のゲルの化学変化速度等が変化する。地熱による注入材料の化学変化は、主にトンネルの裏込めなどで懸濁型材料について考慮されることがあり、高熱状態での長期養生によって把握が可能である。また、注入材料の劣化は温度を上昇させることによってある程度促進可能であるので、本マニュアル（案）では温度促進試験を提案した。一方、凍結融解は非常に強い劣化作用の一つである。注入材料が凍結融解を受けることはまれと考えられるが、寒冷地の地表付近では考慮する必要がある。岩石においては凍結融解試験法が考案されており、本マニュアルではこれを参考に凍結融解試験を提案した。

g. 微生物による分解

有機物分解生物等が挙げられる。これについての調査例はほとんどないが、現地の土を用いて長期的な分解性について実験を実施した例がある¹¹⁾。本マニュアル（案）では現地の土を用いることが可能な飽和土養生試験を提案した。

3. 2 基本性能試験

注入材料については、下記(解説)に示す標準的な方法や現場に応じた方法により、基本性能を把握する。

(解説)

ゲルタイム、一軸圧縮強度、透水係数など注入材料の基本性能については、各材料メーカーからデータが提示されている。しかし供試体の形状や作製方法がまちまちであるなど、客観性の高い物性値が必ずしも得られていない。そこで客観的な物性値を得られるように、標準的な基本性能試験方法を下記に提案した。なお、各現場条件に応じた方法で基本性能を求める必要がある場合は別途検討するものとし、本章では基本的な室内試験に限定して整理した。なお、*印は、本マニュアル(案)で新たに提案した試験方法である。

a. 粘性試験およびゲルタイム試験*

ゲルタイムの測定法は、現在、次の種類がある。

- ① B型粘度計法
- ② ファンネル粘性法
- ③ マグネチックスタラー法
- ④ カラム浸透法
- ⑤ カップ倒立法
- ⑥ ポリエチレン袋養生法

④は土中で薬液のpHが変化することによってゲルタイムが大きく変わるような材料に適用される方法で、⑤⑥は現場等で比較的簡易にゲルタイムのみを測定する方法である。

これらの他に、注入材料のみの試験ではないが、地盤への浸透中におけるゲルタイムの測定法も考案されている²⁾。ここでは、もっとも一般的に用いられているB型粘度計法、カップ倒立法、およびカラム浸透法について、標準的な方法を示す。

粘性およびゲルタイム試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入材料の粘性およびゲルタイムの測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入材料を対象とする。

1. 3 用語の定義

注入材料の粘性は、20℃、1気圧下における水の静粘性係数に対する比率(粘性率、単位cP)をいい、原則としてB型粘度計で求めた値とする。

ゲルタイムは、注入材料の配合直後から固化するまでの時間であり、原則としてB型粘度計によって粘性が100cPに達した時点と定義する。

カップ倒立法は、ゲルタイムの簡易測定法である。

カラム浸透法は、土質によるゲルタイムの変化を測定する方法である。

2. 試験器具

2. 1 粘性の測定

(1) B型粘度計 (図-1に例を示す。あらかじめ表-1に示すような粘度計校正用標準液を用いて校正曲線あるいは、校正係数を算出したもの)

(2) 恒温水槽 (5～35℃の間を±0.5℃の精度で調整できるもの)

(3) 恒温ジャケット

(4) 温度計 (0～50℃を±0.2℃の精度で測定できるもの)

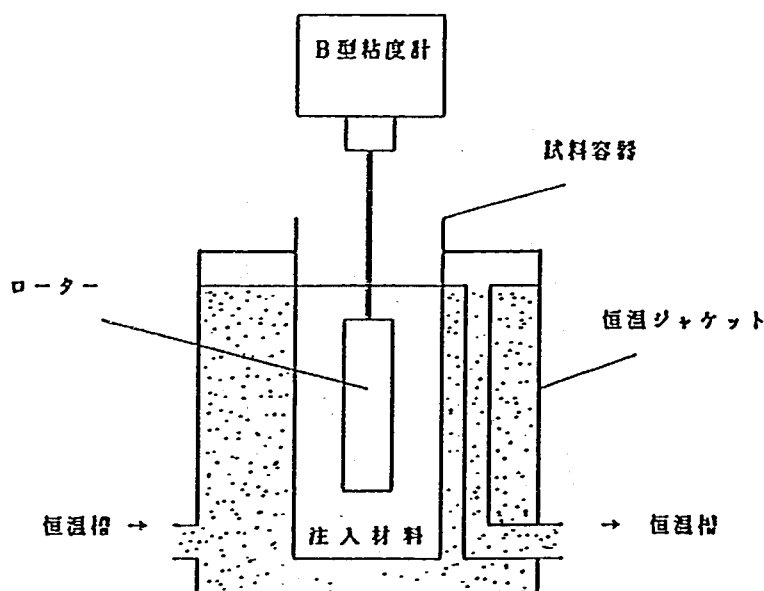


図-1 粘度測定装置の例

表-1 粘度計校正用標準液の種類と粘度 (J I S Z 8809)

種 類	粘 度 (c P) .			
	20 ℃	30 ℃	37.78 ℃	50 ℃
J S 2.5	2	1.6	1.4	1.1
J S S 5	4	3	2.5	2
J S S 10	8	6	5	4
J S S 20	17	11	9	6
J S S 50	42	25	19	12
J S S 100	85	50	35	20
J S S 200	170	90	60	35
J S S 500	450	220	130	70
J S S 1000	900	440	250	120
J S S 2000	1800	800	450	200

2. 2 ゲルタイムの測定

2. 2. 1 B型粘度計法

- (1) 恒温水槽 (5~35℃の間を±0.5℃の精度で調整できるもの)
- (2) 温度計 (0~50℃を±0.2℃の精度で測定できるもの)
- (3) ストップウォッチ (精度が1秒以内のもの)
- (4) 計量カップ (200ml)

2. 2. 2 カップ倒立法

2. 1 に準ずる。

2. 2. 3 カラム浸透法 (土中ゲルタイム測定法)

2. 2. 3 (a) 貫入試験器判定法

- (1) 注入の対象とする地層を代表する試料 (砂)
- (2) 貫入試験器 (ビカー針装置、図-2 に例を示す)
- (3) 一次元カラム注入実験 (室内小型注入実験) 装置 (図-3 に例を示す)

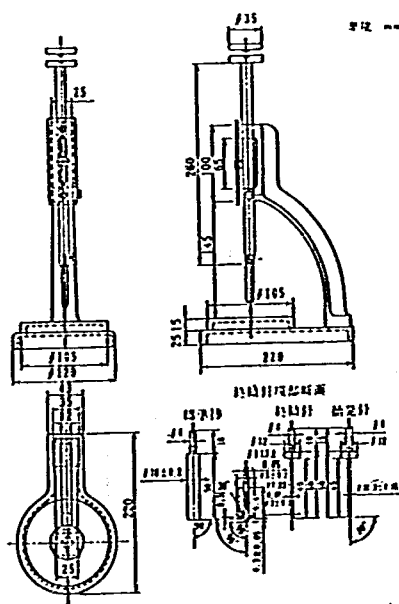


図-2 貫入試験器の例

(4) 計量カップ

(5) ストップウォッチ

2. 2. 3 (b) pH判定法

(1) 注入の対象とする地層を代表する試料(砂)

(2) 一次元カラム注入実験(室内小型注入実験)装置一式

(3) ガラス電極式pH計

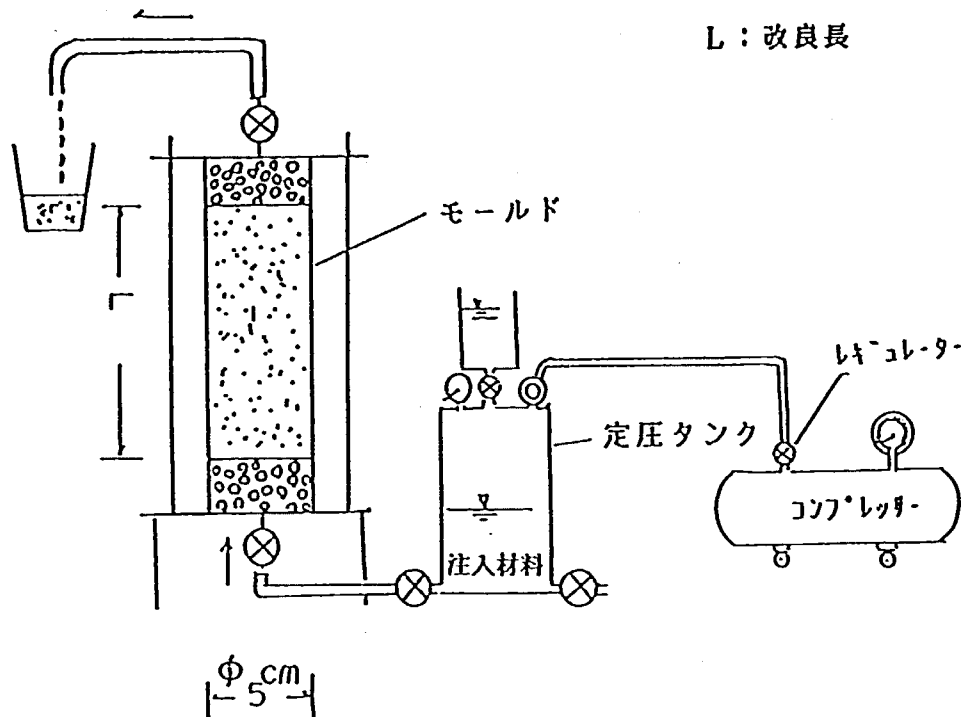


図-3 一次元カラム注入実験装置の例

3. 試料

1回の試験に対し、注入材料200mlを用意する。

4. 測定方法

4. 1 粘性の測定

- (1) B型粘度計は、測定しようとする注入材料の大略の粘度があらかじめわかっているときは、その条件の範囲に入る回転数とローターを選定する。粘度がまもなく全く不明の時は、ローター番号の大きいほうから小さいほうへ、回転数は低速から高速の方へと用いていく。
- (2) 二液性の注入材料の場合、A液(主材)、B液(硬化材)を各100mlずつ、また一液性の場合は200mlをビーカーに取り測定温度に調整された恒温水槽中で液温を測定温度に設定する。粘度計のローターについても同様に設定する。
- (3) 温度が設定温度に達したら、まずローターを粘度計本体に取り付け、次に二液性の注入材料の場合、A液、B液を混合して速やかに試料容器に移してから、一液性の注入材料の場合はそのまま恒温ジャケットにセットする(恒温水槽中で

直接測定する場合、この操作を必要としない)。あらかじめ恒温ジャケットには設定温度の水を恒温水槽より循環させておく。

- (4) ローターに付けたB型粘度計を静かに液中にまっすぐおろしてローター軸の浸液マークの所まで液中に浸漬する。
- (5) 水平水準器を見ながら水準を調整する。
- (6) 粘度計のスイッチをONにする。
- (7) 示針が安定するまで目盛板を回転させる。安定するまでに要する時間はローターの回転速度によって変わる。4 R/min以上の速い回転速度では約20～30秒かかり、より低い速度では目盛板が一回転するうちに安定する。
- (8) 示針が安定した後スイッチをOFFとし、示針の値を読み取り記録する。
- (9) 懸濁系の注入材料については、ローターの回転中に粒子が沈降し溶液と分離することがあるので、試料容器の2/3程度の直径の環状かく拌棒(図-4)で、ローターの回転に支障がない方法で試料容器中の注入材料を上下にゆっくりかく拌しながら測定する。

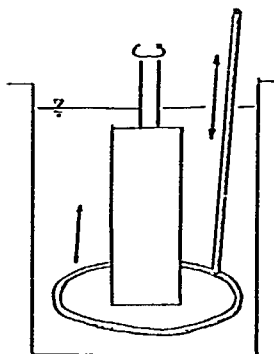


図-4 懸濁系の場合の注入材料のかく拌棒

4. 2 ゲルタイムの測定

4. 2. 1 B型粘度計法

測定法は4. 1の粘性の測定法に従う。注入材料の混合時より100 cPに達するまでの時間をゲルタイムとする。また、本手法により20℃において得られるゲルタイムをB型粘度計法による標準ゲルタイムとする。

4. 2. 2 カップ倒立法

原則としてゲルタイムが1分未満の2液性の注入材料の簡易測定法に適用する。本手法により20℃において得られるゲルタイムをカップ倒立法による標準ゲルタイムとする。

- (1) 注入材料A液(主材)、B液(硬化材)それぞれ100mlを各々の計量カップに取る。
- (2) 注入材料の液温を、恒温水槽等で調整して、測定しようとする液温にする。
- (3) A液とB液を混合し、全量の注入材料を、1秒毎に交互に各々の計量カップに移しかえる。
- (4) A液とB液を混合したときから、流動性を無くした時までの経過時間を秒の単位まで測定する(図-5)。

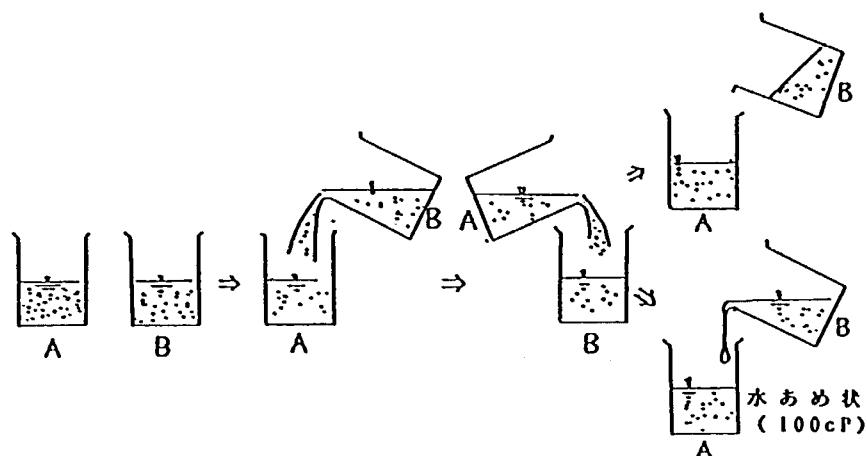


図-5 カップ倒立法によるゲルタイムの測定法

4. 2. 3 カラム浸透法（土中ゲルタイム測定法）

土質によるゲルタイムの変化を測定する場合に用いる。

4. 2. 3 (a) 貫入試験器判定法

- (1) 対象地盤の代表的な砂（気乾状態）を、対象地盤と同じ間隙率になるようにモールドに詰める。モールド直径は5 cm、モールドの長さは10 cm、測定時の室温は20℃を標準とするが、現場に応じた実験を行う場合、モールドの長さは改良半径に、温度は現場の地温とする。
- (2) 一次元カラム注入実験（室内小型注入実験）装置で、注入圧（定圧タンクの圧力）を0.2 kgf/cm²（ゲルタイムの短い注入材料や透水係数が低い土質の場合は適宜高压とするが、この場合は、注入圧と注入形態を記録しておく。）として注入材料をモールドに注入し、濾過液を35 ml採取する。
- (3) 対象地盤の代表的な砂（気乾状態）を50 ml（厚さ2 cm）入れた容器（計量カップ）に採取した濾過液をすばやく注いで砂を飽和する。
- (4) 濾過液を注いで砂を飽和した時から、時々貫入試験器の針を砂中に徐々に降下させ、容器の底まで届かなくなった時（残尺1 cm）をゲルタイムとする。

4. 2. 3 (b) pH判定法

- (1) あらかじめ注入材料の温度とpHとゲルタイムの関係をB型粘度計法などで測定しておき、4. 2. 3 (a) において採取した濾過液の温度とpHを測定してゲルタイムを求める。ただし本手法は貫入試験器判定法を補うものとして用いる。

5. 結果の整理

次の様式に従って測定結果を整理する。

5. 1 粘性の測定

- (1) 液温、作液時からの経過時間、粘性の関係について整理する。
- (2) 測定結果は下記の要領で表形式に整理する。

測定 No.	注入 材料名	配合	測定 温度 (°C)	粘度計条件		粘度測定	
				ローター No.	回転速度 (R. P. M)	作液後から の経過時間 (sec)	粘度 (cP)

5. 2 ゲルタイムの測定

5. 2. 1 B型粘度計法

- (1) 液温、作液時からの経過時間、粘性の変化やゲルタイムについて整理する。
- (2) 測定結果は下記の要領で表形式に整理する。

測定 No.	注入 材料名	配合	測定 温度 (°C)	粘度計条件		粘度測定		ゲル タイム (sec)
				ローター No.	回転速度 (R. P. M)	作液後から の経過 時間 (sec)	粘度 (cP)	

5. 2. 2 カップ倒立法

- (1) 液温、作液時からの経過時間、粘性の変化やゲルタイムについて整理する。
- (2) 測定結果は下記の要領で表形式に整理する。

測定 No.	注入 材料名	配合		測定温度 (°C)	ゲルタイム (sec)
		A液	B液		

5. 2. 3 カラム浸透法

- (1) 液温、作液時からの経過時間、粘性の変化やゲルタイムについて整理する。
- (2) 測定結果は下記の要領で表形式に整理する。

測定 No.	注入 材料名	配合	モールド中の試料土 の性質 (比重、重量、 間隙率等)	改良長 (cm)	測定温度 (°C)	ゲルタイム (sec)

b. 比重試験

比重試験はほぼ確立されており、JIS Z 8804の方法が一般に用いられている。試験法はここでは省略する。

c. pH試験*

注入材料のpH試験はほぼ確立されている。ここでは、ホモゲルのpHの測定方法についても標準的な方法を示す。

pH試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入材料およびホモゲルのpHの測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入材料およびホモゲルを対象とする。

1. 3 用語の定義

液体のpHは、その液体の水素イオンのモル濃度の $[H^+]$ (mol/l)の逆数を常用対数で表わしたものをいう。

ホモゲルのpHとは、ホモゲルを碎き蒸留水に浸漬したときの上澄液のpHである。

2. 試験器具および試薬

2. 1 試験器具

(1) ガラス電極式pH計

最小読み取り値0.1以下のもの

(2) ビーカー

容量500~1000mlのもの

(3) かき混ぜ棒 (ガラス製)

(4) 温度計

目量0.5度以下のもの

2. 2 試薬

(1) pH標準液

(2) 蒸留水

3. 試料

3. 1 試料

(1) 試料を200ml用意する。

(2) ホモゲルの場合は、2mm以下に碎き同重量の蒸留水とともにビーカーに入れ1分間軽く攪拌した後、密封して20℃で1時間放置する。この上澄み液を試料液とする。ホモゲルは標準として250g、試料液は200mlとする。

4. 測定

4. 1 pH計の調整

(1) あらかじめ電源を入れておいたpH計の電極を、ビーカー内の蒸留水に10分以上浸しておく。

(2) 中性りん酸塩pH標準液を入れたビーカーに電極を挿入し、pH計の指示値が表-1のpH標準液の温度に対応したpHに一致するようpH計を調整する。

表－1 pH標準液の各温度における pH

温度(℃)	フタル酸塩	中性りん酸塩
0	4.00	6.98
5	4.00	6.95
10	4.00	6.92
15	4.00	6.90
20	4.00	6.88
25	4.01	6.86
30	4.02	6.85
35	4.02	6.84
40	4.04	6.84

(3) フタル酸 pH 標準液に対しても、(2) の操作を行う。

(4) (2) と (3) の操作を繰り返し、両方の指示値がそれぞれの pH 標準液の温度に対応した pH に、それぞれ ± 0.1 以内で一致するように調整する。

4. 2 pH の測定

(1) ビーカー内の試料液を攪拌棒で軽くかき混ぜ、電極を試料液に挿入する。

(2) pH 計の指示値が安定した後に pH を読み取る。

5. 結果の整理

試験結果について次の事項を報告する。

(1) pH

(2) ホモゲルの場合は、試料液を作製するのに要した試料の重量と碎片のおおよその粒度、上澄み液の容量。

(3) その他特記すべき事項

d. 強度試験用供試体および透水試験用供試体の作製法*

供試体は、ホモゲル供試体とサンドゲル供試体に分けられる。一般に溶液型材料は浸透注入、懸濁型は割裂注入となることが多いため、溶液型ではサンドゲルを、懸濁型ではホモゲルを作製して強度試験および透水試験に供することが多い。しかし超微粒子材料など一部の懸濁型材料は浸透注入も可能との考えからサンドゲル強度を測定する場合もある。逆に溶液型であっても割裂注入が生じることもあるので、注入材料の性質を判定する上からは、両方の供試体を作り比較することが望ましい。したがってここでも両方の供試体の作製法を提案している。供試体の作製方法は、規格のモールドを利用する方法、特殊な塩ビ管を利用する方法、大きなモールドで注入を行ない、この固化体からサンプリングを実施する方法などがある。砂に注入材料を混ぜる方法は、吸引する方法、圧入する方法、砂と注入材料を攪拌混合する方法等があり、圧入条件等も $0.1 \sim$ 数 kgf/cm^2 までばらつきがある。砂は一般に豊浦標準砂が使用されるが、注入前の含水状態は乾燥から飽和までさまざまである。標準的な強度試験用供試体作製法としては、土質工学会¹³⁾、国鉄¹⁴⁾、国土開発技術研究センター²⁾等のものがあり、材料メーカー各社でも独自の方法を有する。また、Christopher et al¹⁵⁾は、ASTM D4320の策定のために供試体作製にかかわる諸条件（供試体サイズ、砂質、注入方法、注入量、注入圧力、整形方法、養生方法、養生期間など）が供試体の一軸圧縮強度に及ぼす影響について検討し、養生方法、養生期間、供試体サイズ、砂質などが一軸圧縮強度に及ぼす影響の大きいことを明らかにして、その成果をASTM D4320に反映させている。本マニュアル（案）に示す方法は、これらの成果を踏まえ、供試体作製に伴う諸条件を詳細に指定し、供試体のばらつきを最小限に抑えるように考案したものである。

強度試験用供試体および透水試験用供試体の作製法

強度試験用には直径5 cm・高さ10 cmの円柱状供試体を、透水試験用には直径10 cm・高さ12 cmの円柱状供試体を用いる。なお、注入材料には、溶液型と懸濁型があり、物性が異なる。したがって供試体の作製法もそれぞれ区別する。

<溶液型注入材料のホモゲル供試体作製法>

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、溶液型注入材料のホモゲル供試体の作製法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

溶液型注入材料に適用する。

1. 3 用語の定義

溶液型注入材料とは、懸濁粒子を含まない注入材料である。ホモゲルとは、砂などを含まない、注入材料のみからなる固化体をいう。

2. 試験器具

2. 1 供試体の作製に用いる器具

(1) モールド

強度試験用の供試体作製には、JIS A 1132 4.2.1～4.2.4に準じた内径5 cm、高さ10 cmの内面の平滑なステンレス、鉄（内面にハードクロムめっき処理したもの）、またはアクリル、塩化ビニールのいずれかの円筒型モールドを用いる。透水試験用の供試体作製には、内径10 cm、高さ12 cmの、同様の材質の円筒型モールドを用いる。

(2) ガラス板

強度試験用の供試体作成には、7～8 cm角程度の平面度0.02 mm以内、厚さ6 mm以上のガラス板2枚を用意する。透水試験用の供試体作製には、同様の材質の12～15 cm角のガラス板2枚を用意する。

(3) グリス状離型剤（グリス、ワセリン等）

(4) メスシリンダー（200 ml）

(5) ビーカー（強度試験用は400 ml、透水試験用は1,000 ml）

(6) 温度計（目量0.5度以下のもの）

(7) ストップウォッチ（1秒まで測定できるもの）

(8) 攪拌棒（ガラス製）

(9) 強度試験用の供試体作製には直径4.9 cmの、透水試験用の供試体作製には直径9.9 cmの押出しプランジャーを用意する。

3. 試料

強度試験用は200ml、透水試験用は1,000ml用意する。

4. 供試体の作製方法

- (1) 試験時の温度は $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ とする。
- (2) ガラス板の上部にグリスを塗布する。
- (3) モールドの内面、底部、および上部にグリスを塗布し、(1)のガラス板上に水平に密着させる。
- (4) 注入材料の主剤、反応剤を2つのビーカーの間で交互に移液することにより混合し、ゲル化に近い状態でモールドに注ぎこむ。この際、注入材料がガラス板とモールド底部の間から漏れるときは、ゲル化するまでモールドを手で押さえる。
- (5) モールド上部まで注入材料を充填した後、下面にグリスを塗布したガラス板でモールドを押さえて密着し、必要であれば重しを置いてゲル化させる。
- (6) 固結後プランジャーで静かに押し出して脱型する。
- (7) 離しろう水が多く定型の供試体の作製が困難な材料の場合は、上記サイズよりも大型のモールドを用いて供試体を作製し、脱型後整形する。

<懸濁型注入材料のホモゲル供試体作製法>

1. 総則

1.1 目的

この試験法は、懸濁型注入材料のホモゲル供試体の作製法を規定することを目的とする。

1.2 適用範囲

懸濁型注入材料に適用する。

1.3 用語の定義

懸濁型注入材料とは、懸濁粒子を含む注入材料をいう。ホモゲルとは、砂などを含まない、注入材料のみからなる固化体をいう。

2. 試験器具

2.1 供試体の作製に用いる器具

- (1) 下記の(2)以外は、溶液型に準じる。
- (2) カッターナイフ (刃は幅2cm以上で肉厚のストレートエッジのもの)

3. 試料

強度試験用は200ml、透水試験用は1,000ml用意する。

4. 供試体の作製方法

- (1) 下記の(2)(3)以外は溶液型に準じる。
- (2) 注入材料がゲル化する直前まで常時攪拌し、粒子が拡散した状態でゲル化直前にモールドに注ぎこむ。
- (3) モールド上部まで注入材料を充填した後、モールド上部をビニール布等で覆い乾燥しないようにし、カッターナイフで水平に削った後脱型する。カッター刃は刃先が磨耗しやすいので、供試体20個作製毎に交換する。

<溶液型注入材料のサンドゲル供試体作製法>

1. 総則

1.1 目的

この試験法は、溶液型注入材料のサンドゲル供試体の作製法を規定することを目的とする。

1.2 適用範囲

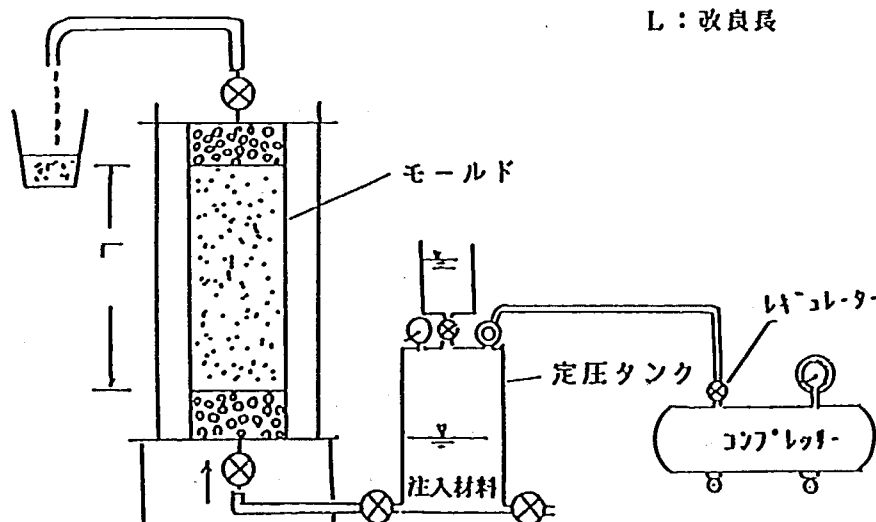
溶液型注入材料に適用する。

1.3 用語の定義

溶液型注入材料とは、懸濁粒子を含まない注入材料である。サンドゲルとは、砂を注入材料で固結したものをいい、ここでは浸透注入による供試体をさすものとする。

2. 試験器具

注入装置は図-1に示すように、土質によるゲルタイムの変化の測定に用いる一次元カラム注入実験装置と同様の構造の装置とする。



φ 5 cm
図-1 一次元カラム注入実験装置の例

- (1) サンドゲル用モールド（強度試験用は、外径56mm以上、内径50mm、長さ180mmで、ステンレス製、または内面をハードクロムめっき処理した鉄製のもの。透水試験用は、外径106mm以上、内径50mm、長さ200mmで同様の材質のもの）
- (2) モールド用上ふた、下ふた（正面形が円型、側面形が凸型のもので、強度試験用は、外径100mm、外枠部厚さ10mmとする。突出部は、直径49.5mmで長さ20mmとする。材質はステンレス製、または内面をハードクロムめっき処理した鉄製とし、ふたは4個所で固定するものとする。透水試験用は、外径150mm、外枠部厚さ10mmとする。突出部は、直径99.5mmで長さ20mmとする。）
- (3) プランジャー（モールド用ふたの突出部と同じ内径で、厚さは供試体直径の1/2以上のもの）
- (4) 金網（呼び寸法425 μ mで耐食性のもの）
- (5) 木製ハンマー（重量500g）
- (6) グリス状離型材（グリス、ワセリンなど）
- (7) コンプレッサー（最大圧力5～7kgf/cm²程度のもの）
- (8) 圧力調節弁（0.1kgf/cm²の調節が可能なもの）
- (9) 注入材料容器（耐圧容器でアクリルなど中が見通せるもの。容量は500ml～1,000ml以上のもの）
- (10) メスシリンダー（500ml～1,000ml）
- (11) ピーカー（500ml～1,000ml）
- (12) 温度計（目量0.5℃以内のもの）
- (13) ストップウォッチ（1秒以内のもの）
- (14) ストレートエッジ

3. 試料

必要量の注入材料（強度試験用は200ml、透水試験用は1,000ml）、標準砂および粗目砂（フィルター材）を用意する。粗目砂は水洗いした直径2～3mmのものをを用いる。

4. 供試体の作製・養生

4.1 締固め

- (1) 間隙率40%になるのに必要な量の標準砂をモールドに一度に入れて、砂の上面が所定の高さになるまでモールド側面を木製ハンマーで軽くたたいて締固める。このとき、モールドの上部と下部を区別できるように記録しておく。
- (2) 締固めた試料の上端、下端に金網およびフィルター材を入れる。フィルター材は上端、下端それぞれ1.5cmとする。
- (3) モールドの上ふたと下ふたを締め付ける。

4. 2 注入材料の注入

- (1) 室温は $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ とする。
- (2) 試料の入ったモールドを、締固め時の上面側が上になるように注入装置に接続する。
- (3) 試料およびフィルター材を飽和させるために注入装置の圧力容器に所定量（強度試験用は 200 ml 、透水試験用は $1,000\text{ ml}$ ）の水を入れた後、 0.2 kgf/cm^2 で加圧して水をモールド中に注入する。
- (4) 所定のゲル化時間に調合した注入材料所定量（強度試験用は 200 ml 、透水試験用は $1,000\text{ ml}$ ）を圧力容器に入れる。
- (5) 圧力容器の圧力を徐々に上げながら、注入材料をモールド中に注入する。注入圧力は、注入材料の粘性やゲルタイムなどの条件が許す範囲で出来る限り低圧とし、通常、 0.2 kgf/cm^2 とする。
- (6) モールド上部の排出口から注入材料が流出しはじめたら注入圧力を一定に保ち、所定量の注入材料をほぼ注入したらその後モールド上下端のコックを閉じて注入を終了する。
- (7) 24時間モールドを静置する。

4. 3 脱型および養生

- (1) モールド中のフィルター材および金網を取り除き、プランジャーを締固め時の上面側から挿入して供試体を静かに押し出す。
- (2) マイターボックスに入れ、端面を整形する。整形においては、締固め時の上面側かつプランジャーによる押出し側を 2 cm 、下面側を 1 cm 切断する。
- (3) 供試体は水分の蒸発、発散がないように密封材で被覆する。密封材はブタジェンフィルム、パラフィンワックスなどを用いる。

<懸濁型注入材料のサンドゲル供試体作製法>

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、懸濁型注入材料のサンドゲル供試体の作製法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

懸濁型注入材料を対象とする。

1. 3 用語の定義

懸濁型注入材料とは、懸濁粒子を含む注入材料をいう。サンドゲルとは、砂を注入材料で固結したものをいい、ここでは砂と注入材料のかく拌による供試体をさすものとする。

2. 試験器具

2. 1 供試体の作製に用いる器具

(1) 下記の(2)以外は、ホモゲルに準じる。

(2) 練り混ぜ用の鉢（ガラスまたはアルミナ）およびさじ（ステンレス）

3. 試料

必要量の注入材料および標準砂を用意する。

4. 供試体の作製・養生

4. 1 供試体の作製

(1) 材料を調合した後、 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ でゲルタイムの数分前まで注入材料をゆっくり攪拌しておく。

(2) モールドの内面にグリス状離型材を塗布する。

(3) 練り混ぜ用の鉢に気乾状態の標準砂500gと薬液300mlを入れ、さじを用いて速やかに激しく30秒間（ゲルタイムが遅い場合は約1分間）攪拌混合する。

(4) 続いて練り混ぜ用鉢の端を木製ハンマーで叩いて、試料中のエアを追い出すと同時に、注入材料と砂を分離させて上澄み液は捨てる。

(5) モールド中に3層に分けて試料を投入し、プランジャーで1層当たり2～5回強く叩く。

(6) 詰め残った標準砂は直ちに水洗いし、後に乾燥して重量を測定する。この結果、モールド中の砂以外の体積率（注入材料が入る前の間隙率に相当）が $40 \pm 3\%$ の範囲にあるものを標準供試体として用いる。

(7) (3)～(6)の作業の代わりに、あらかじめ間隙率が40%になる重量の標準砂を用意し、これを注入材料と攪拌して、砂を全てモールドに入れるようにしてもよい。しかしいずれの場合にも標準砂の密度が供試体下～中央部と上部で充分均一になるようにすること、また、注入材料が分離しないように砂と注入材料を素早く攪拌することに注意する。

(8) モールド上部をビニールなどで覆い乾燥しないようにする。

4. 2 脱型および養生

(1) 24時間後、マイターボックスに入れ、端面を水平に削った後脱型する。

(2) 供試体は水分の蒸発、発散がないように密封材で被覆する。密封材はブタジェンフィルム、パラフィンワックスなどを用いる。

e. 一軸圧縮試験

本試験法は通常の岩や土の一軸圧縮試験法と同一である。標準的な試験法としては、JIS A 1216-1961（土の一軸圧縮試験方法）、JIS M 0302（岩石の圧縮強さ試験法）ならびに同0301（岩石の強さ試験用試料の採取方法及び供試体の作製方法）、土質工学会基準JSF T 511-1990（土の一軸圧縮試験方法）、建設省土木試験基準KDK S 0502-1968（岩石の一軸圧縮試験方法）等がある。ここでは、試験法の詳細については省略するが、サンドゲルの製作条件によって一軸圧縮強度は大きく変化することから、供試体の数は各試験法で規定されている数（2～3個）より多めに設定するのが望ましい。

f. その他の強度試験（三軸圧縮、コーン貫入、曲げ、引張り、ねじり、付着等）

これらの試験は、その必要に応じて注入固化体に適用される場合がある。なお、試験法については省略する。

g. 室内透水試験

室内透水試験の方法は、土質材料に関する通常の試験法（例えば JSF T 311-1990、JIS A 1218 等）と同様である。室内透水試験には定水位透水試験と変水位透水試験があるが、室内で作製した供試体は一般に透水係数が低いので通常変水位透水試験を行なう。注入材料の粘性やゲルタイム、供試体の作製条件に大きな違いがなく、浸透注入がなされたサンドゲルであれば、作製初期は注入材料の種類にかかわらずほぼ一定のかなり低い透水係数（ $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/sec）を持ち、室内試験による改良透水係数は必ずしも材料の性能を有意に示すとはいえず（参考資料1の図-5～7を参照）、むしろ作製条件によるばらつきの方が大きい場合が多い。注入材料の性能による相違を比較するためには、供試体の作製条件を厳密に規定し、かなり多くの透水試験を実施する必要がある。また、劣化による透水係数のわずかな変化を測定するためには、異なる供試体で試験するよりも、単一の供試体で経時的に測定する方が有効である。なお、試験法については省略する。

h. 安全性試験

注入材料の安全性は、未反応の主剤や添加剤そのものの安全性・未反応の注入材料と地盤や地下水の反応による二次物質の安全性・ゲルの安全性・ゲルから溶出する物質の安全性・ゲルと地盤や地下水の反応による二次物質の安全性・排水の安全性、に分けられる。生活に使用する水の安全性を試験する方法は大きく、有害物質試験、毒性試験、生活環境に関する試験に分けられ、注入材料も地下水に流出する可能性があることから上記の試験によって安全性を確認することが基準や指針によって義務づけられている。

有害物質試験は、注入材料に含まれる有害物質を化学分析によって検査するものであり次の方法等がある。

- | | |
|-----------|-----------------------|
| (1) 全水銀 | JIS K 0102.66.1 による方法 |
| (2) カドミウム | JIS K 0102.55. による方法 |
| (3) 六価クロム | JIS K 0102.65.2 による方法 |
| (4) 鉛 | JIS K 0102.54. による方法 |
| (5) ヒ素 | JIS K 0102.61. による方法 |
| (6) 有機リン | JIS K 0102.46. による方法 |
| (7) 全シアン | JIS K 0102.38. による方法 |
| (8) PCB | JIS K 0093 による方法 |

毒性試験は生物への影響を動物実験等によって調べるものであり、次の方法等がある。

- (1) LD₅₀ (複数のマウス経口投与により、重量にして全体の半分の死亡するのに要する薬液量)
- (2) BOD (生物化学的酸素消費量) JIS K 0102.21.による方法
- (3) COD (化学的酸素消費量) JIS K 0102.18.による方法
- (4) SS (浮遊物質) JIS K 0102.14.による方法
- (5) LC₅₀ (ラット経口投与による平均残留薬液量) JIS K 0102.71.による方法

生活環境に関する試験は、飲料水としての適否などに関するもので次の方法等がある。

- (1) 全シリカ量 JIS K 0101.44.による方法
- (2) BOD JIS K 0102.21.による方法
- (3) COD JIS K 0102.18.による方法
- (4) SS JIS K 0102.14.による方法
- (5) TOC (全炭素量) JIS K 0102.22.による方法

また、建設省が昭和49年7月に通達した「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針について」においては、薬液注入工法における水質基準、排水基準が設けられている。参考として以下に関連する水質基準の抜粋を示す。なお、試験法については省略する。

表-3.2.1 人の健康に関する環境基準¹⁸⁾

項目	カドミウム	シアン	有機燐	鉛	クロム (6価)	ヒ素	総水銀	トリハル水素	P C B
基準値	0.01mg/l 以下	検出されないこと	検出されないこと	0.1mg/l 以下	0.05mg/l 以下	0.05mg/l 以下	0.0005mg/l 以下	検出されないこと	検出されないこと
測定方法	日本工業規格 K0102 (以下規格という) 55.2に掲げる方法	規格38.1.2および38.2に定める方法又は、規格38.1.2および38.3に定める方法	環境庁告示第41号付表1に掲げる方法。又は、第41号付表2に掲げる方法。又は、EPAにあっては、規格31.1に定める方法(第41号付表2を除く)方法にあっては、付表2に掲げる方法	規格54.2に定める方法	規格65.2に定める方法	規格61に定める方法	環境庁告示第41号付表3に掲げる方法	環境庁告示第41号付表4の1および第2に掲げる方法	環境庁告示第41号付表5に掲げる方法

1. 基準値は最高値とする。ただし、総水銀に係る基準値については、年間平均値とする。

2. 有機燐とは、パラチオン、メチルジメトンおよびEPAをいう。

3. (検出されないこと)とは、測定方法の欄に掲げる方法により測定した場合において、その結果が当該方法の定量限界を下回ることをいう。

なお、アルキル水銀の項目については、ガスクロマトグラフ法および薄層クロマトグラフ分離-原子吸光光度法の両方法によってアルキル水銀を検出した場合以外の場合をいうものとする。

4. 総水銀に係る基準値は、河川においてその汚染が自然的原因によることが明らかである場合に限り、0.001mg/l以下とする。

注) 環境庁告示第59号、1971.12.28

表-3.2.2 飲料水基準一覽¹⁹⁾[illegible]

注 1) 2) 3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12) 13) 14) 15) 16) 17) 18) 19) 20) 21) 22) 23) 24) 25) 26) 27) 28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35) 36) 37) 38) 39) 40) 41) 42) 43) 44) 45) 46) 47) 48) 49) 50) 51) 52) 53) 54) 55) 56) 57) 58) 59) 60) 61) 62) 63) 64) 65) 66) 67) 68) 69) 70) 71) 72) 73) 74) 75) 76) 77) 78) 79) 80) 81) 82) 83) 84) 85) 86) 87) 88) 89) 90) 91) 92) 93) 94) 95) 96) 97) 98) 99) 100) 101) 102) 103) 104) 105) 106) 107) 108) 109) 110) 111) 112) 113) 114) 115) 116) 117) 118) 119) 120) 121) 122) 123) 124) 125) 126) 127) 128) 129) 130) 131) 132) 133) 134) 135) 136) 137) 138) 139) 140) 141) 142) 143) 144) 145) 146) 147) 148) 149) 150) 151) 152) 153) 154) 155) 156) 157) 158) 159) 160) 161) 162) 163) 164) 165) 166) 167) 168) 169) 170) 171) 172) 173) 174) 175) 176) 177) 178) 179) 180) 181) 182) 183) 184) 185) 186) 187) 188) 189) 190) 191) 192) 193) 194) 195) 196) 197) 198) 199) 200) 201) 202) 203) 204) 205) 206) 207) 208) 209) 210) 211) 212) 213) 214) 215) 216) 217) 218) 219) 220) 221) 222) 223) 224) 225) 226) 227) 228) 229) 230) 231) 232) 233) 234) 235) 236) 237) 238) 239) 240) 241) 242) 243) 244) 245) 246) 247) 248) 249) 250) 251) 252) 253) 254) 255) 256) 257) 258) 259) 260) 261) 262) 263) 264) 265) 266) 267) 268) 269) 270) 271) 272) 273) 274) 275) 276) 277) 278) 279) 280) 281) 282) 283) 284) 285) 286) 287) 288) 289) 290) 291) 292) 293) 294) 295) 296) 297) 298) 299) 300) 301) 302) 303) 304) 305) 306) 307) 308) 309) 310) 311) 312) 313) 314) 315) 316) 317) 318) 319) 320) 321) 322) 323) 324) 325) 326) 327) 328) 329) 330) 331) 332) 333) 334) 335) 336) 337) 338) 339) 340) 341) 342) 343) 344) 345) 346) 347) 348) 349) 350) 351) 352) 353) 354) 355) 356) 357) 358) 359) 360) 361) 362) 363) 364) 365) 366) 367) 368) 369) 370) 371) 372) 373) 374) 375) 376) 377) 378) 379) 380) 381) 382) 383) 384) 385) 386) 387) 388) 389) 390) 391) 392) 393) 394) 395) 396) 397) 398) 399) 400) 401) 402) 403) 404) 405) 406) 407) 408) 409) 410) 411) 412) 413) 414) 415) 416) 417) 418) 419) 420) 421) 422) 423) 424) 425) 426) 427) 428) 429) 430) 431) 432) 433) 434) 435) 436) 437) 438) 439) 440) 441) 442) 443) 444) 445) 446) 447) 448) 449) 450) 451) 452) 453) 454) 455) 456) 457) 458) 459) 460) 461) 462) 463) 464) 465) 466) 467) 468) 469) 470) 471) 472) 473) 474) 475) 476) 477) 478) 479) 480) 481) 482) 483) 484) 485) 486) 487) 488) 489) 490) 491) 492) 493) 494) 495) 496) 497) 498) 499) 500) 501) 502) 503) 504) 505) 506) 507) 508) 509) 510) 511) 512) 513) 514) 515) 516) 517) 518) 519) 520) 521) 522) 523) 524) 525) 526) 527) 528) 529) 530) 531) 532) 533) 534) 535) 536) 537) 538) 539) 540) 541) 542) 543) 544) 545) 546) 547) 548) 549) 550) 551) 552) 553) 554) 555) 556) 557) 558) 559) 560) 561) 562) 563) 564) 565) 566) 567) 568) 569) 570) 571) 572) 573) 574) 575) 576) 577) 578) 579) 580) 581) 582) 583) 584) 585) 586) 587) 588) 589) 590) 591) 592) 593) 594) 595) 596) 597) 598) 599) 600) 601) 602) 603) 604) 605) 606) 607) 608) 609) 610) 611) 612) 613) 614) 615) 616) 617) 618) 619) 620) 621) 622) 623) 624) 625) 626) 627) 628) 629) 630) 631) 632) 633) 634) 635) 636) 637) 638) 639) 640) 641) 642) 643) 644) 645) 646) 647) 648) 649) 650) 651) 652) 653) 654) 655) 656) 657) 658) 659) 660) 661) 662) 663) 664) 665) 666) 667) 668) 669) 670) 671) 672) 673) 674) 675) 676) 677) 678) 679) 680) 681) 682) 683) 684) 685) 686) 687) 688) 689) 690) 691) 692) 693) 694) 695) 696) 697) 698) 699) 700) 701) 702) 703) 704) 705) 706) 707) 708) 709) 710) 711) 712) 713) 714) 715) 716) 717) 718) 719) 720) 721) 722) 723) 724) 725) 726) 727) 728) 729) 730) 731) 732) 733) 734) 735) 736) 737) 738) 739) 740) 741) 742) 743) 744) 745) 746) 747) 748) 749) 750) 751) 752) 753) 754) 755) 756) 757) 758) 759) 760) 761) 762) 763) 764) 765) 766) 767) 768) 769) 770) 771) 772) 773) 774) 775) 776) 777) 778) 779) 780) 781) 782) 783) 784) 785) 786) 787) 788) 789) 790) 791) 792) 793) 794) 795) 796) 797) 798) 799) 800) 801) 802) 803) 804) 805) 806) 807) 808) 809) 810) 811) 812) 813) 814) 815) 816) 817) 818) 819) 820) 821) 822) 823) 824) 825) 826) 827) 828) 829) 830) 831) 832) 833) 834) 835) 836) 837) 838) 839) 840)

表-3.2.3 排水基準一覽²⁰⁾

項 目	公共用水域への全国一律排水基準	東京都公害防止条例 (上乗せ基準)
有害物質	カドミウム 0.1 mg/ℓ シアン 1 mg/ℓ 有機リン 1 mg/ℓ 鉛 1 mg/ℓ 六価クロム 0.5 mg/ℓ ヒ素 0.5 mg/ℓ 総水銀 0.005 mg/ℓ アルキル水銀 検出されないこと PCB 0.003 mg/ℓ	カドミウム 0.1 mg/ℓ シアン 1 mg/ℓ 有機リン 1 mg/ℓ 鉛 1 mg/ℓ 六価クロム 0.5 mg/ℓ ヒ素 0.5 mg/ℓ 総水銀 検出されないこと アルキル水銀 検出されないこと PCB 0.003 mg/ℓ
有害物質以外による汚染状態	水素イオン濃度 pH 5.8~8.6 水素イオン濃度(海域) pH 5.0~9.0 BOD 160mg/ℓ(日間平均 120mg/ℓ) COD 160mg/ℓ(日間平均 120mg/ℓ) 浮遊物質 200mg/ℓ(日間平均 150mg/ℓ) n-ヘキサン抽出物含有量 5 mg/ℓ 鉱油類 30mg/ℓ 動植物油脂類 5 mg/ℓ フェノール類 3 mg/ℓ 銅 5 mg/ℓ 亜鉛 10mg/ℓ 溶解性鉄 10mg/ℓ 溶解性マンガン 2 mg/ℓ クロム 15mg/ℓ フッ素 日間平均 3000 大腸菌群数(1ℓにつき) 40度以下 温度 異常な着色または発泡の認められないこと 外観 臭気度4をこえる不快な臭気をおびていないこと 臭気	pH 5.8~8.6 日間平均20mg/ℓ、最大25mg/ℓ 日間平均30mg/ℓ、最大40mg/ℓ 日間平均70mg/ℓ、最大90mg/ℓ 5 mg/ℓ 1 mg/ℓ 1 mg/ℓ 5 mg/ℓ 10mg/ℓ 10mg/ℓ 2 mg/ℓ 15mg/ℓ 40度以下 異常な着色または発泡の認められないこと 臭気度4をこえる不快な臭気をおびていないこと

注) 総理府令第35号, 1971.6.21

表－3.2.4 薬液注入工事による建設工事の施工に関する暫定指針における
水質基準および排水基準²¹⁾

別表-1 水質基準

薬液の種類		検査項目	検査方法	水質基準
水ガラス系	有機物を含まないもの	水素イオン濃度	水質基準に関する省令（昭和41年厚生省令第11号。以下「厚生省令」という。）又は日本工業規格 K 0102 の8に定める方法。	pH 値 8.6 以下（工事直前の測定値が 8.6 を超えるときは、当該測定値以下）であること。
	有機物を含むもの	水素イオン濃度	同上	同上
		過マンガン酸カリウム消費量	厚生省令に定める方法。	10 ppm 以下（工事直前の測定値が 10 ppm を超えるときは、当該測定値以下）であること。

（注）昭和41年厚生省令第11号は廃止され、新たな省令（昭和53年厚生省令第56号）になっている。

別表-2 排水基準

薬液の種類		検査項目	検査方法	排水基準
水ガラス系	有機物を含まないもの	水素イオン濃度	日本工業規格 K 0102 の 8 に定める方法	排水基準に定める総理府令（昭和46年総理府令第35号）に定める一般基準に適合すること。
	有機物を含むもの	水素イオン濃度	同 上	同 上
		生物化学的酸素要求量 又は化学的酸素要求量	日本工業規格 K 0102 の 16 又は 13 に定める方法	排水基準を定める総理府令に定める一般基準に適合すること。

表-3.2.5 生活環境の保全に関する環境基準¹⁸⁾

河 川

1) 河川 (湖沼を除く)

項目 類型	利用目的の 適 応 性	基 準 値					当該水域
		水素イオン 濃度 (pH)	生物化学的 酸素要求量 (BOD)	浮遊物質 (SS)	溶存酸素量 (DO)	大腸菌群数	
AA	水道1級 自然環境保全 の全おけるもの	6.5以上 8.5以下	1mg/ℓ 以下	25mg/ℓ 以下	7.5mg/ℓ 以上	50MPN / 100ℓ 以下	水域類型ご とに指定す る水域
A	水道2級 自然環境保全 の全おけるもの	6.5以上 8.5以下	2mg/ℓ 以下	25mg/ℓ 以下	7.5mg/ℓ 以上	1,000MPN / 100ℓ 以下	
B	水道3級 おけるもの	6.5以上 8.5以下	3mg/ℓ 以下	25mg/ℓ 以下	5mg/ℓ 以上	5,000MPN / 100ℓ 以下	
C	産業用水1級 おけるもの	6.5以上 8.5以下	5mg/ℓ 以下	50mg/ℓ 以下	5mg/ℓ 以上	-	
D	工業用水2級 おけるもの	6.0以上 8.5以下	8mg/ℓ 以下	100mg/ℓ 以下	2mg/ℓ 以上	-	
E	工業用水3級 環境保全	6.0以上 8.5以下	10mg/ℓ 以下	ごみ等の浮 遊が認めら れないこと	2mg/ℓ 以上	5,000MPN / 100ℓ 以下	
測定方法		規格12.1に 定める方法	規格21に定 める方法	環境庁告示 第41号付表 6に掲げる 方法	規格32に定 める方法	最少数による 定量法	

2) 湖沼 (天然湖沼および貯水量1,000 万立方メートル以上の人工湖)

項目 類型	利用目的の 適 応 性	基 準 値					当該水域
		水素イオン 濃度 (pH)	化学的酸素 要求量 (COD)	浮遊物質 (SS)	溶存酸素量 (DO)	大腸菌群数	
AA	水道1級 自然環境保全 の全おけるもの	6.5以上 8.5以下	1mg/ℓ 以下	1mg/ℓ 以下	7.5mg/ℓ 以上	50MPN / 100ℓ 以下	水域類型ご とに指定す る水域
A	水道2級 おけるもの	6.5以上 8.5以下	3mg/ℓ 以下	5mg/ℓ 以下	7.5mg/ℓ 以上	1,000MPN / 100ℓ 以下	
B	産業用水1級 おけるもの	6.5以上 8.5以下	5mg/ℓ 以下	15mg/ℓ 以下	5mg/ℓ 以上	-	
C	工業用水2級 環境保全	6.0以上 8.5以下	8mg/ℓ 以下	ごみ等の浮 遊が認めら れないこと	2mg/ℓ 以上	-	
測定方法		規格12.1に 定める方法	規格17に定 める方法	環境庁告示 第41号付表 6に掲げる 方法	規格32に定 める方法	最少数による 定量法	

備考 水産1級、水産2級および水産3級については、当分の間、浮遊物質量の項目の基準値は適用しない。

表-3.2.6 生活環境の保全に関する環境基準（表-3.2.5 の続き）

2) 湖沼のN, P (追加)

項目 類型	利用目的の適応性	基準 値		当該水域
		全 窒 素	全 リ ン	
I	自然環境保全およびⅡ以下の図に掲げるもの	0.1mg/ℓ以下	0.005mg/ℓ以下	第1の2の水 (2)のりとする 域に指定する 水域
Ⅱ	水道1, 2, 3級（特殊なものを除く） 水産1級およびⅢ以下の図に掲げるもの	0.2mg/ℓ以下	0.01mg/ℓ以下	
Ⅲ	水道3級（特殊なものを除く） およびⅣ以下の図に掲げるもの	0.4mg/ℓ以下	0.03mg/ℓ以下	
Ⅳ	水産2級およびⅤの図に掲げるもの	0.6mg/ℓ以下	0.05mg/ℓ以下	
Ⅴ	水工農用 産業用水 3級 川川保 種水全	1mg/ℓ以下	0.1mg/ℓ以下	
測定方法		付表7に掲げる方法	付表8に掲げる方法	

3) 海 域

項目 類型	利用目的の適応性	基準 値					当該水域
		水素イオン濃度 (pH)	化学的酸素要求量 (COD)	溶存酸素量 (DO)	大腸菌数	n-ヘキサン抽出物質 (油分等)	
A	水産1級 自然環境保全及びB以下の図に掲げるもの	7.8以上 8.3以下	2mg/ℓ以下	7.5mg/ℓ以上	1000MPN /100ml以下	検出されないこと。	*水域類型ごとに指定する水域
B	水産2級 工業用水及びCの図に掲げるもの	7.8以上 8.3以下	3mg/ℓ以下	5mg/ℓ以上		検出されないこと。	
C	環境保全	7.0以上 8.3以下	8mg/ℓ以下	2mg/ℓ以上			
測定方法		規格12.1に定める方法	規格17に定める方法（ただし、B類型の工業用水及び水産2級のうちノリ養殖の利水点における測定方法はアルカリ性法）	規格32に定める方法	最確数による定量法	付表7に掲げる方法	

- 備考
1. 基準値は、年間平均値とする。
 2. 自然環境保全については、全水域の項目の基準値は適用しない。
 3. 自然環境保全1級は、自然環境保全1級の図に掲げるもの。
 4. 自然環境保全2級は、自然環境保全2級の図に掲げるもの。
 5. 水産1級は、水産1級の図に掲げるもの。
 6. 水産2級は、水産2級の図に掲げるもの。
 7. 水産3級は、水産3級の図に掲げるもの。
 8. 工業用水1級は、工業用水1級の図に掲げるもの。
 9. 工業用水2級は、工業用水2級の図に掲げるもの。
 10. 工業用水3級は、工業用水3級の図に掲げるもの。
 11. 環境保全は、環境保全の図に掲げるもの。
- 注）環境庁告示第59号、1971.12.28

3. 3 耐久性試験

注入材料の耐久性は、下記(解説)に示す標準的な方法や、現場に応じた方法によって把握する。

(解説)

注入材料の耐久性については、溶脱に対する耐久性など一部の性能に関するデータが得られているのみであり、その他多くの耐久性は不明である。また、実施されている耐久性の試験方法もまちまちである。そこで客観的な物性値が得られるように、強度や変形性、透水性などの主要な項目について、標準的な耐久性試験方法を下記に提案するものとした。また、本試験法は各現場条件に応じた方法で耐久性を求める必要のある場合にも土質や水質等を変更することによって適用可能なものとなっている。なお、*印は本マニュアル(案)で提案した試験方法である。

a. 密封養生試験*

本試験法は、注入固化体周囲と物質の出入りがない条件下でのゲルの各種耐久性を試験するもので、地下水位より上での注入固化体の長期的変化を再現しようとするものである。本試験における密封養生の方法は、他の耐久性試験結果と比較する上でも最も基本的な耐久性試験方法である。

密封養生試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、密封状態における注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の各種耐久性の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

密封養生とは、外的環境の変化による影響が供試体に及ばぬように供試体を密封し、定温・暗所で保管する養生法をいう。

2. 試験装置

ポリエチレンあるいはビニール袋と密封可能な容器を用意する。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は一軸圧縮試験に用いるもの、または透水試験に用いるものと同じ規格のものとし、求める耐久性の種類によって選択する。

3. 2 試験前養生

供試体は脱型後ただちに試験に供するものとする。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

脱型後の供試体について、形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さは事前にノギスを用いて供試体円周の120°毎に、計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は、供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。また重量も0.1gまで測定する。

4. 2 養生

供試体を1本毎に、供試体形状に近いポリエチレンあるいはビニール袋に密封し、さらに密封容器に入れ、所定の日数まで20℃・暗所で養生する。このとき、ポリエチレンあるいはビニール袋に密封したまま重量を測定しておく。なお、供試体を1個ずつ入れることが可能でかつ密封性がきわめて高い容器であればポリエチレンあるいはビニール袋に入れる作業を省略してよい。

4. 3 測定時期

測定は原則として1週間後、1ヵ月後、100日後とする。なお、必要があればその

間やその後も適宜測定を行う。

4. 4 測定項目

最初に、袋に入れたまま重量を測定し、これを養生前の重量と比較してその差が充分小さいことを確認する。次に供試体を取り出し、寸法および供試体形状の観察、供試体重量、離しろう水重量、一軸圧縮強度、透水係数などの測定を行う。このとき、収縮が不定形に生じて正確な収縮量が計算出来ない場合は、ラップでくるんで水を充たしたビーカーに入れたときの供試体水浸前後の水位変化量などから収縮量を算定する。

5. 結果の整理

供試体の長さや形状、離しろう水の重量、供試体重量などと養生日数の関係について整理する。なお、供試体10個以上を用いて密封養生試験を行ない、100日後の平均供試体体積を養生前の平均供試体体積で割ったものを密封養生試験における100日体積変化率と規定する。また、同様に100日後の物性値（一軸圧縮強度など）を養生前の物性値で割ったものを密封養生試験における100日（物性値）変化率と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様に密封養生試験におけるX日（物性値）変化率と規定する。

$$(\text{物性値}) \text{ 変化率} = \frac{\text{養生後の物性値}}{\text{養生直前の物性値}}$$

b. 水中養生試験*

本試験は、注入固化体周囲の間隙率が比較的高く、飽和しており、水の動きが小さい条件下でのゲルの各種耐久性を試験するものである。すなわち、地下水位より下で地下水の流れの乏しい場合の注入固化体の長期的変化を簡易に求めようとする試験である。

注入固化体の耐久性試験として現在最も一般的に行なわれているのが水中での養生試験である。しかし養生水の水量、温度、水の交換の有無や交換量、攪拌の有無など実験者が独自で行なっているのが現状である。これらを規定した試験方法も提案されているが²⁾、これは供試体1個毎に攪拌装置で数10日間攪拌し続けなければならない大量の供試体の試験には不適である。養生水の溶脱は養生水量とゲルの量比に依存し、攪拌を行わなくても数十日経過後の溶脱量はほぼ平衡状態となることがわかった(図-6.2.3、図-6.2.5など)ので、本試験は簡易に、かつ実験者によるばらつきが生じないように上記の諸項目について規定した。すなわち、養生水の水量は供試体体積の10倍、温度は20℃とし、水の交換や攪拌は行なわないこととした。なお、同様の試験装置を用いたもので、水の交換を行なうものとしては水交換養生を、また、注入固化体周囲に土があるものとしては飽和土養生を別途提案した。

水中養生試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、静水状態における注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の各種耐久性の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは注入材料のみを固結させたものをいう。

水中養生とは、供試体を定量の水中で、定温・暗所で保管する養生方法をいう。

2. 試験装置

試験装置は、供試体の水浸が可能な蓋付容器とし、その容量は、供試体体積の10倍以上のものとする。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、一軸圧縮試験に用いるもの、または透水試験に用いるものと同じ規格のものとし、求める耐久性の種類によって選択する。

3. 2 試験前養生

供試体は、脱型後、ただちに試験を開始する。

3. 3 試験水

試験目的とする水（地下水など）およびイオン交換水を必要量準備する。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

脱型後の供試体について、形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さはノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 養生

供試体を供試体体積の10倍のイオン交換水に浸漬し、所定の日数まで20℃・暗所で養生する（イオン交換水養生試験）。同様に、実際の地下水の影響を試験する場合には、供試体を供試体体積の10倍の地下水に浸漬し、所定の日数まで20℃・暗所で養生する（試験水養生試験）。

4. 3 測定時期

測定は原則として1週間後、1ヵ月後、100日後とする。なお、必要があればその

間やその後も適宜測定を行う。

4. 4 測定項目

各養生期間の終了した供試体について、形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度、透水係数など必要とする項目について測定する。

5. 結果の整理

形状、寸法、重量、ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目と養生日数の関係を整理する。なお、供試体10個以上を用いてイオン交換水（または試験水）を用いた水中養生試験を行ない、100日後の物性値（一軸圧縮強度など）を養生前の物性値で割ったものをイオン交換水（または試験水）養生試験における100日（物性値）変化率と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様にイオン交換水（または試験水）養生試験におけるX日（物性値）変化率と規定する。試験水を用いた100日後の物性値をイオン交換水を用いた100日後の物性値で割ったものを水中養生試験における100日（物性値）比と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様に水中養生試験におけるX日（物性値）比と規定する。

$$(\text{物性値}) \text{ 変化率} = \frac{\text{養生後の物性値}}{\text{養生直前の物性値}}$$

$$(\text{物性値}) \text{ 比} = \frac{\text{試験水養生試験における養生後の物性値}}{\text{イオン交換水試験における養生後の物性値}}$$

c. 透水養生試験*

本試験は、注入固化体に常に新しい水が供給される条件下でのゲルの各種耐久性を試験するものである。すなわち、地下水位より下で地下水の流れがある場合の注入固化体の長期変化、特に溶脱による変化を、流速の影響も考慮して厳密に再現しようとするものである。本試験の原理は以下のとおりである。

透水条件下でのゲルの溶脱速度は、温度条件が一定であれば、ゲル表面の化学的溶解およびイオンの物理的拡散に支配される。このどちらが律速段階となっているかは、ゲル表面の状態の観察や攪拌による溶解速度の変化の測定によっておおよそ判定できる。一般に固体の溶解は物理的拡散が律速段階となっていると仮定し、拡散層と呼ばれる特殊な領域を固体表面におく。これに、Fick の法則²²⁾ ((1) 式) を適用し、一般にいわれるように拡散定数 D や拡散層の厚さ δ が拡散物質の濃度 c によりあまり変化しないと仮定すると、閉鎖系においては (2) 式が導かれる。

$$d m / d t = - D d c / d x \quad (1)$$

ここに $d m / d t$ は時間当たり拡散流、 x は固体表面からの拡散勾配方向の距離である。

$$C_t = C_0 \cdot \{ 1 - \exp (- D A t / V \delta) \} \quad (2)$$

ここに C_t は時間 t (sec) 後の濃度、 C_0 は飽和 (固体の) イオン濃度、 A は単位領域内のゲルの全表面積、 V は単位領域内の溶液の全量 (すなわち間隙率)、 δ は拡散層の厚さである。 $D A / V \delta$ を k とおけば、溶液中の濃度の増加は、化学的溶解が律速段階の場合と全く同じ (3) 式になる。

$$C_t = C_0 \{ 1 - \exp (- k t) \} \quad (3)$$

したがって、ゲルが充分あり、また溶解によって注入固化体中の間隙率が大きく変化しない微小時間内においては、注入固化体中の水の水質は、その水がゲル中に存在している時間 t (sec) に依存する。地下水が移動しているような解放系でも、注入固化体の流速方向の厚さが X (cm) で平均流速が Y (cm/sec) であるとする、その水の組成はゲル中に存在している時間 $t (= X / Y)$ に依存して濃度増加するため、注入固化体中を移動している範囲内において閉鎖系と同様の濃度変化が生じると考えられる。この場合、注入固化体中を通過してでてくる水の溶脱イオン濃度は (4) 式で表わされる。

$$C_t = C_0 \{ 1 - \exp (- k X / Y) \} \quad (4)$$

流速が a 倍のとき、注入固化体中を通過してでてくる水のイオン濃度の倍率 $N(a)$ は (5) 式で表わせる。

$$N(a) = \{ 1 - \exp(- k X / a Y) \} / \{ 1 - \exp(- k X / Y) \} \quad (5)$$

したがって単一の供試体について複数の流速で透水養生を行って濃度変化を測定し (5) 式に代入すれば k が決定される。

次に、注入固化体を通過する水量は間隙率を p として 1 sec 当たり $p Y$ であるので、1 sec 当たり溶脱量 $u(X)$ は (6) 式となる。

$$u(X) = p Y C_0 \{ 1 - \exp(-k X/Y) \} \quad (6)$$

この時の供試体の単位体積・時間当たり平均溶脱量 $U(X)$ は (7) 式である。

$$U(X) = p Y C_0 / X \cdot \{ 1 - \exp(-k X/Y) \} \quad (7)$$

流速が a 倍、厚さが b 倍の注入固化体の平均溶脱量倍率 $M(a,b)$ は (8) 式で求められる。

$$M(a,b) = a / b \cdot \{ 1 - \exp(-k b X / a Y) \} / \{ 1 - \exp(-k X / Y) \} \quad (8)$$

$M(a,b)$ はすなわち耐久性促進（遅延）倍率である。ダルシー流の場合、厚さが A (cm) で水頭差が B (kgf/cm²) であるような固結土の平均溶脱量を厚さが X の固結土で再現するためには、水頭差を $X B / A$ (kgf/cm²) とすればよい。これが、透水養生における寸法効果の補正法である。比較的密な砂においては、ダルシー流れの範囲が、動水勾配 $i < 0.3 \sim 0.5$ であり、粘性土では高い i までダルシー流が維持されるが低い i で非ダルシー挙動が生じるといわれる²³⁾。本試験に用いる供試体は密な砂の中にゲルが充填されたものであり、砂と粘土の中間的なものと考えられる。また、透水係数が 10^{-6} (cm/sec) 程度であるので、あまり低い水頭差では水がほとんど通過しない。以上より、本供試体に適用する動水勾配は、密な砂でダルシー流れが実現されていると思われる範囲の中で最も高い動水勾配である $i = 1$ を標準とした。したがって本試験法では水頭差 12 cm である。これは例えば注入固化体の厚さが 1.2 m で水頭差 12 m であるような条件での単位体積・時間当たり平均溶脱量を再現することになる。

(8) 式を見ると寸法効果の補正のみならず耐久性の促進が可能なように思えるが、実際には、溶脱にともなって k や Y が変化すること、ゲルの化学的構造が時間の関数として変化することなどから、促進は不確定要因が大きく難しい。これらの点を考慮するためには、ゲルの化学的構造変化と温度の関係を求めたり、積算溶脱量と透水係数の関係などから k および Y の変化を考慮することによって近似していく必要がある。

透水養生試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、透水状態における注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の変化の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、注入材料で砂を固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

透水養生とは定温・暗所において定圧で供試体に透水しながら養生する方法をいう。

2. 試験装置

試験装置は、水圧を規定の圧力まで変えられ、かつ定水圧が長期的にかけられる透水試験器とする。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、透水試験に用いるものと同じ規格のものとする。なお現地の土質を用いる場合は、現地の土質と同一の間隙率に供試体を調整する。

3. 2 試験前養生

供試体は、脱型後直ちに試験に供するものとする。

3. 3 試験水

イオン交換水を必要量準備する。なお、必要に応じて地下水などの試験水を用いる。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

供試体の形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さは、ノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 透水養生

供試体を透水試験器に設置し、所定の日数まで20℃で、供試体に光が当たらないようにして連続透水する（透水養生）。透水時の水頭差は、標準として12cmとする。機器や現場環境など必要に応じて水圧を変化させてよいが、供試体中を流れる水がダルシー流の範囲で測定するものとする。必要によっては養生期間を延長する。

4. 3 測定時期

養生水および透水係数については原則として1週間毎に、供試体を取り出して行う測

定は原則として1週間後、1ヵ月後、100日後とする。なお、必要があればその間やその後も適宜測定を行う。

4. 4 測定項目

流出水の水質と透水係数を測定する。流出水の水質については透水初期の水質変化が最も著しいので、最初の1週間は1日毎に測定するか、流出水を1週間分全て貯留しておき、まとめて測定する。測定精度上は、その後の週も流出水を1週間分全て貯留しておき、まとめて測定することが望ましいが、流出水の量が多くなり貯留に困難を来たす場合は、測定に用いた流出水の流出開始～終了日、時間を記録する。

透水の終了した供試体については、形状、寸法、重量などを測定する。この時、水が流入する面と流出する面では劣化状態が異なり、一般に流入する面の溶脱が著しいので、流入する面と流出する面を区別して劣化状態を観察する。一軸圧縮強度を求める場合には、供試体上下端および側部を削って供試体中央部を直径5 cm、長さ10 cmに整形して測定することを基本とする。

5. 結果の整理

透水係数、水質、形状、寸法、重量、ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目と養生日数の関係を整理する。また、水質から養生日数毎の積算溶脱量を算出し、透水係数と積算溶脱量の関係についても整理する。

供試体10個以上を用いてイオン交換水を用いた透水養生試験を行ない、100日後の物性値（透水係数、一軸圧縮強度など）を養生前の物性値で割ったものを透水養生試験における100日（物性値）変化率と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様に透水養生試験におけるX日（物性値）変化率と規定する。試験水を用いた100日後の物性値をイオン交換水を用いた100日後の物性値で割ったものを透水養生試験における100日（物性値）比と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様に透水養生試験におけるX日（物性値）比と規定する。

d. 水交換養生試験＊

本試験は、注入固化体周囲の間隙率が比較的高く、飽和しており、その水の動きが大きい条件下でのゲルの各種耐久性を試験するものである。すなわち、地下水位より下で地下水の流れのある場合の注入固化体の長期的変化を簡易に求めようとする試験である。本試験法は寸法効果の影響を受けるため、原則として透水養生試験の簡易試験として用いる。

本試験では水中養生との試験環境の整合性をとって、相違点は水の交換の有無のみとした。水を交換することによって溶脱を促進するとともに、養生水の化学分析により溶脱量や溶脱速度が測定出来る。ただし、本試験はあくまでも、異なる注入材料間の相対的な溶脱速度を比較するためのものであり、実際の地盤環境での溶脱速度を直接推定するものではない。現地地盤環境での溶脱速度を推定するためには、ゲルの形態や地下水の流速などを考慮して本試験結果を補正して求める（この補正方法は確立されていないが、試験例を7章で述べる）か、透水養生試験による必要がある。

水交換養生試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の溶脱に対する各種耐久性の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

水交換養生とは、供試体を定量の水中で、定温・暗所で保管する養生方法（水中養生）において、定期的に養生水を交換する養生方法をいう。

2. 試験装置

試験装置は、供試体の水浸が可能な蓋付容器とし、その容量は、供試体体積の10倍以上のものとする。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、一軸圧縮試験に用いるもの、または透水試験に用いるものと同じ規格のものとし、求める耐久性の種類によって選択する。

3. 2 試験前養生

供試体は、脱型後直ちに試験に供する。

3. 3 試験水

試験目的とする水（地下水など）およびイオン交換水を必要量準備する。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

供試体の形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さはノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 養生

供試体を供試体体積の10倍のイオン交換水に浸漬し、浸漬開始から1週間に1回に水全量を交換して所定の日数まで20℃・暗所で養生する。養生水の一部は化学分析に供し、溶脱量を計算する。実際の地下水などの影響を試験する場合にも同様の手順とする。

4. 3 測定時期

養生水については原則として1週間毎に、供試体を取り出して行う測定は原則として1週間後、1ヵ月後、100日後とする。なお、必要があればその間やその後も適宜測定を行う。

4. 3 測定項目

形状、寸法、重量、養生水の化学分析、一軸圧縮強度、透水係数など必要とする項目について測定する。

5. 結果の整理

形状、寸法、重量、ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目と養生日数の関係で整理する。なお、供試体10個以上を用いて水交換養生試験を行ない、100日後の物性値（一軸圧縮強度など）を養生前の平均物性値で割ったものを水交換養生試験における100日（物性値）変化率と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様に、水交換養生試験におけるX日（物性値）変化率と規定する。試験水を用いた100日後の物性値をイオン交換水を用いた100日後の物性値で割ったものを水交換養生試験における100日（物性値）比と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率は同様に水交換養生試験におけるX日（物性値）比と規定する。

養生水の化学分析による溶脱量の表示は、横軸に溶脱日数を、縦軸に積算溶脱量（1供試体当たり）をとって表示する。

e. 飽和土養生試験＊

本試験は、注入固化体周囲の間隙率が比較的低く、飽和しており、その水の動きが小さい条件下でのゲルの各種耐久性を試験するものである。すなわち、地下水位より下で地下水の流れの乏しい場合の注入固化体の長期的変化を簡易に求めようとする試験である。本試験も水中養生や水交換養生と同様簡易試験であるため、寸法効果の影響を受ける。寸法効果を考慮したより厳密な試験法としては、透水養生を提案している。

本試験では水交換養生試験と同様に水の交換も可能としている。しかし水交換試験の項で述べたようにこれはあくまでも異なる注入材料間の相対的な変化速度を比較するためのものであり、現地地盤環境での変化速度を直接推定するものではない。現地地盤環境での溶脱速度を推定するためには、ゲルの形態や地下水の流速などを考慮して本試験結果を補正して求めるか、透水養生試験により求める必要がある。

飽和土養生試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、地盤中の注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の各種耐久性の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

飽和土養生とは、供試体を定量の飽和土中で定温・暗所で保管する養生方法をいう。

2. 試験装置

供試体長さ以上の高さ、および供試体体積の10数倍以上の容量を持つ蓋付容器、恒温槽、ガムテープ、イオン交換水を準備する。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は一軸圧縮試験に用いるもの、または透水試験に用いるものと同じ規格のものとし、求める耐久性の種類によって選択する。供試体の長さは、事前にノギスを用いて供試体円周の120°毎に、計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

3. 2 試験前養生

供試体は、脱型後直ちに試験に供する。

3. 3 試験土

試験目的とする土を、供試体重量の10倍準備する。土は室温で乾燥させたものとする。また、比較のために標準砂（または標準砂と同粒度分布の石英砂）を必要量準備する。標準砂は室温で乾燥させたものとする。

3. 4 試験水

イオン交換水とするが、試験目的によっては地下水などを用いる。

4. 試験方法

4. 1 供試体の設置

蓋付容器の底に試験土を、厚さ2cm程度に敷き詰め、その上に供試体を縦にして入れ、さらに試験土を供試体上面の上2cmまで入れる。次に、上記容器にイオン交換水を注ぎ、試験土と供試体全体を飽和させる。イオン交換水の体積は供試体体積の10倍とする。このとき試験土全体が飽和するように、試験土の間隙率は50%程度とする。

4. 2 養生

供試体を所定の日数まで20℃で養生する。この段階で反応が継続している場合は、適宜測定を継続する。また、比較のために、標準砂（間隙率50%）によって同様の手順で養生を行なう（飽和標準砂養生試験）。

4. 3 水交換

必要によっては、7日毎に水全量を交換する。ただし地盤含有物は湿潤状態のままでよい。上記作業を行ったものを水交換飽和土養生試験と規定し、交換された養生水量を記録しておく。

4. 4 測定時期

測定は原則として1週間後、1ヵ月後、100日後とする。必要があればその間やその後も適宜測定を行う。水を交換する場合、養生水については原則として1週間毎に測定する。

4. 5 測定項目

形状、寸法、重量、養生水の化学分析、一軸圧縮強度、透水係数など必要とする項目について測定する。

5. 結果の整理

形状、寸法、重量、ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目と養生日数の関係を整理する。なお、供試体10個以上を用いて本試験を行ない、100日後の物性値を養生前の物性値で割ったものを飽和土養生試験における100日（物性値）変化率と規定する。また供試体10個以上を用いて本試験を行ない、地盤含有物を用いて求めた100日後の物性値を標準砂を用いて求めた100日後の物性値で割ったものを、飽和土養生試験における100日（物性値）比と規定する。試験が長期（X日）にわたる時の物性値変化率、物性値比はそれぞれX日（物性値）変化率、X日（物性値）比とする。

f. 温度促進試験*

本試験は、密封養生、水中養生、水交換養生、飽和土養生において、温度促進を行うものである。地盤中の温度が20℃前後でないとき、あるいは、短期間の養生試験からある程度長い期間の耐久性を推定したいときに実施する。しかし促進が可能な条件は、促進の度合いが明らかな場合のみである。すなわち、20℃および促進温度で100日以上の実験を実施して試験値を比較した時に促進倍率が養生期間にかかわらず一定である場合、あるいは促進倍率が養生期間の関数として近似可能な場合である。この関数を決定するための一方法について次に述べる。

まず、20℃で100日以上(t日)の養生を実施し、養生期間tと試験値 $X_{20}(t)$ の関係を近似する。多くの試験値に適合する近似式として両対数グラフ上での直線近似があるが、図-6.2.1や図-6.2.2に示されるように、ここでも近似が可能であったと仮定すると、近似式として(1)式が求まる。

$$X_{20}(t) = \alpha \cdot t^a \quad (1)$$

同様に、促進温度(k℃)で同期間の養生を実施し、養生期間tと試験値 $X_k(t)$ の関係を(2)式で近似する。

$$X_k(t) = \beta \cdot t^b \quad (2)$$

促進倍率をA倍とすると、 $X_{20}(t)$ と $X_k(t)$ の関係は(3)式で表される。

$$X_k(t) = X_{20}(At) \quad (3)$$

(1)、(2)式を一部変形して(3)式に代入すると、促進倍率Aとして(4)式が求まる。

$$A = \sqrt[a]{(\beta / \alpha) \cdot t^{b-a}} \quad (4)$$

$a = b$ のとき促進倍率Aは養生期間tにかかわらず一定で $A = \sqrt[a]{\beta / \alpha}$ である。

この他にも種々の近似式があるが、測定値の誤差などを考慮し、妥当な近似式を見いだす必要がある。近似はある程度の期間の範囲内でのみ可能であり極端な外挿は出来ないことに注意する必要がある。適用できる期間についての試験データはないので、とりあえず実際に養生試験を実施した期間の数倍の範囲内の期間の推定に適用すべきである。

温度促進試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、耐久性試験において温度促進を行なう方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

密封養生試験、水中養生試験、透水養生試験、水交換養生試験、飽和土養生試験を対象とする。

1. 3 用語の定義

温度促進とは、注入材料が固化した後の注入固化体の長期的変化を、温度上昇の効果により促進させるものである。したがって真の意味での促進ではなく、相関性がある程度見込める範囲内で実施される限定的な促進である。

2. 試験装置

目的とする温度（60℃程度）まで上昇可能な恒温槽を準備する。

3. 試料

密封養生試験、水中養生試験、水交換養生試験、透水養生試験、飽和土養生試験において、試験前養生の終了した供試体とする。

4. 試験方法

4. 1 方法

試験養生時の養生温度（供試体および養生水の温度）を上昇させる。

4. 2 温度

養生温度は必要とする範囲内で出来るだけ低い温度とする。通常、60℃以下で行なうのが望ましく、100℃を越えてはならない。

4. 3 促進倍率の推定

促進倍率は、20℃および促進温度において100日以上養生試験を実施した結果から推定する。方法は、20℃における養生日数と試験値の関係、促進温度における養生日数と試験値の関係についてそれぞれ近似式を求め、両式を比較することによって促進倍率を算出するものとする。促進倍率が養生期間の関数となる場合は、この関数によって促進倍率を算出する。

5. 結果の整理

20℃および促進温度における養生日数と物性の関係、促進倍率やその変化、これらの近似式について整理する。

g. 乾燥湿潤試験＊

本試験は、注入固化体の乾燥や湿潤による劣化を摸した試験である。ゲルには多くの場合相当量の水分が含まれており、この水分がある程度以上失われるとゲルの構造変化が生じる。構造変化自体は必ずしもゲルの低強度化を意味しないが、サンドゲルの場合、砂粒子の骨格は変形し難くゲルのみが体積の収縮により変形するため、ゲル中に微小な亀裂が多く生じ、結果として注入固化体の脆性化を引き起こす。これがサンドゲルの場合に考えられる乾燥劣化の機構である。また、このようにして乾燥した注入固化体が再び水を含むと、微小な亀裂に水が充たされると同時にゲル自体もわずかながら構造回復するため体積増加し、亀裂に充たされた水の圧力を上昇させて亀裂を進展させる。これがサンドゲルの場合に考えられる乾燥湿潤劣化の機構である。地下深部の地盤注入においては通常このような著しい乾燥湿潤は生じないと考えられるが、劣化機構として厳しいものであるため、地表付近に注入する場合や構造物の裏込めなどの条件下では考慮する必要があるだろう。また比較的深部での地盤注入においても長期的にはゲルの脱水が生じることを考えると、乾燥劣化と長期的劣化は類似したパターンを持つ可能性があると考えられる。

乾燥湿潤試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の乾燥および湿潤による変化を測定する方法を規定する。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

乾燥湿潤とは、供試体の乾燥と飽和を繰返すことをいう。

2. 試験装置

試験装置は、乾燥炉（50℃程度に設定できるもの）と、水浸用の容器（2,000ml以上のもの）を用意する。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、一軸圧縮試験に用いるもの、または透水試験に用いるものと同じ規格のものとし、求める耐久性の種類によって選択する。

3. 2 試験前養生

供試体は脱型後直ちに試験に供する。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

供試体の形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さは、ノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 予備乾燥試験

供試体を、温度40℃、湿度10%に設定した乾燥炉に静置して乾燥させ、継時的に供試体を取り出し重量を測定した後、再び乾燥炉に入れる。重量測定に要する時間は3分以内とする。重量測定は原則として、10分、30分、1時間、6時間、24時間、48時間とし、必要に応じて補足する。次に、この供試体を105℃で24時間乾燥させ重量を測定する。以上より、乾燥時間と含水率の関係を求める。乾燥途中で供試体が破壊する場合は、破壊の形や時間などを記録する。

4. 3 本乾燥

予備乾燥試験で破壊しない場合に、乾燥湿潤試験を行なう。まず、養生した供試体を、

温度40℃、湿度10％に設定した乾燥炉に静置して24時間乾燥させる。その後供試体を取り出し、室温までさました後、寸法および重量の測定、形状等の観察を行う。

4.4 浸水

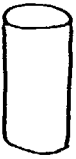
本乾燥終了後の供試体を直ちに供試体体積の10倍のイオン交換水に、20℃で24時間浸漬し、寸法および重量の測定、観察を行う。4.3、4.4の手順を1サイクルの乾燥湿潤試験とする。試験は供試体の劣化度（図－1参照）がD以上となるまで実施する。

4.5 測定項目

1サイクル毎に供試体を取り出し、寸法および重量の測定、形状等の観察を行う。ただし、供試体が破壊した場合は、破壊した固化体片の中で最も大きい固化体の重量と形状を測定・観察する。

5. 結果の整理

予備乾燥試験については、乾燥時間と含水率、破壊時期とその形状、一軸圧縮試験等の関係を整理する。乾燥湿潤試験については、乾燥湿潤のサイクル数と含水率、破壊時期とその形状、一軸圧縮試験等の関係を整理する。破壊形状については、図－1にしたがって区分する。なお、一軸圧縮試験用供試体10個以上を用いて予備乾燥試験を行ない、供試体が図－1の劣化度でD以上となった時の平均含水率を乾燥試験における破壊含水率と規定する。同様に、一軸圧縮試験用供試体10個以上を用いて乾燥湿潤試験を行ない、供試体が図－1の劣化度でD以上となった時の平均サイクル数を乾燥湿潤試験における破壊サイクル数と規定する。

形状							
性状	ほぼ変化なし	砂が落ち角が取れるが原形に近い	ひび～細片が出来るが原形に近い	砂が落ち角が取れ不定形化	ひび～細片が出来不定形化	全体細片化	全体砂化
最大重量	≥95%	95%～50%		50%～5%		5%＞	
劣化度	A	B	C	D	E	F	G

図－1 乾燥湿潤試験における供試体の劣化形態による劣化後の区分例

h. 凍結融解試験＊

本試験は、注入固化体の凍結や融解の繰返しによる劣化を模した試験である。ゲルには多くの場合相当量の水分が含まれているが、この水が凍結する際の体積膨張や氷の界面が周囲からの水を（毛管力、あるいは吸着力により）吸い上げ氷が成長することから、注入固化体中に微小な亀裂や歪みが発生すると考えられる。地下深部の地盤注入においては通常このような凍結融解は生じないと考えられるが、劣化機構として厳しいものであるため、地表付近に注入する場合や構造物の裏込めなどの条件下では考慮する必要があるだろう。

凍結融解試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の凍結融解による変化を測定する方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

凍結融解とは、供試体の凍結と融解を繰り返すことをいう。

2. 試験装置

2. 1 凍結融解試験装置

凍結融解試験装置は、必要な冷却・加熱が自動制御でき、試験槽内の温度が測定できるものとする。冷却・加熱能力は、設定した温度に対し余裕のあるものとする。

2. 2 供試体容器

供試体を入れて水を充たし、そのまま凍結融解することのできるゴム製などの容器を準備する。容器の容量は、直径約60mm、長さ約120mmとし、供試体上面より約10mm程度上まで水を充たすものとする。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、一軸圧縮試験に用いるもの、または透水試験に用いるものと同じ規格のものとし、求める耐久性の種類によって選択する。

3. 2 試験前養生

供試体は脱型後直ちに試験に供する。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

供試体の形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さはノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 試験前水浸

供試体を供試体容器に入れ、20℃に調節した試験槽内で24時間水浸して飽和させる。

4. 3 凍結融解

飽和させた供試体を -20°C ～ $+20^{\circ}\text{C}$ までの温度条件下で凍結融解させる。凍結融解サイクルは1サイクル当たり24時間とし、最初の6時間で $+20^{\circ}\text{C}$ から -20°C まで装置内の温度を直線的に低下させ、次の6時間は -20°C を保ち、その後6時間で $+20^{\circ}\text{C}$ まで直線的に上昇させ、最後の6時間は $+20^{\circ}\text{C}$ を保つものとする。これを1サイクルとする。試験は供試体の劣化度（図-1参照）がD以上となるまで実施する。

4. 4 測定項目

1サイクル毎に供試体を取り出し、寸法および重量の測定、形状等の観察を行う。ただし、供試体が破壊した場合は、破壊した供試体片の中で最も大きいものの重量と形状を測定・観察する。

5. 結果の整理

凍結融解のサイクル数と寸法、重量、形状、一軸圧縮試験等の関係を整理する。破壊形態は、図-1にしたがって区分する。なお、一軸圧縮試験用供試体10個以上を用いて凍結融解試験を行ない、供試体が図-1の劣化度でD以上となった時の平均サイクル数を凍結融解試験における破壊サイクル数と規定する。

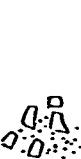
形状							
性状	ほぼ変化なし	砂が落ち角が取れるが原形に近い	ひび～細片が出るが原形に近い	砂が落ち角が取れ不定形化	ひび～細片が出来不定形化	全体細片化	全体砂化
最大重量	$\geq 95\%$	$95\% \sim 50\%$		$50\% \sim 5\%$		$5\% >$	
劣化度	A	B	C	D	E	F	G

図-1 凍結融解試験における供試体の劣化形態による劣化後の区分例

i. クリープ試験＊

注入固化体に長期的に高い荷重がかかる場合、クリープによって予想外の変形を生じたり予想以下の荷重で破壊が生じる可能性がある。本試験はこのようなクリープ特性を求めるものである。ゲルには多くの場合相当量の水分が含まれているため、これが乾燥して地山状態と全く異なる値を示すことのないように、本試験では密封状態のまま試験を行うこととした。

クリープ試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の長時間圧縮によるクリープ特性の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。ここで扱うクリープ試験は、一軸圧縮状態のものとする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

クリープとは、塑性変形が一定応力のもとで時間とともに増加する現象をいう。

2. 試験装置

一定荷重をかけられる装置（長期間の荷重保持精度が約1%内外のもの）、供試体の荷重および歪みを測定する装置、荷重および歪みの記録装置を用意する。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、一軸圧縮試験に用いるものと同じ規格のものとする。

3. 2 試験前養生

供試体は、脱型後直ちに試験に供するものとする。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

供試体の形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さは、ノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 試験室の環境

試験室の環境は、20℃±3℃の範囲内とする。

4. 3 載荷荷重の決定

事前に一軸圧縮試験を行ない、一軸圧縮強度を目安に載荷荷重を決定する。荷重は、一軸圧縮強度の75%、60%、50%の3段階を標準とするが、本試験はばらつきが大きいので1荷重について最低3個は実施し、また必要に応じてその他の荷重についても実施する。

4. 3 供試体の設置

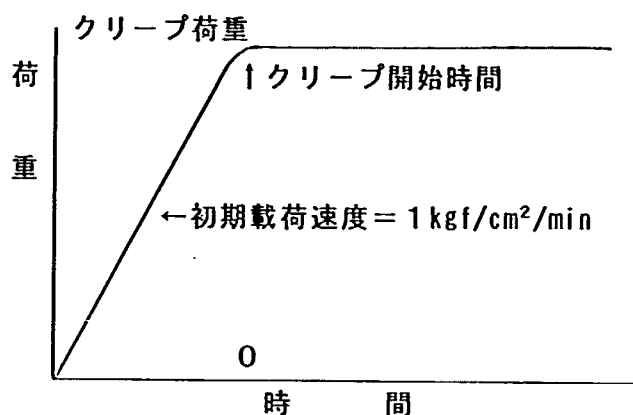
供試体をゴムスリーブで包んで密封し、そのまま載荷する。

4. 4 歪みの測定

歪みの測定にあたっては、原則として供試体端面間の変位を測定する。

4. 5 初期載荷

クリープ開始前にまず規定の荷重まで初期載荷を行なう。初期載荷速度は、原則として $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ とする。クリープ開始時間は、この初期載荷が終了した時点とする（図－1）。



図－1 クリープ試験における標準的な載荷パターン

4. 6 測定間隔

原則として一定歪み毎に破壊時まで測定する。測定間隔は歪み 10^{-3} （長さ 100 mm の供試体で 0.1 mm ）毎以下の間隔で荷重および時間を測定する。一定時間毎に測定する場合は、2次クリープ時の歪みを 10^{-3} 以下の精度で測定出来る程度の時間間隔とする。

5. 結果の整理

破壊時までの、時間、荷重、歪の関係から、クリープ速度、破壊までの時間と荷重の関係などについて整理する。また、破壊後の供試体の重量から載荷前後の含水量の変化についても記録しておく。

j. 繰返し圧縮試験＊

道路交通などが頻繁な構造物の周辺の地盤など注入固化体に動的荷重がかかる場合、長期的に変形性が変化したり静的強度よりも低い荷重で破壊に至る可能性がある。本試験はこのような繰返し荷重特性を求めるものである。ゲルには多くの場合相当量の水分が含まれているため、乾燥して地山状態と全く異なる値を示すことのないように、本試験では密封状態のまま試験を行うこととした。なお、本試験は中心荷重が一軸圧縮強度の50%で周期0.3 Hzのサインカーブの载荷パターンを規定しているが、これはあくまでも標準的なものであり具体的な条件のある場合はその条件下で試験する必要がある。

繰返し圧縮試験

1. 総則

1. 1 目的

この試験法は、注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）の繰返し圧縮による荷重、歪み、破壊時間の測定方法を規定することを目的とする。

1. 2 適用範囲

注入固化体（サンドゲル、ホモゲル）を対象とする。

1. 3 用語の定義

サンドゲルとは、砂を注入材料で固結させたものであり、ホモゲルとは、注入材料のみを固結させたものをいう。

繰返し圧縮とは、一定のパターンに沿って供試体に載荷と除荷を繰り返しかけるものである。なお、ここでは一軸圧縮状態のものとする。

2. 試験装置

荷重制御で一定範囲の荷重を繰返しかけられる装置、供試体の荷重および歪みを測定する装置、荷重および歪みの記録装置を用意する。

3. 試料

3. 1 供試体の形状

供試体の作製法、形状、および寸法は、一軸圧縮試験に用いるものと同じ規格のものとする。

3. 2 試験前養生

供試体は、脱型後直ちに試験に供するものとする。

4. 試験方法

4. 1 試験前の供試体の測定項目

供試体の形状、寸法、重量ならびに一軸圧縮強度など必要とする項目について測定する。供試体の長さは、ノギスを用いて供試体円周の120°毎に計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。直径は供試体端面と中央部で計3点測定し、その平均値を0.1mmの単位まで求める。重量は0.1gまで測定する。

4. 2 試験室の環境

試験室の環境は、20℃±3℃の範囲内とする。

4. 3 載荷パターンの決定

載荷は原則として荷重制御、パターンは圧縮のみのサインカーブとする。圧縮における荷重は、供試体数10個以上について一軸圧縮試験を行なって求めた一軸圧縮強度を目安として中心荷重を固定し、荷重振幅や載荷サイクルを変化させる。ここでは便宜的に載荷サイクルを0.3Hz、中心荷重は一軸圧縮強度の50%、荷重振幅は±10%、±15%、±25%の3段階を標準とするが、本試験はばらつきが大きいので1荷重に

ついて最低3個は実施し、また必要に応じてその他の荷重についても実施する。

4. 3 供試体の設置

供試体をゴムスリーブで密封し、そのまま載荷する。

4. 4 歪みの測定

歪みの測定にあたっては、原則として供試体端面間の変位を測定する。

4. 5 初期載荷

繰返し載荷を行なう前にまず規定の荷重まで初期載荷を行なう。初期載荷速度は、原則として $1\text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ とする。これによって規定の荷重まで達した後、3分間この荷重を維持して歪みの収束を待つと同時に繰返し載荷の準備を行なう。その後、サインカーブパターンによる載荷を開始する(図-1)。

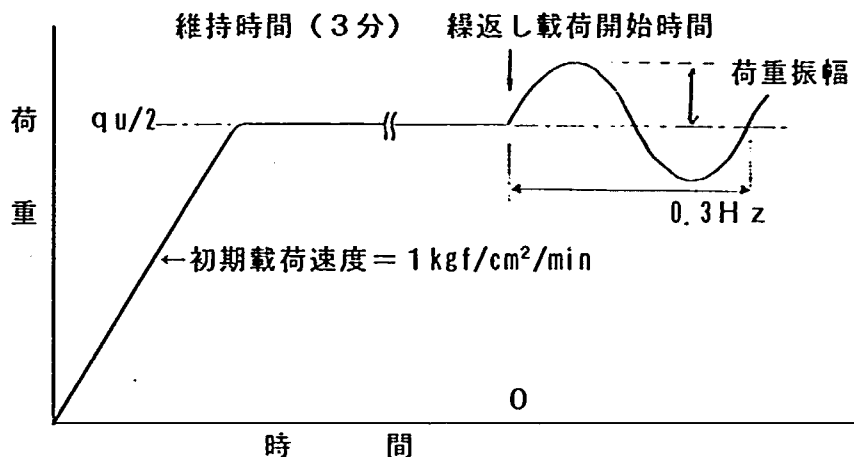


図-1 繰返し圧縮試験における標準的な載荷パターン

4. 6 測定間隔

原則として各サイクル毎の最大、最小荷重の発生時にサイクル数、荷重、歪みを、破壊時まで測定する。歪みは約 10^{-3} (長さ 100 mm の供試体で 0.1 mm)以下の精度で測定する。

5. 結果の整理

破壊時までの、時間およびサイクル数、荷重、歪などの関係から、破壊サイクル数と歪や荷重振幅などの関係について整理する。また、破壊後の供試体の重量から載荷前後の含水量の変化についても記録しておく。

3. 4 材料性能試験結果の整理

基本性能試験および耐久性試験の結果は、材料の耐久性を左右する諸要因と対比できる形で整理する。

(解説)

材料の基本性能試験結果や耐久性試験結果については、利用者が適切な材料を選定し使用出来るように一覧表に図表を添えた形式で整理する必要がある。表-3.4に試験結果一覧表の例を示す。試験結果は出来るだけグラフ形式で示し、また、試験結果自体の確度を判断できるように、グラフには近似曲線のみでなく生データのプロットを残すべきである。

表-3. 4 注入材料性能試験結果一覧表 (一例)

No. 1

材料名称: _____		メーカー: _____		標準配合 (主剤: 添加剤: 水) = 1 : _____ : _____	
主剤原料名: _____		添加剤の原料名: _____			
基本性能試験結果					
粘性およびゲルタイム					
初期粘性: _____ cP		ゲルタイム (B型粘度計法、カップ倒立法、カラム浸透法、その他): _____ 秒			
図-1 混合後の粘性の時間変化			図-2 温度によるゲルタイムの変化		
図-3 pHとゲルタイムの関係			図-4 イオン交換水の希釈によるゲルタイムの変化		
図-5 添加剤重量/主剤重量によるゲルタイムの変化			図- (その他)		
比重					
主剤比重: _____		添加剤比重: _____		材料全体比重: _____	
pH					
主剤pH: _____		添加剤pH: _____		材料全体pH (液): _____ 材料全体pH (ゲル): _____	
透水試験結果					
サンドゲル: _____ cm/sec		ホモゲル: _____ cm/sec			
一軸圧縮試験結果					
サンドゲル q_u : _____ kgf/cm ²		静弾性係数: _____ kgf/cm ²		ホモゲル q_u : _____ kgf/cm ² 静弾性係数: _____ kgf/cm ²	
図- サンドゲルの一軸圧縮試験における応力-歪曲線			図- ホモゲルの一軸圧縮試験における応力-歪曲線		

耐久性能試験結果

強度試験用供試体による長期養生試験結果

密封養生100日体積変化率(脱水収縮率)

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

水中養生100日体積変化率(吸水膨張率)

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

密封養生100日一軸圧縮強度変化率

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

水中養生100日一軸圧縮強度変化率

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

水交換養生100日一軸圧縮強度変化率

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

飽和土養生100日一軸圧縮強度変化率

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

透水養生100日一軸圧縮強度変化率

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

透水養生100日一軸圧縮強度変化率

サンドゲル: _____

ホモゲル: _____

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 密封養生における養生日数と一軸圧縮強度の関係

図一 水中養生における養生日数と一軸圧縮強度の関係

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 水交換養生における養生日数と一軸圧縮強度の関係

図一 飽和土養生における養生日数と一軸圧縮強度の関係

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 透水養生における養生日数と一軸圧縮強度の関係

図一 (その他)

その他の長期養生試験結果(変化率、比など)

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 (その他)

図一 (その他)

耐久性能試験結果

透水試験用供試体による長期養生試験結果

密封養生100日体積変化率(脱水収縮率)

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

水中養生100日体積変化率(吸水膨張率)

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

密封養生100日透水係数変化率

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

水中養生100日透水係数変化率

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

水交換養生100日透水係数変化率

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

飽和土養生100日透水係数変化率

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

透水養生100日透水係数変化率

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

透水養生100日透水係数変化率

サンドゲル: _____ ホモゲル: _____

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 密封養生における養生日数と透水係数の関係

図一 水中養生における養生日数と透水係数の関係

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 水交換養生における養生日数と透水係数の関係

図一 飽和土養生における養生日数と透水係数の関係

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 透水養生における養生日数と透水係数の関係

図一 (その他)

その他の長期養生試験結果(変化率、比など)

(サンドゲル, ホモゲル)

(サンドゲル, ホモゲル)

図一 (その他)

図一 (その他)

温度促進試験結果

養生方法：_____ 養生 促進温度：_____℃（および_____℃ _____℃ _____℃）測定物性：_____

(鉛浮力, 凝り度)

20℃における養生日数と物性値の関係(近似式)

物性値 = _____

促進温度 _____℃における養生日数と物性値の
関係(近似式)

物性値 = _____

20℃に対する促進温度 _____℃での促進倍率
(近似式)

倍率 = _____

促進温度 k℃での促進倍率(複数の温度で試験し
た場合)(近似式)

倍率 = _____

図一 20℃および促進温度における養生日数と測定物性 _____ の関係

養生方法：_____ 養生 促進温度：_____℃（および_____℃ _____℃ _____℃）測定物性：_____

(鉛浮力, 凝り度)

20℃における養生日数と物性値の関係(近似式)

物性値 = _____

促進温度 _____℃における養生日数と物性値の
関係(近似式)

物性値 = _____

20℃に対する促進温度 _____℃での促進倍率
(近似式)

倍率 = _____

促進温度 k℃での促進倍率(複数の温度で試験し
た場合)(近似式)

倍率 = _____

図一 20℃および促進温度における養生日数と測定物性 _____ の関係

養生方法：_____ 養生 促進温度：_____℃（および_____℃ _____℃ _____℃）測定物性：_____

(鉛浮力, 凝り度)

20℃における養生日数と物性値の関係(近似式)

物性値 = _____

促進温度 _____℃における養生日数と物性値の
関係(近似式)

物性値 = _____

20℃に対する促進温度 _____℃での促進倍率
(近似式)

倍率 = _____

促進温度 k℃での促進倍率(複数の温度で試験し
た場合)(近似式)

倍率 = _____

図一 20℃および促進温度における養生日数と測定物性 _____ の関係

養生方法：_____ 養生 促進温度：_____℃（および_____℃ _____℃ _____℃）測定物性：_____

(鉛浮力, 凝り度)

20℃における養生日数と物性値の関係(近似式)

物性値 = _____

促進温度 _____℃における養生日数と物性値の
関係(近似式)

物性値 = _____

20℃に対する促進温度 _____℃での促進倍率
(近似式)

倍率 = _____

促進温度 k℃での促進倍率(複数の温度で試験し
た場合)(近似式)

倍率 = _____

図一 20℃および促進温度における養生日数と測定物性 _____ の関係

乾燥湿潤試験

サンドゲル破壊含水率：_____% 破壊サイクル数：____回 ホモゲル破壊含水率：_____% 破壊サイクル数：____回

(フニダゲル、ホモゲル)

(フニダゲル、ホモゲル)

図一 乾燥時間と含水率の関係

図一 乾燥湿潤サイクルと破壊ランクの関係

凍結融解試験

サンドゲル破壊サイクル数：____回 ホモゲル破壊サイクル数：____回

(フニダゲル、ホモゲル)

図一 凍結融解サイクルと破壊ランクの関係

図一 (その他)

クリープ試験

(フニダゲル、ホモゲル)

(フニダゲル、ホモゲル)

図一 応力と歪みの関係

図一 破壊までの時間と応力の関係

繰返し一軸圧縮試験

(フニダゲル、ホモゲル)

(フニダゲル、ホモゲル)

図一 応力振幅と歪みの関係

図一 破壊までのサイクル数と応力振幅の関係

その他の試験結果

4. 地盤の調査

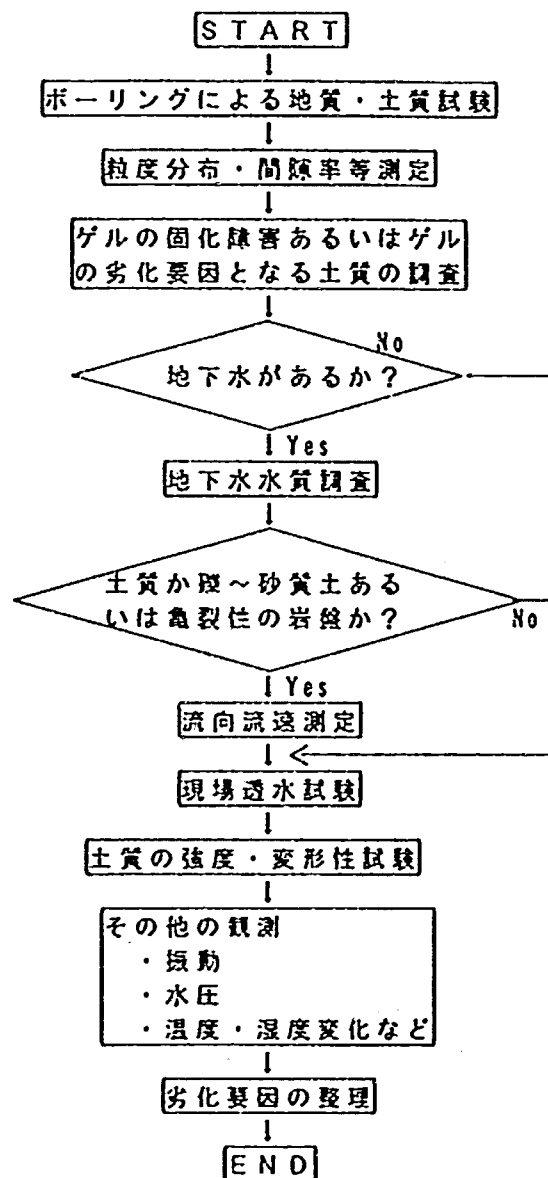
本章では、注入材料の劣化の原因となる項目に関する地盤の調査法について述べる。

4. 1 注入材料の劣化要因に関する地盤調査

地盤中の注入固化体の耐久性を左右する主要な要因については、地盤調査を実施して劣化可能性について詳細に検討する。

(解説)

地盤中の注入固化体の劣化要因に関する地盤調査フローの一例を図－4.1.1に示す。



図－4.1.1 注入固化体の劣化要因に関する地盤調査フロー（一例）

劣化要因に関する地盤調査法には、以下に示すようなものがある。

a. 土質・地下水サンプリング

地盤中に注入材料の固化の障害となる要因となる物質が存在するかどうか確認するために土（岩）や地下水をサンプリングする方法である。土質のサンプリング方法は土質工学会等の方法で良いが、泥水等人工的な材料が混入しないように注意する必要がある。一方地下水は帯水層毎に異なる水質を持つ可能性があるので、深度の異なる井戸から採水することが望ましい。なお、パッカーを用いて特定帯水層の水を採取する方法もある。

b. 土質・地下水試料の化学分析

土質・地下水試料の化学分析法はほぼ確立されている。試験方法としては土質工学会基準、JIS、注入用薬液の性質に関する標準試験法（案）、等がある。地盤中の特定鉱物の分析法としては粉末X線回折試験などがある。水質分析に用いられる定量法としては、表-4.1.1に示すものがある。

表-4.1.1 地下水の水質分析方法

定 量 法	項 目
吸 光 光 度 法	色度、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 、Fe、Mn、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P、F、残留塩素、Cu、Pb、Zn、Al、Cr、As、 CN^- 、フェノール類、有機リン、Org-N、T-P、クロロフィル-a、全炭水化物、リグニン、フミン酸、陰イオン界面活性剤、硫化物イオン
比 濁 法	濁度、 SO_4^{2-}
原子吸光度法	Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、Cu、Pb、Zn、As、Hg、アルキル水銀、(Fe、Mn、Cr)
炎 光 光 度 法	Na^+ 、 K^+
重 量 法	残炭、残留物、懸濁物質、ヘキササン抽出物質
電 気 的 方 法	pH、電気伝導度、DO
ガスクロマトグラフ法	アルキル水銀、PCB
け い 光 法	クロロフィル-a、(SO_4^{2-})
赤外吸光分析法	ヘキササン抽出物質、油分、陰イオン界面活性剤
そ の 他	温度、外観、透明度、一般細菌、大腸菌群

c. 流向流速測定

地下水の流向あるいは流速は、注入材料の溶脱を考慮する際に最も重要な測定項目の一つである。地下水の流向流速を直接測定する方法は大きく二つに分けられる。

① 複数孔でトレーサーを用いて測定する方法

② 単一孔で測定する方法

なお、ダルシー則を仮定し、地下水位から間接的に流向流速を求める方法（流線網による方法）もある。

① 複数孔でトレーサーを用いて測定する方法

トレーサーの種類として次のようなものがある（*はよく使用されるもの）。

- ・放射性同位体
トリチウム (^3H)、ラドン (^{222}Rn)、炭素 (^{14}C)、
ヨウ素 (^{131}I)、コバルト (^{60}Co)、リン (^{32}P) 等
- ・電解質 (高電気伝導度水)
食塩*、塩化アンモニウム、重クロム酸ソーダ、硫酸マンガン、
- ・低電気伝導度水
蒸留水、河川水 等
- ・色素や染料
フローレッシェン*、ウラニン、フクシン、サクラニン、
コンゴーロート、エスキュリン 等
- ・その他
温水、冷水 等

複数孔でトレーサーを用いて測定する方法は、いずれの方法でも基本的に、地下水の流れの上流側のボーリング孔においてトレーサーを投入し、下流側のボーリング孔で濃度の時間変化を計測するものである。本手法によると流向・流速・拡散係数等が算出出来るが、複数孔の削孔が必要で高価であること、トレーサーによっては移動中の吸着が生じ下流側の孔に到達しない場合があること、トレーサー投入時の水の乱れが避けられないこと、単層毎に測定するのが困難で複数の地層のうち最も流速の速い層の影響を強く受けること、等の欠点を有している。しかし後述する単一孔を用いた方法に比較して地山の広域的な流向流速が測定でき信頼性が高いこと、測定が比較的簡易であることなどから、流向や流速の測定において一般的な試験法として用いられている。

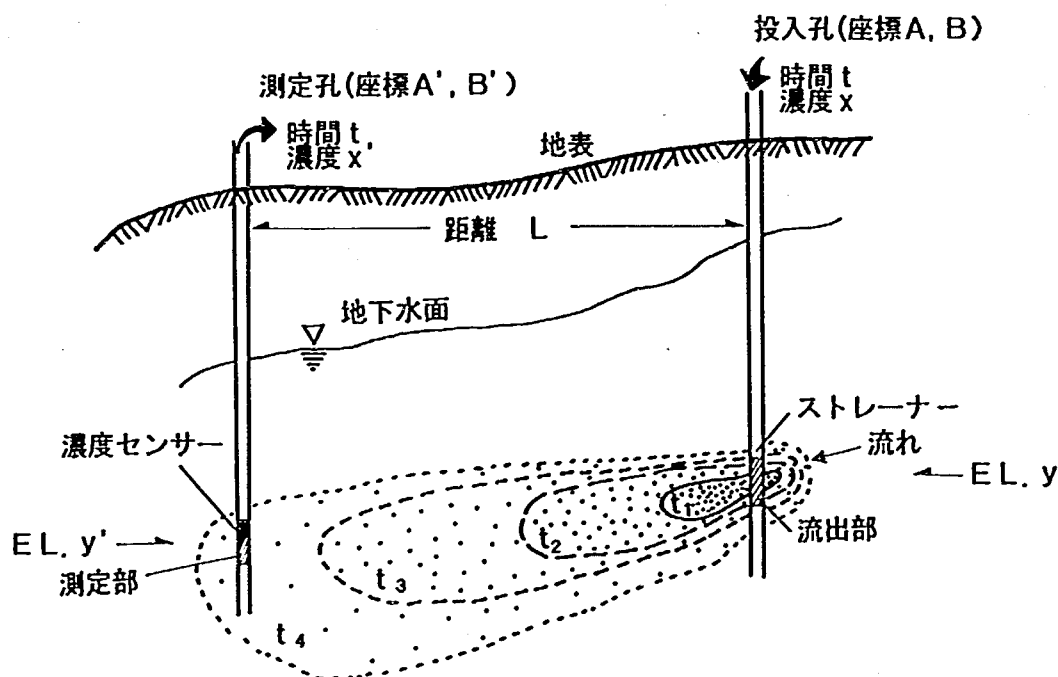


図-4.1.2 トレーサー試験法

② 単一孔で測定する方法

単一孔で流向流速を測定する方法 (単孔式) として、現在、次のものがある。

- ・水中に元々存在する微粒子をCCDカメラで観察する方法
- ・比重を調整した微粒子を水面に浮上させカメラで観察する方法
- ・ホウ素をトレーサーとし中性子水分計で検出する方法
- ・蒸留水をトレーサーとし、電気伝導度を測定する方法

したがって、方法としてはカメラを用いて粒子の動きを直接観察するものと、トレーサーを適用し、ボーリング孔から側方に移動するトレーサーの移動速度や拡散を観察する方法に分けられる。前者の方法の利点は、粒子の動きが直接観察出来るため孔内水の乱流状態を把握出来、したがって測定結果の妥当性をチェック出来ることにある。一方後者は、このようなチェックが出来ないが、前者の方法が粒子の性状に左右されるのに比べて不確定要因が少なく測定結果が直接数値で算出されるので整理が簡易である等の特徴を持っている。なおこれらの方法は、機種にもよるがおよそ $10^{-1} \sim 10^{-5}$ オーダーの流れが観測可能としている。いずれの方法も、孔内での水の動きを測定するものであるため、地盤中での水の動きとはかなり異なる3倍²³⁾～10倍²⁴⁾もの流速を測定していることになり、補正が必要である。また、拡散係数も、孔内では地盤中のその20倍であったという報告²⁵⁾もある。しかし補正は解析的に難しいため、複数孔でのトレーサー試験との対比を行なうなどのデータの蓄積が必要である。また、本手法は上下方向の水の動きに強く影響される。したがってケーシングやストレーナ部を工夫して上下方向の水の動きを小さくし、また、熱対流が生じないようにする必要もある。さらに、孔壁の状態が測定値を大きく左右することにも注意が必要である。なお、単孔方式のほとんどが方位磁石を内蔵しているため磁性の大きい岩の付近ではこれに誤差を生じる可能性がある。

流速のみを測定する方法としてはこの他に、地下水検層（塩水を注入し、電気伝導度の経時変化を測定するもの）、温度検層の一種（温水を注入し、温度の経時変化を測定するもの）などがある。

d. 現場透水試験

通常の地盤注入における現場透水試験の意義は主に注入条件の決定と改良効果の確認にあるが、耐久性を必要とする地盤注入においては、つけ加えて、注入固化体の劣化にかかわる地盤条件としての透水係数を把握することが挙げられる。

試験方法は井戸、ボーリング孔、オーガー孔を利用する方法があり、次の方法に分けられる。

- ・揚水法（揚水量一定として周辺の地下水位を測定するもの）
- ・水位回復法（揚水後水位の回復速度を測定するもの）
- ・孔内湧水圧測定法(J.F.T法)（水位回復法の一つで孔内の特定区間にパッカーをかけ、区間からの湧水による水位上昇速度を測定するもの）
- ・注水法（定量の注水を行なうもの）
- ・ルジオンテスト（注水法の一つで孔内の特定区間にパッカーをかけ、注水圧力と注水速度を測定するもの）
- ・水位変動解析（降雨や干満等によって自然に発生する水位変動から透水係数を計算するもの）
- ・クロスホール透水試験（一方の孔でパルス状の水圧変化を発生させ他方の孔でその変化を捉えるもの。²⁶⁾）

・ その他（蒸発量計測など²⁷⁾²⁸⁾）

等に分けられる。注入前後に行なう現場透水試験として一般的なものは井戸を用いた揚水法や水位回復法による試験、ボーリング孔による注水試験²⁹⁾等である。しかし固化体周辺の比較的狭い範囲の透水性を測定するためには、むしろ任意の層準で透水性の測定が可能な方法が有効である。

e. 地盤の変形や振動の測定

地盤に長期的変形や振動が生じると注入材料の劣化が促進されることが考えられる。変形を測定する方法としてはボアホールゲージや埋込式ゲージによるものがある。振動を測定する方法としては、地表やボアホールでの振動計がある。

f. 直接観察

直接観察するものとして、サンプリングのほかに、孔壁を観察するものとしてボアホールスキャナー、ボアホールテレビジョンなどが開発されている。

5. 現地注入試験

本章では、地盤中での注入材料の存在形態ならびに劣化条件を把握するための方法について述べる。

5. 1 現地注入試験の目的

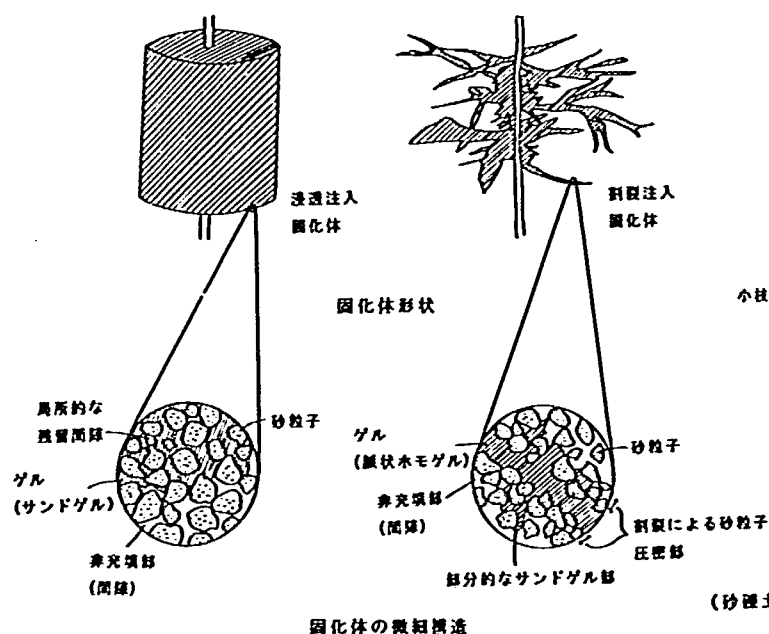
現地注入試験は、施工条件を把握するとともに、注入状況など耐久性に関する項目について検討するために実施する。

(解説)

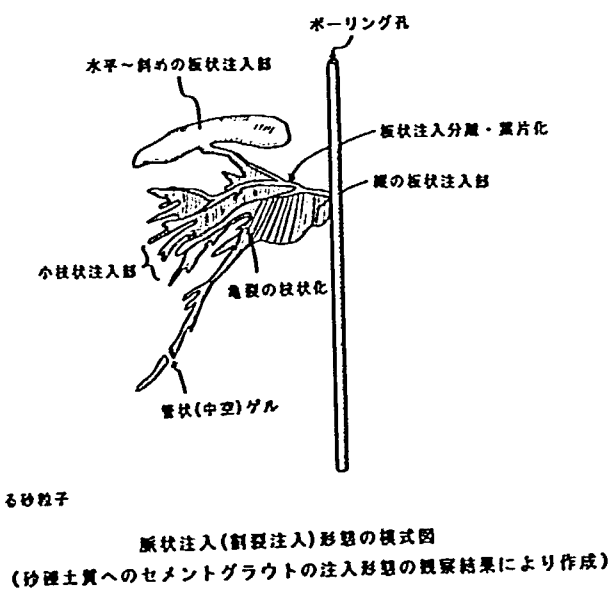
現地注入試験は、特に耐久性を必要としない注入工事においても行われるものである。その場合の試験目的は、施工条件の把握・注入効果の確認など、実際の施工に向けた調査の意味合いが強い。一方、耐久性を必要とする注入における現地注入試験は、上記の目的の他に、耐久性を推定するための調査項目として次のような目的を持つ。

a. 注入形態の把握

ここでの「注入形態」とは、大まかな注入範囲のみならず、注入率やゲルの存在形態（サンドゲル・ホモゲル）およびその三次元的構造を意味する。劣化速度や劣化形態は、注入形態によって大きく左右される。図－5.1.1 は浸透注入と割裂注入の注入形態と微細構造の相違、また、図－5.1.2 は砂礫地盤へのセメントグラウトによる割裂注入形態の観察結果を模式化したものであるが、割裂注入は同図に示されるように、幾つかの段階を経て遠方に浸透していく。割裂部の末端では浸透注入になる場合（割裂浸透）もある。また、一般に注入材料は地層の境界や地質の微細構造に沿って遠方まで浸透する。以上のように注入形態は多様であり、このような注入形態の多様性を充分把握することが、劣化の形態や速度の予測において重要である。



図－5.1.1 注入固化体の微細構造



図－5.1.2 割裂注入の形態

b. 地下水条件の変化の把握

地盤注入工法では注入前後で地盤の透水性が変化するため、地下水の流れが変化する可能性がある。注入材料の溶脱は注入材料の劣化の中で最も注意すべきものの一つであるが、溶脱量は地下水の流れに左右されるため、注入による透水係数の変化や、流速の変化を把握しておく必要がある。

c. 地盤の強度や変形性の変化の把握

通常的地盤注入の場合は、改良強度や変形性という点でこれらの把握は不可欠であるが、耐久性を必要とする場合にはさらに、改良後の継続的变化を把握する上でのおよその初期値を把握する意味を持つ。

5. 2 現地注入試験の方法

現地注入試験の方法は、地盤注入工法に関する既存の指針等に沿って行うものとする。

(解説)

地盤注入工法に関する既存の指針として、建設省²¹⁾、(社)日本薬液注入協会³⁰⁾、国鉄¹⁴⁾のものなどがあり、現地注入試験の方法についても記述してあるので、原則としてこれらに沿って現地注入試験を行うこととする。ただし上記の方法はいずれも通常の地盤注入における現地注入試験方法であるので、耐久性地盤注入における現地注入試験の実施にあたっては、5. 3節に示す調査項目が支障なく実施出来るように、試験位置や範囲、工程などを事前に充分検討しておくものとする。

5. 3 現地注入試験における調査項目

現地注入試験においては、注入前に地盤や地下水の調査を、注入（中）後に注入状況の調査を実施する。

（解説）

現地注入試験における調査項目には次のようなものがある。

a. 注入前の調査

注入前の調査は、土質調査と地下水調査に分けられる。

① 土質調査

土質調査には、注入材料の注入量や注入形態を把握するためのサンプリングと土質試験がある。また、改良前後の物性を把握するためのサウンディングや室内強度試験、現場透水試験も必要である。

② 地下水調査

地下水調査には、薬液の固結性を判定するための水質試験やゲルタイムを推定するための地下水温度測定、固結時や固結後の溶出の可能性を判定するための地下水流速試験がある。

b. 注入中および注入後の調査

注入中および注入後の調査は、注入範囲の調査、注入率と改良物性の調査、注入形態の調査、地下水条件の調査、水質の調査に分けられる。

① 注入範囲の調査

大まかな注入範囲を非破壊で推定するような物理探査などの試験がこれに当たる。物理探査は注入範囲の調査法としては必ずしも精度が高くなく、また、注入範囲よりもむしろ地盤構造に影響を受けることが多いので、注入前後における物理量の変化率で判定する必要がある。注入範囲の推定に利用可能な物理探査として、次のようなものがある。

・電気探査（比抵抗法）

本手法は注入前後の比抵抗の変化を地表から探査するものである。一般に地盤の比抵抗は、注入前（比抵抗 $\rho \approx 10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot m$ オーダー）よりも注入後（ $\rho \approx 10^0 \sim 10^1 \Omega \cdot m$ オーダー）の方が低いため、比抵抗の変化として探査できる。しかし、温泉水や海水など間隙水と注入材料の比抵抗が類似する場合には探査が困難であり、また、割裂注入の場合にも、マスとしての比抵抗の差が小さいので精度は低くなる。測定方法は、電極配置によってウェンナー法、シュランベルジャー法、三極法、二極法、ダイポール・ダイポール法等がある。

・弾性波探査（屈折法）

本手法は注入前後の弾性波速度の変化を地表から探査するものである。弾性波は主に数 10 Hz の P 波を用いる。電気探査に比べ動弾性係数など工学的に意味のある物理量が直接測定出来るのが利点であるが、都市域ではノイズが多く振源の確保が難しいこと、また微小領域での精度に欠けること、低速度の挟み層があると測定出来ないエリアが生じること等が欠点である。

・トモグラフィ法

本手法は 2 本のボーリング孔間の弾性波や電磁波の速度や減衰あるいは電気抵抗を、孔内の測定位置を少しずつずらしながら測定して孔間の物性値分布を面的に再現するもので

ある。弾性波は数10Hz、電磁波は数10～数100MHzの周波数帯域を用いる。注入範囲の大まかな把握には適した手法であるが大型コンピュータによる解析処理に時間を要し高価である。

・AE計測

本手法は地震の震源観測の要領で、注入時に砂の動きや割裂等によって発生する微小音を観測し、注入材料の拡散域・割裂発生の有無・発生位置・割裂の進展方向等を把握するものである。しかし都市域ではノイズが多いため、現状では施工時に割裂の発生等をモニターする程度にとどまっている。

・その他

注入範囲の確認が可能な探査法として電磁波反射法（レーダー法）、反射法弾性波探査などがある。これらは、注入範囲の境界部のインピーダンス差により生じる反射波を探査する方法である。電磁波反射法は数m未満の比較的浅い地下構造を把握するのに適しており、上記の手法の中では最も分解能の高い探査法として今後利用例が増加すると考えられる。しかし現在のところやや探査深度が浅いことなどから、注入前後で探査を実施した例は見当たらない。反射法弾性波探査は地表でハンマーなどを用いて、数10Hz～100Hz程度のSH波を発生させ、地層境界面などからの反射波を地表の受振器で捉える方法である。本手法は地盤の動的物性と直接対応が可能であることが利点である。

一方、物理検層は、注入範囲のより正確な把握のために用いられる。注入試験において有効な物理検層として、次のようなものがある。

・速度検層

本手法は弾性波を用いるもので、PS検層、孔内速度検層、VSP法等がある。PS検層は、振源から受振器までの波の伝播時間を求めて層毎の弾性波速度を求めるものである。振源と受振器の位置関係、波の伝播経路等により、ダウンホール法、アップホール法、クロスホール法、標遊法等に分けられ、一般に行なわれるのはダウンホール法である。ダウンホール法は振源を地表あるいは地表付近に設置し、圧着型あるいは浮遊型の孔中受振器で振源からの弾性波を捉える。孔内速度検層（音波検層）は、単一のゾンデに設定した発信器と受振器で弾性波を捉えるものである。通常、精度向上のために受振器はゾンデ内に位置をずらして2器設定しており、その速度差によって弾性波速度を算出している。PS検層よりも精度が高く、区間の減衰定数の算定も可能である。VSP法は、PS検層において受信波形に現われる反射波のみを抽出（VSP処理）して、反射法地震探査記録に対応する合成反射記録を作成する方法である。

・電気検層

本手法は電氣的性質を用いるもので、比抵抗検層、自然電位検層等に分けられる。比抵抗検層は、地表と孔内に設置した電流電極によって生じる地盤中の電位差を電位電極で測定するもので、その電極配置によってノルマル法（2極法）、ラテラル法（3極法）、マイクロ法に分けられる。

・放射能検層

本手法は、密度検層、中性子検層、自然γ線スペクトル検層等に分けられ、注入において利用可能なのは密度検層、中性子検層である。密度検層は人工的なγ線のコンプトン散乱によるγ線減衰量から地層の密度を測定するものであり、注入前後の密度変化を測定出

来る。中性子検層は高速中性子の水素原子核との弾性散乱による減衰量から水素原子量を算定し、これから地盤中の含水量を把握するものである。地盤が飽和状態にあれば間隙率が測定できる。

・温度検層

本手法は、注入材料が地盤中で熱を発生するとき、これを捉える方法である。しかし、発熱後長期間経過したり、水の流速の速い地盤では適用困難である。

② 注入率と改良物性の調査

注入率や改良物性を求めるためには、密度検層など前述の物理探査法も適用出来るが、精度あるいは測定環境上の問題があるため、サンプリングやサウンディング、現場透水試験、あるいは室内強度（透水）試験を主体に調査する必要がある。

③ 注入形態の調査

注入固化体の耐久性は注入形態に依存するので、これを把握することが重要である。例えば注入固化体表面から溶脱が生じる場合を仮定すると、浸透注入と割裂注入の区分、また、割裂注入の場合には脈の幅・密度・方向性などが劣化形態や劣化速度に大きく関与する。注入形態を把握するためには、高価であるが不攪乱試料を採取するのが最も有効である。サンプリングはゲルの充填率、微細な注入形態、改良効果（強度変化）等を直接的に測定出来る最も有力な手段である。特に、微細な注入形態や改良効果の確認のためには砂礫質でかつ軟質な試料を乱さずに採取する必要があるので、大口径のボーリングや、ボーリングコアがコアチューブに入る時にビニール袋で包みこむ方式、水の代わりに圧縮空気と界面活性剤を用いる方式などでコア採取率を向上させ、コアの乱れを極力抑える方式を用いる必要がある。サンプリングの他に、ボアホールテレビやボアホールスキャナーを用いて孔壁を直接観察することも有効である。

④ 地下水条件の調査

地下水の流速の速い地盤では、注入前と同様の地下水調査を再び実施して、地下水条件の変化を把握することが重要である。地下水の流速が注入によってあまり低下していない場合は、追加注入するか、厳しい劣化条件（溶出条件）として耐久性の予測を行う必要がある。特に割裂注入の場合は、脈が多く形成されていても方向性によっては地下水の流速が早いままである可能性が考えられるので、脈状部で透水性の改良が実現しているかどうか確認する必要がある。

⑤ 水質の調査

一般に現場での溶脱速度は室内試験によるそれとかなり異なることが考えられる。精度の高い劣化予測のためには、注入部周辺のボーリング孔において地下水の採水や地下水検層等を行って注入前後での水質の変化の調査を行い、現場における溶脱速度を確認することが重要である。また地下水の水質の調査は、注入が周囲の環境に与える影響をモニタリングする上でも有用である。

6. 耐久性の推定

本章では、前章までの方法によって得られる資料を活用して耐久性を推定する方法について述べる。

6. 1 劣化形態の推定

材料性能試験、地盤調査、現地注入実験などから注入固化体の劣化形態を推定する。

(解説)

注入固化体の劣化予測のための材料試験のフローの例を図-6.1.1に示す。

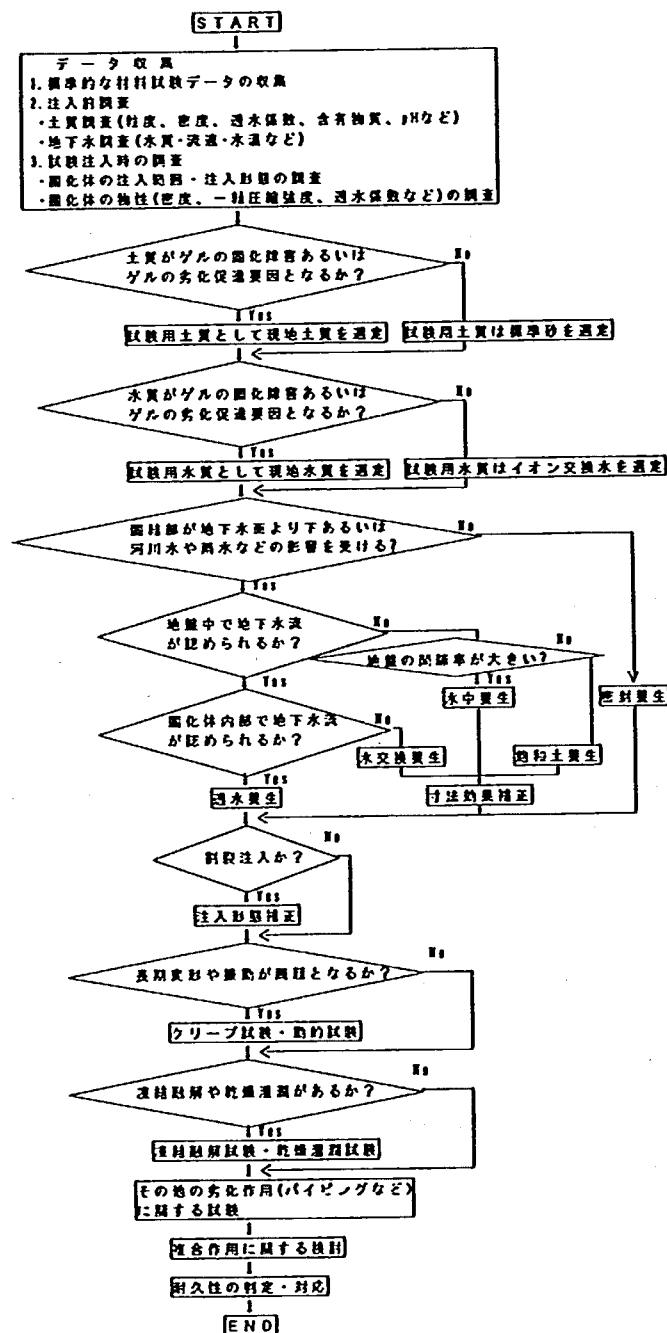
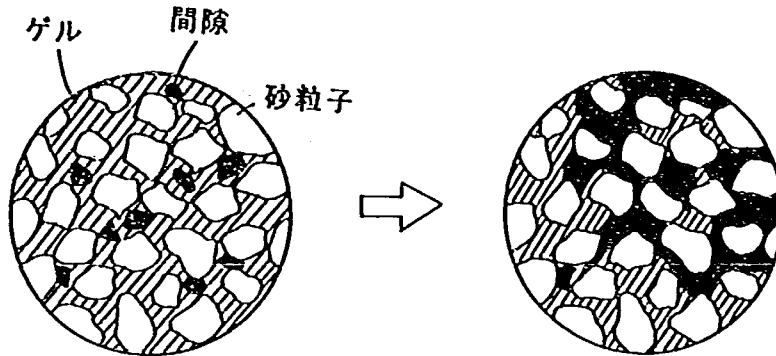


図-6.1.1 注入固化体の劣化予測のための材料試験フロー (一例)

注入固化体の劣化形態は、大きく次の2つに分けられる。

a. 注入固化体表面からの劣化

この種の劣化の代表的なものは、溶脱（溶出）である（図－6.1.2）。



図－6.1.2 溶脱によるゲルの劣化の模式図

溶脱による強度低下や透水性の上昇は、注入固化体の劣化の中で重要なものの一つに挙げられる。浸透注入の場合、注入孔からの距離にかかわらず固結部の間隙の80～100%が充填されるといわれている³¹⁾。このような場合、注入固化体内部の透水係数は周囲の未固結部に比較して非常に低く、地下水による溶脱は注入固化体表面から進行すると考えるのが妥当である。しかし割裂注入の場合、固結部と未固結部が複雑な分布構造を有するため、注入固化体の比表面積が浸透注入に比較して非常に大きくなる。これは、溶脱に寄与する面積が非常に大きくなることを意味する。溶脱は注入固化体の比表面積のみならず地下水の流れに左右されるため、溶脱量が必ずしも注入固化体の比表面積に正比例するとは言えないが、割裂注入による注入固化体の溶脱速度は浸透注入より速く、また、注入固化体表面のみならず内部からも劣化が進む可能性がある（図－6.1.3）。ただし、地下水条件の厳しい地盤は一般に砂礫質で比較的浸透性が高いため浸透注入になりやすく、逆に割裂注入になりやすい細粒地盤は地下水の動きが小さいため、溶脱現象が問題となる地盤の多くは浸透注入が可能な地盤と考えられる。なお、岩盤の亀裂に注入する場合や構造物と地盤の境界に注入する場合は、亀裂状の間隙に沿う強い水の流れによって局所的な溶脱が生じる可能性があるため、これについての検討も必要である。このほかに、注入固化体表面付近から劣化するものとして、乾燥湿潤、凍結融解、微生物による分解などが考えられるが、乾燥湿潤や凍結融解は環境が地盤中であるため影響が小さい。微生物による分解については資料がほとんどなく影響が不明である。したがって注入固化体表面からの劣化に対しては、注入固化体の形態から劣化しやすい位置とその劣化速度を把握し、寸法効果を考慮して長期的な劣化率を算定することが基本的な予測手法である。

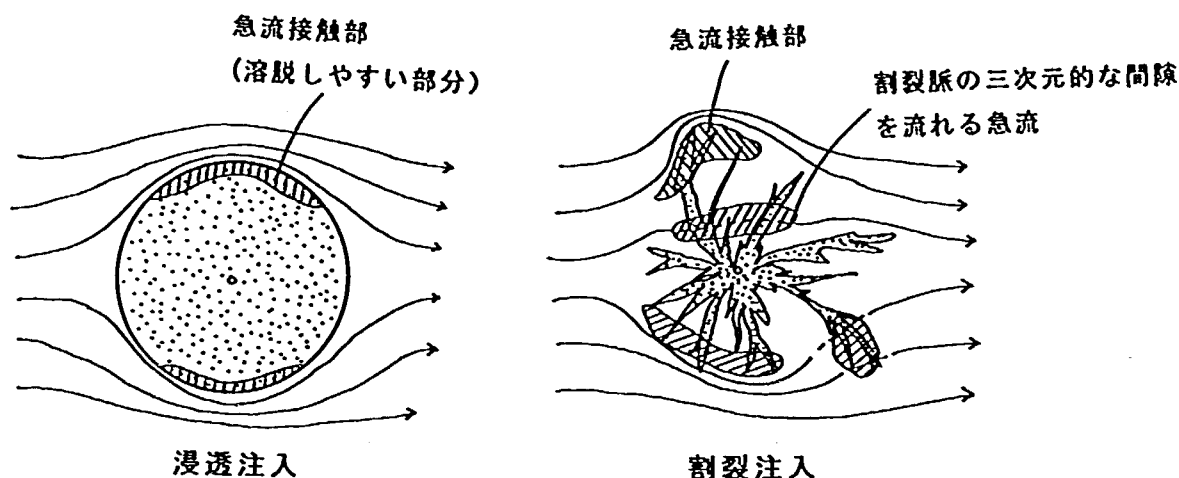


図-6.1.3 浸透注入と割裂注入によるゲル分布と表面からの劣化

ここで、参考として、水ガラスと同様の物質であるアルカリ珪酸ガラスの溶脱速度に関する知見³²⁾を水ガラス系の注入材料の溶脱速度に適用した結果について述べる。

水ガラスと同様の固化体であるアルカリ珪酸ガラスに関する研究では、ガラスと水溶液を反応させたとき、初期段階ではアルカリ金属イオンの溶脱量 L が反応時間 T の $1/2$ 乗に比例して増加すること、また、長期経過後の溶脱量は反応時間に比例して増加することが実験的に確認されている。これは、次に述べる2段階の機構により溶脱が発生しているためと考えられる。

- 1) ガラス中のアルカリ金属イオンが溶液中の水素イオン (H_3O^+)と交換し、ガラス表面にアルカリ金属イオンが抜けシリカに富む表面層が生じる。溶脱速度は表面層を拡散する速度によって律速されるため溶脱量は反応時間の $1/2$ 乗に比例する。
- 2) シリカに富む表面層が厚くなると、表面層が破壊される速度によってガラスの侵食が律速されるため溶脱量は反応時間に比例する。

これを RANA and DOUGLAS³²⁾は(1)式で表現している。

$$L = A T^{0.5} + B T \quad (1)$$

ここに、 A 、 B は定数である。しかし、長期にわたる溶脱実験では(2)式の方が測定値と一致し易いことからよく用いられている (Ewest³²⁾、BENEDICT et al.³²⁾)。

$$L = C T^D \quad (2)$$

ここに、 C 、 D は定数である。 D が1に近い場合はガラスの構造の破壊、0.5に近い場合は溶脱成分の表面層における拡散を、0のときは溶脱成分の飽和などによる溶脱の停滞を示している (WALLACE and WICKS³²⁾)。

本マニュアル作成に伴い実施した水ガラス系注入材料の長期水交換養生試験によると、重量減少から算出した溶脱速度 (図-6.1.4) は、耐久性の高い注入材料、通常の注入材料ともに類似しており、25日までは(2)式において D が0.8程度の溶脱速度を持ち、25～100日では D が0.2程度の溶脱速度となった。

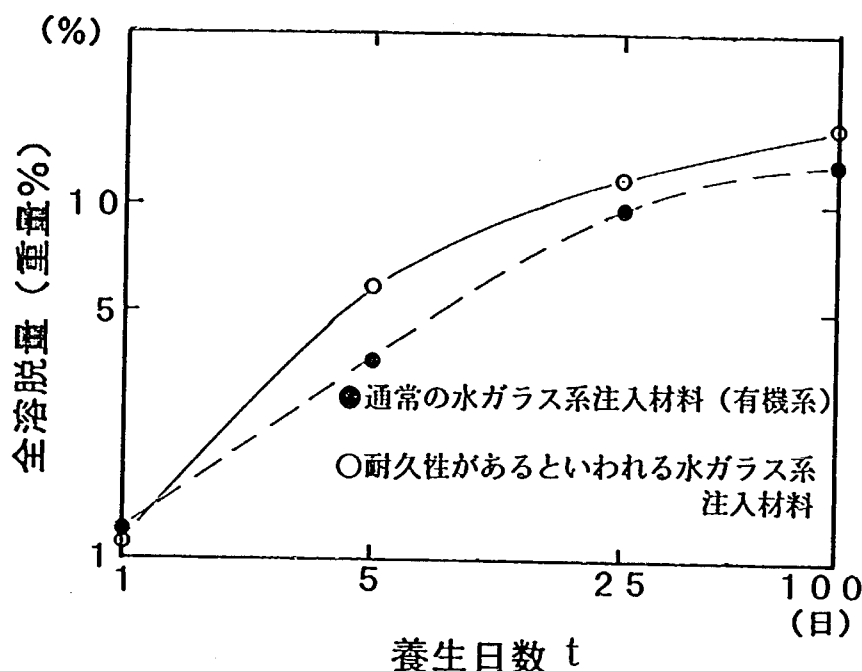


図-6.1.4 水交換養生による水ガラス系薬液の全溶脱量

25日時点で10%程度の重量減少が認められること、水交換養生であるため溶脱成分の飽和による溶脱の停滞は考えられないことなどから、上記の結果は、①溶脱し易い物質であるアルカリ金属イオンなどの多くが離れよう水とともに25～100日までにほぼ溶脱しつつある、あるいは、②長期間経過の間にゲルの構造が変化し溶脱し難くなった、という2つの可能性が考えられる。ただし注入固化体の長期的強度を考える上では、アルカリ金属イオンの溶脱よりもむしろゲルの骨格構造となるシリカ分の溶脱量が溶脱後の注入固化体の強度に影響すると考えられる。そこで水交換養生において養生水のシリカ量からシリカの積算溶脱量を測定した結果(図-6.1.5)、耐久性の高い注入材料は(2)式におけるCが小さく、通常の注入材料に比較して溶脱するシリカ量が少ないことがわかった。したがって耐久性の高い注入材料は、骨格構造となる成分(ここではシリカ分)が溶脱し難いといえる。しかし溶脱量の時間変化(TとDの関係)は、耐久性の高い注入材料、通常の注入材料ともに類似した曲線を示している。(2)式をあてはめると、25日まではDが0.8～1.0、25～100日が0.3～0.5であり、Dが時間とともに低くなる傾向がある。この現象は図-6.1.4でも見られるが、シリカは100日経過後も十分な量がゲルとして存在していることを考えると、図-6.1.4での①の仮定は否定され、②の仮定の可能性、すなわち、長期間経過の間にゲルの構造が変化し溶脱し難くなった可能性が高い。ただし、ここでの「ゲルの構造」とは、ゲル自体の化学的構造だけでなく、注入固化体中におけるゲルの幾何学的な存在形態も含まれる。

以上より、水ガラス系注入材料の溶脱は、(2)式を変形した(3)、(4)式で近似することが可能である。

$$L = a T^b \quad (3)$$

$$b = f(T) \quad (4)$$

ここに、 L は溶脱量、 T は時間、 a は、ゲル形状・体積・劣化条件などにより変化する係数で、 b はゲルの長期的構造変化などにより時間の関数として変化する係数である。 b は、浸透注入の定型供試体で25日以前は0.8～1程度であるが、25日以降は長期的なゲルの構造変化などにより b がより低い方(0.5以下)へ変化すると考えられる。相対的な耐久性は、長期経過後の L と負の相関があると考えられ、養生日数と一軸圧縮強度の関係も(3)式と類似の関係式で表わせる(6.2節参照)。

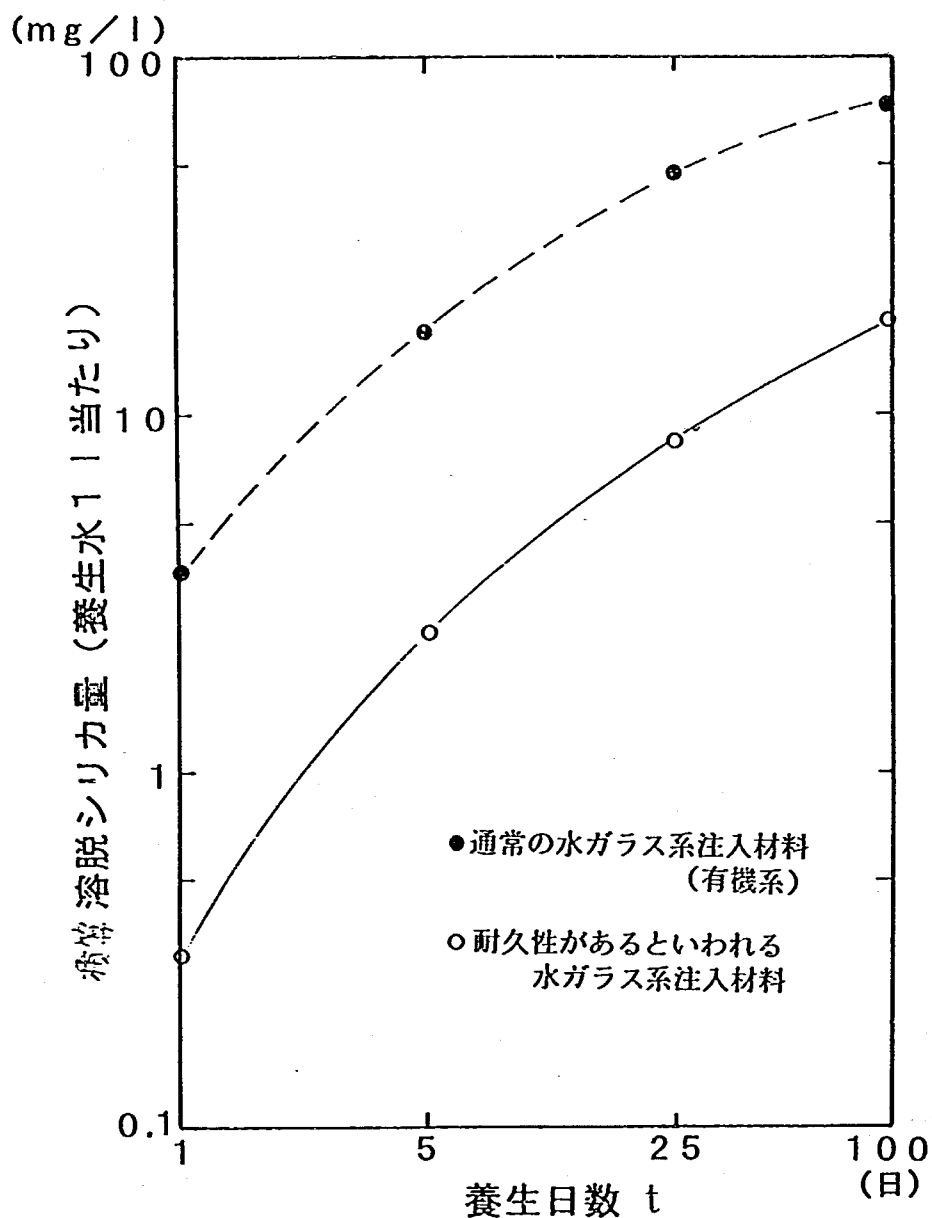


図-6.1.5 水交換養生による水ガラス系注入材料の積算溶脱シリカ量

b. 注入固化体内部の劣化

注入固化体内部、あるいは注入固化体全体の劣化に関するものとしては、ゲルの長期的化学変化による劣化、吸水膨潤、応力による劣化等がある。ゲルの長期的化学変化はほとんどの注入材料で認められており、注入固化体の耐久性を考える場合、必ず考慮しなければならない。しかし、ゲルの長期的化学変化によって必ずしも強度的に劣化するとは限らず、逆に強度上昇が生じる場合もある（収縮によって生じた離しょう水が粘性土を硬化させるという報告もある）。また、収縮を伴うときは、体積変化によって空隙の形成が生じ溶脱と類似した劣化を呈する場合がある。膨潤現象は高分子系の材料で認められており、わずかながら強度低下を引き起こす可能性がある。応力による劣化にはクリープ・振動・繰返し荷重などがあり、長期的に数10%の強度低下を生じる可能性がある。図-6.1.6はゲルの収縮による注入固化体の劣化の模式図である。ゲルの収縮によって注入固化体全体が収縮しようとするが、砂粒子が存在するため均一に収縮出来ず、小領域に分かれて収縮・移動する。その結果、ゲルに微小な引張割れ目が多数形成され、強度が低下する。

したがって固化体内部の劣化に対しては、長期養生による耐久性試験から劣化量を算定することが基本的な予測手法である。

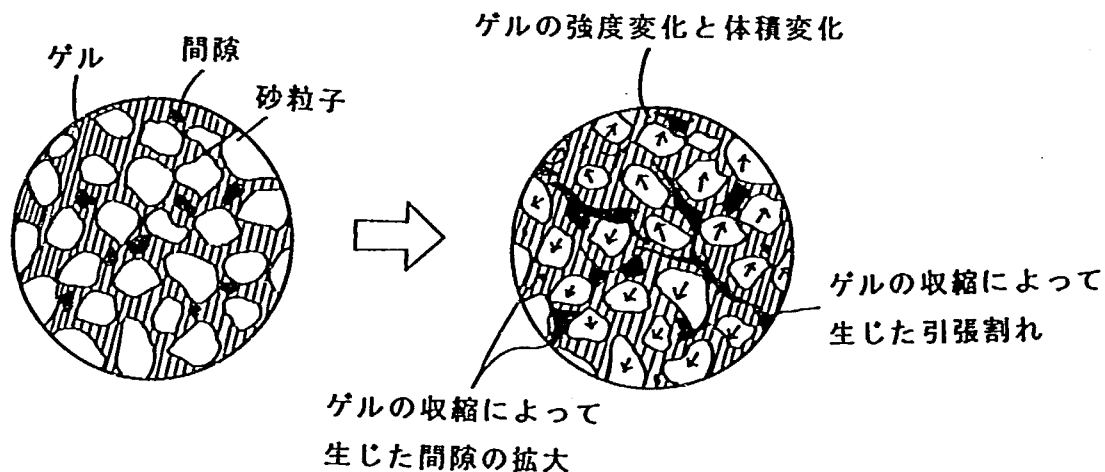


図-6.1.6 ゲルの収縮による注入固化体の劣化の模式図

6. 2 劣化速度の推定

注入材料の性能試験、地盤の調査、現地注入試験などから、注入固化体の劣化速度を推定する。また、注入固化体の劣化形態、劣化速度などから、耐久性の予測を行い、必要とする期間が経過した後も注入固化体が十分な物性値を持つよう設計・施工法を選定する。

(解説)

前節で言及したように、劣化は注入固化体表面からの劣化と内部の劣化に分けられ、これらの劣化作用の複合により劣化速度が決定される。なお、このとき、複数の劣化作用の相乗効果・複合効果を考慮する必要がある。例えば、収縮や振動・繰返し載荷によって注入固化体にひび割れが生じ、これを地下水が流れることによって急速な溶脱が生じ得る。トンネル等の周囲や水ぎわ構造物においては、この種の現象を無視出来ない。上の例では、ひび割れが生じるまでの劣化速度とひび割れが生じてからの劣化速度を分けて考える必要がある。また、注入材料自体は特に劣化しない場合でも、注入固化体周辺地盤の変化により注入材料の劣化が促進されることもある。例えば、構造物周囲の空洞充填などの場合、構造物と周辺地盤の不等沈下を生じて再び空隙が発生して、この空隙を水が流れることによって注入材料の劣化が促進されることがある。このような地盤については、注入時点で沈下現象を予測しておく必要がある。

図-6.1.1に示す様なフローで劣化予測を行う場合の参考資料として、通常の水ガラス系材料等を用いたときの劣化速度、劣化速度に及ぼす地下水の温度の効果、水質の効果、流速の効果、注入形態の効果、寸法効果等についての測定例について次に述べる。水ガラス系に近い注入材料において劣化の推定を行う際に下記の測定データを参考として利用することが可能である。

a. 劣化速度の測定例

注入材料の試験例は乏しいが、いくつかの既存のデータをもとに注入材料の劣化速度の試験例を整理すると図-6.2.1～6.2.2のようになる。

図-6.2.1は直径5cm長さ10cmの供試体を用いたときの、水ガラス系注入材料の種々の養生条件下における一軸圧縮強度の変化の測定例をコンパイルしたものである。空中養生は供試体1個毎の密封養生³³⁾あるいは高湿度室での養生³⁴⁾である。水中養生は供試体1個につき水6l中での養生³³⁾あるいは水量不明⁵⁾である。水交換養生は供試体1個につき6lのイオン交換水を週2回交換している³³⁾。試験結果を概観すると、材料によって一軸圧縮強度は異なるが、 q_u を一軸圧縮強度、 t を養生日数、 D を劣化速度に関する係数とすると、いずれの材料においても全体として $q_u \propto t^{-D}$ で近似されるような強度変化を示す。 D は養生条件によって変化する。すなわち、空中養生の場合は $0.05 \leq D \leq 0.1$ であり、水中養生の場合は $0.1 \leq D \leq 0.15$ である。水中養生の一部や水交換養生では $0.15 \leq D \leq 0.25$ 程度となっている。なお、 $D = 0.1$ においては養生約1000日で、 $D = 0.15$ は同じく養生約100日で養生1日における強度の半分に低下する。

図-6.2.2は、耐久性があるといわれる材料の種々の養生条件下における一軸圧縮強度変化の測定例をコンパイルしたものである。材料によっては通常の水ガラス系とほぼ同様な劣化傾向を示すものもあるが、一部の材料では強度上昇を生じる。これも図-6.2.1と同様に全体として $q_u \propto t^{-D}$ でおおよそ近似可能であり、強度上昇を生じる材料の D は、空中養生の場合 $D \approx -0.2$ 、水中養生～水交換養生の場合 $D \approx -0.1$ である。

以上より、注入材料の一軸圧縮強度は、おおまかには $q_u \propto t^{-D}$ で近似でき、 D は養生条件、注入材料の種類、注入固化体の性状などによって変化するものと整理される。直径5cm長さ10cmの浸透注入された供試体における一日養生後の q_{u_1} を基準に考えると、 t 日後の q_{u_t} は(A)式で示される。

$$q_{u_t} = q_{u_1} \cdot t^{-D} \quad (A)$$

測定された D の中で安全側の値をとると、通常の水ガラス系注入材料の場合、地下水面より上あるいは地下水の影響の小さい条件下では $D \leq 0.1$ 程度、地下水のある条件下では $D \approx 0.15$ 程度、地下水の流れの大きい条件下では $D > 0.15$ 程度とみなされる。実際に注入を実施した地盤で注入固化体の耐久性を比較した例は少ないが、透水性の小さい地盤での水ガラス系注入材料の注入実績によると、数年経過後にゲルが充分残っていたという報告があるので、強度に関しても地下水の影響の小さい条件下で $D \leq 0.1$ という値はほぼ妥当と考えられる。また、図-6.2.10などで後述するように、供試体に継続的に透水した条件下ではゲルが数10日で溶解することから、地下水の流れの大きい条件下では $D > 0.15$ という値も妥当なものと考えられる。

耐久性があるといわれ注入材料のなかには通常の水ガラス系注入材料とほとんど変わらないものもあるが、一部の材料では強度上昇が認められることから、地下水条件によっては耐久性注入材料として利用可能なものがある。ただし地下水などの地盤条件がより過酷なものになれば $D > 0$ になる可能性があるので、実際に現場で耐久性があるかどうかは、現場の地下水の流速などを考慮して D を推定し判断する必要がある。

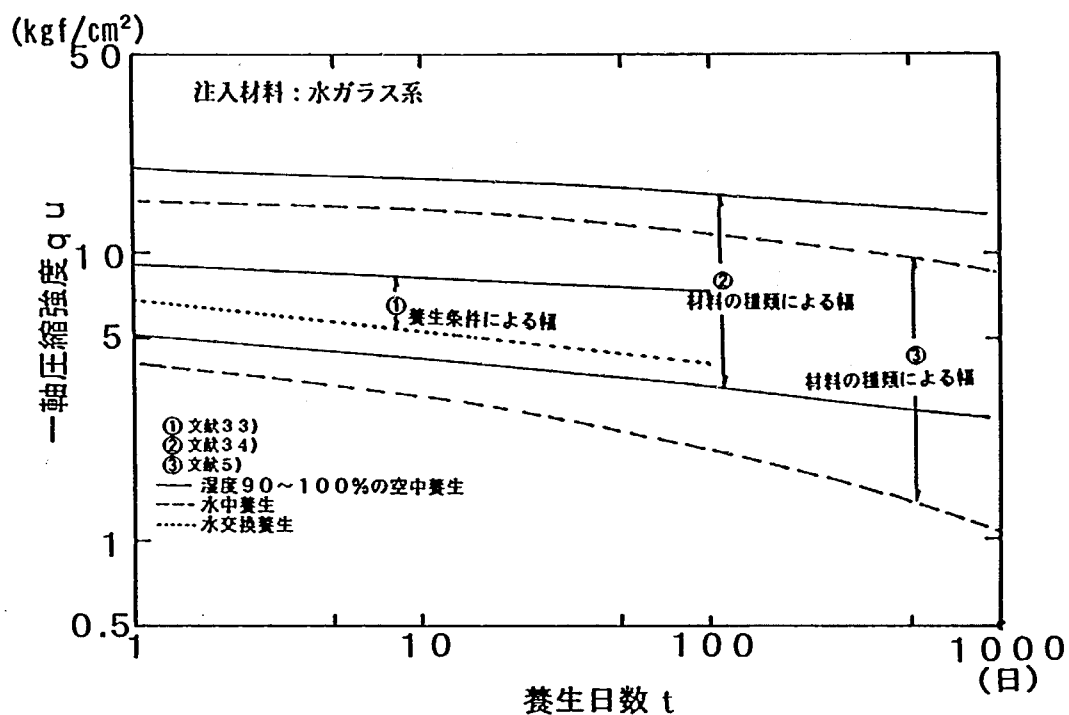


図-6.2.1 水ガラス系注入材料における養生日数と一軸圧縮強度の関係
(文献34)、35)、5)をもとに整理)

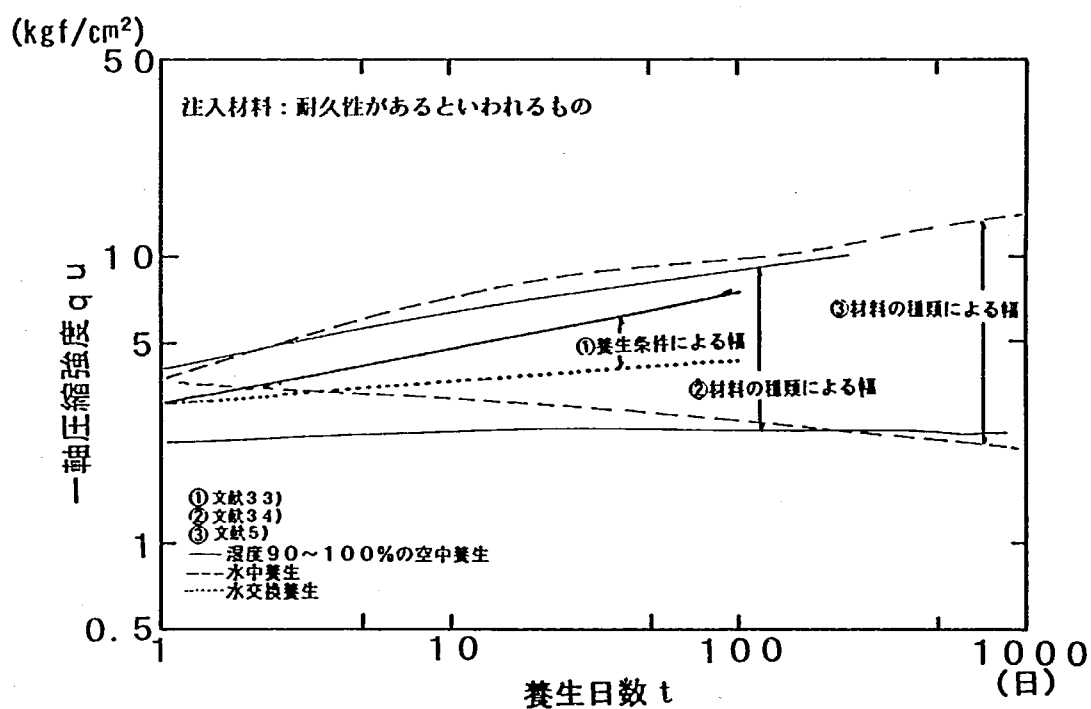


図-6.2.2 耐久性地盤注入材料における養生日数と一軸圧縮強度の関係
(文献34)、35)、5)をもとに整理)

b. 温度効果の測定例

注入材料は温度によってゲルタイムが大きく変化すると同時に、劣化速度も変化すると考えられる。図-6.2.3は水ガラス有機系注入材料（グリオキザール）を用いて約57日間（養生日数は供試体により多少異なる。）養生した際の養生水への溶解 SiO_2 量を示したものである。養生方法は供試体体積の30%のイオン交換水に浸したもの（浸水養生）と、供試体体積の10倍の水に浸しその水を週2回交換するもの（水交換養生）である。浸水養生においては、養生初期で溶脱 SiO_2 量はほぼ平衡状態となる傾向がある。水交換養生は浸水養生の数10倍～約100倍の溶脱 SiO_2 量があり、養生数十日経過後も溶脱が継続している。温度による相違は必ずしも大きくないが、水交換養生と浸水養生のいずれも高温の場合の溶脱量が数%～十数%程度多い。

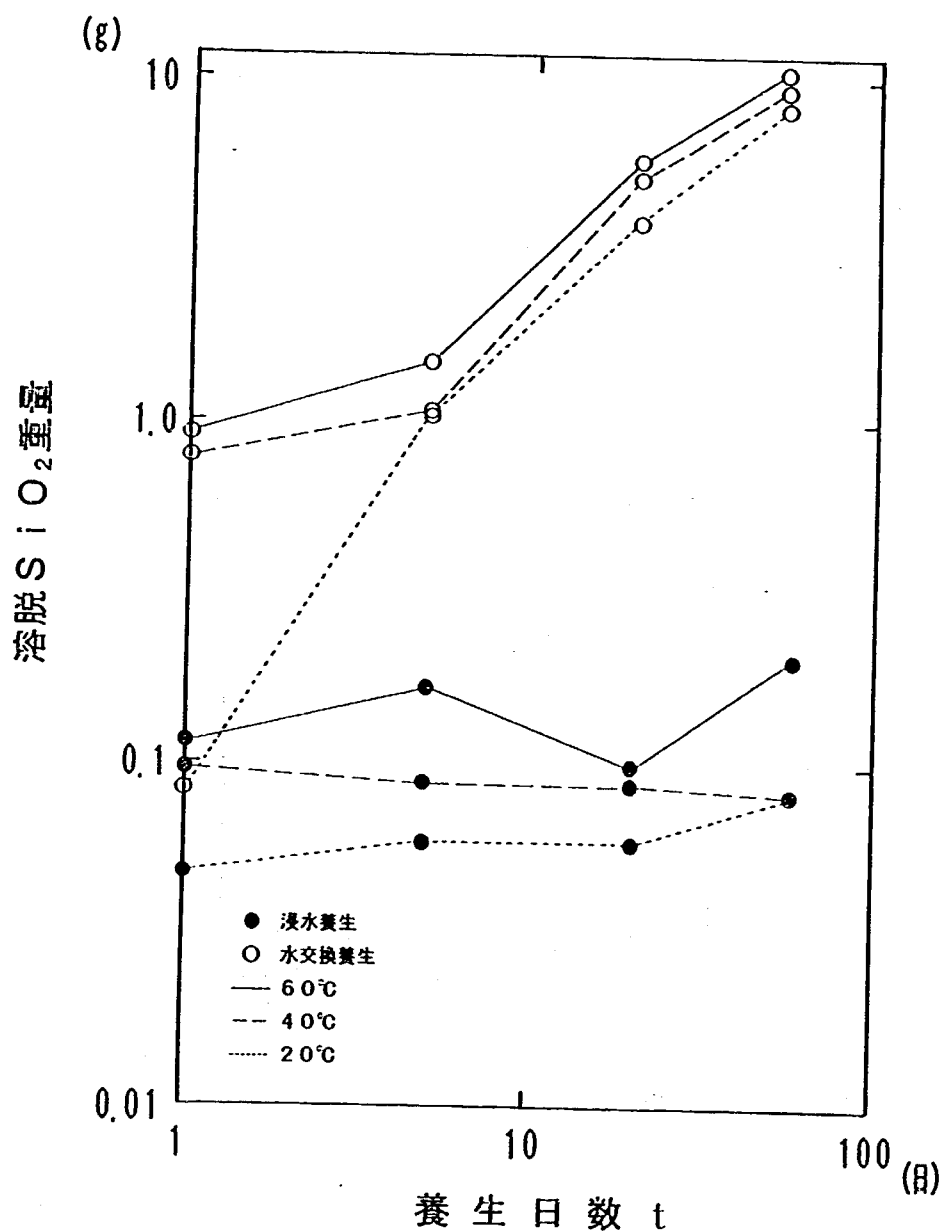


図-6.2.3 温度による溶脱 SiO_2 重量の相違の測定例

図-6.2.4は図-6.2.3と同じ実験において約5-7日間養生した後の一軸圧縮強度を示したものである(図中の1点は6供試体の平均値)。試験結果は、いずれの養生方法においても養生温度の上昇とともに強度が低下しており、温度によって劣化が促進されることを示している。20℃における強度を1とすると、いずれの養生方法においても養生温度が10℃上昇する毎に約5%の強度減少が認められる。浸水養生と水交換養生で比較すると、いずれの温度においても、水交換養生の方が約30%強度が低い。

(A) 式を適用し温度上昇によってDが増加すると仮定すれば、温度が10℃上昇する毎にDはおおよそ0.015増加する。浸水養生は養生水が少なく前節の水中養生と空中養生の中間的な養生法なので $D \approx 0.1$ とすれば、60℃の浸水養生は $D \approx 0.16$ となり、このときの促進倍率は約17倍である。これは10℃上昇するごとに促進倍率がほぼ2倍になることを意味する。一般に化学変化速度は10℃上昇するごとにほぼ2倍になるといわれており、浸水養生の劣化速度はこれにほぼ一致する。

一方水交換養生は前節での検討結果から $D \geq 0.15$ と推定されるので60℃では $D \geq 0.21$ となり促進倍率は約4倍以下に過ぎない。空中養生や浸水養生では主にゲルの化学変化により劣化が進行していると考えられるのに対し、水交換養生の場合溶脱による劣化が主である。一般に固体が水に溶解する場合、温度は溶解や拡散の速度にある程度寄与するが、むしろ溶解速度は固体周囲の水のイオン濃度に決定的な影響を受ける。ゲルの溶脱も同様と考えられ、したがって水交換養生では温度変化の影響が小さいものと考えられる。以上より、温度促進の度合いは、温度によって一律に決定されるものではなく、養生条件により異なっている。

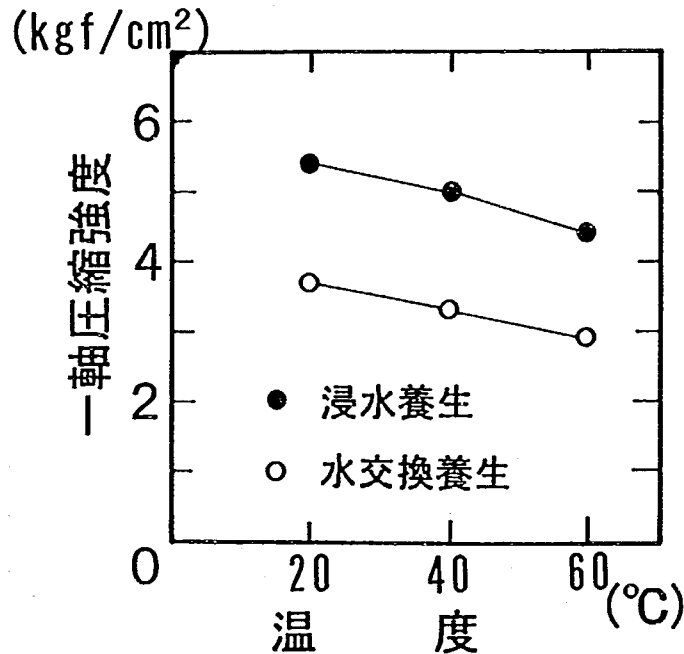


図-6.2.4 温度による一軸圧縮強度の相違の測定例

c. 水質効果の測定例

注入材料は、地盤の温度と同様、地下水の水質によってもゲルタイムや劣化速度が変化すると考えられる。図-6.2.5は水ガラス有機系（GSG-LD）において養生水の水質（pH）を変え、約53日間（養生日数は供試体により多少異なる。）養生した際の溶脱 SiO_2 量の変化を示したものである。養生方法は前節と同様浸水養生と水交換養生の2種類とした。同図によると、浸水養生においては、pHが高いものや低いもので初期の溶脱量が増加する。しかし長期経過すると逆転している。水交換養生ではpH4の溶脱 SiO_2 量が他よりやや低い傾向にある。全体に、水質による溶脱量の相違は、養生方法の相違に比較すると小さいようである。

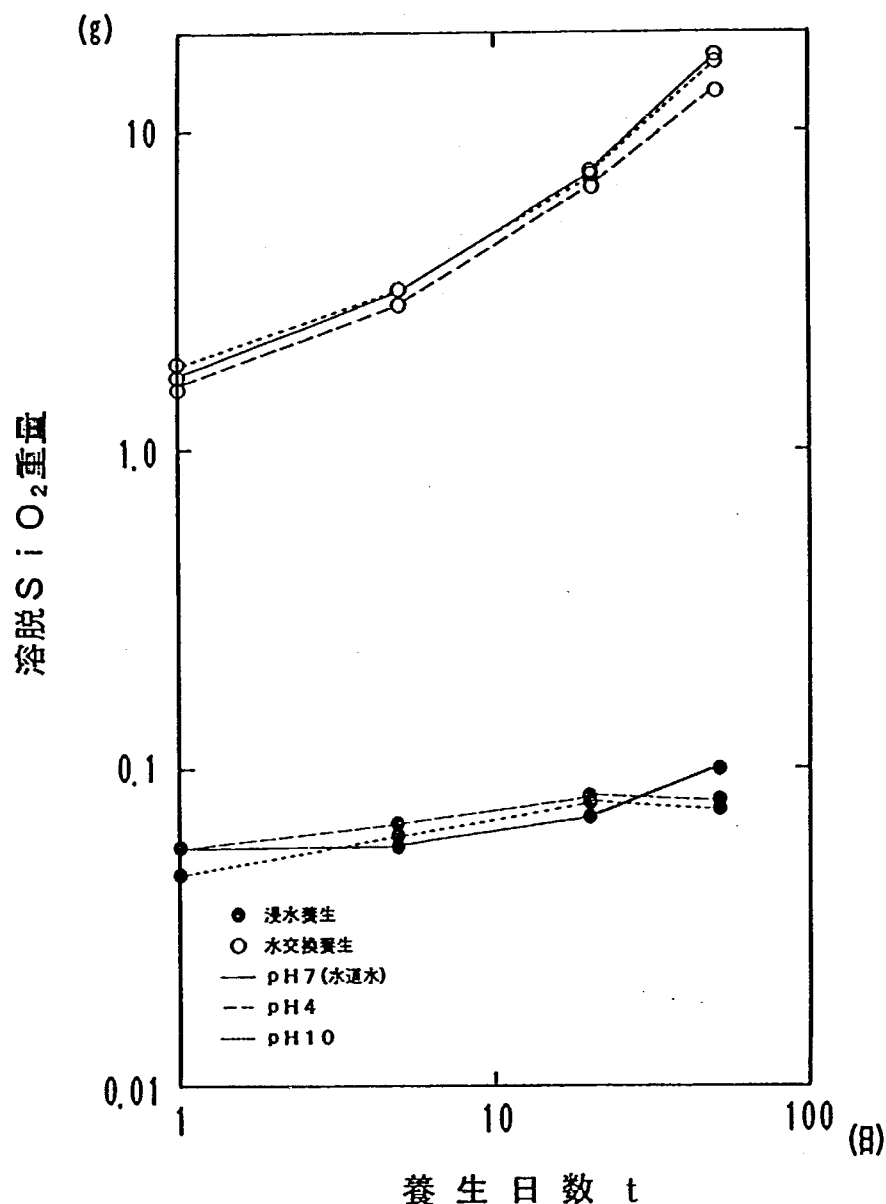


図-6.2.5 水質による溶脱 SiO_2 濃度の相違の測定例

図-6.2.6は図-6.2.5と同じ試験において約53日間養生した後の一軸圧縮強度を示したものである。pHが中性で最も劣化速度は遅く、pH10で強度低下が著しい。浸水養生と水交換養生を比較すると、全体として水交換養生の方が10～30%の強度低下を示す。

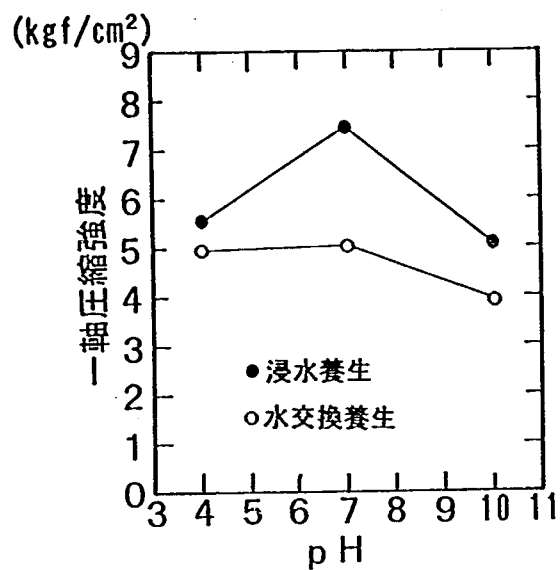


図-6.2.6 水質による一軸圧縮強度の相違の測定例

d. 流速効果の測定例

地下水の流速は、注入材料の溶脱速度に大きな影響を与えられとされる。図-6.2.7は水ガラス系注入材料においてサンドゲル周囲に砂を詰め（周囲の砂は、粒度を変えて流速を3段階に変化させた。）透水しながら養生したときの平均流速と流出水中の SiO_2 濃度の関係である。養生1日目では流速と SiO_2 濃度には負の相関が認められるが5日以降はあまり相違がない。通常流速が小さいとゲルと水が接触している時間が長いため高濃度になる。これが養生1日目において流速と SiO_2 濃度に負の相関がある原因と考えられる。5日目以降に相関がないのは、おそらく養生4日目までの間に流出しやすい未反応 SiO_2 はおおよそ流出してしまい、その後に溶出する SiO_2 量は微量であったために使用した原水の SiO_2 濃度（約16～18mg/l）がバックグラウンドとなったと考えられる。

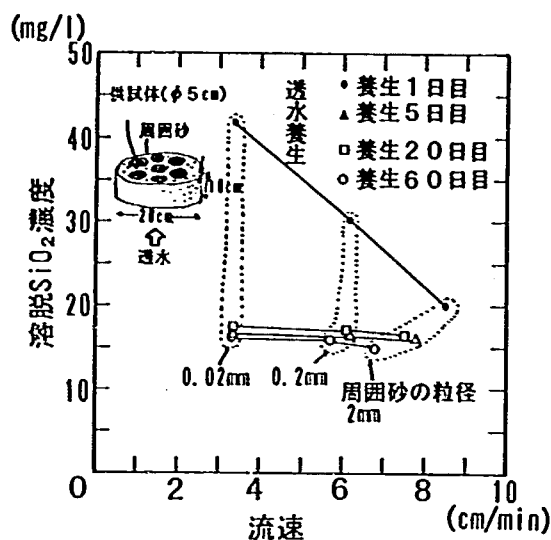


図-6.2.7 流速による溶脱 SiO_2 濃度の相違の測定例

図-6.2.8は図-6.2.7と同じ試験における60日後の流速と一軸圧縮強度の関係である。全体としては流速が早いと溶脱による強度低下が著しいが、流速が遅い場合も強度が低くなっている。周囲の砂が0.02mmの場合、パイピングによって砂の一部が流出していたことから、供試体が一部露出して急速な強度低下を生じたためと考えられる。

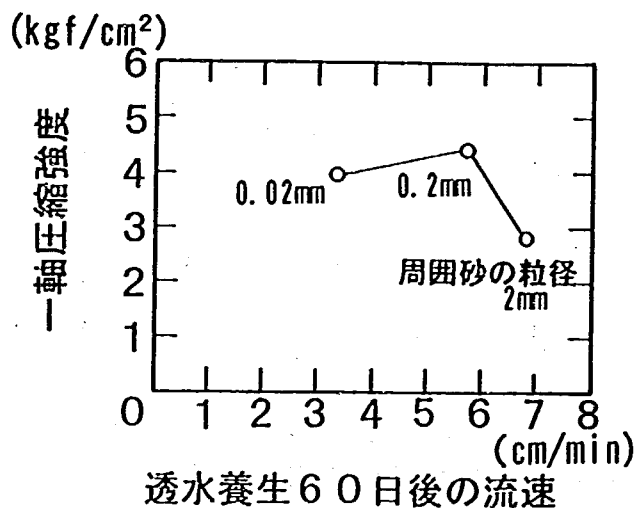


図-6.2.8 流速による一軸圧縮強度の相違の測定例

e. 注入形態効果の測定例

浸透注入と割裂注入では耐久性が異なり、割裂注入でもゲルの脈の厚さや分布により耐久性は異なると考えられる。図-6.2.9は水ガラス系注入材料において、割裂注入を想定して、砂中に厚さの異なる3種類の板状ホモゲル（厚さ1cm、0.6cm、0.3cm）を埋めて透水養生を行なったときの流出水中の SiO_2 濃度変化を示したものである。なお、一つの供試体におけるホモゲルの量は同一に調整した。透水した結果、流速はほぼ同一で約4 cm/minであった。同図によると、厚さが薄い（すなわち表面積が大きい）ゲルは溶脱 SiO_2 濃度がわずかながら高い傾向にあることがわかる。

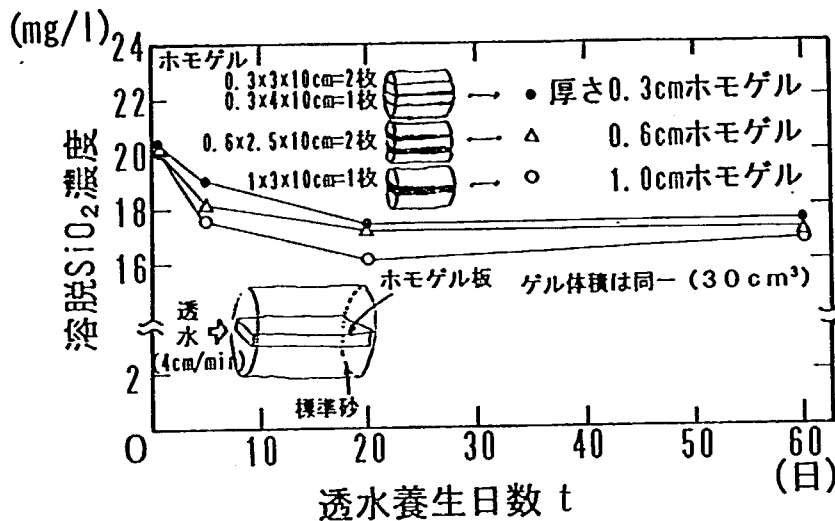


図-6.2.9 注入形態による溶脱 SiO_2 濃度の相違の測定例

上の実験において、透水終了後ゲルを取り出した結果、ゲルは3種の厚さのうち最も厚いゲル（厚さ1cm）以外は溶解していた。実験前後のゲルの大きさを比較した結果が図-6.2.10である。すなわち板状ホモゲルは、流水の方向や脈の形状にもよるが、流速4 cm/min ($=6.0 \times 10^{-2}$ cm/sec) の流速下で、約0.1mm/day ~ 0.2mm/dayの溶解速度を持つ。

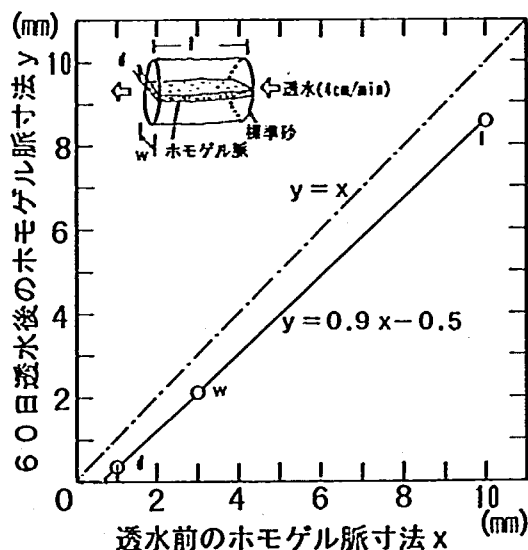


図-6.2.10 透水前と60日後の脈の寸法の比較

f. 寸法効果の測定例

地盤注入においては、設計時においてさまざまな大きさや厚さの注入範囲が設定される。また、室内供試体の耐久性から実地盤中の注入固化体の耐久性を推定する際にも寸法効果を考慮しておく必要がある。

図-6.2.11は水ガラス系注入材料において供試体の寸法を変えて53日間養生した後の一軸圧縮強度である。なお本試験の浸水養生および水交換養生は、いずれも供試体体積の10倍の水中で養生し、水交換養生のみ週2回の水全量交換を行っている。

一般に通常の岩石では寸法効果が認められ、供試体直径を x とすると、 $q_u \propto x^{-a}$ で近似され、 $0.17 \leq a \leq 0.32$ といわれる³⁵⁾。しかし浸水養生の結果には寸法効果が認められず、いずれの寸法についても一軸圧縮強度 2 kgf/cm^2 前後を示している。岩石の場合、既存の割れ目などが寸法効果に影響するといわれているので、浸透注入が達成されほぼ均一となった注入固化体については岩石の場合ほど寸法効果を考慮する必要がないか、あるいは、浸水養生によって小さい供試体の強度が相対的に大きく低下したため、見かけ上同程度の強度になったという2つの可能性がある。ここでは密封養生を実施していないため、いずれの理由によるものか不明である。

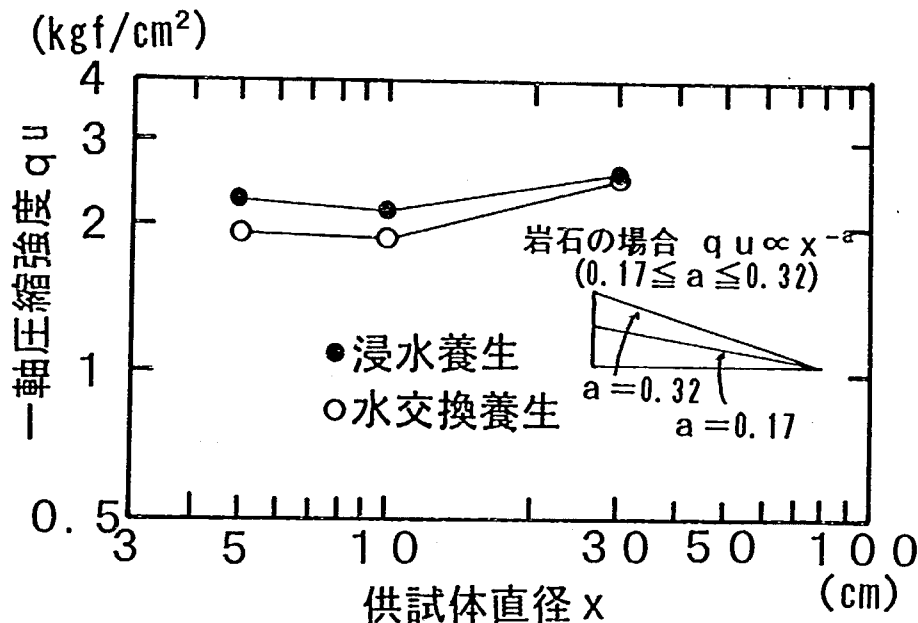


図-6.2.11 供試体寸法による一軸圧縮強度の相違の測定例

一方、浸水養生と水交換養生の強度差に関しては、寸法効果が表われており、小さい供試体ほど、浸水養生供試体の一軸圧縮強度に比較して水交換養生供試体の一軸圧縮強度が小さい傾向がある。溶脱による劣化は注入固化体表面から進行するので、小さな供試体ほど単位体積当たりの注入固化体表面積が大きく、水交換の影響を受けて劣化しやすいためと考えられる。

以上の点から寸法効果について整理すると、水の動きがあまりない地盤中では、小さい供試体（直径5cm・長さ10cm等）を用いた浸水養生試験などによって長期経過後の注入固化体の耐久性をおおよそ推定できると考えられるが、水の動きのある地盤中では、

小さい供試体を用いた水交換養生試験等は実地盤中の注入固化体の劣化量を過大に評価してしまう可能性がある。しかし、注入形態効果の頁で述べたように、割裂注入の場合は注入固化体の内部を水が流れて急速な劣化を生じ得るため、寸法効果の影響は小さいと考えられる。したがって寸法効果を考える場合にも、注入固化体の注入形態毎に分けて考える必要がある。

7. 設計、施工および施工管理

設計、施工、施工管理等は、地盤注入工法に関する既存の指針等に沿って行うものとする。

(解説)

地盤注入工法に関する既存の指針としては、建設省²¹⁾、(社)日本薬液注入協会³⁰⁾、国鉄¹⁴⁾のものなど、また、環境汚染防止に関するものとして(社)日本トンネル技術協会³⁶⁾のものなどがあるので、これらの指針や資料を参考にされたい。

8. 維持管理

本章では、注入後の維持管理手法について述べる。

8. 1 注入後の調査

注入後、必要とする改良物性値を継時的に調査し、劣化の推定結果と対比する。

(解説)

地盤の強度、透水係数など、必要とする改良物性値は劣化により継時的に変化する。7章における劣化予測には不確定要因が多く、正確な劣化予測は難しいと考えるべきである。したがって予測結果と現地調査結果を対比し、予測のずれに対応する必要がある。

調査は原則として、注入直後に注入効果の確認のために実施する方法と同一の調査手法を用い、必要とする改良物性値（強度、変形性、透水性など）を経時的に試験するものとする。調査間隔は、施工直後については予測できない急激な劣化による問題が生じないよう監視する意味から比較的短い時間間隔で実施し、現地における劣化速度がほぼ判明したら、その速度に応じて適切な調査時間間隔を設定する。調査の一応の目安としては、1ヶ月後、3ヶ月後、1年後、数年後、（10数年後、数10年後）程度の間隔が考えられる。なお、調査位置や数量は、局所的な劣化にも対応できるように充分密に、かつ劣化しやすい箇所を重点的に設定する。

8. 2 追加工事

改良物性値の継時的調査結果と劣化予測結果との対比により、危険側のずれが生じていることが明らかとなった場合は、原因の調査、劣化予測の見直しなどを行い、必要に応じて追加工事を実施する。

(解説)

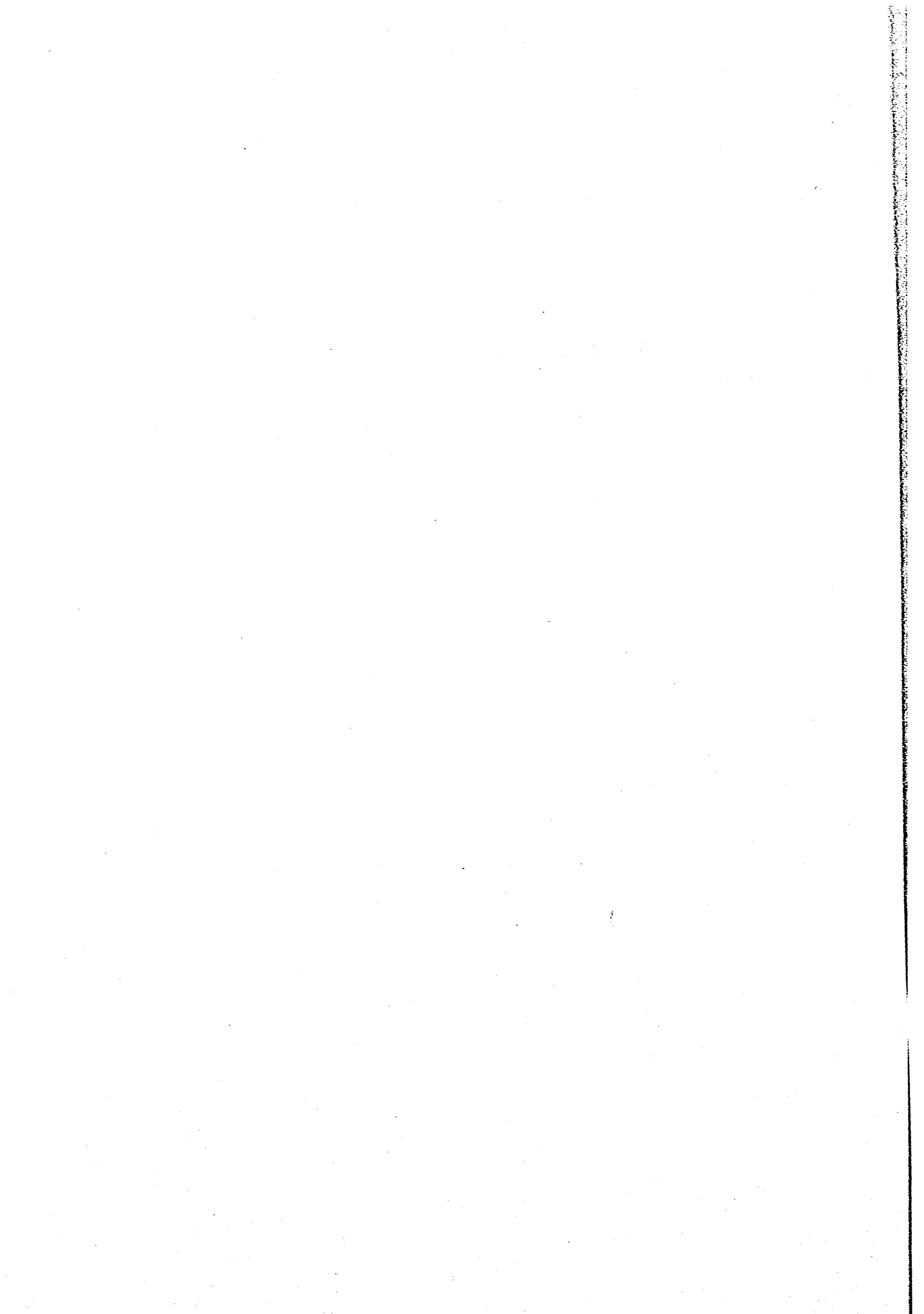
劣化予測結果とのずれは、①注入材料の耐久性の見誤り、②地盤や地下水性状の見誤り、③注入状況の見誤り、④劣化モデルの設定の誤り、などに起因するが、まず劣化の著しい箇所の位置と劣化の程度を充分把握し、劣化予測結果とのずれがどのような機構によって生じたか明らかにする必要がある。この検討により、追加工事が特に必要な箇所や工事規模が明確となり、経済的な工事が実施できる。

引用文献

- 1) 島田俊介, 佐藤武, 多久実 (1989) : 最先端技術の薬液注入工法, 理工図書, p.105.
- 2) 国土開発技術研究センター (1978) : 注入用薬液の性質に関する標準試験法 (案) (建設省土木研究所委託)、93p.
- 3) 米倉亮三, 加賀宗彦 (1984) : サンドゲルの耐久性 (その2), 第19回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1537-1538.
- 4) 多田修一, 米倉亮三, 加賀宗彦, 島田俊介 (1987) : 超微粒子シリカを用いた耐久性グラウト材の開発, 第22回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1813-1814.
- 5) 所武彦, 高橋則雄, 奥村英二 (1989) : 水ガラス系グラウトの耐久性について, 第24回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1919-1920.
- 6) 伊藤孝男, 佐伯吉勝, 吉田明利 (1991) : 超微粒子シリカ系グラウト材による砂質土の固結効果について, 第26回土質工学研究発表会発表講演集, pp.1929-1930.
- 7) 柴崎光弘, 下田一雄, 野上明男 (1977) : 薬液注入工法の設計と施工, 山海堂, pp.66-67.
- 8) 松本徳久, 山口嘉一 (1990) : 低塑性築堤材料のパイピング抵抗性、土木研究所資料第2917号、39p.
- 9) 松本徳久, 山口嘉一, 田原則雄 (1991) : ダム基礎軟岩のパイピング抵抗性、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.247-251.
- 10) 三木五三郎, 斉藤孝夫, 下田一雄, 木村昌義 (1990) : 裏込め注入工法の設計と施工、山海堂、p.31.
- 11) 国土開発技術研究センター (1976) : 薬液注入工法を実施した場合の地下水に及ぼす影響と監視方法に関する調査報告書 (建設省土木研究所委託)、pp.68-79.
- 12) 日本工業規格協会 : 日本工業規格 (J I S) .
- 13) 土質工学会 (1990) : 土質試験の方法と解説、615p.
- 14) 日本国有鉄道 (編) (1987) : 注入の設計施工指針, (社) 日本鉄道施設協会.
- 15) Christopher, B.R., Atmatzidis, D.K., Krizek, R.J., (1989) : Laboratory Testing of Chemically Grouted Sand, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.12, No.2, pp.109-118.
- 16) A S T M (the American Society for Testing and Materials) 基準 D 4320 (Standard Method for Laboratory Preparation of Chemically Grouted Soil Specimens for Obtaining Design Strength Parameters, *Annual Books of ASTM Standards* Vol.04.08, pp.608-611.
- 17) 建設省 (1970) : 建設省土木試験基準 KDK S 0502-1968 (岩石の一軸圧縮試験方法)
- 18) 環境庁 (1971) : 環境庁告示第59号 (人の健康の保護に関する環境基準, 生活環境の保全に関する環境基準) .
- 19) 厚生省 : 水質基準に関する省令ほか.
- 20) 総理府 (1971) : 総理府令第35号.
- 21) 建設省 (1974) : 薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針.
- 22) 玉虫文一ほか (1981) : 岩波 理化学辞典, 岩波書店, p.1123.
- 23) 佐藤理 (1983) : 多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性流-単孔法による地下水流測定への応用-、ながれ、Vol.2、No.3、pp.252-259.

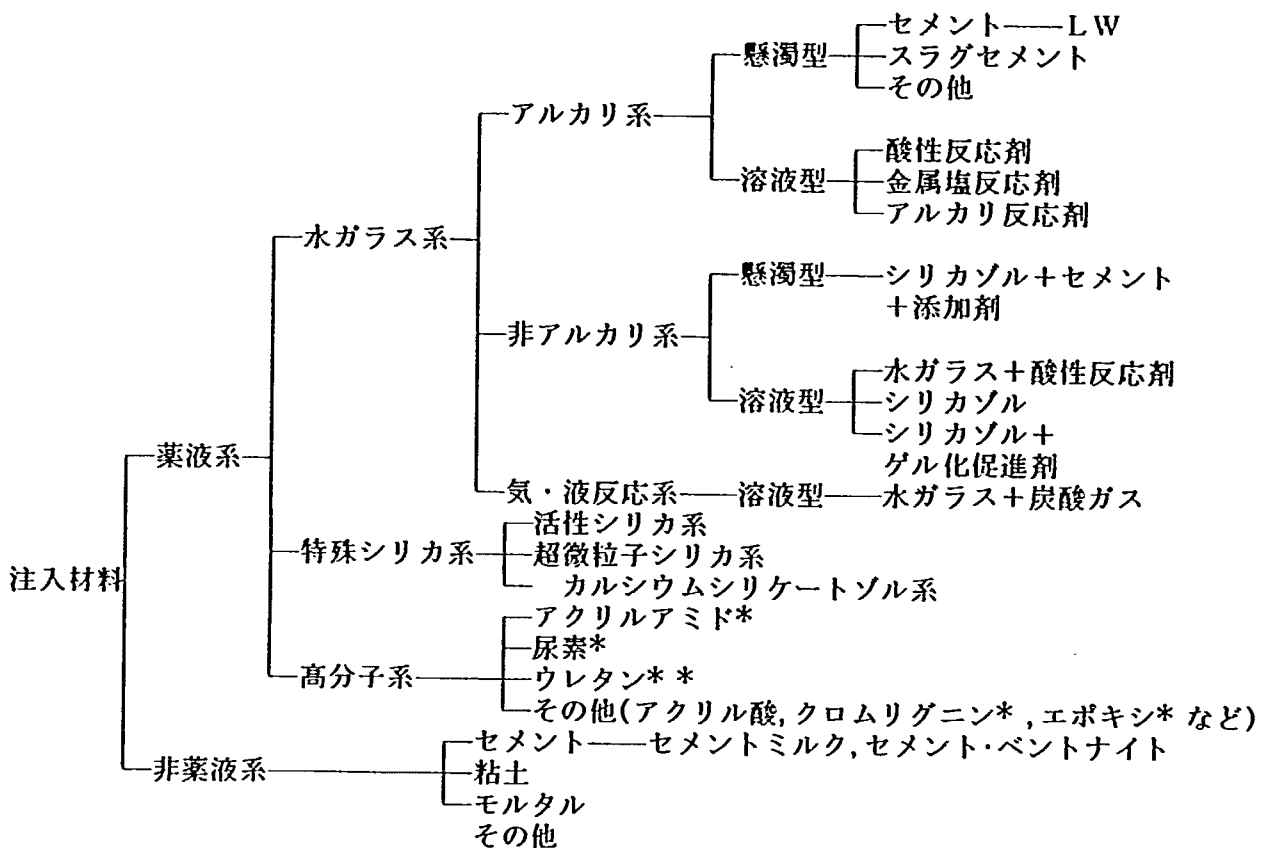
- 24) 安藤義久、田村孝廣、齊藤秀晴、野沢篤志 (1990) : C C Dカメラを利用した地下水流向流速計の適用性、水文・水資源学会 1990 年研究発表会要旨集、pp.196-199.
- 25) 河西基、佐野理、平田洋一、松岡永憲 (1991) : ボーリング孔を横切る地下水流れのトレーサー追跡に関する実験的検討、第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.242-246
- 26) 本島勲、北野晃一 (1990) : クロスホール透水試験装置の開発、電力中央研究所報告 U90002, 20p.
- 27) 渡辺邦夫、藍沢稔幸、小野誠、柳沢孝一、佐久間秀樹、山本肇、神田信之 (1989) : 蒸発料計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定 - (その 1) 測定方法と室内試験 -、応用地質、Vol.30、No.4、pp.11-18.
- 28) 渡辺邦夫、藍沢稔幸、Ronald PUSCH、佐久間秀樹、山本肇、神田信之 (1990) : 蒸発料計測によるトンネル壁面からの湧水量の測定 - (その 2) 現場計測 -、応用地質、Vol.31、No.1、pp.1-11.
- 29) 土質工学会 編 (1983) : 土質調査法、pp.343-373
- 30) 日本薬液注入協会 (1989) : 薬液注入工法の設計・施工指針、56p.
- 31) Akira MORI ,Masahito TAMURA,Yoshihiro HUIJI(1989):Distribution of Grouts in Solidified Region on Chemical Grouting,SOILS AND FOUNDATIONS,Vol.29,No.4,pp.127-134.
- 32) 柳沢文孝 (1990) : ガラスと水の反応について、鉱山地質、40(5)、pp.353-362.
- 33) 土木研究所 (1990) : 平成 2 年度建設技術研究開発費報告.
- 34) 東洋大学工業技術研究所土木施工研究室 (1988) : 薬液注入における恒久性,73p.
- 35) 山口梅太郎、西松裕一 (1987) : 岩石力学入門 (第 2 版)、東京大学出版会、p.113.
- 36) トンネル技術協会 (1978) : 薬液注入工事による環境汚染防止に関する調査研究報告書 (日本道路公団大阪建設局委託)、202p.

参考資料 1 注入材料



1. 種類と特徴

現在利用されている注入材料は一般に、図－1のように分類される¹⁾。同図は、注入材料のみならず埋設管の補修剤等も含んでおり、薬液系とは主に水ガラス等の溶液型注入材料からなるもので固結時間が数10分以内のもの、非薬液系とは主にセメント等の懸濁型注入材料からなるもので固結時間が数時間単位のことを指す。以下に、主な注入材料の概要について主剤毎に述べる。



* 現在用いられていない。

** 緊急時のみ使用可。

図－1 地盤注入材料の種類（文献1）を一部改変）

a. 水ガラス系

水ガラス ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) に硬化材を加えて固結させるもので、反応形式も各種あるため注入材料の種類も多い。現在、最も一般的な注入材料として用いられている。水ガラス系は硬化材の種類によって無機系と有機系に分けられる。

b. アクリルアミド (またはアクリルアマイド) 系

アクリルアミドに過硫酸アンモン等を加え、重合反応によって固結させるものである。最も浸透性が高く、また、耐久性に優れているが、アクリルアミドモノマーの LD_{50} (マウス経口投与により、死亡するマウスの累計重量が全体の半分になる薬剤量) が 252mg/kg と、劇物に指定されているため、現在使用禁止となっている。

c. アクリル酸塩系

アクリル酸塩に過硫酸アンモン等を加えて重合反応を起こさせるものである。アクリルアミド系と異なり、 LD_{50} が $10,000\text{mg/kg}$ 以上であり、現在も使用されている。

d. 尿素樹脂系

尿素樹脂とホルマリンの付加反応と縮合反応によるゲル形成を利用したもので、尿素系接着剤同様、発生強度が大きいことが最大の特徴である。反応過程でホルムアルデヒド ($\text{H} \cdot \text{CHO}$) を生成することから使用禁止中である。

e. クロムリグニン系

リグニンスルホン酸を主成分とするパルプ廃液に重クロム酸を添加してゲル化させるものであるが、重クロム酸が毒物であるため、使用禁止となった。

f. イソシアネート系

ウレタン系とも言われており、イソシアネート基と地中の水がウリア結合することによってゲル化を起こし、強力なウレタン樹脂を形成する。イソシアネート成分の安全性が充分明らかでないが、緊急止水に使われている。

g. エポキシ系等

主に埋設構造物の補修用あるいは防水防蝕用として開発・使用されている高分子系の材料で、エポキシ樹脂系の他に、ゴム系、エマルジョン系等の、従来接着剤として使用していた材料をベースとしている。一般に、弾性・接着性に優れており、構造物の補修には適するが、浸透性・安全性等の面から、注入材料としては使用されていない。

h. 特殊シリカ系

超微粒子シリカ、活性シリカ、ケイ酸カルシウムゾル等を用いた注入材料で、浸透性が高く耐久性に優れると考えられており、恒久グラウトと称される (表-1)。

表-1 耐久性を性能として掲げている主な材料 (1992年現在)

薬液名	系 統	メーカー	備 考
GSG	水ガラス、有機系	強化土グループ	実施権を持つ会社が多数の名前で実施している。
セキスイLG	水ガラス、有機系	頤水化学	
MRG	シリカゾル	ライト工業	
ハードライザー	シリカゾル系	強化土グループ	
シラクソル	活性シリカ	ライト工業	
パーマロック	シリカコロイド	旭電化	

次に、注入材料メーカー・施工会社・協会等へのアンケート調査によって得られた、現在使用中あるいは過去に使用された計294種類の注入材料（巻末資料1参照）の種類に関する全体的な傾向について述べる。調査はメーカー20社、施工会社81社を対象に行い、合計27社より収集された。なお、注入材料に関するアンケート結果については巻末に添付した。

収集された注入材料の主剤の内訳は図-2の通りである。同図によると、全注入材料の

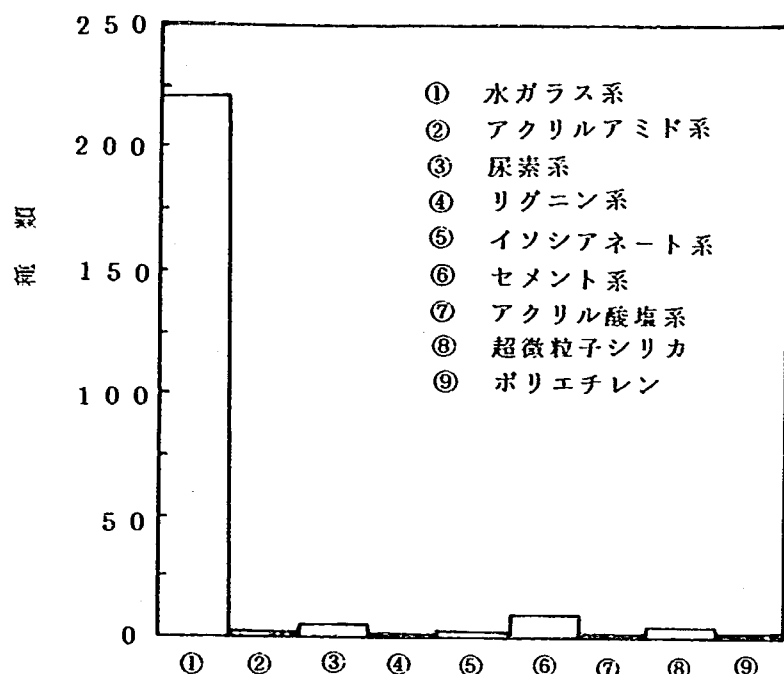


図-2 アンケートによって得られた注入材料の主剤系の頻度分布

80%程度が水ガラス系である。表-2は主剤の種別・溶液懸濁・有機無機・ゲルタイム毎に区分し、集計したものである。ゲルタイムは、秒単位のものを「短い」、分単位のものを「中位」、10数分以上あるいはゲルタイムのないものを「長い」とした。同表によると、現在最も多く使用されているのは水ガラス系溶液型無機系でゲルタイムが短いものであり、全体の約4分の1に当たる。水ガラス系で有機系の注入材料ではゲルタイムは中位のものが多いが、これは有機系の化学反応が比較的緩やかに進行するものが多いためである。懸濁型薬液では、ゲルタイムの短いものが多い。その他では、イソシアネート系は短いゲルタイム、またセメント系は長い固化時間（セメント系はゲルタイムという言葉は用いない）を持つ。イソシアネート系（ウレタン系）は緊急止水、セメント系は主に強度増加や裏込め、あるいはダムの止水など、水ガラス系に比べ利用方法が限定されていることと比較すると、現在使用が禁止されているアクリルアミド系、尿素系、リグニン系の注入材料はいずれも中位（数分程度）のゲルタイムであり、禁止された注入材料は一般に低粘性で浸透性を高めかつ発生強度も高めるという現在の水ガラス系の延長線上としての役割を持っていたことがわかる。

表-2 注入材料の種別およびゲルタイム

No	種 別	溶液懸濁	有機無機	ゲルタイム	銘柄数
①	水ガラス系	溶液型	有機系	短かい	28
②	、	、	、	中 位	45
③	、	、	、	長 い	18
④	、	、	無機系	短かい	78
⑤	、	、	、	中 位	41
⑥	、	、	、	長 い	11
⑦	、	懸濁型	有機系	短かい	0
⑧	、	、	、	中 位	0
⑨	、	、	、	長 い	0
⑩	、	、	無機系	短かい	28
⑪	、	、	、	中 位	6
⑫	、	、	、	長 い	5
⑬	アクリルアミド系	溶液型	有機系	短かい	0
⑭	、	、	、	中 位	2 *
⑮	、	、	、	長 い	0
⑯	アクリル酸塩系	溶液型	有機系	短かい	0
⑰	、	、	、	中 位	2
⑱	、	、	、	長 い	0
⑲	尿 素 系	溶液型	有機系	短かい	0
⑳	、	、	、	中 位	4 *
㉑	、	、	、	長 い	0
㉒	リグニソ系	溶液型	有機系	短かい	0
㉓	、	、	、	中 位	1 *
㉔	、	、	、	長 い	0
㉕	イソシアネート系	溶液型	有機系	短かい	5
㉖	セメント系	懸濁型	有機系	短かい	0
㉗	、	、	、	中 位	0
㉘	、	、	、	長 い	0
㉙	、	、	無機系	短かい	1
㊱	、	、	、	中 位	2
㊲	、	、	、	長 い	12
㊳	そ の 他		無機系	短かい~長い	4
㊴	、		有機系	、	1
					294

* 現在使用禁止

2. 注入材料の基本性能

注入材料としての性能を左右する基本的物性は、浸透性（粘性およびゲルタイム）、工学特性（ホモゲル強度およびサンドゲル強度、改良土の透水係数等）、安全性、および安定性（耐久性）である。これらのうち、浸透性や工学特性に関する一般的な物性は各材料メーカーで独自に試験されている。

地盤注入工法の使用目的及び対象地盤を分類すると、大きく、

- ① 地盤強化（粘性土等よりなる軟弱地盤）、
- ② 止水、透水性改良（砂礫質地盤、亀裂性岩盤等）、
- ③ ①②の両方（未固結地盤～軟岩、高亀裂性岩盤等）、

の三つに分けられる。一方、注入目的を達成するために材料に求められる物理化学工学特性は、基本的に次の四つである。

- a. 浸透性が高いこと
- b. 強度が高いこと
- c. ゲルタイムの調節が容易であること
- d. 安定性・安全性が高いこと

これらの特性について概略的に述べると次のようになる。

a. 高浸透性

高浸透性（すなわち、透水性の高改良能力）を得るためには、注入材料（主剤及び添加剤）の混合時における粘性（初期粘性）が低だけでなく、粘性の時間的変化も問題となる。つまり、注入材料の粘性は混合時以降徐々に高くなる傾向があるため、実質的な粘性は初期粘性よりも高いとみなす必要がある。よって、注入材料が高浸透性を発揮するためには、初期粘性が低だけでなくゲルタイム前の粘性が一定不変である（ゲルタイムに達した時点で急激に粘性が増加し固化する）必要がある。

b. 高強度

注入材料の強度は、ある条件下で地盤に注入された時の地盤の強度改良性で示される。すなわち、ホモゲル強度のみならず、地盤への浸透性が高くなければ、結果的に地盤の強度は改良されない。よってホモゲル強度とサンドゲル強度は相補的なものであり、一般にカタログ等では両方の値を提示している。しかしこれら供試体の作製条件は必ずしも一定していない様である。

c. ゲルタイムの調節

透水性の異なる地盤（礫、砂、シルト、粘土等の互層、亀裂幅の変化が大きい岩盤等）に対して浸透注入を行うために注入速度を変える必要があるが、これに伴いゲルタイムを調節する必要が生じる。特に、礫、砂、シルト、粘土等が互層をなしているときなどは、ゲルタイムの異なる二種以上の注入材料を用いることによって、注入材料の逸流や未固結部分の形成を防ぎ均質な注入を可能にする。

d. 耐久性・安定性・安全性

地盤中には、pHのばらつきや多くのイオン・有機物等が存在し、これらに対して注入材料は長期的に安定でなければならない。ただし緊急止水や切羽の自立等、仮設的に用いる場合はその限りでない。また、地下水が豊富で注入材料が薄められる様な状態でも安定に固化する必要がある。さらに、人体のみならず、湖沼等に存在する生物に対しても安全

でなければならない。この場合、濃度と総量の両面から、その「安全度」を把握する必要がある。

以上四つの項目に留意し注入材料の基礎的物理工学特性に関して整理した。調査対象は、(社)日本薬液注入協会会員へのアンケートによって回答の得られた注入材料であり、そのほとんどは水ガラス系であるが、そのほかに、アクリル酸塩系、イソシアネート系、セメント系、超微粒子シリカ、ポリエチレングリコールアクリレート及び現在は用いられていないアクリルアミド系、尿素系等を幾つか含んでいる。これらの注入材料を対象に、初期粘性（主剤及び添加剤の混合時粘性、単位 cP ）、一軸圧縮強度（サンドゲル及びホモゲル強度、単位 kgf/cm^2 ）、注入固化体（サンドゲル）の改良透水係数（単位 cm/sec ）、ゲルタイム（単位 分）、 LD_{50} （マウス経口投与によって全体の半分の重量%が死亡する投与薬剤量、単位 mg ）等に着目して整理した。ただし、これらの値が全注入材料について得られている訳ではないため、以下の調査結果は概略的な傾向としてみるべきである。また、本調査はアンケートによるため、注入材の性能は、平均値というよりも最高値に近い値を提示しているものがあることを留意する必要がある。

今回得られた注入材料の、混合時における初期粘性のヒストグラムを図-3に示す。これによると最も多いのは初期粘性2～3 cP の材料であるが、水の粘性に近い1～2 cP の注入材料も40種以上みられる。この低粘性がある程度の時間持続するならかなりの高浸透性が得られるが、恐らくこれらは水分を非常に多く配合した場合の粘性と考えられる。

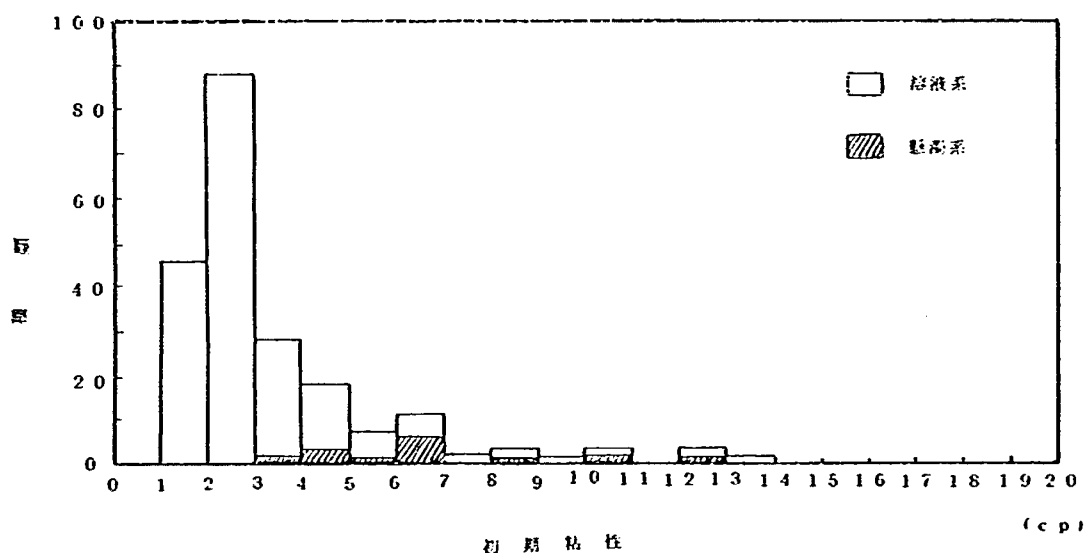


図-3 初期粘性の頻度分布

図-4はホモゲルとサンドゲルの一軸圧縮強度の関係である。これらには明瞭な正の相関がある（図中の直線。ただしこれは同図中の173試料のみの回帰。高強度の試料もあわせた全185試料の回帰直線は $Y=6.31+0.65X$ であるが、本来の近似では上に凸の式となることや高強度のものはばらつきが大きく回帰直線が全体の傾向を反映しなくなるため、同図では材料の多い低強度部分のみ掲げている。）。同図によると注入材料の多くはサンドゲルにおいて3～10 kgf/cm^2 程度の強度（ホモゲルにおいて0.2～3 kgf/cm^2 程度）を持っている。一般に土木地質の分野で、やわらかい岩を「軟岩」と呼び、この基準を一軸圧縮強度約100～200 kgf/cm^2 以下とすることが多いが、注入固化体の強度は「軟岩」の中でも

かなり脆弱な部類に属する。

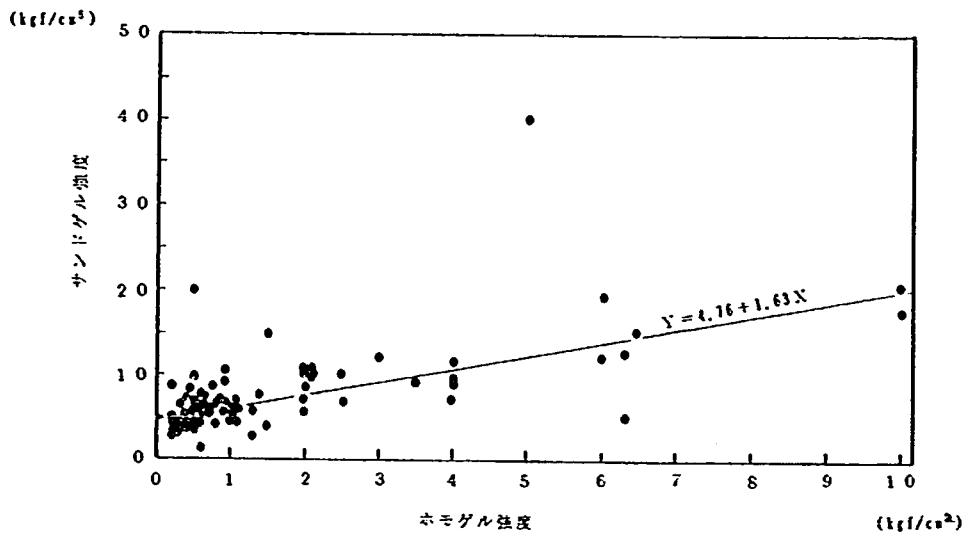


図-4 ホモゲル強度とサンドゲル強度の関係

図-5は初期粘性とホモゲル強度の関係である。同図によるとホモゲル強度と初期粘性には正の相関が認められる。これは初期粘性やホモゲル強度が水ガラスの濃度に比例するためと考えられる。このような条件の相違がサンドゲル強度にも反映されている。

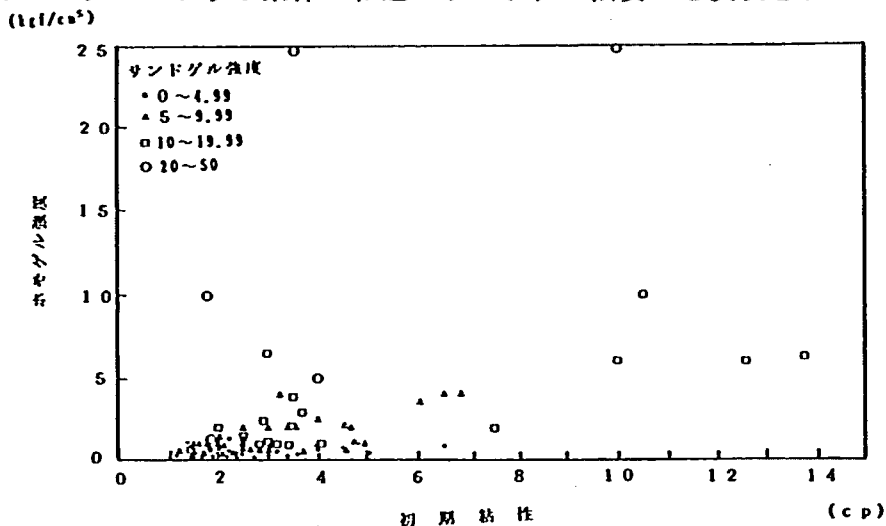


図-5 初期粘性とホモゲル強度の関係

図-6～8は各々注入材料の初期粘性、サンドゲル強度、ホモゲル強度と注入固化体（サンドゲル）の透水係数の関係である。透水係数は注入材料の浸透性と深く係わっており、粘性等と高い相関を有すると考えられるが、実際は粘性や強度とほとんど相関がみられず、 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec付近に分布する。透水係数は供試体の作製条件や測定条件によって大きく異なることがあり、この様な原因によりばらつきが生じている可能性が高い。

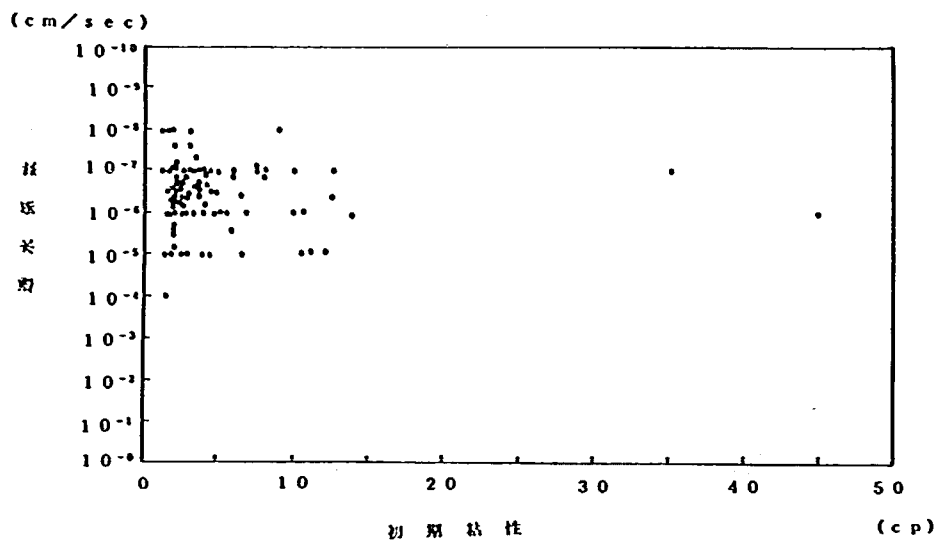


図-6 初期粘性と透水係数の関係

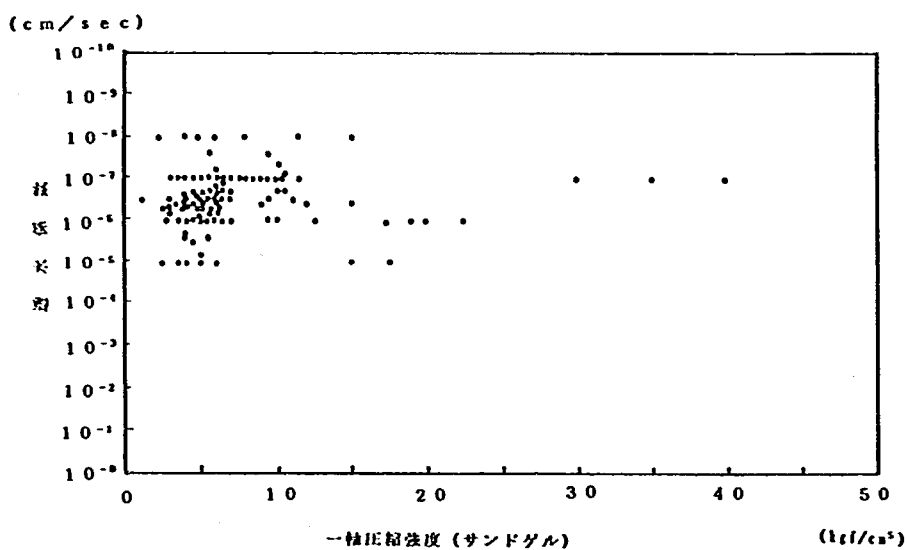


図-7 一軸圧縮強度 (サンドゲル) と透水係数の関係

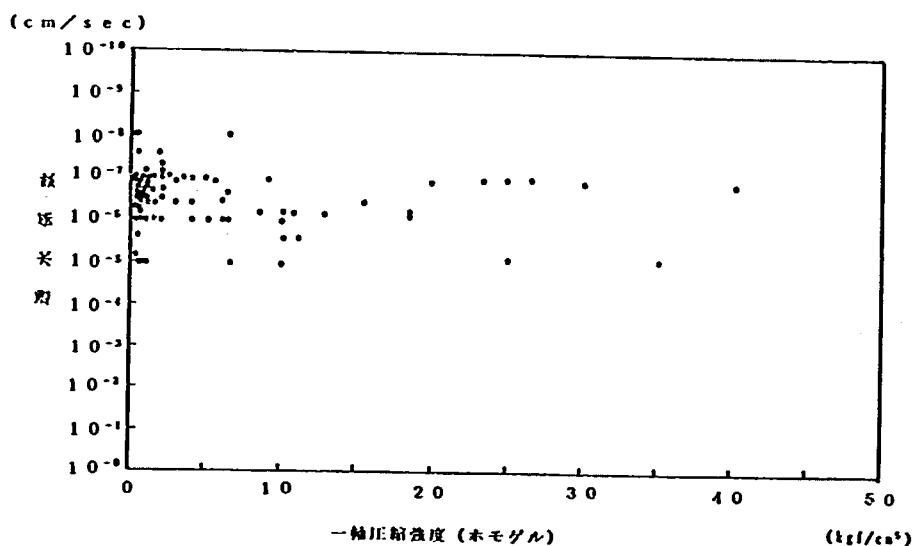


図-8 一軸圧縮強度 (ホモゲル) と透水係数の関係

図-9はゲルタイムのヒストグラムである。これによると0～10秒（瞬結～急結性）のものが全体の1/3～1/4を占め、次に1分程度のものが多い。図には示していないが、緩結性のものとしては最大1時間以上のももある。ただし、同一の注入材料でもゲルタイムは地盤のpH等によってかなりばらつく。

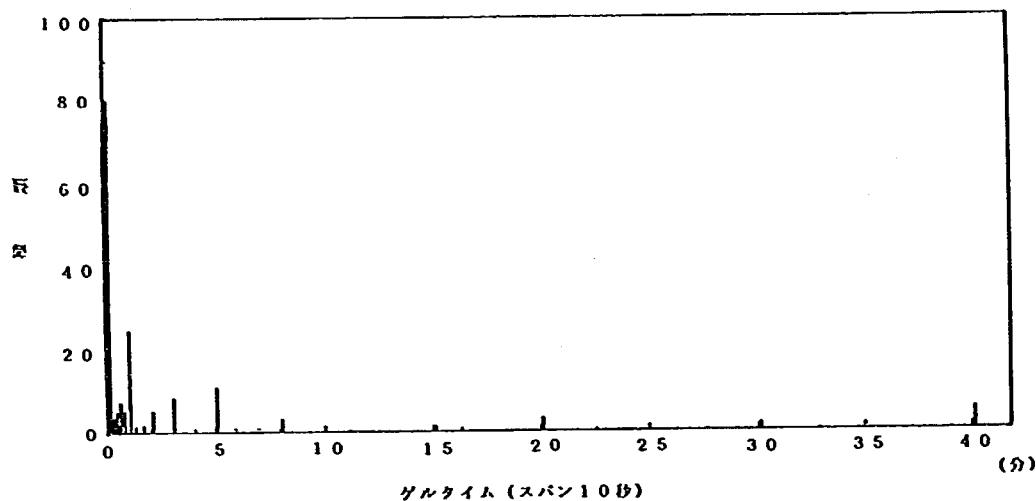


図-9 ゲルタイムの頻度分布

図-10はゲルタイムと粘性の関係である。粘性が低くゲルタイムの長いものほど遠く浸透する材料である。同図によると、両者の間に特に相関は認められない。

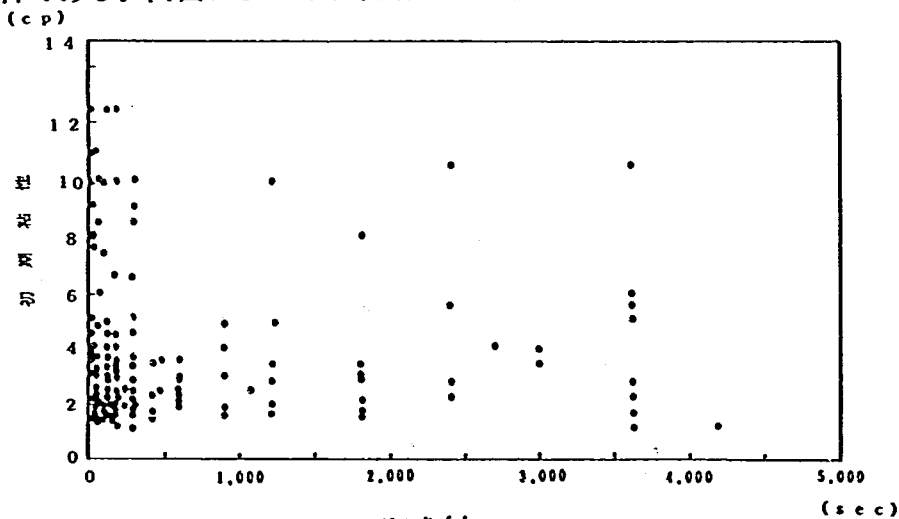


図-10 ゲルタイムと初期粘性の関係

図-11はゲルタイムとホモゲル強度の関係である。これによると、ホモゲル強度の高い注入材料のほとんどが瞬結～急結性のもの（主にトンネルにおける止水用または高透水性地盤用）であり、一方、ゲルタイムが長く発現強度の高い注入材料は、セメント系などの懸濁型の注入材料以外にはほとんどないことがわかる。これは、緩結性の注入材料はゲルタイムを遅延させるために水ガラスを薄めざるを得ず、瞬結性の注入材料に比較して低強度となることを表わしている。

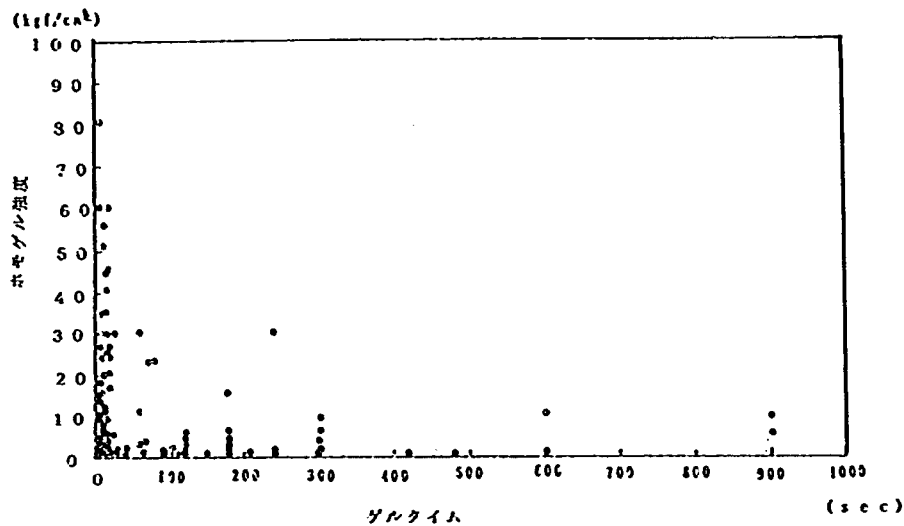


図-1 1 ゲルタイムとホモゲル強度の関係

図-1 2 は LD_{50} と pH (混合時) の関係である。一般に LD_{50} が大きいほど安全とみなされており、また、pH が中性に近いほど土中の物質 (有機酸など) の溶出が少なく、また井戸水や池の水などに影響が小さい。ここで LD_{50} は、主剤、添加剤問わず、データが得られる範囲で最も低い (危険側の) 値を示すものについて掲げている。同図によると、水ガラス系注入材料の多くは、pH 10~12 程度 (ただし固化するに従い中性化する) であり、pH 2~5 程度から固化するに従い中性化するものも幾つか開発されている。なお、水ガラス系で LD_{50} が低いものの中には、硬化剤や遅延剤 (添加剤) が原因となっているものが多い。現在種々の添加剤が用いられるようになっているが、注入材料の安全性のためには、添加剤のみが流出した場合にも注意を払う必要がある。なお、注入材料の長期的安定性 (耐酸・アルカリ性、荷重に対する安定性等) については、充分な長期的試験結果はほとんどなく、注入後数年経過しても劣化した様子はない、といった定性的なものがあるにすぎない。これは、注入材料に関する適切な耐久性試験がないことに起因していると思われる。

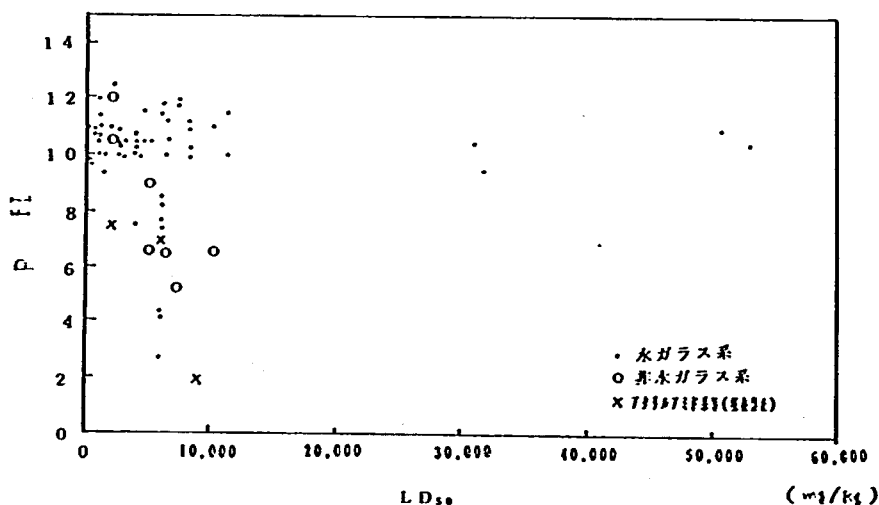


図-1 2 LD_{50} と pH の関係

本調査はアンケートによって得られたデータをもとにしたものであるため、細かい点まで議論することは出来ないが、調査の結果、いくつかの知見が得られた。これを注入材料に求められる四つの基本的な物理工学特性に分けてまとめると次の通りである。

a. 浸透性

- ・初期粘性に限れば、水の粘性に近い、かなり低粘性の注入材料が開発されている（粘性の時間変化は未調査）。しかし水ガラス系材料の粘性は水ガラスと水の量比によりほぼ規定されるので、低粘性のものほど一般に低強度である。

- ・注入材料の浸透性を把握するために改良体の透水係数は重要な指標と考えられているが、本調査では他の指標とほとんど相関がみられない。客観的な数値を得るためには、供試体作製条件や試験条件を明確に規定する必要がある。条件を規定してもこの様な大きいばらつきが生じるのならば、改良体の透水係数によって注入材料の浸透性の良否を比較するのは難しい。

b. 強度

- ・サンドゲル強度とホモゲル強度には明瞭な相関があるため、ホモゲル強度によってサンドゲル強度の推定がある程度可能である。

- ・サンドゲル強度は、セメント系等の一部を除いて一般に数～10数kgf/cm²であり、いわゆる「軟岩」に比較してもかなり軟質である。

c. ゲルタイムの調節

- ・ホモゲル強度の高い注入材料の多くが瞬結～急結性のもの（トンネル切羽用等）であり、ゲルタイムが長く、浸透性が高く、かつ発現強度の高い注入材料の種類は少ない。

d. 安全性・安定性

- ・LD₅₀の低いものの幾つかは、添加剤にその原因が求められる。

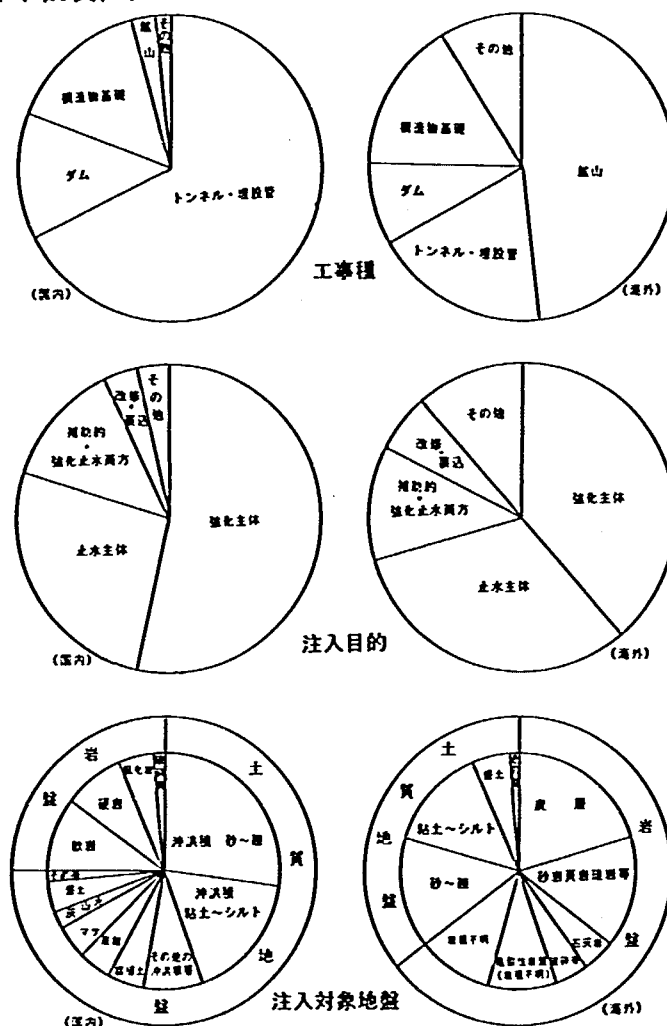
- ・注入材料の比較的短期の溶出特性に関する試験は多いが、長期的安定性（数年程度）についての試験を行っている注入材料はほとんどない。これは、適当な耐久性試験がないことに起因するものと思われる。

以上、調査した注入材料の強度、ゲルタイム等の物理工学特性をみると、注入材料はトンネル掘削等における問題点（緊急止水、軟弱地盤の改良等）に対処することに適したものが多い。これは注入材料が主に軟弱地盤改良工法として発展してきた経緯を示すものと思われる。トンネル掘削や軟弱地盤対策においては、今回の調査でみられるように低粘性材料の開発が頭打ちになっていること、一般に低粘性であっても粘性土中の間隙を充填するのは難しいこと、浸透性よりも沖洪積層の複雑な地盤の把握が経済的に大きな負担となることなどから、材料よりむしろ工法を工夫することによって対処する傾向が認められる。一方、ダム基礎岩盤等においては、トンネルとは異なった物理工学特性を必要とする。ダムのグラウチングにおいては主にセメントミルクが用いられているが、浸透性が低い等の問題点を含んでおり、特に、最近増加している軟岩基礎の処理に必要とされる岩石間隙中への浸透性が高くかつ恒久的・安全な注入材料等、ダム基礎に適した注入材料は未だ開発途上にある。最近開発が進んでいる超微粒子シリカや超微粒子セメント等は、従来の高強度と高浸透性を兼ね備えかつ長期的安定性および安全性に優れているといわれており、ダム基礎に適した注入材料となる可能性を持つが、実験段階であり今後検討の余地が残されている。

3. 注入材料のニーズ

最近の施工事例（公刊文献）より注入対象地盤等について整理するとともに、注入材料に要求される性能を注入施工目的毎に整理した。

図－13は最近の地盤注入施工事例（J I C S Tの文献検索により、主に1980年以降の公刊文献から、国内133、海外70の施工事例を無作為に抽出したもので、海外はソ連27、アメリカ13、両ドイツ9、フランス6、イギリス4、スイスおよびノルウェー各2、チェコ、ハンガリー、中国、イタリア、ビルマ、台北、インド各1の施工例）における工事種、注入目的、注入対象地盤を整理したものである。同図によると、地盤注入の工事対象は、海外では鉱山が多いのに比べ、国内においてはトンネルや埋設管の施工例が多い。よって注入材料も動的な荷重や変形に強く構造物との密着性もよいものが要求される傾向にある。注入目的を見ると、内外ともに地盤強化が最も多く、止水がこれに次ぐ。国内の方が地盤強化の割合が大きいのは注入対象地盤の性状に起因している。すなわち海外の注入対象地盤は岩盤、特に亀裂性岩盤が主体であるのに比べ、国内では土質地盤が全体の75%以上を占めるだけでなく、岩盤も軟岩や風化岩が多く、軟質地盤岩盤が施工例全体の約90%を越えている。このことから地盤強化が可能な注入材料のニーズの高さがわかる。特に、浸透注入が難しいといわれる粘土～シルト、腐植土、軟岩等がかなりの割合を占めており、浸透性の高い注入材料や割裂注入によって地盤の強度・変形性を改良しうる注入材料・施工法のニーズが高い。



図－13 日本と海外の注入工事種、注入目的、対象地盤の比較

表－３は、施工例から注入材料の要求性能を抽出し、施工目的毎に大まかに整理したものである。要求性能として重要と考えられるのは、浸透性（主に粘性とその時間変化）、強度（一軸圧縮強度、三軸圧縮強度、靱性、付着強度等）、耐久性、変形性（静的な延性、動的な耐震性等を含む）、非収縮性（ひび割れ等を生じないこと）等の物理性能、ゲルタイムの制御（希釈に対する安定性等を含む）、耐酸性、溶液の保存性、機械金属等の非腐食性等の化学性能および安全性、経済性等である。施工事例や材料開発の動向より判断して、注入材料として特に必要とされている性能は次の四つに区分出来る。

浸透性および耐久性：河川や構造物を横断するあるいは埋設物が輻輳する地域の大口径あるいは異型シールド、大深度地下空間の建設、軟岩でのダム建設等が増加しており、水ガラス程度の浸透性とセメント系に近い耐久性の両方を求める事例が増加している。

変形性（付着性を含む）および非収縮性：地盤岩盤のみに注入するよりむしろ埋設物補修、トンネルの裏込め、路面下の空洞充填等、構造物と地盤の境界への注入事例が急増しており、地盤と構造物の間に生じる静的または動的変形への追従能力およびひび割れを生じないための非収縮性が求められる。この場合浸透性はさほど必要とされないが構造物の寿命に応じた程度の耐久性が必要とされる。

強度（靱性）および浸透性：沖洪積層等は事前調査で地盤の不均質性を充分把握するのが困難であるため施工法でカバーする傾向にあるが、地盤構造が不明な状態では地盤に応じたきめ細かい注入制御が出来ず、注入形態は一般に割裂注入となる。また粘性土に対しては、割裂注入になるのは避けられない。したがって割裂注入においても地盤の強度や変形性が十分改良できる材料が必要とされる。割裂注入においては未注入部の変形に応じてホモゲルに曲げなどの荷重がかかると予想されるため、単に強度だけでなく靱性が必要とされる。この場合、浸透性に優れていれば割裂浸透注入となりさらに強度の向上が望まれる。また、長いゲルタイムで浸透注入させる方式においても、水ガラス系では長いゲルタイムで高強度のものに乏しいため、強度と浸透性両方に優れた材料が必要とされる。

その他：潜在的なニーズを発掘出来る可能性がある注入材料として、なんらかの性能が他よりきわめて優れているもの、作業性、安全性、経済性等に優れるもの。

表－３ 注入材料に要求される性能

		要求度・重要性大 ○				要求度・重要性中～小 ○				その他(関係なし・不明) —							
物性要求		注入目的 (ニーズ)		ダム		トンネル				地盤補強		止水壁 (壁工法)		緊急止水	壁門漏管 周囲止水	管周の 漏水防止	液状化防止
						山岳		シールド		砂質土	粘性土	長期	短期				
				切羽補強	止水	切羽補強	止水										
浸透性	懸濁系（粒子径）	◎	◎	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○
	溶液系（低粘性）	—	○	○	◎	◎	◎	◎	—	◎	◎	—	—	—	—	—	◎
強度	圧縮強度	◎	◎	◎	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	—	○
	付着強度	—	—	—	—	○	○	—	—	◎	◎	—	—	○	◎	◎	—
靱性		—	—	—	—	○	○	—	—	○	○	—	—	○	○	—	—
変形性	わじれ	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	—	—	◎	◎	—	—
耐震性	耐震性	◎	◎	—	—	—	—	○	—	◎	○	—	—	◎	◎	◎	○
耐久性	強度耐久性	◎	◎	○	○	—	—	○	○	◎	—	—	—	◎	◎	◎	○
	耐水性	○	◎	—	○	—	—	○	○	◎	—	—	—	◎	◎	◎	◎
	非収縮性	○	◎	—	○	○	○	—	○	—	—	—	—	◎	◎	—	—
付着性		—	○	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎
耐腐性		—	—	—	—	○	○	○	○	○	○	—	—	○	◎	—	—
施工性	保存性	—	○	○	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	機械等金属腐食	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◎	◎	◎	○
安全性	施工中の危険度	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○	○	○
	環境工学的安全性	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	—	—	◎	◎	—	—
経済性		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

参考資料 2 注入工法

1. 注入工法の概要

注入工法とは、地盤の透水性を減少させたり、地盤の強度を増大させる目的で地盤中の所定の箇所に注入材料を圧入する工法である。

現在使用されている各種工法は、管路構成や注入モニターが工夫されており、個別の名称が付けられている。これらの工法を注入方法や使用注入管などで次のように分類した（図－1）。

I・注入材が単相で注入されるもの

①注入管が単管のもの

単管ロッド注入工法

単管ストレーナー注入工法

②注入管が二重または三重管ロッドのもの

二重管（三重管）ロッド瞬結工法

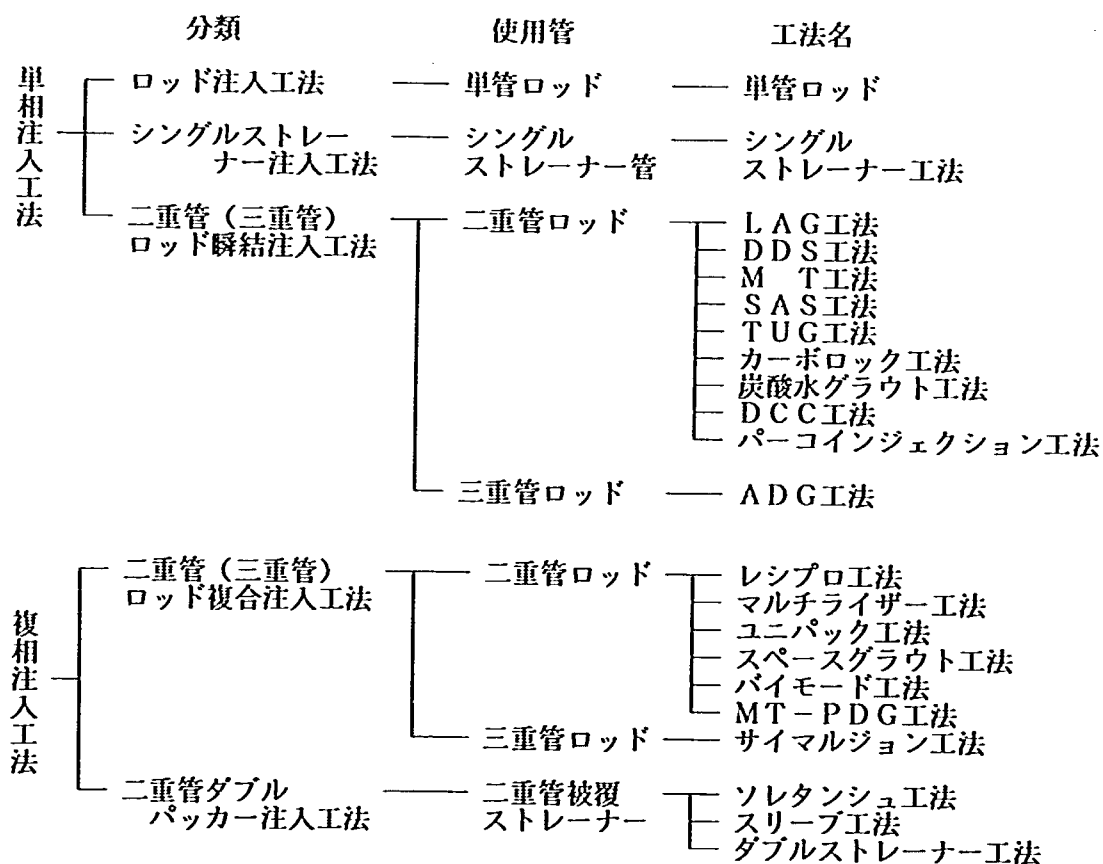
II・注入材料が複相で注入されるもの

①注入管がロッド管のもの

二重管ロッド複合注入工法

②注入管が被覆ストレーナー管のもの

二重管ダブルパッカー注入工法



図－1 注入工法の分類

単管ロッド注入工法

この工法は、ボーリングロッドをそのまま注入管として用いることから名がつけられたものである。この工法は、他の工法が普及するまでは主流の工法として用いられた。所定深度まで削孔すると、削孔水から注入材料に切り替えて、1.5ショット方式によりそのままステップアップで注入作業に入れる。このように、この工法の特徴は他の工法と比べて最も作業が簡単で、注入単価が安いことである。

しかし、この工法はボーリングロッド管の先端から注入材料を噴出させるだけなので、注入材料が乱流状態で注入されることによりそれぞれの地盤に見合った注入速度が調整出来ないこと、方向性が無いこと等がリークや逸出の原因となっている。また、それらに対しての有効な対策が採られていないことなどから、信頼性に欠ける。以上のことや、後述する他の新しい工法が普及してきたこともあり、この工法による注入はほとんど用いられなくなってきている。

シングルストレーナー注入工法

単にストレーナー工法とも呼ばれる。手順としては、パイプ周辺に設けたストレーナー（多孔）管を打設する。管の内部に、砂またはホモゲルなどを充填して必要なステップ分を洗い出すと、その部分だけストレーナーが開孔し、この部分に限定的に注入することが可能となる。注入が終わると同様の方法で次のステップの注入を開始する。単管ロッド工法と比べて、ストレーナーにより横方向に多くの流線がとれること、管が回転しておらず、管と孔壁の回りに注入材料や粘土を詰めるなどパッカー効果が優れていること、また注入管の設置工と注入工とが独立しているため複数本の注入管を同時に注入できるなど利点がある。

しかし、この工法は注入管の設置に手間がかかること、土層が硬いときや深度が大きいときにストレーナー管が設置できないこと、施工単価が高くなること、管が埋め殺しになることなど問題点も多く、単管ロッド工法と同様に現在ではすでに旧式の工法になっている。

二重管（三重管）ロッド瞬結注入工法

この工法は、瞬結性の注入材料を用いることによって注入予定範囲内に固結すると同時にパッカー効果を発揮させることを目的にしている。注入管の先端まで二重管を用いてA液、B液を別々に圧送して、先端に取り付けられたモニターで混合して注入する。この工法に分類される各工法はモニターなどによってそれぞれ特徴づけられることが多い。

この注入方式は、ボーリングロッドをそのまま注入管として用いることができるので施工性がよく、瞬結性注入材料を用いているので地盤に噴出する前に固まってしまい、これによってパッカー効果を持たせられる利点がある。しかし、注入材料を先端で混合させるので、モニターが取り付けられているとはいえ、混合性に問題がある。また瞬結性注入材料を使用しているため浸透しにくく、割裂注入になることが多い。しかし、割裂注入でも脈状の固結体が骨格になり全体としての強度増加は期待でき、止水の面でもある程度余裕のある注入幅で対処すれば対応できる。

二重管（三重管）ロッド複合注入工法

多重管複相注入工法とも言われるこの工法はロッド注入工法の施工性の良さを残しつつ、瞬結工法の欠点である浸透性の問題を解決させるために開発された工法である。

二重管（三重管）のボーリングロッドを瞬結型の注入材料を注入したあと、緩結型（または急結型）の注入材料を注入する。すなわち、二重管ロッドと特殊な先端モニターを用いて削孔後、1次注入として瞬結性の注入材料を注入し、削孔時に生じた注入管と削孔壁の間にできた空隙を埋めて、パッカー効果を発揮させながら、粗間隙の粗詰めをし2次注入の前処理を行う。そして、2次注入で前処理の済んだ地盤にゲルタイムが長く浸透性の良い注入材料を用いて、均質な浸透注入を行おうとするもので、信頼性のある注入工法の一つである。

二重管ダブルパッカー注入工法

この工法は、フランスのソレタンシュ社が開発したソレタンシュ工法が原形となっていて、この工法に分類される工法はほとんど同一の基本構造をとる。この工法は、ゲルタイムが長く浸透性の良い注入材料を用いるため、地盤へのリークが問題になる。そのためこの工法は、リーク防止のためパッカー構成に大きな特徴がある。すなわち、注入外管と孔壁の間は、シール材で充填して先端に2段のパッカー（ダブルパッカー）を装着した内管を挿入し注入を行う。パッカーは、孔壁と外管の間にはシール材で充填されていること、また内管と外管の間は既製管であることなどによって高い効果が発揮される。

このように優れたパッカー効果で、注入効果には高い信頼性がある。また、任意のステップで注入できるのも大きな特徴である。しかし、注入工程が多いこと、他の工法よりもボーリング孔が大きいこと、注入外管が埋め殺しになることなどの問題点もあり、現在では最も高価な工法である。

2 地盤注入工法各論

2.1 単管ロッド注入工法

単管ロッド注入工法の特徴を、表-1に示す。

表-1 単管ロッド注入工法の特徴¹⁾

混合方式	1.5ショット		
注入可能な注入材料	CL, CM, M		
信頼性	不均一な改良となる場合が多く信頼性に乏しい。		
施工性・施工単価	施工は、最も簡便で作業も容易で安価である。		
現場周辺に与える影響	大きな空隙のある地盤、互層地盤の境界などから注入材料が逸走する可能性がある。 地盤変状の可能性が大きく、周辺構造物・埋設物等への影響を配慮する必要がある。		
その他	削孔時にロッド外周のすき間から注入材料が逸出する可能性がある。 注入は範囲外に逸出しやすく、特定の場所に固まりやすい。		
対象地盤	注入効果		形態
粘性土	粗い割裂注入になり改良効果は小さい。	△	a
砂	粗い割裂注入となり改良効果は小さい。	△	a
砂礫	比較的良好な改良効果が得られる場合がある。	○	c
互層	注入材料が特定の場所に注入され、全体の改良は困難。	△	-

注入材料の種類

懸濁液 — 瞬結型 CS
急結型 CM
緩結型 CL

溶液 — 瞬結型 S
急結型 M
緩結型 L

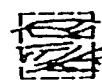
形態



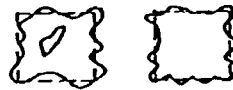
a粗い割裂注入



c浸透部分固結化



b密な割裂注入
部分固結化



d密な浸透固結物または均質で一体固結化

△やや不良

○良

◎良好

瞬結型…ゲルタイムが数10秒以下

急結型…ゲルタイムが数分

緩結型…ゲルタイムが数10分以上

概要

単管ロッド工法は、ボーリングに使用するロッドをそのまま注入管として用いる方法（図-2）で単にロッド注入工法とも呼ばれる。この工法は、ボーリングの作業が完了すると同時に注入作業に入ることができるため、非常に施工が簡便で経済的なことが最大の特徴である。しかし、この工法は信頼性など多くの問題がある。

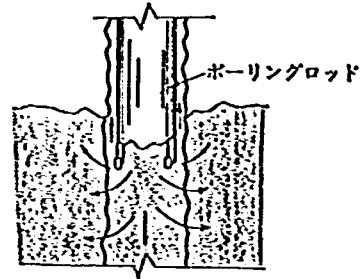


図-2 単管ロッド注入
工法の注入部模式図²⁾

注入材料

主に、セメント系懸濁注入材料（LW）

CM, CL, S

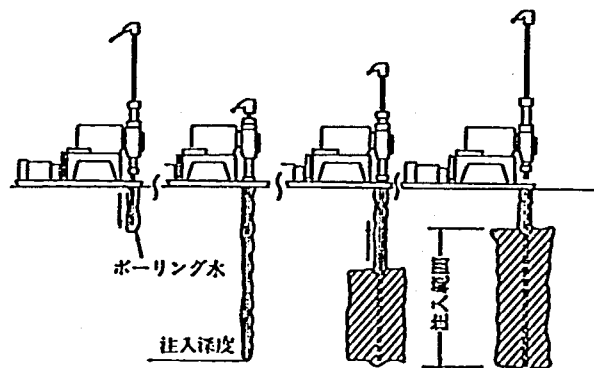
混合方式

1. 5ショット

施工方法²⁾

この工法は、ボーリングロッドをそのまま注入管として使用するもので、主にセメント系懸濁型注入材料が用いられる。

施工の手順を図-3に示す。所定の深度まで掘削した後、削孔水を注入材料に切り替えて注入を行う。注入は、一般にステップアップで行なわれる。注入材料はゲルタイムが数分のものを用い1.5ショットで注入を行う。この工法は、極めて簡単な作業であるが、その反面、単にボーリングロッドの先端からの注入のみなので、注入材料を所定の範囲内に固結させることは困難である。



① 削孔開始 ② 削孔終了 ③ ステップアップ注入 ④ 注入終了
図-3 単管ロッド注入工法施工順序²⁾

2.2 単管ストレーナー注入工法

単管ストレーナー注入工法の特徴を表-2に示す。

表-2 単管ストレーナー注入工法の特徴¹⁾

混合方式	1.5ショット		
注入可能な 注入材料	CM、M		
信頼性	単管ロッド注入工法に比べ、信頼性がある。		
施工性・ 施工単価	注入管の立て込み、注入管の砂詰め、洗浄等多数の工程が必要である。注入深度が深くとれない。比較的高価である。		
現場周辺に 与える影響	地盤変状や周辺構造物への影響は比較的少ない。 ストレーナー管が埋め殺しになる。		
その他	注入管の設置工と注入工が分離しているため、施工管理は容易である。 一般的には、注入管の引き抜きは困難。 手間がかかるなどで、現在はあまり使用されていない。		
対象地盤	注入効果		形態
粘性土	荒い割裂注入となり改良効果は小さい。	△	a
砂	比較的良好な改良効果が得られる。	◎	c, d
砂礫	比較的良好な改良効果が得られる。	○	c
互層	不均一な改良効果となる場合が多く十分な改良効果は得られない。	△	—

注入材料の種類

懸濁液 — 瞬結型 CS
急結型 CM
緩結型 CL

溶液 — 瞬結型 S
急結型 M
緩結型 L

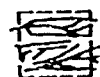
形態



a 粗い
割裂注入



c 浸透部分
固結化



b 密な割裂注入
部分固結化



d 密な浸透固結物または
均質で一体固結化

△ やや不良
○ 良
◎ 良好

瞬結型…ゲルタイムが数10秒以下

急結型…ゲルタイムが数分

緩結型…ゲルタイムが数10分以上

概要²⁾

この工法は、単にストレーナー注入工法とも呼ばれ、シングルストレーナー注入工法に分類される。ボーリング後ストレーナー管を設置し、その中を砂で埋めた後、必要なステップ長だけストレーナーの中の砂を洗い出して、所定のステップの注入を行う。(図-4)

この工法は、多くの孔を設けることで、浸透抵抗を大きく抑えた、均質な注入が可能である。また注入管の設置工と注入工が独立しており複数の注入を同時に行えるため、平面的に広域にわたって注入することができ、繰返しの注入も可能であるなどの利点がある。しかし、その一方で注入管の加工や設置に手間がかかること、管が埋め殺しになること、またこれらの結果、施工単価が高くなること、注入深度があまり深くとれないことなど、問題も多い。

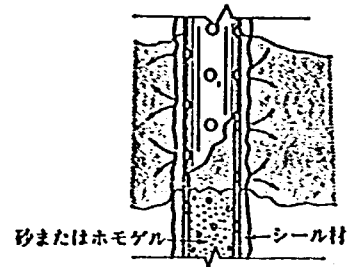


図-4 単管ストレーナー注入工法の注入部模式図²⁾

注入材

急～緩結性のグラウト

混合方式

1, 1.5ショット

施工方法²⁾

施工手順を図-5に示す。

ボーリング機械を用いて削孔し、ボーリング孔内にストレーナー管を設置する。ストレーナー管と孔壁の間は、地表面から注入範囲下端まで粘土または、注入材料を注入してパッカーとする。パイプ内部を洗浄し、管内に砂または、注入材料のホモゲルを充填する。

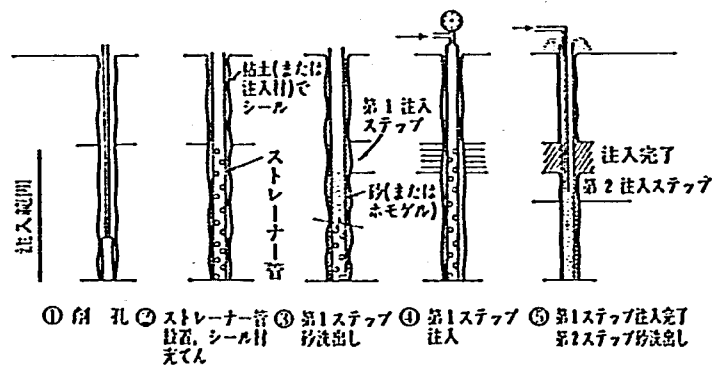


図-5 単管ストレーナー注入工法の施工順序²⁾

この工法は、ステップダウン方式で注入する。ストレーナー上部から、第1ステップ下端まで管内の砂またはホモゲルを洗い流し、第1ステップの注入が終了し、次のステップの管内を水で洗い出しを行い、注入する作業を繰り返す。

注入作業が終了したあとは、ストレーナー管を抜き取ってその後を埋め戻しなどの後処理を行う場合もあるが、そのまま埋め殺しにする場合が多い。

ストレーナー管の注入孔は、2～5mmのものが多く、1.5ショット方式を標準とする。

2.3 二重管ロッド瞬結注入工法

二重管ロッド瞬結注入工法の特徴を表-3に示す。

表-3 二重管ロッド瞬結注入工法の特徴¹⁾

混合方式	2 ショット		
注入可能な注入材料	C S, S		
信頼性	比較的信頼性は高い。		
施工性・施工単価	施工は簡便である。比較的安価である。		
現場周辺に与える影響	ゲルタイムが短いため、注入材料の流失は少ない。 地盤変状の可能性もあり、周辺構造物・埋設物等への影響について検討する必要がある。		
その他	ゲルタイムが短いので注入範囲外への逸出を防げる。 2ショット方式のため、合流が完全に行われないと、未反応ゲルができる可能性がある。 比較的注入圧力が高くなる。		
対象地盤	注入効果		形態
粘性土	やや密な割裂注入で若干の改良効果が得られる。	△	b
砂	割裂注入と浸透注入により比較的良好な改良効果が得られる。	○	b, c
砂礫	良好な改良効果が得られる。	◎	d
互層	比較的良好な改良効果が得られる。	○	-

注入材料の種類

懸濁液 — 瞬結型 C S
急結型 C M
緩結型 C L

溶液 — 瞬結型 S
急結型 M
緩結型 L

形態



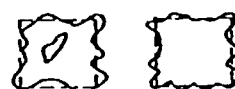
a粗い
割裂注入



c浸透部分
固結化



b密な割裂注入
部分固結化



d密な浸透固結物または
均質で一体固結化

△やや不良
○良
◎良好

瞬結型…ゲルタイムが数10秒以下

急結型…ゲルタイムが数分

緩結型…ゲルタイムが数10分以上

2.3.1 LAG工法

概要^{3),4)}

二重管ロッド瞬結注入工法は、単管ロッド注入工法の欠点を瞬結性の注入材料を使用することによって補うことを基本に考えている。LAG工法は、この注入材の瞬結性をより早めた超瞬結性注入材を使用することによって、より確実に注入しようとするものである。

注入状況の模式図を図-5に示す。

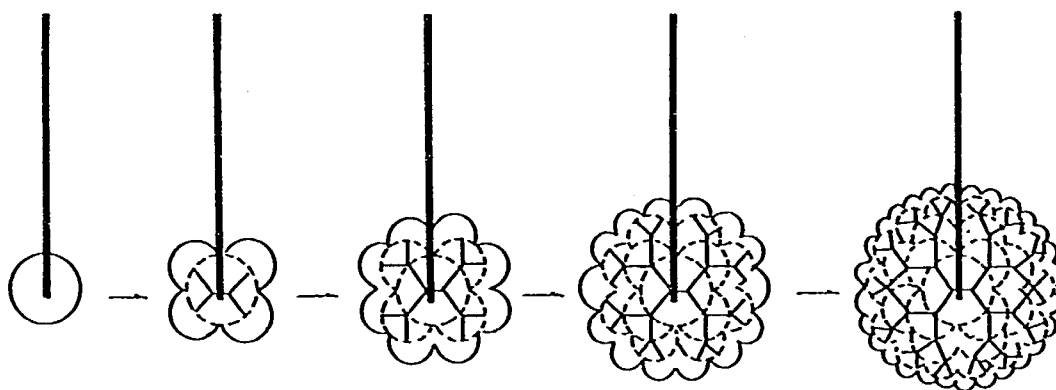


図-6 LAG工法の注入形態模式図³⁾

この工法は、2ショット方式で注入する。この工法の大きな特徴は、超瞬結性のグラウトを用いるため、主剤と硬化剤を別々に噴出させ、土中で混ぜ合わせる点である。通常、2～3秒のゲルタイムで施工する。噴出孔は一つに限定して回転させながら、グラウトを注入する。この注入方法により、流線が全方向であることや、噴出孔が一個であるため、単位噴出量が少なくすむ等の利点もある反面、瞬結性のグラウトを用いる工法の中でもゲルタイムが極端に短いものを使用するために、注入距離が限定される点、土中で混合するため主剤と硬化剤とが、十分に混合されない可能性がある点などの問題点もある。

非常に軟弱な粘性土の場合は、小さな力で容易に塑性変形を起こしやすいため、グラウトは地盤を押し分けて、グラウトの中に次々と入り込み、ホモゲルだけが団塊状となって固結する傾向がみられる。⁵⁾

注入材³⁾

主に溶液型の超瞬結性グラウト。

条件…ゲルタイムが正確に調整できて、温度変化にも対応する。

ゲルタイムが10秒以下。

ゲル化合物は、グラントパッカー効果が発揮する程度に強度を有する物。

地下水などで希釈されても、極端にゲルタイムが延びない。

混合方式

2ショット

機器構成³⁾

注入管設置機、攪拌装置、分流圧力管理装置、注入機、注入スイベル、注入管、モニター

施工方法⁴⁾

この工法の特徴は、超瞬結性グラウトを用いるため、主剤（A）と硬化剤（B）を注入管内で混合させずに、土中で混合させることである。

施工の際のモニターの変化は、図-7に示す。まず、所定の深さまで掘削を行い注入管を設置する。掘削が終わると、送水から注入材料に切り換えて注入する。グラウトは、ロッドの回りをシールしながら注入されていく。噴出口は側方に一カ所あり、ロッドを回転させながら、方向性を持たせて噴出させる。注入においては、土質条件に合った限界圧を設定して、この圧力に達するまで、注入を続ける。

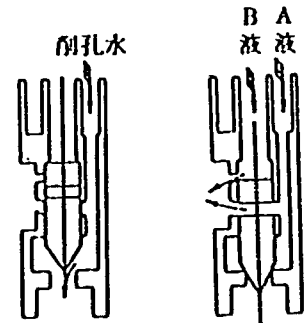


図-7 LAG工法の
モニター図⁶⁾

2.3.2 DDS工法

概要⁷⁾

LAG工法と異なり、A液とB液を管内で混合してから注入する管内混合方式である。管内混合方式を用いると混合効率を高めることができ、管外混合方式と比べると、溶液型、懸濁型、またはゲルタイム等の各種注入材料の条件に広く対応する。また、注入中はロッドが回転しないため、注入材料のリーク防止の面でも有利である。

噴射ノズルは3～6孔あり水平方向に噴出されるので、流線も多いのが特徴の一つである。掘削と薬液注入の切り替えは、水圧でシャーピンを切断する事により行なう。

(図-8)

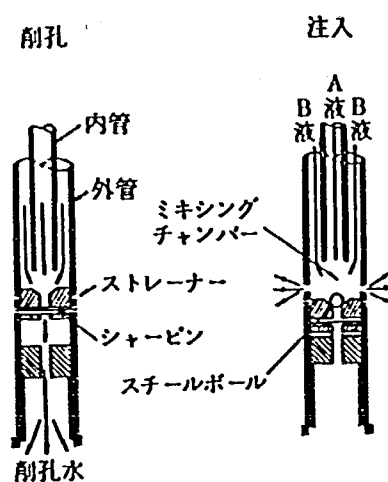


図-8 DDS工法の

モニター図⁶⁾

注入材料

注入材料は、瞬結性のゲルタイムさえ得られれば、特定のものに限定されない。ただし、懸濁型の注入材料と溶液型料の注入材を、次のように使い分ける。⁷⁾

①懸濁型を用いる場合…地盤の強化ならびに均一化を図るもの。

軟弱な粘性土

緩い沖積砂層における複合地盤

砂礫層における前処理

大きな空隙

人為的にゆるめられた地盤

②溶液型を用いる場合…浸透注入を期待するもの。

洪積砂層

前処理の済んだ緩い沖積砂層

前処理の済んだ砂礫層

混合方式

2ショット

機器構成

ボーリングマシン、グラウトミキサー、グラウトポンプ、圧力流量計、スィベル、注入管（二重管ロッド）、モニター

施工方法²⁾

施工の手順を図-9に示す。特殊なグラウトモニター（図-8）を装着した二重管ロッドで清水を用いて、掘削を行う。所定の深度まで掘削すると、スィベルをはずし、二重管ロッドの内管にスチールボール（ロケット）を投入し、再びスィベルを接合する。次に水を圧送すると、水の逃げ場がなくなり、10～20Kg/cm²まで水圧が上昇すると、シャーピ

ンが切断される。シャープピンが切断されると、ロケット部分が下に落ち、下端部は、閉じたままストレーナーが開く。切断後二台のグラウトポンプにより、A液とB液を外管、内管に分けて圧送し、先端のモニター内で混合したあと、ストレーナーにより水平方向に噴出し注入する。注入の際、ロッドは回転させない。

注入順序はステップアップで、ステップ間隔は通常10～30cmで行う。注入速度は、通常15～20ℓ/minであるが、10ℓ/min程度で行う場合もある。⁷⁾

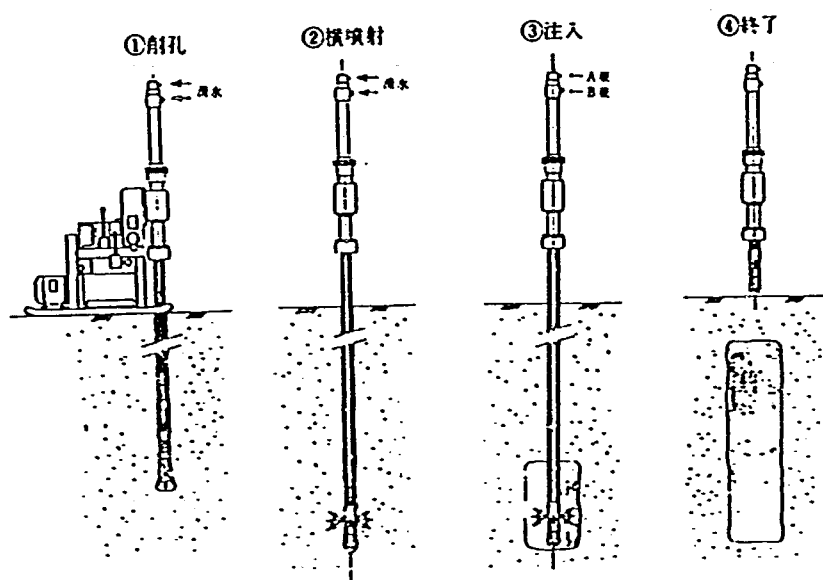


図-9 DDS工法の施工順序

2.3.3 MT工法

概要⁷⁾

この工法の特徴は、二重管ロッドの先端に取り付けられたモニターの中にミックスチャンバーと呼ばれる混合室を持つことである。(図-10)

A液とB液が、ミックスチャンバーの中で良く混合したあとに吐出し注入されるため、地盤中においてグラウトの未反応は起こりにくい。モニターの形状は、先端吐出型とストレーナー吐出型に分けられる。(図-10)

注入材料⁹⁾

懸濁型、溶液型のどちらも使用できる。ただし、瞬結工法として、次の条件を満たさなければならない。

1. グラウトのゲルタイムは、25秒以下であり、ゲルタイムの調整が簡単であること。
2. グラウトのホモゲルがパッカー効果をもたせられるだけの強度があること。
3. 地下水と接触しても希釈されにくく、かつゲルタイムが極端に変化しないこと。

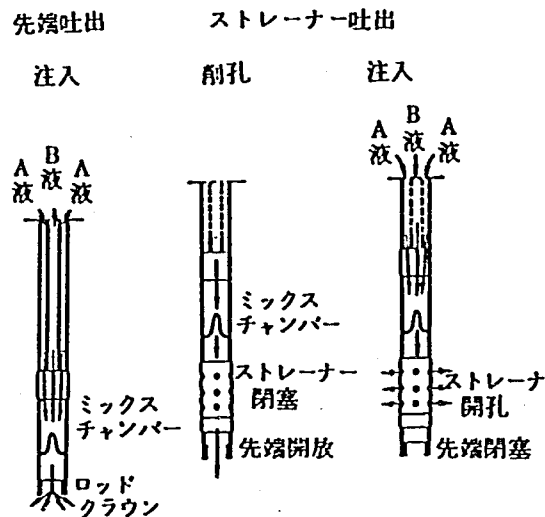


図-10 MT工法モニター図⁶⁾

混合方式

2ショット

機器構成

注入設置機、グラウトミキサー、グラウトポンプ、スィベル、注入管、モニター、圧力管理ボックス、計量計、ロッド、ロッドクラウン

施工方法^{8,9)}

二重管ロッドの先端部にMT工法用モニター（ミックスチャンバーを備えたもの）を取り付けたもので掘削を行う。掘削が終わるとA液を外管で、B液を内管でそれぞれ送液し、A、B両液をミックスチャンバー内で混合させた後、ロッドクラウンの先端もしくはストレーナー孔から注入する。

ストレーナーバルブが接続してある場合は、掘削の際、ストレーナーバルブは閉鎖しており、ロッドクラウンの先端より清水を出しながら掘削をする。掘削が終了すると、無水にしてロッドを約5~10cm圧入してから約45° ロッドを掘削の時と逆回転(手動)すると、ストレーナー孔が開口する。また、軟弱地盤用に自動開閉方式を持ったストレーナーバルブもある。

2.3.4 SAS工法

概要¹⁰⁾

注入材料は、懸濁型、溶液型、の両タイプを使用でき、モニター部分は、他の二重管ロッド瞬結注入工法であるLAG工法、DDS工法、MT工法とそれぞれ基本原理が同じタイプの3種類のモニターが用意されている。(図-11)モニターは、ストレーナー型(タイプA)、回転式ノズル型(タイプB)、ミックスチャンバー型(タイプC)、の3種類であり、いずれも管内方式をとる。

①タイプA

DDS工法に似ており、溶液型の薬液が適する。注入の噴流が多角的で、指向性がありストレーナーと同様の効果がある。

②タイプB

LAG工法と似ており、単一指向性で、回転を与えて注入する。混合する所と吐出する所が近いのでゲルタイムが0秒の薬液も使用できるとされている。懸濁型、溶液型のどちらも使用できる。

③タイプC

MT工法と似ており、ミックスチャンバーを持ったモニターを用いる。先端解放型であるので、単位時間あたりの吐出量を多くとれる。また、圧力、流量の設定装置、および電子制御装置の2液流量同調ポンプをもっている。これによりA、B液の混合比率を一定に保つことができ、これらを集中管理することが出来る。

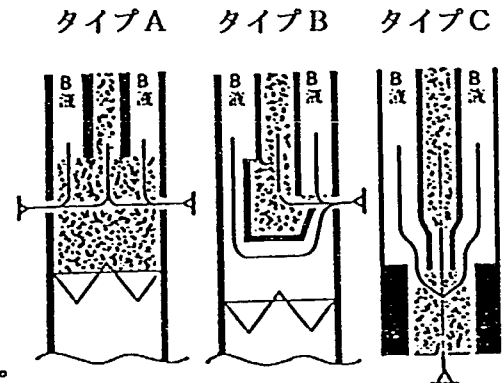


図-11 SASモニター図¹⁰⁾

注入材料¹⁰⁾

懸濁型と溶液型の瞬結溶液の2タイプを次のように使い分けている。

①懸濁型瞬結注入材料

主に地盤強化を目的として使用される。ホモゲルは 30kgf/cm^2 程度の強度を示す。

対象とする地盤は以下のとおりである

- 軟弱な粘土層
- 透水性の大きな砂れき層
- 水みちのある土層
- 大幅な強度改良の必要な地盤
- 湧水などの激しい地盤

②溶液型瞬結注入材料

主に止水を目的として使用される。

対象とする地盤は以下のとおりである

- 透水性の小さい砂層
- あまり軟弱でないシルト、粘土層
- 被圧されている帯水砂層

混合方式

2ショット

機器構成⁹⁾

注入材料自動ミキサー、ポンプユニット、先端管理装置、ボーリングマシン、
二重管ロッド、スイベル、モニター

施工方法

二重管ロッドを用いて所定の深度まで掘削を行う。掘削終了後ミキサーより調合されたA液、B液がポンプユニットに送られる。ポンプユニットには、3連式プランジャー型ポンプ、無段変速モーター、電磁流量計が備えられており、電子制御により常に一定の吐出比率を確保している。圧力制御装置もあり、設定圧力を越えることがないように制御しながら注入する。

タイプAでは掘削から注入の切り替えは、内部水圧をかけて、ニードル弁を落として行う。

2.3.5 カーボロック工法

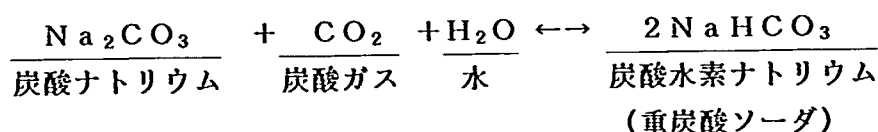
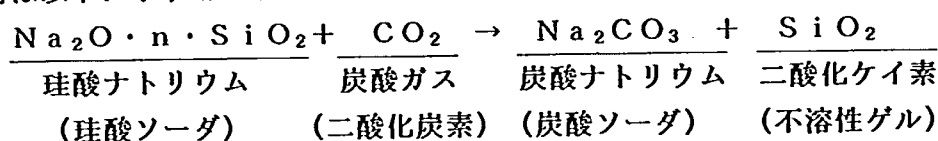
概要¹¹⁾

この工法は、炭酸ガスを硬化剤として用いる点が大きな特徴であり、炭酸ガスの無公害性と、アルカリ中和反応に着目して開発したもので、珪酸ナトリウムを気体である炭酸ガスでゲル化させて、地盤に注入する工法である。

地盤注入の際は、圧力が変化するのでガスの体積も変化し、一定量のガスを送るのが困難であるが、カーボロックシステムによって、圧力の変化を受けても、一定量の炭酸ガスを送ることが可能のようにコントロールされている。

注入材料¹²⁾

珪酸ナトリウムに、炭酸ガスを反応させる気液反応の瞬結性グラウトである。ゲル化の機構は以下に示すとおりである。



混合方式

2ショット

機器構成¹²⁾ (図-12)

攪拌槽(珪酸ソーダ用)、グラウトポンプ、圧力流量測定装置、液化炭酸ガス、カーボコントローラ、ゲルテスター、圧力監視装置、ボーリングマシン、二重管ロッド、カーボロックモニター

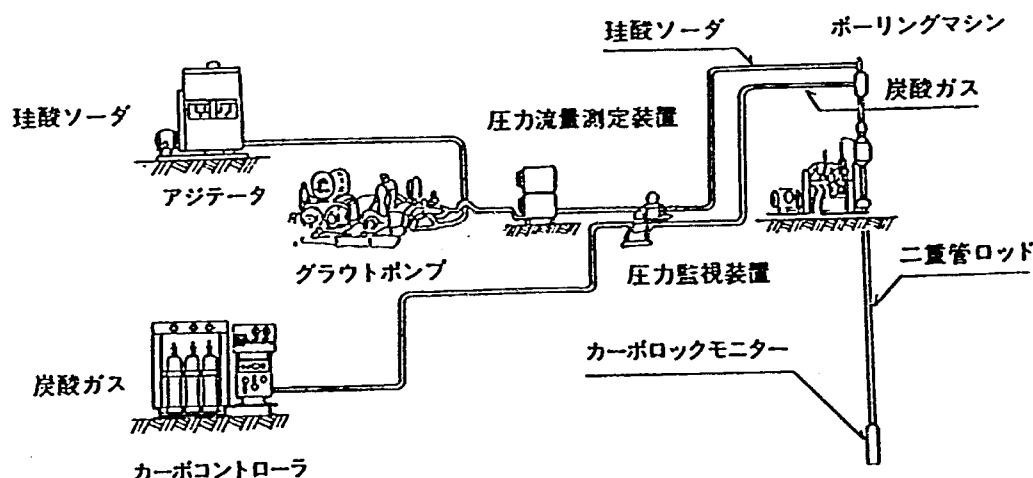


図-12 カーボロック工法機器構成図

施工方法¹¹⁾

二重管ロッドの外管を閉鎖し、内管より清水を注入しながら掘削を行う。掘削が所定の深度に達すると、外管を開き、炭酸ガスを送る。標準吐出量は、12～16 l/minとする。所定の量を注入すると、ステップアップ方式で注入する。注入が終了すると、まず珪酸ソーダの送液ポンプから停止し、次に炭酸ガスを停止する。この状態でロッドの切りはずしを行う。

2.3.6 パーコインジェクション工法

概要¹³⁾

各注入工法は、ロッドの回りを伝って地上に噴出するリークなどの対策が重要である。一般には、瞬結の注入材料を用いたシール材を充填するなどの対策でリークを防いでいるが、この工法は、無水掘りを行なうことにより、孔壁と注入外管の隙間を小さくさせ、このことをリークの対策として採用している。

この工法は無水掘りを行なうため次の特徴がある。

シール効果が上がるため、使用できるゲルタイムの幅が広い。

循環水による注入材料の希釈がない。

自然水位で送水堀から無水堀に切り替える際、一旦引き上げて無水穿孔掘削刃に切り替えるため一連の工程で注入が出来ない。

注入材料¹³⁾

砂質土 溶液型浸透型

溶液型 急～緩結タイプ

粘性土 混濁型急結型

溶液型 瞬～急結タイプ

混合方式

2ショット

施工方法¹³⁾

砂質土の場合

施工の手順を図-14に示す。

二重管ロッドにクランクを装着し、自然水位まで送水掘りを行う。自然水位まで掘削したら、いったんボーリングロッドを引き上げて、ロッドクラウンを掘削刃を装着した、グラウトカートリッジに変えて、無水掘りを行い、注入する。一定量の注入後、いったん送液を止めて注入管下部に1ステップ(25cm)無水掘りを行い、再び注入を開始する。砂質土においては、主にステップダウン方式で注入される。

粘性土の場合

施工の手順を図-15に示す。

粘性土においては、連続性を持たせるため、ステップアップ方式で注入を行う。自然水位まで送水掘りを行い、その後無水掘りに切り替えるまでは砂質土の場合と同じである。注入は一旦、下端まで無水掘りをしてから注入を行う。1ステップを25cmとする。

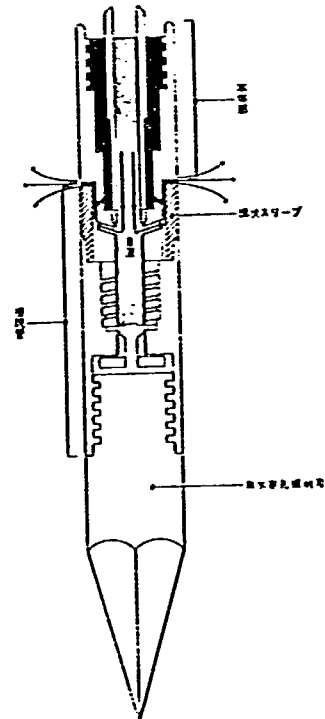


図-13 パーコインジェクション工法モニター図¹³⁾

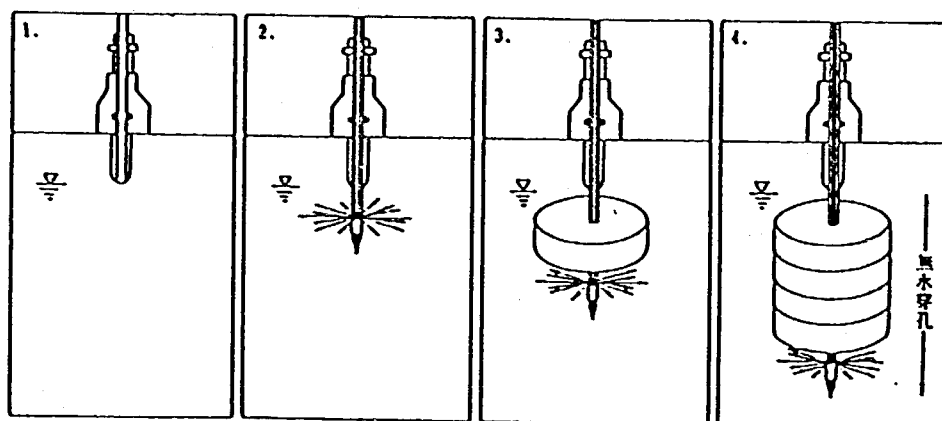


図-14 パーコインジェクション工法施工順序図(砂質土)¹³⁾

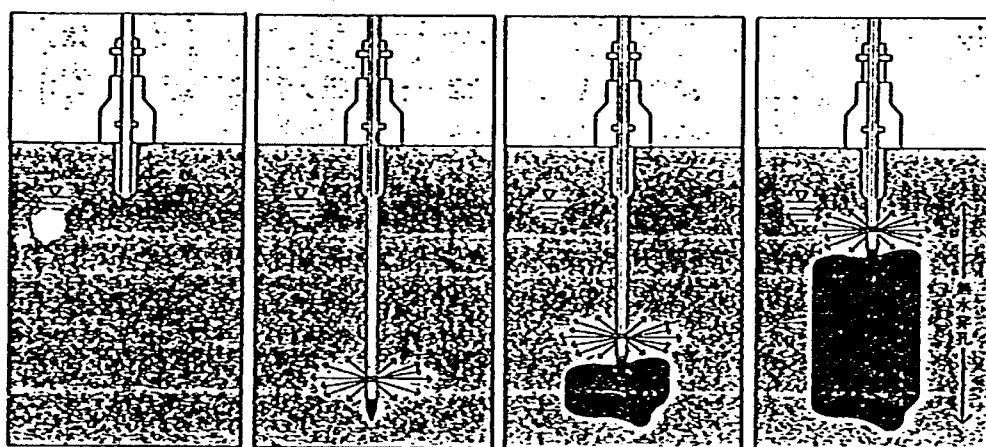


図-15 パーコインジェクション工法施工順序図(粘性土)¹³⁾

2.3.6 ADG工法

概要¹⁴⁾

ロッド工法と同様に、削孔ロッドを注入管として使用しているが、他のロッド管と異なり、外管にゴム製のアクアパッカーと呼ばれるものが備えられ、これを操作するため三重管になっている。これによりパッカー効果を高められることがこの工法の特徴である。アクアパッカーは、両端部に加硫接着されたゴム製のもので、接着部以外は全長にわたり容易に大きく膨張する事ができる（図-16）。このアクアパッカーの付いたロッドをSSロッドと呼ぶ。

所定深度まで掘削した後、自動加圧装置によりアクアパッカーに水を送り、内圧を与えるとゴムが膨張し、孔壁に圧着することにより、高い圧力を受けた注入材料のリークを防ぐ。ステップダウン方式を標準としているが、複合注入方式の場合、1次注入を、ステップダウン方式で所定深度まで行い、2次注入をステップアップ方式で行う。各ステップ毎に、アクアパッカーを作用させて注入を行い、注入が終わると、アクアパッカーを解除させ次のステップに移る。これらの操作は、地上から自由に操作できアクアパッカーは、任意の位置に自由にセットできる。またパッカー効果が大きいので、地表面近くの注入も可能である。

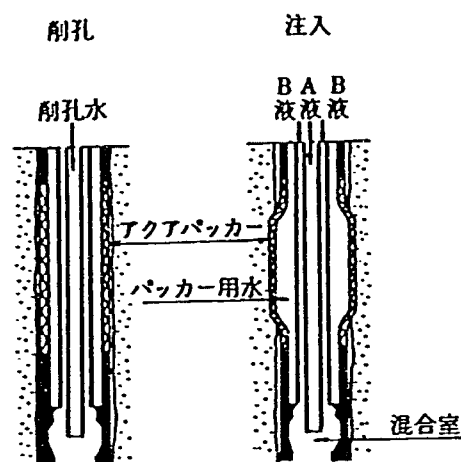
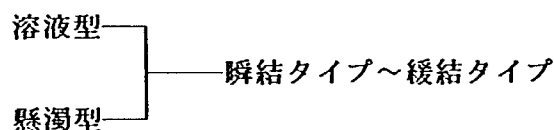


図-16 ADG工法モニター図¹⁴⁾

注入材料



混合方式

1ショット、1.5ショット、2ショットのいずれも使用出来るが、2ショットが主である。

機器構成

攪拌装置、注入機、流量圧力記録装置、分流加圧管理装置、複流回転接手、ADG装置SSロッド、モニター

施工方法¹⁴⁾

この工法はステップダウン（標準的）施工法、ステップアップ（後退式）施工法、岩盤（破碎帯）礫層での施工方法に分けられる。

（1）標準的（ステップダウン）施工法

施工の方法を、図-17に示す。

送水掘りによって削孔水を圧送しながら、表層部分にアクアパッカーの長さ相当分を掘削する。ボーリング（SS）ロッドを孔内に挿入し、アクアパッカー孔壁に圧着する注入ノズルと孔底の間に空間を設ける。表層分および、第1ステップ分の注入を行う。注入後、アクアパッカーの加圧を解除するとパッカーは、ロッドの径に復元し次のステップに移り同じ工程を繰り返す。

（２）後退式（ステップアップ）施工法

主に複合注入方式の２次注入の時に用いる方式で、一次注入においてステップダウンで粗詰めして、所定深度まで達すると、浸透性の良い注入材料をステップアップで注入するものである。

（３）岩盤（破碎帯）礫層での施工法

SSロッドで破碎帯又は礫層に削孔すると、ゴム製のパッカーを痛める恐れがあるので、次の手順で行う。

注入予定深度まで送水掘りし、掘削終了後、削孔ロッド先端から、シール材を噴出しつつ、ロッドを引き抜き、孔内にシール材を充填する。SSロッドを回転しながら下降させ、第1ステップの下端までシール材を排除する。次に、第1ステップの上端まで引き上げ、アクアパッカーに加圧して、孔壁に圧着し注入する。注入終了後は、アクアパッカーの加圧を解除して、次のステップに移り同様に注入作業を行う。

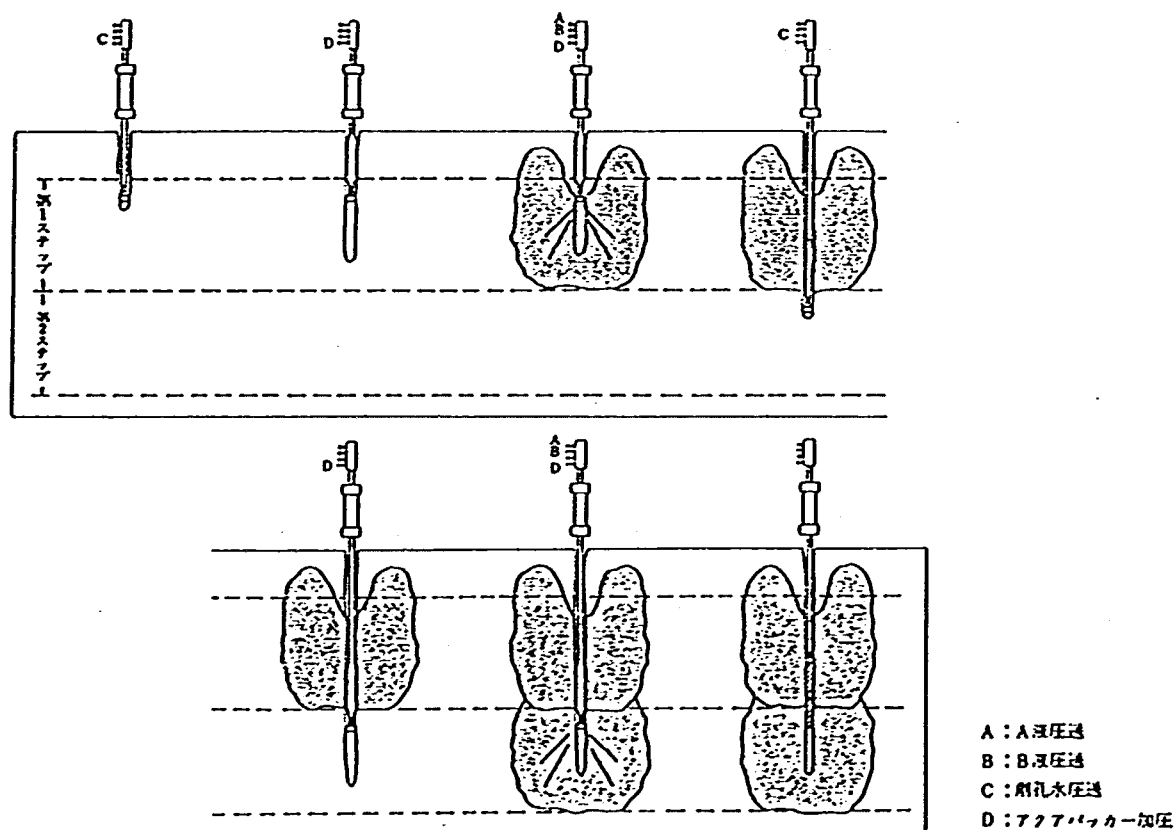


図-17 ADG工法施工順序図¹⁴⁾

2.4 二重管ロッド複相注入工法

二重管ロッド複相注入工法の特徴を表-4に示す。

表-4 二重管ロッド複相注入工法の特徴¹⁾

混合方式	1, 1.5, 2ショット		
注入可能な注入材料	CS + M, CS + L, S + M, S + L		
信頼性	信頼性は高い。		
施工性・施工単価	施工はやや複雑となる。作業性はよい。比較的高価である。		
現場周辺に与える影響	地盤変状や周辺構造物・埋設物への影響は比較的少ない。		
その他	土質条件によって、ゲルタイムの短い注入材料と長い注入材料の組合せの割合を決められる。ゲルタイムの短いものから、長いものまで同一工程の中で注入できる。		
対象地盤	注入効果		形態
粘性土	やや割裂注入となり、改良効果は小さい。	△	a
砂	ほぼ良好な浸透注入による改良効果が得られる。	◎	b, c
砂礫	良好な改良効果が得られる。	◎	d
互層	良好な改良効果が得られる。	◎	—

注入材料の種類

懸濁液 — 瞬結型 CS
急結型 CM
緩結型 CL

溶液 — 瞬結型 S
急結型 M
緩結型 L

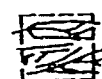
形態



a粗い割裂注入



c浸透部分固結化



b密な割裂注入部分固結化



d密な浸透固結物または均質で一体固結化

△やや不良
○良
◎良好

瞬結型…ゲルタイムが数10秒以下

急結型…ゲルタイムが数分

緩結型…ゲルタイムが数10分以上

2.4.1 マルチライザー工法

概要¹⁵⁾

この工法は、瞬結グラウト（ゲルタイムが約10秒以下）と、浸透性グラウト（ゲルタイム約30分以上）の異なる二種類のグラウトを同一工程で注入が可能である。つまり、砂質土層に対しては、2ショット瞬結性グラウトを主体として注入し、粘性土に対しては、2ショット瞬結性グラウトを主体として注入し、地層の変化に対応した、浸透性グラウトと、瞬結性グラウトを適切な割合で複合した注入が行うことができる。

この工法は瞬結・緩結グラウト、または懸濁・溶液グラウトの切り替えを行うので、目詰まりを生じないような構造のモニターでなければならない。そこでこの工法では図-18に示すように、同一吐出口より瞬結・緩結性のグラウトを、吐出することにより緩結性グラウトが瞬結性グラウトを押し出すようになっている。¹⁶⁾

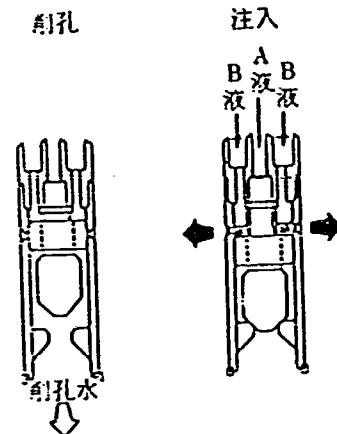


図-18 マルチライザー工法モニター図⁶⁾

注入材料

- 1次注入－瞬結性グラウト（ゲルタイム10秒以下）
- 2次注入－緩結性グラウト（ゲルタイム30分以上）

混合方式

- 1次注入－2ショット
- 2次注入－1ショット

機器構成

注入材料製造ミキサー、注入ポンプ、電磁流量計、ボーリングマシン、マルチライザーモニター

2.4.2 ユニパック工法

概要¹⁷⁾

ロッド注入工法、二重管ロッド注入工法の、施工性の簡便さ、高能率さを生かしながら、高い信頼性を得ようとした工法である。

モニター部は、垂直噴射タイプと、水平噴射タイプがある（図-19）。掘削の時は、外管から掘削水を出しながら掘削する。

モニターの上部は、逆流防止のパッカーを1段有している。注入材料を注入する段階になると、2ショット方式の場合はB液を内管に、A液を外管に通す。A液はゴムスリーブを通し、B液と混じり合って外管に噴出される。1.5ショット方式の場合は、外管を通して混合液を注入する。

注入材料

1次注入…瞬結性 溶液タイプまたは懸濁タイプ

2次注入…急結～緩結性 溶液タイプ

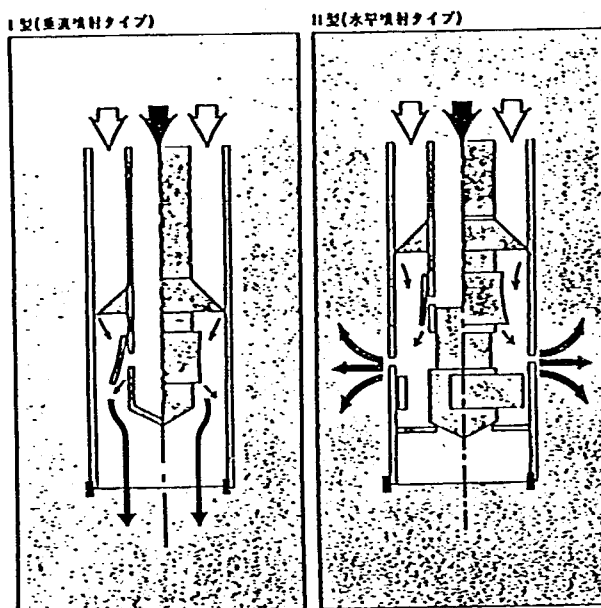


図-19 ユニパック工法モニター図¹⁷⁾

混合方式

1次注入…2ショット

2次注入…1.5ショットまたは、2ショット

機器構成

混合プラント、グラウトポンプ、自動回路変換器、変換制御盤、ボーリングマシン、二重管ロッド、ユニパックモニター

施工方法¹⁷⁾

施工の手順を図-20に示す。

ロッド注入工法と同じように、外管に清水を送り、所定深度まで掘削する。次に外管にA液、内管にB液を送り、瞬結性グラウトで、1次注入をする。1次注入により、掘削時に生じた注入管周囲の隙間にパッカーを形成し、対象地盤の粗間隙を粗詰めして前処理の働きを果たす。1次注入が終了すると、2次注入に切り替える。切り替えは回路変換装置があるので、一工程で複合注入ができる。2次注入が終了すると、ロッドを1ステップ分引き上げ、1次注入から繰り返す。

注入ステップは25～50cm、注入速度は、8～16 ℓ/min程度で、注入圧力はやや低い。

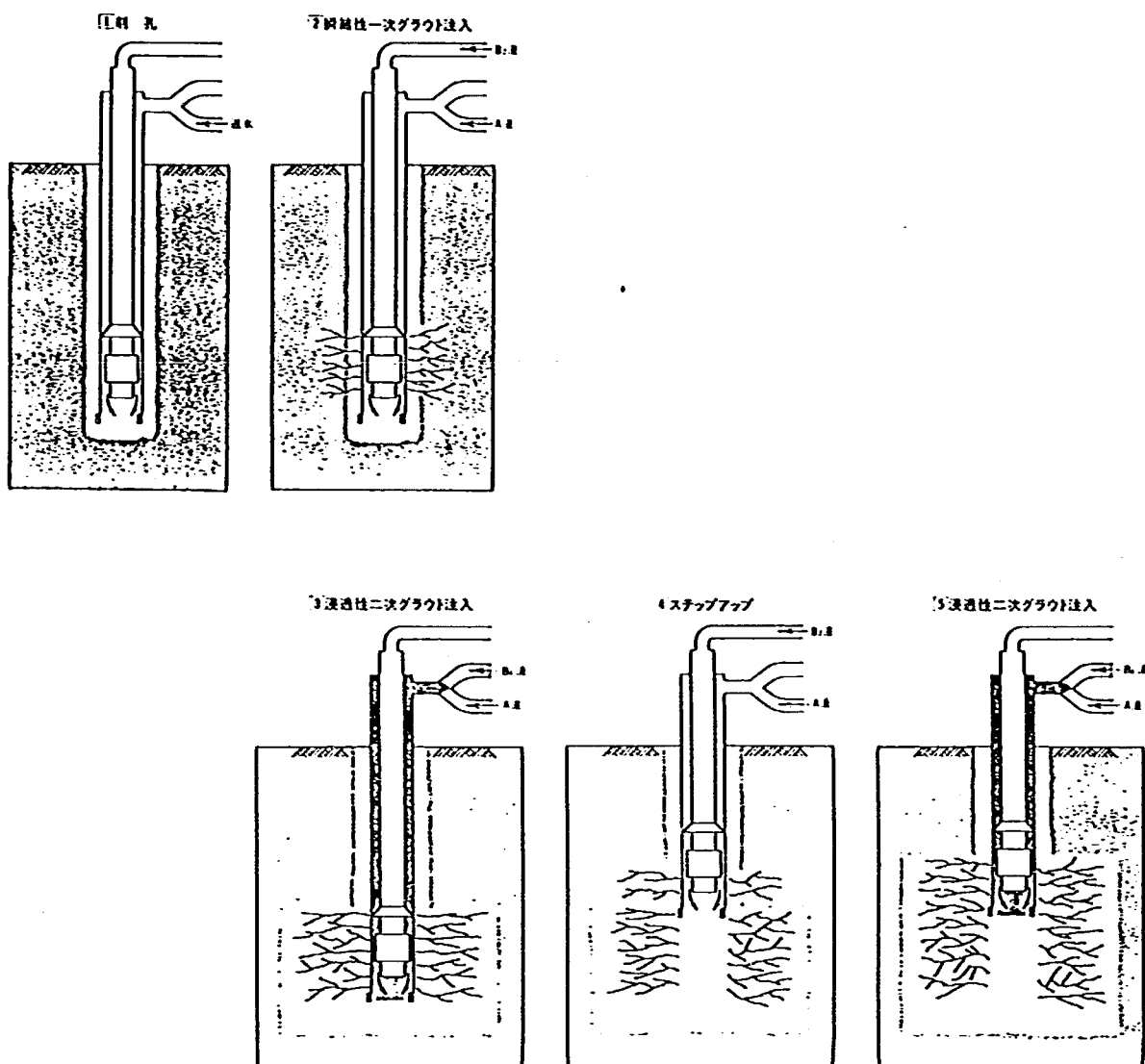


図-20 ユニパック工法施工順序図¹⁷⁾

2.4.3 スペースグラウト工法

概要^{18,19)}

この工法の特徴は、注入孔やストレーナーなどから地盤に注入するのとは異なり外管と内管の関係の差により形成された誘導空間（図-21）によって対象地盤の全方向に低圧力で、緩やかに注入される点である。これまでの工法は注入面が地盤と直接面しているため注入面積を大きくするためには、注入孔を多く設けるか、注入管を回転させるなどの方法が工夫されてきた。この工法は、これらの方法と異なり二重管ロッドで掘削したのち、注入材料を注入する前に、外管だけを1ステップ上げると、掘削後面と内管の間に空間ができる。この空間を誘導空間と呼び、掘削壁面全体が放出面になるので注入面積が広くとれ、低圧力で地盤にむりがなく浸透注入が期待できる。

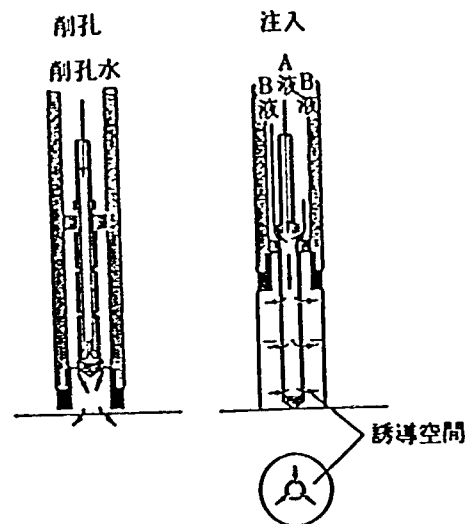


図-21 スペースグラウト工法
モニター図⁶⁾

注入材料

溶液型

- 有機系
- 瞬結型
- 急結型
- 無機系
- 瞬結型
- 急結型

懸濁型

- 無機系
- 瞬結型

機器構成

三槽式攪拌装置、グラウトポンプ、流量計、圧力監視装置、スイベル、ボーリングマシン、モニター（ロケット）

施工方法

施工手順を図-21に示す。スペースグラウト用のモニター（以下ロケットと称す）の外管は、通常のロッドと変わりがなく他のロッド工法と同様に掘削をする。掘削の際清水を二重管の内管から送水する。所定の深度まで掘削を行い、内管からの送水を止めて外管へ15ℓ/min程度の圧力水を送ると、外管内の圧力が上昇して、外管を引き上げる力になる。圧力上昇（10 kgf/cm²）を確認してから、ロッドを50cm引き上げると内管は突出し、圧力が下がる。ロケットが作動完了してから、水をグラウトに切り替えて第1ステップの注入を行う。注入はステップアップ方式で行い、条件は次の通りである。

ステップ長………50cmを標準とする。

グラウト吐出量…8～16ℓ/minを標準とする。

複合注入は瞬結から行い、三槽式攪拌装置に用意した2種類のグラウトを、連続的に注入する。

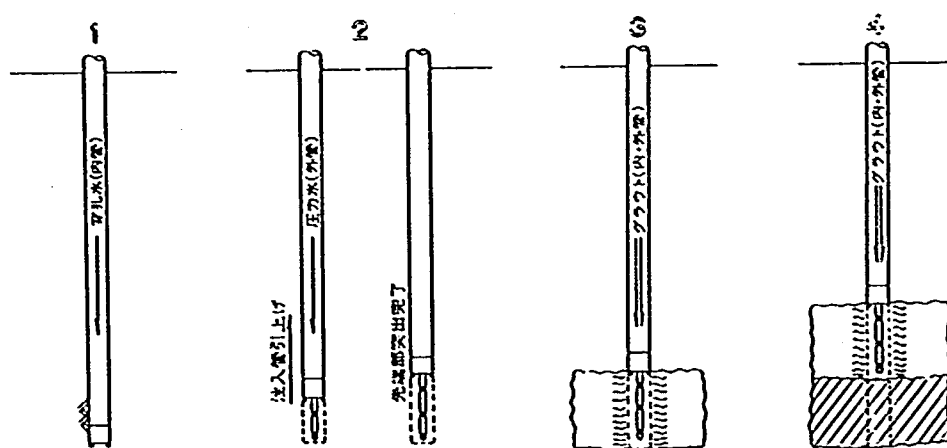


図-22 スペースグラウト工法施工順序図¹⁸⁾

2.4.4 サイマルジョン工法

概要^{20, 21)}

この工法の特徴は、多流路管を用いて上部吐き出し口より瞬結性グラウトを、下部吐き出し口より緩結性のグラウトを注入し同時に複合注入する点にある（図-23）

注入の際、瞬結性グラウトは上部吐き出し口から常時注入されているため最後までグランドパッカーが形成され、確実性の高いパッカー効果が得られる。また、先行して注入された瞬結性グラウトが、緩い部分や、大きな間隙の粗詰めなどの前処理の働きをする。注入管下部から、緩結性のグラウトにより浸透注入を行なう。このような複合注入の優れた効果を1工程で行ない、また送液の切り替えも必要としていないので、作業性が良く経済的である。

浸透性の良い緩結性グラウトは、注入管の引き抜きによって生じる空間にモニターの下端から注入されるので、無理なく浸透注入が行なえる。

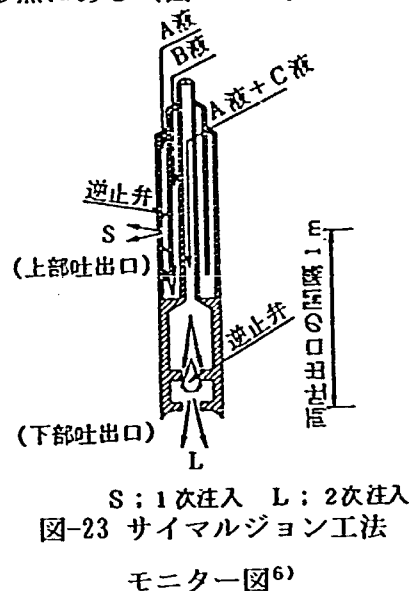


図-23 サイマルジョン工法

モニター図⁶⁾

注入材料

瞬結性グラウト（ゲルタイムが10秒以下のもの）。

緩結性グラウト（ゲルタイムが数分から数10分のもの）。

混合方式

瞬結性グラウト

緩結性グラウト

2ショット方式

1. 5ショット方式を標準

機器構成

調合ユニット、注入ポンプ、中央操作装置、流量計、集中操作ユニット、ボーリングマシン

施工方法²¹⁾

施工の手順を図-24に示す。この工法の注入法は、ステップアップ方式を原則としている。

まずモニター下端の緩結性グラウトの吐出口より清水を送り、掘削を行なう。瞬結性グラウトの吐出口が注入範囲の下限にくるように、注入範囲の下限より1m深い地点まで掘削し、先端装置上部の吐出口より瞬結性グラウトを、回転または、ステップ方式により注入する。次いで1m更新した時点で、緩結性のグラウトの注入を開始し、同時注入の状態をとる。

以後注入範囲の上限まで同時注入を行ない、瞬結性グラウトの吐出口が注入範囲の上限にきた時、同グラウトの注入を止める。下部吐出口より、緩結性のグラウトのみ注入を続

行し、下部吐き出し口が注入範囲の上限に来たとき同グラウトの注入を止め、すべての注入を完了する。 1 ——— 2 ——— 3 ——— 4 ——— 5 ——— 6

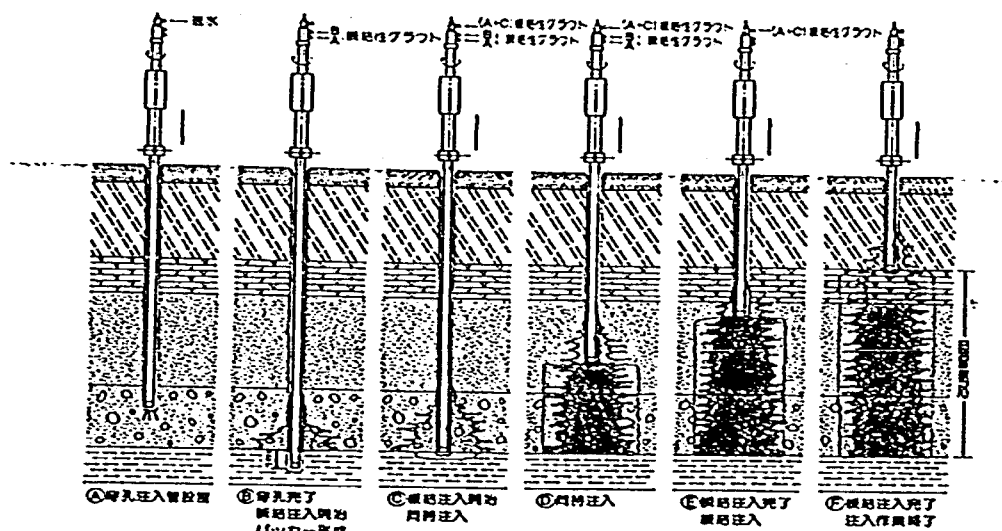


図-23 サイマルジョン工法施工順序図²¹⁾

2.4.5 バイモード工法

概要^{2,22)}

この工法は、建設省総合技術開発プロジェクトの「新地盤改良技術の開発」において開発されたものである。

薬液注入工法にはさまざまな工法があり、それぞれの一長一短がある。また注入原理が異なるので、地盤への注入効果も異なる。そこでこれらの工法の長所を取り入れて適用地盤が広く、注入効果、作業性、経済性、安全性にも優れた工法を開発することを目的に開発された。モニター部を図-25に示す。まず所定深度まで、掘削を行ない、上段のストレーナーから瞬結性グラウトを注入し、粗間隙の充填などの前処理とともに、パッカーを形成させる一次注入を行なう(図-26)。次に、下段のストレーナーから均質化させた地盤の中に、2次注入(本注入)を行ない、限定された範囲内で、土の構造を破壊することなく、浸透注入を行なうとするものである。

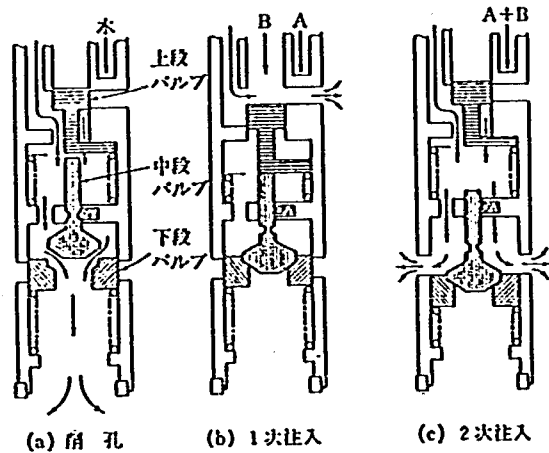


図-25 バイモード工法モニター図²⁾

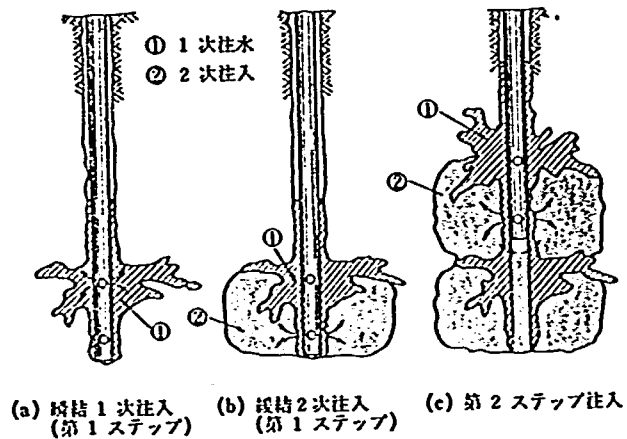


図-26 バイモード工法注入模式図²⁾

注入材料

特に制限はなく、溶液型、懸濁型のどちらでも使える。

1次注入 瞬結タイプ

2次注入 急～緩結タイプ

ただし、1次注入に用いる瞬結タイプは、ゲルタイムが1～2秒のような超瞬結タイプは、管内で固結したり、管の回りのみで固結する可能性があるので、使用しない。よって、ゲルタイムは5秒から設定している。

混合方式

1次注入 2ショット

2次注入 1ショットまたは2ショット

施工方法

施工手順を図-27に示す。

- ①掘削 モニター部において、あらかじめ中段バルブを、図-25(a)左の位置でセットしておいて、所定深度まで掘削を行なう。

② 1次注入 次に、外管と内管から、A、B液を送ると、内管の液圧によって、上段バルブが押し下げられる。更に中段バルブも押し下げられる。(図-25(b)) 上段バルブが押し下げられることによって上段ストレーナーが開き、A、B 2液は、上段バルブ頂上で混合され、外周部に向かって水平方向に噴出される。

③ 2次注入 1次注入が終わると、一旦送液を止める。すると、上段バルブのみバネによって押し上げられて、中段バルブは落下したままの状態になる。ここで外管を使ってA、B両液が混合された1液状で圧送すると下段バルブと中段バルブが下がり(図-25(c)) 2次注入に入る。

④ ステップアップ

2次注入が終わると所定の分だけ、ステップアップし注入する。

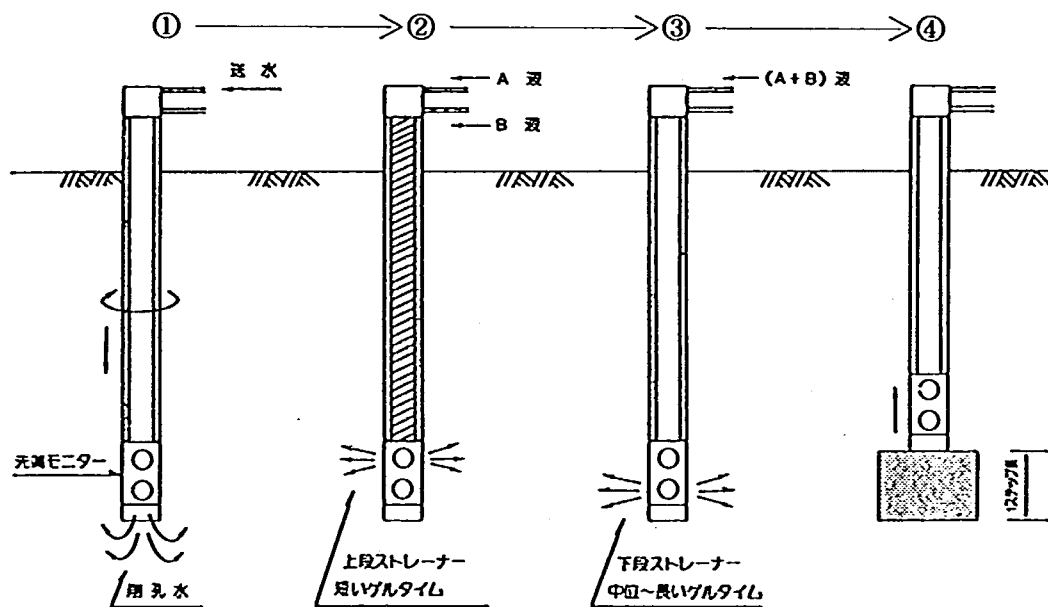


図-27 バイモード工法施工順序図²²⁾

2.5 二重管ダブルパッカー注工法

二重管ダブルパッカー注工法の特徴を表-5に示す。

表-5 二重管ダブルパッカー注工法¹⁾

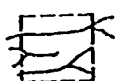
混合方式	1 ショット		
注入可能な注入材料	C L + M C L + L		
信頼性	信頼性は高い。		
施工性・施工単価	注入管の立て込み、シール材の注入養生などの作業を要す。他の工法に比べ、削孔の径も大きく、最も高価である。		
現場周辺に与える影響	地盤の変状、周辺の構造物・埋設物などへの影響は少ない。		
その他	確実なミキシングができ、安定した注入材料を注入できる。シール材により完全にパッカーが出来るので注入精度は高い。外管が埋め殺しとなり不経済。		
対象地盤	注入効果		形態
	粘性土	やや割裂注入となり改良効果は小さい。	△ a
	砂	均質な浸透により良好な改良効果が得られる。	◎ d
	砂礫	良好な改良効果が得られる。	◎ d
	互層	良好な改良効果が得られる。	◎ -

注入材料の種類

懸濁液 { 瞬結型 C S
急結型 C M
緩結型 C L

溶液 { 瞬結型 S
急結型 M
緩結型 L

形態



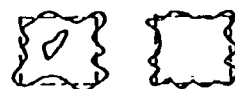
a 粗い
割裂注入



c 浸透部分
固結化



b 密な割裂注入
部分固結化



d 密な浸透固結物または
均質で一体固結化

△ やや不良
○ 良
◎ 良好

瞬結型…ゲルタイムが数10秒以下

急結型…ゲルタイムが数分

緩結型…ゲルタイムが数10分以上

2.5.1 ソレタンシュ工法

概要^{2), 23)}

この工法は、フランスのソレタンシュ社が開発した工法で、二重管ダブルパッカー工法の始まりとなった工法である。

地盤と注入外管の間は、シールグラウトで充填しパッカーを形成させる。注入外管内面は既製管であるため、ボーリング孔とは異なりメカニカルパッカーが有効に働くので、任意のステップでの注入、また、再注入が可能である。注入部を図-28に示す。この工法は、ゲル化時間の長い注入材料を用いて、低速、低圧で注入した浸透注入が期待できる。1ショット方式による注入方式であるため、確実にミキシングが出来る。また、パッカー効果を確実に出せるなど、最も信頼性の高い工法の一つである。しかしその反面、シールグラウトで外管を固着するため外管を埋め殺しにする点や、外管の立て込み、シールグラウトの注入や養生、他の工法と比べて削孔径が大きくなるなど、作業工程が多く、最も高価な注入方式となっている。

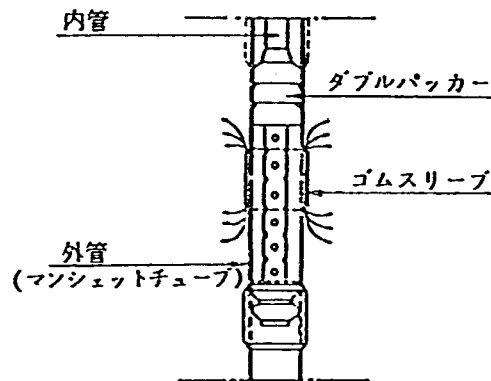


図-28 ソレタンシュ工法注入部⁶⁾

注入材料

シール材 CB (セメントベンナイト)

1次注入 懸濁型 (CB)

2次注入 溶液型

混合方式

1ショット

機器構成

ゲルミキサー、ベビーミキサー、送液ポンプ、電磁流量計、送液ポンプ

施工方法²⁾

施工順序を図-28に示す。ケーシング掘を行なうか、掘削後ケーシングパイプを建て込む。ケーシングパイプ内に注入外管 (マンシエットチューブ) を挿入する。ケーシングパイプと、注入外管の間にシール材を注入してからケーシングパイプを引き抜き、シール材を養生する。

先端に2段のパッカーとその間にストレーナーを備えた注入内管を外管内に挿入する。注入外管は、注入孔が等間隔に設けられている。注入孔には、スリーブゴムがはめ込まれており、管外周の地下水や、他のステップの注入材料の流入を防ぐ逆流防止弁構造となっている。注入の際、所定のステップの注入孔に、内管を二段のパッカー (ダブルパッカ

一)の間にもって行き、注入を行なう。注入外管回りのシール材だけでは不十分な場合は、あらかじめセメントベンナイト (CB) で前処理を行ない、次に緩結性の注入材料で本注入することを基本にする。

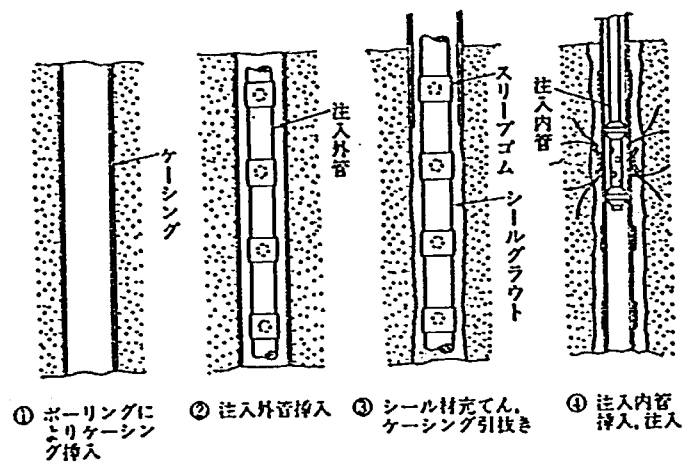


図-29 ソレタンシュ工法施工順序図²⁾

2.5.2 スリーブ工法

概要²⁴⁾

この工法の注入原理は、ソレタンシュ工法とほぼ同様であるが、外管注入孔の違いから現われる流線が異なる。

この工法では、ケーシング削孔した後、ケーシング内にシールグラウトを充填してから、スリーブパイプ（ソレタンシュ工法では、マンシュエットチューブに当たる）を挿入する。

ステップ注入の要領は、ソレタンシュ工法とほぼ同様であるが、注入孔とスリーブ（ソレタンシュ工法ではスリーブゴムに当たり、スリーブ工法ではラバーズリーブに当たる部分を、以下スリーブと呼ぶ。）が異なる。ソレタンシュ工法では、スリーブの両端から噴出されるのに対し、スリーブ工法では、両端を固定したゴム性のスリ

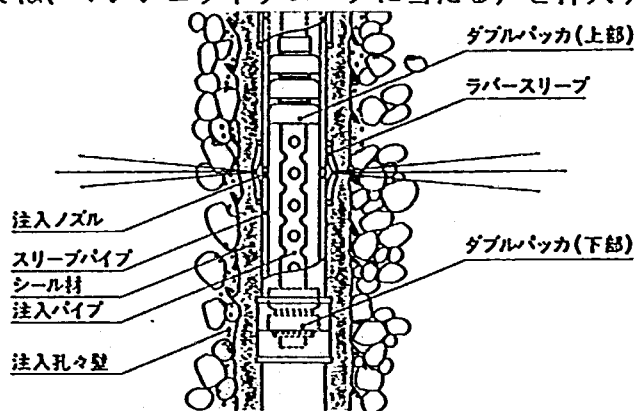


図-30 スリーブ工法注入部²⁴⁾

ーブに切り裂きを入れ、その形状により噴出形状を変えられるので、注入材料の流線形状を地盤に合った形状に出来る。この点が、ソレタンシュ工法と異なる点である。

注入材料

シール材 CB（セメントベントナイト）

1次注入 懸濁型

2次注入 溶液型

混合方式

1ショット

機器構成

主剤タンク、調合機、グラウトミキサー、ボーリングマシン、送水ポンプ、注入機、流量計、ケーシングパイプ、パイプ引抜き機

施工方法²⁴⁾

施工順序を図-31に示す。ロータリーボーリングマシンまたは、ロータリーパーカッションによって、孔径86～101mmの掘削を行なう。掘削は通常ケーシング堀とする。

所定深度まで掘削し、フレキシブルパイプを孔底まで挿入し、ケーシングとする。その中に、シールグラウトを充填し養生する。養生し終ると、最先端をキャップで閉鎖したスリーブパイプを継ぎながら挿入していく。全体にわたり挿入し終われば、引き抜きジャッキなどでケーシングを引き抜く。引き抜き後、シールグラウトが固結するまで養生する。スリーブパイプにダブルバックの付いた、インジェクションパイプを挿入し、圧力水を送り固結したシールグラウトを割るための、クラッキングを行なって注入路を付ける。更

に水押しを行ない地盤の透水性をチェックしてから、グラウトを注入する。

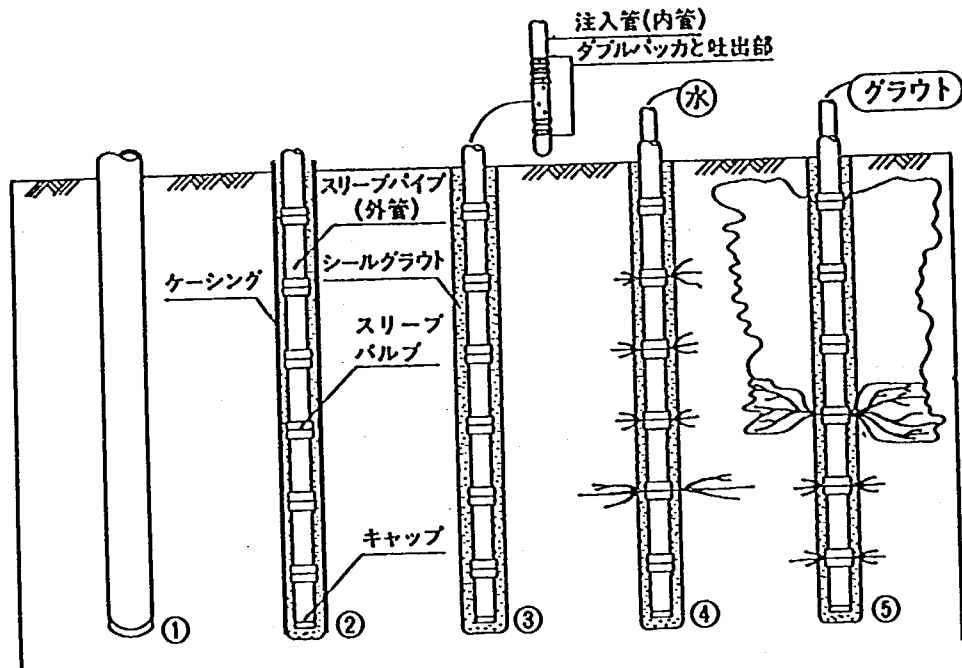


図-31 スリーブ工法の施工順序²⁴⁾

2.5.3 ダブルストレーナー工法

概要²⁵⁾

他の二つの工法と基本的には同じである。外管には（図-32）マンシュエットチューブやスリーブパイプに相当するストレーナー注入管がある。他の工法と比べ、ストレーナー注入管に特徴があり、外管にもストレーナーが設けてあり、それを、特殊シール膜が覆っている。これは、スリーブゴムと同じ働きをするもので、比較的長く、千鳥状に一文字形の切り裂き（膜グラウト孔と呼ぶ）が入っている。注入材料がシール膜の中央付近にある外管のストレーナー孔から噴出され、外管とシール膜との間を通り、数多くある膜グラウト孔から、注入材料を、分散して注入することが出来る。またシール膜が薄いので、他の二つの工法よりもボーリング径が小さいのも特徴である。

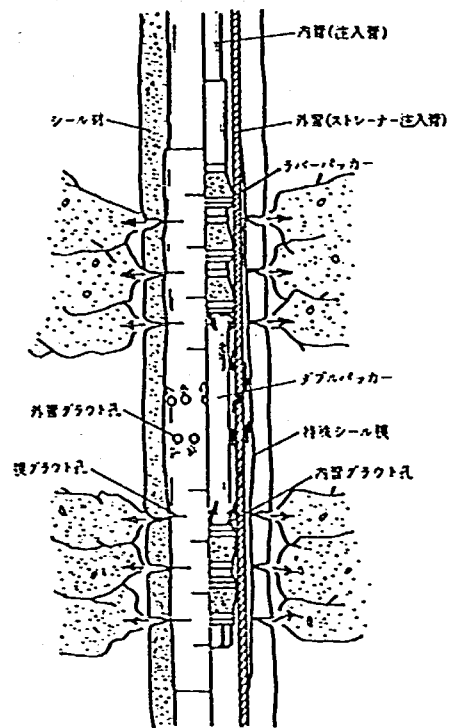


図-32 ダブルストレーナー工法
注入部

注入材料

シール材 CB（セメントベントナイト）

1次注入 懸濁型

2次注入 溶液型

混合方式

1ショット

施工の順序²⁵⁾

施工手順を図-33に示す。所定の深度まで、ケーシング掘りを行なうか、ボーリングを所定深度まで行ない、ケーシングパイプを建て込む。その中に注入外管を建て込み、シール材を注入し、ケーシングを引き抜き養生する。次にダブルパッカーが付いた内管を挿入する。ダブルパッカーの間に外管のストレーナー孔がくるように内管を持っていき、各ステップごとに注入をする。ステップ間隔50cm、注入速度5～10ℓ/minが一般的である。

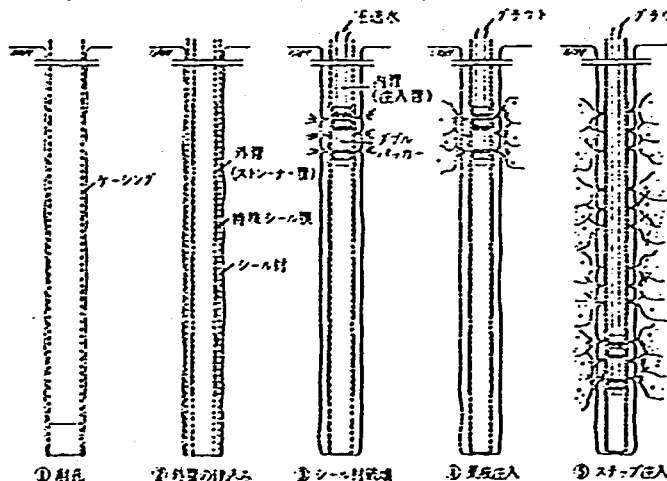


図-33 ダブルストレーナー工法の施工順序

引用文献

1. (社)日本鉄道施設協会 注入の設計施工指針日本国有鉄道編 pp.34~35, 1987
2. 土質工学会 薬液注入工法の調査・設計から施工まで pp.96~107, 1985
3. LAG工法カタログ, LAG協会
4. 所 武彦: LAG工法とその施工方法, 第2回 最近の薬液注入工法, 総合土木研究所 pp.56~63, 1976
5. 所 武彦: LAG工法と粘性土地盤への適用, 第6回 最近の薬液注入工法, 総合土木研究所 pp.47~53, 1981
6. 文献 1, pp.171~173
7. DDS技術マニュアル, DDS研究会
8. 佐野 栄: MT広報とその設計施工, 第3回 最近の薬液注入工法, 総合土木研究所 pp.32~43, 1977
9. MT工法施工マニュアル, MT協会
10. 文献 5, pp.78~87
11. 島田俊介、佐藤武、多久実 最先端技術の薬液注入工法 理工図書pp.54~57, 1989
12. カーボロック工法カタログ, カーボロック研究会
13. パーコインジェクション工法カタログ, パーコインジェクション協会
14. 文献 5, pp.54~59
15. マルチライザー工法カタログ, ライト工業株式会社
16. 文献 11, p.41
17. ユニパック工法カタログ, 複合注入工法協会
18. スペースグラウト工法設計・施工マニュアル, SGR協会
19. スペースグラウト工法とその実施例, 第5回 最近の薬液注入工法, 総合土木研究所 pp.68~72, 1979
20. 所 武彦: サイマルジョン工法とその施工例, 第7回 最近の薬液注入工法, 総合土木研究所 pp.83~89, 1982
21. サイマルジョン工法カタログ, 日本総合防水化学(株)
22. バイモード工法技術マニュアル, (社)日本薬液注入協会
23. ソレタンシュ工法カタログ, ライト工業
24. スリーブ工法カタログ, 日本スリーブ注入協会
25. ダブルストレーナー工法 工法説明書, 三信建設工業(株)

卷末資料 1 注入材料リスト

現在使用されている注入材料

水ガラス系 溶液型 有機系 短（ゲルタイム）

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤（硬化剤、助剤 etc）と 化 学 名	
1	RMG-S ₁	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	炭酸水素ナトリウム・炭酸水素カルシウム NaHCO_3 CaHCO_3	ラ イ ト 工 業
2	ケミ 3号	“	エチレンカーボネイト・炭酸水素カリウム $(\text{CH}_2\text{O})_2 \text{CO}$ KHCO_3	ケミカルグラウト
3	ケミ 5号	“	エチレングリコールジアテート、重炭酸ソーダ又はリン酸 $\text{C}_2\text{H}_4 (\text{OCCOCH}_3)_2$	ケミカルグラウト
4	コンソリダー SG	“	グリオキザール、リン酸	大 阪 防 水 建 設 社
5	TS-1R	“	ジメチルカルボキシレート、リン酸	トシマ建設工業㈱
6	TS-2①	“	ジメチルカルボキシレート、リン酸	トシマ建設工業㈱
7	TS-2②	“	ジメチルカルボキシレート、リン酸	トシマ建設工業㈱
8	TS-3 (I)	“	グリオキザール、リン酸、重硫酸ソーダ	トシマ建設工業㈱
9	TS-3 (II)	“	グリオキザール、リン酸、重硫酸ソーダ	トシマ建設工業㈱
10	TS-3 (III)	“	グリオキザール、リン酸、重硫酸ソーダ	トシマ建設工業㈱
11	TS-3 (IV)	“	グリオキザール、リン酸、重硫酸ソーダ	トシマ建設工業㈱
12	アロンSR-瞬結	“	エチレンカーボネート、塩化ナトリウム、炭酸水素カリウム	東亜合成化学工業
13	アロンSR	“	エチレンカーボネート、塩化ナトリウム、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	東亜合成化学工業
14	アロンSR-Hi 瞬結	“	エチレンカーボネート、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	東亜合成化学工業
15	アロンSR-Hi	“	エチレンカーボネート、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	東亜合成化学工業
16	SGR 3	“	エチレンカーボネート、炭酸水素カリウム、硫酸マグネシウム	東亜合成化学工業

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
17	SGR-5	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	エチレンカーボネート、炭酸水素カリウム、硫酸マグネシウム	東亜合成化学工業
18	三洋サンソルト PCS-1	"	エチレンカーボネート、プロピレンカーボネート、炭酸水素ナトリウム	三 洋 化 成 工 業
19	三洋サンソルト BM-100	"	グリオキザール、酢酸、硫酸水素ナトリウム	"
20	三洋サンソルト SL-3	"	硫酸水素ナトリウム、リン酸2水素ナトリウム、硫酸アルミニウム、 硫酸マグネシウム、エチレンカーボネート、プロピレンカーボネート	"
21	DCC-1	"	グリオキザール、酢酸、リン酸、硫酸水素ナトリウム	"
22	DCC-2	"	"	"
23	DCC-4	"	"	"
24	DCC-6	"	"	"
25	サンコーボール OSB	"	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム、炭酸エチレン、その他	三興コロイド化学
26	サンコーボール OSB-3	"	"	"
27	NCW-2A	"	エチレングリコールジアセテート 重炭酸ソーダ $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OCOCH}_3)_2$ NaHCO_3	日 特 建 設 株
28	PGD-3号	"	グリオキザール KHCO_3 NaHCO_3	三井東圧化学株

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	RSG-II α	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	ネオ-GS $\text{C}_2\text{H}_2 (\text{OCOCH}_3)_2$ 炭酸水素ナトリウム NaHCO_3	ラ イ ト 工 業
2	RSG-II β	"	ネオ-GS $\text{C}_2\text{H}_2 (\text{OCOCH}_3)_2$ リン 酸 H_3PO_4	"
3	CW-2A	"	エチレングリコール $\text{C}_2\text{H}_4 (\text{OCOCH}_3)_2$ 重炭酸ソーダ NaHCO_3	三 信 建 設 工 業
4	" (旧タイプ)	"	" "	"
5	CW-3	"	ジアセテートグリオキザール、リン酸	"
6	コンソリダー-SG	"	グリオキザール、リン酸	大 阪 防 水 建 設 社
7	コンソリダー-S	"	グリオキザール、リン酸	"
8	ケミ 3号	"	エチレンカーボネイト、炭酸水素ナトリウム	ケ ミ カ ル グ ラ ウ ト
9	ケミ 5号	"	エチレングリコールジアセテート、重炭酸ソーダ又はリン酸	"
10	アロンSR	"	エチレンカーボネート、塩化ナトリウム、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	東 亜 合 成 化 学 工 業
11	アロンSR-緩結	"	エチレンカーボネート、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	"
12	アロンSR-Hi	"	エチレンカーボネート、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	"
13	SGR-4	"	エチレンカーボネート、塩化ナトリウム、炭酸水素カリウム	"
14	SGR-6	"	エチレンカーボネート、硫酸マグネシウム、炭酸水素カリウム、硫酸ナトリウム	"
15	三洋サンソルト ES-2	"	2-ブチルラクトン、重炭酸ナトリウム	三 洋 化 成 工 業
16	三洋サンソルト PCS-2	"	エチレンカーボネート、プロピレンカーボネイト、重炭酸ナトリウム	"

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
17	三洋サンソルト BM-100	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	グリオキザール、酢酸、硫酸水素ナトリウム	三 洋 化 成 工 業
18	三洋サンソルト SL-3	"	硫酸水素ナトリウム、リン酸2水素ナトリウム、硫酸アルミニウム、硫酸マグネシウム、エチレンカーボネート、プロピレンカーボネート	"
19	DCC-1	"	グリオキザール、酢酸、リン酸、硫酸水素ナトリウム	"
20	DCC-2	"	"	"
21	DCC-4	"	"	"
22	DCC-6	"	"	"
23	サンコーボール OSB	"	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム、炭酸エチレン、その他	三 興 コ ロ イ ド 化 学
24	サンコーボール OSB-3	"	"	"
25	MGロック5号	"	グリオキザール、炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム	三 井 東 圧 化 学
26	GSG-2	"	グリオキザール、リン酢	強化土エンジニアリング
27	GSG-3	"	"	"
28	GSG-5	"	"	"
29	セキスイ LG5Y	"	炭酸エステル、重炭酸ナトリウム、その他	積 水 化 学 工 業 株
30	セキスイ LG7Y	"	"	"
31	エスタイト 1号	"	クエン酸、硫酸マグネシウム	日 東 化 学
32	エスタイトスーパー 10	"	グリオキザール、クエン酸、硫酸マグネシウム	"

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
33	エスタイト 10 Hb	水 ガ ラ ス	エチレンカーボネート	日 東 化 学
34	エスタイト 10 Hb-2	"	エチレンカーボネート、硫酸水素ナトリウム、硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム、酸化アルミニウム	"
35	エスタイト 10 B	"	エチレンカーボネート、炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム	"
36	レシプロ-2	"	グリオキザール、クエン酸、硫酸マグネシウム	"
37	レシプロ-4	"	"	"
38	NCW-2 A	"	エチレングリコールジアセテート、重炭酸ソーダ	日 特 建 設 株
39	NCW-1	"	グリオキザール、リン酸	"
40	NCW-2	"	"	"
41	NCW-3	"	"	"
42	NCW-4	"	"	"
43	NCW-5	"	"	"
44	PGD-4号	"	グリオキザール、炭酸水素ナトリウム	三 井 東 圧 化 学
45	CGS-3号	"	グリオキザール	三 井 東 圧 化 学

水ガラス系、溶液型 有機系 長

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反応剤（硬化剤、助剤etc）と化学名	
1	コンソリダーSG	水 ガ ラ ス	グリオキザール、リン酸	大阪防水建設社
2	CW-2A	"	エチレングリコール、重炭酸ソーダ	三 倍 建 設 工 業
3	CW-2A (旧タイプ)	"	"	"
4	CW-3	"	ジアセテートグリオキザール、リン酸	"
5	RSG-Ⅲ (RMG-L ₂)	"	トリアセチン	ラ イ ト 工 業
6	RSG-V (RMG-L ₁)	"	グリオキザール、トリアセチン	"
7	三洋サンソルトPCS-2	"	エチレンカーボネイト、プロピレンカーボネイト、重炭酸ナトリウム	三 洋 化 成 工 業
8	mLW-3	mLW・水ガラス	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム、グリオキザール	富 士 化 学 ㈱
9	mLW-4	水 ガ ラ ス	"	"
10	エスタイト 10号	"	グリオキザール、クエン酸、珪酸マグネシウム	日 東 化 学 工 業
11	エスタイト 10H	"	"	"
12	レシプロー 4	"	"	"
13	NCW-1	"	グリオキザール、リン酸	日 特 建 設 ㈱
14	NCW-2	"	"	"
15	NCW-3	"	"	"
16	NCW-4	"	"	"
17	NCW-5	"	"	"
18	NCW-2A	"	エチレングリコールジアセテート、重炭酸ソーダ	"

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	RT-1号 (A型)	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム、炭酸ナトリウム、 塩化ナトリウム	新 日 本 テ ク ノ 株
2	三洋サンソルト ES-3M	"	硫酸アルミニウム、硫酸水素ナトリウム、 リン酸2水素ナトリウム、硫酸マグネシウム	三 洋 化 成 工 業
3	" ES-9	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム、炭酸水素カリウム	"
4	" ES-9M	"	炭酸水素カリウム、硫酸ナトリウム " ナトリウム、塩化ナトリウム	"
5	" シグマ	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カルシウム、炭酸水素カリウム	"
6	" ES-3S	"	硫酸水素ナトリウム、リン酸2水素ナトリウム 硫酸マグネシウム、硫酸アルミニウム	"
7	" SL-1	"	硫酸水素ナトリウム、硫酸アルミニウム リン酸2水素ナトリウム、硫酸マグネシウム	"
8	" SL-2	"	"	"
9	エルンガンマーワナーII	"	炭酸水素ナトリウム、塩化マグネシウム	エ ル ン 株
10	" -III	"	"	"
11	CW-HL1号 (S)	"	硫酸、硫酸アルミ	三 信 建 設 工 業
12	CW-10	"	"	"
13	CW-HL2号 (S)	"	"	"
14	CW-IU	"	"	"
15	カーボロック	"	CO_2	"
16	TKG-2	"	Na_2CO_3	東 興 建 設 株

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
17	RMG-S ₂	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	ラ イ ト 工 業 株
18	ニコートラル-1	"	スルファミン酸	日 本 綜 合 防 水
19	LB-3	"	重炭酸ソーダー、塩化カリウム	"
20	LB-1	"	重炭酸カリウム	"
21	MGロック 3号Ⅲ型	"	硫酸水素ナトリウム、硫酸マグネシウム、硫酸ナトリウム	三 井 東 圧 化 学
22	MGロック 8号	"	炭酸水素ナトリウム、塩化マグネシウム、炭酸水素カリウム	"
23	MGロック ウルトラ	"	"	"
24	MGロック 2号	"	"	"
25	MGロック 3号	"	炭酸水素ナトリウム、硫酸マグネシウム、硫酸ナトリウム	"
26	MGロック 3号Ⅱ型	"	"	"
27	CGS-2号	"	炭酸水素ナトリウム、硫酸マグネシウム、塩化マグネシウム	"
28	PGD-1号	"	"	"
29	アロンSR-US	"	炭酸水素カリウム、炭酸カリウム、硫酸マグネシウム	東 亜 合 成 化 学 工 業
30	" -US-II	"	"	"
31	SGR-1	"	"	"
32	セキシイ LG3S	"	炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム	積 水 化 学 工 業 株

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
33	セキスイ LG5S	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム	積 水 化 学 工 業 株
34	" LG-7S	"	"	"
35	" LG-BM50	"	"	"
36	DCC-M	"	硫酸水素ナトリウム、リン酸	三 洋 化 成 工 業
37	コンソリーダー 2S	"	硫酸水素ナトリウム、硫酸マグネシウム、他	大 阪 防 水 建 設 社
38	" セブン	"	"	"
39	" 4S	"	炭酸水素ナトリウム、他	"
40	エスタイト 3S	"	炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム	日 東 化 学 工 業
41	" 3S (超瞬結)	"	炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム、炭酸カリウム	"
42	" 5S-I	"	酸性芒硝、硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム、酸化アルミニウム	"
43	" 5S-II	"	"	"
44	" 5S-III	"	"	"
45	" 5S-L	"	酸性芒硝、硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム	"
46	" 6S	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム	"
47	" 6S (超瞬結)	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム、塩化カリウム	"
48	" 9S	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム	"

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
49	エスタイト 9 S (超瞬結)	水 ガ ラ ス $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム	日 東 化 学 工 業
50	LC-グラウト 1500	"	酸性芒硝、硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム	"
51	" 1500b	"	"	"
52	ニトックスグラウト 1号	"	炭酸水 H_2CO_3	"
53	" 2号	"	"	"
54	タスタイト セブソーL	"	酸性芒硝、酸化マグネシウム、硫酸アルミニウム	"
55	PG-3号	"	酸性芒硝、カリ明ばん	"
56	エスタイト 8号	"	炭酸水素カリウム、炭酸水素ナトリウム、炭酸カリウム	"
57	レシブロー 1	"	酸性芒硝、硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム、 酸化アルミニウム	"
58	バーコ 6号 (瞬結型)	"	NaHSO_4 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	東 京 地 下 工 事 株
59	NK-C 1号	"	NaHCO_3 KHCO_3 KCl	日 本 基 礎 技 術
60	" 2号	"	"	"
61	ダイショット IH号	"	DS-H硅酸ソーダ、希釈水ガラス、中和緩衝剤	巧 苑 商 事 株
62	" 1号	"	DS硅酸ソーダ、希釈水溶液、中和緩衝剤	"
63	ケ ミ 4号	"	重炭酸ナトリウム、塩化カリウム	ケ ミ カ ル グ ラ ウ ト
64	ハードライザー S1	水ガラス、硫酸、硫酸アルミニウム、 硫酸マグネシウム	HL硅酸ソーダ	強化土エンジニアリング

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
65	ハードライザー S 2	水ガラス、硫酸、硫酸アルミニウム、 硫酸マグネシウム	HL 硅酸ソーダ	強化土エンジニアリング
66	" S 3	"	"	"
67	CG 7 - A (S)	水ガラス Mg (OH) ₂ NCaCO ₃	H ₂ SO ₄	"
68	" B (S)	"	"	"
69	クリーンロック 2号	水ガラス、硫酸、硫酸アルミニウム、 硫酸マグネシウム	水 ガ ラ ス	"
70	サンコーボール L - 2	水 ガ ラ ス Na ₂ O · SiO ₂	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム	三興コロイド化学
71	" US - 2	"	"	"
72	" L - 2 S	"	"	"
73	" US - 3	"	"	"
74	" AS - 3	"	"	"
75	" L - 3	"	"	"
76	" SW - 3	"	"	"
77	" MSウルトラ	"	" その他	
78	TK - 1号	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム、塩化マグネシウム 塩化ナトリウム、硫酸カルシウム	太 洋 基 礎 工 業

水ガラス系 溶液型 無機系 中位

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	コンソリダー 2 号	水 ガ ラ ス	硫酸水素ナトリウム	大阪防水建設社
2	コンソリダー 4 号	"	炭酸水素ナトリウム、他	"
3	サンコボール-US	"	"	三興コロイド化学
4	サンコールボール SW	"	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム	"
5	三洋サンソルト ES-3	"	硫酸マグネシウム、硫酸アルミニウム、硫酸水素ナトリウム リン酸二水素ナトリウム	三洋化成工業
6	" ES-2	"	硫酸アルミニウム、リン酸二水素ナトリウム	"
7	" ES-7	"	炭酸水素ナトリウム	"
8	" SL-1	"	炭酸水素ナトリウム、リン酸二水素ナトリウム、 硫酸アルミニウム、硫酸マグネシウム	"
9	mLW-2	"	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム	富士化学
10	ダイショット 2 号	" (シリカゾル)	中和緩衝剤 (CaCO_3 、 MgCO_3)	巧苑商事
11	アロン SR-US 綴結	"	炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	東亜合成化学工業
12	SGR-2	"	" "	"
13	NK-C 3 号	"	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム、炭酸カリウム	日本基礎技術
14	ケミ 4 号	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム	ケミカルグラウト
15	TS-1	"	" 塩化ナトリウム	トシマ建設工業
16	NS-1	"	硫酸水素ナトリウム、ガリ明バン	日本ソイル工業

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
17	MI-1	水 ガ ラ ス	アルミン酸ソーダ	日本綜合防水
18	エルン・アルファ	"	炭酸水素ナトリウム、珪那化ナトリウム	エ ル ン
19	エルン・ガンマ	"	オルソリン酸、"	"
20	エルン・ガンマーワン	"	炭酸水素ナトリウム、塩化マグネシウム	"
21	MGロック1号	"	" "	三井東圧化学
22	CGS1号-I " 1号-II	"	" " 炭酸水素カリウム	"
23	MI-4	"	アルミン酸ソーダ、硫酸カリウム	日本綜合防水
24	セキスイLG90S	"	塩化マグネシウム、炭酸水素ナトリウム	積水化学工業
25	" BM50	"	炭酸水素カリウム、他	"
26	T.K.G-1	"	炭酸水素ナトリウム、塩化カリウム	東 興 建 設
27	ダイショット2H号	"	中和緩衝剤 (CaCO ₃ , MgCO ₃)	巧 苑 商 事
28	CG7-A (L)	水ガラス、水酸化マグネシウム (炭酸カルシウム)	硫 酸	強化土エンジニアリング
29	CG7-B (L)	" "	"	"
30	クリーンロック1号	水 ガ ラ ス	炭酸水素ナトリウム	"
31	DCC-M	"	硫酸水素ナトリウム	三洋化成工業
32	エスタイト5S-L	"	" 硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム	日東化学工業

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
33	エスタイト3号	水 ガ ラ ス	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム	日東化学工業
34	ニトックスグラウト	“	炭 酸 水	“
35	レシプロー1	“	重硫酸ソーダ、硫酸アルミニウム、酸化マグネシウム、 酸化アルニウム	“
36	ドライデッチV	“	リン酸ソーダ、炭酸水素ナトリウム	堀 田 工 業
37	“ W	“	“ 塩化カルシウム	“
38	パーコ6号	“	硫酸水素ナトリウム、硫酸アルミニウム 他	東京地下工事
39	P G D 2号	“	炭酸水素ナトリウム、炭酸水素カリウム、塩化マグネシウム	三 井 東 圧
40	CGS1号-II	“	“ “ “	“
41	C W - 1 V	“	硫酸第2鉄、重硫酸ソーダ	三信建設工業

水ガラス系 溶液型 無機系 長い

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	シラクルソル	水 ガ ラ ス	カルシウム塩	ライト工業
2	カーボロック L	"	炭 酸 ガ ス	"
3	シリカライザー (RMG-L ₃)	"	硫酸、硫酸マグネシウム、硫酸アルミニウム	"
4	ハードライザー L ₁	"	水酸化マグネシウム、リン酸ナトリウム	強化土エンジニアリング
5	" L ₂	"	" "	"
6	" L ₃	"	" "	"
7	CWHL 1号	"	硫 酸、 硫酸アルミニウム 他	三信建設工業
8	" 2号	"	" "	"
9	ハイドロック	"	炭酸水素ナトリウム、硅弗化ナトリウム	エ ル ン
10	ダイショット 2号	"	硫 酸、 中和緩衝剤	巧苑商事
11	" 2H号	"	" "	"

水ガラス系 懸濁型 無機系 短い

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	m L W - 1	m L W 珪酸ソーダ	ポルトランドセメント、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム	富士化学㈱
2	サンソルト J E T	水 ガ ラ ス	ポルトランドセメント、硫酸カルシウム、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、硫酸ナトリウム	三洋化成工業
3	サンソルト J E T - 2	"	" " "	"
4	R T - 1 号 (B型)	3号水ガラス	普通ポルトランドセメント、水酸化カルシウム、硫酸カルシウム	新日本テクノ㈱
5	エスタイト S G I	"	酸化アルミニウム、消石灰、酸化マグネシウム、炭酸カルシウム、天然石膏、カルシウムアルミネート	日 東 化 学
6	エスタイト S G II	"	"	"
7	エスタイト S G (LAG-1)	"	"	"
8	エスタイト S G P	"	(エスタイト S G と同じ)、ポルトランドセメント	"
9	エスタイト S G P 2	"	" "	"
10	レシプロー 3	"	酸化アルミニウム、消石灰、酸化マグネシウム、炭酸カルシウム、天然石膏、カルシウムアルミネート	"
11	ケ ミ 6 号	水 ガ ラ ス	普通ポルトランドセメント、 CaSO_4 、 Na_2SO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3	ケミカルグラウト
12	コンソリダー K T	"	ポルトランドセメント、硫酸カルシウム 他	大阪防水建設社
13	ハードライザー S S	水ガラス、硫酸(シリカゾル)	" 重炭酸ソーダ	強化土エンジニアリング
14	サンコーボール 10-L	水 ガ ラ ス	水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、その他	三興コロイド化学
15	サンコーボール O S L - 1	"	"	"
16	サンコーボール O S L - 2	"	"	"

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
17	サンコーボールSAM-2	水 ガ ラ ス	水酸化マグネシウム、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム その他	三興コロイド化学
18	サンコーボールSAM-3	“	“ “	“
19	サンコーハードAQ-2	“	水酸化カルシウム、炭酸ナトリウム その他	“
20	RMG-S ₃	特殊水ガラス	カルメント、NaHCO ₃ 、CaSO ₄	ラ イ ト 工 業
21	シリカライザーSS	水 ガ ラ ス	H ₂ SO ₄ 、Al ₂ (SO ₄) ₃ 、MgSO ₄ 、Ca(OH) ₂ 、 NaHCO ₃	“
22	クリーンファーム2号	水ガラス、硫酸、硫酸アルミニウム (シリカゾル)	ポルトランドセメント、重炭酸ソーダ、水ガラス	日本クリーン薬材(株)
23	MGロック6号	水 ガ ラ ス	硫酸カルシウム、硫酸ナトリウム、水酸化カルシウム	三井東圧化学
24	セキスイLG1P	“	水酸化カルシウム その他	積水化学工業(株)
25	セキスイLG2P	“	“	“
26	バーコ3号	“	早強セメント、石膏、消石灰、その他	東京地下工事(株)
27	TGK-3	“	セメント、硫酸カルシウム	東 興 建 設
28	CGS-4	“	(CaSO ₄ ・2H ₂ O)、Ca(OH) ₂ 、Na ₂ SO ₄	三井東圧化学

水ガラス系 懸濁型 無機系 中位

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	ハードライザーSS-M	水ガラス、硫酸(シリカゾル)	ポルトランドセメント、重炭酸ソーダ	強化土エンジニアリング
2	サンコーハードAQ-2	水 ガ ラ ス	水酸化カルシウム、炭酸ナトリウム、その他	三興コロイド化学
3	クリーンファーム	水ガラス、硫酸、硫酸アルミニウム (シリカゾル)	ポルトランドセメント、重炭酸ソーダ、水ガラス	日本クリーン建材協
4	CCP硬化剤3号	特殊水ガラス	ポルトランドセメント、天然産粘土鉱物	日東化学工業
5	LW-1	水ガラス、セメント		日本薬液注入協会
6	LW-2	水ガラス、セメント、ベントナイト		"

水ガラス系 懸濁型 無機系 長い

[illegible]

アクリルアミド系 溶液型

[illegible]

アクリル酸塩系 溶液型

[illegible]

尿 柔 系 溶 液 型

[illegible]

リグニン系 溶液型

[illegible]

イソシアネート系 溶液型 有機系

[illegible]

セメント系 懸濁型 無機系 中位

[illegible]

セメント系 懸濁型 無機系 長い

番号	商 品 名	材 料		会社名または協会名
		主 剤 名 と 化 学 名	反 応 剤 (硬化剤、助剤 etc) と 化 学 名	
1	ストップクリート	セメント	アルミナセメント、炭酸ナトリウム	ケミカルグラウト
2	ストップクリートB	エスメント	石膏、石灰	〃
3	SSS-MAN1号	セメント、細骨材、膨張材	粗骨材、減水剤、流動化剤	日 東 化 学 工 業
4	SSS-MAN2号	セメント、細骨材	専用混合剤	〃
5	CCP硬化剤6号	普通ポルトランドセメント		〃
6	CCP硬化剤7号	〃		〃
7	CCP硬化剤8号	特殊セメント		〃
8	JG-1号	普通ポルトランドセメント	分 散 剤	〃
9	JG-2号	〃	ベントナイト、分散剤	〃
10	JG-3号	〃	〃	〃
11	JG-4号	特殊セメント	分 散 剤	〃
12	エコソル	セメント	ベントナイト、特殊粘土鉱物	ラ イ ト 工 業

その他 無機系

[illegible]

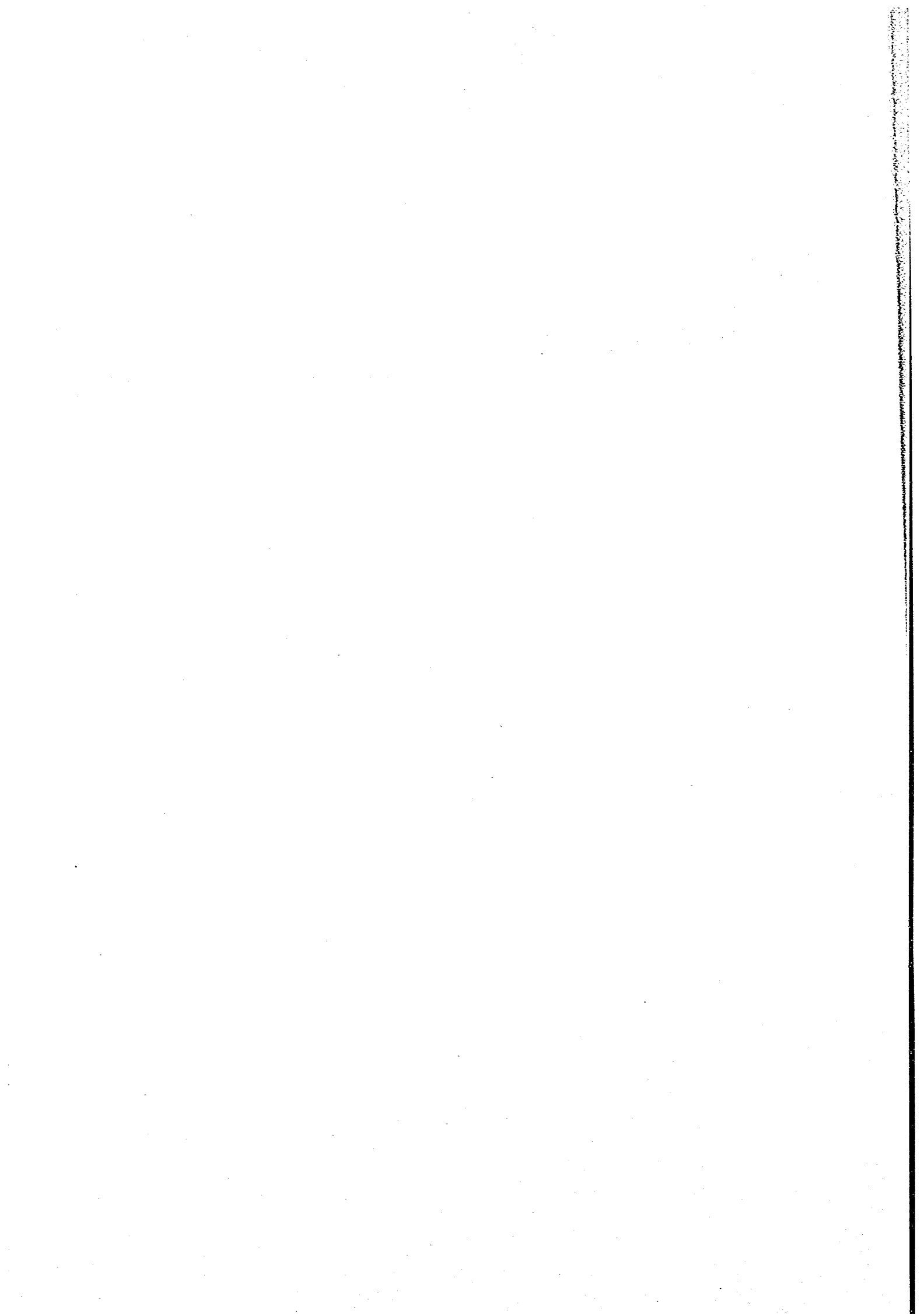
その他 有機系

[illegible]

過去に使用された注入材料

番号	商 品 名	主 材 と 化 学 名	反応剤 (硬化剤、助剤 etc) と化学名	会社名または協会名	備 考
1	日東-SS	$\text{CH}_2=\text{CHCONH}_2$ アクリルアמיד	$\text{N}(\text{CH}_2\cdot\text{CH}_2\cdot\text{OH})_2$ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ エタノールアミン 過硫酸カリウム	日 東 化 学 工 業 株	アクリルアמיד系
2	日東SS-3OR	(同 上) アクリルアמיד	(同 上) (同 上) エタノールアミン 過硫酸カリウム	"	"
3	日東-ダイヤロック	(同 上) 尿素ホルムアルデヒド初期縮合物	H_2SO_4 $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 硫 酸 尿 素	"	尿 素 系
4	ユリロック	$\text{CO}<\begin{smallmatrix} \text{NHCH}_2\text{OH} \\ \text{NH}_2 \end{smallmatrix}$ $\text{CO}<\begin{smallmatrix} \text{NHCH}_2\text{OH} \\ \text{NHCH}_2\text{OH} \end{smallmatrix}$ 尿素ホルムアルデヒド初期縮合物	NaHSO_4 $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 硫酸水素ナトリウム 尿 素	三井東圧化学株	尿 素 系
6	エスロック U	$\text{CO}<\begin{smallmatrix} \text{NHCH}_2\text{OH} \\ \text{NH}_2 \end{smallmatrix}$ $\text{CO}<\begin{smallmatrix} \text{NHCH}_2\text{OH} \\ \text{NHCH}_2\text{OH} \end{smallmatrix}$ 尿素ホルムアルデヒド初期縮合物	H_2SO_4 or NaHSO_4 $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 硫酸又は硫酸水素ナトリウム 尿 素	積水化学工業株	尿 素 系
7	エスロック K	(同) 上	H_2SO_4 or NaHSO_4 (同) $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (同) 上 ポリビニルアルコール	"	"
8	サングラウト	リグニンスルホン酸塩	$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ FeCl_3 重クロム酸ナトリウム 塩化第二鉄	山 陽 バ ル ブ 株	リ グ ニ ン

卷末資料 2 注入工法リスト



注 入 方 式

工法名 二重管ストレーナー 単相式

番号	商 品 名	会 社 名 また は 協 会 名	特 記 事 項
1	ティユー-ジ- T U G 工 法	サンコー工営株式会社	
2	カーボロック工法	三信建設工業 株	・カーボロック研究会
3	エルエー-ジ- L A G 工 法	日本綜合防水 株	・LAG協会
4	炭酸水グラウト工法	日東化学工業 株	・炭酸水グラウト協会
5	ディディ-エス D D S 工 法	株 地 巧 社	・DDS研究会
6	マルチライザー工法 (I)	ラ イ ト 工 業 株	
7	エムテ- M T 工 法	三井東圧化学 株	・MT協会
8	パーコインジェクション工法	東京地下工事 株	

注 入 方 式

工法名 二重管ストレーナー 複相式

番号	商 品 名	会 社 名 また は 協 会 名	特 記 事 項
1	スペースグラウト工法	新日本テクノ株	・ S G R 協会
2	ティケイ T K 工法システム	太洋基礎工業株	
3	ディーシーシー D C C 工法	トシマ建設工業株	・ D & S 協会
4	サスパート S A S (PART-2)工法	トシマ建設工業株	
5	ユニバック工法	三信建設工業株	・ 複合注入工法研究会
6	ベアーフロー工法	ケミカルグラウト株	
7	マルチライザー工法 (Ⅳ)	ライト工業株	
8	レシプロ工法	日本綜合防水株	・ レシプロ工法研究会
9	バイモード工法	社日本薬液注入協会	
10	mLW 工法	富士化学株	
11	H L 工法	サンコー工営株	

注 入 方 式

工法名 そ の 他 の 方 式

番号	商 品 名	会 社 名 また は 協 会 名	特 記 事 項
1	サイマルジョン工法	日本総合防水株	
2	シー・ジー・エス C G S 工 法		C・G・S 協会
3	ジー・キュー・シー G Q C システム	トシマ建設工業株	G・Q・C 協会
4	ジオタイト工法	ケミカルグラウト株	

注 入 方 式

工法名 二重管ダブルバックカー

番号	商 品 名	会社名または協会名	特 記 事 項
1	ソレタンシュ工法	ライト工業株式会社	
2	ダブルストレーナー工法	三信建設工業株式会社	
3	スリーブ注入工法	日特建設株式会社	・日本スリーブ注入協会

耐久性地盤注入材料利用技術
マニュアル(案)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3063号
平成4年3月(1992)

要 旨

中村康夫, 佐々木靖人, 藤井厚企

近年開発されつつある耐久性地盤注入材料について, 基本性能や耐久性能に関する標準的な材料試験方法, 地盤の調査方法, 現地注入試験方法, 実地盤中での耐久性の推定方法, 設計施工方法, 維持管理方法などの利用技術をマニュアル化したものである。

キーワード: 地盤注入材料, 地盤注入工法, 耐久性



郵便はがき

四十一円切
下手はって
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所
地質研究室
行

No. 009

No. 009

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 3063 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印