

泥水シールド工法における泥水に関する研究 (その2)

——砂礫地盤における泥水の品質管理——

喜田大三 炭田光輝
川地武 辻博和

Studies of Slurry in Slurry Shield Tunneling System (Part 2)

——Quality Control of Slurry at Gravelly Ground——

Daizo Kita Mitsuteru Sumida
Takeshi Kawachi Hirokazu Tsuji

Abstract

In excavation at gravelly ground by a slurry shield tunneling system, slurry losses and collapses of tunnel faces sometimes occur. Therefore, establishment of quality control of slurry in order to prevent slurry loss and to stabilize the tunnel face is desired. Hence, a method of quality control of slurry is proposed and applied at two sites of gravelly ground with permeability coefficients of the order of 10^{-1} cm/sec. It was concluded that the proposed method is a superior one.

This report gives consideration to slurry for gravelly ground, the fundamental idea of yield value and wall building properties, and the method of quality control of slurry at gravelly ground. Furthermore, a method of calculating yield value by computer is considered.

概 要

砂礫地盤における泥水シールド工法の掘削では、逸泥が多く、それに起因する切羽の崩壊も発生することが多かった。それ故、逸泥を防止し切羽を安定させるための泥水の品質管理方法の確立が望まれていた。そこで、泥水の降伏値と造壁性を主要な管理項目とする品質管理方法を提案し、透水係数が 10^{-1} cm/s オーダーの2現場の砂礫地盤に適用した。その結果、逸泥も少なく、切羽の崩壊も全く発生することなく掘削でき、提案した管理方法は優れた方法であることが確認できた。本報告は、砂礫地盤用の泥水、降伏値・造壁性の基本的な考え方、砂礫地盤における泥水の品質管理の手法について報告している。また、降伏値を電算機で算出する方法について考察している。

1. まえがき

泥水シールド工法は、粘性土地盤から砂礫地盤までの幅広い地盤において、下水道などのトンネルの築造工事に広く採用されている。本工法では、泥水圧で切羽を安定させて掘削し、掘削土砂をスラリー輸送する。したがって、掘削用泥水は、切羽の安定、掘削土砂の運搬・分離に適合する品質を確保することが重要であり、歴史の古い地中連続壁工法の泥水の品質管理に準じて造壁性、比重、ファンネル粘度などが管理されている。

しかし、砂礫地盤のように透水性の高い地盤の掘削に際し、従来の管理では逸泥が多く、それに起因する切羽の崩壊も発生することが多かった。それ故、そのような

地盤における泥水の品質管理方法の確立が望まれていた。

さて、前報¹⁾で報告したように、逸泥は降伏値を管理することによって防止することが可能と考えられる。

そこで、この知見に基づいて、泥水の降伏値と造壁性を主要な管理項目とする新しい泥水の品質管理の方法を提案した。この方法を2現場の砂礫地盤に適用した結果、逸泥も少なく、切羽の崩壊も全く発生せず、優れた泥水の品質管理の方法であることが確認できた。

本報告では、降伏値、造壁性の基本的な考え方および砂礫地盤における泥水の品質管理の手法について報告する。また、現場で降伏値を管理するために降伏値をパーソナルコンピュータなどの電算機で算出する方法について考察する。

2. 砂礫地盤用泥水

砂礫地盤の掘削では、逸泥を防止できる泥水を使用することが必要である。

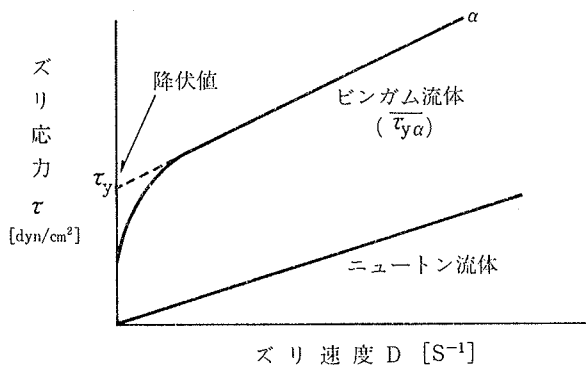
さて、泥水の調合・管理によって逸泥防止を図る方法には次の二つの方法がある。

①逸泥防止材を添加する。

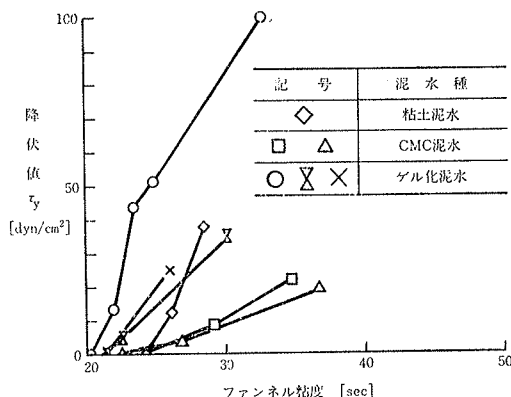
②高粘度・高降伏値を有する泥水を使用する。

①の方法は、地中連続壁工法などで広く採用されている。この方法では、繊維状などの逸泥防止材で地盤の間隙をすめ充填して泥水の地中への過剰な浸透を防止する。しかし、この方法は、泥水シールド工法のように土砂分離にスクリーン・サイクロンを使用するシステムでは逸泥防止材がスクリーン・サイクロンで除かれるので適した方法とは言い難い。

一方、②の方法は粘度、降伏値の高い泥水を地中のある範囲に浸透させつつ掘削する方法で、切羽面だけでなく、切羽からある程度前面までを高粘度・高降伏値の泥水で止水化することによって逸泥を防止する。その結果、地盤のみかけの透水係数が小さくなり、切羽近傍での損失圧力が土留力として作用する。さらに、泥水が浸透した地盤では粘着力が発生し²⁾、カッターの回転によって常に新しい切羽面が現われる泥水シールド工法ではこの地盤改良効果が切羽の安定に特に有効であると考えられ



図一 流動曲線



図二 各種泥水のファンネル粘度と降伏値

る。

泥水シールド工法で使用する泥水のように比較的濃度の高い泥水は、図一に示すようなおおむねビンガム流体としての流動を示し、降伏値 τ_y を持つ。この降伏値 τ_y は、泥水が流動状態にあるとき流動を続けるのに必要なせん断力(ズリ応力)とも解釈でき、降伏値が大きな泥水は逸泥しにくい。

ところで、泥水の降伏値を高くするには、(1)粘土類を富配合する、(2)CMCなどの増粘剤を添加する、(3)ゲル化剤を添加する方法がある。図二は各種泥水の降伏値をファンネル粘度との関係で示したものである。図から明らかなように、降伏値は特定の泥水の場合にはファンネル粘度と比較的相関の高い対応関係にあるが、泥水種・泥水材料が違くと著しく異なる。したがって、従来泥水の流動性を評価するために測定されていたファンネル粘度では降伏値を評価しにくく、泥水の品質管理には降伏値を測定する必要があることがわかる。

なお、当社では、降伏値の高い泥水として作泥時の作業性・ポンプ負荷・経済性などを考慮して、上記(1)~(3)の中で(3)のゲル化剤を添加した泥水を採用している。

3. ゲル化泥水の品質管理方法の提案

当社が砂礫地盤掘削用に使用するゲル化泥水とは、ベントナイトおよび一般粘土からなる泥水に適切なゲル化剤を添加して適度に凝集させた泥水である。本章では、このゲル化泥水の品質管理を行なう上で主要な管理項目である降伏値と造壁性について基本的な考え方を述べるとともに、現場における品質管理の方法を提案する。

3.1. ゲル化泥水の基本的考え方

3.1.1. 降伏値 降伏値の管理は主に逸泥を防止することにある。粘性流体の流動現象については、ニュートン流体の場合にはHagen-Poiseulleの式が、またゲル化泥水のようなビンガム流体では(1)式に示す Buckingham-Reinerの式が適用できる¹⁾。

$$l = PR/4\tau_y \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 l : 浸透距離[cm]
 P : 圧力[dyn/cm^2]
 R : 細管、間隙の半径[cm]
 τ_y : 流体(泥水)の降伏値[dyn/cm^2]

Hazenによると、透水係数とHazenの有効径との関係は近似的に(2)式で与えられる。

$$k = CD_{10}^2 \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 k : 透水係数[cm/s]
 C : 比例定数[$1/\text{cm}\cdot\text{s}$]
 D_{10} : ヘーゼンの有効径[cm]; 10%径
 今、土粒子(Hazenの有効径; 単一の球形粒子)が粗

な状態で堆積しているとすると、粒子径と間隙の断面積に等しい円の半径 r との関係は(3)式の通りである。

$$r = 0.261D_{10} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 r ：間隙の有効半径[cm]

(2)、(3)式を(1)式に代入し、一般に使用されている $C=100$ 、泥水シールド現場の通常の管理圧力 $P=200 \times 980$ (0.2 kgf/cm^2)、そして $R=r$ とすると(4)式となる。

$$l \approx 1300 \sqrt{k} / \tau_y \quad \dots\dots\dots(4)$$

したがって、透水係数と浸透距離との関係は図-3に示す通りとなる。

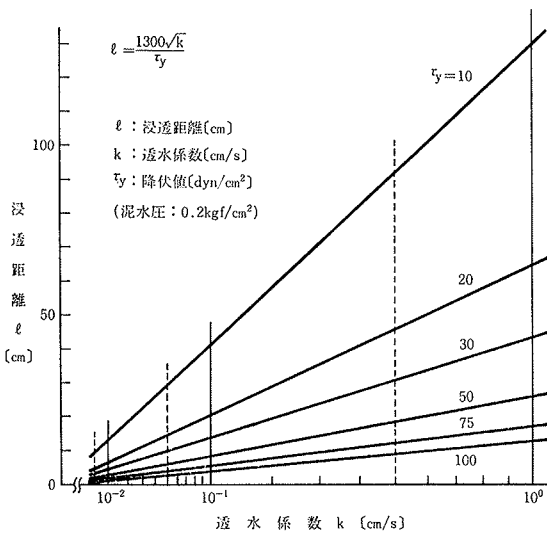


図-3 透水係数と浸透距離の試算例

浸透距離と逸泥量はおおむね比例すると考えられるので、逸泥は降伏値を管理することによって防止できる。

ところで、逸泥を防止することによって泥水圧の確保は可能となるが、切羽の安定に関しては先の2章でも述べたように、地盤中への浸透効果も重要と考えられる。したがって、各種砂礫地盤における適正な降伏値の範囲は逸泥防止のみならず、浸透による地盤改良効果さらには土砂分離などを総合して決定する必要がある。この点については5章で述べる。

なお、降伏値が所定値を確保できないのは、主に、ベントナイト、一般粘土、ゲル化剤の量が不足するときあるいは裏込め材、薬注剤が切羽にまわり込んだときであるので、このような場合には比重、pHの値を参考にしてベントナイト、一般粘土、ゲル化剤もしくは分散剤などを添加して改善すればよい。

3.1.2. 造壁性 ゲル化剤を使用するゲル化泥水では、ベントナイト、一般粘土の質および量あるいはゲル化剤の質および量が適切でない場合、著しく凝集してセメントなどで劣化した時と同様な状態となり、劣化の程度が激しい場合には固液分離を起こす可能性がある。劣化した泥水は掘削泥水としての機能を果たすことができない。

すなわち、切羽の安定への寄与はおろか管・槽などで土粒子の沈積が起り重大な支障となる。

したがって、ゲル化泥水では凝集の程度を管理することは重要である。この凝集の程度は造壁性（脱水量）で把握することができ、室内試験の結果などから造壁性（大林式）が数 ml 以下であると問題がないことが明らかになっているので、造壁性は数 ml 以下となるように管理する。

なお、造壁性のよい泥水は泥膜形成能がよく、砂礫地盤においても切羽のある部分は泥膜を介して切羽水圧が伝達され、切羽の安定に寄与するものと考えられる。

ところで、造壁性が悪くなるのは、主に、裏込め材・薬注剤が切羽にまわり込んだ場合あるいはベントナイト・一般粘土が不足した場合が考えられ、前者の場合には分散剤を後者の場合にはベントナイト・一般粘土を添加して改善すればよい。

3.2. 泥水の品質管理の手法

砂礫地盤の掘進では、地盤条件・掘進条件に適合する泥水品質が保持できない場合、逸泥や余掘を誘発し、ひいては崩壊することになる。そこで、これらの現象を防止するために、適切な泥水品質を維持させるように泥水プラントなどの泥水システムを管理している。

砂礫地盤における泥水の品質管理手法の概要は図-4に示す通りである。すなわち、ボーリングデータ、実績などから管理基準値を設定し、その基準値を満足する泥水を調査し、品質管理試験で確認する。砂礫地盤では先に述べたように降伏値の高いしかも造壁性の優れた泥水で止水化することによって切羽水圧を伝達し切羽の安定を図るので、泥水品質の直接の管理項目は降伏値と造壁性である。この管理項目を基準値内に維持管理するためにはベントナイト、一般粘土、ゲル化剤を適切に調合す

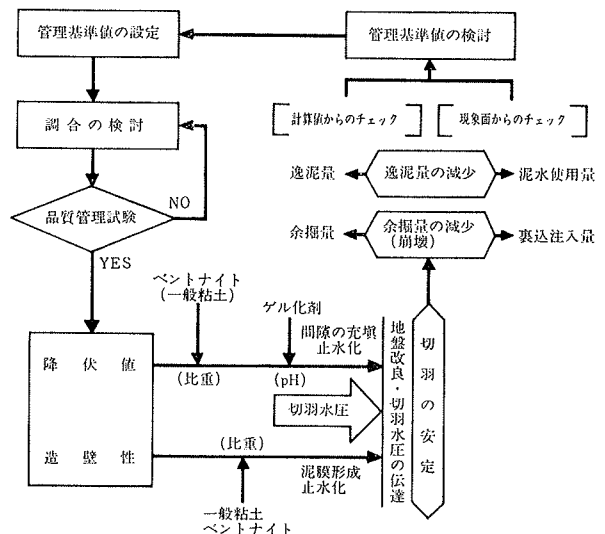


図-4 砂礫地盤における泥水の品質管理の考え方

の必要があり、その際に比重、pHのデータを活用する。なお、土砂の分離状況を把握するために砂分率も測定する。

さて、適切な品質の泥水が切羽に送られると切羽水圧が有効に伝達され切羽は安定するものと考えられる。この状況は余掘量、逸泥量で把握できるものと考えられるので、計算値からの余掘量、逸泥量、また現象面からの裏込注入量、泥水使用量のデータから検討する。そして、これらのデータおよび地山の条件を考慮して次リングの管理基準値を検討し、設定する。以後、同様に順次管理して行けばよいと考えられる。

4. 電算機による降伏値の算出方法

2, 3章で述べたように、ゲル化泥水では降伏値を管理することは非常に重要である。一般に降伏値は、回転粘度計によって流動特性を測定し、図-1の流動曲線を描いて求めている。この方法は流動曲線による方法と称されている。流動曲線による方法は図上で外挿値を求めるため、外挿値には個人差があり、しかも時間がかかる。それ故現場では採用しにくい。

そこで、回転粘度計で測定した流動特性から降伏値をパーソナルコンピュータなどの電算機で算出する方法を考察する。

4.1. 流動曲線の式

電算機で降伏値を正確に求めるためには流動曲線の式(流動方程式)を測定値と相関の高い関数におくことが重要である。

ところで、塗料、印刷インクなどの分散系では、ズリ速度の平方根とズリ応力の平方根とは、図-5に模式的に示すように、直線関係にあることが判明している。この関係を利用した降伏値の算出をCasson式による方法と称し、降伏値は、y切片の値Bを2乗して得られ、これをCasson降伏値といっている。

泥水シールド工法で使用する各種泥水の流動曲線を調べた結果、ゲル化泥水も含めてすべての泥水においてズリ速度の平方根とズリ応力の平方根とは相関の高い直線関係にあることが判明した。回転粘度計では $D=fN$ (f : 定数, N : rpm) の関係にあり当然 τ と N の関係も同様

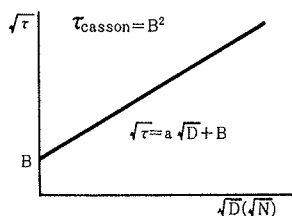


図-5 Cassonの流動曲線

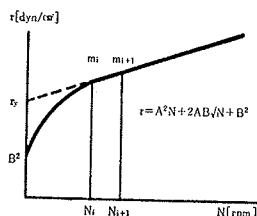


図-6 電算機による降伏値の算出モデル

である。なお、降伏値の算出においてはx軸がD, Nいずれの場合にも同一の結果となる。

したがって、泥水の流動方程式は(5)式で近似できる。

$$\tau = f(N) = A^2N + 2AB\sqrt{N} + B^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 τ : ズリ応力[dyn/cm²]

N : ローター回転数[rpm]

A, B : 泥水によって定まる定数

4.2. 算出条件

泥水の流動方程式を(5)式とおくと、方向係数は(6)式となる。

$$f'(N) = A^2 + \frac{AB}{\sqrt{N}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

図-6のように、 N_i, N_{i+1} の点における方向係数を m_i, m_{i+1} とし、

$$\left| \frac{m_{i+1} - 1}{m_i} \right| = \epsilon \quad \dots\dots\dots(7)$$

とすると $\epsilon < x$ (ただし、 x は0に近い定数) となる時の N_i を算出すれば $N=0$ における τ_y は(8)式で与えられる。

$$\begin{aligned} \tau_y &= f(N_i) - N_i \cdot f'(N_i) \\ &= AB\sqrt{N_i} + B^2 \quad \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

B型粘度計で流動特性を測定した場合、 N のきざみを1としたとき $x=0.01$ とすれば流動曲線の方法によって求めた降伏値と電算機によって算出した降伏値は各種の泥水においてほぼ等しくなることが判明した。

5. 適用例

当社では透水係数が $3 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ および $2 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ の砂礫地盤においてゲル化泥水を適用し、3章で述べた管理手法で泥水の品質管理を行なった。その結果、両現場ともほとんど沈下を起こすことなく無事に掘削できた。

図-7は泥水の品質管理の実績の一例を示すものである。図示するように、ゲル化泥水は、造壁性(大林式)がほとんど5ml程度で安定しており、管理面からも優れた泥水であることが判明した。

本章では実績から降伏値の適正範囲について検討する。

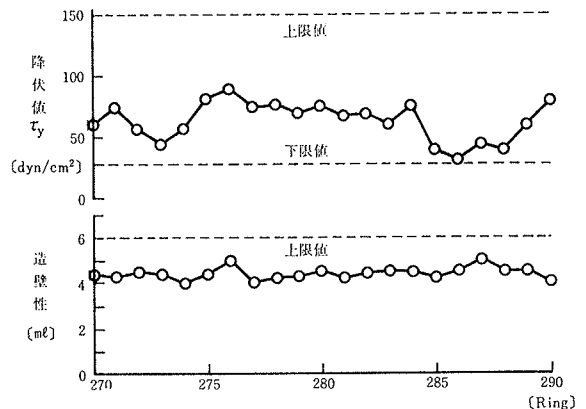


図-7 ゲル化泥水の品質管理実績の一例

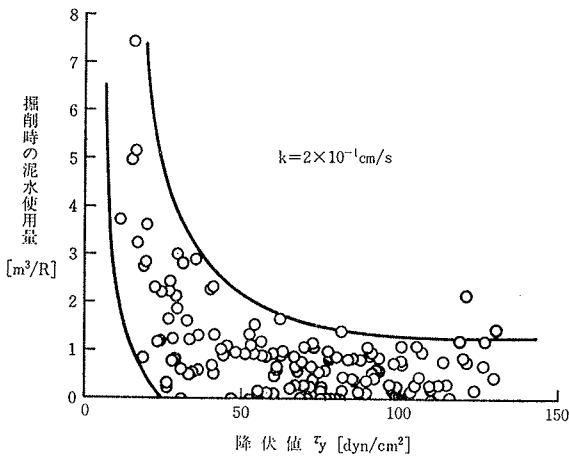


図-8 降伏値と掘削時の泥水使用量

5.1. 降伏値の下限値

降伏値の下限値は逸泥量を考慮して決定すればよいと考えられる。図-8は透水係数が 2×10^{-1} cm の地盤における降伏値と掘削時の泥水使用量の関係を示すものである。図から明らかなように、降伏値が 30 dyn/cm^2 以下になると泥水使用量すなわち逸泥量が著しく多くなることがわかる。この降伏値 30 dyn/cm^2 の値は図-3の浸透距離が 20 cm の値であり、降伏値の概略の下限値は図-4において浸透距離が 20 cm の値に設定すればよいと考えられる。

図-9は夜間(10~15 hr)掘削を停止した時に測定した静止時の逸泥量と降伏値の関係を示すものである。図から明らかなように、降伏値が大きくなると逸泥量は少なくなり、降伏値の管理が重要であることがわかる。ところで、図中の斜線部分は浸透距離は(4)式に従うとしシールドマシン前方の地盤中の間隙を泥水で置換した時の泥水量を示すものである。逸泥量は地盤条件、加圧条件(加剰水圧、加圧時間)および泥水性状によって左右されるので一概に言えないが、計算値よりも多くの量が逸泥しているのは、地盤中の逸泥しやすい場所から多量に

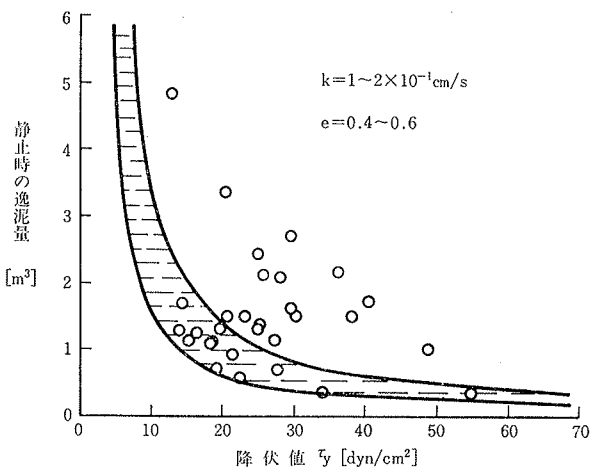


図-9 降伏値と静止時の逸泥量

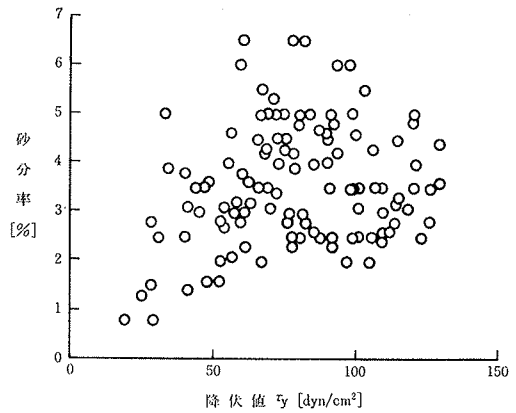


図-10 砂礫地盤における土砂分離の実績

逸泥するためと考えられる。

5.2. 降伏値の上限値

降伏値の上限値は土砂の分級³⁾、ポンプの負荷などを考慮して決定すればよい。図-10は土砂の分離状況を砂分率を指標として示すものである。図示するように、降伏値と砂分率の関係は認められない。換言するならば、降伏値が 150 dyn/cm^2 程度でも十分土砂分離は行なわれている。これは砂礫地盤ではサイクロンで分級しにくい粒径が少ないためと考えられる。また、降伏値が 150 dyn/cm^2 程度の場合にもポンプへの悪影響は認められなかった。

したがって、降伏値の概略の上限値は 150 dyn/cm^2 程度にしても問題はないと考えられる。

6. あとがき

砂礫地盤における泥水シールド工事に際し、降伏値と造壁性を主要管理項目とする新しい泥水の品質管理法を提案し、その妥当性を二つの現場で確認した。特に降伏値の管理は逸泥防止・切羽の安定上重要である。今後、データを蓄積し、降伏値の管理基準の適正範囲を明確にするとともに、逸泥量さらには余掘量の算出手法などの関連技術を検討し、この品質管理法を確立して行きたい。

おわりに、本研究を行なうにあたり、現場測定に協力して下さった現場の皆様様に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 喜田, 川地: 泥水シールド工法における泥水に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 17, (1978), pp. 76~80
- 2) 喜田, 川地: 泥水工法における泥水管理に関する研究(第22報), 大林組技術研究所報, No. 13, (1976), pp. 90~96
- 3) 喜田, 炭田, 辻: 土工事における濁水処理に関する研究(第17報), 大林組技術研究所報, No. 27, (1983), pp. 112~116