

裏込め注入に関する実験

齊藤二郎
内藤和章
鈴木公雄

概要

シールド工事における裏込め注入は一般に注入率が悪くその結果、地盤を乱して周囲に悪影響を及ぼしている、裏込め方法にはモルタルまたはコンクリートを注入する方法と、豆砂利を一次注入として吹き込み、後から二次注入としてモルタルを注入して一次注入でセグメント背後の空隙を満たした豆砂利の空隙を充填する方法の二つがある、この研究では、後者の方法におけるモルタルについて行なった。豆砂利の空隙をモルタルで十分に充填して、地山の流動および漏水を防止するにはどんな配合のモルタルを使用すれば良いかを実験によって求めた。

この実験結果によると、粒径2.5mm~10mmの豆砂利を用いた場合砂の最大粒径は1.2mmが望ましくまた砂量はセメント量以下でないと十分に豆砂利空隙をモルタルで満たすことは困難である。

1. 序

ここ数年来、路上交通が極端に混雑の度合いを増してきたのに伴って、シールド工事が日本において急速に発達した。しかし未解決の問題を多く残しており、裏込め注入もその一つである。シールド機のテール内でセグメントの組み立てが行なわれるので、必然的にセグメント外周と掘削された地山との間には間げきが残される。この間げきは放置しておけば時間と共に地山が塑性変形をし、周囲の地山にゆるみが生じ、ひいては地表面の沈下を発生させ、周囲の構造物に被害を与える。このためシールド機が推進されると直ちに上記のセグメント外周と地山の間の間げきは裏込め注入によって満たされる。一般に裏込め注入は次に示す段階によって施工される。

- (a) 豆砂利の吹き込みによる一次注入
- (b) モルタルによる二次注入
- (c) 一、二次注入で残された微小な空げきを閉塞する三次注入

上記の裏込めが完全に施工されれば、地山の変形の増加を阻止することができ、また漏水の防止にもなるが、現実では豆砂利の一次注入もモルタルの二次注入も共に注入率が悪い。このため地表面の沈下を生じたり覆工後の止水に多くの手間をかける場合が多々ある。最近では一次注入と二次注入を同時に、すなわち豆砂利をモルタルと混ぜコンクリートの形にして注入したり、豆砂利を用いずにモルタルのみを注入する方法もとられている。しかしこれにはモルタルがセグメ

ント背面とスキンプレートの間を通してシールド機内に流入するという問題がある。この外にモルタルは凝結するまでに時間がかかり、このため掘削後地圧の増加が急激に進む軟弱粘土層においては地山のゆるみを防ぐには十分でない。ソ連における例などにおいても豆砂利注入により地山の変形の増加を防ぐ方法の優秀なことが報告されており、豆砂利注入およびモルタルの二次注入を完全に実施することが望まれる。そこでいかなる方法および配合で裏込め注入を行なえば優秀な裏込めが施工できるかを研究中である。これには豆砂利の注入を完全にすることと、注入された豆砂利の空げきを完全にモルタルで満たし裏込めに強度を与えると同時に止水効果をあげることの二者につき解決せねばならないが、ここでは後者の裏込めモルタルについて研究したものを報告する。豆砂利の注入施工に関しては今後の課題として残っている。

裏込めモルタルの配合は各現場において独自に決めているようであるが、その相違は著しい。

	単位体積重量(t/m ³)	比重	空げき率(%)
豆砂利	1.57	2.66	41
砂	1.52	2.62	-

表--1

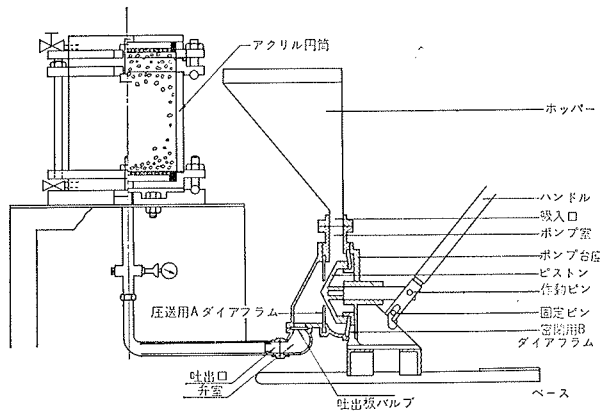
実験は二段階に分けて行なった、まず最初は今までの実施例などを参考にして、これまで現場で使用された配合のモルタルで、実際に注入可能か否かを調べ、これより砂セメント比、水セメント比の概要をつかん

だ、これを実験一とする。

次に第2段階として砂の最大粒径、および粒度を変化させて第一段階における実験よりも更に詳しく砂セメント比、水セメント比につき研究を進めた、これを実験一とする。

2. 実験装置

テストモールドとして内径15.1cm 高さ17.5cmの透明アクリル円筒を用いた。この中に裏込め用豆砂利を入れてセグメント背後に注入された豆砂利とみなし、このテストモールド中に下方からモルタルを圧入した。モルタルの圧入装置として実験一においては豆砂利を入れたと同じアクリル円筒にモルタルを入れ、

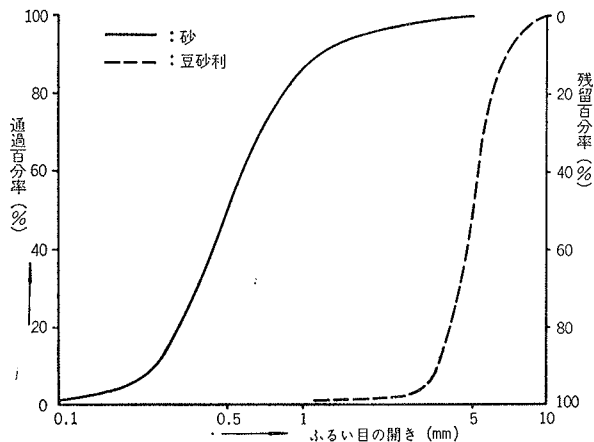


図一 モルタル注入実験装置

気密の蓋をした後圧搾空気を送ってモルタルを圧入する方法をとった。しかしこの方法では、モルタル中の水のみが先に圧送されパイプ中でつまり、成功しなかった。このため、手動モルタルポンプSD-27(日本産業機械製)を使用した。実験装置の詳細は図一に示す。

3. 使用材料

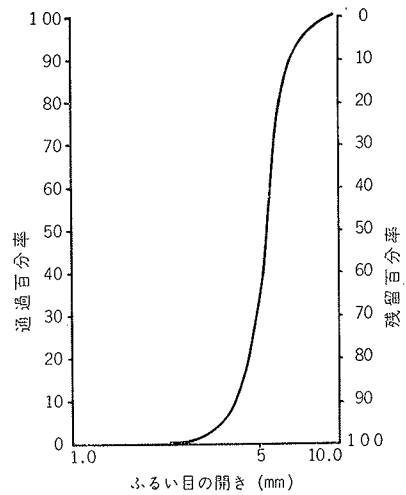
実験一—セメントは、秩父普通ポルトランドセメ



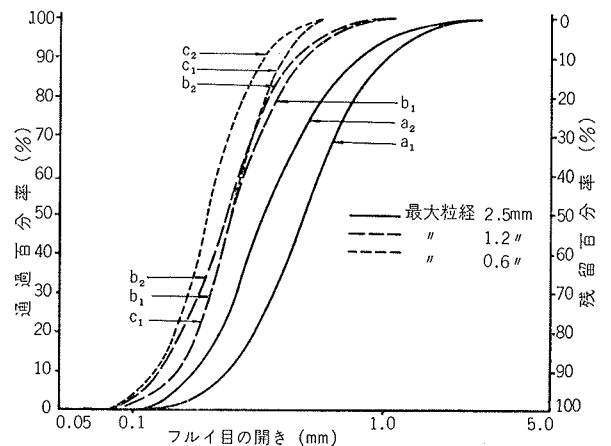
図二 豆砂利および砂の粒度曲線 (実験一)

ントとアサノフライアッシュを等量混ぜたものを使用し、砂は最大粒径2.5mm 粗粒率2.30のものを使用した。豆砂利は粒径2.5~10.0mmのものを使用した。砂および豆砂利の粒度分布その他は図一2、表一に示す通りである。

実験一—セメントは実験一と同様小野田普通ポルトランドセメントとアサノフライアッシュを等量混ぜたものを使用した。豆砂利は、実験一に用いたものと同じものであるが、粒度分布は図一3に示すもの



図三 豆砂利粒度分布 (実験一)



図四 使用砂の粒度分布 (実験一)

を用いた。砂は、砂の粒度と、注入率の関係を調べるため最大粒径2.5, 1.2, 0.6mmの3種類で、それぞれにつき細粒部分の多いものと少ないものを使用して比較した、すなわち6種類の砂を用いた。それぞれの粒度を図一4に示す。

4. 測定項目とその方法

モルタルの性質および、注入効果につき次に列挙す

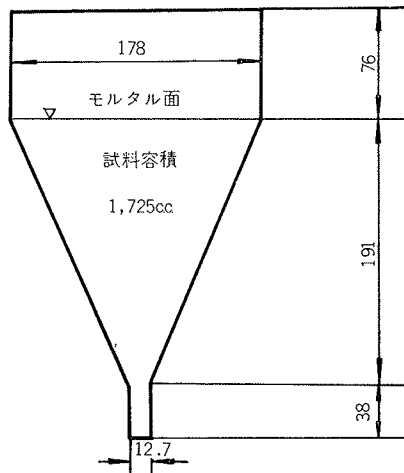


図-5 フローコーン

る測定を行なった。

(1) モルタルの流動性試験, モルタルの流動性は, 図-5 に示す試料容積 1,725cc の漏斗の先を手で押さえて蓋をし 1,725cc の面まで試料を満たし, 次に指を放して自由落下させこの時から連続しているモルタルが初めて途切れるまでの時間を秒で表わし, フロー値として測定した。

(2) モルタルのブリージング率, 容量50ccのメスシリンダーに試料のモルタルを 45 ± 1 cc まで満たし, この時の試料面を読みとって V_0 cc とする。この後, 15 分間隔でモルタル面を読みとり V_0 との差をブリージング量とする。ブリージング量が最大に達した時, また一定値に落着いた時ブリージング終了としてブリージング量 V cc とする。ブリージング率は次式で表わす。

$$\text{ブリージング率} = \frac{V}{V_0} \times 100 (\%)$$

(3) 注入圧, 注入効果, 注入圧はテストモルド下方の注入管に隔膜式圧力計を取り付けこれにより注入圧を測定した。注入効果はテストモルドに注入されたモルタル面の高さを測定しこれにより判定した。

5. 配合

モルタルの配合は, 前述のようにセメント(C):フライアッシュ(F)=1:1 に, 砂量(S)と水セメント比(W/C+F)を変化させた。実験-1ではW/C+Fを50, 65, 85%, S/C+Fを0~2.0まで変化させ, 混和剤も一部使用した。実験-2では, 実験-1の結果を考慮し S/C+Fを1~0.3, W/C+Fを50, 65%で行なった。

6. 実験結果とその考案

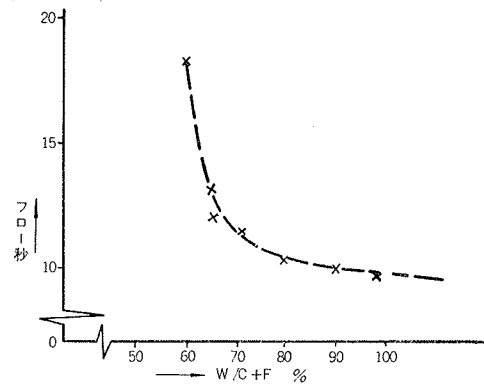


図-6 フロー値とW/C+F

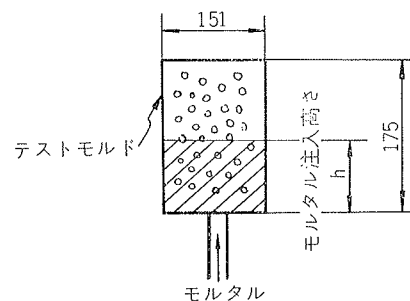


図-7

6.1. 実験-1

(1) 配合と注入効果 最初C:F:S=1:1:4(C+F:S=1:2)とし, 水セメント比を変化させた。W/C+Fを65%から100%まで変化させたがモルタルは豆砂利下面までくるところでつまり, 豆砂利空隙を満たすには至らなかった。なおフロー値と水セメント比との間には相関係が認められた。その関係は図-6に示す通りである。これを見ると S/C+F=2 ではW/C+F=65%を境としてフロー値が急変する。混和剤としてグラリオン(エアモルタル用混和剤)を試用したが, 注入に対して効果はなくモルタルは豆砂利中には注入されなかった。以上の結果 S/C+F=2 では砂量が多過ぎるものと判断し, 砂量を減らしてS/C+F=0より砂を漸増して実験を行なった。この時のS/C+Fとモルタル注入高さh(図-7参照)との関係を示すと図-8の如くなる。図-8をみると値にかなりばらつきが認められ同じ条件の下でも結果がかなり異なっている。しかし一般的には砂セメント比が0.5より大になると水セメント比の如何に拘らず, 注入高は小さくなりほとんど注入はみられない。

現場において採用されている配合にはセメント量より砂量の方が多い配合が多いがこうした配合では豆砂利の空隙をモルタルで満たすことは期待できないもの

と思われる。実験一の結果から判断すると、少くとも砂量はセメント量よりも少なくする必要がある。

(2) ブリージングと水セメント比、混和剤の関係、ブリージングはメスシリンダー法により測定した。ブ

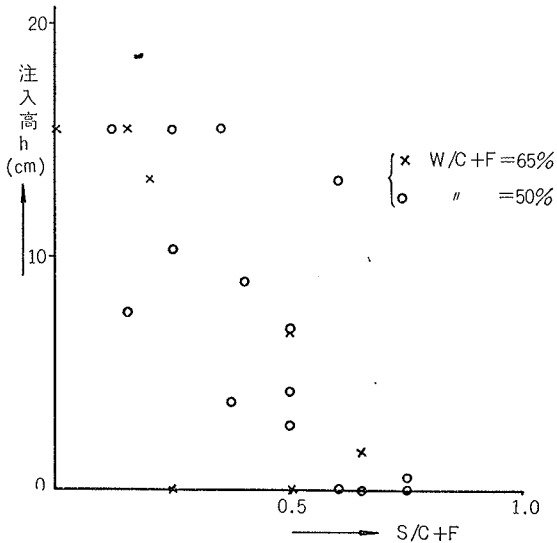


図-8 砂セメント比と注入高さ

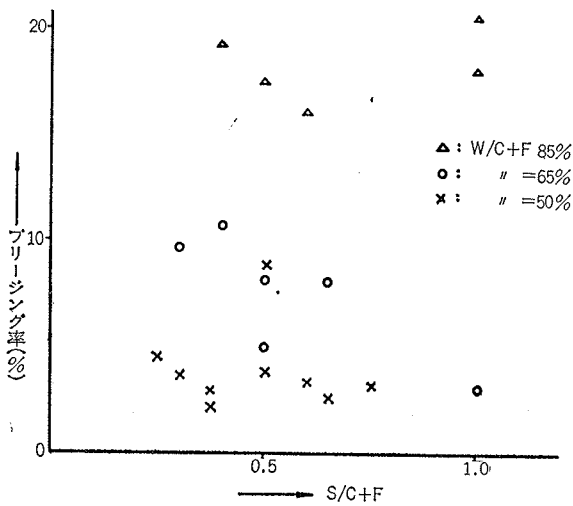


図-9 ブリージング率と S/C+F

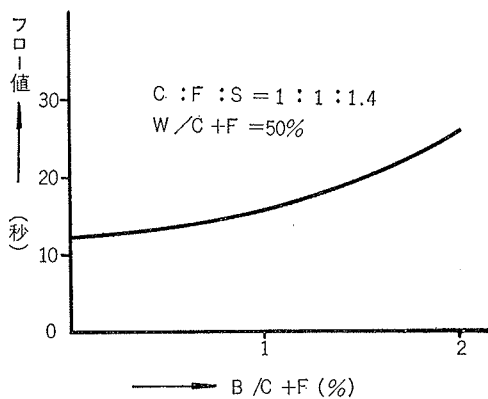


図-10 ベントナイトの混和率とフロー値

リージングが多いとモルタルポンプでモルタルを圧送する際材料分離を生ずる原因ともなり、ブリージングの多いものは裏込注入モルタルとして適当でない。実験に用いたモルタルのブリージング率を示すと図-9のごとくなる。水セメント比85%ではブリージング率が大きくなり不適當と思われる。ベントナイトを少量(C+Fの1~2%)入れるとブリージングはほとんど起こらなくなるがフロー値は非常に大となり流動性は悪くなる。ベントナイトを混ぜた時のフロー値を図-10に示す。なお配合はC:F:S=1:1:1.4でW/C+F=50%である。

(3) 混和剤と注入効果 混和剤として使用したものは前述のグラリオン49(ライオン油脂製)、ベントナイトの外に分散剤リグナル(神戸材料製)を使用した。グラリオン49はエアモルタル用の混和剤でモルタルの空気量が高くなり多量の砂を混入してもモルタルの流動性を低下させない性質がある。本実験では、水セメント比、砂量を同一にし、グラリオンを添加したものと、添加しないものについて比較を試みたが差異は認められなかった。リグナルについても同様の比較実験をしたが、これも差異はなかった。ベントナイトを混和剤として使用するとフロー値は大きくなる。しかし注入効果の点ではこれも変化がなかった。要するに砂量が少なく、フロー値も小で、流動性の高いモルタルでは混和剤の効果はあまり期待できない。

6.2. 実験-2

実験-1においては最大粒径2.5mmの砂1種類のみで最大砂率を求めたが、実験-2においては最大粒径2.5, 1.2, 0.6mmの砂を使用した。それぞれについて砂率と注入高さ(図-7参照)との関係を図-11に示す。この図において、W/C+F=50%の時についてみると最大粒径0.6, 2.5mmでは砂セメント比を0.5より大きくするとほとんど注入されない。一方最大粒径1.2mmの砂を用いた場合、砂セメント比1.0を境として、これより砂量が多くなると注入は難しくなっている。この結果から判断すると砂が単に細かければ注入が容易であるとは限らない。次にW/C+F=65%の時についてみると全体にW/C+F=50%の時より注入率は良くなっている。特に最大粒径0.6mmの注入率が良くなっている。データが若干少ないのでW/C+F=65%において砂の最大粒径は0.6mmと1.2mmのどちらが注入率に対してよいかの優劣はつけ難い。しかし実際現場で使用する場合を考えると最大粒径0.6mmの砂を入手する事はむずかしいものと考えられ、砂の最大粒径は1.2mmが適當と思われる。最大粒径2.5mmではW/C+F=50%の時も65%の時も他の粒径

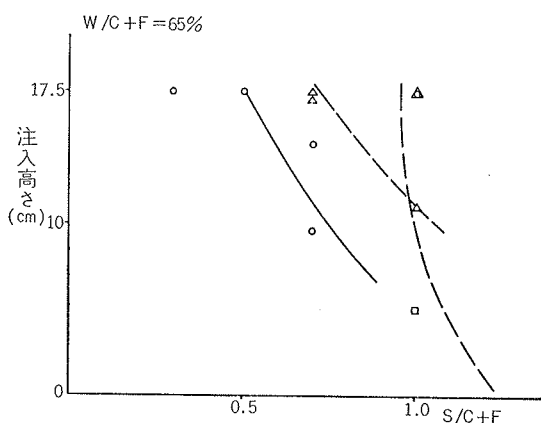
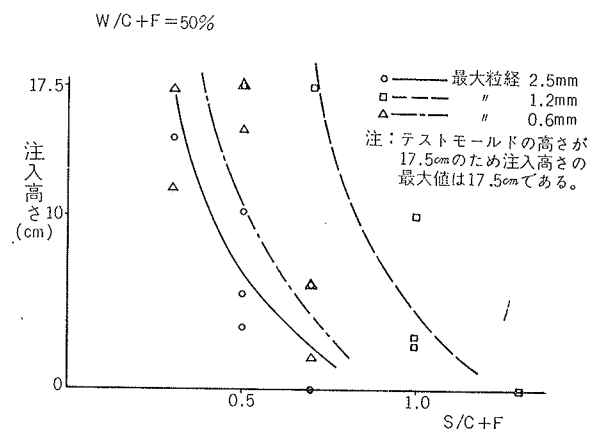


図-11 砂セメント比と注入高さ

の砂を使用した時より明らかに注入率は悪くなっている。最大粒径が同一で粒度の異なる砂相互の間には注入率に対する影響は表われなかった。

次にフロー値と注入率との関連の有無を調べるためフロー値を横軸に注入高さを縦軸にとりプロットしたのが図-12である。これを見るとフロー値と注入率の間には相関関係はないようである。つまりフロー値が大で流動性の低いモルタルであっても配合が適正であれば豆砂利空隙中に入り込むが、反対にフロー値の小さな流動性の高いモルタルであっても配合が適正でなければ豆砂利の空隙を満たすには至らない。ベントナイトを添加したような場合²⁾においては、モルタルがフローコーンより落下せず、フロー値の測定ができない状態になることがあるが、注入は容易に進む場合もある。故にフロー値のみによって注入モルタルの適否を判断することはできない。

次に豆砂利の粒度に関して若干考察してみる。一般に豆砂利は最大、最小粒径を決めて使用している。しかし実際にはモルタルの二次注入をする場合豆砂利の粒度分布もかなり重要なファクターとなるものと考えられる。アメリカにおける研究によると³⁾ 注入される材料とグラウト材との粒度に関し次の関係がある。グ

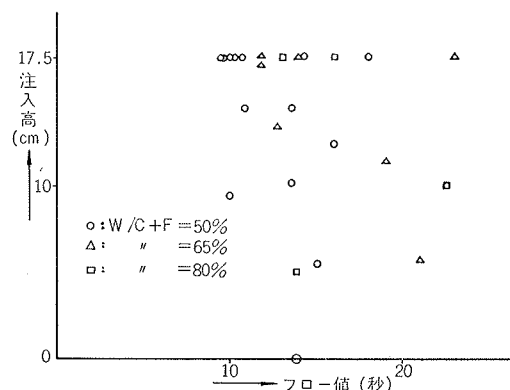


図-12 フロー値と注入高さ

ラウト材料の粒度曲線の D_{85} (85%通過粒径、以下これに準じる)は注入される材料の D_{15} の1/25以下でなければならない。たとえば、今回の実験-2についてみると豆砂利が被注入材であるから図-3の粒度曲線より、 $D_{15}=4.5\text{mm}$ であるからグラウト材の D_{85} は

$$D_{85} = 1/25 \times 4.5 = 0.18\text{mm}$$

以下でなければならないことになる。今最大粒径 1.2mm(図-4における b_1)の砂を使用し、C:F:S=1:1:1.4の時につき考えてみる。セメント、フライアッシュの粒径を0.088mm以下とすると、グラウト材の D_{85} は0.35mmとなる。先に計算した0.18mmよりは大きい。実験-2の結果では、上の配合でW/C+F=65%なら注入は完全であるが、50%にするとかろうじて注入される程度になる。なお注入圧は実験全体を通じ0.3~0.5 kg/cm^2 である。一度モルタルの注入が停止するとこれから注入圧を上昇させても注入は進行しない。故に裏込め注入における注入圧は注入効果に対しあまり大きな影響は及ぼさない。これに対し水セメント比W/C+Fは大きな影響を及ぼしW/C+Fが高い程注入率はよくなる。しかし反面W/C+Fが大きくなるとブリージング率が高くなる。

水セメント比が80%になるとブリージング率は15%以上になり止水効果の点で難点があるものと思われる。

次に豆砂利の粒径と砂の粒径につき検討を行なう。地盤注入に関する研究で、間隙幅とグラウト材の粒径とにつき次のものがある⁴⁾。間隙幅とグラウト材の粒径との比は少なくとも3以上でなければならない。また砂中への注入において、Alfred Machisは間隙径と注入材の粒径との比は少なくとも5であるとしている。今豆砂利の D_{15} を間隙径と仮定すると間隙径は4.5mmである。とするとグラウト材の最大粒径は上述の比が3ならば1.5mm、5ならば0.9mmとなる。実験-2については砂の最大粒径 1.2~0.6mmの時、注入率は良好であったから大体上記の説と一致するようである。

豆砂利の粒径と砂の最大粒径との関係は今後更に豆砂利を変化させて研究を進めなければ正確な結論は出ないが、大体上記のような関係でグラウト材の良否を決定されるものと考えられる。

7. 結 論

実験一1および実験一2を通じ、次のことが言える。

(1) シールド工事における二次注入用のモルタルは、砂量が少くともセメント量以下の配合でなければ、十分な注入はできない。砂量がセメント量の半分以下であれば、有効な裏込めの施工が期待できる。

(2) フロー値と注入効果の間にはあまり相関々係は認められない。フロー値が12~13秒以下の流動性の非常に良いモルタルではフロー値はあまり意味を持たない。

(3) グラウトモルタルとしては $W/C+F=65\%$ 程度が適当である。 $W/C+F=80\%$ 以上にするとブリージングが多く不適当と思われる。

(4) 実験一2に用いた豆砂利に対しては、砂の最大粒径は1.2mmが適当である。

(5) 砂の最大粒径は、豆砂利の粒度曲線の D_{15} の1/3以下程度でなければならぬのではないかと考えられる。

(6) 注入圧は、注入効果に対してはあまり影響せず、 $0.3\sim 0.5\text{ kg/cm}^2$ の低圧で注入の進行が停止すれば、これ以上注入圧を上昇しても、効果はない。

参考文献

- 1) 外尾善次郎 ソ連のシールド工法 産業図書
- 2) 鈴木公雄 大井町シールド裏込注入強度試験報告書 大林組技術研究所
- 3) K. Széchy The Art of Tunneling
- 4) Thomas B. Kennedy Pressure Grouting Fine Fissures Proc. A.S.C.E. 1958. Aug.