

土圧式シールドにおけるポリマス工法の開発

—— 添加材料の性状と掘削土砂の流動性・圧送性等の検証 ——

山下 幸夫 高野 金幸

概 要

シールド工法では、安全で合理的な施工のためにも掘削土を直接ポンプ圧送する技術の開発が強く求められている。いままでは「砂質土はポンプ圧送できないこと」がひとつの常識であった。流動性を増すためにベントナイトを注入すれば残土処理が大変であり、また気泡シールド工法も、気泡特有の弾性圧縮性があることからポンプ圧送には適用できなかった。そこでこの要求に応えるため、水溶性高分子を主成分とする添加材料を用いた新しいシールド工法を開発した。ポリマス工法と名付けたこの工法は、掘削残土の処理が容易であり、砂質土はもちろんのこと、粒度分布によってはかなりの礫分が混入していてもポンプ圧送が可能である。ここでは上記ポリマス工法に関する実験結果と、その有効性について述べた。

1. はじめに

土圧式シールド工法は、チャンバー内に添加材料を注入し、掘削土砂を止水性と塑性流動性を持った混合土に改良して土圧や水圧とバランスさせながら掘進する工法である。近年、この土圧式シールド工法で掘削土砂のポンプ圧送をしたいという要請が高い。特に、急曲線施工や急勾配がある場合、あるいはメタンガスが発生するような地盤においては、安全対策の面からもズリ鋼車にかけてポンプ圧送を採用することが強く求められている。

気泡シールド工法は広範囲の地盤に適用できる優れた工法であるが、添加する気泡の弾性収縮性からポンプ圧送には適さない。一方、泥土圧式としてベントナイトを添加すればポンプ圧送は可能であるが、この場合には掘削残土の処理が大変であり、また大量の材料を使用するために輸送費やプラント設備の面で問題があった。

そこでこれらの問題点を解決するため、水溶性高分子を主成分とする新たな添加材料を開発した。この添加材料を使用したシールド工法をポリマス (POLYMAS; Polymer Added Shield) 工法と呼ぶことにする。ここでは本添加材料の性能を評価・確認すること、および土砂と混合したときの性状やポンプ圧送性能などを把握することを目的に行った実験結果について述べる。併せて、ポリマス工法の適用が有効であることを示す。

2. 添加材料および混合土の性状把握実験

2.1 添加材料の性状把握

砂質土の流動性を高めるためには、ある程度の粘性を

もったゲル強度の高い添加材料を加える必要がある。これらの性状は、現場における貯留時の経時変化や使用時のポンプ輸送におけるせん断作用による材料変化が少なく安定していることが要求される。そこで添加材料の基本性状を把握する目的で、次の実験を行った。

(1) 長期安定性確認実験 作成した添加材料の経時的な粘性変化を27日間の長期にわたって測定した。粘性の測定は粘度計を用いて行った。

(2) ポンプ輸送実験 1インチ、2インチおよび3インチ管を200m配管して、輸送途中および出口にて試料を採取し、輸送距離毎の粘性低下を粘度計を用いて測定した。あわせて、配管内の圧力損失を計測した。

2.2 添加材料混合土の性状把握

現場にて添加材料を使用する際、切羽に対する適正な注入量やポンプ能力の設定に関わる土砂の圧送性能の把握は重要な問題である。また必要に応じてポンプ圧送土を地上において処理する必要がある。そこで添加材料をシールド掘削土に混合した時の状況を把握する目的で、次の実験を行った。

(1) 混合土の流動性確認実験 礫地盤を想定したコンクリート用細骨材 (最大粒径5mm, 礫分含有率22%) および砂地盤を想定した利根川砂に添加材料を混合した場合の流動性をスランプ試験によって求めた。Fig. 1に試料土の粒径加積曲線を示す。

(2) 混合土の攪拌負荷実験 チャンバー内での混合土の攪拌抵抗を調べるために、強制練りミキサーを用いて攪拌時電力負荷量を計測した。試料は利根川砂を用いた。

(3) 混合土のポンプ圧送実験 2インチおよび3インチ管を200m配管して、コンクリート用細骨材と添加材料を混合した土砂のポンプ圧送に伴う圧力損失を測定した。小口径管に対する最大粒径比を考慮すると、細骨材の最大粒径(5mm)はポンプ圧送としてはかなり困難な条件となる。

(4) 混合土の分解処理実験 混合土に含まれた添加材料を専用の分解処理剤を用いて処理する場合の効果調べた。試料は利根川砂に容積比で25~30%の添加材料を加えたものを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 添加材料の性状

3.1.1 粘性の経時変化 Fig.2に添加材料の粘性経時変化の測定結果を示す。溶液作成後2~3日間で粘性低下が幾分認められるものの、長期安定性に優れた添加材料であることがわかる。具体的には粘度保持率(時間経過後粘度/作成直後粘度)として、溶液作成後2~3日間で約85%、27日間経過した時点で約80%となった。ただ工事では通常、溶液作成後ただちに切羽に輸送するため、本実験のように長期間作り置きすることはなく、粘性低下は特に問題とならない程度である。

3.1.2 添加材料の輸送性 Fig.3に溶液をポンプ輸送した時の輸送距離毎の粘性変化を示す。輸送中にわずかながら粘性低下が生じるものの、安定した輸送ができていることがわかる。1インチ管で初期の加圧時に急激な程度低下が生じているが、これはポンプ能力に比べて管径が小さ過ぎ、せん断作用が大きくなったためと考えられる。2インチ管以上になると粘性低下は比較的少ない。

Fig.4に、輸送時の単位長さ当たり管内圧力損失の理論値と実測値との関係を示す。理論式としては添加材料を非ニュートン流体である擬塑性体として次式を適用した¹⁾。

$$\Delta P = \lambda \cdot (1/d) \cdot (1/2) \rho Va^2$$

ここに、 ΔP : 単位長さ当たりの管内圧力損失(Pa/m),

λ : 管の摩擦係数, d : 管径(m),

ρ : 密度(kg/m³), Va : 平均流速(m/s)

Fig.4より、理論式と計測結果が比較的よく一致することがわかる。なお1インチ管の結果が理論値と離れているが、これは上述と同様の理由から、ポンプ能力に見合った流速が確保できなかったためである。

3.2 添加材料混合土の流動性・圧送性

3.2.1 添加材料注入率とスランプ値との関係 Fig.5にコンクリート用細骨材に対する添加材料注入率とスランプ値との関係を示す。添加材料の粘性が高いほど、また添加材料の注入率が多いほど土砂の流動性の改善が図れることがわかる。ただしFig.6に示す利根川砂に対するスランプ値の結果から、試料によってはむやみに溶液の粘性を高くしても土砂の流動性は増加しないことがわかった。添加材料の安定性を考慮した場合、溶液の粘性

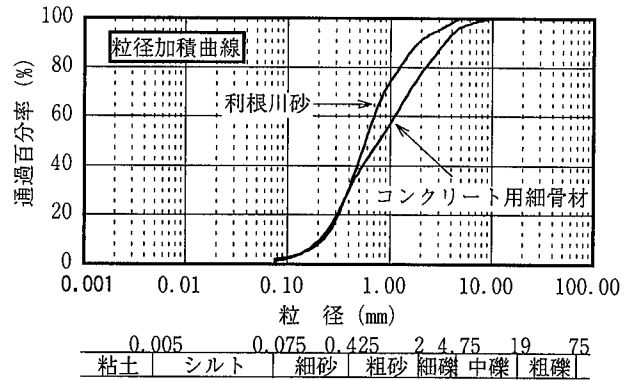


Fig.1 粒度分布
Grain Size Distributions of Soil Sample

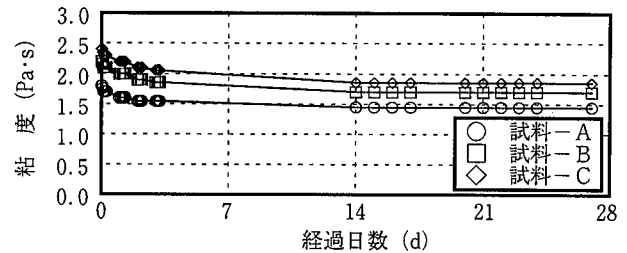


Fig.2 粘性の経時変化
Viscosity Drop in Long-term Experiments

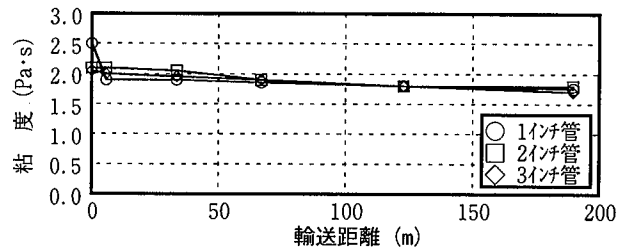


Fig.3 輸送距離毎の粘性変化
Viscosity Drop When Transport Polymer

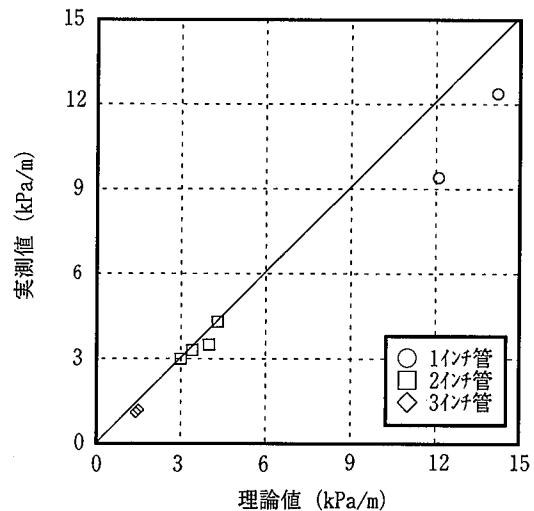


Fig.4 単位長さ当たり管内圧力損失(添加材料輸送)
Pressure Loss at Unit Length
When Transport Polymer

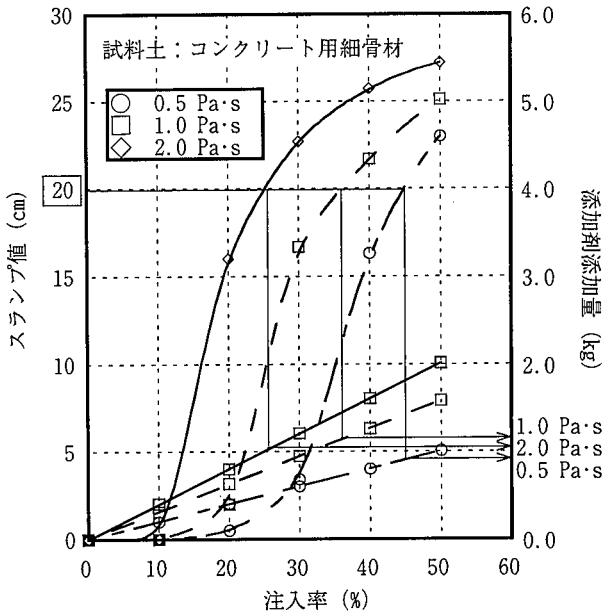


Fig. 5 添加材料注入率とスランプ値の関係
Relationship between Polymer Mixed Ratio and Slump Value

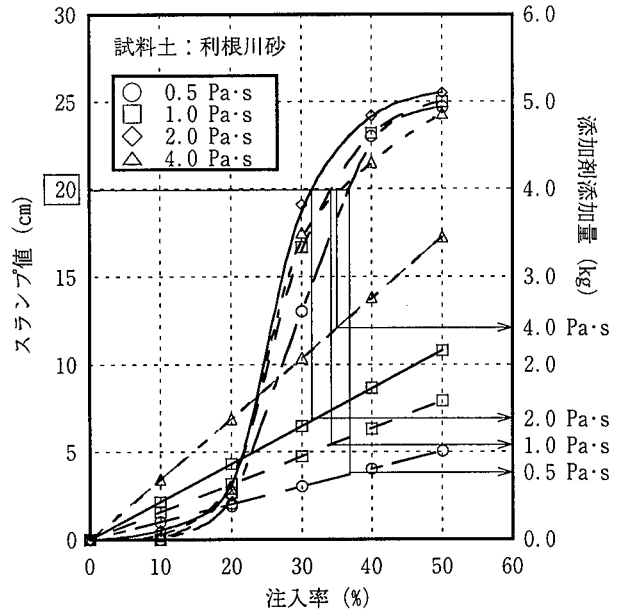


Fig. 6 添加材料注入率とスランプ値の関係
Relationship between Polymer Mixed Ratio and Slump Value

は2.0Pa・s程度が適当である。

また各粘度において経済性に着目した場合、圧送のために必要なスランプ値を20cmとすると、添加剤の総使用量はFig. 5においては1.0>2.0>0.5Pa・sとなり、Fig. 6においては4.0>2.0>1.0>0.5Pa・sの順に少なくなる。単純に経済性を追求すると0.5あるいは1.0Pa・s程度の粘性のものが有利となるが、粘性が低いほど材料分離が発生し、ポンプ圧送に適さなくなる。よって通常は粘性が2.0Pa・s程度の溶液を使用し、掘削土に対し体積比で30%前後注入すれば安全で十分な流動性が確保できる。

3.2.2 添加材料が攪拌負荷におよぼす影響 Fig. 7に添加材料注入率と攪拌負荷との関係を示す。最初土砂のみを徐々に投入し、シールドチャンバー内に土砂が切削され取込まれる状態を模擬した。その状態から添加材料を注入していくと、各粘度とも、注入率が15%までは特に効果はなく、20~30%で急激に攪拌負荷が低下し、その後30%以上では大きく変化しないことが判明した。上記の攪拌負荷の低下は実際のシールド機でカットトルクが小さくなることを示している。

3.2.3 混合土のポンプ圧送性能 Fig. 8に、土砂圧送時の単位長さ当たり管内圧力損失の理論値と実測値との関係を示す。理論式としてはコンクリートのポンプ圧送で実績のあるスランプに基づく次式を適用した²⁾。

$$\Delta P = (2/r) \cdot [K1 + K2(1 + t1/t2) \cdot V] \cdot \alpha$$

ここに、 ΔP : 単位長さ当たりの管内圧力損失

(kgf/cm²/m → 100kPa/m),

r : 管半径(m), $K1$: 粘着係数(kgf/cm²),

$K2$: 速度係数(kgf/cm²/m/s),

$t1/t2$: ポンプ停止/運転時間,

V : 平均流速(m/s), α : 圧力比

Fig. 8より、管内圧力損失の実測値は理論式とよく一

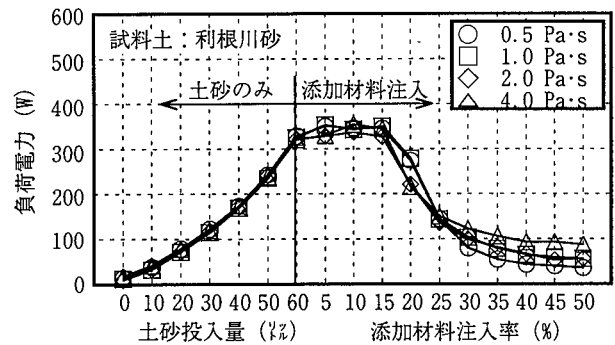


Fig. 7 添加材料注入率と負荷電力量の関係
Relationship between Polymer Mixed Ratio and Electric Power

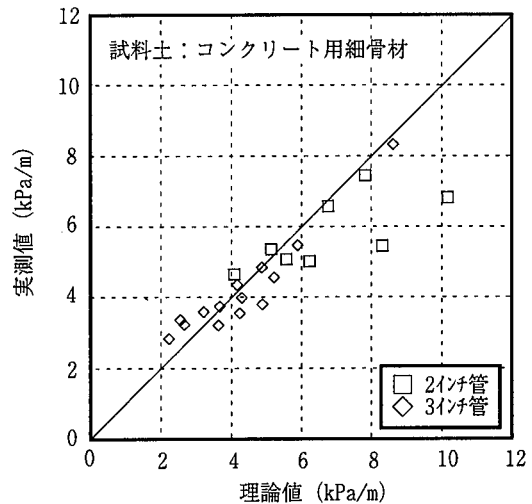


Fig. 8 単位長さ当たり管内圧力損失(混合土圧送)
Pressure Loss at Unit Length
When Transport Polymer Mixed Soils

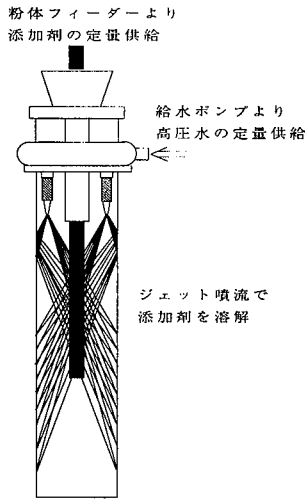


Fig.9 溶解装置概要
Profile of Water-jet Mixing System

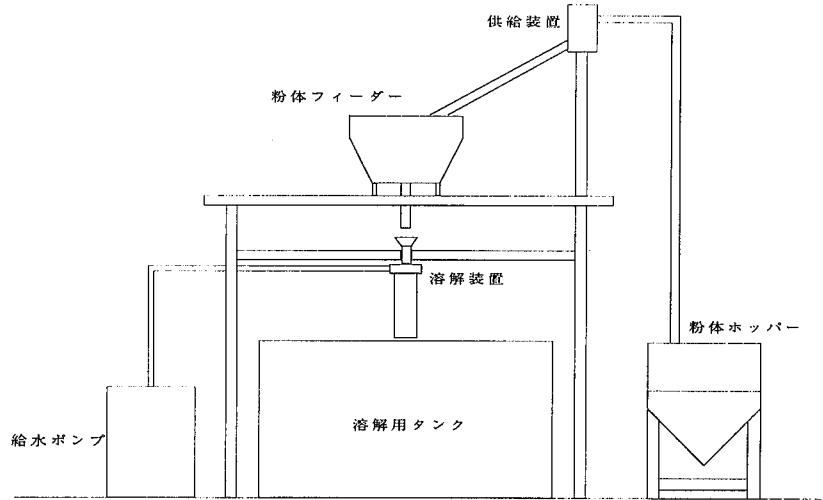


Fig.10 添加材料作成設備概要
An Example of Equipments for Work Site

致することがわかる。したがって、圧送条件が異なっても理論式から推定することが可能である。たとえば実際の工事では圧送配管は8～10インチ管が使用されることが多い。仮に10インチ管で1,000m土砂圧送する場合、シールド外径5.0m、掘進速度4cm/minに相当する圧送土量を確保することにすれば、全体の圧力損失は2.0MPa程度と推定される。

3.2.4 添加材料の分解処理性能 Table 1に分解処理結果を示す。土砂含水比、添加材料濃度および土砂への注入率などを変化させても分解処理時間に大差はなく、すみやかな分解処理が可能である。また分解後のスランプ値は0cmと添加材料注入による流動性は解消され、地山に近い状態にもどることがわかった。

4. 添加材料作成設備

これまでは添加材料および混合土の性状把握・確認等を行い、本工法が有効であることを示した。しかし工法として確立し現場へ適用していくためには、添加材料の機械的・連続的な作成設備が必要となる。以下に添加材料の作成設備について述べる。

ここで「添加材料」とは、粉体の添加剤を水溶液の状態にしたものをいう。一般に、粉体を水溶液にする場合は水に均一に溶けにくく、塊となることが多い。そこで独自の技術として均一な添加材料が作成できる溶解装置を開発した。Fig.9に示すように円筒ガイド内に給水ポンプにより定量の高圧ジェット水を噴射し、噴流内に定量の添加剤を投下することによって機械的な攪拌が行われ、連続的に均一な添加材料が作成される。

Fig.10は、この溶解装置を含めた添加材料作成設備の一例を示したものである。現場での使用を考慮して、高圧ジェット水や粉体の供給など、ほとんどの部分を自動運転にしている。

Table 1 分解処理結果
Results of Separation Polymer from Mixed Soils

実験ケース	I	II	III	IV
土砂含水比(%)	14.32	13.50	23.50	24.51
添加材料濃度(%)	0.6	0.6	0.6	0.7
添加材料注入率(%)	25	30	30	30
スランプ値(cm)	分解前	25↑	25↑	25↑
	分解後	0	0	0
分解処理時間 (min)	1'30"	1'20"	1'30"	1'20"

5. むすび

開発したポリマス工法用添加材料は粘性がきわめて安定しており、加圧輸送しても問題ないことが確認できた。また溶液輸送システムの設計を行うために必要な管内圧力損失の推定も、ポリマス溶液を非ニュートン流体である擬塑性流体とした理論式が適合することを確認した。

また添加材料混合時の流動性の改善も良好であり、シールドチャンバー内における攪拌負荷の低減効果も確認できた。さらに混合土のポンプ圧送性能も優れており、管内圧力損失の推定はコンクリートのポンプ圧送で実績のあるスランプに基づく理論式が適合することを確認した。添加材料の分解処理性能も優れており、混合土を地山に近い状態に戻すことが可能である。

ここで開発したポリマス工法はすでに三重県内のシールド工事に適用して順調な成果を上げている。現場への適用事例については次の機会に執筆することとしたい。

参考文献

- 1) 川崎種一：粘性液体パイプ輸送のレオロジー，NEW FOOD INDUSTRY, Vol.22, No.4～6別冊，(1980)
- 2) 森永 繁：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol.9, No.7，(1971.6)