論文　ポンプによる長距離圧送技術の開発

高山　俊一*1・江頭　智嘉*2・酒井　能具*3・湯　宜新*4

要旨：本実験では,ポンプ圧送による粘性試料の長距離圧送改善を行うため,管内での圧送試料とセメントが分離した状態で圧送するセメント注入装置（外周 1 型・外周 2 型・コア型注入管）を開発し,屋外圧送実験によりそれぞれの圧送性について検討した。その結果,「外周 2 型注入管」を用いた圧送方法は,管内圧力を著しく減少することがでるため,長距離圧送の一方向を示すものと考えられる。

キーワード：ポンパビリティー,圧力損失,管内圧力,粘性土

1.はじめに

外国との貿易を主産業としている我が国では,大型船の運航のために港湾の整備は常に行わなければならない。港湾工事では浚渫土が発生し,常に浚渫土の処理場の確保を考えていなければならない。最近,環境保全の立場から海岸での処理場・埋立地が陸地から 2～3km 離れているなど,土砂や浚渫土などのの捨て場所が採取地から遠くなる傾向にある。一方,土砂や浚渫土を埋立地に排出後は,可能な限り速く浚渫土を固化することが望まれる。そこで,浚渫土をポンプ圧送する場合,吐出後の埋立地である筒先にセメントを混合するより,根元であるポンプ車の近くでセメントを混合する方法が,施工の省力化および迅速性の両面から優れているものと考えた。しかしながら,圧送前にセメント混合を行うことは、迅速性の面から実際不可能である。したがって,著者らはポンプ圧送の途中にセメントミルクを注入する 3 種類の注入管を開発・製作し、それぞれの圧送性について検討した。この注入管を使用すれば,土砂の長距離圧送を可能とするものと考える。

2.実験概要

2.1 使用材料

圧送に使用した材料は,有明海北部の河川域で採取された有明粘土（液性限界 W_L85%,塑性限界 W_P30%,塑性指数 Ip55%,粘土分 51.0%）約 30m^3 を使用し,加水調整によって含水比が約 100%および 90%の 2 種類とした。**表－1** に示すように,含水比が 104.0% である試料を軟練土,91.7%の試料を中練土と呼ぶことにする。有明粘土は 75 μm の通過百分率が 85.57%もあり,さらに 0.00139mm の通過百分率が 22.56%に達し,微粒子が多い試料である。液性限界と塑性指数の関数で,有明粘土の液性限界が B-line(W_L=50%)より高いことから,圧縮性が大きい高塑性の粘土に分類される。

表－1　圧送試料の性質

	軟練土	中練土
密度(g/cm^3)	2.703	2.703
含水比(%)	104.0	91.7
湿潤密度(g/cm^3)	1.416	1.421
ベーンせん断強度(kN/m^2)	0.66	0.52
スランプ(cm)	21.5	19.0

*1 九州共立大学　工学部土木工学科教授　工博（正会員）
*2 九州共立大学　工学部　研究生　工修
*3 関門港湾建設（株）技術開発部　部長
*4 関門港湾建設（株）技術開発部　部長　工博

セメントは白色セメント(太平洋セメント製,密度 3.15g/cm³）を使用した。白色セメントを用いた理由は,注入管から注入したセメントミルクが管内にどのような状況で圧送されているかを確認するためである。セメントミルクの水セメント比は 100%とし,注入量は圧送試料に対して 0.066m³/m³とした。

2.2 実験方法

実験は長さ 90m の配管で行い,**図－1** 配管状況を示す。曲がり部の管長は 1.2m（90 度のエルボ管,0.6m×2 本）である。鋼管径は 5B 管（125A,外径 133mm,厚さ 3.2mm）を使用した。図中の番号の位置にフラッシュダイヤフラム型圧力変換器（東京測器研究所製）を設置し,デジタル動ひずみ計（東京測器研究所製,DRA－101C）に接続し,ひずみ波形を測定した。ポンプ車（三菱 KC-FV519PV）は最大吐出量 100m³/h,ピストン型（シリンダーの最大ストローク 2050mm）を使用した。図中のミキサー車はトラックアジデータ車である。実験での設定吐出量は 15m³/h（目標管内流速 0.3m/s）および 25m³/h（目標管内流速 0.5m/s）の 2 種類とした。**表－2** に実験方法を示す。実験は 3 日間で行い,1 日目は予備実験とし,水および軟練土（有明海浚渫土,含水比 104%）を圧送した。2 日目はセメントミルク注入管の選定（外周 1 型・外周 2,コア型）に関する実験を行った。3 日目は同表に示すように軟練土および中練土（含水比 91.7%）を用い,土単味,セメントミルクを注入した試料および土とセメントミルクを混合したものの管内圧力を測定した。混合した試料の管内圧力が,セメントミルクを注入したそれとどの程度変化するのかを調べた。表中のプレミックス土とは,土試料とセメントミルクが混合して排出された後,ミキサー車で十分に混合したものである。

2.3 注入管の形状と注入方法

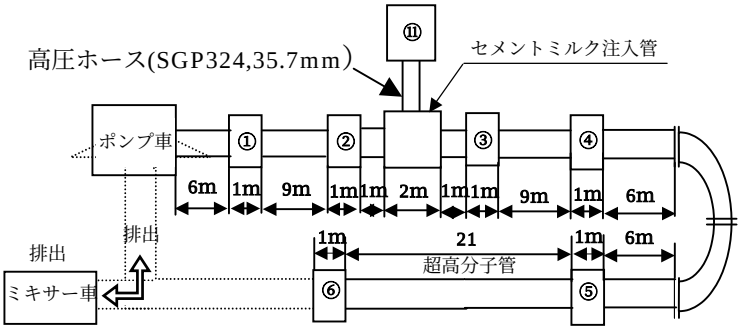
セメントミルク注入管（**図－1**）をポンプ車から 18m の位置に取り付けた。新注入装置の計画において,圧送管内でのセメントミルク注入パターンを何処にすべきかの検討を実施した。圧送管内での土試料とセメントミルクの挙動を予め予測することは困難であるため,効果が期待される 3 種類の注入パターンを選定して各々に対する注入管を製作し,圧送実験の結果に基づいて最良のものを選択することとした。**図－2** にセメントミルク注入管の 3 種類の概略を示す。次に注入管について説明する。

(A)外周 1 型注入管･･･注入したセメントミルクが圧送管底壁に沿って流れるように注入管を製造したものである。圧送時に土試料とセメントミルクの混合が発生しなければ,圧送抵抗は土のみと同等,もしくは近い値と推定される。

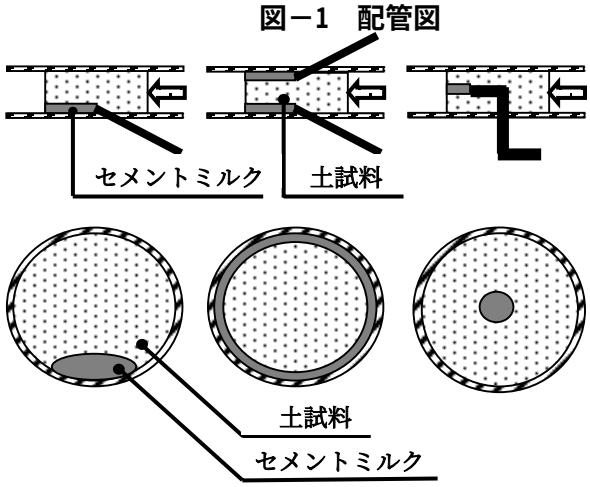
(B)外周 2 型注入管･･･注入したセメントミルク

表－2　実験方法

実験日	圧送試料	セメント注入管	配管長さ(m)	目的
1日	軟練土	無し	180	水、軟練土
2日	軟練土+ミルク注入	外周1	90	セメント注入管の選定
		外周2		
		コア型		
3日	軟練土	外周2	90	圧送試料･ミックス混合土の管内圧力･圧力損失の測定
	同上+ミルク注入			
	同上+プレミックス土			
	中練土			
	同上+ミルク注入			
	同上+プレミックス土			



図－1　配管図



(A)外周 1 型注入　(B)外周 2 型注入　(C)コア型注入管

図－2　注入管の形状と注入パターン

が円周管壁に沿って流れ,圧送試料が管と接触しないようにしたものである。したがって,管内壁の表面にはセメントミルクのみが接触するため,圧送抵抗はセメントミルクのみと同等と推定される。

(C)コア型注入管･･･注入したセメントミルクが圧送試料の中心に注入されるので,管内壁には土のみが接触し,圧送抵抗は土試料のみと同等と推定される。

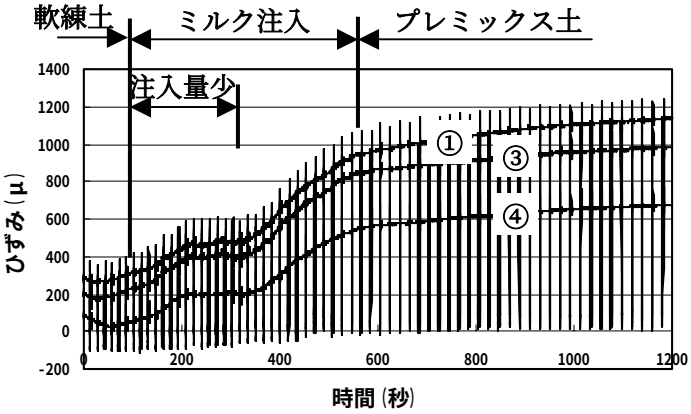
3.実験結果および考察

3.1 圧力計のひずみと時間の関係

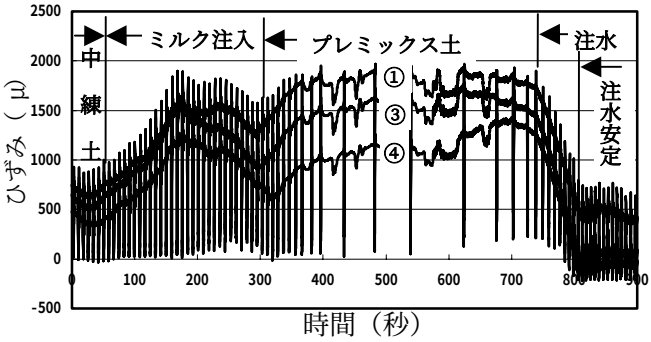
図－3,**図－4** に圧力変換器による波形ひずみと時間の関係を示す。両図とも**表－2** の 3 日目の実験結果である。**図－3** は軟練土および吐出量 31㎥/h,**図－4** は中練土および吐出量 30～33㎥/h の測定結果である。図中の①,③および④の番号は**図－1** の圧力変換器の番号を示し,図中に管内の圧送試料名を示している。両図によると,軟練土および中練土にセメントミルクを注入するとひずみが増加し,さらにミキサー車で土とセメントを混合攪拌してプレミックス土とし,それを再度圧送するとさらにひずみが増加した。**図－3** の 50～300 秒の区間ではセメントミルク注入量が少ないと判断したため,セメント注入量を増加して実験を行った。**図－4** の 400～700 秒の区間ではポンプによる圧送ができなくなったため,ピストン 1 回が 50～60 秒（0～300 秒でのピストンは 1 回が 8.3 秒であった）と圧送速度を減速している。これは,セメントミルクを注入することにより粘性がさらに大きくなり,圧送抵抗が増加したことを示している（プレミックス土の圧送ではセメントミルク注入は行っていない）。また,同図の 740 秒附近から外周 2 型注入管による注水を行うと,ひずみが急激に減少していることが分かる。

3.2 注入管の種類と管内圧力の関係

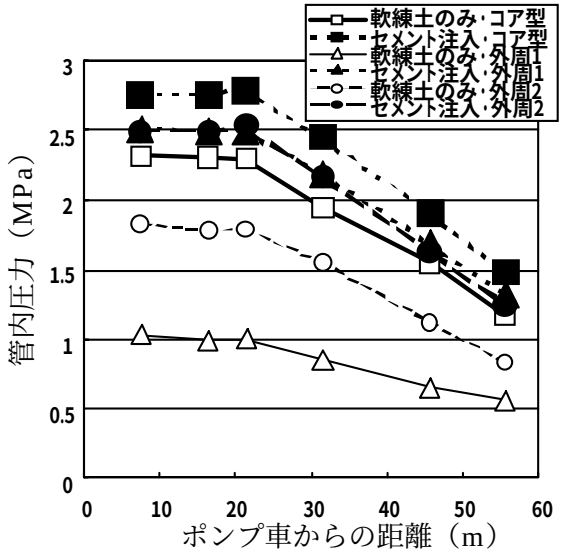
図－2 に示す 3 種類の注入管と管内圧力の関係を**図－5** に示す。管の内部中央に注入口を有する「コア型注入管」を使用時の管内圧力は,軟練土のみの場合でもポンプ車から約 20m までが約 2.3MPa にも達している。これに対し,外周 1 型注入管の場合が約 1MPa,外周 2 型注入管の場合が約 1.8MPa であるので,コア型注入管での管内圧力は他の注入管と比較して 0.5～1.3MPa ほど大きくなることが分かる。注入管を管の中央に設置することは,断面積が変化しないように造っているが(平面図では菱形状になっており,中央に注入管が入る断面積だけ円管を拡大して



図－3　圧力計のひずみと時間の関係（軟練土）



図－4　圧力計のひずみと時間の関係（中練土）



図－5　距離と管内圧力（注入管の比較，2 日目,吐出量 26～27㎥/h）

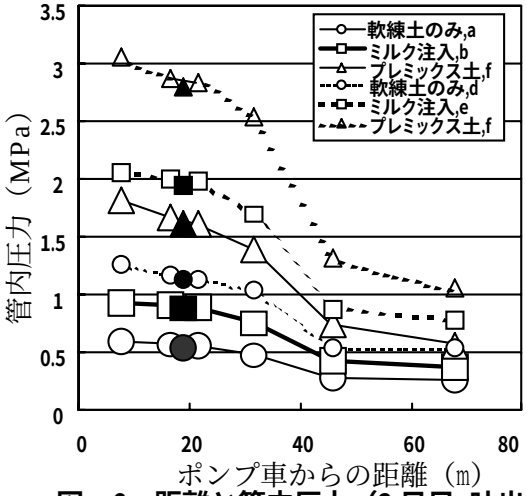
作製した),管の中央に障害物があることになるので、コア型注入管の場合には管内圧力が増大したものと考えられる。したがって,セメント注入方法としてコア型注入管は適してないものと判断した。そこで「外周 1 型」と「外周 2 型」について検討すると,セメントミルクを注入した場合の管内圧力は,両者とも約 2.5MPa であった。外周 2 型注入管を利用した後,吐出口での圧送試料を観察した。実際,**写真－1** に見られるように、セメントミルクが管内管壁に沿って流動し,試料を完全に覆っていることが明らかに認められた。管から排出後の土試料とセメントミルクとの混合の程度を考慮した場合,外周 2 型のように底部にセメントミルクが混合される場合に比べ,土試料の周囲全面にセメントミルクが塗布されていれば,吐出後に土試料とセメントミルクとの混合は行われやすいものと考える。そのため,外周 1 型と 2 型を比較した場合,「外周 2 型注入管」の方が優れているものと判断した。したがって,以下の実験は全て外周 2 型注入管を使用して行った。

3.3 管内圧力とポンプ車からの距離の関係

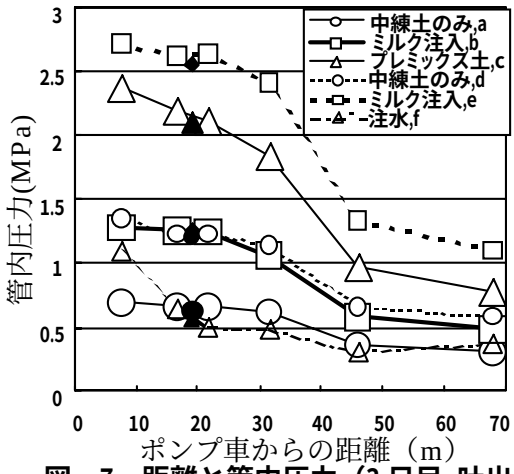
図－6 および**図－7** に管内圧力と圧力変換器のポンプ車からの距離の関係を示す。図中の黒印はセメント注入管（注入口より 2m の位置）での管内圧力を示す。両図とも,最初に①軟練土または中練土のみを圧送した後,②注入口からセメントミルクを注入して圧送,さらに③セメントミルクと土をミキサー車にて混合攪拌したプレミックス土を再度圧送する,3 項目の実験を連続して行ったものである。また、図中の実線（a,b および c）は設定吐出量 15m³/h（目標流速 0.3m/s）の場合であり,点線（d,e および f）は設定吐出量 25m³/h（目標流速 0.5m/s）の結果である。

両図ともポンプ車から圧力変換器の設置位置が遠くなるほど管内圧力は小さくなっている。また,ポンプ車からの距離が 30m～45m の区間で管内圧力が急激に減少している。**図－1** の配管図によると,ポンプ車から 38m 以降に 90 度の曲がり管が 2 個設置されている。すなわち,曲がり管の前の圧力が大きくなり,曲がり管直後の圧力が低下していることを示している。両図を比較すると、**図－6** の軟練土を圧送した場合より,**図－7** の中練土を圧送した方が管内圧力が全体的に大きくなっていることが分かる。また,管内流速の違いによって比較すると,両図とも目標

写真－1 「外周 2 型」を利用した吐出口での試料状況



図－6 距離と管内圧力（3 日目,吐出量 11～14m³/h,a,b,c・吐出量 19～28m³/h,d,e,f）

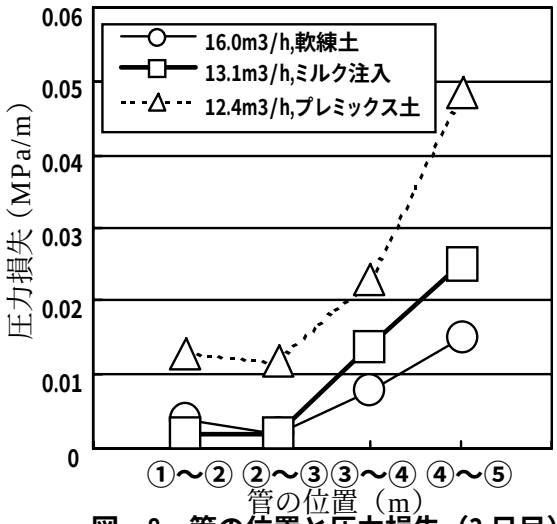


図－7 距離と管内圧力（3 日目,吐出量 14m³/h,a,b,c・吐出量 27～30m³/h,d,e,f）

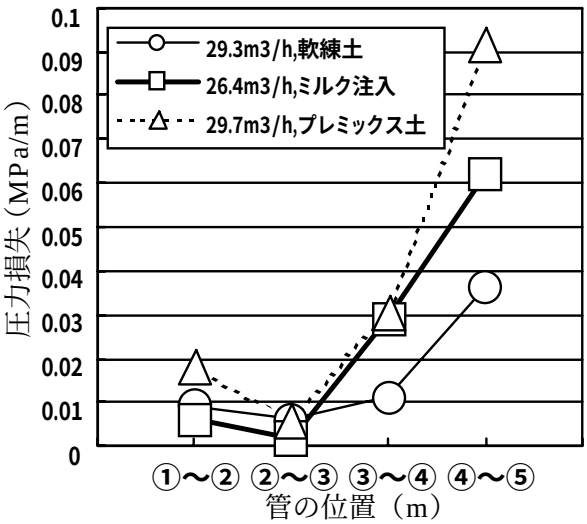
流速が 0.5m/s の管内圧力が全体的に大きくなっている。**図－6** のプレミックス土をみると,目標流速 0.3m/s の場合の管内圧力（c）が 1.7～0.6MPa であるのに対し,0.5m/s の f のそれは 2.7～1.2MPa であり,約 1MPa も増加している。このように,粘性に富んだ試料の場合,圧送速度の大きさによって管内圧力が大きく左右されるものと考えられる。このことは,高強度コンクリートのポンプ圧送実験の結果[1)]と類似した傾向を示している。**図－7** では,プレミックス土圧送時に注水を行った結果(f)を示している。注水前のｅのセメントミルク注入した場合の曲がり管までの管内圧力は,2.7～2.4MPa であったが,セメントミルク注入管から水のみの注水を行った後の圧力(f)は,1～0.5MPa と著しく減少している。外周 2 型注入管を利用して水のみの注水を行うと,圧送試料と管内壁の間に水膜ができ,試料が著しく圧送しやすくなったためと考えられる。すなわち,「外周 2 型」による水の注入方法は管内圧力が著しく減少し,粘性の大きな中練土の場合でも圧送効率が著しく改善されるものと考えられる。

3.4 管の位置と圧力損失の関係

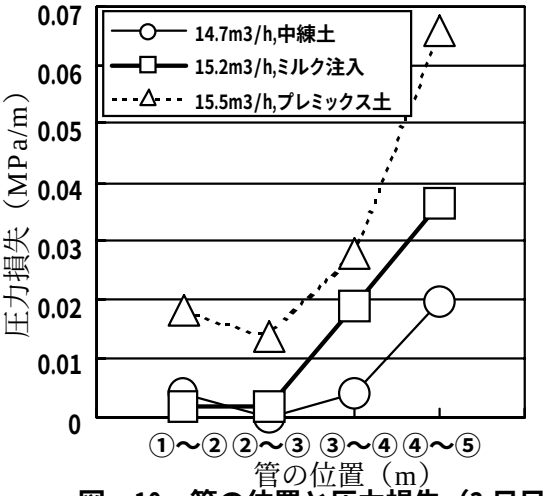
図－8～図－11 に管の種類と圧力の関係を示す。**図－8,9** は軟練土を,**図－10,11** は中練土を使用した圧力損失と管の位置の関係である。図中の横軸は**図－1** の配管図での圧力変換器の番号を示している。図中（**図－8,9,10**）のミルク注入時の圧力損失は,いずれの場合でもプレミックス土での値に比べ 0.02～0.03MPa/m ほど小さくなっている。これは,試料とセメントを混合した状態（プレミックス土）を圧送する場合に比べ,本研究のように外周 2 型注入管により,セメントミルクを途中で注入して圧送した方が長距離圧送を可能とするものと考える。試料とセメントを混合すれば当然のように流動性が減少



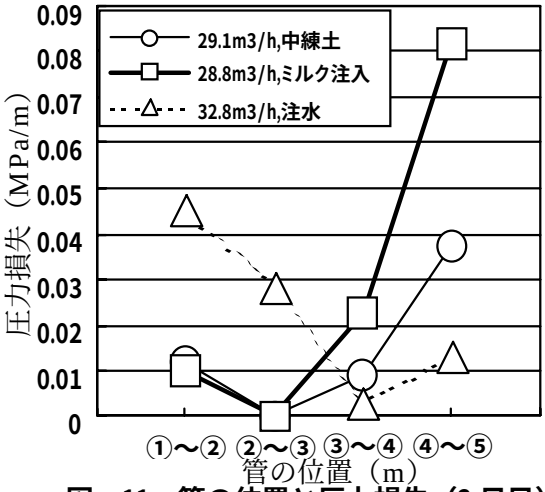
図－8　管の位置と圧力損失（3 日目）



図－9　管の位置と圧力損失（3 日目）



図－10　管の位置と圧力損失（3 日目）



図－11　管の位置と圧力損失（3 日目）

するものと考えられる。したがって,圧送試料は流動性を保持した状態で圧送し,根元近くで注入管を利用してセメントミルクを注入すれば,圧力損失は比較的小さな状態であり,筒先では,試料とセメントミルクがある程度混合されることが予想できるものと考える。また,**図－11** に示されているように,管内での閉塞が予想される場合,注入管を利用して注水を行うと圧力損失が著しく低下し,ポンパビリティーが向上するものと考える。

一般に普通コンクリート（W/C52～57%、スランプ 10～15cm）の水平管における圧力損失は 0.01～0.02MPa/m（吐出量 20～30m^3/hr）である。また,粘性に富んだ高強度コンクリート（W/C28～30%）の圧力損失 [2)3)]は 0.04～0.05MPa/m である。これに対し,直管の位置③～④の圧力損失が最も大きいものとして,0.02～0.03MPa/m を示した。このことから判断すると,今回使用した軟練土および中練土は,普通コンクリートよりは圧送がやや困難であるが,高強度コンクリートよりは圧送しやすいものであると考えられる。また,曲がり管での圧力損失は直管と比較して 2～3 倍も大きくなっており,プレミックス土では特に大きいことが分かる。有明粘土のように粘性を有する試料を圧送する場合,曲がり管を使用すると長距離圧送が不可能となることが十分に予測される。現場での配管は可能な限り曲がり管を使用しないことが望ましいものと考えられる。

4. まとめ

本実験では,ポンプ圧送による粘性土の長距離圧送改善を行うため,圧送管内での軟弱土とセメントが分離した状態で圧送するセメント注入装置（外周 1 型・外周 2 型・コア型注入管）を開発し,屋外圧送実験によりそれぞれの圧送性について検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) セメントミルク注入管としては、「外周 2 型」注入管が圧送性に優れていることが分かった。理由としては,管内圧力が小さいこと,セメントミルクが排出土の周囲に塗布（**写真－1**）されており,排出後の混合効果が優れていることなどが挙げられる。

(2) 土試料からセメントミルク注入,さらにプレミックス土の各圧送にしたがって管内圧力が増加し,圧送性が低下することが明らかとなった。したがって,「外周 2 型」注入管を使用し,土とセメントミルクを同時に圧送すれば、試料と管内壁との摩擦がセメントミルクによって小さくなり,十分に長距離圧送が可能であると考えられる。

(3)「外周 2 型」注入管による「注水」を行うと,管内圧力,または圧力損失が著しく小さくなった。したがって,圧送時に管内閉塞が予想されるような事態になった場合,「外周 2 型注入管」を用いて注水を行うことで管の閉塞が防止できるものと考えられる。

(4)今回使用した土試料は,管内圧力および圧力損失から判断し,普通コンクリート（W/C52～57%）よりは圧送しにくいが,高強度コンクリート（W/C28～30%）よりは圧送しやすいものと考えられる。

参考文献

1)高山俊一,出光隆,村田佳斎：高強度コンクリートのポンパビリティーに関する基礎的研究,セメント技術年報,第 36 巻,pp.382-385,1982.12

2)高山俊一,渡辺明,宮崎太,松竹和久：硬練りコンクリートのポンパビリティー評価試験法に関する実験的研究,コンクリート工学年次講演論文集,Vol.10,No.12,pp.231-236,1988.6

3)高山俊一,渡辺明,出光隆：ポンパビリティー評価法に関する実験的研究,セメント・コンクリート論文集,No.44,pp.618-623,1990.12