

18. 土圧式シールドトンネルの土砂圧送実験とその一考察

建設省：杉山 篤・*茂木 正晴

1. まえがき

近年、我が国における都市部及びその周辺部の基盤整備は、地下空間を利用した地下鉄、上下水道等、各種施設があり、これまで様々な掘削工法により地下空間が構築されてきた。今後、大断面、大深度地下空間を利用した地下道路、地下河川等の構築が予想されるため、掘削技術の向上が益々必要となってきた。

都市部における地下空間の構築は、シールドトンネル工法により施工を行うのが一般的である。工法の種類としては、泥水加圧式シールド工法、土圧式シールド工法に大別される。各シールド工法により掘削排出された土砂を運搬する技術については、泥水輸送方式、土砂圧送方式、ズリトロ方式、ベルトコンベヤ方式等の搬出方法が利用されている。

掘削土運搬技術は、掘削技術のようなシールド機、セグメント組立等の個々の要素技術と比較してみると、障害となる要素が現在までに少ないことから、今まで土砂運搬技術に関する要素技術の提案が重要視されていないきらいがある。しかし、土砂圧送のような連続輸送方式が効率的で経済的にもメリットがあり、現在、多くの現場で採用されているが、経験者による技術的な圧送土砂性状の把握が行われており、現場によっては閉塞等による作業障害が発生するケースもある。

そこで、安全かつ確実、合理的に搬出する技術を検討していくため、今回土砂圧送における土砂性状と管内圧送抵抗の関係等について要素的な実験を行い、土砂圧送方式における最適土砂性状の範囲を把握した。今回、それらの実験結果について報告する。

尚、本実験については、建設省において昭和62年度～平成3年度までに総合開発プロジェクトの一環として「地下空間の利用技術の開発」を研究した内容に基づく結果である。

2. 土砂圧送実験の目的

現在、土圧式シールド工法での掘削土搬出方法として、施工性・安全性・坑内の作業環境・基地の騒音等から土砂圧送方式が採用されている。しかし、土砂圧送における土砂性状については、施工実績等から土砂の粒度分布、含水比、液性限界、スランプ等の値で表されており、それには確固とした根拠がなく、現場土質に応じその都度数値を決めている。そこで、土砂圧送における最適土砂性状の範囲についてを圧送実験により明確にすることを目的とした。

3. 実験方法

3.1 実験手順

本研究における圧送実験の内容は、図-1に示すように実験フローに基づき実験を行った。

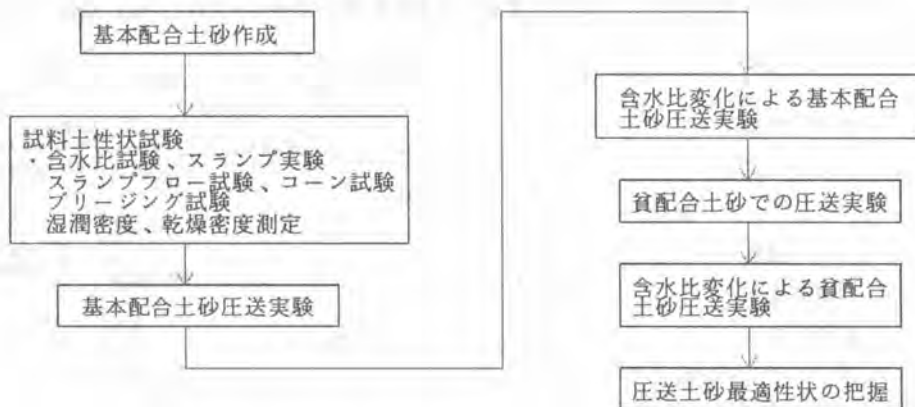


図-1 土砂圧送実験フロー図

3.2 実験内容

3.2.1 基本配合試料土作成

実験により圧送性を確認する上で基本配合試料土の作成が必要であると考えられる。そこで、実験で基準となる基本配合としては「泥土加圧シールド工法協会」の作泥土材算出法で示されている作泥土材の必要・不要の境界線の粒度分布を基本配合とし、実験を行った。尚、本配合試料土の粒度分布を表-1に示す。

表-1 基本配合試料土の粒度分布

名称	粘土	シルト	砂		礫
粒度 (mm)	0~0.005	0.005~0.074	0.074~0.25	0.25~2	2~20
分布 (%)	10	20	10	30	30

3.2.2 含水比変化による試料土作成

各成分を混合し基本配合試料土を作成し、含水比を約3%づつ増加させた試料土を7ケース作成した。尚、含水比の増加は、試料土が分離を起こすまでの範囲とした。また、貧配合についても同様に作成を行った。(実験結果表-3を参照)

3.2.3 貧配合土砂の作成

基本配合のバインダ分(シルト、粘土)を減らすことによって圧送しにくい試料土を作成し、含水比の増減による圧送可能領域の抽出を行った。バインダ分については、基本配合30%に対して20%、15%のバインダ分による圧送性の確認を行った。尚、15%以下については圧送不可能であった。

表-2 貧配合土砂の粒度分布

名称	粘土	シルト	砂		礫
粒度 (mm)	0~0.005	0.005~0.074	0.074~0.25	0.25~2	2~20
分布 (%)	20		20	30	30
	15		25	30	30

3. 2. 4 試料土性状試験（基礎実験）

性状試験は基本配合試料土、含水比を変化させた試料土でそれぞれ行った。また、性状試験は以下について行った。

- ・含水比試験
- ・スランプ試験
- ・スランプフロー試験
- ・コーン試験
- ・湿潤密度
- ・乾燥密度
- ・ブリージング試験

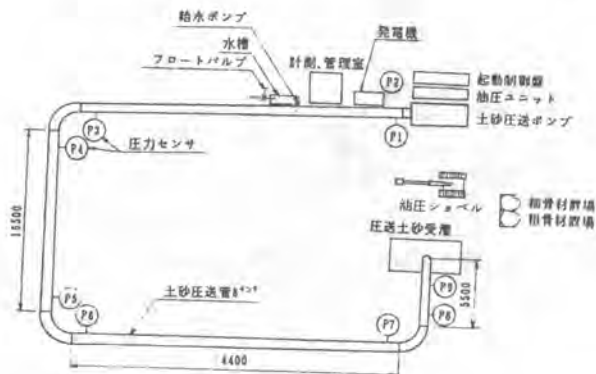


図-2 土砂圧送実験設備全体

3. 2. 5 本実験

基礎実験で作成した試料土をベースにフィールド（図-2 参照）で同様に試料土を作成し、実際にグラベルポンプ（特殊二重シリンダ式、最大吐出量 $20\text{m}^3/\text{h}$ 、最大吐出力 $44\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）により土砂圧送管（管径200mm）に土砂を圧送し、圧送性の確認を行った。本実験は、基本試料土で行い含水比を変化させることにより圧送管内圧力を図-2 に示すように圧力検出器9箇所によって変化を計測し、圧送性を確認すると同時に圧送後の土砂性状の確認を行った。

また、基本配合からバインド分を減らした試料土についても同様に含水比を変化させた際の圧送管内圧力を計測し圧送範囲の確認を行った。

4. 実験結果及び結論

今回、この実験では、圧送土砂の基本配合を土圧式シールド工法における添加材の必要・不必要の境界線としており、土質の範囲を限定し実験を行った。その結果として、各試料土の含水比変化に応じた圧送管内圧力値の推移を図-3 に示す。グラフだけによる判断では含水比が増加するほど圧力値が低下してことから、含水比を増すことによって圧送効率がよいと判断されるが、試料NO. 7, A5, A6, B4の圧送土砂は成分が沈降し、分離してしまうため効率の面から必ずしも良いとはいえない。含水比の少ない試料土については、圧送抵抗が著しく大きくなるため圧送管内での閉塞及びポンプへの負荷が増大するため圧送に適しているといえない。（表-3 参照）

圧送可能領域については、表-3 の太枠のような範囲となる。圧送不可能な範囲については土砂配合に関係するが含水比が低い場合については圧送抵抗の増大により圧送不可能となると考えられる。

また、含水比の高いものについては配合されている際、砂分が分離するため水分のみが圧送されるため土砂そのものの圧送が不可能となると考えられる。尚、表-3 における圧送圧力は、土砂がポンプより押し出された際に生ずる圧力である。

表-3 土砂圧送実験結果

圧送土砂種類	試料 NO	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	スランプ (cm)	圧力 P 1 (kgf/cm ²)	圧力 P 8 (kgf/cm ²)	圧送可否
基本配合 粒度分布 礫 30% 砂 40% シルト 30% 粘土	1	22.4	2.008	1.622	6.5	27.8	2.2	否(抵抗大)
	2	23.9	1.952	1.575	7.3	18.3	2.1	可
	3	24.5	1.945	1.562	9.5	13.3	2.4	〃
	4	26.5	1.972	1.559	16.0			〃
	5	28.1	1.915	1.495	20.0	8.5	1.4	〃
	6	32.3	1.890	1.429	23.5	5.8	1.3	〃
	7	58.2	1.640	1.037	24.0	2.5	0.6	否(分離)
貧配合(A) 粒度分布 礫 30% 砂 50% シルト 20% 粘土	A1	21.1	2.012	1.661	2.0	29.4	2.8	否(抵抗大)
	A2	23.0	2.018	1.641	8.0	16.5	2.0	可
	A3	24.4	1.986	1.596	11.0	12.5	2.1	〃
	A4	25.4	2.016	1.608	14.0	12.6	1.7	〃
	A5	29.2	1.945	1.505	22.5	6.7	1.6	否(分離)
	A6	28.9	1.998	1.550	24.5	5.2	1.2	〃(〃)
貧配合(B) 粒度分布 礫 30% 砂 55% シルト 15% 粘土	B1	19.0	2.050	1.723	0.5	33.3	3.0	否(抵抗大)
	B2	19.7	2.049	1.712	2.5	20.9	2.1	可
	B3	21.6	2.008	1.651	5.5	13.7	1.9	〃
	B4	23.8	2.004	1.619	21.5	9.2	1.5	否(分離)

* P9については土砂吐出口であるため圧力が著しく低下しているため表にはP8の計測結果を記載した。

5. あとがき

土砂圧送実験で対象とした土砂性状については「泥土加圧シールド工法協会」の「作泥土材算出法」における添加材が必要・不必要の境界付近の土砂を基本配合として実験を進めており、実現場における様々な土砂性状を対象に実験を行っていないため、今回の実験を踏まえて、今後、様々な土砂性状に対して同様な実験を行い土砂圧送におけるデータを蓄積し、現場での掘削土搬出技術に寄与したいと考えている。

実現場での土砂圧送を想定し土木研究所構内にて行った今回の土砂圧送実験結果について、今後施工されるシールド現場での掘削土搬出に参考となれば幸いである。

また、土砂圧送実験及び本論文作成において(財)先端建設技術センター及び佐藤工業(株)、(株)鴻池組、西松建設(株)、東洋建設(株)、(株)大本組に御協力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

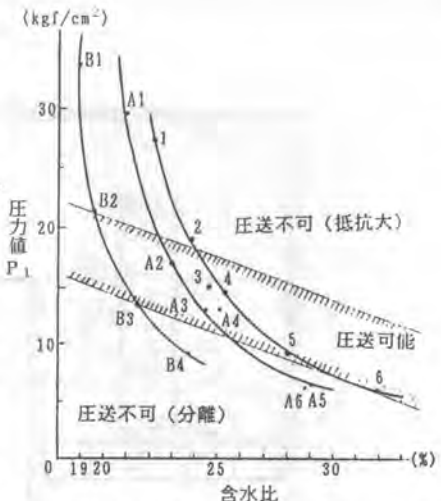


図-3 含水比変化による圧送管内圧力値の推移 (表示圧力値=P1, 圧力センサの計測値)