

泥水シールド工法における大径れき処理輸送システムの開発

齋藤二郎 羽生田吉也
藤原紀夫 吉岡尚也

Development of Large-Sized Gravel Transport System for Slurry Shield Tunneling Method

Jiro Saito Yoshinari Hanyuda
Toshio Fujiwara Hisaya Yoshioka

Abstract

Transporting large-sized gravel particles is the most important problem during slurry shield excavation in gravelly ground. The "Large-Sized Gravel Transport System" devised to eliminate this problem contains a rotary gravel crusher installed midway inside the discharge pipe to crush large-sized gravel in water without removing from the pipe making it possible for slurry transport to be carried out.

In these experiments, three kinds of gravel were crushed in a simplified version of a slurry shield system, and measurements of pressure and flow in the pipe and electric power consumption of the crusher were made. Good results were obtained with no blockage by gravel at the crusher and no hindrance to slurry transport by pipe. Consequently, the assurance was gained that this system would be quite practicable for handling and transporting large-sized gravel in slurry shield tunneling.

概要

れき地盤での泥水シールド工法は、大径れきの処理搬出方法が最も重要な問題になる。この問題を解決するために考案した「大径れき処理輸送システム」は、排泥管の途中にロータリー式れき破碎機を組込んで、大径れきを管の外に取り出すことなく水中で破碎し、スラリー輸送しようとするものである。

実験は、泥水シールドのシステムを単純化した装置を用いて、3種類のれき（1号碎石、割栗石、現地発生れき）を破碎し、合せて管内の圧力や流量、破碎機の消費電力などの測定を行なった。その結果、破碎機でのれきの閉塞、あるいは排泥管によるスラリー輸送等にも何ら支障がないという好結果を得て、泥水シールドの大径れき処理システムとして、十分使用できることを確信した。

1. はじめに

泥水シールド工法は、i) 従来の圧気式シールドにおいて最も恐ろしい噴発の危険はまったくなく、作業員は大気圧のもとで健康的にして安全な作業をすることができる。ii) 圧気式では不可能な高水圧下の深いシールドが可能であるなどの利点があるため、実用化の歴史が浅いにもかかわらず、今やシールド工法の主流になりつつある。

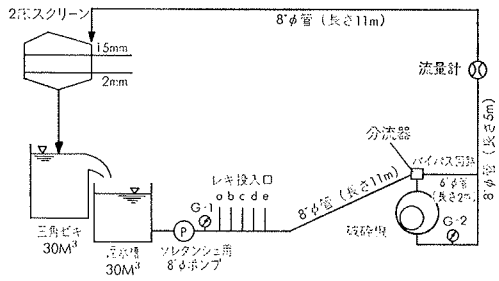
しかし、泥水シールド工法におけるいまだ未解決な問題は数多く残っている。すなわち、i) テールシールド、ii) 切羽の安定、iii) 泥水処理の方法、iv) 掘削土量の管理方法、v) れき地盤でのずり搬出方法などである。こ

れらの問題点については、各所においても研究中である。以下に述べる「大径れき処理輸送システム」は、れき地盤でよく使われている従来の「れき除去装置」とはちがったれきの処理方法である。

2. 実験装置

実験装置のフロー図を図-1に示す。送泥水槽→送泥ポンプ→れき投入装置→分流器→れき破碎機→流量計→2床スクリーン→三角ぜき→送泥水槽の閉回路である。

図-1の装置で、とくに重要な部分をしめているれき破碎機は図-2のような形をしている。このれき破碎機の形式は水中ロータリー式で、仕様はドラムが



図一 水中れき破碎実験フロー図

750φ×600mm, 電動機が45KW-4P, ロータ回転が115rpmのものである。また, 実験に用いた主な機器はつぎのようなものである。

- 1) 水槽 (30M³); 送泥用
- 2) 水槽 (30M³); 3角ぜき付き
- 3) 水中ポンプ
- 4) ソレタンシュ用バイブレックス 2床スクリーン (CIS58 用)
- 5) ソレタンシュ用 200φ; 吸上ポンプ
- 6) 水中れき破碎機; ロータリー式
- 7) れき投入装置 (高さ 50cm, 8"φ のガス管で上下にスリースバルブを付けたもの 5本1組)
- 8) ガス管 (8"φ と 6"φ)
- 9) 耐圧ゴムホース (8"φ)



図二 れき破碎機

3. 実験方法

実験は, ケース I ~ III の 3 段階に分けて実施した。実験に使用した (破碎用) 材料は, i) 1号碎石 (60~80mm), ii) 割栗石 (100~150mm), iii) 現地発生

れきの 3 種類である。以下に各ケースごとの実験方法の概要について述べる。

*ケース I : 空中における破碎機の能力

れき破碎機を地上に設置して, 配管をしなない状態でれきを直接投入し, れきが破碎される時間を測定して破碎能力を調べようとするものである。同時に, 破碎機の消費電力や破碎されたれきの粒度も調べた。実験のサブケースや測定項目, 測定機器については, 以後のケースも含めて表一のとおりである。

*ケース II : 清水循環中におけるれき破碎実験

前述した実験装置で清水を循環させておき, れき投入装置より種々のれきを投入して破碎機の中に送り込み, スラリー輸送の途中で実際に破碎できるかどうかを調べようとするものである。

れきの投入方法は, あらかじめれきの投入装置の上のバルブを開いてれきを詰めてこの上のバルブを閉めた状態にしておく。つぎに, れきの投入は実験のサブケースにしたがって下のバルブを開いて循環水の中に一度落とし込む。

*ケース III : 泥水循環中におけるれきの破碎実験

ケース II とほぼ同じであるが, 循環させる水が泥水であるところが異なる。このケースが実際の泥水シールド工法に最も近い状態になっている。

泥水を作るには, ベントナイトミキサーを用いずに清水を循環させている状態で, 送水水槽の中にベントナイトを投げ込む方法をとった。使用したベントナイト泥水の濃度は 3% である。

以上の実験で数量としてデータを取れるものには, i) れきの粒度分布 (JIS規格による粒度分析), ii) 管内流量 (3角ぜきと電磁流量計による), iii) 管内圧力 (圧力計 G-1, G-2 (図一参照)), iv) 破碎機の消費電力, v) 吸上ポンプの消費電力, vi) 破碎機の騒音などがあ

	名称および方法	実験サブケース	測定項目	測定機器
ケース I	空中における破碎機の能力	1. 1号0.5m ³ を投入 2. 割栗0.5m ³ を投入 3. 1号+割栗0.5m ³ を投入	1. 破碎時間 2. 投入前のれきの写真 3. 破碎後 " " 4. クラッシャーの消費電力	1. カメラ 2. 写真用木製枠(0.5×0.5 m) 3. ストップウォッチ 4. 電力積算計, 電流計
ケース II	清水循環中におけるれき破碎実験	1. 投入口 1 本より 1 号投入 2. " 2 " " 3. " 5 " " 4. 投入口 1 本より 割栗投入 5. " 2 " " 6. " 5 " " 7. 投入口 1 本 (1 号) } 投入 " 1 本 (割栗) } 8. 投入口 2 本 (割栗) } 投入 " 3 本 (1 号) } 9. 投入口 5 本より 発生れき投入	1. 2. 同上 3. 4. 5. ポンプの消費電力 6. 管内の圧力 7. 管内の流量 8. 粒度分析 (サブケース 3, 6, 9)	1. 2. 同上 3. 4. 5. 圧力計 (G-1, G-2). 6. 電磁流量計, 三角ぜき 7. 台ばかり
ケース III	泥水循環中におけるれき破碎実験	1. 投入口 5 本より 1 号投入 2. " 発生れき投入	同上	同上

表一 水中れき破碎実験のケース一覧表

る。計測に用いた主な計器は下表のとうりである。

使用計器	仕様
圧力計	G-1; 5kg/cm ² 用, G-2; 2kg/cm ² 用
圧力検出器**	新興通信製PR-10B ひずみ型ゲージ
電磁流量計*	横河製6150(0~10m ³ /min用)
直角三角ゼキ	高さ50cm
破碎機電流計*	リケンデンシ製SPG5P
電力計*	横河製3005
騒音計	リオン自記騒音計

注) 表中の*印はペン書き
オシロに接続,
**印はデジタル
グラフに接続

つぎに、この実験に使用したれきの強度について述べる。実験に使用れきの強度を調べるためにつぎのような試験を行なった。

- i) プロトジャコノフ試験
- ii) 一軸圧縮試験
- iii) ショア一硬度試験

得られた結果は表一2のようになる。表より、ショ

試験項目 れきの種類	一軸圧縮強度	プロトジャコ ノフ係数	ショア一硬度
現地発生れき	1032 kg/cm ²	8.91	100
1号砕石	1053 "	9.01	81
割栗石	1119 "	11.80	63

表一2 破碎に使用したれきの強度試験結果

ア一硬度が60以上あること、あるいはプロトジャコノフ係数が10前後あることなどから、いずれのれきも“硬い岩石”の分類に属していると言える。したがって、これらのれきを問題なく破碎できれば、れき地盤で発生する大半のれきは、この「大径れき処理輸送システム」で処理が可能になる。

表一1のケースにしたがって行なった実験の結果とそれに対する考案を次章で述べよう。

4. 実験結果と考察

*ケース I について

表一1のサブケースにしたがって、れきを直接投入してみたが、いずれの場合も破碎できた。排出されたれきが、どの程度に破碎されているかを知るのに粒度分析を行なってみた。その結果50mm径以上のものは全くなく、15~30mmのものが50%前後を占めていた。また、破碎機の消費電流も測定してみた。測定の詳しいデータは後述するが、負荷時の消費電流は無負荷時の2~3倍は必要のようである。

破碎中の騒音も一応気がかりになったので測定してみた(表一3参照)。この程度の騒音なら、あまり気にならない騒音と言えよう。

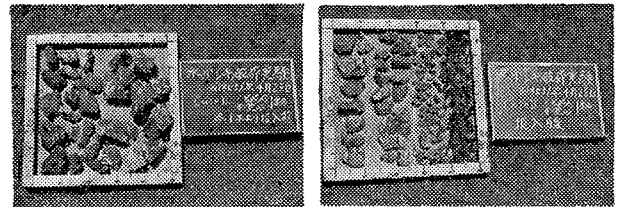
測定距離	無負荷時	負荷時
0 m	80ホーン	85ホーン
5 m	60 "	65 "

表一3 破碎機の騒音

*ケース II について

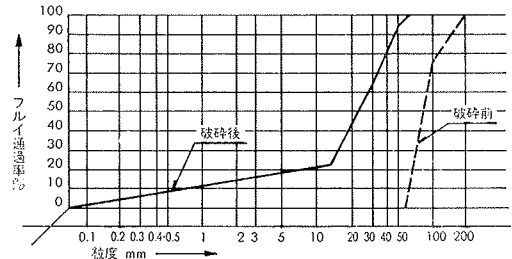
実験のサブケースごとの結果は、後述の一覧表のとおりである。一覧表の中のケースII-5,1のときのみ、動力を伝達させるVベルトがゆるみ過ぎて、破碎機の回転が止まり閉塞を起こした。しかし、これ以外の場合の破碎はすべて可能であった。

破碎されたれきの粒度は、粒度分析の結果50mm径以下が90%以上を占めている。破碎機の消費電流は、ケースIの場合と同じように、負荷時は無負荷時の2~3倍を要している。また、管内を流れる流量は三角ゼキと電磁流量計の2つで測定した。その結果、常時の流量は両者ともよく似た値(6.7m³/min前後)を示した。このことから、管内を流れる流速は約3.6m/secである。以下に実測した一例を挙げてみる。



図一3 投入前のれきの大 きさ (ケースII-8) 図一4 投入後のれきの大 きさ (ケースII-8)

粒度	試 料		破 碎 製 品	
	重量(kg)	%	重量(kg)	%
80~60	60	75		
200~100	20	25		
50~			4.26	5.8
50~30			23.14	31.3
30~15			30.0	40.7
15~0			16.4	22.2
合 計			73.8	100



図一5 投入後のれきの粒度分析 (ケースII-8)

まず、図一3は表一1の実験ケースII-8の場合の投入前のれきの大 きさを示す写真である。図からわかるように、100~150mm径のれきばかりである。このようなれきを5本の投入口から、30秒間隔で1本ずつ投入していくと、投入後排出されたれきは、図一4のように破碎されているのがわかる。排出されたれきを粒度分析してみると、図一5のようになる。6"φ管でスラリー輸送するのに最も心配される50mm径以上のれきは、投入された全れきのわずか5.8%しか占めてい

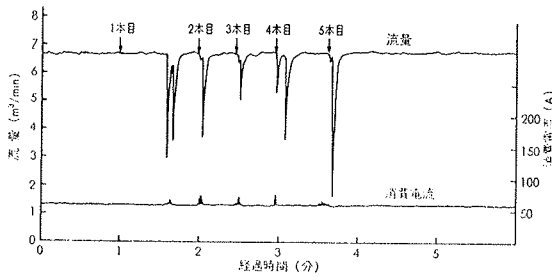


図-6 電磁流量計による管内流量と破碎機の消費電流の変化(ケースII-9)

ないことが、図-5からわかる。ここで、とくに6"φ管と限定したのは泥水シールドの排泥管には6"φ管が使用されることが多いからである。

つぎの図-6は表-1の実験ケースII-9の場合の、電磁流量計による管内流量と破碎機の消費電流の経時変化を示したものである。図中で1~5本目と書いてあるところが、れきを投入したときの時間にあたる。左側の縦軸が管内流量を示し、右側の縦軸が消費電流を示している。常時における管内流量は6.7m³/min(このときの三角ぜきによる流量は6.6m³/min)であるが、ある瞬間に脈流のような現象が記録の中に現われている。一方、破碎機の消費電流は無負荷時で60A、負荷時でもわずか75Aである。これは破碎に使用した現地発生れきの粒径が、たまたま小さかったからである。

*ケースIIIについて

循環させている水がベントナイト泥水に変わっただけで、得られた結果はケースIIとほとんど同じである。

以上の実験結果をまとめると表-4のようになる。

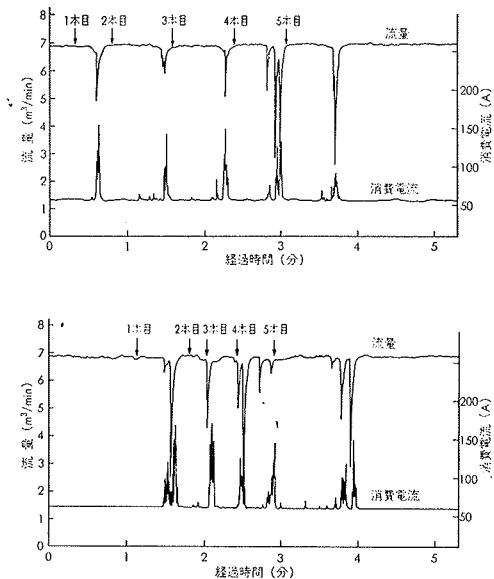


図-7(A, B) 電磁流量計による管内の流量の変化

実験の種類	れきの種類	投入量(kg)	閉鎖百分率(%)	クラッシャー電流(A)		流量(m³/min)		ポンプの電流(A)	分表の巻数	管内圧(kg/cm²)	
				平均	最大	平均	最大			G-1	G-2
ケースI-1	1号砕石	100	100	56	80						
・-2	副産石	75	100	56	150						
・-3	1号と副産	75	100	56	120						
ケースII-1	1号砕石	28	95	65	145	6.6	6.7	2.0	105	閉	0.9 0.65
・-2	・	56	95	65	145	6.6	6.7	1.0	105	閉	0.91 0.65
・-3	・	125	93	60	148	6.6	6.7	0.0	104	閉	0.95 0.6
・-4	副産石	20	97	62	140	6.85	6.75	0.0	106	閉	0.95 0.65
・-5,1	・	40	—	60	145	6.85	6.7	1.8	106	閉	0.97 0.65
・-5,2	・	40	95	65	215	6.85	6.7	3.3	106	閉	0.95 0.65
・-6,1	・	93	96	62	215	7.15	7.0	1.0	106	半閉	0.91 0.65
・-6,2	・	81	94	60	273	7.15	7.05	2.5	106	半閉	0.91 0.65
・-7	1号と副産	26	93	62	185	6.75	6.7	1.4	105.5	閉	0.92 0.65
・-8	・	80	94	62	182	6.85	6.6	1.6	105	閉	0.98 0.62
・-9	現地発生れき	150	100	60	75	6.85	6.7	1.6	106	閉	0.92 0.65
ケースIII-1	1号砕石	100	94	60	185	6.6	6.7	0.8		閉	0.95 0.65
・-2	現地発生れき	150	100	60	65	6.6	6.7	1.7		閉	0.95 0.67

表-4 実験結果の一覧表

表から、つぎのようなことが言える。i) 投入後排出されたれきの粒度は50mm径以下のものが、全体の95%前後を占めている。ii) 破碎機の負荷時の消費電流は無負荷時の2~3倍の電流が必要のようである。iii) 管内を流れる常時の流量は6.7~6.8m³/minで、この値は三角ぜき、電磁流量計ともよく一致している。

以上がケースI-IIIの実験に対する結果および考察であるが、ここで気がかりなのは図-6の流量変化である。すなわち、電磁流量計による流量が、瞬時ではあるが極端に小さくなっていることである。この脈流のような現象が、破碎中の閉塞による影響であるかどうかを調べるために、破碎機の手前に取り付けてあるバイパス回路の開閉を行なって、現地発生れきを再び破碎してみた。このときの流量変化が図-7(A), (B)である。(A)がバイパスを全閉した場合にあたり、(B)がバイパスを全開した場合にあたる。今仮に、脈流の現象が破碎時に原因していれば、破碎時の流量はバイパス回路を全開した方が、全閉した場合より少なくとも多いはずである。ところが、図-7(A), (B)を見る限りでは、両者に違いが認められない。したがって、記録に現われる脈流の現象が破碎機のみ原因しているとは

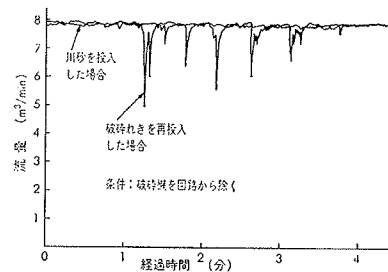


図-8 電磁流量計による管内の流量の変化

言えない。そこで、さらにつぎのような実験を行なった。すなわち、図—1の回路から破碎機を除いて泥水を循環させて川砂と50mm径以下のれきの2種類を投入してみた。その結

実験の種類	消費エネルギー	比エネルギー
ケースII-1	29.4×10 ⁶ Joule	3.2 Joule/cm ³
" -2	75.2 "	4.0 "
" -3	95.8 "	1.9 "
" -4	41.0 "	6.9 "
" -5,1	34.9 "	7.4 "
" -6,1	70.5 "	2.2 "
" -6,2	91.7 "	3.4 "
ケースIII-1	141.2 "	4.2 "

表—5 破碎に要したエネルギー

果が図—8である。図から、れきを投入した場合には、投入本数に相応する脈流の現象が記録の中に現われているのが認められる。この事実から、脈流の現象が電磁流量計の特性にも原因していると考えられる。

以上のほかに、つぎのような考察も行なってみた。すなわち、フライホイールを取りはずしてチェーン駆動にした場合（今までの実験ケースでは、破碎機の回転に慣性力を与えるために、フライホイールを取り付けてあった）、破碎の効率がどの程度悪くなるかについてである。1号破碎石と現地発生れきを破碎して、破碎機の消費電流を調べてみると、これまでの結果と同じように無負荷時で60A、負荷時でも無負荷時の2～3倍を要しただけであった。このことから、この程度の強度のれきならフライホイールがなくても破碎の効率は変わらないと言える。

5. まとめ

以上述べてきたことがらをまとめると、つぎようになる。

i) 破碎機による破碎後の供試材料の粒度分布は、50mm径以下が95%前後を占め、6"φ管において問題となる50mm径以上のれきは残りの5%前後に過ぎない。

ii) 破碎機の消費電流は、無負荷時で60～65A（消費電力は16.4～17.8KW）である。したがって、電動機の出45KWの36～40%を無負荷時に消費していることになる。

iii) 消費電流の変化を積分して、ある定数をかけると破碎機電動機への入力エネルギーになる。このエネルギーのうち、破碎機のロータ関係を回転するのに消費されるエネルギーを差引くと、真の破碎エネルギーになる。この真の破碎エネルギーを消費エネルギーとして、表—5にまとめた。表で比エネルギーというのは、消費エネルギーを投入したれきの体積で割った値を意味している。ここで注目されるのは、ケースII-4および、5,1とケースII-6,1および6,2の割栗石の破碎時において、前者の比エネルギーが後者の比エネル

ギーの約2.5倍になっていることである。このことから、バイパス回路を開放することによって（表—4参照）、比エネルギーを小さくできることがわかる。

iv) 破碎機を組込んだスラリー輸送の管内の圧力変動を細かく観察する目的で、破碎機の前後に取り付けた圧力計G-1、G-2に並列に、ひずみタイプの圧力検出器を取り付けた。その結果、イ) G-1、G-2ともに1.9Hzの周波数をもつ圧力変動を生じており、その変動値はG-1で±0.03kg/cm²、G-2で±0.04kg/cm²ある。ロ) G-1とG-2とでは、位相が約π/2だけずれていることなどがわかった。

v) 慣性力を与えるためにフライホイールを取り付けて、Vベルトにより動力を伝達させた場合とフライホイールを取りはずして、チェーン駆動にした場合とでは破碎機の消費電流に差が認められなかったことより、慣性力の効果はないと言える。

vi) 図—1のような回路における定常状態の流量は6.7m³/min前後で、三角ぜきと電磁流量計で得た値はよく一致している。

6. おわりに

れき地盤での泥水シールド工法で最も重要視されている、大径れきの処理方式として取り入れた「大径れき処理輸送システム」の性能試験を行なった結果、大径れきをスラリー輸送の途中で破碎し、スラリー輸送ができることがわかった。ただし、この大径れき処理輸送システムは泥水シールドのみに使用するものではなくて、トンネル、オープンカット等におけるずりのスラリー輸送、あるいは固体を遠隔地に輸送する場合にも使用できるものである。

最後に本実験は、技術本部土木技術部、機械部、東京機械工場の協力を得て行なったものである。また、水中れき破碎装置の作製にあたっては、光洋機械産業株式会社の御協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

なお、当社の参加メンバーは下記の通りである。

技術本部土木技術部

黒沢重男、内藤和章、山本進、松尾節夫

金田勉、遠藤保

機械部

小笹雅由

東京機械工場

森川修、山本武彦

技術研究所

斎藤二郎、藤原紀夫、羽生田吉也、吉岡尚也