



土木研究所資料
第668号

沈埋トンネルにおける砂吹込み
基礎工法の実験(その1)

昭和46年3月

建設省土木研究所

大規模特殊事業計画調査
(東京湾環状道路調査)

沈埋トンネルに関する試験調査
施 工 機 械 調 査

沈埋トンネルにおける砂吹込み基礎工法
の実験(その1)

機械研究室

樋 下 敏 雄
中 野 新 市

目 次

1	まえがき	1
2	砂吹込み基礎工法	2
2-1	砂吹込みの目的	2
2-2	砂吹込み装置	2
2-3	砂吹込み作業	3
2-4	充 填 材 料	4
3	実験装置, 供試材料および実験方法	5
3-1	砂吹込み実験装置	5
3-1-1	製 作 仕 様	5
(1)	概 要	5
(2)	仕 様	5
3-1-2	各 部 構 造	9
(1)	本体(台車)	9
(2)	充填材供給装置	10
(3)	充填材圧送装置と吹込みパイプ	10
(4)	圧送水供給装置	12
(5)	吹込みノズル	12
(6)	充填材吸引検出装置とサクションパイプ	13
(7)	移 動 装 置	13
(8)	模擬トンネルエレメント	13
3-1-3	実験装置の作動	13
3-2	供 試 材 料	14

3-3 実験方法	14
4 実験結果	18
4-1 整理記号	18
4-2 実験結果集計表	18
5 結果の考察	19
5-1 砂吹込み実験装置	19
5-1-1 管路による充填材の水力輸送について	19
(1) 管径と粒度	19
(2) 含砂率	19
(3) 輸送速度	20
(4) 本実験装置の砂吹込み能力	20
5-1-2 各部構造の検討	21
(1) 充填材供給装置	21
(2) 充填材圧送装置と吹込みパイプ	21
(3) 圧送水供給装置	21
(4) 吹込みノズル	22
(5) 充填材吸引 ^検 出装置	22
(6) 吹込みパイプとサクショパイプ	22
5-2 充填材料	22
5-3 吹込み方法	23
(1) 造成マウンドの形状	23
(2) 天端最長到達距離	24
(3) 模擬トンネルエレメントと造成マウンドの天端との間隙量	27
(4) 造成マウンドの安息角	27
(5) 吹込みノズルの位置と造成マウンドの形成過程およびその形状	27
(6) 模擬トンネルエレメントの形状と造成マウンドの形態	28
(7) 充填材吸引検出装置を併用した場合の効果	28
(8) 充填材の分離	28
(9) 吹込みノズルを移動した場合の吹込み状況	30
5-4 その他	31
(1) 砂吹込み基礎工法の可能性	31
(2) 砂吹込み実験装置の実用機への適応性	31
6 今後の問題点および方針	32
7 あとがき	34
附表	37
附图	37

1. ま え が き

東京湾環状道路調査の一環として調査を行なっている沈埋トンネルの砂吹込み基礎工法（砂吹込み充填方式）は、在来のトンネル工法と異なり、その施工に当って新たに解決しなければならない幾多の技術的な問題がある。

沈埋トンネルの基礎造成工法には、現在のところ大別して次の三通りの方法がある。それらは、掘削底面に砂利または碎石を所定の高さ勾配に正しく敷き均した基層を設ける方法と、水底に一定の間隔をおいて水準にくいを打ち、これに沈埋函を支承させる方法およびトレンチ底面に沈埋函を支える仮支承台を設け、これにより沈埋函の位置を正確に調整した後に、函底の隙間に砂を吹込み充填する方法である。これらは一般に砂利または碎石基層方式（Gravel Bedding Method）、くい支承方式（Pile Driving Method）および砂吹込み充填方式（Sand Jetting Method）と呼ばれるものである。

砂利または碎石基層方式は、主に鋼殻構造の円形断面を有する沈埋函によりトンネルを建設している米国において採用されている工法であるが、矩形断面の沈埋函を考えると、その底幅が相当広くなり、この方式による水準な基礎を造成することが困難になると考えられる。くい支承方式による施工は余りその例を見ないが、一考を要する方法である。砂吹込み充填方式は、1941年に完成したオランダのマーストンネルで開発された工法であり、その後1959年に竣工したカナダのパンクーバー市のディーズアイランドトンネルで改良が加えられ、以後、アムステルダム市のクーントンネル（1965年完成）、同じアムステルダム市のIJトンネル（1968年完成）、デンマークアールボルグ市のリムフィヨールドトンネル（1969年完成）等の建設に用いられた。この砂吹込み基礎工法は主にヨーロッパにおいて採用されているが、その技術の詳細についてはこれまであまり紹介されていない。多車線の道路トンネルのように沈埋函の断面形状の大きいトンネルでは、この工法は非常に有効なものとなるであろう。

我国においてこれまで砂利または碎石基層方式、くい支承方式の基礎造成法による二、三の沈埋式トンネル¹⁾の施工を見たが、それらはいずれも一基ないし数基の沈埋函を接合して建設したものであり、その規模も小さかったが、最近では碎石基層方式による大規模な京葉線多摩川横断沈埋式トンネル²⁾の施工も見られるようになった。しかしながら、今のところ砂吹込み充填方式による水底トンネルの施工例はない。このように我国における水底トンネルの基礎造成工法、特に砂吹込み充填方式について、その技術が未だ充分に開発されていないのが現状である。また今後沈埋式水底トンネルの建設が普及し、その規模が長大化すると共に、施工条件も苛酷なものになると思われる。このため沈埋トンネルにおける砂吹込み基礎工法に関する諸問題を解明し、その施工技術および施工機械を開発するための基礎的資料を必要とする。

本実験は、先ず砂吹込み実験装置を製作し、屋外の実験用水槽にて、砂および碎石の吹込み実験を行ない、その時の吹込み状況その他について調べ検討したものである。

なお、本報告は、実験が継続中であるため、砂吹込み実験装置の概要および実験結果の中間報告をとりまとめたものである。

2. 砂吹込み基礎工法

砂吹込み基礎工法 (Sand Jetting Method, Jetting Process) は始めマーストンネルの建設に際して開発されたが、これが特許工法であったため、これまでその概要について多くの文献、雑誌等で紹介されているが、その技術の詳細にわたっては余り触れられていないのが実状である。それらの技術的な諸問題について解明するのが本研究の目的であるが、ここでは、砂吹込み基礎工法の概要についてこれが改良され完成されたディーズアイランドトンネルの報告書³⁾を基にして述べることにする。

2-1 砂吹込みの目的

砂吹込みの目的は、トレンチ (沈埋函—以後トンネルエレメントと言う—を沈設するために海底に掘削された溝) の底面にトンネルエレメントを支える仮支承台を設け、これによりトンネルエレメントの位置を正確に調整した後、トンネルエレメント底面と海底との空隙を埋戻して、トンネルエレメントの支持層として十分緊密に充填された層を形成することである。

2-2 砂吹込み装置

ディーズアイランドトンネルで採用された砂吹込みの原理は、砂と水の混合物を普通のサンドポンプで圧送してトンネルエレメント底面に噴射させ、それと同時に、圧送された噴入量と同量の水を吸引することであった。

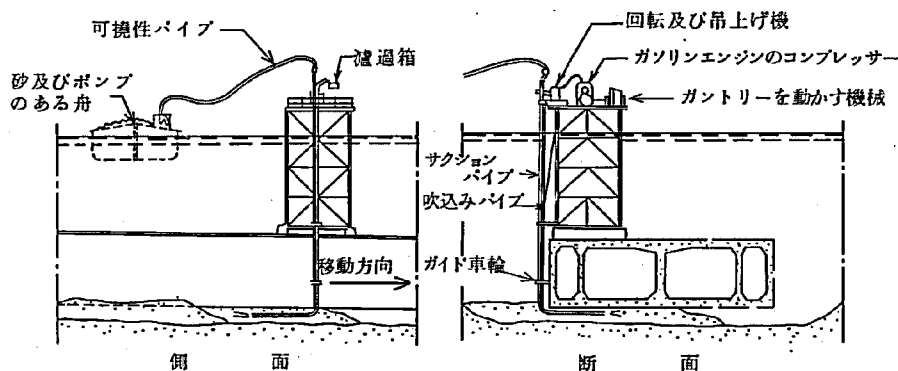


図2-1 砂吹込み装置

図2-1に砂吹込み装置の概要図を示す。トンネルエレメントの上面に付設された鉄筋コンクリート製のレール上をエンジンの駆動により自走するガントリーは、揚水ポンプ、サンドポンプ、コンプレッサー、砂供給装置、各種計測装置等の諸機器を搭載している。吹込みパイプはガントリーならびにトンネルエレメントの側面にガイドされてトンネルエレメントの底とトレンチの底の空隙

にある距離だけ突込まれる。このパイプは、ハンドルとウォームギヤにより 360° 回転できるようになっており、さらに空気駆動のリフト装置で吊り上げることができる。吹込みパイプにより吹込まれた砂と水の混合物の量に相当する水量を吸出すサクションパイプは、吹込みパイプを中央にして両側に平行に装着され、しかも吹込まれた砂の充填状況を検証する目的をも有するため自由に回転することができる。各トンネルエレメント間のレールの切れ目は、潜水夫によってプレハブの溝しがつけられる。ガントリーは、トンネルエレメントの上、下流両側の吹込みができるように、片側が終わると砂吹込み作業船の起重機で吊り上げて、反対側に移すことができる。

上述した砂吹込み装置による砂の吹込み作業を図2-2のフローシートに示す。砂運搬船の砂は、クレーンにより、ホッパー上の振動フルイに入れられ、フィーダーによりミキサーへ送られる。ミキサーへは、さらに水をポンプで揚水し供給している。こうしてできた砂と水の混合物は、サンドポンプによりエレメント底面に圧送される。噴入量と同量の水は、ポンプ (air pump) で吸引されて、ガントリー上の試験ホッパーへ送られ、そこで含砂率を測定する。

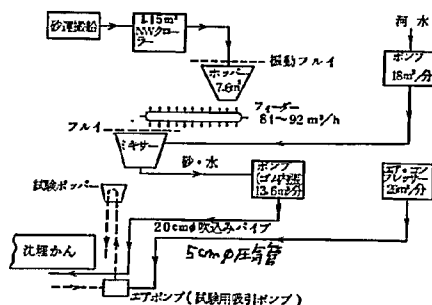


図2-2 砂吹込み作業フローシート

2-3 砂吹込み作業

砂吹込み装置によるトンネルエレメント下の仮支承台の間の砂吹込みの順序は次のとおりである。

(図2-3)。

砂はまず、上流側半分に吹込まれ、それから下流側半分に吹込まれる。最初の1の部分は、吹込みパイプをエレメントの中心線より 52° 北西の方向に向け、ガントリーを南に移動しながら噴射する。それから吹込みパイプをエレメントの中心線より 52° 南西の方向に向くよう、エレメントの下で回転させてから、ガントリーを南へ移す。そしてガントリーを北へ移動させながら2の部分の噴射をする。次に吹込みパイプをエレメントの中心線より 30° 南西の方向となるように回転し、3の部分が始めるためにガントリーを南に動かしてからさらにガントリーを北へ移動しながら噴射する。

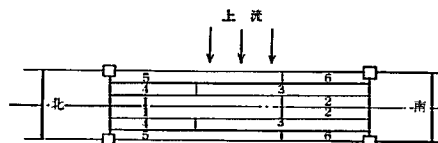


図2-3 砂吹込みの順序

今度は吹込みパイプをエレメントの中心線より 30° 北西の方向に向くように回転させる。ガントリーを4の部分の噴射のため一旦北へ移動させ、それから南へと移動させる。この回転は既に吹込んだ1の部分が水平管を妨害するために、エレメントの下では行なえない。

表2-1 充填材料

フルイ番号 (目の間隔)	通過百分率 (重量比)	理想的な配合
4 (4.76 mm)	100 %	%
8 (2.38)	90~100	100
16 (1.19)	10~60	30
30 (0.55)	0~10	10

従って、吹込みパイプを南の方へ回転させて、エレメントの中心線と平行し、トレンチの法面に引掛らない程度まで吹込みパイプを引き上げておいてから、エレメントの外を 180° 回転させ、それから再び、下へ降してからエレメントの中心線より 30° 北西の方向に向くように回転させる。残る操作は5,6の部分とエレメントの両端の部分の噴射であり、上で述べたことと概ね変わらない。このようにしてトンネルエレメントの下に齊一で緊密な砂の層が形成される。

2-4 充 填 材 料

充填用の材料として、表2-1に示す粒度配合の砂が用いられた。

3. 実験装置、供試材料および実験方法

3-1 砂吹込み実験装置

3-1-1 製作仕様

(1) 概 要

本試験調査に用いた砂吹込み実験装置は、土木研究所機械研究室において、関東地方建設局東京技術事務所の協力を得て昭和44年度に製作したものである。実験装置の外観は写真-1のとおりであり、構造は図3-1のとおりである。

実験装置は、実験水槽（横×縦×高さ；7 m×10 m×5 m）上部のレール上を自走し、模擬トンネルエレメント（鋼板製）下と水槽底の間に砂または砂利（碎石）を吹込み充填する機械装置であり、砂または砂利を貯蔵するホッパー、これを水中に定量ずつ投入する供給装置、砂または砂利を混合した水を圧送するサンドポンプ、配管（吹込みパイプ、サクションパイプ等）、圧送された砂または砂利を吹込むノズル、台車を走行させる移動装置、敷砂の充填度を判定するための吸引検出装置および各種測定器等より構成されている。

(2) 仕 様

本実験装置の主要諸元と装置の概略は次のとおりである。

[1] 主 要 諸 元

- 1) 名称 砂吹込み実験装置
- 2) 形式 自走形、サンドポンプ圧送式
- 3) 性能

最大圧送量（砂または砂利）16.0 m³/h

最大含砂率（容積百分率）

15 %

吹込みパイプ回転角度

180°

台車移動速度

0 ~ 1.0 m/min

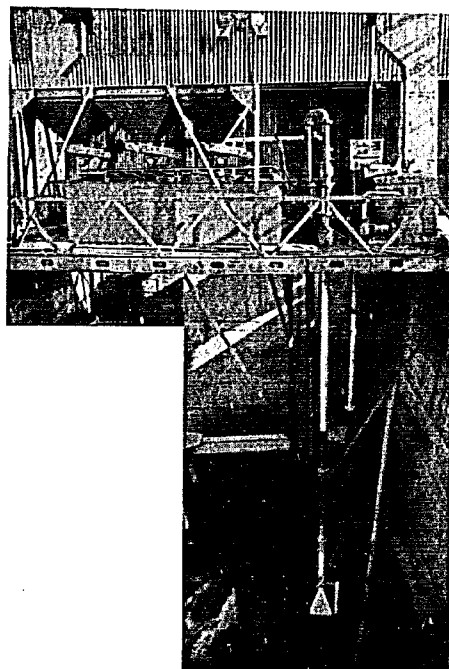
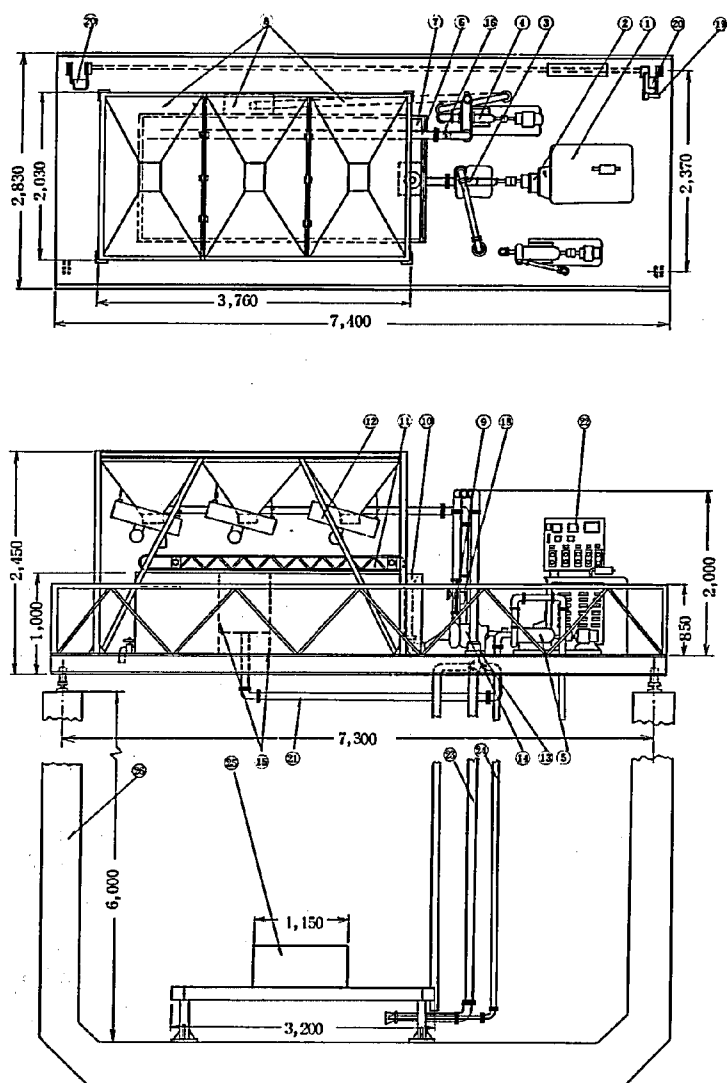


写真-1 砂吹込み実験装置

表3-1 吹込みノズルの種類

吹込みノズルの断面形状	直径	長さ	横×縦	断面積
円形	mm	mm	mm×mm	cm ²
No. 1	100	—		78.5
No. 2	170	150		226.9
No. 3	63	140		31.2
矩形				
No. 4		160	230×100	230.0
No. 5		550	400×100	400.0



- | | | |
|--------------|-------------|---------------|
| ① エンジン | ⑩ シュート | ⑲ 走行用変速機 |
| ② 減速機 | ⑪ ベルトコンベア | ⑳ 減速機 |
| ③ 吹込み用サンドポンプ | ⑫ バイプロフィーダ | ㉑ オーバーフローパイプ |
| ④ 圧送水供給ポンプ | ⑬ 遊合フランジ | ㉒ 配電盤 |
| ⑤ 吸引用サンドポンプ | ⑭ ノズル操作ハンドル | ㉓ 吹込みパイプ |
| ⑥ 圧送水供給用パイプ | ⑮ 制水板 | ㉔ サクションパイプ |
| ⑦ 供給用水槽 | ⑯ 流量調節バルブ | ㉕ 模擬トンネルエレメント |
| ⑧ 充填材ホッパー | ⑰ 台車 | ㉖ 実験用水槽 |
| ⑨ ピンチバルブ | ⑱ ロータメータ | |

図 3-1 砂吹込み実験装置全体図

4) 要 目

全 長	7,400 mm
全 巾	2,830 mm
全 高	2,500 mm (台車下部より)
重 量	5,525 kg

[2] 各 部 構 造

(1) 充填材ホッパー

形 式	角錐形, 鋼板溶接構造 3 連式
全 長	3,600 mm
全 巾	1,900 mm
全 高	900 mm
容 量	3 m ³

(2) 充填材供給装置

形 式	振動式, ベルトコンベア輸送形
最大供給量	33 t/h

(a) バイプロフィーダー

形 式	KM25-2P
最大輸送能力	12 t/h
振動数	2,850/3,450 V.P.m.
傾斜角	下向15°
電 圧	200/220 V
電 流	1.2 A
全 長	900 mm
全 巾	362 mm
全 高	500 mm
重 量	42 kg
数 量	3 台

(b) ベルトコンベア

形 式	超ベビー1型
輸送能力	40 t/h
ベルト速度	30/36 m/min
全 長	3.0 m
全 巾	400 mm
全 高	150 mm
ベルト	300mm×2 p
電 圧	200/220 v

(3) 充填材圧送装置

形 式 サンドポンプ圧送式
水 槽 箱形鋼板溶接構造 5.0 m³

(a) 吹込み用サンドポンプ

口 径 100 mm ϕ
揚水量 130 m³/h
全揚程 5 m
駆動方式 ガソリン機関
数 量 1 台

(b) 遊合フランジ

形 式 ボールベアリング懸架方式
遊合角度 180°
吹込みパイプ径 100 mm ϕ

(4) 圧送水供給装置

形 式 ポリュートポンプ循環式
口 径 125 mm ϕ
揚水量 120 m³/h
全揚程 7 m
駆動方式 電動機直結

(5) サンドポンプ駆動装置

形 式 ガソリン機関直結式

(a) 機 関

名 称 三菱 J H 4-4A
形 式 4サイクル水冷縦形頭上弁式
シリンダー数 4 気筒
内径×行程 79.4 mm×111.1 mm
総排気量 2,199 cc
圧縮比 7.4
連続定格出力 29 ps/1,800 r.p.m
始動方式 電動機

(b) 減速 機

形 式 三菱 J P 113777-2 1段減速歯車式
減速比 1.62 : 1
クラッチ 乾燥単板式

(6) 台 車

形 式 I形鋼, 薄形鋼箱形溶接構造

全 長 7,400 mm

全 巾 2,830 mm

(7) 移動装置

形 式 電動無段変速方式

移動速度 0 ~ 1.0 m/min

車輪径 168 mm ϕ

(a) 無段変速機

形 式 D004A4M

電動機出力 0.4 kw

出力軸回転数 165 ~ 1,000 r.p.m

電 圧 200 / 220 V

全 長 386.5 mm

全 巾 280.0 mm

全 高 218.0 mm

重 量 23.5 kg

数 量 1 台

(b) 減速機

形 式 HDUC-50

減速比 2.42 : 1

全 長 384 mm

全 巾 205 mm

全 高 191 mm

重 量 21 kg

数 量 2 台

(8) 充填材吸引検出装置

形 式 サンドポンプ吸込式

口 径 65 mm ϕ

揚水量 20.4 m³/h

全揚程 12.2 m

駆動方式 電動機直結 3.7 kw

数 量 1 台

サクショ ンパイ プ径 65 mm ϕ

3-1-2 各部構造

(1) 本体(台車)

I形鋼、溝形鋼による箱形溶接構造で、実験用水槽上部の既設のレール上を走行し、水槽、ホッパー、機関、ポンプ等一連の装置を搭載している。(図3-1)

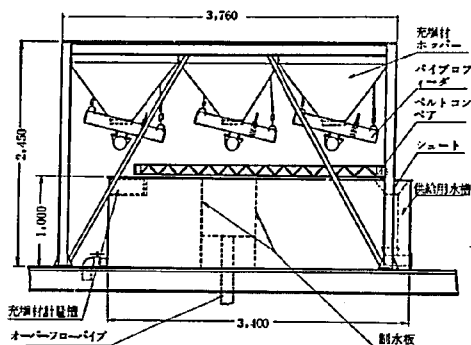


図 3-2 充填材供給装置

(2) 充填材供給装置

本装置は、 1.0 m^3 3連の充填材ホッパーより各種の供試材料をバイプロフィーダーによりベルトコンベアに投入しシュートに供給するもので、バイプロフィーダーは振動数とゲートの開閉間隔を変化させることにより任意の一定の量をフィードすることができる。(図 3-2、写真-2)

(3) 充填材圧送装置と吹込みパイプ

本装置(図 3-3)は砂吹込み実験装置の心臓部とも言える重要な部分である。ベルトコンベアより供給用水槽中に設置されたシュートに投入された供試材料はここで水と混合され圧送用サンドポンプによって加圧され吹込みパイプを介して吹込みノズルに搬送され、模擬トンネルエレメント(鋼板製-図 3-8)の底面と水底の間隙中に噴射される。吹込みパイプの直径は 100 mm で、その中間に供試材料を含んだ混相流の流動状態が観察できるようにアクリル製の透視管が装着されており、トンネルエレメント下に水平に挿入された先端のノズル(図 3-1)は遊合フランジ部に取付けたノズル操作ハンドルによりその角度が 180° まで変化できる。サンドポンプはガソリン機関により減速機を介して駆動され、流速は同機関の許容回転速度の範囲内で変化できる。

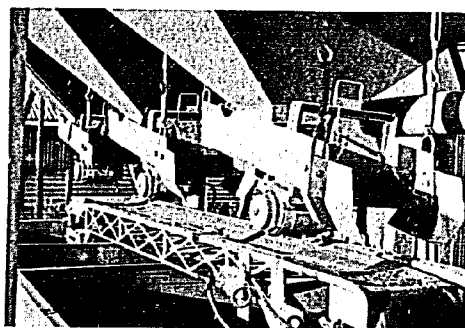


写真-2 バイプロフィーダー

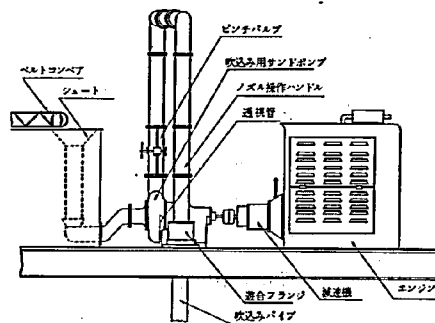
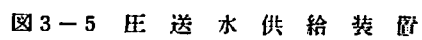
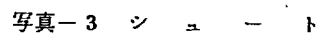
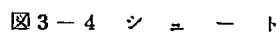


図 3-3 充填材圧送装置

この装置の中で特にシュート部については新たな工夫をこらしたところである。従来の混相流の混合供給装置^{4), 5), 6)}には、かくはん式、ハイドロホイスト方式(密閉式ホッパー型-lock hopper feeder)、プランジャポンプ方式(運動ポケット型-moving pocket type)等があるが、これらはいずれも可動部分を有し、構造が複雑で施設費が増加するほか運転、保安上の注意が必要である。これに反し、図 3-4、写真-3に示すシュートは、管側に水を取入れるための多くの小孔を穿っただけの簡単な構造であり、しかも可動部分がないため故障の心配がなく取扱い、保安が容易である。

ベルトコンベアより投入された充填材は、シュート部を落下する過程で水と混合し、吹込み用サ



ンドポンプに吸引され、吹込みノズルに圧送される。

(4) 圧送水供給装置

本装置は台車上部に設置した容積 5.0 m^3 の供給用水槽とこれに送水する圧送水供給ポンプ（ポリエートポンプ）とオーバーフロー用パイプから構成される。（図3-5）

(5) 吹込みノズル

吹込みノズルは模擬トンネルエレメントの下に水平に挿入された $100 \text{ mm}\phi$ の吹込みパイプの先端に装着される。吹込みノズルの形状の相違、断面変化

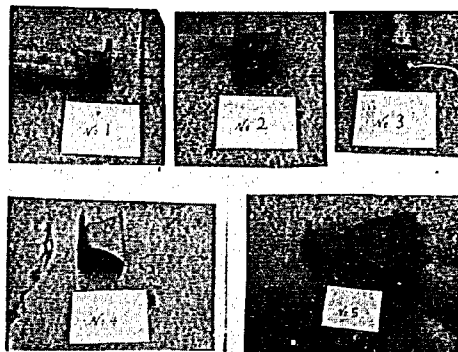


写真-4 各種の吹込みノズル

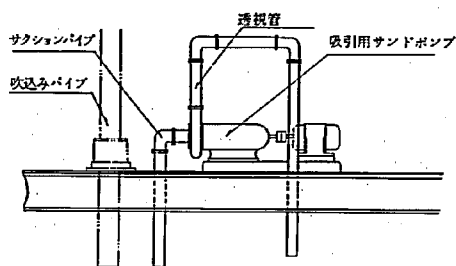


図3-6 充填材吸引検出装置

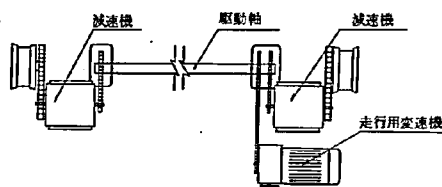
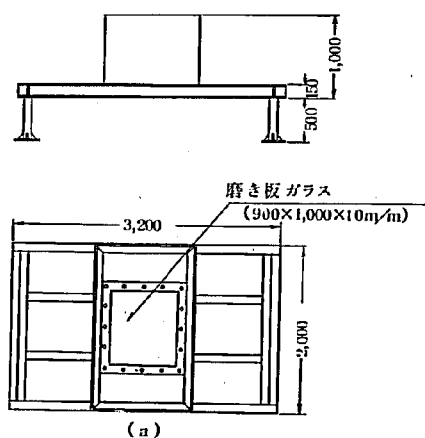
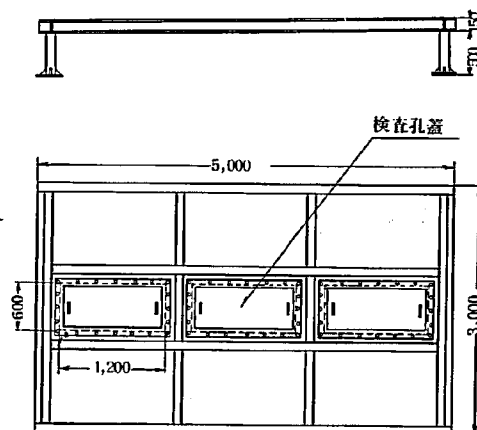


図3-7 移動装置



(a)



(b)

図3-8 模擬トンネルエレメント

による吐出速度の変化に伴いノズルから噴射される充填材の沈澱状況あるいは造成マウンド（模擬トンネルエレメント下に吹込まれてできた砂の山を言う）の形状の違いについて、さらには粒度分布の広い供試材料を吹込んだ際に予想される分離の発生等について調べるため試行的に表3-1に示す各種のノズルを製作した。（写真-4）

(6) 充填材吸引検出装置とサクションパイプ

電動機直結のサンドポンプの吸込側に取付けられた口径65 mm のサクションパイプは吹込みパイプと平行してエレメントの下に挿入されている。サクションパイプの目的は、吹込みノズルから噴射された同量の水を吸引することと、吸引水の中の充填材の量により充填状況を把握することである。本装置は当初の設計方針では後者のみを考慮していたので、吸引用サンドポンプは吹込み用サンドポンプと同量の能力を有していない。(図3-6)

(7) 移動装置

移動は電動機組込みの無段変速機により、動力を得、さらに減速機を用い回転速度を減少せしめ駆動軸にスプロケット、ローラチェーンを介して伝導する。速度は0~1.0 m/min の範囲で無段変速する。(図3-7)

(8) 模擬トンネルエレメント

図3-8に模擬トンネルエレメントを示す。エレメントは鋼板製であり、(a)、(b)の2種類を使用した。(a)はエレメントの中央に充填材が吹込みノズルから噴射され、沈澱する状態を観察できる1 m四方のガラス製の透視窓を具えており、(b)は充填された造成マウンドの水中の平板載荷試験を行なうための可動ふたが付いている。

3-1-3 実験装置の作動

図3-9は本実験装置の配管状態を示したものである。まず(a)に示す供給水は、実験用水槽から吸入管に吸い込まれ、ポリユートポンプに入り、吐出管、ロータメータを経て供給用水槽に入る。この水の一部は供給用の水槽の側面に設けられた流出口(矩形断面)より常にオーバーフローし、オーバーフロー管、スルースバルブを経て実験用水槽にかえる。供給水の流量は、ポンプの吐出側に設けた分岐管の途中に装着したスルースバルブの開閉により調節される。

(b)に示す吹込み用の圧送水は、供給用水槽の中にあるシュートの管側に穿った多数の吸水孔より吸込まれ、サンドポンプによって加圧され、ピンチバルブ、アクリル製の透視管を経て、吹込みパイプにより吹込みノズルまで搬送され、これより

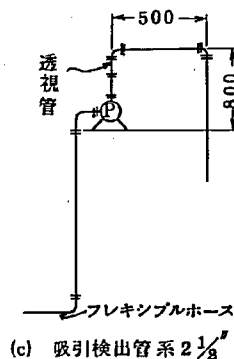
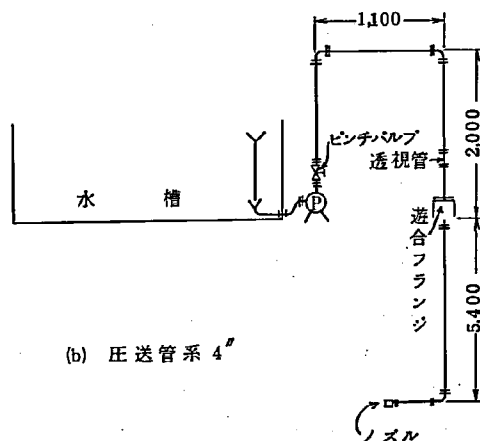
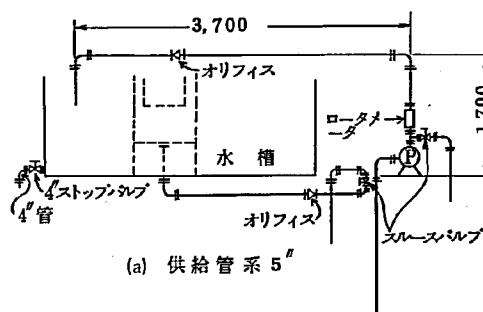


図3-9 配管図

模擬トンネルエレメントの下に噴射される。また圧送水の流量は、サンドポンプ駆動装置であるガソリンエンジンの回転数を変えることにより調整される。

(c)により吸引検出用の水は、サクションパイプにより吸い揚げられ、サンドポンプに入り、吐出管、アクリル製の透視管を経て実験用水槽にもどる。

このようにして清水の循環流が安定した状態になると次に充填材が供給される。充填材ホッパーからパイプフィーダーにより定量ずつ送り出された充填材は、ベルトコンベアの上に落下し、シュートに運ばれる。シュートに投入された充填材は、ここで水と混合し、混相流となってサンドポンプに吸込まれ、加圧されて吹込みパイプを経て、吹込みノズルよりトンネルエレメントの下に吹込まれる。この吹込まれた充填材の一部は、サクションパイプに吸込まれ、サンドポンプより吐出管を経て実験用水槽に還る。

表3-2 供試材料の種類

材料の種類	粒 径	真 比 重	見掛比重	粒 径 加 積 曲 線			
				60 % 粒径	30 % 粒径	10 % 粒径	均等係数
砕 石	1~9mm	2.22	1.36	3.2 mm	2.9 mm	2.3 mm	~~4.38~~ 1.37
砂 (1)	0.1~5	2.58	1.24	1.05	0.56	0.30	3.50
砂 (2)	0.1~5	2.60	1.27	0.68	0.38	0.20	~~1.70~~ 2.52
砂 (3)*	0.1~10	2.53	1.35	0.65	0.28	0.17	~~2.20~~ 3.82

*小玉石まじり

3-2 供 試 材 料

我国のような地震国では、地震時に砂層の流動化現象、揚圧力（負の圧力、浮力）の発生等の問題が起ってくるものと考えられるが、これらについて目下研究中であり、地震に対処する適切な材料の選定ができないのが現状であるが、一般的にみて妥当と思われる材料について吹込み実験を行なった。本実験に供した材料は上表3-2のとおりである。図3-10にそれらの粒径加積曲線を示す。なお、図の中の太線は、表2-1で示したディーズアイランドトンネルで使用された充填材料である。また図3-11は、供試材料の混合比重と容量混合率（含砂率）および重量混合率の関係を示すものである。

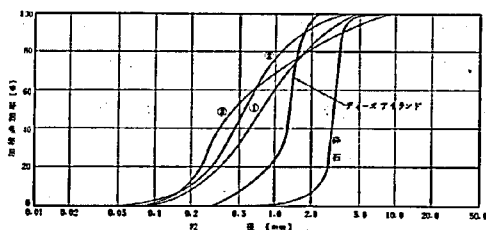


図3-10 粒径加積曲線

3-3 実 験 方 法

砂吹込み実験の要領は、先ず3-1-3に示したように実験装置を運転し清水が循環しているところへ、充填材供給装置のパイプフィーダーのゲートを開けて充填材の投入を行ない、吹込みパイプの透視管により混相流が定常的に圧送され出したのを確認してから、各諸元の同時計測を行なった。

実験は3-2に示した供試材料、碎石7号、砂(1)、砂(2)、砂(3)の4種類を使用し、そのおのについて3-1-2、(5)の吹込みノズルを5通りに変え、さらにその吹込みノズルについて吹込み用サンドポンプの回転数を800r.p.mと1100r.p.mの2通りに変えて計測を行なった。充填材は、単位時間当たりの供給量を設定し、それに合わせたパイプフィーダーのゲートの開き巾を決めることは困難であるためゲートの開きを任意とし、そのときの供給量を測定してから供給した。このため充填材の供給量は0.60～5.50 m³/hの範囲内の任意の値とした。

模擬トンネルエレメントは大きさが3 m×2 mと3 m×5 mの2通りに変え、その時のエレメント下の間隙は約50 cmとした。水深は、約0.8 mないし4 mとした。

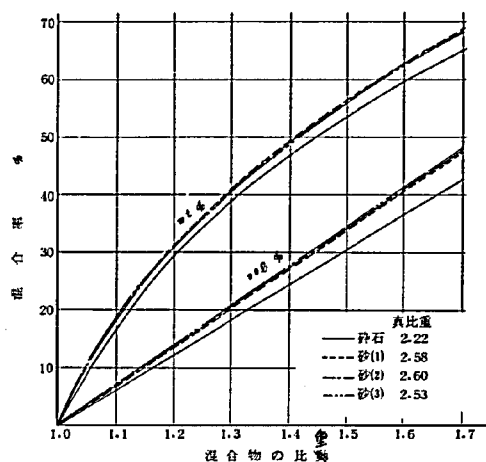


図3-11 混合率と混合比重

表3-3 吹込み実験一覧表

充填材の種類	吹込みノズルの形式	圧送用サンドポンプ回転数 r.p.m.	充填材の供給量 m ³ /h	模擬トンネルエレメントの大きさ m×m	模擬トンネルエレメント下の間隙 m	水深 m	吹込み形式	備考
碎石								
No. 1	No. 2	800	0.66	3×2	0.75	5.00	固定	V.T.R 使用
No. 2	No. 2	800	1.20	3×2	0.52	0.64	"	
No. 3	No. 2	1,000	4.20	3×2	0.55	0.75	"	
No. 6	No. 2	1,000	2.22	3×2	0.50	0.60	"	
No. 7	No. 2	1,000	2.29	3×2	0.53	0.75	"	
No. 8	No. 1	1,200	2.96	3×2	0.54	0.80	"	
No. 9	No. 1	1,100	3.38	3×2	0.50	0.80	"	他端閉塞
砂 (1)								
No. 4	No. 2	700～800	4.44	3×2	0.50	0.80	"	
No. 5	No. 2	700	3.36	3×2	0.52	0.83	"	
No. 10	No. 5	800	3.74	3×2	0.51	0.80	"	
No. 12	No. 5	1,100	4.74	3×2	0.49	1.00	"	
砂 (2)								
No. 11	No. 5	1,100	5.06	3×2	0.51	0.80	"	
No. 13	No. 5	800	4.72	3×2	0.52	0.80	"	
No. 14	No. 2	800	4.72	3×2	0.53	0.80	"	
No. 15	No. 2	1,100	4.72	3×2	0.51	0.80	"	
砂 (3)								
No. 16	No. 4	800	4.71	3×2	0.51	0.80	"	サクショ ン併用
No. 17	No. 4	1,100	4.71	3×2	0.51	0.75	"	
No. 18	No. 5	800	5.44	3×2	0.51	0.80	"	
No. 19	No. 5	800	5.44	3×2	0.51	0.80	"	
No. 20	No. 3	800	2.36	3×2	0.52	0.80	"	サクショ ン併用
No. 21	No. 3	1,100	3.93	3×2	0.52	0.80	"	
No. 22	No. 5	800	4.71	3×5	0.52	4.00	平行移動	
No. 23	No. 5	1,100～1,200	4.71	3×5	0.52	4.00	"	

なお、充填材の種類、項の番号は実験回数を示す。

砂の吹込み形式は、砂吹込み実験装置本体（台車）を固定した場合、すなわち吹込みパイプの位置が、トンネルエレメントに対し一箇所に固定した場合と、エレメントの中心軸に平行に移動した場合の2通りに変えた。

表3-4 測定項目

測定項目	測定対象	測定場所	測定計器
砂吹込み実験時 圧送用サンドポンプの駆動 エンジン回転数	ガソリンエンジン		回転計（エンジン内蔵）
圧送用サンドポンプ吐出圧力 供給用ポリュートポンプ流量	圧送用サンドポンプ 供給用ポリュートポンプ	吐出管	圧力計 ロータメータ・オリフィス流量計
オーバーフロー流量 充填材供給量 吸引検出用サンドポンプ流量	パイプフィーダー 吸引検出用サンドポンプ	オーバーフロー管	オリフィス流量計 計量槽 計量槽
実験後 造成マウンドの支持力	造成マウンド		日本工業規格、道路の平板載荷試験法による。（載荷板は直径30cmのものを使用）
造成マウンドの形状	造成マウンド		巻尺・傾斜測定用水準器

表3-3は上述した条件を変えた砂吹込み実験の一覧表である。6～9回目の実験は、実験水槽、実験装置および充填材料等を洗じょうし、水中にテレビカメラ（V.T.R）を投入して充填材の吹込み状況を観察した。9回目の実験では、さらに、吹込みパイプの水平部を挿入したトンネルエレメントの側方と反対の側を閉塞して吹込み実験を行なった。

表3-4は砂吹込み実験における測定項目の一覧表である。

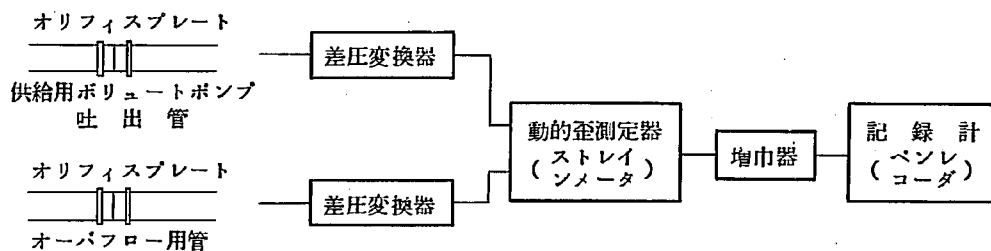


図3-12 サンドポンプによる圧送流量の測定変換方式

サンドポンプによる圧送水の流量は、台車上部に設置した容積5.0 m³の供給用水槽に流入する供給用ポリュートポンプの流量と、この水槽の側面に設けた流出口（矩形断面）からオーバーフローする流量の差から求めた。供給用ポリュートポンプの流量およびオーバーフロー流量はいずれも管路に取付けたオリフィスにより圧力差として検出し図3-12に示す変換方式によって、すなわち差圧変換器、動的歪測定器（ストレインメータ）、増巾器を介して記録計（ペンレコード）に記録した。（写真-5）

充填材の供給量は、吹込み開始前に図3-2に示す充填材供給装置のベルトコンベアを反転させ、パイプフィーダーにより供給された充填材が充填材計量槽に満杯になる時間を測定して算出した。同様に、充填材吸引検出装置のサクション用のサンドポンプによる吸引水の流量もまた、計量槽に

満杯になる時間を計って算出した。

造成マウンドの支持力は、砂吹込み実験終了後、実験水槽内の水を模擬トンネルエレメントの底面にすれすれになるまで抜いて、水中での支持力を日本工業規格・道路の平板載荷試験方法（JIS・A1215）に準拠して測定した。

造成マウンドの形状は、支持力の測定が終わった後、さらに水を排除し、実験水槽内を完全に空にしてから、マウンドの大きさ、天端部の広さ、安息角、模擬トンネルエレメントとマウンドの天端

の間の間隙量、および天端最長到達距離を測定した。また、マウンドの天端部および先端（吹込みノズルの向側）の位置から充填材をとり、吹込み前の材料の粒度構成と比較するため、粒度分析を行なった。

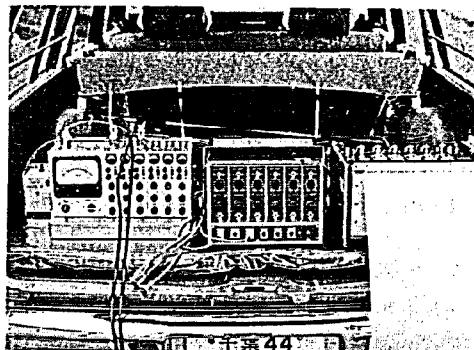


写真-5 計測器

4. 実 験 結 果

各計測項目の整理記号を列記すれば次の通りである。

4-1 整 理 記 号

(1) サンドポンプ関係

N : サンドポンプ駆動エンジン回転数

P : サンドポンプ吐出圧力

q_w : サンドポンプ圧送水流量

(2) 充 填 材

t : 充填材計量槽が満杯になる時間

w : 充填材計量槽が満杯になった時の重量

$\nu_{s,t}$: 充填材の見掛け比重

$\nu_{s,t}$: 充填材の真比重

T : 充填材吹込み総時間

(3) 流 量

$$q = q_w + q_{s,t}$$

q : サンドポンプによる混相流の圧送流量

$q_{s,t}$: 充填材の毎分当りの真の供給容量

$$\text{但し } q_{s,t} = \frac{w}{t} \times 60 / \nu_{s,t} \times 10^3$$

(4) 含 砂 率

$$r : \text{真の含砂率} \quad r = \frac{q_{s,t}}{q} \times 100$$

4-2 実験結果集計表

附表 4-1 に実験結果の集計表を示す。

5. 結果の考察

5-1 砂吹込み実験装置

5-1-1 管路による充填材の水力輸送について

(1) 管径と粒度

管路により砂や砂利を輸送する場合、最大粒度（粒子の寸度）の限界は、単体で送るときは管内すれすれの粒度まで可能であるが、粒群になるとその最大粒径を小さくしなければならず、玉石のような球形のものは管内径の $\frac{1}{3}$ までのもの、碎石類のように稜角の多いものは管内径の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ までのものを輸送するのが安全である。

本実験装置の充填材圧送装置には、その枢要部に口径100 mmのブレードレスポンプを、また、吹込みパイプには同じく口径100 mmのガス管を使用しており、その最大粒度の限界は上に述べた経験的な法則に従えば、20～25 mm 粒度までのものであり、サンドポンプはこの粒度までの充填材の輸送が可能である。しかし今回の実験における供試材料の最大粒度は、碎石の場合には9 mmまでのもの、砂の場合には5 mmまでのものであり、一部小玉石混じりの砂の場合でも10 mmまでのものであった。このためサンドポンプの担う負荷は軽く、吹込みパイプの途中での充填材の停滞、集合等の現象は見られなかった。

(2) 含砂率

砂や砂利の粒群混相液の含砂率（容量混合率のことを言う）が、サンドポンプの性能ならびに管抵抗に与える影響について、長谷川源太郎氏他の行った実験結果⁷⁾によれば、砂を輸送した時は、比重の増加にともない、揚程曲線は清水時のそれにほぼ平行して大きく低下しており、馬力はほぼ比重に比例して上昇している。したがって効率もまた大きな低下をみせている。砂利輸送時は混合比重の増加にともなう揚程の低下が砂の場合よりさらにはなほ大きく、また効率の低下も大きい。サンドポンプの輸送効率は附図5-3に見るように比重が増すに従い大きくなるが、ポンプの効率は比重1.2から急激に低下している。

また、管路抵抗は、砂および砂利を輸送した時は、管内流速が小さい範囲では比重の増加にともない大きな抵抗値を示しているが、流速が速く（3～4 m/sec）なるにしたがい清水の抵抗曲線に近づいてくる。

3-2に掲げた図3-11は供試材料の混合比重と容量混合率（含砂率）および重量混合率の関係を示したものである。上述した実験結果により示された混合比重1.2という値（ポンプ効率が急激に低下する比重）を今回使用した材料の含砂率に直すと、約15%となり、これは従来のポンプ液渠で土砂が輸送される場合の最大含砂率と合致する。今回の実験における充填材輸送時の最大含砂率は7.39%（混合比重1.1）であった。このように最大含砂率の値が小さいのは、充填材を充填材供給装置の最大供給能力以下の低い範囲で供給し、充填材の混相液を輸送するのに適切な最大含砂率を求める実験を行なわなかったがためである。今後の実験では、本実験装置の吹込み能力を

把握する上からも最大含砂率の増大を図る考えである。

(3) 輸 送 速 度

粒群の輸送に必要な速度は、垂直管の場合には単粒子の自由沈降速度の70%位の混相流の平均速度があれば、含砂率（容量混合率）30%（これは一般の値でありポンプ液渾では前述のとおりである）まで混相流を上方に送ることができるが、実用的には自由沈降速度の5倍以上が妥当である。水平管の場合には、管内の平均速度が大きいときは、完全に浮遊しているが、平均速度が小さくなると粒群は次第に管底に集まり、平均速度より小さな速度で流れ、やがて管内に沈澱し、停滞することになる。

ジュランの研究⁸⁾によれば、沈澱状態から脱して、摺動状態に移る限界速度(v)は

$$v = F_L \sqrt{2g D (\zeta - 1)}$$

但し v : 限界速度

F_L : 沈澱限界速度係数、粒度が2 mm 以上の場合には、すべての粒度および濃度に対して、 $F_L = 1.34$ の値をとる。

D : 管直径

ζ : 固体の真比重

で表わされる。垂直管と水平管の管路系の場合、一般に同一管径とすることが望ましい。

附図5-1は寺田氏のもつめた石炭およびばたの管路輸送時の標準値を示したものである⁹⁾。これを参考にすると本実験装置の吹込みパイプ（口径100 mm）の場合には実用的には3.5 m/sec 位の平均速度を必要とするが、今回の実験では、吹込み用サンドポンプの回転数を定格回転数（1450 r.p.m）以下で使用したため圧送流量は少なく、圧送流量を吹込みパイプの断面積で割って算出した管内の平均速度は1.3 ~ 2.2 m/secであった。この速度は真比重の最も大きい砂（2）の限界速度2.4 m/sec より小さい値にもかかわらず、前述したように吹込みパイプ途中における充填材の停滞、集合等の現象が見られなかったのは、図3-3に示すように吹込みパイプの配管は水平部分が極めて少なく大部分垂直部であり、垂直部の実際の流れがサンドポンプによる圧送流量の平均速度より重力落下による速度のほうが速いというサイホン状態になったためと推測される。吹込み用サンドポンプを定格回転数で運転した場合の吹込みパイプ内の平均速度（圧送流量を吹込みパイプの断面積で割った値）は4.2 m/sec となる。

(4) 本実験装置の砂吹込み能力

今回の実験における本実験装置の砂吹込み能力（単位時間当りの供給量）は、最高5.44 m³/h（7.34 ton/h）であった。これは（2）で述べたように、一般の粒群の水力輸送時の含砂率25 ~ 30%と比べて $\frac{1}{3}$ 以下、また、前述のポンプ液渾時と比較した場合でも $\frac{1}{2}$ 以下という低い含砂率の条件下で吹込み実験を行なったため、このような値となった。

附図5-2、5-3は上述した長谷川氏の実験による各種の材料による性能曲線および各種の材料による輸送性能の比較を示したものである¹⁰⁾。これは口径3インチの片側吸込型サンドポンプ（回転数1500 r.p.m）を使って行なった実験結果であり、混合比重1.2（これ以上ではポンプ効率が急激に低下する）のときの最高輸送効率点

$$\eta_s = \frac{W \cdot H}{75 N} \quad \text{ただし } \eta_s: \text{輸送効率} \quad L: \text{揚程 m} \quad W: \text{輸送した材料の重量 kg/}$$

sec $N: \text{ポンプの駆動馬力 HP}$

での輸送能力は約 15 ton/h である。これと口径 100 mm (4 インチ) である本実験装置の吹込み用サンドポンプの輸送能力を比較することは厳密には正しくないが、参考までに示すと約 $\frac{1}{2}$ (7.44/15) となる。

実用機としての砂吹込み機械の吹込みパイプの口径を 8 インチ (204.7 mm ϕ) とし、管内平均流速を 4 m/sec とした場合、これまでの実験における最大輸送時の条件 (含砂率 7.39%) を適応すると、その時の砂吹込み能力は約 33.4 m³/h である。この値はディーズアイランドトンネルの建設に使用された実際の砂吹込み機械の能力 81.6 m³/h (平均含砂率 10%) に比較して $\frac{1}{2.4}$ 以下であるが、前述したように本実験装置の含砂率はさらに大きくすることができるため、この差をより少なくすることができると共に将来は同等の能力をもたせ得るものと考えられる。

5-1-2 各部構造の検討

(1) 充填材供給装置

図 3-2 充填材供給装置のベルトコンベアの後方に取付けた充填材計量槽による充填材供給量の計測は、吹込み開始前における初期統一供給量しか計ることができず、吹込み途中の供給量が測定できないのが難点である。

このため現在、充填材ホッパーの四隅に圧力変換器 (ロードセル) を装着し、これより動的歪測定器を介して記録器に記録することにより、吹込み途中経過の充填材供給量が計量できるように装置を改造中である。

(2) 充填材圧送装置と吹込みパイプ

吹込み用サンドポンプの吐出側に装着された流量調整用のピンチバルブは、充填材の混相液を圧送する際、間欠的な振動を起し、混相流が脈動状態となって流れた。これは、5-1-1、(3)でも述べたように吹込みパイプの配管が、水平部は少なく、大部分垂直管でしかもサイフォン状態となっているため、吹込みパイプの垂直部の流れは、重力による自然落下状態の流れとなり、吹込み用サンドポンプによって送り出される平均速度より大きくなるため吹込みパイプ中に負圧が生じたためと考えられる。

また、吹込みパイプ中に空気の混入が見られ、これが充填材混相流と一緒に模擬トンネルエレメントの下に吹込まれた。このため、時間の経過に従いトンネルエレメント下の空気溜が大きくなり、充填材吸引検出装置によりサクションを掛けた時、サクションパイプ中に空気が含まれ吸込み不能となる原因になった。これは吹込みパイプ途中にあるピンチバルブ、透視管等の接手部のシールが不完全なためであると見られる。

(3) 圧送水供給装置

現在のところ管路により粒群の混相液を輸送する時、その流量を管路の途中において直接測定できる適当な計器が見当たらないため、図 3-5 に示した配管をもって吹込み用サンドポンプによる圧送水量を 3-2 で述べた方法により求めた。

圧送水を供給用水槽に供給するためのポリュートポンプは、吹込み用サンドポンプが、負荷が余りかからない押込み状態で使っているのと違い、正常な状態で運転しているため問題はなかった。

今後、砂吹込み機の実用機の開発に当って、圧送水の流量、含砂率等の計測には充填材の粒径が余り大きくならない範囲であれば、電磁流量計、ガンマ線密度計等を管路途中に直接装着することができ、上述した間接的な方法をとらなくてすむものと考ええる。

(4) 吹込みノズル

今回の吹込み実験に使用した吹込みノズル(表3-1)の形状が充填材の吹込み状況、造成されたマウンドの形に与える影響について、後述するように顕著な差異は見られなかった。しかし、使用した5個の吹込みノズルの中では、吐出口が横に細長い矩形断面をしたNo.5のノズルが、模擬トンネルエレメントと造成されたマウンドとの間隙量を少なくし、またマウンドの天端を水平にすること等、最も良好であった。

(5) 充填材吸引検出装置

本装置は図3-6に示したように、吸引用サンドポンプおよびサクションパイプを備えただけの不十分なものであるため、現在吸引した混相流の流量、含砂率等が自動的に計測できる機構に改造中である。なお、装置の機能については後に触れることにする。

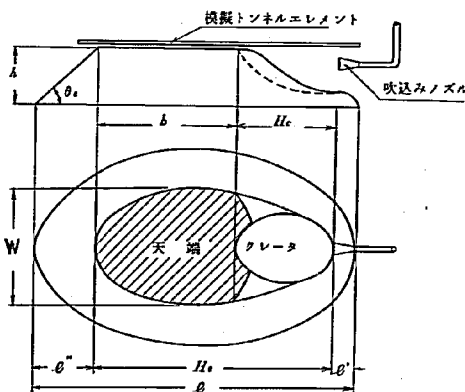
(6) 吹込みパイプとサクションパイプ

ふたつのパイプの相対的な位置は任意に変えられる構造になっているが、今回のサクションを掛けた実験では一定条件で行なった。すなわち、吹込みパイプとサクションパイプの中心軸の間の距離は約24cmとし、サクションパイプの先端(特殊な吸込み用のノズルは取り付けしていない)を、吹込みノズルの出口から約5cm後方にずらした。

5-2 充填材料

3-2 供試材料の項で述べたように我国は地震国であり、得に東京湾周辺は強い地震が多発する地域で、地震時には沈埋トンネルの基礎となる砂層の流動化現象、揚圧力(負の圧力、浮力)の発生等の問題が起ってくるものと考えられるが、これらについて現在研究中であり、沈埋トンネルの基礎あるいは充填材としての地震に十分対処できる適切な材料は未だ明らかにされていない。

このため本実験では外国で見られる砂の他に、充填材として考えられる粒径の大きい砕石についても吹込み実験を行なった。今後適切な材料が明らかにされ次第、それらについても吹込み実験を



但し、

- H_s : 天端最長到達距離
- H_c : クレータの大きさ
- b : 天端の長径
- W : 天端の短径
- h : 天端の高さ
- l : 造成マウンドの長径
- θ_m : 造成マウンドの平均安息角(空气中)
- θ_s : 天端最天端部における安息角

図5-1 造成マウンド概略形状

重ねる必要がある。

5-3 吹込み方法

(1) 造成マウンドの形状

砂の吹込み実験終了後、模擬トンネルエレメントの下に充填されてきた造成マウンドの概略の形状は、図5-1の通りである。

図5-2は、7号碎石の吹込みについて、水中テレビを使用し、ビデオテープレコーダに記録した充填状況を時間の経過により示したもので

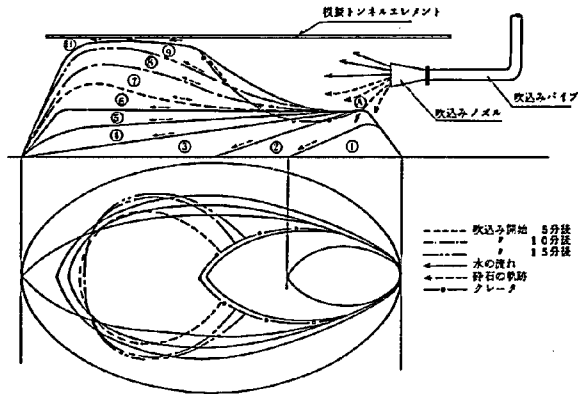


図5-2 吹込み時間の経過による7号碎石の充填状況

ある。吹込みノズルから吐出された充填材は、一部は水流によって遠くへ飛ばされるが大部分ノズル出口から直ちに落下して①の状態に堆積する。時間が経過するに従って②、③、④とその形態を大きくし、⑤の状態に至ると、充填材は水流の影響を大きく受けて、ノズル直下の④の高さより高くなることができず、既成のマウンドの斜面にそって遠方に運ばれ、充填材の速度エネルギーがなくなった時点で停滞し堆積する。このようにして順次⑥、⑦、⑧とマウンドを形成し⑨の状態ではマウンドの天端が形成され始める。その後、吐出された充填材は天端⑨より遠くへ運ばれることはなく、既成の斜面にぶつかりそこで模擬トンネルエレメントの底面に向かって吹上げられ、吹込みノズルに直角の方向に左右に分かれて堆積し、天端の幅を広げていく、このようにしてマウンドの天端は⑨の位置から吹込みノズルに向かって水平に形成されていく。後には吹込みノズルから吐出された水流の逃げ路に必要な大きさのクレータ（凹地）が残される。以上は吹込みパイプのみによる7号碎石の吹込み充填状況であるが、砂の場合もこれとほぼ同じように充填される。

次に図5-1に示したクレータの大きさ(H_c)および天端の短径(W)の天端最長到達距離(H_e)に対する比をそれぞれ H_c/H_e 、 W/H_e としたとき、これらの吹込みノズルの吐出速度(V_{nm})および後述する流体のもつ慣性力と流体中における固体の重さとの比(すなわちフルード数に相当するが、後述するようにこれを吹込み速度係数と呼ぶ)に対する関係は一定でないが、 W/H_e の値は吹込みノズルの吐出速度、吹込み速度係数が増加すると減少する傾向が見られる。また、サクシオンを掛けた場合は大きくなる。このことは、吹込みノズルの吐出速度または吹込み速度係数が大きくなると、天端最長到達距離に比して天端の短径の幅の狭い細長い楕円形のマウンド(附図5-4)が造成されることを示し、また、サクシオンを掛けた場合はマウンドが円形(附図5-5)に近くなることを示している。吹込み充填状況の視察によるとサクシオンを掛けない場合でも充填材の吹込み量が増すとある程度円形(附図5-6)に近づくことが分る。

H_c/H_e の値はサクシオンを掛けた場合、吹込みパイプのみにより吹込んだ場合に比較してその値が小さくなり、しかも造成マウンドのクレータの大きさは、充填後、判然と区別できない程小さ

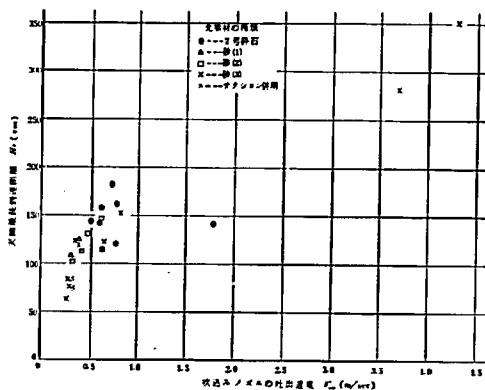


図5-3 吹込みノズルの吐出速度と
天端最長到達距離

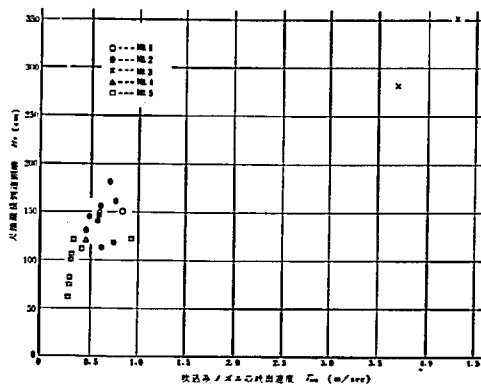


図5-4 吹込みノズルの吐出速度と
天端最長到達距離

くなっている。

(2) 天端最長到達距離

砂吹込み工法において吹込みパイプによりトンネルエレメント下の間隙に吹込まれたマウンド (図5-1) の天端最長到達距離 (H_e) を定量的に把握することは砂吹込みの順序 (図2-3) を決定する上で一つの重要な問題である。

図5-3, 5-4はそれぞれ充填材の種類, 吹込みノズルの種類をパラメータとして吹込みノズルの吐出速度 (V_{nm}) と天端最長到達距離 (H_e) の関係を示したものである。天端最長到達距離は吹込みノズルの吐出速度が増して行くと大きくなる傾向にあるが, 吐出速度の変化する範囲が狭いため, 充填材の種類および吹込みノズルの種類による差は明瞭でない。サクションを掛けた場合, ほぼ同一の吐出速度でも天端最長到達距離は若干小さくなる。これはサクションパイプで吸引される水の速度の向きが吐出速度の向きと反対であるために吐出速度が幾分相殺されるものと考えられる。

次にサンドポンプによる混相流の圧送流量 (Q) と天端最長到達距離 (H_e) の関係を図5-5に示す。天端最長到達距離は混相流の圧送流量の増加と共に山形曲線を描いているが, 吹込みノズルの吐出速度が一定でないためその関係は明らかでない。このため混相流の流量 $0.82 \text{ m}^3/\text{min}$ 前後の荒砂(2) (×印) のように同一流量に

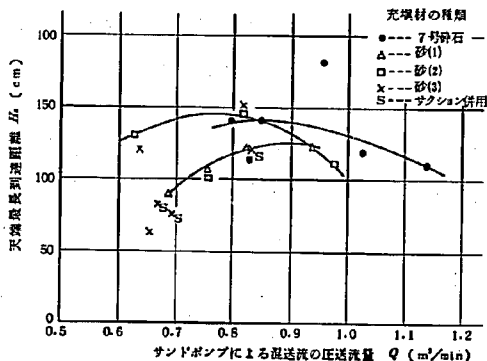


図5-5 サンドポンプによる混送流の圧送
流量と天端最長到達距離

もかわらず吹込みノズルの吐出速度が大きいため、天端最長到達距離は大きくなっている。

以上は天端最長到達距離に影響するものと見られる吹込みノズルの吐出速度およびサンドポンプによる混相流の圧送流量について、それらの関係を示したものである。さらにこれらの要素の他に天端最長到達距離に影響を与えると見られる要素を加味した量との関係について示す。図5-6は噴射係数(M)と天端最長到達距離(H_e)の関係について示したものである。

噴射係数(M)は

$$M = \frac{Q}{k \times d} \dots \dots \dots (1)$$

但し M : 噴射係数

Q : サンドポンプによる混相流の圧送流量
 m^3/min

k : 吹込んだ充填材の平均粒径 mm

d : 吹込みパイプの内径 mm

なお、各実験毎の噴射係数の計算値は附表5-1に示す。これはデンマークのコペンハーゲン大学における模型実験(吹込みと同時にサクションを掛けている)に基づいて天端最長到達距離(H_e)の間に

$$H_e = F(M) \\ = CM \dots \dots \dots (2)$$

但し C : 定数

の関係があると結論された実験式¹¹⁾である。図5-6に見るとおり本実験における噴射係数の計算値と天端最長到達距離の間に(2)式のような比例関係が見いだせるが、充填材の種類の相違により C の値が一定でなく、噴射係数と天端最長到達距離の関係について一義的に論ずることができないのが難点である。

また、コペンハーゲン大学の模型実験では、観察に基づいて次のような仮定、すなわち

- 1 砂吹込み中に、直径 H_e のクレータが形成される。
- 2 密に充填される部分の幅はクレータの直径の2割増であり、直径 H_e の円内に充填材が堆積する。
- 3 以上の2つの円は、吹込みノズルの出口で接する。(図5-1)

をもうけている。これらのうち本実験結果から1, 3は妥当であるが、本実験の大部分をサクションを掛けない状態で行なったためクレータおよび密に充填され

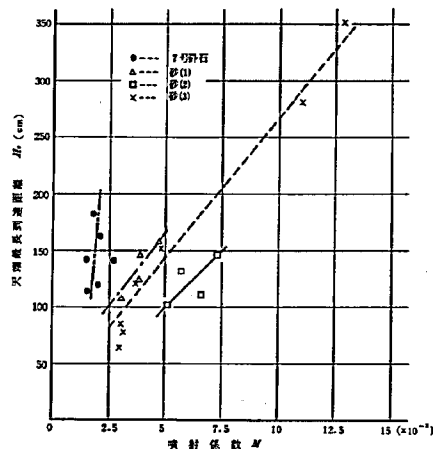


図5-6 噴射係数と天端最長到達距離

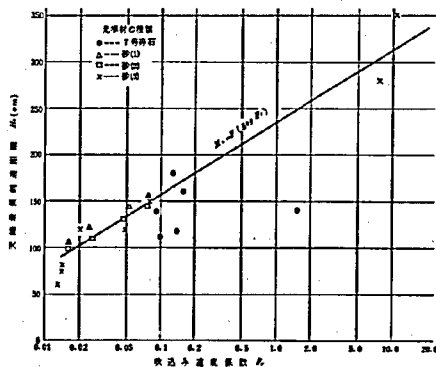


図5-7 吹込み速度係数と天端最長到達距離

部分は円形にならず楕円であった。しかし、既に述べたようにサクションを掛けた場合、あるいはサクションを掛けなくても充填材の吹込み量を増すとある程度円形に近づくことが分かる。2についてクレータの大きさ(H_c)の天端最長到達距離(H_e)に対する比(H_c/H_e)は一定とならず、これらの割合を決定することはできない。

最後に吹込み速度係数(Fr)と天端最長到達距離(H_e)の関係を図5-7に示す。これは寺田氏が水平管路をしゃう動流動する粒群について次元解析¹²⁾を行なった結果を適応したもので、上記の噴射係数と天端最長到達距離の関係における充填材の種類の相違による差をなくし吹込みノズル中の吹込み速度係数と天端最長到達距離の関係を一意的に決定できるようにしたものである。

図5-8に示す大小ふたつの吹込みノズルにおいて、 d, D を吹込みノズルの直径、 u, U を流体の速度、 ρ, P を流体の密度、 ρ_s, P_s を固体の密度とすると、粘性の影響がほとんどない範囲に限定し、さらにサンドポンプによ

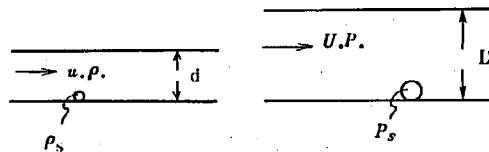


図5-8 吹込みノズルと充填材

り圧送される粒群混相流が流体のもつ慣性力と流体中における固体の重さの支配する流れとし、吹込みノズルからの吐出状態が相似であると仮定すれば、慣性力と固体の重さとの比(吹込み速度係数)が等しいことになる。相似条件は充填材の各粒子ごとに

$$\frac{\frac{d}{dx} \left(\rho \cdot \zeta_x \cdot \zeta_y \cdot \zeta_z \cdot \frac{u^2}{2} \right)}{(\rho_s - \rho) \zeta_x \cdot \zeta_y \cdot \zeta_z \cdot g} = \frac{\frac{d}{dX} \left(P \cdot \zeta_x \cdot \zeta_y \cdot \zeta_z \cdot \frac{U^2}{2} \right)}{(P_s - P) \zeta_x \cdot \zeta_y \cdot \zeta_z \cdot g} \quad \text{.....(3)}$$

として表わされる。ただし dx と dX との比は吹込みノズルの直径 d と D との比に等しいものとする。

上式の関係から v, V をそれぞれの代表速度とすれば

$$\frac{v^2}{2 g d \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} = \frac{V^2}{2 g D \frac{P_s - P}{P}} \equiv Fr \quad \text{.....(4)}$$

が得られる。ここで流速を吹込みノズルの吐出速度 V_{nm} と置き、また、吹込みノズルの直径を D で表わし、充填材と流体の密度をそれぞれ ζ, ζ_l とすれば吹込み速度係数は

$$Fr = \frac{V_{nm}^2}{2 g D} \cdot \frac{1}{\frac{\zeta - \zeta_l}{\zeta_l}} \quad \text{.....(5)}$$

なお、各実験毎の吹込み速度係数の計算値は附表5-1解析データ集計表に示す。また上式の流体の密度 ζ_l は混相流の混合密度とした。

図5-7にみるとおり天端最長到達距離(H_e)は、吹込み速度係数(Fr)が大きくなると共に直線的に増加する傾向を示している。すなわち天端最長到達距離と吹込み速度係数の間に

$$H_e = F(\log Fr) \quad \text{.....(6)}$$

の相関式が成りたつものと推測できる。さらに相関式の定数の決定に際しては今後の実験に俟たね

ばならない。この相関式によりトンネルエレメントの下に充填材を吹込む際の吹込み条件、あるいは作業条件を決定することができる。

たとえば、任意のトンネルエレメントの大きさ（平面）に適合した吹込みノズルから造成マウンド天端の最先端部までの距離（天端最長到達距離、 H_e —これは図2-3で示したように吹込み作業法によって決まる）を決定すれば、(6)式からそのときの吹込みノズルにおける吹込み速度係数（ Fr ）の値が分かり、さらに(5)式から吹込みノズルの直径（ D ）が一定であり、充填材の密度（ ρ ）が明らかであれば、吹込みノズルの吐出速度（ V_{nm} ）を決めることができる。また同時に吹込み用サンドポンプの圧送流量を決定することもできる。

(3) 模擬トンネルエレメントと造成マウンドの天端との間隙量

充填材の吹込みによりマウンドが形成されていく過程は図5-2に示したとおりであり、その過程において模擬トンネルエレメントの底面とマウンドの上部の間に常に水の流れがあり、これが充填材を吹込みノズルから遠方へ運んでいる訳である。このためマウンドの天端が水平に形成された後も吹込みノズルから吐出された水の流路が模擬トンネルエレメントと造成マウンドの天端との間隙となってしまうことになる。これは吹込みパイプのみにより充填材を吹込んだ場合の間隙の出来る原因であり、その間隙量は3～5 cmである。また、サクションパイプを併用した場合は間隙量が1～0.5 cm以下となり造成マウンドの天端がほとんど模擬トンネルエレメントに密着する。本実験では充填材吸引検出装置により吹込みノズルから吐出された水の43～54%を吸引したため、相対的に吐出し流量が減少し、流速の低下をきたしこのように少ない間隙量になったものと考えられる。

(4) 造成マウンドの安息角

模擬トンネルエレメントの下に造成されたマウンドの安息角（ θ_m ）は平均31.6°である。（附表4-1）しかし、これは吹込み終了後、実験水槽の水を排除して空気中で測定した値であるため、水中での安息角はこれより幾分か大きくなるものと考えられる。ちなみに各種充填材料の空気中での平均安息角は25°である。

(5) 吹込みノズルの位置と造成マウンドの形成過程およびその形状

図5-9は模擬トンネルエレメントに対する吹込みノズルの位置を示したものである。(a)、

(b)いずれの場合も充填材が吹込みノズルから噴射され、マウンドを形成していく過程は図5-2に見たとおりであり、(a)における吹込みノズルの模擬トン

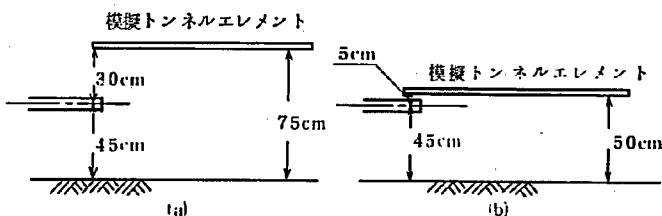


図5-9 模擬トンネルエレメントと吹込みノズル

に対する位置が(b)に比べ25cmも下にあるにもかかわらず、その造成されたマウンド（附図5-7）の形態は、(b)の条件下のマウンド（附図5-8）とほぼ同じように形成される。しかし、吹込みノズルをトンネルエレメントに近接させた方が、マウンドの天端がより平らに形成

される等好ましい面がある。模擬トンネルエレメントと造成マウンドの天端との間隙量は吹込みパイプのみで吹込んだ場合、(a), (b)いずれも3～5 cmである。

(6) 模擬トンネルエレメントの形状と造成マウンドの形態

上に述べてきたことはいずれも模擬トンネルエレメントの下に何らの突起物もなく平らでしかもエレメント下の四方が開放された状態で吹込み実験を行なった結果であるが、図5-10のように他端をブロックで閉塞した状態で充填材を吹込んだ結果、附図5-9のようなマウンドが造成された。造成マウンドは吹込みノズルから出た水流がブロックに衝突し、その反射した流れのため充填材はブロックの近間で洗掘された状態になり、その分は左右に分れて堆積している。

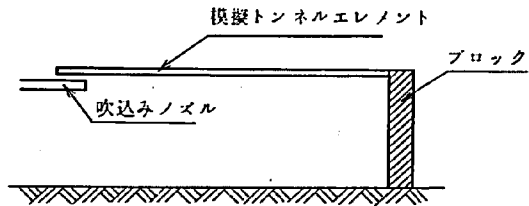


図5-10 他端をブロックで閉塞した
模擬トンネルエレメント

これは吹込みノズルの吐出速度が大きすぎたためと考えられる。任意の吐出速度に対する吹込みノズルとブロックとの適性距離を把むことは今後の実験に俟たねばならない。

(7) 充填材吸引検出装置を併用した場合の効果

充填材の吹込みに際し、充填材吸引検出装置を併用した場合、この装置を使用しない場合に比較して次のような効果がある。

- 1 造成マウンドのクレータ部分が極端に小さくなるか、あるいはほとんど判別がつかない程度になる。
- 2 模擬トンネルエレメントと造成マウンドの天端との間隙量が1～0.5 cm以下となり、造成マウンドの天端がより平らに形成される。
- 3 吹込みパイプのみで吹込んだ場合、充填度(吹込み前のトンネルエレメント下の間隙量に対する充填された充填材の量の割合)の判断を勘にたよるため充填材の量が少なすぎると附図5-10のように十分充填されず、また、多すぎると附図5-6のように吹込みノズルがマウンド中に埋没する結果になるが、サクシヨンパイプにより吐出した混相流の一部を吸引することにより吹込み途中における充填度の検出に利用できる。充填材吸引検出装置はその機能を十分に果していると思われるが、所期の目的を達成するまでには至っていない。
- 4 後述する充填材の分離が少なくなる。これは(3)で述べたようにサクシヨンを掛けることにより相対的に吐出し流量が減少し、流速の低下をきたしたためと考えられる。

(8) 充填材の分離

充填材の吹込みにより模擬トンネルエレメントの下に造成されたマウンドに充填材の一部微粒子の分離する現象が見られる。4種類の充填材、碎石、砂(1)、(2)、および(3)の吹込み前と吹込み終了後の造成マウンド天端部の粒子の粒径加積曲線を図5-11に示す。この図から分るように碎石を吹込んだ場合、吹込み前の粒径加積曲線①と吹込み終了後の造成マウンド天端部の粒径加積曲線②が全く重なっており分離が起きていないが、砂(1)、(2)および(3)の場合はいずれも①と②の間に多少の移動が認められ、造成マウンドの向側に粒径が2 mm以下の微粒子の分離(流径加積曲線は③であ

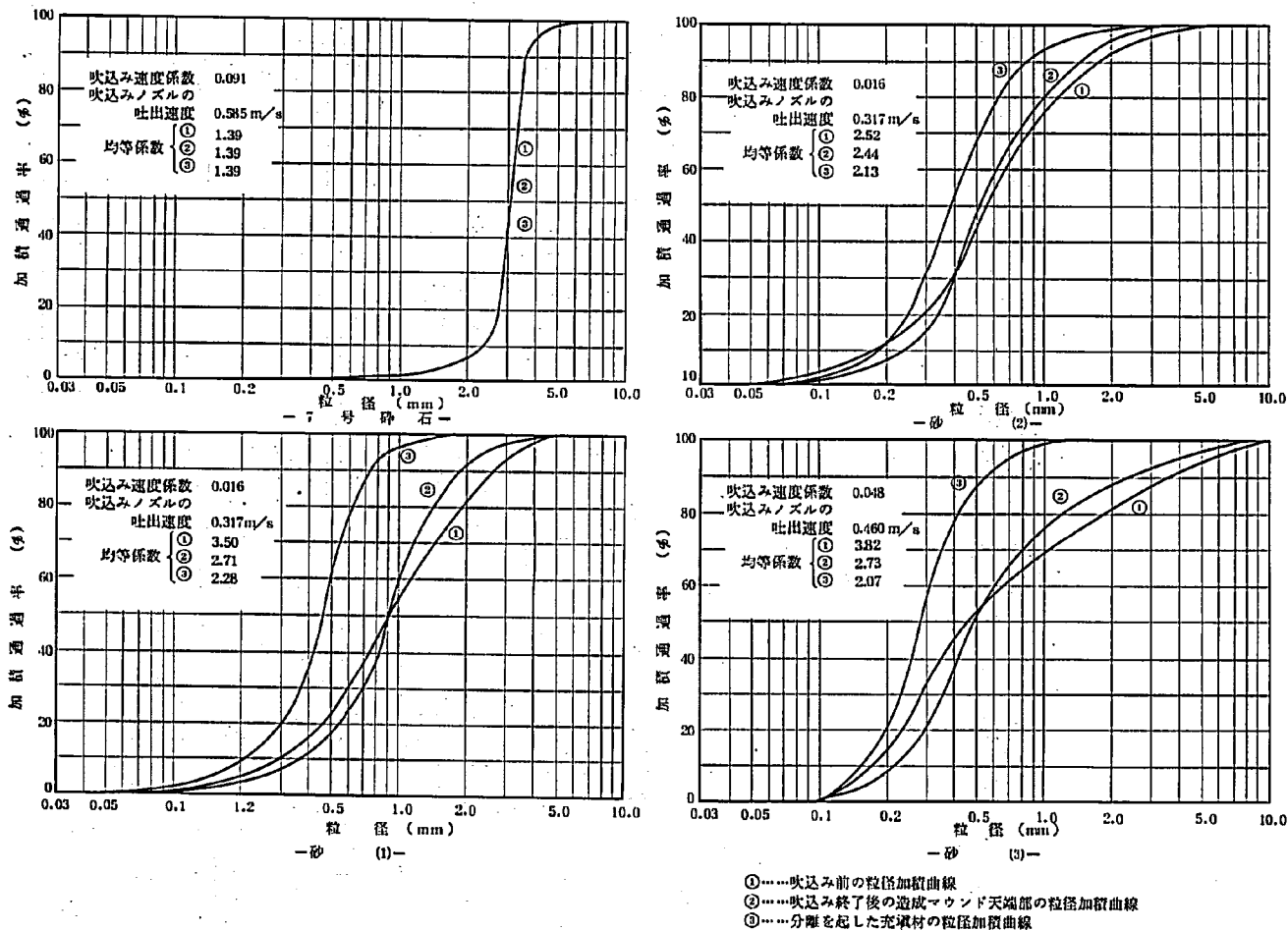


図5-11 充填材と粒径加積曲線

る)が起こる。

碎石は粒度試験の結果、均等係数が1.38と粒度分布がほぼ一様のため分離が発生しなかったが、砂の場合、均等係数はそれぞれ3.5, 1.7, 2.3であり、しかも碎石に比べ微粒子を相当量含んでいるため分離が起きたものと考えられる。(粒度加積曲線①と②の間の移動量の許容範囲、充填材の単位吹込み量に対する分離した量の割合等について、沈埋トンネルの基礎としての充填材の適性をも合せて今後検討する必要がある。)

(9) 吹込みノズルを移動した場合の吹込み状況



写真-6 吹込みノズルを移動した場合に造成されたマウンド

これまで述べてきたことは、吹込みノズルを模擬トンネルエレメントに対し一個所に固定した状態で吹込んだ場合の吹込み状況についての結果および考察である。次に吹込みノズルを模擬トンネルエレメントに対し平行に移動しながら充填材を吹込んだときの造成マウンドを図5-12、写真-6に示す。吹込みに際し、先ず最初図5-12中の①の位置に吹込みノズルを設定し、吹込みパイプにより次充填材の混相流を圧送すると同時に充填材吸引検出装置を働かし、模擬トンネルエレメント下に吹込まれた充填材の一部を吸引し、サクショパイプの途中に装着したアクリル製の透視管内の状況を観察し、充填度を判定して次の地点②に移動する。遂次このようにして③④⑤⑥⑦の地点までそれぞれ60, 48, 53, 47, 51, 57cm 計316cm移動した。

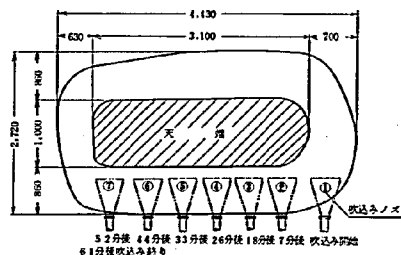


図5-12 吹込みノズルを移動した場合に造成されたマウンド

表5-1はサクショパイプによって吸引された吸引水の含砂率の吹込み時間の経過に対する変化を示したものである。これと吹込み終了後の造成マウンドを照合するとサクショパイプ中の含砂率が必ずしも吹込みパイプ中のそれと同じにならなくてもトンネルエレメントに充填されていることが分かる。

表5-1 サクショパイプ中の含砂率の変化

経過時間	吸引水	砂	含砂率 (重量百分率)
5分後	13615 g	70 g	0.51 %
10分後	13715	90	0.66
15分後	13865	155	1.12
20分後	13860	105	0.76
25分後	14535	1080	7.43
30分後	13950	315	2.26
44分後	13460	380	2.82
52分後	14220	380	2.67

5-4 そ の 他

(1) 砂吹込み基礎工法の可能性

これまでの砂吹込み実験を通して、5-3で述べたように沈埋トンネルの砂吹込み基礎工法、すなわち、砂および砂利（碎石）の混相流を管路で輸送し、それをトンネルエレメント下の間隙に吹込み、充填して基礎を造成する工法が可能であるとの見通しを得た。

沈埋トンネルの砂吹込み基礎工法に関する諸問題について、その一端を明らかにしてきたが、後述するように新たに派生してきた問題点の解決に当っては今後の実験に俟たねばならない。

(2) 砂吹込み実験装置の実用機への適応性

砂吹込み方式による基礎の造成に使われる実際の施工機械は、その構造上、本実験装置とは異なったものになると思われるが、機能的には同じようなものになると予想される。施工機械を開発する上に、砂および砂利（碎石）の輸送方式について検討することは、その機械の枢要部を決める重要な問題であるが、本装置に採用したサンドポンプ圧送方式は実用機の開発に十分適応させることができるものとする。

本実験装置の枢要部を実用機へ十分反映させるためには、なお幾多の諸問題を解決しなければならないが、全き実験装置の完成を目ざし今後の改造と合わせて検討するつもりである。

6. 今後の問題点および方針

今回の実験において、今後解決しなければならない問題点を列挙すれば次の通りである。

6-1 砂吹込み実験装置について

- (1) 圧送水供給ポンプの容量の増大 今回の実験において圧送水供給ポンプの容量が小さいため、吹込み用サンドポンプの回転数を上げて圧送流量を大巾に変化させることができなかった。このため吹込みノズルからの吐出速度を広い範囲にわたって変えて実験を行なうことができず、吹込み速度係数と天端最長到達距離の間の相関式を決定することができなかった。今後このポンプの容量を増大することが必要である。
- (2) 砂吹込み能力の向上 本実験装置の最高輸送効率点をつかみ、その点での砂吹込み実験を行ない、吹込み状況を調べると共に砂吹込み能力の向上を図る必要がある。
- (3) 吹込みパイプ中を流れる充填材混相液の脈動、ピンチバルブの間けつ的な振動および空気の混入を取り除く必要がある。
- (4) 吹込み用サンドポンプの吸込側、吐出側に圧力計を取り付ける。これは、圧力計（真空計）の読みは、混相流の密度の変化とよく対応すると共に粒群の粒径が大きくなった場合、混合比重でものを論ずるより、圧力差で述べた方が妥当であると考えからである。
- (5) 吹込みノズルの製作 今回の実験では、吹込みノズルの相違による吹込み状況の顕著な差異は見られなかったが、今後、数多くの種類の吹込みノズルで実験する必要性を認める。

6-2 充填材料について

前述したように、今のところ充填材料として適切な材料が明らかにされていないのが現状である。今回の実験では既述の4種類の供試材料について吹込み実験を行なったが、以後、さらに粒径の大きな材料、数種類の材料を配合したもの、および薬液等（マルミナセメントなど）を混合した材料についても実験を行なう必要がある。

6-3 吹込み方法について

- (1) 吹込み作業法の確立 前述したように砂吹込みによる基礎工法はクリスチャン&ニールセン社の特許となった工法であり、特許が切れた現在でも、そのノウハウは未だ公開されていない。そのため砂吹込み実験を通して吹込み作業のノウハウを確立することは、是非とも必要なことである。
- (2) 充填度の判定法の確立 砂吹込み作業を遂行する上に、所期の目的である斉一にしかも密に砂または砂利（碎石）がトンネルエレメント底面と水底の間に充填されているか否かを判定することは非常に重要なことであり、この判定法が確立されることが沈埋トンネルの基礎造成工法の中で、砂吹込み方式（砂吹込み基礎工法）を採用する際の一つの技術的前提条件となる

ものである。このため充填材吸引検出装置を完全なものとし、この判定法を確立することが必要である。これと合せて他の方法についても検討する必要を認める。

- (3) 吹込み速度係数と天端最長到達距離の相関式の決定 5-3, (2)で述べた相関式, (6)式を求める必要がある。今回は吹込みパイプのみで吹込んだ場合の関係を示したが、以後これと合せてサクションを掛けた場合の相関についても比較検討する。
- (4) 充填材の分離 充填材の吹込みにより造成されたマウンドに微粒子の分離する現象が見られた。このため今後分離の起らない方法について検討すると共に、分離砂についてはこれを定量的に把握できる方法を見出す必要がある。
- (5) 吹込み境界条件の変化 模擬トンネルエレメントの形状を変え、実験水槽底に土を敷均すこと等、吹込みの境界条件を変化させて、なるべく実際の現場条件に近い条件下で吹込み実験を行なう必要がある。

6-4 そ の 他

- (1) 相似法則 本実験装置における水力輸送関係の性能結果を実用機へ適応する際、相似率について検討する必要がある。
- (2) 吹込み機械設計法の確立 吹込み実験を通して、実用機としての主要諸元を与えることができる具体的なデータを提供する必要がある。

以上は今回の実験を通して明らかにされた問題点であり、今後の方針としては、砂吹込み実験装置を完全なものとし、上記の問題点を逐次明らかにしていくつもりである。

7. あ と が き

本報告は沈埋トンネルにおける砂吹込み基礎工法について、その施工技術上の諸問題を究明すると共に砂吹込み機械の開発に資する基礎的データを収集しようとしたものであるが、吹込み実験において砂吹込み実験装置も未だ完全なものとは言えず、十分な実験を行なうことができなかったが、これまでの砂吹込み実験の結果を要約すると次の通りである。

- (1) サンドポンプ圧送方式による充填材の吹込みが可能である。
- (2) トンネルエレメント下に吹込まれた充填材の混相液を吸引することにより充填度を判定することができる。
- (3) 造成マウンドの形成過程が明らかになり、その形状の概略を把握することができた。
- (4) 吹込みノズル中の流れが粘性を無視し、流体のもつ慣性力と流体中における固体の重さの支配する流れと仮定して、次元解析を行なって得た吹込み速度係数 (Fr) と天端最長到達距離 (H_e) の間に直線的な相関が見られた。

なお、相関式 ($H_e = F(\log Fr)$) を求めるためには、今後の実験によりさらに多くのデータを収集しなければならない。

本実験は4種類の供試材料を使って諸問題の解明に当たった訳であるが、今後さらに他の充填材、あるいは吹込み材料として適切な材料が明らかにされ次第それらについて、上述した方針に基づいて残された問題点を究明して行きたいと思う。

終りに、本実験に当っては当研究所トンネル研究室の関係者の協力を願ったものである。

参 考 文 献

- 1 三好迪男, 道田淳一: 「大阪地下鉄の沈埋函工事 - 堂島川と道頓堀川の施工例について」
トンネル工学シリーズ 6 第5回トンネル工学シンポジウム 1969年11月 P.87
- 2 大平拓也: 「京葉線多摩川横断沈埋式トンネルの施工」 建設の機械化 No 235 1969
年9月 P.2
- 3 SAND JETTING DEAS ISLAND TUNNEL MANUAL No 3
- 4 井伊谷鋼一編: 「粉体工学ハンドブック」 初版朝倉書店 1965年3月 P.477
- 5 寺田進: 「固体の水力輸送装置」 日本機械学会誌 Vol.26 No485 1959年6月 P.
184
- 6 佐々木和郎: 「石炭の水力輸送」 日本機械学会誌 Vol.70 No 578 1967年3月
P.91
- 7 長谷川源太郎, 八木得次, 徳永省三: 「サンドポンプの性能ならびに管抵抗の実験」 運輸
技術研究所報告 Vol 7 No 6 1957年7月
- 8 R. Durand: Colliery Eng'g 1955年5月
- 9 寺田進: 「管路による粒群の水力輸送に関する研究と応用」 日立評論 別冊第45号
1962年2月 P.53
- 10 7に同じ
- 11 3に同じ
- 12 8に同じ

付 図 表

C

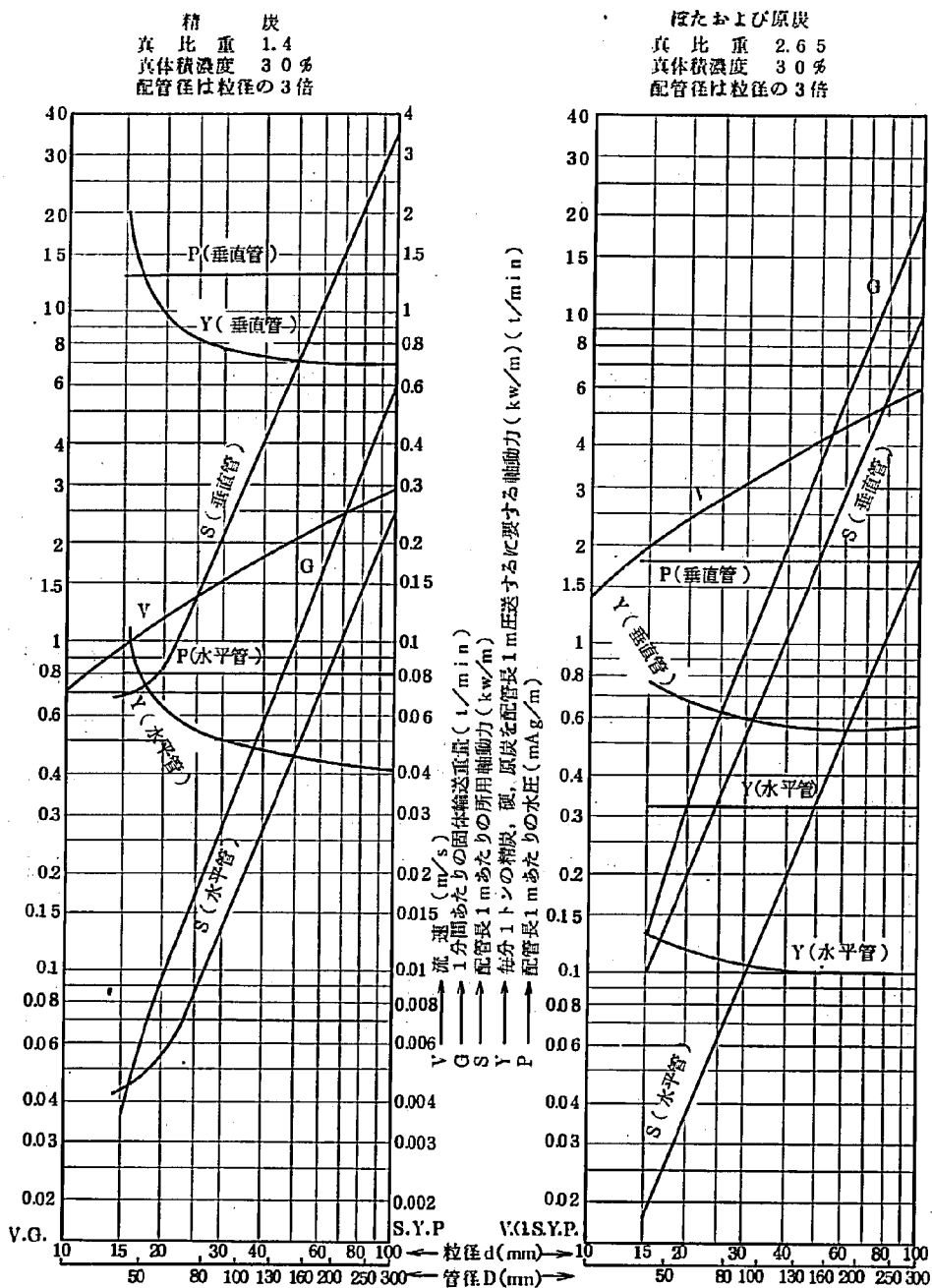
C

附表4-1 砂 吹 込 み 実 験 デ ー タ 集 計 表

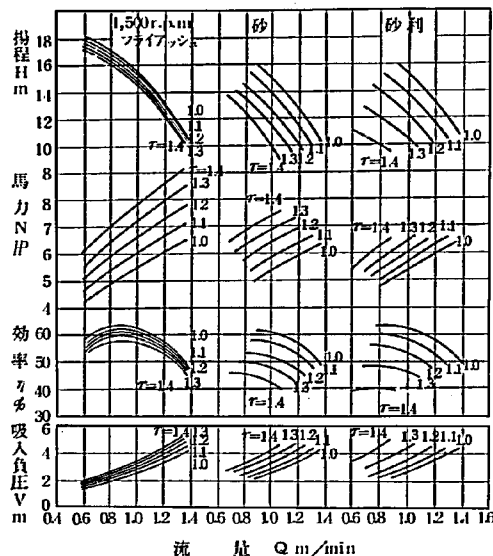
実験回数	年月日	充填材の種類	模擬トンネルエレメントメント	トンネルエレメント下の間隙	トンネルエレメントの間隙量	吹込み形式	吹込みノズルの形式	サンドボンプ駆動エンジン回転数	サンドボンプ吐出圧力P	サンドボンプ圧送水流量 Q_w	①充填材計量槽が満杯になる時間	②充填材計量槽が満杯になった時の重量W	③=②×60 ③=①×60 毎分当りの供給重量W _{skg/min}	④充填材の見掛け比電	⑤充填材の真の比重	⑥=④×10 ³ 毎分当りの見掛け上の供給容量 Q_{sem}/min	⑦=⑤×10 ³ 毎分当りの真供給容量 Q_{stm}/min	⑧充填材吹込み総時間	⑨=⑧×④ ⑨充填材総吹込量 Q_s	⑩=⑧×60 単位時間当り供給量 Q_t	⑪=⑩× ⑦+⑦による差相流の圧送容量 Q_m	⑫=104×⑪ 60×785 射入管内の平均流速 V_d	⑬ノズルの面積 S_n	⑭=104×⑪ 60×785 ノズルの吐出速度 V_m	⑮=⑦×100 ⑮合砂率r %	混 合 比 重	天端最長到達距離 H_c	H_c	b	h	ℓ	w	平均安息角 θ_m	天端最先端部における安息角 θ_e	備考	
回目	月日		m×m	m	m ³			N.r.p.m	kg/cm ²	m ³ /min	t sec	W kg	W _{skg/min}	γ_{se}	γ_{sl}	Q_{sem}/min	Q_{stm}/min	T min	Q_s m ³	Q_t m ³ /h	Q_m m ³ /min	V_d m/s	S_n cm ²	V_m m/s	r %		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	
1	S45 4.25	7号碎石	3×2	0.75	4.50	固定	No.2	800	0.3	1.020	100	26.8	16.1	1.36	2.22	0.011	0.007	90	0.990	0.66	1.027	2.180	226.9	0.754	0.68	1.005	118	114	4	62	266		35	34		
2	4.30	〃	3×2	0.52	3.12	〃	〃	800	—	0.950	60	26.8	26.8	1.36	2.22	0.020	0.012	65	1.300	1.20	0.962	2.042	〃	0.707	1.25	1.020	180	122	58	48.5	270	78	32	31		
3	5.12	〃	3×2	0.75	3.30	〃	〃	1000	—	1.000	17	26.8	94.6	1.36	2.22	0.070	0.043	25	1.750	4.20	1.043	2.214	〃	0.766	4.12	1.365	160	110	50	71	254	60	33	33		
4	6.3	砂(1)	3×2	0.50	3.00	〃	〃	700~800	—	0.790	16	24.5	91.9	1.24	2.58	0.074	0.036	19	1.406	4.44	0.826	1.754	〃	0.607	4.36	1.069	156	120	36	46	285	47	32	32		
5	6.4	〃	3×2	0.52	3.12	〃	〃	700	—	0.660	21	24.5	70.0	1.24	2.58	0.056	0.027	18	1.008	3.36	0.687	1.458	〃	0.498	3.93	1.360	144	90	54	48	311	62	31	32		
6	7.30	7号碎石	3×2	0.50	3.00	〃	〃	1000	0.2	0.774	32	26.8	50.2	1.36	2.22	0.337	0.023	19	0.702	2.22	0.797	1.692	〃	0.585	2.84	1.045	140	89	51		216	28	33	32		
7	8.5	〃	3×2	0.53	3.18	〃	〃	1000	0.25	0.807	31	26.8	51.9	1.36	2.22	0.038	0.023	12	0.458	2.29	0.830	1.762	〃	0.609	2.77	1.045	112						36		V.T.R. 使用	
8	8.18	〃	3×2	0.54	3.24	〃	No.1	1200	0.45	0.815	24	26.8	67.0	1.36	2.22	0.049	0.030	9	0.443	2.96	0.846	1.795	78.5	1.795	3.57	1.060	140	138	2	43	229	31	31	29		
9	8.25	〃	3×2	0.50	3.00	〃	〃	1100	0.10	0.791	21	26.8	76.6	1.36	2.22	0.056	0.034	8	0.450	3.38	0.825	1.752	〃	1.752	4.18	1.065									他端閉塞	
10	9.2	砂(1)	3×2	0.51	3.06	〃	No.5	800	0.05	0.730	19	24.5	77.4	1.24	2.58	0.062	0.030	16	0.998	3.74	0.760	1.614	400.0	0.317	3.95	1.055	106	84	22	47	198	71	35	23		
11	9.4	砂(2)	3×2	0.51	3.06	〃	〃	1100	0.35	0.938	14	25.0	107.1	1.27	2.60	0.084	0.041	14	1.181	5.06	0.979	2.079	〃	0.408	4.21	1.060	110			46	233		29	24		
12	9.8	砂(1)	3×2	0.49	2.94	〃	〃	1100	0.10	0.902	15	24.5	98.0	1.24	2.58	0.079	0.038	12	0.948	4.74	0.940	1.995	〃	0.391	4.04	1.055	122	60	62	47.5	229	45	34	34		
13	9.9	砂(2)	3×2	0.52	3.12	〃	〃	800	0.10	0.721	15	25.0	100.0	1.27	2.60	0.079	0.038	12	0.945	4.72	0.960	1.613	〃	0.317	5.06	1.075	100	43	57	50.5	213	47	30	28		
14	9.10	〃	3×2	0.53	3.18	〃	No.2	800	0.05	0.596	15	25.0	100.0	1.27	2.60	0.079	0.038	12	0.945	4.72	0.635	1.348	226.9	0.466	6.06	1.085	130	103	27	48	237	60	31	26		
15	9.22	〃	3×2	0.51	3.06	〃	〃	1100	0.30	0.779	15	25.0	100.0	1.27	2.60	0.079	0.038	13	1.024	4.72	0.817	1.735	〃	0.600	4.71	1.065	145	105	40	48	244	48	31	28		
16	9.25	砂(3)	3×2	0.51	3.06	〃	No.4	800	0.15	0.594	15	26.5	106.0	1.35	2.53	0.079	0.042	12	0.942	4.71	0.635	1.349	230.0	0.460	6.59	1.095	120	85	35	48	238	45	30	28		
17	9.28	〃	3×2	0.51	3.06	〃	〃	1100	—	0.782	15	26.5	106.0	1.35	2.53	0.079	0.042	15	1.178	4.71	0.824	1.749	〃	0.597	5.08	1.075	150	120	30	41	251	44	31	23		
18	10.6	〃	3×2	0.51	3.06	〃	No.5	800	—	0.605	13	26.5	122.3	1.35	2.53	0.091	0.048	22	1.993	5.44	0.654	1.388	400.0	0.272	7.39	1.110	61	30	31	51	253	110	30	20		
19	10.27	〃	3×2	0.51	3.06	〃	〃	800	0.20	0.626	13	26.5	122.3	1.35	2.53	0.091	0.048	17	1.540	5.44	0.674	1.432	〃	0.281	7.17	1.100	82	32	50	51	217	52	30	25	サクシヨン併用	
20	12.7	〃	3×2	0.52	3.12	〃	No.3	800	0.25	0.675	30	26.5	53.0	1.35	2.53	0.039	0.021	45	1.767	2.36	0.696	1.478	31.2	3.720	3.01	1.040	280	140	140	45	345	57	30	23		
21	12.8	〃	3×2	0.52	3.12	〃	〃	1100		0.770	18	26.5	88.3	1.35	2.53	0.065	0.035	46	3.010	3.93	0.805	1.710	〃	4.302	4.34	1.060	350	200	150	47	482	110	30	24		
22	S46 1.8	〃	3×5	0.52	7.80	平行移動	No.5	800		0.654	15	26.5	106.0	1.35	2.53	0.079	0.042	25	1.963	4.71	0.696	1.478	400.0	0.290	6.02	1.085	75	15	60	52	230	(110)	31	31	サクシヨン併用	
23	1.19	〃	3×5	0.52	7.80	〃	〃	1100~1200		0.787	15	26.5	106.0	1.35	2.53	0.079	0.042	61	4.790	4.71	0.829	1.760	〃	0.345	5.06	1.075	120	20	100	52	270	(310)	30	31	サクシヨン併用	

附表5-1 解析データ集計表

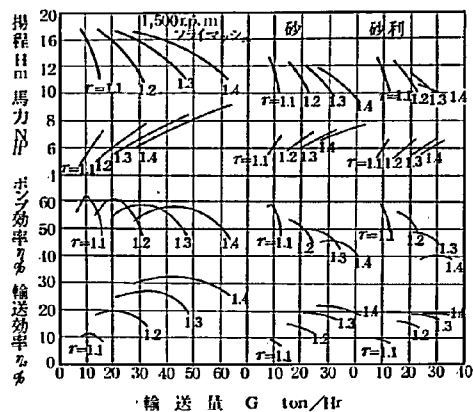
実験回数	充填材の種類	充填材の平均粒径	サンドポンプによる混相流の圧送流量	ノズルの吐出速度	ノズルの見掛け内径	充填材の真の比重	混合比重	天端最長到達距離	噴射係数	吸込み速度係数	備考
回目		k mm	Q m ³ /min	V mm/S	d mm (D,m)	c (vst)	c _e	He cm	$M = \frac{Q}{k \times d}$	$Fr = \frac{V_{nm}^2}{2gD \frac{c - c_e}{c_e}}$	
1	7号碎石	3.08	1.027	0.754	170.0	2.22	1.005	118	2.0×10 ⁻³	0.141	V.T.R. 使用 他端閉塞
2	"	3.08	0.962	0.707	"	2.22	1.020	180	1.8	0.128	
3	"	3.08	1.043	0.766	"	2.22	1.065	160	2.0	0.162	
4	砂(1)	~~1.11~~ 1.08	0.826	0.607	"	2.58	1.060	156	4.7	0.077	
5	"	~~1.11~~ 1.03	0.687	0.498	"	2.58	1.060	144	3.9	0.052	
6	7号碎石	3.08	0.797	0.585	"	2.22	1.045	140	1.5	0.091	
7	"	3.08	0.830	0.609	"	2.22	1.045	112	1.6	0.099	
8	"	3.08	0.846	1.795	100.0	2.22	1.060	140	2.7	1.502	
9	"	3.08	0.825	1.752	"	2.22	1.065		2.7	1.444	
10	砂(1)	1.11	0.760	0.317	225.7	2.58	1.055	106	3.0	0.016	
11	砂(2)	0.66	0.979	0.408	"	2.60	1.060	110	6.6	0.026	サクション併用
12	砂(1)	1.11	0.940	0.391	"	2.58	1.055	112	3.8	0.024	
13	砂(2)	0.66	0.760	0.317	"	2.60	1.075	100	5.1	0.316	
14	"	0.66	0.635	0.466	170.0	2.60	1.085	130	5.7	0.047	
15	"	0.66	0.817	0.600	"	2.60	1.065	145	7.3	0.075	
16	砂(3)	1.00	0.635	0.460	171.2	2.53	1.095	120	3.7	0.048	
17	"	1.00	0.824	0.597	"	2.53	1.075	150	4.8	0.078	
18	"	1.00	0.654	0.272	225.7	2.53	1.110	61	2.9	0.013	
19	"	1.00	0.674	0.281	"	2.53	1.100	82	3.0	0.014	
20	"	1.00	0.696	3.720	63.0	2.53	1.040	280	11.0	7.822	
21	"	1.00	0.805	4.302	"	2.53	1.060	350	12.8	10.808	
22	"	1.00	0.696	0.290	225.7	2.53	1.085	75	3.1	0.014	
23	"	1.00	0.829	0.345	"	2.53	1.075	120	3.7	0.020	



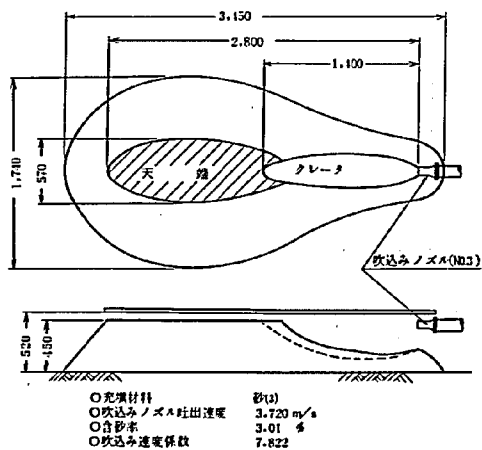
附図5-1 石炭およびぼたの管路輸送時の標準値



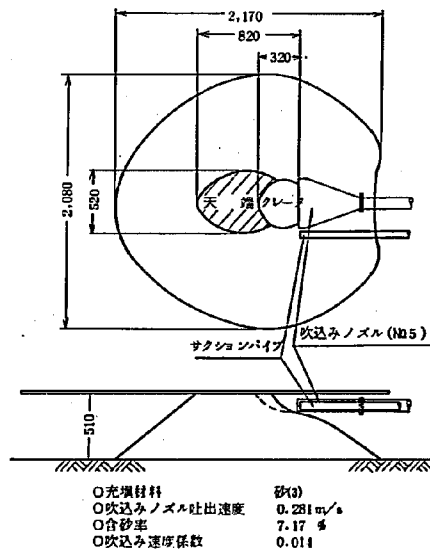
附図 5-2 各種の材料による性能曲線の比較



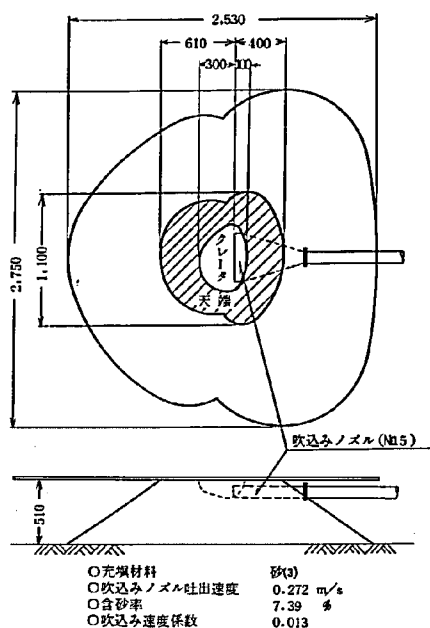
附図 5-3 各種の材料による輸送性能の比較



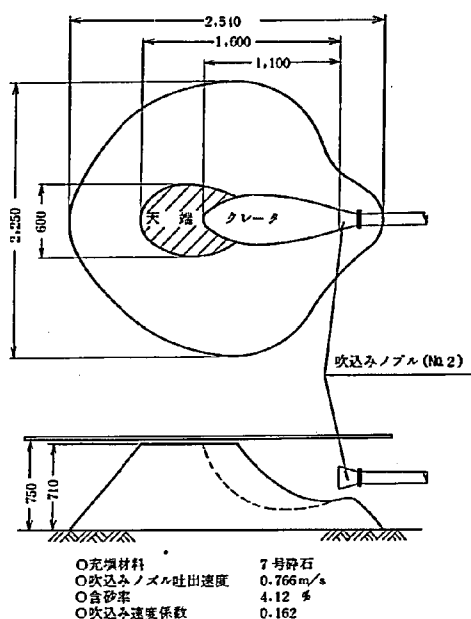
附図 5-4 造成マウンド(実験 No 20)



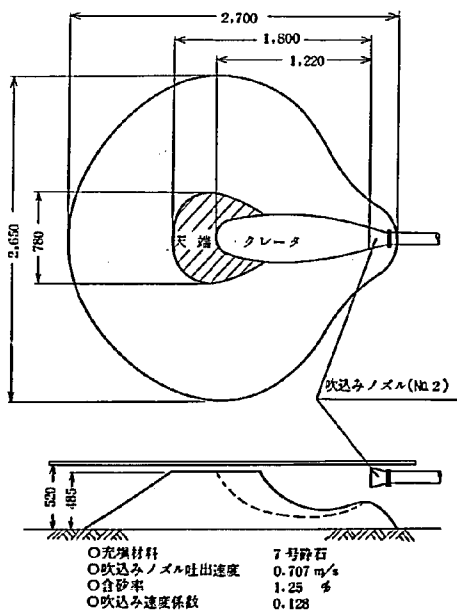
附図 5-5 造成マウンド(実験 No 19)



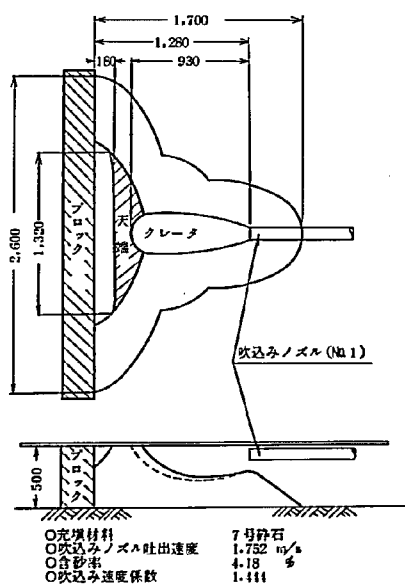
附図 5-6 造成マウンド(実験No 18)



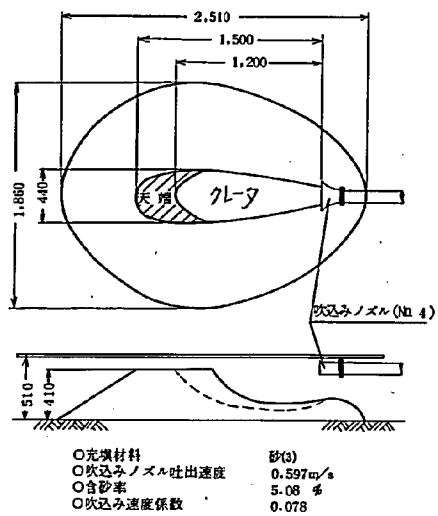
附図 5-7 造成マウンド(実験No 3)



附図 5-8 造成マウンド(実験No 2)



附図 5-9 造成マウンド(実験No 9)



附図5-10 造成マウンド(実験No 17)