

土木研究所資料

土砂圧送技術の開発

平成2年3月

建設省土木研究所
機械施工部機械研究室

Copyright ©(1990) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土砂圧送技術の開発

機械研究室 室長 長 健 次
研究員 高 津 知 司
橋 本 信 仁

要 旨

現在、都市における空間の価値はますます増大し、これに伴い地下空間利用の需要も伸び掘削現場も大規模となり深くなる傾向がある。従来より地下掘削の施工性向上の障害となっていたのが、土砂の搬出輸送技術であった。この技術について、限られた狭い空間で連続的に土砂を搬出する方法について種々の試みがなされているが現在十分な成果が得られておらず、その需要増大傾向からみて緊急に効率的な技術の開発が望まれている。本研究は、管路による輸送における要素技術の確立を目的とするものである。

本研究で開発された要素技術は、スラリー輸送のように土砂全体の含水量を上げて管面摩擦による圧送抵抗を低減させる方式とは異なる。土砂が半固体流れであることを理論的考察及び基礎実験で実証し、それを利用して土砂の管面部分に薄い潤滑層を形成することにより、低含水比土砂の圧送抵抗を低減させるものである。本方式の有用性を、土砂の水平25m垂直5mの管路による圧送実験で検証した。

キーワード：土砂，管路，圧送，半固体流れ，管路圧送基礎式，給水管，H-T管

ま え が き

21世紀へ向けての豊かな国土建設を行うためには、国民生活における価値観の多様化、情報化、国際化、高齢化といった変化に対応しつつ社会資本整備を進める必要がある。

最近の国土空間の利用は、経済活動の活発化にともない、住宅・産業・交通施設を中心として飛躍的に進展した。

一方、今日の土地価格の高騰が大きな社会問題になっている中で、都市における地下空間の価値はますます増大し、掘削現場も大規模となり深くなる傾向にある。

地下掘削においては、掘削した土砂をいかに効率よく搬出するかが施工性を向上させる課題となっている。

本課題では管路による土砂圧送方式に着目し、その輸送効率の向上によりその適用範囲を広げようとしたものである。今回開発された圧送促進システムは、ない場合に比べて圧力損失が低くなり、長距離輸送を可能としている。

平成2年3月

機械研究室 室長 長 健 次
研究員 高 津 知 司
橋 本 信 仁

目

次

まえがき

1	研究開発の概要	3
1.1	現在の土砂輸送方法	3
1.2	土砂圧送方式の効率化	3
2	土砂の管路輸送特性	5
3	土砂圧送基礎実験	8
3.1	実験装置	8
3.1.1	装置概要ならびに管路	8
3.1.2	ポンプ	8
3.1.3	計測機器	8
3.2	実験条件	9
3.3	実験計測項目	11
3.4	実験結果	11
3.4.1	実験試料	11
3.4.2	土質の違いと管内圧力	11
3.4.3	含水比と圧力損失	11
3.4.4	圧力解析	11
3.5	土砂圧送方式の問題点	16
4	高効率土砂輸送装置の開発	17
4.1	給水管による方法	17
4.1.1	給水管の構造と作用原理	17
4.1.2	実験概要	17
4.1.3	実験装置	17
4.1.4	実験条件	17
4.1.5	実験計測項目	17
4.1.6	実験結果	20
4.2	ホッパ改良による方法	24
4.2.1	振動による方法	24

4.2.2 土砂押し込み装置による方法	24
5 まとめ	26
あとがき	
参考文献	
A パラメータ同定	29
A.1 最尤法	29
A.2 最尤法によるパラメータ同定	29
A.3 ニュートン・ラプソン法による解法	30
A.4 ニュートン・ラプソン法の今回の理論式への適用	31
後付写真	

1 研究開発の概要

1.1 現在の土砂輸送方法

現在使用されている土砂の輸送方法・機械の種類を表-1.1に示す。¹⁾これらの輸送方法は土砂の種類や輸送距離、スペース等によって使い分けられている。表-1.2に各種の土砂輸送技術について示す。このうち、1, 2, 3, 7, 8については、開削工法による掘削現場、トンネル工事等で古くから用いられている方法であり、技術もほぼ確立しているが、今回、検討の対象としている地下掘削の現場への適用は、圧気、スペース等の問題からこれらの適用が困難である。このような現場には、4, 5, 6の管路輸送が適していると判断されるが、4, 5は、近年、研究・開発が進められてきたものの、含水比が非常に低い場合か、逆に高い場合（もしくは、スラリー化する）に限定されている。従って、まだ検討の緒についたばかりの6について、適用条件の明確化、効率的な機械の開発が望まれていると判断された。

1.2 土砂圧送方式の効率化

本研究開発は、効率的な土砂搬出輸送技術に関して検討、実験を実施し、基礎資料を得るとともに最も有効性の高いものについての技術の確率を図ることを目的とし、昭和61年度より3か年にわたって実施した。

まず、昭和61年度は既存の土砂輸送技術について文献等による調査を実施した。その中で特に今後の研究開発が待たれていると判断された土砂の管路圧送に関する基礎実験に要する装置を製作し、各種土砂に

表-1.1 土砂の輸送方法・機械の種類

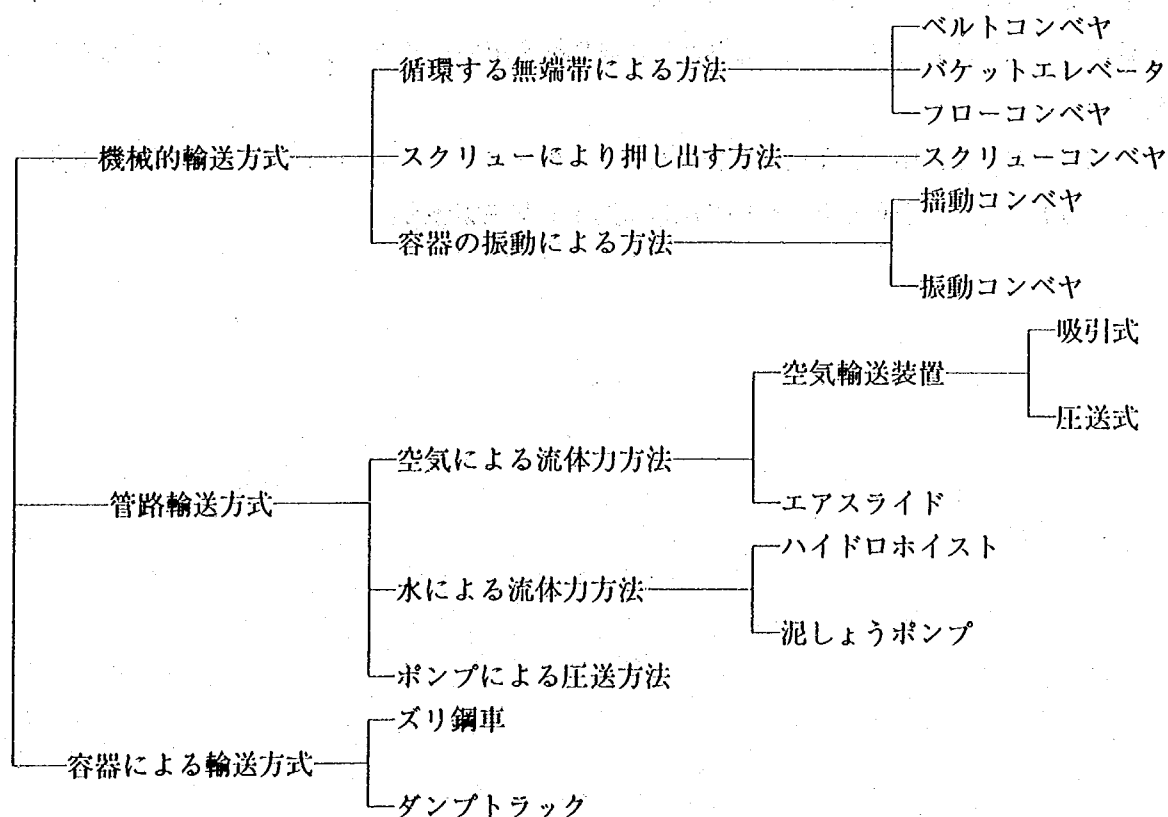


表-1.2 各種の土砂輸送技術について

搬出方法		長 所	短 所
機 械 的 輸 送	①ベルト コンベア	・連続的輸送ができる。 ・広い範囲の土砂を輸送できる。	・急勾配、大塊状になる土質や岩石、著しく軟らかい土、粘性土の輸送は困難
	②スクリー コンベア	・輸送距離が短いときは、最も経済的である。	・粘着性のあるもの、粒径の大きなものは輸送が困難。
	③バケット 方式	・浅い場合は、経済的である。	・非能率的で、作業効率が悪い。 ・作業が断続的である。
管 路 輸 送	④空気による 流体力輸送	・連続輸送である。 ・土砂の性質を変えないで搬送できる。	・含水比が低く、粘性の小さいものに限定される。
	⑤水による 流体力輸送	・土質含水比に対する適応性が広い。 ・安全性が高い。	・排出後に泥水処理の作業を必要とし、コスト面で高くなる。
	⑥ポンプによる 管路圧送	・施工性の向上、安全性が高い。 ・配管自在のため坑内が複雑でもよい。	・土質、工事の規模、施工環境によりコストが大きく左右される。
容 器 輸 送	⑦ズリ鋼車	・コンパクトで、小断面トンネル内でも運搬でき、行き違いすることもできる。	・費用が高くつく。 ・2%勾配までしか運搬できない。
	⑧ダンプ トラック	・敏速に移動できる。 ・比較的道路条件の良い所で、多量の運搬物を短距離運搬するのに良い。	・小断面の場合、小型のものになり、能力が落ちる。地下掘削では長い連絡通路が必要である。

ついて圧送に関する基礎実験を実施した。その結果、土砂圧送においてはポンプ自体の圧送性よりもホッパのピストン部への充填効率が土砂の圧送性に大きな影響を与えることが明らかになった。そのため、昭和62年度はホッパ部に改良を加えた土砂輸送装置の試作機を用いて各種土砂について圧送に関する基礎実験を実施した。

ついで、昭和63年度は、昭和62年度に製作したホッパのプロトタイプの改良および管路抵抗を低減させる圧送促進装置を試作し、各種土砂について圧送に関する基礎実験を実施した。

2 土砂の管路輸送特性

ポンプ圧送方式が土砂の搬送に利用され始めたのはごく最近であり、輸送物である土砂の性状が一定でないため、土質によっては輸送能力の低下、ひいては管内閉塞を生じることがある。

圧力を伴って土砂が円管内を流動する場合の流速分布は図-2.1 に示す3通りとなる。²⁾

図-2.1 (A)は降伏値をもつ粘性液体の流速分布であって、試料と管壁間の付着力がせん断応力より大きい場合である。図-2.1 (B)は試料と管壁間に働くせん断応力が付着力を超え、すべりを生じる場合であって、すべりを伴うビンガム流れという。シールド工事などで多用されるスクリーコンベヤにより押し出される土砂や一般のコンクリートの場合、また流動性の大きいグラウトでも圧力勾配がかなり大きい場合にこの流れとなる。図-2.1 (C)は不飽和の半固体（粘塑性体）の流動を示し、試料のせん断強度がせん断応力より大きい場合であって、含水量の少ない土砂、硬練りコンクリートの場合この流れとなり、半固体流れという。

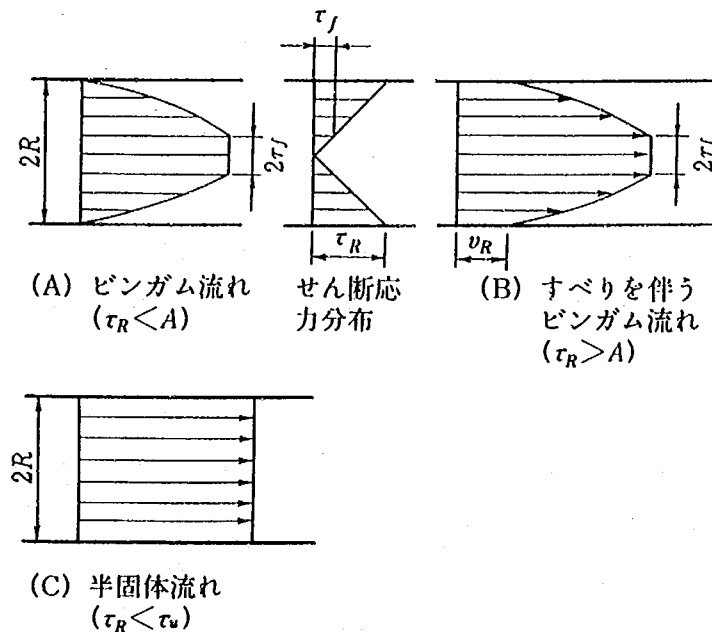


図-2.1 円管内の流速分布

図-2.1 (A)および(B)の流れは水力学的法則に従い、管軸方向の圧力分布は線形となる。これに対し、図-2.1 (C)の場合は指数関数的に変化し、また管軸方向圧力と半径方向圧力は相違する。

a) ビンガム流れ

流量は次の Buckingham の塑性流動式で与えられる。

$$Q_B = \frac{\pi R^4}{8 \eta_{pl}} \frac{\Delta P}{l} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_f}{R} \right)^4 \right] \quad (1)$$

ここで、 Q_B : ビンガム流量 (cm^3/s)、 R : 管の半径 (cm)、 l : 管の長さ (cm)、 η_{pl} : 塑性粘度 (gfs/cm^2)、 τ_f

：柱流半径 (cm) ただし、式(1)を適用できるのはせん断応力が試料と管壁との付着力を超えない場合に限られる。

b) すべりを伴うビンガム流れ

すべりを伴う場合の流量は次式で表わされる。

$$Q = Q_B + \pi R^2 V_R \quad (2)$$

ここで、 Q ：すべりを伴うビンガム流量 (cm³/s), V_R ：すべり速度 (cm/s) 試料と管壁管が液体摩擦状態にあるとすれば、管壁に働くラビング抵抗力はすべり速度に比例するので、

$$\begin{aligned} f_R &= \alpha V_R + A \\ &= \tau_R \\ &= \frac{R}{2} \frac{\Delta P}{l} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 f_R ：ラビング抵抗力 (gf/cm²), α ：粘性摩擦係数 (gfs/cm²), A ：付着力 (gf/cm²), τ_R ：管壁に接する試料のせん断応力 (gf/cm²) となる。

したがって、

$$V_R = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{2} \frac{\Delta P}{l} - A \right) \quad (4)$$

を得る。

c) 半固体流れ含水量の少ない土砂の場合には試料と管壁に固体間の摩擦、すなわちクーロン摩擦が作用すると考える。したがって、管壁における摩擦抵抗力は半径方向圧力に比例するので

$$\begin{aligned} f_R &= \mu P_r + A \\ &= \mu \kappa P + A \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 μ ：摩擦係数, P_r ：半径方向圧力 (gf/cm²), κ ：横圧係数, P ：管軸方向圧力 (gf/cm²) を得る。

ここで、力のつり合い (図-2.2 参照) より、

$$2 \pi R (\mu \kappa P + A) dx = \pi R^2 dP \quad (6)$$

を得る。ただし、 x は配管終端を原点にし、ピストン方向が正となるようにとった。

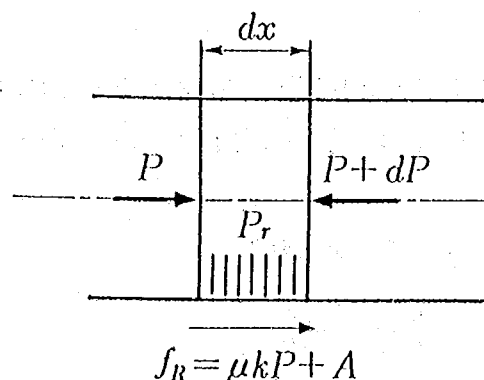


図-2.2 半固体流れ

境界条件 $x=0$ のとき $p=p_0$ で上式を積分すると,

$$p=p_0\exp\left(\frac{2\mu\kappa}{R}x\right)+\frac{A}{\mu\kappa}\left[\exp\left(\frac{2\mu\kappa}{R}x\right)-1\right] \quad (7)$$

$$P_r=\kappa P$$

$$=\kappa p_0\exp\left(\frac{2\mu\kappa}{R}x\right)+\frac{A}{\mu\kappa}\left[\exp\left(\frac{2\mu\kappa}{R}x\right)-1\right] \quad (8)$$

(管路圧送基礎式)を得る。このように管軸方向圧力および半径方向圧力は指数関数的に増加することがわかる。

3 土砂圧送基礎実験

土砂が管路を圧送される場合の特性について各種土砂による圧送実験を行った。また、比較のために高分子系脱水汚泥についても実施した。

3.1 実験装置

3.1.1 装置概要ならびに管路

実験に用いた装置は、図-3.1 に示すように土砂を水平圧送するための輸送管と圧送ポンプおよび計測器とから成っている。輸送管は、200A 鋼管、全長は約50m（その内曲管部は約2m）である。鋼管のポンプ吐出側には、管路加振用バイブレータを取り付ける台を備えている。また、管には5箇所（各左右2個）の圧力センサを取り付けるための穴が開けてある。

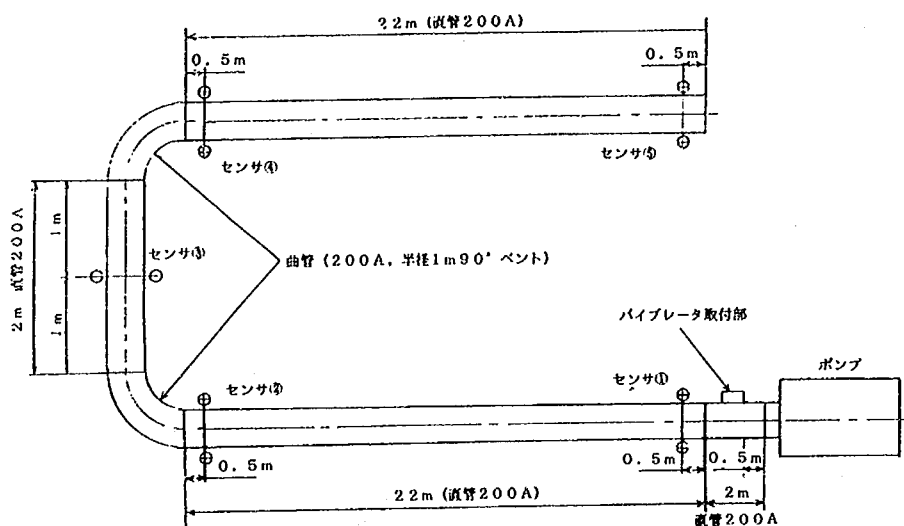


図-3.1 土砂圧送基礎実験装置

3.1.2 ポンプ

ポンプは、土砂およびコンクリート圧送用のシリンダ往復タイプを用いた。

ポンプの圧送機構を図-3.2 に仕様を表-3.1 に示す。

3.1.3 計測機器

1) 圧力センサ

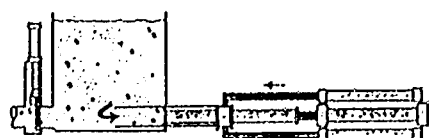
圧力センサは50kg/cm²まで測定できるダイヤフラム型のものを採用し、10箇所に取り付けた。

2) 記録機等

計測に関しては、圧力センサより、動ひずみ計およびシグナルコンディショナを介してデータレコーダに収録した。また、収録したデータをペン書きレコーダに出力し、圧力を求めた。

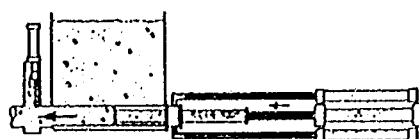
①土砂の取り込み

グラベルシリンダ内に土砂を取り込む。



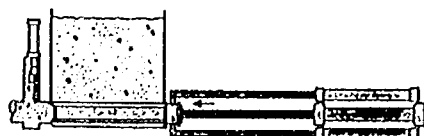
②土砂の圧送

ゲートバルブを開きピストンで土砂を圧送する。



③圧送の完了

ピストンがグラベルシリンダ内の土砂をすべて押し出す。



④引き戻し

ゲートバルブを閉めピストンとグラベルシリンダを同時に引き戻す。

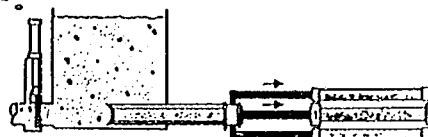


図-3.2 ポンプの圧送機構

表-3.1 ポンプの仕様

項 目	仕 様
最大吐出量	35m ³ /h
油圧シリンダー形式	特殊二重シリンダー式
最大吐出力	62kgf/cm ²
シリンダー内径	228.6 mm ϕ
ストローク長	800 mm
ストローク容量	0.333m ³
シリンダー往復数	15~18回
全長, 全幅, 全高	4,500×750×1,420 mm
全重量	3500kg

3.2 実験条件

実験は、61年度および62年度の2回実施した。61年度は、表-3.2に示すように3種類の試料土（土、関東ローム、砂）に関して、含水比を3条件および土と砂の混合、関東ロームと砂の混合などを含めて11条件について実施した。なお、土と砂、関東ロームと砂の混合割合は、それぞれ50%づつとした。含水比の高、中、底については、それぞれ相互の比較である。

62年度は、表-3.3に示すように2種類の試料土（関東ローム、砂）に関して含水比を3条件および関東ロームと砂の混合、さらに比較のために高分子系脱水汚泥の計10条件について実施した。

表-3.2 実験条件 (61年度)

実験 番号	実験条件	
	試料土	含水比
1	土	高
2	土	中
3	土	低
4	土1:砂1	高
5	土1:砂1	低
6	砂	高
7	砂	低
8	砂	中
9	関東ローム	低
10	関東ローム1:砂1	高
11	関東ローム	高

表-3.3 実験条件 (62年度)

実験 番号	実験条件	
	試料土	含水比
21	関東ローム	低
22	関東ローム2:砂1	低
23	砂	低
24	脱水汚泥	—
25	関東ローム1:砂2	低
26	関東ローム1:砂1	低
27	関東ローム	中
28	関東ローム	高
29	関東ローム1:砂1	中
30	関東ローム1:砂1	高

3.3 実験計測項目

まず、試料土およびその原材料である土、関東ローム、砂の3種類に関して、比重試験 (JIS A1202)、粒度試験 (JIS A1204)、含水比試験 (JIS A1203) を実施した。また高分子系脱水汚泥は、下水試験方法による含水試験を実施した。圧送実験中は、前記5箇所 (計10個) の圧力センサにより管内圧力を測定すると共に、1分間当りのピストンストローク数を計測し、ポンプの輸送量を把握した。

3.4 実験結果

3.4.1 実験試料

試料の試験結果を表-3.4に示す。ここで、試料土の水/砂 (%) (含水比試験で得られた試料土の水分重量と粒度試験で得られた試料土の砂分重量の比 以下 水砂比) と高分子系脱水汚泥の含水率は同質なものとなした。これは、高分子系脱水汚泥の粒度分布が砂の粒度分布と相似であることによる。

3.4.2 土質の違いと管内圧力

測定した管内圧力について、管長と圧力の関係を図-3.3に示す。どの条件においても圧送距離に従い圧力が下がっているが、曲管部においては勾配がやや急の傾向が見られた。

管内圧は砂に比べ土および関東ロームの方がかなり高い値となっている。また、それぞれの土質においては、含水比の高い方が圧力は低い値であった。

3.4.3 含水比と圧力損失

管内圧力の1m当りの圧力損失と含水比の関係を図-3.4に示す。図は、輸送管の全長47m間の平均の圧力損失、直管部42m間の圧力損失、および曲管部5m間の圧力損失である。

図より、直管部に比べ、曲管部の圧力損失はどの条件においても大きいことがわかる。これは、直管部に比べて試料の変形抵抗が加わるためと考えられる。

全般的には、含水比の低い方が圧力損失が高いという傾向が見られたが、圧力損失の差が含水比の違いによるものか、土質の違いによるものか、判断できなかった。

3.4.4 圧力解析

1) 理論式による解析

「2. 土砂の管路輸送特性」で考察したとおり、含水量の少ない土砂は管路による圧送中は半固体流であることが予想される。その考察において、実際に計測可能な配管の半径方向圧力の配管での位置に関する関係式すなわち(8)式が得られている。昭和62年度の実験における1条件のデータをプロットすると図-3.5のようになる。このデータをながめ $P_0 = 0$ を考慮すると、(8)式にあてはまるように見える。(8)式が実験データ合うようにパラメータを決定する。(8)式は未知パラメータに関して非線形なのでニュートン・ラプソン法によりパラメータを同定すると、図-3.5のよう $P_r = 17.8[\exp(0.224x) - 1]$ となる。(付録参照) (このとき、データ数が5個と非常に少ないので、データ間を線形補間しさらにその値に正規乱数を加印した12個のデータを加えて17個のデータにより数値計算を行なった。)

2) 線形回帰式と理論式

一般に実験データの回帰は直線で行なうようであるが、それに従って図-3.5のデータに関して回帰直

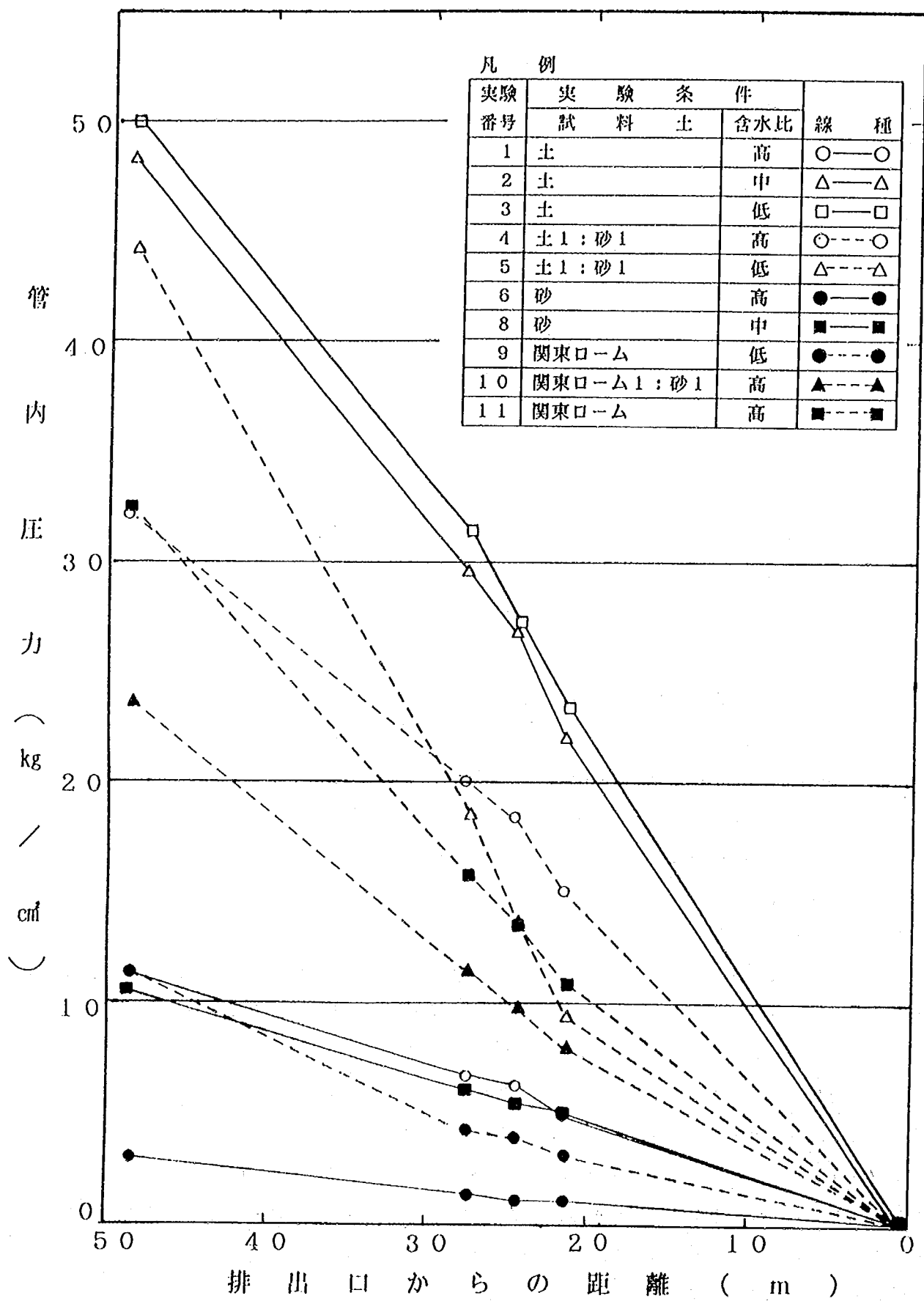


図-3.3 管長と圧力の関係

表-3.4 材料一覧表

実 験 番 号			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ 以上) %		20.6	19.4	18.9	15.2	15.6	10.4	10.6	9.9	8.2	10.5	13.9
	砂分 (74~2000 μ) %		53.8	54.7	52.7	64.4	72.6	80.1	83.4	76.6	62.4	66.1	47.9
	シルト分 (5 ~74 μ) %		21.6	21.9	24.3	18.1	10.3				25.5	20.3	32.8
	粘土分 (5 μ 以下) %		4.0	4.0	4.1	2.3	1.7	9.55	6.0	12.8	3.9	3.2	5.45
	最大粒径 mm		9.52	9.52	9.52	9.52	9.52	7.14	9.52	9.52	7.14	9.52	14.31
	均等係数 U		34.5	32.1	45.1	17.7	10.9	8.3	4.80	5.27	6.17	14.4	18.3
	曲率係数 U		0.63	0.52	0.58	1.03	1.21	1.73	1.13	0.99	0.56	1.25	0.66
土粒子の比重 G			2.619	2.619	2.601	2.608	2.629	2.641	2.656	2.654	2.618	2.627	2.594
含水比 W%			28.9	27.3	25.2	25.9	23.5	25.1	19.2	24.1	60.2	42.2	69.9
水/ (砂+礫) %			38.8	36.8	35.2	32.5	26.6	27.7	20.4	27.9	85.3	55.1	113.1
水/砂 %			53.7	49.9	47.8	40.2	32.4	31.3	23.0	31.5	96.5	63.8	145.9

実 験 番 号			21	22	23	25	26	27	28	29	30
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ 以上)	%	4.2	19.9	25.7	20.5	18.4	6.6	4.1	15.4	7.7
	砂分 (74~2000 μ)	%	43.5	56.3	72.2	45.8	62.2	35.5	30.2	54.4	32.2
	シルト分 (5~74 μ)	%	44.1	18.3	2.1	26.7	14.4	48.6	50.2	22.2	41.6
	粘土分 (5 μ 以下)	%	8.2	5.5		7.0	5.0	9.3	15.5	8.0	18.5
	最大粒径	mm	4.76	9.52	9.52	19.1	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76
	均等係数	U	113.6	24.0	4.78	34.7	27.2	20.0	22.9	54.7	—
	曲率係数	U	5.91	1.16	0.87	0.43	2.35	0.28	0.92	0.99	—
土粒子の比重		G	2.672	2.627	2.631	2.629	2.663	2.665	2.649	2.667	2.709
含水比		W%	79.8	49.6	7.4	53.7	44.2	94.3	102.3	58.9	102.3
水/ (砂+礫)		%	167.3	65.1	7.6	81.0	54.8	224.0	298.3	84.4	256.4
水/砂		%	183.4	88.1	10.2	117.2	71.1	265.6	338.7	108.3	317.7

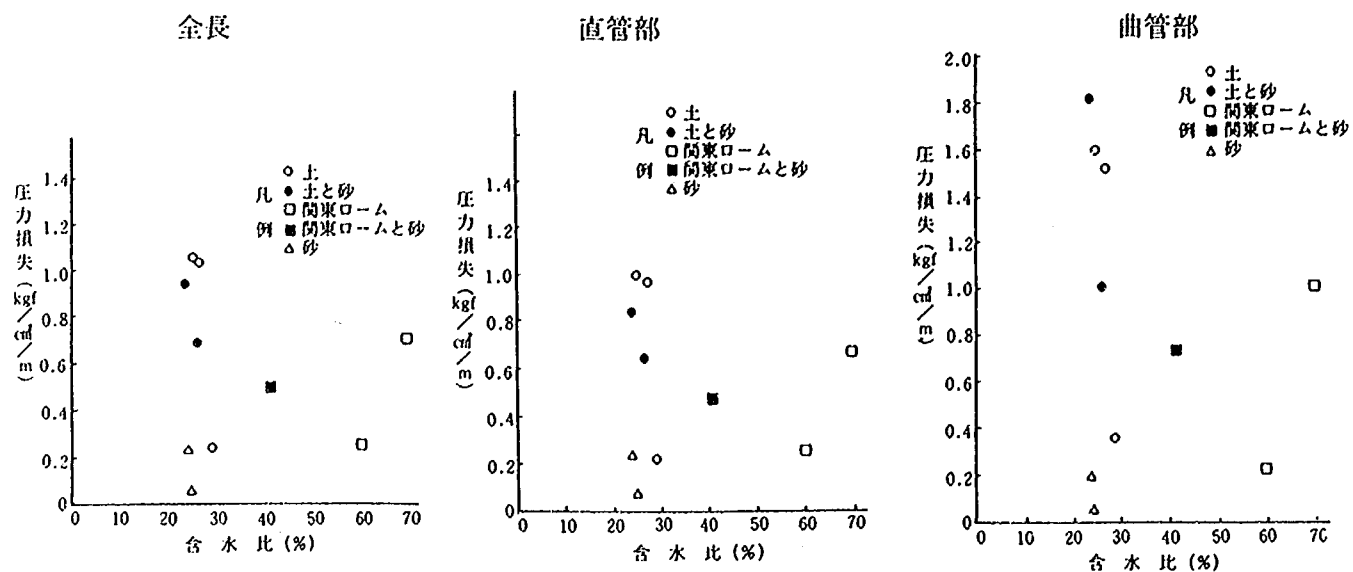


図-3.4 含水比と圧力損失

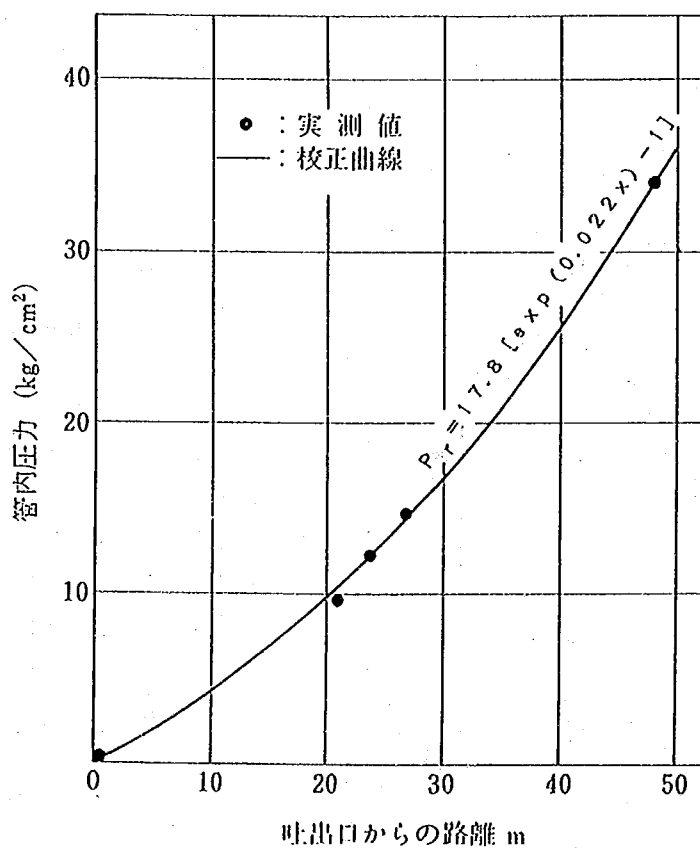


図-3.5 管内圧力と吐出口からの距離の関係

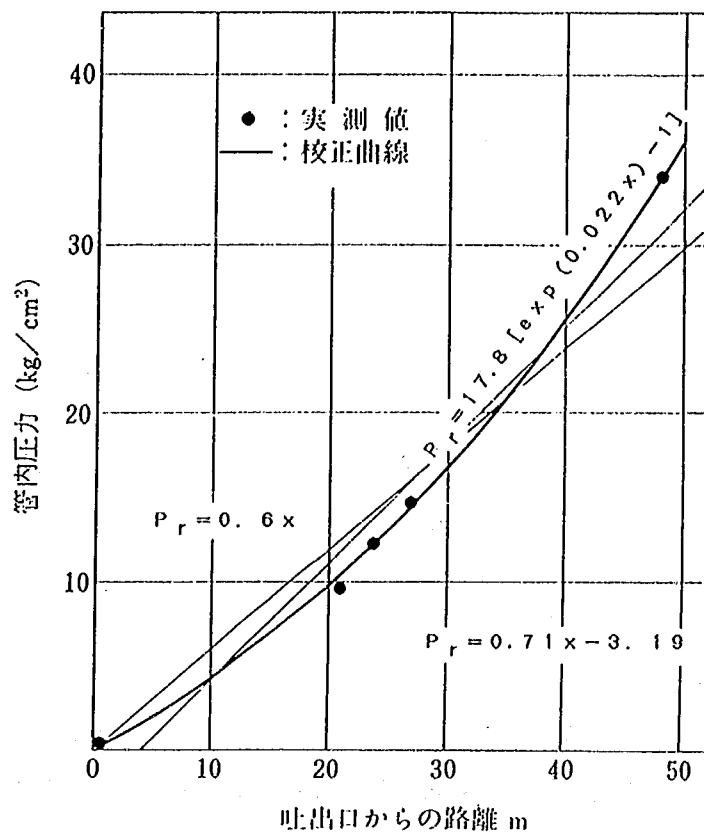


図-3.6 管内圧力と吐出口からの距離の関係

線を求めると、 $P_r = 0.71x - 3.19$ となる。一方、配管終端で半径方向圧が0という実験データの性質を考慮すると、回帰直線は $P_r = 0.6x$ となる。

ここで、これらの回帰直線と1)で得られた回帰式の比較を行なう。多項式による回帰モデルの優劣を比較する規範に、AIC (赤池情報量)⁹⁾がよく用いられる。

この規範は、

$$-2\ln(\text{最大尤度}) + 2(\text{パラメータ数})$$

で与えられ、この値が小さいモデルが良いと判定する。このAICを用いると $P_r = 0.71x - 3.19$ の方がよい回帰式と判定される(表-3.5参照)。ところが、AICは未知パラメータに関して線形のモデルでないと

表-3.5 システム構造の決定

システムモデル	誤差分散	パラメータ数	AICの値	砂原・福田の規範の値
$P_r = 0.6x$	4.8	1	28.7	16.2
$P_r = 0.71x - 3.19$	2.8	2	21.5	14.4
$P_r = 17.8 [\exp(0.0224x) - 1]$	0.22	2	=====	-7.3

有効でないと云われており、理論式 (8)式) は未知パラメータに関して非線形なので直線モデルとの優劣は AIC では論じれない。

非線形のモデルにも有効な規範として、Rissanen の規範と砂原・福田の規範が知られているので、これらを用いてモデルの優劣を論じる。前者は最大尤度を用いるが、後者は計算し易い誤差分散を用いるので、今回は後者の規範を用いてモデルの優劣を判定することにした。

砂原・福田の規範は、

$$\frac{(\text{データ数})}{2} \ln (\text{誤差分散}) + (\text{パラメータ数}) \ln (\text{データ数})$$

で与えられ、この値の小さいモデルがよいと判定される。この規範を用いると、直線式と理論式の比較が行えた。その結果実験データは、直線式より理論式すなわち(8)式のような指数関数による回帰の方が良いと判定される (表-3.5 参照)。

以上の考察により、低含水量の土砂は管路を圧送されるとき半固体流れであるとみなせる。

3.5 土砂圧送方式の問題点

土砂を圧送する場合、圧送距離を確保するために大量の水を加えてスラリーもしくは泥水輸送するのが一般的である。しかし、この泥水輸送は搬出後に泥水処理の作業を必要とし、コスト面で高くなり、また処理用地の確保等の問題を抱えている。

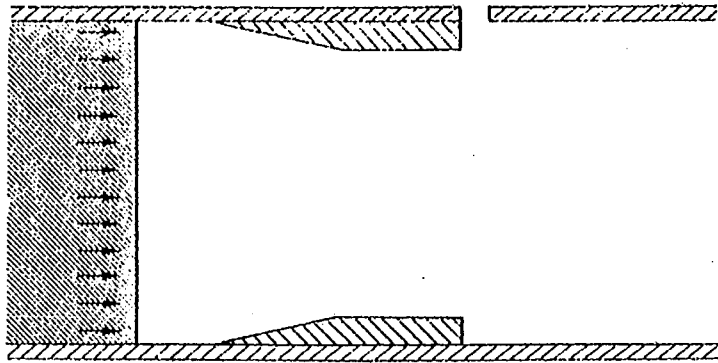
今回行った土砂圧送実験では、現在最も土砂圧送に適していると思われるポンプを用いたにもかかわらず、わずかな距離で閉塞したり、ポンプシリンダ内への土砂の取り込み効率が低い例もみられ、含水比の少ない土砂の管路圧送は容易に行えないことが判る。

これらの問題点を解決すれば、水の確保、排土処理を必要としないシンプルな土砂の搬出が可能と思われる。今後土砂圧送における設備側のあい路となっている次の二点について開発が期待される。

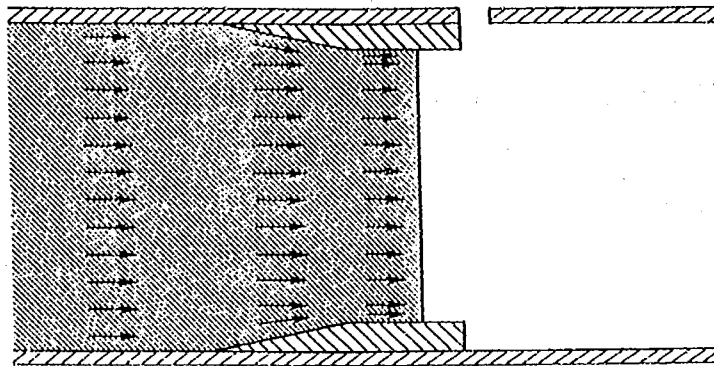
(1)土砂を効率的に取り込むポンプまたはホッパの開発

(2)圧送抵抗の少ない圧送配管の開発

- ① ポンプから押し出された土砂は、すでに締め固められた状態にある。



- ② 土砂は、絞りリングにより徐々に絞られる。



- ③ リングを通過した土砂は、管壁との間に間隙を生ずる。

この間隙に潤滑材を注入すると潤滑層を形成し続け、摩擦抵抗を低減させる。

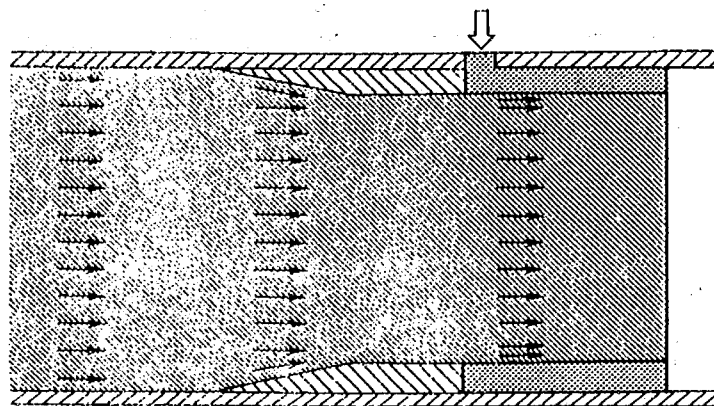


図-4.2 給水管の機構

に容易に浸透することなく潤滑層を形成し続け、摩擦抵抗が低減され、ポンプ圧送能力が高められる（H-T管）⁶⁾。

また絞りリングの内周面に傾斜面が形成されているので、土砂はリングによって徐々に絞られることとなり、リングによる抵抗を最小限に抑えることができる。同様の理由で絞りリングの厚みは間隙を形成するという前提のもとに可能な限り小さい方がよい。

潤滑材としては、水等の液体に限らず霧状のものを含む気体、粉体状の固体、さらには液体等を封入したカプセル等を選択することができるため土砂に限らず生コンクリート、脱水汚泥、焼却汚泥、粉体等を対象とすることもできる。⁷⁾

4.1.2 実験概要

実験は、給水管の土砂における有用性を検証すべく、絞りリングの傾斜角度（図-4.1 参照）を90°と45°の2種類と給水管を用いない場合について実験を行った。

4.1.3 実験装置

図-4.3に配管状況及びセンサ位置図を示す。土砂を垂直に圧送するための輸送配管、ポンプ、ホッパー、給水装置および計測機器から構成される。輸送管は200A鋼管で全長32m（内水平部約27m、垂直部約5m）である。また管には、5地点8ヶ所に圧力センサを取り付けた。

圧送ポンプは基礎実験と同種の油圧式単胴シリンダポンプを用いた。また、潤滑材に水を使用し、高圧洗浄機より給水した。

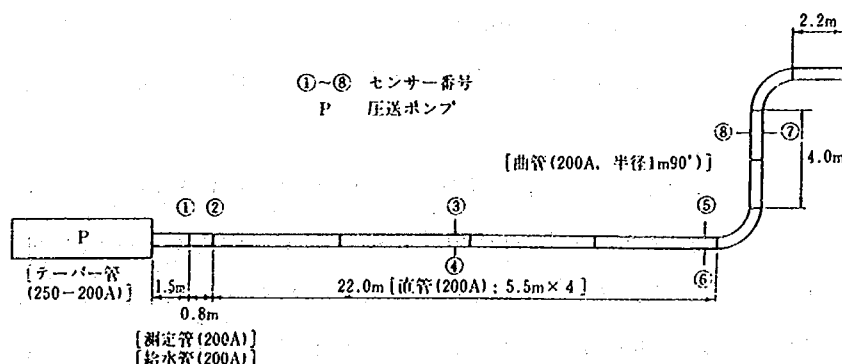


図-4.3 配管状況およびセンサ位置

4.1.4 実験条件

表-4.1に土砂圧送実験条件を示す。供試土は、自然状態のロームと砂及び高分子系脱水汚泥を用いて表-4.1の配合による8条件について実験を行った。

4.1.5 実験計測項目

測定項目については、原材料である関東ロームおよび砂に関して、比重試験（JIS A1202）、含水量試験（JIS A1203）および粒度試験（JIS A1204）の土質試験を実施した。また高分子系脱水汚泥は、下水試験方法による含水比試験を実施した。圧送実験については、管内圧力、圧送距離、ピストン圧力を測定した。

表-4.1 実験条件

実験番号	実 験 条 件
No. 1	関東ローム：砂＝1：1 ー
No. 2	関東ローム：砂＝1：1 リング角度90°
No. 3	関東ローム：砂＝1：1 リング角度45°
No. 4	関東ローム：砂＝2：1 ー
No. 5	関東ローム：砂＝2：1 リング角度90°
No. 6	関東ローム：砂＝2：1 リング角度45°
No. 7	汚泥のみ ー
No. 8	汚泥のみ リング角度45°

実験のフロー及び手順を図-4.4に示す。全てのセンサは動ひずみ計に接続し、そこからペンレコーダにより圧力波の記録をとった。

4.1.6 実験結果

表-4.2に土質試験結果を、表-4.3に給水管と圧送距離の関係を示す。表-4.3に示すとおり給水管を用いたものはすべて土砂は通管している。これに対して給水管を用いなかった場合は、関東ローム：砂＝1：1において圧送距離13.2m（No1 センサ40kgf/cm²時）関東ローム：砂＝2：1では圧送距離15.5m（No1 センサ40kgf/cm²時）にとどまり、給水管を用いた場合には圧送能力が飛躍的に改善されていることがわかる。

図-4.5に管内圧力と圧送距離の関係を示す。リングの傾斜角度が90°と45°では、45°の方が圧力損失が少ない。これは土砂がリングを通過するさい角度90°の場合は土砂の変形が圧送方向に垂直な同一断面で同時に生じるのに対して、45°の場合は、徐々に絞られるため絞り込み途中における断面変形面積が小さく、絞りリングによる圧送抵抗が少なかったことと、さらに潤滑材の水が供給水から絞りリングによってできた間隙を通して土砂表面をまんべんなく覆い易かったことが考えられるが定量的に把握することはできなかった。

表-4.4に給水管の時間当り給水量を、表-4.5に圧送実験試料含水比一覧を示す。表-4.5に示すとおり、圧送前における土砂の含水比と、圧送後の管の中心における含水比はほとんど変わらず、外層においてもスラリー状態は外層から2～3mm程度であり、十分に満足のいく結果となった。これは、土砂が管路中を柱状で移動し、水が潤滑層を形成し続けていることを実証している。また、水の供給を断続的に行ったにもかかわらず、全管路の土砂に潤滑層が形成された。

汚泥の圧送においては、問題なく送れたものの汚泥自体に弾力性があるため給水管の効果は土砂程ではなかった。

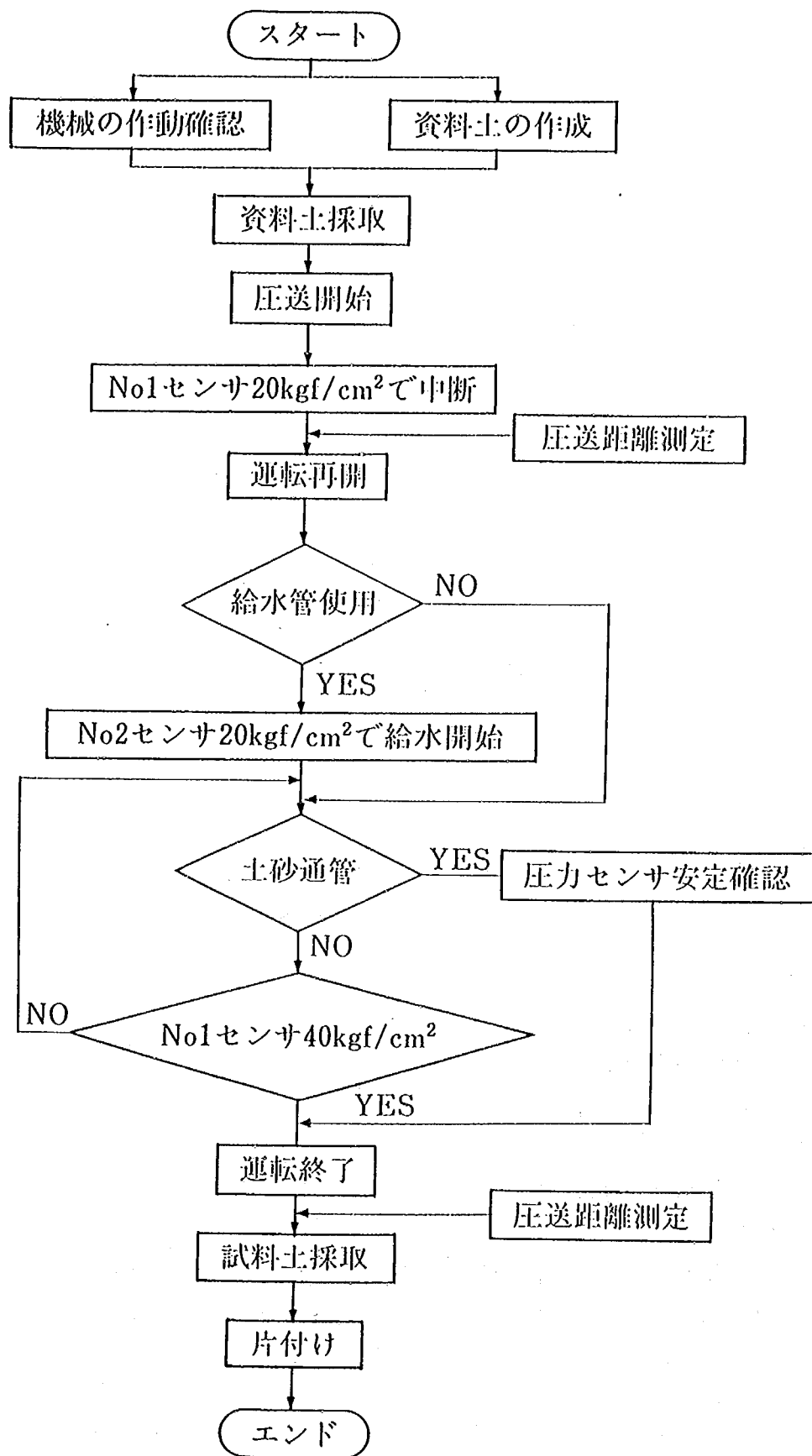


図-4.4 実験のフロー及び手順

表-4.2 土質試験結果

土 質 試 料			関東ローム	砂	
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ 以上)	%	6	20	
	砂分 (74~2000 μ)	%	18	77	
	シルト分 (5 ~74 μ)	%	45	3	
	粘土分 (5 μ 以下)	%	31	—	
	最大粒径	mm	9.32	9.52	
	均等係数	U_c	—	5.0	
	曲率係数	U_c'	—	0.9	
分 類	日本統一土質分類		—F	(Spu)	
			細粒度	均等粒度の砂	
土粒子の比重			G	2.747	2.776
含水比 W_n			%	93.0	7.0
水/ (砂+礫)			%	387.5	7.2
水/砂			%	516.1	9.1

表-4.3 給水管と圧送距離の関係

実 験 番 号	1	2	3	4	5	6	7	8
1 番センサの指示圧力が20 kg/cm ² の時の圧送距離 (m)	6.3	10.7	13.9	10.0	6.4	8.9	25.1	25.8
1 番センサの指示圧力が40 kg/cm ² の時の圧送距離 (m)	13.2	—	—	15.5	—	—	—	—
通管時の 1 番センサの指示圧力 (kg/cm ²)	—	9.8	5.0	—	21.1	6.6	26.1	22.3
最大ピストン圧力 (kg/cm ²)	180	150	120	110	210	140	100	110
リ ン グ 角 度	—	90°	45°	—	90°	45°	—	45°

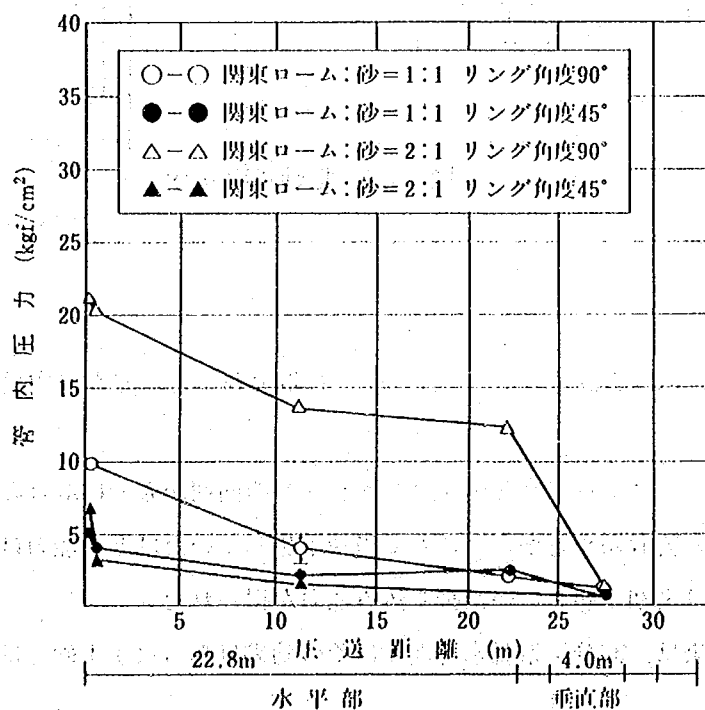
表-4.4 給水管の時間当たり給水量

注) 無負荷時

リング角度	開度	測定結果 (cc/0.5 min)				給水量 (cc/min)
		1 回目	2 回目	3 回目	平 均	
90°	1/6	3,545	3,335	3,600	3,493	6,987
	全開	6,780	6,740	6,790	6,770	13,540
45°	1/6	2,940	2,840	2,840	2,873	5,747
	全開	6,840	6,860	6,890	6,863	13,727

表-4.5 圧送実験試料含水比一覧

実 験 番 号	1	2	3	4	5	6	7	8
圧 送 前	30.98	32.74	44.32	49.42	62.97	52.80	367.30	367.30
圧送後中心部	30.85	33.01	45.41	46.39	62.25	52.66	492.60	366.30
圧送後管壁部	—	40.93	49.12	—	66.81	55.69	507.60	336.70
圧送後の平均	—	40.52	48.93	—	66.58	55.54	506.84	338.07
圧送前後の差	—	7.78	4.61	—	3.61	2.74	139.54	-29.23
リング角度	—	90°	45°	—	90°	45°	—	45°



注) 同距離のセンサーについては、平均値を使用した。

図-4.5 管内圧力と圧送距離の関係

4.2 ホッパ改良による方法

4.2.1 振動による方法

ホッパの壁面を振動させるために200v, 0.4kw, 4P, 50Hzのモータを用いた図-4.6に示すようなホッパを製作し、実験を行った。

モータによりホッパの壁面を振動させたときと、振動させなかったときとでは、土砂圧送ポンプのピストン部への充填能力の差はほとんど認められなかった。

4.2.2 土砂押し込み装置による方法

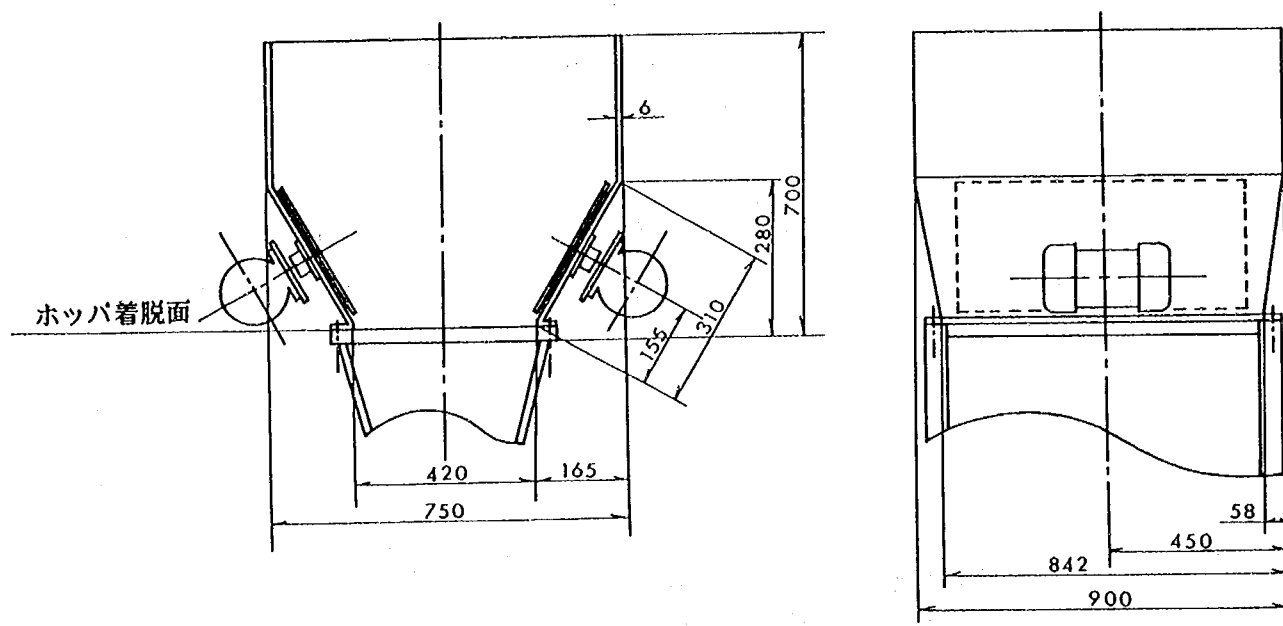


図-4.6 振動式ホッパ

図-4.7に示すような押し込み装置付きホッパをポンプに取り付けた。また、内壁面に低摩擦高分子板を取り付けた。

実験の結果、押し込み装置のストロークとポンプアクションの同期が充分に取れなかったことおよび、ホッパ容積に対して押し込み装置が小さかったことで当初予想していたほどの能力はなかった。しかし、高分子系脱水汚泥においては当初予想していた押し込み能力が得られた。

低摩擦高分子版の滑り効果は、高分子系脱水汚泥ではその効果はあったが土砂ではあまり効果は認められなかった。

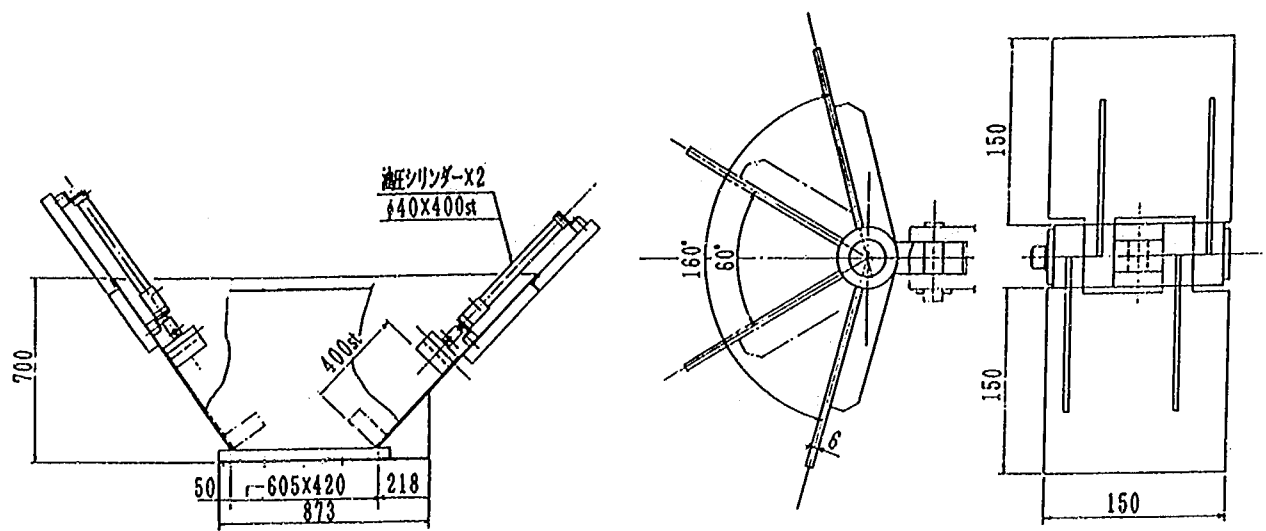


図-4.7 押し込み式ホッパ

5 ま と め

土砂に限らず管路圧送においては、常に閉塞の危険性をはらんでいる。一旦閉塞すると、機能復帰するまでに多大な時間と労力を必要とし、圧送距離が長くなればなるほど負担は大きくなる。今回行った給水管を用いる方法は、土砂の圧送性を向上させなおかつ排土処理が容易に出来るなどの効果があり、十分利用できることが確認された。

給水管の実用化にあたっては、移送物の性状と経済性をかんがみ絞りリングの形状を決定する必要がある。つまり、リングによる圧送抵抗を少なくするには機械加工が必要となるが、同じ容量のポンプを使用するのであれば、絞りリングの形状はシンプルな物の方が経済的である。

今回の実験から、給水を断続的に行っても、十分に圧送性を向上できることがわかった。そこで、管内圧力をパラメータとして給水量を制御する方法が考えられる。給水管を管路曲がり部などの管内圧力が上昇する箇所に設置し、管内圧力がある一定値を越えた場合のみ給水を行うもので経済的であるとともに圧送における信頼性も向上される。³⁾

今後は、図-4.8に示すような土砂の掘削から搬出、排土処理にいたるまでの全体を統合するシステムの構築も可能と考える。

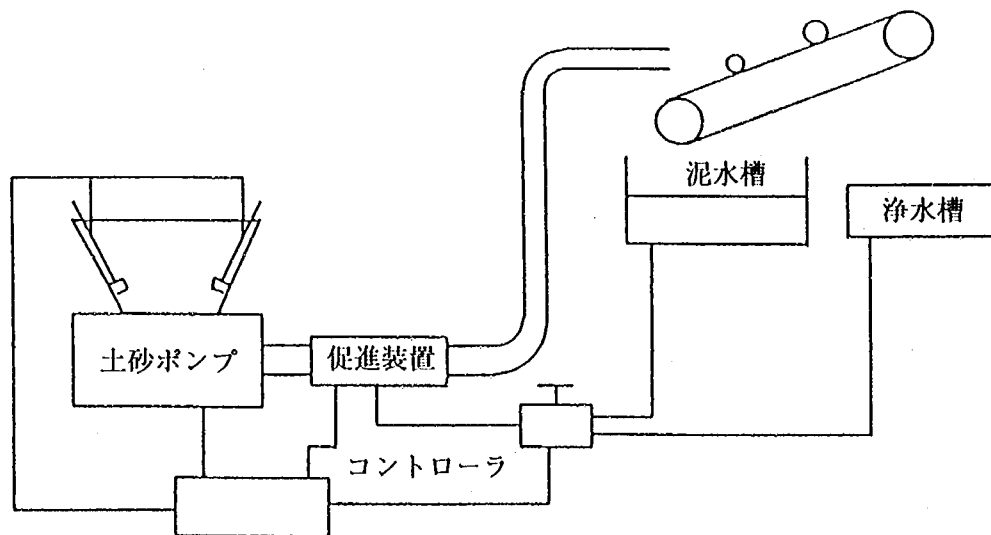


図-4.8 土砂輸送システム構想図

あ と が き

本報告書は、今後ますます増大する傾向にある地下空間の利用等に対応し、掘削土砂搬出技術を確立するために実施した「土砂輸送技術の開発」に関する研究成果について、とりまとめたものである。

高効率土砂輸送装置の開発においては、給水管による方法が含水比の低い土砂の管路輸送において有効であることが検証された。なお、この方法は「管路圧送促進方法およびその装置」として特許出願中である。しかし、今回の実験では、潤滑材に水を用いた場合についてのみ実施したもので、今後実用化に向けて、空気や気泡等の後処理を必要としない潤滑材についても検証を行い、本方法の真の評価がなされるものと期待する。

土砂圧送ポンプについては、土砂の取り込み能力を改善することが圧送性を向上させるための課題として残されている。しかし、機械の実用化に向けて、いくつかの可能性を示すことができたので、今後の研究開発に期待したいと思う。

また、本研究の成果が実際の現場で活用され、施工性、経済性、安全性の向上に資することができれば幸いである。

最後に、実験に際して、試料の提供等御協力していただいた汚泥研究室ならびに、関係各位に対して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 狩野 武：粉粒体輸送装置，日刊工業新聞社，1978
- 2) 村田二郎：フレッシュコンクリートの挙動に関する研究，土木学会論文集，第378号/Vol. 6 1987年 2 月
- 3) 石田和則，高橋繁夫，菊池 豊，蒔田充男，渋谷光男：砂れき土搬送ポンプの実用化と自動運転システム，建設の機械化，1988年11月
- 4) 低スランプコンクリート圧送工法研究会：低スランプコンクリート圧送ポンプの開発報告書，1986年 3 月
- 5) 同上，1987年 3 月
- 6) 同上，1988年 3 月
- 7) 奥野他：土砂の空気輸送の研究と現場テスト，小松技報，第25巻，第 3 号
- 8) 長 健次，高津知司，橋本信仁：含水比の低い土砂の管路圧送における圧送特性の向上法，土木技術資料31-10 (1989)
- 9) 赤池弘次：情報量基準 AIC とは何か，数理科学 No. 153 (1976)
- 10) 村上征勝，田村義保：パソコンによるデータ解析，朝倉書店 (1988)
- 11) 片山 徹：モデル字数の選択，コンピュータロール No. 23 (1988) コロナ社
- 12) 砂原善文，福田得夫：非定常非線形システムのモデリング，計測と制御，Vol. 27, No. 3, pp. 233-246
- 13) 小田中敏男，中山 隆，相良信子：動的計画法と非線形解析，楳書店 (1977)

A パラメータ同定

A.1 最尤法

計測値 y がパラメータ θ と計測位置 x との関数モデルで現わされると仮定する。

すなわち,

$$y=f(\theta, x) \quad (9)$$

ただし, y はスカラー θ と x は各々 1 次元および m 次元ベクトル, 又計測値は N 個あるとする。

このとき, モデルと実データの差を

$$\begin{aligned} e_i &:= y_i - f(\theta, x_i) \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (10)$$

とする。(9)式のモデルにおいて, データより何らかの意味で最適なパラメータ θ を推定したい。これは, モデルに含まれるパラメータ θ を確率変数とみなして, 得られたデータに対してパラメータ θ の事後確率が最大になるように, パラメータに推定値を決定することが妥当といえよう。すなわち, 最尤法によってパラメータ θ を決定する。

データの集合を $Y_N = \{y_i \mid i=1, 2, \dots, N\}$ とするとパラメータ θ の事後確率 $P(\theta \mid Y_N)$ はベイズの定理より

$$\begin{aligned} P(\theta) &= \frac{P(\theta \cap Y_N)}{P(Y_N)} \\ &= \frac{P(\theta)}{P(Y_N)} P(Y_N \mid \theta) \end{aligned} \quad (11)$$

となる。いま, $P(\theta)/P(Y_N)$ を一定と仮定すると, $P(\theta \mid Y_N)$ を最大にすることと $P(Y_N \mid \theta)$ を最大にすることは, 同値である。又, $P(Y_N \mid \theta)$ を最大にするには, その確率密度関数 $p(Y_N \mid \theta)$ を最大にすることで十分である。ここで, 確率密度関数 $p(Y_N \mid \theta)$ に実データ Y_N を代入したものを尤度関数という。又, 尤度関数を最大にするパラメータ θ を最尤推定値という。

A.2 最尤法によるパラメータ同定

尤度関数 $p(Y_N \mid \theta)$ は,

$$p(Y_N \mid \theta) = \left| \frac{\partial e(\theta)}{\partial y^v} \right| p(e(\theta) \mid \theta) \quad (12)$$

となる。ここで, $\left| \partial e(\theta) / \partial y^v \right|$ はヤコビ行列, $e(\theta) = [e_1(\theta), e_2(\theta), \dots, e_N(\theta)]'$,

$y^v = [y_1, y_2, \dots, y_N]'$ である。(10)式より $\left| \partial e(\theta) / \partial y^v \right| = 1$ であるので, (12)式は,

$$p(Y_N \mid \theta) = p(e(\theta) \mid \theta) \quad (13)$$

となる。

今, $e(\theta)$ が正規型確率密度関数 (平均 0, 共分散行列 $\Lambda = \text{diag.}(\sigma^2, \dots, \sigma^2)$) をもつとすると,

$$P(Y_N \mid \theta) = p(e(\theta) \mid \theta)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\Lambda|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} e'(\theta) \Lambda^{-1} e(\theta) \right] \quad (14)$$

となる。(14)式を最大にする θ を求めることは、 $\ln p(Y_N | \theta)$ を最大にする θ を求めることは同値なので、 θ を推定するための評価関数 $J(\theta)$ を $\ln p(Y_N | \theta)$ すなわち、

$$J(\theta) = \frac{N}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln \Lambda + \frac{1}{2} e'(\theta) \Lambda^{-1} e(\theta) \quad (15)$$

とする。よって、最尤推定問題は(15)式を最小にする θ を求めることに帰着される。

A.3 ニュートン・ラブソン法による解法

今回の理論式

$$P_r = \kappa P_0 \exp(\theta_1 x) + \theta_2 [\exp(\theta_1 x) - 1] \quad (16)$$

の場合、評価関数 $J(\theta)$ はパラメータ θ に関して二次形式にならないので、単に

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (17)$$

では、最尤推定値は求められない。すなわち、(17)式がパラメータ θ に関して線形とならないので、 $J(\theta)$ の θ に関する最小化は、非線形最適問題となる。ここで、非線形最適問題の解法で一般的に良く知られているニュートン・ラブソン法¹³⁾に付いて述べる。

今(17)式を満足するパラメータを $\hat{\theta}$ とおき、(17)式の左辺を $\hat{\theta}(k)$ のまわりでテーラ展開をすると

$$\frac{\partial J(\hat{\theta})}{\partial \theta} = \frac{\partial J(\hat{\theta}(k))}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 J(\hat{\theta}(k))}{\partial \theta^2} (\hat{\theta} - \hat{\theta}(k)) + o(\hat{\theta} - \hat{\theta}(k)) \quad (18)$$

となる。ただし、

$$\frac{\partial J(\cdot)}{\partial \theta} = \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \cdot}$$

$$\frac{\partial^2 J(\cdot)}{\partial \theta^2} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \right)' \Big|_{\theta = \cdot}$$

o : ランダウの記号

$$\frac{\partial J(\cdot)}{\partial \theta} = \left[\frac{\partial J(\cdot)}{\partial \theta_1}, \frac{\partial J(\cdot)}{\partial \theta_2}, \dots, \frac{\partial J(\cdot)}{\partial \theta_l} \right]$$

$$\left(\frac{\partial^2 J(\cdot)}{\partial \theta^2} \right)_{ij} = \frac{\partial^2 J(\cdot)}{\partial \theta_i \partial \theta_j}$$

$$\left(\frac{\partial^2 J(\cdot)}{\partial \theta^2} \right) \text{はヘッシアン行列}$$

である。

又、 $(\hat{\theta}(k+1) - \hat{\theta}(k))$ が十分小さくなるような $\hat{\theta}(k+1)$ に対して近似的に

$$\frac{\partial J(\hat{\theta}(k))}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 J(\hat{\theta}(k))}{\partial \theta^2} (\hat{\theta}(k+1) - \hat{\theta}(k)) = 0 \quad (19)$$

が成り立つ。

今、 $\partial^2 J(\hat{\theta}(k))/\partial \theta^2$ が正則ならば、

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) - \left[\frac{\partial^2 J(\hat{\theta}(k))}{\partial \theta^2} \right]^{-1} \frac{\partial J(\hat{\theta}(k))}{\partial \theta} \quad (20)$$

が成り立つ。

上式を用いて、未知パラメータ θ の最尤推定値 $\hat{\theta}$ を求めることが出来る。

A.4 ニュートン・ラプソン法の今回の理論式への適用

今回の理論式において P_0 (大気圧) = 0 とおくと

$$P_r(\theta) = \theta_2 [\exp(\theta_1 x) - 1] \quad (21)$$

となる。(高津, 橋本, 長の式⁸⁾)

ここで、 $\Lambda = \text{diag.}(\sigma^2, \dots, \sigma^2)$ ($\sigma^2 \neq 0$) とおくと、

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta_i} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^N e_n(\theta) \frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_i} \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 J(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_j} \frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_i} + e_n(\theta) \frac{\partial^2 e(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] \quad (23)$$

$$\frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_1} = -\theta_2 x(n) \exp(\theta_1 x(n)) = \theta_2 x(n) \frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_2} \quad (24)$$

$$\frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_2} = -\exp(\theta_1 x(n)) \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 e(\theta)}{\partial \theta_1^2} = x(n) \frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_1} \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 e(\theta)}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} = x(n) \frac{\partial e(\theta)}{\partial \theta_2} \quad (27)$$

$$\frac{\partial^2 e(\theta)}{\partial \theta_2^2} = 0 \quad (28)$$

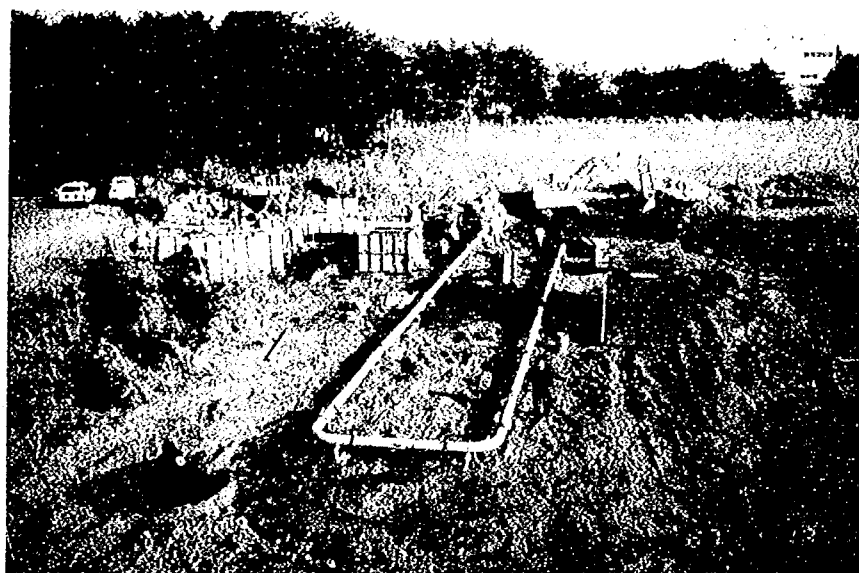
(29)

となる。

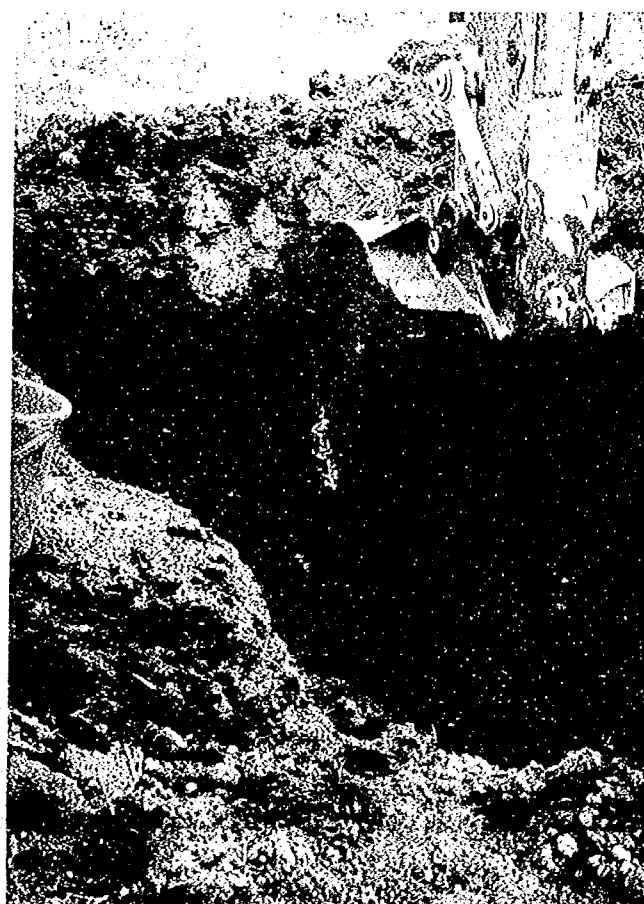
又、分散 σ^2 が未知なので、(15)より分散 σ^2 の最尤推定値は、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} e'(\theta) e(\theta) \quad (30)$$

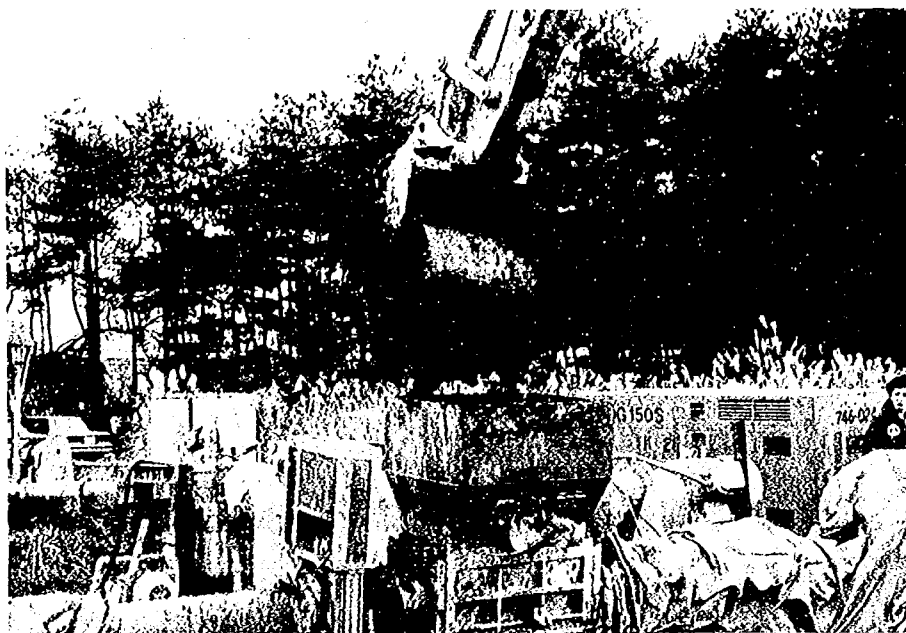
となる。



写真－1 基礎実験装置全景



写真－2 ピット内での土砂の混合



写真－3 土砂の投入状況



写真－4 土砂圧送基礎実験状況
(関東ローム，加水その1)

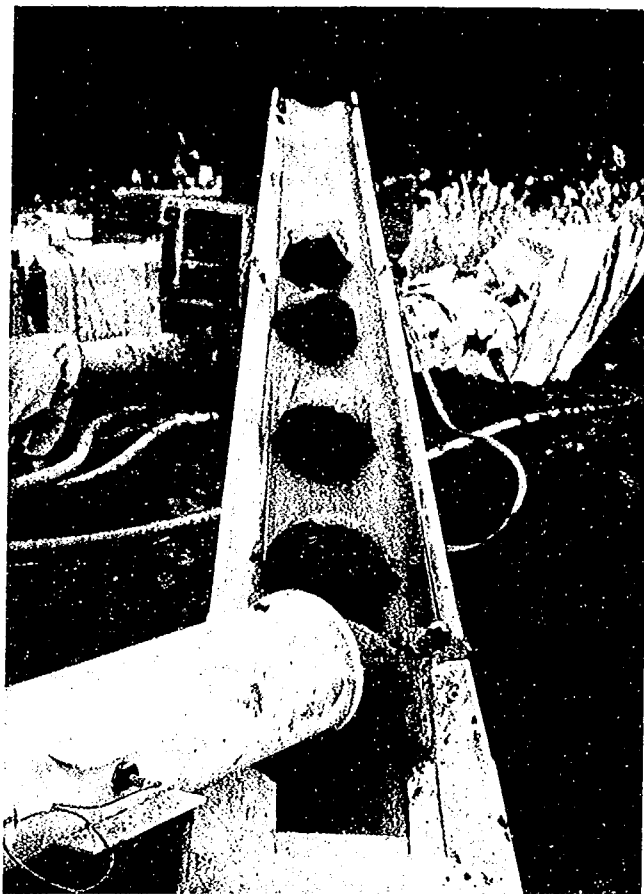
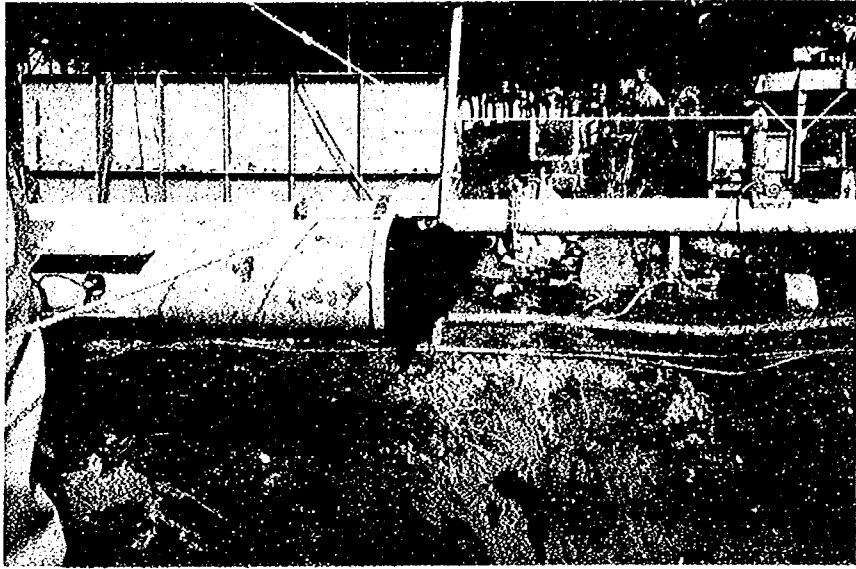


写真-5 土砂圧送基礎実験状況
(関東ローム：砂＝1：1加水その1)



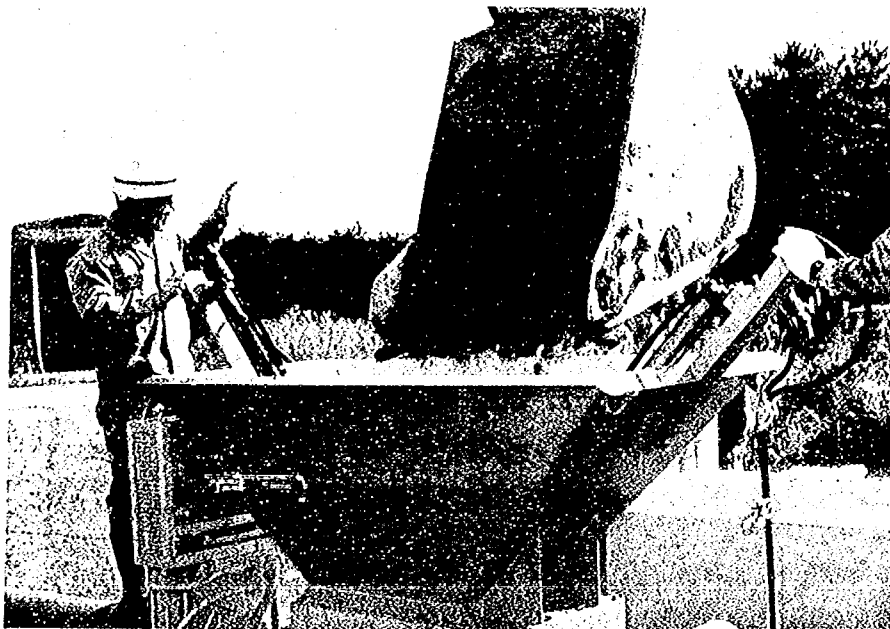
写真-6 管路の閉塞状況



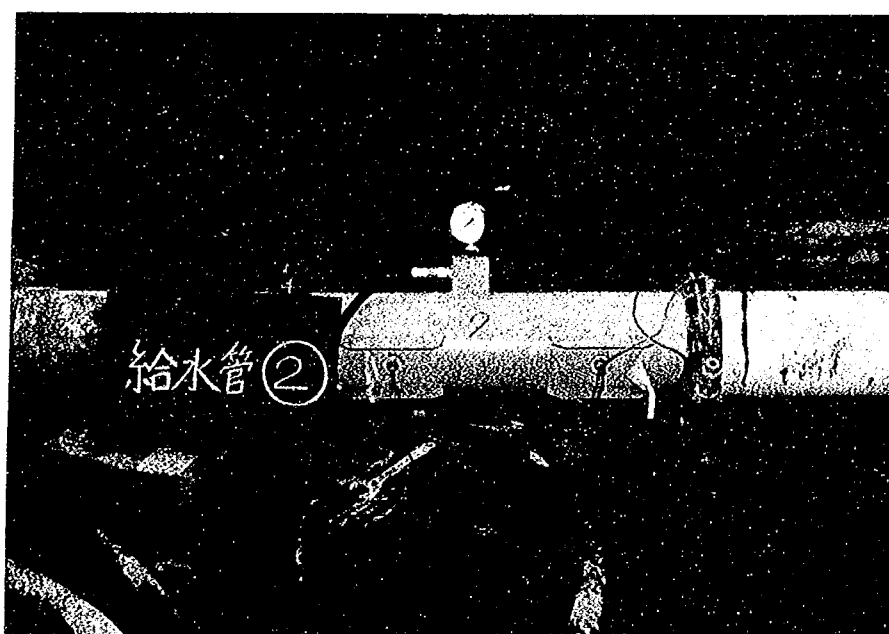
写真一 7 下水汚泥排出状況



写真一 8 高効率土砂輸送実験装置全景



写真－9 土砂押し込み装置付きホッパへの土砂の投入状況



写真－10 給水管取り付け状況



写真-11 土砂圧送状況（給水管による外層のスラリー化）



写真-12 給水管を用いた土砂圧送状況

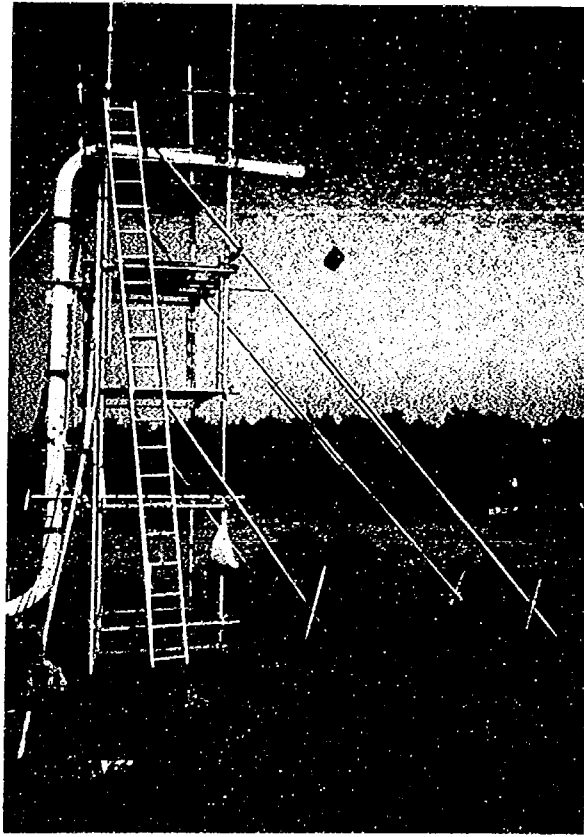


写真-13 土砂排出状況（給水管使用）

要 旨 現在、都市における空間の価値はますます増大し、これに伴い地下空間利用の需要も伸び掘削現場も大規模となり深くなる傾向がある。従来より地下掘削の施工性向上の障害となっていたのが、土砂の搬出輸送技術であった。この技術について、限られた狭い空間で連続的に土砂を搬出する方法について種々の試みがなされているが現在十分な成果が得られておらず、その需要増大傾向からみて緊急に効率的な技術の開発が望まれている。本研究は、管路による輸送における要素技術の確立を目的とするものである。

本研究で開発された要素技術は、スラリー輸送のように土砂全体の含水量を上げて管面摩擦による圧送抵抗を低減させる方式とは異なる。土砂が半固体流れであることを理論的考察及び基礎実験で実証し、それを利用して土砂の管面部分に薄い潤滑層を形成することにより、低含水比土砂の圧送抵抗を低減させるものである。本方式の有用性を、土砂の水平25m垂直5mの管路による圧送実験で検証した。

キーワード：土砂、管路、圧送、半固体流れ、管路圧送基礎式、給水管、H-T管

郵便はがき

41円切手
をはって
下さい。

305□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

機械施工部 機械研究室

No. 03

No. 03

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2877号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印