

風送による土砂の搬出

栗原 和夫* 安達 嗣雄**
 花房 健** 里見 八宗***
 互 昭仁***

要 約

シールド工法の礫搬出において、新しい試みとして掘削土砂の風送工法を採用した。

概略の方法は、ブロワで送風しているパイプ内に、ロータリフィーダで土砂を適量ずつ投入（切込）し、パイプで土砂を地上の土砂ホップまで空気搬送するものである。

この方法による土砂輸送実績は、計画輸送量36t/hに対して、砂及び礫では45t/h、湿潤状態のシルトで12t/hであった。土質への依存度が大きい、これは土の粘着力に関係するものと思われる。即ち、粘着力が大きいものは、風送中にパイプ内面に付着して搬送効率を下げるためである。風送土砂の粘着力試験によると、本装置では0.02kgf/cm²以下で36t/h以上が確保できることがわかった。

粘性土の管内付着対策、ブロワの改良、摩托対策等の改良が必要であるが、ほぼ満足できる結果を得た。

この方法によると、①屈折したトンネル及び立坑、狭い場所での土砂搬出が可能、②坑内の安全度が高い、③深い立坑からの土砂搬出、④圧気シールド、ケーソン等で圧気圧をそのまま利用して土砂搬出が可能など、利用価値が大きい。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 土砂風送計画
- § 3. 土砂風送施工実績
- § 4. 土砂風送の各種利用方法
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

シールド工事等の都市土木工事に於いて、用地難、交通上の規制、騒音・振動等の環境制約等によって、作業基地用地の取得が極めて難渋し、苛酷な条件下で（殊に掘削土砂の搬出に）複雑な設備と、不安全で複雑な作業を強いられることが多くなっている。

この解決方法の一つとして、パイプによる土砂の風送を思い立ち、検討及び試験を重ね、現場において、大量の土砂搬出に使用した。多少の改良点はあるが、充分実

用に耐え得るものと確信できたので、ここにそのあらましを報告する。

礫出し方法として、従来は、①塊状輸送、②流体輸送の2方法を用いてきた。

①塊状輸送は掘削土をそのままの形でズリトロやコンテナに入れ、或いはグラブやバケットで垂直、水平に輸送する方法で最も一般的な方法である。

一方、②流体輸送は泥水式シールド工法のように掘削土砂を泥水とともにパイプ輸送するもの、或いはモノポンプによる高粘度、高濃度の泥土の圧送などがある。流体輸送は切羽から地上迄、一貫して管理し易い状態で輸送されるところに利点があり、泥水の切羽安定機能とあいまって都市トンネル分野に一時代を画した感がある。

しかし、切羽の安定に泥水加压等を必要としない工法（例えば圧気シールド、山岳ずい道等）に於ける礫出しに対しては、従来の塊状輸送によることがほとんどで、何らこれといった新しい方法が生れてこなかった。また、最近、燃料地下貯槽等で深度の大きい構造物の要求が開始め、これの礫出しには在来の方法では大がかりなものとなったり、施工能率が非常に低下する等の問題がある。

*関東(支)次長兼宮城前(出)所長

**関東(支)宮城前(出)係長

***関東(支)宮城前(出)

これらの事情を考え合せ、土砂の風送を思い付いた次第である。

風送の歴史は約一世紀であるが、今迄は穀物、パルプ用チップ等比重の小さい均等粒径の物体の輸送に使われていたが、土砂のような高比重、高粘度、高磨耗度、種類の形状・粒径が混在する物体を送ることは難しいとされていた。実際、当現場の如く水の多い礫、砂、シルト等の異った土質を送ることは冒険であった。しかし、これらの困難を克服した時のメリットが大きいことから、経済性、安全性を含め、種々試験・検討を加え、実用化に取り組んだものである。

§ 2. 土砂風送計画

2-1 土砂風送計画

今回の計画は、第一期工事用として、下床より地上土砂ホップ迄の土砂風送計画を行った(図-1)。

2-2 土砂風送計算

土砂の場合、穀物、パルプ用チップ等に比べて比重が大きく、形状が不定形であるため理論式によって風送計算を行うことが困難である。従って、実験等によって求

めた実用式に依らざるを得ない。ここでは、実用式の一つである「エネルギー損失法」が最も適していると判断し、この方法によって風量計算を行った。

計算方法は、基準風速 v_0 を100feet/sとし、この時の諸損失を推力天秤法等によって実測しておき、これを基に土砂風送時の諸損失を算出する。即ち、基準風速の二乗 v_0^2 を0.1と置き、これと土砂風送時の風速の二乗 v_x^2 との対比数値 $V_x^2 (= v_x^2 / v_0^2 \times 0.1)$ を求め、これより次

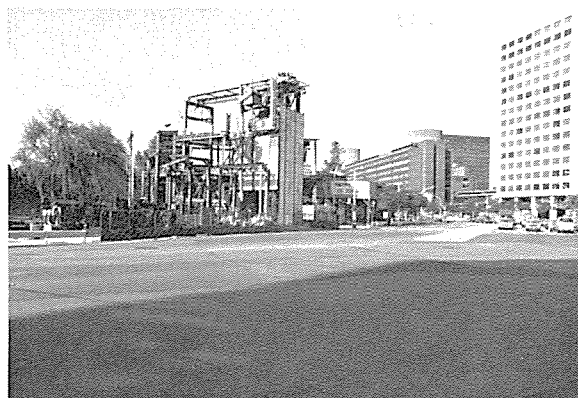


写真-1 土砂ホップ全景

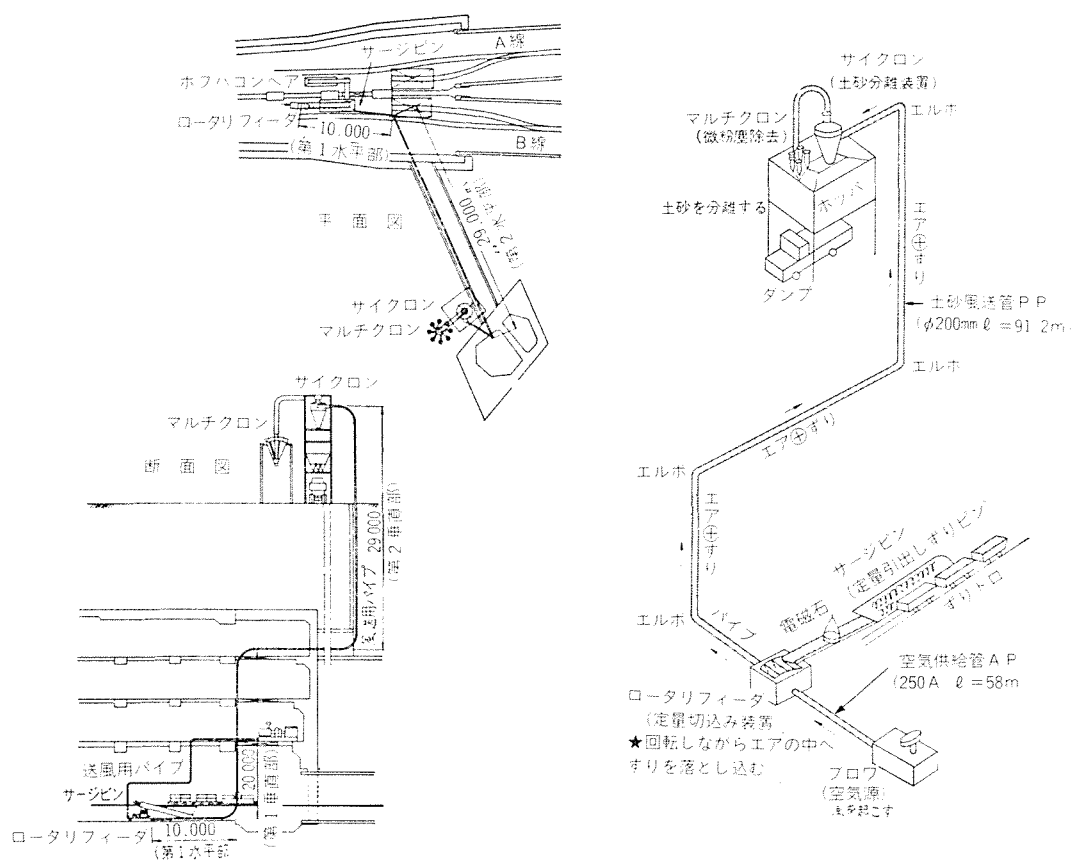


図-1 第一期工事土砂風送計画

式により、土砂風送時の諸損失を求めるものである。

$$FRP = R_A + R_P$$

$$R_A = p \ell \cdot V_P^2 \cdot 10 \cdot \ell_A / 100$$

$$R_P = p \ell \cdot V_A^2 \cdot 10 \cdot \ell_P / 100 + R'_P$$

$$IL = T/H \cdot V_P^2 \cdots \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$LL = \frac{T/H}{100} \cdot \left(\frac{\ell_H}{5} + \ell_V \right) \cdot V_P^2 \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$EL = T/H \cdot E / 180^\circ \cdot V_P^2 \cdots \cdots \cdots \textcircled{3}$$

$$THL = IL + LL + EL$$

$$ML = \frac{THL \times M}{Q'}$$

$$OP = FRP + ML$$

ここに

FRP：無負荷時の圧力 (Free running pressure) (psi)

R_A ：空気供給管 (Air pipe) 中の抵抗 (psi)

R_P ：土砂風送管 (Pneumatic pipe) — " — (psi)

R'_P ：サイクロン混合室の抵抗 (psi)

$p \ell$ ：基準風速時の管長100ft当りの送風抵抗 (psi)

V_A^2 ：空気供給管風速 v_A と基準風速 v_0 との対比数値 $= v_A^2 / v_0^2 \times 0.1$

V_P^2 ：土砂風送管風速 v_P と — " — $= v_P^2 / v_0^2 \times 0.1$

IL：慣性損失 (Inertia loss) = 土砂切込後、一定速度になるまでの損失

LL：管路損失 (Line loss)

EL：エルボ損失 (Elbow loss)

T/H ：土砂風送量 (t/h)

ℓ_H, ℓ_V ：土砂風送管の水平、垂直長さ (ft)

THL：Total Horsepower Loss (L. HP)

ML：Material loss = 土砂風送時の圧力損失 (psi)

M：土砂に対する補正搬送係数

Q' ：圧縮状態の送風量 (cf/min)

OP：運転圧力 (Operating pressure)

土砂のような比重の大きい物質を風送する場合

① 切込点 (フィーダ) から一定速になるまでの距離が長い。従って慣性損失 IL が大きい。

② エルボで衝突変向して減速した時の加速距離が長い。即ちエルボ損失 EL が大きい。

ということで、上式に高い修正ファクタを入れる必要がある。このことを考慮して、本工事の土質を対象にして

計算を行うと次のとおりとなる。

なお、空気源としては、高速遠心ブロウ GR-01 (定格吸込風量101m³/min：ガイドベーン角度0°の時) を使用。現場での風量測定は吸込部にテーパ管を取り付け差圧計目盛読取值より求めた。

風送計算例

当現場の地質は、図-2に示すとおり砂、礫、固結シルトの互層である。この中で最も風送しにくい固結シルトを60t/hを風送した場合の風送計算例を示す。

吸込風量 $Q_s = 101 \text{ m}^3/\text{min}$

実効風量 $Q = 101 - 5 = 96 \text{ m}^3/\text{min}$

(5 m³/minは空気供給配管に於るブロー損失)

風送最高圧 $p = 0.7 \text{ kgf/cm}^2$ と置く。その状態の圧縮係数 $K = 1.44$ である。

圧縮状態での風量 Q' は

$$Q' = 96 \div 1.44 = 66.67 \text{ m}^3/\text{min} = 2,354 \text{ cf/min} \\ = 1.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

・計算1 空気供給管 (Air pipe 250A：AP) 中の風速 v_A

$$v_A = \frac{Q'}{A} = \frac{1.11}{0.0506} = 21.94 \text{ m/s} = 72 \text{ ft/s}$$

基準風速 (100ft/s) との対比数値 $V_A^2 = (v_A / v_0)^2 \times 0.1 = (72/100)^2 \times 0.1 = 0.051$

・計算2 土砂風送管 (Pneumatic pipe $\phi 200\text{mm}$ ：PP) 中の風速

$$\text{初速 } v_i = \frac{1.11}{0.0314} = 35.35 \text{ m/s} = 116 \text{ ft/s}$$

$$\text{終速 } v_f = 116 \times 1.44 = 167 \text{ ft/s}$$

$$\text{平均速度 } v_p = (v_f - v_i) \times 0.6 + v_i$$

$$= (167 - 116) \times 0.6 + 116 = 147 \text{ ft/s}$$

$$V_P^2 = (147/100)^2 \times 0.1 = 0.216$$

・計算3 AP中の抵抗 R_A

250Aの管長100ft当りの基準風速時の抵抗：実験値より $p \ell = 0.16 \text{ psi}$

配管長： $\ell_A = 58 \text{ m} = 190 \text{ ft}$

$$R_A = p \ell \cdot V_A^2 \cdot 10 \cdot \ell_A / 100$$

$$= 0.16 \times 0.051 \times 10 \times 190 / 100 = 0.155 \text{ psi}$$

・計算4 PP中の抵抗 R_P

$\phi 200\text{mm}$ の管長100ft当りの基準風速時の抵抗：実測値より $p \ell = 0.216 \text{ psi}$

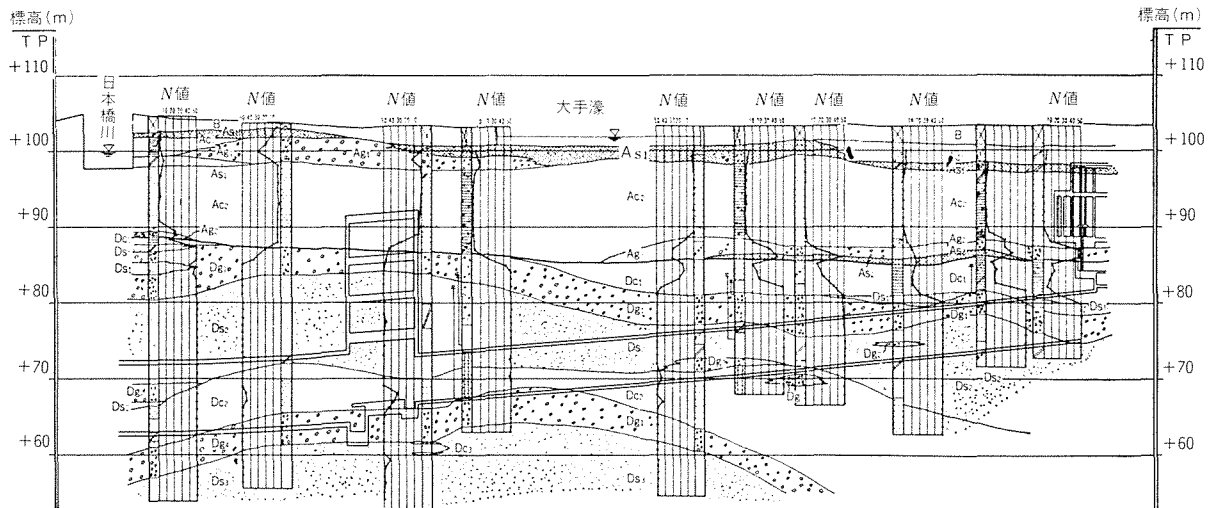
サイクロン混合室抵抗：実測値より $R'_P = 0.25 \text{ psi}$

配管長： $\ell_P = 91.2 \text{ m} = 299 \text{ ft}$

$$R_A = p \ell \cdot V_P^2 \cdot 10 \cdot \ell_P / 100 + R'_P$$

$$= 0.216 \times 0.216 \times 10 \times 299 / 100 + 0.25$$

$$= 1.645 \text{ psi}$$



現世 : B 沖積層 : Ag, Ac, As 洪積層 : Dc, Dg, Ds

図-2 地下鉄11号線大手町4工区地質断面図

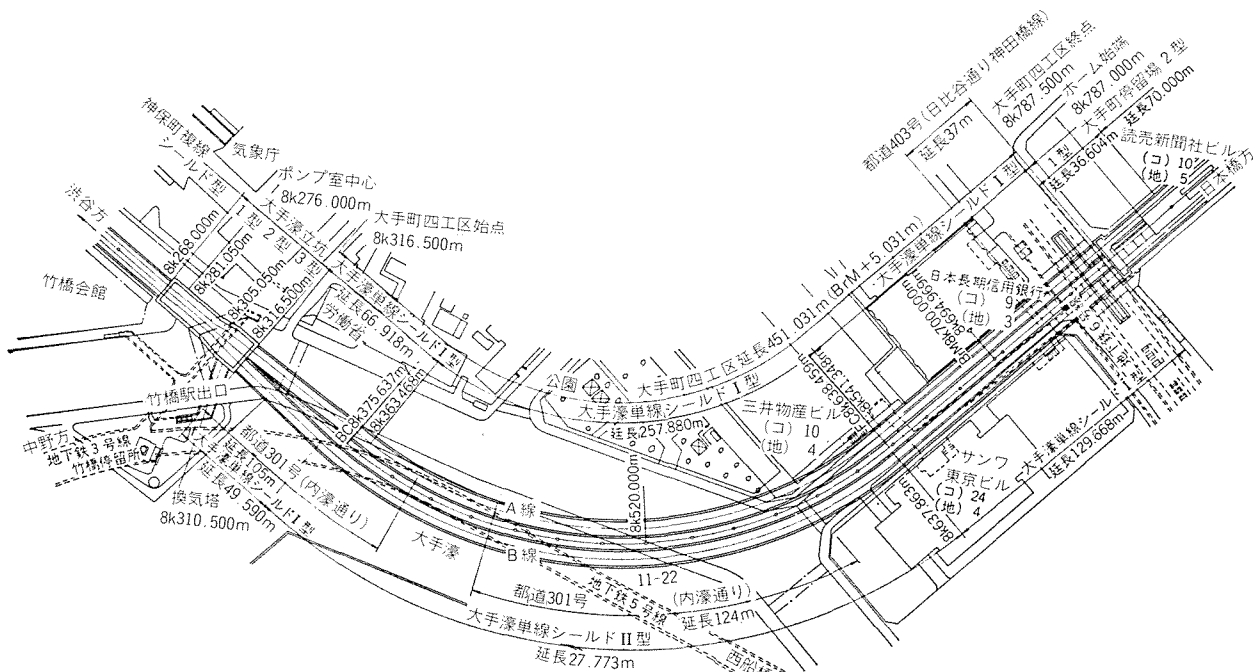


図-3 平面図

- ・計算5 無負荷圧力 (Free running pressure : FRP)

$$FRP = R_A + R_P$$

$$= 0.155 + 1.645 = 1.8 \text{ psi}$$

——以上で無荷運転時圧力 FRP を得たので、次に
土砂風送時の損失を前述の方法で求める——

- ・計算6 慣性損失 (Inertia loss = IL)

$$IL = T/H \cdot V_P^2$$

$$= 60 \times 0.216 = 12.96 \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

- ・計算7 管路損失 (Line loss : LL)

土砂風送管の水平長 : $\ell_H = 128 \text{ ft}$

垂直長 : $\ell_V = 161 \text{ ft}$

$$LL = \frac{T/H}{100} \cdot (\ell_H/5 + \ell_V) \cdot V_P^2$$

$$= 60/100 \times (128/5 + 161) \times 0.216$$

$$= 24.52 \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

- ・計算8 エルボ損失 (Elbow loss : EL)

エルボ角度 E : 90° エルボ $\times 4$ 個 = 360°

$$EL = T/H \cdot E/180^\circ \cdot V_P^2$$

$$= 60 \times 360^\circ/180^\circ \times 0.216$$

$$= 25.92 \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

- ・計算9 Total Horsepower loss (THL)

$$THL = IL + LL + EL$$

$$=12.96+24.52+25.92=63.4 \text{ LHP}$$

・計算10 土砂(Material)風送時の圧力損失(Material loss: ML)

土砂に対する補正搬送係数: $M=300$ とする

圧縮状態下での送風量: $Q'=2354 \text{ cf/min}$

$$ML = \frac{THL \cdot M}{Q'}$$

$$= \frac{63.4 \times 300}{2,354} = 0.08 \text{ psi}$$

・計算11 運転圧力(Operating pressure: OP)

$$OP = FRP + ML$$

$$= 1.8 + 8.1 = 9.9 \text{ psi}$$

$$= 0.69 \text{ kgf/cm}^2$$

以上の計算結果及び同様の方法で求めた固結シルト50

t/hおよび水を加えた固結シルト36t/hを風送した時の計算値を表-1に示す。

なお、表中の実測値は、その後の実運時に得た数値を記入したものである。

2-3 土砂風送試験

図-4の如く本運転の約 $\frac{1}{2}$ のループラインを設備し、模擬試験を行った。

(1) 試験目的

- (i) 風送圧力、計算値と実測値の比較
- (ii) 各機器の機能チェック
- (iii) 配管、エルボの付着、摩耗

(2) 使用機器

- (i) ブロワ

表-1 土砂風送計算結果

計 算 内 容		単 位	固結シルト(最高)	固結シルト(常用)	固結シルト(水分の非常に多いもの)
Q	吸込風量(修正)	m ³ /min	101	101	101
	ブロー補正風量	m ³ /min	96	96	96
予 測 OP		kgf/cm ²	0.7	0.6	0.45
		psi	10	8.5	
K			1.44	1.38	1.3
Q'		m ³ /min	66.67	69.57	73.8
		m ³ /s	1.11	1.16	
計算1. 空気供給管 風速 v_A		m/s	21.94	22.92	24.3
		fps	72	75	
計算2. 土砂風送管 初速 v_i		m/s	35.35	36.94	39.2
		fps	116	121	
計算3. R_A		psi	0.155	0.17	0.194
計算4. R_P		psi	1.645	1.70	1.74
計算5. FRP		psi	1.80	1.87	1.934
		kgf/cm ²	0.126	0.131	
(実 測 値)		kgf/cm ²	(初期 0.15)	(0.15)	(0.14)
		"	(運転中0.4~0.85)	(0.4~0.7)	(0.8)
土砂風送管平均風速 v_P		fps	147	150	152
V_P^2			0.216	0.225	0.231
切 込 量		t/h	60	50	最高 36
		m ³ /h	33.3	27.7	20
Inertia loss			12.96	11.25	8.32
Line loss			24.52	19.19	14.19
Elbow loss			25.92	22.5	16.63
Total HP loss			63.40	52.94	39.14
Material loss			8.08	6.47	4.5
OP		psi	9.9	8.34	6.43
operating pressure		kgf/cm ²	0.69	0.59	0.45
(実 測 値)		psi	(10~12.5)	(8.5~10)	(6.5~11.5)
		kgf/cm ²	(0.7~0.88)	(0.6~0.7)	(0.45~0.8)
運 転 状 況			ほぼ安定しているが時々圧力上昇がみられ、不安定になる。	安定する。	殆んど0.8kgf/cm ² 前後で運転したが、時々圧力が上限に達し切込停止。

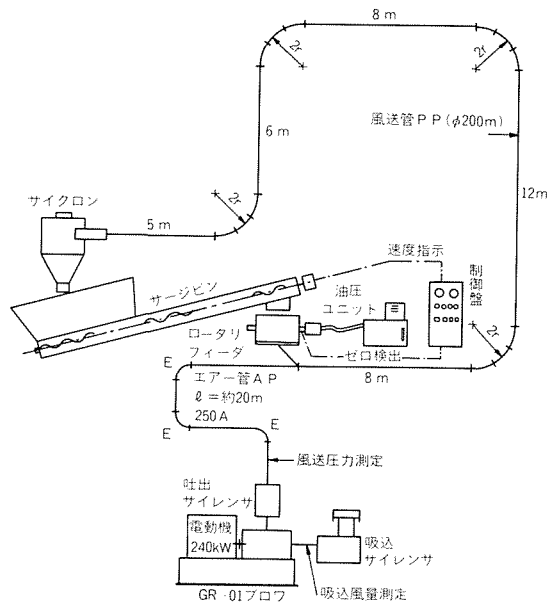


図-4 土砂風送試験フロー

- (ii) ロータリフィーダ
- (iii) サイクロン
- (iv) サージビン
- (3) 試験用材料
 - (i) 碎石 (50~30mmφ) } 購入品
 - (ii) 山砂 }
 - (iii) 固結シルト (宮城前(出)発生土)
 - (iv) 軟弱シルト (葛西(出)発生土)

実効風量 $Q=92\text{m}^3/\text{min}-3\text{m}^3/\text{min}=89\text{m}^3/\text{min}$
 風送最高圧 $p=0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ (推定)
 圧縮係数 $K=1.2$
 切込量 $36\text{t}/\text{h}$

上記条件で2-2と同様の計算を行うと

$$v_i \approx 130\text{fps} \approx 40\text{m}/\text{s}$$

$$FRP = 0.077\text{kgf}/\text{cm}^2$$

$$O.P. = 0.32\text{kgf}/\text{cm}^2$$

という結果を得た。

ここで実際に風送管の初速 $v_i=130\text{fps}(\approx 40\text{m}/\text{s})$ で $36\text{t}/\text{h}$ の割で碎石を投入した試験で $O.P.=0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$, $FRP=0.075\text{kgf}/\text{cm}^2$ という平均値を得た。これは上記計算値とほぼ合っているのでこのテストプラントの方針は概ね正しいと判断した。

次に v_i を下げた実験を試みた。

$$Q=80\text{m}^3/\text{min}$$

$$v_i=35.4\text{m}/\text{s}$$

この結果は以下のとおりであった。

乾燥状態

(山砂) $10\text{kg}/\text{s}$ の割合で投入したところ、瞬間的に $0.3\text{kgf}/\text{cm}^2$ まで上り、投入停止後、直ぐ元の FRP に戻った。

(砂礫) $50\sim 30\text{mm}\phi$ のものを同様に投入し山砂の場合と同じ結果を得た。

湿潤状態

(山砂) 乾燥状態の場合と同様に投入したところ、切込停止後も FRP が $0.1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上下らず乾燥するにつれ少量づつ放出され、約5分後に元の FRP に戻った。

(碎石) 乾燥状態と同様、投入停止行後ぐ之の FRP に戻った。

この結果より、含水比の高い山砂に対しては $v_i=35.4\text{m}/\text{s}$ の風速は低過ぎることが判明した。実際の現場では固結シルト、砂、礫が互層になっている部分もあるのでこれに水が付いた場合は $v_i=40\text{m}/\text{s}$ 以上を必要とすることもあり、この場合は切込最大量は $36\text{t}/\text{h}$ 以下となる。

次に、下記①~④の材料について連続運転を行い、各々について次のとおりの安定風速を得た。

- ① 固結シルト (大塊) $v_i \geq 36\text{m}/\text{s}$
- ② 上記を細分化したもの $v_i \geq 40\text{m}/\text{s}$
- ③ 細分化したものに水を加えたもの $v_i \geq 42\text{m}/\text{s}$
- ④ 軟弱シルト $v_i \geq 42\text{m}/\text{s}$

上記③④では風量不足の懸念もあるが、当現場では固結シルト層では水は少なく、砂礫層では風送上、水の影響は殆んど受けないと判断した。

2-4 風送機械、設備

(1) 空気設備 (ブロワ)

型 式: GR-01

吸込風量: $101\text{m}^3/\text{min}$ (max)

吐出圧力: $1.1\text{kgf}/\text{cm}^2$ (max)

(2) 定量引出し碀ビン (サージビン)

油圧駆動のスクリュによる定量引出しとし、電磁弁切替の3段可変速とした。

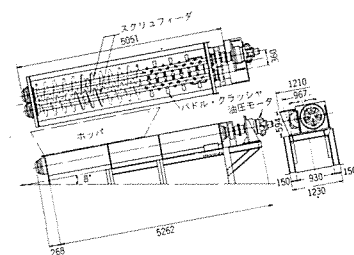


図-5 サージビン (パドルクラッシャ付)

(3) 破碎装置 (パドルクラッシャ)

大径の固結シルトを80mmφ程度に整粒する為、上記スクリュの先端部に取付けた。

(4) 切込み装置 (ロータリフィーダ)

土砂を風送管内に切込むと同時に圧力をもった管内と大気側との隔壁の役目も持ったロータリバルブであ

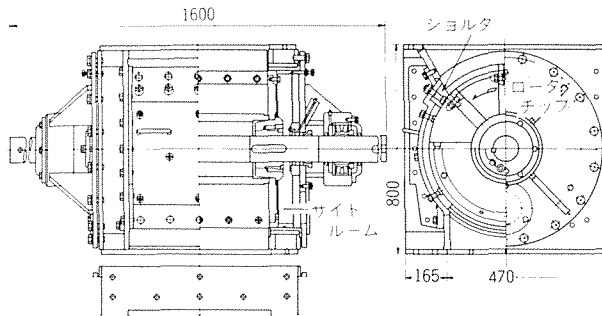


図-6 ロータリフィーダ

り、本システムの最も重要な機械である。気密性が重要であるため摩耗に備えてロータ端部、ケーシング内面、ショルダ部には耐摩耗合金を使用し、且つ各々の部分は容易に交換できる構造とした。

(5) 風送管

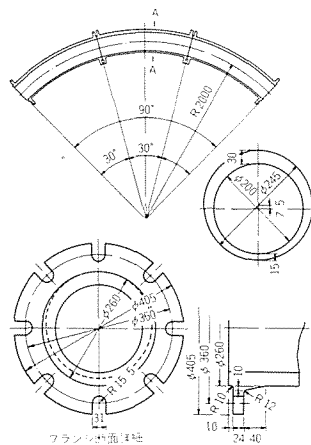


図-7 エルボ

礫、砂、シルト、粘土等各種の土質の摩耗に耐えられ、また、滑性を良くするため、特殊合金(Mn, Ni, Cr₇C₃, W₂C, Si, Mo, V等)の鑄鋼とした。肉厚は直管部で15mm, エルボは摩耗の大きい外周部を30mm, 内周部を15mmとした。

(6) 分離設備 (サイクロン, マルチクロン)

風送管吐出部で土砂と空気の分離を図るもので、マルチクロンは分離空気中の微粉塵を除去するものである。

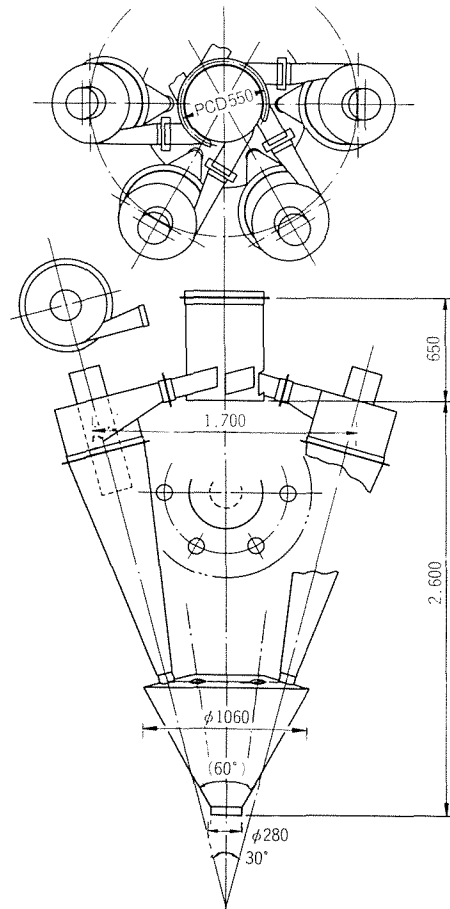


図-8 マルチ・クロン

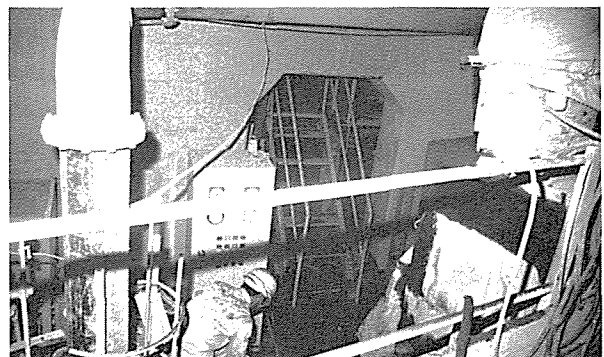


写真-2 土砂風送制御室



写真-3 土砂ホッパ吹出口モニターテレビ

(7) 制御装置

- (i) 各機の起動, 停止
- (ii) 運転中の状態の表示及び緊急表示警報。
- (iii) 負荷の変動に応じて変化する風送圧力を検知し, サージピンのスクリュウ回転数をコントロールする。(切込量の制御をする)。

(8) エアパルス装置

粘性の高いものの付着を除去するため約2kgf/cm²のエアを衝撃波状に風送管内に送るものである。

§ 3. 土砂風送施工実績

3-1 風送量実績

(1) 固結シルト層

A線80m+B線80m=160 m間の平均日進は1.5m/日・片線であり, 残念乍ら予定工程を下廻った。これは地下水の復水が予想以上に大きく, 圧力を伴って湧出し, 水量も多く, シルトが切羽掘削時にバックホーでこね回された状態となり, 粘性(付着力)が著しく増大し, 管内付着を起したためと, 掘削そのものが水のため困難で進行が上らなかったためとである。この現象を図示すると図-9のようになる。すなわち付着が生ずる場合は(O.P)(F.R.P)共に徐々に上昇し, 圧力が上るために風量が減少し, 風速が落ちてくる。

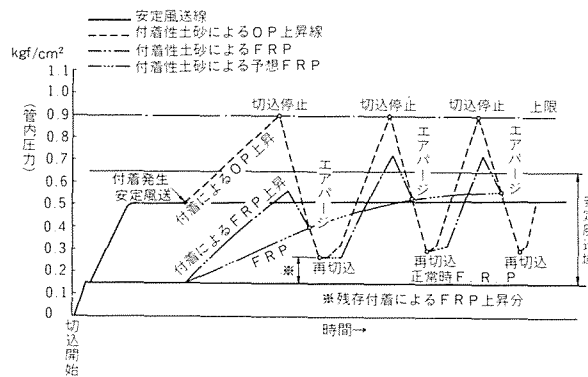


図-9 固結シルトに於ける管内圧力変化

このため風送土砂が失速し, 更に付着が助成され, ついに安定風送域を超えて風送不能となり切込みが停止する。ここで付着除去のためエアパルス等を使用するが完全には解消されず, 残留付着があり, F.R.P.が高くなる。これは当然, 実風送量の低下を意味し, 能率に大きく影響を及ぼす。この区間の時間当り土砂風送量は

$$\begin{aligned} \pi/4 \times 6.75^2 \times 1.5 \text{ m/d} \times 2 \text{ 線} &= 107.4 \text{ m}^3/\text{d} \\ 107.4 \text{ m}^3/\text{d} \times 1.8 \text{ t/m}^3 &= 193.3 \text{ t/d} \\ 193.3 \text{ t/d} \div 16 \text{ h/d} &= 12.1 \text{ t/h (地山換算)} \end{aligned}$$

となっていた。

(2) 砂, 砂礫層

これらの地質については風送そのものには問題はなかったが, 前述したように地下水の回復が大きく, 切羽が崩壊し易く, 切羽葉液注入によって切羽の安定を図り乍ら掘進を行った。このため注入中の進行はゼロで, A線B線交互に注入, 掘進を繰り返した。クリティカルパスは礫出しではなく, 切羽の注入作業に支配された。従って, 日進量によって風送の能率を算出することは適当ではないので, 掘進時間当りの能率によって検討すると

平均土砂風送量25m³/h=45 t/h (地山換算)

最大土砂風送量30m³/h=54 t/h (— " —)

となり, 当初の計画掘進量20m³/hと風送設備能力40m³/h (計画掘進量の2倍) の中間にあった。この地質に於いては, 計画風送量を上廻ることができ, 満足する結果を得た。

表-2 11号線大手町四工区土木工事予定工程表

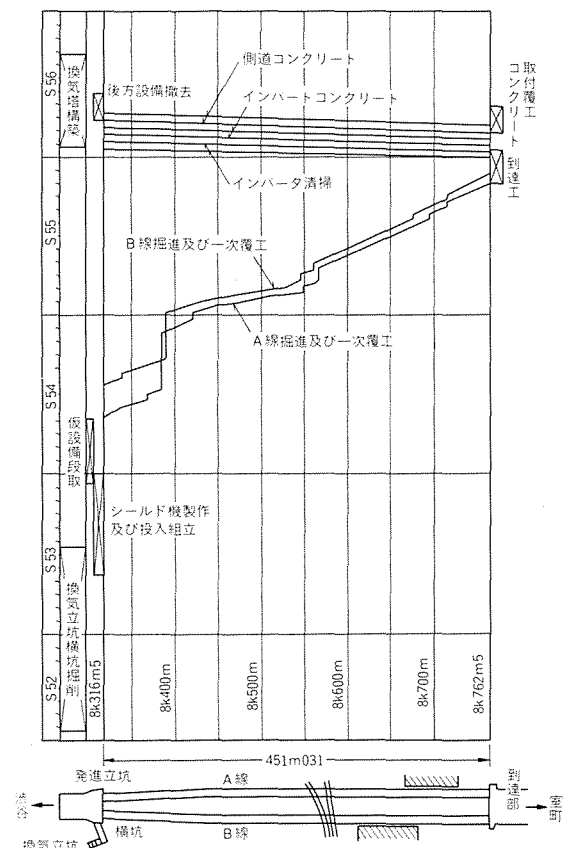




写真-4 サージビンロータリフィーダ稼動中

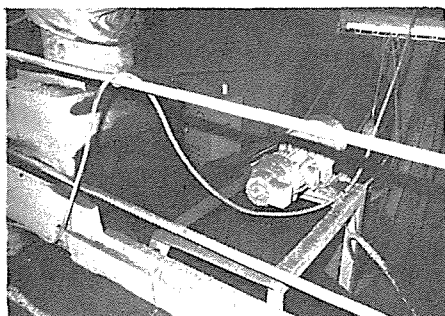


写真-5 ロータリフィーダ投入口

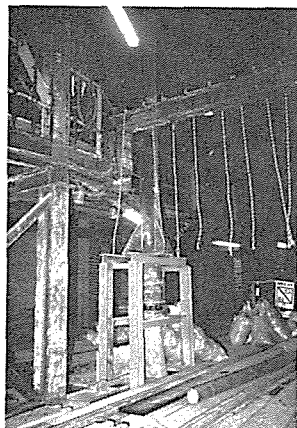


写真-6 ロータリフィーダからの立上り垂直パイプ



写真-7 垂直パイプ

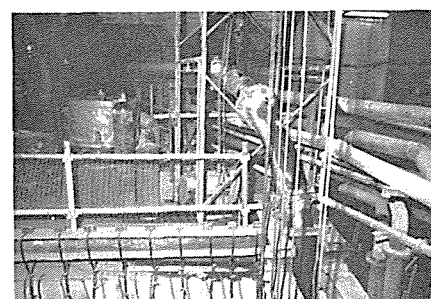


写真-8 垂直から水平へのエルボ

3-2 摩耗とその対策

結論としては各部（エルボ、ロータリフィーダ）に予想以上の摩耗が発生した。これは実験段階では限られた数量の土砂を循環使用したため、摩耗度に影響を及ぼす、砂、礫の鋭角部が鈍化され、実運転よりは可成り低い摩耗量だったためと思われる。以下に各部の摩耗について述べる。

(1) ロータリフィーダ

摩耗部は総べて耐摩耗性の取換可能な部品によって構成したが、これは主に擦り摩耗に対する対策であった。しかし中間約3,000 m^3 の実運転の結果、擦り摩耗現象は勿論認められたが、ショルダ取付用ボルト埋込み穴の現象を見ると回転方向とは逆の摩耗も認められた。これは“ブロー摩耗”とでも呼ぶサンドブラスト状の摩耗現象であった。この他に、ロータとケーシングのクリアランス部の摩耗が認められた。これはクリアランス（0.5mm以下）からの僅かな漏気に伴い、細い砂が持込まれそれにより摩耗が発生し、徐々に粗い砂が入り加速度的に摩耗が拡大したものである。

これらの対策として現場では、前者に対しては、ボルト穴よりのブローをなくすためショルダ取付を背面より建込みボルト式とした。これによりショルダ及びロータチップの寿命が1.5倍（交換頻度1回/2,500 m^3 →1回/4,000 m^3 ）に向上したが、今後、材質の改善等を行い少なくとも現在の倍以上の寿命を持たせるよ

うにしたい。

後者に対しては、両サイドルームをフィーダ内部圧力（1.0 $\text{kgf/cm}^2\text{max}$ ）より高い圧力（約2 kgf/cm^2 ）に保ち内部からの漏気を防いだ。この結果この部分の摩耗は皆無となった。

(2) パイプ

パイプ各部の摩耗測定は超音波厚み計で常時測定を行っていたが、エルボ部で特に激しい局部的摩耗が見られた。これは擦り摩耗ではなく衝突によるえぐり摩耗である。従って衝突・反射を繰り返して土砂が通過するため局部的摩耗が生じたものである。この摩耗は垂直から水平に変わる部分の方が、水平から垂直に変わる部分より大きく、また、吐出端に近いエルボ程摩耗が大きい。これは吐出端に近づく程風速が速いためである。直管部では垂直部の摩耗は殆んどみられなかった。水平部での摩耗は主に底部を土砂が滑走する事により発生するものであるがこの摩耗も一様ではなく、底面の左右にチドリ状に摩耗がみられた。

これら偏摩耗に対しては、エルボ部は土砂の入射角度を小さくし、衝突による摩耗を緩和するため、エルボ直前の直管の取付け（ユニフロー）に角度を持たせた（図-10）。また、約2,500 m^3 毎にエルボの位置替を行った。直管の水平部は定期的に厚さを測り、最大摩耗5mmに達した時点で上下の反転を行った。

3-3 付着力と風送の難易度

風送運転中にサージビンのシュート口（出口部）で採取した試料の土質試験結果と、同一試料の現場での付着力測定結果を表-3に示す。この結果より、風送の難易は付着力と非常に関係があり、現在の設備では当所の予定礫出し量20m³/hを達成できる付着力は約0.02kgf/cm²以下であろうと推察できる。

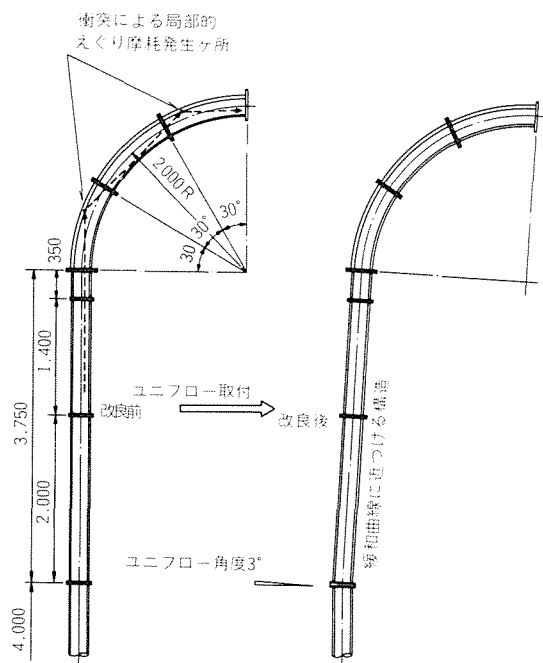


図-10 ユニフロー付エルボ

§ 4. 土砂風送の各種利用方法

土砂風送のメリットは

- ① パイプラインが任意の形状に配管できるので立坑や基地の位置、形状等にとらわれることなく礫出しが可能。
 - ② 土砂ホッパーの位置が自由に選べる。
 - ③ 坑内作業の安全度が高い。
 - ④ 圧気工事の場合、礫出しにマテリアルロックの通過の必要がなく、礫出し時間が短縮できる。
 - ⑤ 礫出しに伴う労力が殆んど必要ないので、繁雑な場所程経済的になる。
 - ⑥ 設備が簡単で維持も簡便である。
 - ⑦ 泥水輸送のような処理設備がいない。
- 等であり、この特徴を利用して
- ① 圧気シールド内より圧気を利用して直接ホッパー迄礫出しをする（図-12参照）
 - ② 作業基地が狭かったり、障害があり立坑付近にホッパーが設置できない場合。
 - ③ 山岳トンネルの立坑、斜坑等の礫出し。
 - ④ 土砂の仮置積置き。
 - ⑤ 上部に障害物があり、直接埋戻しができない場合の埋戻し（吹縮効果も期待できる）。
 - ⑥ ケーソン作業室内よりの礫出し。
 - ⑦ 深度の大きい立坑（最大深さ200 mまで可能）の礫出し。
 - ⑧ カーブ、屈折のあるトンネル。
 - ⑨ 騒音、振動等に対して厳しい場所等への使用に適している（図-11, 12）。

表-3 土質の付着力と風送の難易度

試料番号	1	2	3	4	5	6
採取日	12月7日	12月15日	1月16日	3月4日	3月7日(その1)	3月7日(その2)
含水比(%)	31.4	27.7	33.8	30.4	20.5	23.9
比重	2.703	2.702	2.727	2.719	2.736	2.736
礫分(%)	1	1	2	0	0	0
砂分(%)	64	68	53	42	75	75
シルト分(%)	30	31	45	55	23	23
粘土分(%)	5	—	—	3	2	2
最大粒径(mm)	4.76	9.52	9.52	4.76	4.76	4.76
均等係数	7.4	6.7	5.2	4.9	6.1	6.1
一面せん断試験						
含水比(%)	30.3	29.1	33.8	30.4	20.5	20.5
密度	1.299	1.292	1.291	1.294	1.294	1.294
見かけ粘着力(kgf/cm²)	0.145	0.02	0.13	0.39	0.26	0.26
せん断角(°)	38.7	47.2	51.9	40.7	18.4	18.4
付着力(kgf/cm²)	0.0184	0.0126	0.0302		0.0270	0.0300
〃 現場テスト(kgf/cm²)		0.0230	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300
風送の難易度	易	易	難	難	難	難

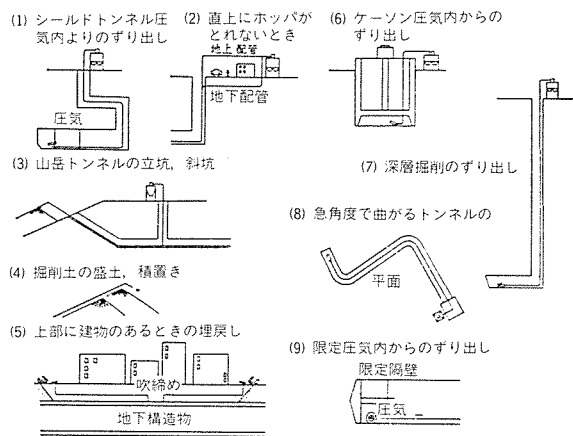


図-11 各種利用方法例

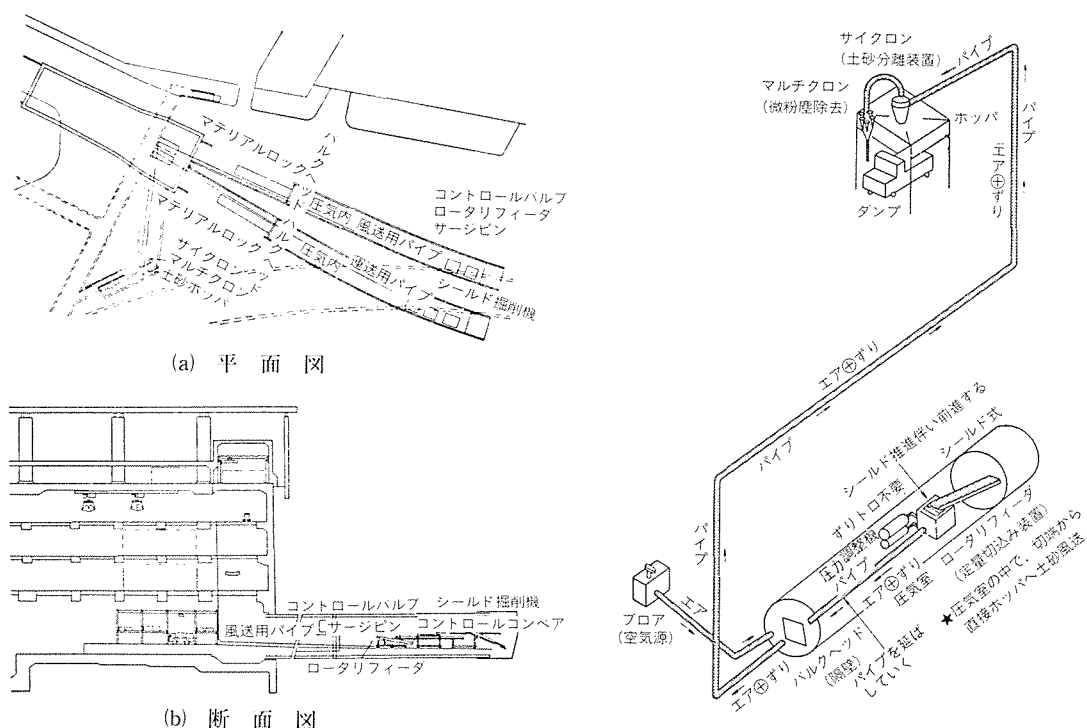


図-12 第2期工事土砂風送計画(圧気圧を利用した土砂風送システム)

§ 5. おわりに

10数年来構想を練り、基礎実験、試運転を重ね、実用運転に踏み切り、初の試みとしては概ね良好な結果を得たが、やはり現場の苛酷な条件下では種々の問題が発生し、掘進進行との絡みの中で苦労も少なくなかった。

それらの問題の中には前述のように現場で解決をみたものもあるが今後の課題として残ったものも少なくない。

問題点

- ① 付着(シルト、粘土、コロイド)対策のシステム化。
- ② 定吐出風量ブロウの開発(①の解決法の1つであり現在、メーカーにて開発中)

③ 摩耗対策

ロータリフィーダ; 最重要課題であり、構造、材質両面からの改善が尚必要。

エルボ; 安価で、耐摩耗性大、滑り良好な材質の開発(例えば石材、ゴム材等)等更につめつつ、経済的、安全なシステムの確立を目指して、研究を進めている。

用途が無限に広がっており、シールド工法、山岳トンネル、深層掘削等の各種工法との連続掘出しと云う絡みから、工法決定の際のポイントになると考えられ、有効に、利用して頂きたいと願って居る。