

榑 銭 高 組 ○正員 松 本 計 三
榑 銭 高 組 吉 田 兼 行
三 井 造 船 榑 和 泉 一 志

1. ま え が き

砂・礫を含む掘削土砂を、ポンプ圧送する時の土砂の圧送形態、改良度合、土性状変化、圧送性等について調査すべく圧送実験を行なった。その解析に、コンクリートで村田・鈴木等が提供しているレオロジー解析法を適用し、流量解析により土砂の圧送性を論じた。以下にその結果を報告する。

2. 実 験 概 要

実験は、図-1に示すモデルⅠ・Ⅱを圧送材料とし、5B管(D=12.5 cm), 水平換算長 $\ell=201H$ (建築学会基準) の条件で行なった。使用したポンプは、西独製のトランクチューブ型スラッジポンプ(KOR-1052HD)である。改良材は、ベントナイト(群馬産250#), 粉末粘土(SCP-B)を用いた。改良土砂の作成は、圧送材料にベントナイト、粘土を添加し空練後、水を投入し混練した。混練にはミキサー車を用いた。測定項目は、実験時にスランプ、テーブルフロー、土性値、吐出圧と管内圧力、加圧ブリージング試験、吐出流量を、実験後に改良土砂のレオロジー特性(降伏値、粘性係数)を測定した。表-1に配合と各測定値を示す。

3. 実 験 結 果

実験の結果から次の事が云える。

- (1) 砂、礫のポンプ圧送は可能で、圧送時の形態はコンクリートと同様であり、管内圧力分布は直線で近似できる。またその流動は、ビンガム体の流動と考えられる。
- (2) 圧送前後の物性値の変化はなく、各測定値と圧送性との間には、直接的関連が見られない。
- (3) 加圧ブリージング試験で閉塞の判定ができそうであり、W/B (水/細粒分) とブリージング率(10秒以後のブリージング量が全体量に占める割合)との間には、図-2に示すような関係が見られる。ブリージングの経時変化の形態は、コンクリートで提案されている下限線を下廻っても、圧送できるものもある。

4. 検討及び考察

土砂の圧送をビンガム体の管内流動と考え、レオロジー解析を行なった。ビンガム体の管内流量は、Buckinghamの流量式⁽¹⁾で表せる。

$$Q_B = \frac{\pi R^4}{8 \ell \eta} \left\{ 1 - \frac{4}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{r_f}{R} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

更らにすべりを考慮すると $Q = Q_B + \pi R^2 VR$ (2) となる。

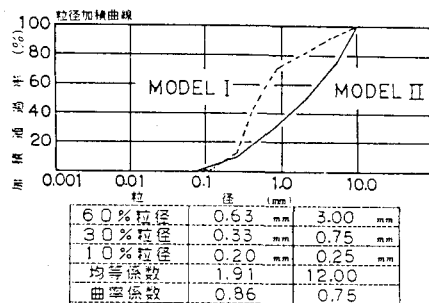


図-1 材料特性

表-1 配合と測定結果

NO	MOD	W/B (%)	B (%)	S.L. (cm)	T.F. (mm)	L (m)	τ_0 (kg/cm ²)	η_{pl} (kg/cm ² s)
1	I	153	17	26.1	205	441	1.635	135.3
2		203	13	26.3	235	839	0.685	27.5
3		262	10	23.6	226	1007	0.632	22.6
4		379	7	17.0	178	—	0.807	50.1
5		124	20	21.3	176	201	2.253	60.7
6		203	13	23.9	208	957	1.124	70.5
7		238	12	24.9	215	722	0.629	9.10
8	II	146	15	22.7	168	533	5.874	291.8
9		154	13	21.6	161	529	2.729	390.1
10		207	10	23.7	185	790	2.871	175.0
11		273	7	23.9	209	666	1.970	175.5

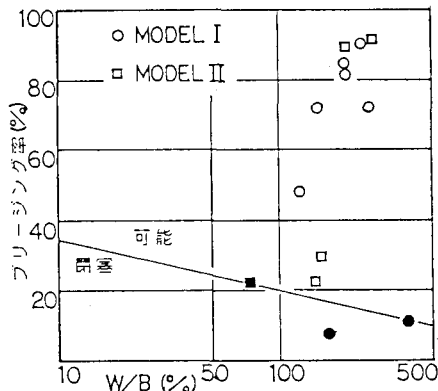


図-2 W/B とブリージング率

ここにQ：流量 (cc/sec)、 ℓ ：管長 (cm)、R：管半径 (cm)、 ΔP ：圧力差 (Pa)、 r_f ：栓流半径 (cm)、VR：すべり速度 (cm/sec) である。(2) 式に従って、モデルⅠ・Ⅱの流量を算出し、その実測値と計算値について比較検討した。

(1) モデルⅠ：降伏値 τ_f より r_f を求め、(2) 式より計算流量 Q_c を求める。実測値 $Q - Q_c = \pi R^2 VR$ となり、すべりによる流量が求められる。

モデルⅠの場合、 $r_f = 0.8 \sim 3 \text{ cm}$ 程度であり、 $Q - Q_c \approx 0$ と考えられる。即ち、 Q/Q_c が表-2に示す値となる。表より、Qと Q_c がほぼ等しいと考えられる。故にモデルⅠでは、ほとんどすべりによる流量はなく流動により流れていると考えられる。

(2) モデルⅡ：降伏値 τ_f より r_f を求めると、 $r_f > R$ となり実験条件からすべて栓流となる。故に(1) 式の第一項は零となり、 $Q_c = \pi R^2 VR$ で表わせる。即ち、全流量がすべりによるものであり、すべり速度VRを求めればよい。コンクリートにおける村田・鈴木等の研究によれば、モルタルが管壁面から受ける抵抗力(ラビング力)において、ラビング応力は、すべり速度に比例する。

$$f = \alpha VR + A \quad (3) \quad \begin{array}{l} \alpha: \text{摩擦に係る係数 (gf/cm}^2 \cdot \text{sec/cm)} \\ A: \text{付着に係る係数 (Pa)} \end{array}$$

管壁におけるせん断応力 τ_R を求め、 $\tau_R = f$ として、次式を示した。

$$\tau_R = \frac{1}{\alpha} (R \cdot \Delta P / 2 \ell - A) \quad (4)$$

実測値より、 τ_R とVRをプロットすると、図-3に示すような関係が見られ、 α は配合に無関係に均一な定数と見なす事ができ、 $\alpha \approx 0.024$ (gf/cm²・sec/cm) を得る。次にAは、コンシステンシーにより相違し降伏値との間に一次式的な関係がある事が、同研究で示されている事から、 τ_f とAの関係を見ると、図-4に示すように、 $A = 0.68 \tau_f - 0.74$ ($r^2 \approx 0.822$) の関係が得られた。以上の結果を(4) 式に代入し、すべりによる流動については、すべり速度を求める実験式(5) を得た。

$$VR = \frac{1}{0.024} \{ (R \cdot \Delta P / 2 \ell) - 0.68 \tau_f + 0.74 \} \quad (5)$$

(5) 式により、流量 Q_c を求め実測値Qと比較し表-3を得た。

表より Q/Q_c は、1例を除きかなり対応する結果を示した。

以上より、土砂のポンプ圧送はレオロジー的解析により論ずる事ができるとの結論を得た。実用に際しては、 τ_f 、 η 、 p 、 ℓ を容易に推定できるように、 τ_f についてはスランプとの相関式を、 η 、 p 、 ℓ については粘度式を求める事で対応できる。今後は、それらの相関性をより高め、精度よく圧送性を評価できるよう、更に実験を行ない研究をする考えである。

5. おわりに

当研究は、都立大村田教授に多大の御指導を得たものであり、当研究室の皆様、㈱銭高組技研、三井造船㈱鉄構土木事業部の皆様に感謝の意を表します。

参考文献 1) 村田・鈴木「すべりを伴うモルタルの管内流動」・土木学会第38回概要集

2) 村田・岡田「最新コンクリート技術選書」：山海堂

表-2 モデルⅠ Q/Q_c

NO.	圧力差 (kgf/cm ²)	実測値 (m ³ /h)	計算値 (m ³ /h)	実測値/計算値
2	12.7	20.8	28.13	0.74
3	13.7	24.0	26.17	0.92
6	① 11.58	22.15	28.18	0.79
	② 19.05	14.4	14.24	1.01
	③ 28.39	6.26	3.77	1.66
7	① 15.31	24.8	28.95	0.86
	② 20.9	14.0	17.96	0.78
	③ 30.44	8.8	11.49	0.77

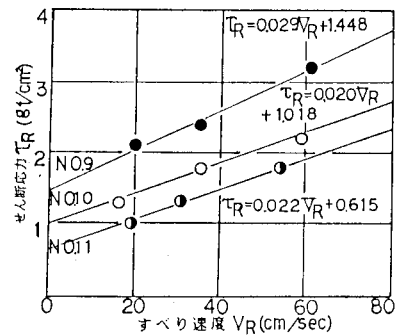


図-3 せん断応力～すべり速度

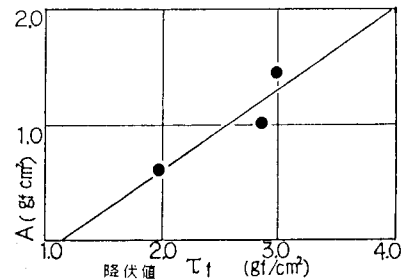


図-4 A～降伏値

表-3 モデルⅡ Q/Q_c

NO.	圧力差 (kgf/cm ²)	実測値 (m ³ /h)	計算値 (m ³ /h)	実測値/計算値
9	1 20.92	26.96	36.25	0.74
	2 15.31	15.60	20.19	0.77
	3 13.44	8.90	14.52	0.61
10	1 14.00	26.20	17.93	1.46
	2 11.57	15.65	10.97	1.43
	3 8.40	7.20	1.90	3.80
11	1 11.60	24.00	22.27	1.08
	2 8.20	13.60	12.55	1.08
	3 6.70	8.50	8.27	1.03