

III-308 軟岩に対する非定常掘削抵抗に関する考察

愛媛大学大学院 学生員 渡辺裕明
愛媛大学工学部 正員 室 達朗

1. 緒言 実際の掘削機械は非定常掘削機構を有しているものが多いにもかかわらず、その詳細な機構は未だ明確にされていない。ここでは、種々の強度を持つ軟岩モデルに対して非定常掘削実験を行い、主にその掘削抵抗について考察した結果を報告する。

2. 軟岩供試体の製作 供試体は、乾燥シルト質ロームと普通ポルトランドセメントと水を混合攪拌した後、150cm×30cm×5.4cmの鋼製容器に打設し、室内で7日間湿潤養生させて実験に用いた。同時に、供試体の一軸圧縮強度 S_c (kgf/cm²)と圧裂引張強度 S_t (kgf/cm²)を測定した。その結果、配合の異なる供試体A, B, Cのそれぞれの S_c , S_t およびせん断強度 S_s (kgf/cm²)の平均値は表1のようになった。

表1 軟岩モデルの力学特性

供試体	S_c (kgf/cm ²)	S_t (kgf/cm ²)	S_s (kgf/cm ²)
A	1.43±1.11	0.16±0.19	0.30±0.32
B	8.16±13.37	0.83±1.44	1.56±2.67
C	24.34±13.52	2.87±1.63	5.20±2.80

3. 非定常掘削実験 実験装置の概略を図1に示す。牽引装置として0.4kWのモータを使用し、牽引速度は7.3cm/min、刃先角は30°、刃幅は5cmと一定にした。非定常掘削実験では、掘削刃取付部に作用している軸力・曲げモーメントから、刃先部に作用する水平・鉛直掘削抵抗 H, V (kgf/cm)および合掘削抵抗 R (kgf/cm)を算出した。同時に、掘削深さ t (cm)を測定し、刃先の通った軌跡を求めた。実験は、すくい角 α を-20°, 0°, 10°, 30°, 40°, 60°の6種類とし、刃先に与える鉛直荷重 P_α (添字はすくい角を表す)を3.15-44.08kgf/cmの間で変えて行った。よって合計84種類の実験を行い、解析・考察した。

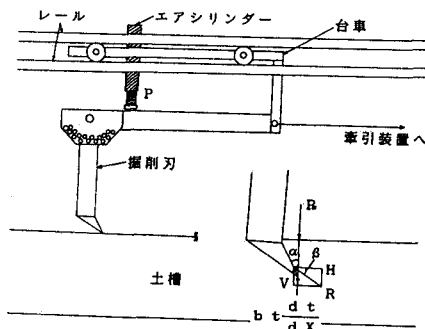


図1 実験装置の概略

4. 解析・考察 図2は、掘削距離 X と H, V および t の関係を、 $\alpha=10^\circ$ 、供試体B, $P_{10}=18.75$ kgf/cmの場合を例として示したものである。図より、 H は X とともに僅かずつではあるが、増加し、 V は掘削開始直後に極小値をとった後、一定値に落ち着く傾向がある。こうした実験結果より、各 α に対する $H_\alpha, V_\alpha, R_\alpha$ を X, P_α, S_s の関数として表し、重回帰分析を行った。また、 $\alpha \leq 30^\circ$ における V_α では前述の挙動が見られたので、笈田の式¹⁾を次式のように変形して帰した。

$$V_\alpha = P_\alpha \left[1 - \frac{\sqrt{1 - P_\alpha / (a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2})} \exp(X / (d_2 P_\alpha^{e_2} S_s^{f_2}) \cdot \ln\{1 + (a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2}) / P_\alpha \cdot (\sqrt{1 - P_\alpha / (a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2})} - 1)\})}{\sqrt{1 - P_\alpha / (a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2})} (1 - 2(a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2}) / P_\alpha) + 2(a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2}) / P_\alpha - 2} \right] \times [1 - \exp(X / (d_2 P_\alpha^{e_2} S_s^{f_2}) \cdot \ln\{1 + (a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2}) / P_\alpha \cdot (\sqrt{1 - P_\alpha / (a_2 P_\alpha^{b_2} S_s^{c_2})} - 1)\})] \quad (1)$$

その結果を表2-表5に示す。図3は、図2と同じ条件における実測値と帰帰曲線を表しており、両者は良く一致している。さらに、笈²⁾によれば、 $H_\alpha / H_0 = 10^{-m\alpha}$ (m :定数)の関係が得られている。本研究においても、 H_α, R_α にこの関係を用いて解析した結果、次式を得た。 β は R が作用する角度を表す。

$$H_\alpha = 2.638 X^{0.057} P_\alpha^{0.573} S_s^{0.179} 10^{-0.0023\alpha} \quad (r=-0.782) \quad (2)$$

$$R_\alpha = 3.469 X^{0.086} P_\alpha^{0.599} S_s^{0.121} 10^{0.0075\alpha} \quad (r=0.705) \quad (3)$$

$$V_\alpha = \pm \sqrt{R_\alpha^2 - H_\alpha^2} \quad (\beta > 0: V_\alpha > 0, \beta < 0: V_\alpha < 0) \quad (4)$$

ただし、これらは $\alpha \geq 0^\circ$ で解析したものである。

次に、掘削刃のくい込みやすさの指標である貫入抵抗係数 b について考察した。 b の値は、笈²⁾による次式より算出した。

$$P_\alpha - V_\alpha = bt \frac{dt}{dX} \quad (5)$$

実験より得られた b を P_α, S_s の関数として表し、重回帰分析を行った結果、次式を得た。

$$b_{20} = 28.474 P_{20}^{-0.833} S_s^{1.501} \quad (r=0.931) \quad (6)$$

$$b_0 = 83.848 P_0^{-0.770} S_s^{1.346} \quad (r=0.809) \quad (7)$$

$$b_{10} = 2.707 P_{10}^{-0.120} S_s^{1.108} \quad (r=0.959) \quad (8)$$

$$b_{30} = 36.416 P_{30}^{-0.532} S_s^{1.086} \quad (r=0.755) \quad (9)$$

$$b_{40} = 8.926 P_{40}^{0.082} S_s^{1.226} \quad (r=0.910) \quad (10)$$

$$b_{60} = 2.635 P_{60}^{0.618} S_s^{1.430} \quad (r=0.892) \quad (11)$$

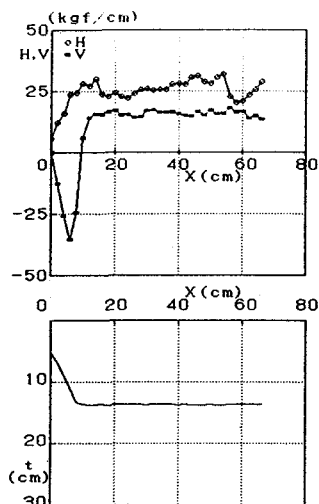


図2 掘削距離 X と水平・鉛直掘削抵抗 H, V および掘削深さ t の関係

($\alpha=10^\circ$, 供試体B, $P_{10}=18.75$ kgf/cm)

さらに、上式(7)-(11)に、 $P_a=10\sim 40\text{kgf/cm}$ 、 $S_s=2.50\text{kgf/cm}^2$ を代入し、算出した値を α の2次関数として表し回帰分析を行った結果、次式が成立した。

$$P_a=10\text{kgf/cm}$$

$$b_a=0.019\alpha^2-1.012\alpha+35.874 \quad (r=0.537) \quad (12)$$

$$P_a=20\text{kgf/cm}$$

$$b_a=0.027\alpha^2-0.891\alpha+22.091 \quad (r=0.943) \quad (13)$$

$$P_a=30\text{kgf/cm}$$

$$b_a=0.036\alpha^2-1.078\alpha+17.496 \quad (r=0.990) \quad (14)$$

$$P_a=40\text{kgf/cm}$$

$$b_a=0.045\alpha^2-1.324\alpha+15.412 \quad (r=0.998) \quad (15)$$

図4は、 $S_s=2.50\text{kgf/cm}^2$ の場合の α と b の関係を示している。図中のデータは式(7)-(11)より得られた値であり、曲線は式(12)-(15)の回帰曲線である。図より、 P_a が大きくなると b の最小値は小さくなり、そして b が最小となる α は小さくなるのが分かる。また、 P_a に関わらず b が最小値をとるのは、 $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ のときである。

5. 結論 すくい角が α' のときの掘削抵抗は式(2)-(4)で与えられること、そして貫入抵抗係数は、 P_a 、 S_s の関数として式(6)-(11)で表され、また $P_a=10\sim 40\text{kgf/cm}$ 、 $S_s=2.50\text{kgf/cm}^2$ 、 $\alpha \geq 0^\circ$ のときに α の2次関数として式(12)-(15)で表されることが分かった。さらに貫入抵抗係数は、 $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ のとき最小となることが判明した。

参考文献 1) 笈田昭; 土のせん断応力-変位曲線表示式に関する一考察, 農業機械学会誌, 第37巻第1号, pp. 20-25, 1975.
2) 島昭治郎; 掘削機構の解明(I), 建設の機械化, 第135号, pp. 71-74, 1961.

表2 H_a の回帰分析結果

	a_1	b_1	c_1	d_1	r
H_{20}	0.604	0.098	1.004	0.011	0.939
H_0	2.638	0.057	0.673	0.179	0.930
H_{10}	1.097	0.148	0.879	0.088	0.952
H_{30}	1.486	0.172	0.793	0.026	0.801
H_{40}	1.725	0.236	0.436	0.251	0.859
H_{60}	5.078	0.073	0.267	0.140	0.808

$$H_a = a_1 X^{b_1} P_a^{c_1} S_s^{d_1}$$

表3 V_a の回帰分析結果($\alpha \leq 30^\circ$)

	a_2	b_2	c_2	d_2	e_2	f_2	r
V_{20}	-26.52	-1.585	2.397	0.213	0.275	0.296	0.785
V_0	-223.0	-1.880	-1.789	0.273	0.699	0.002	0.501
V_{10}	-577.7	-0.779	-1.757	1.522	0.380	-0.765	0.986
V_{30}	-0.213	1.511	-1.151	39.29	-0.194	0.160	0.459

表4 V_a の回帰分析結果($\alpha \geq 40^\circ$)

	a_3	b_3	c_3	d_3	r
V_{40}	-0.484	1.018	0.434	0.498	0.956
V_{60}	-0.092	0.928	0.817	0.362	0.908

$$V_a = a_3 X^{b_3} P_a^{c_3} S_s^{d_3}$$

表5 R_a の回帰分析結果

	a_4	b_4	c_4	d_4	r
R_{20}	1.011	0.145	0.910	0.022	0.915
R_0	3.469	0.086	0.599	0.121	0.932
R_{10}	1.493	0.160	0.795	0.106	0.946
R_{30}	1.224	0.198	1.041	-0.102	0.764
R_{40}	3.924	0.399	0.476	0.392	0.890
R_{60}	2.898	0.192	0.692	0.248	0.793

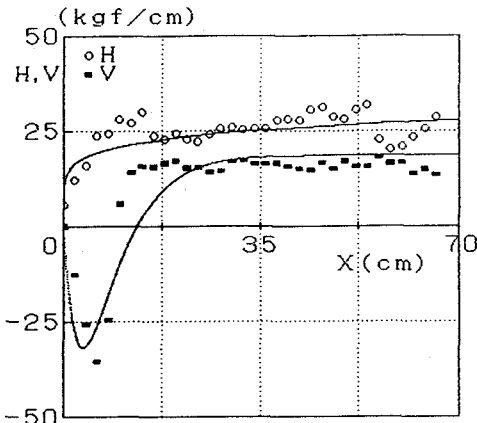
$$R_a = a_4 X^{b_4} P_a^{c_4} S_s^{d_4}$$


図3 掘削距離 X と水平-鉛直掘削抵抗 H, V の関係 ($\alpha=10^\circ$, 供試体B, $P_{a0}=18.75\text{kgf/cm}$)

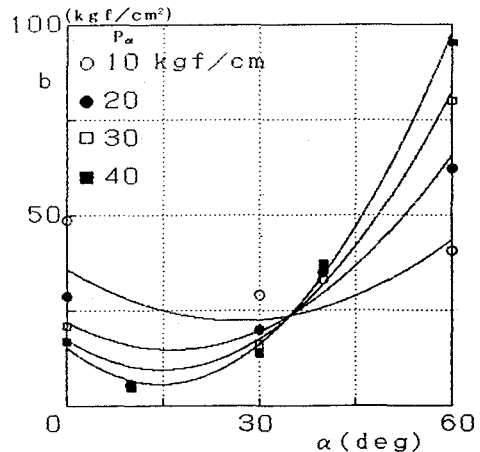


図4 すくい角 α と貫入抵抗係数 b の関係 ($S_s=2.50\text{kgf/cm}^2$)