

III-439

泥水加压シールドのブロー現象に関する実験的研究（その1）

— 泥膜形成時の静的ブロー現象 —

早稲田大学 正会員 森 麟, ○田村昌仁
西松建設（株） 正会員 栗原和夫
早稲田大学 学生会員 佐藤洋一

1. まえがき 泥水加压シールドは、対象地盤の適用範囲が広く東京湾横断道路のシールドトンネル建設においても採用が予想されるなど今後とも有用な工法である。しかし、泥水による切羽の安定機構は未だ十分究明されず最適泥水圧についても不明な点が多い。切羽の安定を考える上で、重要な問題のひとつに泥水圧により地山が割裂し逸泥するブロー（噴発）現象があり、泥水圧により地山が割裂しない上限値を知ることは極めて重要であろう。シールドの推進中はカッターによる泥膜の切除とその後の再形成が絶えず繰り返されるため、この状況下のブローは泥膜が形成された静的な場合と異なることも考えられるが、ここではまずブロー現象を考える上で基本となる泥膜形成時の静的ブロー現象について調査・研究した。

2. 砂質地盤のブロー圧 表. 1, 表. 2には、使用した飽和砂と締め固め土の種類を示す。図. 1には、実験装置の概要を示しているが、実験方法等については文献1)を参照されたい。供試体の中央部に取り付けた注入管に泥水を満たして流入量用ビュレット内の泥水を加压することにより、泥水圧を徐々に増加させる。加压速度は、 0.1 kgf/cm^2 を10秒単位でステップ状に上げる。ブロー即ち割裂の判定は、ビュレットの水位変化より求められる流入量 V と注入管の下端で測定される注入圧 P' の関係より求めることにし、流入量が急激の増加する時点の圧力をブロー圧とした。表. 3には、使用した泥水の性状を示す。図. 2には、泥水による飽和砂試料のブロー圧 P_b' と拘束圧 σ_3' の関係を示す。なお、試料の拘束圧は特に断らない限り全て等方圧である。 P_b' は、試料の透水性が小さくなるにつれて低下している。透水係数が、 10^{-3} (cm/s) よりかなり大きい試料A, B, C, Eの P_b' は拘束圧の8～10倍程度も大きい。透水性の小さい試料Gでは、摩擦角 ϕ こそこれらの試料と同程度であるが、ブロー圧は著しく小さくなっている。

図. 3には、締め固め土の P_b' と σ_3' の関係を示しているが、 P_b' は透水性が大きくなるにつれて増加しており、図. 2の飽和砂の結果とも一致している。密度の大きい試料HDの P_b' は、締め固め度が小さく密度の小さい試料HLの P_b' より大きくなっておりブロー圧に及ぼす密度の影響も考えられるが、全体的にみて透水性の影響が大きいものと思われる。

以上のブロー圧は比較的拘束圧が大きい場合であったが、ブロー現象が問題になるのは土被りが浅く拘束圧が小さい場合である。図. 4には、低拘束圧下のブロー圧 P_b' を示す。また、図中には泥水のかわりにゴム膜を用いて孔壁を加压したときの割裂圧 P_{BL}' も示す。注入管のかわりに直径3mm長さ6cmのゴム膜で覆ったパイプを立上げてこの内部を加压し、ゴム膜が急激に膨張する段階の注入圧を割裂圧 P_{BL}' とした。泥水等の液体による加压では、孔壁周りに生じた亀裂に液が浸透して亀裂を押し拡げていくクサビ作用が生じてブローが発生しうが、ゴム風船による加压ではクサビ作用が発揮できない。そして、この状況での割裂圧は中空円筒の全般せん断破壊を引き起こす極限空洞内圧 P_u' に相当する。

$$P_u' = Fq \cdot \sigma_3' + (Fq - 1) \cot \phi \cdot c \quad (1)$$

$$Fq = (1 + \sin \phi) \{ E \sec \phi / \{ 2(1 + \nu)(\sigma_3' \tan \phi + c) \} \} \quad (2)$$

ϕ : 摩擦角 ν : ボアソン比 E : ヤング率 c : 粘着力

図. 4の破線は、(1)式で示した試料Bの P_u' を示している。 P_u' の値は主に摩擦角 ϕ に左右され、試料Bの摩擦角は他の試料とほぼ等しいのでこれらの P_u' 値も破線で示した程度となる。 P_{BL}' は、透水性の影響が認められずいずれの試料も同程度で P_u' とほぼ一致している。一方、ブロー圧 P_b' は透水性の影響を受け、透水性の小さい試料HLや試料Gでは他の透水性の大きい試料よりかなり小さくなっている。透水係数の小さい試料G, HLの P_b' は P_u' より小さいが、透水係数の大きい試料B, Eの P_b' は P_u' とほぼ等しいことがわかる。したがって、透水性の小さい場合にはクサビ作用で割裂し、 P_u' よりも小さい圧力でブローするが、透水性の大きいものはクサビ作用が生じにくくブロー圧は P_u' とほぼ等しくなると思われる。

筆者らは、砂質地盤の水又は粘性のやや大きい溶液による割裂圧が（3）式となることを指摘した。¹⁾

$$P_f' = m\sigma_3' + \sigma_v + R \quad (3)$$

m：定数（ $1 \leq m \leq 2$ ） σ_v ：引張り強度 R：亀裂進展抵抗

mは、注入加圧速度に依存しており、注入圧により注入管周囲の間隙水圧が増加しない急加圧状態で最大2となる。加圧速度が低下し、間隙水圧が増加するにつれてmは減少し最小値は1となる。Rは、透水性に依存しており、透水性が大きくなるにつれて増加し、 $k = 10^{-4} \sim 10^{-3} (\text{cm/sec})$ において、 $R = 1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ となる。泥水による加圧では泥膜が形成されるので急加圧状態に相当し $m = 2$ となり、割裂圧は（3）式で求められる。しかし、透水係数 k が $10^{-3} (\text{cm/s})$ よりかなり大きい場合には、Rが大きく（3）式の値が（1）式で与えた P_u' より大きくなりうる。ブロー圧は（1）式の P_u' 以上には大きくなりえないので、この場合のブロー圧 P_b' はクサビ作用に起因しない（1）式の P_u' （ $= P_{bl}'$ ）で与えられる。

ブローの方向は、泥水を着色して調べた。透水性が小さい試料Iなどでは、垂直で注入管に対して半径方向の割裂脈が明瞭に確認できる。一方、透水性が大きい試料A、Eでは、脈状の着色域は認められず注入管周囲で均等な着色域が認められ、ブローが生じても割裂脈は見られない。これらのブロー圧は、クサビ作用に起因しない P_u' 程度になるが、泥水の浸透状況からもクサビ作用が生じていないことが確認できた。

3. 粘性土のブロー圧 筆者らは、粘性土（一軸圧縮強度 $q_u = 0.3 \sim 1.8 \text{ kgf/cm}^2$ ）の割裂圧 P_f' が、通常（4）式で表わされることを明らかにした²⁾。

$$P_f' = \sigma_3 + q_u \quad (4)$$

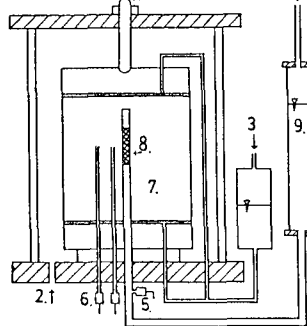
この結果は、水または粘性のやや大きい溶液を用いた場合であるが、事実上不透水の粘性土では泥膜形成の有無を考慮する必要がないので、泥水によるブロー圧に対しても粘性土に（4）式が適用できる。

参考文献 1) 森, 田村, 千, 土木学会論文集, No. 388, 1987 2) 森, 田村, S & F, Vol. 27, No. 1, 1987

表. 1 飽和砂の種類

試料	摘要	密度 γ_s (gf/cm ³)	透水係数 k (cm/sec)	ϕ (%)
A	ケイ砂5号	1.50	6.2×10^{-2}	36
B	ケイ砂7号	1.40	6.3×10^{-1}	38
C	ケイ砂8号	1.43	4.0×10^{-3}	35
D	粉末ケイ砂	1.42	4.0×10^{-4}	37
E	重油標準砂	1.53	1.2×10^{-2}	36
F	混合砂	1.49	9.2×10^{-4}	40
G	塩城砂	1.42	1.0×10^{-4}	40

ϕ ：摩擦角，試料Fは、EとGを7：3で混合したもの



1: 軸差応力 2: 拘束圧 3: 背圧
4: 注入加圧 5: 注入圧 6: 間隙水圧
7: 供試体(180×180mm) 8: 注入管(φ=10mm)
9: 流入量用ピュレット

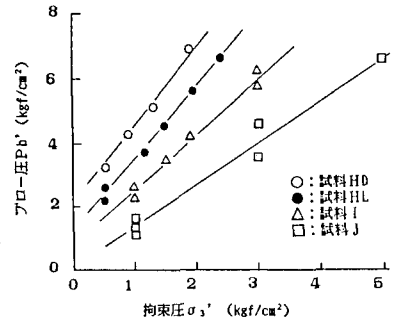


図. 3 締め固め土のブロー圧

表. 2 締め固め土の種類

種類	配合比 R/V	ω (%)	密度 γ_s (gf/cm ³)	透水係数 k (cm/s)	c kgf/cm ²	ϕ (°)
HD	80:20	15	1.52	8.2×10^{-4}	0.18	37
HL	80:20	15	1.42	1.4×10^{-3}	0.07	35
I	65:35	15	1.43	2.1×10^{-4}	0.25	28
J	50:50	14	1.40	$< 10^{-5}$	0.35	15

試料H, I, Jは、試料B（ケイ砂7号）と木節粘土（試料K）の混合土であり、R/Vはその重量比である。ω：含水比、c：粘聚力

表. 3 泥水の性状

種類	濃度N (%)	比重	Fv (秒)	ろ過量 V _f (cc)
a	12	1.068	45.9	13.5
b	10	1.049	28.8	15.8

N：ベントナイト濃度 Fv：ファンネル粘性
V_f：API規格（3kgf/cm²加圧，30秒）のろ過量

図. 1 割裂実験装置

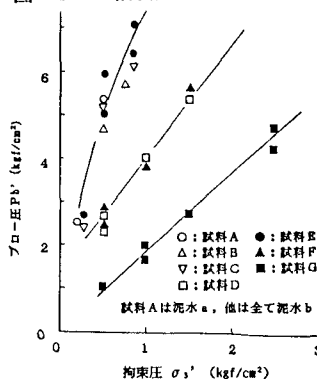


図. 2 飽和砂のブロー圧

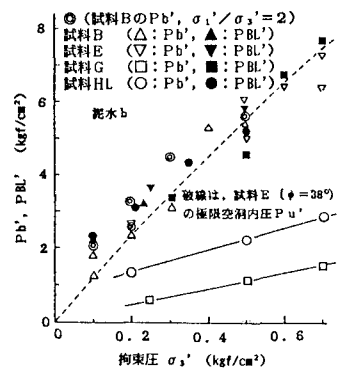


図. 4 低拘束圧下のブロー圧