

III-24

シールド推進時における地表面の局部破壊の原因解明と考察

日本電信電話公社 九州電気通信局 正員 ○伊藤 芳文

" " " 高橋 良明

大成基礎設計(株)

中谷 英雄

1. まえがき

大分市におけるシールド式とう道工事(セグメント外径 3550mm)において、シールドマシン改造のための事前に薬液注入を改造位置に実施し、断気してマシン改造作業中、シールド切羽より水とともに土砂が流入し道路陥没に至った。事故の原因は、現場の土質及び流入機構を分析したところパイピングであることが推察された。本報告は、パイピング現象を時間的要素と土の強度的要素を考慮した「パイピング係数」なる概念を導入して分析して、今後の推進対策の一助としたものである。

2. 地質状況

事故が発生した箇所の地層構成を概念的に表したのが図-1であり、その特徴は次のとおりである。

①切羽に出現する地層は砂層、砂礫層、粘土層の3層で、各層は明確に区別される。②砂礫層は粘土層と砂層の間層部において自然の集水渠の役割をはたしている。③切羽の前方から後方に向って粘土層が下り勾配をなしており後方部に一種の地下谷を形成している。

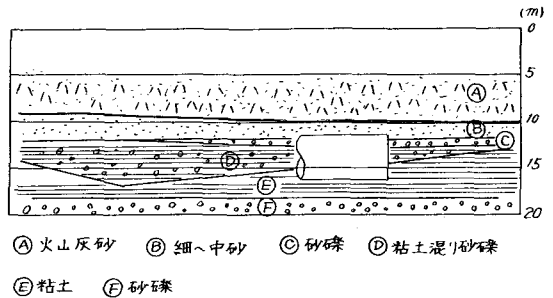


図-1 地層構成の概念図

一方、各地層の工学的な性質を N 値から判断すると火山灰砂は、 $N=15\sim20$ を示すがかなりゆるく、切羽上部に出現する細〜中砂層は $N=25\sim35$ である程度締った状態である。30〜40cmの薄層で分布する砂礫層は極めて透水性が良いが N 値は余り明確でない。粘土混り砂礫は N 値のバラッキも激しく「土砂流堆積物」の可能性が強く N 値だけでは評価しがたい地層である。

また、切羽下端部に出現する粘土層は、 N 値 $=3\sim12$ を示し、硬さにおいてそれほど均質な地層ではない。

3. 事故状況

シールドマシン改造のため断気後、切羽前面を開放したが3日間は切羽部の破壊や目視できるほどの湧水は認められなかった。しかし4日目夜半になって突如200〜300 ℓ/min の湧水とともに相当量の土砂が坑内に流入し始めた。このため緊急注入等の対策を行ったが、流入は約24時間継続し最終的に流入した湧水量は約600 m^3 、土砂は約35 m^3 に達した。

湧水及び土砂の流入箇所は切羽断面でみると、図-2に示すとおり砂礫層と粘土層の層境に当り切羽断面の左斜め下であった。また通水した弱面部は路面の陥没位置からみると図-3に示すとおり切羽の前方やや左側に発達したものと判断される。

4. 事故原因

Bromsの H/D (土核/シールド径)では $12.4/3.55=3.49<4$ となり、全面破壊に区分されるが地表面の陥没範囲が狭いため自立性を失った全面破壊ではない。また破壊状況は、局部破壊でもないため部分的な弱面破壊による地流入といえる。

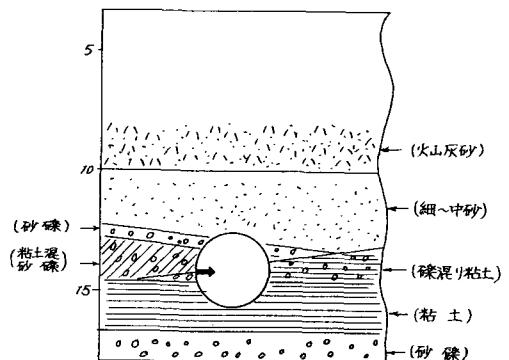


図-2 切羽断面と土砂流入位置

事故原因は、切羽からの湧水と土砂流入の位置、路面陥没の形状とその位置、地層の境界位置、切羽の全体的な自立の維持と状況から判断してパイピングであると思われた。

また、坑内に流入した土砂の粒度試験を行ってみた結果も10m以浅に分布する火山灰砂の粒度に近く、パイピング特有の上部土砂を引き込んだことを証明している。

5. パイピングの発生原因

(1) 薬液注入過程では、M.K. Hubbert や D.G. Willis らの研究¹⁾によれば、薬液注入によるクラックは最も小さい拘束に対し垂直に発生するという現象を報告している。このことから削孔後に孔内から地中（水平）に向けて注入される薬液注入では、土被り圧が最小拘束となり層境にクラックを作りながら薬液が注入されることになる。(図-4)

(2) Henri Cambefort の実験¹⁾によると注入率が限度を越して多量に注入されると、地層の密度 ρ と内部摩擦角 ϕ が低下し弱面となることを明らかにしている。このことは、層境の局部に土質の不均一性から注入量が一方に片より、それが注入限度を超え ρ, ϕ を低下させた部分が残存したと解釈される。

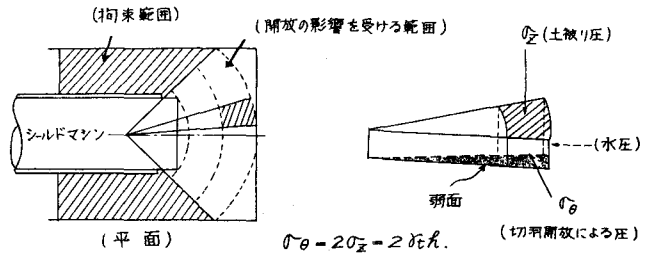


図-4 切羽開放による影響

6. パイピング係数の導入による対策

今回の事故原因であるパイピングは、改良外の地下水圧によって薬注された内部に浸透圧を発生させ、それと地中抵抗とのバランスが崩れた事によって発生したと考えるのはパイピングの概念からみて妥当である。

今回、切羽を開放して約5日間(11/4 hr)はパイピングを防止していることから、この時間的効果を考慮したパイピング係数なる概念を導入してその機構を次のように解析した。

＜解析方法＞パイピングが形成される時間を t 、弱面を通水する速度を v 、弱面の長さを l とすると

$$v = l/t = k_p \cdot i \quad (k_p: \text{パイピング係数}, i: \text{動水勾配}) \quad \text{----- ①}$$

一方、 v は浸透圧と地中抵抗力によって左右されるので、 $i_{rw} = (H - C)/l$ ----- ② が成立つ。

ここに、 H : パイピング位置から地下水位までの距離、 C : 薬注部分のせん断強度、 γ_w : 水の密度

①, ②式からパイピング係数は、 $k_p = l^2/t (H - C/\gamma_w)$ ----- ③ となる。従ってある時間 t だけパイピングを起さない安全な長さ l は、前式の土の強度に安全率を考慮して、 $l_c = \sqrt{k_p \cdot t (H - C/F_s \cdot \gamma_w)}$ ----- ④

今回は地下水位 $GL-1.68m$ 、パイピング発生位置 $GL-15m$ であるから、 $H=13.32m$ となる。また $t=1/4$ 時間、改良後のせん断強度 $C=10 \text{ t/m}^2$ 、 $l=2.5m$ (カバーロック)、 $\gamma_w=1 \text{ t/m}^3$ であるため、パイピング係数 $k_p=1.45 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{sec})$ となった。この k_p を用いて切羽開放時(日数)に対する l_c の長さを算出し薬注による改良範囲を決定して施工したところ十分に安全にシールドマシンの改造を完了することができた。

7. あとがき

パイピングについての研究成果は乏しく、数値解析できる現状でないが、今回のように切羽が開放されてから1/4時間はパイピングを防止していたという事実からパイピング係数なる概念を導入して解析を試みたものである。今後このような概念がパイピングの発生しやすい地盤に対する地盤改良計画の参考になれば幸いである。

8. 参考文献

1) Henri Cambefort (斉藤二郎、福住隆二 共訳): 「地盤注入」, 鹿島出版会, P.76, P.121