

早期閉合トンネル力学パラメータに関する考察

首都大学東京都市環境学部
(株)高速道路総合技術研究所道路研究部
清水建設(株)地下空間統括部

正会員 西村 和夫
正会員 城間 博通
正会員 ○楠本 太

1. はじめに

地山強度比が 1.0 を下まわる押出し性地山では、トンネルの安定場を形成する周方向応力 σ_t は地山強度 q_u より大きくなり、地山は破壊され、支保構造体は不安定になり、大変位や支保工の破壊が発生する。このような地山のトンネル施工では、変形余裕を考慮してトンネルの安定を確保する方法が一般に行われているが、トンネル構造体の安定確保が困難になる場合が多く、大変位の抑制が課題である。このため、トンネルの安定が確保でき、大変位が克服できた早期閉合トンネル事例を選定し、挙動特性を調査、分析して、早期閉合トンネルに関する力学パラメータとこれの基本特性を明らかにした。さらに、地山強度比から作用土圧を推定し、この土圧保持に必要な支保耐荷力の算定方法、設計の考え方を提示した。

2. 力学パラメータ

掘削外力 $f_0 (= \gamma h)$ 、 γ は単位体積重量、 h は土かぶり高)に対する地山の軸圧縮強度 q_u の比であらわす地山強度比 $(= \gamma h / q_u)$ 、作用土圧 $P_0 (= N_c / r_1)$ 、アーチ構造体耐荷力に係わる構造半径比 $(= r_3 / r_1)$ 、内空断面確保のための変形余裕量、早期閉合距離 L_f を代表的な早期閉合トンネル力学パラメータとする。

3. 調査方法

吹付けコンクリート、インバート支保工の早期閉合部材を用いて、上半切羽から 1D (D は掘削幅) 以内で、掘削サイクルの中で断面閉合する早期閉合方法は、基準化はなされていないので、5 タイプの早期閉合パターン(表-1)に区分し、22 事例を選定、力学特性を分析する。

4. 早期閉合トンネル力学特性

部材応力測定データがある 17 例における吹付けコンクリート軸応力と鋼アーチ支保工縁応力の最大値は、 L_f および (r_3 / r_1) との対応で、図-2～図-4 に示す。これらから、以下のことが分かる。

・D の吹付けコンクリート軸応

力は、 $4N/mm^2$ 以下の圧縮である。D は、 $6 \sim 18N/mm^2$ の範囲内にある。E1 は、 $36N/mm^2$ を超える事例がある。

・D 2 の鋼アーチ支保工縁応力は、 $120N/mm^2$ 以下の曲げ圧縮である。D、E1 では、降伏強度の $240N/mm^2$ を超えるが、鋼アーチ支保工は吹付けコンクリートで拘束されているので、支保構造部材としての安定は確保できている。

・D を除くと、早期閉合距離 L_f が短くなると鋼アーチ支保工縁応力は小さくなる。早期閉合距離 L_f と吹付けコンクリート軸応力の相関はみられない。

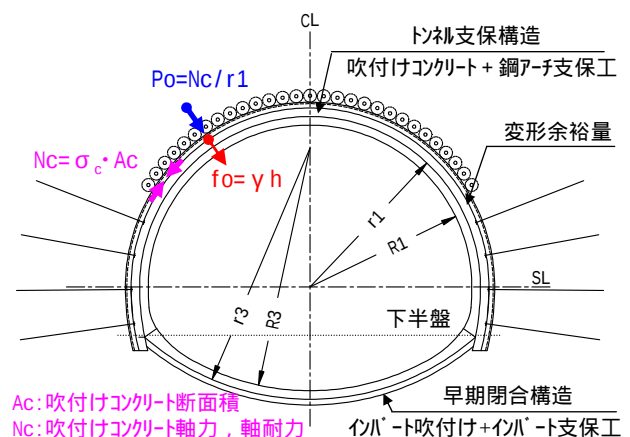


図-1 早期閉合トンネル構造とパラメータ

表-1 早期閉合トンネル区分

閉合パターン	力学的性質	地山強度比	早期閉合の目的
D 1	未固結、強度不足地山	2	早期閉合により、トンネル支持構造体の安定場を形成し、過大な変位発生を抑制する。
D 2	環境保全、掘削影響の抑制	2	早期閉合により、塑性変形の深部伸展を抑制し、トンネル掘削影響域の拡がりなどを抑える。
D 1	変形余裕を必要とする強度不足地山	$1 < 2$	塑性土圧の作用は小さいが、早期閉合なしでの支保構造体の安定確保は困難である。
D 2	変形余裕を必要とする押出し性地山	$0.5 < 1$	塑性土圧作用が予想され、早期閉合なしでの支保構造体の安定確保と大変位の抑制は困難である。
E1	大変形余裕を必要とする押出し性地山	0.5	変位速度が速く、高土圧作用が予想され、作用土圧に見合う高耐力高剛性仕様の支保構造体で安定を確保する。

キーワード：押出し性地山、地山強度比、早期閉合、耐荷力、構造半径比

連絡先：東京都港区芝浦 1-2-3 シェパード S 館, Tel.03-5441-0566, Fax.03-5441-0510

・構造半径比(r_3/r_1)の違いによる吹付けコンクリート軸応力の明確な差異の有無は、不明である。

5. 作用土圧推定

吹付けコンクリートの作用土圧は、 $P_0 = \gamma \cdot H$ (H は土かぶり相当高または掘削影響高) で仮定する。地山強度比 > 0.1 の作用土圧の土かぶり相当高は、吹付けコンクリート軸応力の最大値 σ_c から、 $H = \sigma_c \times A_c / r_1 / \gamma$ で算定し、地山強度比との対応であらわすと、図-5 のようになる。これから、以下のことがいえる。

- ・D では、土かぶり 20m 相当の作用土圧が推定される。
- ・地山強度比 > 0.7 の D, E1 では、土かぶり 25m 相当が推定される。

・土かぶり相当高は、地山強度比 < 0.5 では、地山強度比が小さくなるにつれ大きくなり、地山強度比 0.5 で $H=40m$ 、地山強度比 0.1 で $H=80m$ が推定され、地山強度比による作用土圧 P_0 の推定が可能であるが示唆された。

土かぶりが $h > 200m$ で地山強度比 < 0.1 では、掘削外力 f_0 の除荷で発生する半径方向再配分外力 σ_r は、掘削面から距離 L ほど深部にはいると、概ね $R_f = r_1^2 / (r_1 + L)^2$ に減衰するので、 $\sigma_r = k_0 \cdot (f_0 - q_u) \cdot R_f$ で概算できる (図-6)。この値が $0.01N/mm^2$ 以下となる掘削面からの距離を掘削影響高 H とし、 $K_0=1$, $\gamma=20kN/m^3$, $r_1=5.9m$, 地山強度を $q_u=0.5N/mm^2$ とすると、土かぶり高 $h=300, 500, 1000m$ に対する掘削影響高はそれぞれ $H=130, 175, 250m$ となり、吹付けコンクリートには、 $P_0=2.6, 3.5, 5.0N/mm^2$ の土圧作用が推定できる。

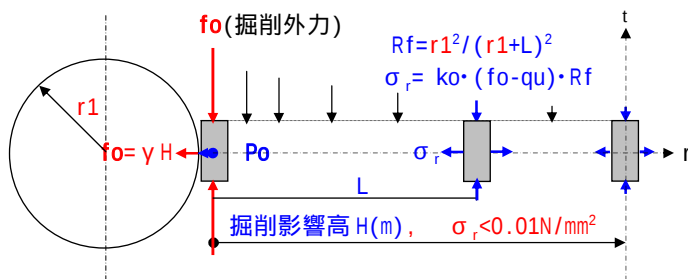


図-6 掘削影響高 H と推定土圧 P_0

6. まとめ

曲げ圧縮部材の鋼 π -支保工は、土圧の一部を保持するが、降伏強度を超えやすい。早期閉合した吹付けコンクリートは、早期に π -構造が形成でき、トンネルの安定が確保できる。これの作用土圧は、土かぶり相当高 H として地山強度比から推定でき、厚肉円筒理論²⁾や $N_c = r \cdot P_0$ などを用いて、地山強度比に対応して必要支保耐力が計算できるようになった。今後は、この早期閉合トンネル設計・施工法の実証するとともに、力学パラメータの高精度化を進める予定である。

参考文献

- 1) 中野清人ほか：早期閉合トンネルの現状と挙動特性，トンネル工学報告集，pp.151-162，2011。
- 2) 楠本太ほか：押し出し性地山における大断面トンネルの力学パラメータに関する考察，JSCE 第 60 回年次学術講演，第 部門，2005。

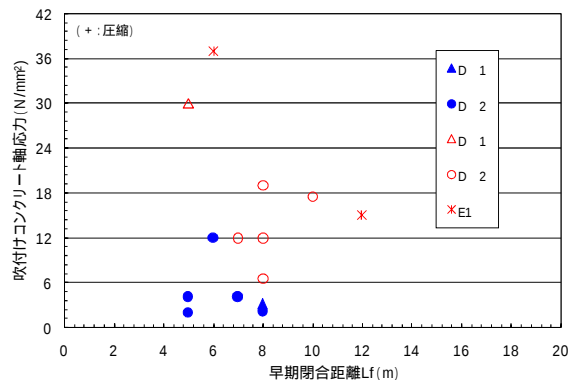


図-2 吹付けコンクリート最大軸応力 (L_f)

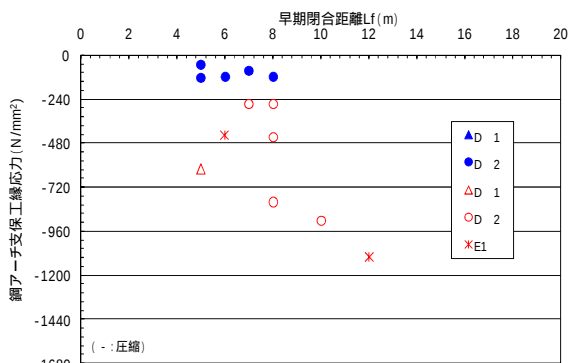


図-3 鋼 π -支保工最大縁応力 (L_f)

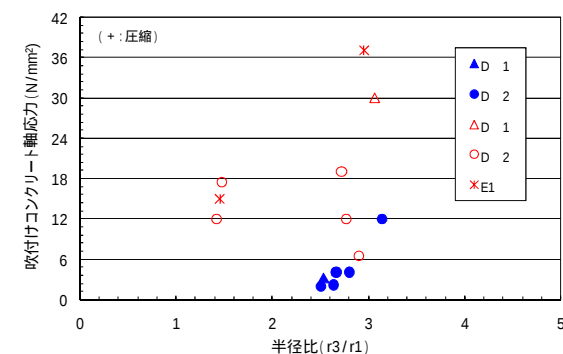


図-4 吹付けコンクリート最大軸応力 (r_3/r_1)

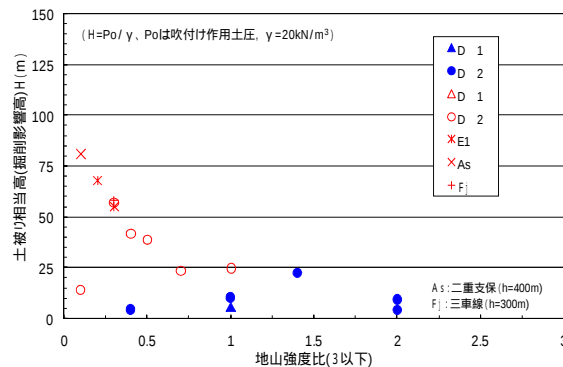


図-5 土かぶり相当高 H