

住宅密集地地下施工における先受け工の応力解放率に与える影響に関する研究

長崎大学工学部 フェロー会員 棚橋由彦

長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静

飛島建設株式会社 正会員 佐々木郁夫

長崎大学大学院 学生員 大隈周史

1. はじめに

近年、都市化した地域で道路を整備する場合に、都市計画や環境対策上トンネル構造が選択されることが多くなってきている。土被りの小さい場所では、固結度が低いことや地下水の影響もあって、切羽の自立性や地山の強度の不足により、トンネルの施工が困難な場合がある。さらに地表の建物や地下埋設物に悪影響を与えないよう、地表沈下を抑制しなければならないこともある。こうした厳しい制約条件に対して、最近では補助工法を活用して解決している施工事例が多くなっている。

各種補助工法のうち、都市部などで土被りの小さいトンネル掘削において長尺鋼管先受け工が、その施工実績の増加が示すように積極的に採用されている。しかし、その構造設計に関しては、合理的設計法は未だ確立されていないのが現状で、その諸言を統一的かつ合理的に決定可能とする設計手法が求められている。また、NATM工法を用いたトンネルの変形挙動を解析して支保工効果を評価するために、応力解放率を用いることにより切羽の進行効果を二次元解析モデルで表現する手法が実務的に用いられているが、地山の力学的特性および初期状態を忠実に考慮した応力解放率の計算法は、まだ明確に示されていないため、過去の設計事例などを参考にして経験的に決定しているのが現状である。

そこで本研究は、三次元掘削解析モデリングを行い、様々なケーススタディにより長尺鋼管先受け工の変位抑制効果を評価するとともに、長尺鋼管先受け工が応力解放率に与える影響について考察を行う。

2. 応力解放率の定義¹⁾

図-1に示すように、トンネル地山変位の測定データを分析すると、切羽面位置(u_o)では、すでに最終変位量(u_{fn})の20~30%以上が生じていることがわかる。

図-2に示すように切羽前方では $p_e = \sigma_o$ 、切羽の近傍では $p_e = u_o/u_{fn} \cdot \sigma_o = SRR \cdot \sigma_o$ 、また無支保の場合では最終的に $p_e = \sigma_o$ となると考えられる。

$$p_e = \sigma_o - p_i \quad (1)$$

$$p_i = (1 - SRR) \cdot \sigma_o = \left(1 - \frac{u(x)}{u_{fn}}\right) \sigma_o \quad (2)$$

ここで、 p_i はトンネル壁面にかかる内圧、 P_e は掘削相当外力、 σ_o は初期地山応力、 SRR は応力解放率、 $u(x)$ はトンネル天盤沈下量、 u_o を切羽面での先行変位、 u_{fn} は無支保でのトンネル天盤最終沈下量、 u_a は切羽面から1掘削サイクル遅れ時点の変位である。

3. トンネル掘削シミュレーション

解析に用いる地山岩盤の力学的特性値は、日本道路公団のD1クラス程度の軟岩物性値を用いる。その挙動はMohr-Coulombの破壊規準に従うものとし、破壊後の挙動は、ひずみ軟化挙動を呈することとする。なお、破壊後は粘着力はピーク時の50%、内部摩擦角は 5° 低下するものとする。鋼製支保工は吹付けコンクリートと一体となって挙動するとみなし、等価的に強度を増加させることとし、ロックボルトはケーブル

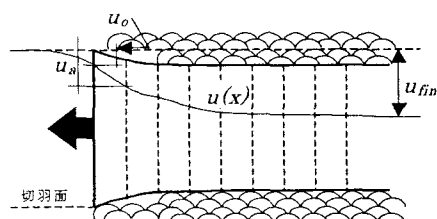


図-1 掘削に伴うトンネル天盤の沈下曲線

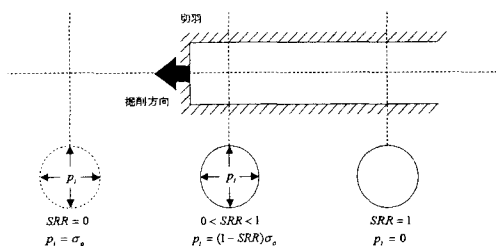


図-2 掘削に伴う内圧効果の変化

要素で、長尺先受け工鋼管はビーム要素で表現する。三次元解析モデルの概要及び二次元解析モデルを図・3、図・4 に示す。

今回の解析では、都市部での施工を想定して変形係数(E)、土被り(H)、地山強度比(Srp)を表・1 のように決定した。ラップ長の違いや、先受け工の施工とインパートの打設の有無を考慮し解析を行った。また、同ケースで二次元解析を実施し、三次元解析との差異を確認する。先受け工を二次元で表現するために、先受け工鋼管の打設される範囲の解析要素を鋼管の変形係数と地山の変形係数を合成した物性値を持った要素に置き換えることで、先受け工をモデル化した。用いた式②を式・(3)に示す。

$$E = \frac{A_1 E_1 (2L_1 + L_2) / (L_1 + L_2) + A_2 E_2}{A} \quad (3)$$

ここで、 A_1 は鋼管の断面積、 E_1 は鋼管の変形係数、 A_2 は地山の断面積、 E_2 は地山の変形係数、 L_1 はラップ長、 L_2 はラップしていない部分の鋼管長、 A は改良地山の断面積 ($A = A_1 + A_2$)、 E は改良体の換算変形係数である。

4. 結果と考察

4.1 先受け工の変位抑制効果

解析結果の一例として、 $E=150\text{MPa}$ 、 $Srp=1$ 、ラップ長 4 m での解析結果を図・5 に示す。ここで、縦軸は天端沈下量 (w) に変形係数を乗じ、土被り(H)で除した値である。図・5 に示す現場データとは、現在、長崎市に建設中のオランダ坂トンネルの計測データである。現場の施工条件は標準支保+先受け工であり、同条件での解析結果と比較し、ほぼ同様の傾向を示すことから、この解析の妥当性が証明できる。この結果より、先受け工は、切羽付近の沈下抑制効果が期待でき、インパートを打設することにより、その効果を切羽後方へ延長することができることがわかった。

4.2 先受け工の応力解放率に与える影響

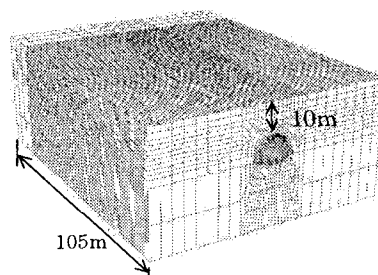
三次元解析において、切羽から 1 掘削遅れでの応力解放率は、無支保状態でおおよそ 50%，先受け工打設時、ラップ長 4 m で 17%，ラップ長 7 m で 16.4% となった。先受け工を打設することにより、応力解放率を 30% 以上減少させることができるが、ラップ長の違いによる応力解放率の影響は、ほとんどないことが分かった。次に、図・6 に二次元解析と三次元解析とを示す。この結果により、二次元と三次元解析の結果は一致せず、二次元解析においては、先受け工の梁としての効果を十分表現できていないことと、切羽前後の地山による拘束効果を考慮できていないためであると考ええる。

5. おわりに

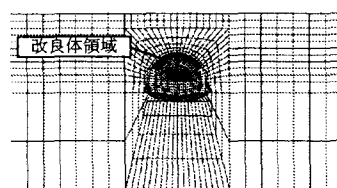
三次元掘削解析を実施し、先受け工の沈下抑制効果、先受け工が応力解放率に与える影響を把握することができた。先受け工の梁としての効果を二次元での表現法と、切羽前後の地山による拘束効果を二次元解析にいかに応用するかが今後の課題である。

(参考文献)

- 1) X. D. PAN, J. A. HUDSON : Technical Note Plane Strain Analysis in Modelling Three-Dimensional Tunnel Excavations, Int. J. Rock. Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 25, pp. 331-337, 1988
- 2) ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会：アンブレラ工法の設計技術資料，pp. 38～42，1996.



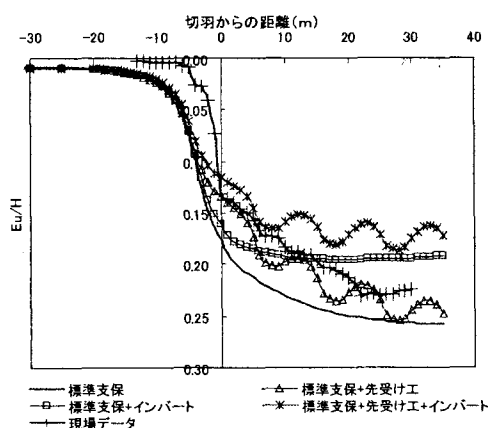
図・3 三次元解析モデル



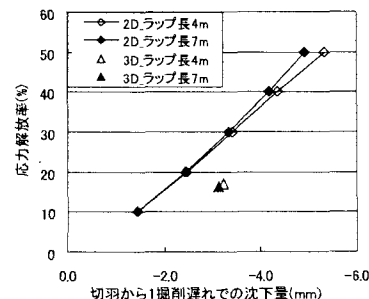
図・4 二次元解析モデル

表・1 解析ケース

	変形係数 E(MPa)	地山強度比 Srp	ラップ長(m)
Case1	150	1	4
Case2			7
Case3		2	4
Case4			7



図・5 三次元解析における先受け工の天端沈下抑制効果



図・6 二次元と三次元解析の差