

裏込め注入圧による地盤反力を主荷重とする設計法の提案と課題

清水建設 正会員 杉山博一
 フェロー会員 後藤 茂
 首都大学東京 正会員 西村和夫

1. はじめに

筆者らは ECL トンネルの合理的な設計法の確立に向け、トンネル周辺地盤の応力状態の変化に着目した覆工の設計手法を提案してきた¹⁾。この手法の基本的な考え方を一般的なシールド工法に展開した場合、具体的には、裏込め注入で ECL 工法と同様に一定の圧力により地盤が支持することができれば、裏込め注入圧による地盤反力を主荷重とした断面力算定手法が適用できる。本報告ではその考え方の概要と断面力算定式を提案するとともに、適用時の課題をまとめる。

2. 本設計法における荷重の考え方

シールドトンネル周辺地盤は切羽圧や裏込め注入圧などによって応力状態が様々に変化する。しかし、セグメントに作用する荷重は、一時的な施工時荷重もあるが、最終的には裏込め注入圧が支配的であると考えた。図-1 はシールド施工によって生じるトンネル周辺地盤の応力状態変化の概念図である。シールドマシンによって掘削された地盤の境界面では裏込め注入圧と応力が釣り合う必要があり、この状態が裏込め硬化後も保持されているならば、周辺地盤の応力は裏込め注入圧と等しくなる。本設計法ではこの状態を主荷重と考え、断面力算定手法を組み立てた。

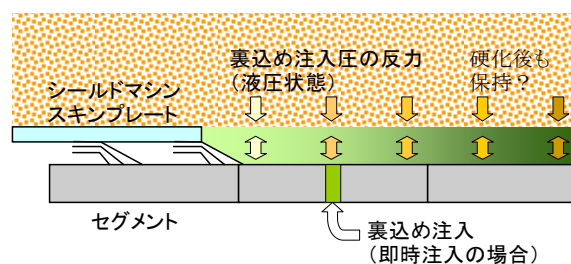


図-1 周辺地盤の応力変化の概念図

3. 断面力の算定方法

断面力算定方法は文献 1) とほぼ同じであり、図-2 に示すような 4 つの要素荷重に分解し、弾性解の重ね合わせにより求める。主荷重(a)は前述したように裏込め注入圧の反力としての土圧分布であり、裏込めがまだ固まらないときの液体状の荷重分布を想定した。この荷重(a)と覆工体の自重(b)の差がトンネルに作用する浮力 F である。この浮力はトンネル上下の地盤応力が変化(c, d)することによりキャンセルされると仮定した。浮力による応力状態変化のメカニズムは不明であるため、ここでは仮に上半側地盤の浮力負担率を α とした。断面力算定式の誘導過程については割愛するが、表-1 に要素荷重ごとの断面力算定式を示す。

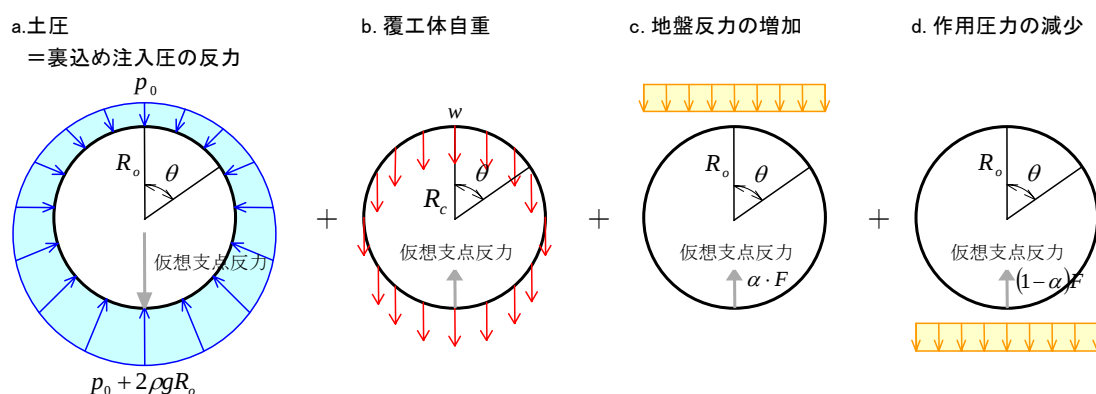


図-2 シールド版地山反力法の要素荷重

キーワード：シールドトンネル、セグメント、設計、裏込め注入圧

連絡先：〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL:03-3820-6978

表-1 地盤反力法（シールド版）における断面力算定式

要素荷重		曲げモーメント M	軸力 N	せん断力 Q
a. 裏込め注入圧の反力		$\frac{1}{4} \rho g R_o^3 (-2 + \cos \theta + 2\theta \sin \theta)$	$p_0 R_o - \frac{1}{4} \rho g R_o^2 (-4 + \cos \theta + 2\theta \sin \theta)$	$\frac{1}{4} \rho g R_o^2 (2\theta \cos \theta + \sin \theta)$
b. 覆工体自重		$\frac{1}{2} w R_c^2 (2 - \cos \theta - 2\theta \sin \theta)$	$\frac{1}{2} w R_c (2\theta \sin \theta - \cos \theta)$	$-\frac{1}{2} w R_c (2\theta \cos \theta + \sin \theta)$
c. 上半部 地盤反力の増加	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$	$\frac{\alpha F R_o}{48\pi} (24 - 9\pi + 8\cos \theta + 6\pi \cos 2\theta)$	$\frac{\alpha F}{6\pi} (3\pi \sin^2 \theta - \cos \theta)$	$-\frac{\alpha F}{6\pi} \sin \theta (1 + 3\pi \cos \theta)$
	$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$	$\frac{\alpha F R_o}{48\pi} (24 + 9\pi + 8\cos \theta - 24\pi \sin \theta)$	$\frac{\alpha F}{6\pi} (3\pi \sin \theta - \cos \theta)$	$-\frac{\alpha F}{6\pi} (\sin \theta + 3\pi \cos \theta)$
d. 下半部 地盤反力の減少	$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$	$\frac{(1-\alpha) F R_o}{48\pi} (24 - 9\pi + 8\cos \theta)$	$-\frac{(1-\alpha) F}{6\pi} \cos \theta$	$-\frac{(1-\alpha) F}{6\pi} \sin \theta$
	$\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$	$\frac{(1-\alpha) F R_o}{48\pi} (24 + 9\pi + 8\cos \theta - 6\pi \cos 2\theta - 24\pi \sin \theta)$	$-\frac{(1-\alpha) F}{6\pi} (\cos \theta + 3\pi \sin \theta (\sin \theta - 1))$	$-\frac{(1-\alpha) F}{12\pi} (6\pi \cos \theta + 2\sin \theta - 3\pi \sin 2\theta)$

ここに、 w ：セグメント単位長さあたりの自重， p_0 ：天端での裏込め注入圧， R_o ：セグメント外径， R_c ：覆工の図心半径， θ ：天端からの角度（ $0 \leq \theta \leq \pi$ ）， F ：1リングあたりに作用する浮力， α ：トンネル上半での浮力分担比率（ $0 \leq \alpha \leq 1$ ），軸力の符号：圧縮を正とする。

4. 本提案式の特徴

本提案式の特徴を示すため、慣用計算法と同じ条件で試算を行い、断面力算定結果を比較した。詳細な試算条件は割愛するが、比較的良好な砂質地盤中に内径 10m、覆工厚 40cm のトンネルを構築することを想定した。また、土被りを 20m、水位は天端から 10m とし、両者の天端での主荷重（土水圧と裏込め注入圧）が同じと仮定した。図-3, 4 は試算結果であり、それぞれ曲げモーメントと軸力を比較したものである。図から分かるとおり、本提案の軸力は慣用計算法よりも大きく算出され、また曲げモーメントは、 $\alpha=1$ （浮力を上半側地盤ですべて受ける）とした場合は慣用計算法の結果に近い値を示すが、 $\alpha=0.5$ （上半、下半で半分ずつ負担）では大きく低減されている。つまり、本提案式では軸力卓越型の結果が得られるため、慣用計算法の結果に比較して曲げ補強の削減が可能となり、建設コストの削減が期待できることになる。

5. 適用に向けた課題

本提案（設計法）は従来にない新しい考え方であるので、その妥当性について検討しなければならない。具体的にはトンネル周辺地盤や裏込めの長期的な応力変化の問題や、また、断面力算定式におけるトンネル上半での浮力分担比率 α の設定方法についても課題と考えられる。これら設計法に関する課題については、模型実験や施工データ等で確認してゆく予定である。一方、施工面では、裏込めが硬化するまで一定の圧力で保持できる注入方法の開発が課題であり、今後検討してゆく予定である。

参考文献：1)たとえば、杉山他、鋼繊維補強コンクリートを用いた ECL トンネルの覆工体に作用する土圧の評価，土木学会論文集 No.694/III-57，2001.12

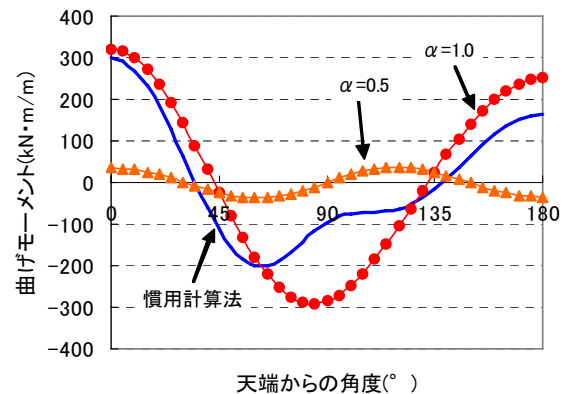


図-3 曲げモーメントの比較

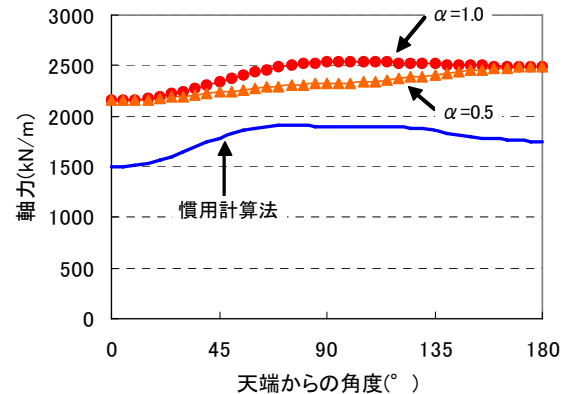


図-4 軸力の比較