

トンネルの開口部に設置する補強部材の変形と凍土に与える影響について

嵯精研 正会員 ○姜 仁超

1. はじめに

大深度シールドトンネルの地中接続工事の増加に伴い、凍土造成がトンネルおよび補強部材に与える影響と効果、凍土部材が掘削、開口によって受ける影響が注目されている。本研究では、地山掘削とトンネルの開口を行う前後に、補強部材に分担される荷重や補強部材の変形挙動が凍土部材の全般的変形挙動にどのように影響を与えるかについて検討を行い、得られた結果を報告する。

2. 解析方法の概要

図-1は、凍結工法により既設シールドトンネルの本管とその側部に到達しているシールド機を地中接続した工事の一例である。シールド機到達接続防護に要する上床部凍土は、到達シールド機スキンプレートのリブ部と、既設シールドトンネルの開口部補強部材で固定された両端固定梁あるいは周辺固定矩形板として、必要凍土厚みを算出している。

1) 開口部補強梁にかかる単位長さ当たりの荷重 ω ：

土の膨張のトンネルへの影響を別途に検討するとすれば、トンネル接続を行うまでは、凍土にかかる土被り荷重は補強梁に伝わらないと考えられる。しかし、既設トンネルの開口と掘削によって、凍土にかかる土被り荷重は補強梁に伝わることになる。図-2に示すように、凍土壁に等分布荷重 p が作用した場合、既設トンネル全体の補強は別途に考慮すると、開口部補強部材に分担される荷重は、凍土梁のスパンは L_1 とすれば、図-3に示すように、スパン長 L の開口部補強梁にかかる単位長さ当たりの荷重は式(1)になる。

$$\omega = pL_1/2 \quad (1)$$

2) 補強梁にかかる曲げモーメント M 、せん断力 Q 、たわみ δ ：

既設シールドトンネルの開口部補強部材は連続梁モデルとすると、 ω の作用により、各支点の曲げモーメント M は式(2)によって計算できる¹⁾。

$$L_m \cdot M_{m-1} + 2(L_m + L_{m+1})M_m + L_{m+1} \cdot M_{m+1} = 6E_s I_s (\theta_{mL} - \theta_{mr}) \quad (2)$$

M_{m-1} , M_m , M_{m+1} ：各支点曲げモーメント； θ_{mL} , θ_{mr} ：2つのスパンをそれぞれ単純梁と考えるときの中間荷重による支点のたわみ角； L_m , L_{m+1} ：スパン； E_s ：補強梁の弾性係数； I_s ：補強梁の断面二次モーメント。

M が求めれば補強梁にかかるせん断力 Q と生じるたわみ δ などが計算できる。

3) 補強梁の変形が凍土壁に与える影響：

シールドトンネルの開口と掘削は、補強梁に変形をもたらすことになり、この補強梁の変形状況が凍土壁に与える影響は次のようになる。

両端を固定された凍土梁の一端が図-4のように鉛直方向に δ だけ移動した場合、凍土梁に生じる曲げモーメントは式(3)によって計算できる²⁾。 $\theta_A = \theta_B = 0$, $\varphi = \delta/L_1$, $C_{AB} = C_{BA} = 0$ とすれば、凍土梁の固定端断面に、荷重 p の作用以外に、鉛直方向に δ だけ移動した場

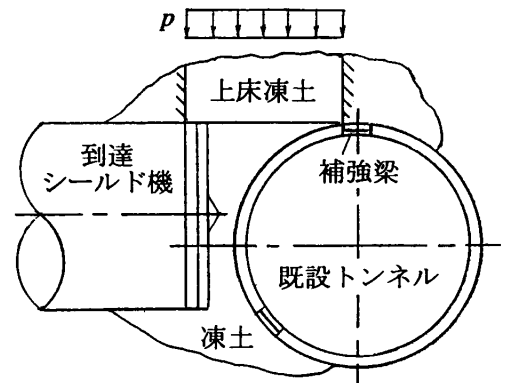


図-1 シールドトンネルの地中接続工事

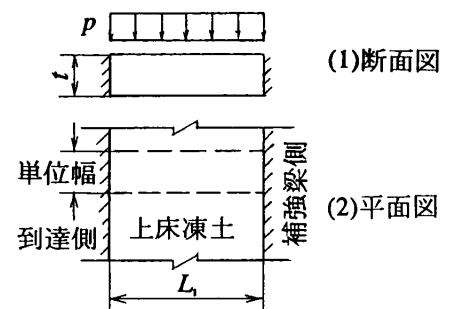


図-2 凍土部材モデル

キーワード：シールドトンネル、変形、凍土、補強、荷重

東京都文京区小石川 1-12-14 TEL 03-5689-2355 FAX 03-5689-2361

合、増加する曲げモーメントは式(4)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= 2E_f I_f (2\theta_A + \theta_B - 3\varphi) / L_1 - C_{AB} \\ M_{BA} &= 2E_f I_f (\theta_A + 2\theta_B - 3\varphi) / L_1 + C_{BA} \end{aligned} \right\}; \quad M_{AB} = M_{BA} = -\frac{6E_f I_f}{L_1} \varphi = -\frac{6E_f I_f}{L_1^2} \delta \quad (4)$$

E_f : 凍土の弾性係数; I_f : 凍土梁の断面二次モーメント; L_1 : 凍土梁のスパン;
 θ_A, θ_B : 凍土梁のたわみ角; φ : 凍土梁の回転角; C_{AB}, C_{BA} : 凍土梁の荷重項。

3. 解析結果および考察

解析の例として、図-1～4 に示すように、補強梁開口部の長さを $L=5.0\text{m}$ 、到達シールド機スキンプレートのリブ部と既設トンネルの開口部補強梁の間にある上床凍土部材のスパンを $L_1=5.0\text{m}$ 、上床凍土に単位面積当たりの荷重 $p=1.0\text{Mpa}$ 、凍土の安全率 $Sf \geq 2$ とした時、両端固定梁モデルにより、 -12°C の粘性土凍土の必要厚みは 3.5m となる。補強梁は H-1400×350×60×95 形鋼 SM570 と仮定する。

補強梁に均等径間に 6～8 箇所に支点を設ける場合の 3 ケースに分けて解析を行い、解析の結果を表-1 にまとめた。表-1 に示した安全率は降伏点と補強梁断面に生じる最大曲げ応力の比で示した。また、7 支点を設ける場合の断面力とたわみを図-3 に示した。なお、 n は補強梁の開口部にある径間数である。また、補強梁の開口部以外の部分に凍土にかかる土被り荷重は直接にその部分に作用しないと考える。解析の結果、補強梁の強度は十分に安全であることがわかった。次に、表-1 の補強梁の変位別に、凍土梁の固定端断面に生じる曲げモーメントの影響を調べ、結果を表-2 にまとめた。表-1 と表-2 に示すように、補強梁に $L/n=1.0\text{m}$ の 8 箇所に支点を設ける場合（補強梁開口部の長さ $L=5.0\text{m}$, $n=5$ ）は、曲げモーメントの増加がわずかに 4% となり、凍土の安全率の低下も 1.92 までで止まり、支持があれば、凍土も成長するので、凍土梁で対応出来ると思われる。

4. まとめ

本研究で、得られた主な結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) シールドトンネルの開口と掘削に伴い、補強部材に分担される荷重や補強部材の変形によって凍土壁に与える影響に関する解析方法を提案した。
- 2) 補強梁の開口部は 3～5 径間の場合、補強梁の強度は十分に安全であることがわかった。
- 3) 補強梁の開口部は 5 径間の場合、補強梁の変位は 0.08mm 以下に止まり、これにより凍土壁に生じる最大曲げモーメントは変形前のわずか 4% におさまリ、安全率の低下も 4% 程度となる。

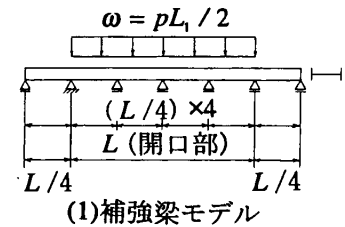
なお、今回、提案した解析方法は弾性解析で行った。

しかし、凍土はクリープ特性があり、凍土の断面に生じる応力は緩和する能力があるので、強度性能が改善される可能性がある。今後は、その変形性能について検討を行っていくことも必要であると考え。

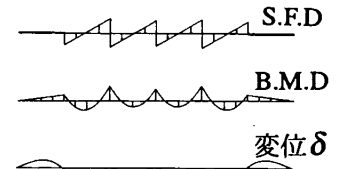
謝辞 本研究の遂行にあたり、(株)精研の皆様には有益なるご助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 湯浅亀一：材料力学，pp.190～195, 1981
- 2) 谷資信：構造力学(1)，鹿島出版会，pp.182～189, 1995.2



(1) 補強梁モデル



(2) 計算結果

図-3 補強梁モデルと解析結果

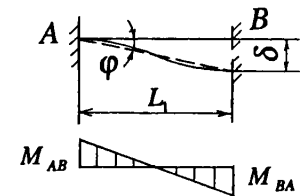


図-4 凍土梁の固定端移動モデル

表-1 補強梁の応力と変位
(H-1400×350×60×95, 種類の記号: SM570)
(降伏点: 420 N/mm^2)

$n+(2)$	L/n m	σ N/mm^2	τ N/mm^2	δ mm	安全率 (曲げ)
3+(2)	1.67	159.86	48.86	0.63	2.63
4+(2)	1.25	93.82	36.97	0.19	4.48
5+(2)	1.0	59.37	29.50	0.08	7.07

表-2 凍土梁の曲げモーメントの増加状況

$n+(2)$	δ mm	$M_{AB}(=M_{BA})$ kN-m	M_{AB}/M	安全率 (曲げ)
3+(2)	0.63	697.58	0.33	1.50
4+(2)	0.19	210.38	0.10	1.82
5+(2)	0.08	88.58	0.04	1.92
p が作用した時の $M=2083.33 \text{ kN-m}$				