

凍結膨脹プレストレスト凍土梁の強度解析について The strength analysis of the prestressed frozen soil beam by frost expansion

姜 仁超*

Ren Chao JIANG

To decrease frost expansion caused by artificial soil freezing, we can decrease the thickness of frozen soil by the arrangement of PC steel. Until now the strength analysis for the prestressed frozen soil beam by frost expansion under the condition of designed load is not enough. So in this paper, the strength analysis under the condition mentioned above is studied. At the same time, the calculation method for design thickness is also considered.

Key Words : Artificial soil freezing, Frozen soil, Frost expansion, Strength, Load

1. 研究の目的

地盤凍結工法での凍結膨脹を軽減する一つの対策として、鉄筋あるいはPC鋼材の配置により造成凍土厚を減らす方法が考えられる^{1), 2)}。鉄筋を配置し、凍土の膨脹変形を拘束しない複合凍土を“鉄筋凍土”，PC鋼材で凍土の膨脹変形を拘束して、凍土に凍結膨脹プレストレスを導入した複合凍土を“凍結膨脹プレストレスト凍土 (PFS)”と呼ぶ。

文献1)で、工事を行うために必要となる凍土に鉄筋配置の構造解析と設計方法を検討した際には、得られた結果から鉄筋の耐荷能力が十分に利用されなかったことが分かった。このような問題点を踏まえ、文献2)で、凍結膨脹プレストレスト凍土を提案したところ、鋼材の有効利用と凍土部材の耐荷能力の増強が可能だと考えられた。しかし、今までの研究は設計荷重を受ける場合の凍結膨脹プレストレスト凍土の強度解析方法が十分に検討できていなかった。そこで、本研究では、設計荷重を受ける場合の静定凍結膨脹プレストレスト凍土梁の強度解析と設計厚みの算定方法を検討する。

2. 解析方法の概要

設計荷重を受ける場合の静定凍結膨脹プレストレスト凍土梁の強度解析は、1) 設計荷重が作用する場合の応力 (凍結膨脹プレストレスを導入しない時)、2) 凍結膨脹プレストレス、3) プレストレス力 P による応力、4) プレストレス状態下の梁の設計荷重が作用する場合の応力などの算定がある。応力解析に基づき、各材料の安全率確保に必要な複合凍土梁の厚みが算出できる。

1) 解析モデルと梁の断面構成

図-1(a)は凍結工法による二本のシールドトンネルの地中拡幅接続工事のモデルである。凍結防護のために、

キーワード：地盤凍結工法, 凍土, 凍結膨脹, 強度, 荷重

* 正会員 工修 株式会社 精研 凍結本部

上床、側壁、下床の凍土を造成する．トンネル間の拡幅接続区間が軸方向に長い場合，上床・下床凍土は構造モデルとして，開口時のセグメントの変形を考慮すると，単純支持梁となる．このとき凍土梁の厚みは梁断面の引張側の曲げ応力により決めることになる．

そこで，引張側に図-2の如く鋼材を挿入して合成梁とすることを提案する．

2) 設計荷重が作用する場合の応力（凍結膨脹プレストレスを導入しない時）

設計荷重による応力の解析方法は文献1)に検討した鉄筋凍土のものと同じである．

図-2 (a)に示すように，対称断面をもつ完全合成梁の軸方向に加わる荷重がないものとするれば，中立軸の曲率半径を ρ とすると，梁の弾性曲げ理論によりひずみは $\varepsilon = z/\rho$ となる．曲げモーメント M に対する変形は，式(1)で与えられる³⁾．中立軸（V-V）の位置 z_0 は，式(2)より求められる³⁾．曲げ応力及び鉄筋と凍土の付着せん断応力は式(3)，(4)により求められる^{3), 4)}．

$$\phi = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \quad (1),$$

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_{Ai} z' dA_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \quad (2),$$

$$\sigma_i = \frac{E_i z M}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \quad (3),$$

$$\tau_0 = \frac{Q_i W}{J_v b_{ui}} \quad (4).$$

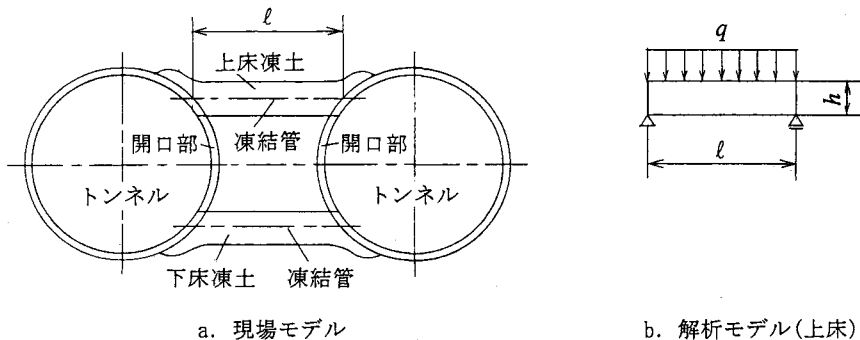


図-1 凍結工法におけるシールドトンネル地中接続工事

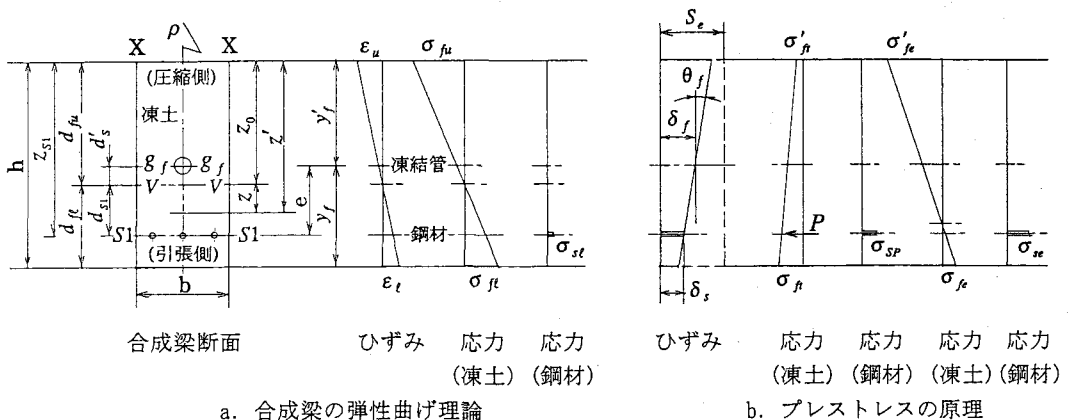


図-2 凍土部材のひずみと応力

ここに、 E_i ：第 i 部材のヤング率、 $\sum_{i=1}^n E_i I_i$ ：合成梁断面の等価曲げ剛性、 ϕ ：合成梁の曲率、 A_i ：第 i 部材の断面積、 I_i ：第 i 部材の梁中立軸に関する断面二次モーメント ($I_i = \int_{A_i} z^2 dA_i$)、 W ：梁の断面に作用するせん断力、 Q_i ：第 i 番目鉄筋の横断面積の中立軸($V-V$)に関する断面一次モーメント、 J_v ：鋼に換算した総断面二次モーメント、 b_{ui} ：第 i 番目鉄筋と凍土接着面の長さとする。図-2の σ_{fu} 、 σ_{ft} 、 σ_{st} はいずれも式(3)で計算できる。

3) 凍結膨張プレストレス

凍結膨張プレストレスの解析は、前述1)鉄筋凍土の図-2(a)の鉄筋配置位置にPC鋼材を入替え、検討を行う。

図-2(b)に示すように、PC鋼材の拘束により凍結膨張プレストレスを導入したとき(以下、“導入後”と呼ぶ)の梁の断面仮定及び関連記号を示した。

拘束のない時の凍土の膨張ひずみを S_e 、PC鋼材の凍土断面重心に対する偏心距を e とすれば、平面保持の仮定から、鋼材の拘束によって凍土断面重心位置に生じる軸方向ひずみ δ_f 、回転角 θ_f 、鋼材の引張ひずみ δ_s 、導入プレストレス力 P 、凍土断面重心軸における凍土の圧縮応力 σ_{fp} 、鋼材引張応力 σ_{sp} はそれぞれ式(5)～(10)となる⁵⁾。

$$\delta_f = S_e - \frac{P}{E_f A_f} \left(1 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (5), \quad \theta_f = \frac{P \cdot e}{E_f I_f} \left(1 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6),$$

$$\delta_s = \frac{P}{E_s A_s} = \delta_f - \theta_f \cdot e \quad (7), \quad P = \frac{E_s A_s}{1 + np(1 + \phi/2)(1 + e^2/(I_f/A_f))} S_e \quad (8),$$

$$\sigma_{fp} = \frac{P}{A_f} \quad (9), \quad \sigma_{sp} = \frac{P}{A_s} \quad (10).$$

ここに、 E_f ：凍土のヤング率、 E_s ：鋼材のヤング率、 A_f ：凍土断面積、 A_s ：鋼材断面積、 I_f ：断面重心軸に対する凍土断面二次モーメント、 ϕ ：凍土のみかけのクリープ係数、 $n = E_s/E_f$ ：鋼材と凍土のヤング率の比、 $p = A_s/A_f$ ：鋼材と凍土の断面積比とする。

4) プレストレス力 P による応力

プレストレス力 P による梁の断面上縁(文献1)の圧縮側)と下縁(文献1)の引張側)の凍土の応力は、それぞれ次式で与えられる。

$$\sigma'_{ft} = \frac{P}{A_f} - \frac{P \cdot e}{I_f} y'_f \quad (11), \quad \sigma_{ft} = \frac{P}{A_f} + \frac{P \cdot e}{I_f} y_f \quad (12).$$

ここに、 I_f ：凍土純断面図心軸 $g_f - g_f$ に関する断面二次モーメント、 y'_f ：断面上縁から図心軸 $g_f - g_f$ までの距離、 y_f ：断面の下縁から図心軸 $g_f - g_f$ までの距離、 σ'_{ft} ：プレストレス力 P による断面上縁の凍土の応力、 σ_{ft} ：プレストレス力 P による断面下縁の凍土の応力とする。

5) プレストレス状態下の梁の設計荷重が作用する場合の応力

プレストレス状態下の梁の設計荷重が作用する場合の断面上縁凍土の応力 σ'_{fe} と下縁凍土の応力 σ_{fe} と鋼材の応力 σ_{se} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\sigma'_{fe} = \sigma'_{ft} + \sigma_{fu} \quad (13), \quad \sigma_{fe} = \sigma_{ft} - \sigma_{ft} \quad (14),$$

$$\sigma_{se} = \sigma_{st} + \sigma_{sp} \quad (15).$$

ここに、 σ_{fu} ：設計荷重による断面上縁の凍土の応力、 σ_{ft} ：設計荷重による断面下縁の凍土の応力とする。

3. 結果と考察

本解析の例では、許容応力度設計方法によって行う。図-2は凍結管が1本であり、鉄筋あるいはPC鋼材3本を梁の引張側に配置した。モデルはスパン $\ell=5.0\text{m}$ 、幅 $b=0.8\text{m}$ の等分布荷重 $p=687\text{ kN/m}^2$ を受ける単純支持梁とする。 -10°C の砂質土凍土(表-1)^{6),7)}の物性値を使用すると、単体凍土の厚みは 3.130m が必要となる。鉄筋は鉄筋コンクリート用鉄筋(表-2)⁸⁾、PC鋼材はPC鋼棒あるいはPC鋼線(表-3)⁹⁾などの物性値を使用した。鉄筋凍土と凍結膨脹プレストレスト凍土の解析例を以下の設定条件のもとで行った。

1) 鉄筋凍土の応力解析と厚みの算定

図-2(a)は鉄筋3本を梁の引張側に配置した場合である。弾性解析を行い、鉄筋の直径(単位は mm 、以下同)及び配置位置毎に必要な凍土厚 h を求めた。

合成凍土梁の厚みと鉄筋配置位置の関係の解析結果を図-3に示した。ここで、 z_{s1} は載荷面から鉄筋断面の図心軸($S1-S1$)までの距離とする。また一例として、 $(h-z_{s1})=0.3\text{m}$ の場合と単体凍土の解析結果を表-4にまとめた。応力データの下括弧()中の数値はその応力に対する部材強度の安全率であり、[]中に応力の状態を示した。

解析の結果、鉄筋を引張側に配置した場合の合成凍土梁の強度特性に関する次の基礎情報が得られた。

D51鉄筋の場合、凍土の曲げ引張安全率が2.050になった時、凍土の圧縮安全率は2.791、凍土と鉄筋との付着せん断安全率は3.249、鉄筋の安全率は5.262となったので、複合凍土構造物の厚みは凍土の曲げ引張強度によって決まることがわかった。

図-3と表-4に示すように、凍土の圧縮安全率及び凍土と鉄筋との付着せん断安全率は凍土の曲げ引張安全率より余裕があるので、配置位置 $(h-z_{s1})$ はより引張縁に近づくに従って、直径がより太い鉄筋を配置すれば、複合凍土梁の厚みを薄くすることが可能である。

2) 凍結膨脹プレストレスト凍土の応力解析と厚みの算定

凍結膨脹プレストレスト凍土の解析例では、前述1)鉄筋凍土の解析条件と結果に合わせて行った。

S_e と ϕ を設定し、導入後の強度解析を行った。鉄筋を使用するとしたとき、強度の不足や過大な変形が生じるので、D51鉄筋を公称径 32mm の異形PC鋼棒⁹⁾に変え、検討した。

一例として、 $S_e=0.3\%$ 、 $\phi=17$ 、PC鋼材の配置位置 $(h-z_{s1}=0.3\sim 1.2\text{m})$ ごとに、合成凍土梁の上縁応力と下縁応力およびPC鋼材の応力を解析し、必要な凍土厚みを求めた。PC鋼材を配置した場合の合成凍土梁の厚みとPC鋼材配置位置の関係の解析結果を図-3に示した。さらに、 $(h-z_{s1})=0.3\text{m}$ 場合の上記の解析結果を表-4にまとめた。

表-1 砂質土凍土の物性値 (塩分濃度0%)

平均温度 ($^\circ\text{C}$)	設計強度 ⁶⁾ (N/mm^2)			ヤング率 ⁷⁾ (kN/mm^2)
	圧縮	曲げ	せん断	
-10	4.5	2.7	1.8	3.8

* 鋼棒と凍土の付着せん断設計強度は異形鋼棒を使用するものとして、凍土のせん断設計強度とする。

表-2 鉄筋の機械的性質⁸⁾

種類の 記号	降伏点又は 0.2%の耐力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング率 (kN/mm^2)
SD295B	295-395	440以上	200

表-3 PC鋼材の機械的性質⁹⁾

材料	降伏点 又は耐力 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング率 (kN/mm^2)
PC鋼棒等	930以上	1080以上	200

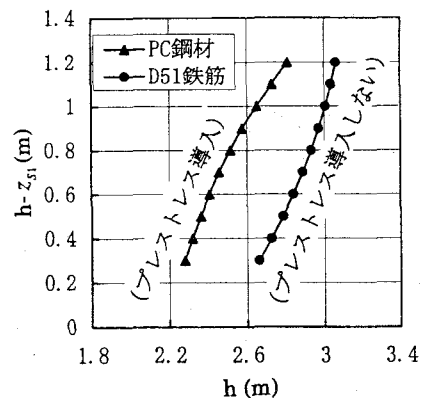


図-3 $h \sim (h-z_{s1})$ 関係

解析の結果、PC 鋼材に凍結膨張プレストレスを導入した場合の合成凍土梁の強度特性に関する次の基礎情報が得られた。

凍土断面上縁の圧縮安全率が 2.231 になった時、下縁の引張安全率は 2.183、凍土と PC 鋼材との付着せん断安全率は 5.516、PC 鋼材の引張安全率は 3.047 となったので、本解析例では、複合凍土構造物の厚みは凍土の曲げ引張強度と曲げ圧縮強度によって決まることがわかった。

鉄筋凍土において凍土と鉄筋との付着せん断安全率は 3.249 にとどまったが、凍土と PC 鋼材との付着せん断安全率は 5.516 となったので、凍結膨張プレストレスを導入すれば、凍土と鋼材との凍着切れの可能性が少なくなった。

また、D51 鉄筋を配置した場合の凍土減量 (= (単体凍土厚 - 複合凍土厚) / 単体凍土厚) は 14.95% にとどまったが、公称径 32mm の異形 PC 鋼棒を配置した場合は 27.25% になり、PC 鋼材に凍結膨張プレストレスを導入した場合は凍土減量効果が大きい。すなわち、PC 鋼材で凍土の凍結膨張を適当に拘束できれば、凍土が薄くでき、鋼材の有効利用、凍結膨張によってもたされる影響の軽減が可能である。

4. まとめ

本研究では、凍土の減量を目的として、設計荷重を受ける場合の静定凍結膨張プレストレスト凍土梁の強度解析と設計厚みの算定方法を提案した。さらに、凍結工法におけるシールドトンネルの地中拡幅接続工事において、この設計方法を用い、補強材の種類及び配置を変えて必要な造成凍土厚みを試算し、補強材の種類、配置などが所要凍土厚みに与える影響を考察した。その結果、凍土減量に必要な静定凍結膨張プレストレスト凍土梁の強度特性に関する基礎情報が得られた。本研究で得られた結果を示すと、以下の通りである。

1. 鉄筋を引張側に配置した時、複合凍土構造物の厚みは引張側の凍土の曲げ引張強度によって決まるが、PC 鋼材を引張側に配置した時、厚みは凍土の曲げ圧縮強度によって決まる。
2. 凍結膨張プレストレスを導入すると、鋼材の利用がより効率的になる。
3. 凍結膨張プレストレスを導入すると、凍土と鋼材との付着せん断安全率を高めることができる。
4. 凍結膨張プレストレスを導入すると、凍結膨張対策として造成凍土を減量することができる。

参考文献

- 1) 姜仁超：鉄筋と凍土からなる複合構造物の設計について，第 38 回地盤工学研究発表会講演概要集，G-09，

表-4 解析結果 ($h-z_{s1}=0.3\text{m}$, 応力の単位: N/mm^2)

	鉄筋凍土 ¹⁾	PFS ²⁾	単体凍土 ¹⁾
鋼材呼び名 (公称直径 mm)	鉄筋 D51 (50.8)	異形 PC 鋼棒 (32.0)	-
凍土厚 $h(\text{m})$ (凍土減量, m) [凍土減量, %]	2.662 (0.468) [14.95]	2.277 (0.853) [27.25]	3.130 - -
凍土下縁応力 σ_{ft}, σ_{fe} (安全率) [応力状態]	$\sigma_{ft}=1.317$ (2.050) [引張]	$\sigma_{fe}=1.261$ (2.183) [引張]	1.341 (2.013) [引張]
凍土上縁応力 $\sigma_{fu}, \sigma'_{fe}$ (安全率) [応力状態]	$\sigma_{fu}=1.612$ (2.791) [圧縮]	$\sigma'_{fe}=2.057$ (2.231) [圧縮]	1.341 (3.355) [圧縮]
付着せん断応力 τ_0 (安全率) [応力状態]	0.554 (3.249) [せん断]	0.326 (5.516) [せん断]	-
鋼材応力 σ_{st} (安全率) [応力状態]	56.058 (5.262) [引張]	305.22 (3.047) [引張]	-
プレストレス 導入の有無	導入しない	導入した	-

* ここに、凍結膨張プレストレスト凍土は PFS と略称

pp. 733-734, 2003. 7

- 2) 姜仁超：凍土の膨脹変形の利用について，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-632，pp. 1263-1264, 2003. 9
- 3) 関谷壮 谷村眞治：最新材料力学, pp. 178～181, 朝倉書店, 1990
- 4) 岡田清他：コンクリート工学ハンドブック, P. 407～418, 朝倉書店, 1981
- 5) H. Muguruma: On the Expansion-Shrinkage Characteristics of Expansive Cement, Proc. of the 11th Japan Congress on Materials Research (Tokyo, 1967), 1968.
- 6) (財)日本建設機械化協会：地盤凍結工法, pp. 1～56, 1981.
- 7) 上田保司他：圧縮と曲げにおける砂凍土の弾性係数の比較, 雪氷学会講演予稿集, 2002.
- 8) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼, pp. 490～493, 1992.
- 9) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼, pp. 483～495, pp. 1179～1183, 1992.