

地盤凍結工法における補強材の効果について

Research on the Effect of Reinforcing Materials used in Artificial Soil Freezing

姜 仁超 JIANG REN CHAO (株精研)

本研究では、凍結膨張の対策として所要凍土厚みを削減することを目的に、凍土と補強材からなる合成構造体の設計方法を提案した。次に、この設計方法を用い、補強材の種類及び配置を変えて、凍土と補強材からなる合成梁の所要凍土厚みを試算し、補強材の種類、配置及び凍結管の本数などが所要凍土厚みに与える影響を考察した。その結果、凍土減量に必要な合成構造体の強度特性に関する基礎情報が得られた。

キーワード：凍土、応力分布、膨張、地盤、弾性

(IGC : D08, E01, E09)

1. まえがき

大深度、大規模の地下工事の発展に伴い、地盤凍結工法は補助工法としてますます重視されている。特に都市部の大深度のシールドトンネル地中接続工事に、凍結工法が最も安全な工法として多く採用されている。しかし、凍結膨張の問題があり、特に粘性土では、 $20\mu\text{m}$ 以下の微粒成分が多いので、地盤が凍結するときに、膨張が著しく¹⁾、既設構造物に被害を与える可能性がある。膨張対策工を講じなければならない場合が多い。

膨張対策工としては、地山を抜き取ることで凍結膨張量を吸収させるなどの方法があるが、凍土造成に要する費用以外にコストがアップする工法が多い。設計段階で凍土厚を小さくすることができれば、凍結膨張量が減少するので、工期を短縮でき、効率的な対策であると考えられる。

従来の凍土強度設計方法においては、凍土の曲げ強度や圧縮強度のみに注目して凍土厚みを決定しており、凍結管の荷重負担分や補強材の補強効果を考慮していない¹⁾ので、凍土厚を小さくすることができない。パイプルーフ工法²⁾は、鋼管で土圧を支え、トンネルの支保工によく使用されるが、止水性が悪いので、大深度のシールドトンネル地中接続工事には使えない。“鉄筋・凍土複合体の力学的性質を明らかにし、その材料としての利用可能性の有無について考察する”研究³⁾があったが、実験結果を取り扱っており、構造解析方法には触れていない。

その課題を解決するために、別報^{4), 5)}で合成凍土部材と考えた設計方法を提案した。提案する設計方法は、凍土と各補強材の欠点を最大限に抑え、利点を十分に発揮しようとするものである。凍土と比べ、鋼管は引張強度と圧縮強度が高く、コンクリートは圧縮強度が高い。凍土は鋼およびコンクリートとの付着性を良くし、完全な止水性と大きな結合力を発揮することができる。凍結管、鋼管、コンクリートなど補強材を地盤中の適当な位置に配置すれば、土の凍結によって一つの合成構造体になると考えられる。このような合成構造体を使用する場合、荷重の一部は鋼管などが分担し、凍土に受け持たせる荷重が軽減することになる。ここでは、鋼管とコンクリートを補強材といい、凍土に荷重を分担させる効果を補強効果という。補強材の

補強効果と凍結管の荷重負担分を考慮すると、凍土の減量が可能となる。安全性確保と経済性の観点から、最小量の造成凍土で、十分な耐力を発揮させるため、その合成構造体としての力学的挙動をよく把握する必要がある。

そこで、本研究では、提案した設計方法を用い、補強材の種類及び配置を変えて、凍土と、凍結管及び補強材からなる合成構造体の所要凍土厚を試算し、補強材の種類、配置及び凍結管の本数などが所要凍土厚に与える影響を検討した。

2. 凍結工法の施工事例と合成梁の断面構成

図-1(a)は凍結工法における二本シールドトンネルの地中接続工事の現場モデルである。凍結防護のために、上床、側壁、下床の凍土を造成する。設計の例としては、図-1(c)に示すような上床の凍土に対し、構造計算モデルは単純支持梁として取り扱う事ができる。従来の凍土強度設計法においては、凍土梁は断面の引張側の曲げ応力によって、凍土梁の厚みを決定している。

提案する設計方法の合成梁の断面構成及び関連記号を図-2及び図-3に示す。

図-2は、凍結管列が1列(補助凍結管を含む)の場合である。図-3は、凍結管列が2列の場合であり、圧縮側に凍結管を挿入したコンクリート充填鋼管を配置する。引張側に二重に配置する鋼管部材内に、凍結管を挿入し、さらに中詰めに充填材を注入し、合成構造とすることにする。

3. 解析方法

本研究では凍土と補強材からなる合成構造体を合成梁として扱い、凍土は弾性体と仮定した^{1), 6), 7)}。

図-3に示すように、対称断面をもつ完全合成梁が曲げられると、ひずみの大きさは中立面からの距離に比例する。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

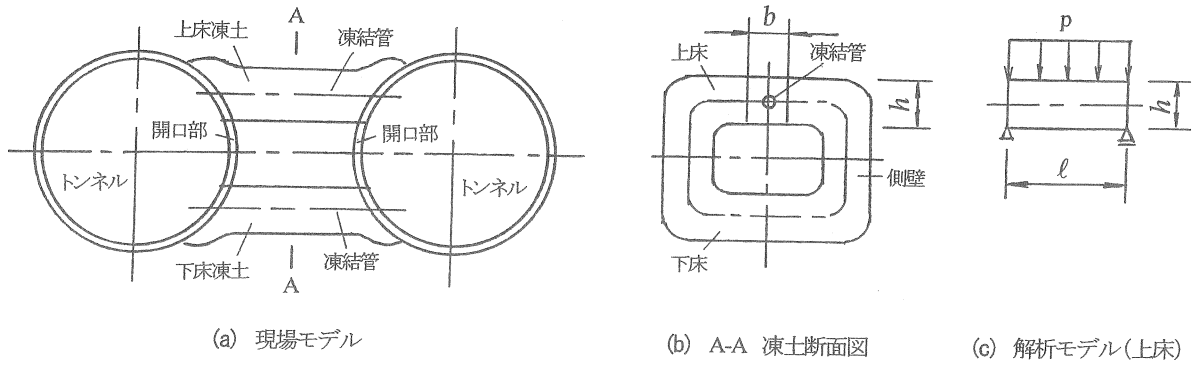


図-1 凍結工法におけるシールドトンネルの地中接続工事

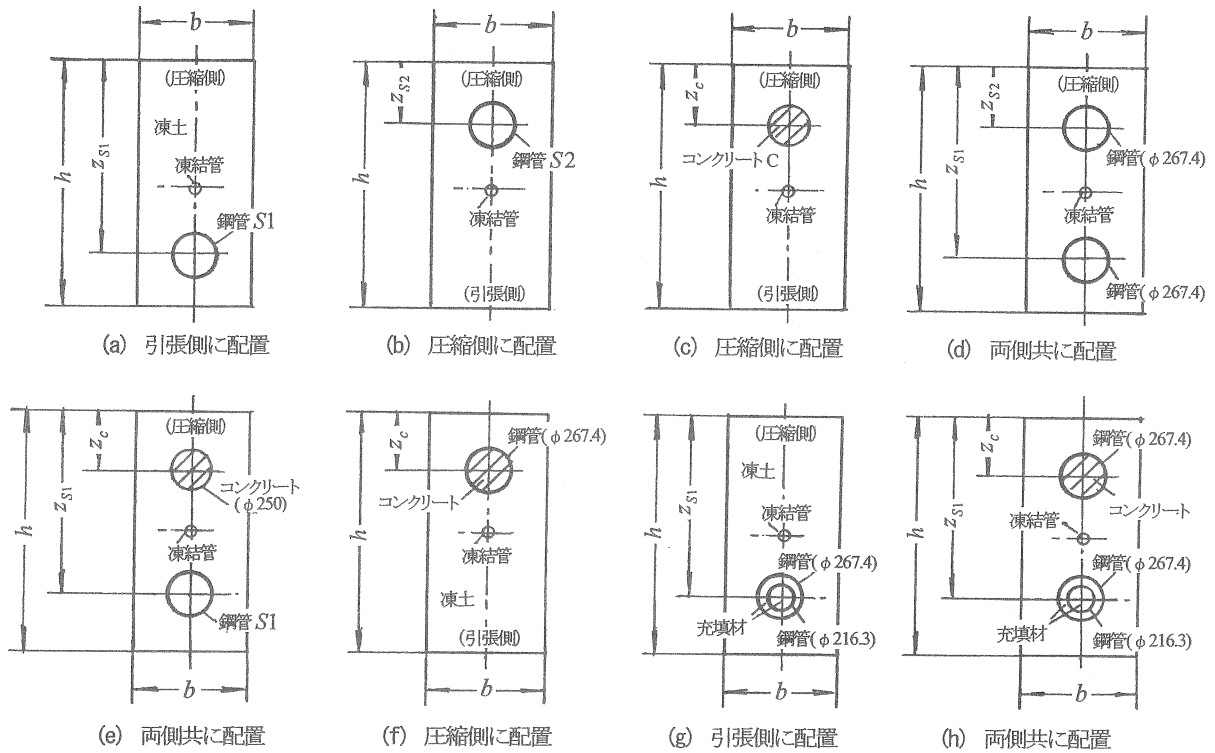


図-2 補強材の配置状況

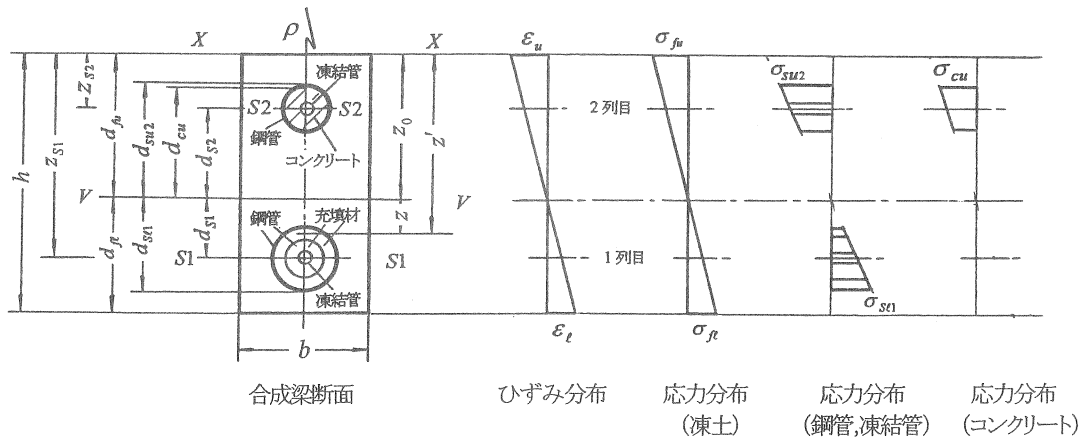


図-3 合成梁の弾性曲げ理論

すると、中立軸より z の距離にある繊維のひずみ ε は構成材料に関係なく、平面保持の法則により $\varepsilon = z / \rho$ になる。梁の弾性曲げ理論により曲げモーメント M に対する変形（曲率 ϕ ）と応力 σ_i は、それぞれ式(1)と式(2) で与えられる⁸⁾。

中立軸 ($V-V$) に平行な任意の軸 $X-X$ を取り（ここで、合成梁の上縁にとる）、この軸と中立軸との距離を z_0 とし、断面内における任意の一点の $V-V$ 軸、 $X-X$ 軸を基準とした座標をそれぞれ z 、 z' とすれば、式(3)が得られる⁸⁾。

鋼管と凍土との境界面の平均付着せん断応力 τ_0 は式(4) より求められる⁹⁾。

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

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \int_{A_i} z' dA_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \quad (3); \quad \tau_0 = \frac{Q_i W}{J_v b_{ui}} \quad (4).$$

ここで、 E_i : 第 i 部材の縦弾性係数； $\sum_{i=1}^n E_i I_i$: 合成梁断面の等価曲げ剛性； 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 番目鋼管（また、補強材）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 番目鋼管（また、補強材）と凍土接着面の長さ； $S1-S1$: 鋼管 $S1$ 断面の図心軸； $S2-S2$: 鋼管 $S2$ 断面の図心軸；である。

補強材の種類、配置及び凍結管の本数などが所要凍土厚に与える影響を調べるため、“凍土厚減量 (%)” を用いて次式で表すことができる。

$$\text{凍土厚減量 (\%)} = (\text{単体凍土厚} - \text{合成凍土厚}) / \text{単体凍土厚}$$

4. 解析モデルと解析条件

1) 解析モデル

ここで、図-1(c) に示すように、モデルはスパン $l=5.0\text{m}$ 、幅 $b=0.8\text{m}$ で等分布荷重 $p=687\text{ kN/m}^2$ を受ける単純支持梁とする。

凍結工法では、凍結管の埋設間隔は 0.8m が多いので、梁の幅は 0.8m とする。土の単位体積重量は約 $1.6\sim 2.0\text{g/cm}^3$ 程度なので、上記の荷重 p は地上部から凍土梁のセンターまでの土水圧で、約 40m に相当し、実際の施工範囲内の荷重である。スパン $l=5.0\text{m}$ も実際の施工寸法である。凍土を構造体として検討する場合の支承条件としては、固定支承と単純支持があり、構造計算は、最も条件の悪くなる状態を想定して検討を行うものとし、図-1 の場合は、トンネルの開口接続のため、凍土梁の端部に变形が生じる可能性があるため、本解析のモデルは単純支持梁とする。なお、他の支承条件にしても、本提案法も使える。

表-1 粘性土凍土の物性値¹⁾ (塩分濃度 0%)

平均温度 (°C)	許容応力 (N/mm ²)			弾性係数 ¹⁰⁾ (kN/mm ²)
	圧縮	曲げ	せん断	
-10	1.5	0.9	0.75	1.961
-12	1.725	1.025	0.85	2.255
-15	2.05	1.225	1.025	2.696

*: 凍着強度については、実験データそのものが少ない。凍土と補強材との許容凍着せん断強度は大浦ら^{11), 12)} の試験データに基づき、凍土の許容せん断強度値を使用する。

表-2 補強鋼管の物性値(一般構造用炭素鋼鋼管¹³⁾)

材料	許容応力 (N/mm ²)		弾性係数 (kN/mm ²)
	長期	短期	
(STK400)	160	235	210

表-3 凍結管の物性値(配管用炭素鋼鋼管¹⁴⁾)

材料	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
(SGP)	290 以上	210

表-4 水中で施工するコンクリートの許容応力度¹⁵⁾

コンクリートの呼び強度 (N/mm ²)	35	40	
設計基準強度 (σ_{ck}) (N/mm ²)	27	30	
圧縮応力度 (N/mm ²)	曲げ圧縮応力度	9	10
	軸圧縮応力度	7.5	8.5

従来の合成効果を考慮しない凍土強度設計方法では、凍土の平均温度が -10°C と -12°C に対する単体凍土の厚みはそれぞれ 3.830m と 3.600m を必要とする^{1), 4), 5)}。

2) 解析条件

設計は、許容応力度法によって行う。本解析では、凍結管列が 1 列と 2 列の場合について、解析を行った。凍結管の配置状況により凍土等の物性値が変化するが、ここでは条件を簡略化し、凍結管列が 1 列の場合の凍土は -10°C の粘性土凍土¹⁾、凍結管列が 2 列の場合の凍土は -12°C (また、 -15°C) の粘性土凍土¹⁾ の物性値を使用し、不変とする。凍土強度の安全率は、設計基準強度 (σ_u) に対する構造計算上の最大応力 (σ_{max}) の比 (σ_u / σ_{max}) をいう。安全率は通常、 $2.5\sim 3.0$ が用いられているが¹⁾、安全率を 2 まで下げて設計する例も多いので^{6), 7)}、今回の検討では、 2.0 を用いる。設計に用いた物性値は表-1~4 で示す。

5. 解析結果と考察

図-2(a), (b), (c) において、各補強材の外径 ϕ (単位は mm, 以下同) 及び配置を変えて所要凍土厚み h に対する凍土厚減量 (%) を求める。図-4, 図-5, 図-6 にその結果を示す。

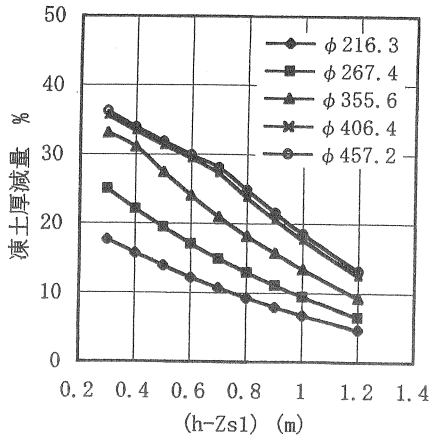


図-4 図-2(a)の解析結果

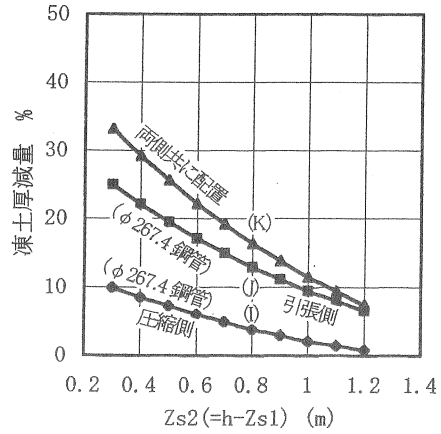


図-7 図-2(d)の解析結果

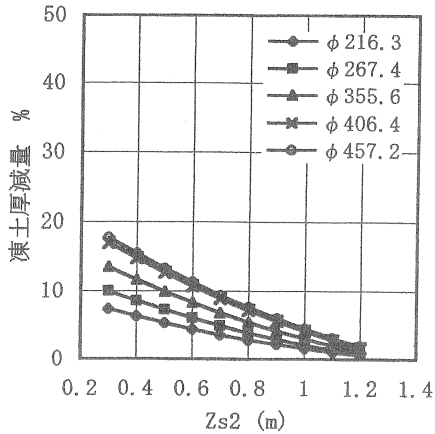


図-5 図-2(b)の解析結果

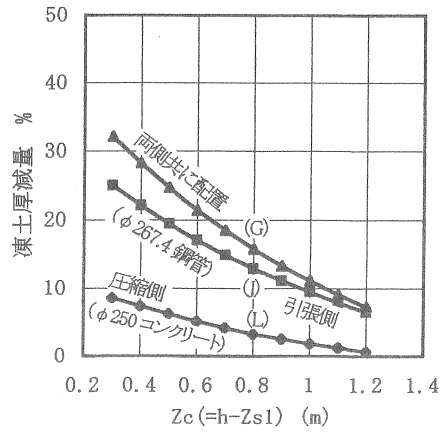


図-8 図-2(e)の解析結果

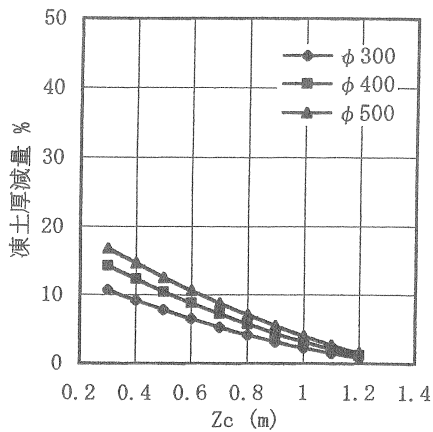


図-6 図-2(c)の解析結果

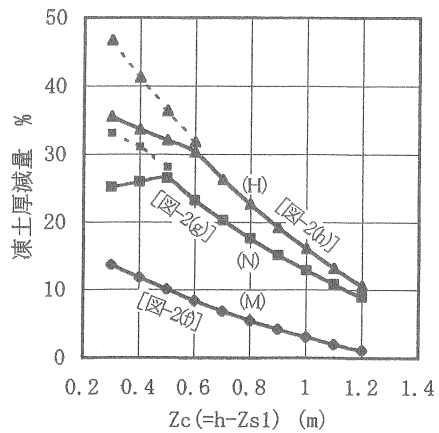


図-9 図-2(f)～(h)の解析結果

図-5 と図-6 に示すように、補強材である鋼管とコンクリートを梁の圧縮側に配置する場合、合成梁の厚み h は凍土の引張側の応力によって決まる。図-4 に示すように、鋼管を引張側に配置する場合も通常は引張側の応力によって決まるが、鋼管の外径によっては合成梁の厚み h が凍土の圧縮側の応力によって決まることもある。例えば、φ 355.6 鋼管では、

($h - z_{s1} = 0.3 \sim 0.4$ m) の曲線と、φ 406.4 鋼管と φ 457.2 鋼管では、($h - z_{s1} = 0.3 \sim 0.7$ m) の曲線が凍土の圧縮側の応力によって決まった。

通常は鋼管の外径が大きいく程、合成梁の等価曲げ剛性 $\sum_{i=1}^n E_i I_i$ が大きく、補強効果も大きい。しかし、図-4 と図-5

に示すように、φ406.4 と φ457.2 の鋼管の場合は、その効果の差があまり大きくない。その原因はこの二種類の鋼管の肉厚が同じ ($t=19\text{mm}$) であるので、それぞれで造った合成梁の等価曲げ剛性 $\sum_{i=1}^n E_i I_i$ も大差がないからである。

図-2(d)に示す配置、すなわち外径φ267.4の鋼管二本を梁の両側共に配置する時 ($z_{s2} (=h-z_{s1})$) に、必要な凍土厚み h に対する凍土厚減量 (%) を求め、図-7に▲記号で示す。また、引張側と圧縮側の鋼管がそれぞれ単独に配置された際の解析結果も図-7に併記した。

図-8の▲記号は、図-2(e)の解析結果であり、圧縮側のφ250コンクリートと引張側のφ267.4鋼管がそれぞれ単独に配置された際の解析結果も図-8に併記した。

いずれも補強材は中立軸から離れ、辺縁側に近い程補強材の等価曲げ剛性 $\sum_{i=1}^n E_i I_i$ が大きく、補強効果が大きい。しかし、図-7に示すように ($z_{s2} (=h-z_{s1}) = 0.8\text{m}$) 時の引張側と圧縮側の補強材の等価曲げ剛性 $\sum_{i=1}^n E_i I_i$ が同じにしても、引張側に配置した方が凍土厚減量 (%) が大きい (J 点の縦座標=12.94%, I 点の縦座標=3.86%)。また、両側に同時に配置する場合の凍土厚減量 (%) は、合成梁の厚み h は凍土の引張側の応力によって決まる場合に、ほぼそれぞれ単独に配置する場合の凍土厚減量 (%) の合計 (K 点の縦座標=16.37%) である。

図-9は図-2(f)~図-2(h)の解析結果である。

凍土の平均温度が -10°C である図-7~図-9において、 $z_{s2} = z_c (=h-z_{s1}) = 0.8\text{m}$ の時、表-5に示す条件に基づき、必要な凍土厚みを表-5にまとめた。また、比較のため、単体凍土を設計する場合の所要凍土厚みも併記した。凍結管列が1列の場合、凍結管の荷重分担分があまり期待されないことがわかった。

図-9において、 $(h-z_{s1}) = 0.3\sim 0.4\text{m}$ の■記号(実線)と $z_c (=h-z_{s1}) = 0.3\sim 0.5\text{m}$ の▲記号(実線)は、温度が -10°C の時の凍土と鋼管の許容凍着せん断応力によって決まった凍土厚みである。これから、補強効果に与える影響は、補強材の種類、配置のみではなく、凍土の強度も重要な要因であることがわかる。また、凍結管列が1列の場合、補強材の補強効果に限界があることを示している。一般に、工事に使用する凍結管内のブライン温度は -25°C 以下であり、図-2(g)と図-2(h)の配置において引張側の鋼管内に補助凍結管を併用すると、引張側鋼管の周囲の凍土温度が -15°C 以下になれば、凍土と補強材との許容凍着せん断強度が高くなり、鋼管の位置と凍土厚み h に対する凍土厚減量 (%) の関係は図中の破線のようになる。

凍土の温度を低下させたことより、凍土と鋼管の界面に十分な付着作用を与えることによって二つの材料を合理的に利用することができる。このことより、補強材を有効に活用するためには、補強材のまわりにある凍土の温度を低くすることが重要である。

表-5 図-2の所要凍土厚(凍土: -10°C)

Case	補強材の配置位置 ($z_{s2} = z_c (=h-z_{s1}) = 0.8\text{m}$)	凍土厚 (m)
	(凍土単体, 凍結管の荷重分担分を考慮せず)	3.830
	(凍土単体, 凍結管の荷重分担分を考慮する)	3.825
I	圧縮側 (φ267.4 鋼管)	3.682
J	引張側 (φ267.4 鋼管)	3.334
K	IとJが両側共に	3.205
L	圧縮側 (φ250 コンクリート)	3.704
G	LとJが両側共に	3.224
M	圧縮側(φ267.4コンクリート充填鋼管)	3.622
N	引張側 (φ267.4 と φ216.3 の二重鋼管)	3.156
H	MとNが両側共に	2.962

表-6 図-3の解析条件(引張側)と所要凍土厚(凍土: -12°C)

Case	外管 (mm)		内管 (mm)		凍土厚 (m)
	外径φ	肉厚t	外径φ	肉厚t	
	(凍土単体, 凍結管の荷重分担分を考慮せず)				3.600
	(凍土単体, 凍結管の荷重分担分を考慮する)				3.440
A	267.4	9	190.7	7	2.770
B	267.4	9	216.3	7	2.759
C	318.5	9	216.3	7	2.698
D	318.5	9	267.4	9	2.660
E	355.6	12	267.4	9	2.591
F	406.4	19	267.4	9	2.490
配置位置: $z_{s2} (=h-z_{s1}) = 0.8\text{m}$					
(圧縮側:コンクリート充填鋼管, φ267.4, t=9)					
(凍結管: φ114.3, t=4.5)					

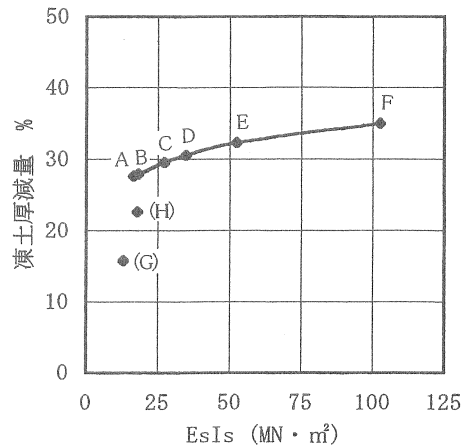


図-10 図-3の解析結果

図-10の横軸は引張側の鋼管の曲げ剛性 $\sum E_s I_s$ であり、縦軸は凍土厚減量 (%) である。なお、この計算例では、 -10°C の単体凍土厚を使用し、凍土厚減量 (%) を算出した。曲線

部分は表-6 の設定条件による図-3 の解析結果である。各解析 Case の所要凍土厚みを表-6 にまとめた。比較のため、凍結管列のみの場合の所要凍土厚みも併記した。この表より、凍結管の荷重分担分が期待されることがわかった。また、図-8 および図-9 から $(h - z_{s1}) = 0.8\text{m}$ の時 (G), (H) の凍土厚みと引張側に配置する鋼管の曲げ剛性との関係性を求め、図-10 に(G)と(H)を併記した。図-2(e)と図-2(h)の配置における引張側の鋼管の曲げ剛性 $\sum E_s I_s$ は図-3の引張側の鋼管の曲げ剛性 $\sum E_s I_s$ とほぼ同じであるが、図-3の方が凍土の強度が大きいので、補強効果も大きい。

6. まとめ

本研究では、凍土の減量を目的として、凍土と補強材からなる合成構造体の設計方法を提案した。さらに、この設計方法を用い、補強材の種類及び配置を変えて凍土と補強材からなる合成梁の所要凍土厚みを試算し、補強材の種類、配置及び凍結管の本数などが所要凍土厚みに与える影響を考察した。その結果、凍土減量に必要な合成構造体の強度特性に関する基礎情報が得られた。本研究によって得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

1) 補強材を梁の圧縮側に配置する場合、合成梁の厚み h が凍土の引張側の応力によって決まる。一方、鋼管を引張側に配置する場合、鋼管の外径の大きさによっては合成梁の厚み h が凍土の圧縮側の応力によって決まる場合がある。

2) 補強材は中立軸から離れ、辺縁側に近い程補強効果が高いが、凍結管列を1列配置する場合に、補強材が引張側に近すぎると凍土の厚みは引張側の凍土と鋼管との許容凍着せん断応力によって決まることがある。その場合、引張側に補助凍結管を配置すると補強効果を高めることができる。

3) 補強効果が補強材の等価曲げ剛性のみではなく、補強材の配置によって凍土の強度も補強効果に与える影響があり、補強材のまわりにある凍土の温度が低くなると補強材の補強効果が高まる。

4) 凍結管列が2列の場合、凍結管の荷重分担分が期待される。

5) 解析の結果により、提案する設計方法は凍結膨脹対策として凍土減量の目的を達成することが可能である。

今回の検討を踏まえた上で今後の課題を以下に示す。

1) 今回の検討では、引張側に設置された鋼管中の充填材の引張応力を無視して¹⁶⁾、凍土の応力を試算し、安全側の凍土の厚みを求めた。しかし、コンクリートは低温下では引張性能が改善されるので^{17), 18)}、今後は、実験データを収集・

蓄積して、最も合理的な計算方法について検討を進めていきたい。

2) 今回提案する設計方法では弾性解析を行った。しかし、凍土中の土粒子表面に 0°C 以下でも凍らない水が存在するので、凍土のクリープ特性を顕著にさせる。今後凍土のクリープ特性を考慮し、複合凍土の変形挙動の研究を進めたい。

参考文献

- 1) (財)日本建設機械化協会：地盤凍結工法，pp. 1-56，1981.
- 2) 斎藤重治：パイプルーフ工法・地盤，理工図書(株)，pp. 3-6，1982.
- 3) 榎戸源則：鉄筋と凍土の複合体に関する基礎研究，土と基礎，Vol. 31, No.4, pp. 13-18, 1983.
- 4) 姜仁超：凍土と、鋼管，コンクリートから成る合成梁の強度解析方法について，第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 593-594，2001.
- 5) 姜仁超：合成凍土梁の強度設計における補強材の補強効果について，土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集，III-B303，pp. 606-607，2001.
- 6) 末廣正人：海底下での凍結工法を用いたシールドトンネル到達防護工について，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，VI-124，pp. 248-249，1997.
- 7) 浦沢義彦：都市部過密地域における凍結工法の設計・設計，トンネルと地下，第 24 巻，1 号，pp. 33-43，1993.
- 8) 関谷壮，谷村眞治：最新材料力学，朝倉書店，pp. 178-181，1990.
- 9) 岡田清：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 407-418，1981.
- 10) Jumikis, A. R. : Thermal Soil Mechanics, RUTGERS UNIVERSITY PRESS, pp. 148-162, 1966.
- 11) 大浦浩文：土の凍着力について，低温科学，物理編，第 19 号，pp. 215-221，1960.
- 12) 真井耕象：凍土の強度について，北大工学部研究報告，No. 16，pp. 45-68，1957.
- 13) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼，pp. 996-1001，1992.
- 14) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼，pp. 870-874，1992.
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書IV下部編・同解説，pp. 164-170，1996.
- 16) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1)基礎編：理論編，pp. 105-108，1999.
- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp. 224-225，1996.
- 18) 岡田清：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 493-496，1981.