

鋼管補強による凍土梁の 曲げ強度特性の改良

上田保司¹・生頼孝博²・山本 稔³

¹正会員 株式会社精研 技術本部 課長代理 (〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2丁目11番16号)

²正会員 理博 株式会社精研 常務取締役 (〒542-0066 大阪市中央区瓦屋町2丁目11番16号)

³フェロー会員 工博 東京都立大学名誉教授 (〒194-0041 町田市玉川学園1-15-2)

鋼管を引張り側に包含した凍土梁試験体を作成し、曲げ載荷実験を行い鋼管補強効果を調べた。凍土単体梁との比較から、強度増加効果が確認できた。また、破壊に至るまで鋼管と凍土との凍着が切れない完全合成梁としての解析手法を導出した。凍土と鋼管との凍着が切れない場合には、荷重～たわみ曲線及び破壊荷重の解析値は実験値と概ね一致し、凍着切れを起こす時点の凍着応力の解析値も、凍着強度の実験値とほぼ一致したことから、解析手法の妥当性が確認できた。現場規模での試算から鋼管包含による凍土厚の削減量を示した。

Key Words : frozen soil, steel pipe, reinforcement, bending strength, laboratory test, linear analy

1. はじめに

地盤内に埋設された凍結管に冷媒を流して凍土壁を造成する地盤凍結工法は、凍土壁の優れた遮水性や高強度、改良の均質性などからシールドの発達・到達防護、既設洞道の拡幅など、都市部を中心に幅広く採用されている。

粘性土地盤に凍結工法を適用する場合、土が凍る際の凍結膨張による既設構造物の変位や立坑への土圧増加が懸念され、対策工を別途施工する場合がある。凍結膨張対策工としては、地山を抜き取る事で凍結膨張量を吸収させる方法¹⁾、凍結管の冷却温度を制御して必要量以外の余分な凍土造成を防ぐ方法²⁾、セメントなどを混合して凍結膨張そのものを抑制する方法³⁾などがあり、現場の条件に適した方法が適用される。場合によっては複数の方法が組み合わせられる事もある。

上記の方法とは別に施工計画時の必要凍結土量を削減できれば、凍結膨張量が減少し凍土造成に要する期間の短縮にもつながるので有力な凍結膨張対策になりうると考えられる。必要凍結土量は凍土の強度を基に耐力壁としての構造計算から算出されるので、凍土の強度を高められれば削減する事ができる。

凍土の強度増加の1方法として、鋼材等により凍土を補強する事が考えられる。過去には鋼管と凍土とを組み合わせた施工例⁴⁾があるが、この例での構造計算は荷重をすべて鋼管に受け持たせるもので、凍土は遮水の目的のみ造成されており、鋼管と凍土の複合体としての強度増加が評価されたものではない。先行研究としては凍

土と鉄筋との複合梁の実験例があり、Sooらの研究⁵⁾では鉄筋の有無による荷重～たわみ関係の相違が論じられているが、鉄筋補強による強度増加効果の定量的な評価はなされていない。榎戸の実験⁶⁾では、鉄筋コンクリート(RC)との比較から鉄筋凍土梁が複合体として機能する事が検証されているが、施工検討上必要となる構造解析手法の確立には至っていない。またこれらの研究は対象が砂凍土であり、凍結膨張対策の上で必要な粘土凍土についての検討はなされていない。

以上の経過と、凍結工法での凍土壁は曲げ部材としての適用が多い事から、本研究では鋼管を包含した砂、粘土凍土梁について、曲げ強度の増加効果を定量的に把握する事を目的とした。鋼管を用いたのは、パイプルーフ工法等で埋設技術が確立している事、凍結管を鋼管内に設置する事で別途の削孔が不要な事などから、現場での施工上、鉄筋よりも利点が多いと考えられるからである。

まず、三等分点載荷方式で鋼管を包含した砂及び粘土凍土梁の室内曲げ実験を行い、凍土単体の場合との比較を行った。また、異なる材料を組み合わせた複合梁の機能を評価するには材料間の付着特性を把握する必要があるので、鋼管と凍土との凍着強度を調べる実験を行った。次に、凍着が切れない完全合成梁としての鋼管包含凍土梁の構造解析手法を導出し、曲げ実験結果に適用して手法の妥当性を調べた。解析により、鋼管包含凍土梁の梁断面内での最弱部位の推定や強度増加効果の定量的把握を行った。最後に現場規模の試算から、鋼管包含による必要凍土の削減量、鋼管の最適配置位置を検討した。

表-1 供試体の物理定数

| | 豊浦砂 | 藤の森青粘土 |
|----------------------------|-------|--------|
| 含水比 (%) | 21.91 | 62.96 |
| 湿潤密度 (g/cm ³) | 1.974 | 1.578 |
| 土粒子比重 (g/cm ³) | 2.64 | 2.632 |
| 水飽和度* (%) | 98.88 | 100 |
| 液性限界 (%) | - | 63.28 |
| 塑性限界 (%) | - | 27.37 |

*土中水がすべて氷に置き換わるとして計算したもの

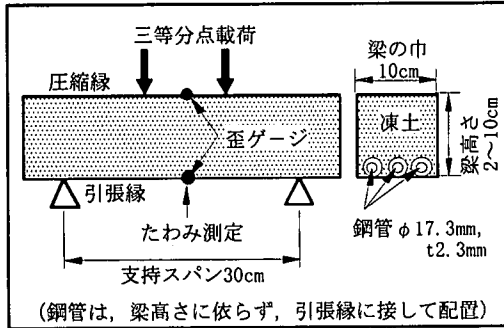


図-1 鋼管包含凍土の曲げ実験模式図

2. 実験方法

(1) 試料土、鋼管

各実験に用いた試料土は風乾状態の豊浦砂及び藤の森青粘土であり、供試体作成時に水と練り合わせた。供試体の凍土部分の物理定数を表-1に示す。以下では砂、粘土とのみ表記する。鋼管は外径 17.3mm、肉厚 2.3mm で、後述するように表面に溝を設けたものと、溝を設けないものを用いた。

(2) 供試体作成及び実験方法

a) 鋼管包含凍土の曲げ実験

図-1に供試体の模式図を示す。鋼製モールドの底面に鋼管を3本並べ、水と練り合わせた試料土を打撃を加えて締め固めながら充填し、上面及び側面を防熱して底面から一次凍結させ、梁高さ2~10cm、巾10cm、長さ40cmに整形して供試体を作成した。

-10℃の低温室内(温度のゆらぎが±0.2℃以内)で供試体を12時間以上養生して十分に温度になじませてから、支持スパン30cmで供試体を支持して、たわみ速度一定で三等分点方式で載荷した。なお凍土梁のみの曲げ実験では圧縮縁よりも引張縁の方が力学的に弱い⁷⁾事から、鋼管は図-1に示すように引張縁に接するように配置した。載荷はブルーピングリングを介して行い、応力が最大となる梁中央のたわみを差動トランスにより計測し、荷重~たわみ曲線をX-Yプロッターで自記記録した。後述する式(4)のたわみと歪の関係から、梁中央引張縁で

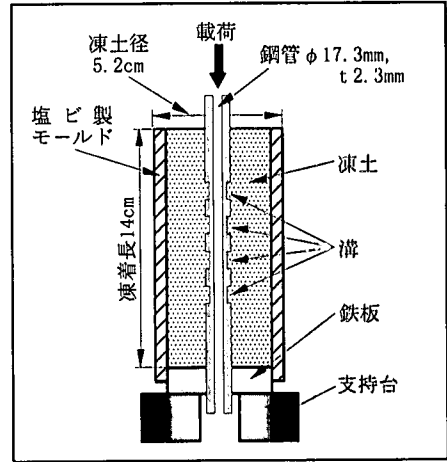


図-2 鋼管と凍土の凍着力実験模式図

の歪速度が先行研究⁷⁾から凍土の弾性的挙動を示す下限である0.15%/minとなるように、たわみ速度を設定した。また図-1に示すように、鋼管包含による歪抑制効果や鋼管と凍土の合成状況などを調べる為、梁中央の圧縮縁、引張縁での凍土の歪、引張縁での鋼管の歪を歪ゲージで計測した。このゲージは先行研究⁷⁾で用いられたセンサー一部1.4×10mm、測定範囲±1%のペーパーゲージである。

一般に合成構造では各部材間の付着力が充分でないと付着切れを起こして合成体としての機能を満足に発揮できない。そこで鋼管と凍土との凍着力を高める為に鋼管表面に深さ0.2mm、巾0.4mmの溝を間隔2mmで設けた(以下では、溝付き鋼管と呼称)。比較の為に溝を設けない鋼管も使用した(以下、溝無し鋼管)。

鋼管と凍土の断面積比によって力学挙動が異なる事が考えられるので、上述の方法で梁の高さを2~10cmの範囲で様々に変えて、室内実験を行った。

b) 鋼管、凍土単体の曲げ実験

鋼管包含の場合との比較検討の為、凍土単体での曲げ実験も行った。供試体作成方法や実験方法は前記a)の場合に準じた。また後述する解析に於いては鋼管及び凍土それぞれの応力~歪曲線をモデル化する必要があるので、鋼管単体についても同様の曲げ実験を行った。

c) 鋼管と凍土の凍着強度実験

鋼管表面の溝設置による凍着力の増加効果を調べる為に、図-2に示す凍土内の鋼管を押し抜き実験(以下では押し抜き実験)を行った。円筒のモールド内に鋼管を建て込み、モールドと鋼管の間に水と練り合わせた試料土を充填してモールド上面・側面を防熱して底面から一次凍結して供試体を作成した。溝の深さは0.35mmで一定とし、溝の数を様々に変えた。但し、溝全部の中の合計が鋼管と凍土の付着長を一定(=4cm)となるように、各溝の巾を調整した。なお、a)の曲げ実験で用いた鋼管についても押し抜き実験を行った。供試体全体を-10℃

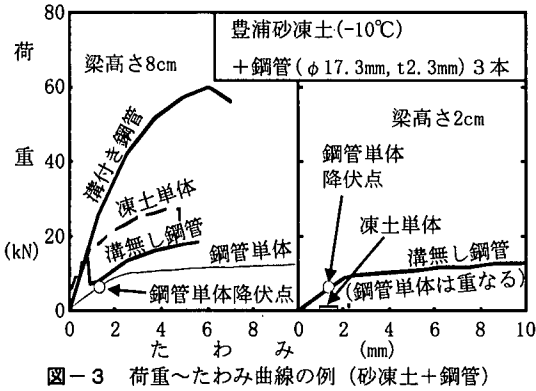


図-3 荷重～たわみ曲線の例 (砂凍土+鋼管)

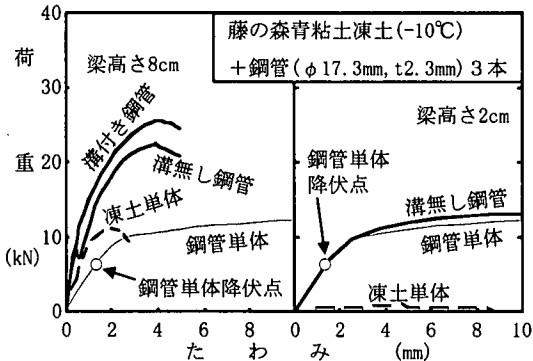


図-4 荷重～たわみ曲線の例 (粘土凍土+鋼管)

の低温室内で養生後、凍着面の歪速度が曲げ実験と同じ0.15%/minとなるように一定速度で鋼管を押し込み、押し抜き最大荷重を求めた。

3. 実験結果

(1) 荷重とたわみの関係

図-3、図-4に梁高さが2、8cmの例を示すように、鋼管包含梁の梁高さが低い(砂、粘土とも梁高さが4cm以下)場合には、実験の範囲でたわみ増加に対する荷重のピークは現れず、荷重～たわみ曲線はほぼ鋼管単体の場合と一致し、凍土は複合梁の力学挙動にほとんど寄与しない。

図-3の砂凍土+鋼管で梁高さが高くなると、溝付き鋼管の場合の荷重は鋼管単体及び凍土単体の場合より大きくなり、荷重のピークが現れる。溝無し鋼管の場合には荷重増加の途中で一度荷重が低下し、再度増加し始める現象が見受けられる。荷重は鋼管単体の場合よりは大きい、再増加後も凍土単体の場合の荷重を下回る。

図-4の粘土凍土+鋼管で梁高さが高い場合には溝付き、溝無し鋼管の場合とも荷重のピークが現れ、鋼管単体、凍土単体の場合よりも荷重は大きい。ただし溝無し

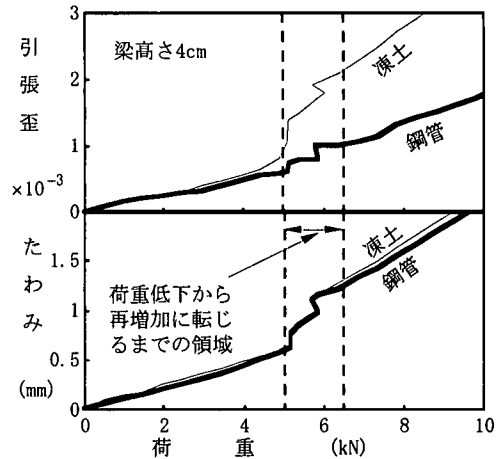


図-5 たわみ、歪の測定例 (砂凍土+溝無し鋼管)

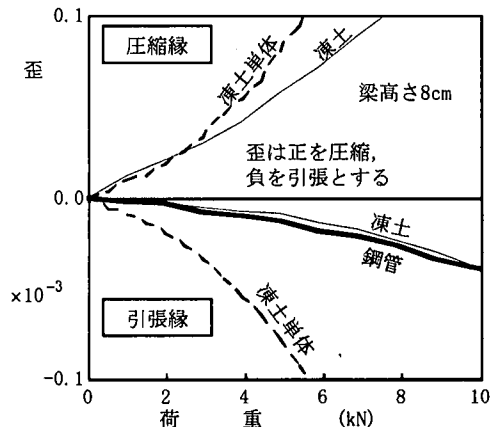


図-6 歪の測定例 (粘土凍土+溝付き鋼管)

鋼管の場合には、砂の場合ほど顕著ではないものの、やはり荷重低下の現象が見受けられる。

砂、粘土ともに梁高さが高い場合は載荷点間で凍土の断面を貫通するクラックが発生して破壊に至る。梁高さが低い場合はこのようなクラックの存在は見いだせない。

実験後の鋼管は曲がった状態となっており、実験中に鋼管の応力は弾性限界を超えた事が分かる。鋼管の降伏強度⁹⁾を285MPa、降伏点までの弾性係数⁹⁾を200kN/mm²として弾性理論¹⁰⁾から鋼管単体実験における降伏点を求めると図-3、図-4に示すようになり、鋼管包含梁でピーク荷重発揮時のたわみは砂、粘土ともに鋼管単体の降伏点でのたわみよりも大きく、この時点で鋼管の応力は弾性限界を超えていると考えられる。

上記降伏点のたわみで凍土単体の荷重を鋼管単体の降伏荷重と比較すると、砂、粘土とも梁高さが2cmでは鋼管の降伏荷重を大きく下回るが、梁高さが8cmでは逆に鋼管の降伏荷重よりも大きくなり、鋼管包含梁の力学挙動への凍土の寄与は梁高さによって異なる事が確認できる。

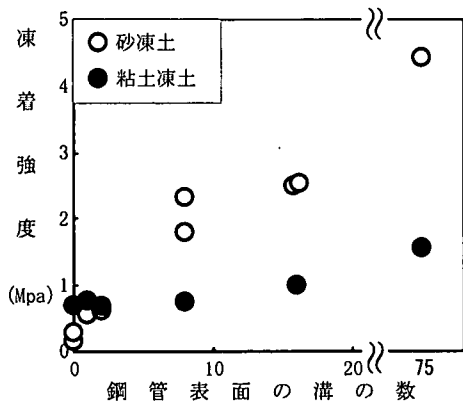


図-7 溝の数と凍着強度の関係

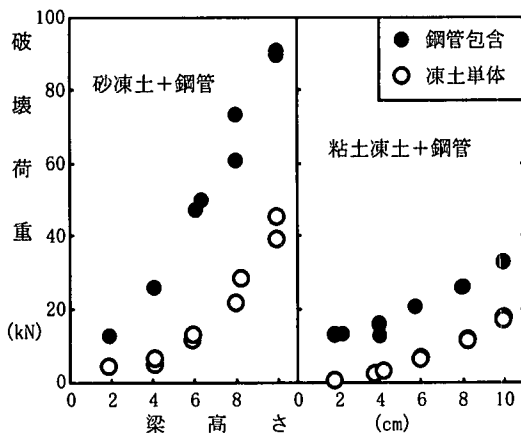


図-8 梁高さと破壊荷重の関係

なお上記の荷重低下現象は砂では梁高さ4cm以上、粘土では6cm以上で起こり、梁高さが高いほど低下量は大きかった。

(2) 荷重低下前後のたわみ、歪の変化

上述の荷重低下の原因を確認する為、梁中央でのたわみ測定を鋼管、凍土それぞれについて独立して行うとともに、歪測定も併用して実験を行った。

図-5に示す測定結果では、荷重低下後も鋼管のたわみと凍土のたわみはほぼ同調している。これに対して引張縁での鋼管、凍土の歪は荷重低下前では同調するものの、低下後は凍土の歪増加が鋼管よりも顕著に大きくなる。以上の結果は荷重低下時には凍土と鋼管との凍着が切れて凍土が梁長手方向に大きく滑る事を示している。実験終了後の供試体の端部断面の観察では、両端とも鋼管端部が凍土内部に5~10mm程度引き込まれており、目視でも凍着切れが起こった事が確認できた。

実用的には凍着面の温度を下げて凍着強度を高める¹¹⁾事や(4)節で述べるように鋼管表面に溝を設ける事により凍着切れを防止できると考えられるので、本研究で

は鋼管と凍土とが一体として機能する複合梁としての強度増加効果の把握を目的とし、上述の検討結果から荷重が低下する場合の実験結果は以降の検討の対象外とする。

(3) 溝付き鋼管の場合の歪の変化

図-6に溝付き鋼管での歪の測定例を示す。比較の為、図中に凍土単体の場合の測定結果も示す。測定範囲で引張縁での鋼管と凍土の歪は概ね追隨しており、両者が一体として挙動する事が分かる。また引張縁の歪は凍土単体の場合に比べてかなり小さい。圧縮縁の凍土の歪増加は引張縁よりも大幅に大きい、凍土単体の場合よりは小さい。

以上から、鋼管包含による歪抑制効果は配置された引張縁に顕著に現れるが、間接的には鋼管が配置されない圧縮縁でも補強効果が現れる事が分かる。

(4) 凍着強度

一般に凍着強度とは凍土と他部材の接合面での剪断強度を指す事が多い¹¹⁾。押し抜き実験では、接合面での剪断応力とともに、溝凹部の凍土の剪断応力も鋼管と凍土の付着に寄与するが、本研究では、両者の寄与による最大押し抜き荷重を鋼管と凍土との凍着面積で除したものを、RCにおける鉄筋とコンクリートの付着強度と同等の意味で、凍着強度と呼ぶ事とする。

図-7に示すように、砂、粘土の場合とも、溝の合計面積は同じであっても鋼管表面の溝の数が多いほど凍着強度は増加した¹²⁾。鋼管表面に溝を設ける事は、凍土と鋼管の一体化を高めるのに有効であるが、溝による凍着強度の増加効果は、砂の場合の方が粘土よりも顕著である事が分かる。

なお本研究で用いた鋼管の表面は光沢を持って滑らかである為、溝無しの場合の凍着強度が-10℃での鉄と凍土との凍着剪断強度の先行研究事例^{13),14),15)}よりもかなり小さく、前述の曲げ実験では特に凍着切れを起こし易かった事が推察される。

(5) 破壊荷重

図-3、図-4に例を示した荷重~たわみ曲線で、荷重のピークが現れる場合はピーク荷重を、ピークが現れない場合はたわみ計測の限界(10mm)付近での荷重増加が緩やかな事からたわみ10mmでの荷重を、それぞれ梁の破壊荷重と定義して実験結果を整理した。

図-8に梁高さと破壊荷重の関係を示す。前述の理由から荷重低下が起きた場合の実験結果は除いてある。比較の為、図中に凍土単体の場合の破壊荷重も示す。砂、粘土の場合とも、鋼管包含の場合の破壊荷重はどの梁高さでも凍土単体の場合を上回り、鋼管による補強効果が確認できる。補強効果を凍土単体と鋼管包含の破壊荷重

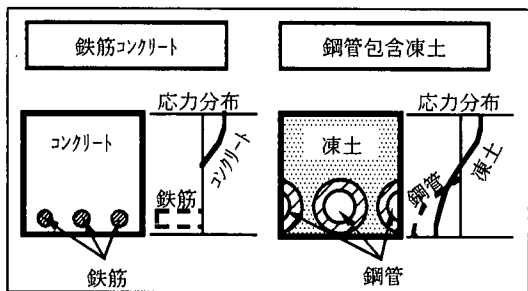


図-9 RCと鋼管包含凍土の応力分布模式図

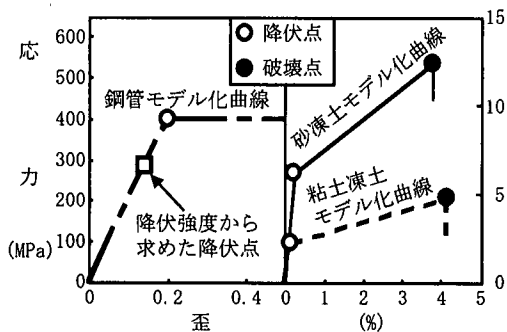


図-10 応力-歪曲線のモデル化

の比率で考えると、図-8から梁高さが低いほど補強効果は大きい。

なお定量的な補強効果の確認は、次章以降で解析により行う事とする。

4. 構造解析

鋼管による凍土壁の補強を現場で実現する為には、設計段階で使用する管のサイズ、埋設本数、配置等を決めなければならない。したがって、鋼管包含凍土壁の破壊に至るまでの力学的挙動を把握でき、降伏・破壊に対する危険部位を特定できる解析手法が必要となる。

これに類する解析手法としては、RC構造物に関する周知の限界状態設計法⁹⁾があるが、鋼管包含凍土とRCには以下の相違があり、そのまま転用する事ができない。その第1は、RCの解析ではコンクリートの引張強度が圧縮強度の1/10以下と極めて小さい事から、引張側コンクリートの強度は無視される。これに対して、凍土では曲げ・引張強度は圧縮強度に対して無視できないほど大きい^{7,10,17)}ので、引張側の凍土も考慮して解析する必要がある。第2は、RCでは鉄筋の断面全体に占める面積比がかなり小さい為鉄筋断面内の応力分布は一樣とされるが、鋼管包含凍土では薄い凍土厚での使用が目的であり、梁断面に占める鋼管断面積の割合も大きくなるので、鋼管断面内の応力分布も無視し得ない。RCと鋼

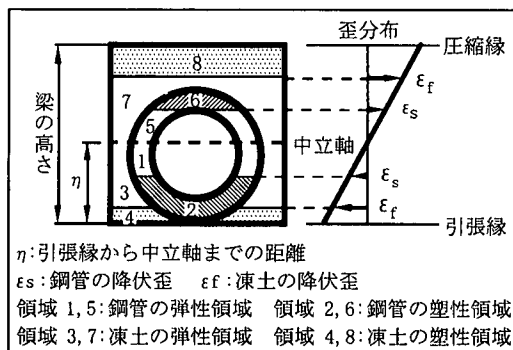


図-11 解析模式図

管包含凍土の応力分布の模式図を図-9に示す。

以上の2点を考慮した上で鋼管と凍土が一体となって機能する完全合成梁としての解析手法を導出し、前述の曲げ実験結果に適用して、その妥当性を検討する。

(1) 各部分材の応力～歪曲線のモデル化

一般に異なる材質の部分材を組み合わせた複合体の解析では、各部分材の応力～歪曲線をモデル化する必要がある。

そこで凍土、鋼管について単体の曲げ実験をそれぞれ数回づつ行い、実験結果の平均から、図-10に示すように応力～歪曲線を歪増加の初期から降伏点までを弾性領域、降伏点以降を塑性領域とするバイリニア曲線にモデル化した。なお図に示すように上述の手順でモデル化した鋼管のモデル化曲線の降伏点は、3章で降伏強度から求めた降伏点とは異なる。

(2) 解析手法

図-11に示すように、圧縮側及び引張側それぞれについて凍土と鋼管、弾性と塑性領域をそれぞれ区別すると、梁断面には最大8つの応力領域が現れる。ただし凍土、鋼管の圧縮、引張縁で降伏歪を超えない段階では塑性領域2, 4, 6, 8は発生せず、また鋼管が中立軸の下側にあり鋼管断面がすべて引張側にある場合は領域5, 6は発生しない。

図-11の領域1～8を独立した部材とみなして各々に働く断面力を考えると、梁の平衡条件により引張力の合計と圧縮力の合計は等しいから、

$$\sum_{m=1\sim 4} (T_m) = \sum_{m=5\sim 8} (C_m) \quad (1)$$

T_m , C_m は領域mに作用する引張力、圧縮力を表す。

計算する梁の状態を選ぶ(例えば圧縮縁の歪が凍土の降伏歪 ϵ_f に達する)と、歪分布は中立軸の位置 η で表現され、 T_m , C_m は η の関数となるから、式(1)から η が決まり、歪分布及び弾・塑性領域の分布が求められる。

もう1つの平衡条件として、外部モーメントMと各領

域の内部抵抗モーメントの和は釣り合う事から、

$$M = \sum_{m=1 \sim 4} (T_m \cdot G_m) + \sum_{m=5 \sim 8} (C_m \cdot G_m) \quad (2)$$

G_m は中立軸と各領域の断面力の中心との距離である。式(2)から、 η の算定時に選んだ梁の状態に見合う外部モーメントの大きさ M が算定される。上述の手順により、梁の特定の箇所が降伏または破壊を起こす時に梁に作用する荷重を知る事ができる。

鋼管と凍土の接合面に作用する凍着剪断応力 τ_f はRCでの鉄筋とコンクリートの付着応力に相当し、

$$\tau_f = \frac{S}{U} \cdot \frac{\sum_{m=1,2,5,6} (A_m \cdot G_m \cdot E_m)}{\sum_{m=1 \sim 8} (E_m \cdot I_m)} \quad (3)$$

で表される。ここで S は梁に働く剪断力、 U は凍土と凍着している鋼管の有効周長である。 A_m 、 G_m 、 E_m はそれぞれ各領域の面積、弾性係数、断面2次モーメントを表す。曲げ実験では、式(3)で計算される τ_f が押し抜き実験による凍着強度を超えると凍着切れを起こす事となる。なお以下の解析では鋼管包含梁の鋼管は梁の引張縁に点接触しているとみなして、鋼管全周を U とする。

曲げ実験での荷重増加に伴う梁のたわみ y は、梁断面のいずれの箇所でも降伏が起きず全断面が弾性領域である初期段階では、弾性理論¹⁰から次式で計算される。

$$y = \frac{\iint M dx dx}{E \cdot I} \quad (4)$$

しかし梁断面のいずれかの箇所でも最初の降伏が起きると、以降は荷重増加に伴って弾・塑性領域の分布が変化し梁の剛性 $E \cdot I$ が一定とならない為、 y を式(4)から直接求める事はできない。

そこで、 $(i-1)$ 番目の降伏が起きてから i 番目に別の箇所の降伏が起きるまでの梁剛性を両時点での平均で扱うと、この間のたわみ増加量 Δy_i は次式で表される。

$$\Delta y_i = \frac{\iint (M_i - M_{i-1}) dx dx}{\sum_{m=1 \sim 8} (E_m \cdot \frac{I_{m,i-1} + I_{m,i}}{2})} \quad (5)$$

以上により、破壊に至るまでの荷重とたわみの関係を求める事ができる。

(3) 実験結果との比較

図-12下部に示すように、砂凍土に鋼管を包含した場合の荷重～たわみ曲線では、実験値と解析値とは概ね一致している。なお同図上部に示すように、凍着応力の解析値はたわみ増加に伴い大きくなるが図-7で示した押し抜き実験による凍着強度(実験値)をかなり下回っており、鋼管包含凍土梁は破壊に至るまで凍着の切れな

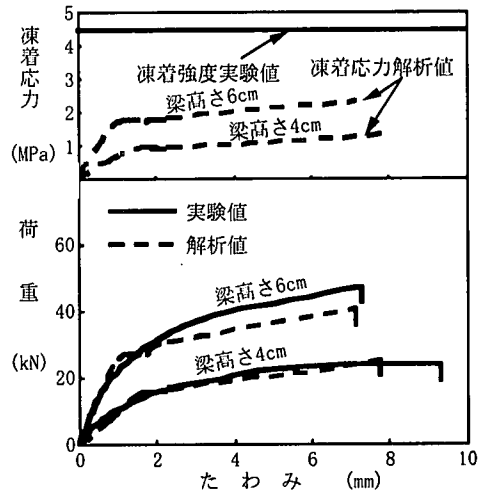


図-12 たわみと荷重、凍着応力の関係 (砂凍土+鋼管)

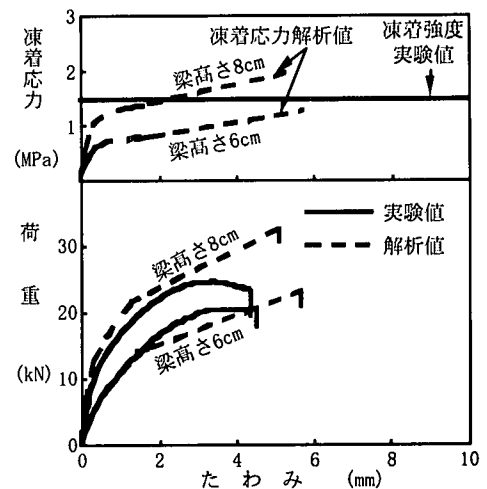


図-13 たわみと荷重、凍着応力の関係 (粘土凍土+鋼管)

い完全合成梁として機能したと考えられる。

これに対して図-13に示す粘土凍土の場合の荷重～たわみ曲線では、解析値は初期の直線的な荷重増加からたわみ2mmを過ぎるあたりまでは実験値に追従するが、その後の両者の傾向は異なり、破壊荷重は実験値よりも解析値の方が大きい。同図上部に示す凍着応力解析値は、梁高さ8cmでは破壊荷重に至るまでに凍着強度実験値を上回り、梁高さ6cmでは破壊荷重の時点で実験値に近い値となっており、実験では凍着切れが生じて完全合成梁から重ね梁へと移行したと推察される。

図-14に示す砂凍土の破壊荷重では、実験範囲で破壊時点での凍着応力解析値は押し抜き実験による凍着強度を超えず、破壊荷重解析値は実験値と概ね一致する。

梁高さが高くなるほど破壊時点の凍着応力解析値は大きくなるが、図-15の粘土凍土で梁高さ6cm以上では

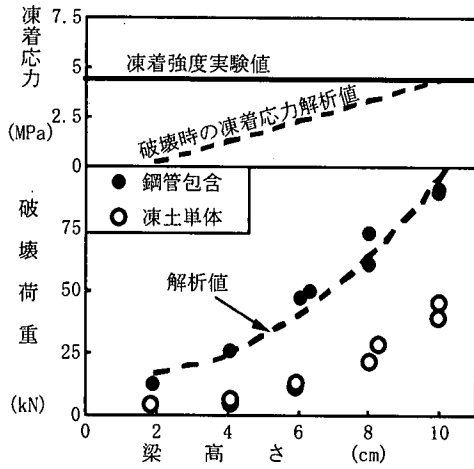


図-1-14 梁高さと破壊荷重, 凍着応力の関係 (砂凍土+鋼管)

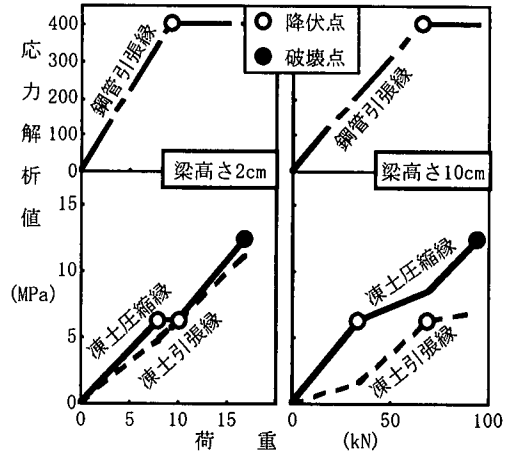


図-1-16 梁中央断面の応力解析結果 (砂凍土+鋼管)

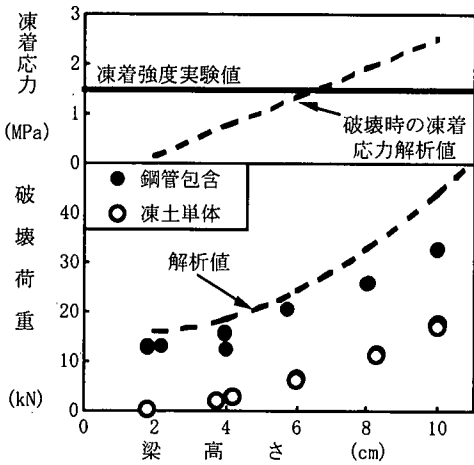


図-1-15 梁高さと破壊荷重, 凍着応力の関係 (粘土凍土+鋼管)

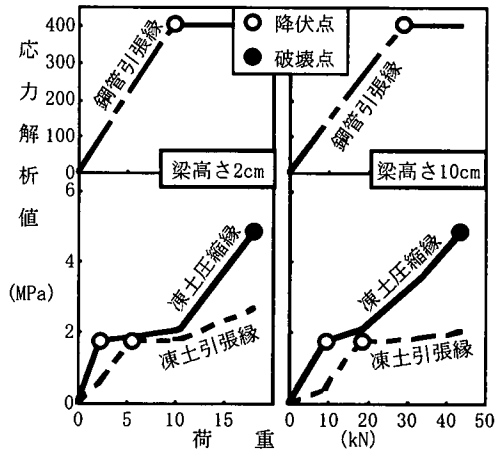


図-1-17 梁中央断面の応力解析結果 (粘土凍土+鋼管)

凍着強度実験値を超えており、破壊荷重解析値は梁高さが高いほど実験値を上回り、梁高さの高い実験では凍着が切れたと推察される。したがって粘土凍土では、鋼管と凍土との凍着力をもっと高める事で本実験よりも大きな増強効果が得られるものと考えられる。

なお梁高さの増加に伴って凍着応力解析値が増加するのは式(3)から中立軸と鋼管の重心との距離が大きくなるためと考えられるが、具体的なメカニズムについては今後の検討課題としたい。

以上の事から、鋼管と凍土の凍着が切れない限りは鋼管包含凍土梁を完全合成梁として解析できる事が分かる。

5. 考察

本章では第4章で導出した解析手法により、鋼管包含

凍土梁に関する幾つかの考察を行う。まず梁断面内での最弱部位を推定する。次に鋼管包含による強度増加効果の定量的な把握を試みる。また鋼管包含による凍土厚の削減量を現場規模で試算する。この試算において、梁断面内での鋼管の配置位置が最適であるかを検証する。

(1) 解析による最弱部位の推定

地盤凍結工法は荷重に対抗する耐力壁としての用途が多い為、造成する凍土壁の構造的に最も弱い箇所を把握する事は、設計・施工上の重要なポイントである。

一般に材質が均質な梁では断面内の最弱部位は一義的に決まり、凍土単体の曲げ実験では、供試体内に局所的な不均質部分が無い限りは土質や供試体寸法に関わらず、必ず引張縁で降伏・破壊が起こる。

しかし鋼管包含凍土のように異質な材料が組み合わせられる梁では材料間の性質の相違や寸法、形状、配置によって断面内の最弱部位の位置は異なり、均質梁のように

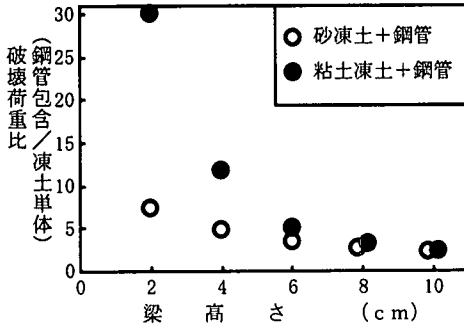


図-18 梁高さと破壊荷重比の関係

断面内の最弱部を一義的に特定する事はできない。

そこで鋼管包含凍土の曲げ実験について、応力が最大となる梁中央断面で、凍着が切れないとする場合の荷重増加に伴う各箇所での応力変化を式(1)、(2)を用いて解析し、断面内での最弱部位を調べた。

図-16左部に示す砂凍土+鋼管の梁高さ2cmの場合は、鋼管引張縁、凍土圧縮縁・引張縁での降伏が極めて狭い荷重の範囲内で起こり、載荷初期から破壊に至るまで凍土の圧縮・引張縁の応力差はほとんど無い。したがって砂質地盤に鋼管包含を適用した場合、凍土厚が薄いと、いずれの部位でも降伏、破壊が起こりうると推察される。図-16右部で梁高さが10cmの場合には引張縁よりもかなり先に凍土圧縮縁での降伏が起こり、降伏後の凍土の応力増加は補強された引張側よりも圧縮側の方が顕著である。

図-17の粘土凍土+鋼管の場合には、2cm、10cmの場合とも他の箇所よりもかなり早期に凍土の圧縮縁が降伏し、破壊時の圧縮縁と引張縁の応力比も砂凍土の場合よりも大きい。

従来の凍結工法で凍土壁を梁部材として設計する場合は凍土の曲げ強度を基準として造成凍土厚が算定されるが、以上の応力解析結果は、鋼管包含凍土の場合は凍土の曲げ強度よりも大きい凍土の圧縮強度で設計できる可能性を示している。

(2) 鋼管包含による強度増加効果

凍着切れを生じない条件下での鋼管包含による増強効果を定量的に把握する為に、図-14、15の破壊荷重の解析値(図中の点線)と凍土単体での実験結果(図中の○)の平均値との比を、破壊荷重比として梁高さで整理した。結果を図-18に示す。破壊荷重比は実験範囲では砂の場合よりも粘土の場合の方が大きく、粘性土地盤に適用する方が増強効果は大きいと考えられる。梁高さが高くなるほど破壊荷重比は減少し、また砂と粘土の差は小さくなるが、実験の範囲内で2以上を確保している。実験範囲の鋼管径に対する梁高さの比率は1.2~5.8倍であったが、次節に示す現場規模での検討から実施工

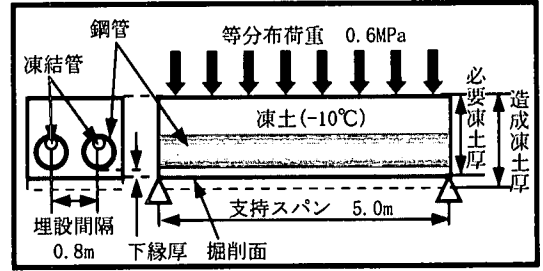


図-19 現場規模模擬計算の概要

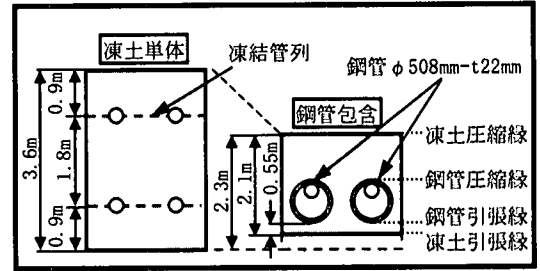


図-20 現場規模模擬計算結果

ではこの比率を超える凍土厚みとなる事は少ない。したがって鋼管包含による強度増加としては、2倍以上を期待してよいと考えられる。

(3) 現場規模での凍土厚削減効果

現場規模での鋼管包含による凍土厚削減効果を確認する為に、図-19に示すように上載荷重0.6MPaを支持スパン5mの梁構造で受ける場合の必要凍土厚を鋼管包含と凍土単体について求める。一般に土の単位体積重量は1.5~2.0g/cm³程度なので、上記の荷重を地表面からの土圧と水圧の合計とすると、本試算条件は施工深度30~40mに相当し、凍結工法の施工実績が多い範囲である。また凍結管を鋼管内に設置するので、鋼管埋設間隔を凍結工法での凍結管埋設間隔としては一般的な0.8mとした。試算では鋼管と凍土それぞれについて、

- ・鋼管 圧縮、引張強度とも235.4MPa

- ・凍土 圧縮3.0MPa、引張1.8MPa、剪断1.5MPaを基準強度とし、安全率(基準強度/発生する応力)が凍土では2、鋼管では1を下回らないように凍土厚を算定する事とする。基準強度は、鋼管はパイプルーフ工法で用いられる短期許容応力度¹⁰⁾、凍土は地盤凍結工法における-10°Cの粘性土に関する強度計算値¹⁰⁾である。

試算結果は図-20に示すように、必要凍土厚は凍土単体での3.6mに対して、鋼管包含では2.1mとなった。両者の場合の部材の各箇所での最大応力及び○内に安全率を示すと、

- ・凍土単体:

圧縮0.85MPa(安全率3.53)、引張0.85MPa(2.12)

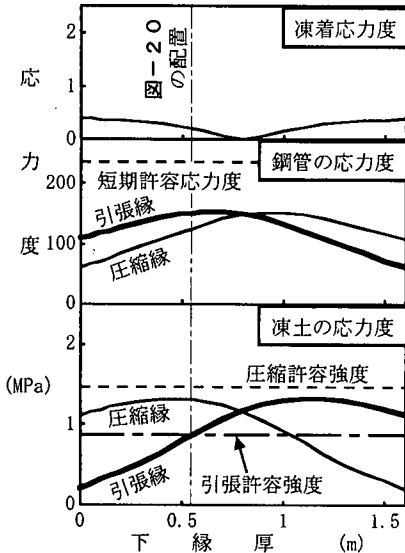


図-21 鋼管設置位置と応力度の関係

・鋼管包含：

凍土 圧縮 1.31MPa (2.29), 引張 0.85MPa (2.12)
 鋼管 圧縮 126.0MPa (1.87), 引張 149.2MPa (1.58)
 凍土と鋼管の凍着 0.20MPa

となり、安全率は全て設定条件を満足する。また、凍着応力は先行研究事例^{13),14),15)}や3章の押し抜き実験値よりもかなり低い。先に述べたように実験では荷重が増加して破壊荷重に近づくほど凍着応力が大きくなり凍着切れの可能性が大きくなるが、現場規模の検討では安全率を設定するので梁の破壊荷重は検討する荷重に対してかなり大きくなり、例えば図-20での梁の破壊荷重は2.16MPaである。したがって現場規模の検討では凍着切れの可能性は小さくなり、鋼管表面の溝のような凍着力を高める処理を施す必要性は少なくなると考えられる。

なお、凍土単体の場合には造成期間や凍土温度の維持の点から2列の凍結管列が必要であるが、鋼管包含の場合には鋼管内に設置される凍結管の位置が梁断面の引張側に片寄る為、造成凍土厚（凍結管の中心から均等に凍土が成長した場合に必要な凍土厚を確保できる時点での全凍土厚）は力学的に求めた必要凍土厚より若干多いが、凍結管列は1列で済む。

以上の試算結果から、鋼管包含での造成凍土厚は凍土単体の場合の64%程度、地山が鋼管に置換される事を考慮すると凍結土量では55%程度となり、本研究の主目的である凍結膨張対策に十分な効果があると考えられる。

(4) 鋼管の最適配置位置

2, 3章でも述べたように、力学的には最も弱いと考えられる梁の引張縁に接して鋼管を配置するのが有利と考えられる。一方、凍土は凍結管列の両側に同じ厚みが

造成される為に片側凍土を掘削する必要があり、鋼管内に設置された凍結管の位置は梁断面の中央部に近づく方が掘削量を減らす事ができる為、鋼管をある程度圧縮側に近づけて配置する事が望まれる。

そこで鋼管の最適配置位置を検討する為に、図-20の鋼管包含凍土梁で鋼管位置を必要凍土厚の範囲内で変化させて応力解析した。凍土、鋼管それぞれの圧縮、引張縁での応力を下縁厚（図-19参照）で整理したものを図-21に示す。梁引張縁での凍土の最大引張応力は鋼管が引張縁に接する（下縁厚が0）時に最小になり、鋼管を圧縮縁に近づけるほど増加するが途中で最大値を示し、以降は鋼管が圧縮縁に接する位置（下縁厚=必要厚-鋼管径）に至るまで減少する。凍土の最大圧縮応力は鋼管の位置が引張縁から圧縮縁に向かう途中までは増加して最大値以降は減少し、鋼管が圧縮縁に接する場合に最小となる。凍着応力は鋼管がいずれかの縁に接する場合に最大となり、鋼管が梁断面中央に配置される場合に最小となる。図-21に許容値も記入したが、凍土の最大圧縮応力及び鋼管の最大圧縮・引張応力は鋼管の位置に関わらず許容強度（=基準強度/安全率）を下回ることに対し、引張縁では図-20での位置よりも圧縮側に鋼管を配置すると引張応力が許容強度を上回る事から、構造的にはこれ以上圧縮縁に寄せる事はできないので、図-20の配置が最適であると言う事ができる。

6. まとめ

地盤凍結工法における凍結膨張対策として造成凍結土量を削減する事を目的に、鋼管包含による凍土の曲げ強度増加効果を調べる室内実験を行った。さらに、RC（鉄筋コンクリート）で確立されている限界状態設計法を基にRCとの相違を考慮して完全合成梁としての鋼管包含凍土梁の構造解析手法を導出し、考察を加えた。

以下に実験、解析から得られた結果を列挙する。

- 1) 支持スパン 30cm, 巾 10cm の鋼管 (φ17.3mm) 包含凍土梁の曲げ実験において、梁高さが2~10cmの範囲では、砂、粘土凍土の場合とも梁高さが低い場合には荷重～たわみ曲線にピーク荷重は現れず、梁高さが高くなるとピーク荷重が現れた。
- 2) 鋼管と凍土との凍着切れによる現象を実験により確認し、凍着切れ防止に必要な条件が把握できた。
- 3) 鋼管包含による強度増加効果を実験により確認し、その効果は砂よりも粘土の場合の方が大きかった事から、凍結膨張対策として有効である事を示した。
- 4) 荷重～たわみ曲線、破壊荷重などの実験値との比較から、導出した解析手法の妥当性を確認し、降伏・破壊の部位を明確にする事ができた。

5) 解析による演繹から鋼管包含梁の場合には凍土の圧縮強度で設計できる可能性のある事、強度増加効果は2倍以上を確保できる事、現場規模での凍土厚削減効果を期待できる事が分かった。

謝辞：本研究の遂行にあたり、有益な助言を頂いた鉄建建設(株)粕谷太郎氏、大阪大学大野義照教授、(株)精研の関係各位に対して感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 山向 薫, 可川清人, 小林 進: 変位吸収孔による凍結膨張変位抑制効果, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.1929-1930, 1998.
- 2) 山向 薫, 可川清人, 仁田政孝: ブライン温度制御による凍土成長抑制効果, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第3部(B), pp.780-781, 1998.
- 3) 生頼孝博, 山本英夫, 岡本 純, 伊豆田久雄: セメント混合による土の凍上及び解凍沈下抑制に関する実験的研究, 雪氷, Vol.46, No.4, pp.189~197, 1984.
- 4) 石川 徹, 石津政男, 溝淵教明: 鋼管圧入と凍結で河底を抜く—都営地下鉄芝園橋一, トンネルと地下, 第3巻, 第2号, pp.49, 1970.
- 5) Sweanum Soo, Robert K. Wen and Orlando B. Andersland: Flexural behavior of frozen soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, pp.355-361, 1986.
- 6) 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, 31-4, pp.13-18, 1983.

- 7) 伊豆田久雄, 生頼孝博, 山本英夫: 凍土の曲げ条件下における変形挙動と強度特性, 雪氷, Vol.50, No.1, pp.25-32, 1987.
- 8) 土木学会編: コンクリート標準示方書・規準編, pp.264, 1997.
- 9) 土木学会編: コンクリート標準示方書・設計編, 1997.
- 10) 湯浅亀一: 材料力学・上巻, コロナ社, 1954.
- 11) 土質工学会編: 土の凍結—その理論と実際—, pp.55, 1994.
- 12) 上田保司, 松岡啓次, 伊豆田久雄, 小林 進: 表面溝切り鋼管による凍着力の増加効果について, 日本雪氷学会講演予稿集, pp.45, 1995.
- 13) 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.
- 14) 大浦浩文, 薄木治之, 高田雄二: 土の凍着力について, 低温科学物理篇, 第19輯, pp.215-221, 1960.
- 15) Parameswaran, V. R.: Laboratory studies of the adfreeze bond between small-scale model piles and frozen sand, *3rd Permafrost*, Vol.1, pp.715-720, 1978.
- 16) 高志 勤, 生頼孝博, 山本英夫, 岡本 純: 砂凍土の一軸圧縮強さに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.302, pp.79-88, 1980.
- 17) 高志 勤, 生頼孝博, 山本英夫, 岡本 純: 均質な粘土凍土の一軸圧縮強さに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.315, pp.83-93, 1981.
- 18) 斉藤重治: パイプルーフ工法・地盤, 理工図書, pp.58-61, 1982.
- 19) 日本建設機械化協会編: 地盤凍結工法—計画・設計から施工まで—, pp.39, 1982.

(2000. 8. 21 受付)

IMPROVEMENT OF BENDING STRENGTH OF FROZEN SOIL BEAM REINFORCED BY STEEL PIPE

Yasushi UEDA, Takahiro OHRAI and Minoru YAMAMOTO

The authors performed laboratory tests for bending characteristics of frozen soil column with rectangular section whose tension side is reinforced by steel pipe. The tests showed an increasing tendency of the bending strength when reinforced. An analytical procedure is developed for the steel pipe reinforced frozen soil column as a composite material. The computed results show rather good comparisons with the relation of load vs. deflection as well bending stress at failure obtained by laboratory test if the frozen bond between the steel pipe and the soil does not break. The computed stress at the breakage of the bond under bending test is also coincident with the adhesive strength obtained by laboratory test. The authors applied the analysis to estimate a site scale condition and estimated how much soil volume to be frozen can be reduced if the steel pipe reinforced frozen column is used.