



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	鋼管に作用する凍着凍上力抑制法に関する実験
Author(s)	福田, 正己; FUKUDA, Masami; 木下, 誠一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 45, 109-120
Issue Date	1987-03-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18541">https://hdl.handle.net/2115/18541</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	45_p109-120.pdf



## 鋼管に作用する凍着凍上力抑制法に関する実験\*

福田正己・木下誠一

(低温科学研究所)

中川茂\*\*

(日本鋼管 中央研究所)

(昭和61年10月受理)

### I. 緒言

寒冷地では、凍土および表層部の凍結融解層（活動層）の存在に起因して種々の問題が生ずる。その中でも重要なものの一つに、凍上性が強い地盤に設置された杭、柱、管等が、凍結融解層の凍上を受けて持ち上げられる凍着凍上問題がある。杭を例にとると、凍結融解層より下の根入れ部における抵抗力が弱い場合、杭は凍上による凍着凍上力を受けて引抜かれ、基礎としての支持力を失ってしまう。

現状では、根入れ長を十分長く取る、地盤と杭の隙間に流動体を充填する、管の継手部で変形を吸収できるようにする、凍結融解層を非凍上性材料に置き換えるなどの対策が取られているが、いくつかの問題点が指摘されている。

凍着凍上力の大きさは地盤の凍結深さと凍上速度に依存する<sup>1)</sup>が、管の表面状態に非常に影響される<sup>2,3)</sup>。そこで今回、管表面に設けた被覆によって凍着凍上力低減を計る方法を検討した。

最初に室内模型実験により各種被覆の凍上力低減効果を確認した。その中から結果の良好であった被覆を選んで、野外実験により自然条件における有効性を検討した。そしてこの結果を、同じ野外実験において周辺地盤をソイルセメントとして処理した場合の凍上量の低下、凍着凍上力の抑制<sup>4)</sup>と比較した。

その結果、凍着凍上力の低減法としては周辺地盤のセメント混合処理よりも、鋼管表面に被覆を設けた方がはるかに有効であることがわかった。

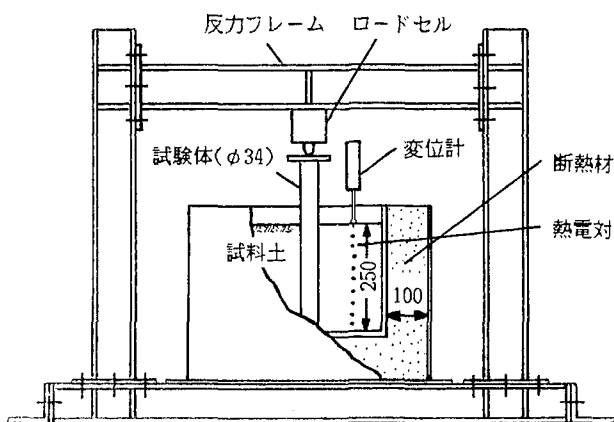
### II. 室内模型実験

#### 1. 試験体

試験体としては、外径 34 mm、長さ 400 mm の鋼管、および同じ鋼管に被覆処理を施したものを使用した（ただし、試験体 B は外径 27.3 mm）。試験体と被覆の種類をまとめて第 1 表に示す。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 2908 号

\*\* 昭和 61 年度低温科学研究所研究生



第1図 室内実験装置

第1表 室内実験試験体

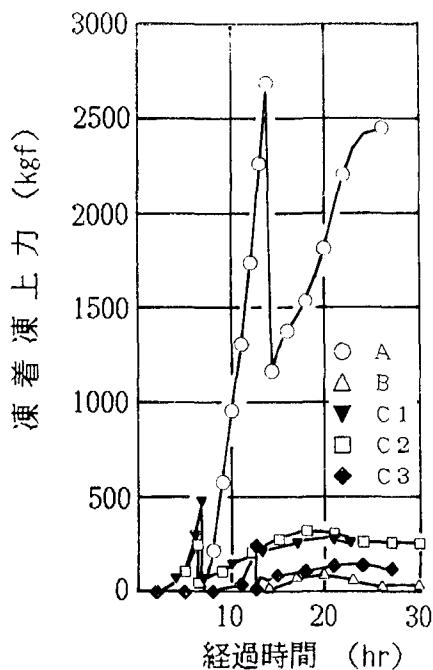
試験体	被覆の種類
A	未処理鋼管
B	ベローズ被覆 (ポリエチレン) 鋼管
C <sub>1</sub>	プラスチック (soft type) 被覆鋼管
C <sub>2</sub>	プラスチック (hard type) 被覆鋼管
C <sub>3</sub>	プラスチック (soft type) 被覆鋼管

ベローズ被覆は周囲地盤の凍上をベローズの伸縮能力によって吸収しようとしたもので、ベローズの材質、形状をうまく選定すれば凍着凍上力は大幅に低減される。プラスチック被覆は被覆した部分の鋼管表面を滑り易くし、凍土と鋼管表面間の凍着強度を被覆によって小さくしようとするものである。その効果は被覆の硬さ、摩擦係数、耐久性などに左右される。

## 2. 実験方法

実験装置を第1図に示す。土槽 (内径 350 mm, 高さ 300 mm, 断熱材厚 100 mm) 内に鉛直に埋め込んだ試験体の周囲に、含水比 75% に調整したシルト質土を突き固めながら充填する。土槽は側面および底部を厚さ 10 cm の断熱材に囲まれている。この土槽を低温槽内の反力フレームにセットし、低温槽の温度を  $-40^{\circ}\text{C}$  とする。土は上面からだけ冷却されてゆく。模型地盤が上面から底まで全層凍結するまでの間、模型地盤の凍結凍上にともなって試験体に作用する凍上力、凍上量を、ロードセル、変位計により計測した。

実験では、被覆が長期間地盤の凍結融解の繰返しを受けた場合、初期の性能を保持するこ



第2図 凍着凍上力の経時変化 (室内実験1回目の結果)

とができるかどうかを確かめるため、同一試験体で15回以上凍結融解を経験させた。1回の凍結融解を野外における1年に相当すると考えれば、実験終了時は15年目ということとなる。

### 3. 実験結果と考察

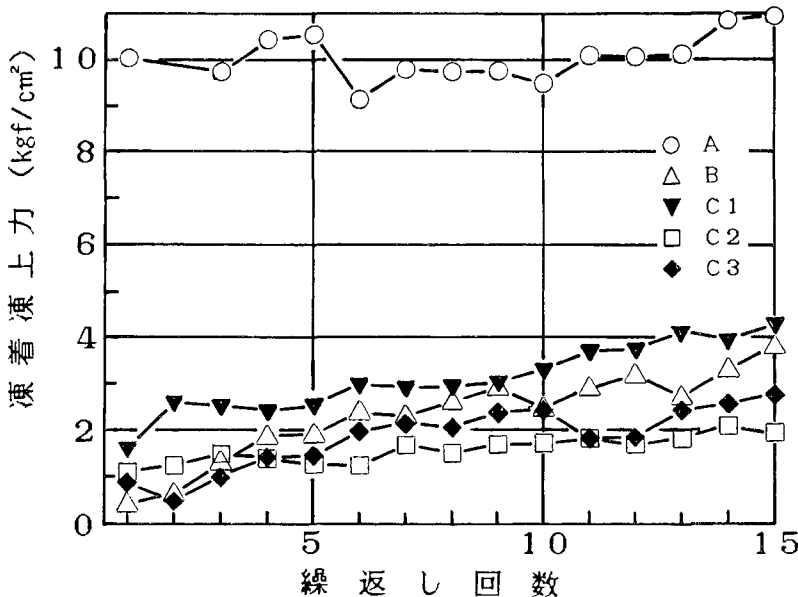
各試験体の実験1回目における凍着凍上力発生状況を第2図に示す。ペローズ(第2図のB)のような可伸縮性材料の装着、あるいはプラスチック(第2図のC<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>)を被覆する方法によって、作用する凍着凍上力は通常の鋼管と比較して10%から20%に低減されていることがわかる。

土槽内に埋込んだCC熱電対の計測結果からみると、模型地盤全層は実験開始後約1日で凍結を完了する。凍着凍上力は地盤の凍結(凍上)が進行する間増加を続け、凍結完了時に最大値を示す。図ではAのように凍結途中で最大凍上力を示してから急に減少する場合もあるが、これは1回目の実験ということで管表面が滑り易かったこと、および地盤と杭とのかみ合いが緩かったこと等のためと考えられる。試験繰返し数が増えると、全ての場合で凍結完了時に最大凍上力が発生する。

第3図は凍結融解の繰返し回数とそれぞれの回における試験体の最大凍着凍上力との関係を示したものである。最大凍上力を地盤内に埋込まれた試験体表面積で割り、単位表面積当りの値として、実験の繰返し回数に対してプロットした。図から次の事がわかる。

(1) 15回繰返し後の値で比較して、被覆した全ての試験体(B, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>)で凍上力は被覆しない鋼管(A)の値の50%以下に低減される。特にC<sub>2</sub>試験体では20%以下であり効果が大きい。

(2) A以外の被覆した全ての試験体において、繰返し数の増加とともに凍上力が増加する。この増加の程度は、被覆の材質によってかなり異なる。



第3図 繰り返し実験結果 (各試験体に15回の凍結融解の繰返しを加えた場合)

(3) Bのベローズ被覆では特に増加の傾向が大きく、1回目と15回目で凍上力は約9倍に増えている。これは凍結時に伸ばされた地盤内のベローズが、融解時に元の形状に戻らずひずみが蓄積され、凍結融解の繰返しとともにその効果を失ってゆくためと考えられる。

プラスチック被覆 ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) では、低減効果が被覆の材質 (低温時における硬さ、摩擦係数、水のはじき易さ等) によって異なる。ここで被覆の硬さを例にとると、良好な低減効果を得るためには  $0^\circ\text{C}$  以下の温度で硬い材料 ( $C_2$ ) が良い。被覆の硬さが柔らかい材料 ( $C_1$ ,  $C_3$ ) の場合には、周囲地盤の凍上によって被覆表面に傷がつき大きな凍上力を示す。さらにこれが永続的に使用されて地盤の凍結融解の繰返しを受けると、表面の傷の進展によって効果が低下することが考えられる。

以上室内実験の結果からは、被覆の材質が硬く、地盤の凍結融解の繰返しに対して強い  $C_2$  タイプのプラスチック被覆が凍上力低減法として最適であり、永続的に凍着凍上力低減効果が持続するものと判断される。次に、野外での実際の温度条件、凍結条件のもとにおける各被覆の効果を確認するため、野外実験を行なった。

### III. 野 外 実 験

野外実験は北海道・苫小牧の低温科学研究所凍上観測現場で行われた。ここの凍結指数は約  $700^\circ\text{C}\cdot\text{days}$  である。

大きさ  $5\times 5\times 2\text{ m}$  の防水コンクリート土槽内に、凍上性の著しい苫小牧シルト (恵庭火山灰) が充填されている。ここ10年間の平均の最大凍結深は約  $60\text{ cm}$  で最大凍上量は  $25\text{ cm}$  である。そして、土槽内の温度分布、凍上量、地下水位変化、及び中性子水分計による含水率分布が連続計測される。

凍着凍上力を抑制する方法としては、室内実験において検証された鋼管自身に表面被覆を施す方法があるが、その他に、周辺地盤を処理して凍上量を低下させる方法も考えられる。野外実験では、地盤をセメント混合処理して凍上量を低下させる方法も用いた。これら2つの低減法の有効性を比較検討した。

#### 1. セメント混合による抑制法

##### 1.1 実験方法

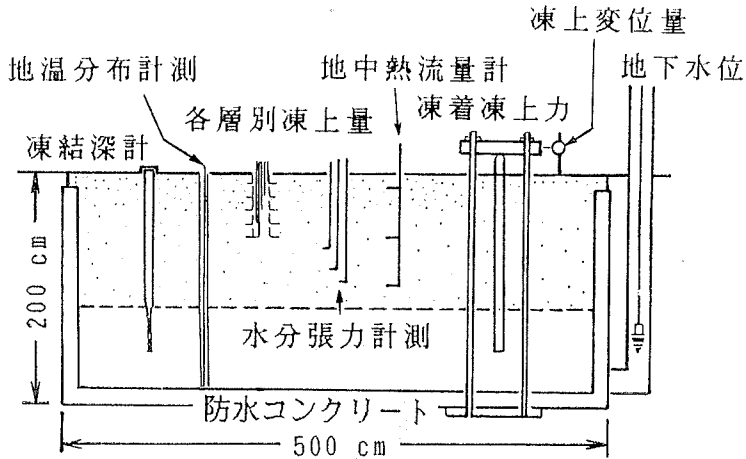
苫小牧には2つの試験土槽があるが、その内の1つに深さ  $60\text{ cm}$  まで早強性セメントを混合した。セメントの混合比は  $10\%$  である。

実験装置を第4図に示す。凍上力を計測する試験体は外径  $2\text{ inch}$  の鋼管である。これが凍着凍上でせり上がるのを反力フレームで押え込み、試験体と反力フレームの間においたロードセルで凍着凍上力を測定した。なおこの実験では、プール底にアンカーされた直径  $3\text{ cm}$  の鉄ロッド2本の間にL形鋼を置き反力フレームとした (第5図)。

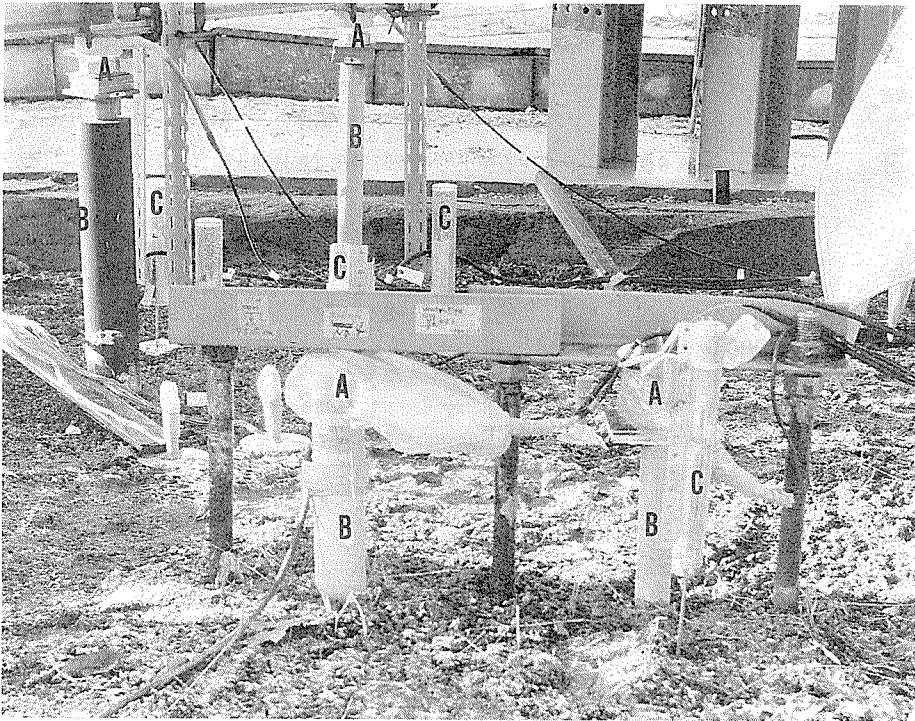
##### 1.2 実験結果と考察

土をセメント処理していない場合に得られた鋼管の凍着凍上力の経時変化を第6図に示す。発生する力については、すでに次の実験式が得られている<sup>5)</sup>。

$$P = P_0 a' \exp(b't) (a \sqrt{t})^2 \quad (1)$$



第4図 野外実験装置 (セメント混合の場合)



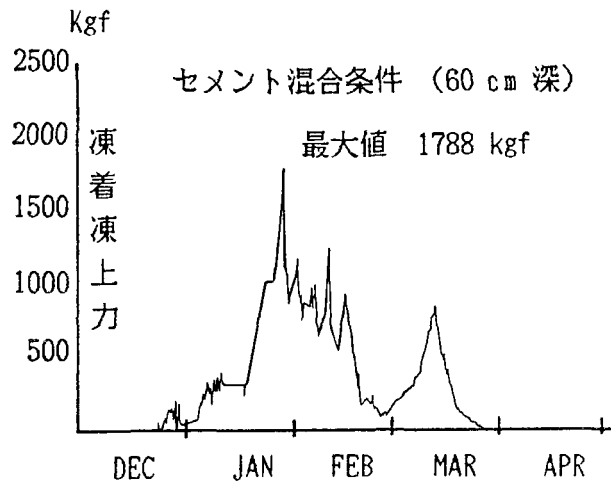
第5図 野外実験装置 (A: ロードセル, B: 試験鋼管, C: 変位計)

ここで、 $a'$ ,  $b'$ ,  $a$ ,  $\varepsilon$ は土質と冷却の条件にかかわる係数であり、 $t$ は経過時間(日)である。この式は次式から導き出されたものである。

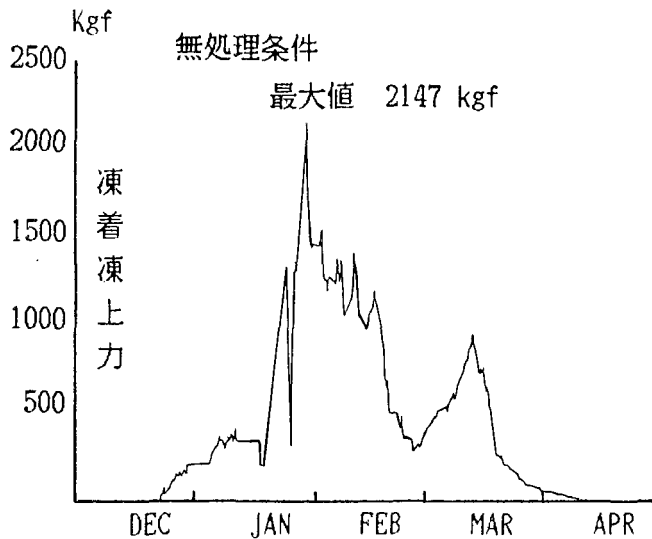
$$P = P_0 \cdot (dh/dt) \cdot D^{\varepsilon} \quad (2)$$

$P_0$ は管の表面状態にかかわる係数、 $dh/dt$ は凍上速度 (mm/day)、 $D$ は凍結深さ (cm)、 $\varepsilon$ は2~3の間の係数である。

この式によれば、発生する力は1月下旬から2月上旬に最大になることが予想される。図のように、発生する力は外気温の変動に影響されて小刻みに変動しているが、最大凍上力は1月下旬に2147 kgfが記録された。この時、鋼管表面には約1.9 kgf/cm<sup>2</sup>のせん断力が作用していることになる。



第6図 鋼管の凍着凍上力の経時変化(無処理土)



第7図 鋼管の凍着凍上力の経時変化(セメント混合土)

第2表 セメント混合による凍上抑制効果

	凍結深 (cm)	凍上量 (cm)	凍上率 (%)
無処理	48.7	15.1	31.0
セメント混合	53.6	11.1	20.7

次にセメント混合した場合の結果を第7図に示す。第6図と比較すると、変動の状態は類似しており、最大値の発生時期も一致している。そして最大値は1788 kgfと無処理に比べておよそ16%減少した。

セメント混合による凍上抑制効果を第2表に示す。凍上率で比べると、セメント混合処理で約33%の低減効果が生じているが、凍着凍上力では低減効果はその半分程度であり、凍上量の抑制よりもさらに効果は少ないことがわかる。これは凍上力の方は(2)式に示すように、凍上速度と凍結深さに関連する量であるため、セメント混合によって凍結深さが大きくなることに起因する。

## 2. 被覆による抑制法

### 2.1 試験体

試験体としては、外径60.5 mm、長さ2500 mmの鋼管、および同じ鋼管に被覆処理を施したものを使用した。試験体を第3表に示す。試験体に対応する被覆の種類は室内実験の場合と同じであるが、野外ではこれにヒートパイプを追加した。

### 2.2 実験方法

実験装置を第8図に示す。凍上観測土槽周囲に基礎を固定して設置した反力フレームにより、土槽内に鉛直に埋込んだ試験体頭部を拘束し、地盤の凍結凍上と共に杭に発生する凍着凍上力をロードセルを用いて計測した。同時に凍上量を変位計で、凍結深さを凍結深度棒で計測した。鋼管とヒートパイプについては、別の土槽においてCC熱電対により温度分布を計測した。

### 2.3 実験結果と考察

第9図は、試験体を埋込んだ土槽地盤の凍上量と凍結深の経時変化を示したものである。図のように、最大凍上量は約25 cm、最大凍結深は約52 cmであり、凍上率50%と非常に大きな凍上性を示した。

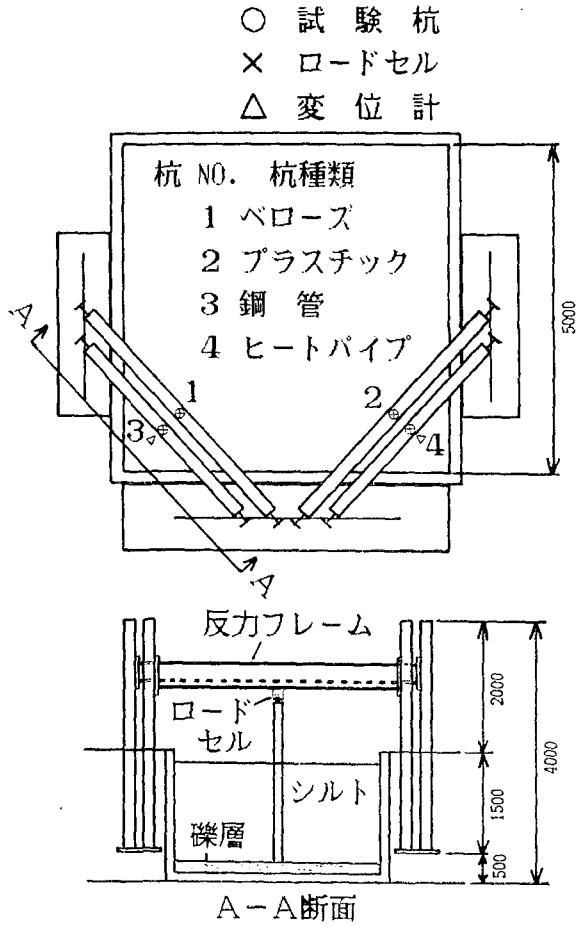
第10図～第13図は実験から得られた凍着凍上力の経時変化を示したものである。1節で得られた結果と同様に、発生する力は外気温の変動に影響されて小刻みに変動している。

第10図は鋼管の場合である。1月中旬から下旬にかけて、2500 kgfの最大凍上力が発生している。

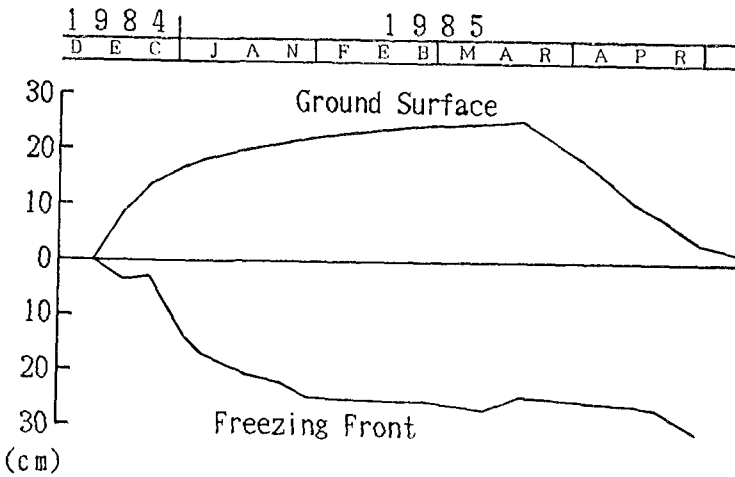
第11図はヒートパイプである。凍上力の発生傾向は鋼管と良く似ている。最大凍上力は、3400 kgfと鋼管の1.4倍の大きさであった。この理由は、ヒートパイプが熱の良導体であり、鋼管よりも冷熱伝達能力がはるかに大きいことによる。すなわち、気温が低下するとヒートパイプ周囲地盤の温度は埋込み部全体に渡って均一に低下し、凍結範囲も15～20%増加した。またヒートパイプと凍土間の凍着強度が表面温度の低下で鋼管の場合よりも増大する。これが凍着凍上力増加の原因となるものと考えられる。

第3表 野外実験試験体(被覆鋼管の場合)

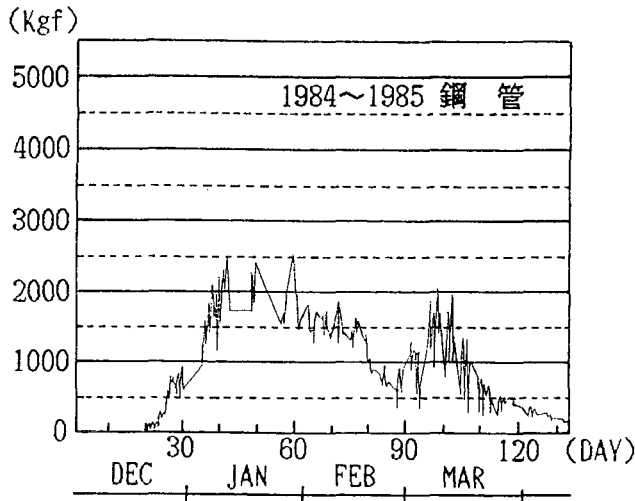
試験体	被覆の種類
A	未処理鋼管
B	ペローズ被覆(ポリエチレン)鋼管
C <sub>2</sub>	プラスチック(hard type)被覆鋼管
D	ヒートパイプ



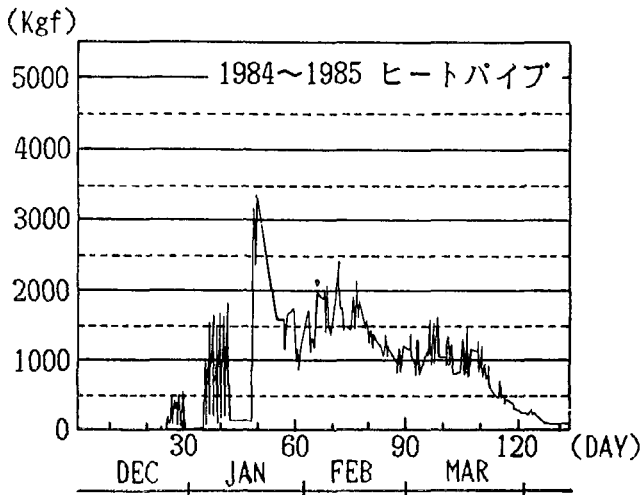
第8図 野外実験装置 (被覆鋼管の場合)



第9図 凍上量・凍結深の経時変化



第10図 凍着凍上力の経時変化(鋼管表面無処理)

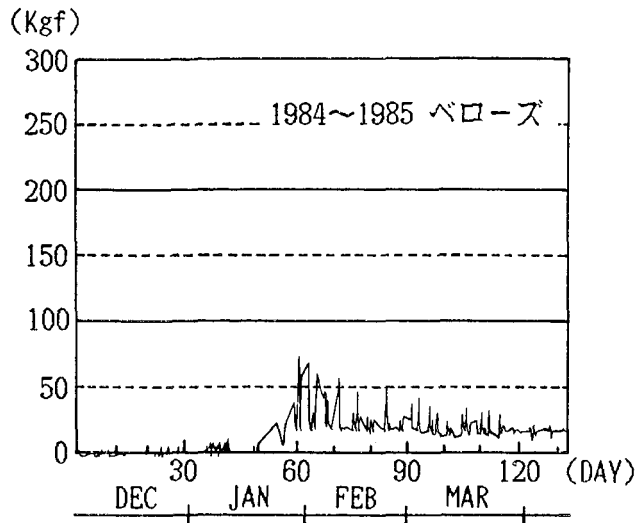


第11図 凍着凍上力の経時変化(ヒートパイプ付き鋼管表面無処理)

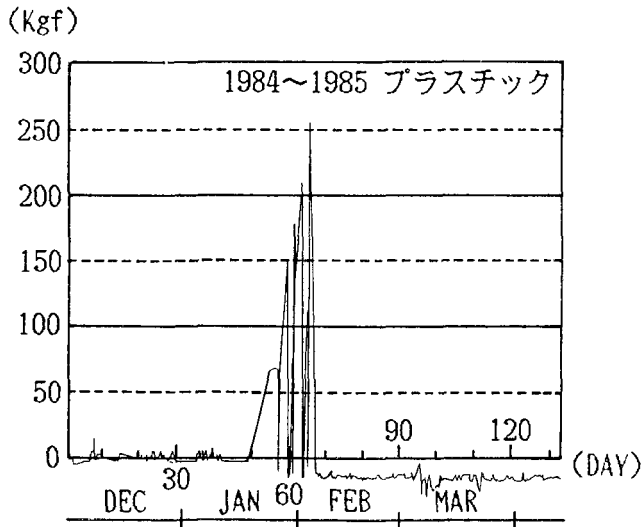
第12図、第13図は、鋼管表面の被覆によって凍上力低減を計った凍上力低減鋼管の結果である。鋼管と比べて発生する力も小さいし、変動傾向も異なる。

第12図はペローズの場合である。地盤の凍上量の増加に対応するように、1月下旬から凍上力が発生し始める。最大凍上力は80 kgfであり、鋼管の約1/30以下であった。またペローズでは最大値から凍上力が低下したのち地盤が全層凍結している間は、20~30 kgfの凍上力が常に試験体に作用していることがわかる。

第13図はプラスチック被覆C<sub>2</sub>の場合である。鋼管と同様の時期に凍上力が作用し始め、1月下旬から2月上旬に最大値に達するが、力は最大値発生直後にほぼ0になる。これは管表面での凍着力がなくなることを意味する。つまり最大値までは、凍土が管をかんでいたが、臨界値を越えると表面での滑りのために凍上力が生じなくなるものと考えられる。被覆された管



第12図 凍着凍上力の経時変化 (ベローズ被覆)



第13図 凍着凍上力の経時変化 (プラスチック被覆)

表面と凍土の静摩擦力の臨界値が最大凍着凍上力に一致する。最大凍上力は 270 kgf であり、鋼管の約 1/10 の大きさであった。

以上のように、被覆を設けた鋼管の凍上力低減効果は室内実験と同様に顕著であることが確認された。また鋼管の凍上力に対する各被覆鋼管の凍上力低減割合は、室内実験における 1 回目の凍結融解で現われた低減割合とほぼ一致しており、各被覆を現地に適用した場合の効果は、室内の凍結融解繰返し実験により推定できるものと考えられる。

#### IV. 結 論

室内実験および野外実験の結果から判断すると、凍着凍上力の低減法としては周辺地盤のセメント混合処理よりも、鋼管表面に被覆を設けた方が有効であることがわかった。

前述したように、管の凍着凍上力には、周辺地盤の凍上速度、凍結深さといった外的要因と、管の表面状態という内的要因がかかわっている。

今回の野外実験では、セメント混合処理によって外的要因を除去し、発生する凍上力を低下させることを試みた。しかし実際には、凍上率自身もあまり減少せず、凍上力は低下しなかった。

一方、管表面にプラスチック被覆を施した鋼管では、凍上力は1/10まで減少した。また室内実験から、被覆のプラスチックの材質を適切に選定すれば、地盤の凍結融解の繰返しに対して永続的に凍着凍上力低減効果が持続することもわかった。

以上のように、鋼管の凍着凍上力抑制法の有効性は、外的要因よりも内的要因に強く依存しており、管表面のプラスチック被覆処理による低摩擦化が、凍着凍上力低減に最も妥当な方法の一つであることがわかった。

#### 文 献

- 1) 福田正己・木下誠一 1984 パイプにかかる凍着凍上力の冬期間変化について. 低温科学, 物理篇, **43**, 185-187.
- 2) 木下誠一・犬野武敏 1963 凍上力 I. 低温科学, 物理篇, **21**, 117-139.
- 3) 木下誠一・犬野武敏・小黒 貢 1966 凍上力 II. 低温科学, 物理篇, **24**, 285-295.
- 4) 福田正己・木下誠一・生頼孝博・山本英夫・伊豆田久雄 1986 セメント混合による凍上抑制に関する室内及び野外実験. 土の凍結に関するシンポジウム, 99-104.
- 5) M. Fukuda and S. Kinoshita 1985 Field prediction of the uplift force to conduits due to frost heaving. Fourth International Symposium on Ground Freezing, Vol. **2**, 135-139.

#### Summary

Laboratory and field experiments of frost heaving specially related to the uplift force on the pipes were conducted by the present authors. The test steel pipes were buried in frost susceptible soil layers and were subjected to severe frost heaving force while soil was frozen. The pipes were forced to lift up. However, the overlaid structural steel angle above the pipes constrained the uplift movement of them. The reactive force was measured by the load cell placed between the pipes and overlaid steel angle. In an effort to reduce the uplift force, two methods were experimented.

As the first method, a frost susceptible soil in the test site was treated by mixing with a cement to serve as a non-frost susceptible soil. Then, test pipes were buried in it to measure uplift force and the results were compared with measured values in a non-treated soil.

As the second method, the surface of steel pipes was coated with a plastic film made of low adhesive material. These surface coated pipes were buried in a non-treated soil. Then, the uplift force acting on them was measured. The results of measurements indicated that

the uplift force acting on the plastic coated pipes reduced to the level of less than 10% of the non-treated pipes. In this method a soil treated as non-frost susceptible showed no remarkable reducing effects. Plastic coating of steel pipes is recommended as one of the methods of reducing uplift force on the pipes by frost heaving.