

基礎杭利用による地熱融雪法の 設計施工運転と数値シミュレーション

宮本重信¹・竹内正紀²・木村照夫³

¹正会員 福井県雪対策・建設技術研究所 (〒918-8108 福井県福井市春日3丁目303)

²工博 福井大学教授 工学部機械工学科 (〒910-0017 福井県福井市文京3丁目9の1)

³工博 京都工芸繊維大学教授 大学院工芸科学研究科 (〒601-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

建物の基礎杭を地熱の集熱に兼用する安価な地熱融雪システムを開発してきた。福井県内の駐車場など3カ所で施工され、その一つはすでに5シーズン運転され、有益な知見が得られた。周囲が最大積雪66cmの際にも、放熱管が埋設されたその融雪路面は6cmほどの残雪にとどまった。杭から得られた熱量の実測値などは、シーズン通じて、数値シミュレーションの結果とほぼ一致した。また、気象台のデータに基づく豪雪時の数値シミュレーションによって、有名な56豪雪でも融雪能力が持続することが分かった。融雪の際の杭の温度変化にともなう杭の変位と応力については、その最大値が計算された。

Key Words : snow-melting system, building pile, geothermal energy, thermal stress numerical simulation

1. はじめに

スイスなどでは、地球環境保全のため、地熱を利用した空調が実用化されている¹⁾。また、国内の雪国でも、地熱を利用した融雪が試みられている²⁾。これらは、維持費は安価だが、地熱を回収するための熱交換杭とヒートポンプの施工費が高い。

こうした中で、筆者らは、構造物の基礎杭を熱交換器に兼用することによる安価な地熱融雪システムを開発してきた³⁾。0℃の雪を溶かす融雪なら、放熱部での熱抵抗を少なくすれば、回収した地熱の温度が低くてもそのまま使えて、ヒートポンプなしで建設費も電気代も安価にできると考えた。そのシステムの構成は、図-1に示すように、道路や駐車場などの融雪舗装面に埋設した放熱管と基礎杭の中空部を管路でつなぎ、その内部に水などの熱媒体を注入し、管路の途中には循環ポンプを設置したものである。融雪路面上に雪が積もっている時は、その積雪を感知するセンサーからの信号で循環ポンプが運転される。杭頭部の熱媒体は路面内の放熱管に送られ、路面上の雪を溶かす。放熱後の熱媒体は、杭の中の細い管を通り杭底に送られる。杭底部で管から出た熱媒体は、杭の中空部をゆっくり上昇し杭頭部に流れ、その間に杭壁や周囲の地盤から熱を回収する。

1991年1月に、杭2本と融雪面積20㎡規模の本融雪システムで融雪実験を行った。約23時間の融雪運転

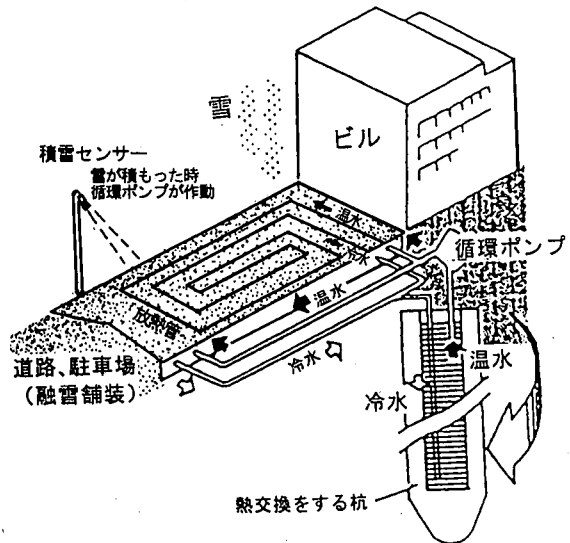


図-1 融雪システムの概念図

とその後72時間の回復時における熱移動などについて、数値シミュレーションを行い、実測との一致を確認した⁴⁾。また、この実験から、このシステムが自然状態で最大積雪深60cmになるような降雪でもほぼ無積雪を保てるほどの融雪能力を持つことが分かった。そこで、1991年5月から福井県職員住宅駐車場400㎡の試験工事に着工し、1993年1月から供用開始した。以後今日まで、周辺で積雪66cmを記録した際にも、6cm程度の積雪にとどまり、その融雪能力が確認された。その後、本融雪システムは、民

表-1 本融雪システムの事例概要

融雪対象	福井県立大学職員住宅駐車場 400㎡
熱交換使用杭	48本(設計施工)45本(実際の使用)
PHC 杭	長さ35m, 外径400mm
構造物設計内径	290mm(実際: 270mm)
杭1本当り融雪負荷	8.3㎡/本(設計施工) 8.9㎡/本(実際の使用)
循環ポンプ	2.2kW 循環水量240L/min 設計揚程30m
地盤の自然状態での平均温度	15.8℃

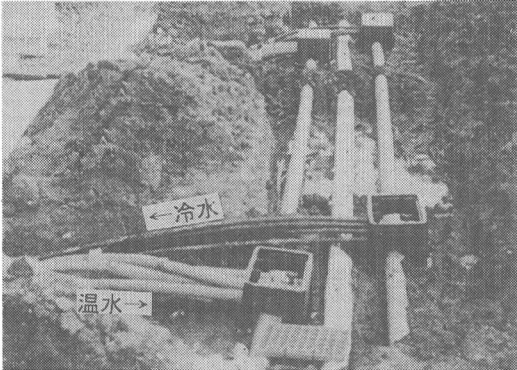


写真-1 杭からのポリエチレン管とヘッダー管

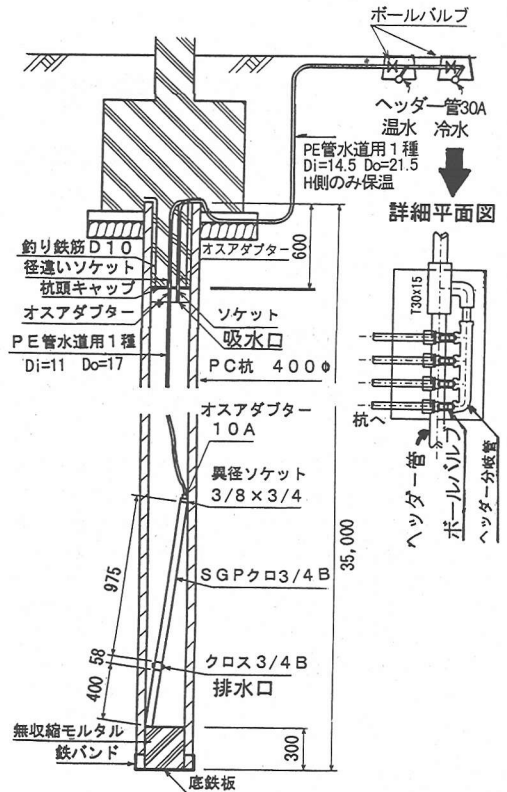


図-2 杭内部と杭周辺の配管図

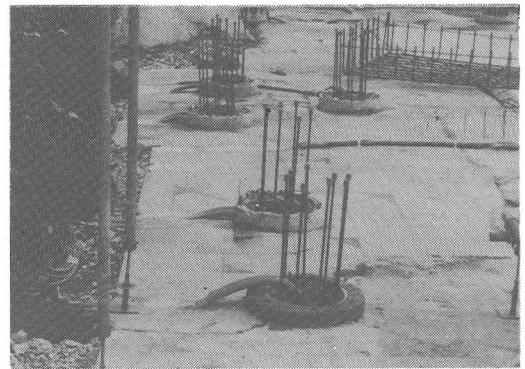


写真-2 建物下の配管

間の駐車場に導入され1996年12月から運転され、1997年12月には福井県立音楽堂の歩道にも運転される。

一連の施工から、本融雪システムの建設費は、他の地熱利用融雪システムの約1/4で⁵⁾、電気ヒーターやボイラーの融雪とほぼ等しいことが分かった。

しかし、このシステムは、低温熱源での融雪で、かつ杭内水温や地温の変化で融雪能力が変化することに加え、構造物の杭を兼用利用することから、①杭からの漏水、杭との配管、建物下の配管などの設計施工 ②杭の形状や地盤の条件に対応した現場ごとの融雪能力の評価 ③杭壁の温度変化にともなう杭頭変位と杭壁の応力の発生などに特別な配慮が必要とされる。

本稿では、①上記の3例の設計・施工・運転から得られた知見 ②1シーズンの融雪での数値シミュレーション結果の実測による検証 ③過去の豪雪に対する本融雪システムの適用予測 ④杭に温度変化が生じることでの応力・変位についての実測と数値シミュレーションの4点について述べる。

2. 設計・施工・運転の事例

本融雪システムを福井市内で試験的に施工した福

井県立職員住宅駐車場の概要を表-1に示す。これを主な事例にして、設計・施工・運転で得られた知見を以下に示す。

(1)採熱部(杭とその周辺)

各杭からの流入と流出の2本ずつの管は、建物の周囲に設けたヘッダー管に接続した(写真-1, 図-2)。その接続箇所には、ボールバルブを設けた。このバルブは、漏水杭の発見に有用で、漏水杭につ



写真-3 杭内部への配管

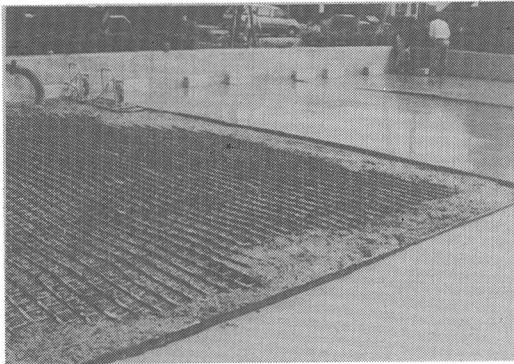


写真-4 放熱管の配管とコンクリート舗装の施工

ながるバルブを閉栓することで、システム全体の破綻は回避された⁹⁾。

杭は、打撃工法で施工されたが、打撃途中に無収縮モルタルを投入し、杭底に厚さ30cmのモルタル層をつくり、漏水防止対策にした(図-2)。しかし、48本中3本は、漏水が著しくて利用できないことが、竣工後の注水で分かった。残り45本については、全部で年間1m³の漏水が生じた。これは、主に杭の底部と杭頭部からの漏水であると推測された。県立音楽堂の施工では、無収縮モルタルの杭底への投入は行わず、杭打設後に杭中空部を満水にし、漏水がほとんどない杭を選んで配管した。なお、杭周囲がセメントミルクで覆われるプレボーリング杭を用いた最初の実験施工³⁾では、水漏れは生じなかった。

各杭からヘッダー管までの建物下の流入と流出の管は、その内部に空気だまりが生じないようにできるだけ凹凸とならない配管とした。写真-2に、その施工状況を示す。

杭の中空部と外部との配管の接続は、杭頭キャップに開けられた穴を通して行った(写真-3、図-2)。配管は、必要に応じて鞘管の中を通し、管の保護と戻り管・送り管の識別に用いた。また、杭内部の配

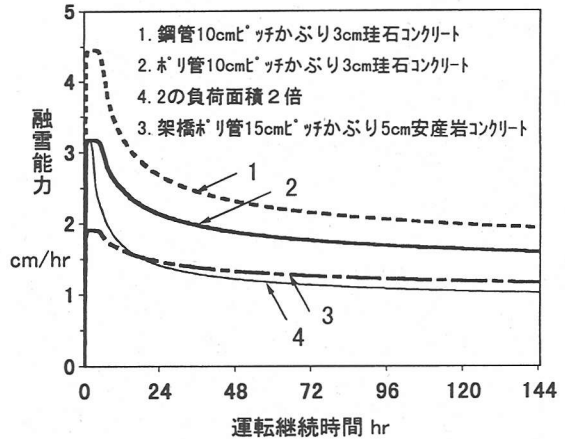


図-3 融雪部条件と融雪能力

管(ポリエチレン水道1種管)の直径は、市販の最小のもの(内径11mm)を用いた。これによって、各杭のどれも同じ長さである杭内の鉛直配管の水頭損失が大きくなり、杭頭部からヘッダー管までの配管(内径13mm)長が杭の位置によって異なることによる杭ごとの流量のバラツキは小さくなった。杭から建物周囲のヘッダー管までの水平配管長が杭によって著しく異なる県立音楽堂では、各杭ごとに定流量バルブを取り付けた。

(2)融雪部(駐車場)

融雪部では、流水(熱媒体)から積雪までの熱抵抗が大きいと時間当たりの融雪能力が低下する。後述する数値シミュレーションモデルを用いて、表-1の条件で、融雪部の違いによる融雪能力への影響を6日間(144時間)の連続融雪運転で試算した。図-3はその結果である。

これまでの研究で、本融雪能力は、杭内部に貯留された水が一巡するまでは一定で、その後急速に低下し、やがて、融雪などで使われる熱量と杭内部の水が杭壁や地盤から回収する熱量とが等しくなり、ほとんど低下しなくなることが分かっている¹⁾。図-3でも、そのことが示されている。

図-3で、1.の鋼管を10cm間隔、そのかぶりを3cmにして珪石骨材のコンクリート舗装(熱伝導率2.5W/mK)に埋設した融雪部の融雪能力は、最初の杭内水温が15.8℃の際には4.5cm/hr、144hr連続運転後も2cm/hrを維持している。しかし、ボイラー加熱温水循環で代表的な3.の架橋ポリエチレン管15cm間隔、かぶり5cm、安山岩骨材の舗装(熱伝導率1.5W/mK)のものでは、最初でも2cm/hrの能力が得られない。このように、低温水利用の融雪で

は、流水(熱媒体)から積雪までの熱抵抗を小さくすることが大切である。

この現場では、施工性なども考慮し、2.のポリエチレン管を10cm 間隔、かぶり3cm、珪石骨材のコンクリート舗装にした。この場合の融雪能力は、3.2~1.7cm/hr で、福井市内で一般に使われている2cm/hr にほぼ対応する。

ここで、この2.の融雪部の条件は変えずに、杭1本当たりの融雪面積を2倍にする例を図-3に4.として示した。この場合の融雪能力は、管路内の水が1巡するまでは水温は変わらないので、元の2.と同じであるが、1巡後は急激に下がり、その後一定値に収斂し、144時間後では元の2.の能力の64%になる。このことから、融雪部の設計は、杭本数などの採熱部の条件をも考慮して決められるべきであることが分かる。

放熱管のかぶりについては、約5cm 以下にしないと、路面が雪で白くなってから運転開始となる積雪センサー運転では、融雪のスタートが遅れて実用的でなくなることを経験している。なお、放熱管のかぶりを3cm と薄くした舗装面は、自家用車の駐車場として5年供用された現在もクラックなどの異常は見られない。

さらに、隣接する放熱管は低温と高温が相殺するような配管にしたことで、均一な融雪となった。写真-4は、放熱管施工時の状況である。

(3)ポンプ、センサーなどの設備と運転

杭からの温水は、全て温水ヘッダー管に集められ、融雪面に流れる。融雪面からの冷水は、機械室で循環ポンプで加圧され、建物周囲の冷水ヘッダー管に送られ、さらに杭へと流れる。

杭内に貯められた83m³の水が温度変化によって体積変化しても、それが水位変動内で収まるように容量0.6m³のタンクを循環ポンプ直前に設けた。しかし、実際には、杭からの水漏れが生じ、このタンクは無意味になり、自動給水装置(ボールタップ)が必要となった。

運転制御に関しては、杭内部の水温変化で融雪能力が変動することから、降雪を感知する降雪センサーではその運転は困難と考え、融雪路面の積雪を感知するセンサーで行った⁹⁾。このセンサーによって、杭内貯留の水温が高くて融雪能力が高い時は断続運転、融雪能力が低く強い降雪が続く残雪が生じた時は降雪後の継続運転となり、効果的な運転が実現した。

杭内部に貯める熱媒体は、漏水による地下水汚染が懸念されるので、水道水を用いた。この場合、放

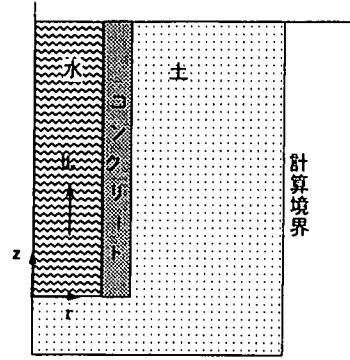


図-4 地中杭の断面図と座標系

熱管内の水が凍結して放熱管が破壊するとか舗装にひび割れが生じることが心配されるので、放熱管に沿わせて温度センサーを設置し、0°C以下でポンプを自動運転することにした。実際には、この凍結運転は、福井市内では暖かくてほとんどなされなかった。

以上の融雪と凍結の自動運転を5年間続けたところ、2度だけポンプ内部に空気がたまり、積雪時に循環ポンプが稼働しないことが生じた。ポンプ内は常に満水となるように水タンクより下面に設置したにもかかわらずトラブルが生じたので、それ以後設計の2カ所の施設では、循環ポンプを自吸式とした。

3. 長期の融雪と数値シミュレーション

(1)数値シミュレーションと実測値の比較

すでに、筆者らは、杭から融雪時に取出される熱量と杭内部の水が杭壁・地盤から集熱する熱量を求めるため、図-4に示す座標系と次式(1)、(2)、(3)、(4)を用いて数値計算を行った⁹⁾。

1)コンクリート杭および土に関して

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{C\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

2)コンクリート杭内の水に関して

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = -\frac{\lambda_w}{C_w \rho_w} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - U_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \frac{h P_w}{C_w \rho_w A_w} (T_l - T_w) \quad (2)$$

3)融雪面となる舗装内の放熱管の熱移動に関して

$$(1 + \alpha) \frac{\partial T_w}{\partial t} = -V_w \frac{\partial T_w}{\partial x} - \frac{K_u B}{C_w \rho_w} (T_w - T_s) - \frac{K_d B}{C_w \rho_w} (T_w - T_d) \quad (3)$$

4)コンクリート杭と放熱管をつなぐ連結管に関して

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = -W_w \frac{\partial T_w}{\partial x} - \frac{K_c P_w}{C_w \rho_w A_w} (T_w - T_c) \quad (4)$$

ここに、 t は時間、 T はコンクリート杭または土の温度、 T_w は杭内、放熱管あるいは連結管内の水温、 T_i は杭内壁の表面温度、 T_s 、 T_d 、 T_c はそれぞれ舗装面上の雪、舗装下方の路盤、連結管周囲の土の温度である。 U_r 、 V_r 、 W_r はそれぞれ杭内、放熱管内および連結管内の水の速度である。 r は杭の中心から半径方向の距離、 x は放熱管入口からの放熱管に沿った距離、 Z は杭の底より上方向の距離である。 h は杭内の水と杭の内壁との間の熱伝達率である¹⁰⁾、¹¹⁾。 α は舗装のもつ熱容量を放熱管内の水の熱容量に置き換えた場合の割合を示している。 B は放熱管の配管ピッチ、 P_r 、 A_r は杭あるいは連結管の周囲長さおよび断面積、 K_u 、 K_d 、 K_c はそれぞれ舗装面の上方と下方、および連結管の熱通過率である。また、 λ 、 ρ 、 C と λ_r 、 ρ_r 、 C_r は、それぞれ土もしくはコンクリートと水の熱伝導率、密度、比熱である。

杭2本(杭長22m、杭内径310cm)と融雪面積20 m^2 規模の実験施設での実測値は、この式に基づく数値計算の結果とよく一致した。しかし、その期間は、連続22時間30分の融雪とその直後から72時間に限られたものであった。

そこで、杭や融雪面積の条件を変えた県立大学職員住宅の実際規模の融雪設備(表-1)で、かなりの降雪があった1993年12月中旬から翌年3月15日までの1シーズンの降雪について、数値シミュレーションを行い、実測との比較を行った。

長期の融雪では、 r 方向と杭軸下方向の計算(断熱)境界までの距離が影響する。 r 方向については、建物周囲の杭ではその外方向の境界は無限になるし、内部の杭も等間隔に設置されていない。そこで、その影響の大きさを計算結果で後に確認するとして、ここでは、建物の内側の隣接杭間の平均距離4mの1/2とした。

計算領域の地盤の平均熱伝導率と平均熱容量は、1mごとのサンプリング試料から、各々1.82W/(mK)、3.22MJ/(m 3 K)であること、またコンクリート杭のそれは供試体から各々1.83W/(mK)、4.56MJ/(m 3 K)であることを求めた。

実測値として、ヘッダー管分岐部での建物内部に位置する代表的な杭への出入口水温とその流量、杭内部の水温(杭の頭部近傍と底部近傍)を自動計測した。

計算では、シーズン初め(12月17日)の地盤、杭内水などの温度を、杭内部の水温の実測値から、全て17 $^{\circ}\text{C}$ とした。この値は、この地域の自然状態での地盤の平均温度15.8 $^{\circ}\text{C}$ に比べて高いが、これは、夏に路面温度が上昇した際にポンプを運転したところ、前シーズンに融雪で使用した以上の熱が地盤に貯えられたことによる。

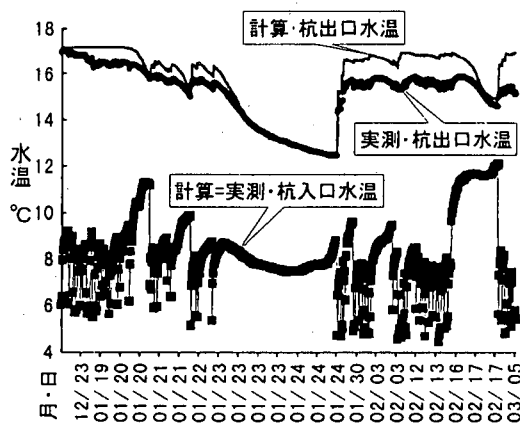


図-5 杭の入口水温と出口水温の計算値と実測値

計算は、実測の流量と杭への入口水温を杭底の流出位置に与え、水が杭内を流れ地熱を回収し杭頭出口に達するとして行った。運転停止の際の熱移動も計算を行い、杭とその周囲の温度場を逐次計算した。図-5は、融雪運転中のデータについて取りだして、杭入口水温の実測値、杭出口水温の実測値およびその計算値を示したものである。なお、図の横軸は、日付について等間隔でなく、比較的まとまった降雪のあった1月20~24日、2月3日、2月16~17日が拡大されている。

ほぼ連続した融雪運転となった1月23~24日では、実測された杭入口水温(図-5)は、最初は融雪路面全体が冷やされているため5.2 $^{\circ}\text{C}$ と低く、路面が温かくなるにつれ融雪にのみ熱が使われ9 $^{\circ}\text{C}$ 近くまで上昇している。やがて、冷水が杭頭にまで流れてきて杭出口水温が下がるため融雪面への入口水温が下がる。すると融雪面からの出口温度は当然下がり、杭入口水温が下がることになる。融雪面に雪が少なくなると杭出口水温が下がっても杭入口水温は上昇する。無積雪になると運転は停止する。この連続した融雪運転では、出口水温の計算値は、運転にともなって次第に温度が下がり実測値とよく一致している。

1月23~24日以外では、融雪面からの冷えた水が杭出口にまで流れないうちに融雪の運転が終了してしまい、杭出口水温は融雪の影響をほとんど受けなかった。

図-6は、図-5と同じ計算によって得られた杭頭近傍(杭頭より0.5m下方)と杭底近傍(杭底より1.5m上方)の計算水温を1シーズン全期間について、実測値と対比したものである。この図の杭頭近傍の水温について、計算値は融雪による水温低下の影響のみを考慮しているが、実測値は融雪とは関わりなく全期間にわたって徐々に低下していることが分かる。

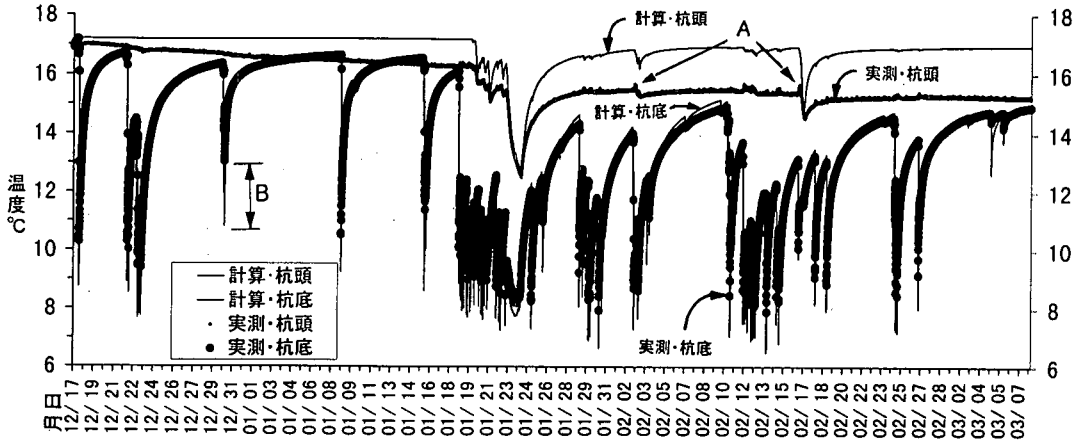


図-6 杭頭、杭底の水溫（計算値と実測値）

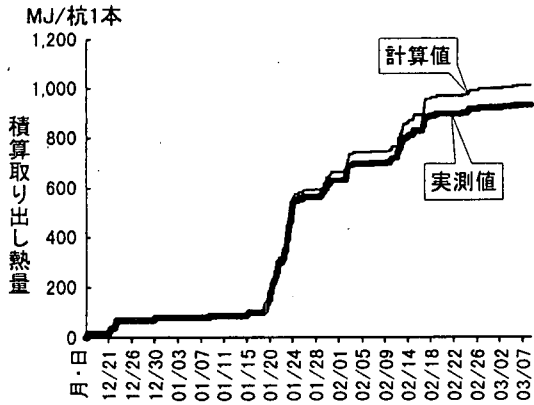


図-7 積算取り出し熱量

この杭頭近傍の水溫の実測値は、計算値より次第に低くなり、やがて3月には約 2°C 低くなっている。その現象は、図-5でも、出口水溫の実測値が計算値より次第に低くなっていることに見られる。これは、計算では地表面（建物の下）を断熱と仮定しているが、実際には地表面から熱が奪われ、杭頭近傍ではその水溫が低下することによる。したがって、杭内部の水溫分布は、杭頭部では地表面からの冷却でやや低くなり、杭底部では融雪でかなり冷やされ、杭頭部よりやや下部で最も高温になる。そこで、融雪開始後しばらくすると、その最も高温の水が杭頭部に送られ、図-6の矢印Aで典型的なように杭頭近傍部の水溫は $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 上昇する。地表面の実際の熱的条件は、建物内の暖房などによっても異なるが、参考までに12月から3月の外氣溫の月平均は 6.0°C 、 3.3°C 、 3.0°C 、 5.4°C であった。

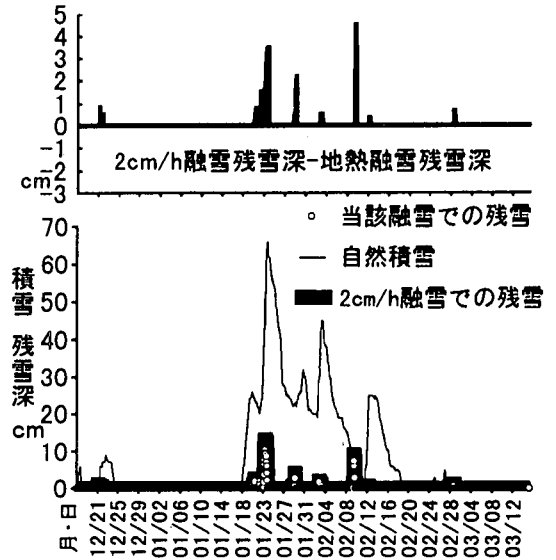


図-8 融雪の数値シミュレーション結果

図-6で、杭底近傍水溫は、融雪時に冷水が入ってくると 8°C 近くまで急激に低下する。しかし、その後融雪運転停止とともに、1月20日までは、融雪運転時間が少なくて、ほぼ元の水溫にゆっくりと回復している。1月20～23日のかなりの降雪による連続的な運転でも、徐々に回復し、2月9日では約 15°C にまで回復している。

また、運転開始直後の杭底水溫の最低温度は、計算値が実測値より例えば図-6の矢印Bで示されるように、 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 低くなっている。これは、ヘッダー管分岐点から杭底までポリエチレン管内を流れる間に、建物下面の地盤と杭内水で温められることが計算さ

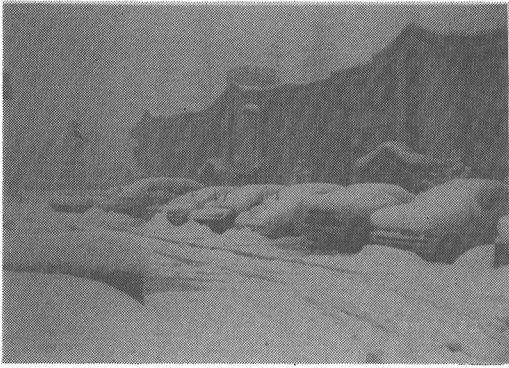


写真-5 5年間で最大積雪の際の状況1994年1月23日16時
(背景の建物の杭を利用)



写真-7 新たな積雪26cmでの状況 1994年2月2日10時

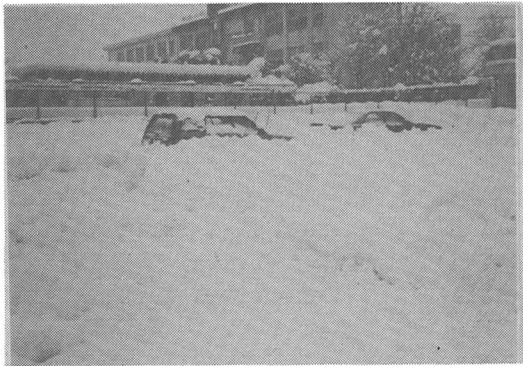


写真-6 写真-5と同じ時の周囲の駐車場

れてないことによると思われる。しかし、この計算と実測の差は、ポリエチレン管の周囲の地盤がすぐに冷やされるためか、一時的なもので、すぐに計算値と実測値は一致し始める(図-6)。

杭出入口水温の差と流量の積から杭1本から取り出した熱量を求め、その累計を図-7に示した。この図から、すでに述べた計算と実測の差違は小さくて、その熱量累計の差違は1シーズンで約8%にすぎないことが分かる。

次に、図-5～図-7と同じ期間の福井地方気象台記録の降水量からの降雪負荷を融雪面に与え、福井市内では降雪1cm融雪するには390kJ/m²の熱量が必要と見積もって²⁾、数値シミュレーションを行った。さらに、本融雪システムの融雪能力が変動することが融雪に与える影響を知るため、電気ヒーターやボイラーなどの融雪能力が一定しているシステムとの比較を行った。ここでは、福井市内で一般に使われている融雪能力2cm/hのものを取り上げた。計算では、それぞれ融雪能力を超えた降雪を残雪深として求めた。図-8は、その結果で、図の上部に、能力2cm/h融雪での残雪深から本融雪システムでの残雪

深を差し引いたものを示した。シーズン中いずれも、本融雪システムの方が2cm/hの融雪より残雪が少なかった。本融雪システムの残雪深は1月23日16時では9.3cmと計算されたが、実際の残雪深は約6cmであった(写真-5)。これは、計算では駐車場全面に融雪負荷がかかるとしているが、実際には車の駐車場でその負荷が少ないことなどによると考えられる。この時刻では、図-8に示す自然積雪深は66cm(気象台観測)に達し、周辺の駐車場では、写真-6のように車はフロントの高さまで雪に埋もれた。なお、その後2月2日夜～3日朝には、新たに26cmが積もる降雪があったが(図-8)、本融雪システムの運転下では写真-7のようにほぼ無積雪で、これは図-8の計算による残雪深とも一致した。

(2)豪雪での数値シミュレーション

福井地方を1980年12月27日から翌年1月23日まで襲った約20年来の豪雪(56豪雪)の降雪パターン(気象台観測)を、県立大学職員住宅の融雪システムで融雪したとして、その残雪深を数値シミュレートした。図-9に、その結果を、能力2cm/hの一定融雪での残雪深、積算降雪深、自然状態での積雪深とともに示した。また、図の上部に、能力2cm/h融雪での残雪深から本融雪での残雪深を差し引いたものを示した。なお、この残雪深には、積雪の自然沈下や日射などでの融雪は考慮されてない。しかし、その影響は、12月27日から12月29日にかけて積算降雪深と自然降雪深(気象台観測)がほぼ一致していることから、残雪になるような雪が激しく降り続けている期間は、無視できると考えられる。

図-9では、本融雪装置は、積算降雪深495cm、最大自然積雪深195cmの56豪雪に対して、集中的な降雪があった12月27～30日、1月5～7日、1月11日～15日には、降雪に融雪が追いつけず、最大で35cmの残雪となるが、それ以外はほぼ無積雪となっている。

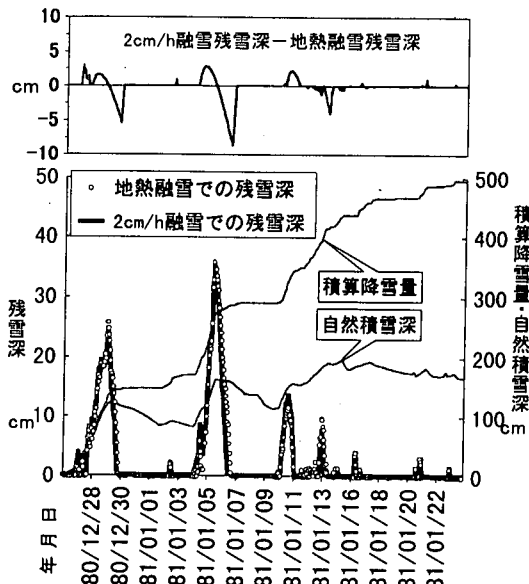


図-9 豪雪での数値シミュレーション結果

また、図-9の上部から、能力2cm/hの融雪に比べ、本融雪は、初めは能力が上回り残雪量が少ないが、やがて能力が下がり、約90cmの連続融雪後は、能力2cm/hの融雪残雪深より残雪が多くなる事が分かる。初めの能力が高いことで最大残雪深は、能力2cm/hの融雪とほぼ同じである(図-9)。融雪の終了では、能力2cm/hの融雪に比べ、12月30日では3時間、1月7日では7時間、1月11日では1時間遅れるものの無積雪となる。

このような融雪結果となる原因を同じ期間中の杭内部の平均水温と杭壁の平均温度の変化を示した図-10で見つめる。最初15.8℃の平均水温と平均壁温度は、連続融雪で、各々6℃、8℃近くまで下がる。その低下は初めは急速だが、次第に低下しなくなっている。これは、水温が低下すると、融雪に使われる熱流は小さくなり、逆に杭内の水が杭壁や地盤から回収する熱流は大きくなり、両熱流は次第に等しくなることによる¹⁰⁾。等しくなるにつれ、杭内の水温の低下はわずかになり、融雪能力はほぼ低下しなくなる。そして、融雪終了後も、地熱を回収し続け、次の寒波までには、13℃まで回復している。

なお、ここでは、積雪センサーによって積雪がある限り運転されるが、現在一般的に使われている降雪センサーでは、12月30日7時以後は雪が降っていないため、30日7時の積雪11cmで運転がストップしてしまう。なお、能力2cm/hの融雪であっても、積雪7cmの状態でも運転が停止し無積雪に至らない。

以上から、図-8の通年の最大降雪では能力一定の融雪に比べ残雪が少なかった本融雪システムも、豪

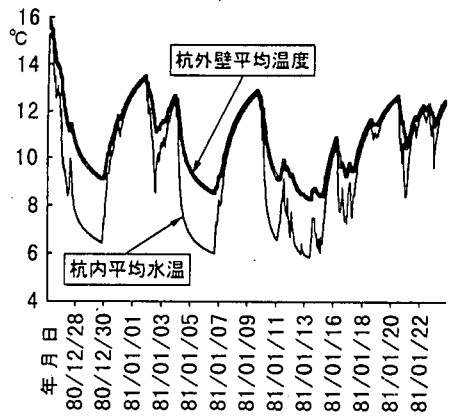


図-10 豪雪の際の杭内平均水温

雪では、次第に能力が低下し、能力一定の融雪に比べ最大残雪深はほぼ変わらないが、寒波の後半では残雪はやや多くなる。しかし、融雪は続けられ、能力一定の融雪に比べ、数時間遅れで無積雪にできることが分かる。

ここで、杭の設置間隔が融雪に及ぼす影響について述べる。これまで計算で用いた図-4のr方向の計算(断熱)境界の2mを4m、1mに変えて残雪深を計算してみた。その結果は、4mにしても、最大で0.2mmの違いにすぎなかった。1mにすると、12月30日では全く差がないが、1月7日で最大3.9cm、1月14日で最大5.6cm残雪深が多くなった。豪雪で地盤がかなり冷やされても、その熱伝導率と容積比熱からは、この程度の差しか生じない。したがって、杭の間隔については、あまり厳密に考えずに平均での取り扱いが良い。

実際の設計に際しては、放熱管種とその間隔とかぶり、舗装の熱伝導率、循環流量、使用杭本数を変えた幾つかの条件で、通年と豪雪の降雪パターンで本数値シミュレーションを行う。そして、その結果をもとに、例えば図書館と緊急病院などといった各々の豪雪時の融雪目標の違いも考えて、最適な条件のものを選定することになる。

4. 温度変化にともなう杭の変位と応力

(1) モデル式

本融雪システムは、基礎杭を兼用するため安価であるが、その代償として、基礎杭が温度変化し、杭には応力と変位が生じる。この値は豪雪時に最大となるが、その値を事前に知ることが必要とされる。

まず、杭の軸方向の変位については考えると、杭の軸方向の変位と外力の関係は、図-11に示すように、周囲および先端にバネを有する弾性体としてモ

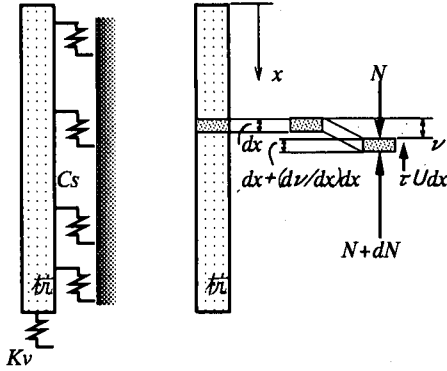


図-11 杭の軸方向の応力-変位モデル

デル化される。

図-11において微小区間 dx での力の釣り合いを考えると次式を得る。

$$dN + \tau U dx = 0 \quad (5)$$

ここに、 dN : 微小区間 dx での圧縮力の増加量、 dx : 微小区間長、 U : 杭外周長、 τ : 杭周面摩擦応力である。

杭周面摩擦応力は変位 ν に比例するとみなせると次式を得る。

$$\tau = C_s \nu \quad (6)$$

ここに、 ν : 深さ x における杭の軸方向変位量、 C_s : 杭と周囲地盤のすべり係数である。

さて、杭の dx 部分に温度変化 T が生じたとすると、杭周囲の拘束がなければ長さ dx は $(1 + \alpha T) \cdot dx$ になるはずだが、拘束を受けて $dx + (d\nu/dx) \cdot dx$ にしなければならない。したがって、この場合に生じる圧縮力 N は次式となる。

$$N = \frac{(1 + \alpha T) dx - \{dx + (d\nu/dx) \cdot dx\}}{(1 + \alpha T) dx} A_p \cdot E_p \\ = (\alpha T - d\nu/dx) \cdot A_p \cdot E_p / (1 + \alpha T) \quad (7)$$

ここに、 α : 杭の熱膨張率、 T : 深さ x における杭の温度変化、 A_p : 杭の純断面積、 E_p : 杭のヤング係数である。

式(5)(6)(7)より

$$\alpha \frac{dT}{dx} - \frac{d^2\nu}{dx^2} = - C_s \cdot \nu \cdot U \frac{1 + \alpha T}{A_p \cdot E_p} \quad (8)$$

を得る。

杭長 L を n 等分割し式(8)を差分式に直し、 $\alpha T \ll 1$ であるから $1 + \alpha T = 1$ として整理すると $i = 1$ から $i = n - 1$ までについて

$$\nu_{i+1} - \left\{ 2 + \frac{C_s \cdot U}{A_p \cdot E_p} (\Delta x)^2 \right\} \nu_i + \nu_{i-1} \\ = \alpha \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2} \Delta x \quad (9)$$

が得られる。

次に境界条件について考える。建物全体が同一仕様の杭によって支持され、融雪による杭頭変位は全ての杭について同じであるとすると、建物荷重などによるそれまでの杭内部の変位・応力に温度変化による変位・応力を重ね合わせることで杭の変位・応力は求められる。また、この場合、温度変化によって生じる杭頭での応力は0で、杭底での圧縮力は変位に比例すると考えると次式を得る。

$$N_{x=0} = (\alpha T_{x=0} - d\nu/dx_{x=0}) \cdot A_p \cdot E_p / (1 + \alpha T_{x=0}) \\ = 0 \quad (10)$$

$$N_{x=L} = (\alpha T_{x=L} - d\nu/dx_{x=L}) \cdot A_p \cdot E_p / (1 + \alpha T_{x=L}) \\ = kv \cdot A_{pb} \cdot \nu_{x=L} \quad (11)$$

ここに、 kv : 鉛直方向地盤反力係数、 L : 杭長、 A_{pb} : 杭底の全断面積である。

C_s , kv と杭の任意位置での温度 T を既知とするなら式(9)(10)(11)の合せて $n + 1$ 個の式から $\nu_0 \sim \nu_n$ までの $n + 1$ 個の未知数が求められる。そこで、次に C_s , kv について検討する。

(2) 実測杭頭変位からの逆解析

まず、融雪実験時の杭頭変位量から C_s , kv を推測することにした。使用した杭は、セメントミルクで孔壁保護を行いながらのプレボーリング工法で設置したものである。実験現場の杭先端部は砂質土で標準貫入試験の N 値が16であることから岡原らの場所打ち杭の実験式を用いて $kv = 6.7 \text{ N/cm}^2$ と推定した¹⁴⁾。

次に C_s については、駒田・山川は杭径の1%の変位について $C_s = N \text{ 値} / 1.5 \text{ N/cm}^2$ とし¹⁵⁾、岡原らはコンクリート杭の降伏時変位量について砂質土で $C_s = N \text{ 値} / 5.1 \text{ N/cm}^2$ 、粘性土で $C_s = N \text{ 値} / 1.5 \text{ N/cm}^2$ であるとしている¹⁶⁾。これらの C_s と N 値の関係は、ばらつきが大きく、さらに、杭壁温度変化による変位に比べ変位の大きな領域での値である。そこで、ここでは C_s は N 値に比例し、また粘性土と砂質土でその比例定数が違うと仮定し、その比例定数を徐々に変えて先のモデル式を用いて杭頭変位量を算出し、この計算値が実測杭頭変位と最も一致する値を求めることとした。

ここでの杭頭変位量は、門型に支持固定した鋼管にダイヤルゲージを取り付けて計測した。また、杭の熱膨張率は、杭の供試体を用いて計測した。1992年1月19日14時からの融雪運転によって、杭には図-12に示す温度変化と図-13の杭頭変位量が実測された。これらの値を用いて、先のモデル式で試行計算した。その結果、 C_s を砂質土では $N \text{ 値} / 1.1 \text{ N/cm}^2$ 、粘性土では $N \text{ 値} / 0.44 \text{ N/cm}^2$ と仮定した杭頭変位量

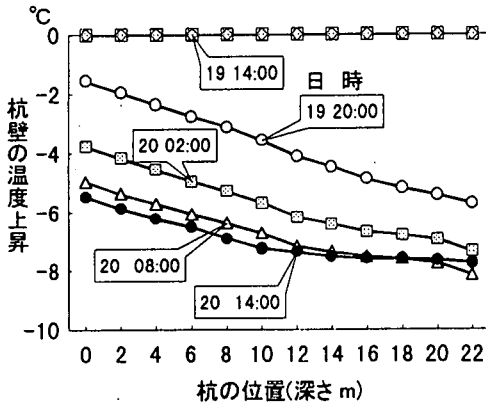


図-12 杭壁温度の変化

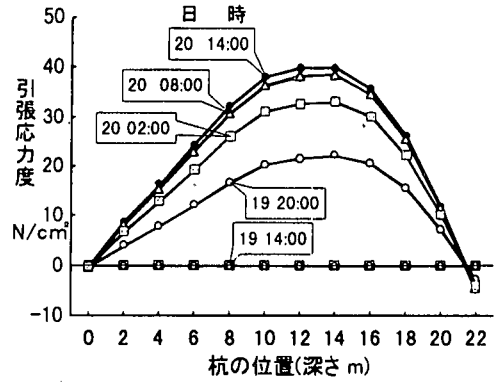


図-14 杭の応力度

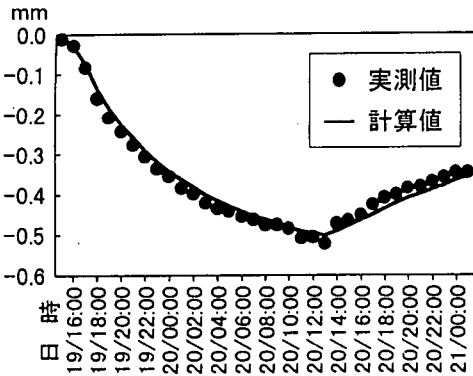


図-13 杭頭の変位量

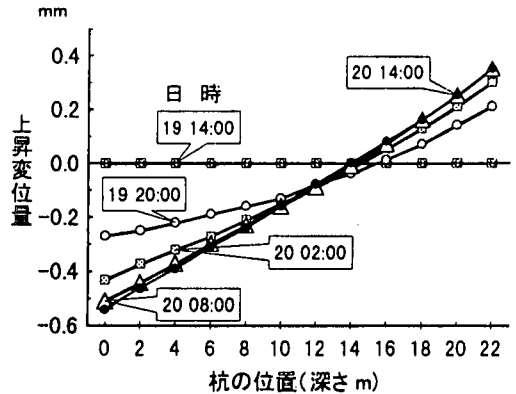


図-15 杭の変位量

の計算結果が図-13に示すように実測値とよく一致した。前述の駒田・山川や岡原らの N 値 $/1.5 \sim N$ 値 $/5.1 \text{ N/cm}^2$ に比べて、ここでの C_s が大きいのは、 C_s は変位量の小さい領域では大きいことによると考えられる。

次に、この逆算された C_s を用いて、この融雪実験期間中の杭の引張応力、杭の各位置での変位量を6時間ごとに求めた結果を図-14、図-15に示す。これらの図から、杭の温度低下によって、杭はある程度縮み、杭頭では沈下し、杭底では上昇していることが分かる。なお、実際は建物荷重による杭底の沈下量が温度低下で減ることを意味する。したがって、温度低下で、杭底地盤への負荷は小さくなり、杭の先端支持力としては安全側になる。

また、杭と周辺地盤のすべり抵抗と杭底鉛直方向の地盤反力によって、その変位はある程度拘束されていることから、杭には引張応力が発生している。その値は、杭の中央部よりやや下で最大の 38.7 N/cm^2 になると計算された。

(3) 豪雪時の応力・変位

以上の計算では、建物を支える全ての基礎杭が同じように温度変化すると仮定した。しかし、1本の柱の下に複数の基礎杭があって、その内の1本だけを融雪に使う場合は、その杭頭は周囲の融雪に使わない杭で固定され変位しないと考える方が杭の応力に関しては安全側になる。この場合は、式(10)は次式に置き換えられる。

$$\nu_0 = 0 \quad (12)$$

この杭頭固定のケースを含めて、先に述べた56豪雪時での県立大学職員住宅での数値シミュレーションで、杭壁温度が最も低くなった1月14日11時での温度上昇を求め(図-16)、杭の変位とその内部応力を求めた(図-17、図-18)。

建物の杭全てが融雪に使われ杭頭が自由に上下する杭頭フリーの場合では、杭頭が 0.64 mm 沈下する結果となっている。杭の設計荷重を載荷した際の杭頭の鉛直変位は、一般に数 mm 程度に達することから、この程度の沈下では、建物への影響は生じな

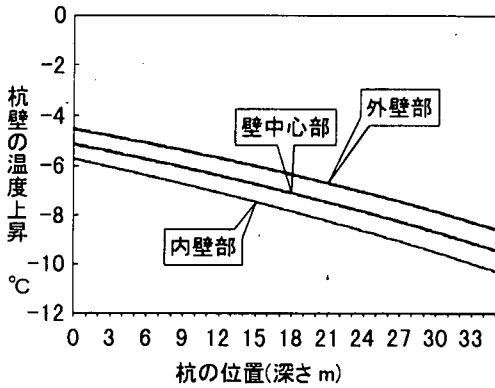


図-16 豪雪時の杭壁温度上昇

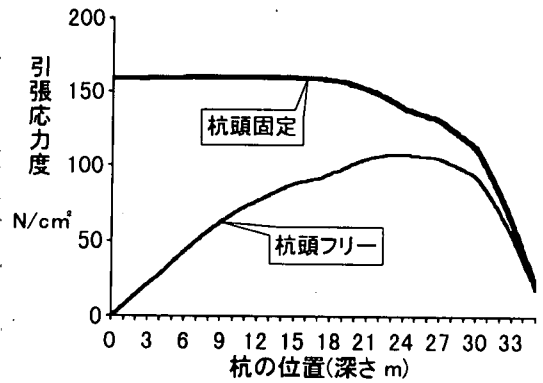


図-18 豪雪時の杭の応力度

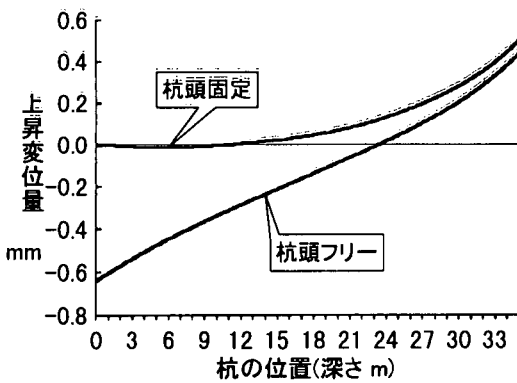


図-17 豪雪時の杭の変位量

いと考えられる。また、杭には中央部よりやや下の深さ23mで、最大108 N/cm²の引張応力が生じると計算された。

また、杭頭固定の場合では、杭のほぼ中央部付近の13mの深さまで杭は変位せず、それより深い部分で杭が上昇する結果が得られた。これらは、杭頭変位フリーで縮んだものをその杭頭変位量だけ上に引っ張ったものと解される。杭には、杭頭から深さ17mまで、ほぼ同じ160 N/cm²の引張応力が生じている。それより深いところでは、その変位が完全には拘束されなくなり、引張応力は小さくなっていることが分かる。

これらの応力の設計上の扱いは、常時荷重として考える場合は豪雪時の値の75%を用い、地震時と同時に作用すると考える場合は、屋根への積雪荷重がその35%を考慮する¹⁷⁾ことに準じるのが適当と考えられる。これで設計すると、一般に、常時荷重では、構造物載荷で設計された杭の応力にかなり余裕があ

って問題にならない。地震時では融雪起因での引張応力の35%は、一般に許容曲げ引張応力の一割程で小さく、杭の応力に余裕があれば杭種のランクを上げるまでに至らない。

最後に、杭の軸直交方向の温度差による応力について述べる。杭壁が一様に温度低下する場合は、杭は杭軸直交方向に縮み、内部に応力は生じない。杭の内壁が外壁より直線形の温度分布で $T^{\circ}\text{C}$ 低くなると、内壁と外壁に $\alpha E_p T l (2(1-\nu))$ のそれぞれ引張応力と圧縮応力が生じる¹⁸⁾。ここに、 ν はポアソン比で、杭の供試体での試験から0.2を得ている。豪雪時には、壁の内と外側の温度差は図-16に示すようになり、最大値は1.7 $^{\circ}\text{C}$ と計算された。したがって、壁内側と壁外側に29.4 N/cm²のそれぞれ引張応力と圧縮応力が生じる。なお、杭軸直交方向には、建物の荷重による応力は生じないので、十分な余裕があり、この程度の小さな応力では問題にならない。

5. まとめ

これまで述べたことから次の4点が分かった。

- ①融雪部で熱抵抗を小さくすることや杭1本当たり融雪面積などを適切にとって施工されれば、本融雪システムによって、ポンプ動力のわずかな電気代と漏水によるわずかな水道料金のみで十分な融雪が可能となる。
- ②本数値シミュレーションは、1シーズンの融雪についても実測とほぼ一致し、融雪能力の見積もりに有効である。
- ③実際と数値シミュレーションから、通年の降雪では能力2cm/hの融雪より今回の条件の本融雪システムではよく溶けることが分かった。豪雪時にも、はじめはよく溶けるため2cm/hの融雪とほぼ同じ

最大残雪深にでき、雪が降り止み2cm/hの融雪が無積雪になった後も、積雪センサーによって運転され、その数時間後には無積雪にできる。

④本融雪システムによって生じる杭の変位と応力を数値シミュレーションで求めた結果、杭頭変位は建物などに悪影響を与えるほど大きくならず、また杭内部に生じる引張応力も、構造物の荷重による応力に比べ、それほど大きなものではない。

以上から、本稿に記したことに留意し、紹介した数値シミュレーション手法を用いて設計施工がなされれば、少なくとも福井のような比較的温暖な雪国では、本融雪システムは非常に有効である。

これまで、本融雪システムは暴雪時には地盤が冷えてしまい電気熱源などの融雪能力一定の融雪に比べて劣るのではないか、あるいは建物や杭に悪影響が生じるのではないかなど設計者に不安があった。こうした不安が本融雪システム普及の桎梏になっていた。本稿によって、その不安が解消され、いっそう普及が進むことを願う。

謝辞：当該融雪システムの開発では、パイルメーカーである三谷セキサン(株)と(株)ホクコン、また施工や普及ではパイプインパイル融雪協会や福井県土木部管轄課などに協力をいただいていた。記して謝意とする。

参考文献

1) 盛田耕二, 田子真：地熱の新たな可能性を示唆するスイスの例－浅部低品位地熱資源の利用(その1), 地熱第31巻第2号, pp. 41~57, 1994. 6.

- 2) 新潟県企画調整部地域政策課：人と地球環境にやさしい雪対策, pp. 30~40, 1997.
- 3) 宮本重信, 千田秋広, 竹内正紀, 木村照夫, 橋詰善光, 青木由裕, 高橋浩三, 小林志伸：基礎杭利用地熱融雪法の開発, 福井県雪対策・建設技術センター年報第4号, pp. 39~48, 1991年8月.
- 4) 竹内正紀, 木村照夫, 宮本重信, 坪田諭治：基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 52, pp. 59~69, 1993.
- 5) 2) pp. 50~51.
- 6) 権利者 福井県, 三谷セキサン(株), (株)ホクコン, 考案者 宮本重信：基礎杭を利用した熱交換システム(実用新案), 出願1991. 3 登録1996. 12.
- 7) 4) pp. 62~64.
- 8) 宮本重信：融雪を制御するセンサーについて, 社団法人雪センター発行ゆき NO. 25, pp. 55~60. 1996. 10.
- 9) 4) pp. 62~64.
- 10) 4) pp. 63.
- 11) S. W. Churchill：Combined Free and Forced Convection in Channels, Heat Exchange Handbook, 2. 5, 10-1, Hemisphere, 1983.
- 12) 4) pp. 62.
- 13) 4) pp. 67.
- 14) 岡原美智夫, 中谷昌一, 松井謙二：杭の鉛直および水平方向の支持特性に関する研究, 土木学会構造論文集, vol. 37A, pp. 1457, 1991.
- 15) 駒田敬一, 山川朝生：くいの支持力と変形特性に関する調査, 建設省土木研究所資料, 第963号, pp. 20, 1974.
- 16) 13)
- 17) 建築基準基本法施行令第86条5項, 1996.
- 18) 日本機械工学会機械工学便覧改訂第51版, pp. 4-89, 1968.

(1997. 11. 13 受付)

DESIGN, CONSTRUCTION, OPERATION AND NUMERICAL SIMULATION OF SNOW-MELTING SYSTEM USING GEOTHERMAL ENERGY COLLECTED BY BUILDING PILE Shigenobu MIYAMOTO, Masanori TAKEUCHI and Teruo KIMURA

Availability of new snow-melting system where the geothermal energy collected by building piles with circulating water was used for melting the snow on the ground was evaluated from the practical applications in parking lot &c. and its numerical simulation. For example, in the snow-melting area having present system, the depth of laying snow was kept less than 6 cm through 5 seasons nevertheless the snow laid 66 cm depth in maximum at the surrounding areas. Measured heat quantity collected by building piles agrees well with the result obtained from the numerical simulation. The results of numerical simulation based on the data of famous 56-heavy snow fall season obtained from Meteorological Observatory suggest that the present system is enough to melt the snow in such season. Moreover, the maximum thermal stress and displacement in the piles caused by the cooling due to circulating water used for snow-melting were evaluated by numerical calculation.