

鋼管杭を用いた氷蓄熱システムの開発  
第2報 シミュレーションによる熱損失の検討

正会員 横山 治男\*1 同 貫井 泰\*1  
同 〇森野 仁夫\*2 同 奥山 博康\*2

鋼管杭 氷蓄熱 熱損失  
相変化 シミュレーション 熱回路網

1. はじめに

鋼管杭氷蓄熱システムの熱損失を検討するため、熱回路網 (NETS) によるシミュレーション評価を行った。

2. 計算条件 計算条件として設定した熱負荷、冷凍機能力、コイル熱交換器の仕様、周囲土壌の物性、システムの運転条件などを表1に示す。

冷凍機は 47.5kW の冷凍能力を有し、0:00 から 8:00 までの夜間蓄熱で鋼管杭内に氷蓄熱を行なう。冷房負荷への冷熱供給は 12:00 から 16:00 までのピークカット対応とした。鋼管杭周囲の土壌はボーリングの結果から、砂質シルトで代表した。地下水位はGL-3.3mであり、土壌の湿潤密度は 1,600~1,800kg/m<sup>3</sup> に分布していた。

表1 計算条件

・熱負荷と冷凍機能力

熱負荷	60.5kW × 4時間(12:00-16:00)
冷凍機能力	47.5kW
所要蓄熱量	302kWh/日(熱損失20%を想定) 夜間蓄熱(00:00-7:00)

・コイル熱交換器の仕様

コイル熱交換器		36 ユニット
ブライン	比熱	3.72 J/gK
	比重	1.028
	流量	18.0 m <sup>3</sup> /h
内部熱伝達率 α <sub>i</sub>		2,300 W/m <sup>2</sup> K
外部熱伝達率 α <sub>o</sub>		350 W/m <sup>2</sup> K
熱伝導率 λ <sub>c</sub>		0.47 W/mK

・土壌の条件

・その他の条件

土質	砂質シルト	冷凍機ブライン出口温度	-6°C
熱伝導率	0.93 W/mK	冷房負荷出口温度	12°C
比熱	1.25 kJ/kg°C	外気温度	東京標準年
比重	1,600 kg/m <sup>3</sup>	土壌温度(不易層)	17°C

3. モデル化 熱回路網解析による鋼管杭氷蓄熱システムの解析モデルを図1に示す。

コイル熱交換器は 36 ユニットが鋼管杭にU字型にセットされるが、モデルでは熱交換器の表面積を等価とした1本で扱った。節点1から8がこれに当たる。

鋼管杭内部は蓄熱有効水深 35mを節点9から12に4分割して扱った。

節点13(コイル熱交換器出口)と60(冷凍機出口温度)の間に冷凍機が、節点13と61(空調機出口温度)の間に冷房負荷が配置されている。

鋼管杭周囲の土壌は節点14から59までで表現され、鋼管外表面から水平方向に0.1m、0.3m、0.5m、0.8m、1.5m、2.5m、3.5m、4.5mの位置を、垂直方向にはGLから深さ方向に5m、15m、25m、35m、55mの位置を代表している。既知節点62、64は不易層の土壌温度を表し17°Cで年間一定とした。また、外気温度の既知節点63、65は東京標準年気象データとした。

蓄熱運転では冷凍機出口温度が-6°Cに、冷房運転では空調機側出口温度が12°Cに制御される条件とした。ブラインは、これらの運転時間以外は流動しない。

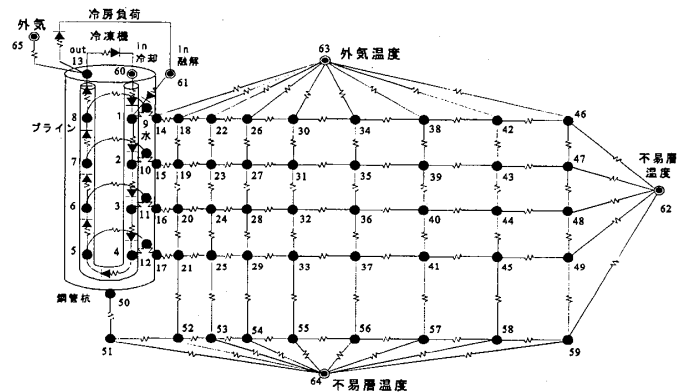


図1 熱回路網によるモデル化

4. 計算上の相変化の扱い

鋼管杭氷蓄熱システムの運転では、水の凍結と融解による相変化が繰り返される。このような相変化を計算するために(1)式から(3)式で示される相当比熱と呼ぶ概念を導入した。相変化中はモデル上、図2に示す相当温度域で比熱が増大したと考える。

相変化は(3)式の相当比熱による熱容量の温度依存の変化と見なし、NETSの状態フィードバック機能で模擬した。

$$(体積v, 密度\rho, 相当比熱c_{pt}の氷・水の熱流収支) = c_{pt} \cdot \rho \cdot v \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

$$(水から氷への潜熱q_Lとして相変化に要する熱量) = q_L \cdot \rho \cdot v$$

$$= \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{pt} \cdot \rho \cdot v \frac{d\theta}{dt} dt = \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{pt} \cdot \rho \cdot v d\theta = c_{pt} \cdot \rho \cdot v \cdot (\theta_2 - \theta_1) \dots\dots\dots(2)$$

$$(相変化中の相当比熱 c_{pt}) = c_{pt} = \frac{q_L}{(\theta_2 - \theta_1)} \dots\dots\dots(3)$$

A Development of the Ice Storage System using Steel Piles  
No.2 The examination of the heat loss by the simulation.

YOKOYAMA Haruo, NUKUI Yasushi,  
MORINO Kimio, OKUYAMA Hiroyasu

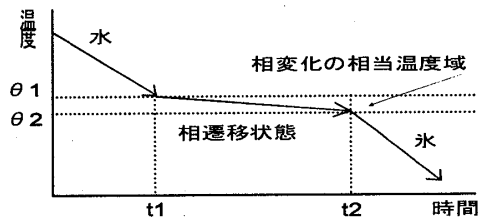


図2 相変化の相当温度域

5. 解析結果 今回の計算において相当温度域の幅は2℃とし計算時間間隔は0.5時間とした。計算時間間隔が1.0時間では相当温度域の飛び越しが生じた。

鋼管杭氷蓄熱システムの全般的な運転状況を図3に示す。図には蓄熱運転と冷房運転がスケジュールに従って実施されている状況と、これに伴う鋼管杭内部の製氷・解氷状況を示しており、また、深さ25mにおける鋼管杭外表面から水平距離0.1m、0.3m、0.5m、0.8m(節点20, 24, 28, 32)の土壌温度の変化を示した。

節点13の冷房運転時の温度は、鋼管杭周囲土壌への熱損失や毎日の残水量の状況によって変化しているが、運転開始から比較的短時間で7℃以下となり継続的なピーク対応冷房運転が可能状態となっている。このときの計算開始時点の鋼管杭内部水温は土壌温度と同一の17℃としている。土壌温度の変化を見ると鋼管杭から0.1mの位置では急激な温度低下を見せているが、0.5m以上離れた位置では2日間程度以上の時間遅れで温度変化が始まっていることが分かる。

図4には夏期における節点13のコイル熱交換器出口温度と、節点9から12の蓄熱槽水温、ならびに、節点20の土壌温度の変化を時間的に拡大して示す。

同図の蓄熱運転時間帯においてコイル出口温度および蓄熱槽の温度(節点9から12)が低下傾向を示しているが、この部分が製氷時間帯に当たっている。午前8時になって夜間蓄熱運転が終了した時点で温度変化が停止し、それ以降12:00まで一定温度で推移している。

次に、12:00から冷房運転が開始され、これらの節点の温度が上昇を示している。このうち蓄熱槽温度で0℃を超えて急激な上昇を見せている部分が、蓄熱槽の氷が全て解けて顕熱分が上昇していることを表している。コイル出口温度は冷房運転が終了し一定温度で推移する前に2段階の上昇を見せているが、2段階目の急上昇はこの状況を反映している。3日目と5日目の冷房時間帯ではこのようなコイル出口温度の2段階の変化が見られないが、このときは蓄熱槽の氷が残存している状況にある。

図5には鋼管杭周囲の土壌温度の1年間に渡る変化の状況を節点20から48の水平方向の8点で代表して示す。

鋼管杭外表面から0.1mの位置では鋼管杭内部の日周期の水温変化の影響を大きく受けているが、0.3m、0.5mではその影響が次第に緩和され、0.8mでは日周期の影響

は見られない。鋼管杭外表面から0.3m、0.5mの位置における土壌温度は、鋼管杭氷蓄熱システム運転開始から1年経過後も低下傾向を示しているが、運用上は3ヶ月程度で定常状態になったものと判断して差し支えない。

このときの鋼管杭からの熱損失量は100~120 MJ/日と推定され、1日当たりの蓄熱量に対する鋼管杭からの熱損失の割合は10%程度と推定される。

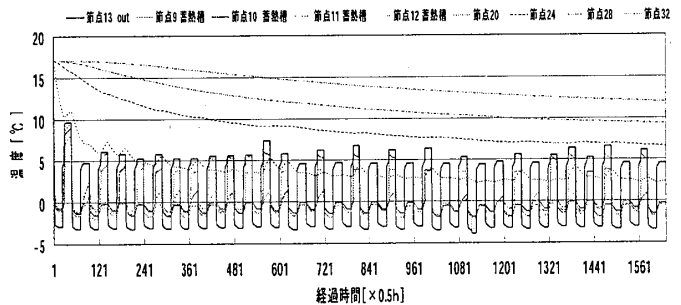


図3 鋼管杭氷蓄熱システムの運転状況

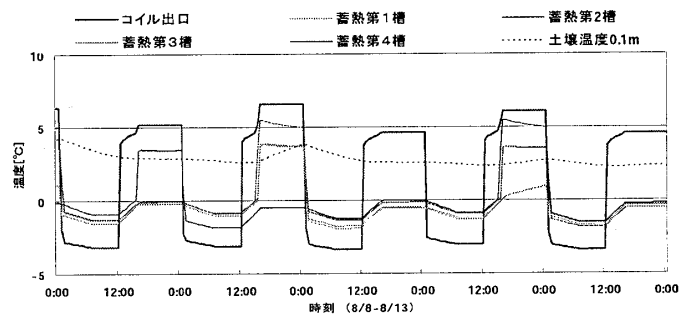


図4 製氷・解氷の状況

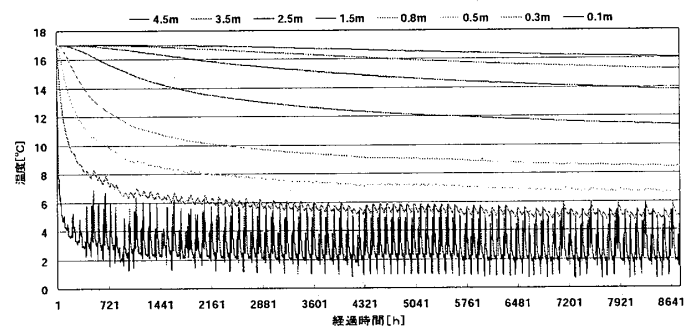


図5 鋼管杭周囲の土壌温度の変化

6. おわりに

シミュレーションによる評価の結果、鋼管杭氷蓄熱システムの熱損失は10%程度と予測され、技術的な成立の可能性が確認された。鋼管杭氷蓄熱システムの運転性能については、今後、実証実験を行い確認を進めて行く。

計算上の相変化の扱いにおいて、相当温度域の幅をどの程度にするかは、時間積分間隔や空間的な離散化程度とも関係しており、今後、検討を要する課題である。

\*1 東京電力㈱建設部土木・建築技術センター

\*2 清水建設㈱技術研究所

\*1 Tokyo Electric Power Company, Construction Dep.

\*2 Shimizu Corporation, Institute of Technology