

# 夏の熱を群杭効果で地中保存した融雪 - 近年の維持管理と設計施工での技術開発 -

宮本重信<sup>1</sup> 永井二郎<sup>1</sup> 竹内正紀<sup>1</sup> 橋詰善光<sup>2</sup> 奥田広行<sup>3</sup>

## 1. はじめに

地中熱利用融雪では従来は熱干渉を避け熱交換杭間隔を広げる設置であった。筆者らは、逆に、熱交換杭間隔を1.5mから2mに狭くして群杭にした。そのことで夏の融雪面の日射熱を地中に送っても多数の杭同士の熱干渉（群杭効果）で熱の拡散は抑制された（図1）。その結果福井と札幌の実験で初冬に地中の不易温度に比べ約10高温にすることができ、融雪能力を高めた。この方法で、熱交換杭の長さを従来方式の約半分にしても融雪能力は同じにできた。更に、この方法で短い杭を多数設置することになり、沖積平野での基礎杭設置工法を熱交換杭に転用でき、そこでもコストを削減できた。こうして、このシステムは電熱融雪なみの設置費にまで削減できた。また循環水のポンプ動力は約5W/m<sup>2</sup>と少ないため夏の蓄熱運転を含めた成績係数（出力量/消費電力量）も約12と見積もった。既に、鋼管基礎杭利用の橋面、専用鋼管杭利用で駐車場・福井駅歩道・幸（鋼床版）橋、工場製作のコンクリート基礎杭利用の上中IC（コンクリート床版）橋で実用を重ねた。

実施例の駐車場では2015年から、夏の蓄熱の運転での循環流量をインバータで半減化し蓄熱量を落とさずに、蓄熱運転を含めた成績係数（出力量/消費電力量）を19に高めた。こうして電熱融雪に比べて設置費が安価で、かつ電熱融雪の約1/20の年間電力消費を福井で実現した。

更に、橋面ではコンクリート床版と鋼床版で床版と融雪放熱管と舗装の融合、車道、駐車場や歩道でも放熱管と舗装の融合を図り、設置費と運用費の削減を実現した。その後、実際に大規模に実施された施工後のコンクリート路面のひび割れや基礎杭兼用利用での漏水と水質での維持管理を通じて更なる技術の進化を図った。

また、専用熱交換杭では回転貫入鋼管杭使用では寒冷地や橋面では不凍液量が増えて設置費が高く、腐食リスクもゼロでは無いことから地盤改良工法を応用したWUチューブ挿入工法の開発を行った。それは敦賀駅広場で実用に至った。更に、2016年には大口径での性能の向上を図った。

これらは福井県内の実施に止まっているが、融雪面と地中の2箇所の3次元非定常数値シミュレーションを用いれば、他の地域でのシミュレーションできる。

近年の技術開発と施工後の耐久性を中心に、以下紹介する。

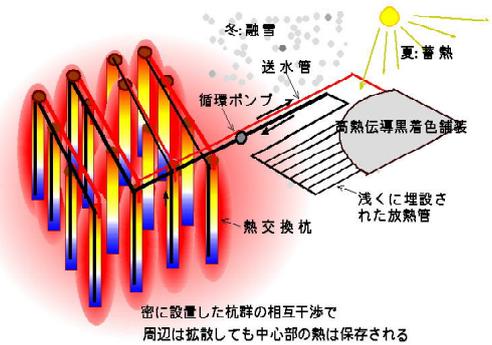


図1 群杭効果での地中蓄熱の概念

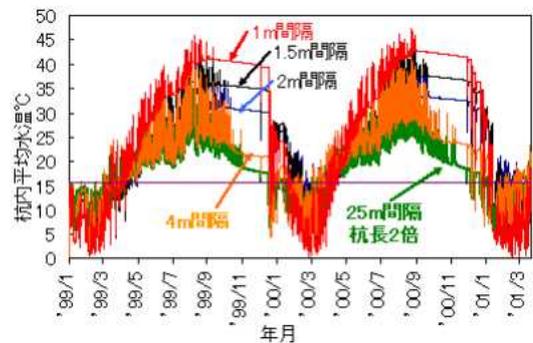


図2 杭設置間隔と杭内水温の変化

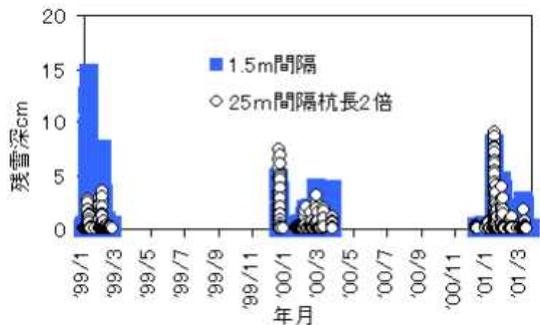


図3 杭設置間隔（1.5m vs 25m杭長2倍）と残雪深

## 2. 熱交換杭の設置間隔と熱の季節間保存、融雪能力

開発した融雪システムは、融雪面と熱源杭との熱移動で構成される。それぞれを交互に3次元熱解析で各地の標準気象データを読み込んで3分毎に熱の流れを計算すること2次元平面での残雪深が計算される。この数値シミュレーションソフトは福井と札幌で、幾つものケースで実測で検証されている<sup>1)2)3)4)</sup>。

熱交換杭を多数設置する場合、その間隔が広すぎると

\*1 福井大学

\*2三谷セキサン(株)

\*3福井県工業技術センター

表1 各要素技術の費用対効果

技術要素区分	放熱管設置位置など			珪石骨材(高熱伝導化)使用			舗装日射吸収率			蓄熱温度			杭長			放熱管流れ反転		放熱管の間隔			循環水の流速			蓄熱効果							
	かぶりmm	平均残雪深cm	運転時間h/年	骨材	平均残雪深cm	運転時間h/年	顔料セメント比	残雪深cm	運転時間h/年	開始停止	平均残雪深cm	最大残雪深cm	運転時間h/年	融雪積当り杭長m/m <sup>2</sup>	平均残雪深cm	最大残雪深cm	運転時間h/年	平均残雪深cm	最大残雪深cm	運転時間h/年	融雪面積当りL/(min m <sup>2</sup> )	平均残雪深cm	最大残雪深cm	運転時間h/年	杭長/融雪積m/m <sup>2</sup> (蓄熱の有無)	平均残雪深cm	運転時間h/年				
条件と結果	76	14.8	1105	普通	11	976	0%	11.1	751	13°C 9°C	11	18	573	1.7	11.5	18.3	954	無	12.5	986	15	9.0	14.2	745	0.50	9.4	15.8	805	4 (無)	12.6	181
	45	7.9	1051	珪石	7.9	1051	3%	8.6	755	6°C 3°C	7.9	12.6	1051	2.3	5.0	9.5	945	有	8.6	755	10	7.8	12.8	781	0.55	8.6	13.4	755	2 (有)	8.6	755
		6.9	-54		3.1	75		2.5	4		0.7	0.8	285		2.9	3.1	-105		3.9	-231		1.2	1.4	36		0.8	2.4	-50		4	574
上段から下段への建設費の増 [¥/m <sup>2</sup> ]	2,430 (床版合成化考慮-17,400)			400			500			0			3,385			670		957			217									-23,200	
上段から下段への50年間運転費の増 [¥/m <sup>2</sup> ]	-130			180			10			430			230			-540		-40			100							3,030			
上段から下段への効果対費用(建設費+50年間運転費)の増/削減残雪深 [¥/(cm年)]	332 (床版合成化考慮:-2,530)			186			204			205 (最大残雪:83)			1137 (最大残雪:634)			33		1309 (最大残雪:191)			122 (最大残雪:41)							-5,043			

\*運転時間h/年には'00年3月21日～'01年3月20日までの時間を用いた。  
 \*日射吸収率はセメント比顔料0%で0.70とした。他の効果対費用計算では日射吸収率は0.83とした。  
 \*日射吸収率、放熱管出入口反転、放熱管の間隔及び循環水の流速での蓄熱開始-停止の温度は9°C-5°Cとしている。

蓄熱された熱は冬までに拡散してしまう。逆に杭間隔が狭いと高温にはなるものの蓄熱総量は少なくなるので、冬の途中で蓄熱した熱量がなくなり以後は融雪能力が著しく低下する。従って最適な杭の間隔が存在する。

融雪面積当たりの杭長を変化させ数値シミュレーションを行った結果、融雪面積当たりの杭長を2m/m<sup>2</sup>前後にすれば、ほぼ目標の能力が得られると見込まれた。そこで融雪面積当たりの杭長を2m/m<sup>2</sup>として、杭の設置間隔を1m, 1.5m, 2m, 4mと変えて、さらに設置間隔を25mとして2本の杭で同じ融雪面積を融雪する(融雪面積当たりの杭長は2倍の4m/m<sup>2</sup>)という五つの条件で数値シミュレーションを実施した。

それぞれの杭間隔での杭内平均水温の変化を図2に示す。4m, 2m, 1.5m, 1mと杭間隔が狭くなるにつれて杭内平均水温は夏の蓄熱運転時に高くなり、秋には路面が高温にならないことから蓄熱運転はされないが、その温度がほぼ保持され、'00年12月1日でそれぞれ23.3, 32.1, 36.2, 41.0 と高い温度になる。しかし、25m間隔杭長2倍では18.3 で、蓄熱しても拡散することが分かる。杭間隔の狭い1m間隔の杭内平均水温は12月中旬に39.2

と最も高温であったが融雪運転の都度急激に低下し、1月末には最も低くなる。融雪の全期間を通じて杭内平

均水温が高い1.5mから2mがここでの融雪に最適な杭の間隔だと推測される。

杭設置間隔1.5m と25m間隔でその杭長を2倍(4m/融雪面積m<sup>2</sup>)にした二つのケースでの平均残雪深の変化を図3に示す。図3から、1.5m間隔での最大残雪量は、25m間隔杭長2倍のそれに比べて、蓄熱なしで迎えた'99年1~2月では2~3倍と多いが、蓄熱後の'00年では逆に少なく、大雪の'01年の冬でもほぼ同じであることが分かる。すなわち、融雪面積当たり杭長を1/2にしても、杭間隔を1.5mにして夏の蓄熱を行うことで、同じような残雪深にできる。

なお、この方法では蓄熱温度の変化が著しいことから、融雪能力が変化する。降雪の有無を感知するセンサではなく路面の積雪の有無を感知する積雪センサによって制御されることで、高温時には間欠運転、低温時には雪が降り止んでも残雪があれば溶けるまで運転することで無駄なく最大の能力を発揮できる。そのセンサも開発進化させてきた。

### 3. 要素技術の最適組み合わせ<sup>4)</sup>

さて、融雪面では放熱管を舗装の浅くに埋設すれば熱抵抗が小さくなり夏の集熱と融雪に有利になる。舗装コ



写真1 夏の熱群杭効果保存の融雪(幸橋)



写真2 夏の熱群杭効果保存の融雪(幸橋)



写真3 RC床版と融雪放熱管の融合(放熱管上面まで通常コンクリート, 上面黒着色鋼繊維補強コンクリートのwet on wet 打設(上中IC橋))

ンクリートの骨材を熱伝導率に優れる珪石にすることも有用である。また舗装コンクリートを黒色顔料で日射吸収率を高めることも夏の集熱に寄与する。放熱管の間隔を15cmから10cmに狭くすることも融雪能力を高める。

このように融雪能力向上に寄与する要素技術は多くある。各地の標準気象データで精度の良く非定常数値シミュレーションで残雪量の算出や年間の運転時間の算出が可能となった。そのことで費用対効果を精度良く求めることができ、要素技術の最適な選択が可能となった。

この要素技術の最適な組み合わせを写真1, 写真2の幸橋(鋼床版橋)での夏の熱の鋼管専用杭群による蓄熱による

融雪・凍結抑制で行った。その結果が表1である。

表1の左端では鋼管放熱管埋設深さを76mm(従来のアスファルト舗装)から45mm(鋼繊維補強コンクリート舗装)にしたことで、最大残雪深は半減になることが集約されている。そのことで融雪面積当たりで2430円/㎡アップする。ただし、鋼繊維補強コンクリートにすることで、剛性が大きくなることを活かして、鋼床版橋としての設計で無く合成鋼床版橋として設計でき、17400円/㎡逆に安価にできた。50年間の運転時間と設置費では平均残雪量を1cm減らすのに332円/㎡/cm(合成鋼床版橋化<sup>5)</sup>)で-2530円/㎡/cm)となる。このように放熱管と床版の融合(相互浸透)は、大きなコスト削減となる。なお、上中IC橋の鉄筋コンクリート床版でも床版鉄筋を融雪放熱管の固定に使い、アスファルト舗装をコンクリート舗装にして耐久性を高めながら熱抵抗と死加重の削減という融合でコスト縮減とした(写真3)<sup>5)</sup>。

次の右欄にはコンクリート骨材を高熱伝導の珪石にすることでコストを186円/㎡/cmとしている。その右はコンクリートに黒色顔料を入れて夏の集熱を高める効果対費用である。その右は、夏の運転を路面温度が地中温度より13 高い時ポンプを稼働、放熱管出入り口水温差が9 以下になればポンプを停止とするから 9 以上で稼働、温度差5 以下停止にすれば、205円/㎡/cmの費用となる。これを6 稼働3 停止にすると968円/㎡/cmと一気に費用が高んでいる。

以下の杭長や放熱管の間隔、循環流量などの残雪深削減あたりの費用を求めた。こうした一覧の中で、費用の少ない順番に、選択すれば概ね良い選定になり、大きなコスト縮減となる。

#### 4. コンクリート舗装(車道)とタイル(歩道)の耐久性

放熱管埋設では耐久性も考えるとコンクリート舗装が適する。橋面では床版コンクリートの中に放熱管を埋設し、コンクリートで摩耗層は少ないが2cmほどを見込んでそれを舗装とみなして、床版と同時施工した(写真1)。施工後1年半経過で、放熱管の管上や放熱管固定の1m間隔のスペーサー上に干渉収縮ひび割れ最大0.2mmが多数発生した<sup>6)</sup>。コンクリート打設後に降雪となった箇所はひび割れが発生しなかったことなどから、散水養生不足が原因と分かった。膨張剤を使用すると十分な散水養生を要するが、十分でなかった。これは施工者の責任で修補された。ケイ酸ソーダを塗布することで、ひび割れにC-S-Hのゲルが形成されて、やがてひび割れはなくなった。

また、一般にコンクリートは温度管理されても湿度管理がされていない。そこで次回施工の上中IC橋の鉄筋コンクリート床版と放熱管の融合施工(写真3)では、透湿・遮水のゴアテックスフィルムで覆った湿度センサをコンクリートと養生マットの中間において湿度を記録管理した。上中ICでは、そのような管理をしたが、床版の1部に最大0.1mmひび割れが生じ、これは特記記載の瑕疵担保2年内で交通開放前に、珪酸ソーダ塗布で対処できた。

ひび割れなどが異形の連続鉄筋で分散することで目地なし舗装が出来るという車道での連続鉄筋舗装<sup>7)</sup>では、ひび割れは、施工後10年以上経過するが生じていない。鋼製放熱管を曲げずに直線設置できることと合わせて舗装と放熱管の融合として有用なことが確認された。また、幸橋での上述のひび割れも、異形鉄筋を10cmメッシュで放熱管上に橋脚前後の負の曲げモーメント区間に設置した箇所では、生じなかった。

橋面歩道部のタイルでは、ブローアップで問題が生じた。これは膨張目地を挿入してないことが原因で、膨張目地を入れて修繕した。膨張目地を入れている福井市内のタイルでも数年経過でひび割れが生じていた。施工時からタイルとモルタルとの付着が悪くて剥がれ、大きな面積のタイルでは加重でモーメントも大きくなり、やがて割れる。完成検査に打音検査をすると特記すると施工者から現状では一定程度の不合格となるから、接着性の高いもので施工させてとの申し出があって、工費もやや高くなった。しかし、高価なタイルが10年余で剥がれ破損するのに比べて遙かに安価である。施工後10年経過で従来のような剥がれはない。また、ポリエチレン放熱管は5m間隔でUターンさせずに目地を横断して、延長50mほどでUターンし、施工の省力化とした。約10年経過したが、そのことによる破損などは生じていない。

それでも橋面部で縦断勾配のある橋面のタイルで目地部から雨水が浸透し、流末で、炭酸カルシウムの析出が見られた。これが亜鉛メッキ鋼管の腐食させた。これも炭酸カルシウムで隙間が自己治癒されないと付着力低下などが生じかねない。流入箇所の目地部にケイ酸ソーダを塗布すると修繕できるかもしれない。

## 5. 夏の蓄熱での大幅節電で年間COP19に

群杭効果で夏蓄熱するシステムの循環量は $0.58 \frac{\text{L}}{\text{分}/\text{m}^2}$ で、そのポンプ消費電力量は夏の蓄熱で $2.04 \text{kWh}/\text{m}^2/\text{y}$ 、融雪で $0.30 \text{kWh}/\text{m}^2$ 、年間 $2.34 \text{kWh}/\text{m}^2/\text{y}$ であった。夏は日中の連続運転で地中内は温度飽和し温度拡散しない。夏は間欠運転にしても、 $0.58 \frac{\text{L}}{\text{分}/\text{m}^2}$ の循環量をインバーター回転数で半減化しても、蓄熱量に影響を与えないことが数値シミュレーションから分かった。駐車場の融雪でインバーター化し夏の蓄熱循環量を半減化すると瞬間消費電力は $4.2 \text{W}/\text{m}^2$ が $1.0 \text{W}/\text{m}^2$ になり、蓄熱時 $0.61 \text{kWh}/\text{m}^2/\text{y}$  (70%削減)、融雪時 $0.30 \text{kWh}/\text{m}^2/\text{y}$ 、年間 $0.91 \text{kWh}/\text{m}^2/\text{y}$  (60%削減)の実績を得た(図4)。

また実測の初冬の蓄熱温度は5年間蓄熱が融雪より大きいことの積み重ねもあって、2010年の25 が循環量半減化の2016年には27 に増えた(図5)。従来は融雪負荷 $17.0 \text{kWh}/\text{y}/\text{m}^2$ で成績係数7.3であったが、蓄熱循環量半減をインバーターで行った結果成績係数は19となった。

夏の運転は、地中温度より路面が例えば8 高温で運転を開始、10分後に放熱管出入口水温差が4 以下になれば運転を停止している。運転停止の放熱管出入口水温

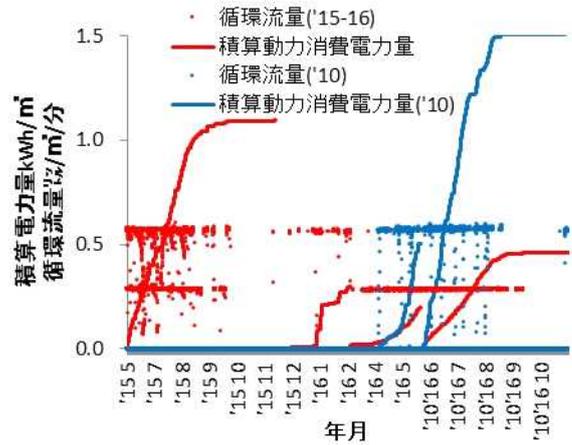


図4 2015～16年2010年の月-循環流量と消費電力量

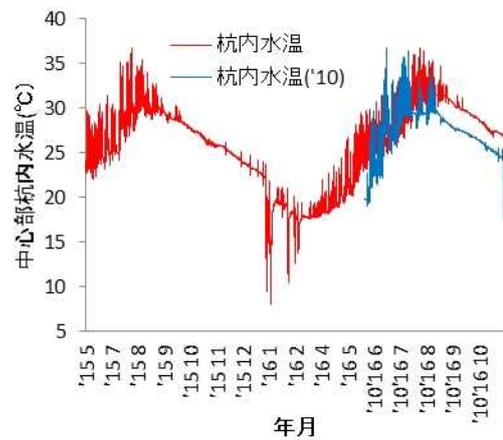


図5 2010年と2015～2016年の杭内水温

差を100 に変えるだけで、運転は間欠運転になる。こうして費用なしで節電できる。今春これを既存の施設に導入した。

## 6. コンクリート杭内貯水循環での漏水と回路スケールへの対応 大気密閉化とケイ酸ソーダ添加<sup>8)</sup>

遠心力での工場製作のプレストレス高強度コンクリート杭 (PHC杭)の底に鋼板で当てて貯水して、この貯水を融雪面に循環した融雪は、福井県内を中心に7箇所施工され運転されている。最初の駐車場融雪は27年間ほとんどメンテナしで運転されたきた。一方で、一部に打撃杭でのそれでは漏水と炭酸カルシウムの析出でトラブルを招いている。

二酸化炭素の循環水への浸透は、酸素に比べて大気内の分圧が小さいことからポリエチレン管を除くと樹脂配管からの浸透はわずかである。しかし、図6左図のように、大気開放系補給水のボールタップのボールに炭酸カルシウムが付着し、そのタンク内側の水没ステンレス鋼には厚さ1mmほどの炭酸カルシウムが付着している。また、大気開放タン

クからの流れの直後の流量計が閉塞したこと等から給水とその大気開放箇所から循環水への二酸化炭素の進入だと推測される。

そこで、それまでの補給給水の大気開放系配管から大気密閉系にすることを考えた。大気密閉系にすれば、漏水杭でも杭内水位は地下水水位で平衡し、漏水は生じない。二酸化炭素と酸素の進入がなくなり炭酸カルシウム析出での目詰まりも腐食も抑制される。杭内水位 (=地下水水位) が自吸式ポンプで対応可能できる高さであればシステムは成立する。杭の細長い形状や膨大な循環貯水量を考えると、水質制御で目詰まりや腐食を抑制するのではなくて、酸素や二酸化炭素を循環水に浸透させない制御が適したのではなかったかと考えた。

そこで、橋面融雪の上中インタチェンジ橋では漏水が生じていたので、図6右図大気密閉系に示すように、自吸式ポンプの手前の空気抜きタンクは大気密閉とした。更に高さ10mの橋面融雪用放熱管の将来の漏水(大気開放)を考慮し、融雪面と熱源杭とを運転時以外は電動弁で遮断した。3年経過したが、給水なしで運転されている。ここではPHC杭内面にエポキシ樹脂塗装を施した。杭内面にノ口が残る表面への塗布で、その量も十分でないことと杭頭の上面は塗装されていないこともあってか、貯水約6年経過でカルシウム硬度205mg/l、飽和係数4.5、pH11.5である。Ca<sup>2+</sup>が高くて二酸化炭素が浸透しなければ炭酸カルシウムとして析出しないからトラブルは抑制される。

なお、橋面や寒冷地では、放熱管内の循環水が凍結しないように運転を行うが、停電等での放熱管内の循環水の凍結リスクが残る。循環水を不凍液にすれば費用は非常に高い。それには熱源部と融雪面とを分離し、それぞれ密閉回路とし、それを熱交換器で繋ぐ。この方法であれば凍結リスクを解消でき、より寒冷地での適用が可能となる。

しかしリスクを考えると、ケイ酸ソーダを貯水当初に貯水量の0.3%も添加すれば、杭のコンクリートにC-S-Hゲルが形成されて、Ca<sup>2+</sup>の貯水への流出もひび割れ漏水も減る。

長さ2m外径30cmの杭内模型での実験では、そこへの貯水のCa<sup>2+</sup>は、一時的に9000ppmにもなり、その後は炭酸カルシウムが形成され下がる。当初ケイ酸ソーダ添加するとCa<sup>2+</sup>は無添加の約1/10になった。15ヶ月後の飽和(ランゲリア)指数は無添加の4.7がケイ酸ソーダ添加で1.7に改善された。ケイ酸ソーダ(3号)の価格は120円/l程度で、貯水量の0.5%であれば熱源杭全体費用の約2%と安価である。

図7に、これまでの杭貯水方式での貯水について、腐

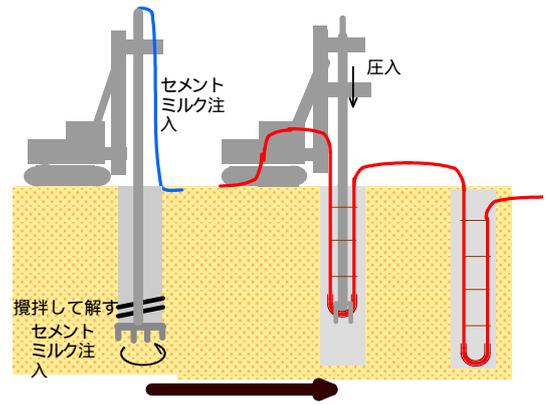


図8 地盤改良機(杭打ち機)利用でのWUチューブ攪拌圧入



写真4 地盤改良機(杭打ち機)利用でのWUチューブ攪拌圧入

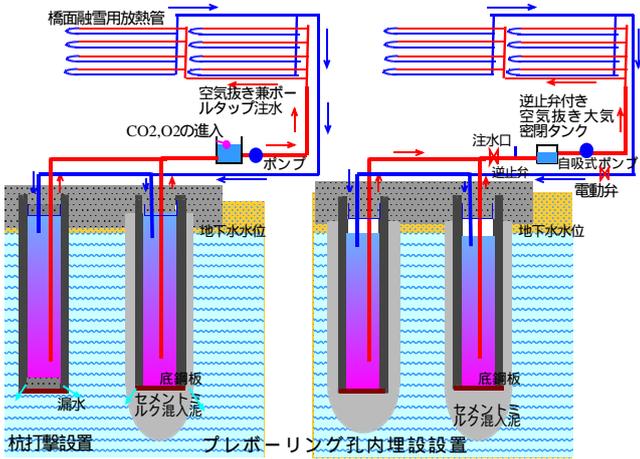
食性とスケールの発生を示した。ケイ酸ソーダー添加で炭酸カルシウムなどのスケール発生側から腐食発生側になっている。ケイ酸ソーダ添加貯水に吊したステンレス鋼、青銅(砲金)、黄銅、鋼板、アルミ、銅では、亜鉛のみで著しい腐食が生じた。

この方法であれば、ニューマチックケーソン基礎の巨大空洞を水質も改善しながら蓄熱槽にでき、安価な橋面融雪熱源にできる。

#### 7. 専用杭の進化 杭打ち機を利用したUチューブ挿入

幸橋などでの夏の熱の蓄熱には回転貫入鋼管杭を用いたが、鋼材の高騰と腐食リスク、寒冷地や橋面での不凍液コスト増から地盤改良工法を応用したWUチューブ挿入工法の開発を行った。

図8のように、掘削機先端からセメントミルクを出しながら地盤を掘削する。その後、その泥孔に2組のUチューブを間隔を広げてロッドで圧入する。ボーリングと異なり地盤改良機やプレボーリング工法の杭打ち機は大口径掘削となることで、Uチューブの間隔を広げることが容易で、それが地盤への熱拡散が大きくなる。その性能を考慮すると設置費を下げられた。これは敦賀駅前広場での夏の熱蓄熱での融雪に実用に至っている(写真4)。更に、4組のUチューブでの圧入へと改良した試験



大気開放系 大気密閉系  
図6 システム図(融雪)

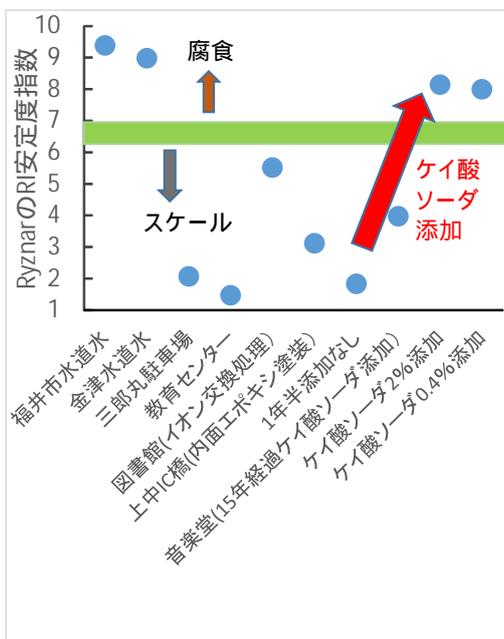


図7 コンクリート杭貯水水質の腐食・スケール性

施工を実施し、数値シミュレーション通りの性能が得られることを検証している<sup>9)</sup>。

### 8. おわりに

技術の専門分化や公務員技術者が民間委託で減ったことなどもあってか、システム全体を俯瞰した設計が不十分になっている。そうしたことから、筆者らは、要素技術の融合や相互浸透を目指し、熱、橋梁や道路、杭の大学や民間の研究者らと共同で技術の開発、実用を図ろうとした。そのテーマを含めて、14年前に夏の熱を地中に保存できると気づいたことを競争的研究費に提案し、採択して戴き福井と札幌で実験実証した。それを幸橋や上中i c橋など4箇所を実現した。その竣工後、維持管理する中で幾つかの未熟さ、不都合な真実に出会った。それを正直に公表し教訓とさせて戴いた。それが新たな技術

にも繋がった。

地球温暖化で、福井での融雪ニーズは減っているが、一方で寒冷地での民間での再生可能エネルギーによる融雪ニーズは高い。専用杭でも電熱融雪ほどの設置費で、木曾杭兼用であれば更に約1/2、消費電力は電熱融雪の1/20と概算される。筆者らの研究が活かされることを願う。

一連の研究は、NEDO「技術融合による地中熱融雪システムのコスト縮減と省エネ化の研究開発(平成14~16年度)」、環境省地球温暖化対策技術開発・実証研究事業「杭打ち機を用いた井戸、熱交換杭の開発と地中熱利用等への適用(平成22~24年度)」、NEDO「共生の大地への地中蓄熱技術の開発(平成27~30年度)」の成果による。記して関係者への謝辞とする。

### 文献

- 1) 永井二郎, 宮本重信, 大澤良和, 五十嵐俊介, 柴田和夫, 竹内正紀: 季節間蓄熱を援用した地中熱融雪の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 2008.3
- 2) 永井二郎, 宮本重信, 西脇昌哉, 竹内正紀: 放熱管理設路面融雪の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集(B編), 2010.07
- 3) 宮本重信, 永井二郎, 竹内正紀, 山崎三知朗, 山端信也: 橋梁基礎杭を用いた季節間蓄熱融雪の実測と数値シミュレーション, 土木学会論文集G, 2011.2
- 4) 宮本重信, 竹内正紀, 永井二郎, 菅原桂一郎: 熱交換杭群を用いた合成鋼床版橋での季節間蓄熱融雪の一設計, 土木学会論文集G, 2008.02
- 5) 松井繁之, 堀川都志雄: NEDOエネルギー使用合理化技術戦略開発エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発事業「技術融合による地中熱融雪システムのコスト縮減と省エネ化の研究開発」成果報告書第3章融雪機能を備えた合成鋼床版とRC床版の輪荷重走行試験機による疲労耐久性の評価, 第4章地中熱による温水の循環放熱管を埋設した凍結抑制型合成鋼床版の疲労特性, 2006.3
- 6) 幸橋床版・舗装のひび割れ調査委員会: 幸橋(合成鋼床版橋)における床版・舗装のひび割れ等について, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」第22号, 2009.8
- 7) 宮本重信, 西澤辰男, 武市靖, 野田悦郎, 高島浩一: 融雪用放熱管を有する舗装の設計・施工の合理化例, 土木学会論文集, Vol.66. No.3, 276-287, 2011
- 8) 宮本重信, 橋詰善光: コンクリート杭貯水循環での地中熱融雪・冷暖房での漏水, 目詰まりと腐食の抑制-ケイ酸ソーダ, 糸くず, 大気密閉回路の利用-空気調和衛生工学会年次講演, 2017.9
- 9) 宮本重信, 永井二郎, 竹内正紀, 橋詰善光, 佐々木貴史: 基礎杭を用いた各種熱交換杭の性能, 日本冷凍空調学会年次講演, 2016