

基礎杭を用いた地中熱利用システムの開発

Development of Geothermal Energy System with Foundation Piles

村野昭人* 福手 勤* 斎藤 衛**

1. はじめに

地中熱エネルギーは天候や場所に左右されず、安定した発電量を供給できるエネルギーとして着目されている。土壌中の温度は、ある程度の深さになると外気による温度変化を受けにくくなるため、地中と外気の間に温度差が生じる。この温度差を利用し、冷暖房時のエネルギー使用量を削減する取り組みが増加しつつある。

地中熱に関する多くの事例では、地中熱を取り出すために水や不凍液を循環させる方式を用いている。この方法では、多くのエネルギーを得られる一方で、運用時のエネルギー消費が大きくなることが課題となっている。

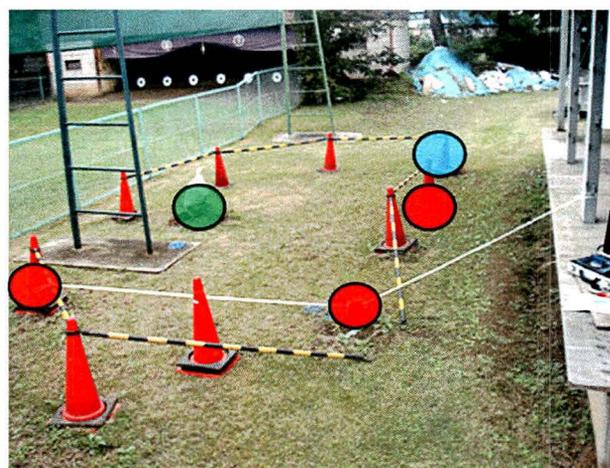
そこで本研究では、それらの課題に対応するため、建築物の基礎杭の中にチューブを通し、ブロワーを用いた空気循環により熱を取り出す地中熱利用システムについて検討する。冷暖房に伴う消費エネルギーの削減量やCO₂削減量を算出することで、基礎杭を用いた空気循環での地中熱利用の有効性を検証する。

2. 基礎杭を用いた地中熱利用システムの実験概要

東洋大学の川越キャンパス内に、建築物の基礎杭を想定し、鋼管杭を埋設した。埋設した鋼管杭の詳細を表1に示す。杭打工事は東洋大学、初雁興業株式会社、株式会社高脇基礎工事の共同研究として実施された(図1)。施工は、①鋼管杭建込、②杭芯セット、③回転貫入、④継杭建入、⑤溶接、⑥回転貫入、⑦貫入完了の順に行った。

表1 鋼管杭の諸元

杭長(m)	杭種	本数(本)	単位質量(kg/m)	1本当たりの質量(kg)
6	STK400 φ114.3×4.5t	3	12.2	73.2
9	STK400 φ114.3×4.5t	1	12.2	109.8
12	STK400 φ114.3×4.5t	1	12.2	146.4



●6m杭 ●9m杭 ●12m杭

図1 地中熱利用システムの実験場所

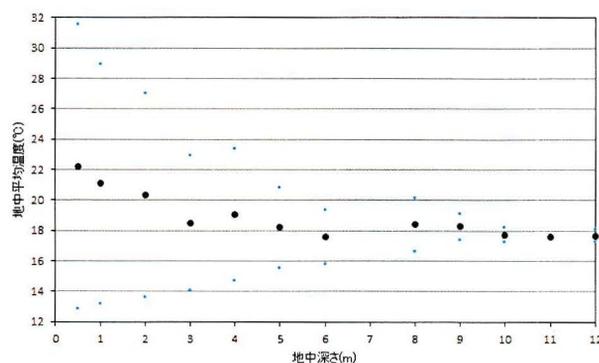


図2 地中温度分布

3. 地中熱利用システムの実験結果

3.1 地中の温度分布

実験で得られた、地中深さ別の温度測定結果を図2にまとめた。地中温度は、一年を通して地下5m程からは18°C付近で安定していることが確認できた。一般に通常の地盤では、地下5m以下では15°C~18°Cで安定しているとされており、本実験の東洋大学川越キャンパス内においても、同様の結果が得られた。

一方で、0.5m～4m までの地中温度は、深くなるにつれ徐々に安定してはいるものの、ばらつきが大きい結果となった。この理由としては、浅い土壌では外気の変化や日射量、天候によつての影響を受けやすい環境にあり、地中の温度変動が激しくなったと考えられる。

3. 2 採放熱量の算出

実験から得られた入口温度と出口温度を用いて、地中熱により得られる熱量を算出する。

採放熱量算出式(式 1)を以下に示す。式 1 より求められた値がプラスだった場合は放熱、マイナスだった場合は採熱となる。各季節の採放熱量を、平均温度、最大放熱温度、最大採熱温度、中間温度ごとにそれぞれ算出した結果を以下に示す。

$$Q = C \times V \times (T_2 - T_1) \dots \text{式 1}$$

C : 容積比熱 1.2(kJ/m³・K)

V : 風量 6m 杭 1.68(m³/h)、9m 杭 3.36(m³/h)、
12m 杭 6.00(m³/h)

Q : 採熱量(kJ/h)

T₂ : 入口(外気)温度(K)

T₁ : 出口温度(K)

求めた季節別の採放熱量をまとめた表を表 2、表 3 に示す。冬～夏は実験を通し、最も安定していた 9m 杭を使用し、秋は 9m 杭と新たに設置した 12m 杭を使用する。

従来の使用電力と冷暖房消費エネルギー削減効果を比較し、まとめた結果を表 4、表 5 に示す。最大採放熱量と中間の採放熱量で冷暖房消費エネルギー削減効果を算出した。

最大採放熱量が安定して得られた場合を想定して算出した結果、9m杭で従来の使用電力の 1.96%～6.93%、10月～12月の12m杭で6.28%～12.02%の削減が見込めるといふ結果となった。一方で、中間の採放熱量で算出した結果、9m杭で従来の使用電力の0.96%～4.07%、10月～12月の12m杭で1.96%～7.21%の削減が見込め

表 2 季節別採放熱量まとめ (朝)

季節		杭		最大採放熱温度	中間温度差	
冬(1月～3月)	1月	下旬	9m杭	温度差(K)	-11.07	-5.09
				熱量(kJ/h)	-37.20	-17.10
	2月	上旬		温度差(K)	-12.30	-3.25
				熱量(kJ/h)	-41.33	-10.92
	2月	下旬		温度差(K)	-6.34	-2.89
				熱量(kJ/h)	-21.30	-9.71
3月	上旬	温度差(K)	-7.86	-2.96		
		熱量(kJ/h)	-26.41	-9.95		
3月	下旬	温度差(K)	-8.20	-1.98		
		熱量(kJ/h)	-27.55	-6.65		
春(4月～6月)	6月	9m杭	温度差(K)	51.60	16.50	
			熱量(kJ/h)	173.38	55.44	
			温度差(K)	6.37	-12.20	
夏(7月～9月)	7月	上旬	温度差(K)	11.70	4.01	
			熱量(kJ/h)	39.31	13.47	
	7月	下旬	温度差(K)	14.80	6.63	
			熱量(kJ/h)	49.73	22.28	
	8月	上旬	温度差(K)	11.80	4.82	
			熱量(kJ/h)	39.65	16.20	
	8月	下旬	温度差(K)	13.00	8.55	
			熱量(kJ/h)	43.68	28.73	
	9月	上旬	温度差(K)	11.70	7.45	
			熱量(kJ/h)	39.31	25.03	
	秋(10月～12月)	10月	下旬	温度差(K)	-11.20	-2.56
				熱量(kJ/h)	-37.63	-8.60
11月		上旬	温度差(K)	-12.00	-5.88	
			熱量(kJ/h)	-40.32	-19.76	
11月		下旬	温度差(K)	-19.10	-9.58	
			熱量(kJ/h)	-64.18	-32.19	
12月		上旬	温度差(K)	-20.40	-11.00	
			熱量(kJ/h)	-68.54	-36.96	
12月		下旬	温度差(K)	-20.50	-10.00	
			熱量(kJ/h)	-68.88	-33.60	
10月		下旬	12m杭	温度差(K)	-10.20	-1.37
				熱量(kJ/h)	-61.20	-8.22
	11月	上旬		温度差(K)	-11.40	-5.09
				熱量(kJ/h)	-68.40	-30.54
	11月	下旬		温度差(K)	-18.40	-9.06
				熱量(kJ/h)	-110.40	-54.36
12月	上旬	温度差(K)	-19.70	-10.80		
		熱量(kJ/h)	-118.20	-64.80		
12月	下旬	温度差(K)	-20.10	-10.10		
		熱量(kJ/h)	-120.60	-60.60		

表 3 季節別採放熱量まとめ (夜)

季節		杭		最大採放熱温度	中間温度差	
冬(1月～3月)	1月	下旬	9m杭	温度差(K)	-11.80	-6.40
				熱量(kJ/h)	-39.65	-21.50
	2月	上旬		温度差(K)	-11.76	-5.46
				熱量(kJ/h)	-39.51	-18.35
	2月	下旬		温度差(K)	-4.94	-3.09
				熱量(kJ/h)	-16.60	-10.38
3月	上旬	温度差(K)	-7.27	-3.37		
		熱量(kJ/h)	-24.43	-11.32		
3月	下旬	温度差(K)	-8.61	-2.88		
		熱量(kJ/h)	-28.93	-9.68		
春(4月～6月)	6月	9m杭	温度差(K)	45.30	19.10	
			熱量(kJ/h)	152.21	64.18	
			温度差(K)	3.08	-1.62	
夏(7月～9月)	7月	上旬	温度差(K)	10.35	-5.44	
			熱量(kJ/h)	32.76	8.37	
	7月	下旬	温度差(K)	9.75	2.49	
			熱量(kJ/h)	32.29	12.16	
	8月	上旬	温度差(K)	8.51	2.99	
			熱量(kJ/h)	28.59	10.05	
	8月	下旬	温度差(K)	11.00	5.77	
			熱量(kJ/h)	36.96	19.39	
	9月	上旬	温度差(K)	7.79	3.85	
			熱量(kJ/h)	26.17	12.94	
	秋(10月～12月)	10月	下旬	温度差(K)	-11.30	-6.04
				熱量(kJ/h)	-37.97	-20.29
11月		上旬	温度差(K)	-13.70	-8.96	
			熱量(kJ/h)	-46.03	-30.11	
11月		下旬	温度差(K)	-18.70	-12.60	
			熱量(kJ/h)	-62.83	-42.34	
12月		上旬	温度差(K)	-19.80	-14.00	
			熱量(kJ/h)	-66.53	-47.04	
12月		下旬	温度差(K)	-20.10	-12.40	
			熱量(kJ/h)	-67.54	-41.66	
10月		下旬	12m杭	温度差(K)	-10.30	-5.01
				熱量(kJ/h)	-61.80	-30.06
	11月	上旬		温度差(K)	-13.00	-8.60
				熱量(kJ/h)	-78.00	-51.60
	11月	下旬		温度差(K)	-18.00	-12.00
				熱量(kJ/h)	-108.00	-72.00
12月	上旬	温度差(K)	-19.10	-13.70		
		熱量(kJ/h)	-114.60	-82.20		
12月	下旬	温度差(K)	-19.60	-12.50		
		熱量(kJ/h)	-117.60	-75.00		

表 4 冷暖房消費エネルギー削減量
 (最大採放熱量)

月		1月	2月	3月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
9m杭	消費エネルギー削減効果(kWh)	1.32	1.91	1.85	2.65	2.56	1.09	0.34	3.56	4.68
	従来の使用電力(kWh)	67.46	63.10	67.46	67.46	67.46	45.70	8.70	65.28	67.46
	削減割合(%)	1.96	3.03	2.74	3.93	3.80	2.39	3.86	5.45	6.93
12m杭	消費エネルギー削減効果(kWh)	-	-	-	-	-	-	0.55	6.08	8.11
	従来の使用電力(kWh)	-	-	-	-	-	-	8.70	65.28	67.46
	削減割合(%)	-	-	-	-	-	-	6.28	9.31	12.02

表 5 冷暖房消費エネルギー削減量
 (中間採放熱量)

月		1月	2月	3月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
9m杭	消費エネルギー削減効果(kWh)	0.66	0.80	0.65	0.97	1.28	0.63	0.13	2.07	2.74
	従来の使用電力(kWh)	67.46	63.10	67.46	67.46	67.46	45.70	8.70	65.28	67.46
	削減割合(%)	0.99	1.26	0.96	1.44	1.90	1.38	1.48	3.18	4.07
12m杭	消費エネルギー削減効果(kWh)	-	-	-	-	-	-	0.17	3.48	4.87
	従来の使用電力(kWh)	-	-	-	-	-	-	8.70	65.28	67.46
	削減割合(%)	-	-	-	-	-	-	1.96	5.32	7.21

るといふ結果となった。

4. 地中熱利用システムのLCCO₂の評価

4.1 評価の対象

地中熱を利用せずに一般的な空調を利用する際に排出されるCO₂排出量と、地中熱利用システムを家庭に導入したと仮定し、利用する上で排出されるCO₂排出量を比較し、評価する。

ライフサイクルCO₂を算出する際の項目として、以下の3つが挙げられる。

- ①掘削・埋設する導入の際に発生するCO₂排出量
- ②エアコンを使用している際に発生するCO₂排出量
- ③メンテナンス・廃棄する際に発生するCO₂排出量

以上の3つの項目について評価を行う。設置する条件として、東京都の一般住宅に5mの基礎杭を2本設置するものとする。広さは45坪、約148.5m²と設定した。

4.2 一般的な空調を利用する場合

地中熱を利用せずに一般的な空調を利用する場合、掘削・埋設する工事等は行わず、エアコンを設置する作業のみとなるため、CO₂排出量も排出しないとみなす。

次に、エアコンを使用している際に発生するCO₂排出量を、月別のエアコン1台あたりの使用電力量を用いて算出する。なお、CO₂排出原単位は2012年7月31日に東京電力が発表した京都メカニズムクレジット等を反映した調整後のCO₂排出原単位である0.463kg-

CO₂/kWh(前年度比24%増)を使用する。

算出計算を以下に示す。

年間合計冷房使用電力(kWh) :

$$63.10+67.46+67.46+45.70=243.71(\text{kWh})$$

年間合計暖房使用電力(kWh) :

$$8.70+65.28+67.46+67.46+63.10+67.46+30.46=369.92(\text{kWh})$$

年間合計冷暖房使用電力(kWh) :

$$243.71+369.92=613.63(\text{kWh})$$

エアコンを使用している際に発生するCO₂排出量

$$613.63(\text{kWh}) \times 0.463(\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{kWh}) = 284.11(\text{kg} \cdot \text{CO}_2)$$

となり、地中熱を利用せず、一般的な空調を利用する場合のCO₂排出量は284.11kg・CO₂となる。

この値は1台分の空調を利用する場合のCO₂排出量の値であるため、家庭に3台のエアコンを保有すると仮定すると、284.11(kg・CO₂)×3(台)=852.33(kg・CO₂)となる。

メンテナンス・廃棄する際に発生するCO₂排出量であるが、メンテナンス及び廃棄は頻繁に行われるものではないことに加え、CO₂排出量もほとんど発生しないものと考えられるため、今回の算出計算には含めないものとする。

4.3 地中熱利用システムを導入する場合

地中熱利用システムを導入する場合のライフサイクルCO₂排出量を算出する。掘削・埋設する導入の際に発生するCO₂排出に関しては、建物を新築する際に設置する場合、建築物の基礎杭内に設置できるため、CO₂排出量はほとんどないと考えられる。そのため、今回は新たに地中熱利用システムを導入したと仮定した場合に、設置・埋設する際のCO₂排出量を算出する。

設置・埋設する際に発生するCO₂として、建設機械の稼働に伴い排出されるCO₂と、運搬に伴うCO₂が挙げられる。

以下に示す式2を用いて、建設機械の稼働段階のCO₂排出量を求める。なお、稼働する機械は杭打機(10tセルフ)とする。

建設機械の稼働段階の CO₂ 排出量 (t・CO₂)
 =燃料消費量 (ℓ/h) ×原単位 (kg・CO₂/L) ×10⁻³
 ×実際の施工量(m³)/1日当たりの標準施工数量(m³/日)
 ……式 2

燃料消費量は、川越キャンパス内の実験場所にて施工した際に使用した、DHJ-08 杭打機のカatalogに記載されている機関出力、燃料消費率を用いて、式 3 から算出する。

燃料消費量=機関出力 (kW) ×運転 1 時間あたり燃料消費率 (ℓ/kW・h) ……式 3

軽油の比重を 0.84 とすると、燃料消費量=40.8 (kW) ×245 (g/kW・h) =40.8 (kW) ×0.29 (ℓ/kW・h) =11.8 (ℓ/h) となる。従って、1 日 5 時間作業した場合には、11.8×5=59.0 (ℓ) となる。

燃料の原単位として、国土交通省、国土技術政策総合研究所のプロジェクト研究報告(2012.2)、社会資本をととした環境評価技術の開発～温室効果ガス削減や廃棄物削減効果を適切に評価する尺度をつくる～(P3-138)における一般品の燃料の二酸化炭素排出原単位に基づき、軽油 2.95kg・CO₂/ℓ ガソリン 2.84kg・CO₂/ℓ の値を用いる。

実際の施工量は、長さ 5m、直径 140mm の杭を設置することを仮定することから以下のように求められる。

実際の施工量
 ={5 (m) ×(0.07 (m) ×0.07 (m) ×π)}×2(本)
 =0.15 (m³)
 となる。

よって建設機械の稼働段階の CO₂ 排出量は、
 建設機械の稼働段階の CO₂ 排出量 (t・CO₂)
 =59.0 (ℓ/h) ×2.95(kg・CO₂/ℓ)×10⁻³×0.15 (m³) /0.15 (m³/h)
 =0.17 (t・CO₂) = 170 (kg・CO₂)
 となる。

次に運搬の際に発生する CO₂ 排出量として、トラックによる輸送に伴う CO₂ 排出量を求める。運搬の際には 11t トラックを用いると設定し、以下の式で運搬する際の CO₂ 排出量を求める。

運搬する際の CO₂ 排出量 (kg・CO₂)
 =燃料消費量 (ℓ) ×燃料の CO₂ 排出原単位 (kg・CO₂/ℓ)
 +間接 CO₂ 排出量 (kg・CO₂)
 =燃料消費量 (ℓ) ×燃料の CO₂ 排出原単位 (kg・CO₂/ℓ)
 ×間接 CO₂ 排出量補正率

燃料消費量の算出には、10t 以上のトラックの平均燃料消費量である 4.0km/ℓ を用いる。移動距離を片道 10km と設定すると、往復 20km となり、燃料は 5.0ℓ 必要となる。燃料の CO₂ 排出原単位は、軽油を用いるため、前出と同様、2.95 (kg・CO₂/ℓ) とする。

間接 CO₂ 排出量補正率は、自家輸送の場合と自家輸送以外の場合では、値が変わる。国土交通省、国土技術政策総合研究所のプロジェクト研究報告(2012.2)、社会資本を通し環境評価技術の開発～温室効果ガス削減や廃棄物削減効果を適切に評価する尺度をつくる～(P3-136)では、自家輸送の場合の関接 CO₂ 排出量補正率を 1.37、自家輸送以外の場合の補正率を 1.42 としている。今回は自家輸送以外であるため、1.42 を用いて計算すると、運搬の際に発生する CO₂ 排出量は、
 運搬する際の CO₂ 排出量 (kg・CO₂)
 =5.0 (ℓ) ×2.95 (kg・CO₂/ℓ) ×1.42
 =20.95 (kg・CO₂)
 となる。

以上より、
 掘削・埋設する際に発生する CO₂ 排出量は、
 建設機械の稼働段階の CO₂ 排出量 (kg・CO₂)+運搬の際に発生する CO₂ 排出量 (kg・CO₂)
 =170 (kg・CO₂) +20.95 (kg・CO₂)
 =190.95 (kg・CO₂)
 となる。

次に、エアコンを使用している際に発生する CO₂ 排出

量は、GEO パワーシステムを利用することで、家庭内のエネルギー消費量は 640Mcal になる。よって kWh に直すため単位換算をすると、

$$640\text{Mcal} = 640000\text{kcal}$$

$$1\text{kcal} = 0.00116\text{kWh}$$

$$640000 \times 0.00116$$

$$= 742.40\text{kWh} \text{ となる。}$$

CO₂ 排出原単位は 0.463 (kg- CO₂) であるため、年間の排出量は

$$742.40 \text{ (kWh)} \times 0.463 \text{ (kg- CO}_2\text{/kWh)} = 343.73 \text{ (kg- CO}_2\text{)}$$

となる。

また、メンテナンス・廃棄する際に発生する CO₂ 排出量であるが、地中熱利用システムを家庭に導入したと仮定する場合も、メンテナンス及び廃棄は頻繁に行われるものではないことに加え、CO₂ 排出量もほとんど発生しないものと考えられるため、今回の算出計算には含めないものとする。

よって、地中熱利用システムを家庭に導入したと仮定し、利用する上で排出される CO₂ 排出量は、

$$190.95 \text{ (kg- CO}_2\text{)} + 343.73 \text{ (kg- CO}_2\text{)} = 534.68 \text{ (kg- CO}_2\text{)}$$

となる。

すなわち、地中熱を利用せず一般的な空調を利用する場合の 852.33kg- CO₂ と比較すると、新たに設置する場合には、CO₂ 排出量の面では年間 290.65kg- CO₂ 削減できるという結果となった。

図 3 に利用期間ごとのライフサイクル CO₂ を示す。年に 481.6 kg- CO₂ ずつ削減できることになり、一般的な空調を利用する場合と比べ、30 年終了時点で 14257.05 kg- CO₂ の CO₂ 排出を削減できることが分かった。

本実験における地中熱システムを導入した際の CO₂ 排出量を求め、従来のエアコン使用時と比較し、削減効果の算定を行う。算出した結果として、年間で通常のエアコンを 1 台使用する場合では、284.11kg-CO₂ の排出となった。地中熱利用で削減できる排出量は、年間のエネ

ルギー削減効果の合計と CO₂ 排出原単位を掛け合わせたものであり、

$$0.66+0.80+0.65+0.97+1.28+0.63+0.13+0.13+2.07+2.74$$

$$= 9.93 \text{ (kWh)}$$

$$9.93 \text{ (kWh)} \times 0.463 \text{ (kg- CO}_2\text{/kWh)}$$

$$= 4.60 \text{ (kg- CO}_2\text{)}$$

となる。

通常のエアコン使用、284.11kg-CO₂ の排出と比較した割合にすると、1.62%と小さな値にとどまっているが、杭 1 本の計算であることを踏まえると、実際に使用する際には複数の杭を用いることが一般的であり、より多く削減できると考えられる。

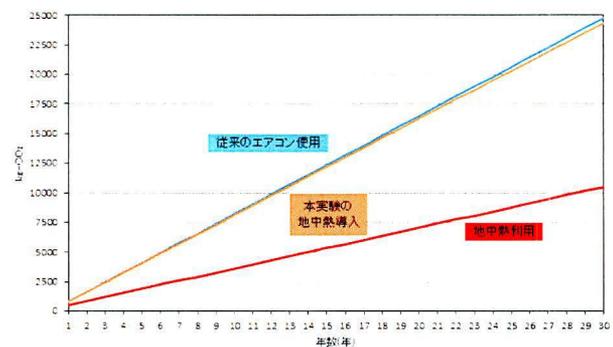


図 3 利用期間ごとのライフサイクル CO₂ 比較

5. まとめ

本節では、基礎杭を利用した空気循環による地中熱利用システムについて検討した。地中温度は、実験サイト内においても地中 9m 以下において安定していることが分かった。最も安定して採熱できた秋季の 9m 杭では、平均の中間温度差で朝 6.7℃、夜 9.5℃の温度差が得られ、十分に地中熱を利用できることが分かった。

今後の課題として、熱を効率的かつ安定的に取り出すために杭の出口部分に断熱材を設置するなどの改良を施すこと、風量を変化させた場合の影響を定量的に分析すること、基礎杭の本数を増やした場合の相互の干渉作用を調査することなどが挙げられる。また、システムの効率を評価するために、ライフサイクル CO₂ や費用対効果を他の技術と比較することが挙げられる。