

## ボアホール蓄熱システムにおける地質・地盤調査体系のFS研究

Feasibility Study on the Geological Investigation System in the Borehole Thermal Energy Storage

桑原 徹 (くわはら とおる)

㈱大林組 技術研究所 主任研究員

細野 高康 (ほその たかやす)

㈱ダイヤモンドコンサルタント ジオテクニカル事業部 課長

橋本 直樹 (はしもと なおき)

川崎地質㈱関東支社 技術部主任

田中 俊博 (たなか としひろ)

㈱大林組 エンジニアリング本部 副部長

## 1. はじめに

近年、地球温暖化防止を目指した炭酸ガス排出抑制型社会への転換が世界的な課題となっており、自然エネルギー源の多様化・有効利用が求められている。自然エネルギー源の一つとして地下蓄熱がある。地下蓄熱技術は、北欧・中欧・北米において研究開発されている技術で、一般的には、夏季に発生する温排熱を貯蔵して冬季の暖房熱源に利用し、逆に冬季の冷熱を貯蔵して夏季の冷房熱源に利用しようとするもので、大型ビル、地域冷暖房施設などへと幅広く導入が進められている。一方、我が国ではいまだ研究段階の状況にある<sup>1)</sup>。

地下蓄熱は、帯水層蓄熱とボアホール蓄熱の二つに大きく分けられる。これらの構成技術としては地下の蓄熱技術・設備の熱回収技術・システム評価技術などに分けられる。ボアホール蓄熱においては、地中に削孔されたボアホール中に熱交換パイプを挿入し、これを介して熱のやりとりを行うものである。欧米では大型ビルや地域冷暖房用として、深度50m～200mのボアホール(φ150mm程度)が、数十～数百本削孔されている。ボアホール蓄熱の構成要素としては、地質・地盤特性の調査評価技術、地中熱交換装置、削孔埋設技術、蓄熱性能・環境影響解析技術、新型ヒートポンプ、および省エネ効果・環境調和性・経済性などを算定するトータルシステム技術からなる(図-1)。

このうち地質・地盤特性の調査評価技術に関しては、

欧米の均質な地盤と異なる、日本の地盤特性を反映した調査評価体系と要素技術を構築することが不可欠である。本研究は、我が国におけるボアホール蓄熱技術のための、調査評価体系と新規要素技術の開発に関してフィージビリティスタディーを行ったものである<sup>2),3)</sup>。

## 2. 地質・地盤調査体系のFS

## 2.1 地質・地盤条件の概要

ボアホール蓄熱においては、地盤中に蓄熱した熱が逸散しないという観点から、地下水流速が20m/年(約 $6.3 \times 10^{-5}$  cm/s)以下という条件<sup>4)</sup>がある。また削孔費の低減という点から、出来るだけ軟弱・均質な地盤が有利である。したがって対象となる地盤は、第四紀の粘土層・シルト層・シルト質砂層などの難透水性地盤、新第三紀の泥岩(土丹も含む)・シルト岩・砂岩などの不透水性軟岩が対象となる。欧米では結晶質岩などの硬岩も不透水性ということから対象ではあるが、ここでは割愛する。

## 2.2 調査項目と調査の流れ

## (1) 検討条件

以下の要因を検討条件とした。

- 敷地面積最大10 000 m<sup>2</sup>、調査深度最大150 m
- 地下水・熱解析コードの入力パラメーター、初期条件、境界条件との関連
- 海外における地質地盤特性調査の実態と日本固有の地質条件(不均質性、地下水条件など)の加味
- Thermal Response Testの位置づけ

Thermal Response Test(以下TRTと記述)は、ボーリング孔を利用して、地盤(岩盤)～ボアホール孔壁～熱交換パイプ間の熱の移動を総合的に評価しようとする原位置試験手法である<sup>5)</sup>。試験自体はボアホール蓄熱を小型化・模擬したような試験方法で、ボーリング孔内にパイプを通じて流した温水の温度変化を測定して、有効熱伝導率と熱抵抗を算出するものである。熱抵抗には、borehole thermal resistance(熱媒体～ボアホール孔壁間の熱抵抗)とground thermal resistance(ボアホール孔壁～地盤(岩盤)の間の熱抵抗)の二つがあるが、設計的には前者の影響が大きいとされている。TRTは、理論的には80年代に確立され、実用的な移動式(車載式)測定システムが完成したのは1995年スウェーデン

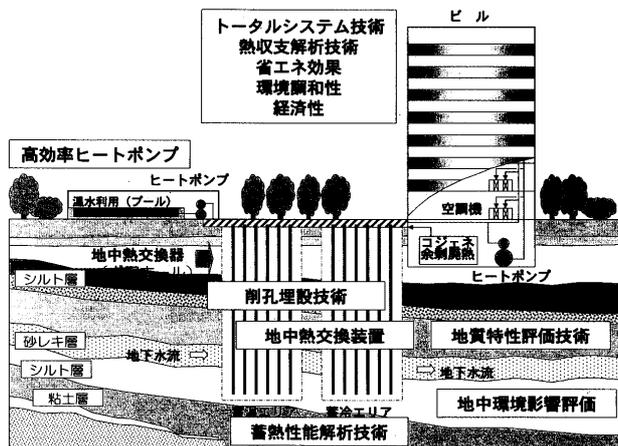


図-1 ボアホール蓄熱システムの概念

論文

においてであり、今や大規模ボアホール蓄熱システムの調査設計における「standard tool」とされている<sup>6)</sup>。

(2) 検討結果

検討結果から、調査体系は主に次の三つから構成した。

- TRT によるボアホールの熱出力量の評価
- 地質構成・地下水特性・熱特性調査等に基づく対象領域の熱回収効果・熱拡散評価
- 礫層分布・粘性土分布による施工性・削孔性評価

これらを流れ図で示したのが、図-2である。以下のような特徴を含む。

① 調査体系は三つの構成フローと、計画・調査設計・維持管理の三段階に分かれる。また調査の目的・対象、および調査試験項目が示されている。調査試験項目に関しては、重要度の高いものと必要に応じて行うべきものの2種類のランクに分けて示した。

② 上段のフローは、TRTを主体としたボアホールの熱出力量 (Specific heat transfer rate: W/m) の評価 (必要なボアホールの深度・本数) および確認である。「計画」では概略のボアホールの数量把握と地中地盤蓄熱システムの導入効果の判断、「調査設計」では光ファイバーセンサーによる温度計測および地下水特性に伴うボアホールの熱特性を把握した上での TRT 結果の詳細評価、「維持管理」ではシステム稼働中における熱出力の確認である。

なお TRT においては、土質や岩質の違い、異方性、岩盤亀裂や高透水性地盤からの地下水流入、高温化による

粘性度の変化などによって対流・乱流が生じ、測定データのばらつきによる熱伝導率や熱抵抗の算定誤差を招くものと考えられている<sup>6)</sup>。また光ファイバー温度センサーによるボアホール内部の温度分布測定という観点から、ボアホールにおける熱交換・回収の実態が調査され、TRT のデータ評価方法に問題が投げかけられている<sup>7)</sup>。

③ 中段のフローは、熱シミュレーション (熱回収効果・熱拡散効果の評価) のための地盤特性の把握である。「調査設計」では主として地質構成・地下水特性・熱特性の各種地盤特性の把握が主となるが、地質構成・地下水特性は②の結果も利用し、熱特性と併せて、総合的な地質・地盤特性評価を行う。また設備の腐食・目詰まりの可能性評価のために、水質調査を行う。「維持管理」ではモニタリングとして、地下水特性 (地下水位、間隙水圧)・熱特性 (温度分布) を把握する。

④ 下段のフローは、施工性評価である。「調査設計」において、特に玉石混じりの高透水性礫層の分布の把握と削孔能率の評価、ならびに地盤沈下を引き起こす可能性のある粘性土の評価を対象とする。

2.3 新規要素技術の FS

ボアホール蓄熱技術に必要な調査試験の要素技術に関して、特に地下水流速の高精度化、原位置熱特性測定技術、および蓄熱に伴う地盤の長期観測技術に関して、新規開発技術として下記の4件のフィージビリティ・スタディーを実施した<sup>8)</sup>。

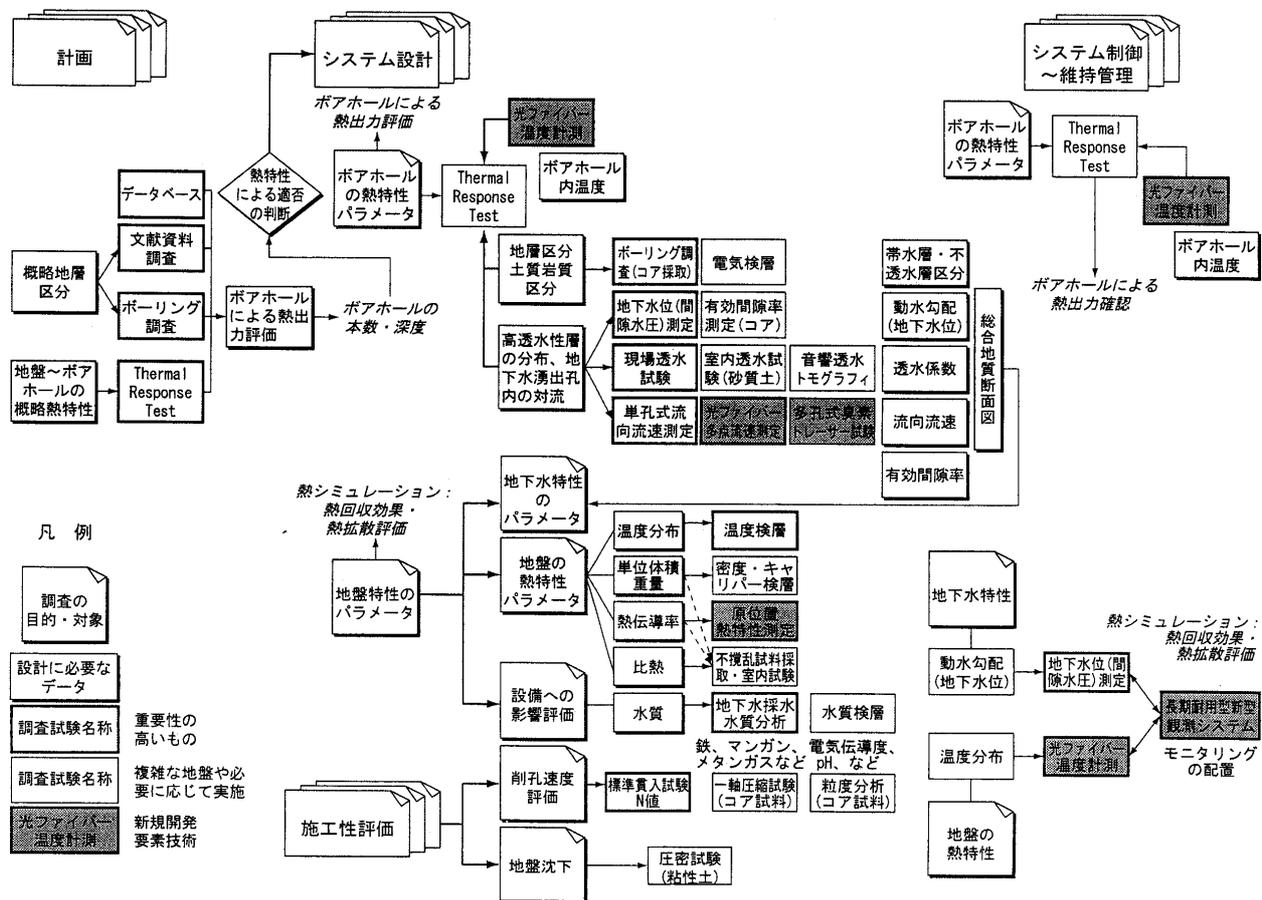


図-2 調査項目と調査体系

- ① 地下水の流向流速測定の高精度化
  - ・光ファイバーセンサーを併用した自己発熱型多点流速測定システム
  - ・臭素イオンレーザー測定システム
- ② 原位置地盤の熱伝導率測定手法
  - ・「ボックスプローブ法」(QTM式プローブ)<sup>9)</sup>を利用した線熱源方式(孔壁圧着方式)。深度数m~100mを対象。
- ③ 地盤およびボアホールの温度計測システム
  - ・高精度光ファイバー温度計測システムによる三次元温度モニタリング方式, など。
- ④ 維持管理が容易な長期耐用型観測システム
  - ・ピエゾメーター方式によるパッカー内蔵型多段式間隙水圧測定型の地下水観測孔システム
  - ・孔内充填式・光ファイバー温度センサー組込み式の地下水・地温観測孔システム

#### 2.4 フィージビリティ・スタディーの結果

欧米における第四紀層や第三紀層地盤での地盤蓄熱は、非常に平坦な地形のために、含水比が高いにもかかわらず地下水の流動が極めて小さい軟質・均質な地盤で行われている。一方日本では、平野部でも相対的に地形勾配が急なために流速は大きい。平野部の代表的な地質柱状図に基づいて、各層の透水係数と広域の動水勾配から推定されたダルシー流速は、地域によって大きく異なる。したがって当初の地盤条件である流速20 m/年以下の難透水層が、厚さ数十mにわたって常に分布しているわけではない。ボアホールの機能を考えると、熱出力の平均的な量が熱交換系と関係するので、挟在される透水層の評価もケースバイケースと予想される。

しかし逆にこれはTRTのデータ評価に際して、地下水流の実態とその影響を十分に研究する必要のあることを示唆している。その意味からはTRTとそれらを実評価する各種地下水調査、ボアホール孔内での詳細な温度分布計測などは不可欠といえる。その反面、原位置熱伝導率の測定ではTRTとの関連で位置づけがあいまいになったが、ごみ焼却場などの高温排熱も併せて利用する高温蓄熱の場合は、環境影響評価のために不可欠となる。

#### 3. 今後の研究課題

前述したように地質特性評価は、ボアホールの熱出力評価、温度場からの地質環境モニタリング、削孔能率評価の三つに大別できる。この内特に、ボアホールの熱出力評価を中心とした地質特性評価技術、および地質環境モニタリング技術が重要であると考えられる。したがって、今後の研究課題は、①TRTの実施体制の確立、②TRTのデータを正確に評価するための地質・地下水・熱特性の調査・試験・評価技術の確立、および③環境影響評価としての「場」の地下水・熱モニタリング技術、の三つに集約できる。

以上の研究開発成果により、普及・実用化という観点からは、実際の事業プロジェクトにおいて活用可能な実用的な評価体系が構築できるものと考えられる。

#### 4. おわりに

日本における地中地盤蓄熱技術の将来展望は必ずしも明確ではないが、現在導入の気運が非常に高まっている。欧米では地盤蓄熱に関する地盤工学・応用地質学的な貢献が極めて大きい。我が国においても地盤工学としての基礎を固めておく必要があろう。いずれにしても普及のためには、代表的な地盤や岩盤、あるいは地域に関しての情報データベース化が望まれる。

なお、本研究は通産省工業技術院ニューサンシャイン計画における先導研究「地中地盤蓄熱システム技術先導研究開発」(平成11~12年度)を(財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センターが受託し実施した、ボアホール蓄熱技術における「地質特性把握のための要素技術開発手法の検討」の一部である。発表の機会を与えていただいた関係各位の方々に御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) (財)ヒートポンプ・蓄熱センター 編: 地下蓄熱と地下熱利用セミナー 資料集, pp. 114~174, 1998.
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (財)エンジニアリング振興協会: 平成11年度依託業務成果報告書「地中地盤蓄熱システム技術先導研究開発」, pp. 191~215, 2000.
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (財)エンジニアリング振興協会: 平成12年度依託業務成果報告書「地中地盤蓄熱システム技術先導研究開発」, pp. 132~186, 2001.
- 4) (財)エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター: 深部地盤直接蓄熱システムに関する調査研究報告書, p. 133, 1999
- 5) S. Gehlin and B. Nordell: Thermal Response Test—Mobile Equipment for Determining the Thermal Resistance of Boreholes, Proceedings 7th International Conference on Thermal Energy Storage, pp. 103~108, MEGASTOCK 1997, Sapporo, Japan, 1997.
- 6) M. Benner and E. W. P. Hahne ed.: Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage, TERRASTOCK 2000, Stuttgart, Germany, 2000.
- 7) Eckart Hurlig et al.: Fibre optic temperature measurements: a new approach to determine the dynamic behaviour of the heat exchanging medium inside a borehole heat exchanger, Proceedings 8th International Conference on Thermal Energy Storage, pp. 189~194, TERRASTOCK 2000, Stuttgart, Germany, 2000.
- 8) 細野高康・橋本直樹・桑原 徹・田中俊博: ボアホール蓄熱システムにおける地盤調査要素技術のFS研究, 土木学会第56回年次学術講演概要集, 第7部, VII-119, 2001.
- 9) 炭泉貞夫・荒川美明: 迅速熱伝導率計, 計測技術, Vol. 4, No. 4, pp. 60~66, 1976.

(原稿受理 2001.4.20)