

Ⅲ-766

地中加熱による石炭灰処分場の地盤改良に関する研究

一（その2） 加熱効果のメカニズムおよび温度上昇特性に関する検討 一

前田建設工業（株） 正会員 ○石黒 健 伊東 多聞
同 上 安田 昭彦 嶋田 三朗

1. はじめに

本論文では、（その1）に引き続き、養生温度が石炭灰の強度発現に及ぼす影響および加熱効果のメカニズムについて検討を加える。さらに、小型モールド内に熱源のヒーターを設置した模型実験を実施し、加熱時の石炭灰地盤の温度上昇特性や強度増加に関する測定を行った結果について報告する。

2. 養生温度の違いが石炭灰の強度発現に及ぼす影響

図-1は、乾燥密度を種々に変えた不飽和供試体（含水比30%）の一軸圧縮強度と養生温度の関係を示したものである（7日間養生）。不飽和供試体では、常温（15度）から養生温度60度までは温度上昇とともに単調に強度が増加し、80度ではやや収斂する傾向を示す。原位置においても60度～80度程度の地中温度が達成できれば加熱効果は十分発揮されるものと考えられる。また高密度・高温養生下では顕著な強度発現が見られ、例えば乾燥密度 1.3g/cm^3 （相対密度120%）では $q_u=5\text{kgf/cm}^2$ を越える強度値が得られている。この場合、液化化対策のみならず直接基礎の支持地盤の造成といった用途も十分に可能と考えられる。一方飽和供試体（○印）においても養生温度の影響は見られるが、強度値自体は不飽和供試体に比べてかなり小さい。このような加熱効果のメカニズムを調べるために、走査型電子顕微鏡による微視的検討を行った。写真-1（倍率5000倍）は、乾燥密度 1.0g/cm^3 、含水比30%で1週間養生した供試体のSEM像を示す。（a）は常温養生、（b）は60度養生にて作製した供試体である。（a）では石炭灰の粒子がほぼ原型の球形のまま残っているのに対し、（b）では粒子表面および粒子間に多くの水和物が生成され、これが粒子間を結合している様子が観察される。養生温度の上昇に伴う一軸圧縮強度の増加は、このような化学反応の促進度合いの違いによって説明づけることができよう。

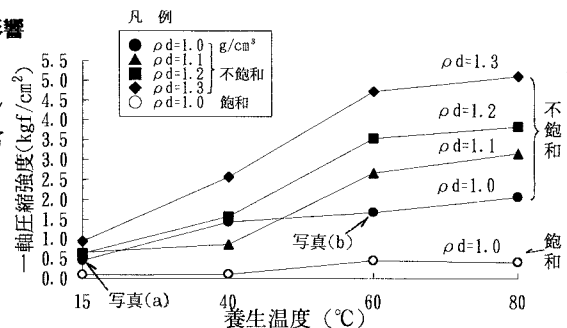
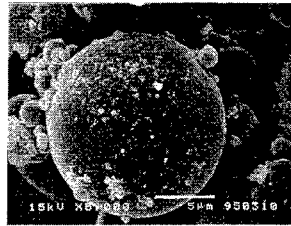
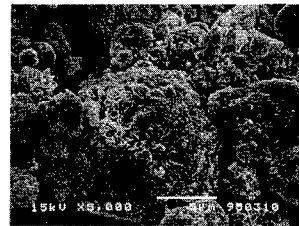


図-1 養生温度と一軸圧縮強度の関係



(a) 常温養生試料



(b) 60度養生試料

写真-1 養生後の石炭灰のSEM像

微鏡による微視的検討を行った。写真-1（倍率5000倍）は、乾燥密度 1.0g/cm^3 、含水比30%で1週間養生した供試体のSEM像を示す。（a）は常温養生、（b）は60度養生にて作製した供試体である。（a）では石炭灰の粒子がほぼ原型の球形のまま残っているのに対し、（b）では粒子表面および粒子間に多くの水和物が生成され、これが粒子間を結合している様子が観察される。養生温度の上昇に伴う一軸圧縮強度の増加は、このような化学反応の促進度合いの違いによって説明づけることができよう。

3. 小型モールドを用いた石炭灰の加熱実験

石炭灰を地中加熱した際の温度上昇特性、および改良効果を定性的に調べる目的で、小型模型実験を実施した。実験に用いた土槽を図-2に示す。土槽は直径30cm、高さ38cmの円筒形で、この中に層厚

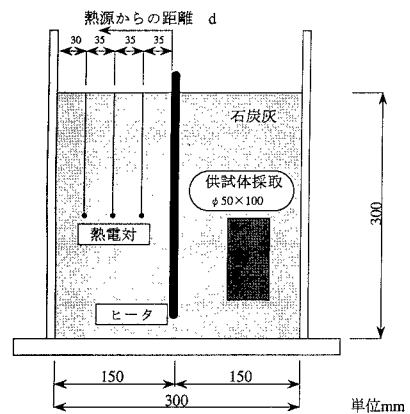


図-2 模型実験の概要

30cm、初期乾燥密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ の乾燥状態の石炭灰地盤を空中落下法によって作製した。この後、土槽中央に孔開き塩ビ管をセットし、供試体を乱さないように若干の水頭差を与えながら24時間注水して飽和石炭灰地盤を作製した。実験は飽和地盤、不飽和地盤の2種類に対して実施したが、前者ではこの状態で塩ビ管を取り去り、代わりに地中加熱用の棒状電気ヒーター（ $\phi 12\text{mm}$ ）を挿入し、約8時間の加熱を昼間のみ14回（総計で約5日間相当）繰り返した。不飽和条件の実験では、飽和地盤作製の後塩ビ管の上端からサクシオンを負荷し、強制脱水により飽和度50%付近まで地盤を不飽和化させた。この後ヒーターによる加熱を12時間継続している（ヒーター破損のため12時間で停止）。実験では、図-2中の3箇所に設置した熱電対によって加熱時の地中温度を測定するとともに、実験終了後に供試体をサンプリングし、水浸飽和の後一軸圧縮強度の測定を行った。なお加熱実験では、モデル地盤表面からの水分の蒸発と含水比の低下を防ぐ目的で、飽和条件ではモールド内に常に水を張った状態を、また不飽和条件ではモールド表面をシールし水蒸気の発散を防いだ状態を加熱中保った。

図-3には、土槽内3箇所での地中温度の測定結果を示す（飽和条件では8時間でいったん停止）。飽和条件の実験では地中温度は50～70度まで上昇しているのに対し、不飽和条件の実験では飽和条件に比べて温度上昇が早く、6～8時間後にはモデル地盤全体の温度が100度にまで達する結果となった。なお、別途実施した水のみ加熱実験では水温の最大値は約70度であり、この値は飽和地盤の最大値とほぼ一致する。飽和地盤では熱源のエネルギーが水温上昇や地表面からの熱の発散に消費されたのに対し、不飽和地盤では地表面をシールし熱の発散を防いだこともあって地中温度やその上昇速度が高まったものと考えられる。いずれにしても、地盤を不飽和化することで地中温度がより高く、より早く上昇することは明らかであり、この意味からも原位置における地下水位低下は有効と考えられる。今後、本模型実験の実測値から石炭灰地盤の熱特性を逆解析し、その物性値を用いて実地盤での加熱条件を再現した試解析を行い、実施工で必要とされる熱源のピッチや断熱条件等を明らかにしていく予定である。

試験後の地盤からサンプリングした供試体の一軸圧縮試験結果を図-4に示す。一軸圧縮強度は飽和条件で $q_u=0.40\text{kgf}/\text{cm}^2$ （1点のみ）、不飽和条件で $q_u=1.05, 1.33, 2.36\text{kgf}/\text{cm}^2$ （3点平均で $1.58\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）の値が得られた。不飽和条件での強度値のばらつきは、地盤の固結度が高いためにサンプリング時の乱れの影響が生じたものと考えられる。加熱時間や加熱温度は異なるものの、両条件での強度値の違いは（その1）で述べた要素試験の結果と定性的には整合するものといえよう。なお不飽和地盤では強制脱水の過程で地表面に平均15mmの沈下が発生し、モデル地盤の平均的な乾燥密度は $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ から $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ に増加した。強制脱水に伴う密度増加（有効応力の増加による圧密促進効果）についても、より大型、あるいは上載荷重を負荷した状態での検討を今後実施する予定である。

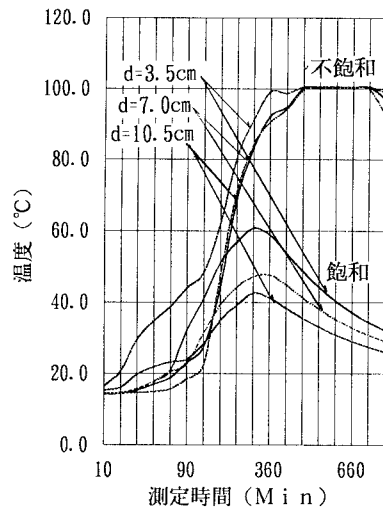


図-3 地中温度の測定結果

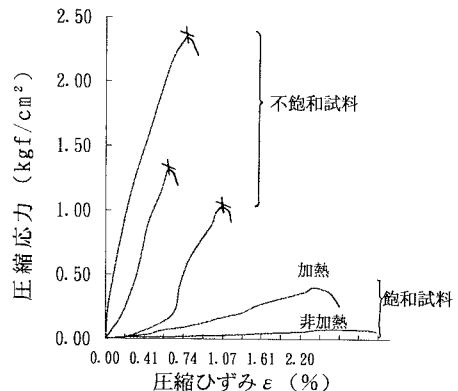


図-4 サンプリング試料の一軸圧縮試験結果