

高温履歴を与えたセメント処理した粘性土の強度発現

山口大学大学院 学生会員 ○調 優吾
山口大学大学院 正会員 原 弘行

1. はじめに

セメント処理土の強度は水和反応の進行によって発現し、その水和反応の進行は時間と温度に依存することが知られている。セメント系の材料に高温履歴を与えて強度発現を促進させる研究は、コンクリート分野に端を発し、数多くの検討が行われてきている。しかしながら、地盤改良の分野における研究事例は少なく、僅かにみられる報告では高温養生時の短期材齢強度との相関から現場での長期材齢強度を推定する手法が採用されている。すなわち、温度による強度発現の促進効果を定量的に評価した事例はみられず、広範な土や改良条件を満足するような強度推定手法を開発する試みはなされていない。そこで、本研究では様々な温度で養生したセメント処理土に対して一軸圧縮試験を行い、高温養生による強度発現の促進効果を評価した。

2. 実験方法

試料土にはカオリン粘土 ASP-200 を用い、含水比を液性限界 (81.6%) の 1.5 倍となるように調整して使用した。表-1 に試料土の物性を示す。固化材には普通ポルトランドセメントを用い、その添加量は 100kg/m^3 とした。試料土に固化材を添加し、攪拌機で混合して直径 50mm、高さ 100mm のプラスチックモールドに詰め、所定の材齢まで養生した。本実験では、養生水の温度は 20°C (標準養生)、 30°C 、 40°C 、 55°C 、 70°C の 5 通りとした。また、20、30、40、55、 70°C の条件での養生期間はそれぞれ最長で 112、28、21、21、14 日とした。養生水を所定の温度に保つためにウォーターバスを使用した。また、特に養生初期においてウォーターバスと供試体の温度に乖離が生じると考えられたため、測温用に用意したダミー供試体内に防水処理を施した小型温度ロガーを埋め込んで養生期間中の供試体温度を正確に測定した。連続で記録できるデータ数は 4096 個と限られていたため、養生期間に合わせて計測間隔を 10~25 分とした。次章で述べる温度による促進効果の評価には、設定温度ではなく温度データロガーで計測された実測温度を用いている。所定の材齢まで養生した供試体に対して一軸圧縮試験を行った。

表-1 試料土の物性

| | | |
|-------|---------------------|------|
| 土粒子密度 | (g/cm^3) | 2.58 |
| 液性限界 | (%) | 81.6 |
| 塑性限界 | (%) | 32.7 |
| 粒度組成 | (%) | |
| 砂 | | 0.0 |
| シルト | | 20.5 |
| 粘土 | | 79.5 |

3. 実験結果と考察

図-1 に、一例として 20°C 養生の一軸圧縮試験の結果を示す。各材齢で 3 つの供試体を一軸圧縮試験に供したが、ここでは代表的な一例を示している。材齢に伴って一軸圧縮強さが増加することが確認できる。

図-2 に各温度の一軸圧縮強さの経時変化を示す。養生期間が同じであっても、養生温度が高くなるほど一軸圧縮強さが大きくなっていることがわかる。これは、高温養生によって水和反応の進行が促進されたことを示唆

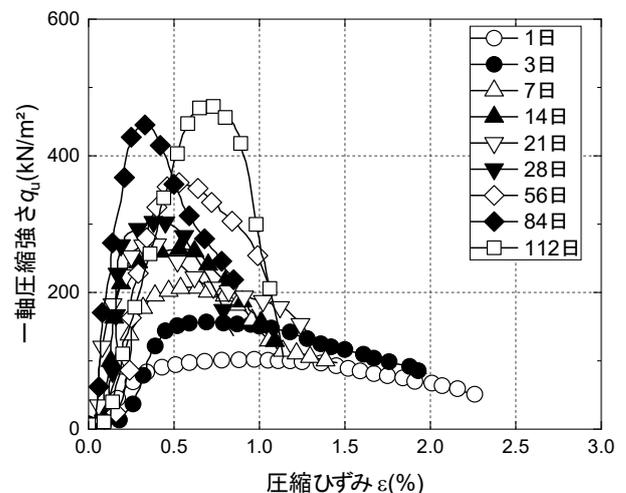


図-1 応力-ひずみ関係

している。水和反応の進行が温度に大きく影響を受けていることが確認できた。しかし、55℃と70℃を比べると同じ養生期間のときの一軸圧縮強さがほぼ同じであり、さらには養生期間が10日を超えると55℃養生の場合の方が一軸圧縮強さが大きくなっていることから、温度が高いほど水和反応が促進されるわけではなく、促進できる温度に頭打ちがあると推測される。

ここで、各温度の強度増進性状を評価するために、温度時間関数として等価材齢を採用し、成長曲線の1つであるゴンペルツ関数を用いて強度発現特性を評価した²⁾。等価材齢は式(1)で算出した。式中の反応速度定数は、アレニウス則によるものであり、式(2)で表される。今回用いた成長曲線の式を(3)に示す。

$$t_e = \left(\frac{k_{T_c}}{k_{T_{rf}}} \right) \times \Delta t \quad (1) \quad k_T = A \exp\left(\frac{-E}{RT} \right) \quad (2)$$

$$q_u = Ka^{e^{-bt_e}} \quad (3)$$

ここに、 t_e ：等価材齢（日）、 k_{T_c} ：温度 T_c での反応速度定数、 $k_{T_{rf}}$ ：基準温度 T_{rf} （ここでは20℃）での反応速度定数、 Δt ：養生時間、 A ：頻度因子、 E ：見かけの活性化エネルギー（J/mol）、 R ：気体定数（J/molK）、 q_u ：一軸圧縮強さ、 K 、 a 、 b ：定数を表す。

図-3に等価材齢と一軸圧縮強さの関係を示す。養生温度が異なっても等価材齢が同じであれば一軸圧縮強さは同程度の値を示す結果となり、それぞれの養生温度での強度増進の挙動を一義的に表すことが出来た。ただし、70℃の場合だけは成長曲線の近似線から逸脱し、20℃～55℃とは異なる挙動を示した。このことから、高温履歴を与えた場合、温度による強度発現がアレニウスの法則に従って促進されるのは55℃程度までであると推察できる。

4. まとめ

本研究では、セメント処理土を対象に温水による促進養生を実施し、一軸圧縮試験の結果から強度発現の促進効果について力学的観点から評価した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 養生温度が高いときほど、セメント処理土の強度発現を促進させることができた。しかしながら、70℃の場合は、55℃と同程度の促進効果にとどまった。
- 2) 55℃以下の条件では、等価材齢によってセメント処理土の強度発現挙動を一義的に評価することができた。しかしながら、アレニウスの法則に従って強度発現が促進されるのは55℃程度までであった。

【参考文献】

- 1) 姫野季之, 日野剛徳, 三浦哲彦, 碓井博文, 喜連川聰容：セメント系固化材を用いた地盤改良における促進養生法に関する実験的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.15, No.4, pp.705-714, 2020.
- 2) 谷口円, 桂修, 佐川孝広, 濱幸雄：強度増進の温度依存性に及ぼすセメント鉱物組成の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.661, pp.443-448, 2011.

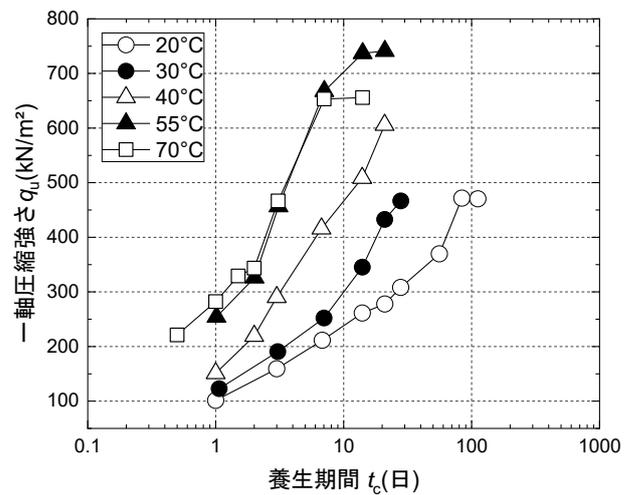


図-2 一軸圧縮強さの経時変化

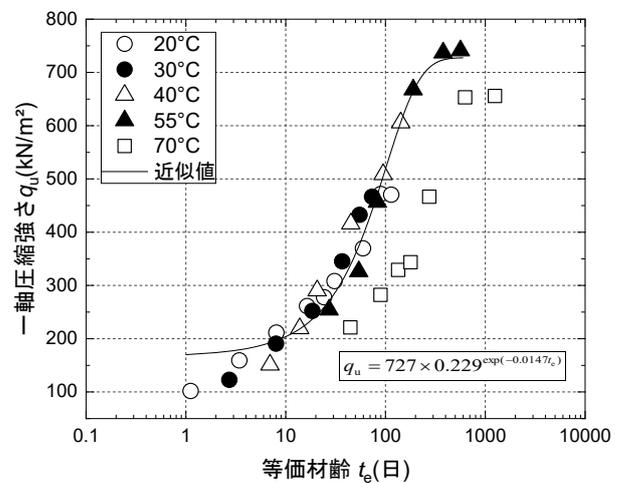


図-3 等価材齢と一軸圧縮強さの関係