

環境配慮地盤固化改良土の低温環境下における強度発現に関する検討

大成建設 正○池上 浩樹, 正 松井 秀岳
正 大脇 英司, 正 藤原 斉郁

1. 背景・目的

著者らは、地盤改良分野における CO₂ 排出量削減に向けた取組みとして、高炉スラグの硬化を促進する刺激材を工夫し、ポルトランドセメントの使用量をゼロとした「結合材」の実用化を目指している¹⁾。セメントやセメント系固化材では、現場室内強度比が室内配合検討と現場施工における養生温度の相違に起因する強度発現の違いを包含している²⁾。一方で、高炉スラグの水和反応はセメントより温度の影響を受けやすく、低温環境において強度発現が遅れる傾向が示されている³⁾。そのため、セメントやセメント系固化材の知見に基づく現場室内強度比では、低温環境下における結合材改良土の強度発現を十分考慮できず、目標強度を達成できないことが懸念される。従って、実用化に向けては結合材改良土の温度依存性を評価し、適切に考慮しなければならない。

温度依存性を評価するためには、強度の経時変化と低温環境による強度発現の遅延程度を把握する必要がある。本報では、低温養生における結合材改良土の強度の経時変化の確認を目的とした一軸圧縮試験結果と強度発現の遅延程度について等価材齢を用いて整理した結果を報告する。

2. 等価材齢とゴンペルツ曲線

調ら⁴⁾は、異なる温度で養生したセメント改良土の温度依存性をアレニウス則による等価材齢とゴンペルツ曲線により表現できることを示している。ここで、等価材齢とはある養生温度・養生日数での水和度を基準温度における水和度と等しくなるように換算した材齢としている。等価材齢は式(1)で表され、同式中の反応速度定数は式(2)で表されるアレニウス則に基づくものである。

$$a_e = (k_{T_c} / k_{T_{rf}}) \times \Delta t \tag{1}$$

$$k_T = A \exp(-E / (RT)) \tag{2}$$

また、改良土の等価材齢と一軸圧縮強さの関係を示す関数として式(3)で表されるゴンペルツ曲線を用いた。

$$q_u = K \alpha^{\exp(-\beta a_e)} \tag{3}$$

ここに、 a_e ：等価材齢(day)、 k_{T_c} ：養生温度 T_c での反応速度定数、 $k_{T_{rf}}$ ：基準温度 T_{rf} での反応速度定数（ここでは 20℃）、 Δt ：養生日数(day)、 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/mol・K)、 T ：絶対温度(K)、 q_u ：一軸圧縮強さ(kPa)、 a_e ：等価材齢(day)、 α, β, K ：定数である。

3. 検討対象

表 1 に改良土の配合条件と供試体の養生条件、図 1 に本検

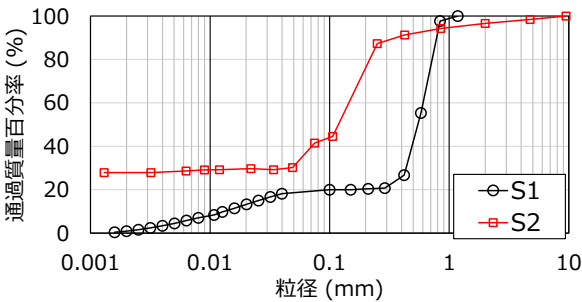


図 1 粒度分布

表 1 配合条件と養生条件

No.	材料		配合条件（改良土 1m ³ あたり）					養生条件	
	土試料	粉体	土試料		スラリー			養生温度：養生日数 ℃：day	
			土 kg	水 kg	粉体 kg	水 kg	ベントナイト kg		
1	S1	高炉 B	1318.6	301.2	81.2	158.3	8.1	5℃：3, 10, 28	
2		結合材	1436.0	328.0	61.9	92.8	8.8	20℃：3, 5, 7, 10, 14, 21, 28	
3	S2	結合材	1252.6	370.7	129.0	129.0	0	5℃：3, 7, 14, 28 20℃：3, 7, 14, 28	

キーワード 地盤改良, 低温養生, 強度発現, 等価材齢, 高炉スラグ, 低炭素
連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1
大成建設(株)技術センター TEL045-814-7221

討で使用した2種類の土試料の粒度分布を示す。改良土の配合は、地中連続壁工法を対象とした配合 No.1, 2 と浅層改良を対象とした配合 No.3 の3種類である。No.1, 2 の土試料 S1 は、市販の珪砂 5 号（竹折鉱業所）とトチクレー（大竹工業）を混合した砂質土であり、No.3 の土試料 S2 は、地盤改良を予定する現場から採取された砂質土のうち 9.5mm ふり通過分である。また、粉体は従来品として「高炉セメント B 種」を、開発品として高炉スラグ微粉末とカルシウム系の化合物（刺激材）を主体とし、ポルトランドセメントの使用量をゼロとした「結合材」を使用した。改良土は粉体と水、ベントナイトを予め混合したスラリーと土試料を混合して作製した。供試体は $\Phi 50\text{mm} \times \text{H}100\text{mm}$ のプラスチックモールドに突き固めを行わない方法で充填し、5, 20℃の養生温度で所定の養生日数まで湿空養生した。

4. 試験結果

図 2 に改良土の養生日数と強度比の関係を示す。強度比は、それぞれの一軸圧縮強さを各配合の 20℃・28 日養生の一軸圧縮強さで除して算出したものである。なお、各配合の 20℃・28 日養生の一軸圧縮強さは No.1 から順に、496.2kPa, 1350.5kPa, 3606.6kPa であった。同図中には 5℃・28 日養生の強度比を併記している。20℃養生の強度の経時変化は、No.1 で双曲線的、No.2 で線形的、No.3 で指数関数的となっており、土試料や粉体が同一であっても強度の発現傾向が異なる結果となった。

次に非線形最小二乗問題の解法の一つである Levenberg-Marquardt 法により、式(1)から(3)中の E, α, β, K を各配合に対してそれぞれ求めた。なお、本検討において初期値解は $E_0, \alpha_0, \beta_0, K_0 = 1000, 0.1, 0.1, 1000$ とした。

表 2 に各配合の計算結果と反応速度定数比を、図 3 に等価材齢と一軸圧縮強さの関係を示す。限られた試料・配合での検討結果ではあるが、高炉セメント改良土と結合材改良土の双方について、等価材齢を用いることで養生温度の異なる一軸圧縮強さの経時変化をそれぞれひとつの傾向線で表現することができた。5℃養生での養生日数を 20℃養生の養生日数に換算する反応速度定数比は、No.1 で 0.28, No.2, 3 で 0.16~0.17 となり、高炉セメント改良土に比べて結合材改良土の低温環境下での強度発現が遅れる傾向を定量的に評価することができた。なお、今回の検討では結合材を用いた 2 配合で見かけの活性化エネルギーがほぼ同値となったが、仮にこの値が土試料や配合によらず粉体固有の一定値である場合、任意の土試料・配合において基準温度の強度－養生日数関係のみを確認することで、任意の温度・材齢の強度を推定することが可能となる。

5. まとめ

結合材改良土を対象とした一軸圧縮試験と等価材齢を用いた整理より、養生温度の異なる強度の経時変化をひとつの傾向線で表現することができた。今後は、結合材改良土における見かけの活性化エネルギーの違いを把握するとともに、土試料・配合の違いが強度の経時変化に与える影響を検討することで結合材改良土の温度依存性を適切に考慮し早期の実用化を目指していきたい。

参考文献 1)松井秀岳ら：CO₂ 排出量を削減する「環境配慮地盤固化技術」の開発，大成建設技術センター報，No.55, 2022. 2)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル 第 5 版，p.134, 2021. 3)土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕 2007 年制定，pp.164-165, 2007. 4)調優吾ら：高温養生されたセメント処理土の強度発現挙動の評価とそれを利用した強度推定手法，第 15 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.113-118, 2022.

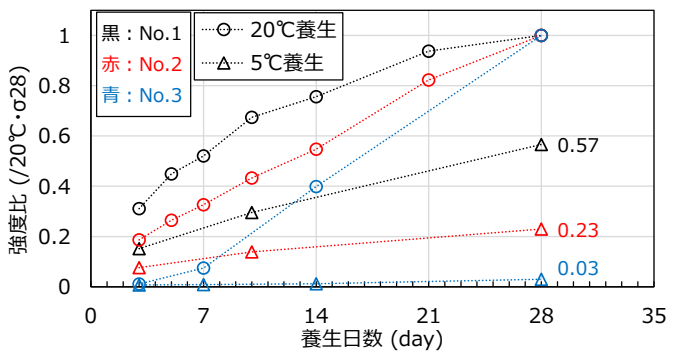


図 2 養生日数と正規化強度の関係

表 2 計算結果と反応速度定数比

No.	E kJ/mol	α	β	K	反応速度定数比
1	57.6	0.15	0.15	503.3	0.28
2	82.7	0.08	0.08	1739.8	0.16
3	79.4	0.001	0.13	4292.7	0.17

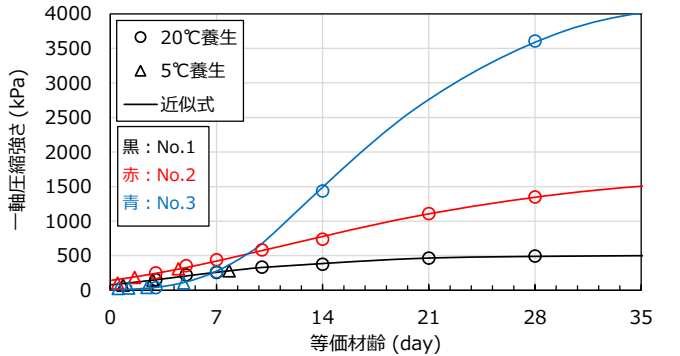


図 3 等価材齢と一軸圧縮強さの関係