

# 異なるセメントを用いたコンクリートの見掛けの活性化エネルギーに関する実験的検討

大成建設株式会社 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○臼井 達哉  
正会員 武田 均

## 1. はじめに

一般にコンクリートの強度増進は、セメントの水和反応によるものであり、養生温度と材齢に依存する。コンクリート標準示方書[設計編]<sup>1)</sup>では、温度ひび割れに対する照査等で用いられるコンクリートの圧縮強度の強度発現について温度の影響を等価な材齢として評価する有効材齢を用いることで温度依存性を考慮している。この有効材齢は Arrhenius 則に基づいたものになっているが、セメントの種類によらず同じ見掛けの活性化エネルギーの値を用いている。これまでポルトランドセメント系において強度発現の温度依存性を検討した事例<sup>2)</sup>はあるが、高炉セメントコンクリートに関して検討した事例はない。そこで本研究では、養生温度 20℃、40℃の環境温において凝結時間測定時の貫入抵抗値をもとに普通セメントコンクリート、高炉セメントコンクリートの見掛けの活性化エネルギーの違いの検討を試みた。

## 2. 有効材齢

コ示<sup>3)</sup>に記載されている有効材齢を式(1)に示す。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T/T_0} \right] \quad (1)$$

ここで  $\Delta t_i$ : 温度が  $T$  である時間(日),  $T$ : コンクリートの温度(℃),  $T_0$ : 1℃. この有効材齢式は、Arrhenius 則に基づいたものであり、見掛けの活性化エネルギー ( $E_a$ ) が一定値と仮定した場合<sup>3)</sup>に相当する。コ示<sup>3)</sup>では、セメントの種類によらず  $E_a/R$  を 4000 と設定している。(  $R$  は気体定数, J/mol/K)

## 3. コンクリートの配合と凝結試験時間および圧縮強度の試験概要

結合材は、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末 4000 を用いた。コンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメントのみを用いた配合、高炉スラグ微粉末を内割で 40% 置換した配合とし、水結合材比 55%, スランブ

15±2.5cm, 空気量 4.5±1.5% と設定した。養生温度 20℃ の供試体は、コンクリートの練上り温度を 20℃, 環境温度 20℃ とした。5mm ふるいによるスクリーニング後、JIS A 1147 に基づき供試体を 2 体採取し、凝結終結まで貫入抵抗値の測定を行った。養生温度 40℃ は、コンクリートの練上り温度を 35~40℃ とし、5mm ふるいによるスクリーニング後、供試体を 1 体採取し 40℃ の環境において供試体を養生し貫入抵抗値の測定を行った。加えて、供試体製作、貫入抵抗値測定の温度環境は 20℃ であったため、養生温度 40℃ の供試体については、供試体の採取、貫入抵抗値の測定毎に温度測定を行った。(図-1) 圧縮強度の測定材齢と試験本数を表-2 に示す。圧縮強度についても貫入抵抗値と同様に養生温度 20℃, 40℃ で測定を行った。なお、圧縮試験開始材齢までの養生は、上面をビニールで覆った封かんとした。

## 4 試験結果

凝結始発/終結時間を表-3、貫入抵抗値と材齢を図-2 に示す。普通セメントコンクリート、高炉セメントコンクリートとも、養生温度が高い 40℃ の方が貫入抵抗値の上昇する材齢が早く、凝結終結時間も早い。養生温度が高い方が凝結時間が早くなることは自明であるが、セメントの種類の違いに着目すると、養生温度 20℃ では普通セメントの方が、高炉セメントよりも凝結始発、終結時間が早い。養生温度が 40℃ では高炉セメントの方が普通セメントよりも早くなっている。つまり、高炉セメントの方が温度依存性が高いことがわかる。図-3 に図-2 の材齢をコ示<sup>3)</sup>で定義されている  $E_a/R$  を 4000(K) とした有効材齢で記載したものを示す。この結果を見ると、図-3(左)において、普通セメントでは N20 と N40 がほぼ一致

表-1 コンクリートの配合

| 配合 | W/B [%] | s/a [%] | 単位量 [kg/m <sup>3</sup> ] |     |     |     |     |      |
|----|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
|    |         |         | W                        | OPC | BFS | S   | G   | Ad   |
| N  | 55      | 47.5    | 166                      | 302 | -   | 863 | 963 | 3.02 |
| BB |         |         | 164                      | 179 | 119 | 861 | 961 | 2.98 |

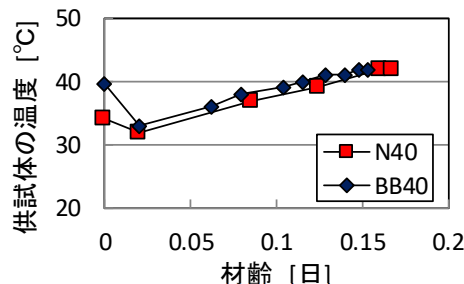


図-1 N40, BB40 の供試体温度温

表-2 試験材齢

| 材齢   | 養生温度 |     |
|------|------|-----|
|      | 20℃  | 40℃ |
| 12時間 |      | 1本  |
| 14時間 |      | 1本  |
| 16時間 |      | 1本  |
| 1日   | 3本   | 1本  |
| 2日   | 3本   | 3本  |
| 3日   | 3本   | 3本  |

表-3 凝結始発/終結時間

| 配合名  | 凝結始発 | 凝結終結 |
|------|------|------|
| N20  | 5:50 | 8:00 |
| BB20 | 6:10 | 9:25 |
| N40  | 3:05 | 3:55 |
| BB40 | 2:35 | 3:40 |

20: 養生温度 20℃, 40: 養生温度 40℃

キーワード: 貫入抵抗値, 凝結時間, コンクリート温度, 活性化エネルギー 圧縮強度

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 技術センター TEL045-814-7221

している。これは、普通セメントコンクリートの温度依存性はコ示の有効材齢で評価できることを示している。しかし、図-3(右)において高炉セメントの BB20 と BB40 は、コ示の有効材齢による温度補正を行ったとしても一致していない。これは、普通セメントと高炉セメントの見掛けの活性化エネルギーは同一ではなく、セメントの種類により異なることを示している。BB20 と BB40 が一致するように有効材齢の  $Ea/R$  を最小 2 乗法により求めたところ 4835 (K) となった。

次に、圧縮強度と有効材齢、修正有効材齢の関係を図-4、図-5 に示す。普通セメントは、N20 と N40 の圧縮強度は、1 つの曲線状にあり同一の回帰式で表現可能な結果とな

っている。これは、貫入抵抗値と同様に普通セメントコンクリートの温度依存性はコ示の有効材齢で評価できることを示している。一方で、高炉セメントの BB20 と BB40 の圧縮強度は、有効材齢では 1 日～2 日において BB40 の方が BB20 よりも大きな圧縮強度となっており若干の差がある。一方で貫入抵抗値から得られた  $Ea/R$  を 4835 (K) とした修正有効材齢では有効材齢よりも BB40 と BB20 の圧縮強度が 1 つの曲線に近いことがわかる。つまり、高炉セメントの圧縮強度は、修正有効材齢を用いることで、温度依存性をより精度よく評価できると考えられる。

以上の結果から、高炉セメントの見掛けの活性化エネルギーが普通セメントよりも大きいことがわかる。見掛けの活性化エネルギーは 0 である場合、温度依存性がないことを規定する<sup>3)</sup>。つまり、見掛けの活性化エネルギーが大きいほど、温度依存性が高く温度の影響を強く受けることを示す。コンクリートの他の諸物性として自己収縮ひずみに着目すると、高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみの最終値は、その他のセメントよりも経験最高温度による変化量が大きい。これは温度依存性が高いとも読みとることができ、高炉セメントは、温度依存性が高い傾向にあることは明らかである。

5 まとめ

本研究における試験結果から貫入抵抗値から簡易に見掛けの活性化エネルギーを算出できることがわかった。普通セメントと高炉セメントでセメントによって見掛けの活性化エネルギーが異なり、高炉セメントの方が見掛けの活性化エネルギーが大きく温度依存性が高いことが明らかになった。

参考文献

- 1) 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp328-333, 2018.3
- 2) 谷口ら:各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.1, pp357-362, 2008
- 3) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅:ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp.140-149, 1997.6

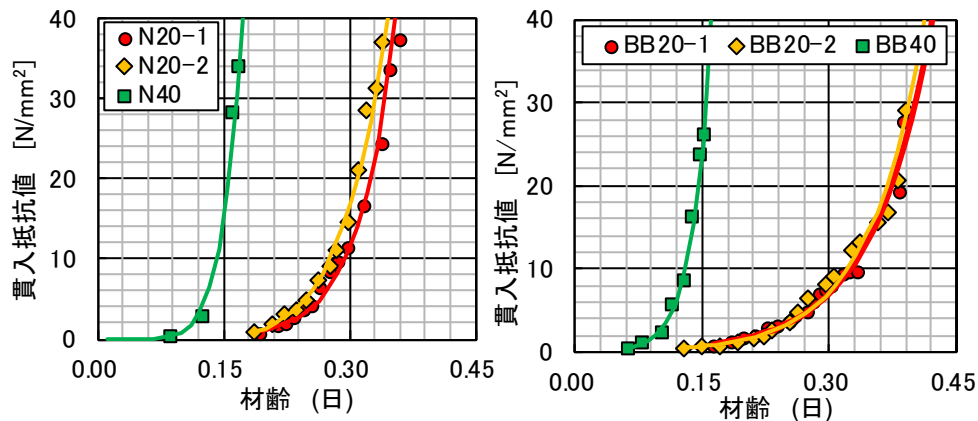


図-2 貫入抵抗値と材齢 (左: N, 右: BB)

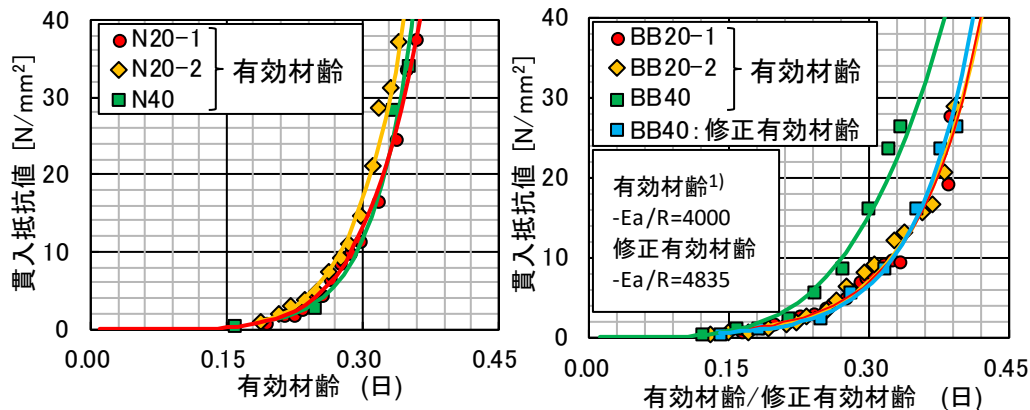


図-3 貫入抵抗値と有効材齢/修正有効材齢 (左: N, 右: BB)

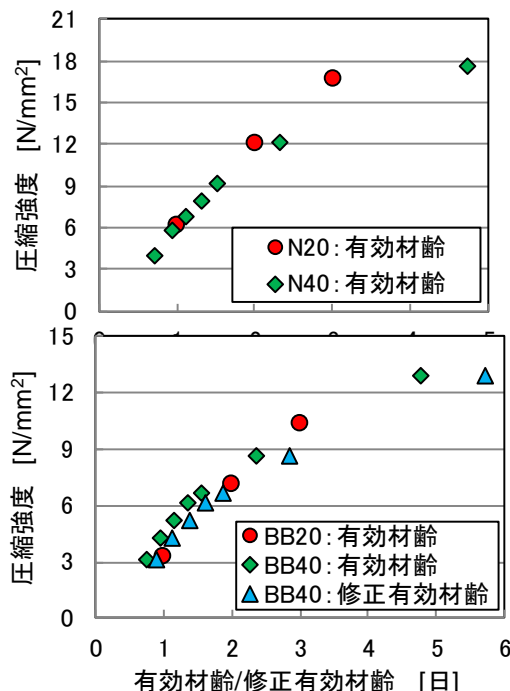


図-5 圧縮強度と有効材齢/修正有効材齢 (BB)