

各種セメントを使用したコンクリートの強度増進への等価材齢適用に関する検討

各種セメント 圧縮強度増進 等価材齢
積算温度 見かけの活性化エネルギー

正会員 ○ 谷口 円*
同 桂 修**
同 吉野利幸**
同 濱 幸雄***

1. はじめに

コンクリートの強度増進は養生温度と材齢に依存し、この関係を一義的に記述する温度時間関数として積算温度、等価材齢(equivalent age)がある。わが国では、基準温度を-10℃とした積算温度方式が主に寒中コンクリート施工指針¹⁾で利用されている。低熱ポルトランドセメントコンクリートは、従来の積算温度では温度・時間依存性を一律に表せない点²⁾が指摘され、セメント種類により水和への温度・時間依存性が異なるためと考えられる。そこで、本報告は各種セメントを使用したコンクリートの強度増進を記述するための等価材齢の適用について検討するものである。

2. 実験概要

表1に実験計画を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント(以下それぞれOPC, MPC, LHCと表記する)の3種類とし、水セメント比を30, 40, 50, 60%のコンクリートとした。表2に各セメントのブレン比表面積、密度、Bogue式により算出した鉱物組成を示す。混和剤は水セメント比60, 50%にはAE減水剤標準型、40, 30%は高性能AE減水剤標準型を使用し、空気量の調整にはAE助剤を使用した。細骨材は当麻産陸砂(表乾密度2.58g/cm³)、粗骨材には当麻産碎石(表乾密度2.88g/cm³)を使用した。コンクリートの調合は、空気量4.5%、水セメント比60~40%はスランブは18cm、水セメント比30%はスランブフロー60cmを目標として、試し練りを行って決定した。表3にコンクリートの決定調合を示す。練り上がり温度は15℃を目標とした。コンクリートの練り混ぜは、100リットル強制二軸型ミキサーで行った。練り上がり後、空気量、スランブ、温度を測定し、φ10×20cmの円柱供試体を作製した。作製した試験体は練り上がり後直ちに封緘し、5, 20および35℃で所定の材齢まで養生し、圧縮強度を測定した。また、試験体温度を打設直後から10分間隔で測定・記録した。ここでは、91日までの報告とする。

3. 結果および考察

等価材齢は、異なる養生温度の影響を基準とする温度で養生した材齢に換算して表すものであり、その算出方法には以下に示すものがある³⁾。

積算温度による等価材齢 t_{eq}

$$t_{eq} = \sum \frac{T - T_0}{T_s - T_0} \Delta t \quad (1)$$

表1 実験計画

| セメント種類 | 水セメント比 (%) | 練り上がり温度 (°C) | 養生条件 | 養生温度 (°C) | 圧縮強度測定材齢 (日) |
|--------|------------|--------------|------|-----------|------------------|
| OPC | 30 | 15 | 封緘養生 | 5 | 3, 7, 14, 28, 56 |
| | | | | 20 | 91, 182 |
| MPC | 40 | 15 | 水中養生 | 20 | 7, 28, 91 |
| LHC | 60 | | | 20 | 7, 28, 91 |

表2 セメントの性状と鉱物組成(Bogue式)

| セメント種類 | ブレン比表面積 (cm ² /g) | 密度 (g/cm ³) | 鉱物組成 (%) | | | |
|--------|------------------------------|-------------------------|----------|-------|--------|-------|
| | | | エーライト | ビーライト | アルミニウム | フェライト |
| OPC | 3450 | 3.17 | 63 | 12 | 8 | 9 |
| MPC | 3100 | 3.24 | 46 | 32 | 5 | 13 |
| LHC | 3330 | 3.24 | 33 | 49 | 2 | 11 |

表3 コンクリートの調合

| セメント種類 | 水セメント比 (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 質量 (kg/m ³) | | | 化学混和剤の使用量 (G×%) | |
|--------|------------|---------------------------|-------------------------|-----|------|-----------------|--------|
| | | | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 減水剤 | AE剤 |
| OPC | 60 | 176 | 293 | 812 | 1070 | 1.00 | 0.0040 |
| | 50 | 176 | 352 | 764 | 1070 | 1.00 | 0.0040 |
| | 40 | 170 | 425 | 720 | 1070 | 0.70 | 0.0040 |
| | 30 | 175 | 583 | 738 | 892 | 1.60 | 0.0100 |
| MPC | 60 | 175 | 292 | 852 | 1037 | 1.00 | 0.0043 |
| | 50 | 175 | 350 | 805 | 1037 | 1.00 | 0.0030 |
| | 40 | 169 | 423 | 763 | 1037 | 0.60 | 0.0025 |
| | 30 | 170 | 567 | 775 | 892 | 1.50 | 0.0080 |
| LHC | 60 | 172 | 287 | 863 | 1037 | 1.00 | 0.0040 |
| | 50 | 172 | 344 | 818 | 1037 | 1.00 | 0.0040 |
| | 40 | 167 | 418 | 772 | 1037 | 0.53 | 0.0025 |
| | 30 | 170 | 567 | 775 | 892 | 1.10 | 0.0073 |

A Study on Application of Equivalent Age for Compressive Strength Development Using Various Cement

TANIGUCHI Madoka, KATSURA Osamu,
YOSHINO Toshiyuki, HAMA Yukio

を等価材齢に換算し、(3)式により計算した圧縮強度と実測値の相関係数を表4に示す。OPCでの相関係数が他のセメントにくらべ低かった。図1に水セメント比60%での各セメントの積算温度による等価材齢と圧縮強度の関係を示す。OPCコンクリートは35℃養生で長期材齢での強度の低下が他のセメントに比べ顕著に観察された。これは、初期水和高温条件で形成される組織構造の違いが及ぼす悪影響とされ⁹⁾、等価材齢だけで容易に表現できず、相関係数が低下したと思われる。算出方法から比較すると、OPCは文献6)の相関係数が低く、積算温度での相関係数が最も高かった。MPCでも、文献6)での相関が低かったが、相関係数が最も高いのは文献7)であった。LHCでは、積算温度での相関係数が最も低く、文献6)での相関係数が高かった。積算温度での適用性は低かった。ASTMC1074などでは積算温度の T_0 を変え、調合それぞれに対応した温度時間関数を得る手法が示されている。しかし、実用性の面からは適用するのは難しい。一方、アレニウス式での等価材齢は、文献7)の見かけの活性化エネルギーの場合がセメント種類を問わず適用性が高く、セメント種類ごとに適切な活性化エネルギーの値があると考えられた。

次に、セメント種類ごとの見かけの活性化エネルギー値を実測値と計算値の誤差が最も小さくなる値として算出した。前述の通り初期の高温による長期材齢での強度低下の影響を考慮するため、(3)式に初期温度の影響を表す項を加えた(5)の式を適用した。係数a, bは、20℃の結果から決定してあるため、係数cと見かけの活性化エネルギーの値を最小二乗法により算出した。

$$F = \frac{F_0(1 - c(T_{24} - 20))}{(1 + \exp(at_{24} + b))} \quad (5)$$

ここで、 T_{24} は打ち込み後24時間のコンクリート温度(℃)

図2に得られた式での計算値と実測値の関係をセメント種類ごとに相関係数とあわせて示す。相関係数はOPCで0.9875, MPCで0.9944, LHCで0.9965と良い対応を示していた。図3に得られた見かけの活性化エネルギーと各セメントのエアライト(C_3S)に対するピーライト(C_2S)の比の関係を示す。ピーライト/エアライト比の高いものほど見かけの活性化エネルギーが高くなる傾向が認められた。

4. まとめ

低熱セメントを含む各種セメントを使用したコンクリートでは等価材齢によって温度・時間依存性を一義的に記述することが可能であり、本研究の範囲で、等価材齢算定に必要なセメントごとの見かけの活性化エネルギーはセメントの鉱物組成に依存することを示した。

[謝辞]

本実験の実施にあたり、日鐵セメント株式会社、株式会社フローリックより材料の提供・実験への多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を示します。

*北海道立北方建築総合研究所生産技術部 工修
 **北海道立北方建築総合研究所生産技術部 博士(工学)
 ***室蘭工業大学建設システム工学科 博士(工学)

表4 等価材齢の算出方法による相関係数の比較

| セメント種類 | 積算温度の換算 | アレニウス式(活性化エネルギーの相違) | |
|--------|---------|---------------------|----------|
| | | 文献6)によるE | 文献7)によるE |
| OPC | 0.9737 | 0.9633 | 0.9721 |
| MPC | 0.9857 | 0.9772 | 0.9875 |
| LHC | 0.9774 | 0.9908 | 0.9868 |

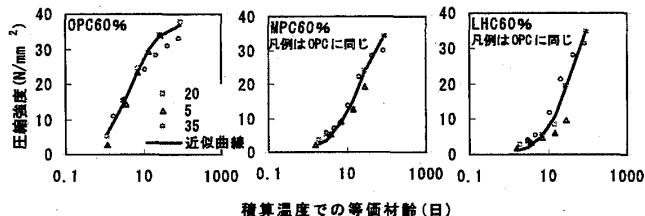


図1 積算温度による等価材齢と圧縮強度の関係の一例

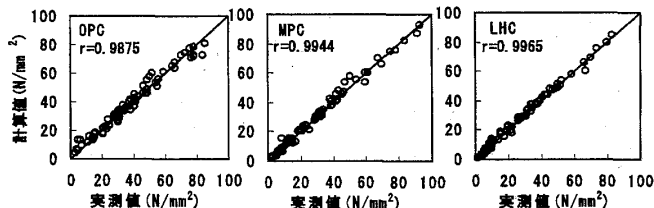


図2 (5)式による圧縮強度の計算値と実測値の関係

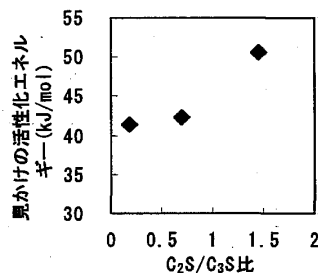


図3 C_2S/C_3S 比と見かけの活性化エネルギー

[参考文献]

- 1) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説, pp. 218-226, 1998
- 2) 小山宣幸, 平田久則, 上田厚元, 小島利広: 低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの積算温度に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, vol. 19, pp. 523-528, 1997
- 3) Guo Chengju: Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI Materials Journal, pp. 341-353, 1989
- 4) たとえば Nicholas J. Carino, Rajesh C. Tank: Maturity Functions for Concretes Made with Various Cements and Admixtures, ACI Material Journal, pp. 188-196, 1992
- 5) たとえば L. D'Aloia, G. Chanvillard: Determining the "apparent" activation energy of concrete Ea-numerical simulations of the heat of hydration of cement, cement and concrete research, Volume 32, Issue 8, pp. 1277-1289, 2002
- 6) Fleisleben Hansen, P., and Pedersen, J: Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, Nordisk Betong, Vol. 21, pp. 19-34, 1977
- 7) Anton K. Schindler: Effect of Temperature on Hydration Of Cementitious Materials, ACI Materials Journal, pp. 72-81, 2004
- 8) A. M. Neville: Properties of Concrete -fourth edition, pp. 359-365, 2002

*Hokkaido Northern Regional Building Research Ins., M.Eng.
 **Hokkaido Northern Regional Building Research Ins., Dr.Eng
 ***Muran Ins.of Technology Dr.Eng.