

各種セメントを対象とした極若材齢を含むコンクリート強度発現性に関する検討

太平洋セメント株式会社 正会員 ○吉光 涼
 太平洋セメント株式会社 正会員 扇 嘉史
 太平洋セメント株式会社 正会員 早川 隆之
 太平洋セメント株式会社 正会員 谷村 充

1. はじめに

スリップフォーム工法に適用するコンクリートや、早期開放が要求される舗装用コンクリートなどの施工では、通常のコンクリートよりも若材齢における強度発現の評価が求められる。

コンクリート強度の発現に関連して過去に様々な予測手法が検討されている。例えば、成長曲線に立脚したコンクリートの強度予測法¹⁾は、セメントの水和反応に伴って強度が発現し、水和反応が温度と時間に依存するため、コンクリート強度が養生温度と材齢によるマチュリティの関数で表すことができるという考えに基づく。養生温度の影響としては積算温度やアレニウス式を応用したマチュリティが用いられ、その影響は基準温度で養生された場合の材齢に換算した等価材齢として考慮される。そして、これらマチュリティと強度発現に対応した曲線(強度発現式)、例えばゴンペルツ曲線やロジスティック曲線を組み合わせることにより、養生温度の影響を加味してコンクリート強度を予測できる。このような強度予測法は、簡便な方法であるにもかかわらず、予測精度も高く、利便性に富むと思われる。しかし、既往の研究では、成長曲線の適用は材齢 1 日程度以降の圧縮強度の場合に限られており、それ以前(極若材齢)への適用性については十分に検討されていない。そこで、本報告では、極若材齢を含めた範囲の圧縮強度における、強度発現式の適用性について各種セメントを対象として基礎的に検討した。

2. 実験概要

使用材料について、セメントは、普通ポルトランドセメント(N)、早強ポルトランドセメント(H)、中庸熱ポルトランドセメント(M)、低熱ポルトランドセメント(L)および高炉セメントB種(BB)の5種類とした。細骨材には山砂(密度 2.57g/cm³)、粗骨材には硬質砂岩砕石 2005(密度 2.65g/cm³)を使用した。また、混和剤は AE 減水剤(リグニンスルホン酸系)および AE 剤(アルキルアリルスルホン酸化合物系)を用いた。

コンクリート配合について、水セメント比は 55%、細骨材率は 46%とした。AE 減水剤の添加率は C×0.25%(C はセメント質量)一定とし、目標スランプ 12.5±2.0cm、空気量 4.5±0.5%になるように、単位水量および AE 剤使用量で調整した。環境温度 10、20 および 30℃にてコンクリートの練混ぜを行い、スランプおよび空気量の測定後、直ちに φ10×20cm の円柱供試体を作製した。作製した供試体は、各環境温度にて材齢 3 日まで封緘養生し、その後は水中養生を施した。圧縮強度試験(JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」)は、材齢 3 日までは 6 時間から 12 時間おきに、それ以降は 3 日、7 日、28 日、56 日、91 日で実施した。

3. 試験結果および考察

極若材齢を含んだ材齢 3 日までにける強度発現への養生温度の影響に関して、積算温度もしくはアレニウス式のいずれに基づいた考え方が適しているか検討した。図 1 に積算温度とアレニウス式による等価材齢と圧縮強度の関係について M、BB を例として示す。なお、積算温度の基準温度は-10℃とし、等価材齢の基準温度は 20℃とした。また、アレニウス式による場合は既往の知見¹⁾に基づき同様に基準温度を 20℃として等価材齢を計算した。この条件において、30℃養生で材齢 1 日の場合、積算温度およびアレニウス式による等価材齢は、それぞれ約 1.33 日、約 1.57 日となる。図 1 から、積算温度と比較してアレニウス式による等価材齢の方がばらつきが少なく、養生温度が異なる場合においても強度発現を一義的に

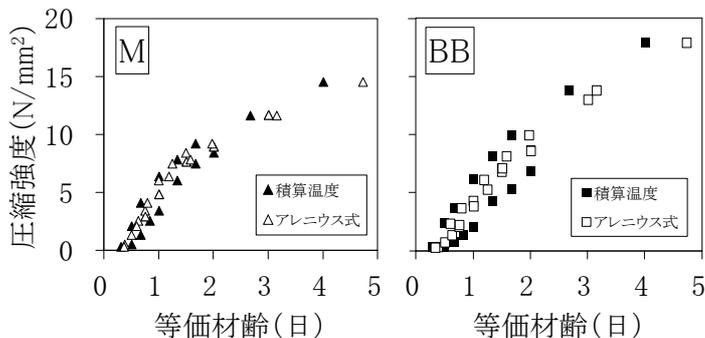


図 1 等価材齢と圧縮強度の関係

キーワード :コンクリート、圧縮強度、若材齢、強度発現、強度発現予測

連絡先 :〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2, 太平洋セメント(株) 中央研究所, TEL:043-498-3855, FAX:043-498-3821

表現できることが分かる。次に、このばらつきを定量的に評価した。具体的には、等価材齢と圧縮強度の関係について、ゴンペルツ曲線とロジスティック曲線で回帰し、その回帰式から予測される圧縮強度と実測値との差異の大きさを評価した。その結果、セメント種類によらずアレニウス式による等価材齢の方が平均二乗誤差の平方根(RMSE)が小さく、養生温度が異なる場合でも強度発現を一義的に表現できることが確認された。これを受け、材齢 3 日以降を対象とした強度発現式についてもアレニウス式による等価材齢で評価した。

極若材齢以降、材齢 91 日までを対象として、強度発現式の適用性を検討した結果を表 1(a)に示す。評価方法は、材齢 3 日までの場合と同様とした。ゴンペルツ曲線、ロジスティック曲線、双方ともに RMSE が小さく、良好な予測精度を示した。しかし、図 2 に一例を示すように、若材齢で 10N/mm²を下回る低強度領域における、強度発現式から予測した圧縮強度に着目すると、実測値との差異が大きいことが確認された。

中村ら²⁾は、エーライト(C₃S)量が少なく、ビーライト(C₂S)量の多い低発熱セメントの断熱温度上昇について、一般的に用いられる K、α、S を実験定数とした Q=K(1-exp(αt^S))の式では予測精度が低く、これらの和、すなわち Q=K₁(1-exp(α₁t^{S₁))) + K₂(1-exp(α₂t^{S₂)))なる式により予測精度が向上するとしている。この知見より、第 1 項は C₃S の、2 項目は C₂S の反応に対応し、C₂S が多く含まれるセメントにおいては、その反応についても考慮する必要があると考え、強度発現式に対しても式[1]に示したゴンペルツ曲線の和と式[2]に示したロジスティック曲線の和について検討を実施した。}}

強度発現式の適用性評価は上記と同様に行い、その結果を表 1(b)に示す。曲線の和を用いることで、特に C₂S 量の多い L において RMSE が小さくなることが確認された。図 3 に L に関して、等価材齢と圧縮強度の関係ならびにロジスティック曲線の和(式[2])を示す。低強度領域においても、予測値と実測値との差異が明らかに小さいことが確認される。また、強度発現式について、等価材齢が約 7 日までは式[2]の第 1 項に対応する曲線 a の寄与が大きい、その後は第 2 項に対応する曲線 b の寄与が大きくなる傾向であった。この傾向は、その他のセメント種類でも認められた。丸山ら³⁾は約 C₃S の約 90%が反応した後に C₂S の水和反応が加速し、その時期は 20℃養生の場合、7 日程度であるとしている。本検討において、曲線 a は C₃S の反応に、曲線 b は C₂S の反応に対応しており、水和反応の側面からも曲線の和を強度発現式として適用することは妥当であると考えられる。

$$f_c = f_1 \exp \left\{ -b_1 \left(\frac{1}{t} \right)^{a_1} \right\} + f_2 \exp \left\{ -b_2 \left(\frac{1}{t} \right)^{a_2} \right\} \quad [1]$$

$$f_c = \frac{f_1}{1 + \exp \{-a_1 \log t + b_1\}} + \frac{f_2}{1 + \exp \{-a_2 \log t + b_2\}} \quad [2]$$

ここに、 f_c : 予測圧縮強度、 t : 等価材齢
 $a_1, a_2, b_1, b_2, f_1, f_2$: 実験定数

実務的に極若材齢の強度を予測しようとする場合、その強度発現は曲線 a のみで回帰することが可能であり、約 7 日までの 3 材齢以上の圧縮強度を予め測定し、強度発現式の係数を得ることで予測できると考えられる。今後、取得データを活用し、水和反応シミュレーション等による強度予測の可能性について検討する予定である。

【参考文献】

1) 氏家ほか: 各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討、土木学会論文集、No.798、V I-68、pp.51-61 (2005)
 2) 中村ほか: マスコンクリートの温度解析における断熱温度上昇近似式の適合性に関する研究、山口大学研究報告、46 巻、1 号、pp.95-102 (1995)
 3) 丸山ほか: エーライトおよびビーライトの水和反応速度に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.75、No.650、pp.681-688 (2010)

表 1 等価材齢と圧縮強度の関係

(a)		N	H	BB	M	L
	ゴンペルツ曲線	2.17	2.57	1.20	2.45	2.85
	ロジスティック曲線	2.17	2.79	1.29	2.18	2.15
(b)						
	ゴンペルツ曲線の和	2.15	2.49	1.02	1.59	1.05
	ロジスティック曲線の和	1.76	2.27	0.99	1.62	0.84

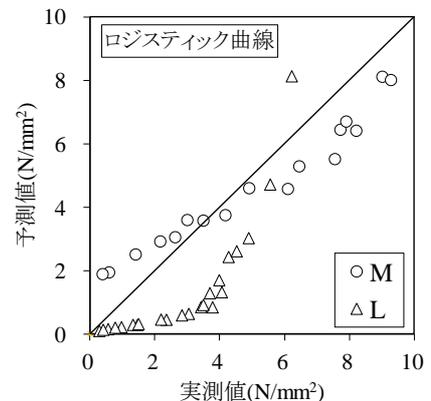


図 2 若材齢時の圧縮強度の実測値と予測値の関係

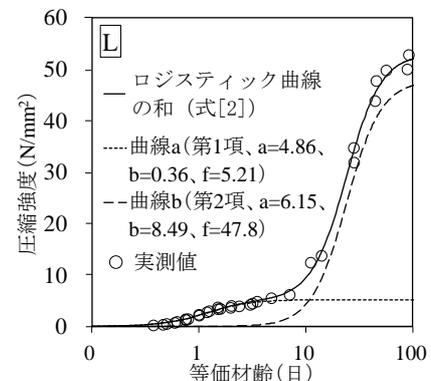


図 3 等価材齢と圧縮強度の関係