

急結剤の水和と急結特性の関係に関する基礎的検討

太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 ○細川佳史
 西松建設(株)技術研究所 正会員 松浦誠司
 戸田建設(株)土木工事統括部 正会員 田中 徹
 東京大学生産技術研究所 F会員 魚本健人

1 はじめに

急結剤の急結性状は、セメントと急結剤の相互作用的な水和反応に起因した現象である。急結剤の急結性状については、急結剤を添加したペーストあるいはモルタルのプロクター貫入抵抗値による評価が一般的な手法となっているが、水和反応とプロクター貫入抵抗の関係について詳細に検討された例は少なく、定性的な評価に留まっているのが現状である。したがってここでは、急結剤の水和反応と急結特性の関係を明らかにすることを目的として、急結剤を添加したセメントペースト（以下単にペーストと称す）の結合水量とプロクター貫入抵抗の関係についての定量的な評価を試みた。

2 実験の概要

2.1 使用材料および配合

本研究で検討対象とした急結剤はセメント鉱物系粉体急結剤（汎用タイプ）である。ペーストの W/C は 45.6% とし、急結剤の添加率はセメントに対する質量比で 3.0%、5.0%、6.5% の 3 水準とした。

2.2 測定項目および測定方法

測定項目および測定方法を表 1 に示す。プロクター貫入試験に供するペーストは、まずハンドミキサーでセメントペーストを混練りし、その後所定量の急結剤を投入して 5～10 秒間ハンドミキサーで攪拌して調製した。測定する材齢は 120 分までを上限とし、貫入抵抗値が約 25MPa に達した場合はその時点で測定終了とした。なお、材齢の基点は、ペースト調製における急結剤投入時とした。ペーストの結合水量の測定方法については別報¹⁾を参照されたい。

3 実験結果および考察

3.1 プロクター貫入抵抗値の経時変化

一般のセメントペーストについてはプロクター貫入抵抗値やビガー針貫入長さなどの経時変化を表す実験式として式[1]が知られている²⁾。しかし本研究では、急結剤を添加したペーストについて、材齢 30 秒～1 分の経時変化の近似が良好でないことが認められたため、式[1]を修正した式[2]を提案する。

$$R = at^b \quad [1]$$

$$R = a(t-c)^b \quad [2]$$

（ここに、 R :貫入抵抗値、 t :材齢、 a, b, c :実験パラメータを示す）

図 1 に各急結剤添加率における貫入抵抗の経時変化と、式[1]および式[2]で近似した結果を示す。近似における重相関係数 r はいずれの式ともおよそ 0.97～0.99 程度で近似の精度に差はないが、急結剤の急結性が顕著に表れる材齢 0.5min の相対誤差は、表 2 に示すとおり式[2]の方が極めて小さいことが認められた。したがって、急結性を評価するプロクター貫入抵抗の経時変化の近似式としては式[2]が有効であることがわかった。

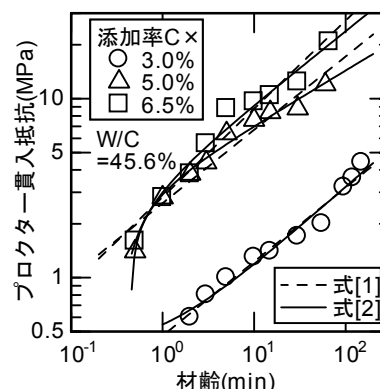


図 1 各急結剤添加率における貫入抵抗の経時変化

3.2 結合水量による貫入抵抗の定量的評価

Powers らは、フレッシュコンクリートのコンシステンシー R と単位水量 W_f について次のような考察を行った³⁾。

表 1 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法	材齢
ペーストのプロクター貫入抵抗値	JIS A 6202 - 1995 に準拠	30 秒 1～120 分
ペーストの結合水量	950℃の強熱減量より算出	5, 15, 30, 60 分

表 2 材齢 0.5min における式[1]および式[2]による値と実測値との相対誤差

急結剤 添加率	相対誤差(%)	
	式[1]	式[2]
5.0%	40.095	-0.421
6.5%	25.382	-1.613

キーワード：急結剤，急結特性，プロクター貫入抵抗，結合水量，自由水量

連絡先：〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 Tel 043-498-3876 Fax 043-498-3849

コンシステンシーの増分 dR は、コンクリート中の固体粒子の体積 V_s と単位水量 W_f の比の増分 $d(V/W_f)$ およびコンシステンシーに比例し、式[3]が成立するというものである。ここで、式[3]をプロクター貫入抵抗にも適用し、 R を貫入抵抗、 W_f をペースト中の自由水量、 V_s をペースト中の固体粒子の体積と置き換えるものとする。式[3]を積分し、さらに固体体積 V_s と自由水量 W_f の和が常に 1 であると仮定すると式[4]が得られる。

$$dR = kR \cdot d(V/W_f) \quad [3]$$

$$R = R_0 \exp(k(1/W_f - 1)) \quad [4]$$

（ここに R_0 は実験定数、 k は固体粒子の性質による定数、を示す）

材齢 t における自由水量 $W_f(t)$ は、ペースト中の単位水量 W から水和によるペーストの結合水量 $\omega(t)$ を差し引いた値とし、式[5]のとおりペーストの結合水量ならびにペーストを構成する材料の単位量 C （単位セメント量）、 W （単位水量）、 Q （単位急結剤量）により求められる。

$$W_f(t) = W - \left(\frac{C}{1 + \omega_c} + \frac{Q}{1 + \omega_q} \right) \cdot \omega(t) \quad [5]$$

（ここに ω_c 、 ω_q はそれぞれセメント、急結剤が水和する以前に元来有する結合水量、を示す）

さて、式[4]は $\ln R$ と $1/W_f - 1$ が直線関係になることを示している。そこで両者をプロットすると図 2 に示すように、急結剤添加率の値にかかわらず両者が直線関係になることが認められた。このことから、この直線の傾きである k が、添加率に依存しない値として、急結特性を定量的に示す指標になりうるものと考えられる。

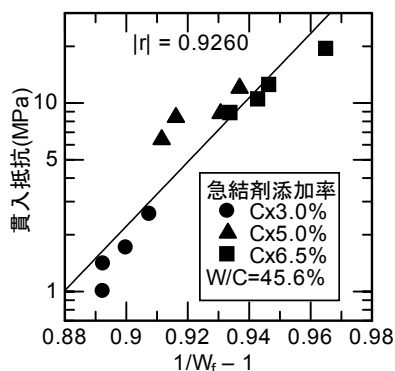


図 2 貫入抵抗 R と自由水量 W_f の関係

3.3 結合水量の経時変化

式[2]と式[4]から R を消去し W_f について整理すると式[6]が得られる。

$$\frac{1}{W_f} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{a}{R_0} (t - c)^b \right) + 1 \quad [6]$$

したがって、急結剤の急結特性値として考えられる k 、ならびに、プロクター貫入抵抗の経時変化から求められる実験パラメータ a 、 b 、 c が既知であれば、式[5]と式[6]

により任意の急結剤添加率における結合水量の経時変化が計算により求められる。図 3 に結合水量の計算値と実測値を示す。一部に計算値と実測値の間で大きな差が認められるが、概ね結合水量の経時変化を良好に示しているものと考えられる。この方法によれば、結合水量の測定が困難な材齢（1min 以内）において、プロクター貫入抵抗により急結剤を添加したペーストの結合水量の測定が可能であることを示しており、急結剤の材料設計の際、重要な知見を与えるものである。

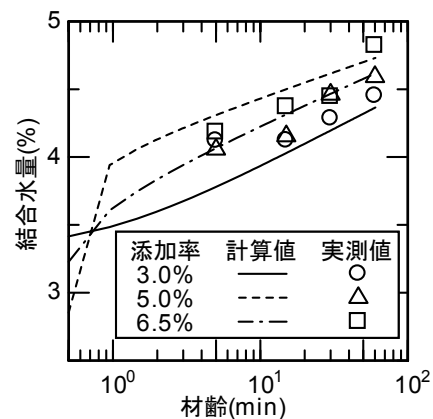


図 3 結合水量の計算値と実測値

4 まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 急結剤を添加したペーストのプロクター貫入抵抗の経時変化は式[2]にしたがうことが認められた。
- (2) 結合水量により求められるペースト中の自由水量とプロクター貫入抵抗の関係から、急結特性を定量的に評価する指標の可能性について示した。
- (3) 急結性の特性値とプロクター貫入抵抗値の経時変化から求められる実験パラメータから、任意の急結剤添加率におけるペーストの結合水量の経時変化が算出可能であることを示した。

今後は、各種急結剤やさまざまな W/C のペーストにおいて同様な検討を行い、急結剤の急結特性を示すと考えられる k 値や結合水量の算出方法について、汎用性、有用性を明らかにしていく予定である。

【参考文献】

- 1) 細川佳史ほか、吹付けコンクリートにおける急結剤特性の定量的評価に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.55, pp.418-424, (2001)
- 2) S. Popovics, Fundamentals of portland cement concrete: A Quantitative approach Vol.1, John Wiley & Sons, (1982)
- 3) T. C. Powers, Properties of fresh concrete, John Wiley & Sons, (1968)