

通常流込み成型で460N/mm²の圧縮強度を発現する新規セメント硬化体

太平洋セメント(株) 正会員 博(工) ○河野 克哉
 太平洋セメント(株) 中山 莉沙
 太平洋セメント(株) 多田 克彦

Abstract : In this study, the new types of manufacturing method have been considered for the cementitious materials containing the novel cement systems. The purpose of this work is to achieve the highest level compressive strength in hardened mortar. The grain size and proportion of ternary blended cement systems were calculated using the closest packing theory of Furnace. The casted specimens were prepared by mixing the constituents with an extremely small amount of water. After removal of mold, the products including densest packing cement systems absorbed moisture from the outside surface, followed by two-stage heat curing. As a result, the densest packing design and pre-soaking treatment enable to produce hardened cement body having ultra high compressive strength of above 460 N/mm².

Key words : Ultra high compressive strength, Closest packing, Pre-soaking treatment, Heat curing

1. はじめに

超高強度コンクリートは、構造物の長大化に寄与できるとともに高耐久化を実現できる材料である。最近では、国内で設計基準強度300N/mm²の超高強度コンクリートがプレキャスト部材として実用化されたことが報告されている¹⁾。また、海外における既往の試験室レベルの検討においては、型枠内で高温加圧成型(温度250~400℃)することで、最高680N/mm²程度の超高強度セメント硬化体が得られたことも報告されている²⁾。高温加圧成型法(ホットプレス成型法)は、最高レベルの圧縮強度を発現させるために有効な方法であるが、型枠を組み立てて打ち込むことで任意の形状を得ることができるといったセメント材料に特有の長所を犠牲にするものであり、実用性に乏しい方法といえる。そのため、本研究では、実用化が期待できるような型枠への通常の流込み成型法において、最高の圧縮強度を達成することを目標とし、新しいセメント硬化体の構成材料、配合および製造方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料, 配合および練混ぜ

(1) 使用材料

表-1に示すように、結合材(以下, B)には低熱ポルトランドセメント(以下, C), 石英微粉末(以下, SI)およびシリカフューム(以下, SF)を用いた。また、細骨材には珪砂(以下, S)を、混和剤には高性能減水剤(以下, SP)ならびに消泡剤(以下, DF)を用いた。

(2) 配合

配合は、表-2に示すとおりとした。ここで、Bを構成する各粉体の粒子間空隙をできるだけ減じることで少ない水量(以下, W)で流動できる緻密な粉体混合物が得られるものと考えて、最密粒度となる結合材の処方を検討した。すなわち、非連続粒度系の2~4成分の粉体に対して最密充填状態を与える成分数、粒子径、配合比に関する簡便な計算法であるFurnaceの最密充填理論³⁾にもとづいて算出した。この計算法では、2, 3, 4成分の粉体の最密充填は、粉体の成分数 $n+1$ 、各粉体の空間率 ε (同一と仮定)、最大粒子径 D_1 、最小粒子径 D_{n+1} 、最大粒子と最小粒子のサイズ比 $K=D_{n+1}/D_1$ 、最大密度系の相隣り合

う粒子径比 $D_{n+1}/D_n=K^{1/n}$ とした場合、 $n+1$ 成分の混合割合(体積比)は、

$$1\text{次粒子} : 2\text{次粒子} : 3\text{次粒子} : 4\text{次粒子} = 1/(1+\varepsilon) : \varepsilon/(1+\varepsilon) : \varepsilon^2/(1+\varepsilon) : \varepsilon^3/(1+\varepsilon)$$

の各項を $n+1$ 次粒子までの総和でそれぞれ割ったものとなる。

ここで、表-1に示したCとSFの各粉体について、平均粒子径をそれぞれ $D_f=20\mu\text{m}$ 、 $D_s=0.1\mu\text{m}$ 、空間率をいずれも $\varepsilon_f=\varepsilon_s=0.5$ と仮定したとき、サイズ比は $K=D_s/D_f=5\times 10^{-3}$ となり、図-1に示した粉体混合物が最大密度を与えるサイズ比と成分数 $n+1$ の関係から、最大密度を与える成分数は $n+1=3.05$ 、つまり3成分となる。さらに $D_{n+1}/D_n=K^{1/n}$ の関係から、CとSFの間に加えるべき粒子径は $D_2=(D_1\cdot D_s)^{1/2}=1.41$ と算出される。表-1に示したSI(粒子径 $D_s=1.41$ 、空間率 $\varepsilon_s=0.5$)は、このような中間粒子となるように粉体粒度を調整したものであり、各粉体の混合割合でC : SI : SF=5.71 : 2.86 : 1.43 \approx 6 : 3 : 1(体積比)とした3成分系結合材を、水結合材比(以下、W/B)を13%ならびに15%の2水準で使用した。なお、いずれの配合においても、Sの絶対容積を355L/m³、SPの添加率をB \times 2.5%およびDFの添加率をB \times 0.02%で一定とした。

表-1 使用材料

種類	名称	略号	物性
結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント	C	比表面積 3330cm ² /g, 密度 3.24g/cm ³
	石英微粉末	SI	密度 2.59g/cm ³
	シリカフューム	SF	比表面積 20m ² /g, 密度 2.29g/cm ³
細骨材	珪砂	S	最大寸法 0.3mm, 密度 2.61g/cm ³
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF	ポリグリコール系

表-2 配合

No.	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							フロー *2 (mm)	空気量 *3 (%)
		W	B			S	SP *1	DF *1		
			C	SI	SF					
1	13	180	913	362	107	927	B \times 2.5%	B \times 0.02%	230	2.2
2	15	199	876	347	102				295	2.0

*1 Wの一部に内割置換 *2 落下振動無し *3 空気室圧力方法

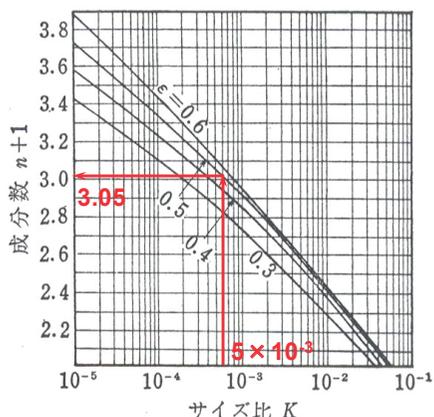


図-1 最大密度を与える成分数とサイズ比の関係³⁾

(3) 練混ぜ

オムニミキサ(容量 5L)にB, W, SP, SおよびDFを投入して6分間の練混ぜを行い、練り上がったモルタルを型枠(内寸法 $\phi 5 \times 10\text{cm}$)に打ち込んだ。なお、表-2中に併記したようにW/B=13~15%の範囲でコンシステンシーはフロー230~295mm, 空気量2.0~2.2%の範囲となっており、いずれの配合においても通常の流込み成型が可能となるような高い流動性を示した。

2.2 吸水処理ならびに熱養生

(1) 吸水処理

通常の型枠(内寸法 $\phi 5 \times 10\text{cm}$)に打ち込んだ後、材齢48時間まで封緘養生(室温20°C)を行った供試体は脱型して、以下に示す脱気吸水または煮沸吸水に供した。

i) 図-2に示すようにデシケーター内で供試体を完全に水中に浸漬した状態で、アスピレーターにて上層空気を排出させて減圧することで、外表面から供試体内部へ水分を供給した。このときの脱気時間は0分, 1分, 30分および90分の4水準に変化させた。また、脱気吸水処理の前後で供試体質量を測定し、吸水量(V_p)を算出した。

ii) 図-3に示すようにビーカー内で供試体を完全に水中に浸漬した状態で、電熱ヒーターにて約5°C/分の昇温速度で100°Cに達するまで加熱し、30分間の煮沸を実施した。その後、供試体は室温20°Cになるまで水中にて自然冷却した。なお、煮沸吸水処理の前後で供試体質量を測定し、同様に吸水量(V_p)を算出した。

(2) 熱養生

前述の i) または ii) の吸水処理を行った供試体は、蒸気養生(昇温速度15°C/h, 最高温度90°C, 最高温度保持時間48h, 降温速度15°C/h, 1atm)に供した後、さらに加熱養生(昇温速度60°C/h, 最高温度180°C, 最高温度保持時間48h, 降温速度60°C/h, 1atm)を実施した。

2.3 圧縮強度試験

2段階の熱養生を完了した供試体(寸法 $\phi 5 \times 10\text{cm}$)は、JIS A 1108に準じて耐圧機(容量1000kN)にて圧縮強度を測定した。

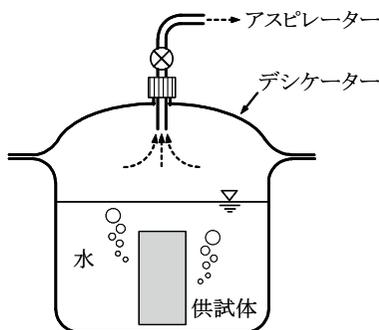


図-2 脱気吸水処理

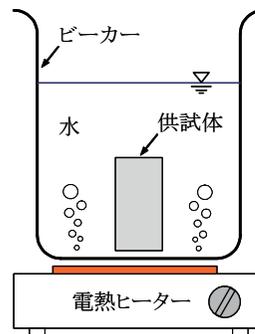


図-3 煮沸吸水処理

3. 実験結果ならびに考察

3.1 脱気吸水処理がセメント硬化体に与える影響

(1) 供試体の空隙飽水度

図-4は、脱型直後に脱気吸水処理を行った供試体において、空隙飽水度と脱気時間の関係を示したものである。なお、供試体の空隙飽水度は、表-2に示したフレッシュモルタルにおける空気量(a)に供試体容積(V_m)を乗じた供試体空隙量を吸水処理による水分(吸水量 V_w)が占める割合(百分率)のことを示している($V_w/(V_m \cdot a) \times 100$)。W/B=13%ならびにW/B=15%のいずれの場合においても脱気時間が長いほど空隙飽水度が高くなっており、同じ脱気時間ではW/B=13%の場合にくらべてW/B=15%の場合の方が空隙飽水度は高くなっている。とくに脱気時間が30分以上になると、供試体の空隙飽水度は、W/B=13%の場合にはほぼ頭打ちになるものの、W/B=15%の場合にはさらに上昇する傾向を示している。これは、W/Bが高い方が脱型時における硬化組織が粗いため、まだ透水性が高い組織構造を有しており、外部から水を吸収しやすかったものと考えられる。

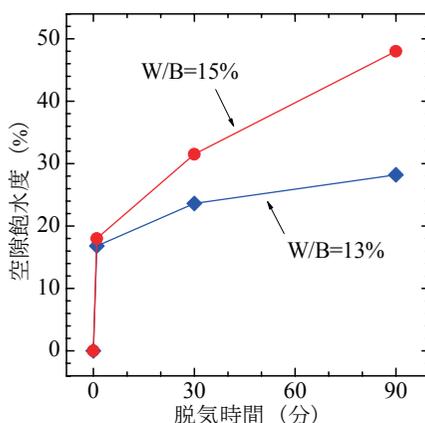


図-4 供試体の空隙飽水度と脱気時間の関係

(2) 供試体の圧縮強度

図-5は、脱型直後に脱気吸水処理を行った供試体において、熱養生後の圧縮強度と脱気時間の関係を示したものである。30分間の脱気吸水処理を行ったときの圧縮強度は、W/B=13%の場合に平均411N/mm²(419N/mm², 409N/mm²および405N/mm²の平均値)、W/B=15%の場合に平均464N/mm²(473N/mm², 461N/mm²および458N/mm²の平均値)となっており、いずれのW/Bにおいても、きわめて高い圧縮強度を発現することがわかった。しかしながら、90分間の脱気吸水処理を行ったときの圧縮強度は、W/B=13%の場合には脱気時間を延長してもほとんど頭打ちとなったものの、W/B=15%の場合では30分間の脱気吸水処理を行った場合よりも低下する傾向を示した。脱気時間が0分間(吸水処理を行わない)ならびに1分間と短いときには、W/B=13%の場合とW/B=15%の場合で圧縮強度に大きな違いを生じていないものの、30分間以上の脱気吸水処理を実施することで、熱養生開始前に供試体の空隙飽水度が高かったW/B=15%の場合では460N/mm²以上の超高強度を有する硬化体を得ることができた。このことは、脱型直後に供試体の外表面から内部に供給された水分は、その後の熱養生時に反応水として機能したことを示唆している。すなわち、外部から強制的に吸収した水分が供試体の内部で養生に用いられ、きわめて緻密な硬化組織の形成に寄与することで、圧縮強度を飛躍的に増進させたものと考えられる。

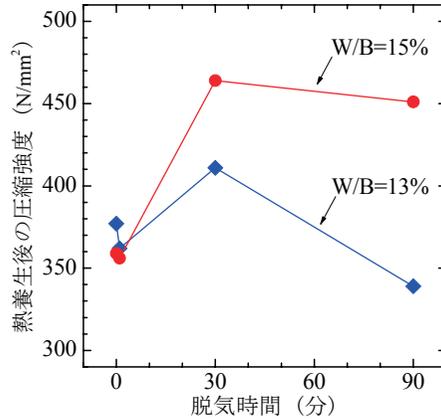


図-5 供試体の圧縮強度と脱気時間の関係

3.2 煮沸吸水処理がセメント硬化体と与える影響

(1) 供試体の空隙飽水度

図-6は、脱型直後に煮沸吸水処理をした供試体において、熱養生後の圧縮強度と空隙飽水度との関係を示したものである。なお、この図中には、図-4ならびに図-5で示した脱気吸水処理を行った供試体のデータも併記して比較する形としている。30分間の煮沸によって吸水させた供試体の空隙飽水度は、W/B=13%の場合に48.6%、W/B=15%の場合に44.0%となった。煮沸吸水処理の場合には、脱気吸水処理の場合のようにW/Bに依存せずほぼ同じ飽水状態となっている。また、W/B=15%の供試体は、水中で30分間の煮沸を実施した場合と水中で30分以上の脱気を実施した場合で、いずれも供試体中の空隙の約半分が水で満たされたほぼ同じ状態になった。このことより、煮沸によって蒸気圧膨張を受けた供試体内部の空隙は、水中における自然冷却中に減圧することで外部の水を徐々に内部に引き込んだものと考えられる。

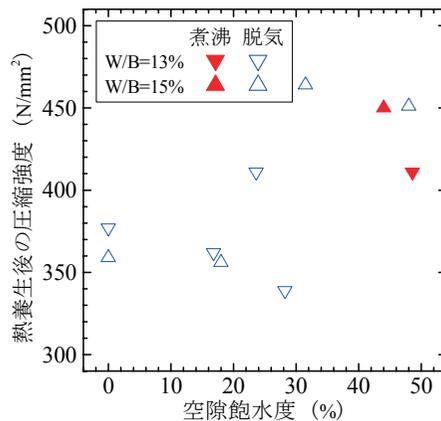


図-6 供試体の圧縮強度と空隙飽水度の関係

(2) 供試体の圧縮強度

図-6に示すように30分間の煮沸によって吸水を行った供試体は、熱養生後の圧縮強度がW/B=13%の場合に平均411N/mm²(416N/mm²、414N/mm²および403N/mm²の平均値)、W/B=15%の場合の平均450N/mm²(416N/mm²、414N/mm²および403N/mm²の平均値)となった。煮沸吸水処理は、脱型直後の早期材齢時に

急速な昇温速度で100℃の温度環境を経験させるものであるが、熱養生後にきわめて高い強度発現を実現していることから、煮沸と冷却の過程において内部拘束による温度ひび割れなどの初期欠陥を硬化組織に発生させていないものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、型枠への通常の流込み成型法にて、きわめて高い圧縮強度を得るため、新しいセメント硬化体の構成材料ならびに製造方法について検討した。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを用いた結合材に、平均粒子径を $1.4\mu\text{m}$ 程度に調整した石英微粉末を中間粒子として添加し、低熱ポルトランドセメント：石英微粉末：シリカフェームの配合比をそれぞれ6：3：1とすることで、理論上で最密粒度となる3成分系の結合材となり、実際に低水結合材比でも流込み成型が可能となる高い流動性を得た。
- (2) 最密粒度となる3成分系の結合材を水結合材比15%のモルタルとし、通常の流込み成型した供試体を脱型直後に強制吸水、すなわち脱気吸水または煮沸吸水のいずれかを実施することで、空隙飽水度を50%程度にすることができた。
- (3) 脱型直後に強制吸水を行った供試体は、その後、2段階の熱養生(最高温度90℃の蒸気養生と最高温度180℃の加熱養生)に供することで、通常の流込み成型法で最高記録となる $450\sim 464\text{N/mm}^2$ の圧縮強度を発現する新しいセメント硬化体を得ることができた。

参考文献

- 1) 今井和正, 山本佳城, 加藤雅樹, 村松晃次: 設計基準強度 300N/mm^2 のコンクリートを用いたRC細柱の開発と適用, コンクリート工学, Vol. 51, No. 12, pp. 959-966, 2013
- 2) 鶴澤正美, 山田一夫: PRCを用いた超高強度・高じん性のコンクリートの開発動向, コンクリート工学, Vol. 39, No. 2, pp. 53~56, 2001
- 3) 三輪茂雄: 粉粒体工学, 朝倉書店, pp. 140-145, 1972