

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (16)

— 吹付けコンクリートの強度特性と水和性状の関係 —

Properties of Shotcrete (16)

—The relationship between the strength property and hydration process of shotcrete—

細 川 佳 史*・魚 本 健 人**

Yoshifumi HOSOKAWA and Taketo UOMOTO

1. は じ め に

吹付けコンクリートの特徴をあげるとすれば、圧縮空気による施工および急結剤の添加といった2点であろう。これらにより、吹付けコンクリートは任意の場所に型枠を必要とせず施工可能となり、早期に構造体としての機能を発揮する。逆に、吹付けコンクリートの強度特性、施工性、耐久性などは、これらに大きく影響を受けるといえる。

急結剤について着目すると、これを添加する目的は、吹き付けたコンクリートの強度を早期に得ることであるが、それはセメントの水和反応を急激に促進することにより実現している。したがって、吹付けコンクリート中のセメントの水和性状は、通常打設によるコンクリート中のセメントの水和性状と大きく異なることが予想される。コンクリートの強度発現はセメントの水和の進行によるものであるから、吹付けコンクリートの強度発現は急結剤の影響を受けたセメントの水和に大きく依存することになる。しかしながら、セメントの水和性状の観点から吹付けコンクリートの強度特性を検討した報告はこれまであまり多いとは言えない。

そこで本研究は、各種混和剤を使用した吹付けコンクリートの強度発現および水和性状に対する各種混和材の影響、および両者の関係について、急結剤を使用せず圧縮空気による打設を行わない通常のコンクリートとの対比の上で検討し、吹付けコンクリートの基本的特性を把握することを試みた。

2. 実 験 概 要

2.1 使用材料

本研究では、各種混和材としてシリカフェーム (SF) およびフライアッシュ (FA) を検討対象とした。比表面積はそれぞれ 200,000 cm²/g (BET 法), 3,730 cm²/g (ブレン法) である。セメントは普通ポルトランドセメント (密度

3.15 g/cm³) を使用した。粗骨材 (G) は八王子産 6 号砕石 (密度 2.66 g/cm³, 吸水率 1.02%, 粗粒率 6.24) を使用し、細骨材 (S) は君津産山砂 (密度 2.61 g/cm³, 吸水率 1.7%, 粗粒率 2.76) を使用した。混和剤 (Ad) は高性能減水剤を使用し、空気量の調整に消泡剤を使用した。急結剤にはカルシウムアルミネート系粉体急結剤を使用した。

2.2 配合および実験水準

実験に使用したコンクリートの配合を表 1 に、実験水準を表 2 に示す。各混和材の混合方法はセメント置換とし、置換率はセメント重量に対し一律 10% とした。なお、目標スランプを得るために高性能減水剤を適宜添加して調整した。

本研究では、コンクリートの強度特性およびセメントペーストの水和特性について実験を行うこととしている。したがって、表 2 における急結剤の添加と無添加の相違は、コンクリートにおいては吹付けコンクリートとベースコンクリートを、セメントペーストにおいては、急結剤添加ベ

表 1 基本配合

Gmax (mm)	Sl' (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					C	W	S	G
15	12	2	56.9	60.0	360	205	1035	703
15	21	2	45.6	58.2	450	205	960	703

表 2 実験水準

No.	結合材量 (kg/m ³)	W/C (%)	混和材	急結剤 添加率 Cx (%)	Symbol	
					急結剤 添加	無添加
1	360	56.9	—	7	Nq	N
2			SF		SFq	SF
3			FA		FAq	FA
4	450	45.6	—	5	Nq	N
5			SF		SFq	SF
6			FA		FAq	FA

*太平洋セメント株式会社

**東京大学国際・産学共同研究センター

ーストと無添加ペースト（以下これをベースペーストと称す）を区別したものである。

2.3 吹付けシステム

吹付けコンクリートの製造に使用した吹付けシステムを図1に示す。吹付け方式は湿式吹付け方式を採用し、空気搬送方式の吹付けシステムにより吹付けを行い供試体を作成した。

2.4 初期強度試験

材齢 5, 10, 15, 30 分の強度は ASTM C 403-70 に準拠し MEYCO 針貫入試験により求めた。材齢 3, 6, 24 時間の強度は JSCE-G 561 に準拠しプルアウト試験により求めた。両試験とも、供試体の養生は供試体採取した現場にて行った。

2.5 長期強度試験

吹付けコンクリートの強度試験については JIS A 1107 に準拠して行い、600 × 600 × 250 mm の箱型枠に採取した供試体から $\phi 75 \times 100$ mm の円柱供試体採取し圧縮強度を求めた。ベースコンクリートの強度試験については JIS A 1108 に準拠した。両試験とも、供試体の養生は標準水中養生を行った。

2.6 セメントペースト実験

ペースト試料の作成方法は以下の方法にしたがった。各配合から骨材を除いたペースト部分のみを所要量計量してホバートミキサで混練りしベースペーストを調製した。急結剤添加ペーストについては、磁性乳鉢に混練りしたベースペーストを採取し所定量の急結剤を添加・混合して調製した。調製した各ペーストは材齢 1 日まで気中養生 (20°C, RH 60%) を行い、それ以降は標準水中養生とし、所定材齢経過後アセトン中で湿式粉碎して水和を停止、50°C で乾燥して測定試料とした。

調製したペースト試料について、結合水量を 1000°C の強熱減量値から算出した。測定した材齢は、5, 10, 15, 30 分, 3, 6 時間までを急結剤添加ペーストについて行い、それ以降の 24 時間, 7, 28 日までについては急結剤添加ペーストおよびベースペーストの両方について行った。

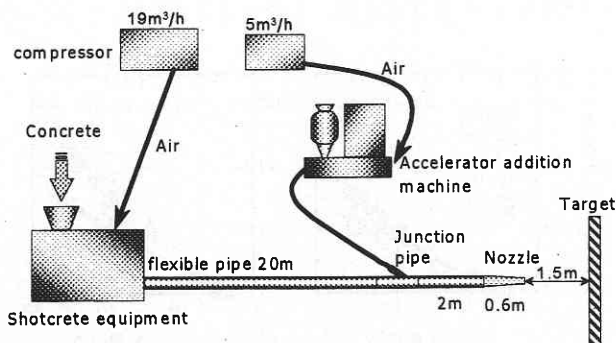


図1 吹付けシステム

3. 実験結果および考察

3.1 強度の経時変化

吹付けコンクリートおよびベースコンクリートの圧縮強度の経時変化を図2に示す。本研究では材齢の時期により供試体の形状や強度の試験方法が異なっているが、図に示されるように材齢の経過にともない強度が漸増していることから、本研究で行った試験方法は吹付けコンクリートにおける強度の評価方法として妥当なものと考えられた。

材齢 5 分から 6 時間の吹付けコンクリートの強度についてみると、水比 56.9, 45.6% とも混和材の影響は認められないが、材齢 24 時間以降については、混和材および水比の影響が認められた。水比 56.9% では、材齢 24 時間で FA を置換したものの強度が他より若干低く、材齢 28 日となると SF を置換したものが他より若干高くなった。この傾向は水比 45.6% でも同様であるが、強度の差は更に大きくなっており、特に材齢 28 日における SF 置換の強度は他のものの約 1.67 倍にも達した。

一方、ベースコンクリートの強度についてみると、水比 56.9% におけるベースコンクリートの強度については、無添加に比べ SF 置換の強度が大きく FA 置換の強度が小さく、その差は吹付けコンクリートにおける差とほぼ同程度かそれより若干大きい程度である。同様に水比 45.6% におけるベースコンクリートにおいても、SF が無添加より大きく FA が無添加より小さいという傾向がみられるが、SF を置換した吹付けコンクリートにみられたような強度の差はベースコンクリートには認められなかった。

なお、吹付けコンクリートの長期強度は同じ材齢におけるベースコンクリートの強度より常に低い。これは一般的な傾向であり、急結剤がセメントの水和におよぼす影響、およびコンクリートの吹付け時に導入される粗大な空隙等が吹付けコンクリートの長期強度の低下の原因とみられている。

3.2 結合水量の経時変化

急結剤添加ペーストおよびベースペーストの結合水量の経時変化を図3に示す。なおこの値は全粉体（急結剤添加ペ

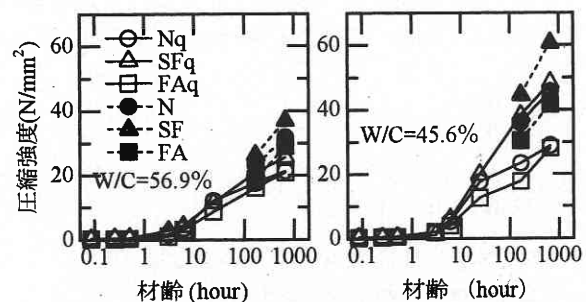


図2 圧縮強度の経時変化

研 究 速 報

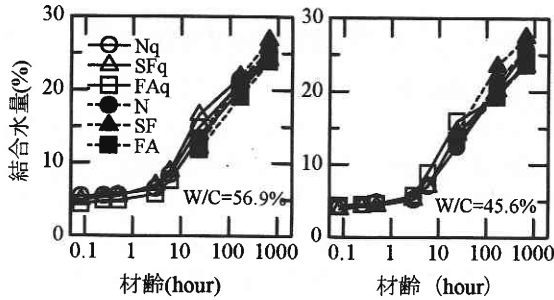


図3 結合水量の経時変化

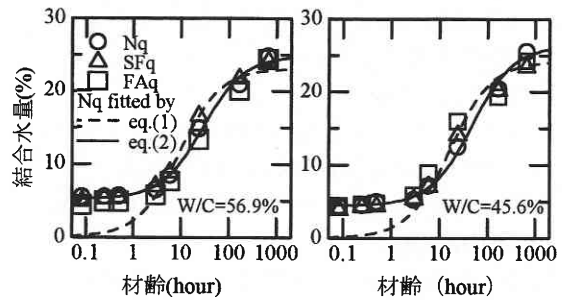


図4 急結剤添加ペーストの結合水量の経時変化

ーストではセメント+混和材+急結剤、ベースペーストではセメント+混和材) に対する結合水量であり、急結剤および各種混和材が予め有する水量を差し引いたものである。

図に示されるように、結合水量も強度の場合と同様に、材齢の経過に伴い漸増していることがわかる。混和材の影響についてみてみると、材齢5分から6時間まで混和材の影響が認められないのは、圧縮強度にみられた傾向と同様であるが、材齢24時間以降については、圧縮強度の場合と異なり混和材の影響はここでは認められず、特に、水比45.6%におけるSF置換が強度におよぼしたような顕著な影響は結合水量の場合にはほとんどみられなかった。

ベースペーストとの対比でみると、結合水量におよぼす混和材の影響については、ベースペーストの方が急結剤添加ペーストより若干大きいものと認められた。

また、急結剤添加ペーストとベースペーストの同材齢における結合水量の差については、圧縮強度では常に吹付けコンクリートがベースコンクリートより低くなる傾向であるのに対し、結合水量では急結剤添加ペーストとベースペーストの差はほとんど認められなかった。

3.3 結合水量の経時変化の定式化

佐伯らによると、セメントの結合水量の経時変化は式(1)により精度良く表現できることが報告されている¹⁾。ここでは式(1)が急結剤添加ペーストの結合水量の経時変化についても適用可能か検討した。図4の点線で示した曲線は、混和材無添加の急結剤添加ペーストの結合水量について、式(1)により最小2乗回帰した結果であるが、材齢6時間以降で比較的良好に回帰できているものの、材齢5分から3時

$$w = \frac{Wt}{(1/aW) + t} \dots\dots\dots (1)$$

$$w = \frac{W(t-t_0)}{(1/aW) + (t-t_0)} \dots\dots\dots (2)$$

w : 結合水量 (%), W : 終局結合水量 (%)

a : 水和の進行しやすさを表す係数

t : 材齢 (hour), t₀ : 定数

間までについては回帰できているとは言い難い。一方、tを線型変換した式(2)で回帰したところ、図4中実線で示した曲線のように材齢5分から材齢28日に至るまで回帰可能となった。材齢5分から3時間までの初期材齢における結合水量は、セメントと急結剤の相互作用の水和によるものであるから、急結剤を添加していないセメントの水和に基づく式(1)は本実験結果には適用困難と考えられ、式(2)が急結剤添加ペーストの結合水量の経時変化に有用である。

3.4 強度と結合水量の関係

圧縮強度と結合水量の間には直線的な関係が認められることが従来報告されている²⁾。そこで本研究においても、吹付けコンクリートの圧縮強度と急結剤添加ペーストの結合水量、およびベースコンクリートの圧縮強度とベースペーストの結合水量の関係をプロットした。図5にその結果を示す。まず水比56.9%についてみると、ベースコンクリート、吹付けコンクリートともに圧縮強度と結合水量が直線関係にあることが認められた。特に吹付けコンクリートにおいては、材齢5分から28日に至るまで両者が直線関係にあることから、圧縮強度と結合水量の直線関係が吹付けコンクリートにおいても極初期材齢から適用可能であることが今回の実験で明らかとなった。また、圧縮強度と結合水量の関係は、ベースコンクリート、吹付けコンクリートともに混和材の置換の有無あるいは混和材種類に関わらずそれぞれ同一直線上にあることから、両者の関係におよぼす混和材の影響は小さいものと考えられた。一方、水

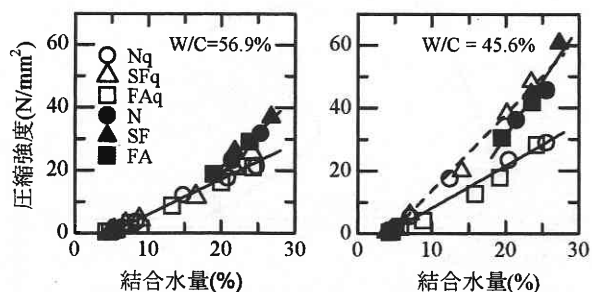


図5 結合水量と圧縮強度の関係

比 45.6% についてみると、ベースコンクリートでは水比 56.9% の場合と同様、圧縮強度と結合水量の関係が、混和材置換の有無あるいは混和材種類に関わらず同一直線上にあることが認められるが、吹付けコンクリートでは、SF を置換した吹付けコンクリートの直線（点線にて示す）が、無添加および FA によってなす直線と異なっており直線の傾きが大きくなった。以上から、圧縮強度と結合水量の直線関係におよぼす混和材の影響は、水比や混和材種類によって相違し、本実験結果においては、水比 45.6% における SF 置換の場合のみ混和材種類が影響することが明らかとなった。

図 6 に水和セメント水比と圧縮強度の関係を示す。ここで水和セメント水比（以降 CH/W ）とは、単位セメント量にセメントの水和率を乗じ単位水量で除したものである。ただし水和率の算出については、結合水量を、式(2)による回帰で求めた終局結合水量により除することで求めた。 CH/W と圧縮強度は、水比、材齢などにかかわらず良好な相関関係にあることが報告されている³⁾。本実験結果についても、ベース、吹付けコンクリートともに CH/W と圧縮強度とが W/C にかかわらず相関性を示したが、上記のとおり SF を置換した場合、 W/C によって結合水量と圧縮強度の関係が無添加あるいは FA の場合と異なるため、混和材よりも急結剤の影響が卓越する材齢 5 分から 3 時間までの初期材齢において、 CH/W と圧縮強度との相関性が特に良好となることが明らかとなった。

3.5 強度と結合水量の直線関係に関する考察

以上のような強度と結合水量の直線関係から、強度の増分は結合水量の増分に比例するという強度発現モデルを考える。ここでベースコンクリートについてみると、結合水量の単位増加量に対する強度の増分は、混和材の添加の有無や種類に関わらず、水比にのみ依存して変化した。水比は硬化後における硬化体の空隙量に大きく影響を及ぼし、水比が大きいと空隙量も増加する。したがって結合水量の単位増加量に対する強度の増分は、硬化体の空隙量に依存し、空隙量が大きくなると結合水量の単位増加量に対する

強度の増分が小さくなると考えてよい。吹付けコンクリートは前述したとおり、吹付け時に粗大な空隙をコンクリート内部に導入するため、硬化体の空隙量がベースコンクリートよりも増加する。したがって、結合水量の単位増加量に対する強度の増分は、ベースコンクリートよりも吹付けコンクリートの方が小さくなることになる。強度と結合水量の直線関係において、吹付けコンクリートの直線の傾きがベースコンクリートの傾きより小さいのは、以上のような考察によるものと考えられた。

しかしながら、水比 45.6% における SF を置換した吹付けコンクリートについては、SF が強度と結合水量の直線関係に影響をおよぼすため、上記の考察を完全に適用することができない。その原因究明については、硬化体を構成する水和生成物の相組成や、SF の物理的性状が強度におよぼす影響といった観点からの検討が必要と考えられ、今後の課題といえる。

4. ま と め

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 混和材を吹付けコンクリートに使用すると、ベースコンクリートの場合と同様に強度に影響を及ぼす。特に低水比における SF の影響はベースコンクリートよりも吹付けコンクリートにおいて顕著である。
- (2) 急結剤添加ペーストおよびベースペーストの結合水量におよぼす混和材の影響は小さい。
- (3) 吹付けコンクリートにおける強度と結合水量の関係はベースコンクリートと同様に直線性を示し、混和材の添加の有無や種類の影響を受けない。ただし SF を置換すると水比によっては影響を受ける。
- (4) 水和セメント水比と圧縮強度には、ベース、吹付けコンクリートそれぞれに相関性が認められた。特に、急結剤の影響が卓越する材齢 5 分から 30 分の初期材齢においてその相関性が顕著であった。

謝 辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける共同研究の一環として行われたものであり、共同研究各社、協力会社および関係各位のご協力に深く感謝いたします。

(2000年8月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐伯竜彦, 長瀧重義: セメント・コンクリート論文集, No. 52, pp. 326-333 (1998).
- 2) 例えば, 山崎寛司, 土木学会論文集, No. 85, pp. 15-44 (1962).
- 3) 関根吾ほか, 土木学会論文集, No. 146, pp. 38 ~ 46 (1967).

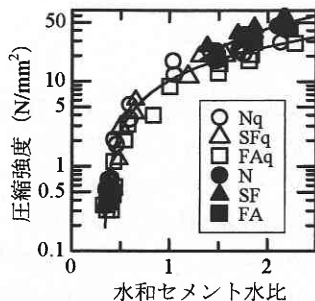


図6 水和セメント水比と圧縮強度の関係