

論文

[1036] 高流動・高強度コンクリートの実構造物への適用に関する実験

依田和久*1・桜本文敏*2・閑田徹志*1・名和豊春*3

1. はじめに

近年、構造物の高層化・長大化が進む中で、コンクリートの高強度化が望まれている。

一方、施工性改善の観点から、締め固め不要でかつ充填しやすい高流動性を有する種々のコンクリートが実用化されてきている。しかし、この種のコンクリートは、高炉スラグなどの微粉末や増粘剤を用いるため使用材料の種類が増え、製造時に計量や品質管理などが煩雑になりやすい。

以上のことから、使用材料を増やすことなく、製造の容易な「高流動・高強度コンクリート」用セメントが開発された[1]。本セメントは、普通セメントに比べ比表面積が大きく、化合物中のピーライト(C₂S)を多く含むものである。ここで報告する「高流動・高強度コンクリート」は、本セメントを用いるだけで製造が可能である。なお、セメントおよびコンクリートの基礎物性については名和らが別途報告している[2]。

本報告は、この高流動・高強度コンクリートに関し、実大規模の施工における流動性・充填性・強度性状の評価を目的として実施した模擬施工実験ならびに実建屋への適用実験の結果を述べるものである。

2. 実験計画

2.1 実験概要

〔実験Ⅰ〕側壁模擬試験体

図-1に側壁模擬試験体概要を示す。本試験体は、実験Ⅱで施工する実構造物建屋の最も薄い壁を模擬したものであり、延べ長さ4m・高さ3m・壁厚300mmのL型である。なおD16の鉄筋を縦・横150mmピッチでダブルに配筋してある。

コンクリートの打設はポンプ筒先を型枠の上端一箇所に固定して行い、振動締め固めは一切行わなかった。

コンクリートの流動性・充填性の評価は、型枠の一面を透明アクリル板にして目視観察により行った。また、試験体に熱電対を埋め込んで硬化過程の温度履歴を調べた。さらに材令28日および91日に試験体の12箇所からコアを抜き取り、材料分離抵抗性を評価する一手法としてコア側面における粗骨材面積を調べ、その後、圧

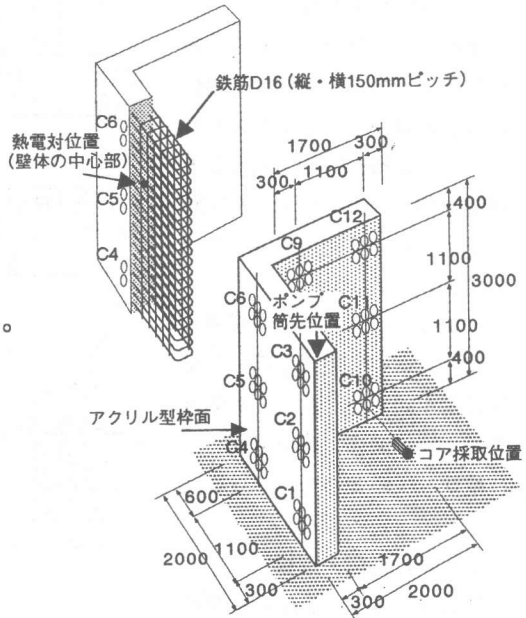


図-1 側壁模擬試験体概要

*1 鹿島技術研究所 第四研究部 研究員、工修(正会員)
 *2 鹿島技術研究所 第四研究部 主任研究員、工修(正会員)
 *3 秩父セメント(株)中央研究所 研究部 副主任研究員、工博(正会員)

縮強度試験を行った。

〔実験Ⅱ〕実構造物建屋

図-2に施工の対象とした実構造物建屋を示す。同建屋は、C社の2万トンセメントサイロ付属のエレベータ棟の地下ピット部分（コンクリート打設量125m³）であり、大きさ6.15×8.55m・高さ3.60m・最小壁厚300mmである。

コンクリートの打設は、18m³までポンプ筒先を一箇所に固定して行い、その後適宜移動して行った。振動締め固めは一切行わなかった。

施工時に回転翼型粘度計[3]でコンクリートの流動特性を調べた。また、構造物中の2箇所に熱電対を埋め込んで硬化過程の温度履歴を測定し、材令91日でコアの圧縮強度試験を行った。

以上のほか実験Ⅰ・Ⅱとも、スランプ・スランプフロー・空気量・コンクリート温度を測定し、標準養生・現場養生等による圧縮強度試験を行った。

また、予め実施した室内実験の結果、良好な流動性・充填性を示す本コンクリートのスランプフローは60~70cmであろうと判断された。そのため、両実験でのスランプフローによる管理目標値を65±5cmとした。

2.2 使用材料および調合

表-1に両実験で使用した材料を示す。また、表-2に調合を示す。本調合は室内実験および生コン工場での製造実験の結果に基づき定めた[2]。

2.3 製造・運搬

製造は、生コン工場の強制練りミキサ（容量2.5m³、練り混ぜ量1.5m³）にてモルタルを15秒先練りし、その後粗骨材を投入して75秒（合計90秒）練り混ぜて行った。

運搬時間は約15分であった。

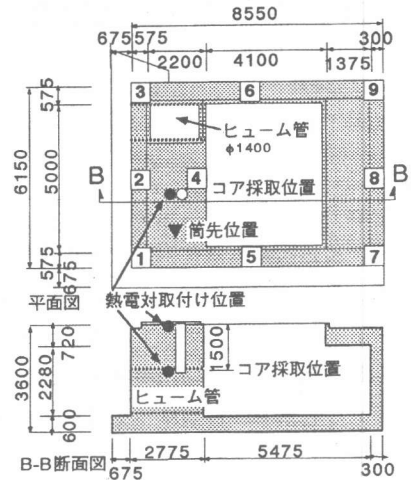


図-2 実構造物概要

表-1 使用材料

使用材料	種類および品質
セメント	高ビーライト系セメント、比重3.20、比表面積4080cm ² /g 化合物の構成比(%) C ₃ S:C ₂ S:C ₃ A:C ₄ AF=35:46:3:9
細骨材	①上里産陸砂、表乾比重2.61、吸水率1.68%、FM 3.05 ②有恒産砕砂、表乾比重2.61、吸水率1.78%、FM 3.07 ①、②を重量比7:3で混合
粗骨材	両神産砕石、表乾比重2.66、吸水率0.86%、FM 6.61、実績率60.1%
混和剤	高性能AE減水剤（ $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ）酸基含有多元 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ 、比重1.05

表-2 調合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	目標 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能 AE減水剤 (C×wt%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
3.0	5.0	2.0	170	567	826	842	1.25

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果（実験Ⅰ）

コンクリート 採取時期	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
出荷時	28.0	65.0	1.3	23.0
荷卸時	28.0	71.0	1.8	22.5
60分後	28.0	67.0	1.7	23.0
90分後	28.0	67.5	1.8	22.0

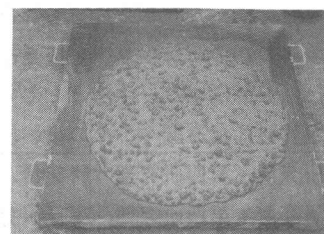


写真-1 練り上がり状況

3. 実験 I の結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

表-3 に試験結果を示す。スランプフロー値は、出荷時で65.0cmと目標値を満たし、荷卸時で71.0cmとやや大きくなったものの、60分および90分経過後ではほぼ目標値が得られている。空気量および温度は、出荷時から90分経過のものまでそれぞれ1.3~1.8%および22.0~23.0°Cの範囲にあり安定している。

また、写真-1 にコンクリートの練り上がり状況を示す。フロー先端部まで粗骨材がみられ、分離のない良好な状態であった。

3.2 流動性・充填性

図-3 に側壁模擬試験体の、打設開始から終了まで（所要12分25秒）のコンクリートの流動勾配を示す。このときの流動勾配は5/100~12/100であった。また目視により、コンクリートは、内部の鉄筋の影響を受けることなく型枠の隅々まで充填し、脱型後、ジャンカ・豆板等は見られなかった。これより、本コンクリートは、優れた流動性および振動締め固めを必要としない充填性を有していることが確認された。

3.3 材料分離抵抗性

図-4 に側壁模擬試験体におけるコア供試体採取高さ1500mmでのコンクリート側面の粗骨材分布状況を示す。流動距離に関わらず、粗骨材の分布はほぼ均一である。図-5 に流動距離および高さ別の粗骨材面積率を示す。粗骨材面積率はコア採取高さが低い位置で小さいのがみられるものの、全体的にみるとその変動は小さい。これらにより、コンクリートからの粗骨材の分離はほとんどないと考えられる。

また、図-6 に流動距離がコア強度に及ぼす

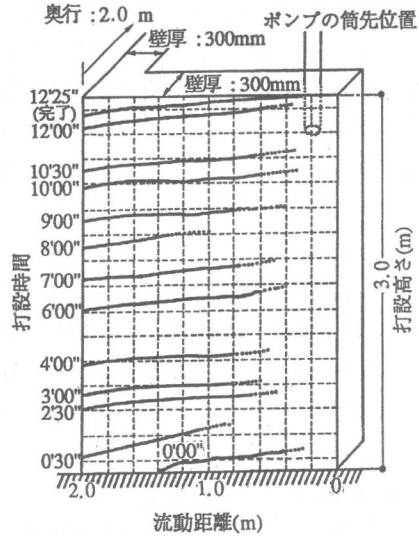


図-3 側壁模擬試験体の充填状況

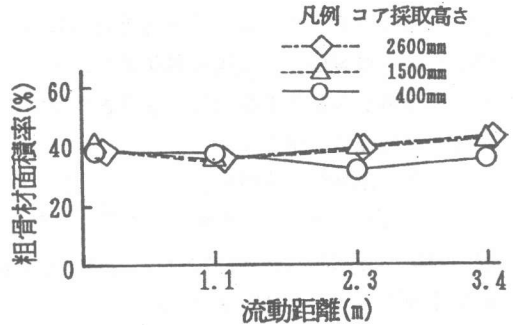


図-5 流動距離が粗骨材の分布に及ぼす影響

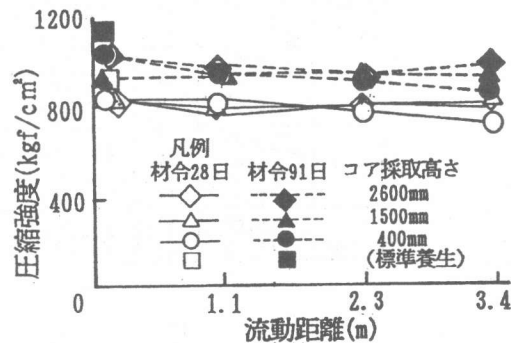


図-6 流動距離がコア強度に及ぼす影響

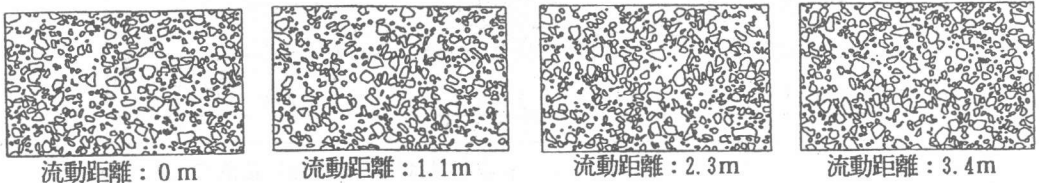


図-4 コア側面部の粗骨材の分布状況（採取高さ1500mm）

影響を示す。コア採取位置に関わらず強度の変動はほとんど見られない。これは水セメント比 (W/C) に変化がなく、ペーストからの水の分離がほとんどないことを表していると考えられる。

以上の2点より本コンクリートは材料分離抵抗性に優れていると考えられる。

3. 4 硬化コンクリートの性状

表-4 に圧縮強度試験結果を示す。コア強度は、標準水中養生強度に比べて若干低く、材令28日で88% (838/952)、材令91日で85% (977/1149) であった。コアの静弾性係数も標準水中養生のものに比べ若干低く、標準養生に対して材令28日で93% (3.50/3.77)、材令91日で88% (3.68/4.20) であり、圧縮強度とはほぼ同じ傾向にあることがわかる。

表-4 圧縮強度試験結果 (実験 I)

	圧縮強度			静弾性係数*1	
	7日	28日	91日	28日	91日
養生等					
標準水中	639	952	1149	3.77	4.20
現場水中	643	911	1097	3.66	3.86
現場封緘	609	869	964	3.51	3.72
コア*2	-	838	977	3.50	(3.68)

*1 ($\times 10^5$)

(単位: kgf/cm²)

*2 全12箇所平均、()内のみ2箇所平均

4. 実験 II の結果および考察

4. 1 フレッシュコンクリートの性状

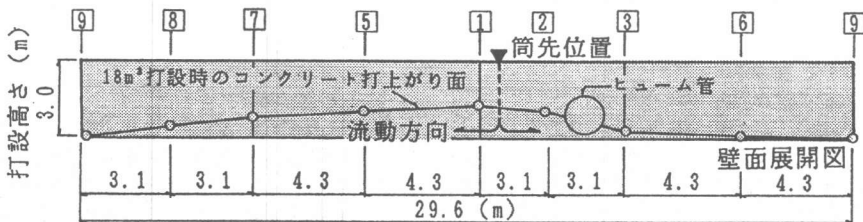
本実験は延べ13台のアジテータ車を使用した。表-5 に代表的なコンクリートの試験結果を示す。スランブフローは、出荷時で61~65cm、荷卸時で59~62cm、筒先で55~58cmであった。荷卸時の結果は実験 I の傾向と異なるが、これはバラツキの範囲と考えられる。空気量および温度は、出荷時から筒先で採取したものまでそれぞれ1.8~2.5%および20.5~23.0℃の範囲にあり、実験 I と同様に安定していた。

4. 2 流動性・充填性

図-7 にコンクリートを約18m³打設した時のコンクリート打上り面の高さを示す。この時の流動勾配は8/100~16/100であり、実験 I とほぼ同等である。これより、流動性・充填性の点で問題なく施工できたと判断される。

表-5 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果 (実験 II)

アジテータ車No.	コンクリート採取時期	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
						7日	28日	91日
第4車	出荷時	27.0	61.0	2.8	20.5	596	891	1068
	荷卸時	27.5	59.0	2.5	23.0	615	923	1113
	筒先	27.5	54.5	2.5	23.0	630	932	1091
第7車	出荷時	27.0	65.0	2.4	22.5	671	977	1148
	荷卸時	27.5	63.0	1.8	23.0	676	976	1148
	筒先	27.5	58.0	1.8	23.0	673	988	1108
第10車	出荷時	27.0	61.0	2.5	21.0	-	-	-
	荷卸時	28.0	62.0	1.9	22.5	674	1014	1197
荷卸時の平均						655	971	1153



(注) 1~9の記号は図-2の測定位置に対応する。

図-7 コンクリート打上り面高さの分布

4.3 コンクリートの流動特性

施工時に回転翼型粘度計(回転数:10~50r.p.m.)を用い、回転数とトルクを測定した。図-8に回転数とトルクの関係を示す。さらに見かけの塑性粘度は、最小二乗法によって直線回帰したときの回転数に対するトルクの比で表すものとし、計算結果を併せて示す。

見かけの塑性粘度は、同一装置による和美らの実験結果[3]と比較するとスランプ18cmのAEコンクリートより若干高く、普通セメントを用いた水セメント比30%の高強度コンクリートより低い。また、本コンクリートの見かけの降伏値はほぼ0に近い値と推測される。

本コンクリートの見かけの降伏値が小さいのは、名和らの報告[2]のとおりペーストの降伏値が低いためと考えられ、塑性粘度が上記の範囲にあったのは、調合上モルタル量が多く粗骨材同士の接触が起こりにくいことおよびペーストの粘度が低いことが原因と考えられる。また、名和らの報告[4]によると、セメント中のC₃AやC₄AFの割合を小さくするとこれらの化合物へ吸着される混和剤の絶対量が少なくなり混和剤によるセメント粒子への分散作用が効果的に発揮されるとしており、これがペーストの降伏値を低くしている一因と考えられる。

降伏値が0に近いことは振動締め固めをせずに自重だけで建物各部までコンクリートが行きわたるという特性に寄与していると考えられる。また、材料分離を生じない範囲で塑性粘度を低く抑えることは、ポンプ圧送性および充填性の点で有利になると考えられる。

4.4 強度性状

荷卸時の標準水中養生強度は材令7日で655kgf/cm²、材令28日で971kgf/cm²、材令91日で1153kgf/cm²であった。これらの結果は実験Iの標準養生強度とほぼ同等であった。

図-9に実構造物の表面部(打上がり面からの深さ300mm)および中心部(打上がり面からの深さ1500mm)における温度履歴を示す。表面部は打設後約24時間で最高温度が60.0℃に達し、

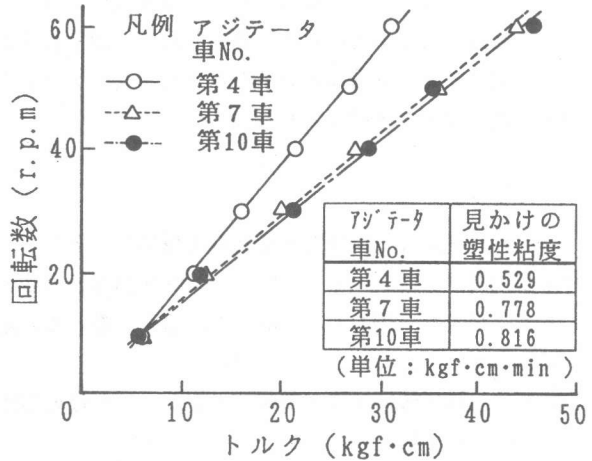


図-8 ツーポイント試験結果

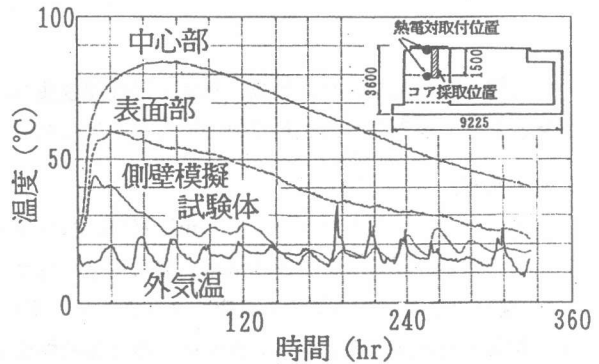


図-9 実構造物の温度履歴

表-6 実構造物のコア強度(実験II)

養生条件	最高温度(°C)	圧縮強度(kgf/cm ²)	
		材令28日	材令91日
コア	中心部	—	1028
	表面部	—	986
標準水中	20.0	971	1153

(注) 各部のコアは2本の平均

中心部は約62時間で最高温度が84.6℃となった。なお、側壁模擬試験体は打設後約12時間で最高温度が44.3℃であった。表-6に材令91日における実構造物のコア強度を示す。構造物中心部の材令91日コア強度は1028kgf/cm²であり、材令28日の標準養生強度に対して106% (1028/971)、材令91日の標準養生強度に対して89% (1028/1153) の大きさである。

梶田らの研究[5]によると、普通セメントを用いた高強度コンクリートの場合、水和時の最高温度が60℃を越えると材令91日のコア強度は材令28日の標準養生強度を下回る傾向のあることが指摘されている。今回の結果は、温度履歴の最高値が84.6℃と60℃を大きく上回ったにも関わらず、強度の低下は見られなかった。浅賀らの研究[6]によれば、セメント中のピーライトの初期の水和率は、高温(最高温度80℃)で養生した方が20℃養生の場合よりも大きくなることが報告されている。高ピーライト系セメントを用いた本コンクリートは、高温環境下で水和が進行したため水和率が高くなったと推測される。

5. まとめ

高炉スラグなどの微粉末や増粘剤を用いることなく、高ピーライト系セメントを用いた「高流動・高強度コンクリート」(水セメント比30%)について実施工実験を行い、以下の結果を得た。

- ①スランプフロー値を60~70cmとした場合、優れた流動性および振動締め固めを必要としない充填性を有する。
- ②見かけの降伏値はほぼ0であり、また、見かけの塑性粘度は同一の水セメント比の高強度コンクリートより低い。
- ③最高温度85℃の温度履歴を受けた実構造物のコア強度は材令91日で1028kgf/cm²を示し、材令28日の標準養生供試体の強度と比べ6%ほど高く、硬化初期に高温を受けても強度低下はほとんど見られなかった。

謝辞

本実験を行うにあたり、鹿島・飛鳥・間共同企業体、竹本油脂(株)、埼玉秩父コンクリート(株)をはじめ多くの方々にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 「チチブハイフローセメント」技術資料、秩父セメント(株)、1992.9
- 2) 名和豊春、深谷泰文、鈴木清孝、柳田克巳：高ピーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、1993.6
- 3) 和美広喜ほか：高強度コンクリートの流動特性値に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.927-928、1991.9
- 4) 名和豊春ほか：高性能減水剤の吸着挙動に及ぼす硫酸塩の影響、セメントコンクリート論文集、No.43、pp.138-143、1989
- 5) 梶田佳寛ほか：高強度コンクリートを用いた構造物コンクリートの強度管理方法に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.837-838、1991.9
- 6) 浅賀喜与志ほか：低熱セメントの各構成鉱物の水和反応に及ぼす養生温度の影響、セメント・コンクリート論文集、No.45、pp.60-65、1991