低熱ポルトランドセメントを用いた高強度高流動コンクリートの構造体品質の均一性に関する調査

DIAGNOSIS OF THE QUALITY OF STRUCTURE MADE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE WITH LOW-HEAT PORTLAND CEMENT

藤井和俊 — * 1 鳴瀬浩康 — * 2
 渡邊一弘 — * 3 中瀬博一 — * 4
 毛見虎雄 — * 5

Kazutoshi FUJII — * 1 Hiroyasu NARUSE — * 2
 Kazuhiro WATANABE — * 3 Hirokazu NAKASE — * 4
 Torao KEMI — * 5

キーワード:

低熱ポルトランドセメント, 高強度高流動コンクリート, 構造体品質, 圧縮強度, 粗骨材面積率, 中性化深さ

Keywords:

Low-heat portland cement, High-strength and high-fluidity concrete, Quality in structures, Compressive strength, Rate of coarse aggregate area, Carbonation depth

On the demolition of an existing structure made of high-strength and high-fluidity concrete, we determined various quality parameters and their variations by place. Parameters included compressive strength, Young's modulus of elasticity and coarse aggregate distribution by the sampled core, and concrete fill capability and carbonation depth of surfaces cut by wire-sawing. Uniformity of the quality of the structure was evaluated by the variance analysis of the data. It was found that the quality of the high performance concrete was acceptable though the slight variation in a structure was observed.

1. はじめに

高強度高流動コンクリートは、その特性から一般の建築物のみならず鉄筋コンクリート造建築物の高層化・大型化の傾向に伴って、建築分野でも高強度のマスコンクリート部材へ次第に利用されつつある。

高強度コンクリートでは、粉体量が多く、水和発熱が多くなり、水和発熱に起因するひびわれが生じるため、マスコンクリート部材に適用するためには水和発熱の少ない低熱ポルトランドセメントなどが多く用いられている。また、低熱ポルトランドセメントは、低温での初期強度発現がやや小さいほかは、良好な硬化コンクリートの性質を示すことや流動性がよいことなどからもその使用は増大するものと考えられる。しかしながら低熱ポルトランドセメントは、1997年にJIS化されたばかりで、構造用としての歴史が浅い。このため、高強度コンクリートにおいては、初期材齢に高温履歴を受けた場合、長期にわたる強度発現にどのような影響があらわれるかについては、まだ十分には明らかにされていない¹⁾。

一方、高流動コンクリートは、自由流動距離が長いと鉄筋間を通過する際、粗骨材とモルタルが分離し、流れの先端部では粗骨材量の少ないコンクリートとなる恐れがある。これらについても、実大施工実験の報告^{2)~8)}はあるものの、実際の構造物の構造体品質の均一性についての調査は、計画的にコアを採取することが困難なことから、その報告は少ないと考えられる。

今回対象となる建物が再開発地域にあることから、約5年半経過した低熱ポルトランドセメントを用いた高強度高流動コンクリート構造物をワイヤーソーイングで解体する機会を得た。

本報告は、高強度高流動コンクリートを使用した高密度配筋のマスコンクリート部材となる実際の構造物(反力壁)から採取したコアの圧縮強度、ヤング係数、粗骨材面積率およびワイヤーソーイングで切り出した切断面のコンクリートの充填性や中性化深さを調査するとともに、さらに圧縮強度と粗骨材面積率の各特性値に及ぼす反力壁の横、幅および高さ方向の影響について分散分析を行い、構造体品質の均一性について検討したものである。なお、本構造物の建設時の品質は、既に技術報告集第5号⁹⁾に報告したものである。

2. 解体した構造物の概要⁹⁾

2.1 構造物の概要

解体した構造物は、横 8m×高さ 8m×幅 2mの反力壁である。反力壁の配筋は、D32~25@125~250mm ダブル である。また、幅方向に実験治具定着孔用スリーブが500mm ピッチで設けられている。コンクリートの打設は、1995年9月14日~10月9日にわたり6層に分けて行った。今回の調査対象範囲は、リフト高さが同一の第2~第5リフトとした。

2.2 構造物の形状ならびに切断位置とコア採取位置

構造物の形状、ワイヤーソーイングによる切断位置およびコア採

*1 三菱建設技術研究所 室長・博士(工学)
 (〒349-0224 埼玉県白岡町彦兵衛54)

*2 協宇部三菱セメント研究所 主席研究員

*3 三菱建設技術研究所 主任研究員・工修

*4 三菱建設(株)東京建築支店 主任

*5 ものつくり大学 非常勤講師・工博

*1 General Manager, Technical Research Institute, Mitsubishi Construction, Dr. Eng.

*2 Chief Research Engineer, Ube-Mitsubishi Cement Research Institute, Corporation

*3 Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Mitsubishi Construction, M. Eng.

*4 Engineer, Construction Group, Tokyo Branch, Mitsubishi Construction

*5 Lecturer, Monotsukuri Institute of Technology, Dr. Eng.

写真-1 構造物の解体状況

写真-2 構造物の搬出状況

取位置を図-1、コア供試体のカット位置を図-2、構造物の解体状況を写真-1、搬出状況を写真-2に示す。

2.3 使用材料および調合

使用材料を表-1、計画調合を表-2に示す。目標とするスランプフローは $650 \pm 50 \text{ mm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5 \%$ とした。

表-1 使用材料

使用材料	種類及び物性
セメント	低熱ポルトランドセメント (L) CS ₂ 量60%密度: 3.24 g/cm^3 , 比表面積: $3040 \text{ cm}^2/\text{g}$
粗骨材	鍋山産石灰岩碎石 表乾密度: 2.71 g/cm^3 , 吸水率: 0.74%
細骨材	鍋山産石灰岩砕砂 表乾密度: 2.68 g/cm^3 , 吸水率: 1.46%, 粗粒率: 3.3 香取郡産山砂 表乾密度: 2.58 g/cm^3 , 吸水率: 2.01%, 粗粒率: 1.8
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)
分離低減剤	水溶性セルロースエーテル系

表-2 コンクリートの計画調合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
	セメント	水	細骨材		粗骨材	混和剤 (C×%)	分離低減剤 (g/m ³)
			(砕砂)	(山砂)			
45.0	367	165	460	438	929	2.2	300

2.4 構造物建設時の測定結果

1) コンクリートの測定結果

建設時のポンプ圧送後のフレッシュコンクリートの試験結果を表-3、硬化コンクリートの試験結果を表-4に示す。

促進中性化試験は、日本建築学会の「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」に準拠して行った。

2) 温度履歴

各リフトの中心部に熱電対を設置した。温度履歴の実測結果を図-1に示す。各層の温度履歴は、同様な傾向で事前に行った解析値と概ね一致していた。

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

試験項目	各リフトの試験結果			
	2	3	4	5
スランプフロー (mm)	560×555	580×595	665×650	590×565
フロー50cm時間 (秒)	5.1	5.3	3.1	6.2
空気量 (%)	3.6	5.1	5.8	5.7
コンクリート温度(℃)	22.1	25.2	25.4	21.8
外気温 (℃)	22.9	21.3	25.5	18.1

表-4 硬化コンクリートの試験結果

試験項目	試験材齢	各リフトの試験結果			
		2	3	4	5
標準養生の 圧縮強度 (N/mm ²)	3日	-	13.6	-	-
	7日	-	19.6	-	-
	28日	38.0	33.7	31.0	36.7
	56日	-	41.6	-	-
	91日	-	48.1	-	-
ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	3日	-	1.99	-	-
	7日	-	2.21	-	-
	28日	3.13	2.77	2.67	2.91
	56日	-	3.02	-	-
	91日	-	3.20	-	-
促進中性化深さ(mm)	26週	-	15.2	-	-

図-3 温度履歴

3. 試験項目と試験方法

3.1 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度の測定は、材齢5年5ヶ月で採取したコア供試体について JIS A 1107 に準じて行い、ヤング係数は圧縮強度の1/3で計算した。コアは圧縮強度試験実施4～5日前より採取を開始し、2日前に成形を完了して、強度試験まで標準養生を行った。

3.2 粗骨材面積率

粗骨材面積率の測定は、採取したコアの側面にフィルムを張り付け、骨材断面を楕円近似し、長軸長さが5mm以上の骨材を写し取って行った。

3.3 中性化深さ

ワイヤーソーイングによる切断面に1%フェノールフタレイン溶液を塗布し、中性化深さを測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 コアの圧縮強度

(1) 第4リフトのコアの圧縮強度

第4リフト切断面①、④、⑦の圧縮強度試験結果を図-4に、第4リフト切断面①、④、⑦の圧縮強度の横、幅および高さ方向位置の三元分散分析結果を表-5に示す。

表-5より第4リフト切断面①、④、⑦の圧縮強度は、横方向については5%有意となったが、幅方向および高さ方向については、有意差は認められない。流動距離と考えられる横方向については図-4に示すようにその差は小さく、既往の実験結果⁴⁾と同様な結果で、問題となる差異ではないと考えられる。

(2) 各リフトのコアの圧縮強度

各リフト切断位置④、⑦の中段の圧縮強度を図-5に、各リフト切断位置④、⑦の中段の圧縮強度の横、幅方向および各リフトの位置の三元分散分析結果を表-6に示す。

表-6より各リフト切断位置④、⑦の中段の圧縮強度は、各要因とも有意差がなかった。

(3) 全コアの圧縮強度

全コアの圧縮強度の平均値は60N/mm²と、標準養生28日の圧縮強度の約1.7倍であった。また、全コアの標準偏差は、4.4N/mm²、変動係数7.4%と既往の実験結果⁴⁾と同様な結果で、構造体コンクリートの均一性は確保されているとみなせる。

図-4 第4リフトのコアの圧縮強度

図-5 各リフトのコアの圧縮強度

表-5 第4リフトコアの圧縮強度の横(切断位置)、幅および高さ方向の三元分散分析結果

**:1%有意 *:5%有意						
要因	偏差平方和	自由度	平均平方	F 値	P 値	判定
A:横方向	108.11	2	54.05	7.6924	0.0137	*
B:幅方向	1.52	2	0.76	0.1079	0.8990	
C:高さ方向	58.09	2	29.05	4.1336	0.0585	
A×B	27.35	4	6.84	0.9729	0.4730	
A×C	85.88	4	21.47	3.0552	0.0837	
B×C	19.22	4	4.81	0.6839	0.6226	
誤差	56.22	8	7.03			
全体	356.38	26				

表-6 各リフトコアの圧縮強度の横(切断位置)、幅方向および各リフトの三元分散分析結果

**:1%有意 *:5%有意						
要因	偏差平方和	自由度	平均平方	F 値	P 値	判定
A:横方向	7.65	1	7.65	0.251	0.6342	
B:幅方向	3.91	2	1.96	0.0642	0.9385	
C:各リフト	39.53	3	13.18	0.4323	0.7377	
A×B	101.74	2	50.87	1.669	0.2653	
A×C	64.70	3	21.57	0.7075	0.5817	
B×C	36.06	6	6.01	0.1972	0.9656	
誤差	182.88	6	30.48			
全体	436.46	23				

4.2 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-6に示す。

採取したコアのヤング係数は、圧縮強度が高くなると大きくなる傾向があるが、バラツキが大きい。RC 規準¹⁰⁾では、ヤング係数は NewRC 式の係数 $k_1=k_2=1.0$ として示されており、 k_1 、 k_2 は使用骨材、混和剤により適切な値を用いてもよいとされている。本研究

図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

の供試体では、石灰岩碎石であるので $k_1=1.2$ とし、 γ は RC 規準より 23.5 として計算した結果を図-6中に破線で示した。計算結果は、本研究で採取したコアのヤング係数のほぼ平均的な値となった。

4.3 粗骨材面積率

(1) 第4リフトのコアの粗骨材面積率

第4リフト切断面①、④、⑦の粗骨材面積率を図-7に、第4リフトの粗骨材面積率の横、幅および高さ方向位置の三元分散分析結果を表-7に示す。

第4リフトの粗骨材面積率は、表-7より各要因とも有意差なしとなり、一様なものとみなせる。また、粗骨材面積率の平均値は 34.2%であり、これは調合上の粗骨材容積率である 34.3%に近い値であった。

(2) 各リフトのコアの粗骨材面積率

各リフト切断位置④、⑦の中段の粗骨材面積率を図-8、各リフト切断位置④、⑦の中段の粗骨材面積率の横、幅方向および各リフトの位置の三元分散分析結果を表-8に示す。

各リフトの粗骨材面積率の平均値も 34.2%で、これも調合上の粗骨材容積率に近い値であった。また、表-8より各リフト切断位置④、⑦の中段の粗骨材面積率は、各要因とも有意差なしとなり、各リフトの粗骨材面積率もほぼ一様なものとみなせる。

(3) かぶり部の粗骨材面積率

かぶり部分と中央部の粗骨材面積率の関係を図-9に示す。

かぶり部分の粗骨材面積率は、既往の実験結果¹¹⁾とほぼ同様な結果で中央部の 70~80%となり、中央部の粗骨材面積率に比べて全てのリフトで小さくなった。このことは、過密配筋の影響が大きいと考えられるが、特に 50cm フロー時間が 3.1 秒と小さく、スランプフローが 665×650mm と大きい第4リフトのかぶり部分の粗骨材面積率が、小さくなった。

図-7 第4リフトのコアの粗骨材面積率

図-8 各リフトのコアの粗骨材面積率

表-7 第4リフトコアの粗骨材面積率の横(切断位置)、幅および高さ方向の三元分散分析結果

要 因	偏差平方	自 由 度	平均平方	F 値	P 値	判定
A:横方向	66.21	2	33.11	3.5436	0.0791	
B:幅方向	35.66	2	17.83	1.9088	0.2100	
C:高さ方向	8.89	2	4.45	0.4760	0.6378	
A×B	82.10	4	20.53	2.1971	0.1595	
A×C	28.73	4	7.18	0.7689	0.5746	
B×C	22.79	4	5.70	0.6100	0.6671	
誤差	74.74	8	9.34			
全体	319.13	26				

表-8 各リフトコアの粗骨材面積率の横(切断位置)、幅方向および各リフトの三元分散分析結果

要 因	偏差平方	自 由 度	平均平方	F 値	P 値	判定
A:横方向	4.38	1	4.38	0.5171	0.4991	
B:幅方向	31.08	2	15.54	1.8353	0.2388	
C:各リフト	76.77	3	25.59	3.0225	0.1155	
A×B	54.90	2	27.45	3.2422	0.1110	
A×C	9.92	3	3.31	0.3907	0.7643	
B×C	91.21	6	15.20	1.7955	0.2473	
誤差	50.80	6	8.47			
全体	319.04	23

図-9 かぶり部分と中央部の粗骨材面積率の関係

4.4 粗骨材面積率と圧縮強度およびヤング係数

粗骨材面積率と圧縮強度の関係を図-10に、粗骨材面積率とヤング係数との関係を図-11に示す。

粗骨材面積率と圧縮強度との関係は認められないが、粗骨材面積率が小さくなるとヤング係数も小さくなる傾向が見られた。

図-10 粗骨材面積率と圧縮強度の関係

図-11 粗骨材面積率とヤング係数の関係

4.5 中性化深さ

(1) 各リフトの中性化深さ

各リフトの中性化深さを図-12に示す。各リフトの中性化深さは、コア抜きを行っていない切断位置①の第2・3リフトを除くと約8.7mmであった。ちなみに次式¹²⁾をもちいて

$$C = A\sqrt{CO_2/5} \cdot \sqrt{t}$$

(C: 中性化深さ(mm), CO_2 : 炭酸ガス濃度(%), A: 中性化速度係数(mm・週^{0.5}), t: 材齢(週))

表-4に示す材齢26週の促進中性化試験(CO_2 濃度5%)の結果15.2mmから中性化速度係数を求めると3.0となり、この値と今回測定した中性化深さ8.7mmおよび中性化試験までの材齢280週から CO_2 濃度を試算すると0.14%となり一般の屋内濃度の1.4倍となる。このことは、反力壁は屋内にあり、冬期実験中に採暖のためにジェットヒーターを用いたことによる乾燥や屋内の炭酸ガス濃度が高くなったことも原因と考えられる。

(2) 打継ぎ部の中性化深さ

打継ぎ部の中性化深さを図-13に示す。打継ぎ部の中性化深さは、一般部に比べて大きい。特に下リフト打継ぎ部は一般部の約4倍、上リフト打継ぎ部の約2倍と中性化深さが大きい。これらを模式的に示すと図-14となる。この原因については更に検討が必要と考えられるが、文献¹³⁾によると高強度高流動コンクリートの場合、ブリーディングが少なく、表面の乾燥が早まることが多く、表層部がポーラスになって耐久性が低下する危険性が助長されることが指摘されている。この対策としては、コンクリートの上面の十分な湿潤養生が重要となる。また、打放し構造物での一体打込み、もしくは打継ぎ部の炭酸ガスの進入防止のための処理が必要であると考えられる。

図-12 各リフトの中性化深さ

図-13 打継ぎ部の中性化深さ

図-14 打継ぎ部の中性化深さの模式図

4.6 鉄筋周りなどのコンクリートの充填性

鉄筋周りの充填状況の一例を写真-2に、定着孔受けアングル周りの充填状況の一例を写真-3に示す。

全ての切断面において目視観察できた鉄筋周りおよび定着孔受けアングル周りのコンクリートの充填性は、良好であった。

写真-2 鉄筋周りの充填状況

写真-3 定着孔受けアングル周りの充填状況

5. まとめ

本研究の結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) コアの圧縮強度は、第4リフトの横方向については5%有意となったが、それ以外は横、幅および高さ方向と各リフトの各要因とも有意差がなかった。
- (2) 全コアの圧縮強度の平均値は 60N/mm^2 と、標準養生28日の圧縮強度の約1.7倍であった。また、全コアの標準偏差は、 4.4N/mm^2 、変動係数7.4%で、構造体コンクリートの均一性は確保されているとみなせる。
- (3) 採取したコアのヤング係数は、圧縮強度が高くなると大きくなる傾向があるが、バラツキが大きい。
- (4) 粗骨材面積率は、調合上の粗骨材容積率である34.3%に近い値であり、各要因とも有意差なしとなり、粗骨材面積率はほぼ一様なものとみなせる。
- (5) かぶり部分の粗骨材面積率は、中央部の70~80%となり、中央部の粗骨材面積率に比べて全てのリフトで小さくなった。
- (6) 各リフトの中性化深さの平均値は、約8.7mmであった。打継ぎ部

の中性化深さは、一般部に比べて大きく、特に下リフト打継ぎ部の中性化深さは、一般部の約4倍、上リフト打継ぎ部の約2倍であった。

(7) 全ての切断面において目視観察できた鉄筋周りおよび定着孔受けアングル周りのコンクリートの充填性は、良好であった。

謝辞

本研究を進めにあたり、ヒロセ化学 広瀬 美孝氏、システムエンジニア(株) 柳沢 敦志氏ならびに松田 祐基子氏に協力をいただきました。深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 杉山央、榎田佳寛：早強および低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの強度発現性に及ぼす初期高温履歴の影響，日本建築学会構造系論文集，No.520，PP9~16，1999.6
- 2) 宇仁菅康行，毛見虎雄，藤井和俊，小長光公和，中瀬博一，明石峰子，鳴瀬浩康：高流動・高強度コンクリートの実大施工実験（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集A，PP385~386，1995.8
- 3) 上西隆，田村博，大橋正治，木村芳幹：碎石粉使用高流動コンクリートの実大施工実験（その11），日本建築学会大会学術講演梗概集A，PP69~70，1996.9
- 4) 弦田康平，和泉意登志，井上和政，阪西康，牧保峯，三浦義雅，三浦豊司：新タイプの高流動コンクリートの開発（その8），日本建築学会大会学術講演梗概集A，PP95~96，1996.9
- 5) 小沼和仁，伊藤正人，林伯健，蓮見昌之，佐藤正明，石田浩一：分離低減剤を用いた高流動コンクリートに関する実験研究（その18），日本建築学会大会学術講演梗概集A，PP183~184，1997.9
- 6) 和泉意登志，本多幸武，佐野寛，早川光敬，芝池達司，立山創一，寺田謙一：高流動コンクリート実大施工実験（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集A，PP319~344，1995
- 7) 周建東，中田善久，西山直洋，平石信也，葉賀忠昭，笠井芳夫：フローイングコンクリートに関する実験研究（その26），日本建築学会技術講演梗概集A，PP227~228，1996
- 8) 中瀬博一，毛見虎雄，藤井和俊，小長光公和，宇仁菅康行，鳴瀬浩康，柳澤敦志：実大壁による高流動コンクリートの施工性に関する実験的研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集A，PP601~602，1994.9
- 9) 山本祐基子，毛見虎雄，藤井和俊，宇仁菅康行，渡邊一弘，中嶋和子：低熱セメントを用いた高流動コンクリートのマスコンクリート部材への適用，日本建築学会技術報告集 第5号 PP12~17，1997.12
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 一許容応力度設計法一，P38~40，1999
- 11) 坂田昇，中下兼一，深田敦宏，万木正弘：高流動コンクリートの配合が施工性及び充填性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No1，PP131~136，1993
- 12) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，P87，1991.
- 13) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）・同解説，P127，1997

[2001年10月17日原稿受理 2002年2月18日採用決定]