

論文 流動性とひび割れ低減性を有したコンクリートの開発

依田 和久^{*1}・閑田 徹志^{*2}・百瀬 晴基^{*3}・森田 健一^{*4}

要旨：流動性とひび割れ低減性を有したコンクリートを開発した。これは流動化剤を用いた中流動コンクリートの技術とひび割れ低減コンクリートの技術を組み合わせた流動化コンクリートである。このコンクリートを現場に適用すべく、室内実験によりコンクリートの材料・調合を選定し、モックアップ実験により充填性の確認を行うとともに外観の出来を調べた。実験結果を通じて、狭隘部にも打設可能な流動性と、ひび割れ低減性を有するコンクリートの開発ができ、現場適用に向けた実用化の見通しを得た。

キーワード：流動性, 充填性, ひび割れ低減性, 流動化コンクリート, 高流動コンクリート

1. はじめに

近年、曲面を多用したり、従来の構造形式とは異なる複雑な形状の建築物が増えてきている。

材料としてコンクリートを使用したものも例外ではなく、今回、アーチと曲面を多用した鉄骨をコンクリートで被覆した建築物を施工する機会を得た。その概要を図-1に示す。本建物は構造的には鉄骨で成立しており、鉄骨の座屈防止、耐火被覆、意匠上の理由によりその周囲をコンクリートで覆っている。コンクリート中にはひび割れの抑制・分散を意図してメッシュ筋と鉄筋がある。また部材は幅220mmの鉛直(壁)に対し、フランジ幅65mmのI形鋼を始め全断面に鋼材が配置されている。このように狭隘部が多いためコンクリートには適切な流動性及び充填性が必要となる。さらに躯体の仕上げが打ち放しとなるため、ひび割れ低減性が求められた。

このような場合、ひび割れ低減性を付与した高流動コンクリート¹⁾の適用が考えられ、スランプフローで管理することになる。今回の事例では、例えば、鉛直(壁)部材天端部は、水平(床)部材の鉄筋が干渉し、型枠継目を緊密に組み立てることができない。このため鉄骨天端近傍で

は打設状況に応じてスランプ管理のコンクリートへの切替えが望ましい。そこで新たに流動性とひび割れ低減性を有したコンクリートを開発した。これは流動化剤を用いた中流動コンクリートの技術²⁾とひび割れ低減コンクリート³⁾の技術を組み合わせた流動化コンクリートである。流動性の付与は流動化剤の添加により行うので、打設状況に応じた対応ができる。また、開発した流動化剤²⁾に増粘剤がプレミックスされているため、高流動コンクリートで不可欠な粉体の増量や増粘剤の添加が不要となる。

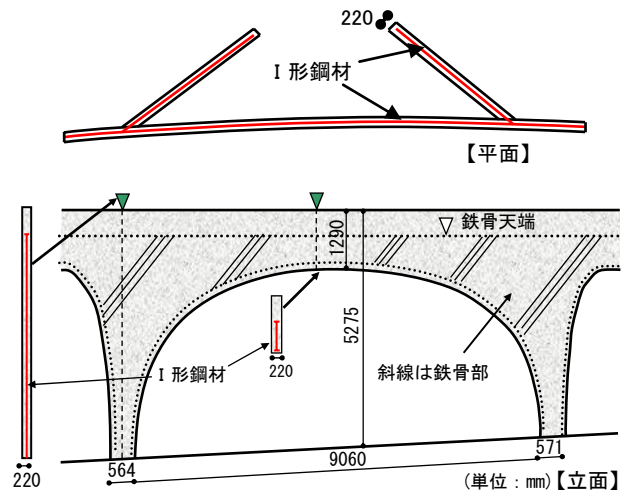


図-1 モックアップ試験体の概要

*1 鹿島技術研究所 建築生産グループ上席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ上席研究員 Ph.D (正会員)

*3 鹿島技術研究所 建築生産グループ研究員 (正会員)

*4 鹿島 東京事業本部 東京建築支店工事課長

2. 目的

本研究の目的は、室内実験により流動性・充填性、ひび割れ低減性を有するコンクリートを作り込み、モックアップ実験により外観の出来を含む所要性能を確認することにより、意図した流動化コンクリートの開発を行うことである。

3. 室内実験

3.1 実験概要

実験条件の組合せを表-1に示す。

コンクリートの種類は、スランプフローを55cmとした高流動コンクリートと、流動化剤を用いた中流動コンクリート技術を応用したものを対象とした。中流動コンクリートの技術を応用したものは、スランプ21cmのベースコンクリートを現場で受け入れ後、流動化剤を添加してスランプフロー55cmとするもの（ここでは便宜上「流動化コンクリート」という）である。ベーススランプを21cmとしたのは18cmのものに比べ粗骨材かさ容積が小さくなり、流動化後も流動性が向上すると判断したためである。

粗骨材の種類は、生コン工場が常用している砂岩碎石で最大寸法の20mm（記号GS）のほかに、充填性を期待して同15mm（記号GM）や、ひび割れ低減を期待して最大寸法20mmの石灰岩碎石（記号GC）も検討対象とした。

実験Iでは流動性・充填性についてコンクリートの種類や粗骨材種類の影響を、実験IIではひび割れ低減性について膨張材や収縮低減剤の要否を検討した。

3.2 使用材料及び調査

使用材料を表-2に、コンクリート調査を表-3に示す。

調査は、一連の予備実

験の結果から、単位粗骨材かさ容積が525～545L/m³（絶対容積320～332L/m³）の範囲であればかさ容積が小さいほど流動性が良いことを把握した上で定めた。目標値のうち、スランプフロー値は55cm、空気量は3.0%とした。

表-1 実験条件の組合せ

実験	区分	記号	コンクリート	粗骨材*	膨張材	収縮低減剤
I	室内	HO	高流動 (呼び強度51)	砂岩20	無	EG
		HS		砂岩15		
		HM		石灰岩20		
		HC	流動化 (呼び強度39)	砂岩20		
		RS		石灰岩20		
		RC				
II	室内	BP	流動化 (呼び強度39)	石灰岩20	有	—
		BE			有	EG
		BH			有	HB
		PH			無	HB
		PP			無	—
III	モックアップ	BP		石灰岩20	有	—

*岩種の後に続く数値は最大寸法(mm)

表-2 使用材料

区分	種類	物性等
セメント	中庸熱セメント	M社製, 密度3.21g/cm ³
混和材	膨張材	D社製, 密度3.05g/cm ³ , 石灰・エトリンガイト複合系
細骨材	混合砂*	表乾密度2.63g/cm ³ , FM2.70
	山砂(S1)	千葉・富津産, 表乾密度2.58g/cm ³
	石灰岩砕砂(S2)	奥多摩産, 表乾密度2.64g/cm ³
	砂岩砕砂(S3)	八王子産, 表乾密度2.64g/cm ³
粗骨材	砂岩碎石	八王子産, Gmax ^{*2} 20, 表乾密度2.67g/cm ³ , FM6.60
		八王子産, Gmax15., 表乾密度2.66g/cm ³ , FM6.35
	石灰岩碎石	横瀬産, Gmax20, 表乾密度2.67g/cm ³ , FM6.60
混和剤	高性能AE減水剤	K社製, 密度1.05g/cm ³ , ポリカルボン酸系
	流動化剤	K社製, 特殊増粘剤入りポリカルボン酸系
	収縮低減剤	D社製, 密度1.05g/cm ³ , 有機界面活性剤, 記号EG
T社製, 密度1.00g/cm ³ , ポリエーテル誘導体, 記号HB		

*1.S1, S2, S3の混合砂, 質量混合比はS1:S2:S3=20:28:52(%)とした。

*2.Gmaxとは最大寸法(mm)のこと

表-3 コンクリート調査

実験	記号	W/B ^{*1} (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤の添加量 ^{*2}	
				水	収縮低減剤	セメント	膨張材	細骨材		粗骨材
I	HO	39.1	51.8	170	0	435	0	905	854	Ad 1.3%
	HS	39.1	51.8	161	9	435	0	905	854	Ad 1.3%
	HC	39.1	51.8	161	9	435	0	905	835	Ad 1.1%
	HM	39.1	52.7	161	9	435	0	921	835	Ad 1.4%
	RS	43.5	48.5	167	8	402	0	837	900	Ad 0.6%, SP 1.5kg/m ³
	RC	43.5	48.5	167	8	402	0	837	900	Ad 0.6%, SP 1.5kg/m ³
II	BP	43.5	48.5	175	0	382	20	834	900	Ad 0.55%, SP 1.35kg/m ³
	BE			167	8	382	20			Ad 0.55%, SP 1.4kg/m ³
	BH			167	8	382	20			Ad 0.55%, SP 1.2kg/m ³
	PH	43.5	48.5	167	8	402	0	Ad 0.55%, SP 1.2kg/m ³		
	PP			175	0	402	0	Ad 0.55%, SP 1.4kg/m ³		
III	MBP	43.5	50.2	175	0	382	20	863	871	Ad 0.8%, SP 1.1kg/m ³

*1 Bは結合材を意味し、セメントと膨張材の質量の総和

*2 Adは高性能AE減水剤とし、結合材量に対する質量割合(%)で表し、SPは流動化剤とした

3.3 試験項目及び方法

試験項目及び方法を表-4に示す。

コンクリートの充填性の確認は、図-2に示すL型フロー試験装置²⁾を用いた。充填性の試験は、A室にコンクリートを充填させた後、仕切り板を引き上げ、コンクリートをB室に充填させて行った。測定は、仕切り板引き上げ直後にコンクリート先端がB室の妻壁(L=800mm)に到達する時間Tを測定し、目視による充填状況とその流動勾配を調べた。

長さ変化試験のうち、膨張材を用いた実験IIでは全てJIS A 6202附属書2の拘束法を実施した。

なお、コンクリートの練混ぜは容量60Lの傾胴型強制二軸ミキサを使用した。

3.4 実験結果及び考察

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状の結果を表-5に示す。室内実験においてスランブフロー及び空気量の目標値を満足し、コンクリートの状態はワーカブルであり良好であった。

(2) 流動性・充填性

実験Iのスランブフロー試験におけるフロー停止時間を図-3に示す。スランブフローは49.5~54.5cmで、空気量は2.7~4.3%であった。フロー停止時間について、HSとRS、HCとRCを比較した場合コンクリート種類の影響はほとんどなく同等であった。粗骨材種類ではHM>HS≥HC、RC≥RSとなった。即ち、フロー停止時間は最大寸法15mmのHMのものが、最大寸法20mmのHSやHCよりも長くなり、同じ最大寸法20mmのGSとGCでは同等であった。

充填性を把握するためHS、RS、RCのL型フロー試験における到達時間を図-4に示す。到達時間は長い順にHSの15.3秒、RSの11.7秒、RCの5.4秒であった。高流動コンクリートHSに対し、流動化コンクリートRSは76%であり、流動化コンクリートRCは35%の到達時間となった。また、L型試験装置におけるコンクリートの充填状況を写真-1に示す。RCは、RSとHSに比べて良く充填されていた。これを流動勾配

表-4 試験項目及び方法

区分	試験項目	試験方法	実験Ⅰ	実験Ⅱ	実験Ⅲ
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101	○	○	○
	スランブフロー	JIS A 1150	○	○	○
	スランブフロー時間		○	○	○
	空気量	JIS A 1128	○	○	○
	コンクリート温度	温度計による	○	○	○
	状態	目視による	○	○	○
	充填性	L型フロー試験	○	-	-
強度性状	圧縮強度	JIS A 1108	○	○	○
	割裂引張強度	JIS A 1113	-	○	-
長さ変化	長さ変化率	JIS A 1129-1	○	-	-
	膨張・収縮ひずみ	JIS A 6202附2	-	○	-

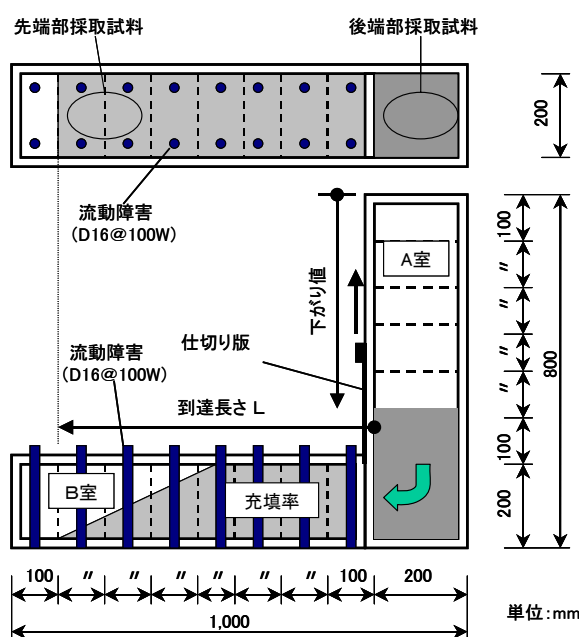


図-2 L型フロー試験装置

表-5 フレッシュ性状の結果

実験	記号	コンクリート	フロー (cm)	停止*1 (秒)	空気量 (%)	温度 (°C)	状態
Ⅰ	HO	高流動	56.0	13.5	3.5	24.0	良
	HS	高流動	52.5	14.2	4.3	23.0	良
	HM	高流動	54.5	25.9	2.9	24.0	良
	HC	高流動	49.5	11.0	3.2	23.0	良
	RS	流動化	52.0	12.3	2.7	23.0	良
	RC	流動化	53.0	13.5	3.0	23.5	良
Ⅱ	BP	流動化	48.0	8.3	3.4	23.0	良
	BE	流動化	48.5	11.2	2.8	23.0	良
	BH	流動化	51.0	9.9	2.4	23.0	良
	PH	流動化	54.0	9.5	3.2	23.0	良
	PP	流動化	55.0	9.8	2.4	23.0	良
Ⅲ	MBP	流動化	56.5	23.0	4.1	11.0	良

*1 フローの流動停止時間(秒)

でみると RC が 7.5° , RS が 14° , HS が 14.5° であり, 目視の充填状況と流動勾配はほぼ一致する結果となった。RC と RS で使用している粗骨材の粒形判定実積率はともに 61.0%であったが, RC の石灰岩碎石は RS の砂岩碎石に比べ, 外観上丸みを帯びており, このことが高い充填性に寄与した一因と考えられた。また, 実験Ⅱのコンクリートも練上りやスランプ試験の状態から RC と同様の性状を有していると判断した。

(3) 圧縮強度

図-5 にコンクリートの圧縮強度を示す。高流動コンクリートの呼び強度は $51(\text{N}/\text{mm}^2)$ であり, 流動化コンクリートの呼び強度は $39(\text{N}/\text{mm}^2)$ であり, 多少ばらつきはあったが, それぞれの呼び強度に対し, 十分な圧縮強度が得られた。

(4) 長さ変化率

図-6 にコンクリートの長さ変化率を示す。長さ変化率は, コンクリート種類の違いによる差は小さいものの, 粗骨材種類の違いによる差が見られた。石灰岩碎石を用いた HC や RC は, 砂岩碎石を用いた HS や RS よりも 100μ 程度小さくなった。なお, 収縮低減剤を添加した HS は,

無添加の HO に比べ, 長さ変化率が 200μ 程度小さくなり, 収縮低減剤を混入した効果があった。

(5) ひび割れ低減性

コンクリートのひび割れ低減性を付与するために実施した実験Ⅱのコンクリートの圧縮強度を図-7 に示す。多少ばらつきはあったが, 対

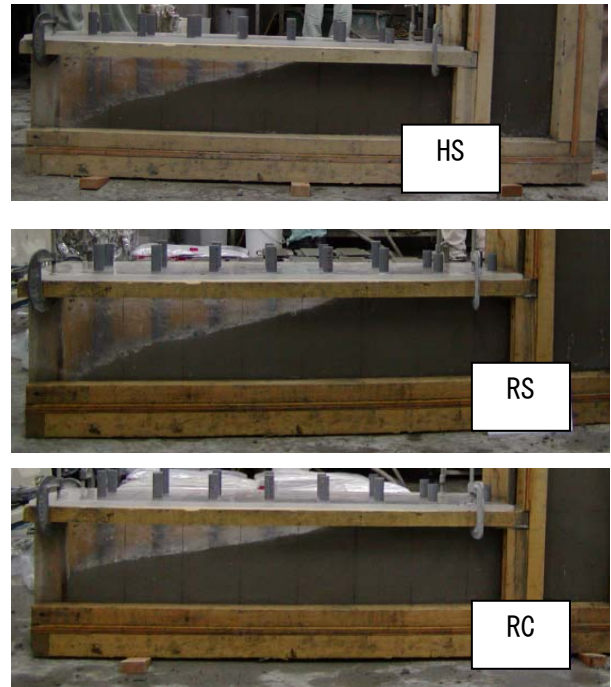


写真-1 各コンクリートの充填性

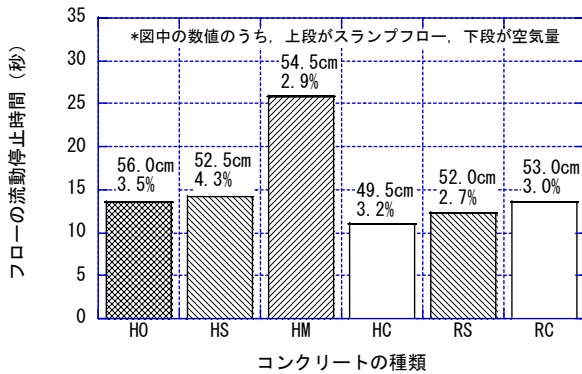


図-3 スランプフローの流動停止時間

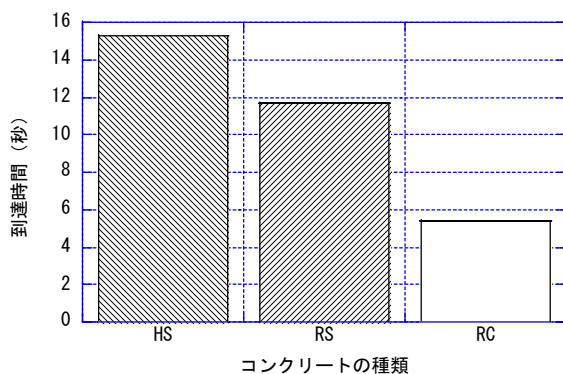


図-4 L型フロー試験における到達時間

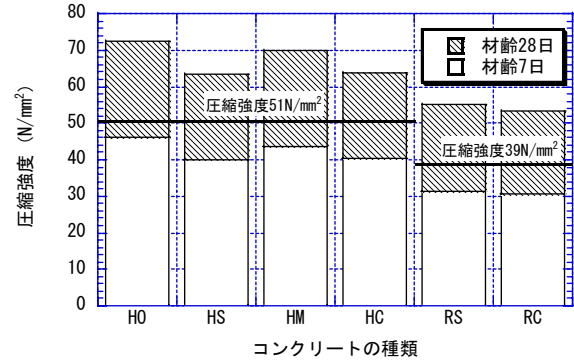


図-5 コンクリートの圧縮強度

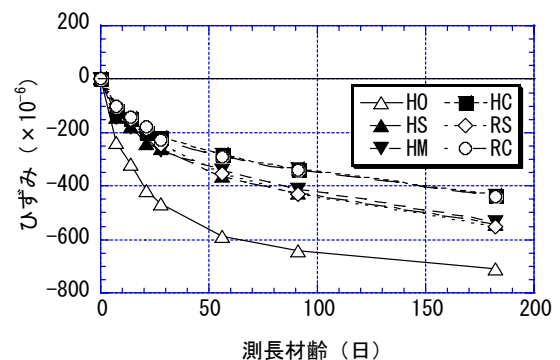


図-6 コンクリートの長さ変化率

象としたコンクリートにおいて圧縮強度は 48.7 ~ 62.1 N/mm²であった。圧縮強度は、PHが最も低い結果となったが、このPHでも呼び強度 39(N/mm²)に対し、十分な圧縮強度が得られた。

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-8に示す。割裂引張強度は、3.7~4.3 N/mm²の範囲であった。圧縮強度と割裂引張強度は野口式の線上にプロットされており同式より推定可能である。

コンクリートの膨張・収縮ひずみを図-9に示す。膨張材と収縮低減剤を組み合わせたBHやBEの収縮ひずみは小さく、次いで膨張材単味のBP、収縮低減剤単味のPH、膨張材及び収縮低減剤無混入のPPの順になった。膨張材や収縮低減剤を混入により収縮ひずみ低減効果が見られた。

3.5 まとめ

本実験から得られた知見を以下に示す。

- (1) スランプフローを一定とした場合の充填性について、流動化コンクリートは高流動コンクリートに比べ、また石灰岩砕石は砂岩砕石に比べ良好であった。
- (2) コンクリートの長さ変化率は、石灰岩砕石を用いたHCやRCは、砂岩砕石を用いたHSやRSよりも100μ程度小さくなった。
- (3) 拘束下での収縮ひずみは、膨張材と収縮低減剤を組み合わせたものが最も小さく、膨張材単味、収縮低減剤単味、膨張材・収縮低減剤無混入の順となった。

石灰岩砕石を用い、膨張材と収縮低減剤を組み合わせた流動化コンクリートが良いと言える。

4. モックアップ実験

4.1 実験概要

室内実験の結果から膨張材と収縮低減剤の有効性を把握できた。しかし、収縮低減剤は生コン工場に投入すると他のバッチの製品への影響が懸念され、空気量の調整がやや難しいこともあり、今回は収縮低減剤を用いることなく膨張材単味によるコンクリートBPを選定した。

実験Ⅲでは、室内実験の結果を通じて選定し

た膨張材単味のコンクリートBPについて、実機試し練りを兼ねたモックアップ実験を行い、コンクリート外観の出来の良否を調べた。試験体を図-1に示す。使用材料を表-2に、調合を表-3に、試験項目及び方法を表-4に示す。

実験Ⅲでは室内実験で選定したコンクリートにおいて空気量のみ変更し、4.5%とした。これは流動性や耐凍害性を考慮し、3.0~4.5%の範囲であれば空気量の多少が外観の出来に影響することが小さい⁴⁾と判断したためである。

モックアップ試験体の施工手順は、アーチ部

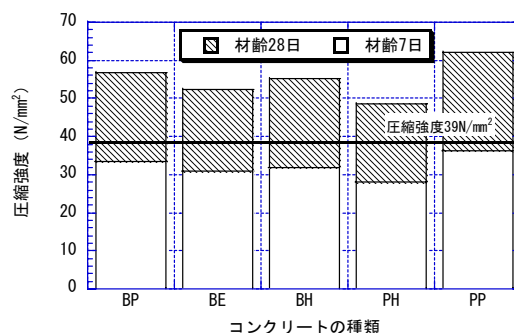


図-7 コンクリートの圧縮強度

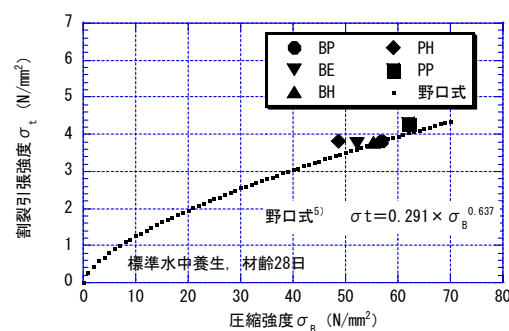


図-8 圧縮強度と割裂引張強度の関係

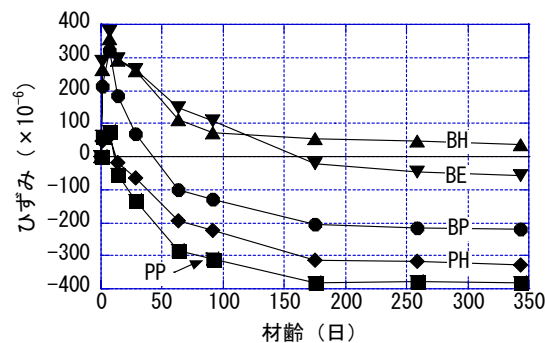


図-9 コンクリートの膨張・収縮ひずみ

で打ち上がるように2本の柱脚から分けて施工し、その後アーチ上部からは全体が一体になるように打ち上げた。圧送はスクイズ式のポンプ車を利用した。締固めは、試験体の片側ずつ振動機の届く範囲でその有無による効果を検討した。振動機無しの部位は竹棒で突き、木槌で叩いて締め固めた。養生は、膨張材を使用しているため7日間型枠を存置し、試験体の天端面は水分が逸散しないように適宜散水を行った。

4.2 実験結果及び考察

フレッシュ性状は表-5に示す通り目標値を満足した。写真-2にスランプ試験時のコンクリートの状態を示す。コンクリートは同心円状に広がり、粗骨材も均一に分布している。

写真-3に柱脚のコンクリートの外観を示す。各コンクリートともジャンカや気泡が目立つこともなく、ひび割れもなく良好な外観を呈していた。また、振動機有無による顕著な違いはなかったが、振動機無の方が空気泡の分布が均一であるように見えた。

4.3 まとめ

流動化コンクリート BP をモックアップ試験体に打設した結果、適切に締固め及び養生を行うことにより、ジャンカなど初期欠陥や目立った空気泡がなく、ひび割れもみられないコンクリートを施工することができた。

5. おわりに

本研究を通じ、流動性を高め、ひび割れ低減性を付与した流動化コンクリートを開発した。これは高流動性を有するものであり、流動性の付与も施工部位に合わせて適宜対応でき合理的な利用が可能である。また、使用する流動化剤に増粘剤がプレミックスされているため、高流動コンクリートで不可欠な粉体の増量や増粘剤の添加が不要であり、コスト的にも有利である。

謝辞

本コンクリートを開発するに当たり、関東宇部コンクリート工業(株)相模原工場、花王(株)、山



写真-2 試験時のコンクリートの状態



写真-3 叩きのみで締め固めた柱脚部

宗化学(株)、電気化学工業(株)、竹本油脂(株)の関係各位にご協力頂きました。紙面を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、保利彰宏ほか：ひび割れ抵抗性に優れる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集，Vol.23，No.1，pp.67-72，2001.6
- 2) 依田和久ほか：流動化剤を用いた中流動コンクリートの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1249-1254，2005.6
- 3) 百瀬晴基，閑田徹志ほか：低温環境下における収縮ひび割れ低減に有効なコンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.521-526，2006.6
- 4) 一宮一夫：セメントペーストの表面張力抑制を，コンクリートテクノ，Vol.25，No.3，pp.39～43，2006.3
- 5) 野口貴文ほか：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第472号，pp.11-16，1995.6