

4. 高流動コンクリートの実大施工実験 ～粉体系高流動コンクリートと普通コンクリートの比較～

石原誠一郎
立松 和彦
山崎 順二

要 旨

流動性が良く、打設時に締め固めをほとんど必要としない高流動コンクリートは、建設業の将来にとって必要不可欠な要素技術であると考えている。本実験では、石灰石粉を用いた高流動コンクリートと普通コンクリートとの性状を比較するために、柱および開口を有する壁からなる実大の試験体を作り、種々の試験を実施した。打設時には流動勾配・側圧などを測定し、硬化後はコンクリートの流動距離ごとにコア強度・粗骨材面積率などを測定した。また、耐久性についても検討した。その結果、この高流動コンクリートは流動性・充填性に優れ、硬化性状・耐久性についても普通コンクリートと同等の性能を有していることを確認した。

キーワード

高流動コンクリート／粉体／流動勾配／耐久性

目 次

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果および考察
4. ま と め

4. TESTING OF HIGH-FLUID CONCRETE USING FULL-SCALE SPECIMEN ～COMPARISON OF HIGH-FLUID CONCRETE USING FINE POWDER WITH NORMAL CONCRETE～

Seiichirou Ishihara
Kazuhiko Tatematsu
Junji Yamasaki

Abstract

High-fluid concrete, concrete of enhanced fluidity that eliminates the need for compacting in concrete placing work, is considered to become one of essential technical elements for the future of the construction industry. In order to grasp the properties of high-fluid concrete, high-fluid concrete using fine powder was compared with normal concrete. For the purpose of comparative study, various tests were carried out using a full-scale specimen that comprises columns and walls having openings in them. During concrete placing operations, flowing gradients and lateral pressures were measured. After the concrete had been hardened, core specimen were taken from different flowing distance ranges to determine their strength and coarse aggregate distribution ratio. The estimation of durability were also examined. The test results revealed that high-fluid concrete has high fluidity and filling efficiency. It was also found that high-fluid concrete compares favorably with normal concrete in terms of hardening properties and durability.

1. はじめに

近年建設業各社において高流動コンクリートの研究開発が盛んに行われている。その背景としては、高強度コンクリートの実施工例が増えるに伴い高密度配筋でも確実に充填できるコンクリートのニーズが高まってきたことと、パイプレータによる締め固めという熟練を伴う苦渋作業の軽減、ということの2つがあげられる。

こうしたニーズに応えるため、当社でも高流動コンクリートの研究を進めてきた。水中コンクリートなどでは増粘剤を用いて高粘性・流動性を得ているが、建築構造物に使用するためには、間隙通過性などを考慮すると、粘性があまり大きくなく流動性に優れた高流動コンクリートが適していると考えられる。そこで、粉体（ここでは石灰石粉）を用いた高流動コンクリートについて、室内試験を繰り返し、フレッシュ性状・圧縮強度などを検討してきた。今回の実大施工実験は、そうした成果に基づき、高流動コンクリートの実プラントでの製造・実際の施工性（流動性や充填性）・流動性状・硬化性状などについて、普通コンクリートと比較検討する目的で行ったものである。

本実験では、実際の建物に近い配筋状態の柱および有開口の壁からなる試験体を2体造り、実大施工実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

今回の実験に使用した材料を表-1に示す。本実験では、微粉末として石灰石粉を、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能A E減水剤およびA E助剤を使用した。細骨材については山砂と砕砂を7：3（容積比）の割合で混合して使用した。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-2に示す。粉体系高流動コンクリート（以下F系と略）については、単位水量 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比50%、水粉体比（ $W/(C+F)$ ）35%、石灰石粉混入量 $150\text{kg}/\text{m}^3$ 、細骨材率51.8%とした。

スランプフローの目標値を $60\pm 5\text{cm}$ 、空気量の目標値を $4.5\pm 1.5\%$ とし、室内試験練りにより適切な高性能A E減水剤の添加量を把握し、調合を決定した。さらに室内で製造したものとプラント実機練りにより製

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（比重 3.16）
微粉末	石灰石粉（比重 2.73）
細骨材	城陽産山砂（比重 2.56、FM 2.80） 高槻産砕砂（比重 2.66、FM 2.85）
粗骨材	高槻産砕石（比重 2.68、実績率 58.0%）
混和剤	高性能A E減水剤（ポリカルボン酸系） A E助剤

表-2 コンクリートの調合

調合種類	W/C	W/P	s/a	単位重量 kg/m^3					
	%	%	%	C	W	S	G	F	AE (C+F)%
F系	50.0	35.0	51.8	350	175	823	793	150	1.50
B系	50.0	—	44.8	384	192	744	949	—	0.96

P：(C+F) F：石灰石粉

造したものについて経時変化試験を行い、練り上がり後90分までの高流動コンクリートの性状を確認した。また比較用の普通コンクリート（以下B系と略）については、高流動コンクリートと同一水セメント比（27-18-20N）の標準的な調合のコンクリートとした。

2.3 試験項目および試験方法

フレッシュコンクリートの性状および硬化コンクリートの物性を評価するために、表-3に示す各種の試験を行った。

フレッシュコンクリートについては、アジテータ車荷卸し・ポンプ筒先・流動後（図-1に示す試料採取口から採取）の3時点で試料を採取し、各時点でのコンクリートの品質変化について評価した。

硬化コンクリートについては、 $\phi 10\times 20\text{cm}$ の円柱供試体を上述したフレッシュコンクリートの試験と同時点で採取した。供試体の養生方法は標準・封かん・気中の3種類とし、表-4に示す各材齢において圧縮強度試験を行った。静弾性係数の測定は、材齢4週と13週において行った。

実大試験体については、流動勾配・コンクリート温度・側圧・セパレータ歪み・沈下量の測定を行った。コア採取は材齢4週および13週において行い、かさ比重・コア強度・粗骨材面積率（材齢4週の供試体）を測定した。粗骨材面積率については、コア供試体側面に透明のシートを貼り付け、5mm以上の粗骨材をトレースし、画像解析装置により粗骨材面積を算出して求めた。

表－３ 試験項目と試験方法

	試験項目	試験方法
フレッシュ コンクリート	スランプフロー	JIS A 1101
	50cmフロー時間	スランプフローが50cmに達した時間を測定
	空気量	JIS A 1128
	単位容積質量	エアメータを用いて測定
	コンクリート温度	—
	Vロート 流下時間	V型(75mm)ロートからコンクリートが流下する時間を測定
	Lフロー試験	—
	BOX試験(有筋)	—
硬化 コンクリート	かさ比重	JIS A 1110の粗骨材の比重測定方法に準じて測定
	圧縮強度	JIS A 1108
	静弾性係数	JIS原案(コンプレッソメータを用いて測定)
	引張強度	JIS A 1113
	乾燥収縮率	JIS A 1129
	凍結融解抵抗性	JIS原案(A法)
	促進中性化試験	高耐久性指針(案) ¹⁾
実大試験体	流動勾配	実大試験体の4ヶ所に透明型枠を設置して計測
	コンクリート 内部温度	柱および壁に熱電対を埋め込んで測定
	コンクリート 側圧	直径10cmの土圧計を壁下部に設置して測定
	セパレータ歪み	柱のセパレータに取り付けたひずみゲージにより測定
	沈下量	柱天端および壁天端に変位計を設置して測定
	コア強度	JIS A 1107
	かさ比重	JIS A 1110の粗骨材の比重測定方法に準じて測定
	粗骨材面積率	コア供試体側面の粗骨材をトレースして面積率を算出

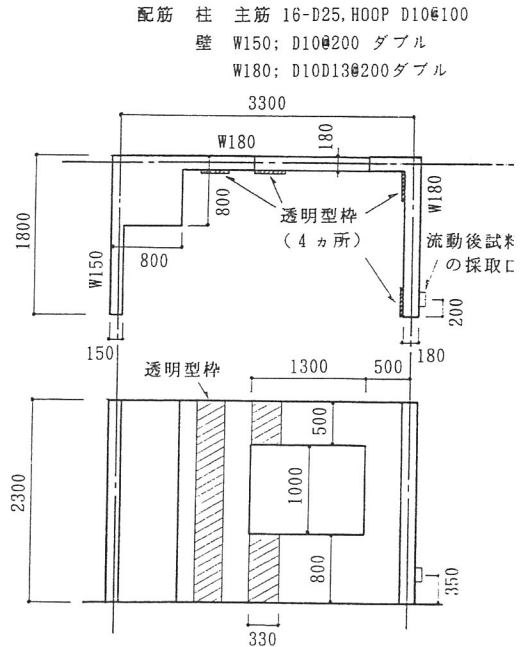
表－４ 強度試験材齢と養生方法

(単位：日)

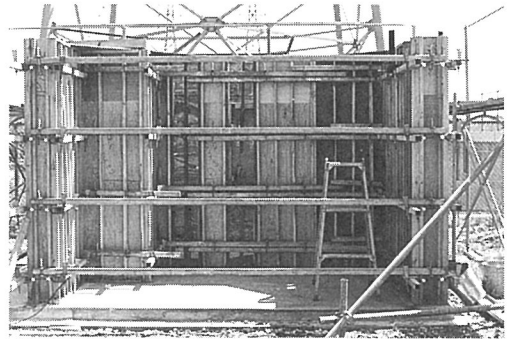
採取時期	標準養生	封かん養生	気中養生
アジテータ荷卸し	7・28・91	—	—
ポンプ筒先	1・4・7・14 28・29	1・4・7・14 28・91	4・7・14 28・91
流動後	7・28・91	—	—

2.4 コンクリートの製造

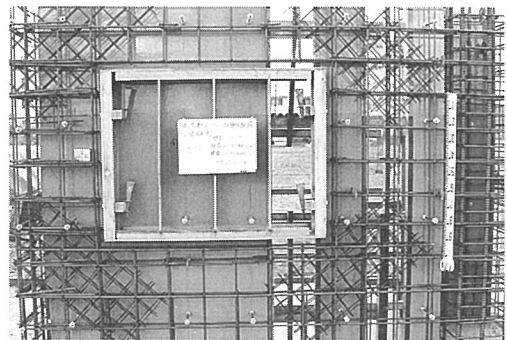
コンクリートの製造は、高槻市にあるレディーミクストコンクリート工場において、容量1.5㎡の強制2軸練りミキサーを用いて4.5㎡練り混ぜた。練り上がりから荷卸しまでの時間は約30分であった。



図－１ 実大試験体の形状および寸法



写真－１ 打設前の実大試験体



写真－２ 実大試験体配筋状況

表－5 フレッシュコンクリートの試験結果

コンクリート 種 類	試料採取 時 点	スランプフロー cm×cm	スランプ cm	50cmフロー 時間 sec	空 気 量 %	単 位 容 積 質量 kg/L	Lフロー距離 cm	Vロート時間 sec	BOX高さ の差 cm
F 系	出 荷 時	58×56	—	—	1.9	—	—	—	—
	荷 卸 し	56×54	—	1.3	1.7	2.43	58.0	10.4	4.7
	筒 先	41×40	—	1.1	2.3	2.33	37.0	5.0	11.3
	流 動 後	49×47	—	1.3	3.1	2.32	47.8	4.2	5.4
B 系	出 荷 時	—	18.5	—	4.0	—	—	—	—
	荷 卸 し	30×27	19.5	—	4.3	2.27	—	—	25.8
	筒 先	42×40	23.0	—	3.0	2.31	—	—	—
	流 動 後	30×28	15.5	—	4.7	2.28	—	—	—

2.5 実大試験体の形状および打設方法

実大試験体の形状および寸法を図－1に、打設前の実大試験体を写真－1に、開口部まわりの配筋状況を写真－2に示す。コンクリートの流動性状を確認するために、図－1に示す4ヶ所に透明型枠をセットした。

コンクリートの打設はF系・B系ともブーム付ポンプ車を用い、約20m³/hの速度で圧送した。打設方法については、最初はF系・B系とも締め固めを行わずに柱頂部から自由落下させることにより打設した。F系については柱天端まで打ち上がった後、そのまま締め固めを行わずに筒先を開口部の方へ徐々に移動させながら打設し、B系については、F系と同様に柱天端まで締め固めをせずに打ち上げた後、パイプレータで締め固めを行いながら筒先を徐々に開口部の方へ移動させて、残りの部分を打設した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表－5に示す。スランプフローの目標値を60±5cm、空気量の目標値を4.5±1.5%とした。測定の結果、スランプフローは目標値内であったが、空気量が下回る結果となった。

F系は、B系と比較するとやや経時変化が大きくなる傾向にあり、荷卸し時（混練後30分）から流動後（混練後約60分）の間にスランプフローが7cm低下した。しかし50cmフロー時間やVロート流下時間から判断すると、低粘性で材料分離も生じていないと考えられるので、コンクリートの品質として特に問題となる点はなく、良好であったといえる。またF系の場合、筒先においてスランプフローが大きく低下しているが、この低下が圧送ロスによるものか、先送りしたモルタ

ルが残っていたものか、もしくはその他の要因によるものなのかは、更なる検討が必要である。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度および引張強度

図－2にポンプ筒先の試料から採取した円柱供試体の圧縮強度試験結果を、図－3に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。F系の強度発現性は、材齢初期においてはB系の方がやや大きくなるが、以後はB系と同程度であった。また圧縮強度と静弾性係数の関係は、F系とB系、および養生方法に明確な差はなく、New RC式²⁾にはば一致した。引張強度はF系とB系に差はなく、材齢4週において2.7～2.9MPa程度であった。

(2) 乾燥収縮率

図－4に乾燥収縮率の測定結果を示す。乾燥材齢26週において乾燥収縮率が 13×10^{-4} 程度と大きい値を示しているが、F系の乾燥収縮率はB系とほぼ一致しており、石灰石粉を混入したことによる収縮量の変化は見られなかった。

(3) 凍結融解抵抗性

図－5に凍結融解試験結果を示す。F系の凍結融解抵抗性はB系に比べて低く、凍結融解240サイクルで相対動弾性係数がほぼ60%に低下した。この原因はB系の空気量が3.0%であるのに対し、F系は2.3%とB系に比べて少なかったためと考えられるので、両者はほぼ同等の凍結融解抵抗性を有していると推測できる。

(4) 促進中性化試験

図－6に促進中性化試験結果を示す。現在実験を継続中であるが、F系・B系とも促進材齢13週において中性化深さが12mm程度であるので、高耐久性指針（促進材齢26週において25mm以下¹⁾）を満足すると思われる。

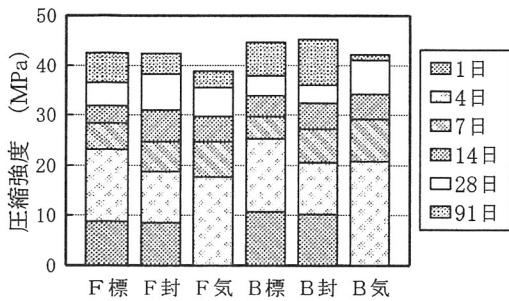


図-2 円柱供試体の圧縮強度試験結果

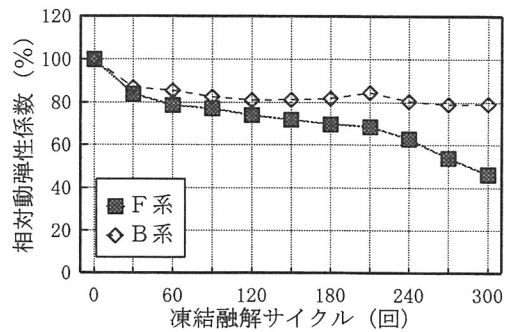


図-5 凍結融解試験結果

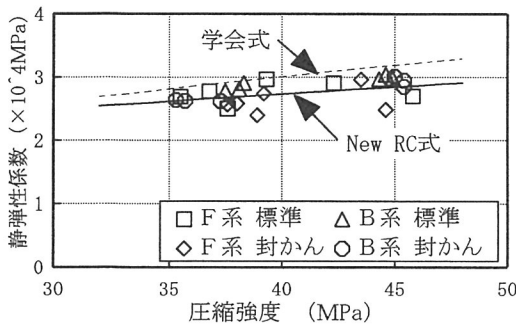


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

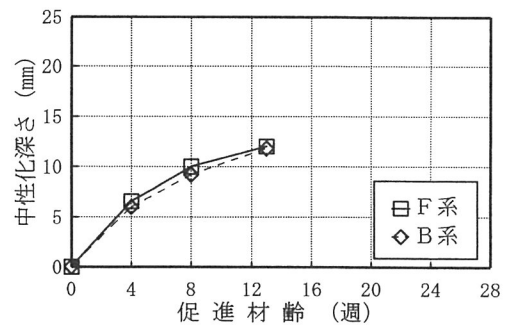


図-6 促進中性化試験結果

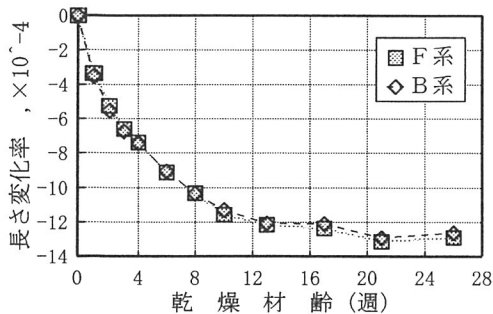


図-4 乾燥収縮率測定結果

る。材齢13週までの結果から判断すると、F系は材齢初期での中性化速度が速く、B系よりも中性化深さが大きくなるが、促進材齢13週でB系とほぼ同程度となり、以後長期材齢においてF系の方が中性化深さがやや小さくなる傾向にある。

3.3 実大試験体に関する試験結果

(1) 流動勾配

荷卸し時のスランプ試験結果を写真-3に、F系およびB系の流動状況を写真-4および図-7・8に示す。F系の流動勾配は10°～15°程度であり、開口部

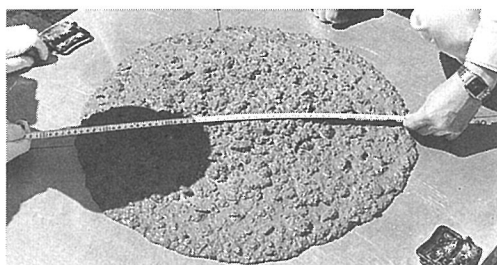
の下部や、写真-2に示す開口補強部のような過密配筋部についても、打ち込み欠陥を生じることなく打設することができた。今回の実験程度の流動距離(約5m)の場合は、スランプローが50～55cm程度の適度な流動性を有するコンクリートであれば、パイプレタによる締め固めをほとんど必要とせずに、あるいは過密配筋部のみに補助的に軽微な締め固めを行うことによって、密実なコンクリートを打設できると考えられる。

(2) コンクリート内部温度

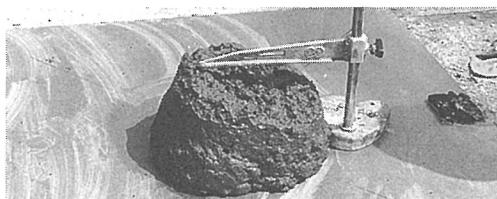
図-9に示す壁(T1・T2)および柱各部(T3～T5)で、コンクリートの内部温度を測定した。柱中央部の最高温度はF系が55℃、B系が53℃であり、両方とも打設後25時間で最高温度に達している。壁についてはF系とB系にほとんど差がなく、打設後約30時間で最高温度45℃に達した。これよりF系の発熱量はB系と同程度であり、粉体を混入することによる発熱量の変化はほとんど見られなかった。

(3) コンクリートの側圧

図-9に示す壁下部(P1:コンクリートヘッド

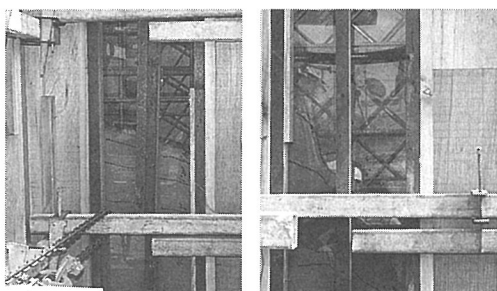


F 系



B 系

写真-3 スランプフロー試験結果



F 系

B 系

写真-4 コンクリートの流動状況

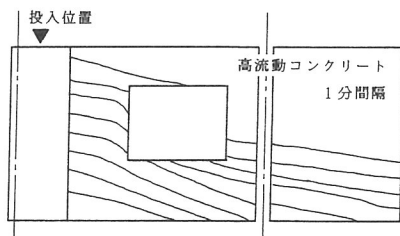


図-7 F系の流動勾配

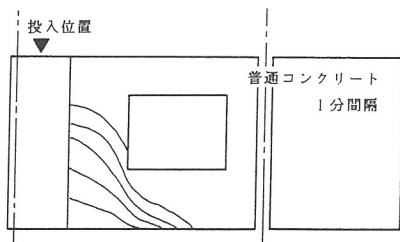


図-8 B系の流動勾配

1.9m)においてコンクリートの側圧を測定した。測定結果を図-10に示すが、F系とB系に顕著な差はなく、最大 $2.1 \sim 2.2 \text{ t/m}^2$ であり、液圧として計算した値の48～50%であった。通常、高流動コンクリートの側圧は普通コンクリートより大きくなり、液圧として計算した値の60%程度作用するといわれているが、今回の測定結果では、F系の側圧はB系とほぼ同値であった。

(4) セパレータ歪み

図-9に示す4点(S1～S4)において、セパレータ中央部の引張歪みを測定した。測定結果からセパレータに作用する応力を求めると、F系の場合は最下部のS4の応力が最も大きく、次いでS3→S2→S1の順に低下するのに対し、B系ではS3が最も大きく、S4→S2→S1の順となった。最大応力は、F系のS4およびB系のS3で 0.16 kgf/cm^2 程度と、両方ともほぼ同じ値を示した。

(5) コンクリート天端の沈下量

図-9に示す柱(D1)および壁(D2)で、コンクリートの天端の沈下量を測定した。柱天端での沈下量はF系が2.0mm、B系が1.3mmであり、F系の方がやや大きい値を示したが、ブリーディングはほとんど発生せず、硬化後のコンクリート表面にひびわれも見られなかった。これらのことから判断すると、F系の沈下量は、問題となるほど大きなものではなかったと考えられる。なお壁天端の沈下量は、両方とも0.5mm程度であった。

(6) 流動距離・打ち込み高さとコア強度の関係

図-11に示す位置でコア供試体を採取し、流動距離および打ち込み高さがコア強度にどのような影響を与えるかを検討した。図-12よりF系においては、材齢4週では流動距離が長い場合でもコア強度は変動せず、材齢13週では若干変動した。これらを総合的に判断すると、今回の実験程度の流動距離(約5m)では強度への影響はほとんどないと考えられる。

流動距離が60cmの位置における打ち込み面からの深さとコア強度の関係を図-13に示すが、F系・B系とも高さによるコア強度の変動は少なかった。通常、柱や壁では下部のコンクリート強度が大きくなる傾向にあるが、本実験でも同様の傾向であり、打ち込み面からの距離が深くなるほどコア強度がやや増加する結果となった。

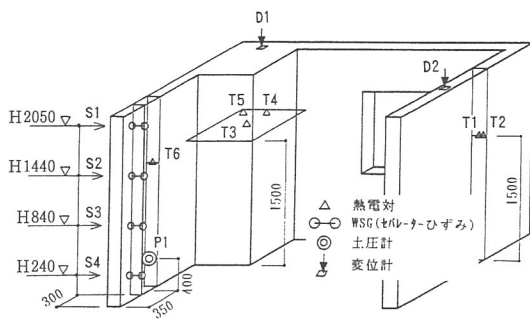


図-9 実大試験体における各種測定位置

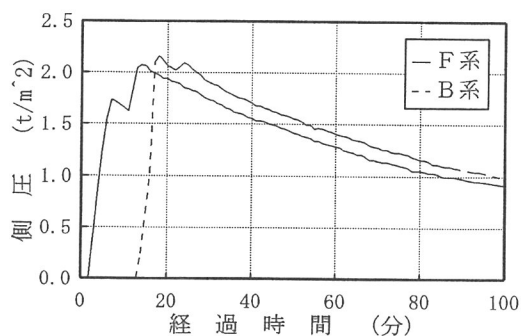


図-10 コンクリートの側圧測定結果

(7) 流動距離・打ち込み高さと粗骨材面積率の関係

実大試験体の各部分のコンクリートの均質性を評価するために、材齢4週において採取したコア供試体側面の粗骨材面積率を測定した。図-12および図-13に測定結果を示す。F系については、流動距離が長くなるほど粗骨材面積率がやや減少する傾向にあった。一方、高さ方向の粗骨材面積率については、F系では上部・中部がほぼ等しく、下部がやや大きな値であった。B系では上部が最も小さく中部が最も大きな値であった。パイププレートによる締め固めに伴って、上部の粗骨材が下方へ移動する傾向があると考えられる。この結果より、良好な性状を示す高流動コンクリートでは、均質な構造体ができることを示しているといえる。また、計画調査より計算した粗骨材体積率と測定した粗骨材面積率を比較すると、粗骨材体積率はF系が31.0%、B系が37.2%であるのに対し、実測の粗骨材面積率はF系が29.7%～36.6%、B系が38.0%～44.4%の範囲であり、計算値と実測値の関係は、F系・B系とも同様の傾向を示した。

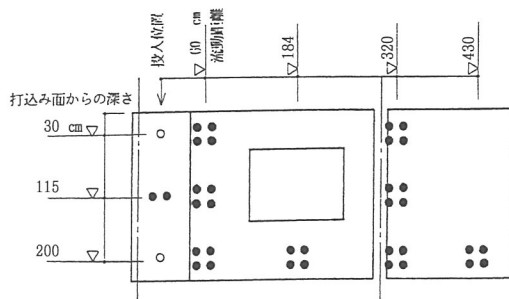


図-11 実大試験体のコア供試体採取位置

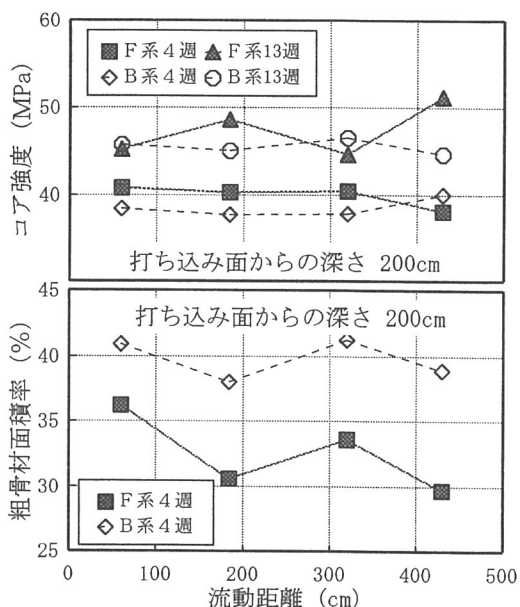


図-12 流動距離とコア強度・粗骨材面積率

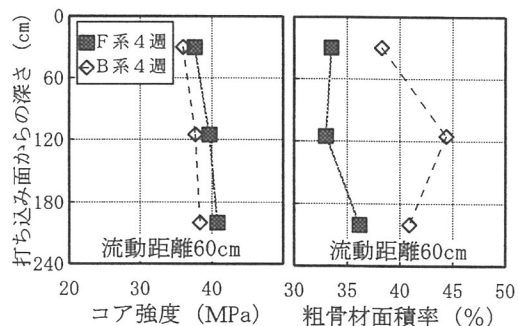


図-13 打ち込み高さとはコア強度・粗骨材面積率

(8) かさ比重と粗骨材面積率の関係

コア供試体のかさ比重は、流動距離および打ち込み高さによる変動は少なく、材料分離を評価するまでには至らなかったが、粗骨材面積率と併用することにより評価できると考えられる。図-14に、かさ比重と粗骨材面積率の関係を示す。今回の測定結果からは、ゆるやかな相関関係があると思われた。

以上、各部のコア供試体の圧縮強度や粗骨材面積率の測定結果から、壁試験体中の粗骨材はほぼ均等に分布しているので、コンクリートの流動時に極端な材料分離を生じることがなかったと考えられる。

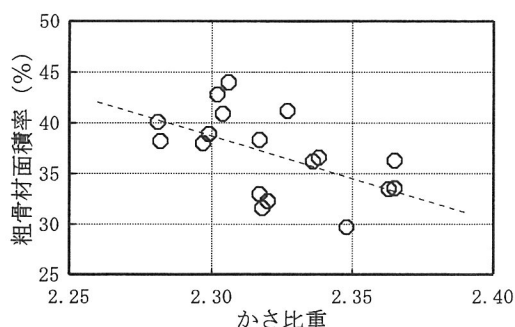


図-14 かさ比重と粗骨材面積率の関係

4. まとめ

柱および開口を有する壁からなる実大試験体に粉体系（石灰石粉）の高流動コンクリートおよび普通コンクリートを打設して比較検討した結果、以下のことが確認できた。

- 1) 微粉末として石灰石粉を混入した高流動コンクリートは、普通コンクリートよりも流動性に優れ、かつ適度な分離抵抗性を有する低粘性の高流動コンクリートであった。
 - 2) 乾燥収縮率・凍結融解抵抗性・促進中性化深さについては、同一水セメント比の普通コンクリートと同程度の性能を有していた。
 - 3) コンクリートの流動距離や、打ち込み面からの深さによる品質の低下は見られなかった。
 - 4) 高流動コンクリートの側圧は、普通コンクリートの側圧とほぼ同じ値であった。
- 今後は、高流動コンクリートの安定的な製造、ポンプ圧送などについて検討を重ねていきたい。

[参考文献]

- 1) 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」，1991
- 2) 財国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「New RC 研究開発概要報告書」，1993