

論 文

[1166] 高流動コンクリートの強度および耐久性に関する研究

正会員○梅沢 健一（エヌエムビー 中央研究所）

岡沢 智（エヌエムビー 中央研究所）

堀部 勝芳（エヌエムビー 中央研究所）

正会員 中川 僕（エヌエムビー 中央研究所）

1. はじめに

近年、建築構造物の大型化や複雑な形状を呈した部材あるいは鉄筋が過密に配置された部材が増加しており、それらをコンクリート施工する場合、十分な締固めが行い難く、締固め不足から発生する欠陥などは、コンクリート構造物の耐久性を低下させる大きな要因の一つとなることが考えられる。

一方、コンクリート作業員の高齢化や人員不足が、大きな社会問題として取り上げられ、その対策の一つとして、コンクリート工事の省力化や機械化による合理化施工を土木・建築工事にいかに取り入れて行くかが、これから課題となっている。

このような背景の中で、高流動性を有し、かつ、材料分離抵抗性が大きく充填性に優れているコンクリート（以下、高流動コンクリートと略す）に関する研究が数多く行なわれるようになり、同コンクリートに要求される粘性の程度や流動特性あるいはそれを定量的に評価する試験方法などフレッシュ性状に関わる特性の一部は明かになりつつあるが、硬化コンクリートの特性に関しては、未だ確認されていない点も多い。〔1〕〔2〕

そこで、本研究では、成分系の異なる結合材を用いた高流動コンクリートの、おもに強度特性と耐久性に関わる性状について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 高流動コンクリートの配合

実験に用いた高流動コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混和材料とした2成分系と、更に高炉スラグ微粉末にフライアッシュを用いた3成分系の2種類とした。また、対比用コンクリートは、JIS A 6204に規定しているAE減水剤を用いたスランプ18cmの配合とした。コンク

リートの配合を表-1に示す。なお、この2種類の高流動コンクリートは、小沢らが提唱した高い材料分離抵抗性と流動性状を評価する方法の1つである鉄筋間隔5cmのメッシュを通過し、さらに鉄筋が密に配置されたモデル型枠への充填が確認された配合である。〔1〕

表-1 コンクリートの配合

コンクリート の種類	結合材 の種類	目標 スランプ・フロ- (スランプ)	水結合 材比 (%)	単位量 (kg/m ³)		混和剤の種類と使用量
				水	結合材	
高流動 コンクリート	2成分系	60 cm	30.2	165	546	高性能AE減水剤 「SP」 (結合材x1.4%)
	3成分系		30.0	165	550	高性能AE減水剤 「SP」 (結合材x1.0%)
対比コンクリート (JIS A 6204)	普通セメント	(18 cm)	55.0	176	320	A E 減水剤標準形 「P」 (250mL/C=100kg)

備考) 1)結合材混合比(重量%): 2成分(普通セメント:Slag:=32:68)

3成分(普通セメント:Slag:FA=30:30:40)

2)試験温度: 20 °C 3)空気量: 高流動コンクリート: 2%, 対比コンクリート: 4.5%

2.2 使用材料

実験に使用した材料を表-2に示す。なお、高流動コンクリートに使用した混和剤は、ポリカルボン酸エーテルと架橋ポリマーの複合体を主成分とした高性能A-E減水剤「S-P」とした。また、対比用コンクリート（以下O-P-Cと略す）に用いた混和剤はリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分としたA-E減水剤標準形「P」とした。

2.3 検討項目と試験方法

高流動コンクリートの強度と耐久性に関する検討項目を表-3に示す。なお、高流動コンクリートの練り混ぜ、細孔径分布、促進中性化試験および塩化物イオンの浸透性に関する試験方法は以下のとおりとした。

(1) 高流動コンクリートの練り混ぜ方法

100Lパン型強制練りミキサを使用して、図-1に示す要領で高流動コンクリートを練り混ぜた。

(2) 細孔径分布

水銀圧入式ポロシメーターによった。

(3) 促進中性化試験

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）・同解説のコンクリートの促進中性化試験方法（案）によった。

(4) 塩化物イオン浸透性試験

$10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の供試体を材令28日まで標準養生した後、(NaClの3%溶液 20°C)に3日間浸漬 $\rightarrow 20^{\circ}\text{C}, 60\%$ で4日間乾燥=1サイクル)を4サイクル繰り返した場合の塩化物イオンの浸透深さと浸透量を測定した。なお、塩化物イオンの分析はコンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法のJCI規準案(3)で提案している「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(案)」によった。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの特性

(1) スランプフローの経時変化

図-2にコンクリートの練り上がり直後から経時90分までのアジテートによるスランプフローの経時変化を示す。経過時間に伴うスランプフローの変化は、2成分および3成分系高流動コンクリートとも同様な傾向を示し、練り上がり直後に比べ経時30分で混和剤のスランプ保持作用により約5~10cm程度増大し、その後漸減して経時90分ではほぼ練り上がり直後のスランプフローとなつた。

表-2 使用材料一覧

種類		物性値
結合材(B)	セメント	比重:3.16, 比表面積:3350cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	比重:2.91, 比表面積:6400cm ² /g
	フライアッシュ	比重:2.19, 比表面積:3370cm ² /g
細骨材(大井川水系陸砂)		比重:2.62, 吸水率:1.46%, FM:2.71
粗骨材(硬質砂岩碎石)		MS:20mm, 比重:2.64, FM:6.65

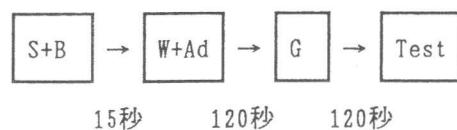


図-1 高流動コンクリートの練り混ぜ方法

表-3 検討項目

区分	検討項目
フレッシュ特性	①スランプフローの経時変化 ②アーリーソーク, 凝結時間
強度特性	①圧縮強度(標準養生, 蒸気養生) ②静弾性係数
耐久性特性	①長さ変化 ②凍結融解(材令14日)と気泡組織 ③細孔径分布 ④促進中性化 ⑤塩化物イオンの浸透性
熱的特性	①断熱温度上昇

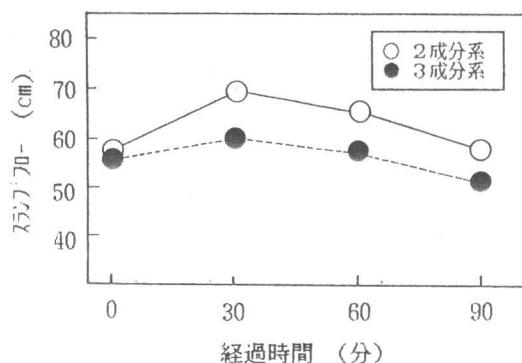


図-2 スランプフローの経時変化

(2) ブリージングおよび凝結時間

図-3にブリージングおよび凝結試験結果を示す。高流動コンクリートのブリージング率はOPC(8.77%)に比べ非常に少なくなつており2成分で約1/20、3成分系で約1/5となつた。

一方、凝結時間は結合材の種類に影響されOPCに比べやや遅延する傾向にあり、2成分で約1~2時間程度、3成分ではフライアッシュの混入率が高いこともあって約5~6時間程度遅延した。

3.2 強度特性

(1) 圧縮強度(標準養生、蒸気養生)

図-4に標準養生および養生条件を<前置時間;2hrs, 昇温速度;20°C/hr, 最高温度;65°C, 保持時間;4hrs>とした場合の蒸気養生の強度発現性状を示す。標準養生における圧縮強度は、2成分の場合、結合材中に占めるスラグ混入量が多いにも拘らず比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を使用していることから3日以降の材令でOPCを大きく上回っており、材令28日で707kgf/cm²を得ている。また、3成分の場合材令7日までOPCとほぼ同程度であったが、材令28日以降ではフライアッシュのポジラン活性反応でOPCを上回る結果となった。

蒸気養生における脱型時(材令1日)の圧縮強度は2成分で425kgf/cm²、3成分で160kgf/cm²となり、2成分の場合は実用上十分な強度が得られるものと判断される。また、脱型後の気中養生における強度の増進も認められ、材令3ヶ月の2成分で634kgf/cm²、3成分で466kgf/cm²が得られている。

(2) 静弾性係数

図-5に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は結合材の違いに拘らず、特に高強度の領域で適合性が高いとされているACI 363式の近辺に点在しており、混和材混入率が大きい高流動コンクリートの場合にも両者の関係には特に問題は認められない。

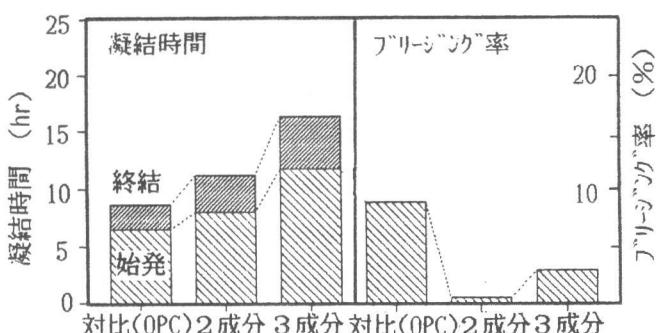


図-3 ブリージング率および凝結時間

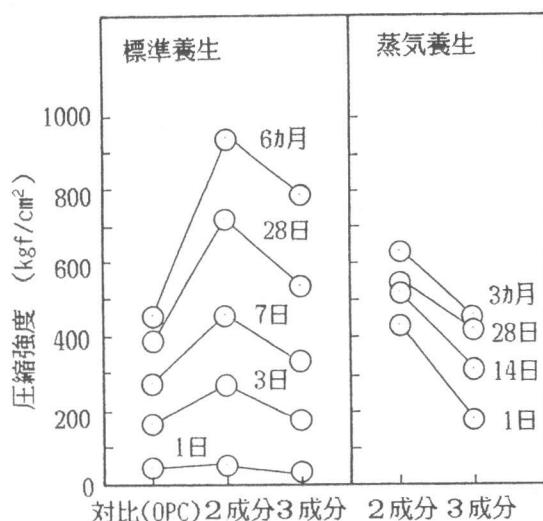


図-4 強度発現性状

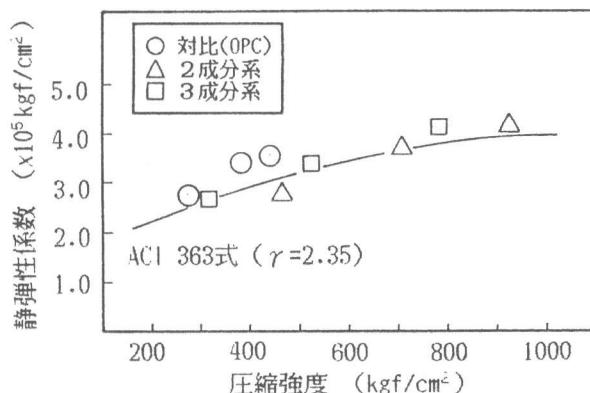


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.3 耐久性に関する特性

(1)長さ変化

図-6に乾燥収縮試験における長さ変化と重量減少率の結果を示す。高流動コンクリートの長さ変化は結合材の種類に拘らずほぼ同程度の値となっていて、材令4週以降でOPCに比べ小さくなる傾向にあり、現在まで得られている材令6ヶ月における長さ変化はOPCに比べ $1.5 \sim 2.0 \times 10^{-4}$ 程度小さくなっている。一方、高流動コンクリートの重量減少率は結合材の種類で異なる性状を示し、2成分に比べ3成分の重量減少率が大きくなる傾向にあった。

これは、2成分に比べ水和の進行速度が遅いフライアッシュを混入した3成分では、収縮に関与しない水分の逸散が大きいことなどに起因しているものと推察される。

(2)凍結融解に対する抵抗性と気泡組織

図-7に凍結融解試験結果を示す。

OPC、2成分および3成分の空気を連行させたものは300サイクルにおいても十分な耐凍害性を示しているが、3成分の空気を連行しない場合は耐凍害性に劣る結果となった。また、硬化コンクリートの気泡組織の指標となる硬化後の空気量と気泡間隔係数を表-4に示す。このように、空気を連行しない2成分および3成分系高流動コンクリートが、ほぼ同程度の水結合材比および気泡組織を示しているにもかかわらず耐凍害性の面でこれらの間に優劣が生じた原因には、水和物組織の緻密さなどが影響しており、特に3成分系を構成するフライアッシュの特性とその混入量に起因しているものと考えられるが、詳細な点は今後の課題である。

(3)細孔径分布

図-8に材令28日および材令6ヶ月の細孔径分布と総細孔容積(T.P.V)を示す。

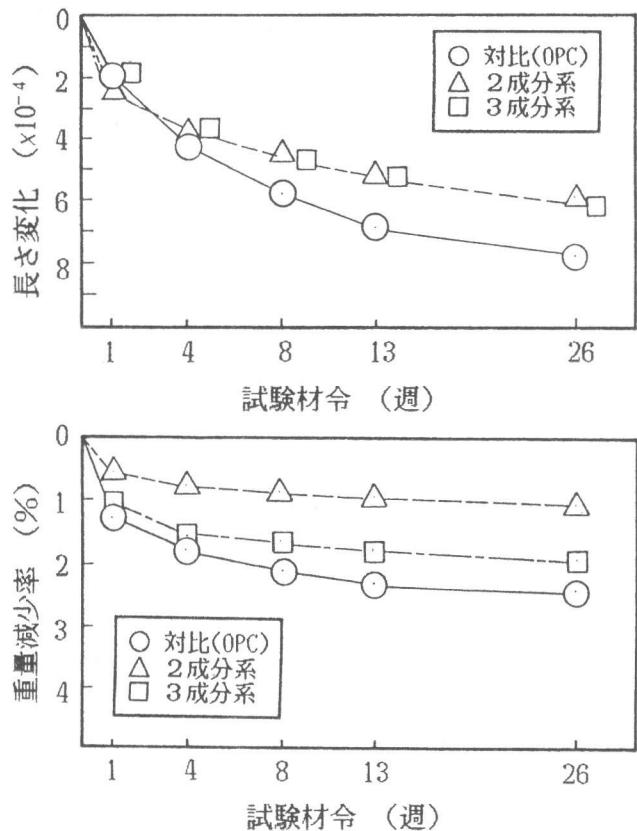


図-6 長さ変化と重量減少率

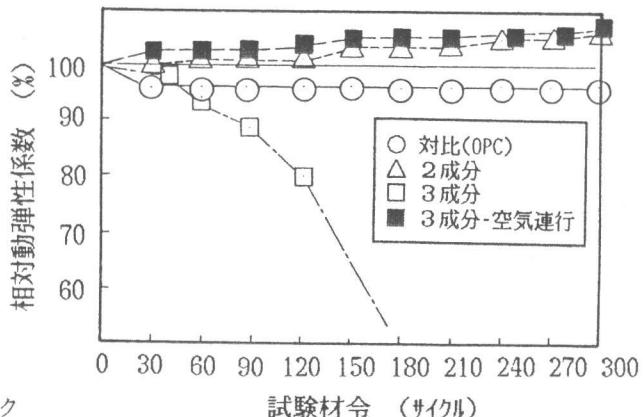


図-7 凍結融解試験結果

表-4 硬化コンクリートの気泡組織

コンクリートの種類	硬化後の空気量(%)	気泡間隔係数(μ)
対比(OPC)	4.6	287
2成分	1.5	489
3成分	1.8	513
3成分(空気連行)	5.7	159

高流動コンクリートの総細孔容積は2成分に比べ3成分が若干大きいもののOPCに比べ非常に少なく、材令28日でOPCの約1/2～1/3となり、コンクリート中の水和物が緻密な組織構造を形成しているといえる。また、一般的にいわれているように、圧縮強度と総細孔容積の関係には結合材の種類にかかわらず良好な相関が認められている。

(4) 塩化物イオンの浸透性

図-9に標準養生後、NaCl13%溶液に浸漬および乾燥を4サイクル繰り返した場合のコンクリート表面からの距離と塩化物イオンの浸透量の関係を示す。2成分および3成分系高流動コンクリートの塩化物イオンの浸透性はOPCに比べ小さく、表面から0.5cmにおける塩化物イオンの浸透量を比較した場合、2成分でOPCの約50%、3成分で約65%となった。塩化物イオンの拡散はセメントペーストの細孔構造に大きく影響を受けるといわれている。塩水浸漬の開始材令である材令28日の総細孔容積と4サイクル後の塩化物イオンの浸透量の関係は図-10に示すように、非常に良好な相関が認められており、水和物組織の緻密さが塩化物イオンの拡散の低減に大きく寄与していることが分かった。

(5) 促進中性化

図-11に材令8週までの促進中性化試験結果を示す。一般にコンクリートの中性化的程度は上記で述べた塩化物イオンの浸透性と同様に硬化体の緻密さ、すなわち細孔構造に大きく影響されるといわれている。

高流動コンクリートの材令8週における中性化深さは、2成分の場合OPCに比べて著しく小さい結果となったが、3成分ではOPCとほぼ同程度であった。

3.4 断熱温度上昇特性

図-12に空気循環式試験装置を用いた断

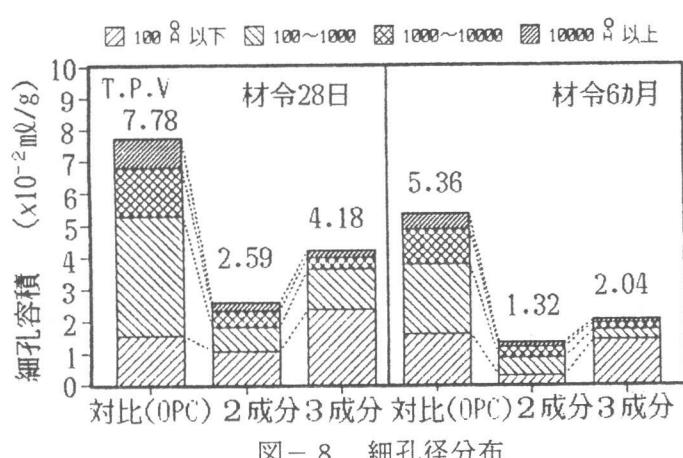


図-8 細孔径分布

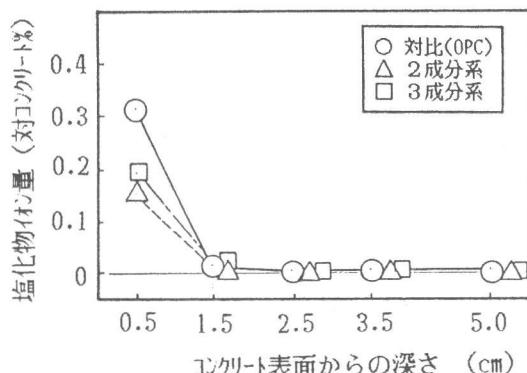


図-9 塩化物イオンの浸透性

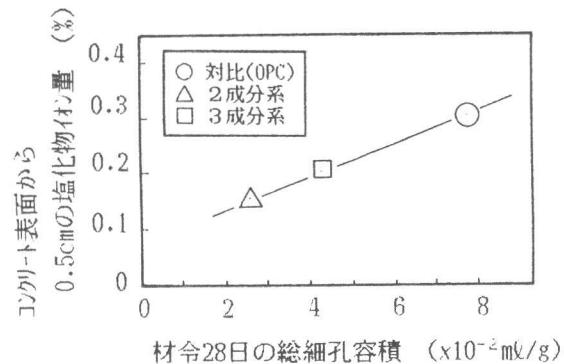


図-10 総細孔容積と塩化物イオン浸透量の関係

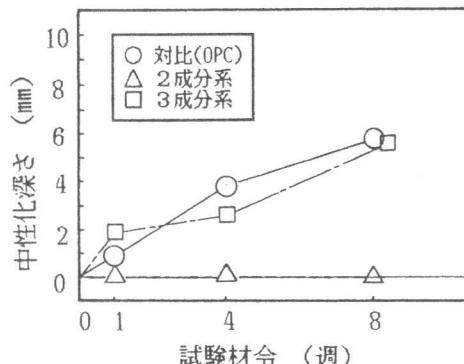


図-11 促進中性化試験結果

熱温度上昇試験結果を示す。断熱温度上昇量を表示する近似式は、既往の研究の中でいくつか提示されているが、その中でも、打ち込み初期の断熱温度上昇量が緩やかな場合に比較的相関性が高いとされている下式により求めた。表-5に近似式の実験定数を示す。

$$T = K (1 - e^{-\alpha t^\beta})$$

ここに、 T ; 断熱温度上昇量 ($^{\circ}\text{C}$)

t ; 材令 (日)

K, α, β ; 実験定数

高流動コンクリートの断熱温度上昇量の終局値 K は、3成分で OPC とほぼ同程度、2成分で OPC を約 6°C 上回ったが、温度上昇速度 α はいずれも OPC より小さくなっている。3成分の場合には水和熱の面で有効と考えられる。

4.まとめ

結合材の構成が2成分系（普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末）および3成分系（普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末+フライアッシュ）の高流動コンクリートのおもに強度発現および耐久性に関して検討した結果を取りまとめると、次のようになる。

- 1) 高流動コンクリートの経過時間に伴うスランプフローは、経時30分で若干増加するものの、経時90分まで練り上がり直後の性状を保持している。
- 2) 高流動コンクリートの強度発現性状は、標準養生で材令3~7日以降 OPC (JIS A 6204のAE減水剤を用いたスランプ18cmの配合) を上回り、また、蒸気養生においても2成分の場合、脱型時で実用的な強度を得ている。
- 3) 高流動コンクリートの長さ変化は OPC に比べて小さく、また、耐凍害性は2成分系の場合、空気を連行しなくとも十分な耐久性を得ている。
- 4) 高流動コンクリートの塩化物イオンの浸透性および中性化は OPC に比べて小さく、細孔構造の緻密さと密接な関係にあった。
- 5) 高流動コンクリートの断熱温度上昇特性は、温度上昇速度が OPC に比べて小さく、また、最高温度は3成分系で OPC とほぼ同程度であった。

「謝辞」

本研究を行うに当たっては、東京大学岡村研究室の多大な御指導を頂いた。ここに付記して、厚く御礼申し上げます。

「参考文献」

- 1) 小沢一雅・前川宏一・岡村甫：ハイパフォーマンスコンクリートの開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、No. 1 pp. 699-704、1989. 6
- 2) 中島良光・梶田秀幸・三浦信一・牧野英久：二成分系のハイパフォーマンスコンクリートの配合に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 1 pp. 173-178、1991. 6

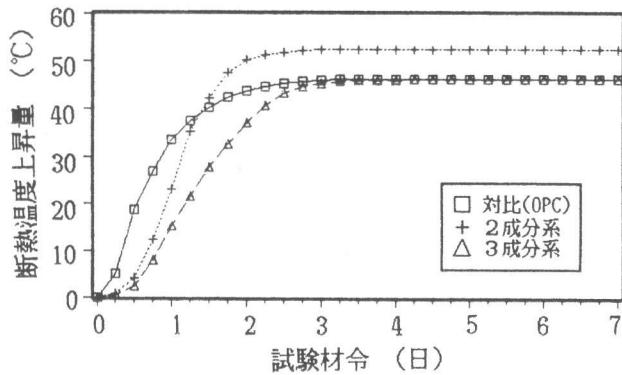


図-1-2 断熱温度試験結果

表-5 近似式の実験定数

種類	K	α	β
対比(OPC)	46.2	1.24	1.39
2成分系	52.4	0.59	2.57
3成分系	46.2	0.37	2.16