

論文 水中不分離性コンクリートの低発熱化, 高流動化に関する研究

舟橋政司*1・大西雅也*2・森本英樹*2・渡部 正*3

要旨:従来の水中不分離性コンクリートの材料分離抵抗性を保持したまま流動性を向上させるため, AE 減水剤と流動化剤 (トリアジン系) の組合せの代わりに高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) を使用した結果, スランプフローは増大した。また, 結合材として低熱ポルトランドセメントとフライアッシュの使用, それに加え, 水結合材比一定のもと単位セメント量を減じたことによるペースト減少分を石灰石微粉末で補充することで低発熱化, 強度増加, 材料分離抵抗性の向上が図れた。さらに, 粗骨材容量の調整により, 過密配筋水中構造物への適用も可能となる結果が得られたので報告する。

キーワード: 水中不分離性コンクリート, 石灰石微粉末, 断熱温度上昇, 充填試験

1. はじめに

水中不分離性コンクリートは分離抵抗性を高めるために, 水中不分離性混和剤を 2~3 kg/m³ 添加しており, 粘性が非常に高いコンクリートである。そのため, 流動性を確保するために単位水量が 220~230kg/m³ 程度と多く, それに伴い単位セメント量が多くなり発熱量が大きくなるという課題がある。

近年, 種々の低発熱形セメントの使用や混和材によるセメントの置換で発熱量の抑制が試みられている。

そこで, 本研究では, 水結合材比一定のもと, 低熱ポルトランドセメントをフライアッシュで 30%置換するとともに, 混和剤による単位水量, セメント量の低減, それに付随するペースト量の減少分を石灰石微粉末で補うことにより水中不分離性コンクリートとしての性能を保持したまま流動性の向上, 材料分離抵抗性の保持, 低発熱化が可能であるか検討した。

さらに, 過密配筋された水中鉄筋コンクリート構造物への適用を考えた場合, 水中不分離性コンクリートの充填性を評価する指標はなく¹⁾, 打設実験により鉄筋や鋼材周りの充填性を確認している現状にある。そこで, 本研究では高流

動コンクリートの充填性確認試験の 1 つである U 型充填試験器²⁾を用いて充填性を評価した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

試験に用いた材料を表—1 に示す。

セメントは低熱ポルトランドセメントを使用し, フライアッシュを内割りで 30%置換した。粗骨材は碎石で 20~10mm(G1)と 10~5mm(G2)を 55:45 の比率で用いた。

表—1 使用材料

使用材料	記号	主成分および物性
セメント	C	低熱ポルトランドセメント 比重3.22, 比表面積3,460cm ² /g
混和材	FA	フライアッシュ: 比重2.27, 比表面積3,870cm ² /g 強熱減量3.0%, 湿分0.2%, 単位水量比98% 圧縮強度比74.5%(28日)
	LS	石灰石微粉末 比重2.71, 比表面積3,610cm ² /g
細骨材	S	大井川産川砂 比重2.61, F.M. 2.94
粗骨材	G1	両神産碎石, 混合割合G1:G2=55:45 20~10mm, 比重2.72
	G2	10~5mm, 比重2.71
混和剤		AE減水剤: リグニンスルホン酸化合物が主成分の複合体
		流動化剤: 高縮合トリアジン系化合物
		高性能AE減水剤: ポリカルボン酸エーテル系架橋ポリマーの複合体
		水中不分離性混和剤: 水溶性セルローズエーテル

*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 研究第一グループ 工修 (正会員)

*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 研究第一グループ 工修

*3 前田建設工業 (株) 技術研究所 研究第一グループ 工博 (正会員)

2.2 試験内容

結合材はセメントとフライアッシュとし、全ての配合試験の水結合材比は63%一定とした。ただし、単位水量(W)の表示は、混和剤を含まない水量で、水中不分離性混和剤の添加率は、単位水量に対する比率で示し、AE減水剤、流動化剤および高性能AE減水剤は結合材に対する比率で示すこととした。

本研究では、流動性、充填性の向上および低発熱化を図るため、以下の検討を行った。

(1)各種混和材料が流動性状に及ぼす影響

従来の水中不分離性コンクリートは、AE減水剤と流動化剤の組み合わせが一般的であるが、ここでは、高性能AE減水剤を使用した場合のコンクリートの流動性に及ぼす影響をスランブフロー試験により検討した。

また、低発熱化のために単位セメント量を低減することにより生じるペースト減少分を石灰石微粉末で補充し、ペースト量一定とした場合に、流動性がどのように変化するか確認した。

(2)粗骨材容量が充填性状に及ぼす影響

粗骨材容量をパラメータとして、U型充填試験器を用いて、粗骨材容量が水中不分離性コンクリートの充填性に及ぼす影響を検討した。

このとき、ペースト/細骨材容積比(V_p/V_s)を一定にし、粗骨材容量の変化に応じて、ペースト量及び細骨材量を増減させた。

(3)石灰石微粉末混入が諸特性に及ぼす影響

水中不分離性コンクリートの低発熱化を図るため、本研究では低熱ポルトランドセメントをさらにフライアッシュで30%置換した。さらに、単位セメント量を低減するため、水結合材比一定のもと単位水量(単位セメント量)を減じることによるペースト減少量を石灰石微粉末で補充する方法を検討した。すなわち、石灰石微粉末を混入した場合でもペースト容量は、石灰石微粉末無混入の単位水量 220kg/m^3 の配合と同一とした。

また、石灰石微粉末が無混入の場合および混入した場合の断熱温度上昇試験を行い、各配合

の発熱特性を確認した。さらに、同一配合で凝結試験も実施した。

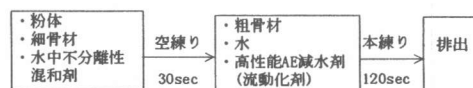
2.3 試験方法

試験項目及び試験方法を表—2に示す。

練り混ぜは容量50リットルの水平二軸ミサを用いて図—1に示す手順で練り混ぜた。

表—2 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランブフロー試験	JSCE-F503「コンクリートのスランブフロー試験方法(案)」に準拠し、スランブフローを測定した。
U型充填試験 ²⁾	高流動コンクリートの充填性の指標として用いられているU型充填試験器を用いた。流動障害となる鉄筋は異形棒鋼D10を5本配置した障害条件S2とした。
圧縮強度試験	材齢7日、28日および91日の圧縮強度試験用供試体を気中および水中で各材齢3本採取した。水中作製供試体の作製方法は、JSCE-F504「水中不分離性コンクリートの圧縮強度試験用水中作製供試体の作り方(案)」に準拠した。
凝結時間	ASTM C 403「貫入抵抗によるコンクリートの凝結時間試験方法」に準じて測定した。



図—1 練り混ぜ方法

3. 試験結果および考察

3.1 各種混和材料が流動性状に及ぼす影響

単位水量 220kg/m^3 、 $s/a=45\%$ 、水中不分離性混和剤量 2.5kg/m^3 一定の配合で、流動化剤および高性能AE減水剤の添加率を変えて、スランブフロー試験を行った。混和剤の添加率は、結合材の1%からそれぞれの混和剤の添加可能上限値までとした。なお、この試験では石灰石微粉末は使用していない。

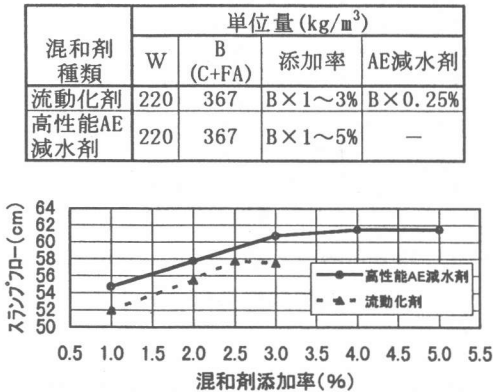
図—2に、混和剤添加率とスランブフローの関係を示す。

この図より、高性能AE減水剤の方が、同一添加率に対してスランブフローが大きくなることが認められる。また、流動化剤は添加率2.5%、高性能AE減水剤では3.0%以上添加してもスランブフローの増加がほとんど認められない。

ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤と、ト

リアジン系の流動化剤を同時添加で比較したため、主成分の違いによる効果の差がでていることも考えられる。しかしながら、同一添加率に対するスランプフローの優位性から、高性能AE減水剤を3%添加するのが流動性に対しては最も良いと判断した。

そこで、以後の配合試験は全て高性能 AE 減水剤を結合材の3%添加することとした。



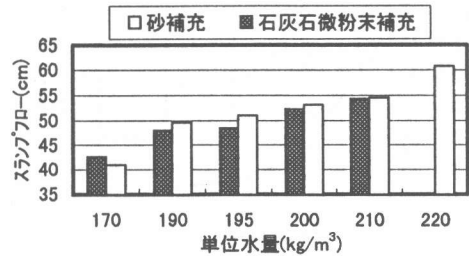
図－2 混和剤添加率とスランプフローの関係

図－3は、水結合材比一定で、単位水量を減少させた時のペースト量の減少分を、砂で補う方法と石灰石微粉末で補う方法で、スランプフローを比較したものである。このとき、単位水量 220kg/m³、結合材量 367kg/m³の配合を基準とし、粗骨材容量は 330リットル一定、水中不分離性混和剤量は 2.5kg/m³一定とした。

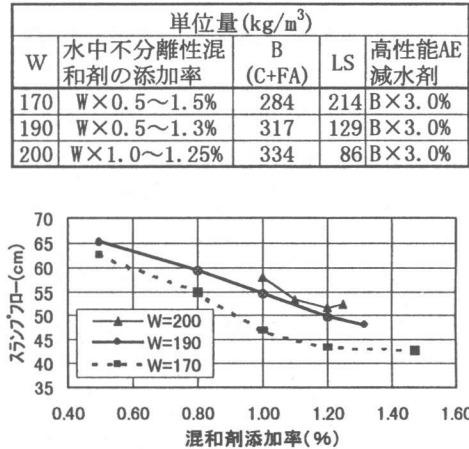
その結果、石灰石微粉末がスランプフローに及ぼす影響はほとんど認められなかった。これは、水中不分離性コンクリートの場合、水中不分離性混和剤の添加量がスランプフローに及ぼす影響が支配的であり、高流動コンクリートのように、粉体量の増加が流動性向上に作用しなかったと考えられる。

図－4は、水中不分離性混和剤の添加率とスランプフローの関係を示したものである。この図より、水中不分離性混和剤の添加率を減少させれば、スランプフローが増大することがわかる。スランプフロー試験での材料分離性状につ

いては、添加率が 1.0%以上であれば分離は生じていなかった。



図－3 石灰石微粉末がスランプフローに及ぼす影響



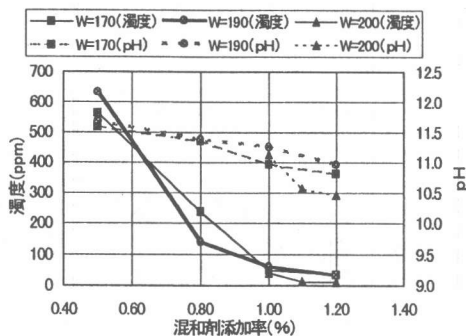
図－4 水中不分離性混和剤添加率とスランプフローの関係

図－5は、図－4と同じ配合での水中不分離性混和剤添加率とpHおよび濁度の関係を示したものである。

Aプロジェクト工事での規準値、pH 12以下、濁度 150ppm 以下の条件で考えると、各単位水量とも添加率 1.0%で材料分離もせず、条件を満たすことがわかる。

また、水中不分離性コンクリートの一般的なスランプフロー 50±5cm 程度であれば、水中不分離性混和剤添加率 1.0%とすると、単位水量を 170~190kg/m³程度にできると推測できる。

単位水量を減少させることにより、結合材量、各混和剤量とも使用量を減らすことができ、経済的であると思われる。



図－５ 水中不分離性混和剤添加率と濁度，pH の関係

3.2 粗骨材容量が充填性状に及ぼす影響

スランプフローが 60cm 前後で材料分離も生じなかった単位水量 200kg/m³、水中不分離性混和剤添加率 1.0%，粗骨材容量 330リットルの配合を基準として、粗骨材容量を変化させて U 型充填試験を行った。ペースト／細骨材容積比 (V_p/V_s) を 1.24 一定として、ペースト量、細骨材量ともに変化させた。粗骨材容量を変化させた時のスランプフロー試験，U 型充填試験の結果を図－6 および図－7 に示す。

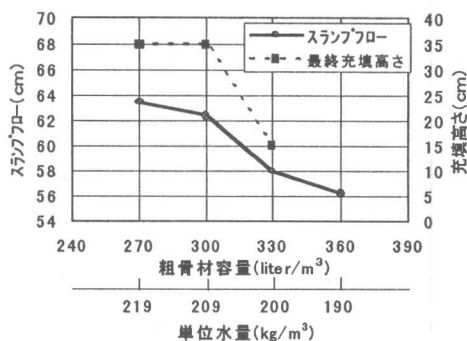
図－6 より，粗骨材容量が少ないほどスランプフローが大きくなることがわかる。ただし，スランプフローが増大しても材料分離はしておらず，どの配合においても良好であった。

流動障害に D10 鉄筋 5 本を用いた場合，粗骨材容量 270 及び 300リットルでは U 型充填試験器を全通（充填高さ 35cm）するが，330リットルでは充填高さ 15.5cm までしか充填できなかった。しかし，330リットルの配合も流動障害が D13，3 本の場合には全通（240 秒）した。

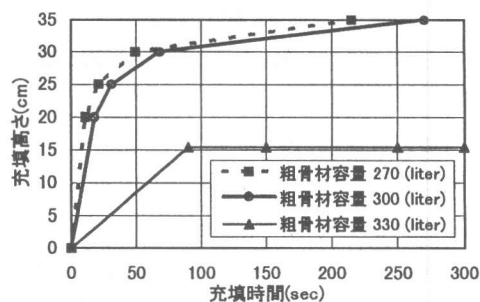
鉄筋間通過状況を目視で観察したが，どの配合においても，コンクリート上部まで骨材が充填されていることが確認できた。

鉄筋コンクリート構造物の配筋条件等によって，充填の難易度が異なるため，一義的に配合を決めることはできないが，粗骨材容量を変化させることで充填性を調整することが可能であるといえる。

粗骨材容量 (lit./m ³)	単位量(kg/m ³)				
	W	B (C+FA)	LS	水中不分離性 混和剤 (W×1.0%)	高性能 AE減水剤 (B×3.0%)
270	219	366	95	2.19	11.0
300	209	349	91	2.09	10.5
330	200	334	86	2.00	10.0



図－6 粗骨材容量とスランプフロー，充填高さの関係（流動障害 D10－5 本）



図－7 U 型充填試験結果
（流動障害 D10－5 本）

3.3 断熱温度上昇特性及び凝結性状

従来の中水分離性コンクリートと同等の単位水量の配合（単位水量 220kg/m³：石灰石微粉末無混入），本研究において流動性状，材料分離抵抗性の良好さから基準とした配合（単位水量 200kg/m³：石灰石微粉末 86kg/m³），さらに本研究において従来の中水分離性コンクリートと同程度の流動性状の配合（単位水量 170kg/m³：石灰石微粉末 214kg/m³）の 3 種類のコンクリートについて断熱温度上昇特性，凝結特性を調査した。具体的には，結合材量 367kg/m³，

334kg/m³及び284kg/m³の3種類の配合である。

図-8、図-9にそれぞれ断熱温度上昇試験、凝結試験の結果を示す。なお、参考のために、3成分系低発熱形セメント（中庸熱ポルトランドセメント+高炉スラグ+フライアッシュ）の試験結果も示す。

これらの図から、結合材量が少ない配合ほど終局断熱温度上昇量は小さくなっており、結合材量334kg/m³で終局断熱温度上昇量は35℃程度であった。しかし、発熱開始時期は結合材量が少ないほど早くなっている。

また、凝結性状は石灰石微粉末無混入の配合では終結（27MPa）が48～49時間と非常に遅くなっているのに対し、石灰石微粉末86kg/m³の配合では、終結時間が33～34時間と大幅に短くなっている。さらに、214kg/m³と石灰石微粉末の多い場合には、終結時間が20時間以内となっている。

セメントの種類	単位量 (kg/m ³)			技術資料での算定値 (°C)
	W	B (C+FA)	LS	
3成分系低発熱形低熱ポルトランド	220	376	0	29.08
低熱ポルトランド	220	367	0	40.25
低熱ポルトランド	200	334	86	38.09
低熱ポルトランド	170	284	214	34.79

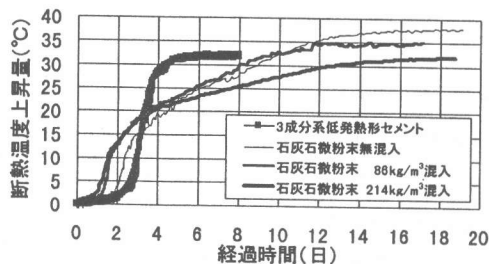


図-8 断熱温度上昇試験結果

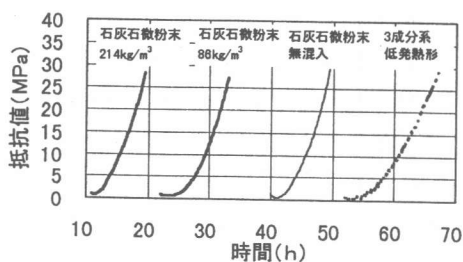


図-9 凝結試験結果

これらの性状は、混和剤添加量の影響も考えられるが、石灰石微粉末を使用した場合に、C₃Sの水和熱に相当する第2ピークの発現時期が早くなる³⁾という報告もあり、石灰石微粉末が断熱温度上昇特性や凝結特性に影響を及ぼしている可能性も考えられる。

3.4 石灰石微粉末が強度特性に与える影響

図-10は、水結合材比一定で、単位水量を減少させて、付随するペースト量の減少量を砂で置換する方法と石灰石微粉末で置換する方法の2種類で、石灰石微粉末の有無が圧縮強度に及ぼす影響を示したものである。この時、粗骨材容量330リットル、水中不分離性混和剤添加量2.5kg/m³一定とした。

図中の棒グラフは、水中採取供試体の材齢7、28および91日強度を表し、折れ線グラフは、各材齢の水中気中強度比を表している。

石灰石微粉末無混入の配合では、単位水量の違いによる水中採取試料の圧縮強度に顕著な差が認められない。一方、石灰石微粉末混入の水中採取試料では、単位水量が少ないものほど、すなわち石灰石微粉末混入量の多いものほど圧縮強度が大きくなった。また、水中気中強度比についてはどの材齢でも、石灰石微粉末無混入では、単位水量による変動が大きく、混入した配合では安定している。

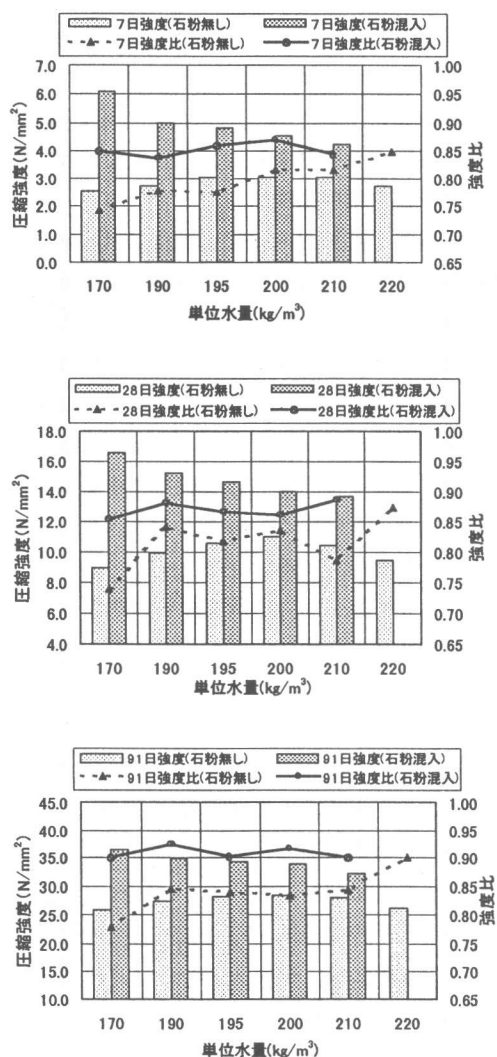
これらの結果より、石灰石微粉末を混入することで、材料分離抵抗性が改善されるものと考えられる。

石灰石微粉末をセメントと混合した場合には、微粉末効果、CaCO₃の核生成助材としての作用、あるいは石灰石微粉末自身が反応してモノカーボネート水和物が生成されるためなどにより、セメントの水和が促進されるといわれている⁴⁾。この圧縮強度試験結果から、石灰石微粉末を混入することにより、セメントの水和が促進されたこと、組織が緻密になっていることが考えられる。

また、石灰石微粉末の強度発現効果は、初

期材齢において著しく、28日、91日ではほとんど効果がないといわれている。しかしながら、

石灰石微粉末	単位量(kg/m ³)						ベ-スト/ 細骨材 容積比 (V _p /V _s)
	W	B (C+FA)	LS	S	水中不 分離性 混和 剤添加量	高性能 AE減水剤 (B×3.0%)	
無	220	366	-	735	2.5	11.0	1.24
	210	350	-	776	2.5	10.5	1.12
	200	334	-	818	2.5	10.0	1.01
	195	326	-	838	2.5	9.8	0.96
	190	317	-	859	2.5	9.5	0.91
	170	284	-	942	2.5	8.5	0.75
有	210	350	43	735	2.5	10.5	1.24
	200	334	86	735	2.5	10.0	1.24
	195	326	107	735	2.5	9.8	1.24
	190	317	129	735	2.5	9.5	1.24
	170	284	214	735	2.5	8.5	1.24



図一10 石灰石微粉の有無と圧縮強度の関係

本研究の範囲内では、材齢 28, 91 日においても強度発現への効果が認められた。これは、低熱ポルトランドセメントをフライアッシュで置換しているため、強度発現が遅れることに起因しているものと思われる。

本研究において、水結合材比一定のもと単位水量（結合材量）を減じ、石灰石微粉末を混入することにより、より高強度で材料分離の小さい水中不分離性コンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 高性能 AE 減水剤を使用すれば、AE 減水剤と流動化剤の組合せよりスランプフローを増大させることが可能である。
- (2) 粗骨材容量を変えることで充填性を調整することが可能である。
- (3) 低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、石灰石微粉末を使用することにより、水中不分離性コンクリートの低発熱化を図ることが可能となった。
- (4) 石灰石微粉末を混入すると、無混入のものに比べて圧縮強度が増大し、水中気中強度比も高い値で安定する。

参考文献

- 1) 水中不分離性コンクリート設計施工指針（案），コンクリートライブラリー67，pp.98-100，1991
- 2) 高流動コンクリートに関する技術の現状と課題，コンクリート技術シリーズ，土木学会，pp.11，1996
- 3) 小林孝一，服部篤史，宮川豊章，藤井学：石灰石微粉末の混和がセメントの初期水和に与える影響，セメント・コンクリート論文集，No.50，pp.570-575，1996
- 4) 坂井悦郎，中川晃次，三原敏夫，大門正樹：フライセメント，セメント・コンクリート，No.546，pp.129-136，1992