

論文 単位水量を低減した水中不分離性コンクリートに関する基礎的検討

花岡 大伸^{*1}・川島 仁^{*2}・羽瀧 貴士^{*3}・佐藤 肇^{*4}

要旨：従来の水中不分離性コンクリートは、水中での分離抵抗性や自己充填性等を高めるため、普通コンクリートに比較して単位水量と単位セメント量が多く、また水中不分離性混和剤を添加した配合となっている。そのため、構造物条件によっては自己収縮や水和熱が問題となる場合があり、また高コストとなる課題を有している。そこで著者らは、高性能 AE 減水剤を使用することで単位水量および単位セメント量を大幅に低減し、同時に水中不分離性混和剤の添加量も低減した水中不分離性コンクリートの各種性状について、室内試験による基礎的な検討を行った。その結果、このようなコンクリートの現場への適用可能性が確認できた。

キーワード：水中不分離性コンクリート、単位水量、高性能 AE 減水剤、水中不分離度

1. はじめに

従来の水中不分離性コンクリートの配合は、普通コンクリートに比較して単位水量と単位セメント量が非常に多く、また流動化剤と水中不分離性混和剤（以下、水中不分離剤）を添加したものである¹⁾²⁾。これにより、水中での分離抵抗性、自己充填性およびセルフレベリング性を高め、水中打設においても材料分離が少なく、かつポンプ施工が可能なコンクリートを実現している。その結果、①高い流動性を活かした空隙充填、②材料分離防止にとくに配慮した高品質の水中コンクリート、③水中での鉄筋コンクリート構造物、④工事現場周囲の水質汚濁防止にとくに配慮した施工、⑤鋼管杭や鋼矢板の補修および防食ライニング、⑥張石固結や捨石マウンドの固結、⑦災害復旧、⑧コンクリート構造物の補修・補強など、数多くの水中構造物に使用されてきた。しかしながら、従来の水中不分離性コンクリートは、単位水量が220kg/m³程度（粗骨材最大寸法 20mm の場合）および単位セメント量が 400～440kg/m³程度（水セメント比（以下、W/C）が 50～55% の場合）にもなり¹⁾、普通コンクリートと比較して多いため、構造物の条件によっては自己収縮や水和熱が問題となることが懸念される。また、一般に水中不分離剤の使用量は、単位水量に対して 1.0～1.5%（2～4kg/m³）程度であるため¹⁾、コンクリート自体が高コストであることも課題のひとつである。

そこで著者らは、流動化剤に代えて高性能 AE 減水剤を使用することで単位水量および単位セメント量を大幅に低減し、同時に水中不分離性混和剤の添加量も低減した水中不分離性コンクリートの各種性状について、室内試験による基礎的な検討を行った。このような水中不分離性コンクリートの実用化により、従来の水中不分離

性コンクリートと同等以上の品質を有し、同時にコストダウンを実現できる可能性が期待される。本稿では、水セメント比が 45～55%、単位水量が 195kg/m³、スランプフローの目標値が 45～50cm の配合について、フレッシュコンクリートの性状（スランプフロー、空気量、水中不分離性）および強度特性（圧縮強度）を確認した結果について示す。なお、使用セメントは、普通ポルトランドセメントとフライアッシュ B 種セメントの 2 種類について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表 1 に水中不分離性コンクリートの使用材料を示す。細骨材には千葉県君津産山砂、粗骨材には北海道北斗市峯朗産砕石 2005（Gmax：20mm）を用いた。また水中不分離剤には、セルロース系（化学名：メチルセルロース）の混和剤を用いた。さらに従来の水中不分離性コンクリートに使用していた流動化剤に代えて、減水効果が高く良好なスランプ保持性能が期待されるポリカルボン酸エーテル化合物の高性能 AE 減水剤を使用した。ここで、セルロース系の水中不分離剤を用いる場合には、水中不分離剤の添加量によって空気量が決まり、AE 減水剤や高性能 AE 減水剤は空気連行作用を目的として使用されることがなく、その減水効果や遅延または促進効果を利用する目的で使用するのが一般的であることから¹⁾、減水効果の高い AE 減水剤を使用することとした。また、比較用として用いた従来配合のコンクリートには、メラミンスルホン酸系化合物の流動化剤を使用した。

*1 東亜建設工業（株）技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 博（工）（正会員）

*2 東亜建設工業（株）技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ（正会員）

*3 東亜建設工業（株）技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ リーダー 博（工）（正会員）

*4 第一工業製薬（株）機能化学品事業部

表－1 水中不分離性コンクリートの使用材料

材 料	概 要
水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3300cm ² /g） フライアッシュ B 種セメント（密度：2.96g/cm ³ ，比表面積：3330cm ² /g）
細骨材	千葉県君津産山砂（表乾密度 2.60g/cm ³ ，粗粒率 2.59）
粗骨材	北海道北斗市義朗産砕石 2005（表乾密度：2.70 g/cm ³ ，粗粒率：6.72，実積率：60.8%）
水中不分離剤	セルロースエーテル系
流動化剤	メラミンスルホン酸系化合物
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系エーテル化合物

表－2 検討ケースおよびコンクリートの配合

配合 Case	W/C (%)	SF* (cm)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	水中 不分離剤 (kg/m ³)	流動化剤 (kg/m ³)	高性能 AE 減水剤 (kg/m ³)
従来	55	50	42	221	402 (N)	626	966	W×1.10%	C×2.50%	—
1	55	50	42	195	355 (N)	718	1030	W×0.90%	—	C×2.00%
2		50						W×1.00%		C×2.50%
3		45						W×0.90%		C×1.50%
4	50	50			390 (N)	706	1013	W×0.90%		C×2.00%
5		45								C×1.25%
6	45	50			433 (N)	691	991	W×0.95%		C×2.50%
7		45								C×1.25%
8	55	50			355 (FB)	716	1025	W×0.90%		C×2.30%
9								W×0.95%		
10								W×1.00%		
11								W×1.05%		

SF*：スランプフローの目標値，N：普通ポルトランドセメント，FB：フライアッシュ B 種セメント
空気量の設計値：3.5%

表－3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー	JIS A 1150-2005 に準拠
空気量	JIS A 1187-1997 に準拠
水中分離度	JSCE-D 104-1999 附属書 2 に準拠 ¹⁾
圧縮強度	水中気中作製供試体採取 1.0m の水中自由落下試験

2.1 検討配合

表－2 に検討ケースおよびコンクリートの配合を示す。
表－2 に示すとおり，今回検討を行ったコンクリートの配合は，単位水量を 195kg/m³としたものであり，従来配合と比較して単位水量を 26kg/m³低減させた。また，従来配合と同じ水セメント比の配合で比較すると，単位セメント量は 47kg/m³低減させた配合である。さらに水中不分離剤についても，従来配合よりも少ない添加量とした。

検討ケース 1～7 では，普通ポルトランドセメントを用いて，水セメント比（45%，50%，55%）およびスランプフローの目標値（45cm，50cm）を変えた場合の検討とした。なお，ケース 6，7（水セメント比 45%）については，単位セメント量が多く分離抵抗性の低下が懸念されたため，水中不分離剤の添加量を単位水量の 0.95%とした。また検討ケース 8～11 では，フライアッシュ B

種セメントを用いた場合の検討とし，水中不分離剤の添加量を変化させた。

なお，各配合とも，スランプフローが目標値の±3cm となるように高性能 AE 減水剤を調整した。また，空気量は「水中不分離性コンクリート設計施工指針（案）」¹⁾の基準値（以下，基準値）である 4.0%以下を目標値とした。

2.3 試験項目

表－3 に試験項目を示す。試験項目は、フレッシュコンクリートの性状（スランブフロー、空気量、水中分離性）および強度特性（圧縮強度、1.0m の水中自由落下試験）とした。ここで、1.0m の水中自由落下試験は、従来配合および検討ケース 1、10 において、水中分離度の低下の程度を定量的な指標で比較するために、通常の土木学会規準「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）」¹⁾よりも厳しい条件で水中作製供試体を作製するために行った。水中自由落下試験では、内径 $\phi 300\text{mm}$ 、高さ 1200mm のアクリル管に高さ 1.0m の位置まで水道水を張り、製造直後のコンクリートを静水中に静かに自由落下させた。コンクリートの打設高さはアクリル管底面から 250mm 程度とし、 $\phi 100 \times \text{H}200\text{mm}$ の円柱供試体を採用して圧縮強度試験を行った。

3. 従来配合との比較

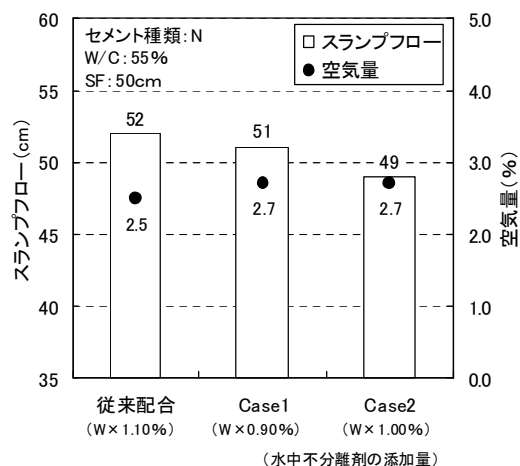
ここでは、今回の検討配合が水中不分離性コンクリートとしての性能（スランブフロー、空気量、水中分離度および圧縮強度）を十分に満足しているか確認するため、従来配合との比較を行った。従来配合との比較は、セメント種類、水セメント比およびスランブフローの目標値が従来配合と同じ検討ケース 1、2 とした。なお、今回検討を行った水中不分離性コンクリートの製造は、従来配合と同様な方法（ミキサの種類、練混ぜ時間など）で行い、練混ぜのしやすさは従来配合と同様であった。

3.1 フレッシュコンクリートの性状

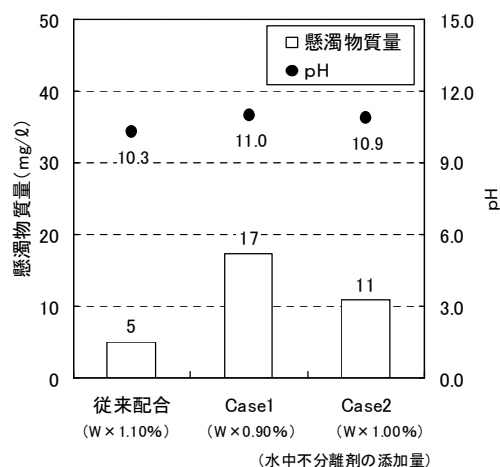
図－1 にスランブフローと空気量の測定結果を示す。これより、いずれものケースにおいてもスランブフローの目標値 $\pm 3\text{cm}$ 、空気量は基準値（4.0%）を満足した。さらに、図－2 には懸濁物質量と pH の測定結果を示す。これによると、検討ケース 1、2 の懸濁物質量は、従来配合と比較するとやや多い値ではあったが、懸濁物質量および pH ともに基準値（50mg/l 以下、12 以下）³⁾を満足している。とくに懸濁物質量については、基準値である 50mg/l を大きく下回っていることから、水中における分離抵抗性に問題はないと考えられる。このことから、水中不分離剤の使用量を単位水量の 0.90%程度にしても水中分離度の基準を満足できることが確認された。

3.2 圧縮強度

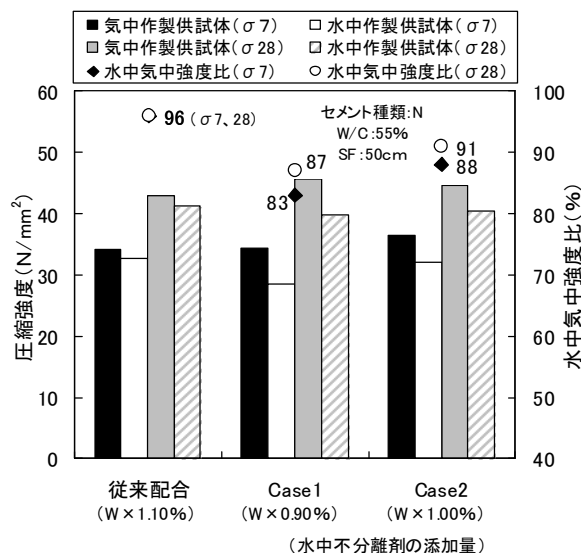
図－3 に圧縮強度と水中気中強度比を示す。これによると、検討ケース 1、2 の気中・水中作製供試体の圧縮強度は、材齢 7 日、28 日ともに従来配合の強度とほぼ同等であることが分かった。また、いずれの水中気中強度比も 80%以上であることから、水中不分離性コンクリートとしての圧縮強度は十分に満足していることが確認



図－1 スランブフローと空気量の測定結果



図－2 懸濁物質量と pH の測定結果



図－3 圧縮強度と水中気中強度比

された。さらに水中気中強度比について着目してみると、検討ケース 1、2 の水中気中強度比は、材齢 7 日より材齢 28 日のほうが大きくなる傾向がみられた。すなわち、気中作製供試体よりも水中作製供試体のほうが、材

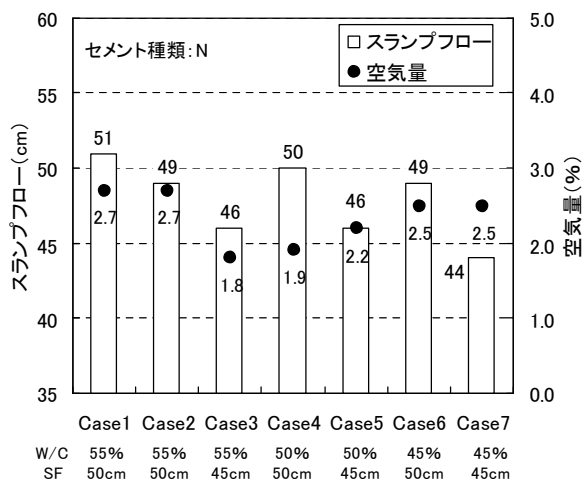


図-4 スランプフローと空気量の測定結果

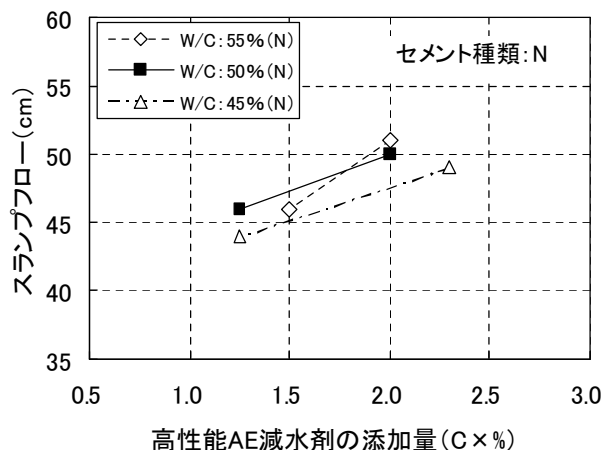


図-5 高性能 AE 減水剤の添加量とスランプフローの関係

齢 7 日以降の強度発現が大きい可能性が示唆された。ただし、検討ケース 1, 2 の水中気中強度比は、従来配合の値より小さくなっているため、水中分離抵抗性については従来配合よりもやや劣っている傾向にあり、懸濁物質量の結果と同様に水中不分離剤の添加量の差が影響していると考えられる。

4. 水セメント比およびスランプフローを変えた場合の結果

4.1 フレッシュコンクリートの性状

図-4に検討ケース1～7のスランプフローと空気量の測定結果を示す。これによると、いずれの検討ケースにおいてもスランプフローは、目標値に対して ± 3 cm以内であることが分かる。また、空気量についても、基準値（4.0%以下）を満足していた。ここで、高性能 AE 減水剤の添加量とスランプフローの関係を図-5に示す。これによると、水セメント比が小さくなるほど、スランプフローを 5cm 大きくするために必要な高性能 AE 減水剤の添加

量が増える傾向あった。また水セメント比が 45% の配合は、水中不分離剤の添加量を単位水量に対して 0.95% としていることから、目標スランプフロー 50cm の性状を得

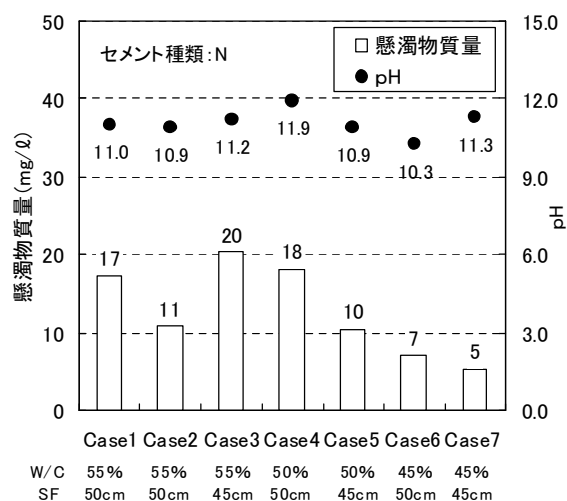


図-6 懸濁物質量と pH の測定結果

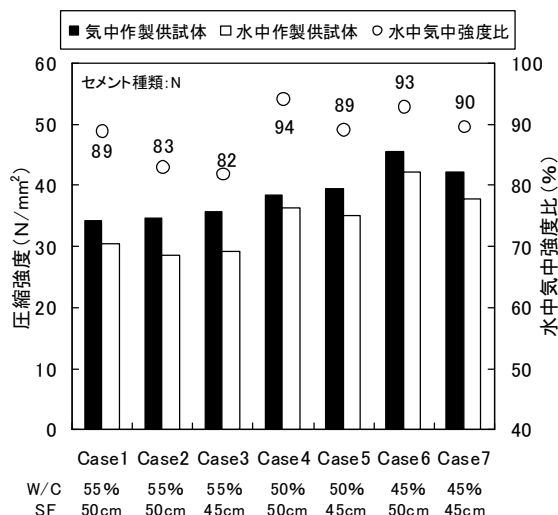


図-7 圧縮強度と水中気中強度比 (σ_7)

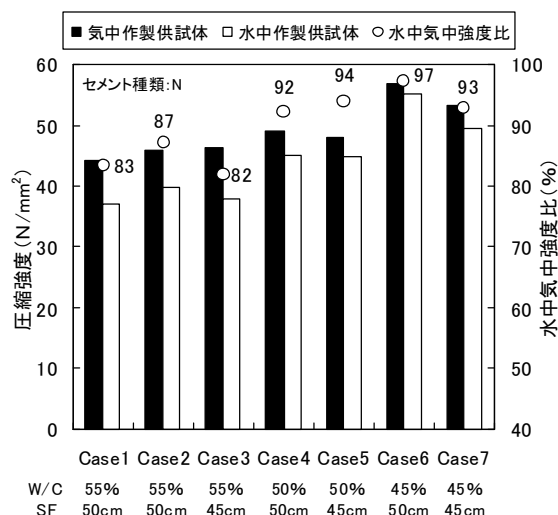


図-8 圧縮強度と水中気中強度比 (σ_{28})

るために必要な高性能 AE 減水剤の添加量が多くなった。

図-6 に検討ケース 1~7 の懸濁物質量と pH の測定結果を示す。これによると、いずれの検討ケースにおいても懸濁物質量および pH もともに基準値 (50mg/l 以下, 12 以下) を満足している。また、水セメント比が 45% の配合は、水中不分離剤の添加量が多いため、懸濁物質量の値が少ない結果となった。

4.2 圧縮強度

図-7 および図-8 に検討ケース 1~7 の圧縮強度と水中気中強度比を示す。これらによると、水セメント比が小さくなるほど、圧縮強度が大きくなる傾向が確認された。気中水中強度比は、いずれの検討ケースにおいても 80% 以上であり、水セメント比やスランプフローを変えた配合においても、水中気中強度比は材齢 7 日と比較して材齢 28 日のほうが大きくなる傾向を示した。

上記の結果から、今回検討を行った範囲内 (W/C45% ~55%, SF45cm~50cm) の水セメント比やスランプフローの配合は、水中不分離性コンクリートとしての性能 (スランプフロー空気量, 水中分離度および圧縮強度) を満足していることが確認された。

5. フライアッシュ B 種セメントを用いた場合の結果

5.1 フレッシュコンクリートの性状

図-9 に検討ケース 8~11 における水中不分離剤の添加量とスランプフローの関係を示す。これより、高性能 AE 減水剤の添加量が単位セメント量の 2.30% の場合、水中不分離剤の添加量が $W \times 0.90 \sim 1.05\%$ の範囲においては、水中不分離剤の添加量が多くなるほど、スランプフローが小さくなる傾向を示したが、その差は ± 3.0 cm 以内の範囲であった。

また検討ケース 11 においてスランプフローの経時変化を調べた。図-10 にスランプフローの経時変化を示す。ここで、「水中不分離性コンクリート設計施工指針 (案)」では、スランプフローの経時低下量について 30 分後に 3.0cm 以下と定められている。図-10 によると、スランプフローの経過変化量は、製造後 60 分が経過した時点においても、3.0cm 以内に収まっている。これは高性能 AE 減水剤の特徴のひとつでもあるスランプ保持性能の効果と考えられる。なお、空気量については、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様に、全ての検討ケース 8~11 においても 4.0% 以下であった。

図-11 に検討ケース 8~11 の懸濁物質量と pH 測定結果を示す。これによると、フライアッシュ B 種セメントを用いた場合の懸濁物質量は、普通セメントの場合と同等であり、水中不分離剤の添加量が多いほど、懸濁物質量が少ない傾向を示した。

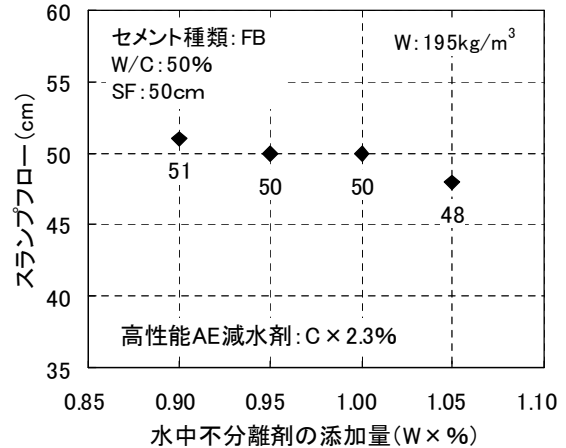


図-9 水中不分離剤の添加量とスランプフローの関係

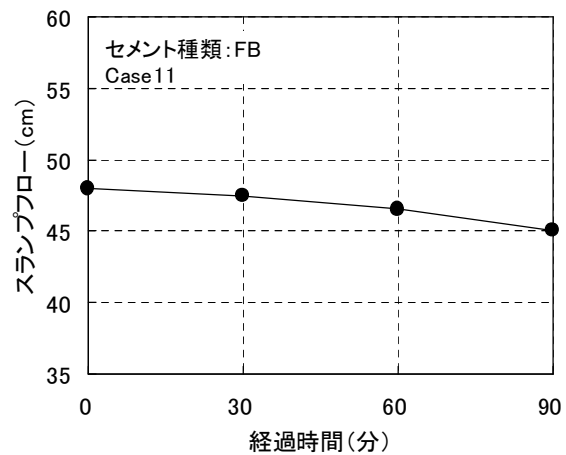


図-10 スランプフローの経時変化

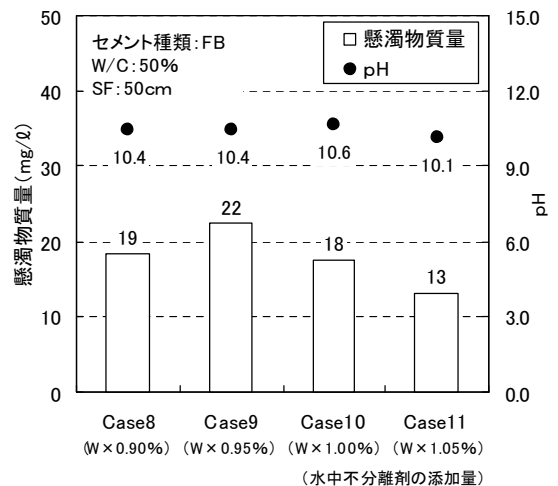


図-11 懸濁物質量と pH の測定値

5.2 圧縮強度

図-12 および図-13 に検討ケース 8~11 の圧縮強度と水中気中強度比を示す。これらによると、全ての検討ケースにおいて材齢 7 日, 28 日ともに水中気中強度比が 80% 以上であった。また、水中不分離剤の添加量にかかわらず、圧縮強度はほぼ同等の値であることから、今回

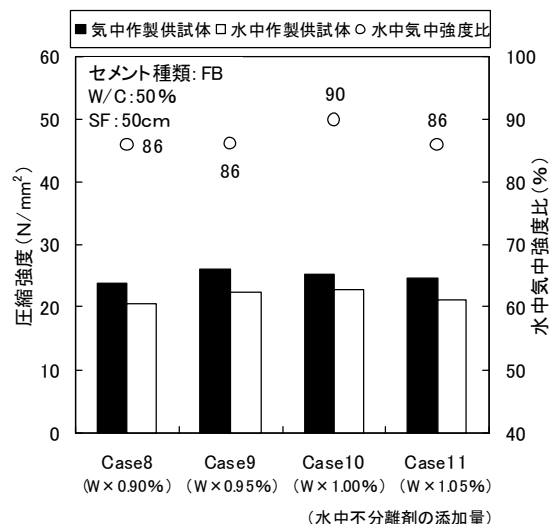


図-12 圧縮強度と水中気中強度比 ($\sigma 7$)

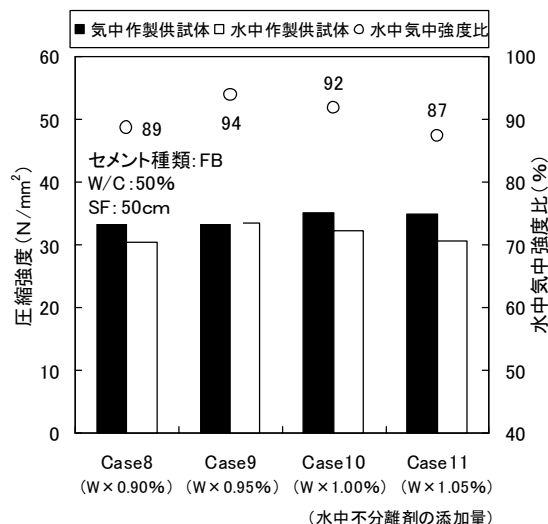


図-13 圧縮強度と水中気中強度比 ($\sigma 28$)

検討を行った範囲内（水中不分散剤の添加量 $W \times 0.90 \sim 1.05\%$ ）においては、水中不分散剤の添加量は圧縮強度に影響を及ぼさないことが確認された。

6. 水中自由落下試験の結果

図-14 に 1.0m の水中自由落下試験の結果を示す。ここで、1.0m 水中落下供試体と水中作製供試体の強度の比を「落下/水中強度比」と定義する。図-15 の結果から、それぞれの落下/水中強度比は、従来配合では 95%，検討ケース 1 では 87%，検討ケース 10 では 94% であった。このことから、今回検討を行った水中不分散性コンクリートは、従来配合と比べると、水中落下に対する分離抵抗性がやや劣る部分がみられたため、施工の際はこれに十分配慮して施工計画（配合、施工方法）を検討する必要がある。

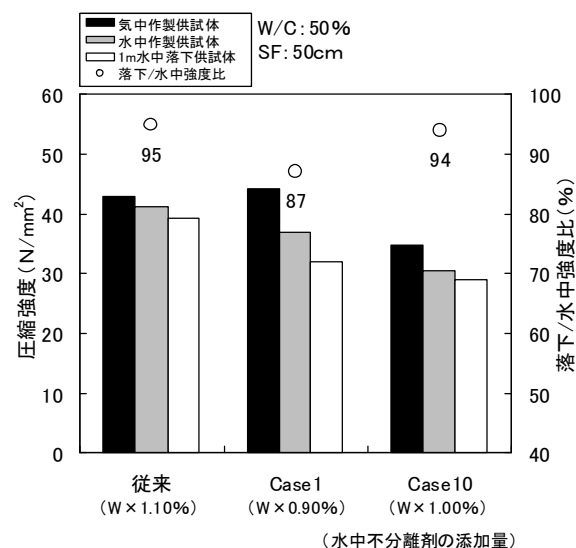


図-14 水中自由落下試験の結果 ($\sigma 28$)

7. まとめ

本検討で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 高性能 AE 減水剤を使用することで単位水量および単位セメント量を低減し、同時に水中不分散性混和剤の添加量も低減した水中不分散性コンクリートの性状（スランプフロー、空気量、水中不分散性）および強度特性（圧縮強度）について調べ、水中不分散性コンクリートとしての性能を十分に満足していることを確認した。
- (2) 上記(1)の結果は、普通ポルトランドセメントを用いた場合のみならず、フライアッシュ B 種セメントを使用した場合でも確認した。
- (3) 今回検討を行った水中不分散性コンクリートは、水中分離度試験や水中自由落下試験の結果から、従来配合と比較して水中における分離抵抗性がやや劣る部分もみられた。施工の際はこれに

十分配慮して施工計画を検討する必要がある。

なお、今後は更なるデータの蓄積と適用範囲拡大に向けて検討を行い、従来の水中不分散性コンクリートと同等以上の品質を有し、同時にコストダウンを実現した水中不分散性コンクリートの実用化を目指す予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー67，水中不分散性コンクリート設計施工指針（案），1991.5
- 2) （財）沿岸開発技術研究センター，漁港漁村建設技術研究所：水中不分散性コンクリート・マニュアル（特殊コンクリートマニュアル改訂版）（設計・施工），1998.3
- 3) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書施工編，pp.340-341，2008.5