

분체종류에 따른 초유동 콘크리트의 레오로지 특성에 관한 연구

Rheology Properties of the Super Flowing Concrete according to Binders

박 칠 림* 안 재 현** 권 영 호*** 이 상 수****
Park, Chil Lim Ahn, Jae Hyen Kwon, Yeong Ho Lee, Sang Soo

Abstract

This research is to examine the relationships between viscosity and fluidity according to binders in the super flowing concrete. And this research is described with respect to rheology concept, confined water ratio(β_P) of binders in paste and mortar, also investigated experimentally the relationships between the relative flowing ratio(Γ_m) and the funneling velocity ratio(R_m) on the mortar state according to the water binder ratio(W/B) and the dosage of the superplasticizer.

From the confined water ratio tests, it is found that β_P of the class C fly ash is higher than that of the class F fly ash and limestone in paste and mortar, therefore class F fly ash and limestone are effective to improve the fluidity. And then β_P is reflected mix conditions of mortar and super flowing concrete. The result of test, the optimum mix condition to the compactibility is satisfied when the replacement ratio is 30% and K_p is 0.8 for the case of fly ash and limestone.

1. 서론

초유동 콘크리트는 타설시의 인위적인 다짐작업을 배제함으로써 施工의 合理化 및 施工環境의 改善 등과 같은 構造物의 信頼性을 確保하기 위해 개발된 것이다.⁽¹⁾ 따라서, 다짐이 필요없는 초유동 콘크리트를 제조하기 위해서는 콘크리트의 自己充填性 개념을 이해하는 것이 중요하다.

지금까지 초유동 콘크리트의 自己充填性은 굳지않은 콘크리트의 流動性 및 粘性(재료분리 저항성)과 같은 레오로지 특성으로 평가되어 왔지만,^{(2),(3)} 궁극적으로 초유동 콘크리트의 레오로지 특성에 대한 메카니즘을 규명하기 위해서는 페이스트 및 모르타르 상태에서부터 각각의 재료조건에 대한 성능평가 및 유기적인 배합설계 시스템의 확립이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

따라서, 本 研究에서는 초유동 콘크리트의 自己充填性에 미치는 레오로지 성능을 체계적으로 평가하기 위하여, 분체종류에 따른 페이스트 상태의 流動特性(구속수비 및 변형계수)을 실험적으로 검토한 후, 이러한 결과를 바탕으로 모르타르 상태의 상대플로우 면적비 및 상대유하 속도비에 대한 평가시험을 통해 초유동 콘크리트용 모르타르의 레오로지 특성을 評價하고자 한다. 그리고 기존에 제안된 초유동 콘크리트의 배합설계 시스템⁽⁴⁾을 이용하여, 각각의 분체를 사용한 모르타르의 구속수비가 초유동 콘크리트의 레오로지 특성에 미치는 영향을 함께 검토하고자 한다.

* 정희원, (주)대우건설기술연구소, 소장·공학박

** 정희원, (주)대우건설기술연구소, 책임연구원

*** 정희원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원

**** 정희원, (주)대우건설기술연구소, 주임연구원

2. 레오로지 특성평가

2.1 페이스트의 레오로지 특성평가

초유동 콘크리트의 유동특성을 수치화하기 위해서는 전단응력과 변형속도에 관한 레오로지 모델을 가정할 필요가 있으며, 가장 단순한 항복값과 소성점도와 같은 레오로지 정수를 도입한 개념이 그림 1에 나타난 Bingham Model이다. 그러나, 이러한 모델을 콘크리트에 직접 적용하는 것은 다소 복잡한 수치해석이 필요하며, 3차원적 복합모델에 대한 구성방정식이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 매트릭스를 구성하는 페이스트 또는 모르타르에 대한 유체개념을 1차적인 평가개념으로 도입하고자 한다.

특히, 페이스트의 경우, 결합재에 따른 플로우 시험으로 구속수비 및 변형계수를 산정하여 재료에 따른 流動性의 평가정수로 도입하는 방안이 바람직하다. 이러한 평가개념은 그림 2와 같이 표현된다.

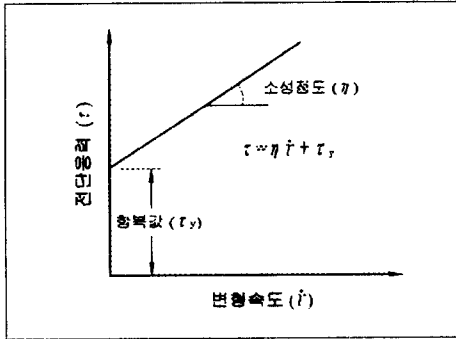


그림 1 Bingham Model

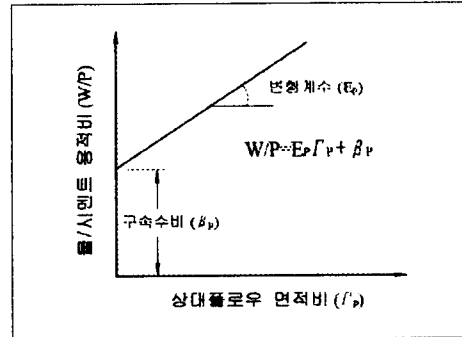


그림 2 물/시멘트 용적비와 상대플로우 면적비

여기서, 구속수비(β_p)는 시멘트 및 분체입자가 구속하는 단위수량, 즉 유동에 기여하지 못하는 구속수량의 비율로 정의하며, 기울기인 변형계수(E_p)는 동일 플로우를 얻는데 필요한 단위수량의 대소 정도를 나타낸다.⁽¹⁾ 따라서, 구속수비가 크다는 것은 유동성에 기여하지 못하고 결합재(시멘트+분체)에 구속되는 수량이 높다는 것을 의미하며, 변형계수가 크다는 것은 동일 플로우를 얻는데 필요한 단위수량이 크다는 것을 의미한다.

시멘트 또는 결합재-페이스트의 流動特性을 평가하기 위한 구속수비 및 변형계수 산정방법은 표 1과 같다. 이때, 상대플로우 면적비는 (식 1)로 산정한다.

$$\Gamma_p = \frac{\pi (F_p/2)^2 - \pi (F_0/2)^2}{\pi (F_0/2)^2} = (F_p/F_0)^2 - 1 \quad (\text{식 1})$$

여기서, F_p 는 페이스트의 플로우값(mm), F_0 는 플로우-콘의 단면직경(100mm)을 나타낸 것이다.

페이스트의 플로우 시험은 KS R 5201에 준용하며, 낙하운동을 가하지 않은 상태에서 페이스트의 변형이 종료한 시점에서 2방향의 플로우 직경을 측정하여 평균값을 (식 1)에 대입하여 상대플로우 면적비를 산정한다.

이때, 물/결합재 용적비에 따라 상대플로우 면적비와 물/결합재 용적비는 매우 밀접한 상관성을 갖게 되는데, 이를 선형관계로 회귀분석하여 상대플로우 면적비가 0이 되는 절편값이 구속수비이다. 페이스트 상태의 구속수비는 모르타르 및 초유동 콘크리트의 배합조건과 품질관리에 매우 중요한 영향

표 1 구속수비 및 변형계수 산정방법

플로우 시험 (시멘트 or 분체) (모르타르 : Sr 40%)	물/시멘트(분체) 용적비 ⇒ 1.10~1.40 (4 Cases) ⇒ 1.40~1.85 (4 Cases)
↓	
상대플로우 면적비 - 물/결합재 용적비	시험결과 (선형회귀분석)
↓	
결합재의 구속수비 및 변형계수	상대플로우 면적비(=0) ⇒ β_p 직선의 기울기 ⇒ E_p

을 미치는 변수이기 때문에, 사전에 실험으로 정확한 값을 산정하는 것이 필요하다.

2.2 모르타르의 레오로지 특성평가

초유동 콘크리트용 모르타르의 레오로지 특성은 유동성 및 점성의 개념을 도입하여 평가하는 것이 바람직하다. 기존의 연구⁽²⁾에 따르면, 초유동 콘크리트용 모르타르의 流動性은 상대플로우 면적비(이하, Γ_m)으로 평가하며, 모르타르의 粘性은 상대유속 속도비(이하, R_m)로 평가하는 방안을 제시한 바 있다. 이때, 모르타르의 레오로지 특성은 $(\Gamma_m \cdot R_m) = (5 \cdot 1)$ 의 범위일 때 가장 양호한 것으로 평가되며, 이러한 레오로지 특성은 초유동 콘크리트의 상태에서도 매우 밀접한 상관성을 갖는다.

여기서, R_m 은 그림 3과 같은 깔대기 유하시험 장치를 사용하여 측정된 유하시간(T_r)을 (식 2)에 대입하여 산정한다. 또한, 그림 4는 초유동 콘크리트용 모르타르의 레오로지 특성에 있어서 물/결합재 용적비 및 고성능 감수제 첨가율의 영향을 $\Gamma_m \cdot R_m$ 의 관계로 나타낸 것이다.

$$R_m = \frac{10}{T_r} \quad (\text{식 2})$$

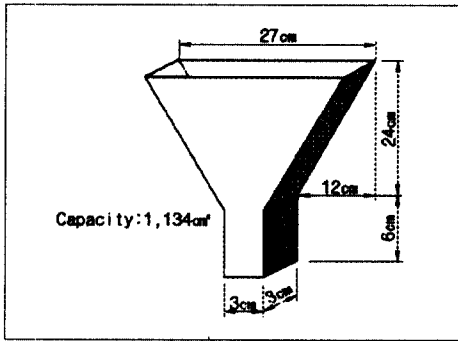


그림 3 모르타르의 깔대기 유하시험장치

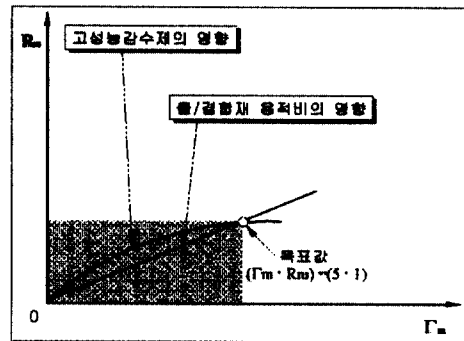


그림 4 모르타르의 레오로지 특성에 대한 영향인자

모르타르의 레오로지 특성평가를 통하여 초유동 콘크리트의 최적배합을 추정할 수 있기 때문에, 현장 조건에 따라 변동하는 재료에 대해 모르타르 시험을 실시하고 여기서 도출된 최적배합으로 현장 시험배합을 실시하게 되면, 시험량도 줄일 수 있을 뿐만 아니라 품질관리가 명확하므로 매우 경제적인 초유동 콘크리트의 현장실용화가 가능해진다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 연구^{(1),(4)}에서 최적 잔골재 용적비(S_r) 40%를 대상으로 모르타르 상태의 $\Gamma_m \cdot R_m$ 상관성으로부터 점성 및 유동성 평가를 통해 최적배합 조건을 도출하고자 한다.

한편, 모르타르의 流動特性을 구속수비 및 변형계수로 평가하기 위하여 페이스트 상태와 마찬가지로 물/결합재 용적비 1.40, 1.55, 1.70 및 1.85에 대한 플로우 시험을 실시하고자 하며, 이러한 결과를 통해 사용한 분체 종류에 따른 초유동 콘크리트의 레오로지 특성을 평가하고자 한다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

분체 종류에 따른 초유동 콘크리트의 레오로지 특성을 평가하기 위하여, 시멘트는 T사의 보통 포틀랜드 시멘트 (I종), 잔골재는 남양만의 세척사를 사용하였다.

또한, 사용한 플라이애쉬는 울산 열병합발전소(C급)와 보령 화력발전소(F급)에서, 석회석분은 G사에서 생산된 것으로 품질시험 결과는 표 2와 같다.

표 2 분체의 품질시험 결과

특성	비중	CaO (%)	습분 (%)	강입감량 (%)	비표면적 (cm ² /g)
F급 플라이애쉬	2.21	2.50	0.19	3.57	3,158
C급 플라이애쉬	2.69	27.8	0.10	4.67	2,470
석회석분	3.02	52.0	0.04	16.2	3,430

3.2 배합조건 및 범위

초유동 콘크리트용 페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 배합조건·범위는 표 3과 같다.

표 3 배합조건 및 범위

구분	변수	물/결합재 용적비 (%Vol)	진골재 용적비 (%)	결합재 치환율 (%)	고성능 감수제 (B×%)
페이스트		110~140	-	0~50	-
모르타르		77~185	40	30	0.9~1.8
콘크리트		80~110	40~47	30	0.9~1.8

분체 종류별 결합재의 치환율은 페이스트의 레오로지 특성평가 시험에서 가장 구속수비가 우수한 치환율을 대상으로 하였다. 모르타르의 물/결합재 용적비는 구속수비와 $\Gamma_m \cdot R_m$ 의 영향을 함께 검토하기 위한 것으로, 구속수비 평가에는 고성능 감수제의 영향을 배제하였기 때문에 높은 범위의 물/결합재 용적비를 대상으로 하였으며, $\Gamma_m \cdot R_m$ 평가에는 물/결합재 용적비 및 고성능 감수제의 첨가율에 따른 효과를 검토할 목적으로 낮은 범위의 물/결합재비를 대상으로 하였다. 또한, 초유동 콘크리트의 물/결합재 용적비 (W/B)는 모르타르의 구속수비(β_m)에 적당한 수비계수(K_m)을 곱한 (식 3)으로 산정하였다. 콘크리트의 레오로지 특성의 경우, 유동성은 슬럼프 플로우, L형 플로우 등으로 평가하였고, 점성은 유하시간, Box 간극통과성 높이차 등으로 평가하였다.

$$(W/B) = K_m \times \beta_m \quad (\text{식 } 3)$$

4. 실험결과 및 분석

4.1 구속수비 및 변형계수 평가

페이스트 및 모르타르의 유동특성을 평가하기 위하여 분체의 치환율에 따른 구속수비 및 변형계수를 측정하였으며, 결과는 표 4 및 그림 4와 같다. 또한 그림 5는 분체종류에 따른 구속수비 및 변형계수 시험결과이다.

표 4 유동 특성 실험결과

분체치환율	특성	페이스트		모르타르		
		β_p	E_p	β_m	E_m	T_i
F급 플라이 애쉬 (FFA)	0	1.09	0.08	1.23	0.10	2.9
	10	1.02	0.08	1.22	0.13	3.0
	30	0.98	0.07	1.21	0.14	3.9
	50	0.92	0.07	1.15	0.16	4.3
C급 플라이 애쉬 (CFA)	0	1.09	0.08	1.23	0.10	2.9
	10	1.08	0.09	-	-	-
	30	1.19	0.09	1.34	0.15	10.8
	50	1.25	0.12	-	-	-
석회 석분 (LS)	0	1.09	0.08	1.23	0.10	2.9
	10	1.03	0.08	-	-	-
	30	0.96	0.08	1.01	0.23	3.2
	50	0.96	0.06	1.31	0.18	5.3

페이스트 및 모르타르 상태에서 구속수비는 분체의 특성에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 즉, 치환율이 증대할수록, F급 플라이애쉬와 석회석분의 구속수비는 감소하는 반면에 C급 플라이애쉬의 구속수비는 증가하는 것으로 나타났다.

이는 분체입자의 형상, 분말도, 미세구조 등의 영향으로 평가된다. F급 플라이애쉬의 경우에는 용융점이 비교적 높은 조건에서 급냉으로 형성되기 때문에 구형입자의 구조를 갖게 되지만, C급 플라이애쉬의 경우에는 용융점이 낮은 조건에서 생성되므로 침상형상을 띄고 있다.

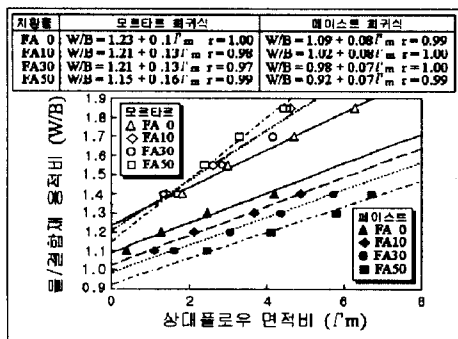


그림 4 치환율에 따른 구속수비(F급 FA)

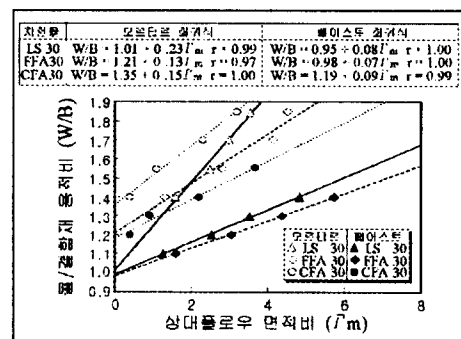


그림 5 분체종류별 구속수비(치환율 30%)

분체 치환율에 따른 페이스트의 변형계수도 구속수비와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, F급 플라이애쉬의 경우, 치환율이 증가할수록 구속수비와 변형계수가 함께 감소하기 때문에, 유동성 개선효과가 증대되었다. 그러나, F급 플라이애쉬를 사용한 모르타르의 경우, 치환율이 증가할수록 구속수비는 감소하는 경향을 나타내지만, 변형계수는 오히려 증가하는 경향을 나타내었다.

이는 페이스트의 변형계수 결과와 상반되는 것으로 모르타르의 유하시간(T_r)과 비교해 볼 때, 플라이애쉬 치환율이 증대할수록 잔골재(표준사)와 페이스트 매트릭스의 점성증대로 인하여, 모르타르 자체의 변형저항성이 증대되었기 때문으로 사료된다.

페이스트 및 모르타르의 구속수비와 변형계수로 레오로지 특성을 평가해 볼 때, F급 플라이애쉬가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 치환율은 점성과 유동성을 고려하여 30%로 하는 것이 바람직하다.

4.2 모르타르의 유동성 및 점성 평가

초유동 콘크리트용 모르타르의 레오로지 특성은 상대플로우 면적비(Γ_m)와 상대유하 속도비(R_m)로 평가한다. 본 연구에서는 분체종류별 물/결합재 용적비(W/B)와 고성능 감수제 첨가율(SP)의 효과에 따른 Γ_m-R_m 관계로 流動性和 粘性을 평가하고자 한다.

그림 6 및 그림 7은 석회석분 및 F급 플라이애쉬 치환율이 각각 30%일 때, 물/결합재 용적비와 고성능 감수제 첨가율의 효과에 따른 Γ_m-R_m 관계를 나타낸 것이다.

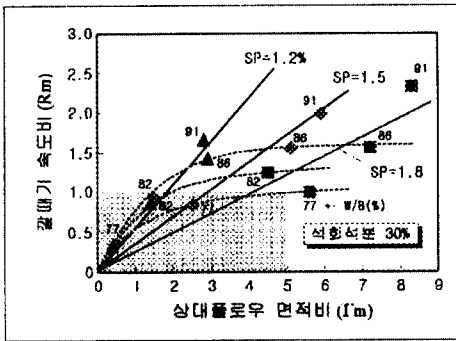


그림 6 Γ_m-R_m 의 상관관계 (석회석분 30%)

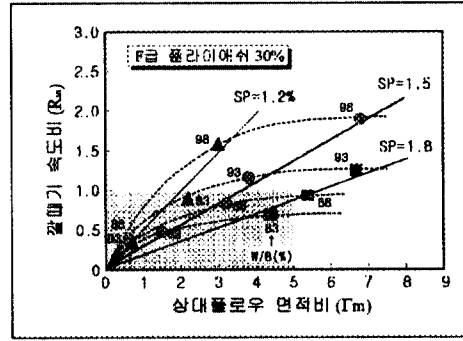


그림 7 Γ_m-R_m 의 상관관계(F급 플라이애쉬 30%)

실험결과, 고성능 감수제 첨가율이 일정할 때, 물/결합재 용적비가 증가할수록 Γ_m-R_m 관계는 원점을 통과하는 직선관계로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이는 물/결합재 용적비의 증가가 유동성뿐만 아니라 점성에도 영향을 미치기 때문이다. 그러나, 물/결합재 용적비가 일정할 때, 고성능 감수제 첨가율을 증대시키면 Γ_m-R_m 관계는 곡선을 띄며 기울기도 감소한다. 이는 고성능 감수제에 의한 분산성 증대와 함께 단위수량의 감소로 인하여 유동성 및 점성증대에도 기여하기 때문이다.

따라서, 초유동 콘크리트의 배합조건을 선정할 때는 점성과 유동성을 동시에 만족할 수 있는 물/결합재 용적비(단위수량) 및 고성능 감수제 첨가율의 효과를 충분히 고려해야 한다. 연구결과, 석회석분을 30% 치환한 모르타르는 물/결합재 용적비 77~82%, 고성능 감수제 첨가율 1.8% 범위에서 가장 우수한 점성과 유동성을 갖는 것으로 나타났으며, F급 플라이애쉬의 경우에는 물/결합재 용적비 88%, 고성능 감수제 첨가율 1.8% 범위에서 가장 적합한 것으로 평가된다.

그러나, 석회석분을 치환할 경우에는 유동성 개선에 효과적인 반면에, F급 플라이애쉬를 치환할 경우에는 점성 및 유동성을 동시에 개선할 수 있는 것으로 나타났다.

4.3 초유동 콘크리트의 유동성 및 점성 평가

분체 종류에 따른 초유동 콘크리트의 레오로지 특성을 평가하기 위한 배합조건 및 실험결과는 표 5

와 같으며, 분체종류별 물/결합재비는 (식 3)을 이용하여, 모르타르의 구속수비(β_m) \times 수비계수(K_m)로 산정하였다. 각 분체의 치환율은 시멘트 중량의 30%로 하였으며, 잔골재 용적비(S_r)는 47%, 굵은골재 용적비(G_v)는 52%로 고정시켰다.

표 5 초유동 콘크리트의 배합조건 및 실험결과

특성 종류	모르타르 구속수비 (β_m)	수비 계수 (K_m)	W/B (%)	잔골재 용적비 (%)	굵은골재 용적비 (%)	슬럼프 플로우		유하 시간 (sec)	BOX 높이차 (cm)	L형 플로우		SP제 첨가량 (%)
						50cm속도 (cm/s)	최종값 (cm)			속도 (cm/s)	최종값 (cm)	
F급 플라이애쉬	1.20	0.80	35	47	52	1.8	66 \times 67	20.0	5.0	1.3	88	1.3
C급 플라이애쉬	1.35		39			4.8	67 \times 66	9.0	5.5	1.7	78	1.1
석회석분	1.00		30			3.7	64 \times 65	8.4	4.0	1.4	75	1.8

실험결과, 분체와 관계없이 모르타르의 구속수비에 따라 주어진 물/결합재비에 대해 유동성 및 충전성을 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 점성의 척도인 유하시간은 F급 플라이애쉬가 가장 높은 것으로 나타났으며, Box 간극통과성도 양호한 값을 나타내었다. 현재 연구된 초유동 콘크리트의 배합설계⁽⁴⁾는 주로 본 연구에서 서술한 방법으로 구성되어 있으나, 앞으로 물/결합재비 및 단위수량을 주변수로 하고 수비계수 및 잔골재 용적비를 종속변수로 하는 배합설계 시스템으로 구축할 필요가 있다. 이는 모든 시방서 체계가 물/결합재 용적비 및 단위수량에 대한 제한값을 두고 있기 때문이다.

따라서, 페이스트와 모르타르의 구속수비에 대한 상관관계 및 이에 대한 초유동 콘크리트의 배합설계 시스템을 구축하기 위한 지속적인 연구·분석이 필요하다.

5. 결론

분체 종류에 따른 페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 레오로지 특성평가에 따른 실험적 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 페이스트 및 모르타르의 유동 특성에서 구속수비는 분체 치환율 30%인 경우, 석회석분 < F급 플라이애쉬 < C급 플라이애쉬 순으로 나타내고 있으며, 특히 모르타르에서 F급 플라이애쉬 치환율에 따른 변형계수는 페이스트와 상이한 경향을 나타나고 있다.
- (2) 모르타르의 레오로지 평가방법으로 평가한 결과, 충전성이 가장 양호한 범위는 석회석분의 경우, W/B 77~82%, S_p 1.8% 범위로 유동성 개선에 효과적이며, F급 플라이애쉬의 경우에는 W/B 88%, S_p 1.8% 범위로 점성 및 유동성에 유효한 것으로 나타나고 있다.
- (3) 초유동 콘크리트의 충전성능이 가장 양호한 배합조건은 수비계수 0.8, 잔골재 용적비 47%, 굵은골재 용적비 52%로 나타내고 있으며, 분체 종류에 상관없이 동일한 수비계수로서 초유동 콘크리트의 배합설계 시스템을 구축할 수 있었다.

【참고문헌】

- (1) 岡村甫, 前川安一, 小澤一雅., “ハイパフォーマンスコンクリート”, 技報堂出版, 1993.
- (2) 大内雅博, 日比野誠, 小澤一雅, 岡村甫., “自己充填コンクリート用モルタルの配合設計法”, 日本コンクリート工學年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997, pp.19~24
- (3) 大内雅博, 土谷 正., “自己充填コンクリート用モルタルの配合修正システム”, 日本コンクリート工學年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996, pp.45~50
- (4) 박칠림, 안재현, 권영호, 이상수., “超流動 콘크리트의 配合設計에 關한 研究”, 한국콘크리트학회 가을학술 발표논문집 제8권2호, 1996.11, pp.283~289