

전단변형 의존성을 고려한 굳지않은 시멘트 페이스트의 레올로지 성질

Rheological Properties of Fresh Cement Paste Considering Shear Strain Dependent Properties

이건철* 이시우** 류현기*** 한천구****
Lee, Gun Cheol Lee, Si Woo Ryu, Hyun Gi Han, Cheon Goo

ABSTRACT

In this study, the shear box tests are carried out with cement paste in order to quantify the rheological constants. The materials have four level of water-cement ratios in 0.30~0.45, with or without high-range water-reducing AE agent. As the results, it was clarified that the rheological constants of cement paste are dependent on the value of shear strain, and the incremental coefficient of yield value is varied with the water-cement ratio and the dosage of high-range water-reducing AE agent.

1. 서론

굳지않은 콘크리트의 성질과 관련한 학문분야를 체계화 하기 위해서는 굳지않은 콘크리트의 거동을 이론적으로 설명할 필요가 있다. 이와 관련하여 굳지않은 콘크리트의 유동거동을 레올로지적으로 설명하고자 하는 연구가 여러 학자들에 의해 진행되어 왔는데, 그 대부분의 연구는 굳지않은 콘크리트를 균질한 점소성체로 가정한 빙엄모델(Bingham model)로 설명하고 있다¹⁾.

그러나, 굳지않은 콘크리트는 시멘트 페이스트 이외에도 잔골재, 굵은골재를 다량 포함한 고농도 서스펜션으로서 그 유동거동은 매우 복잡하며, 전단변형 저항성에 관해서도 빙엄모델과는 전혀 다른 성상을 나타내는 등, 굳지않은 콘크리트의 유동거동을 빙엄유체로 가정함에는 많은 문제점이 존재한다.

따라서, 본연구에서는 굳지않은 콘크리트를 고체와 액체의 혼합물인 고농도 서스펜션으로 가정하고, 이의 구성모델로서 전단변형 의존성모델(Shear strain dependent model)을 이용하여 굳지않은 콘크리트의 유동거동에 대한 적용성을 검토하고자 한다. 이의 일환으로, 본고에서는 모르타 또는 콘크리트를 형성하는 기본재료인 시멘트 페이스트에 대하여 레올로지 성질로서 전단변형 의존성에 대하여 검토하고자 한다.

*정회원, 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원. 공박

**정회원, 충청대학 건축과 교수, 공박

***정회원, 충주대학교 건축공학과 교수, 공박

****정회원, 청주대학교 건축공학부 교수, 공박

2. 레올로지 모델

그림 1은 레올로지 모델을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 고농도 서스펜션의 복잡한 성질을 단순화하여 식 (1)과 같이 2개의 병엄정수인 항복치 τ_y 와 소성점도 η 가 전단변형에 의존하여 변화하는 식 (2)과 같은 모델을 가정하였다.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, τ : 전단응력(Pa),

τ_y : 항복치(Pa),

η : 소성점도(Pa · s),

$\dot{\gamma}$: 전단변형속도(1/s)

$$\tau_y = \tau_{y0} + \tau_{y1} \dot{\gamma},$$

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 \dot{\gamma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

본 모델중의 레올로지 정수는 전단변형 $\dot{\gamma}$ 가 0일 때의 병엄정수 τ_{y0} , η_0 및 전단변형에 대한 증가 계수 τ_{y1} , η_1 의 합계 4개가 된다.

3. 실험개요

3.1 실험계획 및 사용재료

표 1은 실험에 이용한 시멘트 페이스트의 배합을 나타낸 것이다. 표 중에는 콘시스턴시 시험의 측정결과를 병용 표기 하였다.

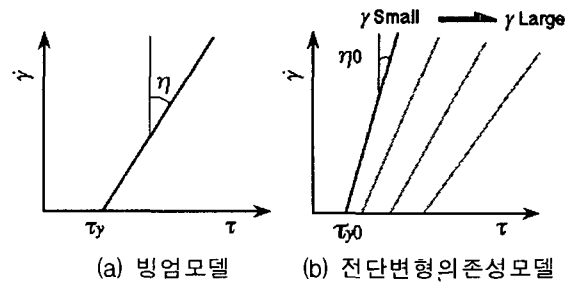
본 실험에서는 물시멘트비가 0.30~0.45의 4수준 배합, 2시리즈의 조건에 대하여 검토하였다. 즉, 시리즈 I은 플레인의 시멘트 페이스트, 시리즈 II는 고성능 AE감수제를 시멘트에 대한 질량비로 0.2%첨가한 것으로 하였다.

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트, 고성능 AE감수제는 폴리칼본산계의 혼화제를 사용하였다.

3.2 실험방법

굳지않은 시멘트 페이스트에 대한 전단변형 의존성 모델의 적용성을 파악하기 위해 시료의 전단응력, 전단변형 및 전단변형속도의 관계를 직접 측정하는 전단박스 시험을 실시하였다. 전단박스 용기의 치수는 그림 2와 같이 100×95×100mm이며, 전단방향이 수평으로서 이때의 최대 전단변형은 1.0이 된다. 전단변형속도는 굳지않은 콘크리트의 유동속도를 상정하여 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0/s의 6수준으로 하고, 측정의 순번이 측정결과에 영향을 미치지 않도록 각 전단변형속도를 랜덤의 순번으로 측정을 실시하였는데, 각 전단변형속도별로 3~5왕복시켜 반복 전단 변형시 측정되는 전단응력의 평균치를 이용하였다.

이와 병용하여 콘시스턴시 시험도 실시하였는데, 시멘트 모르타 플로우 시험규정에 따른 시멘트 페



(a) 병엄모델 (b) 전단변형의존성모델

그림 1. 레올로지 모델

표 1. 시멘트 페이스트의 배합 및 실험결과

Series	W/C	SP/C	W	C	Table flow test		1/2size slump test	
					Fl.o	Fl.	mSl.	mSf
I	1	0.30	487	1,622	104	193	75	127
	2	0.35	525	1,500	129	225	115	190
	3	0.40	558	1,396	170	239	124	242
	4	0.45	587	1,305	209	268	135	290
II	1	0.30	487	1,622	135	218	113	183
	2	0.35	525	1,500	228	-	134	306
	3	0.40	558	1,396	266	-	139	358
	4	0.45	587	1,305	281	-	142	394

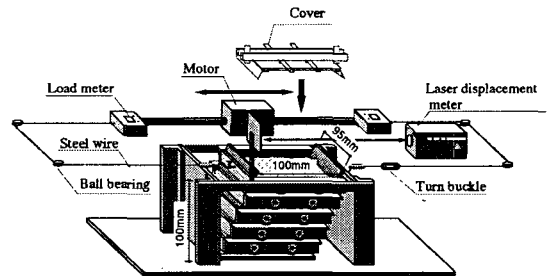


그림 2. 전단박스 시험장치

이스트의 플로우 시험, 1/2사이즈의 슬럼프 시험을 이용한 미니 슬럼프 시험을 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 콘시스턴시 곡선

그림 3은 전단변형의 진행에 따른 콘시스턴시 곡선 변화의 일례이다. 그림에 나타난 콘시스턴시 곡선은 전단응력과 전단변형속도의 관계로서 0.1간격의 전단변형구간에 대한 평균 전단응력을 전단변형속도별로 나타낸 것으로서, 본 연구의 범위에서는 전단변형이 0.1이하 및 0.8이상에서 장치저항 등에 의한 측정 오차 및 시료의 충전상태에 따라서는 강제변형이 제대로 전달되지 않을 가능성이 있어 분석대상에서 제외하고, 전단변형 $\gamma=0.1$ 을 전단변형의 원점으로 하였다.

그림 4는 그림 3과 같은 방법으로 본 실험 범위의 콘시스턴시 곡선을 나타낸 것이다. 그래프의 이해를 돕도록 전단박스 시험결과는 전단변형이 0.0~0.1 및 0.6~0.7의 결과만을 나타내었다. 모든시료에 있어서 전단변형의 증대와 함께 콘시스턴시 곡선은 우측으로 이동하는 경향을 나타내고 있다. 이 결과는 시멘트 페이스트를 고농도 서스펜션으로 가정할 필요가 있고, 그 레올로지 성질에는 전단변형 의존성이 있음을 시사하고 있다.

또한, 여기서 측정된 전단응력은 물시멘트비가 작아질수록 증가하고, 고성능 AE 감수제를 첨가할수록 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 서스펜션이 고농도화 될수록 전단변형 의존성이 현저해지는 결과를 반영하고 있는 것으로 사료된다.

4.2 레올로지 정수

그림 5는 그림 4의 콘시스턴시 곡선의 회귀식으로 부터 구해진 항복치와 전단변형과의 관계를 나타낸 것이다. 전단변형이 0인경우의 항복치 τ_{y0} 는 물시멘트비의 영향은 거의 없고, 50Pa 정도로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 한편, 전단 변형에 대한 증가계수인 τ_{y1} 은 물시멘트비가 커질수록 감소하고, 고성능 AE감수제를 첨가 할수록 작아지는 경향으로 나타났다. 또한, 본 실험의 범위에서는 고성능 AE감수제를 첨가한 시리즈 II의 항복치는 전단변형에 대해서 거의 직선적인 증가 경향을 나타내는 반면, 플레인의 시리즈 I에서는 비교적 곡선적인 경향을 나타내고 있다.

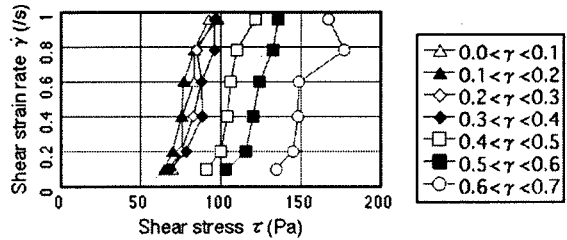
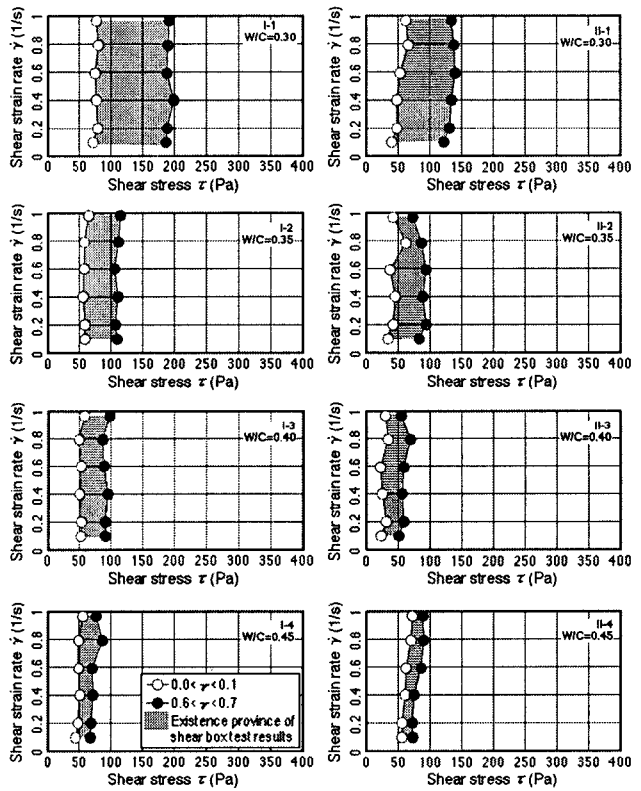


그림 3. 전단변형성 콘시스턴시 곡선



(a) 시리즈 I

(b) 시리즈 II

그림 4. 시멘트 페이스트의 콘시스턴시 곡선

그림 6은 그림 5의 데이터를 평균한 병업 모델과 직선식으로 근사하여 얻어진 전단변형 의존성 모델의 레올로지 정수를 몰시멘트비와 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 전단변형이 0일때 항복치인 τ_{y0} 는 몰시멘트비의 영향이 작은 반면, 전단변형에 대한 항복치의 파라미터인 τ_{y1} 에 관해서는 배합조건에 따라 크게 다른 것을 알 수 있다. 즉, 몰시멘트비의 증가와 함께 감소하고, 고성능 AE감수제의 첨가에 의해 저하함을 알 수 있다. 이것은 사용하는 데이터의 범위나 근사모델에 의해 레올로지 정수의 값에는 큰 차이를 보일 가능성이 있다.

그림 7은 전단박스시험에서 얻어진 소성점도와 전단변형의 관계를 나타낸 것이다. 소성점도는 전단변형이 0에서의 소성점도 η_0 의 경우 거의 0 Pa·s의 값을 나타내고 있으며, 전단 변형에 대한 증가계수인 η_1 은 모든 시료에 있어서도 전단변형의 증가에 따라 일정한 값을 나타내고 있다. 본 시험장치에 의해 모델 서스팬션을 시료로 하여 실시한 앞선 연구에서는 소성점도 η_0 , η_1 이 측정되었던 것을 고려하면, 본 실험에서의 결과는 고농도 서스팬션 특유의 성질 또는 본 실험에서의 전단변형 속도 및 전단변형의 범위에서는 소성점도가 전단변형에 의존하지 않을 가능성이 크다.

5. 결론

본 연구에서는 굳지않은 시멘트 페이스트를 시료로한 전단박스 시험을 실시하여, 그 레올로지 성질로서 전단변형 의존성 모델의 검토를 실시하였다. 그 결과, 시멘트 페이스트의 레올로지 성질에는 전단변형 의존성이 존재하는 것으로 나타났는데, 특히, 항복치가 전단변형에 의존하여 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 그 성질은 고성능 AE감수제를 첨가하는 것에 의해 보다 감소하는 것으로 나타났다.

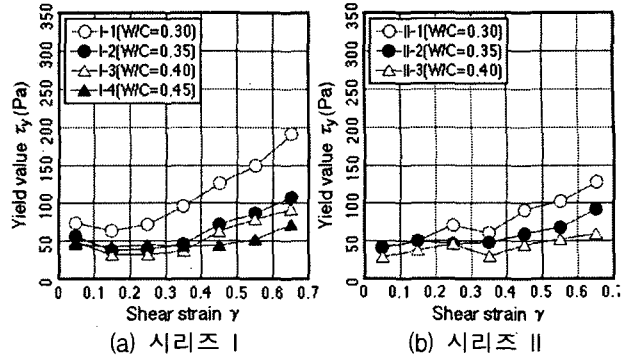


그림 5. 시멘트 페이스트의 전단변형과 항복치의 관계

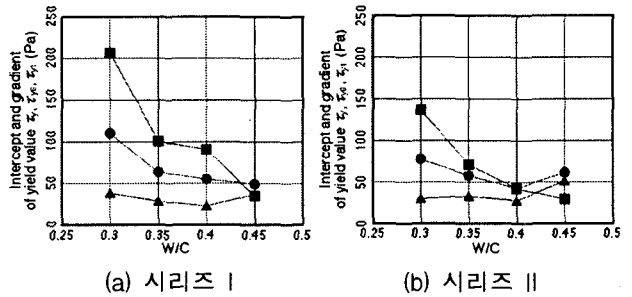


그림 6. 몰시멘트비와 항복치의 관계

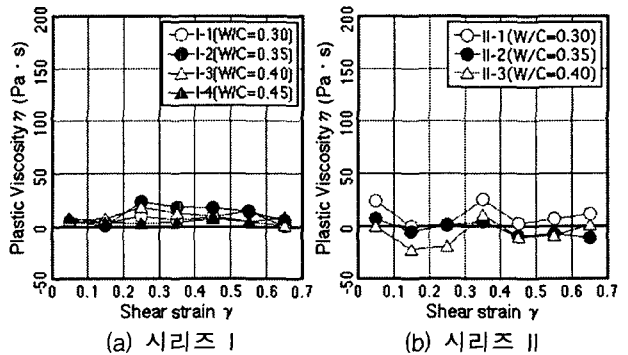


그림 7. 시멘트 페이스트의 전단변형과 소성점도의 관계

참고문헌

1. 森博嗣, 田中政史, 谷川恭雄; フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究, 日本建築學會構造系論文集, No.421, 1991. 3, pp.1~10