

비소성 시멘트 콘크리트의 역학적 거동에 대한 실험 연구

An Experimental Study on the Mechanical Behavior of Concrete Using Non-Sintered Cement

유 성 원^{1*} 민 경 완²

Yoo, Sung-won^{1*} Min, Gyeong-oan²

*Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Wanju-Gun, Jeonbuk, 565-701, Korea ¹
Korea Laboratory Institute, Geumchun-Gu, Seoul, 153-803, Korea ²*

Abstract

If cement could be manufactured with industrial byproducts such as granulated blast furnace slag, phosphogypsum, and waste lime rather than clinker, there would be many advantages, including the maximization of the use of these industrial byproducts for high value-added resources, the conservation of natural resources and energy by omitting the use of clinker, the minimization of environmental pollution problems caused by CO₂ discharge, and the reduction of the production cost. For this reason, in this study, mechanical behavior tests of non-sintered cement concrete were performed, and elasticity modulus and stress-strain relationship of non-sintered cement concrete were proposed. Nine test members were manufactured and tested according to reinforcement ratio and concrete compressive strength. According to the test results, there was no difference between general cement concrete and non-sintered cement concrete in terms of flexure and shear behavior.

Keywords : non-sintered cement, elasticity modulus, stress-strain relationship, mechanical behavior

1. 서 론

1.1 연구의 목적

건설재료의 연구는 고성능 및 다기능을 중심으로 해왔고, 이뿐만 아니라 환경부하를 우선적으로 고려하여 각종 폐기물을 적극적으로 활용하여 건설재료에 부합시키기 위해 연구개발이 이루어지고 있다. 이를테면 시멘트 산업은 석회석 채굴에 있어서 한계에 직면할 것으로 예상되고, 화석에너지의 단가상승, 향후 온실가스 배출 규제 등 시멘트 제조원가 상승으로 인해 콘크리트 원가는 더욱 상승할 것으로 생각된다. 그러나 이러한 실정에도 불구하고 현재 약

2500만톤의 폐인산석고 및 350만톤의 폐석회가 활용 되지 못하고 폐기물로 분류되어 적치되어 있는 실정이며 이의 처리문제가 매우 심각한 상태이다[1].

또, 향후 온실가스 감축이 시멘트 업계의 가장 큰 현안으로 될 것과 세계의 시멘트 수요량은 21세기 초반까지 매년 2.5~5.8% 정도 증가로 이어지고 있어 새로운 시멘트 관련 기술의 개발이 필요한 실정이다. 이와 같은 문제점에 대안으로 클링커를 사용하지 않고 산업 부산물과 산업폐기물을 이용한 결합재를 제조하면 생산원가 절감과 천연자원 및 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염을 동시에 해결 할 수 있을 것으로 판단된다[1,2].

그럼에도 불구하고 현재까지 비소성 시멘트 콘크리트의 연구분야는 주로 재료적인 차원 즉, 압축강도, 탄성계수, 건조수축 및 내구성 분야 등에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나 비소성 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다[1,3,4,5,6,7].

Received : December 12, 2011

Revision received : December 28, 2011

Accepted : January 2, 2012

* Corresponding author : Yoo, Sung-won

[Tel: 82-63-290-1469, E-mail: imysw@woosuk.ac.kr]

©2012 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

이를 위하여 본 논문에서는 고로슬래그 등의 산업부산물과 산업폐기물을 결합재로 이용한 비소성 시멘트를 이용하여 제조된 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 휨부재의 거동을 실험하고 분석하였다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 플라이애시, 고로슬래그 등의 산업부산물과 산업폐기물을 결합재로 이용한 비소성 시멘트를 이용하여 콘크리트 시편을 제조, 압축강도, 탄성계수 및 응력-변형률 관계를 측정하여 현행 설계기준과 비교검토한 후, 새로운 모델을 제안하였고, 9개의 구조 휨부재를 제작하여 부재의 휨거동을 실험하고 제안된 모델과 비교 분석하였다.

2. 기존 연구의 고찰

비소성 시멘트 콘크리트의 본격적인 연구는 국외의 경우 1990년대 중반, 국내의 경우에는 2000년대 초반으로 규정할 수 있다[1,8,9]. 특히 1995년 Singh and Garg[9]는 플라이애쉬와 자극제를 첨가한 지오폴리머 형태의 비소성 시멘트 콘크리트의 수화원리 및 강도 특성 등에 대해서 연구하였으며, 국내의 경우, 2002년에 Lee[4]가 제지슬래그를 이용한 모르타르의 특성에 대한 연구를 시도한 것으로 Moon[1]은 2004년 전후로 비소성 시멘트의 전반적인 강도, 내구성 등의 특성을 연구하고 있으며, 최근에는 Ahn and Jung[5]은 2007년에 마그네시아 인산염 시멘트 모르타르를 이용하여 배합선정, 강도특성 및 흡수율 등을 평가하였고, 2010년 Jeong and Lim[6]은 나노슬래그와 알칼리자극제를 이용한 모르타르의 강도, 응결 및 단열온도상승 등에 대하여 연구하였다. 이러한 일련의 연구들은 앞서 기술한 바와 같이 주로 재료적인 차원 즉, 압축강도, 탄성계수, 건조수축 및 내구성 분야 등에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나 비소성 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조부재 거동 등에 대한 연구가 필수적으로 판단되어 본 연구에서는 이에 대한 접근 및 평가를 수행하였다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 비소성 시멘트 제조에 사용된 재료

비소성 시멘트(NSC)의 제조를 위해 고로슬래그 미분말

(GBFS)과 수화반응 유도를 위한 황산염 자극제로는 N사의 인산제조 시 폐기물로 배출되는 폐인산석고(PG)를, 알칼리 자극제로는 공업용 소석회(SL)와 D사에서 소다회(Na₂CO₃) 제조 공정 중에 폐기물로 배출되는 폐석회(WL)를 사용하였다. PG는 0.5% 석회 수용액에 20℃에서 5분 동안 세척되었으며 이때 석회 수용액중 PG의 비율은 중량비로 14% 였다. 세척, 중화처리된 PG를 450℃에서 하소한 II형 무수석고(APG) 상태와 80℃에서 건조한 한 이수석고(DPG) 상태로 전이시켜 미분쇄하여 사용하였다. WL은 배출상태의 것을 90℃에서 1일 건조한 후 미분쇄하여 사용하였다. 사용재료의 화학적 성질은 Table 1에 나타내었다[1,8,9].

Table 1. Chemical composition of raw materials

Item Type	Oxide composition(%)						Specific gravity
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
GBFS	34.76	14.50	41.71	0.14	0.44	0.13	2.91
APG	1.34	0.12	40.97	0.06	-	54.93	2.88
DPG	1.08	0.07	32.28	-	-	43.29	2.36
SL	-	0.19	65.88	-	-	1.13	2.27
WL	4.88	1.62	42.12	0.11	1.89	3.12	2.22
OPC	20.88	5.39	64.73	0.27	0.22	1.65	3.15

3.2 비소성 시멘트 콘크리트 배합 및 양생

콘크리트의 배합은 Table 2와 같으며 보통 시멘트 배합의 경우, 바인더 양을 1종 시멘트 100%를 사용하였으며, 비소성 시멘트 배합의 경우, 슬래그, 황산염 자극제 및 알칼리 자극제를 7 : 2 : 1로 혼합 사용하였고 KS F 2405에 의거하여 콘크리트를 제작하였으며 Ø10×20cm의 몰드에 타설하여 증기 양생실(65℃, 80%RH)에서 8시간 양생한 다음 20±2℃인 수증에서 양생 후 3, 7, 28, 90일 재령에서 압축, 휨, 인장강도를 측정하였다.

Table 2. Mix Proportion of concrete

ID	W/B	S/a	Unit Weight (kg/m ³)				
			W	B	S	G	AD
1	28.6	39	165	576	629	1003	5
2	33.3	39	162	485	670	1009	4
3	40.0	38	136	340	651	1087	3

3.3 공시체 실험방법

압축강도 실험 시 하중재하는 변위제어 방식의 2,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하였다. 압축시험 시에 공시체 원주 둘레로 3개의 LVDT를 설치하여 변형을 측정하고, 응력-변형률 곡선, 압축강도 및 탄성계수를 산정하였

다. 고강도 콘크리트의 압축응력-변형률 곡선은 일반 콘크리트와는 다르므로 미국 FHWA에서 제안한 탄성계수 산정법 즉, 극한 압축강도의 10% 및 30%에 해당하는 특성값을 이용하여 탄성계수를 산정하였다[10].

3.4 부재 실험체 계획

이 실험에서는 직사각형 단면형상을 가진 9개의 부재를 제작하였다. 실험변수로는 철근량(ρ_{min} , $(\rho_{min} + \rho_{max})/2$, ρ_{max})과 비소성 시멘트 압축강도(33, 39, 45 MPa) 각각 3 수준으로 총 9수준이다. 각 부재별 상세 내용 및 실험체의 형상은 Table 3 및 Figure 1, 2에 나타내었다.

Table 3. Detail of test beams

ID	b (mm)	h (mm)	d (mm)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)
L33				33		D10-2EA
M33				33		D16-2EA
H33				33		D22-2EA
L39				39		D10-2EA
M39	120	240	200	39	400	D16-2EA
H39				39		D22-2EA
L45				45		D10-2EA
M45				45		D16-2EA
H45				45		D22-2EA

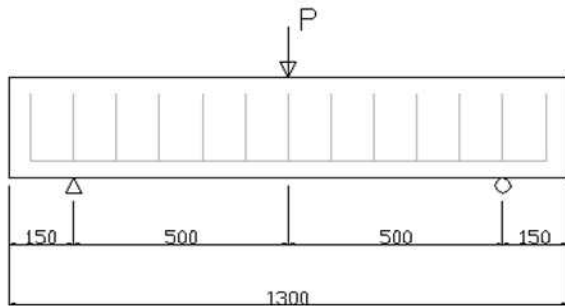


Figure 1. Dimension of test beam



Figure 2. Test setup

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압축강도

28일 재령에서의 압축강도 시험 결과는 다음 Table 4에 나타내었다. Table 2, 4에서 알 수 있듯이 1종 시멘트 콘크리트보다는 비소성 시멘트 콘크리트의 압축강도가 다소 크을 알 수 있으며, 비소성 시멘트 콘크리트의 W/B - 압축강도 관계는 보통 콘크리트와 유사하게 나타났다.

Table 4. Test results of concrete compressive strength

ID	f_{ck} (MPa)	
	Non-sintered Cement	TYPE I Cement
1-1	57.49	44.73
1-2	56.56	39.97
1-3	57.29	42.23
2-1	60.35	44.15
2-2	59.93	41.81
2-3	48.07	44.73
3-1	64.29	46.67
3-2	62.63	46.46
3-3	61.53	43.67

4.2 탄성계수

비소성 시멘트 콘크리트의 탄성계수를 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 알 수 있듯이 비소성 시멘트 콘크리트의 탄성계수는 현행 콘크리트 구조설계기준 [11]에서 제시하고 있는 $E_c = 8,500\sqrt{f_{ck} + 8}$ 에 비해 10~20% 정도 작은 것으로 나타나, 본 연구에서는 통계적 처리과정을 거쳐서 비소성 시멘트 콘크리트의 탄성계수를 다음 식 (1)과 같이 제안하였으며, 그 결과는 Table 5에 나타내었다.

$$\epsilon_0 = 1.2 f_{ck} / E_c, \quad E_c = 1,800 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad \text{----- (1)}$$

Table 5. Test results of concrete elasticity modulus

ID	Test Results		Present Design Code		Proposed Results	
	E_c (MPa)	ϵ_0	E_c (MPa)	ϵ_0^*	E_c (MPa)	ϵ_0
1-1	27,307	0.00252	34,261	0.00421	26,812	0.00253
1-2	27,647	0.00260	34,098	0.00410	26,521	0.00246
1-3	25,927	0.00265	34,227	0.00442	26,750	0.00265
2-1	29,485	0.00243	34,754	0.00409	27,695	0.00246
2-2	29,264	0.00263	34,683	0.00410	27,567	0.00246
2-3	25,065	0.00239	32,534	0.00384	23,797	0.00230
3-1	28,600	0.00285	35,409	0.00450	28,886	0.00270
3-2	29,623	0.00264	35,136	0.00423	28,387	0.00254
3-3	31,932	0.00250	34,953	0.00385	28,055	0.00231

* ϵ_0 : strain at peak strength of $f - \epsilon$ curve = $2f_{ck} / E_c$

4.3 응력-변형률 관계

보통시멘트 콘크리트의 응력-변형률 관계를 Hognestad Model[12]로 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$f_c = f_{ck} \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_0 = \frac{2f_{ck}}{E_C} \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0$$

$$f_c = \frac{0.15f_{ck}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{cu}} (\varepsilon - \varepsilon_0) + f_{ck}, \quad \varepsilon_{cu} = 0.0038 \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \quad (2)$$

비소성 시멘트 콘크리트의 응력-변형률 관계를 Hognestad Model에 적용하면 그 차이가 매우 큰 것으로 나타나, 본 연구에서는 통계적 처리과정을 거쳐서 비소성 시멘트 콘크리트의 응력-변형률 관계를 다음 식 (3)과 같이 제안하였으며, 그 대표적인 결과를 Figure 3에 나타내었다.

$$f_c = f_{ck} \left[\frac{1.2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \frac{1}{5} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_0 = \frac{1.2f_{ck}}{E_C} \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0$$

$$f_c = \frac{0.15f_{ck}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{cu}} (\varepsilon - \varepsilon_0) + f_{ck}, \quad \varepsilon_{cu} = 0.0038 \quad \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \quad (3)$$

4.4 구조 시험체의 휨거동

4.4.1 비소성 시멘트 콘크리트 물성

구조 시험체의 휨거동 평가에 사용된 비소성 시멘트 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 다음 Figure 4와 같다.

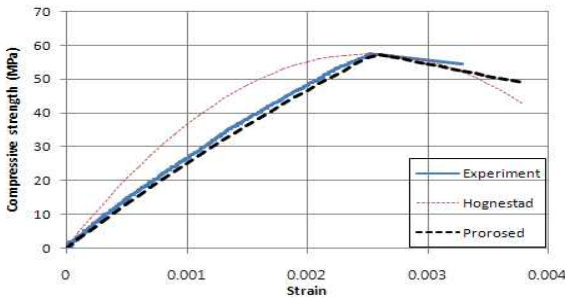


Figure 3. f-ε relationship of non-sintered cement concrete

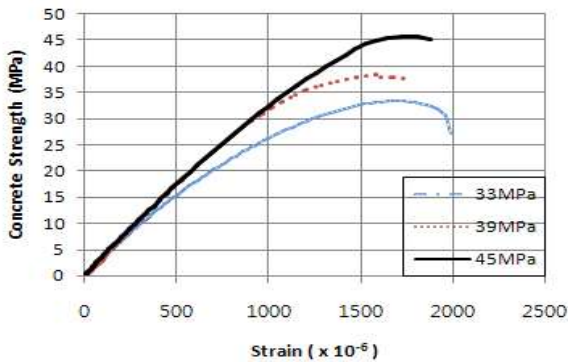


Figure 4. f-ε relationship of non-sintered cement concrete for beam

4.4.2 균열, 항복 및 극한 하중/변위

구조 시험체의 휨거동 평가 결과, 실험에서 구해진 균열, 항복, 극한하중/변위는 및 파괴 형상은 다음 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 알 수 있듯이 균열하중은 콘크리트 압축강도에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 철근 항복하중 및 극한하중은 철근량에 의존하고 있는 것으로 나타났다.

한편 파괴 형상은 최소철근비가 배근된 경우에는 휨파괴, 최대철근비가 배근된 경우에는 전단파괴, 그리고 중간의 철근비인 경우에는 휨과 전단에 의해서 파괴되는 것으로 나타났으며, 발생한 균열 형상은 Figure 5에 나타내었다.

Table 6. Summary of test results of test beams

ID	Crack (kN)	Yield (kN,mm)		Ultimate (kN,mm)		Failure pattern	Δ _u / Δ _y
	P _{cr}	P _y	Δ _y	P _u	Δ _u		
L33	22.6	56.5	1.47	84.0	7.25	Flexure	4.93
M33	23.6	127.1	2.50	134.4	2.71	Flexure+Shear	1.08
H33	23.1	170.2	3.73	193.9	4.67	Shear	1.25
L39	23.9	57.5	1.68	82.6	15.66	Flexure	9.32
M39	23.2	128.7	1.98	174.1	3.73	Flexure+Shear	1.88
H39	24.0	247.7	5.18	256.5	6.03	Flexure+Shear	1.16
L45	33.9	55.2	1.14	97.9	13.55	Flexure	11.89
M45	28.7	128.3	2.34	201.3	30.83	Flexure+Shear	13.18
H45	32.6	220.1	3.66	233.3	4.31	Shear	1.18



Figure 5. Crack pattern of test beams

4.4.3 하중-처짐 관계

구조 시험체의 휨거동 평가 결과, 하중-처짐 관계는 Figure 6~8에 나타내었다.

Figure 6~8을 분석해보면, 비소성 시멘트 콘크리트 구

조 부재는 하중-처짐 관계에 있어서 초기균열 단계까지 선형으로 증가하며, 초기균열 이후 처짐량은 비선형으로 증가하며, 이후 하중은 극한하중까지 증가한다. 또한 전반적인 거동은 콘크리트 압축강도에도 영향을 받지만 그 크기차이는 상대적으로 작게 나타났으며, 철근량(비)의 영향이 구조 거동에 절대적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다.

일반적으로 콘크리트 구조물의 연성은 연성지수(ductility index)로 정량화할 수 있으며, 변형 특성 중에서 구조물의 처짐, 회전각, 또는 곡률을 바탕으로 표현할 수 있다[13]. 본 연구에서는 식 (4)와 같이 처짐에 근거하여 연성지수를 정의하여 각 부재의 연성 특성을 고찰하였다.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \text{ ----- (4)}$$

여기서 μ : 부재의 연성지수

$\Delta_{u(y)}$: 부재의 극한(항복)하중에서의 처짐

실험에서 얻어진 부재의 연성지수는 Table 6에 나타내었다. 고강도 콘크리트의 연성지수에 관한 기존 연구 결과는 고강도 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위한 최소 연성지수로써 4.0 이상의 값을 제안하고 있다[11]. 실험결과에 의하면, 비소성 시멘트 콘크리트 휨부재의 경우, 철근비가 최소철근비(L-Series) 0.006일 때의 연성지수는 4.93, 9.32 및 11.89로 나타나 항상 4.0이상으로 취성파괴를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. 철근비가 최대철근비 및 중간정도의 철근비인 부재들(M, H-Series)는 철근비 자체만으로 보면 연성지수가 4.0을 상회해야 하지만 휨전단 혹은 전단파괴가 발생되어 오히려 연성지수가 작게 나타나고 있다. 이러한 현상들은 일반 콘크리트에서도 동일하게 나타나므로 비소성 시멘트 콘크리트의 부재거동 경향 자체는 일반 콘크리트 부재와 크게 차이하지 않음을 알 수 있다.

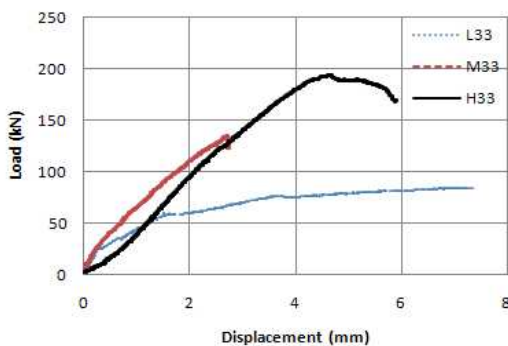


Figure 6. Load-displacement for fck = 33 MPa

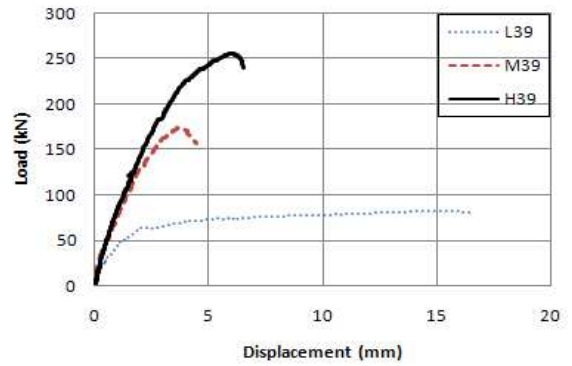


Figure 7. Load-displacement for fck = 39 MPa

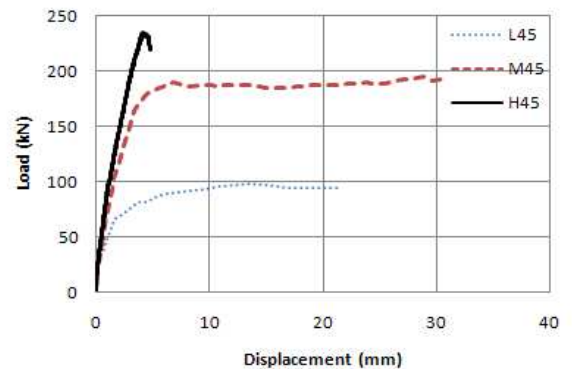


Figure 8. Load-displacement for fck = 45 MPa

4.4.4 하중-변형률 관계

구조 시험체의 거동 평가 결과, 하중-변형률 관계는 Figure 9~14에 나타내었다. 하중-콘크리트 변형률의 경우, 철근이 적게 배근된 L-Series에서는 콘크리트 극한변형률이 0.0035~0.0040로 나타나 휨연성거동이 일반콘크리트와 비슷하게 나타났다. 한편 하중-철근 변형률의 경우, 철근이 많이 배근된 H-Series에서는 전단파괴 현상으로 철근이 항복한 직후 부재가 극한 상태에 도달하는 현상이 나타나 전단거동도 일반콘크리트와 비슷하게 나타났다.

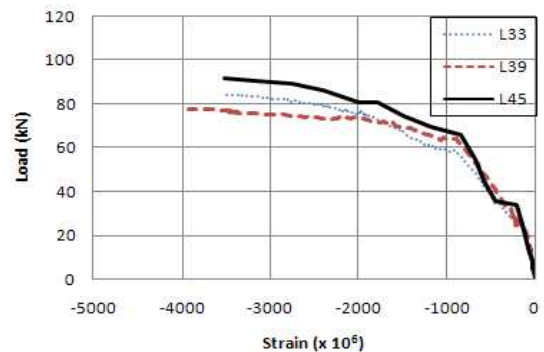


Figure 9. Load-concrete strain for $\rho = prmin$

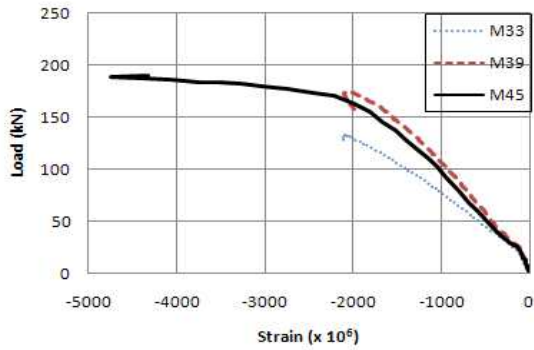


Figure 10. Load-concrete strain for $\rho = (p_{min}+p_{max})/2$

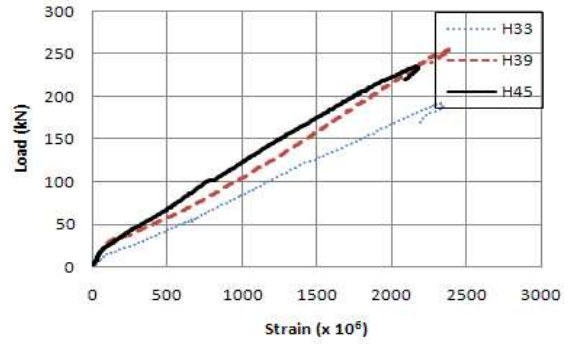


Figure 14. Load-steel strain for $\rho = p_{max}$

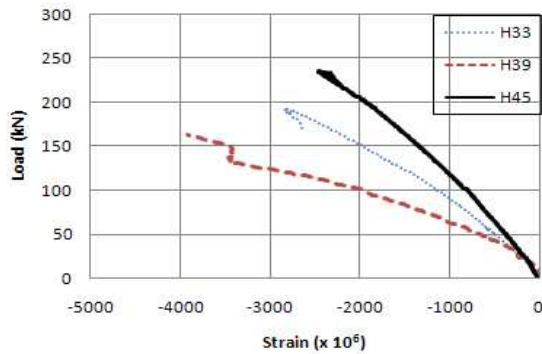


Figure 11. Load-concrete strain for $\rho = p_{max}$

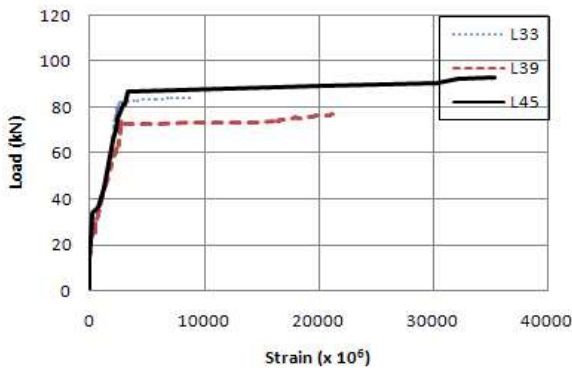


Figure 12. Load-steel strain for $\rho = p_{min}$

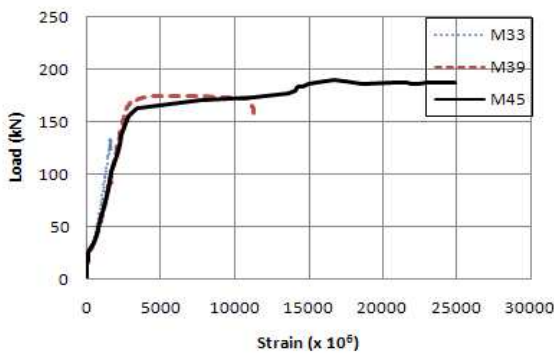


Figure 13. Load-steel strain for $\rho = (p_{min}+p_{max})/2$

5. 결 론

고로슬래그, 폐인산석고 등의 산업부산물과 산업폐기물을 결합재로 이용한 비소성 시멘트 콘크리트의 역학적 거동을 실험 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고로슬래그 미분말과 수화반응 유도를 위한 황산염 자극제로 폐인산석고, 알칼리 자극제로 공업용 소석회, 폐석회를 사용하여 비소성 시멘트를 제조하였다.
- 2) 비소성 시멘트 콘크리트의 탄성계수, 응력-변형률 관계는 일반 콘크리트와 차이가 큰 것으로 나타나, 비소성 시멘트 콘크리트의 탄성계수, 응력-변형률 관계를 제안하였다.
- 3) 구조 시험체 실험 결과, 비소성 시멘트 콘크리트의 휨 및 전단 거동 경향은 일반 콘크리트 부재와 크게 차이 나지 않는 것으로 나타났다.

요 약

클링커 대신 고로슬래그, 폐인산석고, 폐석회 등의 산업 부산물을 이용하여 비소성시멘트를 제조하면 산업부산물 재활용, 클링커 제조를 위한 에너지 감소, CO₂저감으로 인한 환경오염문제 및 생산원가 저감 등의 장점이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 비소성 시멘트 콘크리트의 역학적 거동실험을 수행하여 비소성 시멘트 콘크리트의 탄성계수, 응력-변형률 관계를 제안하였다. 또한 철근비, 압축강도를 변수로 9개의 구조 시험체를 제작하였으며, 그 실험 결과 비소성 시멘트 콘크리트의 휨 및 전단 거동 경향은 일반 콘크리트 부재와 크게 차이 나지 않는 것으로 나타났다.

키워드 : 비소성시멘트, 탄성계수, 응력-변형률, 역학적 거동

Acknowledgement

This work was supported by Woosuk University(2011).

References

1. Moon KJ. Characteristics of non-sintered cement and concrete using industrial byproducts [dissertation]. Jeonbuk (Korea): University of Jeonbuk; 2004, 168 p.
2. Uchikawa H. Gypsum and lime, 1st ed, New York: MacGrawHill; 1990, Chapter 9, Cement; p. 497-505.
3. Takahashi H, Hardening property of cement mortar adding heavy metal compound and solubility of heavy metal from hardened mortar. J of Cement and concrete research, 1989 Oct 31;19(5):589-602.
4. Lee SW, An experimental study on the properties of mortar mixing paper ash, Journal of the Korea Institute of Building Construction 2002 Sep;2(3):115-21
5. Ahn MY, Jung SJ, An experimental study on the properties of ultra rapid hardening mortar using magnesia-phosphate cement, Journal of Korea the Institute of Building Construction 2007 Dec;7(4):109-16
6. Jeong SW, Lim NG, Study of non sintered cement mortar using nanoslag and alkali activator, Journal of the Korea Institute of Building Construction 2010 Dec;10(6):61-6.
7. Yang IH, An experimental study on flexural behavior of steel fiber reinforced ultra high performance concrete, J of Korea concrete institute, 2009 Dec 31;21(6):737-44.
8. Erdem E, Olmez H, The mechanical properties of supersulphated cement containing phosphogypsum, J of Cement and concrete research, 1993 Aug 31;23(4):115-21.
9. Singh M, Garg M, Phosphogypsum - fly ash cementitious binder - its hydration and strength development, J of Cement and concrete research, 1995 Aug 28;25(4):752-58.
10. Fedaral highway administration, Material property characterization of ultra-high performance concrete, 1st ed, Washington D.C: FHA; 2006, Chapter 3, High performance concrete; p. 23-49.
11. Ministry of land, transport affairs, Concrete structural design code, 3rd rev, Seoul: Korea concrete institute; 2008, 425 p.
12. Park R, Paulay P. Reinforcement concrete structures, 2nd ed, New York: John Wiley & Sons; 1974, Chapter 2, Stress-strain relationships; p. 11-3.
13. Shin SW, Ghosh SK, Moreno J, Flexural ductility of ultra high strength concrete members, American concrete institute Structural Journal, 1989 Aug 25;86(4):394-400.