



알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 보의 휨거동 평가

이광명^{1)*} · 서정인²⁾

¹⁾성균관대학교 건설환경시스템공학과 ²⁾우석대학교 토목환경공학과

Evaluation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Using Alkali Activated Slag Concrete

Kwang-Myong Lee^{1)*} and Jung-In Seo²⁾

¹⁾Department of Civil and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

²⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea

ABSTRACT Cement zero concrete produced by alkali-activators and industrial by-products such as slag instead of cement, enables to solve the environmental pollution problems provoked by the exhaustion of natural resources and energy as well as the discharge of carbon dioxide. However, researches on the cement zero concrete are still limited to material studies and thus, study on the structural behavior of relevant members is essential to use the cement zero concrete as structural materials. This paper aims to evaluate experimentally and analytically the flexural behavior of RC beams using 50 MPa alkali activated slag concrete. To achieve such a goal, flexural tests on three types of RC beam specimens were conducted. A nonlinear analysis model is proposed using the modulus of elasticity and stress-strain relationship of alkali activated slag concrete. The analysis results obtained by the proposed model agree well with the experimental results, which could verify the validity of the proposed model.

Keywords : Alkali activated slag concrete, alkali activator, flexural behavior, strain compatibility condition

1. 서 론

향후 교토의정서 등의 국제 협약을 수행하기 위해서는 온실가스 감축이 매우 중요한 문제로 대두될 것이다. 특히 시멘트 제조과정에서 발생하는 온실가스의 저감은 시멘트 및 콘크리트 업계의 가장 중요한 현안이 될 것으로 예상된다. 이에 반해서 전 세계의 시멘트 수요량은 21세기 초반까지 매년 2.5~5.8% 정도 증가할 것으로 예상되고 있어 새로운 시멘트 관련 기술의 개발이 필요한 실정이다.¹⁾ 이러한 문제점의 대안으로 시멘트를 전혀 사용하지 않고 슬래그와 같은 산업 부산물과 알칼리 활성화제를 사용하여 콘크리트를 제조하면 천연자원 및 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염을 동시에 해결할 수 있을 것으로 판단된다.^{2,3)}

국내의 경우, 2000년도 이후 슬래그, 플라이 애시 및 알칼리 활성화제를 사용한 무시멘트 콘크리트 제조 기술이 꾸준히 연구되고 있다. 하지만 현재까지 알칼리 활성화

화제를 사용한 무시멘트 콘크리트의 연구는 주로 재료적인 측면 즉, 강도, 탄성계수, 건조수축 및 내구성 분야 등에 국한되어 수행되고 있다.⁴⁻¹⁰⁾ 그러나 알칼리 활성화제를 사용한 무시멘트 콘크리트를 구조재료로 사용하기 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다.^{11,12)}

따라서 본 논문에서는 50 MPa급 프리캐스트 제품용 알칼리 활성화 슬래그(Alkali Activated Slag, AAS) 콘크리트의 탄성계수 및 응력-변형률 관계를 실험적으로 구하고, 이러한 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동을 실험을 통해 조사하였다. 또한 실험을 통해 얻은 탄성계수 및 응력-변형률 관계를 이용하여 휨부재의 거동을 해석적으로 평가하고 실험결과와 비교, 분석하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용재료

본 연구에서는 결합재로 밀도가 2.90 g/cm³, 분말도 4,365 cm²/g, 염기도가 1.78인 KS 기준에 적합한 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 잔골재로는 밀도가 2.58 g/cm³

*Corresponding author E-mail : leekm79@skku.ac.kr

Received March 9, 2015, Revised April 7, 2015,

Accepted April 7, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

Table 1 AAS Concrete mix proportion

W/B (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m ³)					
		Water	GGBFS	Fine Agg.	Coarse Agg.	WG*	NaOH
45	50	165	367	855	869	73	19

* WG : Waterglass

Table 2 AAS Concrete properties

Age (days)	Slump (mm)	Air (%)	Comp. Strength (MPa)
1	165	3.1	5.6
3			32.0
7			40.6
28			55.3



Fig. 1 Test setup for modulus of elasticity

이고 조립율이 2.92인 강사를, 굵은 골재로는 밀도가 2.62 g/cm³이고 최대치수가 19 mm인 쇠석을 사용하였다.

고로슬래그 미분말의 활성을 위하여, 순도 98%인 수산화나트륨과 SiO₂ = 28.8% 및 Na₂O = 9.3%인 공업용 물유리와 같은 두 종류의 알칼리 활성화제를 슬래그 질량대비 Na₂O = 6%와 Ms(SiO₂/Na₂O) = 1.0의 조건으로 첨가하였다. 또한, AAS 콘크리트의 유동성을 확보하기 위하여 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

실험부재 제작에 사용한 50 MPa급 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같으며, 슬럼프, 공기량 및 재령에 따른 압축강도가 Table 2에 정리되어 있다. 부재 제작에 사용된 인장철근은 SD500으로 직접인장시험 결과 평균 항복강도는 499.6 MPa이었다.

2.2 탄성계수, 응력-변형을 관계 실험

알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 탄성계수 및 응력-변형을 관계를 알아보기 위해 $\Phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 제작하여 Fig. 1과 같이 하중에 따른 변형률을 측정하였다.

Table 3 Test variables of flexural members

ID	f'_c (MPa)	Tensile steel ratio	Tensile steel detail
25	55.3	0.0304	D25-3EA
22		0.0232	D22-3EA
19		0.0172	D19-3EA

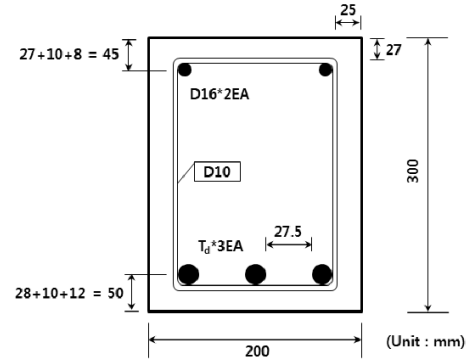


Fig. 2 Reinforcement details

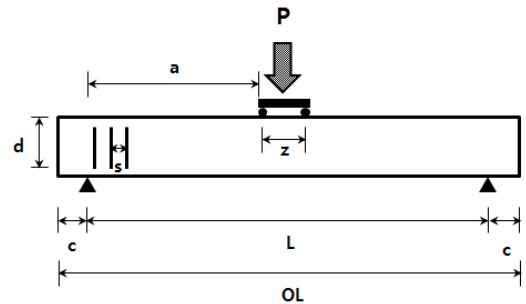


Fig. 3 Dimensions of flexural member

Table 4 Dimensions of flexural member (unit : mm)

d	a	L	s	c	z	OL
250	1,125	2,600	70	100	350	2,800

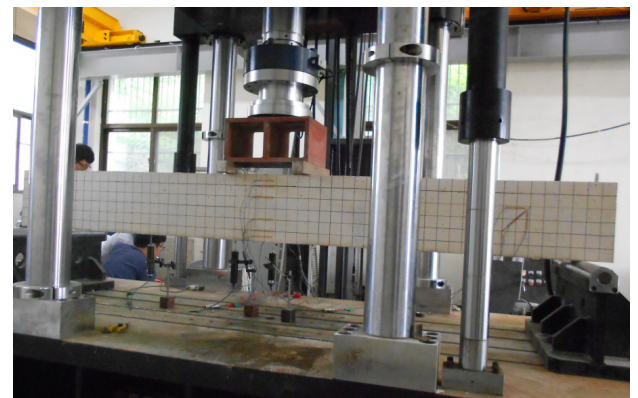


Fig. 4 Test set-up for flexural member

2.3 휨거동 부재 실험

프리캐스트용 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 부재의 휨거동을 조사하기 위해 실험변수를 철근비 3수

준(균형철근비의 76, 58, 43%)으로 정하여, Table 3과 같이 3 종류의 부재를 제작하였다. 부재의 단면은 Fig 2와 같으며, 전단철근(D10)을 70 mm 간격으로 촘촘히 배치하여 전단파괴를 방지하고자 하였다. 부재의 형상과 제원이 Fig. 3과 Table 4에 정리되어 있으며, Fig. 4는 제작이 완료된 부재와 하중 재하 장치의 모습을 나타낸다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 탄성계수와 응력-변형률 관계

ACI 318-08¹³⁾에서 제안한 콘크리트의 탄성계수 식은 다음과 같다.

$$E_c = 4,700 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

여기서 f'_c 는 콘크리트 압축강도이다.

한편 Hognastad¹⁴⁾가 제안한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \text{ for } \epsilon_c < \epsilon_0 \quad (2a)$$

$$f_c = f'_c \left[1 - 0.15 \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{0.038 - \epsilon_0} \right] \text{ for } \epsilon_c \geq \epsilon_0 \quad (2b)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (2c)$$

여기서 f_c , ϵ_c 는 각각 콘크리트 응력 및 변형률이며, ϵ_0 는 최대 응력에서의 변형률이다.

Table 5 Test and prediction of modulus of elasticity

	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ϵ_0
Test	55.3	31,465	0.00285
Predicted model		34,951	0.00320

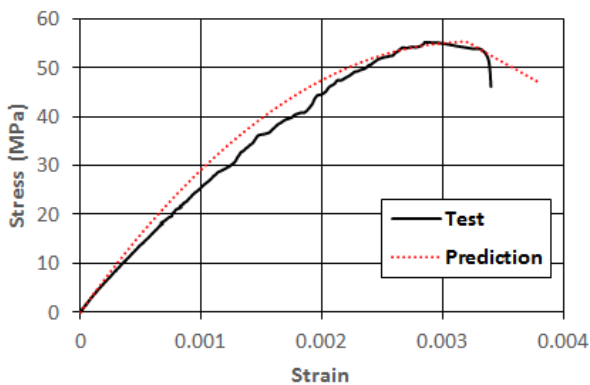


Fig. 5 Stress-strain relationship of test and prediction

식 (1)과 (2)를 이용하여 예측한 탄성계수(E_c), 최대 응력에서의 변형률(ϵ_0)이 실험값과 함께 Table 5에 정리되어 있다. 실험값과 예측값을 비교해 보면 약 10% 오차를 나타냈는데, 이는 슬래그의 밀도가 시멘트의 밀도보다 다소 작기 때문에 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 단위 질량이 감소하기 때문으로 추정된다. 또한 응력-변형률 관계를 나타낸 Fig. 5에서 동일한 응력에서 예측값보다 실험값이 다소 큰 변형률을 나타냈다.

3.2 부재의 휨거동

3.2.1 균열, 철근 항복 및 극한 하중

휨 파괴 실험 결과로부터 구한 균열 하중, 인장 철근의 항복하중 및 극한하중이 Table 6에 정리되어 있다. 실험 결과 모든 부재에서 휨파괴가 발생했으며, 인장 철근비가 클수록 하중저항 능력이 더 우수하였다. 또한 철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.15~1.41 정도로 나타났다. 반면 부재 제작에 동일한 압축강도를 갖는 알칼리 활성 슬래그 콘크리트를 사용하였기 때문에 모든 부재에서 균열하중이 유사하게 나타났다.

3.2.2 하중-처짐 관계

부재의 하중-처짐 관계를 나타낸 Fig. 6을 보면, 모든 부재는 하중과 처짐이 거의 선형적으로 증가하는 단계를 지나 인장철근이 항복한 이후 곡선의 기울기가 급격히 변

Table 6 Crack, yield and ultimate load of members

ID	Crack load (kN)	Yield		Ultimate		Ultimate /yield		Failure pattern
		load (kN)	displ. (mm)	load (kN)	displ. (mm)	load	displ.	
25	20.6	272.5	13.82	313.4	20.90	1.15	1.51	flexure
22	24.4	171.9	10.37	242.3	27.05	1.41	2.61	flexure
19	22.4	137.1	10.53	168.0	31.81	1.23	3.02	flexure

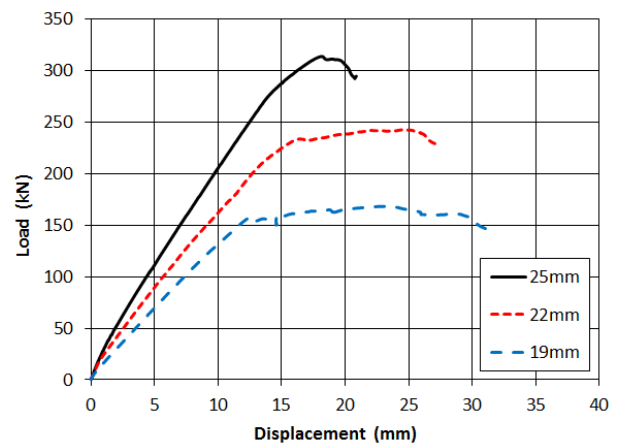


Fig. 6 Load-displacement according to steel ratio

화하였다. 특히 인장철근비가 증가할수록 하중과 처짐의 선형 구간이 증가하였으며, 최대하중 이후 하중-처짐 곡선이 급격히 하강하는 취성적 파괴양상을 나타냈다. 따라서 알칼리 활성 콘크리트를 이용한 철근 콘크리트 부재의 거동 역시 일반 콘크리트 부재의 거동과 유사하게 철근비에 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

일반적으로 콘크리트 구조물의 연성은 연성지수(ductility index)로 정량화할 수 있으며, 변형 특성 중에서 구조물의 처짐, 회전각, 또는 곡률을 이용하여 표현할 수 있다¹⁵⁾. 본 연구에서는 식 (3)과 같이 처짐에 근거하여 연성지수를 정의하여 각 부재의 연성 특성을 고찰하였다.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (3)$$

여기서, μ 는 부재의 연성지수이고 Δ_u 와 Δ_y 는 각각 부재의 극한하중과 항복하중에서의 처짐이다.

실험에서 얻어진 부재의 연성지수를 Table 6에 나타내었다. 고강도 콘크리트의 연성지수에 관한 기존 연구에서는 고강도 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위한 최소 연성지수로서 4.0 이상의 값을 제안하고 있다.¹⁶⁾ 실험결과에 의하면, 모든 부재에서 연성지수가 4.0 보다 작았으며, 철근비가 작아질수록 증가하는 것으로 나타났다. 본 실험의 경우 철근비가 가장 작은 부재가 균형철근비의 43% 수준으로 일반적인 힘부재보다는 철근이 다소 많이 배치된 점을 감안하면, 철근비가 더 작은 실제 구조물에서는 연성지수를 4.0 이상 확보하여 취성파괴를 방지할 수 있는 것으로 예상된다.

3.2.3 하중-철근 변형률 관계

부재의 하중-철근 변형률 관계를 나타내는 Fig. 7을 보면, 균열 하중보다 작은 하중상태에서는 변형률이 매우 작게 나타났으며 균열 하중 이후 하중이 증가함에 따라 변형이 선형적으로 증가하였다. 또한 인장철근 항복 이후에는 변형률이 크게 증대하는 경향을 보였다.

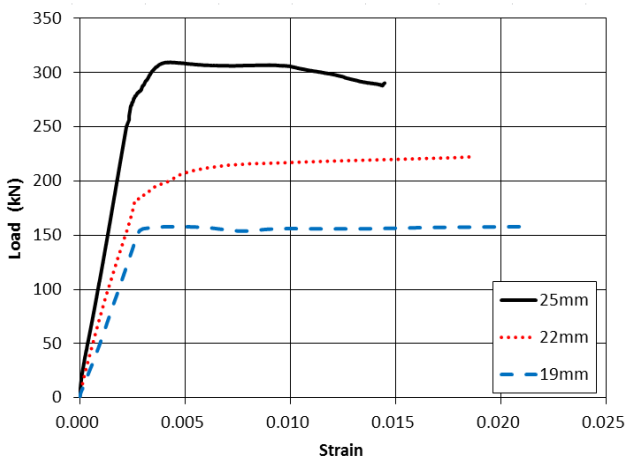


Fig. 7 Load-steel strain according to steel ratio

3.2.4 하중-콘크리트 변형률 관계

부재의 하중-콘크리트 변형률 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 부재들에서 콘크리트 극한변형률이 0.0030~0.0033으로 나타났으며, 이는 일반 콘크리트에 비해 약간 작거나 유사한 수준으로, 이러한 경향은 Table 5의 최대 응력에서의 변형률(ϵ_0)의 실험값이 일반 콘크리트의 예측모델을 이용한 예측값보다 작은 것과 일치하는 결과이다.

4. 변형률 적합조건에 의한 해석

4.1 사용 재료의 모델

본 연구에서는 RC 부재의 비선형 휨거동 해석기법을 제안하기 위하여 콘크리트 모델은 식 (2)의 Hognestad가 제안한 비선형 모델을 사용하였으며, 철근 모델은 Bilinear Model을 사용하여 철근 항복 후에는 철근의 탄성계수를 무시하였다.

4.2 RC 부재의 비선형 휨거동 해석기법

알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 RC 부재의 비선형 휨거동을 평가하기 위하여 변형률 적합조건 방법을 이용한 비선형 해석기법을 제안하였다. 이를 위해 콘크리트 압축 연단의 변형률을 초기단계에서 파괴단계까지 증가시키면

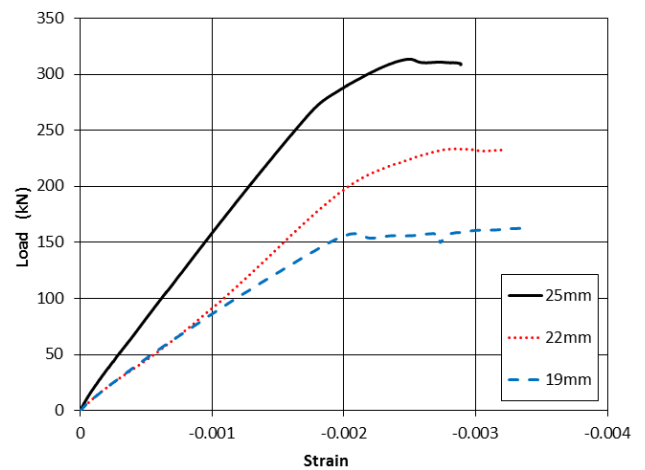


Fig. 8 Load-concrete strain according to steel ratio

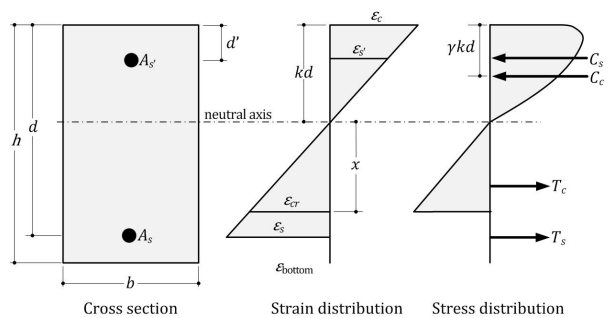


Fig. 9 Strain compatibility of section for analysis

서, 각 단계별로 콘크리트 및 철근의 응력, 휨강도, 곡률 및 처짐을 다음과 같이 계산하였다.

단면 내의 변형률 분포 즉, 단면 상연 및 하연의 변형은 Fig. 9와 같이 곡률 및 중립축 깊이를 이용하여 결정할 수 있다. 단계별로 곡률을 증가시키고 중립축의 위치를 가정하여 단면 내의 변형률의 분포를 산정하며, 이때 곡률은 부재의 단위 길이 당 기울기의 변화로 단면에서의 변형률 경사와 동일하다고 가정한다. 변형률 적합조건에 의한 보 단면 상연 및 하연의 변형률은 식 (4)와 같다.

$$\epsilon_{top} = kd\phi \quad (4a)$$

$$\epsilon_{bot} = (h - kd)\phi \quad (4b)$$

변형률 분포를 결정한 후, 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 관계로 부터 응력을 계산한다. 단면의 응력을 산정한 후 단면력을 산정할 수 있으며, 이때 단면력의 합은 식 (5)와 같은 평형조건을 만족해야 한다.

$$C_c + C_s + T_c + T_s = 0 \quad (5a)$$

$$\int_{A_c} f_c dA_c + \int_{A_s} f_s dA_s = 0 \quad (5b)$$

여기서, C_c , T_c 및 C_s , T_s 는 각각 콘크리트가 부담하는 압축력, 인장력 및 철근이 부담하는 압축력, 인장력이고 f_c 는 콘크리트 응력, f_s 는 철근 응력이다.

평형상태를 만족시키는 단면 내 응력 분포에 근거하여 단면력, 즉 모멘트를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = \int_{A_c} f_c y dA_c + \int_{A_s} f_s y dA_s \quad (6)$$

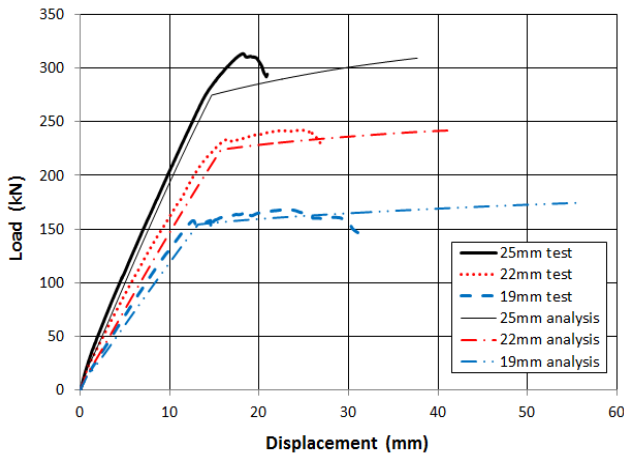


Fig. 10 Load-displacement of analysis and test

식 (6)에서 구해진 모멘트 M 과 곡률 ϕ 은 식 (7)과 같은 관계를 이용하여 지간길이가 L 인 부재에 작용하는 하중 P 와 지간 중앙에서의 처짐 δ 으로 치환할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1}(L/2 \times \phi) \quad (7)$$

$$\delta = (1 - \cos\theta) / \phi$$

$$P = 4M/L$$

4.3 실험결과와 해석결과의 비교분석

4.3.1 하중 - 처짐 관계

하중-처짐 관계의 실험결과와 해석결과를 나타내는 Fig. 10을 보면 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하여 제안된 해석 모델이 적절한 것으로 판단된다. 하지만 철근비가 큰 25 mm 부재의 경우, 해석결과와 비교하여 실험부재가 다소 취성 거동을 보인 것으로 나타났다.

4.3.2 하중 - 변형률 관계

하중-철근 변형률, 하중-콘크리트 변형률 관계의 실험결과와 해석 결과를 각각 Fig. 11과 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 해석결과가 실험결과와 비교적 잘

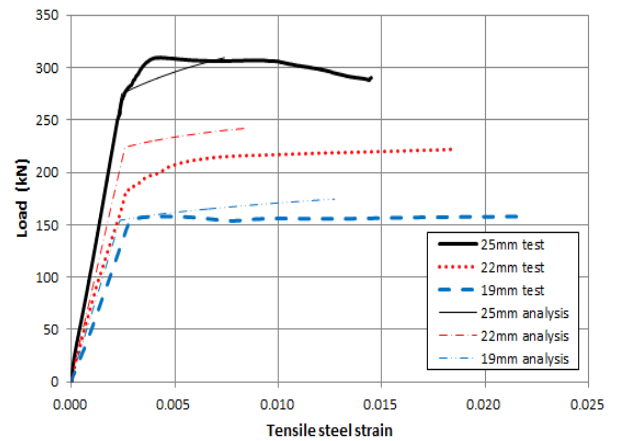


Fig. 11 Load-tensile steel strain of analysis and test

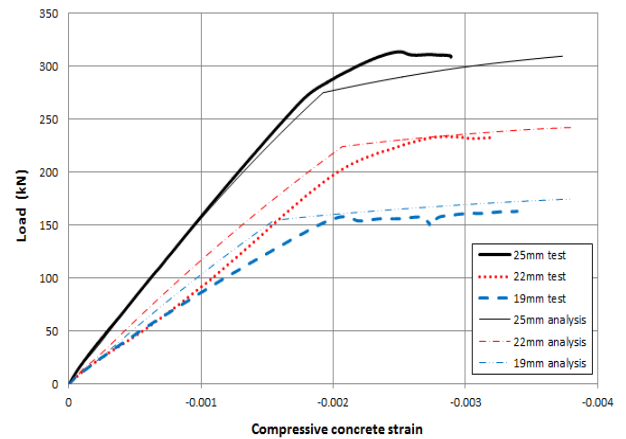


Fig. 12 Load-compressive concrete strain of analysis and test

일치하여 제안된 해석 모델이 적절한 것으로 사료된다. 하지만 22 mm 부재의 하중-철근 변형률 실험결과, 해석 결과보다 작은 하중에서 철근이 항복한 것으로 나타났다. 또한 19, 22 mm 부재의 하중-콘크리트 변형률 그래프에서 동일한 하중에서 예측값과 비교하여 실험에서 상대적으로 큰 변형을 보였다. 이는 3.1에서 분석한 것과 같이 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 경우 일반 콘크리트의 탄성계수 및 응력-변형률 모델과 다소 차이를 보이기 때문으로 사료되며 보다 정확한 해석을 위해서는 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트에 적합한 탄성계수 및 응력-변형률 모델이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 철근 콘크리트 보의 휨거동을 실험 및 해석적으로 평가하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 탄성계수와 최대 응력에서의 변형률은 일반 콘크리트와 비교하여 다소 작았다. 이는 슬래그의 밀도가 시멘트의 밀도보다 작아서 콘크리트의 단위질량이 작아지는 이유로 추정된다. 향후 탄성계수 및 응력-변형률 관계에 대한 적절한 모델의 제시가 필요할 것으로 사료된다.
- 2) 휨부재 실험 결과, 철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.15~1.41 정도로 나타났으며, 인장 철근비가 클수록 하중저항 능력이 더 우수하였다.
- 3) 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 탄성계수와 응력-변형률 관계를 이용한 비선형 휨거동 해석 모델을 제안하였으며, 해석 모델을 이용하여 얻은 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하여 제안된 해석 모델은 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 탄소저감형 건설재료 기술개발(과제번호11 기술혁신 F04)의 일환으로 국토해양부 건설기술혁신사업의 재정적 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., "Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems", *Advances in Cement Research*, Vol.27, 1995, pp. 93-102.
2. Shi, C. and Day, R. L., "Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Pozzolans", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.5, 2001, pp. 813-818.
3. Yang, K. H., Song, J. K., and Choi, D. W., "CO₂ Assessment

- of Alkali-Activated Concrete Based on Korean LCI Database", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.6, 2011, pp. 36-39.
4. Collins, F. G. and Sanjayan, J. G., "Workability and Mechanical Properties of Alkali Activated Slag Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.3, 1999, pp. 455-458.
5. Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., and Lukey, G. C., "Engineering Properties of Inorganic Polymer Concrete (IPCs)", *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.2, 2007, pp. 251-257.
6. Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and van Deventer, J. S. J., "Geopolymer Technology: The Current State of the Art", *Journal of Materials Science*, Vol.42, 2007, pp. 2917-2933.
7. Kim, T. W., "The Strength Properties of Alkali-Activated Slag Mortars by Combined Caustic Alkali with Sodium Carbonate as Activator", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.6, 2012, pp. 745-752.
8. Yang, K. H. and Seo, E. A., "Evaluation of Shrinkage Strain of Alkali-Activated Slag Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25 No.6, 2013, pp. 593-599.
9. Oh, S. H., Hong, S. H., and Lee, K. M., "Autogenous Shrinkage Properties of High Strength Alkali Activated Slag Mortar", *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol.2, No.1, 2014, pp. 60-65.
10. Song, K. I., Lee, B. Y., Hong, G. H., Gong, M. H., and Song, J. K., "Effects of Basicity on the Carbonation Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortar", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24 No.5, 2012, pp. 577-584.
11. Yang, K. H., *Development of a Mix Design and Standards for Eco-Friendly Green Concrete Using Cementless Alkali-Activated Binders*, Technical Report, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, Korea, 2011, 106 pp.
12. Nielsen, M. P., *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1984, 936 pp.
13. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 473 pp.
14. Hognestad, E., *A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*, Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, IL, 1951, 128 pp.
15. Yang I. H., "An experimental study on flexural behavior of steel fiber reinforced ultra high performance concrete", *Journal of Korean Concrete Institute Structural*, Vol.21, No.6, 2009, pp. 737-744.
16. Shin, S. W., Ghosh, S. K., and Moreno, J., "Flexural ductility of ultra high strength concrete members", *American Concrete Institute Structural Journal*, Vol.86, No.4, 1989, pp. 394-400.

요약 시멘트를 전혀 사용하지 않고 슬래그와 같은 산업 부산물과 알칼리 활성화제를 사용하여 콘크리트를 제조하면 천연자원 및 에너지 고갈 문제와 이산화탄소 배출에 의한 환경오염을 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 현재까지 알칼리 활성화제를 사용한 무시멘트 콘크리트의 연구는 주로 재료적인 분야에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나 무시멘트 콘크리트를 구조재료로 사용하기 위해서는 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다. 본 논문에서는 50 MPa급 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보부재 3개를 제작하여 휨실험을 수행하였다. 실험결과를 검증하기 위하여 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 탄성계수와 응력-변형률 관계를 이용한 비선형 해석 모델을 제안하였으며, 제안된 해석 모델을 이용하여 해석을 수행한 결과, 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하여 제안된 해석 모델은 적절한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 무시멘트 콘크리트, 알칼리 활성화제, 휨거동, 변형률 적합조건