알칼리활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계

양근혁^{1)*} · 송진규²⁾ · 이경훈³⁾

¹⁾경기대학교 건축공학과, ²⁾전남대학교 건축공학과, ³⁾전남대학교 바이오하우징 연구사업단

A Stress-Strain Relationship of Alkali-Activated Slag Concrete

Keun-Hyeok Yang,^{1)*} Jin-Kyu Song,²⁾ and Kyong-Hun Lee³⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

³⁾Bio-Housing Research Institute, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

ABSTRACT The present study summarizes a series of compressive tests on concrete cylinder in order to examine the stress-strain relationship of alkali-activated (AA) slag concrete. The compressive strength and unit weight of concrete tested ranged from 8.6 MPa to 42.2 MPa and from 2,186 kg/m³ to 2,343 kg/m³, respectively. A mathematical equation representing the complete stress-strain curve was developed based on test results recorded from 34 concrete specimens. The modulus of elasticity, strain at peak stress, slopes of ascending and descending branches of stress-strain curves were generalized as a function of compressive strength and unit weight of concrete. The mean and standard deviation of the coefficient of variance between measured and predicted curves were 6.9% and 2.6%, respectively. This indicates that the stress-strain relationship of AA slag concrete is represented properly with more accuracy in the proposed model than in some other available models for ordinary portland cement (OPC) concrete.

Keywords : AA slag concrete, stress-strain relationship, compressive strength, unit weight

1. 서 론

천연자원 고갈 및 온실가스 문제를 해결하기 위한 일환으로서 보통 포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC)의 소비량을 줄이기 위한 많은 노력과 기술¹⁻³⁾들이 개발되고 있다. 이에 따라 산업부산물인 고로슬래그 또는 플라이애쉬를 이용하여 OPC의 치환기술에서 2000년대에는 대체기술인 알칼리 활성(alkali-activated, AA) 결합재로 적극적으로 발전하고 있다. 최근에는 AA 결합재의 실용화를 위해 강도발현 성능과 함께 내구성과 경제성이 함께 고려되고 있다.^{3,4)}

시멘트를 사용하지 않은 알칼리 활성 콘크리트의 실용화와 다각화를 위해서는 안정적인 구조체 적용이 요구된다. 이를 위한 가장 기초적인 연구는 AA 콘크리트의 역학적 특성들에 대한 정확한 평가이다. 하지만 대부분의 AA 콘크리트에 대한 연구¹⁻⁴⁾들은 결합재 배합과 수화생성물 평가 및 압축강도발현 관계에 중점을 두고 진행되었다. 알칼리 활성 콘크리트의 역학적 특성에 대한 소수

연구들⁵⁻⁷⁾도 압축강도와 탄성계수 및 인장강도의 관계가 OPC 콘크리트에 비해 다소 차이를 보여줄 뿐, 설계 모델로서의 발전이 아직 미미하다. 특히 Bondar 등⁶⁾은 AA 콘크리트의 탄성계수는 결합재로 이용되는 원재료와 활성화제의 종류에 따라 동일 압축강도를 갖는 OPC 콘크리트에 비해 20% 이상 높거나 낮을 수 있음을 보였다. 이는 AA 콘크리트의 응력-변형률 관계가 결합재 종류에 따라 OPC 콘크리트와는 다르게 있을 수 있음을 의미하기도 한다.

콘크리트 구조부재의 해석 및 설계를 위해서는 구성 재료들의 응력-변형률 관계가 반드시 필요하다. 이에 따라 OPC 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 많은 모델⁸⁻¹³⁾들이 실험 결과에 근거하여 제시되고 있다. 하지만 AA 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 실험 결과는 매우 부족하여 OPC 콘크리트의 응력-변형률에 대한 제안 모델들의 적용성에 대한 확인도 아직 이루어지지 않았다. 이 연구의 목적은 AA 콘크리트의 응력-변형률 관계를 평가하고 실험 결과에 기반한 합리적인 모델을 제시하는 것이다. 알칼리 활성 결합재의 경제성과 적용성을 고려하여 Yang 등¹⁴⁾이 제시한 활성화제를 이용하여 압축강도 약 45 MPa 이하의 수준에서 응력-변형률 관계를 평가하였다.

*Corresponding author E-mail: yangkh@kgu.ac.kr

Received July 29, 2011, Revised September 27, 2011,

Accepted September 27, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

2. 실험

2.1 시험체 상세

콘크리트의 배합 시 주요 고려사항인 물-결합재비(W/B), 단위수량(W) 및 잔골재율(S/a)을 변수로 Table 1에 나타낸바와 같이 34배합을 실험하였다. 시멘트를 사용하지 않은 AA 결합재는 두 종류를 이용하였는데, 7.5% $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 1\% \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{고로슬래그}$ 의 S형과 7.5% $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\% \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{고로슬래그}$ 의 C형이다. Table 1에 나타낸 그룹 I

에서 W/B 는 0.25에서 0.6까지 변화하였으며, W 와 S/a 는 각각 185 kg/m^3 과 0.43으로 고정하였다. 그룹 II에서는 W/B 와 S/a 를 각각 0.3과 0.43으로 고정하고 W 가 155 kg/m^3 에서 205 kg/m^3 까지 변화하였다. 그룹 III에서는 S/a 가 0.35에서 0.5까지 변화하였으며 W 는 185 kg/m^3 이고, W/B 는 S형 결합재와 C형 결합재에서 각각 0.3과 0.33이다.

천연모래와 최대 직경 25 mm의 부순 자갈을 잔골재와 굵은 골재로 이용하였다. 사용된 모래와 쇄석의 비중은 각각 2.62와 2.6이다. 배합 시 이들 골재들의 수분 상태는 표면 건조 포화 상태를 유지하였다.

Table 1 Summary of test results and predictions

Group	Specimen*	W/B	W (kg/m ³)	S/a	Test results				Predictions				Exp./Pre.	
					w_c (kg/m ³)	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	ε_0	E_c (MPa)	ε_0	β_1	k	$(E_c)_{\text{Exp.}}$	$(\varepsilon_0)_{\text{Exp.}}$
													$(E_c)_{\text{Pre.}}$	$(\varepsilon_0)_{\text{Pre.}}$
I	1S-25	0.25	185	0.43	2342	42.2	31465	0.00285	30964	0.00278	0.834	3.426	1.016	1.026
	1S-30	0.3			2246	28.5	25287	0.00240	24181	0.00243	0.812	1.931	1.046	0.987
	1S-35	0.35			2231	24.6	23515	0.00243	22339	0.00229	0.802	1.576	1.053	1.063
	1S-40	0.4			2264	18.6	19724	0.00200	20024	0.00196	0.776	1.111	0.985	1.021
	1S-50	0.5			2229	12.5	16552	0.00185	16229	0.00165	0.749	0.644	1.020	1.120
	1S-60	0.6			2227	8.9	12945	0.00143	13816	0.00140	0.725	0.411	0.937	1.019
	1C-28	0.28			2253	37.1	29907	0.00274	27499	0.00275	0.833	2.746	1.088	0.996
	1C-30	0.3			2264	24.2	21625	0.00230	22661	0.00222	0.797	1.572	0.954	1.034
	1C-35	0.35			2259	22.0	20832	0.00217	21597	0.00213	0.790	1.382	0.965	1.019
	1C-40	0.40			2240	15.3	19453	0.00161	17978	0.00181	0.764	0.846	1.082	0.890
	1C-50	0.5			2243	11.4	18765	0.00149	15688	0.00157	0.741	0.575	1.196	0.951
	1C-60	0.6			2186	8.6	13005	0.00129	13221	0.00142	0.726	0.383	0.984	0.911
II	2S-155	0.3	155	0.43	2326	32.3	28388	0.00247	27028	0.00246	0.814	2.385	1.050	1.003
	2S-165		165		2275	29.9	25296	0.00239	25212	0.00245	0.813	2.092	1.003	0.977
	2S-175		175		2283	32.7	26628	0.00259	26435	0.00254	0.819	2.365	1.007	1.019
	2S-185		185		2246	30.5	25262	0.00245	24964	0.00251	0.817	2.112	1.012	0.975
	2S-195		195		2251	31.3	25760	0.00263	25354	0.00254	0.819	2.192	1.016	1.036
	2S-205		205		2234	30.0	24996	0.00250	24572	0.00251	0.817	2.052	1.017	0.995
	2C-155		155		2343	25.4	22669	0.00234	24407	0.00217	0.793	1.754	0.929	1.077
	2C-165		165		2308	25.3	22497	0.00234	23817	0.00221	0.796	1.710	0.945	1.057
	2C-175		175		2309	24.1	20441	0.00220	23295	0.00216	0.792	1.605	0.877	1.018
	2C-185		175		2264	25.4	21603	0.00252	23183	0.00228	0.801	1.676	0.932	1.107
	2C-195		195		2301	24.2	21965	0.00227	23219	0.00218	0.793	1.606	0.946	1.044
	2C-205		205		2262	25.3	22984	0.00240	23109	0.00227	0.801	1.665	0.995	1.055
III	3S-35	0.3	185	0.35	2289	29.6	24514	0.00270	25325	0.00241	0.810	2.081	0.968	1.118
	3S-40			0.4	2287	29.7	24137	0.00250	25332	0.00242	0.811	2.088	0.953	1.033
	3S-43			0.43	2246	28.5	25262	0.00253	24181	0.00243	0.812	1.931	1.045	1.040
	3S-45			0.45	2304	30.5	24077	0.00233	25937	0.00243	0.811	2.184	0.928	0.960
	3S-50			0.5	2279	32.0	25973	0.00265	26098	0.00252	0.818	2.294	0.995	1.051
	3C-35	0.33		0.35	2287	24.5	22957	0.00214	23141	0.00221	0.795	1.620	0.992	0.970
	3C-40			0.4	2251	24.5	21925	0.00224	22597	0.00225	0.799	1.586	0.970	0.993
	3C-43			0.43	2266	24.5	22516	0.00225	22823	0.00223	0.798	1.600	0.987	1.007
	3C-45			0.45	2263	24.8	22660	0.00208	22908	0.00225	0.799	1.623	0.989	0.924
	3C-50			0.5	2271	26.0	21614	0.00249	23547	0.00229	0.802	1.736	0.918	1.086

*The first and second parts of all specimen notations indicate the group class and type of alkali activators, respectively, while the third parts of the notations in group I, II and III give the water-to-binder (W/B) ratio, unit water content (W), and fine aggregate-to-total aggregate (S/a) ratio, respectively.

2.2 측정 상세

콘크리트의 응력-변형률 관계를 측정하기 위하여 Fig. 1에 나타낸바와 같이 $\phi 100 \times 200$ mm 실린더에 5 mm 변위계가 양쪽에 설치된 컴프레서미터와 전기저항게이지를 부착하였다. 가력은 3,000 kN 용량의 만능시험기를 이용하여 변위제어 하였다. 이때 변위는 컴프레서미터에 수직으로 설치된 변위계에서 0.05 mm/min의 속도로 정가력하였다. 시험체의 횡변형 및 체적 변화를 평가하기 위하여 컴프레서미터에 수평방향으로 변위계를 설치하여 시험체의 직경 변화를 측정하였다.

편심의 영향을 최소화하기 위하여 각 시험체의 가력면을 연마하였다. 또한 초기에 설계강도의 1/3까지 가력하면서 변위계와 전기저항 게이지로부터 기록된 값들을 비교하고 필요 시 공시체의 위치를 조절하면서 중심축하중 가력을 확인하였다. 측정된 응력-변형률 관계로부터 압축강도, 탄성계수 및 최대응력 시 변형률에 대한 평균값을 산정하였다. 탄성계수는 원점과 최대응력의 45%를 연결하는 직선의 기울기¹⁵⁾로 산정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 응력-변형률 관계

Fig. 2에는 그룹 I의 시험체들에서 측정한 AA 슬래그 콘크리트의 전형적인 응력-변형률 관계를 나타내었다. 콘크리트 압축변형률이 0.005를 넘으면 많은 균열들의 발생으로 인해 공시체에 대한 컴프레서미터의 고정이 불안전하면서 신뢰할 수 있는 데이터를 얻지 못했다. 알칼리 활성화 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계는 OPC 콘크리트와 같이 비선형 포물선형을 나타내었는데, 그 형상은 콘크리트 압축강도(f_{ck})에 중요한 영향을 받았다. 응

Fig. 1 Test set-up

Fig. 2 Typical stress-strain curves of AA concrete (group I)

력초기에는 거의 선형거동을 보이지만 최대응력의 20~30% 이상에서 뚜렷한 비선형 거동을 보이며 최대응력의 80~85%부터는 변형률이 급격하게 증가하였다. 최대응력 시 변형률 및 최대응력 이후 감소하는 응력의 기울기는 콘크리트 강도가 높을수록 컸다. 한편, 응력-변형률 곡선의 상승부 및 하강부의 기울기는 사용된 알칼리 활성화제에 영향을 받지 않았다.

3.2 탄성계수

일반적으로 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 콘크리트 압축강도와 단위용적질량에 의해 영향을 받는다. 이 연구에서 실험된 알칼리 활성화 콘크리트의 단위용적질량(w_c)은 Table 1에 나타낸바와 같이 2,186~2,343 kg/m³ 범위에 있어서 w_c 가 E_c 에 미치는 영향은 크게 나타나지 않았다. 하지만 알칼리 활성화 콘크리트의 E_c 는 OPC 콘크리트에서와 같이 f_{ck} 가 증가할수록 증가하였다.

Noguchi 등¹⁶⁾ 실험 데이터들의 분석으로부터 OPC 콘크리트의 E_c 는 f_{ck} 와 w_c 의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있음을 보였다.

$$E_c = A_1 (f_{ck})^p (w_c/w_0)^q \quad (1)$$

여기서, w_0 는 콘크리트 단위용적질량의 기본값으로서 2,300 kg/m³로 가정하며, A_1 , p 및 q 는 실험 상수이다. 알

Fig. 3 Regression analysis for E_c of AA slag concrete

Fig. 4 Comparisons of proposed and existing models for E_c

칼리 활성 콘크리트에서 이들 실험 상수들을 결정하기 위하여 이 실험 결과 및 Douglas 등³⁾의 실험 결과를 이용하여 회귀분석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 회귀분석 결과 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 E_c 를 나타내는 식 (1)의 실험 상수 A_1 , p 및 q 는 f_{ck} 가 약 50 MPa 이하에서 각각 5190, 0.47 및 1.5로 제시될 수 있었다. Fig. 4에는 w_c 는 2,300 kg/m³을 갖는 OPC 콘크리트의 E_c 에 대한 기존 모델들과 이 제안 모델을 비교하였다. 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 E_c 에 대한 식 (1)은 CEB-FIP¹²⁾ 및 EC 2¹³⁾의 제안값보다 약 15~20% 낮았으며, Carreira and Chu⁹⁾ 모델에 비해서는 f_{ck} 가 20 MPa 이상일 때 높았다. 한편, ACI 318-08¹⁵⁾ 제안 모델과는 매우 비슷한 값을 보였는데, 이는 f_{ck} 의 증가에 대한 E_c 의 증가비율이 두 모델에서 매우 가깝게 제시되기 때문이다.

3.3 최대응력 시 변형률

알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 최대응력 시 변형률 (ϵ_0)은 Table 1에 나타낸바와 같이 압축강도의 증가와 함께 증가하였다. 이는 OPC 콘크리트⁹⁻¹¹⁾에서도 일반적으로 관찰되는 특성이다.

알칼리 활성 콘크리트의 ϵ_0 에 대한 예측 모델을 제시하기 위하여 이 실험 결과를 회귀분석 하여 Fig. 5에 나

Fig. 5 Regression analysis for ϵ_0 of AA slag concrete

타내었다. 동일 그림에 비교를 위해 OPC 보통 중량 콘크리트의 실험 결과를 함께 나타내었다. 콘크리트 압축강도는 차원해석을 위해 탄성계수로 무차원하였다. 콘크리트의 ϵ_0 는 일반적으로 f_{ck}/E_c 의 증가와 함께 증가하였다. 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 ϵ_0 에 대한 실험 데이터는 매우 부족하지만 이 실험 결과들의 회귀분석으로부터 다음과 같이 ϵ_0 를 간단하게 나타낼 수 있었다.

$$\epsilon_0 = 1.125(f_{ck}/E_c)^{0.91} \quad (2)$$

한편, f_{ck}/E_c 의 증가에 대한 ϵ_0 의 증가 기울기는 OPC 보통 중량 콘크리트보다는 AA 슬래그 콘크리트에서 컸다. 일반적으로 콘크리트는 최대 응력의 80~90%에서 급격히 횡변형이 증가하며 현저하게 비선형거동을 보인다. 이때 비선형거동은 횡변형 증가 크기에 의해 영향을 받는다. 시험체 1S-25와 1S-50에서 측정된 AA 슬래그 콘크리트의 전형적인 종방향과 횡방향의 변형률 및 부피 변화율을 Fig. 6에 나타내었다. 최대응력의 80~85% 시점에서 횡 변형률이 급격히 증가하며 최대응력의 약 95% 시점에서 다수의 종방향 균열들의 발생과 함께 부피 변화는 압축에서 인장으로 변하기 시작하였다. 이에 따라 종방향 변형률의 증가 기울기도 현저히 증가하였다. 이 현상은 1S-50 시험체보다는 압축강도가 높은 1S-25 시험체에서 더 뚜렷하였다. 최대응력의 80% 이상에서 횡변형의 급격한 증가는 골재와 페이스트 계면의 균열 및 두 재료의 분리가 증가하기 때문인데, 이는 페이스트의 점착력에 의해 영향을 받는다. Figs. 5 및 6으로부터 이 연구에 이용된 알칼리 활성 결합재의 점착력은 OPC에 비해 다소 낮을 가능성이 있다. 이에 대한 유용한 연구 결과는 없기 때문에 정량적인 결과를 얻기 위한 실험이 필요하다.

4. 응력-변형률 관계의 제시

4.1 기본 곡선식

알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 곡선의 기

Fig. 6 Typical longitudinal, lateral and volumetric strain behaviors of AA slag concrete

본 형상은 Fig. 7에 나타낸바와 같이 종(bell) 모양으로 이상화 될 수 있다. 비선형 곡선의 형상은 다음 식에 의해 일반화될 수 있다.

$$y = \frac{\beta_3 x}{x^{\beta_2} + \beta_1} \quad (3)$$

여기서, $y(=f_c/f_{ck})$ 는 응력을 압축강도로 무차원한 값이며, $x(=\epsilon_c/\epsilon_0)$ 는 변형률을 최대응력 시 변형률로 무차원한 값이며, f_c 는 임의의 변형률 ϵ_c 일 때의 응력이다. 경계조건으로서 $x=0$ 일 때 $y=0$ 이므로 $\beta_1 > 0$ 이어야 한다. 또한 $x=1$ 일 때 $y=1$ 이므로 $\beta_3=\beta_1+1$ 이다. 식 (3)의 곡선식

Fig. 7 Generalization of stress-strain curve in compression

에서 임의의 점에 대한 접선($E_t = df_c / d\epsilon_c$)은 다음과 같다.

$$E_t = \frac{f_{ck}}{\epsilon_0} \frac{(\beta_1 + 1)(x^{\beta_2} + \beta_1 - \beta_2 x^{\beta_2})}{(x^{\beta_2} + \beta_1)^2} \quad (4)$$

$x=1$ 일 때 접선기울기 $E_t=0$ 이므로 $\beta_2=\beta_1+1$ 이다. 또한, $x=0$ 일 때 E_t 는 초기 접선기울기(E_{ci})와 같으므로 β_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_1 = \frac{1}{\frac{\epsilon_0 E_{ci}}{f_{ck}} - 1} \quad (5)$$

따라서 응력-변형률 곡선의 기본 형상을 나타내는 식 (3)은 경계조건으로부터 f_{ck} , ϵ_0 및 E_{ci} 에 따라 결정되는 변수 β_1 의 함수로 표현될 수 있다. 초기 접선기울기 E_{ci} 는 실험으로부터 결정될 수 있지만 매우 작은 초기 변형을 정확히 측정하는 것은 매우 힘들다. 따라서 원점과 최대 응력의 45%점을 연결하는 기울기인 탄성계수 개념($\epsilon_1 = 0.45f_{ck}/E_c$)을 적용하면 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$0.45(X_1)^{\beta_1+1} + (0.45 - X_1)\beta_1 - X_1 = 0 \quad (6)$$

여기서, $X_1 = \frac{0.45f_{ck}}{\epsilon_0 E_c}$ 이다. 임의의 콘크리트 압축강도에 대해서 E_c 와 ϵ_0 는 각각 식 (1)과 (2)에 의해 평가될 수 있으므로 식 (6)의 β_1 은 Newton-Raphson법과 같은 수치해석 기법을 이용해서 결정할 수 있다. 단위용적질량이 1,600~2,300 kg/m³이며 콘크리트 압축강도가 10~100 MPa일 때 수치해석적으로 결정된 β_1 의 값을 Fig. 8에 나타내었다. 따라서 알칼리 활성 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 위한 변수 β_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_1 = 0.726 \left(\frac{f_{ck}}{f_{co}} \right)^{0.1} \left(\frac{w_0}{w_c} \right)^{0.3} \quad (7)$$

여기서, f_{co} 는 참고값으로서 10 MPa로 가정한다. 식 (5)와 (7)로부터 E_{ci} 를 산정할 수 있다. 단위용적질량이 2,300 kg/m³일 때 AA 슬래그 콘크리트의 E_{ci} 는 1.07~1.09 E_c 로 평가될 수 있는데 이는 OPC 콘크리트에 대해 CEB-FIP 기준이 제시하는 1.17 E_c 에 비해 낮은 값이다.

Fig. 8 The value of β_1 obtained from numerical analysis

한편, 식 (7)에 나타낸 β_1 의 값은 응력-변형률 곡선의 상승 부분에서의 경계조건을 이용하여 산정한 것이다. 따라서 β_1 의 값은 하강부분에서 수정이 되어야만 한다. 하지만 하강곡선에서 뚜렷한 경계조건 및 E_c 와 같은 이용할 수 있는 명확한 정보가 없다. 하강부분에서 β_1 의 값은 실험 결과를 이용하여 보정한다면 콘크리트의 응력-변형률 관계는 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$f_c = \frac{(k\beta_1 + 1) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^{k\beta_1 + 1} + k\beta_1} f_{ck} \quad (8)$$

여기서, k 는 하강부분 ($\varepsilon_c > \varepsilon_0$) 기울기에 대한 보정계수로서 상승부분인 $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$ 에서는 1.0이다.

4.2 보정계수 k

식 (8)에 나타낸 응력-변형률 곡선의 하강부분 기울기는 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 보정계수 k 값에 의해 중요한 영향을 받는다. 보정계수 k 값이 증가할수록 응력감소 기울기는 증가하였다. 이는 콘크리트 압축강도가 증가할수록 최대응력 이후 하강부분의 기울기는 증가하므로 k 값은 f_{ck} 의 함수로 나타낼 수 있음을 의미한다. 각 공시체에서 측정된 응력-변형률 곡선과 식 (8)을 이용한 회귀분석으로부터 보정계수 k 를 결정하였다. 이 연구에서 실험된 공시체들간의 w_c 의 차이는 크지 않기 때문에 k 값

Fig. 9 Variation of descending branch of the stress-strain curve according to the value of k

Fig. 11 Typical comparisons of measured and predicted stress-strain curves of AA slag concrete

Fig. 10 Regression analysis for k in Eq. (8)

에 대한 w_c 의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 하지만 제시된 E_c 의 모델이 f_{ck} 와 함께 w_c 를 고려하고 있어 k 값을 식 (9)와 같이 제시하였다(Fig. 10).

$$k = 0.5 \left(\frac{f_{ck}}{f_{co}} \cdot \frac{w_c}{w_0} \right)^{1.32} \quad \text{for } \varepsilon_c > \varepsilon_0 \quad (9)$$

5. 실험 결과와 제안 모델의 비교

알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 제안 모델 및 실험 결과의 전형적인 비교를 Fig. 11에 나타내었다. 비교를 위해 동일 그림에 OPC 콘크리트에 대한 설계기준인 EC 2 모델 및 최근 제안된 Tasnimi 모델을 함께 나타내었다. EC 2 모델은 상승부에서 실험 결과를 다소 과대평가하며, 최대 응력 이후의 응력감소 기울기는 실험 결과에 비해 현저히 컸다. Tasnimi 모델에 의한 예측값은 상승부에서 실험값보다 다소 작았으며, 최대응력 이후에는 f_{ck} 가 35 MPa 이상에서 실험값을 과대평가하는 경향을 보였다.

한편, 이 제안모델은 콘크리트 압축강도 및 결합재 종류에 관계없이 실험 결과와 잘 일치하였다. 특히 E_c , ε_0 (Tabel 1) 및 하강부분에서 응력감소 기울기도 실험 결과와 잘 일치하였다.

제시된 모델의 합리성 및 정확성은 각 시험체에서 산정된 다음의 변동계수(CoV)들로부터 평가될 수 있다.

$$CoV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{s_{i-Exp}}{s_{i-Pre}} - 1 \right)^2} \quad (10)$$

Fig. 12 The values of CoV according to f_{ck}

여기서, n 는 각 시험체에서 측정된 응력 수, s_{i-Exp} 와 s_{i-Pre} 는 각각 변형률 i 번째에서 측정된 응력값과 예측된 응력값이다. 각 시험체에서 산정된 CoV 값들을 f_{ck} 에 따라 Fig. 12에 나타내었다. 모든 시험체에 대해 CoV 의 평균(γ_{m-cov})과 표준편차(γ_{s-cov})를 동일 그림에 함께 나타내었다. EC 2 모델은 f_{ck} 가 낮을수록 CoV 값이 증가하며 γ_{m-cov} 와 γ_{s-cov} 는 각각 59%와 37.9%로서 높았다. Tasnimi 제안모델로부터 산정한 CoV 는 f_{ck} 에 큰 영향을 받지 않으며 γ_{m-cov} 와 γ_{s-cov} 는 각각 16.5%와 4.7%이었다. 한편 이 제안 모델로부터 산정한 CoV 의 평균과 표준편차는 각각 6.9%와 2.6%로서 실험 결과와 매우 잘 일치하였다.

6. 결 론

시멘트를 사용하지 않은 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계를 평가하기 위한 모델을 일반화하기 위하여 기본 모델 형상 식 및 탄성계수, 최대 응력시 변형률 그리고 상승부와 하강부의 기울기를 제시하였다. 제시된 모델은 압축강도(f_{ck})가 약 45 MPa 이하, 단위용적질량(w_c)이 2,186~2,343 kg/m³ 범위의 콘크리트 실험 결과에 기반하여 제시됨으로서 고강도 및 경량 콘크리트에서는 수정이 요구될 수 있지만, EC 2 및 Tasnimi 제안 모델에 비해 실험 결과와 잘 일치하였다. 한편, 응력-변형률 곡선의 하강부에서는 압축변형률이 약 0.005까지만 측정되었기 때문에 그 이상의 변형률에 대해서는 추가 검증이 필요할 수도 있다. 하지만 제시된 하강 기울기는 실험 결과와 잘 일치하며, 설계기준에서도 압축변형률 0.003~0.004 이하에서 실용적으로 중요하게 다루고 있다.

알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 실험 및 모델제시로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계는 OPC 콘크리트와 같이 비선형 포물선형을 나타내며, 그 형상은 압축강도(f_{ck})에 중요한 영향을 받았다. 한편, 응력-변형률 곡선의 상승부 및 하강부의 기울기는 사용된 알칼리 활성화제에 영향을 받지 않았다.
- 2) 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 탄성계수(E_c), 최대

응력 시 변형률(ϵ_0), 상승부와 하강부 기울기는 모두 f_{ck} 와 w_c 의 함수로 간단히 제시될 수 있었다.

- 3) 제시된 응력-변형률 모델에 의한 각 시험체의 예측값과 실험값에서 산정한 변동계수들의 평균과 표준편차는 각각 6.9%와 2.6%이었다. 제시된 모델은 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계를 비교적 정확하고 합리적으로 나타내고 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(R01-2008-000-20395-0) 및 바이오하우징 지원에 의하여 연구되었다.

참고문헌

1. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D., *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor and Francis, 2006, 376 pp.
2. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-Activated Binders: A Review," *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 7, 2008, pp. 1305~1322.
3. 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 Material Science*, Vol. 42, No. 9, 2007, pp. 2917~2933.
4. Yang, K. H., Sim, J. I., and Nam, S. H., "Enhancement of Reactivity of Calcium Hydroxide-Activated Slag Mortars by the Addition of Barium hydroxide," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 3, 2010, pp. 241~251.
5. Douglas, E., Bilodeau, A., and Malhotra, V. M., "Properties and Durability of Alkali-Activated Slag Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 5, 1992, pp. 509~516.
6. Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., and Ramezani-pour, A. A., "Engineering Properties of Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 108, No. 1, 2011, pp. 64~72.
7. Sofi, M., van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., and Lukey, G. G., "Engineering Properties of Inorganic Polymer Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 2, 2007, pp. 251~257.
8. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression," *ACI Journal*, Vol. 75, No. 6, 1978, pp. 603~611.
9. Carreira, D. J. and Chu, K. H., "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression," *ACI Journal*, Vol. 82, No. 6, 1985, pp. 797~804.
10. Hsu, L. S. and Hsu, C. T. T., "Complete Stress-Strain Behavior of High-Strength Concrete under Compression," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 12, 1994, pp. 301~312.
11. Tasnimi, A. A., "Mathematical Model for Complete Stress-Strain Curve Prediction of Normal, Lightweight, and High-Strength Concretes," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 56, No. 1, 2004, pp. 23~34.
12. Comité Euro-International du Béton (CEB-FIP), *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance*,

- International Federation for Structural Concrete (Fib), 1999.
13. European Standard EN 1992-1-1:2004, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures*, British Standards Institution, 2004.
 14. Yang, K. H., Cho, A. R., Song, J. K., and Nam, S. H., "Hydration Products and Strength Development of Calcium Hydroxide-Based Alkali-Activated Slag Mortars," *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 2012, pp. 410~419.
 15. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005, 473 pp.
 16. Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K. M., Chiaia, B. M., and Fantilli, A. P., "A Practical Equation for Elasticity Modulus of Concrete," *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 5, 2009, pp. 690~696.

요 약 이 연구에서는 알칼리활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 관계를 평가하기 위한 일련의 콘크리트 실린더의 압축 실험을 요약하였다. 실험된 콘크리트의 압축강도는 8.6 MPa에서 42.2 MPa의 범위이며, 단위용적질량은 2,168 kg/m³에서 2,343 kg/m³의 범위이다. 34개의 콘크리트 시험체에서 얻은 결과들에 근거하여 알칼리활성 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 모델을 수학적으로 제시하였다. 콘크리트의 탄성계수, 최대응력 시 변형률 및 곡선의 상승부와 하강부의 기울기는 압축강도와 단위용적질량의 함수로 일반화하였다. 각 시험체에서 측정 한 값과 제시된 모델의 예측값 사이에서 산정된 변동계수들의 평균과 표준편차는 각각 6.9%와 2.6%이었다. 따라서 제시된 모델은 보통포틀랜드 시멘트 콘크리트에서 제시된 다른 모델들에 비해 AA 슬래그 콘크리트의 응력-변형률 특성을 보다 더 정확하고 합리적으로 나타내었다.

핵심용어 : 알칼리 활성 슬래그 콘크리트, 응력-변형률 관계, 압축강도, 단위용적질량