

혼화재를 다량 치환한 경량 및 보통중량 콘크리트의 압축피로 특성 평가

Evaluation on Fatigue Performance in Compression of Normal- and Light-weight Concrete Mixtures with High Volume SCM

문재성^{1*} · 양근혁²Jae-Sung Mun^{1*} · Keun-Hyeok Yang²

(Received December 20, 2014 / Revised December 24, 2014 / Accepted December 25, 2014)

The objective of this study is to examine the fatigue behavior in compression of normal-weight and lightweight concrete mixtures with high volume supplementary cementitious material(SCM). The selected binder composition was 30% ordinary portland cement, 20% fly-ash, and 50% ground granulated blast-furnace slag. The targeted compressive strength of concrete was 40 MPa. For the cyclic loading, the constant maximum stress level varied to be 75%, 80%, and 90% of the static uniaxial compressive strength, whereas the constant minimum stress level was fixed at 10% of the static strength. The test results showed that fatigue life of high volume SCM lightweight concrete was lower than the companion normalweight concrete. The value of the fatigue strain at the maximum stress level intersected the descending branch of the monotonic stress-strain curve after approximately 90% of the fatigue life.

키워드 : 다량치환 혼화재, 경량콘크리트, 압축 피로, 응력-변형률 관계

Keywords : High volume SCM, Lightweight concrete, Fatigue in compression, stress-strain relationship

1. 서론

최근 전 세계적으로 CO₂의 증가로 대변되는 환경문제와 자원고갈의 문제가 대두되고 있다. 이에 따라 콘크리트 산업분야에서도 산업부산물인 고로슬래그(Ground granulated blast-furnace slag, GGBS)와 플라이 애쉬(Fly-ash, FA)를 기존에 결합재로 사용되는 보통포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement, OPC)를 대체 및 치환하여 사용하는 것에 대한 연구 및 적용사례가 증가하고 있다. GGBS와 FA의 사용은 장기 재령에서 높은 압축강도, 및 수화열 저감 등의 장점을 갖는다. 바텀애쉬와 같은 산업부산물로부터 생산되는 경량골재 콘크리트 역시 자원의 재활용 측면에서 친환경성을 갖는 것으로 보고되고 있다(Neville 1995). 경량 콘크리트는 일반적으로 1400~2000kg/m³의 낮은 비중을 갖는다. 이러한 장점을 통하여 최근에는 자중을 감소시키기 위하여 건축물에 적용하는 경우가 증가하고 있다.

플라이애쉬 및 고로슬래그는 콘크리트의 염화물 확산계수를 저하시키는데 유리하다고 보고되고 있다(Shi et al. 2006; Duxson et al. 2007; Pacheco et al. 2008). 이에 따라 해양 콘크리트 구조부재에서 FA 또는 GGBS와 같은 혼화재(supplementary cementitious materials, SCMs)의 다량치환이 점차 시도되고 있다. 또한 일반적으로 프리캐스트로 제작되는 해양 콘크리트 부재들은 운반 및 시공에서의 경제성을 고려하여 경량콘크리트의 적용이 관심을 끌고 있다. 부유시설을 포함한 해양 콘크리트 구조부재는 파도 및 조류에 의한 피로 하중의 영향을 받는다. 즉, 이들 해양콘크리트 구조부재들은 내염해와 같은 내구성과 함께 피로거동에 대해 세심하게 평가되어야만 한다. 하지만 혼화재 다량치환 콘크리트 및 경량콘크리트에서 피로거동에 대한 유용한 자료는 매우 적은 상황이다.

콘크리트의 피로 거동은 사용재료, 공기량, 물-시멘트비 등의 배합조건, 양생온도 및 습도 등에 따른 환경요인 그리고 하중이력, 하중폭 및 가력속도 등의 하중재하 요인등과 같은 다양한 조건에

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

¹경기대학교 일반대학원 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Kyonggi-do, 443-760, Korea)

²경기대학교 플랜트·건축공학과 (Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 443-760, Korea)

따라서 영향을 받는다(Sparks and Menzies 1973; Tepfers and Kutti 1979; Maekawa and Okamura 1983; Lee and Barr 2004). 일반적으로 콘크리트의 피로 한계는 10×10^6 으로 높은 반복횟수의 피로 강도를 갖는 것으로 알려져 있다(ACI 215, 1997). 이러한 이유로 대부분 콘크리트 구조물의 설계는 피로를 고려하고 있지 않다. 하지만, 피로 거동은 반복하중으로 인하여 내부균열이 발생하여 영구적인 손상이 일어나 구조물이 사용하중에 도달하기 전에 피로하중으로 인하여 급작스러운 파괴가 발생 할 수 있다. 특히, 파도 및 조류에 의한 영향을 받는 해양 구조물과 자동차의 통행에 따른 반복하중을 받는 도로 및 교량의 슬래브 등은 피로거동에 의한 파괴에 매우 취약하여 피로에 대한 설계가 필요하다(Xiao and Yang 2013).

이 연구에서는 피로하중 하에서 균열의 진전 및 응력-변형률 거동의 측정을 통하여 혼화재 다량 치환된 보통중량 및 경량 콘크리트의 피로수명을 평가하였다. 콘크리트의 설계 압축강도는 40MPa이다. 압축피로 실험은 최대응력 비($0.75f_{ck}$, $0.80f_{ck}$, $0.9f_{ck}$) 및 최소응력 비($0.1f_{ck}$) 사이에서 1Hz의 속도로 수행하였다.

2. 실험

2.1 배합설계

압축피로 특성을 평가하기 위한 High volume SCM 경량 및 보통중량 콘크리트에 대한 배합은 Table 1에 나타내었다. 배합설계는 해양 콘크리트와 프리캐스트 콘크리트를 고려하여 목표 압축강도 40MPa로 설정 하였다. 슬럼프는 타설을 고려하여 200 ± 10 mm로 설정하였으며, 공기량은 $3 \pm 0.5\%$ 로 하였다. 사용된 결합재의 비율은 OPC : FA : GGBS는 30 : 20 : 50로 하였다. 경량 콘크리트는 골재의 낮은 강성을 고려하여 보통중량 콘크리트보다 5% 낮은 물-결합재비(W/B)로 설정하였다. 또한 경량 콘크리트의 단위용적중량은 $1,700\text{kg/m}^3$ 으로 하였다.

Table 1. Mixture proportions of each concrete specimen

Specimen	Concrete type	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)				
				OPC	FA	GGBS	F	C
HL	LWC	25	42	186	310	124	518	570
HN	NWC	30	45	155	258	103	772	943

*W, OPC, FA, GGBS, F, and C indicate water, ordinary portland cement, fly-ash, ground granulated blast-furnace slag, and fine and coarse aggregates, respectively.

2.2 재료특성

사용된 결합재의 화학적 조성 Table 2에 나타내었다. OPC는 CaO와 SiO₂가 주요성분으로 그 성분비는 각각 62%와 21.3%이었으며, 비중과 분말도는 각각 3.15, 3,800cm²/g이었다. GGBS는 CaO와 SiO₂가 주요성분으로 그 성분비는 각각 44.38%와 31.55%이었으며, 비중과 분말도는 각각 2.95, 4,000 cm²/g이다. FA는 SiO₂와 Al₂O₃가 주요성분으로 그 성분비는 각각 57.0%, 29.3%이며, CaO가 0.4%인 F급으로 KS 규격 2종을 만족하였다. FA의 비중과 분말도는 각각 2.2와 4,200cm²/g이다.

보통중량콘크리트를 위한 굵은골재와 잔골재의 최대크기는 각각 19mm와 5mm이다. 경량골재는 국내산 팽창점토 구조용 골재를 사용하였으며, KS 기준에 준하여 체가름 실험을 실시하였다. 인공 경량 굵은골재 및 잔골재의 최대크기는 각각 19mm와 4mm이다. 경량 골재는 보통중량 골재와 비교하여 높은 흡수율을 갖는다. 사용된 경량 굵은 골재와 잔골재의 흡수율은 각각 18.96, 13.68%였다(Table 3). 이에 따라 배합에 사용된 경량골재는 24시간 침수 후 표건상태로 사용되었다. 경량골재는 콘크리트 배합 시 함수율을 측정하여 단위수량에서 보정하였다.

Table 2. Chemical composition of cementitious materials (% by volume)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂
OPC	22.1	5.0	3.0	64.8	1.6	0.54	0.3
GGBS	31.55	13.79	0.53	44.38	5.2	0.4	0.98
FA	53.3	27.9	7.8	6.79	1.11	0.84	-

Table 3. Physical properties of aggregates used

Type		G _{max} (mm)	Density	Water absorption (%)	FM	Unit weight (kg/m^3)
Coarse aggregate	Expanded clay granule	19	1.21	18.96	6.56	729
	Granite	19	2.65	0.62	6.05	1700
Fine aggregate	Expanded clay granule	4	1.65	13.68	4.34	832
	Natural sand	5	2.60	1.85	2.51	1750

G_{max} is the maximum size of aggregates and FM is the fineness modulus of aggregates.

2.3 실험방법 및 측정

High volume SCM 경량 및 보통중량 콘크리트의 배합은 80%강

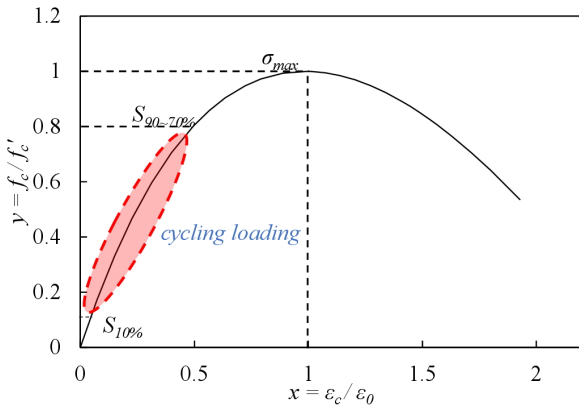


Fig. 1. Range of maximum and minimum stress for fatigue.

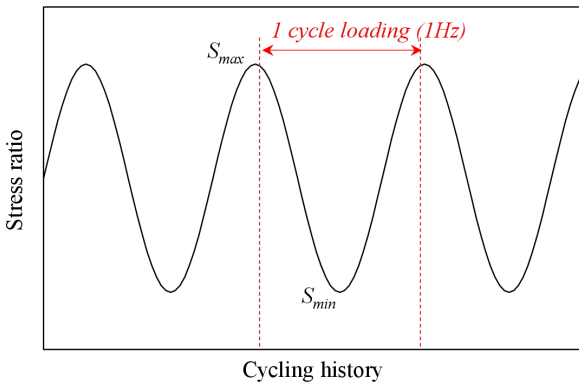


Fig. 2. Loading history.

제식 믹서기로 결합재와 골재를 1분간 건비빔 후 물을 혼입하여 1분간 습비빔을 실시하였다. 굳기 전 콘크리트에서는 KS 기준(2006)에 준하여 슬럼프와 공기량 실험을 실시하였다.

압축피로의 실험은 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 91일간 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 60%에서 기건양생을 실시한 실험체를 사용하였다. 피로강도는 응력비와 가력속도에 따라 가장 큰 영향을 받는다. 수행된 실험의 최대 응력비(S_{max})는 정적 실험으로 측정된 응력의 0.9, 0.8, 0.75로 수행되었으며, 최소 응력비(S_{min})는 정적 압축강도의 0.1로 설정하였다(Fig. 1). 응력의 가력 이력은 동일한

응력폭을 모사한 sine파를 기본으로 설정하였으며, 가력속도는 1Hz로 수행되었다(Fig. 2). 압축피로의 평가는 피로 수명과 정적 및 피로 응력-변형을 관계 그리고 피로 및 잔존 변형률이 측정되었다.

3. 실험결과 및 분석

이 연구에서 수행된 정적 압축 실험에 대한 결과는 Table 4에 피로 압축실험 결과는 Table 5에 요약하였다. 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프 및 공기량은 목표 값을 만족하였다. 즉 공기량은 보통중량 콘크리트와 경량콘크리트에서 각각 3.1%와 2.6%로 측정되었다. 보통중량 콘크리트는 압축강도 39.82MPa로 목표 압축강도를 만족한 반면, 경량 콘크리트는 35.29MPa로 약 10% 낮은 압축강도를 보였다. 피로 특성 평가를 위한 하중가력은 정적 압축거동의 특성들을 고려하였다.

3.1 균열진전

압축피로에 따른 경량 및 보통중량 콘크리트 내부의 균열 진전은 Fig. 3에 나타내었다. 일반적으로 피로 거동은 내부 균열의 생성되고 반복하중에 의하여 내부 균열이 파괴시 까지 진전되는 특성을 갖는다. 실험결과, 피로 거동에 따른 내부 균열은 정적 하중으로 가력한 실험체와 같은 균열 전진을 보였다. 즉, 경량콘크리트의 경우 페이스트와 골재 계면의 접착력보다 낮은 골재의 강도로 인

Table 4. Properties of fresh concrete and monolithic compressive test results

Speci-men	S_i (mm)	A_c (%)	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	ϵ_0
HL	206	2.6	35.29	13254	0.00256
HN	200	3.1	39.82	26911	0.00257

* S_i , A_c , f_{ck} , E_c and ϵ_0 are initial slump, air content, compressive strength at 28 days, elasticity and strain at peak stress

Table 5. Summary of fatigue test results

Speci-mens	Number of failure (N_f)			Maximum fatigue strain at failure (ϵ_f, N_f)			Maximum residual strain at failure (ϵ_r, N_f)			Normalized maximum fatigue strain ($\epsilon_{f,N_f}/\epsilon_0$)			Normalized maximum residual strain ($\epsilon_{r,N_f}/\epsilon_0$)		
	S_{max}			S_{max}			S_{max}			S_{max}			S_{max}		
	0.9	0.8	0.75	0.9	0.8	0.75	0.9	0.8	0.75	0.9	0.8	0.75	0.9	0.8	0.75
HL	43	2121	22522	0.0043	0.0043	0.0043	0.0015	0.0020	0.0021	1.678	1.682	1.689	0.581	0.808	0.813
HN	154	8500	63248	0.0046	0.0048	0.0051	0.0024	0.0025	0.0025	1.794	1.887	1.966	0.966	0.972	0.974

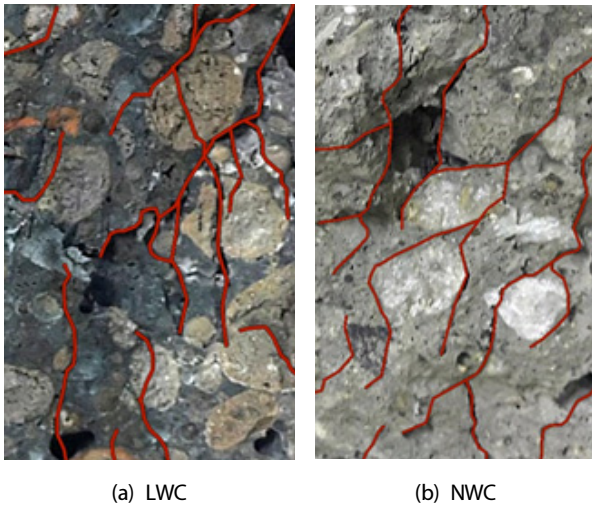


Fig. 3. Typical crack propagation at failure surface

하여 골재를 관통하는 균열이 생성되었으며, 보통중량 콘크리트의 경우 페이스트와 골재의 계면에서 균열이 전진되는 결과를 갖는 것으로 평가되었다. 경량콘크리트에서 관찰된 균열의 골재관통은 취성적 피로거동으로 연결되었다.

3.2 피로 수명(S-Nf 관계)

혼화재 다량 치환 경량 및 보통중량 콘크리트의 피로 파괴횟수는 최대 응력비에 따른 결과를 나타내었다(Table 5, Fig. 4). 최대 응력비와 피로 수명의 관계는 상용로그에 대하여 선형 반비례 관계를 보이는 것을 나타냈다. 즉, 단위용적중량과 상관없이 응력비가 감소함에 따라서 피로수명이 증가하는 경향을 보였다. 이는 콘크리트 뿐만 아니라 모든 재료적 특성으로 평가된다.

일반적으로 압축강도가 낮을수록 피로 수명이 증가하는 경향을

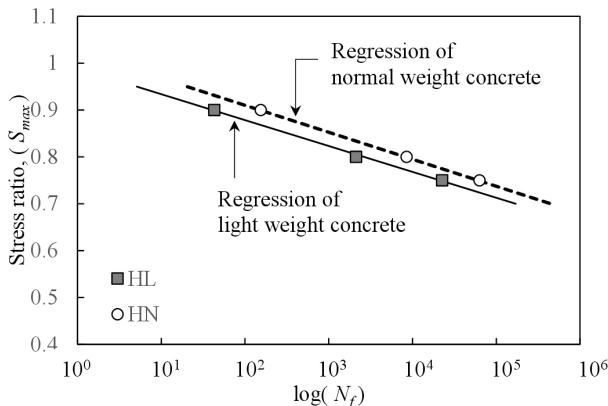


Fig. 4. S-N_f relationships of concrete specimens

나타낸다. 하지만, 경량콘크리트가 보통중량 콘크리트 보다 낮은 압축강도를 갖음에도 불구하고 경량콘크리트가 보통중량 콘크리트와 비교하여 낮은 피로수명을 갖는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 균열전진 평가에서와 같이 경량골재의 낮은 강도로 생기는 관통균열이 원인으로 판단된다.

3.3 피로 응력-변형률 관계

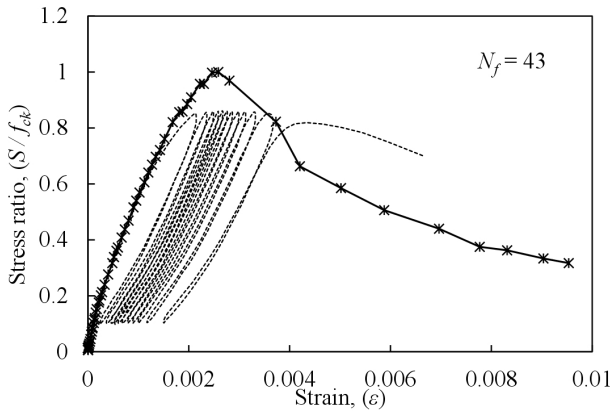
혼화재 다량 치환 경량 및 보통중량 콘크리트의 피로 응력-변형률 관계는 동일한 응력비의 영향으로 분석하기 위하여 응력비와 변형률의 관계로 Fig. 5, 6에 나타내었으며, 동일한 그림에 정적 응력-변형률 관계를 같이 나타내었다. 압축 피로 응력-변형률 관계는 경량 및 보통중량 콘크리트와 관계없이 같은 경향성을 보였다. 즉 응력비가 감소할수록 반복 가력 횟수는 증가하였지만, 정적 응력-변형률 관계의 최대 응력 이후 곡선의 범위에서 파괴되는 것으로 평가되었다. 또한 반복횟수가 증가함에 따라서 피로 변형률과 잔존 변형률이 증가하였다. 특히 피로 변형률의 증가는 잔존 변형률의 증가와 비교하여 증가폭이 크게 평가 되었다. 이에 따라서 피로 응력-변형률 관계는 반복 가력 횟수가 증가함에 따라 그 래프의 기울기가 작아지는 경향을 보였다.

경량콘크리트의 압축피로 응력-변형률 관계는 보통중량 콘크리트와 비교하여 상승 가력 곡선과 하강 가력 곡선의 폭이 적게 나타났다. 이는 경량콘크리트의 경우 골재의 관통 파괴가 일어나서 가력되는 하중에서 벌어졌던 균열이 하강 가력 곡선에서 빠르게 닫히는 것이 원인으로 판단된다.

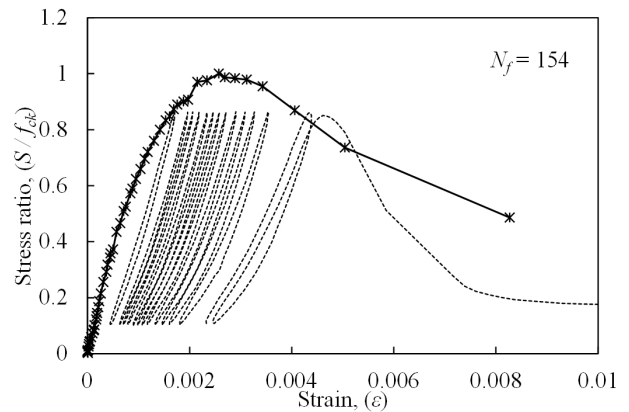
4. 결론

혼화재 다량 치환 경량 및 보통중량 콘크리트의 응력비에 따른 압축피로 특성을 평가하였다. 본 연구에서 측정한 압축 피로 응력-변형률 관계는 시멘트 콘크리트의 특성과 비교함으로써 결합재의 특성이 압축피로에 미치는 영향을 평가할 수 있는데, 이는 추후 연구에서 제시될 것이다. 본 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

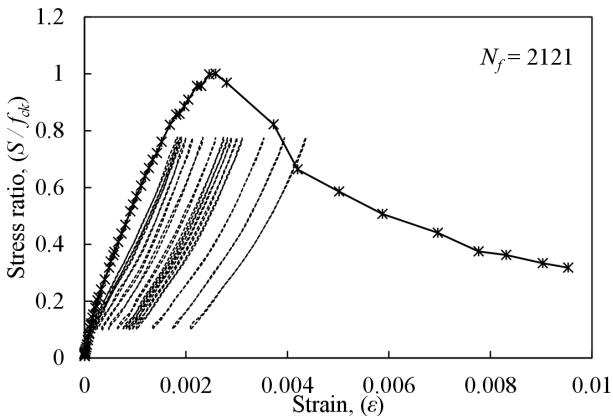
- 1) 압축피로에 의한 균열전진은 경량 콘크리트에서는 골재의 관통 파괴에 의한 균열전진을 보였으며, 보통중량 콘크리트의 경우는 골재와 페이스트 계면에서 균열의 전진이 있었다.
- 2) 압축피로에 의한 피로 수명은 응력비가 감소함에 따라 증가하였으며, 상용로그 함수에 대하여 반비례 하였다.



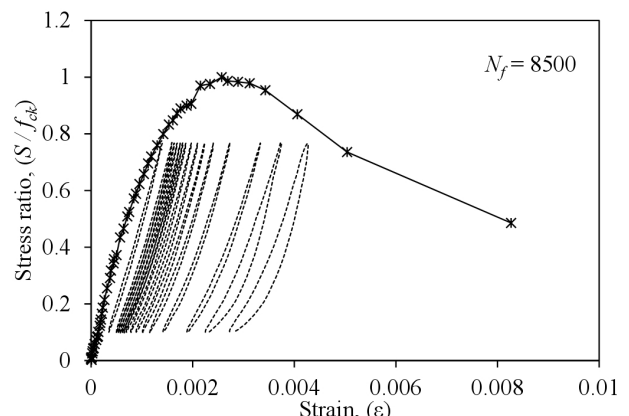
(a) $S_{max} = 0.9$



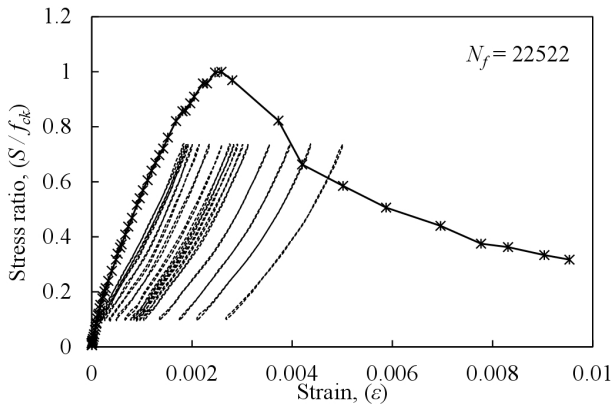
(a) $S_{max} = 0.9$



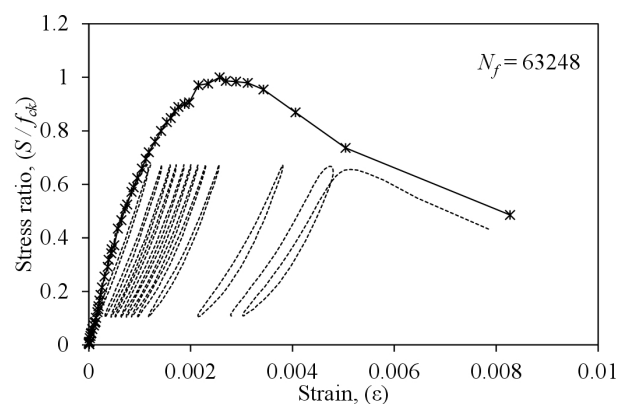
(b) $S_{max} = 0.8$



(b) $S_{max} = 0.8$



(c) $S_{max} = 0.75$



(c) $S_{max} = 0.75$

Fig. 5. Fatigue stress-strain curve of high volume SCM lightweight concrete

Fig. 6. Fatigue stress-strain curve of high volume SCM normal-weight concrete

- 3) 동일한 응력비에서 경량 콘크리트가 보통중량 콘크리트와 비교하여 낮은 피로 수명을 보였다.
- 4) 피로 응력-변형률 관계에서 압축피로에 의하여 파괴되는 변형률의 위치는 콘크리트 종류에 관계없이 정적 하중하의 응력-변

- 형률 관계의 하강곡선 기울기와 교차하였다.
- 5) 피로 응력-변형률 관계에서 상승 가력 하중 곡선과 하강 가력 곡선의 폭은 보통중량 콘크리트보다 경량콘크리트에서 적었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다.(No. 2013067519).

References

ACI Committee 215.R-92.(1997), Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading (Reapproved 1997), ACI Manual of Concrete, 24.

Duxson P, Fernandez-Jimenez, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, van Deventer JSJ. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science*, **42(9)**, 2917-2933.

Korea Industrial Standard. (2006). Koean Standards Information Center.

Lee, M. K., and Barr, B. I. G.(2004) An overview of the fatigue behavior of plain and fibre reinforced concrete, *Cement and*

Concrete Composites, **26**, 299-305.

Maekawa K, Okamura H. (1983). The deformational behavior and constitutive equation of concrete using the elastoplastic and fracture model, *Journal of Faculty Engineering, University of Tokyo*, **37(2)**, 253-328.

Neville AM. (1995). *Properties of concrete*, Longman, England.

Pacheco-Torgal F, Castro-Gomes J, Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: a review. *Construction and Building Materials*, **22(7)**, 1305-1322.

Shi C, Krivenko PV, Roy D. (2006). Alkali-activated cements and concretes. Taylor and Francis.

Sparks, P.R. and Menzies, J.B. (1973). The effect of the rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression. *Magazine of Concrete Research*, **75(83)**, 73-80.

Tepfers, R., and Kutti, T. (1979). "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete," *ACI Journal Proceedings* **76(5)**, 635-652.

혼화재를 다량 치환한 경량 및 보통중량 콘크리트의 압축피로 특성 평가

이 연구의 목적은 혼화재 다량 치환 경량 및 보통중량 콘크리트의 압축 피로 특성 평가이다. 사용된 결합재는 시멘트 30%, 플라이애쉬 20%, 고로슬래그 50%이다. 콘크리트의 설계 압축강도는 40MPa 이다. 반복하중은 최대 응력비가 정적 콘크리트 압축강도의 75%, 80% 및 90%와 최소 응력비가 정적 강도의 10% 범위에서 1Hz의 속도로 가력하였다. 실험결과 혼화재 다량 치환 경량콘크리트의 피로수명은 혼화재 다량치환 보통중량 콘크리트에 비해 다소 낮았다. 최대응력에서의 피로변형률 값은 피로수명의 약 90% 이후부터 정적 응력-변형률 곡선의 하강부와 교차하였다.