

이방향 휨응력상태의 콘크리트 강도 특성, 크기효과 및 피로거동에 관한 실험적 연구

지광섭* · 김지환**

Zi, Goangseup*, Kim, Jihwan**

An Experimental Study on Strength Properties, Size Effect, and Fatigue Behaviour of Concrete under Biaxial Flexural Stress State

ABSTRACT

In this study, flexural strength properties of concrete under biaxial stress state were experimentally investigated. Tests for size effect and fatigue behaviour of concrete under biaxial stress were carried out by the ASTM C 1550 and the biaxial flexure test(BFT). The results given by the biaxial tests were compared to those by the third-point bending test. Test results showed that biaxial flexural strengths obtained from the ASTM C 1550 and the biaxial flexure test are greater than the strength by the third-point bending test. As the size increases, the uniaxial and biaxial flexural strength decreases. However, the slope of the size effect of the biaxial strength was greater than that of the uniaxial strength. Finally, the fatigue response of concrete under the biaxial stress state was similar with that for uniaxial stress state.

Key words : Biaxial flexural stress, Biaxial flexural strength, Biaxial flexure test, Size effect, Fatigue

초 록

본 논문에서는 이방향 응력상태에서의 콘크리트 강도 특성과 크기효과 그리고 피로거동에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 ASTM C 1550 시험법과 이방향 휨강도 시험(biaxial flexure test; BFT)을 적용하여 크기효과 및 피로시험을 실시하였으며, 단순보의 3등분점 하중에 의한 콘크리트 휨강도 시험(third-point bending test) 결과와 비교하였다. 실험 결과 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 일방향 응력상태의 강도보다는 ASTM C 1550 시험법과 이방향 휨강도 시험법에 의한 이방향 응력상태의 강도가 더 큰 것으로 측정되었다. 3등분점 재하 휨강도 시험, ASTM C 1550, 이방향 휨강도 시험법 모두 시편의 크기가 증가함에 따라 강도는 감소하는 것으로 관찰되었으며, 이방향 휨인장강도의 크기 효과가 일방향 휨인장강도의 크기효과보다 더 큰 것으로 확인되었다. S-N 곡선에 의한 일방향과 이방향 휨강도의 피로 수명은 유사한 것으로 분석되었다.

검색어 : 이방향 휨응력, 이방향 휨강도, 이방향 휨강도 시험, 크기효과, 피로

1. 서론

콘크리트 교량 슬래브, 공항이나 고속도로 포장체와 같은 구조물들에 작용하는 응력은 축방향 인장보다는 휨인장을 주로 받기 때문에

* 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학과 정교수 (Corresponding Author · School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University · g-zi@korea.ac.kr)

** 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (jihwan@korea.ac.kr)

Received October 10 2012, Revised January 27 2013, Accepted March 7 2013

휨시험을 통해서 얻은 인장강도가 실제 콘크리트의 재료적 성질을 더 잘 나타내고 있어, 설계기준강도와 콘크리트 품질결정 및 관리 등에 콘크리트 압축강도와 더불어 휨인장강도가 주로 사용되고 있다. 지금까지 콘크리트의 휨인장강도는 시편 제작과 시험의 용이성으로 경제적이면서도, 휨인장 응력상태에 대한 저항성을 잘 반영할 수 있는 3등분점 재하 휨강도 시험(third-point bending test)에 의해 결정되어 왔다.

3등분점 재하 휨강도 시험은 장방향의 무근 콘크리트 보 시험체를 사용하기 때문에 시험 시 시험체가 일방향 휨인장 응력상태에서 그 강도가 결정된다. 그러나 앞에서 언급한 슬래브, 포장체 등과 같이 부재의 길이에 비해 두께가 얇은 판 또는 쉘 형태의 콘크리트 구조물들은 외부 하중 및 건조수축과 같은 내부적인 요인으로 인해 일방향 인장 응력상태이기 보다는 이방향 인장 응력상태에 놓이게 된다. 그러므로 콘크리트 부재들의 실제 응력 상태를 고려한 구조적 성능평가를 위해서는 이방향 인장 응력상태에서 결정된 강도에 대한 실험과 그 결과의 고찰이 요구된다.

최근 건설분야에서 섬유보강 콘크리트의 휨인성을 평가하기 위한 centrally loaded round panel test(ASTM C 1550)와 무근 콘크리트의 이방향 휨인장강도 측정을 위한 이방향 휨강도 시험(biaxial flexure test; BFT)이 개발되었다(Zi 등, 2008). 두 시험법은 모두 Fig. 1과 같이 패널 형태의 시험체를 이용하여 시험을 수행하며, 3등분점 재하 휨강도 시험처럼 그 절차가 간편하고 경제적이어서 현장에서 수행이 가능하다. 또한, 판 구조물의 응력상태를 이상적으로 모사할 수 있고, 파괴모드가 실제 판구조물과 유사한 이점을 가지고 있다.

콘크리트와 같은 취성재료의 강도는 시험체의 재료적 특성 외에

도 그 파괴특성으로 인해 시험체나 구조물의 크기에 영향을 받는 것으로 나타났다. Bažant은 콘크리트 재료에 파괴역학을 도입하여 콘크리트 강도의 크기효과(size effect)를 설명하였으며, 현재 deterministic size effect, energetic size effect, statistical energy size effect 지배적이다(Bažant, 1984; Bažant와 Planas, 1998). 그러나 이러한 크기효과 법칙들은 모두 콘크리트 압축 강도 및 보 시험체를 이용한 일방향 휨인장강도의 크기효과에 관한 연구로 아직까지 이방향 휨인장 응력상태에서의 콘크리트 크기효과에 관한 연구는 이루어진 바 없다. 또한, 공항 및 도로 포장체와 같은 콘크리트 구조물들은 장기간에 걸쳐 피로 하중이 작용되므로 이방향 응력상태에서의 피로수명에 관한 연구가 필요하다. 최근까지 다축응력(이방향 압축과 이방향 인장) 상태의 콘크리트 특성을 평가하기 위한 몇몇 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 이방향 응력상태의 구현을 위한 실험의 복잡성과 비경제성으로 인하여 연구 결과는 제한적일 뿐만 아니라(Nelson 등, 1988; Su와 Hsu, 1988; Subramaniam 등, 1999), 이방향 휨인장상태에서의 콘크리트 피로 거동에 관한 연구는 수행된 바 없다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 이방향 휨인장강도의 크기 효과 규명과 이방향 응력상태에서의 피로거동 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험을 이용한 크기효과 및 피로실험을 실시하였으며, 일방향 인장응력상태의 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 결과와 비교하였다. 실험 결과에 대한 고찰과 분석을 통하여 일방향 인장응력상태의 강도 특성, 크기효과 그리고 피로거동과의 상관관계를 유추하여 이방향 응력상태의 구조물 거동 평가에 대한 기초자료로 제공하고 자 한다.

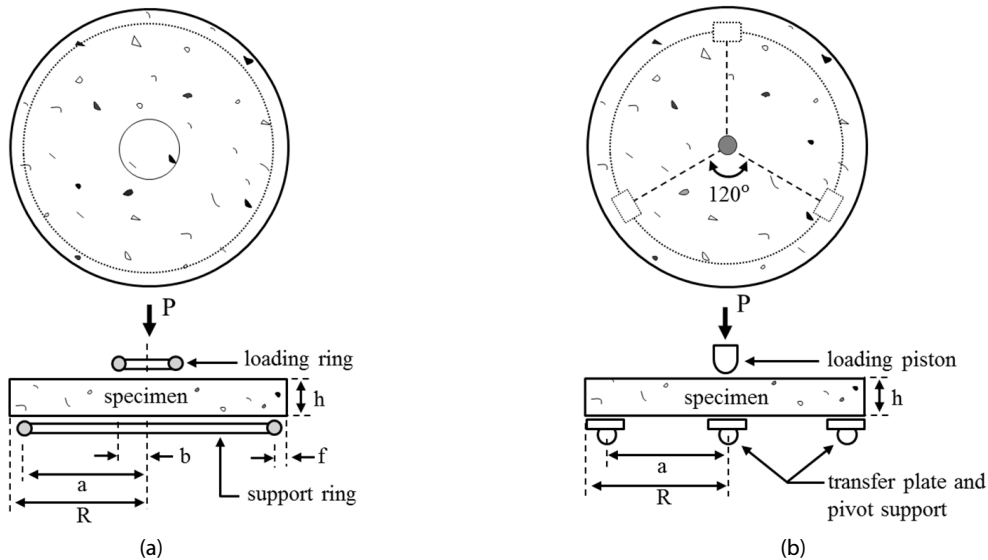


Fig. 1. (a) biaxial flexure test, (b) ASTM C 1550 methods.

2. 실험 개요 및 방법

일방향과 이방향 인장응력상태에서 시험체의 크기에 따른 강도 변화와, 반복하중에 의한 피로수명 차이를 규명하기 위하여 실험을 수행하였다. 이를 위해 보 시험체를 이용한 일방향 휨인장 응력상태의 크기효과와 피로시험은 ASTM C 78에 규정된 3등분점 재하 휨강도 시험을 적용하였다. 원형 패널을 이용한 이방향 휨인장 응력상태의 크기효과와 피로시험은 ASTM C 1550 기준과 이방향 휨강도 시험 방법(Kim 등, 2013)에 준하여 시험을 수행하였다. 모든 시험체는 28일 목표강도를 30 MPa로 설계하였고, 굵은 골재 최대치수는 크기효과에 사용되는 가장 작은 시험체($h=30$ mm)를 고려하여 6.5 mm인 부순 굵은 골재를 사용하였다. 적용된 콘크리트 배합설계는 Table 1에 정리하였다.

각 시험법에 따른 재료 강도는 측정된 하중의 최댓값으로부터 산정하였다. 3등분점 재하 휨강도 시험의 강도는 탄성보이론에 기초한 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$\sigma_u = \frac{Pl}{wh^2} \quad (1)$$

여기서, σ_u 는 콘크리트 일방향 휨인장강도(MPa), P 는 최대하중(N), l 은 시험체의 지간(mm), h 는 시험체 높이(mm)이며, w 는 시험체의 폭(mm)이다.

Table 1. Mixture proportion of concrete

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)			
		W	C	S	G
42	49	170	405	866	934

Table 2. Dimensions of third-point bending test

sizes	third-point bending test			
	h [mm]	w [mm]	l [mm]	L [mm]
S	30	30	90	190
M	48	48	144	244
L	75	75	225	325

Table 3. Dimensions of the biaxial flexure test and ASTM C 1550 specimens

sizes	biaxial flexure test / ASTM C 1550					
	h [mm]	R [mm]	a [mm]	b_0 [mm]	b [mm]	b_e [mm]
S	30	131	125	5.5	31.5	10.55
M	48	210	200	11	50	17.58
L	75	328.5	312.5	14	78	26.44

이방향 휨강도 시험의 강도는 탄성판이론에 근거한 식 (2)를 사용하여 계산하였다.

$$\sigma_b = 0.2387 \frac{P}{h^2} \left[2(1+\nu) \ln \frac{a}{b} + (1-\nu) \frac{(a^2 - b^2)}{R^2} \right] \quad (2)$$

여기서, σ_b 은 콘크리트 이방향 휨인장강도(MPa), P 는 최대하중(N), h 는 시험체 높이(mm)이며, a, b, R 은 각각 원판 시험체의 중앙 점부터 지지점 및 가력점까지의 거리(mm), 시험체의 반지름(mm)이다. ν 는 콘크리트 포와송비이다. 강도 계산 시 필요한 ν 는 실험에 의해 측정된 0.184를 사용하였다.

ASTM C 1550 기준에는 휨인장강도 산정을 위한 이론식이 제시되어 있지 않아 세라믹 분야의 ball-on three-balls 시험의 강도 산정식을 사용하였다(Kim 등, 2013).

$$\sigma_f = 0.2387 \frac{P}{h^2} \left[(1+\nu) \left(1 + 2 \ln \frac{a}{b_e} \right) + \frac{(1-\nu)(2a^2 - b_e^2)}{2R^2} \right] \quad (3)$$

$$b_e = \sqrt{1.6b_0^2 + h^2} - 0.675h, \quad (b_0 < 0.5h)$$

여기서, σ_f 은 콘크리트 이방향 휨인장강도(MPa), P 는 최대하중(N), h 는 시험체 높이(mm)이며, R 은 시험체의 반지름(mm)이다. a 는 원판 시험체의 중앙 점부터 지지점까지의 거리, b_0 와 b_e 는 가력 장치와 시험체가 마주 닿은 면적의 반지름(mm)과 유효 반지름(mm)이다.

2.1 크기효과 실험

3등분점 재하 휨강도 시험을 이용한 보 시험체의 일방향 휨인장 강도의 크기효과와 ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험을 이용한 원형 패널의 이방향 휨인장 강도의 크기효과를 알아보기 위하여 3 가지 크기($h=30, 48, 75$ mm)로 보 시험체와 패널 시험체를 제작하였다. 각 시험법에 따른 주요 시험변수는 Table 2와 3에 나타내었으며, 크기효과 시험에 사용된 보 시험체와 패널 시험체의 두께는 동일하다. 시험체는 강도의 통계적 분산을 고려하기 위해 각각의 크기에 따라 13개씩 총 39개의 보 시험체와 ASTM C 1550 과 이방향 휨강도 시험을 위한 78개의 패널 시험체를 제작하였다.

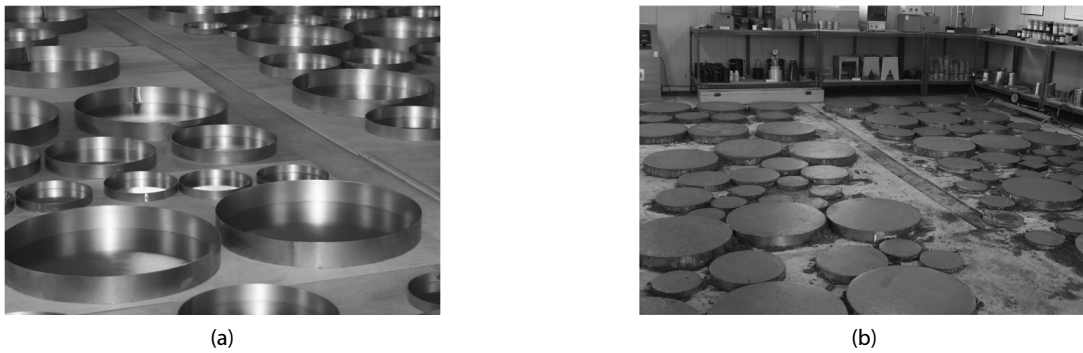


Fig. 2. (a) steel molds for round specimens, and (b) concrete specimens

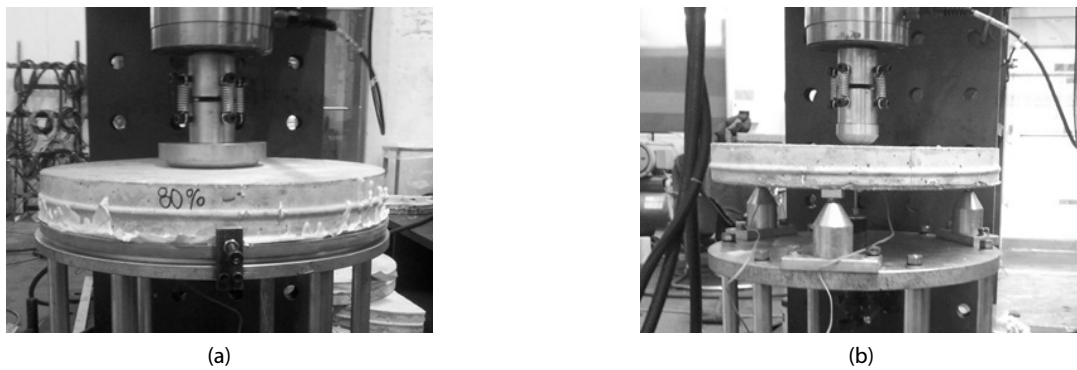


Fig. 3. Test set-ups for (a) biaxial flexure test, and (b) ASTM C 1550

패널 시험체 하면의 평탄성 확보를 위하여 거푸집은 Fig. 2(a)와 같이 원형 철판으로 제작하였다. 또한, 균일한 시험체 제작을 위하여 레미콘으로 타설한 후 24시간이 경과하여 거푸집을 제거하였으며, 시험 수행 시까지 양생조에서 수증양생을 실시하였다. Fig. 2(b)는 타설 전경이다. 콘크리트의 압축강도는 5개의 $\varnothing 100 \times 200$ mm 실린더 공시체를 제작하여 ASTM C 39 기준에 의해 측정하였으며, 평균 33 MPa로 얻어졌다. 크기효과를 위한 하중 재하는 100 kN 용량의 유압 액츄에이터(hydraulic actuator)를 사용하여, 1 mm/min 변위제어(displacement control) 방식으로 하중을 재하하였다. 모든 시험체는 시험편이 파괴될 때까지의 최대 하중을 측정하여 강도를 계산하였다.

2.2 피로실험

3등분점 재하 휨강도 시험, ASTM C 1550 그리고 이방향 휨 강도 시험을 이용하여 콘크리트 보 시험체와 패널 시험체에 일정 응력수준으로 반복적으로 가해지는 피로시험을 수행하였다. 피로 시험과 피로응력 수준 결정을 위한 정적시험을 위해 총 14개의 보 시험체와 28개의 패널 시험체를 제작하였다. 시험체 제원은 Table 2와 3의 M 크기($h = 48$ mm)의 제원을 적용하였으며, 크기효과 실험과 동일한 배합(Table 1)을 이용하여 시험체를 추가 제작하

였다. 시험 수행 시까지 피로시험 중 강도증진에 따른 편차를 최소화 하기 위해 시험체를 90일간 양생조에서 수증양생을 실시하였고, 이후 실험 도중에 수분으로 인한 시험체 강도변화의 영향을 줄이기 위하여 약 2달 동안 기진양생한 후 실험을 수행하였다. 콘크리트의 90일 압축강도는 평균 70 MPa로 얻어졌다.

정적 시험에서 각 시험법에 따라 5개의 시험체를 이용하여 시험을 수행하였다. 정적 시험은 1 mm/min의 변위제어 방식으로 하중을 가하여 시험체의 파괴 강도를 측정하였고, 측정된 정적시험의 최대하중을 바탕으로 피로시험을 위한 응력 수준을 결정하였다. 최저응력수준(S_{min})은 정적 휨강도 f'_r 의 $0.1f'_r$ 로 고정하였고, 최대 피로응력수준(S_{max})은 정적 휨강도의 90%, 80%, 70%로 하였다. 각 최대응력수준에 대하여 3개의 시험편을 사용하여 피로강도를 측정하였으며, 피로하중이력은 sine파를 사용하였다. 하중속도는 10 Hz로 고정하였고, 하중이 중간 값에 도달하는데 급격한 하중변화를 고려하여 1~20 cycles 동안 5단계로 나누어 하중을 서서히 증가시켰다. 또한, 이방향 휨강도 시험과 ASTM C 1550 시험을 이용한 피로시험 시 피로누적에 따른 패널의 변형정도를 알아보기 위하여 시험체 중앙의 아랫면에 2개의 변형률 게이지를 교차하도록 부착하여, 반복 하중에 따른 하중-변형률 이력을 측정하였다. Fig. 3은 이방향 휨강도 시험과 ASTM C 1550의 실험 전경을 보여준다.

Table 4. Test results of size effect in concrete strengths under different stress states

test methods	third-point bending test			ASTM C 1550			biaxial flexure test		
h [mm]	30	48	75	30	48	75	30	48	75
mean strength [MPa]	5.43	4.41	4.24	11.31	10.19	8.71	8.28	6.88	5.59
S.D [MPa]	0.39	0.49	0.20	1.21	0.96	0.72	0.48	0.65	0.31
c.o.v [%]	7	11	5	11	9	8	6	10	6

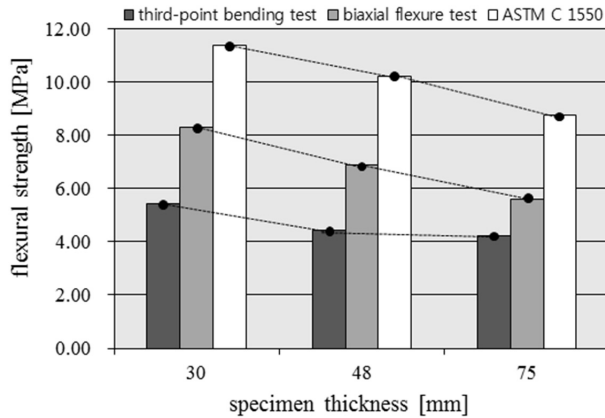


Fig. 4. Size effect in flexural strengths of concrete

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 크기효과

Table 4는 시험체의 크기에 따른 일방향 휨인장강도와 이방향 휨인장강도의 시험결과를 요약한 것이다. 시험결과로부터 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 일방향 휨강도보다는 ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험에 의한 이방향 휨강도가 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 두께 30 mm 시험체에서의 ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험에 의한 이방향 휨인장강도와 3등분점 재하 휨강도 시험의 일방향 휨인장강도와의 크기 비는 2.08과 1.52로 측정되었고, 두께 75 mm 시험체에서는 각각 2.05와 1.32가 측정되어, 일방향과 이방향 휨인장강도 차이는 시험체의 크기에 따라 상이한 것으로 나타났다. 변동계수(coefficient of variation; c.o.v)는 일방향과 이방향 휨인장강도 모두 11% 이하로, 신뢰할 수 있는 실험결과가 관찰되었다.

Fig. 4에는 시험체의 크기에 따른 일방향과 이방향 휨강도 분포를 도시하였다. 일반적으로 콘크리트와 같은 취성재료는 시험체의 크기가 증가함에 따라 강도는 감소하는 경향을 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험에 의해 측정된 휨강도는 시험체의 크기가 증가함에 따라 감소하는 것으로 측정되었다. 그러나 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 일방향 휨강도는 시험체의 두께가 30 mm에서 48 mm로

증가함에 따라 강도 크기가 감소한 반면, 48 mm에서 75 mm 시험체에서는 일정한 강도 값을 가지는 것으로 나타나, Fig. 4에서 예상할 수 있는 것과 같이 시험체의 크기가 증가함에 따라 이방향과 일방향 강도의 차이는 감소할 것으로 판단된다. 이러한 결과는 이방향 휨인장강도의 크기효과가 일방향 휨인장강도의 크기효과보다 더 큰 것을 의미하며, 두 응력상태에서의 콘크리트 크기효과에 관한 보다 자세한 내용은 후속 논문에서 다루고 있다(Zi 등, 2013).

3.2 피로시험

피로 시험에 앞서 수행한 일방향(3등분점 재하 휨강도 시험)과 이방향(ASTM C 1550, 이방향 휨강도 시험) 정적 시험에서 측정된 강도결과와 피로실험 결과를 Table 5와 6에 각각 정리하였다. 본 실험에서도 크기효과 실험결과와 같이 이방향 휨인장강도가 일방향 휨인장 강도보다 큰 것으로 나타났으며, 변동계수는 모두 5% 이하로 측정되었다. 피로실험에서는 모든 시험법에서 응력준이 낮아짐에 따라 피로수명이 증가하였으며, 실험결과와 편차가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 5는 이방향 휨강도 시험을 이용한 최대응력수준 80%의 피로실험에서 패널 시험체 인장면 중앙에서 측정된 하중 반복횟수에 따른 두 변형률 값을 비교한 것이다. 원형 패널에 반복하중이 작용하는 초기에는 두 변형률 값이 거의 일치하는 것으로 나타났으나, 하중반복 횟수가 증가함에 따라 두 변형률이 증가하면서 그 차이 또한 증가하는 것으로 나타났다. 시험체 파괴 시에는 하나의 변형률이 급격히 증가하여 파괴되는 것으로 관찰되었으며, 이는 반복하중 초기에만 원형 패널이 등방성 응력상태에 놓이고, 하중반복 횟수가 증가함에 따라 비등방성 응력상태에 놓이게 되어 파괴에 이르는 것을 의미한다. 그러나 이러한 국소화(localization) 현상은 손상이나 균열발현 문제에서 잘 알려져 있는 문제이며 재료의 변형경화(strain-hardening) 특성이 없는 경우 일반적인 현상이다(Bazant와 Planas, 1998). 즉, 등방성의 응력상태이더라도 재료의 파괴는 한 방향에서 발생한다. ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험을 이용한 콘크리트 패널의 등방성 응력상태의 구현 여부를 증명하기 위한 정적실험(Kim 등, 2012)에서는 하중 재하와 동시에 측정된 두 개의 하중-변형률 곡선이 파괴 직전까지 거의 일치하는 것으로 보고된 바 있다.

Table 5. Test results of static tests

test methods	third-point bending test	biaxial flexure test	ASTM C 1550
mean strength [MPa]	7.43	9.68	12.73
S.D [MPa]	0.13	0.39	0.57
c.o.v [%]	2	4	5

Table 6. Test results of fatigue tests

test methods	no.	number of cycles to failure, N_f		
		$S_{max}=90\%$	$S_{max}=80\%$	$S_{max}=70\%$
third-point bending test	1	71	32,741	1,016,199
	2	2,797	67,972	2,000,000*
	3	7,641	439,985	2,000,000*
ASTM C 1550	1	445	38,760	935,597
	2	11,759	45,593	2,000,000*
	3	16,749	504,178	2,000,000*
biaxial flexure test	1	147	3,635	423,344
	2	832	87,391	786,570
	3	1,967	154,931	2,000,000*

* : number of cycles to failure over 2×10^6 cycles

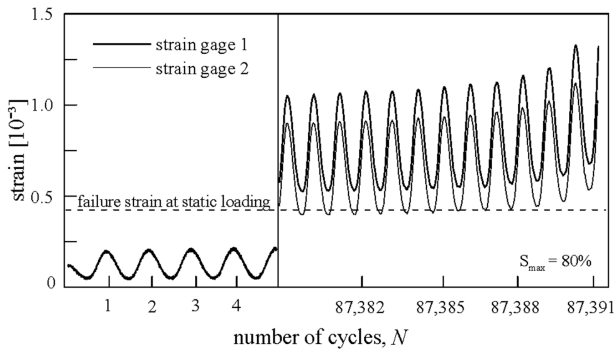


Fig. 5. The strain values of a round panel for biaxial flexure test according to the number of cycles

Fig. 6은 ASTM C 1550을 이용한 최대응력수준 80%의 피로 실험에서 시험체 인장면 중앙에서 측정된 하중 반복횟수에 따른 두 변형률 값을 비교한 것이다. 하중 반복 횟수에 따라 최대 변형률이 크게 3단계로 나누어지는 것을 알 수 있다. 초기 단계는 변형률이 빠르게 증가하는 반면, 그 증가율은 점점 감소하는 것을 알 수 있고, 중간 단계에서는 변형률이 일정하게 증가하다가, 마지막 파괴 직전의 단계에 다시 변형률이 급격하게 증가하였다. 이러한 결과는 콘크리트 내부의 미세균열의 성장에 의한 강성 변화에 기인하며, 일방향 압축 반복하중에서의 콘크리트 거동과도 유사하다(Holmen, 1982; Neville, 1995).

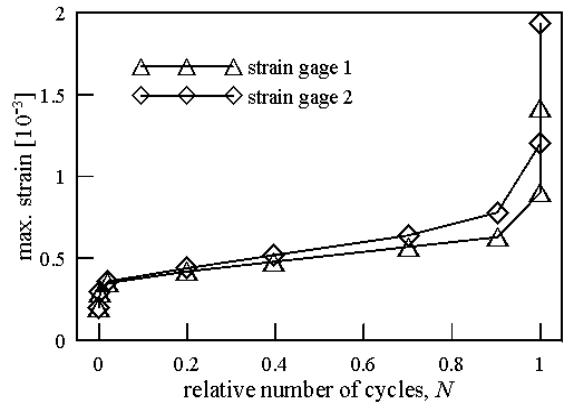


Fig. 6. The maximum strain values of a round panel for ASTM C 1550 according to the number of cycles

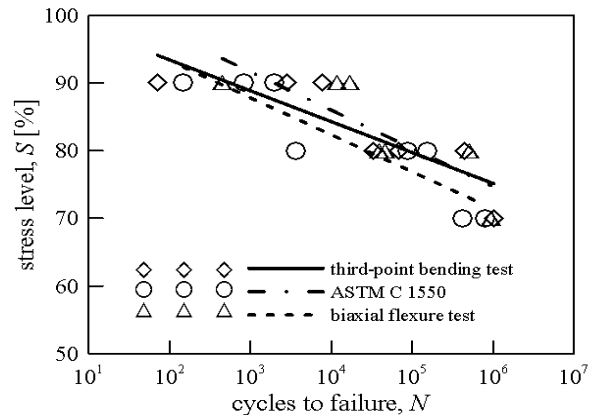


Fig. 7. S-N curves

Fig. 7에는 응력 수준에 따른 파괴 시 반복횟수의 관계를 회귀분석하여 구한 S-N 관계로 나타내었다. 이방향 응력상태의 피로수명은 ASTM C 1550에 의한 피로 수명이 이방향 휨강도 시험에 의한 피로수명보다 더 큰 것으로 나타났으며, 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 일방향 휨인장강도의 피로수명은 ASTM C 1550 과 이방향 휨강도 시험에 의한 결과 사이의 사이에 있는 것을 알 수 있다.

Table 7은 실험에 의해 측정된 3등분점 재하 휨강도 시험, 이 방향 휨강도 시험과 ASTM C 1550 시험법의 S-N 관계식과 하중 반복 횟수 200만에서의 피로강도를 비교하였다. 실험 결과로부터 3등분점 재하 휨강도 시험, 이방향 휨강도 시험과 ASTM C 1550 시험체의 반복 횟수 200만에서의 피로강도는 각각 정적 하중의 74%, 70%, 73%인 것으로 나타났다. 기존 연구에서 이방향 압축응력상태에서의 피로강도는 일방향 압축응력상태에서의 피로강도보다 더 큰 것으로 보고된 바 있다(Su와 Hsu, 1988). 그러나 본 연구에서는 콘크리트 피로실험의 큰 분산성을 고려한다면 일방향과 이방향 휨인장응력상태의 피로수명은 유사한 것으로 판단된다.

Table 7. *S-N* relation

test methods	<i>S-N</i> relation	fatigue strengths to 2×10^6 cycles
third-point bending test	$S_{max}=102.52-4.56 \log(N)$	74% of the static strength
biaxial flexure test	$S_{max}=104.18-5.46 \log(N)$	70% of the static strength
ASTM C 1550	$S_{max}=108.58-5.64 \log(N)$	73% of the static strength

4. 결론

본 연구에서는 이방향 응력상태에서의 콘크리트 강도 특성과 크기효과 그리고 피로거동을 평가하기 위해 원형 패널 시험체를 제작하여 크기효과와 피로시험을 수행하였으며, 일방향 인장응력 상태의 3등분점 재하 휨강도 시험 결과와 비교하였다. 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험을 통해 최대 휨인장강도는 ASTM C 1550과 이방향 휨강도 시험에 의한 이방향 휨인장강도가 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 일방향 휨인장강도보다 더 큰 것으로 관찰되었다.
- (2) 3등분점 재하 휨강도 시험, ASTM C 1550, 이방향 휨강도 시험 모두 시편의 크기가 증가함에 따라 강도는 감소하는 것으로 관찰되었으며, 이방향 휨인장강도(ASTM C 1550, 이방향 휨강도 시험)의 크기효과가 일방향 휨인장강도(3등분점 재하 휨강도 시험)의 크기효과보다 더 큰 것으로 확인되었다.
- (3) 이방향 휨강도 시험과 ASTM C 1550에 의한 이방향 인장강도의 피로거동과 3등분점 재하 휨강도 시험에 의한 일방향 인장강도의 피로거동을 회귀분석하여 구한 *S-N* 관계에 의하면 일방향과 이방향 인장상태의 피로수명은 유사한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원(2012R1A1B3004227)과, 국토해양부 산하 한국해양과학기술진흥원의 첨단항만건설기술개발사업 연구비 지원(20120093)을 받아 수행되었습니다.

References

- ASTM (2004). ASTM C 39/C 39M: *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2010). ASTM C 78/C 78M: *Standard test method for flexural strength of concrete (Using simple beam with third-point loading)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM (2008). ASTM C 1550-08: *Standard test method for flexural toughness of fiber-reinforced concrete (Using centrally-loaded round panel)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bazant, Z. P. (1984). "Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, No. 4, pp. 518-535.
- Bazant, Z. P. and Planas, J. (1998). *Fracture and size effect: in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC Press, New York.
- Holmen, J. O. (1982). "Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading." *ACI Materials Journal*, Vol. 75, pp. 71-110.
- Kim, J., Kim, D. J. and Zi, G. (2013). "Improvement of the biaxial flexure test method for concrete." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 154-160.
- Kim, J., Yi, C. K. and Zi, G. (2012). "Biaxial flexural strength of concrete by two different methods." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 64, No. 12, pp. 1057-1065.
- Nelson, E. L., Carrasquillo, R. L. and Fowler, D. W. (1988). "Behavior and failure of high-strength concrete subjected to biaxial-cyclic compression loading." *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 4, pp. 248-253.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*, 4th edn. Longman, Harlow, England.
- Subramaniam, K. V., Popovics, J. S. and Shah, S. P. (1999). "Fatigue behavior of concrete subjected to biaxial stresses in the compression-tension region." *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 6, pp. 663-669.
- Subramaniam, K. V. and Shah, S. P. (2003). "Biaxial tension fatigue response of concrete." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 6, pp. 617-623.
- Su, E. C. M. and Hsu, T. T. C. (1988). "Biaxial compression fatigue and discontinuity of concrete." *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 3, pp. 178-188.
- Zi, G., Oh, H. and Park, S. K. (2008). "Novel indirect tensile test method to measure the biaxial tensile strength of concretes and other quasibrittle materials." *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 751-756.
- Zi, G., Kim, J. and Bazant, Z. P. (2013). "Size effect on biaxial tensile strength of concrete." *ACI Materials Journal*, - in press.