

고강도 콘크리트의 피로 거동에 관한 실험적 연구

Experiments for the Fatigue Behavior of High Strength Concrete

김진근*
Kim, Jin-Keun

김윤용**
Kim, Yun-Yong

ABSTRACT

In this paper, the effect of compressive strength on the fatigue behavior of plain concrete was studied. The fatigue behavior of plain concrete in uniaxial compression is somewhat affected by the compressive strength of the concrete. Concrete cylindrical specimens(100×200mm) with compressive strength of 265kg/cm², 530kg/cm², 860kg/cm² and 1053kg/cm² were tested and analyzed on the fatigue strength. In addition to fatigue strength, the deformation characteristics of the concrete subjected to fatigue loading was investigated. The fatigue strength was decreased for the higher-strength concrete. The deformation studies indicated that the irrecoverable strain in normal strength concrete is greater than that in high strength concrete.

1. 서론

콘크리트 기술이 발전함에 따라 구조물에 사용되는 콘크리트의 강도 수준은 점점 더 증가하는 추세이며 강도 설계법의 적용 및 새로운 콘크리트 구조물의 건설에 의해 높은 응력 수준에서도 충분히 사용성을 발휘할 수 있는가에 대하여 관심이 높아가고 있다. 특히 교량 슬래브, 해양 구조물, 철근 콘크리트 도로포장 등 피로 하중이 지배적인 구조물에서는 피로강도의 중요성이 더욱 강조된다. 피로 하중이 직접적인 파괴 원인이 되지 않더라도 반복 하중에 의해 콘크리트 내부의 균열이 진전하여 사용 하중에 못미치는 하중 상태에서도 급작스런 파괴가 발생하기도 한다.(1)

또한 최근 고강도 콘크리트의 실용화 추세에 발맞추어 각종 구조물의 부재가 고강도화 되면서 고강도 콘크리트의 피로거동 연구가 요구되고 있

다. 현재 강도에 따라서 피로거동의 차이를 두고 있지는 않으나, (2) 물-시멘트비에 따른 피로거동의 차이를 연구하는(3) 등 새로운 피로계수를 결정하여 결과치의 흠어짐(data scattering)을 보정하고자 노력하고 있다.

또한 피로 하중을 받는 콘크리트는 균열이 분산되어 단조 하중 상태에 비해 큰 연성(ductility)을 보이는 것으로 보고되고 있어(4) 피로 변형도를 측정할 후 강도별로 비교 분석하는 것은 중요한 일이라 여겨진다. 따라서 본 연구의 목적은 고강도 콘크리트의 피로 내성(fatigue resistance)에 중점을 두어 압축강도에 따른 무극 콘크리트의 피로 거동을 실험 연구하여 최고응력수준-파괴횟수-압축강도 관계식을 도출하고, 콘크리트의 피로 비탄성 변형도를 측정하여 강도에 따른 콘크리트의 피로 변형 특성을 파악하는데 있다.

2. 콘크리트의 피로거동

피로강도란 주어진 횟수만큼 하중을 반복하였을 때 파괴 시의 응력을 정적인 극한강도(압축,

* 정희원, KAIST 토목공학과 부교수, 공학박사

** KAIST 토목공학과 석사과정

인장, 휨 등)에 대한 비율로 나타낸 것이다. 정적 인 극한강도에 못미치는 응력이 반복되더라도 재료 내부에서는 미세 균열이 진전하여 피로 파괴에 이르게 된다. 기존의 연구는 콘크리트의 피로 거동을 최고응력수준과 파괴횟수의 관계(S-Nr relationship)를 이용하여 수식화하였고, (5)-(7)이 관계식을 통해 Miner의 합을 산정한 후 구조물의 피로수명을 예측하였다.(8)

피로강도에 미치는 영향 인자는 내재요인(공기량, 물-시멘트비, 골재의 종류, 시멘트량), 외부환경요인(온도, 습도), 하중 상태(하중 폭, 하중 이력, 하중 주파수), 역학적 특성(압축강도, 탄성계수, 파괴계수) 등의 네 가지로 구분하여 설명할 수 있다.(9) 이 중에서 하중 폭에 의한 영향이 가장 중요한 것으로 알려져 있어 대부분의 경우 최고응력수준에 따른 파괴횟수를 재료의 피로 특성으로 간주한다. 그러나 콘크리트는 고강도일수록 취성이 크고, 피로거동의 경우에도 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비해서 높은 취성을 나타낸다.(10)

3. 실험

3.1 실험 계획

일반적으로 수행되는 피로강도 실험은 최저응력수준을 상수로 취하는 방법과 최저응력수준과 최고응력수준의 비율(응력비)을 일정하게 하는 방법이 있다.(11) 본 실험에서는 전자의 실험 방법을 사용하였고 최저응력수준은 $0.25f_c'$ 으로 고정시켰다. 그 외에 하중 주파수(1Hz), 골재 등도 일정하게 하였고 하중 이력은 그림 1과 같이 일정한 진폭을 갖는 정현 곡선(sine curve)이다. 실험 변수의 자세한 내용은 표 1에 기재한 바와 같다

표 1. 실험 변수

최고응력수준 (%)	95, 85, 80, 75
압축강도 (kg/cm ²)	250, 500, 800, 1000

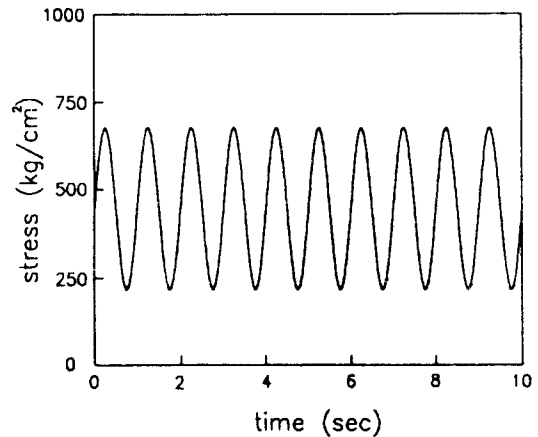


그림 1. 하중 이력($f_c' = 860\text{kg/cm}^2$, $S_{max} = 75\%$)

3.2 실험 재료

본 실험에 사용된 시멘트는 S사 제품의 제 1종 포틀랜드 시멘트이며 잔골재로는 효과적인 고강도 발현을 위하여 조립율이 2.89인 금강 유역의 대평리산 강모래를 사용하였다. 굵은골재는 골재의 최대치수 13mm이고 비중이 2.65, 조립율이 6.08인 화강암 쇄석을 사용하였다. 본 실험에서 사용된 혼화제는 ASTM C494 type F의 규격을 만족시키는 고성능감수제이다.

표 2. 배합 설계

공시체 기호	단 위 중 량 (kg/m ³)					고성능 감수제 (%)	슬럼프 (cm)
	시멘트	S.F.	물	잔골재	굵은골재		
LS	320		217.6	716.7	930.7	*	10.1
MS	450		155.6	698.1	1046.9	3.0	8.1
HS	468	52	147.8	602.6	983.2	2.2	12.7
UHS	488	162	123.5	533.0	1082.0	3.0	13.6

(저강도:LS 중간강도:MS 고강도:HS 초고강도:UHS)

3.3 배합 설계 및 공시체의 제작

본 연구에서는 콘크리트가 목표한 압축강도를 발현하고 적절한 작업성을 갖도록 하기 위하여 7차에 걸친 예비실험을 수행한 후 이를 토대로 하여 표 2와 같이 배합비를 결정하여 총 12회로 나누어 타설하였다.

압축강도 및 피로강도 실험용 공시체는 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 몰드를 사용하여 KS F2405에 따라 제작하였으며, 타설과 동시에 KS F 2402에 따라 슬럼프 실험을 실시하였다. 공시체는 제작 후 즉시 비닐로 덮어 수분의 증발을 방지하였으며, 항온항습실($23 \pm 1^\circ \text{C}$, 99% R.H.)에서 24시간 성형한 후 탈형하였다.

3.4 실험 방법

재령 30일 전후에 공시체를 시험하였고 피로강도 실험 직전에 각각 3개의 공시체에 대하여 KS F 2405에 따라 압축강도 실험을 수행한 후 평균치를 기준으로 약 3일에 걸쳐 피로강도 실험을 하였다. 실험 후에 다시 압축강도 실험을 실시한 결과 3일 간의 시간 차이에 의한 강도의 증진은 거의 없는 것으로 나타났다. 이 때 실험에 사용된 기기는 250톤 용량의 Instron사의 Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Materials Testing System 이다. 이때 이물질(시멘트풀, 유황 혼합물)에 의한 실험 시의 오차를 방지하기 위하여 랩핑 시스템을 사용하지 않고, 공시체 절삭기를 사용하여 공시체 면을 평활하게 연마한 후 실험을 수행하였다.

피로 수명을 구하기 위한 실험을 수행할 시는 공시체의 습윤상태를 지속적으로 유지하기 위하여 물에 적신 두꺼운 헝겊을 감아서 실험 중에 공시체 내의 수분이 외부로 증발하는 것을 방지하였다. 그리고 피로 변형도 측정 실험의 경우에는 압축강도 및 피로강도 실험 공시체 모두 12시간 공기중에 방치한 후 3개의 스트레인 게이지(strain gauge)를 공시체의 표면에 부착하여 변형도를 측정하였다. 피로 변형도를 측정하는 기기는 TEAC사의 카세트 데이터 레코더(cassette data recorder MR30)이다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 S-Nr-fc' 관계

최대응력수준에 따른 파괴횟수를 압축강도를 중심으로 표 3에 정리하였다. 그림 2는 수행된 피로강도 실험의 결과를 압축강도 별로 회귀분석을 실시한 후 반대수 눈금(semi-log scale)으로 나타낸 그림이고 식(1)~식(4)는 압축강도에 따른 S-Nr 관계식이다.

표 3. 피로 실험 결과

압축강도 (kg/cm ²)	최고응력수준 S _{max} (%)	공시체 갯수	피로수명 N _f
265	95	6 + 2*	122.6
	85	5 + 2*	1363.0
	80	5 + 2*	5737.8
	75	3 + 2*	55738.6
530	95	5 + 2*	100.4
	85	6 + 2*	968.0
	80	6 + 2*	2528.2
	75	5 + 2*	10117.0
860	95	4 + 2*	58.3
	85	6 + 2*	1045.3
	80	6 + 2*	1643.8
	75	4 + 2*	3483.5
1035	95	4 + 1*	45.8
	85	4 + 1*	481.3
	80	3 + 1*	1419.3
	75	4 + 1*	3394.3

(* : 변형도 측정에 사용된 공시체의 갯수)

$$S_{max} = -7.4277 \log N_f + 108.87 \quad (1)$$

R - Square = 0.934

$$S_{max} = -9.9070 \log N_f + 114.25 \quad (2)$$

R - Square = 0.967

$$S_{max} = -10.337 \log N_f + 113.63 \quad (3)$$

R - Square = 0.874

$$S_{max} = -10.073 \log N_f + 111.14 \quad (4)$$

R - Square = 0.907

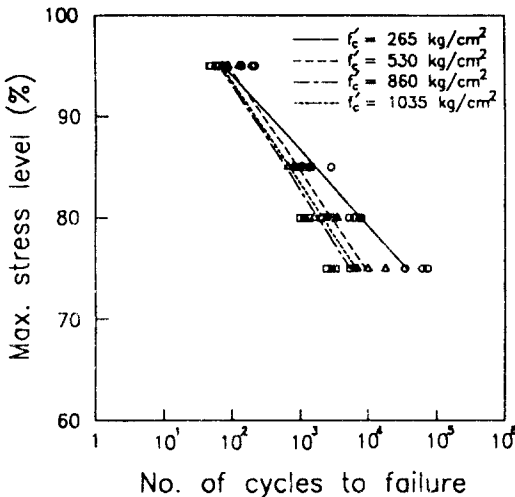


그림 2. S-Nf-fc' 관계

회귀분석식을 보면 압축강도가 커질수록 기울기가 급한 반면 일정한 상수값을 갖는 양상을 볼 수 있다. 여기서 상수항의 값이 대체로 110을 갖는 것은 압축강도 실험의 변형도를 효과와 같은 이유로 분석될 수 있다. 즉 피로강도와 같이 매우 빠른 변형도율로 압축강도 실험이 수행된다면 표준 압축강도 실험에 의해 결정된 강도보다 큰 값(약 110% ~ 120%)을 나타내게 된다.(12) 그림 2를 보면 피로강도와 파괴횟수의 상용로그값이 선형 역비례 관계에 있는데 이러한 현상은 콘크리트 뿐만 아니라 대부분의 재료에서 나타난다.(13)(14) 본 실험에서 수행하지 않은 낮은 응력수준 상태에서의 피로 특성(피로 한계)을 포함

하여 2개의 직선, 혹은 곡선으로 수식화하는 방법이 일반적으로 사용된다.(15)

그림 2에서 보는 바와 같이 강도가 높을수록 같은 최고응력수준에서 파괴횟수(피로 수명)가 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 그 이유는 고강도 콘크리트가 갖고있는 취성에 기인하는 것으로 사료되며, 피로하중 상태에서도 고강도 콘크리트는 균열 집중 현상이 나타나 저강도 콘크리트에 비해 낮은 피로강도를 갖는다. 무근 콘크리트의 휨 피로 거동에 관한 연구(3)에 의하면 물-시멘트비가 낮아질수록 피로강도가 떨어진다는 보고가 있으며 이는 고강도 콘크리트의 피로강도가 보통강도 콘크리트에 비해 낮게 나타난 본 연구의 결과와 일치한다.

4.2 피로 변형도

피로 비탄성 변형도를 분석하기 위하여 하중 횟수를 피로 수명에 대한 백분율로 정규화하였고 1회의 피로 하중이 가해지는 동안 가장 큰 변형도를 취하여 그림 3, 4와 같이 도시하였다.

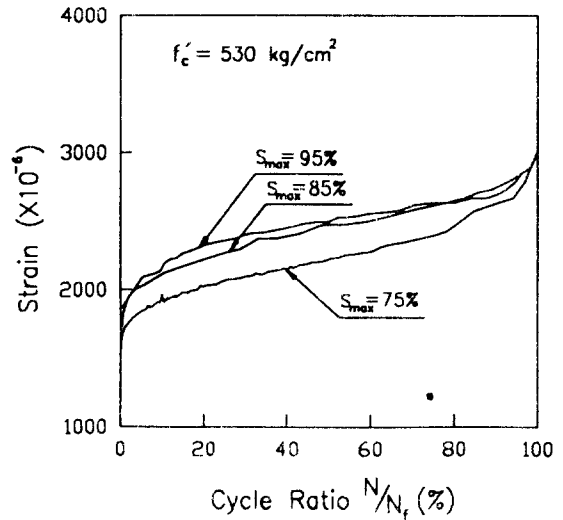


그림 3. 최고응력수준에 따른 피로 변형도

일축 압축의 피로 하중을 받는 콘크리트는 중기에 비해 초기와 말기의 비탄성 변형량이 매우 크게 나타나는 특성을 갖는다. 그림 3은 압축강도 530kg/cm²의 피로 비탄성 변형도를 나타낸

그림이다. 최고응력수준이 높을수록 초기 변형도가 크고 피로 수명에 가까운 말기에는 오히려 최고응력수준이 낮은 공시체가 더 큰 변형도를 보여준다. 그림 4는 최고응력수준이 75%인 경우로서 피로 변형도를 압축강도에 따라서 도시한 것이다. 고강도 콘크리트가 보통강도 및 저강도 콘크리트에 비하여 현저히 작은 비탄성 변형도를 보인다. 고강도 콘크리트는 피로 누가 손상이 적은 상태에서 피로 파괴에 이르고, 피로 하중 하에서도 단조 하중의 경우와 마찬가지로 매우 큰 취성을 나타낸다.

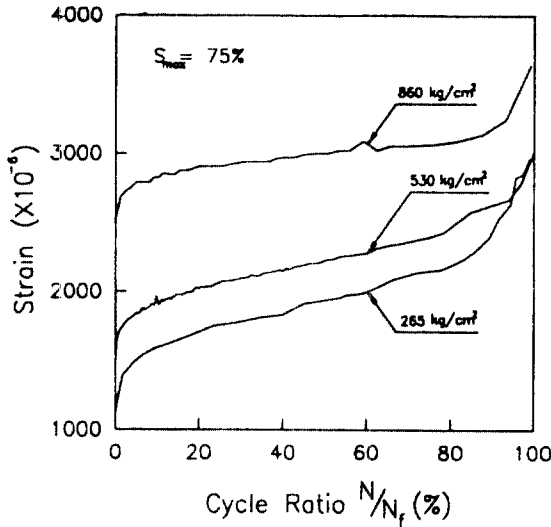


그림 4. 압축강도에 따른 피로 변형도

5. 결 론

일축 압축 상태에서 압축강도 수준에 따른 무근 콘크리트의 피로 특성을 연구한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 최고응력수준을 갖는 일정 진폭 하중이 가해질 경우, 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비해 짧은 피로 수명을 갖는다.
- 2) 일축 압축 피로 실험을 통하여 피로 수명을 연구한 결과 고강도 콘크리트가 보통강도, 저강도 콘크리트에 비해서 피로 하중에 취약하다는 결론을 얻었다.
- 3) 동일한 압축강도에서 피로 하중의 최고응력수

준이 높은 경우, 초기의 변형도는 크나 피로 수명까지의 비탄성 변형도가 작다. 결국 피로 파괴시의 최종 변형도는 최고응력수준이 낮은 경우(파괴횟수가 많은 경우)가 더 크다.

- 4) 동일한 최고응력수준을 갖는 일정 진폭 하중이 가해질 때, 초기의 변형도는 고강도 콘크리트가 크나, 피로 수명까지의 피로 비탄성 변형도는 보통강도 혹은 저강도 콘크리트에 비하여 작다. 피로 변형도를 측정할 결과 강도 수준이 높아질수록 취성이 커진다는 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 1991년 과학재단 목적기초 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사함을 드립니다. 또한 공시체의 연마에 도움을 주신 동양중앙연구소 정재동 실장님께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) ACI Committee 215, "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading," (ACI 215R-74) American Concrete Institute, Detroit, 1986, 25pp.
- 2) ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 48pp.
- 3) Klaiber, F.W., and Lee, D.Y., "The Effect of Air Content, Water-Cement Ratio, and Aggregate Type on The Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete," Fatigue of Concrete, SP-41, ACI, 1982, pp. 111-131.
- 4) Bazant, Z.P., and Xu, K., "Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete," ACI Materials Journal, Proceedings Vol. 88, No 4, July-August 1991, pp. 390-399.
- 5) Kakuta, Y. et al., "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," Proc. IABSE, Lausanne, Vol. 37, 1982, pp. 51-58.

- 6) Waagaard, K., "Fatigue Strength Evaluation of Offshore Concrete Structures," Proc. IABSE, Lausanne, Vol.37, 1982, pp. 97-115.
- 7) Japan Society Civil Engineers, Transactions, 122, October 1965.
- 8) Miner, M.A., "Cumulative Damage in Fatigue," Transactions, American Society of Mechanical Engineers, Vol.67, 1945, pp.159-222
- 9) Mor, A., Gerwick, B.C., and Hester, W.T., "Fatigue of High-Strength Reinforced Concrete," ACI Materials Journal, Proceedings Vol.89, No 2, March-April 1992, pp.197-207.
- 10) Bazant, Z.P., and Schell, W.F., "Fatigue Fracture of High Strength Concrete and Size Effect," Center for Advanced Cement Based Materials, Northwestern University, Evanston, Illinois 60208, March 1992, 34pp.
- 11) Holmen, J.O., "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," Fatigue of Concrete, SP-41, ACI, 1982, pp. 71-110.
- 12) Bischoff, P.H., and Perry, S.H., "Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates," Materials and Structures, Vol.24, No.144, 1991, pp. 425-450.
- 13) Felbeck, D.K., and Atkins, A.G., "Strength and Fracture of Engineering Solids," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984, 542pp.
- 14) Barsom, J.M., and Rolfe, S.T., "Fracture and Fatigue Control in Structure," 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987, 628pp.
- 15) Nakazawa, H., and Kodama, S., "Statistical S-N Testing Method with 14 Specimens : JSME Standard Method for Determination of S-N Curve," Current Japanese Materials Research Vol.2, The Society of Materials Science, Japan, 1987, pp. 59-69.