

고강도 콘크리트의 피로거동에 관한 실험적 연구

Experiments for the Fatigue Behavior of High Strength Concrete

김진근* 김윤용**
Kim, Jin Keun Kim, Yun Yong

요약

본 연구에서는 콘크리트의 강도수준에 따른 피로실험을 수행하여 고강도 콘크리트의 피로거동 특성을 분석하였다. 실험변수는 4종류의 강도수준(26 MPa, 54 MPa, 82 MPa, 103 MPa)과 4종류의 최고 응력수준(75%, 80%, 85%, 95%)이며 실험에 사용된 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm의 원통형 공시체로서 총 160개가 제작되었다. 실험 결과, 강도수준이 증가함에 따라 피로강도가 감소하였고 강도수준의 영향을 고려한 S-N_f 관계식을 제안하였다. 또한 강도수준의 영향 이외에도 변형도율 효과를 도입하여 피로실험과 압축실험에서 발생하는 하중재하율의 차이를 보정하였다. 한편, 피로 비탄성변형도는 강도수준이 증가함에 따라 감소하였으나 반복횟수에 따른 변형도 증가율은 강도수준이 높을수록 큰 것으로 나타났다.

Abstract

In this study, cylindrical concrete specimens with various strength levels were tested to investigate the fatigue behavior of high strength concrete. Selected test variables were compressive strength with 4 levels(26 MPa, 54 MPa, 82 MPa, 103 MPa) and maximum stress with 4 levels (75%, 80%, 85%, 95%). A total of 160 specimens($\phi 100 \times 200$ mm) were casted for the test. The fatigue life was decreased for the higher-strength concrete. A model for S-N_f relationship considering the effect of compressive strength, was proposed. In addition, this model included the strain rate effect which was modified for the strength level. It was found that the irrecoverable strain of normal strength concrete was greater than that of high strength concrete. However the strain increase per cycle of load was great for the higher-strength concrete.

Keywords : fatigue, high strength concrete, strength level, strain rate effect, irrecoverable strain, fatigue life ratio, strain increase per cycle of load.

* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
** 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 1994년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 구조물 중에서 교량 슬래브, 해양 구조물, 철근 콘크리트 도로포장 등 피로하중이 지배적인 구조물에서는 피로강도가 매우 중요하며, 더우기 피로하중이 직접적인 파괴 원인이 되지 않더라도 반복하중에 의하여 콘크리트 내부의 균열이 진전하여 사용하중에 못미치는 하중상태에서도 급작스런 파괴가 발생하기도 한다.⁽¹⁾ 또한 최근 고강도 콘크리트의 실용화 추세에 있어 각종 구조 부재가 고강도화 됨에 따라 고강도 콘크리트의 피로거동에 관한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 현재, 피로설계에 있어서 강도수준의 영향을 고려하지 않으나⁽²⁾ 불-시멘트비에 따른 피로거동을 연구하는 등⁽³⁾ 새로운 피로계수를 결정하여 데이터의 흠어짐을 보정하고자하는 노력이 진행되고 있다. 또한 피로하중을 받는 콘크리트는 균열이 분산되어 단조하중상태에 비하여 취성계수가 작아지는 것으로 알려지고 있다⁽⁴⁾. Bazant 등⁽⁵⁾은 피로하중상태의 취성계수가 줄어드는 경향이 고강도화 됨에 따라 저감된다는 연구결과를 통하여 고강도 콘크리트의 취성적인 거동에 관하여 연구보고하고 있다.

콘크리트의 피로거동에 대한 관점은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 구조적인 관점이다. 구조적 관점의 연구는 구조부재를 대상으로 직접 반복하중을 가하여 파괴횟수, 처짐, 하중반복 후의 부재강도 등을 구하여 부재의 파괴 확률을 산정하는 것이다. 둘째는 피로강도의 관점에서 피로거동을 파악하는 연구로서 공시체를 갖고 일정한 반복하중에 의한 피로실험을 수행한 후 피로강도, 파괴횟수, 피로변형도 등의 관계를 규명하는 연구이다. 셋째는 미시적 관점이다. 공시체에 노치를 두어 초기에 균열을 형성한 후, 실험체에 피로하중을 가하여 반복하중에 의한 균열의 진전을 파악하는 연구로서 피로파괴(fatigue fracture)실험이 대표적인 미시적 관점에서의 연구이다.

본 연구는 피로강도의 관점에서 콘크리트의 피로특성을 파악함에 그 목적을 두었으며, 고강도 콘크리트의 피로내성(fatigue resistance)에 연구의 주안점을 두어 압축강도의 수준에 따라서 피로

실험을 수행하였다. 실험의 결과로서 최고응력수준-파괴횟수-압축강도의 관계를 구하였고, 콘크리트의 피로 비탄성변형도를 측정하여 강도수준에 따른 콘크리트의 피로변형특성을 파악하였다.

2. 콘크리트의 疲勞舉動(fatigue behavior of concrete)

피로강도란 주어진 횟수만큼 반복하중을 주었을 때, 파괴 시의 응력을 정적인 극한강도(압축, 인장, 휨 등)에 대한 백분율로 나타낸 것이다. ACI Committee 215의 보고에 의하면 콘크리트의 피로한도는 10×10^6 과 같은 높은 반복횟수에서의 피로강도로 취하는 것이 적합하며, 압축강도, 인장강도, 휨강도 등 공히 약 55% 정도로 보고 있다⁽¹⁾.

피로란 반복하중에 의하여 재료의 내부 구조가 점진적으로 영구적인 변화를 일으키는 현상을 말한다. 이러한 변화란 점진적인 손상을 의미하며, 균열의 진전을 유발시키고 많은 횟수로 하중이 반복되면 재료가 파괴에 도달한다. 또한 파괴 시에는 단조하중에 비하여 큰 변형도를 나타내는데,⁽⁶⁾ 이는 피로의 점진적 손상에 의하여 균열이 분산되기 때문이다.

기존의 연구는 일반적으로 최고응력수준과 파괴횟수의 관계(S-N_f relationship)만을 이용하여 콘크리트의 피로거동을 수식화하였다. 모델식은 Miner가 제안한 누가피로손상(Miner Sum)을 산정한 후 예상되는 하중이력에 대하여 구조물의 피로해석을 수행하는 목적으로 이용되며 국내에서도 교량구조물 등에 이와 같은 피로해석연구가 이루어지고 있다⁽⁷⁾. 그러나 압축강도실험에 의한 1차적 오차와 피로강도실험에 의한 2차적 오차를 포함하고 있으므로 데이터의 흠어짐 폭이 상당히 넓다. 또한 기존의 모델식에서는 강도수준에 따른 영향이 무시되고 있어, 이의 보정을 통하여 더욱 정확한 피로해석이 가능하리라고 판단된다.

피로강도에 미치는 영향요인은 공기량, 불-시멘트비 등의 내재요인과 온도, 습도 등의 환경요인, 그리고 하중폭, 하중이력, 하중주파수 등의 하중요인과 압축강도, 탄성계수 등의 재료특성요인 등

이다⁽⁸⁾. 이 중에서 하중폭에 의한 영향이 가장 중요한 것으로 알려져 있으므로 대부분의 경우에는 최고응력수준에 따른 파괴횟수를 재료의 피로특성으로 간주하여 왔다. 기존의 연구에 따르면 물-시멘트비의 증가에 따라 피로수명이 커지고, 공기량이 늘어나면 피로수명이 줄어든다. 그러나 콘크리트는 고강도화 될수록 취성이 커지고, 피로하중하에서도 고강도 콘크리트의 취성이 보통강도 콘크리트에 비하여 큰 것으로 보고되고 있어⁽⁵⁾ 본 연구에서는 재료특성요인 중에서 압축강도를 실험 변수로 택하여 실험을 수행하였다.

3. 實 験

3.1 실험 변수

일반적으로 수행되는 피로강도 실험은 최저응력수준을 상수로 취하는 방법과 최저응력수준과 최고응력수준의 비율(응력비)을 일정하게 하는 방법이 있다⁽⁹⁾. 본 실험에서는 전자의 실험 방법을 사용하였고 최저응력수준은 $0.25f_c$ 으로 고정시켰다. 그 외에 하중 주파수(1Hz), 골재 등도 일정하게 하였고 하중이력은 Fig. 1과 같이 일정한 진폭을 갖는 정현곡선(sine curve)이다. 실험 변수의 자세한 내용은 Table 1에 제시한 바와 같다.

Table 1 Parameters for experiments

Max. stress level (%)	95, 85, 80, 75
Comp. strength(MPa)	25, 50, 80, 100

3.2 공시체 제작 및 양생

압축강도 및 피로강도 실험용 공시체는 $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 KS F2405에 따라 몰드를 3층으로 나누어 각 층을 25회 붓나짐하여 제작하였으며, 타설과 동시에 KS F 2402에 따라 슬립프 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 탈형하였고 실험을 수행하기 직전까지 습윤 양생을 하여 양질의 콘크리트 공시체를 제작하였다.

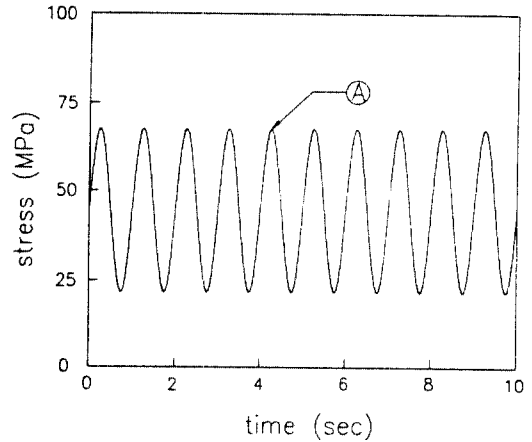


Fig. 1 Loading history($f_c=84$ MPa, $S_{max}=75\%$)

3.3 실험 재료

본 연구에 사용된 시멘트는 S사 제품의 제1종 포틀랜드 시멘트이며 고강도 콘크리트의 효과적인 강도 발현을 위하여 잔골재로서 조립율이 2.89인 금강 유역의 대평리산 강모래를 사용하였다. 굵은골재로는 최대치수가 13mm인 쇄석을 사용하였고 적절한 작업성을 확보하기 위하여 ASTM C494 type F의 규격을 만족하는 고성능감수제를 혼화제로 사용하였다. 또한 고강도 콘크리트를 제조할 시에는 혼화제로서 실리카흄을 사용하였으며 사용된 제품은 노르웨이산 Elkem Microsilica 분말제품이다.

3.4 배합 설계

콘크리트가 목표한 압축강도를 발현하고 적절한 작업성을 갖도록 하기 위하여 7차에 걸친 예비 실험을 수행한 후 이를 토대로 하여 Table 2과 같이 배합비를 결정하였다. 배합비는 저강도, 중간

Table 2 Mix proportions

Mix. no.	Unit content (kg / m ³)				Admix. ture (%)	Slump (mm)
	Cement	S. F.	Water	Fine agg. / Coarse agg.		
LS	320		217.6	716.7 / 930.7		61
MS1	450		155.6	698.1 / 1046.9	3.0	81
MS2	480		168.0	677.3 / 1015.7	2.0	208
HS1	442	78	156.0	632.7 / 1032.3	2.0	169
HS2	468	52	147.8	602.6 / 983.2	2.2	127
UHS	488	162	223.5	533.0 / 1082.0	5.0	141

(저강도 : LS 중간강도 : MS 고강도 : HS 초고강도 : UHS)

강도, 고강도, 초고강도 등을 목표로 하여 설계하였고 총 8차에 걸쳐 타설하여 공시체를 제작하였다. 한편 강도별 공시체 기호는 LS, MS, HS, UHS 등으로 정하였고, 배합 설계가 다른 동일 목표강도의 공시체는 타설 순으로 번호를 적어 서로 구분하였다.

3.5 실험 방법

총 160개의 공시체를 제작하여 압축강도 실험에 48개, S-N_f 곡선 실험에 75개, 피로변형도 측정 실험에 28개의 공시체가 사용되었다. 채령 30일 진 후에 실험을 실시하였고 피로강도 실험 직전에 각각 3개의 공시체에 대하여 KS F 2405에 따라 압축강도 실험을 수행한 후 평균치를 기준으로 약 3일에 걸쳐 피로강도에 대하여 실험하였다. 실험 후에 다시 압축강도 실험을 실시한 결과 3일 간의 채령 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. 또한 이물질(시멘트풀, 유황 혼합물)에 의한 실험 시의 오차를 방지하기 위하여 캐핑 시스템을 사용하지 않고, 공시체 절삭기를 사용하여 공시체 면을 평활하게 연마한 후 실험을 수행하였다. 한편, 피로강도는 콘크리트의 수분상태에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 그러므로 피로수명을 구하기 위한 실험을 수행할 시는 공시체의 습윤상태를 지속적으로 유지하기 위하여 물에 적신 양생포를 감아서 실험 중에 공시체 내의 수분이 외기로 증발하는 것을 방지하였다. 그리고 피로 비탄성변형도 측정 실험의 경우에는 압축강도 및 피로강도 실험 공시체 모두 12시간 공기중에 방치한 후 세 개의 포일형 스트레인 게이지(foil strain gauge)를 공시체의 표면에 부착하여 변형도를 측정하였다. 피로변형도의 측정에 사용된 기기는 TEAC사의 카세트 데이터 레코더(cassette data recorder MR30)이다. 피로실험을 수행할 때, 초기에는 표준변형도율로 1회 반복하중을 재하한 후에 2회부터 파괴 시까지 1Hz의 주파수로 피로하중을 가하였다.

4. 實驗結果 및 分析

4.1 강도수준에 따른 S-N_f 관계

최대응력수준에 따른 파괴횟수를 압축강도를 중심으로 Table 3에 정리하였다. Fig. 2는 각 압축강도 별로 수행한 피로강도실험의 결과를 IMSL을 이용하여 회귀분석한 후 반대수 눈금(semi-log scale)으로 나타낸 것이고 식(1)~식(4)는 각 강도수준의 S-N_f 관계식이다.

Table 3 Test data for fatigue

Comp. strength (MPa)	Max. stress level S _{max} (%)	Number of specimens	Avg. fatigue life N _f
26	95	6+2*	123
	85	5+2*	1363
	80	5+2*	5738
	75	3+2*	55739
52	95	5+2*	100
	85	6+2*	968
	80	6+2*	2528
	75	5+2*	10117
84	95	4+2*	58
	85	6+2*	1045
	80	6+2*	1644
103	75	4+2*	3484
	95	4+1*	46
	85	4+1*	481
	80	3+1*	1419
	75	4+1*	3394

(* : Number of specimens used in strain measurement)

f_c=26MPa 에 대하여,

$$S_{max} = -7.428 \log N_f + 108.87, r = 0.9666 \quad (1)$$

f_c=52MPa 에 대하여,

$$S_{max} = -9.907 \log N_f + 114.25, r = 0.983 \quad (2)$$

f_c=84MPa 에 대하여,

$$S_{max} = -10.34 \log N_f + 113.74, r = 0.935 \quad (3)$$

f_c=103MPa 에 대하여,

$$S_{max} = -10.07 \log N_f + 111.14, r = 0.952 \quad (4)$$

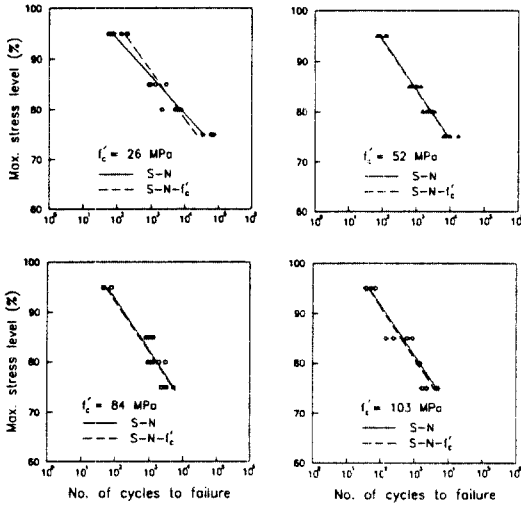


Fig. 2 S-N_f Relationships

강도수준에 따른 S-N_f 관계를 도시한 Fig. 2를 보면 피로강도와 파괴횟수의 상용로그 값이 선형 역비례 관계에 있음을 알 수 있는데, 이러한 현상은 콘크리트 뿐만 아니라 대부분의 재료에서 나타나는 일반적인 특성이다⁽¹¹⁾. 콘크리트의 최고응력수준-파괴횟수 곡선은 반복횟수가 10²~10⁷의 범위에서 대략 선형관계를 갖는 것으로 알려져 있으므로⁽¹⁾ 본 실험에서 수행하지 않은 낮은 응력수준 상태에서의 피로특성(피로한도)를 포함하여 두 개의 직선, 혹은 곡선으로 수식화하는 방법이 일반적으로 사용된다⁽¹²⁾. Table 3에 나타난 바와 같이 강도수준이 증가할수록 같은 최고응력수준의 피로하중을 받을 때, 파괴횟수(피로수명)가 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 이는 고강도 콘크리트의 피로내성이 저강도 콘크리트에 비하여 감소된다는 사실을 나타내는 결과이다. 한편, Fig. 2의 점선은 본 연구에서 제시한 S-N_f-f'_c 실험식으로서 저강도 콘크리트의 경우 S-N_f 곡선의 기울기와 상당한 차이가 있다. 따라서 저강도 콘크리트의 S-N_f 관계는 최고응력수준 75%에서 이미 비선형 구간으로 들어섰음을 나타내고 있다.

4.2 S-N_f-f'_c 관계식

4.2.1 변형도율(strain rate) 효과의 도입

각각의 강도수준에 따른 최고응력수준-파괴횟수 관계식에서 나타난 바와 같이 압축강도가 커질수록 직선의 기울기가 급해지는 경향을 보이고 있어 저강도 콘크리트와 고강도 콘크리트의 기울기 차이는 약 20% 이상을 보이고 있다. 한편, 종축절편은 강도수준에 관계없이 약 110 정도의 일정한 값을 갖는데 이와 같은 현상은 압축강도 실험의 변형도율(하중재하율)효과를 근거로 하여 설명할 수 있다. 즉, 피로강도실험과 같이 매우 빠른 변형도율로 압축강도 실험이 수행된다면 표준 압축강도 실험에 의해 결정된 강도보다 큰 값(약 110%~120%)을 나타내게 된다⁽¹³⁾. 또한 Su 등⁽¹⁴⁾은 최고응력수준 100%에서 피로실험을 수행하여 약 10회의 파괴횟수를 구하였고, 최고응력수준 110%에서도 약 4회의 파괴횟수를 얻었으며 Sparks 등⁽¹⁵⁾은 압축강도실험과 피로실험에서 나타나는 하중재하율의 변화에 따라 S-N_f 관계에 큰 차이가 나타난다고 보고하고 있다. 그러므로 본 실험과 같이 표준재하속도의 압축강도실험과 급속한 재하속도의 피로실험의 경우에는 변형도율 효과가 나타나게 되므로 S-N_f 곡선의 종축절편이 100% 이상의 값을 갖는 것이 타당하다고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 피로실험에서 발생하는 변형도율 효과를 반영하기 위하여 본 실험의 변형도율과 유사한 빠르기(2×10⁻³/sec)로 수행된 압축강도 실험 결과⁽¹⁶⁾를 피로 분석에 포함하였다. 변형도율 효과에 관한 실험의 결과는 Table 4에 제시된 바와 같다. 빠른 변형도율로 실험된 경우 표준 변형도율 실험에 비하여 약 110%~120%의 강도증진이 나타남을 알 수 있으며, 강도수준이 증가할수록 변형도율 효과가 감소하는 경향이

Table 4 Test data for the effects of strain rate⁽¹⁶⁾

Strength level	Strain rate (/sec)	Max. stress(avg.) (MPa)	Ratio (%)
LS	standard test(2×10 ⁻³)	22.8	100
	Fatigue test(2×10 ⁻³)	26.7	117
MS	standard test(2×10 ⁻³)	45.6	100
	Fatigue test(2×10 ⁻³)	53.7	118
HS	standard test(2×10 ⁻³)	88.7	100
	Fatigue test(2×10 ⁻³)	101.0	114
UHS	standard test(2×10 ⁻³)	109.2	100
	Fatigue test(2×10 ⁻³)	120.5	110

있으므로 저강도 콘크리트가 변형도율 효과에 민감한 것으로 나타났다.

4.2.2 실험식의 제안

본 연구의 결과에 의하면 강도수준이 증가함에 따라 콘크리트의 피로수명(파괴횟수)이 줄어들고 있다. 또한 이러한 경향은 최고응력수준이 낮아질수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 $S-N_f-f_c$ 관계식을 구하는데 있어서 압축강도의 수준을 다음의 식(5)와 같이 $S-N_f$ 곡선의 기울기로 모델링하였다. 한편, 상수항 B, 즉 하중반복 횟수 1회에 파괴되는 최고응력수준은 변형도율 효과를 적용하여 압축강도에 따라 영향을 받는 것으로 보았다. IMSL을 이용하여 회귀분석을 수행하였고 모든 압축강도 항은 일반적인 설계강도인 20.6 MPa (210 kg/cm²)로 무차원화 하였다.

$$Y = AX_1^\alpha X_2^\beta \quad (5)$$

여기서 A, B, α , β : Empirical constants

$$X_1 = \frac{f_c}{20.6}$$

$$X_2 = \log N_f$$

$$Y = S_{\max}$$

식(6)은 회귀분석의 결과로서 강도수준이 증가할수록 $S-N_f$ 곡선의 기울기가 급해지는 경향을 무차원화한 강도수준의 0.066승을 파괴횟수와 곱으로 표현하였고 실험식에 의한 저강도 콘크리트와 초고강도 콘크리트의 기울기 차이는 약 12%로 나타났다. 또한 강도수준에 따른 변형도율 효과는 압축강도의 -0.025승으로 표현되며 저강도 콘크리트는 116, 초고강도 콘크리트는 112이다. Fig. 3은 실험식을 데이터와 함께 도시한 그림으로서 Fig. 2의 점선과 같은 곡선이다.

$$S_{\max} = -9.3 \left(\frac{f_c}{20.6} \right)^{0.066} \log N_f + 116.6 \left(\frac{f_c}{20.6} \right)^{-0.025}, r = 0.946 \quad (6)$$

고강도 콘크리트의 피로내성이 저하되는 원인은 고강도 콘크리트의 재료적 특성인 높은 취성에

기인하는 것으로 사료되며, 피로하중 하에서도 고강도 콘크리트는 균열집중현상이 나타나 저강도 콘크리트에 비하여 낮은 피로강도를 갖는다. CEB-FIP의 고강도 콘크리트에 관한 보고서에 의하면⁽¹⁰⁾ 고강도 콘크리트의 피로강도가 보통강도 콘크리트에 비하여 상대적으로 낮게 평가된다고 보고하고 있으며, Klaiber 등⁽³⁾은 무근콘크리트의 휨 피로거동에 관한 연구를 통하여 물-시멘트비가 낮아질수록 피로강도는 저하되는 것으로 보고하였다. 이와 같은 결과는 고강도 콘크리트의 피로수명이 보통강도 콘크리트에 비하여 작게 나타난 본 연구의 결과와 일치한다.

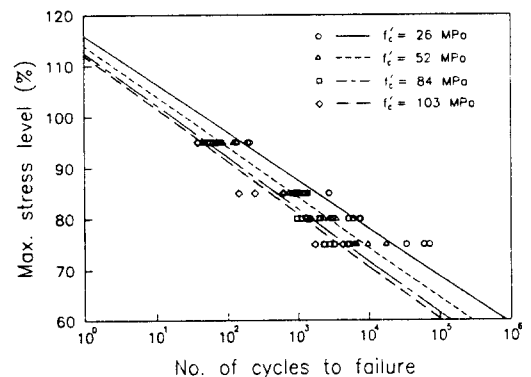


Fig. 3 Test data with fitting curve

4.3 피로 변형도

4.3.1 피로수명에 의한 정규화

피로 비탄성변형도를 분석하기 위하여 하중반복횟수를 피로수명에 대한 백분율로 정규화하였고, 1회의 피로하중 동안에 발생하는 가장 큰 응력 (Fig. 1의 A점)에 상응하는 변형도를 취하여 도시화 하였다. 측정된 실험치와 피로거동이력은 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

1축압축의 피로하중을 받는 콘크리트는 중기에 비해 초기와 말기의 비탄성 변형량이 매우 크게 나타나는 특성을 갖는다. Fig. 5에서 압축강도가 52 MPa 일 때의 피로 비탄성변형도를 나타낸 그림이다. 최고응력수준이 높을수록 초기 변형도는 크나, 피로 파괴(fatigue failure)에 가까워질수록 최고응력수준이 낮은 공시체가 더 큰 변형도를 나타낸다. 이러한 현상은 콘크리트의 응력-변형도

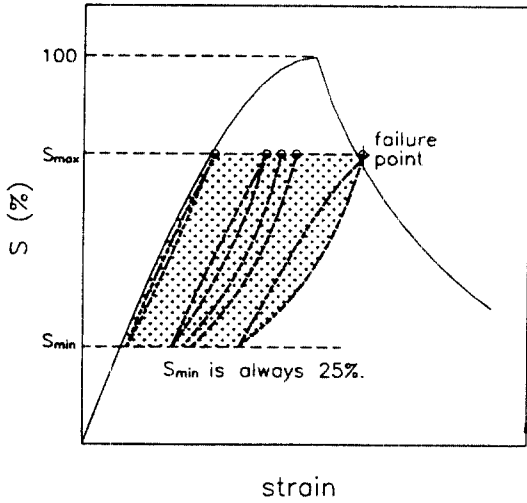


Fig. 4 Fatigue behavior ($f_c=52\text{MPa}$, $S_{max}=75\%$)

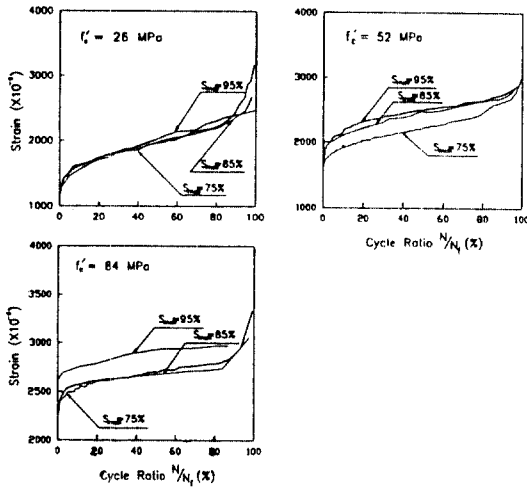


Fig. 5 Measured variation of total maximum strain with life ratio I

곡선에서 상승부의 피로실험 초기점부터 파괴포락선까지의 비탄성영역이 낮은 최고응력수준의 경우에 더 크기 때문이다.

Fig. 6는 피로변형도를 강도수준에 따라서 도시한 것으로서 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비하여 현저히 작은 비탄성변형도를 보인다. 따라서 고강도 콘크리트는 피로누가손상이 적은 상태에서 피로 파괴에 이르게 됨을 알 수 있고, 피로하중 하의 콘크리트는 단조하중상태의 경우와 마찬가지로 강도수준이 증가할수록 높은 취성을

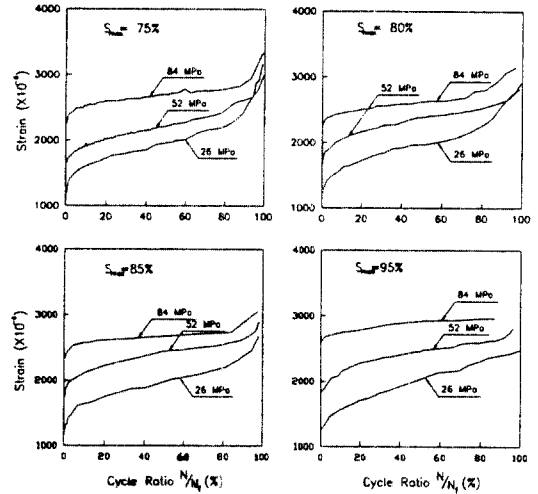


Fig. 6 Measured variation of total maximum strain with life ratio II

나타낸다.

4.3.2 응력-변형도 곡선에 의한 정규화

응력-변형도 곡선 상에 피로실험의 최고응력수준 시의 변형도를 Fig. 7과 같이 도시하였다. 그림에서 B점은 초기피로하중을 가하였을 때의 변형도로서, 초기에는 표준변형도율의 재하율이므로 단조하중의 응력-변형도 곡선 상승부와 일치되는 점이다. 한편, 단조하중의 응력-변형도 곡선은

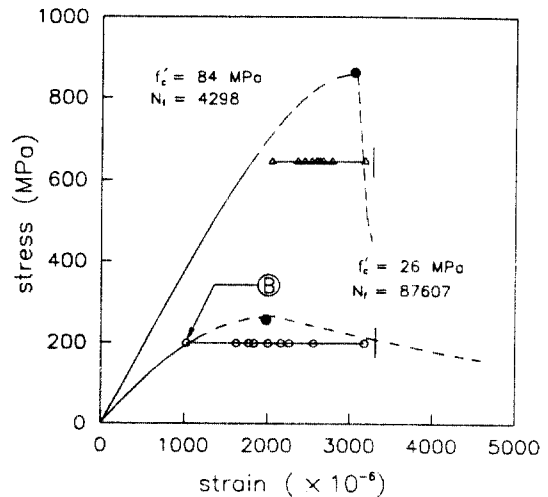


Fig. 7 Measured variation of total maximum strain with stress-strain curve ($S_{max}=75\%$)

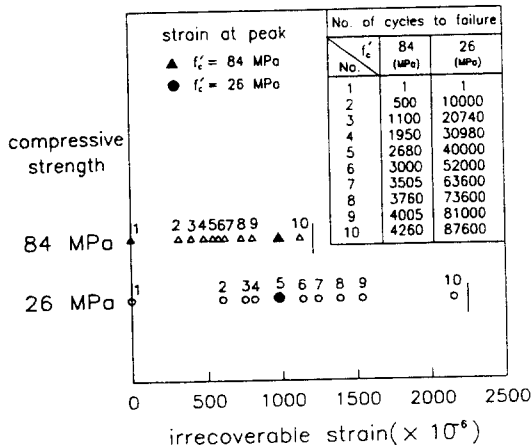


Fig. 8 Measured variation of irrecoverable maximum strain with number of cycles ($S_{max}=75\%$)

Kim-Lee 식⁽¹⁷⁾을 사용하여 해석적으로 산정하였는데 실험치를 매우 정확히 예측하고 있다.

파괴횟수에 따른 비탄성변형도의 변화를 강도수준에 따라 비교하기 위하여 Fig. 8과 같이 비탄성변형도의 초기점을 시점으로 변형도를 정규화하였다. 반복횟수에 따른 변형도 증가율은 강도수준이 높을수록 큰 것으로 나타났다. 한편, 응력-변형도 곡선의 최고응력 변형도(ϵ_0)와 피로변형도를 비교해 볼 때, 저강도 콘크리트의 경우 ϵ_0 를 지난 후에도 상당한 변형량(약 1300×10^{-6})을 보이는 반면, 고강도 콘크리트는 ϵ_0 의 부근에서 급격한 피로 파괴에 이른다. 반복하중 하에서 고강도 콘크리트의 파괴 특성은 단조하중상태와 마찬가지로 매우 취성적이다.

5. 結 論

일축압축의 피로하중을 가하여 강도수준에 따른 콘크리트의 피로거동 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 최고응력수준을 갖는 일정 진폭하중이 가해질 경우, 강도수준이 증가할수록 적은 피로수명을 갖는다. 따라서 고강도 콘크리트의 피로내성이 저강도 콘크리트에 비하여 현저히 감소한다. 또한 이러한 경향은 최고응력수준이 낮아질수록 더욱 뚜렷하였다.

- 2) 콘크리트의 피로강도에 있어서 강도수준의 영향을 고려하기 위하여 $S-N_f-f_c$ 관계에 대한 실험식을 제안하였다. 제안식은 강도수준 이외에도 변형도율 효과를 도입하여 피로실험과 압축실험에서 발생하는 하중재하율의 차이를 보정하였다. 또한 최고응력수준이 낮아질수록 강도수준에 따른 피로내성의 감소경향이 뚜렷하여지므로 강도수준에 따라서 $S-N_f-f_c$ 곡선의 기울기가 변화하는 실험식을 제안하였다.

- 3) 콘크리트의 피로 비탄성변형도를 측정할 결과 동일한 최고응력수준의 일정 진폭하중을 가하였을 때, 강도수준이 낮을수록 비탄성변형도가 크게 측정되었다.

- 4) 단조하중 실험을 통하여 구한 응력-변형도 곡선과 피로변형도를 비교하였을 경우, 최고응력 변형도 이후에 고강도 콘크리트는 급작스런 피로 파괴를 일으키는 반면, 저강도 콘크리트는 상당한 비탄성 변형을 나타낸 후 피로파괴에 도달한다. 따라서, 단조하중상태와 마찬가지로 반복하중에 있어서도 고강도 화됨에 따라 콘크리트는 취성적으로 거동한다.

- 5) 반복횟수당 피로변형도는 강도수준이 증가할수록 크게 측정되었는데, 이는 고강도 콘크리트의 취성계수가 크기 때문에 동일한 최고응력수준의 반복하중이 가해질 때, 저강도 콘크리트에 비하여 반복횟수당 피로변형도가 더 큰 것으로 사료된다.

- 6) 향후에는 콘크리트의 누가손상을 나타내는 최적의 재료상수를 도입하여 강도수준 등의 재료특성에 독립적인 일반적 피로모델식을 제시하여야 하고, 휘피로거동에 미치는 강도수준의 영향을 규명하여 구조부재에 대한 적용연구를 수행하여야 할 것이다.

感謝의 글

본 연구는 1991년도 과학재단 목적기초 연구의 연구비 지원으로 일부 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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, 1984, 48 pp.
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, 401pp.
4. Bazant, Z.P., and Xu, K., "Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 88, No 4, July-August 1991, pp. 309-399.
5. 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, 34 pp.
6. Shah, S.P., and Chandra, S., "Mechanical Behavior of Concrete Examined by Ultrasonic Measurements," ACI Materials Journal, Vol. 5, No 3, Sept. 1970, pp. 550-563.
7. 오병환, 김지상, 정철현, 한승환, "교량구조물의 피로신뢰성해석연구," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제3권, 제1호, 1991, pp. 129-132.
8. Mor, A., Gerwick, B.C., and Hester, W.T., "Fatigue of High-Strength Reinforced Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 89, No 2, March-April 1992, pp. 197-207.
9. Holmen, J.O., "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," Fatigue of Concrete, SP-41, ACI, 1982, 401pp.
10. FIP-CEB Working Group on High Strength Concrete, "High Strength Concrete-State of the Art Report," 1990, 61pp.
11. Felbeck, D.K., and Atkins, A.G., "Strength and Fracture of Engineering Solids," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984, 542 pp.
12. 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
13. 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.
14. Su, C.M., and Hsu, T.C., "Biaxial Compression Fatigue and Discontinuity of Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 85, No. 3, May-June 1988, pp. 178-188.
15. Sparks, P.R., "The Influence of Rate of Loading and Material Variability on the Fatigue Characteristics of Concrete," Fatigue of Concrete, SP-41, ACI, 1982, 401pp.
16. 김진근, 박찬규, 박연동, "고강도 콘크리트의 재료역학적 특성-변형도율과 인장강도를 중심으로-", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권, 제2호, 1992, pp. 111-118.
- 17) 김진근, 이태규, "횡보강 효과를 고려한 콘크리트의 응력-변형도 관계," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제2권, 제1호, 1990, pp. 116-121.

(접수일자 : 1993. 10. 7)