

반복하중을 받는 콘크리트의 누가손상 특성

Cumulative Damage Characteristics of Concrete Subjected to Variable Amplitude Loadings

변	근	주*
Byun,	Keun	Joo
김	문	겸**
Kim,	Moon	Kyum
한	상	훈***
Han,	Sang	Hoon

Abstract

Cumulative damage characteristics of concrete, on which repetitive loads are applied, are investigated. Preliminarily, a series of uniaxial compression tests on cylindrical specimens of plain concrete is carried out to find out that, among various factors, stress levels of repetitive loadings and loading order are the most governing factors of cumulative damage of concrete. Based on this preliminary study, fatigue tests are carried out applying two-levels of stresses, stepwisely. As a result, it is found that characteristics of cumulative damage of concrete are governed by nonlinear relationships and do not follow Miner's linear theory. It is also observed that cumulative damage characteristics and static strengths of concrete vary with loading history of stresses. Empirical equations which may be useful in predicting fatigue characteristics and remaining life of concrete structures are proposed for concrete subjected two stress levels.

요 지

본 논문에서는 압축반복하중을 받는 콘크리트의 피로누가손상 특성이 연구되었다. 압축을 받는 무근콘크리트의 원주형 공시체에 대한 기초실험을 통하여, 콘크리트의 누가손상에는 여러 인자들 중에서 반복적으로 작용되는 응력의 수준과 재하순서가 가장 크게 영향을 미친다는 것을 발견하였다. 이를 기초로 2단계 응력수준 조건하에서의 피로실험을 실시하여, 콘크리트의 누가손상특성은 Miner의 선형이론을 따르기 보다는 오히려 비선형의 상관관계를 가지며, 응력의 재하방법에 따라 누가손상의 특성과 콘크리트의 정적강도가 변화됨을 구명하였다. 또한 본 연

* 정희원 · 연세대학교 공과대학 교수, 토목공학과

** 정희원 · 연세대학교 공과대학 조교수, 토목학과

*** 정희원 · 충북대학교 공과대학 조교수, 토목공학과

구를 통하여 2단계 응력수준하에서 콘크리트의 피로특성과 콘크리트구조의 잔존수명을 예측하는데 사용될 수 있는 실험공식이 도출되었다.

1. 서 론

차량에 의한 이동하중을 받는 콘크리트 포장 및 교량, 풍하중 및 지진의 영향을 받는 콘크리트구조, 대형크레인하중을 받는 플랜트의 크레인 거더, 파동에 의한 동수압과 조류의 영향을 받는 콘크리트 해양구조 등과 같은 콘크리트 구조는 반복하중을 받기 때문에 콘크리트의 피로거동이 문제가 될 수 있다. 콘크리트 구조의 피로는 점진적이고 영구적인 구조의 내적 변화 과정에 의하여 발생되고, 이로 인하여 작용하중의 반복과정이 증가하게 되면, 콘크리트의 강도가 저하되면서 손상을 입게 되어 균열이 발전된다. 어떤 경우에는 이 피로에 의한 누가손상(cumulative damage)으로 사용하중하에서도 구조의 역학적 기능이 저하되거나 중구에는 완전 파괴에까지 이르게 되는 경우가 있게 된다. 따라서 기존 구조물의 손상상태를 정량적으로 규명하여 구조물의 누가 손상정도와 잔존수명을 파악하는 것은 물론이고, 설계단계에서부터 사용 기간동안 발생할 수 있는 손상을 예측하여, 설계에 반영할 수 있는 자료를 얻는 것이 매우 중요하다. 많은 피로자료를 가지고 있는 나라에서는 이런 자료들을 이미 시방서에까지 반영하고 있으나, 국내에서는 콘크리트의 피로에 관한 연구가 아직도 미흡한 실정이다^(1,2).

여기서 손상(damage)이라는 것은 손상이 없는 조건에 대한 구조의 안전성이나 사용성의 감소로 정의되고, 수학적으로는 파괴시까지의 하중의 반복작용회수에 대한 현재까지의 반복작용회수의 비로 표시된다⁽³⁾.

콘크리트구조의 피로거동은 콘크리트구조를 형성하는 구성재료 즉 콘크리트, 철근 등의 각각의 피로특성에 의하여 구명될 수 있다고 알려져 있으므로⁽¹⁾, 본 연구에서는 콘크리트만의 피로 누가손상의 특성을 연구 대상으로 취하였다.

누가 손상에 관한 연구는 Palmgren 이 제안하고, 1945년 Miner 에 의하여 실험적으로 증명

된 Miner's rule로부터 비롯된다⁽⁴⁾. 원래 이누가 손상 개념은 비행기나 선박의 설계에 활용하기 위하여 개발되었기 때문에 주로 금속 및 비철금속재료가 누가손상의 연구 대상이었고, 이들 재료에 대하여 Miner 의 누가손상 이론이 잘 맞는다고 알려져 있었기 때문에 1960년대말까지는 연구의 진전이 별로 없었다⁽⁵⁾.

1968년 Sweet 와 Kozin 은 금속 및 비철금속일지라도 일정진폭의 응력(constant-amplitude stress)이 아니고, random stress 를 받게 되면 Miner 이론만으로는 누가손상을 정확히 예측할 수 없다는 것을 지적하였다⁽⁶⁾.

한편 콘크리트의 누가손상에 관한 연구는 1970년 초부터 시작되었으나, 주로 Miner's rule 의 적합성에만 관심을 두었다. 1979년과 1983년 Siemes 는 처음으로 본격적인 콘크리트의 누가손상에 관한 연구 결과를 발표하였다^(7,8) 그는 Miner 의 이론이 일정진폭의 하중을 받는 경우에는 어느 정도 타당하지만 variable-amplitude loading 에 의한 random stress 하에서는 오차가 크기 때문에, 추계학적 개념을 도입한 수정 Miner 공식을 제안하였다.

일반적으로 구조물에 작용되는 반복하중은 random loading 의 경우가 많고, 이런 random loading 에 의한 누가손상을 추계학적 방법에 의해 접근하는 것이 타당할 것으로 사료된다⁽⁹⁾. 장차 본 연구진은 계속적인 실험적 연구를 바탕으로 누가손상을 해석적으로 예측할 수 있는 추계학적 모형을 개발하고자 한다. 그러나 때로는 콘크리트 도로포장과 같은 구조의 설계에서는 차량에 의한 random loading 을 일정한 크기를 가진 단축등가하중(equivalent axle load)으로 환산하여 피로설계에 반영하고⁽¹⁰⁾, 교량의 경우에도 동가의 유효응력(effective stress range)으로 환산하여 피로 거동을 해석한다⁽¹¹⁾.

따라서 본 연구에서는 누가손상 예측을 위한 추계학적 모델의 개발에 앞서서 2단계의 압축 응력(two stress levels)을 받는 무근콘크리트

의 누가손상특성을 실험적으로 구명하는데 연구의 목적을 두었다. 본 연구를 통하여 콘크리트의 누가손상에 크게 영향을 주는 인자와 그 영향, 콘크리트의 누가손상 특성, 2단계 응력하에서 콘크리트의 누가손상과 잔존수명을 예측할 수 있는 실험공식을 제안하고자 한다.

2. 누가손상 이론

콘크리트 원주형 공시체가 콘크리트 극한강도(σ_{ck})보다 낮은 압축응력(σ_c)을 N_i 번 반복적으로 받으면 피로거동에 의하여 파괴에 이른다고 할 때, N_i 번보다 적은 n_i 번의 반복응력을 받으면, 그 콘크리트의 손상정도는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$D = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

한편, 동일한 공시체가 압축강도(σ_{ck})보다 낮은 σ_1 의 응력하에서는 N_1 , σ_2 의 응력하에서는 N_2 번까지 반복하중을 받을 수 있을 때, 이 공시체가 σ_1 의 반복응력을 n_1 번($n_1 < N_1$) 받은 후 계속하여 σ_2 의 반복응력을 n_2 번($n_2 < N_2$)번 받은 경

우의 전 누가손상정도(total cumulative damage)는 Miner's rule에 의하여 식 (2)와 같이 표시된다⁽⁴⁾.

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

Miner 및 다른 연구가들은 $D=1$ 이 되면 파괴에 이른다고 제안하였고, 알루미늄 합금으로 만든 공시체의 실험을 통하여 파괴시의 D 는 0.56-1.77의 범위이고, 자료의 분산은 심하지만 평균치는 1.0에 가깝다고 보고하였다^(8,12,13). 이 결과를 토대로 하여 누가손상에 의한 파괴기준을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

그러나 그림 1(a)와 같이 일정진폭의 반복하중을 받는 경우라도 응력의 수준($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)에 따라서 파괴에 이르는 누가손상의 경로는 Miner's rule을 따르지 않음을 알 수 있다^(3,12). 또한 일정진폭이 아니고, 그림 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 σ_1 이 먼저 작용한 후 이어서 σ_2 가 작용

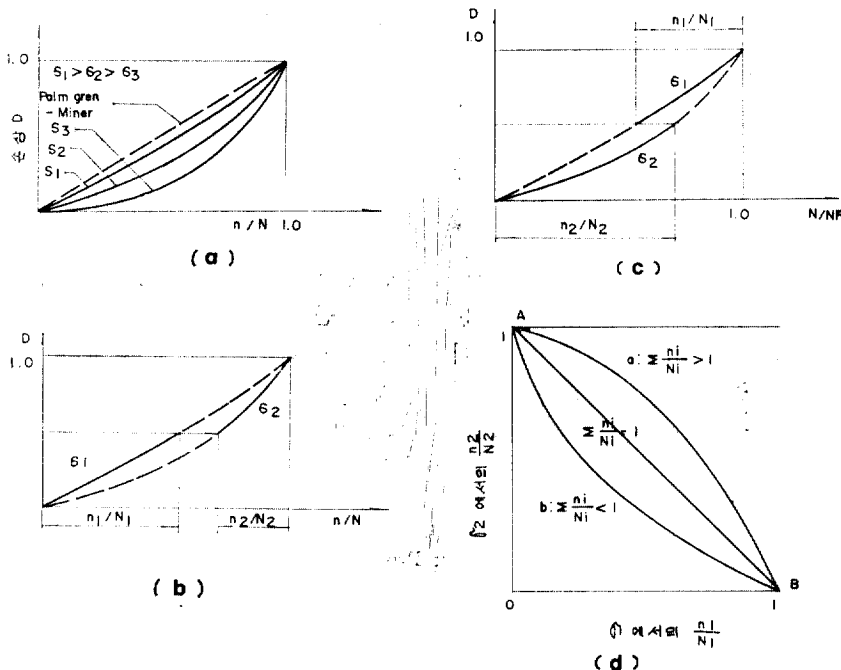


그림 1. Possible relationship between n_1/N_1 & n_2/N_2 for different stress levels

하면, 누가손상에 의한 파괴 기준으로 $\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \leq 1$ 이 성립되고, 그림 1(c)와 같이 하중이 역순으로 작용하면 파괴기준이 $\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \geq 1$ 이 될 수 있다.

이들의 결과를 종합하면 그림 1(d)을 얻을 수 있고, 그림에서 $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ 의 직선이 Miner's rule 이다. 따라서 본 연구에서는 2단계 응력에서의 누가손상에 의한 파괴기준으로 선형합수 대신에 비선형 합수인 식 (4)를 도입하고 이를 실험에 의하여 검증하고자 한다.

$$\frac{n_2}{N_2} = f\left(\frac{n_1}{N_1}\right) \quad (4)$$

탄성계수의 변화를 이용하는 Loland model, tensorial damage parameter 를 이용하는 Benouniche's model⁽⁶⁾, cycle ratio 와 누가손상에 따른 S-N 상관도의 변화량을 이용하는 Marin's model⁽¹⁴⁾, 확률모형을 이용하는 B-model^(15,16) 및 Monte Carlo model⁽¹⁷⁾ 등등이 있다. 그러나 콘크리트의 압축강도와 반복응력을 받는 콘크리트의 S-N(Strength-Number of cycles to failure) 상관도를 기준으로 한 콘크리트의 누가손상 실험결과는 실험자료의 분산도가 매우 크기 때문에, 콘크리트의 누가손상을 이론적으로 표현하기는 매우 어렵다. 현단계에서는 아직도 콘크리트의 누가손상을 명확히 표시하는 모형은 없으므로, 실험적으로 누가손상 특성을 연구하는 것이 가장 타당한 것으로 사료된다.

3. 반복 압축하중을 받는 콘크리트의 피로시험

3.1 콘크리트의 누가손상 특성에 영향을 주는 인자

콘크리트의 누가손상은 반복하중에 의한 피로거동에 기인하는 것이므로, 누가손상특성에 영향을 주는 인자는 피로거동의 경우와 거의 같다고 할 수 있다. 무근콘크리트의 피로특성에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되는 인자는 콘

크리트의 구성재료와 품질, 습도, 재령, 환경조건, 하중의 재하주기, 응력수준, 응력비, 재하응력의 파형(waveform), 재하도중의 휴지시간, 재하순서 등을 들 수 있다^(7,18). 이들중 대부분은 일정진폭의 반복하중 조건하에서의 피로실험으로 구명될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일정진폭의 반복하중 하에서 콘크리트의 강도, 하중의 재하주기, 응력비, 응력수준, 재하응력, 파형, 골재의 크기, 2단계 응력의 반복하중하에서 재하순서 등이 콘크리트의 피로에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였고, 이 영향인자에 관한 연구중 일부는 문헌 (19)에 수록된 바 있다. 문헌 (19)의 기초연구로부터 콘크리트의 강도, 공기량 및 양생조건 등의 영향을 최소화하기 위하여 무차원의 응력비를 실험에 도입하였고, 250 cpm 내지 800 cpm 사이의 하중재하주기에서는 재하주기가 피로에 미치는 영향이 적고, 재하파형과 골재의 크기도 피로특성에 영향을 다소 미치는 인자라고 사료되지만 그 영향이 매우 적음을 확인하였다. 또한 자료의 분산을 극소화 하고, 적은 영향이라도 배제하기 위하여 재하파형을 정형파형, 모든 공시체의 공기량과 양생조건, 골재의 크기를 동일조건으로 만들어 실험하기 때문에, 작용응력의 수준과 재하순서를 가장 영향이 큰 인자로 선정하였다.

3.2 공시체의 제작 및 실험방법

(1) 공시체 제작

압축을 받는 콘크리트의 피로실험자료의 분산은 콘크리트의 압축강도 자료의 분산보다 더 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 실험자료의 분산을 최소화하기 위하여 모든 공시체를 구입한 레드믹스드 콘크리트의 동일 배치로부터 제작하여, 동일조건하에서 50 일 이상 양생하였고, 본 연구에 사용된 콘크리트의 배합표는 표 1 과 같다.

표 1 에 의해 제작된 공시체는 $\phi 100 \times 200$ 의

표 1. Mix Proportions

Max. Agg. Size	Slump	W/C	S/a	W	C	S	G
mm	cm	%	%	kg	kg	kg	kg
25	12	52.1	39	197	378	698	1112

원주형이고, 그 수는 156 개 이었다.

(2) 시험장치

정적 압축강도 시험을 위하여는 200 ton 용량의 만능재료기(일본 Shimadzu 사 제작)를 사용하였고, 피로실험을 위하여는 그림 2와 같은 50 ton 용량의 만능피로시험기(미국 Instron 사 제작)를 사용하였고, 피로시험에 도입한 재하속도는 600 cpm, 재하파형은 Haver-sine wave 이었다.



그림 2. 시험장치

(3) 실험방법

(i) 누기손상 실험자료의 분산을 줄이기 위하여 먼저 동일공시체에 대한 S-N 상관도를 도출하였다.

(ii) 누기손상 실험에서는 최소응력을 $S_{min} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{ck}} = 0.1$ 로 고정시키고, 응력의 수준을 표시하는 $S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ck}}$ 의 값을 0.7, 0.8, 0.9로 나누었고, 응력의 재하순서는 two stress levels 을 취하여, 저응력 다음에 고응력을 가하는 경우와 고응력 다음에 저응력을 작용시키는 경우로 나누었다. 즉 그림 (3)과 같이 전자에서는 먼저 $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ck}}$ 을 0.7에서 0.8, 0.7에서 0.9, 후자에서는 0.8에서 0.7, 0.9에서 0.7로 재하시키는 순서를 택하였다.

자료의 분포를 관찰하기 쉽게하기 위하여 처음 작용시키는 응력단계에서는 $\frac{n_1}{N_1}$ 의 값을 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 이 되도록 n_1 을 택하여 작용시키고, 다음 단계에서 공시체가 파괴할 때까지 반복하중을 가하여 n_1 를 얻었다.

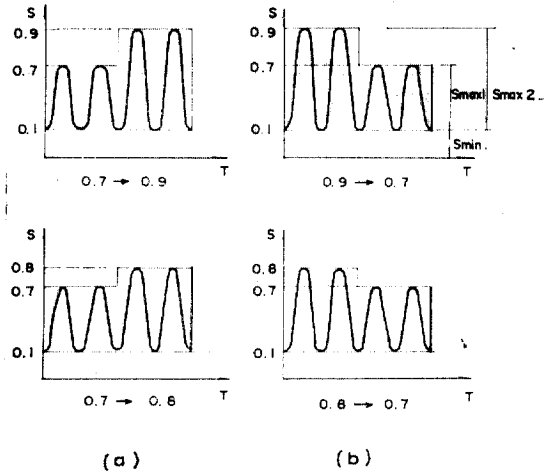


그림 3. Program-loading test

3.3 S-N 상관도

누기손상 특성을 실험적으로 규명하려면 제일 먼저 동일재료에 대한 S-N 상관도가 기본적으로 필요하다. 증가되는 실험자료의 분산을 최소로 줄이기 위하여 동일배치 및 동일조건의 공시체를 이용하여 피로실험을 수행하였다. S_{min} 은 0.1로 고정시키고, S_{max} 을 0.7, 0.8, 0.9로 변화시키면서 얻어진 실험결과는 그림 3과 같다. 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 S-N 상관관계를 실험조건의 동질성 때문에 자료의 분산이 적고, 실험자료는 타연구결과^(24, 25)와 마찬가지로 반대수그래프상에서 선형을 나타내므로, S-N 상관관계를 실험자료로부터 도출하면 식 (5)와 같고, 이식으로부터 응력수준에 대응하는 피로수명(N_F)을 예측할 수 있다.

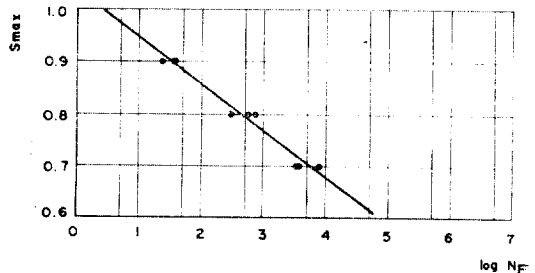


그림 4. S-N curve

$$S_{max} = 1.0344 - 0.0890 \log N_F$$

$$\text{여기서 } S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ck}} \quad (5)$$

N_F ; 파괴에 이르는 응력의 반복회수

4. 누가손상실험 및 결과분석

4.1 누가손상 실험

동일 배치로부터 제작된 공시체의 누가손상

표 2. Results of the static compressive cylinder strength tests

Specimen Group	Average Strength (Kg/cm ²)	Specimen Group	Average Strength (Kg/cm ²)	Specimen Group	Average Strength (Kg/cm ²)
D	210.3	J	281.4	P	231.7
E	199.7	K	258.2	Q	238.3
F	218.3	L	274.1	R	267.2
G	239.3	M	233.6	S	277.1
H	223.3	N	262.9		
I	242.5	O	195.0		

표 3. Results of cumulative damage tests

(a) 누가 손상 실험 결과(0.7→0.8)

(N_1 : 5719, N_2 : 430)

Cycles		Specimen No.	Cycles to fracture		Average cycles to fracture		$\sum \frac{n}{N}$	Calculated $\sum \frac{n}{N}$
n_1	n_1/N_1		n_2	n_2/N_2	n_2	n_2/N_2		
1144	0.2	D-4	66	0.15	1393	3.24	3.44	2.89
		D-5	1991	4.64				
		G-4	1245	2.90				
		O-4	1771	4.12				
		O-5	3242	7.54				
		O-6	43	0.10				
2288	0.4	D-6	355	0.83	1502	3.49	3.89	3.84
		D-7	194	0.43				
		G-5	1378	3.21				
		P-4	3599	8.37				
		P-5	989	2.30				
		P-6	2494	5.80				
3431	0.6	D-8	173	0.40	826	1.92	2.52	3.84
		E-4	652	1.52				
		E-5	99	0.23				
		P-7	2266	5.27				
		P-8	1342	3.12				
		P-9	426	0.99				
4575	0.8	E-6	468	1.09	1486	3.46	4.26	2.89
		E-7	2564	5.98				
		E-8	4140	9.65				
		Q-4	1488	3.46				
		Q-5	241	0.56				
		Q-6	13	0.03				

Cycles		Specimen No.	Cycles to fracture		Average cycles to fracture		$\Sigma \frac{n}{N}$	Calculated $\Sigma \frac{n}{N}$
n_1	n_1/N_1		n_2	n_2/N_2	n_2	n_2/N_2		
1144	0.2	F-4	198	6.19	113	3.54	3.74	3.32
		F-5	19	0.59				
		H-4	54	1.69				
		Q-7	180	5.63				
		Q-8	89	2.78				
		Q-9	140	4.38				
2288	0.4	F-6	140	4.38	114	3.55	3.95	4.48
		F-7	183	5.72				
		H-5	19	0.59				
		H-4	76	2.38				
		R-5	127	3.97				
		R-6	137	4.28				
3431	0.6	F-8	180	5.63	129	4.04	4.64	4.48
		F-9	72	2.25				
		H-6	42	1.31				
		R-7	171	5.34				
		R-8	67	2.09				
		R-9	244	7.63				
4575	0.8	F-10	206	6.44	84	2.63	3.43	3.32
		F-11	22	0.69				
		F-12	29	0.91				
		S-4	100	3.13				
		S-5	86	2.69				
		S-6	61	1.91				

특성을 실험하기 위하여는 먼저 공시체군들의 정적 압축강도가 필요하다.

피로실험은 많은 시간을 필요로 하고, 동일 배치라도 재령의 변화에 따라 강도의 변화를 가져올 수 있기 때문에 공시체군별로 압축강도 시험이 수행되었고, 실험결과를 수록하면 표 2와 같다.

그림 4 으로부터 S_{max} 에 대응하는 피로수명 N_F 를 구하여 누가손상 실험의 기본자료로 삼는다. 즉 그림 3 의(a)와 같이 $S_{min}=0.1$ 로 고정시키고 먼저 $S_{max1}=0.7$ 을 n_1 번 작용시키고, 이어서 $S_{max2}=0.8$ 또는 0.9 의 응력을 공시체가 파괴할 때까지 가하여 S_{max2} 의 작용회수 n_2 를 구한다. 다른 경우도 이와 같은 방법으로 실험

하여 누가손상 실험 자료를 얻을 수 있고, 이 실험결과를 수록하면 표 3과 같고 한편 $\frac{n_1}{N_1}$ 에 대응하여 $\frac{n_2}{N_2}$ 의 평균치만을 도시하면 그림 5와 같다.

그림 5에서는 언제나 일단계로 먼저 작용된 응력수준을 S_1 및 σ_1 , S_1 에 대응하는 피로수명을 N_1 , σ_1 의 응력을 작용시킨 회수를 n_1 으로 취하였고, 2단계로 뒤에 작용하는 경우에는 점차 2를 붙인 것이다.

4.2 실험결과 분석

(1) 누가손상에 의한 파괴기준

표 4에서 볼 수 있듯이 일단계에서 낮은 응력, 2단계에서 높은 응력을 받을 경우(CASE1)에는 두단계 응력에 의한 파괴기준 즉 $\Sigma \frac{n}{N}$ 은

Cycles		Specimen No	Cycles to fracture		Average cycles to fracture		$\Sigma \frac{n}{N}$	Calculated $\Sigma \frac{n}{N}$
n ₁	n ₁ /N ₁		n ₂	n ₂ /N ₂	n ₂	n ₂ /N ₂		
86	0.2	F-13	6187	1.08	2134	0.37	0.57	0.92
		F-14	1528	0.27				
		H-7	476	0.08				
		I-4	1415	0.25				
		I-5	2515	0.44				
		J-4	681	0.12				
172	0.4	F-15	4386	0.85	2713	0.47	0.87	0.87
		F-16	7470	1.31				
		H-8	909	0.16				
		J-5	262	0.05				
		J-6	2463	0.43				
		J-7	786	0.14				
257	0.6	F-17	904	0.16	1130	0.20	0.80	0.87
		G-6	522	0.09				
		H-9	3624	0.63				
		J-8	524	0.09				
		J-9	10	0.002				
		K-4	1153	0.20				
343	0.8	G-7	6966	1.22	2252	0.39	1.19	0.92
		G-8	872	0.15				
		G-9	1798	0.31				
		K-5	52	0.01				
		K-6	2934	0.51				
		K-7	891	0.16				

2.25~4.3의 범위이고, 반대로 일단계에서 높은 응력, 2단계에서 낮은 응력을 받은 경우 (CASE 2)에는 $\Sigma \frac{n}{N}$ 이 0.57~1.19의 범위에 들므로 콘크리트에서는 Miner의 선형 누가손상 이론이 성립하지 않고, 오히려 cycle ratio로 표시되는 누가손상의 파괴기준은 비선형관계가 성립함을 보여주는 것이다. 그러므로 본 연구에서는 실험자료의 통계적 분석을 통하여 두 단계의 응력조건하에서 누가손상에 의한 비선형 파괴기준을 식 (6)과 같이 2차 방정식을 제안한다.

$$\frac{n_2}{N_2} = f\left(\frac{n_1}{N_1}\right) = a\left(\frac{n_1}{N_1}\right)^2 + b\left(\frac{n_1}{N_1}\right) + c \quad (6)$$

식 (6)의 상수는 $\frac{n_1}{N_1} = 0$ 때는 $\frac{n_2}{N_2} = 1$, 또한 $\frac{n_2}{N_2} = 0$ 일때는 $\frac{n_1}{N_1} = 1$ 을 만족시키도록 최소자승법에 의하여 결정될 수 있다. 표 4의 실험자료와 그림 4로부터 앞에서 예상하였듯이 자료의 분산은 심하지만, 표 4의 $\Sigma \frac{n}{N}$ 에 관한 실측치와 계산치를 비교하여 볼때 본 연구의 결과가 Miner 이론에 비하여 타당하다고 사료된다.

이런 경향은 문헌 (12)와 (20)에서도 발견할 수 있다.

실험자료로부터 다소 무리는 있지만 식 (6)의 계수를 구하면 표 4와 같으며, 그 결과를 도시하면 그림 6과 같다. 이식을 이용하면 two

Cycles		Specimen No	Cycles to fracture		Average cycles to fracture		$\Sigma \frac{n}{N}$	Calculated $\Sigma \frac{n}{N}$
n ₁	n ₁ /N ₁		n ₂	n ₂ /N ₂	n ₂	n ₂ /N ₂		
6	0.2	G-10	8299	1.45	2672	0.47	0.67	0.85
		G-11	820	0.14				
		G-12	3294	0.58				
		L- 4	1729	0.30				
		L- 5	891	0.16				
		L- 6	996	0.17				
13	0.4	G-13	1372	0.24	1646	0.29	0.69	0.78
		G-14	203	0.04				
		H-10	1590	0.28				
		L- 7	2463	0.43				
		L- 8	996	0.17				
		N- 7	3249	0.57				
19	0.6	G-15	1681	0.29	1467	0.26	0.86	0.78
		G-16	252	0.04				
		G-17	1259	0.22				
		M- 4	2882	0.50				
		M- 5	2620	0.46				
		M- 6	105	0.02				
26	0.8	G-18	637	0.11	753	0.13	0.93	0.85
		G-19	42	0.007				
		G-20	259	0.05				
		N- 4	2882	0.50				
		N- 5	681	0.12				
		N- 6	61	0.003				

stress levels 하에서의 손상정도와 잔존수명을 개략적으로 구할 수 있다. 즉 어떤 구조가 일단 계로 σ_1 의 응력을 n_1 번 받았을 때, 2단계 응력 σ_2 를 받을 수 있는 잔존수명 n_2 를 구한다고 하자. 응력수준 σ_1 과 σ_2 에 대응하는 피로파괴 수명 N_1 과 N_2 를 식 (5)로부터 구하여 식 (6)에 대입하면 잔존 수명 n_2 를 구할 수 있다.

물론 본 연구에서 얻어진 파괴기준에 대한 실험식은 주어진 조건에만 적합하도록 제한되어 있으나, 앞으로 추진코자 하는 체계학적 누가손상 모델의 개발에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 누가 손상특성

(i) 응력 수준과 재하순서는 콘크리트의 누가

손상에 미치는 영향이 큼을 알았다.

(ii) 낮은 응력을 먼저 가하고, 이어서 높은 응력을 가하면 $\Sigma \frac{n}{N}$ 은 1보다 커지고, 반대의 재하방법을 취하게 되면 $\Sigma \frac{n}{N}$ 은 일반적으로 1보다 적고, 전자가 후자에 비하여 피로수명이 길다는 것을 구명하였다. 이 경향은 힘을 받는 콘크리트의 누가손상 특성파도 일치하는 것으로 나타났다⁽²⁶⁾.

(iii) 1단계 응력과 2단계 응력사이의 차이가 적을 수록 Miner's rule에 가까워진다.

(iv) 1단계의 낮은 응력하에서 $\frac{n_1}{N_1}$ 를 0.5 이하로 취하면, 2단계의 높은 응력으로 파괴시까지 저항할 수 있는 $\frac{n_2}{N_2}$ 는 크게 증가하는데, 이는 콘크리트가 일단계에서 초기에 낮은 응력

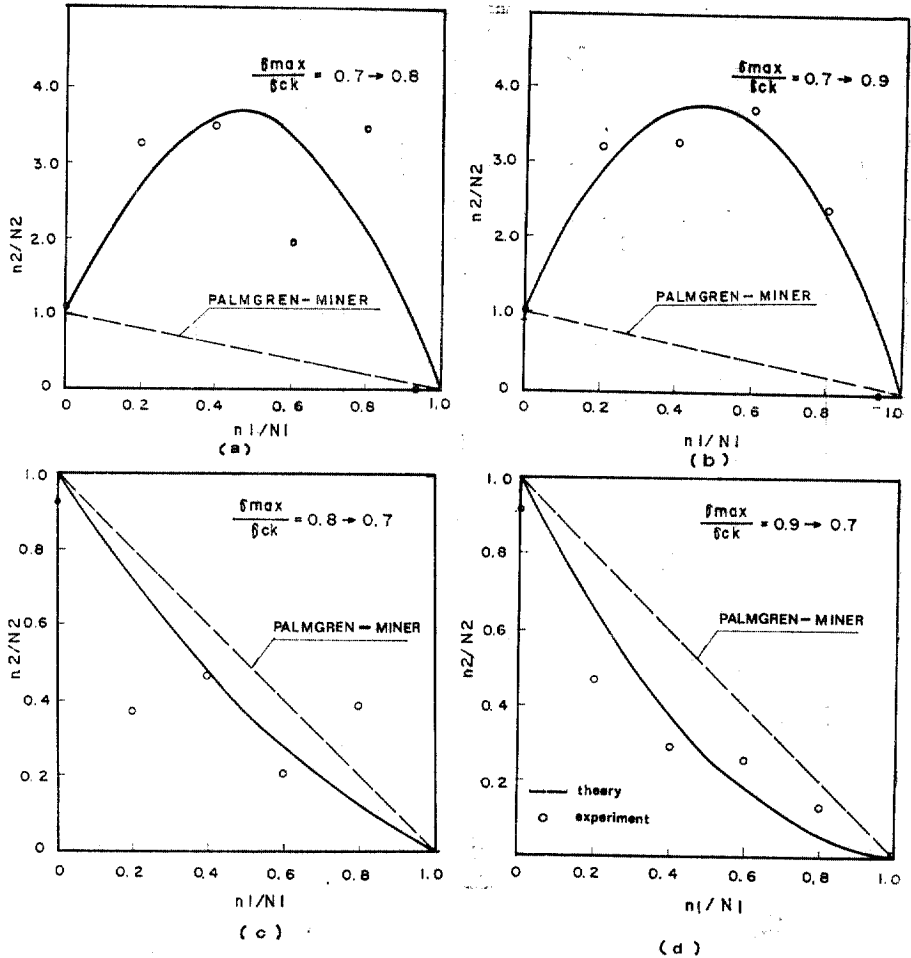


그림 5. $\frac{n_1}{N_1} - \frac{n_2}{N_2}$ curve

표 4. Constants

CASE	Loading order		Constants		
	S_1	S_2	a	b	c
CASE 1	0.7	0.8	-11.84	+10.84	1
	0.7	0.9	-14.48	+13.48	1
CASE 2	0.8	0.7	+0.35	-1.53	1
	0.9	0.7	+0.93	-1.93	1

을 받으면, 콘크리트의 강도가 증가하기 때문에 생기는 것으로 판단되고, 이 경향은 비철금속의

경우와 일치하는 경향이다^(8,12).

이 결과를 검증하기 위하여 동일배치에서 15개의 공시체를 제작한 후 정적 압축강도와 $S=0.8$ 로 $0.2N_1$ 과 $0.3N_1$ 의 반복하중을 가한 경우의 강도를 시험한 결과, 반복하중을 받은 후의 압축강도는 정적강도에 비하여 24.3%와 50.7%씩 증가하였다.

(v) 압축을 받는 무근콘크리트의 누가손상 실험치들은 $S-N$ 상관실험치, 휨피로 실험치에 비하여 자료의 분산이 심하고, 특히 1단계로

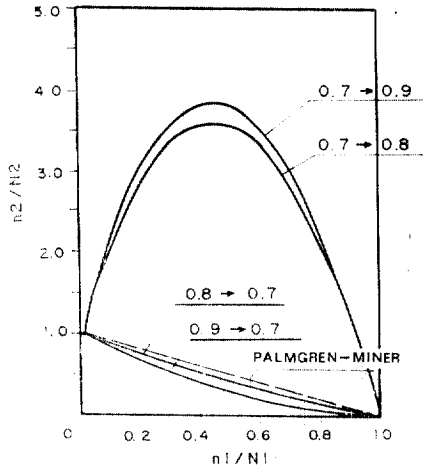


그림 6. Proposed $\frac{n_1}{N_1} - \frac{n_2}{N_2}$ curve

저응력, 2 단계로 고응력을 받는 경우의 자료분산도가 더 큰 것으로 나타났다.

(vi) 콘크리트보의 누가손상에 관한 연구이지만 국내의 연구자료와 비교하기 위하여 문헌(26)을 선정하여 비교하였다. 본 연구는 압축을 받는 원주형 공시체에 관한 것이고, 문헌(26)은 휨피로의 결과이다. 두 연구의 실험조건에 다소 다른 점이 있어서 엄밀한 비교는 어렵지만, 그 경향만을 비교한 결과는 표 5 과 같다.

표 5. Cumulative damage under two step loadings.

Loadig order	$\frac{n_1}{N_1}$	$\sum \frac{n}{N}$	
		본 연구	문헌 26
$S_{max}=0.8 \rightarrow 0.7$	0.4	0.87	0.91
	0.8	0.92	0.97
$S_{max}=0.9 \rightarrow 0.7$	0.4	0.78	0.72
	0.8	0.85	0.90

표 5의 재하순서하에서는 누가손상에 의한 파괴기준이 차이가 별로 없는 것으로 나타났다. 그러나 재하 순서가 역순이 되면 다소 차이가 있었는데, 이것은 압축과 휨의 피로저동이 서로 상이하기 때문에 발생하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

반복 압축응력을 받는 무근콘크리트의 누가손상 특성에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 응력수준과 재하순서는 콘크리트의 누가손상에 미치는 영향이 크다는 사실이 입증되었다.
- 2) 변동 진폭의 반복하중을 받는 경우에는 Miner의 선형 누가손상이론이 잘못지 않는 것으로 구명되었다. 2 단계 응력 재하에서는 1 단계에서 낮은 응력을 재하시키고, 2 단계로 높은 응력을 재하시키면 $\sum \frac{n}{N}$ 은 2.52~4.3의 범위의 값을 나타내고, 재하 방법을 역순으로 취하면 $\sum \frac{n}{N}$ 은 0.57~1.19 이나 대부분이 1.0 미만이었다.

3) 두 단계의 응력하에서 누가손상에 의한 파괴기준으로 다음 식을 제안한다.

$$\frac{n_2}{N_2} = a \left(\frac{n_1}{N_1} \right) + b \left(\frac{n_1}{N_1} \right)^2 + c$$

이식을 이용하여 최대응력비가 0.7과 0.9 사이에 있는 경우의 두 단계의 응력하에서 누가손상과 잔존수명을 예측할 수 있도록 하였다.

4) 콘크리트는 낮은 반복응력을 초기에 받으면 콘크리트의 강도가 증가하는 것으로 밝혀졌다.

감사의 말

본 연구는 1985년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 본 연구를 위해 지원해준 재단 당국에 감사로 드린다.

참 고 문 헌

1. Lorrain, M. and Loland, K.E., "Damage Theory Applied to Concrete", Fracture Mechanics of Concrete, edited by F.H. Wittmann, Elsevier, 1983, pp.341~369.
2. B.S., Code of Practice for Fatigue, Part 10 of B.S.(Chapter 8 &11); The Palmgren-Miner Rule, 1978.
3. Marco, S.M. and Starkey, W.L., "A Concept of

- Fatigue Damage”, *Trans. of the ASME*, May 1954, pp.627~632.
4. Miner, M.A., “Cumulative Damage in Fatigue,” *Jr. of Applied Mechanics*, ASME, Sept. 1945, pp.159~164.
 5. Hawkins, N.M. and Shah, S.P., “American Concrete Institute Considerations for Fatigue,” *Proc. of IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures*, 1982, pp.41~50.
 6. Sweet, A.S. and Kozin, F., “Investigation of a Random Cumulative Damage Theory,” *Jr. of Materials* 3, 1968, pp.802~823.
 7. Siemes, A.J.M., “Miner’s Rule with Respect to Plain Concrete; Variable Amplitude Tests,” *ACI SP 75-17*, 1982. pp.343~371.
 8. Van Leeuwen, J., and Siemes, A.J.M., “Miner’s Rule with Respect to Plain Concrete”, *Heron*, Vol.24, 1979.
 9. Bogdanoff, J.L. and Kozin, F., “On Nonstationary Cumulative Damage Models,” *Jr. of Applied Mechanics*, Vol.49, ASME, pp.37~42.
 10. 日本セメント協會, “コンクリートの曲げ疲労強度に関する研究”, 道路対策専門委員會 報告 R-3, 1985, pp.1~65.
 11. 변근주, 오진우, 김영진, “하중스펙트럼을 이용한 강철도교의 피로해석에 관한 연구”, 연세대학교 산업기술연구소 논문집, Vol.18, No.1, 1986, pp71~77.
 12. Wilkins, E.W.C., “Cumulative Damage in Fatigue,” *Proc. of Colloquium on Fatigue*, IUTAM, 1956, pp.320~332.
 13. Plantema, F.J., “Some Investigations on Cumulative Damage,” *Proc. of Colloquium on Fatigue*, IUTAM, 1956, pp.218~227.
 14. Marin, T., *Mechanical Behavior of Engineering Materials*, Prentice Hall, 1962.
 15. Kozin, F. and Bogdanoff, J.L., *Probabilistic Models of Cumulative Damage*, John Wiley & Sons, 1985, pp.257~330.
 16. Kesler, C.E., “Effect of Speed of Testing on Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete,” *HRB Vol.32*, 1953, pp.251~258.
 17. Ma, Fai and Wong, F.S., “On the Monte Carlo Methodology for Cumulative Damage”, *Computers and Structures*, Vol.17, No.2. 1983, pp.177~181.
 18. Holmen, J.O., “Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading,” *Dr. ing. Thesis*, The Norwegian Institute of Technology, the University of Trondheim, 1979, pp.1~218.
 19. 변근주, 박병희, 이호범, “반복하중의 응력비 및 주기가 무근콘크리트의 피로거동에 미치는 영향”, 연세대학교 산업기술연구소 논문집 Vol.17, No. 1, 1985, pp.47~57.
 20. Klaiber, F.W. and Lee,D., “The Effects of Air Content, W/C Ratio, and Aggregate Type on the Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete,” *ACI SP-75 (Fatigue of Concrete Structures)*, 1982, pp.111~132.
 21. Sparks, P.R., “The Influence of Rate of Loading and Material Variability on the Fatigue Characteristics of Concrete,” *ACI SP-75 (Fatigue of Concrete Structures)*, 1982, pp.331~342.
 22. Tepfers, R. and Thomas, K., “Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete,” *Jr. of ACI*, Vol.76, No.5, 1979, pp.635~652.
 23. Raithby, K.D. and Galloway, I.W., “Effects of Moisture Condition, Age, and Rate of Loading on Fatigue of Plain Concrete,” *ACI, SP 41 (Fatigue of Concrete)*, 1974, pp.15~34.
 24. ASTM, “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life(S-N) and Strain-Life(E-N) Fatigue Data”, *ASTM ST 744*, 1979, pp.129~137.
 25. 오병환, “콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성 해석에 관한 이론 및 실험연구”, 대한토목학회논문집 제5권 제4호, 1985, pp.113~119.
 26. 오병환, “변동진폭의 피로하중을 받는 콘크리트의 누적 손상이론”, 대한토목학회논문집 제6권 제4호, 1986, pp.79~88.

(接受:1986. 11. 20)