

조깅인장피로시험을 이용한 포장용콘크리트의 피로해석

Fatigue Analysis of Pavement Concrete by Split Tension Fatigue Test

전 성 일* 원 치 문** 이 주 형*** 홍 창 우**** 윤 경 구*****
Jeon, Sung Il Won, Chi Moon Lee, Joo Hyung Hong, Chang Woo Yun, Kyong Ku

ABSTRACT

The purpose of this research was to obtain fatigue property of pavement concrete by split tension fatigue test. The specimens of pavement concrete were fabricated using the concrete at job site. The fatigue tests of split tension were performed by 4 stress levels(90%, 80%, 70%, 60%) and 3 stress ratio(0.1, 0.3, 0.5).

From this research, the S-N relationship, S-N-P relationship was derived and Weibull probability density functions was plotted using the distribution parameters.

1. 서론

일반적으로 콘크리트 포장도로는 교량, 해양구조물등과 더불어 적용되는 하중이 동적 또는 반복하중 상태이다. 기존의 많은 연구에서 이와 같은 콘크리트의 특성을 연구하기 위하여 피로실험을 수행하였고, 많은 제안식들이 도출되었다. 그러나 실제 포장용콘크리트에 대한 피로연구는 많이 연구가 되지 못하였다. 또한 현재 콘크리트 피로실험에 있어 조깅인장실험은 그 수행횟수가 상당히 적은 편이며, 특히 아스팔트 콘크리트의 경우 $\phi 10 \times 5 \text{cm}$ 크기인 공시체로 피로실험을 수행하고 있으나, 콘크리트에서는 이와 같은 방법으로 연구가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 포장용 콘크리트의 피로특성을 규명하기 위하여, 실제 콘크리트 포장이 진행되는 현장에서 시험체를 제작하여, 재령에 따른 압축·인장·휨의 정적강도측정과 $\phi 10 \times 5 \text{cm}$ 크기인 공시체를 이용한 조깅인장피로실험을 수행하였다. 또한 조깅인장 피로실험을 통하여 포장용콘크리트의 응력비에 따른 S-N관계, S-N-P관계를 규명하고, Weibull 분포매개변수를 산정하여 응력수준에 따른 확률밀도분포를 분석하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 시편 제작 및 양생

본 연구에서는 중부내륙고속도로에 건설되고 있는 시험도로 본선구간을 대상으로 포설된 콘크리트를 이용하여 시험체를 제작하였고, 콘크리트의 배합표는 표 1에 나타내었다.

* 정회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 한라대학교 토목공학과 전임강사

*** 정회원, 석재복합신소재제품연구센터 연구원 공학박사

**** 정회원, 석재복합신소재제품연구센터 연구원 공학박사

***** 정회원, 강원대학교 토목공학과 조교수

표 1 포장용 콘크리트의 배합설계

W/C	S/a	단위수량 W (kg)	시멘트량 C (kg)	잔골재량 S (kg)	굵은골재량(kg)		AE표준 감수제	비고
					32mm G ₁	19mm G ₂		
42.3	37.7	144	340	682	660	532	510	

시험체 제작시 다짐은 바이브레이터를 이용한 진동다짐을 병행하여 사용하였고, 2층다짐을 실시하였다. 타설 후 급속한 수분을 증발을 막기 위해 양생포를 사용하여 24시간 양생을 하였으며, 24시간 후 탈형을 하여 56일 동안 수중양생을 실시하였는데 이때의 수조의 온도는 23±2℃로 유지하여 양생하였다. 56일 이후부터는 시험체를 기건(20℃, 50%RH)양생하였다.

2.2 실험방법

포장용 콘크리트의 정적강도특성을 알아보기 위하여, 동일한 배합으로 제작된 시험체의 재령별(7일, 28일, 56일) 압축강도, 간접인장강도, 휨강도를 측정하였다. 압축강도시험은 KS F 2405, 휨강도 시험은 KS F 2408, 간접인장시험은 KS F 2433의 규정에 준하여 수행하였으며, 만능재료시험기(UTM)을 사용하여 강도를 측정하였다. 압축강도의 측정시 편심의 영향을 최소화하기 위해 시험체의 양단을 연마기를 사용하여 수평하게 하였다. 각각의 시험과 재령에 따라 3개의 시편을 사용하였고, 그의 평균값을 사용하여 강도를 나타내었다.

피로실험은 조갯인장피로실험을 사용하였으며, 보통 콘크리트의 조갯인장 피로실험은 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 크기로 된 시험체를 사용하나, 본 실험에서는 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ 의 크기로 된 시험체를 사용하였다. 기존의 아스팔트재료의 조갯인장피로실험은 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ 의 시험체를 사용하였으나, 현재 콘크리트에는 적용사례가 없는 실정이다. 그림 1은 조갯인장피로실험의 장치모형을 나타낸 것이다. 시험체가 가압판 위에서 편심되지 않도록 하며, 가압판과 공시체 사이 균등한 하중전달과 시험체의 국부적인 파괴를 막기 위해 3mm 두께의 합판을 설치한다. 그림 2는 Instron 시험기를 사용한 조갯인장피로실험의 전경을 나타낸 것이다.

조갯인장피로 실험은 정적강도의 변화가 거의 없는 재령 56일 이후부터 실험을 수행하였다. 응력수준은 90%, 80%, 70%, 60%로 변화를 주었으며, 응력비는 0.1, 0.3, 0.5로 하였고, 응력비가 0.1인 경우 7개의 시편을, 응력비 0.3, 0.5인 경우 5개의 시편을 사용하였다. 피로파는 정현파를 사용하였고, 피로주기는 20Hz로 하였다. 피로하중재하시 초기 평균하중(mean level)까지 도달시간은 20초로 하였고, 실

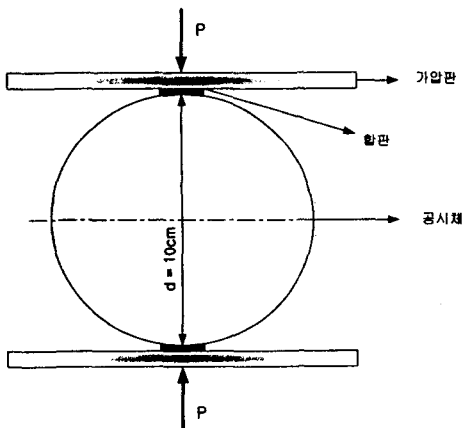


그림 1 조갯인장피로실험의 장치모형



그림 2 조갯인장피로실험 전경

험의 종료는 200만 사이클까지 주었으며, 이때에도 파괴가 안 이루어지면 정적시험을 수행하여 파괴하였다. 제작된 시편중 본 연구에서 사용한 시편은 강도측정을 위한 원형시편(Φ10×20cm) 18개, 콘크리트 보(10×10×46cm) 9개, 그리고 조갸인장피로시험을 위한 원형시편(Φ10×5cm) 68개를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 포장용 콘크리트의 정적강도특성

현장에서 채취한 포장용 콘크리트의 정적강도 특성은 그림 3~그림 5에 나타내었다. 본 실험결과에서 알 수 있듯이 재령 28일까지는 강도가 급격히 증가하다가, 그 이후에는 미세하게 증가하는 형상을 보여주고 있다.

3.2 포장용콘크리트의 피로특성

3.2.1 S-N 관계

포장용 콘크리트의 조갸인장피로실험 결과는 그림 6 ~ 그림 9에 나타내었다. 본 실험의 결과로부터 S-N관계를 규명하기 위하여, 단순회귀분석을 통한 각각의 응력비에 따라 회귀식을 산정하였다.

각각의 응력비에 따른 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{응력비 } 0.1 : \quad \frac{f_{\max}}{f'_c} = 1.041409 - 0.05825 \log N_F \quad (1)$$

$$\text{응력비 } 0.3 : \quad \frac{f_{\max}}{f'_c} = 1.051937 - 0.04706 \log N_F \quad (2)$$

$$\text{응력비 } 0.5 : \quad \frac{f_{\max}}{f'_c} = 1.071613 - 0.04488 \log N_F \quad (3)$$

여기서, $\frac{f_{\max}}{f'_c}$ = 응력수준 ; N_F = 시편의 파괴시 반복사이클의 횟수(피로수명)

무근 콘크리트의 인장피로강도에 대하여 Tefers and Kutti가 제안한 S-N-R관계식은 다음과 같다.

$$\frac{f_{\max}}{f'_c} = 1 - 0.0685(1 - R) \log N_F \quad (4)$$

여기서, R = 응력비 (f_{\max}/f_{\min}).

본 실험의 결과로부터 산정한 회귀식을 Tefers and Kutti가 제안한 S-N-R관계식과 비교하여 보면, 응력비 0.1과 0.3에서 회귀식의 기울기 값이 Tefers and Kutti식의 기울기와 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 하지만 응력비 0.5에 대해서는 큰 차이를 보이고 있고, 그림 10에서 회귀곡선을 비교한 것으로부터 응력비 0.5에서 전체 데이터의 상관성이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 차이를 보이는 것은 보통 콘크리트의 피로한도가 명확히 규정되어있지 않지만, 본 실험은 단지 200만 사이클로

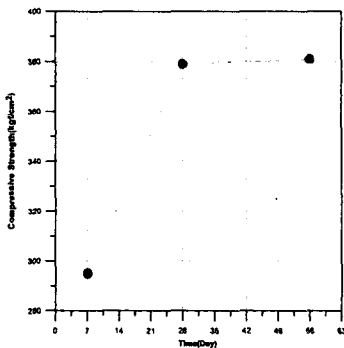


그림 3 재령별 압축강도 특성

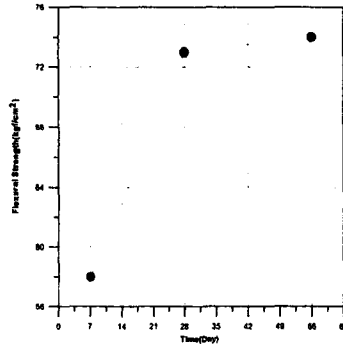


그림 4 재령별 휨강도 특성

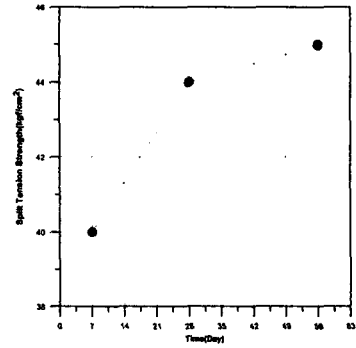


그림 5 재령별 조갸인장강도 특성

제한을 두어서 실제 낮은 응력수준에서 명확한 파괴사이클수를 측정하기가 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 콘크리트의 피로실험은 낮은응력수준에서 시편이 파괴될 때까지 수행하기에는 하나의 시편당 많은 시간이 소요되기 때문에, 실제로 일부의 높은 응력수준에 대하여 실험을 하고, 그 실험결과에 대한 S-N관계로부터 콘크리트의 피로한도를 추정하는 것이 일반적이다.

3.2.2 피로수명에 대한 확률분포결정

본 피로데이터에 대한 통계적 해석을 위하여 Weibull 분포를 사용하였고, 정규분포(normal distribution)와 비교하였으며, 응력비 0.1에 대한 응력수준 90%, 80%, 70%의 데이터를 사용하였다.

Weibull 분포의 확률밀도함수(PDF) $f_N(n)$, 누적분포함수(CDF) $F_N(n)$ 은 다음과 같다.

$$f_N(n) = \frac{\alpha}{u - n_0} \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^\alpha \right]; \quad n \geq n_0 \quad (5)$$

$$F_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^\alpha \right]; \quad n \geq n_0 \quad (6)$$

여기서, α = 형상매개변수 (shape parameter); u = 특정 극한값(characteristic extreme value); n_0 = 위치매개변수.

공학재료의 피로거동을 나타내는데, $n_0 = 0$ 인 two-parameter Weibull 분포가 알맞고, 더욱더 안전한 신뢰성을 주는 것으로 보고되고 있다. 본 논문에서도 two-parameter Weibull 분포를 이용하기 위해, 분포매개변수 α , u 값을 그래픽방법과 모멘트방법으로 산정하였다.

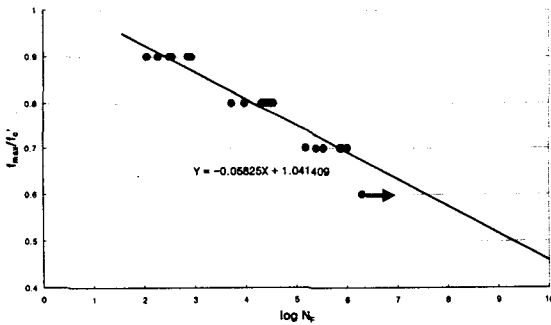


그림 6. 응력비 0.1에서의 S-N선도

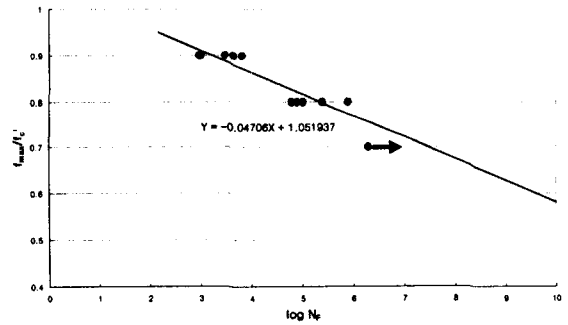


그림 7. 응력비 0.3에서의 S-N선도

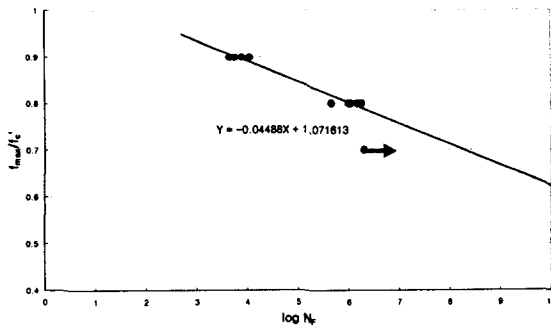


그림 8. 응력비 0.5에서의 S-N 선도

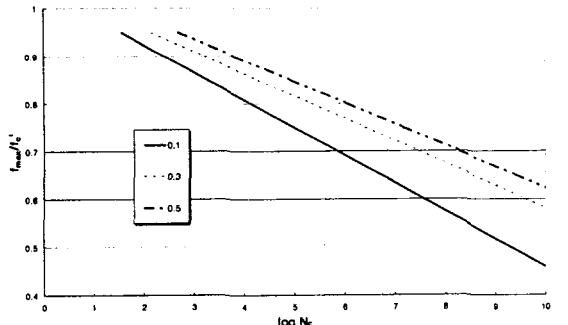
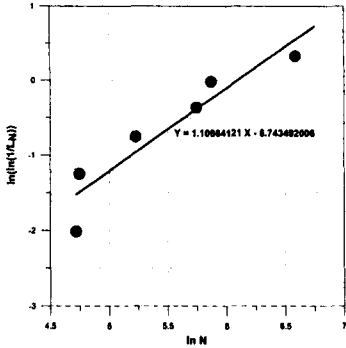


그림 9. 각각의 응력비에 따른 회귀곡선 비교



1) 그래픽방법 :

생존함수(surviorship function) $L_N(n)$ 은 식(6)으로부터 얻을수 있다.

$$L_N(n) = 1 - F_N(n) = \exp\left[-\left(\frac{n}{u}\right)^\alpha\right] \quad (7)$$

여기서, $L_N(n) = 1 - \left[\frac{i}{k+1}\right]$; i = 피로수명의 파괴순서,
 k = 시편의 수(크기)

식(7)을 정리하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L_N}\right)\right] = \alpha \ln n - \alpha \ln u \quad (8)$$

그림 10 피로수명과 신뢰함수와의 관계 (응력수준 90%인 경우)

식(8)에서 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L_N}\right)\right]$ 과 $\ln n$ 과의 관계로부터 α , u 값을 산정할 수 있다. 그림 11은 응력수준 90%에 대하여 위의 관계를 도식한 것으로, 단순회귀분석으로 분포매개변수를 구할 수 있다.

2) 모멘트방법 :

본 방법에서 분포매개변수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_N^2 = \left(\frac{\sigma_N}{\mu_N}\right)^2, \quad \alpha = V_N^{-1.08}, \quad u = \mu_N / \Gamma(1 + 1/\alpha) \quad (9)$$

여기서, V_N^2 = 분산계수, σ_N = 피로수명의 평균, μ_N = 피로수명의 표준편차

표 2 Weibull 분포 매개변수 값

		응력수준		
		90%	80%	70%
그래픽 방법	α	1.107	1.318	1.222
	u	443	26426	820269
모멘트 방법	α	1.304	2.078	1.772
	u	411	24509	705496
평균	α	1.205	1.698	1.497
	u	427	25467	762882

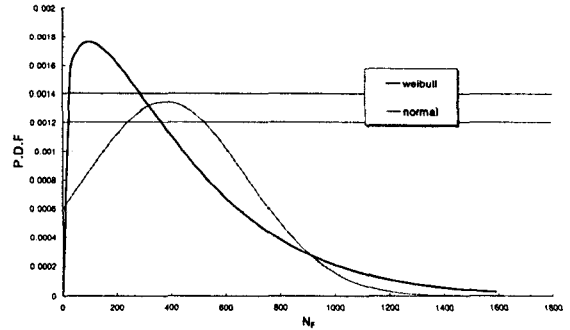


그림 11 확률밀도분포 (응력수준 90%)

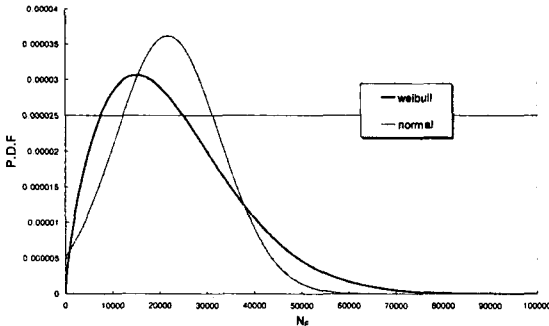


그림 12 확률밀도분포 (응력수준 80%)

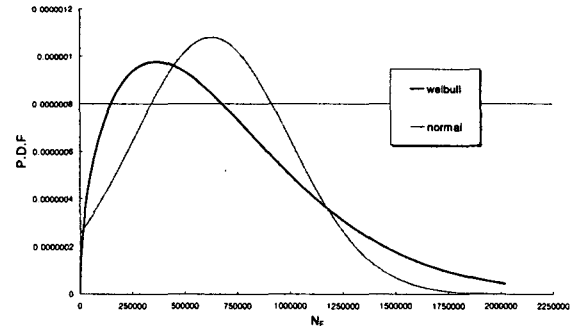


그림 13 확률밀도분포 (응력수준 70%)

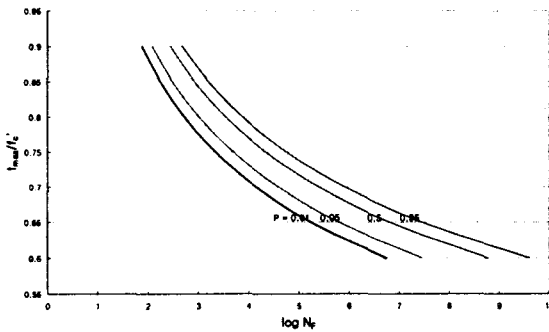
표 2는 각각의 방법에 대한 Weibull 분포의 매개변수 값을 나타내고 있으며, 그림 11~13은 각각의 응력수준에 따른 확률밀도함수를 나타내고 있다. 그래픽방법과 모멘트방법에 의해 산출된 분포매개변수값은 약간의 차이를 보이고 있으며, 이것은 각 변수당 시편의 개수가 7개로 통계적 처리에 있어 크기가 작고 피로데이터의 편차에 기인하는 것으로 판단된다.

3) S-N-P관계

McCall은 진동수 5Hz, 최소응력수준을 0.05로 일정하게 하여 얻은 데이터를 다음과 같은 S-N-P관계식으로 나타내었다.

$$\log N_f = 1.978 \left(\frac{f_{\max}}{f_c} \right)^{-3.033} (-\log L)^{0.0596} \quad (10)$$

여기서, $L = 1-P$



본 연구에서는 응력비 0.1에 대하여 Weibull 분포매개변수와 피로수명데이터를 이용하여, 식(7)을 식(10)과 같은 형태로 나타내었으며, 그것은 아래의 식(11)과 같다. 본 실험에서는 진동수 20Hz와 응력비를 일정하게 한 것으로 McCall의 실험변수와 약간의 차이는 있다.

$$\log N_f = 1.894 \left(\frac{f_{\max}}{f_c} \right)^{-3.147} (-\log L)^{0.0621} \quad (11)$$

식(11)을 이용하여, S-N-P 선도를 그림 14에 나타내었다.

그림 14 S-N-P 선도

4. 결론

본 연구를 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 조깅인장피로실험에 의한 포장용 콘크리트의 피로거동은 응력비 0.1, 0.3에서 Tefers and Kutti가 제안한 식과 유사하게 나타났으나, 응력비 0.5에서는 큰 차이를 보였고, 이것은 실제로 낮은 응력수준에서 명확한 파괴사이클수를 확인 할 수 없었기 때문이다.
- (2) 그래픽방법과 모멘트방법에 의해 산정된 Weibull분포매개변수 값은 약간의 차이를 보였으며, 이것은 시편의 편차와 시편의 개수가 작았기 때문이라고 판단된다.
- (3) 본 논문에서는 조깅인장피로실험을 통한 포장용콘크리트의 S-N관계식과 S-N-P관계식을 도출하였고, 식(1)~식(3)과 식(11)에 나타내었다.
- (4) 본 논문에서 제시한 S-N관계, S-N-P관계, Weibull분포매개변수, 확률밀도분포등은 지속적인 포장용콘크리트의 피로데이터 구축으로 수정·보완되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Byron W. Porter, Thomas W Kennedy, "Comparison of Fatigue Test Methods for Asphalt Materials," The Texas Highway Department in cooperation with U. S. Department of Transportation Federal highway Administration, Research Report Number 183-4, April, 1975.
2. Hsu, T. T. C, "Fatigue of Plain Concrete," ACI Journal Proceedings, Vol. 78, No. 4, Apr, 1981, pp.292~304.
3. Jan Ove Holmen, "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," ACI Publication SP75-4, 1982, pp.71~110.
4. Oh, Byung Hwan, "Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure," Journal of Structural Engineering, ASCE V. 112, No. 2, Feb, 1986, pp.273~288.