

굵은 골재 종류를 종합한 포장 콘크리트의 피로수명과 확률분포 해석

Fatigue Life and Analysis of Probability Distribution for Pavement Concrete
Combined with Types of Coarse Aggregate

김성권* 최성용**

Kim, Seong-Kwon Choi, Seong-Yong

1. 서론

현재 국내 도로포장 구조물은 국내의 건설재료, 기후, 교통조건 등에 적합치 못한 해외의 설계법을 그대로 이용하고 있는 실정이므로 국내 실정에 적합한 포장 설계법을 개발하기 위하여 “한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안” 연구가 활발히 진행 중이다.[1]

콘크리트 포장 설계법 개발 분야에 있어서 반복 하중으로 인한 재료의 피로거동을 고려한 설계와 해석이 중요하나 현재까지 국내에는 포장용 콘크리트의 피로거동 특성에 관한 연구가 미비한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 콘크리트 포장 설계법 개발의 일환으로 기존에 연구되었던 화강암의 피로특성과 더불어 국내의 대표적 굵은 골재인 석회암, 사암에 대한 포장용 콘크리트의 피로특성을 파악하기 위하여 쪼갠인장 피로시험방법을 이용하여 실험하고 유효한 종합 모델을 제시하였다. 또한, 콘크리트 피로데이터의 신뢰성 확보를 위하여 확률론적 개념을 이용하여 해석하였으며, 해석의 적합도 검정을 수행하였다.

2. 실험

2.1 실험개요

굵은 골재의 종류에 따른 포장용 콘크리트에 대한 피로시험은 일정진폭하중을 적용하여 응력비 0.1로 고정시킨 후 응력수준을 90, 80, 70%로 변화하여 실험을 수행하였다. 이때 하중재하속도는 20Hz를 적용하였으며, 하중재하 형상은 정현파를 적용하였다. 또한, 실험기간동안 강도의 증진을 최소화하기 위하여 시편 제작 24시간 이후 탈형하여 양생온도 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 수조에서 재령 28일까지 수중 양생시킨 후 기건 양생하여 실험하였다.

쪼갠인장 피로시험은 $\Phi 15 \times 30\text{cm}$ 의 원주형 시험체를 제작하여 $\Phi 15 \times 7.5\text{cm}$ 가 되도록 절단한 후 버어니어 캘리퍼스에 의하여 시험체의 두께에 대한 측정오차가 $7.5 \pm 0.2\text{cm}$ 이내가 되는지를 확인하여 시험에 사용하였다.

* 정회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정, 공학박사, 033-250-6240, af519@lycos.co.kr

** 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정, 공학박사, 033-250-6240, choisy2@empas.com



또한, 시험장치에 있어서 시험체가 가압판 위에서 편심이 되지 않도록하며, 가압판과 공시체 사이 균등한 하중전달과 시험체의 국부적인 파괴방지를 위하여 3mm 두께의 가압판을 설치하였다. 시험에 사용된 피로시험기는 INSTRON을 사용하였으며, 정적강도 측정으로부터 계산된 평균값을 적용하여 응력수준의 범위를 결정하였다. 또한, 피로하중 재하시 평균하중까지 도달시간은 20초로 하였으며, 실험의 종료는 200만 사이클까지 수행하였다.

2.2 재료특성

콘크리트 배합에 사용된 시멘트는 강원도 영월군 서면에서 생산되는 국내 S사 1종 보통 포틀랜드 시멘트 제품이며, 사용된 굵은 골재는 화강암과 석회암의 경우 입도에 맞추기 위해서 19mm, 25mm, 32mm의 골재를 1:0:1.24, 1:1:3의 비율로 혼합하여 사용했으며, 사암의 경우는 19mm와 32mm의 골재의 비율을 1:1로 혼합하여 사용하였다. 여기서, 사암의 40mm 골재는 최대치수 32mm를 맞추기 위해서 32mm의 체로 체가름을 실시하여 사용하였으며, 콘크리트용 혼화제는 중부내륙고속도로의 시험도로에 사용한 국내 S사의 제품인 AE감수제 표준형(LIGACE-CA)을 사용하였다.

2.3 콘크리트 배합

화강암과 석회암, 사암에 대한 콘크리트 배합은 중부내륙고속도로의 시험도로에서 사용된 배합을 기본으로 하였으며, 콘크리트 배합전 골재의 입도와 함수상태를 보정한 후 실험을 실시하였다. 콘크리트의 배합에서 재료의 투입순서는 굵은 골재와 잔골재 및 시멘트를 믹서기 내에 투입 한 후 1분간 건비빔을 실시, 혼화제를 배합수에 희석하여 믹서기 내에 투입 한 후 콘크리트를 배출하였다. 본 연구에 사용된 콘크리트의 배합표는 표1과 같다.

Table1. Mix Proportions of Pavement Concretes Used [Unit : kg/m^3]

| | W/C (%) | S/a (%) | Water (kg) | Cement (kg) | Sand (kg) | Gravel(kg) | | | AE (g) |
|-----------|---------|---------|------------|-------------|-----------|------------|---------|---------|--------|
| | | | | | | G1 32mm | G2 25mm | G3 19mm | |
| Granite | 42.3 | 37.7 | 144 | 340 | 682 | 660 | - | 532 | 510 |
| Limestone | 42.3 | 37.7 | 144 | 340 | 687 | 723.6 | 241.2 | 241.2 | 510 |
| Sandstone | 42.3 | 37.7 | 144 | 340 | 687 | 590.5 | - | 590.5 | 510 |

3. 실험결과

각각의 강도는 세 개 이상의 시험체를 이용하여 측정하였으며, 그 결과는 표2와 같다. 특히, 휨강도를 $45 kgf/cm^2$ 이상으로 규정하는 포장용 콘크리트의 설계기준 강도를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 재령 56일에 측정된 조깅인장 강도는 화강암, 석회암, 사암이 각각 $47 kgf/cm^2$, $42 kgf/cm^2$, $43 kgf/cm^2$ 으로 나타났다.



Table2. Results of Strength Tests

[Unit : kgf/cm^2]

| | 7 days | | | 28 days | | |
|----------------------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| | Granite | Limestone | Sandstone | Granite | Limestone | Sandstone |
| Compressive Strength | 441 | 243 | 228 | 536 | 289 | 249 |
| Flexural Strength | 62 | 42 | 44 | 64 | 46 | 48 |

3.1 피로실험 결과

표3은 응력수준에 따른 피로수명을 굵은 골재별 각각 15개의 시험체를 실험하여 그 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트의 피로시험 데이터는 표3에 나타낸 바와 같이 통계적 분산성을 내재하고 있으므로 확률론적 개념을 도입한 신뢰성 해석이 필요하다. 또한, 시험데이터의 보다 정확한 신뢰성 해석을 위하여 두 가지의 기준을 설정하여 해석시 제외되는 데이터를 구분하여 † 와 ‡ 로 나타내었다. † 는 실험데이터의 상관계수(R^2)가 0.9 이하가 되는 데이터이고, ‡ 는 시험체가 200만회 반복하중 재하시 파괴되지 않는 것이다.[2,3,4,5]

Table3. Results of Split Tension Fatigue Test with Types of Coarse Aggregate

| | Fatigue Life | | | | | | | | |
|----|--------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | S = 90 % | | | S = 80 % | | | S = 70 % | | |
| | Granite | Limestone | Sandstone | Granite | Limestone | Sandstone | Granite | Limestone | Sandstone |
| 1 | †132 | †58 | †57 | †2,383 | †598 | †116 | †15,217 | †4,957 | †33,830 |
| 2 | †241 | †62 | †62 | 9,960 | †1,167 | †183 | †45,962 | †46,201 | †67,200 |
| 3 | 416 | †115 | 114 | 12,320 | †1,274 | †2,033 | †72,849 | †89,182 | 79,598 |
| 4 | 477 | †116 | 164 | 15,033 | †3,362 | 8,584 | 107,516 | 127,395 | 84,173 |
| 5 | 622 | 229 | 168 | 22,181 | 8,776 | 9,815 | 117,349 | 155,371 | 89,320 |
| 6 | 1,036 | 230 | 191 | 23,352 | 13,243 | 14,506 | 124,399 | 260,066 | 187,021 |
| 7 | 1,656 | 470 | 228 | 25,171 | 14,974 | 16,959 | 183,767 | 296,052 | 342,035 |
| 8 | 1,716 | 598 | 285 | 35,747 | 36,118 | 19,046 | 203,184 | 385,102 | 424,214 |
| 9 | 2,205 | 600 | 597 | 40,113 | 38,080 | 21,503 | 239,396 | 602,083 | 493,420 |
| 10 | 2,397 | 839 | 598 | 40,767 | 39,079 | 36,538 | 299,816 | 662,476 | 500,189 |
| 11 | 2,582 | 962 | 616 | 59,458 | 51,902 | 45,081 | 374,390 | 934,041 | 765,130 |
| 12 | 2,640 | 1,342 | 1,050 | †61,424 | 64,385 | 57,357 | 519,747 | 986,388 | 807,659 |
| 13 | †4,111 | 1,394 | †4,929 | †94,688 | 76,292 | 113,879 | 567,747 | 1,468,088 | ‡2,000,000 |
| 14 | †5,679 | 2,257 | †6,066 | †114,321 | 88,275 | †403,083 | †1,494,864 | ‡2,000,000 | ‡2,000,000 |
| 15 | †5,913 | †2,457 | †10,119 | †122,016 | †112,712 | †943,375 | ‡2,000,000 | ‡2,000,000 | ‡2,000,000 |

3.2 콘크리트의 피로특성

3.2.1 S-N 관계

그림1, 2는 굵은 골재의 종류에 따른 S-N선도와 굵은 골재를 종합한 종합 S-N모형을 나타낸 것으로 모든 경우에 따른 단순회귀분석을 통하여 표4와 같이 굵은 골재에 따른 피로수명과 피로강도, 종합모형에 대한



피로수명과 피로강도를 나타낼 수 있다. 또한, 응력비 0.1에 따른 조결인장피로실험에 대한 회귀분석식을 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{f_{max}}{f_c} = 1.0844 - 0.0291 \log N_F \tag{1}$$

여기서, $\frac{f_{max}}{f_c}$: 응력수준, N_F : 파괴시 반복사이클의 횟수(피로수명)

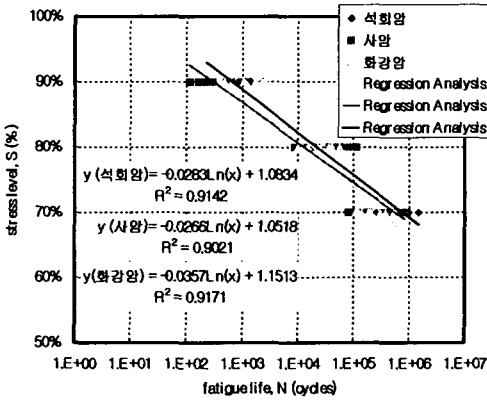


Figure1. S-N Curves with Types of Coarse Aggregate

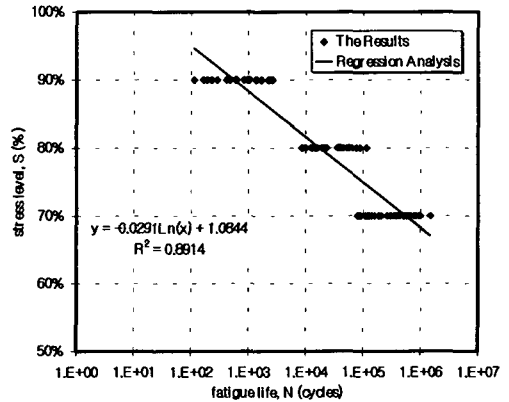


Figure2. S-N Curve Combined with Types of Coarse Aggregate

Table4. Fatigue Life and Fatigue Strength

| | Fatigue Life (cycles) | | | Fatigue Strength(%) | |
|-----------|-----------------------|--------|---------|---------------------|--------------|
| | 90% | 80% | 70% | 200 cycles | 1,000 cycles |
| Granite | 976 | 17,872 | 327,093 | 63.77% | 58.23% |
| Limestone | 652 | 22,340 | 765,055 | 67.28% | 62.73% |
| Sandstone | 301 | 12,915 | 554,357 | 66.59% | 62.31% |
| Combined | 543 | 17,281 | 549,959 | 66.26% | 61.61% |

3.2.2 피로수명에 대한 확률분포결정

피로데이터에 대한 통계적 해석을 위하여 Weibull 분포와 정규분포(Normal distribution)를 사용하여 비교하고자 하였으며, 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.

$$F_N(n) = \frac{\alpha}{u - n_0} \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^{\alpha - 1} \exp \left[- \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^\alpha \right]; n \geq n_0 \tag{2}$$

$$f_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^\alpha \right]; n \geq n_0 \tag{3}$$

여기서, α : 형상매개변수, u : 특정극한값, n_0 : 위치매개변수이다.



1) 그래픽 방법 :

생존함수(Surviorship function) $N_F(n)$ 은 식(3)으로부터 얻을 수 있다.

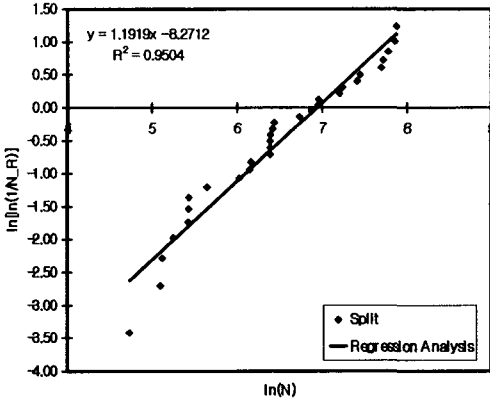


Figure3. Graphical Analysis for Obtaining Weibull's Two Parameters at S=90%

$$L_N(n) = 1 - F_N(n) = \exp\left[-\left(\frac{n}{u}\right)^\alpha\right] \quad \text{식(4)}$$

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

i : 피로수명의 파괴순서, k : 시편의 수

식(4)를 정리하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L_N}\right)\right] = \alpha \ln n - \alpha \ln u \quad \text{식(5)}$$

식(6)에서 $\ln\left[\ln\left(\frac{1}{L_N}\right)\right]$ 과 $\ln n$ 의 관계로부터 α 와 u 값을 구할 수 있다. 그림3은 응력수준 90%에 대하여 위의 관계를 도식한 것으로, 단순회귀분석을 통하여 분포매개변수 α 와 u 를 구할 수 있다.

2) 모멘트방법 :

본 방법에서 분포매개변수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_N^2 = \left(\frac{\sigma_N}{\mu_N}\right)^2, \alpha = V_N^{-1.08}, u = \frac{\mu_N}{\Gamma(1+1/\alpha)} \quad \text{식(6)}$$

여기서, V_N^2 : 분산계수, σ_N : 피로수명의 평균, μ_N : 피로수명의 표준편차이다.

3) 최우추정법 :

최우추정 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i^{\alpha^*} \quad \text{식(7)}$$

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^k (n_i^{\alpha^*} \ln n_i)}{\sum_{i=1}^k n_i^{\alpha^*}}\right) / \left(\frac{\sum_{i=1}^k n_i^{\alpha^*}}{\alpha^*}\right) - \frac{1}{\alpha^*} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ln n_i \quad \text{식(8)}$$

여기서, α^* , θ^* 은 각각 최우추정법으로 α 와 u 를 계산하기 위한 방정식이다. 위의 방정식으로부터 매개변수 α 는 컴퓨터를 이용한 반복기법에 의해 구할 수 있으며, 매개변수 u 는 $u = \theta^{1/\alpha}$ 의 관계로부터 계산된다.



Table5. Values of Weibull's Two Parameters for Fatigue Life

| | S = 90 % | | S = 80 % | | S = 70 % | |
|--------------------------------------|----------|-------|----------|--------|----------|---------|
| | α | u | α | u | α | u |
| Graphical Method | 1.192 | 1,032 | 1.478 | 38,888 | 1.332 | 447,029 |
| Moment Method | 1.221 | 1,021 | 1.378 | 38,096 | 1.263 | 440,763 |
| Maximum Likelihood Estimation Method | 1.246 | 1,029 | 1.471 | 38,756 | 1.343 | 449,001 |
| Mean | 1.220 | 1,027 | 1.442 | 38,580 | 1.313 | 445,598 |

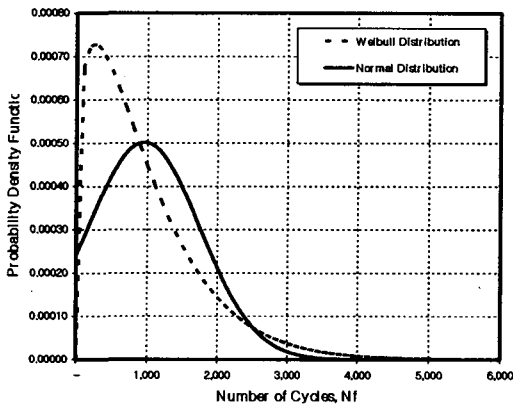


Figure4. Probability Density Function for Fatigue Life at S=90%

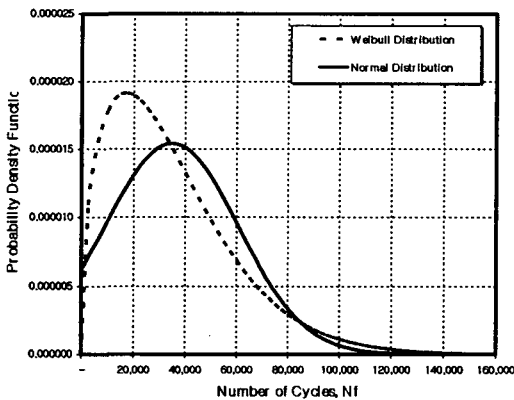


Figure5. Probability Density Function for Fatigue Life at S=80%

표5는 Weibull 분포의 매개변수 α 와 u 를 그래픽방법, 모멘트방법 및 최우추정법으로 계산하여 나타낸 것이다.

그림4~6은 각각의 그래픽방법, 모멘트방법 및 최우추정법에 의해 산출된 매개변수의 평균값을 이용하여 응력수준에 따른 확률밀도함수를 나타내고 있다.[6]

응력수준의 변화로 확률밀도함수의 분포양상이 차이를 나타내고 있다. 이러한 분포양상은 α 와 u 에 의해 결정되며 Weibull 분포의 매개변수 α 는 분포의 모양을 결정하고 u 는 피로수명의 척도를 규정한다.

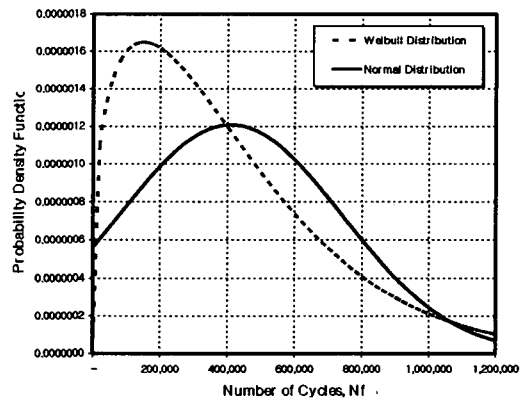


Figure6. Probability Density Function for Fatigue Life at S=70%

정규분포는 모든 응력수준에 대하여 음의 피로수명을 나타내는 비정상적인 경향을 보이므로 Weibull 분포를 이용하여 콘크리트의 피로수명을 나타내는 것이 보다 바람직하다.



3.3 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정

Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정은 그래픽 방법, 모멘트방법 및 최우추정법으로 계산된 Weibull 분포의 매개변수 α 와 u 의 평균값을 사용하여 통계량 D 를 산정하고, 이것을 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정의 임계치 D_C 와 비교하여, 산정된 통계량 D 가 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 채택되는가를 검정한 것이다.

표6에서 나타낸 바와 같이, 각각의 응력수준에 대한 적합도 검정 결과 모든 경우에 있어서 Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정의 통계량 D 는 임계치 D_C 와 비교하여 5%의 유의수준에서 적합한 것으로 나타났다.

Table6. Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness-of-fit with Stress Levels

| | D | $D_C(N=30)$ | Significant Level | Result |
|-----|--------|-------------|-------------------|----------|
| 90% | 0.1481 | 0.2400 | 5% | Accepted |
| 80% | 0.1224 | 0.2400 | 5% | Accepted |
| 70% | 0.1000 | 0.2400 | 5% | Accepted |

4. 결론

본 논문에서는 굵은 골재의 종류를 종합한 포장용 콘크리트의 피로수명과 확률분포 해석을 위하여 쪼갠인장 피로시험방법을 적용하여 일정진폭 피로하중이 작용하는 경우에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

- 1) 골재별 S-N 선도를 제시하였고, 응력 수준별 피로수명과 피로강도를 산정하였다. 또한, 피로시험 결과 데이터를 이용하여 굵은 골재의 종류를 종합한 S-N 선도를 제시하였으며, 200만회 피로강도와 1000만회 피로강도는 각각 66%, 62%로 나타났다.
- 2) 응력수준 및 굵은 골재의 종류에 따라 피로수명이 일정한 경향을 갖지 못하는 것은 콘크리트 피로 데이터 자체의 분산성을 나타내는 것으로 사료된다.
- 3) Weibull 분포의 매개변수 α 와 u 를 계산하여 피로시험 데이터의 신뢰성 해석을 수행하였으며, Kolmogorov-Smirnov의 적합도 검정방법을 이용하여 신뢰성 해석의 적합도 검정 결과 각각의 응력수준에서 모두 적합한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

[1] 건설교통부, “한국형 포장 설계법 개발 및 포장성능 개선방안”, 2001
 [2] 김동호, 김경진, 이봉학, 윤경구, “확률론적 개념을 이용한 일정진폭 쪼갠인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로 해석”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002
 [3] 김동호, 김성환, 이주형, 윤경구, “쪼갠인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로해석”, 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 149-156, 2002
 [4] 윤병성, “골재 종류를 고려한 콘크리트포장의 통합 피로모형 개발 및 평가” 강원대학교 토목공학파 대학원



- [5] Kyong-Ku Yun, Dong-Ho KIM, Kwang-Woo. KIM, "Fatigue Behavior of Pavement Concrete by Split Tension Fatigue Test", THE 82nd ANNUAL MEETING, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, WASHINGTON, D.C., January 2003
- [6] 최장식, 김동호, 김성환, 윤경구, "휨과 조깅인장 피로시험을 이용한 포장용 콘크리트의 피로해석", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp.169-176