

콘크리트 포장 피로실험 데이터의 쪼갬인장 피로특성

Split Tension Fatigue Characteristics Analysis of Fatigue Tests Data for Concrete Pavements

김 동 호* 김 성 환** 윤 병 성*** 이 봉 학****
Kim, Dong-Ho Kim, Sung-Hwan Yun, Byung-Sung Lee, Bong-Hak

Abstract

The purpose of this study was to investigate and analyze the fatigue test data of pavement concrete. The static strength tests were carried out to check the compressive strength, flexural strength, and split tension strength at 56 days in order to minimize strength variation effect during test. The specimens were fabricated at twelve sections at a construction site of highway. The stress level and stress ratio of fatigue test were determined from static test results. The results are as follow:

The flexural strength at 28 days mostly satisfied the criterion for design, but the compressive strength at 28 days were slightly below the criterion even though it satisfied at 56 days. The fatigue limit was 2 million cycles if the specimen was not failed to that cycles. The S-N curves were developed from the fatigue test results at each stress levels and each stress ratio. Then, the fatigue life of pavement concrete at a given stress level and fatigue strength of pavement concrete could be derived from these curves. Analysis using method No.2 was more acceptable because resulting of comparison and analysis using method No.2 was presented 2 sections were presented $R^2 < 0.7$, and other 2 sections were presented $0.7 < R^2 < 0.8$, and the others 8 sections were $R^2 \geq 0.8$

키워드 : 피로실험, 쪼갬인장, 피로수명, 응력수준

Keywords : Fatigue test, Split tension, Fatigue life, Stress level

1. 서 론

교량, 도로, 공항 및 해양구조물은 피로하중을 받는 대표적인 구조물이다. 그러나 지금까지 국내의 포장 콘크리트에 대한 피로실험 및 연구는 미흡한 실정이며 콘크리트 포장도로의 설계는 주로 국외의 설계법이나 일부 수정된 설계기준을 사용하여 왔다. 국외의 설계법은 국내의 환경조건, 교통조건, 재료적 물성 등이 다르기 때문에 적용하는

데는 제한성을 가지고 있다. 따라서 국내실정에 적합한 설계법을 개발하려는 노력이 최근 진행되고 있다[1][2]

또한, 지금까지 국내·외 콘크리트 피로실험은 대부분 압축응력이나 휨응력을 받는 경우에 대하여 연구되어 왔으며, 특히 국외의 경우 포장 콘크리트에 대한 연구는 휨응력을 받는 경우가 주로 이루어져 왔다. 그러나 실제포장체는 순수 휨 응력을 받기 보다는 압축응력과 인장응력을 동시에 받게 되는 2축 응력상태의 조합응력을 받게 된다. 이러한 상태를 재현 할 수 있는 실험방법이 쪼갬인장 피로 실험 방법이며 포장 콘크리트의 피로거동

* 강원대학교 토목공학과 박사후과정
** 강원대학교 토목공학과 박사과정
*** 강원대학교 토목공학과 석사과정
**** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

을 이상적으로 모사할 수 있고 파괴모드가 유사한 이점을 가지고 있어 포장 콘크리트의 피로수명이나 피로강도의 예측, 잔존수명 평가에 기여할 수 있는 장점을 지니고 있다[3][4].

따라서, 본 연구에서는 국내 고속도로 건설이 진행중인 현장에서 총12개 단면을 선정하여 시험체를 제작하고 정적강도측정과 조깅인장 피로실험 방법을 수행하여 포장 콘크리트의 피로해석을 수행하였다.

2. 실험

2.1 재료특성

현장에서 조사된 콘크리트 배합에 사용한 시멘트는 강원도 영월군 서면에서 생산되는 국내 H사 1종 보통포틀랜드 제품이며, 콘크리트 배합에 사용된 굵은골재는 충북 음성군 감곡면 오향리에서 채취된 것이며, 잔골재는 경기도 여주군 점동면 덕평리에서 채취한 것으로 조사되었다. 굵은골재의 최대치수는 32mm로서 골재의 입도분포가 표준입도에 맞지 않아 32mm의 골재와 19mm의 골재를 약 55% : 45%의 비율로 혼합하여 사용한 것으로 나타났다. 또한, 혼화제는 국내 J사 제품의 표준형 AE감수제(LIGACE-UA)로서 첨가량은 시멘트 중량의 0.15%를 사용한 것으로 나타났다.

2.2 콘크리트 배합

표 1은 콘크리트 배합표를 나타낸 것이며, 그림 1과 그림 2는 포설 전경과 현장에서 제작한 공시체를 나타낸 것이다.

2.3 실험방법

2.3.1 정적강도

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405 규정에 의하여 Ø15×30cm 원형공시체를 현장에서 제작하여 재령 28일에 수행하였다.



그림 1 콘크리트 포장 현장

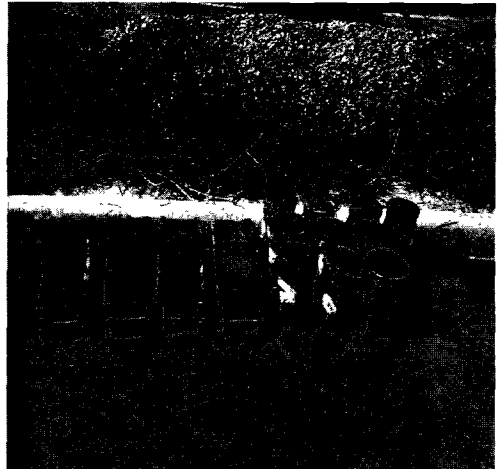


그림 2 현장제작 공시체

휨강도 시험은 15×15×55cm의 빔 공시체를 제작하여 KS F 2408에 따라 재령 28일에서 3등분점 하중재하방식으로 시험을 수행하였으며, 콘크리트의 조깅인장 강도측정은 KS F 2423에 규정된 조

표 1 콘크리트 배합

| 슬럼프 (cm) | 공기량 (%) | 물/시멘트비 (%) | 잔골재율 (%) | 물 (kg) | 시멘트 (kg) | 잔골재 (kg) | 굵은골재(kg) | | AE 감수제 (g) |
|-------------|------------|---------------|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| | | | | | | | G ₁ (32mm) | G ₂ (19mm) | |
| 2.5 | 4.5 | 42.3 | 37.7 | 144 | 340 | 682 | 660 | 532 | 510 |

갠시현방법을 사용하였다 본 연구에서는 조깅인장 강도를 기준으로 피로실험에 필요한 응력수준을 결정하는 자료로 사용하였다. 따라서, 콘크리트 피로실험과의 동일한 조건을 충족시키기 위하여 $\varnothing 15 \times 30$ cm의 원주형 시험체를 제작한 후 $\varnothing 15 \times 7.5$ cm가 되도록 절단하여 조깅인장강도 실험과 피로 실험에 사용하였다.

2.3.2 조깅인장 피로실험

조깅인장 피로실험은 $\varnothing 15 \times 30$ cm의 원주형 시험체를 제작한 후 $\varnothing 15 \times 7.5$ cm가 되도록 절단한 후 버어너 캐리퍼스를 이용하여 시험체의 두께에 대한 허용오차가 7.5 ± 0.2 cm 이내가 되는지 측정 후 실험에 사용하였다 또한, 시험체가 가압판 위에서 편심이 되지 않도록 하고 가압판과 공시체 사이 균등한 하중전달과 시험체의 국부적인 파괴를 막기 위해 3mm 두께의 가압판을 설치하여 실험하였다

실험은 피로실험 기간 동안 강도의 증진현상을 최소화하기 위하여 시험체를 재령 28일 수중양생한 후 56일까지 공기 중 양생하여 정적 강도측정 결과로부터 응력수준을 계산하여 피로실험에 적용하였다 또한, 피로하중 재하시 초기 평균하중(mean level)까지 도달시간은 실험적으로 결정된 20초를 가하여 시험체의 손상을 방지하고자 하였으며, 실험의 종료는 200만 사이클까지 수행하였다

본 연구에서 수행된 피로실험은 일정진폭 하중을 받는 콘크리트의 피로실험으로 일정진폭 하중은 일정한 주기와 진폭의 하중이 지속적으로 작용

되는 경우이다 이때 콘크리트의 피로실험에 적용되는 하중재하 속도는 20Hz와 정현파를 적용하였으며 응력비는 적용최대응력에 대한 최소응력의 비로서 0.1로 하였다

또한, 피로하중 재하시 초기 평균하중까지 도달 시간은 실험적으로 결정하여 20초를 적용하였다

그림 3은 Instron 장비를 이용하여 조깅인장 피로실험을 수행하는 장면을 나타낸 것이다

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정적 강도측정 결과

3.1.1 압축강도

현장에서 포설된 콘크리트를 채취하여 제작된 공시체를 이용하여 압축강도를 실시하였다 제작된 공시체의 양생은 콘크리트 포장체 양생제 살포시 동일한 방법으로 양생제를 살포한 후 노면에서 1일간 기건양생을 실시하였다 1일 이후 탈형하여 현장 수조에 침수시켜 27일간 수중양생을 실시한 후 만능재료시험기 이용하여 강도실험을 실시하였다.

본 연구에서는 콘크리트 포장 구간에 대한 재령 28일 압축강도 측정 결과 평균값은 약 246 kgf/cm²로 나타났다 그러나, 각 단면별로 현장 공시체의 압축강도 결과는 큰 차이를 보였다 재령 28일에 있어 압축강도 최대값은 A단면으로 약 279 kgf/cm², 재료 56일에는 L단면으로 418 kgf/cm²로 나타났으며, 최소값은 E단면으로 181 kgf/cm²로 측정되었다. 특히, C, D 및 E단면의 경우 전체적으로 낮은 압축강도값을 나타내어 공시체 제작시의 다짐불량이 공시체의 압축강도결과에 영향을 미치는 것으로 판단되었다 그러나, 재령 56일의 강도는 평균 351kgf/cm²로 양호한 것으로 나타났다

3.1.2 휨강도

휨강도 측정은 재령 28일 3등분절 하중재하 방식으로 실험하였다. 콘크리트 포장의 경우 휨강도가 설계기준강도이며, 재령 28일 휨강도 45kgf/cm²를 기준으로 하고 있다. 콘크리트 포장 단면에 있어 평균 휨강도는 약 51.3kgf/cm²를 나타내어 설계 기준강도를 만족하는 것으로 나타났다 그러나, 압축강도와 마찬가지로 최대휨강도치와 최소휨강도치는 다소 크게 나타났다 A, C단면은 58.5kgf/cm²를, L단면은 42.6kgf/cm²를 각각 나타내었다 전체적으로 휨강도 측정을 위한 현장 공시체 제작이 압축강도 공시체보다는 매우 양호한 결과를 나타내



그림 3 피로실험 전경

었다. 따라서, 현장에 포설된 콘크리트의 휨강도는 설계기준 강도를 충분히 만족하는 것으로 판단된다.

3.1.3 쪼갬인장강도

쪼갬인장강도 측정은 KS 규정에 의하여 실시하되 피로실험과 동일한 조건이 되도록 하기 위하여 $\varnothing 15 \times 30 \text{cm}$ 의 공시체를 제작하여 $\varnothing 15 \times 7.5 \text{cm}$ 가 되도록 절단하여 실험하였다. 이러한 쪼갬인장강도 실험은 그 자체로 콘크리트 포장체의 인장강도를 유추할 수 있으며 또한, 정적 쪼갬인장강도 측정결과로부터 피로시험에 적용할 응력수준을 결정하기 위하여 실험을 실시하였다.

쪼갬인장강도 측정결과 평균 쪼갬인장하중은 약 6,723kgf로 나타났다. 또한, 각 단면에 따른 평균값은 최소 D단면의 6,180kgf에서 K단면의 7,406kgf까지 약 1,225kgf의 범위를 가지고 나타났다. 이러한 하중치를 응력으로 환산할 경우 쪼갬인장강도는 약 35~42 kgf/cm²의 범위를 가지게 된다 또한, 이들 각 단면에 대한 쪼갬인장강도의 평균치는 약 38kgf/cm²로 측정되었다. 쪼갬인장강도 측정을 통하여 각 단면별 평균 하중을 피로실험에 적용하게 된다.

3.2 피로실험 결과

콘크리트 포장에서 각 단면 별 제작한 6개의 $\varnothing 15 \times 30 \text{cm}$ 의 원주형 공시체는 공시체 절단기를 이용하여 $\varnothing 15 \times 7.5 \text{cm}$ 가 되도록 절단한 후 쪼갬인장강도 측정에 3개를 사용하고 9개의 공시체는 피로실험을 수행하였다. 따라서, 각 단면에서 피로실험은 9개의 공시체로서 총 12개 단면에 대하여 108개가 피로실험에 사용되었다.

피로실험에 사용된 108개의 공시체는 소위 응력수준과 피로수명의 관계로 특성 지워지는 S-N 선도를 작성하여 각각의 응력수준에 대한 피로수명과 200만회 또는 1,000만회의 피로강도를 추정하고 각 단면별로 응력수준 80%에 대해 수행되는 피로 실험결과와 해석을 위해 기본 데이터로서 사용하고자 하였다. 따라서, 각 단면별 3~4개의 공시체를 추출하여 44개의 공시체는 S-N 선도 작성에 실험되었으며, 각 단면별 5개의 잔여 공시체는 응력수준 80%를 적용하여 각 단면에 따른 피로수명의 분산성 해석을 위해 실험하였다.

3.2.1 피로실험 데이터

각 단면별 3~4개의 공시체를 추출하여 S-N 선도 작성에 사용한 총 44개의 공시체는 응력수준 90%와 80%에 대하여 15개의 공시체를 사용하고, 응력수준 70%에 대해서 14개의 공시체를 실험하였다.

표 2는 S-N 선도를 작성을 위해 실험된 44개의 공시체의 피로실험 결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 피로실험 데이터는 상당한 변화성과 분산성을 나타내는 것으로 알려져 있으며 특히, 응력수준이 낮아질수록 이러한 분산성은 더 크게 나타난다. 표 2에 나타난 실험결과에서도 이러한 데이터의 분포는 동일한 경향을 보이고 있으며 유효한 데이터의 범위를 설정하기 위한 2가지의 기준을 설정하여 해석하고 한다.

표 2 응력수준에 따른 피로수명 측정결과

| No. | 응력수준 | | | 비고 |
|-----|----------|---------|------------|----|
| | 90% | 80% | 70% | |
| 1 | 53 | † 188 | † 9,628 | |
| 2 | 115 | † 1,090 | † 21,674 | |
| 3 | 116 | † 1,341 | † 37,238 | |
| 4 | 238 | † 1,781 | 41,824 | |
| 5 | 306 | 3,426 | 134,410 | |
| 6 | 473 | 4,840 | 361,540 | |
| 7 | 599 | 5,264 | 406,891 | |
| 8 | 1,528 | 5,328 | 467,160 | |
| 9 | 1,704 | 10,754 | 583,955 | |
| 10 | 2,317 | 20,991 | 774,788 | |
| 11 | 2,422 | 29,721 | 928,018 | |
| 12 | 2,869 | 47,176 | ‡ 2000,000 | |
| 13 | † 18,234 | 118,710 | ‡ 2000,000 | |
| 14 | † 64,235 | 143,437 | ‡ 2000,000 | |
| 15 | † 73,842 | 189,513 | | |

첫째는 결정계수 R^2 을 0.8로 기준으로 하였을 때 기각되는 데이터이며 두 번째는 200만회 반복 하중 재하시 공시체가 파괴되지 않은 것으로 각각 * 와 † 로 표시하여 나타내었다. 따라서, 두 가지 기준을 적용하여 해석데이터의 범위를 설정하여 S-N 선도로 나타낸 것이 그림 4이며 해석에 사용된 데이터를 "기본데이터"로 정의하였다

그림으로부터 실험결과를 회귀분석하여 S-N 관계식을 도출한 결과 식(1)과 같이 나타났으며, 이때 결정계수(R^2)은 0.80으로 나타났다

$$L_n(N_f) = 42\,301 - 40\,650(S) \quad (1)$$

식(1)의 S-N 관계식으로부터 응력수준 90, 80, 70%에 대한 피로수명을 산정하고 200만회의 피로수명에서 피로강도를 계산하여 나타낸 것이 표 3이다 응력수준 90%에서의 피로수명은 304로 나타났으며, 응력수준 80%와 70%에서는 각각 17,685와 1,030,473로 산정되었다. 또한, 200만회 피로수명을 기준으로 한 피로강도는 경적강도의 약 68%로 나타났다.

3.2.2 단면별 피로실험 결과 비교

콘크리트 포장 각 단면에 따라 피로실험 데이터의 비교를 위하여 동일한 응력수준 80%에 대하여 5개의 공시체를 피로실험하여 그 결과를 표 4에 나타내었다. 응력수준 80%에 대한 피로실험은 50만회 이상을 나타낼 경우 데이터는 의미가 없다고 판단되어 실험은 50만회를 기준으로 종료하였다

또한, 실험결과는 각 단면별 5개의 데이터로서 5개의 데이터를 단지 평균과 표준편차, 분산, 변동계수 등의 개념으로 계산하여 결과를 제시하는 것은 데이터의 수가 매우 적고 또한 콘크리트 피로실험 데이터가 정규분포를 따르지 않는 것으로 알려져 있기 때문에 합리성이 결여되는 것으로 판단되어 다음과 같이 두 가지 방법으로 해석하고자 한다. 두 가지의 해석방법은 다음과 같다

(1) 제1방법 : 전 절에서 분석한 기본데이터에 실험결과를 포함시켜 S-N 선도를 작성하고 결정계수 R^2 을 분석한다

(2) 제2방법 : 전 절에서 분석한 기본데이터는 응력수준 90%와 70%에 대해서만 적용하고 여기에 실험결과 즉 응력수준 80%에 대한 5개의 데이터를 적용하여 S-N 선도를 작성하고 결정계수 R^2 을 분석한다

그림 5~10은 제1방법으로 분석한 결과를 나타낸 S-N 선도이며, 그림 11~16은 제2방법으로 분

석한 S-N 선도를 나타낸 그림이다 또한, 이상 두 가지 해석방법으로 분석하여 결정계수 R^2 을 분석하여 나타낸 것이 표 5이다. 그림 5~16 및 표 5에 나타낸 바와 같이 결정계수 분석결과는 제1방법의 경우 0.7미만이 경우는 A, B, E, 단면의 3구간이고, 나머지 9개 단면은 모두 0.7~0.8 인 것으로 나타났다

한편, 제2방법을 적용한 경우에는 B, E 단면에서 0.7 미만을 나타냈으며, A, K 단면에서 0.7~0.8의 범위를 나타냈다 또한, 0.8 이상을 나타내는 단면이 8개인 것으로 나타났다 그러나, 표 4에서 H 단면의 경우 50만회 이상 피로수명을 나타낸 데이터가 4개이며, F 단면에서는 3개로서 해석에 포함된 데이터가 상대적으로 작기 때문에 신뢰성은 낮은 것으로 사료되며, C, D의 단면에서는 이러한 데이터가 각각 1개를 포함하고 있어 이에 대한 영향도 분석결과에 다소 기인될 것으로 사료된다

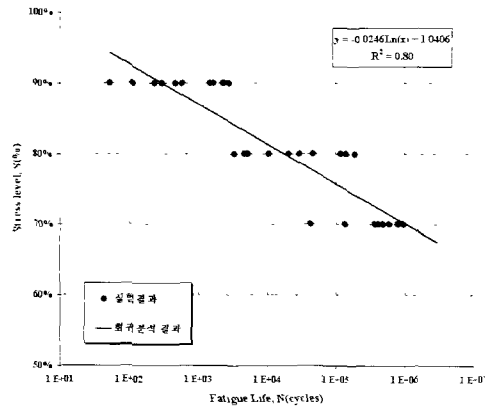


그림 4 S-N 선도

표 3 피로수명과 피로강도의 추정

| 응력수준별 피로수명 | | | 200만회의 피로강도 |
|------------|--------|-----------|-------------|
| 90% | 80% | 70% | |
| 304 | 17,685 | 1,030,473 | 68.4% |

표 4 응력수준 80%에서 단면별 피로수명

| 단면 | 피로수명 (cycles) | 단면 | 피로수명 (cycles) |
|----|------------------|----|------------------|
| A | 117 | G | 5,021 |
| | 352 | | 5,714 |
| | 686 | | 11,292 |
| | 1,062 | | 29,722 |
| | 5,329 | | 52,827 |
| B | 40 | H | 100,485 |
| | 792 | | ※500,000 |
| | 968 | | ※500,000 |
| | 16,459 | | ※500,000 |
| | 642,847 | | ※500,000 |
| C | 908 | I | 783 |
| | 18,785 | | 4,347 |
| | 66,569 | | 12,538 |
| | 85,322 | | 29,965 |
| | ※500,000 | | 31,442 |
| D | 2,560 | J | 1,026 |
| | 26,834 | | 2,692 |
| | 63,587 | | 5,513 |
| | 226,272 | | 7,047 |
| | ※500,000 | | 308,410 |
| E | 65 | K | 290 |
| | 168 | | 6,128 |
| | 739 | | 56,144 |
| | 3,727 | | 95,713 |
| | 164,470 | | 229,485 |
| F | 9,629 | L | 7,171 |
| | 26,753 | | 36,069 |
| | ※500,000 | | 44,146 |
| | ※500,000 | | 55,340 |
| | ※500,000 | | 56,187 |

※ : 50만에서 파괴되지 않은 공시체

표 5 단면별 결정계수 비교

| 단면 | S=80%데이터에서 결정계수(R^2) | 기본데이터와 S=80%데이터에서 결정계수(R^2) |
|----|-----------------------------|---------------------------------------|
| A | 0.6693 | 0.6217 |
| B | 0.6347 | 0.6064 |
| C | 0.8206 | 0.7638 |
| D | 0.8282 | 0.7721 |
| E | 0.6301 | 0.5979 |
| F | 0.8731 | 0.8052 |
| G | 0.8578 | 0.7908 |
| H | 0.8622 | 0.8001 |
| I | 0.8241 | 0.761 |
| J | 0.7848 | 0.7302 |
| K | 0.7628 | 0.7172 |
| L | 0.8607 | 0.7982 |

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 포장이 진행중인 현장에서 총 12개의 단면에서 시험체를 제작하여 정적강도측정과 피로실험을 수행하고 단면에 대한 비교분석을 하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 재령 28일에서의 휨강도 측정결과는 L단면을 제외하고는 모두 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 압축강도의 경우 재령 28일에서 강도발현이 미진하였으나 56일의 강도는 양호한 것으로 나타났다.

(2) 피로실험결과는 합리적 해석을 위하여 데이터의 분산성이 큰 데이터를 해석시 제외하였다. 이는 결정계수 0.8을 기준으로 기각되는 데이터와 200만회 파괴되지 않은 것으로 두 가지 기준을 설정하여 제시하였다.

(3) 실험결과로부터 S-N 관계식을 제시하였으며, 응력수준별 피로수명과 200만회의 피로강도를 산정하여 나타내었다.

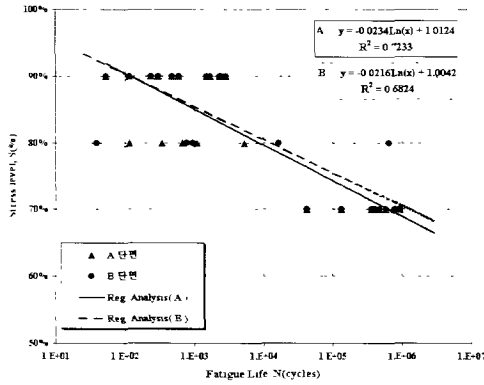


그림 5 A, B 단면(응력수준 80%)

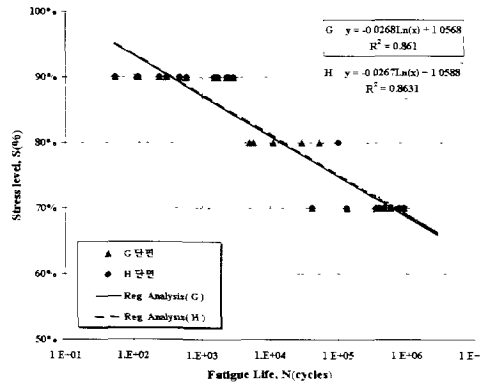


그림 8 G, H 단면(응력수준 80%)

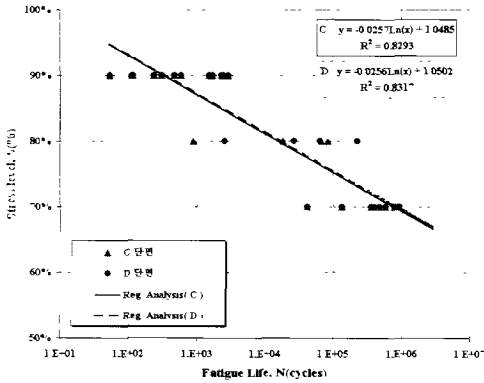


그림 6 C, D 단면(응력수준 80%)

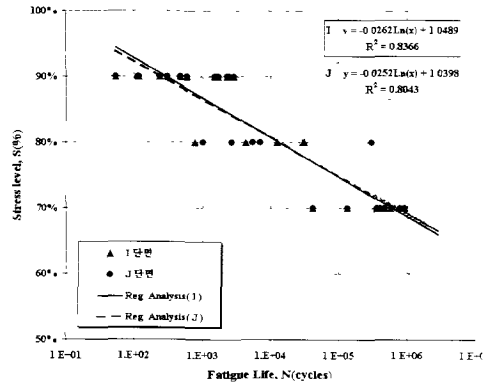


그림 9 I, J 단면(응력수준 80%)

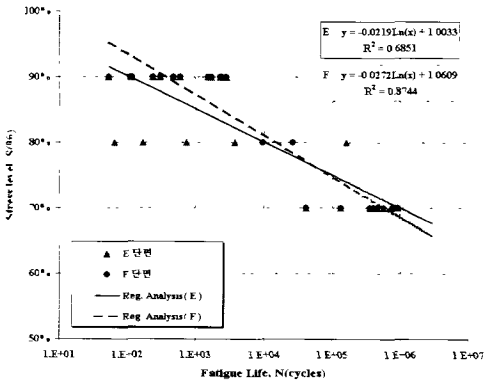


그림 7 E, F 단면(응력수준 80%)

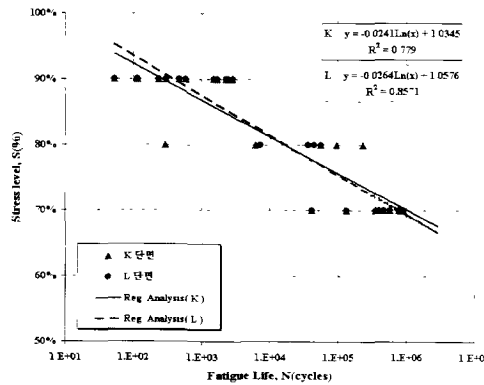


그림 10 K, L 단면(응력수준 80%)

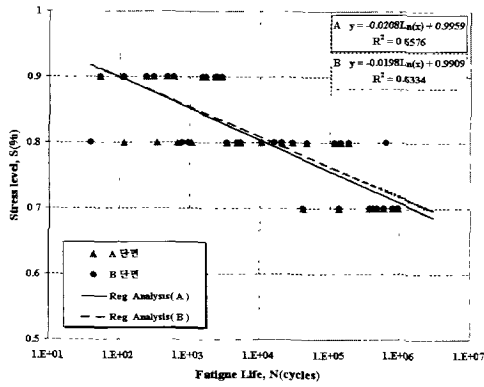


그림 11 A, B 단면(기본데이터 + 응력수준 80%)

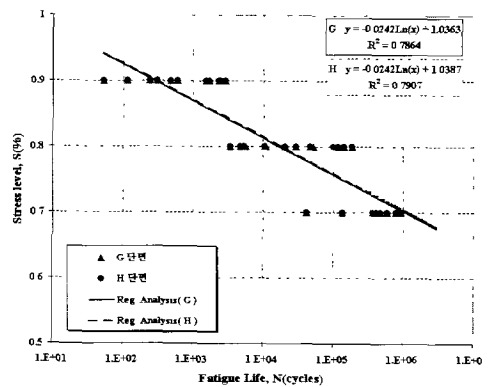


그림 14 G H 단면(기본데이터 + 응력수준 80%)

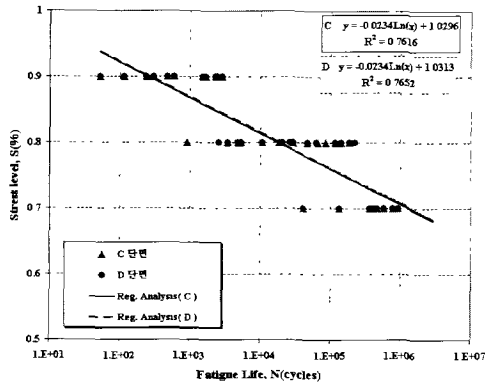


그림 12 C, D 단면(기본데이터 + 응력수준 80%)

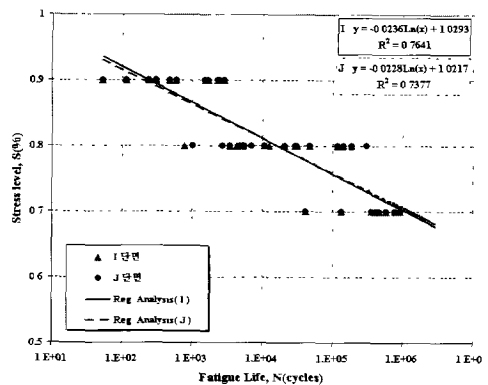


그림 15 I, J 단면(기본데이터 + 응력수준 80%)

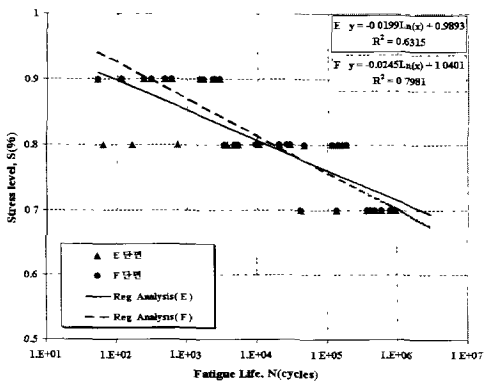


그림 13 E, F 단면(기본데이터 + 응력수준 80%)

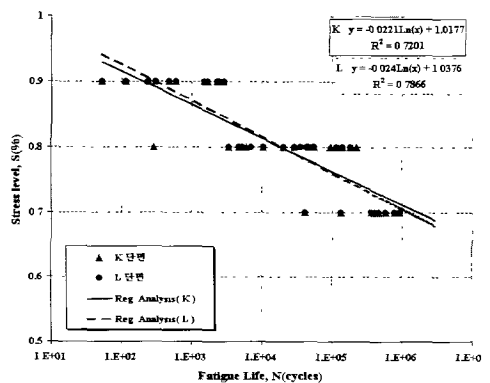


그림 16 K, L 단면(기본데이터 + 응력수준 80%)

(4) 제1방법에 의해 총 12개의 단면을 비교분석한 결과 3개 단면에서 결정계수가 0.7 미만으로 나타났다으며, 9개 단면은 0.7~0.8 사이에 분포하는 것으로 나타났다

(5) 제2방법을 적용하여 비교분석한 결과는 2개 단면에서 결정계수가 0.7 미만으로 나타났으며, 2개 단면은 0.7~0.8 사이에 분포하고 8개 단면에서 0.8 이상을 나타내었다.

[10] Stock, A. F. "CONCRETE PAVEMENTS," ELSEVIER APPLIED SCIENCE., 1988.

참고문헌

- [1] 최창식, 김동호, 김성환, 윤경구, "휨과 조깅인장 피로시험을이용한 포장용 콘크리트의 피로 해석", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 169~176, 2002.
- [2] 최창식, 김동호, 김성환, 이주형, 윤경구, "휨 피로시험을 이용한 포장용 콘크리트의 피로 해석", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, pp. 401~406, 2002.
- [3] 김동호, 김경진, 이봉학, 윤경구, "확률론적 개념을 이용한 일정진폭 조깅인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002
- [4] 김동호, 김성환, 이주형, 윤경구, "조깅인장 반복하중을 받는 포장용 콘크리트의 피로 해석", 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, pp. 149~156, 2002.
- [5] Cowher, C. E. and T. W. Kennedy, "Cumulative Damage of Asphalt Materials Under Repeated-Load Indirect Tension," Center for Highway Research, Research Report 183-3, 1975.
- [6] Holmen, J. O., "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading," ACI Publication SP75-4, pp 71~110, 1982.
- [7] Kyong-Ku YUN, Dong-Ho KIM, Kwang W. KIM, "Fatigue Behavior of Pavement Concrete by Split Tension Fatigue Test" THE 82nd ANNUAL MEETING, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, WASHINGTON, D.C., January 2003.
- [8] Oh, B. H., "Fatigue-Life Distribution of Concrete for Various Stress Levels," ACI Materials Journal, Title no. 88-M15, pp. 122-128, 1991.
- [9] Singh, S. P. and S. K Kaushik, "Flexural Fatigue Life Distributions and Failure Probability of Steel Fibrous Concrete," ACI Materials Journal, V.91, No.6, pp. 658~667, 2000