

콘크리트 포장 슬래브 누적피로손상 회귀모형의 적용

Apply to Regression Models for Concrete Pavement Slab Cumulative Fatigue Damage

박주영* · 임진선** · 김상호*** 정진훈****

Park, Joo Young · Lim, Jin Seon · Kim, Sang Ho · Jeong, Jin Hoon

1. 서 론

콘크리트 슬래브의 강도는 포장체에 반복적으로 재하되는 차량의 하중에 의하여 꾸준히 감소하며, 장기적으로 피로균열이 발생한다. 온도와 수분의 분포로 인해 슬래브 내에는 항상 응력이 도입되어 있다. 그러므로 이를 고려한 후 차량하중의 영향을 추가해야만 보다 정확한 콘크리트 포장의 피로수명을 예측할 수 있다. 기존의 전통적인 피로모형은 응력-강도비 S 와 피로수명 N_f 의 관계를 $S-N$ 선도에 도시하는 모형이 일반적이었지만, 이는 환경하중이 고려되는 콘크리트 포장에 직접 적용하기에는 한계가 있었다. 특히 하중에 의한 요인인 최소응력과 최대응력의 비 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ 은 같은 응력-강도비 수준에서 R 의 변화에 따라 피로수명이 다르게 예측되게 하는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 따라서 선행 연구에서는 콘크리트 포장에 교통하중이 재하되기 전에 도입되어 있는 환경하중의 영향을 합리적으로 고려할 수 있는 피로모형을 개발하기 위해, 여러 선행 연구자들의 피로실험 결과를 수집하였고, 회귀분석을 실시하였다. 그리고 그 결과를 통해 모형계수를 결정하였다.

본 연구에서는 역학적 설계논리를 활용, 여러 단면조건과 재료, 기상, 차종별 교통량과 계수 등을 입력변수로 한 모형을 구성하였다. 이러한 모형으로 콘크리트 포장 구간에서 가장 큰 교통량을 나타내는 지역인 서울 외곽순환도로 학의~관교JCT 8km구간의 교통량 및 차종별 분포를 해석에 선택하여 피로수명을 예측하였다. 또한, 선행연구자들의 피로식과 비교, 분석하여 개발된 피로모형의 적합성을 평가하였다.

2. 피로회귀모형의 개발

콘크리트 포장에 교통하중이 재하되기 전에 도입되어 있는 환경하중의 영향을 합리적 수준으로 고려할 수 있는 피로모형을 개발하기 위하여, 박병희(1984), 원대연(1988), 김동호(2005), 그리고 Shi 등(1994)이 실시한 피로실험 결과를 수집하였다. 서로 다른 실험 조건에 대해서는 임진선(2009)이 제시한 방법으로 보정하였고, 피로수명을 로그화한 $\text{Log}(N_f)$ 를 종속변수로, 응력-강도비 S 와 최소응력과 최대응력비 R 을 각각 독립변수로 취해 다중회귀분석을 실시하였다(박주영 2010). 그 결과 식 1과 같은 모형을 개발하였다. 여기서 R 을 콘크리트 포장에 적용 시 σ_{\min} 은 포장이 시공된 후 교통하중이 재하되기 전 온도 및 습도에 의한 환경하중에 의하여 슬래브에 도입된 응력으로, σ_{\max} 는 환경하중이 가해진 상태에서 교통하중이 재하될 때의 응력이라 할 수 있다. 또한 S 는 콘크리트 휨강도에 대한 σ_{\max} 이라 정의하였다.

$$\text{Log}(N_f) = 13.291 - 12.431(S) + 2.677(R) \quad (\text{식 1})$$

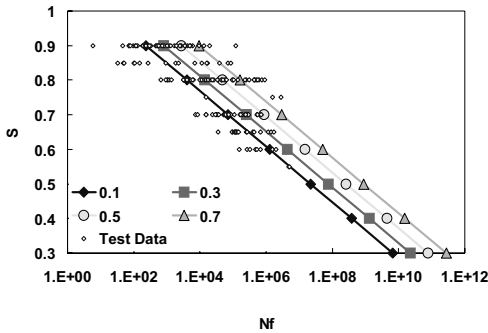
* 정 회 원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 032-873-5332(E-mail : pjy0704@naver.com)

** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 032-873-5332(E-mail : coreplay@hanmail.net)

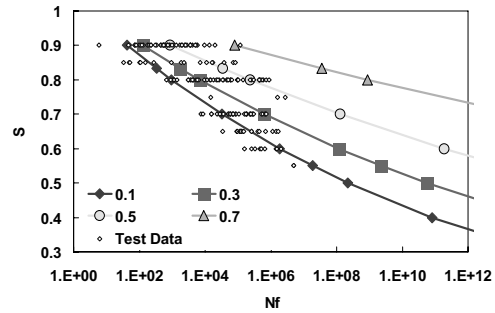
*** 정 회 원 · (주)STX건설 기술영업팀 팀장 · 02-6960-3975(E-mail : midasksh@onestx.com)

**** 정 회 원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 032-860-7574(E-mail : jhj@inha.ac.kr)

그리고 기존의 R을 고려하는 대표적인 Shi(1993)의 모형과 개발된 모형의 예측결과를 아래 그림 1에 비교하였다. 그 결과 두 모형 모두 R이 0에 가까운 경우 즉 최소응력이 거의 없는 경우에는 유사한 결과를 보였으나 R이 커지면 기존 모형은 예측결과가 매우 민감하게 변하는 반면 제안 모형은 큰 변화가 없음을 확인하여 인자에 대한 민감도가 기존보다 적음을 알 수 있었다.



(a) 제안모형



(a) 기존모형(임진선 2009)

그림 1. R에 따른 예측모형간의 민감도 비교

3. 역학적 설계방법에 의한 피로누적손상도 산정

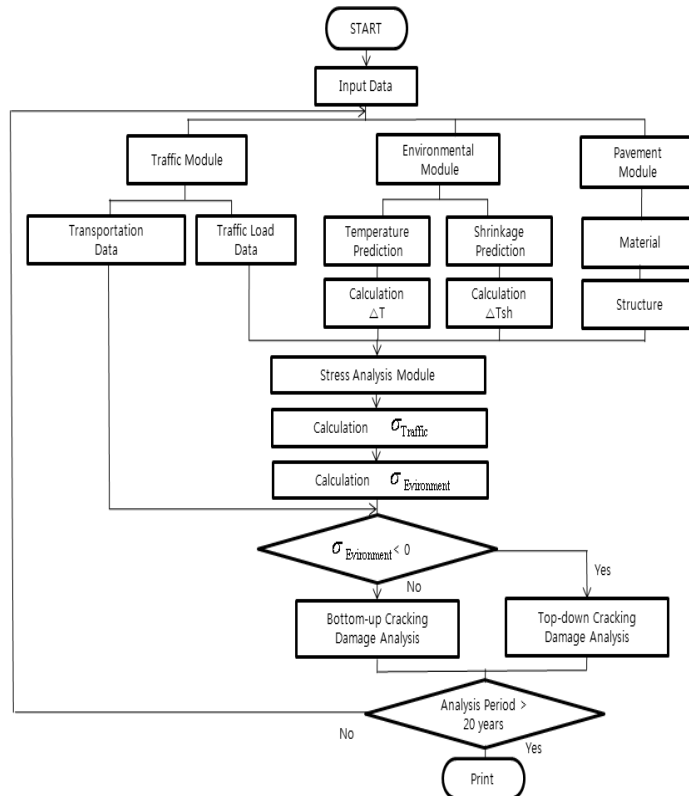


그림 2. 역학적 포장 설계 방법에 의한 누적 손상도 산정과정

누적손상이란 포장체의 손상을 매 시간마다 혹은 몇 시간 간격으로 계산하고 이를 연속적으로 누적하여 도로의 공용기간 중 특정한 시점에서 포장의 손상된 정도를 알 수 있도록 한 개념이다. 이를 통하여 특정한 시기에 발생하는 포장체의 온도, 수분함량, 교통하중, 포장의 물성 등의 변화를 고려한다. 이러한 논리를 바탕으로 아래의 그림과 같이 AASHTO 2002 설계법과 한국형 포장설계법 개발 연구를 참고하여 역학적 포장설계 방법에 의한 누적 손상도 산정과정을 도시하였다. 위의 그림 2에서 보여주는 것과 같이 콘크리트 포장의 역학적 설계방법을 이용한 누적 손상도를 산정하기 위해서 크게 교통 모듈과 환경 모듈, 포장체 모듈, 구조해석 모듈, 그리고 피로해석 모듈로 구분하여 단위시간에 대한 손상도를 산정하였다. 그리고 이를 포장 공용기간동안 모든 경우에 대하여 누적시켜 상향균열과 하향균열에 대한 최종 누적 손상도를 산정하였다.

3.1 콘크리트 포장 재료 물성

콘크리트 설계 휨강도, 각 포장 층의 탄성계수와 두께, 콘크리트 열팽창계수, 슬래브의 줄눈 간격과 두께, 그리고 복합 지지력 계수를 입력 변수로 설계하였다. 복합지지력 계수 산정은 한국형 포장설계법 보고서를 참고하여 산정하였다(국토해양부 2004). 본 연구에서는 피로해석을 보다 손쉽게 하기 위해 콘크리트 재료의 시간 의존적인 특성은 배제하였다.

3.2 환경하중

온도하중에 의한 컬링응력을 결정하기 위해서는 하중입력 변수인 온도차이가 있어야 한다. 이를 얻기 위하여 측후소 76개 지역의 국내 기상자료 데이터베이스를 갖는 베타버전의 한국형 포장설계 프로그램을 사용하였는데, 설계프로그램 내에 서브프로그램으로 포함되어 있는 포장온도 예측 프로그램(박희문 외 2004)을 사용하여 월별 포장온도를 예측하였다. 본 연구에서 사용한 온도예측 프로그램은 하루 중 매 시간마다 슬래브의 깊이에 따라 포장의 온도를 비선형으로 예측하므로 Mohamed와 Hansen이 제안한 모형(1996)을 사용하여 등가선형 온도차이로 환산하였다. 또한 Jeong 등(2010)이 ACI 209R-92 건조수축 예측 모형을 기반으로 현장계측을 통해 제안한 건조수축 등가온도차 모형의 건조수축에 관한 영향을 등가 온도차이로 산정하여 와핑(Warping)을 고려할 수 있도록 하였다. 건조수축과 동시에 유발되는 크리프에 의한 응력감소는 박정우 등(2009)이 제시한 응력감소 모형을 사용하여 모형에 반영하였다.

3.3 교통하중

현재 국내의 고속국도 및 일반국도의 통합차종분류는 모든 차종에 대하여 12종으로 분류하고 있다. 본 연구에서는 교통하중을 결정하기 위하여 교통량 조사 차종 분류 가이드(국토해양부, 2006)와 고속국도 차종별 축하중 분포(국토해양부, 2004)를 참고하였다. 피로손상해석을 보다 간편히 하기 위해 12종 축 별 하중분포 중 90%에 해당하는 하중을 대표 하중으로 선정하여 해석에 반영하였다.

3.4 구조해석

콘크리트 포장의 구조해석은 예측된 콘크리트 슬래브의 깊이별 온도와 건조수축 등가 온도차를 이용하여 상·하부의 온도 차이를 계산한 후 컬링의 형태를 판단하여 최대 인장응력이 발생하는 위치를 결정하였다. 본 연구에서는 정길수(2008)의 콘크리트 포장 응력 회귀식을 사용하여 온도하중과 차륜하중에 의하여 슬래브의 상·하부에 발생한 최대 인장응력을 각각 계산하였다.

3.5 피로파손해석

한국형 포장 설계법 프로그램에서는 포장 두께에 따라 온도의 범위를 각각 다르게 하여 상향컬링, 하향컬링, 컬링없음의 3가지 형태로 포장 형태를 구분하였다. 그러나, 본 연구에서는 위의 현상을 근거로 온도구배가 0 이하로 형성되면 하향균열(Top-down) 손상으로 판단하고, 반대로 온도구배가 0을 초과하면 상향균열(Bottom-up)로 판단하여 환경하중이 시간에 따라 미치는 영향을 더욱 정밀하게 분석하였다. 또한, 앞서 제시

하였던 모형 식 1의 독립변수인 응력-강도비 S 와 최소응력 최대응력비 R 를 계산하여, 피로수명 N_f 산출하였다. 여기에 방향계수, 차로계수, 시간계수, 차중비율을 곱해 앞서 제시하였던 논리에 근거하여 20년 동안 각각의 누적 손상(Cumulated Damage)을 예측하였다.

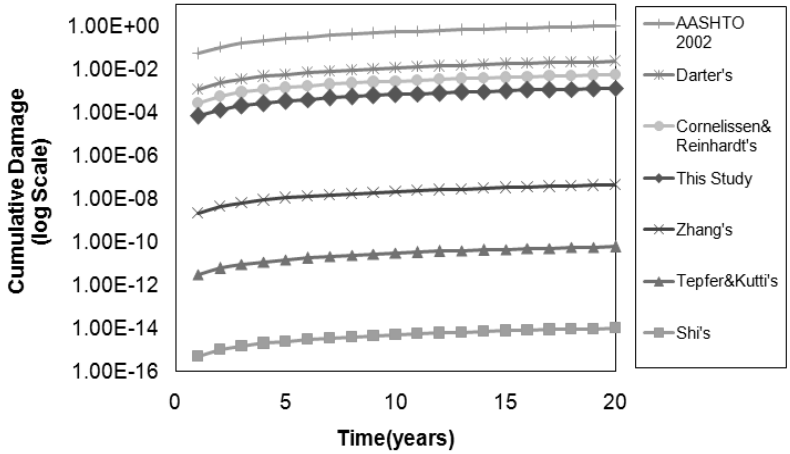
4. 피로누적손상 회귀모형의 적용 및 비교

기존 연구를 통해 제안된 모형들과의 차이를 비교 및 평가하기 위하여 앞에서 설명한 역학적 설계 방법 논리에 따른 콘크리트 포장 누적피로손상도 해석 프로그램을 구현하였고, 각각의 피로모형을 적용하였다. 본 연구에서 적용한 피로 모형은 표 1과 같다.

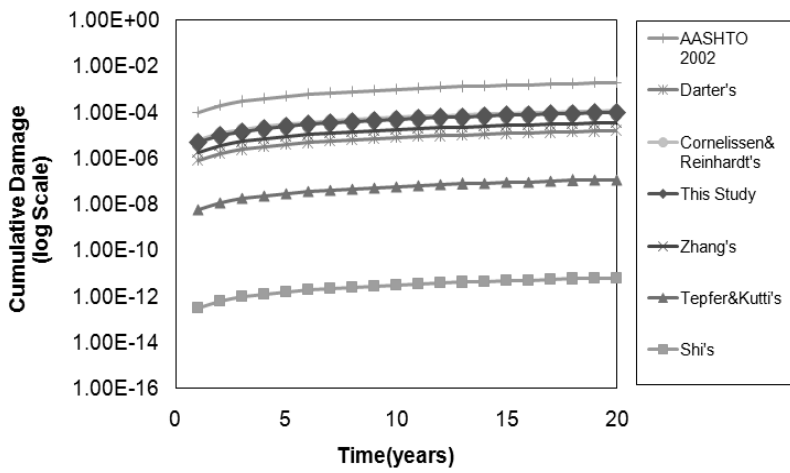
표 1. 손상도 예측 결과 비교를 위한 피로모형

연구	피로모형식
Darter(1977)	$\log_{10}N = 17.61 - 17.61(S)$
Cornelissen & Reinhardt(1984)	$\log N = 14.81 - 14.52 \frac{\sigma_{\max}}{f_c} + 2.79 \frac{\sigma_{\min}}{f_c}$
Tepfer & Kutti(1979)	$S = 1 - 0.0690(1 - R) \log N$
Shi(1993)	$S = AN^{-0.0422(1-R)}$ 여기서, A = 생존확률에 따른 계수
Zhang(1996, 1997)	$S = C_f [1 - 0.087(1 - R) \log N]$ 여기서, C_f = 하중 재하속도에 따른 상수
AASHTO 2002	$\log N = (-S^{-5.367} \log(1 - P) / 0.0032)^{0.2276}$ 여기서, P = 파괴확률 50%를 고려한 상수
Developed Model	$\log(N_f) = 13.291 - 12.431(S) + 2.677(R)$

각 피로 모형에 따른 누적 피로손상도를 비교 분석하기 위한 프로그램의 입력변수 중 일평균 교통량(AADT)은 교통량정보시스템 사이트에서 2000년부터 2007년까지의 교통량 통계연보를 참고하였고, 콘크리트 포장 구간에서 가장 큰 교통량을 나타내는 지역인 서울외곽순환도로 학의~관교JCT 8km구간의 교통량 및 차중별 분포를 해석에 선택하였다. 그리고 방향계수 및 차로계수는 원창연(2008)을 참고하여 결정하였다. 포장 구조는 국내 고속도로 준능 콘크리트 포장에 적용되는 두께 300mm, 줄눈 간격 6m를 적용하였고, 린콘크리트는 두께 150mm를 적용하였다. 콘크리트의 탄성계수는 구조해석에 일반적으로 사용되는 28GPa를 적용하였고, 시간에 따른 탄성계수의 증가는 고려하지 않았다. 또한, 열팽창계수는 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 적용하였으며, 콘크리트의 휨강도는 도로공사표준시방서에서 제시하는 4.5MPa를 적용하였다. 하중 전달률은 85%로 정하였고, 계절에 따른 영향은 고려하지 않았다. 기층, 보조기층 및 노상의 복합지지력계수는 한국형 포장 설계법 연구에서 제안한 결과를 참고하여 417.90MPa/m를 적용하였으며, 계절에 따른 지지력에 변화는 고려하지 않았다. 환경조건에 관련한 입력변수는 앞서 설명한 것과 같이 한국형 포장설계법 서브프로그램을 사용하여 각 계절에 따라 각 시간별 영향이 고려되도록 결정하였다.



(a) 하향균열 (Top-Down)



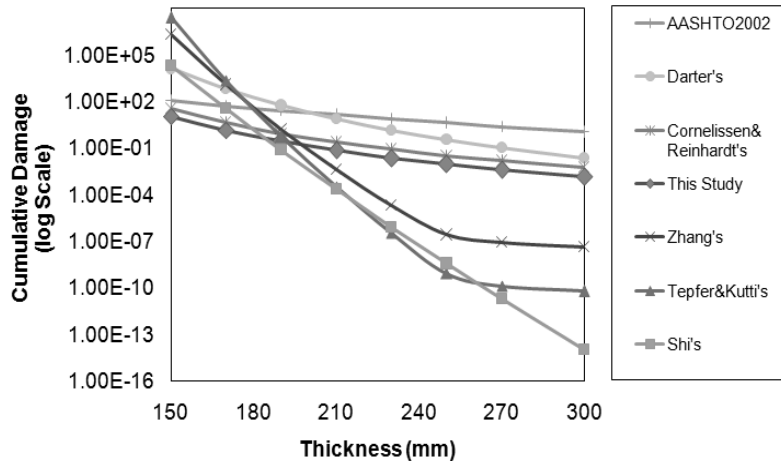
(b) 상향균열 (Bottom-Up)

그림 3. 모형별 누적피로손상도 해석 결과

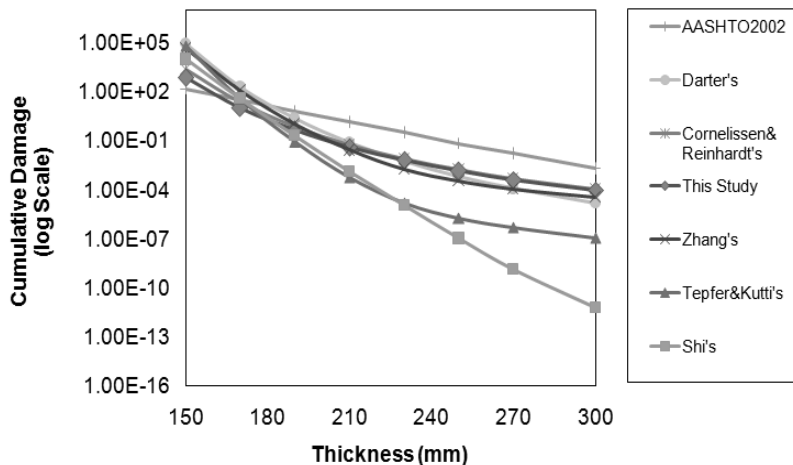
위 그림 3과 같이 누적피로손상도 해석 프로그램을 사용하여 포장 공용기간 20년에 대한 피로모형의 하향균열(Top-Down) 피로손상도 및 상향균열(Bottom-Up) 피로 손상도를 산출하였다. 앞에서 언급했던 입력변수에 대한 누적피로손상도 해석 결과, 상향균열보다 하향균열의 누적손상도가 크게 나왔으며, 약 4정도의 Log 간격의 차를 나타내었다. 피로 모형간의 손상도 예측은 AASHTO 2002 모형의 예측결과가 가장 크게 산출되었으며, Shi의 모형이 가장 작게 나타났다. 본 연구에서 개발된 모형은 Cornelissen & Reinhardt가 제안한 모형과 가장 유사한 결과를 나타냈으며, 상향균열의 경우 누적손상도가 Cornelissen & Reinhardt의 모형에 비하여 다소 적게 산출되는 경향을 나타내었다. AASHTO 2002 피로모형의 경우 포장 두께 300mm, 줄눈간격 6m에 대한 누적손상도가 1 이상을 예측하였는데, 이러한 결과는 AASHTO 2002 MEPDG 프로그램에서 유사한 결과를 나타내었다. 국내의 경우 고속도로 대부분의 포장이 두께 300mm, 줄눈 간격이 6m이며, 이에 대한 공용성이 충분히 입증된 것을 보면, 현장 시험을 기반으로 제안된 AASHTO 2002 피로 모형은 상당히 보수적인 피로모형이라 사료된다. Tepfer & Kutti와 Shi 등이 제안한 모형은 앞에서 언급한 것과 같이 실내 실험

조건의 범위에서는 상당히 유사한 피로수명을 예측하였다. 하지만, 실험조건을 벗어나면 R의 변화에 대하여 피로수명의 변화가 매우 민감하여 결국 매우 낮은 수준의 누적피로손상도 결과를 나타냈다. 위 두 모형을 역학적 포장 설계논리에 적용할 경우 매우 낮은 누적피로손상도를 산출하며, 이것은 결국 매우 과소한 설계를 유발 시킬 수 있다.

5. 두께에 따른 민감도 분석



(a) 하향균열 (Top-Down)



(b) 상향균열 (Bottom-Up)

그림 4. 포장 두께에 따른 모형별 누적피로손상도 해석 결과

포장 두께를 150mm에서 300mm까지 변화 시켜가며 각 모형 별 20년 피로 누적손상도를 산출하였고, 그 결과는 그림 4와 같다. 하향균열의 경우 개발모형은 AASHTO 2002, Dater, Cornelissen & Reinhardt의 모형과 유사한 민감도를 나타냈으며, Zhang, Tepfer & Kutti 그리고 Shi의 모형이 유사한 경향을 나타내었다. 본 연구에서 개발한 모형은 R을 고려함에도 불구하고 R을 고려하지 않는 모형과 같이 두께에 따른 민감도가 과

대하지 않았으나, Zhang, Tepfer & Kutti 그리고 Shi의 모형은 두께 변화에 따라 매우 민감한 경향을 보였다. 개발모형, Cornelissen & Reinhardt, Tepfer & Kutti 그리고 Shi의 모형은 두께 약 180mm에서 누적피로손상도가 1을 나타냈다. Zhang의 모형은 200mm, Dater의 모형은 240mm, 그리고 AASHTO 2002 모형은 300mm부터 누적피로손상도가 1을 나타냈다. 상향균열의 경우에도 이와 유사한 경향을 보였는데, 약 200mm까지는 모든 모형이 유사한 기울기를 가지며 변화 하였지만, Zhang, Tepfer & Kutti 그리고 Shi의 모형은 그 이후 두께 변화에 매우 민감하였다. 또한, 개발모형, Cornelissen & Reinhardt, Tepfer & Kutti 그리고 Shi의 모형은 두께 약 180mm에서 누적 피로손상도가 1을 나타냈다. Zhang의 모형과 Dater의 모형은 200mm, 그리고 AASHTO 2002 모형은 220mm에서 부터 누적피로손상도가 1을 나타냈다.

6. 결 론

콘크리트 포장에 교통하중이 재하되기 전에 도입되어 있는 환경하중의 영향을 합리적 수준으로 고려할 수 있는 피로모형을 개발하기 위해, 선행 연구에서는 여러 선행 연구자들의 피로실험 결과를 수집하여 환경하중의 영향을 고려하는 새로운 피로 회귀모형을 개발하였다. 그리고 본 연구에서는 역학적 설계 방법 논리에 따른 콘크리트 포장 누적 피로손상도 해석 프로그램을 구현하였고, 각각의 피로모형을 적용하여 보았다. 또한 두께에 따른 민감도 분석을 실시 하였고 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 콘크리트 포장 슬래브의 피로거동은 교통하중보다는 환경하중에 의해 더 큰 영향을 받으므로 역학적-경험적 설계과정에서 사용되어지는 피로모형은 최소응력의 영향을 고려해야 함을 알 수 있었다.
- 2) 국내에서 시공되고 있는 폭 3.6m, 줄눈간격 6m, 두께 300mm의 콘크리트 포장 슬래브에 대한 누적피로손상도 해석 결과, 상향균열 보다 하향균열의 누적손상도가 크게 나왔으며, 약 4정도의 Log 간격의 차를 나타내었다.
- 3) 국내 콘크리트 포장 슬래브에 대한 각 피로모형 별 누적피로손상도를 산출한 결과 AASHTO 2002 피로모형을 제외한 나머지 모형의 누적피로손상도의 결과가 다소 낮은 수준에서 형성되었다. 이러한 결과는 AASHTO 2002는 현장 데이터를 기반으로 설계되었지만, 나머지 모형은 콘크리트 포장의 현장 상태가 20년의 공용기간 동안 시공직후의 상태와 같이 유지된다는 가정에 기초를 두었기 때문이라 결론지었다.
- 4) 본 연구에서 개발한 모형은 최대-최소응력비인 R을 고려함에도 불구하고 R을 고려하지 않는 모형과 같이 두께에 따른 민감도가 과대하지 않음을 확인하였고, 역학적 설계에 개발모형의 적용이 타당함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Aas-Jakobsen, L. (1970). "Fatigue of Concrete Beams and Columns." *Bulletin No.70-1*, Division of Concrete Structures, NTH, Trondheim.
- [2] Cornelissen, H. A. W. and Reinhardt, H. W. (1984). "Uniaxial Tensile Fatigue Failure of Concrete Under Constant-Amplitude and Programmed Loading.", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36 No. 129, 216-226.
- [3] Darter, M. I. (1977). *Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Volume 1: Development of Design Procedures*, Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-77-III.
- [4] Mohamed, A. R. and Hansen, W. (1996). "Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling stress in Concrete Pavement." *Transportation Research Record 1568*, TRB, National Research Council, Washington, DC, 65-71.
- [5] Murdock, J .W. and Kesler, C. E. (1958), "Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams." *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.30, No.2, 221-231.
- [6] Shi, X. P., Fwa, T. F., and Tan, S. A. (1993). "Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete.", *ACI*

- Material Journal*, Volume 90, No 5.
- [7] Tepfers, R. and Kutti, T. (1979). "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete." *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 76, 635-652.
- [8] Zhang, B., Phillips, D. V., and Wu K. (1996). "Effect of Loading Frequency and Stress Reversal on Fatigue Life of Plain Concrete.", *Magazine of Concrete Research*, 48, No. 177, 361-375.
- [9] Darter, M.I., Becker, J.M., Snyder, M.B., and Smith, R.E, *Portland Cement Concrete Pavement Evaluation System (COPES)*, NCHRP report 277, Transportation Research Board, 1985
- [10] Jeong, J.H., Lim, J.S., Sun, R.J., and Zollinger, D.G. (2010) Modeling of Differential Shrinkage for Pavement Design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, in press
- [11] 건설교통부. (2004). 콘크리트 포장 설계법 개발, 한국형 포장 설계법 1단계 3차년도 최종 보고서, 15-83.
- [12] 건설교통부. (2004). 아스팔트 포장 설계법 개발, 한국형 포장 설계법 1단계 3차년도 최종 보고서, G1 29-60.
- [13] 김동호, 최성용, 윤경구(2005). "등가 피로수명에 의한 콘크리트의 피로해석 및 모델.", 대한토목학회 논문집, 제 25권, 제 3A호, 505-510.
- [14] 박병희 (1984), 콘크리트의 피로강도 해석을 위한 수정 Goodman 도표의 실험적 도출, 석사학위 논문, 연세대학교.
- [15] 원대연 (1988), 환경인자가 무근콘크리트의 피로특성에 미치는 영향, 석사학위 논문, 연세대학교.
- [16] 박정우, 정영도, 임진선, 정진훈 (2009) "콘크리트 슬래브 건조수축응력 감소에 관한 초기 연구", 한국도로학회 논문집, 제 11권, 제 4호, pp. 87~94.
- [17] 원대연 (1988), 환경인자가 무근콘크리트의 피로특성에 미치는 영향, 석사학위 논문, 연세대학교.
- [18] 임진선 (2009), 환경하중 및 차량빈도를 고려한 확률론적 콘크리트 포장 피로모형의 개발, 석사학위 논문, 인하대학교
- [19] 전성일 (2002), Fatigue Analysis of Pavement Concrete by Split Tension Fatigue Test, 석사학위 논문, 강원대학교
- [20] 원창현 (2008) 시간교통량 분포를 고려한 고속도로 설계시간 서비스 목표계수 개발, 박사학위 논문, 아주대학교
- [21] 교통량 통계연보(2007), 교통량정보제공시스템, <http://www.road.re.kr>