



환경하중을 고려한 콘크리트 포장 피로모형 연구

A Study on Fatigue model of Concrete Pavements Considering Environmental Loading

임진선*
Lim, Jin Sun

정진훈**
Jin Hoon-Park

박희문***
Hee Mun-Kim

김연복****
Kim, Yeon Bok

1. 서론

콘크리트 포장의 수명에는 기층의 종류, 길어깨의 종류, 포장의 두께 그리고 기후조건 등 다양한 인자들이 영향을 미친다. 줄눈 콘크리트 포장에 발생하는 응력은 교통하중과 환경하중에 의한 것으로 대개 콘크리트의 항복응력보다 훨씬 적은 수준이 발생하지만, 충분한 강도발현 이전에 발생한 콘크리트 포장의 초기 균열 및 미세균열의 장기적인 진전에 의한 파괴의 주된 요인은 교통 및 환경하중의 반복에 의한 피로파손이라 할 수 있다. 최근 50 여 년 동안, 많은 학자들이 콘크리트 포장의 파손을 유발시키는 최대 인장응력과 하중 반복횟수 사이의 관계를 파악하고자 노력하였다. 위와 같은 연구를 통하여 콘크리트 포장 피로강도의 40~50% 미만의 응력은 피로파손에 영향을 미치지 않음이 규명되었다(Fordyce, P. 와 Yrjanson, W. A, 1969).

최근에 와서 콘크리트 포장의 설계방법은 기존의 경험적 설계방식에 의한 포장의 두께 설계에서 벗어나, AASHTO 2002 포장 설계법과 같은 역학적-경험적 설계방법으로 변화하고 있다. 이와 같은 역학적-경험적 설계방법은 교통하중과 환경하중, 포장재료 등에 관한 다양한 변수에 대하여 역학적인 방법으로 응력, 변형율, 처짐 등을 산출하고, 경험적으로 개발된 모형으로 공용성을 예측하고 현장조건에 맞도록 보정하여 적정 요구수준의 공용수명을 가지는 포장을 설계하는 방법을 말한다. 이 역학적 경험적 설계방법은 기존의 설계 방법에 비하여 다소 복잡하여 간단히 포장의 단면을 결정하지 못하지만, 다양한 하중조건 하에서 여러 가지 재료와 단면 구조를 갖는 포장을 설계 할 수 있으며, 지역별 기상조건을 반영하므로 해당 지역에 적합한 포장 단면을 결정할 수 있는 장점을 지닌다. 또한 같은 지역에서도 여러 가지 대안의 포장 단면을 설계할 수 있는 장점을 지닌다.

역학적-경험적 설계과정에서 포장의 공용수명 즉 설계수명을 결정하는 가장 중요한 부분은 설계과정에 사용되는 피로모형이라 할 수 있다. 기존의 전통적인 피로모형은 응력-강도비 S와 피로수명 N의 관계를 S-N선도에 도시하는 모형이 일반적이지만, 이는 환경하중이 고려되는 콘크리트 포장에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 콘크리트 포장의 피로모형에 대한 기존의 연구결과를 적극 활용하여 교통하중 뿐만 아니라, 환경하중을 합리적으로 고려할 수 있고 더 나아가 차량의 속도에 의한 영향까지 반영할 수 있는 피로모형을 개발하여 역학적-경험적 설계 논리에 합리적으로 적용하는 것을 목적으로 한다.

2. 환경하중을 고려한 피로모형

* 인하대학교 토목공학과 석사과정-032-873-5332 (E-mail : coreplay@hanmail.net)
** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사-032-860-7574 (E-mail :jhj@inha.ac.kr)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 031-910-0323 (E-mail :hpark@kict.re.kr)
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 책임연구원 · 공학박사-031-910-0310 (E-mail :ybkim@kict.re.kr)



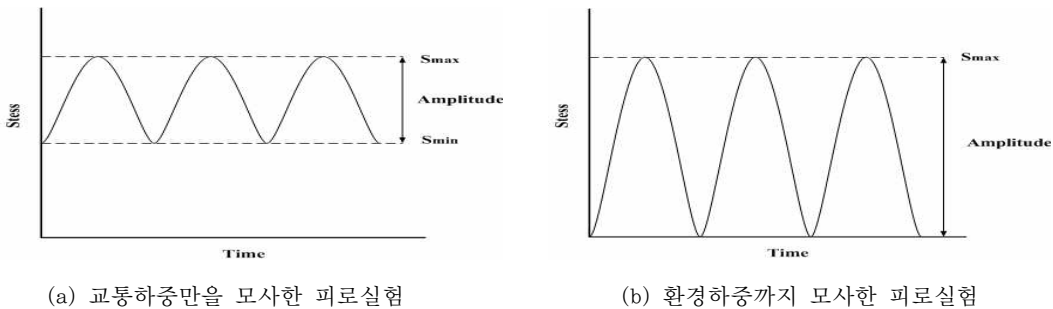
기존에는 현장에서 포장의 공용성에 영향을 미치는 파손을 장기적으로 관찰하고 이에 영향을 미치는 각종 인자들을 파악하여 파손과의 관계를 통계적 분석하고 모형으로 나타내어 설계에 활용하여 왔다. 환경하중은 교통하중에 비하여 그 중요성이 매우 과소평가되어 왔고 포장에 미치는 역학적 역할도 명확히 규명되지 않았기 때문에 현재까지도 환경하중 보다는 교통하중 위주로 콘크리트 포장의 설계가 이루어지고 있다. 온도 및 습도에 의한 컬링 및 와핑 현상은 이미 오래 전부터 보고되었으나, 이러한 환경하중에 의하여 포장체에 발생하는 응력을 역학적으로 해석하는 방법은 근래에 와서야 여러 연구자에 의하여 제안되고 있다 (Jeong 과 Zollinger, 2004; Wells, S. A. 외 2006). 콘크리트 포장의 공용성 모형에도 환경하중을 고려해야 할 필요가 있으며, 피로모형의 경우에도 환경하중에 의하여 발생하는 응력을 최소응력으로 사용하여 피로수명을 보다 정확하게 예측할 수 있다.

기존 대부분의 피로모형은 <그림 1>-(a)와 같이 최소응력을 고려하지 않고 최대응력만을 발생시키면서 개발되었기 때문에 환경하중을 전혀 고려할 수 없다. 이러한 일반적인 피로모형인 S-N 모형은 동적하중에 의하여 부재에 발생하는 최대응력의 정적강도에 대한 비, 즉 응력-강도비 S와 파괴시의 재하 횟수인 피로수명 N과의 관계를 Wohler곡선으로 식 (1)과 같이 표현된다(한국형포장설계법개발과 포장성능 개선방안 연구 2002).

$$S = \frac{S_{max}}{f} = a + b \cdot \log_{10} N \quad (1)$$

- 여기서, S : 동적하중에 의한 최대응력과 정적강도의 비
- f : 정적 극한강도 (MPa)
- S_{max} : 동적하중에 의한 최대응력 (MPa)
- N : 피로수명 (회)
- a, b : 실험을 통해 결정되는 계수

하지만, 실제 콘크리트 포장은 환경하중에 의한 응력이 도입된 상태에서 교통하중에 의한 응력이 추가로 도입되기 때문에 피로모형을 합리적으로 개발하기 위해서는 <그림 1>-(b)와 같이 최소응력(S_{min})이 도입된 후 추가의 응력이 도입되어 최대응력(S_{max})에 도달하는 논리의 피로모형이 제시되어야 한다. 이에 관하여 Murdock과 Kesler는 반복하중 재하 시 발생하는 최소응력과 최대응력의 비 $R(=S_{min}/S_{max})$ 이 콘크리트의 피로수명에 영향을 미친다고 최초로 보고하였다 (1958). Murdock과 Kesler의 연구(1958) 이후, Aas-Jackobsen (1970), Tepfer와 Kutti(1979)를 비롯한 많은 연구자들은 최소-최대응력비 R이 콘크리트 피로수명에 매우 중요한 영향을 미친다고 보고하였다.



<그림 1> 환경하중을 고려하기 위한 피로실험의 재하방법



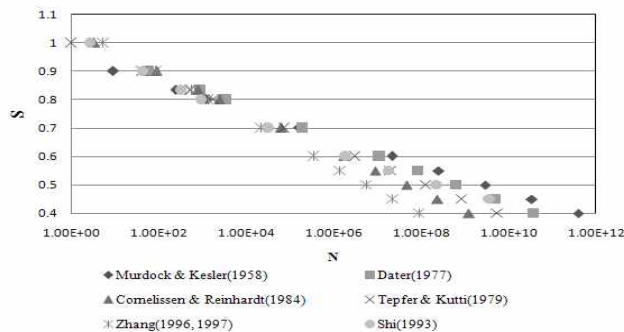
2.1 모형개발을 위한 데이터 추출 및 회귀분석

콘크리트의 피로실험을 통하여 개발된 수많은 피로모형들은 그 경향이 서로 비슷하지만 콘크리트의 재료, 시편의 크기, 실험방법 등에 영향을 받으므로 동일한 결과를 예측하지 못 할뿐만 아니라 동일한 조건 하에서 실험을 하더라도 큰 편차가 발생하게 된다. 따라서 기존에 개발된 각종 피로모형을 검토하여 50%의 파괴 확률, 영에 가까운 최소-최대응력비, 약 20Hz의 하중 재하빈도의 일반적인 조건들이 실험에서 이미 반영되었거나 또는 해석에서 반영할 수 있는 모형을 선택하고 각 모형으로부터 6개씩의 데이터를 추출하여 냈다. 예를 들면, 설계의 안전측을 고려하여 낮은 파괴확률에 대하여 개발된 Darter의 수정 피로모형과 PCA의 피로모형 등은 대상에서 제외되었다. 또한, Cornelissen과 Reinhardt의 피로모형(1984) 중 코팅되어 습윤상태에 있는 시편을 실험하여 개발된 피로모형과 같이 특정한 재료특성을 대상으로 개발된 모형은 제외되었다. <표 2>에서는 데이터를 추출을 위하여 선택된 피로모형들을 나열하였다.

<표 1> 데이터 추출을 위한 피로모형

연구자	피로모형	실험조건
Murdock과 Kesler(1958)	$S(\%) = -4.71 \log(N) + 94.5$	휨 실험, P=50%, $S_{min} = 0.13 \sim 0.18$
Darter(1977)	$\log_{10}N = 17.61 - 17.61(R)$	휨 실험, P=50%, $S_{min} = 0$
Cornelissen과 Reinhardt(1984)	$\log N = 14.81 - 14.52 \frac{S_{max}}{f_c} + 2.79 \frac{S_{min}}{f_c}$	휨 실험, $S_{min} = 0$
Tepfer와 Kutti(1979)	$S = 1 - 0.0690(1 - R) \log N$	휨 실험, $S_{min} = 0$
Shi(1993)	$S = AN^{-0.0422(1-R)}$	휨 실험, P=50%, $S_{min} = 0$
Zhang(1996, 1997)	$S = C_f [1 - (1 - R')\beta \log N]$	휨 실험, $S_{min} = 0$

파괴확률 P = 50%, 최소-최대응력비 R = 0, 하중재하빈도 20Hz의 동일한 조건 하에서 모형개발을 위하여 선택된 각 피로모형을 S-N선도에 나타내면 <그림 2>와 같다. 1.0에서 0.6사이의 응력-강도비에서 각 모형들은 비슷한 피로수명을 나타내었으나 응력-강도비가 0.6 아래로 내려가면서 각 모형 간의 피로수명의 차이는 점점 커지는 경향을 나타내었다.



<그림 2> 각 피로모형으로부터 추출된 결과

통계분석 프로그램인 SPSS를 사용하여 각 모형으로부터 추출된 데이터에 대한 회귀분석을 수행하여 현장의 데이터로 모형의 보정이 용이한 장점을 갖는 지수식 형태의 피로모형이 식 (2)와 같이 개발되었으며, 이 경우 계수 A와 B의 값은 각각 1.054948와 -0.0043594로 결정되었다.

$$S = 1.054948N^{-0.0043594} \tag{2}$$

2.2 새 피로모형의 제시

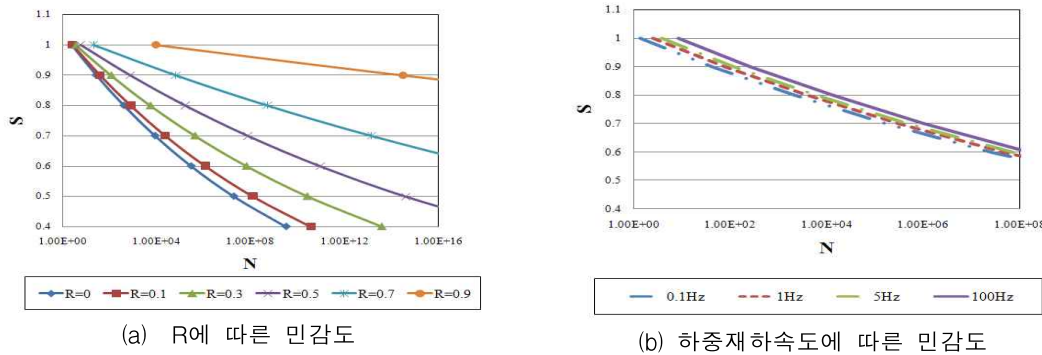
본 연구에서 개발된 식 (2)의 기본적인 형태의 피로모형에 Shi의 등가 피로수명 기반의 피로모형(1993)과 동일한 방식으로 최소-최대응력비 R을 반영하고 Zhang의 피로모형(1996, 1997)과 동일한 방식으로 재하 빈도계수 C_f 를 반영하여 식 (3)과 같이 환경하중과 하중 재하빈도를 고려할 수 있도록 하였다. 하중의 재하속도를 나타내는 빈도계수 C_f 의 모형도 각 피로모형으로부터 추출된 데이터에 대하여 회귀분석을 수행하여 피로모형의 형태와 동일하게 지수식의 형태로 식 (4)와 같이 제시되었다.

$$S = 1.054948 C_f N^{-0.043594(1-R)} \tag{3}$$

$$C_f = 0.937 \cdot f^{0.009} \tag{4}$$

여기서, f는 하중의 재하빈도(Hz)이다.

그림 3은 본 연구에서 개발된 피로모형이 최소-최대 응력비와 하중 재하빈도에 따라 변화하는 정도인 민감도를 나타내었다. <그림 3>-(a)에서 보듯이, 최소-최대 응력비 R이 증가할수록 피로수명도 증가하였는데, 이는 총 하중이 동일한 경우, 큰 환경하중이 작용한 상태에서 작은 교통하중이 추가로 가해질 때보다는 작은 환경하중이 작용한 상태에서 큰 교통하중이 가해질 때 피로파손이 더 쉽게 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 하중 재하빈도가 높을수록 <그림 3>-(b)와 같이 피로수명이 증가하였는데, 이는 차량의 속도가 빠를수록 피로파손이 잘 발생하지 않는 반면, 차량의 속도가 느릴수록 피로파손이 쉽게 발생한다는 것을 의미한다. 하지만, 하중의 재하빈도를 설계에 제대로 반영하기 어려우며, 향후 차량의 제원과 속도 등을 차중에 따라 구체적으로 분석하여야 할 것으로 판단된다.



<그림 3> 제안된 모형의 인자에 따른 민감도

3. 개발된 피로모형의 적용

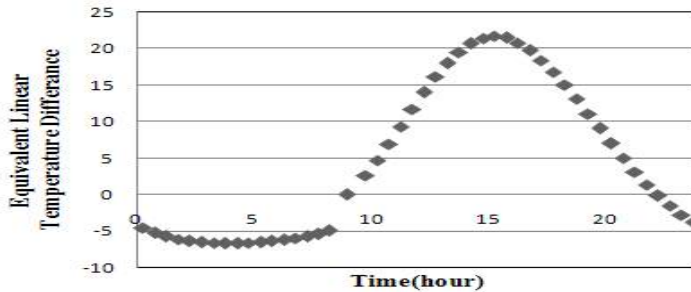
국내의 줄눈 콘크리트 포장 슬래브는 일반적으로 두께 300mm, 폭 3.6m, 길이 6.0m의 크기를 갖고, 다웰바 및 타이바로 서로 결속되면서 시공이 이루어진다. 이러한 국내의 일반적인 슬래브에 환경하중 및 교통하중이 재하된 경우에 대하여 본 연구에서 개발한 모형을 적용하여 피로수명을 예측하였고, 기존 피로모형과의 차이를 검토하였다.

3.1 환경하중 및 교통하중 결정

온도하중에 의한 쉐어링력을 결정하기 위하여 베타버전의 한국형 포장설계 프로그램에 포함되어 있는 포장온도



예측 프로그램(박희문 외 2004)과 측후소 76개 지역의 국내 기상자료의 데이터베이스를 사용하여 월별 포장온도를 예측하였다. 포장의 온도는 슬래브의 깊이에 따라 비선형으로 분포하였는데, Mohamed와 Hansen이 제안한 모형(1996)을 사용하여 등가선형 온도차이로 환산하였다. <그림 4>는 서울지역에서 6월에 하루동안 시간대별 슬래브 내에 발생한 등가선형 온도차이를 예측한 결과를 일례로서 보여주고 있으며, 1월부터 12월까지 예측된 등가선형 온도차이는 -10℃ ~ 22℃의 범위를 나타내었다. 양(+의 온도차이는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 높다는 것을 의미한다.



<그림 4> 예측된 슬래브 내 등가선형 온도차이의 24시간 변화 (서울 6월)

슬래브 상부가 하부보다 빠르게 건조하여 발생하는 부동의 건조수축으로 인하여 슬래브에는 재령에 따라 상향의 컬링이 점점 커지면서 상부에는 인장응력이 발생된다. 구조해석에는 부동 건조수축을 입력값으로 바로 사용할 수 없기 때문에 부동 건조수축으로 인한 슬래브 상하부 간의 변형율의 차이를 콘크리트의 열팽창계수로 나누어 등가의 온도차이로 환산하여 사용하게 된다. 현장실험 결과를 검토한 결과, 재령 1년이 지난 콘크리트 슬래브의 부동 건조수축으로 슬래브 상부와 하부 사이의 변형율에 약 150×10^{-6} 정도의 차이가 있음이 제안되었다 (Wells 2006, 임진선의 2008). 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 열팽창계수가 $1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 로 가정하여 부동 건조수축에 등가인 온도차이를 -15℃로 결정하였다.

교통하중을 결정하기 위하여 교통량 조사 차종 분류 가이드(건설교통부 2006)와 고속국도 차종별 축하중 분포(건설교통부 2004)를 참고하여 고속국도에서 운행되는 1종부터 12종까지 차량의 축 종류별 평균 축하중을 <표 2>과 같이 정리하였다.

<표 2> 차종별 축 구성 및 평균 축하중

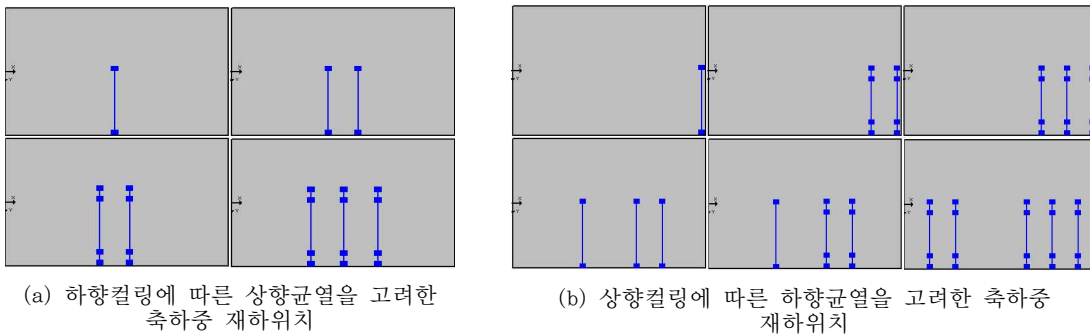
차종	평균하중(kN)			
	단축(조향축)	단축(구동축)	복축	삼축
1종	6.61	6.61	-	-
2종	44.40	81.48	-	-
3종	15.61	17.03	-	-
4종	35.26	49.69	-	-
5종	57.81	-	110.42	-
6종	54.46	53.47	100.38	-
7종	63.57	60.46	-	237.34
8종	43.40	63.02	60.68	-
9종	-	49.69	128.03	-
10종	35.27	-	112.93	-
11종	55.43	-	128.03	-
12종	53.12	-	89.38	125.58

3.2 구조해석

이상의 과정을 통하여 결정된 환경하중 및 교통하중 데이터를 3차원 유한요소 프로그램인 EverFe 2.24(Davids,

W. G. 외 1998) 입력값으로 사용하면서 구조해석을 수행하였다. EverFe 2.24는 미국의 워싱턴 대학에서 줄눈 콘크리트 포장의 구조해석을 위하여 개발한 프로그램으로서 다른 프로그램과의 비교를 통하여 이미 검증은 마친 충분히 신뢰할만한 수준의 프로그램이다 (정길수 외 2008). 또한, 이 프로그램은 줄눈 콘크리트 포장 슬래브의 구조해석만을 위하여 개발되었기 때문에 모델의 구성 및 변환이 매우 간편한 장점을 갖고 있다.

본 연구에서는 표층과 기층의 물성, 노상지지력, 슬래브와 기층 사이의 마찰력, 다웰바와 타이바, 그리고 골재맞물림에 관한 입력변수는 프로그램에서 제안하는 기본값을 사용하고, 환경하중과 교통하중만을 독립변수로 하여 구조해석을 실시하였다. 환경하중의 경우, 온도로 인한 등가온도차이는 국내 지역 및 시기에 따라 계산된 $-10^{\circ}\text{C}\sim 22^{\circ}\text{C}$ 를 사용하였고, 건조수축으로 인한 등가온도차이를 -15°C 를 사용하였다. 따라서, 온도와 건조수축의 영향을 모두 고려한 등가온도차이의 범위인 $-25^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ 를 환경하중으로 구조해석에 입력값으로 사용하여 최소응력 S_{\min} 을 계산하였다. 환경하중에 의한 최소인장응력은 하향컬링일 때 슬래브 하부에서 $0.0\text{MPa}\sim 0.6\text{MPa}$, 상향컬링일 때 슬래브 상부에서 $0.0\text{MPa}\sim 2.6\text{MPa}$ 의 범위 내에서 조건에 따라 다양하게 계산되었다. 온도와 건조수축의 환경하중으로 인한 최소응력에 교통하중으로 인한 응력이 추가되면 최대응력 S_{\max} 이 계산된다. <그림 5>는 최대응력 S_{\max} 를 계산하기 위하여 슬래브 내의 다양한 위치에 차종별 축하중을 재하한 모습을 나타내었다.



<그림 5> 컬링형태를 고려하여 결정된 축하중 재하위치

구조해석을 통하여 상향균열을 발생시키는 슬래브 하부에서의 인장응력을 계산한 결과 $0.1\text{MPa}\sim 1.1\text{MPa}$ 범위의 최대응력이 계산 되었고, 하향균열을 발생시키는 슬래브 상부에서의 인장응력의 경우 $0.1\text{MPa}\sim 4.2\text{MPa}$ 범위의 최대응력이 계산되었다. 상향균열의 경우에는 $0.19\sim 0.97$ 사이의 최소-최대응력 비가 발생할 수 있으며, 하향균열의 경우에는 $0.09\sim 0.92$ 사이의 최소-최대응력비가 발생할 수 있는 것으로 계산되었다. 상향균열해석 시 최대응력의 범위가 하향균열해석의 범위보다 작은 이유는 앞에서 언급한 것 처럼 환경하중에 의한 상향컬링이 고려되었기 때문이며, 또한 각 차종별 축하중 또한 평균값으로 해석했기 때문이다.

<표 3> 컬링형태에 따른 슬래브의 인장응력 및 R의 범위 (슬래브 크기 : L=6m, B=3.6m, t=300mm)

	컬링형태	최소응력 범위	최대응력 범위	R의 범위	위치
상향균열해석	하향컬링	$0.0\text{MPa}\sim 0.6\text{MPa}$	$0.1\text{MPa}\sim 1.1\text{MPa}$	$0.19\sim 0.97$	슬래브 종방향 측면 중앙 하부
하향균열해석	상향컬링	$0.0\text{MPa}\sim 2.6\text{MPa}$	$0.1\text{MPa}\sim 4.2\text{MPa}$	$0.09\sim 0.92$	슬래브 종방향 측면 중앙 상부

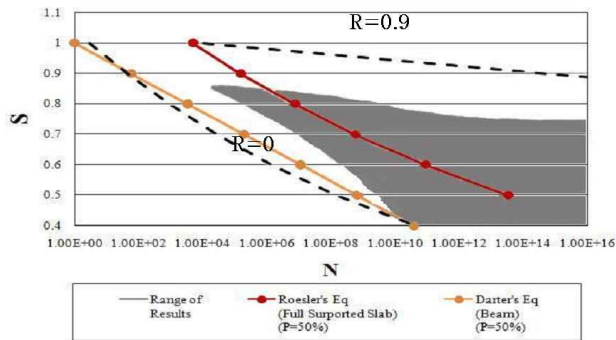
3.3 기존 모형과의 비교

환경하중과 교통하중을 변수로 하여 3차원 유한요소 해석으로 계산된 최소 및 최대응력을 본 연구에서 제안된 식 (3)의 피로모형에 입력값으로 사용하여 상향균열에 관한 피로해석과 하향균열에 관한 피로해석을 각각 수행하였다.



콘크리트의 휨인장강도는 5MPa로 가정하였고, 콘크리트 포장이 대부분 고속 주행의 도로에 사용되는 점을 감안하여 하중 재하빈도는 $5Hz$ 의 비교적 낮은 값으로 가정하고 해석하였다.

피로해석을 수행한 결과를 <그림 6>에 나타내었다. 환경하중과 교통하중을 입력값으로 하여 구조해석으로 계산한 최소-최대응력비 R 별 응력-강도비 S에 따른 피로수명의 분포범위는 <그림 3>-(a)에서 이상적으로 나타낸 범위보다는 좁게 나타났다. 최소-최대응력비가 0에 가까울수록 피로수명이 감소하였으며 최소-최대응력비가 1에 가까워질수록 피로수명이 증가하는 것으로 예측되었다. 이는 동일한 크기의 총하중에서 환경하중의 비율이 커질수록 피로수명이 증가하는 것을 의미한다. 본 연구에서 개발된 모형을 기존의 대표적인 피로모형인 Darter의 모형과 비교할 때, 동일한 응력-강도비에서 피로수명을 더 길게 예측하는 것으로 나타났다. 개발된 모형은 파괴확률 50%를 갖는 Roesler의 피로모형(1998)과 유사한 결과를 나타내었다. Roesler의 피로모형은 완전히 지지된 실물 크기의 콘크리트 슬래브에 대한 피로실험을 통하여 개발된 모형이므로 본 연구에서 개발된 모형은 현장에서 발생하는 피로균열을 예측하기에 적합한 것으로 판단된다.



<그림 6> 개발된 모형과 기존 모형의 예측결과 비교

환경하중 및 교통하중에 대한 구조해석 결과, 상향균열을 발생시키는 경우에 대하여 슬래브 하부에서 계산된 최대응력 S_{max} 은 대부분 강도의 50% 미만으로 계산되어 피로파손의 발생에 영향을 별로 미치지 않는 것으로 나타났다. 하향균열을 발생시키는 경우에 대하여 슬래브 상부에서 계산된 응력-강도비는 비교적 0에서 1 사이에 고르게 분포하여 피로파손은 주로 하향균열에 의하여 발생하는 것으로 예상되었다.

5. 결론

본 연구는 콘크리트 포장 슬래브의 역학적-경험적 설계를 위한 피로모형을 개발하기 위하여 문헌조사를 통하여 콘크리트의 피로파손에 영향을 미치는 다양한 인자를 검토하였으며, 역학적-경험적 논리에 맞는 피로모형을 개발을 위하여 기존에 제안되었던 피로모형의 다양한 형태, 모형의 논리 및 모형이 가지는 인자들에 대하여 검토하였다. 그리고 이를 통하여 새로운 피로 모형을 제안하였으며, 이 모형을 국내의 환경 및 교통데이터에 대하여 적용하여 보았다. 제안한 피로모형의 계수는 향후 더 많은 실험을 통한 검증 및 보정을 거쳐 수정 보완 될 수 있을 것이다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

- 콘크리트 포장 슬래브는 교통하중 보다 환경하중의 크기 및 영향이 보다 지배적이기 때문에 기존의 S-N 모형의 피로식은 합리적으로 콘크리트 포장의 파손을 예측 하는데 한계가 있으며, 따라서 최대-최소 응력비 R을 고려해야 함을 알 수 있었다.
- 국내에서 시공되어지고 있는 폭 3.6m, 줄눈간격 6m, 그리고 두께 300mm의 콘크리트 포장 슬래브의 피로해석을 실시 해본 결과, 슬래브 하부에서 반복적으로 발생하는 인장응력에 대한 상향균열해석의 대부분의 결과 값은 내구한계를 벗어나 피로파손에 영향을 미치지 못 함을 알 수 있었다.
- 콘크리트 포장 슬래브의 피로파손은 주로 하향균열로 인하여 파괴됨을 결과를 통하여 알 수 있었으며, 이 하향균열에 대한 보다 더 합리적인 구조해석 방법이 제안될 필요가 있음을 알 수 있었다.



감사의 글

본 연구는 국책과제인 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구에 의하여 수행되었으므로 연구비를 지원한 국토해양부에 감사드립니다.

참고문헌

Aas-Jakobsen, L. (1970). "Fatigue of Concrete Beams and Columns." Bulletin No.70-1, Division of Concrete Structures, NIH, Trondheim.

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, Volume 36 (129), 216-226.

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.

Davids, W. G., Turkiyyah, G. M., and Mahoney, J. P. (1998). "EverFE : Rigid Pavement Three-Dimensional Finite Element Analysis Tool." , Transportation Research Record 1629, TRB of the National Academies, Washington DC, 41-49.

Fordyce, P. and Yrjanson, W.A., "Modern Design of Concrete Pavement", American Society of Civil Engineers Transportation Engineering Journal, Volume 95, No. TE3, 407-438.

Jeong, J. H. and Zollinger, D. Z. (2004). "Early-age curling and warping behavior: Insights from a fully instrumented test-slab system." , Transportation Research Record 1896, TRB, National Research Council, Washington DC, 76-89.

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.

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.

Packard, R. G. and Tayabji S. D. (1985). "New PCA Thickness Design Procedure for Concrete Highway and street pavement." , Third International Conference on Concrete Pavement design and Rehabilitation, Purdue University, 225-236.

Roesler, J.R. (1998). Fatigue of Concrete Beams and Slabs, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois.

Shi, X. P., Fwa, T. F., and Tan, S. A. (1993). "Flexural Fatigue Strength of Plain Concrete." , ACI Material Journal, Volume 90, No 5.

Tepfers, R. and Kutti, T. (1979). "Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete." Journal of the American Concrete Institute, Vol. 76, 635-652.

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.

Wells, S. A., Phillips B. A., and Vandenbossche, J. M. (2006) "Characterizing Strain Induced by Environmental Loads in Jointed Plain Concrete Pavements: Immediately After Paving and Throughout First 10 Months." , Transportation Research Record 1947, TRB of the National Academies, Washington, DC, 36-48.

건설교통부. (2002). "콘크리트 포장 설계법 개발" , 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 1차년도 최종 보고서, 189-242.

건설교통부. (2004). "콘크리트 포장 설계법 개발" , 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 3차년도 최종 보고서, 15-83.

건설교통부. (2004). "아스팔트 포장 설계법 개발" , 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 1단계 3차년도 최종 보고서, G1 29-60.

건설교통부. (2006). 교통량 조사 차종 분류 가이드, 건설교통부.

안덕순, 박희문 (2004). "현장 계측자료를 이용한 포장체 온도예측모델 개발 연구." , 한국도로학회 2004 학술발표대회 논문집, 제 6권 17-20.

임진선, 정진훈, 조윤희, 김연복. (2008). "콘크리트 슬래브의 부등전조수축에 대한 연구" , 한국도로학회 2008년도 봄학술대회 논문집, 31-38.

정길수, 김인태, 유성우, 조윤희. (2008). "유한요소법을 이용한 줄눈 콘크리트 포장 응력식 개발" , 한국도로학회 논문집, 제 10권 2호, 167-181.