

장기 포장 공용성 자료를 이용한 콘크리트 포장의 피로파손 모형 제안

Proposal of Fatigue Damage Model for Concrete Pavement Using Long Term Pavement Performance Data

김 성 권* 최 성 용** 윤 경 구***
Kim, Seong-Kwon Choi, Seong-Yong Yun, Kyung-Ku

1. 서론

콘크리트 포장에 발생하는 피로파손은 구조적 공용성 추정을 위한 중요한 요소이다. 콘크리트 포장의 피로파손은 기본적으로 두 가지 원인에 의하여 발생한다. 하나는 계절의 온도변화, 동결·융해, 내구성 약한 재료의 사용, 골재의 화학적 반응, 잘못된 하중전달 장치의 배치 등과 같이 포장 구조체 자체의 결함이고 다른 하나는 환경하중이 포장체에 응력이나 변형을 발생시켜 이로 인해 피로파손이 일어나는 경우이다. 콘크리트 포장의 피로파손 발생 원인을 크게 두 가지로 구분하였지만 실제로는 이 두 가지의 원인이 복합적으로 작용하는 경우가 대부분이다.

콘크리트 포장의 피로파손에 관한 예측 모형에 대해서는 다양한 연구가 진행되어 지금까지 여러 피로파손 모형들이 제시되었으며 국내에서도 실내 실험인 휨인장 피로실험과 조깅인장 피로실험을 통하여 화강암, 석회암, 사암에 대하여 암석 종류별 그리고 통합골재에 대한 각각의 피로파손 모형이 제시되었다.^{[1], [7]} 그러나 이는 실내실험을 통한 피로파손 모형으로 재료조건, 하중조건 그리고 제한된 환경조건만이 반영되어 현장에서의 다양한 조건을 반영하지 못하고 있다는 단점을 포함하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 유일하게 10여 년 간의 장기 포장 공용성 자료를 축적하고 있는 중부고속도로를 대상으로 장래 교통량 예측과 차중에 따른 등가 축하중 계수를 이용하여 콘크리트 포장의 피로특성을 파악하여 재료조건, 교통 및 하중조건, 환경조건, 경계조건 등이 충분히 반영된 현장조건에서의 피로파손 모형을 제시하고자 하였다.^{[4], [5]}

2. 본론

2.1 개요

콘크리트 포장의 주된 손상은 다음과 같은 두 가지의 범주로 나눌 수 있다.

- i) 피로균열, 건조수축 균열, pumping, faulting, punchouts과 같이 예측 모델이 필요한 것
- ii) D-cracking, spalling, frozen joint, blow up, sealant failure 등과 같이 설계에 의하여 제어가 가능한 것.

피로균열은 교통하중에 의한 인장응력과 콘크리트의 인장강도를 초과하는 환경조건에 의해 콘크리트 포장에 발생한다. 여러 실내실험에서 콘크리트 시편이 인장강도보다 작은 하중에서도 균열이 발생한다는 것을 연구에 의해 발견되었으며, 이러한 균열을 피로균열이라 칭하였다.

* 강원대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사 (033-250-6240, E-mail : kimskwon@kangwon.ac.kr)
** 강원대학교 토목공학과 박사수료, 공학석사 (033-250-6240, E-mail : choisy@kangwon.ac.kr)
*** 강원대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (033-250-6236, E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr)



이러한 피로균열에 의한 포장체의 손상을 줄이고 예측하기 위해 현장실험과 실내실험을 통해 아래와 같은 피로균열 모형들이 현재까지 개발되어 왔다.

1) PCA Fatigue model

이 모델은 콘크리트 포장의 파손형태를 피로 파손과 침식 파손으로 정의하고 있으며, 콘크리트포장의 피로수명 예측을 위하여 선형적 응력비에 대한 파괴까지의 하중반복수의 log 스케일이 필요하며, 0.5의 내구성의 한계로 가정되었다. 아래의 식은 파괴계수에 대한 피로수명의 관계를 수학적으로 나타낸 것이다.

$$\log N = 11.78 - 12.11 \frac{f}{MR} \quad \text{for} \quad 0.55 < \frac{f}{MR} < 1$$

$$N = \left(\frac{4.2577}{\frac{f}{MR} - 0.4325} \right)^{3.268} \quad \text{for} \quad 0.45 < \frac{f}{MR} < 0.55 \quad \text{<식 1>}$$

$$N = \infty \quad \text{for} \quad \frac{f}{MR} < 0.45$$

여기서, N은 파괴까지 하중의 반복수이며, f는 하중응력을 나타낸다. 그리고 MR은 콘크리트의 파괴계수(재령 90일의 휨강도)를 의미한다.

2) Darter's Fatigue Model

줄눈콘크리트에 대한 설계의 발전에서, Darter는 3개의 불리 된 연구로부터 분석하였다. 아래의 식은 실험 결과에 대한 평균 회귀분석식이다.

$$\log N = 17.61 - 17.61 \frac{f}{MR} \quad \text{<식 2>}$$

이 식은 50%의 파괴 확률에 대한 평균 회귀식이다. 24%~50%이 파괴확률에 대한 감소를 가지는 새로운 피로모델은 줄눈콘크리트의 'zero-maintenance design'에 선택되었다. 이 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\log N = 16.61 - 17.61 \frac{f}{MR} \quad \text{<식 3>}$$

3) ARE Fatigue Model

이 모델이 모든 부분은 AASHO 실험도로의 결과에 의해 분석되었다. 포장에 적용되는 하중의 실제 수는 18Kip(80kN)의 축하중이 사용되었다. 소성층이론은 교통에 대한 평해 방향에서 나타나는 최소응력을 계산하는데 사용되었다.

이 회귀식 결과는 다음과 같다.

$$N_F = 23440 \left(\frac{MR}{f} \right)^{3.21} \quad \text{<식 4>}$$

4) 국내 실내 실험을 이용한 피로파손 모형

화강암, 석회암, 사암에 관하여 국내에서는 각각의 암석별 조감인장 피로실험을 실시하여 통합 피로파손 모형을 다음과 같이 제시하였다.

$$\ln(N_F) = 37.275 - 34.364(S) \quad \text{<식 5>}$$

2.2 장기 포장 공용성 자료

장기 포장 공용성 자료 조사는 공용중인 포장에서 얻어지는 여러 가지 자료를 이용하여 차량하중과 환경하중을 받는 실제 포장체의 거동을 살피고 파손 진행 과정을 정기적이고 정량적으로 추적 조사하는 것이다. 이러한 일련의 과정으로 공용성에 영향을 미치는 여러 이차들을 분석함으로써 포장 재료의 선정, 포장 설계, 포장 평가, 포장 유지관리, 보수 시기 및 방법의 결정 등에 사용할 수 있는 기초 자료를 축적하여 공용성이 우수하고 비용적인 측면에서도 경제적인 포장을 설계·시공하기 위함이다.



2.2.1 국내 중부고속도로의 장기 포장 공용성 자료 조사 및 분석

국내 Y사에서 실시된 자료를 살펴보면 중부고속도로 콘크리트 포장 구간에 대하여 1987년 개통 전부터 1999년까지 총 7차에 걸친 포장 공용성 자료 조사는 상행선과 하행선으로, 추월선과 주행선으로 나누어 실시되었다. <그림 1>은 구간별 대표적 포장 단면을 나타내며 <표 1>은 포장 공용성 자료 조사 결과로 총 콘크리트 슬래브의 실측 수에 대한 균열 발생 슬래브 수의 비율로 표시하였으며, 공용연수에 따라 균열이 발생한 슬래브의 비율을 도시화 한 것이 <그림 2>이고, 이를 회귀분석하여 <식 6>과 같이 중부 고속도로 콘크리트 포장의 균열 발생에 대한 공용성 모형을 도출하였다.

$$PCRAKED = 0.0037^{0.2573 (Year)} \quad \text{<식 6>}$$

2.2.2 교통량 조사 및 분석

중부고속도로 파손상태 조사 보고서(1999)에는 공용개시 후 1992년부터 1998년까지 구간별 교통량을 조사하여 주행차선과 추월차선으로 구분하여 차종별 교통량 및 ESAL로 환산하여 제시하였다. 주행차선에 대한 실측된 교통량을 분석하여 공용기간 내 장래 교통량을 예측하여 <그림 3>에 나타내었다.

장래 교통량 추정방법은 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 단순·직접적 추정방법중의 하나로 과거 추세 연장법을 사용하여 기 조사된 교통량을 근거로 장래교통량이 과거교통량의 변화추세를 따르는 것으로 가정하여 예측하였다.^[3]

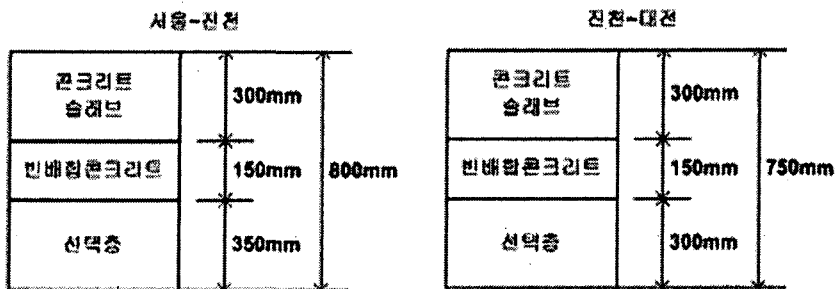
위 예측방법에 따라 공용연도별 실측 ESAL과 예측 ESAL 및 누적 ESAL로 계산하여 나타낸 것이 <표 2>이다. 또한 <표 2>에는 공용기간에 따른 실측 균열발생슬래브(%)와 예측 균열발생슬래브(%)를 균열에 대한 콘크리트 포장의 공용성 모형에 따라 계산하여 나타내었다.

2.3 차종별 응력수준 및 피로수명 산정

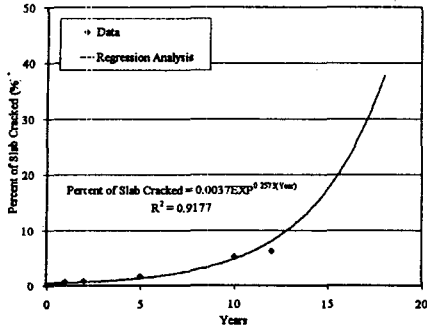
2.3.1 최대응력 산정 및 응력수준 결정

콘크리트 포장에 작용하는 응력을 산정하기 위하여 Westergaard의 해석이론을 사용하고자 재료의 물리적 특성 4가지를 다음과 같이 정의하였다.

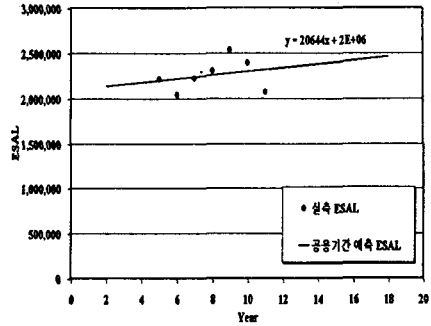
- ① 슬래브의 두께 : 300mm
- ② 콘크리트의 탄성계수 : 28GPa



<그림 1> 구간별 대표 시공 단면



<그림 2> 공용기간에 따른 균열발생판율



<그림 3> 중부고속도로 실측 및 예측 ESAL

<표 1> 중부고속도로 콘크리트 포장의 균열발생 슬래브 비율

구분		상행선			하행선			합계
		주행선	추월선	소계	주행선	추월선	소계	
콘크리트 총 슬래브 수 (실측수)		1,680 (924)	1,680 (924)	3,360 (1,848)	1,700 (1,380)	1,700 (1,380)	3,400 (2,760)	6,760 (4,608)
1차 (87.10)	균열발생 판 수	-	2	2	6	5	11	13
	균열발생 판 비율	-	0.12	0.06	0.35	0.29	0.32	0.19
3차 (88.11)	균열발생 판 수	16	9	25	12	8	20	45
	균열발생 판 비율	0.95	0.54	0.74	0.71	0.47	0.59	0.67
4차 (89.06)	균열발생 판 수	18	12	30	12	10	22	52
	균열발생 판 비율	1.07	0.71	0.89	0.71	0.59	0.65	0.77
5차 (92.12)	균열발생 판 수	45	18	63	35	18	53	116
	균열발생 판 비율	2.68	1.07	1.88	2.06	1.06	1.56	1.72
6차 (97.02)	균열발생 판 수	217	38	255	73	28	101	356
	균열발생 판 비율	12.92	2.26	7.59	4.29	1.65	2.97	5.27
7차 (99.08)	균열발생 판 수	259 (142)	46(25)	305 (167)	88 (71)	34 (28)	122 (109)	427 (405)
	균열발생 판 비율	15.42	2.74	9.08	5.18	2.00	3.59	6.32



③ 포아슨 비 : 0.15

④ 노상 지지력 계수 : 100pci

또한 차종별 응력수준을 결정하기 위한 콘크리트 포장의 기준강도는 현장에서 실측한 재령 28일의 휨강도 5.34MPa를 이용하여 공용기간 동안 강도증진 현상을 고려하기 위하여 실측강도에 대한 5년 이후에서의 예상 강도증가계수 1.35를 적용한 후 응력수준을 산정하였다. 차종별 응력과 응력수준은 고속도로 트럭하중 및 포장설계를 위한 차량 하중별 등가 축하중 계수를 이용하였다.^[8]

<표 2> 공용기간에 따른 중부고속도로 예측 ESAL 및 균열 발생률(%)

공용년수	공용년도	Slab Cracked(%)	년 ESAL	누적 ESAL
0	1987	0	2,000,000	2,000,000
1	1988	0.48	2,020,644	4,020,644
2	1989	0.62	2,041,288	6,061,932
3	1990	0.80	2,061,932	8,123,864
4	1991	1.04	2,082,576	10,206,440
5	1992	1.34	2,212,802	12,419,242
6	1993	1.73	2,044,142	14,463,384
7	1994	2.24	2,202,112	16,683,496
8	1995	2.90	2,306,691	18,990,187
9	1996	3.75	2,533,367	21,523,554
10	1997	4.85	2,392,654	23,916,208
11	1998	6.27	2,068,715	25,984,923
12	1999	8.11	2,247,728	28,232,651
13	2000	10.49	2,268,372	30,501,023
14	2001	13.57	2,289,016	32,790,039
15	2002	17.55	2,309,660	35,099,699
16	2003	22.70	2,330,304	37,430,003
17	2004	29.37	2,350,948	39,780,951
18	2005	37.98	2,371,592	42,152,543
19	2006	49.13	2,392,236	44,544,779
20	2007	63.54	2,412,880	46,957,659
21	2008	82.19	2,433,524	49,391,183
22	2009	100.00	2,449,007	54,284,036

차종별 최대응력과 응력수준은 <표 3>에 나타내었다. 등가 단축 하중에서의 최대응력과 응력수준은 각각



1.89MPa, 26.2%로 나타났으며 1종, 2종 및 4종의 차량하중에서의 응력수준은 무시할 수 있을 정도로 나타났다. 일반적으로 콘크리트의 피로한계는 대략 1000만회의 피로수명에서 응력수준 55%이하로 알려져 있으므로 그 이상의 응력수준을 고려하였다.

2.3.2 피로수명 산정

결정된 응력수준으로부터 등가 단축하중 계수를 이용하여 균열발생률과 상대응력수준에 따른 피로수명을 도시하여 나타낸 것이 <그림 4>이다.

중부고속도로 파손상태 조사 보고서(1999)를 분석할 때 <표 2>에서 공용기간에 따른 예측 교통량 및 균열 발생률(%)을 이용하고, 콘크리트 포장 슬래브의 50%이상의 균열이 발생하였을 때 파괴라 정의하므로 이 시점을 기준으로 상대응력수준별 피로수명을 산정하면 <표 4>와 같다.

2.4 중부고속도로 장기 포장 공용성 자료를 이용한 피로파손 모형

<표 4>에서 산정된 응력수준과 피로수명을 도시하여 나타낸 것이 <그림 5>이다 이 결과를 이용하여 중부 고속도로 자료를 기반으로 한 피로파손 모형을 나타낸 것이 <식 7>이다.

$$\ln(N_F) = 17.696 - 1.482 \left(\frac{\sigma_{\max}}{MR} \right) \quad \text{<식 7>}$$

<식 2>는 현장에서의 교통 및 하중조건, 경계조건 및 환경조건이 그대로 반영된 즉 경험적 방법에 의해 제시된 피로파손 모형이라 할 수 있으며 이 모형은 동일 환경조건에서 교통하중 및 교통량이 피로강도 및 피로수명에 크게 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

그러므로 콘크리트 포장의 피로설계는 설계 대상구간의 교통 및 하중조건, 설계 공용기간 동안의 교통량을 정확히 예측하는 것이 선행되어야 할 것으로 판단되며 이러한 조건에 합리적으로 적용할 수 있는 모형이 필요할 것으로 사료된다.

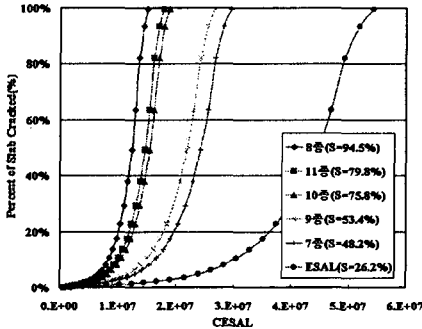
<표 3> 중부고속도로에 대한 Westergaard 이론에 따른 응력수준 산정 결과

구분	EALF	응력계산결과(MPa)	콘크리트 포장의 강도 (MPa)	응력수준(%)
ESAL	1.0	1.89	7.16	26.2
1종	0.001	0.00	"	0.0
2종	0.029	0.05	"	0.8
3종	1.262	2.38	"	33.0
4종	0.025	0.05	"	0.7
5종	0.467	0.88	"	12.2
6종	1.953	3.68	"	51.1
7종	1.843	3.48	"	48.2
8종	3.613	6.82	"	94.5
9종	2.039	3.85	"	53.4
10종	2.896	5.46	"	75.8
11종	3.049	5.75	"	79.8

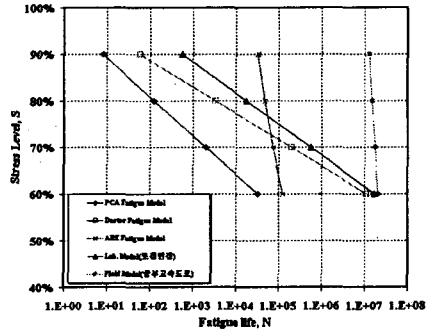


<표 4> 콘크리트 포장 슬래브의 50% 균열발생시 응력수준별 피로수명

응력수준(%)	94.5	79.8	75.8	53.4	48.2
피로수명(N)	12,329,028	14,609,636	15,381,484	21,846,385	24,169,712



<그림 4> 상대응력수준별 균열발생 비율과 피로수명



<그림 5> 국내·외 피로파손 모형 및 장기 포장 공용성 자료를 이용한 피로모형

3. 결론

본 연구에서는 중부고속도로를 장기 포장 공용성 자료를 바탕으로 일련의 과정을 거쳐 현장 조건에 적합한 콘크리트 포장의 피로파손 모형을 제안하고자 하였으며 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 중부고속도로를 대상으로 실측된 장기 포장 공용성 자료를 이용하여 공용연구에 따른 콘크리트 슬래브의 균열 발생에 따른 공용성 모형을 제안하였다.
2. Westergaard 이론에 의해 계산된 콘크리트 포장의 응력과 응력수준 산정 결과는 1종, 2종 및 4종의 교통하중인 경우 아주 미소하게 나타났으며 3종, 5종, 7종의 교통하중에서도 피로한계인 50% 이하로 나타나 이러한 하중으로 인한 영향을 없을 것으로 판단된다.
3. 국내에서는 유일하게 다년간 장기 포장 공용성 자료가 축적되어 있는 중부고속도로를 대상으로 기 조사된 교통량 및 균열발생을 자료에 기초하여 하중 및 교통조건, 경제조건, 환경조건이 반영된 중부고속도로 콘크리트 포장의 경험적 피로파손 모형을 제안하였다.
4. 제안된 현장 피로파손 모형은 국내·외 피로파손 모형고 더불어 실내 실험과 현장 자료를 이용한 피로 모형과도 다소 피로수명에 있어 차이를 보이고 있으며, 이는 재료적인 특성과 환경적인 영향에 의한 것으로 판단된다.
5. 제안된 피로파손 모형은 국내 현장의 교통, 하중조건, 경제조건 및 환경조건이 반영된 경험적 모형으로 교통 및 하중조건이 피로강도 및 피로수명에 크게 영향을 미치기 때문에 피로설계는 이러한 인자를 합리적으로 적용할 수 있는 방안이 추후 모색되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구를 통하여 제안된 피로파손 모형을 중부고속도로만을 대상으로 제시하였으므로 일반적인 적용성, 교통하중을 등가 축하중 계수를 이용하여 단일한 교통량으로 전화한 문제, 외간법에 의한 교통량 추정 등의 애로점을 포함하고 있으므로 향후 국내의 대표적 고속도로를 대상으로 보다 체계적이고 계획적인 포장 공용성 자료 수집을 통한 콘크리트 포장에 대한 피로파손 모형의 제안이 요구된다고 판단된다.



감사의 글

본 연구는 한국건설교통부 KPRP 연구과제, ‘한국형 포장 설계법 개발 및 포장성능 개선방안’의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 김동호, “조깅인장 반복하중을 받는 콘크리트의 피로신뢰성 및 누적손상” 2003
- [2] 김연복, 조윤호, 김부일, “고속도로 트럭 하중 분포 및 포장 설계를 위한 차량 등가 하중 계수의 산정”, 1998
- [3] 민원, “도로공학”, 2004
- [4] 용마엔지니어링, “중부고속도로 개통10년사”, 1997
- [5] 용마엔지니어링, “중부고속도로 파손상태 조사 보고서”, 1999
- [6] 유태석, 한승환, “고속도로 줄눈콘크리트 포장 LTPP구간의 파손 및 환경데이터 분석”, 1999
- [7] 윤병성, “골재 종류를 고려한 콘크리트포장의 통합 피로모형 개발 및 평가”, 2004
- [8] 조윤호, “고속도로 트럭하중 분포 및 포장설계를 위한 등가 차량 하중계수의 산정”, 1999
- [9] 한국도로공사, “시험도로 콘크리트 포장재료 물성정량화 방안에 관한 연구”, 2002