

설계변수별 연속철근 콘크리트 포장의 피로수명 연구

Study on Fatigue Life of Continuously Reinforced Concrete Pavement with Design Parameter

박 종 섭* / 강 영 종**

Park, Jong Sup / Kang, Young Jong

Abstract

A laboratory investigation is conducted to characterize and quantify fatigue lives of continuously reinforced concrete pavements (CRCP) with initial design parameters. Eight specimens scaled were made based on results of finite-element analyses and stress-strain curve comparisons. Static tests were firstly performed to obtain magnitudes of static failure loads and to predict crack patterns before fatigue tests. The fatigue lives measured in the study were compared based on each initial design parameter. The comparison indicates that the fatigue lives of CRCP specimens with initial cracks increases with increasing the initial crack spacing, and CRCP specimens with reinforcements at top of the concrete slab have more fatigue lives than those with reinforcements at midheight of the concrete slab. In addition, the fatigue lives were significantly affected by soil conditions under the CRCP specimens. The results obtained in the study can be used for maintenance and retrofit of the continuously reinforced concrete pavements.

key words : Concrete Pavement, Continuously Reinforced Concrete Pavement, Fatigue Life, Crack, Soil Condition

요 지

초기 설계조건이 반영된 연속철근 콘크리트 포장의 피로수명을 규명하고자 시험체를 제작하여 피로시험을 실시하였다. 유한요소해석 결과분석과 사용되는 재료의 특성을 고려하여 축소된 8개의 시험체를 제작하였다. 피로시험에 앞서서 정적파괴하중 결정과 균열발생 및 진전 상황을 추정하고자 정적하중재하 시험이 실시되었다. 피로시험 결과로부터 초기발생균열의 간격이 증가할수록 피로수명이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 콘크리트 슬래브 표면 가까이 철근을 배근한 시험체가 슬래브 중앙에 철근을 배근한 시험체 보다 우수한 피로수명을 나타내었다. 또한, 지반조건의 변화가 균열발생 및 피로수명에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 국내 고속도로에 건설된 연속철근 콘크리트 포장의 유지보수에 적극 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 콘크리트 포장, 연속철근 콘크리트 포장, 피로 수명, 균열, 지반 조건

1. 서 론

시멘트 콘크리트 포장은 대형 차량 하중에 대한 지

지력이 좋고 수명이 길며, 시공 후에 잦은 유지 보수가 필요치 않아 국내외 고속도로에 도입된 이후 그 사용이 급격히 증가하였다. 초기 콘크리트 포장은 도로 전폭에 철근 없이 줄눈만을 설치하였는데, 평단성 불량

* 정회원 · 상명대학교 토목환경공학부 교수 (E-mail : jonpark@smu.ac.kr)

** 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수

과 Faulting으로 인해 포장의 공용성에 문제가 발생하곤 하였다. 이러한 결점을 보완하고자 줄눈부에 다웰바(Dowel Bar)를 설치하는 줄눈 콘크리트 포장(Jointed Concrete Pavement, JCP), 포장 내 일부 철근배근 및 줄눈을 설치하는 철근콘크리트 포장(Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP)이 사용되었다. 그러나, 줄눈이 설치된 포장의 경우 줄눈부 파손이 빈번히 발생하여 포장 유지보수 및 차량주행성에 많은 문제점을 유발하였다. 따라서, 포장 내에 연속적으로 철근을 배근하여 콘크리트의 균열이 포장 전 구간에서 고루 분포하게 하므로써 줄눈을 생략할 수 있는 연속철근 콘크리트 포장(Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP)이 개발되었다. CRCP의 종방향 연속철근은 콘크리트 포장에서 발생하는 수축균열과 포장체의 뒤틀림을 억제시키며 포장내 하중전이가 균등하여 포장의 구조적인 결함을 최소화하는 역할을 수행한다(Yoder and Witczak, 1975).

미국의 경우 1908년 Michigan주 Detroit에 처음 콘크리트 포장이 적용되어 고속도로 및 국도에 널리 사용되고 있다. 국내 시멘트 콘크리트 포장은 1970년대 유가폭등으로 아스팔트 비용이 증가하자 적극적으로 고려되기 시작하였으며, 연속철근 콘크리트 포장은 1984년 경부고속도로 일부구간에 확장 및 개량 목적으로 처음 도입된 이래 1987년 경부선의 수원 비상활주로 외 21곳 총 60km정도의 노선에 적용되었다. 그 이후, 중부선 신설포장에 본격적으로 CRCP공법이 적용되며 발전되었다(건설부, 1988). 이렇듯 연속철근 콘크리트 포장의 물량은 급증하고 기존의 콘크리트 포장은 점점 노후화 되고 있으나 국내에는 시멘트 콘크리트 포장의 공용년수가 작아 아직 유지 보수에 대한 합리적인 관리체계가 마련되어 있지 않은 실정이다. 따라서 합리적인 포장관리체계의 필요성이 대두되고 있으며 이를 위해서는 콘크리트 포장에 대한 데이터베이스를 구축, 콘크리트 포장의 파손 원인 분석, 포장의 피로수명, 보수시기 및 보수방법 등 여러 방향의 연구 조사가 필요로 하고 있다.

콘크리트 포장의 피로수명에 대한 연구는 일부 연구자들에 의해 수행되었다 (Vesic and Saxena, 1970; Taute 등, 1981; Majidzadeh and Ilves, 1983; Suh 등, 1992; Jung 등, 1994). 콘크리트 포장의 피로수명은 휨강도와 휨응력 및 반복하중을 변수로 포함한 식으로 제안되고 있으며, 연속철근 콘크리트 포장의 경우 발생하는 균열간격 및 균열폭을 기준으로 포장의 파손여부를 결정하고 있다. 미국

AASHTO(1993) 설계기준은 균열발생 간격이 1m~2.5m (100m당 균열 40-100개)로 제한하고 있으며, 균열폭은 1mm이하로 제한하고 있다. Kang 등(2004)은 축소 제작된 시험체를 이용하여 실내피로 실험을 수행하여 다양한 연구자들이 제안한 피로수명 설계식 중 Vesic and Saxena(1970)의 제안식이 국내 CRCP 유지보수 실무에 적용 가능함을 확인한바 있다.

본 연구는 Kang 등(2004)의 연구결과를 토대로 CRCP 시험체에 초기 설계변수 즉 초기균열, 철근 배근높이, 지반조건 등에 따른 피로수명을 규명하고자 한다. 본 논문의 구성을 살펴보면 시험체 제작과 실내 실험 준비를 위한 상사법칙 적용방법, 유한요소해석 결과분석, 지반모사용 고무판 제작에 대해 먼저 기술하고 있으며, 정적실험을 통한 파괴하중 산정 및 설계변수별 시험체 피로실험의 결과를 분석하고 최종적으로 결론을 기술하고 있다.

2. 실험 준비 및 시험체 설계와 제작

일반적으로 연속철근 콘크리트 포장은 콘크리트 건조수축과 온도하중에 의한 구속체적의 변화 등 환경적인 영향에 의해 초기에 일부 균열이 발생하고 공용 중 차량하중에 의해 추가적인 균열발생 및 진전이 이루어지게 된다. 본 연구는 초기균열 등의 설계 조건 구현 후 차량하중에 의한 포장의 피로수명 규명에 목적을 두고 있다. 본 연구의 대상 CRCP는 중부고속도로에 시공된 형식을 토대로 하였으며, 중부고속도로는 콘크리트 슬래브 30cm, 린콘크리트 기층 15cm, 바닥부분인 선택층 30cm로 구성되어 있다. 또한, 차선은 2차선이며 전체폭은 40.25cm이다. 이와 같은 대상 포장을 실험실에서 피로실험을 수행하기 위해서는 실험실 규모에 맞는 축소된 시험체 제작이 필수적이었다. 따라서, 상사법칙을 적용하여 시험체를 제작하였다.

2.1 상사법칙

축소된 CRCP 시험체의 탄·소성 거동, 균열 전파 과정 및 피로수명 규명을 위해 상사법칙 중 극한강도 모델(Ultimate Strength Model, USM)을 적용하였다. 극한강도모델은 기하학적 상사성(Geometry Similitude), 재료적 상사성(Material Similitude), 하중 상사성>Loading Similitude)을 만족시켜야 한다. 따라서 본 연구에서는 원형과 축소 시험체의 응력-변형률 곡선이 일치하는 모델(True Model)을 적용하였으며 세 가지 상사성과 실험실 여건을 고려하여 상사

율(Similitude Ratio, SR)은 1/4로 결정하였다. 시험체 제작에 적용된 상사율을 표 1에 자세히 나타내었다. 표 1에 나타낸 바와 같이 응력과 변형률의 상사율은 1이며, 길이의 상사율은 1/4이다. 표 2는 실험 대상 포장인 중부고속도로 포장의 제원과 상사율 1/4를 적용한 시험체의 규격을 나타내고 있다. 차량 하중은 2점 재하 방식으로 시험체 표면에 재하되며 콘크리트 바닥의 지반반력계수는 응력단위를 길이로 나눈 값으로 상사율 4를 적용하여 706 MN/m³으로 설계하였다. 시험체에 사용한 철근은 SD40의 재료적 성질을 만족시키는 Steel Wire로 제작되었으며, AASHTO 설계기준의 종방향 철근비를 만족하도록 종방향 철근

은 지름 4.5mm을 3.75cm 간격으로 배근하였고, 횡방향 철근은 지름 3mm을 18.75cm 간격으로 배근하였다. 사용된 종방향 철근비는 60%이다.

2.2 유한요소해석

무한길이를 가지는 CRCP의 실내 실험을 위해 시험체의 종방향 길이와 횡방향 차선수를 결정하고자 범용 해석프로그램인 ALGOR(1989)를 이용하여 유한요소해석이 실시되었다. 또한, 변수별 피로실험에 앞서서 하중작용 위치에 따른 응력 및 처짐 비교와 지반조건 변화에 따른 응력과 처짐 변화를 해석적으로 추정해 보았다. 그림 1은 해석에 사용된 모델 및 재하 하중 위치를 보여주고 있다. 콘크리트 슬래브는 육면체 Solid 요소, 철근은 직교 이방성 Plate 요소, 지반조건은 Winkler Spring 요소가 적용되었다.

표 1. 상사법칙 적용비율

물리량		차원	상사	비율
재료적 물리량	응력	FL ⁻²	S _E	1
	탄성계수	FL ⁻²	S _E	1
	Poisson's ratio	-	-	1
	비중	FL ⁻³	S _E /S _L	4
	변형률	-	-	1
기하학적 물리량	길이	L	S _L	1/4
	회전	-	-	1
	면적	L ²	S _L ²	1/16
	단면 2차 모멘트	L ⁴	S _L ⁴	1/256
하중	집중 하중	F	S _E S _L ²	1/16
	분포 하중	FL ⁻¹	S _E S _L	1/4
	압력	FL ⁻²	S _E	1
	모멘트	FL	S _E S _L ³	1/64
	전단력	F	S _E S _L ²	1/16

F = force, L = length, S_E = stress ratio, S_L = length ratio

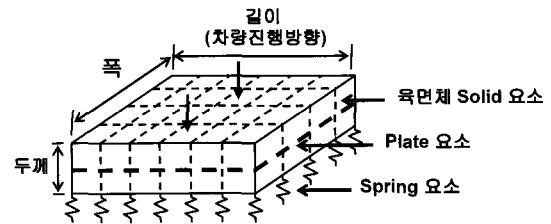


그림 1. 유한요소해석모델

유한요소해석모델은 표 3에 나타낸 바와 같이, M1, M2, M3의 세 가지 형식의 모델로 검토되었으며 상세한 제원은 표 3에 나타내었다. M1 모델은 무한 종방향 길이를 가지는 1차선 모델이며, M2 모델은 1.4m 종방향 길이를 가지는 1차선 모델, 그리고 M3 모델은 1.4m 종방향 길이를 가지는 2차선 모델이다. M2와

표 2. 중부고속도로와 축소 시험체 제원

구분		중부 고속도로	1/4 축소모델	
콘크리트 슬래브	두께 (mm)	300	75	
	폭 (mm)	4,025	1,000	
	탄성계수(GPa)	27.6	27.6	
	최대 골재 크기 (mm)	40	10	
철근	종방향	지름(mm)	19	4.5
		간격(mm)	50	37.5
	횡방향	지름(mm)	13	3
		간격(mm)	750	188
탄성계수 (E: GPa)		200	200	
지반 반력 계수(MN/m ³)		177	706	

표 3. 시험체의 유한요소해석모델

해석 모델		M1	M2	M3
콘크리트 슬래브	두께(mm)	75	75	75
	폭(mm)	1,000	1,000	2,000
	길이(mm)	무한	1,400	1,400
	탄성계수(GPa)	27.6	27.6	27.6
철근	Plate 두께(mm)		0.445	
	종방향 탄성계수(GPa)		200.1	
	횡방향 탄성계수(GPa)		18.2	
흙의 탄성계수 (kN/m)			993.2	
작용하중 (kN, SR=1/16)			5	
작용 압력 (MPa)			0.55	
작용 압력 면적 (mm ²)			68 × 68	

M3 모델의 종방향 길이 1.4m는 M1 모델 해석결과 종방향으로 처짐이 0인 지점을 기준으로 결정되었다. 그림 2는 해석결과 얻어진 세 모델의 표면 응력분포를 나타내고 있으며, 그림 3은 하중 작용위치(Long. Distance = 0인 지점)로부터 떨어진 거리에 따른 발생 처짐을 모델별로 나타내고 있다. 그림 2(a), (b)의 응력분포도를 비교하면 두 모델은 거의 같은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. M3 모델의 경우 하중이 작용하지 않는 옆 차선의 발생 응력은 아주 작은 값을 확인할 수 있으며, M2와 M3 모델 또한 응력분포가 유사함을 확인할 수 있다. 그림 3의 세 모델의 처짐 비교를 살펴보면, M2와 M3 모델은 하중작용점에서 300mm 구간까지는 최대 2%, 300~500mm 구간까지는 최대 5%, 500~700mm 구간까지는 최대 10% 정도의 차이를 보이고 있어 매우 유사함을 알 수 있다. 작용하중이 모델의 모서리에 가깝게 작용하는

경우 M1, M2, M3 모델의 응력과 처짐의 값은 더욱 유사함을 확인할 수 있었다. 따라서 세 가지 형식의 모델의 응력과 처짐의 비교·분석 결과 M2 모델을 시험체 제작 표준으로 선정하였다.

2.3 시멘트 배합설계

시험체 제작을 위해 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이고 굵은 골재는 최대 치수가 10mm인 쇄석이며, 잔골재는 채취장에서 구입한 강모래이다. 슬래브 타설시 좋은 작업성(Workability) 확보를 위해 유동화제를 사용하고자 기준휨강도를 5% 증가시켜 배합설계를 수행하였다. 표 4는 시험체 제작을 위한 배합설계와 공칭 휨강도 등을 나타내고 있다. 시험체의 공칭 휨인장강도는 3.1 MPa, 탄성계수는 24 GPa이다.

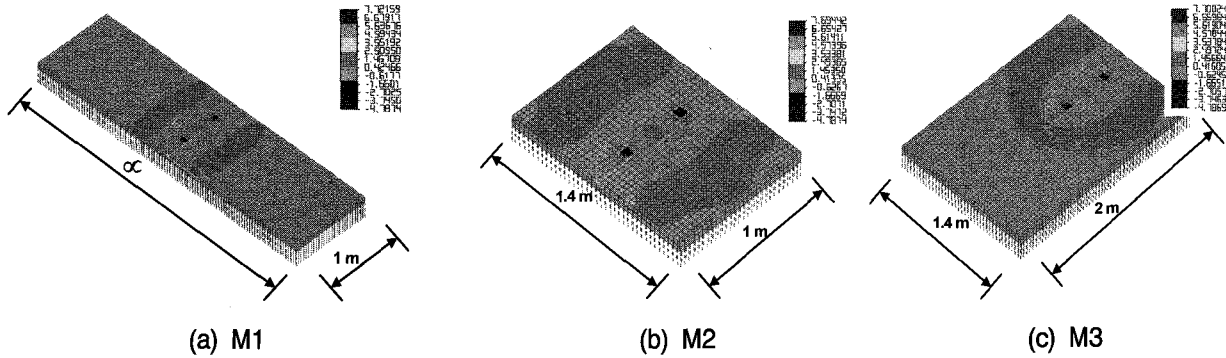


그림 2. 유한요소해석 응력결과 비교

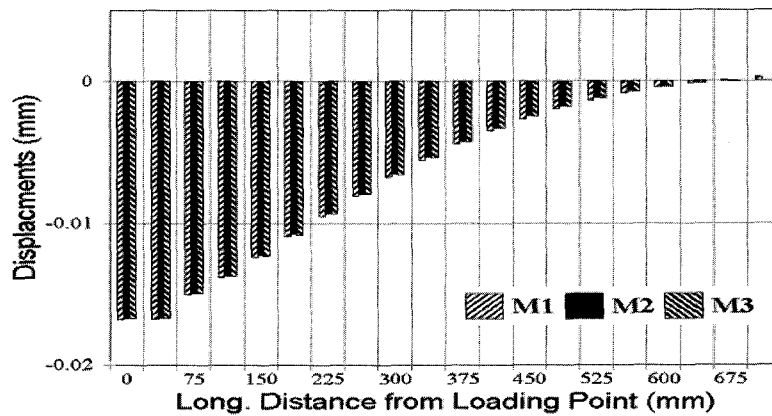


그림 3. 유한요소해석 처짐 결과 비교

표 4. 시험체의 배합구성 (전체부피=1000Liter 기준)

물 (kg)	시멘트 (kg)	잔골재 (kg)	굵은 골재 (kg)	AE (cc)	유동화제 (cc)	휨인장 설계강도 (MPa, σ_r)	휨인장강도 (MPa, σ_{28})	탄성계수 (GPa)
167	457	333	1281	130	333	5.4	3.1	24

2.4 지반 모사와 콘크리트 슬래브 제작

콘크리트 슬래브, 린콘크리트 기층, 선택층으로 구성되어 있는 CRCP의 상부 린콘크리트기층과 선택층은 탄성계수와 동탄성계수를 고려하여 지반반력계수 (706 MN/m^3)를 산정하였고, 계산된 지반반력계수를 만족하는 지반조건을 구현하고자 고무판(Rubber Plate)을 제작하였다. 그림 4는 제작된 고무판의 구성과 제원을 나타내고 있다. 고무판은 200mm (가로) \times 200mm (세로) 크기의 얇은 금속판에 30mm (가로) \times 30mm (세로) \times 12.8mm (두께)를 가지는 고무를 10mm 간격으로 총 25개를 배치하여 제작하였고, 시험체의 슬래브 바닥면 전체에 연속적으로 설치되었다(그림 5). 이 고무판의 성능은 만능시험기를 이용하여 요구되는 지반반력계수를 얻을 수 있을 때까지 다양한 종류의 고무와 고무판 구성을 적용하여 최종적으로 그림 4의 구성과 표 5의 제원과 성능을 확인할 수 있었다.

콘크리트 혼합(Mixing)은 레미콘 차량을 이용하여 실시되었으며 콘크리트 슬럼프는 7.5cm , 유동화제 투입전 공기량은 8%이다. 시험체 제작 후 젖은 양생포를 이용하여 시험체의 습도를 유지하며 공기 중 양생이 실시되었으며 총 8개의 시험체가 변수별 피로실험을 위해 제작되었다. 표 6은 제작된 시험체 번호와 적용된 설계변수를 나타내고 있다. 시험체 8과 9는 기준 시험체이며 10~15 시험체는 설계변수별 시험체이다. 10~12시험체는 균열간격이 250mm , 375mm , 500mm 로 제작된 것으로 실제 콘크리트 포장으로 환산하면 각각 균열발생간격이 1m , 1.5m , 2m 에 해당된다. 초기균열은 0.15mm 두께의 얇은철판을 균열간격에 따라 거푸집에 고정시킨 후 콘크리트를 타설하여 시험체를 제작하였다.

일반적으로 철근은 콘크리트 슬래브의 중간(Center)에 설치되나 포장 표면의 균열제어를 위해서는 표면쪽(Upper)에 설치되는 것이 유리할 것으로 판단되어 그 피로성능을 규명하고자 시험체 13과 14를

표 5. 고무판 설계

목표 지반계수 (지반조건 I) (MN/m^3)	고무크기 (mm^2) ($a \times b$)	고무 두께 (mm) (t)	고무 탄성계수 (MPa, E)	흙 반력계수 (GN/m^3) ($k_c = E/t$)	금속판 크기 (mm^2) (A)	Spring 계수 (MN/m) ($k = k_c \times a \times b$)	고무판 반력계수 (MN/m^3) ($k_c' = k/A$)
706	30×30	12.8	15.7	1.23	200×200	1.1	687

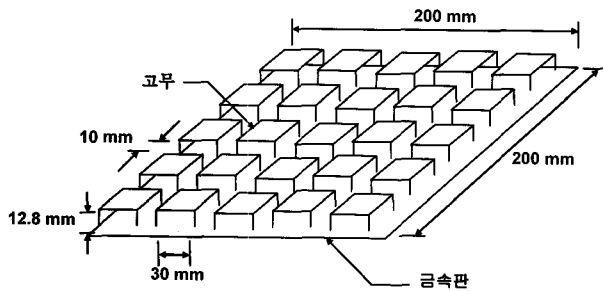


그림 4. 고무판

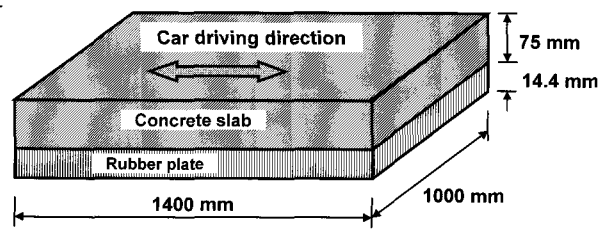


그림 5. 시험체 규격

표 6. 제작된 시험체 종류

시험체 번호	내용	균열간격(mm)	지반조건	철근위치	하중 작용위치
8	기준 시험체	-	I	Center	Edge
9	기준(검토) 시험체	-	I	Center	Edge
10	균열 시험체	250	I	Center	Edge
11	균열 시험체	375	I	Center	Edge
12	균열 시험체	500	I	Center	Edge
13	철근 위치 시험체	-	I	Upper	Edge
14	균열 및 철근 위치 시험체	375	I	Upper	Edge
15	지반 조건 II 시험체	-	II	Center	Edge

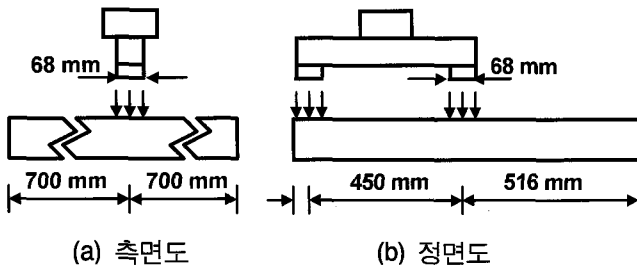


그림 6. 하중 작용 위치

제작하였다. 시험체 15의 지반조건 II(지반반력계수 = 196MN/m^3)는 표 4의 지반조건 I(지반반력계수 = 706MN/m^3)의 1/3.5 정도 되는 지반조건을 가지고 있다. 작용하중은 그림 6과 같이 취약부분인 포장 가장자리에 작용하는 경우를 고려하여 재하하였다. 시험체 표면과 바닥에는 그림 7과 같이 변형률 게이지가 설치되었으며, 균열폭 측정을 위한 Demec Gage Pointer가 표면에 설치되었다.

3. 피로 실험 및 결과

피로시험에 앞서서 변형률의 측정범위와 균열 형상을 추정하고자 정적시험이 실시되었다. 정적시험은 0 tonf에서 5 tonf까지 하중을 가력하여 변형률게이지와 다이얼 게이지를 이용하여 변형률과 처짐을 측정하였다. 가장 큰 변형률은 대부분의 시험체에서 하중이 작용하는 두 지점 사이에서 발생되었으며 변형률은 작용하중에 선형적으로 비례하며 발생되었다. 5 tonf 가력시 변형률은 약 $100\sim 250 \times 10^{-6}$ 사이로 발생되었으며, 처짐은 2.5~3.5 mm 정도 계속되었다. 균열의 형상은 하중 작용 두 지점 사이를 지나 모서리 부분으로 우각부 파괴가 이루어질 것으로 추정되었다. 피로실험은 정적파괴하중 8 tonf의 60%에 해당하는 4.8 tonf을 5Hz 재하속도로 가력하여 실시하였다. DAA-10A 동적측정장비를 이용하여 일정 횟수마다 변형률 데이터를 기록하였으며, 500,000번 횟수마다 Demec Gage를 이용하여 균열 발생 또는 균열 폭을 관측하였다. 피로수명은 Punch-out 파괴와 AASHTO (1996) 기준에 따라 균열폭이 1mm를 넘는 시점을 기준으로 결정하였다. 본 시험체는 1/4 상사모델이므로 시험체의 허용 최대 균열폭은 0.25mm로 적용하였다. 그림 8은 각 시험체별 측정된 대표적인 변형률 측

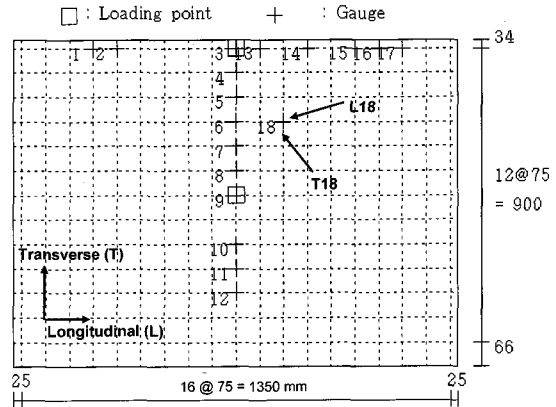


그림 7. 대표적인 변형률 게이지 설치도

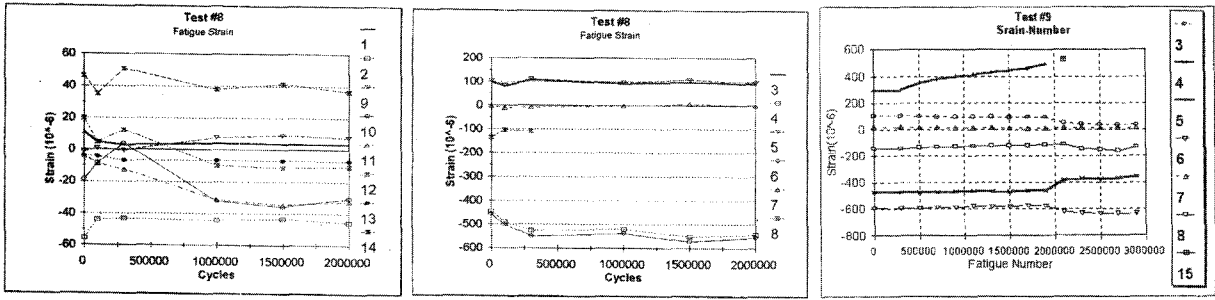
정값을 나타내고 있으며, 그림 9는 발생된 균열도를 나타내고 있다.

· 제 8 시험체

그림 8(a)와 8(b)의 변형률 측정값을 살펴보면 피로하중 재하초기에 작은 값의 변화를 보이다가 대부분의 변형률 게이지에서 측정값의 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 9(a)의 균열도에 나타난 바와 같이 Demec Gage 측정값과 육안으로 관찰된 Punch-out 균열이 2,000,000회에서 발생되었다. 다른 시험체의 경우 육안으로 균열이 관측되기 전에 변형률 측정값의 변화가 먼저 발생하였으나 본 시험체는 측정값의 큰 변화없이 균열이 육안으로 먼저 관찰된 경우이다. 1,500,000회에서 2,000,000회 사이의 균열폭 증가는 0.31mm로 나타났으며, 균열의 모습은 정적하중재하시에 넓게 발생한 Punch-out 균열의 모습과 유사하였다. 따라서, 무균열 설계지반계수를 가지며 포장 중간높이에 철근이 배근된 제 8시험체의 피로수명은 2,000,000회로 결정하였다.

· 제 9 시험체

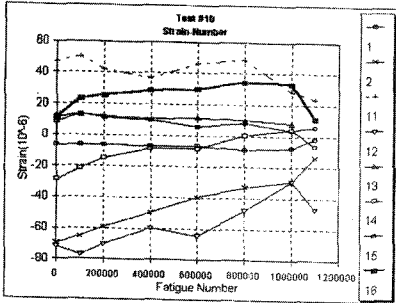
그림 8(c)의 변형률 곡선을 살펴보면 측정값들이 2,100,000회 주변에서 크게 변화하는 것을 알 수 있으며 Demec Gage 측정값 또한 균열이 발생하는 2번과 7번 Point에서 크게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 초기 균열발생 후 진전 상황을 관찰하기위해 계속해서 하중을 재하했으나 균열폭만이 증가될 뿐 추가적인 균열은 발생하지 않았다. 5번 변형률 게이지는 균열이 관통한 곳으로 1,900,000회에 게이지가 끊어졌고 그 옆에 새로 설치한 15번 게이지도 주변에 균열이 발생되면서 끊어졌다. 측정된 균열폭은 0.27mm



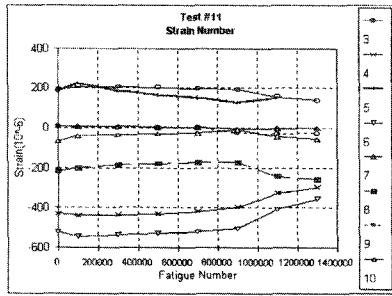
(a) 시험체 8

(b) 시험체 8

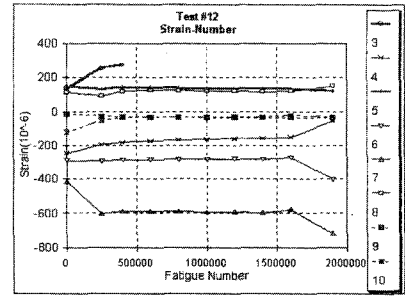
(c) 시험체 9



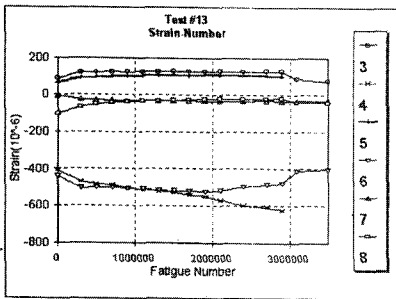
(d) 시험체 10



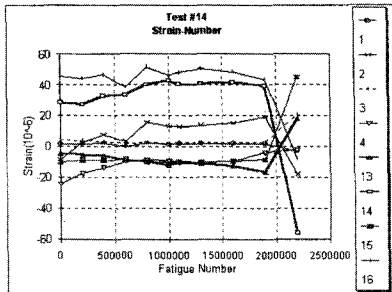
(e) 시험체 11



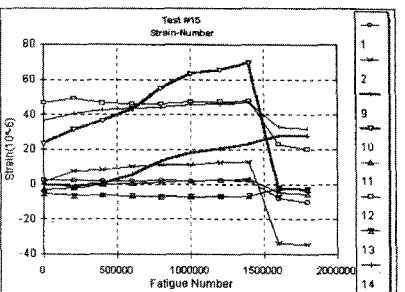
(f) 시험체 12



(g) 시험체 13



(h) 시험체 14



(i) 시험체 15

그림 8. 피로실험 변형률 측정값

로서 원형 CRCP인 경우 1.08mm에 해당하는 값이다. 따라서, 제 9시험체의 피로수명은 2,100,000회로 판단하였다. 본 실험결과는 같은 조건의 제 8시험체의 피로수명과 유사한 결과를 나타내었다.

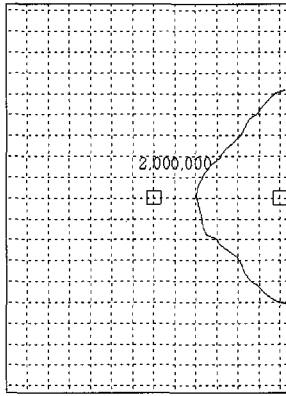
• 제 10 시험체

본 시험체에는 250mm 간격으로 5개의 균열이 설치되어 있다. 그림 9(c)에 나타낸 바와 같이 중앙의 균열 옆에 하중을 재하하였다. 그림 8(d)의 변형률 측정값을 살펴보면 1,000,000회에서 1,100,000회 사이에서 큰 변화를 일으키고 있다. 또한, 하중작용위치가 가까이 그림 9(c)의 균열도와 같은 Punch-out 파괴를 유도하는 균열이 좁은 범위에서 먼저 발생되고 초기균열 건너편으로 균열이 진전되었다. Demec Gage 측정값은 0.21mm를 나타내고 있으며, Data

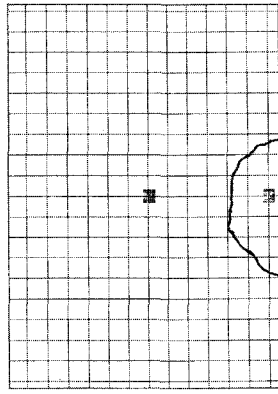
Analyzer 측정 결과 1,070,000회와 1,080,000회 사이에 균열이 크게 발생하는 것을 관측할 수 있었다. 따라서 250mm 초기 균열 간격을 가지는 제 10시험체의 피로수명은 1,080,000회로 결정하였다.

• 제 11 시험체

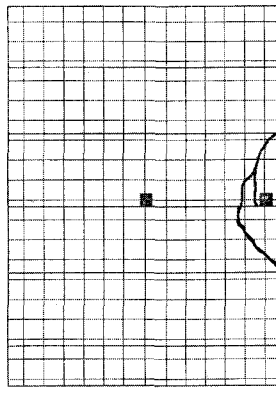
제 11시험체는 변형률 측정값이 1,100,000회부터 큰 변화를 보이고 있으며 5번 계지는 1,100,000회에 끊어져 변형률 값을 계속 측정할 수 없었다. Demec Gage 측정값은 1,300,000에서 크게 증가하였다. 시험체에 발생한 균열은 그림 9(d)의 균열도에 나타낸 Punch-out 형태의 심각한 균열이 육안으로도 관찰되었다. 당시 균열폭은 0.29mm였으며 비대칭 균열 형상을 보이고 있다. Data Analyzer 기록결과를 보면 1,240,000회에서 1,250,000회 사이에서 허용



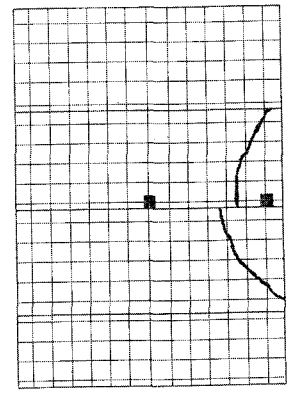
(a) 시험체 8



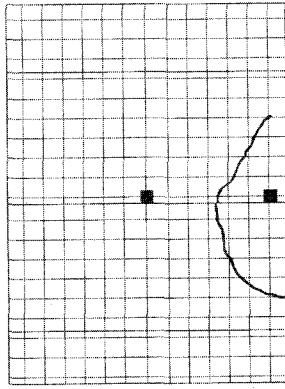
(b) 시험체 9



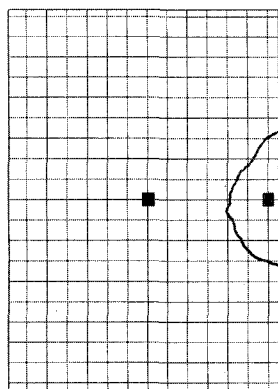
(c) 시험체 10



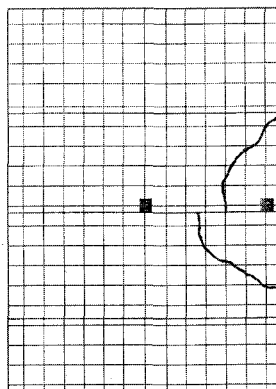
(d) 시험체 11



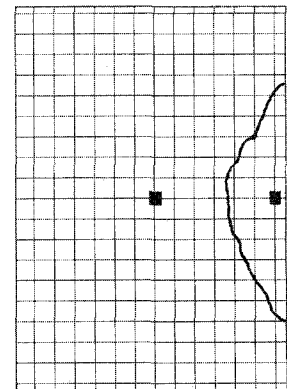
(e) 시험체 12



(f) 시험체 13



(g) 시험체 14



(h) 시험체 15

그림 9. 피로실험 균열도

균열폭을 넘는 균열이 발생된 것으로 판단된다. 따라서 375mm 초기 균열 간격을 가지는 본 시험체의 피로수명은 1,250,000회로 결정하였다.

· 제 12 시험체

500mm 균열간격으로 시험체 3곳에 초기 균열이 설치된 본 시험체는 그림 8(f) 변형률 측정결과 400,000회에서 변형률 게이지 3번 위치에서 미세 균열이 발생되고, 1,600,000회에서 1,900,000회 사이에서 대부분의 변형률 측정값이 크게 변화되는 것을 알 수 있었다. 그림 9(e)의 균열도의 균열은 3번 게이지 위치에서 초기 발생되어 Demec Gage 측정 Point E12, E8을 지나 변형률 게이지 14번으로 진전되며 비대칭 구조로 발생되었다. 1,650,000회에서 변형률 측정결과와 Data Analyzer 기록결과로 확인할 수 있었으며, 측정된 균열폭은 0.26mm로 허용 균열폭을 넘는 결과이다. 제 12시험체의 피로수명은 1,650,000회로 판단하였다.

· 제 13 시험체

철근을 콘크리트 슬래브 표면 가까이 설치한 본 시

험체에 4,000,000까지 피로하중을 재하하였다. 그림 8(g)와 같이 변형률은 2,900,000회에서 3,100,000회 사이에서 큰 변화를 보이고 있다. 균열은 5번 변형률 게이지를 지나 반대편으로 진전되며 대칭적으로 발생하였다. 5번 게이지는 2,900,000회까지 관측되고 3,100,000회 이후 끊어졌다. Demec Gage로 측정된 균열폭은 0.31mm였으며 Data Analyzer 기록 분석결과 3,060,000회에 균열 발생 및 큰 균열진전이 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 본 시험체의 피로수명은 3,060,000회로 결정하였다.

· 제 14 시험체

제 13시험체의 설계조건에 추가적으로 375mm 초기균열간격을 설치한 제 14시험체는 총 2,200,000회를 가력하여 그림 8(h)의 변형률 값과 9(g)의 균열도를 얻을 수 있었다. 균열은 1,900,000회와 2,200,000회 사이에 변형률 게이지 7번을 가로질러 발생되어 초기 균열 건너편으로 진전되었다. 측정된 균열폭은 0.27mm였으며 Data Analyzer 측정결과 1,930,000회에 게이지 값들이 크게 변화하였다. 따라서 본 시험체의 피로수명은 1,930,000회로 판단하였다.

표 7. 시험변수별 피로시험결과

시험체	피로수명 (횟수)	균열폭 (mm)	피로수명비교	균열형상
8	2,000,000	0.31	1.0	우각부 대칭균열
9	2,100,000	0.27	1.05	우각부 대칭균열
10	1,080,000	0.21	0.54	우각부 비대칭균열
11	1,250,000	0.29	0.63	우각부 비대칭균열
12	1,650,000	0.26	0.83	우각부 비대칭균열
13	3,060,000	0.31	1.53	우각부 대칭균열
14	1,930,000	0.27	0.97	우각부 비대칭균열
15	1,580,000	0.28	0.79	우각부 대칭균열

· 제 15 시험체

지반조건I(지반반력계수 = 706 MN/m³)을 가지는 제 8과 9시험체와 달리 지반조건 II(지반반력계수 = 196 MN/m³)로 제작된 제 15시험체는 Punch-out 균열이 제 8과 9시험체보다 넓게 분포되어 발생하였다. 변형률 측정결과는 1,400,000회에서 1,600,000 회 사이에서 크게 변화되었는데, 변형률 게이지 5번은 큰 변형률 값을 보이다가 1,600,000에서 끊어졌다. 발생한 균열폭은 0.28mm였으며, Data Analyzer 측정결과 1,580,000회에서 게이지들의 측정값이 크게 변화하였다. 제 15시험체의 피로수명은 1,580,000회로 결정하였다.

4. 결 론

연속철근 콘크리트 포장을 1/4로 축소한 시험체를 제작하여 설계변수별 피로시험을 실시하였다. 실험 변수로는 초기 균열 존재 여부 및 균열간격, 철근의 배근 위치, 지반조건이 고려되었다. 총 8개의 피로시험체에 대한 실험결과를 표 7에 정리하였으며, 피로수명을 그래프로 그림 10에 비교하였다.

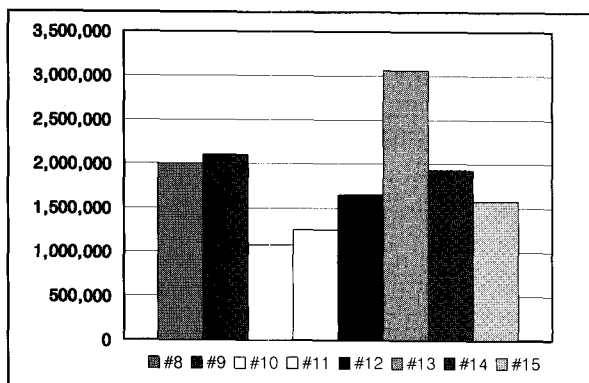


그림 10. 시험체 피로수명 비교

1. 제 8시험체를 기준으로 균열간격에 따른 피로수명을 비교해 보면, 초기균열간격 250mm, 375mm, 500mm가 존재하는 제 10, 11, 12 시험체의 피로수명은 각각 54%, 63%, 83%의 수명을 나타내고 있다. 즉 초기균열간격이 250mm~500mm(실규격 1m~2m)일 때, 포장의 피로수명은 대략 50%~80%정도를 나타내는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 또한, 초기균열간격이 500mm(실규격 2m)이상되는 경우 초기 균열이 존재하지 않는 포장의 피로성능에 근접하는 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 AASHTO (1994)의 균열간격제한 상한선 2.5m 기준을 국내 연속철근 콘크리트 포장에 적용 가능할 것으로 판단된다.

2. 초기균열이 고려된 시험체 10, 11, 12의 최종 Punch-out 균열도는 비대칭적으로 발생하였다. 하중이 직접적으로 작용한 곳의 균열분포보다 초기균열 건너편에 발생한 균열의 분포가 넓게 위치함을 관측할 수 있었다. 본 실험에서는 초기균열 모사시 골재 맞물림에 의한 하중전달은 배제하고 철근에 의해서만 초기균열 건너편으로 하중전달이 이루어지도록 제작되었다. 따라서 발생한 균열 형상을 토대로 연속철근 콘크리트 포장에 있어서 하중전달이 원활하게 이루어짐을 확인할 수 있었으며, 국부적으로 포장면의 탈락 및 분란 현상이 적절히 제어됨을 관측할 수 있었다.

3. 철근이 표면 가까이 설치된 제 13시험체는 슬래브 중간높이에 철근이 설치된 제 8시험체보다 53% 수명이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 375mm 초기균열이 설치된 제 11과 14시험체 피로수명을 비교해 보면 상부에 철근이 배근된 제 14시험체가 54% 정도 우수한 피로수명을 나타내었다. 표면 가까이 배근되는 철근의 경우 현

장시공시 다짐에 보다 많은 주의가 필요로 하지만, 다짐 등의 시공성이 향상된다면 연속철근 콘크리트 포장의 수명을 극대화 할 수 있을 것이다.

4. 지반조건이 취약하면 많은 변위를 유발하여 포장의 균열발생을 촉진시키고 균열부위의 심각한 파손을 일으키게 된다. 제 8시험체 지반조건은 39% 수준으로 구현된 제 15시험체의 피로수명은 제 8시험체의 79%를 나타내었다. 본 실험결과를 통해 포장 지반의 다짐 및 안정처리층 설치시 충분한 지지력을 가질 수 있도록 시공하는 것이 포장의 피로수명에 중요함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 구현하지 못하였으나 일부 지반의 취약부분으로 인한 포장의 국부적인 파손과 탈락으로 피로수명을 저하시키지 않도록 포장시공이 이루어져야 할 것이다.
5. 연속철근 콘크리트 포장의 피로수명에 영향을 미치는 또 다른 설계인자로는 슬래브의 두께, 종방향 철근량, 철근의 부착면적비 등이 있으며 이러한 다양한 설계변수를 검토하여 콘크리트 포장의 피로성능을 분석하는 것은 향후 콘크리트 포장의 유지보수시스템 구축을 위한 주요한 데이터를 제공할 것이다.

감사의 글

본 실험 연구를 위해 실험실과 장비를 제공해준 고려대학교 건축·사회환경공학과에 감사드리며, 실험 진행에 많은 도움을 주신 선문대학교 윤기용 교수, 손준상, 양현정에게 감사의 마음을 전합니다.

참고 문헌

건설부 (1988) 중부고속도로 건설지. 한국도로공사.
 AASHTO (1993) *guide for design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. USA.
 Algor (1989) *Algor processor reference manual*. Algor Inc., Pittsburgh, PA.
 Jung, H.K., Lee, B.C., Lim, S.Y., and Kim, K.H. (1994) *A study on development of cracks and*

behavior in continuously reinforced concrete pavement, Annual Research Report. Korea Highway Research Center, Korea Highway Corporation.

Kang, Y.J., Park, J.S., Yoon, K.Y. and Han S.Y. (2004) Experimental study on fatigue strength of continuously reinforced concrete pavements. *Magazine of concrete research*, Thomas Telford, Vol. 56, No. 10, December, pp. 605-615.
 Majidzadeh, K., and Ilves, G. J. (1983) *Evaluation of rigid pavement overlay design procedure: development of the OAR procedure*. FHWA-RD-83-090, Federal Highway Administration.
 Suh, Y-C, Hankins, K. D. and McCullough, B. F. (1992) *Early-age behavior of continuously reinforced concrete pavement and calibration of the failure prediction model in the CRCP-7 program*. Research Report 1244-3, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, TX. USA.
 Taute, A., McCullough, B. F. and Hudson, W. R. (1981) *Improvements to the materials characterization and fatigue life prediction methods of the Texas rigid pavement overlay design procedure*. Research Report 249-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, TX. USA.
 Vesic, A. S., and Saxena, S. K. (1970) *Analysis of structural behavior of AASHTO road test rigid pavements*. NCHRP Report 97, HRB, National Research Council, Washington, D.C. USA.
 Yoder, E.J. and Witczak, M.W. (1975) *Principle of pavement design*, John Wiley & Sons Inc., New York.

© 논문접수일 : 2007년 07월 27일
 © 심사의뢰일 : 2007년 07월 27일
 © 심사완료일 : 2007년 08월 13일