

섬유보강 콘크리트 기층의 적용을 위한 환경하중에 대한 설계인자 영향 분석

Sensitivity Analysis of Design Variables under Environmental Loads for FRC Base Application

조영교* · 김성민** · 박종섭*** · 박영환****

Cho, Young Kyo · Kim, Seong-Min · Park, Jong Sup · Park, Young Hwan

1. 서 론

섬유보강 콘크리트(FRC: Fiber Reinforced Concrete)를 이용하여 도로 포장의 기층을 구성하고 그 위에 아스팔트 또는 콘크리트로 표층을 구성함으로써 기능적인 측면과 구조적인 측면 모두에서 우수한 공용성을 발휘할 수 있는 복합포장 공법의 개발이 진행 중에 있다. 이러한 공법에서 FRC 기층의 환경하중에 대한 거동은 표층의 거동에 영향을 미칠 수 있으며, 특히 표층이 아스팔트로 이루어졌을 경우에는 구조적으로 우수한 FRC 기층이라도 이러한 기층에 발생하는 균열에 의해 표층에 반사균열 등의 파손을 야기할 수도 있다.

본 연구는 FRC를 이용하여 도로 포장의 기층을 구성하였을 경우에 온도 및 습도 변화 등의 환경하중에 대한 기층의 거동을 분석하기 위해 수행되었다. 따라서 이러한 기층의 재료물성이 변화함에 따른 균열간격 및 균열틈 등의 균열 발생 특징을 구조해석을 통해 분석하였다.

2. 해석 방법

FRC 기층의 환경하중에 대한 거동을 분석하기 위하여 2차원 유한요소모델을 개발하였다. 종방향(가로방향, 차량진행방향)과 수직방향의 좌표계를 평면으로 하여 콘크리트 기층 및 하부층을 모델링 하였다. 콘크리트 기층은 4절점 선형 직사각형 요소로 구성하였으며 하부지층은 복합수직강성을 가지는 스프링 요소로 구성하였다. 이러한 스프링 요소는 콘크리트 기층의 환경하중에 대한 쥘링 거동을 제대로 모사할 수 있도록 무인장스프링(tensionless spring)으로 구성하였다. 콘크리트 기층이 온도변화에 의해 수축 팽창을 할 때 하부층과의 마찰에 의한 저항은 종방향 스프링을 이용하여 모사하였다.

FRC 기층 포장에서 균열은 콘크리트의 인장응력이 인장강도에 다다랐을 때 발생하게 된다. 만약 콘크리트의 인장강도가 위치에 관계없이 항상 일정하다고 가정하면 환경하중에 의한 새로운 균열은 균열과 균열의 중간에서 발생하게 될 것이다. 왜냐하면 모델에서 콘크리트의 최대응력은 균열간격의 중간에서 생기기 때문이다. 하지만 콘크리트의 인장강도는 위치에 따라 달라지기 때문에 새로운 균열은 균열간격의 중간에서 항상 발생하지는 않는다. 이러한 콘크리트의 인장강도의 위치에 따른 변화를 고려하기 위하여 종방향을 따라 각각의 유한요소에 콘크리트의 인장강도를 정규분포를 이용하여 임의로 지정을 한다. 그 후 해석을 통해 얻은 콘크리트의 응력과 인장강도를 각각의 유한요소에서 비교한다. 응력의 값이 강도의 값보다

* 학생회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail : brain@khu.ac.kr) - 발표자

** 정희원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자(E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

*** 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 수석연구원 · 공학박사(E-mail : jspark1@kict.re.kr)

**** 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 연구위원 · 공학박사(E-mail : yhpark@kict.re.kr)

크게 나오는 곳 중 그 차이가 가장 큰 곳에서 새로운 균열이 발생하게 된다. 균열이 발생하면 FRC 기층은 두 개의 슬래브로 나뉘어지며 각각의 슬래브에 대해 이러한 해석을 다시 하여 궁극적으로는 슬래브 내의 모든 위치에서 인장응력이 인장강도보다 작아지게 되면 더 이상의 균열은 발생하지 않을 것이며, 결국 여러 다른 균열간격을 가지는 FRC 기층의 균열 특성을 분석할 수 있게 된다.

유한요소의 크기는 종방향으로는 7.62cm(3in.)로 하였으며 수직방향으로는 기층 두께의 1/10로 하였다. FRC 기층 포장의 구조해석 모델을 이용하여 콘크리트 타설 후 시간의 경과에 따른 평균 균열간격의 변화 및 균열틈의 변화를 분석하였다. 1일부터 28일 까지는 매일 결과를 산출하였으며 28일 이후에는 콘크리트 타설 후 가장 추운 날이 되는 일자를 타설 후 120일로 가정하여 결과를 산출하였다. 여기서 120일은 특별한 의미는 없으며 연중 가장 추운 날의 결과로 생각하면 된다.

3. 해석 변수

표 1은 FRC 기층 포장의 환경하중에 의한 영향을 분석하기 위한 변수 값을 보여준다. 해석에 사용된 인자는 기층 슬래브 두께, 열팽창계수, 탄성계수, 인장강도, 압축강도가 사용되었으며, 인장강도는 식 (1)을 적용하여 산정하였다(Ahmad and Shah, 1985). 즉 인장강도는 압축강도에 대한 일정한 함수로 가정하여 압축강도와 인장강도는 궁극적으로 하나의 인자로 고려하여 해석을 수행하였다. 표 1의 변수 값 앞에 붙여진 번호는 해석과 결과값 분석이 용이하도록 번호를 사용한 것으로 1111의 경우 슬래브두께 12cm, 열팽창계수 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 탄성계수 10GPa, 압축강도 5MPa, 인장강도 1.07MPa를 변수로 하여 해석한 것이다.

각 인자가 콘크리트 슬래브의 균열간격과 균열틈에 미치는 영향을 분석하기 위하여 표 1에서 보여주는 각 변수의 중앙값인 2322를 기준으로 민감도 분석을 수행하였다. 즉, 기층 슬래브 두께가 변화할 때 균열간격과 균열틈의 변화를 분석하기 위해서는 슬래브 두께 이외의 변수는 모두 중앙값에 놓고 해석을 수행하는 것이다.

표 1. 해석에 사용된 변수 값

슬래브 두께(cm)		① 12	② 15	③ 18	
열팽창계수($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	① 8	② 9	③ 10	④ 11	⑤ 12
탄성계수(GPa)		① 10	② 15	③ 20	
압축강도(MPa)		① 5	② 10	③ 15	
인장강도(MPa)		1.07	1.52	1.86	

$$f_{sp} = 0.48 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

여기서, f_{sp} 는 활열인장강도이며, f'_c 은 압축강도이다.

환경하중에 대한 해석을 수행하기 위해서는 온도에 대한 데이터를 입력해야 한다. 일반적인 콘크리트 포장의 슬래브 두께가 30cm이기 때문에 이러한 두께에 대한 온도 변화 추세는 널리 알려져 있으나 본 연구에서는 약 15cm를 전후한 두께의 콘크리트에 대한 온도 데이터를 필요로 한다. 따라서 본 해석을 위해 2009년 가을 주문진 근교의 고속도로에 시공된 15cm 두께의 콘크리트 포장에서 실측한 온도 데이터를 이용하였으며 상세한 내용은 표 2와 같다.

표 2. 해석에 사용 된 콘크리트 기층 온도

기층 슬래브 두께 슬래브 위치	12cm		15cm		18cm	
	상부(°C)	하부(°C)	상부(°C)	하부(°C)	상부(°C)	하부(°C)
1일	27.5	30.7	27.5	31.5	27.5	32.3
2일	24	27.2	24	28	24	28.8
7일	19	22.2	19	23	19	23.8
28일	13	16.2	13	17	13	17.8
120일	0	1.6	0	2	0	2.4

위에서 설명한 입력값 이외에 본 해석에서 사용한 입력값은 표 3과 같다.

표 3. 해석에 사용 된 입력값

	Unit	Value
Poisson's Ratio of Concrete		0.15
Specific Weight of Concrete	t/m^3	2.32
Coefficient of Variation for Concrete Tensile Strength	%	10
Drying Shrinkage at 256 days		0.0004
Vertical Stiffness of Subgrade	MPa/m	80
Frictional Bond-Slip Stiffness / Unit Area	MPa/m	40.72

4. 해석 결과

기층 슬래브 두께에 따른 민감도 분석을 위해 슬래브 두께는 변화를 주며 나머지 인자인 열팽창계수, 탄성계수, 압축강도(인장강도)는 표 1의 중앙값을 사용한 1322, 2322, 3322에 대하여 해석을 수행하여 분석하였다.

그림 1(a)는 슬래브 두께별 시간에 따른 균열간격으로 시공 초기 급격히 균열 간격이 작아지며 시간이 지남에 따라 감소의 비율이 완만해지는 것을 알 수 있다. 또한 3322가 균열간격이 가장 넓고 2322, 1322의 순으로 나타나며 이는 슬래브 두께가 두꺼울수록 균열간격이 넓어지는 것을 의미한다. 그림 1(b)는 슬래브 두께별 시간에 따른 균열틈 변화를 보여주며 시공 초기 균열틈이 급격히 증가하며 시간이 지남에 따라 증가의 정도가 감소하는 것을 알 수 있으며 균열틈의 크기는 3322, 2322, 1322의 순으로 슬래브 두께가 두꺼우면 균열틈 또한 넓어진다. 이는 슬래브의 두께가 두꺼울 경우 균열간격이 넓어지게 되고, 일반적으로 균열틈은 균열간격에 비례하기 때문에 균열간격이 넓어지면 균열틈 또한 넓어지게 된다.

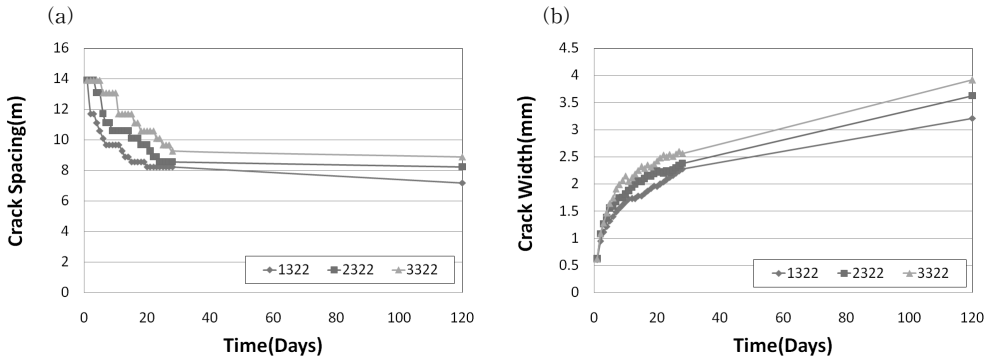


그림 1. 기층 슬래브 두께 변화에 의한 균열 양상: (a) 균열간격, (b) 균열틈

기층 슬래브 두께의 민감도 분석과 유사하게 열팽창계수, 탄성계수, 압축강도(인장강도)에 대한 각각의 분석을 수행하였으며 이에 대한 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4는 각 변수의 증감에 따라 균열간격과 균열틈의 관계를 나타낸 표이다. 탄성계수의 증가는 균열간격의 감소를 야기하지만 균열틈에는 영향을 거의 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 분석을 통해 각 인자가 균열간격을 최대가 되도록 하는 3113이 균열간격이 가장 크게 나타날 것이며 1531이 가장 작게 나타날 것을 예측할 수 있다. 또한 균열틈은 35X3 (즉, 3513, 3523, 또는 3533)이 가장 크며 11X1이 가장 작음을 예측 할 수 있다.

표 4. 인자 변수 증가에 따른 균열간격 및 균열틈 변화 양상

	변수값	균열간격	균열틈
슬래브두께	증가	증가	증가
열팽창계수	증가	감소	증가
탄성계수	증가	감소	-
인장강도	증가	증가	증가
압축강도			

5. 결 론

본 연구에서는 FRC 기층 포장에 환경하중을 받을 때의 거동을 유한요소해석을 통해 분석하였다. 분석결과 고려한 변수가 균열간격 및 균열틈에 미치는 일반적인 영향을 파악할 수 있었으며, 이러한 결과를 이용하여 표층 포장과 가장 적합하게 어울릴 수 있는 FRC 기층을 구성하는 재료를 개발하는 기반이 될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 얻은 결과 중 주요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 고려한 변수의 증감값을 기준으로 민감도 분석을 수행한 결과, 기층 슬래브 두께와 인장강도가 증가할수록, 그리고 열팽창계수와 탄성계수가 감소할수록 균열간격이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- 기층 슬래브 두께가 증가하거나, 열팽창계수가 증가할 때, 또는 인장강도가 증가할 때 균열틈이 증가하게 된다. 탄성계수의 변화는 균열틈의 변화양상에 뚜렷한 영향을 미치지 않는다.
- 일반적으로 균열간격이 증가하면 균열틈도 증가하는 경향을 보이지만 열팽창계수의 증가는 균열간격을 감소시키는데도 불구하고 균열틈을 증가시키는 경향이 있다.

참고 문헌

- [1] Ahmad, S. H. and Shah, S. P.,(1985), "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete," PCI Journal, Vol. 30, No. 6, pp. 92-119.