

3차원 유한요소해석을 통한 연성포장의 층간접촉특성이 피로균열에 미치는 영향 평가

Effect of Interface Conditions on Flexible Pavement Fatigue Cracking Using 3D Finite Element Analysis

조명환*, 김낙석**

Jo, Myoung-hwan · Kim, Nakseok

Abstract

To determine design or remaining life of flexible pavement, tensile strain at the bottom of asphalt concrete course and vertical strain on top of subgrade should be estimated. Various computer programs can be used for determining the strain at the critical position in pavement. However, these are conducted under the assumptions of full bonded or unbound state of layer interface conditions. This study compares the output of finite element analysis and multi-layer elastic analysis as vertical load was applied to the surface of flexible pavement. It is noted that the pavement performance is significantly affected depending upon the interface conditions.

Key words: Interface conditions, Flexible pavement, Finite Element Analysis

1. 서론

아스팔트 콘크리트 포장은 다층 구조로 이루어져 있기 때문에 포장의 잔류수명과 거동을 예측할 때, 각 층의 구조적 특징과 재료 물성을 고려하게 된다. 그러나 일반적으로 포장의 잔류수명과 거동을 예측할 때, 각 층들이 생성하는 경계조건을 무시하고 완전접합(full bonded)상태로 가정하여 해석을 수행하게 되며, 특수한 경우에 비접합(unbound)상태로 구조해석을 수행하게 된다. 그러나 아스팔트 콘크리트 포장의 경계면 조건은 포장의 시공방법, 공용상태 및 포장체 온도 등의 영향으로 여러 조건을 보일 수 있다. 따라서 본 연구는 피로균열 예측 모형을 개발하기 위하여 아스팔트 콘크리트 포장의 경계면 조건이 미치는 영향에 관련된 민감도 분석을 수행 하고자 한다. 이를 위하여 동적재하시험으로부터 포장의 현장 거동을 측정하고, ABAQUS 프로그램을 사용하여 여러 가지 경계면 조건이 포장의 거동에 미치는 영향을 비교· 분석하고자 한다.

2. 층간 경계면 조건

경계면에 관련된 연구는 Uzan(1976)이 경계면을 순수전단력이 작용하는 유한 두께를 갖는 층으로 정의하여 해석을 실시한 후 최근들어 활발한 논의가 진행되고 있다. 다층구조의 포장체에서 경계면 상태는 포장의 공용성을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 그 이유는 완전접합(full bonded) 상태와 비접합(unbound) 상태에서의 최대변형률의 크기와 발생위치가 다르기 때문이다. 실제 포장구조에서는 Romanoschi et al.(2001)의 연구 결과를 살펴보면 경계면의 마찰특성에 따라 다양한 종류의 경계면 조건이 발생할 수 있다.

* 정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 박사과정 · E-mail: dragonjo@unitel.co.kr

** 정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 부교수

Romanoschi et al.는 Louisiana 주의 시험포장도로에서 추출한 현장코어를 이용하여 경계면 조건, 온도, 그리고 연직하중을 변화시켜 120회의 직접전단시험을 실시하였으며, 시험결과는 그림 1과 같이 구속압력에 따른 경계면의 마찰계수분포를 얻었다. 그림 1을 살펴보면 마찰계수 μ 의 값이 0.55-0.85인 경우가 전체의 약 70%를 차지하였으며, 시험에서 얻어진 마찰계수 μ 의 범위는 0.41-1.89의 값을 보여주고 있다.

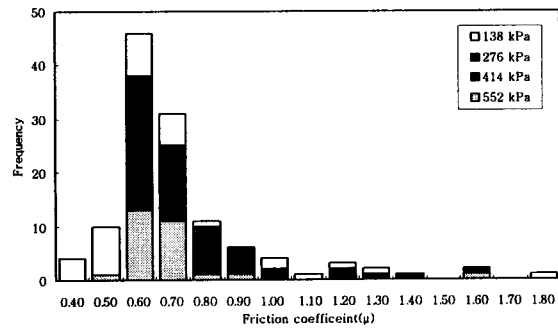


그림 1. 전단 시험에 의한 마찰계수의 분포

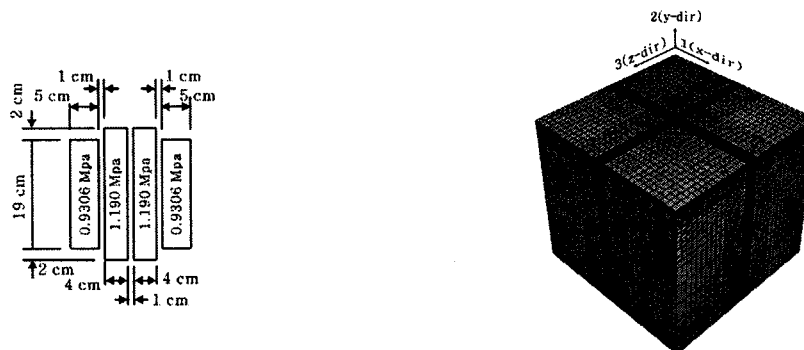
3. 동적하중재하시험 결과 및 분석

시험에 사용된 타이어의 접지압력이 포장체에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 한국도로공사에서 운영중인 시험도로의 A5 단면에 대하여 동적하중 재하시험을 수행하였다. 시험에 사용된 차량은 적재 하중 없이 타이어의 공기압력을 전륜의 경우 1.034MPa로 고정하였으며, 시험결과 A5 단면의 경우 아스팔트 콘크리트 표층과 아스팔트 콘크리트 중간층의 변형률은 완전접촉상태의 거동을 보여주고 있으며, 아스팔트 전체 층의 경우를 살펴보면 동적하중재하시험 결과 중립층의 위치는 중간층의 중앙부분(표층으로부터 12cm 전후)으로 파악되었다.

4. 유한요소해석 및 분석

4.1 유한요소해석 모델

층간 접촉 조건이 포장 층의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 아스팔트 중간층, 아스팔트 기층, 쇄석 보조기층, 동상방지층 간의 경계면에 대하여 완전접합, 비접합 상태를 고려하였으며, 표 1과 같이 구분하여 유한요소해석을 수행하였으며 해석에 사용된 유한요소 모델과 하중형태를 그림 2에 나타내었다.



(a) 타이어 접지면적 모델링

(b) 3차원 모델의 Mesh 작성

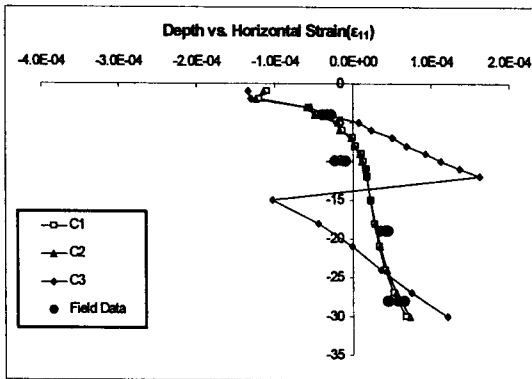
그림 3. 3차원 유한요소해석 모델

4.2 해석결과 및 분석

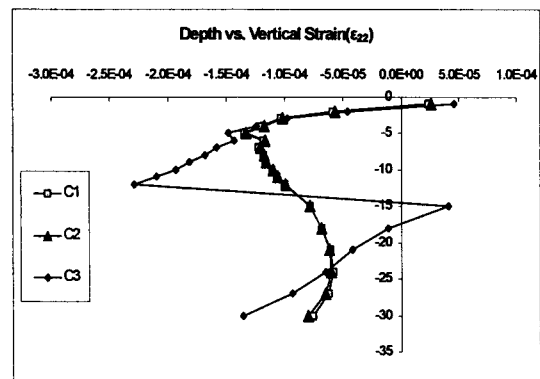
그림 3은 층간 접촉 조건을 사용하여 깊이 변화에 따른 예측된 변형률과 전절에서 살펴본 시험도로 A5 단면에서 수행된 동적하중재하시험으로부터 측정된 인장변형률을 나타낸 것이다. 그림 3을 살펴보면 Case 1과 Case 2의 경우 아스팔트 콘크리트 층과 그 하부 층인 쇄석 보조기층의 접합상태에 따른 인장 변형률의 크기 차이는 Case 1에 대하여 표층으로부터 12cm 위치에서는 약 97.5%, 106.4%의 값을 나타내고 있다. 아스팔트 콘크리트층 내부에 비접합면이 존재하는 Case 3의 경우, 표층으로부터 12cm 위치에서는 약 938.7%, 179.61%의 값을 나타내고 있다. 즉, Case 3의 경우는 Case 1이나 Case 2보다 하중을 분담해야하는 포장층의

깊이가 아스팔트 중간층과 아스팔트 기층 사이에 비접합면이 존재하게 됨으로써 50% 전후로 감소하게 되어 표층으로부터 12cm 위치에서는 900%를 넘는 예측 값의 차이를 보여주고 있다. 따라서 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장층을 시공할 때, 아스팔트 콘크리트 층의 두께가 두꺼울 경우 2~3층으로 나누어 시공되며 이때 층간 경계면의 시공이 피로수명에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Case 3의 완전접합과 비접합 경계면 조건에 추가적으로 Romanoschi et al.(2001)의 실험 결과로부터 얻어진 마찰계수 분포를 사용하여 아스팔트 콘크리트 포장의 거동을 해석하였으며, 해석결과는 그림 4와 같다. 그림 4를 살펴보면 표층으로부터 12cm 부분의 횡방향 인장변형률의 경우 Case 4의 경우에 대하여 Case 이 Case 7이 각각 97.94%, 100.00%, 93.61%의 크기를 보여주고 있으며, 마찰면이 존재하는 경계면을 기준으로 상부(1~12cm)에서의 횡방향 변형률과 압축변형률의 크기에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 경계면을 기준으로 하부(13~20cm)에서의 횡방향 변형률은 마찰계수에 따라 큰 차이를 보여주고 있으며, Case 6의 경우에 압축 변형 및 인장변형이 거의 생기지 않는 것으로 나타났으며, 마찰계수의 증가에 따라서 인장 변형률과 압축 변형률의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 마찰계수가 1.0보다 큰 경우 경계면을 기준으로 상부 아스팔트 콘크리트 층과 하부 아스팔트 콘크리트 층의 피로수명 모두를 고려해야 할 것으로 사료된다.

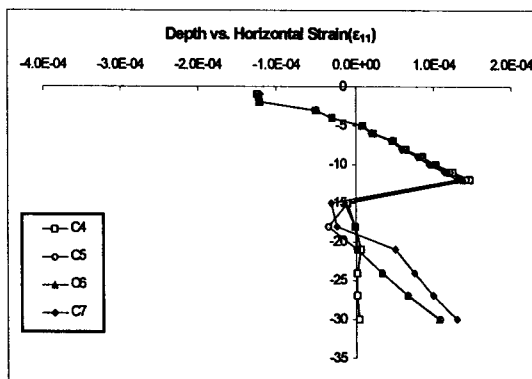


(a) 횡방향 변형률 분포(σ_{11})

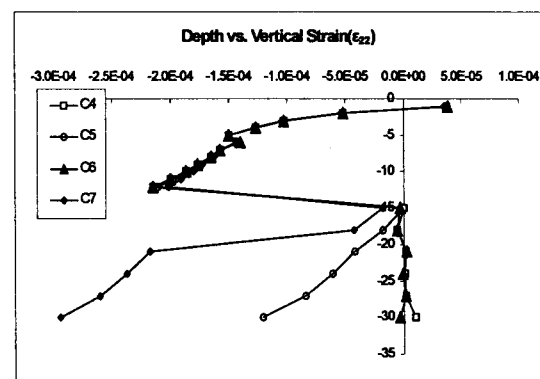


(b) 수직 변형률 분포(σ_{22})

그림 3. 층간 접촉조건에 따른 변형률 분포곡선



(a) 횡방향 변형률 분포(σ_{11})



(b) 수직 변형률 분포(σ_{22})

그림 4. 층간 마찰계수에 따른 변형률 분포곡선

5. 결 론

본 연구는 3차원 유한요소해석 모델을 통하여 피로균열의 발생 과 진전예측 모델을 개발하기 위한 선행연구로서 층간접촉 문제에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 층간접촉조건에 따른 3차원 유한요소해석결과의 타당성 검토를 위하여 한국도로공사의 아스팔트 포장 구간 중 A5 단면에 대한 동적하중재하시험을 수행하였으며, 아스팔트 콘크리트 표층과 아스팔트 콘크리트 중간층의 변형률은 완전접촉상태의 거동을 보여주었으며, 층립추의 위치는 중간층의 중앙부분(표층으로부터 15cm 전후)으로 파악되었다.
2. 아스팔트 콘크리트 포장의 층간접촉조건이 포장의 거동과 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다. 아스팔트 콘크리트 층 내부에 비접합경계층이 존재하는 포장의 피로수명은 모든 아스팔트 층이 완전접합조건인 경우보다 피로수명이 6.07% 감소하는 것으로 예측되었다. 따라서 아스팔트 콘크리트 층의 두께가 두꺼울 경우 2~3개 층으로 구분하여 시공되는 현장 조건을 고려할 때, 아스팔트 콘크리트 층의 경계면 조건이 피로수명예측에 영향이 큰 것으로 나타났다.
3. 아스팔트 콘크리트 층 내부에 마찰계수(μ)가 0.5~1.5인 경계층이 존재하는 경우, 경계층이 포장의 거동 과 피로수명에 미치는 영향을 평가하였다. 경계층을 기준으로 아스팔트 콘크리트 상부 층의 피로수명은 $\mu=1.0$ 에 대하여 각각 93.00%($\mu=0.8$)와 118.93% ($\mu=1.5$)를 보여주었으며, 하부 층은 $\mu=1.0$ 에 대해서 각각 97.64%($\mu=0.8$)와 529.92% ($\mu=1.5$)를 보여주었다. 따라서 마찰계수를 사용한 경계층의 영향으로 피로수명 의 예측에 사용되는 최대인장변형률의 고려해야하는 임계위치가 바뀌는 것으로 나타났다.
4. 아스팔트 콘크리트 포장을 구성하고 있는 아스팔트 콘크리트 층, 보조기층, 노상의 접합조건이 인장응력 분포 및 피로수명 예측에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 아스팔트 콘크리트 층 내 부에 완전접합되지 않은 경계층이 존재할 경우, 포장의 피로수명과 최대인장변형률의 발생 위치를 예측 하는데 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 피로균열 예측모형에서 포장층의 구조 및 재료의 특성뿐만 아니라 아스팔트 콘크리트 층 내부에 존재할 수 있는 층간 경계조건도 고려되어야 할 것으로 판 단된다.

참고문헌

1. Monismith, C.L. (1981), "Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design", Proceedings of the Eighteenth Pavement Conference, East Lansing, MI.
2. National Cooperative Highway Research Program(2004), "Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement", National Cooperative Highway Research Program.
3. Romanoschi, S.A, and Metcalf, J.B.(2001), "The Effects of Interface Condition and Horizontal Wheel Loads on the Life of Flexible Pavement Structure", Transportation Research Board, TRB 1778, TRR Washington, D.C., pp. 123-131.
4. Romanoschi, S.A, and Metcalf, J.B.(2001), "Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces", Transportation Research Board, TRB 1778, TRR Washington, D.C., pp. 132-139.
5. Ullidtz, P.(1987), "Pavement Analysis", Elsevier, Amsterdam, 177-198.
6. Uzan, J.(1976), "Influence of the Interface Condition on Stress Distribution in a Layered System", Transportation Research Board, TRR 616, TRB Washington, D.C., pp.71-73