

섬유보강 아스팔트 포장 부착 전단강도의 FE 모형화

FE Modeling of Geogrid-Reinforced Asphalt Pavement Bonding Shear Strength

이강훈* · 윤태영** · 권수안*** · 정진훈****

Lee, Kang Hun · Yun, Tae Young · Kwon, Soo Ahn · Jeong, Jin Hoon

1. 서론

현재 도로 포장 설계는 경험적 지식과 역학적 포장해석에 바탕을 둔 설계법에 의해 실시되고 있으며, 포장구조 해석은 실내실험을 바탕으로 포장 재료의 물성을 기초로 해석적 거동을 포장의 공용성과 연계하여 이루어진다. 포장구조해석 시 일반적으로 그림 1과 같이 하중을 재하할 때 도로 포장체에서 발생하는 포장 표면, 기층상부, 표층하부, 보조기층 상부에서 발생하는 응력 및 변형률을 결과치로 하며 이를 바탕으로 포장체의 거동을 분석하고 있다. 이때 일반적으로 도로 포장은 다층으로 이루어진 구조체로 각 층은 탄성계수 및 포아송비와 같은 물리적 특성이 다른 재료로 구성되어지기 때문에 하중이 재하되면 층간 경계면 상태에 따라서 상부층과 하부층 간에 다른 응력분포와 변형율을 보이게 된다. 즉 도로 포장체에서 층간 경계면 특성은 포장체 전체에 발생하는 응력 및 변형율에 변화를 가져오게 되며 경계층의 상태가 포장 수명에 큰 영향을 끼치게 된다(최준성, 2002).

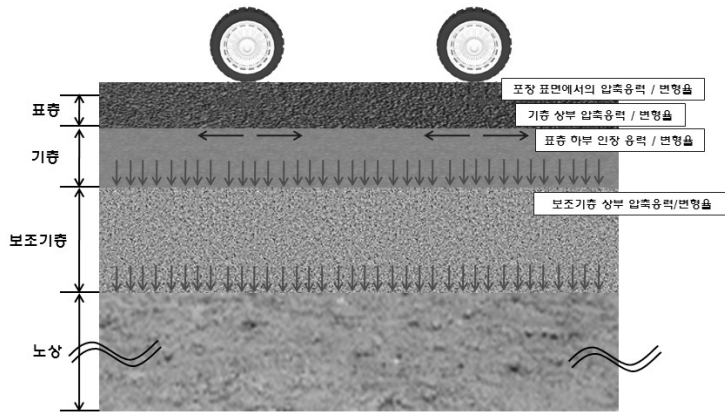


그림 1. 포장구조 해석시 고려되는 응력 및 변형율

한편 최근 소성변형 및 반사균열이 빈번한 교차로나 오르막 차로 구간에 섬유보강아스팔트 포장이 그 대안으로 제시되고 있다. 섬유보강 아스팔트 포장은 포장체 내부에 삽입된 섬유그리드가 포장체 내부에서 발생하는 횡방향 응력을 분산시킴으로 아스팔트 표층에 발생하는 소성변형 및 반사균열을 억제한다. 이러한 섬유보강 아스팔트 포장에서 아스팔트 층과 섬유그리드간 부착 상태는 포장체의 거동에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되며 실제 시험 시공 현장에서 시공 상태에 따라 그 부착강도가 다양하게 나타났다(박상구 외, 2009). 이에 본 연구에서는 섬유보

* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : smileo16@hanmail.net)

** 정 회 원 · 한국건설기술연구원 Postdoctor · 공학박사(E-mail : taeyoungyun08@gmail.com)

*** 정 회 원 · 한국건설기술연구원 선임연구위원 · 공학박사(E-mail : sakwon@kict.re.kr)

**** 정 회 원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : jhj@inha.ac.kr)

강 아스팔트 포장에서 아스팔트 표층과 섬유그리드 간의 부착특성에 따른 포장체 거동의 변화를 분석하기 위하여 선행연구에서 수행된 섬유보강 아스팔트 포장의 부착전단 강도 실내시험을 기초로 하였다. 그리고 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 현장 시공 상태에 따른 표층과 섬유그리드간 부착특성을 Cohesive Zone Model(CZM)을 적용하였고 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus로 모형화하였다.

2. Cohesive Zone Model(CZM)

일반적으로 파괴역학에서 정의하고 있는 파괴의 종류는 그림 2와 같이 Mode 1,2,3로 나뉜다. 이 세 가지 파괴 모형은 CZM을 이용하여 모형화 할 수 있으며, Hillerborg 등(1976)이 Cohesive Model을 사용하여 부서지기 쉬운 재료의 파괴를 모형화하였다. 또한 Needleman(1987)은 처음으로 CZM을 이용한 연성 재료의 균열 전진을 모형화하였으며, 그 이후 많은 연구자들이 다양한 분야에서 CZM을 사용하고 있다. CZM은 주로 임의의 재료에서 발생하는 균열의 전진을 구현하는데 사용되며, 그 밖에 접촉하고 있는 두 재료의 접촉면의 특성을 모형화하는데 사용되고 있다.

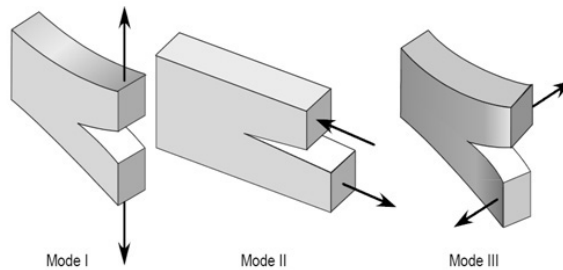


그림 2. 파괴 개념도

어떠한 재료에 균열이 발생하게 되면 그림 3과 같이 크게 Traction Free Surface와 Traction on Surface로 나뉘는데, Traction Free Surface는 구속되지 않은 구간이며, Traction on Surface은 실제 파괴가 일어나는 구간 (Fracture Process Zone, FPZ)으로 점착응력(Cohesive stress) 혹은 견인력(Traction stress)이 발생한다.

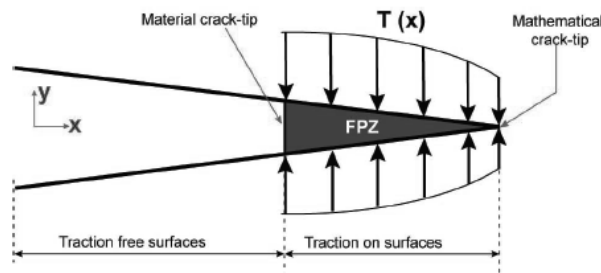


그림 3. FZP 모식도(Gurtner,2009)

FPZ에서 발생하는 점착응력은 CZM 유한요소 해석에서 재료의 상대적 분리된 변위의 함수로 정의되며 Abaqus에서는 연속체의 접촉면으로써 Cohesive Element 혹은 Cohesive Behavior가 사용된다. Cohesive Zone은 Traction-separation 법칙(TSL)을 따른다. Cohesive Element의 특성은 견인력과 변위의 그래프로 정의할 수 있다. 이때 재료의 파괴 파라미터로 사용되는 최대변위(δ_M) 및 최대 견인력(T_0)은 Cohesive Element가 파괴되는 최대변위와 두 물체의 접촉면에서의 발생하는 최대응력으로 정의된다. Cohesive

element의 파괴후 거동은 TSL의 특정 형상과 최대변위 값 그리고 Cohesive Energy(Γ_0)에 의해 나타낼 수 있으며 Cohesive Energy는 다음 식 1로 계산할 수 있다.

$$\Gamma_0 = \int_0^{\delta_M} T(\delta) d\delta \tag{식 1}$$

두 물체의 파괴 모형은 앞서 기술한 바와 같이 Mode 1,2,3으로 구분된다. 이러한 파괴 모형을 Needleman(1999)은 파괴 모드에 따라 견인력-변위 관계를 모형화 했으며 그 결과는 그림 4에서 보여주고 있다. Mode 1의 경우 수직방향으로의 파괴이다. 따라서 접촉면이 서로 관통할 수 없으며, 음의 상대 변위는 나타나지 않는다. Mode 2,3의 경우 분리 방향에 따라 음, 양의 변위가 나타날 수 있다.

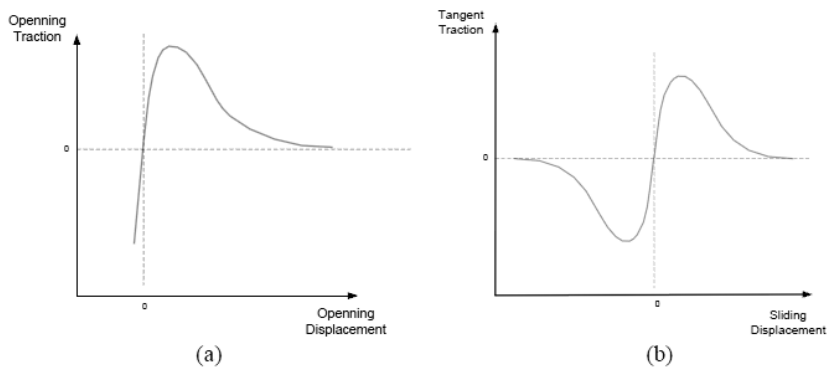


그림 4. Needleman의 견인력-변위 구성 모델 (a) Mode 1 (b) Mode 2,3(Needleman,1999)

또한 Needleman의 연구에서는 물체의 접촉 특성을 선형 탄성(Linear Elastic), 선형 연성(Linear Softening), 선형 탄성-진행성 연성(Linear Elastic-progressive Softening), 선형 탄성-역행성 연성(Linear Elastic-regressive Softening)으로 나타내었다. 그림 5에서 이를 보여주고 있다.

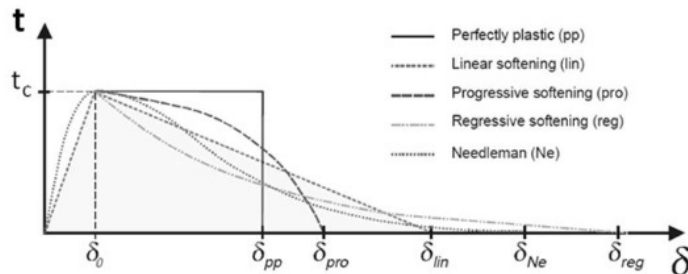


그림 5. 접촉특성의 다양한 견인력-변위 관계(Needleman,1999)

3. CZM을 이용한 섬유보강 아스팔트 부착전단강도 모형화

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus를 이용하여 아스팔트 표층과 섬유그리드간 접촉특성을 모

형화하였다. 부착특성은 CZM을 구성하기 위해 Abaqus Contact 요소 중 하나인 Cohesive Behavior 옵션을 사용하여 구성하였다.

3.1 Abaqus에서의 CZM

본 연구에서 사용한 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus에서는 CZM을 Cohesive element와 Cohesive Behavior로 지원한다. Cohesive Behavior는 접촉특성을 가진 층의 두께가 없거나 거의 0에 가까운 모델에 적용하기 유용하며, Cohesive element를 사용한 CZM의 구현은 접촉층이 유한한 두께를 가질 때 적합한 방법이다 (Abaqus 6.10 User Manual). 본 연구에서는 Cohesive Behavior를 사용하여 섬유보강 아스팔트 포장의 부착 전단 강도를 모형화 하였다.

CZM을 구현하기 위한 파라미터는 수직방향과 전단방향의 Cohesive 강성(K^*)과 최대 견인력(T_0) 그리고 Cohesive 에너지(Γ_0)를 이용하여 구현이 가능하다. 이 세 가지 파라미터의 정의는 그림 6에서 나타내고 있다. Cohesive 강성(K^*)은 초기 거동에서의 견인력-변위의 기울기로 정의되며 Cohesive 에너지는 견인력-변위간 면적으로 정의할 수 있다. 이는 Needleman(1999)가 제시한 여러 접촉 거동 특성 중 선형 연성(Linear Softening)의 관계를 모형화한 것으로 일반적으로 견인력과 변위의 관계는 그림 6(a)와 같이 비선형의 관계를 가지고 있으나 모델을 단순화시키기 그림 6(b)와 같이 선형 탄성화 거동을 하는 것으로 가정하여 모델링을 수행하였다. 데미지를 받기 전 Cohesive 강성과 변위와의 관계는 다음 식 2와 같다.

$$T_i = K^* \cdot \delta_i \quad i = N, S, T \quad \text{식 2}$$

여기에서, N (Normal)은 수직방향을 의미하며, S (Shear)와 T (Tangential)는 전단방향을 의미한다.

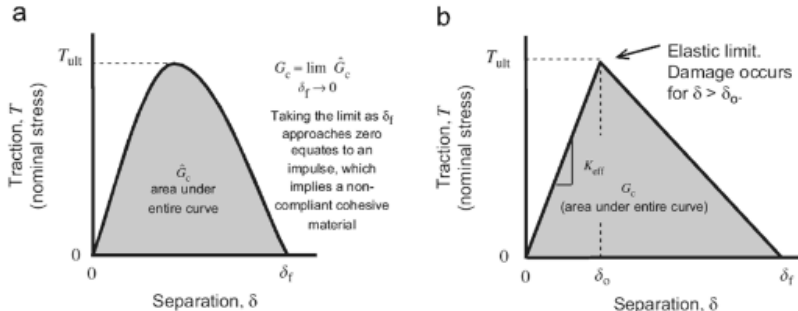


그림 6. CZM 파라미터 개념도 (a) 전형적인 TSL (b) Abaqus에 적용되는 TSL

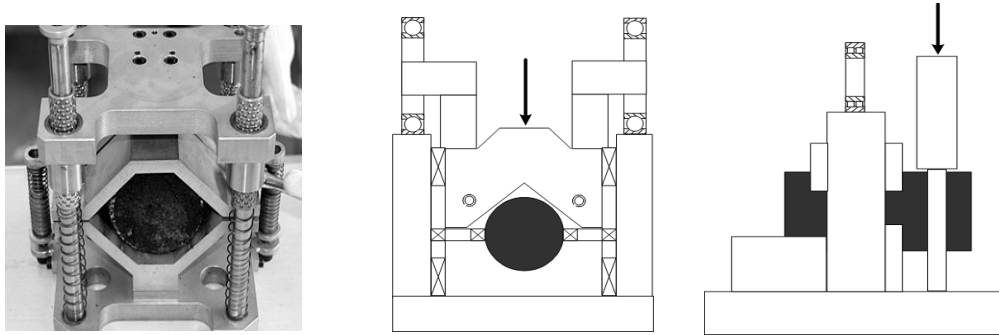
3.2 모델의 구성

3.2.1 실내시험

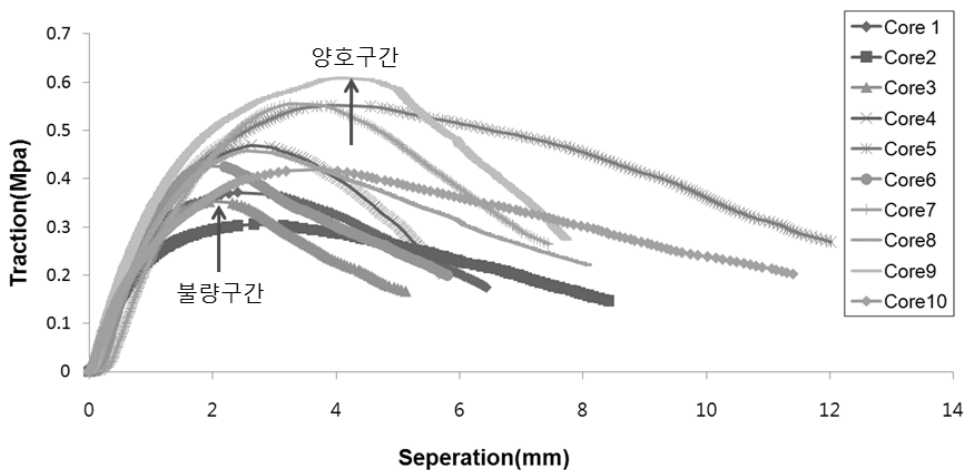
CZM 구성을 위해 사용된 실험 데이터는 상기 서술한 바와 같이 박상구 외(2009)가 수행한 시험시공현장 코어를 대상으로 한 부착전단강도 시험 데이터를 이용하였다. 그림 7(a)는 실내 시험 전경 및 모식도를 나타낸 것이다. 실험의 개요는 섬유보강 아스팔트 포장의 하부층을 고정하고 상부층에 일정한 변위를 주어 발생하는 변위를 측정하였다. 그 결과는 그림 7(b)와 같다.

Romanoschi(1999)는 아스팔트 층간 부착강도를 측정하기 위하여 직접전단 시험을 수행했다. 시험 결과 아스팔트 층간 부착강도는 온도에 따라 0.138MPa~0.552MPa의 범위에서 나타났다고 기술하고 있다. 따라서 본 연구에서는 모형의 층간 경계면 Cohesive Behavior 특성을 그림 7(b)에서 나타내고 있는 10개의 코어에 대한 실내 실험 결과 중 최대 견인력이 0.608MPa에 속하는 Core 9을 시공 상태가 양호한 구간의 데이터로 사용하였으며, 다소 낮은 최대견인력 0.352MPa이 나타난 Core3을 시공 상태가 불량한 구간의 데이터로 사용하였다. 시공상태가 불량한 구간

은 현장 시험 시공시 아스팔트 운반차량의 지연으로 다짐온도가 하강한 구간 혹은 차량의 진입으로 섬유보강재가 뒤틀리거나 섬유보강재 위로 흙이 떨어진 구간 등에서 나타났다.



(a) 부착전단강도 시험 전경 및 정면, 측면 모식도



(b) 시공상태별 부착전단강도 시험 결과

그림 7. 부착전단 강도 시험(박상구, 2009)

3.2.2 부착전단강도 FE 모형

모형은 각각 직경 150mm, 두께 50mm으로 3D Solid 8절점 요소인 C3D8로 구성하였다. 층간 부착특성은 Abaqus에서 지원하는 Contact 요소인 Cohesive Behavior를 사용하여 선형 연성 거동(Linear Softening)를 모형화 하였다. 이는 이중 선형 거동 중 하나로 국외에서는 Xin 외(1992)와 Rasmussen 외(2001)가 유한차분법을 이용하여 이중선형화 방법을 제시하고 있으며, 국내에서는 임진선 외(2010)가 에너지 방법을 통하여 이중선형화 방법을 제시하고 있다. 이러한 방법은 합리적인 복잡한 계산과정과 가정사항을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 실험 결과를 간단히 하기 위해 단순히 실내시험 결과 중 최대 견인력이 발생하는 점을 이용하여 결정하였으며 보다 합리적인 Cohesive 접착특성을 모형화하기 위하여 추후 Abaqus와 호환되는 Subroutine을 이용하여 구현할 예정이다. 본 연구에서의 주된 관심사는 부착 특성이기 때문에 섬유그리드 층은 따로 구성하지 않았다. 모델링에 사용된 CZM 부착 특성 물성은 표 1과 같다.

구조해석 시 모형의 정확한 거동을 구현하기 위해 경계조건을 정하는 것은 매우 중요하다. 선형 연구에서 수행

된 부착전단강도 시험을 모사하기 위하여 하부층 요소의 X,Y,Z 방향을 고정시키고 상부층을 일정한 변위로 실제 발생한 최대 변위까지 이동시켜 두 층의 경계면의 모든 노드점에 발생하는 반력을 분석하였다. 구성된 모형의 경계조건 및 모형은 그림 8과 같다.

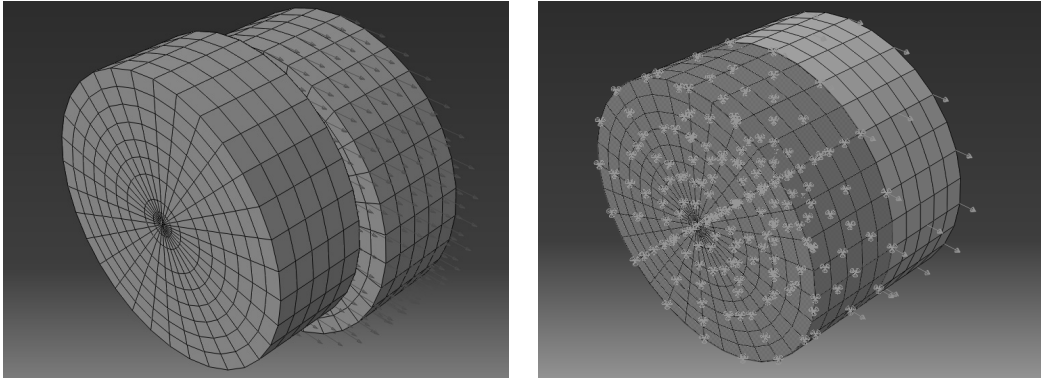


그림 8. 부착 전단강도 구성 모델 및 경계조건

표 1. CZM의 부착특성 적용 물성

시공상태	Cohesive 파라미터		
	Cohesive Stiffness (K^* , MPa)	Maximum Traction (T_0 , MPa)	Cohesive Energy (G_0 , N·mm)
불량(Core3)	0.181	0.352	1.234
양호(Core7)	0.149	0.608	3.039

3.4 결과

Abaqus를 이용하여 섬유보강 아스팔트 포장의 부착 전단강도 실내시험을 모사한 결과는 다음 그림 9와 같다. 그림 9와 같이 시공 상태가 양호했던 구간과 불량했던 구간에서 모두 실측 데이터를 이용하여 구성된 선형 연성화 모델과 본 연구에서 해석 값이 매우 유사하게 나타났다. 하지만 최대 견인력은 대략 6% 정도 차이를 보였으며, 이는 구현 모델 메쉬의 영향으로 판단된다.

Abaqus Cohesive Behavior를 이용하여 CZM의 선형 탄성 연성 파괴 모형을 비교적 합리적으로 구현할 수 있었다. 하지만 실제 파괴시 발생하는 견인력-변위 그래프는 비선형을 나타낸다. 이는 추후 Abaqus와 호환 가능한 Subroutine을 사용하여 보다 합리적인 CZM 특성을 구현하여 포장체에 적용, 아스팔트 표층과 섬유그리드간 부착 특성에 따른 섬유보강 아스팔트 포장의 거동을 분석할 예정이다.

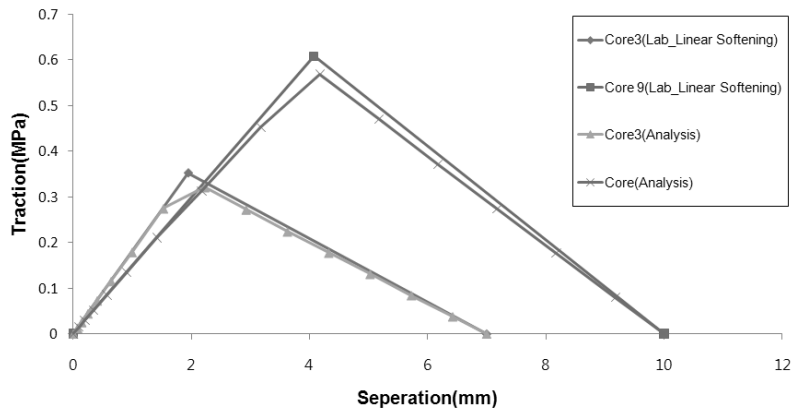


그림 9. 섬유보강아스팔트 포장 FE 모형 해석 결과

4. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구는 소성변형 및 반사균열에 대한 저항성이 양호한 섬유 보강 아스팔트 포장의 표층과 그리드간의 부착 전단강도 시험을 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus를 사용하여 모형화한 연구로 아스팔트 층과 그리드의 부착특성에 따른 포장체의 거동분석을 위한 초기 연구이다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 문헌조사 결과 두 물질간의 부착특성은 Cohesive Zone Model을 사용하여 구현이 가능하며, 많은 연구에서 파괴역학에서 정의하고 있는 파괴유형인 Mode 1,2,3 및 복합적인 파괴모형에 CZM을 사용하여 모형화하고 있다.
- (2) 본 연구에서는 Cohesive 파라미터의 기본 이론을 Needleman(1999)이 제시하고 있는 여러 부착 모형중 선형탄성 연성화 파괴를 이론적 기반으로 하여 박상구 외(2009)의 실내 실험의 결과 중 가장 큰 응력, 즉 최대 견인력이 발생할 때까지의 변위 대비 견인력의 크기를 Cohesive 강성으로 정의하였다. 파괴 후 거동은 견인력-변위 그래프에서 그 면적에 해당하는 값을 Cohesive 에너지로 모델에 입력하였다. 경계조건은 한쪽 층을 고정시키고 다른 한쪽 층을 최대 변위까지 이동시켜 파괴 면에서 발생하는 반력을 이용 견인력을 계산하여 실내실험결과와 비교 분석하였다. 해석결과 실내실험 데이터와 해석 데이터가 거의 일치하였으며, 층간 부착특성을 Cohesive Behavior로 구현 가능함을 보였다.
- (3) 하지만 부착특성은 실제로 비선형의 관계를 가지기 때문에 향후 Subroutine을 이용하여 견인력과 변위간의 비선형 특성을 구현할 계획이며, 이러한 특성을 이용하여 실제 포장체의 모형에 적용하여 아스팔트 층과 섬유그리드간 부착특성에 따른 섬유보강 아스팔트 포장의 거동 분석을 실시할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 박상구, 김기현, 권수안, 정진훈. (2009), “섬유보강 아스팔트 포장 전단강도 개선방안 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 29권, 제 5호, pp. 619-625.
- [2] 임진선, 손석철, 유주호, 정진훈. (2010), “콘크리트 포장 슬래브와 보조기층 간 마찰특성 모형화”, 한국도로학회, 제12권 제 4호, pp.211-218.
- [3] 최준성, 유지형, 박동엽. (2002), “아스팔트 포장의 구조해석”, 한국도로학회, 제 4권 제 2호, pp. 4-23.
- [4] ABAQUS Documentation for Version 6.10.
- [5] Anvari, M. (2008), “Simulation of Dynamic Fracture in Aluminum Structures”, Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Design and Materials, Doctoral thesis.
- [6] Gürtner, A. (2009b), “Experimental and Numerical Investigations of Ice-Structure Interaction”, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Doctoral thesis.
- [7] Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P.E. (1976), “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements”, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773-782.
- [8] Needleman, A. (1987), “A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding”, Journal of Applied Mechanics, Vol. 54, pp. 525-531.
- [9] Needleman A (1999), “An Analysis of Intersonic Crack Growth Under Shear Loading”, Journal of Applied Mechanics, pp. 847-857.
- [10] Rasmussen, R.O. and Rozycki, D.K. (2001), “Characterization and Modeling of Axial Slab-Support Restraint”, Transportation Research : Journal of the Transportation Research Board 1779, Transportation Research Board of the National Academies, pp.26-32.
- [11] Romanoschi, S. (1999), “Characterization of Pavement Layer Interfaces”, Louisiana State University,



Baton Rouge. Ph.D. Dissertation.

- [12] Xin, D., Zollinger, D.G. and James, R.W. (1992), "One-Dimensional Model for Analysis of CRC Pavement Growth", In American Society of Civil Engineers : Journal of Transportation Engineering, Vol.118, No4, American Society of Civil Engineers Publications, pp 557-575