

## 콘크리트 포장 슬래브와 보조기층 간 마찰특성 모형화

### Modeling of Friction Characteristic Between Concrete Pavement Slab and Subbase

임진선 Lim, Jin Sun	학생회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : coreplay@hanmail.net)
손석철 Son, Suk Chul	학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : ssc3621@naver.com)
유주호 Liu, Ju Ho	정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : juminok3@empal.com)
정진훈 Jeong, Jin Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

#### ABSTRACT

Volume of concrete slab changes by temperature and moisture effects. At that time, tensile stress develops because the slab volume change is restrained by friction resistance between the slab and subbase, and then crack occurs occasionally. Accordingly, researchers have made efforts to figure out the friction characteristics between the slab and subbase by performing push-off tests. Lately, researches to analyze concrete pavement behavior by the friction characteristics have been performed by finite element method. In this study, The friction characteristics between the slab and subbase were investigated based on the friction test results for lean concrete, aggregate, and asphalt subbase widely used in Korean concrete pavements. The energy method bilinearizing relation between nonlinear friction resistance and displacement were suggested. The friction test was modeled by 3-D finite element program, ABAQUS, and the model was verified by comparing the analyzed results to the test results. The bilinear model developed by the energy method was validated by comparing analysis results obtained by using the nonlinear and bilinear friction resistance-displacement relation as input data. A typical Korean concrete pavement was modeled by ABAQUS and EverFE and analyzed results were compared to evaluate applicability of the bilinear model.

#### KEYWORDS

concrete pavement, slab, subbase, friction resistance, displacement, bilinear model, FE analysis

#### 요지

콘크리트 슬래브는 온도 및 수분의 영향을 받아 체적이 변화된다. 이때 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항이 슬래브 체적변화를 구속하여 인장응력이 발생되고 경우에 따라 균열이 유발되기도 한다. 따라서 연구자들은 Push-off 실험을 실시하여 슬래브와 보조기층 간의 마찰특성을 파악하려고 노력해 왔다. 최근에는 마찰특성에 의한 콘크리트 포장의 거동을 유한요소법으로 해석하려는 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 국내 콘크리트 포장에 주로 사용되는 린콘크리트, 쇄석, 아스팔트 보조기층에 대하여 실시된 마찰실험 결과를 바탕으로 슬래브와 보조기층 간 마찰특성을 조사하였다. 비선형의 마찰저항과 변위의 관계를 이중선형화하는 에너지 방법이 제시되었다. 마찰실험을 3차원 유한요소 프로그램 ABAQUS로 모형화하였으며 해석결과를 실험결과와 비교하여 모형을 검증하였다. 비선형과 이중선형 마찰저항-변위 관계를 각각 입력값으로 사용하여 얻은 해석결과를 비교하여 에너지 방법으로 개발된 이중선형 모형의 타당성을 검증하였다. 일반적인 국내 콘크리트 포장을 ABAQUS와 EverFE로 모형화하고 해석결과를 비교하여 이중선형 모형의 적용성을 평가하였다.

#### 핵심용어

콘크리트 포장, 슬래브, 보조기층, 마찰저항, 변위, 이중선형 모형, 유한요소 해석

#### 1. 서론

슬래브와 보조기층 간의 마찰저항은 건조수축뿐만 아니라 수화열 및 대기온도의 상승과 하강으로 인한 콘크리트 슬래브의

수축과 팽창의 거동을 구속하여 응력을 발생시킨다. 이때 발생된 콘크리트 슬래브의 인장응력이 인장강도를 넘어설 때 균열 등의 파손이 발생되어 장기적으로 도로포장의 공용성을 저하시

킨다(Wesevich 등, 1987; 박문길, 2009). 미국과 유럽의 줄눈 콘크리트 포장에는 모래, 쇄석, 아스팔트, 시멘트 안정처리 등 다양한 재료의 보조기층이 사용되고 있으며, 보조기층 종류에 따른 마찰저항 특성에 관한 여러 연구결과가 설계기준과 시공지침 등에 반영되고 있다(Rasmussen 등, 2001). 반면 국내의 경우 1990년대 초반 이전에 시공된 줄눈 콘크리트 포장에 아스팔트 보조기층과 쇄석 보조기층이 사용되었고, 그 후에는 확일적으로 린콘크리트 보조기층 위에 분리막(Polyethylene sheet)을 덮는 방식으로 시공하고 있으나, 사용되는 보조기층 재료의 종류가 제한적임에도 불구하고 슬래브와 보조기층 간의 마찰 특성에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다(박문길, 2009). 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성은 환경하중에 의한 콘크리트 포장의 수평거동을 파악하는데 필요한 자료로서 줄눈간격, 줄눈재, 타이바 등의 설계에 필요한 입력변수로 활용될 수 있다(Suh 등, 2002).

Lee(2000)는 기존 해외 연구자들이 수행한 현장 마찰실험(Push-off Test) 결과를 이용하여, 기층 마찰 모형(Base Friction Model)을 제안하였다. 제안된 기층 마찰 모형은 기존 현장 마찰실험의 결과를 이용하여 수평 하중 재하 횟수에 따른 수정계수와 콘크리트 슬래브 두께에 따른 수정계수를 사용하여 슬래브-보조기층 간 마찰계수를 산출하였다. 2000년대 이후 몇몇 연구자들이 콘크리트 슬래브와 보조기층 간의 마찰을 3차원 유한요소 모형으로 모사하였다. Davids 등(2003)은 EverFE 2.2 프로그램에서 두께가 없는 16 절점 Interface 요소로 연결하는 방법으로 슬래브와 보조기층 간의 마찰을 모사하였다. Maitra 등(2009)은 ANSYS를 이용하여 접촉요소인 CONTAC178로 슬래브와 보조기층 간의 마찰을 모형화하였다. CONTAC178 요소는 마찰면을 기준으로 수직방향의 압축과 수평방향의 마찰을 구현하여 인장이 유발될 때 콘크리트 슬래브와 보조기층 간의 접촉 손실을 모사한 것이다.

본 연구에서는 현장에서 측정된 비선형의 마찰저항과 변위의 관계를 구조해석에 활용하기 위하여 에너지 방법을 사용하여 이중선형의 형태로 근사화하는 방안을 제시하였다. 그리고 3차원 유한요소 프로그램 ABAQUS를 사용하여 현장실험을 모형화한 후 해석결과와 실험결과를 비교 및 검토하여 유한요소 모형의 타당성을 검증하였다. 현장에서 측정된 비선형 마찰저항-변위와 이중선형화하여 구한 최대 마찰저항 및 초기 미끄럼 변위를 각각 입력값으로 사용하여 유한요소 해석된 결과를 비교하여 에너지 방법을 사용한 이중선형화 모형의 타당성을 검증하였다. 또한 국내에서 사용되는 줄눈 콘크리트 포장을 모형화하고 슬래브의 온도를 변화시키며 해석을 수행하였으며, 콘크리트 포장 전용 3차원 유한요소 프로그램 EverFE 해석 결과와 비교하여 개발된 모형의 적용성을 평가하였다.

## 2. 비선형 마찰저항-변위 관계의 이중선형화

슬래브의 수평거동을 합리적이고 정확하게 예측하기 위하여 현장 마찰실험 결과(박문길, 2009; 임진선 등, 2009)로 도출된 비선형의 마찰저항과 변위의 관계를 에너지 방법으로 이중선형화하여 최대 마찰저항, 초기 미끄럼 변위, 그리고 마찰강성을 결정하는 방안을 제시하였다.

### 2.1. 마찰실험

선행 연구(박문길, 2009; 임진선 등, 2009)에서는 린콘크리트 보조기층, 쇄석 보조기층, 및 아스팔트 보조기층 위에 타설된 0.75×1×0.2m 크기의 콘크리트 슬래브에 그림 1과 같이 수평하중을 가하고 변위를 측정하는 실험을 수행하였다. 반력벽에 고정된 로드셀로 하중을 가하여 슬래브 측면에 밀착시킨 강판을 4mm/hr의 일정한 속도로 밀면서 강재로 제작한 틀에 설치된 LVDT로는 슬래브의 변위를 측정하였다. 린콘크리트 보조기층과 쇄석 보조기층은 분리막을 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우로 구분하고 분리막을 사용하지 않은 아스팔트 기층까지 합하여 총 5 종류의 보조기층에 대하여 실험을 수행하였다. 각 보조기층에 대하여 3~4회 실험을 실시하였으며 하중과 슬래브의 수평변위의 관계는 그림 2와 같이 비선형으로 나타났다. 초기 1회에 측정된 최대 마찰저항이 가장 컸으며 횟수가 거듭될수록 안정화되어 3회와 4회에 측정된 값은 유사했다.

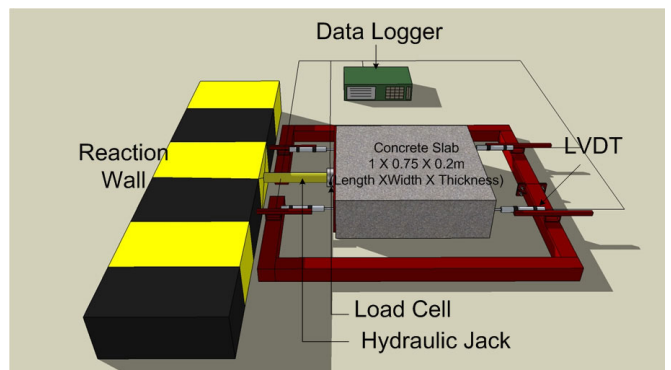


그림 1. 마찰실험 상세도(임진선 등, 2009)

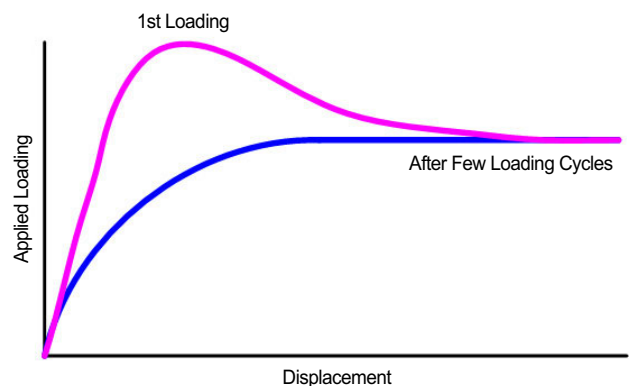


그림 2. 마찰실험 개념도

본 연구에서는 마찰거동이 어느 정도 안정화된 3회와 4회의 마찰실험 결과를 평균하여 사용하였으며 그 결과는 그림 3과 같다. 최대 마찰저항의 크기는 아스팔트, 쇄석, 린콘크리트, 분리막을 사용한 쇄석, 분리막을 사용한 린콘크리트 보조기층의 순으로 나타났다. 아스팔트 보조기층과 쇄석 보조기층의 경우 마찰저항이 지속적으로 증가하여 약 0.8~0.9mm 사이의 비교적 큰 변위에서 상대적으로 큰 최대 마찰저항을 나타내었다. 린콘크리트 보조기층의 경우 초기 1회 하중재하 시 슬래브와 보조기층이 완전히 부착되어 로드셀의 재하 가능한 한도까지 하중을 가하여도 변위가 거의 발생하지 않았다(임진선 등, 2009). 그림 3에서 린콘크리트 보조기층에 관한 경향은 중장비를 사용하여 강제로 슬래브와 보조기층을 분리시킨 후 수행한 결과이며, 0.2~0.3mm 사이에서 최대 마찰저항을 나타내었다. 분리막을 사용한 쇄석 보조기층의 경우 0.1mm 이하에서 최대 마찰저항을 나타냈으며, 분리막을 사용한 린콘크리트의 경우에는 0.7~0.8mm의 비교적 큰 변위에서 상대적으로 작은 최대 마찰저항을 나타내었다.

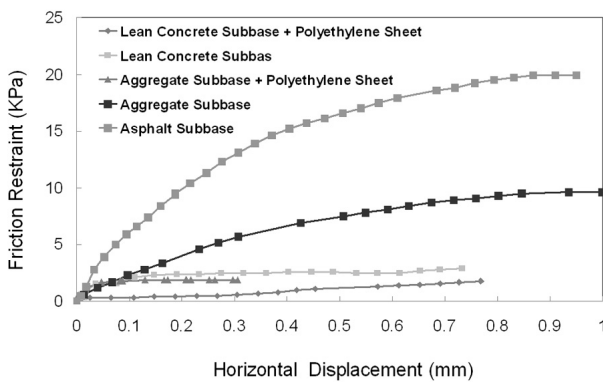


그림 3. 마찰실험 결과

## 2.2. 에너지 방법을 사용한 마찰저항의 이중선형화

콘크리트 포장 3차원 유한요소 해석 프로그램 EverFe 2.24와 설계 프로그램 HyperPave 등에서는 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항과 변위의 관계를 이중선형(Bilinear)화하여 입력변수로 사용하도록 지원한다. Xin 등(1992)과 Rasmussen 등(2001)의 유한차분법을 이용한 이중선형화 방법은 합리적이지만 매우 복잡한 과정과 많은 가정을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 현장의 마찰실험 결과를 간단하게 표현하기 위해서 비선형인 마찰저항과 변위의 관계를 에너지 방법으로 이중선형화하는 방법을 제안하였다. 현장에서 마찰실험을 실시하는 동안 사용된 에너지와 동일한 에너지가 사용되도록 아래의 방법으로 이중선형화하였다. 그림 4는 에너지법을 이용한 이중선형화 방법을 그림으로 나타낸 것이다.

• 식 (1)과 같이 실제 실험 동안 사용된 에너지,  $E_{field}$ 와 이중

선형 모형에 의해 사용된 에너지,  $E_{modeling}$ 는 같다고 가정한다.

$$E_{field} - E_{modeling} = 0 \quad (1)$$

• 그림 4에서 현장실험 결과에 해당하는 비선형의 곡선 ①에 대한 에너지는 식 (2)를 적분하여 얻을 수 있다. 여기서,  $u'$ 는 현장에서 발생한 최대 마찰저항( $\tau_0$ )에 해당하는 변위이다.

$$E_{field} = \int_0^{u'} \tau(u) du \quad (2)$$

• 그림 4에서 이중선형 모형에 해당하는 직선 ②에 대한 에너지는 식 (3)으로부터 얻을 수 있다. 여기서, 초기 미끄럼 변위( $u_0$ )는 모형의 최대 마찰저항( $\tau_0$ )에 해당하는 변위이다.

$$E_{modeling} = \tau_0(u' - \frac{1}{2}u_0) \quad (3)$$

• 위 식들로부터 식 (4)와 같이  $u_0$ 를 결정할 수 있으며, 이로부터 마찰강성  $k(= \tau_0 / u_0)$ 를 결정할 수 있다.

$$u_0 = \frac{2(\tau_0 \cdot u' - E_{field})}{\tau_0} \quad (4)$$

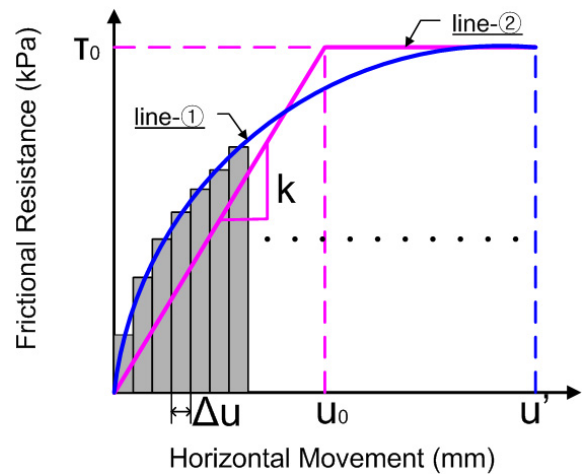


그림 4. 에너지 방법을 이용한 이중선형화 개념도

제안된 방법으로 그림 3의 현장 마찰실험 결과를 이중선형화하였으며 그 결과는 표 1과 같다. 최대 마찰저항은 5종류의 보조기층 중 아스팔트 보조기층에서 가장 컸고 분리막을 설치한 린콘크리트 보조기층에서 가장 작았다. 분리막을 설치한 쇄석 보조기층의 최대 마찰저항은 린콘크리트 보조기층 다음으로 작았으나 마찰강성은 가장 컸다. 이는 골재, 분리막, 그리고 슬래

브가 서로 맞물린 상태로 수평 하중에 저항하다 매우 작은 변위에서 미끄럼이 갑작스럽게 발생하였기 때문에 사료된다.

표 1. 마찰실험에 대한 보조기층 별 이중선형화 결과

보조기층 형태	최대 마찰저항, $\tau_0$ (kPa)	초기 미끄럼 변위, $u_0$ (mm)	마찰강성, $k$ (kPa/mm)
린콘크리트(분리막)	1.802	0.766	2.352
린콘크리트	2.903	0.274	10.595
쇄석(분리막)	1.902	0.040	47.550
쇄석	9.611	0.602	15.965
아스팔트	19.922	0.522	38.165

### 3. 현장실험 유한요소 해석

이중선형화하여 구한 슬래브와 보조기층 간의 최대 마찰저항과 초기 미끄럼 변위를 3차원 유한요소 프로그램인 ABAQUS의 입력값으로 사용하여 슬래브의 수평거동을 해석하였다. 현장 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 유한요소 모형의 타당성을 검증하였다. 또한 실제 비선형 마찰저항-변위의 관계를 입력값으로 사용하여 해석한 결과와 비선형의 관계를 이중선형화하여 얻은 최대 마찰저항 및 초기 미끄럼 변위를 입력값으로 사용한 해석 결과를 비교하여 이중선형화의 적절성을 검토하였다.

#### 3.1. 유한요소 모형화

앞의 2.1절에서 설명한 현장실험을 3차원 유한요소 프로그램 ABAQUS로 모형화하였다. 그림 5와 같이 슬래브와 보조기층은 3차원 Solid 요소 중 20절점을 갖는 C3D20R 요소로 구성하였고 슬래브와 보조기층 간은 Connector 요소인 CONN3D로 연결하였다. 그림 6과 같이 슬래브에는 8192개 (32×32×8) 그리고 보조기층에는 2048(32×64×1)개의 요소가 사용되었고, CONN3D는 슬래브와 보조기층의 상호 대응되는 절점을 연결하는 방법으로 총 1089(33×33)개의 요소가 사용되었다. 또한 보조기층의 측면과 하부를 구속하는 방법으로 경계조건을 지정하였다. 해석에 사용된 슬래브 및 린콘크리트, 쇄석, 아스팔트 보조기층의 크기와 물성은 표 2와 같다.

표 2. 마찰실험의 유한요소 모형화에 사용된 주요 입력변수

	크기(m)	탄성계수 (MPa)	포아송비	단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	열팽창계수 (/°C)
슬래브	1×0.75×0.2	28000	0.18	2.4	10.0×10 <sup>-6</sup>
린콘크리트 보조기층	2×0.75×0.1	15000	0.2	2.3	-
쇄석 보조기층	2×0.75×0.1	200	0.35	1.9	-
아스팔트 보조기층	2×0.75×0.1	3000	0.3	2.2	-

CONN3D 요소는 서로 맞닿아 있는 슬래브와 보조기층 간의 절점을 직접 연결하고 그 연결 특성을 손쉽게 정의할 수 있으며, 거동의 변화를 연속적으로 관찰할 수 있는 장점이 있다 (ABAQUS, 2006). 그리고 CONN3D 요소는 선형탄성뿐 아니라 비선형 하중-변위 관계를 손쉽게 정의할 수 있는 특징도 지닌다. 수평하중에 의한 슬래브의 수평거동을 CONN3D 요소로 모사하기 위하여 3차원 국부 좌표계에서 각각의 요소가 3방향의 자유도를 가지며 개별적으로 거동할 수 있는 Cartesian 옵션을 사용하였다. 현장실험에서 슬래브에 가해진 수평하중으로 비선형 마찰저항을 계산하고 각 요소에 배분하여 입력하였으며, Contac 방법을 사용하여 슬래브 아래면과 보조기층 윗면이 겹치는 오류가 발생하지 않도록 모형화하였다.

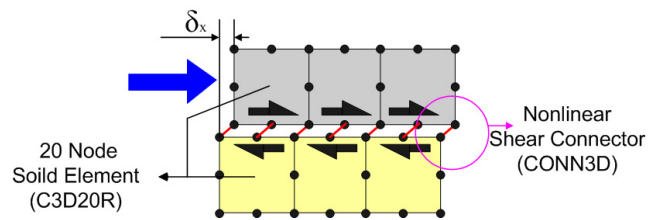


그림 5. 슬래브와 보조기층 간 CONN3D 연결 개념도

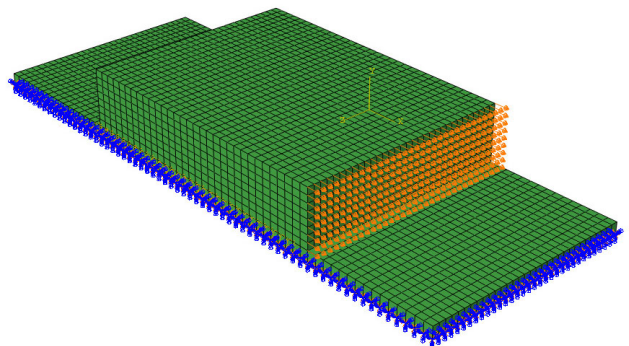


그림 6. 마찰실험의 3차원 유한요소 모형

#### 3.2. 유한요소 모형 검증

그림 7과 같이 변위제어방법을 사용하여 슬래브의 수평변위를 증가시키면서 개개의 CONN3D요소에 발생한 수평반력의 합을 계산하는 방법으로 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과를 현장 실험에서 가해진 수평하중 및 변위와 비교하여 유한요소 모형을 검증하였다. 그림 8 (a)~(e)에서는 현장에서 측정된 마찰저항(수평하중과 슬래브 면적의 비)과 변위의 관계를 유한요소 모형으로 구한 마찰저항(CONN3D에 발생한 수평반력의 합과 슬래브 면적의 비)과 변위의 관계와 비교하였다. 변위에 따라 마찰저항이 증가하였으며, 현장에서 측정된 결과와 유한요소 모형에 의한 해석결과는 거의 일치하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 유한요소 모형으로 슬래브와 보조기층 간 마찰에 의하여 발생하는 실제 거동을 합리적으로 모사할 수 있다고 판단되었다.

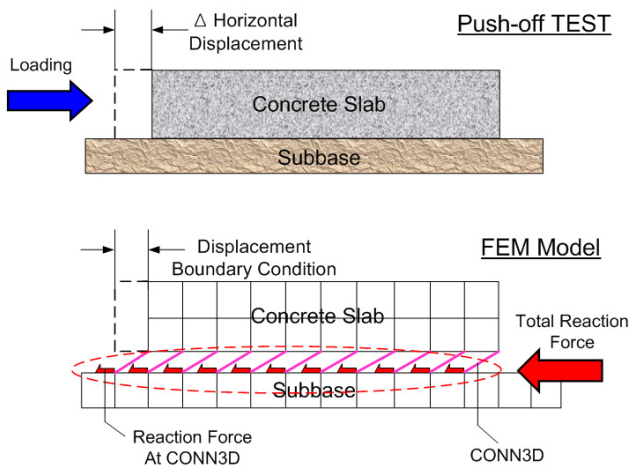
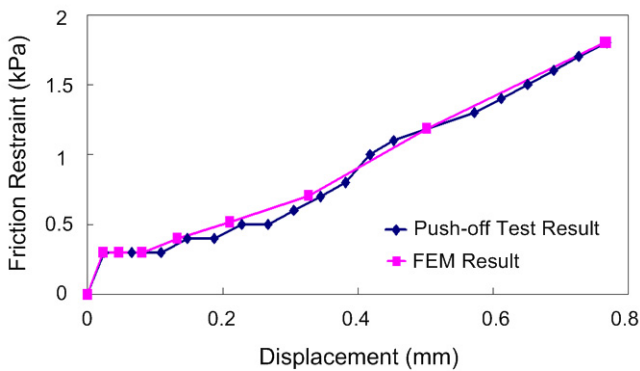
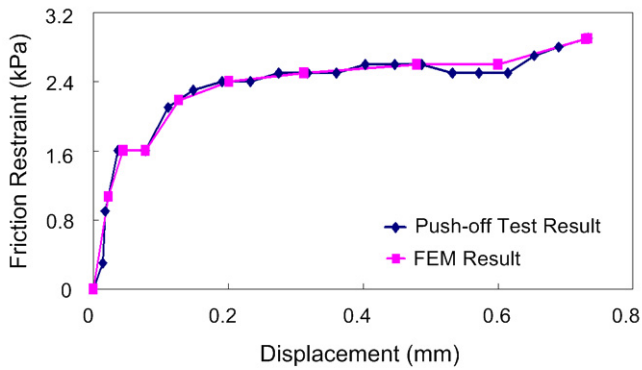


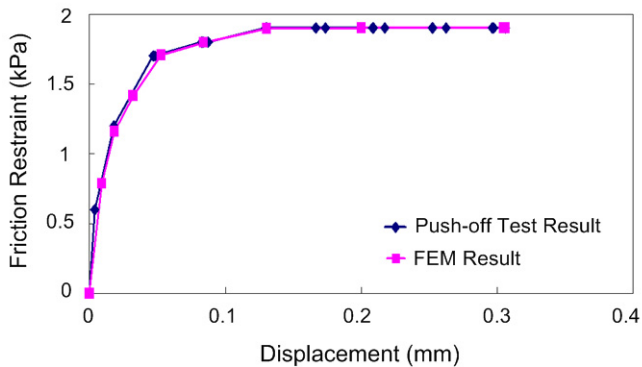
그림 7. 유한요소 모형 검증 개념도



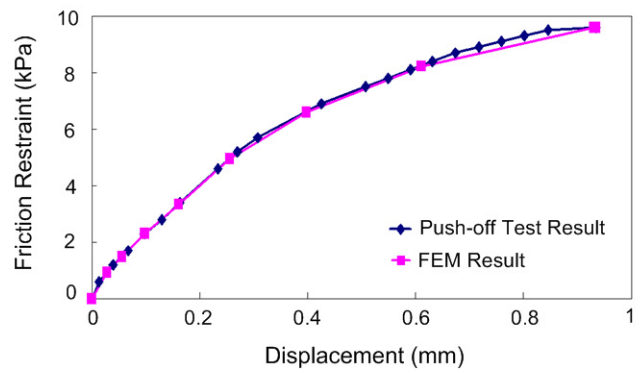
(a) 분리막을 설치한 린콘크리트 보조기층



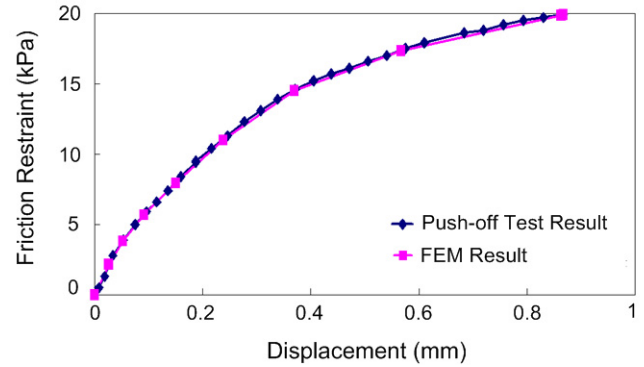
(b) 분리막을 설치하지 않은 린콘크리트 보조기층



(c) 분리막을 설치한 쇠석 보조기층



(d) 분리막을 설치하지 않은 쇠석 보조기층



(e) 분리막을 설치하지 않은 아스팔트 보조기층

그림 8. 마찰실험과 유한요소 해석 결과의 비교

### 3.3. 비선형과 이중선형 마찰저항-변위 관계에 의한 해석결과 비교

에너지 방법으로 이중선형화하여 구한 최대 마찰저항과 초기 미끄럼 변위를 앞의 3.1절에서 개발된 유한요소 모형의 입력값으로 사용하여 현장실험을 해석한 결과와 비선형의 실제 마찰저항-변위 관계를 입력값으로 사용하여 해석한 결과를 비교하였다. 그림 9는 슬래브에 수평변위를 인위적으로 발생시키면서 해석하였을 때 슬래브와 보조기층 간 마찰저항에 의하여 슬래브 내부에 발생된 응력( $\sigma_{xx}$ )의 분포를 나타낸 것으로 하중이 재하된 슬래브 측면의 맞은편 하부에서 가장 큰 인장응력이 발생하였다. 표 3은 비선형 마찰저항-변위를 입력값으로 해석된 슬래브 하부에서의 최대 인장응력( $\sigma_{xx}$ )과 최대 마찰저항 및 초기 미끄럼 변위를 입력값으로 사용하여 해석된 결과를 비교한 것이다. 발생된 응력의 크기는 표 1에서 보인 최대 마찰저항의 크기와 동일한 순서로 아스팔트 보조기층의 경우가 가장 컸고 분리막을 사용한 린콘크리트 보조기층의 경우가 가장 작았다. 최대 마찰저항과 초기 미끄럼 변위를 입력값으로 사용하여 구한 최대 인장응력이 약간 더 크게 계산되어 이중선형 모형을 사용하여 설계하는 것이 실제 비선형 마찰저항-변위를 사용하는 것보다 안전측을 더 고려할 수 있는 방법으로 판단되었다. 상대오차는 표 1에 보인 초기 미끄럼 변위의 크기와 동일한 순

서로 분리막을 사용한 린콘크리트 보조기층의 경우가 가장 컸고 분리막을 사용한 쇠석 보조기층의 경우가 가장 작았다. 다섯 종류의 보조기층 모두에서 상대오차는 10% 미만으로 계산되어 비선형과 이중선형 마찰저항-변위 관계에 의한 결과는 유사한 것으로 나타났다.

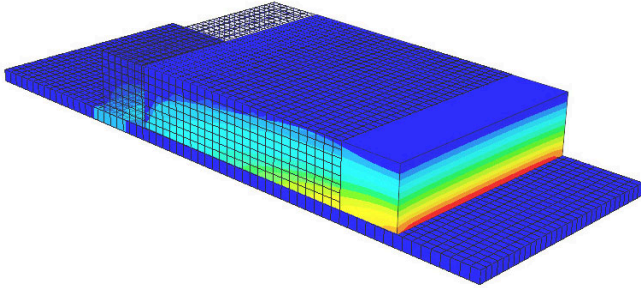


그림 9. 현장실험 유한요소 해석에 의한 슬래브 응력( $\sigma_{xx}$ ) 분포도

표 3. 비선형과 이중선형 마찰저항-변위 관계에 의한 해석 결과

보조기층 종류	비선형에 의한 최대 인장응력(MPa)	이중선형에 의한 최대 인장응력(MPa)	상대오차(%)
린콘크리트(분리막)	0.024	0.026	8.88
린콘크리트	0.048	0.051	5.62
쇄석(분리막)	0.033	0.034	2.54
쇄석	0.148	0.162	8.76
아스팔트	0.279	0.294	4.83

## 4. 국내 콘크리트 포장 유한요소 해석

국내 현장에서 시공되는 콘크리트 포장을 ABAQUS로 모형화하고 비선형 마찰저항-변위와 이중선형화하여 얻은 최대 마찰저항 및 초기 미끄럼 변위를 각각 입력값으로 사용하여 온도하중에 의한 슬래브의 거동을 해석하고 비교였다. 또한 마찰강성과 초기 미끄럼 변위를 입력변수로 제공하는 콘크리트 포장 전용 유한요소 프로그램 EverFE 2.24 해석 결과와도 비교하였다. 이를 통하여 본 연구에서 에너지 방법으로 이중선형화된 보조기층 별 마찰저항-변위의 관계를 기존의 범용 유한요소 해석 프로그램에 적용할 수 있음을 보였다.

### 4.1. 유한요소 모형화

국내 줄눈 콘크리트 포장을 그림 10과 같이 ABAQUS로 모형화하였다. 앞서 보인 현장실험을 모사한 모형과 동일하게 슬래브와 보조기층을 C3D20R 요소로 구성하고 CONN3D로 연결하면서 비선형과 이중선형의 마찰저항-변위 관계를 각각 적용하였다. 표 1과 동일한 물성을 사용하였으며, 노상은 Dense Liquid 요소로 구성하고 0.03MPa/mm의 지지력을 적용하였

다. 경계조건으로는 보조기층의 측면을 구속하였다. 먼저 자중을 고려한 후 슬래브 전체에  $-50^{\circ}\text{C}$ 의 온도차( $\Delta T$ )를 주는 방식으로 하중을 가하였다. 온도차는 국내 연교차에 대한 기상청 자료를 검토하여 결정하였다. 또한 마찰저항과 초기 미끄럼 변위를 입력변수로 지원하는 콘크리트 포장 해석 전용의 유한요소 프로그램 EverFE 2.24를 사용하여 ABAQUS와 동일하게 모형화하고 동일한 입력변수를 사용하여 해석하고 그 결과를 비교하였다.

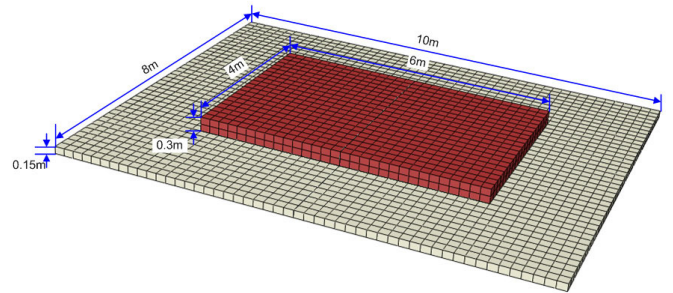
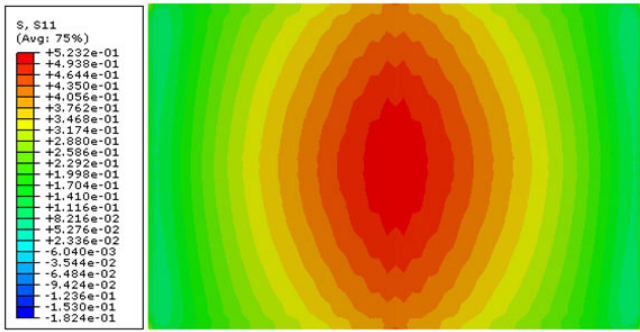


그림 10. 국내 콘크리트 포장의 유한요소 모형

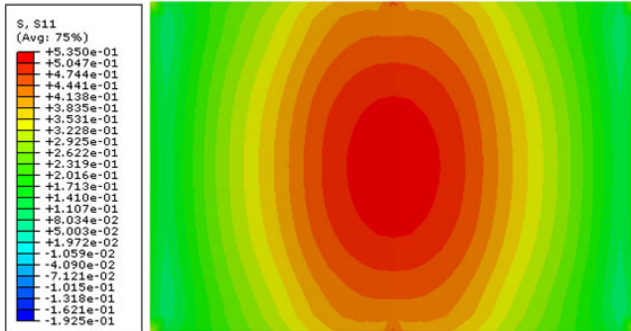
### 4.2. 해석 결과 비교 및 적용성 검토

유한요소 해석 결과, 그림 11과 같이 슬래브 하부 중앙에서 가장 큰 인장응력이 발생하였다. 그림 11은 아스팔트 보조기층을 사용한 경우에 슬래브 하부에서 발생한 응력 분포로, 이중선형화로 구한 최대 마찰저항과 초기 미끄럼 변위를 입력값으로 사용한 ABAQUS 해석에서 가장 큰 인장응력이 계산되었다. EverFE로 해석된 인장응력의 크기가 가장 작았으나 ABAQUS 해석 결과와의 차이는 매우 작았다. 다른 보조기층의 경우에도 응력분포는 그림 11과 매우 유사한 형상을 나타내었다. ABAQUS 해석결과를 상세히 검토한 결과, 비선형 마찰저항-변위 관계를 입력값으로 사용한 경우보다는 최대 마찰저항과 초기 미끄럼 변위를 사용한 경우가 마찰강성과 초기 미끄럼 변위를 입력값으로 사용하는 EverFE의 응력분포와 더 유사한 것으로 나타났다. ABAQUS와는 달리 EverFE 해석결과는 슬래브 단부에서 0에 가까운 응력을 보였는데, 이는 EverFE가 접촉면 비선형 해석을 수행하여 슬래브와 보조기층 간에 벌어짐(Opening)이 발생할 경우 수평방향의 마찰저항을 고려하지 않는 특성을 갖기 때문으로 사료된다.

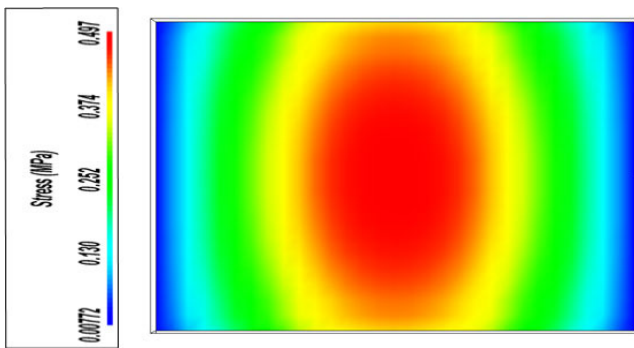
비선형 및 이중선형 마찰저항-변위 관계를 각각 입력값을 사용한 ABAQUS 해석과 EverFE 해석을 각 보조기층 별로 수행하여 슬래브 하부 중앙에 발생한 최대 인장응력을 표 4와 같이 구하였다. 이중선형 모형을 사용한 ABAQUS 해석으로 계산된 최대 인장응력이 가장 컸으며 EverFE 해석으로 계산된 최대 인장응력이 가장 작았다. 그 차이는 최대 마찰저항이 큰 보조기층의 경우일수록 더 큰 것으로 나타났다. 온도하중에 의한 수평변위는 보조기층의 종류에 상관없이 거의 일정하게



(a) ABAQUS 비선형 모형



(b) ABAQUS 이중선형 모형



(c) EverFE 2.24

그림 11. 온도하중( $\Delta T = -50^\circ\text{C}$ )재하에 의한 슬래브 하부 응력 ( $\sigma_{xx}$ ) 분포 (아스팔트 보조기층)

표 4. 온도하중( $\Delta T = -50^\circ\text{C}$ ) 재하에 대한 해석 결과

보조기층 종류	ABAQUS (비선형)		ABAQUS (이중선형)		EverFE	
	$\sigma_{xx}$ (MPa)	변위 (mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	변위 (mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	변위 (mm)
린콘크리트 (분리막)	0.041	2.986	0.042	2.986	0.040	2.998
린콘크리트	0.110	2.976	0.111	2.975	0.100	2.990
쇄석(분리막)	0.068	2.978	0.068	2.977	0.063	2.994
쇄석	0.132	2.970	0.137	2.969	0.122	2.982
아스팔트	0.517	2.943	0.525	2.942	0.496	2.946

계산되었다. 비록 차이는 매우 작았지만 EverFE, 비선형 마찰 저항-변위를 사용한 ABAQUS, 그리고 이중선형 모형을 사용한 ABAQUS 순으로 수평변위가 컸으며, 최대 인장응력의 경우와 마찬가지로 최대 마찰저항이 큰 보조기층의 경우일수록 그 차이가 커지는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 현장에서 측정된 비선형의 마찰저항과 변위의 관계를 구조해석에 간단히 사용하기 위하여 에너지 방법에 의해 이중선형화하고 유한요소 해석으로 검증하였다. 주요한 연구결과는 다음과 같다.

1. 현장 마찰실험으로 측정된 비선형의 마찰저항-변위 관계를 에너지 방법으로 이중선형화하여 최대 마찰저항, 초기 미끄럼 변위, 마찰강성을 구하는 방법을 제안하였다.
2. 3차원 유한요소 프로그램 ABAQUS을 사용하여 슬래브와 보조기층 간 마찰특성을 Connctor 요소로 모형화하였다. 해석 결과와 현장실험 결과를 비교한 결과, Connctor 요소를 사용한 유한요소 모형이 마찰에 의한 슬래브의 수평거동을 합리적으로 모사함을 확인할 수 있었다.
3. 제안된 이중선형 모형으로 유한요소 해석된 최대 인장응력은 비선형 마찰저항-변위를 입력하여 해석된 결과보다 크게 나타났고 다섯 종류의 보조기층 모두에서 상대오차가 10% 미만으로 계산되어 에너지 방법에 의한 이중선형화가 합리적임을 알 수 있었다.
4. 슬래브 하부에서 발생된 최대 인장응력의 크기는 최대 마찰저항의 크기와 동일한 순서로 아스팔트 보조기층의 경우가 가장 컸고 분리막을 사용한 린콘크리트 보조기층의 경우가 가장 작았다. 초기 미끄럼 변위가 작을수록 상대오차가 작았다.
5. 국내 콘크리트 포장을 ABAQUS와 EverFE로 모형화하고 온도하중을 재하한 결과 최대 마찰저항이 클수록 슬래브의 최대 인장응력이 크게 계산되었다. ABAQUS 해석 결과, 슬래브 하부 중앙에서 발생한 최대 인장응력은 이중선형 모형을 사용한 경우가 비선형 마찰저항-변위를 사용한 경우보다 약간 더 컸으며, 이중선형 모형을 사용하는 EverFE 해석결과와 더욱 유사한 것으로 나타났다.
6. 최대 마찰저항이 클수록 온도하중에 의한 슬래브의 수평변위가 작게 계산되었지만 그 차이는 매우 적었다. 따라서 슬래브와 보조기층 간 마찰특성이 온도하중에 의한 슬래브의 수평변위에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

- 박문길 (2009) 콘크리트 포장의 슬래브-기층 종류별 마찰력 연구. 석사학위논문, 인하대학교.
- 임진선, 박문길, 남영국, 정진훈 (2009) 콘크리트 슬래브와 보조기층 사이의 마찰특성 조사. *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제29권, 제6D호, pp. 719-726.
- ABAQUS (2006). *ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.6*, Abaqus Inc.
- Davids, W. G., Wang, Z., Turkiyyah, G., Mahoney, J. P., and Bush, D. (2003) "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavement with EverFE2.2." *Transportation Research Record* : Journal of the Transportation Research Board 1853, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 34-42.
- Lee, S. W. (2000) "Characteristics of Friction between Concrete Slab and Base." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Korean Society of Civil Engineers, Vol. 4, No. 4, pp. 265-275.
- Maitra, S. R., Reddy, K. S., Ramachandra, L. S. (2009) "Experimental Evaluation of Interface Friction and Study of Its Influence on Concrete Pavement Response." *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol. 135, No. 8, pp. 563-571.
- Rasmussen, R. O. and Rozycki, D. K. (2001) "Characterization and Modeling of Axial Slab-Support Restraint." *Transportation Research Record* : Journal of the Transportation Research Board 1779, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 26-32.
- Suh, Y. C., Lee, S. W. and Kang, M. S. (2002) Evaluation of Subbase Friction for Typical Korean Concrete Pavement. *Transportation Research Record* : Journal of the Transportation Research Board 1809, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 66-73.
- 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, No. 4, American Society of Civil Engineers Publications, pp. 557-575.
- Wesevich, J. W., McCullough, B. K., and Burns, N. H. (1987) *Stabilized subbase friction study for concrete pavements*, Research Report 459-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, April.

접 수 일 : 2010. 11. 18

심 사 일 : 2010. 11. 20

심사완료일 : 2010. 12. 3