

중·신·콘의 구조해석을 위한 다중 슬래브 모형 개발

Multi-Slab Model for Ultra thin Whitetopping by Finite Element Analysis

류성우* 윤태영** 조윤호***
Ryu, Sung-Woo Yoon, Tae-Young Cho, Yoon-Ho

1. 서론

아스팔트 포장은 공용연수가 지날수록 기준에 볼 수 없었던 바퀴자국, 표면 밀립, 물결모양 변형, 거북등 균열 등의 변형과 균열이 발생한다. 이에 따른 잦은 개·보수로 많은 예산이 소요되고 있음에도 불구하고 중차량이 많이 통과하는 아스팔트 도로는 신설 당시의 공용성을 나타내지 못하고 있다. 최근 이러 문제점을 해결하기 위해 국외에서는 아스팔트 덧씌우기 공법 대신 얇은 콘크리트 덧씌우기 공법 (Whitetopping, 이하 중·신·콘)을 개발하여 적용하고 있으며 국내에도 연구가 진행되고 있다. 유한요소법을 이용한 중·신·콘 구조해석은 실제포장을 모형화하고 해석하여 응력, 변형률, 처짐량을 알아내는 것으로써 그 결과를 포장 단면 설계에 반영하기 위해서이다. 일반적인 포장 구조를 해석할 경우에는 웨스터가드(Westergaard)나 버미스터(Burmister)가 제안한 이론식이나 이를 근거로 개발된 포장 구조 해석 프로그램을 이용하지만, 본 공법에 적용하기 어렵다. 따라서 콘크리트 포장과 아스팔트 포장이 혼합된 형태인 중·신·콘 포장을 해석하는 경우에는 특성에 맞는 해석 모형 개발이 필요하다.

본 글에서는 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 중·신·콘 포장 해석에 사용되는 단일 슬래브 모형의 한계점을 지적하기 위해 하중 재하 위치에 따른 포장의 거동특성을 다중 슬래브 모형과 비교·분석하였다.

2. 단일 및 다중 슬래브 모형 개발

2.1 화이트타핑 해석 범위 결정

해석 단면은 경기도 이천의 덕평 폐도에 시험시공 구간을 선택하였다. 덕평 폐도는 2002년 7월에 포설된 시험 단면으로 차량이 통과하지 않아 현장 실험을 자유롭게 할 수 있어 정적 하중 재하 실험이나 FWD를 이용한 실측 자료 획득이 수월한 구간이다. 이들 현장 실험 결과는 모형에서 획득한 결과와 비교 분석하여 개발된 모형의 검증에 이용되었다. 해석 범위는 단일 슬래브 모형인 경우 슬래브 1개(1.8m×1.8m)인 반면, 다중 슬래브 모형인 경우 슬래브 4개(2×2 : 3.6m×3.6m)와 길어깨(0.4m)까지 고려하였다. 포장 두께는 콘크리트 10cm, 아스팔트 11cm, 아스팔트 보조기층 15cm을 적용하였다.

2.2 요소망 생성 및 입력변수 선정

해석에 사용된 유한 요소는 3D Solid 요소로써 C3D8를 이용하였으며, 요소망 생성은 3D Solid의 가장 큰 문제점인 해석 시간을 단축하고 정확한 해석을 하기 위해 세구간으로 나누었다. 그 방법으로는 하중 재하 위치의 유한요소는 크기가 작은 것으로, 그 외 부분은 상대적으로 큰 것으로 구성하였다.

재하 하중은 정적하중재하시험에서 물을 적재한 레미콘 트럭의 최대바퀴압력을 측정된 결과, 가장 큰 압력이 발생한 앞바퀴를 사용하였다. 바퀴하중의 면적과 압력을 모델링하는 과정에서, 모형에 적용하기 위하

* 비회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정 · 02-861-0251(E-mail:htsrsw@hanmail.net)
** 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · 02-9100-541(E-mail:sentirain@hanmail.net)
*** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사 · 02-820-5336(E-mail:yhcho@cau.ac.kr)



여 18cm×18cm의 정사각형 변적에 약 802265 Pa의 타이어 압력이 재하된 해석하였다. 모형에 입력되는 각 포장층의 물성값은, 콘크리트층의 탄성계수와 단위중량은 실측하였으며 아스팔트의 경우 정적하중재하 시험과의 결과를 11월에 정리하면 다음 <표 1>과 같다. 콘크리트 탄성계수 및 단위중량은 실내 실험을 통하여 얻은 값이고 포아손비는 대표값을 사용하였다. 아스팔트 층의 탄성계수는 추후 모형을 검증하기 위한 현장 데이터값이 11월달에 계측한 값이므로 계절에 의한 영향을 고려하여 상대적으로 높은 값을 적용하였다. 그외 다른 층들의 물성값은 일반적으로 사용되는 값들을 사용하였다.

<표 1> 구조해석에 사용된 각층의 물성값

포장층	물성 항목	물성값
콘크리트층	탄성계수	24.13 GPa
	단위중량	2.4 t/m ³
	포아손비	0.2
아스팔트층	탄성계수	3.8 GPa
	단위중량	2.21 t/m ³
	포아손비	0.35
아스팔트 보조기층	탄성계수	2.5 GPa
	포아손비	0.35
노상	탄성계수	68.95 MPa
	포아손비	0.4

2.3 해석 모형의 최적 요소수 선정

모형에 따른 거동특성을 확인하기 위하여 평면 및 깊이에 따른 최적 요소수를 선정하였다. 기본 조건은 단일 슬래브(몰리지지) 중앙부에 하중이 재하된 모형을 바탕으로 처짐량 변화를 살펴보았다. 민감도 분석결과 평면 요소는 하중 재하 위치에 10개 (1.8×1.8cm), 하중 재하 주변 6개 (3.6×3.6cm), 그리고 그 외는 약 14개(10×10cm)를 사용하는 것이 적절하다고 판단되었다. 깊이 방향으로는 콘크리트 층 10개(1cm), 아스팔트층 10(1.1cm), 아스팔트 보조 기층 7개 (2.1cm), 노상층 6개 (5cm)를 적용하였다.

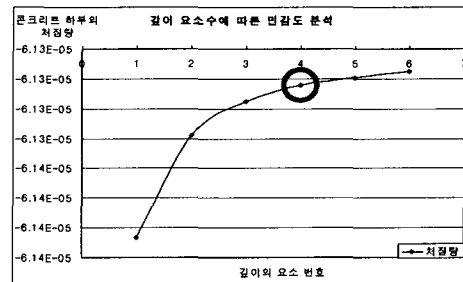
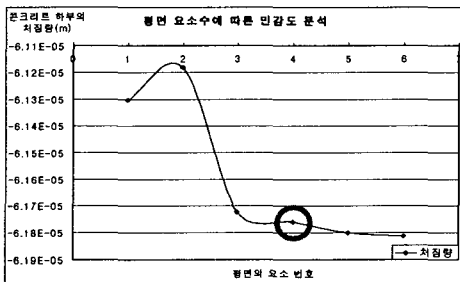


그림 1. 해석 모형의 최적 요소수 결정을 위한 민감도 분석 (중앙부)

2.4 노상 깊이에 따른 모형의 거동 분석

단부에 하중이 재하되었을 경우 노상층의 두께를 30cm 에서부터 300cm 까지 변화시켜가며 중.신.콘 거동을 분석하였다. <그림 2>에서 알 수 있듯이 노상층의 깊이에 따른 응력 변화폭은 상당히 협소함을 알 수 있었다. 하지만 변형률의 경우는 각 모형마다 큰 차이를 보이고 있었다. 따라서 현장시험과의 결과 비교 및 정확한 해석을 위하여 노상의 변형률 변화가 거의 없는 약 300cm까지 고려하여 개발된 모형에 적용하였다.

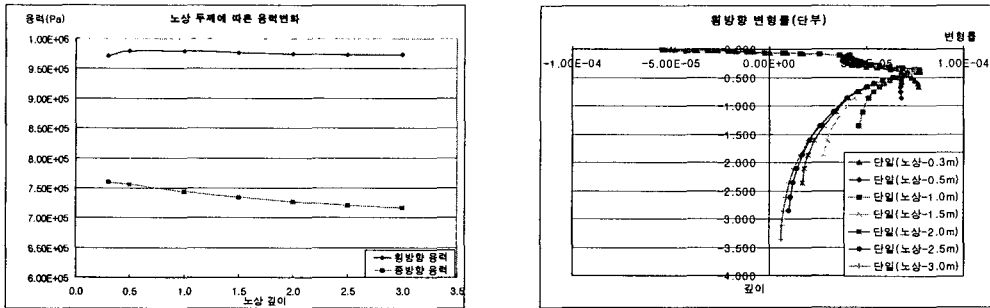


그림 2. 노상 두께에 따른 모형의 거동 분석

2.5 줄눈부 형상 결정

중·신·콘의 표준 거동 해석 조건을 만들기 위해서 줄눈부 조건을 변화시켜가며 그에 따른 영향을 살펴 보았다. 해석에 사용된 모형은 <그림 3>에서 나타난 것과 같이 다중 슬래브 모형을 사용하였으며, 단부에 하중이 재하된 경우로 해석을 수행하였다. 각각의 줄눈부 조건은 <표 2>와 같이 줄눈부 깊이, 줄눈 폭, 줄눈 간격을 고려하였다.

줄눈 깊이 및 폭에 따른 슬래브 하부의 인장 응력 및 표면의 최대 처짐량은 그림에서와 같이 커다란 변화가 없었다. 이 결과를 바탕으로, 모형에 적용한 줄눈 깊이는 일반적으로 슬래브 두께의 1/3 절삭한 경우, 줄눈폭은 일반적으로 약 6mm의 경우를 사용하였으며 이는 줄눈부 팽창/수축을 고려한 것이다.

줄눈 간격(콘크리트 슬래브 크기) 변화 따라 중·신·콘 슬래브 하부에 발생하는 인장응력과 처짐량을 나타내면 <그림 3>와 같다. 줄눈 간격이 80cm 에서 220cm 까지 증가할 때 최대 횡방향 인장응력은 다른 요소와 마찬가지로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 처짐량은 간격이 넓어질수록 적게 발생한다는 것을 알 수 있었다. 본 모형에서는 향후 시험 재하시험 결과와 비교하기 위하여 일반적으로 사용하는 1.8m 모형을 이용하여 모형간 차이를 분석하였다.

<표 2> 해석 단면의 줄눈부 형상 변화

항목	줄눈부 깊이 (cm)	줄눈부 폭 (mm)	줄눈 간격 (m)
변화폭	0	6	0.8
	2	8	1.2
	4	10	1.5
	6	12	1.8
	8	-	2.2

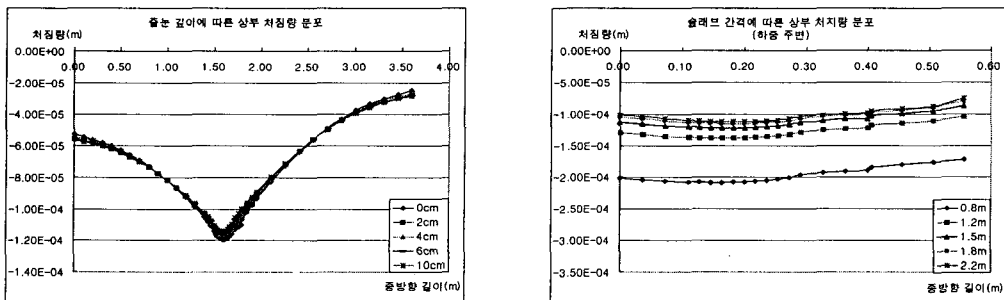


그림 3. 줄눈 폭에 따른 중·신·콘 거동

3. 단일 및 다중 슬래브 모형 해석 결과

각 하중은 중앙부, 단부, 우각부, 길어깨부로 나누어 각 위치에 따라 재하하였다. 모형은 단일 슬래브 모형과 하부지지 조건에 따라 롤러지지 조건, 무한 요소(INC3D8)를 적용한 다중슬래브 모형으로 나누어 해석하였으며 그에 따른 응력, 변형률 및 처짐량을 살펴보았다.

중앙부 하중재하시 모형에 따른 응력 분포는 <그림 3>과 같다. 다중 슬래브 모형은 하중 재하된 인접 슬래브에 하중이 전달된 것을 육안으로 확인할 수 있었지만, 단일 슬래브의 경우 인접 슬래브의 영향을 반영할 수 없었다. 하중 재하 위치에서 깊이에 따라 측정된 응력은 <그림 4>에서 알 수 있듯이 모형간의 차이가 크게 나타나지 않았다. 하지만 횡방향 변형률 경우, 콘크리트 슬래브내에서부터 단일 슬래브 모형과 다중슬래브 모형간의 차이가 발생하였으며 아스팔트 층을 지나면서 그 차가 점점 커져가는 것을 알 수 있다. 위와 같이 변형률이 모형간에 차이를 보이는 이유는 종·횡방향의 경계조건의 인접여부 및 전체적인 해석 범위의 차이에 따른 결과로 판단된다. 처짐량의 경우 세 모형간의 차이가 나타났으며 그 순서는 롤러 지지조건의 무한 요소조건의 다중 슬래브 모형, 단일 슬래브 모형, 다중슬래브 모형 순으로 나타났다

중앙부 하중 재하 모형과 동일하게 단부, 우각부, 길어깨에 하중이 재하된 경우를 모형화하여 해석한 결과, 깊이에 따른 횡방향 응력은 큰 차이는 발생하지 않았다. 반면 횡방향 변형률은 단일 슬래브 모형과 다중 슬래브 모형간에 차이가 크게 나타났지만 지지 조건에 따른 영향은 적었다. 처짐량의 경우, 최대 처짐량은 길어깨 하중 재하 모형이 중앙부 하중 모형과 동일하였으나 단부 및 우각부에 하중 재하 모형의 경우 롤러 지지 조건의 다중 슬래브 모형, 무한 요소 조건의 다중 슬래브 모형, 단일 슬래브 모형 순으로 크기로 나타났다.

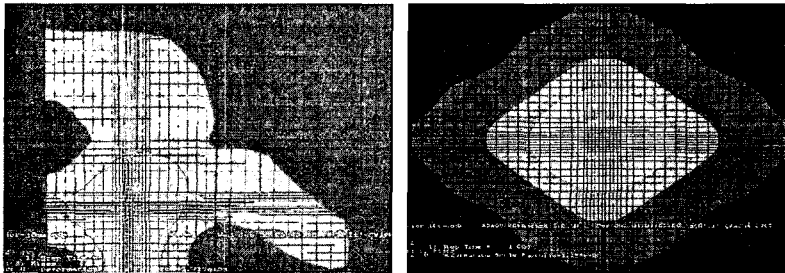
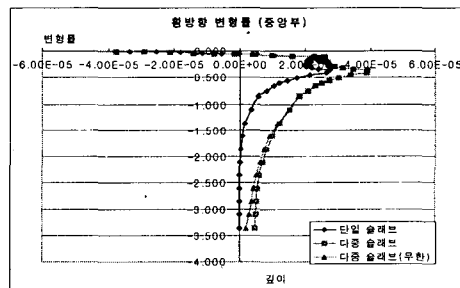
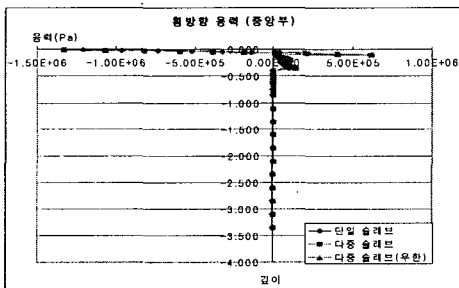


그림 4. 다중 슬래브 모형과 단일 슬래브 모형의 응력분포 (중앙부)



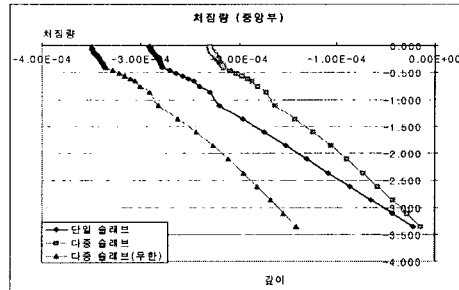


그림 5. 다중 슬래브 모형과 단일 슬래브 모형의 해석 결과 비교 (중앙부)

4. 현장 실험을 통한 다중 슬래브 모형의 검증

개발된 다중 슬래브 모형(롤러지지조건)의 검증 작업은 정적하중재하시험과 FWD침하량 시험 결과를 이용하였다.

4.1 정적하중 재하시험과의 비교

정적하중재하시험은 덕평에 있는 시험시공 현장에 실시하였으며, 모형 검증은 중앙부와 단부의 10, 15cm 단면에 시험한 결과를 바탕으로 하였다. 그 결과 콘크리트 슬래브 두께(10cm)의 경우, 하부 변형률은 모형과 실측 결과값이 0.8 ~ 1.2 범위 내에서 매우 유사한 경향을 나타냈다. 하지만 상부 변형률은 모형과 실측값이 다소 차이를 보이고 있다. 그 이유는 콘크리트 슬래브 상부로부터 일정 깊이만큼 떨어진 곳에 변형률 게이지가 매립되어 있지만 3차원 다중 슬래브 모형에서는 슬래브 최상부의 요소에서 변형률 값을 측정하였기 때문에 판단된다. 15cm 두께의 경우에서도 슬래브 하부 변형률은 모형과 실측값의 차이가 크지 않았다.

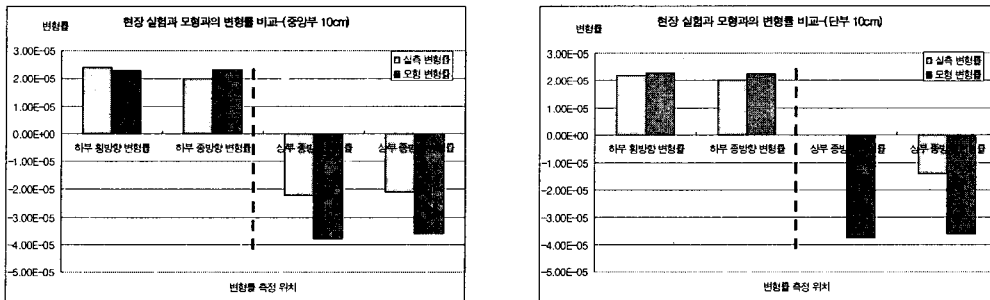


그림 6. 정적하중재하시험과 모형과의 비교

4.2 FWD 침하량과의 비교

FWD 장비를 이용하여 측정된 침하량과 3차원 다중 슬래브 모형의 침하량은 Geophone (센서)의 위치에 따라 유사한 경향을 나타내고 있으나 전체적인 침하량은 모형의 값이 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 현장의 모형에 고려하지 못한 다양한 변수들과 실제 압력 재하 면적 및 크기의 모형화 적용과정에 발생한 오차로 판단된다. 하지만 전체적인 침하량 변화 추세를 실험 결과와 모형이 상호 유사하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

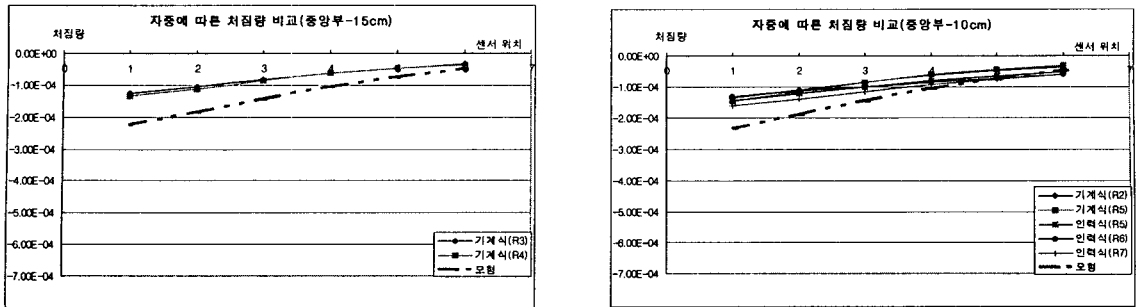


그림 6. FWD 치짐량과 모형과의 비교

5. 결론

상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 중.신.콘을 다양한 조건하에서 단일 슬래브 및 다중슬래브 모형화하여 해석한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 노상 깊이에 따른 중.신.콘의 거동을 연구한 결과 30cm 이상의 경우 응력에 대하여 큰 차이는 없었으나 변형률의 차이가 커서 약 300cm를 고려한 결과 일정한 값을 보였고 이를 모형에 적용하였다.
2. 하중 재하위치에 따른 단일 슬래브 모형 및 다중 슬래브 모형간의 응력, 변형률, 치짐량 등의 비교를 통하여 중.신.콘의 해석 모형으로 3차원 다중슬래브 (롤러지지) 모형이 적합함을 알 수 있었다.
3. 시험 시공 현장에서 측정한 정적하중재하시험과 FWD 치짐량을 이용하여 개발된 다중 슬래브 모형의 해석 결과와 비교했을 경우 매우 유사한 경향을 나타냈다.

참고 문헌

1. "Guidelines For The Thickness Design Of Bond Whitetopping Pavement In The State Of Colorado" Final Report, 1998, 12.
2. 이재훈, "얇은 콘크리트 덧씌우기 포장의 거동분석", 중앙대학교 석사논문, 2001.12
3. 구한모, 윤태영, 조윤희 "아스팔트 포장에 얇은 콘크리트 덧씌우기 포장적용 기준수립", 대한토목학회, 2003. 03
4. 구한모, "교통하중 및 환경하중 조건에 따른 Whietopping 거동 분석 ", 석사논문, 2002. 12
5. "ABAQUS/Standard User's Manual, Volume II", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 2000
6. J. Kim, "Three-Dimensional Finite Element Analysis Of Multi-Layered Systems, University of Illinois", 2000