



줄눈콘크리트 포장의 구조적 형상이 AREA법을 이용한 역해석에 미치는 영향

Effect of Structural Geometry of Jointed Concrete Pavement on Backcalculation using AREA Method

유 태 석* 심 종 성**
Yoo, Tae Seok Sim, Jong Sung

Abstract

Different backcalculation results for the same material properties are caused by different structural geometry. In this paper, based on real simulation results for typical pavement systems using 3-dimensional FE models, modified AREA graphs are proposed to graphically backcalculate modulus of elasticity of slab and subgrade based on center deflection and AREA. In modified graph for single infinity slab models, deflection and AREA are increased in deeper depth to bedrock. But, effects of depth to bedrock more than 4.0 meters on backcalculation results are negligible. And, center deflection and AREA generated from multi-finite slab models are larger than those of single infinity slab models with same depth to bedrock.

Keywords : structural geometry, backcalculation, 3-dimensional FE model, modified AREA graph

요 지

동일한 물성을 가지는 포장이라도 포장의 구조적인 형상에 따라 역해석 결과가 다르게 나타난다. 본 논문에서는, 구조적인 형상을 고정하고 동적 하중을 모사하는 3차원 유한요소모델을 만들어 얻어진 최대 처짐과 AREA의 분포를 통해서 물성을 추정하는 수정된 AREA 도표를 제안하였다. 제안된 도표를 이용하여 단일 무한 슬래브에 대한 민감도 분석 결과 노상의 깊이가 깊어지면 처짐과 AREA가 증가하는 것으로 나타났고 4.0m이상에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 층별 물성과 노상 깊이가 같은 경우 단일 무한 슬래브 모델과 다중 유한 슬래브 모델을 비교하는 경우 다중 유한 슬래브 모델의 처짐과 AREA가 더 크게 나타났다.

핵심용어 : 구조적 형상, 역해석, 3차원 유한요소모델, 수정된 AREA 도표

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 전임연구원

** 한양대학교 건설교통공학부 교수



1. 서론

AREA법은 콘크리트포장의 물성 역해석에 가장 널리 사용되는 방법으로 slab-on-grade 구조의 무한 넓이를 가지는 판에 정적하중이 가해지는 경우를 가정하여 유도된 방법이다(Hall et al., 1991). 따라서 유한 크기의 슬래브, 유한한 노상깊이, 다웰 바가 존재하는 실제 포장구조에 동적하중이 가해지는 경우 이러한 가정은 더 이상 성립할 수 없으며 수치 해석상으로 예측되는 값과는 다른 값이 얻어지게 된다. AREA법을 통해서 얻어지는 역해석 물성은 슬래브 아래의 동적지지력과 슬래브의 탄성계수로 역해석 결과가 나타내는 물성이 어떻게 달라지는지를 알기 위해서는 실제 콘크리트포장 구조를 모사한 모델을 구축해야 한다. 본 연구에서는 실제의 포장구조와 시험조건을 모사한 모델을 구축하고 얻어진 처짐 응답을 그렇지 않은 조건으로 유도된 응답과 비교하여 이들 변수가 콘크리트포장에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 3차원 유한요소모델을 사용하여 기반암, 유한 크기 슬래브, 다웰 바, 기층을 고려하였으며 ABAQUS를 이용한 implicit dynamic analysis를 수행하였다.

2. 3차원 유한요소모델

3차원 유한요소모델은 단일 무한 슬래브 모델과 다중 유한 슬래브 모델로 나누어진다. 단일 무한 슬래브 모델은 무한 크기 효과를 가지도록 크기를 증가시킨 모델로 슬래브 아래 기층과 노상을 모델한 연속체 요소를 사용한 것으로 그림 1과 같다. 모델의 크기는 상대강성변경의 8배 이상으로 하여 무한판 가정에서 유도된 Westergaard의 처짐에 수렴하도록 하였다(Ioannides et al., 1985). 모델에 사용된 요소는 3차원 8절점 solid brick 요소인 C3D8을 사용하였고 콘크리트 슬래브와 기층 사이 경계면은 contact algorithm을 적용하였으며 마찰은 없는 것

으로 가정하였고 기층과 노상 사이 경계면은 완전 부착이 되도록 하였다.



그림 1. 단일 무한 슬래브 모델

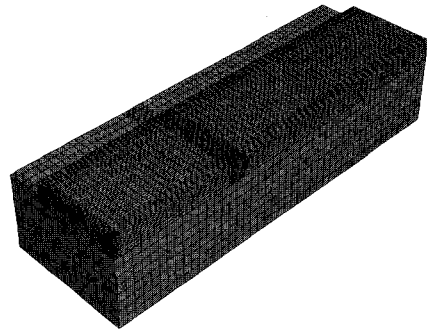


그림 2. 다중 유한 슬래브 모델

다중 유한 슬래브 모델은 3차원 8절점 solid brick 요소인 C3D8 요소를 사용한 다우웰 바를 사용하여 연결하였고 메모리 및 해석시간의 제약으로 다우웰 바와 표층, 기층과 기초사이는 완전 부착하도록 하였다. 기층콘크리트의 폭은 3,000mm, 길이는 9,000mm, 두께는 150mm를 사용하여 모델 하였다. 다중 유한 슬래브 모델은 그림 2와 같다. FWD하중이 가해지는 재하판은 직경 300mm, 두께 30mm로 슬래브 중앙에 위치하도록 하였고 다우웰 바는 직경 32mm, 길이 500mm이고 단부에서 140mm만큼 떨어진 후 300mm의 간격으로 7개가 배치되도록 하였다.

두 가지 모델의 경계조건은 바닥의 경우 수직방향 변위만을 구속하여 기반암의 효과를 고려하였고, 노상 및 기층의 측면은 수직 및 길이방향 변위가 발생하



도록 하였으나 법선방향 변위는 구속하였다. 측면의 경우 깊이에 비해 하중지점에서 떨어진 거리가 길어 응력파의 영향이 적은 것으로 가정하였으나 향후 영향 정도를 고려한 모델기법의 확립이 필요한 것으로 판단된다. 또한 모든 메모리 및 해석시간을 효율적으로 사용하기 위해 하중 재하판을 중심으로 2개축에 대해서 대칭조건을 사용하였다.

모델에 사용된 물성은 표 1과 같이 정리되며 최종적으로 FWD 충격하중으로 인해 표면에서 발생하는 처짐을 조사하였다. 표면 처짐은 슬래브 중앙과 슬래브 중앙에 위치하는 하중 재하판 중앙으로부터 304.8mm(12in.), 609.6mm(24in.), 914.4mm(36in.) 떨어진 4개의 처짐을 AREA법에 대입하여 지지력 및 탄성계수를 역산하

표 1. 모델에 사용된 물성

구 분	탄성계수 (MPa)	밀도 (kg/m ³)	자중 (kN/m ²)	포아손비
표층콘크리트	20,690	2,295	22.5	0.15
	27,580			
	34,483			
기층콘크리트	12,411	2,197	21.6	0.20
노상	49	1,795	17.7	0.45
	74			
	98			
다우웰 바	200,056	6,992	68.6	0.30
재하판	200,056	6,992	-	0.30

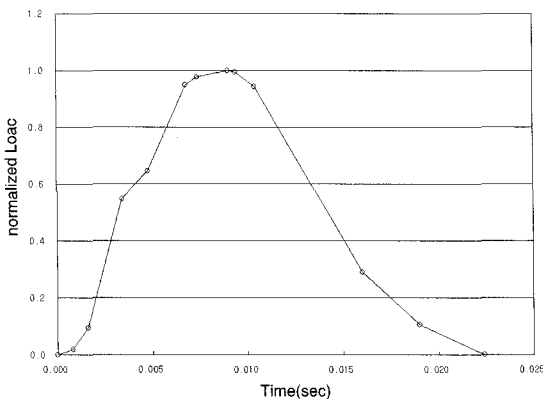


그림 3. 하중이력 모델

였다. FWD 충격하중은 재하판을 통해 포장에 전달된 하중이 표면 처짐을 발생시키는 것을 모사하기 위해 총 중량 40kN이 두께 30mm, 직경 300mm의 원형 판에 등분포 하중의 형태로 가해지는 것으로 모델하였다(Shoukry et al., 1997). 동적해석에 사용된 정규화 된 하중이력은 그림 3과 같으며 FWD로 계측된 하중을 13개 포인트로 단순화한 데이터를 읽어 들여 해석하도록 하였다.

본 절에서는 실제의 동적하중 조건을 적용한 해석을 수행하고 AREA법을 사용한 역해석을 수행하여 실제 현장에서 얻어지는 결과와 비교하였다. 감쇄의 영향을 고려하는 경우 Rayleigh 감쇄를 사용하였고 α 값은 고주파에서의 노이즈 제거를 위해서 인위적 감쇄 (artificial damping) -0.05를 사용하였다 (ABAQUS, 2002). β 값의 경우 $2\zeta/\omega_n$ 의 공식에서 감쇄비 ζ 는 5%, ω_n 는 28π 로 가정하여 얻어진 0.00114로 산정하여 모든 층에 적용하였다. 감쇄비의 경우 아스팔트포장의 경우 5%를 사용하는 경우가 조사되었고(Mamlouk et al., 1997, Ong et al., 1991), 아스팔트와 콘크리트의 합성포장에서 5%를 사용되는 경우가 조사되었으며(Shoukry et al., 1997), 포장형식에 상관없이 기층 이상은 2% 노상은 불포화 조건에서 2%, 포화조건에서 5%를 적용(Rosset et al., 1995)한 예를 참고하여 본 논문에서는 모든 층에 5%를 사용하였다. 고유진동수의 경우 $\omega_n=2\pi f$ 의 관계에서 f 는 13~16Hz(Mamlouk et al., 1997)범위 가운데 14Hz를 사용(Ong et al., 1991)하였는데 이것은 감쇄비와 마찬가지로 포장의 고유진동수는 시험 위치와 포장 형식에 따라 다른 값을 가지나 본 연구의 목적이 특정 위치의 측정 결과와 비교하는 것이 아니고 구조변화에 따른 영향분석이기 때문에 사용하였다. 향후 현장에 적용하여 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 동적시험을 통해 적절한 감쇄비와 고유진동수를 찾고 더불어 층별 물성정의에 따라 역해석 결과에 미치는 영향에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 동적 해석에 따른 민감도 분석은 분석 시간의 제약을 고려하여 단일 무한 슬래브 모델을 사



용하였고 정적인 처짐, 감쇄계수를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 처짐을 비교하였다.

3. 노상 깊이가 처짐 및 AREA에 미치는 영향

노상 깊이가 처짐 크기와 AREA로 표현되는 처짐 형상에 미치는 영향을 검토하였고 동적 해석 및 정적 해석을 수행한 후 비교하는 방법을 사용하였다. 여기에서는, 단일 무한 슬래브 모델을 사용하여 3가지 표층 탄성계수(20,690MPa(3,000ksi), 27,580MPa(4,000ksi), 34,483MPa(5,000ksi)), 5가지 노상 깊이(1.0m, 1.5m, 2.0m, 4.0m, 8.0m)에 대해서 해석을 수행하였다. 이때, 지반 탄성계수는 모든 노상 깊이에 대해서 81kPa/mm (300pci)의 역산 동적지지력이 구해지는 값을 그림 4를 이용하

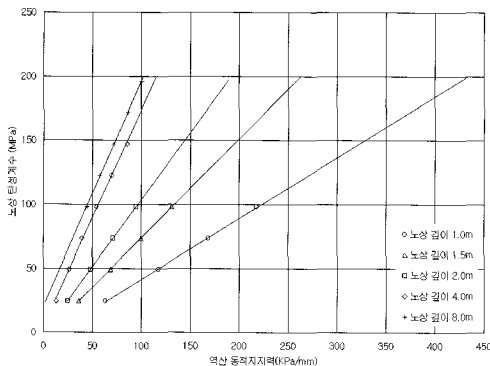


그림 4. 노상 깊이에 따른 노상 탄성계수와 역산 동적지지력 관계

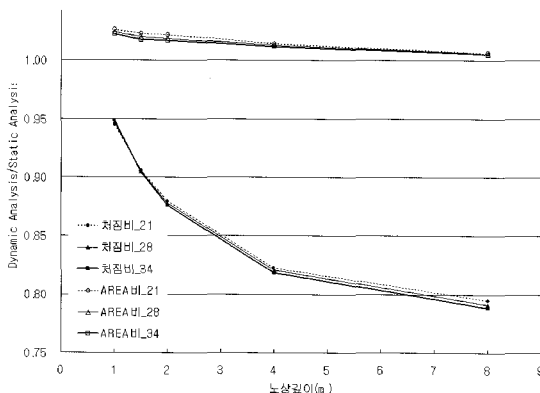


그림 5. 노상 깊이의 변화에 따른 처짐의 크기 및 형태 변화

여 구한 후 적용하였다. 지반 탄성계수를 고정한 이유는 현장의 평가 지지력이 기반암의 영향을 받기 때문으로 평판재하시험을 통해서 동일한 지지력을 제시하는 포장에 FWD시험을 수행하는 경우 어떠한 변화가 발생하는지 조사하기 위해서이다.

그림 4는 정적 유한요소해석을 이용하여 노상탄성계수와 역산 동적지지력의 관계를 구한 것으로 슬래브 탄성계수 27,580MPa에 대한 도표이며 슬래브 탄성계수 차이에 따른 변화는 크지 않은 것으로 판단되었다.

동적해석 결과를 정적해석 결과와 비교하기 위하여 처짐비 및 AREA비를 구한 후 그림 5와 같이 비교하였으며 범례 숫자는 표층 슬래브의 GPa단위 탄성계수를 의미한다. 여기에서 탄성계수 차이에 따른 변화는 크지 않았으나 노상깊이가 증가에 따라 처짐비 및 AREA비는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 처짐의 경우 노상의 깊이가 깊어질수록 해석방법의 차이에 따른 값의 차이는 커질 것으로 판단되었다.

4. 노상 깊이가 물성의 역산에 미치는 영향

단일 무한 슬래브 모델에 대하여 슬래브 및 노상 탄성계수의 변화(12개 경우)에 따라 정적해석 결과와 동적 해석 결과를 비교하였고 6개의 노상 깊이(1.0m, 1.5m, 2.0m, 4.0m, 6.0m, 8.0m)를 적용하여 총 72개의 경우에 대한 결과를 얻을 수 있었다.

노상의 깊이가 깊어질수록 역산지지력은 감소하는 경향을 나타내었고 그림 6과 같이 노상 탄성계수가 작을수록 동적해석을 통해 구해지는 역산지지력을 정적해석을 통해 구해지는 역산지지력으로 나누어 얻어지는 비율이 커지는 경향을 나타내었다. 즉, 지반이 약할수록 동적하중에 의한 동적지지력의 증가율이 커져 실제보다 과대평가될 가능성이 크게 나타났다. 또한 노상의 깊이가 깊어질수록 동적하중에 의한 동적지지력의 증가율이 커지며 노상 탄성계수가 작을수록 기울기가 증가하는 것으로 나타났다. 그



림 6 및 그림 7의 범례에서 앞의 숫자는 GPa단위 슬래브 탄성계수를 뒤 숫자는 MPa단위 노상 탄성계수를 의미하여 슬래브34_노상98은 슬래브 탄성계수 34,483MPa, 노상 탄성계수 98MPa를 의미한다.

역산 탄성계수에서도 노상의 깊이가 깊어질수록 동일한 탄성계수에서 구해지는 역산 탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었고 노상 탄성계수가 작을수록 동적해석을 통해 구해지는 역산 탄성계수와 실제 탄성계수의 비는 커지는 경향을 나타내었으며 그림 7과 같이 정리되었다.

AREA법을 이용해 역해석을 수행하는 경우 포장의 물성과 노상 깊이에 따라 다른 값을 얻으므로 그림 8과 같이 노상 깊이별 최대 처짐 및 AREA의 분포를 통해 물성을 추정하는 방법이 가장 실용적인 것으로 판단된다. 그림 8은 단일 무한 슬래브에 대해 얻어진 도표로 현재 AASHTO 포장설계지침에서 제

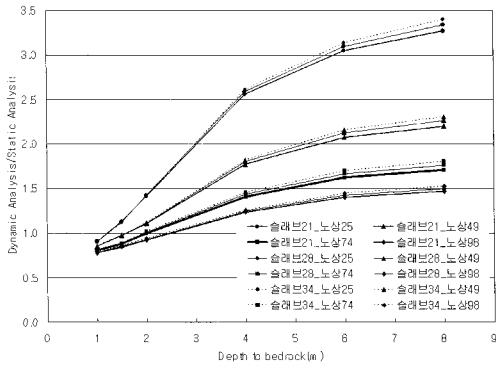


그림 6. 노상 깊이의 증가에 따른 동적지지력 비율 변화

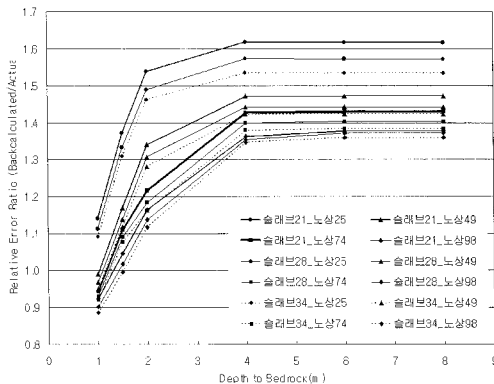


그림 7. 노상 깊이의 증가에 따른 표준 탄성계수 비율 변화

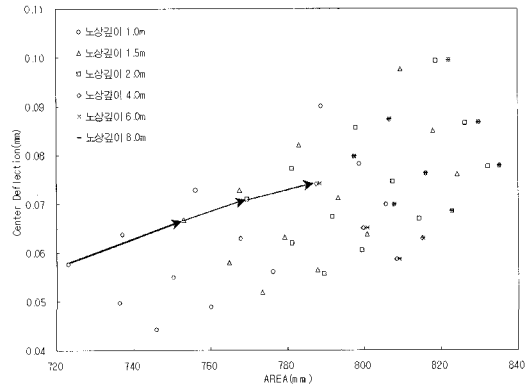


그림 8. 노상 깊이 변화에 따른 최대 처짐과 AREA분포 변화

시하는 AREA법(AASHTO, 1993)이 생기기 전에 사용하였던 방법과 유사하다(Darter et al., 1992). 다만, 차이점은 전통적인 방법은 슬래브의 탄성계수와 하부의 동적지지력으로 그물망이 형성되지만 본 연구에서는 슬래브의 탄성계수와 노상의 탄성계수로 그물망이 형성된다. 그림에서 슬래브 및 노상 탄성계수가 같은 경우 노상의 깊이가 달라지면 처짐과 AREA가 증가하는 것으로 나타났고 노상 깊이 4.0m 이상에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 이것은 동적하중의 영향범위를 넘어서기 때문으로 2.0m와 4.0m 사이에 해당 모델에 대한 영향깊이가 존재할 것으로 판단된다.

1.5m 노상 깊이에 대한 최대 처짐과 AREA분포에서 노상 및 슬래브의 탄성계수는 그림 9와 같은 분포를 나타낸다. 그림과 같이 슬래브의 탄성계수가 클

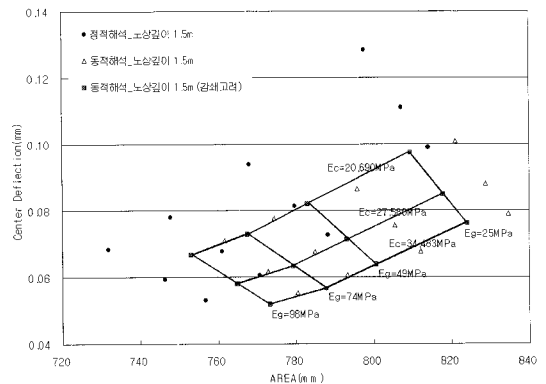


그림 9. 노상 깊이 1.5m에 대한 최대 처짐 및 AREA 분포



수록 아래 부분에 분포하고 노상 탄성계수가 클수록 AREA가 감소하여 왼쪽에 분포하고 있다. 따라서 같은 조건의 포장에 대하여 최대 처짐과 AREA의 값의 위치를 파악하면 슬래브와 노상의 탄성계수를 추정할 수 있을 것으로 판단되었다. 그림에서 E_c 는 슬래브의 탄성계수를 E_g 는 노상의 탄성계수를 의미한다.

5. 기층 탄성계수 및 마찰계수가 물성의 역산에 미치는 영향

기층 탄성계수가 미치는 영향을 조사하기 위해서 앞에서 해석한 12,411MPa의 기층이 이 값의 1/2인 6,205MPa으로 바뀐 경우를 조사하였다. 이때 슬래브의 탄성계수는 27,580MPa를 사용하였고 노상의 탄성계수는 59MPa를 사용하여 시간에 따른 처짐의

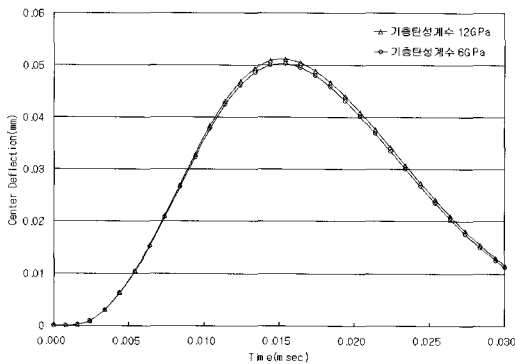


그림 10. 기층탄성계수 변화에 따른 시간 - 중앙 처짐 그래프

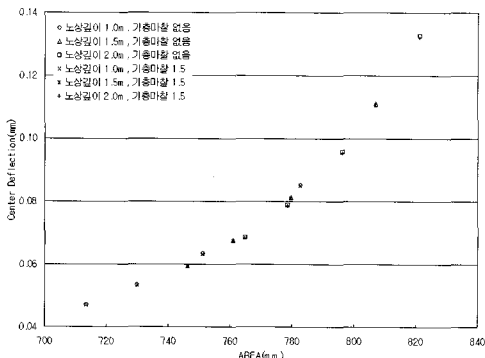


그림 11. 슬래브와 기층사이의 마찰에 따른 AREA - 중앙 처짐 도표

경향과 역산탄성계수, 역산지지력을 비교하였다. 시간에 따른 처짐의 경향은 그림 10과 같고 최대 처짐의 경우 상대오차 1.5%를 나타내었으며 이로 인한 역산탄성계수와 역산지지력의 상대오차는 각각 1.5% 및 2%를 나타내어 기층이 50%변화한 경우 나타나는 응답의 변화는 상대적으로 크지는 않은 것으로 판단되지만 무시하기 힘든 크기이므로 앞서 제시한 중앙 처짐과 AREA로 이루어진 도표에 이러한 영향을 고려하면 더 합리적인 결과를 얻을 것으로 판단된다.

콘크리트 슬래브와 기층사이의 마찰계수로 인한 영향을 조사하기 위해서 3가지 노상깊이(1.0, 1.5, 2.0m)에서 마찰계수 유무에 따른 처짐 및 AREA의 변화를 조사하였으며 그림 11과 같은 결과를 나타내었다. 슬래브의 탄성계수는 27,580MPa를 사용하였고 노상의 탄성계수는 4가지(25, 49, 74, 98MPa)를 사용하였다. 그림과 같이 기층마찰의 유무에 따라서 눈에 띄는 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 또한 우리나라 고속도로 콘크리트포장처럼 표층과 기층 사이에 비닐 막을 사용하는 경우 기층마찰계수 1.5는 비교적 큰 값이기 때문에 포장의 역산에서 큰 차이를 나타내는 인자가 되지는 않을 것으로 판단되었다.

6. 슬래브의 형상이 물성의 역산에 미치는 영향

다중 유한 슬래브 모델의 해석도 단일 무한 슬래브의 해석과 유사한 경향을 보였으나 동적지지력의 경우 단일 무한 슬래브에서 얻어진 결과 보다 낮은 값을 탄성계수의 경우 높은 값을 나타내었다. 다중 유한 슬래브 모델의 경우 감쇄를 고려($\beta=0.00114$)하는 경우 슬래브와 기층 사이에 작용하는 마찰계수는 1.5를 사용하였다(Shoukry et al., 2002). 다중 유한 슬래브 모델의 해석방법에 따른 변화는 그림 12와 같이 정리되며 지반을 Winkler기초로 한 경우, elastic solid 기초로 하고 정적 및 동적 해석을 한

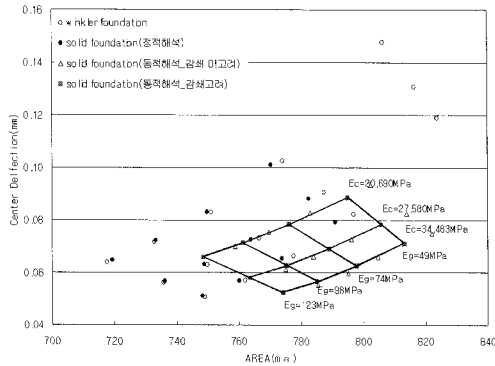


그림 12. 다중 슬래브에서 노상 깊이 1.5m에 대한 최대 처짐 및 AREA 분포

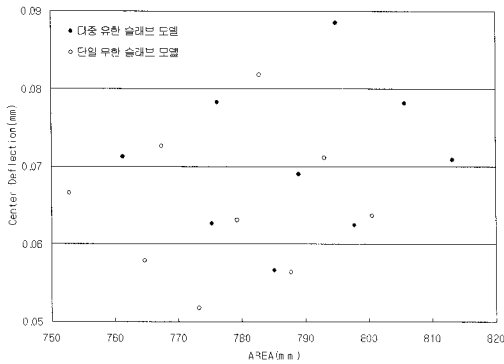


그림 13. 노상 깊이 1.5m에 대한 단일 및 다중 슬래브의 비교 경우 중앙 처짐과 AREA의 분포가 변화하였다. 그림으로부터 동일한 AREA와 중앙 처짐으로 물성추정을 하는 경우 정적 해석 결과에서 얻어지는 물성추정 결과와 동적 해석 결과에서 얻어지는 물성추정 결과는 다르게 나타날 것으로 판단되었다.

본 논문의 다중 유한 슬래브 모델을 사용하여 감쇠효과를 고려한 동적해석을 수행하는 경우 1개의 경우를 실행시키는데 2.4GHz속도의 CPU와 2GB 크기의 RAM을 소유한 workstation을 사용하여 48~72시간이 소요되어 노상의 깊이는 1.5m에 대하여만 고려하였다. 이 결과를 노상 깊이 1.5m인 단일 무한 슬래브 모델에 마찰계수의 영향을 추가하여 해석한 결과와 비교하였으며, 그림 13과 같이 단일 무한 슬래브 모델에서 다중 유한 슬래브 모델로 바뀌는 경우 처짐과 AREA는 증가하는 것으로 나타났다.

7. 결론

AREA법은 slab-on-grade 구조의 무한 넓이를 가지는 판에 정적하중이 가해지는 경우를 가정하여 유도된 방법으로 유한 크기의 슬래브, 유한한 노상깊이, 다웰 바가 존재하는 실제 포장구조에 동적하중이 가해지는 경우 수치해석과는 다른 결과를 얻게 된다. 본 연구에서는 이러한 실제의 구조적인 형상과 시험 조건을 모사하여 얻어진 응답을 AREA법에 대입한 후 결과를 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 동적해석 결과를 정적해석 결과와 비교하기 위하여 처짐비 및 AREA비를 구한 후 비교하였고 표층 탄성계수 차이에 따른 변화는 크지 않았으나 노상깊이 증가에 따라 처짐비 및 AREA비는 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 동일한 물성을 가지는 포장이라도 슬래브의 기하학적 형태, 노상 깊이에 따라 역해석 결과가 다르게 나타나므로 본 논문에서는 특정한 기하학적 형태와 노상 깊이를 고정하고 실제 조건을 모사하는 3차원 유한요소모델을 만들어 얻어진 최대 처짐과 AREA의 분포를 통해서 물성을 추정하는 방법을 제안하였다.
- 3) 단일슬래브에 대한 민감도 분석결과 슬래브 및 노상 탄성계수가 같은 경우 노상 깊이가 깊어지면 처짐과 AREA가 증가하는 것으로 나타났고 4.0m이상에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 단일 무한 슬래브 모델과 다중 유한 슬래브 모델을 비교할 때 층별 물성과 노상 깊이가 같더라도 구조적 형상의 영향으로 다중 유한 슬래브 모델의 처짐과 AREA가 더 크게 나타났다.

참고문헌

- 유태석(2007), “콘크리트포장의 구조적 형상과 켈링 거동이 FWD를 이용한 물성 역해석에 미치는 영향 분석,” 박사학위논문, 한양대학교.



- 유태석, 심종성(2006), "줄눈 콘크리트포장 3차원 유한 요소모델의 민감도 분석," 대한토목학회 논문집 제 26권 제3D호, pp.435-444.
- AASHTO(1993), *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D.C.
- ABAQUS(2002), "*ABAQUS/Standard User's Manual*," Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Darter, M. I., Smith, K. D. and Hall, K. T.(1992), "Concrete Pavement Backcalculation Results from Field Studies," TRR 1377, *Transportation Research Board*, pp.7-16.
- Hall, K. T., and Mohseni, A.(1991), "Backcalculation of Asphalt Concrete-Overlaid Portland Cement Concrete Pavement Layer Moduli," TRR 1293, *Transportation Research Board*, pp.112-123.
- Ioannides, A. M., Thompson, M. R. and Barenberg, E. R.(1985), "Westergaard Solutions Reconsidered," TRR 1043, *Transportation Research Board*, pp13~23.
- Mamlouk, M. S.(1997), "Use of Dynamic Analysis in Predicting Field Multilayer Pavement Moduli," TRR 1043, *Transportation Research Board*, pp.113-121.
- Ong, C. L., Newcomb, D. E. and Siddharthan, R.(1991), "Comparison of Dynamic and Static Backcalculation Moduli for Three-Layer Pavements," TRR 1293, *Transportation Research Board*, pp.86-92.
- Roesset, J. M., Stokoe II, K. H. and Seng, C.-R.(1995), "Determination of Depth to Bedrock from Falling Weight Deflectometer Test Data," TRR 1504, *Transportation Research Board*, pp.68-78.
- Shoukry, S. N., Fahmy, M., Prucz J. and William, G.(2002), "3D Finite Element Modeling of Rigid Pavement Response to Moving Load and Nonlinear Temperature Gradient," *Proceedings of the Third International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis*, Amsterdam, The Netherlands, pp.401~422.
- Shoukry, S. N., Martinelli, D. R. and Selezneva, O. I.(1997), "Dynamic Performance of Composite Pavements Under Impact," TRR 1570, *Transportation Research Board*, pp.163~171.

접 수 일: 2007. 1. 19

심 사 일: 2007. 2. 2

심사완료일: 2007. 3. 8