

온도구배로 인한 줄눈 콘크리트포장 슬래브의 지지조건 변화

Variation of Support Conditions under JCP Slabs due to Temperature Gradient

유 태 석^{*} 한 승 환^{**}
Yoo, Tae Seok Han, Seung Hwan

ABSTRACT

The concrete slab on the foundation may have curling and warping deformations due to temperature gradient of its section. These deformations may change the support conditions of concrete slabs, and cause higher level of stresses than expected. In this study, partial support conditions due to several temperature gradients are evaluated using FE analysis. Especially, 3D FE model is adopted to evaluate the partial contact between the slab and the base which is hard to be simulated in 2D FE models. The discrepancies of analysis results increase at high temperature gradients. And it is concluded that 3D FE model can be used to simulate real support and temperature conditions.

1. 서 론

대부분의 콘크리트포장은 가로 및 세로 줄눈으로 분리된 슬래브가 연속적으로 배열되어 이루어져 있으며 각각의 슬래브는 다우웰바 및 타이바로 연결된다. 이러한 포장형식을 줄눈 콘크리트포장이라고 하는데 포장의 특성상 온도구배에 의한 curling과 warping이 심하게 나타난다.

기온의 변화가 존재하는 한 curling과 warping은 끊임없이 발생하며 따라서 슬래브 각 부분에서의 지지조건은 주기적으로 변화하게 된다. 슬래브 하부의 지지조건이 시간적으로 변화하므로 같은 위치에 같은 크기의 하중이 가해진다고 하더라도 시간에 따라 다른 처짐과 응력이 나타날 수밖에 없으며 그 정도는 무시하기 어려워 이를 고려한 포장의 해석 및 설계가 요구된다 하겠다. 따라서, 온도구배로 인한 포장지지력의 변화에 따른 응력변화를 도입하여 포장설계의 개념을 제고하기 위한 노력이 계속되고 있으나 우리나라의 경우 기초적인 데이터가 빈약하고 특히 포장모델에 대한 정립이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 온도구배가 발생한 줄눈 콘크리트포장에 대한 포장해석을 수행하였다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 포장해석 방법을 통해 얻은 응력 및 처짐결과를 범용해석 프로그램을 사용하여 얻어진 정밀한 해석결과와 비교하였으며 그 결과에서 발생한 차이의 원인을 분석하여 포장해석 방법의 개선방안을 제시하고자 하였다.

* 한국도로공사 도로연구소 인 구 원
** 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

2. 줄눈 콘크리트포장의 해석을 위한 2차원 모델

2.1 지 반

콘크리트 슬래브를 지탱하는 지반에 대한 이상화는 크게 2가지 방법을 사용하여 이루어진다. 하나는 Winkler foundation으로 지반을 스프링으로 가정하여 전단을 고려하지 않는 것으로 보는 방법이고 다른 하나는 Elastic foundation으로 지반을 탄성체로 판단하는 방법이다. 그러나 실제지반의 처짐양상은 이들의 중간정도를 나타내고 있으며 이를 고려한 모델을 사용하는 경우도 있다.¹⁾

2.2 슬래브 및 기층

국내 고속도로 콘크리트포장은 88고속도로를 제외하고 슬래브 밑에 린콘크리트 기층이 도입되어 지반 위에 놓여지도록 되어있다. 슬래브 및 기층에 대한 이상화는 사용되는 해석방법에 따라 다를 수 있으나 널리 사용되는 방법은 등가두께의 개념이다. 이것은 2차원 모델을 사용하는 포장해석 프로그램에서 채택되는 방법으로 각 층의 강도 및 접착상태에 따라 두 층을 등가의 한 층으로 변화시켜 처짐을 해석한 후에 응력을 다시 계산하는 방식이다. 그러나 슬래브와 기층사이의 계면에서 발생하는 거동과 슬래브의 형상변화, 기층단면의 변화를 고려하는 데는 한계를 가지고 있다.

2.3 다우웰바 및 골재맞물림

콘크리트포장의 줄눈은 콘크리트 슬래브를 연결하는 다우웰바 및 타이바와 콘크리트 슬래브 사이의 골재 맞물림으로 크게 나누어 이상화된다. 다우웰바와 타이바는 철근자체가 가지는 휨 및 전단저항과 철근과 콘크리트의 상호작용에 따른 다우웰-콘크리트 상관계수로 이상화되고 있으며 골재 맞물림의 경우 슬래브사이의 스프링으로 이상화되고 있다.

2.4 슬래브의 온도구배

그림 1은 Florida에서 조사된 콘크리트포장 슬래브에 대한 현장조사 결과²⁾로 온도구배에 의한 단면 변형의 상태를 보여주고 있으며 린콘크리트 기층을 가지는 콘크리트포장의 온도구배로 인한 지지상태는 그림 2와 같이 이상화 될 수 있다. 2차원 해석모델에서 온도구배가 발생한 포장체의 해석은 등가슬래브가 온도구배로 인한 변형을 일으키는 경우 변형에 따른 지반 스프링과의 관계를 검토하도록 되어있다. 즉, 포장체의 자중, 온도 및 차량하중으로 인한 처짐을 구하

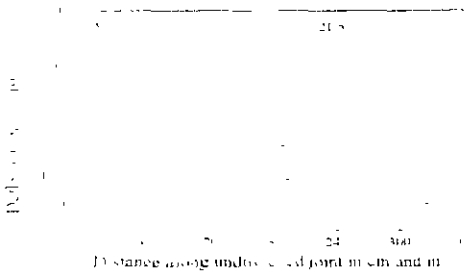


그림 1. 콘크리트 슬래브 단면내 온도구배에 따른 변형

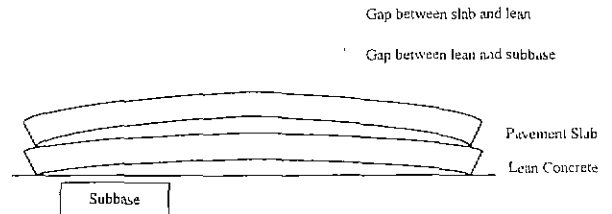


그림 2. 실제 포장에서 온도구배에 의한 지지상태

고 온도구배로 인하여 상향처짐이 기준면 이상이 되는 지점의 경우 지지력이 없는 것으로 계산한 후 변화된 지지조건을 사용하여 재계산하는 방법을 채택하여 수렴할 때까지 반복한다.

3. 줄눈콘크리트포장의 해석을 위한 3차원 모델

2차원 모델은 실제 포장의 모사에 한계를 가지고 있으며 이러한 한계를 극복하기 위해서 등가단면과 같은 단순화 기법을 도입하고 있다. 따라서 사용자가 사용하기에 편리하고 계산에 큰 시간이 소요되지 않는 장점을 가지고 있지만 다양한 포장형태를 해석하기에는 한계를 나타낼 수밖에 없으며 이를 극복하기 위해 3차원 모델의 개발이 이루어져 왔다.

3.1 지반 및 기층하부

지반에 대한 모사는 Winkler foundation의 스프링을 사용하는 방법, Elastic foundation을 사용하는 방법이 있으나 3차원 프로그램의 특성상 지반에 대한 모델은 다양하게 이루어 질 수 있다. 지반이 기층과 만나는 지점은 contact모델을 사용하여 온도구배가 기층에도 발생하는 경우 지반과의 상호관계를 고려하여 해석을 수행한다.

3.2 슬래브와 기층

3차원 해석에서 슬래브와 기층은 3D solid요소를 각각의 층에 사용하여 모델된다. 이때 각각의 요소는 curling과 warping이 발생하는 경우 분리와 집착이 반복적으로 일어날 수 있는데 이러한 거동은 contact모델⁴⁾을 도입하여 해결할 수 있다. 기층과 지반과의 사이에 발생하는 거동에도 마찬가지로 contact모델을 사용한다. 온도구배는 각 요소의 상부, 중앙 및 하부 절점에 온도를 입력하므로써 다양한 형태의 실제 온도분포를 모사할 수 있으며 깊이별 요소수가 증가할수록 더욱 실제와 가까운 결과를 기대할 수 있다.

3.3 다우웰바와 골재맞물림

3차원 모델에서 줄눈을 모델하기 위해서는 다우웰바와 골재맞물림을 나타내어야 한다. 먼저 다우웰바의 모델에는 보요소를 주로 사용하여 실제의 상태를 모사한다. 골재맞물림의 경우에는 스프링을 도입하거나 앞에서 언급한 contact모델을 도입하여 모사하기도 한다. 이러한 contact모델은 포장에 균열이 발생한 경우 온도변화에 따른 팽창으로 인한 슬래브 상호간에 줄눈에서 발생하는 마찰을 효과적으로 모사할 수 있다.⁴⁾

4 온도구배를 고려한 포장해석

본 연구에서는 콘크리트포장 슬래브에 온도구배가 발생할 때의 거동을 파악하기 위하여 포장해석을 실시하였다. 포장해석은 현재 널리 사용되고 있는 방법인 2차원 유한요소 해석과 3차원 정밀해석 방법을 도입하여 수행하였다. 2차원 유한요소 해석은 포장해석에 가장 널리 사용되는 프로그램을 사용하여 수행하였고 3차원 정밀해석은 범용 유한요소 해석프로그램인 abaqus를 사용하여 수행하였다. 3차원

해석은 3D brick을 사용하여 슬래브와 기층을 모사하였고 층과 층 사이는 contact모델 가운데 interface요소를 사용하였다. 다우웰바는 보요소를 사용하였으며 지반은 Winkler foundation을 도입하였다 온도에 대한 효과를 파악하기 위해 줄눈은 건전한 상태를 기준으로 하였고 슬래브와 기층사이의 마찰은 무시하였다.

4.1 해석모델

포장해석모델은 1차선 줄눈 콘크리트포장을 채택하였다. 모델은 3개의 슬래브를 모사하기 위하여 1개의 슬래브에 1/2의 슬래브를 연결시키고 1/2의 슬래브에는 대칭조건을 적용하여 중앙에 차량하중이 가해지도록 하였다. 차량하중은 단축하중을 사용하여 67.5psi의 접지압이 작용하도록 하였다. 줄눈의 다우웰바는 30cm간격으로 배치되도록 하였으며 줄눈의 간격은 0.25cm가 되도록 하였다. 포장해석모델 및 입력변수는 그림 3과 같이 요약하여 나타낼 수 있다.

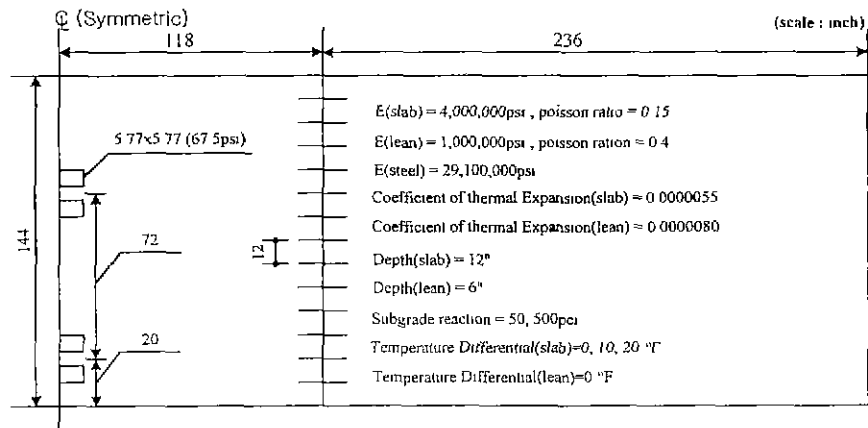


그림 3. 포장해석모델 및 입력변수

4.2 입력변수

포장해석에 사용된 입력변수는 온도구배와 지반의 지지력이다. 온도구배는 전혀 없는 경우와 실제 포장에서 빈번히 일어날 수 있는 구배차인 10 및 20 °F를 콘크리트 슬래브에만 적용하였다. 또한 지반지지력은 50 및 500pci를 사용하였는데 낮은 지지력에서는 curling이 발생하더라도 지반과 기층과의 사이에 부분지지현상이 발생하지 않기 때문에 슬래브와 기층의 부분지지로 인한 효과를 알 수 있고 높은 지지력에서는 curling으로 인한 응력 및 치짐의 양상을 명확히 구분할 수 있다. 이외에도 기층의 폭을 변화시켜 이에 따른 표층의 거동을 고찰하였다.

5. 해석결과

5.1 2차원 해석결과

2차원해석은 지반지지력과 단면내 온도 분포를 변수로 하여 수행되었다. 본 연구의 2차원 해석에서

언어진 결과를 요약하면 다음의 표 1과 같다. 표 1의 결과는 하중경우를 포장슬래브의 자중과 단축하중, 그리고 온도하중이 결합되어 작용되어지는 것을 나타낸 것이다. 그리고 슬래브 자중과 온도하중만을 작용시킨 결과를 비교하여 단면내 온도 분포가 해석결과에 미치는 영향을 분석하고자 하였다

해석결과에 의하면 지지력 계수가 50pci인 경우 온도분포에 상관없이 하중만에 의한 효과를 나타내는 처짐 및 응력의 차이가 일정한 값을 보인다. 그러나 지지력계수가 500pci인 경우에는 단면내 온도 분포에 따라 처짐 및 응력이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 등가단면을 사용하는 2차원 해석 프로그램이 슬래브의 부분지지조건을 모사하고 있으나, 여기에 적용되는 부분지지 조건이 포장시스템의 슬래브와 린콘크리트 기층사이의 부분지지조건이 아니라, 린콘크리트 하부의 부분 지지조건만을 모사하고 있는 것을 보여 주고 있다. 즉 하부의 지지력을 감소시켜 린콘크리트층의 하부 완전지지를 보장하는 경우 표층 콘크리트 슬래브의 단면내 온도구배에 의한 curling 효과가 나타나지 못하고 있는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다. 게다가 실제 단면 온도 분포는 표층 슬래브에 발생되어지며, 그 아래의 린 콘크리트 기층에는 온도구배가 상대적으로 매우 작기 때문에 비합리적인 평가를 하는 것으로 판단된다.

표 1. 2차원 해석에 의한 슬래브 단면의 처짐 결과

Deflection(in)	k(pci)	$\Delta T(^{\circ}F)$	자중+윤하중+온도하중(A)			자중+온도하중(B)			A-B		
			Center	Edge	Corner	Center	Edge	Corner	Center	Edge	Corner
50	0	0	0.04589	0.05258	0.03514	0.02928	0.02928	0.02928	0.01661	0.02330	0.00586
		10	0.03869	0.05722	0.05012	0.02209	0.03392	0.04426	0.01661	0.02330	0.00586
		20	0.03150	0.06186	0.06510	0.01489	0.03856	0.05924	0.01661	0.02330	0.00586
500	0	0	0.00559	0.00708	0.00278	0.00293	0.00293	0.00293	0.00266	0.00415	-0.00015
		10	0.00245	0.01176	0.01139	-0.00027	0.00760	0.00404	0.00272	0.00416	-0.00015
		20	0.00165	0.01638	0.02042	-0.00813	0.01073	0.00416	0.00648	0.00565	-0.00045

5.2 3차원 해석결과

3차원 해석에서는 온도구배의 효과가 없는 경우의 처짐과 응력을 2차원 모델과 비교하므로써 모델의 적합성을 검토하였고 온도구배가 발생한 경우 어떤 양상을 보이는지 조사하였다. 그림 4는 3차원 모델의 온도구배로 인한 응력을 나타내는데 린콘크리트 기층의 경우 온도구배가 없어 슬래브의 깊이 에 따른 응력변화가 상대적으로 심하게 나타나고 있다. 온도에 따른 처짐과 응력의 양상을 도시한 그림 5 및 6에서 온도구배가 없는 경우 두 모델의 처짐과 응력은 거의 일치하는 것으로 나타나 3차원 모델의 적합성을 확인할 수 있었다. 또한 온도구배가 발생한 경우 이러한 양상은 크게 변하여 처짐의 변화와 함께 슬래브 하부에서 발생하는 인장응력의 증가를 관찰할 수 있었다. 이러한 응력의 구배는 지지력의 변화로 설명할 수 있으며 그림 5에서 슬래브 하단의 처짐과 기층상단의 처짐차이에서 명확히 확인할 수 있다 특히 온도구배 20°F에서 슬래브 하부와 린 콘크리트 기층 상부에 약 0.002inch의 간극이 발생되어지는 것을 확인할 수 있었고 하중이 가해지

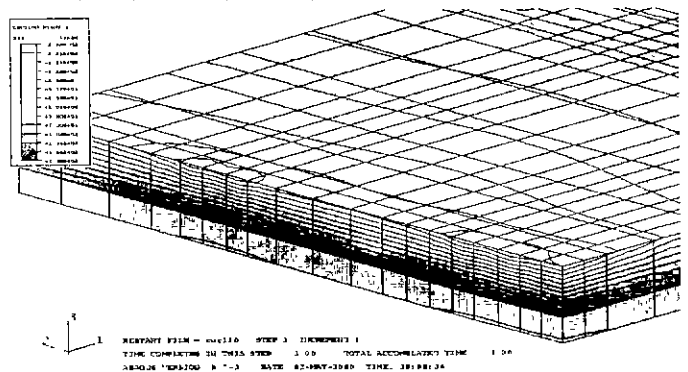


그림 4. 온도구배로 인한 깊이별 응력변화

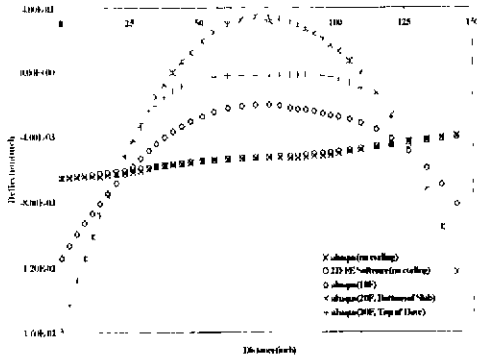


그림 5. 온도구배에 따른 처짐양상

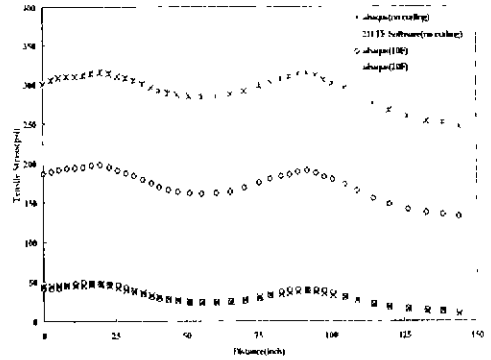


그림 6. 온도구배에 따른 응력양상

지 않는 경우 이 차이는 더욱 커질 것으로 사료되며 포장의 해석 및 설계에 고려되어야 할 중요한 사항인 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 현재 널리 사용되어지는 2차원 해석 모델을 이용하여 줄눈 콘크리트 포장 슬래브의 단면내 온도구배를 고려한 해석을 수행하여 단면내 온도구배에 의한 슬래브의 거동특성을 분석하였고, 포장슬래브 평가를 위한 3차원 해석모델의 활용성을 검토하였으며, 이를 통해 단면내 온도구배에 의한 체적변형으로 인한 표층 슬래브와 린콘크리트 사이에 발생되어지는 간극과 부분지지조건의 영향을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 단면내 온도구배는 포장 슬래브의 자체의 체적변형으로 인하여 지지조건을 변화시키며 이를 고려한 해석이 반드시 필요하다.
- (2) 기존의 복합지지력계수를 이용한 해석이나, 등가단면을 이용한 해석에서는 단면온도구배에 의한 부분지지조건을 모사하지 못하는 것으로 판단된다.
- (3) 3차원 해석모델을 이용한 해석을 통해 포장 슬래브 하단과 린 콘크리트 하단에서 발생되어지는 부분지지조건을 평가할 수 있다 특히 온도구배가 큰 경우 이를 고려하지 못한 해석은 오차를 포함할 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1 A. M. Ioannides, "Analysis Slab-on-Grade for a variety of Loading and Support Conditions," Ph. D. thesis University of Illinois, Urbana, 1984.
2. Armaghani, J. M., Larsen, T. J., and Smith, L. L., "Temperature Response of Concrete Pavement," Transportation Research Record 1121, TRB.
- 3 ABAQUS Standard Theory Manual, ver5.7, 1997.
4. Uddin, W., Zhang, D., and Fernandez, F., "Finite Element Simulation of Pavement Discontinuities and Dynamic Load Response," Transportation Research Record 1448, TRB.