



지반위에 놓인 콘크리트 슬래브의 온도하중 하의 컬링 거동 및 하부층 영향 실험적 분석

Experimental Analysis of Curling Behavior of Concrete Slabs on Grade under Temperature Loading and Underlying Layers' Effects

김 성 민* 박 희 범**

Kim, Seong-Min Park, Hee Beom

Abstract

This study was conducted to analyze the curling behavior of concrete slabs on grade under temperature loading through the laboratory tests and to investigate the effects of the support conditions of underlying layers on the curling behavior of the slab on grade systems. For the laboratory tests, the concrete slabs were fabricated and the temperature measurement sensors were installed. The temperature loading was applied intentionally and the time histories of the vertical displacements of the slab at several different positions were measured. One-layered underlying layers were made using different materials and different thicknesses. Two-layered underlying layers were also made to have the same composite stiffness each other, but the material of the upper layer was designed to be different. The experimental analysis results showed that the trend of the displacement time histories of the slab was basically the same as that of the temperature gradient time histories. The characteristics of the curling behavior of the slab were analyzed by separating the regions of curling up and curling down. The difference in the vertical displacements at the center and corner decreased as the stiffness of the underlying layer became larger, and the upper layer's material of the underlying layers affected the curling behavior of the slab.

Keywords : concrete slab, curling, curl up, curl down, underlying layer, temperature gradient

요 지

본 연구는 지반위에 놓여진 콘크리트 슬래브가 온도하중을 받아서 컬링할 때의 거동을 실내 실험을 통해 분석하고 슬래브를 지지하고 있는 하부층의 구성이 슬래브의 컬링 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 수행되었다. 실험을 위해 콘크리트 슬래브를 제작하고 온도측정 센서를 장착하였으며 인위로 온도하중을 가하며 슬래브의 여러 위치에서 변위의 변화를 측정하였다. 하부층은 두 가지의 관점을 고려하여 구성하였으며, 첫째는 단일 하부층을 이용하여 재료와 두께를 달리하여 지지력을 다르게 하는 경우이며, 둘째는 하부층을 복층으로 구성하되 복합지지력은 일정하나 슬래브와 직접 접촉하는 상위하부층의 재료성질을 다르게 하는 경우이다. 실험결과 시간에 따른 슬래브의 수직 변위 변화는 온도구배의 변화와 거의 일치하는 양상을 보였으며 컬링 거동의 특성을 컬업 구간과 컬다운 구간으로 구분하여 분석하였다. 하부층의 지지력은 커질수록 슬래브의 중앙과 코너의 수직 변위 차이는 감소하게 되며 최상위 하부층의 재료 성질이 컬링 거동에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

핵심용어: 콘크리트 슬래브, 컬링, 컬업, 컬다운, 하부층, 온도구배

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수

** 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 박사과정



1. 서론

콘크리트 도로 포장에 차량에 의한 하중과 온도변화 및 습도변화 등과 같은 환경하중에 의해 변위가 발생되며 이러한 변위는 응력을 야기시켜 콘크리트 포장의 거동 및 균열발생 등의 공용성을 지배하게 된다. 콘크리트 포장은 과거에 비해 슬래브의 두께가 두꺼워졌기 때문에 차량하중에 의한 응력보다 오히려 환경하중에 의한 응력이 포장체의 거동을 지배하는 경향이 있다. 또한 콘크리트 포장은 개통되기 이전에 환경하중에 의해 초기균열 등의 손상을 받기 쉽기 때문에 환경하중에 의한 거동분석이 매우 중요시되고 있는 실정이다(Kim et al., 1998; Jeong and Zollinger, 2004; Nam et al., 2006).

환경하중이 작용할 때 콘크리트 포장의 표층인 콘크리트 슬래브에 발생하는 응력을 지배하는 주요 변수 중의 하나는 이러한 슬래브를 지탱하고 있는 하부층의 지지력이다. 그림 1에 보인 바와 같이 일반적으로 낮에는 슬래브 표면의 온도가 하부의 온도보다 커지기 때문에 슬래브의 중앙부가 위로 솟고 줄눈부(또는 단부)가 아래로 내려가는 형태의 휨이 발생하게 되고(이를 컬다운이라 함), 밤에는 반대로 슬래브 표면의 온도가 하부보다 작아져서 슬래브의 중앙부가 아래로 내려가고 줄눈부가 위로 올라가는 형태의 휨이 발생하며(이를 컬업이라 함), 이러한 현상을 컬링 현상이라 부른다.

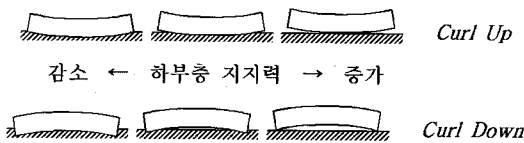


그림 1. 슬래브 컬링 현상

그림 1에서 보여주는 바와 같이 연약한 하부층 위에 콘크리트 슬래브가 놓여져 있다면 환경하중에 의해 슬래브가 컬링할 때 하부층이 유연하므로 슬래브와 하부층 사이에 접촉면적이 넓어짐으로써 콘크리

트 슬래브의 자중을 하부층이 효과적으로 지지해 주어 슬래브에 응력을 크게 발생시키지 않는다. 하지만 콘크리트 슬래브가 강한 하부층 위에 놓여져 있다면 슬래브가 컬링할 때 슬래브와 하부층 사이의 접촉면적이 작아지게 되며 슬래브 자중에 의해 콘크리트의 응력이 증가하게 된다. 이와 같이 환경하중 하에서는 강한 지지력을 가진 하부층이 오히려 슬래브의 응력을 증가시키게 되어 콘크리트 포장에 좋지 않은 결과를 미치게 된다(Bradbury, 1938). 이러한 환경하중에 대한 하부층의 영향은 차량하중에 대한 하부층의 영향(Westergaard, 1925)과 서로 상반된 결과를 보이게 되므로 모든 하중조건을 고려한 적절한 하부층의 설계가 중요시 된다(Jeong et al., 2006).

본 연구의 목적은 콘크리트 포장의 단순화된 형태로 볼 수 있는 지반위의 콘크리트 슬래브 시스템을 이용하여 온도하중이 슬래브에 작용하여 슬래브가 컬링할 때의 일반적인 거동을 실험을 통해 측정하여 분석하고 또한 슬래브 하부의 지지층이 슬래브의 컬링 거동에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 따라서 콘크리트 슬래브를 제작하고 하부층을 여러 가지 관점을 고려하여 구성한 후 슬래브에 온도하중을 가하여 슬래브의 컬링 거동을 측정하여 분석하였다. 본 논문에서는 이러한 연구 내용 및 결과에 대하여 상세히 기술하였다.

2. 컬링 거동 측정을 위한 실험

하부층의 지지조건이 달라질 때의 지반위에 놓인 콘크리트 슬래브의 컬링 거동을 측정하기 위하여 우선 가로 세로의 길이가 1m이며 두께가 5cm인 콘크리트 슬래브를 그림 2에 보인 바와 같이 제작하였다. 실내에서 하부층의 구성을 바꾸어가며 실험을 수행하기 편리하도록 슬래브의 크기를 그리 크지 않게 하여 운반이 용이하도록 제작하였다. 실험 시에 슬래브의 온도변화를 슬래브 깊이에 따라 측정하기 위하여 온도센서를 그림 2에 보인 바와 같이 표면으로부터



1cm 깊이마다 측정할 수 있도록 미리 준비한 후에 슬래브 제작 시에 이러한 온도 센서를 슬래브의 중앙 부분과 코너부분에 장착하였다.

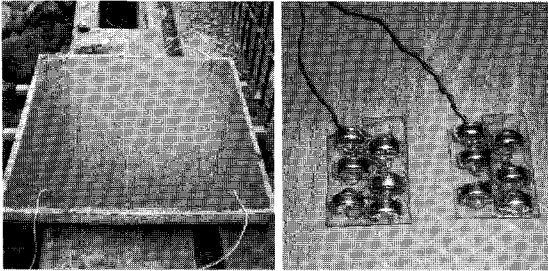
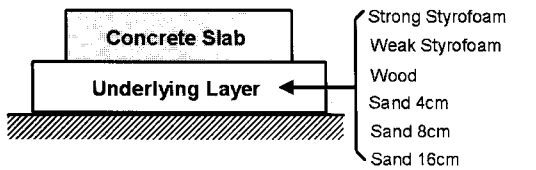
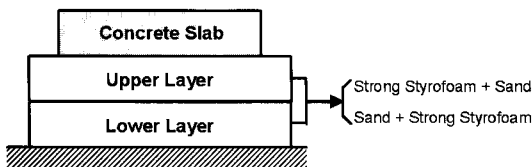


그림 2. 슬래브 제작 및 온도센서 장착

슬래브를 지지하는 하부층의 구성은 두 가지의 관점에서 접근하였다. 첫 번째는 하부층의 수직 지지력을 다르게 하는 경우이며 두 번째는 하부층의 수직 지지력은 일정하나 슬래브와 직접 접촉하는 하부층의 최상위 층의 재료 성질이 다를 경우이다. 하부층의 수직 지지력을 다르게 하기 위해서 그림 3(a)에 보인 바와 같이 서로 다른 재료를 이용하여 하부층을 구성하거나 또는 같은 재료를 사용하지만 하부층의 두께를 달리하여 하부층을 구성하였다. 사용된 재료로는 강성이 약한 스티로폼과 강한 스티로폼, 모래, 합판 등이며 모래는 두께를 4, 8, 16cm로 다르게 하였다. 하부층의 복합 수직 지지력은 같지만 슬래브와



(a) 지지력 변화

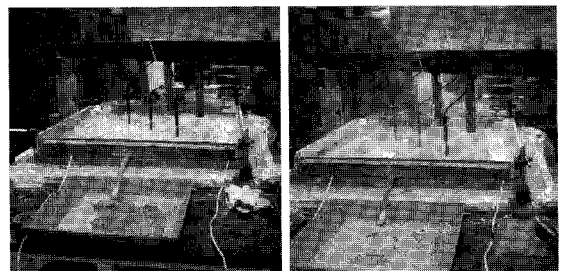


(b) 복합 지지력 일정

그림 3. 하부층 구성

직접 접촉하는 최상위 하부층의 성질이 다를 경우를 모사하기 위해서는 그림 3(b)에 나타낸 바와 같이 두 개의 서로 다른 재료를 이용하여 두 층의 상하 배치를 바꾸어 가며 실험을 수행하였다. 이러한 여러 종류의 하부층의 구성을 이용한 실험을 통해 슬래브의 컬링 현상이 하부층의 수직 지지력과 어떠한 관계가 있는지를 파악할 수 있으며 또한 슬래브 바로 밑의 하부층의 성질이 슬래브 컬링 거동에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

슬래브에 수직 방향의 온도변화를 가하여 슬래브의 컬링을 유도하기 위하여 두 가지 방법을 사용하여 슬래브를 컬업과 컬다운하도록 하였다. 그림 4에 보인 바와 같이 슬래브를 컬업시키기 위해서는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮아야 하기 때문에 이를 위해 슬래브의 표면에 얼음을 재하하였으며, 슬래브의 컬다운을 유도하기 위해서는 슬래브 상부의 온도가 높아야 하므로 슬래브 표면에 뜨거운 물을 부어서 상부의 온도를 높이도록 하였다. 뜨거운 물과 얼음을 재하할 때 이것이 슬래브의 상부에 갇혀 있을 수 있도록 그림에 보인 바와 같이 슬래브 면적과 같은 크기의 재하판을 만들어서 슬래브에 올려놓고 여기에 물과 얼음을 재하하였다. 재하판은 방수 비닐로 되어 있어서 온도가 슬래브에 쉽게 전달될 수 있도록 하였으며 테두리를 목재를 이용하여 제작한 후 비닐로 덮어씌웠다. 또한 LVDT를 이용하여 변위를 측정할 위치에는 재하판에 구멍을 만든 후 이 곳을 플라스틱 컵을 이용하여 방수처리함으로써 변위 측정이 용이하도록 하였다. 하중 재하 순서는 먼저 뜨거운 물을 부어서 슬래



(a) 얼음 (컬업 묘사)

(b) 뜨거운 물 (컬다운 묘사)

그림 4. 온도하중 재하



브를 쪼개다운시킨 후 물이 식을 때까지 한참을 놓아두어 슬래브가 다시 평평해지도록 유도한 후 식은 물을 하중 재하판에 설치해놓은 배수구를 통해서 배출시킨 후에 얼음을 재하하여 슬래브를 컬업시켰으며 얼음이 녹아서 다시 슬래브가 평평해질 때까지 실험을 수행하였다. 따라서 슬래브가 평평한 순간에서부터 컬업과 쪼개다운을 거쳐서 다시 평평해질 때까지의 거동을 측정할 수 있도록 하였으며 이는 하루의 일교차에 의해서 슬래브가 컬링하는 현상을 묘사한 것이다.

슬래브가 컬링할 때 슬래브의 여러 위치에서 수직 변위의 변화를 측정하기 위하여 그림 5에 보인 바와 같이 슬래브의 네 코너와 슬래브 중앙 그리고 중앙과 코너의 사이에 LVDT를 장착하였다. 각 LVDT는 그림에 나타낸 바와 같이 이름을 붙여 놓아 실험결과 분석 시에 측정위치를 파악할 수 있도록 하였다.

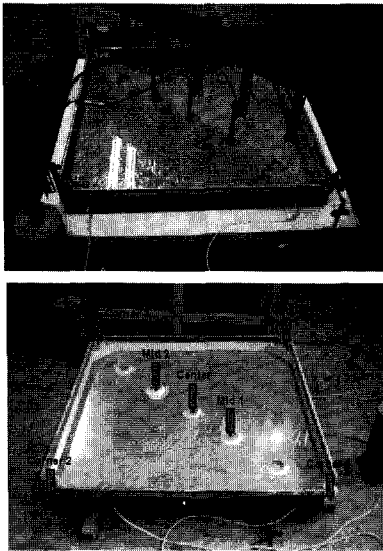


그림 5. 변위 측정 장치 셋업

3. 실험결과 분석

3.1 온도변화 분석

슬래브의 컬링을 야기하는 슬래브의 깊이별 온도

변화의 추세를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험초기에 뜨거운 물을 부어서 슬래브의 온도를 증가시킬 때는 슬래브의 표면이 가장 가파른 온도의 상승을 보여주며 깊이가 깊어질수록 온도의 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 각 측정 깊이에서 최대온도에 다다른 시간은 깊이가 깊어질수록 늦어지는 것을 알 수 있다. 물이 점차로 식어 가면 슬래브의 온도도 서서히 감소하는 것을 알 수 있으며 얼음을 슬래브에 재하시키면 슬래브의 온도가 급격히 떨어지게 된다. 이때에도 슬래브 표면으로부터 깊이가 깊어질수록 온도 감소율이 작아지는 것을 알 수 있으며 얼음이 녹아갈수록 슬래브의 온도 감소가 둔해지는 것을 볼 수 있다.

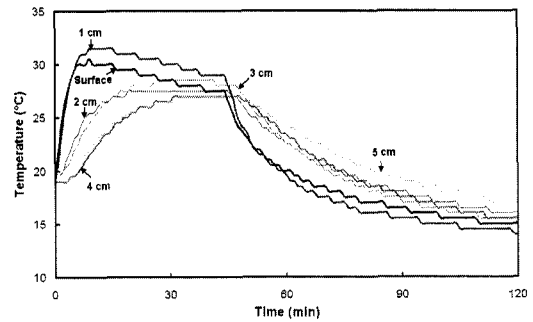


그림 6. 깊이에 따른 온도변화

슬래브의 컬링 현상을 분석하기 위해서는 일정한 시간에 깊이별 온도변화를 이용하여 슬래브의 수직 온도구배를 결정하여야 한다. 실제로는 깊이에 따른 온도의 변화가 선형이 아니기 때문에 이러한 비선형 온도구배에 의해 발생하는 슬래브의 휨곡률과 일치하는 휨곡률을 야기하는 선형 온도구배를 구하는 것이 필요시 된다. 이러한 평형 선형 온도구배를 구하는 방법을 그림 7을 이용하여 설명한다. 그림에서는 본 실험에서 사용된 온도센서의 정확한 장착위치를 보여 주며 각 센서에서 측정된 온도가 대표하는 범위는 두 센서 간의 중간 지점까지인 것으로 가정하였다.

일반적으로 보에서 수직 온도분포에 따른 휨은 식 (1)에 의해 구할 수 있으며 선형 온도구배가 있을 경

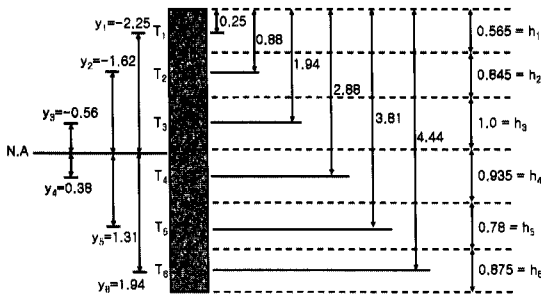


그림 7. 선형 온도구배 결정을 위한 분석

위의 힘은 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$M = \int_A E\alpha T y dA = E\alpha \sum T_i y_i A_i \quad (1)$$

$$M = EIk = E I \alpha G \quad (2)$$

여기서 E 는 탄성계수, I 는 단면2차모멘트, α 는 열팽창계수, T 는 온도, y 는 중립축으로부터의 거리, A 는 면적, k 는 곡률, G 는 수직선형 온도구배이다. 위의 두 식에 나타낸 힘이 같다고 가정함으로써 선형 온도구배를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G = \frac{12}{h^3} \sum T_i y_i h_i \quad (3)$$

여기서 h 는 보 또는 슬래브의 두께이며 h_i 와 y_i 는 그림 7에 나타난 거리이다. 따라서 본 실험에서의 선형 온도구배는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} G = & 0.096 \times (T_1 \times (-2.25) \times 0.565 \\ & + T_2 \times (-1.62) \times 0.845 + T_3 \\ & \times (-0.56) \times 1.0 + T_4 \times 0.38 \\ & \times 0.935 + T_5 \times 1.31 \times 0.78 \\ & + T_6 \times 1.94 \times 0.875) \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식을 이용하여 그림 6에 나타낸 깊이별 온도 변화를 이용하여 시간에 따른 선형 온도구배를 구하면 그림 8과 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 실험초기 슬래브의 상부온도를 증가시켰을 경우에는 슬래브의 쪼그라들음을 야기하는 부(-) 온도구배가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며 슬래브 상부의 온도

가 식어감에 따라 온도구배가 감소하는 것을 볼 수 있다. 얼음을 이용하여 슬래브 상부의 온도를 감소시켰을 경우에는 슬래브의 쪼그라들음을 야기하는 정(+) 온도구배가 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며 시간이 지남에 따라 온도구배가 점점 감소하여 0에 근접해 가는 것을 볼 수 있다.

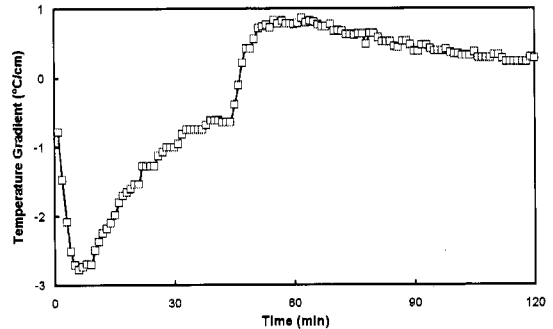


그림 8. 수직 온도구배 변화

3.2 쪼그라들기 거동 분석

콘크리트 슬래브가 그림 6과 8에서 보여준 온도 변화를 받을 때의 쪼그라들기 거동을 측정하여 그림 9에 결과를 나타내었다. 실험초기에 부 온도구배의 증가에 따라 슬래브가 쪼그라들 때 모든 코너에서의 변위가 아래 방향으로 증가하는 것을 알 수 있으며 슬래브 중앙과 중앙 근처에서는 변위는 위로 발생하는 것을 알 수 있다. 부 온도구배가 감소하면 이러한 변위가 모두 함께 감소하여 초기값에 근접하게 된다. 얼음을 재하하여 정 온도구배가 급격히 증가하면 모든 코너의 변위가 위로 증가하며 중앙부분의 변위는 아래로 발생하게 되어 슬래브를 쪼그라들리게 된다. 그 후 온도구배가 감소하면 모든 변위가 다시 함께 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 8의 온도구배의 형상과 그림 9의 변위의 형상은 매우 유사하게 된다. 슬래브가 쪼그라들 때 슬래브의 중앙부분과 코너에서의 변위의 변화는 확실히 반대방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. 또한 네 군데 코너와 두 군데 중앙 근처에서 측정된 변위의 변화 경향은 매우 유사한 것을



알 수 있으나 측정값이 서로 일치하지는 않는다.

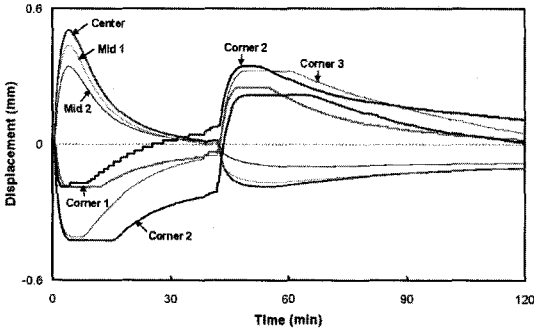


그림 9. 수직변위 변화

그림 10은 슬래브 코너와 중앙부근에서의 변위 측정치의 평균값을 구해 변화를 분석한 결과이다. 슬래브의 컬링 거동이 온도구배의 형상과 유사한 것을 뚜렷이 알 수 있다. 슬래브가 쪼그라들 때는 코너 부분에서 하부층과의 접촉이 더욱 심해지며 반대로 중앙 부분은 하부층과의 접촉이 약해지므로 변위의 변화가 중앙부분에서 더 크게 발생하는 것을 발견할 수 있다. 반대로 슬래브가 팽창할 때는 슬래브의 중앙부분에서 하부층과의 접촉이 심해지므로 변위의 변화는 코너 부분에서 더 커지게 되는 것을 알 수 있다.

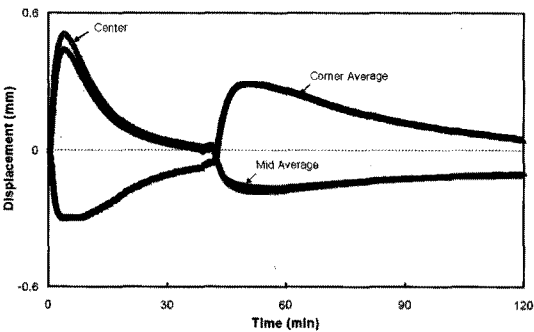


그림 10. 평균 수직변위 변화

그림 10에 나타낸 시간에 따른 수직변위의 변화와 그림 8에 나타낸 시간에 따른 온도구배의 변화에서 같은 시간에서 변위와 온도구배를 연결시키면 온도구배와 변위와의 관계를 구할 수 있으며 슬래브의 코

너와 중앙에서의 온도구배와 수직변위와의 관계를 그림 11에 나타내었다. 슬래브의 부 온도구배 증가에 따른 슬래브의 코너와 중앙 모두에서의 수직변위의 변화는 온도구배 증가 초기에는 변위의 변화가 크지만 온도구배가 커지면 커질수록 변위의 변화량은 그리 커지지 않는 것을 알 수 있다. 쪼그라든 상태에서 슬래브가 평평해지는 상태로 돌아올 때는 온도구배와 변위와의 관계가 거의 선형에 가까워지는 것을 알 수 있다. 슬래브가 컬업할 때는 온도구배의 증가에 따른 코너에서의 변위의 변화는 어느 정도 비선형 관계를 보이고 있으나 중앙에서는 거의 선형의 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 컬업 상태에서 평평한 상태로 돌아올 때는 온도구배와 변위와의 관계가 거의 선형이 된다. 그림에서 부 온도구배가 약 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 일 때 변위의 변화가 거의 수직에 가깝게 급격히 발생한 것으로 나타나는 이유는 이때에 물 또는 얼음의 재하 및 제거가 수행되었기 때문에 물과 얼음의 무게 변화에 의한 변위의 변화가 생겼기 때문이다.

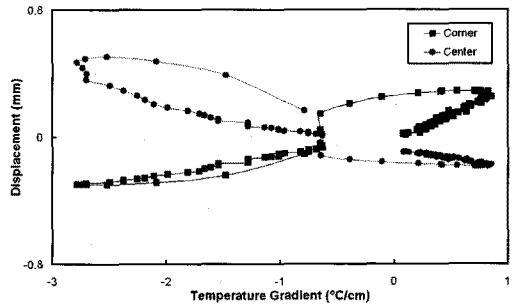


그림 11. 온도구배에 따른 코너와 중앙에서의 수직변위 변화

슬래브의 중앙과 코너에서의 변위의 차이를 구해 온도구배와 슬래브의 컬링 거동과의 관계를 분석하면 그림 12와 같다. 슬래브 중앙과 코너의 변위차는 부 온도구배가 증가할 때 비선형적으로 증가하며 부 온도구배가 감소할 때는 거의 선형적으로 감소한다. 슬래브의 정 온도구배가 증가할 때는 변위차가 미소하게나마 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 정 온도구배가 감소할 때는 거의 선형적으로 변위차



가 감소하게 되는 것을 알 수 있다.

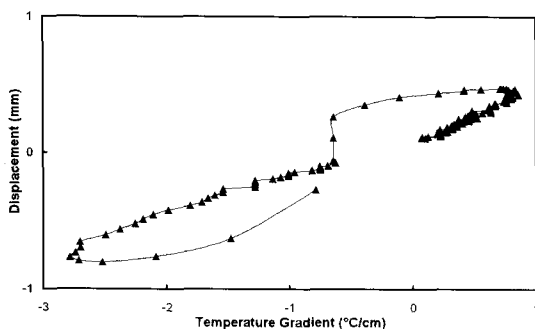
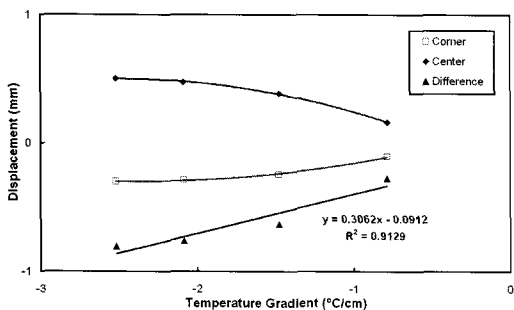


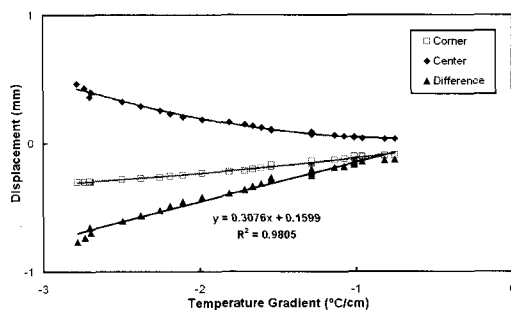
그림 12. 코너와 중앙에서의 수직변위 차이

슬래브가 평평한 상태에서 쪼그라들 때, 쪼그라들 상태에서 평평한 상태로 될 때, 평평한 상태에서 컬업 될 때, 컬업 상태에서 평평한 상태로 될 때 등 슬래브의 컬링 거동을 4가지의 형태로 구분하여 슬래브의 변위와 온도구배의 관계가 뚜렷이 나타나는 부

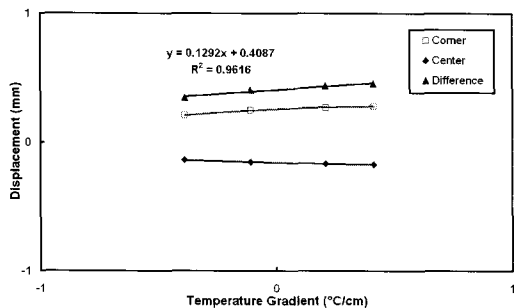
분을 고려하여 분석하면 그림 13과 같다. 슬래브의 중앙과 코너에서의 변위와 온도구배와의 관계는 2차방정식 형태의 추세선을 이용하여 표현하였으며 그림 13(a)의 슬래브가 쪼그라들 때의 경우에서만 뚜렷하게 2차방정식 형태의 관계를 볼 수 있다. 따라서 슬래브 중앙과 코너의 변위차이와 온도구배와의 관계는 모든 경우에 있어 선형 추세선을 이용하여 분석하였다. 이러한 추세선의 방정식에서 기울기는 변위차이와 온도구배와의 관계를 나타내는 중요한 항목이지만 절편은 실험을 시작할 때 LVDT 0점 셋팅 시점에 따라 변화하게 되므로 분석 시에 고려하지 않아도 된다. 온도구배의 변화에 따른 슬래브 중앙과 코너의 변위차이의 변화, 즉 그림에서 선형 추세선의 기울기는 슬래브가 평평한 상태에서 컬업 할 때가 가장 작으며 컬업 상태에서 평평해질 때가 가장 커지는 경향이 있다.



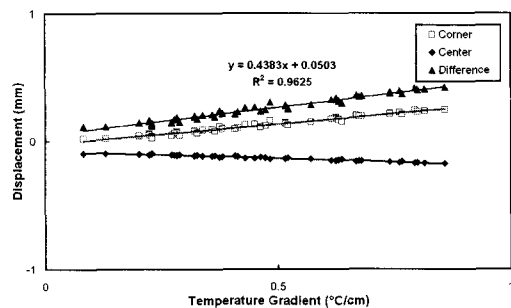
(a) 평평에서 쪼그라들



(b) 쪼그라들에서 평평



(c) 평평에서 컬업



(d) 컬업에서 평평

그림 13. 온도구배와 수직변위 관계



3.3 하부층 영향 분석

앞에서 보여준 실험결과의 그림들은 하부층이 8cm의 모래로 구성되어 있을 경우이며 하부층의 구성이 달라지더라도 앞에서 설명한 슬래브의 일반적인 컬링 거동은 변함이 없게 된다. 하지만 하부층의 구성이 달라지면 일정한 온도구배를 받더라도 슬래브의 컬링 정도가 다르게 되어 슬래브의 변위 및 응력에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 하부층의 구성이 슬래브의 컬링 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 3에서 설명한 바와 같이 여러 종류의 재료를 이용하여 하부층을 구성하여 실험을 수행하였으며 결과를 표 1에 요약하여 나타내었다. 표에서 온도구배 증가에 따른 수직변위의 증가율을 네 가지의 컬링 거동구간에 따라 보여주며 평균값도 나타내었다. 수직변위의 증가율이란 슬래브 중앙과 코너에서의 변위차이가 온도구배에 따라 변화하는 정도를 의미한다.

일정한 온도구배 하에서는 슬래브의 중앙과 코너에서의 변위차이가 작을수록 하부지지력이 강한 것을 의미하게 된다. 예를 들어 슬래브가 컬업할 때 하부지지력이 크면 슬래브의 중앙부분만 하부층에 접촉하게 되고 나머지 부분은 들리게 되며 이때 자중에 의해 슬래브가 다시 아래로 처지게 되기 때문에 중앙과 코

너의 변위차이가 슬래브를 전체적으로 지지하고 있는 연약한 하부층일 때 보다 작아지게 된다. 표 1에서 하부층이 모래로 구성되어 있는 경우를 살펴보면 모래의 두께가 두꺼울수록 변위차이가 커지는 것을 알 수 있으며 이는 모래의 두께가 증가할수록 하부층의 지지력이 감소되기 때문이다. 하부층의 두께가 일정할 때에는 재료의 성질이 지지력을 결정하게 되며 표에서 스티로폼으로 하부층이 구성되었을 경우를 살펴보면 약한 스티로폼인 경우에 지지력이 작아져서 변위차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

다음은 하부층이 두 개의 서로 다른 재료로 구성되어 있을 때의 결과를 살펴본다. 하부층이 두 개의 다른 재료로 이루어져 있을 때는 어느 재료가 위에 있고 아래에 있는지에 관계없이 복합지지력은 일정하게 된다. 하지만 표에서 알 수 있듯이 하부층이 모래와 스티로폼으로 구성되어 있을 때 모래가 위에 있을 경우의 변위차가 스티로폼이 위에 있을 경우에 비해 작은 것을 알 수 있다. 스티로폼이 위에 있을 경우의 변위차는 스티로폼으로만 구성된 하부층일 경우보다 약간 크게 나타나며 이것은 두 개 층의 복합지지력이 한 개의 스티로폼으로 구성된 하부층의 지지력에 비해 약해지기 때문이다. 하지만 모래가 위에 있을 때는 변위차가 모래로만 하부층이 구성되어 있을 경우의 변위차와 거의 일치되는 것으로 보아 슬래브와 접촉하는 최상위 하부층이 연속체가 아닌 입상(granular)의 재료로 구성되었을 경우에는 복합지지력 보다는 최상위층의 지지력에 의해 컬링 거동이 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

표 1. 하부층 구성에 따른 슬래브 컬링 거동

하부층 구성	온도구배(°C/cm) 증가에 따른 수직변위(mm) 증가율				
	평평→ 컬다운	컬다운→ 평평	평평→ 컬업	컬업→ 평평	평균
목재	0.1140	0.2754	0.1047	0.3729	0.2168
강한스티로폼	0.2035	0.4184	0.1219	0.5555	0.3248
약한스티로폼	0.3675	0.2634	0.0949	0.6851	0.3527
모래 4cm	0.3121	0.3143	0.1126	0.3833	0.2806
모래 8cm	0.3062	0.3076	0.1292	0.4383	0.2953
모래 16cm	0.4311	0.4056	0.1693	0.3428	0.3372
모래 4cm(위) + 강한스티로폼	0.3726	0.2914	0.1421	0.3297	0.2840
강한스티로폼(위) + 모래 4cm	0.3154	0.4056	0.1335	0.5210	0.3439

4. 결론

본 연구는 지반위에 놓여진 콘크리트 슬래브가 온도하중을 받아서 컬링할 때의 거동을 실내 실험을 통해 분석하고 슬래브를 지지하고 있는 하부층의 구성이 슬래브의 컬링 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 수행되었다. 실험을 위해 콘크리트



슬래브를 제작하고 온도측정 센서를 장착하였으며 인위로 온도하중을 가하며 LVDT를 이용하여 슬래브의 여러 위치에서 변위의 변화를 측정하였다. 하부층의 구성은 두 가지의 관점에서 접근하였으며 첫째는 단일 하부층을 이용하여 재료와 두께를 달리하여 수직지지력을 다르게 하는 경우이며, 둘째는 하부층을 복층으로 구성하되 복합 수직지지력은 일정하나 슬래브와 직접 접촉하는 상위하부층의 재료성질을 다르게 하는 경우이다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 슬래브의 깊이별로 측정된 온도분포를 이용하여 평형 선형 온도구배를 구할 수 있었으며 이러한 온도구배의 시간에 따른 변화는 슬래브의 수직 변위의 변화와 거의 일치하는 양상을 보였다.
- 슬래브가 쥘다운될 때는 코너 부분에서 하부층과의 접촉이 심해지고 중앙부분은 하부층과의 접촉이 약해지므로 수직 변위의 변화가 중앙부분에서 더 크게 발생하게 된다. 반대로 슬래브가 쥘업할 때는 슬래브의 중앙부분에서 하부층과의 접촉이 심해지므로 수직변위의 변화는 코너 부분에서 더 커지게 된다.
- 슬래브가 평평한 상태에서 온도구배가 증가하여 쥘업 또는 쥘다운의 쥘링을 할 때 슬래브의 중앙과 코너의 수직변위 차이는 온도구배가 증가할수록 커지게 되지만 증가율은 점차 감소하게 된다.
- 슬래브가 쥘업 또는 쥘다운 상태에서 온도구배가 감소하여 평평한 상태로 돌아올 때는 슬래브 중앙과 코너의 변위차이는 온도구배 변화와 거의 선형적으로 비례하여 감소하게 된다.
- 온도구배의 변화에 따른 슬래브 중앙과 코너의 변위차이의 변화는 슬래브가 평평한 상태에서 쥘업할 때가 가장 작으며 쥘업 상태에서 평평해질 때가 가장 커지는 경향이 있다.
- 온도구배가 일정할 때 하부층의 지지력이 증가할수록 슬래브의 중앙과 코너의 수직변위 차이는 감소하게 된다.

- 하부층이 여러 개의 다른 재료로 구성되었을 경우에는 복합 수직지지력이 슬래브의 쥘링 거동을 일반적으로 지배하게 되지만 최상위 하부층이 입상재료로 구성되었을 경우에는 쥘링 거동이 복합 지지력보다는 최상위 하부층의 지지력에 의해 더 크게 영향을 받게 된다.

감사의 글

본 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00493).

참고문헌

Bradbury, R. D. (1938). *Reinforced Concrete Pavements*, Wire Reinforcement Institute, Washington, D.C.

Jeong, J. H., Lee, J. H., Suh, Y. C., and Zollinger, D. Z. (2006). "Effect of slab curling on movement and load transfer capacity of saw-cut joints," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No.1947, National Research Council. pp. 69-78.

Jeong, J. H. and Zollinger, D. Z. (2004). "Early-age curling and warping behavior: Insights from a fully instrumented test-slab system," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No.1896, National Research Council. pp. 66-74.

Kim, S.-M., Won, M. C. and McCullough, B. F. (1998). "Numerical modeling of continuously reinforced concrete pavement subjected to environmental loads," *Transportation Research Record*, No. 1629, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 76-89.

Nam, J.-H., Kim, S.-M. and Won, M.C. (2006). "Measurement and analysis of early-age concrete strains and stresses: Continuously



reinforced concrete pavement under environmental loading." *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No.1947, National Research Council. pp. 79-90.

Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis." *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.

접 수 일: 2008. 7. 3

심 사 일: 2008. 7. 8

심사완료일: 2008. 8. 11