



콘크리트 포장 슬래브의 하부층 구성에 따른 컬링 거동 실험적 분석

Experimental Analysis of Curling Behavior of Concrete Pavement Slabs According to Underlying Layer Composition

김성민* 박희범** 서봉교***
Kim, Seong-Mi Park, Hee Beom Seo, Bong Kyo

1. 서론

일반적으로 콘크리트 포장은 차량하중이 파손의 대부분을 야기 하리라 생각하기 쉽지만 상당히 많은 종류의 파손은 환경하중에 의해 야기되고 있다. 대부분의 초기 파손은 환경하중에 의해 발생되며 그 외의 스폴링, 핀치아웃, 내부수평 균열 등의 파손도 건설 초기의 환경하중에 의한 손상이 차량하중에 의한 영향과 혼합되어 발생하는 경우가 대부분이다. 특히 환경하중이 작용할 때 슬래브의 거동에 영향을 미치는 주요 변수중의 하나는 하부층의 지지력이다.

본 연구에서는 지반위의 콘크리트 슬래브 시스템을 통해 온도하중이 슬래브에 작용하여 슬래브가 컬링할 때의 일반적 인 거동을 실험을 통해 측정하여 분석하고 또한 슬래브 하부의 지지층이 슬래브의 컬링 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 콘크리트 슬래브를 제작하고 하부층을 여러 가지 관점에서 고려하여 구성한 후 슬래브에 온도하중을 가하여 슬래브의 컬링 거동을 측정하여 분석하였다.

2. 실험 방법

우선 실내실험이 가능한 가로 세로의 길이가 1m이며 두께가 5cm인 콘크리트 슬래브를 제작하고 슬래브 깊이에 따른 온도 변화를 측정하기 위하여 온도센서를 표면으로부터 1cm 깊이마다 측정할 수 있도록 온도 센서를 장착하였다.

슬래브를 지지하는 하부층은 강성이 약한 스티로폼과 강한 스티로폼, 모래, 합판, 4, 8, 16cm 두께의 모래를 조합하여 수직 지지력을 다르게 하는 경우와 하부층의 수직 지지력은 일정하나 슬래브와 직접 접촉하는 하부층의 최상위 층의 재료 성질이 다를 경우를 실험하였다. 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 온도 변화를 가하여 슬래브의 컬링을 유도하기 위하여 두 가지의 방법을 사용하여 슬래브를 컬업과 컬다운 하도록 하였다. 먼저 뜨거운 물을 부어서 슬래브를 컬다운 시킨 후 물이 식을 때까지 한참을 놓아두어 슬래브가 다시 평평해지도록 유도한 후 얼음을 재하 하여 슬래브를 컬업 시켰으며 얼음이 녹아서 다시 슬래브가 평평해질 때까지 실험을 수행하였다. 따라서 슬래브가 평평한 순간에서부터 컬업과 컬다운을 거쳐서 다시 평평해질 때까지의 거동을 측정할 수 있도록 하였으며 이는 하루의 일교차에 의해서 슬래브가 컬링하는 현상을 묘사한 것이다.

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수 · 공학박사 · 031-201-3795 (seongmin@khu.ac.kr)
** 경희대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · 031-201-3799 (bambams@khu.ac.kr)
*** 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정 · 031-201-3799 (greatmanner@khu.ac.kr)

슬래브가 켈링할 때 슬래브의 여러 위치에서 수직 변위의 변화를 측정하기 위하여 <그림 1>에 보인 바와 같이 슬래브의 네 코너와 슬래브 중앙 그리고 중앙과 코너의 사이에 LVDT를 장착하였다.

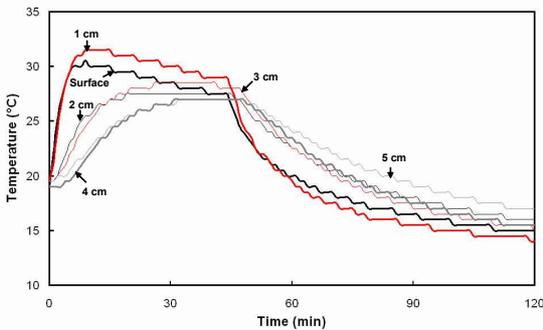


<그림 1> 변위 측정 장치 셋업

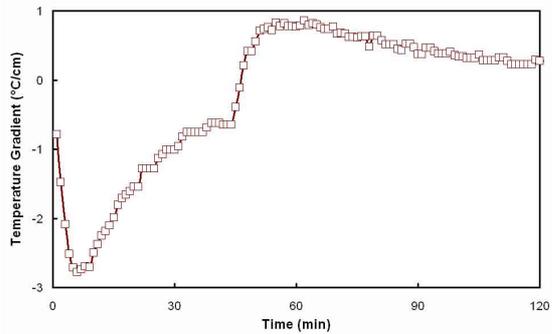
3. 실험 결과

3. 1 온도 변화 특성 분석

슬래브의 깊이별 온도 변화의 추세를 <그림 2>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험 초기에 뜨거운 물을 부어서 슬래브의 온도를 증가 시킬 때는 슬래브의 표면이 가장 가파른 온도의 상승을 보여주며 깊이가 깊어질수록 온도의 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 물이 점차로 식어 가면 슬래브의 온도도 서서히 감소하는 것을 알 수 있으며 얼음을 슬래브에 재하 시키면 슬래브의 온도가 급격히 떨어지게 된다.



<그림 2> 깊이에 따른 온도 변화



<그림 3> 수직 온도구배 변화

슬래브의 켈링 현상을 분석하기 위해서는 일정 시간에 깊이별 온도 변화를 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. 일반적으로 보에서 수직 온도 분포에 따른 선형 온도구배는 식(1)로부터 구할 수 있다.

$$G = \frac{12}{h^3} \sum_i T_i y_i h_i \quad (1)$$

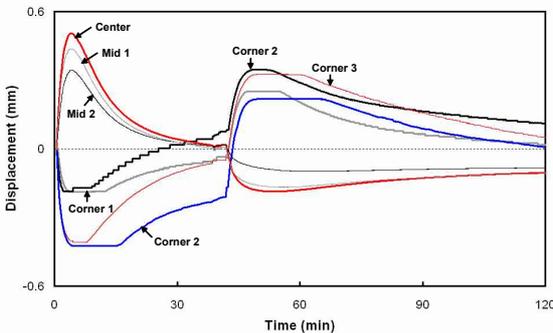


여기서 h 는 보 또는 슬래브의 두께이며 h 와 y_s 는 센서간의 거리이다.

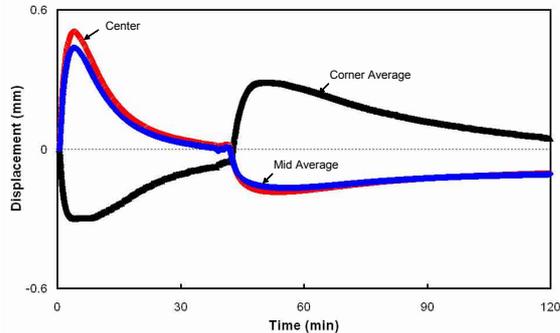
위의 식을 이용하여 <그림 2>에 나타난 깊이별 온도 변화를 이용하여 시간에 따른 선형 온도구배를 구하면 <그림 3>와 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 실험 초기 슬래브의 상부 온도를 증가시켰을 경우에는 슬래브의 쪼그라들기(+) 온도구배가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며 슬래브 상부의 온도가 식어감에 따라 온도구배가 감소하는 것을 볼 수 있다. 얼음을 이용하여 슬래브 상부의 온도를 감소시켰을 경우에는 슬래브의 팽기(+) 온도구배가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 2 슬래브 쪼그라들기 특성 분석

콘크리트 슬래브가 <그림 2>와 <그림 3>에서 보여준 온도 변화를 받을 때의 쪼그라들기 거동을 측정하여 <그림 4>에 결과를 나타내었다. 실험 초기에 부 온도구배의 증가에 따라 슬래브가 쪼그라들기 될 때는 모든 코너에서의 변위가 아래 방향으로 증가하는 것을 알 수 있으며 슬래브 중앙과 중앙 근처에서는 변위는 위로 발생하는 것을 알 수 있다. 얼음을 재하 하여 정 온도구배가 급격히 증가하면 모든 코너의 변위가 위로 증가하며 중앙부분의 변위는 아래로 발생하게 되어 슬래브를 팽기 시키게 된다. 따라서 <그림 3>의 온도구배의 형상과 <그림 4>의 변위의 형상은 매우 유사하게 된다. 슬래브가 쪼그라들기 할 때 슬래브의 중앙 부분과 코너에서의 변위의 변화는 확실히 반대 방향으로 움직이는 것을 알 수 있다. <그림 5>는 슬래브 코너와 중앙부근에서의 변위 측정치의 평균값을 구해 변화를 분석한 결과이다. 슬래브의 쪼그라들기 거동이 온도구배의 형상과 유사한 것을 뚜렷이 알 수 있다.

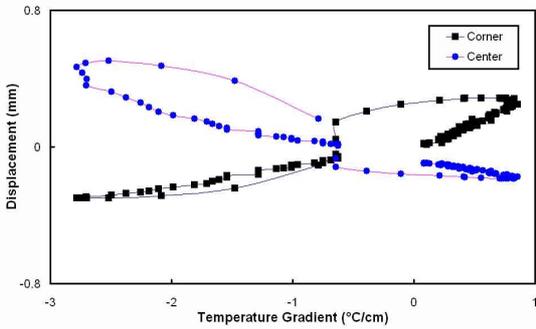


<그림 4> 수직 변위 변화

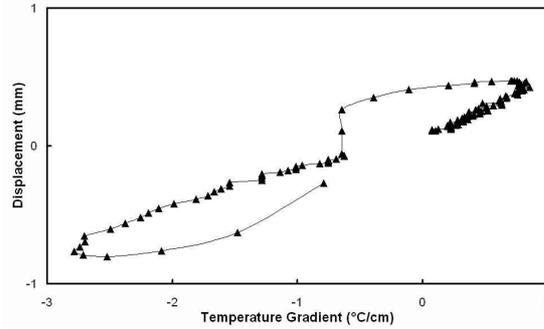


<그림 5> 평균 수직 변위 변화

<그림 4>에 나타난 시간에 따른 수직 변위의 변화와 <그림 3>에 나타난 시간에 따른 온도구배의 변화에서 같은 시간에서 변위와 온도구배를 연결시키면 온도구배와 변위와의 관계를 구할 수 있으며 슬래브의 코너와 중앙에서의 온도구배와 수직변위와의 관계를 <그림 6>에 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. 쪼그라들기 상태에서 슬래브가 평평해지는 상태로 돌아올 때는 온도구배와 변위와의 관계가 거의 선형에 가까워지는 것을 알 수 있다. 슬래브가 팽기 할 때는 온도구배의 증가에 따른 코너에서의 변위의 변화는 어느 정도 비선형 관계를 보이고 있으나 중앙에서는 거의 선형의 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 팽기 상태에서 평평한 상태로 돌아올 때는 온도구배와 변위와의 관계가 거의 선형이 된다. 슬래브의 중앙과 코너에서의 변위의 차이를 구해 온도구배와 슬래브의 쪼그라들기 거동과의 관계를 분석하면 <그림 7>과 같다. 슬래브 중앙과 코너의 변위 차는 부 온도구배가 증가할 때 비선형적으로 증가하며 부 온도구배가 감소할 때는 거의 선형적으로 감소한다.



(그림 6) 온도구배에 따른 수직 변위 변화



(그림 7) 코너와 중앙에서의 수직 변위 차이

3. 3 하부층 구성 영향

앞에서 보여준 실험 결과의 그림들은 하부층의 구성이 달라지더라도 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. 표 1에서 온도구배 증가에 따른 수직변위의 증가율을 네 가지의 컬링 거동 구간에 따라 보여주며 평균값도 나타내었다.

(표 1) 하부층 구성에 따른 슬래브 컬링 거동

하부층 구성	온도구배(°C/cm) 증가에 따른 수직변위(mm) 증가율				
	평평→걸다운	걸다운→평평	평평→걸업	걸업→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

일정한 온도구배 하에서는 슬래브의 중앙과 코너에서의 변위차이가 작을수록 하부 지지력이 강한 것을 의미하게 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.

하부층이 두 개의 다른 재료로 이루어져 있을 때는 어느 재료가 위에 있고 아래에 있는지에 관계없이 복합 지지력은 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 복합 지지력이 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 복합 지지력 보다는 최상위층의 지지력에 의해 켄링 거동이 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하부층 구성에 따른 켄링 거동을 실내 실험을 통해 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 슬래브에서 측정된 수직 온도 분포를 이용하여 선형 온도구배를 구할 수 있었다.
- 부 온도구배의 증가에 따라 슬래브가 켄다운 될 때 중앙부분에서의 수직변위의 변화가 더 크게 나타났으며 정 온도구배의 증가에 따라 슬래브가 켄업 될 때는 코너부분에서의 수직변위의 변화가 크게 나타났다.
- 슬래브의 중앙과 코너의 변위 차는 부 온도구배가 증가할 때 비선형적으로 증가하며 부 온도구배가 감소할 때는 거의 선형적으로 감소한다.
- 하부층이 복합적으로 구성되어 있을 때는 슬래브의 켄링 거동이 복합 수직 지지력의 지배를 받지만 상위 하부층이 입상의 재료로 구성되어 있을 경우에는 복합 지지력보다 입상체의 지지력에 더 큰 영향을 받게 된다.