

동절기 매트기초공사시 콘크리트의 초기동해방지 및 온도충격제어에 관한 해석적 연구

An Analytic Study on Early aged Freezing Damage Prevention and Thermal Crack Control of Concrete in Cold-Weathering Mat Foundation Construction

이 도 범* 김 효 락** 박 지 훈*** 최 일 호***
Lee, Do Bum Kim, Hyo Rak Park, Ji Hoon Choi, Il Ho

ABSTRACT

This study is performed for checking the limitation and application of each curing/heating methods on cold-weathering mat foundation construction, considering temperature control, early strength security and temperature declination range limit, by means of concrete material properties and thermal analysis technique that were published previously.

In the result of this analysis, we checked the open air temperature and mat depth that are possible to apply each curing/heating methods on cold-weathering construction and found curing/heating time of each methods that is able to prevent early aged freezing damage and thermal crack

1. 서론

최근 공기단축을 목적으로 동절기에도 콘크리트공사가 수행하는 현장이 늘어나고 있으며, 다양한 보양/급열 방법들이 콘크리트의 품질확보를 위해 적용되고 있다. 콘크리트의 초기동해방지 및 온도충격 방지는 콘크리트의 온도관리, 초기강도 확보, 양생종료시 온도하강폭 제한 등을 모두 만족시켜야 한다. 그러나, 동절기 매트기초 공사는 매스콘크리트에서 발생하는 수화열의 영향 등을 고려함 없이 일반적인 방법으로 진행되어 공기 및 비용의 낭비를 초래할 뿐 아니라 과열에 의한 보양/급열 종료시 온도 충격에 의한 균열 문제도 빈번하다고 할 수 있다. 이에 본 논문집에 함께 발표된 “동절기 콘크리트 공사시 콘크리트의 온도해석기법에 관한 실험적 연구”(이하 “기 발표 논문”) 에서 콘크리트 재료 특성 및 온도해석 기법을 적용, 각각의 보양/급열 방법별 MAT기초 콘크리트의 온도이력을 계산하여, 부재 두께 및 외기온 같은 조건별로 각 방법의 한계와 적절한 적용 방법을 확인하는 것을 목적으로 한다.

* 정회원, (주)대림산업 기술연구소 책임연구원
** 정회원, (주)대림산업 기술연구소 선임연구원
*** 정회원, (주)대림산업 기술연구소 연구원

2. 해석 개요

콘크리트와 부직포의 열전도율, 비열, 밀도등의 열 물성치와 콘크리트의 발열함수(단열온도상승곡선)은 기 발표 논문에서 검증된 값을 사용하였다. 콘크리트의 수화반응 시작시간은 실험결과와 같이 타설완료후 12시간 이후로 하였으며, 단열온도상승곡선은 콘크리트 초기온도 10℃를 기준으로 하였다. 지반은 하부로 3m만큼 경압으로 모델링하여 초기온도를 일평균기온으로 설정하고, 시간에 따라 콘크리트 온도에 영향을 주는 지반의 온도변화도 해석하였다. MAT기초의 취약부위는 표면부이므로 구조적으로 가장 중요한 철근피복깊이(3cm)의 온도를 중점적으로 나타내었다. 기 발표 논문에서 검증된 바와 같이 표면이 외기에 노출된 경우 풍속 6m/s를 고려하여 대류열전달계수 30kcal/m²hr℃를 적용하였고, 상옥을 덮어 외풍을 차단할 경우 미풍(1m/s미만)이라고 가정하여 대류열전달계수 10kcal/m²hr℃를 적용하였다. 상옥을 덮고 공간가열요소가 없는 경우에는 기 발표 논문에서 밝혀진 바와 같이 상옥내부의 기온은 외기온과 같다고 보았다.

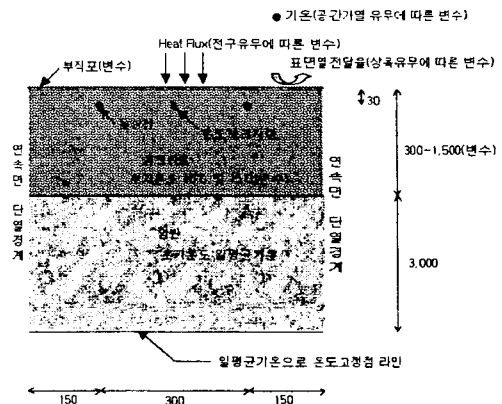


그림 1 매트 해석을 위한 모델링 개요

3. 변수설정

3.1 콘크리트 초기온도

보통 현장반입시 레이콘온도를 13℃~15℃로 관리하므로 현장대기시간 및 타설시간 등을 고려하여 타설완료후 콘크리트의 온도가 10℃가 되는 것으로 하였다. 보양이 없을 경우 초기온도 상향(15℃)을 변수로 고려하였다.

3.2 보양/급열 방법

표 1 보온/급열 방법

보양방법	재료	규격	기타
무조치	-	-	-
보온	부직포 T=5	-	-
내부가열	온상선 22W/m	깊이 3cm, 간격 30cm	표면 부직포 병용 포함
면가열	전구 300W	5~10m ² 당 1개	양생 상옥설치
공간가열	열풍기 등	상옥내 기온 5℃ 유지	양생 상옥설치

3.3 기온

외기온은 일평균기온 0, -4, -8, -12℃의 네단계로 하였다. 최근 3년간 6개도시 동절기 기온을 분석한 결과 일교차 평균이 약 9℃로 나타났으므로 일기온은 일평균기온에서 ±4.5℃에서 증감하는 변화를 갖도록 설정하였다. 이때, 일최저는 오전 7시, 일최고는 오후 2시에 나타나도록 하였다. 콘크리트는 오후 6시에 타설완료되는 것으로 하였다. 따라서 결과그래프의 시작시점은 타설일 오후 6시를 나타낸다.

3.4 MAT 두께

MAT두께에 따라 수화열에 따른 콘크리트 온도가 달라지므로 본 연구에서 중요한 변수가 된다. MAT두께는 300mm, 600mm, 900mm, 1200mm, 1500mm의 다섯단계로 하였다.

4. 해석결과 판단 기준

4.1 초기 동해방지 콘크리트 온도

시방서에 의하면 적정강도가 얻어질 때까지 콘크리트를 5℃이상으로 유지해야 하며, 특히 2일간은 0℃이상이 되도록 제시하고 있다. 기 발표 논문에서와 같이 깊이 3cm지점의 콘크리트 온도로 표면온도를 계산할 수 있다. 표면온도(Ts)는 그림2와 같이 기온(Ta), 소정깊이(d)의 콘크리트 온도(Tc), 표면보온상태(Rs, 표면에서부터 공기까지의 열저항), 콘크리트의 열전도율(k), 흡수복사열량(Q)을 이용하여 열평형방정식(식1)으로 계산할 수 있다. 본 논문에서는 각 조건에 따라 표면온도가 0℃가 되는 3cm깊이의 온도를 역계산하여 이보다 온도가 낮을 경우 표면부 초기동해로 판정하였다.

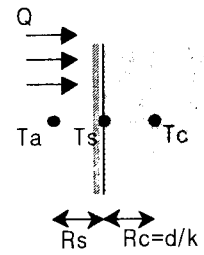


그림 2 표면온도에 영향을 미치는 요인들

$$Q + \frac{(T_c - T_s)}{R_c} = \frac{(T_s - T_a)}{R_s} \quad (식1)$$

4.2 초기강도 확보

본 연구 대상은 보통의 노출 상태에 해당하고 슬래브 및 보와 같이 공사중 하중을 고려할 필요가 없는 MAT기초이므로 시방서 제시사항을 고려하여 초기동해 방지를 위하여 50kgf/cm² 강도 확보를 기준으로 하였다. 한편, 온도해석결과를 강도로 환산하기 위해 기 발표 논문의 25-240-15 레미콘을 대상으로 적산온도-강도 관계를 파악하는 실험을 하였다. 적산온도-강도 관계는 표준양생온도범위와 다를 경우 하나의 함수식으로 표현하기 어렵다. 본 연구에서는 매재령의 온도(θ)를 이용한 보정항(β)을 사용하는 大崎의 적산온도(M) 계산식(식2)을 사용하였다. 적산온도를 계산하기 위하여 먼저 표준양생(20 ± 3℃) 및 저온양생(외기밀봉양생, 0℃ ~ 10℃) 공시체의 온도를 15분 간격으로 7일간 측정하면서 2, 3, 5, 7일 강도를 측정하였다(표2). 적산온도는 경화가 시작되는 시점인 12시간부터 누적하였으며, 적산온도와 강도의 관계를 그림 3과 같이 그래프로 그린 후 실험식(식3)을 구하였다.

$$M = \sum_0^t \beta(\theta + 10)\Delta t \quad (\text{온도보정항 } \beta = 0.0003(\theta + 10)^2 + 0.006(\theta + 10) + 0.55) \quad (식2)$$

$$f'_c = 243.82(1 - \exp(-0.012496M)) \quad (식3)$$

표 2 콘크리트의 압축강도 측정결과와 적산온도

재령(日)		2	3	5	7
외기 양생	적산온도(DD, 온도보정)	21	29	50	70
	압축강도(kgf/cm ²)	54	74	117	152
표준 양생	적산온도(DD, 온도보정)	39	72	147	216
	압축강도(kgf/cm ²)	94	150	197	232

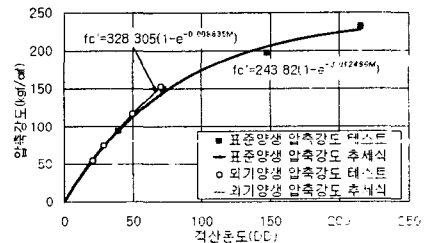


그림 3 적산온도-강도관계 그래프

4.3 온도 최대 강하폭

표준시방서에는 콘크리트 양생 종료시 갑자기 한기에 노출시키지 말고 서서히 식히도록 제시되어 있으며, ACI 306R에는 표 3과 같이 양생종료시 부재 두께별 온도하강 제한치를 두고 있다. 본 연구에서는 두께 300,600 mm에는 22℃/일을 적용하고, 두께 900,1200,1500 mm에는 17℃/일을 적용하였다.

표 3 콘크리트 표면부 온도하강 제한치

단면치수(mm)	300 미만	300~900	900~1,800	1,800 초과
온도하강 제한치(℃/日)	28	22	17	11

5. 해석 결과

5.1 무보양

무보양일 경우 타설후 11시간 전후로 모든 두께에서 온도가 1.7℃ 미만으로 떨어져 표면부에 초기동해가 발생하는 것으로 나타났다(콘크리트 초기온도가 10℃일 경우).

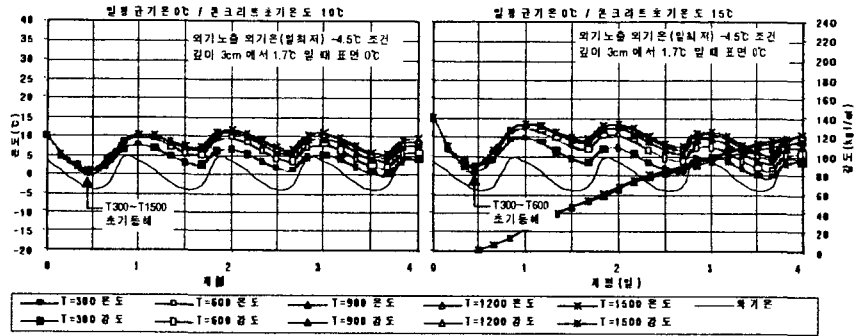


그림 3 무보양의 경우 해석결과 콘크리트 초기온도가 15℃일 경우는 두께 900이상일 경우 표면부 초기동해를 피할 수 있는 것으로 나타났다. 본 해석 결과는 일평균 기온이 0℃일 경우이므로, 기온이 이보다 낮을 경우에는 동해의 정도가 더 심해질 것으로 판단된다.

5.2 보온 양생

(부직포 덮기)

일평균 기온이 -8℃일 때 두께 600 이상의 매트는 부직포 보양만으로 초기동해없이 소정 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 초기동해를 입지 않은 경우 대부분 만 1.5일 이내에 저항 강도(50kgf/cm²)가 발현되는 것으로 나타났다. 부직포 제거는 작업원 동원이 가능한 일과시간(오

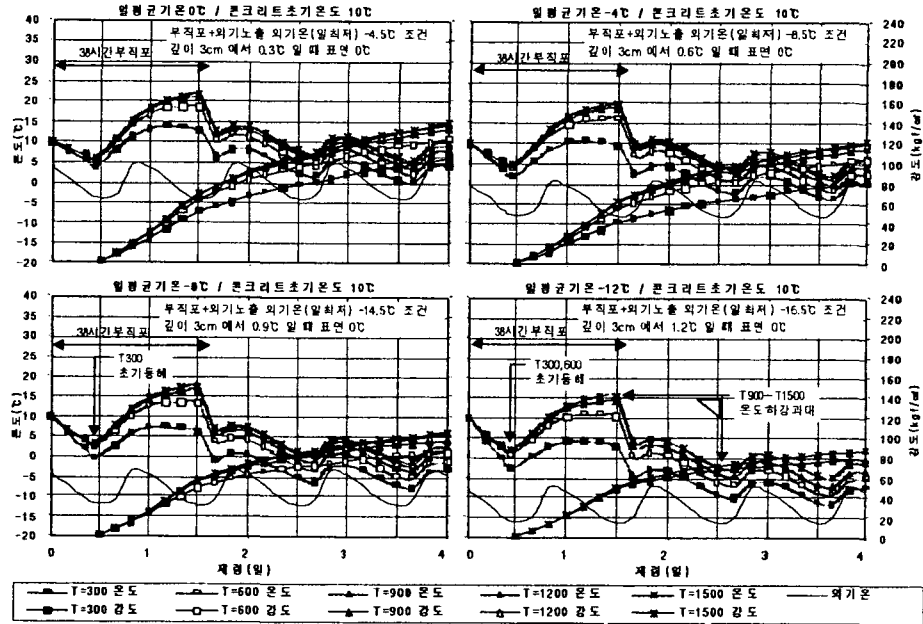
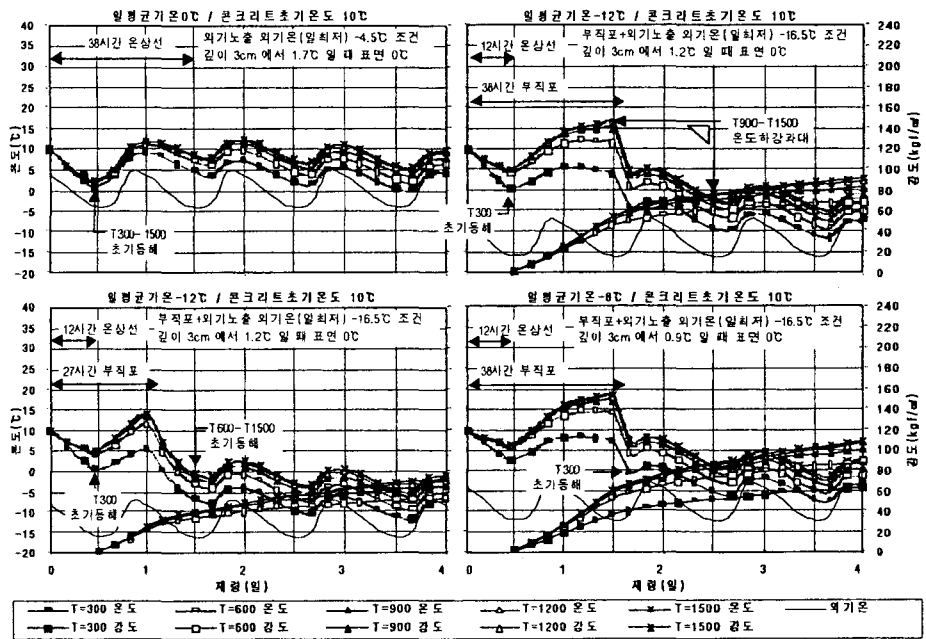


그림 4 부직포 보온의 경우 해석결과 전 8시~오후 9시)중에 이루어져야 한다. 따라서, 이를 고려하면 타설후 38시간(타설 2일째 오전 8시)이 적절한 보양종료시간으로 판단된다. 보양종료후 온도강하치는 일평균기온이 -12℃일 경우만 17℃/일 이상으로 나타나 온도충격에 따른 균열이 예상된다. 따라서, 극저온의 조건에서는 보양기간을 이보다 더 연장해야 할 것으로 판단된다.

5.3 내부가열(온상선 설치)

보온 조치 없이 온상선만을 설치할 경우 일평균 기온 0℃에서도 초기동해가 발생하였다. 이에 온상선에 부직포 보온을 추가하여 해석을 수행한 결과 일평균 기온 -12℃에서도 대부분 동해없이 소정 강도가 발현되었다. 그러나 두께 900이상인 경우에는 부직포 해체 직후 온도강하가 과대하여 온도균열의

위험이 높은 것으로 나타났다. 따라서 부직포 해체 시점을 콘크리트의 온도가 본격적으로 상승하기 전인 27시간(타설 1일째 오후 9시)으로 앞당긴 결과 온도하강치는 기준을 만족하였으나, 소정강도에 도달하기 전인 재령 1.5일 전후에 초기동해가 발생하였다. 따라서, 일평균 기온 -12°C 의 극한조건에서는 부직포 보온과 온상선 가열의 방법을 병용할 경우, 부직포 제거 시점을 상당히 뒤로 미루어야 할 것이다. 일평균기온 -8°C 의 조건에서는 38시간후에 부직포를 제거해도 일일 온도하강 제한치를 만족하는 것으로 나타났다. 이 경우 초기동해방지 강도는 약 1.3일 전후에 발현되는 것으로 나타났다.



5.4 면 가열 (상옥내 전구 설치) 일평균기온 -8°C 이하일 경우 모든 두께에서 초기동해가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 전구 밀도를 2배로 높여 본 결과 콘크리트 온도가 소폭 상승하여 두께 900mm 이상에서 초기동해를 방지할 수 있는 것으로 나타났다. $60\text{W}/\text{m}^2$ 이상 전구 밀도를 높이는 것은 현실성이 없으므로 전구가열의 방법은 일평균 기온 -8°C 이상에서 제한된 두께에서만 적용가능할 것으로 판단된다.

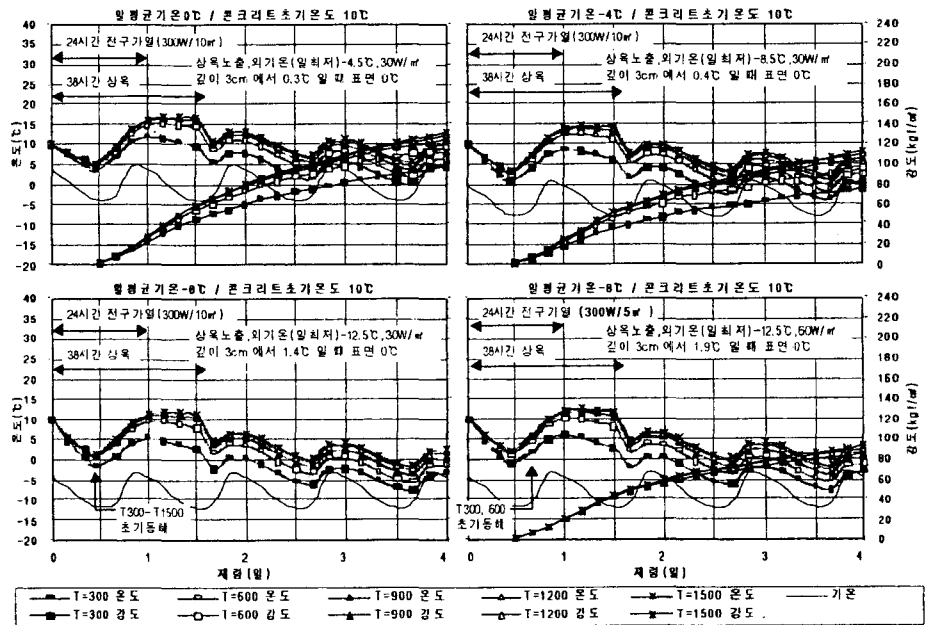


그림 5 온상선 (내부가열)의 경우 해석결과

그림 6 면가열(전구가열)의 경우 해석결과

5.5 공간 가열 (상옥내 난방)

공간가열을 하여 상옥내 기온을 5℃으로 유지할 경우 대부분의 경우 초기 동해 발생은 없으며 두께 300일 경우 일평균 기온 -8℃이하, 두께 600일 경우 일평균 기온 -12℃일 때 초기 동해가 발생하였다. 이때 발생한 초기 동해는 재령 12시간 이내에 발생하는 것이 아니라 양생 상옥 해체 후 소정강도가 발현되기 전에 표면 온도가 영하로 떨어져 발생된 것으로서 공간 가열 및 양생 상옥의 존치 시간을 늘려야 될 것으로 판단된다.

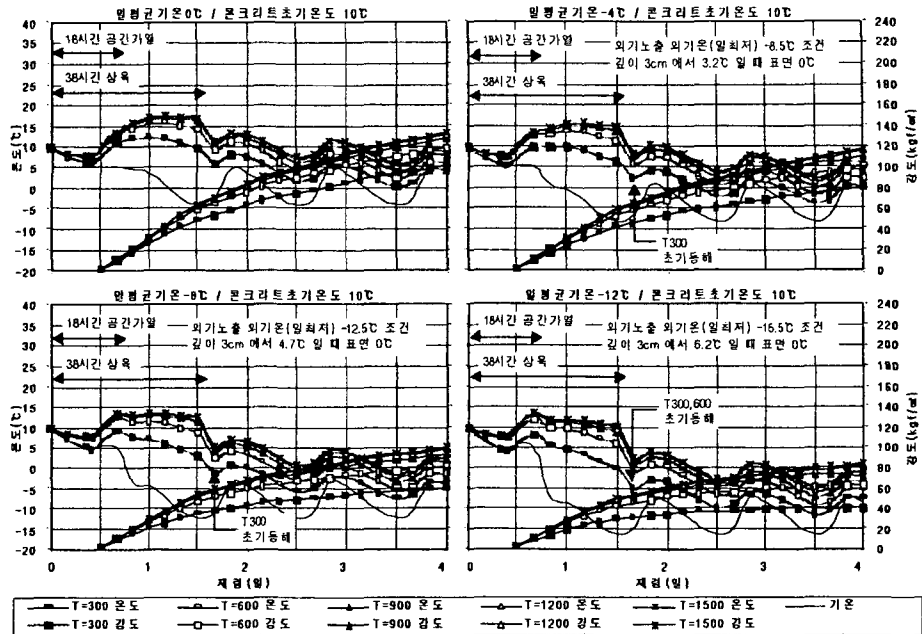


그림 7 공간가열의 경우 해석결과

6. 결론

기 발표된 논문에서 검증된 전산해석 방법을 이용하여 동절기 MAT기초 콘크리트에 대하여 널리 사용하고 있는 보양/급열 방법에 대하여 해석을 실시하였다. 본 해석에서 보양 및 급열 방법은 무보양, 부직포 보온, 온상선 설치, 전구 가열, 공간 가열을 변수로 주었고, 콘크리트의 두께는 300, 600, 900, 1200, 1500mm로 변화시켰다. 일 평균기온은 0, -4, -8, -12℃의 4단계, 일교차는 9℃로 하였다. 콘크리트 초기온도는 10℃로 설정한 후 온도 해석을 수행하여 적산온도에 의한 재령별 강도를 계산하였다.

해석 결과 각 보양/급열 방법에 대하여 적용 가능한 외기온 및 MAT 두께를 확인할 수 있었고, 초기 동해 방지 및 온도 충격을 방지 할 수 있는 각 방법의 보양/급열 지속 시간을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, "콘크리트 표준시방서", 1999
2. 한민철 외 4인, "적산온도방식에 의한 콘크리트의 강도증진해석에 관한 연구", 대한건축학회학술대회논문집 제 18권 1호, 1998
3. ASTM C 1074-98, "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method"