

埋入形 熱線에 의한 寒中콘크리트의 保養方法 適用에 관한 研究

Application of Curing Method Using the Heating Cable for Cold Weather Concreting

김 형 래* 이 정 철** 김 찬 수*** 이 명 진**** 김 봉 주*****
Kim, Hyung Rae Lee, Jung Chul Kim, Chan Soo Yi, Myoung Jin Kim, Bong Joo

Abstract

The purpose of this study is to analyze the curing effect of heating cable for concreting in cold weather. An experiment was conducted to evaluate the temperature history of concrete structures cured with embedded heating cables.

Results are as follows ; In comparison with the non-heating case, applying of heating cable resulted in the rise of temperature in the range of 10°C. In order to get successful results, the optimal pitch length for the embedded heating cables ranged from 20cm to 25cm. When working with the existing curing methods, applying this heating cable would be more effective in concrete curing. Finally, a formula and process was suggested to predict the internal temperature history of concrete structures under the various curing conditions.

1. 서 론

동절기에 시공되는 건축공사의 콘크리트 보양을 위해 국내에서는 주로 시공층의 구조체 주위를 방수천막 등으로 둘러싸고 급열장치로 보양막 내부공간을 가열하는 방법이 사용되고 있으나, 이러한 방법은 열효율이 낮을 뿐만 아니라 화재 우려, 연소가스발생 및 부위에 따른 열 공급량의 편차 등으로 인해 현장품질관리와 구조체의 균등한 품질확보 측면에서 많은 어려움을 초래하는 것으로 알려져 있다. 또한, 이러한 보양방법 적용시에는 급열이 취약한 부위의 콘크리트 압축강도 발현정도가 초기강도 확보를 위한 급열양생기간 및 거푸집제거에 따른 골조공사기간을 결정하는 가장 중요한 요인이 되므로, 이러한 문제점들을 개선·보완하기 위한 합리적인 보양시스템의 검토가 절실히 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 보편적으로 사용되는 보양방법들의 문제점을 보완하고 한중콘크리트 시공시 소요 품질을 확보하기 위한 보양시스템 구축의 일환으로서, 열선양생방법을 적용한 실제 구조

*정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원
**정회원, 현대건설(주) 기술연구소 연구원
***정회원, 현대건설(주) 기술연구소 책임연구원, 건축시공기술사
****정회원, (주)이코이앤씨 대표이사
*****정회원, 국립천안공업대 조교수, 공학박사

체 콘크리트의 열선매입조건 변화에 따른 내부온도 분포이력 측정실험을 수행하였다. 또한, 실험결과를 토대로 콘크리트 내부의 총발열량과 표면에서의 총손실열량의 관계로부터 콘크리트의 평균온도 예측식과 프로세스를 도출하고 이를 통하여 각종 보양방법별 슬래브 콘크리트의 온도이력을 예측·비교함으로써 열선양생방법의 적용성을 검토하였다.

2. 실험

2.1. 실험개요

2.1.1. 적용대상부재

본 실험에서는 열선매입에 따른 보양효과의 비교·검토가 용이할 것으로 판단되는 SRC라멘조 주상복합건물의 슬래브를 각각 대상 건축물 및 부재로 선정하였다. 한편, 대상 슬래브는 지하층 주차장 바닥으로서 부재의 단면두께는 180mm, 상부근의 피복두께는 30mm였다.

2.1.2. 실험인자 및 수준

콘크리트내부에의 열선매입에 따른 부위별 온도분포이력을 파악하기 위한 실험인자로서 열선의 매입간격과 열선히팅여부를 선정하였다. 즉, 현장배근간격을 고려하여 열선매입간격을 4수준으로 구분하였으며, 열선을 매입한 부위(이하, 열선가열부위)와 열선을 매입하지 않은 부위(이하, 비열선부위)로 구분하여 수행하였다. 실험인자 및 수준은 표 1과 같다.

표 1 실험인자 및 수준

실험인자	실험수준	수준수
열선매입간격 (mm)	220	4
	250	
	300	
	350	
열선히팅여부	Heating	2
	Non-heating	

2.1.3. 사용재료

적용된 콘크리트는 설계기준강도 240kgf/cm²의 레디믹스트 콘크리트로서 최대골재크기 25mm, 슬럼프 15cm였으며, 매입형 열선은 직경 0.6mm의 발열선 위에 1mm 두께의 PVC절연체로 피복하고 그 위에 0.8mm의 주석도금된 연동선 편조를 씌워 총 직경이 4.2mm이며, 약 20W/m의 발열특성을 보유하고 있는 정열전선을 사용하였다.

표 2 실험조건별 분류기호 및 측정위치

2.2. 실험내용 및 방법

2.2.1. 실험내용 및 측정항목

매입형 열선에 의한 콘크리트 보양효과 검토를 위한 평가항목으로서 구조체의 부위별·단면깊이별 온도편차 발생여부와 온도상승효과를 선정하였으며, 이를 위해 열선으로부터 수평거리 및 부재표면으로부터 깊이에 따른 콘크리트의 온도분포에 대한 경시변화를 측정하였다.

기호	온도센서 매입위치		열선매입간격
	열선구간	열선사이구간	
S1-1	상부 : 3cm	상부 : 3cm 중간 : 9cm 하부 : 15cm	22cm
S1-2	열선사이구간		
S2-1	열선구간	상부 : 3cm 중간 : 9cm 하부 : 15cm	25cm
S2-2	열선사이구간		
S3-1	열선구간	상부 : 3cm 중간 : 9cm 하부 : 15cm	35cm
S3-2	열선사이구간		
S4-2	열선사이구간	상부 : 3cm	30cm
기준열선	열선표면에 센서부착		

2.2.2. 온도측정위치 및 실험조건

콘크리트의 온도측정을 위해 K-type의 온도센서를 매입하였으며, 실험조건별 분류기호 및 측정위치는 표 2와 같다. 즉, 온도측정위치는 열선통과 구간(이하, 열선구간) 및 열선과 열선 사이 구간(이하, 열선사이구간)으로 구분하였으며, 슬래브 상부표면으로부터 깊이별로 3cm(상부근위치), 9cm(중심부), 15cm(하부근위치) 지점으로 하였다.

2.3. 실험결과 및 고찰

2.3.1. 열선매입간격에 따른 온도분포

표면으로부터 3cm 깊이의 상부근 위치에 있어서 열선구간 및 열선사이구간의 열선가열에 따른 콘크리트 온도분포이력은 그림 1 및 그림 2와 같다.

열선구간은 열선으로부터 측정점의 거리가 5mm 이내로서 열선매입간격에 관계없이 콘크리트 타설 개시후 18시간 정도 경과시 20~23℃ 정도의 온도분포를 보였다. 한편, 열선사이구간은 열선으로부터 이격거리가 11~17.5cm의 범위로서, 열선매입간격 22cm인 S1-2의 경우 열선구간인 S1-1의 경우와 유사한 온도변화경향을 보이고 있는 것에 비하여 열선매입간격이 25cm 이상인 경우에는 외기온이 하강함에 따라 열선가열에 의한 콘크리트의 온도상승효과가 급격히 저하되는 것으로 나타났다.

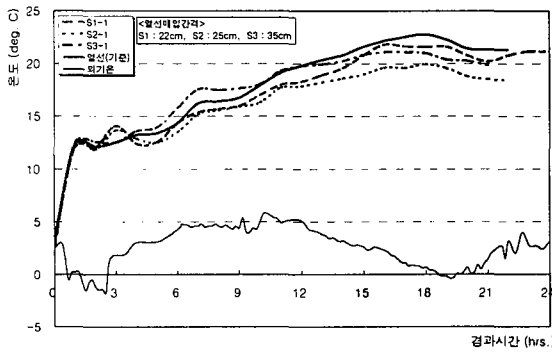


그림 1 상부근위치에서 열선구간의 콘크리트 온도분포

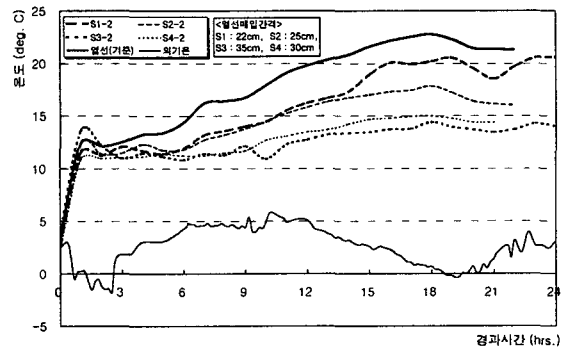


그림 2 상부근위치에서 열선사이구간 콘크리트 온도분포

2.3.2. 표면으로부터의 깊이별 온도분포

그림 3 및 그림 4는 열선매입간격 22cm, 35cm에 대하여 표면으로부터 깊이별 콘크리트의 온도분포를 나타낸 것이다. 열선가열에 의한 콘크리트의 온도상승효과가 매우 큰 것으로 나타난 열선매입간격 22cm의 경우, 열선구간 및 열선사이구간의 전체 단면에 걸쳐서 열선가열기간 동안의 깊이별 온도 편차가 3℃ 내외로서 균등한 온도분포를 나타냈다. 반면에 열선매입간격 35cm의 경우에는 열선구간의 상부(S3-1(상부))에 비하여 열선구간의 하부와 열선사이구간의 전단면에서 상대적으로 매우 낮은 온도를 나타냈음을 알 수 있다.

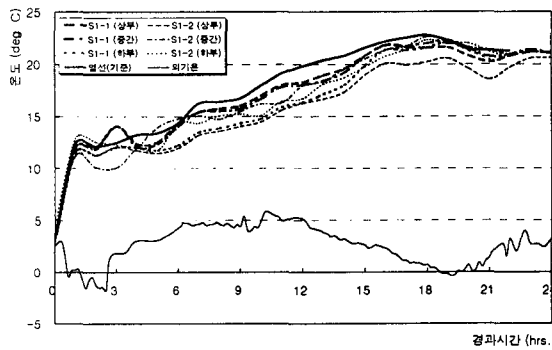


그림 3 콘크리트의 깊이별 온도분포(열선매입간격22cm)

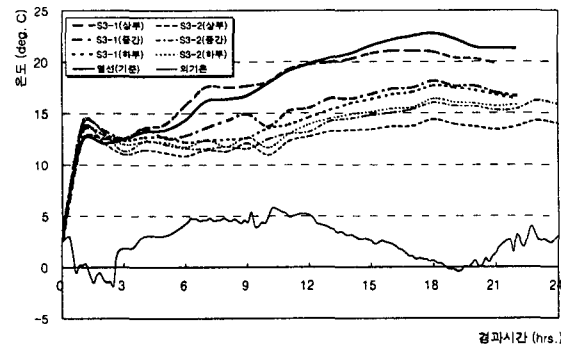


그림 4 콘크리트의 깊이별 온도분포(열선매입간격35cm)

이러한 실험결과들은 열선매입간격이 일정간격을 초과하는 경우 슬래브의 단위표면적당 공급열량이 감소되며, 이로 인해 열선으로부터의 이격거리가 큰 지점에서는 단위시간당 외기에 의한 열손실량이 열선으로부터의 공급열량을 초과하는 데 기인하는 것으로 판단된다.

2.3.3. 열선히팅여부에 따른 콘크리트 온도

그림 5에 나타난 슬래브의 표면 및 상부근 위치에서의 열선가열부위(Heating)와 비열선부위(Non-heating)에 대한 온도변화 측정결과로부터 열선에 의한 콘크리트 보양효과를 확인할 수 있다. 즉, 열선가열부위에서는 표면으로부터 3cm깊이에서의 온도분포가 콘크리트 타설시점부터 지속적으로 상승하여 약 18시간 경과시 20℃ 이상의 온도를 나타낸 반면, 비열선부위에서는 시간의 경과에 따라 최초 타설시점의 콘크리트 온도에 비해 다소 저하되는 것으로 나타났다. 더욱이 기존 타설부위와 접한 슬래브 단부에서는 비열선부위의 경우 약 5℃ 정도까지 콘크리트 온도가 저하되어 열선가열부위와 약 20℃의 온도차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 표면온도도 열선가열부위의 경우 10℃ 내외의 온도를 유지하는 것에 비해 비열선부위에 있어서는 거의 외기온과 동일한 수준까지 저하되었다.

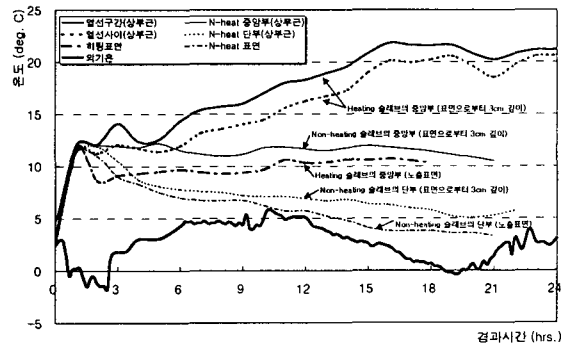


그림 5 슬래브 부위별 열선히팅효과

3. 열선양생을 고려한 콘크리트의 온도이력예측

이상의 실험결과로부터 열선양생에 따른 동절기 콘크리트의 보양효과를 확인할 수 있었으나 실험 여건상 외기온이 -2.0~5.5℃의 범위로서 그다지 혹한기라고 볼 수 없으며, 기존의 다른 보양방법과의 비교가 곤란한 것으로 판단된다. 따라서, 본 장에서는 콘크리트의 열적특성을 고려한 온도이력예측을 위한 계산식 및 프로세스를 도출하고 이를 통한 각종 보양방법별 온도이력을 예측·비교함으로써 열선양생방법의 적용성을 검토하였다.

3.1 콘크리트의 온도예측식 검토

매입형 열선을 적용한 콘크리트의 경과시간별 온도변화는 콘크리트 내부의 총발생열량과 표면부에서의 총손실열량의 관계로부터 산출하는 것이 가능하다. 즉, 콘크리트 내부의 총발생열량은 시멘트의 수화에 의한 발열량(Q_c)과 열선의 가열에 따른 발열량의 총합으로서 시멘트의 수화발열량(Q_c)은 식(1)에 나타난 콘크리트의 단열온도 상승식으로부터 단열온도를 시간에 대하여 미분하고 콘크리트의 단위중량과 비열을 곱하여 단위시간당 수화발열량을 산출할 수 있으며, 그 값에 슬래브의 단면두께(0.18m)를 곱함으로써 단위시간 및 단위표면적당($1m^2$) 콘크리트의 수화발열량을 식(2)에 의해 계산할 수 있다.

$$T = K(1 - e^{-at}) \quad \text{식(1)}$$

여기서, T : 단열온도 상승량(℃), t : 재령(일), 시간일 경우에는 1/24을 곱함
K : 최대상승온도(℃), a : 반응속도계수

$$Q_c = \frac{\rho_c C_c \Delta T}{\Delta t} d \quad \text{식(2)}$$

여기서, Q_c : 단위표면적($1m^2$)당 콘크리트 수화발열량($kcal/m^2hr$)
 ρ_c : 콘크리트의 밀도 ($2400kg/m^3$), C_c : 콘크리트의 비열 ($0.25kcal/kg^\circ C$)
 ΔT : 수화열에 의한 콘크리트의 온도차($^\circ C$), Δt : 단위경과시간(hour)
 d : 슬래브 부재의 단면크기 ($0.18m$)

또한, 열선히팅에 의한 발열량(Q_h)은 콘크리트 부재의 단위표면적당($1m^2$) 열선의 매입간격에 의해 결정되는데, 본 연구결과를 토대로 적정 매입간격을 $20cm$ 로 가정할 경우 단위표면적당 소요 열선길이는 $5m/m^2$ 이며 열선의 발열용량이 $20W/m$ 이므로, 다음의 식(3)에 의해 산정될 수 있다.

$$Q_h = 20W/m \times 5m/m^2 = 100W/m^2 = 100 \times 0.86kcal/m^2hr \quad \text{식(3)}$$

한편, 노출표면 $1m^2$ 당 단위시간동안의 열손실량 Q_t 는 부재표면의 열손실계수(K_t), 부재온도(T_c)와 외기온(T_e)의 차이에 의해 식(4)로부터 구할 수 있다.

$$Q_t = \Sigma K_t A \Delta T = \Sigma K_t A (T_c - T_e) \quad \text{식(4)}$$

이상에서 콘크리트의 온도변화에 직접적으로 관련된 잔여열량은 $Q_c + Q_h - Q_t$ 로부터 얻을 수 있으며, 식(5)에 의해 임의시점의 콘크리트 온도를 산정할 수 있다.

$$T_{h+\Delta t} = T_h + (Q_c + Q_h - Q_t) \cdot \Delta t / (\rho_c \cdot C_c \cdot d) \quad \text{식(5)}$$

여기서, $T_{h+\Delta t}$: 임의 시점의 콘크리트 평균온도 ($^\circ C$), Δt : 단위경과시간 (hour)
 Q_c : 시멘트의 수화에 의한 발열량, Q_h : 열선에 의한 발열량, Q_t : 총손실열량

본 실험결과 측정된 슬래브 상하층의 외기온도조건과 콘크리트의 열적특성값으로부터 식(5)를 이용하여 콘크리트의 평균온도를 산출한 결과는 그림 6과 같으며, 계산식에 의한 온도변화경향이 실측값과 매우 유사할 뿐만 아니라 임의의 시점에서의 실측값과의 온도차이가 $2\sim 3^\circ C$ 이내로서 열선양생 콘크리트의 온도예측이 충분히 가능할 것으로 판단된다. 다만, 계산값이 실측값에 비해 초기 온도가 다소 높게 나타나는 것은 콘크리트의 단열 온도상승식을 이용한 수화발열량 산출시 시멘트 수화발열곡선의 휴지기(Dormant Period)에 대한 부분이 계산식에서는 고려되지 않았으며, 실제조건에서 타설시 낮은 온도의 거푸집과 철근 등에 의한 손실열량이 고려되지 않은 점에 기인하는 것으로 판단된다.

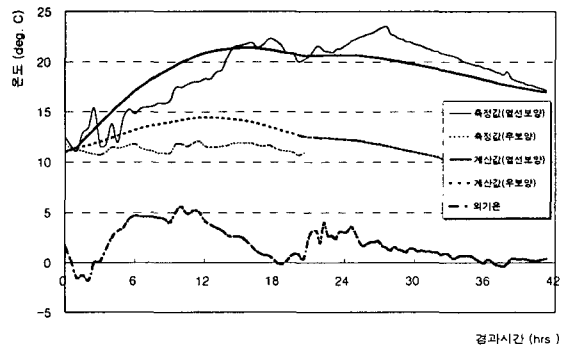


그림 6 계산식에 의한 콘크리트의 평균온도 산출결과

3.2. 열선양생 콘크리트의 온도이력 추정

매입형 열선에 의한 한중콘크리트 보양방법의 적절한 활용을 위해서는 더 혹독한 조건하에서의 보양효과를 온도이력 예측을 통하여 검증할 필요가 있다. 이에 따라 상기한 온도이력 예측식과 프로세스를 이용하여 두께 $135mm$ 의 슬래브를 대상으로 일평균 기온 $-5^\circ C$, 일교차 $10^\circ C$ 인 외기조건하에서의 각종 보양방법별 경과시간에 따른 72시간 동안의 콘크리트 온도이력을 추정하였다. 기본적인 조건으로서 콘크리트의 단위시멘트량 $340kg/m^3$, 치기온도 $10^\circ C$ 로 하였으며, 콘크리트 열경계면의 열손실계수는 콘크리트 표준시방서, 일본 한중콘크리트 시공지침 등에서 제시된 값을 이용하여 실측값과 가

장 근사한 계산결과가 얻어지는 각각의 계수값을 선정하였다. 그 결과, 합판거푸집의 경우 구조체가 외기에 완전히 개방되었을 때 $7.0\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 개구부를 밀폐하여 무풍조건이 되었을 경우 $3.4\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 를 적용하는 것이 가장 근사한 결과를 나타냈으며, 콘크리트의 노출표면은 풍속을 고려할 필요가 없을 경우 $7.4\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 일반적인 완전노출조건에 대해서는 $10\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 시트 덮음 $5.0\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, 보온매트 $4.5\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 를 적용하는 것이 가장 적절한 것으로 나타났다.

외기온의 변화를 사인함수식에 의해 24시간 주기로 반복할 경우 조건별 온도예측 결과는 그림 7과 같다. 즉, 주어진 외기조건하에서 열선매입후 추가보양을 하지 않는 경우 무보양조건에 비하여 72시간동안 7~8°C정도의 온도상승이 가능함을 알 수 있다. 또한, 열선보양중 슬래브 상부의 노출면을 시트 등으로 덮을 경우에는 약 8°C 정도의 추가 온도상승이 가능하며, 다시 슬래브 하부공간의 온도를 0°C로 유지시키는 경우에는 기존의 가열보양에 의해 보양막 내부온도를 10°C로 균등하게 급열하는 경우와 동등 이상의 보양효과를 얻을 수 있는 것으로 예상된다.

한편, 기존의 가열보양방법을 적용하는 경우에는 실제로 외기온도의 강하에 따른 동반 온도하강 가능성이 매우 크므로 적정수준의 온도를 균등하게 유지하는 것이 매우 곤란한 것으로 판단되며, 열선에 의한 보양에서도 3일(72시간) 동안 지속적으로 전원공급하는 것을 전제로 한 예측결과로서 가정된 외기조건하에서 24시간 이내에 전원공급을 중단할 경우에는 그 시점으로부터 급격한 온도강하를 고려하여 별도의 보온조치를 하든가 보양기간을 연장하는 것이 불가피할 것으로 판단된다.

한편, 기존의 가열보양방법을 적용하는 경우에는 실제로 외기온도의 강하에 따른 동반 온도하강 가능성이 매우 크므로 적정수준의 온도를 균등하게 유지하는 것이 매우 곤란한 것으로 판단되며, 열선에 의한 보양에서도 3일(72시간) 동안 지속적으로 전원공급하는 것을 전제로 한 예측결과로서 가정된 외기조건하에서 24시간 이내에 전원공급을 중단할 경우에는 그 시점으로부터 급격한 온도강하를 고려하여 별도의 보온조치를 하든가 보양기간을 연장하는 것이 불가피할 것으로 판단된다.

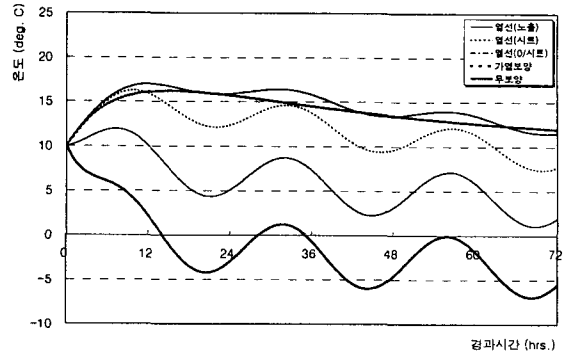


그림 7 보양조건별 콘크리트의 온도예측결과

4. 결 론

- (1) 부재단면이 작고 상부표면이 외기에 노출되어 있는 현장타설 콘크리트 슬래브 부재에 대해 열선양생방법을 적용한 결과, 22cm의 간격으로 열선을 매입한 경우 외기온 $-2\sim 5.5^\circ\text{C}$ 의 조건하에서 24시간 경과시점까지 10°C정도의 온도상승효과가 있는 것으로 나타났다.
- (2) 균등한 품질확보를 위한 적정 열선매입간격은 외기온도와 풍속 등의 외부환경조건과 슬래브 상부면의 보온재 피복여부와 보온재료의 종류 등 열경계조건에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나 20cm 내외가 적절하며 철근배근간격 및 현장여건에 따라 25cm까지도 가능한 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 제시된 실험 및 온도이력예측 결과를 토대로 종합적으로 검토해 볼 때, 0°C 이하의 기온이 3일 이상 지속되는 혹한기 조건하에서 열선보양방법을 적용하는 경우에도 외기온도 및 보양조건을 고려한 콘크리트의 온도예측식 및 프로세스를 이용하여 시공전에 검토·보완한다면, 동절기 시공시 콘크리트 구조체의 품질확보와 공기단축이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서, 1999
2. 日本建築學會, 寒中コンクリト施工指針・同解説, 1989
3. 洪悅郎, "RILEM 『寒中コンクリト施工指針』의附錄, Part I, II, III, IV", セメント・コンクリト, No.526~529, 1990.12~1991.3
4. Krylov, B. A., Cold Weather Concreting, CRC Press, 1998