



연직파이프쿨링 공법에 의한 매스콘크리트 온도균열 제어에 관한 해석적 연구

서태석¹⁾ · 조윤구¹⁾ · 이근주¹⁾ · 임창근^{1)*}

¹⁾현대건설 연구개발본부 첨단재료연구팀

Analytical Study on Thermal Cracking Control of Mass Concrete by Vertical Pipe Cooling Method

Tae-Seok Seo,¹⁾ Yun-Gu Cho,¹⁾ Kewn-Chu Lee,¹⁾ and Chang-Keun Lim^{1)*}

¹⁾Advanced Material R&D Team, Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin 446-719, Korea

ABSTRACT In this study, the vertical pipe cooling method was developed to propose the pipe cooling method suited for the vertically long mass concrete structures. FEM (finite element method) analysis was carried out to investigate the validity of the vertical pipe cooling method, and the temperature, the behavior of tensile stress of concrete and the crack index were investigated. In result, it was confirmed that the vertical pipe cooling method was effective in the thermal cracking control of mass concrete member.

Keywords : vertical pipe cooling method, mass concrete, FEM analysis, thermal cracking control

1. 서 론

콘크리트의 수화 반응에 의한 온도변화에 기인하는 균열(온도균열)은 매스콘크리트 구조물에 주로 발생하며, 이러한 균열은 콘크리트의 품질저하에 큰 영향을 미친다. 최근에 대규모 해양구조물, 장대교량, 발전소, 초고층 빌딩 등 토목, 건축 구조물이 대형화 되면서 부피가 큰 매스콘크리트의 온도균열이 문제가 되고 있다. 콘크리트가 경화하는 과정에서 온도변화에 의한 콘크리트의 팽창, 수축이 구속을 받게 되면 콘크리트 내에 응력이 발생하게 되고, 인장응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되면 균열이 발생하게 된다. 구속조건에는 내부구속과 외부구속으로 나눌 수 있으며, 내부구속에 의한 응력이 원인으로 발생한 균열은 콘크리트 표면에서 불규칙적으로 발생하고, 외부구속에 의한 응력이 원인으로 발생한 균열은 콘크리트 단면을 관통하는 특징이 있다.¹⁾

매스콘크리트의 온도균열을 방지하기 위해서는 콘크리트에 발생하는 수화열을 제어해야 하며, 재료적 대책으로는 시멘트 양의 저감, 시멘트 종류를 변경하는 방법이 있고, 시공적인 대책으로는 선행냉각법, 파이프쿨링(관로식냉각)법 등이 있다.²⁾ 선행냉각법은 배합수나 골

재, 시멘트 등의 사용재료를 냉각시키는 방법이고, 파이프쿨링법은 콘크리트 타설 전에 수평으로 파이프를 설치하고 냉각수를 통과시켜 내부에 발생하는 수화열을 낮추는 방법으로, 주로 중력식 댐 및 기초에 적용되는 방법이다. 하지만 이 공법은 수평으로 길고 넓은 부재에 적합하고, 벽식 매스구조물이나 교각과 같은 수직으로 긴 구조물에는 부적합한 공법이다.

따라서 이 연구에서는 수직으로 긴 매스 구조물에 적합한 파이프쿨링 공법을 제안하기 위하여 기존의 파이프쿨링 공법과는 달리 파이프를 수직으로 설치하는 연직파이프쿨링 공법을 개발하였다. 이 공법의 타당성을 검토하기 위하여 해석대상 부재의 형상(1×3×20 m, 4×4×4 m)을 달리하여 FEM(finite element method) 해석을 수행하였으며, 온도 및 응력 변화와 온도균열 지수 등을 검토하였다.

2. 연직 파이프쿨링 공법

2.1 개요

일반적인 파이프쿨링법은 콘크리트 타설 전에 수평으로 파이프를 설치하고 냉각수를 통과시키는 방법으로, 주로 중력식 댐 및 기초에 적용되는 방법이다. 하지만 이 공법은 수평으로 길고 넓은 부재에 적합하고, 벽식 매스구조물이나 교각과 같은 수직으로 긴 구조물에는 부적합하다. 따라서 이 연구에서는 수직으로 긴 구조물에 적합한 파이프쿨링 공법을 제안하기 위하여 Fig. 1과 같이 기

*Corresponding author E-mail : cklim@hdec.co.kr

Received July 8, 2013, Revised November 1, 2013,

Accepted November 13, 2013

©2014 by Korea Concrete Institute

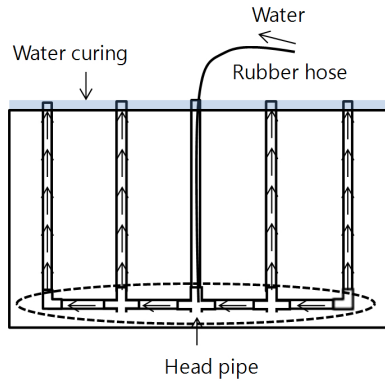


Fig. 1 Conceptual diagram of vertical pipe cooling

Table 1 Vertical pipe cooling method and horizontal pipe cooling method

Items	Vertical pipe cooling	Horizontal pipe cooling
Pipe placement	Vertically	Horizontally
Lift height	No limitation	1~2 m
Availability	Vertically long mass concrete	Horizontally large mass concrete
Outlet water	Reuse as curing water for concrete surface	Disuse

존의 파이프쿨링 공법과는 달리 수직으로 파이프를 설치하였으며, 각각의 파이프는 헤드관으로 연결되어 있는 것이 특징이다.

2.2 특징

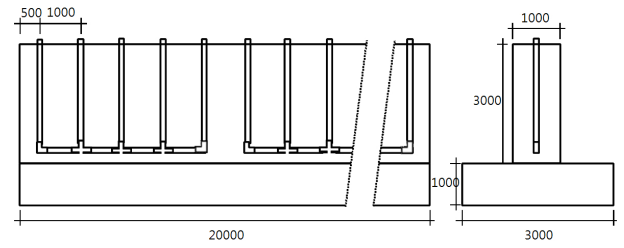
호스를 이용하여 콘크리트 내부로 공급된 냉각수는 콘크리트 내부의 수화열을 낮추고, 콘크리트 표면 위로 넘쳐 올라온 냉각수를 이용하여 담수양생을 실시함으로써, 온도균열의 제어 및 건조수축에 의한 균열제어 효과를 기대할 수 있다. Table 1에 연직 파이프쿨링 공법과 기존의 수평 파이프쿨링 공법을 비교하였다.

3. 해석방법 및 조건

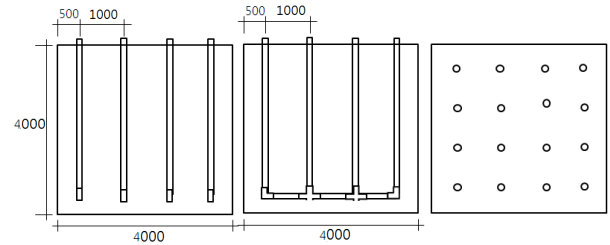
3.1 해석개요 및 해석대상 구조물

이 수화열 해석에는 유한요소 해석 프로그램인 DIANA를 이용하였다. 시간에 따른 콘크리트의 단열온도상승, 타설온도, 표면 열전달, 외기온 특성 등이 고려되어 콘크리트의 온도상승 및 강하속도를 예측할 수 있고, 구속특성 및 크리프의 영향을 고려한 탄성계수와 인장강도의 시간에 따른 변화를 고려하여 구조물에 발생한 인장응력 및 균열발생확률을 예측할 수 있다.

해석대상 구조물은 Fig. 2와 같으며, 파이프 배치 간격



(a) Wall type



(b) Cubic type

Fig. 2 Mass concrete members for analysis (unit: mm)

Table 2 Adiabatic properties

f_{28} (MPa)	Unit weight of cement (kg/m^3)	Equation (1)	
		K	α
40	380	54.8	1.4

은 1 m로 하여 해석을 실시하였다. 이 공법의 특징은 파이프를 수직으로 설치하여 타설 높이를 기존의 타설 높이보다 높게 할 수 있다는 특징이 있으므로, 해석대상 부재 높이를 3 m와 4 m로 하여 해석을 실시하였다.

3.2 해석상의 설정 조건

Table 2에 해석에 적용된 콘크리트의 단열온도 특성을 정리하였고, 콘크리트의 단열온도 상승특성은 식 (1)을 이용하였다. 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 정수 K 및 α 는 기존의 실험자료를 참고로 하였다. 콘크리트의 역학특성을 고려하기 위해서 시간에 따른 탄성계수(식 (2))와 압축강도(식 (3)) 예측식을 이용하였다. 균열발생 판정 기준이 되는 인장강도는 식 (4)를 이용하였다. 콘크리트 타설온도는 및 외기온도는 20°C 일정으로 하였고, 거푸집은 타설 후 7일에 탈형하는 것으로 설정하였다. Table 3에 콘크리트 표준시방서에 근거한 온도응력 해석조건을 정리하였고, 파이프쿨링 적용을 위한 해석조건을 Table 4에 정리하였다.²⁾

$$Q = K(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

$$E_c(t) = \phi 47000 \sqrt{f_c(t)} \quad (2)$$

$$f_c(t) = \frac{t}{4.5 + 0.95t} \times d_i \times f_{28} \quad (3)$$

Table 3 Analytical condition 1

Items	Concrete	Ground
Thermal expansion coefficient ($\mu/^\circ\text{C}$)	10	10
Thermal conductivity ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	2.70	3.45
Surface heat transfer coefficient (W/m^2)	with form	8
	without form	14
	Water curing	8
Specific heat ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)	1.155	0.795
Poisson's ratio	0.18	0.30
Creep reduction factor(ϕ)	Until 3 days : 0.73 Until 5 days : 1 3-5 days : Linear interpolation	-
Density (kg/m^3)	2300	2650
Young's modulus (MPa)	Equation (2)	30000
Ambient temperature ($^\circ\text{C}$)	20	

Table 4 Analytical condition 2

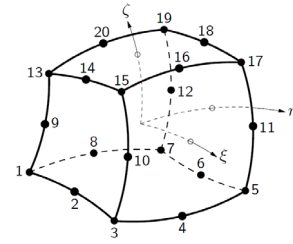
Items	Input data
Pipe external diameter (mm)	50
Cooling water inflow rate ($\text{L/min} \cdot \text{line}$)	3
Cooling water temperature ($^\circ\text{C}$)	15
Water flow convection coefficient ($\text{kJ}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}$)	33000 (steel pipe)
Water flow period	Until the concrete temperature reaches the maximum temperature

$$f_t(t) = 0.44 \sqrt{f_c(t)} \quad (4)$$

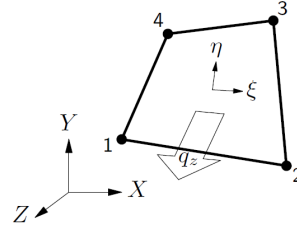
여기서, K 는 최종 단열온도 상승량($^\circ\text{C}$), α 는 온도상승속도에 관한 실험계수, ϕ 는 크리프 영향계수, d_i 는 재령 28일과 91일일 때의 콘크리트 강도 보정계수(1.11), f_{28} 은 재령 28일 에서의 콘크리트 압축강도(MPa), t 는 재령(일), $f_c(t)$ 는 재령 t 일 에서의 콘크리트 압축강도(MPa), $f_t(t)$ 는 재령 t 일에서의 콘크리트 인장강도(MPa)를 의미한다.

3.3 해석 모델링

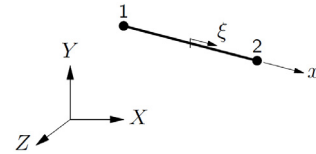
온도 및 응력 해석에서는 콘크리트, 지반, 열전달표면 및 쿨링파이프를 대상으로 모델링 하였다(Fig. 3). 콘크리트 및 지반에 대하여는 20절점 solid brick element로 모델링 하였고, 열전달표면 및 쿨링파이프에 대하여는 각각 4절점 quadrilateral element, 2절점 cooling pipe element로 모델링 하였다.



(a) 20-node solid brick element for concrete and rock

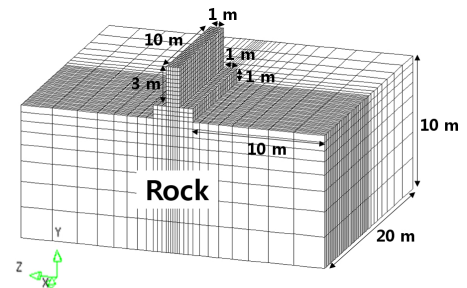


(b) 4-node quadrilateral element for boundary

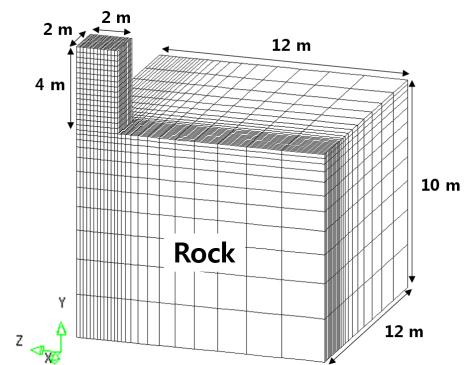


(c) 2-node cooling pipe element

Fig. 3 Element types



(a) Wall type



(b) Cubic type

Fig. 4 Models of finite elements

해석대상 구조물의 유한요소법에 의한 모델링은 Fig. 4와 같다. Wall type 구조물의 경우 기초슬래브는 이미 경화가 끝난 것으로 가정하였으며, 벽체 중심을 따라 배치된 쿨링파이프로 인하여 길이방향으로만 대칭인 1/2-model

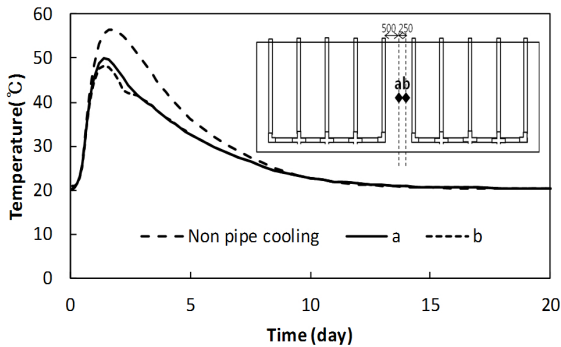
로 모델링하였다. Cubic type 구조물의 경우 쿨링파이프가 x 및 z 방향에 대하여 대칭으로 배치되었으므로 1/4-model로 모델링 하였다.

지반(rock)의 하단부 연속면에 xyz 방향으로 모두 구속을 주었고, 지반의 측면 연속면에는 각각 연속되는 방향으로 x 또는 z 방향의 구속을 주었다. 또한 콘크리트 표면과 지반의 상부표면은 열전달표면으로 설정하여 외기 대류계수와 외기온도의 영향을 받을 수 있도록 하였으며, 지반의 하단부 연속면과 측면 연속면은 고정온도 20°C로 설정하였다.

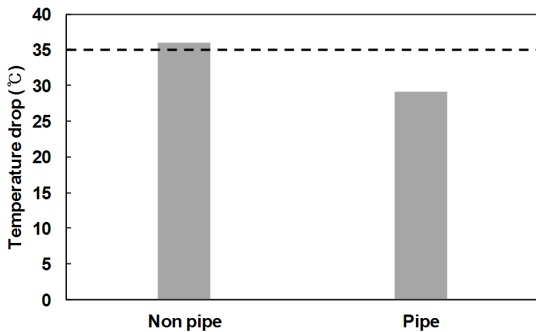
4. 해석 결과 및 분석

4.1 온도 변화

Fig. 5에 wall type 구조물에 대한 콘크리트 온도변화를 나타내었다. 파이프쿨링을 실시한 콘크리트의 중심부 최고온도(Fig. 5(a))는 파이프쿨링을 실시하지 않은 콘크리트의 중심부 최고온도보다 6°C 정도 낮게 나타났으며, 파이프에서 500 mm 떨어진 위치에서의 온도 a와 250 mm 떨어진 위치에서의 온도 b는 차이가 1°C 정도로 거의 같은 온도변화를 나타내었다. Fig. 5(b)에 중심부 온도 최고치에서부터의 온도하강량을 나타내었다. 방향성이 큰 벽식 매스콘크리트의 경우 온도하강에 의한 콘크리트의 수축이 외부구속을 받게 되어 균열이 발생할 가능성이 높다. 따라서 이러한 부재의 경우에는 온도하강량을 작게 제어하는 것이 중요하며, 일본콘크리트공학협회(JCI)^{3,4)}에

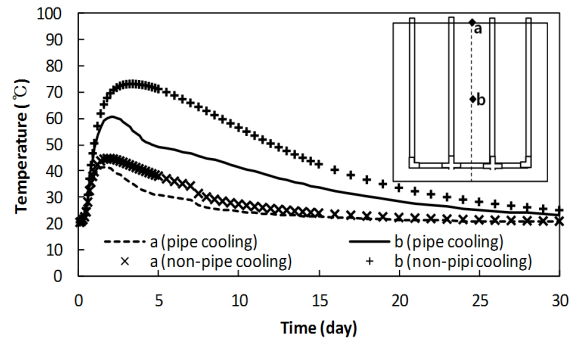


(a) Temperature histories

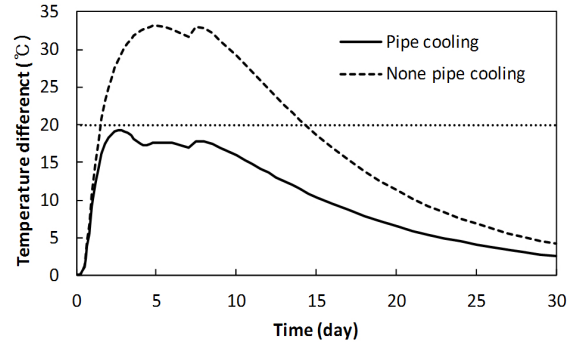


(b) Drop of temperature

Fig. 5 Wall type specimen



(a) Temperature histories



(b) Internal-external temperature difference

Fig. 6 Cubic type specimen

서는 온도하강량을 35°C 이하로 제어할 것을 권장하고 있다. 파이프쿨링을 실시하지 않은 콘크리트의 온도하강량은 36°C로서 JCI 권장값을 상회하는 것으로 나타났고, 파이프쿨링을 실시한 콘크리트는 29°C로서 JCI 권장값보다 6°C 낮은 것으로 나타났다.

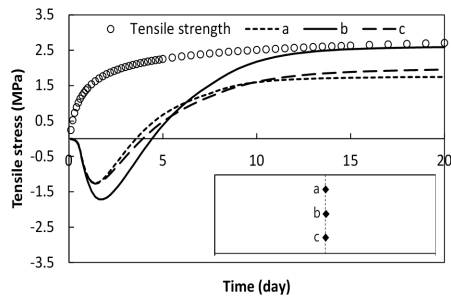
Fig. 6에 cubic type 구조물에 대한 콘크리트 온도변화를 나타내었다. 파이프쿨링을 실시한 콘크리트의 중심부 최고온도(Fig. 6(a))는 파이프쿨링을 실시하지 않은 콘크리트의 중심부 최고온도보다 12°C 정도 낮게 나타났다. Fig. 6(b)에 내외부 온도차(b-a)를 나타내었다. 여기에서 외부온도는 콘크리트 표면 온도로 하였다. 방향성이 크지 않은 매스콘크리트의 경우에는 내외부 온도차에 의해서 콘크리트 표면부에 인장응력이 발생하여 균열이 발생할 가능성이 높다. 따라서 내외부 온도차를 작게 제어하는 것이 중요하며, BS code⁵⁾에서는 내/외부 온도차를 20°C 이하로 규정하고 있다. 파이프쿨링을 실시하지 않은 콘크리트의 내외부 온도차는 33°C로서 BS 기준을 크게 상회하는 것으로 나타났고, 파이프쿨링을 실시한 콘크리트는 BS기준을 만족하는 것으로 나타났다.

4.2 응력변화

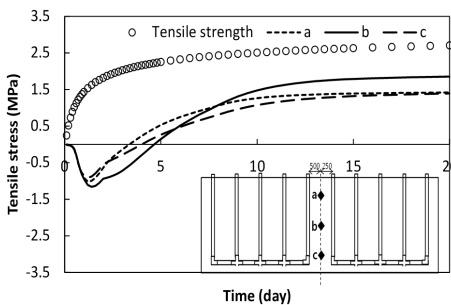
Fig. 7에 wall type 구조물의 응력거동을 나타내었다. 온도가 최고치에 도달할 때까지는 콘크리트 내부에 압축 응력이 발생하고 온도 최고치 이후부터는 콘크리트 수축의 구속작용에 의해 인장응력이 발생하는 외부구속형 응력거동을 나타내었다. 부재의 중심부 b에서 최대 인장응

력이 발생하였고, 파이프쿨링을 실시하지 않은 시험체의 경우 부재 중심부에서 인장응력이 재령 12일 경에 인장강도(식 (4))에 도달하는 것으로 나타났다. 하지만, 파이프쿨링을 실시한 시험체의 경우에는 인장응력이 40% 정도 감소하여 인장강도에 도달하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8에 cubic type 구조물의 응력거동을 나타내었다. 부재 내부의 응력거동(b, c)은 외부구속형 거동을 나타내었지만 그 영향이 매우 작았으며, 전반적으로 온도가 최

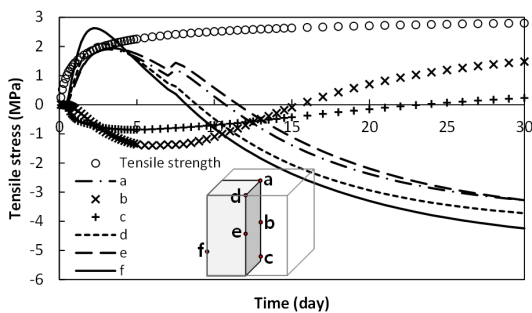


(a) Non pipe cooling

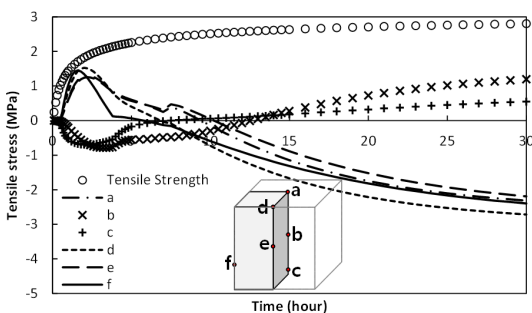


(b) Pipe cooling

Fig. 7 Behavior of tensile stress (wall type)



(a) Non pipe cooling



(b) Pipe cooling

Fig. 8 Behavior of tensile stress (cubic type)

고치에 도달할 때까지 내외부 온도차에 의하여 콘크리트 표면부에 인장응력이 발생하고 온도 최고치 이후부터는 압축응력이 발생하는 내부구속형 응력 거동을 나타내었다. 파이프쿨링을 실시하지 않을 경우 인장응력이 인장강도를 크게 상회하는 것으로 나타났지만, 파이프쿨링의 실시로 인하여, 인장응력이 최대 46% 정도 까지 감소하였다.

4.3 균열지수

매스콘크리트의 온도균열 발생에 대한 검토는 온도균열 지수(식 (5))를 산정하여 그 값으로 평가하는 것을 원칙으로 하고 있다.^{2,6)}

$$I_{cr}(t) = f_{sp}(t) / f_t(t) \quad (5)$$

여기서, $f_{sp}(t)$ 는 재령 t 일에서 콘크리트의 인장강도(MPa)이고, $f_t(t)$ 는 재령 t 일에서의 인장응력을 의미한다. 온도균

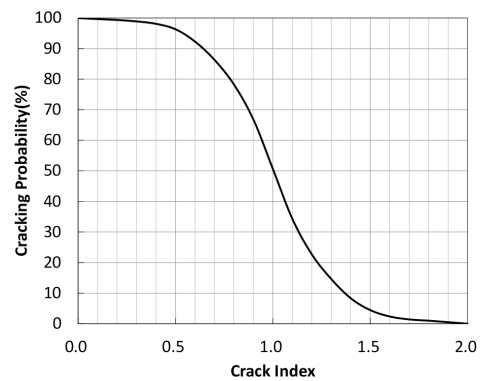
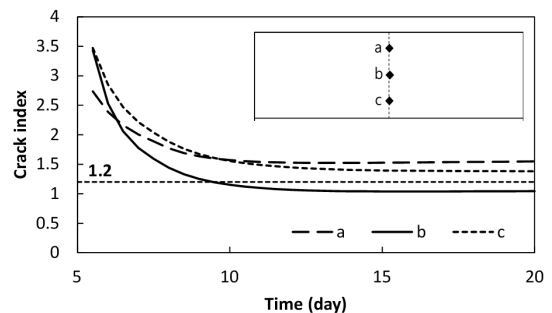
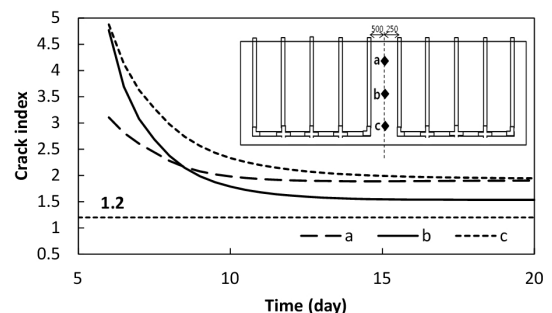


Fig. 9 Crack index vs cracking probability²⁾

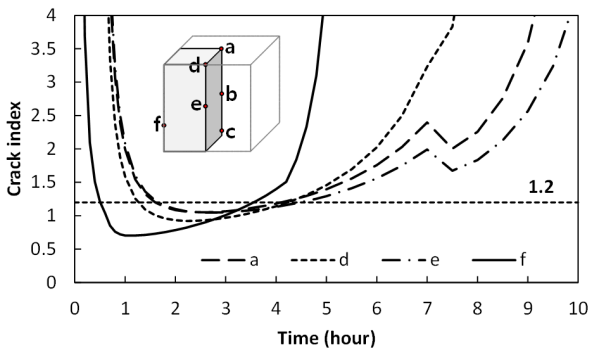


(a) Non pipe cooling

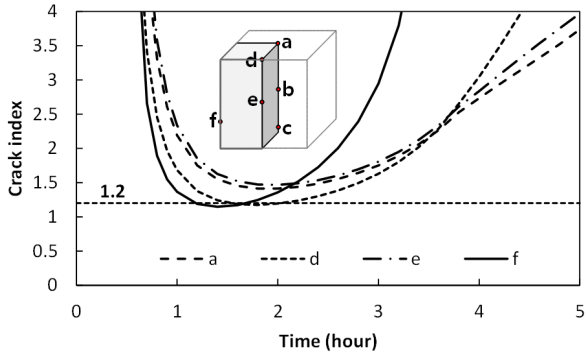


(b) Pipe cooling

Fig. 10 Crack index (wall type)



(a) Non pipe cooling



(b) Pipe cooling

Fig. 11 Crack index (cubic type)

열지수는 구조물의 중요도, 환경조건 등에 대응할 수 있도록 산정해야 하며, 온도균열지수를 통하여 대략적인 균열발생 확률²⁾을 예측할 수 있다(Fig. 9).

Fig. 10에 wall type 구조물의 균열지수를 나타내었다. 파이프쿨링 공법을 적용하지 않은 시험체의 경우, 최소 균열지수가 1.0으로 균열발생확률이 50%인 것으로 나타났고, 파이프쿨링 공법을 적용했을 경우, 균열지수가 1.5로 균열제어에 효과가 있는 것으로 나타났다. Fig. 11에 cubic type 구조물의 균열지수를 나타내었다. 파이프쿨링을 적용하지 않을 경우, 균열지수 최소값이 0.7로 균열발생확률이 85% 이상인 것으로 나타났지만, 파이프쿨링을 적용했을 경우, 균열지수 최소값이 1.15로 온도균열 제어에 효과가 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 연구에서는 수직으로 긴 매스 구조물에 적합한 파이프쿨링 공법을 제안하기 위하여 연직파이프쿨링 공법

을 개발하였고, 타당성을 검토하기 위하여 wall type 구조물과 cubic type 구조물을 대상으로 하여 FEM 해석을 수행하였으며, 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) Wall type 구조물의 경우, 파이프쿨링을 실시한 콘크리트의 중심부 최고온도는 파이프쿨링을 실시하지 않은 콘크리트의 중심부 최고온도보다 6°C 정도 낮게 나타났으며, 콘크리트의 온도하강량은 29°C로 JCI 권장값보다 6°C 낮은 것으로 나타났다.
- 2) Cubic type 구조물의 경우, 파이프쿨링을 실시한 콘크리트의 중심부 최고온도는 파이프쿨링을 실시하지 않은 콘크리트의 중심부 최고온도보다 12°C 정도 낮게 나타났고, 내외부 온도차 규정(20°C 미만)을 만족하는 것으로 나타났다.
- 3) Wall type 구조물에서, 파이프쿨링 공법을 적용하지 않은 시험체의 경우, 최소 균열지수가 1.0으로 균열발생확률이 50%인 것으로 나타났고, 파이프쿨링 공법을 적용했을 경우, 균열지수가 1.5로 균열제어에 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 4) Cubic type 구조물에서, 파이프쿨링을 적용하지 않을 경우, 균열지수 최소값이 0.7로 균열발생확률이 85% 이상인 것으로 나타났지만, 파이프쿨링을 적용했을 경우, 균열지수 최소값이 1.15로 온도균열 제어에 효과가 있는 것으로 나타났다.

References

1. EUGENECOP., *Massive Ocean Concrete Design Guide Book*, EUGENECOP Institute of Technology, 2010, pp. 16-17.
2. KCI, *Concrete Standard Specification*, Korea Concrete Institute, 2009, pp. 363-368.
3. Report of Committee, "Research Committee on Cracking Control of Mass Concrete," *Proceedings of Japan Concrete Institute*, Vol. 28, No. 1, 2006, pp 13-22.
4. Tatsuki, S., Ishibashi, T., Furuyama, S., and Oba, M., "Study on the Temperature Crack Concrete of Box Rigid Frame Structure," *Proceedings of JSCE*, No. 739, 2003, pp. 265-272.
5. BS 8110-2, *Structural Use of Concrete-part 1: Code of Practice for Special Circumstances*, British Standard, 1985, 23 pp.
6. JSCE, *Specification for Design and Construction of Concrete Structures (Construction Part)-Mass Concrete*, Japan Society of Civil Engineers, 1996, pp. 173-193.

요약 이 연구에서는 수직으로 긴 매스 구조물에 적합한 파이프쿨링 공법을 제안하기 위하여 기존의 파이프쿨링 공법과는 달리 파이프를 수직으로 설치하는 연직파이프쿨링 공법을 개발하였다. 타당성을 검토하기 위하여 해석대상 부재의 형상(1×3×20 m, 4×4×4 m)을 대상으로 하여 FEM 해석을 수행하였으며, 온도 및 응력 변화와 온도균열 지수 등을 검토하였다. 그 결과, 매스콘크리트 구조물의 온도균열 제어에 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 연직파이프쿨링, 매스콘크리트, FEM 해석, 온도균열 제어