

인산계 무기염을 이용한 콘크리트의 수화 발열 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Hydration Heat of Concrete Using Phosphate based Inorganic Salt

정 석 만^{1,2} 김 세 환² 양 완 희² 김 영 선³ 기 전 도³ 이 건 철^{4*}

Jeong, Seok-Man^{1,2} Kim, Se-Hwan² Yang, Wan-Hee² Kim, Young-Sun³ Ki, Jun-Do³ Lee, Gun-Cheol^{4*}
*Doctoral course, Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea*¹
*Researcher, R&D CENTER, WITHMTECH Co., Ltd, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16367, Korea*²
*Researcher, Research & Development Institute, LOTTE Engineering & Construction, Seoul, 06527, Korea*³
*Professor, Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea*⁴

Abstract

Whereas the control of the hydration heat in mass concrete has been important as the concrete structures enlarge, many conventional strategies show some limitations in their effectiveness and practicality. Therefore, In this study, as a solution of controlling the heat of hydration of mass concrete, a method to reduce the heat of hydration by controlling the hardening of cement was examined. The reduction of the hydration heat by the developed Phosphate Inorganic Salt was basically verified in the insulated boxes filled with binder paste or concrete mixture. That is, the effects of the Phosphate Inorganic Salt on the hydration heat, flow or slump, and compressive strength were analyzed in binary and ternary blended cement which is generally used for low heat. As a result, the internal maximum temperature rise induced by the hydration heat was decreased by 9.5~10.6% and 10.1~11.7% for binder paste and concrete mixed with the Phosphate Inorganic Salt, respectively. Besides, the delay of the time corresponding to the peak temperature was apparently observed, which is beneficial to the emission of the internal hydration heat in real structures. The Phosphate Inorganic Salt that was developed and verified by a series of the aforementioned experiments showed better performance than the existing ones in terms of the control of the hydration heat and other performance. It can be used for the purpose of hydration heat of mass concrete in the future.

Keywords : mass concrete, heat of hydration in concrete, hydration of cement, retarding admixture

1. 서 론

최근 사회기반시설의 대형화 추세에 따라 매스 콘크리트의

수화열 제어에 대한 중요성이 더욱 커지고 있으며, 지금까지 수화열 및 이에 의해 유발되는 온도균열을 저감하기 위하여 다양한 방법들이 적용되어 왔다. 예를 들어 콘크리트 배합의 개선, 파이프쿨링, 프리쿨링, 분할타설, 보온 양생, 스템 등을 이용한 외기온도 조절 등이 있다[1]. 콘크리트 배합개선의 경우 강도 요건이 충족되는 범위에서 단위시멘트량 저감, 2종 중용열 시멘트 또는 4종 저열 시멘트의 사용, 플라이애시 혼입(2성분계 배합) 또는 플라이애시와 고로슬래그의 동시 혼입(3 성분계 배합) 등으로 세분화될 수 있다. 하지만 지역별로 배합

Received : October 12, 2020

Revision received : December 1, 2020

Accepted : December 4, 2020

* Corresponding author : Lee, Gun-Cheol

[Tel: 82-43-841-5207, E-mail: gcleee@ut.ac.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

이나 결합재 비율이 다르고, 각 원재료 품질변동으로 콘크리트 품질이 불균질하며, 온도 응력으로 균열 발생이 증가하는 등의 문제가 발생하고 있다[2]. 최근 국내에서는 재료적인 대책으로 기존의 통상적인 방식과 차별화되는 방안도 시도된 바 있는데, 예를 들어 수화열 저감을 위한 초 지연제의 응결시간 차를 이용하는 방법[3], 잠열재를 활용하는 방법[4] 등이 연구되어 왔으며, 해외의 경우 지연제 및 촉진제를 활용하여 시멘트의 수화 발열을 제어하고자 한 연구사례도 보고되고 있다[5,6]. 따라서 본 연구에서는 해외 연구사례를 참고하여 지연제 및 촉진제를 활용한 인산염 기반의 무기 지연제가 콘크리트 수화 발열에 미치는 영향을 검토하고자 일련의 실험을 실시하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합표는 Table 2~3과 같다. 인산염 기반 무기 지연제를 이용하여 콘크리트 수화발열에 미치는 영향을 검토하기 위해 시멘트 페이스트와 콘크리트로 각각 실험을 진행하였다. 통상적으로 수화열 저감이 요구되는 매스 콘크리트에서는 배합 측면의 대책으로 보통 포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement 이하: OPC)만 사용하기 보다는 플라이애시(Fly Ash 이하: FA)나 고로슬래그(Blast Furnace Slag 이하: BFS)와 같은 혼화재를 혼입하는 경우가 많다. 즉, 이러한 혼화재로 원래 시멘트량의 일부를 대체함으로써 수화 발열을 저감 시키는 것이다. 이처럼 국내 실정에서 시멘트보다 저렴한 산업부산물인 플라이애시 및 고로슬래그를 사용하면 저열시멘트 또는 중용열시멘트보다 경제적이므로 선호되고 있다. 따라서, 페이스트 배합시험도 Table 1과 같이 2성분계(보통포틀랜드시멘트:플라이애시=7:3) 및 3성분계(보통포틀랜드시멘트:고로슬래그:플라이애시=5:3:2)로 구성하였으며, 수화열 저감과 더불어 강도, 작업성 등 기타 물성 측면에서도 적절하다고 알려져 있는 혼합 비율을 선택하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 2성분계 및 3성분계 각각에 있어 수화열 저감제의 혼입 유무를 변수로 설정하였다. 이 연구에서는 수화 제어물질이 첨가되었으므로 이를 통틀어 “인산계 무기염”(Phosphate Based Inorganic Salt 이하: PIS)으로 표현하였으며, 그 최적 혼입량은 사전실험을 거쳐 결합재량의 5%로 결정되었다. 그 외 물시멘트비, 잔골재율, 고성능감수제의 혼입율은 사전실험에서 적절한 작업성 및 강도가 확보되었던 범위에서 선정하였다.

Table 1. Experimental plan

Factor		Levels		
Experiment of Paste	Mixture	Binder	2	OPC:FA(7:3) OPC:BFS:FA(5:3:2)
		PIS ^{*)} (%)	2	0, 5
		Fresh state	1	Flow (mm)
	Test item	Hardened state	2	Compressive strength (3, 7, 28 days)
				Heat of hydration(°C)
Experiment of Concrete	Mixture	Binder	2	OPC:FA(7:3) OPC:BFS:FA(5:3:2)
		PIS ^{*)} (%)	2	0, 5
		Admix(%)	1	1.0
	Test item	Fresh state	1	Slump (mm) Air (%)
				Compressive strength (3, 7, 28 days)

*) PIS: Phosphate Based Inorganic Salt

Table 2. Binder Mix proportion for paste

	W/B (%)	Binder(%)				PIS (B/%)	
		OPC	BFS	FA	Sum		
Binary blended cement	Plain	36	70	-	30	100	-
	PIS	36	70	-	30	100	5
Ternary blended cement	Plain	36	50	30	20	100	-
	PIS	36	50	30	20	100	5

Table 3. Mix proportion of concrete

	W/B (%)	S/a (%)	Weight for unit volume: kg/m ³									
			W	Binder(%)				S	G	PIS Ad.		
				OPC	BFS	FA	Sum					
Binary blended cement	Plain	37	45	163	308	-	132	440	785	890	-	4.4
	PIS	37	45	163	308	-	132	440	785	890	22	4.4
Ternary blended cement	Plain	37	45	163	220	132	88	440	785	890	-	4.4
	PIS	37	45	163	220	132	88	440	785	890	22	4.4

2.2 실험재료

시멘트는 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,615cm²/g의 1종보 통포틀랜드시멘트, 혼화재는 밀도 2.91g/cm³, 분말도 4,415 cm²/g의 2종 고로슬래그와 밀도 2.24g/cm³, 분말도 3,410 cm²/g의 2종 플라이애시를 사용했다. 본 연구에서 사용된 인산염 기반 무기 지연제는, Figure 1과 같이 회백색의 분

Table 4. Physical properties of phosphate based inorganic salt

	Shape	Color	Density (g/cm ³)	Particle Size(mm)	water Content (%)
PIS	Powder	Dark White	2.37±0.1	< 0.15	< 0.5

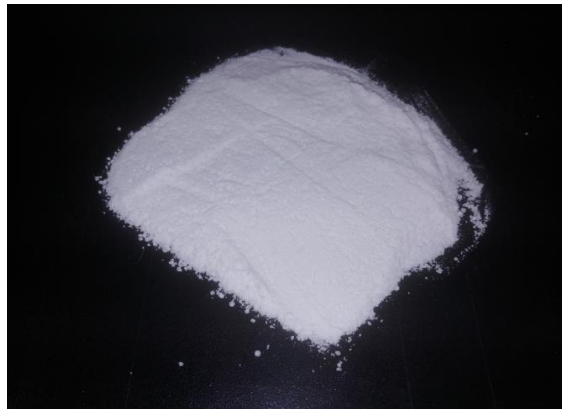


Figure 1. Phosphate based inorganic salt

말형이며, 물리적 특성은 Table 4와 같다. 인산계 무기염 (Phosphate Based Inorganic Salt)은 시멘트의 경화 지연을 위한 Sodium Tripolyphosphate($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$)와 강도 저하를 보완하기 위한 알칼리 황산염 (alkali sulfate: R_2SO_4)을 기반으로 한 제품(국내 W사)을 사용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 시멘트 페이스트

시멘트 페이스트의 물성 확인을 위해 KS L 5105에 따른 플로 시험 및 KS L ISO 679에 의한 압축강도 시험을 실시하였다. 결합재와 물의 혼합 방법은 KS L ISO 679에 따랐다. KS L 5105에는 소정의 테이블 낙하 거리 및 횟수에 따른 페이스트 지름으로 플로를 측정하도록 되어있어 규격에 근거하여 실험을 실시하였다[8,9]. 각 배합의 수화 발열 경향 파악을 위하여 Figure 2~3과 같이 실험을 진행하였고, Figure 4와 같이 한 변 길이 410mm의 정육면체 형상을 가진 스티로폼 단열박스(70L)를 사용하였다. 스티로폼의 두께는 25mm이며, 중심부에 열전대(Thermocouple Wire, TX-F JIS)를 설치 후 Data Logger(10 Channel, GL220-HHOCH)를 사용하여 10분 간격으로 간이 단열 온도 측정을 진행하였다.



(a) Mixing

(b) Insulation box

Figure 2. Set up for experiment



(a) Pouring

(b) Measurement

Figure 3. Simple adiabatic temperature measurement in concrete

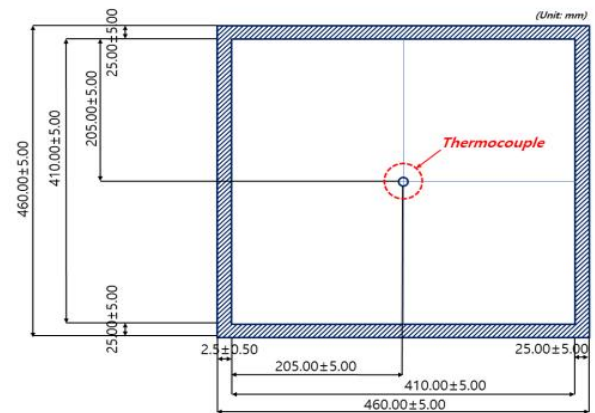


Figure 4. Dimension of Insulation box

2.3.2 콘크리트

슬럼프는 KS F 2402, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 측정하였고[11,12], KS F 2403 규정에 의거하여 지름 100mm, 높이 200mm의 공시체를 제작하여 양생 후 KS F 2405에 의거하여 재령 별 압축강도를 측정하였다[10,13]. 각 배합의 수화 발열 측정은 Figure 4와 같이 25mm의 두께와 한 변 길이 410mm의 정육면체 형상을 가진 스티로폼 단열박스 (70L)를 사용하여 페이스트와 동일한 조건으로 진행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시멘트 페이스트

시멘트 페이스트의 배합실험 결과는 다음과 같다. 플로 시험 결과 2성분계 배합에서는 수화열 저감제 무 혼입의 경우 210mm, 있는 경우 225mm로 측정되었고, 3성분계 배합에서는 그 값이 각각 215mm, 230mm로 나타났다. 즉, 인산계 무기염 혼입으로 인해 2성분계 및 3성분계 페이스트 배합의 플로값이 15mm 정도 증가하였으므로 유동성이 오히려 향상되었다. 재령에 따른 압축강도 측정결과는 Table 5와 같으며, 3일, 7일 및 28일 재령 모두 인산계 무기염 혼입에 따라 페이스트의 압축강도가 감소하는 경향을 보였다.

Table 5. Compressive strength of paste

		Compressive strength(MPa)		
		3 Days	7 Days	28 Days
Binary blended cement	Plain	29.0	37.0	54.7
	PIS	23.3	30.6	48.4
Ternary blended cement	Plain	27.7	35.8	53.2
	PIS	21.2	30.9	49.0

하지만 강도 감소율은 재령이 경과 함에 따라 줄어들었으며, 28일 재령에서의 감소율은 2성분계 배합의 경우 11.5%, 3성분계 배합은 7.9%였다. 페이스트 간이 단열 온도 측정결과로는 Figure 5~6과 같이 나타내었다. 2성분계 및 3성분계 배합 모두에 있어서 인산계 무기염 사용에 따른 수화 발열 지연 및 최고온도 저감 효과가 있음을 보여주고 있다. 수화 발열 특성의 공정한 비교를 위해서는 타설 시 배합들의 온도(이하 타설온도)를 동일하게 조절하는 것이 바람직하다. 이는 콘크리트표준시방서(KCI 2009)의 단열온도상승 근사식[7]에 나타나 있듯 타설온도가 최종단열온도상승량 및 온도상승 속도에 영향을 미치기 때문이다. 그러한 이유로 이 연구에서도 타설 온도를 동일하게 맞추기 위해 노력하였으나, 2성분계에서는 2.3℃, 3성분계에서는 4.2℃의 타설온도 차이가 발생하였다. 하지만 이 정도 차이는 무시할 만한 수준으로 판단하였다. 2성분계 배합에서는 인산계 무기염이 혼입되지 않은 경우 11.4시간에 97.8℃에 도달하여 타설 온도부터 74.7℃ 상승하였다. 인산계 무기염 혼입으로 인해 최고온도 및 온도상승량이 각각 88.5℃ 및 67.7℃로 저감 됨과 동시에 최고 온도 도달 시점도 17.9시간으로 지연되었다. 즉, 연구된 인산

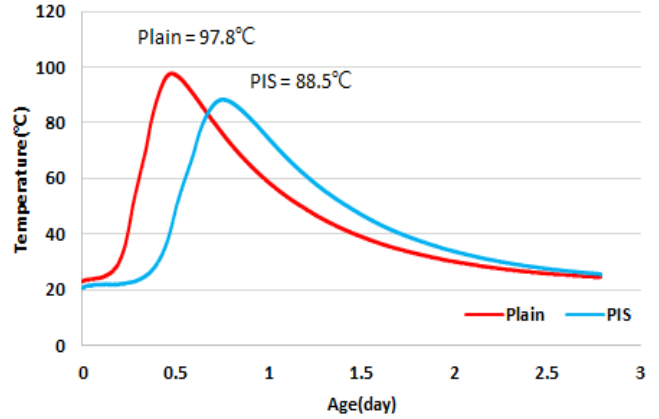


Figure 5. Simple adiabatic temperature measurement of binary cement

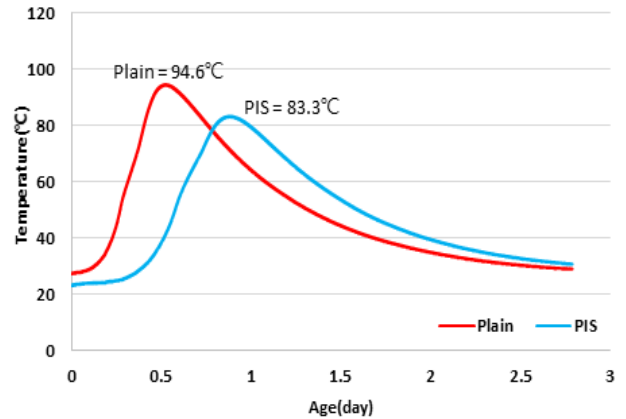


Figure 6. Simple adiabatic temperature measurement of ternary cement

계 무기염의 온도상승량 저감율은 9.5%, 최고온도 발생 지연은 6.5시간으로 나타났다. 한편 3성분계 배합에서는 인산계 무기염 미 혼입 시 12.4시간에 94.6℃의 최고온도(온도상승량 67.1 ℃)에 도달하였고, 인산계 무기염 혼입 시 20.8시간에 83.3℃의 최고온도(온도상승량 60 ℃)에 도달하였다. 따라서 온도상승량 저감율은 10.6%였으며, 최고온도 도달 시간은 8.4시간이 지연되었다. 따라서 페이스트 단계에서는 2성분계 배합과 비교할 때 3성분계 배합에서 인산계 무기염의 최고온도 저감 및 수화 발열 지연 효과가 더욱 뚜렷하게 나타나는 특징이 관찰되었다.

3.2 콘크리트

콘크리트 배합실험 결과는 다음과 같다. 슬럼프 시험 결과 인산계 무기염의 혼입에 의해 2성분계 배합에서는 슬럼프가 180mm에서 200mm로, 3성분계에서는 185mm에서 205

mm로 증가하여 유동성 향상 효과가 있었다. 이는 인산계 무기염의 높은 분말도의 영향으로 판단된다. 공기량의 경우 인산계 무기염의 혼입 전 공기량은 2성분계 및 3성분계에서 각각 4.3% 및 4.6%였으나, 혼입 후 각각 4.1% 및 4.0%로 미소하게 감소하였다. 한편, 재령에 따른 압축강도 측정결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Compressive strength of concrete

		Compressive strength(MPa)		
		3 Days	7 Days	28 Days
Binary blended cement	Plain	13.2	19.3	32.8
	PIS	10.8	18.7	34.6
Ternary blended cement	Plain	14.3	22.1	35.1
	PIS	12.3	22.4	38.2

특이사항으로 인산계 무기염의 혼입에 따라 3일 재령에서는 압축강도가 감소했으나, 7일 재령에서 유사한 수준으로 회복되었고, 28일 재령에서는 강도 경향이 역전되어 인산계 무기염의 미 혼입 배합보다 더 큰 압축강도가 발현되었다. 28일에서의 강도 증가량은 2성분계 및 3성분계에서 각각 5.5% 및 8.8%였다. 콘크리트 간이 단열 온도 측정결과로는 Figure 7~8과 같이 나타내었다. 2성분계 및 3성분계 배합 모두 인산계 무기염 사용 결과 수화 발열 지연 및 최고온도 저감 효과가 나타났다. 2성분계 배합의 경우 인산계 무기염의 미 혼입 시 10.3시간에 최고온도 59.4℃(온도상승량 33.2℃)에 도달하였다. 반면 인산계 무기염의 혼입 시에는 14.3시간에 54.3℃(온도상승량 29.3℃)에 도달하였으므로, 온도상승량 저감을 11.7%, 최고온도 발생 시점 4시간 지연 효과가 있었다. 한편 3성분계 배합에서는 인산계 무기염의 미 혼입 시 10.3시간에서 60℃의 최고온도(온도상승량 32.7℃)에 도달하였고, 인산계 무기염의 혼입 시 15.4시간에 최고온도 55.2℃(온도상승량 29.4℃)에 도달하였다. 따라서, 인산계 무기염의 효과로 온도 상승량은 10.1% 저감되었고, 최고온도 시점이 5.1시간 지연되었다. 따라서 콘크리트 배합의 경우 페이스트 배합과는 다르게 3성분계보다 2성분계의 최고온도 저감 효과가 약간 더 컸으나, 지연 효과는 페이스트 배합과 마찬가지로 3성분계에서 좀 더 크게 나타났다.

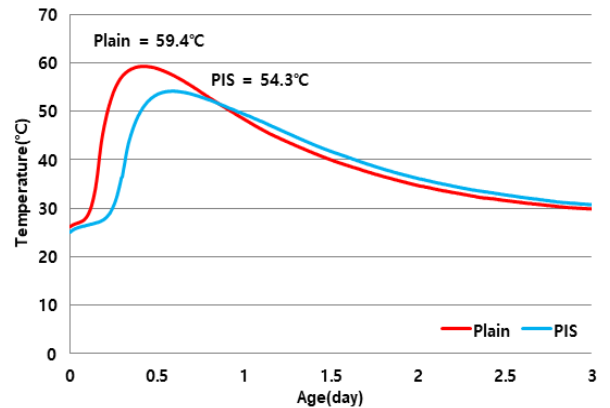


Figure 7. Simple adiabatic temperature measurement of binary cement

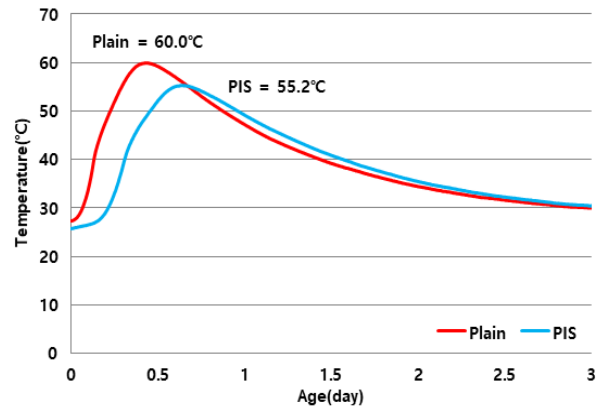


Figure 8. Simple adiabatic temperature measurement of ternary cement

4. 결 론

본 연구에서는 인산계 무기염이 콘크리트 수화 발열에 미치는 영향을 검토하고자 일련의 실험을 실시하였다. 인산계 무기염은 시멘트의 경화 지연을 위한 Sodium Tripolyphosphate ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$)와 강도 저하를 보완하기 위한 알칼리 황산염 (alkali sulfate: R_2SO_4)을 기반으로 한 제품(국내 W사)을 사용하였다. 콘크리트의 저발열을 위해 통상적으로 사용되는 2성분계 및 3성분계 배합에 있어서 인산계 무기염의 여부에 따른 수화열, 플로 또는 슬럼프, 공기량, 압축강도 등을 비교하였다.

- 1) 페이스트와 콘크리트의 압축강도 성능에 있어서 인산계 무기염의 혼입 배합은 일반 배합과 동등 또는 그 이상의 성능을 나타내었다. 특히, 콘크리트 배합에서 인산계 무기염에 의해 초기 재령 강도가 저하되었던 점이 알칼리

황산염에 의해 빠르게 회복되었고, 인산계 무기염의 혼입 배합의 강도는 미 혼입 배합과 비교할 때 7일은 유사, 28일은 더 크게 측정되었다.

- 2) 페이스트와 콘크리트의 수화열 저감 성능에 있어서 페이스트의 수화열에 의한 내부 최대 온도상승량의 경우 인산계 무기염의 혼입 시 9.5~10.6%의 저감 효과를 보여주었고, 콘크리트의 수화열에 의한 내부 최대 온도상승량의 경우 인산계 무기염의 혼입 시 10.1~11.7%의 저감 효과를 보여주었다. 따라서 3성분계 배합에서 인산계 무기염의 최고온도 저감 및 수화 발열 지연 효과가 뚜렷하게 나타나는 특징이 확인되었다. 또한, 실 구조물의 내부 수화열 발산에 유리한 최고온도 발생 시점의 지연 효과도 뚜렷이 나타났다.
- 3) 이를 종합해 보면 인산계 무기염의 혼입으로 페이스트와 콘크리트의 수화열 저감에 상당 부분 기여 하는 것으로 판단된다. 향후 서중 콘크리트 혹은 고온다습한 동남아시아 등의 공사현장에서 매스 콘크리트 수화열 저감의 목적으로 활용이 가능할 것으로 판단되며, 앞으로도 본 연구와 같은 다양한 콘크리트의 수화열 저감과 관련된 연구가 필요하다고 사료된다.

요 약

콘크리트 구조물의 대형화에 따라 매스 콘크리트의 수화열 제어에 대한 중요성이 커지는 반면, 기존의 관련 대책들은 효용성이나 실용성 측면에서 한계를 보이는 경우가 많다. 따라서 이 연구에서는 재료적인 대책으로 매스 콘크리트의 수화열을 제어하기 위해 시멘트의 경화를 제어하는 방향으로 수화열을 저감할 수 있는 방안을 검토하였다. 본 연구에서는 해외 연구사례를 참고하여 인산염계 지연제와 무기질 수화 제어물질이 결합된 인산계 무기염 수화열 저감제를 사용하였으며, 이에 따라 인산계 무기염의 수화열 저감 효과는 단열박스에 페이스트와 콘크리트를 적용하여 검증하였다. 즉, 저발열을 위해 통상적으로 사용되는 2성분계 및 3성분계 배합에 있어서 인산계 무기염의 혼입 여부에 따른 수화열, 플로 또는 슬럼프, 압축강도 등을 비교하였다. 실험결과 페이스트와 콘크리트의 압축강도 성능에 있어서 인산계 무기염의 혼입 배합은 일반 배합과 동등 또는 그 이상의 성능을 나타내었다. 특히, 콘크리트 배합에서 인산계 무기염에 의해 초기 재령 강도가

저하되었던 부분이 알칼리 황산염에 의해 빠르게 회복되었고, 인산계 무기염의 혼입 배합의 강도는 미 혼입 배합과 비교할 때 7일은 유사, 28일은 더 크게 측정되었다. 수화열에 의한 내부 최대 온도상승량의 경우 인산염계 무기 지연제 혼입 시 페이스트에서는 9.5~10.6%, 콘크리트에서는 10.1~11.7%의 저감 효과를 나타내었다. 또한 실 구조물 내부의 수화열 발산에 유리한 최고온도 발생 시점의 지연 효과도 뚜렷이 나타났다. 따라서 본 연구에서 사용된 인산계 무기염은 시멘트 페이스트와 콘크리트의 수화열 저감에 상당 부분 기여 하는 것으로 확인되며, 앞으로 서중 콘크리트 혹은 고온다습한 동남아시아 등의 공사현장에서 매스 콘크리트 수화열 저감의 목적으로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구와 같은 다양한 콘크리트의 수화열 저감과 관련된 연구가 필요하다고 사료된다.

키워드 : 매스콘크리트, 콘크리트 수화열, 시멘트 수화, 지연제

Funding

Not applicable

Acknowledgement

This research was supported by a grant from National Land Transportation Technology Project by Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of Korean. (No. 19CTAP-C152837-01-000000).

ORCID

Seok-Man Jeong, <http://orcid.org/0000-0003-0853-2629>
 Se-Hwan Kim, <http://orcid.org/0000-0002-3018-3237>
 Wan-Hee Yang, <http://orcid.org/0000-0002-0737-7519>
 Young-Sun Kim, <http://orcid.org/0000-0001-8119-2232>
 Jun-Do Ki, <http://orcid.org/0000-0003-3371-2509>
 Gun-Cheol Lee, <http://orcid.org/0000-0003-4743-6373>

References

1. Baek DI, Kim MS. Application of heat pipe for hydration heat

-
- control of mass concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2008 Apr;20(2):157-64. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2008.20.2.157>
2. Jo MK, Kim JS, Lee JU, Ko PJ, Jo SJ. Application of ternary blended concrete for reducing thermal cracking of mat-foundation mass concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2018 Jan;30(1):58-61.
 3. Yoon S, Hwang YS, Baik BH, Han CG. Investigation on the applicability for method of setting time difference by super retarding agent for reducing hydration heat of transfer girder mass concrete. *Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2004 May 5; Pyeongchang, Korea*. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2004. p. 128-31.
 4. Bentz DP, Turpin R. Potential application of phase change materials in concrete technology. *Cement and Concrete Composites*. 2007 Aug;29(7):527-32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.007>
 5. Collepardimm. *Concrete admixtures handbook*. New York: Noyes Publishers; 1995. Chapter 6, *Concrete Admixtures Handbook (Properties, Science, and Technology)*; p. 286-409.
 6. Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc; 2006. Chapter 8, *Concrete. Microstructure, Properties, and Materials (Third Edition)*; p. 291-5.
 7. Korea Concrete Institute. *Standard Specification for Concrete*. Seoul: Kimoondang; 2009. p. 187-201.
 8. KS L ISO 679. *Standard test methods of testing cements determination of strength*. Korea Industrial Standards. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2016. 19 p.
 9. KS L 5105. *Testing method for compressive strength of hydraulic cement mortars*. Korea Industrial Standards. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2007. 9 p.
 10. KS L 5405. *Standard test method for compressive strength of concrete*. Korea Industrial Standards. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2010. 28 p. <
 11. KS F 2421. *Standard test method for air content of fresh concrete by the pressure method*. Korea Industrial Standards. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2016. 30 p.
 12. KS F 2402. *Standard test method for concrete slump*. Korea Industrial Standards. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2017. 14 p.
 13. KS F 2403. *Standard test method for making concrete specimens*. Korea Industrial Standards. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2019. 14 p.