

Research Paper

고성능 저발열 자기충전 콘크리트의 최적 배합설계

Optimal Mix Design of High-Performance, Low-Heat Self-Compacting Concrete

김영봉¹ · 이준해² · 박동천^{3*}

Kim, Young-Bong¹ · Lee, Jun-Hae² · Park, Dong-Cheon^{3*}

¹Senior Researcher, Business Operation Division, Korea Conformity Laboratories, Seocho-Gu, Seoul, 06711, Korea

²Building Engineer, KYERYONG Construction Industrial Co., Ltd., Munjeong-Ro, Daejeon, 35262, Korea

³Professor, Department of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime and Ocean University, Youngdo-Gu, Busan, 49112, Korea

*Corresponding author

Park, Dong-Cheon
Tel : 82-51-410-4587
E-mail : dcpark@kmou.ac.kr

Received : July 7, 2022

Revised : July 26, 2022

Accepted : July 26, 2022

ABSTRACT

The foundation of high-rise concrete building in coastal areas generally must be installed in an integrated manner, not separately, in order to prevent defects caused by stress on the upper and lower parts of the mounting surface and to manage the process smoothly. However, when performing integrated punching, there is a concern that temperature stress cracks may occur due to hydration heat. Due to the large member size, it is difficult to make a sufficient commitment, so it is necessary to mix concrete with high self-charging properties to ensure workability. In this research, the amount of high-performance spray and admixture used was adjusted as experimental variables to satisfy this required performance. Through the analysis of the results for each blending variable, it was found that the unit quantity was 155kg/m³ and the cement ratio in the binder was 18%, and the target values of the pre-concrete properties and compressive strength were satisfied. A four-component binder(18% cement, 50% slag fine powder, 27% fly ash, 5% silica fume) was used.

Keywords : high performance concrete, self-compacting, hydration heat, optimal concrete mixing design, RC foundation

1. 서론

최근 해안지역 초고층 건축물의 매트기초의 경우 대형 매스부재이며 시공 시 원활한 공정관리와 균질한 품질을 확보하기 위해서 일반적으로 상하층 분리타설이 아닌 일체타설 시공이 바람직한 것으로 인식되고 있다[1,2]. 하지만 콘크리트 일체타설의 경우 시멘트 수화열과 부재의 두께로 인해 발생하는 높은 내 외부 온도차는 온도균열을 유발하고 이는 내하력 및 내구성 저하의 원인이 되기도 한다. 매스콘크리트로 규정하는 크기는 구조형식, 시공조건, 사용재료 등에 따라 달라지므로 일률적으로 정하기는 어렵지만 일반적으로 넓이가 넓은 평판구조나 기둥 형상일 경우 0.8m 이상, 하단 구속 벽체 형식의 구조물은 두께 0.5m 이상을 매스콘크리트로 보고 있다. 매스콘크리트의 수화열로 인한 구조체 내 외부 온도차의 저감을 위해 프리쿨링, 포스트쿨링의 방법도 빈번히 적용되고 있지만 프리쿨링은 대규모 부대설비의 요구, 저감 온도의 한계 및 품질의 균질성에 대한 문제로 대량의 콘크리트 타설이 요구되는 초고층 매트기초에는 적용에 한계가 있고[3] 포스트쿨링은 파이프 간격, 통수량, 통수온도, 냉각기간 등에 대한 면밀한 검토가 요구되며 부대설비에 대한 경제성 저하로 쉽게 적용하기 어려운 실정이다[4].



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 연유로 분리타설에서의 주요 문제점인 상하층부의 연결부 응력 최소화를 개선하고자 하부층에는 초지연제를 혼입시키는 연구가 진행되고 있지만 이 또한 시공현장에서 균질하게 적용하기에 한계가 있는 현실이다[5,6].

이러한 연구배경 하에 본 연구에서는 초고층 매트기초의 일체타설에 요구되는 콘크리트의 고강도와 고유동성, 낮은 수화열을 동시에 만족하며 성능을 극대화 할 수 있는 낮은 물결합재비, 자기충전성, 저발열의 특성을 구현할 수 있는 최적 배합을 고성능 분산제와 혼화재의 사용을 통해 실험적으로 도출하고자 하였다.

2. 배합설계 품질관리 기준 설정

한국콘크리트학회 표준시방서에 준해서 매트기초용 콘크리트 품질관리 기준을 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. Quality control criteria for mat foundation concrete

Sortation	Quality control of standard	Specification standard
Standard	20-45-650	Self-compacting concrete
Design reference strength	45MPa(day 56)	Cylindrical specimen
Air volume	3.5±1.5%(2.0~5.0%)	-
Slump flow when arriving at the site	650±50mm	600~700mm
Flow 500mm reach time	4.0~10.0sec	3.0~20.0sec
Concrete temperature at the time of placing	Less than 30°C	Less than 35°C
Chloride content	Less than 0.30kg/m ³	KS F 4009

배합설계는 가능한 낮은 범위에서 결합재 용적(Vp)을 결정하고, 유동성과 충전성을 만족하는 적정 단위수량(W)과 잔골재율(S/a)을 설정하는 과정으로 진행하였다. 배합강도는 콘크리트 표준시방서에 따라 식 (1)과 같이 기존 압축강도 시험횟수가 14회 미만에 해당하므로 설계기준 압축강도 45MPa를 더한 55MPa로 계획하였고 기준재령은 매트기초의 저발열성을 감안하여 56일로 하였다. 고강도 콘크리트의 특성과 자기충전성, 저발열성을 모두 만족하도록 배합변수별 실험을 실시하였다. 변수는 분체 중의 결합재 구성, 분체 중의 시멘트 비율, 단위수량의 순으로 최적값을 도출해 가도록 했다.

$$\text{배합강도}(F_{cr}) = \text{설계기준 압축강도}(F_{ck}) + 10(\text{MPa}) \tag{1}$$

3. 실험개요

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트 및 혼화재

본 실험에 사용된 시멘트는 비중 3.15, 분말도 3,264cm²/g인 영월산 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 물리적 성질 및 화학적 특성은 Table 2와 같다. 혼화재는 Table 3과 같은 물성의 재료를 사용하였다.

Table 2. Cement properties

Specific gravity	Fimeness (cm ² /g)	Setting time(min)		Ignition loss (%)	Stability(%)	Compressive strength(kg/cm ²)		
		Initial set	End set			Day 3	Day 7	Day 28
3.15	3.264	200	370	1.60	0.09	227	285	389

Table 3. Physical and chemical properties of admixtures

	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Activity index(%)			Chemical composition(%)						
			Day 3	Day 7	Day 28	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ignition loss
Blast furnace slag	2.94	4.174	96	111	116	28.14	15.87	1.06	45.95	4.98	2.12	0.35
Fly ash	2.11	3.990	-	89	97	50.72	20.76	6.37	3.61	1.08	0.54	3.04
Silica fume	2.20	200,000				94.8	0.66	1.06	0.19	0.61	2.12	2.8

3.1.2 골재

굵은 골재는 최대 치수가 20mm이고, 비중은 2.6~2.7의 골재를 사용했다. 잔골재의 경우 바닷모래를 세척한 세척사와 부순 모래를 적정비율로 혼합한 혼합사를 사용하였다. 조립률 2.6~2.9 범위와 표준입도곡선을 만족하는 제품을 사용하였다. 본 배합에 사용된 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성은 Table 4와 같다.

Table 4. Physical properties of aggregates

Maximum size (mm)	Specific Gravity	Coarse aggregates				Sortation	Fine aggregate				
		F. M.	Absorption rate	0.08mm passing rate			F. M.	Density	Absorption rate	Clay content	0.08mm passing rate
20.00	2.71	6.94	0.92%	0.3%	Water-washing	2.81	2.63	1.20%	0.4%	4.5%	
					Crushed	2.90	2.68	1.27%	0.9%	3.3%	

3.1.3 혼화제(고성능 감수제)

굵은 골재는 최대 치수가 20mm이고, 비중은 2.6~2.7의 골재를 사용했다. 잔골재의 경우 바닷모래를 세척한 세척사와 부순 모래를 적정비율로 혼합한 혼합사를 사용하였다. 조립률 2.6~2.9 범위와 표준입도곡선을 만족하는 제품을 사용하였다. 본 배합에 사용된 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성은 Table 5와 같다.

Table 5. Physical and chemical properties of high performance water reducing agent

Main ingredient	Type	Color	Solid content	Density
Polycarboxylic acid-based	Liquid	Light brown	20%	1.02

3.2 실험방법

3.2.1 굳지 않은 콘크리트 물성

시공성 평가를 위해 슬럼프 시험을 KS F 2402(콘크리트 슬럼프 시험), 공기량을 KS F 2421(압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법, 2006)의 규정에 준하여 실시하였다.

3.2.2 간이단열 수화열 측정

두께 100mm 스티로폼 단열부재를 이용하여 0.5m×0.5m×0.5m 육면체 틀을 만들고 열전대를 이용하여 시간경과에 따른 중심부 온도를 측정하였다.

3.2.3 압축강도

압축강도 시험은 재령 56일에 KS F 2405(콘크리트의 압축 강도 시험 방법) 규정에 준하여 실시하였다.

4. 배합 변수별 결과와 최적배합 도출

4.1 결합재 구성에 따른 배합시험 결과

결합재 구성에 따른 물성을 평가하기 위해 Table 6과 같이 배합설계를 하였다. 그 결과 배합 1~4의 경우 혼합 30분경과 후 기포 발생 및 재료분리가 발생하여 Figure 1과 같이 30분 이후의 슬럼프 플로의 측정이 불가능하여 폐기하였다. 배합 5~8의 경우 90분 시간경과에도 불구하고 슬럼프 플로 600mm를 만족하였고 600mm 도달시간의 경우 배합 7~8의 경우 우수한 성능을 나타내었다. 혼화재의 구성비율이 많을수록 특히 플라이애시의 영향이 큰 것으로 평가되었다. Figure 2는 500mm 플로 도달시간이며 공기량의 경우 Figure 3에서 볼 수 있듯이 배합 5, 6의 경우 5%를 초과하였으나 배합 7, 8의 경우 목표 공기량 $3.5 \pm 1.5\%$ 의 범위에 들어가는 것을 확인했다.

Table 6. Mixing design with binder composition as a variable

Sortation	W/B (%)	S/a (%)	Water	Unit material amount(kg/m ³)						Admixture		
				Amount of binder	Binder Composition(%)				Fine aggregate		Coarse aggregate	Binder × %
					Cement	Blast furnace slag	Fly ash	Silica fume	Water-washing	Crushed		
1	36.7	52.6	165	450	35	35	25	5	622	272	822	1.30
2	36.7	52.5	165	450	30	40	25	5	619	271	822	1.30
3	36.7	52.4	165	450	30	35	30	5	616	269	821	1.20
4	36.7	52.3	165	450	25	40	30	5	614	268	822	1.00
5	36.7	52.6	165	450	35	35	25	5	622	272	822	1.07
6	36.7	52.5	165	450	30	40	25	5	619	271	822	1.00
7	36.7	52.4	165	450	30	35	30	5	616	269	821	0.98
8	36.7	52.3	165	450	25	40	30	5	614	268	822	1.00

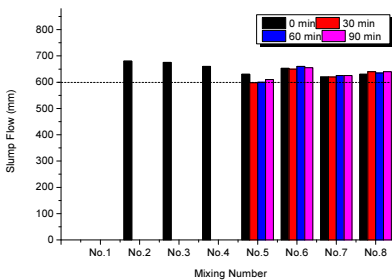


Figure 1. Slump flow of mixing by composition of binders

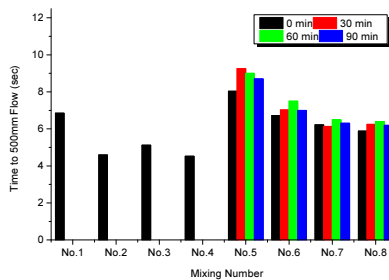


Figure 2. Time for flow to reach 500mm by composition of binders

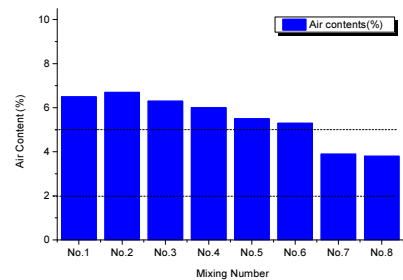


Figure 3. Air volume of the mixture according to the composition of the binder

압축강도 측정결과 Figure 4와 같이 재령 56일에서 배합강도 55MPa 보다 큰 60MPa 이상의 압축강도를 나타내서 목표 성능을 충족하는 것으로 나타났다. 간이단열 수화열 측정결과 Figure 5와 같이 45시간 경과 후 최고온도를 발현하였으며, 배합

설계 5의 경우 35.8°C, 배합설계 6의 경우 33.4°C, 배합설계 7의 경우 36.4°C, 배합설계8의 경우 35.6°C를 발현하여 저발열 성능을 확인할 수 있었다.

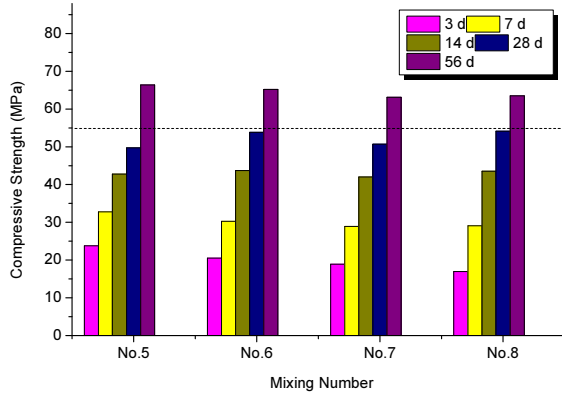


Figure 4. Compressive strength of mixing by composition of binders

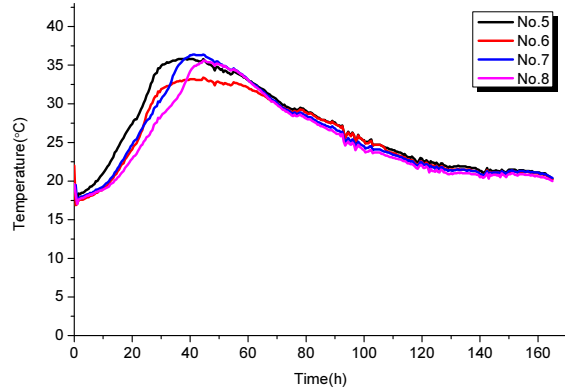


Figure 5. Hydration heat of compositions 5 to 8 satisfying concrete performance before hardening in composition of binder

4.2 시멘트 비율 조정에 따른 배합시험 결과

결합재 구성 중에서 경제성 및 수화발열에 영향을 미치는 시멘트 비율을 20%로 하여 Table 7과 같이 배합설계하였다. 유동성 및 충전성 향상을 위해 잔골재율을 54%로 높였으며 잔골재 중에서 세척사와 부순모래의 비율을 배합 1~3에서는 6:4, 배합 4~6에서는 5:5로 하여 실험하였다. Figure 6의 슬럼프 플로 측정결과 배합 1~3의 경우 시간경과에 따른 슬럼프 플로가 유지되지 않아 90분 경과시점에서 측정이 불가하였으며 배합 4~6의 경우 슬럼프 플로 600mm~700mm의 범위를 만족하는 값을 유지하였다. Figure 7과 같이 슬럼프 플로 500mm에 도달하는 시간의 결과에서 알 수 있듯이 플라이애시 구성비가 가장 높은 배합 4에서 가장 유동성이 뛰어난 것으로 관측되었다. Figure 8의 공기량 또한 배합 4~6에서 목표 공기량 3.5±1.5%의 범위에 들어가는 안정된 값을 보였으며 압축강도도(Figure 9) 재령 56일에 배합강도 55MPa를 상회하는 값을 나타내었다.

Table 7. Design of a combination using cement ratio as a variable

Sortation	W/B (%)	S/a (%)	Water	Unit material amount(kg/m ³)									Admixture
				A mount of binder	Binder				Fine aggregate			Binder × %	
					Cement	Blast furnace slag	Fly ash	Silica fume	Water-washing	Crushed	Coarse aggregate		
1	36.7	54.0	165	450	20	40	35	5	543	369	798	1.40	
2	36.7	54.0	165	450	20	45	30	5	543	369	798	1.35	
3	36.7	54.0	165	450	20	50	25	5	543	369	798	1.55	
4	36.7	54.0	165	450	20	40	35	5	453	462	798	1.30	
5	36.7	54.0	165	450	20	45	30	5	453	462	798	1.40	
6	36.7	54.0	165	450	20	50	25	5	453	462	798	1.55	

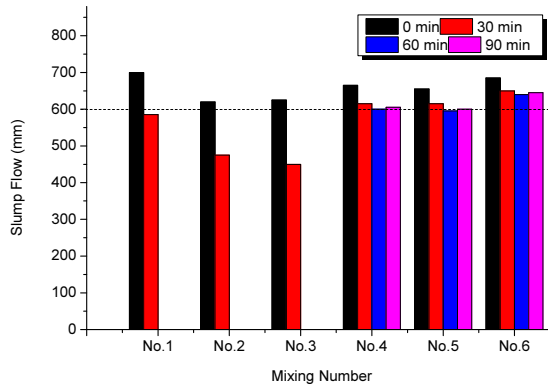


Figure 6. Slump flow of mixture by cement scale adjustment

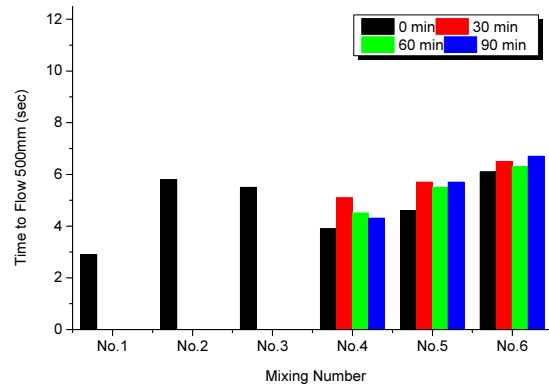


Figure 7. Time for flow of the mixture to reach 500mm according to cement magnification adjustment

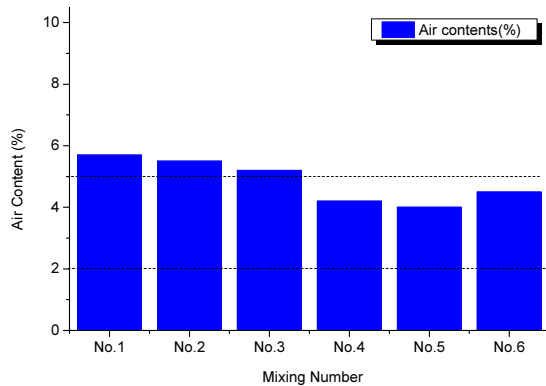


Figure 8. Air volume of the mixture according to cement magnification adjustment

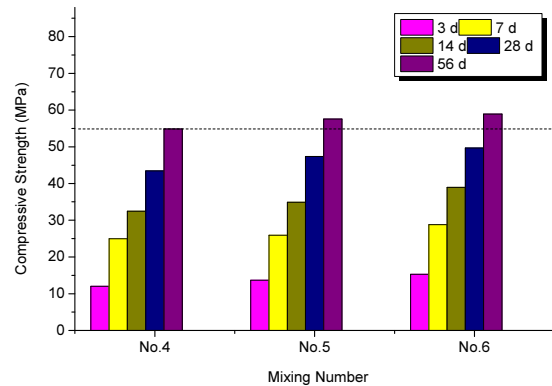


Figure 9. Compressive strength of the mixture according the adjustment of cement magnification

4.3 단위수량 조정에 따른 배합시험 결과

[4.1 결합재 구성에 따른 배합시험 결과]와 [4.2 시멘트 비율 조정에 따른 배합시험 결과]에서 분체 구성비와 시멘트 비율을 조정하여 배합결과를 근거로 시멘트 사용량을 20%로 하였을 경우 더 나은 결과를 기대할 수 있을 것으로 판단하여 Table 8과 같이 시멘트 비율을 15~18%로 하는 6배합 설계를 하였다.

단위수량을 배합 1, 2에서는 145kg/m³, 배합 3, 4에서는 155kg/m³, 배합 5, 6에서는 165kg/m³로 하였다. 실험결과 슬럼프 플로는 Figure 10과 같이 배합 1, 2 즉 단위수량 145kg/m³에서 시간경과에 따라 90분 경과시점에서 재료분리가 발생하였다. 이는 목표 유동성을 만족하기 위해 혼화제 사용을 최대 150% 증가한 것에 기인하는 것으로 생각된다. Figure 11은 플로 500mm 도달시간이다. Figure 12에서 볼 수 있듯이 공기량도 5%를 넘어 6%에 육박하여 목표값에서 벗어나는 결과를 초래하였다.

배합 5, 6의 경우 단위수량 165kg/m³로 배합하였으며 Figure 10의 슬럼프 플로에서 볼 수 있듯이 시간 경과에도 불구하고 일정한 값을 지속하는 원활한 작업성을 나타내었지만 Figure 13에서와 같이 압축강도가 배합강도 55MPa에 미치지 못하는 결과를 나타냄으로써 결국 배합 3, 4(단위수량 155kg/m³)에서 가장 만족스러운 결과를 도출할 수 있었다. 그 중에서도 혼화재의 구성비율이 높은 배합 4가 배합 3보다 시공성과 압축강도에서 우수한 결과를 나타내었다.

Table 8. Mixed design with unit quantity adjustment as a variable

Sortation	W/B (%)	S/a (%)	Unit material amount(kg/m ³)									Admixture Binder(%)
			Water	Binder				Fine aggregate			Coarse aggregate	
				A mount of binder	Composition(%)			Water-washing	Crushed			
					Cement	Blast furnace slag	Fly ash			Silica fume		
1	32.2	54.0	145	450	15	50	30	5	467	476	823	2.10
2	32.2	54.0	145	450	18	50	27	5	467	476	823	1.95
3	34.4	54.0	155	450	15	50	30	5	460	469	810	1.40
4	34.4	54.0	155	450	18	50	27	5	460	469	810	1.40
5	36.7	54.0	165	450	15	50	30	5	453	462	798	1.35
6	36.7	54.0	165	450	18	50	27	5	453	462	798	1.30

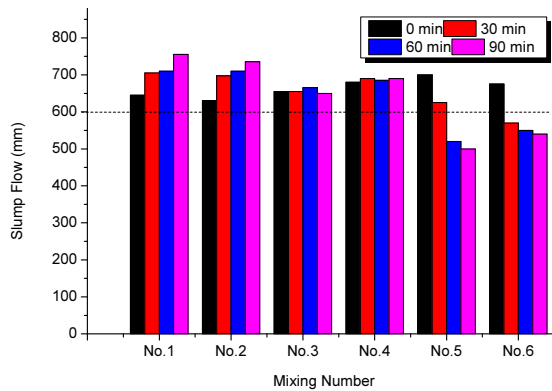


Figure 10. Slump flow of mixing by adjustment of unit quantity

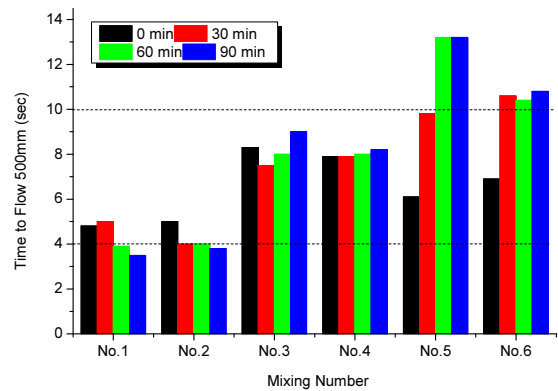


Figure 11. Time for flow of the mixture to reach 500mm according to unit quantity

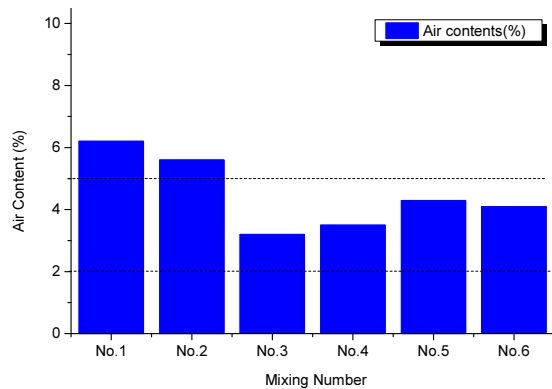


Figure 12. Amount of air in the mix according to the unit quantity adjustment

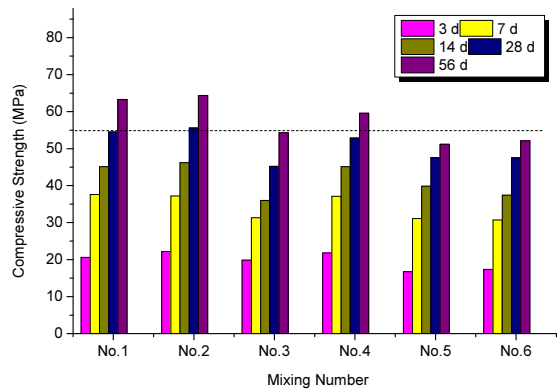


Figure 13. Compressive strength of mixing by adjustment of unit quantity

5. 결론

배합 변수별 결과분석을 통해 단위수량은 155kg/m^3 에 결합재에서 시멘트 비율 18%일 때 굳지 않은 콘크리트 물성 및 강도발현 목표값을 만족하는 것으로 나타났다. 혼화재는 고로슬래그, 플라이애시, 실리카흄이 사용되었다. 이상과 같은 일련의 실험을 통하여 재료별 차이에 있을 것을 감안하더라도 매트기초 시공을 위한 저발열 고성능 콘크리트 배합의 최적 배합해로 아래와 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 1) 역학적(고강도) 특성 : 물/결합재 비 37.0% 이하
- 2) 수화발열(저발열) 특성 : 결합재량 범위($450\sim 480\text{kg/m}^3$)내 가능한 작게 사용, 4성분계(시멘트 18%, 슬래그미분말 50%, 플라이애시 27%, 실리카흄 5%)
- 3) 유동(고유동) 특성 : 잔골재율 49.5~55.0%, 단위수량 $145\sim 165\text{kg/m}^3$
- 4) 충전(자기충전) 특성 : 굵은골재 최대치수 20mm, 굵은골재 체적(V_g) 0.290~0.320
- 5) 가능한 낮은 범위의 결합재 용적(V_p) 결정 : 결합재 용적(V_p) 0.160~0.170

상기의 최적배합해는 사용재료의 품질에 따라 시공성 및 역학적 특성에 영향을 끼칠 수 있으므로 철저한 원재료 품질관리가 요구된다.

요약

해안지역 초고층 콘크리트 건축물 매트기초는 상하층 응력발생으로 인한 결함예방과 원활한 공정관리를 위해 일반적으로 일체타설이 요구되지만 일체타설의 경우 수화열에 의한 온도응력 균열 발생의 우려가 있으며 다짐에 대한 시공성을 확보하기 위해 높은 수준의 자기충전성의 콘크리트 배합이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 요구성능을 만족할 수 있도록 고성능 분사제와 혼화재의 사용량을 실험변수로 배합 실험을 통해 최적량을 도출하고자 하였다. 배합 변수별 결과분석을 통해 단위수량은 155kg/m^3 , 결합재에서 시멘트 비율 18% 일 때 굳지 않은 콘크리트 물성 및 강도발현 목표값을 만족하는 것으로 나타났다. 4성분계(시멘트 18%, 슬래그미분말 50%, 플라이애시 27%, 실리카흄 5%)가 사용되었다.

키워드 : 고성능 콘크리트, 자기충전, 수화열, 최적 콘크리트 배합, 매트기초

Funding


This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korean government (No. 2019R1A2C1088029)


Acknowledgement

One of the authors, Dr. Kim Young-bong's thesis, was used as data for this paper.

ORCID

Young-Bong Kim,  <https://orcid.org/0000-0001-8855-1912>

Jun-Hae Lee,  <https://orcid.org/0000-0001-6238-8811>

Dong-Cheon Park,  <https://orcid.org/0000-0001-7243-5140>

References

1. Hajime O, Kazuamsa O, Masagi O. Self-compacting high performance concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 1995 Dec;7(5):33-42.
2. Kwon YH. An experimental study on the construction performances and economical evaluation of the self-compacting concrete by cementitious materials. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2017 Jun;29(3):315-22. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2017.29.3.315>
3. Chung CH, Park JH, Lee SH. Study on precooling of concrete using ice and cooling water. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2000 Jun;12(3):95-102. <https://doi.org/10.22636/JKCI.2000.12.3.95>
4. Seo TS, Cho YG, Lee KC, Lim CK. Analytical on thermal cracking control of mass concrete by vertical pipe cooling method. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2014 Feb;26(1):57-62. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.1.057>
5. Han CG, Lee JS, Lee JS. The field application of mass concrete mat foundation using super retarding concrete and horizontal division-placement. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2010 May;26(5):59-66.
6. Kim HS, Han MC, Kim JY, Han SB. Hydration heat analysis of mass concrete considering low heat mixture and block placement. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2008 Jan;24(1);63-70.