

Research Paper

초고층 건축물 매트 기초용 고성능 콘크리트 내구성 평가

Durability Evaluation of High-Performance, Low-Heat Self-Compacting Concrete for Foundation of Tall Buildings

김영봉¹ · 박동천^{2*}

Kim, Young-Bong¹ · Park, Dong-Cheon^{2*}

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

²Professor, 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 : September 1, 2022
Revised : September 20, 2022
Accepted : September 21, 2022

ABSTRACT

Concrete used for the foundation of high-rise buildings is often placed through in an integrated pouring to ensure construction efficiency and quality. However, if concrete is placed integrally, there is a high risk of temperature cracking during the hydration reaction, and it is necessary to determine the optimal mixing design of high-performance, high-durable concrete through the replacement of the admixture. In this study, experiments on salt damage, carbonation, and sulfate were conducted on the specimen manufactured from the optimal high-performance low-heating concrete combination determined in the author's previous study. The resistance of the cement matrix to chlorine ion diffusion coefficient, carbonation coefficient, and sulfate was quantitatively evaluated. In the terms of compression strength, it was measured as 141% compared to the structural design standard of KCI at 91 days. Excellent durability was expressed in carbonation and chlorine ion diffusivity performance evaluation. In particular, the chlorine ion diffusion coefficient, which should be considered the most strictly in the marine environment, was measured at a value of $4.09 \times E-12 m^2/y$ ($1.2898 \times E-10 m^2/s$), and is expected to be used as a material property value in salt damage durability analysis. These results confirmed that the latent hydroponics were due to mixing of the admixture and high resistance was due to the pozzolane reaction.

Keywords : high performance concrete, durability, salt attack, carbonation, sulfate resistance

1. 서론

초고층 건축물의 매트기초는 대형 매스부재가 일반적이며 원활한 시공관리 및 품질확보를 위하여 상하층 분리타설보다 일체타설을 선호하고 있다[1-3]. 하지만 매스 부재의 경우 시멘트 수화열로 인하여 온도 균열 발생의 우려가 높고 이에 대응해서 프리쿨링 및 포스트 쿨링법이 사용되고 있으나 사용의 한계 및 각종 설비의 필요 등의 문제로 쉽게 적용하기 어려운 실정이다[4]. 분리타설의 경우 상하층 경계부에서 내구성이 저하하게 되며[5] 일체타설의 경우에도 온도균열 발생으로 열화 인자의 침투가 용이하게 되는 사례가 빈번하다. 이에 저자는 기존연구에서 일체타설이 가능한 매트기초용 최적 콘크리트배합을 결정하였으며 고강도 및 고유동성, 낮은 수화열을 확인하여 확정할 수 있었다.

본 연구에서는 저자의 기존연구[6]에서 도출된 최적 고성능 저발열 콘크리트 배합으로 제작된 시험체를 대상으로 내구성에 대한 검토를 실시하였다. 역학적 특성을 비롯하여 탄산화, 염해, 내황산염성에 대한 일련의 실험을 통하여 성능에 대한 정량적 특성값을 측정하였으며 높은 성능발현의 메커니즘에 대하여 검토 분석하였다.



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.

2. 실험개요

2.1 사용재료

시멘트 및 혼화재료, 골재는 저자의 기존 연구에 사용된 재료와 동일 물성의 재료를 사용하였다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 고로슬래그 미분말은 포항산(비중 2.94, 분말도 4,174cm²/g), 플라이애시는 경남하동산(비중 2.11, 분말도 3,990cm²/g), 실리카흙은 중국산(비중 2.10, 분말도 200,000cm²/g)을 사용하였다. 굵은 골재는 쇄석골재, 잔골재는 부순모래와 세척사를 혼합한 혼합사이며 폴리카르본산계 고성능 감수제를 혼화제로 이용하였다.

2.2 콘크리트 배합

Table 1에 내구성 평가의 대상이 된 최적 고성능 저발열 해양 콘크리트 배합을 나타내었다. 물 결합재비 34.4%에 단위수량 155kg/m³으로 하였다.

Table 1. High performance marine concrete mixing

W/B (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m ³)									Admixtures
		Water	Binder				Fine aggregate			Binder × %	
			Binder	Composition ratio(%)			Sea sand	Crushed sand	Aggregate		
			Cement	Blast furnace slag	Fly ash	Silica fume					
34.4	54.0	155	450	18	50	27	5	460	469	810	1.55

2.3 내구성평가를 위한 시험방법

역학적 특성 및 내구성 관련 시험 항목 및 기준을 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Test method and related criteria

Sortation	Experimental item	Relevant criteria	Age and other
Mechanical properties	Compression strength and modulus of elasticity	KS F 2405(Test method for compressive strength of concrete), KS F 2438(Test method for coefficient of elasticity and Poisson's ratio of concrete circular specimens)	2weeks, 4weeks, 8weeks, 13weeks
	Carbonation	Accelerated carbonation test	KS F 2584(Test method for accelerated carbonation of concrete)
Chloride invasion resistance	Rapid chloride ion permeability test	KS F 2711(Test method for chlorine ion penetration resistance of concrete by electrical conductivity)	28 days after standard curing
	Chloride movement factor assessment test	NT BUILD 492(Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments)	1week, 2weeks, 4weeks, 8weeks, carbon dioxide concentration 5%
	Saltwater immersion test	KS F 2737(Measurement method of the depth of concrete chloride penetration by indicators)	28 days after standard curing
Sulfuric acid resistance	Sulphuric acid immersion test	ASTM C 267, "Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes"	underwater curing 1week, 2weeks, 4weeks, 8weeks, 13weeks
	Relative dynamic modulus of elasticity	ASTM C 579 (Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes)	
	Expansion rate	ASTM C 490 (Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete)	

3. 내구성 평가 결과

3.1 역학적 특성

Figure 1은 압축강도와 탄성계수 측정결과이다. 물결합재비 34.4%에서 재령 56일에 63.5MPa의 압축강도와 47.6GPa의 탄성계수값이 측정되었다. 통상 OPC에서는 표준양생 28일 이후 성능의 수렴이 일어나는 반면 본 실험에서는 혼화재의 잠재수경성 및 포졸란 반응의 영향으로 재령이 증가함에 따라 압축강도와 탄성계수가 지속적으로 더욱 향상되는 것을 볼 수 있었다.

3.2 탄산화

Figure 2는 촉진 탄산화 시험에서 시간 경과에 따른 탄산화 깊이 및 회귀분석을 통해 탄산화계수를 도출한 결과이다. 촉진 기간 56일째에 탄산화 깊이는 13mm였으며 탄산화계수는 1.59로 산출되었다.

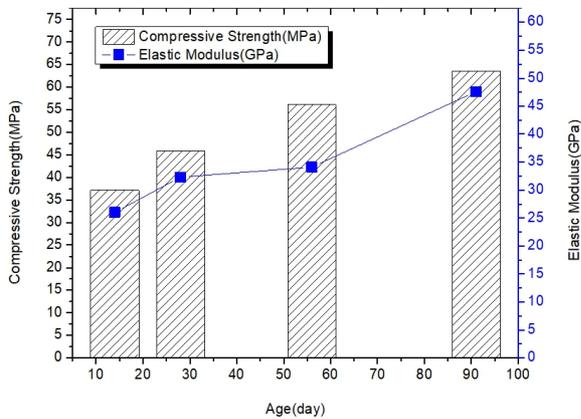


Figure 1. Results of measurement of compressive strength and elasticity coefficient with age

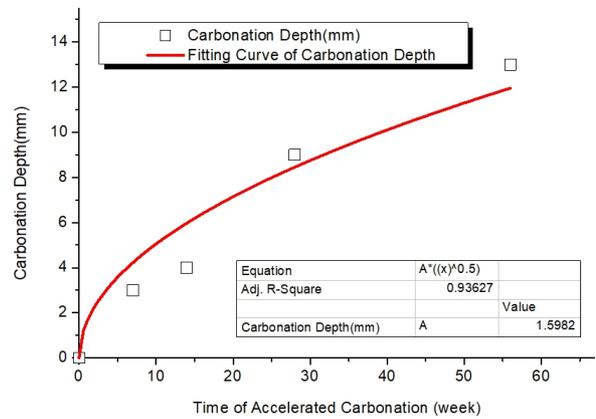


Figure 2. Derivation of carbonation depth and carbonation coefficient by accelerated carbonation

3.3 염소이온 확산성

Figure 3은 급속 염화물이온 침투성 시험결과이며 이는 전기영동법에 준한 시험법이다. 표준양생 28일 이후 재령 91일대에 통과 전하량은 650coulomb로 측정되어 평가기준에 의하면 1,000coulomb이하는 매우 낮은 침투성으로 분류되므로 본 시험체의 경우 상당히 침투성이 낮은 고내구성으로 평가되었다. 급속 염화물 침투성 시험과 동일한 원리로 측정하는 NT BUILD 492법을 이용한 결과를 Figure 4에 나타내었다. 표준재령 이후 91일 경과하였을 경우 염화물이온 침투깊이가 0.4mm로 비정상 염소이온 이동계수(실효확산계수)로 0.03×10E-12m²/s가 산출되었다. 재령 7일의 0.68×10E-12m²/s에 비해 상당히 낮아지는 경향을 나타내었다. 이는 혼화재 혼입의 영향으로 시간경과에 따른 반응으로 콘크리트 조직의 치밀화에 기인한 것으로 사료된다.

Figure 5는 염수침지시험을 통한 침투깊이의 시간경과에 따른 결과값이다. 재령 7일, 14일경에 2mm 이하의 침투깊이였으나 91일경에 침투깊이가 3.7mm에 이르렀다. 이러한 값만으로는 장기 내구성에 대한 예측의 데이터로 활용하기 어렵기에 Figure 6과 같이 침지 후 91일경의 시험체를 대상으로 깊이별 농도를 측정하였다. 이 값을 이용하여 편미분방정식 이론해로 회귀분석한 결과 염화물 이온 확산계수가 4.09×E-12m²/y(1.2898×E-10m²/s) 값으로 산출되었다. 이 값은 전기영동을 이용

한 값 $0.03 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 보다 다소 높은 값이지만 염화물이온 고정화현상을 고려하여 전기영동법에 기초하여 구한 실효확산 계수를 겉보기 확산계수로 환산한다면 타당한 값의 범위라 사료된다. 이 값은 편미분 방적식을 통해 장기 염해 내구성 예측에 있어 콘크리트 물성값으로 사용 가능할 것이라 기대된다.

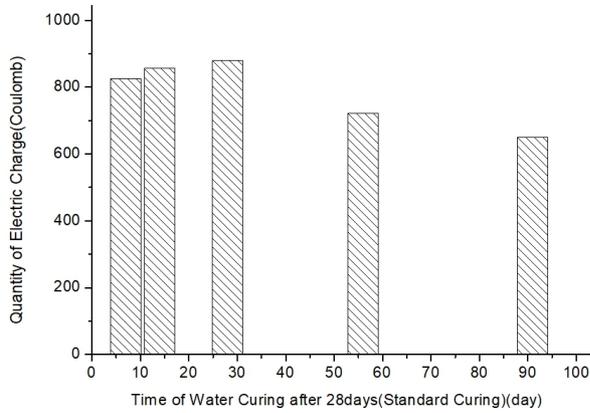


Figure 3. Experimental results of rapid chloride ion penetration over time

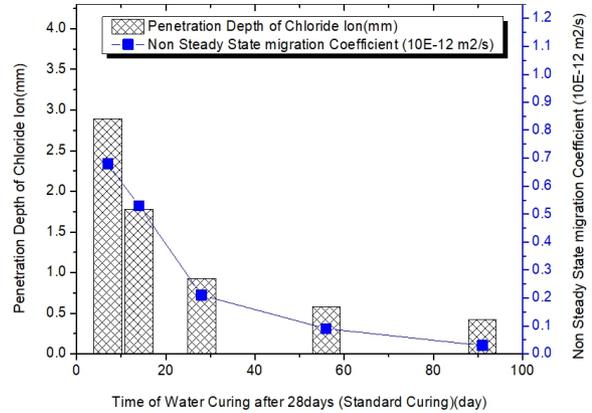


Figure 4. Depth and effective diffusion factor of chloride ion penetration by electrophoresis method

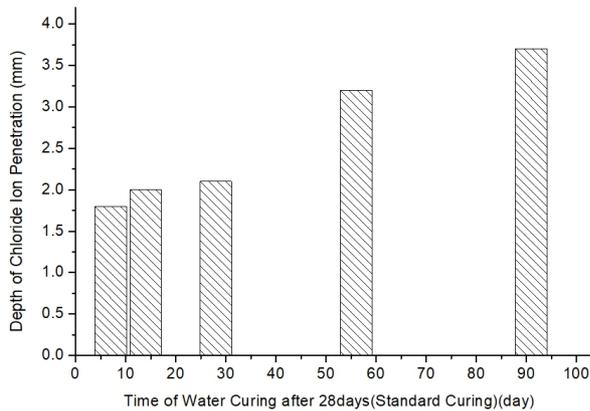


Figure 5. Depth of chloride ion penetration over time in seawater immersion test

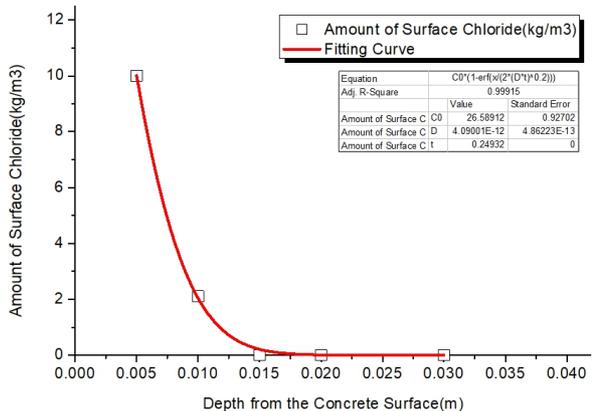


Figure 6. Determination of chloride ion penetration and diffusion coefficient by concrete depth on day 91

3.4 내황산염

Figure 7은 내황산염 시험의 결과로 상대 동탄성계수는 95.74~100.96%의 범위로 황산마그네슘 침식에 의한 열화가 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 황산염 침식에 대한 열화지수가 크면 열화도가 크다는 의미로 그 값은 Figure 8과 같이 0.19~0.61%의 범위로 측정되어 상당히 고내구성을 가지는 것으로 평가되었다. 시멘트 대체로 혼화재 사용이 증가하여 C3A량이 감소되어 황산마그네슘의 주요 열화인자인 에트링가이트의 생성이 줄어든 점에 기인한 것으로 판단된다. 혼화재의 사용으로 일어나는 수화과정에서의 치밀화 현상은 황산염의 확산 침투 저항 및 매트릭스의 손실도 저감하는 것으로 나타났다.

Figure 9는 황산염 침지 기간별 길이변화율 측정결과를 나타낸 것이다. ASTM C 1012(Standard Test Method for Length

Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution)에서는 흑독한 황산염 환경에서 팽창률 0.05% 이하, 보통의 황산염 환경에서 0.1% 이하가 되도록 규정하고 있으며, 본 실험에서는 침지 재령 91일에 길이변화율 0.045%로 측정되어 흑독한 환경에서도 적용 가능할 배합이라 사료된다. 황산마그네슘에 의한 열화 속도보다 잠재수경성 및 포졸란 반응으로 강도 발현이 촉진되어 길이 변화가 거의 발생하지 않은 것으로 사료된다.

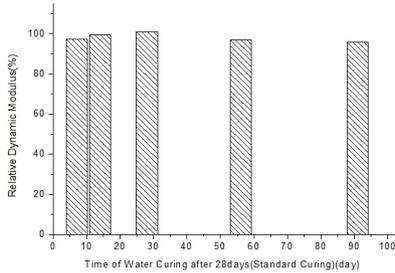


Figure 7. Changes in relative dynamic modulus of elasticity over time

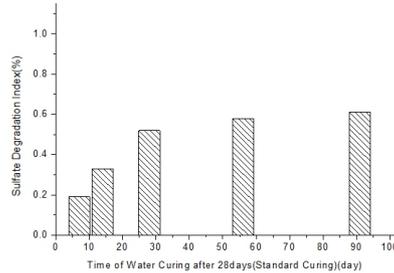


Figure 8. Changes in sulfate degradation index over time

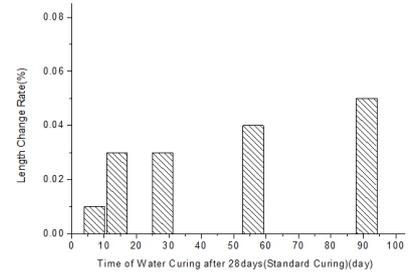


Figure 9. Measurement of length change rate over time

4. 결론

해양환경에 위치한 초고층 건축물용 매트기초에 사용되는 최적 고성능 저발열 콘크리트 배합에 대한 내구성을 평가한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 역학적 특성은 한국콘크리트학회 구조설계 기준대비 재령 91에서 141%로 측정되어 관련 기준을 만족하는 것으로 나타났다.
- 2) 탄산화 및 염소이온 확산성 평가에서 우수한 내구성을 발현했다. 특히 해양환경을 고려할 때 가장 엄중히 검토해야 하는 염소이온 확산계수는 $4.09 \times E-12 \text{m}^2/\text{y}$ ($1.2898 \times E-10 \text{m}^2/\text{s}$) 값으로 산출되어 고내구성이 확인 되었으며 향후 염해 내구수명 해석에서 재료물성값으로 적용가능할 것으로 기대된다.
- 3) 내황산 성능 평가는 상대동탄성계수 및 열화지수, 팽창률 모든 항목에서 흑독한 황산염 환경 규정에도 만족할 수준의 값을 얻을 수 있었다.

요약

초고층 건축물용 매트기초에 사용되는 콘크리트는 시공성 및 품질확보를 위하여 일체타설로 진행되는 경우가 많다. 하지만 일체타설의 경우 수화반응 과정에서 온도균열이 발행할 우려가 높으며 혼화재 치환을 통해 고성능 고내구성 콘크리트 최적배합을 도출할 필요가 있다. 본 연구에서는 저자의 기존연구에서 도출한 최적 고성능 저발열 콘크리트 배합으로 제작된 시험체를 대상으로 염해 및 탄산화, 내황산염에 대한 실험을 실시하고 염소이온 확산계수와 탄산화계수, 황산염에 대한 시멘트 매트릭스의 저항을 정량적으로 평가하였다. 혼화재의 혼입에 의한 잠재수경성 및 포졸란 반응에 의한 높은 저항성을 확인할 수 있었다.

키워드 : 고성능 콘크리트, 내구성, 염해, 탄산화, 내황산염

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>

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

References

1. Hajime O, Kazuamsa O, Masagiro 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. Kwon YH. An experimental study on the optimum mix design and constructability evaluation of mass concrete used in super massive structures. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2018 Aug;30(4):365-73. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2018.30.4.365>
4. Ha JH, Cho YG, Hyun TY, Lim CK, Seo TS. Control of thermal crack in mass concrete using automated curing system. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2013 Apr;25(2):195-200. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.2.195>
5. Cho BD, Kim SH, Jeon SJ. Assessment of bond characteristics between new and old concrete in various mixtures and joint conditions. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2014 Aug;26(4):507-15. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2014.26.4.507>
6. Kim YB, Lee JH, Park DC. Optimal mixing design of high performance low-heat self-filled concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2022 Aug;22(4):337-46. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2022.22.4.337>