특집

‖수리 및 항만 콘크리트 구조물의 신기술‖

해양 콘크리트 구조물의 재료 및 시공

- Materials and Construction of Off-Shore Concrete Structures -

고경택* *Koh, Kyoung Taek*　장일영** *Jang, Il Young*　김성욱*** *Kim, Sung Wook*　이광명**** *Lee, Kwang Myong*

1. 머리말

해양 콘크리트 구조물은 해양공간에 설치된 구조물 전반을 말하며, 〈그림 1〉과 같이 석유 및 천연가스 탐사용 플랫폼, 선박정박시설, 도크, 해상 도시, 해상 비행장, 해상 발전소, 해저 저유탱크, 해상 터널, 해저 거주기지, 해상 교각 등이 해당된다. 이러한 해양 콘크리트 구조물은 일반적인 육상 구조물과 비교하여 해수, 저온 등 가혹한 환경에 노출되는 경우가 많기 때문에 적절한 설계, 시공 및 재료의 선정 등이 필요하다.

해양 콘크리트 구조물에 작용하는 외력 가운데 물리적인 것은 바람, 파도, 조류, 수압, 표사 등에 의한 마찰, 동결융해 작용, 지진시 동수압, 빙산 등에 의한 충격력 등이 있다. 그리고 화학적인 것은 해수에 포함된 황산염 및 각종 염화물에 의한 열화작용이다. 이 가운데 바람, 파도 및 조류 등의 외력은 구조물을 사용할 때뿐만 아니라 시공 시, 유지관리할 때에도 작용하기 때문에 주의할 필요가 있다. 그리고 해수에 의한 콘크리트의 열화와 강재 부식은 해양 콘크리트의 재료선정 및 배합설계에 있어서 고려해야 할 매우 중요한 사항이다.

본고에서는 먼저 해양 콘크리트가 해양환경으로부터 받는 열화작용을 알아보고, 해양 콘크리트에 적용한 재료와 시공 면에서 고려할 만한 특수성 및 최근의 시공사례를 기술하고자 한다.

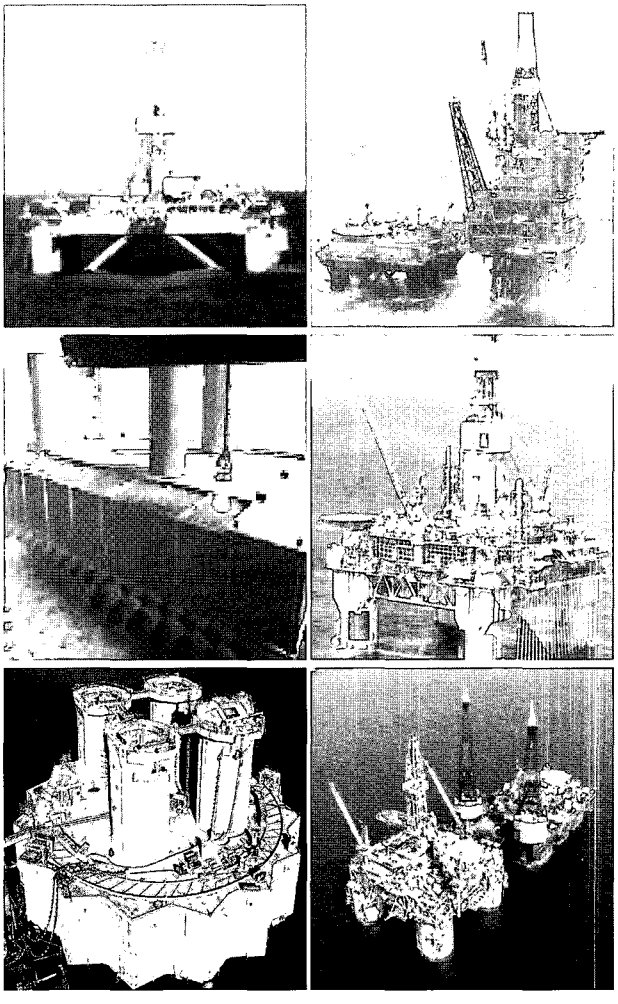

그림 1. 해양 콘크리트 구조물의 적용사례

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
** 정회원, 금오공과대학교 토목환경부 교수
*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원
**** 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

2. 해양 콘크리트의 열화

2.1 해수에 의한 콘크리트 부재의 열화작용

해수 중에는 Cl^-, Na^+, SO_4^{2-}, Mg^{2+} 등 다양한 물질이 포함되어 있고, 그 가운데 시멘트와 반응하여 콘크리트 부재의 열화의 원인이 되기도 하는 물질이 있다. 해양 구조물의 노출조건은 설치된 장소에 따라 ①항상 해수에 잠겨있는 조건, ②간만대와 비말대에 있어서 건습반복을 받는 조건, ③해상 대기부에 있어서 비래염분 등의 영향을 받는 조건으로 대별된다. ①, ②에서의 콘크리트 구조물은 직접 해수에 노출되기 때문에 해수의 화학작용에 의한 극심한 열화작용을 받게 된다. 특히 ②에서는 건습반복을 받고 산소의 공급도 추가되기 때문에 콘크리트 자체의 열화이외에 철근부식에 미치는 영향도 커지게 된다. 또한 북해, 북극해 등과 같은 한냉지에서는 동결융해 작용에 의한 손상도 추가된다. 그 때문에 이 부분은 콘크리트에 있어서 ①과 ③보다도 가혹한 조건이 된다. 또 ①에서는 표사 등에 의한 마찰작용을 받는 경우도 있다. 또한, 해양환경하에서는 일반적으로 습도가 높기 때문에 탄산화에 의한 콘크리트의 열화는 문제가 되지 않는다.

2.2 콘크리트 자체의 열화

2.2.1 동결융해에 의한 침식작용

콘크리트 중의 공극에 포함된 물는 수산화칼슘 등이 포함된 수용액으로 빙점은 약 -1.0 °C이다. 그러나 해수 중의 콘크리트에서는 염류를 포함하고 있기 때문에 빙점이 저하되어 해수에 침지된 콘크리트의 동결에 있어서는 미동결 부분의 해수의 염분농도가 상승한다. 이 때문에 해양 콘크리트에서는 일반적인 물의 동결에 의한 팽창압에 기인하는 통상의 손상이외에 화학적 침식작용이 부가되어 콘크리트의 열화가 심하게 발생한다.

2.2.2 황산염에 의한 열화

황산염에 의한 열화는 주로 다음과 같이 구분된다.

①C_2S, C_3S의 수화생성물인 $Ca(OH)_2$와 해수 중의 $MgSO_4$의 반응에 의해 $Mg(OH)_2$와 석고를 생성하는 반응

②C_3A의 수화생성물인 C_3AH_6과 ①에 의해 생성된 석고와의 반응으로 생성된 에트린자이트(ettringite)에 의한 것

이 가운데 ①의 반응으로 생성된 석고는 해수에 용해되기 쉽기 때문에 시멘트 경화체의 다공화를 촉진시키고 조직의 취약화를 일으키는 원인이 된다. 또 ②의 반응으로 생성된 에트린자이트는 그 팽창작용에 의해 콘크리트를 팽창파괴시키는 원인이 된다.

황산염에 의한 열화를 방지하기 위해서는 콘크리트 중의 $Ca(OH)_2$를 감소시키는 포졸란과 고로슬래그 미분말의 혼입과 C_3A가 적은 시멘트를 사용하는 것이 유효하다.

2.2.3 염화물에 의한 열화

콘크리트에 침투한 염화물은 시멘트 중의 C_3A와 반응하여 프리델씨염을 생성하고, 그 일부가 고정되는 동시에 시멘트 수화물 중의 $Ca(OH)_2$는 해수 중의 $MgCl_2$과 반응하여 $Mg(OH)_2$과 $CaCl_2$가 된다. 이러한 반응 생성물 가운데 $CaCl_2$는 가용성이기 때문에 해수 중에 용해되어 시멘트 경화체의 다공화를 촉진시키고 조직을 취약하게 하는 원인이 된다.

염화물에 의한 열화를 방지하기 위해서는 콘크리트 중의 $Ca(OH)_2$를 감소시키는 포졸란과 고로슬래그 미분말의 혼입의 유효하다. 또 침투한 염화물을 프리델씨염으로 고정시키기 위해서는 시멘트 중의 C_3A가 많아야 좋다.

2.3 철근의 부식

해양 콘크리트에서도 일반 해안가의 철근콘크리트와 마찬가지로 해수로부터 공급되는 염소이온의 침투에 의한 철근부식에 의해 콘크리트의 균열발생이 발생되어 콘크리트의 덮개에 박리 또는 탈락 등의 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이를 방지하기 위해 고강도, 고내구화를 통해 수밀한 콘크리트 제조가 필수적이고, 경우에 따라서 철근부식억제제 혼입 및 표면처리 등이 필요하다.

3. 사용재료 및 콘크리트의 배합

해양 콘크리트는 큰 외력에 대해 견딜 수 있는 충분한 강도, 피로저항성 등의 역학적 성능뿐만 아니라 앞에서 기술한 다양한 열화환경에서도 견딜 수 있어야 한다. 그래서 해양 콘크리트 구조물에 사용되는 재료는 우수한 내구성을 가져야 되며, 다음과 같이 선정되어진다. 〈표 1〉은 국내, ACI, FIP의 시방서에서 해양 콘크리트 재료에 관련된 규정에 대해 비교분석한 것이다.

3.1 시멘트

시멘트로는 보통포틀랜드 시멘트 이외에 고로슬래그 시멘트, 플라이 애쉬 시멘트 등이 사용되고 있으며, 최근에는 폴리머시멘트 콘크리트, 폴리머 함침 콘크리트 등이 사용되고 있다.

한편 황산염 반응에 의한 콘크리트의 열화를 방지하기 위해 C_3A의 함유량이 낮은 내황산염 시멘트(5종시멘트)가 사용될 수 있으나, C_3A는 염소이온을 프리델씨염으로 고정시키는 효과가 있기 때문에 그 양을 낮추는 것은 철근부식 측면에서 해양 콘크리트의 재료로써 바람직하지 않으므로 국내 콘크리트 시방서에서 제외되었다.

표 1. 해양 콘크리트의 규준의 비교

항목	콘크리트 표준시방서	ACI 357			FIP		
시멘트	혼합시멘트 중용열시멘트	Type I, II, III 혼합시멘트 $4 \le C_3A \le 10\,\%$			물보라, 대기중에는 중용열 시멘트 초속경 시멘트는 보수 시에만 사용 매스 콘크리트에는 저발열형 시멘트		
혼화재료	BFS, FA를 적당량 혼합 사용	SF와 적당량 혼합사용			SF 사용 권장		
염소이온	-	RC : 시멘트 질량의 0.1 % 이하 PSC : 0.06 % 이하			시멘트의 0.1 % 이하 $CaCl_2$는 불가		
압축강도	-	해중, 대기중, 물보라 : 35 MPa 침식되기 쉬운 부분 : 42 MPa			해중, 대기중, 물보라 : 35 MPa 침식되기 쉬운 부분 : 36 MPa		
최대 W/C	해중 0.5 대기중 0.45 물보라 0.45	해중 0.45 대기중 0.4 물보라 0.4			0.45, 가능한 0.4가 바람직함		
최소시멘트량	해중 300 kg/m^3 물보라, 대기중 330 kg/m^3	356 kg/m^3			40 mm 골재 : 320 kg/m^3 20 mm 골재 : 360 kg/m^3 물보라 : 400 kg/m^3		
공기량	물보라 6 %, 대기중 5 %	물보라 6 %, 대기중 5 %					
콘크리트 덮개	-	지역	RC	PSC	지역	RC	PSC
		물보라, 대기중	65 mm	90 mm	물보라, 대기중	75 mm	100 mm
		해중	50 mm	75 mm	해중	60 mm	75 mm

3.2 골재

해양 콘크리트에 사용되는 골재도 다른 콘크리트와 마찬가지로 강경, 내구적이고 적당한 입도를 가지는 골재를 사용해야 한다. 특히 해수 중에는 알칼리 금속이 알칼리골재반응을 촉진시키므로 반응성 골재는 사용하기 전에 반응성 시험을 통해 확인해야 한다.

부체식 구조물 또는 정착식 구조물에서 예항 시 부담을 줄이기 위해 경량 콘크리트를 이용하는 경우가 많다. 경량 콘크리트 제조에는 경량골재가 이용되지만, 경량 콘크리트의 동결융해 저항성을 향상시키기 위해 북해, 북극해에 건설되는 석유탐사용 플랫폼에 이용되는 골재는 절건상태의 경량골재를 사용함으로써 양호한 결과를 얻고 있다.

3.3 혼화재

해양 콘크리트에 적합한 혼화재로는 고로슬래그 미분말, 플라이 애쉬, 실리카 퓸 등이 있다. 이런 포졸란 혼화재는 양생을 충분히 실시할 경우에만 시멘트 수화생성물과 반응하여 콘크리트의 조직이 치밀해지는 효과가 있다.

영국-프랑스 해협 터널 건설에는 시멘트의 30 %를 플라이 애쉬로 치환하고, 물-결합재비 0.32로 하여 투수계수가 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ m/s인 치밀한 콘크리트를 제조하였다고 보고된 바 있다.

실리카 퓸은 일반적으로 시멘트와 5 ~ 10 % 정도 치환하여 사용하는데 물-결합재비가 낮은 고강도 콘크리트에서 소요의 워커빌리티를 확보하기 위해 고성능 감수제를 함께 사용하는 경우가 많다. 해양 콘크리트에 실리카 퓸을 사용한 사례로는 북해 유전 플랜트폼, 미국 및 노르웨이의 부유 교량 등이며, 대부분 고강도, 고내구성 콘크리트가 필요한 가혹한 환경조건이다.

3.4 화학혼화제

AE제 및 고성능 감수제 등의 화학혼화제를 적절히 사용하면 적당한 연행공기량을 가지고 낮은 물-시멘트비에서 워커빌리티가 좋은 콘크리트가 제조되어, 결과적으로 내구성이 우수한 콘크리트가 된다. 따라서 해양 콘크리트에는 화학혼화제를 사용하는 것이 일반적이다. 해양 콘크리트에 자주 사용되는 수중 콘크리트용 혼화제로는 프리팩트 콘크리트용 혼화제, 수중불분리성 혼화제가 있다. 여기서 수중불분리성 혼화제는 증점제의 일종으로서 셀룰로우스계 또는 아크릴계의 수용성고분자와 고성능 감수제와 조합하여 사용함으로써 재료분리저항성 및 유동성이 우수한 수중 콘크리트를 제조할 수 있다. 수중불분리성 콘크리트는 일본에서 관서국제공항의 연락교, 明石해협대교의 해중기초에 대규모에 이용되었고, 최근에는 국내에서도 사용되고 있다.

3.5 콘크리트 배합

내구성이 우수한 해양 콘크리트를 제조하기 위해서는 앞에서 설명한 재료를 적절히 선정하여 배합에 유의 할 필요가 있다. 콘크리트 시방서 또는 ACI에서 재료 및 배합 사항을 규정하고 있으나, 해양 구조물이 설치된 장소의 현황 및 구조물 조건 등을 종합적으로 고려하여 적절한 재료 및 배합을 선정할 필요가 있다. 〈그림 2〉는 콘크리트의 장기 내해수성에 대해 물-시멘트비, 양생방법 등에 따라 Gjorv가 노르웨이 Trondheim항에서 30년간 실시한 시험결과이다. 재령 3~5년 정도까지는 서서히 강도가 증가하나, 재령 10년 이후는 해수작용의 영향이 미수화 시멘트 입자의 수화반응에 의한 강도증가를 상회하여 점차 강도가 저하되어 재령 30년에서는 초기의 재령과 비교하여 휨 강도가 50 %

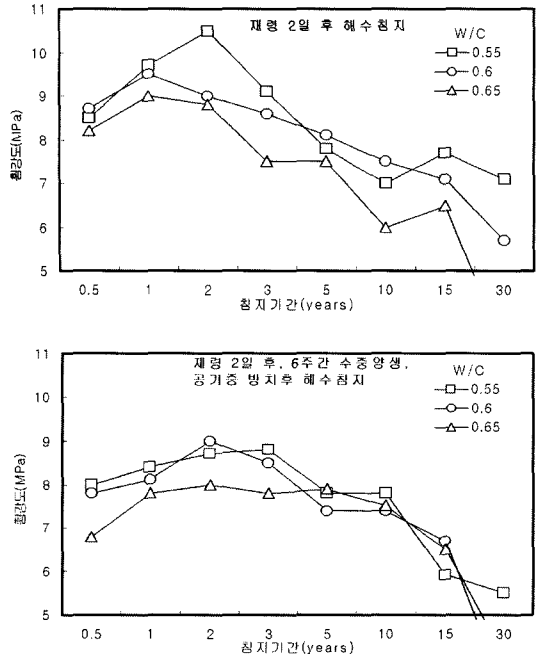

그림 2. 해수 침지 시험 결과

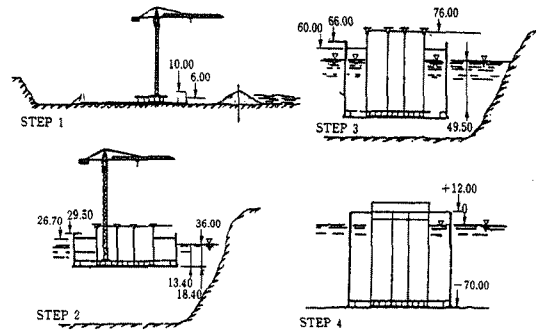

그림 3. 콘크리트 플랫폼의 시공순서

이하가 되는 경우가 있다. 따라서 해양 콘크리트에서 해수작용에 대해 내구성을 향상시키기 위해서는 가능한 물-시멘트비를 낮게 하고 적절한 양생을 실시할 필요가 있다.

4. 해양 콘크리트의 시공방법

해양 콘크리트의 시공은 육상 콘크리트 구조물의 경우와 비교하여 파도의 영향, 급변하는 기후, 수압 등 작업성이 극히 나쁘다는 특수성이 있다. 해양 콘크리트의 시공법에는 다양한 방법이 있으나, 대표적으로 콘크리트 플랫폼을 시공방법에 대해 설명하고자 한다. 콘크리트 플랫폼은 파력 등의 외력에 대해 콘크리트 구체 중력으로 저항하는 중력식 구조물이 일반적이며, 이 구조물의 내부 공간에 원유를 저장하는 저유기능을 가진다. 〈그림 3〉은 콘크리트 플랫폼의 시공순서인데, 먼저 가설 크레인 등으로 구체일부를 구축하고 해상에 넣어 구체 상부를 시공한다. 구체가 완성된 후 설치 예정지점까지 예항하여 물로 수평을 맞추는 등의 방법으로 침설한다. 일반적으로 기계 등을 예항 전에 크레인에 의해 탑재하여 현지에 침설하면 바로 플랫폼으로서 기능이 발휘된다.

5. 시공사례

5.1 Hibernia 플랫폼

〈그림 4〉는 캐나다 Newfoundland 해안에 있는 해양 콘크리트 플랫폼을 건설한 사례이다. 이 플랫폼은 1991년에 공사가 시작되어 1996년에 완공되었으며, 높이 111 m인 콘크리트 구조물로 이루어져 있다. 구조물 건설에 사용되는 콘크리트 양은 16만 5,000 m^3이며, 설계수명은 30년이다. 그리고 Hibernia 플랫폼이 건설된 환경은 해양 및 한랭지역으로 가혹한 조건하에 있어 고강도·고내구성 콘크리트를 적용하였다. Skirt 부분에 설계기준강도 49 MPa(실제 평균강도 73.8 MPa), 베이스 슬래브 부분에 설계기준강도 69 MPa(실제 평균강도 81.7 MPa)인 고강도 콘크리트를 사용하였다. 구체적으로 사용된 콘크리트 배합과 실험결과를 정리하면 〈표 2〉와 같다.

5.2 Troll GBS 플랫폼

〈그림 4〉는 북해에 있는 Troll GBS(Gravity Base Structures) 플랫폼으로 높이가 369 m(수심 303 m)이고, 구조물 건설에 콘크리트가 22만 4,000 m^3 정도 사용되었다. 이 구조물의 수명은 70년으로 설계되었으며, 설계기준강도가 75 MPa이다. Troll GBS 플랫폼에 사용된 콘크리트에는 Leca 800이라는 입자가 다른 2종류의 경량골재(표건상태)를 사용하였고, 〈표 3〉은 콘크리트 배합이다.

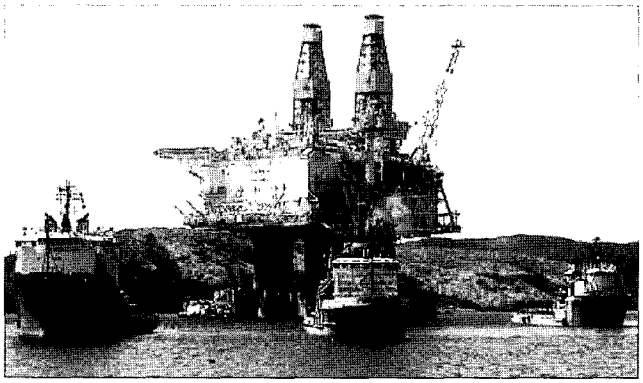

그림 4. Hibernia 플랫트 폼

표 2. Hibernia 플랫폼에 사용된 콘크리트 배합 및 실험결과

부재	W/C (%)	unit content(kg/m^3)				ml			슬럼프 (mm)	평균강도 (MPa)
		W	C*	S	G	SP	WRA	AE		
skirt	36	162	450	976	976	700	220	25	158	73.8
base slab	34	152	450	830	910	1,300	300	10	216	81.7

* 시멘트에 실리카 퓸이 8 % 포함됨

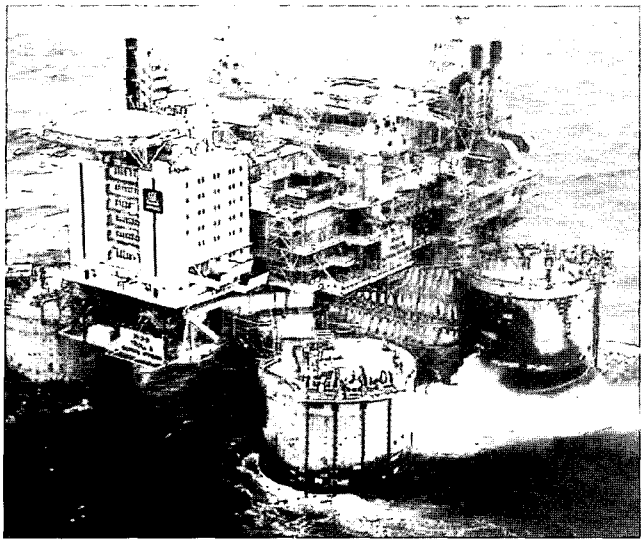

그림 4. Troll GBS 플랫폼

표 3. Troll GBS 플랫폼에 사용된 콘크리트 배합

constituent	unit content(kg/m^3)
Cement HS 65	434
Microsilica	14
Water	178
Sand 0 ~ 5 mm	911
Crushed quartzdiorite 5 ~ 20 mm	455
Leca 800 4 ~ 8 mm(dry)	132
Leca 800 8 ~ 16 mm(dry)	108
Superplasticizer	7
w/(c+s)	0.4
유효 w/(c+s), 경량골재의 흡수율 7%으로 가정	0.36

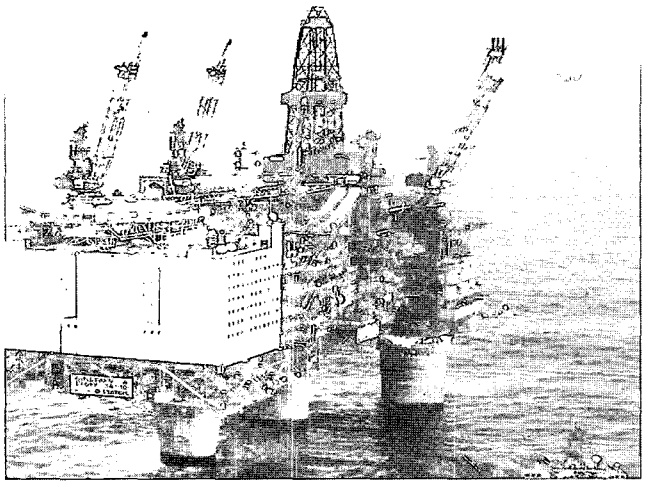

그림 5. Heidrun 부체 플랫트 폼

표 4. Heidrun 플랫트 폼에 사용된 콘크리트 배합

constituent	unit content(kg/m^3)
Cement SP30-4A	420
Silica fume	20
Water	169
Sand 0 ~ 3 mm	630
Leca 800 4 ~ 8 mm(dry)	320
Leca 800 8 ~ 16 mm(dry)	260
Superplasticizer	5 ~ 10 ℓ

5.3 Heidrun 부체 플랫폼

〈그림 5〉는 북해에 있는 Heidrun 부체 플랫폼으로 수심 345 m의 해상에 설치된 석유탐사 시설이다. 이 플랫폼은 북해에서 최초로 고강도 경량 콘크리트를 사용하였다. 경량 콘크리트의 설계기준강도는 60 MPa이며 사용한 콘크리트 양은 7만 m^{3}이고, 사용된 PSC 강재량은 4,000톤이다. 〈표 4〉는 사용된 콘크리트 배합이다.

6. 맺음말

본고에서는 해양 콘크리트 구조물, 특히 가스 및 석유 탐사용 플랫폼에 대해 주로 기술하였다. 향후 남극 대륙, 러시아 개발 참여로 점차 해양 콘크리트 구조물의 적용이 증가할 것이다. 그리고 해상 비행장, 인공섬, 해저터널 등에 대해서도 해양 콘크리트의 적용 가능성은 한층 높아질 것이다. 이상과 같이 해양 콘크리트 구조물이 설치된 환경은 해수침식 뿐만 아니라 저온, 파랑 등 가혹하므로 콘크리트 구조물의 고내구성, 고강도 등 고성능화가 필요하다. 유럽, 미국, 일본 등에서는 해양 콘크리트에 대한 연구가 오래전부터 활발히 진행되어 실제 구조물의 적용실적이 많으나, 국내에서의 해양 콘크리트 구조물에 관련된 연구는 미흡한 수준에 있다. 따라서 향후 국내에서도 산, 학, 연 등 관련 업계에서 해양 콘크리트 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. ACI 357R, "Guide for the design and construction of fixed offshore concrete structures," 2003.
2. ACI 357.1R-91, "State-of-the-art on offshore concrete structures for ta artic," 2003.
3. Hoff, G. C., Walum, R., Elimov, R., and Woodhead, H. R., "Production of high-strength concrete for the Hibernia offshore concrete platform," Proceedings ACI International Conference Singapore, 1994.
4. Sandvik, M., Hovda. T. and Smeplass, S., "Modified normal density(MND) concrete for the troll GBS platform," Proceedings ACI International Conference Singapore, 1994.
5. "Offshore Platforms and Pipelining," The Perroleum Publishing Company, 1976.
6. 鹿島建設土木設計本部, "海洋·港湾構造物/P C構造物", 鹿島出版社, 1994.
7. 關博, 上田茂, "海洋コンクリート構造物の設計と施工", 鹿島出版社, 1981.
8. Metha, P.K., "Durability of concrete in marine environment -A fresh look, concrete in marine environments," ACI SP-109, 1988.
9. 건설교통부, "콘크리트표준시방서", 2003.