02

초장대교량용 콘크리트 기술 개발

Development of Concrete Technology for Super Long Span Bridge

김영진
Young-Jin Kim
대우건설 기술연구원 부원장

김성욱
Sung-Wook Kim
한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구위원

김상철
Sang-Chel Kim
한서대학교 토목공학과 교수

정상화
Sang-Hwa Jung
한국건설생활환경시험연구원 선행기술팀장

최명성
Myoung-Sung Choi
대우건설 기술연구원 토목연구팀 선임연구원

1. 머리말

최근 국가 · 지역 간 물류 이동의 중요성이 대두되면서 초장대교량 발주량이 급증하는 추세다. 전 세계에서 추진 중인 초장대교량 사업은 유럽 15개, 아시아 10개, 미주 7개 등으로 사업비만 47조 5,000억 원에 달한다. 북미 지역은 1900년대 초반에 건설됐던 노후 교량 대체 사업이 활발하며, 중동 국가는 오일머니를 바탕으로 대규모 프로젝트를 추진하고 있다. 또한 중국에서는 1990년대 이후 장대교량 건설 시장이 급성장하고 있다. 국내에서도 2001년 ~ 2004년 4조 5,000억 원이던 시장 규모가 향후 10년간 10조원대로 성장할 것이란 전망이 나온다. 해당 국가의 랜드마크로써 건설기술에 대한 과시 및 침체된 경제에 활력을 불어넣어 주는 역할을 하는 초장대교량 건설은 점차 구조물이 대형화됨에 따라 주 사용재료인 콘크리트의 요구 성능도 점차 높아지고 있다. 그 대표적인 사례로 고압송용 콘크리트를 요구하는 주탑 시공기술, 균열저감용 초저발열 콘크리트를 요구하는 앵커리지 시공기술과 우수한 수중불분리성을 요하면서 유동성이 우수한 콘크리트를 요구하는 해상기초 시공기술을 들 수 있다. 이러한 경향은 사장교 및 현수교의 주경간 길이가 증가함에 따라 비례적으로 주탑 높이, 하부 구조인 기초 및 케이블을 고정하는 앵커리지의 규모 및 요구 성능이 높아지고 있으며, 이러한 요구 성능을 만족하는 고기능성 콘크리트에 대한 필요성은 계속 가속화될 전망이다.

2. 초장대교량용 콘크리트 핵심 기술

일반적으로 콘크리트 주탑 시공 시 상부로 콘크리트를 운반하기 위해서 버킷(bucket) 또는 펌핑(pumping)을 이용하는 두 가지 방법이 있다. 버킷의 경우 초기 비용은 비교적 저렴한 편이나 주탑의 높이가 증가하면 크레인을 이용한 작업의 어려움과 오랜 타설 간격에 따른 콘크리트 품질저하 등의 문제가 있어 펌핑을 이용한 콘크리트 압송이 경제적인 방안으로 평가되고 있다. 한편 해상교량의 하부구조에 타설하는 콘크리트의 경우 물과 접하는 경우가 많아 일부 중요 부위에는 수중불분리 콘크리트를 타설해야 하며, 이 때 시공 효율성과 품질 안정화를 위한 방안이 필요하다. 또한 앵커리지의 규모는 교량의 주경간장이 길어질수록 증대되기 때문에 시멘트의 수화열에 의한 품질 저하를 방지하기 위해서 온도균열 발생이 적은 초저발열 콘크리트의 적용이 필요하다. 따라서 이러한 각 구조물별 요구 성능을 만족하는 기술 개발을 통해 점차 장대화 되어가는 교량에 적용한다면 공기 단축 및 경제성 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 필요에 의해 국토해양부에서는 '초장대교량사업단(단장:송필용(한국도로공사))'을 2009

년 발족하였고, 그 가운데 콘크리트 요구 성능을 만족하는 기술 개발을 위해 대우건설, 한국건설생활환경시험연구원, 한국건설기술연구원, 한서대학교 연구진들이 참여하고 있다. 이 연구 개발의 핵심기술은 크게 3가지로, 첫째, 수직 높이 400 m 이상 일괄 타설과 압송 전 · 후의 콘크리트 물성 변화가 적은 콘크리트를 개발하고, 둘째, 기존 보통포틀랜트 시멘트를 사용한 콘크리트와 비교하여 온도균열 발생이 적은 초저발열 콘크리트를 개발하고, 셋째, 수중 타설시 콘크리트의 품질을 확보하기 위하여 고유동 특성을 가지는 수중 및 수중불분리성 콘크리트를 개발하는 것이다.

2.1 수직 400 m 일괄 압송 고압송 콘크리트

초장대교량의 고주탑 시공용 콘크리트 개발에서 가장 중요한 인자는 콘크리트 압송성이다. 400 m 높이까지 콘크리트의 물성변화 없이 압송 가능하다면 경제성 확보와 함께 구조적 안정성이 크게 증대될 것이다. 따라서 굳지 않은 콘크리트의 펌프 압송성 예측기술, 압송 전 · 후의 물성변화 최소화 기술 및 펌프압송시 관내 폐색현상 방지 기술은 본 연구의 핵심기술이다. 콘크리트의 펌프 압송성 예측 기술은 사용될 재료를 가지고 타설 높이까지 압송이 가능한지 여부를 확인하고, 시공성을 만족하는 펌프 장비 및 배관 선정 및 압송효율을 증대시킬 수 있는 콘크리트 배합을 사전에 파악 할 수 있는 기술이다. 이러한 펌프 압송성 예측 기술은 유변학(Rheology)적 특성 시험에서 얻어진 레올로지 상수(점도, 항복값)를 이용하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 방법을 이용하여 유동성과 펌프압송성의 관계를 정량적으로 분석하는 것이다. 〈그림 1〉은 유변학적 특성을 나타내는 대표

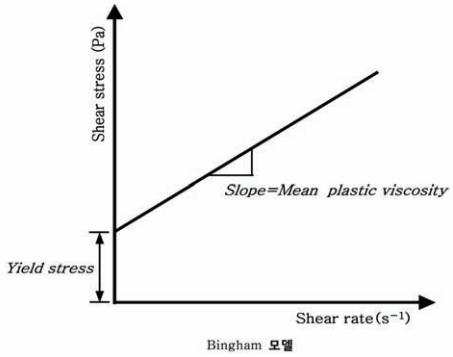
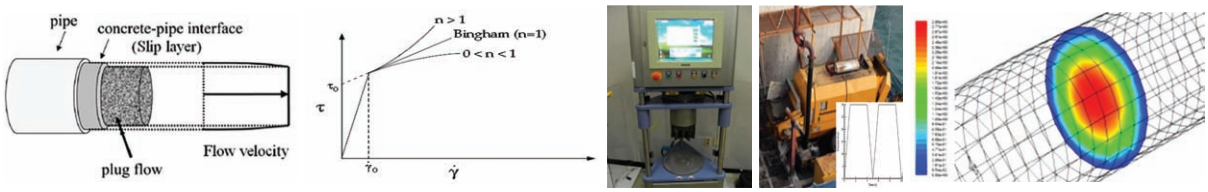


그림 1. 유변학(Rheology)적 특성 검토 모델

적인 모델(Bingham Model)을 나타낸 것이며, 〈그림 2〉는 이를 활용하여 콘크리트의 압송 성능을 예측하기 위한 절차를 정리한 것이다. 이러한 과정을 통하여 압송 전 · 후의 물성변화를 최소화 시킬 수 있는 콘크리트의 배합설계 기술이 완성되며, 압송 후에도 슬럼프, 공기량 및 압축강도의 변화를 최소화 시킬 수 있는 콘크리트의 제조가 가능하다. 또한 펌프 압송 시 관내의 폐색 현상은 수직으로 압송할 경우 수직관내에서 자중에 의해 물이 이탈하여 폐색이 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 골재의 함수 상태에 따른 콘크리트의 특성 및 가압블리딩 시험 등을 실시하여 압력을 받은 굳지 않은 콘크리트의 특성변화에 대한 영향 요인을 분석하는 것이 필요하다. 이렇게 콘크리트 압송성능을 사전에 파악함으로써 효과적인 현장 공정 계획수립이 가능하며 궁극적으로 콘크리트 압송에 따른 문제점들을 사전에 파악하여 해결할 수 있다.

2.2 세계 최고 수준의 초저발열 콘크리트

초장대교량의 앵커리지 시공용 콘크리트 기술에서 가장 중요한 인자는 초저발열 콘크리트의 개발이다.



- 관내유동 : Plug + Slip flow
- 유동특성 : Rheology parameters

(a) 압송 메커니즘 분석

- Non-Newtonian fluid
- Herschel-Bulkley(Bingham)

(b) 재료모델 설정

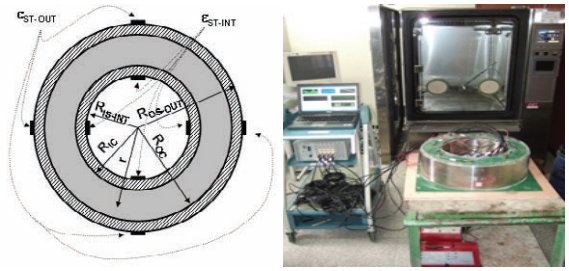
- Viscosity, Yield stress 등
- Pulse type pressure inlet

(c) 재료 특성값 및 경계조건 설정

- 유체 Equation(Navier-Stokes eq.)
- 소요압력, 토출량, 배관마찰 등 도출

(d) 유동 해석

그림 2. CFD 해석과정



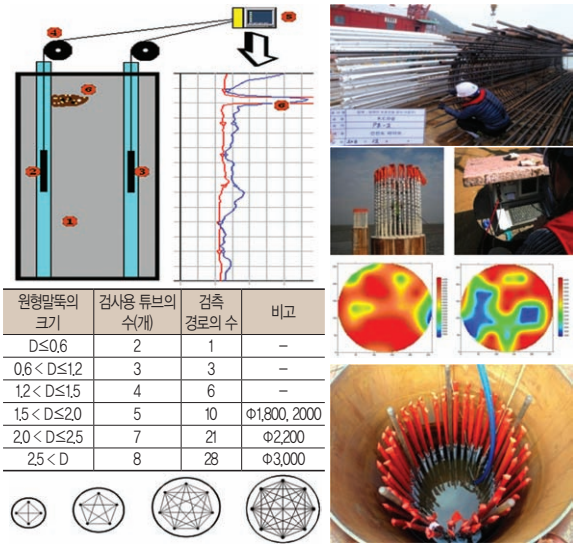
(a) Dual ring 시스템 (b) 시험전경

그림 3. 온도균열 저항성 정량평가 시스템 평가 장치

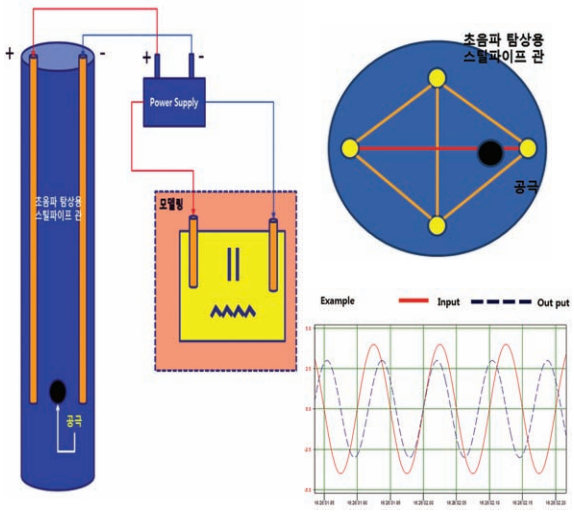
초저발열 콘크리트의 핵심 기술로는 시멘트 자체의 수화 발열량을 저감시키는 기술이며, 저발열 시멘트에는 3성분 혼합시멘트계 저발열 및 고벨라이트계 저발열 시멘트 2종류가 있다. 각각의 시멘트에는 서로 장단점을 가지고 있으며, 초장대 교량에 적용하기 위해서는 수화열이 낮고, 목적 강도값을 확보하며 동시에 유동성이 좋아야 하는 관점에서 두 종류의 저발열 시멘트의 장점을 활용할 필요가 있다. 현재까지는 콘크리트의 구조적인 목표성능을 만족하는 결합재의 미소수화열은 40 cal/g 정도가 세계 최고 수준이었는데, 본 연구개발을 통해 35 cal/g 이하의 초저발열 결합재를 개발하여 콘크리트 단열온도상승을 대폭 저감함으로써 균열발생확률을 감소시켰다. 이러한 사용재료에 대한 개발과 아울러 〈그림 3〉과 같이 Dual ring과 Acoustic emission을 이용하여 콘크리트 온도균열의 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 평가시스템을 개발하였다. 이렇게 개발된 기술을 통해 수화열 발생도 낮추고, 정량적인 온도균열 평가를 할 수 있어 대형 앵커리지 블록을 효과적으로 시공할 수 있다.

2.3 작업성이 우수한 고유동 수중/수중불분리 콘크리트

초장대교량의 대형 해상기초 시공용 콘크리트에서 가장 중요한 인자는 고유동 수중불분리성 콘크리트의 개발이다. 목표성능 수준은 수중슬럼프 600 mm 이상, 수중/기중 재령 28일 압축강도비 0.8 이상, 그리고 현탁물질액 150 mg/ℓ를 확보하는 것이다. 이를 위해 기존 혼화제의 성능을 향상시켜 최적화된 수중불분리성 혼화제를 개발하였고, 재료분리 없는 고유동성을 갖기 위해 광물질 혼화재, 시멘트 종류 등을 검토하여 적정의 콘크리트 배합을 도출함으로써 목표성능 수준에 도달하는 고유동 수중불분리성 콘크리트 배합기술을 완성하였다. 아울러 개발된 고유동 수중불분리성 콘크리트 제조 기술과 함께 해상기초의 대부분을 차지하는 수중콘크리트 제조 기술도 개발하였으며, 〈그림 4〉와 같이 실제 현장에서 콘크리트 타설에 따른 충진성 등의 건전성을 평가할 수 있는 모니터링 기술도 개발하여 현장에 적용하였다. 이러한 고유동 수중/수중불분



원형말뚝의 크기	검사용 튜브의 수(개)	검측 경로의 수	비고
D≤0.6	2	1	–
0.6 < D≤1.2	3	3	–
1.2 < D≤1.5	4	6	–
1.5 < D≤2.0	5	10	Φ1,800, 2000
2.0 < D≤2.5	7	21	Φ2,200
2.5 < D	8	28	Φ3,000



• 측정원리 및 방법 • 시험용 Tube RCD 현장 설치 • 측정원리 및 방법 • 실험 및 데이터 측정 예

(a) 초음파 이용법(기존) (b) 전극 이용법(개발)

그림 4. 수중콘크리트 건전성 모니터링

그림 5. 170 m Semi-scale test 전경 및 계측 상세

그림 6. 1,000 m Full-scale test 전경 및 계측 상세

리성 콘크리트를 적용함으로써 해상기초 시공 시 고품질의 콘크리트 성능확보와 아울러 우수한 작업성으로 인한 공사기간 단축 및 경제성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 핵심기술 개발 현황 및 적용 사례

3.1 고주탑용 고압송 콘크리트

콘크리트 압송에 따른 배관 내 유동 메커니즘을 분석하여 실 구조물의 펌프 압송 성능을 사전에 예측하고자 하는 CFD 해석적 기법, 그리고 해석적 기법의 검증과 소규모 실험조건에서의 데이터를 분석하여 실제 규모의 시공조건을 유추하는 상사성 개념을 적용한 펌프압송 성능을 분석하기 위해 수평 170 m의 semi-scale test〈그림 5〉를 수행하였다. 그리고 수직 400 m 주탑 시공의 압송 상황을 모사할 수 있는 수평 1,000 m full-scale test〈그림 6〉를 통해 실제 초장대교량 주탑 시공성능을 확인하였다. 이를 통해 고압송용 콘크리트 제조 기술을 개발하였고, 펌프압송 평가시스템 구축을 통해 효과적인 고주탑 시공 성능을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 앵커리지용 초저발열 콘크리트

개발된 초저발열 결합재를 사용하여 콘크리트의 수화열에 의한 온도상승 값을 분석하기 위해 4 m ×4 m×4 m 대형 Mock-up test를 수행하였다. 설치된 기초 매트와 상부에 설치될 Mock-up 구조물을 구속시키고 내 · 외부 온도와 온도 응력 등에 대한 계측 모니터링, 그리고 외기 온도를 고려하여 양생기간을 설정해 초저발열 결합재를 사용한 콘크리트를 타설하였다. 〈사진 1〉은 Mock-up 구조물의 전경이며, 〈그림 7〉은 콘크리트의 단열온도 상승값을 비교한 결과로 기존기술보다 우수한 성능을

사진 1. 4 m×4 m×4 m Mock-up Test 전경

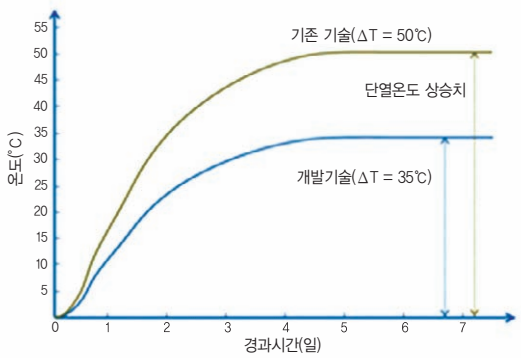


그림 7. 개발 기술에 대한 단열온도상승 시험값 비교

확인할 수 있으며, 이 실험을 통해 개발된 초저발열 결합재의 성능도 확인할 수 있었다. 또한 대형 앵커리지 블록의 시공성도 확인할 수 있어 향후 매스콘크리트 시공에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 해상기초용 수중/수중불분리 콘크리트

개발된 수중불분리 혼화제와 최적배합을 기반으로 한 고유동 수중불분리 콘크리트 및 수중콘크리트 제조 기술을 〈그림 8〉과 같이 대우건설에서 건설하고 있는 새천년대교(압해 ~ 암태 1공구) 현장 RCD 파일에 적용한 결과 압축강도비(수중/가중)가 0.9 이상, 슬럼프 플로우가 610 mm 이상으로 우수한 성능을 확인하였다. 이를 통해 개발된 기술은 실제현장의 시공성능을 향상시키면서 고품질의 성능을 확보할 수 있는 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 경제성 분석

개발된 초장대교량용 콘크리트 핵심 기술에 대하여 기존 콘크리트 기술과의 경제성을 비교 · 평가하기 위해 초장대교량 프로토타입(사장교(주탑 및 해상기초 분석대상)):주경간 1,200 m 3경간 연속 사장교, 283.5 m A형 콘크리트 주탑, 현수교(앵커리지 분석대상):주경간 2,800 m 2경간 타정식 현수교, 중력식 앵커리지)를 대상으로 분석을 실시하였다. 분석결과 주탑 공사의 경우 기존의 버킷방식에 비해 펌핑을 사용할 경우 직접비를 포함하여 7% 이상의 공사비 절감과 15% 정도의 공기단축을 이룰 수 있었으며, 해상기초 공사와 앵커리지 공사의 경우 직접비에서 각각 5%, 8% 이상의 공사비 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

그림 8. 수중불분리 콘크리트 적용 구간(새천년대교 현장)

5. 맺음말

초장대교량 건설용 고기능성 콘크리트 개발을 통하여 수직높이 400 m 이상 일괄 압송할 수 있는 콘크리트 제조 기술과 타설 성능을 사전에 예측할 수 있는 펌프압송 평가시스템을 구축하여 경제적인 고압송용 콘크리트의 적용 가능성을 확인하였으며, 대형 앵커리지 시공을 위한 초저발열 결합재 개발 및 온도균열의 정량평가 시스템 구축을 통해 매스콘크리트 시공 시 가장 큰 문제점인 수화열에 의한 온도 균열을 저감할 수 있는 방안을 수립하였다. 또한 대형 해상기초 시공 시 우수한 작업성과 품질을 확보할 수 있는 수중/수중불분리 콘크리트의 제조 기술 및 건전성 모니터링 기술을 개발하여 현장에 적용함으로써 그 우수성을 확인하였다. 국가의 랜드마크 역할을 담당할 초장대교량 건설에 본 초장대교량사업단 콘크리트 연구결과들을 활용하여 고품질의 콘크리트 성능확보 및 우수한 시공성능에 기여할 수 있기를 기대해 본다.

담당 편집위원 : 김진국(포항산업과학연구원 강구조연구소)
jkkim@rist.re.kr

김영진 박사는 연세대학교 토목공학과에서 반복하중을 받는 RC 휨부재의 비선형해석에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후, 1992년부터 대우건설 기술연구원에서 토목연구팀장을 거쳐 부원장으로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 프리캐스트 조립식 급속시공 교량, 저탄소시공시스템, 콘크리트 내구성 분야 등이며, 현재 초장대교량사업단 콘크리트분야 연구책임자와 우리 학회 콘크리트원자력구조물위원회 위원장을 맡고 있다.

youngjin.kim@daewooenc.com

김성욱 박사는 동국대학교 토목공학과에서 콘크리트 크리프에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 1989년부터 한국건설기술연구원에서 콘크리트 재료분야 및 구조분야에 대한 연구를 수행하고 있다. 2004년에는 호주 UNSW 대학의 Visiting Scholar로 근무하였고, 주 관심 연구분야는 고강도, 초고성능 및 해양콘크리트이며 우리학회 제10기 이사로서 국제정보위원장을 역임하였다.

swkim@kict.re.k

김상철 교수는 미국 Ohio주립대에서 콘크리트의 복합재료학적 파괴거동으로 박사학위를 취득하였으며, 콘크리트의 파괴역학적 거동, 고유동 콘크리트와 다기능 콘크리트의 재료 개발 및 콘크리트의 내구성 향상 방안 등에 연구를 수행하였다. 현재는 산업폐자재의 활용을 통한 그린콘크리트 연구에 관심을 갖고 있다. 우리 학회와 한국구조물진단유지관리공학회의 감사를 역임하였으며, 현재 한국건설순환자원학회의 회장으로 역임하고 있다.

schkim@hanseo.ac.kr

정상화 박사는 서울대학교 토목공학과에서 콘크리트의 탄산화 측정장치 개발 및 적용에 관한 연구로 2003년 박사학위를 취득하였으며, 2006년 이후 한국건설생활환경시험연구원에 재직 중이다. 주로 콘크리트의 내구성 및 부산물 활용기술과 관련된 연구를 수행하였으며, 최근에는 결합재로서 플라이 애시 및 슬래그를 대량 혼입하기 위한 연구를 수행하고 있다. 현재 우리 학회의 이사를 역임중이다.

jsh2593@kict.re.kr

최명성 박사는 한국과학기술원 건설 및 환경공학과에서 레올로지 특성을 이용한 콘크리프 펌프압송에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 2005년부터 대우건설 기술연구원에서 근무하고 있다. 주 관심 연구분야는 시멘트기반 재료의 레올로지 특성, 수화열, 내구성, 고기능성 콘크리트 등이다.

myoungsung.choi@daewooenc.com