

광안대교 하부기초구조물의 혼합형 저발열시멘트의 적용



김상철*



강석화**

1. 서 언

기존의 온도균열과 관련된 문제는 대부분이 댐이나 원자력발전소, 항만구조물과 같이 특수한 경우의 메시브한 구조물로 국한되어 생각하는 경우가 많았으나, 최근들어서는 고강도콘크리트의 사용에 따른 시멘트 사용량 증가와 시공방법의 기술적 발전에 따라 대량급속시공이 증가하고, 따라서 수화열에 의한 온도균열제어는 거의 모든 구조물에 큰 관심사로 대두되고 있는 실정이다.

매스콘크리트에서의 수화열 및 온도응력을 제어하는 방법으로는 파이프쿨링이나 프리쿨링 등의 시공공법 개선이 통상 알려져 있는 방법으로 생각할 수 있겠지만, 이들만을 적용하는데에는 특수한 장비설치와 관련한 공사비 상승 및 작업장 확보 등으로 적용하는 데에는 한계가 있을 수 있

다. 따라서 보다 효율적인 방법으로는 이와 병행하여 사용재료 및 배합을 적절히 선정하고 불력 분할과 치기간격을 조절함으로써 효율적이고 경제적으로 온도균열 제어를 실시할 수 있다. 특히, 과거에는 화학적 성분을 변경한 중용열시멘트가 있으나, 가격이 고가이고 환경적 인자로 의해 그 사용이 제한받게 되어 기존 공사에는 사용경험이 있는 시멘트에만 의존하여 왔다. 그러나 무기혼화재의 사용이 활성화되면서 산업폐자재의 활용이라는 측면과 치밀한 콘크리트구조 형성과 더불어 경제성도 뛰어나 혼합형시멘트의 사용이 점차 활발해지고 있는 추세이다.

본 고에서는 그 일환으로 무기혼화재와 포틀랜드시멘트를 혼합하여 생산한 혼합형 저발열시멘트의 적용사례를 매스콘크리트 구조물인 광안대로 현수교 구간을 통해 소개하고자 한다.

* 정회원, 동아건설산업(주) 기술본부 책임연구원

** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구팀장

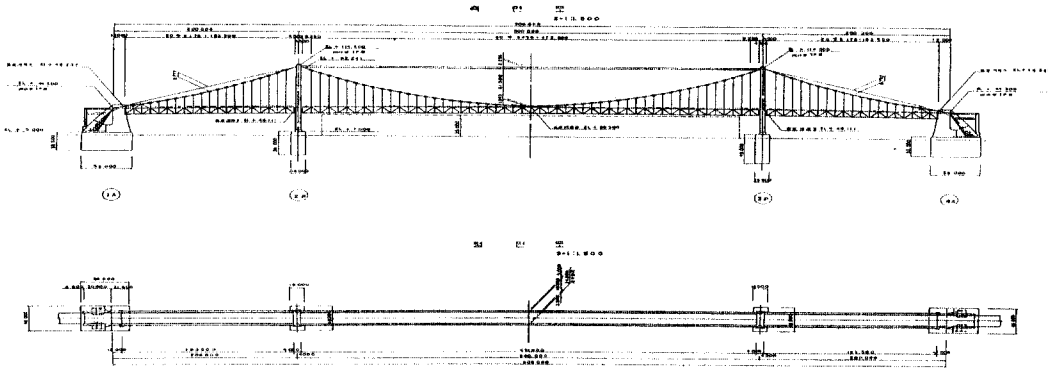


그림 1 광안대교 현수교 일반도

2. 광안대로 주요 현황

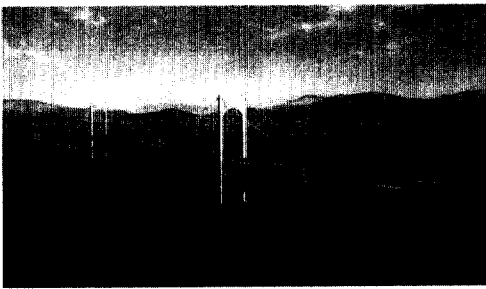


그림 2 현수교 조감도

광안대로는 부산 남구 남천동 49광장에서 해운대구 우동 수영비행장 부근까지를 연결하는 총길이가 7.420km의 자동차 전용도로로써, 급증하는 항만물동량의 원활한 처리와 부산과 동부 경남지역간 및 해운대 신시가지에서 발생하는 교통량을 해소할 목적으로 건설하고 있다. 본 광안대로는 현수교와 트러스접속교 및 강상판 접속교의 3구간으로 대별되며 교량 형식별 주요 제원을 요약하면 표 1과 같다.

3. 현수교 교량 개요

광안대교로 명칭되고 있는 광안대로의 중앙에 위치한 현수교 구간은 중앙경간 500m, 측경간이 각각 200m로 이루어진 3경간 2현지교로써 국내에서 최초로 시도되는 복층구조로 되어있다. 국내의 현수교로는 30년전에 시공된 남해대교가 유일한 시공사례이나 설계 및 시공상의 기술축적이

거의 이루어지지 못한 형편이므로 본 현수교는 일본과 기술협력계약을 통해 설계 협조가 이루어졌지만, 실질적으로는 국내의 기술이 주가 되어 설계 및 시공이 이루어진다는 점에서 큰 의의가 있다고 하겠다. 본 교량의 구조형식 및 제원을 기술하면 다음과 같다.

가) 보강트러스와 강상판

보강트러스는 비합성 형식이므로 보강트러스의 높이는 9.85m, 폭 24m로 되어 있다. 보강트러스는 상층 및 하층 모두 4차선 편도 자동차 전용도로로 구성된 2층 구조이며 수직재를 갖는 평행현 와렌(Warren)트러스 형식으로 되어 있다. 보강트러스는 행어(Hanger)를 통해 주케이블에 매달리게 되며 그 위에 상·하층의 강상판이 놓이게 된다. 상층 강상판은 양측에 보도 2.0m씩을 포함하여 그 폭이 22.0m이며 하층은 18.0m로 설계되어 있다. 상·하층 강상판 모두 차선도색 위치에 세로보(Stringer)가 위치하도록 계획하였기 때문에 비대칭 구조이며 한쪽 방향으로 2.0%의 횡단구배를 가지는 구조로 되어 있다. 보강트러스의 하현재 옆에는 유지보수용 작업차의 이동을 위한 레일을 부착하기 위해 브라켓(Bracket)을 설치하였다.

나) 케이블 및 행어

케이블가설공법은 A/S(Air Spinning)공법을 채택하였으며 케이블 새그비(Sag Ratio)는 1/8로 설계되어 있다. 현수교의 주케이블에는 최대 12,548ton의 장력(중앙경간은 12,293ton)이

표 1 광안대로 교량형식별 제원

구분	현 수 교	트러스 접속교	강상판 접속교	
위치	광안리 해수욕장의 전면으로 전제노선의 중앙부	현수교의 좌우측	시·종점부의 나머지 구간	
연장	900m	360m×2개소+30m×2개소=780m	-본선 : 3,070,000m · A-line: 1,277.8m · B-line: 1,310.0m	
지간 구성	200m+500m+200m	3@120m=360m (SHED 구조 60m벌도)	표준지간 60m	
폭원	-강상판 Deck : 22m(상층), 18m(하층) -보강형트러스 : 24.7m	-강상판 Deck : 18m -주형트러스 : 21m	-본선 : 11-21m · A line : 11-21m · B-line : 14.5-28m	
상부공	형식	-보강형 : Truss Girder -강상판: 비합성 Steel Deck -주 탑 : Steel Pylon	-주 형 : Truss Girder -강상판:비합성 Steel Deck	강상판 Steel Box
	공법	-케이블 : A/S 공법 -보강트러스 및 강상판 : 면재가설 -주 탑 : F/C에 의한 대블럭가설후 C/C에 의한 소블럭가설	F/C에 의한 대블럭가설	F/C에 의한 대블럭가설
하부공	형식	콘크리트 격자케이싱기초	문형라멘 철근콘크리트 교각 및 대구경 강관파일(φ2500)	문형라멘 철근콘크리트 교각 및 대구경 강관파일(φ2500)
	공법	Steel Caisson 및 지중연속벽을 이용한 Open Cut공법	항타기에 의한 항타 및 내부 굴착 콘크리트 시공	항타기에 의한 항타 및 내부굴착 콘크리트 시공

주 : F/C=Floating Crane, C/C=Crawler Crane

걸리게 되는데, 이러한 큰 장력에 견디기 위해서는 $\phi 5.0\text{mm}$ 의 소선이 312가닥으로 1개의 Strand를 구성하며 37개의 Strand가 모여 1개의 주케이블을 형성하게 된다. Wrapping이후의 케이블 직경은 약 0.6m (공극률 20%)가 되며, 이 때 최대장력에 대한 안전율은 약 2.5로 계획되어 있다.

강상판이나 보강트러스에 작용하는 각종 설계 하중들은 행어를 통해 주케이블로 전달하게 되는데 행어와 주케이블을 연결하기 위해서는 케이블 밴드라는 주강제품과 이에 따르는 크램프(Cramp), 소켓, 크램프메탈 등의 각종 부속품들이 필요하게 된다. 광안대교의 행어로프는 $\phi 66\text{mm}$ (측경간 제 1행어)와 $\phi 61\text{mm}$ (일반부)의 두 가지를 사용하게 되며 그 구성은 모두 $6 \times \text{WS}(41) + 7 \times \text{S}(19)$ 로 선택할 예정이다.

다) 주 탑

주탑은 현수교 전체의 조형적 완성도를 좌우하는 가장 큰 요소라 할 수 있다. 따라서 주탑부는 경관성을 중시여겨 주탑의 외관을 곡선형 수평계를 갖는 라멘식으로 설계되었으며 그 높이는 105m로 되어 있다. 또한, 외관상 이음부는 볼트를 사용하지 않고 현장용접을 사용하도록 하였으

며 유지관리를 위하여 주탑내부에 엘리베이터를 설치하여 점검을 위한 출입이 편리하도록 계획되어 있다. 주탑의 상단부에는 케이블 거치를 위한 새들(Tower Saddle)이 설치되며, 최하단은 앵커프레임(Anchor Frame)과 앵커볼트를 이용하여 주탑기초와 연결되도록 설계되어 있다.

라) 앵커구체(Anchor Block)

앵커구체는 케이블 및 보강트러스로부터 전달되는 수직, 수평하중을 지지하는 매우 중요한 구조로, 케이블을 정착시킴으로써 케이블이 충분한 장력을 받을 수 있는 기능과 함께 현수교와 연결되는 접속교량의 지점역할도 하게 된다. 블릭의 형상은 경관상의 배려에서 케이블의 굴절각을 크게 하고 크기를 가능한 작게 하여 구체가 두드러지지 않는 모양으로 계획되어 있다. 본 교량은 타정식인 관계로 자중이 매우 커야 하기 때문에 콘크리트 자체가 거대한 매스콘크리트 구조물로 되어 있다. 따라서 1회 타설고 및 분할타설 크기에 대해 수화열 해석을 실시하여 시공시의 수화열 관리에 대해 신중을 기하고 있다. 본 교량에서는 케이블의 정착방식을 일본에서 많이 사용하고 앵커프레임(Anchor Frame)방식 대신에 최근 유럽에서 사용하고 있는 스트랜드(Strand)를 사용한 정착방식을 채택하였다.

표 2 전체 콘크리트 구조물 제원 및 소요물량

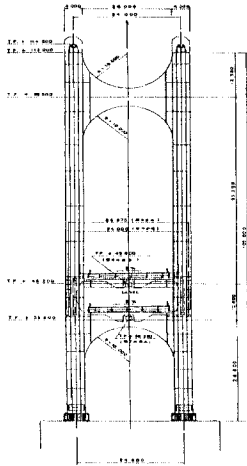


그림 3 주탑 일반도

4. 광안대교 콘크리트 설계 및 전체공사 수행 현황

광안대교에서 콘크리트가 적용되는 구간은 크게 앵커구체와 그 하부기초 및 주탑기초로 구분되며, 하부기초공사를 건작업으로 수행하기 위해서는 앵커구체기초와 주탑기초를 지중연속벽으로 둘러싼 후 그 내부를 굴착하고 콘크리트 기초공사를 수행하도록 설계되어 있다.

설계상의 시멘트 적용계획은 해수면 이하의 경우는 내황산염시멘트인 5종시멘트를 사용하도록 하고 앵커구체는 대형 매스콘크리트 구조물이므로 수화반응속도가 일반 포트랜드시멘트보다 지연되어 수화열이 적게 발생하는 고로슬래그시멘트를 사용하도록 하였으며 기타 구조물은 1종 포트랜드 시멘트로 적용하도록 설계되어 있다. 각 설계상의 구조물별 사용되는 콘크리트의 종류, 강도 및 소요 물량은 표 2와 같다.

당초 설계에서는 지중연속벽의 경우 수중불분리성콘크리트로 강도 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ (기중강도 $400\text{kg}/\text{cm}^2$)로 계획하였다. 그러나 계획한 지중연속벽이 본벽 개념에서 가설단계 공사시 외력을 지지하고 하부기초공사시 단순히 견시공을 할 수 있도록 하는 가벽개념으로 전환되면서 구조계산을 다시 수행한 결과 설계강도는 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 가 적정한 것으로 산정되었다. 따라서 기중시 콘크리트 강도는 25%할증 적용과 배합할증 15%를 적용하여 배합강도는 $345\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 기준으로 하였다.

구 분	구조물	콘크리트 종류	콘크리트량 (원설계기준)
앵커구체 AB1	케이슨 구조체	240-25-5종	36.386
	케이슨속채움	135-25-5종	13.591
	지중연속벽	400-19-5종	8.440
	앵커구체	240-25-고로	25.703
	Shed	240-25-1종	2.662
	교각	270-25-1종	1.047
앵커구체A B2	케이슨 구조체	240-25-5종	36.059
	케이슨속채움	135-25-5종	15.336
	지중연속벽	400-19-5종	9.440
	앵커구체	240-25-고로	25.703
	Shed	240-25-1종	2.662
	교각	270-25-1종	1.047
주탑 PY1	케이슨 구조체	240-25-5종	12.863
	지중연속벽	400-19-5종	5.915
주탑 PY2	케이슨 구조체	240-25-5종	15.423
	지중연속벽	400-19-5종	7.286
총 계			222.563m ³

주 : * 압축강도(kg/cm²)-골재크기(mm)-시멘트 종류순임

또한 용도변경에 따라 일시적 구조물로 전환되고 SCW공법 적용에 따른 차수벽 설치가 이루어지면서 직접적인 해수의 접촉이 없어졌기 때문에 고가인 수중불분리성콘크리트로 타설할 필요가 없이 타설작업이 용이한 고유동콘크리트로 전환되었다. 지중연속벽의 벽두께는 1.2m로 평균심도가 30m이며 트레미공법을 이용하여 타설하였다.

광안대교 주탑기초부는 표 2에 나타난 바와 같이 당초에는 케이슨 형식의 기초로 설계되어 있었으나 암반지지부의 심도가 당초 계획한 것보다 깊고 암선경사가 급격하여 RCD말뚝기초 형식으로 변경되었다. 본 말뚝은 해수와 직접적으로 접촉하고 있으며 콘크리트 타설작업이 해상B/P선을 이용하고 있고 타 공구와의 해상B/P선 공유 등의 문제로 인하여 내황산염시멘트인 5종시멘트를 사용하여 타설하였다.

전체공사 추진현황으로 앵커구체부는 차수벽과 지중연속벽 설치 및 내부굴착을 실시하여 케이슨 저판 콘크리트 타설을 완료하였고, 현재는 케이슨 벽체를 위한 철근조립중에 있으며 금년도 말까지는 벽체콘크리트 타설을 완료할 계획이다. 또한 주탑부는 PY1의 경우 RCD말뚝타설이 완료되어 미장 설치중에 있으며, PY2는 현재 말뚝 타설중 (12월 초순 현재 30분중 20분 완료)에 있다.

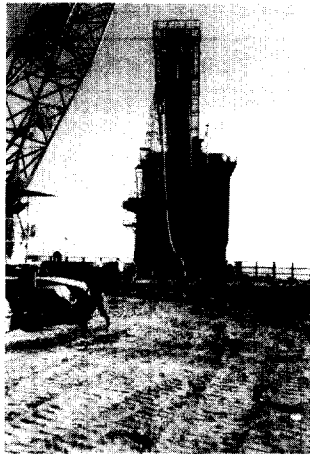


그림 4 타설에 사용한 B/P선

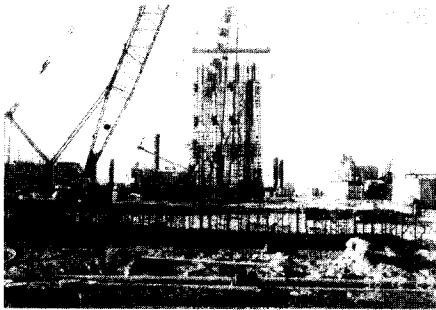


그림 5 지중연속벽 작업현황

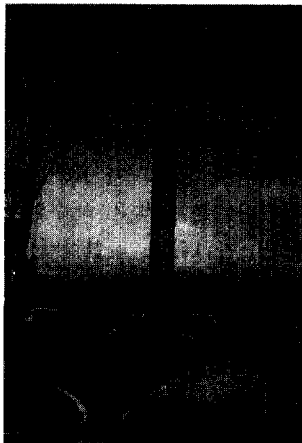


그림 6 RCD 작업현황

5. 하부기초 구조물의 시멘트 평가

광안대교 하부기초구조물은 해수와 접하고 있어 염해에 의한 콘크리트 열화현상과 철근부식이

우려되는 구조물이며, 또한 상부에서 작용하는 하중을 지지하여야 하는 목적을 지닌 중요 구조물이다. 이러한 문제점을 고려하여 당초 설계에서는 내황산염시멘트인 5종시멘트를 사용하는 것으로 하였으나 문헌상이나 기존 시공 경험을 통해 설계상의 시멘트를 매스콘크리트에 적용할 시 문제점이 도출될 수 있는 것으로 보고되고 있어 이에 대한 확인 및 대책방안으로 타 시멘트에 대해서도 검토하게 되었다. 당초 설계상의 5종시멘트와 슬래그함유량이 45%, 65%인 2종류의 고로슬래그시멘트 및 혼합형저발열시멘트 등 4종류의 시멘트에 대해 실내시험을 실시하여 각 시멘트별 물리·화학적 특성을 파악하였고, 모형 타설 실험을 실시하여 수화열 발생 크기, 온도응력 및 균열 발생 여부, 코아채취를 통한 강도발현도를 측정하여 시멘트 종류별로 비교·평가하였다. 모형타설 시험에 사용된 모의시험체는 이론적 해석을 통해 실 구조물의 효과를 충분히 파악할 수 있는 최소 크기인 $6\text{m} \times 2.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ (길이×높이×폭)으로 결정하여 시멘트 종류별로 4개소 제작하였으며 그 내부에는 온도계, 변형계, 유효응력계, 무응력계 등을 시험체 내부에 설치하였다.

본 고에서는 혼합형 저발열시멘트가 사용되게 된 경위에 대해 각 항목별로 실험적 결과와 현장 여건을 고려한 사항을 기술한다.

5.1 수화열 발생 측면

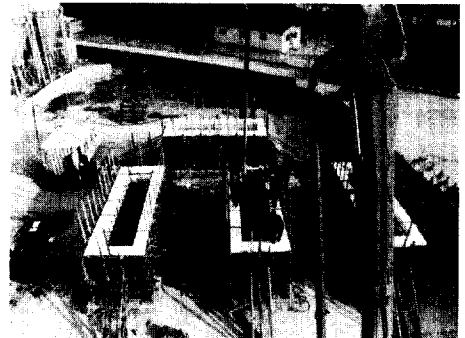


그림 7 모형타설시험 전경

본 광안대교의 콘크리트 구조물은 대부분이 매스콘크리트 구조물로서 해상 B/P선의 타설능력 이외에도 수화열 크기가 작업속도 및 균열제어

측면에서 크게 좌우하므로 가능한 한 수화열 발생이 작은 시멘트 선정이 필요하였다. 본 모의시험체에 온도계를 매설하여 온도를 측정한 결과 고로슬래그 65% > 고로슬래그 45% > 5종시멘트 > 저발열시멘트 순으로 나타났다. 일반적으로 고로슬래그 시멘트는 수화열 저감효과의 목적으로 사용되고 있는 무기혼화제이지만, 온도의존성이 매우 높기 때문에 환경온도가 고온상태에서는 슬래그의 활성도가 높아지므로 오히려 수화발열량이 더 커질 우려가 있다. 이러한 결과가 본 모형실험에서도 보였으며 수화열 저감측면에서 저발열시멘트가 가장 유리한 것으로 나타났다.

5.2 온도응력결과

유효응력계를 이용하여 모의시험체 내부에 발생한 응력발생현황을 검토한 결과 유효응력계가 가지고 있는 다소의 분해점과 해석기준의 견지에 따라 그 값 상의 차이가 발생할 수 있으므로 정확한 응력 계측결과치를 얻었다고 판단하기에는 다소 무리가 있다고 할 수 있다. 그러나 압축응력이 클수록 인장응력의 값이 상승되므로 이를 통해 비교하여 보면 수화열 계측과 동일하게 고로슬래그 65% > 고로슬래그 45% > 5종시멘트 > 저발열시멘트의 순으로 응력발생 측면도 저발열시멘트에서 가장 낮게 나타났다. 또한 계측기상의 문제점으로 제기되고 있는 인장곡선의 peak점에서 다시 압축방향으로 감소현상을 나타내고 있는 부분을 인장측으로 절상시킬 경우에도 이와 비슷한 현상을 나타내고 있어 내부에 발생하는 온도균열의 영향도 저발열시멘트가 가장 유리한 것으로 평가되었다.

5.3 내해수성

해수속에는 Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{+2} 등의 이온이 다량 함유되어 있으며 콘크리트의 열화현상을 촉진시키는 성분으로는 황산계의 화학성분이 크게 좌우한다. 그 외에도 철근의 부식을 촉진시키는 성분으로 여러가지가 있겠으나 그 중에서 염화물이온이 가장 강력하게 작용하는 유해성분으로 알려져 있다. 일반적으로 고로슬래그시멘트나 저발열

시멘트와 같이 무기혼화제를 이용한 혼합형시멘트의 경우는 내부에 포함된 포틀랜드시멘트의 수화작용이 종료되는 시점에서 혼화제에 의해 2차 수화반응을 하기 때문에 구조물의 표면이 단종의 포틀랜드 시멘트보다 치밀하게 된다. 이러한 측면에서 혼합형 시멘트는 5종시멘트와 거의 유사할 정도로 구조물의 열화현상을 방지할 수 있다.

그러나, 5종시멘트의 경우는 일반 포틀랜드시멘트에 비해 1/3정도 C_3A 의 양을 감소시킴으로써 C_3S 와 함께 수화발열량 크기에 영향을 미치는 성분을 감소시킬 수 있는 반면, C_3A 와 염화물이 반응하여 생성되는 불용성의 클로로알루미늄이 생성이 지하여 충분한 치밀성 확보측면에서는 불리하다고 알려져 있다. 이러한 현상은 실내시험을 통해 분석한 결과 5종시멘트는 내황산염에 대해서는 매우 강한 반면 염소이온 침투에 대해서는 불리한 것으로 나타났다.

5.4 강도 발현

모의 시험체를 이용한 압축강도시험 이외에도 실내에서 제작한 공시체를 이용하여 시험을 수행하여 보면 5종시멘트가 고로슬래그나 저발열시멘트인 혼합형 시멘트보다 초기 강도 발현 측면에서 우수하게 나타났다. 거푸집 조기철거를 위해서는 초기강도 확보가 중요하며 구조적으로 안정성 확보차원에서도 소요 재령일에 요구되는 강도가 확보되어야 할 것이다. 일반적으로 혼합형시멘트는 포틀랜드시멘트에 비해 초기강도가 떨어지나 잠재수경성으로 인해 장기재령에서는 강도확보가 높은 것으로 나타나고 있다.

공기단축과 균열발생 및 성장을 억제하는 차원에서 가능한 한 초기강도가 클수록 유리하므로 이 점에서 혼합형 시멘트보다는 5종시멘트가 우수한 것으로 나타났다. 실질적으로 4종류의 시멘트를 이용한 모형타설실험에서 5종시멘트를 제외한 고로슬래그와 저발열시멘트에서는 균열이 발견되었다. 여러 복합적인 요인이 작용하여 모의시험체에 균열이 발생하였지만 5종시멘트의 경우에는 타 시멘트에 비해 초기의 인장강도발현이 우수하여 균열발생을 다소 억제시키는데 공헌하였을 것으로 판단된다.

5.5 형상 및 외부 환경영향

모의시험체는 크기가 2.5m×1.5m×6.0m(높이×길이×폭)로써 벽체구조물에 가까운 형상으로 인해 외부구속에 의해 지배를 받는 매스콘크리트이지만, 외부를 스티로폼으로 감싸주어 수화열의 방출을 막아줌으로써 실질적으로는 무한대에 가까운 후딩형 기초형식이라 할 수 있다. 본 케이스기초는 모형타설시험 당시 타설고를 2m로 계획하였기 때문에 여유를 고려하여 2.5m로 하였다. 내부구속에 의한 균열발생을 파악하고자 하였으나 스티로폼을 제거했을 당시 균열의 발생을 조사한 결과 모든 모의시험체에서 균열은 발생하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 거푸짐을 제거함으로써 건조수축이 발생하여 표면에 균열이 발생하였고, 이러한 균열발생은 급격한 외부의 온도강하로 인해 구조물이 수축하면서 표면에 발생된 균열이 시험체 내부로 진행되지 않았나 추측된다. 또한, 문헌상의 조사에 의하면 혼합형시멘트의 경우는 포틀랜드계 시멘트에 비해 건조수축이 높은 것으로 알려져 있다. 이와 같은 요인과 초기강도발현이 낮은 혼합형 시멘트가 복합적으로 작용하므로써 균열이 유발되었을 것으로 사료된다. 그러나, 본 하부기초 저판의 경우는 지중(해중) 구조물이면서 후딩형 기초이기 때문에 건조수축의 영향은 매우 작을 것으로 판단되나, 가능한 균열의 유발을 억제하는 차원에서는 건조수축의 영향이 작고 초기강도발현이 양호한 5종시멘트가 유리한 것으로 해석되었다.

5.6 경제성 및 생산성 검토

본 시멘트 단가를 이용한 경제성을 비교 평가하였을 당시는 고로슬래그 45%가 가장 저렴하였고 다음이 저발열시멘트, 5종시멘트순으로 나타났다.

고로슬래그시멘트는 현재 국내에서도 사용이 다소 활성화되고 있으나 외국에서 생산하고 있는 고로슬래그시멘트에 비해서는 품질의 균질성 보장이 어렵기 때문에 광양주변의 소규모공사나 건축공사에 많이 사용되고 있는 반면 대형 중요구조물에는 그 사용 실적이 없다.

저발열시멘트는 고로슬래그시멘트에 비해 품질이 월등히 우수하고 단가측면에서 고로슬래그시멘트와 크게 차이가 나지 않으며 5종시멘트에 비해서는 매우 저렴한 잇점이 있다. 그러나 일본에서는 명석대교 등과 같이 저발열시멘트와 같은 3성분계 시멘트의 사용이 활성화되고 있지만 국내에서는 최근에 개발된 관계로 시공실적이 많지 않아 차후에 발생할 문제점에 대해서 검증이 되지 않은 것이 단점이었다.

5.7 중성화시험

중성화현상은 콘크리트자체의 알칼리성분이 장기간 공기중에 방치하였을 때 공기속에 내포되어 있는 이산화탄소 작용으로 인해 콘크리트가 pH=8.5~10의 중성화로 변경되는 현상을 말한다. 일단 중성화현상이 발생되면 콘크리트 표면의 열화현상이 현저하게 되고 철근의 표면까지 도달하게 되면 알칼리에 의한 철근의 부동태 상태가 유지되지 않아 콘크리트의 방청효과는 크게 저하된다.

중성화촉진시험을 수행한 결과 혼합시멘트계인 저발열과 고로슬래그시멘트는 5종시멘트에 비해 중성화 깊이가 크게 나타났다. 따라서 중성화반응은 5종시멘트가 가장 우수하고 다음이 고로슬래그시멘트, 저발열시멘트 순으로 나타났다.

5.8 시공성 평가

배합시험을 통해 비교하였을 때 고로슬래그 시멘트 65%의 경우는 블리딩이 많이 발생하게 되어 배합상에 어려움이 많았으며, 이보다는 덜하지만 고로슬래그 45%에서도 일정량 이상의 배합수를 추가함에 따라 블리딩이 발생하게 되어 시공성이 5종시멘트나 저발열시멘트에 비해 떨어지는 것을 알 수 있었다. 5종시멘트는 블리딩이나 레이턴스 발생 측면에서 보통 OPC와 비슷하였다.

저발열시멘트의 경우는 시험실에서 배합을 실시하였을 때 5종시멘트와 거의 유사하게 배합이 양호하였으며 특히, 블리딩 발생측면에서는 5종시멘트보다 적게 발생하였다.

저발열시멘트는 타설경험이 많지 않으므로 실제 타설을 실시한 경험이 있는 한탄대교를 방문

하여 저발열시멘트의 시공성을 조사하였다. 한탄대교는 총 지간이 166.8m의 아치교량으로 교대 기초부는 20.2m×17.0m×10m로 되어 있고 저발열시멘트를 사용하도록 설계되어 있다. 총 10m의 높이는 1회 타설고를 2m씩으로 하여 5단으로 타설을 실시하였으며 콘크리트타설시기는 9월부터 11월말까지 수행하였다. 타설기간중 온도균열 제어차원에서 파이프쿨링의 적용여부를 조사하기 위해 쿨링파이프 배관과 온도계측기를 설치하여 1단부분 타설 후 온도를 계측한 결과 유입된 수온과 쿨링후의 수온과의 온도차가 2℃ 정도로 나타나 이 후 타설시에는 파이프쿨링을 수행하지 않았다.

시공시의 문제점에 대해 한탄대교 현장감리단에 질의한 결과 포틀랜드시멘트보다 경화는 다소 지연되었으나 경화지연으로 인해 오히려 레이턴스 제거가 타시멘트보다 우수하였으며 블리딩이나 온도균열 문제는 발생하지 않았던 것으로 응답하였다.

6. 저발열시멘트 적용 및 콘크리트 관련 공사 현황 및 계획

모형타설시험과 각종 실내시험을 실시한 후 부산시와 감리단 및 시공사간의 시험결과에 대한 검토와 기술자문회의를 거쳐 혼합형저발열 시멘트를 사용하기로 결정하였다. 광안대로 현수교구간의 기초케이슨 저판은 크기가 53.6m×43.6m×4m로 한 번에 타설하게 되면 슬래브 면적이 넓어 구축도가 커지기 때문에 균열발생확률이 매우 높게 된다. 따라서 구축에 의한 균열발생을 최소화하기 위해 적절한 크기로 저판을 분할타설할 필요가 있다. 구조해석 프로그램을 이용하여 외력이 작용하였을 때 전단력이 최소화될 수 있는 부분에 대해 시공준비가 생기도록 하고 타설고를 2m로 하여 구조 및 수화열 해석을 실시한 결과 각 단계별 슬래브에 대해 7개씩으로 분할하는 것이 가장 유리한 것으로 해석되었다. 그러나 기초 저판 타설시기가 계절적으로 혹시기에 가까운 7월이었고 타설블럭 크기 또한 구조적 안정성 및 공기를 감안할 때 더 이상 줄일 수 없는 형편이었으며, 해상B/P선의 공간부족으로 프리쿨링 적용도 어려운 관계로 파이프쿨링만을 적용하였다. 파이프는 온돌공사에서 주로 사용되고 있는 외경

이 $\phi 25.4\text{mm}$ 의 X-L 파이프를 사용하고 1단 저판에 대해 2단 배열로 파이프의 수는 4개 설치하였다. 사용되는 냉각수는 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 해수로 콘크리트타설 후 4일간 계속적으로 통수하였다. 통수 방법은 블럭의 외곽부에서 중심부로 유출시키는 방식을 적용하여 가급적 내부온도와 냉각수의 급격한 온도차가 발생하지 않도록 유의하였다. 파이프쿨링의 적용에 대해서도 효율적인 쿨링을 도모하기 위해 수화열 해석을 실시하였고, 온도계측기를 위치별로 매설하여 이론적 해석결과와 실측치를 비교하였다. 비교결과는 계측위치에 따라 다소 차이는 있었으나 해석결과는 실측치를 거의 유사하게 모사하였으며 파이프쿨링을 실시하였을 경우는 $45 \sim 55^\circ\text{C}$ 의 범위에 있어 쿨링을 실시하지 않았을 때에 비해 $5 \sim 10^\circ\text{C}$ 정도 낮아 쿨링에 따른 온도저감효과는 크지 않았으나 온도응력에 있어서는 균열발생확률이 $34 \sim 40\%$ (온도균열지수 $0.99 \sim 1.05$)에서 4% (균열지수 $1.6 \sim 1.7$)로 낮아져 파이프쿨링이 균열제어측면에서 효과적인 것으로 나타났다. 또한 시공결과에 대해서도 현재까지 조사한 바에 따르면 국부적으로 미세한 균열이 발견되었으나 구조적인 문제가 발생할 정도의 심각한 균열은 발견되지 않았다. 현재 혼합형 저발열시멘트는 광안대교 하부기초 케이슨 전체에 적용할 계획이며 차후 앵커구체에도 본 시멘트 적용을 면밀히 검토하고 있다.

7. 결 언

광안대교는 매스콘크리트 조건에 따른 수화열 발생을 최소화하고 염해에 대한 내구성 문제가 함께 고려되어야 하는 특수조건을 안고 있다. 따라서 본 현장에 적합한 시멘트 선정을 위해 모형타설과 여러 실내시험을 거쳐 혼합형 저발열시멘트를 하부기초 구조물에 적용하였으며 사용 시공중에 있다. 현재까지 사용 결과에 따르면 상당한 양의 수화열을 제어할 수 있었으며 품질상에 큰 문제가 발생하지 않고 있어 그 사용은 앵커구체에도 적용할 계획 중에 있다. 그러나, 콘크리트는 비균질성 복합재료로 시멘트는 하나의 구성성분일 뿐 모든 균열의 발생을 억제할 수 있는 유일한 방법이 아니므로 시공시 환경조건에 따른 품질 및 관리에 철저를 기하고 있다. 