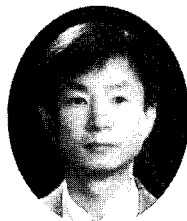


# 특집

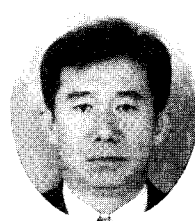
|| 수중 콘크리트 ||

## 수중 콘크리트의 시공

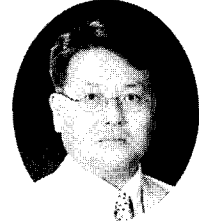
- Underwater Concrete Construction -



최흥식\*



허 권\*\*



양은익\*\*\*

### 1. 수중 콘크리트의 시공

일반적으로 콘크리트는 공기 중에서 시공되는 것이 바람직하나, 하천이나 해상에서는 기상, 해상 조건 때문에 육상화 작업이 경비가 많이 들고 공정 기간이 길어지는 단점 때문에, 규모가 크고 비교적 높은 강도를 필요로 하지 않는 경우는 수중 콘크리트를 타설하는 것이 더 경제적이 된다.

일반적인 수중 콘크리트의 시공법으로는 트레미공법, 콘크리트 펌프공법, 프리팩트 콘크리트 공법 등이 있다.

한편 최근에 굳지 않은 콘크리트가 수중에서 시멘트의 유실이나 재료 분리가 생기지 않도록 저항성을 갖게 하는 고분자계의 첨가제가 개발되어 트레미관 등을 사용하지 않고 직접 수중에 낙하시켜 콘크리트를 타설하는 수중 불분리 콘크리트가 이용되고 있다. 대표적인 수중 콘크리트 타설법은 다음과 같다.

#### 1.1 트레미 콘크리트 공법

트레미 콘크리트 공법은 수중 콘크리트 중에서도 비교적 높은 강도를 필요로 하는 경우에 사용되는 공법으로, 트레미관을 수중 거푸집 속에 집어넣고 이것을 통하여 콘크리트를 타설한다. 트레미용 콘크리트로는 물시멘트비 50% 이하, 단위 시멘트량 370

kgf 이상의 것이 사용된다. 트레미관의 직경은 깊이에 따라 다소 증가하나, 주로 30~50cm의 것이 많고 1개 트레미관의 시공 면적은 30m<sup>2</sup> 정도이다. 이 공법의 시공 수심은 잠수부의 작업성을 고려하여 30~40m 이내가 적합하며, 그 이상의 수심에서는 특별한 조치가 필요하다.

#### 1.2 콘크리트 펌프 공법

콘크리트 펌프공법이란 펌프배관의 선단을 수중에 넣고 이것을 통하여 수중 콘크리트를 타설하는 공법이다. 시공법에 있어서는 트레미 공법과 공통점이 많으며, 그 차이는 트레미 공법에서는 콘크리트가 자중에 의해 침하하지만, 펌프공법에서는 펌프의 압력에 의해 콘크리트를 압송하는 것이다. 따라서 시공에서의 주의점은 배관 선단의 토출반력을 어떻게 대처하는가 하는 것이다. 이러한 반력에 저항하기 위하여 항상 배관의 선단을 타설한 콘크리트 속에 꽂아 놓아야 하므로, 배관의 선단부분은 경사배관이나 유연한 호스를 사용할 수 없고 연직의 강관으로 하는 것이 좋다. 어쩔 수 없이 유연한 호스 등을 사용하는 경우에는 이동 방식을 잠수부에 의존하는 방법 외에 별도의 방법을 고려하여 선단을 고정해야 한다.

#### 1.3 프리팩트 콘크리트 공법

이 공법은 수중의 거푸집 속에 미리 직경 50~150mm 정도

\* 정희원, 충청대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 충청대학 화학공학과 부교수

\*\*\* 정희원, 강릉대학교 토목공학과 조교수

의 굵은 골재를 채우고 난 후에, 시멘트 모르타르를 주입하여 콘크리트를 제작하는 시공법이다. 모르타르 주입은 주입관을 통하여 최하단으로부터 상향으로 실시하며, 콜드조인트가 생기지 않도록 연속하여 윗 부분까지 타설하는 것이 바람직하다. 주입을 도중에 중단하여 콜드조인트가 생기면, 레이턴스 제거가 매우 곤란하기 때문에 구조적으로 결함을 만드는 결과가 된다.

특히 장대교량 기초에서는 한번에 대량의 콘크리트를 타설하기 위하여, 프리팩트 콘크리트가 사용되고 있다. 예를 들면, 瀬戶 대교에서는 23만 $m^3$ 의 콘크리트가 이 공법으로 시공되었다.

주입 모르타르는 시멘트, 플라이애쉬, 모래, 혼화제 및 배합수를 혼합한 것으로 비교적 부배합이 우수하며 유동성이 좋은 배합을 사용한다.

한편 프리팩트 콘크리트의 강도는 플라이애쉬 등의 혼화제를 사용하기 때문에 장기강도가 증가하므로, 일반적으로 재령 91일을 기준으로 하여 설계기준강도를 정하고 있다. 실제로 타설된 콘크리트의 압축강도는 200~400 $kgf/cm^2$  까지 얻어진다.

### 1.4 설치 케이슨 또는 설치 후딩 공법

이 공법은 별도의 공장이나 도크에서 제작된 강재 케이슨, 콘크리트제 케이슨 또는 후딩을 현지에 예인하고, 사전에 굴삭된 지지반 위에 floating 크레인을 이용하여 침설한 후, 케이슨 속에 프리팩트 콘크리트, 또는 수중불분리 콘크리트 등을 타설하여 기초를 완성하는 공법이다.

설치후딩의 경우 후딩 밑면에는 특수 콘크리트를 주입하여 기초와 일체가 되도록 시공한다. 프리팩트 콘크리트를 보완하여 사용되는 수중불분리 콘크리트는 수중불분리제를 콘크리트에 첨가하여 시멘트 입자를 불분리제의 입자로 보호하여 외부의 자유수에 의한 시멘트 입자의 유실을 방지한 콘크리트이다.

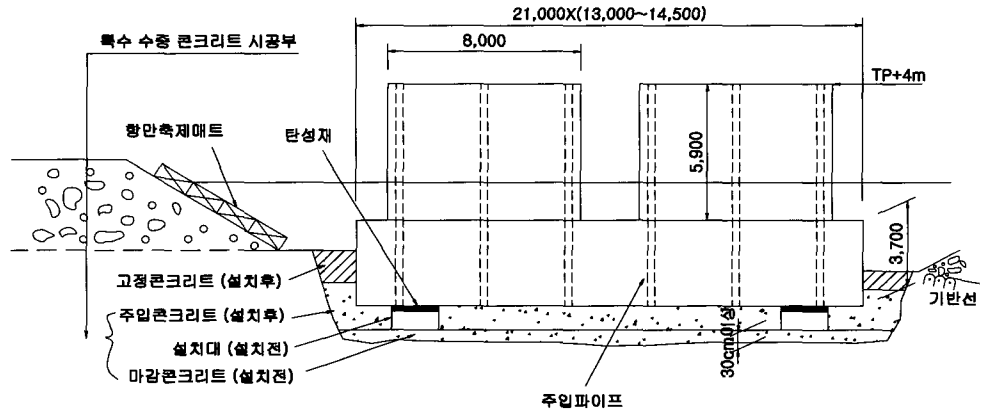


그림 1. 설치 후딩 공법

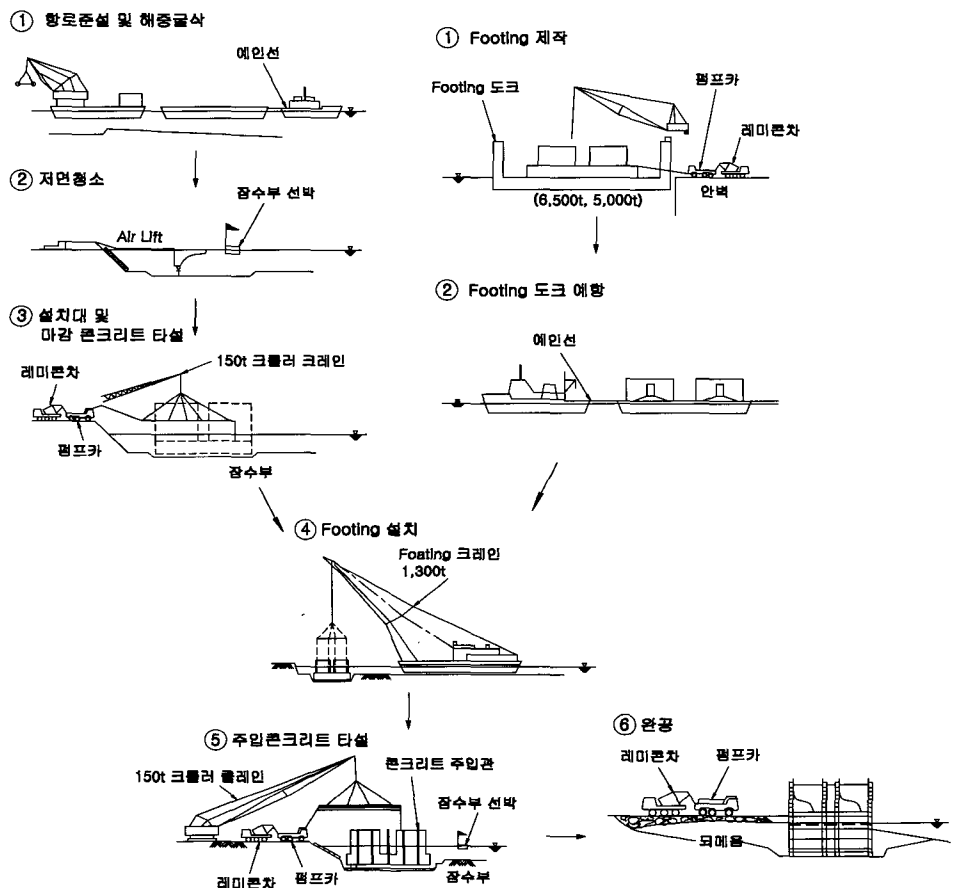


그림 2. 설치 후딩 및 설치 케이슨의 가설 순서

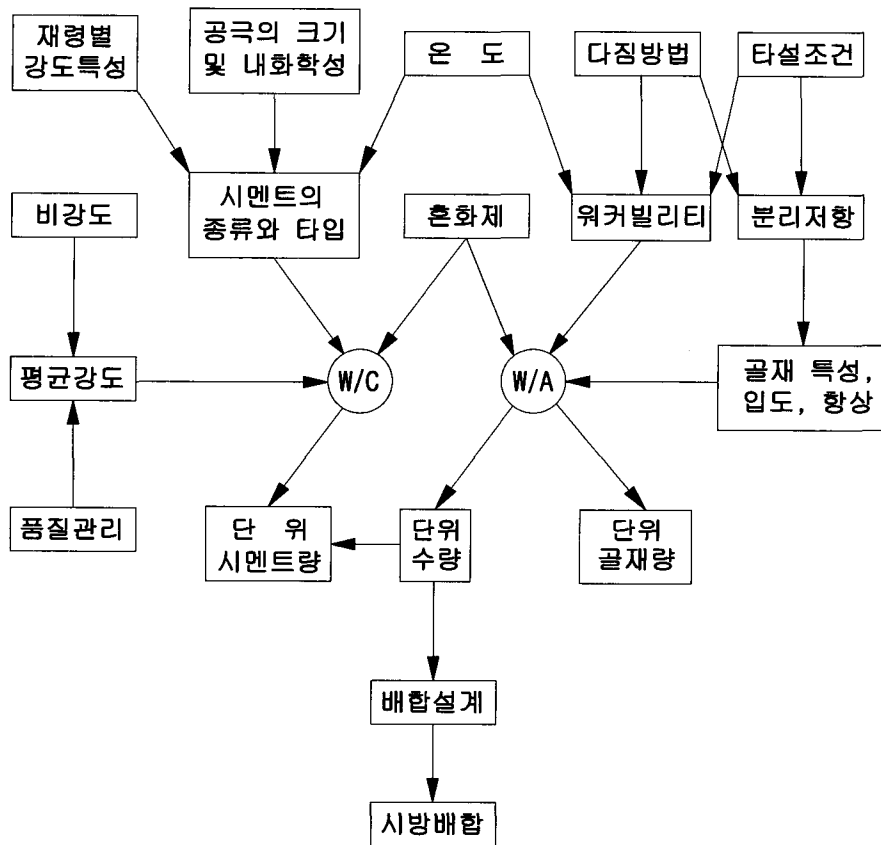


그림 3. 타설 조건을 고려한 배합 인자간의 상관 관계

## 2. 시공성을 고려한 콘크리트 배합

수중불분리 콘크리트가 개발되기 이전에는 수중에서의 콘크리트 타설은 주로 타설 방법의 개선을 통하여 품질이 우수한 수중 콘크리트를 제조하는데 주력하였다. 그러나 수중불분리 콘크리트가 개발되면서 공사의 시공범위 등에 대한 개념이 크게 변화되기 시작하였고, 수중공사의 기술혁신이 이루어졌다. 실제로 수중불분리 콘크리트를 시공함에 있어서는 배합설계시 고려하여야 할 조건을 먼저 인지하고 이를 배합과 시공에 반영하는 것이 중요하다. 배합설계시 인자간 연계성을 고려하여 도표화하면 그림 3과 같다.

환경에 대한 고려에 따라 타설 방법이 선정되기도 하며 이에 대한 탁도나 슬럼프플로우 등의 기준이 서로 다르게 적용될 수도 있다. 품질관리는 공극에 대한 충전성, 수질 등의 환경에 대한 대책은 물론, 강도나 내구성은 실험적으로 검증된 상태에서 진행되어야 할 것이다. 기타 설계기준강도가 결정됨에 따라 배합 강도가 결정되며 시공조건 즉, 수중 최대 낙하거리, 최대 유동거리에 따른 충전성 등이 고려된다. 보통 수중불분리 콘크리트의 경우 슬럼프플로우는  $52.5 \pm 2.5cm$ 에서 8시간 정도 유지되도록 하여 타설한다.

이때 경시변화 없이 8시간 정도가 유지되도록 하는 것은 충분

한 시간동안 충전되도록 하기 위한 조건이다. 그러나 유동시간을 지나치게 고려할 경우 콘크리트의 응결에 영향을 미칠 수 있으므로 주의하여야 한다.

조골재의 크기는 무근 콘크리트나 철근 간격이 넓은 경우 40mm를 사용할 수도 있으나 보통의 경우 20~25mm를 사용하는 것이 대부분이다.

시멘트종류의 선택은 일반적인 경우 1종 보통 시멘트를 사용하지만 매스콘크리트의 경우 고로 시멘트, belite시멘트, 3성분계시멘트 등이 사용되고 특수한 경우 조강시멘트가 사용된다. 국내시공에서 바다에 타설할 때 해수 내에 있는 황산(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)이온에 저항성을 갖도록 하기 위하여 5종 시멘트를 사용한 경우도 있다. 시멘트의 신선도가 유지되도록 사일로 등에서의 풍화에 유의해야 한다.

잔골재율은  $G_{max}$ 가 20~25mm 인 경우 약 38% 내외에서 사용하나, 굳지 않은 콘크리트의 충전성 등이 강조될 때는 40~45% 정도의 잔골재율을 사용한다.

수중불분리 혼화제는 가격이 저렴하고 염의 형태로 되어 있지 않으면서 물과 쉽게 반응하여 충분히 구속수를 가질 수 있는 고분자 물질을 사용하여야 한다. 대개 사용량은  $2 \sim 5kgf/m^3$  이다.

수중불분리 혼화제 사용량에 따른 점성변화는 log함수로 변화하므로 소량의 증가에 따라 탁도의 감소는 크게 얻을 수 있다. 반

대로 소량의 감소에 따라 불분리 성능이 크게 저하될 수 있으므로 불분리제의 사용은 매우 세심한 주의를 필요로 한다.

### 3. 수중 콘크리트의 시공 사례

일본은 지리적으로 4개의 큰 섬으로 이루어진 나라로서, 수중 공사가 많아 수중불분리 콘크리트 분야의 적용이 활발하다.

국내의 경우도 최근 서·남해를 중심으로 섬을 연결하는 연도교, 섬과 육지를 연결하는 연육교 등의 공사가 활발히 진행되고 있고, 내륙의 경우도 강이나 연약지반 등에서 지하수위가 지표에 근접한 경우에 적용사례가 점차 늘어나고 있다. 그 밖의 적용사례는 부두의 접안슬래브 또는 등대 등의 해안가 구조물의 부분적인 보수공사에도 수중 콘크리트의 타설이 이루어졌으나, 그 사용량이 비교적 크지 않았다.

한편 국부적인 보수의 경우 낮은 경비에 의해 수중 콘크리트를 타설하는데 충분한 공법과 재료의 검토가 부족한 경우도 있으며 이의 개선을 위하여는 소규모 공사에 적합한 시공방안이 도출될 필요가 있다. 국내외에 시공된 수중 콘크리트 공사의 몇 가지 예를 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.1 關西국제공항 연락교 하부공

關西국제공항 연락교는 해상을 매립하여 조성한 인공섬과 육지를 연결하는 총 연장 4km인 도로, 철도 병용교량으로, 해상 중앙부분은 도로와 철도를 상하로 배치한 2층 구조의 강제연속트러스 교량이며 공항 측과 육지측은 도로와 철도를 분리한 강제 박스형 교량으로 구성되어 있다. 연락교의 하부공으로는 해상부분에 29기의 교각, 인공섬에 교각 1기, 육지부에 교각 1기를 합쳐 총 31기의 교각이 있다.

연락교 공사는 1987년 6월에 착수하였으며 전체의 수중불분리 콘크리트 시공수량은 해상부분 교각의 29기에서 마감콘크리트와 기초콘크리트를 포함하여 약 14만  $m^3$ 이다. 수중불분리 콘크리트의 제조 및 타설은 콘크리트 플랜트선(CP선박)을 사용하였다.

공사에 사용한 시멘트는 해중에서의 매스콘크리트임을 고려하여 수화열이 작고 화학저항성과 수밀성이 우수한 고로시멘트B종을 사용하였다. 고로시멘트는 보통시멘트와 비교하여 초기강도는 낮으나 장기재령에서는 동등 이상의 강도가 발휘되는 것으로 확인된 것이다. 한편 기초콘크리트의 관리기준은 91일 강도로  $240kgf/cm^2$ 을 설정하였으나 특수 혼화제가 강도에 어떤 영향을 미치는지 충분히 파악되지 않은 것을 고려하여 실제 현장배합에서는 재령 28일 강도를  $240kgf/cm^2$ 으로 하였다.

각 교각의 시공실적에 따르면 재령 28일, 91일에서의 기준, 수중제작 공시체의 압축강도 차이는 거의  $30kgf/cm^2$  이하로 나

타나 기중제작 공시체의 강도로 품질관리가 가능함을 보여주었다.

수중불분리 콘크리트의 타설에는 트레미관을 사용하였으며 타설시 자유낙하높이가 50cm로 제한되어 있으나 실제 시공에서는 품질 향상을 위해 트레미관의 선단을 콘크리트 속에 꽂아 넣고 타설하였다. 이때 트레미관 선단의 관리는 타설강관에 부착한 표식을 확인하면서 콘크리트 타설면의 상승에 맞추어 트레미관을 들어올리는 방법을 사용하였으며 트레미관의 매립 깊이는 1m 이내로 하였다. 수중불분리 콘크리트는 점도가 높아 펌프에 의한 시공능률이 크게 저하하였으며 배관재료의 마모가 심하게 발생하였다. 기초콘크리트의 시간당 타설량은 40~60 $m^3$  정도였다.

#### 3.2 明石해협대교 주탑 기초의 시공

明石해협대교는 神戸와 淡路島를 잇는 전체길이 3,910m, 중앙지간 길이 1,990m인 3경간 2хин지 보강트러스 현수교로써 주탑을 지지하는 주탑기초로는 각각 2P( $\phi 80m \times$ 높이70m)와 3P( $\phi 78m \times$ 높이67m)가 있다. 주탑기초의 시공법은 대수심, 심한 조류의 조건에서 안전, 확실, 신속시공이 가능한 설치케이스 공법을 채택하였다.

설치 케이스 공법에 사용되는 수중 콘크리트로는 사전 실험결과를 근거하여 저발열형 수중불분리 콘크리트를 선정하였다. 수중불분리 콘크리트의 타설은 기상 및 해상조건이 가혹한 상태에서 이루어지므로 안전, 확실성을 고려하여 1회 타설량 정도의 재료를 미리 저장하고(콘크리트로 약 9,000 $m^3$ ) 3일간 연속하여 타설하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 케이스의 양측에 콘크리트 플랜트선과 자재선박을 항상 계류시켰다. 시공은 2층벽 부분에서는 16분할된 각 구획을 각각 6개의 타설관으로 일괄타설하였고 내부 중앙부는 콘크리트의 일체화를 위한 처리를 하면서 3~4m 정도의 높이로 층타설을 하였다.

明石해협대교의 하부공 공사는 주탑기초 2P가 1989년 10월, 주탑기초 3P가 1990년 1월부터 각각 수중 콘크리트의 타설을 시작하여 2P는 1990년 10월에 약 27만 $m^3$ , 3P는 1990년 12월에 약 23만 $m^3$ 를 타설 완료하였다.

#### 3.3 RCD 파일의 시공

RCD(Reverse Circulation Drill)말뚝기초는 풍화대 또는 연암층 등에 근입된 casing에 철골 또는 철근을 배근하고 트레미 등으로 수중 콘크리트를 타설한 후, 트레미 파이프를 해체하고, 일반 콘크리트 또는 lean콘크리트를 시공하는 현장타설 말뚝이다. 그 예로서 현수교 구간 900m와 접속교 6.52km로 건설되는 총연장 7.42km의 복층 왕복 8차로로 이루어진 광안대교에서 현수교 구간의 주탑 기초는 RCD말뚝으로 시공되었다.

이때 사용된 RCD말뚝은 해수와 직접 접하고, 타공구와의 해

상 B/P선 공유문제로 인하여 5종 시멘트로 사용하였으며, 타설은 트레미공법을 이용하였다.

### 3.4 설치 케이스 및 우물통 기초의 시공

전남 신안군 팔금면에서 암태면을 잇는 팔금-암태 연도교는 대림산업(주)에서 시공하고 있는 연도교로서 전체길이 600m로서 중앙에 길이 140m로 3경간과 양단에 90m 경간을 갖는 5경간 FCM교량으로서 하부 기초는 설치케이스 공법을 채택하였다.

설치 케이스 공법 적용 시, 일반적으로 경비의 절약을 위하여 부력에 대한 저항이 가능한 중량을 고려하여 하부에 수중불분리 콘크리트를 타설한 후 육상화시키고 일반 콘크리트를 타설하는 방법이 사용된다. 팔금-암태도 연육교의 경우 총 수중 콘크리트의 타설물량은 약 6000m<sup>3</sup>였으며, 타설은 버켓공법을 사용하였다. 우물통 기초의 경우도, 통상의 우물통을 내린 후, 하부에 수중불분리 콘크리트를 타설하고, 이후 일반 콘크리트를 타설하는 방법이 주로 이용되고 있다.

예를 들어 대림산업(주)에서 시공한 삼천포 대교의 경우 우물통의 깊이가 약 20~30m이며, 부력의 크기를 고려하여 미리 타설된 수중불분리 콘크리트의 높이는 2.5~9.0m였으며, 부력에 의한 부상을 방지하고 안정화시킨 후, 일반 콘크리트를 타설하였다. 이때 수중 콘크리트의 타설은 트레미 공법을 사용하였다.

### 3.5 연약 지반의 경우

1999년 삼성물산에서 시공한 서해안 고속도로 제 13공구의 경우, 바닷가에서 가까운 연약지반으로서 교각 하부에 RCD 파일 시공 후에도 지하수의 흐름에 의해 콘크리트가 씻겨 나가는 문제가 예상되어, 이에 대한 저항성이 우수한 수중불분리 콘크리트로 설계 변경되어 시공되었다. 이곳에서의 적용은 추후 타 현장의 연약지반 공사에 과급 효과를 가져왔다. 이 때 사용된 RCD 파일의 제원은 직경이 1.5m, 깊이는 약 20~40m로서 설계강도는 240kgf/cm<sup>2</sup>, 배합강도 300 kgf/cm<sup>2</sup>인 수중불분리 콘크리트를 사용하였다. 이 때 사용된 굵은 골재 최대치수는 25mm, 슬럼프플로우 55±5cm, 소요 공기량 3.0~4.0%, 탁도는 100ppm 이하로 관리되었다.

### 3.6 수중 콘크리트의 타설 후 시험

일반적으로 수중 콘크리트 공사는 시공 후 품질확인이 매우 어렵다. 따라서 중요 구조물인 경우 모의 시험공사를 진행한 후 품질을 확인하고 시공하거나, 구조물에서 경화된 콘크리트의 품질이 확인된 후 계속 공사를 진행한다.

광안대교의 경우 타설후 주탑기초의 경우 RCD 파일의 초음파

실험을 통하여 내부의 이상 공극에 대한 검사를 하였으며, 기타 구간의 경우 말뚝정재시험과 하중전이 시험 등을 통하여 시공 상태를 평가하였다.

## 4. 수중 콘크리트 공사의 과제

최근 수중공사의 사례가 잦아지면서 그 품질의 향상에 많은 관심을 갖게 되었다. 이를 위해서는 수중 콘크리트의 경우 배합과 운반을 포함한 전체 공정상의 통합적 연구가 필요하다고 하겠다.

해외 선진 연구에 견주어볼 때 재료에 대한 기초 연구가 낙후되어 있는 실정이다. 이런 이유 중 하나는 국내에서 개발된 재료가 구조물에 적용될 때 장기적 안정성이나 내구성에 대한 연구진행이 어려울 뿐 아니라 현장에서도 신뢰하지 못하는 경우가 많기 때문이다.

또한 골재의 선정에 있어서도 국내시공의 경우 매우 중요한 요소가 된다. 왜냐하면 연도교의 경우 섬에서 골재 채취가 어려울 뿐 아니라 해사나 쇄석사 등을 사용할 경우 품질 기준을 적용하기가 매우 어려운 상황이 될 수 있으므로 이에 대한 연구도 활발히 진행될 수 있어야 할 것이다.

한편 타설 장비나 운송장비 등에 대해서도 현재 국내 실정은 해외에서 개발된 고가의 장비를 그대로 받아들여 사용하는 경우가 대부분이나 이에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

국내 수중콘크리트 분야는 향후 개발하여야 할 분야가 매우 크며, 이의 개발을 위해서는 재료, 설계, 시공 등 각 분야의 인력과 인접 학문의 공조를 통하여 연구가 이루어 질 때 유용한 결과도 도출될 수 있을 것으로 기대된다. □

## 참고문헌

1. Concrete Society (1990) Under Water Concrete-Technical Report No. 35.
2. 特殊水中コンクリート・マニュアル,(設計・施工) 昭和61年版, 財團法人, 沿海 開發 技術 七ソター.
3. 土木學會, 콘크리트・라이브러 67 水中不分離性콘크리트設計施工指針(案). 平成3年.
4. 加島 坂本光重・樋口康三・北口雄章 : 「明石海峽大橋 水中 施工計劃」, セメント・ニコンクリート No.508, June 1989.
5. 鬼丸良雄・坂本 香 : 「特殊水中콘크리트による 海中橋脚の施工」, 콘크리트工學, Vol. No.8, Aug. 1986.
6. Hughes, B.P.(1961) Development of an apparatus to determine the resistance to separation of fresh concrete. Civ. Eng. Publ. Pev., 56, No. 658, 633-634.
7. Khayat, K.H.(1991) Underwater Repair of Concrete Damaged by Abrasion Erosion. Technical Report, REMR-CR-37, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.