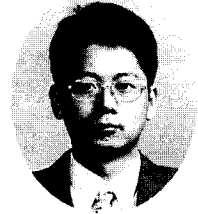


# 특집

콘크리트 구조물의 공사 계측 기술 현황

## 콘크리트 공사의 계측 계획

- Planning of Measurement for Concrete Construction -



이영욱\*

### 1. 개요

#### 1.1 계측의 목적

구조물과 기초 지반의 거동을 예측하고 안전성을 판단하는 것은 건설 기술자로서 수행하여야 할 주요 과업이지만, 현실적으로 그 문제를 해결하기란 그리 쉽지 않다. 왜냐하면 설계에서부터 시공에까지 이르는 각 과정에서 여러 가지의 불확실한 요소가 산재해 있기 때문이다.

구조 설계시 하중과 재료, 구조의 거동에 대한 가정은 실제의 구조물의 거동과 항상 부합하는 것은 아니다. 또한 시공시에도 기후와 온도의 변화, 재료의 변화 등 수많은 불확실성이 내재하고 있다. 이러한 문제점을 합리적으로 해결하여 보다 안전하면서도 경제적인 설계, 시공을 위하여 시공 과정에 대한 정확한 정보가 요구되는데, 그 정보의 제공 수단으로 계측이 사용된다.

일반적으로 계측을 하는 목적은 다음과 같다.

- 임박한 위험의 징후를 발견하기 위한 계측
- 시공 중 위험을 주는 정보에 대한 계측
- 소송시 증거를 위한 계측
- 지역의 특이한 경향을 파악하기 위한 계측
- 이론을 검증하기 위한 계측
- 지역의 특이성을 파악하기 위한 계측

일반적으로 계측은 하나의 목적을 위해서가 아닌 여러 가지 목적을 가진 경우가 많다. 따라서 계측을 하여야 하는 목적을 분명히 하고 계측 항목을 사전에 엄밀하게 분석하여야 한다.

#### 1.2 계측의 절차

계측을 위해서는 먼저 계측 항목을 정확하게 설정하고 계측 계획을 수립하여야 한다. 계측 계획을 위하여서는 시공 현장의 상황뿐만 아니라 계측 장비의 특성에 대해서도 알고 있어야 한다. 계측 대상 설정을

\* 정회원, 군산대학교 건축공학과 교수

위하여 예비 해석을 수행할 수도 있다. 예비 해석은 계측할 데이터의 범위와 경향을 예측하는 데 매우 유용한 자료를 제공하므로, 예비 해석은 계측의 실패 확률을 낮추는 효과를 가져다 준다.

최근에 계측 기술이 자동화, 복잡화됨에 따라 많은 부문에 대하여 계측 전문가의 자문을 받아야 하지만, 소규모의 계측에서는 건설 기술자가 직접 계측을 수행하는 경우도 있다. 일반적으로 건설 기술과 계측 기술 모두를 잘 아는 기술자를 확보하기는 어려우므로 현장에서는 계측시 이 두 부문의 전문가가 협력하여 계측 계획을 작성함이 바람직하다. 특히, 초기의 계측 대상 설정과 최종의 계측 해석에서는 건설 기술자의 역할이 매우 중요하므로, 계측 대상 설정시 건설 기술자는 계측의 이유와 목적을 계측 기술자에게 잘 인지시켜 줄 필요가 있다.

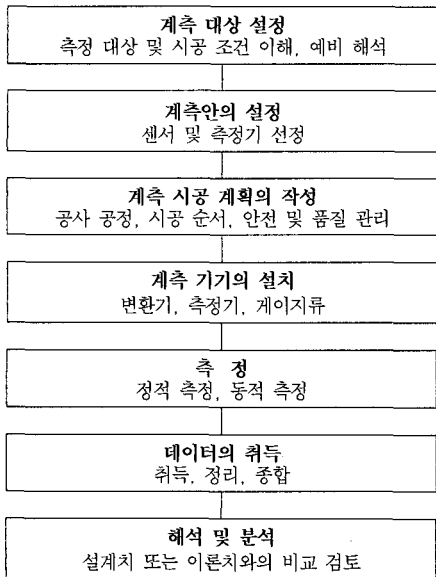


그림 1. 일반적인 계측 절차

### 1.3 계측의 종류

계측은 계측 대상의 변화하는 속도에 따라 정적 계측과 동적 계측으로 구분할 수 있다. 시간에 따른 변동의 폭이 상대적으로 작은 데이터를 정적 데이터라고 한다. 정적 데이터의 예로는 간극 수압, 거푸집 측압, 콘크리트의 수화열, 구조물의 처짐 등을 들 수 있다. 동적 데이터의 예로는 진동과 소음이 대표적이다. 일

반적인 경우 정적 계측 시스템과 동적 계측 시스템은 <그림 2>와 같은 계측 구성도를 형성한다.

계측 시스템을 정적 시스템으로 하느냐 또는 동적 시스템으로 하느냐에 따라 엄청난 계측의 결과가 차이 날 수 있으므로 정적과 동적 구분에 유의하여야 할 것이다.

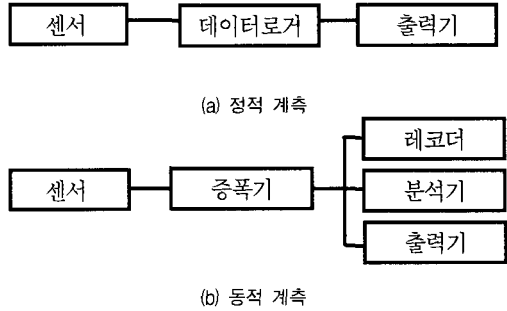


그림 2. 계측기 구성도

또한, 자동화의 정도에 따라 수동과 반자동, 자동 계측으로 구분할 수도 있다. 이러한 자동화의 정도는 측정수와 빈도, 계기의 배치 상황 등을 검토하여 현장 상황에 알맞는 방식을 선택하여야 한다.

급속하게 발전하는 컴퓨터와 통신 기술의 영향에 의하여 계측의 자동화 및 중앙 관리화가 활발하게 이루어지고 있다. 유무선을 통하여 현장의 계측 데이터를 중앙제어실의 주 컴퓨터로 전송하면, 본사에서는 전송받은 자료를 분석하여 대책안을 마련, 현장으로 송부하거나 직접 원격으로 현장의 장비를 자동 제어할 수도 있다.

## 2. 현장 계측의 신뢰성

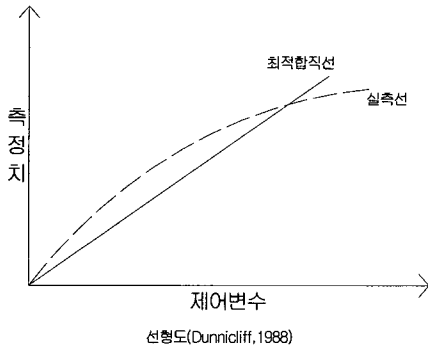
### 2.1 신뢰성과 관련된 주요 용어

#### (1) 정확도와 정밀도, 감도

정확도란 계측한 결과인 측정치가 참값에 근사한 정도를 나타내는 기준이며, 정밀도는 같은 조건에서 동일한 대상을 여러 번 측정한 실측치들의 상호 유사 정도를 말하는 반복정밀도(repeatability)라고도 말한다. 감도(sensitivity)란 계측 기기로 측정할 수 있는 최소 단위를 말하는 것으로 보통 계측 기기의 최소 측정 단위와 직접적인 관계가 있다.

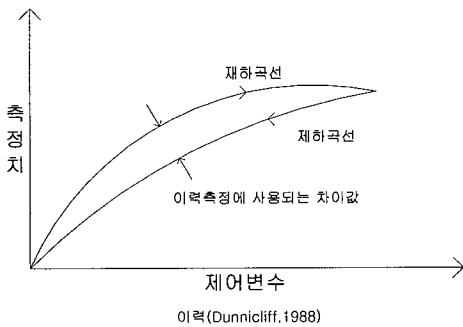
(2) 선형도(linearity)

일반적으로 계측기의 제어 변수와 측정치와의 관계를 선형으로 설정하지만, 실제로는 선형이 아닌 곡선의 형태를 나타낸다. 이때 실측치 곡선에 가장 일치하는 직선을 그어 실측치와의 오차의 백분율을 선형도라고 한다. 예를 들어 선형도가 1% F.S.(1% Full Scale)라 함은 선형 보정 관계시 최대 오차가 측정 범위 안에서 최대 1%까지 발생한다는 것이다.



(3) 이력(hysteresis)

측정값이 증가 및 감소가 반복하는 경우 아래 그림처럼 이력 곡선이 나타나며, 이런 경우 제어 변수 증가시와 감소시 측정 곡선의 최대 차이를 전체 측정 범위에 대한 백분율로 나타낸 것을 이력이라고 정의한다. 이력이 큰 계측 기기는 빠르게 변화하는 동적 계측에는 사용할 수 없다.



2.2 불확실성의 요인

구조물을 계획하고 사용하는 단계에 이르는 설계와

시공의 과정에서 다음과 같은 불확실성의 요인이 존재한다.

(1) 강도에 관한 불확실성

재료의 불균일성과 비등방성 및 제조법과 제조 과정에 대한 관리의 차이로 강도에 차이가 발생한다.

(2) 하중에 관한 불확실성

일반적으로 적재 하중은 비정상적(random)이므로 정확한 예측이 불가능하며, 구조물의 용도 변화에 따라 하중이 변화할 수도 있다. 또한 일부 하중을 미리 예측하지 못하는 경우도 존재할 수 있다.

(3) 설계 계산에 관한 불확실성

설계 하중과 구조물을 해석 모델링으로 치환하면서 생기는 오차와 설계 과정에서 인간의 실수 등에 의한 불확실성이 존재한다.

이러한 불확실성을 극복하기 위하여 시공시 관측을 통해 입수되는 새로운 정보에 의하여 향후의 거동을 예측한다. 또한 당초 예측에 사용된 변수를 수정하여 다시 예측하고 안전을 확인하면서 공사를 진척시킬 수 있다.

2.3 현장 계측의 오차

설계와 시공에서의 불확실성 극복을 위하여 현장 계측을 수행하지만, 본 현장 계측에서도 오차가 발생하므로 이를 고려하여 계측의 신뢰성을 확보하여야 한다.

현장 계측을 위해서는 2.1절의 설명에서와 같이 계측 센서와 계측기의 정밀도와 감도, 선형도 등에 대한 정보를 알고 있어야 계측 결과의 신뢰 수준을 알 수 있다. 예를 들어 총괄적인 계측 시스템의 오차가 ±5%이고 최대 허용값이 100 톤이라고 한다면, 이 계측 시스템을 이용할 경우 95 톤이 계측시 최대 허용값이 될 것이다.

또한 계측 센서의 부적절한 설치에 따른 오차를 고려하여야 한다. 예를 들어 스트레인게이지의 부착시 목적하는 방향과 정확하게 평행하지 않을 수 있다. 이와 같은 경우에는 설치된 계측 센서의 현황을 정확히 파악하고 계측된 값을 보정하는 것이 바람직하다.

계측시에 발생하는 오차 중 가장 큰 요인은 부적절한 계측기를 사용할 때에 발생한다. 예로써, 장기 계측시에 사용되는 계측기의 안정성은 장비에 따라 차이가 크다. 장기 계측시에는 표시된 계측기 사양에 따른 성능이 확보되지 않을 수도 있으므로 이에 대한 사전 점검이 필요하다. 동적인 계측에서는 계측 센서의 주파수대가 계측하고자 하는 주파수대와 반드시 일치하도록 하여야 한다. 계측 대상의 주파수대가 일치하지 않는 경우의 측정된 속도 및 가속도 값은 정확도에 큰 문제를 발생시키므로, 동적 계측에서 주파수대역은 반드시 주의 깊게 고려하여야 할 사항이다.

### 3. 콘크리트 공사와 계측

#### 3.1 계측 항목

일반적인 콘크리트 공사가 진행되는 동안 필요한 계측 항목은 <표 1>과 같다. 콘크리트의 타설부터 콘크리트가 경화되어 정상적인 구조적 거동을 하기까지에 필요한 계측 항목은 구조물의 종류에 따라 상이하지만 이 표에서는 일반적인 공사에서 공통적으로 나타날 수 있는 항목을 중심으로 표시하였다.

표 1. 콘크리트 공사의 계측 항목

계측 항목	계측 센서
공사 소음	소음계, 음압계
구조물의 진동	가속도계, 속도계
발파 진동	가속도계, 속도계
구조물의 침하	침하계, 경사계
지보공의 변위	변위계, 경사계
콘크리트의 수화열	열전대, 스트레인게이지
콘크리트의 축압	압력계, 토압계
건조 수축 및 크리프	(배럴형)스트레인게이지
균열의 진행 여부	스트레인게이지, 균열변위계
콘크리트 또는 철근의 응력	스트레인게이지, 철근계, 로드셀

<표 1>에 나타난 계측 항목 외에도 많은 계측 항목이 존재하며, 현장의 조건과 장소, 시간 등에 따라 계

측의 항목과 방법이 바뀔 수 있다. 실제로 다양한 항목에 대한 계측이 이루어지고 있으며, 이를 위한 다양한 센서들이 있다.

장대 교량이나 터널, 초고층 건물 등은 계측이 공사와 유지 관리에 매우 중요한 부분을 차지하고 있으므로 계측 전문가에 의한 계측이 바람직하다. 콘크리트 공사와 관련하여 동적 계측을 수행해야 하는 경우로 공사 중의 발파 또는 기계 진동으로 인한 콘크리트의 양생이 문제시 될 경우가 있다. 또는 장대 교량이나 초고층 건물의 경우는 공사 중 풍하중에 의한 진동의 영향을 확인하기 위하여 필요하기도 하다. 두 가지 모두 진동을 측정해야 하지만 계측하는 주파수대가 상이하므로 서로 다른 계측 시스템을 사용하는 것이 일반적이다.

#### 3.2 계측 기기

계측 기기의 종류는 기계식, 유압식 등 수동 계측에 사용하는 기기가 있으나, 최근 대부분 자동화 계측기를 사용하므로 전기전자식 계측기에 대한 설명을 주로 하고자 한다.

##### (1) 데이터 로거(Data Logger)

정적 계측에 사용되는 데이터 로거는 핵심 장비라고 할 수 있다. 이 장비는 계측 센서로부터 입력 신호를 증폭 및 A/D 변환하여 이를 표시하거나 저장하는 기능을 가지고 있다. 개인용 컴퓨터가 발달함에 따라 표시하고 저장하는 기능은 컴퓨터로 이전되는 경향을 보이고 있다. 이 장비를 사용할 경우 고려해야 하는 사항은 다음과 같다.

- ① 최대 측정 가능한 채널(channel)의 수
- ② 계측 가능 항목과 범위 : 스트레인, 온도, 전류, 전압 등 계측 항목을 측정할 수 있는지를 확인해야 하며 측정되는 범위 또한 확인이 필요하다.
- ③ 분해 성능 : 측정된 값을 읽을 수 있는 정밀도를 나타낸다.
- ④ 최대 측정 속도 : 측정 채널을 읽을 수 있는 속도가 빠를수록 우수한 장비이나 가격이 상승한다.
- ⑤ 사용 가능한 인터페이스 : 사용 가능한 인터페

이스가 제공되어야 기존의 장비 및 컴퓨터와 접속이 가능하다.

(2) 증폭기와 데이터 레코더

증폭기는 동적 스트레인 미터(strain meter)라고도 하며 주로 동적 계측에 사용된다. 동적 데이터가 증폭기, 필터링을 거친 후 A/D 변환기를 거쳐서 디지털 자료로 변환된다. 증폭의 배율과 증폭에 따른 노이즈를 제거하기 위한 필터(filter)의 성능도 고려 대상이다. 일반적으로 동적 데이터의 측정 시간의 간격이 매우 작다면 이를 실시간으로 분석하기에 어려움이 많다. 따라서 자세한 분석은 추후에 수행하고 일단 데이터 레코더를 사용하여 데이터를 저장하는 것이 일반적이다.

데이터 레코더는 단순히 데이터를 저장하는 기능을 가지고 있으며, 데이터의 저장 속도와 용량을 중점적으로 확인하여야 한다. 일반적으로 채널의 수가 증가하면 저장 속도는 선형적으로 반비례한다.

최근 개인용 컴퓨터의 발달에 따라 우수한 증폭 및 변환 성능을 가진 컴퓨터용 보드(board)가 널리 보급되는 추세에 있다. 이러한 보드를 컴퓨터 안에 장착하는 경우에는 데이터 레코더 기능을 컴퓨터가 대신하는 것이 일반적이다.

(3) 분석기와 출력기

<그림 2>에서 분석기라 함은 일반적으로 주파수(FFT : Fast Fourior Transform) 분석기를 말한다. 이 분석기는 시간의 이력을 주파수로 동시 변환하여 분석함을 기본 목적으로 하고, 트리거(trigger) 기능 등 제품 사양에 따라 여러 가지 다른 분석 기능도 추가할 수 있다. 현장에서는 주 계측이 시작되기 전에 계측 상황을 파악하기 위하여 분석기가 주로 동원된다. 일반적으로 분석기의 사용 가능한 주파수 범위가 한정되어 있으므로 계측할 진동 주파수의 범위와 일치하는지 확인하여야 한다.

<그림 2>의 출력기로서 XY 플로터와 디지털 또는 아날로그형 지시계, 모니터 등이 있다. 컴퓨터 소프트웨어의 발달로 컴퓨터의 모니터에 디지털과 아날로그의 정보 모두를 표시할 수 있게 되었다. 물론 이 출력기도 매우 빠른 동적 데이터를 실시간으로 표시하는데 한계가 있다. 매우 다양한 종류의 계측용 소프트웨어가 존재하고 있으며, 이러한 소프트웨어를 사용하면

계측된 결과의 출력을 좀더 계측의 목적에 부합되도록 할 수 있다.

(4) 스트레인 게이지 이용 센서

스트레인 게이지를 사용한 변환기에는 로드셀, 변위 변환기, 경사기 등의 다양한 계기가 있다. 이러한 장비는 정적 계측과 동적 계측에 사용되므로 측정 용도와 용량을 확인하고 사용하여야 한다. 특히 하중이나 변위를 측정하는 계측기에는 동적 사용과 정적 사용이 구분되어 있으므로 이에 대한 주의가 요구된다. 앞의 2.1장의 설명과 같이 동적 계측 센서에는 '이력(hysteresis)'에 의한 오차가 반영되므로 이력이 큰 경우에는 동적 계측용 센서로는 부적절하다.

스트레인 게이지를 이용한 계측 센서는 압력(스트레인, 응력, 토압, 수압, 관내압 등)과 변위(침하, 경사, 변위, 신축량)와 가속도와 기상(풍향, 풍속, 우량) 등 거의 모든 계측에 사용되고 있다.

하중계(load cell)는 계측 대상과의 부착 상황에 따른 여러 가지 형태가 있다. 일반적으로 하중계를 계측 대상과 접합시키기 위한 여러 가지 하드웨어(saddle, mounting block 등)가 있으므로 이들을 잘 활용하여야 한다. 하중계는 압축과 인장을 동시에 측정 가능한 것과 압축력만 측정 가능한 것으로 구분되어 있다.

변위를 측정하기 위한 변위변환기는 측정 범위와 정도에 따라 다양한 제품이 있다. 일반적으로 스프링을 사용한 변위변환기가 사용되나, 이러한 종류는 동적 계측에는 부적합하다.

(5) 압전(pizeoelectric) 센서

압전 센서는 하중과 압력, 가속도와 같은 동적 현상을 계측하는 데 사용된다. 이 센서의 내부에 수정이나 세라믹과 같이 압전을 발생하는 물체(압전체)가 있어, 외부의 입력에 의하여 응력이 발생한다. 이 압전체는 외부 응력에 비례하여 일정한 전압을 발생시킨다. 피조(piezo)는 히랍어로 '쥐어짜다(squeeze)'의 뜻이 있다. 압전체의 높은 강성은 충격과 같이 급격하게 변동하는 고주파수 영역의 진동 계측을 가능하게 한다.

이 센서의 주요 해결 과제는 압전체에 발생하는 미세한 전압의 변화를 가시적으로 볼 수 있도록 변환하는 방법의 개발이다. 많은 개발 과정을 거쳐서 현재에는 2가지 시스템으로, Charge Mode와 LIVM(Low

Impedence Voltage Mode) 시스템이다. 이 두 시스템은 서로 다른 장단점이 있으므로 진동의 특성을 잘 파악한 후에 시스템을 결정하는 것이 바람직하다.

## 4. 계측 관리

### 4.1 계측 계획의 수립

계측은 구체적인 계측 목적에 따라 발생 가능성이 있는 문제점을 미리 예측하여 정확한 계측기 설치 지점을 설정하고 합리적인 계측 기기의 배치 운영, 계측 관리 요원의 선정, 계측 빈도 등 각 계측 항목을 통하여 양호한 결과를 유추할 수 있는 기술이 요구되며, 아울러 문제 해결을 위한 역학적 해석과 기술적 판단을 할 수 있는 관리 기준이 준비되어야 한다.

체계적인 계측 관리를 수립하기 위해서는 우선 수집된 기초 자료를 토대로 선정된 계측 항목을 결정한 후, 소요 계측기의 종류와 수량, 위치 시기와 간격, 수집된 계측 결과의 평가 및 활용 방안 등을 체계적으로 정리하여 시행착오를 최소화하도록 계획을 수립하여야 한다.

### 4.2 계측의 위치

현장 계측은 가능하면 다양한 거동을 규명할 수 있는 많은 센서를 설치하면 좋겠지만 경제성을 고려한다면 적절한 위치를 선정하여 최소한의 개수를 확보하여야 한다. 계측 위치 선정시의 일반적인 고려 사항은 다음과 같다.

- ① 계측 진행시에 판단의 기준을 삼을 수 있도록 구조물의 거동이 충분히 예측되는 계측 지점의 확보
- ② 구조물을 대표할 수 있는 곳
- ③ 중요 구조물이 인접하여 있는 곳
- ④ 하중의 집중적인 영향을 받는 부위
- ⑤ 계기의 설치 및 배선이 가능한 곳

### 4.3 계측 자료의 취득과 정리

#### (1) 자료의 수집

계측시에는 일상 오차(부주의, 오독, 계산 실수),

계기 오차(편차 미조정, 영점 미조정 등), 환경 오차(기후, 습도, 온도, 먼지 등), 관측 오차(시차, 개인 오차) 등이 발생되므로 계측기의 측정은 반드시 계측기의 원리와 목적을 이해하고 경험이 있는 기술자에 의해서 수행되어야 한다.

계측 결과에 대해서는 계측 번호, 연월일, 시각, 계측 대상물, 측정자, 기후, 현지 상황, 이상치의 원인 등을 기록하여야 한다.

계측 기기의 초기치 측정은 신뢰성 있는 기초 자료로 활용할 수 있도록 시공 전에 얻어져야 한다. 계측 자료의 수집 빈도는 공사 정도에 따라 적절하게 수행되어야 하며 급격한 구조물의 응력 변화나 주변 구조물에 문제가 발견되면 그 빈도를 증가하여야 할 것이다. 측정 일시 사이의 공백 기간 중의 변화도 주의 깊게 관찰하여야 하며, 자료 수집시 공사 내용 및 주변 상황, 기상 조건 등도 면밀히 기록하는 것도 중요한 일이다.

#### (2) 자료의 정리

수집된 계측 결과는 즉각적인 조치를 필요로 하는 갑작스런 변화가 발생했는지 판단하기 위하여 정리가 필요하다.

정리의 일반적인 형태는 계산표와 차트이다. 계산표에는 원 데이터(raw data)와 변환 계수와 보정 계수들을 표시하고 계산 결과에 따른 공학적 데이터를 보기 쉽게 정리하여야 한다. 또한 데이터의 현황과 추후의 경향을 쉽게 예측할 수 있도록 차트를 그리는 것이 바람직하다. 주요 변수를 설정하여 요약적이고 쉽게 이해할 수 있도록 그리는 것이 차트 작성시의 중요 사항이다.

## 5. 맺음말

콘크리트 구조물의 설계부터 시공에 이르기까지 존재하는 재료와 해석 모델링 등의 불확실성을 극복하기 위하여 현장에서의 계측은 필수 불가결하다. 이제, 현장에서의 계측은 문제점을 사전에 발견해내고 이를 해결하기 위하여 반드시 필요한 부분으로 그 위치를 확보하고 있다.

콘크리트 공사시 수화열과 응력 등과 같이 수많은 계측 항목에 대하여 계측 후 적절한 대응을 위하여, 건설 기술자는 계측 항목의 설정과 계측된 데이터를

분석할 수 있어야 한다. 그러나, 계측기와 센서, 계측 위치 등과 같이 계측의 전문 분야는 계측 기술자와 같이 협력하여 계측 계획을 작성하는 것이 바람직하다.

콘크리트 공사는 불확실성이 많은 만큼 계측의 필요성은 다른 어떤 재료의 경우보다 크다고 할 수 있다. 계측과 관리에 의하여 콘크리트 공사의 품질이 향상될 수 있다. 앞으로 콘크리트 공사에서 계측은 더 이상 특수한 대형 현장에서만 시행되는 것이 아니고, 일반적인 모든 현장에서 보편적으로 시행되어야 할 사항이다.

계측기와 센서, 컴퓨터와 계측용 소프트웨어의 발달은 계측의 자동화 시스템을 쉽게 이루었다. 이러한 자동화는 적극 활용할 대상이지, 맹목적으로 받아들여서는 안될 부분이다. 자동화가 아무리 발전하더라도 계측의 대상 설정과 결과의 분석은 건설 기술자의 몫으로 여전히 남아있을 것이다. □

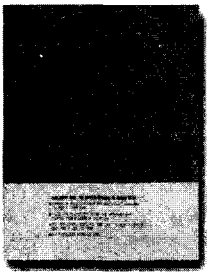
**참고문헌**

1. 현장계측계획, 탐구문화사, 1992, 이은수 외 2인.
2. 개착식 구조물의 시공관리를 위한 계측 및 품질관리 방법, 1995, 4. 한국지반공학회.
3. 製品綜合カタログ, 東京計測機研究所, 1997~1998.
4. 土木・建築用 變換機, 測程器, 共和電業, 1997, 11.
5. 現場計測計劃の立て方-現場技術者のための土と基礎シリーズ, 土質工學會, 1990.
6. General Catalog & Instrumentation Handbook, - Piezoelectric Sensors for Dynamic Measurements, 1998~1999, pp 66~67.
7. Handbook on Structural Testing, Robert T. Reese, Wendell A. Kawahara, The Fairmont Press Inc., 1993.

○ 신간안내 ○

**콘크리트표준시방서 해설**

**“ 건설교통부 제정 「콘크리트표준시방서」의 해설집 발행!”**



- 1999년 개정된 건축·토목 분야 콘크리트 표준시방 본문의 구체적인 해설
- 국내외 각종 시방서와 관련 자료를 수집·참조하여 합리적 콘크리트 구조물을 시공할 수 있도록 집필
- 주요 엔지니어링사, 건설연구소, 현장 감리단 및 관련 기술공사 등 전문 기술인의 검토 의견 반영
- 한국콘크리트학회 제규준(안) 수록

- 가격 : 회원 27,000원/비회원 30,000원(우편료 2,500원 별도)  
 - 문의 및 주문 : (02) 568-5985~7