

비파괴기법을 이용한 구조물의 안전성 및 사용성 평가

이 상 민

시설안전기술공단 교량진단본부

Evaluation of Structural Safety and Serviceability by In Situ Nondestructive Techniques

Sang Min Lee

Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation

1. 서 론

구조물은 인간의 요구에 의하여 설계·시공되므로 구조물의 준공후 공용기간 동안 사용자가 안전하고 쾌적하게 이용할 수 있는 耐荷性(load carrying capacity), 耐久性(durability) 및 使用性(serviceability)을 유지하여야 한다. 그러나 대부분의 토목 및 건축구조물은 사용기간 동안 끊임없이 반복되는 하중작용과 주변환경의 영향으로 미시적 재료수준(material level)에서는 균질성과 화학·물리적 특성이 저하되어 가고, 거시적 구조수준(structural level)에서는 균열, 비틀림, 처짐, 부등침하 등이 발생하므로 최적조건하에서도 준공초기의 건전성을 서서히 상실하여 간다.

구조물에 발생하는 각종 열화(deterioration)와 손상(damage)은 구조물의 설계성능(design performance), 기능(function) 및 파괴안전률의 감소를 수반하므로 손상정도에 따라서는 인명과 재산을 위협하는 붕괴사고의 원인이 되기도 한다. 따라서 구조물을 보다 경제적으로 유지관리하기 위해서는 구성재료의 노후와 구조부재의 손상에 대한 각종 비파괴 평가기술이 확립되어야 하며, 이를 바탕으로 구조물의

이력을 체계적으로 관리하여야 하지만 아직까지는 구조물의 파괴안전률에 대한 설계·시공·사용자의 지나친 과신과 공공시설물(infrastuctures)의 유지관리에 대한 정책적 경시로 비파괴기법을 이용한 재료의 미시적 평가기술과 구조물의 거시적 평가기술의 연구개발이 미흡한 실정이다.

최근 교량, 지하철, 건축물등 각종 토목·건축구조물의 대형붕괴사고, 불량 레미콘 파동, 海砂를 사용한 신도시 아파트의 조기열화 및 노후 아파트의 재개발등이 사회적 문제로 대두되면서 건설분야 전반에 걸쳐 비파괴 평가기술의 정밀성 향상과 이론적 체계에 입각한 일반화된 평가기준의 정립이 시급한 과제로 인식되고 있다. 이러한 배경을 토대로 본고에서는 토목 및 건축구조물에 적용되고 있는 주요 비파괴기법을 대상으로 적용현황, 적용범위, 문제점 및 향후 연구개선 방향을 간략히 토의해 보고자 한다.

2. 시설물의 건전성 저하 및 하자 발생 원인

공용중인 시설물에 발생하는 건전성 저하 및 하자

발생 원인은 그림 1에 제시된 바와 같이 크게 缺陷 (defect), 損傷(damage), 劣化(deterioration)로 구분된다. 이중 결함은 시설물의 계획, 설계 및 시공단계에서 발생하는 목표성능에 대한 하자현상이며, 손상(파재하중, 물리적·화학적 작용, 충격, 지진등에한 하자)과 열화(동해, 염해, 철근부식, 콘크리트의 중성화, 알칼리-골재반응, 화학적 침식등 주로 환경적 원인에 의한 하자)는 준공이후 사용중에 발생하는 성능 저하현상으로 지속적인 유지관리로 최소화시킬 수 있는 사항이다. 시설물의 건전성 저하는 여러 가지 복합적 현상을 동시에 수반하면서 발생하는 것이 일반적이는데, 그림 1에서 보는 바와 같이 원인은 달라도 동일한 건전성 저하현상이 발생할 수 있으므로 시설물의 손상원인 규명을 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 한편 손상은 구조물을 대상으로 하는 거시적 개념에 근거하며 열화는 구성재료를 대상으로 하는 미시적 개념에 근거한다.

표 1은 시설물의 내하성, 내구성 및 사용성에 심각한 영향을 미칠 수 있는 손상원인을 시설물별로 분석한 것으로 실제 비파괴기법이 적용되고 있는 조사분야이다.

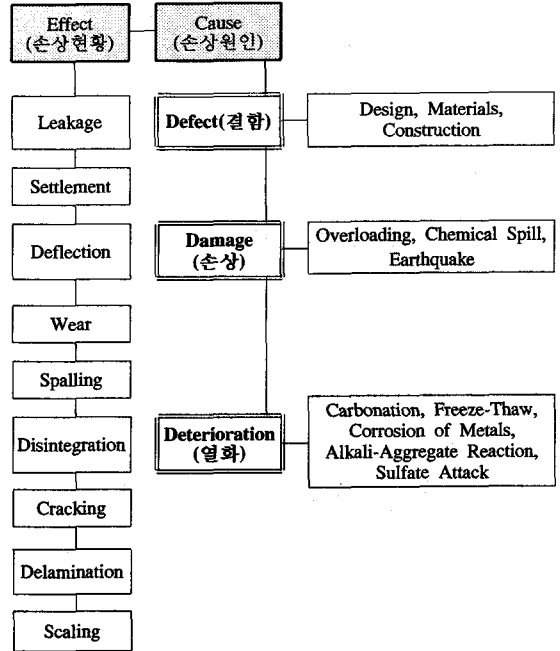


그림 1. 시설물의 건전성 저하 원인

표 1. 시설물의 주요 손상 및 비파괴계측 항목

시설물	주요 손상 및 결함	비파괴 계측항목
교 량	<ul style="list-style-type: none"> - 철근콘크리트 부재의 철근량 부족, 배근불량 - 하중균열, 건조수축균열, 시공이음 분리 - 콘크리트의 표면물성 저하 및 미세균열 과다 발생 - 매스콘크리트의 내부재료 분리 및 불연속면 발생 - 콘크리트의 중성화, 백화 및 철근부식 - 콘크리트의 동결융해로 인한 단면결손 및 강성 저하 - 강재의 용접불량, 부재 연결부 및 볼트체결부의 결함 - 강재의 피로균열, 응력집중 및 용접부 잔류응력 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • Material Level - 콘크리트의 역학적 특성 (강도, 강성, 포아송비) - 콘크리트의 물리적 특성 (공극률, 골재특성, 구성비) - 콘크리트의 화학적 특성 (수화조직, 염화물량, pH, 구성성분 정성·정량분석) - 내부결합 및 공동크기 - 균열깊이, 균열폭 - 철근 및 강재의 배근상태 (깊이, 간격, 직경) - 철근 부식속도, 부식률 - 강재의 부식성분 - 강재의 용접상태 - 강재의 도막 두께
터 널	<ul style="list-style-type: none"> - 라이닝 아치부 콘크리트의 균열, 박리, 강도저하 - 라이닝 배면의 공동 및 방수시트 손상에 의한 누수 	<ul style="list-style-type: none"> - 철근 부식속도, 부식률 - 강재의 부식성분 - 강재의 용접상태 - 강재의 도막 두께
하천 및 항만	<ul style="list-style-type: none"> - 수문 및 갑문시설의 부식 및 노후 - 잔교시설 및 케이슨 구조물의 파손 및 결함 - 안벽의 법선변위 및 침하 	<ul style="list-style-type: none"> - 정적변형률, 처짐 - 동적변형률, 처짐, 동적특성 - 진동특성 (주기, 진폭, 감쇄률) - 구조체의 경사도 - 구조체 침하 및 지반지지력 - 진동, 소음 전달률 - 구조체 배면의 누수경로 - 온도전달 특성
상수도	<ul style="list-style-type: none"> - 관로 이음부의 용접불량 	
댐	<ul style="list-style-type: none"> - 월류부의 토사류에 의한 마모 및 단면결손 - 기초지반의 누수, 파이핑 및 세굴 	
건축물	<ul style="list-style-type: none"> - 조립식 구조체의 연결 불량 및 내부공동 발생 - 지반침하로 인한 활동성 균열 - 누수발생 및 가스, 상수, 냉난방 배관라인의 부식 - 주요 부재의 과도한 변형, 비틀림 및 경사발생 - 충격 파손 및 진동에 의한 변형 발생 - 창호, 조적벽체의 비구조적 변형 	

표 2. 시설물의 안전성 평가 체계

구 분	실시시기	정 의
안전점검	일상점검	경험과 기술을 갖춘 자가 육안 또는 점검기구 등에 의하여 검사를 실시함으로써 시설물에 내재되어 있는 위험요인을 조사하는 행위
	정기점검	
	특별점검	
정밀안전진단	<ul style="list-style-type: none"> - 5년에 1회 이상 - 대통령령이 정하는 시설물 - 안전점검 결과 시설물의 재해예방 및 안전성 확보를 위하여 필요하다고 인정되는 경우 	시설물의 물리적·기능적 결함을 발견하고 그에 대한 신속하고 적절한 조치를 취하기 위하여 구조 안전성 및 결함원인등을 조사·측정·평가하여 보수·보강방법을 제시하는 것

3. 시설물의 안전성 평가 체계

공용중인 시설물에 발생하는 건전성 저하 및 하자발생 원인은 그림 1에 제시된 바와 같이 법률 제4922호(1995년 1월 5일 제정) “시설물의 안전관리에 관한 특별법”, 대통령령 제14631호 (1995년 4월 20일 제정) “시설물의 안전관리에 관한 특별법시행령”에 의하면 공용중인 시설물의 안전성 평가는 표 2와 같이 크게 안전점검과 정밀안전진단으로 구분된다. 표 1에서 보는 바와 같이 시설물의 안전점검과 정밀안전진단의 수행을 위하여 비파괴기법의 적용이 필수적임을 알 수 있다.

4. 비파괴기법을 이용한 시설물의 안전성 평가

4. 1. 재료수준(Material Level)에서의 건전성 평가 방법

비파괴기법을 이용한 재료수준에서의 건전성 평가방법은 화학적 이론을 근거로 하는 화학적 검사법, 강도와 강성 등 역학적 특성을 이용하는 물리적 검사법, 초음파의 전달특성을 이용하여 내부결함이나 물성저하를 탐사하는 초음파탐상법, 충격탄성과 탐사법, 이외에도 적외선탐사법, 전기화학적 검사법, 레이더법, 방사선투과검사법, 자분탐상검사법, 침투탐상검사법 등으로 구분된다.

4. 1. 1. 화학적 검사법

통계자료에 의하면 우리나라의 시멘트 소비량은 6,000만톤/년으로 세계 최고의 시멘트소비국이며 이

에 따라 공공 시설물의 70% 이상이 각종 콘크리트 구조물로 시공되어 있다. 최근 고강도/고성능콘크리트(High Strength/High Performance Concrete)의 개발이 성공적으로 진행됨에 따라 콘크리트가 갖는 구조재료로서의 단점(경화시간, 자중, 인장강도, 취성)에도 불구하고 적용범위가 다변화되는 추세에 있다. 콘크리트구조물의 노후 및 손상은 구조체의 균열, 박리, 침하, 비틀림, 처짐과 함께 콘크리트 재료의 화학적 변화를 수반하므로 콘크리트 시편의 정량·정성분석은 주변환경에 기인한 내구성 및 열화현상의 원인추정에 활용이 가능하다.

화학적 검사법은 진단목적별로 재료성능과 배합추정, 콘크리트 조직평가, 콘크리트 내부의 열화상태 평가 등 3가지 구분되며 진단목적별 세부구성 체계는 표 3과 같다.

(1) 콘크리트의 성능 및 배합추정

가. 콘크리트의 화학적 구성비

일반적으로 보통시멘트의 CaO양은 64.5%, 골재의 CaO양은 0.3%, 천연골재중의 불용성 잔분은 95.4%이며, 단위골재량, 단위시멘트량 및 단위수량은 콘크리트의 배합원리를 따른다.

나. 시험방법

1) 콘크리트 시편을 48시간 水浸시킨후 수중중량과 표면절대건조 단위용적중량을 측정하고 다시 시편을 110±5℃로 중량평형이 될 때까지 건조한 후 절대건조 단위용적중량을 측정한다.

표 3. 콘크리트의 건전성 평가를 위한 화학적 검사법의 구성체계

진단 목적	시료 형태	콘크리트 표본 채취시료 부분		
		콘크리트	시멘트	골재
콘크리트의 성능 및 배합추정		콘크리트중의 Cl^- 량 Cl^- 반송재중의 Ca, Na, K의 추정 전 불용잔분, Ca, Na, K의 정량	각종 원소 분석 소성도의 판정 슬래그, 플라이애쉬의 추정 슬래그, 플라이애쉬중의 Ca, Na, K의 추정	Ca, Na, K의 정량 암석·광물종류 판정 반응성광물의 검출 정량 개재물질 풍화도 입자형상
		단위시멘트량, 단위수량, 골재량의 추정 시멘트중의 알칼리량(R_2O) 추정		
콘크리트의 조직평가		공기량, 공기분포 O_2 와 Cl^- 의 확산계수 반응생성물 관찰 Ettringite 관찰 공극수 조성	세공 분포 $Ca(OH)_2$ 의 정량 $Ca(OH)_2$ 의 결정관찰	
콘크리트의 내부 열화 상태평가		단면의 Cl^- 농도 분포 단면의 알칼리량 분포 반응생성물관찰 Ettringite 관찰 공극수 조성	중성화 깊이 ($CaCO_3$ 의 정량) 시멘트-골재계면의 관찰	

2) 시편을 105 μ이하의 분말로 분쇄한 후, 분말시편의 불용잔분과 CaO 량을 측정하고 분말시편을 정량분석한다(습식분석 또는 X-ray 회절분석).

다. 단위재료량의 추정

화학적 검사법에 의한 경화 콘크리트의 단위재료량 및 배합추정과정은 표 4와 같다.

표 5. 콘크리트의 중성화 Mechanism

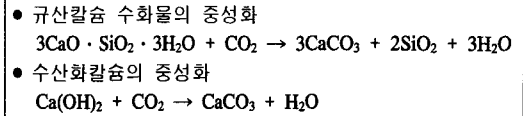


표 4. 배합추정 세부내용

평가항목	산정공식
콘크리트의 단위용적중량	a : 수중중량 (kg) b : 표건중량 (kg) c : 절건중량 (kg) d : 표건단위용적중량 $\frac{b}{b-a} \times 1000$ (kg/m ³) e : 절건단위용적중량 $\frac{c}{b-a} \times 1000$ (kg/m ³)
화학분석값	f : 콘크리트중의 CaO (%) g : 콘크리트중의 불용잔분 (%)
재료의 분석	h : 시멘트중의 CaO (64.5%) i : 골재중의 CaO (0.3%) j : 골재중의 불용잔분 (95.4%)
배합추정	k : 골재량 $\frac{g}{j} \times 100$ (%) L : 시멘트량 $\frac{f-(k \times i/100)}{h} \times 100$ (%)
단위재료량	m : 단위골재량 $d \times k / 100$ (kg/m ³) n : 평균흡수량을 1%로 가정한 단위골재량 (kg/m ³) o : 단위시멘트량 $d \times L / 100$ (kg/m ³) q : 시멘트비중 r : 잔·굵은골재 평균 비중 s : 공기량 t : 단위수량 $1000 - \left\{ \frac{n}{o} + \frac{m'}{p} + (q \times 10) \right\}$ (kg/m ³)

(2) 콘크리트의 조직 평가

주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 콘크리트의 수화조직, 공극량, 반응생성물의 결합조직 등을 관찰하는 방법이다. 건전한 콘크리트인 경우 미세조직이 치밀하며 침상조직보다는 판상조직이 발달해 있다.

(3) 콘크리트의 내부열화 상태 평가

가. 중성화 발생원인 및 특성

1) 건전한 콘크리트는 경화시멘트풀의 수화화합물 중 약 25%를 차지하는 Ca(OH)₂의 영향으로 pH가 12~13인 강알칼리성을 나타낸다. 그러나 콘크리트가 대기중에 노출되면 표 5와 같이 대기중에 0.035% 포함되어 있는 약산성의 탄산가스와 수화생성물이 반응하여 탄산칼슘으로 환원되면서 표면부터 콘크리트

리트의 pH가 서서히 8~10 정도로 낮아지는데 이를 중성화라고 정의한다.

2) 중성화현상은 콘크리트의 물리적 또는 역학적 성능저하에는 큰 영향을 미치지 않으나, 경화시멘트풀의 60% 이상을 차지하는 규산칼슘수화물(CaO-SiO₂-H₂O)의 결합조직 약화에 따른 치밀성 저하, 콘크리트의 취성화, 미세공극의 알칼리농도 변화, 철근표면의 부동피막 파괴등의 손상을 수반하므로 구조물의 내구성능을 감소시키는 주요인자로 알려져 있다.

3) 중성화 속도는 경과기간의 제곱근에 비례하며 식 (1)~(2)와 같이 시멘트와 골재의 종류, 혼화제의 특성, 배합비 등에 따라서 큰 차이를 보인다. 최근 지구 온난화, 오존층 파괴, 화석연료의 사용증대로

1.5ppm/yr의 비율로 이산화탄소가 증가하고 있다.

W/C ≥ 0.6 인 경우 :

$$t = \frac{X^2[0.3(1.15 + 3W/C)]}{R^2(W/C - 0.25)^2} \dots\dots\dots (1)$$

W/C < 0.6 인 경우 :

$$t = \frac{7.2X^2}{R^2(4.6W/C - 1.76)^2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 t는 경과시간(년), X는 중성화 깊이(cm), W/C는 콘크리트의 물/시멘트비, R은 시멘트와 골재 종류 및 혼화제 특성에 관련되는 중성화비율 상수로 강자갈과 강모래를 사용한 보통시멘트의 경우 1이며, 여기에 AE제를 첨가한 경우 0.6을 적용한다.

나. 중성화깊이의 평가

1) 시차열중량 분석법 : 시멘트수화물에 열을 가하면 400~500℃에서 Ca(OH)₂가 탈수되고, 650~900℃에서 CaCO₃가 탈탄산되는 특성이 있다. 즉 온도에 대응하는 중량변화(열중량분석 : TG)와 흡열·발열 상태조사(시차열분석 : DTA)를 통하여 중성화 여부를 판단하는 방법으로 중성화 피해상부의 콘크리트 시편을 1cm이하의 간격으로 절단한후, 각각의 시편에 대하여 측정된 시차열중량 분석결과를 건전부와 대비함으로써 중성화 깊이를 평가한다.

2) 페놀프탈레인용액 도포법 : 현장에서 간단히 적용할 수 있는 방법으로 콘크리트 파단면에 페놀프탈레인용액 도포한후 색의 변화를 관찰하는 방법이다. 강알칼리성일수록 짙은 보라색을 나타낸다.

다. 염화물량의 평가

염화물에 의하여 발생하는 콘크리트의 염해는 크게 내부염해(海砂사용)와 외부염해(제설용염화물 살포, 해안환경)로 구분된다. 해사중에는 0.3%의 NaCl이 포함되어 있는데 이를 세척하지 않고 콘크리트에 사용할 경우 강재부식과 콘크리트의 백화가 구조체에 심각한 문제를 일으키므로 현행 시방서에서는 해사중 NaCl의 상한을 0.04%(콘크리트 기준으로 0.3kg/m³)로 규정하고 있다. 또한 해안환경의 경우, 해안에서 200m 이내는 염해지역, 200m~1km는 준

염해지역이므로 이들 지역내에 있는 콘크리트구조물의 건전성 평가시 세심한 배려가 필요하다.

라. 알칼리의 이동과 백화현상

구조물의 공용 중 표면에 발생하는 백화현상은 콘크리트 내부의 수용성 알칼리 성분이 표면으로 이동하여 탄산염 형태로 석출되는 현상이다. 석출물의 주요 성분은 CaCO₃, Na₂SO₄, Na₂CO₃이며, 중성화와 함께 진행되므로 콘크리트 구조물의 건전성 평가기준이 되고 있다. 백화현상은 수분의 건조속도가 빠른 환경, 누수의 침입 환경, 즉 20℃, 60% RH, 풍속 3m/sec 와 5℃, 70% RH, 풍속 3m/sec에서 잘 발생한다. 또한 염화물 침투율이 크거나 균열이 발생한 경우 백화현상의 발생빈도가 높다.

마. 화학적 침식

염산, 초산 및 황산과 같은 強酸類는 석회질을 용해 또는 부식시키는 작용을 하며, 탄산과 같은 약산류는 석회질과 반응하여 鹽類를 생성시킨다. 일반적으로 pH가 3이하의 강산인 경우 시멘트풀의 조직손상에 미치는 영향이 지대하므로 별도의 방지대책이 필요하며, pH치가 3~6 범위인 경우도 점진적인 유해작용을 보이므로 콘크리트에 침투되는 수용액의 농도를 낮추어 주어야 한다. 탄산칼슘은 물에 13 mg/l 정도 용해되며, 중탄산칼슘은 165,000 mg/l의 용해성을 나타내는 pH 7~8 정도의 중성을 나타내는 화학성분으로 콘크리트의 경화지연 및 중성화를 촉진시킨다. 특히 초산은 시멘트의 수화반응에 매우 유해한 성분으로 0.1%의 농도에서도 응결지연작용을 나타내며, 0.6% 이상에서는 콘크리트의 경화가 현저히 지연된다. 또한 수산화칼슘[Ca(OH)₂], 암모니아 이온[NH₄⁺]도 시멘트풀의 조직을 손상시키는 성분이다.

한편 황산염[SO₄⁻]은 시멘트수화물과 반응하여 불용성의 반응물을 생성시킨다. 이 생성물을 ettringite [3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄ + 32H₂O]라고 부르며, 가늘고 긴 결정조직과 수분을 다량으로 함유하고 있어 시멘트풀의 체적증가를 수반한다. 따라서 콘크리트에 황산염이 작용하면 콘크리트 내부에 팽창압이 추가로 발생되고 이로 부터 취약부 또는 표층부의 박리(scaling)가 발생된다. 특히 초산칼슘, 황

산마그네슘, 황산나트륨등이 유해하며, 대부분 이상 팽창의 조기발견이 어렵기 때문에 방지할 경우 구조물 붕괴의 원인되기도 한다. 일반적으로 황화물 [SO₃]이 수분 또는 습기를 만날 경우 황산염으로 변화될 가능성이 높으므로 골재중에 포함된 황화물의 양을 규제할 경우 시멘트의 이상팽창을 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다. 독일에서는 골재중 황화물의 양을 1% 이하, 오스트리아에서는 0.7% 이하로 규제하고 있다.

바. 동결융해에 의한 내구성 저하

콘크리트의 공극수가 동결하면 콘크리트의 체적이 약 9% 증가한다. 따라서 콘크리트가 반복되는 동해를 받을 경우, 콘크리트 내에 주기적으로 팽창 압력(빙압) 및 구속효과가 발생하게 되는데 이 구속압이 인장강도를 초과할 경우 표층부의 박리 (scaling) 및 균열이 급속히 진전된다. 동해에 의하여 국부적인 땅상균열 및 골재 爆裂現象(pop out)이 발생한 경우는 굵은 골재와 잔골재의 내구성이 상이함에 기인하는 수가 많으며, 주로 동절기 시공에 의한 콘크리트의 강도발현 불량 및 구조물 준공후 최초의 동절기에 집중 발생한다.

사. 마모에 의한 내구성 저하

흐르는 물이나 반복되는 과량을 받는 하천과 항만구조물, 교통에 의하여 손상을 받는 도로구조물의 경우 충격에 의하여 콘크리트 표면마모, 박리, 철근 노출 및 부식등의 손상이 발생한다. 일반적으로 이들 구조물의 표층콘크리트는 압축강도(σck) 300kg/cm² 이상, W/C비 45% 정도, 최대 굵은골재 치수 32mm 이하, 단위시멘트량 350kg/m³ 이하, 석영계의 잔골재 φ4mm 이하를 사용한 경우 내마모성 확보에 효과적이다.

4.1.2. 전기화학적 검사법

(1) 철근 부식도 조사

가. 강재의 부식 Mechanism

강재의 부식은 전기화학적 작용에 의하여 진행된다. 즉 강재가 부식하기 위해서는 철이 이온화하는 양극(anode, 결합부)과 산소가 환원하는 음극(cathode, 건전부) 그리고 이들을 상호연결하는 전

해물(50% 이상의 습기를 함유하고 있는 수용액)이 존재하여야 한다. 통상 강재는 pH 11 이상의 강알칼리 상태에서 부식에 저항하는 1×10⁻⁶ mm 두께의 얇은 수산화물 피막을 표면에 형성하여 산소의 침입을 막고 부식에 저항하므로 안정상태에 있게 된다. 따라서 건전한 철근콘크리트 부재에 배근되어 있는 보강철근은 콘크리트에 포함된 알칼리수용액에 의하여 표면피막을 형성하여 안정상태를 유지하지만, 콘크리트 내부로 Cl⁻, SO₄²⁻ 등의 음이온이 침투하거나 고온상태가 지속되면 부분적으로 강재표면의 부동태 피막이 파괴되어 부식이 시작된다. 이 중 염화물(Cl⁻)이 강재의 부식에 가장 유해한 성분으로 알려져 있다.

강재의 녹은 산화철(FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃), 수산화제 1철[Fe(OH)₂] 및 수산화제 2철[Fe(OH)₃]로 구분되며 다공성에 흡수성이 강하기 때문에 강재표면에 아무리 두꺼운 녹이 발생하여도 내부부식의 억제효과가 미약하다. 강재가 부식되면 2.5~4배의 체적팽창이 발생하므로 피복 콘크리트의 균열 및 박리를 수반하게 된다. 연구자료에 의하면 강재가 부식될 때 양극과 음극의 간격은 약 2~6cm 정도이며, (Cl⁻)/(OH⁻) ≥ 0.6 상태에서 부식율이 급격히 증가하는 것으로 보고되고 있는데 특수환경조건을 제외하고는 일반적으로 콘크리트의 중성화(알칼리성 저하)에 의한 철근부식은 0.2~0.3 mm/yr 로 큰 문제가 되지 않는 것으로 평가된다. 그림 2는 콘크리트의 pH와 강재부식율과의 상관관계를 도시한 것이다.

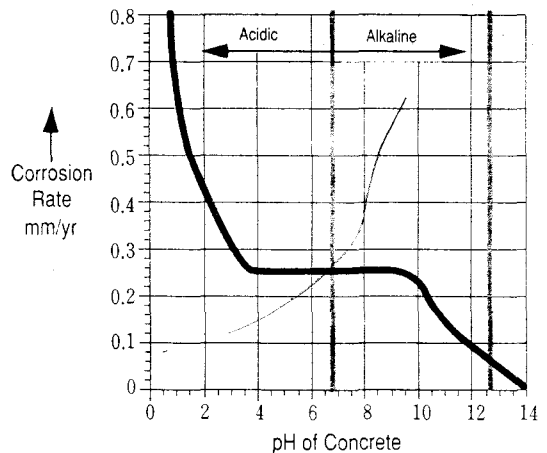


그림 2. 콘크리트의 pH와 철근부식률의 상관관계

강재의 부식상태는 구조물에 미치는 손상정도를 근거로 잠재기(I기), 진전기(II기), 가속기(III기), 열화기(IV기)로 구분된다.

1) 잠재기 : 염화물 이온이 콘크리트로 침투하여 강재주위에 축적되는 과정으로 강재표면에 얇은 부식피막이 형성되나 콘크리트에는 묻지 않은 상태.

2) 진전기 : 강재부식으로 부식생성물이 국부적으로 축적되기 시작하며 팽창압에 의하여 콘크리트에 균열이 도입되는 단계로 용존산소와 수분공급량이 부식속도를 지배한다.

3) 가속기 : 강재의 단면감소는 관찰되지 않으나 강재와 콘크리트의 부착이 파괴되고 강재와 직각방향의 균열이 발생한 상태. 균열발생에 의하여 구조물의 정적 내하력에 미치는 영향은 무시할 수 있으나 고응력의 반복하중이 작용하는 경우 내하력과 인성의 저하가 발생한다.

4) 열화기 : 강재부식이 가속되어 단면적의 감소가 현저하며, 구조물의 내하력 저하가 발생하는 단계이다.

철근이 부식하면 철근의 단면적이 감소하므로 구조물의 하중저항성(load carrying capacity)이 감소한다. 문헌분석에 의하면 철근콘크리트 휨부재의 경우, 인장철근이 단면적의 1.5% 만 부식하여도 휨부재의 단면내력이 감소하기 시작하며 4.5% 정도 부식되면 휨부재의 저항하중이 12% 감소하는 것으로 보고되고 있다.

(2) 철근 부식도 탐사 방법

ASTM에서 규정하고 있는 전위차 측정법을 이용하여 철근부식 상태를 평가하는 방법으로 현장에서는 주로 Potential Wheel이 사용되고 있다. 철근과 인접 콘크리트 사이의 전위차를 측정하기 위하여 포화유동산 전극이 조합전극으로 사용되며 측정된 전위차의 평가기준은 다음과 같다.

- $-200\text{mV} < E$: 90% 이상의 확률로 부식없음
- $-350\text{mV} < E \leq -200\text{mV}$: 불확정
- $E \leq -350\text{mV}$: 90% 이상의 확률로 부식 존재

(3) 철근 부식 면적률의 추정 공식

콘크리트의 중성화깊이와 철근 부식면적률 P(%)의 추정공식은 식 (3)과 같다.

$$P(\%) = \left[1 - \phi\left(-\frac{D-X}{0.41X}\right) \right] \times 100 \dots\dots (3)$$

여기서 D는 피복두께(mm), X는 중성화깊이(mm), $\phi(\)$ 는 정규분포 함수

4.1.3. 초음파탐상법

(1) 탐상 원리 및 시험 방법

(가) 탐상 원리

초음파 탐상법(Ultrasonic Technique)은 콘크리트 부재의 양측면에 초음파 발진센서와 수신센서를 위치시킨 후, 수신센서에 도달되는 초음파의 전달속도와 초음파의 특성을 측정하여 콘크리트의 내부결합 및 물성을 평가하는 방법이다. 콘크리트구조물의 내부결합 탐상에는 0.2kHz~0.5kHz의 저주파가 이용된다.

(나) 시험방법

직접법(대청법)과 간접법이 이용되나 직접법은 콘크리트의 강도와 물성평가에 주로 적용되며, 간접법은 균열 및 내부결합 탐상에 적용된다. 발진센서와 수신센서의 최소거리는 10cm 이상이며, 콘크리트 표면에 마감재가 있는 경우에는 마감재를 제거하여야 한다. 초음파의 전달속도는 콘크리트의 강도, 함수비, 공극률, 내부철근의 직경 및 배근간격에 따라 다소 차이를 보이므로 동일 개소에 대하여 3회 이상의 측정을 실시하여 평균값을 취하여야 한다.

(2) 초음파탐상법을 이용한 콘크리트의 강도 및 균열깊이 평가

콘크리트의 비파괴강도 평가공식은 식 (4)와 같고, 균열깊이 평가공식은 식 (5)와 같다.

$$\sigma_{ck} = 215 V_p - 620 \dots\dots\dots (4)$$

$$H = X \sqrt{\left(\frac{T_c}{T_s}\right)^2 - 1} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $T_s = \frac{2X}{V}$: 균열이 없는 건전부의 초음파 전달 시간

$$T_c = \frac{2\sqrt{X^2 + H^2}}{V} : \text{균열면 주위의 초음파 전달 시간}$$

$$L_1 = 2X : \text{건전부의 전달 길이,}$$

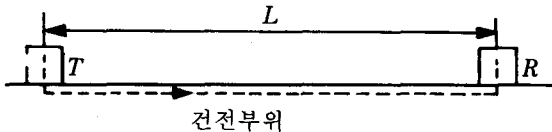
$$L_2 = 2\sqrt{X^2 + H^2} : \text{균열주위의 전달 길이}$$

$$H = \text{균열 깊이,}$$

$$\sigma_{ck} = \text{콘크리트의 강도(kg/cm}^2\text{)}$$

$$V_p = \text{초음파 전달 속도(km/sec)}$$

• 건전부



• 균열부

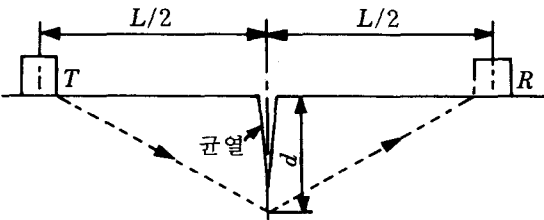


그림 3. 초음파탐상법을 이용한 강도 및 균열 깊이 측정 방법

4.1.4. 물리적 검사법

물리적 검사법을 이용한 콘크리트의 강도 평가방법으로는 Schmidt Hammer를 이용한 표면반발경도법과 코아채취에 의한 국부파괴법이 이용된다. 최근 비파괴 콘크리트 강도의 정밀성을 향상시키기 위하여 표면반발경도법과 초음파탐상법의 조합법이 개발되어 사용되고 있다. 강도 이외에도 현장에서 채취한 코아를 이용하여 실험실에서 콘크리트의 응력-변형률관계, 포아슨비, 초기탄성계수, 절선탄성계수, 극한변형률 등을 평가한다.

(1) 측정 원리 및 시험 방법

(가) 측정 원리 및 측정 방법

1) 슈미트햄머는 측정범위에 따라 NR Type(보통강도용, 150~600 kg/cm²), M Type(고강도 및 매스콘크리트용, 600 kg/cm² 이상), P Type(저강도용, 50~150 kg/cm²)이 있으므로 대상 콘크리트의 강도

수준에 따라 각기 다른 시험기를 사용하여야 한다.

2) Schmidt Hammer는 사용직전 반드시 테스트 엔빌로 교정하여야 하며, 이때 교정 반발경도 R이 80±1의 범위를 나타내어야 한다.

3) 콘크리트 표면은 평탄하게 연마하여 요철, 부착물, 분말 등을 제거해야 하며 곰보, 공극, 노출된 자갈 부위는 측정점에서 제외한다. 측정위치의 콘크리트 두께는 10cm 이상되어야 하며, 우각부의 경우 모서리에서 최소 6cm 떨어진 부위에서 측정하여야 한다. 부재별로 최소 3개소 이상을 측정하여 평균값을 취하여야 한다.

4) 측정개소마다 Schmidt Hammer의 타격점은 20점, 타격점 상호간의 간격은 3cm를 표준으로 하여 종 5열, 횡 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격한다.

5) 측정값은 원칙적으로 경수값을 읽도록 하되 평균타격값의 ±15%를 상회하는 값은 제외시킨다. 측정값의 평균을 그 측정개소의 반발경도(R)로 한다. 반발경도는 타격각도, 표면의 건습상태, 수직사하중에 의한 수평강도의 영향, 재령 등에 따라 보정하여야 한다.

6) 반발경도법과 조합법을 이용한 콘크리트의 비파괴강도 평가공식은 식 (6)~식 (7)과 같다.

반발경도법 : $\sigma_{ck} = \alpha \sigma_c$

$$\sigma_c = -184 + 13 R_o$$

$$R_o = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 \dots \dots \dots (6)$$

조합법 : $\sigma_{ck} = 0.85 \sigma_c$

$$\log 10\sigma_c = 0.01149 R_o + 0.3794 V_p + 0.4332 \cdot (7)$$

식 (6)은 RILEM, ACI, 일본재료학회 등에서 채택하고 있는 공식으로 σ_{ck} 는 콘크리트의 강도(kg/cm²), R_o 는 수정반발경도, R은 측정반발경도, ΔR_1 는 타격각도 보정계수이다. ΔR_2 는 압축부재의 수직사하중에 의한 수평강도의 보정계수, α 는 재령보정계수로 표 6을 적용한다. 식 (7)은 RILEM에서 채택하고 있는 공식으로 V_p (km/sec)는 초음파전달속도이다.

표 6. 반발경도의 재령보정계수

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1,000	3,000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

4.1.5. 레이더법

본 방법은 레이더식 철근탐사기(Reinforcing Steel Detector)를 사용하여 콘크리트 표면에서 내부로 레이더파를 발사한 후 철근(또는 이질면)에서 반사되는 반사파를 안테나가 수신하고 이를 영상처리하여 출력하는 것으로 콘크리트 내부철근의 배근간격과 피복두께는 정확히 탐사할 수 있으나 철근직경의 탐사는 불가능한 단점이 있다. 과거에는 지뢰탐사기의 원리를 이용한 자기식 철근탐사기(Magnetic Detector)가 사용되었으나 철근직경, 배근간격, 피복두께 등에 따라 측정결과의 편차가 커 현장에서 철근위치의 확인목적으로만 사용하고 있다.

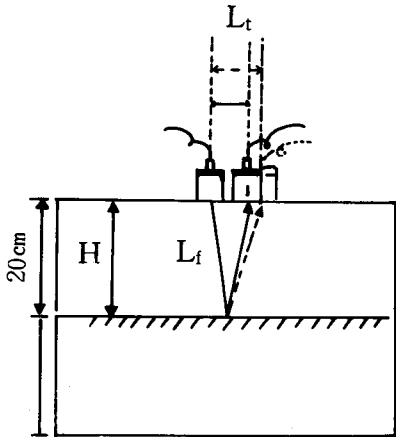
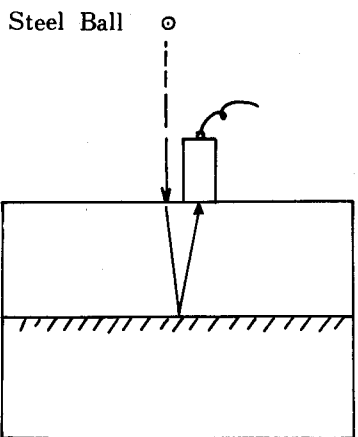
4.1.6. 충격탄성과 탐사법

(1) 탐사원리

대상물체의 표면에 일정한 충격에너지를 주었을 때 여기서 발생된 탄성파가 물체 내부의 결함 또는 매질물의 불연속면이나 이질면을 만날 경우 물질의 impedance차에 의해 반사되어지는 신호특성을 FFT 분석하여 내부결함, 경계층의 위치 및 크기를 frequency domain상에서 찾아내는 방법이다. 콘크리트와 같이 입자가 큰 복합재질에는 저주파가 이용되므로 측정결과의 해석시 전문기술이 요구된다.

(2) 충격탄성과 탐사법과 초음파 탐사법의 비교
콘크리트의 건전성 평가를 위하여 초음파 탐사법을 이용하면 콘크리트의 내부강도, 균열깊이, 콘크리트의 응결시간 및 내부 불연속면의 깊이 등을 개

표 7. 초음파 탐사법과 충격탄성과 탐사법의 비교

항 목	초음파 탐사법 (Pitch-catch법)	충격탄성과 탐사법 (Impact-echo법)	
사용 전파	고주파(초음파)	저주파(20kHz이하)	
탐사개략도			
해석방법	$T_h = L_t / V_c$ $= \sqrt{(4H^2 + L_t^2) / V_c}$ (T_h : L_t 의 도달시간 V_c : 초음파 통과속도) * 도달시간을 기하학적으로 해석	$F = \frac{V_c}{2H}$ (F : 경계층에서 반사 주파수) * Real-time wave를 FFT해석후 주파수 획득	
비교 실험 예	실제깊이	20.5 cm	20.5 cm
	측정깊이	23.0 cm	21.0 cm
	오차	+ 2.5 cm	+ 0.5 cm

략적으로 추정할 수 있다. 그러나 초음파는 고주파이기 때문에 콘크리트내의 내부결합이나 불연속면을 대부분 통과하므로 내부결합과 불연속면의 분석시 극히 일부의 반사파만을 이용하게 되는데 이로 인하여 측정결과가 다소 부정확해지는 단점이 있다. 이에 비하여 충격탄성과 탐사법은 저주파를 내부에 통과시켜 표면으로 반사되는 파의 특성을 감지하는 방법이므로 비교적 정확도가 높다고 할 수 있다. 표 7은 내부결합 평가에 이용되는 초음파 탐상법(Pitch-catch법)과 충격탄성과 탐상법(Impact-echo법)을 비교한 것이다. 주로 콘크리트 포장하부에 발생한 공동의 위치와 크기, 터널라이닝 배면의 공동 유무 확인에 적용된다.

4.1.7. 적외선 탐사법

(1) 탐사원리

절대영도이상의 온도를 갖는 물체는 표면으로 부터 적외선을 방출하고 있으며, 방출량은 물체의 온도와 엄밀한 관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 대상 구조체에서 방출되는 적외선량을 측정하면 그 물체의 온도를 알 수 있고, 이를 이용하여 콘크리트 구조물의 표면상태를 평가하는 방법이다. 적외선은 약 0.8~1,000 μm 범위의 파장을 갖고 있는 마이크로파와 가시광선사이 영역의 전자파이므로 적외선 영역의 전자파만을 감지하는 소자를 카메라에 부착하여 일반 광학 카메라와 같은 방법으로 적외선 화상 즉 대상물의 온도분포를 얻을 수 있다.

콘크리트구조물의 표면은 기온, 수온 및 태양의 복사열 변화에 따라 재료의 열전도율과 비열 등의 물리적 성질이 달라져 표면상태와 표면부의 박리유무에 따라 다른 온도변화를 보인다. 이러한 특성을 이용해 건전부와 열화부로부터 방사되는 적외선 양의 차이를 적외선 카메라를 이용하여 검출해 내는 방법이므로 건물 외장타일, 굴뚝의 열분포, 터널 라이닝 배면누수상태 추정 등에 적용된다.

(2) 적외선 탐사법의 특징

적외선 탐사법의 일반적인 특징은 다음과 같다.

1) 먼 장소로부터 검사가 가능하며, 광범위한 온도 분포를 1회의 계측으로 측정할 수 있다.

2) 최소 0.01℃의 온도차까지 감지 가능하다.

3) 계측시 열방사 패턴이 일정하므로 물체 표면의 온도분포를 열화상 처리할 수 있다.

4) 시간적으로 연속적인 계측이 가능하다.

4.1.8. 강재의 건전성 탐사

(1) 방사선투과검사법

방사선이 물질을 투과하는 성질을 이용하는 것으로 X선 필름상의 농도차에 의해 강재의 내부결합 및 용접상태를 탐상하는 방법이다.

1) 강재 주 부재의 맞대기 용접이음부에 대한 내부결합 검사를 목적으로 적용된다.

2) 투과시험 방법은 KS B-0845(강 용접부의 방사선 투과시험방법 및 투과사진의 등급분류 방법)에 따른다.

3) 투과시험을 실시하고자 하는 용접이음부의 표면을 깨끗이 청소하여야 하며, 투과사진에는 최소한 검사대상 및 촬영위치의 식별기호가 동시에 촬영되도록 하고, 투과사진과 촬영개소의 관련이 명백해야 한다.

4) 투과도계의 구조는 KS B-0845에 따르고 그 식별도는 다음식에 의해 구한 값이 2.0%이하이어야 한다.

$$\text{투과도계 식별도} = \frac{\text{시험부에 있어서 식별되는 투과도계의 최소 지름(mm)}}{\text{투과도계(mm)}} \times 100\%$$

5) 방사선투과시험은 부재의 하중특성을 고려하여 최대모멘트 작용부 및 인장부를 주요 대상으로 한다.

(2) 자분탐상검사법(Magnetic Particle Examination)

자화상태의 조사부위에 자성분말을 뿌리면, 균열, 공극 등에 누설장이 발생되고 불연속 표면에 달라 붙게 되어 결함을 표시해 준다.

1) 자성물체의 표면 또는 인접결함을 발견하기 위하여 사용되며, 자분은 건조상태 또는 물, 기름 등에 의해 습윤상태로도 사용할 수 있다. 습윤상태로 사용할 때는 피로균열과 같은 작고 미세한 균열을 찾는데 사용한다.

2) 강재의 균열탐사를 위하여 자기장을 예상되는 결함형성 방향에 수직 또는 여러방향으로 정렬시켜

야 한다.

(3) 침투탐상검사법(Liquid Penetrant Examination)

균열에 침투되는 침투액이 현상액에 착색되는 원리를 이용하여 결함을 찾아내는 방법이다.

1) 구조물 표면결함에만 한정되며 금속과 비금속 재료에 모두 적용할 수 있다.

2) 어두운 장소에서 사용하거나 미세한 균열을 탐지하기 위해서는 형광성 침투제를 사용하며, 침투액은 염색제 계통 또는 형광제 계통 모두 사용 가능하나 저점성, 고침투성, 높은 습윤능력(high wetting ability), 높은 표면장력과 균질성, 재료를 부식시키지 않고 천천히 마르며 쉽게 제거될 수 있는 특성을 가져야 한다.

3) 침투액 분사전, 강재표면은 페인트 및 녹을 제거하고 청소하여야 하며 분사후 과잉 침투제는 표면으로부터 제거한 뒤 현상액을 살포해야 한다.

(4) 초음파탐상검사법(Ultrasonic Examination)

초음파탐상검사법은 내부결함을 찾기 위하여 재료 내의 소리에 대한 진동특성을 이용하여 점검하는 방법이다.

1) 강재에서의 초음파탐상검사법은 펄스반사법을 적용한다.

2) 초음파를 시험체 표면에 경사지게 전파시킬 경우에는 경사 아크릴 쉘기받침을 사용하여 초음파를 전달시켜야 하며 방사선투과검사 후, 필름 판독이 어려운 경우나 강재 결함에 대한 충분한 자료를 가지고 있는 경우에는 방사선투과검사법에 비하여 초음파탐상검사법이 다소 효과적이다.

3) 초음파탐상검사법은 펄스반사파울 이용한 시험 방법으로 금속재료의 초음파탐상검사법(KS B-0817), 강 용접부의 방사선투과검사법 및 투과사진의 등급분류 방법(KS B-0896)에 따른다.

4) 탐상시험의 초기에는 초음파탐상검사법을 정확하게 수행할 수 있는 능력을 확인하기 위하여 전 시험개소의 1/10에 상당하는 수의 방사선투과검사를 요구할 수 있다.

5) 초음파탐상기의 성능은 KS B-0817 에 따라 시험하고 한국표준규격에서 정해진 요건을 만족해야 한다.

4.2. 구조수준(Structural Level)에서의 건전성 평가방법

비파괴기법을 이용한 구조수준에서의 건전성 평가방법은 크게 정적재하시험과 동적재하시험으로 구분된다. 일반적으로 재하시험은 구조물의 실제 하중-변형을 거동을 평가하고 처짐, 균열, 진동 등에 대한 사용성 검토함은 물론 새로운 구조해석방법과 실제기법의 검증, 구조물의 결함원인 규명, 준공도면이 없거나 보수·보강 자료가 미비한 경우 실제 거동의 평가를 목적으로 실시한다.

4.2.1. 시험경간 선정 및 계측기 부착

(1) 시험경간의 선정

1) 시험경간은 주요 부재의 손상상태, 보수 및 보강이력 등을 고려하여 종합적으로 가장 취약한 경간 또는 위치를 선택한다.

2) 건축구조물의 경우 지반침하, 용도변경, 개축, 증축, 과도한 장기변형이 발생한 경간을 선정하여야 하며, 토목구조물의 경우 이동하중의 분포, 신축이음과 받침장치의 노후정도를 고려하여야 한다.

(2) 계측기 및 센서의 부착

1) 대상 구조물의 설계하중, 총연장, 경간장, 구조형식 및 시험목적에 따라 시험의 종류, 센서 및 계측기의 종류, 부착위치 및 개소수, 재하하중, 시험회수 등을 결정한다.

2) 계측기와 센서는 압축·인장 휨변형률, 전단변형률, 최대처짐, 진동특성, 균열거동 등을 계측하기 위하여 부착하여야 하며, 콘크리트에는 60~90mm strain gage, 철근과 강재에는 13mm strain gage를 부착한다. 처짐의 측정을 위해서는 $\pm 50\text{mm}$ 또는 $\pm 100\text{mm}$ 의 LVDT(전자식 변위계)를 부착한다. 진동시험에는 strain type 또는 piezo type의 가속도계를 최대휨모멘트 위치에 부착한다.

3) 4차선 이하 교량, 복개구조의 경우 계측기와 센서의 부착 개소수는 시험경간내 전 거더와 슬래브를 대상으로 하며 4차선 이상의 경우는 예외로 한다. 슬래브교의 경우 시험트럭의 축간거리 간격만큼 이격시켜 전폭에 대하여 계측기와 센서를 부착함을 원칙으로 하며, 특수교량이나 박스교의 경우는 시험목적에 맞게 결정한다.

4) 연속구조물의 경우 하중 영향범위를 고려하여

정·부 모멘트부에 공히 계측기와 센서를 부착하여야 한다.

5) 슬래브 상부에 센서를 부착할 경우 직사광선, 습기, 이물질에 의한 손상 및 간섭을 받지 않도록 별도의 방습 및 보호처리를 하여야 한다.

6) 동일지점에 부착하는 계측기는 항상 2조로 하여 측정결과를 상호·비교할 수 있어야 한다.

7) 거더 지점부의 전단 변형률을 측정하기 위하여 로제트게이지를 부착한다.

8) 합성구조의 경우 콘크리트 바닥판과 강재 거더 또는 프리스트레스트 거더의 합성거동을 검토하기 위하여 최대 모멘트가 발생하는 단면의 상부 플랜지 부분과 이와 접하는 슬래브 또는 바닥판에 변형률 게이지를 부착한다.

4.2.2. 시험 하중의 선정 및 시험 계획

1) 시험하중은 구조물 설계하중의 60% 범위에서 결정하되, 토목구조물은 전륜/후륜의 축중비가 도로 교시방서 규정을 크게 벗어나지 않는 범위에서 토

사를 적재한 덤프트럭을 사용하고, 건축구조물의 경우는 구조물의 용도에 따라 bag 시멘트, 모래, 물주머니, 블럭, 소형차량 등을 사용한다. 아파트 주차장의 경우는 토목구조물과 동일하중을 선택한다.

2) 시험차량은 성능이 양호한 차량을 선택하여야 하며, 2차선 교량의 경우는 1대, 4차선 이상의 교량은 2대를 교폭방향으로 동시재하시킨다. 2대의 덤프트럭이 사용되는 경우, 트럭간 총중량의 차이는 ± 5% 이내이어야 한다.

3) 재하시험 시기는 교량의 주변여건, 교통량, 보행자의 안전등 경제적, 사회적 손실을 고려 하여 교통통제의 영향이 적은 시간대를 선정한다.

4) 우천시나 대기온도가 계측기의 작동범위를 벗어날 때는 재하시험을 실시하지 아니한다.

5) 콘크리트 구조물의 경우 재령 56일 이전에는 재하시험을 실시하지 않음을 원칙으로 한다.

6) 재하시험원 및 교통통제원은 주·야간 모두 육안 식별 가능한 복장을 착용하여야 한다.

7) 차량의 안전운행을 위하여 각종 교통통제용 입

표 8. 각국의 시방서에서 규정하고 있는 재하시험방법 및 판정기준

시방서 규정	재하시험 방법	판정 기준
ACI 318-77	0.85(1.4x고정하중+1.7x적재하중)에서 자중을 뺀 하중을 24시간 지속 재하시킨 후, 최대처짐 a를 측정한다. 측정 후 즉시 하중을 제거하고 24시간 경과 후 잔류처짐 b를 측정한다(신설 구조물의 경우 재령 56시간 이전에는 재하시험을 실시하지 않는다).	(a) $a \leq l^2 / (20,000 h)$ 인 경우 → 건전 (b) $a \geq l^2 / (20,000 h)$ 인 경우 · $b \leq 0.25 a$ (RC 구조), · $b \leq 0.20 a$ (PC 구조) → 건전 (c) PC구조 이외의 구조가 (a),(b) 모두 만족하지 않을 경우, 재시험을 실시하여 재하시험에 의하여 명백한 파괴징후가 나타나지 않거나 $b \leq 0.80 a$ 인 경우 구조가 건전한 것으로 판단함.
RILEM No.53	재하하중은 시험목적에 따라 임의로 선정한다. 일반적으로 전설계하중의 1.4배에서 자중을 뺀 하중을 16시간 지속재하한 후, 최대처짐 a를 측정하고, 즉시 하중을 제거하여 16시간 이상경과 후 잔류처짐 b를 측정한다.	(a) 콘크리트의 재령 56일 이상 경과 후, 최초의 재하시험에서 · $b \leq 0.25 a$ (RC 구조) · $b \leq 0.20 a$ (PC 구조) → 건전 (b) 기존구조물의 경우 · $b \leq 0.125 a$ (RC 구조) · $b \leq 0.100 a$ (PC 구조) → 건전 (c) 약재령에서는 재하시험을 실시하지 않음.
JASS 5-1958 A법	설계 적재하중(활하중)을 4시간 지속 재하하여 최대처짐을 측정한다. 하중 제거 후, 1시간 경과시 잔류처짐을 측정한다.	잔류처짐이 최대처짐의 15% 이내이면 구조가 건전함.
JASS 5-1958 B법	설계 적재하중(활하중)의 2배를 재하한 직후의 처짐을 측정한다 후, 하중 제거 직후의 잔류처짐을 측정한다.	잔류처짐이 최대처짐의 10% 이내이면 구조가 건전함.
건설부 건축설계기준	ACI 318-77과 동일	ACI 318-77과 동일

간판, 비상조명등, 보조장비를 설치하여 운영하여야 하며, 재하시험 종료후 부분적으로 훼손된 구조물 표면을 원상복구하여야 한다.

4.2.3. 정적재하시험

구조물의 설계시 예측한 초기거동은 공용기간이 장기화됨에 따라 재료의 내구성 감소 및 구조적 노후로 점차 건전성이 저하되어 간다. 따라서 주요 부재의 정적하중에 의한 처짐 및 변형률을 실측하여 대상 구조물의 실제거동을 분석하고 실측값과 이론에 의한 해석값을 비교하여 구조물의 실제 하중저항능력을 구할 수 있다. 정적재하시험은 다음과 같은 목적에 따라 측정위치, 시험하중의 재하위치 등을 결정하여 정적처짐과 정적변형률을 측정한다.

(1) 평가항목

- 1) 중립축 위치 결정
- 2) 하중의 횡분배
- 3) 주 거더와 슬래브(또는 바닥판)와의 합성 작용
- 4) 부재의 강성
- 5) 응력 및 처짐의 영향선
- 6) 계산응력과 측정응력의 비교

(2) 시험방법

- 1) 재하시험은 시험하중외에 여타의 하중이 완전히 통제된 상태에서 초기값을 설정한다.
- 2) 시험하중의 재하로 발생한 구조물의 진동, 소음, 충격 등 측정결과에 영향을 미칠 수 있는 일체의 영향요소들이 소멸된 다음 측정을 시작한다.
- 3) 재하경우별로 3회 이상의 반복측정을 실시함을 원칙으로 한다.
- 4) 표 8은 각국의 지방에서 제시하고 있는 건축구조물의 재하시험방법 및 판정기준이다.

4.2.4. 동적재하시험

구조물의 동적재하시험은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 시험하중의 반복재하에 의한 동적응답으로부터 실제 구조물의 충격계수 및 동적거동 평가를 위한 시험과 구조물의 고유진동특성을 구하기 위한 시험이 있으나, 주로 토목구조물을 대상으로 한다.

(1) 토목구조물의 주행시험

1) 특수한 목적인 제외하고 동적재하시험은 재하차량 이외에 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 실시한다.

2) 정적재하시험용 계측기와 동적재하시험용 계측기가 상이한 경우 계측기의 측정오차를 검증하기 위하여 동적재하시험용 계측기를 사용하여 정적재하시험과 동일한 1개 재하경우를 선택하여 정적재하시험을 실시한다.

3) 시험차량의 주행속도는 최저 10km/h 에서 최대 60km/h 까지로 하되, 접속도로의 선형, 노면상태, 차량통제 현황등이 허락되지 않을 경우에는 예외로 한다.

4) 주행속도별로 상행차선과 하행차선에서 각각 동일 속도의 주행시험을 실시한다.

5) 측정결과를 이용하여 교량의 충격계수, 동적변형률, 가속도, 진동주기, 여진동 등 고유진동수에 따라 사용성 측면에서의 교량진동 특성을 분석한다.

(1) 건축구조물의 진동특성 시험

1) 진동하중을 받는 공장건물, 학교 실험실등, 기계기초, 외부진동에 의하여 손상이 진행되고 있는 건물구조 및 미소진동에 민감한 전자부품 제조실등의 건전성 평가를 위하여 진동실험을 수행한다.

2) 구조물의 진동특성 즉 고유진동수, 감쇄율, 진동모드를 평가하여 진동이 사용자에 미치는 심리적, 육체적, 정신적 영향을 평가한다.

3) 고층구조물의 내진안전도, 내풍안전도를 평가함에 있어 계측된 동적특성이 기본자료로 활용되며 공용중 일정기간 사이의 동적특성 차이는 구조물의 손상정도를 평가하는데 사용 될 수 있다..

5. 각종 비파괴계측 결과의 평가

토목 및 건축구조물의 주요 노후현상 및 점검항목은 표 9와 같으며, 각종 노후현상별 한계상태는 표 10과 같다. 앞으로 토목 및 건축구조물의 안전성 평가에 보다 적극적인 비파괴기법이 도입되기 위해서는 계측결과를 정량·정성적으로 평가할 수 있는 세분화된 평가기준이 개발되어야 한다.

표 9. 토목 및 건축구조물의 주요 노후 현상 및 점검 항목

구분	목표성능	노후현상	주요 점검항목
토목구조물	단면파괴 변형 균열폭 진동 피로	균열 철근부식 중성화 알칼리반응 염해 동해 강성저하	강재의 파단 균열상태 중성화깊이 박리 진동특성 변형량
건축구조물	구조기능 단면형태 변형 균열폭	중성화 철근부식 균열 투수 강도저하 큰 변형 표면열화 동해	철근 부식면적 균열폭 투수 유무 설계기준강도비 처짐-시간비 진동수비 잔류변형량 열화상태

표 10. 각종 열화현상의 한계 상태

열화현상	한계치 설정 인자	한계 상태
중성화 철근 부식	철근 부식률	교량, 도로구조물, 주차장구조 15% 내외 일반 건축구조, 아파트 30% 내외 공장, 창고 50% 내외
균열	균열폭	PC 구조 0.1 mm 이상 보수 요망 RC 구조 0.2 mm 이상 보수 요망
누수	누수의 유무	누수 발생
강도저하	설계기준 강도비	인발시험 75% 슈미트햄머 또는 초음파속도 90% 코어 압축강도 85%
큰 변형	처짐-시간비 균열폭 및 길이 고유진동수비 잔류변형률	처짐-시간비 0.01 이상 균열폭 3mm 이상 균열간격 20cm 이하 고유진동수비 0.75 미만 재시험에 의한 잔류변형률 0.15 이상
표면열화	열화정도	광범위하게 큰 단면손실이 발생 하고 열화깊이가 인장철근 깊이 까지 도달한 경우 또는 현재 열 화정도는 보통이나 그 원인이 불명확하며 열화가 빠르게 진행 되는 경우
동해	열화정도	철근에 인접한 균열, 박리, scaling, 깊이가 30cm 이상되는 열화

6. 결 론

우리나라의 경제성장이 가속화되고 국민의 소득 수준이 상승함에 따라 과거와는 달리 보다 쾌적하고 미려하며 사용성과 안전성을 공유하고 있는 공공 시설물이 요구되고 있다. 특히 각종 대형건설사고를 경험하면서 노후시설물의 유지관리에 대한 중

요성을 그 어느 때 보다도 절실히 느끼고 있다. 구조물을 효과적으로 유지관리하고 잔존수명을 연장하기 위해서는 재료, 설계, 시공분야의 선진화 뿐만 아니라 성능저하를 예측하고 평가하는 비파괴기술의 연구개발이 선행되어야 한다. 국내의 경우 비파괴계측 장비의 정밀성 향상과 다변화, 비파괴계측 결과의 평가기준의 정립 등 유지관리분야(진단 및 보수·보강)가 전반적으로 미흡한 수준이나, 천재지변이 빈번한 외국의 예를 볼 때, 향후 설계분야와 대등한 규모로 성장할 것이 예상되고 있다.

건설시장 개방에 따른 건설분야의 국제화 및 선진화를 주도하기 위해서는 비파괴평가 기술을 포함한 유지관리 전문분야에 걸쳐 보다 과감한 연구개발 및 투자가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) 磯畑 脩 監修, 實務者のための建物診断,丸善株式會社, (1990)
- 2) 日本コンクリート工學協會, 콘크리트構造物의 壽命豫測と耐久性設計に關するシンポジウム 論文集, 日本コンクリート工學協會 耐久性設計研究委員會, (1988)
- 3) 建築技術, 建物の劣化診断と補修·改修工法, 建築技術, Vol.4, 増刊, (1991)
- 4) 高架構造研究會編, 道路橋の點檢補修, 高架構造研究會, 理工圖書
- 5) 岡田 清 監修, 土木構造物의 診断, 山海堂, (1991.)
- 6) 白石 成人, 構造物의 라이프타임リスク의 評價, 日本土木學會, 構造工學シリーズ 2, (1988.)
- 7) 小林 一輔, 콘크리트構造物의 早期劣化と耐久性診断, 森北出版株式會社, (1991)
- 8) V. M. Malhotra and N. J. Carino, CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, (1991), pp.1~316.
- 9) P. H. Emmons, Concrete Repair and Maintenance Illustrated, Construction Publishers and Consultants, (1993), pp.1~114.
- 10) 대한건축학회, 건축물의 안전진단과 보수보강, 대한건축학회 세미나논문집, (1993)
- 11) 이상민, 콘크리트구조물의 안전진단 및 성능평가, 한국기술정보원, (1995.)
- 12) 이상민, “비파괴시험법에 의한 R/C구조물의 평가-건축구조물에의 적용현황 및 전망”, 한국콘크리트학회지 제6권 2호, (1994. 4), pp. 34~39.