

제 3 장 내구성 조사

3.1 개 요

3.2 콘크리트 압축강도 측정

3.3 피복두께 측정

3.4 탄산화 시험

제3장 내구성 조사

3.1 개 요

점검시 육안조사에 의한 외관상태 항목과 함께 내구성 요소인 재료의 품질상태 조사는 시설물의 상태평가를 실시하는데 중요한 요소로서 시설물의 상태평가를 위한 조사항목 및 평가기준은 『안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2010. 12)』를 준용하여 적용하였다.

3.2 콘크리트 압축강도 측정

3.2.1 반발경도법

콘크리트의 표면 경도를 측정하여, 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 비파괴로 추정하는 검사방법이다.

반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F_c')와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

가. 반발경도(R)

외관조사 결과에 의해서 결정된 측정개소에 대해서 표면 평활 작업을 하여 타격점 상호간의 간격은 3cm를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도 값의 산술 평균(R_m)을 구한다.

산술평균값 R_m 에 대해서 RILEM Recommendation에 따라 각 반발경도의 값이 $R_m \pm 20\%$ 의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술 평균하여 반발경도 R을 결정한다. 제외된 반발치가 4개 이상일 때는 측정지점의 반발경도값(R)은 버린다. 여기서 측정된 반발치의 값들이 많은 편차를 보이고 있으면 보편적으로 콘크리트의 품질이 불균질하게 평가될 수 있을 것이다.

나. 보정반발경도(Ro)

보정반발경도 R_o 은 다음 식과 같이 측정경도 R 에 보정값 $\angle R1$, $\angle R2$, $\angle R3$ 을 더한 값으로 한다.

$$R_o = R + \angle R1 + \angle R2 + \angle R3$$

여기서, $\angle R1$: 타격방향에 따른 보정값

$\angle R2$: 압축부재의 사하중 응력에 따른 보정값

$\angle R3$: 콘크리트의 습윤 상태에 따른 보정값

1) 타격 방향에 따른 반발경도의 보정

수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에는 반발치를 보정해 주어야 한다. 하향 타격(-90°)의 경우에는 Schmidt Hammer 내부의 해머중량에 의해서 실제보다 반동량이 작아지므로 +값으로 수정해 주고, 상향의 타격($+90^\circ$)의 경우에는 반대현상에 의해서 -값으로 수정해 주어야 한다.

【표 I.3-1】 타격방향에 따른 반발경도 보정치

반발경도	보 정 치				비 고
	$+90^\circ$	$+45^\circ$	-45°	-90°	
10			+2.4	+3.2	상향수직타격 $+90^\circ$ 하향수직타격 -90°
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4	
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7	
50	-3.1	-2.1	+1.5	+2.2	
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	

2) 압축응력에 따른 반발경도 보정

타격방향과 직각방향으로 압축응력을 받는 부재는 압축응력이 커짐에 따라 반발경도에 의한 압축강도가 실제보다 커진다는 사실이 시험결과 입증되었다. 그 크기는 대략 압축응력이 1.0MPa인 경우 $\angle R2 = -0.015R$, 2.5MPa인 경우 $\angle R2 = -0.05R$ 이다.

3) 콘크리트 습윤상태에 따른 보정

콘크리트 표면이 습윤상태에 있으면 기건상태보다 반발도가 작게 나오게 된다. 따라서 완전 습윤상태에서는 기건상태를 기준으로 $\angle R3 = +5$ 로 보정한다.

4) 비파괴 강도 추정

보정반발경도 R_o 로부터 압축강도(F_c)의 상관관계를 도출한 여러가지 제안식 들은 다음과 같다.

【표 I.3-2】 압축강도 제안식

구 분	계산식	비 고
방법1.	$F_c = -18.0 + 1.27 R_o \text{ (MPa)}$	일본 재료학회 강도
방법2.	$F_c = (7.3 R_o + 100) \times 0.1 \text{ (MPa)}$	일본 건축학회 CNDT 소위원회 강도추정식
방법3.	$F_c = (15.2 R_o - 112.8) \times 0.1 \text{ (MPa)}$	과학기술부(고강도콘크리트)

여기서, F_c : 추정강도(MPa) R_o : 반발경도

5) 28일 강도의 추정

수년이 경과한 콘크리트 구조물은 표면경도가 높기 때문에 다음식과 같이 재령 28일 강도($F_{28'}$)로 환산한 압축강도로 수정하여 콘크리트의 압축강도를 추정한다. 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 보정계수 α 는 다음 표와 같으며, 3000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

$$F_{28'} = \alpha \cdot F_c$$

【표 I.3-3】 재령계수 α 의 값

재령	4일	5일	6일	7일	8일	9일	10일	11일	12일	13일	14일	15일	16일	17일	18일
n	1.90	1.84	1.78	1.72	1.67	1.61	1.55	1.49	1.45	1.40	1.36	1.32	1.28	1.25	1.22
재령	19일	20일	21일	22일	23일	24일	25일	26일	27일	28일	29일	30일	32일	34일	36일
n	1.18	1.15	1.12	1.10	1.08	1.06	1.04	1.02	1.01	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.95
재령	38일	40일	42일	44일	46일	48일	50일	52일	54일	56일	58일	60일	62일	64일	66일
n	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85
재령	68일	70일	72일	74일	76일	78일	80일	82일	84일	86일	88일	90일	100일	125일	150일
n	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81	0.80	0.80	0.78	0.76	0.74
재령	175일	200일	250일	300일	400일	500일	750일	1000일	2000일	3000일					
n	0.73	0.72	0.71	0.70	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63					

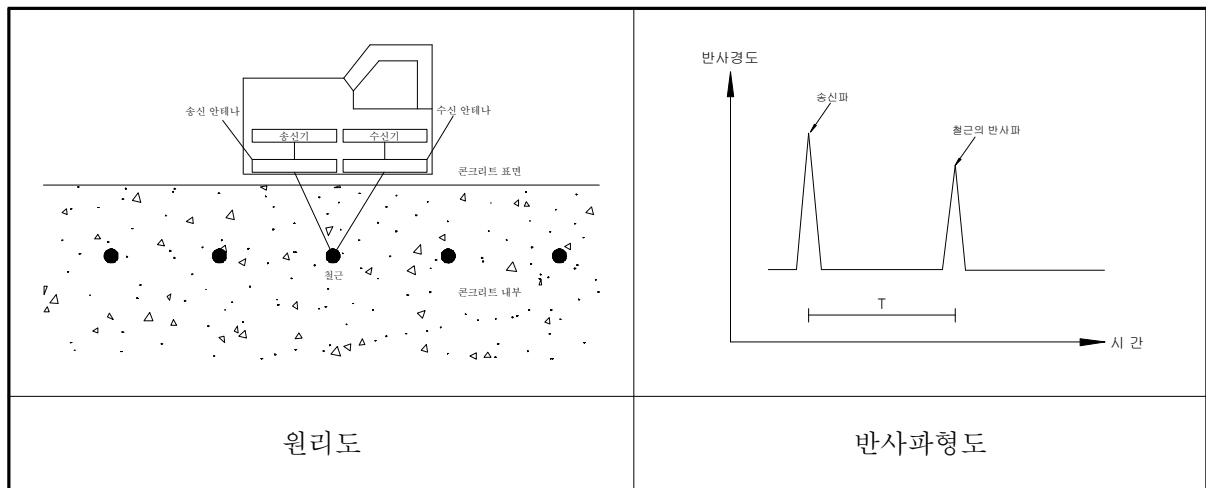
6) 압축강도의 판정

- 평가기준 : $\frac{f_{ck} \text{ 비파괴}}{f_{ck} \text{ 설계기준}} \geq 0.90$: 건전

3.3 피복두께 측정

3.3.1 측정원리

본 기기의 원리는 현재 넓게 이용되고 있는 일반의 레이더와 기본적으로 동일하다. 즉, 아래의 그림과 같이 전자파를 안테나에서 콘크리트를 향하여 방사하고, 그 전자파가 콘크리트와 전기적 성질이 다른 물질, 예를 들면 철근, 공동 등의 반사물체와의 경계면에서 반사되어, 재차 콘크리트 표면에 나와 표면 가까이에 있는 수신 안테나에 도달하기까지의 시간으로부터 반사물체까지의 거리를 알게 된다. 안테나를 콘크리트 표면에서 이동함에 따라, 수평면상의 위치를 알게 된다. 본기기는 콘크리트 낮은 부분을 높은 분해능으로 탐사하기 위한 목적으로 하기 때문에 Pulse폭이 지극히 짧은 1나노초(10억분의 1초) 이하의 Pulse파를 송신에 이용하고 있다.



【그림 I.3-1】 원리도 및 반사파형도

콘크리트안의 전자파 속도V는 다음의 식으로 표시된다.

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_v}} \quad (m/s)$$

단, C ; 진공중(공기 중)의 전자파 속도(3×10^8 m/s)

ϵ_v ; 콘크리트 비유전율(예 : 6~10 정도)

반사물체까지의 거리D는 송신시각으로부터 반사파 수신 시각까지의 시간차 T로부터 구할 수 있다.

$$D = \frac{1}{2} VT \quad (m)$$

3.3.2 적용조건

콘크리트 내부에서 전파의 감쇄가 작은데다(도전율이 작고, 전기를 통하지 않음), 측정 대상물의 전파를 반사하는 물체(콘크리트와 유전율이 다름)이고, 반사펄스가 충분히 수신 가능해야 할 필요가 있다. 측정결과의 판정은 현장상황(경계조건)에 따라 차이가 있으며, 적용 가능한 조건과 곤란한 조건을 구분하여 기술하면 다음과 같다.

가. 적용 가능한 조건

- 1) 철근 피복두께의 측정, 깊이의 한계
 - 측정심도 약 20cm 이내, 철근경 $\phi 10$ 일때 24cm, $\phi 6$ 일때 18cm
- 2) 배근간격의 측정 한계
 - 측정분해가능 약 10cm 이상, 철근경 $\phi 10$ 일때 7cm, $\phi 20$ 일때 8cm

나. 측정결과의 판정을 용이하게 하기 위해서

- 1) 콘크리트의 질이 가능한 한 균일할 것
- 2) 경계조건이 복잡하지 않을 것(안테나에 비교해서 넓은 장소)
- 3) 철근이 안테나의 진행방향에 가능한 한 평행할 경우에 측정할 것
- 4) 측정대상 철근경이 $\phi 6\text{mm}$ 이상일 것

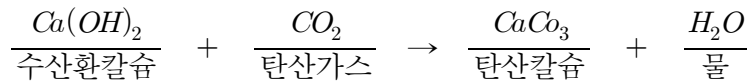
다. 적용 곤란한 조건

- 1) 전파를 양호하게 반사할 물체(철근, 금강 등의 금속)가 100mm 이하의 좁은 간격이고, 그 아래의 배관과 철근 등을 측정하는 경우
- 2) 철근이 안테나의 진행방향과 직교해서 측정할 수 없는 경우
- 3) 철근이 상하 방향으로 겹쳐 있는 경우의 근접한 철근

3.4 탄산화시험

3.4.1 측정개요

탄산화란 콘크리트의 탄산화(Carbonation) 과정에서 나타나는 현상으로 탄산화에 의해서 문제가 발생하는 것은 콘크리트 자체에서 생기는 것이 아니고, 콘크리트 중의 철근에 녹이 발생함으로써 문제를 일으키는 것이다.



(pH 12~13) (대기중에 존재) (pH 8.5~10)

탄산화가 일어나는 메카니즘을 보면 시멘트의 수화 반응에서 생성되는 수산화칼슘 $[Ca(OH)_2]$ 은 pH 12~13정도의 강 알칼리성을 나타내지만 대기중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하면 탄산칼슘과 물로 변화하고 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5~10 정도로 낮아지게 된다. 따라서, 콘크리트의 탄산화는 일반 환경에서도 확실하게 진행되기 때문에 매입된 철근의 부식에 따른 문제가 가장 기본적인데 중요하다. 콘크리트 내부의 pH가 11이상에서 철근은 표면에 $1 \times 10^{-6} \text{mm}$ 두께의 수산화물 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 부동태막을 형성하므로 산소 침입을 막아 철근의 부식을 방지하지만 탄산화에 의하여 pH가 11보다 낮아지면 부동태막이 파괴되면서 철근에 녹이 발생하게 된다. 이러한 녹은 원래 부피의 약 2.5배에서 최대 7배까지 팽창하고 녹의 팽창압력에 의해 콘크리트 내부에는 균열이 발생하게 되며 철근의 부착강도 저하, 피복 콘크리트의 탈락, 철근 단면적의 감소 등 구조물의 내구성 저하를 초래하게 되므로 콘크리트 구조물의 내구성면에서 탄산화를 파악하는 것이 중요하다.

3.4.2 측정방법

탄산화의 판별법은 콘크리트의 피복을 해체하고 그 파단면에 1%의 페놀프탈레인-알코올 용액을 분무하여 변색 여부를 관찰하는 방법이 가장 일반적이다. 무색으로 나타난 부분은 탄산화가 되었으며, 적색으로 변화하면 탄산화되지 않은 부분으로 구별하게 된다. 본 과업에서는 콘크리트 미소구간을 파취하여 시행하였다.

3.4.3 평가기준

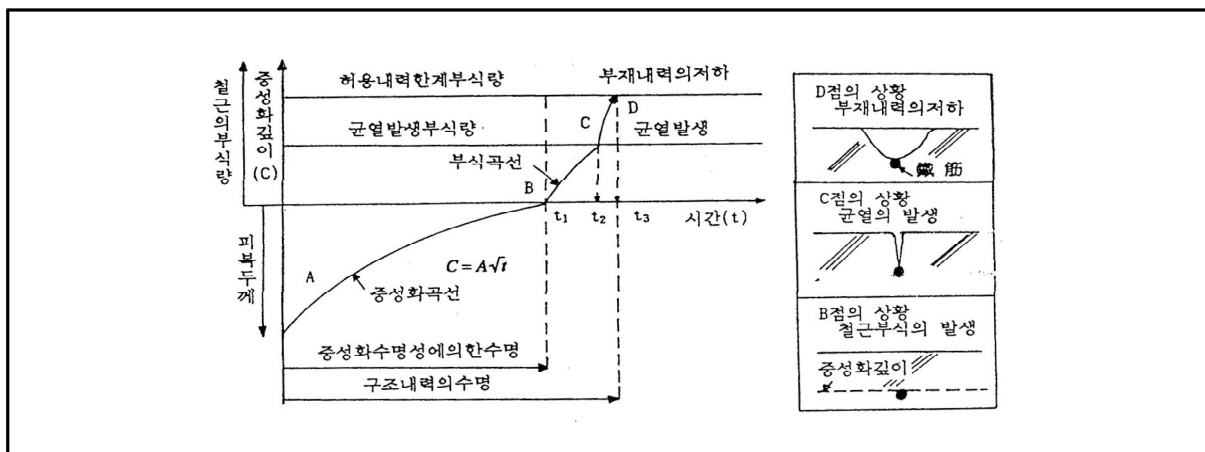
탄산화의 진행 상태는 피복두께의 절대값이 클수록 탄산화 잔여깊이 값이 커지므로 피복두께가 클수록 철근부식까지의 탄산화 도달시간에 대한 여유가 크다. 피복두께와 탄산화 측정깊이를 고려한 철근콘크리트 구조물에서의 탄산화 진행상태 상태평가 등급은 다음과 같다.

【표 I.3-4】 탄산화 상태평가 기준

등 급	탄산화 잔여 깊이	철근부식의 가능성
a	30mm이상	탄산화에 의한 부식발생 우려 없음
b	10mm이상 ~ 30mm미만	향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음
c	0mm이상 ~ 10mm미만	탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음
d	0mm미만	철근부식 발생
e	—	—

3.4.4 내구수명 평가

콘크리트가 탄산화되어 철근 부식이 시작되고, 수명에 이르는 개념은 다음과 같다.



【그림 I.3-2】 탄산화와 철근 콘크리트 수명과의 관계

즉, t_1 은 탄산화영역이 철근표면에 도달하는 시점, t_2 는 그 결과 철근이 부식되고 콘크리트에 균열을 발생시키는 시점, t_3 은 부재내력이 한계에 도달하는 시점을 의미한다. 지금까지 철근콘크리트 구조물의 수명은 t_1 의 시점이라고 판단되어 왔으나, 실제 구조물에 적용할 경우 많은 문제점이 나타나게 된다. 전문가에 따라서는 t_1 의 시점이 반드시 철근

의 유해한 부식량의 시점이라고는 생각되지 않기 때문에 t_2 의 시점을 수명으로 산정하는 것이 적절하다는 의견이 있으므로 아직까지는 명확한 수면을 판단하기는 어렵다. 또한, 다양한 환경조건에 따라 t_1 에서 t_1 도달까지의 시간이 다르기 때문에 본 과업에서는 탄산화에 의한 내구수명을 t_1 에 도달할때까지의 시간으로 결정하고 내구수명을 산정하였다. 대기중의 탄산가스에 의한 콘크리트 표면으로 부터의 탄산화 진행을 경과 시간의 함수로 표현한 것이 탄산화 속도식이다. 탄산화가 정상상태에서 탄산가스의 콘크리트 내부 확산에 따라 생긴다고 가정하면, 탄산화깊이 C 는 경과시간 t 의 평방근에 비례한다고 하는 식이 도출된다. 이것을 통상 $\sqrt{t}$ 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

$$C = A\sqrt{t}$$

위 식에서 계수 A 는 탄산화속도계수라고 하며, 수치가 큰만큼 탄산화 속도가 크게 된다. 계수 A 는 콘크리트 재료적 요인 및 환경조건에 의해 정해지는 복잡한 함수이다.

본 과업에서 탄산화에 의한 수명 평가는 경과년수와 탄산화깊이와의 관계를 통해 탄산화 속도계수를 역추적하여 탄산화가 철근에 도달하는 시간을 계산하였다.

앞서 언급한 식에서 준공후 현재까지의 경과년수 t 는 설계도로부터 구할 수 있고 탄산화깊이 C 는 현장조사를 통해 획득할 수 있으므로 탄산화 속도계수 A 를 산정할 수 있다. 이에 따라 다음 식을 통하여 현재로부터 탄산화가 철근에 도달하는데 걸리는 시간을 추정할 수 있다.

$$t_d = \frac{D_c^2}{A^2} - t_0$$

여기서, t_d : 탄산화가 철근에 도달하는데 걸리는 시간

D_c : 현장조사로부터 얻어진 철근까지의 피복두께(mm)

A : 탄산화시험으로부터 계산된 계수

t_0 : 현재의 구조물 경과시간