

제 4 장 내구성조사

4.1 개요

4.2 콘크리트 내구성 조사

제 4 장 내구성조사

4.1 개요

교량의 콘크리트 내구성조사는 교량에 손상을 주지 않고 콘크리트의 시공 상태, 물성 및 열화정도를 조사하는 방법으로 콘크리트의 비파괴강도, 탄산화, 철근배근상태, 철근의 부식도 등의 현장시험을 비파괴시험 장비들을 이용하여 조사하는 방법이다.

교량 구조물의 내구성 저하의 대표적인 현상은 콘크리트 탄산화, 철근부식, 균열, 강도저하, 표면 노후화, 부재의 큰 변형, 동결융해, 누수, 건조수축 등의 현상으로 분류된다. 철근의 부식과 콘크리트의 균열은 독립된 원인에 의해 나타나는 것이 아니고, 그 밖의 열화를 일으키는 원인과도 복합적으로 관계되고 있다.

내구성 조사는 구조물에 열화손상이 이미 현저하게 진행되었을 경우 열화의 정도 및 그 원인관계를 조사하고 보수·보강의 판정을 하며 아직 열화손상이 없거나 경미한 구조물의 내구성 조사 실시로 향후 경향을 예측 및 예방하고 예방보전을 검토하기 위한 자료를 수집하는 것을 목적으로 한다.

내구성 조사의 적용범위는 다음과 같다.

- 내구성 조사를 대상으로 하는 구조물은 강·콘크리트 구조물에 한한다.
- 내구성 조사는 구조체를 중심으로 수행한다.
- 내구성 조사는 조사 시점의 열화상태 뿐만 아니라 구조물의 이력, 주요환경, 열화원인을 조사하여 향후 열화손상 진행정도를 예측하고, 내용년수와 관련하여 종합적인 안전진단을 수행한다.
- 향후 유지관리 시 금회 재료시험 위치에서의 결과치를 활용하여 비교·분석할 수 있도록 내구성 조사 위치도를 수록한다.

본 장에서는 콘크리트 및 강재의 내구성 조사, 품질조사 등을 실시하여 구조물의 내구성과 사용성을 검토하고 상태평가, 보수 보강공법 및 유지관리 방안 제시의 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

【표 4.1-1】 내구성 조사 항목

구 분	조 사 항 목		조 사 내 용
콘크리트	강도조사	반발경도 초음파전달속도	비파괴 시험 장비로 콘크리트 강도를 조사
	품질조사	염화물함유량	시료채취 후 시험
	탄산화 조사		채취된 코어 및 시료를 이용하여 탄산화 깊이를 조사
	균열깊이 조사		초음파 탐지기를 이용해 균열깊이 조사

금회 정밀안전점검 시 내구성 조사를 위하여 실시한 비파괴 재료시험 수량은 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2019. 01)에 따른 기준수량 이상으로 실시하였다. 금회 비파괴 조사의 시험위치는 시간경과에 따른 구조물의 노후화 진행정도를 파악, 비교하기 위하여 기 점검에서 측정되지 않은 부위와 내구성 확인이 필요하다고 판단되는 부재에 대해서도 추가로 조사하였다.

【표 4.1-2】 비파괴 재료시험 기준 수량

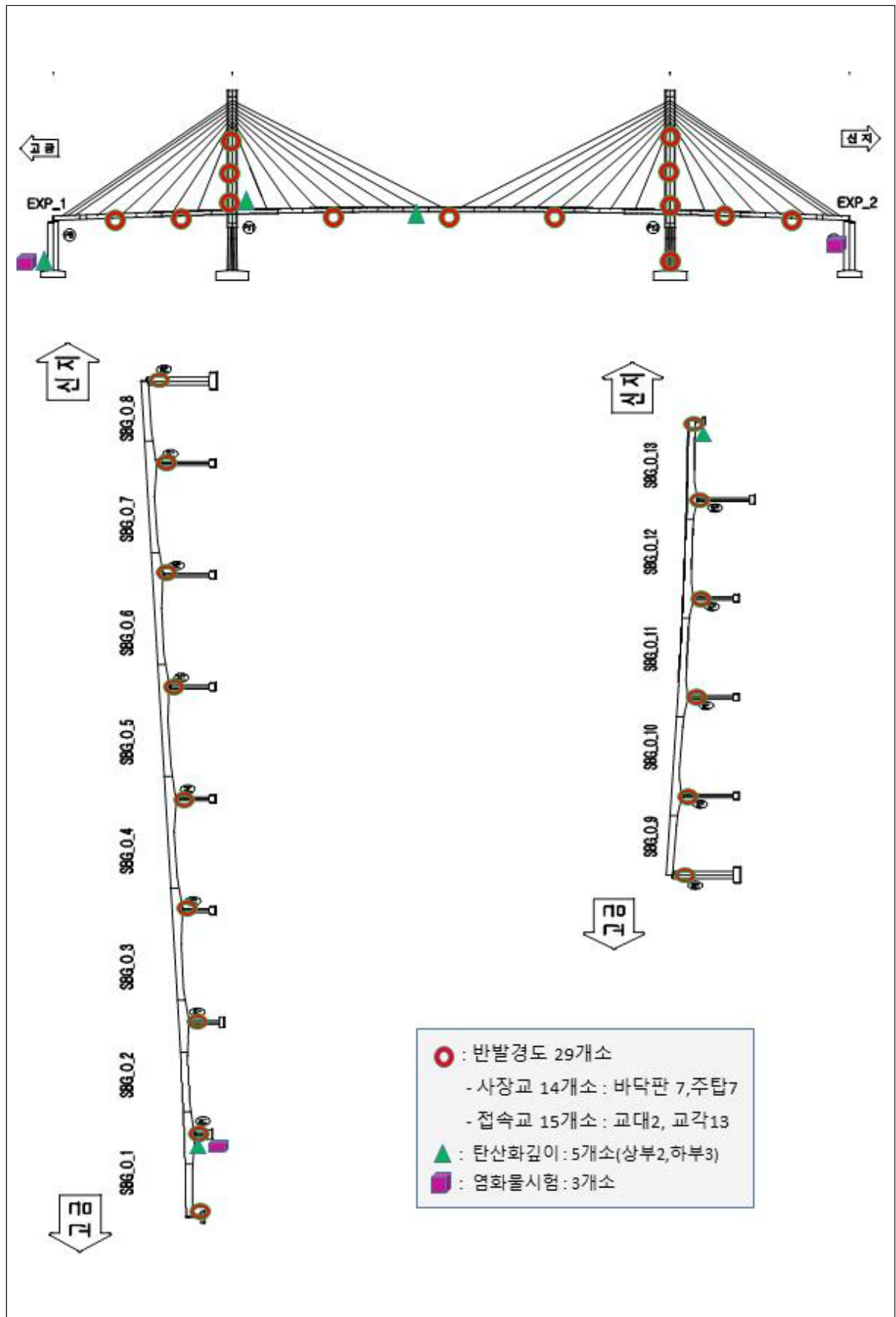
구 분	세부지침 기준			금회 수량	비고
	상부구조	하부구조	산출수량		
반발경도	○1개소/50m	○1개소/50m	29	29	상부: 7 하부: 22
탄산화 깊이 측정	○5경간 이내 : 2~3개소 ○5경간 이상 : 3~6개소			5	상부:2 하부:3
염화물함유량시험	○과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정			3	하부:3
균열깊이 조사	○부재의 중요도를 고려 책임기술자의 판단에 따라 수량 결정		현장 조사시 결정	-	-

* 기준 수량

- 53개소(상부구조 : $1305/50 = 26.1$ 개소, 하부구조 : $1305/50 = 26.1$ 개소)
- 연장별 조정비 : $60\% - \left(\frac{1305m - 1000m}{1500m - 1000m} \right) \times (60\% - 50\%) = 53.9\%$
- 산출수량 : 53개소 $\times$ 53.9% = 28.6 $\rightarrow$ 29개소

【표 4.1-3】 금회 정밀안전점검 재료시험 실시수량

구 분		반발경도		탄산화 깊이	염화물 함유량	비고
		상부	하부			
진도대교	기준	-	4	2~3	-	
	적용	-	8	5	3	



【그림 4.1-1】 비파괴 시험 위치도

4.2 콘크리트 비파괴시험

본 과업에서의 비파괴시험은 대상교량의 콘크리트의 추정강도 및 균열깊이, 염화물(염분) 함유량, 탄산화 깊이 등을 조사하였으며, 각 시험별 내용 및 평가방법은 다음과 같다.

4.2.1 반발경도시험

이 검사법은 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 타격 시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F_c')와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

1) 측정기의 점검 및 교정

반발경도측정기는 엄밀한 검사를 하더라도 사용 후에 기계적인 오차가 발생하는 것이 단점이 있으므로 사전에 테스트 앤빌(Test Anvil)에 의한 정기 교정을 실시하여야 한다.

교정방법은 테스트 앤빌에 의한 반발경도측정기(N형)의 반발경도 R은 80을 기준으로 80 ± 2 의 범위를 정상으로 할 경우, 가능한 한 80 ± 1 의 범위이어야 한다. 이 범위의 값을 벗어날 경우 조정하여야 한다. 반발도가 72 정도까지 나타나고 더 이상 반발도가 올라가지 않을 경우에는 다음 식에 의하여 보정하며, 이 이상의 보정값을 필요로 하는 반발경도측정기는 사용하지 않는 것이 좋다.

$$R = R_0 \times 80 / R_a$$

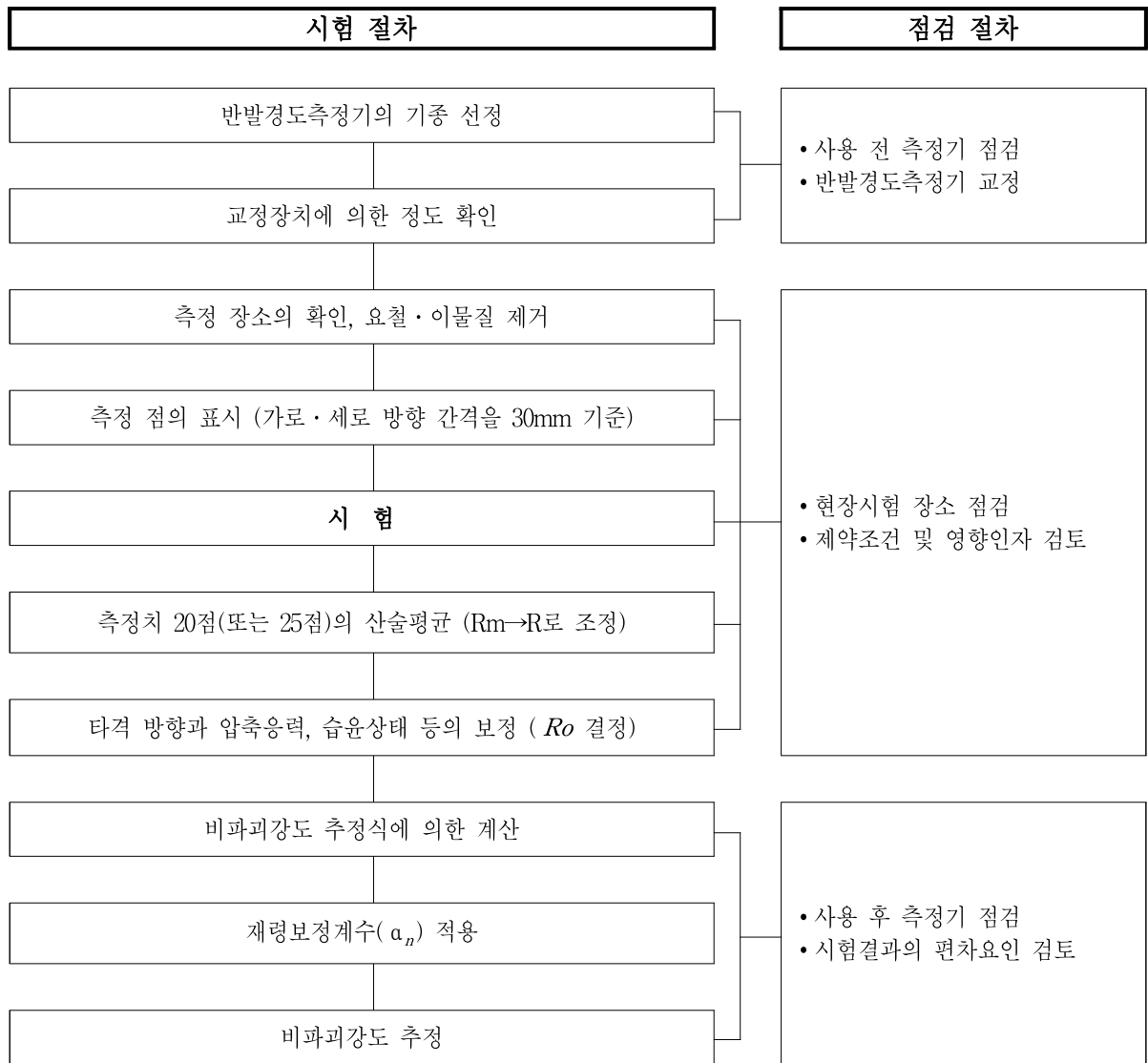
여기에서, R_a : 테스트 앤빌에 따른 하향 타격 시($\alpha=90^\circ$)의 반발도

R_0 : 반발도 R의 평균값

반발경도측정기와 테스트 앤빌의 보정 특성인 액면 수치(R_a)는 제작사에 따라 교정 반발경도의 치수의 범위는 차이를 나타내므로 유의하여 사용하여야 한다. 이는 제조사가 다른 반발경도측정기와 테스트 앤빌을 혼용하여 이용할 경우에는 그 결과 값(R_a)이 상이하므로 특별한 주의가 필요하며, 무심코 이를 혼용하여 사용하였을 경우 평가된 콘크리트 비파괴강도의 신뢰성에 문제점으로 나타난다.

가. 반발경도(R)

슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격 시 내부에 내장된 중추의 반동량을 반발도(R)로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 콘크리트의 압축강도를 추정한다.



【그림 4.2-1】 반발경도시험 및 측정기 점검 등의 절차

외관조사 결과에 의해서 선정된 측정개소에 대해서 타격점 상호간의 간격은 30mm를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도 값의 산술 평균값(R_m)을 구한다.

산술평균값 R_m 에 대해서 RILEM Recommendation에 따라 각 반발경도의 값이 $\pm 20\%$ 의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R 을 결정한다. 여기서, 측정된 반발치의 값들이 많은 편차를 보이고 있으면 보편적으로 콘크리트의 품질이 불균질하다고 평가될 수 있다.

나. 보정반발경도(R_0)

보정반발경도 R_0 은 식(4.1)과 같이 측정경도 R 에 보정값 ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 을 더한 값으로 한다.

$$R_0 = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서, ΔR_1 : 타격방향에 따른 보정값

ΔR_2 : 압축부재의 사하중 응력에 따른 보정값

ΔR_3 : 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값

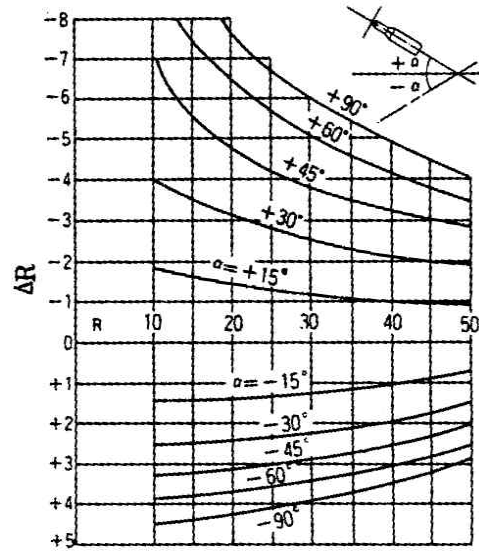
1) 타격 방향에 따른 반발경도의 보정(ΔR_1)

수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에는 반발치를 보정해 주어야 한다. 반발경도 보정치는 아래 <표 4.2.1>와 같다.

하향 타격(-90°)의 경우에는 Schmidt Hammer 내부의 해머중량에 의해서 실제보다 반동량이 작아지므로 (+)값으로 보정해 주고, 상향의 타격($+90^\circ$)의 경우에는 반대현상에 의해 (-)값으로 보정해 주어야 한다.

【표 4.2-1】 타격방향에 따른 일본재료학회 보정값

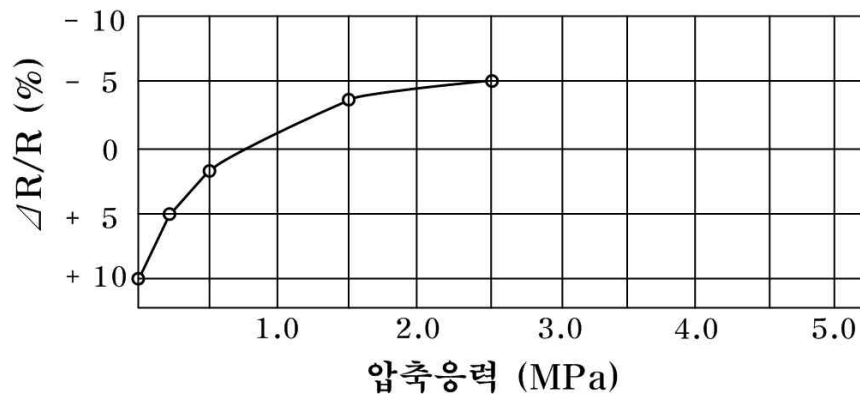
반발경도	보 정 값				비 고
	$+90^\circ$	$+45^\circ$	-45°	-90°	
10			+2.5	+3.4	상향수직타격 $+90^\circ$ 하향수직타격 -90°
20	-5.4	-3.5	+2.4	+3.2	
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	
40	-3.9	-2.7	+2.0	+2.7	
50	-3.1	-2.0	+1.6	+2.2	
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	



【그림 4.2-2】 타격 방향에 따른 일본건축학회 보정치 곡선

2) 압축응력에 따른 반발경도의 보정

아래 그림은 타격방향과 직각방향으로 압축응력을 받는 부재는 압축응력이 커짐에 따라 반발경도에 의한 압축강도가 실제보다 커진다는 사실이 시험결과 입증되었다. 그 크기는 대략 압축응력이 1 MPa인 경우 $\Delta R_2 = -0.015R$, 2.5 MPa인 경우 $\Delta R_2 = -0.05R$ 이다.



【그림 4.2-3】 압축응력에 따른 반발경도의 보정곡선

3) 콘크리트 습윤상태에 따른 보정

콘크리트 표면이 습윤상태에 있으면 기건상태 보다 반발도가 적게 나오게 된다. 따라서, 완전 습윤상태에서는 기건상태를 기준으로 $\Delta R_3 = +5$ 로 보정한다.

4) 재령계수에 따른 보정

수년이 경과한 콘크리트 구조물은 표면경도가 높기 때문에 식(4.2)와 같이 환산한 압축강도로 수정하여 콘크리트의 압축강도를 추정하며, 콘크리트의 재령에 따른 보정 계수 α 는 표 【표 4.2-2】와 같다.

$$F_{28'} = \alpha \cdot F_c \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

【표 4.2-2】 재령계수 α 의 값

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	3000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

5) 압축강도의 추정

보정반발경도 R_o 로부터 압축강도(F_c)의 상관관계를 도출한 여러 가지 제안식은 다음 (4.3~4.6)과 같다.

- 일본재료학회 (보통 콘크리트)

$$F_c = -18.0 + 1.27R_o \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

- 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식 (보통 콘크리트)

$$F_c = (7.3R_o + 100) \times 0.098 \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

- 과학기술부 (고강도 콘크리트)

$$F_c = 15.2R_o - 112.8 \times 0.098 \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

- 김무한 외 제안식 (고강도 콘크리트)

$$F_c = 1.429R_o + 0.8057 \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

4.2.2 콘크리트 압축강도 결과

본 구조물의 사장교 및 접속교의 콘크리트 구조물에 대하여 비파괴 강도시험을 수행하였다.

가. 비파괴 강도

육안조사로써 콘크리트 표면이 양호한 부위를 선정하고, 표면 요철, 부착물, 이물질 등을 제거하고, 슈미트 해머를 사용하여 반발경도를 측정하였다. 측정결과는 타격방향, 재령 등에 의한 보정을 한 후 비파괴강도 추정치에 이용하였으며, 동일한 위치에서 간접법에 의한 초음파 전달속도를 측정하여 반발경도에 의한 추정강도와 비교·분석하여 보다 정확한 콘크리트 비파괴강도를 추정하는데 이용하였다.

반발경도법 및 초음파법에 의한 콘크리트 비파괴 강도추정표 【표 4.2-3~6】의 결과는 제안된 추정 압축강도 식들에 의해 도출하였으며, 비파괴강도 값은 표준편차가 비교적 적은 식을 이용하였다.

반발경도 시험기 검교정성적서(SD-700)	반발경도 측정위치 마킹
반발경도 측정	

【사진 4.2-1】 콘크리트 강도 시험 현황

1) 상부구조 비파괴강도 추정식의 비교 분석

【표 4.2-3】 사장교 상부구조(바닥판) 비파괴강도

[MPa]

구 분	시 험 위 치		반발경도법/추정강도		설 계 기 준 강 도
			식 4.3	식 4.4	
바닥판 (S1~S3)	S1	CB10~11	42.1	47.8	45.0
		CB19~20	44.0	49.0	
	S2	CB36~37	43.9	49.5	
		CB49~50	44.6	50.2	
		CB62~63	43.3	49.0	
	S3	CB82~83	44.0	49.7	
		CB91~92	41.7	47.4	
평균			43.3	48.9	
표준편차			0.92	0.87	
변동계수			2.12	1.77	
MAX			44.6	50.2	
MIN			41.7	47.4	

【표 4.2-4】 사장교 상부구조(바닥판) 추정강도

[MPa]

구 분			비파괴강도	평균추정강도(A)	설계기준강도(B)	(A/B)×100(%)
상부 구조	바닥판	S1	47.8~49.0	48.4	45.0	107.5
		S2	49.0~50.2	49.5		110.1
		S3	47.4~49.7	48.5		107.8
		종합	47.4~50.2	48.9		108.6

2) 하부구조 비파괴강도 추정식의 비교 분석

【표 4.2-5】 접속1교 하부구조 비파괴강도

[MPa]

구 분	시험위치	반발경도법		설 계기 준 강도
		식 4.5	식 4.6	
접속1교	P1 코핑부	34.0	40.0	35.0
	P2 코핑부	32.5	38.6	
	P3 코핑부	34.6	40.6	
	P4 코핑부	36.8	42.7	
	P5 코핑부	33.4	39.5	
	P6 코핑부	33.7	39.7	
	P7 코핑부	35.9	41.8	
	P8 코핑부	32.6	38.7	
평균		34.1	40.2	
표준편차		1.42	1.34	
변동계수		4.16	3.30	
MAX		36.8	42.7	
MIN		32.5	38.6	

【표 4.2-6】 접속2교 하부구조 비파괴강도

[MPa]

구 분	시험위치	반발경도법		설 계기 준 강도
		식 4.5	식 4.6	
접속2교	P9 코핑부	33.9	40.0	35.0
	P10 코핑부	32.7	38.8	
	P11 코핑부	34.6	40.6	
	P12코핑부	36.8	42.7	
	P13 코핑부	33.1	39.2	
평균		34.22	40.26	
표준편차		1.44	1.37	
변동계수		4.20	3.40	
MAX		36.8	42.7	
MIN		32.7	38.8	

【표 4.2-7】 접속교 하부구조(교대) 비파괴강도

[MPa]

구 분	시험위치	반발경도법		설계기준강도
		식 4.5	식 4.6	
접속교	A1 교대 구체	31.3	37.4	30.0
	A2 교대 구체	29.2	35.4	
평균		30.2	36.4	
표준편차		1.05	1.00	
변동계수		3.47	2.74	
MAX		31.3	37.4	
MIN		29.2	35.4	

【표 4.2-8】 사장교 하부구조 비파괴강도

[MPa]

구 분	시험위치	반발경도법		설계기준강도
		식 4.5	식 4.6	
사장교	PY1 LOT07	41.0	46.8	40.0
	PY1 CB	38.2	44.1	
	PY1 LOT14	39.2	45.0	
	PY2 LOT01	40.6	46.4	
	PY2 LOT07	38.5	44.3	
	PY2 CB	39.9	45.7	
	PY2 LOT14	38.7	44.6	
평균		39.4	45.2	
표준편차		1.00	0.97	
변동계수		2.53	2.14	
MAX		41.0	46.8	
MIN		38.2	44.1	

【표 4.2-9】 하부구조 추정강도

[MPa]

구 분			비파괴강도	평균추정강도(A)	설계기준강도(B)	(A/B)×100(%)
하부 구조	교각	접속1교	38.3~42.7	40.2	35.0	114.8
		접속2교	38.8~42.7	40.2	35.0	114.8
	교대	접속교	35.4~37.4	36.4	30.0	121.3
	주탑	사장교	44.1~46.8	45.2	40.0	113.0

교량별 상·하부구조 추정강도를 분석한 결과 표준편차와 변동계수가 작은 추정강도 제한식(식4.6)을 적용하였을 때 설계기준강도 보다 추정강도가 10~20% 상회하는 조사결과를 확인하였다

3) 기 점검결과와 비교분석

【표 4.2-10】 기점검 결과와 비교 (상부구조)

구 분			상부구조 반발경도 비교 [MPa]		설계기준강도 [MPa]
			20년정밀점검	22년정밀점검	
상부 구조	바닥판	S1	50.1	48.4	45.0
		S2	49.9	49.5	
		S3	46.0	48.5	

【표 4.2-11】 기점검 결과와 비교 (하부구조)

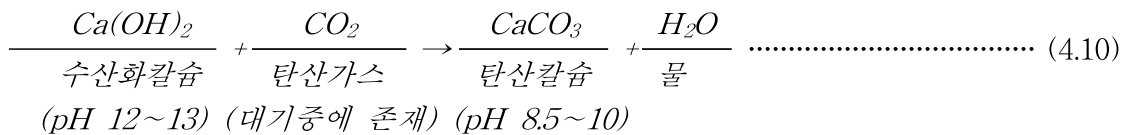
구 분			하부구조 반발경도 비교 [MPa]		설계기준강도 [MPa]
			20년정밀점검	22년정밀점검	
하부 구조	교각	접속A교	40.5	40.2	35.0
		접속B교	39.1	40.2	
	교대	접속교	38.2	36.4	30.0
	주탑	사장교	41.4	45.2	40.0

4.2.3 탄산화 시험

가. 개 요

탄산화는 콘크리트 구조물의 열화와 관련하여 현재 주목받고 있는 현상 중 하나이다.

여기서 탄산화란 굳은 콘크리트와 공기 중의 탄산가스가 반응하면서 알칼리성을 잃게 되는 현상을 일컫는다. 즉, 건전한 콘크리트는 경화 시멘트 풀의 수산화 화합물중 약 25%를 차지하는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 영향으로 pH가 13~12인 강알칼리성을 나타내나 탄산가스와 수산화칼슘이 반응하면 탄산칼슘(CaCO_3)으로 환원되면서 표면부터 콘크리트의 pH가 서서히 10이하로 낮아지는 현상이다.



콘크리트는 탄산화에 의해 직접적으로 성능이 저하되는 것은 아니며, 단지 탄산화가 문제가 되는 이유는 탄산화가 피복두께를 넘어서 철근의 표면에 도달하게 되면 철근표면을 감싸고 있던 부동태 피막이 파괴되면서 철근표면에 부식이 시작되기 때문이다. 이와 같이 탄산화에 의한 철근콘크리트 성능저하 과정은 다음과 같다.

	STEP 1 정상, 재료 및 강도상의 변화는 거의 없다. (약간의 건조수축에 의한 균열)
	STEP 2 녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생한다.
	STEP 3 철근의 윗면이 팽창한다. 균열이 표면까지 연장되어 공기와 수분의 침입이 격화되어 동해 등의 다른 열화도 유발시키며 녹물이 보인다.
	STEP 4 철근 윗면의 피복이 부수어져 떨어지고, 철근의 노출이 시작된다. 철근단면적이 감소한다.
	STEP 5 철근 윗면이 거의 없어지고 철근은 공기 중에 직접 노출된다. 내구성능은 없다.

【그림 4.2-7】 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하

탄산화 현상은 자체적으로는 콘크리트의 물리적 또는 기계적 성능저하에 큰 영향을 미치지 않으나, C-S-H(규산칼슘 수화물)의 결합조직 약화에 따른 강성저하, 탄산화된 콘크리트의 취성화, 미세 공극용액의 알칼리 농도변화, 철근표면의 부동태 알칼리 피막파손 및 철근부식 등의 손상을 부수적으로 동반하므로 구조물의 내구성 등을 감소시키는 주요 인자로 알려져 있다.

나. 탄산화 속도에 미치는 요인

탄산화 속도에 영향을 미치는 요인으로는 환경조건(대기 중의 탄산가스농도, 온도, 습도, 마감재 등)을 주원인으로 하는 외적요인 및 콘크리트 자체의 성능, 품질(함수율, 강도, 시멘트의 종류, 배합조건, 시공조건 등)을 주원인으로 하는 내적요인에 의해 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 대표적인 원인을 정리하면 다음과 같다.

【표 4.2-12】 탄산화 속도에 영향을 미치는 요인

구분	영향 인자	탄산화 속도
내 적 요 인	시멘트의 종류	• 수화반응이 느릴수록 탄산화 속도가 빠름 • 조강 포틀랜드시멘트<보통 포틀랜드시멘트<중용열 포틀랜드시멘트
	골재의 종류	• 투기성이 큰 골재일수록 탄산화 속도가 빠름 • 강모래, 강자갈 < 강모래, 화산골재 < 화산골재
	계면활성제 종류	• 동일 물-시멘트비, 동일 슬럼프라면 탄산화 속도와 무관함
	압축강도	• 압축강도가 낮을수록 탄산화 속도가 빠름
	물-시멘트비	• 물-시멘트비가 증가하면 탄산화 속도가 빠름
	시공 정밀도	• 다짐이 불충분할수록 탄산화 속도가 빠름
	콘크리트 결합부	• 균열부위, 이음부, 손상부위 등에서 탄산화 속도 빠름
환 경 조 건	온 도	• 온도상승 시 탄산화 속도 빠름 • 20~50℃사이에서는 영향이 크지 않음
	이산화탄소 농도	• 농도가 클수록 탄산화 속도 빠름 • 탄산가스농도 3~10% 사이에서 상승비율이 큼
	습 도	• 상대습도 50~70%에서 탄산화속도가 최대
	실내, 실외	• 실내의 탄산화속도가 빠름.

다. 탄산화 속도식

대기 중의 탄산가스에 의한 콘크리트 표면으로부터의 탄산화의 진행을 경과시간의 함수로서 표현한 것이 탄산화 속도식이다. ‘탄산화가 정상상태에서 탄산가스의 콘크리트내부 확산에 따라 생긴다고 가정하면, 탄산화깊이 C는 경과시간 t의 평방근에 비례한다’라고 하는 다음의 식이 도출된다. 이것은 통상, $\sqrt{t}$ 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

$$C = A \times \sqrt{t} \dots\dots\dots (4.11)$$

여기서, C : 탄산화깊이 (mm)

A : 탄산화속도계수 (mm/ $\sqrt{t}$)

t : 재령(년)

- 탄산화 속도계수 = 탄산화 깊이 / $\sqrt{\text{재령(년)}}$
- 수명예측(년) = (철근피복 / 탄산화 속도계수)²
- 잔존수명예측(년) = 수명예측년수 - 경과년수

라. 탄산화깊이의 측정

본 과업에서는 일반적으로 현장에서 간편하게 이용되는 페놀프탈레인법(페놀프탈레인은 pH 지시약의 일종으로 1% 알칼리용액)을 이용하여 콘크리트의 탄산화 진행 정도를 측정한다.

콘크리트 구조물에서의 탄산화 시험은 구조체에서 채취한 코어 또는 구조체 안전(내하력 등)에 영향을 미치지 않는 부위를 선정 일부분을 파손하여 노출된 대상 측정면에 가능한 한 빨리 분무하여 탄산화 깊이를 측정하며, pH 8.2~10.0 이상의 알칼리측에서 보라색으로 발색하며 중성측에서는 무색으로 나타나게 되는데, 탄산화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 깊이를 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정한다.

마. 평가기준

탄산화 상태평가 기준은 다음과 같다.

【표 4.2-13】 탄산화 상태평가 기준

기 준	탄산화 잔여깊이	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	-	-



【사진 4.2-2】 탄산화 시험전경

바. 탄산화 깊이 측정 결과

1) 탄산화깊이 측정 결과

【표 4.2-14】 탄산화 측정 결과

구분	시험위치	탄산화 깊이 (mm)	설계 피복두께 (mm)	실측 피복두께 (mm)	잔여깊이 (mm)	속도계수 (A)	잔존수명 예측(년)	판정
상부	주탑(PY1)	2.00	150	150.0	48.0	0.8944	100년이상	a
	보강거더 바닥판(S2)	0.55	60	60.0	59.45	0.2459	100년이상	a
하부	교각기둥 (P1좌측면)	3.51	100	90.0	86.5	1.5692	100년이상	a
	교대 구체 (A2 전면)	8.05	100	90.0	81.9	3.6000	100년이상	a
	교각 기둥 (P8 전면)	1.84	100	95.0	93.16	0.8228	100년이상	a



2) 시설물 내구성 예측 서비스를 활용한 내구성 예측

국토안전관리원에서 시행하고 있는 시설물 내구성 예측 서비스를 활용하여 공용년수 증가에 따른 탄산화의 향후 추이를 예측해 보았다. 장보고 대교의 상하부 구조를 대상으로 하였으며, 내구성 예측 서비스를 활용하여 100년 후 탄산화 깊이 및 탄산화 속도계수를 예측하였다. 그 결과는 다음과 같다.

【표 4.2-15】 예측 서비스를 이용한 탄산화에 의한 내구성 예측

주탑 - PY1	
실측 피복두께(mm)	50
탄산화 진행깊이(mm)	2.0
잔여깊이(mm)	48.0
탄산화 속도계수	0.8944
공용년수	5년
잔존수명	100년 이상
평가	a

분석결과

다운로드

시각화

탄산화 등급

A (탄산화 속도 계수)

등급 산정 기준

a

(48)

0.894427

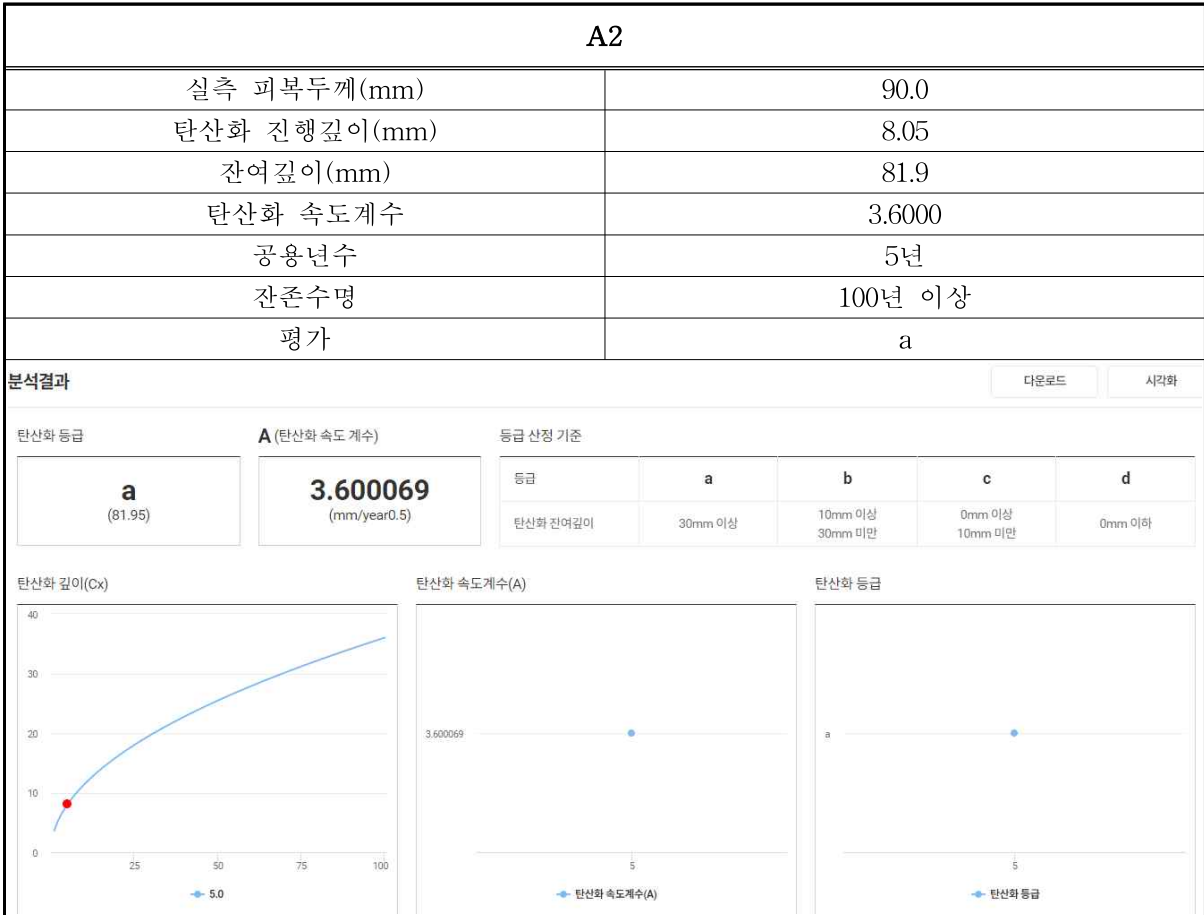
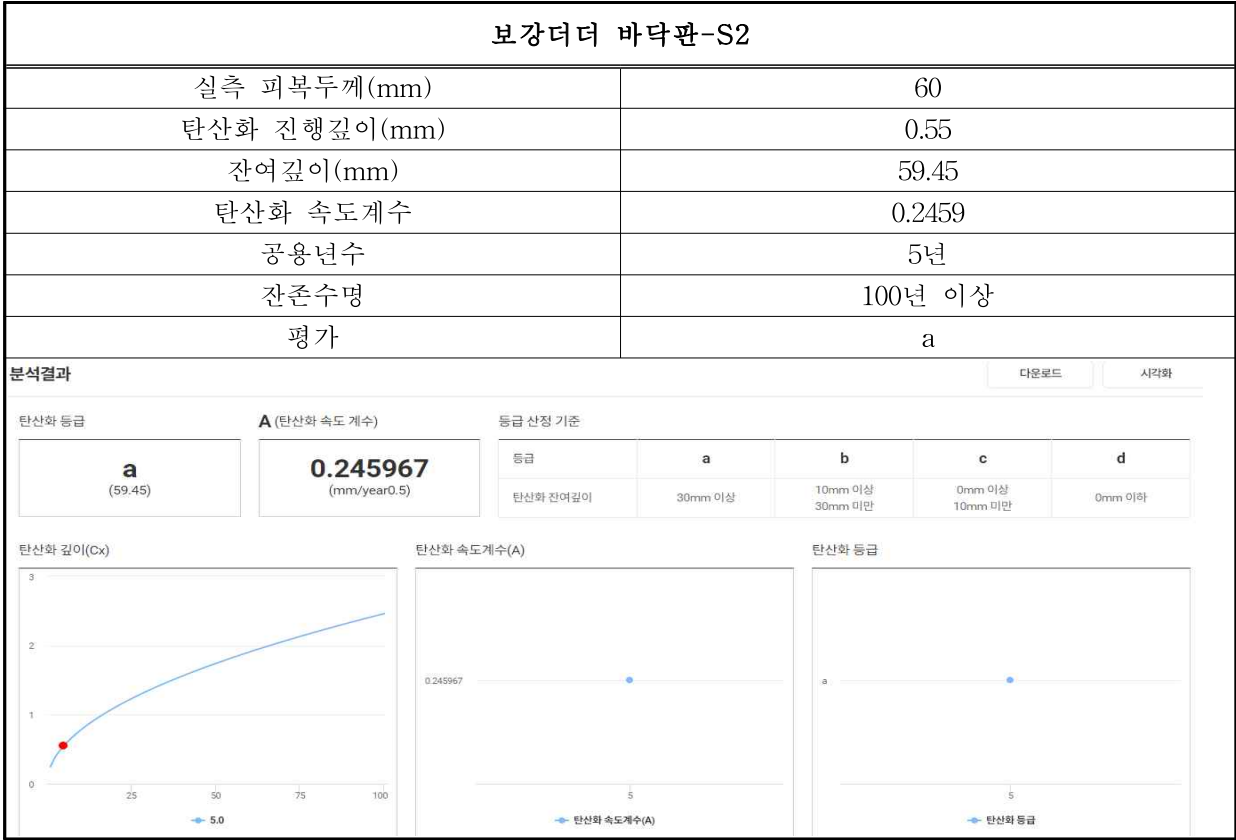
(mm/year0.5)

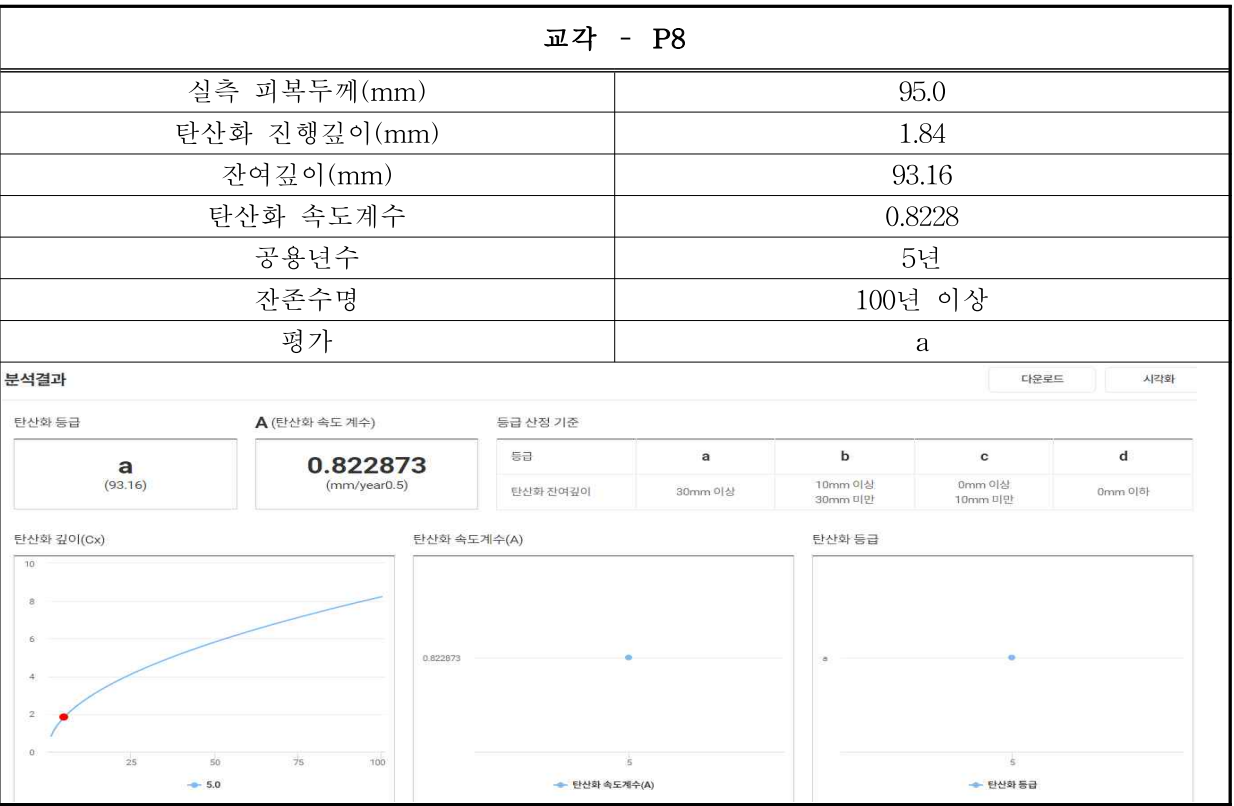
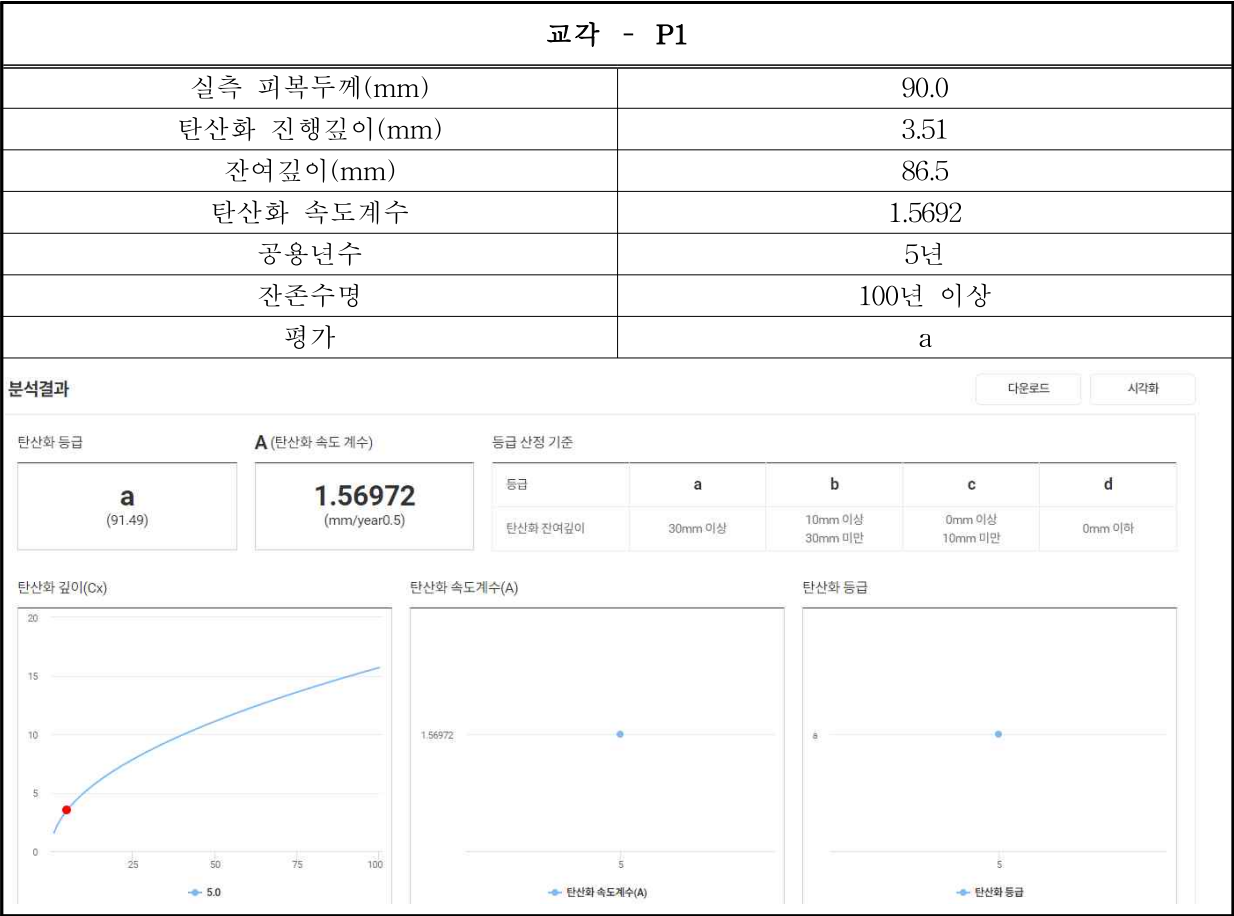
등급	a	b	c	d
탄산화 잔여깊이	30mm 이상	10mm 이상 30mm 미만	0mm 이상 10mm 미만	0mm 이하

탄산화 깊이(Cx)

탄산화 속도계수(A)

탄산화 등급





3) 기 점검(2020년 정밀)과 비교

【표 4.2-16】 탄산화 시험 기 점검결과 비교

구분	시험위치	기 정밀점검 (2020년)		금회 정밀점검 (2022년)		탄산화 측정깊이현황
상부	탄산화깊이 (mm)	0.54~0.66	a	0.55~2.0	a	탄산화 깊이 측정 결과 비교 기점검결과(2020년) 금회점검결과(2022년) 측 제목 ■ PY1 ■ 바닥판(S2) ■ P1좌측 ■ A2전면 ■ P8전면
	잔 여 깊이 (mm)	49.34~109.46	a	48.0~59.4	a	
하부	탄산화깊이 (mm)	1.81~8.03	a	1.84~80.5	a	
	잔 여 깊이 (mm)	78.19~156.6	a	78.1~86.5	a	

4) 점검의견

콘크리트 부재에 대하여 탄산화 시험을 수행한 결과 탄산화 깊이는 0.55m ~ 8.05m로 조사되었으며 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2019. 01)” 건전성 평가기준(탄산화 잔여깊이 30mm이상 : “a”)을 만족하고 있으므로 탄산화에 의한 내구성 저하의 우려는 없는 것으로 확인되었다.

4.2.5 염화물 함유량 조사

콘크리트가 탄산화 되거나 염화물이 침투하게 되면 철근 주위의 산소 차단 역할을 하는 부동태막이 파손되고, 강재 표면이 활성화되면 철근의 부식이 시작된다. 일반적으로 부재의 단면이 작으면서 철근량이 많고 슬럼프가 큰 콘크리트를 사용하는 구조물에서는 염분에 의한 철근 부식이 일어나기 쉽다.

염화물에 의하여 발생하는 콘크리트의 염해는 강재부식 등 구조물에 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 콘크리트 구조물의 건전성 평가 시 염해에 대한 평가가 필요하다.

염화물 함유량 분석은 주철근 깊이까지 깊이별로 단계를 구분하여 염화물 분포를 파악함을 원칙으로 한다.

가. 염화물에 의한 성능저하 특성

철근의 녹은 다공질에 흡수성이 있어 녹이 두껍게 형성되어도 부식을 억제하는 효과는 적으며, 녹슨 부분은 원래체적의 약 2.5~7배 팽창하기 때문에 피복 부분에 균열을 일으키고, 이에 따라 부식 작용은 더 가속화된다.

1) 염화물 함유량이 어느 한계를 넘으면 철근의 부식속도가 가속화된다.

- 콘크리트가 치밀하고 pH11 정도 이상의 알칼리성을 유지하고 있으면 소량의 염화물이 존재해도 부식은 매우 느리지만, 콘크리트 시방서에 규정된 염화물

이온량 0.3kg/m^3 , 염화나트륨 함유량 0.04% 정도를 넘으면 철근부식의 가능성이 커진다.

2) 철근 부식 속도는 콘크리트의 알칼리성, 건조의 정도, 염화물 함유량의 다소에 따라 변화한다.

- 콘크리트가 탄산화 되어도 건조한 환경에서는 부식속도는 느리다.
- 탄산화 되고 습도가 적당하면 염화물이 침입하지 않아도 철근은 부식한다.
- 염화물 이온량이 어느 정도 이상 존재하면 콘크리트가 알칼리성이라도 철근은 부식한다.
- 탄산화 되고 피복두께가 얇으면서 적당히 습해 있으면 부식속도는 매우 빠르다.

3) 철근의 부식 상태를 외부에서 비파괴 시험으로 정확하게 판정하는 것은 어렵다.

- 자연전위 변화로부터 철근의 부식 정도를 추정하는 방법이 개발되어 있지만 철근량이 많은 실제 구조물의 경우는 측정이 곤란하다.

4) 철근이 상당히 부식되고 나서 콘크리트 표면에 균열이 발생한다.

- 염화물 이온에 의한 부식은 구조물 준공 후 빠르면 2~3년에 철근에 따라 균열이 발생한다.

5) 철근의 부식은 피팅(pitting)상으로 되는 경우가 많다.

- 염화물에 의한 철근의 부식은 군데군데 피팅상으로 생기며, 철근의 단면결손이 피팅상 부식의 부분을 대상으로 한다.

6) 염화물 이온을 경화한 콘크리트로부터 제거하는 것은 어렵다.

- 콘크리트에 존재하는 염화물 이온을 제거하기 위한 방법으로 전기영도법 등을 고려할 수 있으나, 실용화되어 있지 않다.

7) 염화물에 의해 철근이 부식되어 콘크리트에 균열이 생긴 후 부식의 진행을 외부에서 정지시키는 것은 곤란하다.

- 염화물에 의해 철근이 부식되어 생긴 균열에 에폭시(Epoxy)수지를 주입하거나, FRP로 직접 씌우거나 해도 교량의 콘크리트 등에는 외부로부터 물이 침입하거나, 콘크리트 중에 산소와 수분이 어느 정도 존재하기 때문에 부식을 정지시키는 것은 불가능하다.

나. 염화물의 구성

콘크리트 내 염화물의 구성은 수용성 염화물과 고정 염화물로 구성되어 있다. 이 2종류의 염화물을 일컬어 전염화물이라고 하며 현재는 철근의 임계발청농도를 전 염화물을 기준으로 정하고 있다.

1) 수용성 염화물(가용성 염화물)

- 세공용액, 시멘트, 수화물 층간에 용해되었거나 흡착되어 있는 염화물
- 온수에 의해 추출

2) 고정화된 염화물

- 시멘트 수화물과 화학적으로 결합하여 고정화된 염화물
- 질산용액에 의해 추출

다. 염화물 함유량 기준

경화콘크리트 내부의 염화물에 의한 철근부식을 방지하기 위한 허용기준은 ACI 기준과 국내 콘크리트구조설계기준에 의하면 염화물에 노출된 철근콘크리트의 경우 수용성 염화물함유량은 사용한 시멘트 중량의 0.15% 이내가 되도록 규정하고 있다.

그러나 이 평가 기준은 공용구조물에서 재령 28~42일 이내 수용성염화물량을 측정하여야 하며, 이것은 공용기간 동안 추가로 침투할 염화물을 고려한 안전측인 허용기준이므로 안전진단과 같이 준공 후 일정기간이 지나서 구조물의 염화물 함유량에 대한 평가를 수행할 경우에는 적절하지 못한 기준으로 판단되며, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2019.01)에 의거 굳은 콘크리트의 염화물에 의한 철근부식을 방지하기 위한 기준으로 전염화물이온(Cl^-) 함유량을 기준으로 규정하고 있으며, 강재가 부식될 수 있는 부식발생 한계 염화물량은 전염화물을 기준으로 $2.5kg/m^3$ 로 규정하고 있다. 본 점검도 이를 토대로 전염화물량을 측정하여 평가하였다.

【표 4.2-17】 염화물 상태평가 기준

기준	전염화물 이온량	철근부식의 가능성
a	염화물 $\leq 0.3kg/m^3$	염화물에 의한 부식이 발생할 우려 없음
b	$0.3kg/m^3 < \text{염화물} < 1.2kg/m^3$	염화물이 함유되어 있으나, 부식발생 가능성 낮음.
c	$1.2kg/m^3 \leq \text{염화물} < 2.5kg/m^3$	향후 염화물에 의한 부식발생 가능성 높음.
d	$2.5kg/m^3 \leq \text{염화물}$	철근부식 발생
e	-	-

라. 시험자료의 NaCl(%)를 염화물이온량으로 환산

- $NaCl(\%) \rightarrow Cl(\%)$ 로 환산

$$\begin{aligned}
 Cl(\%) &= NaCl(\%) \times Cl \text{ 분자량} / (Na^+ \text{ 분자량} + Cl \text{ 분자량}) \\
 &= NaCl(\%) \times 35.45 / (22.98 + 35.45) \\
 &= NaCl(\%) \times 0.60681
 \end{aligned}$$

- $Cl(\%) \rightarrow Cl$ 이온량으로 환산

$$Cl \text{ 이온량}(kg/m^3) = Cl(\%) / 100 \times 2,300(kg/m^3, \text{ 무근콘크리트 단위중량})$$

마. 시험 방법

본 교량의 전염화물시험은 하부구조에서 시행하였으며 채취된 코어의 표면에서 철근까지 20mm씩 깊이별로 나누어 콘크리트를 분쇄하여 시료를 마련하였다. 염화물 함유량 측정시험은 질산은 적정법에 의해 콘크리트 시료에 포함된 전염화물 이온량(Cl^-)을 측정하는 시험을 수행하였다. 또한, 금회 정밀안전점검에서는 밀물과 썰물의 영향을 직접 받지 않는 비말대에 대한 염화물함유량 시험을 실시하여 염화물에 대한 영향을 검토하였다.



【사진 4.2-3】 염화물 시편 채취 현황

바. 시험결과

1) 염화물 함유량 측정 및 현장분석 결과

【표 4.2-18】 염화물 함유량 현장분석 결과

위치	깊이(mm)	염화물 함유량		염화물상태평가기준 (kg/m ³)	판정	비 고
		Cl ⁻ (%)	Cl ⁻ (kg/m ³)			
교각 (P8 배면, 비말대)	0~20	0.0928	2.101	a : 염화물≤0.3 b : 0.3<염화물<1.2 c : 1.2≤염화물<2.5 d : 염화물≥2.5 e : -	-	철근위치 판정
	20~40	0.0477	1.080		-	
	40~60	0.0407	0.921		-	
	60~80	0.0246	0.558		-	
	80~100	0.0233	0.526		b	
P1	0~20	0.0713	1.612	a : 염화물≤0.3 b : 0.3<염화물<1.2 c : 1.2≤염화물<2.5 d : 염화물≥2.5 e : -	-	철근위치 판정
	20~40	0.0377	0.853		-	
	40~60	0.0323	0.731		-	
	60~80	0.0292	0.662		-	
	80~100	0.0246	0.557		b	
A2	0~20	0.0431	0.976	a : 염화물≤0.3 b : 0.3<염화물<1.2 c : 1.2≤염화물<2.5 d : 염화물≥2.5 e : -	-	철근위치 판정
	20~40	0.0422	0.955		-	
	40~60	0.0404	0.914		-	
	60~80	0.0273	0.618		-	
	80~100	0.0226	0.512		b	

2) 시설물 내구성 예측 서비스를 활용한 내구성 예측결과

국토안전관리원에서 시행하고 있는 시설물 내구성 예측 서비스를 활용하여 공용년수 증가에 따른 염화물 함유량의 향후 추이를 예측해 보았다. 장보고 대교의 하부구조를 대상으로 하였으며, 내구성 예측 서비스를 활용하여 염화물 함유를 통한 내구성을 예측해 보았다. 그 분석결과는 다음과 같다.

【표 4.2-19】 내구성 예측 서비스를 활용한 염화물 함유량에 따른 내구성 예측결과

위 치 별	염화물 함유량에 따른 내구성 예측	분석결과										
P8/물 보라지역	분석결과 다운로드 시각화 염화물 등급 b (0.5kg/m³) D (확산계수) 2.10328 등급 산정 기준 <table><tr><th>등급</th><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>d</th></tr><tr><td>염화물 침투량</td><td>0.3kg/m³ 미만</td><td>0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만</td><td>1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만</td><td>2.5kg/m³ 이상</td></tr></table> 깊이별 공방연수별 염화물 침투량(Cx) 염화물 확산계수(D) 염화물 침투량 등급	등급	a	b	c	d	염화물 침투량	0.3kg/m³ 미만	0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만	1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만	2.5kg/m³ 이상	“b”등급
등급	a	b	c	d								
염화물 침투량	0.3kg/m³ 미만	0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만	1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만	2.5kg/m³ 이상								
P1/해안선부근	분석결과 다운로드 시각화 염화물 등급 b (0.5kg/m³) D (확산계수) 2.14775 등급 산정 기준 <table><tr><th>등급</th><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>d</th></tr><tr><td>염화물 침투량</td><td>0.3kg/m³ 미만</td><td>0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만</td><td>1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만</td><td>2.5kg/m³ 이상</td></tr></table> 깊이별 공방연수별 ☒ 20.0mm ☒ 40.0mm ☒ 60.0mm ☒ 80.0mm ☒ 100.0mm 5 염화물 침투량(Cx) 염화물 확산계수(D) 염화물 침투량 등급	등급	a	b	c	d	염화물 침투량	0.3kg/m³ 미만	0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만	1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만	2.5kg/m³ 이상	“b”등급
등급	a	b	c	d								
염화물 침투량	0.3kg/m³ 미만	0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만	1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만	2.5kg/m³ 이상								
A2/해안선부근	분석결과 다운로드 시각화 염화물 등급 b (0.5kg/m³) D (확산계수) 3.74846 등급 산정 기준 <table><tr><th>등급</th><th>a</th><th>b</th><th>c</th><th>d</th></tr><tr><td>염화물 침투량</td><td>0.3kg/m³ 미만</td><td>0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만</td><td>1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만</td><td>2.5kg/m³ 이상</td></tr></table> 깊이별 공방연수별 ☒ 20.0mm ☒ 40.0mm ☒ 60.0mm ☒ 80.0mm ☒ 100.0mm 5 염화물 침투량(Cx) 염화물 확산계수(D) 염화물 침투량 등급	등급	a	b	c	d	염화물 침투량	0.3kg/m³ 미만	0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만	1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만	2.5kg/m³ 이상	“b”등급
등급	a	b	c	d								
염화물 침투량	0.3kg/m³ 미만	0.3kg/m³ 이상 1.2kg/m³ 미만	1.2kg/m³ 이상 2.5kg/m³ 미만	2.5kg/m³ 이상								

2) 점검의견

염화물 함유량에 의한 내구성 예측결과는 “b”등급으로 예측되었다.