



## 제 4 장 내구성 조사 및 시험

### 4.1 개 요

### 4.2 콘크리트 내구성 조사 및 시험

### 4.3 내구성 조사 및 시험 결과

## 제 4 장 내구성 조사 및 시험

### 4.1 개 요

본 과업 구조물의 상태평가를 적절히 수행하기 위해서는 정밀점검의 목적에 부합하는 내구성 조사 및 시험을 실시하여야 하며, 이를 통해 제3장에서 기술한 외관조사 내용과 함께 구조물의 사용성, 안전성을 검토하고 보수·보강공법 및 유지관리 방안 제시의 기초 자료로 활용할 수 있도록 한다.

내구성 조사 및 시험은 구조물의 특성을 간접적으로 측정하는 방법으로 사용장비 및 측정방법, 적용한계 등을 고려하여 사용법을 충분히 숙지한 자가 검·교정을 필한 장비를 사용하여 실시한다.

#### 4.1.1 내구성 조사 및 시험 내용

- (1) 각 부재별 바닥판, 교대, 교각에 대해 조사를 실시하였다.
- (2) 각 항목별 시험위치 및 측정개소는 외관조사를 실시한 후 부재의 구조적인 안전성과 부재의 외관상태를 고려(손상다수)하여 선정하였다.
- (3) 내구성조사 및 시험은 『안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량편)』에 준하여 실시하였다.

【표 4.1】 내구성 조사 및 시험 내용

| 구 분        | 조 사 및 시 험 내 용                 |
|------------|-------------------------------|
| 1. 반발경도시험  | 슈미트햄머로 반발경도를 측정하여 콘크리트 강도를 측정 |
| 2. 탄산화깊이시험 | 페놀프탈레인용액으로 콘크리트의 탄산화 진행깊이를 조사 |

### 4.1.2 시험 측정일자 및 조사자

【표 4.2】 내구성 조사 측정일자 및 조사자

| 구 분            | 일 자                            | 조 사 자      | 비 고 |
|----------------|--------------------------------|------------|-----|
| 콘크리트<br>비파괴 시험 | 2016. 02. 29<br>~ 2016. 03. 07 | 장 진 원 외 4명 | -   |

### 4.1.3 적용 기준 및 실시 수량

본 교량에 대한 콘크리트 및 강재 비파괴 시험은 “안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침(국토해양부, 2013.04)”에 근거하여 위치 및 수량을 결정하였으며, 구조물의 분석이 객관적이며 보편타당하게 이루어질 수 있도록 기준 수량을 모두 만족하였다.

【표 4.3】 내구성 조사 및 시험실시 수량

| 구 분  |         | 세부지침 기준                           |           | 세부지침 기준 산출 수량 |      | 금회 시험 수량 |      | 비 고 |
|------|---------|-----------------------------------|-----------|---------------|------|----------|------|-----|
|      |         | 상부구조                              | 하부구조      | 상부구조          | 하부구조 | 상부구조     | 하부구조 |     |
| 콘크리트 | 반발경도시험  | ◦ 1개소/50m                         | ◦ 1개소/50m | 46            | 46   | 46       | 46   |     |
|      | 탄산화깊이시험 | ◦ 5경간 이상 : 3~6개소<br>(상부구조 2개소 이상) |           | 6             | 6    | 6        | 6    |     |

#### 4.1.4 내구성 조사 및 시험현황



면정리(바닥판하면)



탄산화깊이 시험(바닥판하면)



페놀프탈레인 용액 측정(드릴링)



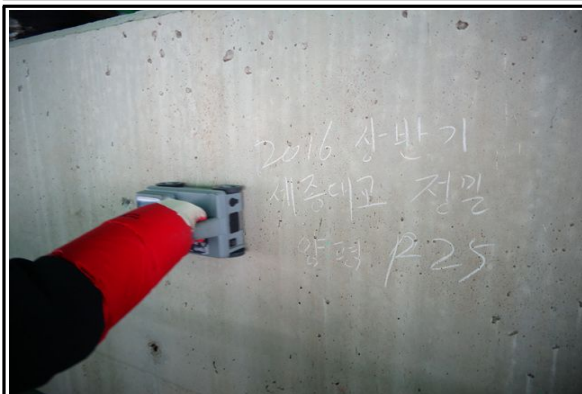
반발경도 시험(바닥판하면)



면정리(교각)



탄산화깊이 시험(교각)



피복두께 측정 (교각)



반발경도 시험(교각)

【그림 4.1】 내구성 조사 및 시험현황

## 4.2 콘크리트 내구성 조사 및 시험

### 4.2.1 개요

#### (1) 반발경도시험

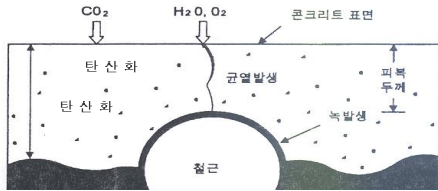
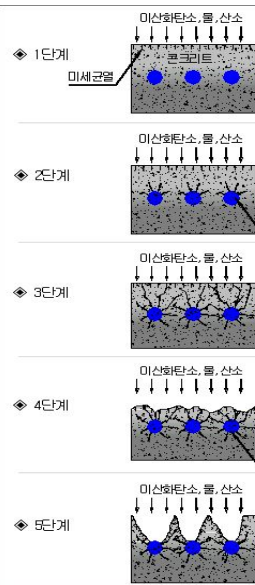
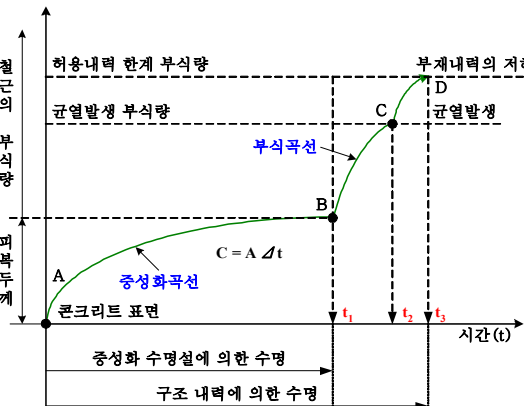
| 개 요            | <div>■ 콘크리트 표면의 반발경도를 측정하여, 콘크리트의 압축강도를 추정하는 검사방법이다.</div> <div>■ 슈미트해머는 경화된 콘크리트 표면을 타격시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(<math>f_c'</math>)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |      |      |                            |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|--|----------|------------|--|--|--|----|------|------|------|------|----|---|---|------|------|----------------------------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|------|------|------|------|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 시험방법           | <div>■ 반발경도 측정은 선정된 부위에 그라인딩 작업으로 표면 정리를 한 다음 타격점 상호간의 중·횡 간격을 30mm기준으로 그어 직교되는 부위에 20점 이상을 타격하여 반발경도 값의 산술 평균값을 구하고, 각 반발경도 값이 평균값의 <math>\pm 20\%</math> 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도를 결정</div> <div>■ 보-기둥의 모서리에서는 최소 30~60mm 이격 하고, 측정 부재의 최소두께는 반발도의 영향을 고려하여 100mm이상을 원칙으로 함</div> <div>■ 측정치는 원칙적으로 정수값을 읽고, 표면 건조상태의 부위를 선정, 측정하여 건조에 따른 보정, 압축응력에 따른 반발도의 보정과 타격 방향에 대한 보정 및 재령에 따른 보정을 적용함</div> <div><div>측정기의 기종 선정</div><div>↓</div><div>점검기에 의한 정도확인</div><div>↓</div><div>측정 장소의 확인, 요철제거</div><div>↓</div><div>Marker 등에 의한 측정점의 표시</div><div>↓</div><div>측정, 20점 이상의 평균</div><div>↓</div><div>타격 방향, 습윤 및 재령의 보정</div><div>↓</div><div>강도추정식에 의한 압축강도 산출</div><div>↓</div><div>압축강도의 추정</div><div>&lt;반발경도법에 의한 강도추정 흐름도&gt;</div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |      |      |                            |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 보정방법           | <div>■ 타격방향에 따른 보정(<math>\Delta R_1</math>)</div> <table><tr><th rowspan="2">반발경도 (R)</th><th colspan="4">수평과 이루는 각도</th><th rowspan="2">비고</th></tr><tr><th>+90°</th><th>+45°</th><th>-45°</th><th>-90°</th></tr><tr><td>10</td><td>-</td><td>-</td><td>+2.4</td><td>+3.2</td><td rowspan="6">상향수직 : +90°<br/>하향수직 : -90°</td></tr><tr><td>20</td><td>-5.4</td><td>-3.5</td><td>+2.5</td><td>+3.4</td></tr><tr><td>30</td><td>-4.7</td><td>-3.1</td><td>+2.3</td><td>+3.1</td></tr><tr><td>40</td><td>-3.9</td><td>-2.6</td><td>+2.0</td><td>+2.7</td></tr><tr><td>50</td><td>-3.1</td><td>-2.1</td><td>+1.6</td><td>+2.2</td></tr><tr><td>60</td><td>-2.3</td><td>-1.6</td><td>+1.3</td><td>+1.7</td></tr></table> <div>■ 콘크리트 재령에 따른 보정(<math>\alpha</math>)</div> <table><tr><th>구분</th><th>7일</th><th>14일</th><th>21일</th><th>28일</th><th>100일</th><th>500일</th><th>750일</th><th>1000일</th><th>2000일</th><th>3000일</th></tr><tr><td>재령(<math>\alpha</math>)</td><td>1.72</td><td>1.36</td><td>1.12</td><td>1.00</td><td>0.78</td><td>0.67</td><td>0.66</td><td>0.65</td><td>0.64</td><td>0.63</td></tr></table> <div>■ <math>R_o = R + \Delta R_1</math><br/>여기서, <math>\Delta R_1</math> : 타격방향에 따른 보정값</div> |      |      |      |                            |      |      |       |       |       |  | 반발경도 (R) | 수평과 이루는 각도 |  |  |  | 비고 | +90° | +45° | -45° | -90° | 10 | - | - | +2.4 | +3.2 | 상향수직 : +90°<br>하향수직 : -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 | +1.6 | +2.2 | 60 | -2.3 | -1.6 | +1.3 | +1.7 | 구분 | 7일 | 14일 | 21일 | 28일 | 100일 | 500일 | 750일 | 1000일 | 2000일 | 3000일 | 재령( $\alpha$ ) | 1.72 | 1.36 | 1.12 | 1.00 | 0.78 | 0.67 | 0.66 | 0.65 | 0.64 | 0.63 |
| 반발경도 (R)       | 수평과 이루는 각도                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |      |      | 비고                         |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                | +90°                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | +45° | -45° | -90° |                            |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 10             | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | -    | +2.4 | +3.2 | 상향수직 : +90°<br>하향수직 : -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 | +1.6 | +2.2 |                            |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 60             | -2.3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -1.6 | +1.3 | +1.7 |                            |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 구분             | 7일                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 14일  | 21일  | 28일  | 100일                       | 500일 | 750일 | 1000일 | 2000일 | 3000일 |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 재령( $\alpha$ ) | 1.72                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1.36 | 1.12 | 1.00 | 0.78                       | 0.67 | 0.66 | 0.65  | 0.64  | 0.63  |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 압축강도 추정식       | <div>■ 방법 1 : <math>F_c = (-18.0 + 1.27 \times R_o) \times \alpha</math> (MPa) <math>\Rightarrow</math> 일본재료학회 추정식</div> <div>■ 방법 2 : <math>F_c = \{(7.3R_o + 100) \times 0.098\} \times \alpha</math> (MPa) <math>\Rightarrow</math> 일본건축학회 추정식</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |      |      |                            |      |      |       |       |       |  |          |            |  |  |  |    |      |      |      |      |    |   |   |      |      |                            |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |      |      |      |      |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

※ 콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼(한국시설안전기술공단, 2006.12) 참조

※ 콘크리트 내구성 평가절차 수립(국토해양부, 시설안전기술공단, 1999.12) 참조

※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2013.04) 참조

(2) 탄산화깊이 시험

| 개요        | <p>■ 경화콘크리트는 표면에서 서서히 탄산화 하여 pH값은 12~13에서 8~10이하로 감소한다. 이 과정을 콘크리트의 탄산화라고 한다.</p> $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  <p>■ 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.</p>                                                                                                                                                                                                  |  <p>◆ 1단계<br/>미세균열<br/>재질 및 강도상의 변화는 거의 없다(약간의 건조수축에 의한 균열)</p> <p>◆ 2단계<br/>미산화탄소, 물, 산소<br/>녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생</p> <p>◆ 3단계<br/>미산화탄소, 물, 산소<br/>철근의 윗면이 팽창하여 균열이 표면까지 연장되고 동해 등의 다른 열화를 유발시킴. 녹물이 보임</p> <p>◆ 4단계<br/>미산화탄소, 물, 산소<br/>철근 윗면의 피복이 탈락되기 시작하고 철근노출이 시작됨. 철근의 단면적 감소</p> <p>◆ 5단계<br/>미산화탄소, 물, 산소<br/>철근의 피복이 탈락하여 철근은 공기와 풍수에 직접 노출됨. 내구성능 저하 가속</p> <p>&lt;탄산화에 의한 콘크리트 성능저하 과정&gt;</p> |                     |         |   |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------|---|---|---|---|-----------|---------|--------------------|-------------------|--------|---|-----------|--------------------|------------------------|---------------------|---------|---|
| 측정 방법     | <p>■ 코어 공시체 표면 또는 햄머드릴을 이용하여 직경 1~2cm 정도의 구멍을 뚫고 청소 후에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정 또는 채취된 코어에 시험</p> <p>■ 페놀프탈레인 1%용액: 페놀프탈레인 1g + 에탄올 90cc(순도 95%) + 증류수 = 100ml로 제조</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                     |         |   |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |
| 시험 순서     | <ol style="list-style-type: none"> <li>① 탄산화시험 위치 선정</li> <li>② 페놀프탈레인 1% 용액을 적신 원형시험지 준비</li> <li>③ 페놀프탈레인용액을 적신 원형시험지를 드릴 밑에 두고 드릴링 시작</li> <li>④ 원형시험지가 변색되는 시점에 드릴링 멈춤</li> <li>⑤ 드릴링된 깊이(mm) 측정, 평균값 선정</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                     |         |   |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |
| 평가 기준     | <p style="text-align: center;">&lt;탄산화 상태평가 기준&gt;</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">평가 구분</th> <th style="width: 15%;">a</th> <th style="width: 15%;">b</th> <th style="width: 15%;">c</th> <th style="width: 15%;">d</th> <th style="width: 15%;">e</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>탄산화 잔여 깊이</td> <td>30mm 이상</td> <td>10 mm 이상 ~ 30mm 미만</td> <td>0 mm 이상 ~ 10mm 미만</td> <td>0mm 미만</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>철근부식의 가능성</td> <td>탄산화에 의한 부식발생 우려 없음</td> <td>향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음</td> <td>탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음</td> <td>철근부식 발생</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 평가 구분               | a       | b | c | d | e | 탄산화 잔여 깊이 | 30mm 이상 | 10 mm 이상 ~ 30mm 미만 | 0 mm 이상 ~ 10mm 미만 | 0mm 미만 | - | 철근부식의 가능성 | 탄산화에 의한 부식발생 우려 없음 | 향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음 | 탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음 | 철근부식 발생 | - |
| 평가 구분     | a                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | b                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | c                   | d       | e |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |
| 탄산화 잔여 깊이 | 30mm 이상                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 10 mm 이상 ~ 30mm 미만                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0 mm 이상 ~ 10mm 미만   | 0mm 미만  | - |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |
| 철근부식의 가능성 | 탄산화에 의한 부식발생 우려 없음                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음 | 철근부식 발생 | - |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |
| 내구 수명 평가  | <p>■ <math>t_1</math>: 탄산화가 철근표면에 도달하는 시점<br/> <math>t_2</math>: 철근 부식, 콘크리트 균열 발생 시점<br/> <math>t_3</math>: 부재내력이 한계에 달하는 시점</p> <p>■ 탄산화속도 식: <math>C = A\sqrt{t}</math><br/> 여기서, <math>C</math>: 탄산화깊이(mm)<br/> : 경과년수(년)<br/> : 탄산화 속도계수(mm/ )</p> <p>■ 탄산화가 철근에 도달하는 시간(<math>t_d</math>):</p> $t_d = \frac{D_c^2}{A^2} - t_0$ <p>여기서, <math>D_c</math>: 철근까지의 피복두께(mm)<br/> <math>t_0</math>: 현재의 구조물 경과시간(년)</p>                                                                                                                                                                                                                                          |  <p>&lt;콘크리트 내부에서 철근부식의 개념&gt;</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                     |         |   |   |   |   |           |         |                    |                   |        |   |           |                    |                        |                     |         |   |

※ 콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼(한국시설안전기술공단, 2006.12) 참조

※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2013.04) 참조

### 4.2.2 반발경도시험

대상구조물의 콘크리트 압축강도를 평가하기 위하여, 슈미트 헤머를 이용한 반발경도법을 실시하였으며, 시험결과는 설계자료와 비교·분석하였다.

#### (1) 반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정결과

반발경도법에 의한 압축강도 추정은 각 측정부재에 따라 타격방향에 의한 보정을 한 후 콘크리트 압축강도를 추정하였고 일본재료학회와 일본건축학회 계산식을 사용하여 두식의 평균으로 설계강도와 비교하였다.

【표 4.4】 반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정결과

| 구분       | 부재  | 측정 위치    | 추정강도(MPa) |      | 평균<br>(MPa) | 설계강도<br>(MPa) | 강도율<br>(%) | 비 고 |
|----------|-----|----------|-----------|------|-------------|---------------|------------|-----|
|          |     |          | 재료학회      | 건축학회 |             |               |            |     |
| 상부<br>구조 | 바닥판 | S1 원주방향  | 27.7      | 28.2 | 27.9        | 27.0          | 103.3      |     |
|          |     | S1 양평방향  | 29.9      | 29.4 | 29.7        |               | 110.0      |     |
|          |     | S2 원주방향  | 28.5      | 28.6 | 28.6        |               | 105.9      |     |
|          |     | S2 양평방향  | 29.7      | 29.3 | 29.5        |               | 109.3      |     |
|          |     | S4 원주방향  | 27.8      | 28.2 | 28.0        |               | 103.7      |     |
|          |     | S4 양평방향  | 28.1      | 28.4 | 28.2        |               | 104.4      |     |
|          |     | S5 원주방향  | 28.9      | 28.8 | 28.9        |               | 107.0      |     |
|          |     | S5 양평방향  | 26.9      | 27.7 | 27.3        |               | 101.1      |     |
|          |     | S7 원주방향  | 28.6      | 28.7 | 28.7        |               | 106.3      |     |
|          |     | S7 양평방향  | 29.8      | 29.4 | 29.6        |               | 109.6      |     |
|          |     | S11 원주방향 | 29.8      | 29.3 | 29.6        |               | 109.6      |     |
|          |     | S11 양평방향 | 28.9      | 28.8 | 28.9        |               | 107.0      |     |
|          |     | S14 원주방향 | 28.1      | 28.4 | 28.3        |               | 104.8      |     |
|          |     | S14 양평방향 | 28.4      | 28.6 | 28.5        |               | 105.6      |     |
|          |     | S15 원주방향 | 29.8      | 29.4 | 29.6        |               | 109.6      |     |
|          |     | S15 양평방향 | 28.7      | 28.7 | 28.7        |               | 106.3      |     |
|          |     | S16 원주방향 | 28.1      | 28.4 | 28.2        |               | 104.4      |     |
|          |     | S16 양평방향 | 27.7      | 28.2 | 27.9        |               | 103.3      |     |
|          |     | S17 원주방향 | 28.3      | 28.5 | 28.4        |               | 105.2      |     |
|          |     | S17 양평방향 | 29.2      | 29.0 | 29.1        |               | 107.8      |     |
|          |     | S19 원주방향 | 28.4      | 28.6 | 28.5        |               | 105.6      |     |
|          |     | S19 양평방향 | 29.0      | 28.9 | 28.9        |               | 107.0      |     |
|          |     | S20 원주방향 | 28.5      | 28.6 | 28.6        |               | 105.9      |     |
|          |     | S20 양평방향 | 27.6      | 28.1 | 27.8        |               | 103.0      |     |
|          |     | S21 원주방향 | 28.7      | 28.7 | 28.7        |               | 106.3      |     |
|          |     | S21 양평방향 | 27.6      | 28.1 | 27.8        |               | 103.0      |     |
|          |     | S22 원주방향 | 28.4      | 28.5 | 28.5        |               | 105.6      |     |
|          |     | S22 양평방향 | 28.2      | 28.5 | 28.4        |               | 105.2      |     |
|          |     | S23 원주방향 | 29.4      | 29.1 | 29.2        |               | 108.1      |     |
|          |     | S23 양평방향 | 31.0      | 30.0 | 30.5        |               | 113.0      |     |
|          |     | S24 원주방향 | 29.2      | 29.0 | 29.1        |               | 107.8      |     |
|          |     | S24 양평방향 | 28.7      | 28.7 | 28.7        |               | 106.3      |     |
|          |     | S26 원주방향 | 26.6      | 27.5 | 27.0        |               | 100.0      |     |
|          |     | S26 양평방향 | 28.6      | 28.7 | 28.7        |               | 106.3      |     |
|          |     | S27 원주방향 | 29.7      | 29.3 | 29.5        |               | 109.3      |     |
|          |     | S27 양평방향 | 27.8      | 28.2 | 28.0        |               | 103.7      |     |
|          |     | S28 원주방향 | 28.4      | 28.6 | 28.5        |               | 105.6      |     |
|          |     | S28 양평방향 | 27.7      | 28.2 | 27.9        |               | 103.3      |     |
|          |     | S29 원주방향 | 28.4      | 28.5 | 28.5        |               | 105.6      |     |
|          |     | S29 양평방향 | 29.7      | 29.3 | 29.5        |               | 109.3      |     |
|          |     | S30 원주방향 | 28.4      | 28.6 | 28.5        |               | 105.6      |     |
|          |     | S30 양평방향 | 28.2      | 28.4 | 28.3        |               | 104.8      |     |
|          |     | S31 원주방향 | 26.5      | 27.5 | 27.0        |               | 100.0      |     |
|          |     | S31 양평방향 | 27.5      | 28.1 | 27.8        |               | 103.0      |     |
|          |     | S32 원주방향 | 29.4      | 29.1 | 29.2        |               | 108.1      |     |
|          |     | S32 양평방향 | 28.3      | 28.5 | 28.4        |               | 105.2      |     |

주) 강도율(%) = (추정강도/설계강도) × 100

【표 4.4】 반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정결과 - 계속

| 구분       | 부재         | 측정 위치    | 추정강도(MPa) |      | 평균<br>(MPa) | 설계강도<br>(MPa) | 강도율<br>(%) | 비 고 |
|----------|------------|----------|-----------|------|-------------|---------------|------------|-----|
|          |            |          | 재료학회      | 건축학회 |             |               |            |     |
| 하부<br>구조 | 교대<br>및 교각 | A1 원주방향  | 24.3      | 26.2 | 25.2        | 24.0          | 105.0      |     |
|          |            | A1 양평방향  | 23.7      | 25.9 | 24.8        |               | 103.3      |     |
|          |            | A2 원주방향  | 23.1      | 25.6 | 24.3        |               | 101.3      |     |
|          |            | A2 양평방향  | 23.8      | 26.0 | 24.9        |               | 103.7      |     |
|          |            | P1 원주방향  | 23.9      | 26.0 | 24.9        |               | 103.7      |     |
|          |            | P1 양평방향  | 23.5      | 25.8 | 24.6        |               | 102.5      |     |
|          |            | P2 원주방향  | 24.3      | 26.3 | 25.3        |               | 105.4      |     |
|          |            | P2 양평방향  | 25.0      | 26.7 | 25.8        |               | 107.5      |     |
|          |            | P4 원주방향  | 24.5      | 26.3 | 25.4        |               | 105.8      |     |
|          |            | P4 양평방향  | 25.5      | 26.9 | 26.2        |               | 109.2      |     |
|          |            | P6 원주방향  | 26.7      | 27.6 | 27.2        |               | 113.3      |     |
|          |            | P6 양평방향  | 26.4      | 27.4 | 26.9        |               | 112.1      |     |
|          |            | P7 원주방향  | 25.2      | 26.7 | 26.0        |               | 108.3      |     |
|          |            | P7 양평방향  | 25.0      | 26.6 | 25.8        |               | 107.5      |     |
|          |            | P8 원주방향  | 26.0      | 27.2 | 26.6        |               | 110.8      |     |
|          |            | P8 양평방향  | 26.1      | 27.2 | 26.7        |               | 111.3      |     |
|          |            | P9 원주방향  | 26.5      | 27.5 | 27.0        |               | 112.5      |     |
|          |            | P9 양평방향  | 26.1      | 27.3 | 26.7        |               | 111.3      |     |
|          |            | P11 원주방향 | 25.8      | 27.1 | 26.4        |               | 110.0      |     |
|          |            | P11 양평방향 | 25.9      | 27.2 | 26.6        |               | 110.8      |     |
|          |            | P13 원주방향 | 26.4      | 27.4 | 26.9        |               | 112.1      |     |
|          |            | P13 양평방향 | 25.9      | 27.2 | 26.6        |               | 110.8      |     |
|          |            | P14 원주방향 | 26.4      | 27.4 | 26.9        |               | 112.1      |     |
|          |            | P14 양평방향 | 26.4      | 27.4 | 26.9        |               | 112.1      |     |
|          |            | P15원주방향  | 26.3      | 27.4 | 26.8        |               | 111.7      |     |
|          |            | P15 양평방향 | 26.1      | 27.2 | 26.7        |               | 111.3      |     |
|          |            | P17 원주방향 | 26.1      | 27.2 | 26.7        |               | 111.3      |     |
|          |            | P17 양평방향 | 26.5      | 27.5 | 27.0        |               | 112.5      |     |
|          |            | P19 원주방향 | 26.3      | 27.4 | 26.9        |               | 112.1      |     |
|          |            | P19 양평방향 | 26.5      | 27.5 | 27.0        |               | 112.5      |     |
|          |            | P21 원주방향 | 26.2      | 27.3 | 26.7        |               | 111.3      |     |
|          |            | P21 양평방향 | 26.3      | 27.4 | 26.9        |               | 112.1      |     |
|          |            | P22 원주방향 | 25.0      | 26.6 | 25.8        |               | 107.5      |     |
|          |            | P22 양평방향 | 26.0      | 27.2 | 26.6        |               | 110.8      |     |
|          |            | P24 원주방향 | 26.7      | 27.6 | 27.2        |               | 113.3      |     |
|          |            | P24 양평방향 | 26.2      | 27.3 | 26.8        |               | 111.7      |     |
|          |            | P26 원주방향 | 26.7      | 27.6 | 27.2        |               | 113.3      |     |
|          |            | P26 양평방향 | 25.9      | 27.1 | 26.5        |               | 110.4      |     |
|          |            | P27 원주방향 | 25.7      | 27.1 | 26.4        |               | 110.0      |     |
|          |            | P27 양평방향 | 26.7      | 27.6 | 27.2        |               | 113.3      |     |
|          |            | P28 원주방향 | 26.2      | 27.3 | 26.8        |               | 111.7      |     |
|          |            | P28 양평방향 | 26.7      | 27.6 | 27.2        |               | 113.3      |     |
|          |            | P29 원주방향 | 25.9      | 27.2 | 26.6        |               | 110.8      |     |
|          |            | P29 양평방향 | 25.4      | 26.9 | 26.2        |               | 109.2      |     |
|          |            | P31 원주방향 | 28.4      | 28.6 | 28.5        |               | 118.8      |     |
|          |            | P31 양평방향 | 28.5      | 28.6 | 28.6        |               | 119.2      |     |

주) 강도율(%) = (추정강도/설계강도) × 100

반발경도법에 의한 압축강도 추정 결과 상부구조의 강도율은 100.0~113.0%, 하부 구조는 101.3~119.2%로 측정되어, 전 구간 모두 설계강도 이상으로 콘크리트의 품질 상태는 양호한 것으로 판단된다.

(2) 시험 보고서

【표 4.5】 반발경도 시험보고서

| 구 분                    | 세종대교                                   |
|------------------------|----------------------------------------|
| 시험일자                   | 2016. 03. 02 ~ 03. 07.                 |
| 시험시간                   | 09:00~18:00                            |
| 구조물에서 시험 영역의 위치        | 바닥판, 교대, 교각                            |
| 시험 대상 구조물 또는 표본에 대한 설명 | 비교적 양호한 상태 (구조적 손상 없음)                 |
| 콘크리트의 설계 조건            | 바닥판 : fck=27.0MPa, 교대·교각 : fck=24.0MPa |
| 시험 위치의 표면 상태           | 양호                                     |
| 시험시의 온도                | 기온 : -4.7℃ ~ 12.3℃                     |
| 콘크리트의 재령               | 재령:3000일 이상                            |
| 콘크리트 내부함수 상태           | 기건 상태                                  |
| 반발경도측정기의 종류 및 제품 번호    | 종류:NR-TYPE, 제품번호: 28191                |
| 반발경도측정기의 타격 방향         | 90°, 0°                                |

(3) 기 점검 콘크리트강도 비교·분석

① 비파괴강도

본 교량에 대한 기 점검의 추정압축강도 결과와 금회의 추정압축강도를 비교·분석한 결과 다음과 같다.

【표 4.6】 기 점검 추정압축강도 결과 비교

| 구분     | 반발경도법(MPa) |           | 설계강도 | 비 고 |
|--------|------------|-----------|------|-----|
|        | 2014년 정밀점검 | 금회 정밀점검   |      |     |
| 바닥판 하면 | 27.6~30.7  | 27.0~30.5 |      |     |
| 교대, 교각 | 25.9~28.0  | 24.3~28.6 |      |     |

주) 전차와의 비교는 각각의 측정위치가 일치하지 않아 부재별 측정치의 최소·최대값으로 비교하였다.

② 비교·분석 결과

기 점검에서 실시한 반발경도시험 결과를 금회 측정치와 비교·분석한 결과, 전반적으로 비슷한 콘크리트 강도를 보이고 있는 것으로 분석되었으며, 설계기준강도를 상회하는 양호한 상태로 조사되었다.

### 4.2.3 탄산화깊이 및 콘크리트 내구수명 측정

#### (1) 탄산화 깊이 측정

탄산화깊이 시험은 구조물에 매입된 철근을 부식시킬 수 있는 탄산화의 영향을 파악하기 위한 시험으로, 시험용액을 이용하여 콘크리트의 탄산화 진행깊이를 조사한 후 실측한 피복두께 대비 잔여피복두께를 파악하여 구조물의 내구성을 판단하고 상태평가 및 유지관리방안의 기초자료로 활용하였다.

#### (2) 탄산화 깊이 측정결과

【표 4.7】 탄산화깊이 시험결과

| 구분       | 부재  | 위치       | 탄산화깊이<br>(mm) | 최소피복<br>(mm) | 잔여피복<br>(mm) | 평가결과 |
|----------|-----|----------|---------------|--------------|--------------|------|
| 상부<br>구조 | 바닥판 | S1 원주방향  | 6.5           | 40.0         | 33.5         | a    |
|          |     | S1 양평방향  | 6.3           | 40.0         | 33.7         | a    |
|          |     | S11 원주방향 | 6.5           | 40.0         | 33.5         | a    |
|          |     | S11 양평방향 | 6.0           | 40.0         | 34.0         | a    |
|          |     | S32 원주방향 | 6.9           | 40.0         | 33.1         | a    |
|          |     | S32 양평방향 | 7.5           | 40.0         | 32.5         | a    |
| 하부<br>구조 | 교대  | A1 원주방향  | 7.2           | 100.0        | 92.8         | a    |
|          |     | A1 양평방향  | 7.2           | 100.0        | 92.8         | a    |
|          |     | A2 원주방향  | 7.5           | 100.0        | 92.5         | a    |
|          |     | A2 양평방향  | 7.5           | 100.0        | 92.5         | a    |
|          | 교각  | P11 원주방향 | 7.5           | 100.0        | 92.5         | a    |
|          |     | P11 양평방향 | 7.9           | 100.0        | 92.1         | a    |

주) 상기 피복두께 측정값은 급회 및 전회, 설계값 중 최소값을 적용함.

본 구조물의 탄산화깊이 시험결과, 바닥판은 6.0~7.5mm로 측정되었으며, 교대, 교각은 7.2~7.9mm로 측정되었다. 탄산화진행 정도에 따른 잔여피복두께는 상·하부구조 모두 30.0mm 이상으로 양호한 상태(평가 : a)로 평가되었다. 이에 따른 콘크리트의 내구수명을 다음과 같이 분석하였다.

(3) 탄산화진행 정도에 따른 콘크리트의 내구수명 예측

본 구조물의 탄산화깊이에 따른 탄산화속도를 계산하여 측정부위에 대한 내구수명을 예측하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 세종대교 준공년도 : 2007년 (경과년수 : 8년)
- 탄산화 속도계수(A) = 탄산화깊이 /  $\sqrt{\text{경과년수(년)}}$
- 수명예측(년) = (실측피복두께 / 탄산화속도계수)<sup>2</sup>

【표 4.8】 탄산화깊이에 의한 콘크리트 내구연한

| 시험 위치 |          | 탄산화<br>깊이(mm) | 실측피복<br>두께(mm) | 평가 | 탄산화속도<br>계수(A) | 수명예측<br>(년) | 비 고 |
|-------|----------|---------------|----------------|----|----------------|-------------|-----|
| 바닥판   | S1 원주방향  | 6.5           | 40.0           | a  | 2.30           | 212.5       |     |
|       | S1 양평방향  | 6.3           | 40.0           | a  | 2.23           | 228.9       |     |
|       | S11 원주방향 | 6.5           | 40.0           | a  | 2.30           | 212.5       |     |
|       | S11 양평방향 | 6.0           | 40.0           | a  | 2.12           | 256.9       |     |
|       | S32 원주방향 | 6.9           | 40.0           | a  | 2.44           | 184.1       |     |
|       | S32 양평방향 | 7.5           | 40.0           | a  | 2.65           | 150.2       |     |
| 교대    | A1 원주방향  | 7.2           | 100.0          | a  | 2.55           | ∞           |     |
|       | A1 양평방향  | 7.2           | 100.0          | a  | 2.55           | ∞           |     |
|       | A2 원주방향  | 7.5           | 100.0          | a  | 2.65           | ∞           |     |
|       | A2 양평방향  | 7.5           | 100.0          | a  | 2.65           | ∞           |     |
| 교각    | P11 원주방향 | 7.5           | 100.0          | a  | 2.65           | ∞           |     |
|       | P11 양평방향 | 7.9           | 100.0          | a  | 2.79           | ∞           |     |

※ ∞ : 탄산화 예측수명년수와 잔존수명년수가 1,000년 이상인 경우

콘크리트의 내구수명을 분석해본 결과, 내구연한(탄산화진행이 최외측 철근까지 도달하는데 걸리는 시간)은 100년 이상으로, 탄산화시험 결과 상·하부 구조 모두 탄산화에 의한 철근부식의 우려는 없는 것으로 판단되나, 본 자료는 이론적인 것이므로 여러 환경적요소에 대비하여 향후 정밀안전진단 및 정밀점검 시에 지속적으로 탄산화 시험을 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(4) 탄산화 시험보고서

【표 4.9】 탄산화 시험 보고서

| 구 분         |     | 세종대교          |
|-------------|-----|---------------|
| 경과년수        |     | 8년            |
| 사용 골재의 종류   |     | 확인되지 않음       |
| 측정면의 종류     |     | 드릴링에 의한 콘크리트면 |
| 시약          |     | 페놀프탈레인 1%용액   |
| 측정기구        |     | 버니어 캘리퍼스      |
| 시약분무 후 측정시간 |     | 직 후           |
| 탄산화 깊이      | 측정값 | 비파괴위치도 참조     |
|             | 평균값 | 7.0mm         |
|             | 최대값 | 7.9mm         |

(5) 기 점검 탄산화시험 결과 비교·분석

금회 측정한 탄산화깊이와 전회 점검(2014년 점검) 탄산화진행에 따른 잔여피복두께를 비교하여 그 경향을 분석한 결과, 전 시험부재에서 모두 양호한 상태로 평가되었으며, 측정값이 기 점검결과와 다소 상이하나 이는 시험위치 및 수량의 차이로 인한 것으로 판단된다.

【표 4.10】 기 점검 탄산화시험 결과비교

| 시험 위치 |       | 2014년 점검 |           | 금회 점검   |           |
|-------|-------|----------|-----------|---------|-----------|
|       |       | 탄산화 깊이   | 잔여피복      | 탄산화 깊이  | 잔여피복      |
| 상부 구조 | 바닥판   | 2.1~5.9  | 34.2~37.3 | 6.0~7.5 | 32.5~34.0 |
| 하부 구조 | 교대/교각 | 2.0~5.9  | 44.8~97.9 | 7.2~7.9 | 92.1~92.8 |

주) 전차와의 비교는 각각의 측정위치가 다소 일치하지 않아 부재의 최소·최대값으로 비교하였다.

### 4.3 내구성조사 및 시험 결과

#### 4.3.1 콘크리트 내구성조사 및 시험 결과 분석

【표 4.11】 콘크리트 내구성조사 및 시험 결과 분석

| 구 분                        | 시험 결과 |        |            |           | 결과 분석                                                                      |                                                |
|----------------------------|-------|--------|------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 압 축<br>강 도<br>시 험<br>(MPa) | 구분    | 부재명    | 반발경도법(MPa) | 설계강도(MPa) | • 콘크리트 강도조사 결과,<br>모두 설계기준강도(상부구조 : 27.0MPa, 하부구조 : 24.0MPa)를 상회하는 것으로 분석됨 |                                                |
|                            | 상부    | 바닥판    | 27.0~30.5  | 27.0      |                                                                            |                                                |
|                            | 하부    | 교대, 교각 | 24.3~28.6  | 24.0      |                                                                            |                                                |
|                            |       |        |            |           |                                                                            |                                                |
| 탄산화<br>시 험<br>(mm)         | 구분    | 부재명    | 탄산화깊이      | 잔여피복      | 내구연한                                                                       | • 탄산화에 의한 잔여피복두께는 상·하부구조(평가 : a)으로 양호한 상태로 평가됨 |
|                            | 상부    | 바닥판    | 6.0~7.5    | 32.5~34.0 | 100년 이상                                                                    |                                                |
|                            | 하부    | 교대, 교각 | 7.2~7.9    | 92.1~92.8 | 100년 이상                                                                    |                                                |
|                            |       |        |            |           |                                                                            |                                                |