

철근콘크리트 구조물의 피복두께

콘크리트의 피복과 중성화 Concrete Cover & Carbonation



정재동*

1. 서 론

굳은 콘크리트는 표면으로부터 공기중의 탄산가스를 흡수하여 콘크리트중의 수화반응으로 생성된 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변화하면서 알칼리성을 잃게 된다. 이 현상을 중성화라 한다.

중성화는 콘크리트의 표면에서부터 시작되어 피복 콘크리트 부분을 거쳐, 내부의 철근방향으로 진행된다. 중성화면이 철근표면에 도달하게 되면 (학설에 따라서는 2mm전부터도) 철근표면을 감싸고 있던 부동태피막이 파괴되면서 철근표면에 부식이 시작된다.

이러한 콘크리트의 중성화현상은 일반적인 환경하에서도 확실하게 진행되어 철근을 부식환경으로 만드는 등 콘크리트의 수명에 관계되는 가장 기본적인 중요한 문제이다

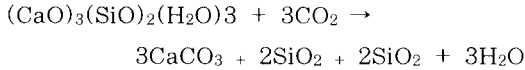
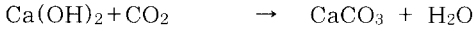
본 항에서는 철근콘크리트 구조물에 있어서의 중성화현상의 메커니즘, 중성화와 수명 그리고 중성화진행속도와 피복두께의 관계 등에 대해 간략히 정리한다.

2. 중성화현상과 콘크리트의 수명

2.1 중성화현상

시멘트의 수화 반응에서 시멘트양의 약 1/3이 생성되는 수산화칼슘은, pH 12~13 정도의 강알칼리성을 나타내며 또 이것이 시멘트 수화물 전체의 pH를 결정하고 있다. 수산화칼슘은 대기중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하여 다음과 같은 반응에 의하여 탄산칼슘과 물로 변화한다.¹⁾

*정회원, 대구대학교 건축공학과 교수



그리고, 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5~10 정도로 낮아지는 것으로 인하여 중성화라고 불린다.(넓은 의미로는 탄산화를 포함) 시멘트 페이스트에 있어서의 탄산화반응은 수산화칼슘뿐만 아니라 각종의 수화 생성물 및 미수화물에서도 일어나지만 중성화에 관해서는 수산화칼슘의 영향이 가장 크다. 중성화는 콘크리트의 표면에서 내부를 향하여 진행하며 콘크리트는 탄산가스와 반응한 중량만큼 무거워지고 치밀해진다. 그리고 중성화함에 따라 약간의 극히 미세한 균열이 발생하지만 문제가 될 정도는 아니다.

따라서 중성화에 의하여 물리적 열화가 생기는 것은 콘크리트 내부 철근의 부식에 의한 것이다.

콘크리트 내부의 pH가 11 이상에서 철근은 표면에 부동태를 형성하므로 산소가 존재해도 녹슬지 않지만, 중성화에 의하여 pH가 11보다 낮아지면 철근에 녹이 발생하고 또 이러한 녹에 의하여 철근은 약 2.5배까지 체적이 팽창한다.

그리고 이 녹의 팽창압력에 의해 콘크리트 내부에 균열을 발생시키며 철근 부차강도의 저하, 피복콘크리트의 박리, 철근 단면적의 감소에 의한 저항 모멘트의 저하 등의 물리적 열화의 진행과 함께 종국적으로는 철근콘크리트 구조물 전체의 위기를 초래한다.(그림 1 참조)

2.2 중성화와 콘크리트의 수명³⁾

철근콘크리트 구조물은 특별한 성능저하의 요인이 없는 경우에도 상술한 바와 같이 대기중의 탄산가스에 의해 콘크리트가 중성화하고, 콘크리트중의 철근이 부식하여 구조내력의 저하 및 콘

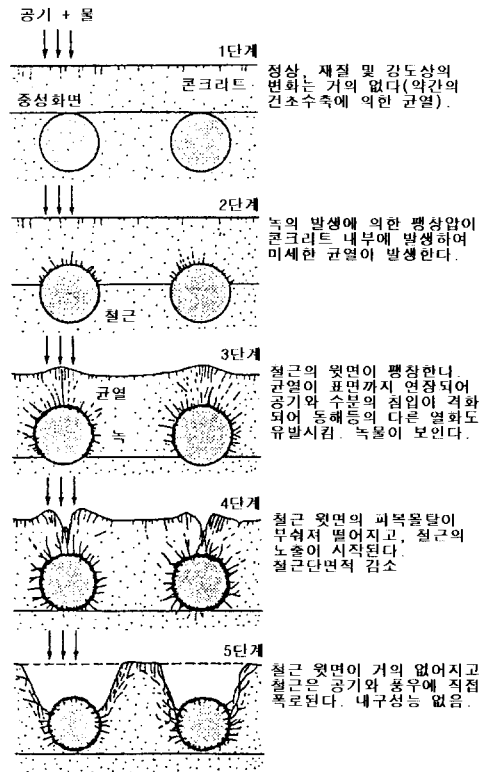


그림 1 중성화에 의한 콘크리트 성능저하²⁾

크리트의 균열, 박리, 탈락 그리고 미관, 기능상의 장애를 일으켜 안전성을 저하시킨다.

그림 2에 콘크리트의 중성화에 의한 철근의 부식과 철근콘크리트 구조물의 내구성의 개념을 나타낸다. 여기서 t_1 은 중성화 깊이가 철근의 표면에 도달하는 시점이며, t_2 는 그 결과 철근이 부식하여 콘크리트에 균열을 발생시키는 시점, t_3 는 부재내력이 한계에 도달하는 시점을 나타내고 있다.

지금까지는 철근콘크리트 구조물의 수명을 t_1 의 시점으로 판단하여 왔으나(중성화 수명설), 한편으로는 부재 내력이 한계에 도달하는 시점인 t_3 를 수명으로 보는 설도 있다(구조 내력 수명설). 그러나 최근에는 t_1 의 시점은 부재 내력상 너무 안전하고 t_3 는 너무 위험한 영역에 속하여 철근이 부식되어 균열을 발생시키는 시점인 t_2 를 철근콘

크리트의 수명 산정점으로 정의하고 있다.

따라서, 철근콘크리트 구조물의 물리적인 내력의 한계는 t_2 , t_3 이지만, t_1 에 도달하는 기간은 피복두께, 사용재료, 콘크리트의 품질, 환경조건 및 마감재 등의 조건에 따라 비교적 쉽게 예측이 가능한데 비해 t_1 에서 t_2 혹은 t_3 까지의 기간의 예측은 아주 곤란하며, 콘크리트의 내·외부의 조건이 열악한 경우에는 극히 단시간에 도달할 수도 있어, t_1 까지의 거리 즉, 피복두께의 확보가 콘크리트의 수명확보에서 극히 중요함을 알 수 있다.⁴⁾

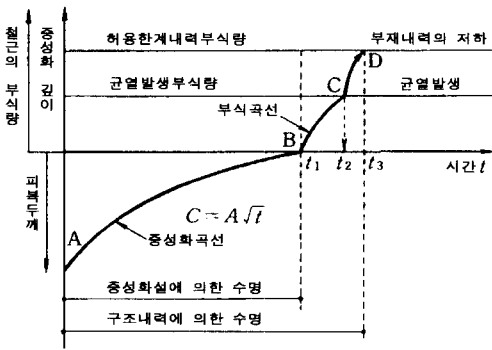


그림 2 중성화와 콘크리트 수명⁴⁾

3. 중성화 진행속도의 평가

철근콘크리트 구조물의 실태조사에 의하면 일반환경하에 있어서 철근의 부식은 중성화 깊이와 피복두께의 상관관계에 의해 결정된다고 알려져 있다.

중성화의 판별 방법으로서 공시체의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용액을 분무하여 변색의 여부를 관찰하는 방법이 가장 일반적이며, 무색이면 중성화한 것으로 적색으로 변화하면 비중성화(알칼리)부분으로 구분하게 된다. 중성화 시험시의 콘크리트공시체는 코어공시체나 연마된 공시체를 그대로 사용하는 것은 좋지 않다. 특히 코어공시체 등은 표면에 공시체 채취시의 미립분이 붙어 있어 중성화부분의 판별이 어려워진다. 따라서, 콘크리트공시체 등은 압축강도시험기 등을 이용하여 할열시킨 뒤 그 파단면에 분무하여 시험

하는 것이 정확한 결과를 얻을 수 있다.

중성화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 상술한 중성화 부분과 비중성화 부분의 경계면까지의 길이(이하 "중성화 깊이"로 칭함)와, 경과한 시간의 함수로서 나타낸다. 중성화 깊이와 경과년수와의 관계는 일반적으로,

$$X = R\sqrt{t} \quad (1)$$

여기서,

X : 기준이 되는 콘크리트 중성화 깊이(cm)

t : 경과년수(년)

R : 시멘트, 골재의 종류, 환경조건, 혼화재료, 표면마감재 등의 정도를 나타내는 상수로 나타내며, 상수 R 은 실험에 의하여 구할 수 있다.

이 식은 중성화 속도를 나타내는 가장 기본적인 가정으로 인식되어지고 있다. 그리고, 이후 이 식은 물시멘트비 60% 이하에서 실험식과 다소 차이가 있어 콘크리트의 종류를 인자로 한 중성화율에 의한 보정을 행하여 상기의 식을 수정한 중성화 속도식이 일반적으로 사용되고 있다.¹⁾

(1) 물시멘트비가 60% 이상인 경우

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3W)X^2}{R^2(W - 0.25)} \quad (2)$$

(2) 물시멘트비가 60% 이하인 경우

$$t = \frac{7.2X^2}{R^2(4.6W - 1.76)^2} \quad (3)$$

여기서,

W : 물시멘트비(%/100)

X : 중성화깊이(cm)

t : 기간(년)

R : 중성화율($rc \times ra \times rs$)

rc, ra, rs : 시멘트, 골재, 혼화제의 종류에 관한 계수

중성화율 R 은 사용하는 시멘트의 종류와 콘크리트의 종류에 의해 결정된다. 그림 3에 시멘트의 종류에 따른 콘크리트의 중성화율 R 의 예를

나타내었으며, AE제 혹은 AE감수제를 사용한 일반적인 콘크리트에서는 1.0을 사용하면 된다.³⁾

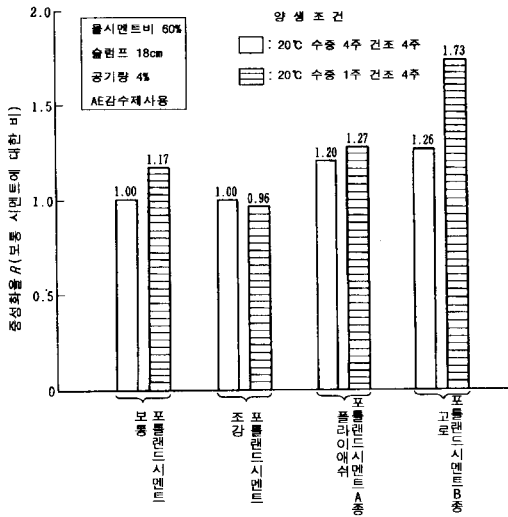


그림 3 중성화속진시험에 의한 중성화깊이⁵⁾

4. 중성화 진행속도와 피복두께

철근콘크리트 구조물의 피복두께에 대해서는 콘크리트표준시방서와, 건축공사표준시방서 등에 그 최소값이 설정되어 있어, 이 규정의 범위내에서는 최소한의 수명을 보장할 수 있도록 되어 있다.

그러나, 중성화 진행속도는 사용재료, 배합조건, 시공정밀도 및 사용환경 등에 따라 현저한 차이가 난다. 실제로 현장에서 시공되는 철근콘크리트 구조물의 피복두께는 부위별로 혹은 시공기술자별로 시공정밀도의 차 즉 변동오차가 발생되므로 규정의 최소치를 만족하기 위해서는 충분한 안전율을 고려한 피복두께의 확보가 필요하다.

실제로 중성화현상에 의한 철근의 부식은 건물의 전체부분에서 고르게 발생되는 예는 적으며, 피복두께가 작게 시공된 일부분에서 먼저 발생하고 이러한 어느 한 부분의 부식, 탈락 혹은 박리에 의해 철근콘크리트 구조물 전체의 안전성을 위협하게 된다.

표 1은 최근까지 중성화진행속도의 예측을 위해

표 1 피복두께별 중성화 소요계산예

| 물시멘트비 (%) | 피복두께 (cm) | 중성화기간 (년) |
|-----------|-----------|-----------|
| 55 | 1 | 12.1 |
| | 2 | 48.6 |
| | 3 | 109.3 |
| | 4 | 194.3 |
| | 5 | 303.6 |
| 60 | 1 | 7.2 |
| | 2 | 28.8 |
| | 3 | 64.8 |
| | 4 | 115.2 |
| | 5 | 180.0 |
| 65 | 1 | 5.81 |
| | 2 | 23.3 |
| | 3 | 52.3 |
| | 4 | 93.0 |
| | 5 | 145.3 |

가장 일반적으로 사용되고 있는 전항의 식2와 식3을 사용하여, 물시멘트비 55, 60, 65% 하천사, 쇄석 및 AE제를 사용한 일반적인 콘크리트를 대상으로 계산한 피복두께별 중성화 소요기간을 나타낸 것이다.

표에 나타난 계산결과와 같이 중성화는 콘크리트의 표면부터 진행되어 물시멘트비가 높을수록 빨라지며, 물시멘트비가 55%에서 65%로 10% 증가 됨에 따라 2배이상 빨라짐을 알 수 있다.

또한, 피복두께가 두꺼워 질수록 현저하게 진행속도가 늦어져, 피복두께 최초 1cm(0~1cm)의 중성화기간은 물시멘트비 55, 60 및 65% 별로 각각 12.1, 7.2, 5.81년 인데 비해, 그 다음 1cm(1~2cm)의 중성화기간은 각각 48.6, 28.8, 23.6년으로 나타나고 있다.

이러한 결과로부터 국내의 콘크리트 관련 규정집에 규정된 부위별 최소 피복두께 즉 2, 3, 4 혹은 5cm의 확보가 얼마나 중요한가를 알 수 있다. 그리고 해당구조물에 따라 요구되는 설계내구수명이 서로 다르나 시공정밀도(피복두께의 미확보)나 사용환경 혹은 부위별 콘크리트 품질의 차이 등에 따라서는 상기 중성화기간의 계산결과보다 현저하게 빨리 중성화가 진행될 수 있다.

따라서, 중성화에 의한 철근의 부식을 완벽히 방지하기 위해서는 시멘트, 골재, 혼화재료의 종류 및 품질, 콘크리트의 종류 및 품질 특히 물시

멘트비, 마감재의 유무와 종류, 환경조건 및 시공 정밀도 등이 중성화기간에 미치는 영향을 고려하여 최소 피복두께 플러스 알파의 개념으로 설계 피복두께를 설정할 필요가 있다.

5. 중성화면에서의 피복두께 설계상의 고려요인^{6),7),8)}

대기 중에서 일정기간을 경과한 콘크리트의 중성화 진행속도는 시멘트의 종류, 골재의 성질, 배합조건, 혼화재료, 시공정도, 폭로조건 등의 영향을 크게 받으므로, 이러한 주요한 요인들이 콘크리트 피복두께의 중성화에 미치는 영향을 고려하여 각 구조물의 피복두께를 설정할 필요가 있다.

5.1 시멘트의 종류

사용 시멘트의 종류에 따라서는 중성화 속도에 큰 차이가 난다. 혼합시멘트 혹은 실리카질의 혼화제를 사용하면 중성화 속도가 빠르고 철근콘크리트의 내구성을 위해서는 포틀랜드시멘트를 사용하는 것이 유효하며 그 중에서도 조강시멘트가 보통시멘트보다 중성화가 늦고 더욱 좋은 효과가 얻어진다. 따라서, 국내규정에 의해 일률적으로 적용되고 있는 피복두께도 시멘트의 종류에 따라서는 그림3과 같이 중성화율을 고려하여 피복두께를 설정할 필요가 있다.

5.2 골재의 종류

콘크리트에 사용되는 골재는 그 종류에 따라서는 중성화의 진행속도에 크게 영향을 미친다. 보통의 강모래, 강자갈, 쇠석 등과 같이 밀실, 견고한 골재는 시멘트페이스트 부분보다 투기성이 낮으므로 탄산가스는 시멘트페이스트 부분을 통하여 진행한다. 그러나 비중이 낮은 경량 골재 등을 이용한 콘크리트는 골재 내부에 많은 공극을 갖고 있기 때문에 탄산가스는 골재 내부를 통해서도 진행한다. 따라서 보통 콘크리트에 비하여 중성화가 빠르게 된다.

그리고, 중성화 속도는 골재의 비중이 작아질

수록 빨라지는 경향이 있으며, 경량골재를 이용한 콘크리트는 강모래, 강자갈을 이용한 콘크리트의 약 3배 정도 중성화가 빠르게 진행하므로 설계내구수명을 만족하기 위한 피복두께 산정시 골재종별에 따른 별도의 계수적용이 필요하다.

5.3 양생조건, 세공량, 물시멘트

콘크리트 내부의 세공량과 그 분포상태는, 콘크리트의 내구성에 막대한 영향을 끼친다. 콘크리트의 동해에 미치는 세공의 영향에 관해서는 기존의 연구를 통하여 많은 것이 밝혀져 있으나, 중성화에 있어서의 세공의 역할은 투기성이 큰 콘크리트일수록 중성화가 빠르다는 것은 용이하게 예상되나, 세공량과 그 분포상태의 영향에 관해서는 거의 알려져 있지 않다.

그러나 이러한 세공량에 관계되는 요인은 물시멘트비의 크고 작음에 좌우되는 바가 크므로 현재까지의 중성화속도 예측방법에서는 물시멘트비에 포함된 개념으로서 고려해주고 있다.

(1) 양생조건에의 영향

일반적으로 수화반응이 진행할수록 세공량은 적어진다. 중성화 속도는 양생조건에 따라 큰 차이가 나며 수화반응이 빠른 시멘트일수록 중성화가 늦고, 수화반응이 늦은 시멘트라도 충분한 양생을 하면 중성화 진행속도를 지연시킬 수 있다.

그리고 수중양생을 한 콘크리트는 전체 세공범위 내의 세공이 확실하게 감소하여 중성화진행속도가 늦은 것에 비해 기중양생의 경우는 콘크리트의 표면에 가까울수록 세공량은 많아지며 비교적 입경이 큰 세공 쪽에 편중되어 중성화 진행속도가 빨라진다.

(2) 세공량 및 물시멘트비의 영향

콘크리트의 물시멘트비는 중성화 진행속도에 가장 큰 영향을 미치며, 물시멘트비가 커질수록 중성화가 빨라지는 것이 일반적이다. 그리고 콘크리트의 세공량도 물시멘트비의 증가와 함께 많아지는 것으로부터 세공량의 증가는 중성화진행속

도를 촉진시키는 요인의 하나로서 간접적으로 추측할 수 있다.

그러나, 세공량(분포상태)을 중성화속도 추정 의 직접적인 인자로서 사용한 예는 아직 없으며, 앞으로 이 부분에 관한 연구의 진전이 기대된다.

(3) 투기계수와 중성화와의 관계

투기계수는 콘크리트에 사용되는 시멘트와 골재의 종류, 배합, 양생조건, 타설방법 등에 따라 크게 변화한다. 투기계수와 중성화 깊이는 밀접한 관계가 있으며, 콘크리트의 중성화 속도를 투기계수로부터 추정할 수 있다는 가능성을 시사하고 있다. 그리고 투기계수와 세공량(분포상태)과의 관계가 파악된다면 보다 간단하게 중성화 속도를 추정하는 것이 가능해질 것이다.

5.4 압축강도와 중성화의 관계

콘크리트의 중성화에 영향을 미치는 인자는 매우 많고 서로의 인자가 상호간에 영향을 미치는 경운 있으므로 중성화요인별 영향도를 나타내는 것은 상당히 곤란하다. 중성화의 영향인자 중 주요한 여러개의 인자에 의존하면서 콘크리트의 대표적 특성이기도 한 압축강도를 그 대표특성으로 하여 중성화속도와와의 관계를 검토하면 제반 중성화 영향요인을 포함한 형태로 나타낼 수 있다.

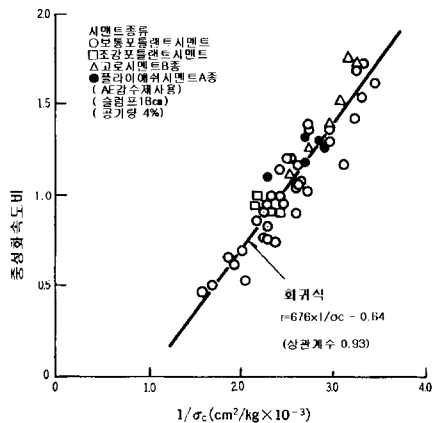


그림 4 압축강도와 중성화의 관계¹⁰⁾

그림4는¹⁰⁾ 압축강도와 중성화의 관계를 나타낸 일례이다. 압축강도와 중성화 진행속도는 그림과 같이 직선관계로 나타내질 수 있으며 높은 상관관계를 나타낸다. 이러한 실험결과는 물시멘트비, 시멘트의 종류, 양생조건 등의 대부분의 내부적 영향요인을 포함한 결과로 추정할 수 있으며, 중성화면에 있어서는 압축강도가 높을수록 유리함을 알 수 있다. 향후, 피복두께의 산정시 이러한 관계식의 응용이 기대된다.

5.5 환경조건의 영향

중성화에 영향을 미치는 환경인자로서 온도, 습도, 탄산가스 농도, 옥내외, 방위 등이 있다. 온도는 기체인 탄산가스의 활성화와 콘크리트 내부의 확산속도 및 중성화 반응에 관계하며 온도가 상승하면 중성화는 빨라진다.

습도의 영향은 상대습도가 0% 혹은 100%부근에서 중성화는 진행하지 않고, 상대습도 45에서 55%의 범위에서 중성화 속도가 최대로 되며, 습도가 높을 경우에는 콘크리트 내부공극 중에 존재하는 수분으로 인하여 탄산가스의 확산이 저지되어 중성화는 늦어진다. 또한 옥외는 옥내보다 탄산가스농도가 낮기 때문에 중성화가 늦으며, 옥외라도 비에 젖는 부분보다 비에 젖지 않는 부분의 중성화가 빠르다(실제조사를 통해 실내외 비교결과 옥외 1.0일 경우 옥내는 1.7배 빨라진다고 보고되고 있음)

5.6 표면 마감재의 종류와 중성화 진행속도

콘크리트의 표면 마감재는 기체인 탄산가스의 침입을 저지시켜 중성화 진행속도를 효과적으로 지연시킬 수 있다. 그러나 콘크리트 구조물에 사용되는 마감재의 종류는 상당히 많으며 마감재 그 자체도 시간의 경과와 함께 열화되므로 실제 시공되어 있는 마감재의 중성화 억제효과를 정확하게 파악하기는 곤란하다. 최근 일본에서 조사된 마감재의 종류에 따른 중성화 진행속도의 차이를 표 2에 나타낸다.

표 2 환경조건 및 마감재에 의한 콘크리트의 중성화깊이⁹⁾

| | 옥 내 | 옥 외 | 옥 내 | | | | | | | 옥 외 | | | |
|---------------------|-----------------|--------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------|-----------------------|-------------|--------|-------------|------------------|---------------|
| | | | 마 감 재 무 | 플 라 스 터 | 모 르 터 바 탕 | 플 라 스 터 | 모 르 터 | 모 르 터 바 탕 | 페 인 트 | 타 일 | 페 인 트 | 마 감 재 무 | 모 르 터 |
| 1984년판 JASS 5 해설 | 1.5 ~ 3.0 | 1.0 | 1.0 | - | - | 0.2~ 0.3 | - | 0 ~ 0.2 | 0.5~ 0.7 | 1.0 | 0.2~ 0.3 | 0.5~ 0.7 | 0 ~ 0.2 |
| 실시조사에 의한 계수 | 1.7 | 1.0 | 1.0 | 0.79 | 0.41 | 0.29 | 0.15 | 0.21 | 0.57 | 1.0 | 0.28 | 0.8 | 0.7 |

참고문헌

6. 결 론

철근콘크리트 구조물에 있어서의 피복두께는 구조물의 내구성, 내화성 및 구조내력에 큰 영향을 미치므로 설계 피복두께의 적절한 설정과 시공시 피복두께의 정밀도 확보가 그 철근콘크리트 구조물의 장기적 품질확보에 극히 중요한 사항이 된다.

특히 콘크리트의 장기적 내구성능을 좌우하는 중성화현상은 일반적인 환경하에서도 확실하게 진행되어 철근을 부식환경으로 만드는 등 콘크리트의 수명에 관계되는 가장 기본적인 중요한 문제이다.

따라서, 중성화에 의한 철근의 부식을 완벽히 방지하기 위해서는 시멘트, 골재, 혼화재료의 종류 및 품질, 콘크리트의 종류 및 품질 특히 물시멘트비, 마감재의 유무와 종류, 환경조건 및 시공정밀도 등이 중성화기간에 미치는 영향을 고려하여 최소 피복두께 플러스 알파의 개념으로 설계 피복두께를 설정할 필요가 있다.

1. 岸谷孝一 : 鐵筋コンクリートの耐久性, 鹿島出版會, 1981
2. 鄭 載東 : 콘크리트의 중성화에關する研究の現狀と課題, セメント・コンクリート, No. 496, 1988
3. 和泉意登志, 喜多達夫, 前田照信 : 콘크리트構造物のシリーズ 中性化, 1986
4. 日本建築學會 : 建築工事標準仕様書 同解説 JASS 5, 鐵筋コンクリート工事, 1997
5. 嵩 英雄・和泉意登志 : 經年RC構造物におけるコンクリートの中性化と鐵筋の腐蝕, 第6回コンクリート工學年次論文集, 1984, 7
6. 内田祥三, 田 稔 : 鋼の耐久試験, 建築雜誌, 第516号, 1928
7. 田稔 : 콘크리트의 중성화와鐵筋의腐食, セメント・クリト, No. 272, 1969
8. 近藤連一譯, 콘크리트의炭山化-鐵筋의防食に對する影響と作用-, セメント・コンクリート, No. 314, 1973.4
9. 押田文雄, 和泉意登志・嵩 英雄 : 콘크리트의中性化に及ばずセメントの種類, 調合および養生條件の影響(その1), (その2), 日本建築學會大會學術講演梗概集 1985, 10
10. 和泉, 押田, 嵩, 西原 : 콘크리트의中性化に及ばずセメントの種類および養生條件の影響について, 第7回コンクリート工學年次論文集, 1985