

L형측구 콘크리트 구조물의 표면박리파손 원인분석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Scaling Failure Cause in L-Shoulder Concrete Structure

| | | |
|-------|-----------------|---|
| 전 성 일 | Jeon, Sung IL | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : jeonsi@kict.re.kr) |
| 남 정 희 | Nam, Jeong Hee | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail : archnam@kict.re.kr) |
| 안 상 혁 | Ahn, Sang Hyeok | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : shahn@kict.re.kr) |
| 안 지 환 | An, Ji Hwan | 정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : jenix@kict.re.kr) |

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to verify the causes of surface scaling at L-shoulder concrete structure.

METHODS : From the literature reviews, mechanisms of frost damage were studied and material properties including strength, air void, spacing factor and scaling resistance of L-shoulder concrete structure were analyzed using core specimens taken by real fields.

RESULTS : The spacing factor of air void has relatively high correlation of surface conditions : lower spacing factor at good surfacing condition and vice versa. If the compressive strength is high, even though spacing factor does not reach the threshold value of reasonable durability, the surface scaling resistance shows higher value. Based on these test results, the compressive strength also provide positive effect on the surface scaling resistance.

CONCLUSIONS : The main causes of surface scaling of L-shoulder could be summarized as unsuitable air void amount and poor quality of air void structure. Secondly, although the compressive strength is not the governing factor of durability, but it shows the positive effect on the surface scaling resistance.

Keywords

L-shoulder, concrete, frost damage, surface scaling, spacing factor

Corresponding Author : Jeon, Sung IL, Senior Researcher
Highway Pavement Research Division, Korea Institute of
Construction Technology 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu,
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
Tel : +82.31.9100.5427 Fax : +82.31.9100.161
E-mail : jeonsi@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering

http://www.ksre.or.kr/

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Sep. 26, 2014 Revised Oct. 1, 2014 Accepted Nov. 26, 2014

1. 서론

최근 국내에서는 콘크리트 구조물 특히 수분 또는 제설제에 노출되는 구조물에서 표면박리(surface scaling) 파손이 급증하고 있다. 이와 같은 파손은 동결기 이후 발생하며, 봄철에 피해사례가 다수 보고가 되고 있는 실정이다. 2000년대 중반부터 한국도로공사 콘크리트포장도로에서 다수의 스폴링 파손이 발생하였으며, 이에 대한 파손은 콘크리트 공기량 부족에 의한 동결손상이 원인인 것으로 보고되었다. 이후 2000년대 후반

부터는 도심부 도로 주변 소구조물인 L형측구, 교량연석에서 다량의 표면박리파손이 발생하였으며, 특히 신도시 개발지구 또는 기존 도시 개보수구간에서 피해사례가 보고되고 있다.

일반적으로 표면박리파손은 동결손상(frost damage)에 의해 발생한다고 알려져 있으며, 특히 제설제와 같은 염해에 의해 가속화되어 salt scaling이라고 불려진다.

Fig. 1은 연속된 구간 내에 L형측구 표면형상을 비교

한 것이다. 이 그림은 인도 옆쪽으로 신축건물이 들어서면서 해당 부분 앞에 L형측구를 다시 시공하였는데, 동절기 이후 기존 10년 정도 공용중인 측구는 표면상태가 양호하지만, 오히려 새로 시공된 L형측구는 표면박리파손이 다량으로 발생한 사례를 보여주고 있다.

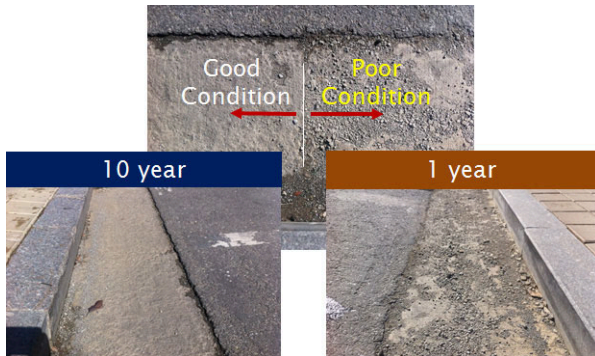
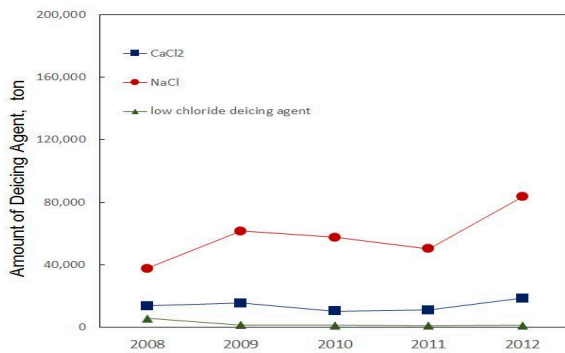
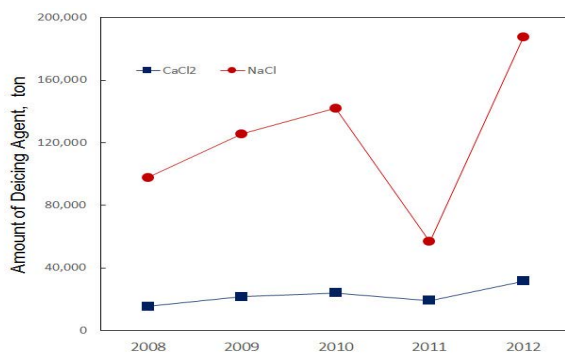


Fig. 1 Comparison of Surface Condition on L-Shoulder

최근 들어 동절기에 강수량이 증가하고, 도로이용자의 편의를 위해 제설제 사용량이 증가하고 있는데(Fig 2 참조), 이것이 도로시설물의 내구성 측면에서 부정적 요인으로 작용하는 것은 사실이다. 또한 이에 대한 원인만을 부각시켜 공사관계자가 파손에 대한 책임을 면하고자 하는 행위들도 반복적으로 이루어지고 있다.



(a) National highway



(b) Expressway

Fig. 2 The Amount of Deicing Agent

그러나 유독 최근에 건설된 콘크리트 구조물에서 다량의 표면박리파손이 발생한다는 현상만을 보아도, 단순히 대외환경적인 요인으로 파손원인을 돌리는 것은 문제가 있어 보이며, 좀더 근본적인 문제에 대한 논의가 필요한 시점이다.

이에 본 연구에서는 기존문헌 분석을 통해 표면박리파손에 대한 메커니즘을 분석하였고, L형측구 구조물의 샘플을 채취하여 다양한 물성평가를 수행하였으며, 이를 통해 국내 L형측구의 표면박리파손에 대한 원인을 규명하고자 하였다.

2. 동결손상 메커니즘

2.1. 시멘트 페이스트 공극구조

시멘트 페이스트는 수화과정에서 설계자가 임의로 조정할 수 없는 미세한 pore¹⁾를 가지고 있으며, 이에 다공성 재료(porous material)로 간주된다(Pigeon and Pleau, 1995). 시멘트 페이스트에 존재하는 공극은 크게 3가지로 gel pore, capillary pore, air void로 분류할 수 있다. 또한 air void는 연행공극(entrained air void)과 갇힌공극(entrapped air void)으로 나눌 수 있다(Mehta and Monteiro, 2006).

특히 capillary pore는 물-시멘트비와 수화정도에 따라 그 양이 달라지며, 특히 capillary porosity 콘크리트의 강도 및 내구성에 중요한 영향을 미치는 인자이다. 이 capillary pore는 전체가 하나의 네트워크로 연결되어 있으며, 콘크리트 내부로 수분이 침투할 경우의 이동 경로가 된다. 이에 최근 들어 pore의 connectivity와 depercolation에 대한 연구를 통해 pore 구조에 대한 심층적 연구가 진행되고 있는 추세이다.

2.2. 동결손상 이론

콘크리트 내부공극(Void)이 갖는 중요성은 1920대에 북미를 중심으로 반복적인 동결융해의 작용을 받는 구조물의 열화현상에 대한 해석에서부터 시작되었다. 이를 통해 콘크리트의 내부공극을 통해 내동결성 향상이 가능하다는 것이 밝혀졌다(Snyder, 1998).

시멘트 페이스트의 동결작용은 여러 연구자들에 의해

1) 본 논문에서는 공극이라는 용어를 가능하면 한글로 표현하지 않았다. 이는 pore, air void를 모두 공극으로 해석할 수 있는데, 실제로 의미상 약간의 차이가 있기 때문이다. pore의 경우 내부에 물이 채워질 수 있는 공극을 의미하며, gel과 capillary pore가 여기에 해당된다. air void는 공기만으로 채워져 있는 공극을 의미한다.

많은 이론들이 제안되었다. Collins(1944)은 ice lens formation theory를 주장하였는데, 이 이론은 응집력을 가지고 있지 않은 다공성 재료에 열흐름(heat flow)이 수직방향으로 흘러 얼음이 점진적으로 형성된다고 설명한다. 그러나 이 이론은 air void의 중요성을 설명하지 못한다.

Power(1945, 1949)는 air void의 역할을 설명한 “수압이론(hydraulic pressure theory)”을 발표하게 되고, 그로부터 10년 후 Power and Helmuth(1953)는 “삼투압이론(osmotic pressure theory)”이 제안된다. 이후, Litvan(1972, 1973, 1975, 1980)에 의해 이 이론이 발전하게 되고, 콘크리트의 동결손상에 대한 메커니즘을 이론적으로 완성했다고 알려져 있다.

일반적으로 물이 얼음이 될 때 9% 정도 체적이 증가한다. 그러나 이러한 현상만으로 동결손상(frost damage)을 설명하기에는 부족함이 있다. 수압이론은 온도가 0°C 이하로 내려갈 때, capillary pore에 존재하는 물이 얼게 되고, 주변에 얼지 않은 물이 양방향으로 이동하면서, 내부의 압력을 증가시킨다는 이론이다. 이 내부의 압력이 시멘트 페이스트의 인장응력을 초과하게 되면 파괴가 발생하게 된다. Power(1949)는 시멘트 페이스트 내부의 영향을 고려하여 air void를 둘러싸고 있는 페이스트의 두께를 Eq. (1)과 같이 계산하였다. 이 식은 동결작용에 의해 발생하는 팽창압의 정도가 air void의 반경, air void의 간격(페이스트의 두께)에 영향을 받음을 설명하고 있다.

$$\frac{L^3_{max}}{r_b} + \frac{3L^3_{max}}{2} = \frac{KT}{UR} \times (constant) \quad (1)$$

- 여기서, L = air void를 둘러싸고 있는 페이스트의 두께
- r_b = air void의 반경
- K = 시멘트 페이스트의 투수계수
- T = 시멘트 페이스트의 인장응력
- U = 온도가 내려가는 정도에 따라 동결이 발생하는 물의 양
- R = 동결율(freezing rate)

Power and Helmuth(1953)는 콘크리트의 동결용해 손상에 있어 수압이 주요한 원인이 아님을 밝혀내고, 기존의 이론을 수정하여 삼투압 이론을 제시하였다. 대부분 콘크리트 내부에 존재하는 물은 화학적 성분(알칼리 성분)이 용해되어 있으며, 이러한 경우 어는점(freezing

point)이 낮아지게 되고, 상대적으로 더 작은 pore에서 표면장력이 크게 발생하여 물이 0°C로 떨어져도 그 즉시 동결이 발생하지 않는다. 온도가 동결이 발생 가능한 정도에 도달하면, capillary pore 내에 존재하는 얼지 않은 물이 동결이 발생한 곳으로 이동하며, 이때 빙정은 얼지 않은 물의 증가로 화학적 농도가 증가하게 된다. 이 용액의 농도가 녹는점에서의 농도와 같아질 때 빙정을 더 이상 형성하지 않게 된다. 이것을 pore 내에 빙정과 용액사이의 열평형(equilibrium)이라 한다. 이와 같이 콘크리트 내에 존재하는 물이 화학적 농도를 가지고 있고, 이 물에 동결이 발생할 경우 주변 물이 동결이 발생한 지점으로 이동하여 capillary pore 내에 화학적 농도를 증가시켜 삼투압을 발생시킨다는 것이 Power and Helmuth가 제안한 삼투압 이론이다.

Litvan 이론은 실제 현장에서 0°C 이하로 떨어져도 capillary pore에 존재하는 물은 얼지 않는다는 것을 기초로 하고 있다. 이 이론에 따르면, capillary pore에 존재하는 물이 얼지 않고 supercooled 상태로 존재하게 되며, 이 상태에서는 빙정이 생성될 때 발생하는 것보다 더 큰 수증기압(vapour pressure)이 발생하게 된다. 또한 동결작용에 의한 역학적 손상이 수분의 이동에 의해 발생하며, 질서정연하게 규칙적으로 발생하지는 않고, 특히 여기에 영향을 주는 요소는 동결율(rate of freezing), 물이 외부표면에 도달하는 거리, 동결지속 시간 등이 있다. 동결작용에 의한 매우 빠른 건조과정, 이에 상당한 압력에 의해 물이 움직이고, 이것이 내부의 높은 응력을 야기하고, 균열을 야기할 수 있다. Litvan의 이론이 성립하기 위한 근본적인 가설은 capillary pore에 존재하는 물이 얼지 않는다는 것에 있다. 이 이론은 물의 움직임과 이를 통해 발생하는 내부응력에 대한 부분이 power의 수압이론과 유사한 측면이 있다.

콘크리트 내 동결작용에 대한 이론들은 여러 학자들마다 의견이 분분하며, 하나의 이론으로 현상을 완벽히 설명할 수는 없다. 그러나 이 이론들의 공통점은 분명 동결작용 시 콘크리트 내부의 압력이 증가하고(수분의 이동에 의한), 이 내부의 압력을 해소하기 위해서는 적절한 양의 연행공극이 적정하게 분포해 있어야 한다는 것이다.

2.3. Salt Scaling

일반적으로 동결손상에 의한 파손은 크게 두 가지 형태 (i) 내부의 미세균열 진전, 이후 파괴, (ii) 표면박리(surface scaling)로 분류할 수 있다. 균열진전은 내부

의 팽창압이 부재의 역학적 특성을 손실시킬 경우 발생되고, 표면박리는 표면부의 시멘트 페이스트 또는 모르타르 조각이 점진적으로 떨어져 나가는 현상을 나타낸다. 표면박리가 심하게 발생할 경우 골재입자가 떨어져 나갈 수도 있다(Pigeon and Pleau, 1995).

동결손상에 의한 내부의 균열진전과 표면박리가 역학적으로 어떻게 다른지 명확하게 설명할 수는 없다. 그러나 표면박리가 부분적으로 내부의 압력(수압, 삼투압... 등) 증가에 의해 발생할 수 있음은 분명하다. 이것은 콘크리트 내부의 연행공극이 표면박리에 대한 저항성을 증진시키기 때문이다. Verbeck and Klieger(1957)은 제설제 역할을 할 수 있는 여러 화학적 물질에 콘크리트가 노출되었을 경우 공기량 변화에 따른 표면박리에 대한 특성을 비교하였는데, 그 결과 연행공극이 표면박리 저항성을 확보하는데 긍정적인 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 제설제에 의해 발생하는 표면박리는 화학적 현상에 의한 것이 아니고, 대부분 물리적인 현상에 의해 발생된다고 하였다(화학적 농도가 3~4% 정도일 경우이며, 고농도일 경우는 예외임). 물론 장기간 노출될 경우 때론 화학적 공격에 의해 발생되기도 한다. 또한 황산염을 불순물로 함유한 제설제의 경우 콘크리트 표면에 매우 심각한 파손을 일으킬 수 있다고 하였다.

Harnik et al(1980)는 콘크리트가 제설제에 노출될 경우 긍정적인 측면과 부정적인 측면 두 가지로 나누어진다고 하였다. 제설제 성분이 콘크리트 내부에 침투하였을 때, 물의 화학적 농도가 증가하여 pore 내에 존재하는 물의 어는점이 낮아져, 이로 인해 물이 빙정으로 변화될 가능성 또한 낮아지게 되는 긍정적인 측면도 있다(supercooling effect). 그러나 부정적 측면으로 (i) 소금(salt)의 흡습성(hygroscopic character) 때문에 콘크리트의 포화도가 증가하는 것(이미 Litvan(1975)은 제설제에 노출될 경우 노출되지 않은 경우에 비해 콘크리트의 포화도가 더 크게 증가하는 것이 문제라고 지적함), (ii) supercooled 상태인 물이 동결될 경우 손상효과가 증가함, (iii) 콘크리트 내부의 화학적 농도 차이에 의해 differential stress가 증가함, (iv) 눈과 얼음으로 덮여져 있는 콘크리트 위에 제설제를 살포할 경우 temperature shock 발생, (v) pore 공간에 물이 과포화(supersaturation)상태가 되면 salt crystallization 이 발생(도로시설물에서는 발생하기 어려움) 등이 있다.

Siebel(1989)은 300 μ m 이하의 크기를 가진 공극량이 표면박리량과 밀접한 상관성이 있음을 밝혔다(Fig. 3 참조).

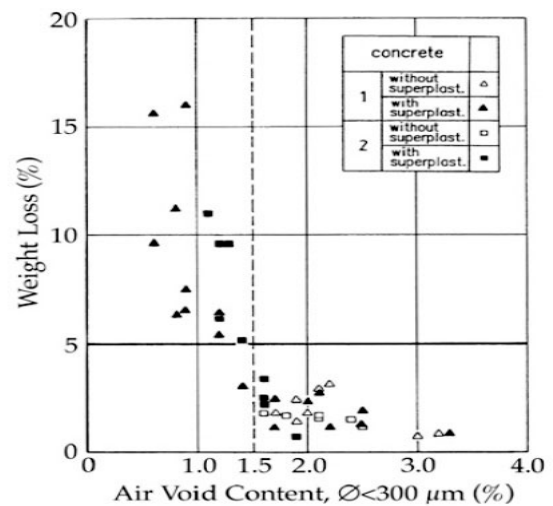


Fig. 3 Correlation between Scaling Damage and Volume of Air Voids (Valenza and Scherer, 2007)

Valenza and Scherer(2007)은 연행공극이 표면박리 저항성을 증진시키는 이유를 두 가지로 설명하였는데, 첫째가 블리딩(bleeding) 감소, 둘째가 내부압력 경감이다. AE제가 시멘트입자에 달라붙어 부력에 의해 입자가 뜨는 것을 잡아줘 블리딩을 감소시킨다고 주장한다.

그동안 많은 연구자들은 콘크리트에 salt scaling 발생을 막기 위해서 AE제 첨가를 통해 적정한 연행공극을 형성시켜야 한다고 제안하였다. 물론 이외에도 salt scaling에 영향을 미치는 인자들로 물-결합재비, 단위결합재량, 광물성혼화재 치환량, 시공조건(양생, 마감) 등이 있다.

물-결합재비의 경우 capillary porosity와 직접적인 상관성이 존재하며, 페이스트 내 capillary porosity의 증가(물-결합재비가 증가할 경우)가 외부로부터의 수분 및 염화물의 침투를 증가시켜 궁극적으로 내구성능의 저하를 가져오게 한다. 이에 국내외 대부분의 지방서에서는 동절기 수분 또는 제설제에 노출되는 구조물에 대하여 내구성능을 확보하기 위해서 최대 물-결합재비에 대한 기준을 제시하고 있다.

또한 고로슬래그의 경우 콘크리트 내 치환량이 증가할수록 박리량이 증가하는 것으로 알려져 있다. Bilodeau and Malhotra(1993)는 염화물에 노출시켜 동결융해실험을 진행한 결과 슬래그를 사용할 때 콘크리트의 초기 박리량이 증가하고, 또한 치환량이 증가함에 따라 박리량이 증가한다고 보고하였다.

일반 OPC에서는 탄산화(carbonation)가 진행되면 전체적인 porosity가 감소하는 경향을 나타내며, 이를 통해 콘크리트의 내구성능이 향상되는 긍정적 측면이 있다(물론 콘크리트의 탄산화는 콘크리트 내 철근부식

을 가속화하는 단점이 문제임). 이에 반해 슬래그가 첨가된 콘크리트의 경우(전체적으로는 porosity가 감소하지만) 탄산화가 진행되면 직경 30nm 크기 이상의 pore가 크게 증가하는 경향을 나타내며, 이것이 표면박리저항성을 저하시키는 요인으로 보고되고 있다(Ngala and Page, 1997; Valenza and Scherer, 2007).

이에 대부분의 국내의 지방서에서는 제설제에 노출된 콘크리트에 대하여 광물성혼화재 치환비율을 제한하고 있다. 콘크리트표준시방서(2009)에서는 고로슬래그 치환율을 50% 이하로 제한하고 있는데, Malhotra(1993)의 연구결과를 보면 고로슬래그 25% 치환한 콘크리트가 일반 OPC에 비해 약 3배 이상의 박리량을 나타내고 있어, 수분 또는 제설제에 노출될 수 있는 도로 시설물의 경우 혼화재 치환율에 대한 주의를 기울일 필요가 있다.

3. 실험계획

본 연구에서는 L형측구에 발생된 표면박리파손에 대한 원인을 분석하기 위해 경기도 내 일부 지역을 선정하여, 육안조사를 통해 표면상태를 평가하고, 코어시료를 채취하였다. 코어채취구간은 동질성 구간 내에 전전구간(표면박리파손이 거의 없는 상태)과 불건전구간(표면박리파손이 전면적으로 발생한 상태), 제설제 살포구간과 살포하지 않은 구간으로 나누어 총 4개구간 8개소를 선정하였다(Table 1, Fig. 4 참조).

Table 1. Core Sampling Section

| Section name | Concrete surface condition | Sample name | Deicing agent |
|--------------|----------------------------|-------------|---------------|
| Section 1 | Good | 1-G | ○ |
| | Poor | 1-P | |
| Section 2 | Good | 2-G | ○ |
| | Poor | 2-P | |
| Section 3 | Good | 3-G | ○ |
| | Poor | 3-P | |
| Section 4 | Good | 4-G | X |
| | Poor | 4-P | |



Fig. 4 Picture of Scaling Failure

코어채취는 각 개소별 원형코어 5개, 사각코어 2개를 채취하였으며, 이 시료를 이용하여 압축강도, 화상분석 실험, 표면박리실험, 염화물함량실험을 수행하였다. Fig. 5는 현장에서 사각코어채취 전경을 나타내고 있다. 압축강도와 표면박리실험은 열화부를 제거하기 위해 표면에서 5cm 이상을 절단한 후 진행하였다. 압축강도실험은 KS F 2403, 표면박리실험은 ASTM C 672에서 규정한 방법을 사용하였다. 표면박리실험에서는 염화칼슘수용액에 노출시켜 동결융해사이클을 주는데, 본 연구에는 이를 포함하여 일반 물에 노출시킨 경우와 동시에 비교하였다. 염화물함량실험은 KS F 2713 기준에 따라 수행되었으며, 코어시편에서 깊이별 0cm, 1cm, 5cm, 10cm, 15cm 위치에 시료가 평가되었다. 콘크리트 혼합물의 공극구조를 분석하기 위해 수행된 화상분석 실험은 ASTM C 457에 규정한 방법을 준용하였다. 실제 이 기준은 linear traverse 또는 modified point method로 콘크리트 공극구조를 분석하게 되어 있으나, 본 연구에서는 현미경으로 촬영된 콘크리트 표면사진을 면적법(소프트웨어 'image-pro'를 이용)으로 분석하여, 결과값의 신뢰도를 향상시키고자 하였다. 코어시편에서 깊이 5cm, 10cm 위치 단면에 대하여 공극구조를 평가하였으며, 보수적인 값을 채택하기 위해, 이 중에서 상대적으로 간격계수가 최대값을 나타내는 것에 대하여 해당구간의 대표값으로 선정하였다. Fig. 6은 화상분석 실험장비와 분석프로그램을 보여주고 있다.



Fig. 5 Sampling of Quadrangular Core

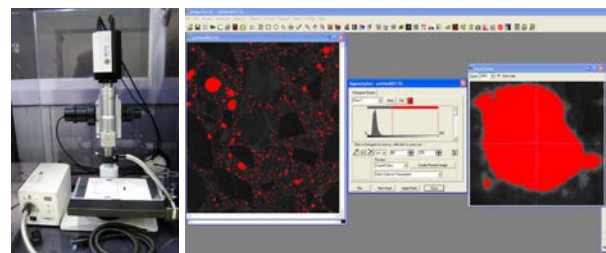


Fig. 6 Image Analysis Equipment

콘크리트의 염화물함유량실험은 KS F 2717에서 규정한 방법을 사용하였으며, 콘크리트 코어시료를 깊이

별로 0cm, 1cm, 5cm, 10cm, 15cm로 각각 절단하여 염화물함량을 분석하였다.

4. 코어시료 분석결과

4.1. 1구간 분석결과

Fig. 7은 1구간의 압축강도 실험결과를 나타내고 있다. 일반적으로 L형측구용 콘크리트의 설계압축강도는 대부분 18MPa로 설정되었으며, 콘크리트표준시방서(국토해양부, 2009)에서 코어강도는 설계강도에 85%를 초과하면 만족하는 것으로 되어 있다. 1구간의 압축강도결과 기준값(설계강도×0.85)은 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 깊이별 염화물함량을 도식한 것인데, 콘크리트 상부의 염화물함유량이 일반적인 것 보다 큰 값을 나타내는 것으로 보아 제설제가 살포된 구간인 것을 알 수 있다. 일반적으로 콘크리트 표면에 염화물이 침투할 경우 표면에서 깊이 1cm 위치에 염화물함량이 가장 높게 나타나는데, 본 연구결과에서 유사한 경향을 나타내었다.

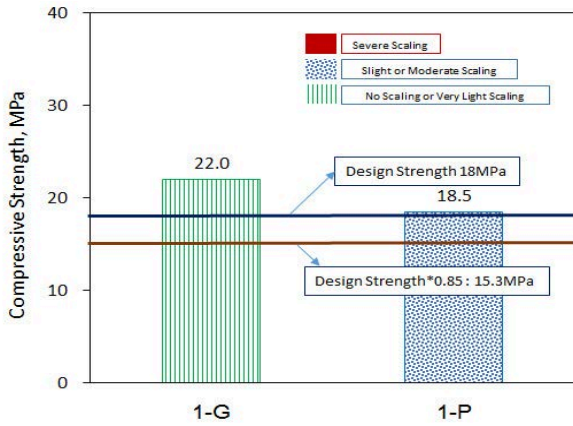


Fig. 7 Compressive Strength–Section 1

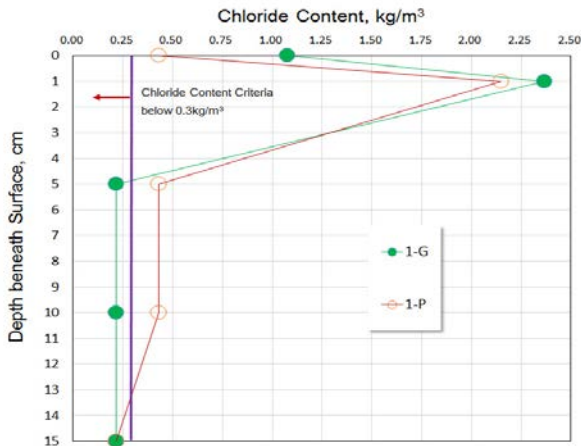
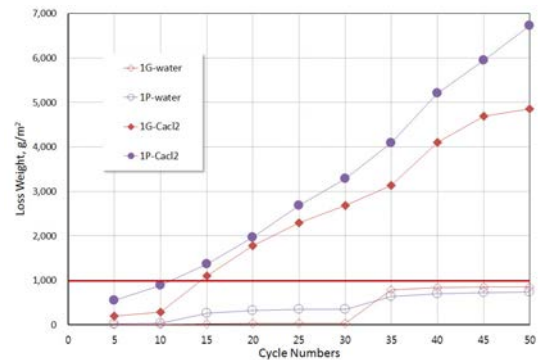
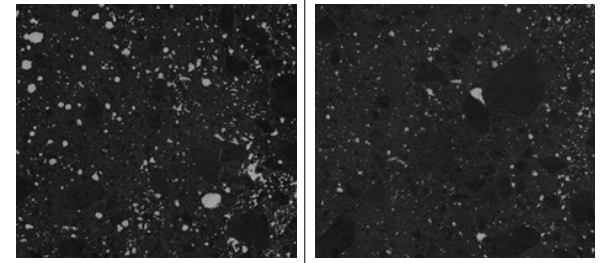


Fig. 8 Chloride Content by Depth–Section 1

Table 2는 1구간의 화상분석결과를 나타내었다. 화상분석은 2차원 화상에 대한 콘크리트 공극구조를 분석하는 것으로 유사한 공극구조를 나타낸다고 하여도 간헐공극의 유무에 따라 공기량은 달라질 수 있어, 간격계수로 공극구조상태를 비교·평가하는 것이 합리적이다. 화상분석실험결과, 두 개소의 간격계수가 일반적인 기준치²⁾ 보다 좀 더 큰 값을 나타내고 있어, 적정한 연행 공극의 분포가 다소 부족한 것으로 평가되었다. 또한 Fig. 9의 표면박리저항성실험에서 염화칼슘수용액에 노출시킨 경우 두 시료 모두 박리량이 15cycle에서 이미 기준치(1,000g/m²)를 초과하였고, 육안등급은 표면부 대부분의 페이스트가 떨어져 나가 골재가 심각히 노

Table 2. Air Content and Spacing Factor–Section 1

| 1-G | | 1-P | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| Air Content | 5.8% | Air Content | 2.5% |
| Spacing Factor | 262 μ m | Spacing Factor | 271 μ m |




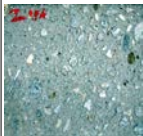


| 1-G-water | 1-P-water | 1-G-CaCl ₂ | 1-P-CaCl ₂ |
|---|--|---|---|
| 1 Rating | 1 Rating | 5 Rating | 5 Rating |
|  |  |  |  |

Fig. 9 Surface Scaling–Section 1

2) Canadian Standard CSA A23.1에서는 콘크리트가 과도하게 노출될 경우(severe exposure conditions) 간격계수를 230 μ m 이하로 규정하고 있으며, 미국 Kansas DOT는 간격계수를 250 μ m 이하로 규정하고 있다.

출되는 상태인 5등급으로 판정되어, 두 개소 모두 콘크리트에 충분한 내구성능이 확보되지 못한 것으로 평가되었다. 표면상태가 건전한 1-G 시료가 불건전한 1-P 시료에 비해 상대적으로 박리량이 적게 발생하였으나 그 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 전반적으로 염화칼슘수용액에 수침시킨 시편이 물에 수침시킨 시편에 비해 약 5배 이상 크게 나타나, 염화물이 콘크리트 손상에 크게 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

4.2. 2구간 분석결과

Fig. 10은 2구간의 압축강도 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 기준치 이상을 나타내고 있으며, 상대적으로 표면상태가 건전한 2-G의 압축강도가 좀 더 큰 값을 나타내었다. Fig. 11은 2구간의 깊이별 염화물함량을 도식한 것이며, 콘크리트 상부에 염화물값이 큰 것으로 보아 동절기 제설제가 살포된 것으로 추정된다. 표면상태가 건전한 2-G의 경우 깊이 1cm

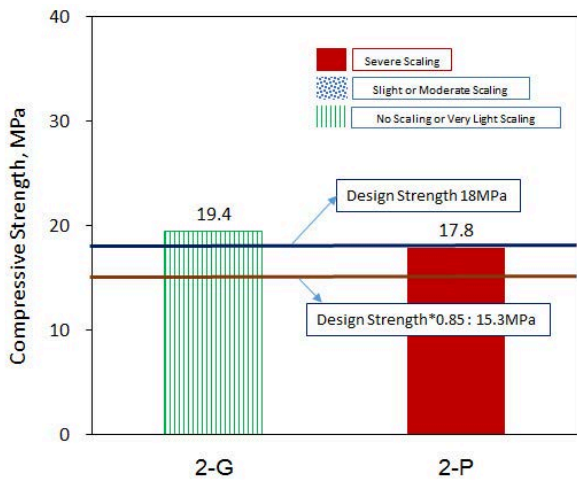


Fig. 10 Compressive Strength–Section 2

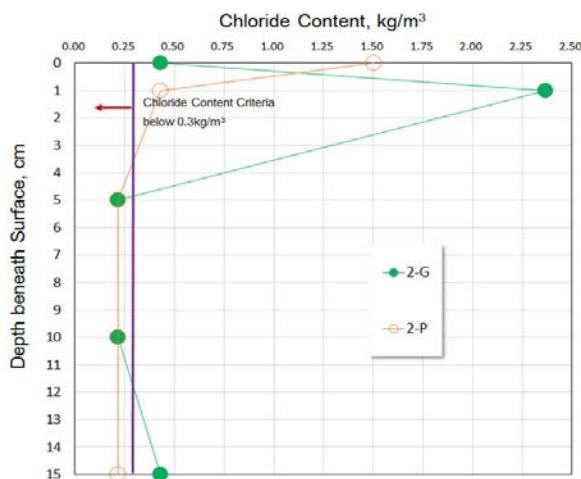


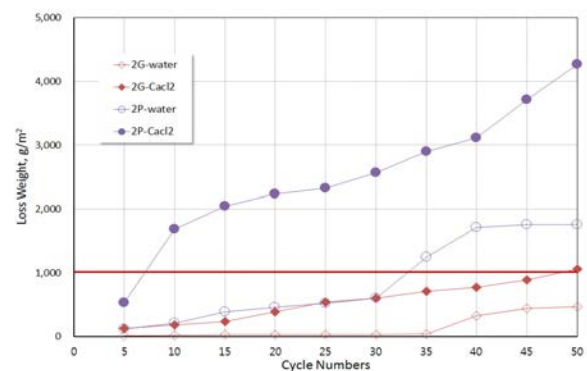
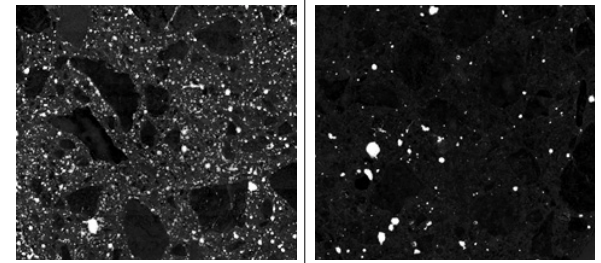
Fig. 11 Chloride Content by Depth–Section 2

정도에서 염화물값이 최대를 나타내는데, 2-P의 경우는 오히려 표면부가 최대를 나타내고 깊이 1cm에서는 기준치에 근접한 값을 나타내고 있다. 이는 2-P의 경우 콘크리트 열화에 의해 표면부에 페이스트가 심각히 떨어져 나갔기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3은 2구간의 화상분석결과를 나타내고 있다. 표에서 나타난 바와 같이 표면상태가 건전한 2-G 시료는 간격계수가 244 μ m를 나타내어 콘크리트의 공극구조가 우수한 것으로 평가되었으나, 표면상태가 불건전한 2-P 시료는 간격계수가 632 μ m를 나타내어 콘크리트 내 연행공극이 거의 존재하지 않으며 전체적인 공극구조가 불량인 것으로 평가되었다. 이와 함께 Fig. 12에 나타난 표면박리저항성 실험결과를 보면, 2-G 시료가 2-P 시료에 비해 박리량이 상당히 작은 것을 알 수 있으며, 특히 2-P 시료는 염화칼슘수용액에 노출시킨 경우 10cycle만에 기준치를 초과하였으며, 물에 노출시킨

Table 3. Air Content and Spacing Factor–Section 2

| 2-G | | 2-P | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| Air Content | 2.9% | Air Content | 1.3% |
| Spacing Factor | 244 μ m | Spacing Factor | 632 μ m |



| 2-G-water | 2-P-water | 2-G-CaCl ₂ | 2-P-CaCl ₂ |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|
| 1 Rating | 3 Rating | 3 Rating | 5 Rating |

Fig. 12. Surface Scaling–Section 2

경우에도 박리량이 상당히 크게 발생하여 35cycle만에 기준치를 초과하였다. 이와 같은 결과는 콘크리트 내 연행공극이 부재할 경우 동결기에는 단지 물에만 노출되어도 콘크리트가 동결손상을 크게 입을 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 표면상태가 건전한 2-G 시료는 염화칼슘수용액에 노출시킨 경우에 50cycle에서 박리량이 기준치를 약간 초과하여 육안등급이 3등급을 나타내었으며, 2-P 시료는 5등급을 나타내었다.

4.3. 3구간 분석결과

Fig. 13은 3구간의 압축강도 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 두 시료 모두 압축강도가 30MPa 이상을 나타내어, 다른 구간에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내었다. 염화물함량 측정결과에서 표면부 인근에 일부 염화물이 검출되었으며(Fig. 14 참조), 본 구간 또한 겨울철 당시에 제설제가 살포된 것으로 추정된다.

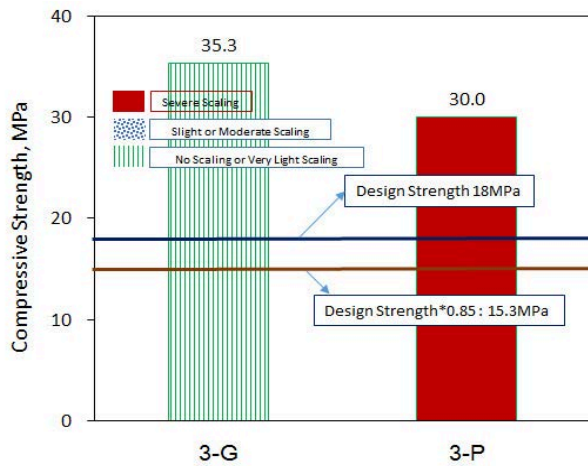


Fig. 13 Compressive Strength–Section 3

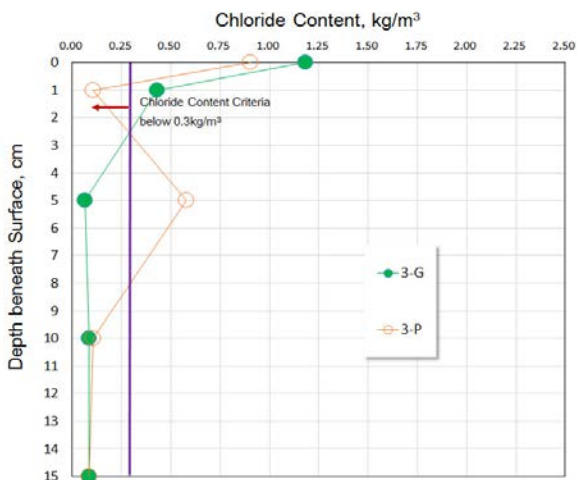
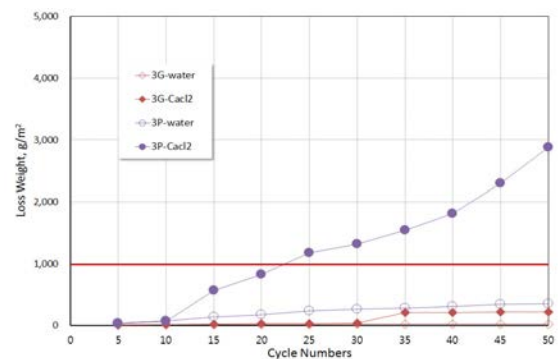
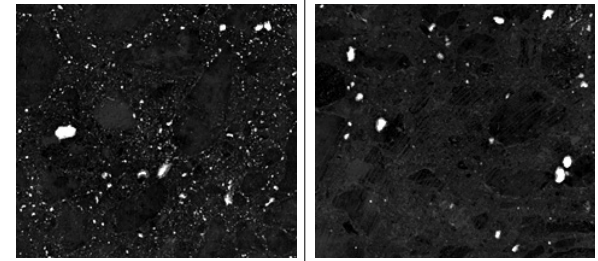


Fig. 14 Chloride Content by Depth–Section 3

Table 4는 화상분석결과를 나타내고 있는데, 표면상태가 건전한 3-G 시료는 간격계수가 259 μ m로 측정되어 일반적 기준치를 조금 초과하였으며, 표면상태가 불건전한 3-P 시료는 간격계수가 545 μ m로 연행공극이 거의 없는 부적절한 공극구조를 나타낸 것으로 평가되었다. 또한 표면박리저항성 실험결과(Fig. 15 참조), 3-P 시료는 25cycle에 이미 기준치를 초과하여 충분한 내구성능을 확보하지 못한 것으로 평가되었다. 또한 3-G 시료는 표면박리가 거의 발생하지 않았으며 특히 육안등급에서 물에 노출시킨 경우 0등급, 염화칼슘에 노출시킨 경우 1등급을 나타내어 동결작용에 거의 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 높은 압축강도를 나타내어도 콘크리트 내 적절한 공극구조를 형성하지 못한다면, 콘크리트의 내구성능을 확보하기는 어렵다는 것을 보여주고 있는 것이며, 이에 반해 적절한 강도와 공극구조를 확보한다면 동결작용에 충분히 저항할 수 있음을 시사하는 것이다.

Table 4. Air Content and Spacing Factor–Section 3

| 3-G | | 3-P | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| Air Content | 2.0% | Air Content | 0.9% |
| Spacing Factor | 259 μ m | Spacing Factor | 545 μ m |



| 3-G–water | 3-P–water | 3-G–CaCl ₂ | 3-P–CaCl ₂ |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|
| 0 Rating | 1 Rating | 1 Rating | 5 Rating |

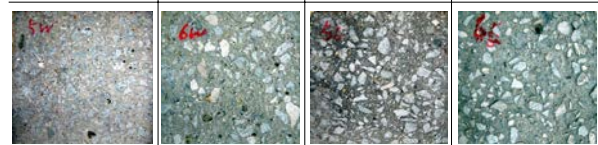


Fig. 15 Surface Scaling–Section 3

4.4. 4구간 분석결과

4구간의 압축강도 실험결과를 Fig. 16에 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이 두 개소 모두 기준치 이상을 나타내고 있으며, 특히 4-G 시료 보다 4-P 시료의 압축강도가 좀 더 큰 값을 나타내었다. 깊이별 염화물함량 결과를 보면(Fig. 17 참조), 모든 위치에서 염화물이 기준치 이하를 나타내어, 해당 구간에는 동결기에 제설제가 살포되지 않은 것으로 추정된다. 이는 제설제가 살포되지 않고 동결기 수분에만 노출된 경우에도 L형측구 콘크리트가 파손이 발생하고 있다는 현실을 단적으로 보여주고 있다.

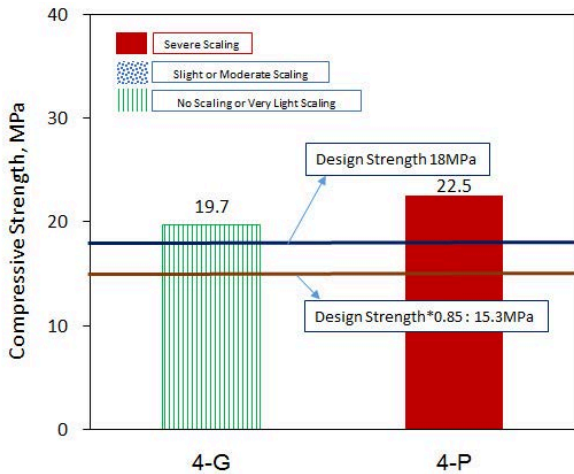


Fig. 16 Compressive Strength–Section 4

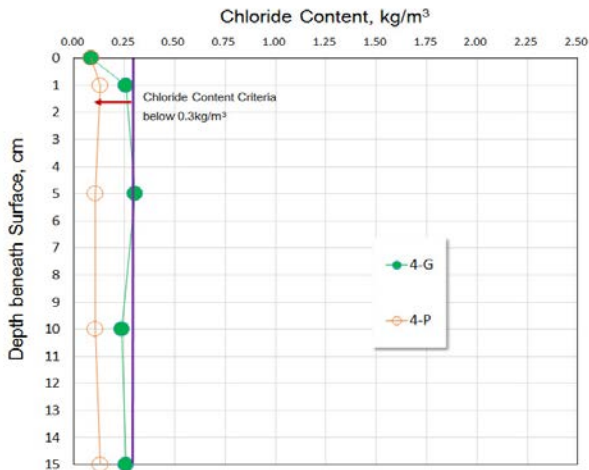


Fig. 17 Chloride Content by Depth–Section 4

Table 5의 화상분석 실험결과를 보면, 표면상태가 건전한 4-G 시료는 간격계수가 169 μ m를 나타내어 연행공극이 상당히 많이 분포하였으며, 적절한 공극구조를 나타낸 것으로 평가되었다. 이에 반해 표면상태가 불건전한 4-P 시료는 간격계수가 기준치보다 조금 더 큰 값

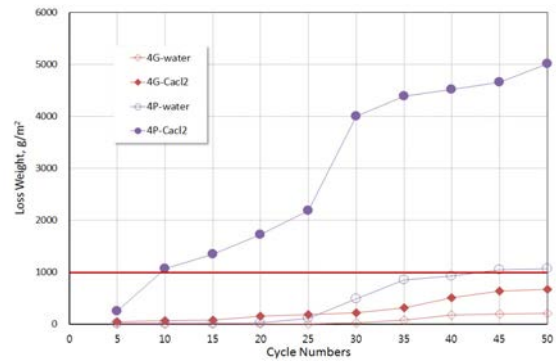
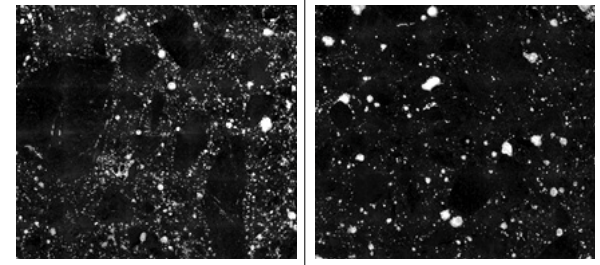
을 나타내었다.

표면박리저항성 실험결과(Fig. 18 참조)에서는 염화칼슘수용액에 노출시킨 경우 4-P 시료가 10사이클에서 이미 기준치를 초과하여 충분한 내구성 확보가 되지 않은 것으로 평가되었으며, 4-G 시료는 박리가 상당히 작게 발생하여 내구성이 우수한 것으로 평가되었다.

이와 같은 결과는 낮은 압축강도에서도 콘크리트 내 연행공극이 많이 분포하여 공극간에 간격이 작다면 동결작용에 의해 발생하는 콘크리트 내부 압력을 해소시킬 수 있어 표면박리저항성을 충분히 확보할 수 있다는 것을 보여주는 것이며, 이에 반해 기준치에 근접한 간격계수를 나타낸다고 하여도 압축강도가 작을 경우 적절한 내구성 확보가 어려울 수 있다는 것을 시사하는 것이다.

Table 5. Air Content and Spacing Factor–Section 4

| 4-G | | 4-P | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| Air Content | 4.0% | Air Content | 4.2% |
| Spacing Factor | 169 μ m | Spacing Factor | 262 μ m |



| 4-G-water | 4-P-water | 4-G-CaCl2 | 4-P-CaCl2 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 Rating | 3 Rating | 1 Rating | 5 Rating |

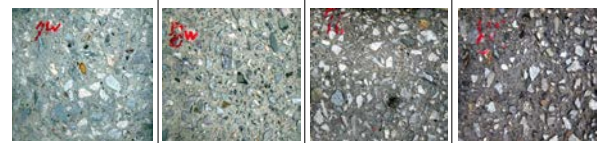


Fig. 18. Surface Scaling–Section 4

4.5. 분석결과 비교·평가

Fig. 19는 L형측구의 표면상태에 따른 압축강도와 간

격계수를 비교한 차트이다. 그림에서 알 수 있듯이 콘크리트 표면의 건전·불건전상태가 압축강도와 상관성이 높지 않은 것으로 나타났으며, 이에 반해 간격계수는 상대적으로 건전구간이 작은 값을, 불건전구간이 높은 값을 나타내고 있어, 표면박리저항성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 표면박리저항성실험을 통해 평가된 육안등급과 압축강도, 간격계수를 비교한 결과도 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 20과 21 참조). 이와 같은 결과는 그동안 L형측구에서 발생된 표면박리파손의 주요한 원

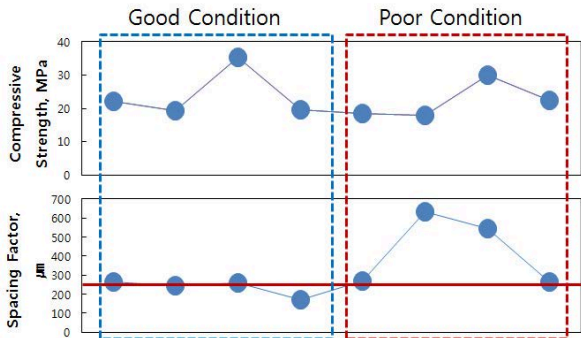


Fig. 19 Comparison of Concrete Properties with Field Surface Condition

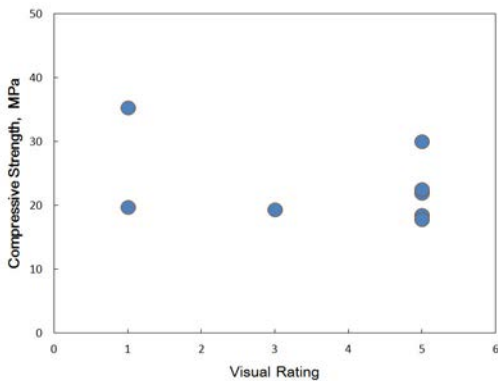


Fig. 20 Comparison of Compressive Strength with Visual Rating

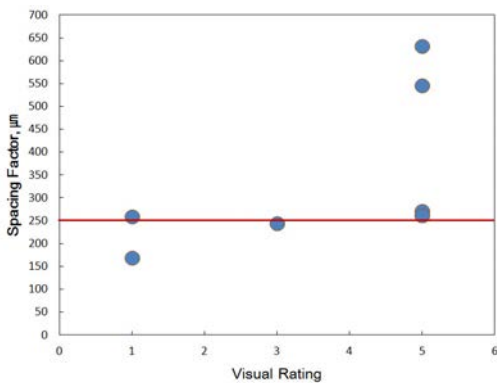


Fig. 21 Comparison of Spacing Factor with Visual Rating

인이 콘크리트 내 적정한 공기량, 공극구조를 확보하지 못했기 때문이라는 것을 나타내고 있는 것이다.

또한 본 연구결과에서 보면 간격계수의 기준치를 만족하지 못하여도 기준치에 근접한 경향을 보인 구간 중 압축강도가 높은 구간은 건전한 상태를 보이고, 압축강도가 낮은 구간은 불건전한 상태를 보이는 것으로 보아, 콘크리트의 압축강도 또한 표면박리파손에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

낮은 압축강도에서도 간격계수가 169µm를 나타낸 4-G 시료의 경우에는 염화칼슘에 노출시킨 표면박리저항성실험에서 1등급을, 유사한 압축강도에서 간격계수가 244µm를 나타낸 2-G 시료의 경우에는 3등급을 나타내고 있어, 낮은 압축강도를 나타내고 있는 콘크리트의 경우 임계간격계수(critical spacing factor)³⁾가 일반적인 기준치보다는 낮을 수 있다는 것을 알 수 있다. Power(1945)는 동결율이 11°C/h일 때 임계간격계수를 250µm라고 하였으며, M. Pigeon and R. Pleau(1995)는 간격계수를 200µm 이하로 추천하고 있다. 기 언급된 국외기준에서도 간격계수에 대한 기준치는 국가별로 다르게 제시되어 있다. 이렇게 제시된 임계간격계수는 콘크리트의 압축강도와 상관없이 범용적인 값으로 제안된 것인데, 본 연구결과를 볼 때 압축강도에 따른 임계간격계수는 달라질 수 있기 때문에, 기준치는 가장 보수적인 값을 채택할 필요가 있다. 현재 국내에서는 콘크리트 내 공극구조를 평가하기 위한 방법으로 공기량시험기준만이 제시되어 있는데, 추후 간격계수에 대한 기준을 논의할 경우 이에 대한 충분한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

L형측구 표면박리파손과 관련하여 현재 적용되고 있는 낮은 콘크리트기준과 동질기 기후환경변화를 그 원인으로 돌릴 수도 있다. 그러나 최근에 시공된 구간에서 파손사태가 급격히 증가하고 있다는 점, 동질성 구간 내에서 건전구간과 불건전구간이 존재한다는 점 등은 근본적으로 콘크리트 품질에 대한 문제점을 지적할 수밖에 없는 이유이며, 본 연구결과가 이를 뒷받침하고 있다.

본 연구에서는 콘크리트 설계기준, 시공방법(마감, 양생) 등에 대한 검토는 제외하였으며, 순수하게 콘크리트의 재료적 특성을 평가하고 이를 통해 표면박리파손에 대한 원인을 분석하고자 한 것이다. 물론 현재의 설계기준, 시공방법 등이 일부 파손을 가속화한 측면이 있을 것으로 추정되며, 이에 L형측구를 포함한 도로소구구조물

3) 콘크리트의 동결융해저항성 관련 내구성지수가 80% 이상을 나타내기 위한 간격계수의 임계점

에 대한 관련 기준검토가 향후 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 L형측구 콘크리트의 시료를 채취하여 그동안 발생된 표면박리파손에 대한 원인을 분석하고자 하였으며, 이에 대한 결론을 다음과 같이 정리하였다.

1. 동결손상에 대한 메커니즘은 여러 학자들마다 각기 다른 이론들을 제시하고 있지만, 이 모든 이론들의 공통점은 동결작용 시 콘크리트 내 내부압력이 증가한다는 것이며, 또한 적절한 연행공극분포를 통해 이 압력을 경감시킬 수 있다는 것이다.
2. L형측구의 코어시료 분석결과, 전반적으로 건전구간의 시료는 간격계수가 작고, 불건전구간은 간격계수가 크게 나타났으며, 또한 표면박리실험과 비교하여도 유사한 경향이 나타났다. 이에 L형측구 표면박리파손에 대한 주요한 원인이 콘크리트의 적절한 공기량, 공극구조를 확보하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.
3. 또한 압축강도와 표면박리파손에 대한 직접적인 상관성을 찾지는 못했으나, 압축강도의 크기에 따라 박리량이 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 임계간격계수 또한 변화될 수 있음을 확인하였다. 이에 L형측구 콘크리트의 낮은 압축강도가 표면박리파손에 영향을 미친 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 (2013- 0101-1-1) 재원으로 수행되었습니다.

References

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2009), "Concrete Standard Specification"
- A. Bilodeau, V.M. Malhotra, Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials: CANMET researches, International Workshop on the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freezing in the Presence of Deicing Salts, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Beton, Universite de Sherbrooke-Universite Laval, Quebec, August 1993, pp. 191-228.
- Collins, A. R. (1944), "The destruction of concrete by frost", Journal of the Institution of Civil Engineers, pp. 29-41.
- J.J. Valenza II, G.W. Scherer (2007), "A review of salt scaling: I . Phenomenology", Cement and Concrete Research 37, pp. 1007-1021.
- Pigeon, M., Pleau, R. (1995), "Durability of concrete in cold climates", E&FN SPON.
- P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro (2006), "Concrete : Microstructure, Properties, and Materials", third edition, pp. 30-32.
- Powers, T. C. (1945) "A Working Hypothesis for further Studies of Frost Resistance", Journal of the American Concrete Institute, pp. 245-272 .
- Powers, T. C. (1949) "The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete", Proceedings of the Highway Research Board, pp. 184-211.
- Powers, T. C. and Helmuth, R. A. (1953), "Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Pastes during Freezing", Proceedings of the Highway Research Board, pp. 285-297.
- Powers, T. C. (1958) "The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete", Bulletin 90, PCA.
- V.T. Ngala, C.L. Page(1997), "Effects of Carbonation on Pore Structure And Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes", Cement and Concrete Research, Vol.27, No.7, pp. 995-1007.