



추운 지역의 스폐링 파손 사례에 관한 연구

A Case Study on Spalling Distresses in Cold Regions

홍 승 호* 유 태 석** 권 순 민*** 정 진 훈****
 Hong, Seung Ho Yoo, Tae Seok Kwon, Soon Min Jeong, Jin Hoon

Abstract

Field and laboratory investigations were performed for concrete pavement of the Yeongdong Expressway located in western part of the Kangwon Province where lots of the substantially large spalling distresses were found. The spalling distresses were investigated to the naked eye in the field, and splitting tensile strength, air void, and neutralization tests were performed for the cores obtained from the pavement. In addition, load transfers at joints and dynamic bearing capacities at slab centers were measured to identify the lowering of the structural capability of the pavement. It was judged that the investigated concrete slabs were affected by freezing and thawing action because the air voids of the cores were substantially low. Therefore, it was concluded that the low air voids affected the lots of the large spalling distress in the pavement located in the region of cold winter.

Keywords : *jointed concrete pavement, spalling, freezing and thawing, air void*

요 지

매우 큰 규모의 스폐링 파손이 집중적으로 발생한 강원도 영서지방 영동고속도로의 줄눈 콘크리트포장에 대하여 현장 및 실내 조사를 수행하였다. 현장에서 육안으로 스폐링 파손 상태를 조사하였으며, 코어를 채취하여 실내에서 활렬 인장강도, 공극률, 그리고 중성화에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 스폐링 파손에 의하여 포장의 구조적 성능이 저하되었는지를 알아보기 위하여 줄눈부에서의 하중전달률과 슬래브 중앙에서의 동적지지력을 측정하였다. 조사구간의 콘크리트 슬래브는 공극률이 상당히 낮아 동결융해 작용에 큰 영향을 받은 것으로 판단되었다. 따라서, 이로 인하여 겨울철 대기온도가 상대적으로 낮은 조사구간에서 상당히 큰 규모의 스폐링이 다수 발생한 것으로 결론지어졌다.

핵심용어 : 줄눈 콘크리트포장, 스폐링, 동결융해, 공극

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원 · 공학석사
 ** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원 · 공학박사
 **** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사

1. 서론

스폴링은 콘크리트포장의 가로줄눈 및 세로줄눈과 무작위 임의균열에 발생하기 쉬운 파손의 한 유형으로, 줄눈으로부터 약 15cm 내의 슬래브 상부가 부서져 나가는 현상이다. 겨울철에 기온이 영하로 내려가는 지역에서 수분의 동결융해 작용이 스폴링 발생에 큰 영향을 미친다는 주장이 상당한 설득력을 얻고 있으며, 따라서, 동결지수나 동결융해주기 등이 스폴링 파손을 예측하는 모형의 주요인자로 사용되어 왔다(Darter 외 1993, Simpson 외 1994, Titus-Glover 외 1998, Yu 외 1998, Hoerner 외 2000). 이 외에도, 온도변화에 의한 줄눈의 움직임 때문에 줄눈에 침투한 단단한 이물질이 줄눈부의 슬래브에 압력을 가하여 스폴링이 발생한다는 주장(Lee와 Stoffels 2001)과 콘크리트가 충분한 강도를 발휘하기 이전에 슬래브 내부의 온도 및 습도구배에 의하여 발생한 콘크리트의 전단응력이 슬래브의 표면에 수평방향의 균열(delamination)을 발생시켜 이 균열이 교통신중에 의하여 스폴링으로 발전한다는 주장(Jeong과 Kim 2004) 등이 있어 왔다.

스폴링을 예측하는 모형에 포함되는 변수들은 주로 장기공용성 구간에서 획득된 자료를 분석하기 이전 또는 그 과정에서 통계적인 방법 등을 통하여 추정된 것들로서, 스폴링의 발생에 미치는 각 변수의 영향은 아직도 현장 또는 실내에서의 실험을 통해서 거의 확인되지 않은 상태이다. 또한, 개발된 스폴링 파손의 메커니즘에 대해서도 실험을 통한 검증이 아직 충분히 되어 있지 않은 상태이다. 특히, 국내에서는 스폴링 파손의 모형개발이나 메커니즘 해석 등에 대한 연구가 아직 초기 상태이므로 이를 위한 실험 및 관찰 자료의 축적이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 강원도 영서지방의 영동고속도로 일부 구간의 줄눈 콘크리트포장에 집중적으로 발생한 큰 규모의 스폴링 파손을 현장에서 관찰하였으며 채취한 코어를 실내에서 실험하여 이 구간에서 발생한 스폴링 파손의 주요 원인을 찾아내었다.

2. 육안에 의한 파손상태 조사

현장에서의 스폴링 파손에 대한 조사는 큰 규모의 파손이 발생한 강원도 영서지방의 영동고속도로 강릉방향(A구간)과 인천방향(B구간)의 줄눈 콘크리트포장 두 구간에서 수행하였다. 인접한 두 구간의 동결지수와 동결기간은 각각 613℃-일과 94일로 상당히 높은 값을 갖는 지역에 속하여 있고, 참고로 서울의 동결지수와 동결기간은 각각 380.9℃-일과 80일이다(이경하 외 2003). 두 조사 구간에서 발생한 스폴링의 경우, 가로줄눈은 물론 세로줄눈에서 골재가 빠져나오면서 줄눈을 중심으로 패이는 현상을 나타내었다. 본 연구에서 조사된 두 구간의 파손유형 및 상태는 아래와 같다.

2.1. A구간에서의 파손상태

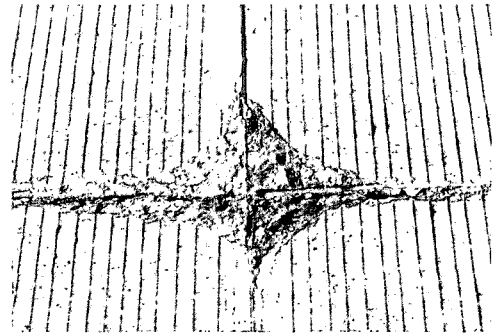
A구간은 강릉방향의 2차선 구간으로 내리막 구간에 위치한다. 파손이 심한 일부 구간에서는 가로줄눈 및 세로줄눈에 이미 패칭보수를 실시하였으나 패칭에 그림 1의 (a)와 같은 파손이 여러 곳에서 발견되었다. 이미 패칭이 수행된 곳과 접하여 그림 1의 (b)와 유사한 상태의 스폴링이 몇 개의 슬래브에 걸쳐 연속으로 발생한 것을 관찰할 수 있었다. 줄눈을 중심으로 하여 골재가 서서히 빠져나가는 형태의 파손이 발생하고 있었으며, 골재가 빠져나간 곳과 접하는 슬래브 표면에서는 D-균열로 추정되는 상당히 촘촘하고 가는 실균열들이 발견되어 이 스폴링 파손이 콘크리트 내 수분의 동결융해와 관련이 있을 것으로 추측되었다(Huang 1993). 또한, 이 균열이 발전할 경우 이곳에서 골재가 빠져나가 스폴링의 규모는 점점 더 커질 것으로 판단되었다.

2.2. B구간에서의 파손상태

B구간은 인천방향 3차선의 곡선구간에 위치하며, 시공당시의 기록은 확인할 수 없었으나 콘크리트의



(a) 패칭에 발생한 파손



(b) 줄눈 교차부에 발생한 스폴링

그림 1. A구간에서 파손이 발생한 모습



(a) 2, 3차선이 접하는 세로줄눈에서의 스폴링



(b) 3차선의 가로줄눈에 발생한 스폴링

그림 2. B구간에서 파손이 발생한 모습

색이나 골재의 종류로 보아 중앙 2개 차선과 외곽 1개 차선은 다른 시기에 시공된 것으로 판단되었고 이 중 외곽 차선에서 현저하게 많은 스폴링 파손이 발생한 상태였다. 특히 2차선과 3차선이 접하는 세로줄눈을 따라 스폴링이 그림 2의 (a)와 같이 발생하였으며 3차선의 가로줄눈에는 큰 규모의 스폴링이 그림 2의 (b)와 같이 발생하였다. 교통하중의 영향을 거의 받지 않는 콘크리트 길어깨에서의 줄눈에서도 스폴링이 다수 발견되어 이 구간의 스폴링 발생에 하중 이외의 다른 요인이 작용하였음을 짐작할 수 있었다.

3. 코어채취 및 강도조사

구간 내 콘크리트 슬래브의 상태를 보다 정밀하게

조사하기 위하여 직경 10cm의 코어를 ASTM C 42/C 42M-99 "Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete"에 의하여 채취하였다. A구간에서는 그림 3의 (a)와 같이 파손이 더 심하게 발생한 1차선에서 코어를 채취하였는데, 패칭보수가 된 지점의 슬래브 중앙에서 1개와 가로줄눈에서 2개의 코어를 채취하였으며 패칭보수가 아직 되지 않은 지점에서는 슬래브의 중앙, 모서리, 그리고 세로줄눈에서 각각 1개씩의 코어를 채취하여 총 6개의 코어가 획득되었다.

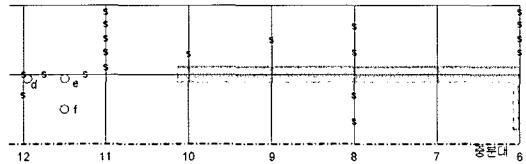
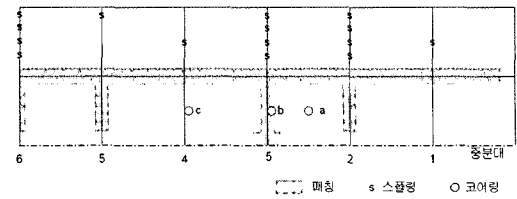
B구간의 경우에는 동일한 이정에서도 차선에 따라 다른 파손정도를 나타내었기 때문에 그림 3의 (b)와 같이 대체로 건전한 상태였던 1차선과 스폴링 파손이 많이 발생한 3차선에서 코어를 채취하였다. 1차



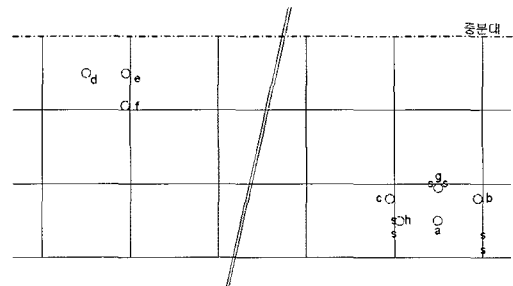
선에서는 슬래브의 중앙, 가로줄눈, 그리고 모서리에서 1개씩의 코어를 채취하였고 3차선에서는 슬래브의 중앙에서 1개, 가로줄눈에서 3개, 그리고 세로줄눈에서 1개의 코어를 채취하여 총 8개의 코어가 획득되었다.

3.1. 코어상태 평가

그림 3에서 보았듯이, 코어는 건전한 지점과 파손된 지점에서 각각 채취되었으며 이중 파손된 지점에서 채취된 코어의 상태는 그림 4에서 보는 바와 같다. A구간에서 채취된 코어의 상부에는 촘촘한 간격의 균열이 그림 4의 (a)와 같이 발생되어 스폐링 파손의 전조를 보이고 있었다. 균열은 슬래브의 표면에서 약 3.5cm의 깊이까지 발전하여 이 깊이 이상의 두께를 갖는 스폐링이 발생할 가능성이 있는 것으로 판단되었다. 그림 4의 (b)에 보인 코어는 스폐링이 발생하여 부분단면 보수를 한 위치에서 채취한 것으로 약 6.5cm의 두께를 갖는 패칭 층이 하부의 슬래브 층과 분리되어 있다.



(a) A구간의 파손상태 및 코어채취 위치



(b) B구간에서의 코어채취 위치

그림 3. 구간별 콘크리트 슬래브의 파손상태 및 코어채취 위치



(a) A구간 e지점에서 채취된 코어



(b) A구간 b지점에서 채취된 코어



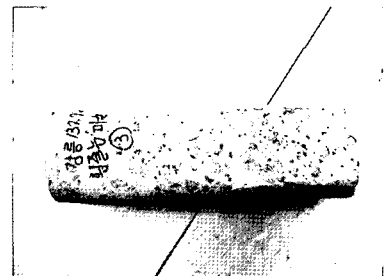
(c) B구간 g지점에서 채취된 코어의 상부



(d) B구간 g지점에서 채취된 코어의 하부



(e) B구간 h지점에서 채취된 코어



(f) B구간 c지점에서 채취된 코어

그림 4. 채취된 코어의 상태



B구간의 3차선 세로줄눈부에서 채취한 코어의 상부와 하부의 모습은 그림 4의 (c) 및 (d)와 같다. 코어의 상부에서는 스포링 파손으로 진전될 가능성이 있는 균열들이 일정 깊이까지 진전되어 있었으며 코어의 하부에서는 콘크리트의 열화가 심하여 운반시의 가벼운 충격에도 재료가 쉽게 분리되면서 파괴되었다.

평상시 가로줄눈부 슬래브의 얇은 깊이에 수평방향의 균열이 존재하였으며(Jeong과 Kim 2004), 이 균열에 의하여 코어 채취시 발생한 약한 압력에 수평방향 균열 상부의 얇은 층이 깨지고 조각이 난 것을 그림 4의 (e)에서 볼 수 있다. 그림 4의 (f)에서도 가로줄눈부에서 채취된 코어의 하부에 열화가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 이처럼 줄눈부의 슬래브 하

부에서 큰 열화현상이 발생한 것은 줄눈부의 슬래브 하부가 스포링에 의해 파손된 줄눈을 통해 침투한 수분 등에 접촉하는 시간이 많았기 때문으로 추측되었다. 또한, 3차선의 열화가 발생한 코어의 하부가 1차선의 열화가 발생하지 않은 코어의 하부에 비해 코어 채취 후 건조하는데 소요되는 시간이 더 긴 것을 관찰할 수 있었다. 이는, 서로 다른 시기에 타설된 두 차선의 콘크리트가 서로 다른 성질을 갖거나 3차선 콘크리트가 열화되면서 발생한 미세균열을 통해 많은 양의 수분이 침투하였기 때문으로 보여진다.

3.2. 콘크리트의 할렬인장강도

채취된 직경 10cm의 코어를 10cm의 길이로 절단

표 1. 할렬인장강도 실험결과

구 간	위 치	시편번호*	길이 (cm)	파괴하중 (ton)	인장강도 (kg/cm ²)	평균인장강도 (kg/cm ²)
A	중앙부	a-m	9.650	8.553	56.4	50.2
		a-b	10.450	7.212	43.9	
	가로줄눈	b-m	10.547	7.464	45.1	46.1
		b-b	10.240	7.571	47.1	
	가로줄눈	c-m	10.609	9.305	55.9	50.9
		c-b	10.455	7.518	45.8	
	모서리	d-m	10.225	8.743	54.4	59.5
		d-b	9.950	10.090	64.6	
	세로줄눈	e-m	10.450	7.854	47.8	47.2
		e-b	10.250	7.509	46.6	
중앙부	f-m	10.550	7.928	47.8	46.7	
	f-b	10.050	7.179	45.5		
B	중앙부	a-m	10.850	8.023	47.1	45.2
		a-b	10.450	7.120	43.4	
	중앙부	d-m	10.450	8.602	52.4	54.0
		d-b	10.825	9.442	55.5	
	가로줄눈	e-m	10.300	10.247	63.3	56.3
		e-b	10.225	7.923	49.3	
	세로줄눈	g-m	10.400	6.902	42.2	42.2
	가로줄눈	h-m	11.100	7.687	44.1	42.3
		h-b	11.175	7.126	40.6	

* m : middle, b : bottom

하여 코어당 3개씩의 시편을 얻은 후 그 중 하부와 중간부 2개의 시편에 대하여 KS F 2423 “콘크리트의 인장강도 실험방법”에 의해 활렬인장강도를 측정하였다. 시편의 길이방향에 직각으로 가해진 파괴시의 최대하중을 이용하여 식 (1)에 의하여 시편의 활렬인장강도를 구하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

$$f_{split} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (1)$$

여기서, f_{split} = 활렬인장강도(kg/cm²)
 P_{max} = 최대하중(kg)
 l = 시편의 길이(cm)
 d = 시편의 직경(= 10cm)

실험 결과, 활렬인장강도가 특별히 낮은 코어는 없는 것으로 나타났다. A구간의 경우, 건전한 지점으로 판단되는 슬래브 중앙부와 파손지점으로 판단되는 모서리 또는 세로줄눈부 간의 강도의 차이가 크지 않아 D-균열과 스폴링의 발생에 영향을 미친 슬래브 표면에서의 강도저하가 슬래브 하부까지는 진전되지 않은 것으로 판단되었다. 오히려, 스폴링이 발생한 지점의 약 5cm 안쪽의 슬래브에서 채취된 코어의 강도는 특히 커서 D-균열과 스폴링을 유발한 강도저하의 수평방향으로의 진전은 크지 않은 것으로 판단되었다.

B구간의 경우, 1차선의 비교적 건전한 슬래브에서 채취된 코어(d, e)의 강도가 심한 파손을 보인 3차선의 슬래브에서 채취된 코어(a, g, h)의 강도보다 컸다. 이는 다른 시기에 타설된 콘크리트의 강도성질의 차이에 의하여 스폴링 파손의 정도가 장기적으로 크게 달라질 수 있음을 암시하는 것이기도 하다. 3차선에서 채취된 코어의 강도를 서로 비교하면, 줄눈부에서 채취된 코어의 강도가 열화현상에 의하여 슬래브

의 중앙부에서 채취된 코어의 강도보다 작아진 것을 볼 수 있다. 또한 활렬인장강도 실험에 사용하기 위한 시편의 가공과정에서 c, g 코어의 하부에서 조각 파손이 발생하여 줄눈부의 슬래브 하부에 열화가 많이 진전되었음을 다시 한번 확인할 수 있었다.

4. 콘크리트 슬래브의 내구성 조사

A구간과 B구간에서 채취된 코어에 대하여 공극률 분석 실험을 수행하였다. 콘크리트 슬래브의 내부에 적정량의 공극이 존재해야만 동결-융해 현상에 의한 콘크리트포장의 파손을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다(Neville 1996). 콘크리트 슬래브 내에 존재하는 공극은 연행공극과 갇힌 공극으로 구분하는데 일반적으로 10~1,000 μ m 범위의 크기를 갖는 공극을 연행공극이라고 하며, 1,000 μ m 이상의 크기를 갖는 공극은 갇힌 공극이라 한다. 장기적으로 동결융해에 대한 내구성 확보를 위해서는 10~1,000 μ m 크기의 연행공극이 적절하게 분포되어 콘크리트 내에 존재하는 수분의 동결융해에 따른 체적의 변화를 완화시켜 주어야 한다. 콘크리트 구조물의 알맞은 공기량의 범위는 4~7%가 가장 이상적이며, 굵은 골재의 최대 치수가 커질수록 적정 공기량은 작아진다. 줄눈 콘크리트포장 건설시 유럽 국가별 적정 공기량 기준은 표 2와 같다(FHWA 2001).

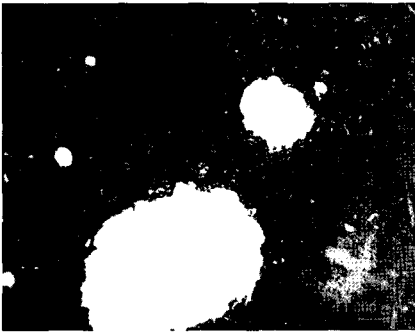
콘크리트 공극구조의 조사 방법에는 크게 ASTM C 475 “Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete”에 의한 방법과 컴퓨터를 이용한 화상분석 방법이 적용되고 있다. ASTM C 475 방법은 현미경으로 시편을 확대하여 경화된 콘크리트 표면 위에 나타난 공극의 크기 및

표 2. 유럽 각국 줄눈 콘크리트포장의 공기량 규정

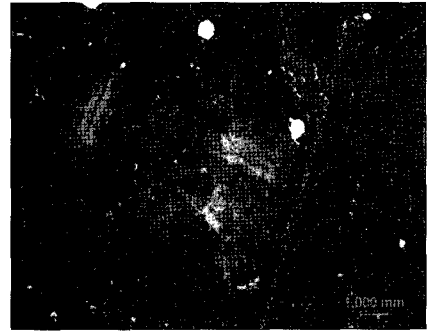
국 가	오스트리아	덴마크	핀란드	프랑스	독일	영국	스웨덴
공기량(%)	3.5~5.0	4.0~7.0	2.0~4.0	3.0~6.0	3.5~4.0	4.0~5.0	4.8~7.0

개수를 육안으로 관측하여 ASTM C 475에서 제시된 계산식에 의해 계산하는 방법이다. 본 방법에는 리니어 트레버스법과 수정 포인트 카운티법이 사용되고 있다. 리니어 트레버스법은 분석 대상 시편에서 1차원의 선을 따라 진행하면서 공극의 크기와 간격을 계산하는 방식이다. 수정 포인트 카운티법은 무차원의 분석 대상 시편에서 분포된 횡선의 수 또는 점

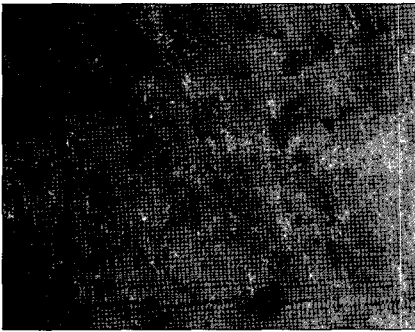
을 현미경의 십자선을 따라 측정하는 방법이다. 본 방법의 정확한 측정을 위해서는 분석 대상 시편의 표면 처리에 대한 규정이 ASTM C 475에 규정되어 있다. 본 방법은 분석에 장시간이 소요되고 분석자들에 의한 오차 발생 가능성이 있어 근래에는 많이 사용되지 않고 있다(Monteiro 등 2002). 최근에 제안된 화상분석 방법은 이미지 프로세싱 기술을 응용하



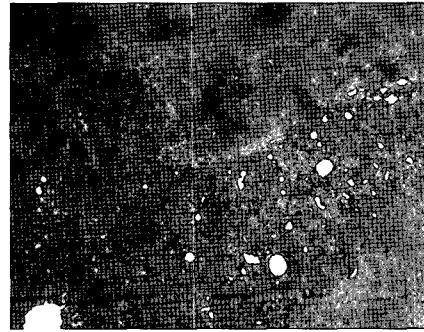
(a) A구간에 갇힌 공기가 분포된 상태



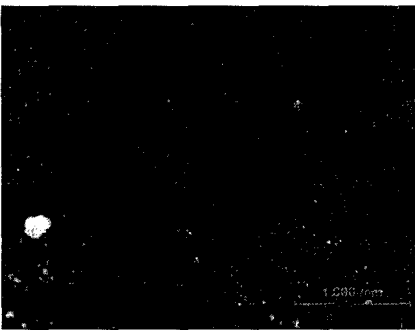
(b) A구간에 공극이 관찰되지 않은 상태



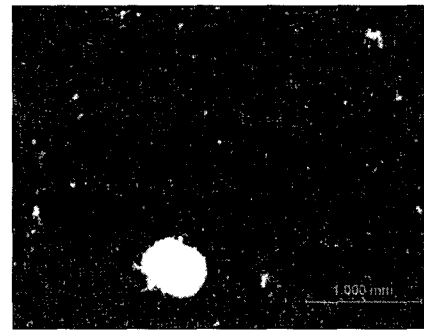
(c) B구간 1차선의 공극상태



(d) B구간 1차선의 공극상태



(e) B구간 3차선의 공극상태



(f) B구간 3차선의 공극상태

그림 5. 구간별 콘크리트 슬래브에 대한 공극량 관찰



여 콘크리트 시편 공극의 크기 및 간격을 계산하는 방법이다(Pleau 등 2001). 이 방법은 아직 표준화 되지 않았지만, 공극의 크기 및 공극 간의 평균 간격인 간격계수를 산정할 수 있으며 컴퓨터의 이미지 프로세싱 기술을 응용한 자동 분석으로 처리속도가 매우 빠르고 분석자 및 반복 측정에 의한 오차가 크지 않다는 장점이 있다. 본 연구에서는 화상분석을 이용하여 시편의 전체 공극량을 분석하였다.

4.1. 공극상태 조사

A구간에서 채취된 코어를 가공하여 획득된 시편을 위상차 현미경으로 관찰하였으며, 공극은 그림 5의 (a)와 (b)에서 보듯이 매우 불균일한 크기로 분포되어 있었다. 이미지 프로세싱을 통하여 계산된 공극률은 4.35%로 콘크리트 슬래브의 공극률로는 매우 양호하였다. 하지만, 표 3에서 보듯이, 19번째와 20번째 지점에서의 공극률이 각각 47%와 27%로 매우 높았으며 이들 공극들의 직경은 거의 모두 1000 μ m 이상으로 콘크리트 내구성에는 영향을 주지 않는 간헐 공극들이었다. 이들 19번째와 20번째의 지점을 제외한 평균 공극률은 0.67%로 콘크리트 슬래브 내에 연행공극이 거의 분포되어 있지 않는 것으로 분석되어 장기적인 동결융해 작용에 매우 취약한 상태라고 판단되었다.

B구간의 1차선과 3차선에서 각각 채취된 코어를 가공하여 획득된 시편을 위상차 현미경으로 관찰하였으며, 그림 5의 (c)부터 (f)에서 보듯이 매우 작은 크기의 공극들이 분포하는 것을 볼 수 있었다. 본 논문에서 구체적인 결과를 표로 나타내지는 않았지만, 두 구간에서의 평균 공극률은 각각 0.71%와 0.85%로 매우 낮게 계산되어 이 두 구간의 콘크리트 슬래브도 장기적인 동결융해 작용에 매우 취약한 상태였다. 따라서, 본 연구를 위하여 조사된 구간들에서 발견된 큰 규모의 스폴링 파손은 주로 콘크리트 내에 연행공기가 부족하여 발생한 것으로 추정되었다. 콘크리트 연행공기의 양은 시멘트의 양, 분말도, 수량,

표 3. A구간 콘크리트 슬래브에 대한 공극량 분석결과

일련번호	공극수(개)	공극면적(mm ²)	공극률(%)
1	64	0.007	0.070
2	20	0.000	0.006
3	58	0.386	3.695
4	13	0.000	0.004
5	9	0.000	0.003
6	12	0.000	0.008
7	112	0.033	0.318
8	35	0.013	0.126
9	8	0.000	0.005
10	186	0.039	0.377
11	11	0.000	0.003
12	63	0.027	0.267
13	94	0.039	0.373
14	99	0.030	0.294
15	244	0.117	1.125
16	233	0.129	1.236
17	14	0.000	0.008
18	28	0.441	4.222
19	33	4.986	47.678
20	43	2.857	27.324
평 균			4.354

미립재료의 양, 잔골재율, 잔골재의 입도분포, 운반 방법, 운반시간, 콘크리트의 온도, 기온 등에 영향을 받으며(Neville 1996) 콘크리트포장의 경우에는 이러한 요인들 중 콘크리트의 운반시간이나 타설온도 등과 같은 시공조건에 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다.

4.2. 중성화 실험

콘크리트 슬래브에 제설제 등의 염화물이 침투한 깊이를 통하여 스폴링 파손에 미치는 영향을 알아보기 위하여 채취된 코어에 대하여 중성화 실험을 수행하였다. 이를 위하여 그림 6과 같이 코어를 깊이방향으로 잘라 시편을 얻은 후 페놀프탈레인 용액을 시편

의 잘린 면에 살포하여 색이 변하는 깊이를 관찰하였다. 그 결과, 슬래브 표면 근처에서도 페놀프탈레인 용액에 의한 중성화 반응이 거의 일어나지 않아 스폐링 파손에 영향을 미치는 염화물의 침투가 적었던 것으로 판단되었다.



(a) A구간 중성화 실험결과



(b) B구간 중성화 실험결과

그림 6. 구간별 콘크리트 슬래브에 대한 중성화 실험결과

5. 포장의 구조적 성능 조사

스폴링 파손에 의하여 포장의 구조적 성능이 저하되었는지의 여부를 알아보기 위하여 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 사용하여 하중전달률과 동적지지력 등을 조사하였다. 하중전달률은 가로줄눈에서의 하중전달 효율이 가장 빠르게 저하될 것으로 추정되는 위치인 차량바퀴의 진행위치(wheel path)에서 측정하였으며, 지지력은 콘크리트 슬래브

의 중앙에서 측정하였다. 하중전달률은 어떤 슬래브의 가로줄눈부에 충격하중을 가하였을 때 발생한 처짐과 이 때 인접하는 슬래브의 가로줄눈부에서 발생한 처짐의 비로써 식 (2)의 식에 의하여 계산된다.

$$LTE = \frac{w_u}{w_l} \times 100 \quad (2)$$

여기서,

LTE = 하중전달률(%)

w_u = 하중이 재하되지 않은 슬래브의 처짐

w_l = 하중이 재하된 슬래브의 처짐

AASHTO에서 1993년도에 발간한 “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures”에서는 FWD실험을 할때 슬래브의 중앙에서도 하중이 가해지는 위치와 그 인접부에서 처짐의 차이가 존재하므로 이를 이용하여 줄눈부에서의 하중전달률을 보정하는 방법을 제안하였으나 본 연구에서는 외적인 조건을 최대한 배제한 상태에서 순수하게 줄눈부의 처짐만으로 하중전달상태를 판단하기 위해서 보정작업을 생략하였다. 하중전달률과 함께 Westergaard의 이론적인 처짐공식인 식 (3)을 이용하여 FWD 충격하중에 의한 조사구간의 동적지지력을 계산하였다.

$$k = \left(\frac{P}{8d_0 l^2} \right) \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2l} \right) + \gamma - 1.25 \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

여기서,

k = 동적지지력 (pci)

P = FWD 하중

d_0 = FWD 하중에 의한 슬래브의 최대처짐값(inch)

l = 슬래브의 상대강성반경(inch)

a = 재하판 반경 (= 5.9inch)

γ = 오일러 상수 (= 0.577)

고속도로를 장시간 차단할 수 없었기 때문에 본 연구에서는 A구간 중 스폐링 파손이 더 심했던 1차선에서 하중전달률과 동적지지력을 측정하였다. 실험 결과는 표 4와 같으며 동적지지력과 하중전달률 모



표 4. A구간 1차선의 하중 전달률과 동적지지력

동적지지력(kg/cm ³)		하중전달률(%)		중앙부 최대처짐(μm)		줄눈부 최대처짐(μm)	
평균	변동계수	평균	변동계수	평균	변동계수	평균	변동계수
5.7	19%	84.4	4%	84	12%	78	9%

두 양호한 것으로 측정되어 측정구간 내에 큰 규모의 스폐링 파손이 많았던 것을 고려하면 스폐링 파손에 의하여 포장에 유의할만한 구조적 손실은 발생하지 않은 것으로 판단되었다.

6. 결론

본 연구는 겨울철에 기온이 상대적으로 낮은 강원도 영서지방의 영동고속도로 상행선과 하행선 두 구간의 줄눈 콘크리트포장에 발생한 스폐링 파손의 원인을 알아내고 그 대책을 세우기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 육안으로 파손상태를 조사하였으며, 코어를 채취하여 실내에서 할렬인장강도, 공극률, 중성화 등을 측정하였다. 또한, 스폐링 파손에 의한 포장의 구조적 성능 저하의 여부를 알아내기 위하여 FWD를 사용하여 줄눈부에서의 하중전달률과 슬래브 중앙에서의 동적지지력 등을 측정하였으며, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 스폐링 파손에 대한 육안조사 결과, 줄눈을 중심으로 골재가 빠져나가는 형태의 스폐링이 발생하고 있음을 관찰할 수 있었고 파손과 인접한 슬래브의 표면에 실균열이 발생하고 있어 파손의 규모가 지속적으로 확대될 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 동일한 지점에서 다른 시기에 타설된 B구간의 1차선과 3차선이 매우 다른 정도의 스폐링 파손 상태를 보여 콘크리트의 재료성질에 의해 스폐링 파손의 정도가 크게 달라질 수 있음을 짐작할 수 있었다. 또한, 큰 규모의 스폐링 파손이 집중적으로 발생한 B구간의 3차선에서 줄눈의 파손부를 통한 지속적인 수분의 침투로 인하여 줄눈부의 슬래브 하부가 크게 열화된 사실

을 발견하였다.

- 2) 할렬인장강도 실험을 수행한 결과, 뚜렷하게 강도가 저하된 구간은 없는 것으로 나타났다. 하지만, 스폐링 파손이 거의 발견되지 않은 B구간의 1차선의 경우 큰 규모의 스폐링이 집중적으로 발견된 3차선에 비하여 강도가 커서 스폐링 파손의 정도가 콘크리트 재료의 성질에 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한, B구간의 3차선에서 채취한 코어의 하부를 절단하는 과정에서 조각파손이 발생하여 줄눈을 통한 수분의 침투에 의해 슬래브의 하부가 열화된 것을 확인할 수 있었다. 이외에도, 슬래브 상부에 발생한 수평방향 균열(delamination) 때문에 코어의 상부가 코어채취도중 부서지는 현상을 관찰할 수 있었다.
- 3) 콘크리트의 내구성을 조사하기 위하여 공극률과 중성화 실험을 실시하였다. 간헐 공극을 제외할 경우, 조사구간에서 채취된 코어의 공극률은 매우 낮아 콘크리트 내에 연행공극이 거의 존재하지 않음을 알 수 있었고 이 때문에 슬래브가 장기적인 동결융해 작용에 취약한 상태인 것으로 판단되었다. 충분한 연행공극을 확보하기 위해서는 콘크리트의 운반시간이나 타설온도 등을 적절하게 관리할 필요가 있는 것으로 판단되었다.
- 4) 중성화 실험 결과, 염화물이 콘크리트 슬래브의 표면으로부터 침투한 깊이가 얇은 것으로 나타나 조사된 구간에서 염화물이 스폐링 파손에 미친 영향은 매우 작은 것으로 판단되었다. FWD에 의하여 측정된 줄눈부에서의 하중전달률과 포장의 동적지지력 결과도 만족스러운 수준으로 나타나 스폐링 파손에 의한 포장의 구조적 성능저하는 크지 않은 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Darter, M. I., Abdelrahman, M., Okamoto, P. A., and Smith, K. D. (1993), *Performance-Related Specifications for Concrete Pavements: Volume I - Development of a Prototype Performance-Related Specification*. FHWA-RD-93-042, Federal Highway Administration.
2. FHWA (2001), *The Effects of Higher Strength and Associated Concrete Properties on Pavement Performance*. Publication No. FHWA-RD-00-161, June, p. 78.
3. Hoerner, T. E., Darter, M. I., Khazanovich, L., Titus-Glover, L., and Smith, K. D. (2000), "Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-Related Specifications". *Final Report, FHWA-RD-00-130, Vol. 1*. Federal Highway Administration.
4. Huang, Y. H. (1993), *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall, Inc., New Jersey.
5. Jeong, J. H., and Kim, N. (2004), "Moisture Effects on Delamination and Spalling Distress Mechanisms of Early-Age Concrete Pavements," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 2, March, pp. 197-204.
6. Lee, S. W. and Stoffels, S. M. (2001), "Analysis of In Situ Horizontal Joint Movements in Rigid Pavements," *Transportation Research Record 1778*, TRB, National Research Council, Washington DC, pp. 9-16.
7. Monteiro, P. J. M., Corr, D. J., Lebourgeois, J., Bastacky, S. J. and Gartner, E. M. (2002), "Air Void Morphology in Fresh Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1025~1031.
8. Neville, A. M. (1996), *Properties of Concrete*. Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
9. Pleau, R., Pigeon, M. and Laurencot, J. L. (2001), "Some Findings on the Usefulness of Image Analysis for Determining the Characteristics of the Air-Void System on Hardenend Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, pp. 237~246.
10. Simpson, A. L., Rauhut, J. B., Jordahl, P. R., Owusu-Antwi, E. B., Darter, M. I., and Ahmad, R. (1994), Early Analysis of LTPP General Pavement Studies Data, Volume III : *Sensitivity Analysis for Selected Pavement Distresses*. Report SHRP-P-393, Strategic Highway Research Program.
11. Titus-Glover, L., Owusu-Antwi, E. B., and Darter, M. I. (1998), *Design and Construction of PCC Pavements, Volume III : Improved PCC Performance*. FHWA-RD-98-113, Federal Highway Administration.
12. Yu, H. T., Smith, K. D., Darter, M. I., Jiang, J., and Khazanovich, L. (1998), *Performance of Concrete Pavements, Volume III : Improving Concrete Pavement Performance*. FHWA-RD-95-111, Federal Highway Administration.
13. 이경하, 옥창권, 김인수 (2003), 동결지수 적용기준에 관한 연구. 연구보고서, 한국도로공사, PA-03-08.

〈집수 : 2005. 7. 4〉