

장기간 현장조사를 통한 연속철근 콘크리트 포장의 균열간격과 균열폭 특성 분석

Characteristics of Crack Spacing and Crack Width of Continuously Reinforced Concrete Pavement Based on Long-Term Field Surveys

오한진 Oh, Han Jin | 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 박사후연구원 (E-mail : ohj85@ex.co.kr)
조영교 Cho, Young Kyo | 정회원 · 경희대학교 공과대학 사회기반시스템공학과 박사후연구원 (E-mail : brain@khu.ac.kr)
김성민 Kim, Seong-Min | 정회원 · 경희대학교 공과대학 사회기반시스템공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to investigate characteristics of crack spacing and crack width and their relationship in continuously reinforced concrete pavement (CRCP) based on the data obtained from long-term field observations.

METHODS : The crack spacings and crack widths are measured periodically over 10 years at two different CRCP sections: one with asphalt bond breaker beneath concrete slab, and the other with bonded lean concrete base beneath concrete slab. The effects of steel ratio, type of underlying layer, terminal treatment method, and seasonal temperature change on the crack characteristics are evaluated by analyzing the measured data.

RESULTS : The CRCP with lean concrete base shows smaller crack spacings than those of the CRCP with asphalt bond breaker. As the steel ratio increases, both the crack spacing and crack width tend to decrease. The crack width becomes larger as the crack age increases, but once the crack age is over a certain value the crack width tends to converge. When the terminal anchor lug system is not used and the expansion joints are employed at the terminals, the crack spacings and crack widths increase near the terminal sections. The crack spacing and crack width seem to be proportional each other, but not necessarily linearly, and their relationship is more distinguished in the summer when the crack widths become smaller.

CONCLUSIONS : The steel ratio, underlying layer type, terminal treatment method, and seasonal temperature change affect the characteristics of cracks and the crack spacing and crack width are related to each other.

Keywords

continuously reinforced concrete pavement, crack spacing, crack width, field survey, steel ratio, terminal, underlying layer

Corresponding Author : Kim, Seong-Min, Professor
Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, 1732
Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17104, Korea
Tel : +82.31.201.3795 Fax : +82.31.202.8854
E-mail : seongmin@khu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

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

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Mar. 17, 2016 Revised Mar. 23, 2016 Accepted Jun. 07, 2016

1. 서론

강성 포장인 시멘트 콘크리트 포장(PCCP: Portland Cement Concrete Pavement)에서 가장 널리 사용되고 있는 형식은 줄눈 콘크리트 포장(JCP: Jointed Concrete

Pavement)과 연속철근 콘크리트 포장(CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement)이다. 국내의 경우 CRCP에 비하여 초기 시공비용이 적고 시공성이 편리하다는 이유로 JCP를 주로 사용하고 있다. JCP

는 콘크리트 슬래브에 발생하는 횡방향 균열을 제어하기 위하여 길이방향으로 일정 간격마다 횡방향 수축줄눈을 두어 횡방향 균열을 유도하고, 수축줄눈부의 원활한 하중 전달을 위하여 다웰바가 설치된다. CRCP의 경우 슬래브 내부에 연속적으로 종방향 철근이 설치되며 JCP와 달리 슬래브의 횡방향 균열 발생을 허용하는 포장 형식이다.

CRCP는 횡방향 수축줄눈을 생략하고 연속적으로 포장 슬래브를 구성하기 때문에 JCP의 주된 손상인 줄눈부 스포링 등이 발생하지 않으며, 횡방향 균열부에서의 차륜 하중에 대한 하중전달을 역시 매우 우수한 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2006; Ryu et al., 2012). 또한 철근의 존재에 의해 하부지반에 부분적인 결함이 발생하더라도 포장 슬래브에 직접적인 파손이 발생하지 않는 등 공용성이 매우 우수한 것으로 평가되고 있다(McCullough and Dossey, 1999a, 1999b; Roesler et al., 2005; Ahn, 2006; Sun et al., 2011a). 이에 유럽의 여러 국가 및 텍사스, 일리노이 등 미국의 여러 주에서도 CRCP를 주된 포장 형식으로 사용하고 있다(FHWA, 1993; 2007). 또한 장기간 CRCP 공용 후 상부에 아스팔트 포장으로 덧씌우기한 경우에도 반사균열이 거의 발생하지 않으며, 노후화된 포장에 CRCP로 덧씌우기를 한 경우도 우수한 공용성을 보이고 있다(Volle, 2001; Sun et al., 2011b; Mokarem et al., 2007; Plessis et al., 2011; Ryu et al., 2009).

CRCP는 시공 초기부터 횡방향 균열이 발생하기 시작하며 오랜 기간 동안 균열이 점진적으로 발생하는 포장 형식이므로 균열간격과 균열폭 등 균열과 연관된 인자가 공용성에 미치는 영향을 분석하는 것이 중요한 사항이라 할 수 있다. 하지만 AASHTO 86, 93 등의 설계법에서는 균열간격과 균열폭에 대한 역학적 관계가 규명되지 못한 상태에서 경험적으로 선정된 균열간격과 균열폭을 주요 관리 인자로 사용하고 있다(Suh et al., 1992; Nam et al., 2007). 미국에서는 역학적 경험적 설계법(MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)을 개발하였으며, 이러한 설계법에서는 공용연수가 증가함에 따라 균열폭이 벌어지며 이에 따른 하중전달율이 저하된다는 이론을 도입하였다. 하지만 현장의 실측결과를 반영하지는 못하였으며, 또한 여러 설계 요소에 대한 정확성이 부족하여 실무에서의 사용이 미비한 실정이다(Ha et al., 2012a; Ha et al., 2012b).

따라서 본 연구에서는 CRCP의 횡방향 균열 발생에 따른 균열간격 및 균열폭 특성을 분석하기 위하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 횡방향 균열간격과 균열폭을 현

장조사를 통하여 측정하였다. CRCP 시공초기부터 10년 이상 지속적인 균열 조사를 수행하였으며 축적된 데이터를 기반으로 철근비, 하부지층 형식, 단부처리 방법, 계절 영향 등에 따른 CRCP의 균열간격 및 균열폭의 특성을 분석하였으며 균열간격과 균열폭의 상관관계도 분석하였다.

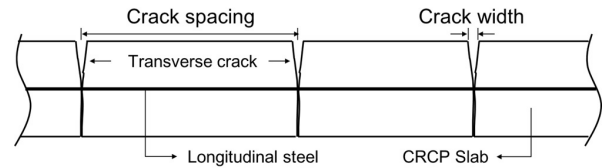


Fig. 1 Crack Spacing and Crack Width in CRCP

2. 균열간격 및 균열폭 조사

본 연구에서 수행된 균열간격 및 균열폭 조사는 두 CRCP 구간에서 수행되었다. 각 CRCP 구간의 주요 차이점은 슬래브 하부층의 구성이 다른 것이다. 하나의 CRCP 구간의 슬래브 하부는 아스팔트 부착방지층(Asphalt bond breaker layer)이 구성되어 있으며, 다른 CRCP 구간은 부착방지층이 없이 슬래브 하부에 바로 린콘크리트 하부층(Lean concrete base layer)을 사용하였다. 두 CRCP 구간은 약 25km 정도(동서 약 1km, 남북 약 24km) 떨어져 있으며, 일기 변화 등 환경적 조건과 지역적 조건이 유사하다.

2.1. 아스팔트 부착방지층을 사용한 CRCP

아스팔트 부착방지층을 사용한 CRCP(A-CRCP라 칭함)는 2002년 10월에 두께 300mm, 폭 8.2m, 연장 390m로 건설되었으며, CRCP 슬래브와 하부 린콘크리트층 사이에 아스팔트 부착방지층을 설치하였다. A-CRCP의 종방향 철근비는 종방향 위치에 따라 0.6%(C1), 0.7%(C2) 및 0.8%(C3)로 설계되었으며, 슬래브의 중간 깊이에 종방향 철근을 설치하였다. 각 철근

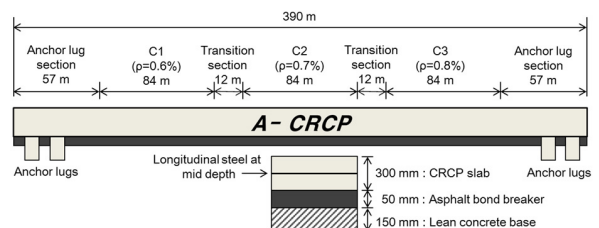


Fig. 2 A-CRCP Section

비 구간(C1, C2, C3)은 약 84m로 구성되어 있으며, 각 구간 사이에는 약 12m의 변이구간을 두었다. A-CRCP의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다.

A-CRCP 구간의 횡방향 균열 발생 과정을 콘크리트 타설 직후부터 지속적으로 조사하여 각 횡방향 균열의 발생 위치와 발생 시기를 기록하였다. 횡방향 균열 발생 조사 시기를 Table 1에 나타내었다. 균열 조사는 C1, C2, C3 모든 구간에서 수행되었다. 횡방향 균열의 번호는 첫 번째 숫자가 조사 시기를 나타내며 두 번째 숫자는 해당 조사 시기에서 발견된 균열의 순서를 나타낸다. 예를 들어 횡방향 균열 번호 5-2는 5차 조사인 2005년 5월의 조사에서 발견되었으며, 시점으로부터 2번째로 발견된 균열이다.

균열폭 측정은 2014년 5월에 수행된 10차 및 2014년 12월에 수행된 11차 조사에서 수행되었다. 계절적 영향에 따른 균열폭의 거동을 분석하기 위하여 여름철과 겨울철에 각각 조사를 수행하였다. 균열폭은 균열자를 사용하여 슬래브 표면에서 측정하였다. 균열폭 측정은 주행차로에서 수행되었으며, 동일한 횡방향 균열에서 중앙부와 휠패스(Wheel-pass)에서 각각 측정하였다. 겨울철 균열폭 측정은 CRCP 슬래브 표면에 다이아몬드 그라인딩이 적용된 후에 수행되었다. 다이아몬드 그라인딩은 주행차로 휠패스 구간에만 적용되었으며, C1 구간은 표면으로부터 약 9mm, C2와 C3 구간은 약 5mm의 두께가 절삭되었다. 따라서 다이아몬드 그라인딩이 적용된 휠패스 구간과 다이아몬드 그라인딩이 적용되지 않은 주행차로의 중앙부에서 각각 균열폭을 측정하였다.

Table 1. Crack Survey Time of A-CRCP

Survey no.	Time of survey	Crack no.	Note
A-CRCP paving	October 2002	-	
1	After paving	1-n	
2	September 2003	2-n	
3	July 2004	3-n	
4	October 2004	4-n	
5	May 2005	5-n	
6	October 2007	6-n	
7	September 2010	7-n	
8	May 2011	8-n	Free end construction
9	August 2012	9-n	
10	May 2014	10-n	Crack width investigation
11	December 2014	11-n	Diamond grinding, Crack width investigation

2.2. 린콘크리트 하부층을 사용한 CRCP

린콘크리트 하부층을 사용한 CRCP(L-CRCP라 칭함)는 두께 280mm, 폭 8.2m, 연장 500m로 2012년 9월 건설되었다. 종방향 철근비는 0.68%이며, 슬래브의 중간 깊이에 종방향 철근을 설치하였다. L-CRCP는 린콘크리트 하부층 위에 콘크리트 슬래브를 직접 타설하여 층간의 부착을 허용하였으며, 양측 단부에는 팽창줄눈이 설치되어 있으며, 줄눈콘크리트 포장과 연결되어 있다. L-CRCP의 개념도를 Fig. 3에 나타내었다.

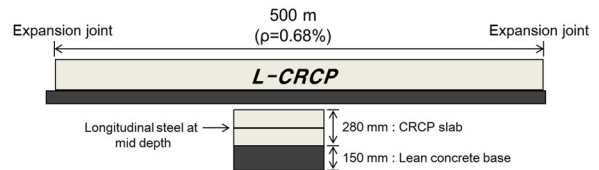


Fig. 3 L-CRCP Section

L-CRCP 역시 콘크리트 타설 직후 횡방향 균열의 발생 과정을 지속적으로 조사하였다. Table 2는 L-CRCP의 횡방향 균열 조사 시기를 보여준다. 균열 번호는 A-CRCP와 동일한 방법으로 조사시기-발견순서로 기입하였다. 균열폭은 13차 균열 조사에서 측정하였다.

Table 2. Crack Survey Time of L-CRCP

Survey no.	Time of survey	Crack no.	Note
L-CRCP paving	October 26, 2012	-	
1	After paving	1-n	
2	November 8, 2012	2-n	
3	November 15, 2012	3-n	
4	November 21, 2012	4-n	
5	November 29, 2012	5-n	
6	December 18, 2012	6-n	
7	January 25, 2013	7-n	
8	January 30, 2013	8-n	
9	March 6, 2013	9-n	
10	May 7, 2013	10-n	
11	November 11, 2013	11-n	
12	June 18, 2014	12-n	
13	January 21, 2015	13-n	Crack width investigation

3. 균열간격 특성 분석

각 CRCP 구간별 횡방향 균열간격을 분석하기 위하여 균열 조사를 통해 조사 시기별로 발생한 횡방향 균열

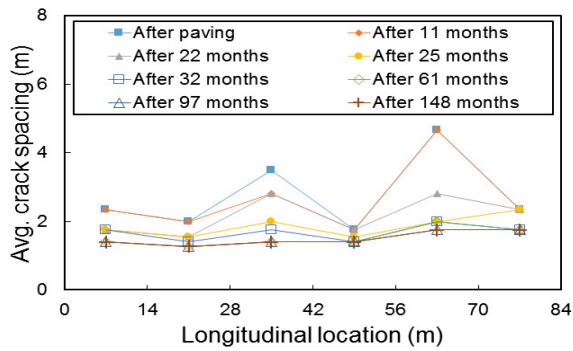
의 개수를 사용하여 평균 균열간격을 산출하였다. 평균 균열간격은 각 조사 구간별 연장을 균열 누적개수에 1

을 더한 값으로 나누어 산출하였으며, Table 3에 나타내었다.

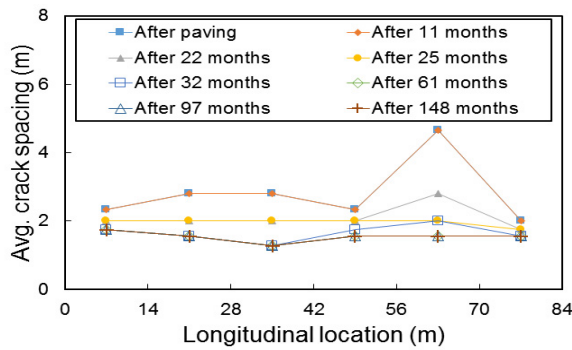
Table 3. Number of Transverse Cracks and Average Crack Spacing

CRCP section	Crack survey time	Number of cracks	Average crack spacing(m)
A-CRCP C1 (steel ratio 0.6%, length 84m)	After construction	28	2.897
	2003. 09.	29	2.800
	2004. 07.	35	2.333
	2004. 10.	39	2.100
	2005. 05.	44	1.867
	2007. 10.	50	1.647
	2010. 09.	51	1.615
	2011. 05.	51	1.615
	2012. 07.	51	1.615
	2014. 05.	51	1.615
	2014. 12.	51	1.615
	Current	51	1.615
	A-CRCP C2 (steel ratio 0.7%, length 84m)	After construction	26
2003. 09.		26	3.111
2004. 07.		35	2.333
2004. 10.		37	2.211
2005. 05.		46	1.787
2007. 10.		49	1.680
2010. 09.		49	1.680
2011. 05.		49	1.680
2012. 07.		49	1.680
2014. 05.		49	1.680
2014. 12.		49	1.680
Current		49	1.680
A-CRCP C3 (steel ratio 0.8%, length 84m)		After construction	40
	2003. 09.	45	1.826
	2004. 07.	53	1.556
	2004. 10.	56	1.474
	2005. 05.	62	1.333
	2007. 10.	67	1.235
	2010. 09.	72	1.151
	2011. 05.	72	1.151
	2012. 08.	72	1.151
	2014. 05.	72	1.151
	2014. 12.	72	1.151
	Current	72	1.151
	L-CRCP (steel ratio 0.68%, length 500m)	2012. 11. 01	73
2012. 11. 08		115	4.310
2012. 11. 15		118	4.202
2012. 11. 21		125	3.968
2012. 11. 29		136	3.650
2012. 12. 18		149	3.333
2013. 01. 25		149	3.333
2013. 01. 30		165	3.012
2013. 03. 06		190	2.618
2013. 05. 07		191	2.604
2013. 11. 11		208	2.392
2014. 06. 18		244	2.041
2015. 01. 21		297	1.678
Current		297	1.678

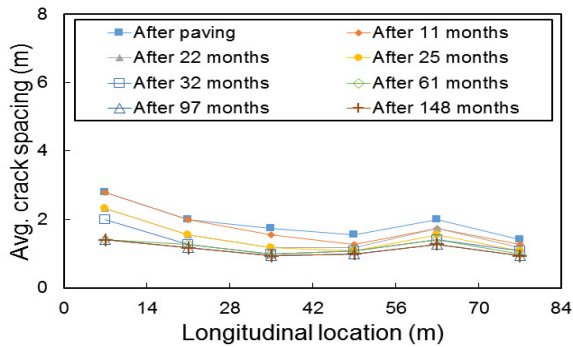
시간 경과에 따른 각 CRCP의 종방향 구간별 평균 균열간격 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 철근비 0.6%의 A-CRCP C1, Fig. 4(b)는 철근비 0.7%의



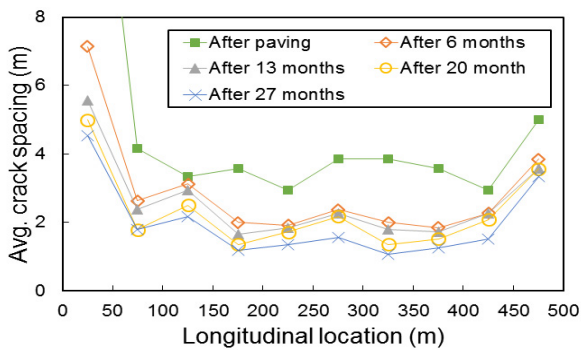
(a) A-CRCP C1



(b) A-CRCP C2



(c) A-CRCP C3



(d) L-CRCP

Fig. 4 Average Crack Spacing Depending on Longitudinal Location

A-CRCP C2, Fig. 4(c)는 철근비 0.8%의 A-CRCP C3, 그리고 Fig. 4(d)는 철근비 0.68%의 L-CRCP 구간을 보여준다. 그림의 가로축은 CRCP의 종방향 구간을 의미하며, 세로축은 종방향 구간별 평균 균열간격을 나타낸다.

A-CRCP C1 구간과 A-CRCP C2 구간의 종방향 구간별 평균 균열간격 변화를 보면 초기에는 종방향 위치별로 균열간격이 다양하게 발생한 것을 알 수 있으나 약 25개월부터는 모든 종방향 구간에서 약 2m 내외로 평균 균열간격이 유사하게 발생하는 것을 알 수 있다. A-CRCP C3 구간의 경우는 초기부터 종방향 구간별로 비교적 유사한 크기의 균열간격을 가지며 시간이 경과할수록 균열간격이 좁아지는 것을 알 수 있다.

L-CRCP 구간의 평균 균열간격은 양측 단부부근에서 상대적으로 넓은 것을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 전체 구간에서 평균 균열간격은 좁아지지만 양측 단부에서 50m 이내의 구간은 중앙부에 비하여 균열간격이 확연히 넓은 것을 알 수 있다. A-CRCP에서는 양단의 균열간격과 중앙부에서의 균열간격의 차이가 크지 않았지만 L-CRCP에서 발생한 단부에서와 중앙부에서의 균열간격의 차이는 단부의 구성 형식이 서로 다르기 때문에 나타난 결과로 분석된다. A-CRCP의 경우 양측 단부에 앵커리그가 설치되어 있어 모든 구간에서 슬래브의 수축팽창에 대한 억제력이 유사하게 발생하지만, L-CRCP의 단부는 앵커리그가 설치되지 않고 자유단부로 구성되어 있기 때문에 단부 부근은 슬래브의 수축팽창에 대한 억제력이 중앙부에 비해 작게 된다. 따라서 L-CRCP는 단부 부근에서는 중앙부에 비하여 균열이 적게 발생하여 균열간격이 넓은 것으로 분석된다.

공용 기간에 따른 평균 균열간격 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 공용 기간이 증가함에 따라 추가적인 횡방향 균열이 발생하여 평균 균열간격이 점차 좁아지는 것을 알 수 있다. 철근비 0.6%의 A-CRCP C1 구간과 0.7%의 A-CRCP C2 구간의 균열간격은 양생 초기에는 약 3m, 공용 기간이 약 3년 후인 5차 조사부터는 약 1.6m의 균열간격을 유지하며, 균열간격의 변화가 유사하게 발생하는 것을 알 수 있다. 철근비 0.8%의 A-CRCP C3 구간은 양생 초기부터 균열간격이 약 2m로 C1과 C2 구간에 비하여 확연하게 좁게 발생하였으며, 공용연수 약 3년 후인 5차 조사부터는 약 1.15m의 균열간격을 유지하고 있다. CRCP는 일반적으로 철근비가 높아지면 종방향 철근이 환경하중에 의한 콘크리트의 수축거동을 제지하는 현상이 커지기 때문에 콘크리트의 인

장응력이 증가하게 되며 결과적으로 더 많은 횡방향 균열이 발생하게 된다. 따라서 A-CRCP의 경우 철근비 0.6%인 C1, 0.7%인 C2 구간의 경우는 철근비의 효과가 뚜렷하지 않지만 0.8%인 C3에서는 C1과 C2 구간에 비하여 좁은 균열간격을 보여주는 것을 알 수 있다.

L-CRCP의 단부는 이미 언급한 바와 같이 자유단부이며, A-CRCP의 단부는 앵커리그가 설치되어 있다. 따라서 L-CRCP의 전체 구간의 평균 균열간격과 A-CRCP의 평균 균열간격의 비교로는 하부층 종류에 따른 영향을 파악하기는 어렵다. 따라서 L-CRCP의 전체 구간 평균 균열간격이 아닌 양측 단부로부터 100m를 제외한 중앙 300m 구간(L-0.68%-Central)과 양측 단부로부터 100m까지 총 200m 구간(L-0.68%-Terminal)으로 구분하여 분석하였다. L-CRCP의 단부로부터 100m 구간까지의 평균 균열간격은 약 2.4m이며, L-CRCP 중앙부의 평균 균열간격은 유사한 철근비가 사용된 A-CRCP C2 구간에 비해 균열간격이 좁게 발생하는 것으로 나타났다. 유사한 철근비가 사용되었음에도 L-CRCP에서의 균열간격이 더 좁게 발생하는 것은 아스팔트 부착방지층을 사용한 CRCP에 비해 린콘크리트가 설치된 CRCP에 균열이 더 많이 발생한다는 것을 의미한다. 이는 슬래브와 하부층 간의 직접적인 부착에 의한 마찰저항이 린콘크리트 기층을 사용한 CRCP가 더 크기 때문인 것으로 분석된다.

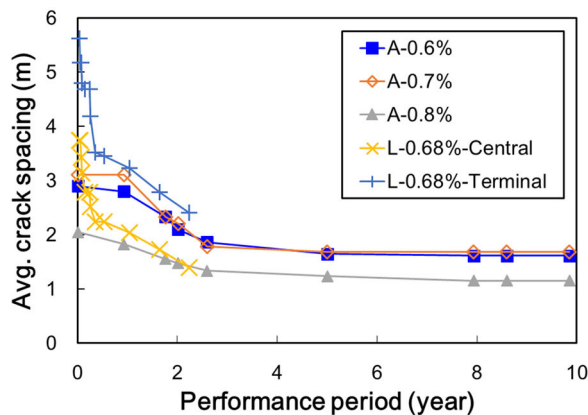


Fig. 5 Average Crack Spacing Depending on Performance Period

4. 균열폭 특성 분석

A-CRCP의 균열폭 특성 분석을 위한 조사는 2014년 5월의 10차 균열 조사와 2014년 12월의 11차 균열조사에서 수행하였다. 10차 조사는 대기 및 슬래브의 온도가 높

은 여름철의 균열폭 측정이며, 11차 조사는 대기 및 슬래브의 온도가 낮은 겨울철의 균열폭 측정이다. 여름철 균열폭 측정은 A-CRCP C1 구간과 A-CRCP C3 구간에서 수행되었다. 측정 위치는 주행차로의 중앙부와 휠패스에서 측정하였으며, 측정 결과 중앙부와 휠패스 위치의 균열폭은 거의 유사한 것으로 나타났다. A-CRCP C1 구간에서는 총 50개의 횡방향 균열에서 균열폭을 측정하였으며, A-CRCP C3 구간에서는 총 64개의 횡방향 균열에서 균열폭을 측정하였다. 여름철 A-CRCP에서의 횡방향 균열폭 측정 결과를 Table 4에 나타내었다. 균열폭 측정을 수행한 횡방향 균열을 발생 시기에 따라 구분하고 동일한 발생시기의 균열에 대해 평균 균열폭을 나타내었다.

Table 4. Crack Widths of A-CRCP in Summer

CRCP section	Crack no.	No. of cracks (EA)	Average crack width (mm)
A-CRCP C1 (steel ratio 0.6%)	1-n	27	0.347
	2-n	1	0.413
	3-n	6	0.319
	4-n	4	0.281
	5-n	5	0.300
	6-n	6	0.321
	7-n	1	0.213
	Total	50	0.329
A-CRCP C3 (steel ratio 0.8%)	1-n	34	0.254
	2-n	5	0.205
	3-n	7	0.230
	4-n	4	0.206
	5-n	6	0.302
	6-n	3	0.183
	7-n	5	0.120
	Total	64	0.235

여름철 A-CRCP 구간의 균열 발생 시기에 따른 횡방향 균열폭을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 가로축은 균열발생 후 경과된 시간을 의미하며, 세로축은 각 시기에 해당하는 평균 균열폭을 보여준다. 범례는 A-CRCP C1 구간의 경우 A-0.6%-S, A-CRCP C3 구간의 경우 A-0.8%-S로 표기하였다. 균열폭의 크기는 철근비가 높은 A-CRCP C3 구간의 경우 A-CRCP C1 구간의 경우보다 대체적으로 좁게 나타났다. 또한 최근에 발생한 균열일수록 균열폭이 다소 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 초기에 발생한 균열의 경우 어느 정도의 시간이 경과하면 그 이후로는 균열폭의 크기가 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 횡방향 균열폭의 크기는 초기에 좁게 발생하나 시간이 경과하면서 점

점 벌어진 후 일정한 크기로 수렴하는 것으로 판단된다.

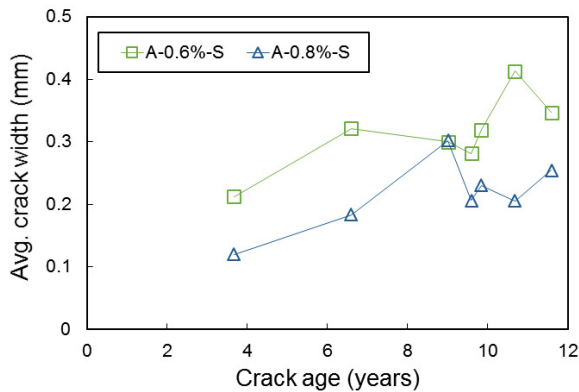


Fig. 6 Average Crack Width of A-CRCP in Summer

A-CRCP는 여름철 균열폭 조사 이후 주행차로 휠패스 구간에 다이아몬드 그라인딩이 적용되었다. 따라서 겨울철 A-CRCP의 균열 조사 결과는 다이아몬드 그라인딩이 적용된 휠패스 구간과 다이아몬드 그라인딩이 적용되지 않은 구간으로 구분하여 분석하였다. 횡방향 균열폭의 크기는 C1 구간에서 50개, C2 구간에서 34개, C3 구간에서 64개의 측정을 수행하였으며 횡방향 균열폭 측정 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Crack Widths of A-CRCP in Winter

Survey sections	Crack no.	No. of cracks (EA)	Average crack width (mm)	
			Center	Wheel pass (Diamond Grinding)
A-CRCP C1 (Steel ratio 0.6%)	1-n	27	0.459	0.257
	2-n	1	0.450	0.200
	3-n	6	0.400	0.213
	4-n	4	0.431	0.206
	5-n	5	0.445	0.190
	6-n	6	0.408	0.158
	7-n	1	0.450	0.225
	Total	50	0.442	0.228
A-CRCP C2 (Steel ratio 0.7%)	1-n	18	0.375	0.290
	3-n	6	0.354	0.288
	4-n	2	0.375	0.263
	5-n	6	0.375	0.292
	6-n	2	0.313	0.238
	Total	34	0.361	0.281
	A-CRCP C3 (Steel ratio 0.8%)	1-n	34	0.451
2-n		5	0.388	0.190
3-n		7	0.386	0.264
4-n		4	0.400	0.175
5-n		6	0.475	0.333
6-n		3	0.100	0.100
7-n		5	0.220	0.130
Total		64	0.409	0.240

겨울철 A-CRCP 구간의 균열 발생 시기에 따른 횡방향 균열폭을 Fig. 7에 나타내었다. 범례는 각 CRCP 구간에 다이아몬드 그라인딩이 적용되지 않은 주행차로 중앙부는 -WC, 다이아몬드 그라인딩이 적용된 휠패스는 -WD로 표기하였다. 다이아몬드 그라인딩이 적용되지 않은 주행차로 중앙부의 횡방향 균열폭은 전반적으로 C1 구간의 균열폭의 크기가 가장 넓게 측정된 것을 알 수 있다. 또한 C2 구간의 1차~5차 균열의 균열폭의 크기는 C1 구간에 비해 다소 좁게 측정된 것을 알 수 있다. C3 구간의 6차, 7차 균열(최근 발생 균열)의 균열폭의 크기는 약 0.2mm로 다른 구간의 균열폭보다 매우 작게 측정되었으나 그 이전에 발생한 균열의 균열폭은 다른 구간의 균열폭과 유사해지는 것을 알 수 있다. 따라서 겨울철 균열폭 조사 결과에서도 여름철과 같이 발생 시기가 오래된 횡방향 균열의 균열폭은 과도하게 벌어지지 않으며 일정 균열폭으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 균열 발생 시기가 오래되지 않은 경우에는 철근비가 높을수록 균열폭이 작은 경향을 보이지만 균열 발생 후 시간이 오래 경과되면 균열폭의 차이가 거의 없어지는 것을 알 수 있다.

다이아몬드 그라인딩으로 표면을 절삭한 경우에는 균열 발생 시기에 따른 균열폭의 변화는 유사한 경향을 보이지만 균열폭의 크기는 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 다이아몬드 그라인딩으로 표면을 약 9mm 정도 절삭한 C1 구간의 균열폭의 경우와 표면을 약 5mm 정도 절삭한 C2와 C3 구간의 경우를 비교하면 C1 구간의 균열폭의 감소가 더욱 큰 것을 알 수 있다. 따라서 CRCP의 횡방향 균열폭의 크기는 표면에서 넓게 관찰되더라도 슬래브 내부로 조금만 들어가도 균열폭이 상당히 좁아지는 것을 알 수 있다.

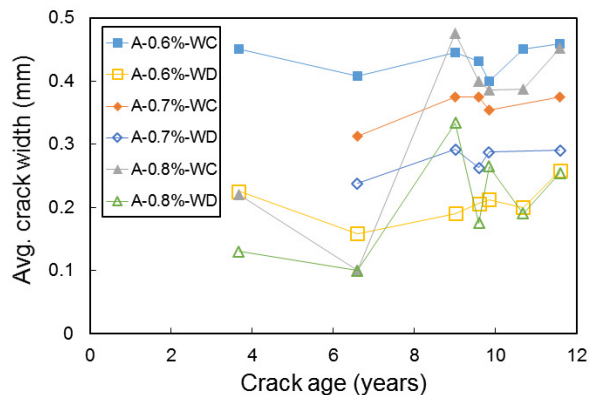


Fig. 7 Average Crack Width of A-CRCP in Winter

A-CRCP 구간별 계절에 따른 균열폭의 크기를 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 균열폭의 크기는 겨울철보

다 여름철에 좁게 나타나는 것을 알 수 있다. 계절에 관계없이 철근비가 높은 C3 구간의 균열폭 크기가 C1 구간에 비해 전반적으로 좁은 것을 알 수 있으나, 발생 시기가 오래된 균열에서는 겨울철에는 두 구간의 균열폭의 차이가 그리 크지 않은 것을 알 수 있다.

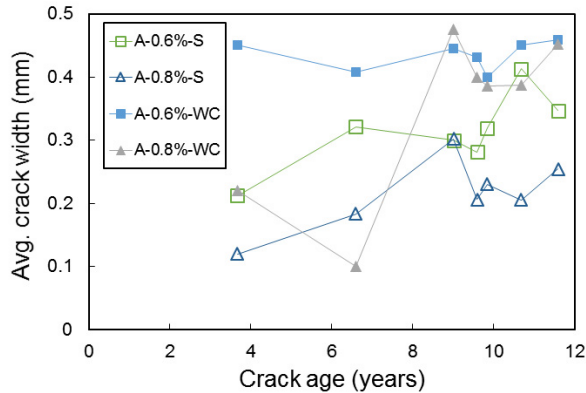


Fig. 8 Seasonal Effect on Crack Width at A-CRCP

L-CRCP의 균열폭 측정은 겨울철인 2015년 1월의 13차 균열조사에서 수행되었다. 조사 구간은 차량 진행 방향에 따라 L-CRCP의 시점인 자유단부로부터 100m 까지인 단부 부근 구간과 270~350m 구간의 중앙부 구간에서 수행되었다. 균열폭 측정 위치는 주행차로에서 횡방향을 따라 가운데 부분(Center), 휠패스(Wheel pass) 및 모서리(Edge)에서 균열자를 사용하여 측정하였다. Table 6에 나타낸 바와 같이 L-CRCP 중앙부 270~350m 구간에서는 총 63개의 횡방향 균열에서 균열폭을 측정하였으며, 측정 구간에서 3차(3-n), 7차(7-n), 10차(10-n) 균열 조사에서 추가 균열은 발생하지 않았다. 표에는 조사 구간의 균열 발생 시기에 따른

Table 6. Crack Widths in L-CRCP Central Section

Crack no.	No. of cracks	Average crack width (mm)			
		Center	Wheel pass	Edge	Average
1-n	13	0.233	0.221	0.158	0.204
2-n	7	0.268	0.254	0.157	0.226
4-n	2	0.388	0.400	0.325	0.371
5-n	3	0.292	0.283	0.183	0.253
6-n	4	0.250	0.219	0.156	0.208
8-n	2	0.200	0.188	0.150	0.179
9-n	4	0.200	0.194	0.144	0.179
11-n	4	0.206	0.213	0.144	0.188
12-n	9	0.214	0.192	0.131	0.179
13-n	15	0.157	0.147	0.113	0.139
Total	63	0.220	0.208	0.148	0.192

횡방향 균열의 개수와 횡방향 측정 위치에 따른 평균 균열폭을 나타내었다.

L-CRCP 단부 부근 구간의 균열폭 측정 결과를 Table 7에 나타내었다. 표에는 조사 구간의 발생 시기에 따른 횡방향 균열의 개수와 측정 위치에 따른 평균 균열폭을 나타내었다. 단부 부근 구간에서는 총 36개의 횡방향 균열에서 균열폭을 측정하였다. 측정 구간에서 4차(4-n), 7차(7-n), 13차(13-n) 조사에서 균열은 발생하지 않았다.

Table 7. Crack Widths in L-CRCP Terminal section

Crack no.	No. of cracks	Average crack width (mm)			
		Center	Wheel pass	Edge	Average
1-n	7	0.504	0.596	0.350	0.483
2-n	3	0.525	0.517	0.408	0.483
3-n	3	0.317	0.433	0.142	0.297
5-n	1	0.475	0.400	0.375	0.417
6-n	1	0.475	0.425	0.175	0.358
8-n	3	0.483	0.533	0.358	0.458
9-n	5	0.310	0.430	0.235	0.325
10-n	1	0.375	0.525	0.100	0.333
11-n	3	0.275	0.575	0.200	0.350
12-n	9	0.386	0.419	0.214	0.340
Total	36	0.408	0.490	0.265	0.387

L-CRCP의 균열폭 조사 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 가로축은 균열 발생 후 경과 시간으로 오른쪽으로 갈수록 초기에 발생한 횡방향 균열을 의미하며, 세로축은 평균 균열폭을 나타낸다. 범례 표기는 중앙부 구간의 경우 주행차로 가운데 부분은 L-C-WC, 휠패스는 L-C-WW, 모서리는 L-C-WE, 세 위치의 평균은 L-C-WA로 표기하였다. 단부 부근 구간의 경

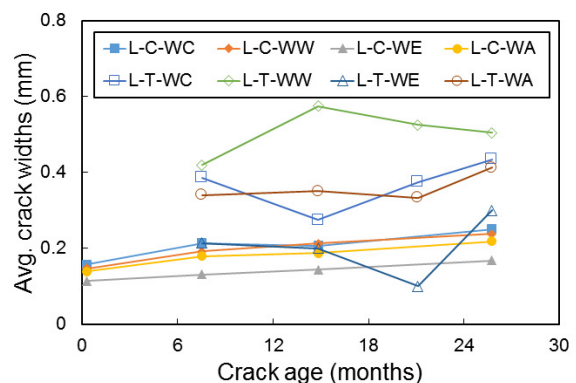


Fig. 9 Crack Widths in L-CRCP

우 주행차로 가운데 부분은 L-T-WC, 휠패스는 L-T-WW, 모서리는 L-T-WE, 세 위치의 평균은 L-T-WA 로 표기하였다.

L-CRCP의 중앙부 구간과 단부 부근 구간의 균열폭을 비교하면 단부 부근 구간의 균열폭이 더욱 큰 것을 알 수 있으며, 중앙부의 평균 균열폭은 약 0.2mm 내외, 단부 부근 구간의 평균 균열폭은 약 0.4mm 이내로 나타났다. 따라서 동일한 철근비와 두께를 가지는 CRCP에서 단부가 자유단부인 팽창줄눈으로 처리되었을 경우에는 종방향 위치에 따라 균열폭의 크기가 다르며, 단부 부근 구간의 균열폭이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

L-CRCP의 중앙부 구간 균열폭은 발생 시기가 빠를 수록 균열폭이 다소 커지는 경향이 있는 것을 알 수 있으며, 단부 부근 구간도 다소 불규칙적이기는 하지만 대체적으로 시간이 경과하면 균열폭이 커지는 경향을 보인다. 따라서 횡방향 균열은 균열 발생 후 시간이 경과 할수록 균열이 더 벌어진다는 것을 알 수 있다.

횡방향 위치에 따른 균열폭 크기를 살펴보면 슬래브의 측면 모서리 부분에서 가장 작은 것을 알 수 있다. 270~350m의 CRCP 중앙부에서는 주행차로 가운데 부분과 휠패스 부분의 균열폭이 거의 유사하지만 자유단부 부근에서는 휠패스 부분의 균열폭이 가장 넓은 것을 알 수 있다. L-CRCP는 A-CRCP와 달리 차량의 통행이 많은 구간이므로 균열부의 미소한 마모 및 탈리 등의 영향으로 휠패스 위치의 균열폭이 다소 넓은 경향을 보이는 것으로 판단된다.

겨울철에 측정된 A-CRCP 구간과 L-CRCP 구간의 횡방향 균열폭을 균열 발생 후 경과 시간에 따라 Fig. 10에 나타내었다. L-CRCP의 경우는 주행차로에서 횡방향으로 가운데 부분과 휠패스 부분의 균열폭의 평균으로 나타내었다. A-CRCP에 발생한 횡방향 균열은 초

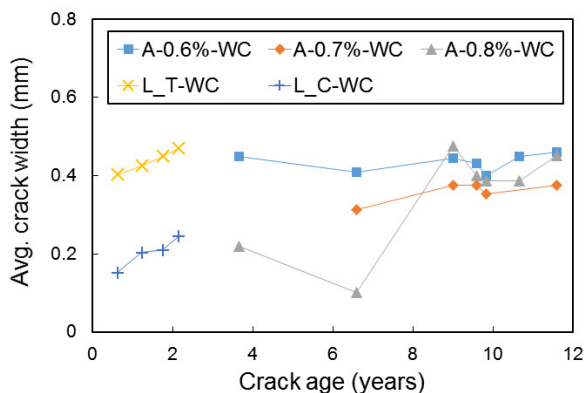


Fig. 10 Crcaak Width Comparison between A-CRCP and L-CRCP

기 균열 발생 후 약 12년이 경과하였으며 약 4년 이내에는 추가적으로 발생한 균열이 없는 반면 L-CRCP는 공용 기간이 비교적 짧은 것을 알 수 있다. 두 구간 모두에서 최근에 발생한 균열의 균열폭이 초기에 발생하여 오랜 시간이 경과한 균열의 균열폭 보다 다소 좁은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 균열 발생 후 시간 경과에 비례하여 균열폭이 넓어지지는 않고 어느 정도의 크기로 수렴하는 것을 알 수 있다.

5. 균열간격과 균열폭 상관관계 분석

여름철 A-CRCP의 균열간격과 균열폭의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 가로축은 균열폭을 측정 한 횡방향 균열과 가장 가까운 두 개의 횡방향 균열까지의 평균 균열간격이며, 세로축은 해당 균열의 균열폭을 보여준다. 그림을 보면 철근비가 높은 A-CRCP C3 구간에서의 균열간격과 균열폭이 철근비가 낮은 A-CRCP C1 구간에 비해 다소 작은 것을 알 수 있다. A-CRCP C1 구간의 평균 균열폭은 약 0.33mm이며, A-CRCP C3 구간의 평균 균열폭은 약 0.24mm이다. 따라서 철근비가 높으면 균열간격과 균열폭이 함께 작아지는 것으로 분석된다.

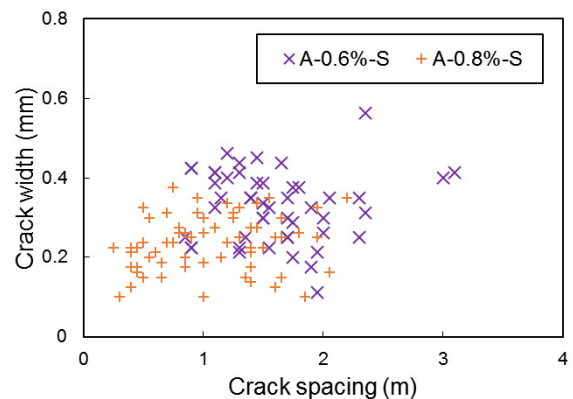


Fig. 11 Relationship between Crack Spacing and Crack Width at A-CRCP in Summer

겨울철에 측정된 A-CRCP의 균열간격과 균열폭의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 철근비가 0.6%와 0.7%인 C1과 C2 구간은 균열폭과 균열간격의 분포 정도가 유사한 것을 알 수 있다. 철근비가 0.8%인 C3 구간은 균열간격과 균열폭이 넓게 분포되어 있으며 균열간격과 균열폭이 모두 작은 경우도 상당히 많이 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 겨울철의 측정 결과에서도 여름철 결과와 같이 철근비가 높으면 균열간격과 균열폭이 모

두 작아지는 경향을 볼 수 있다.

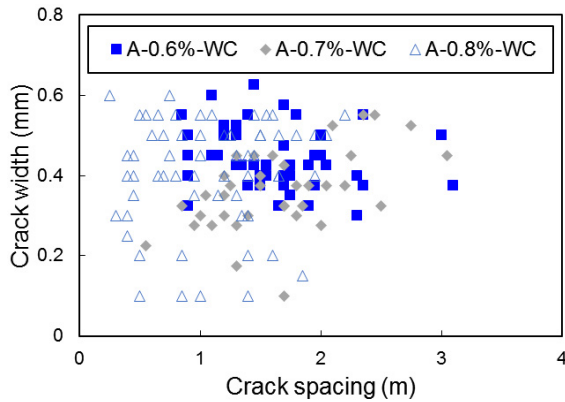


Fig. 12 Relationship between Crack Spacing and Crack Width at A-CRCP in Winter

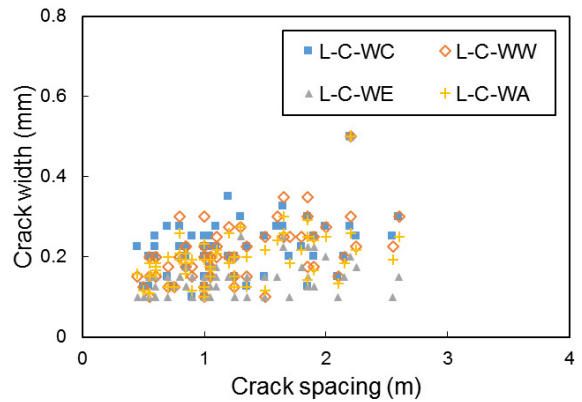
A-CRCP 구간의 횡방향 균열 발생 조사를 통해 산정한 C1과 C3 구간의 평균 균열간격 및 여름철과 겨울철에 측정된 평균 균열폭을 비교하여 Table 8에 나타내었다. 표를 보면 철근비가 높은 C3 구간에서의 균열간격이 작으며 균열폭도 작은 것을 알 수 있다. 또한 여름철에 슬래브가 팽창하여 균열폭이 감소하는 경우에는 철근비에 따른 균열폭의 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

Table 8. Relationship between Crack Spacing and Crack Width at A-CRCP

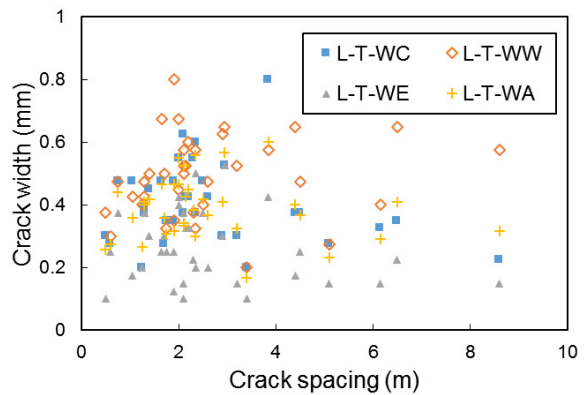
Section	Average crack spacing(m)	Average crack width (mm)	
		summer	winter
A-CRCP C1	1,596	0.329	0.442
A-CRCP C3	1,074	0.235	0.409

겨울철에 측정된 L-CRCP 횡방향 균열의 균열간격과 균열폭의 관계를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)는 중앙부 270~350m 구간의 균열간격과 균열폭의 관계를 보여준다. 균열폭이 다소 넓은 중앙부와 휠패스 위치에서 측정된 균열폭과 균열간격과의 관계를 보면 균열 간격이 넓을수록 균열폭도 넓어지는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 13(b)는 단부 부근 구간의 균열간격과 균열폭의 관계를 보여준다. 중앙부와 휠패스 위치에서 측정된 균열폭과 평균 균열간격이 약 4m 이내의 균열들을 보면 균열간격이 넓어질수록 균열폭도 넓어지나 균열간격이 4m보다 커지더라도 균열폭은 이에 비례하여 커지는 않는 것을 알 수 있다. 또한 Table 9에 나타낸 바와 같이 균열간격이 넓은 단부 부근 구간의 균열폭과 균열간격이 좁은 중앙부 구간의 균열폭을 비교하면 균

열간격이 넓은 단부 부근 구간에서의 균열폭이 뚜렷이 더 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 균열폭은 균열간격에 따라 영향을 받는 것으로 분석된다.



(a) Central Section



(b) Terminal Section

Fig. 13 Relationship between Crack Spacing and Crack Width at L-CRCP in Winter

Table 9. Relationship between Crack Spacing and Crack Width at L-CRCP

Section	Average crack spacing(m)	Average crack width (mm)			
		Center	Wheel path	Edge	Average
L-CRCP Central	1,245	0.220	0.208	0.148	0.192
L-CRCP Terminal	2,649	0.408	0.490	0.265	0.387

6. 결론

본 연구에서는 CRCP의 횡방향 균열 특성을 분석하기 위하여 횡방향 균열간격과 균열폭을 아스팔트 부차방지층을 사용한 A-CRCP 구간과 린콘크리트 하부층을 사용한 L-CRCP 구간에서 10년이 넘는 기간 동안

측정하여 자료를 분석함으로써 철근비, 하부지지층 형식, 단부처리 방법, 계절 영향 등이 CRCP의 균열간격, 균열폭 및 상호 관계에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하였다. 이러한 연구를 통해 CRCP의 균열 특성에 대한 그동안 적립된 사항을 확인하고 또한 측정 자료를 기반으로 논란이 있는 사항에 대한 근거를 마련하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. CRCP의 시종점 단부에 앵커리그를 설치한 경우와 팽창줄눈을 두고 앵커리그를 설치하지 않은 경우를 비교하면, 앵커리그가 없는 CRCP의 중앙부 구간과 앵커리그를 설치한 CRCP는 중방향을 따라 균열간격이 유사하게 발생하지만, 앵커리그를 설치하지 않은 CRCP의 단부 구간은 중앙부 구간에 비해 균열이 적게 발생하여 균열간격이 넓어지게 된다.
2. 동일한 철근비가 사용된 CRCP에서 슬래브 하부에 아스팔트 부착방지층을 사용한 경우와 린콘크리트 부착 기층을 사용한 경우를 비교하면 린콘크리트를 사용한 CRCP에서 균열이 더 많이 발생하여 균열간격이 좁게 된다. 이는 린콘크리트 기층을 사용한 CRCP는 슬래브와 하부층 간의 직접적인 부착에 의한 층간 수평마찰저항이 크기 때문에 콘크리트 슬래브의 수축에 대한 저항성 증대 및 이에 따른 콘크리트의 인장 응력 증가로 인해 나타나는 것으로 분석된다.
3. CRCP의 균열은 최근에 발생한 균열일수록 균열폭이 다소 작게 된다. 하지만 발생 후 시간이 오래 경과된 균열의 경우는 어느 정도의 시간이 경과하면 그 이후로는 균열폭의 크기에 변화가 거의 없게 된다. 따라서 균열폭의 크기는 초기에는 좁게 발생하나 시간이 경과하면서 점점 벌어진 후 일정한 크기로 수렴하게 된다.
4. CRCP의 균열폭 크기는 철근비가 높아지면 대체로 좁아지게 된다. 계절적으로는 여름철에 균열폭이 닫힐 경우에는 철근비에 따른 균열폭의 차이가 뚜렷하나, 겨울철에 균열폭이 열릴 경우에는 오래되지 않은 균열에 대한 철근비에 따른 균열폭 차이는 확인하지만 균열 발생 시기가 오래된 균열에서는 철근비에 따른 균열폭 차이가 미소해진다.
5. 다이아몬드 그라인딩으로 표면을 수 mm 정도 절삭 하더라도 균열폭이 대폭 감소하게 된다. 이는 CRCP의 횡방향 균열폭의 크기는 표면에서 넓게 관찰되더라도 슬래브 내부로 조금만 들어가도 균열폭이 상당히 좁아진다는 것을 의미한다.

6. 동일한 철근비와 두께를 가지는 CRCP에서 시종점 단부가 자유단부인 팽창줄눈으로 처리되었을 경우에는 중방향 위치에 따라 균열폭의 크기가 다르게 되며 단부 부근 구간의 균열폭이 가장 커지게 된다.
7. 횡방향 위치에 따른 균열폭의 크기는 슬래브의 측면 모서리 부분에서 가장 작으며, 교통량이 많은 구간일 수록 주행차로 가운데 부분과 휠패스 부분의 균열폭의 차이가 증가하여 휠패스 부분의 균열폭이 가장 넓어지게 된다.
8. 본 연구를 통해 CRCP에서 균열간격이 작아지는 요인이 있을 경우에는 이러한 요인이 균열폭도 작아지게 하기 때문에 궁극적으로는 균열간격과 균열폭은 서로 연관되어 있는 것으로 분석된다. 예를 들어 철근비가 높아지면 평균 균열간격과 평균 균열폭이 함께 작아지게 되며, 이는 일반적으로 균열간격과 균열폭은 연관이 있다는 것을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A2A2A01006554).

REFERENCES

- Ahn, S. S. (2006). "A comparative study of CRCP and JCP performance with 20-year field data in Jung-bu Expressway," Doctoral Dissertation, Hanyang University.
- FHWA (1993). "Report on the 1992 U.S. tour of European concrete highways," Report No. FHWA-SA-93-012, Federal Highway Administration.
- FHWA (2007). "Long-life concrete pavements in Europe and Canada," Report No. FHWA-PL-07-027, Federal Highway Administration.
- Ha, S. J., Yeon, J. H. and Won, M. C., (2012a). "CRCP ME Design Guide," Research Report 0-5832, Texas Tech University.
- Ha, S. J., Yeon, J., H., Choi, B., H., Jung, Y., S., Zollinger, D., G., Wimsatt, A., and Won., M., C. (2012b). "Development mechanistic-empirical design for CRCP," Research Report 0-5832-1, Texas Tech University.
- Kim, S. M., Cho, B. H. and Kwon, S. M. (2006). "Behavior of continuously reinforced concrete pavement under moving vehicle loads and effect of steel ratio," International Journal of Highway Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 119-130.
- McCullough, B. F. and Dossey, T. (1999a). "Considerations for high-performance concrete paving: recommendations from 20 years of field experience in Texas," Transportation Research Record, No. 1684, pp. 17-24.
- McCullough, B. F. and Dossey, T. (1999b). "Controlling early-age

- cracking in continuously reinforced concrete pavement observations from 12 years of monitoring experimental test sections in Houston, Texas," *Transportation Research Record*, No. 1684, pp. 35-43.
- Mokarem, D. W., Galal, K. A. and Sprinkel, M. M. (2007). "Performance evaluation of bonded concrete pavement overlays after eleven years," *Transportation Research Record*, No. 2005, pp. 1-16.
- Nam, J. H., Kim, D. H., Choi, S. and Won, M. C. (2007). "Variation of crack width over time in continuously reinforced concrete pavement," *Transportation Research Record*, No. 2037, pp. 3-11.
- Plessis, L., Strauss, P. and Kilian, A. (2011). "Monitoring the behaviour of thin reinforced concrete pavements through accelerated pavement testing," *Geotechnical Special Publication*, pp. 43-50.
- Roesler, J. R., Popovics, J. S., Rancho, J. L., Mueller, M. and Lippert, D. (2005). "Longitudinal cracking distress on continuously reinforced concrete pavements in illinois," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 19, No. 4, pp. 331-338.
- Ryu, S. W., Park M. Y., Nam J. H., An Z. O., Bae J. O., Cho Y. H. and Lee S. W. (2009). "Initial behavior of thin-bonded continuously reinforced concrete overlay CRCO on aged jointed concrete pavement," *GeoHunan International Conference, Geotechnical Special Publication*, pp. 101-106.
- Ryu, S. W., Saraf, S. and Won, M. C. (2012). "Project level performance database for rigid pavements in Texas, II," *Research Report 0-6274-1*, Texas Tech University.
- Suh, Y. C., Hankins, K., and McCullough, B. F. (1992). "Early-age behavior of continuously reinforced concrete pavement and calibration of the failure prediction model in CRCP-7 program," *Research Report 1244-3*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Sun, R. J., Cobos, L. and Won, M. C. (2011a). "Behavior of the longitudinal construction joint of continuously reinforced concrete pavement," *Geotechnical Special Publication*, No. 212, ASCE, pp. 200-207.
- Sun, R. J., Won, H. and Won, M. C. (2011b) "The application and early-age behaviors of continuously reinforced bonded concrete overlay of distressed jointed concrete pavements," *Geotechnical Special Publication*, No. 212, pp. 208-215.
- Volle, T. H. (2001). "Thin bonded concrete overlays in illinois: preliminary report on performance," *Transportation Research Record*, No. 1778, pp. 156-163.