

연속철근 콘크리트 포장 단부 및 수평균열 거동 실험적 분석

Experimental Analysis of Terminus and Horizontal Crack Behaviors in Continuously Reinforced Concrete Pavement

조영교	Cho, Young Kyo	경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (E-mail : brain@khu.ac.kr)
김성민	Kim, Seong-Min	정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)
안주옥	An, Zuog	정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : zoan@khu.ac.kr)
한승환	Han, Seung Hwan	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (E-mail : hansu@ex.co.kr)

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the necessity of the anchor lug system in continuously reinforced concrete pavement(CRCP) by comparing longitudinal displacements of CRCPs with and without anchor lugs, and to investigate the effect of horizontal cracking on CRCP performance by measuring the vertical displacements. The measurements before and after the anchor lug section was separated were conducted for 12 days in June, and for 14 days in August after the abrupt displacements according to cutting disappeared, respectively. This short term measurement results showed that when anchor lugs were installed, a daily displacement variation at any location was less than 0.1mm; therefore, longitudinal movements were negligibly small. When there were no anchor lugs, longitudinal displacements mainly occurred near the free end and the displacement variation was small; therefore, an expansion joint system seems to be employed at a CRCP terminus without installing anchor lugs. However, further studies are needed to verify the terminus behavior due to annual temperature changes. The horizontal crack width variation was ignorable and did not affect the vertical displacement of the slab. Therefore, the horizontal crack did not delaminate the slab and did not seem to reduce the structural capacity and performance of CRCP.

KEYWORDS

continuously reinforced concrete pavement, horizontal crack, anchor lug, terminus, curling, environmental load

요지

본 연구는 연속철근 콘크리트 포장(CRCP: Continuously reinforced concrete pavement)에서 단부 앵커러그 유무에 따른 종방향 변위 비교를 통해 앵커러그의 필요성을 분석하고, 내부 수평균열의 수직방향 변위 측정을 통해 이러한 균열이 CRCP의 공용성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 앵커러그 구간 절단 전 거동 측정은 6월 중에 12일간 계속하였으며, 앵커러그 구간 절단 후의 측정은 절단 시 슬래브에 급격히 발생하는 변위가 사라진 이후 8월 중에 14일 동안 계속하였다. 이와 같은 단기간의 계속 결과 CRCP 단부의 종방향 변위는 앵커러그가 설치되어 있는 경우에는 모든 위치에서 일일 변위 변화가 0.1mm 이내로 종방향 거동이 거의 발생하지 않았다. 단부에 앵커러그가 설치되지 않은 경우에는 변위가 자유 단부 부근에서만 주로 발생하며 종방향 변위 변화가 작아서 팽창줄눈으로 처리하여도 적절할 것으로 예측되었으나, 향후 추가연구에 의해 사계절 온도변화에 따른 단부의 거동을 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다. 내부 수평균열은 거동 측정 결과 거의 비활성균열이며 전체적인 슬래브의 수직변위에 영향을 미치지 않았다. 따라서 수평균열이 슬래브를 상하로 분리시켜 CRCP의 구조적인 성능 및 공용성의 저하를 유발하지는 않을 것으로 분석되었다.

핵심용어

연속철근 콘크리트 포장, 수평균열, 앵커러그, 단부, 컬링, 환경하중

1. 서론

연속철근 콘크리트 포장(CRCP, Continuously

reinforced concrete pavement)은 줄눈 콘크리트 포장(JCP, Jointed concrete pavement)과 함께 콘크리

트 포장을 대표하는 주요 형식임에도 불구하고 우리나라에서는 중부고속도로 개통 이후에는 사용이 매우 미미하였다. 이러한 이유는 우선 CRCP에서 자연적으로 발생하도록 허용하는 횡방향균열을 일반적인 콘크리트 구조물에서의 파손에 해당하는 균열과 유사하게 의식하여 이에 대한 거부감이 높았던 점을 들 수 있다. CRCP에서의 균열은 표면에서는 다소 큰 것처럼 보여질 수 있으나 거의 대부분의 균열은 표면에서 아주 조금만 내려가도 균열틈이 매우 미소해지며 철근의 주위에서는 아예 균열이 없는 경우가 많다. 따라서 CRCP의 횡방향균열은 비활성균열이라고 보아도 무방할 정도의 균열임에도 불구하고 경부고속도로 황간 부근의 폐도 등에서 볼 수 있듯이 예전에는 이러한 균열을 표면처리한 후 줄눈재로 막는 등 CRCP에 대한 지식이 매우 부족한 상태에서 국내에 적용함으로써 이에 대한 적절한 평가를 받지 못했다고 할 수 있다.

그러나 중부고속도로 20년 평가 결과 등에서 나타난 바와 같이 초기 시공비용이 다소 높더라도 수명주기비용에서 유리하며, 유지관리에 편이성이 존재하고, 평탄성 등의 공용성이 우수하며, 향후 아스팔트 덧씌우기 공사 등에서 반사균열 등의 손상 발생 가능성이 적은 장점으로 인해 한국도로공사에서는 CRCP의 확대 적용 방안을 마련하는 등 CRCP의 사용 가능성이 다시 높아지고 있는 실정이다(안성순, 2006; 안성순 외, 2006). 따라서 국내에 도입된 CRCP 공법에서 잘못 적용된 사항은 수정하고 균열 거동을 적절히 이해함으로써 국제적으로 우수성을 인정받은 CRCP가 우리나라에서도 발전할 수 있도록 하여야 할 것이다.

국내의 CRCP는 교량접속부와 같은 포장의 시점 또는 종점부인 종방향 단부에는 앵커러그(Anchor lug)를 설치하여 온도변화에 따른 CRCP의 종방향 변위를 억제함으로써 CRCP가 팽창하여 구조물의 파손을 야기하는 것을 방지할 수 있도록 하고 있다. 그러나 이러한 앵커러그의 설치 시공이 쉽지 않기 때문에 국내에서 CRCP 공법을 꺼려하는 다른 하나의 이유로 부각되어 있다. 일반적으로 미국에서는 콘크리트 포장의 형식에 관계없이 콘크리트 포장을 사용할 경우에는 종방향 단부에 앵커러그 또는 팽창줄눈 중 하나를 선택하여 설치하도록 하고 있다. CRCP는 연속적으로 구성되어 있는 포장체이기 때문에 온도 및 수분변화 등의 환경하중에 의해 수축팽창이 클 것으로 예상하여 우리나라에서는 CRCP의 단부에서는 앵커러그를 사용하며 JCP의 단부에서는 팽창줄눈을 사용하는 것으로 전해진 것으로 판단된다. 하지만 CRCP의 시공 및 연구가 가장 활발하게

이루어지고 있는 미국의 텍사스주에서는 앵커러그의 사용은 매우 미소하며 CRCP의 단부에 대부분 팽창줄눈을 두고 있는 실정이다. 이는 CRCP의 길이가 길더라도 하부층과의 마찰에 의해 종방향 변위가 상당히 구속되어 실제로 종방향 단부에서의 변위는 그리 크지 않기 때문에 앵커러그의 설치 없이 팽창줄눈의 사용으로도 구조물에 손상을 입히지 않는다는 것을 경험하였기 때문이다. 따라서 우리나라에서도 CRCP에서의 단부 앵커러그 사용의 필요성을 검토해야 할 것이다.

CRCP 슬래브 내부의 철근이 위치한 깊이에서 횡방향균열로부터 수평방향으로 평면으로 발생하는 수평균열은 근래에 미국 텍사스주에서 처음으로 발견되었으며 우리나라에서도 최근에 CRCP에 내부 수평균열이 존재한다는 사실이 발견되었다(Kim and Won, 2004; 김성민 외, 2006). 수평균열은 CRCP 내부에서 발생하는 균열이기 때문에 오래전부터 CRCP에 존재했던 균열이었을 수 있음에도 불구하고 포장 표면에서 관찰되지 않기 때문에 그동안 발견되지 않았던 것으로 판단된다. 따라서 CRCP의 확대 보급을 위해서는 이러한 수평균열의 심각성 및 공용성에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

본 연구는 CRCP에서 단부 앵커러그 유무에 따른 종방향 변위를 측정하여 앵커러그의 필요성을 분석하고, 내부 수평균열의 유무에 따른 슬래브의 컬링 거동을 측정하여 공용성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다. 본 논문에서는 이러한 연구 내용 및 결과에 대하여 상세히 기술한다.

2. 단부 앵커러그 유무에 따른 CRCP 거동 분석

CRCP 단부 거동 측정을 위한 실험은 2단계로 나누어 진행하였다. 1단계는 그림 1(a)와 같이 양단에 앵커러그가 설치되어 있을 경우로써 앵커러그로 인해 양단이 고정된 상태의 CRCP 종방향 거동에 대한 분석을 위하여 실험을 수행하였다. 2단계는 그림 1(b)와 같이 한쪽의 앵커러그 절단을 통해 자유 단부를 형성 한 후 CRCP 종방향 거동을 측정하였다. 궁극적으로 1단계의 앵커러그가 설치된 경우의 CRCP 종방향 거동과 2단계의 자유 단부를 가지고 있는 CRCP의 종방향 거동을 비교 분석하여 앵커러그의 필요성 및 팽창줄눈으로 대체 가능 여부에 대하여 검토하였다.

현장 실험은 중부내륙고속도로 상에 위치한 시험도로 CRCP 구간에서 수행되었다. CRCP 구간은 철근비가

0.6, 0.7, 0.8%로 다르게 구성된 세 개의 구간으로 형성되어 있으며 전체 슬래브 길이 372m, 폭 8.4m, 두께 0.3m로 2002년에 시공되었다. 시험도로 CRCP 구간의 구성에 대해서는 그림 2에 나타내었으며 콘크리트 슬래브와 린콘크리트의 사이에 5cm 두께의 부착방지층인 아스팔트층을 두고 있다.

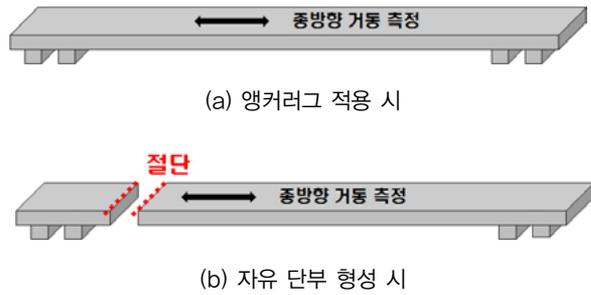


그림 1. 종방향 거동 측정

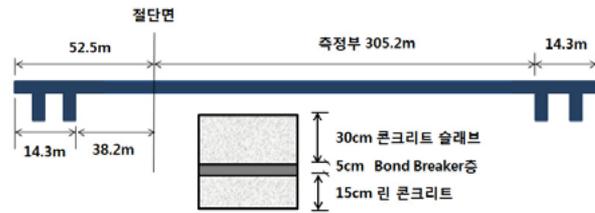


그림 2. 시험도로 CRCP 구간

2.1. 단부 거동 측정 실험

환경하중에 의한 CRCP의 종방향 변위 측정을 위해 그림 3과 같이 9개의 변위계(DT: Displacement transducer)를 설치하였다. 절단면의 우측으로는 8개의 변위계를 설치하였으며, 절단면의 좌측에는 1개의 변위계를 설치하였다. 이때 변위계를 횡방향균열에 인접하여 설치하게 되면 균열틈의 변화가 종방향 변위에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이러한 가능성을 최소화하기 위하여 변위계 설치 위치는 균열과 균열의 중간 위치가 되도록 하였다. 변위계의 기본 설치 계획은 약 30m 간격으로 하였으나 약 130m와 225m 위치에 설치한 변위계는 오작동을 하여 분석에서는 제외시켰다.

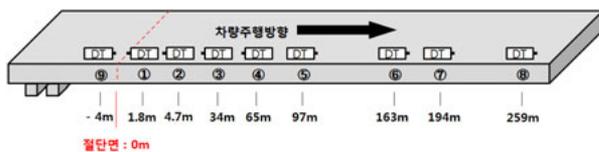


그림 3. 종방향 변위 측정 계측기 설치도

CRCP의 종방향 거동은 환경하중에 의한 영향이 지배적이지만 CRCP의 종단경사가 크면 자유 단부 형성

시에 추가적인 종방향 변위가 발생할 우려가 있다. 따라서 레벨측정을 통해 종단경사를 측정하였으며 이에 대한 결과값을 그림 4에 나타내었다. 측정구간의 종단경사는 차량 진행방향으로 상향 0.85%로 미소한 것으로 나타났다.

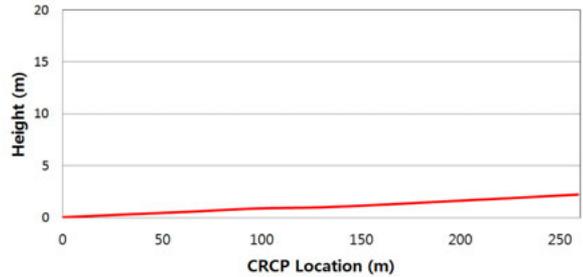


그림 4. CRCP 종단경사

그림 5(a)는 변위계 설치를 위한 거치대 설치 사진을 보여준다. 변위계는 차량통행에 지장이 없도록 슬래브 측면에 설치하였으며 길어깨에 코어링 작업을 통해 아스팔트를 제거한 후 하부지반에 변위계 거치대가 설치되도록 하였다. 이는 CRCP 슬래브가 종방향으로 수축 또는 팽창할 때에 거치대가 콘크리트 슬래브와 함께 거



(a) 거치대 설치

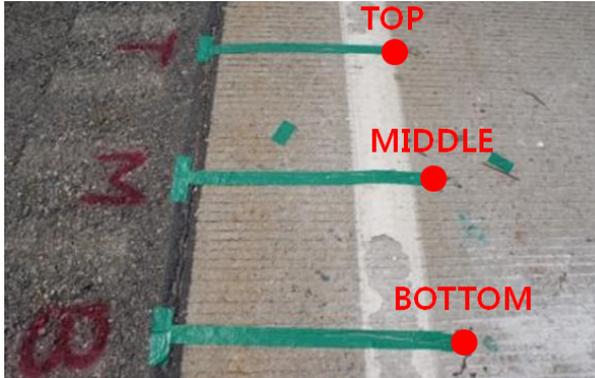


(b) 변위계 설치

그림 5. 변위계 설치 작업

동하면 CRCP의 종방향 변위를 적절히 측정할 수 없기 때문에 가능한 콘크리트 슬래브의 거동에 영향을 받지 않는 곳에 거치대를 설치하기 위함이다. 거치대를 설치한 후에 그림 5(b)와 같이 변위계를 설치하였다.

또한 콘크리트 슬래브의 깊이별 온도변화를 측정하기 위하여 그림 6(a)와 같이 온도 측정 센서인 Thermocouple과 i-Button을 슬래브 상부, 중앙부, 하부에 설치하였으며 대기의 온도도 그림 6(b)와 같이 온도 측정 센서를 이용하여 측정하였다.



(a) 슬래브 깊이 매설



(b) 대기온도 측정

그림 6. 온도측정 센서 설치

1단계의 실험을 수행한 후에 앵커러그와 슬래브의 분리를 통해 자유 단부를 형성하기 위하여 슬래브 전단면 절단 작업을 수행하였다.

절단 작업은 그림 7(a)와 같이 절단기를 이용하였으며 그림 7(b)와 같이 절단면 사이의 이물질 제거 작업을 수행한 후 그림 7(c)와 같이 스펀지로 줄눈을 채워 이물질의 유입을 방지하도록 하였다.



(a) 슬래브 절단



(b) 잔여물 제거



(c) 줄눈 처리

그림 7. 자유 단부 형성 작업

2.2. 단부 거동 분석

이미 언급한 바와 같이 CRCP의 종방향 변위 측정은 앵커러그 유무에 따라 2단계로 수행하였다. 1단계는 앵커러그가 존재하는 경우이며, 2단계는 앵커러그 구간 절단을 통해 앵커러그가 존재하지 않는 자유 단부 상태의 CRCP에서 종방향 변위를 측정하였다. 거동 측정은 6월부터 8월에 걸쳐 수행되었다. 앵커러그 구간 절단 전 거동 측정은 6월 2일부터 13일까지 12일간 계속하였으며, 앵커러그 구간 절단 후의 측정은 절단 시 슬래브

에 급격히 발생하는 변위가 사라진 이후 8월 11일부터 25일까지 14일 동안 계측하였다.

그림 8은 1단계인 앵커러그 구간 절단 전의 온도계측 결과이다. 계측 8, 9일째 비가 내리면서 일일 평균온도가 낮아졌고 온도변화도 작게 발생하였다. 일일 온도변화는 슬래브 표면에서 가장 크게 발생하였고 슬래브 깊이가 깊어질수록 작게 발생하였다.

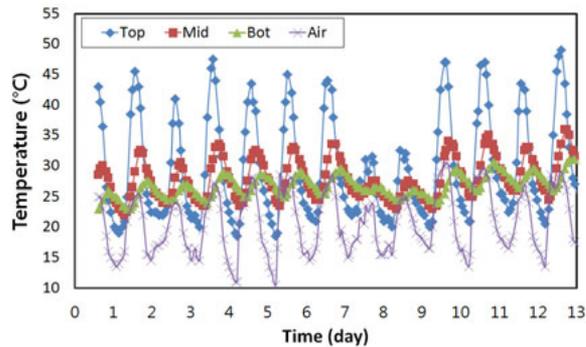


그림 8. 앵커러그 구간 절단 전 온도 데이터

그림 9는 슬래브 위치별로 종방향 변위 측정 결과를 나타내었다. 변위 값의 부호는 차량주행방향으로의 변위를 +, 반대방향을 -로 나타내었다. 2번 변위계는 계측 도중 틱현상이 심해서 계측 결과에서 제외시켰다. 앵커러그에 의해 양단이 고정되어 있는 CRCP는 역학적으로는 종방향으로의 변위가 거의 발생하지 않아야 한다. 그림에서 보듯이 일일 온도변화에 따라 종방향 변위가 다소 변동하는 것을 볼 수 있으나, 모든 계측 위치에서 일일 변위 변화가 약 0.1mm 이내로 매우 미소하게 발생하는 것을 알 수 있다. CRCP는 횡방향균열이 존재하기 때문에 온도변화에 의한 이러한 균열의 열림과 닫힘 현상이 종방향 변위에 영향을 미칠 수 있으며, 본 연구에서 균열틈의 변화를 측정 한 결과 일일 변화량이 약 0.1mm 이내이기 때문에 앵커러그가 설치된 CRCP에서는 사실상 환경하중에 의한 종방향 변위 변화가 없다고 보아도 무방할 것으로 판단된다.

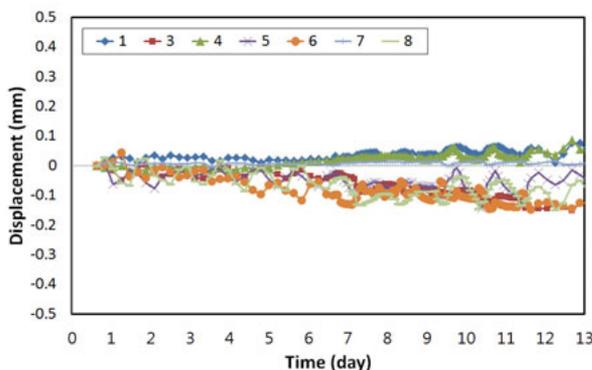


그림 9. 앵커러그 구간 절단 전 CRCP 종방향 변위 변화

그림 10은 앵커러그 구간을 절단한 후에 종방향 변위 계측기간 동안의 온도변화를 나타내었다. 계측기간 동안 비가 내리는 날이 많았으며 이러한 이유로 인해 일일 온도 변화가 그리 크지 않은 날이 많은 것을 알 수 있다.

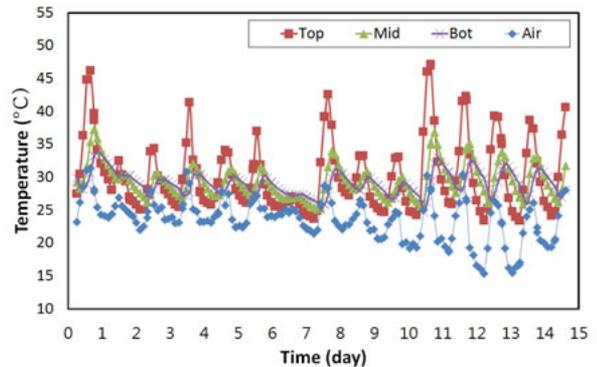


그림 10. 앵커러그 구간 절단 후 온도 데이터

그림 11은 앵커러그 구간 절단 후의 종방향 변위를 나타낸 그림이다. 그림에서 변위의 부호는 이전에 정의한 것과 같이 양(+)의 방향은 차량주행방향, 음(-)의 방향은 차량주행 반대방향이다. 3번과 8번 변위계는 측정값이 안정적이지 못하여 분석에서 제외시켰다. 온도 변화에 따른 일일 변위의 크기를 비교하면 슬래브 절단면과 가장 근접한 1번 변위계의 일일 변위 변화가 가장 큰 것을 알 수 있으며 최대 약 2.5mm 가량 거동하는 것으로 나타났다. 2번 변위계의 경우 1번 변위계와의 이격거리가 3m에 불과하지만 일일 변위 변화량은 1번 변위계 측정값의 약 절반 정도로 급감하여 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 단부에서 약 65m 떨어진 4번 변위계 이후에서는 변위 변화량이 매우 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 절단면의 반대쪽의 앵커러그로부터 약 35m 길이의 CRCP에 설치한 9번 변위계에서의 변위 변화가 약 300m 길이의 CRCP에 설치한 1번 변위계에서의 변위 변화와 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 길

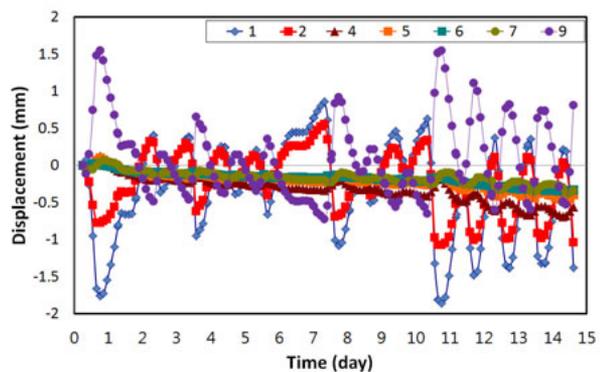
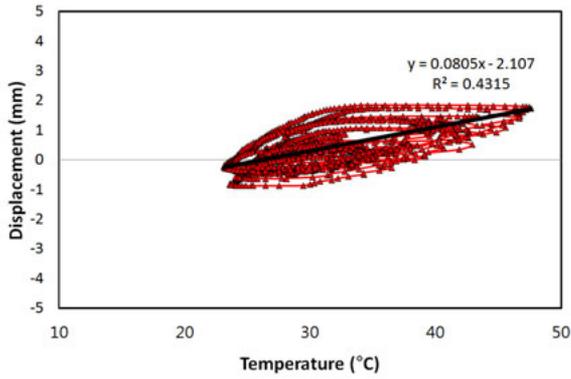
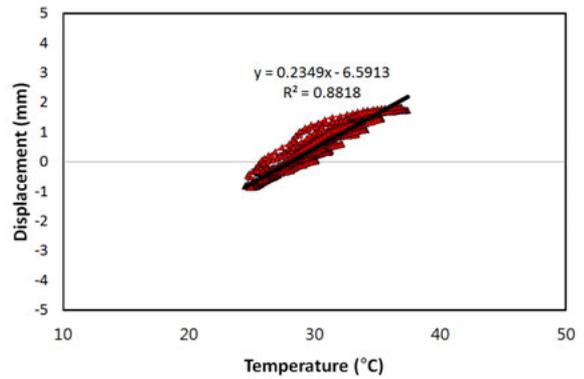


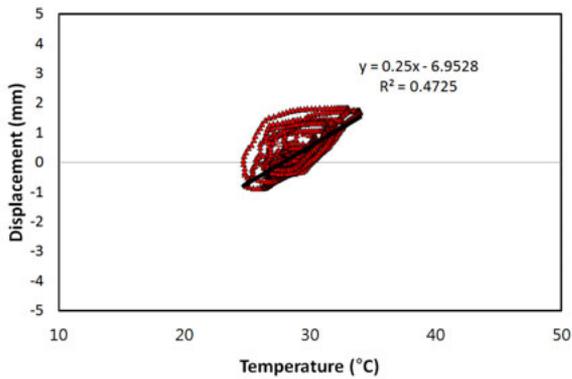
그림 11. 앵커러그 구간 절단 후 CRCP 종방향 변위 변화



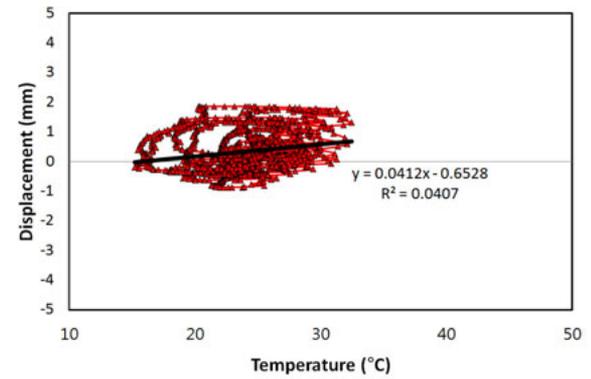
(a) 슬래브 표면 온도



(b) 슬래브 중간깊이 온도



(c) 슬래브 하부 온도



(d) 대기온도 기준

그림 12. 자유 단부 변위 변화

이가 약 300m와 35m인 CRCP에서 자유 단부의 변위 변화량이 유사하며 단부에서 조금만 들어가도 변위 변화가 급격히 줄어드는 현상으로 보아 CRCP의 자유 단부 거동은 CRCP의 연장과는 큰 상관이 없다는 것을 추측할 수 있다. 이는 CRCP 슬래브와 하부층과의 마찰 및 부착저항이 존재하기 때문에 단부에서 어느 정도 들어오면 종방향 변위가 거의 발생하지 않는 것으로 분석된다.

온도변화에 따른 자유 단부의 변위 변화 정도를 분석하기 위하여 그림 10과 11의 데이터를 이용하여 온도와 변위와의 상관관계를 구하였다. 그림 12(a)는 슬래브 표면 온도변화에 의한 자유 단부 변위 변화를 나타내었으며, 그림 12(b), (c), (d)는 각각 슬래브 중간 깊이, 슬래브 하부, 대기온도 변화에 따른 자유 단부 변위 변화를 나타내었다. 단위온도변화당 변위 변화를 산출하기 위하여 직선의 추세선을 이용하였다. 자유 단부의 단위온도변화당 변위 변화는 슬래브 하부의 온도를 기준으로 하였을 때 가장 큰 것을 알 수 있고, 슬래브 중간깊이, 슬래브 표면, 대기온도의 순으로 작아지는 것을 알 수 있다.

그림 12에서는 단위온도변화에 따른 자유 단부 변위 변화의 평균값을 구하였기 때문에 어떤 날은 이보다 더 큰 변위변화율을 보일 수가 있다. 따라서 대기온도 변화에 따른 자유 단부의 일일 변위 변화를 그림 13에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정된 날에 따라 변위 변화율인 추세선의 기울기가 변화하게 된다. 그림 12(d)에서 변위변화율 평균값이 0.0412mm/°C였으나 그림 13에서 최대 변위변화율은 0.1572mm/°C로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 연중 대기 온도변화에 따른

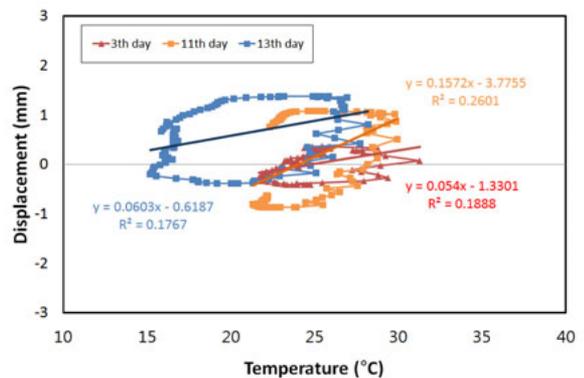
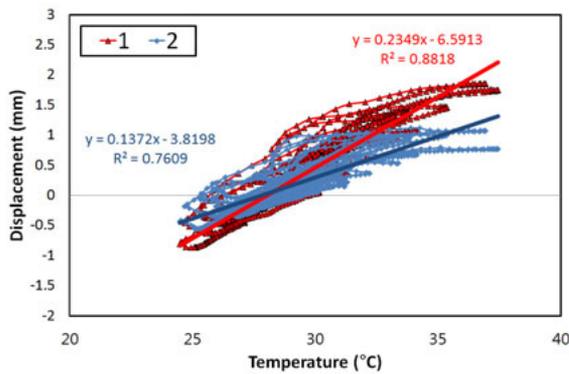


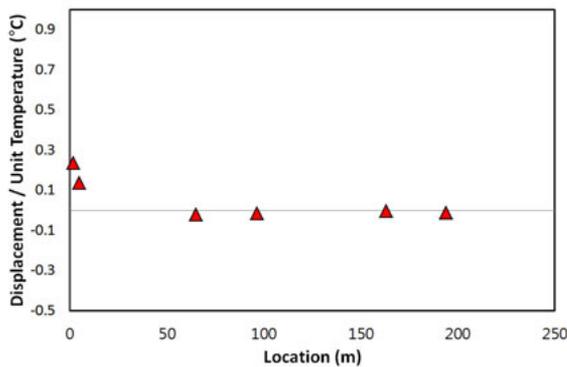
그림 13. 대기온도 변화에 따른 자유 단부 일일 변위 변화

CRCP 자유 단부의 변위 변화를 보수적인 측면에서 보다 크게 예측할 시에는 이러한 최대 변위변화율을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

CRCP 자유 단부에서부터 거리가 멀어질수록 단위온도변화에 따른 종방향 변위 변화가 어떻게 변화하는지를 분석하였다. 그림 14(a)는 1번과 2번 변위계 위치에서 슬래브 중간깊이의 온도를 기준으로 위치별 온도변화와 종방향 변위의 상관관계를 나타내었다. 자유 단부인 절단면과 가장 가까운 1번 변위계 위치에서 추세선의 기울기가 2번 변위계 위치에서의 추세선의 기울기에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 다른 측정 위치에서의 단위온도변화당 종방향 변위 변화를 살펴보면 그림 14(b)와 같다. 즉, 자유 단부 근처에서는 온도변화에 따라 종방향 변위의 변화가 뚜렷이 발생하지만 어느 정도 단부에서 멀어지면 사실상 온도변화에 따라 종방향 변위가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.



(a) 변위계 1과 2 위치



(b) 위치에 따른 단위온도변화 당 종방향 변위 변화

그림 14. 온도변화에 따른 종방향 변위 변화

우리나라 기후조건에서 CRCP 자유 단부의 변위 변화를 예측하기 위하여 여러 지역의 연중 기온을 구해 표

1에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 강릉지역의 연중 온도차가 약 60℃로 가장 크게 나타났으며, 이를 그림 13에서 구한 최대 단위온도변화당 변위 변화율인 0.1572mm/℃에 곱하면 단부의 변위가 연중 약 9.4mm 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 단부의 변위는 일일 최대 변위변화율을 이용하여 산출한 것이므로 실제로는 연중 온도변화에 의해 이보다는 작은 단부 변위 변화를 나타낼 것으로 예측된다. 따라서 CRCP의 단부에 앵커리그를 적용하지 않더라도 자유 단부에서의 변위의 변화가 약 1cm 이내로 작게 발생할 것으로 예상되어 앵커리그 없이 팽창줄눈으로 단부를 처리하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

표 1. 지역별 대기 온도(기상청, 2010)

지역	연 최고온도(°C)	연 최저온도(°C)	연 온도차(°C)
서울	36.3	-14.7	51
대전	35.5	-13.8	49.3
강릉	31.7	-28.7	60.4
대구	37.4	-11.8	49.2
부산	33.5	-7.8	41.3
여수	34.2	-5.4	39.6
제주	33.9	-3.2	37.1

CRCP 자유 단부의 종방향 변위는 온도와 습도에 의해 주로 변위가 발생하지만 본 연구에서는 온도에 의한 영향만을 고려하였다. 향후 습도의 영향에 의한 CRCP 종방향변위 거동에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. CRCP 내부 수평균열 거동 분석

수평균열은 CRCP의 철근이 배근된 깊이에서 수평 평면으로 발생하는 균열로써 콘크리트 타설 후 얼마 되지 않아 발생한 초기 횡방향균열 부근에서 주로 발생하는 반면 뒤늦게 발생한 횡방향균열에서는 일반적으로 수평균열이 존재하지 않는 것으로 알려져 있다(김성민 외, 2006). 이러한 수평균열이 횡방향균열 부근에만 국부적으로 존재할 경우에는 CRCP 공용성에 영향을 미치지 않겠지만 수평균열이 상당히 진전되어 콘크리트 슬래브를 상하로 분리할 경우에는 슬래브의 휨강성이 감소하여 CRCP의 공용성을 크게 감소시킬 수 있다(Kim and Nelson, 2004; Kim et al., 2003). 따라서 수평균열이 존재하는 위치에서 슬래브의 수직 쉐어링거동을 측정하여 수평균열이 슬래브를 두 층으로 분리시키

고 있는지를 확인할 필요가 있다.

3.1. 실험 셋업

CRCP의 수평균열에서의 수직방향 거동을 측정하기 위해 시험도로 CRCP 구간에서 실험을 수행하였다. 시공초기에 발생한 횡방향균열에서 그림 15와 같이 길어깨 부분을 제거하여 내부 수평균열의 존재를 확인하였으며, 이웃한 횡방향균열에서는 수평균열이 존재하지 않는 것을 확인하였다. 길어깨 제거 부분에서 내부 수평균열이 확인된 곳은 횡방향균열을 따라 슬래브 여러 곳에서 코어를 채취함으로써 이러한 수평균열이 슬래브의 중앙부에서도 존재함을 확인하였으며, 반대로 수평균열이 길어깨 제거 부분에서 발견되지 않은 곳은 슬래브 안쪽에서도 수평균열이 없는 것을 확인하였다(김성민 외, 2006). 따라서 이러한 내부 수평균열이 존재하는 곳과 존재하지 않는 곳에서 슬래브 킬링에 의한 수직 방향 거동 계측을 통해 수평균열이 CRCP의 공용성에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.



그림 15. 내부 수평균열

내부 수평균열의 거동을 측정하기 위해 그림 16과 같이 수평균열의 수직방향 변위 측정을 위한 변위계 3개와 균열계이지(CG: Crack gauge) 1개를 설치하였다. 균열계이지①은 온도변화 또는 킬링거동에 의한 수평균열의 균열틈 거동을 살펴보기 위해 그림 17(a)와 같이 수평균열이 발생한 곳에 수평균열을 사이에 두고 설치하였다. 변위계①과 변위계②는 수평균열이 발생한 위치에서의 슬래브의 수직방향 거동을 측정하도록 횡방향 균열 양쪽에 그림 17(b)와 같이 설치하였으며, 변위계③은 수평균열이 발생하지 않은 위치에서의 슬래브 수직 변위 변화를 계측하기 위해 그림 17(c)와 같이 설치하였다. 또한 슬래브의 킬링거동은 슬래브의 깊이에 따른 온도변화에 의해 발생하기 때문에 실험 시에 슬래브의 상

부, 중간깊이, 하부 및 대기 중에 온도측정센서인 Thermocouple을 설치하여 온도변화를 측정하였다.

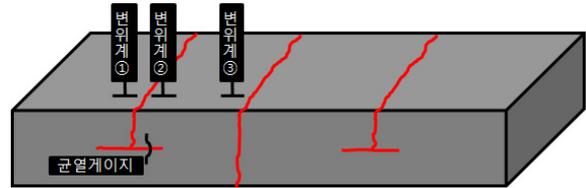


그림 16. 내부 수평균열 계측센서 설치도



(a) 균열계이지



(b) 변위계 ①, ②



(c) 변위계 ③

그림 17. 계측센서 설치

그림 18에서 보여주는 바와 같이 수평균열이 존재하여 슬래브가 상하로 분리되면 슬래브 표면 부근의 수직 온도경사가 하부보다 크기 때문에 상부 슬래브의 컬링 변위가 더 크게 발생하게 된다(Kim and Nelson, 2004). 따라서 이러한 경우에는 수평균열에서의 균열 틈 변화가 확인되며 슬래브 표면의 수직변위는 수평균열이 없는 곳에서의 수직변위에 비해 크게 발생하게 된다.

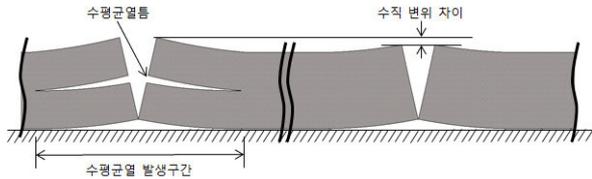


그림 18. 수평균열 유무에 따른 슬래브 컬링 거동

3.2. 수평균열 거동 분석

수평균열의 거동을 분석하기 위하여 앞에서 설명한 계측을 약 일주일 간 수행하였다. 그림 19는 슬래브 깊이에 따른 온도 변화를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 대기의 온도가 상승하면 슬래브 표면의 온도가 가장 먼저 상승하며 깊이가 깊어질수록 최대온도가 낮아지게 된다. 또한 각 측정 깊이에서 최대 온도에 다다른 시간은 깊이가 깊어질수록 다소 늦어지는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 대기의 온도가 감소하면 슬래브 표면의 온도가 가장 많이 감소하게 되며 깊이가 깊어질수록 온도변화가 작은 것을 알 수 있다. 따라서 낮에는 슬래브 표면의 온도가 높고 슬래브 하부의 온도가 낮아져 슬래브의 중간부분이 위로 들리고 모서리부분이 아래로 가라앉는 하향컬링(Curl-down) 현상이 발생하며, 반대로 새벽에는 슬래브의 상부온도가 하부온도보다 낮아져서 슬래브의 중간부분이 아래로 가라앉고 모서리부분이 위로 솟는 상향컬링(Curl-up) 현상이 발생하게 된다.

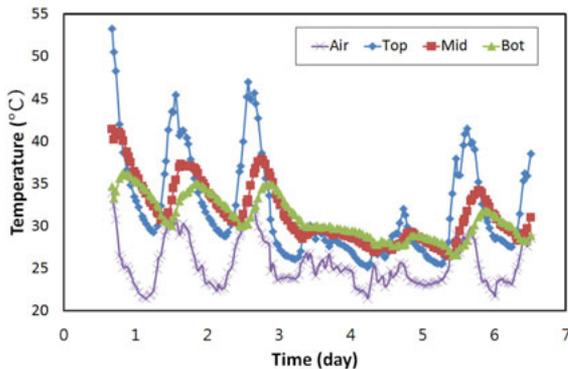


그림 19. 온도 측정 데이터

이와 같은 슬래브 상하의 온도변화에 따라 CRCP 슬래브에 수직변위 변화가 발생하게 된다.

수평균열이 발생하여 슬래브를 두 층으로 분리시켰을 경우에는 상하부 각각의 슬래브에 해당하는 수직온도경사를 구하여 컬링 거동을 예측하여야 한다. 따라서 그림 19에 나타난 깊이별 온도 변화를 이용하여 선형 수직온도경사를 구해 그림 20에 나타내었다. 그림에서 30cm로 나타난 것은 전체 슬래브 두께에 해당하는 선형 온도경사이며, 15cm-Top은 슬래브의 상부 15cm 만을 고려하여 구한 온도경사이고, 15cm-Bot는 슬래브 하부 15cm 만을 고려하여 구한 선형 온도경사이다. 그림에서 볼 수 있듯이 15cm 상부에서 온도경사가 가장 크게 나타났으며, 15cm 하부에서 온도경사가 가장 작게 나타났다. 이를 통해 수평균열로 인해 슬래브가 상하부로 분리된다면, 수평균열 상부의 슬래브에서 컬링에 의한 수직변위가 더 크게 발생하여 수평균열의 틈이 발생한다는 것을 알 수 있다.

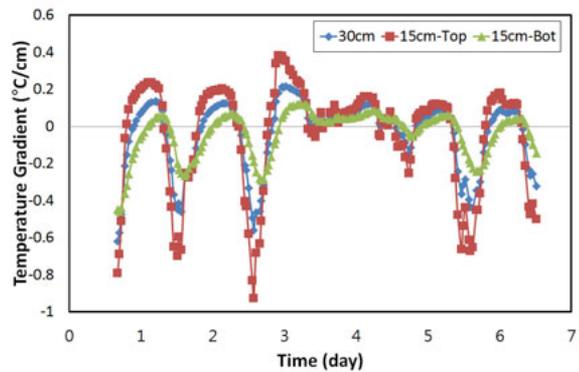


그림 20. 선형 수직온도경사

그림 21은 컬링에 의한 수직방향 변위를 나타낸 그림으로 변위계①과 변위계②는 수평균열이 발생한 위치에 설치하였으며 변위계③은 수평균열이 발생하지 않은 위치에 설치하였음에도 모든 계측값이 거의 동일하게 나

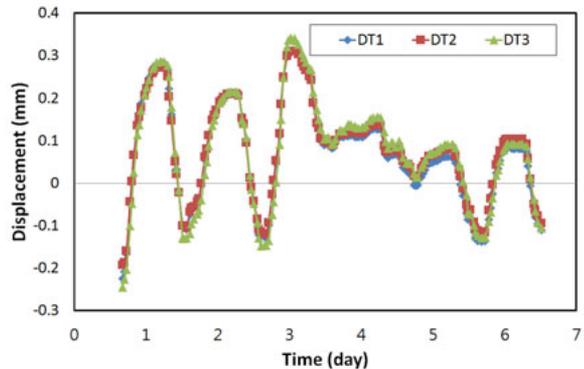


그림 21. 컬링에 의한 수직 변위

타나는 것을 알 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 수평균열이 슬래브의 상하부를 분리시켰다면 수평균열이 존재하는 곳에서의 수직변위가 더 크게 나타날 것이다. 하지만 수평균열이 있더라도 수직변위가 수평균열이 없는 곳에서의 수직변위와 거의 같다는 것은 수평균열이 슬래브의 상하부를 분리시켜 휨강성을 감소시킬 정도로 심각한 수준은 아니라는 것을 의미한다.

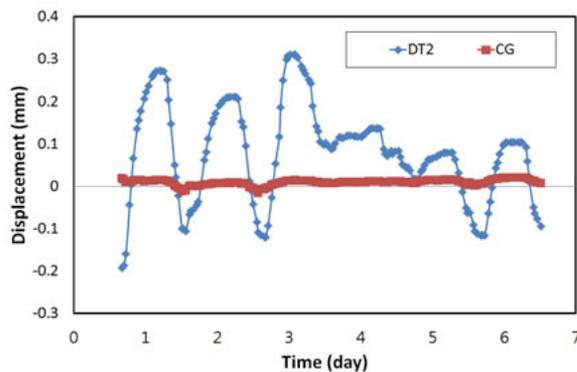
수평균열의 거동을 보다 세밀하게 관찰하기 위하여 수평균열틈과 수직 변위와의 관계를 그림 22에 나타내었다. 그림 22(a)는 수평균열이 발생한 위치에서 변위계와 균열계이지의 측정값을 비교한 것으로 변위계 변위가 양(+)의 방향으로 가는 것은 수직 변위가 위로 발생하여 슬래브가 들리고 있는 것을 의미하며, 균열계이지 변위의 양(+)의 방향은 수평균열틈이 커지는 것을 의미한다. 그림에서와 같이 수평균열틈의 변화는 수직 변위에 비해 매우 미소하여 수평균열틈의 거동은 전체적인 슬래브의 수직거동에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이는 그림 21에서 수평균열 유무에 의한 슬래브의 수직거동 비교에서 차이가 발생하지 않은 것을 설명해준다. 수평균열틈의 거동이 미소하지만 이러한 균열틈이 온도변화에 의해 어떠한 변화를 하는지를 분

석하기 위하여 수평균열틈을 20배하여 슬래브의 수직 변위와 비교하여 그림 22(b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 수평균열틈의 거동은 슬래브의 수직방향 컬링 거동과 양상이 매우 유사한 것을 알 수 있다. 즉, 수평균열틈도 변위의 변화가 발생하는 하지만 그 크기가 비활성균열로 분류되는 CRCP 횡방향균열의 틈보다도 훨씬 작다. 따라서 수평균열이 존재할 경우에 이러한 균열의 거동은 매우 미소하여 슬래브를 두 층으로 나뉘므로써 CRCP의 구조적 성능을 저하시키지는 않는다는 것을 알 수 있다.

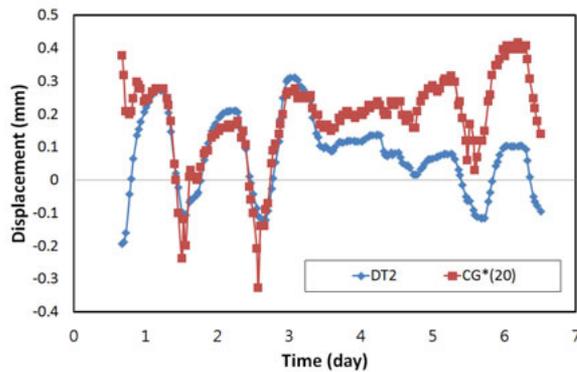
4. 결론

본 연구에서는 시험도로 CRCP 구간에서 앵커리그 유무에 따른 CRCP의 종방향 변위를 측정하여 특성을 분석하고, 내부 수평균열 유무에 따른 수직 변위를 측정하여 분석하였다. 거동 측정은 6월부터 8월에 걸쳐 수행되었으며, 앵커리그 구간 절단 전 거동 측정은 6월 중에 12일간, 앵커리그 구간 절단 후의 측정은 절단 시 슬래브에 급격히 발생하는 변위가 사라진 이후 8월 중에 14일 동안 계속하였다. 이러한 단기 계속 결과 CRCP의 거동 및 공용성과 관련된 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. CRCP의 시점부와 종점부인 단부에 앵커리그를 설치한 경우에는 위치에 관계없이 환경하중에 대한 일일 종방향 변위 변화가 약 0.1mm 이내로 매우 작게 발생하여 종방향으로의 거동이 거의 없는 것을 알 수 있다.
2. CRCP 단부에 앵커리그가 없을 경우에는 종방향으로의 변위가 발생하지만 단부에 근접해있는 부근에서만 뚜렷한 종방향 변위가 발생하며 어느 정도 단부에서 멀어지면 앵커리그가 있을 때와 유사하게 매우 미소한 종방향 변위가 발생한다.
3. 현장 실험 결과 CRCP의 자유 단부에서 단위기온변화에 대한 최대 종방향 변위 변화가 0.1572mm/℃로 측정되어 연 기온차가 약 60℃ 발생한다면 자유 단부 변위는 약 9.4mm 발생할 것으로 분석되었다. 이러한 변위 변화는 그리 크지 않기 때문에 CRCP의 단부에 앵커리그의 설치 없이 팽창줄눈으로 처리하여도 적절할 것으로 예측되나, 향후 추가연구에 의해 사계절 온도변화에 따른 단부의 거동을 확인할 필요가 있다.



(a) 변위 비교



(b) 균열틈 확대 비교

그림 22. 수직 변위와 수평균열틈 관계

4. CRCP 내부의 수평균열은 환경하중에 의해 거동을 하지만 그 크기가 무시할 수 있을 정도로 미소하여 슬래브의 전체적인 수직 변위에는 영향을 미치지 않으며, 따라서 수평균열이 슬래브를 상하로 분리시켜 CRCP의 구조적 성능인 휨강성을 저하시켜 공용성 저하에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 기초연구사업 중 일반연구자지원사업(과제번호: 2010-0007816; 2011-0004164)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

기상청 (2010). "자동 기상 관측 연보", 기상청.
 김성민, 조병휘, 권순민 (2006). "연속철근콘크리트 도로포장 구조물의 내부수평균열", *한국콘크리트학회 논문집*, 한국콘크리트학회, 제18권 3호, pp.425-429.
 안성순 (2006). "중부고속도로 20년 공용성 평가를 통한 CRCP와 JCP의 비교 연구", 박사학위논문, 한양대학교.

안성순, 김형배, 서영찬, 김경수 (2006). "중부고속도로 공용 자료를 활용한 CRCP와 JCP의 경제성 비교 연구", *한국도로학회 학술발표회 논문집*, 한국도로학회, pp. 157-164.

Kim, S. M. and Nelson, P. K. (2004). "Experimental and numerical analyses of PCC overlays on PCC slabs-on-grade subjected to climatic loading," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, Issue 3-4, pp. 785-800.

Kim, S. M., Nelson, P. K., Ruiz, M., Rasmussen, R. O. and Turner, D. (2003). "Early-age behavior of concrete overlays on continuously reinforced concrete pavements," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No 1823, pp. 80-92.

Kim, S. M. and Won, M. C. (2004). "Horizontal cracking in continuously reinforced concrete pavements," *ACI Structural Journal*, Vol 101, No 6, pp. 794-791.

접 수 일 : 2011. 10. 4
 심 사 일 : 2011. 10. 5
 심사완료일 : 2011. 12. 5