

# 환경하중에 의한 연속철근콘크리트(CRCP) 종방향 철근의 구속정도 Degree of Restraint(DOR) of Longitudinal Steel at Continuously Reinforced Concrete Pavement(CRCP) Against Environmental Loadings

남정희 Nam, Jeong-Hee | 정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 연구위원 · 교신저자  
(E-mail : archnam@kict.re.kr)  
안상혁 Ahn, Sang Hyeok | 정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 연구위원 (E-mail : shahn@kict.re.kr)

## ABSTRACT

**PURPOSES :** The purpose of this study is to evaluate the degree of restraint (DOR) of longitudinal steel at continuously reinforced concrete pavement (CRCP) against environmental loadings.

**METHODS :** To measure the longitudinal steel strain, 3-electrical resistance and self-temperature compensation gauges were installed to CRCP test section (thickness = 250mm, steel ratio = 0.7%) and continuously measured 10 min. intervals during 259 days. In order to properly analyze the steel strains first, temperature compensation process has been conducted. Secondly, measured steel strains were divided into 12 phases with different events such as before paving, during concrete hardening, and after first cracking, etc.

**RESULTS :** Thermal strain rate (TSR) concept is defined as the linear strain variations with temperature changes and restraints rate of longitudinal steel against environmental loadings (especially thermal loading) with different cases is defined as degree of restraint (DOR). New concept of DOR could be indirect indicator of crack width behaviors of CRCP.

**CONCLUSIONS :** Before paving, DOR of longitudinal steel is almost same at the coefficient of thermal expansion of steel (12.44m/m/°C) because of no restraint boundary condition. After concrete pouring, DOR is gradually changed into -1 due to concrete stiffness developing with hydration. After first cracking at crack induced area, values of DOR are around -3~-5. The negative DOR stands for the crack width behavior instead of steel strain behavior. During winter season, DOR reached to -5.77 as the highest, but spring this values gradually reduced as -1.7 as the lowest. Based on this observation, we can presume crack width decreased over time within the time frame of this study. This finding is not consistent with the current theory on crack width variations over time, so further study is necessary to identify the causes of crack width reducing. One of the reasons could be related to concrete stress re-distribution and stress relaxation.

## Keywords

*degree of restraint (DOR), thermal strain rate (TSR), continuously reinforced concrete pavement(CRCP), longitudinal steel strain, environmental loading*

Corresponding Author : Nam, Jeong-Hee, Research Fellow  
Highway pavement research division, SOC research Institute, Korea  
Institute of Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu,  
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.910.0190  
E-mail : archnam@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Nov. 13, 2014 Revised Nov. 14, 2014 Accepted Nov. 28, 2014

## 1. 서론

일반적으로 AASHTO-86/93 설계기준에 따라 연속 철근콘크리트포장(Continuously Reinforced

Concrete Pavement; 이하 CRCP)의 종방향 철근을 설계하기 위해서는 균열간격(crack spacing), 최대균열폭(crack width), 최대철근응력(steel stress) 등을

검토해야 한다(AASHTO 86/93). 균열간격의 경우 잠재적 펀치아웃(punchout)과 스폐링(spalling)을 최소화하기 위해서 1.1~2.4m 범위를 유지할 수 있게 철근량을 조절해야 하며, 균열폭의 경우, 스폐링과 철근으로의 수분유입을 방지하기 위해 최대균열폭 간격을 1.0mm로 제한하고 있다. 그러나 McCullough 등(1975)의 연구결과에 따르면 수분유입에 따른 철근의 부식을 최소화 하고, 하중전달효율을 높이기 위해서는 0.6mm 이하의 균열폭이 더 효과적이라고 제시하기도 한다. 또한 종방향 철근의 과도한 항복에 의해 발생하는 균열폭이 넓어지는 현상을 최소화 하여 이에 따른 하중전달효율 저하방지를 위해 철근의 응력은 항복범위내 안전율을 고려한 값 이내로 제한하고 있다.

이와 같은 다양한 설계 검토사항 중 가장 검토하기 어려운 항목이 바로 균열폭 거동이다. 실질적으로 균열폭 거동은 균열발생시기 및 균열발생위치 등에 따라 크기가 다양하며, 동일한 균열이라도 계측위치별, 관찰자별 다양한 균열폭이 계측될 수 있어 균열폭 거동을 정량화 하기는 매우 어렵다(Moon 등, 2008). 또한 균열폭 거동은 콘크리트의 인장강도, 콘크리트의 열팽창계수, 건조수축계수, 철근의 직경, 철근의 열팽창계수 등과 관계가 있으며, 환경하중 측면에서는 대기온도 및 습도의 변화, 구속 조건으로는 하부지반의 마찰계수 등과 관련이 있다. 따라서 이 같은 다양한 변수에 대한 영향을 역학적-경험적(Mechanistic-Empirical, M-E)으로 반영한 M-E 설계법의 경우는, 역학적 구조해석과 경험적인 공용성 모델을 바탕으로 CRCP의 균열폭 거동을 추정할 수 있는 장점을 가진 설계법으로 평가되고 있다(NCHRP, 2004).

일반적으로 M-E 설계법의 경우 균열이 발생되면, 콘크리트 재료의 건조수축 등의 영향에 따라 균열폭이 시간이 지남에 따라 넓어지는 경향을 보이는 것으로 나타나고 있으나, 현장에서 장기계측된 콘크리트 데이터를 바탕으로 균열폭 거동을 제시한 일부 논문의 결과는 M-E 설계법과 항상 일치되는 균열폭 거동 경향을 보이는 것은 아니다(Nam, 2005; Kohler, 2005). 이와 같이 상반된 CRCP 균열폭 거동 결과는 아직도 균열폭 거동을 명확하게 이론화 하고 이해하지 못하고 있다는 사실을 반증하는 좋은 지표라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 시험시공된 CRCP 구간을 대상으로 종방향 철근의 장기거동을 연속계측하고, 계측결과를 정밀분석하여 균열폭 거동을 간접적으로 지수화 할 수 있는 철근구속정도(Degree of Restraint, DOR)라는 개념을 새로이 제시하고자 한다. 또한 제시된

철근구속정도를 바탕으로 환경하중에 따른 CRCP 종방향 철근의 장기거동을 명확하게 분석하고자 한다.

## 2. 철근구속정도(Degree of Restraint, DOR)

### 2.1. Thermal Strain Rate(TSR) 개념

일반적인 경우 물체는 온도가 상승하면 팽창하고, 하강하면 수축하게 된다. 이와 같이 환경하중(특히 종방향 철근의 경우 온도변화에만 반응)에 의해 선형적으로 변화되는 재료의 변형률을 Fig. 1과 같이 Thermal Strain Rate(이하, TSR)이라 정의하였다(Nam 등, 2007). 온도 변화에 따른 변형률의 변화는 일반적으로 양(+)의 기울기를 가지고 있으며, 특히 외부구속이 전혀 없는 환경조건에서 측정된 온도변화에 따른 변형률의 비를 Fig. 2와 같이 열팽창계수 (Coefficient of Thermal Expansion, COTE)로 표현하기도 한다. 본 계측에서 사용된 종방향 철근의 열팽창계수는  $12.44 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 로 측정되었으며, 이를 TSR의 기본값(reference TSR)으로 설정하였다.

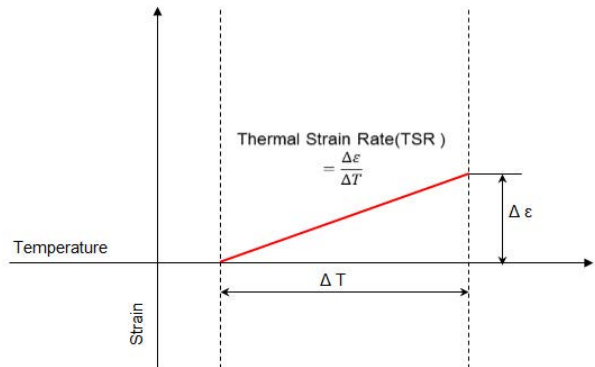


Fig. 1 Concept of Thermal Strain Rate (TSR)

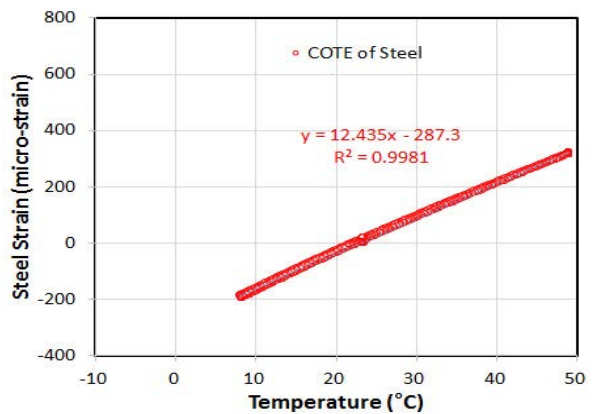


Fig. 2 Coefficient of Thermal Expansion of Longitudinal Steel (Reference TSR)

## 2.2. Degree of Restraint(DOR) 개념

CRCP의 경우 환경하중(온도 및 습도하중)에 의한 체적변화가 종방향 철근과 하부마찰에 의해 구속되는 구조 형식이다. 실제 CRCP 두께의 중심부위에 설치된 종방향 철근 측면에서 거동을 분석하면, 구속이 전혀 없는 경우는 TSR의 기본값인 철근의 열팽창계수와 동일한 거동을 보이겠지만, 콘크리트가 타설된 후 양생이 진행됨에 따라, 콘크리트에 의해 점진적으로 종방향 철근은 구속을 받게 되며, 또한 하부구조와 마찰에 의해서도 구속력이 점진적으로 증가하게 된다. 이와 같이 종방향 철근이 받는 구속의 정도를 Eq. (1)과 같이 TSR의 기본값인 열팽창계수와와의 상대적 비율인 Degree of Restraint (DOR)으로 정의하였다.

$$DOR = [(TSR - COTE) / COTE] \quad (1)$$

여기서,  $DOR$  = Degree of Restraint

$TSR$  = Thermal Strain Rate(m/m/°C)

$COTE$  = TSR at unrestrained condition (m/m/°C)

TSR 값의 경우 균열이 발생하기 전에는 온도변화에 따른 철근의 변형률을 나타내는 값이 될 것이나, 균열이 발생된 후에는 실질적으로 균열폭 거동으로 이해하는 것이 올바른 해석방법일 것이다. 이해를 돕기 위해 Fig. 3에서 다양한 경우의 TSR 값을 도식화 하였다. TSRcase I의 경우는 CRCP에서 콘크리트가 타설되기 전의 경우로 철근의 변형률 거동을 나타내며 이때 TSR 거동은 양(+의 기울기(10m/m/°C))를 나타낸다. 그러나 TSRcase II의 경우는 온도변화에 따라 실제 철근의 거동이 거의 없는 경우를 나타내며 이때 TSR의 기울기는 0m/m/°C을 나타내게 된다. 이 같은 경우는 콘크리트가 타설된 직후, 콘크리트의 강성(stiffness)이 점차로 증가되면서 철근의 거동을 구속하게 되고, 마침내 온도가 변화하더라도 철근이 움직이지 못하는 경우가 발생될 수도 있는 상황을 가정한 것이다. 또 다른 예는 콘크리트의 경화가 진전되는 동시에, 환경하중에 의해서 CRCP가 구속됨에 따라 양생초기에 콘크리트의 응력이 강도를 넘어서는 시점에서 CRCP에 균열이 발생하는 경우이다. TSRcase III의 경우는, 균열이 발생된 후 철근의 균열폭 거동에 의해서 발생하는 현상을 나타낸다. 즉 온도가 증가함에 따라 실질적으로 철근은 균열폭 거동(균열발생 후 대기온도가 증가할 경우 철근 양쪽의 콘

크리트가 팽창하기 때문에 균열폭 부위에 위치한 철근 변형은 수축하게 되는 현상)을 하기 때문에 TSR 기울기는 음(-)의 기울기(-10m/m/°C)를 나타낸다. 여기서 음의 기울기 값이 커진다는 의미는 균열폭 거동이 점점 커진다는 의미로 정의될 수 있다.

이와 같이 정의된 TSR 개념을 바탕으로 시간이 지남에 따라 환경하중에 의한 종방향 철근의 구속정도를 Eq. (1)에서 정의된 DOR로 정량화 하고자 한다.

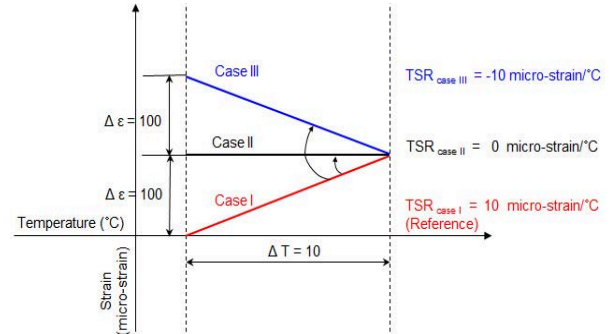


Fig. 3 Example of Different Cases of Thermal Strain Rate (TSR)

## 3. 연속철근콘크리트(CRCP) 시험시공

### 3.1. 시험시공 개요

국토교통부에서는 2013년 동두천시 관내 국도대체우회도로를 건설하기 위해서 JPCP 형식의 콘크리트 포장 시공하였다. Fig. 4에서 같이 공사연장 중 회천-상패 구간에 대해 동년 9월 23일 연속철근콘크리트를 약 200m 시험시공하였다. 실제 시공은 CRCP의 두께 변화에 대한 영향력을 비교하기 위해 두 개 구간(A 구간 : 두께=250mm, 연장=100m, B 구간 : 두께=200mm, 연장=100m)으로 구분하여 시공하였으며, 철근비는



Fig. 4 Location of CRCP Construction at HoeCheon-SangPai Region (STA 4+340-545)

FHWA(1990)의 권장사항을 적용하여 0.7%로 동일하게 설계하였다. 종방향 철근의 DOR을 계측하기 위하여 A, B구간에서 동일하게 철근변형을 계측하였으나 본 고에서는 A구간의 259일 장기계측 결과만을 대상으로 분석을 수행하였다. 계측기간 동안에는 공사차량 이외의 차량통행은 제한되었으므로, 환경하중으로만 CRCP 거동이 계측되었다고 가정하였다.

### 3.2. 철근변형을 게이지 설치

CRCP의 종방향 철근(HD-19)은 전체 포장두께의 중심부에 설치되었다. 횡방향 철근(HD-16)은 1200mm 간격으로 설치하였고, 세로줄눈부에 설치한 타이바(tie bar)는 횡방향 철근 사이에 HD-16을 1200mm 간격으로 배치하였다.

Fig. 5에서와 같이 종방향 철근의 변형을 측정하기 위하여 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 전기저항식(electrical resistance) 변형률 게이지인 자체온도보정게이지(self-temperature compensation gauge)를 사용하였으며, 사용 게이지의 열팽창계수는  $11.8 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 이고 게이지 상수 2.11인 값을 사용하였다.



Fig. 5 Steel Strain Gauges Installation on the Longitudinal Steel (Detail)

데이터 계측은 Campbell Scientific사에서 제조한 16 채널의 CR-1000을 사용하였으며, 10분 간격으로 모니터링을 수행하였다. 균열위치를 미리 확보하기 위하여 균열유도장치(crack inducer)를 'L'자형으로 제작하였으며, 실제로 시공 이틀 후에 균열유도장치 상부에 균열이 성공적으로 유도되었다.

시간에 따른 종방향 철근의 DOR을 효과적으로 분석하기 위하여 철근변형률 게이지를 Fig. 6에서 보는 바와 균열유도장치 위치에 2개, 균열에서 약 450mm 떨

어진 부분에 1개 설치하였다. 위치에 따른 각 게이지의 표시(naming)은 Table 1에 정리하였다. 또한 변형률 게이지의 온도보정을 하기위하여 게이지 설치위치에서 머커플(thermocouple)을 이용하여 온도를 계측하였다.

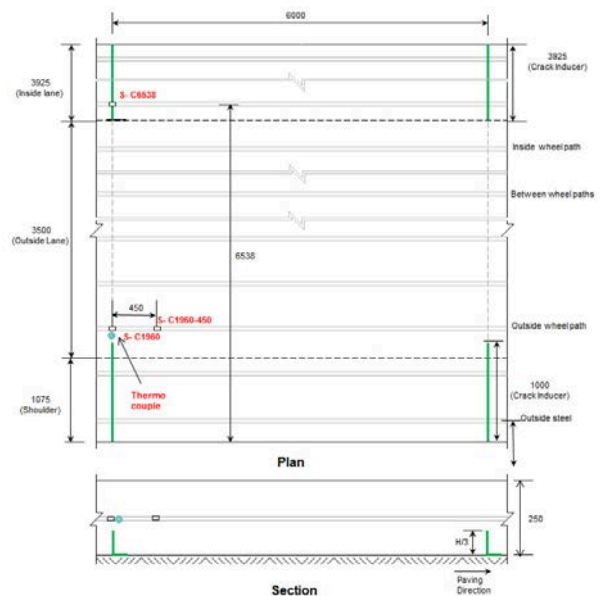


Fig. 6 Layout of Steel Strain Gauges Installation

Table 1. Denotation of Steel Strain Gauges

No.	Denotation	Description
1	S-C1960	Ex) S-C1960-450 S : Steel C : Crack
2	S-C6538	1960 : Distance from slab edge (mm) (transverse direction)
3	S-C1960-450	450 : Distance from crack (mm) (Longitudinal direction)

## 4. 종방향 철근 TSR 분석

### 4.1. 종방향 철근변형률 계측

CRCP의 종방향 철근 DOR 분석을 정밀하게 하기 위해서 게이지 제작회사에서 제시한 온도보정 프로세스 (Kyowa Electronic Instruments, 2005) 및 Finke 등(1978)의 연구결과를 참조로 하여 온도보정을 수행하였다. 철근변형률 및 철근위치의 온도를 2013년 9월부터 2014년 6월까지 연속적으로 259일 동안 성공적으로 계측하였다. CRCP 시공위치가 동두천 관내임을 고려할 때 온도변화는 국내의 동절기를 모사하였다고 간주

할 수 있으며, Fig. 7에서와 같이 9월의 기온과, 익년 6월의 기온이 유사함을 볼 때 환경하중에 의한 종방향 철근의 DOR를 분석하기 좋은 실험조건이라고 할 수 있다. 균열유도장치 부위에 설치된 S-C1960과 S-C6538은 첫 번째 균열(2.257days) 발생 후 균열폭 거동을 하기 때문에 변형률의 폭이 상대적으로 크게 계측되었으며, 균열발생 부위에서 약 450mm 떨어진 구간에 설치된 S-C1960-450의 경우는 균열이 발생되지 않았기 때문에 CRCP에서 두 횡방향 균열사이 존재하는 철근의 실질적인 변형률 거동을 대표한다고 할 수 있다.

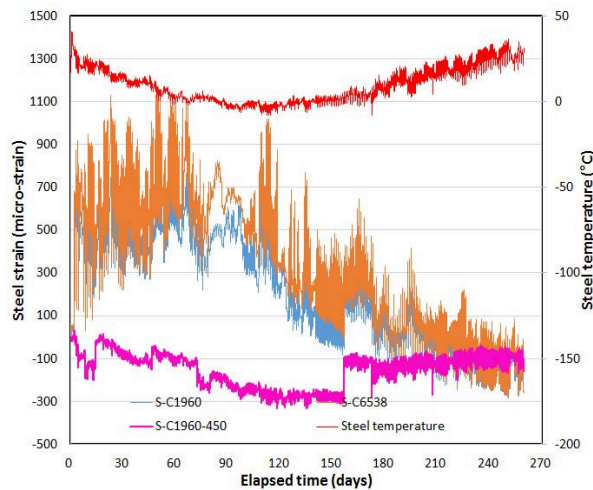


Fig. 7 Steel Strain and Steel Temperature Variations During 259Days

계측기간 동안 종방향 철근의 DOR 분석을 용이하게 하기 위해서 Fig. 8과 같이 Phase(단계)를 특정현상(event) 발생시기를 기준으로 구분하였다. Phase I의 경우는 콘크리트 타설 전 종방향 철근의 거동을 나타내고 있으며, phase II의 경우는 콘크리트가 타설되고 균열유도장치 상부로 첫 번째 균열(2.257days)이 발생되기 직전까지의 종방향 철근의 DOR을 분석하였다. Phase I과 Phase II사이에는 콘크리트가 타설되고 초기 setting이 진행되기 직전까지의 시기로 철근 데이터의 안정화가 이루어지지 않아 분석에서 제외시켰다. Phase III의 경우는 균열유도장치에서 약 5440mm에서 추가균열(4.069days)이 발생되기 전까지 종방향 철근의 거동을 분석하였다. 이와 같이 259일 동안의 거동을 12단계로 구분하였으며, 구분시기 및 특정현상에 대해서 Table 2에 정리하였다.

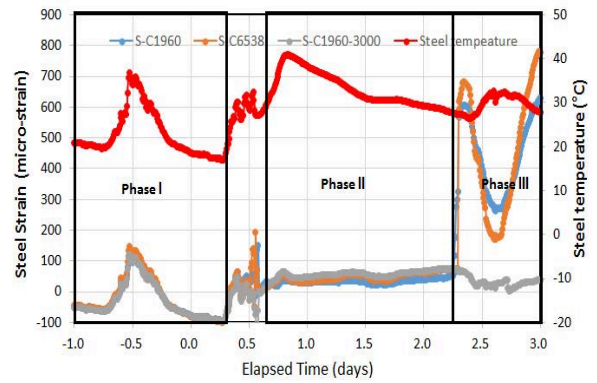


Fig. 8 Temperature Measurement Before Paving Using Thermocouple

Table 2. Definition of Each Phase

Phase	Beginning Date	Description
1	2013-09-12	Before paving
2	2013-09-23	Before first cracking at crack induced area
3	2013-09-25	Before second cracking at 5440mm far from the first crack
4	2013-09-27	until 14days
5	2013-10-07	Before third and fourth cracking
6	2013-10-16	Until 30days
7	2013-10-22	Before first crack widening at crack induced area
8	2013-11-08	After crack widening at crack induced area
9	2013-11-28	Before first crack widening again at crack induced area
10	2014-02-26	After first crack widening again at crack induced area
11	2014-03-14	End of winter period
12	2014-04-18	Spring period (until 2014-06-09)

## 4.2. 콘크리트 타설 전(Phase I)

CRCP 시공 전 종방향 철근의 DOR를 분석하기 위해서 공사 10일 전부터 철근 게이지의 변형률 및 철근의 온도를 계측하였다. 종방향 철근의 경우 철근의 연속성을 확보하기 위해 엇갈림 배치를 통해 겹이음을 철근 지름의 25배(500mm) 이상 연결하였다. 실제 미국 각 주별 시방서를 분석해 보면 겹이음 길이는 종방향 철근 직경의 25~35배 수준을 유지하고 있다. 콘크리트 타설 전 종방향 철근의 자중, 겹이음, 체어(chair) 등의 구속에 의한 구속력을 평가하기 위해서 Fig. 9과 같이 플로팅(plotting)을 통해 TSR 값을 계산하였다. Fig. 9에서 보이는 TSR의 경향은 구속이 전혀 없는 Fig. 2 철근의

열팽창계수( $12.44 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ )와 거의 유사한 TSR  $11.21 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 를 보이고 있다. 플로팅의 형상도 Fig. 2와 유사하게 온도의 최대, 최소지점에서 샤프(sharp)한 선형거동을 보여주고 있으며, 이는 일반적으로 구속을 전혀 받지 않은 상태의 철근의 열팽창 거동과 일치하므로, 콘크리트 타설 전 종방향 철근은 거의 구조적 구속을 받고 있지 않다는 사실을 간접적으로 보여주고 있다. 다만 TSR이 약  $1.23 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$  정도 차이나는 이유는 현장에 설치된 연장선 길이 및 연장선 노출온도 등에 의한 영향으로 추정된다.

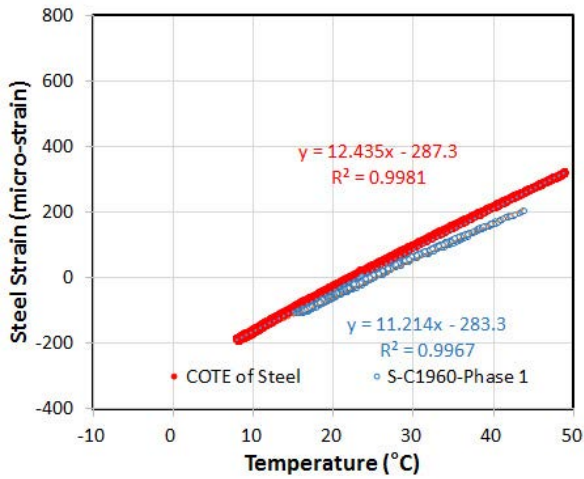


Fig. 9 Comparison of COTE and TSR-Phase I at Before Paving

### 4.3. 첫 번째 균열발생 전(Phase II)

콘크리트 타설 후 콘크리트는 수화반응을 통해 온도가 증가되면서, 서서히 강성(stiffness)을 가지게

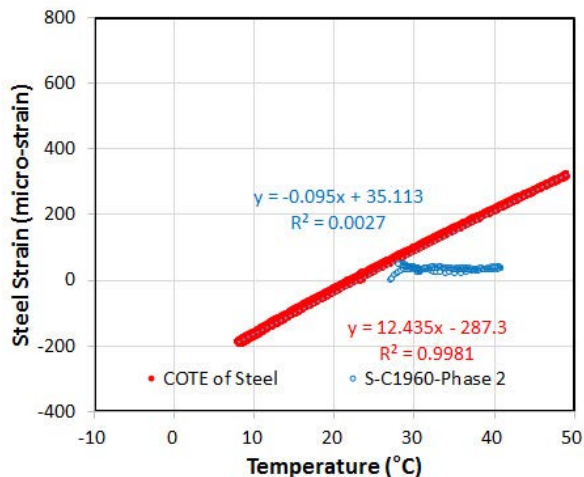


Fig. 10 Comparison of COTE and TSR-Phase II After Concrete Pouring

되며 환경하중에 의해 자유롭게 움직이려고 하는 종방향 철근을 구속하게 된다. 이같은 현상은 Fig. 10에서 제시된 종방향 철근의 TSR의 변화를 보면 알 수 있다. TRR 값이 거의 '0'를 나타내고 있으며, 이는 콘크리트의 내부 온도가 약  $25 \sim 41^\circ\text{C}$ 로 변화하는 동안 종방향 철근이 거의 움직이지 않는다는 의미이다. 이는 콘크리트가 굳어짐에 따라 종방향 철근을 구속한다는 의미이고 2장에서 언급한 TSRcase II에 해당되는 현상임을 알 수 있다. 분석의 편의를 위해서 기준이 되는 Fig. 2의 COTE 자료를 각 phase에 동일하게 표시하였다.

### 4.4. 두 번째 균열발생 전(Phase III)

콘크리트가 경화됨에 따라 강도는 점진적으로 증가되거나 이와 동시에 대기온도 및 콘크리트 온도의 지속적인 하강으로 콘크리트가 부담해야 되는 응력이 늘어나고 마침내 시공 이틀 후 새벽(2.257day)에 균열이 균열유도장치 부위에 발생되었으며 콘크리트와 철근이 함께 받던 응력을 철근이 모두 저항하게 됨에 따라 인장변형이 급격하게 증가되는 현상이 발생되었다.

이에 따라서 종방향 철근의 거동은 2장에서 언급한 TSRcase III의 균열폭 거동을 하게 된다. Fig. 11을 보면 TSR은  $-29.46 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 으로 온도거동과 반대 거동을 하게 된다. 즉 온도가 감소되면 균열부위에 위치한 철근은 증가된 변형률을 보이게 된다. 이는 전형적인 균열폭 거동이며 균열 양쪽에 위치한 콘크리트 슬래브가 수축함에 따라 철근이 인장거동을 하게 된 결과라고 할 수 있다.

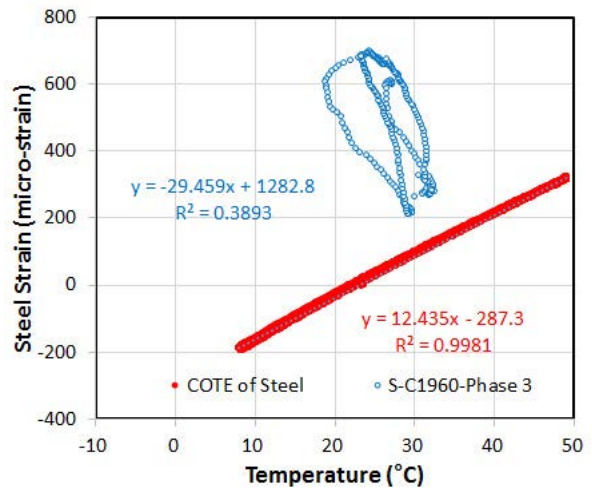


Fig. 11 Comparison of COTE and TSR-Phase III After First Cracking at Crack Induced Area

#### 4.5. 두 번째 균열발생 후(Phase IV)

두 번째 균열은 균열유도장치에서 약 5440mm 떨어진 위치에서 4.069days에 발생되었다. Phase IV의 경우는 두 번째 균열이 발생된 시점부터 시공 후 14일간의 기간을 분석하였다. Fig. 12에서 TSR은  $-43.49 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$  계측되었으며, 이는 균열폭 거동이 Phase III보다는 약 1.5배 증가되었다는 간접적인 지표이기도 하다. 이 같은 TSR의 증가는 환경적 요인으로는 대기기온의 하강과 관련이 있는 것으로 추정되며, 콘크리트 재료 측면에서는 건조수축의 증가, 구조적 측면에서는 CRCP의 경화가 진전됨에 따른 컬링(curling) 응력의 증가에 기인된 현상으로 추정할 수 있다.

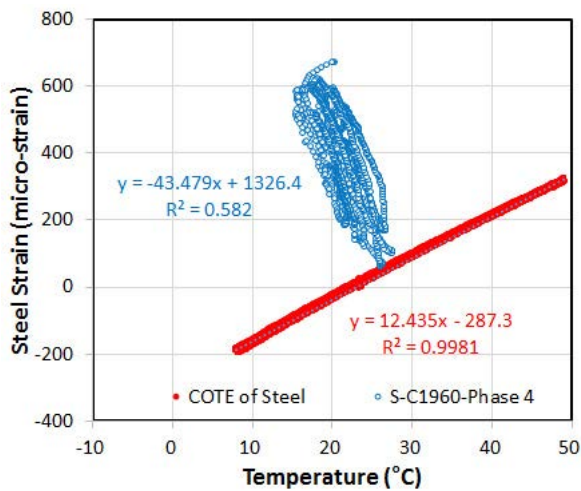


Fig. 12 Comparison of COTE and TSR-Phase IV After First Cracking at Crack Induced Area

#### 4.6. 동절기 거동(Phase V~Phase X)

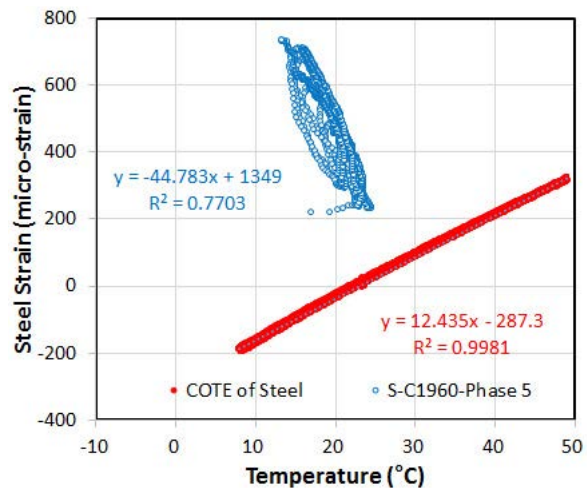
약 150일 기간의 동절기 기간 동안 철근의 온도는 약  $-8.2^\circ\text{C}$ 까지 떨어지며, TSR은  $-59.34 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 까지 발생되었다. 그러나 Fig. 13에서와 같이 동절기가 끝나는 시점인 Phase X의 경우 TSR 값은  $-21.06 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 까지 감소하게 된다. 이는 실질적으로 균열폭 거동이 동절기 최고시점과 비교해 약 2.8배 감소된 결과이다.

#### 4.7. 환절기 거동(Phase XI ~Phase XII)

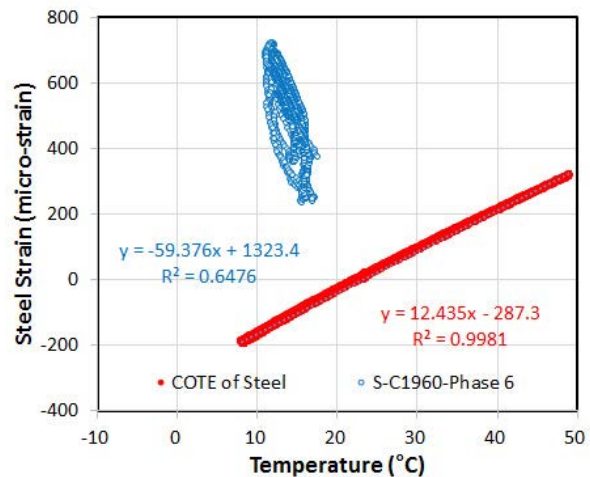
이와 같은 TSR 값의 감소는 환절기인 2014년 3월부터 6월까지 더욱 두드러지게 나타난다. 마지막 Phase XII의 경우 TSR 값은  $-8.69 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 로 균열발생 이후 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 실질적으로 균열발생 후 분석된 TSR 값의 선형거동이 명확하지 않

음에 따라 추세선의  $R^2$  값의 범위가 0.3~0.6에 머무르고 있지만 Fig. 14에서 보이는 전체적인 경향은 확실히 TSR 값이 낮아지는 것을 알 수 있다. 특히 동일한 온도범위를 포함하고 있는 phase IV와 phase XII를 비교할 경우 명확한 기온기 차이가 보이며 이를 정량화하기 위해 제시된 TSR 값은 타당한 지표라 할 수 있을 것이다.

그러나 시간이 지남에 따라 콘크리트의 건조수축 및 컬링 응력의 증가에 따라 균열폭이 증가되고 이는 TSR의 증가로 표현되는 일반적인 M-E 설계법 예측경향과 상이한 계측결과를 설명하기는 쉽지 않다. 다만 CRCP의 특성상 추가적인 균열발생으로 콘크리트 응력이 재분배(stress re-distribution)되고 이에 따라 응력완화(stress release) 현상에 기인된 결과일 수도 있다는 개념적인 추정은 가능할 것이다.

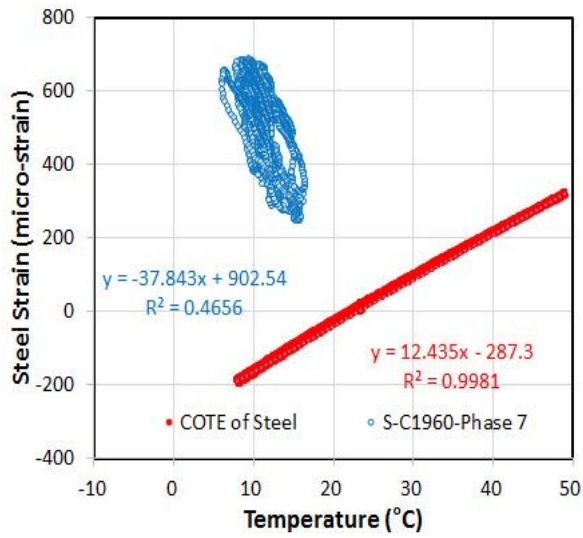


(a) Phase V

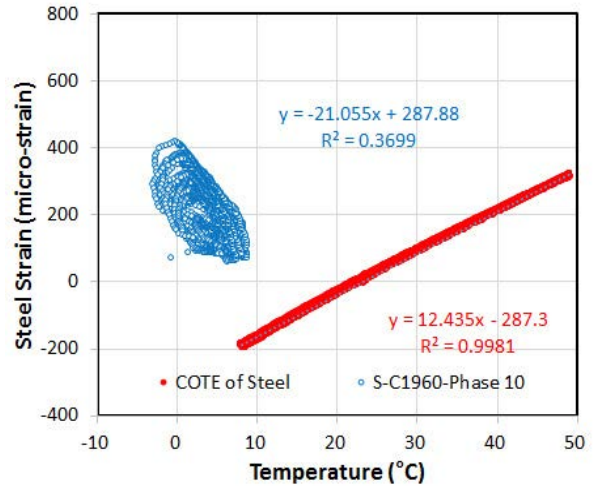


(b) Phase VI

(Figs. Continued)

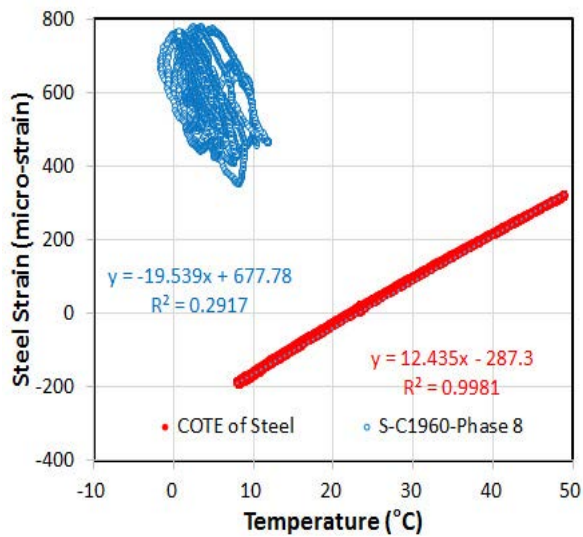


(c) Phase VII

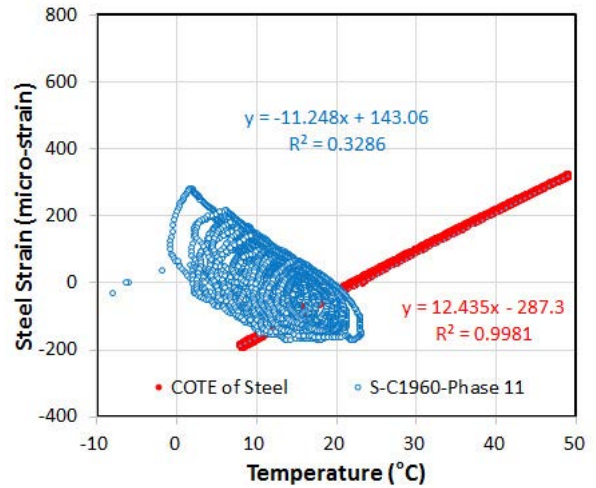


(f) Phase X

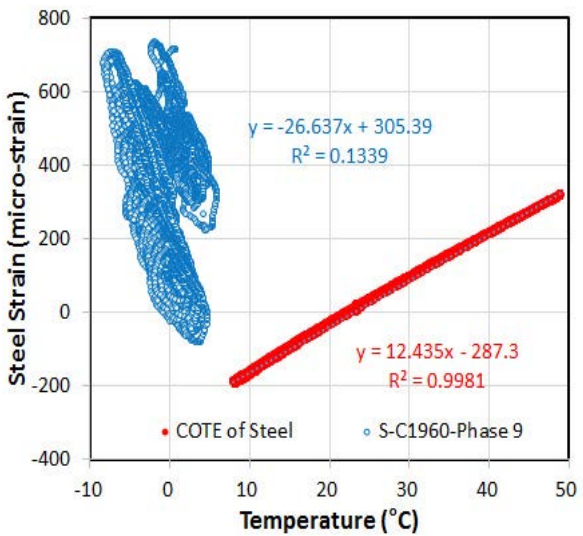
Fig. 13 Comparison of COTE and TSR Phase Between V to X During Winter



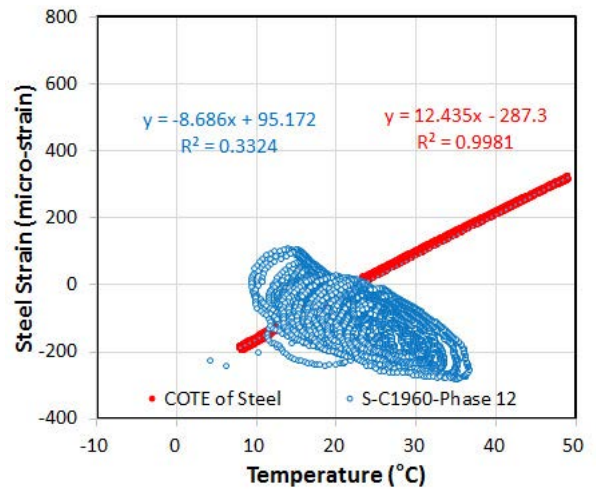
(d) Phase VIII



(a) Phase XI



(e) Phase IX



(b) Phase XII

Fig. 14 Comparison of COTE and TSR Phase XI and XII During Spring



## 5. 종방향 철근 DOR 분석

종방향 철근의 DOR 분석을 위해 2013년 9월부터 연속적으로 259일 동안 계측된 결과를 phase별로 12 단계로 나누었고, 계산되어진 TSR를 Eq. (1)에 적용시켜 각 phase별 DOR 값을 Table 3에 정리하였고, 시간축에 따른 DOR의 변화경향을 Fig. 15에 도식화 하였다. DOR 측정의 기준이 되는 기준값은 사용된 철근의 열팽창계수( $12.44 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ )를 사용하였으며, 기준값으로부터 상대적인 TSR 값의 변화를 DOR로 표시하였다.

균열유도장치위에 설치된 게이지인 S-C1960과 S-C6538의 DOR을 비교해 보면, 균열발생 전인 phase I에서는 거의 유사한 거동을 보인다. 첫 번째 균열이 발생된 직후에도 동일한 균열폭 거동(-DOR 거동)을 보이고 있으나, 구속정도의 크기는 시간이 지남에 따라 S-C6538이 S-C1960보다 65% 더 크게 나타났다. 이는 동일한 균열폭 거동을 보이나, 슬래브 단부에서 1960mm 떨어진 S-C1960 보다 6538mm 떨어진 S-C6538(슬래브 폭 중심부위)에서 응력을 많이 받는 일반적인 슬래브 거동을 타당하게 대변한다고 할 수 있다. 균열발생부위에서 약 450mm 떨어진 위치의 종방향 철근의 DOR 거동은 절대값의 크기도 작으며, 상대적으로 시간의 경과에 무관하게 일정한 경향을 보이는 특성을 나타내고 있다.

Table 3. Degree of Restraint at Different Steel Locations

Phase	Elapsed time (day)	Degree of Restraint (DOR)		
		S-C1960	S-C6538	S-C1960-450
1	-10	-0.10	-0.04	0.00
2	0	-1.01	-1.02	-1.03
3	4	-3.37	-4.70	-0.75
4	14	-4.50	-6.54	-1.03
5	22	-4.60	-6.82	-0.81
6	29	-5.77	-8.91	-0.89
7	46	-4.04	-6.53	-0.65
8	66	-2.57	-3.91	-0.51
9	156	-3.14	-3.04	-0.28
10	172	-2.69	-3.45	-0.59
11	207	-1.90	-2.24	-0.70
12	259	-1.70	-1.87	-0.87

그러나 TSR phase XI ~ XII 거동분석에서도 나타난 바와 같이 Fig. 15를 보면, 시간이 경과됨에 따라 균열 발생부위에서 균열발생 직후 DOR이 급격히 증가되었다 점진적으로 감소되는 경향을 뚜렷이 보이고 있다. 이

는 균열발생부위에서 시간에 따라 균열폭이 서서히 감소되는 경향을 간접적으로 표시하는 지표라고 판단된다. 이 같은 균열폭 감소현상을 원인으로서는 CRCP의 특성상 균열이 지속적으로 발생되고, 발생된 균열로 인해 콘크리트 응력이 재분배(stress re-distribution)되고 이에 따라 응력완화(stress release) 현상이 원인 중에 하나일 것이라고 추정해 본다. 현재의 단계에서 명확하게 균열폭 감소원인을 이해하고 설명하기에는 많은 가정이 필요할 것이고 추가적인 연구의 수행이 필요하다고 판단된다.

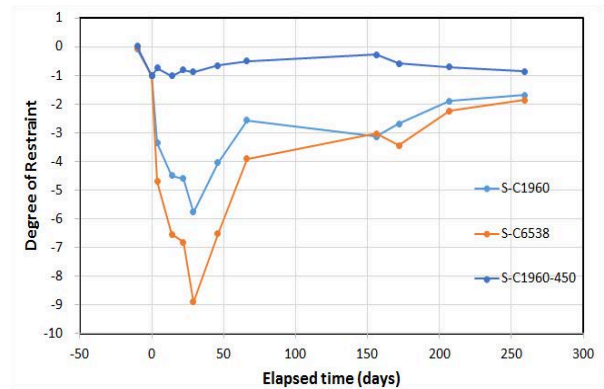


Fig. 15 Degree of Restraint at Different Steel Locations

## 6. 결론

CRCP 종방향 철근 거동에서 중요한 균열폭 거동을 명확하게 이해하기 위해 국내에서 시험시공된 CRCP 구간을 대상으로 종방향 철근의 거동을 장기계측하고, 계측 결과를 정밀분석하여 균열폭 거동을 간접적으로 지수화할 수 있는 철근구속정도(Degree of Restraint)라는 개념을 새로이 제시하였다. 또한 제시된 철근 구속정도를 바탕으로 환경하중에 따른 CRCP 종방향 철근의 장기거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 환경하중에 의해 선형적으로 변화되는 종방향 철근의 변형률의 기울기를 Thermal Strain Rate(TSR)로 정의하고, 구속이 없는 상태의 TSR 기본값(일반적으로 재료의 열팽창계수, COTE)과 현장 계측된 TSR 값의 상대적 변화를 Degree of Restraint(DOR)로 정의하고 균열폭 거동의 간접적인 지수로 제안하였다.
2. 콘크리트가 타설 전 종방향 철근의 TSR 값은 철근의 열팽창계수(COTE;  $12.44 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ )와 유사한  $11.21 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$  값을 보였으며, 이는 콘크리트 타

설 전 종방향 철근은 거의 구속을 받지 않는다는 것을 보여주는 지표이며, 이는 DOR 값 '0'으로 표현됨을 알 수 있다.

3. 콘크리트가 타설된 후 경화됨에 따라 종방향 철근은 서서히 구속을 받게 되며, 온도변화에 따라 움직임이 없는 TSR 값 '0m/m/°C'를 나타내며, 이는 구속이 시작되는 시점으로 DOR 값은 '-1'의 범위를 갖게 된다.
4. 균열유도장치 상부에 유도균열이 발생된 직후, 종방향 철근의 변형은 급격하게 증가되고, 이에 따라 철근의 거동은 균열폭 거동으로 전환하게 된다. 따라서 TSR 값은  $-29.46 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 을 가지며, 온도거동과 반대거동을 하게 된다. 균열폭 거동시점의 DOR 값은 -3~-5의 범위를 나타내며 이는 종방향 철근 양쪽에 위치한 콘크리트 슬래브의 구속력이 점진적으로 증가됨을 나타낸다.
5. 약 150일 간의 동절기 기간동안 S-C1960 위치의 TSR 값은 최대  $-59.34 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 값을 가지며, 이에 따른 DOR 값은 -5.77까지 상승하게 된다. 이 같은 TSR의 증가는 대기 기온의 하강, 콘크리트 건조축의 증가, 콘크리트 슬래브 컬링(curling) 응력의 증가에 기인된 현상으로 추정할 수 있다.
6. 시공 후 200일이 지난 2014년 3월부터 6월까지 종방향 철근의 거동 시 TSR 값은  $-8.69 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 로 균열발생 이후 가장 낮은 값을 나타내고, 이때 DOR 값은 -1.7을 보인다. 이 같은 종방향 철근의 DOR 감소는 시간이 지남에 따라 균열폭이 서서히 감소되는 경향을 간접적으로 표시하는 지표로 판단된다.
7. 균열폭 감소원인으로는 CRCP의 특성상 균열이 지속적으로 발생되고, 이로 인해 콘크리트 응력의 재분배, 응력완화현상이 원인 중에 하나일 것이라 추정해 본다.

현재의 단계에서 시간이 지남에 따라 명확하게 균열폭 감소원인을 설명하기에는 많은 가정 및 추가적인 연구의 수행이 필요할 것이다. 다만, 본 연구를 통해 CRCP 종방향 철근의 장기계측을 통해 귀납적 방법으로 DOR이 감소되는 경향을 모니터링 했으며, 앞으로도

추가적인 계측 및 DOR분석을 통해 CRCP 균열폭 거동을 명확하게 이해하기 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

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

#### References

- AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, America Association of State and Highway Transportation Officials. Washington., D.C.
- FHWA (1990). Continuously Reinforced Concrete Pavement, Technical Advisory, T 5080.14, Federal Highway Administration, D.C.
- Finke, T.E., & Heberling, T.G. (1978). Determination of thermal-expansion characteristics of metals using strain gages. *Experimental Mechanics*, pp.155-158.
- Kohler, E.R (2005) *Experimental Mechanics of Crack Width in Full-Scale Sections of Continuously Reinforced Concrete Pavements*, Doctoral Dissertation, Univerisyt of Illinois at Urbana-Champaign, IL
- Kyowa Electronic Instruments (2005). What's a strain gage. KYOWA Electronic Instruments Co., LTD.
- McCullough, B.F., Abou-Ay yash, A., Hudson, W.R., and Randall, J.P. (1975) *Desvign of Continuously Reinforced Concrete Pavement for highways*, Final Report, Research Project NCHRP 1-15, Prepared for Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program, National Academy of Sciences.
- Nam, J.H.,(2005) *Early-age Behavior of CRCP and Its Implications for Long-Term Performance*, Doctoral Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas
- Nam, J.H., Kim,D.H, Choi, S.C, and Won, M.C. (2007) *Variation of Crack Width over time in Continuously Reinforced Concrete Pavement*, Transportation Research Record, Vol.2037, 2007 Rigid and Flexible Pavement Design
- NCHRP (2004). *Guide for Mechanistic-Mepirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Final Report, 1-37A, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Transportation Research Board, National Research Council.
- Won, M.C., Choi, S.C, and Nam, J.H. (2008) *Behavior and Performance of Continuously Reinforced Concrete Pavement*, 9th International Conference on Concrete Pavements, International Society for Concrete Pavements