

연속철근콘크리트(CRCP) 종방향 철근의 초기거동 분석

Analysis of Longitudinal Steel Behaviors of Continuously Reinforced Concrete Pavement at Early Age

남정희 Nam, Jeong-Hee

정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 연구위원
교신저자 (E-mail : archnam@kict.re.kr)

전성일 Jeon, Sung Il

정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 수석연구원 (E-mail : jeonsi@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to analyse the longitudinal steel strain and stress of continuously reinforced concrete pavement(CRCP) with longitudinal and transverse direction at early age using stress dependent strain analysis method.

METHODS : To measure the longitudinal steel strain, 9-electrical resistance and self-temperature compensation gauges were installed to CRCP test section (thickness = 250mm, steel ratio = 0.7%) and continuously measured 10min. intervals during 30days. In order to properly analyze the steel stress first, temperature compensation process has been conducted. Secondly, measured steel strains were divided into stress dependent strain (elastic strain) and stress independent strain (thermal strain) and then stress dependent strain was applied to stress calculation of longitudinal steels.

RESULTS : Steel strains were successfully measured during 30days. To verify the accuracy of temperature compensation process, measured coefficient of thermal expansion(COTE, $11.46 \times 10^{-6} \text{m/m}^\circ\text{C}$) of longitudinal steel before paving was compared with that of unrestrained steel. Max. steel stress in the transverse direction shows about 266MPa at 23days after placement.

CONCLUSIONS : Steel stresses in the longitudinal and transverse direction have been evaluated. In longitudinal direction, steel stress from the crack was rapidly reduced from 183MPa at crack to 18MPa from 600mm apart the crack. From this observation, stress effective length can be identified as within 600mm apart from the crack. In transverse direction, max. stress point was located near the center of pavement width and stress level(266MPa) is about 66% of yield stress of steel

Keywords

continuously reinforced concrete pavement(CRCP), longitudinal steel stress, longitudinal steel strain, early-age behaviors

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 Oct. 17, 2014 Revised Oct. 20, 2014 Accepted Nov. 20, 2014

1. 서론

우리나라에서 대규모 연속철근 콘크리트 포장(Continuously Reinforced Concrete Pavement; 이하 CRCP)이 적용된 사례는 1987년 건설된 중부고속도로(CRCP 연장 68.4km)의 시공사례이고, 한국형 도로포장

설계법 개발 및 검증의 일환으로 중부내륙고속도로에 2002년 시험도로(연장 0.3km)가 건설되어 포장의 거동을 체계적으로 이해하기 위한 노력이 수행된 바 있다(김지원 등, 2002). 현재 국내에서는 초기공사비가 저렴하고 시공경험이 많은 무근 줄눈 콘크리트 포장

(Jointed Plain Concrete Pavement; 이하 JPCP) 이 전체 콘크리트 포장형식의 대부분을 차지하고 있으나 줄눈부의 잦은 손상으로 인해 내구수명 이전에 파손이 빈번해짐에 따라 포장공용수명 연장의 방법으로 CRCP 적용이 대두되고 있다(전범준 등, 2014). 한국도로공사에서는 2013년에 평택-제천간 고속도로에 CRCP(포장두께 280mm, 철근비 0.68%) 약 500m를 시험시공하였으며, 현재까지 공용성을 지속적으로 모니터링하고 있다.

CRCP는 국내에서 많이 시공되고 있는 JPCP와는 달리 환경하중(온도 및 습도하중)에 의한 체적변화가 종방향 철근과 하부마찰에 의해 구속되는 구조형식이다. 이와 같은 구속에 따라 하절기 시공 시 초기균열이 시공 후 약 1~2일 사이에 발생되며, 균열의 단면형상의 경우 상부는 폭이 넓고 종방향 철근 위치에서는 철근이 응력(stress)을 잡아주는 구조적 연속성을 보이기 때문에 폭이 좁아지는 브이(V) 형태의 형상을 나타나게 된다.

처음 CRCP 설계법이 개발되었을 때 종방향 철근비는 당시 공용되고 있던 CRCP의 공용성 평가에 의거하여 산정되었다(AASHTO, 1981). 현재 미국 연방도로국(Federal Highway Administration; FHWA)에서는 종방향 철근량 설계 시 최소 0.60%의 철근비 사용을 권장하고 있고, 겨울철 월평균 온도가 -12.2°C 이하인 지역의 경우에는 최소 0.7%의 철근비 사용을 권장하고 있다(FHWA, 1990).

콘크리트와 철근에 발생하는 응력의 수준은 CRCP의 장기공용성에 영향을 미치게 되는데, 균열발생 이전에는 철근이 콘크리트 체적변화를 구속하고 콘크리트와 철근이 일체로 거동하면서 동일한 변형률을 가지고 이에 해당하는 응력이 발생한다. 균열이 발생된 후에는 콘크리트의 불연속으로 인해 작용하는 내력을 철근이 부담해야 하기 때문에 철근에 상당히 높은 응력이 발생하게 된다. 이때 철근 발생응력이 항복강도 이하로 발생되어 과도한 균열폭이 발생되지 않도록 철근량을 설계하여야 한다(McCullough, B.F., 1979). 그러나 국내에서는 실제로 CRCP의 종방향 철근의 초기거동 및 발생응력에 대한 모니터링 결과가 거의 없으며, 이를 활용하여 국내실정에 맞는 CRCP 철근량 설계를 수행한 경우 또한 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일반국도에서 시험포장된 CRCP를 대상으로 종방향 철근의 초기변형을 계측하고 응력거동을 분석하여 CRCP 종방향 철근의 초기거동 이해 및 설계에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연속철근콘크리트(CRCP) 시험시공

2.1. 시험시공 개요

국토교통부에서는 2013년 동두천시 관내 국도대체우회도로를 건설하기 위해서 JPCP 형식의 콘크리트 포장을 시공하였다. Fig. 1에서 같이 공사연장 중 회천-상패 구간에 대해 동년 9월 23일 연속철근콘크리트를 약 200m 시험 시공하였다. 실제 시공은 CRCP의 두께 변화에 대한 영향력을 비교하기 위해 두 개 구간(A구간 : $t=250\text{mm}$, 연장=100m, B구간 : $t=200\text{mm}$, 연장=100m)으로 구분하여 시공하였으며, 철근비는 FHWA의 권장사항을 적용하여 0.7%로 동일하게 설계하였다. 종방향 철근의 초기변형을 계측하기 위하여 A, B구간에서 동일하게 철근변형을 계측하였으나 본 고에서는 A구간의 초기 30일간 계측결과만을 대상으로 분석을 수행하였다.



Fig. 1 Location of CRCP Construction at Hoecheon-Sangpai Region (STA 4+340-545)

2.2. 철근변형을 게이지 설치

CRCP의 종방향 철근(HD-19)은 전체 포장두께의 중심부에 설치되었으며, 위치를 잡기 위해서 플라스틱 체어(chair) 및 콘크리트 블록(block)을 사용하여 고정시켰다. 종방향 철근비는 0.7%로 설계하였으며, 횡방향 철근(HD-16)은 1200mm 간격으로 설치하였고, 세로줄눈부에 설치한 타이바(tie bar)는 횡방향 철근 사이에 HD-16을 1200mm 간격으로 배치하였다.

Fig. 2에서 같이 종방향 철근의 변형을 측정하기 위하여 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 전기저항식(electrical resistance) 변형률 게이지인 자체온도보정 게이지(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. 데이터 계측은 Campbell scientific사에서 제조한 16 채널의 CR-1000을 사용하였으며, 10분 간격으로 모니터

링을 수행하였다.



Fig. 2 Steel Strain Gauges Installation on the Longitudinal Steel (Detail)

종방향 철근의 초기변형을 효과적으로 모니터링하기 위한 선결조건은 철근 게이지를 부착한 부위에서 균열이 발생되어야 한다는 것이다. 일반적으로 CRCP는 환경하중에 의해서 무작위 균열(random crack)이 시공 후 1~2일 사이에 발생되기 때문에 균열발생위치를 예상하기는 매우 어렵다. 따라서 균열위치를 미리 확보하기 위하여 균열유도장치(crack inducer)를 'L' 자형으로 제작하면 효과적으로 균열위치를 예상할 수 있다(Nam, 2005). 균열유도장치는 CRCP 시작부에서 길이방향으로 약 80m(전체 200m의 중심부 부근)에 설치하였으며 CRCP의 단부거동으로부터 되도록 가장 먼 거리에 설치하려고 의도하였다. 균열유도장치의 높이는 콘크리트 면의 단면손실을 유도하기 위해 전체 단면의 H/3로 설정했으며, 길이는 주요 게이지의 설치위치를 제외하고 전 포장폭(약 8500mm)에 걸쳐 설치하였다.

Table 1. Denotation of Steel Strain Gauges

No.	Denotation	Description
S1	S-C60	Ex) S-C1960-150 S : Steel C : Crack 1960 : Distance from slab edge (mm) (transverse direction) 150 : Distance from crack (mm) (Longitudinal direction)
S2	S-C1960	
S3	S-C2885	
S4	S-C3810	
S5	S-C6538	
S6	S-C1960-150	
S7	S-C1960-300	
S8	S-C1960-450	
S9	S-C1960-600	

종방향 철근의 초기변형을 효과적으로 분석하기 위하여 변형률 게이지를 Fig. 3에서 보는 바와 같이 종방향 및

횡방향으로 나누어서 설치하였다. 종방향(longitudinal direction) 철근변형을 보기 위해서는 균열유도장치로부터 150mm 간격으로 각각 철근 게이지를 5개씩 부착하였으며, 균열발생 시 균열발생지점 철근의 횡방향(transverse direction) 응력분포 경향을 파악하기 위해서 총 5개의 게이지를 포장폭 방향으로 부착하였다. 또한 변형률 게이지의 온도보정을 하기위하여 게이지 설치위치에 서머커플(thermocouple, 열전대)을 이용하여 온도를 계측하였다.

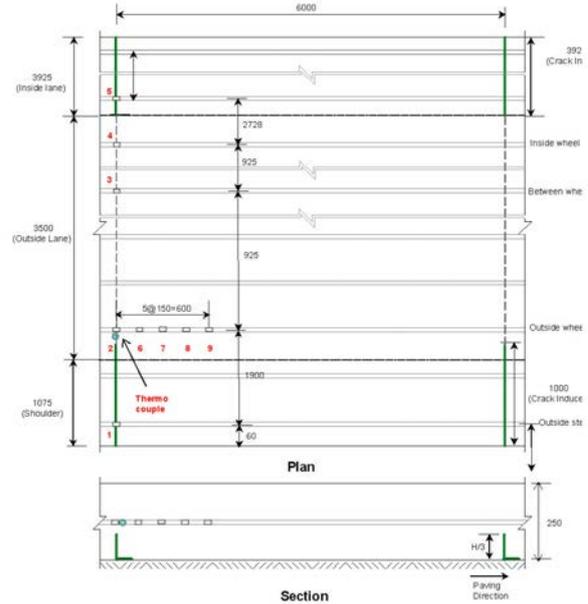


Fig. 3 Layout of Steel Strain Gauges Installation

3. 종방향 철근 초기거동 분석

3.1. 온도보정(Temperature compensation)

CRCP에서 균열이 발생하기전 철근의 초기거동을 명확하게 분석하기 위해서는 철근변형률 게이지 측정값에 대해 온도보정을 수행해야 한다. 전기저항식 변형률 게이지는 외력에 의한 변형뿐만 아니라 온도의 변화에 영향을 받기 때문이다(Finke 등, 1978). 특히 콘크리트 포장 같이 초기 환경하중(온도 및 습도)에 영향을 많이 받는 구조물의 경우 올바른 온도보정을 위해 계측 및 분석 시 많은 주의를 요하고 있다. 이와 같이 온도에 의한 영향력을 최대 줄이기 위해서 자체적으로 게이지 상수(gauge factor) 및 Thermal output을 이용하여 온도보정이 되는 자체온도보정 게이지를 사용하였으나 게이지의 특성에 대한 명확한 이해를 통해 실제 변형률을 분석할 필요가 있다(남정희 등, 2013).

이와 같은 온도보정을 원활하게 하기 위해 시공 10일 전부터 철근 게이지의 변형률 및 철근의 온도를 미리 계측하였다. 철근변형률 데이터의 경우 시공 7일 전에 데이터 로고의 전원공급문제로 약 하루분의 데이터 계측이 이루어지지 않은 점을 제외하고는 30일간 성공적으로 계측이 이루어졌다. Fig. 4에 따르면 타설 전 10일 동안 철근부위의 온도변화는 최소 14.4°C에서 최대 43.7°C에 이르는 것으로 나타났다. 이와 같이 약 30°C에 이르는 온도변화 폭은 직사광선에 그대로 노출된 철근 부위의 온도를 직접 계측한 결과로 보여진다. 그러나 반면에 실제 계측된 철근변형률의 변화폭은 Fig. 5와 같이 전반적으로 60micro-strains 수준을 유지하고 있다. 실제 철근의 일반적인 열팽창계수를 11.8×10^{-6} m/m/°C로 간주했을 경우 상당히 적은량의 변형이 계측된 것이다. 이와 같은 계측결과는 철근의 구속 때문이 아니라 자체온도보정 게이지를 사용했기 때문에 온도변형에 의한 변형량이 데이터 로고를 통해 자동적으로 보정되어서 나온 결과라고 하겠다. 만약 온도보정결과가 아주 정밀하다면 실제 계측결과는 '0'이 나와야겠지만, 게이지의 열팽창계수와 실제 철근의 열팽창계수의 미세

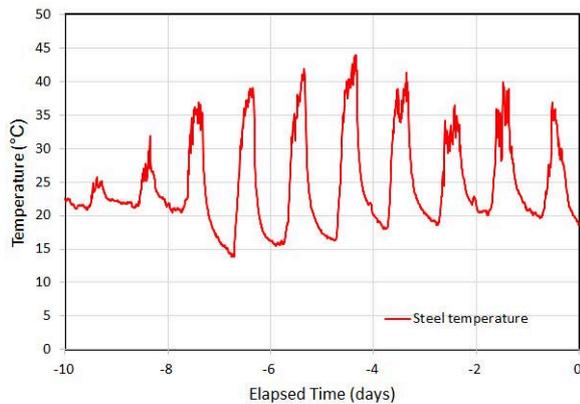


Fig. 4 Temperature Measurement before Paving Using Thermocouple

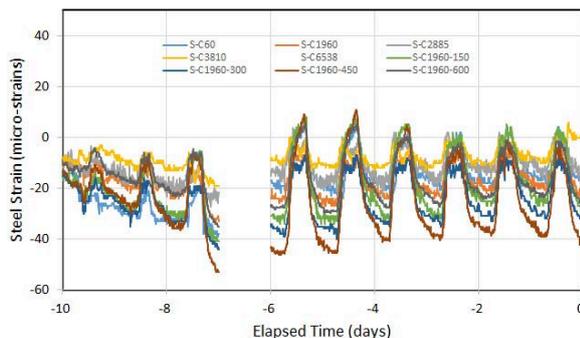


Fig. 5 Results of Steel Strain Measurement before Paving (Raw Data)

한 차이와 게이지 연장선의 길이에 따른 전기저항 증가 등이 계측오차의 원인으로 약 60micro-strains의 변형이 계측된 것으로 추정할 수 있다.

따라서 CRCP 철근의 정밀한 초기거동분석을 위해서 온도보정 프로세스(temperature compensation process)를 통해 자체온도보정 게이지의 온도보정효과를 역추적할 필요가 있다. 게이지 제작회사에서 제시한 온도보정 프로세스(Kyowa Electronic Instruments, 2005)를 참조로 하여 온도보정계수를 적용하여 계측된 S2-Raw data를 보정하면 Fig. 6과 같은 결과와 나타난다. 실제 온도변화 30°C에 따라 변형률의 변화폭이 약 300micro-strains에 이르는 것으로 볼 때 온도보정 전·후의 값이 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 온도보정 결과를 검증하기 위해 콘크리트 타설 전의 철근의 열팽창계수를 Fig. 7과 같이 플로팅(plotting)해 보면 약 11.46×10^{-6} m/m/°C가 계측됨을 알 수 있다. 이 같은 결과는 일반적인 철근의 열팽창계수인 11.8×10^{-6} m/m/°C와 거의 일치하는 값으로 올바른 철근의 거동을 분석하기 위해서 반드시 온도보정을 한 후 게이지의 변형 거동을 분석해야 함을 의미하는 것이다. 또한 Fig. 7의 열팽창계수 데이터와 같이 온도의 최대, 최소

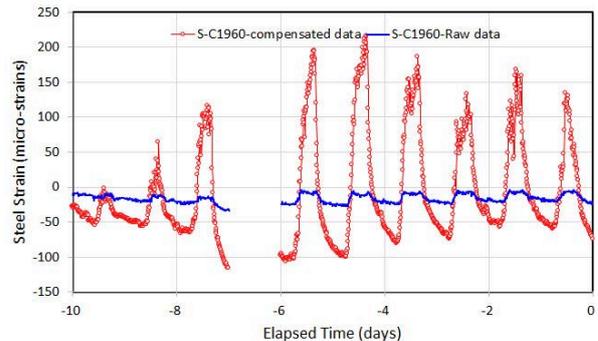


Fig. 6 Temperature Compensation of Steel Strain Using Temperature Compensation Factor

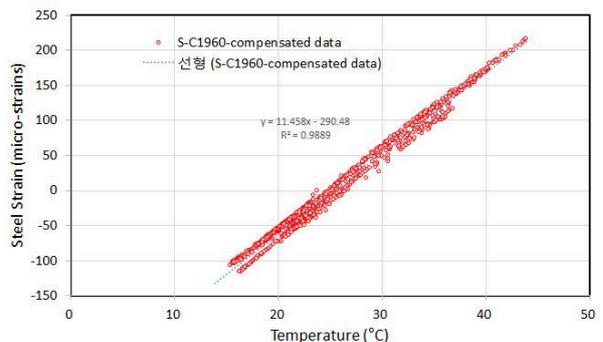


Fig. 7 Coefficient of Thermal Expansion of Steel After Temperature Compensation

지점에서 샤프(sharp)한 선형거동을 보여주는 것은 일반적으로 구속을 전혀 받지 않은 상태의 철근의 열팽창 거동과 일치하므로, 콘크리트 타설 전 철근은 거의 구조적 구속을 받고 있지 않다는 사실을 간접적으로 보여주고 있다.

3.2. Initial setting point

철근의 Raw data에 대한 온도보정을 수행한 후 철근 데이터의 분석 시작점(initial setting point)을 결정하는 과정이 필요하다. 콘크리트의 경화과정에서 initial 및 final setting의 설정이 분석의 중요한 시점인 것과 같이 철근 데이터의 경우도 분석 시작점을 논리적으로 설정하는 것이 중요하다. Fig. 8과 같이 실제 시공과정 중에서 철근 게이지가 설치된 부분을 보호하기 위해 콘크리트를 이용하여 게이지가 설치된 부분을 먼저 덮어두는 과정을 수행하게 되는데, 이와 같은 과정을 수행하면 일반적으로 철근의 온도가 급격히 변화하게 된다. 또한 실제 슬리폼 페이퍼(paper)가 게이지 설치부위를 통과할 경우 슬리폼 페이퍼에 설치된 진동기(vibrator)의 강한 진동으로 Fig. 9와 같이 데이터의 변화폭이 커지



Fig. 8 Concrete Pouring at Steel Strain Gauge Location

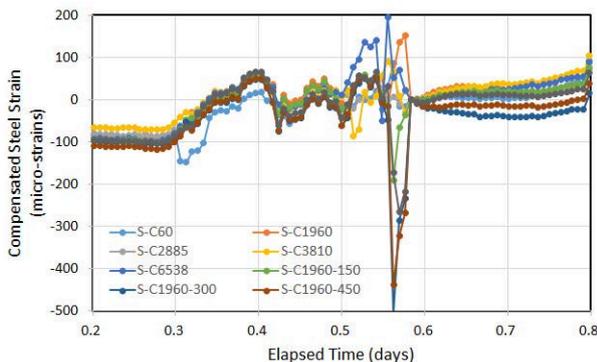


Fig. 9 Initial Setting of Steel Strain After Concrete Pouring

게 된다. 따라서 시공 시 획득한 사진자료를 참조하고, 온도 및 변형률 게이지가 안정화된 지점을 찾아 철근 데이터 분석의 시작점으로 설정하는 것이 필요하다.

3.3. 종방향 철근변형률 분석

Fig. 10에서와 같이 균열유도장치 상부를 따라서 유도균열이 시공 이틀 후 새벽 6시 10분경에 발생하였다. 실제 균열유도장치와 발생균열의 위치는 최대 $\pm 30\text{mm}$ 범위 폭 내에서 발생되었으며, 균열폭은 육안으로 관측하기 어려울 정도로 미세하였다.

환경하중에 의해서 CRCP가 초기에 균열이 발생하는 이유는 하부구조의 마찰응력과 연속철근이 콘크리트를 구속하기 때문에 발생된다고 알려져 있다(Won 등, 1991). 실제로 콘크리트 온도가 낮아지고, 건조수축이 발생하게 되면 콘크리트는 수축하게되나, 콘크리트의 수축량과 철근의 수축량 차이와, 콘크리트 자중에 의한 하부구조의 마찰저항으로 콘크리트는 수축 시 강한 구속을 받고, 이에 따라 인장응력이 발생되게 되는 것이다. 그리고 콘크리트 인장강도보다 인장응력이 초과되는 시점에서 마침내 콘크리트에서 균열이 발생하게 되는 것이다.



Fig. 10 Crack Occurrence at the Crack Induced Area

실제 철근의 초기변형은 Fig. 11에서와 같이 콘크리트가 강성을 가지기 전에는 수화열 등의 온도변화에 따라 약 50micro-strain 정도 변형이 증가되는 경향을 보이다가 콘크리트가 경화되어 일정량 이상의 강성이 생기면 콘크리트와 일체거동을 시작하게 된다. 이에 따라서 콘크리트는 연속철근 및 마찰저항에 의한 구속을 받게 되며 서서히 인장응력이 증가되는 것이다. 그러나 실제 변형률 데이터만으로는 정확한 응력의 변화를 이해하기는 어렵다.

Fig. 11에서와 같이 시공 후 대기온도의 지속적인 하강으로 콘크리트가 부담해야 되는 응력이 늘어나고 마침내 시공 이틀 후 새벽(2.257day)에 균열이 균열유도 장치 부위에 발생되었으며 콘크리트와 철근이 함께 받던 응력을 철근이 모두 저항하게 됨에 따라 인장변형이 급격하게 증가되는 현상이 발생되었다.

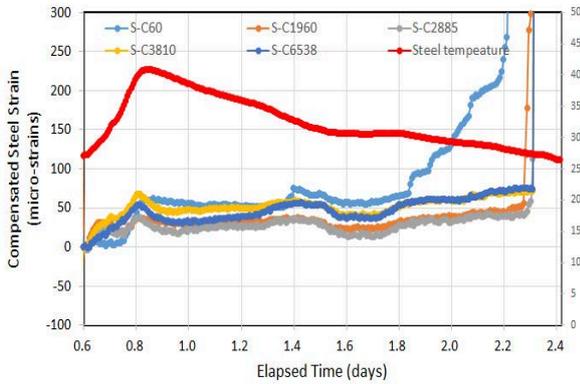


Fig. 11 Steel Strain Variations at Longitudinal Steels through Transverse Direction from Edge

3.4. 종방향 철근의 응력분석 방법

종방향 철근의 응력분석을 위해 환경하중에 의한 콘크리트 응력분석 시 많이 사용되는 Bazant(1988)의 변형률 분석방법을 응용하였다. Eq. (1)과 같이 일반적으로 변형률은 구속조건에 의해서 역학적 응력이 발생하는 stress dependent strain과 구속조건과는 상관없는 stress independent strain으로 크게 구분할 수 있으며, 콘크리트의 경우 stress dependent strain은 탄성범위 내에서의 elastic strain과 creep strain으로 구분할 수 있으며, stress independent strain은 온도하중에 의한 thermal strain과 습도변화에 의한 shrinkage strain으로 나눌 수 있다. 실제 종방향 철근 자체의 초기거동의 경우 creep strain과 shrinkage strain이 발생되지 않으므로 Eq. (1)은 Eq. (2)와 같이 단순해 질 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \epsilon_E(t) + \epsilon_C(t) + \epsilon_S(t) + \epsilon_T(t) \\ &= \epsilon_o(t) + \epsilon^o(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\epsilon(t)$ = total strain or temperature compensated strain

$\epsilon_E(t)$ = elastic strain

$\epsilon_C(t)$ = creep strain

$\epsilon_S(t)$ = shrinkage strain

$\epsilon_T(t)$ = thermal strain

$\epsilon_o(t)$ = stress dependent strain

$\epsilon^o(t)$ = stress independent strain

$$\epsilon(t) = \epsilon_E(t) + \epsilon_T(t) = \epsilon_o(t) + \epsilon^o(t) \quad (2)$$

실제 CRCP에서 종방향 철근의 응력계산을 위해 필요한 stress dependent strain을 산출하기 위한 개념도를 Fig. 12에 도식화하였다. 동일한 환경하중 조건이라도 실제 응력의 발생여부는 구속조건(boundary condition)에 따라서 달라지게 된다. 구속이 전혀 없는 상태에서는 환경하중의 변화에 따라 변형은 발생되지만 응력은 크게 보편(global aspect) 발생되지 않는다. 반면에 구속이 되어 있을 경우에는 구속이 되어있지 않는 경우와 비교해서 구속정도에 따라 측정된 변형의 결과가 차이가 나며, stress independent strain을 알 경우에는 이를 이용하여 stress dependent strain을 계산할 수 있는 것이다. 종방향 철근의 경우에는 온도하중에 의한 영향만을 받기 때문에 철근의 온도 변화만 측정하면 종방향 철근의 stress independent strain을 쉽게 계산할 수 있다. 따라서 온도보정이 이루어진 계측데이터(total strain)에서 철근의 stress independent strain을 빼 주면 실제 철근에 발생하는 stress dependent strain을 계산할 수 있다.

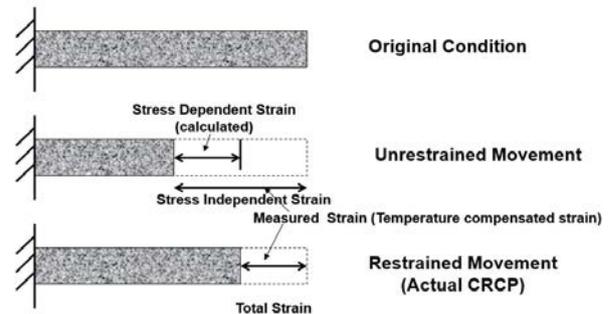


Fig. 12 Conceptual Diagram of Stress Dependent Strain Calculation of CRCP

이와 같은 방식을 적용해서 실제로 종방향 철근(S-C1960)의 stress dependent strain을 구하면 Fig. 13과 같다. 콘크리트가 시공되기 전 철근의 경우 실제 변형은 발생되나 열팽창계수 계산에서 검토된 바와 같이 구속이 거의 되어 있지 않기 때문에 stress dependent strain은 거의 '0'에 가까운 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 그리고 콘크리트 타설 직후의 경우는 온도의 상승과 콘크리트 수화반응에 의한 부피팽창으로 실제로 철근

에 압축응력이 걸리는 것을 알 수 있으며, 균열발생으로 콘크리트가 인장응력을 더 이상 받아 줄 수 없는 시점부터는 인장변형이 급속하게 증가되는 것을 알 수 있다.

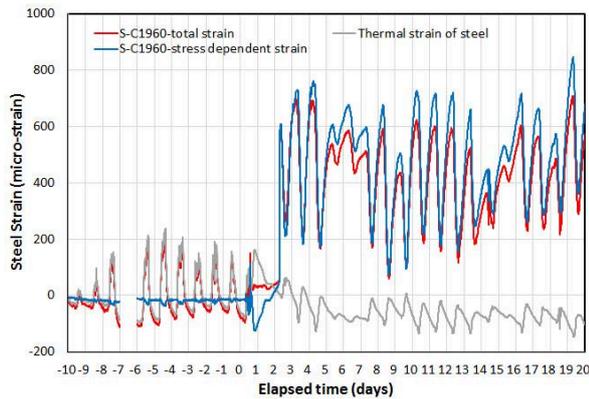


Fig. 13 Analysis of Stress Dependent Strain (S-C1960)

3.5. 종방향 철근 응력 분석

Stress dependent strain을 이용하여 종방향 철근의 초기거동을 종·횡방향으로 분석을 수행하였다. 분석의 편의를 위해 Table 2와 같이 종방향(longitudinal direction)을 차량진행방향으로 부착된 게이지로 정의하고, 횡방향(transverse direction)은 차량진행방향의 직각방향으로 부착된 게이지로 정의하였다.

Table 2. Denotation of Steel Strain Gauges

Direction	Steel strain gauges
Longitudinal	S-C1960, S-C1960-150, S-C1960-300, S-C1960-450, S-C1960-600
Transverse	S-C60, S-C1960, S-C2885, S-C3810, S-C6538

균열이 발생된 시점부터 종방향으로 발생된 철근 응력을 분석해 보면, Fig. 14에서와 같이 균열유도장치에 의해 유도균열이 발생된 시점에 균열유도장치 상부의 철근에 급격한 인장응력(약 121MPa)이 걸리는 것을 알 수 있다. 균열이 발생되기 전 콘크리트와 철근이 인장응력을 분담해서 받고 있다가 균열발생 후 콘크리트의 인장응력 분담부분을 철근이 전부 부담하게 된 결과라고 할 수 있다. 즉 균열부위를 중심으로 양쪽에 위치한 콘크리트 포장체가 철근을 당기는 구조적 거동을 하는 것과 같은 이치이다. 시공 후 약 30일간의 모니터링 결과를 바탕으로 보면 포장 단부에서 1960mm 내부의 종방향 철근의 최대응력은 온도의 지속적인 하강으로 인해 시공 23일 후 최대 183MPa에 이른다. 그러나 기온의

지속적인 하강 및 추가균열의 발생 등으로 인해 지속적으로 최대응력의 변화는 예상된다.

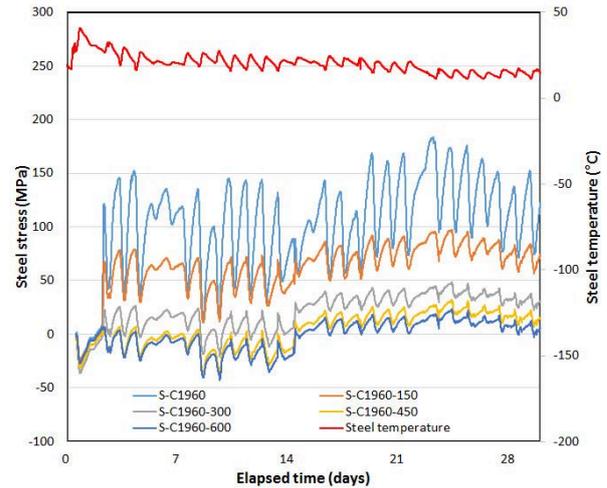


Fig. 14 Steel Stress Variations with Longitudinal Direction from Crack After Placement

Table 3과 Fig. 15에서와 같이 종방향으로 150mm 간격으로 연속적으로 부착된 5개의 철근변형률 게이지의 변형을 분석해보면 균열부위의 최대응력을 100%로 하였을 경우 150mm 위치에서는 최대응력의 54%, 300mm 위치에서는 최대응력의 21%, 450mm에서는 최대응력의 11%, 600mm에서는 최대응력의 7% 정도 발생되는 것을 알 수 있다. 이 같은 측정결과를 바탕으로 균열발생 시 실제 종방향 철근이 동시에 영향을 받는

Table 3. Stress Effective Length of Longitudinal Direction

Location from crack(mm)	Max. stress (MPa)			Stress reduction rate(%)
	13/09/26	13/10/12	13/10/16	
0 (S-C1960)	145.85	168.40	183.63	-
150 (S-C1960-150)	78.00	92.60	95.83	53.55
300 (S-C1960-300)	25.85	43.40	44.23	20.60
450 (S-C1960-450)	6.34	25.64	27.31	10.76
600 (S-C1960-600)	3.59	18.06	18.01	7.20

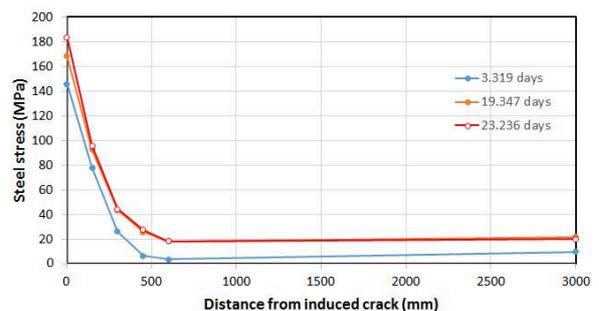


Fig. 15 Steel Strain Reductions with Longitudinal Direction from Crack

길이를 응력유효길이(stress effective length)로 정의하고 이는 최대 600mm 이내로 집중된 형태로 분포되는 것을 알 수 있다.

균열이 발생된 시점부터 횡방향으로 발생된 철근 응력을 분석해 보면, Fig. 16에서의 분포와 같이 포장 폭(8500mm)중심으로 가운데 부분에서 가장 응력이 높게 형성됨을 알 수 있다. 실제 종방향 응력분포를 분석했던 포장 단부에서 1960mm 내부의 최대응력(183MPa) 보다 포장 폭 중심부의 경우(단부로부터 3810mm) 약 145%에 해당하는 266MPa의 응력분포를 보이고 있다.

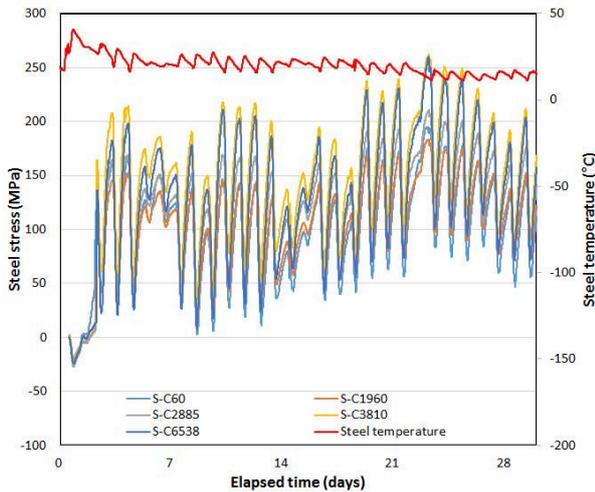


Fig. 16 Steel Strain Variations with Transverse Direction at Crack

슬래브 끝단부의 경우는 Fig. 17에서와 같이 상대적으로 기 설치된 'L형 측구'와의 마찰 등에 의해서 응력이 약간 높게 나타난 것으로 추정된다. 그러나 전반적인 형상은 슬래브의 포장 폭 중심부로 갈수록 응력이 증가되는 일반적인 응력분포를 보이고 있으며, 종방향 철근의 항복응력인 400MPa의 최대 66%의 범위를 보이는

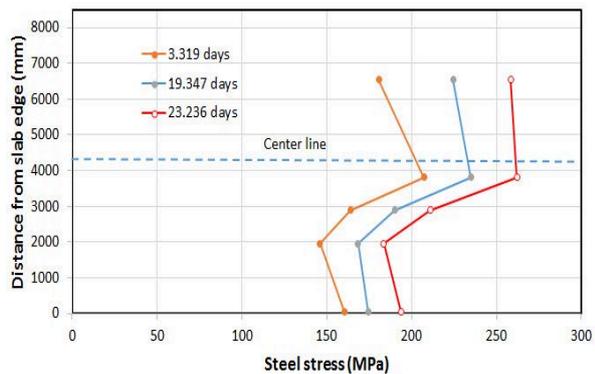


Fig. 17 Steel Strain Variation with Transverse Direction at Crack from Slab Edge

것을 알 수 있다. 그러나 이러한 응력분포는 대기온도의 하강 및 추가균열의 발생 등으로 인해 지속적으로 변화할 것으로 예상된다.

4. 결론

국내실정에 맞는 CRCP를 설계하기 위해서 가장 중요한 설계인자 중의 하나인 종방향 철근의 거동을 이해하기 위해 동두천시 관내 국도대체 우회도로 공구 중 회천-상패 구간에 CRCP를 약 200m 시험 시공하였다. 실제 시험구간은 두께 = 250mm, 철근비 = 0.7% 구간에 대해 철근변형률 게이지를 종방향 철근에 종방향 및 횡방향으로 각각 5개씩 부착하였으며 30일간 모니터링을 수행하였다. 계측결과에의 정밀도를 향상시키기 위해서 자체온도보정이 되는 전기저항식 게이지를 사용하였으며, 온도보정 프로세스(temperature compensation process)를 적용한 후 종방향 철근의 초기변형률을 계측하고 응력거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트가 타설되기 전 종방향 철근의 열팽창계수 거동을 분석해 보면 일반적으로 구속을 전혀 받지 않은 상태의 철근의 열팽창 거동과 일치하므로, 콘크리트 타설 전 연속철근은 거의 구조적 구속을 받고 있지 않다고 추정된다.
2. CRCP의 초기균열을 유도하기 위해 균열유도장치를 사용하였으며, 시공 2.257일 경과 후 유도균열이 균열유도장치 상부에서 발생되었다. 균열발생 오차범위는 균열유도장치에서 최대 ±30mm 범위 폭 내에서 발생됨에 따라 단면의 H/3 범위의 균열유도장치는 효과적인 유도균열 발생 방법으로 판단된다.
3. 종방향 철근의 응력 분석을 위해 변형률을 크게 stress dependent strain과 stress independent strain으로 구분하는 방법을 응용하여 제시하였으며 온도보정된 전체변형률(total strain)에서 온도에 의한 변형인 stress independent strain을 차감시켜 응력을 유발시키는 stress dependent strain을 계산하는 방법을 제시하였다.
4. 균열발생 후 포장단부에서 1960mm 내부의 종방향 철근의 종방향 응력분포를 살펴보면 시공 23일 후 최대 183MPa이 발생되었으며, 종방향으로 응력분포 유효길이(stress effective length)는 균열발생 지점에서 최대 600mm 이내로 위치함을 알 수 있고 응력의 크기는 균열부 최대응력의 약 7%에 해당됨을

관찰하였다.

5. 종방향 철근의 횡방향 응력분포는 최대응력(266 MPa)이 포장폭 중심부분에서 발생이 되었으며 이는 철근의 항복응력 400MPa에 66%의 범위에 해당된다. 그러나 이러한 응력분포는 대기온도의 하강 및 추가균열의 발생 등에 따라 변화가 예상되므로 지속적인 모니터링이 필요하겠다.

향후에는 지속적인 모니터링 결과의 분석을 통해 환경하중에 의한 철근의 장기응력거동을 계산하고, 추가 균열의 발생에 따른 철근 응력분포의 변화에 대한 분석을 수행할 예정이다. 또한 콘크리트의 응력분포와 연계하여 종합적인 CRCP 초기거동에 대한 분석을 수행할 예정이다.

감사의 글

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

References

AASHTO (1981). AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures, Chapter 3 revised, American Association of State and Highway Transportation Officials. Washington., D.C.

Bazant, Z.P.,(1988) Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete, John Wiley and Sons

FHWA (1990). Continuously Reinforced Concrete Pavement,

Technical Advisory, T 5080.14, Federal Highway Administration, D.C.

[Http://www.fhwa.dot.gov/pavement/t508014.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/pavement/t508014.cfm)

Finke, T.E., & Heberling, T.G. (1978). Determination of thermal-expansion characteristics of metals using strain gages. *Experimental Mechanics*, 155-158.

Jeon, B. J., et al (2014). Evaluation of Field application using Mechanical Placement Method for CRCP, 2014 Fall conference of The Korean Society of Road Engineers. 18.

Kim, J. W., et al. (2002). Research of construction and operation of Korea Road Test Bed. Expressway & Transportation Research Institute, [Http://research.ex.co.kr/file_03/LIB/OTKHRP500316/OTKHRP500316.xml](http://research.ex.co.kr/file_03/LIB/OTKHRP500316/OTKHRP500316.xml)

Kyowa Electronic Instruments (2005). What's a strain gage. KYOWA Electronic Instruments Co., LTD.

McCullough, B.F., Ma, J.C.M., and Noble, C.S.(1979) Limiting Criteria for the Design of CRCP. Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas

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., An, D.S., and Kim, Y.B.(2014) Coefficient of Thermal Expansion Measurement of Concrete using Electrical Resistance Strain Gauge, *International Journal of Highway Engineering*, The Korean Society of Road Engineers. Vol.15 No.6

Won, M.C., Hankins, k. and McCullough, B.F, (1991) Mechanistic Analysis of CRCP Considering Material Characteristics, Variability, and Fatigue, Center for Transportation Research, Research Report 1169-2.