

# 매립형 철골합성구조의 부등건조수축에 따른 내부강재구속효과에 관한 연구

## Embedded-Steel Restraining Effects due to Differential Drying Shrinkage in SRC(Steel Reinforced Concrete) Structures

조병완                      김성호\*\*                      김영진\*\*\*                      고상윤\*\*\*\*  
Jo, Byung Wan · Kim, Sung Ho · Kim, Young Jin · Ko, Sang Yoon

### Abstract

During the past few decades, several composite steel-concrete structural systems have been used and the demand of SRC (Steel Reinforced Concrete) structure increases on the construction of coping structures. But drying shrinkage of concrete which is not uniform and the additional restraining effects of encased steel in concrete may cause the crack which leads to harmful damage to structures. In this study, specimens were made to show the restraining effects of embedded-steel in concrete and the differential drying shrinkage strains at various position of concrete were measured and analysed by Compensation Line Method. The result showed that there were remarkable difference in the drying shrinkage according to the depth of the concrete, and the tensile stress of the concrete near to encased steel showed the significant amount of stress contrary to the specimen which has no embedded-steel.

### 1. 서론

최근 상대건철 구조물에 사용이 증가되고 있는 철골 철근콘크리트 매립형 합성보에서 다량의 시멘트 혼입에 의한 수화열로 인한 온도응력과 건조수축응력 및 철근과 철골에 의한 구속응력이 추가되어 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 외관상의 문제로 구조물 설계에 무시할 수 없는 영향을 일으키는 경우가 빈번히 일어나고 있다. 특히 매립형 철골합성부재와 같은 합성부재에서 콘크리트는 수축하고, 강은 팽창하는 이 수축에 저항함에 따라 잔류응력이 발생하게 된다. 이로 인하여 철근 및 철골에는 압축응력이 발생하게 되고 콘크리트에는 인장응력이 발생하게 되어 이들의 내부구속에 의해 콘크리트 단면에 균열이 발생하는 경우가 있다. 지금까지 이러한 구속응력을 예측하기 위한 실험 및 연구가 이루어졌으나 대형화된 구조물에서의 단면 깊이에 따른 부등건조수축 변화량을 고려한 내·외부구속에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 매립형 철골합성보의 부등건조수축으로 인한 내부구속을 내부강재구속(internal steel restraint)이라 정의하여, 강재에 의한 구속과 콘크리트 단면 높이에 따른 부등건조수축으로 인하여 발생하는 내부강재구속응력을 콘크리트 계층에 따라 예측·해석하기 위하여 강재와 콘크리트의 합성시 순서를 해석, 단면 깊이에 따른 건조수축 변형량을 측정하였다. 또한, Compensation Line Method를 이용한 내부강재구속 해석을 통하여 구속효과를 밝히고자 하였다.

김성호 : 서울대학교 토목공학전공 석사학위 취득, 부교수  
김영진 : 서울대학교 토목공학전공 석사학위 취득, 연구원  
고상윤 : 연세대학교 토목공학전공 석사학위 취득  
조병완 : 연세대학교 토목공학전공 석사학위 취득

2 ACI 207 위원회의 제안에 따른 구속응력

콘크리트 부재의 변형 구속은 벽체 또는 바닥 슬래브에서와 같이 부재 전체 변형을 다른 부재 또는 시방이 구속하는 외부구속의 경우와, 대형기초 또는 뎀에서와 같이 내외부의 변형차이로 인한 내부구속의 경우로 나눌 수 있다. 구속응력은 구속계수  $K_R$ 을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_s = K_R \Delta_C E_C \tag{1}$$

$K_R$ : 구속상도(완전구속시 1),  $\Delta_C$ : 구속이 없는 자유로운 변형,  $E_C$ : 콘크리트 탄성계수(변형발생시)

구속계수의 계산은 구속조건에 따라 아래의 값을 사용할 것을 ACI 207위원회에서 제안하고 있다

2.1 연속 외부구속의 경우

콘크리트 부재가 접촉하는 전면에 걸쳐 구속되는 경우, 구속계수는 지간/높이비(L/H)와 부재높이(h/H)에 따라 차이를 보이며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$K_R = [(L/H-2)/(L/H+1)]^{H/H} ; L/H \geq 2.5 \text{일때} \tag{2}$$

$$K_R = [(L/H-1)/(L/H+10)]^{H/H} ; L/H \leq 2.5 \text{일때} \tag{3}$$

2.2 내부구속의 경우

내부구속의 경우, 응력분포는 양면이 연속 외부구속된 경우와 흡사하며 내부구속에 의한 인장응력과 압축응력의 합은 0이 된다. 응력이 0이 되는 선은 일반적으로 온도응력해석 또는 시산법으로 구할 수 있으며, 자유표면의 구속계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_R = \frac{1}{1 + 2d_s W - 2d_s} \tag{4}$$

2d: 인장응력의 깊이, W 슬래브 총폭 또는 벽체의 높이(m)

2.3 Compensation Line Method (CL Method)에 의한 구속응력

2.3.1 내부구속응력

Compensation Plane이라는 것은 그림 1, 2에 나타난 바와 같이 전혀 외부구속이 없는 구조체에 있어서 온도 분포에 대응하는 변형률이 존재하는 경우, 임의의 평면에 대하여 이 평면과 온도변형률분포 기선으로 둘러싸인 면적의 차이가 같도록 하여(압축변형률과 인장변형률이 같다) 이것에 탄성계수를 곱하여 평형을 이루어 생기는 평면을 말한다.

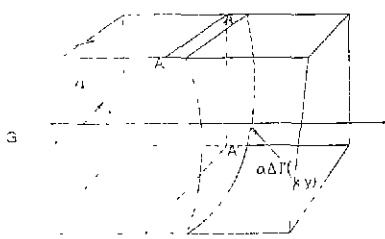


그림 1 단면에 따른 변형률 분포

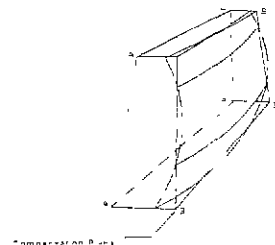


그림 2 Compensation Plane

$$\Delta N = \int_A E_C(t) [a\Delta T_s(x, y) - \Delta \bar{\epsilon}_s - \Delta \phi_s] dA = \int_A E_C(t) [a\Delta T_s(x, y) - \Delta \phi_s] dA = 0 \tag{5}$$

$$\Delta M_y = \int_A E_C(t) [a\Delta T_s(x, y) - \Delta \bar{\epsilon}_s - \Delta \phi_s] y dA = \int_A E_C(t) [a\Delta T_s(x, y) - \Delta \phi_s] y dA = 0 \tag{6}$$

$$\Delta M_x = \int_A E_C(t) [a\Delta T_s(x, y) - \Delta \bar{\epsilon}_s - \Delta \phi_s] x dA = \int_A E_C(t) [a\Delta T_s(x, y) - \Delta \phi_s] x dA = 0 \tag{7}$$

$\Delta$ : 온도변형률,  $\Delta$ : 인장변형률, A: 콘크리트 단면적,  $E_C(t)$ : 해당 t에서의 콘크리트 탄성계수

식 (5)~(7)로부터 다음 식을 구할 수 있다

$$\overline{\Delta \epsilon}_x = \frac{1}{A} \int_A \alpha \Delta T_i(x, y) dy \quad \Delta \phi_{i,x} = \frac{\int_A \alpha \Delta T_i(x, y) y dA}{\int_A y^2 dA} \quad \Delta \phi_{i,y} = \frac{\int_A \alpha \Delta T_i(x, y) x dA}{\int_A x^2 dA}$$

다음으로 Compensation Plane과 변형을 곡선의 차로부터 내부응력 증분치를 구할 수 있다

$$\Delta \sigma_{i,x} = E_c(t_i) [\alpha \Delta T_i(x, y) - \overline{\Delta \epsilon}_x - \Delta \phi_{i,x} y - \Delta \phi_{i,y} x] \quad (8)$$

### 3.2 외부구속응력

구속효과가 완전하다면, Compensation Plane은 초기 위치에서 고정된 상태로 있게 된다. 그림 3에서와 같이, 자유팽창시의 Compensation Plane의 위치는 각각  $-\overline{\Delta \epsilon}_x$ ,  $-\Delta \phi_{i,y}$  그리고  $-\Delta \phi_{i,x}$  씩 이동하게 되므로 완전외부구속으로 인한 응력은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{i,x} &= -R_x E_c(t_i) \overline{\Delta \epsilon}_x - E_c R_{y,i}(t_i) \Delta \phi_{i,y} - R_{x,i} E_c(t_i) x \Delta \phi_{i,x} \\ &= -R_x \frac{\Delta N}{A} - R_{y,i} \frac{\Delta M_y}{I_y} - R_{x,i} \frac{\Delta M_x}{I_x} \quad (9) \end{aligned}$$

$R_x$ 와  $R_{y,i}$ ,  $R_{x,i}$ 는 축력과 x, y축에 대한 힘 구속계수

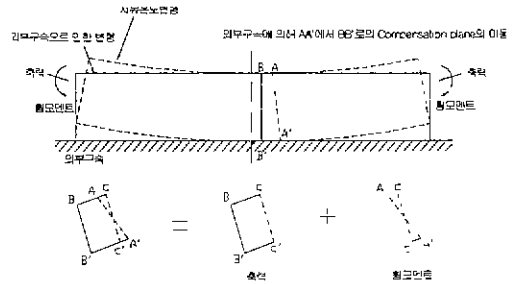


그림 3 외부구속상태

따라서 재령  $t_1$ 부터  $t_2$ 사이의 내부구속응력과 외부구속응력의 합은

$$\Delta \sigma_{e,i} = (\Delta \sigma_{i,i} + \Delta \sigma_{R,i}) \quad (10)$$

이며, 총 응력은 다음 식과 같다.

$$\sigma_i = \sum_j \Delta \sigma_{e,i} = \sum_j (\Delta \sigma_{i,i} + \Delta \sigma_{R,i}) \quad (11)$$

### 3.3 구속계수

구속계수인  $R_x$ ,  $R_{y,i}$ 는 자유로운 열변형을 구속하는 비율을 나타내는 계수로서 완전 구속일 때 1, 완전 자유일 때 0이 된다. 이러한 값은 콘크리트 형상, 즉 길이 L과 높이 H의 비(L/H), 및 타설된 콘크리트의 구속해가 되는 기설 콘크리트 혹은 암반과의 탄성계수의 비로부터 구해진다.

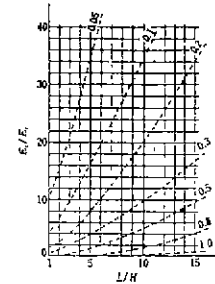


그림 4 축방향 구속계수

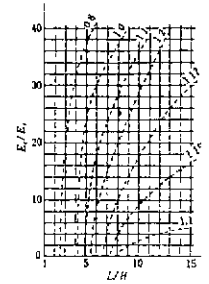


그림 5 힘 구속계수

### 3 무등건조수축 실험

시험체는 배립형 결골합성부재를 그림 6과 같이 단순화하였으며, 콘크리트의 건조수축실험은 무근 콘크리트와 요철이 있는 강재를 사용하여 내부강재구속을 받는 시험체를 제작하였다. 각 변수별로 강재와 콘크리트의 합성시험체를 제작하여 표 2에 나타내었다.

상판에는 4개의 D13 철근을 100mm 간격으로 용접하여 콘크리트 차기 및 이동시에 콘크리트와 강판과의 부착력을 보완하고자 하였으며, 콘크리트와 강판의 경계조건을 완전고정상태로 가정하여 내부강재구속응력을 산출할 수 있도록 하였다. 또한 건조수축의 발산조건을 건조시에 1차된 흐름으로 만들기 위하여 시험체 상부치기면을 제외한 나머지 면을 비닐로 도포하여 수분의 증발을 방지하였으며, 시험체 제원 및 개이지 매립위치는 단면의 높이에 따른 무등건조수축량을 측정하기 위하여 그림 7과 같이 콘크리트 내부에 고정하였다. 수화열 및 기타

표 2 변수별 시험체 분류

시험체명	시험체높이	물/시멘트비	내부장재구속
PILOT	200	0.64	×
100-L-C	100	0.64	○
100-H-C	100	0.33	○
200-L-C	200	0.64	○
300-M-C	200	0.40	○
200-H-C	200	0.33	○
300-L-C	300	0.64	○
300-H-C	300	0.33	○

요인에 의한 단면내의 온도차를 보정하기 위하여 온도케이지를 매립형 케이지와 같은 위치에 매설하였다

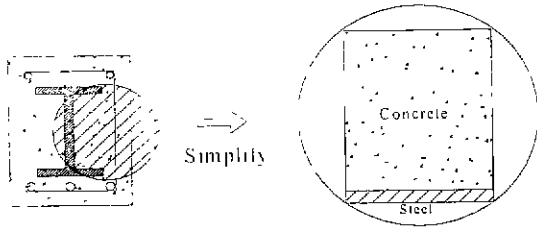


그림 6 매립형 철골합성부재의 단순화과정

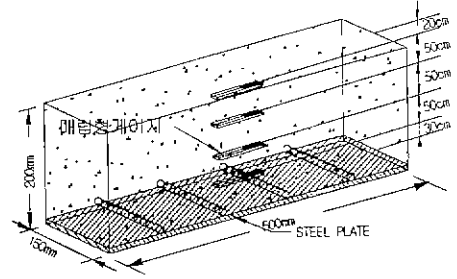


그림 7 시험체제원 및 매립형케이지 위치

본 연구에서 사용한 시멘트는 KS L 5101에서 규정한 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 각각의 콘크리트 배합비 및 철근과 강판의 재료적 특성은 표 3~4와 같다.

표 3 콘크리트 배합표

Mix	W/C (%)	S/A (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				S.P. (%)	f <sub>ck</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
			W	C	S	G		
H	33	38	179	541	647	1055	0.5	700
M	40	42	169	423	736	1016	2.0	500
L	64	45	198	310	782	955	-	300

표 4 철근과 강판의 재료적 성질

구분	항복강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )
Bar D13	4520	6430	2.04 × 10 <sup>9</sup>
Steel SS41	5270	6260	1.90 × 10 <sup>9</sup>

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 1) 구속이 없는 시험체(Pilot)

시험체 Pilot-L-UC는 구속효과가 없는 단순 부등건조수축에 의한 변형률을 측정하고자 하였다. 콘크리트 내부의 각 위치에서 부등수분분포로 인하여 발생하는 부등건조수축량은 그림 8에 나타내었다.

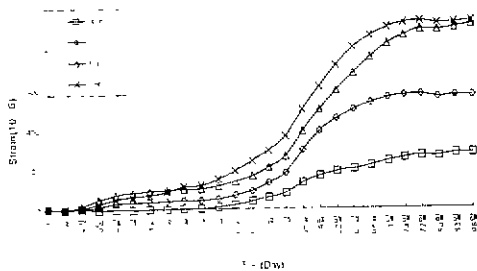


그림 8 Pilot-L-UC 시험체의 건조수축 변형률

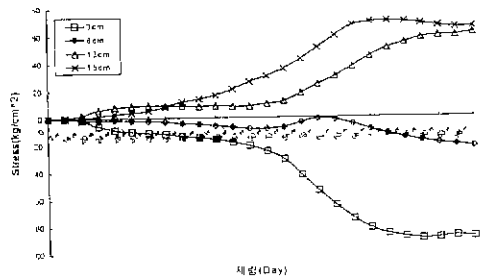


그림 9 Pilot-L-UC 시험체의 내부구속응력

Pilot-L-UC는 일방향 수분확산이 일어나는 시험체로서 수분확산으로 인하여 콘크리트 내부는 부등수분분포를 형성한다. 이런 경우 콘크리트 단면의 각 위치에서의 함수량은 서로 다르므로 이로 인하여 콘크리트의 탄성계수, 크리프계수, 자유수축량이 각 위치마다 다르다. 따라서 콘크리트 단면은 내부구속을 받게 되어 그림 9에서 보는 바와 같이 노출표면에서 2cm와 7cm 떨어진 콘크리트 표면에는 인장응력이 발생하였으며, 노출표면에서 12cm와 17cm 떨어진 콘크리트 내부에는 압축응력이 발생하였다.

## 1.2 구속 효과가 있는 기원체(200-L-C)

200-L-C 시험체는 Pilot-L-UC 시험체와 배합비 및 형상비가 동일하며 추가적으로 시험체 하단부에 강재구속을 설치한 시험체로서 내부강재구속효과를 밝히고자 하였다. 재령에 따른 콘크리트 건조수축변형률 값은 그림 10과 같다. 콘크리트 노출표면에 가까울수록 건조수축변형률이 증가하는 경향을 보이는 시험체(Pilot-L-UC)와는 반대로 내부강재구속을 받고 있는 시험체(200-L-C)의 높이에 따른 변형률 값은 구속효과로 인하여 강재로부터 가장 가까운 높이(3cm)에서의 변형률이 가장 크게 나타났으며 오히려 노출표면에 가까운 위치(18cm)에서의 변형률이 작게 나타나는 현상을 보여주고 있다.

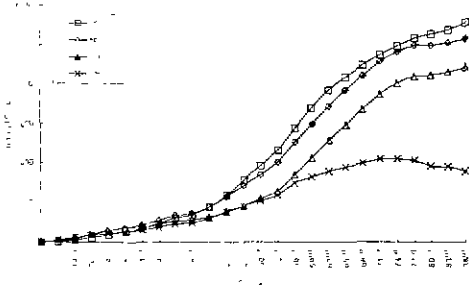


그림 10 200-L-C 시험체의 건조수축 변형률

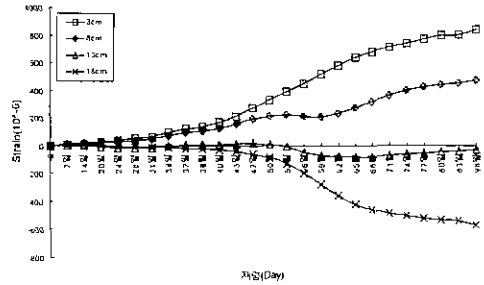


그림 11 내부강재구속으로 인한 변형률

### 1.3 내부강재구속효과에 대한 고찰

그림 11에서는 200-L-C에서 측정된 변형률과 Pilot-L-UC의 같은 높이에서의 재령에 따른 변형률 차를 나타낸 것으로서 이 값을 내부강재구속에 의한 변형률로 가정하여 해석을 수행하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 내부강재구속만으로 인한 변형률은 강재에 가까운 위치(3cm, 8cm)에서는 인장변형률로 나타났으며, 노출표면에 가까운 위치(13cm, 18cm)에서는 압축변형률이 나타남을 확인할 수 있었다.

그림 12에서는 200-L-C와 Pilot-L-UC의 변형률 차를 근거로 CL Method를 사용하여 내부강재구속으로 인하여 발생하는 응력을 구하였다. 내부강재구속응력 산정시 강재에 의한 변형률 분포를 콘크리트 높이에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하였으며, 회귀분석을 통하여 재령에 따른 시험체 높이별 건조수축 변형률 증분치를 강재로부터의 높이와 변형률에 관한 1차원 다항식으로 표현하였다. 이로부터 재령에 따른 1년내의 평균변형률과 곡률을 구한 후, 재령별 유효탄성계수값과 식 (8)을 통하여 각 시의 응력 증분치를 구하였으며, 콘크리트 높이에 따라 변화하는 내부강재구속응력을 산정하였다.

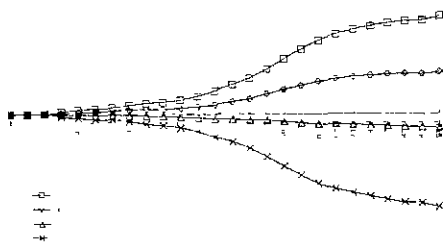


그림 12 내부강재구속효과로 인한 구속응력

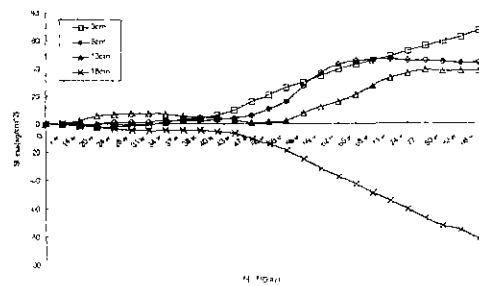


그림 13 내부구속응력과 외부구속응력의 합

콘크리트 높이에 따라 불규칙적으로 변화하는 부동건조수축에 의한 내부강재구속응력 산정결과를 그림 12에 나타내었다. 내부강재구속으로 인한 구속응력은 변형률 분포와 유사하였으며, 강재로부터 가까운 위치(3cm)에서의 인장응력은 재령 28일에서는  $8.6\text{kg/cm}^2$ 로 허용관련응력의 약 28%에 이르렀으

며 재령 47일 이후에는 균열응력을 초과하였다. 이후에 재령이 증가함에 따라 다소 큰 폭으로 증가하다가, 재령 70일 이후에 증가량이 둔화되어 재령 80일에는 허용균열응력의 약 49배에 달하는 148kg/cm의 인장응력을 받는 것으로 나타났다.

그림 13에서는 앞에서 구한 내부구속응력과 내부강재구속응력의 합을 재령에 따라 나타내었다. 노출표면으로부터 가까운 위치의 콘크리트는 건조수축으로 인한 인장응력이 크게 발생하였지만 내부강재 구속효과로 인하여 응력이 상쇄되는 경향을 보였으며, 강재와 가까운 곳의 콘크리트는 내부강재구속에 의한 크리프의 영향으로 내부구속에 의한 압축응력이 상쇄되어 결과적으로 인장력이 가해짐을 확인할 수 있다.

재령이 증가함에 따라 강재에서 18cm 떨어진 곳을 제외하고는 전단면에 걸쳐 인장응력이 증가하였으며, 콘크리트의 단면높이에 따른 응력값을 비교하였을 때, 강재에서 3cm 떨어진 곳의 인장응력이 가장 크게 평가되었으며 재령 80일에서의 인장응력값은 허용균열응력을 2배이상 초과하는 것으로 나타났다. 이는 CP Line Method에 의한 구속응력해석값이 다소 과도하게 평가됨을 알 수 있었으며, 매립형 철골합성부재의 부등건조수축으로 인한 구속효과를 정량적으로 해석할 수 있는 해석법과, 축방향 구속계수 및 횡 구속계수에 대한 수정 및 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 강재에서 18cm 떨어진 곳의 압축응력은 그림 10에서 나타난 바와 같이 시험체 200-L-C의 실험측정시 건조수축 변형률이 현저하게 낮게 측정된 영향으로 분석된다.

## 5 결론

매립형 철골합성부재의 내부강재구속효과를 고려한 부등건조수축 실험결과 및 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 매립형 철골합성구조부재에서 각 위치에 따른 건조수축량을 측정한 결과 기존의 평균적인 개념의 건조수축량과는 상당한 차이를 나타내었다.
- (2) 내부강재구속이 없는 시험체는 콘크리트 노출표면에 가까울수록 건조수축량이 증가하였으나 이와는 반대로 내부강재구속이 있는 시험체는 강재에 가까운 곳에 위치한 콘크리트의 변형률이 구속효과로 인하여 큰 폭으로 상승하였다.
- (3) CP Line Method를 이용한 내부강재구속응력 해석 결과, 콘크리트 단면의 높이별 구속응력의 차는 재령에 따라 10kg/cm<sup>2</sup> ~ 30kg/cm<sup>2</sup>에 가까운 큰 응력차이를 보였으며 강재에 가까운 곳의 구속응력은 콘크리트 허용균열응력을 2배이상 초과하는 것으로 나타났다.
- (4) 내부강재구속이 있는 합성부재의 물-시멘트비에 따른 건조수축 변형률은 물-시멘트비가 큰 시험체가 작은 시험체에 비하여 크게 나타났으며, 또한 건조수축으로 인한 변형이 클수록 내부강재구속에 의한 응력도 함께 증가함을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1 한국도로공사 도로연구소(1997) "구속된 건조수축이 철근콘크리트의 인장거동에 미치는 영향"
- 2 김진균, 이철성(1997) "콘크리트의 부등건조수축에 관한 연구", 콘크리트 학회 논문집 제9권 2호.
- 3 김성철(1996) "콘크리트의 크리프 이론과 메카니즘", 건설기술정보
- 4 박신원(1994) "메스콘크리트구조의 온도분포 및 열응력 해석에 관한 이론 및 실험연구", 서울대학교
- 5 Japan Concrete Institute Committee on Thermal Stress of Massive Concrete Structures(1992) "A Proposal of a Method of Calculating Crackwidth Due to Thermal Stress", September.
- 6 ACI Committee 209(1995), "Prediction of Creep, Shrinkage, and Time Effects on Concrete Structures" *ACI Manual of Concrete Practice*
- 7 ACI Committee 207(1991), "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete", *ACI Manual of Concrete Practice*
- 8 Akio KITAJIMA(1983) "Analysis of Creep and Shrinkage of Composite Structure", Kawada Information, Vol. 31, Jan.