

합성거더교의 등가 건조수축 변형률

Equivalent Shrinkage Strain For Steel-Concrete Composite Girder Bridges

배 두 병¹⁾ · 정 대 준²⁾

Bae, Doobyong Jung, Dae Jun

요약 : 현대 교량이 연속화, 장대화되어 가는 추세에 따라 강-콘크리트 합성거더교의 내구성 및 안전성 확보를 위해 콘크리트의 건조수축과 크리프 등 장기거동에 의한 영향이 정확히 평가 산정되어야 한다. 그러나, 현 도로교 설계기준에 주어진 최종 건조수축 변형률은 180° 인데이는 실험적 연구 등을 통해서 밝혀진 값보다 현저히 작은 값으로 여러 시공사례에서 문제점이 발견되고 있는 등 건조수축에 의한 영향이 과소 평가 되고 있어 이에 대한 수정이 필요한 시점에 있다. 이에 본 논문에서는 바닥판으로 콘크리트 슬래브를 적용한 플레이트 거더교, 박스 거더교, 프리풀렉스빔교를 대상으로 콘크리트 구조설계기준에 제시된 건조수축 및 크리프에 대한 규정을 적용하여 시간단계별 비선형 해석을 수행하였고, 얻어진 결과를 도로교 설계기준에 따라 산정된 값들과 비교 분석하여, 최종적으로 비선형 해석의 결과와 동일한 응력을 발생시키는 선형 등가 건조수축 변형률을 산정하였다. 그 결과 도로교 설계기준에서 제시한 180° 보다 대략 2배의 값을 적용하는 것이 실제의 건조수축의 영향을 반영하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : Since Modern bridges have a tendency to make the spans continuous and longer, the effect of concrete shrinkage and creep is very important and must be evaluated appropriately for the durability and safety of steel-concrete composite bridges. However, highway design specification in current use prescribes 180° as the final shrinkage strain, which is far less value than one resulted from many experimental researches and cause some problems in the construction of composite bridges due to the underestimation of shrinkage strain.

Thus, in this paper nonlinear analysis with time-steps applying the CEB-FIP(90) provision have been conducted for plate girder bridge, box girder bridge and Preflex beam bridge and the linear equivalent shrinkage strain for the design of composite bridges, which produces the stress equal to the values from the nonlinear analysis, has been calculated by comparing the results with the values following highway design specification. The results yield appropriately double values than 180° which highway design specification prescribes.

핵심 용어 : 시간단계해석, 등가건조수축 변형률, 합성거더교, 건조수축, 크리프

KEYWORDS : time-step analysis, equivalent shrinkage strain, composite girder bridge, shrinkage, creep

1. 서 론

강재 거더와 콘크리트 슬래브로 구성된 합성거더교는 구조적 특성이나 경제적으로 장점이 많아 현재 가장 흔하게 건설되고 있는 교량 형식이다. 그러나, 콘크리트의 고유 성질인 건조수축 및 크리프의 영향이 예상보다 매우 커서 외국의 경우 주거더의 압축플랜지 및 복부판의 국부적인 좌굴을 발생시키는 원인이 되기도 한 사례가 보고 되는 등(B.T. Yen, D.bae,

1988)(B.T. Yen, D.bae, 1989), 합성거더교 설계시 콘크리트 슬래브의 건조수축에 의한 영향이 매우 중요한 사항으로 부각되고 있다. 미국의 도로교설계기준인 AASHTO의 경우 고려하여야 할 건조수축량 및 이로 인한 영향 산정방법이 제시되어 있지 않고 설계자에게 맡겨 이의 영향을 고려하도록 하고 있으나 우리나라의 도로교 설계기준에서는 최종 건조수축 변형률 및 크리프 계수를 제시하고 야쓰미 식에 의해 주거더 및 콘크리트 슬래브에 발생하는 응력을 산정하도록 하고 있다. 그리

1) 정희원, 국민대학교 건설시스템공학부 교수
(Tel : 02-910-4697, Fax : 02-910-4939, E-mail : dbbae@kookmin.ac.kr)
2) 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정(jung8092@hotmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

나, 최근의 실험적 연구에 의하면 콘크리트 슬래브의 건조수축량이 현 도로교 설계기준에 제시된 값보다 현저히 커서 강거더 및 콘크리트에 설계시 예측된 값보다 큰 응력이 발생하는 것으로 보고 되고 있다.(장승필, 배두병, 이광명, 2001), (배두병, 이광명, 김성곤, 1998), (윤석주, 1998), (전진웅, 1998) 더욱이 최근 교량의 대형화 및 장경간화에 따라 강-콘크리트 합성거더교의 장기거동의 영향에 대한 정확한 평가는 교량의 내구성 및 안전성 확보를 위해 매우 중요한 사항이라고 볼 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 합성거더교의 건조수축에 의한 실제 거동을 반영할 수 있도록 콘크리트 구조설계기준에서(한국콘크리트학회, 1999) 채택하고 있는 CEB-FIP(90)코드(CEB-FIP, 1999)에서 제시된 콘크리트의 건조수축과 크리프 평가방법을 적용하여, 대표적 합성거더 형식인 플레이트 거더교, 강박스 거더교 및 프리플렉스빔교에 대한 해석모델을 구성하고 시간 단계별 비선형 해석을 수행하였으며, 그 결과를 현 설계기준의 영향 평가방법에 따라 산정된 응력값과 비교하여 합성거더교 설계 시 적용할 최종 건조수축 변형율을 제시하고자 한다.

2. CEB-FIP(90) 장기거동 예측모델

CEB-FIP(90)는 많은 실험과 연구를 통하여 가장 정확한 모델로 인정되었으며, 콘크리트의 압축강도, 부재의 크기, 습도, 온도 등 9가지 변수에 따라 크리프와 건조수축에 대한 예상값을 나타낸다. 이는 도로교 설계기준(2000)의 '4.2.3.4 건조수축', '4.2.3.3 크리프' 장에서도 역시 제시되고 있다.(한국도로교통협회, 2000)

그림 1을 대상으로 하여 구속이 없다고 가정 했을 때 건조수축률과 크리프 계수를 CEB-FIP(90)에 따라 산출하였다.

그림 1. 건조수축률 및 크리프 계수 대상모델

압축강도로는 33.24 Mpa를, 단면계수로는 132mm를, 습도로는 60% 및 온도는 20°C를 적용하였으며, 습윤 양생 후 7일부터 365일까지 산출하였다.

2.1 건조수축 모델

도로교 설계기준의 CEB-FIP(90) 건조수축 모델식은 콘크리트의 설계기준강도, 건조수축의 실험시점, 기온, 평균상대습도, 부재의 크기 등을 고려하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_s) = \varepsilon_{sho} \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

여기서, ε_{sho} 은 습도, 온도, 압축강도등 각 변수에 따라 나타나는 최종 건조수축률을 나타내며, $\beta_s(t - t_s)$ 은 시간이 지남에 따른 건조수축 발생률을 나타낸다.

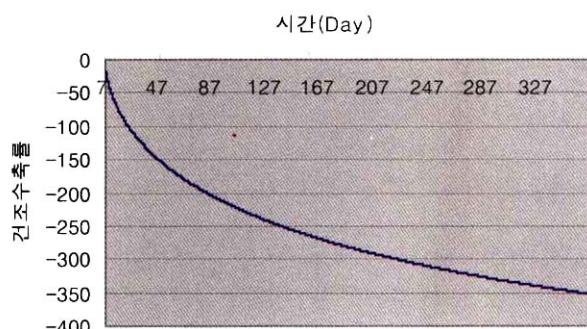


그림 2. 건조수축률 발생량

그림 2에서 보는 바와 같이 CEB-FIP(90) 코드를 이용하여 건조수축률을 구한 결과 365일까지 약 350^{1,2}의 건조수축이 발생하는 것으로 나타났다.

2.2 크리프 모델

시간 t' 에서 작용응력 $f_c(t')$ 에 의한 콘크리트의 순간 변형 및 크리프 변형을 함께 고려한 전체 변형률 $\varepsilon_{c\sigma}(t, t')$ 는 콘크리트의 압축강도 또는 설계기준강도, 부재의 크기, 평균 상대습도, 재하시의 재령, 재하기간, 시멘트 종류, 양생온도, 온도변화, 작용응력의 크기에 따라 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t') = f_c(t') \left[\frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad (2)$$

여기서, $E_{ci}(t')$ 는 재령별 접선탄성계수, $\phi(t, t')$ 는 재령별 크리프계수, E_{ci} 는 초기 접선탄성계수이다.

그림 3은 그림 1을 기본 모델로 하여 식(2)의 $\phi(t, t')$ 를 365일까지 구한 값이다.

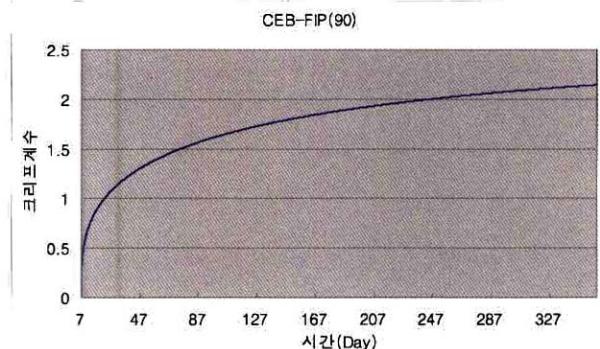


그림 3. 크리프 계수 변화량

2.3 AEMM(Age-adjusted Effective Modulus Method)

콘크리트의 장기거동에서 실제 응력변화는 그림 4와 같이 곡선 형태로 나타난다. 이에 따라 크리프의 영향도 곡선으로 나타나므로 이에 대한 고찰이 필요하다.

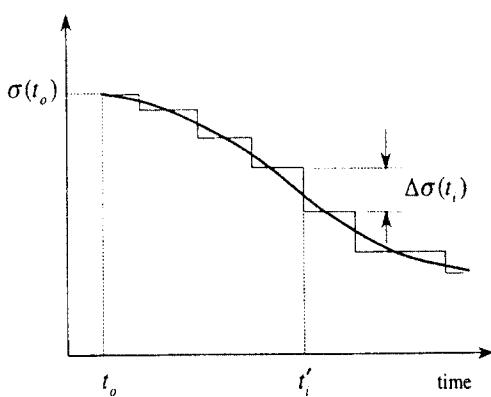


그림 4. 시간 의존적인 응력 이력

시간 의존적인 응력 이력이 그림 4와 같을 때 전체 변형률을 나타내 보면

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_E(t) + \varepsilon_c(t) + \varepsilon_{SH}(t)$$

$$= \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + \sum_i \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E(t_i)} + \phi(t, t_0) \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} + \sum_i \phi(t, t_0) \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E(t_i)} + \varepsilon_{SH}(t) \quad (3)$$

(3)위의 식을 적분식으로 나타내면,

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E(t_0)} + \int_0^t \frac{1 + \phi(t, t')}{E(t')} d\sigma(t') + \varepsilon_{SH}(t) \quad (4)$$

식(4)의 첫 번째 항은 초기 탄성 변형률과 초기 응력에 의한 크리프 변형률이고 두 번째 항은 응력의 점진적인 변화에 따른 크리프 변형률이다.

점진적으로 발생한 응력은 초기에는 작은 값이므로 크리프 영향을 $\phi(t, t_0)$ 배 만큼 고려하는 것이 아니라, 시간을 고려해서 크리프 계수를 감소시킨 $\chi(t, t_0)\phi(t, t_0)$ 를 사용한다. 여기서, $\chi(t, t_0)$ 를 재령 계수(aging coefficient)라고 한다. 0.5와 1사이의 값을 갖는 시간계수 χ 를 사용한 유효 탄성계수 \bar{E} (incremental elastic modulus)를 Age Effective Modulus로 사용한다. 시간 계수를 사용하여 적분식을 간단히 하면 식(5)와 같다.

식(4)를 초기 도입된 탄성하중과 Age Effective Modulus를 고려하여 나타내면, 다음의 식(5)와 같다.

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0) \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E(t_0)} + \Delta\sigma(t) \frac{1 + \chi\phi(t, t_0)}{E(t_0)} + \varepsilon_{SH} \quad (5)$$

식(5)에서 첫 번째 항은 일정한 응력을 지속적으로 받을 때 발생하는 변형률이고, 두 번째 항은 응력이 점진적으로 변할 때 발생하는 변형률이다. 재령계수의 의미는 점진적인 응력변화로 인한 크리프는 χ 만큼 작아진다는 것이다. 이것은 다른 말로 $\chi(\sigma(t) - \sigma(t_0))$ 에 의해서 크리프가 발생했다는 것과 동일하다. 다음의 식(6)을 Age Effective Modulus라고 하며 이 유효 탄성계수를 이용하여 크리프, 건조수축을 계산하는 방법을 AEMM (Age adjusted Effective Modulus Method)라고 한다.

$$\bar{E} = \frac{E(t_0)}{1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)} \quad (6)$$

3. 선형 등가건조수축 변형률 산정 과정

3.1 선형 등가건조수축 변형률 산정

건조수축과 크리프는 상호연관성을 가지며 거의 동시에 발생하게 된다. 하지만 두 가지 현상을 동시에 고려하는 기능이 유한 요소 해석에서는 충분치 않으므로 두 현상을 분리하여 해석을 수행하였다.

합성거더교를 설계하는데 있어서 단면의 응력검토 중 건조

수축에 의한 응력을 기존의 구조계산 방법(야쓰미 해법)으로 산정하며, 이 때 건조수축으로 인한 압축력을 구하는데 적용하는 건조수축 변형률은 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 을 사용하여 응력을 산출하였다. 그리고, CEB-FIP(90)의 건조수축/크리프 예측 모델을 적용한 FEM(유한 요소 해석)으로 비선형 해석을 수행하여 건조수축에 의한 응력을 산정하였으며, 비선형 해석으로 나온 응력 결과값을 기존의 구조계산으로 구한 응력 결과값으로 나눠 응력비를 구하고 이에 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 을 곱하면 비선형 해석과 동일한 응력 값을 산출할 수 있는 선형 등가건조수축변형률을 산정할 수 있게 된다.

3.2 비선형 FEM(유한 요소 해석)

콘크리트의 재료적 특성인 건조수축과 또 그 건조수축으로 발생하는 응력에 기인하는 크리프를 비선형 해석하기 위해서 LUSAS FEM 프로그램을 사용하였다.

LUSAS는 정적, 동적, 비선형 해석등 다양한 기능으로 현재 널리 사용되고 있는 영국의 FEA L.T.D.에서 개발한 범용 유한요소해석 프로그램으로서 본 논문에서는 LUSAS V13.4를 사용하였다.

각 교량형식별로 콘크리트는 8절점 Solid 요소로, 강거더는 Shell 요소로 3차원 모델링 하였다. 콘크리트와 강거더의 해석모델은 콘크리트와 강거더의 접하는 선과 면을 공유하는 방법으로 합성을 표현하였으며, 비선형 해석을 시간 단계별로 수행하기 위해서 콘크리트 재령 7일부터 18,250일(50년)까지 총 24가지의 시간 단계(Time-step)로 나누었다. 건조수축 혹은 크리프의 변형률을 CEB-FIP(90) 예측 모델식을 이용해서 각 콘크리트 재령별로 구하였다. 각 재령별 변형률을 콘크리트의 열팽창계수로 나누면 온도($^{\circ}\text{C}$)로 표현이 된다. 이것이 재령별 온도하중으로서, 비선형 해석 Option을 이용하여 온도하중의 증분을 가하는 것으로 비선형 해석을 수행하였으며, 적용한 응력은 요소 표면의 Node들의 최대 응력값을 선택하였다.

4. 합성거더교의 선형 등가 건조수축 변형률의 산정

우리나라에서 가장 시공사례가 많은 플레이트 거더교, 박스 거더교, 프리플렉스 빔에 대하여 선형등가 건조수축 변형률을 산정하였으며, 콘크리트 건조수축에 많은 영향을 미치는 온도와 습도는 우리나라 평균 온도(15°C)와 습도(60%)를 기준으로 해석하였다.

4.1 플레이트 거더교

대상 교량은 교장 40m의 단순교이며 폭원은 12.14m, 사각은 90° 이다. 콘크리트 슬래브의 설계기준강도로는 270kgf/cm^2 를 적용하였으며 기타 사용재료의 물성치는 표 1과 같다.

그림 5는 대상 플레이트 거더교의 단면 및 변단면 배치상태를 보여주고 있다.

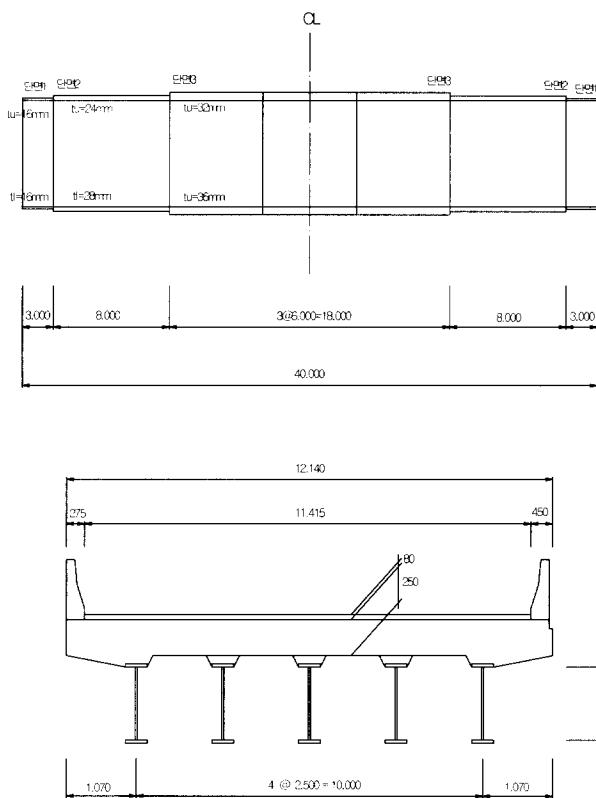


그림 5. 플레이트 거더교의 변 단면 배치와 전체 단면도

4.1.1 구조 계산

최종 건조수축변형률 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 을 적용하여 식(10)의 건조수축에 의한 바닥판 콘크리트의 압축력 P_2 를 구하게 된다.

콘크리트의 건조수축률을 고려하기 위해서는 강거더와 콘크리트의 탄성계수비를 구하고, 식(7)을 이용하여 n_2 를 산출한다.

$$n_2 = n \left(1 + \frac{\phi_2}{2} \right) \quad (7)$$

여기서, $n = \frac{E_s}{E_c}$: 탄성계수비

$\phi_2 = 2\phi_1 = 4.0$: 크리프 계수의 2배

n_2 를 이용한 환산단면법으로 합성단면의 단면 2차

모멘트를 다음과 같이 구한다.

$$I_{r2} = I_s + A_s \times d_{s2}^2 + \frac{I_c}{n_2} + \frac{A_c}{n_2} \times d_{c2}^2 \quad (8)$$

건조수축으로 인한 바닥판 콘크리트에 작용하는 압축력은

$$P_2 = E_{c2} \cdot \epsilon_s \cdot \frac{A_c}{n_2} \quad (9)$$

$$\text{여기서, } E_{c2} = \frac{E_s}{n_2}$$

$$\epsilon_s = 180 \times 10^{-6} : \text{최종건조수축변형률}$$

P_2 와 같이 된다. 바닥판 콘크리트에 작용하는 압축력은 합성단면의 도심과의 편심으로 인해서 휨모멘트를 발생시키는데 이것은 식(10)과 같다.

$$M_2 = P_2 \cdot d_{c2} \quad (10)$$

이 휨모멘트로 인해서 단면에 휨응력이 발생하게 되는데, 각각 바닥판 콘크리트 상·하연의 응력 f_{cu2} , f_{ct2} 과 강거더의 상·하연의 응력 f_{su2} , f_{st2} 은 다음 식에 의하여 구하게 된다.

$$f_{cu2} = \frac{1}{n_2} \cdot \left(\frac{P_2}{A_{i2}} + \frac{M_2}{I_{i2}} \cdot y_{c2} \right) - E_{c2} \cdot \epsilon_s \quad (11a)$$

$$f_{ct2} = \frac{1}{n_2} \cdot \left(\frac{P_2}{A_{i2}} + \frac{M_2}{I_{i2}} \cdot y'_{c2} \right) - E_{c2} \cdot \epsilon_s \quad (11b)$$

$$f_{su2} = \frac{P_2}{A_{i2}} + \frac{M_2}{I_{i2}} \cdot y'_{c2} \quad (11c)$$

$$f_{st2} = \frac{P_2}{A_{i2}} + \frac{M_2}{I_{i2}} \cdot y_{c2} \quad (11d)$$

식(11.a)~(11.d)의 결과값은 구조설계기준에 따라 최종 건조 수축률을 건조수축률을 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 으로 하고 야쓰미 해법을 이용하여 단면에 발생하는 응력을 산정하는 식을 나타낸 것이다

4.1.2 비선형 장기거동 해석(FEM)

강거더와 바닥판 콘크리트의 합성을 표현하기 위해서 두 요소가 맞닿는 선과 면을 공통으로 적용하여 Rigid Link나 Tied Mesh와 같은 효과를 발휘하도록 구성하였으며, 그림 6은 모델링 형상을 보여주고 있다.

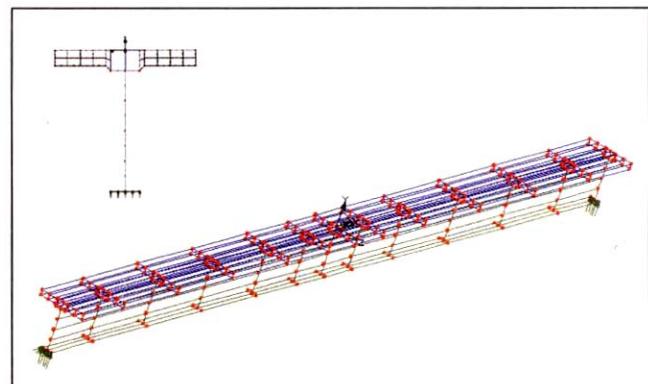


그림 6. 3차원으로 제작된 플레이트 거더교 해석 모델의 전체 형상

표 1. 해석모델의 재료 물성치

구 분	강 재	콘크리트
탄성계수	$2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$	재령에 따라 변화
포아슨비	0.3	0.17
단위중량	7.85 t/m^3	2.5 t/m^3
열 팽창계수	$12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	$9.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

비선형 해석을 통해 선형등가 건조수축 변형률을 산정한 과정은 다음과 같다.

4.1.2.1 건조수축률을 온도하중으로 변환

CEB-FIP(90) 건조수축 예측모델을 이용하여 바닥판 콘크리트의 건조수축률을 18,250일(50년)까지 시간 단계별로 계산하여 콘크리트의 열팽창 계수로 나누어 주면, 표 2와 같은 온도하중으로 표현된다.

4.1.2.2 해석 모델을 이용한 건조수축만의 발생응력 산출

표 2에서의 각 재령별 온도하중과 탄성계수를 해석모델에 대입하여 온도하중의 비선형 해석을 수행한 결과 표 3의 적용 응력이 산출되며, 이것은 건조수축만의 발생 응력값을 정리한 것이다. 이 응력으로 인해 다시 발생하는 크리프 발생 응력과 누적해야 최종 건조수축에 의한 응력값이 산출된다.

4.1.2.3 크리프 해석모델에 적용한 응력과 온도하중

(11)식을 이용하여 크리프 변형률을 산출하고 크리프 변형률을 열팽창 계수로 나누어 줌으로써 크리프 온도하중이 생성된다.

$$\epsilon_{co}(t, t') = f_c(t') \left[\frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad (12)$$

4.1.2.4 건조수축으로 인한 응력 산출

표 2, 표 3에서 나타낸 순수 건조수축에 의한 온도하중과 크리프로 인한 온도하중을 더하여 최종적으로 건조수축에 의해 발생되는 온도하중을 산출하고, 이 온도하중으로 비선형 유한 요소 해석을 통하여 최종 응력 값을 산출한다.

4.1.2.5 선형등가 건조수축 변형률 산정

비선형 해석을 통하여 산출된 응력값이 현 설계기준에서 제시한 최종건조수축률 $180\mu\epsilon$ 으로 적용하여 계산한 값보다 약 2~2.3배의 비율로 큰 값을 보이고 있으며, 이렇게 산출한 응력 비에 $180\mu\epsilon$ 을 곱하여 각 위치별 선형 등가 건조수축변형률을 구하였으며, 표4에 이를 정리하였다.

표 2. 건조 수축 해석을 수행할 각 재령별 온도하중과 탄성계수

재령일	건조수축 변형률	온도하중(°C)	탄성계수(kgf/cm^2)
7	-1.455E-05	-1.470	231596
8	-1.571E-05	-1.587	237669
11	-1.878E-05	-1.897	250724
14	-2.141E-05	-2.162	259223
21	-2.654E-05	-2.681	270888
28	-3.083E-05	-3.114	277344
56	-4.393E-05	-4.438	287956
84	-5.389E-05	-5.444	291774
97	-5.792E-05	-5.850	292823
100	-5.881E-05	-5.940	293028
104	-5.997E-05	-6.058	293283
111	-6.195E-05	-6.258	293687
114	-6.278E-05	-6.342	293845
118	-6.387E-05	-6.452	294044
122	-6.494E-05	-6.560	294230
125	-6.573E-05	-6.639	294362
161	-7.452E-05	-7.528	295571
271	-9.626E-05	-9.723	297300
365	-1.112E-04	-11.235	297960
830	-1.640E-04	-16.567	299035
1825	-2.323E-04	-23.464	299499
3650	-3.048E-04	-30.786	299693
7300	-3.812E-04	-38.502	299790
18250	-4.686E-04	-47.335	299849

표 3. 위치별 선형 등가 건조수축 변형률의 산정

구 분	구조계산 응력값	비선형해석 응력값	응력비	선형등가 건조수축변形률
콘크리트	f_{cu}	6.26	12.80	$367\mu\epsilon$
	f_{cl}	7.29	16.98	$419\mu\epsilon$
강 형	f_{su}	-194.15	-452.93	$419\mu\epsilon$
	f_{sl}	38.55	77.15	$360\mu\epsilon$

표 5. 위치별 선형 등가건조수축변형률의 산정

구 분	구조계산 응력값	비선형해석 응력값	응력비	선형등가 건조수축 변형률
콘크리트	f_{cu}	8.84	17.64	2.00
	f_{cl}	9.92	23.56	2.37
강 형	f_{su}	-139.92	-298.57	2.13
	f_{sl}	30.23	59.49	1.97

4.2 박스 거더교

박스 거더교는 플레이트 거더교와 함께 현재 가장 많이 시공되고 있는 합성거더교의 형식으로 그림 7은 대상 교량의 변단면 배치와 전체 단면도이다. 대상 교량은 40m연장의 단순교이며 폭 원은 7.45m, 사각은 90°이다. 사용재료 및 물리상수는 '플레이트 거더교'와 동일하며, 구조계산과 비선형해석 역시 플레이트 거더교와 동일하다.

표 4. 크리프 해석을 수행할 각 재령별 응력과 온도하중

재령일	적용 응력 kg/cm^2	$f_{cu}(t)$	$E_{ci}(t)$	$\beta(t')$	$\phi(t,t')$	크리프 변형률	온도하중 (°C)
7	0.59	210.28	205762	0.909	0.938	4.712E-06	0.476
8	0.64	217.18	219033	0.635	0.383	3.721E-06	0.376
11	0.76	232.66	246791	0.619	0.519	4.406E-06	0.445
14	0.87	243.44	264204	0.583	0.489	4.708E-06	0.476
21	1.08	259.76	287165	0.557	0.602	5.931E-06	0.599
28	1.26	270.00	299382	0.516	0.557	6.533E-06	0.660
56	1.80	290.51	318691	0.488	0.795	1.040E-05	1.051
84	2.21	300.09	325400	0.428	0.697	1.191E-05	1.203
97	2.37	303.11	327222	0.396	0.514	1.132E-05	1.143
100	2.41	303.73	327577	0.385	0.323	9.948E-06	1.005
104	2.46	304.51	328018	0.383	0.350	1.036E-05	1.046
111	2.54	305.78	328715	0.380	0.411	1.120E-05	1.131
114	2.57	306.29	328988	0.375	0.315	1.052E-05	1.063
118	2.62	306.94	329330	0.373	0.341	1.093E-05	1.104
122	2.66	307.56	329651	0.371	0.339	1.108E-05	1.120
125	2.69	308.00	329878	0.368	0.309	1.094E-05	1.105
161	3.06	312.36	331949	0.367	0.642	1.576E-05	1.592
271	3.95	319.92	334892	0.349	0.838	2.286E-05	2.309
365	4.57	323.49	336007	0.316	0.726	2.467E-05	2.492
830	6.74	331.13	337817	0.298	1.017	4.285E-05	4.328
1825	9.56	336.12	338595	0.254	0.994	5.995E-05	6.056
3650	12.55	339.18	338920	0.218	0.922	7.567E-05	7.643
7300	15.70	341.36	339082	0.190	0.855	9.110E-05	9.202
18250	19.31	343.31	339180	0.166	0.782	1.074E-04	10.845

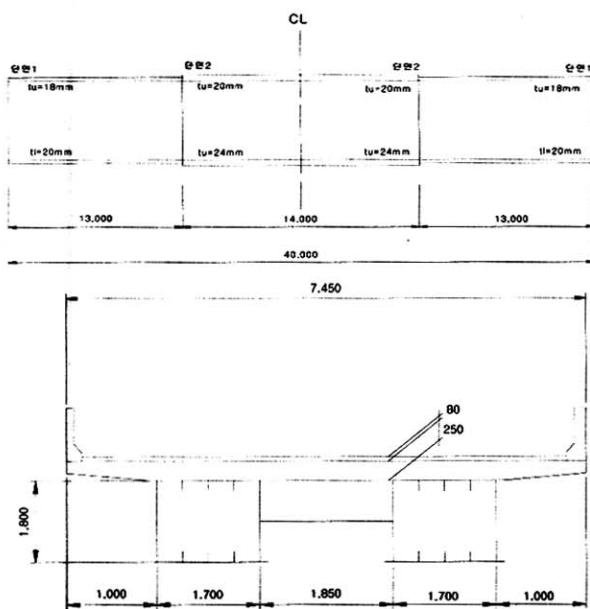


그림 7. 박스 거더교의 변단면 배치와 전체 단면도 (단위:mm)

4.3 프리플렉스빔의 건조수축 변형률의 산정

프리플렉스빔은 프리스트레스트 콘크리트 보와 같이 인장측의 콘크리트에 프리스트레스를 도입한 일종의 프리스트레스 합성형으로 I형 단면을 갖는 강거더에 프리플렉션 하중에 의한 휨 변형을 준 상태에서 하부 플랜지 주위를 콘크리트로 완전히 폐복한 후 프리플렉션 하중을 제거함으로써 아래 플랜지 콘크리트(케이싱 콘크리트)에 압축력을 도입시킨 합성형이다.

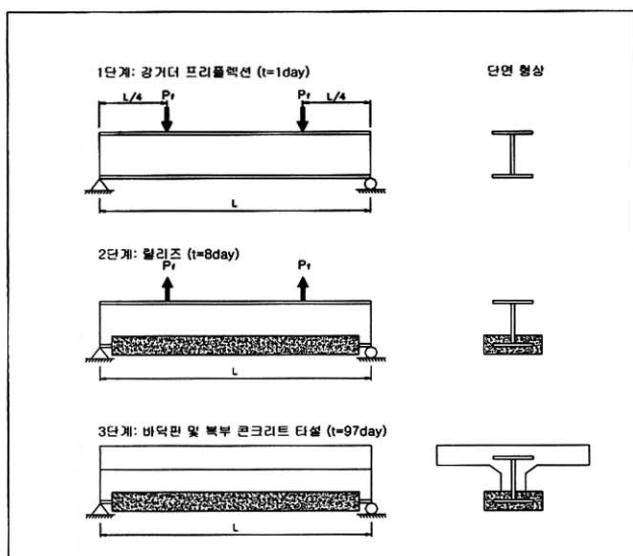


그림 8. 프리플렉스빔 제작단계와 단면형상

그림 8은 프리플렉스빔의 제작단계별 단면형상과 제작 메카니

즘을 나타낸 것으로 실제 프리플렉스 교량에서는 3단계 이후에 2차 고정하중단계와 활하중 재하 단계가 존재하지만, 본 논문에서는 활하중이 적용되지 않기 때문에 3단계까지만 표현하였다.

4.3.1 구조계산

물리적 상수는 다음과 같고, 프리플렉스 빔의 제작에 있어서 여러 단계별의 단면상태로 인하여 다음의 3단계로 나뉘어서 구조계산을 실행하였다. (1) 케이싱 콘크리트 초기 영향 단계에서는 프리플렉션 하중이 도입된 이후 케이싱을 타설하고부터 릴리즈의 단계를 거쳐 바닥판 콘크리트의 타설전까지의 건조수축응력을 측정한 단계이고, (2) 바닥판 콘크리트 영향 단계는 바닥판 콘크리트에 최종 건조수축 변형률이 적용된 것이다. (3) 최종건조수축 단계는 케이싱 콘크리트에 최종 건조수축변형률을 적용한 것이다. 다음은 해석시 적용한 콘크리트와 강재의 물성치이다.

4.3.1.1 콘크리트

- 설계기준강도

$$\cdot \text{케이싱 콘크리트} : f_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\cdot \text{바닥판과 복부 콘크리트} : f_{ck} = 270 \text{ kgf/cm}^2$$

- 탄성계수

$$\cdot \text{케이싱 콘크리트} :$$

$$E_c = 10.500 \times \sqrt{f_{ck}} + 70,000 = 2.8 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$= 3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (바닥판 콘크리트 타설단계시)}$$

- 바닥판과 복부 콘크리트 :

$$E_c = 4.270 \times w^{1.5} \times \sqrt{f_{ck}} = 2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$$

4.3.1.2 강재 (SM 520)

$$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

4.3.2 비선형해석

계산단계와 동일하게 비선형해석도 3단계로 나누어 수행하였으며 그 결과값을 표 6에 나타내었다.

표 6. 위치별 선형 등가 건조수축 변형률의 산정

구 분		구조계산 용력값	비선형해석 용력값	응력비	선형등가 건조수축 변형률
케이싱	f_{cu}'	10.10	19.22	1.90	$342\mu\epsilon$
	f_{cl}	17.92	30.84	1.72	$310\mu\epsilon$
바닥판	f_{cu}	11.36	27.30	2.40	$432\mu\epsilon$
	f_{su}	-136.25	-325.00	2.39	$430\mu\epsilon$
강 형	f_{sl}	-98.40	-187.87	1.91	$344\mu\epsilon$

4.4 비교 및 분석

일단 최종적으로 변형률을 선택하기 위해서 그림 9, 그림 10에 앞에서 구한 합성거더교의 변형률들을 정리하였다. 그림 9는 앞서 구한 플레이트 거더교, 박스 거더교, 프리플렉스빔의 강거더의 변형률이며 각 교량의 좌측 막대 그래프는 강거더 상연응력(f_{su}), 우측은 강거더 하연응력(f_{sl})의 변형률을 나타낸다.

그림 9의 막대 그래프에서 볼 수 있듯이, 일단 각 교량에서 상하연의 변형률이 차이를 보이고 있고, 상연이 하연의 변형률보다 조금씩 상회하는 경향이 동일한 양상을 보이고 있으며 플레이트 거더교와 프리플렉스빔의 상연 변형률이 다소 높은 값을 갖는다. 또한 플레이트 거더교와 박스 거더교의 하연의 변형률은 거의 동일한 반면 프리플렉스빔은 다소 차이를 보이고 있으며 상하연 값의 차이가 크다. 이론적으로나 상식적으로도 모두 같은 변형률 값을 보여야 하겠지만, 같은 교량의 상하연의 변형률이 차이를 보이는 원인과 강거더 하연의 응력비는 비슷한 반면 강거더 상연의 응력비가 차이를 보이는 원인을 분석해 볼 필요가 있다.

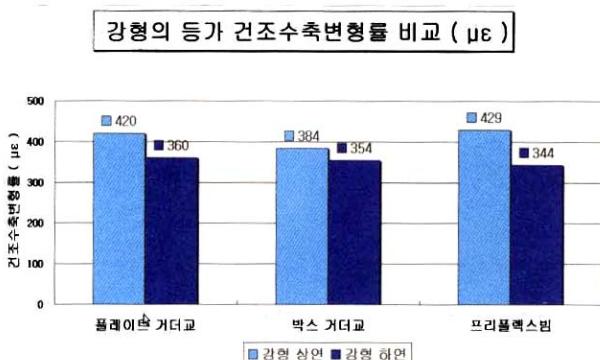


그림 9. 강거더의 등가 건조수축 변형률 비교

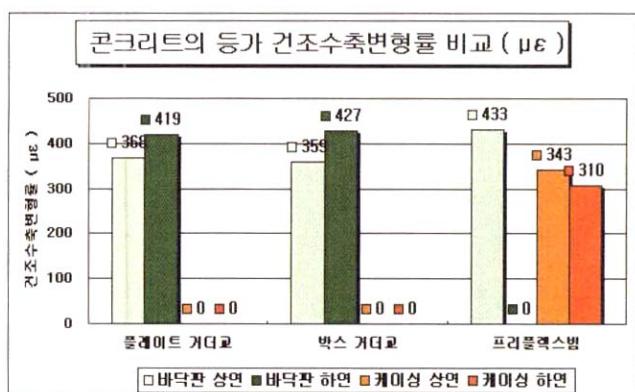


그림 10. 콘크리트의 등가 건조수축 변형률 비교

그림 9 및 그림 10에 나타난 상하연 변형률의 차이와 교량 형식별로 변형률이 차이를 보이는 원인을 분석해 보면 다음과 같다.

(1) 우선 같은 교량에 있어서 상하연 변형률이 차이를 보이는 원인을 분석해 보았다. 프리플렉스빔을 제외하고, 강거더 상하연의 변형률 중 상연이 크게 나오는 것은 바닥판 콘크리트와의 접촉으로 인한 응력의 집중현상에 의한 것으로 사료된다. Shell 요소를 적용한 해석 모델에서 응력의 측정점은 요소의 표면에서의 최대 응력값을 채택하였기 때문에 상하연간의 변형률 차이가 더 크게 발생했다. 실제 구조물에서 이 접촉부위는 전단 연결재가 위치하지만 유한요소해석 모델에서는 합성을 표현하기 위해서 강거더와 콘크리트 요소가 선과 면을 공유하는 방법을 택했기 때문에 응력 집중이 더 크게 표현된 것이다. 또한 바닥판 콘크리트의 상하연 변형률 중에서 하연 변형률이 더 큰 현상이 접촉부위의 콘크리트에도 응력 집중현상이 발생하였기 때문에 위의 분석을 뒷받침한다.

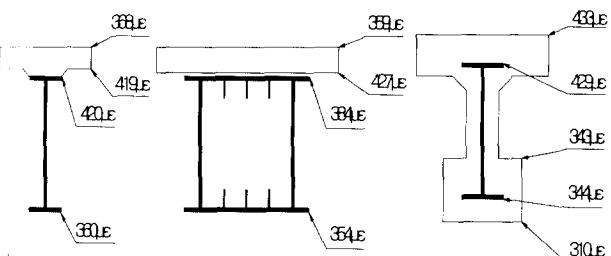


그림 11. 위치별 선형 등가건조수축변형률 도시

프리플렉스빔의 경우, 강거더의 상연 변형률이 하연보다 큰 원인은 프리플렉스빔의 구조계산에 있어서 복부 콘크리트는 계산에서 제외되었기 때문이라고 사료된다. □□프리플렉스 합성형 설계기준 및 동해설(안)□□(2001)에서 □□바닥판 콘크리트를 타설할 때 강거더의 횡좌굴을 검토하는 경우 이외에는 복부콘크리트를 설계계산에 고려하지 않는다. □□라는 조항이 있다. 구조적으로 복부 콘크리트는 저항단면에서 제외되기 때문이다. FEM 모델에서는 복부 콘크리트를 표현하기 위하여 합성단면의 도심의 위치가 하강하고 이로 인한 강거더 상연의 편심이 증가하여 구조계산의 응력값보다 다소 큰 값이 산출된 것으로 사료된다. 이것은 도심의 하강으로 편심이 감소한 강거더 하연의 변형률이 $344^{1/2}$ 으로서 다른 합성거더교의 값보다 작은 값을 나타내며, 바닥판 콘크리트 상연의 변형률이 $433^{1/2}$ 으로, 강거더 상연의 $429^{1/2}$ 과 거의 동일하다는 점이 위의 분석과 일치한다.

(2) 각 교량 형식에 따라서 강거더 상연간, 바닥판 하연간의

변형률이 조금씩 다른 원인을 분석해 보았다. 플레이트 거더교의 경우 강거더 상연 변형률과 바닥판 하연 변형률이 $420\mu\epsilon$ 으로 일치하여 접촉부의 응력집중 현상이 동일하게 발생했음을 보여준다. 박스 거더교의 경우 강거더 상연의 변형률이 $384\mu\epsilon$, 바닥판 하연이 $427\mu\epsilon$ 으로서, 바닥판 하연에 응력집중이 더 크게 발생한 것으로 분석되는데, 박스 거더교의 특성상 응력의 집중이 강거더의 상부 플랜지에 넓게 분포되었고, 반대로 바닥판의 경우 강거더와의 접촉부위가 넓어 응력 집중이 바닥판에 더 많이 분포된 것이 그 원인으로 분석된다.

(3) 프리플렉스빔의 케이싱 콘크리트 상하연 변형률은 $343\mu\epsilon$ / $310\mu\epsilon$ 으로서 다른 합성거더교의 바닥판 콘크리트 상연의 변형률 $360\mu\epsilon$ 대와 다소 차이를 보이고 있다. 이것은 앞에서 분석한 바와 같이 복부 콘크리트의 존재로 인하여 감소된 편심효과에 따른 응력감소 현상으로 보이며, 역시 편심의 감소로 인해 작은 값이 나온 강거더 하연과 케이싱 상연의 변형률이 $343\mu\epsilon$ 으로 일치하는 것이 분석을 증명하고 있다.

결론적으로, 위와 같은 분석이후 최종 변형률을 선택하였다. 합성거더교로서 콘크리트는 강거더로 환산되므로 강거더의 변형률을 우선적으로 선택하였으며 비선형 해석 모델에서 응력집중이 적용된 강거더 상연의 변형률은 제외하였다. 강거더 하연의 변형률은 플레이트 거더교, 박스 거더교, 프리플렉스빔이 각각 $360\mu\epsilon$, $354\mu\epsilon$, $344\mu\epsilon$ 이며, 이중에서 앞서 설명한 듯이 프리플렉스빔은 복부 콘크리트의 존재로 인해 적정값보다 적게 나온 값이므로 제외시킨다. 결국 합성거더교의 선형 등가 건조수축변형률은 $354\mu\epsilon$ ~ $360\mu\epsilon$ 이라 말 할 수 있으며 안전측으로의 선택을 위해서 최종적으로 $360\mu\epsilon$ 이 적정한 값이라고 사료된다.

최종적으로 선형 등가건조수축변형률 $\epsilon_s = 360\mu\epsilon$ 을 합성거더교에 있어 기준에 제안된 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 대신 대입하면 본 논문에서 수행해 왔던 시간 단계별의 비선형 해석의 결과값과 동일한 결과가 나오게 되어 실제 구조물의 장기거동 현상과 흡사한 결과를 얻을 수 있다.

5. 결 론

(1) 합성거더교의 건조수축에 의한 응력을, 재령 18,250일 (50년)까지 시간단계별로 비선형 해석한 값과 동일한 결과를 발생시키는 선형 등가 건조수축 변형률을 찾은 결과 $\epsilon_s = 360\mu\epsilon$ 로 산정되었다. 이것은 현 설계기준에서 제안하는 최종 건조수축 변형률 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 에 2배가 되는 값이다.

- (2) 콘크리트의 건조수축을 해석 연구한 논문들 중 대부분이 건조수축 발생 응력으로 인해서 크리프가 발생한다는 사실을 간파하여 기존의 구조계산보다 응력값이 3배에서 5배까지 크다고 결론을 내리고 있는데, 본 논문에서는 건조수축으로 인하여 발생하는 크리프를 고려하였기 때문에 건조수축만으로 발생하는 응력의 약 40% 정도 감소하였다. 이에 대한 결론으로 $\epsilon_s = 360\mu\epsilon$ 이 산정되었고, 이는 합성거더교의 교량형식 결과에 적절히 맞아 해석과정의 신뢰성을 증명한다고 할 수 있다.
- (3) 기존의 구조계산($\epsilon_s = 180\mu\epsilon$)으로 산정한 응력에 비해서 비선형 해석에서 산정된 응력이 2배로 크게 나왔다. 이것은 현재 일선 실무회사들의 구조계산에서 건조수축에 의한 응력을 2배 과소평가하고 있다는 의미이다. 본 논문에서 제시한 선형 등가건조수축변형률 $\epsilon_s = 360\mu\epsilon$ 을 각 교량 형식의 구조계산에 $\epsilon_s = 180\mu\epsilon$ 대신 대입하여 단면의 응력조합을 해본 결과, 플레이트 거더교와 박스 거더교의 경우 강거더의 상하연 모두에서 허용응력을 초과하는 결과가 발생하였다. 이것은 안전측으로 믿고 선택되었던 교량 단면에 대한 현재까지의 설계가 모두 잘못 되었다는 것을 의미하고 합성형 교량에 심각한 문제를 발생시킬 것이라고 예상된다.
- (4) 위와 같은 결론들로 미루어 보건데, 현 설계기준의 건조수축에 의한 영향은 과소평가 되어있고, 제안값 ($\epsilon_s = 180\mu\epsilon$)은 선형 등가 건조수축 변형률 ($\epsilon_s = 360\mu\epsilon$)으로 2배 확대 수정되어야 한다. 현 설계기준의 수정을 위해서는 이론적으로 다른 방법을 사용하고 실험적 연구도 뒤따라야 할 것이다. 이후에 수행될 'AEMM을 이용한 건조수축해석'과 '합성거더교의 건조수축 실험'에서는 여러 가지 변수 연구가 수행될 것이며, 본 논문의 선형 등가 건조수축 변형률 $\epsilon_s = 360\mu\epsilon$ 과의 비교분석을 통해서 더욱 신빙성 있는 결과를 산정하여 현 설계기준의 제안값을 적정한 값으로 수정할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 한국도로교통협회 (2000), 도로교설계기준.
- 대한토목학회 (2002), 도로교설계기준 해설집(안).
- 한국콘크리트학회 (1999), 콘크리트구조설계기준.
- 대한토목학회 (2001), 프리플렉스 합성형 설계기준 및 동해설(안).
- 건설교통부 (2001), 도로설계편람 제5편 교량.
- 포항산업과학연구원 (1998), 경량전철 강구조물 설계요령집.
- 장승필, 배두병, 이광명 (2001), 프리플렉스 보의 연속화 방안

연구 및 개발, 서울대 공학연구소 연구보고서.
장승필, 배두병, 심창수 (2000), 프리플렉스 보의 연속화 실험, 대한토목학회 논문집(1), pp. 1-3, 72-75.
삼표산업(주) (2001), 프리플렉스 합성형공법.
배두병, 이광명, 김성곤, (1998), 프리플렉스빔 교량의 균열발생기구 모형화에 관한 연구, 국민대 구조안전연구소 연구 보고서.
이선구 (1997), 프리플렉스빔의 제작 단계별 거동 연구, 국민 대학교 석사논문.
윤석주 (1998), 프리플렉스 빔의 설계 및 제작의 적정성 연구, 국민대학교 석사논문.
전진웅 (1998), 프리플렉스 합성형의 시간의존적 거동, 성균관 대학교 석사논문.
정재민 (2000), P.C 교량 슬래브 연속화에 따르는 비선형 해

석 모델에 관한 연구, 울산대학교 석사논문.
Zdenek P.Bazant, Ignacio Carol, E&FN SPON (1993), Creep and Shrinkage of Concrete.
CEB-FIP (1999), Structural Concrete-Textbook on Behaviour, Design and Performance-Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990.
B.T. Yen, D.bae, (1988), structural Behavior of a Long Span Plate Girder During Placement of Deck Proceeding of 5th IBC, Pittsburg.
B.T. Yen, D.bae, (1989), Evaluation of webs of Composite Plate Girders Buckled During Construction, Proceeding of 6th IBC, Pittsburg.
(접수일자 : 2003. 11. 12 / 심사일 2003. 11. 21 /
심사완료일 2004. 2. 2)