

재령보정 유효계수방법에 의한 프리스트레스트 합성거더의 장기거동 실험 검증

배 두 병¹⁾ · 오 창 국^{2)*} · 최 석 환³⁾

¹⁾ 교수, 국민대학교, 건설시스템공학부 ²⁾ 조교수, 국민대학교, 건설시스템공학부 ³⁾ 부교수, 국민대학교, 건설시스템공학부

Experimental Verification of Age-adjusted Effective Modulus Method to Long-Term Behavior Estimation of Prestressed Composite Girders

Bae, Doo Byong¹⁾ Oh, Chang Kook^{2)*} Choi, Sok Hwan³⁾

¹⁾ Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

²⁾ Assistant Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

³⁾ Associate Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea

ABSTRACT : Prestressed composite girders provide efficient composite action by applying prestress to the sub-encasing concrete. In this study, an enhanced prestressed composite girder with forms suspended from the steel girder is utilized. Long-term behavior of the prestressed composite girder is estimated using age-adjusted effective modulus method, which is verified experimentally using measurements obtained from an in-service bridge. Then, parametric study is carried out to investigate the influences caused by ambient temperature, humidity, prestressing and concrete casting date.

KEYWORDS : age-adjusted effective modulus method, prestressed composite girders, long-term behavior, creep, shrinkage, prestress loss

1. 서 론

프리플렉스 합성거더교는 가격이 비교적 고가임에도 불구하고 다른 교량 형식에 비해 형고비가 낮아 교량 형식 선정시 형하공간에 제약이 있는 경우에는 상당한 경쟁우위를 차지하고 있는 교량형식이다^[1]. 그러나 프리플렉스 합성거더는 강재의 복원력으로 콘크리트부에 압축응력을 도입하고 있으므로 고강도의 프리스트레싱 강재에 의하여 압축응력을 도입하는 프리스트레스트 콘크리트 거더에 비해 시간에 따른 콘크리트의 소성변형에 대해 구조적으로 취약하다는 단점이 있다. 즉, 릴리즈 후 점진

적으로 진행되는 콘크리트의 건조수축 및 크리프 변형에 의해 발생하는 프리스트레스트의 손실은 문제점으로 대두되고 있다^[2].

본 연구에 적용된 프리스트레스트 합성거더는 허용응력이 서로 다른 강재와 콘크리트를 효율적으로 합성시키고, 하부 콘크리트의 인장저항능력을 높이기 위하여 프리스트레싱 강선을 통해 압축력을 도입한 거더형식으로, Fig. 1과 같이 거푸집을 강재에 매달아 콘크리트의 자중이 강재에 부담된 상태로 합성시켜, 설계하중 재하시 강재와 콘크리트가 동시에 허용응력에 도달할 수 있도록 응력을 배분시킴으로써 단면의 효율을 극대화하였다^[3].

이러한 프리스트레스트 합성거더교를 제작하는데 있어서 가장 어려운 것이 일반 합성거더교에 비해 훨씬 복잡한 크리프와 건조수축 같은 콘크리트의 장기적인 영향으로 인해 발생하는 손실과 단계별 거동을 이해하는 것이다^[4].

본 연구에서는 콘크리트의 크리프 및 건조수축 변형에 대한 시간 의존적 변형 특성은 CEB/FIP(1990) Model Code^{[5],[6]}를 적용하고, 장기거동의 영향은 프리스트레스트 합성거더의 제작공

Note.-Discussion open until April 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 13, 2011; revised April 12, 2012; approved on August 14, 2012.
© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-2-910-5444; Fax. +82-2-910-4939
E-mail: ockoo@kookmin.ac.kr

정을 감안하여 시공단계별로 발생하는 여러 지속하중의 영향을 적절히 반영하는 것으로 알려진 재령보정 유효계수방법(Age-adjusted Effective Modulus Method, AEMM)^{(7),(8)}을 사용하여 해석하였다. 이를 통하여 장기거동 효과로 인한 프리스트레스의 손실과 거더 단면의 변형을 증가 양상을 확인하고, 실제교량을 대상으로 시공단계별로 계측한 결과와 현행 도로교설계기준에 명시된 야쓰미 해법에 의한 결과와 비교 검증을 수행하였다. 또한 온도, 습도, 프리스트레스 긴장시기, 바닥판 타설시기를 변수로 한 변수해석을 수행하여 각 변수들이 장기거동에 미치는 영향을 산정하고 재령보정 유효계수방법의 유효성을 검증하였다.

본 연구의 결과 및 추가적인 변수해석을 통해서, 장기거동의 영향에 대한 합리적인 평가방법 및 프리스트레스트 합성거더에 대한 설계기준을 향후 제시하고자 한다.

2. 프리스트레스트 합성거더

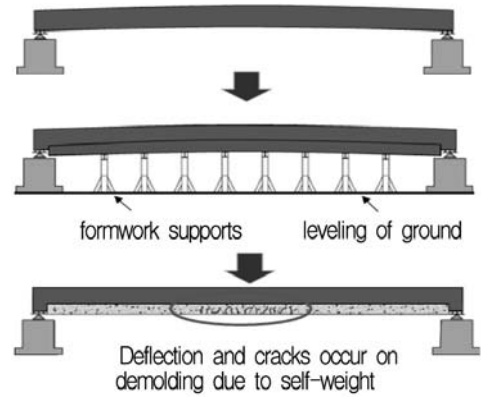
2.1 프리스트레스트 합성거더의 특징

프리스트레스트 합성거더는 강재와 콘크리트를 합성한 후 프리스트레싱 강선을 통해 하부 케이싱 콘크리트에 프리스트레스를 도입한다. 이러한 방식은 거더 제작시 콘크리트 타설을 위한 거푸집이 강재 거더에 매달리도록 지지되므로 Fig. 1과 같이 하부케이싱 콘크리트 단면에는 자중에 의한 인장응력이 발생하지 않는다. 또한 거더 가설 직전 긴장작업을 수행하는 적치기간을 조절함으로써 장기거동으로 인한 손실을 최소화할 수 있다. 그리고, 강재거더가 축강성에 기여하므로 축방향 수축량이 적어서 강선의 유효율이 높다.

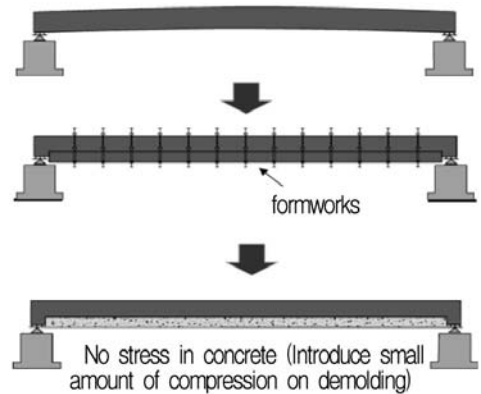
2.2 콘크리트의 장기거동

강재, 콘크리트와 프리스트레싱 강선으로 이루어진 프리스트레스트 합성거더에서 강거더의 윗부분에 위치한 바닥판 콘크리트는 주로 압축력에 대하여 저항하고, 아래 부분에 위치한 하부케이싱 콘크리트는 미리 프리스트레스를 받아 인장력에 대하여 저항하게 된다. 이때 탄성중립축의 경우는 콘크리트의 탄성계수에 따라 변화하고, 소성중립축의 경우는 콘크리트의 강도에 따라 결정된다. 따라서 합성거더의 해석에서는 콘크리트의 시간에 따라 변화하는 탄성계수, 강도 및 장기거동의 영향이 매우 중요하다.

콘크리트에 압축응력이 도입된 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 장기거동(크리프 및 건조수축)에 의하여 응력의 재분배가 이루어져 콘크리트 단면에는 압축응력의 손실이 발생하게 된다. 강재거더나 강선 모두 콘크리트의 크리프나 건조수축에



(a) Construction Method of General Composite Girders



(b) Construction Method of Prestressed Composite Girders

Fig. 1 Construction Method Comparison between General and Prestressed Composite Girders

의한 소성변형을 제한하고 있으며 이러한 제한에 따른 압축응력 손실량은 내적평형을 고려하여 구할 수 있다^{(9),(10),(11),(12)}.

2.3 재령보정 유효계수 방법

시간계수로 표현되는 유효 탄성계수 \bar{E} (Age Effective Modulus)를 이용하여 크리프, 건조수축을 계산하는 방법을 재령보정 유효계수방법이라고 한다.

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

재령보정 유효계수 방법은 Trost에 의해서 콘크리트의 재령에 따라 유효계수(effective modulus)를 단순히 적용하는 방법으로 제안되었고⁽¹³⁾, Bazant에 의해서 보다 정확하게 형식화되고 발전된 방법으로 제안되었다⁽¹⁴⁾. 현재는 CEB/FIP (1990) 합성단면편에서 응력산정 방법으로 제안하고 있다⁽⁶⁾.

콘크리트의 장기거동에서 실제 응력변화는 Fig. 2와 같이

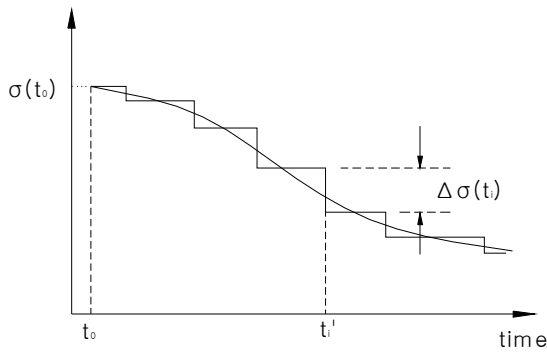


Fig. 2 Time-dependent Stress History

곡선 형태로 나타나고 이에 따라 비선형으로 나타나는 크리프의 영향에 대해 고려해야 한다. 콘크리트의 시간 의존적인 응력 이력이 Fig. 2와 같을 때 전체 변형률은 $\epsilon(t)$ 는

$$\epsilon(t) = \sigma(t_0) \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E(t_0)} + \Delta\sigma(t) \frac{1 + \chi(t, t_0)\phi(t, t_0)}{E(t_0)} + \epsilon_{sh} \quad (2)$$

여기서, ϵ_{sh} 는 건조수축에 따른 변형을 나타낸다. 이때 발생한 응력은 초기에는 작은 값이므로 시간 계수(aging coefficient) $\chi(t, t_0)$ 를 사용해서 크리프계수 $\phi(t, t_0)$ 를 감소시킨 $\chi(t, t_0)\phi(t, t_0)$ 를 사용한다. 시간계수는 응력변화로 인하여 크리프가 χ 만큼 작아지는 것을 고려한 것으로, 0.5에서 1사이의 값을 갖는다.

2.3.1 CEB/FIP(1990) Model Code의 적용

콘크리트의 크리프 및 건조수축 변형에 대한 시간 의존적 변형특성은 CEB/FIP(1990) Model Code를 사용하여 산정하였다.

1) 크리프계수 산정

크리프 변형률 $\epsilon_{c\sigma}(t, t')$ 은 시간 t' 에서 작용응력 $f_c(t')$ 에 의한 콘크리트의 순간 변형 및 크리프 변형을 함께 고려하여 식 (3)을 사용하여 구할 수 있다.

$$\epsilon_{c\sigma}(t, t') = f_c(t') \left[\frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad (3)$$

$$E_{ci} = 10,000 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (4)$$

$$E_{ci}(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{ci} \quad (5)$$

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

2) 건조수축 변형률 산정

콘크리트 건조수축 변형률은 대기의 평균상대습도, 부재의 크기 등을 고려하여 다음과 같이 구한다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sh0}\beta_s(t - t_s) \quad (6)$$

여기서, t_s 는 수축이 시작될 때의 콘크리트의 재령(일)이다.

2.3.2 시공단계별 재령보정 유효계수법의 적용

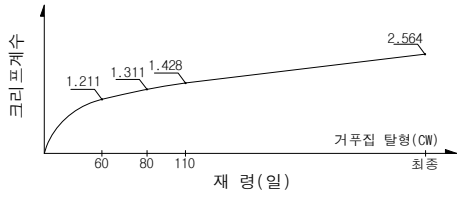
재령보정 유효계수법을 이용한 장기거동해석의 시공단계는

- ① 거푸집 탈형 후 프리스트레싱 강재 긴장력 도입 직전,
- ② 프리스트레싱 강재 긴장력 도입 후 거더를 교각에 적치하고 바닥판 콘크리트 타설을 위한 거푸집 조립이 완료되는 시점,
- ③ 거푸집 내에 바닥판 콘크리트를 타설한 후 양생이 종료되는 시점,
- ④ 바닥판 콘크리트 설계강도 발현 직후 2차고정하중이 재하된 상태에서 최종단계까지 총 4단계로 구분할 수 있으며 표준공정 및 이때의 저항단면은 Fig. 3과 같다.

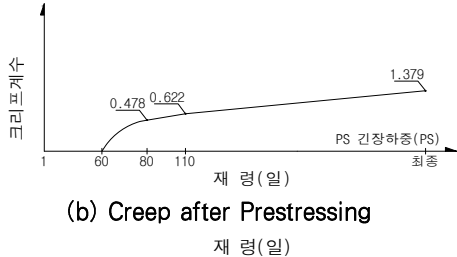
Age(days)	1	60	80	110	Final
Loads	Demolding	Prestressing	Dead load before Composite Action	Dead load after Composite Action	
Resisting Cross-section					
Elastic Modulus for Casing Concrete (E)	21,923MPa	39,000MPa	39,449MPa	42,278MPa	

Fig. 3 Resisting Cross-section for Each Phase in Long-term Behaviour Estimation

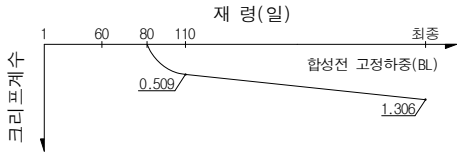
Fig. 4는 작용하중별 크리프 변형과 시공단계별 건조수축변형률을 각각 나타낸다. 또한 해석에 적용된 시공단계별 시각은 다음과 같다; 거푸집 탈형 $t_1=1$ day, 프리스트레스 도입 $t_2 = 60$ days, 합성전 고정하중 재하 $t_3=80$ days, 합성후 고정하중 재하 $t_4=110$ days, 최종 검토단계 $t_5=20,000$ days. 단면계수 및 단면성질과 관련된 값의 기준은 케이싱 콘크리트 하단으로 하였다. 왜냐하면, 콘크리트의 재령에 따라 탄성계수가 지속적으로 변하기 때문에, 중립축이 계속 변하게 되고, 따라서, 단면1차모멘트 및 단면2차모멘트의 값은 케이싱 콘크리트 하단을 기준으로 계산하는 것이 편리하기 때문이다.



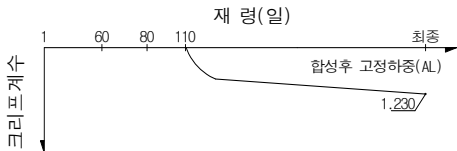
(a) Creep after Demolding



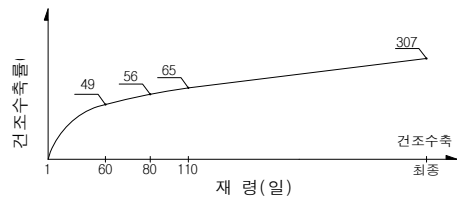
(b) Creep after Prestressing



(c) Creep due to Dead Load before Composite Action



(d) Creep due to Dead Load after Composite Action



(e) Shrinkage Strain at Each Loading Stage

Fig. 4 Creep Strains for Each Load (a)~(d) and Shrinkage Strains at Each Loading Phase (e)

3. 장기거동 영향평가

3.1 실교량 계측을 통한 장기거동 실험연구

프리스트레스드 합성거더교의 장기거동 효과로 인한 프리스트레스의 손실과 거더 단면의 변형을 증가양상을 확인하기

위하여 실제교량을 대상으로 시공단계별로 계측하고 모니터링한 변형률과 재령보정 유효계수방법으로 해석한 변형률을 비교하고, 현행 도로교설계기준에 명시된 야스미 해법에 의한 결과와의 비교를 통하여 재령보정 유효계수방법의 합리성을 검증하였다.

3.1.1 대상교량 및 실험개요

대상교량은 경기도 양평군 옥천면 아신리에 위치한 아신교로, 트럭하중에 대하여 1등급이고, 하나의 지간이 27.25m로 이루어진 2경간 연속교로서, 교폭이 13.5m이고 주형수가 6개이다. 합성거더의 하부케이싱 콘크리트의 설계압축강도는 45MPa이고, 상부슬래브 콘크리트의 설계압축강도는 27MPa이다. 강거더에는 SM520강재를 적용하였고, 프리스트레스를 도입하는 프리스트레싱 강선으로 SWPC7B 15.2mm의 저릴렉세이션 강연선을 사용하였다. Fig. 5에서 나타내듯이 하나의 지간당 총 6개의 거더가 있고, 그중 G1거더(외측)와 G3거더(내측)를 계측 대상으로 정하고 장기거동을 계측하였다. 계측은 하부케이싱 콘크리트 타설로부터 바닥판 포장전까지 110일에 걸쳐서 1시간 단위로 수행하였으며, 내측거더와 외측거더의 단부와 중앙부에서 변형률을 측정하였다.

하부케이싱 콘크리트는 타설 후 2일간 증기양생을 거쳤으며 이후 2일간은 건조상태로 양생을 실시하였다. 타설 후 4일간에 걸쳐 양생을 실시한 후 거푸집을 탈형하였고, 탈형한 날을 1일로 하여 17일에는 프리스트레스를 도입하였다. 그리고 31일째 되는 날에 거치를 실시하였는데, 거더가 콘크리트 타설시부터 단순지지상태로 되어 있었기 때문에 거치는 시공단계상에서 별다른 의미가 없었다. 계측상의 마지막 시공단계인 바닥판 타설은 74일째 실시하였고, 이후 32일간의 장기거동 계측을 끝으로 실험을 종료하여 총 110일에 걸친 계측을 통해 장기거동에 대한 실제 구조물의 영향을 파악할 수 있었다.

3.1.2 게이지 설치 위치

본 실험에서 사용된 게이지는 크게 두 가지 형식으로 분류된다. 하나는 반영구적으로 사용할 수 있는 진동현식 게이지(vibrating wire)이고, 다른 하나는 일반 전기저항식 게이지(foil)

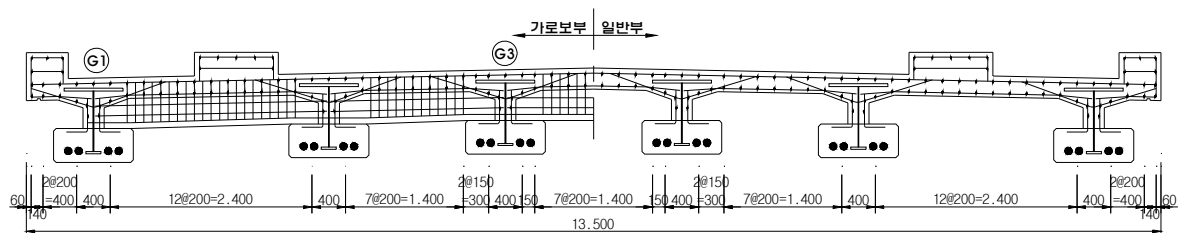


Fig. 5 Cross-section at the Middle of the Target Bridge

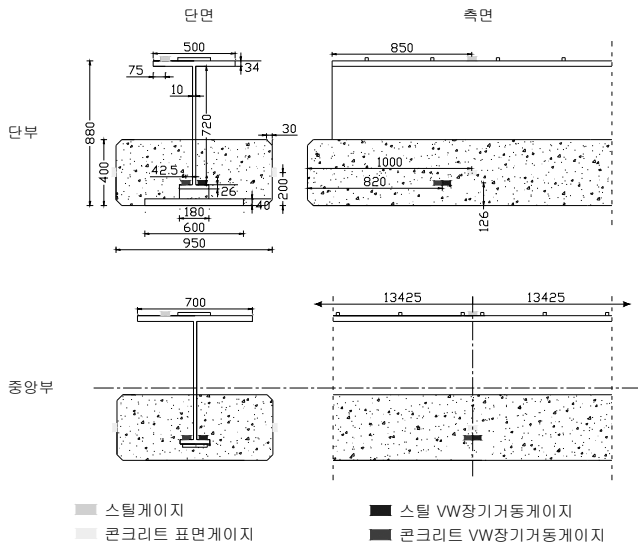


Fig. 6 Gauge Locations

strain gauge)이다.

외측거더와 내측거더의 단부와 중앙부에 Fig. 6과 같이 게이지를 설치하였다. 진동현식 게이지(Fig. 6에 vw로 표시)는 케이싱하연으로부터 126mm 높이의 하부플랜지상에 설치하였다. 북부판을 기준으로 한쪽은 콘크리트에 매립되는 형태로 설치하였고, 다른 쪽은 하부플랜지에 용접되는 형태로 설치하였는데, 이 설치위치는 케이싱콘크리트와 강재의 동일 위치에서의 변형을 비교하기 위하여 선정하였다.

진동현식 게이지는 변형률과 더불어 온도도 측정할 수 있는 이점이 있어서 본 계측에서는 전 시공단계에서 진행되는 장기 거동의 측정을 위해 사용되었고, CR10-X Data Logger과 연결되어 장기거동을 계측하였다.

전기저항식 게이지로는 프리스트레스트가 도입될 때에만 하부 케이싱 콘크리트의 양 옆 표면과 상부 플랜지상의 변형을 계측하였고, TDS-303 Data Logger가 함께 사용되었다.

3.1.3 온도계측 및 보정

장기거동 측정장비인 CR10-X Data Logger를 이용하여 전체 시공단계에 걸쳐 진동현식 게이지 위치에서 온도를 측정하였다. 시간당 측정된 내측거더 단부의 온도계측 데이터를 Fig. 7에 나타내었다. 강재와 콘크리트의 온도차는 없었으며 일교차에 의하여 등락폭이 크지만 전반적으로 5°C에서 25°C 까지 상승하는 양상을 보인다. 내측거더 중앙부와 외측거더 단부 및 중앙부에서도 동일한 양상의 계측결과를 얻었고, 이 실측온도는 계측된 변형률 데이터의 온도보정을 위하여 사용되었다.

진동현식 게이지를 이용하여 온도를 계측할 때 게이지와 계측장비사이에서 자체온도보정을 거친 후에 데이터로 산출

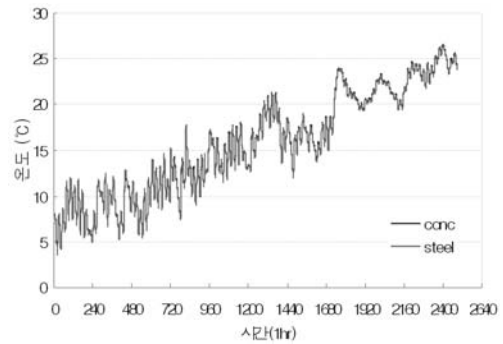


Fig. 7 Measured Temperature at the End of the Interior Girders

되지만, 장기계측이 요구되거나 정밀계측이 요구될 때에는 선펡창계수에 의한 오차를 줄이기 위하여 식 (7)와 같이 온도를 보정하여야 한다.

$$\mu\epsilon = (\epsilon_{current} - \epsilon_{initial}) \times B + (\alpha_s - \alpha_c)(T_{current} - T_{initial}) \quad (7)$$

여기서, $\epsilon_{current}$, $\epsilon_{initial}$ 와 $T_{current}$, $T_{initial}$ 는 각각 계측된 시점 및 초기의 변형률과 온도, $B = 0.975$, 그리고 $\alpha_s = 12.2 \mu\epsilon/^\circ C$, $\alpha_c = 10.4 \mu\epsilon/^\circ C$ 이다.

3.2 장기거동 실험결과

3.2.1 콘크리트의 탄성계수

케이싱콘크리트의 역학적 성질들을 측정하기 위해 $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$ 의 원주형 공시체 12개를 제작하였다. 몰드에 콘크리트를 채운 후 처음 24시간 동안은 케이싱콘크리트와 함께 증기 양생을 실시하였고, 그 후 탈형한 뒤 수중 양생을 실시하였다. 공시체 특성실험결과와 평균값이 Table 1이다.

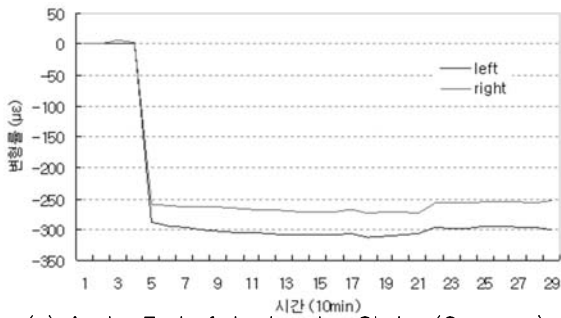
Table 1. Concrete Properties

28-day Compressive Strength	28-day Splitting Tensile Strength	28-day Elastic Modulus
66.6 MPa	4.81 MPa	30,870 MPa

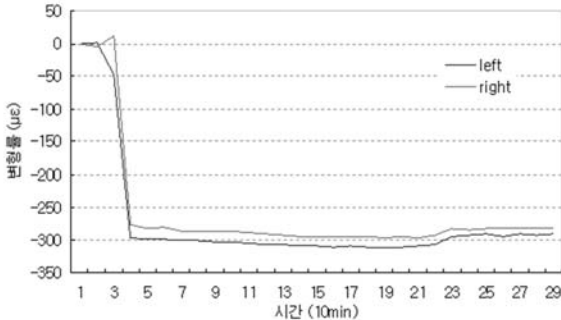
3.2.2 프리스트레스트 도입시 계측결과

1) 단부의 하부케이싱 콘크리트

프리스트레스트 도입시 10분 간격으로 콘크리트 표면에 부착한 전기저항식 게이지를 통해 변형률을 측정하였다. 총 두 번에 걸쳐서 프리스트레스트를 도입하는데 거더의 양단 중 먼저 긴장하는 쪽에는 콘크리트의 탄성변형에 따른 손실량 만큼을 추가로 긴장하였다. 강선 하나당 긴장력 1,780kN를 도입하여 강선 2개에 총 3,560kN의 긴장력을 도입하였다.



(a) At the End of the Interior Girder (Concrete)



(b) At the End of the Exterior Girder (Concrete)

Fig. 8 Strains of Bottom Casing Concrete Measured at the End of the Girder on Introduction of Prestress

Fig. 8에서와 같이 초기정착에 의하여 $300\mu\epsilon$ 정도의 압축 변형이 나타났으며 계측하는 단부의 케이싱 콘크리트는 후기 긴장의 영향을 거의 받지 않았는데 이것은 게이지가 부착된 단부의 반대편 단부에 후기긴장이 도입됐기 때문이다. 이 시공 단계에서는 합성전 고정하중이 재하되기 전이므로 내측거더와 외측거더의 구분은 무의미하다.

2) 중앙부의 하부케이싱 콘크리트

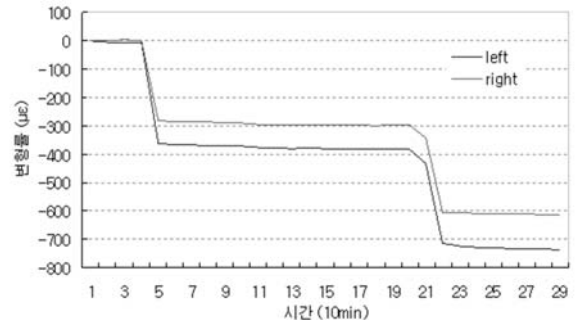
중앙부 강선의 수는 4개이고, 강선 하나당 긴장력이 1,780kN이었므로 총 7,120kN의 긴장력을 도입하였다. 두 번의 긴장에 걸쳐 각각 $300\mu\epsilon \sim 350\mu\epsilon$ 정도의 압축변형이 나타났으며 거더의 중앙부이기 때문에 두 번의 긴장의 영향이 확연히 나타났다 (Fig. 9 참조).

3) 상부플랜지

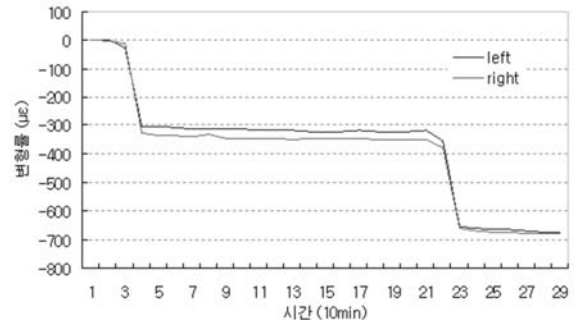
거더의 상부플랜지는 하부케이싱 콘크리트와는 달리 프리스트레스에 의하여 인장변형이 발생하였다. 단부에는 미소한 인장변형이 나타났고 중앙부에는 두 번의 긴장에 의하여 각각 $70\mu\epsilon$ 정도의 인장변형이 발생하였다 (Fig. 10 참조).

3.2.3 장기거동 계측결과와 재령보정 유효계수 방법에 의한 해석결과의 비교

아신교를 대상으로 계측한 변형률과 식 (2)를 이용하여 재령보정 유효계수방법에 의해 계산한 변형률을 비교해 보았다. 재령보정 유효계수방법에 의한 해석시, 계측데이터와 동일조건에서의 비교를 위해 28일 탄성계수에 공시체 시험값인 30,870

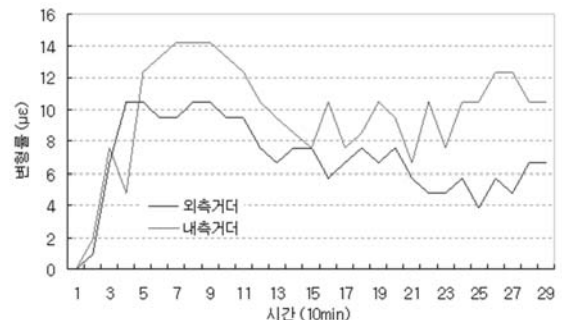


(a) At the Middle of the Interior Girder (Concrete)

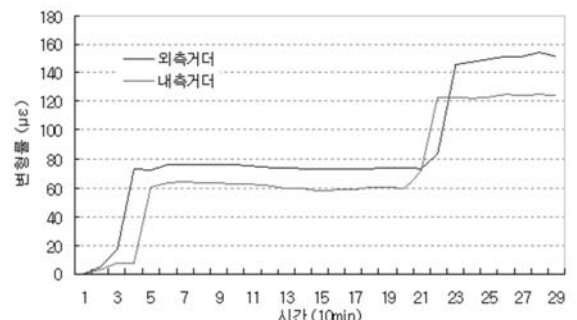


(b) At the Middle of the Exterior Girder (Concrete)

Fig. 9 Strains of Bottom Casing Concrete Measured at the Middle of the Girder on Introduction of Prestress



(a) Upper Flange at End (Steel)



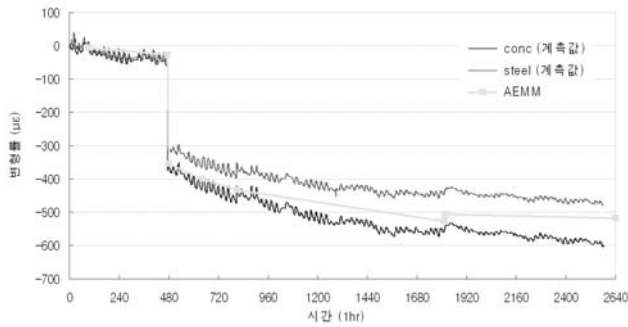
(b) Upper Flange at Middle (Steel)

Fig. 10 Strains of Upper Flange on Introduction of Prestress

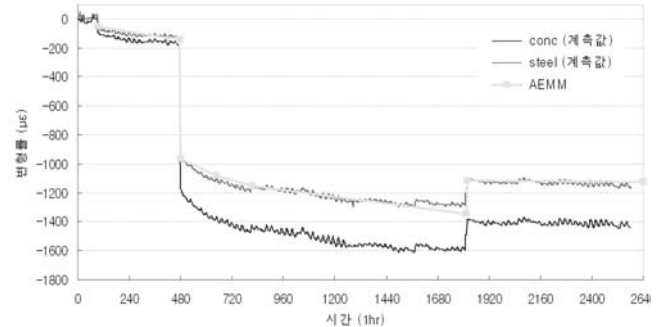
MPa를 적용하고, 양평현장조건인 평균온도 15°C 와 평균상대습도 60%를 적용하여 해석을 수행하였다.

1) 거더 단부

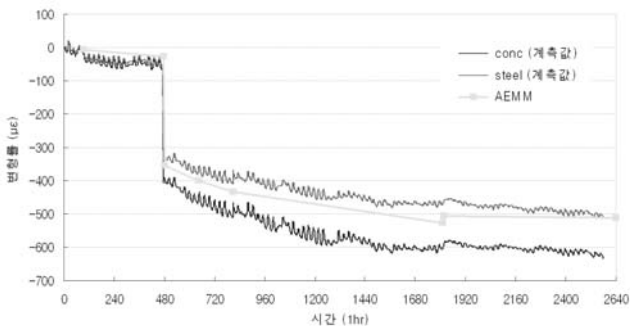
케이싱 콘크리트를 양생하면서부터 크리프와 건조수축이 진



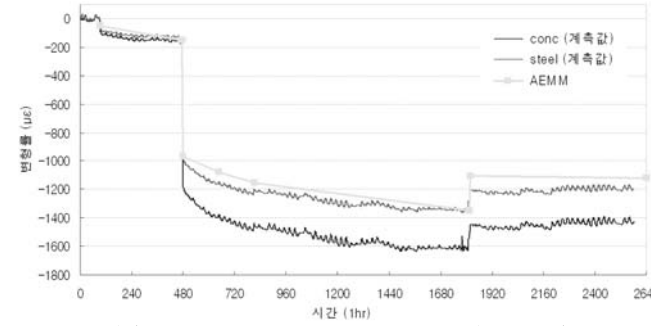
(a) At End of Interior Girder (126mm)



(a) At Middle of Interior Girder (126mm)



(b) At End of Exterior Girder (126mm)



(b) At Middle of Exterior Girder (126mm)

Fig. 11 Time-dependent Strains at Interior and Exterior Girder Ends

Fig. 12 Time-dependent Strains at Middle

행되다가 프리스트레스에 의해 $300\mu\epsilon$ 정도의 압축변형이 발생하였다. 초기단계부터 단순지지상태였기 때문에 가설 시에는 어떠한 변화도 나타나지 않았으며 거더의 단부이기 때문에 합성전 고정하중이 작용하였을 때에도 미소한 정모멘트의 영향만을 받았다. 이 때 엄밀히 말하자면 외측거더보다 내측거더에서 다소 큰 인장변형이 발생하였는데 이는 내측거더가 슬래브하중에 대한 영향을 다소 크게 받기 때문이다.

전반적으로 내측거더와 외측거더에서 동일한 경향으로 장기거동에 의한 손실이 발생하고 있다. 또한 재령보정 유효계수방법에 의한 변형을 해석값이 계측값과 동일한 경향을 나타내며 일치하는 것으로 보아, 재령보정 유효계수방법에 의한 해석의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

2) 거더 중앙부

케이싱 콘크리트를 양생하면서부터 크리프와 건조수축이 진행되다가 프리스트레스에 의해 $900\mu\epsilon$ 정도의 압축변형이 발생하였다. 이후 합성전 고정하중이 재하되기 전까지 압축변형이 계속 진행되는데 프리스트레스가 도입된 직후에 더 큰 기울기로 변형이 발생하고 점차적으로 변형폭이 줄어드는 경향을 보인다.

합성전 고정하중이 작용하였을 때에는 슬래브하중에 의한 정모멘트의 영향으로 $160\mu\epsilon$ 정도의 인장변형이 발생하였다. 이 때 거더 단부와 마찬가지로 내측거더에서 슬래브하중에 대한 영향을 더 받기 때문에 외측거더보다 다소 큰 인장변형이

발생하였다.

전반적으로 내측거더와 외측거더에서 동일한 경향으로 장기거동에 의한 손실이 발생하고 있으며, 재령보정 유효계수방법에 의한 변형을 해석값이 계측값과 동일한 경향을 나타내며 일치하는 것으로 보아, 거더 단부에서의 경우와 마찬가지로 재령보정 유효계수방법에 의한 해석의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

다만, 콘크리트의 변형률이 강재의 변형률보다 다소 크게 나타나는 것은 게이지의 위치에 따른 국부적인 응력집중과 기하학적인 영향인 것으로 판단된다. 그 이유는 콘크리트 게이지는 게이지 주변의 콘크리트의 구속효과만이 작용하지만 강재 게이지는 이와 더불어 지그에 의한 강재거더의 구속효과 또한 작용하기 때문이다. 하지만 이에 관한 명확한 근거를 규명하려면 여러 차례의 장기거동실험이 추가로 수행되어야 할 것이다.

3.2.4 재령보정 유효계수 방법과 야쓰미 해법에 의한 누적응력 비교

장기거동 계측데이터와 재령보정 유효계수방법에 의해 산정한 변형률의 비교를 통해, 재령보정 유효계수방법에 의한 해석이 프리스트레스트 합성거더의 시공단계별로 발생하는 여러 지속하중에 의한 장기거동의 영향을 적절히 고려하는 것으로 검증되었다. 이를 기반으로 재령보정 유효계수방법을 통한 단계별 응력을 산정하여, 야쓰미 해법에 의한 응력값과 비교해 보았다.

1) 크리프계수와 건조수축률

Table 2와 Table 3은 아신교 내측거더 중앙부를 대상으로 야쓰미 해법과 재령보정 유효계수방법에 의해 산정한 크리프 계수와 건조수축을 값이다. 재령보정 유효계수방법을 적용한 경우, 거푸집 탈형으로부터 60일째 긴장하고, 20일후에 합성전 고정하중이 재하되는 프리스트레스트 합성거더의 표준공정을 적용하였다.

Table 2. Creep Coefficient

Bottom Casing (Days)	AEMM				Yassumi Method			
	60	80	110	20,000	60	80	110	20,000
Demolding	1.07	1.13	1.21	2.04	1.20	-	-	2.00
Prestressing	-	0.48	0.61	1.18				
Before Composite Action	-	-	0.51	1.13				
After Composite Action	-	-	-	1.07				
Deck (Days)	AEMM		Yassumi Method					
	110	20,000	110	20,000				
Before Composite Action	1.24	2.58	-	2.00				
After Composite Action	-	1.63	-	2.00				

Table 3. Shrinkage Strains

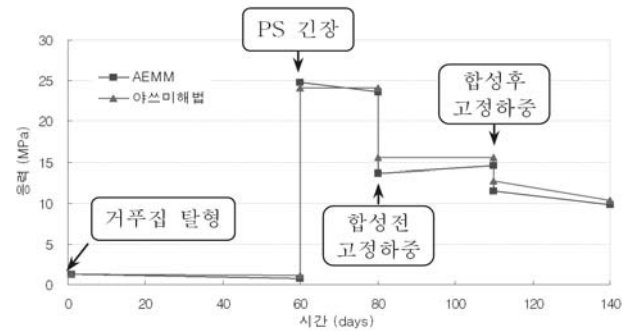
Bottom Casing (Days)	60	80	110	20,000
AEMM	52.12	59.97	69.94	330.02
Yassumi Method	45	-	-	270
Deck (Days)	110	20000		
AEMM	60.24	426.25		
Yassumi Method	-	270		

Table 2에 나타난 바와 같이, 재령보정 유효계수방법 적용 시 표준공정을 도입한 경우에는 크리프계수가 야쓰미해법에 의한 값인 2.0에 인접한 값을 나타내고 있다.

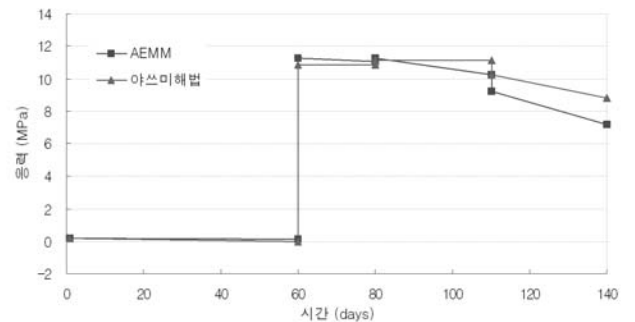
2) 케이싱 콘크리트와 강재에서의 단계별 누적응력

케이싱 콘크리트에서는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 하연과 상연 모두에서 두 가지 해석법이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 참고로, Fig. 13과 Fig. 14에서 압축력을 양(+)의 값으로 하여 도시하였다.

강재의 경우에는 Fig. 14에 나타난 바와 같이 두 가지 해석법에 따라 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 야쓰미 해법이 대다수의 조건에서 손실응력을 과소평가를 하기 때문으로, 실제 손실의 절대값 누계는 재령보정 유효계수 방법에 의한 것이 -4.06MPa로 야쓰미 해법에 비해서 36%정도가 더 크게 산정되었다.

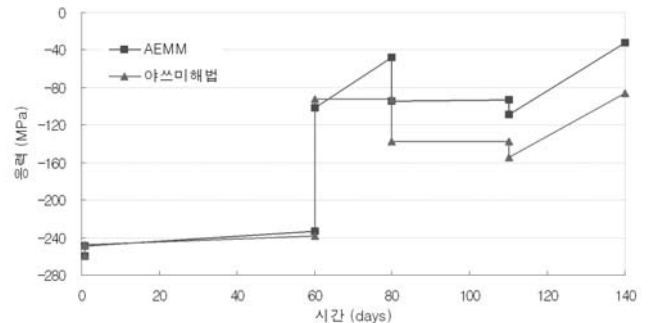


(a) At Middle of Interior Girder (Casing Bottom)

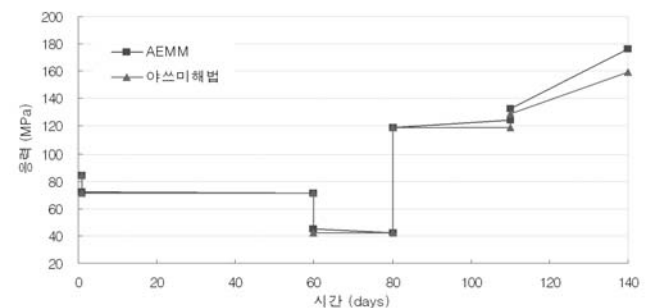


(b) At Middle of Interior Girder (Casing Top)

Fig. 13 Accumulated Stresses at Each Stage for Casing Concrete



(a) At Middle of Interior Girder (Bottom Surface of Steel)



(b) At Middle of Interior Girder (Top Surface of Steel)

Fig. 14 Accumulated Stresses at Each Stage for Steel

또한 해석 알고리즘상의 손실항을 보면 재령보정 유효계수 방법에서는 모든 시공단계별로 장기거동에 의한 손실을 산정할 수 있는 반면, 야쓰미 해법에서는 초기손실과 최종손실만을

산정하게끔 되어 있다. 그러므로, 본 해석에서 적용한 표준공정보다 프리스트레스 도입(Fig. 13의 PS 긴장)을 빨리하고 바닥판 타설(Fig. 13의 합성전 고정하중)이 늦어지는 불리한 공정이 적용되면 두 공간간의 손실을 반영하지 못하는 야쓰미해법으로는 손실이 발생하지 않는 것으로 산정되어 손실을 더욱 더 과소평가하게 되므로 구조물의 안전성에 결함을 발생시킬 수 있을 것이다. 이에 관한 정량적인 분석결과를 얻기 위한 변수해석 결과를 다음 장에서 수록한다.

4. 장기거동 변수해석

4.1 변수항목 및 조건

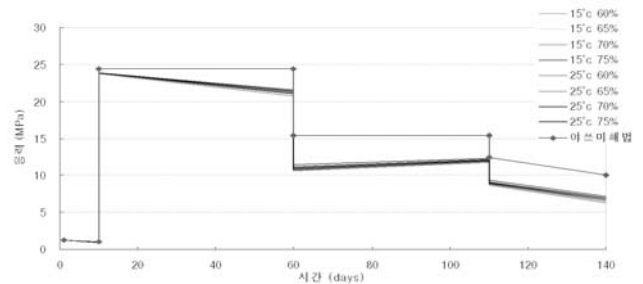
변수해석은 프리스트레스트 합성거더의 장기거동에 의한 프리스트레스의 손실을 산정하기 위하여 슬래브전장이 27.25m인 아신교를 대상으로 PS 긴장시기, 바닥판 타설시기, 온도, 습도 변수들을 조합하여 160가지 경우에 대해 AEMM과 야쓰미해법을 이용하여 실시하였다.

변수항목은 다음과 같은 기준으로 선정되었다. PS긴장시기와 바닥판 타설시기 등 시공단계별 공정일수는 프리스트레스트 합성거더교의 장기거동에 의한 손실을 최대화 또는 최소화할 수 있는 조건을 고려하였다. 즉, PS긴장과 바닥판 타설을 거꾸집 탈형으로부터 각각 10일과 60일 후에 수행하는 경우(PS10 Casting60으로 표기)와 거꾸집 탈형으로부터 60일 후와 110일후에 각각 PS긴장과 바닥판을 타설하는 경우를 상한선과 하한선으로 정하고, 이 범위 안에서 10일 간격으로 조정하였다. 그리고 온도와 습도의 환경조건은 실제 시공조건인 하한선과 상한선인 15°C~25°C, 60%~75%를 기준으로 선정하였다. Table 4에서 바닥판 타설시기 +10 day는 PS 긴장 후 10일 후에 바닥판 타설(즉, PS10 Casting20)을 수행한 경우를 의미한다.

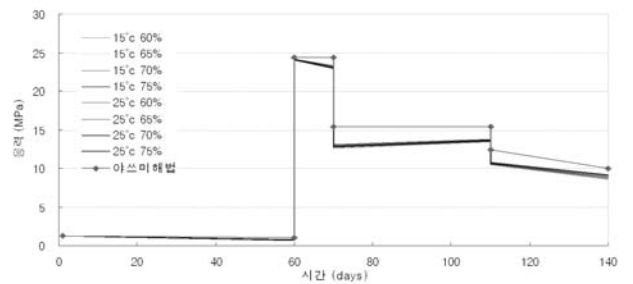
Table 4. Variables

Time on Introduction of Prestress	Time on Casting of Deck	Temp.	Humidity
10 day	+10 day	15 °C	60 %
20 day	+20 day	25 °C	65 %
40 day	+30 day		70 %
60 day	+40 day		75 %
	+50 day		

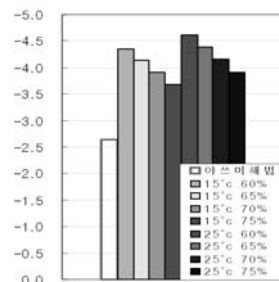
4.2 케이싱하연과 강재하연의 단계별 응력 및 총 손실응력 전체 160가지의 경우 중 케이싱하연과 강재하연에서의 총



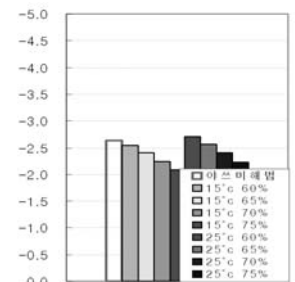
(a) At Middle of Interior Girder (Casing Bottom) -PS10 Casting60



(b) At Middle of Interior Girder (Casing Bottom) -PS60 Casting70



(c) Total Stress Losses (MPa) -PS10 Casting60

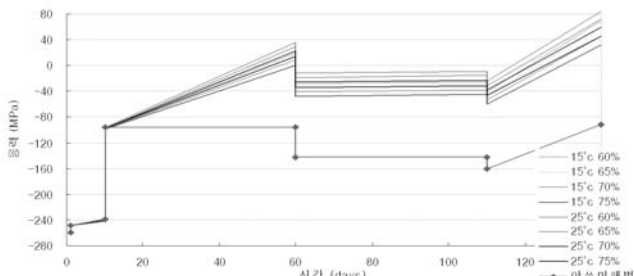


(d) Total Stress Losses (MPa) -PS60 Casting70

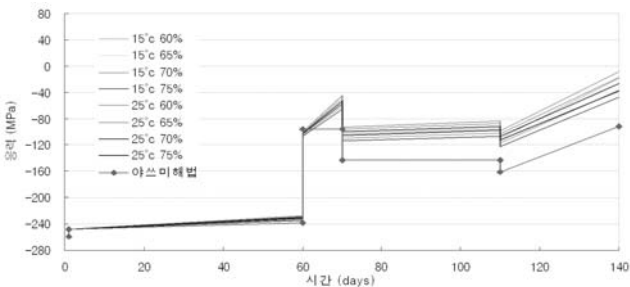
Fig. 15 Accumulated Stresses and Total Stress Losses at the Bottom of Casing According to Prestressing and Casting Concrete

손실응력이 가장 큰 경우(Fig. 15의 (a),(c)와 Fig. 16의 (a),(c)와 가장 작은 경우(Fig. 15의 (b),(d)와 Fig. 16의 (b),(d)만을 선택하여 도시하였다. 각각의 그림에서 온도와 습도의 범례항목은 각 손실응력 그래프의 왼쪽으로부터 순차적으로 나타내었다.

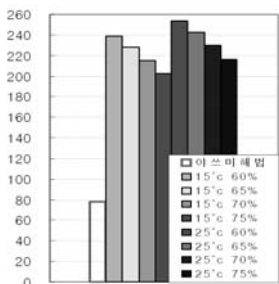
케이싱하연에서나 강재하연에서 모두 PS10 타설60인 경우의 총 손실응력값이 동일한 온도 및 습도 조건에서 최대임을 확인할 수 있었고, 최소인 경우는 PS60 타설70인 경우임을 알 수 있었다. 즉, 거꾸집 탈형 후에는 최대한 프리스트레스의 도입을 늦추고, 프리스트레스 도입 후에는 최대한 빨리 바닥판을 타설하는 경우가 장기거동에 의한 손실이 가장 적게 나타남을



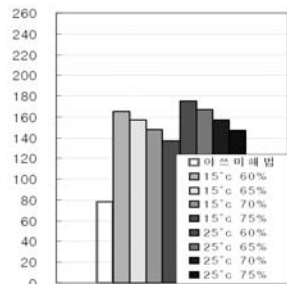
(a) At Middle of Interior Girder (Steel Bottom)
-PS10 Casting60



(b) At Middle of Interior Girder (Steel Bottom)
-PS60 Casting70



(c) Total Stress Losses (MPa)
-PS10 Casting60



(d) Total Stress Losses (MPa)
-PS60 Casting70

Fig. 16 Accumulated Stresses and Total Stress Losses at the Bottom of Steel According to Prestressing and Casting Concrete

알 수 있다. 또한 PS 긴장 시기와 타설 시기가 같은 경우에는 온도가 낮고 습도가 높을수록 장기거동에 의한 손실이 작게 발생되는 것을 확인할 수 있다.

최대 총 손실응력값은 케이싱하연의 경우 PS10 타설60이고 온도가 25°C 습도가 60%일 때 약 -4.6MPa이었으며, 총 손실율은 20.2%에 해당한다. 여기서, 총 손실율은 케이싱 콘크리트의 타설로부터 최종단계까지 발생한 총 손실응력에 대한 프리스트레스 도입시 발생응력과의 비율(%)로 산정하였다. 케이싱하연에서의 최소 총 손실응력값 및 총 손실율과 강제하연에서의 최대 및 최소 총 손실응력과 총 손실율을 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Total Stress Losses and Stress Loss Ratios

Stages	Casing Bottom		Steel Bottom	
	Max.	Min.	Max.	Min.
Stages	PS10 Casting60	PS60 Casting70	PS10 Casting60	PS60 Casting70
Temp. & Humidity	25°C 60%	15°C 75%	25°C 60%	15°C 75%
Total Stress Loss	-4.6MPa	-2.1MPa	201.9MPa	137.0MPa
Total Loss Ratios (%)	20.2%	8.9%	141.8%	106.8%

AEMM을 이용한 결과와는 대조적으로 야쓰미 해법을 이용한 경우에는 PS 긴장시기나 타설시기와 관계없이 합성후 고정하중이 재하되는 시기만 같으면 손실응력값이 동일하다는 사실에 주의해야 한다. 또한, 케이싱하연에서 보다는 강제하연에서 야쓰미 해법에 의한 총 손실응력값이 AEMM으로 얻은 값보다 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 이는 야쓰미 해법의 해석 알고리즘상 프리스트레스 도입 직후의 구속효과에 의한 장기거동의 손실을 고려하지 못하기 때문이다.

거푸집 탈형 후 60일째 프리스트레스를 도입하고 20일 후에 바닥판을 타설하는 표준공정을 적용하는 경우에는 야쓰미 해법에 의한 장기거동 해석결과와 AEMM을 적용한 해석결과 차이가 줄어들어 케이싱하연에서는 온도가 25°C 습도가 60%일 때 최대 총 손실응력값이 -2.8MPa(AEMM)과 -2.6MPa(야쓰미 해법)로 거의 일치하는 것을 알 수 있고, 강제하연에서는 177.1MPa(AEMM)과 78.2MPa(야쓰미 해법)로 그 차이가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 프리스트레스트 합성거더의 장기거동을 평가하기 위하여 실제 교량을 대상으로 예측하고 모니터링한 실험결과와 재령보정 유효계수방법을 이용한 장기거동 해석결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 프리스트레스트 합성거더 형식으로 시공된 실제교량을 대상으로 시공단계별로 예측하고 모니터링한 장기거동 실험결과와 CEB/FIP(1990) Model Code를 적용한 재령보정 유효계수방법에 의해 산정된 변형률이 동일한 경향을 나타내며 일치하는 것으로 보아 재령보정 유효계수 방법에 의한 해석이 프리스트레스트 합성거더의 시공단계별로 발생하는 여러 지속하중에 의한 장기거동의 영향을 적절히 고려하는 것으로 검증되었다.

- (2) PS긴장시기와 타설시기 및 온도, 습도에 대한 변수 연구를 수행한 결과 케이싱하연의 경우는 전체적으로 프리스트레스 도입 직후의 장기거동 손실을 고려하지 못하는 야쓰미 해법이 재령보정 유효계수 방법보다 2~5MPa 정도 총 손실응력(약 8~20%의 총 손실율에 해당함)을 작게 평가하고 있으나, 강재하연의 경우에는 상당히 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 이는 야쓰미 해법의 해석 알고리즘상 강재에서 더 크게 나타나는 프리스트레스 도입 직후의 구속효과에 의한 장기거동의 손실을 고려하지 못하기 때문이다.
- (3) 변수 연구 결과 온도가 낮고 습도가 높을수록 장기거동에 의한 손실이 작게 발생됨을 확인할 수 있으며, 거푸집 탈형으로부터 최대한 프리스트레스의 도입을 늦추고, 프리스트레스 도입 후에는 최대한 빨리 바닥판을 타설하는 경우 장기거동의 손실을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 공기와 공사비 등의 문제로 무한정 양생기간을 늘릴 수는 없기 때문에 거푸집 탈형 후 60일째 프리스트레스를 도입하고 20일 후에 바닥판을 타설하는 표준공정을 따르는 것이 바람직하다.
- (4) 표준공정에 대하여 재령보정 유효계수방법을 적용하면 야쓰미 해법에 의한 크리프계수인 2.0과 거의 유사한 값이 산정된다. 표준공정을 따르는 경우 케이싱 콘크리트에서는 두 방법으로 산정한 누적응력값이 거의 일치하지만, 강재의 경우에는 손실응력을 과소 평가하는 야쓰미 해법에 의한 값이 훨씬 작게 산정되었다.
- (5) 연구 결과를 종합해 볼 때, 표준공정이 도입될 때 뿐 아니라, 다른 공정이 도입되는 경우에도 응력손실을 과소 평가하는 야쓰미 해법을 사용하는 것보다는 재령보정 유효계수방법을 이용하여 응력손실을 산정하는 것이 더욱 타당하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 R&D정책인프라사업(11기술표준화09-01)에 의한 성능기반 강-콘크리트 합성구조 설계기준개발의 연구비 지원과 2012년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌(References)

[1] Morano, S.G. and Mannini, C. (2006) Preflex Beams: A Method of Calculation of Creep and

Shrinkage Effects, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 1, pp.48-58.

[2] 이덕준(2009) Preflex 합성형 Girder의 문제점과 대안 공법에 관한 연구, 석사학위논문, 우송대학교.
Lee, D.J. (2009) *A Study on the Problems and Alternative Method of Preflex Composite Girder*, M.S. dissertation, Woosuk University, Korea (in Korean).

[3] Ghali, A. (2002) *Concrete Structures: Stresses and Deformations: Analysis and Design for Serviceability*, 3rd Edition, Spon Press, U.S.A.

[4] 나윤호, 배두병, 류형근(2007) 프리스트레스트 합성거더의 장기거동에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 2007년도 정기학술발표대회 논문집, 대한토목학회, pp.3814-3817.
Na, Y., Bae, D., and Ryu, H.K. (2007) An Experimental Study on Long-Term Behavior of Prestressed Composite Girders, Proceedings of Annual KSCE Conference, KSCE, pp.3814-3817 (in Korean).

[5] CEB/FIP (1999) *Structural Concrete, Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990*. International Federation for Structural Concrete(fib), Switzerland.

[6] Comite Euro-International Du Beton (1990) *CEB/FIP MODEL CODE*, Thomas Telford, Switzerland.

[7] Amadio, C. and Fragiocomo, M. (1997) Simplified Approach to Evaluate Creep and Shrinkage Effects in Steel-Concrete Composite Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 9, pp.1153-1162.

[8] Gilbert, R.I. (1989) Time-Dependent Analysis of Composite Steel-Concrete Sections, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No.11, pp.2687-2705.

[9] Gilbert, R.I. (1988) *Time Effects in Concrete Structures*, Elsevier Science Ltd., U.S.A.

[10] Bazant, Z.P. and Baweja, S. (2000), Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3, *ACI Special Publication*, Vol. 194, pp.1-84.

[11] 배두병, 정대준(2004) 합성거더교의 등가 건조수축 변형률, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제1호, pp.135-144.
Bae, D. and Jung, D. J. (2004) Equivalent shrinkage strain for steel-concrete composite girder bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 16, No. 1, pp. 135-144 (in Korean).

- [12] 배두병, 윤석구, 함상희(2004) 콘크리트 건조수축에 의한 합성거더의 장기거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제6호, pp.807-818.
Bae, D., Youn, S. G. and Ham, S. H. (2004) Long-term behavior of steel-concrete composite girders due to concrete shrinkage, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 16, No. 6, pp. 807-818 (in Korean).
- [13] Trost, H. (1967) Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriechund Relaxations Probleme bei Beton und Spannbeton, *Beton-und Stahlbetonbau*, Vol. 62, pp.230-238, pp.261-269.
- [14] Bazant, Z.P. (1972) Prediction of Concrete Creep Effects using Age-adjusted Effective Modulus Method, *ACI Journal*, Vol. 4, pp.212-217.

요 약 : 프리스트레스트 합성거더란 합성거더의 하부 콘크리트에 프리스트레싱 강선을 통해 압축력을 도입한 거더형식으로, 본 연구에서는 거푸집을 강재에 매달아 콘크리트의 자중이 강재에 부담된 상태로 합성시켜 단면의 효율을 극대화한 거더를 사용하였다. 이러한 프리스트레스트 합성거더에 대하여 재령보정 유효계수방법을 사용하여 시공단계별로 발생하는 여러 지속하중에 의한 장기거동 효과로 인해 유발되는 프리스트레스의 손실을 산정하고, 실제교량을 대상으로 시공단계별로 계측한 결과에 대해 야쓰미해법을 이용한 결과와 비교하였고, 또한 온도, 습도, 프리스트레스 긴장시기, 바닥판 타설시기를 변수로 한 변수해석을 수행하여 유효성을 검증하였다.

핵심용어 : 재령보정 유효계수방법, 프리스트레스트 합성거더, 장기거동, 크리프, 건조수축, 프리스트레스 손실