

변수해석을 통한 프리스트레스트 합성거더의 시공단계별 장기거동 평가법 개선방안

배 두 병¹⁾ · 오 창 국^{2)*}

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

Improvement in Long-term Behavior Estimation of Prestressed Composite Girders for Various Construction Sequences using Parametric Study

Bae, Doobyong¹⁾ Oh, Chang Kook^{2)*}

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

ABSTRACT : The age-adjusted effective modulus method has been known to provide more precise assessment than the traditional Yassumi method for long-term behavior estimation of prestressed composite girders. The age-adjusted effective modulus method, however, involves complicated calculation, thereby making the Yassumi method more prevalent in actual design. This study presents rational approaches to revise creep coefficients for the Yassumi method by using parametric study results obtained from the age-adjusted effective modulus method.

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

1. 서 론

프리스트레스트 합성거더는 하부 콘크리트에 프리스트레싱(PS) 강선을 통해 압축력을 도입함으로써 하부 콘크리트의 인장저항능력을 높일 수 있는 거더 형식이다^[1]. 본 연구에서는 강재 I-거더와 하부케이싱 콘크리트를 합성한 뒤 저릴렉세이션 PS 강선을 이용하여 콘크리트에 압축응력을 도입하고, 바닥판 콘크리트를 타설하여 제작되는 프리스트레스트 합성거더를 사용하였다. 특별히 강재에 거푸집을 매달아 콘크리트 타설시 그 자중이 강재에 가해지는 상태로 합성을 수행하여, 설계하중이 재하되는 단계에서는 강재와 콘크리트가 동시에 허용응력 상태에 도달할 수 있도록 효율성을 극대화시킨

형식을 사용하였다^{[1],[2]}.

하지만, 프리스트레스트 합성거더교는 일반 합성거더교에 비해 콘크리트의 장기거동, 즉, 크리프와 건조수축으로 인해 발생하는 거동을 정확하게 평가하는 일이 어렵다. 이전 연구^[3]에서는 콘크리트의 크리프 및 건조수축 변형에 대한 시간 의존적 변형 특성은 CEB/FIP(1990) Model Code^{[4],[5]}를 적용하고, 장기거동의 영향은 재령보정 유효탄성계수방법(Age-adjusted Effective Modulus Method, AEMM)^{[6],[7]}을 사용하여 해석한 후, 실제교량을 대상으로 시공단계별로 예측한 결과와 도로교설계기준(2010)^[8]과 철도설계기준(2011)^[9]에서 기반한 야쓰미 해법에 의한 결과와 비교 검증을 수행하여 재령보정 유효탄성계수방법의 유효성을 검증하였다^[3].

하지만, 재령보정 유효탄성계수방법은 산출방법이 복잡하여 실무에서는 야쓰미 해법을 이용하여 장기거동을 해석하는 것이 일반적이다^[8]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 재령보정 유효탄성계수방법에 의해 여러 시공단계별 재령일수에 따른 변수해석을 수행하고, 야쓰미 해법에 의한 장기거동 해석 시 크리프계수를 보정하여 실무에서 합리적으로 반영할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

Note.-Discussion open until February 28, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 14, 2012; revised May 29, 2013; approved on July 24, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

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

2. 재령보정 유효탄성계수방법을 이용한 변수해석 결과 분석

이 장에서는 재령보정 유효탄성계수방법을 사용하여 시공 단계별로 발생하는 여러 지속하중에 의한 장기거동 효과로 인해 유발되는 프리스트레스의 손실을 산정하고, 실제교량을 대상으로 시공단계별로 측정한 결과에 대해 야쓰미해법을 이용한 결과와 비교하고, 또한 온도, 습도, 프리스트레스 긴장 시기, 바닥판 타설시기를 변수로 한 변수해석을 수행하여 유효성을 검증한 이전 연구결과^[3]를 간략하게 정리하였다.

2.1 콘크리트의 장기거동과 재령보정 유효탄성계수방법

크리프 및 건조수축과 같은 장기거동에 의해 프리스트레스 트 콘크리트 구조물에 발생하는 압축응력의 손실은 내적평형을 고려하여 구할 수 있다^{[10],[11],[12],[13]}. 이 때, 시간계수로 표현되는 유효 탄성계수 \bar{E} (Age Effective Modulus)를 이용하여 크리프, 건조수축을 계산하는 방법을 재령보정 유효탄성계수방법이라고 한다^{[14],[15]}.

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

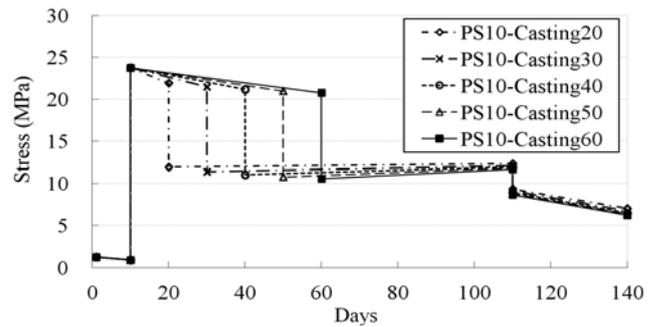
여기서, $\chi(t, t_0)$ 는 시간 계수(aging coefficient), $\phi(t, t_0)$ 는 크리프계수이다. 재령보정 유효탄성계수 방법은 CEB/FIP (1990)^[5]와 EuroCode2(2004)^[16]에서 합성단면에서 응력산정 방법으로 제안하고 있다.

재령보정 유효탄성계수 방법을 다음과 같은 4가지 시공단계

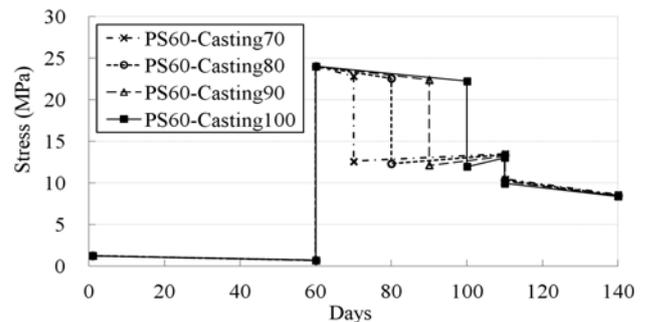
- ① 거푸집 탈형 후 프리스트레싱 강제 긴장력 도입 직전,
- ② 프리스트레싱 강제 긴장력 도입 후 거더를 교각에 적치하고 바닥판 콘크리트 타설을 위한 거푸집 조립이 완료되는 시점,
- ③ 거푸집 내에 바닥판 콘크리트를 타설한 후 양생이 종료되는 시점,
- ④ 바닥판 콘크리트 설계강도 발현 직후 2차 고정하중이 재하된 상태에서 최종단계까지 총 4단계에 적용한다.

2.2 장기거동 변수해석 결과

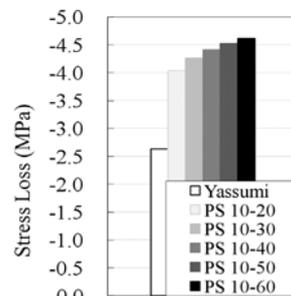
변수해석은 27.25m인 실교량^[3]을 대상으로 하여, PS 긴장시기, 바닥판 타설시기, 온도 및 습도의 변수들을 조합하여 160가지 경우에 대해 실시하였고, 케이싱하연과 강제하연에서 총 손실응력이 가장 큰 경우(각각 Fig. 1(a),(c)와 Fig.



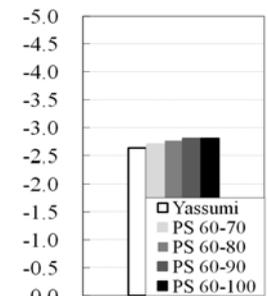
(a) When prestressing is applied 10 days after demolding (PS10)



(b) When prestressing is applied 60 days after demolding (PS60)



(c) Total stress losses (PS10)



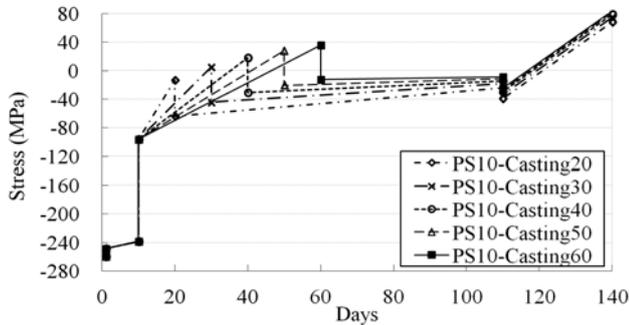
(d) Total stress losses (PS60)

Fig. 1 Accumulated stresses ((a),(b)) and total stress losses ((c),(d)) at the middle of interior girder(casing bottom)

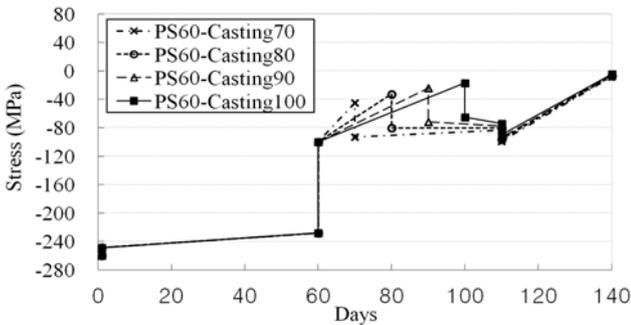
2(a),(c)와 가장 작은 경우(각각 Fig. 1(b),(d)와 Fig. 2(b),(d))를 PS긴장시기와 바닥판 타설시기에 따라 도시하였다. 합성거더 단면과 케이싱 설치 위치는 배두병 등(2012)의 Fig. 5와 Fig. 6을 참조하라. 이 때, 콘크리트에 도입된 응력수준은 내·외측 거더 단부에 각각 9.65MPa과 9.62MPa, 이고 내·외측 거더 중앙부에 각각 22.68MPa과 20.72MPa이며, 강제비는 0.058이다.

변수해석에 사용된 변수는 Table 1에 나타내었다. 총 160가지의 경우에 대해 변수해석을 수행하였다. Fig. 1의 PS10-Casting20(또는 PS10-20)은 거푸집 탈형으로부터 각각 10일째와 20일째(Table 1에서는 +10 day로 표기)에 PS

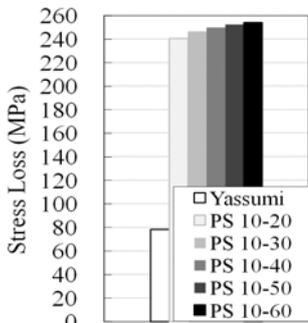
긴장과 바닥판 타설을 수행한 경우를 의미한다.
 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다⁽³⁾.



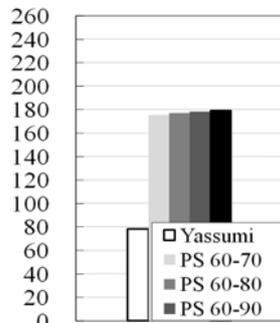
(a) When prestressing is applied 10 days after demolding (PS10)



(b) When prestressing is applied 60 days after demolding (PS60)



(c) Total stress losses (PS10)



(d) Total stress losses (PS60)

Fig. 2 Accumulated stresses ((a), (b)) and total stress losses ((c), (d)) at the middle of interior girder (bottom surface of steel)

Table 1. 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		

- ① 재령보정 유효탄성계수 방법을 이용한 해석이 프리스트레스트 합성거더의 시공단계별로 발생하는 여러 지속하중에 의한 장기거동의 영향을 적절히 고려하는 것으로 검증되었다.
- ② 총 손실응력 산정시 야쓰미해법이 재령보정 유효탄성계수 방법보다 과소평가하고 있음을 알 수 있다.
- ③ 온도가 낮고 습도가 높을수록 장기거동에 의한 손실이 작게 발생된다. 그리고, 거푸집 탈형으로부터 최대한 프리스트레스의 도입을 늦추고, 프리스트레스 도입 후에는 최대한 빨리 바닥판을 타설하는 경우에 장기거동의 손실을 줄일 수 있다.
- ④ 표준공정을 따르는 경우, 케이싱 콘크리트에서는 야쓰미 해법과 재령보정 유효탄성계수 방법으로 산정한 두 가지 누적응력값이 거의 일치하지만, 강재의 경우에는 야쓰미 해법에 의한 값이 훨씬 작게 산정된다. 그러므로, 표준공정이 도입될 때 뿐 아니라, 다른 공정이 도입되는 경우에도 응력손실을 과소 평가하는 야쓰미 해법을 사용하는 것보다는 재령보정 유효탄성계수방법을 이용하여 응력손실을 산정하는 것이 더욱 타당하다고 판단된다.

3. 장기거동 변수해석

이 장에서는 콘크리트의 탄성계수, 슬래브의 전장 및 강성비에 대한 추가 변수해석을 수행하여, 야쓰미 해법에 의한 크리프계수를 합리적으로 보정하는 방법을 모색해보려 한다.

3.1 콘크리트의 탄성계수

케이싱 콘크리트의 탄성계수에 따른 단계별 누적응력을 비교해 보았다. PS긴장을 60일에 수행하고, 타설을 80일째에 수행한 표준공정을 적용하였고, 사용된 세 가지의 탄성계수값은

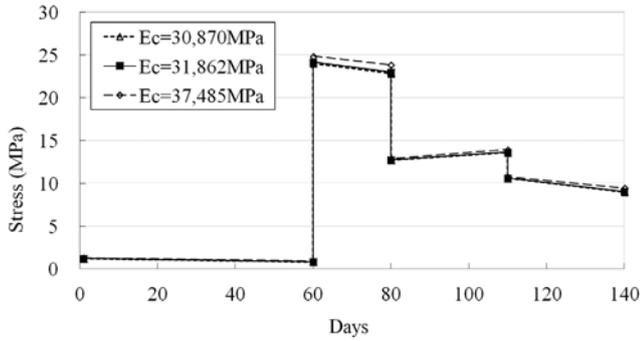
- ① 공시체 특성시험결과의 평균값인 30,870MPa,
- ② CEB/FIP(1990) Model Code의 28일 탄성계수 (E_{28})인 37,485MPa,
- ③ 탄성 해석시에는 28일 탄성계수의 85%만 적용하라는 CEB/FIP(1990) Model Code의 규정에 따른 값인 31,862MPa과 같다.

여기서, $E_{28} = E_{co} [(f_{ck} + \Delta f) / f_{cmo}]^{1/3}$

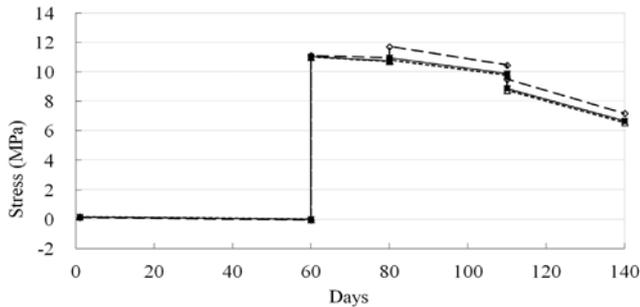
$$f_{ck} = 45 \text{ MPa}, \Delta f = 8 \text{ MPa},$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ MPa}, E_{co} = 21500 \text{ MPa}.$$

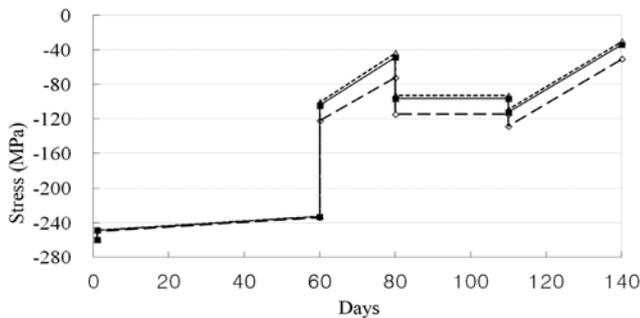
Fig. 3에 나타난 것과 같이 강제하연을 보면 적용하는 탄성계수가 커질수록 응력의 변동폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 3(a)~(d) 각각의 경우 응력의 차이가 미소하므로, 탄성계수의 차이가 응력에 미치는 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 이에 따라, 본 연구에서는 CEB-



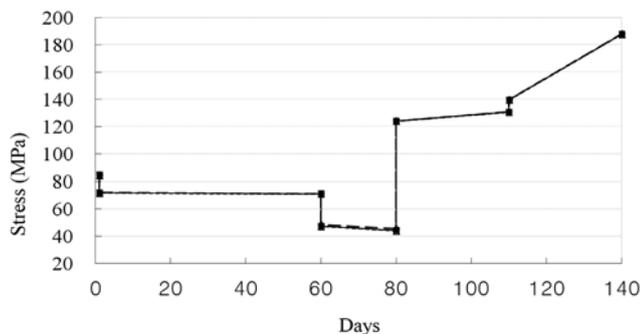
(a) At Middle of interior girder (casing bottom)



(b) At middle of interior girder (casing top)



(c) At middle of interior girder (bottom surface of steel)



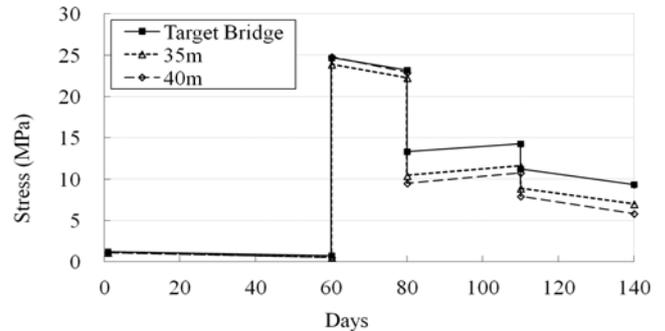
(d) At middle of interior girder (top surface of steel)

Fig. 3 Accumulated stresses according to modulus of elasticity

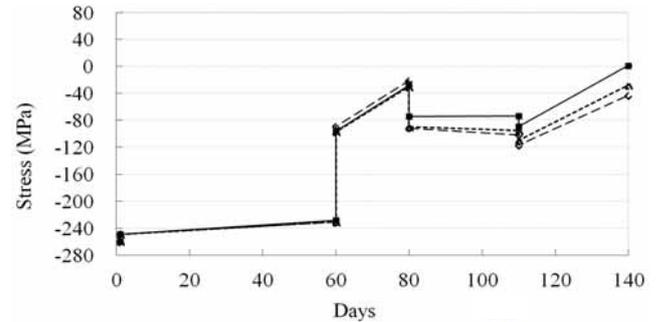
FIP(1990) Model Code에 규정된 값인 $E_c = 0.85E_{28} = 31,862MPa$ (③의 경우)을 적용하였다. 이 값은 공시체 특성실험결과의 평균값과 3%의 근소한 오차가 있다.

3.2 슬래브 전장별 손실응력과 손실을 비교

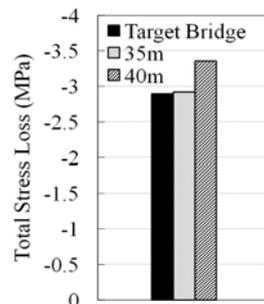
표준공정을 적용하여 슬래브 전장별로 단계별 발생응력과 손실응력을 산정하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 슬래브 전장이 길어질수록 케이싱콘크리트의 단면적이 커지므로 장기거동에 의한 인장의 손실응력(-)이 증가하는 것을 알 수 있다. 도시된 값들은 각각 내측중앙부 케이싱하연(Fig. 4(a), (c))와 내측중앙부 강제하연(Fig. 4(b), (d))에서의 발생응력과 총 손실응력값이다.



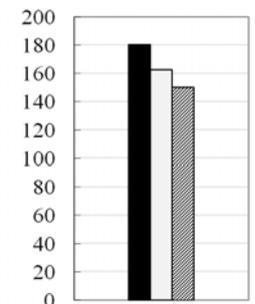
(a) At middle of interior girder (casing bottom)



(b) At middle of interior girder (bottom surface of steel)



(c) At middle of interior girder (casing bottom)



(d) At middle of interior girder (bottom surface of steel)

Fig. 4 Accumulated stresses and total stress losses at the bottom of casing and steel surface for different span length

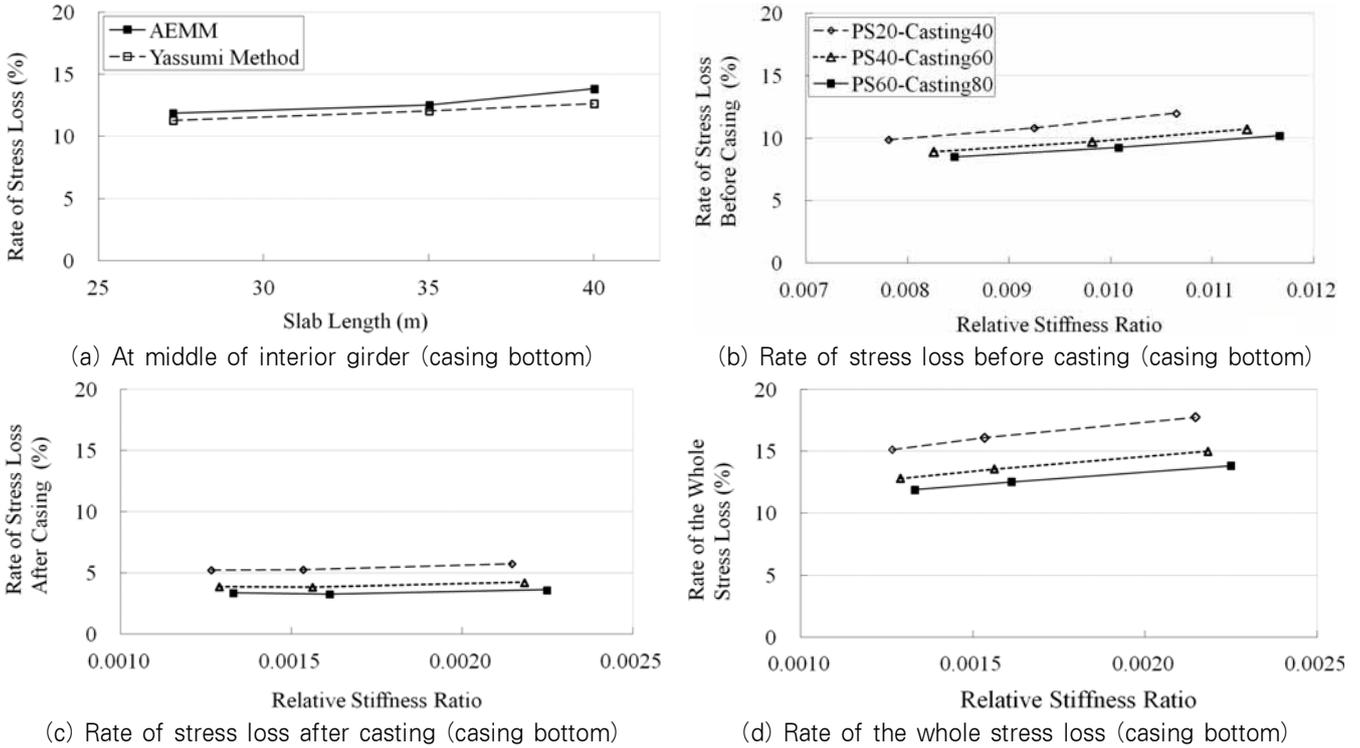


Fig. 5 Rate of stress loss with respect to slab length and relative stiffness ratio according to various construction sequences

케이싱하연에서의 슬래브 전장별 손실율을 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5(a)의 왼쪽으로부터 첫 번째 표식이 27.25m의 실교량⁽³⁾을 나타내고, 두 번째, 세 번째 표식이 각각 35m 표준교와 40m 표준교를 나타낸다. 이전 연구에서 밝혀진 것과 마찬가지로 야쓰미 해법이 프리스트레스트의 손실에 대해 과소평가함을 알 수 있으며, 또한, 표준공정을 적용하였기 때문에 두 가지 해석법으로 산정된 손실율의 차이가 그리 크지 않은 것을 알 수 있다⁽³⁾.

주목할만한 사항은 손실율의 분포가 선형이라는 사실로, 만일 합성거더의 슬래브 전장이 27.25m와 40m 사이라면 그러한 합성거더교의 손실율에 대해서는 선형보간법(linear interpolation)에 의하여 손실율을 유추해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 강성비에 따른 손실율 비교

다음으로 강성비에 따른 슬래브 전장별 손실율을 나타내었다. 강성비 α 는 다음의 식으로 산출하였다.

$$\alpha = \frac{A_a I_a}{A_v I_v} \quad (2)$$

여기서, A_a , I_a 는 각각 거더와 PS강선의 면적 및 단면2차

모멘트이고, A_v , I_v 는 각각 거더, PS강선과 콘크리트에 대한 면적 및 단면2차모멘트이다.

식 (2)에 나타내듯이 단면의 강성비를 전체단면의 강성에 대한 강계단면의 강성의 비율로 정의하고, 여러 가지의 서로 다른 시공단계를 함께 고려하여 각각에 대한 타설전 손실율(Fig. 5(b)), 타설후 손실율(Fig. 5(c)) 그리고 총손실율(Fig. 5(d))을 각각 도시하였다. 여기서, 타설전 손실율과 타설후 손실율을 합하면 총손실율이 된다. 슬래브 전장에 따른 손실율의 경우와 마찬가지로 상대강성비에 대한 손실율 또한 전체적으로 선형분포를 하는 것으로 보아 손실율과 단면 강성비가 정비례관계에 있음을 알 수 있다.

4. 야쓰미 해법의 합리적인 크리프계수 적용방안

프리스트레스트 합성거더의 장기거동 평가 시 재령에 따라 변하는 역학적인 성질을 실제 구조물의 거동과 동일하게 적용하려면 재령보정 유효탄성계수 방법을 이용하여 해석하는 것이 합당하나, 복잡한 알고리즘으로 인하여 실무에서는 야쓰미 해법을 이용하여 장기거동을 해석하는 것이 일반적이다^{(8),(9)}. 이러한 이유로 본 연구에서는 야쓰미 해법에 의한 장기거동 해석 시 크리프계수의 보정을 통하여 야쓰미 해법의 시간이력을 고려하지 못하는 단점을 보완하는 방법을 제시하

고자 한다. 야쓰미 해법의 크리프계수 보정은 재령보정 유효탄성계수 방법에 의하여 여러 시공단계별 재령일수에 따른 변수해석을 통하여 도출한 데이터를 근거로 수행하였다.

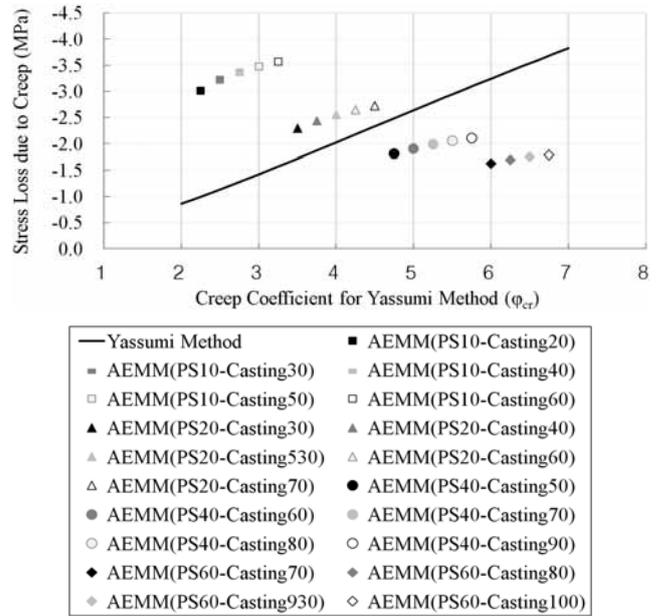
4.1 실교량 적용 크리프계수

슬래브 전장이 27.25m인 실교량⁽³⁾을 대상으로 야쓰미 해법을 이용하여 장기거동을 해석할 때, 콘크리트의 재령변화에 따른 시간이력에 대한 고려를 하려면 재령보정 유효탄성계수 방법에 의한 손실응력을 산정하고 이와 동일한 손실응력을 발생시키는 크리프계수를 산출하여 야쓰미 해법에 적용하는 것이 합리적이다. 구체적인 방법을 재령보정 유효탄성계수 방법과 야쓰미 해법에 대하여 시공단계별 공정일수에 따른 크리프에 의한 장기거동의 손실을 나타낸 Fig. 6(a)를 이용하여 설명하면 다음과 같다.

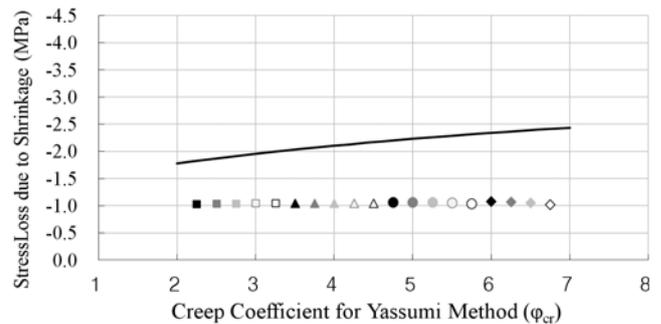
예를 들어, 거푸집 탈형으로부터 60일 후에 프리스트레스를 도입하고 20일 후에 바닥판을 타설하는 표준공정 적용시에 야쓰미 해법을 이용하여 크리프계수를 산출한다면 적당한 크리프계수는 얼마인지 산정하는 방법을 Fig. 6(a)를 이용하여 알아보자. 그래프 상에서 AEMM(PS60-Casting80)을 나타내는 다이아몬드 모양의 표식에서부터 X축과 평행한 선을 긋고 이 선과 실선으로 표시된 야쓰미 해법을 나타내는 실선과의 교점을 찾는다. 이 교점은 상기한 공정에 대하여 야쓰미 해법에 의한 손실응력과 재령보정 유효탄성계수 방법에 의한 손실응력이 동일해지는 크리프 계수값을 표시한다. 즉, Y축 상에서 손실응력 -1.7MPa를 기준으로 크리프계수 3.4를 적용하면 야쓰미 해법을 이용하는 경우에도 시간이력을 고려한 재령보정 유효탄성계수 방법과 동일한 장기거동 해석결과를 얻을 수 있게 된다.

건조수축에 대해서는 Fig. 6(b)를 이용한다. 그래프에 나타난 바와 같이, 재령보정 유효탄성계수 방법을 이용하면 여러 가지 다른 조건의 시공단계에 대해서 건조수축에 의한 손실응력의 크기는 대동소이함을 알 수 있다. 또한 그래프상에서 야쓰미 해법을 나타내는 실선의 기울기가 Fig. 6(a)와 비교하여 확연히 작아진 것을 확인할 수 있는데, 이는 건조수축에 의한 장기거동 손실은 크리프계수에 따른 영향이 거의 없다는 것을 의미한다. 이러한 사실은 식 (3)에서 알 수 있듯이 콘크리트의 건조수축에 의한 응력을 계산할 때의 크리프 계수(ϕ_{sh})는 콘크리트의 크리프에 의한 응력을 계산할 때의 크리프계수(ϕ_{cr})의 2배를 사용하기 때문이다⁽⁸⁾.

$$\phi_{sh} = 2\phi_{cr} \quad (3)$$



(a) Stress loss due to creep (target bridge)



(b) Stress loss due to shrinkage (target bridge)

Fig. 6 Stress loss due to creep and shrinkage for the target bridge

Fig. 6(b)는 또한 야쓰미 해법이 건조수축에 의한 손실을 재령보정 유효탄성계수 방법에 비해 과대평가하고 있음을 보여준다. 따라서, 야쓰미 해법을 이용하여 건조수축에 대한 손실을 평가할 때에는 재령보정 유효탄성계수 방법에서 산정한 손실응력과 제일 적은 차이를 보이는 최소 크리프계수값인 2.0을 사용하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다.

4.2 35m와 40m 표준교 적용 크리프계수

슬래브 전장이 35m와 40m인 표준교에 대해서도 동일한 그래프를 그리면 각각 Fig. 7(a), (b)와 (c), (d)와 같다. 35m와 40m의 표준교도 야쓰미 해법을 이용하여 장기거동을 해석할 때, 콘크리트의 재령변화에 따른 시간이력에 대한 고려를 하려면 Fig. 7을 이용하여 동일한 방법으로 크리프계수를 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

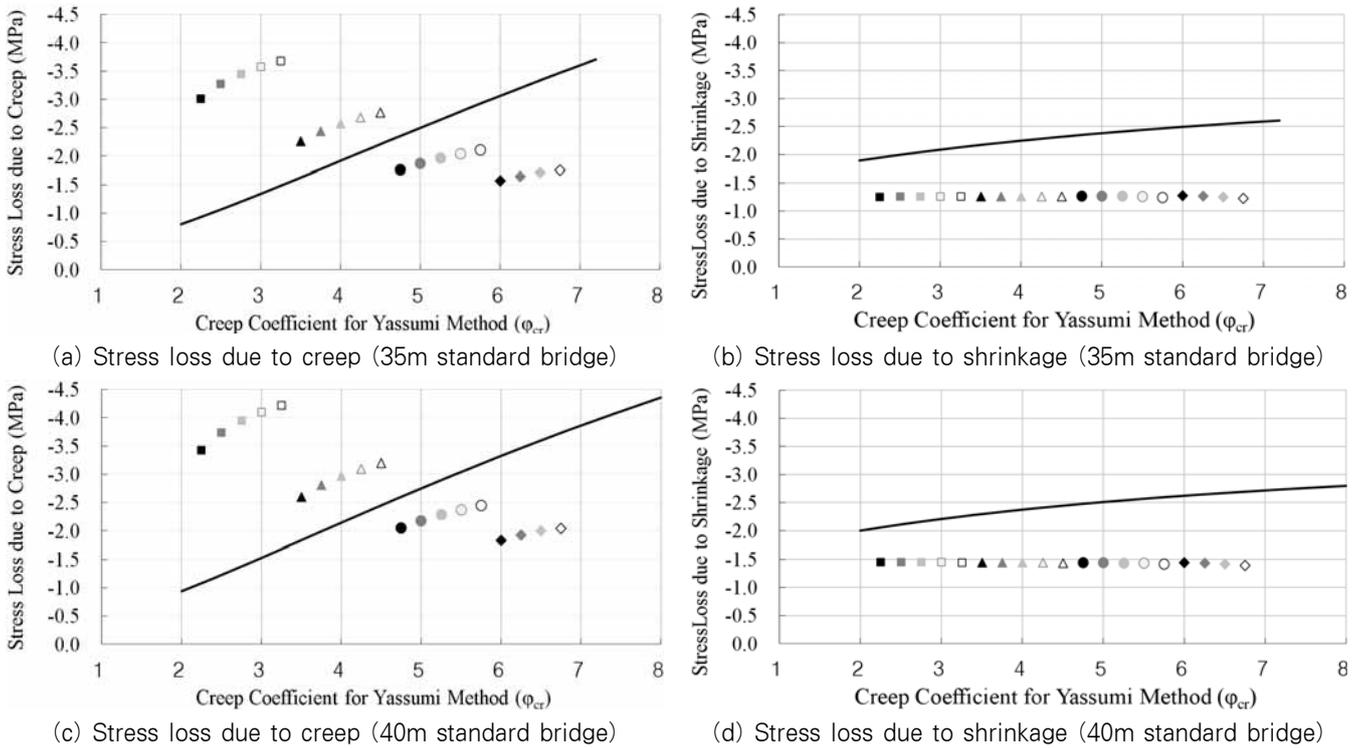


Fig. 7 Stress loss due to creep and shrinkage for the 30m and 40m standard bridges

만일, 대상 합성거더의 슬래브전장 길이가 실측된 대상교량(27.75m)보다는 길고 40m 표준교보다는 짧은 경우라면 선형보간(linear interpolation)을 이용하면 콘크리트의 재령변화에 따른 시간이력을 고려하되 야쓰미 해법을 이용하여 크리프계수를 산정할 수 있다. 이는 Fig. 5에 도시된 바와 같이 슬래브 전장에 대하여 응력손실율이 선형으로 변화할 뿐 아니라, 상대강성비에 대해서도 타설전 손실율, 타설후 손실율, 총 손실율 모두 선형분포를 보이기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 프리스트레스트 합성거더의 시공단계별 장기거동을 평가하는 방법에 대한 개선방안을 제시하기 위해 변수해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 프리스트레스트 합성거더의 장기거동 평가 시 재령에 따라 변하는 역학적인 성질을 실제 구조물의 거동과 동일하게 적용하려면 기존의 야쓰미 해법을 이용하는 것보다는 재령보정 유효탄성계수 방법을 이용하여 해석하는 것이 더욱 타당하다. 이러한 결론은 실제 교량을 대상으로 예측하고 모니터링한 실험 결과와, PS 긴장시기, 타설시기, 온도 및 습도에 대한 변수 연구 결과를 통해서 검증되었다.

- (2) 재령보정 유효탄성계수 방법의 알고리즘이 복잡하다는 사실로 인하여 상대적으로 간단한 야쓰미 해법을 이용하여 장기거동의 영향을 평가하는 경우에는 재령보정 유효탄성계수 방법에 의한 응력손실값과 동일한 손실을 산정하기 위하여 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 야쓰미 해법에 사용되는 크리프계수를 보정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 이용하면 야쓰미 해법을 통해서도 합리적인 크리프계수를 적용하여 실제거동과 가까운 장기거동 손실을 산정할 수 있도록 보완이 가능하다.
- (3) 본 연구에서 제시한 방법은 슬래브전장 27.25m인 실교량과 35m, 40m인 표준교에 대하여 산정한 결과값으로 적용대상 교량의 슬래브전장이 이와 다른 경우에는 선형보간에 의해 그 값을 산정할 수 있다. 이는 응력 손실율이 슬래브 전장에 대해 그리고 상대강성에 대해서는 정비례 관계가 있기 때문이다.

연구 결과를 종합해 볼 때, 표준공정이 도입될 때 뿐 아니라, 다른 공정이 도입되는 경우에도 응력손실을 과소 평가하는 야쓰미 해법을 사용하는 것보다는 재령보정 유효탄성계수 방법을 이용하여 응력손실을 산정하는 것이 더욱 타당하지만, 크리프에 의한 손실응력 그래프(Fig. 6과 Fig. 7)와 선형보간을 이용하면 합리적으로 장기거동의 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 R&D정책인프라사업(11기술표준화09-01)에 의한 성능기반 강-콘크리트 합성구조 설계기준개발의 연구비 지원과 2013년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌(References)

[1] 나윤호, 배두병, 류형근 (2007) 프리스트레스트 합성거더의 장기거동에 관한 실험적 연구, 2007년도 정기학술발표대회논문집, 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).

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

[3] 배두병, 오창국, 최석환 (2012) 개령보정 유효계수방법에 의한 프리스트레스트 합성거더의 장기거동 실험 검증, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp. 571-582.
Bae, D., Oh, C.K., and Choi, S.H. (2012) Experimental verification of age-adjusted effective modulus method to long-term behavior of prestressed composite girders, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 5, pp. 571-582 (in Korean).

[4] 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.

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

[6] Amadio, C. and Fragiaco, 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.

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

[8] 한국도로교통협회 (2010) 도로교설계기준, 건설정보사.
KRTA (2010) *Design Specifications for Highway Bridges*, Korea Road & Transportation Association (in Korean).

[9] 한국철도시설공단 (2011) 철도설계기준: 노반편, 건설정보사.
KRNA (2011) *Design Specifications for Railway: Roadbed*, Korea Rail Network Authority (in Korean).

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

[11] 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.

[12] 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).

[13] 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).

[14] Trost, H. (1967) Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriech-und Relaxations-Probleme bei Beton und Spannbeton, *Beton-und Stahlbetonbau*, Vol. 62, No. 10, pp.230-238, No. 11, pp.261-269.

[15] Bazant, Z.P. (1972) Prediction of Concrete Creep Effects using Age-adjusted Effective Modulus Method, *ACI Journal*, Vol. 4, pp.212-217.

[16] CEN (2004) Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 2: Concrete bridges-Design and detailing rules, BS EN 1992-1-1, European Committee for Standardization.

요 약: 합성거더 하부 콘크리트에 프리스트레스를 도입한 프리스트레스트 합성거더의 크리프와 건조수축 평가 시 재령보정 유효탄성계수방법을 이용하면 기존의 야쓰미 해법을 이용한 경우보다 더 정확한 결과를 산출할 수 있다. 하지만, 재령보정 유효탄성계수방법은 산출방법이 복잡하므로 실무에서는 야쓰미 해법을 이용하여 장기거동을 해석하는 것이 일반적이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 이 연구에서는 재령보정 유효탄성계수방법에 의해 여러 시공단계별 재령일수에 따른 변수해석을 수행하고, 야쓰미 해법에 의한 장기거동 해석 시 크리프계수를 보정하여 실무에서 합리적으로 반영할 수 있는 방법을 제시하였다.

핵심 용어: 재령보정 유효탄성계수방법, 프리스트레스트 합성거더, 장기거동, 크리프, 건조수축
