

LRFD에 의한 2경간 Preflex 합성형교에 관한 연구

A Study on the two span preflex composite girder bridges with LRFD

구 민세 * 박 영제 ** 오 석태 ***
Koo, Min Se Park, Young Je OH, SEOK TAE

ABSTRACT

Preflex beams are prestressed by the predeflection technique, which enables the use of concrete-encased high strength steel beams where deflection or cracking of concrete, or both, would otherwise be excessive. This study presents the analysis of the two span preflex composite girder bridges with Load and Resistance Factor Design(LRFD), which is most widely used design rule in the advanced states. The results show that the comparison of LRFD with Allowable Stress Design(ASD) according to span length.

1.서론

LRFD(Load and Resistance Factor Design), 즉 하중-저항계수설계법은 미국의 AISC(American Institute of Steel Construction)에서 1986년에 채택되었으며, 그후 1994년에 AASHTO에서도 현대적 교량의 설계법으로 채택되었다. 지난 80년대 초 이래로 유럽이나 캐나다 등지에서 발전된 LSD(Limit State Design), 즉 한계상태설계법과 유사하며 구조신뢰성방법에 기초한 일종의 확률적 한계상태설계법이다.

국내에서는 AASHTO-LRFD시방서를 기준으로 하중-저항계수 설계법에 의한 시방서를 제정하였고, 이에대한 연구는 주로 합성형보에서의 연구가 주로 이루어지고 있다. 그러나 LRFD가 실무설계자에게 생소한 설계법이고 이에대한 각종 설계소프트웨어가 부족하기 때문에 널리 보급되지 못하고 있는 실정이다. 더욱이 프리플렉스교량의 경우 1985년에 국내에 처음으로 도입되어 점차 확대되어 사용되고 있으나 허용응력 설계법에 의존하고있는 실정이다. 따라서 세계적으로 널리 사용되어지고 있는 새로운 설계법인 LRFD에 의해서 프리플렉스 교량의 경제성과 안전성, 단면의 여유성을 고찰하고자 한다.

2.이론적 배경

2.1 AASHTO-LRFD의 기본개념

*인하대학교 토목공학과 교수

**인하대학교 토목공학과 박사과정

***인하대학교 토목공학과 석사과정

일반적으로 하중-저항계수설계법의 기본형식은 다음과 같다.

$$\eta \sum y_i Q_i \leq \phi R_n = R_r \quad (1.1)$$

단,

$$\eta = \eta_D \eta_R \eta_I > 0.95$$

여기서, y_i 는 하중계수, ϕ 는 강도감소계수, η 는 연성, 여유성, 구조물의 중요도에 관련된 계수이며, Q_i 는 하중효과, R_n 은 공칭강도, R_r 는 보정된 저항이다. 식(1.1)에서 좌측항은 가정된 하중조합의 작용하에 구조해석에 의해 계산된 하중계수를 곱한 설계하중의 작용력을 나타내고, 우측항은 선정된 부재가 제공하는 한계구조내력(limit structural capacity)을 나타낸다. LRFD에 의해 구조물을 설계하는 경우에는 구조물의 거동에 따라 고려해야 하는 모든 한계상태에 대해 식(1.1)이 만족하는가를 검사해야 한다. 즉, 모든 가능한 설계하중의 조합작용으로 인한 극한 또는 하중계수를 곱한 작용외력보다 구조부재의 실제설계강도 즉, 구조저항이 최소한 같거나 커야 한다는 것이다.

2.2 Preflex 교량의 기본개념

프리플렉스(Preflex) 합성보는 강재의 장점과 압축력에 우수한 콘크리트의 장점을 활용한 구조형식으로 타형식에 비해 높은 구조적인 장점때문에 널리 사용되어왔다. 그러나 개발된지 40여년이 지난 지금까지도 대부분이 단순보형 교량건설 기술수준에 머물고 있는 실정이나 최근에 와서야 지점상하강을 이용하여 연속화시키는 공법이 개발되었다. 따라서 본 연구에서는 지점 상하강을 이용한 프리플렉스 합성보의 연속화 공법에 대하여 연구를 수행한다. 프리플렉스합성보를 연속화하여 시공하는 경우 다음과 같은 2가지 사항은 반드시 고려되어야 한다. 첫째, 정모멘트 및 부모멘트구간의 콘크리트 단면은 인장응력에 의하여 균열이 발생하지 말아야하며, 둘째, 강재와 콘크리트의 합성효과를 이용하여 프리플렉스합성부재의 대표적인 장점이라 할 수 있는 휨강성(flexural rigidity)을 증가시켜야 한다는 것이다.

3. P.S 합성보의 각 단계별 제작 및 해석방법

3.1. 각 단계별 제작도

프리플렉스 합성형의 제작은 부재의 운반길이에 따라 공장제작 또는 현장제작을 한다. 공장제작과 현장제작은 동일한 방법으로 하게 되며 2경간 프리플렉스 합성형교의 시공에 사용되는 부재는 2개의 외측경간용 프리플렉스형이고 시공순서는 다음과 같이 9단계로 세분화하여 설명할 수 있다.

- 단계 1) 프리플렉션 하중의 재하
- 단계 2) 하부플랜지 콘크리트의 타설 및 릴리즈
- 단계 3) 연결지점의 상승
- 단계 4) 내부 지점부 바닥판, 복부 및 하부플랜지 콘크리트 타설
- 단계 5) 연결 지점의 하강
- 단계 6) 바닥판 및 복부 마감 콘크리트의 타설
- 단계 7) 아스팔트 포장의 타설

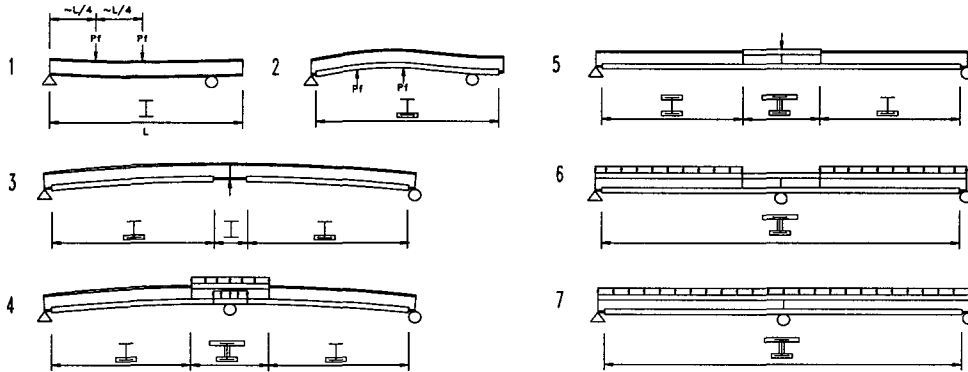


그림1. 2경간 Preflex합성형 교량의 제작 과정

3.2. 해석방법

설계 단면의 가정에서는 단면의 국부좌굴이 발생하지 않도록 폭 두께비를 제한한다. 단면이 슬렌더(Slender)하면 탄성 국부 좌굴이 강도를 좌우하기 때문이다. 프리플렉스 단면에 사용되는 강재는 최소항복강도가 345MPa를 초과하기 때문에 부모멘트 구간에서 설계하중하에서 탄성해석으로 계산한 지점부 모멘트를 감소시킬수 없다. 프리플렉스보는 시공단계중의 응력에 대하여 검토해야하며 시공단계별 적용응력은 표 3.1과 같다.

표 3.1 단계별 적용응력

	단계	응력	허용응력규정	LRFD 규정
강재	preflexion시	인장(압축)	$0.8 \sigma_y (0.9 \sigma_y)$	$0.8 \sigma_y$
	설계하중작용시	인장(압축)	$0.7 \sigma_y$	σ_y
콘크리트	Release	압축	$0.6 \sigma_{ci}$	$0.6 \sigma_{ci}$
		인장	$2.0 \sqrt{\sigma_{ck}}$	$2.0 \sqrt{\sigma_{ck}}$
	설계하중작용시	압축	$0.4 \sigma_{ck}$	$0.6 \sigma_{ck}$
		인장	$2.0 \sqrt{\sigma_{ck}}$	$2.0 \sqrt{\sigma_{ck}}$

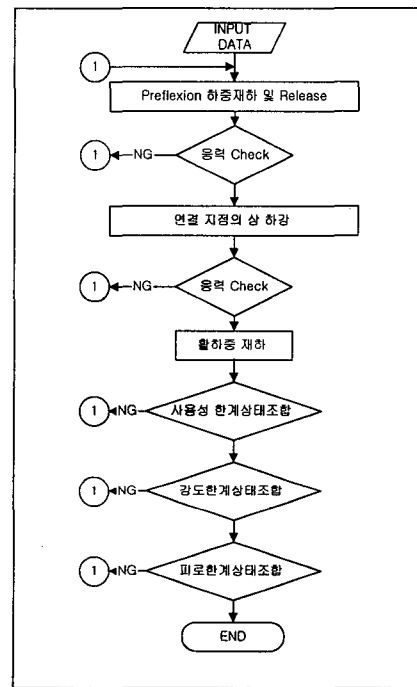


그림 2. 2경간 프로그램 흐름도

3.3. 설계단면의 가정

조밀단면과 비조밀 단면은 플랜지와 복부의 세장비에 따라 분류된다. 조밀단면(CompactSection)은 공칭강도가 $M_n = M_p$ 이고, 압축을 받는 플랜지 또는 복부판의 국부좌굴이 M_p 에 도달할 때까지 발생하지 않는 경우의 단면을 말하며, 폭/두께비 한계 λ_p 로 규정한다. 비조밀 단면(Non-Compact Section)은 중립축에서 가장 먼 단면이 항복응력 F_y 에 도달하는 순간까지를 단면의 저항으로 허용하는 경우의 단면을 M_n 을 위한 말하며, 폭/두께비 한계 λ_r 로 규정한다.

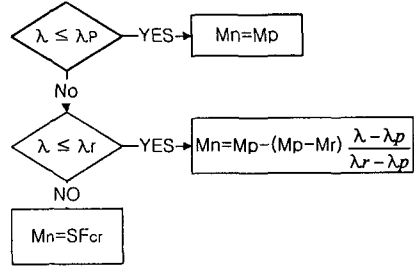


그림3. FLB와 WLB에 의한 단면설정

3.4 활하중

기존의 도로교 시방서에서는 설계트럭하중(DB하중)과 설계차선하중(DL하중) 중에서 더 불리한 하중 효과를 주는 것을 설계차량활하중으로 사용한다. 반면에 LRFDS방서에서는 설계트럭하중 또는 설계텐덤하중 중에서 불리한 효과를 주는 하중에 설계차선하중을 더하여 차량활하중으로 사용한다.

표 3.2. 휨모멘트 계산을 위한 차선당 활하중 분배계수

	분배계수	
	1개 설계차선 재하	2개 이상 설계차선 재하
내측보	$0.06 + \left(\frac{S}{4300}\right)^{0.4} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.3} \left(\frac{K_g}{Lr_s^2}\right)^{0.1}$	$0.075 + \left(\frac{S}{2900}\right)^{0.6} \left(\frac{S}{L}\right)^{0.2} \left(\frac{K_g}{Lr_s^2}\right)^{0.1}$
외측보	지렛대 법칙	$e = 0.77 + \frac{d_e}{2800} \geq 1.0$

표3.3. 설계차량활하중

교량 등급	설계 하중 등급	TL 하중							설계차선하중 (kN/m)
		설계트럭하중(kN)				설계텐덤하중(kN)			
		하중 (W)	총중량 (1.8W)	전륜하중 (0.1W)	후륜하중 (0.4W)	총중량 (W)	전륜하중 (0.25W)	후륜하중 (0.25W)	
1등급교	TL-240	240	432	24	96	292	73	73	10.8
2등급교	TL-180	180	325	18	72	220	55	55	8.1
3등급교	TL-135	135	243	13.5	54	166	41.5	41.5	6.1

다만 피로한계상태를 검토할 경우 후륜축 하중의 간격은 9000mm로 일정하게 취한다.

3.5 하중조합

본 프로그램에 사용된 한계상태는 다음과 같다.

(1) 강도한계상태조합 I

일반적인 차량통행을 고려한 기본하중조합으로 풍하중은 고려하지 않는다.

(2) 사용성한계상태조합 II

차량하중에 의한 강구조물의 항복과 미끄러짐에 취약한 연결부의 미끄러짐에 대한 하중조합이다. 이 프리플렉스 단면은 하부 케이싱 콘크리트에 압축력이 도입되어 있으나 균열후의 상태를 검토하기 위해서 시방서의 합성 I 형단면의 규정을 사용하였다.

규정은 오직 강구조물에만 적용되며 사용성한계상태조합 I 과 강도한계상태조합 I 의 중간정도이다.

(3) 사용성한계상태조합 III

균열제어의 목적으로 프리스트레스트 콘크리트 부재에서의 인장응력을 검토하기 위한 하중조합이다.

(4) 피로한계상태조합

피로설계트럭하중을 조합하여 반복적인 차량하중과 동적응답에 의한 피로파괴를 검토하기 위한 하중조합이다.

한계상태 검토시에는 합성전의 응력과 합성후의 응력을 검토하여야 하며 이때 플랜지 응력은 다음값을 초과하지 않도록 하여야 한다.

① 합성단면의 상하플랜지

$$\sigma_f \leq 0.95 R_h \sigma_{yf}$$

② 비합성 단면의 상하플랜지

$$\sigma_f \leq 0.80 R_h \sigma_{yf}$$

도로교 표준시방서는 단면의 거동양상에 따라 조밀 및 비조밀, 바닥판과의 합성여부에 따라 합성과 비합성으로 단면을 분류하고, 각각에 대하여 강도와 세장비등을 규정하고 있다. 표 3.1과 표 3.2는 각각 조밀합성단면에 대한 규정과 비조밀합성 단면에 대한 규정을 요약한 것이다.

표 3.4 강도한계상태-조밀합성 I 형단면

공칭 휨강도	정모멘트	부모멘트
	$M_n = M_p$	
복부의 세장비	$\frac{2D_c}{t_w} < 3.76\sqrt{\frac{E}{\sigma_{yc}}}$	$\frac{2D_c}{t_w} < 3.76\sqrt{\frac{E}{\sigma_{yc}}}$
압축플랜지 세장비	제한 없음.	$\frac{b_f}{2t_f} < 0.382\sqrt{\frac{E}{\sigma_{yc}}}$
뒷개판	$b_1/t \leq \frac{498}{\sqrt{\sigma_y}}$ λ_p is not applicable	

표 3.5 강도한계상태-비조밀합성 I 형단면

공칭휨강도	부모멘트
	$F_n = R_b R_h \sigma_{yf}$
복부 세장비 • 수평보강재 없음. • 수평보강재 있음.	$\frac{2D_c}{t_w} \leq 6.77\sqrt{\frac{E}{\sigma_c}}$ $\frac{2D_c}{t_w} \leq 11.63\sqrt{\frac{E}{\sigma_c}}$
압축플랜지 세장비	$\frac{b_f}{2t_f} \leq 1.38\sqrt{\frac{E}{\sigma_c \times \sqrt{\frac{2D_c}{t_w}}}}$
뒷개판	$b_1/t \leq \frac{625}{\sqrt{\sigma_y}}$ $b_2/t \leq \frac{249}{\sqrt{\sigma_y}}$

4. 해석결과

LRFD설계법에 의한 지간 길이별 단면 제원은 표4.1과 같다.

표 4.1. 지간 길이에 따른 단면치수

지간 (m)	플랜지 폭(cm)	플랜지 두께 (cm)	덮개판 폭(cm)	덮개판 두께 (cm)	복부높이 (cm)	복부두께 (cm)	프리플렉션하중 (kN)	상승력 (kN)	하강력 (kN)	처짐 (cm)
30	40	2.2	80	2.2	64.2	1.5	827.48	95.22	110.71	3.74
35	40	2.8	80	2.8	71.8	1.5	915.05	117.39	41.00	4.31
40	40	2.8	80	2.8	81.8	1.5	1006.45	145.24	168.18	4.98
45	40	2.8	80	2.8	96.8	1.5	1005.76	202.21	224.87	5.28

지간 30m에서 허용응력 설계법과 LRFD 설계단면은 그림4.1, 그림4.2와 같다.

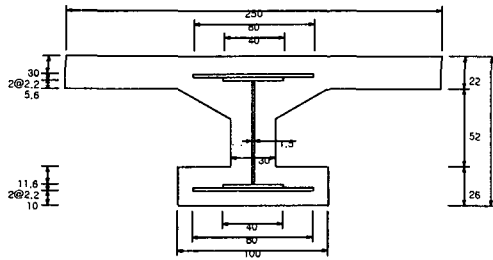


그림4.1. 허용응력 설계법에 의한 단면

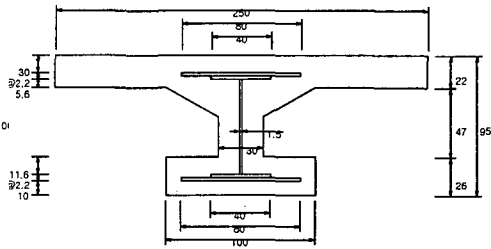


그림 4.2. LRFD에 의한 단면

그림 4.3과 4.4는 각각 지간에 따른 형고 변화와 프리플렉션 하중의 차이를 보여준다. 그림에서 보듯이 LRFD 설계법에 의한 단면은 허용응력 설계법보다 단면이 작는데 이는 지점상승시 더 많은 압축력이 도입시킬수 있기 때문이다.

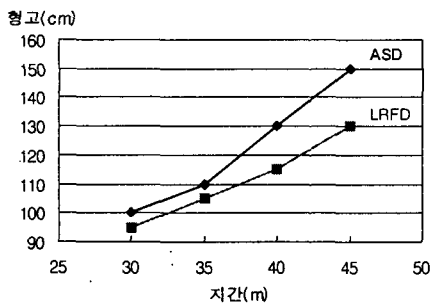


그림 4.3 지간에 따른 형고변화

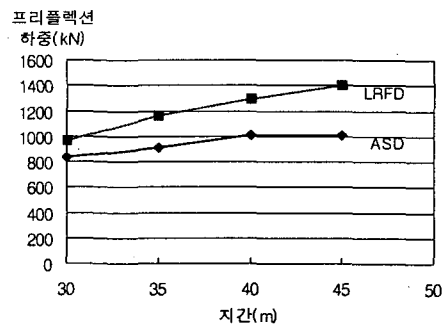


그림 4.4 프리플렉션 하중의 결정

표 4.2는 피로한계상태에서 플랜지와 덮개판, 복부와 스티드에 대해 검토한 결과를 보여준다. 정모멘트 구간 덮개판이 피로에 가장취약하게 검토되었으며 지간의 변화에 따라 활하중응력범위는 크게 변화하지않았다.

표4.2 지간에 따른 부재의 피로응력검토

	검토부재	공칭피로강도 (MPa)	30m	35m	40m	45m
정모멘트구간	하부플랜지	34.50	12.46	11.45	11.75	11.85
	덮개판	13.27	13.23	12.33	12.47	12.45
부모멘트구간	Stud	41.35	7.28	7.11	7.08	7.05
	상부플랜지	34.50	9.27	8.47	8.78	8.96
	덮개판	11.59	6.71	6.45	6.55	6.60
	복부	13.65	5.62	5.76	7.02	8.14

그림4.5는 지간에 따른 활하중에 의한 처짐을 나타낸다. LRFD에 의한 설계는 허용응력 설계법보다 더 많은 처짐이 발생하는데 이는 단면형상이 줄어들어서 단면2차 모멘트 값이 줄었기 때문이다.

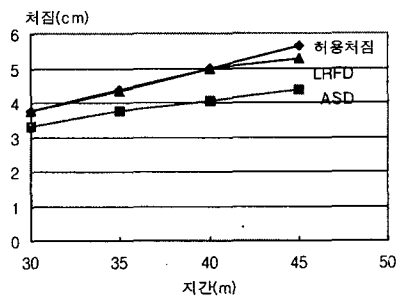


그림4.5 활하중에 의한 처짐비교

5. 결론

본 연구는 2경간 프리플렉스 합성형 교량을 LRFD설계법에 따라 해석하였다. 도로교 표준시방서 하중-저항계수 설계법에 의하여 강도한계상태, 사용성한계상태, 피로한계상태와 같은 한계상태에 대하여 검토하였다. 허용응력 설계법과 비교하기 위하여 형고와 프리플렉션 하중, 지점 상승량과 하강량을 변화시켰다. 해석 결과에 의하면 지간변화에 따라 약 10%의 형고가 감소하였는데 이는 허용응력 설계법에 비해 프리스트레스시에 더 많은 압축력을 도입할 수 있기 때문이다.

피로한계상태에서 복부와 플랜지, 덮개판과 이음부는 안전하게 검토되었으나 정모멘트 구간의 덮개판이 피로에 대하여 가장 취약한 것으로 나타났다. 따라서 허용응력 설계법으로 설계된 단면은 덮개판의 두께를 줄이거나 폭을 플랜지보다 작게하는 것이 바람직하다. 본 연구를 통하여 개발한 프로그램은 설계 실무자들이 LRFD에 의한 2경간 프리플렉스 합성형교량의 설계를 보다 쉽게 접근할수 있도록 개발되었다.

6.참고문헌

- 1.건설교통부,“도로교표준시방서(부록) 하중-저항계수 설계편”,1994
- 2.전산구조공학회,“도로교의 하중-저항계수 설계법”, 교재 21-1
- 3.조효남, 한봉구,“강구조공학”,구미서관, 1997
- 3.AASHTO , “LRFD Bridge Design Specifications, 1st ed.”,1994
- 4.William T.Segui,, “LRFD Steel Design, 2ed”, PWS Publishing,1998
- 5.Theodore V.Galambos , F.J.Lin and Bruce G.Johnston, “Basic Steel Design with LRFD”
Prentice-Hall,inc.,1996
- 6.Barker and Puckett,“Design of Highway Bridges”,A Wiley-Interscience Publication,1998