

압연형교의 ALFD설계에 관한연구

A Study on the ALFD Design of Rolled Beams

정 경 희* 김 진 성** 양 승 이***
Chung, Kyung-Hee Kim, Jin-Sung Yang, Seung-Ie

Abstract

The maximum moment may occur at interior supports of continuous bridges. If the bigger moment is applied on them, a local yielding at interior supports may occur. They may show plastic behaviors, and the moment will be redistributed. The strength design, L.F.D., redistributes 10% of the negative moment which is obtained from the elastic analysis. However, A.L.F.D method computes the moment which is redistributed. This moment is called automoment. The moment-rotation curve is needed to find automoment. In this paper moment-rotation curve for compact sections suggested from AASHTO Guide Specifications is used to find automoment. Based on A.L.F.D. limit states specification method, a three-span continuous bridge is designed.

요 지

연속교의 내측지점에는 최대모멘트가 발생한다. 보다큰 모멘트가 작용하면 내측지점에 국부적 항복이 발생 할 수 있고 소성거동을 하면서 모멘트를 재분배 시킨다. 강도설계법인 LFD방법은 탄성해석으로부터 구한 부모멘트의 10%를 막연히 재분배 시켜주고 있다. 그러나 ALFD방법은 내측지점에서 국부항복에 의하여 발생되는 모멘트를 계산하여 설계에 반영하도록 하고있다. 이러한 국부항복에 의하여 발생되는 모멘트를 자생 모멘트라 한다. 자생모멘트를 구하기 위해서는 모멘트-비탄성회전각곡선이 필요하다. 본 논문에서는 조밀단 면에서 AASHTO 지침시방서에서 제시한 모멘트-비탄성회전곡선을 이용하여 자생모멘트를 구하였다. 또한 ALFD 한계상태 규준을 적용하여 3경간 연속합성교를 설계하였다.

Keywords : rolled beam, compact section, automoment, service load, overload, maximum load, moment-rotation curve, local yielding.

핵심 용어 : 압연형, 조밀단면, 자생모멘트, 소성회전, 사용하중, 과재하중, 최대하중, 모멘트-회전곡선, 국부항복.

* 한국철도대학 철도시설토목과 교수

** 인덕대학교 건설정보시스템 부교수

*** 콜로라도 주립대 토목환경학과 박사

E-mail : yangsione@dreamwiz.com 019-9155-0471

•본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

허용응력설계법 (WSD : Working Stress Design)은 재료의 성질에만 안전을 고려하고 하중의 특성은 고려치 않아 구조물의 실제거동에는 부합하지 않는다. 그러나, 강도설계법 (Load Factor Design)은 오랜 기간 동안 많은 실험을 통하여 얻어진 자료를 적용하기 때문에 실제거동에 잘 부합되는 결과를 얻을 수 있다. 강도설계법인 LFD 방법은 AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)에 의해 채택 되었다⁽¹⁾. 조밀단면 부재의 설계에 대해서 ALFD (Alternative Load Factor Design) 방법이 1986년 AASHTO의 지침시방서 (Guide Specification)에 도입 되었다⁽²⁾.

한국의 경우에는 주로 허용응력설계법을 사용되고 있으며 1996년에 개정된 도로교표준시방서의 부록 편에 강도설계법 (LFD)이 사용할 수 있도록 하였다⁽¹⁰⁾. 강교의 설계에 있어서 강도설계법의 특이한 점은 연속교의 내측지점에서 탄성해석에 의해 구해진 부모멘트의 일부를 정모멘트 지역으로 재분배하여 준다. LFD 설계법에서는 탄성해석으로부터 구한 부모멘트의 10%를 부모멘트 지역에서는 감해주고 이 값을 정모멘트 지역으로 재분배 시켜준다⁽¹⁰⁾.

이렇게 하는 이유는 과재하중과 같은 큰 하중이 재하되면 내측지점의 일부에 국부항복이 발생하게 되어 하중이 지나간 후에도 영구변형이 남게된다. 이러한 영구변형은 내측지점의 부모멘트를 감소시켜주고 경간

내에서는 정모멘트를 증가시켜주는 모멘트가 발생하는데 이 모멘트를 자생모멘트(Automoment)라고 부른다^{(3),(4),(5)}. LFD방법에서는 이 자생모멘트를 고려해 줄 때 탄성해석으로부터 얻은 부모멘트의 약 10%라고 가정하고 있다. ALFD설계법에서는 이 부모멘트의 10% 대신에 실험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 자생모멘트의 크기를 계산하고 그 값을 정모멘트 지역에 재분배 해준다⁽⁶⁾.

이 자생모멘트의 값을 구하기 위해서는 내측 지점에서의 모멘트-비탄성회전곡선의 개발이 선행 되어야 한다. 이에 관련된 실험적 연구가 조밀단면에 대해서 개발되어 1986년 AASHTO 지침시방서에 채택되었다⁽²⁾.

반면 비조밀단면에 대해서는 개발 중에 있다. 따라서 본 논문에서는 미국에서 개발된 조밀단면의 모멘트-비탄성회전곡선을 이용하여 자생모멘트를 구하였다. 사용강재는 국내에서 생산되는 압연강재를 이용하여 연속합성 I-Beam교를 연구의 대상으로 하였으며 하중은 사용하중 (Service Load) 과재하중 (Over Load) 최대하중 (Maximum Load)의 한계상태설계규준을 따랐다. ALFD방법의 설계규준은 AASHTO의 지침시방서에 규정된 설계규준을 적용하였다.

2. 강도설계법의 한계상태 규준

강도설계법인 LFD방법 및 ALFD방법은 강재로 구조물설계시 구조물이 수행해야할 한도를 하중단계별로 정해놓고 이 한도를 만족하도록 설계하는 방법이다.

Table 1 하중단계별 수행조건

| 하중단계 | 구조물 수행조건 | LFD | ALFD |
|--------------------------|-------------------------------|---|---|
| 사용하중 D+L+I | 처짐 및 피로응력이 허용한도에 있도록 제한 | | |
| 과재하중 D+5/3(L+I) | 불쾌한 주행감을 주지 않도록 하기위한 영구처짐의 제한 | 부모멘트의 10%감소 응력제한: 정모멘트단면 합성단면 : $0.95\sigma_y$ 비합성단면 ; $0.8\sigma_y$ 부모멘트단면 : $0.8\sigma_y$ | 자생모멘트의 재분배 응력제한 정모멘트단면 합성단면 : $0.95\sigma_y$ 비합성단면; $0.8\sigma_y$ 부모멘트단면 응력제한 안함 shakedown현상인정 |
| 최대하중 1.3(D+ 5/3(L+I)) | 교량의 최대저항능력 평가 | 단면의 모멘트를 소성모멘트(M_p)로 제한. 조밀단면조건을 만족 해야한다. | Mechanism형성 여부 검토. 조밀단면의 조건을 만족해야 함 |

따라서, 자유힌지인 ⑥점에서부터 지점모멘트를 증가시키면 ⑥ - ① 직선을 따라가게 되며 비탄성회전각이 발생하지 않는다면 ①점의 탄성모멘트에 도달하게 된다. 그러나 부재는 모멘트 - 비탄성실험곡선에서 나타난 바와 같이 비탄성회전이 발생되므로 실험곡선과 만나는 점 ③까지 밖에 도달하지 않는다. 따라서, 실험곡선과 ① - ⑥ 직선과의 교점 ③을 구하면 그점에 대응하는 모멘트가 실제로 작용하고 있는 모멘트이다. 이때의 모멘트가 shakedown모멘트(Msh) 이고 이때의 변형이 실제의 비탄성회전각이다. 자생모멘트(Mau)는 탄성해석으로부터 구한 ME와 shakedown 모멘트(Msh)의 차로써 나타낸다. 하중이 통과한 후에도 자생모멘트는 지점의 사하중모멘트(MD)를 감소시켜 주며 다음에 오는 활하중에 대해서는 이미 발생한 소성회전각 θ_p 을 유지하면서 ④점에서 ③점 까지 수직 상승한다. 즉 shakedown 모멘트(Msh) 까지는 탄성적으로 거동하고 이보다 더 큰 하중이 오면 ③점부터 실험곡선을 따라 비 선형으로 거동하게 된다. 이 때의 실제모멘트는 이상에서 언급한 방법을 따라 다시 계산할 수 있다. 내측지점이 2개 이상인 연속보의 경우 내측지점의 자생모멘트는 다른 내측지점의 자생모멘트의 크기에도 영향을 받게 되므로 자생모멘트의 재분배가 필요하다.

5. 설계예

3경간 연속합성형교 (20m+24m+20m)인 교량을 내측주형을 대상으로하여 단면결정에 가장 중요한 모멘트만을 고려하여 ALFD절차로 설계하였다. 강재은 항복강도 $\sigma_y = 3200 \text{ kgf/cm}^2$ 인 H 708×300×15×28 을 사용하였고, 주형간격은 2.2m로 가정하였다.

합성전 사하중 $w_{d1} = 1.64 \text{ tf/m}$ 합성후 사하중 $w_{d2} = 0.388 \text{ tf/m}$ 이고 교량등급은 1등급이고 충격 및 분배계수는 한국도로교시방서 규정에 따랐다.

Table 2 최대 휨모멘트 (tf · m)

| | 제1경간 | 제2경간 | 지 점 |
|--------|--------|--------|-------|
| 합성전사하중 | 46.76 | 38.18 | 79.89 |
| 합성후사하중 | 11.06 | 9.03 | 18.90 |
| 합성후활하중 | 111.80 | 107.93 | 96.39 |

최대 휨모멘트가 발생하는 위치는 제1경간의 0.4L 제2 경간의 중앙 및 내측 지점위치를 선택하여 아래 표와 같이 구하였다.

5.1 단면가정

한국도로교시방서 규정에 따라 슬래브의 유효 폭을 결정하였다. 조밀 및 비조밀단면의 검토도 시방서 규정에 따라 검토한 결과 H708×300×15×28 강재는 조밀단면의 조건을 만족하였다. 따라서 이 단면의 기하학적 성질은 다음 Fig. 3과 같다.

여기서

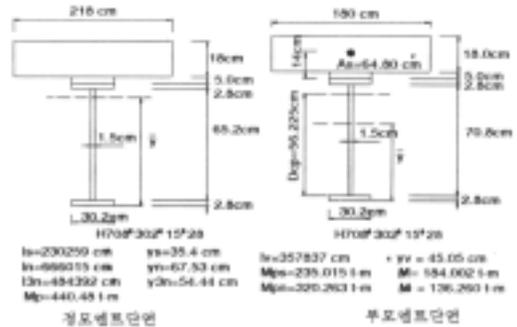


Fig. 3 단면의 기하학적 성질

- I_s : 강재의 단면 2차 모멘트
- I_n : 합성단면 2차 모멘트 (n=8)
- I_{3n} : 합성단면 2차 모멘트 (n=24)
- I_v : 내측지점의 합성단면 2차 모멘트 (강재+철근)
- M_{ps} : 강재의 소성 모멘트
- M_{pn} : 부모멘트단면의 소성 모멘트
- M_{pf} : 압축 플랜지의 소성모멘트
- M_{pw} : 웹의 소성모멘트
- D_{cp} : 부모멘트단면의 소성중심까지의거리
- M_p : 정모멘트단면의 소성모멘트

5.2 과재하중에 대한 검토

5.2.1 비탄성 회전각의 발생유무검토

합성전 사하중모멘트

$$\frac{M_{dl}}{M_{ps}} = \frac{79.89}{235.015} = 0.339 < 0.6$$

여기서 M_{dl} 은 합성전사하중에 의한 모멘트이고, M_{ps} 는 강재만의 소성 모멘트이다. 합성전 사하중에 의해서는 비탄성회전각이 발생하지 않는다.

합성후 사하중모멘트

$$\frac{M_{dl}}{M_{pn}} = \frac{79.89}{320.263} = 0.249 > 0.17$$

합성후 사하중에 의해서는 비탄성회전각이 발생한다.

과재하중에 의한 모멘트

$$M_{OL} = 79.89 + 18.90 + \frac{5}{3} \times 96.39 = 259.45$$

$$\frac{M_{ol}}{M_{pn}} = \frac{259.45}{320.26} = 0.81 > 0.17$$

합성후 과재하중에 의해서 비탄성 회전각이 발생한다

5.5.2 과재하중이 작용시 강재 응력검토

$$f_s = \frac{M_{OL}}{I_v} y_v = 3266 \text{ kgf/cm}^2 > 3200 \text{ kgf/cm}^2$$

과재하중에는 강재의 항복강도 보다 크므로 국부항복이 발생한다.

5.3 내측지점에서 소성회전각의 계산

5.3.1 등가등분포하중의 계산

과재하중에 의해 내측지점이 완전소성힌지가 발생할 때 등가등분포하중으로 바꾸면 3연모멘트법에 의하여 다음과 같다.

$$w = 5.33 \text{ tf/m}$$

5.3.2 내측지점에서 자유회전각 계산

외측 경간 및 내측경간 에서 합성 및 비합성을 고려하여 등가등분포하중을 재하여 공액보법에 의해 내측지점의 총회전각을 구하면 다음과 같다.

$$\theta_p = \theta_1 + \theta_2 = 41.872 \text{ (mrad)}$$

여기서

θ_1 : 첫 번째 내측지점의 좌측의 소성 회전각

θ_2 : 첫 번째 내측지점의 우측의 소성 회전각

이 값은 내측지점에서 완전소성회전각이며 이후의 거동은 내측지점에서 소성모멘트를 유지하면서 단순보 같이 거동한다.

소성회전에 따라 탄성모멘트는 1차식으로 감소한다. 1차식은 다음과 같다.

$$M_2(\theta_p) = -0.0192 \times \theta_p + 0.81029$$

5.3.3 자생모멘트 계산

자생모멘트는 Schilling이 제안한 모멘트-비탄성회전각 곡선을 이용하여 구할 수 있다.

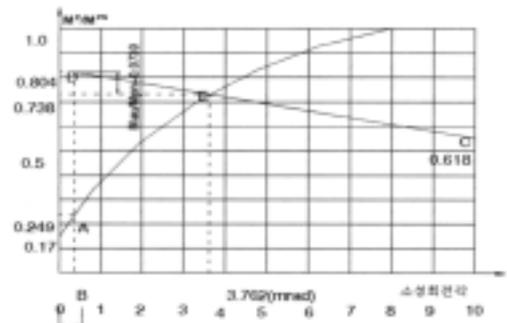


Fig. 4 자생모멘트계산

실험곡선을 이용하여 자생모멘트는 D점의 종축값과 두식의 교점인 종축값 차이에 소성모멘트를 곱하여 계산한다

$$M_{au} = (0.804 - 0.738) \times M_{pn} = 21.05 \text{ t} \cdot \text{m}$$

이자생모멘트 (M_{au}) 값은 한쪽내측지점만의 소성회전에 의해 발생한 값이다.

3경간에서 한쪽 교각에서 발생한 자생모멘트는 다른 쪽 교각에도 영향을 준다. 이 영향은 3연모멘트법에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$M_i = -\frac{Mau \cdot N}{2(N+1)} = 5.74 \text{ t} \cdot \text{m}$$

중첩의 원리에서

$$Mau = 21.05 - 5.74 = 15.31 \text{ t} \cdot \text{m}$$

이 자생모멘트는 내측지점에서 부모멘트를 감소시키고 경간에서는 정모멘트를 증가시킨다.

1경간 0.4 위치에서 자생모멘트는

$$Mau = 0.4 \times 15.31 = 6.124 \text{ t} \cdot \text{m}$$

5.4 과제하중에 의한 응력검토

ALFD방법에서 과제하중에 대한 응력제한은 부모멘트 단면에서는 응력제한을 하지 않고 정모멘트지역에서 발생하는 최대응력이 비합성시에는 항복응력의 95%보다 작도록 제한하고 있다. 정모멘트 지역에서 최대응력이 발생하는 하부플랜지단에서의 응력을 검토하면 다음과 같다.

- 합성전 사하중 응력 718.94 kgf/cm²
- 합성후 사하중 응력 123.27 kgf/cm²
- 합성후 과제하중 응력 1884 kgf/cm²
- 자생모멘트 응력 68.81 kgf/cm²
- 계 2795 kgf/cm² < 0.95F_y = 3040 kgf/cm²

그러므로 Hi708×302×15×28 단면은 과제하중에 의한 한계상태 규준을 만족한다.

5.5 최대하중에 대한 검토

최대하중에 대해서는 메카니즘의 형성여부를 검토한다. 내측지점단면은 부모멘트를 받으므로 콘크리트의 인장응력이 무시되고 철근만이 강재와 합성되는 비대칭단면이다. 따라서, 소성설계 개념을 그대로 사용하기 위해서는 소성모멘트를 감소시킨 유효소성모멘트(9)를 사용해서 검토한다.

5.5.1 유효소성모멘트의 계산

$$M_{pe} = R_f \cdot M_{pf} + R_w \cdot M_{pw} \quad (3)$$

여기서

R_f, R_w : 플랜지 및 웹모멘트 감소계수

F_{yfe}, F_{ywe} : 플랜지 및 웹의 유효항복강도로서 다음과 같이 한다.

$$F_{yfe} = 0.0845 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 6755.97$$

이 값은 F_{yf} 보다 크므로

$$F_{yfe} = 3200 \text{ kg/cm}^2 \text{ 으로 한다.}$$

$$F_{ywe} = 1.32 \cdot E \cdot \left(\frac{t_w}{D_{\text{체}}}\right)^2 = 1732.95 \text{ kg/cm}^2$$

이 값은 F_{yw} = 3200 kg/cm² 보다 작으므로

$$F_{ywe} = 1732.95 \text{ kg/cm}^2 \text{ 으로한다.}$$

$$R_f = \frac{F_{yfe}}{F_y} = 1 \quad R_w = \frac{F_{ywe}}{F_y} = 0.5415$$

따라서 유효소성모멘트는

$$M_{pe} = 1 \times 184 + 0.54 \times 136.26 = 257.58 \text{ t} \cdot \text{m}$$

내측지점에서 최대설계하중

$$M_{MAX} = 1.3(79.89 + 18.90 + \frac{5}{3} \times 96.39) = 337.29 \text{ t} \cdot \text{m}$$

5.5.2 최대하중위치에서 모멘트계산

차선하중 하중계수

$$F = 1.3 \times \frac{5}{3} \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{2.2}{1.65}\right) \left(1 + \frac{15}{40+20}\right) = 1.805$$

지점에 유효소성모멘트가 작용하고 차선하중과 사하중에 의해 경간에서 최대 휨모멘트가 발생할 수 있는 위치는 x = 8.13m 이다.

이 상태에서 최대휨모멘트를 구하면

M_{max} = 227.15 t·m < M_p = 257.58 t·m 이므로 차선하중에 의해 메카니즘은 형성되지 않는다.

최대하중작용시 지점모멘트가 가장 크게 발생 시는 영향선도에 의하여구하면

$$297.73 > M_{pe} = 257.78 \text{ t} \cdot \text{m}$$

차선하중에 대하여 지점단면은 소성힌지가 형성된다.

트럭하중계수

$$F = 1.3 \cdot \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{2.2}{1.65} \right) \left(1 + \frac{15}{40 + 20} \right) = 3.61$$

경간에서 최대휨모멘트가 발생할 수 있는 트럭하중의 위치는 $x = 8.2 \text{ m}$ 이다.

경간에서의 작용된 트럭하중에 의한 최대휨모멘트 $M = 318.05 \text{ t} \cdot \text{m} < M_p = 440.48 \text{ t} \cdot \text{m}$ 이므로 트럭하중에 대하여 경간 단면은 메카니즘이 형성되지 않는다.

반면 지점에서는, 트럭하중재하 상태에서 최대 지점모멘 $M = 288.94 \text{ t} \cdot \text{m} > M_{pe} = 257.78 \text{ t} \cdot \text{m}$ 이다. 따라서 트럭하중에 의해 지점단면은 소성힌지가 발생한다.

6. 결 론

연속교의 내측지점에서 국부항복에 의해 발생하는 모멘트를 구하여 설계에 반영하는 방법은 미국이 조밀 단면에서 개발된 모멘트-비탄성회전곡선을 설계에 적용하는 ALFD 설계법으로 채택하고 있다.

한국에서는 LFD방법으로 탄성모멘트의 10%를 감소시켜 설계에 적용하도록 시방서에 규정하고 있다⁽¹⁰⁾. 본 논문에서는 3경간연속압연교를 ALFD방법으로 설계한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ALFD를 이용하여, 국부항복에 의해 발생된 자생모멘트의 영향을 설계에 반영한 결과 10 %를 재분배한 LFD방법보다 지점단면의 감소를 가져온다⁽¹¹⁾.

- 2) 내측지점에서는 모멘트-비탄성 회전에 의하여 자생모멘트를 구하였기 때문에 실제거동에 해당하는 설계를 할 수 있다.
- 3) 기존교량의 평가시에 ALFD방법을 고려하여 평가하면 실제거동에 부합되는 평가가 될 수 있다.

참고문헌

1. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 15th, 1992.
2. AASHTO, "Guide Specification for ALFD Procedures for Steel Beam Bridges Using Braced Compact Section," Washington, D.C. 1986.
3. Baker, M.G., "Inelastic Design of Steel Girder Bridge," AISC., 1995.
4. Grubb, M.A., "The AASHTO Guide Specification for ALFD Procedure for Steel Beam Bridges," AISI, 1987.
5. Haaizer, g., and Carskaddan, P.S., "Suggested Autostress Procedures for LFD of Steel Beam Bridges," AISI Project 188 April 1987
6. Hourigan, E.V and Holt, R.C., "Design of a Rolled Beam Bridge by New AASHTO Guide Specification for Compact Braced Sections," AISI, 1987.
7. Schilling, C.G., "Exploratory Autostress Girder Designs," AISI Project 188, July, 1988.
8. Schilling, C.G., "An Unified Autostress Method," AISI Project 51, Washington, D.C, Nov. 1989.
9. Carskaddan, P.S., Haaizer, G. and Grubb, M.A., "Computing the Effective Plastic Moment," Engineering Journal, 1st Quarter, pp 12-15, 1982.
10. 건설부, 도로교표준시방서. 1996.
11. 정경희, "내측지점 및 경간내의 소성변형을 고려한 3경간 연속 합성판형교의 강도해석," 박사학위논문, 홍익대학교 대학원, 1996.

(접수일자 : 2003년 2월 19일)