

AASHTO LRFD 전단설계방법의 고찰

The Technical Review of AASHTO LRFD Shear Design

정 제평*

김 우**

Jeong, Je Pyong

Kim, Woo

ABSTRACT

The Sectional Design Model(AASHTO LRFD) is appropriate for the design of typical bridge girders, slabs, and other regions of components where the assumptions of traditional engineering beam theory are valid. The shear resistance of a concrete member may be separated into a component, V_c , that relies on tensile stresses in the concrete, V_s , that relies on tensile stresses in the transverse reinforcement. The expressions for V_c and V_s apply to both prestressed and nonprestressed section, with the terms β and θ depending on the applied loading(M , V , N , and T) and the properties of the section. With β taken as 2.0 and θ as 45° , the expressions for shear strength become essentially identical to those traditionally used for evaluating shear resistance. Recent large-scale experiments, however, have demonstrated that these traditional expression can be seriously unconservative for large members not containing transverse reinforcement. And This paper can present only a brief introduction to shear design of AASHTO LRFD and is to review of the technical difficulty.

Keyword : AASHTO LRFD, Shear Design, Shear Critical Section, Mohr Circle, Truss Model

요 약

AASHTO LRFD의 단면설계법은 일반적인 교량 거더, 슬래브와 일반적인 보이론의 가정이 유효한 기타 부재영역에 적용이 가능하다. 콘크리트 부재의 전단저항은 콘크리트의 인장응력에 기초한 콘크리트전단성분 V_c 와 횡방향 철근의 인장응력에 기반한 전단철근의 전단성분 V_s 로 구분할 수 있다. 스트레싱과 비스트레싱 부재 모두 V_c 와 V_s 항은 작용하중과 단면 성질에 근거한 β 와 θ 의 항으로 적용된다. β 가 2이고 θ 가 45° 일 경우, 전단강도는 전단저항을 평가하는 전통적 방법과 근본적으로 동일하다. 그러나 최근 대규모 실험결과, 이러한 전통적 방법이 횡방향철근을 포함하지 않는 대형부재에서 심각히 불안정하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 AASHTO LRFD의 전단설계기준을 살펴보고 문제점을 고찰한 것이다.

* 정희원, 전남대학교 공업기술연구소 특별연구원, 공학박사

** 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

1. 서론

AASHTO LRFD(2002년)에서는 Collins의 수정압축장이론(MCFT)에 기반한 전단설계이론을 도입하였다. 이것은 콘크리트의 전단설계 방향에 획기적인 사건으로 그동안의 경험적 방법에서 탈피하여 평형조건과 재료(콘크리트, 철근)의 구성조건 그리고 변형적합조건에 기반한 최신트러스모델(modern truss model)로의 진화를 보여준 것이다. AASHTO LRFD의 전단설계에 관한 규정은 5.8절과 5.13절에서 다루고 있으며, 가장 중요한 부분은 5.8.3절로 Collins의 수정압축장이론(MCFT)를 기반으로 부재설계에 일반화한 "A General Shear Design Method" 논문 내용이 핵심을 이루고 있다. 본 연구에서는 AASHTO LRFD의 전단설계기준을 살펴보고 문제점을 파악하고자 한 것이다.

2. AASHTO LRFD의 전단설계 (5.8.3.4.2 일반 계산법)

최소철근량 이상의 전단철근이 배치 유무에 따라 아래 식을 이용하여 종방향 변형률 ϵ_x 를 계산한다.

- 최소철근량 이상의 전단철근이 배치된 단면:

$$\epsilon_x = \frac{\frac{M_u}{d_v} + 0.5N_u + 0.5(V_u - V_p) \cot \theta + A_{ps}f_{po}}{2(E_s A_s + E_p A_{ps})} \leq 0.002 \quad (1)$$

- 최소철근량 미만의 전단철근이 배치된 단면:

$$\epsilon_x = \frac{\frac{M_u}{d_v} + 0.5N_u + 0.5(V_u - V_p) \cot \theta + A_{ps}f_{po}}{E_s A_s + E_p A_{ps}} \leq 0.002 \quad (2)$$

- 위 식 (1)과 (2)에 의해 계산한 ϵ_x 의 값이 음수일 경우:

$$\epsilon_x = \frac{\frac{M_u}{d_v} + 0.5N_u + 0.5(V_u - V_p) \cot \theta - A_{ps}f_{po}}{2(E_c A_c + E_s A_s + E_p A_{ps})} \quad (3)$$

AASHTO LRFD의 전단설계절차는 아래 표1과 같다.

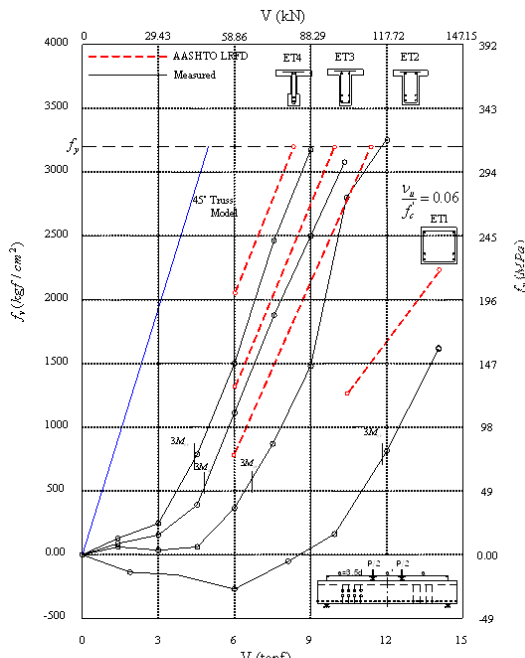
표 1. AASHTO LRFD 5.8.3의 전단설계 절차

No	전 단 설 계 세 부 절 차	관 련 기 준
1	b_v, d_v 결정	식 5.8.2.9
2	V_p 계산	
3	전단응력비 v/f_{ck} 계산	식 5.8.2.9-1
4	강연선의 전단길이가 단면내에 존재하면 유효평균값 f_{po} 계산	
5	철근의 정착길이가 단면내에 존재하면 유효값 A_s 계산	
6	ϵ_x 를 가정하고, 표 5.8.3.4.2에 의하여 β, θ 결정	표 5.8.3.4.2
7	ϵ_x 계산	식 5.8.3.4.2-1
8	계산된 ϵ_x 값이 가정값 보다 작거나 같은가? (Y : 9, N : 6)	
9	가정된 ϵ_x 값이 너무 보수적인가(크게 가정되었는가)? (Y : 6, N : 10)	
10	$V_u = \phi V_n$ 을 만족하는 횡방향철근량 결정	식 5.8.3.3
11	종방향철근량으로 소요인장력을 저항하는가? (Y : END, N : 12)	
12	식 5.8.3.5에 의한 종방향철근량을 감소시키기 위하여 전단저항강도를 초과하여 이용할 수 있는가? (Y : 14, N : 13)	
13	종방향철근량 추가 (11로 이동)	
14	ϵ_x 보다 클 수 있는 β 와 θ 를 표 5.8.3.4.2에서 결정 (10으로 이동)	표 5.8.3.4.2

3. AASHTO LFRD 전단설계 분석

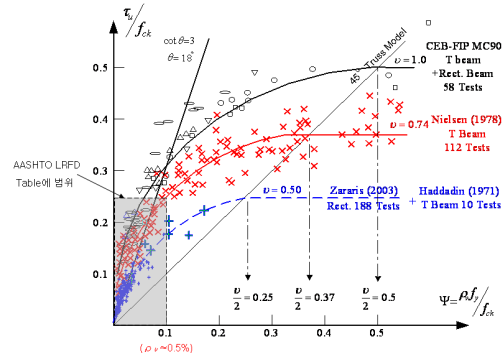
3.1 전단설계 기준 적용시 문제점

Leonhardt 보(1965)를 이용하여 AASHTO LFRD에 제시된 표 5.8.3.4.2-1를 이용한 방법(표 1)과 정밀해석(MCFT) 방법을 이용하여 해석한 그림 1(a)의 결과를 살펴보면, 복부폭이 두꺼운 ET1보에서 균열각 차이가 4°, 나머지 ET2, ET3, ET4 보에서는 모두 약 1° 오차가 발생하였다. 이것은 복부폭이 두꺼울수록 전단저항강도 예측이 벗어남을 의미한다. 또한 AASHTO LFRD 표 5.8.3.4.2에 제시된 범위가 그림 1(b)의 음영부분에 해당하여, 실제 높은 전단응력을 받는 부재를 설계할 경우, 정밀 해석(MCFT)에 의한 방법을 수행해야 하는 불편이 발생한다. 그리고 비선형 해석(ATENA 2D)을 이용하여 기하조건과 재료조건이 동일한 RC보에서 스티럽비 변화에 따른 주철근 인장력(T)의 변화를 분석한 결과, 그림 1(c)와 같이 Tension Shift(ΔT)가 변화가 상당히 크게 발생하였다. Tension Shift(ΔT) 변화는 a/d 가 클수록 ΔT 변화가 작아지는 경향을 보이나, a/d 가 증가하여도 주철근량이 높아 발생 전단응력이 높을 경우(또는 복부가 얇은 PSC 부재), ΔT 변화 또한 증가하게 된다. 이것은 AASHTO LFRD 전단설계 과정에서 최소전단철근 배치 유무로만 ϵ_x 의 식 적용을 구분하는 방법에 문제가 있다는 것을 의미하며, 최소횡방향철근 이상 배치된 보에서도 횡방향철근량에 따른 ϵ_x 변화량에 대해서 정확한 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

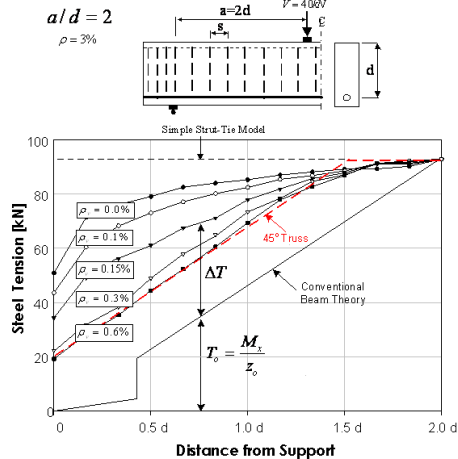


Spec.	MCFT		AASHTO LFRD Table	
ET4	$\rho = 1.02\%$	$v_s / f'_c = 0.24$	$\theta = 33.8^\circ$	$\epsilon_s = 481 \mu\epsilon$
ET3	$\rho = 0.51\%$	$v_s / f'_c = 0.14$	$\theta = 33.8^\circ$	$\epsilon_s = 561 \mu\epsilon$
ET2	$\rho = 0.34\%$	$v_s / f'_c = 0.11$	$\theta = 33.7^\circ$	$\epsilon_s = 641 \mu\epsilon$
ET1	$\rho = 0.17\%$	$v_s / f'_c = 0.06$	$\theta = 37.2^\circ$	$\epsilon_s = 723 \mu\epsilon$
				$\beta = 1.70$
				$\beta = 2.29$
				$\beta = 2.41$
				$\beta = 2.38$

(a) Comparison of the predicted with the measured stirrup stresses by AASHTO LFRD



(b) AASHTO LFRD Table에 제시된 전단응력 범위



(c) 전단철근량 변화에 따른 주철근인장력

그림 1 AASHTO LFRD 전단설계 분석

3.2 집중하중을 받는 RC 보의 위험단면

집중하중에 지배받는 RC 보의 각단면을 MCFT로 해석한 그림 2의 결과를 살펴보면, 복부요소는 시간에 따라 동일한 전단응력을 받지만 변형률은 하중점으로 갈수록 종방향 및 횡방향 변형률은 증가하게 된다. 이러한 현상은 전단력과 휨모멘트의 조합작용에 의해 하중점 방향으로 갈수록 균열각이 증가하는 현상에 기초하며, 스트럿의 주압축응력(f_2)은 받침점 방향에서 최대가 발생하며, 최대전단변형률과 수직방향변형률은 하중점에서 최대가 발생한다. 따라서 하중점 근처에 스테럽이 많이 배치되는 결과가 나타난다. 이러한 결과는 그동안 1방향 보의 경우 받침점 내면에서 1d가 전단위험단면이라는 ACI 전단위험단면과 상이한 점이며서 향후 설계자에서 충분한 설명이 필요하다.

a/d=3.5 (Leonhardt, 1965, ET3)

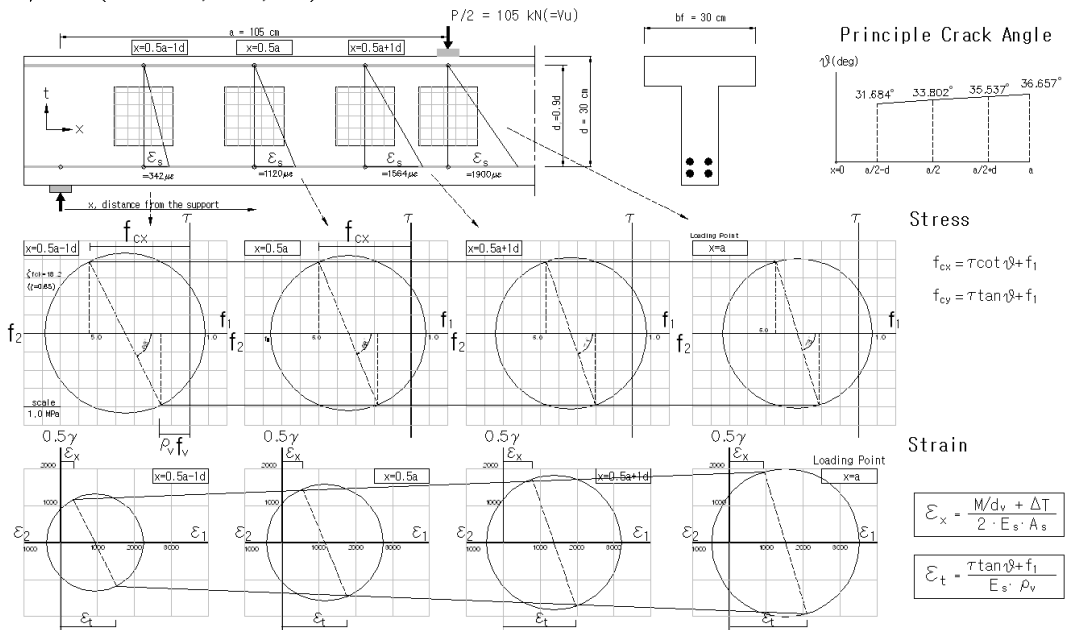


그림 2 집중하중을 받는 RC 보의 응력-변형률 Mohr 원

4. 결론

본 연구는 AASHTO LRFD Bridges Design Specifications의 전단설계 기준을 살펴보고, AASHTO LRFD의 전단설계 적용시 발생하는 문제점을 분석한 것이며, 스테럽비에 따른 종방향변형률 미반영과 제시된 전단응력 사용범위가 작고 집중하중을 받는 보에서 전단위험단면에 대한 충분한 검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Vecchio, F. J., Collins, M. P. (1986), "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI Journal*, Vol.83, No.2, pp. 219-231.
2. Publication Code LRFD-3, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2007