

웹브 2단 보강 플레이트거더의 수평보강재 휨강성 요건에 대한 해석적 연구

김병준¹ · 박용명^{2*} · 성택룡³ · 박찬희³

¹공학박사, (주)수성엔지니어링, 구조부, ²교수, 부산대학교, 토목공학과, ³공학박사, 포스코 기술연구원 구조연구그룹

Numerical Study on the Bending Rigidity Requirements of Longitudinal Stiffeners for Plate Girder Webs Reinforced by Two Stiffeners

Kim, Byung Jun¹, Park, Yong Myung^{2*}, Seong, Taek Ryong³, Park, Chan Hee³

¹Ph.D., Dept. of Structures, SooSung Engineering Co., Ltd., Seoul, 05836, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³Ph.D., Steel Structure Research Group, POSCO, Incheon, 21985, Korea

Abstract - For plate girder bridges with large girder heights, stiffened webs with two longitudinal stiffeners are often considered. The AASHTO LRFD bridge design specifications provide the bending rigidity requirements of stiffener in the case of single-stiffener reinforcement, but do not address any requirement for two stiffener reinforcement. Kim *et al.* proposed a bending rigidity requirement equation for the stiffener when two stiffeners of plate-type are installed on one side of the web. In this paper, a numerical study was conducted to analyze whether the proposed rigidity requirement of stiffeners is appropriate. The yield strength of steel, asymmetry of section, web slenderness ratio, and the aspect ratio of web were included as variables, and compact compression flanges were considered. A series of nonlinear analysis was conducted for the variables to estimate the flexural strength of the girder, and the appropriateness as a rigidity requirement of stiffeners was evaluated from whether or not the yield moment was reached.

Keywords - Plate girder, Stiffened web, Two longitudinal stiffeners, Bending rigidity of stiffeners, Nonlinear analysis

1. 서론

플레이트거더의 형고가 매우 클 경우 웹브의 휨압축 좌굴(web-bend buckling) 강도의 확보를 위해 Fig. 1과 같이 편측에 플레이트 형태의 수평보강재에 의한 2단 보강이 종종 고려된다. 이 때 수평보강재는 웹브의 면외 변형을 적절히 억제함으로써 좌굴이 조기에 발생하지 않도록 소정의 휨강성(bending rigidity, 이하 ‘강성’)을 가져야 한다.

1단 보강 웹브에서 휨압축 좌굴계수와 보강재의 강성 요건에 대해서는 Dubas^[1]로부터 Massonnet^[2], Rockey and Leggett^[3], Cooper^[4] 그리고 Frank and Helwig^[5] 등 다수의 연구자에 의해 연구되었다.

2단 보강의 경우, Rockey and Cook^[6,7]은 수평보강재가 웹브의 양측에 대칭으로 설치되는 2축 대칭 단면 조건에 대해 휨압축 좌굴계수가 최댓값이 되는 보강재의 최적 위치 및 보강재의 강성 요건을 에너지법으로부터 유도하였다. 한편, Kim *et al.*^[8]은 Fig. 1과 같이 편측에 보강재가 설치된 2축 및 1축 대칭 거더의 보강재 위치에 따른 좌굴 고유치해석을 수행하고 실용적인 좌굴계수식을 제안하였다. 아울러 웹브 세장비와 형상비를 변수로 한 고유치해석으로부터 좌굴 절선(nodal line)을 형성하기 위한 보강재의 강성에 대한 식을 제안하였다.

현재 AASHTO LRFD 교량설계기준^[9](이하 ‘AASHTO 기준’)에서는 1단 보강에 대해서는 휨압축 좌굴계수 식

Note.-Discussion open until February 29, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 26, 2023; revised on June 10, 2023; approved on June 10, 2023.

Copyright © 2023 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2350 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. ympk@pusan.ac.kr

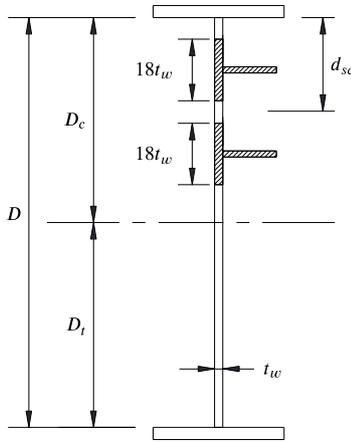


Fig. 1. Stiffened web with two longitudinal stiffeners

과 더불어 Massonnet^[2]와 Cooper^[4]가 제안한 보강재의 강성요건식을 제시하고 있다. 하지만, 2단 보강에 대해서는 별도의 좌굴계수식 및 보강재의 강성 요건을 제시하지 않고 있다. 종래의 허용응력설계법에 의한 도로교 설계기준^[10]은 3단 보강까지 허용하였으나, 현재 LRFD에 의한 국내 강구조부재설계기준^[11]은 AASHTO 기준을 토대로 하고 있으므로 2단 보강 플레이트거더교의 적용이 사실상 어려운 실정이다.

최근 Kim *et al.*^[12]은 편측에 플레이트 형태의 보강재로 2단 보강된 거더의 휨강도 평가를 위한 실험 연구를 수행하였다. 이때 웹 형상비 1.0, 웹 세장비 347, 항복강도 300 MPa급의 2축 대칭 플레이트거더가 사용되었으며, 웹은 비보강 및 2가지 제원의 보강재가 적용되었다. 이들 실험 연구에서는 변수가 제한적이므로 본 연구에서는 강재의 항복강도(HSB460 및 HSB690^[13]), 단면의 비대칭성(2축 및 1축 대칭 단면), 웹 세장비 및 웹 형상비를 변수로 하여 보강재의 필요 강성 평가를 위한 해석적 연구를 수행하였다. 선행연구의 보강 거더 시험체를 해석적 연구의 검증 모델로 활용하고 상기 변수를 고려한 비선형해석으로부터 거더 휨강도를 평가함으로써 Kim *et al.*^[8]이 제안한 2단 수평보강재 강성식의 타당성을 분석하였다.

2. 수평보강재의 휨강성 요건

2.1 AASHTO LRFD 기준

AASHTO 기준^[9]에서는 보강재가 웹의 면외 변형이

거의 발생하지 않도록 억제함으로써 좌굴 절선을 형성하기 위한 등가 T-단면(Fig. 1에서 빗금 친 부분으로 수평보강재와 웹의 18 t_w 부분)의 단면2차모멘트 I_l 을 식 (1)로 제시하고 있다.

$$I_l \geq Dt_w^3 [2.4\alpha^2 - 0.13] \quad (1)$$

여기서, I_l : 등가 T-단면의 연직 도심축에 대한 단면2차모멘트, D : 웹 높이, t_w : 웹 두께, d_o : 수직보강재의 간격, α : 웹 형상비(= d_o/D)이다.

단, 식 (1)은 1단 보강 웹 조건으로부터 도출된 것이며^[2], 2단 보강 시 보강재의 강성 요건에 대해서는 별도로 언급하지 않고 있다.

2.2 Kim *et al.*^[8]

Kim *et al.*^[8]은 Fig. 1과 같이 편측으로 2단 보강된 2축 대칭 거더에 대해 웹 세장비(D/t_w)와 형상비(α)를 변수로 하여 좌굴고유치해석을 수행하고 좌굴 절선이 형성되는 보강재의 강성을 도출하였다. 이때 상·하 보강재는 동일한 제원으로 고려하였으며 웹의 상단과 하단은 단순지지로 가정하였다. 이로부터 보강재의 단면2차모멘트에 대한 요건을 다음 식으로 제안하였다.

$$I_l \geq Dt_w^3 [5.45\alpha^2 - 3.78\alpha + 1.38] \quad (2)$$

여기서, I_l 은 등가 T-단면 1개의 단면2차모멘트이다.

선행 논문^[12]에 보인 바와 같이 식 (2)는 식 (1)에 비해 큰 보강재 강성을 요한다.

3. 매개변수 전산해석

3.1 해석 변수 및 해석 단면 선정

수평보강재에 대한 식 (2)의 강성 요건이 웹 2단 보강 거더의 공칭 휨강도를 적절히 확보할 수 있는지 여부를 평가하고자 강재의 항복강도, 단면의 비대칭성, 웹 세장비 및 웹 형상비를 변수로 고려한 비선형해석을 수행하였다. 상기 변수들을 상정한 이유는 식 (2)가 적용 가능한 항복강도의 한계 평가, 식 (2)가 2축 대칭 거더에 대한 고유치해석으로부터 도출된 점, 그리고 2단

보강 시 예상되는 웹브 세장비와 형상비 범위를 고려하기 위함이며 각 변수별 상세한 내용은 다음과 같다.

먼저 강재의 항복강도와 단면의 비대칭성 변수로서 교량용 강재인 HSB460과 HSB690을 고려하였으며, HSB460 거더에 대해서는 1축 대칭 단면을 포함하였다. 웹브 높이(D)는 모두 3,000 mm로 하였으며 해석 대상 단면들의 제원을 Fig. 2(a) - Fig. 2(d)에 제시하였다. 해석 단면들의 플랜지 폭은 600 mm($D/5$)를 기준으로 하였으며, 비대칭 단면들은 반대편 플랜지 폭을 630 mm로 하였다. 이는 AASHTO 기준의 최소 플랜지 폭 $D/6$ 를 만족한다. Fig. 2(a)의 Case 1 및 Fig. 2(b)의 Case 2는 2축 대칭 단면(보강재를 단면적에 포함하지 않은 경우)이며, Fig. 2(c)의 Case 3는 $D_c < D_t$, Fig. 2(d)의 Case 4는 $D_c > D_t$ 인 1축 대칭 단면이다. 여기서 D_c 와 D_t 는 중립축으로부터 웹브의 압축측 및 인장측 높이이다.

한편, 모든 단면 case에서 조밀 압축플랜지를 고려하였다. 이에 따라 식 (2)가 보강재의 강성 요건으로서 적정하지 여부는 거더의 공칭 휨강도인 항복모멘트(M_y)에 도달할 것을 전제로 하였다. 단, 비조밀플랜지 범위에 대해서는 향후 보완 연구가 필요할 것으로 생각된다.

일반적으로 상·하 보강재는 실무적 측면을 감안하여 동일 제원으로 고려하기로 한다. Kim *et al.*^[8]에 의하면 웹브 상·하단이 단순지지 조건일 때 보강재의 최적 위치는 단면의 비대칭성에 관계없이 압축플랜지로부터 보강재 중심까지 거리 d_{sc} (Fig. 1 참조)가 $0.4D_c$ 일 때이며, 보강재의 간격은 단면의 비대칭 정도에 따라 약간 차이가 있으나, 2축 대칭 단면의 경우 $0.15D$ 일 때이다. 이에 따라 Case 1 및 Case 2의 2축 대칭 단면을 기준으로 하

되 플랜지에 의한 웹브 구속 효과를 감안하여 압축플랜지로부터 400 mm(= 0.133 D)와 850 mm(= 0.283 D)로 하였다. 한편 1축 대칭 단면에서는 최적 위치가 변하지만 실제 적용 측면에서 보강재 위치를 동일하게 고려하였다. 이때 Case 3는 $d_{sc} = 0.45D_c$, Case 4는 $d_{sc} = 0.36D_c$ 가 된다.

AASHTO 기준에서 웹브가 보강재로 보강된 경우 비조밀(non-compact) 세장비 한계를 식 (3)으로 규정한다.

$$\frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \quad (3)$$

여기서, k : 휨압축 좌굴계수, E : 강재의 탄성계수(= 210,000 MPa), F_{yc} : 압축플랜지의 항복강도(MPa)이다.

해석 대상 단면들의 웹브 두께는 Kim *et al.*^[8]의 좌굴계수식으로 좌굴계수를 산정하여 식 (3)으로부터 비조밀 한계세장비에 해당하는 두께를 계산한 후 10% 여유를 고려하여 최종 두께(t_w)로 적용하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 참고로 Kim *et al.*^[8]의 좌굴계수식으로부터 Case 1 및 Case 2 단면은 $k = 309.3$, Case 3 단면은 $k = 315.0$, Case 4 단면은 $k = 172.9$ 로 산정된다. 한편 현재 AASHTO 기준에서는 보강재 단수에 관계없이 D/t_w 비를 300으로 제한하고 있으므로 Case 1 및 Case 3 단면은 $t_w = 10$ mm로 하였다. 따라서 웹브 세장비는 263 - 300의 범위가 된다. 참고로 웹브 1단 보강 시 최대 k 값은 AASHTO 기준으로부터 129.3(2축 대칭 거더 조건)으로 산출된다. 이때 HSB460 거더의 경우 식 (3)으로부터 D/t_w 한계는 약 230이 된다. 이로부터 2단 보강 시 웹브 세장비 263 - 300은 실질적인 범위로 예상된다.

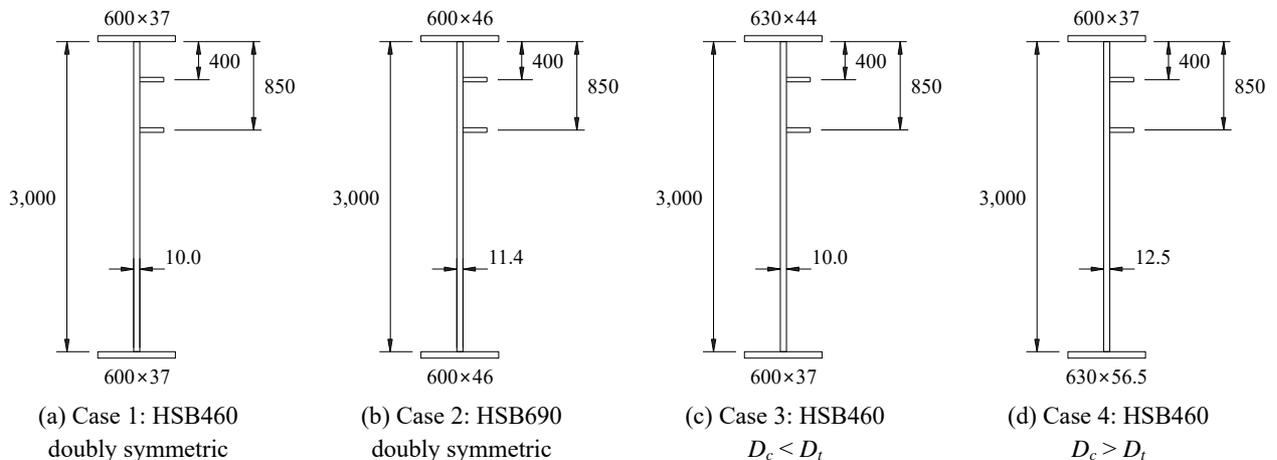


Fig. 2. Girder sections (Unit: mm)

마지막으로, 웹 형상비(α)는 1.5까지 고려하였다. 이는 2단 보강 웹의 형고가 큰 점을 감안하면 충분한 범위로 생각된다.

한편, 보강재의 폭(b_s)-두께(t_s) 비는 자유돌출판으로서의 좌굴을 방지하기 위하여 AASHTO 기준에서 제시한 식 (4)를 만족하도록 결정하였다.

$$b_s/t_s \leq 0.48\sqrt{E/F_{yc}} \quad (4)$$

이상의 요건을 감안하여 웹 형상비 0.5 - 1.5 범위에 대해 식 (2)로부터 결정한 보강재의 제원을 Table 1에 제시하였다.

3.2 거더 시험체 검증 해석

식 (2)의 적정성 평가를 위한 매개변수 해석에 앞서 본 연구에서 적용하고자 하는 전산해석모델의 타당성을 검증하기 위해 웹을 2단으로 보강한 두 개의 거더 시험체(Kim *et al.*^[12]의 T3-4A와 T3-4B)를 각각 해석하였다.

초기처짐은 Fig. 3와 같은 형상을 고려하였다. 웹의 초기처짐량(δ_{ow})은 AWS 기준^[14]을 준용하여 $\min(D/100, d_o/100)$ 으로 고려하였으며, 플랜지의 초기처짐량(δ_{of})은

$\min(b_{fc}/150, 0.3d_o/150)$ 을 적용하였다. 여기서, b_{fc} 는 압축플랜지의 폭이다.

검증 FE 해석은 ABAQUS 프로그램^[15]을 사용하여 재료 및 기하 비선형해석을 수행하였다. 보강재를 포함하여 모든 판은 S4R 쉘요소로 모델링하였다. 항복기준으로 von Mises 기준을 적용하였고 변형률경화 구간에는 isotropic strain hardening 모델을 사용하였다.

T3-4B 시험체의 최대 하중에서의 형상을 Fig. 4에 예시하였으며, 실험과 비선형 FE 해석에 의한 하중-변위 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 양자 간의 하중-변위 곡선의 기울기 형상(roundness)에서 다소 차이가 나타나는데, 그 원인으로는 실험에서의 시험체 지지대 및 가력프레임의 변형과 용접잔류응력의 영향을 FE 해석에서는 고려하지 않은 점을 들 수 있다. White *et al.*^[16]에 의한 용접잔류응력의 고려 유무는 하중-변위 곡선의 roundness에는 영향을 미치지만 종국 휨강도에 미치는 영향은 미소한 것으로 제시되었으며, 본 연구에서는 용접잔류응력을 무시하였다. Fig. 5로부터 T3-4A 및 T3-4B 시험체는 실험에 의한 P_{max} 대비 각각 0.978, 0.971로, 매개변수해석을 위한 비선형해석 방안은 적절한 것으로 판단된다.

Table 1. Dimension of longitudinal stiffeners by Eq. (2)

(Unit: mm)

d_o	α	Case 1 (Fig. 2(a))	Case 2 (Fig. 2(b))	Case 3 (Fig. 2(c))	Case 4 (Fig. 2(d))
1,500	0.5	98×9.6	103×12.3	98×9.6	115×11.2
2,250	0.75	119×11.6	125×14.9	119×11.6	139×13.6
3,000	1.0	144×14.0	152×18.2	144×14.0	169×16.5
3,750	1.25	170×16.6	178×21.3	170×16.6	198×19.3
4,500	1.5	194×18.9	204×24.4	194×18.9	226×22.0

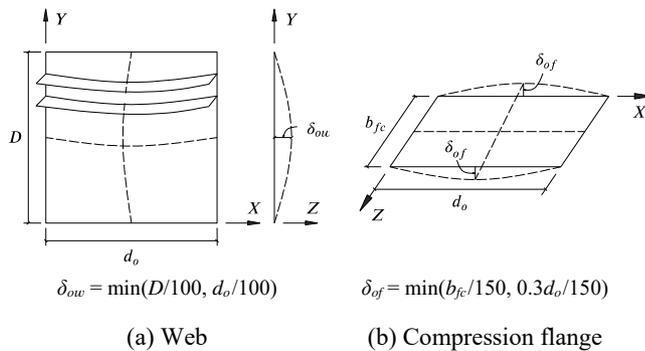


Fig. 3. Geometric imperfection

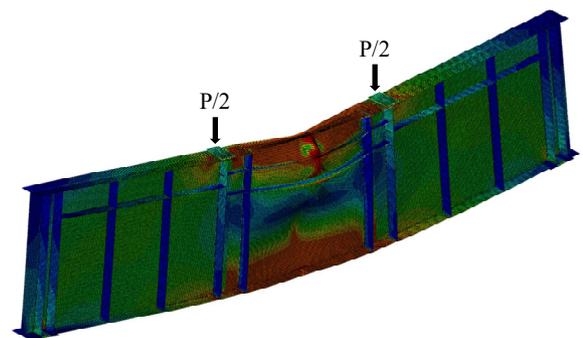


Fig. 4. Deformed shape of T3-4B Specimen

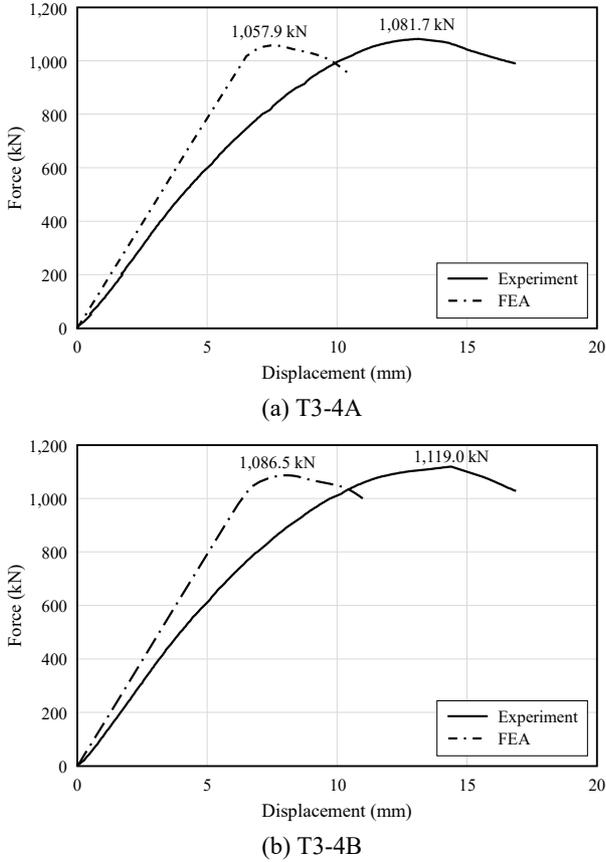


Fig. 5. Force-displacement curve from experiments and FEA

4. 휨강도 평가 해석 및 결과

4.1 비선형 FE 해석 방법

2단 보강 거더의 휨강도 평가는 Fig. 6에 보인 4점 재하 모델을 사용하였다. 이는 Kim *et al.*^[12]이 수행한 시험체와 동일한 형태이다. 압축플랜지와 웨브가 만나는 위치에서는 횡비틀림좌굴의 방지를 위해 횡방향 변위를 구속하였다. Fig. 6에서 중앙패널 양측의 빗금친 부분의 웨브는 좌굴 방지를 위해 중앙패널 웨브 두께(t_w)의 2.5배를 적용하였다.

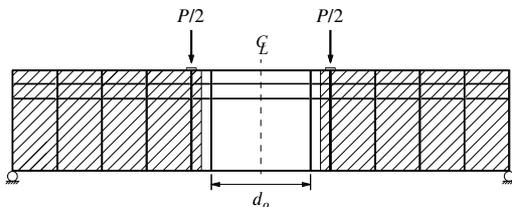


Fig. 6. Configuration of FE model

강재의 재료모델은 Fig. 7과 같이 multi-linear 모델로 고려하였으며 Table 2에 항복 및 인장강도와 해당 변형률을 제시하였다. 거더의 휨강도 평가를 위한 해석에서 초기처짐(Fig. 3)을 포함한 모델링 기법과 비선형해석 방법은 앞의 시험체 거더 해석과 동일한 방식을 적용하였다.

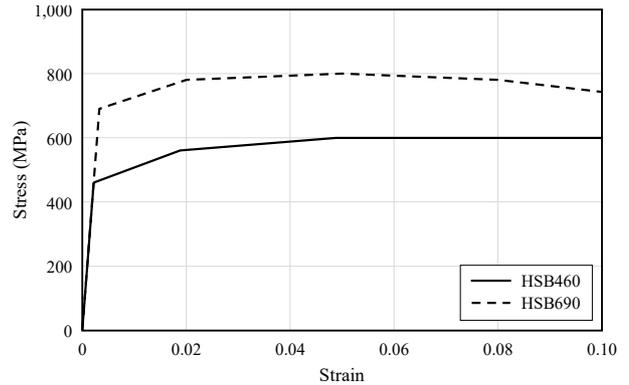


Fig. 7. Idealized material model

Table 2. Stress-strain

Steel	F_y	ϵ_y	F_u	ϵ_u
HSB460	460	0.0022	600	0.049
HSB690	690	0.0033	800	0.050

4.2 휨강도 평가 결과 및 분석

비선형해석으로부터의 휨강도(M_{uFEA}) 결과를 Table 3에 제시하였으며, Case 1 단면의 변형 형상을 Fig. 8에 예시하였다. 한편, AASHTO 기준은 2020년부터 수평보강재를 단면적에 포함하도록 규정하고 있다. 이 경우 Case 1 및 Case 2 단면도 $D_c < D_t$ 가 된다. Table 3에서 $M_{y,min}$ 은 보강재를 단면적에 포함하고 압축플랜지(M_{yc}) 또는 인장플랜지에 대한 항복모멘트(M_{yt}) 중 작은 값이다. M_{ycf} 는 역시 보강재를 단면적에 포함하고 Fig. 9과 같이 압축플랜지가 F_y 에 도달하였을 때의 휨모멘트이다. $D_c > D_t$ 인 Case 4 단면은 $M_{y,min}(=M_{yc})$ 과 M_{ycf} 가 같다. 한편, Fig. 10에는 $M_{uFEA}/M_{y,min}$ 과 M_{uFEA}/M_{ycf} 의 비를 도시하였다.

보강재 강성의 적정 여부는 압축플랜지를 조밀플랜지로 적용하였으므로 거더 휨강도가 $M_{y,min}$ 에 도달할 때를 강성의 하한치로, M_{ycf} 에 도달하면 합당한 것으로 간

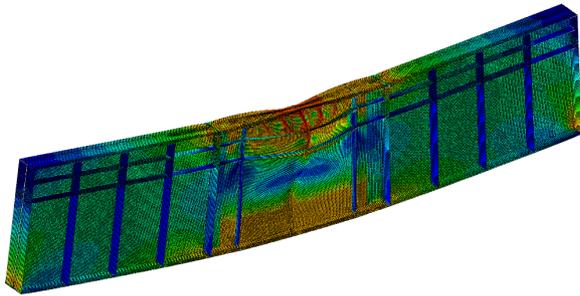


Fig. 8. Example of FE analysis (Case 1 section, $\alpha = 1.0$)

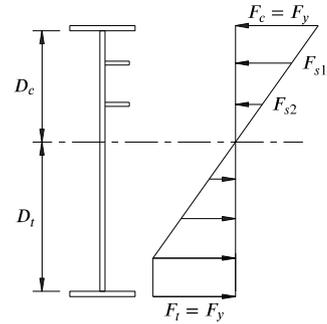


Fig. 9. Definition of yield moment M_{ycf} when $D_c < D_i$

Table 3. Flexural strengths

(Unit: kN·m)

Case	α	$M_{y,min}$ (= M_{yt} or M_{yc})*	M_{ycf}	M_{uFEA}	$\frac{M_{uFEA}}{M_{y,min}}$	$\frac{M_{uFEA}}{M_{ycf}}$
Case 1 (Fig. 2(a))	0.5	37,298.2	38,192.9	38,436.0	1.031	1.006
	0.75	37,267.1	38,474.8	38,958.4	1.045	1.013
	1.0	37,220.6	38,897.1	39,525.6	1.062	1.016
	1.25	37,170.0	39,358.2	40,026.6	1.077	1.017
	1.5	37,119.2	39,812.7	40,399.7	1.088	1.015
Case 2 (Fig. 2(b))	0.5	68,424.8	70,246.1	70,019.3	1.023	0.997
	0.75	68,351.7	70,826.4	70,815.2	1.036	1.000
	1.0	68,247.2	71,662.5	71,182.9	1.043	0.993
	1.25	68,137.6	72,528.3	71,090.1	1.043	0.980
	1.5	68,021.3	73,426.8	71,011.7	1.044	0.967
Case 3 (Fig. 2(c))	0.5	38,274.2	42,520.5	44,589.0	1.165	1.049
	0.75	38,238.6	42,710.0	45,226.4	1.183	1.059
	1.0	38,189.4	42,957.8	45,659.5	1.196	1.063
	1.25	38,130.8	43,248.9	46,008.0	1.207	1.064
	1.5	38,073.5	43,524.2	46,168.0	1.213	1.061
Case 4 (Fig. 2(d))	0.5	42,946.0	42,946.0	43,008.6	1.001	1.001
	0.75	43,648.1	43,648.1	43,881.1	1.005	1.005
	1.0	44,683.5	44,683.5	45,047.3	1.008	1.008
	1.25	45,857.7	45,857.7	46,239.0	1.008	1.008
	1.5	47,145.3	47,145.3	47,249.0	1.002	1.002

* $M_{y,min} = M_{yt}$ in Case 1, 2, and 3 whereas $M_{y,min} = M_{yc}$ in Case 4.

주하기로 한다. Table 3 및 Fig. 10으로부터 4개 case의 단면 모두 형상비(α) 1.5까지에 대해 휨강도(M_{uFEA})가 $M_{y,min}$ 보다 큰 결과를 보인다. 한편 HSB460 거더(Case 1, 3, 4 단면)는 모두 $\alpha = 1.5$ 까지 M_{ycf} 에 도달하는 휨강도를 보인다. 반면, HSB690의 Case 2 단면은 α 가 증가할수록 M_{ycf} 에 미치지 못하는 강도를 보인다. 이 경우 $\alpha = 1.5$ 에서 최대 3.3 % 부족한 것에 불과하지만 HSB690

의 고강도강 거더에 대해서는 실험 등에 의한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

이상으로부터 Kim *et al.*^[8]이 제안한 식 (2)는 플레이트 형태의 보강재가 편측에 설치되는 2단 보강 웹브의 보강재 강성 요건으로 $F_y = 460$ MPa까지, 웹브 형상비 1.5까지의 2축 및 1축 대칭 거더에 적용 가능할 것으로 판단된다.

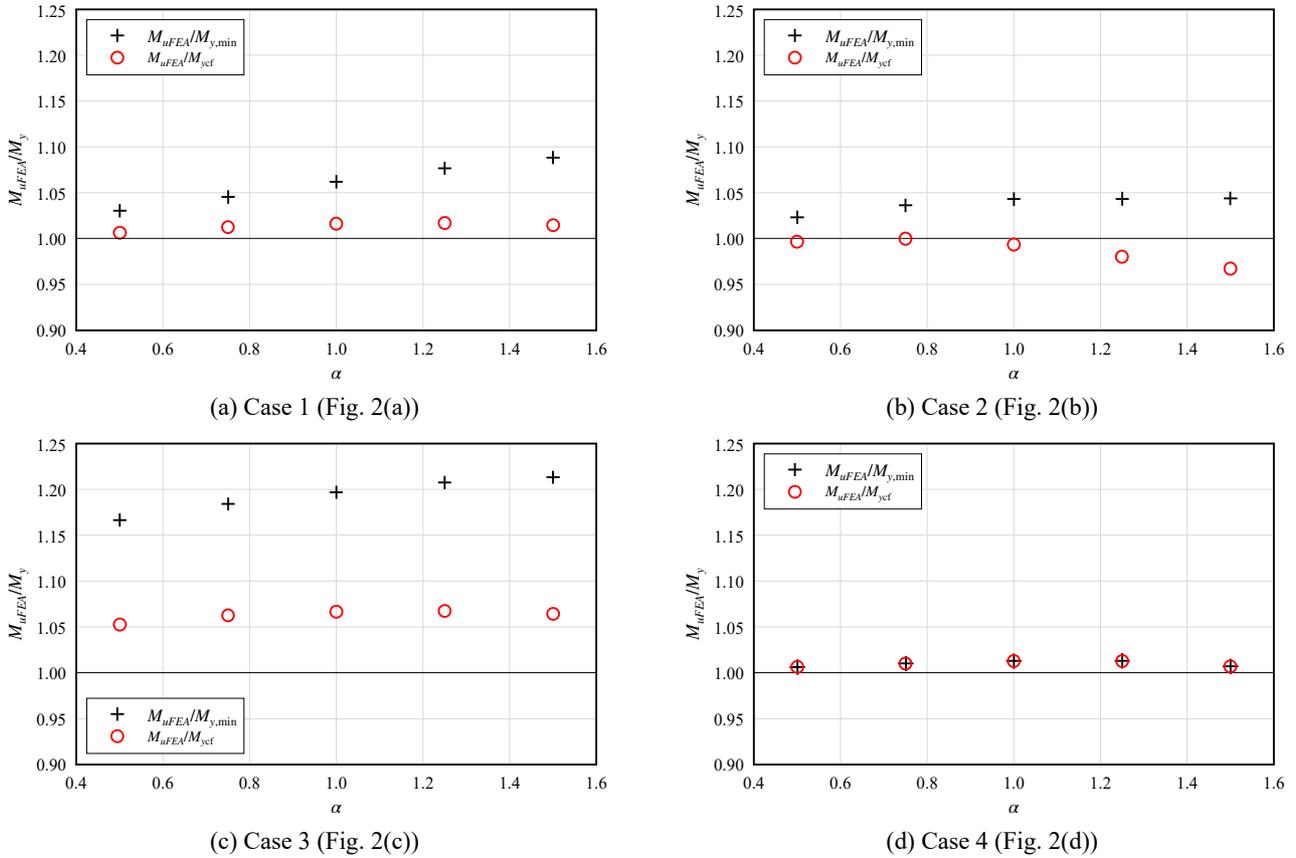


Fig. 10. Results of M_{uFEA}/M_y

5. 결론

본 연구에서는 플레이트 형태의 수평보강재로 웨브의 편축을 2단 보강할 때 Kim *et al.*^[8]이 제안한 식 (2)가 수평보강재의 강성 요건으로 적절한지 여부를 해석적으로 평가하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) AASHTO LRFD 기준에서는 웨브 1단 보강에 대해서는 좌굴계수 식 및 보강재 강성 요건을 제시하고 있으나, 2단 보강에 대해서는 별도의 요건을 제시하지 않고 있어 형고가 매우 큰 플레이트 거더 및 박스거더의 사용에 대비하기 위해서는 이에 대한 기준이 반드시 필요하다.
- (2) 2단 보강 시 보강재 강성 요건으로 Kim *et al.*^[8]이 제안한 식 (2)는 AASHTO 기준의 1단 보강재의 강성 요건인 식 (1)에 비해 큰 단면2차모멘트를 요하는데, 식 (2)의 적정성 평가를 위해 강재의 항복강도(HSB460 및 HSB690), 단면의 비대칭성(2축 및 1축 대칭 단면), 웨브 세장비(D/t_w) 그리

고 웨브 형상비(α)를 변수로 포함하였다. D/t_w 는 263 - 300, α 는 0.5 - 1.5 범위를 고려하였다.

- (3) 거더 휨강도 평가를 위한 매개변수해석에 앞서 초기처짐을 포함한 전산해석 방안의 타당성 검증 위해 선행연구의 실험체들에 대한 검증 해석을 수행하였으며, 이로부터 전산모델 및 비선형해석 방안은 적절함을 확인하였다.
- (4) 압축플랜지를 조밀플랜지로 적용하였으므로 거더 휨강도가 $M_{y,min}(= \min(M_{yc}, M_{yf}))$ 에 도달할 때를 보강재 강성의 하한치로 간주하고, M_{ycf} (Fig. 9 참조)에 도달하면 강성이 합당한 것으로 간주하였다. $M_{y,min}$ 및 M_{ycf} 산정 시 보강재를 단면적에 포함하였다. HSB460 및 HSB690의 모든 단면에서 휨강도는 $M_{y,min}$ 을 상회하였다. 한편 HSB460의 대칭 및 비대칭 거더는 모두 M_{ycf} 에 도달하였으나, HSB690 거더는 형상비가 증가할수록 M_{ycf} 에 도달하지 못하였다. 이 경우 $\alpha = 1.5$ 에서 3.3% 부족한 것에 불과하지만 HSB690 거더에 대해서는 적용에 앞서 실험 등에 의한 검증이 필요할 것

으로 판단되었다.

- (5) 이상으로부터 식 (2)는 웹브 2단 보강 시 플레이트 형상의 편측 보강재의 강성 요건으로서 $F_y = 460$ MPa까지, 그리고 형상비 1.5까지의 2축 및 1축 대칭 거더에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

한편, 본 연구에서는 플랜지 폭을 $D/5$ 로 제한하고 조밀 압축플랜지를 대상으로 하여 플랜지 압축좌굴강도만을 고려하였다. 향후 실무 적용을 위해서는 플랜지 폭 및 비조밀플랜지 변수를 포함한 횡비틀림좌굴강도와 플랜지 압축좌굴강도의 평가를 위한 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 RS-2020-KA156007)”의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌(References)

- [1] Dubas, C. (1948) Contribution à l'étude du voilement des tôles raidies (A Contribution to the Study of Buckling of Stiffened Plates), *Rapport du congrès AIPC (IVBH Kongressbericht, IABSE Congress Report)*, Vol.3, pp.129-136 (in French).
- [2] Massonnet, Ch. (1954) Essais de Voilement sur Poutres à Âme Raidie, *IABSE Publications (Mémoires AIPC)*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.14, pp.125-186 (in French).
- [3] Rockey, K.C., and Leggett, D.M.A. (1962) The Buckling of a Plate Girder Web Under Pure Bending When Reinforced by a Single Longitudinal Stiffener, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, ICE Publishing, Vol.21, No.1, pp.161-188.
- [4] Cooper, P.B. (1967) Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders, *Journal of Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.93, No.2, pp.419-452.
- [5] Frank, K.H., and Helwig, T.A. (1995) Buckling of Webs in Unsymmetric Plate Girders, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.32, No.2, pp.43-53.
- [6] Rockey, K.C., and Cook, I.T. (1965) Optimum Reinforcement by Two Longitudinal Stiffeners of a Plate Subjected to Pure Bending, *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, Vol.1, No.1, pp.79-92.
- [7] Rockey, K.C., and Cook, I.T. (1965) The Buckling Under Pure Bending of a Plate Girder Reinforced by Multiple Longitudinal Stiffeners, *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, Vol.1, No.2, pp.147-156.
- [8] Kim, B.J., Park, Y.M., Kim, K., and Choi, B.H. (2019) Web Bend-Buckling Strength of Plate Girders with Two Longitudinal Web Stiffeners, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno-Press, Vol.69, No.4, pp.383-397.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials (2020) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (9th Ed.), USA.
- [10] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standards for Steel Member (Load and Resistance Factored Design)* (KDS 14 31 10: 2017), Korea (in Korean).
- [12] Kim, B.J., Park, Y.M., Park, C.H., and Seong T.R. (2022) Experimental Study on the Bending Rigidity Requirements of Longitudinal Stiffeners for Plate Girder Webs Reinforced by Two Stiffeners, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 34, No.2, pp.67-76 (in Korean)
- [13] Korean Agency for Technology and Standards (2016) *Rolled Steels for Bridge Structures* (KS D 3868: 2016), Korea (in Korean).
- [14] American Welding Society (2020) *Structural Welding Code - Steel* (ANSI/AWS D1.1/D1.1M: 2020), USA.
- [15] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2022) *Abaqus Analysis User's Manual*, USA.
- [16] White, D.W., Zureick, A.H., Phoawanich, N., and Jung, S.K. (2001) *Development of Unified Equations for Design of Curved and Straight Steel Bridge I-Girders (Final Report to American Iron and Steel Institute Transportation and Infrastructure Committee)*, Professional Service Industries, Inc., and Federal Highway Administration, USA.

요 약: 형고가 큰 플레이트거더교에서는 2단 보강 웨브가 종종 고려된다. AASHTO LRFD 교량설계기준은 1단 보강의 경우 보강재의 휨강성 요건을 제시하고 있으나, 2단 보강에 대해서는 제시하지 않고 있다. 이에 Kim *et al.*은 플레이트 형태의 수평보강재로 웨브의 편측을 2단 보강할 때 보강재의 휨강성 요건식을 제안하였다. 본 연구에서는 이들이 제안한 보강재의 휨강성 요건이 적절한지 여부를 분석하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 강재의 항복강도, 단면의 비대칭성, 웨브의 세장비 그리고 웨브의 형상비를 변수로 포함하였으며, 압축플랜지는 조밀플랜지를 고려하였다. 이들 변수에 대해 거더의 휨강도 산정을 위한 비선형해석을 수행하고, 항복 모멘트에 도달하는지 여부로부터 보강재 휨강성 요건으로서의 적정성을 평가하였다.

핵심용어: 플레이트거더, 보강 웨브, 2단 수평보강재, 보강재 휨강성, 비선형해석
