등분포 하중을 받는 일축대칭 일단 스텝보의 비탄성 거동 특성 고찰

박이슬*, 박종섭*
*상명대학교 시설공학과
e-mail:pyiseul@sangmyung.kr

A Study on Inelastic Behavior of Monosymmetric Singly Stepped Beam Subjected to Uniform Load

Yi-Seul Park*, Jong-Sub Park*
*Dept of Infrastructure Engineering, Sangmyung University

요 약

최근 변단면 거더의 경제성을 고려하여 장경간 거더 교량과 강골조 구조물에 변단면보의 사용이 증가하고 있으며, 고강도 강의 등장으로 인해 변단면보의 정확한 좌굴 강도의 평가가 매우 중요시 되고 있다. 본 논문에서는 기존에 연구된 탄성 횡-비틀림 좌굴 강도에 관한 연구를 바탕으로하여 ρ별로 비탄성 구간에 비지지 길이가 존재하는 일축대칭 I형 변단면보의 횡-비틀림 좌굴 강도 해석을 실시하였다. 해석에는 유한요소해석프로그램인 ABAQUS(2007)가 사용되었으며, MINITAB(2006)을 이용하여 간편한 설계식을 제안하고 있다. 일단 계단식 단면을 가지는 보에 대하여 고려하였으며, 플랜지 길이 방향 비, 너비방향 비, 두께의 비로 계단식 I형 보를 나타내었다. 집중 하중을 적용시켰으며 비선형 해석을 위해 잔류응력 및 초기변형과 재료비선형을 고려하였다. 본 연구 결과에서 제안된 식은 향후 다양한 하중이 작용하는 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도에 대한 연구에 많은 도움이 될 것이다.

1. 서론

최근 변단면 거더의 경제성을 고려하여 장경간 거더 교량과 강골조 구조물에 변단면보의 사용이 증가하고 있으며, 고강도 강의 등장으로 인해 변단면보의 정확한 좌굴 강도의 평가가 매우 중요시 되고 있다. 대형 구조물의 경우 부재의 길이에 따라 하중의 변화가 큰 경우에는 단면이 일정한 부재를 사용하면 비효율적이다. 이러한 경우 하중의 분배에 따라 변단면 부재를 사용하면 단면 전체에 거의 일정한 응력을 발생시키도록 할 수 있고, 또한 사하중을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 구조물의 제작비용 또한 줄일 수 있어 매우 경제적인 설계가 가능하다.

미국의 AISC-LRFD 설계기준(2005)은 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 고려한 휨강도를 다음의 식으로 계산하도록 제안하고 있다.

$$M_n = C_b[M_p - M_p - 0.7F_yS_x)(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p})] \le M_p \qquad (1)$$

여기서 C_b=모멘트 구배 수정계수, M_p=공칭소성휨강도, M_r=잔류응력을 고려한 항복모멘트, L_b=비지지 길이, L_p=소성모멘트 대응지간길이, L_r=잔류응력을 고려한 항복모멘트 대응지간길이이다. C_b는 하중변화에 따른 좌굴강도 산정을 위해 사용되는 모멘트 구배 수정계수로 식 (2)와 같이 나타난다.

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \le 3.0 \qquad (2)$$

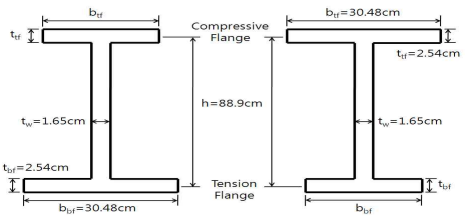
여기서 $R_m(0.5 + 2(\frac{I_{yc}}{I_y})^2)$은 일축대칭 매개변수를 나타내며, y축에 대한 압축플랜지의 단면2차모멘트를 나타낸 I_{yc}와 y축에 대한 단면2차모멘트인 I_y로 정의된다. 일축대칭도의 범위는 $0.1 \le \rho \le 0.9$로서 0.2의 간격으로 일축대칭 단면을 고려하였으며, 플랜지의 폭만을 변화시켰다. ρ와 $1-\rho$인 단면은 상부 플랜지와 하부 플랜지의 폭이 서로 뒤바뀐 관계를 갖는다. 이축 대칭 I형 보의 ρ는 0.5이다. 또한 이축대칭 단면을 가질 경우의 R_m은 1의 값을 가진다. $M_{\max}$, M_A, M_B, M_C는 각각 비지지 길이 부분의 최대 모멘트, 1/4지점, 1/2지점, 3/4지점의 모멘트로 절대값을 적용한다.

본 연구에서는 미국의 AISC-LRFD 설계기준(2005)

의 제안식과 기존 계단식 단면 변화보의 연구결과를 토대로 하여 비지지 길이 내 한쪽 끝단에 계단식 단면 변화를 갖는 일축대칭 I형 일단 스텝보를 일축대칭도(ρ)별로 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 산정식을 개발·제안하고자 한다.

2. 유한요소 해석 모델링

등분포 하중을 받는 일축대칭 I형 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위하여 유한요소해석프로그램인 ABAQUS(2007)가 사용되었으며, 4절점 쉘요소인 S4R요소가 해석에 이용되었다. 그림 1은 본 연구에 사용된 일축대칭 I형 부재의 단면 치수를 나타내고 있다.



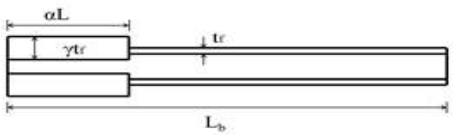
[그림 1] 해석 모델 단면

일축대칭 I형 보의 단면에 대한 일축대칭도($\rho = I_{yc}/I_y$)는 y축에 대한 압축플랜지의 단면2차모멘트를 나타낸 I_{yc}를 y축에 대한 단면2차모멘트인 I_y를 나눈 값으로 정의된다. 일축대칭도의 범위는 $0.1 \le \rho \le 0.9$로서 0.2의 간격으로 일축대칭 단면을 고려하였다.

해석 모델은 한쪽 끝단에 계단식 단면 변화를 가지는 일단 스텝보(Singly Stepped Beam)를 고려하였고, 플랜지의 길이 방향비를 α, 너비 방향비를 β, 두께의 비를 γ로 하여 스텝보를 나타내었다. 일단 스텝보의 매개변수 해석범위는 표 1에, 일단 스텝보의 정면도 및 평면도는 그림 2와 같다.

[표 1] 일단 스텝보의 매개변수 해석 범위

ρ	α	β	γ
0.1 0.3 0.5 0.7 0.9	0.167	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8
	0.25	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8
	0.333	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8
	0.5	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8



(a) 정면도

(b) 평면도

[그림 2] 양단 스텝보 해석 모델

비선형 해석을 실시하기에 앞서 단면 내 잔류응력과 부재의 초기결함 및 재료비선형을 고려하였다. 잔류응력은 Pi & Trahair(1995)가 고려한 단순 삼각형 분포로 가정하였고, 부재의 초기결함은 국내 I형강 표준 치수 허용치(현대제철, 2006)에 근거하여 부재 길이의 0.1%를 초기 최대 횡 변위로 적용하여 초기제작오차로 고려하였다. 해석을 위해 응력-변형률 곡선이 탄소성(Elasto-plastic) 형태를 갖는 재료를 사용하였으며 탄성계수는 210GPa, 항복응력은 280MPa이다.

해석에 사용된 모델의 비지지 길이는 비탄성 구간 내에 존재하는 L_b=6m(L_b/h=6.75)를 고려하였다.

3. 유한요소해석 결과

범용구조해석프로그램인인 ABAQUS(2007)을 통하여 얻어진 유한요소해석결과를 회귀분석프로그램인 MINITAB(2006)을 이용하여 균일모멘트를 받는 단순지지된 일축대칭 I형 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 설계식을 ρ별로 개발·제안하였다.

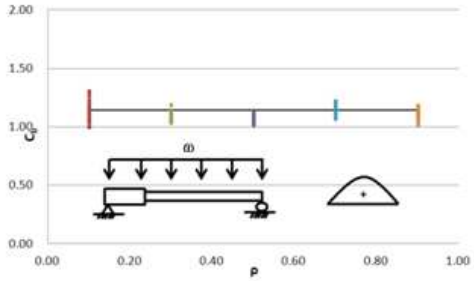
$$M_{ist}^m = C_{ist}^m M_{icr}^m \quad (3)$$

$$C_{ist}^m = 1 + 0.8\alpha^{1.4}(\beta\gamma^{0.5} - 1) \quad (4)$$

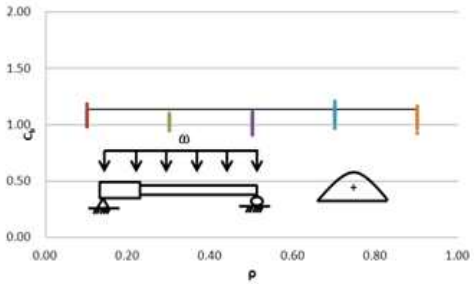
$$C_{ist}^m = 1 + 0.4\alpha^{0.8}(\beta\gamma^{1.1} - 1) \quad (5)$$

여기서, M_{ist}^m는 균일모멘트를 받는 일축대칭 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도이며, M_{icr}^m은 보 전체 비지지 길이에 균일단면으로 적용된 보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도로 AISC-LRFD 설계기준(2005)에 따라 식 (1)의 C_b값에 일축대칭도인 ρ가 고려된 값을 적용한다. 식 (4)는 일축대칭도(ρ)가 0.1, 0.9인 경우에 적용 가능한 식이며, 식 (5)는 일축대칭도(ρ)가 0.3, 0.7인 경우에 적용 가능한 식이다. 식

(4)와 (5)의 α, β, γ는 스텝보 계수이다.



(a) ρ=0.1-0.9



(a) ρ=0.3-0.7

[그림 3] 유한요소해석결과와 제안식 비교

그림 3의 (a)와 (b)는 비탄성 구간 내 비지지 길이를 갖는 일단 스텝보의 ρ가 0.1, 0.9일 때와 0.3, 0.7일 때를 고려하여 개발한 제안식과 유한요소해석 결과를 비교한 그래프이다. 실선은 각각 식 (4)와 (5)의 C_{ist}^{m}를 나타내며, 점들은 유한요소해석 결과이다. 해석결과와 제안식 (4)를 비교한 그림 3의 (a)를 보면 ρ가 0.1인 경우에는 단면변화가 큰 α=0.5, β=1.0~1.4 γ=1.0~1.8인 경우를 제외한 나머지 부분에서는 ±10% 내외의 차이를 보이고 있고, ρ가 0.9일 때의 경우도 마찬가지로 단면변화가 큰 경우를 제외하고는 ±9%의 오차를 나타내고 있다. 또한 해석결과와 제안식 (5)를 비교한 그림 3의 (b)를 보면 ρ가 0.1인 경우에도 마찬가지로 단면변화가 큰 α=0.5, β=1.0~1.4 γ=1.0~1.8인 경우를 제외한 나머지 부분에서는 ±15% 내외의 차이를 보이고 있고, ρ가 0.9일 때도 마찬가지로 단면변화가 큰 경우를 제외하고는 ±14%의 오차를 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구는 비탄성 구간 내 비지지 길이가 존재하는 일축대칭 I형 일단 스텝보가 등분포 하중을 받을 때의 횡-비틀림 좌굴강도 해석 연구결과를 기술하고 있다. 범용구조해석프로그램인 ABAQUS(2006)을 사용하여 유한요소해석을 실시하였으며, 유한요소해석값을 회귀분석프로그램인 MINITAB(2006)을 사용하여 등분포 하중을 받는 일축대칭 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴모멘트의 설계식을 일축대칭도인 ρ별로 제안하였다. 그 결과 비교적 적은 오차가 발생하였으며, 본 연구에서 제안된 식의 사용이 합리적이라고 판단된다. 본 연구결과는 복잡한 유한요소해석을 거치지 않고 간편하게 사용될 수 있으며, 다양한 하중조건을 고려한 일축대칭 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 설계식 개발로 확장 개발될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업연구 결과입니다.(No. 2010-0023275)

참고문헌

[1] 현대제철(2006), Korea Standard 치수 허용차. KSD 3502

[2] ABAQUS(2007), Standard User's Manual (Ver.6.7-2), Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.

[3] MINITAP 14 Korean(2006), Statistic, Minitap Inc.

[4] American Institut8e of Steel Construction (AISC) (2005), *LRFD Specification, 4th. Edition*, Chicago, Illinois

[5] Pi, Y.L. and Trahair, N.S. (1995), "Inelastic Torsion of Steel I-Beams," ASCE, Journal of structural Engineering, Vol. 121, pp. 609~620.

[6] Trahair N.S. (1993), Flexural-Torsional Buckling of Structures, CRC Press