

가설흙막이벽의 엄지말뚝(H형강) 휨응력 검토시 플랜지의 고정점간 거리(I)에 대한 이론적 검토사례



이정배
(주)한빛구조엔지니어링
구조설계부 대표이사
(lee@hbse.co.kr)



박민경
(주)한빛구조엔지니어링
구조설계부 사원
(mail@hbse.co.kr)

1. 서론

최근 도심지의 고심도 굴착 공사가 많아짐에 따라 흙막이벽 또한 강성이 큰 공법의 적용빈도가 커지고 있다. 일반적인 흙막이벽 공법은 엄지말뚝벽체(H-pile + 토류판 or 숏크리트), 널말뚝벽체(sheet Pile), 현장 타설말뚝벽체(C.I.P, S.C.W), 지하연속벽체 등으로 구분할 수 있으며 H-pile + 토류판, C.I.P, S.C.W, 지하연속벽체(diaphragm Wall) 등이 일반적으로 적용빈도가 높은 편이다. 엄지말뚝과 지지구조를 가지는 버팀 흙막이벽 형식으로 굴착을 시행하는 경우 굴착진행에 따라 변화하는 토압에 대하여 굴착단계별로 해석하고 각 단계에 발생하는 하중값(축력, 휨모멘트, 전단력)에 대해 엄지말뚝이 내력을 확보할 수 있도록 설계한다. 일반적으로 흙막이벽의 H형강 엄지말뚝 부재는 토압에 의한 휨 거동이 지배적이며, 따라서 토압에 의해 발생하는 휨모멘트와 전단력에 의해 부재의 크기가 결정된다.

흙막이벽의 H형강 엄지말뚝 설계시 허용 휨응력은 I/β 값에 의해 결정되며, 여기서 I 은 플랜지 고정점간 거리, β 는 압축플랜지의 폭이다. 본 소고에서는 허용휨응력 산정 기준에서의 I 값의 의미에 대한 고찰을 통해 각 각의 흙막이 공법별로 합리적인 I 값의 적용 방안에 대해 검토하였다.

2. 기준검토

2.1 구조물 기초설계 기준(국토교통부 제정)-가설흙막이 구조물의 부재단면설계

가설흙막이 구조물의 단면설계에 대한 사항은 '구조물 기초설계 기준(국토교통부 제정)'의 7.6항에 기술되

어 있으며, 7.6.3 부재단면 설계 시 고려사항에 대한 해설부에서 구체적인 설계 방법에 대해 기술하고 있다. 복공 등의 설치에 따른 축력에 대한 검토사항은 논외로 하고, 가설 흠막이벽의 엄지말뚝 H형강 부재의 휨에 대한 검토 내용에 대해 요약하면 다음 식(1)과 같다.

$$f_b = \frac{M \times a}{Z} \leq f_a \quad (1)$$

여기서, f_a 는 엄지말뚝의 허용휨응력을, f_b 는 외력에 의해 발생된 응력을, M 은 외력에 의한 최대 휨모멘트를, a 는 엄지말뚝 간격을, Z 는 엄지말뚝의 단면계수를 나타낸다.

구조물 기초설계 기준에 명시된 강재의 허용응력은 다음 표 1과 같다.

표 1의 허용 휨응력 산정식에서 H형강의 허용 휨응력은 일반적으로 압축연의 휨응력에 의해 결정된다. 압축연의 허용 휨응력은 I/β 값에 따라 결정되며, I/β 값이 4.6(SS400), 4.0(SM490)보다 작거나 같은 경우는 인장연과 같은 최대휨응력 값으로 결정되나, I/β 값이 4.6, 4.0보다 크고 30이하인 경우 압축연의 허용휨응력값은 115 MPa(SS400), 132.38 MPa(SM490)로서 최대응력 대비 210 MPa(SS400)의 55%, 285 MPa(SM490)의

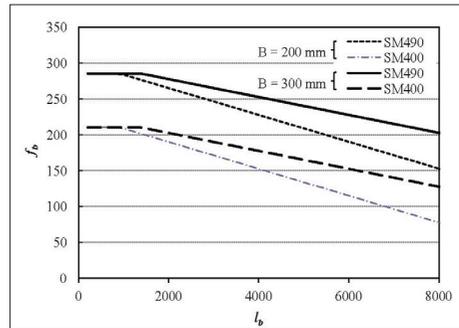


그림 1. 플랜지 고정점간 거리와 휨응력의 관계

표 1. 흠막이벽 설계용 강재의 허용응력(구조물 기초설계 기준, 국토교통부)

종 류		일반구조용 압연강재 SS400, SM400, SMA490	SM490	비고
축방향인장(순단면)		210	285	140×1.5=210, 190×1.5=285
축방향압축(총단면)		$\frac{I}{\gamma} \leq 18.6$, 일 경우 210	$\frac{I}{\gamma} \leq 16$, 일 경우 285	I(cm): 유효좌굴장 γ(cm): 단면2차반경
		$18.6 < \frac{I}{\gamma} \leq 92.8$, 일 경우 $210 - 1.23(\frac{I}{\gamma} - 18.6)$	$16 < \frac{I}{\gamma} \leq 80.1$, 일 경우 $285 - 1.94(\frac{I}{\gamma} - 16)$	
		$\frac{I}{\gamma} > 92.8$, 일 경우 $\left[\frac{1,800,000}{6,700 + (\frac{I}{\gamma})^2} \right]$	$\frac{I}{\gamma} > 80.1$, 일 경우 $\left[\frac{1,800,000}{5,000 + (\frac{I}{\gamma})^2} \right]$	
휨응력	인장연(순단면)	210	285	I: 플랜지의 고정점간 거리 β: 압축플랜지 폭
	압축연(총단면)	$\frac{l}{\beta} \leq 4.6$; 210 $4.6 < \frac{l}{\beta} \leq 30$, $210 - 3.74(\frac{l}{\beta} - 4.6)$	$\frac{l}{\beta} \leq 4.0$; 285 $4.6 < \frac{l}{\beta} \leq 30$, $285 - 5.87(\frac{l}{\beta} - 4.0)$	
전단응력(총단면)		120	165	
지압응력		315	428	강관과 강판
용접강도	공장현장	모재의 100% 모재의 90%		

에 의한 횡좌굴이 발생 가능할 것으로 예상된다. 그러나 SCW, CIP, H-pile + 숏크리트 공법의 경우, 각각 Soil Cement, 콘크리트, 콘크리트(또는 암반)와 숏크리트가 H형강의 웹부와 플랜지부를 횡방향으로 구속하고 있기 때문에 횡좌굴 현상이 발생할 가능성은 없다.

따라서 흙막이벽의 휨응력 산정시, H-pile에 토류판 공법의 경우 플랜지의 고정점간 거리 l 값은 지지점간 거리 즉, 스트러트 혹은 어스앵커의 수직 설치 거리 값을 적용하는 것이 타당하다. 그러나 횡좌굴 현상이 발생하지 않은 SCW, CIP, H-pile + 숏크리트 공법의 경우 H-pile의 허용응력 산정시 고려되는 플랜지의 고정점간 거리 l 값은 무시하여 압축연에서도 재료의 최대 허용응력값을 적용하여 엄지말뚝 H파일에 대한 부재 설계를 수행하는 것이 합리적이라고 판단된다.

3. 예제 분석

3.1 예제 및 검토조건

일반적으로 사용되는 가설흙막이벽과 지지공법이 적용된 예제를 선정하여 각 경우에 대한 H형강 엄지말뚝 부재의 허용휨응력에 대해 검토 분석하였다. 적용 예제 및 검토조건은 다음과 같다.

<예 제>

예제 1) STRUT(또는 앵커) 수직 설치 간격이 2.0 m인 S.C.W

예제 2) 지하 중간층 층고가 3.6 m인 경우의 역타공법이 적용된 C.I.P

예제 3) 지하 최하층 층고가 6.5 m인 경우의 역타공법이 적용된 H형강 엄지말뚝 + 숏크리트

<검토 조건>

1) 플랜지의 고정점간 거리 l 값

- ① 지지점 간 거리로 적용 : 스트러트 간격, 층고, 굴토단계에서의 최대 지지점간 거리
- ② 횡좌굴의 발생여부를 판단하여 최대 허용휨응력값 적용

2) H형강 사이즈 및 강도

- ① H-294×200×8×12(SS400), H-300×300×10×15(SS400)

3) 수평 처짐에 대한 검토는 생략함.

<예 제 풀 이>

예제 1)

- STRUT(또는 앵커) 수직 설치 간격이 @2,000 인 S.C.W
- H-pile 엄지말뚝 간격 @900
- 최대 작용하중 $M_{max} = 160 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $V_{max} = 150 \text{ kN}$



Case 1] I 값을 STRUT간격 @2,000으로 적용하는 경우

① H-294×200×8×12(SS400)부재 검토

$$\cdot \frac{l}{\beta} = \frac{200}{20} = 10$$

$$\cdot \sigma_a = 210 - 3.74 \left(\frac{l}{\beta} - 4.6 \right) = 189.8 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_b = \frac{M_{\max} \times 1,000}{z} = \frac{160 \times 1000}{771} = 207.52 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_b > \sigma_{ba}, \quad \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} = \frac{207.52}{189.9} = 1.09 \text{N.G}$$

② H-300×300×10×15(SS400)부재 검토

$$\cdot \frac{l}{\beta} = \frac{200}{30} = 6.67$$

$$\cdot \sigma_{ba} = 210 - 3.74(6.67 - 4.6) = 202.3 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_b = \frac{M_{\max} \times 1,000}{z} = \frac{160 \times 1000}{1360} = 117.6 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_b < \sigma_{ba}, \quad \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} = \frac{117.6}{202.3} = 0.58 \text{O.K}$$

$$\cdot \sigma_v = \frac{V_{\max}}{A_{web}} = \frac{150 \times 1000}{2160} = 69.4 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_{va} = 120 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_v < \sigma_{va}, \quad \frac{\sigma_v}{\sigma_{va}} = \frac{69.4}{120} = 0.58 \text{O.K}$$

→ H-294×200×8×12부재는 N.G로 적용 불가,

H-300×300×10×15 부재를 @900 간격 적용 가능.

Case 2] I 값을 고려하지 않은 경우(즉, 횡좌굴이 발생하지 않는 경우)

① H-294×200×8×12(SS400)부재 검토

$$\cdot \sigma_{ba} = 210 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_b = \frac{M_{\max} \times 1,000}{z} = \frac{160 \times 1000}{771} = 207.52 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_b < \sigma_{ba}, \quad \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} = \frac{207.52}{210} = 0.99 \text{O.K}$$

$$\cdot \sigma_v = \frac{V_{\max}}{A_{web}} = \frac{150 \times 1000}{270 \times 8} = \frac{150,000}{2160} = 69.4 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_{va} = 120 \text{ MPa}$$

$$\therefore \sigma_v < \sigma_{va}, \quad \frac{\sigma_v}{\sigma_{va}} = \frac{69.4}{120} = 0.58 \text{O.K}$$

→ 횡좌굴이 발생하지 않으므로 최대 휨응력값 적용시 H-294×200×8×12 부재를 @900 간격 적용 가능.

예제 2)

- 지하 최하층 층고가 6.5 m인 경우의 역타공법이 적용된 경우
- H-pile 엄지말뚝 설치 간격 @1500 인 H-pile + 숏크리트 구간
- 최대 작용하중 $M_{max} = 185 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $V_{max} = 210 \text{ kN}$
- H-pile + 숏크리트 구간은 H-pile천공 설치 시 콘크리트 충전함.

Case 1] I 값을 수평지지점 간격(층고)인 6.5m로 적용한 경우

① H-300×300×10×15(SS400)부재 검토

$$\cdot \frac{l}{\beta} = \frac{650}{30} = 21.67$$

$$\cdot \sigma_a = 210 - 3.74(21.67 - 4.6) = 146.2 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_b = \frac{M_{max} \times 1.5 \times 1,000}{z} = \frac{185 \times 1.5 \times 1000}{1360} = 204 \text{ MPa}$$

$$\cdot \therefore \sigma_b > \sigma_{ba}, \quad \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} = \frac{204}{146.2} = 1.39 \text{N.G}$$

→ H-300×300×10×15 부재 @1,500 간격은 N.G. 따라서 H-pile 간격 @1,000으로 재검토 필요함.

Case 2] I 값을 고려하지 않은 경우(즉, 횡좌굴이 발생하지 않는 경우)

① H-300×300×10×15(SS400)부재 검토

$$\cdot \sigma_{ba} = 210 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_b = \frac{M_{max} \times 1.5 \times 1,000}{z} = \frac{185 \times 1.5 \times 1000}{1360} = 204 \text{ MPa}$$

$$\cdot \therefore \sigma < \sigma_{ba}, \quad \frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}} = \frac{204}{210} = 0.97 \text{O.K}$$

$$\cdot \sigma_v = \frac{V_{max} \times 1.5 \times 1,000}{A_{web}} = \frac{210 \times 1.5 \times 1000}{270 \times 10} = 116.7 \text{ MPa}$$

$$\cdot \sigma_{va} = 120 \text{ MPa}$$

$$\cdot \therefore \sigma_v < \sigma_{va}, \quad \frac{\sigma_v}{\sigma_{va}} = \frac{116.7}{120} = 0.97 \text{O.K}$$

→ 횡좌굴이 발생하지 않으므로 최대 힘응력값 적용시 H-300×300×10×15 @1,500 간격 적용 가능.

4. 결론

가설흙막이벽 H형강 엄지말뚝 설계시 압축연의 허용 힘응력값은 I / β 값에 의해 결정되어 진다. 이 때 사용되는 I 값은 휨을 받는 H형강부재의 횡좌굴에 대한 비지지길이(laterally Unbraced Length)를 의미하는 값으로, 횡좌굴의 발생 여부에 따라 I 값이 결정되고 허용 힘응력값 또한 결정되어진다.

구조물 기초설계 기준(국토교통부 제정)에서 I 값은 가설 흙막이벽의 종류에 관계없이 '플랜지 고정점간 거리로 정의되어 있고, 따라서 엄지말뚝 설계시 일반적으로 '흙막이벽의 지지점 간격'(스트러트 간격 또는 탐다운 공법의 경우 층고)으로 적용되어 설계되고 있다.



그러나 휨에 의한 횡좌굴 현상은 가설 흙막이벽의 종류에 따라 즉, 엄지말뚝 H형강 부재의 웹브와 플랜지에 대한 횡방향 구속여부에 따라 발생여부가 결정된다. 즉, H-pile+토류판의 경우 횡좌굴이 발생 가능하며, SCW, CIP, H-pile + 숏크리트 공법의 경우 Soil Cement, 콘크리트, 콘크리트(또는 암반)와 숏크리트가 H형강의 웹브부와 플랜지부를 횡방향으로 구속하고 있기 때문에 횡좌굴 현상이 발생할 가능성은 없다. 따라서 가설 흙막이벽의 엄지말뚝 H파일의 허용 휨응력값을 결정하는데 있어 중요한 변수인 I 값은 횡좌굴의 발생 여부를 고려하여 합리적으로 적용되어야 하며, 횡좌굴이 발생하지 않은 경우는 허용 휨응력의 최대값을 사용하는 것이 타당할 것이다.

예제 분석 결과와 같이 횡좌굴이 발생하지 않는 경우를 고려하여 엄지말뚝 H형강 부재를 설계할 경우 보다 효율적인 설계가 가능함을 알 수 있었으며, 그 효과는 지지점간 거리(플랜지의 고정점간 거리, I 값)가 클수록 크게 나타났다.

본 소고에서는 흙막이벽체의 종류에 따라 각 각의 특성에 맞는 I 값(laterally Unbraced Length)에 대해 분석하였으며, 이를 통해 보다 경제적이고 합리적인 흙막이벽체 설계에 도움이 되고, 또한 본 소고에 대한 다양한 의견이 개진되어 각 각의 흙막이벽 공법에 따른 합리적인 I 값에 대한 설계 기준이 정립되기를 희망한다.

참고문헌

1. Korean Geotechnical Society(2015), Foundation Design Manual for Structures(in korean language), pp.568-573
2. Sim, J. U., Jeong, S. S., and Lee, J. H.(2015), "Numerical analysis of Self-Supported Earth Retaining Wall with Stabilizing Piles", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.31(5), pp.35-46.
3. Jeong, D. U., Im, J. C., Yoo, J. W., Seo, M. S., Koo, Y. M., and Kim, S. J.,(2013), "An Experimental Study on the Inclined Earth Retaining Structure in Clay", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.29(6), pp.63-75.
4. Sho, K. H., and Yang, K. Y.(2009), "Study on the Application of Double-up Method for Framework", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.25(9), pp.191-198.
5. Sho, K. H.(2011), "Study on the Application of Semi-open cut Top-Down Construction for Framework", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.11(2), pp.129-138.
6. Edwin, H., Charles, N., and James, E.(1992), Design of Steel Structures third edition, pp.288-293.