

# 철근콘크리트 지하벽과 강재를 합성한 합성벽의 휨설계

## Flexural Design of the Composite Basement Wall Combined with Reinforced Concrete Wall and Steel Member

서 수 연\*  
Seo, Soo-Yeon

### Abstract

The purpose of this study is to suggest the flexural design process of the composite basement wall (CBM) combined with reinforced concrete (RC) basement wall and H-pile in sheet pile. Especially, the effect of tensile stress happened in the shear connectors combining the RC wall with H-pile was considered in the design. For this, the design process in Korea design code for composite structure was studied and the decrease of shear strength of shear connector was reflected in the calculation of flexural strength of CBM. In addition, the impact of considering the shear strength reduction of the shear connector was examined in the nonlinear cross-sectional analysis results previously performed. As a result of the study, it was found that there was a good correspondence with the actual experimental results by considering the shear strength reduction according to the actual tensile stress occurring in the shear connector.

키워드 : 휨설계 과정, 합성지하벽, 인장응력, 전단연결재, 강도저감

Keywords : Flexural design process, Composite basement wall, Tensile stress, Shear connector, Strength reduction

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경

최근 도심지 건물의 시공에서 지하층 건설에 대한 수요가 증가하고 있다. 지하구조의 시공에서 합성지하벽 (Composite Basement Wall, CBW)은 지하굴토를 위해 설치하는 흙막이와 건축벽을 합성하여 하나의 구조체로 구성된 벽체이다. 이 벽은 2000년대 초반에 개발되어 현재 건물 지하공사에 적용되고 있다(Seo et al., 2005, Lee & Seo 2021). 합성지하벽에 적용되는 흙막이는 CIP (Cast In Place Concrete Pile)로서 이 CIP는 H형강을 콘크리트와 함께 말뚝의 형태로 형성한 주열식 벽체를 말한다. 따라서 합성지하벽의 기본적인 구성은 Figure 1(a)와 같이 H파일과 RC벽을 전단연결재로서 결합하는 상세가 일반적이다 (Kwon et al. 2001; Kim et al. 2002; Seo et al. 2006, 2010; Yoon et al. 2009; Seo & Kim 2020).

합성지하벽은 건축벽과 흙막이인 H-pile을 합성한 벽체로서, Figure 1과 같이 토압이 작용하는 측, 즉 건축벽의 외부에 H-pile이 위치하고 있다. 합성벽은 부모멘트를 받

는 합성벽의 거동과 유사하다. 이에 대하여 Johnson et. al (1975)은 전단 연결재가 충분하고 인장 철근이 배근 되어 있는 경우 콘크리트가 인장력에 의해 균열이 발생하더라도 철골 좌굴 이전까지는 휨 파괴되지 않는다는 연구 결과를 발표하였다. 하지만 이 연구는 합성지하벽과 같이 인장력과 전단력을 동시에 받는 접합면의 거동 특성을 고려하고 있지 못하다. Mirza & Furlong (1985)은 합성지하벽과 유사한 형태인 콘크리트 역 T형 보 (Concrete Inverted T Beam)의 설계를 위한 연구를 수행하여 펀칭전단 (Punching Shear)과 브라켓 전단 (Bracket Shear)에 의해 국부적이고 취성적인 파괴 특성이 나타남을 밝혔다. 또한 이러한 파괴 양상으로 인하여 응력 재분배가 제한되어 최대 하중 이후의 변형성능이 저하됨을 지적하였다.

합성지하벽이 합성벽과 다른 점은 Figure 2와 같이 벽단부 각층 바닥위치에서는 RC 벽체가 압축을 받고 부재의 중앙부에서는 RC 벽체가 인장을 받게 된다. 즉 합성벽과 반대로 정모멘트 구간에서는 벽체철근의 인장과 흙막이 CIP의 압축거동에 의해 휨에 저항한다. 또한 실제 흙막이에서 H형강만이 건축벽과 연결됨으로 인하여 그 이외 부분의 흙막이로부터 전달되는 토압과 벽체의 강성차이에 의해 실제 합성지하벽의 H형강과 RC 벽체사이에는 벌어짐 변형이 발생할 가능성이 높다. 이와 같은 상황을 고려하여 Kwon et. al (2001)은 휨실험을 실시하여 합성지하벽의 휨거동을 파악하였으며 Seo et. al (2006)은 파괴기구에 근거한 해석적 연구를 실시하였다. 하지만, 이

\* 한국교통대 건축학부 교수, 공학박사  
(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, syseo@ut.ac.kr)

이 연구는 2023년도 한국교통대학교의 지원에 의한 결과임.

와 같은 특성에 의하여 나타나는 합성효과의 변화를 설계 설계시에 어떻게 반영할 것인가에 대해서는 충분히 제시되지 않은 상황이다.

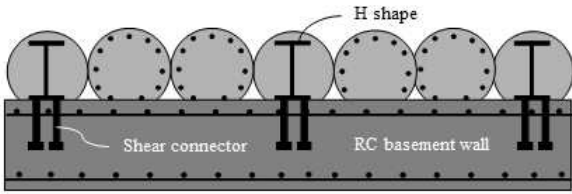


Figure 1. Composite basement wall

1.2 연구의 목적 및 방법

본 논문에서는 합성지하벽에서 콘크리트벽과 H-piule강재를 연결하는 전단연결재의 특성을 고려하여 휨강도를 산정하는 절차를 연구하고자 한다. 이를 위하여 합성부재의 휨설계를 위한 국내의 기준식을 파악하고 여기에 실제 실험을 통하여 얻은 연결재 특성에 따른 영향을 반영하여 적절히 강도를 예측할 수 있는 절차를 구축하였다. 또한 기 수행된 비선형 단면해석결과에서 전단연결재의 전단강도 저감을 고려함에 따른 영향을 검토하였다.

2. 합성지하벽의 휨거동 특성

합성지하벽의 휨에 대한 설계방법은 합성보의 설계개념과 동일하게 KDS 14 31 10 (2019)에 따른다. 다만 합성지하벽과 합성보의 휨응력을 비교하면, 합성보의 경우 바닥의 하중이 RC-slab에서 강제보로 전달되므로 RC-slab와의 접합부에서 강재는 압축응력상태에서 전단력의 전달이 이루어지고, 중앙부에서 주로 강재에 인장응력이 발생하며 콘크리트에서 압축응력이 발생한다. 하지만 합성벽체의 경우 RC벽체와 강재 접합부에서 강재는 인장응력상태로 전단력을 전달하며, 중앙부에서 RC벽체에 인장응

력이, 강재에서는 압축응력이 발생하게 된다.

KDS 14 31 10 (2019)의 합성보 부모멘트 설계프로세스에 따라 합성지하벽의 중앙부에 대한 설계를 할 경우 항복한계상태(소성모멘트)에 대한 합성단면의 소성응력분포로부터 구할 수 있다. 부모멘트를 받는 합성보의 휨설계는 전단연결재의 수평 전단력과 인장철근의 인장력 중 작은 값을 유효 인장력으로 결정한 후 소성모멘트를 구한다. 본 연구에서의 합성지하벽에 대한 휨내력 역시 같은 개념으로 산정 하였으며 소성중립축 위치에 따른 소성모멘트의 개념을 적용하였다. 중립축은 Figure 3과 같이, 합성률이 100%일 경우 하나의 중립축을 가지고, 100% 미만일 경우 약간의 분리된 거동으로 두 개의 중립축을 가지게 되며, 0% 경우 완전히 분리되어 H-pile과 RC 벽체가 각각의 단면에 대한 중립축을 가진다.

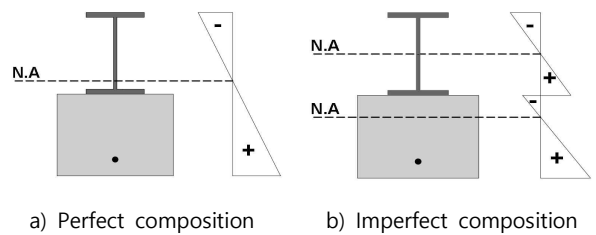


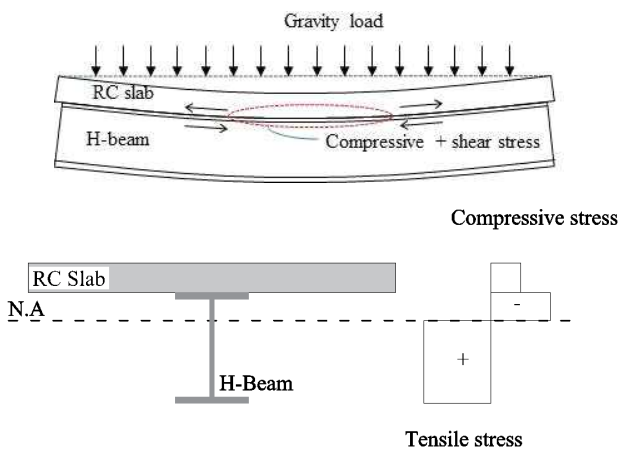
Figure 3. Strain profile of CBW

따라서, 전단연결재의 합성율에 따라 완전합성보 또는 불완전 합성보의 거동을 보이게 된다. 특히, 전단연결재에는 인장응력이 발생하기 때문에 이를 고려하여야 한다.

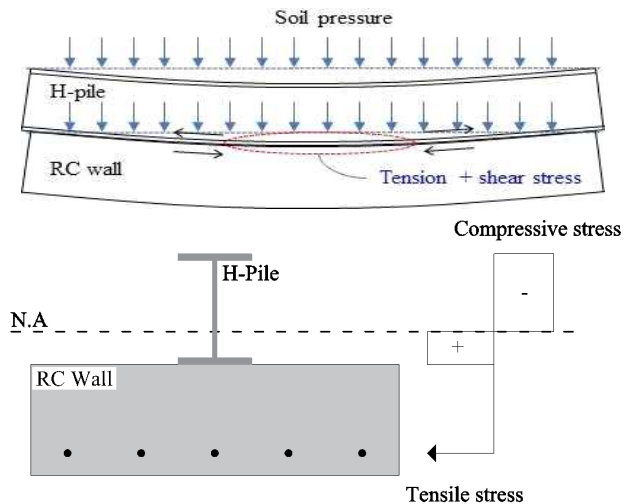
3. 합성지하벽의 휨설계

합성지하벽의 휨강도는 KDS 14 31 10 (2019)에 따라 다음과 같이 산정할 수 있다.

1) 철골 인장 플랜지 ( $P_{yw} < C_e \leq P_y$ )



(a) Composite beam



(b) Composite basement wall

Figure 2. Resistance mechanisms against bending of composite beam and CBW

$$C_e = \min(\sum Q_n, A_{sr} \times f_y, A_s \times F_y) \quad (1)$$

$$C_e + (2b_f y) F_y = P_y \quad (2)$$

$$y = \frac{P_y - C_e}{2b_f F_y} \quad (3)$$

$$M_n = C_e(a_r + 0.5d) + (P_y - C_e)(0.5d - 0.5y) \quad (4)$$

2) 철골웹 (  $C_e \leq P_{yw}$  )

$$C_e = (k \times t_w) 2F_y \quad (5)$$

$$k = \frac{C_e}{2t_w F_y} \quad (6)$$

$$M_n = M_{ps} + C_e(a_r + 0.5d) - (k t_w) 2F_y \times 0.5k \quad (7)$$

$$= M_{ps} + C_e(a_r + 0.5d) - \frac{C_e^2}{4t_w F_y}$$

$$P_{yw} = (d - 2t_f) t_w F_y \quad (8)$$

$$M_n = M_{ps} + C_e(0.5d + a_r) - \frac{C_e^2}{P_{yw}}(0.25d - 0.5t_f) \quad (9)$$

$$= M_{ps} + \left(0.5d + a_r - \frac{C_e}{P_{yw}}(0.25d - 0.5t_f)\right) C_e$$

여기서,  $A_s$ : 철골 단면적,  $A_{sr}$ : 인장철근 단면적,  $f_y$ : 철근의 항복강도,  $F_y$ : 철골의 항복강도,  $a_r$ : H-pile과 벽계 계면에서 부터 철근 중심까지의 거리,  $b_f$ : 철골 플랜지 폭,  $d$ : 철골의 전체 깊이,  $t_f$ : 철골 플랜지의 두께,  $t_w$ : 철골 웹의 두께,  $C_e$ : 합성 벽체의 유효인장력,  $P_y$ : 철골 전체 단면의 항복축력,  $P_{yw}$ : 철골 웹의 항복축,  $\sum Q_n$ : 영(zero) 모멘트 지점과 최대 모멘트 지점사이의 전단스터드 수평 전단력의 합,  $M_{ps}$ : 철골 단면의 소성모멘트

최대 모멘트 발생 위치와 모멘트가 0이 되는 위치 사이에서 발생하는 총수평전단력  $V'$ 는 벽체 철근이 항복하거나 전단연결재의 전단강도가 지배하는 이 두 가지를 고려할 수 있다. H-pile인 소일시멘트로 감싸져 있기 때문에 강재의 압축좌굴은 발생할 가능성이 낮다. 따라서, 전술한 2가지 한계상태, 즉 벽체 철근의 인장항복과 전단연결재의 전단강도 중에서 작은 값으로 한다. 철근의 인장항복은 Eq. (10)에 따라 산정할 수 있다.

$$V' = F_{yr} A_r \quad (10)$$

여기서,  $A_r$ 은 RC 벽체의 유효폭 내에 있는 적절하게 정착된 길이 방향 철근의 단면적 ( $\text{mm}^2$ ).  $F_{yr}$ 은 RC 벽체 철근의 설계기준 항복 강도 (MPa)

강재 연결재의 전단강도는 Eq.(11)과 같이 산정한다.

$$V' = \sum Q_n \quad (11)$$

RC 벽과 H-pile 사이에 설치하는 스티드 전단연결재의 전단강도는 Eq.(12)에 의해 산정한다.

$$Q_n = 0.5A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq R_g R_p A_{sc} F_u \quad (12)$$

여기서,  $A_{sc}$ : 스티드 전단연결재의 단면적 ( $\text{mm}^2$ ),  $E_c$ : 콘크리트의 탄성계수 (MPa),  $F_u$ : 스티드 전단연결재의 인장강도 (MPa),  $R_g = 1.0$ ,  $R_p = 0.75$

스티드 연결재 대신에,  $\sqsubset$ 형강 전단연결재를 사용할 경우에는 수평 전단력은 Eq.(13)에 따른다.

$$Q_n = 0.3(T_f + 0.5T_w)L_a \sqrt{f_{ck} \times E_c} \quad (13)$$

여기서  $T_f$ :  $\sqsubset$ 형강 전단연결재의 플랜지 두께(mm)  $T_w$ :  $\sqsubset$ 형강 전단연결재의 웹 두께(mm)  $L_a$ :  $\sqsubset$ 형강 전단연결의 길이(mm)  $f_{ck}$ : 콘크리트 설계기준 압축강도(MPa)  $E_c$ : 콘크리트 탄성계수(MPa)

실제 전단스터드에 발생하는 인장응력은 작용하는 힘의 크기, 그리고 벽체와 강재의 상대강성에 따라 그 크기가 결정된다. 전단스터드의 전단성능은 작용하는 인장응력의 크기에 반비례하며 Figure 13과 같은 상관관계를 보인다. 여기서 상관계수  $\alpha$ 는 통상 2.0이 사용되지만 ACI 318에서는 5/3가 제시되어 있다. 이 값을 사용하여 산정할 수 있다.  $\sqsubset$ 형강 전단연결재의 경우에는 인장응력-전단응력 상관관계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

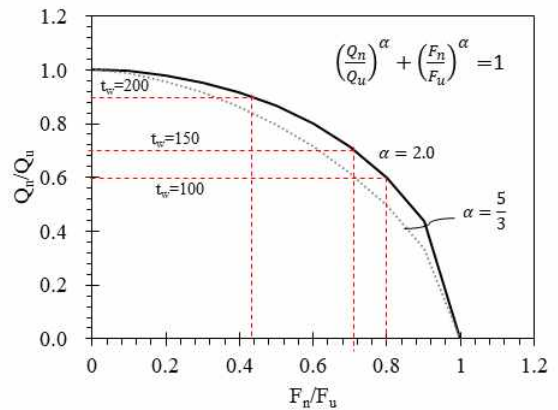


Figure 4. Correlation between shear stress and tensile stress in shear stud

이상과 같이, 현행 기준의 합성부재 휨설계 절차에 따라 합성지하벽의 휨강도를 산정할 수 있다. 다만, 전단연결재에 인장응력이 발생하기 때문에 이 인장응력에 따라 전단연결재의 전단강도가 감소하는 현상을 반영하는 것이 바람직 하다. 이를 위해서는 전단과 인장응력을 받는 상태에서 인장응력의 크기에 따른 저감을 고려하여야 한다. 현행 기준에서 정의된 Figure 4과 같은 상관곡선을 사용할 수 있지만, 실제 예상되는 처짐을 기반으로 인장응력의 크기를 산정할 수도 있다.

#### 4. 합성지하벽의 휨 해석

전단연결재의 인장응력이 발생함에 따른 전단강도의 저감을 적절히 고려할 경우, 기본적인 화이버모델기반의 휨 해석을 통하여 휨강도를 평가할 수 있다. 합성지하벽의 거동이 휨 지배인 경우에는 비선형단면해석을 통하여 그 거동을 예측할 수 있다. 특히 재료의 비선형특성을 반영할 수 있는 비선형 단면해석을 통하여 휨내력을 산정할 수 있다.

Figure 5는 합성지하벽에 사용된 각 재료인, 콘크리트, 철근, 그리고 강재의 재료특성을 입력한 그림을 나타낸다. 콘크리트는 Figure 5(a), (b)와 같이 Mander 모델을 사용하여 전단보강근으로 구속된 구속효과를 반영할 수 있다. 철근과 강재는 Figure 5(c), (d)와 같이 항복 이후 변형 경화를 반영할 수도 있다. 콘크리트의 인장강도는 통상적으로 압축강도의 1/10로 가정하며, 인장탄성계수는 압축탄성계수와 동일한 것으로 가정한다. 철근은 선요소로 모델링하고 콘크리트와 H-pile은 화이버로 모델링 한다.

Figure 6은 X-Tract 프로그램을 이용하여 Seo & Kim

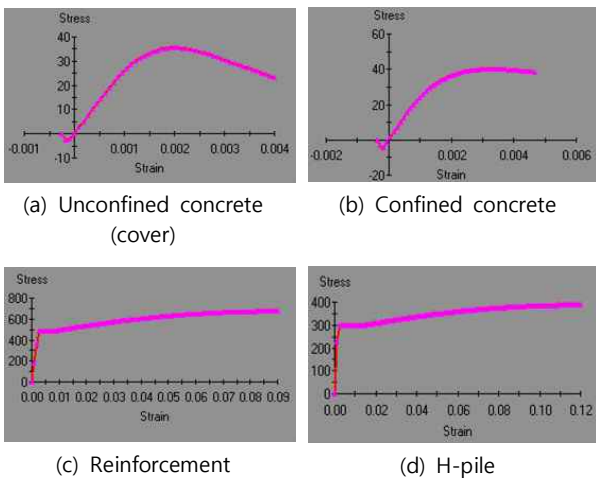


Figure 5. Stress – strain relationships of materials

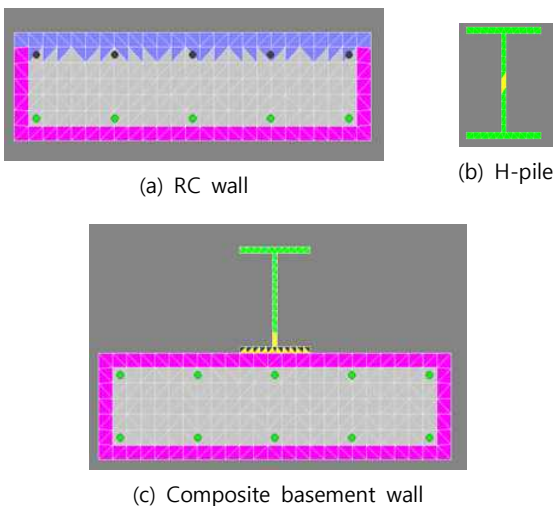


Figure 6. Analyzed sections (Seo & Kim 2020)

(2020)이 수행한 비선형 단면해석결과의 응력분포를 나타낸다. 각 실험체별로 모멘트-곡률 곡선을 구한뒤, 지점에서 가력위치의 거리를 고려하여 처짐으로 변환하면 하중-변위곡선으로 나타낼 수 있다. 비선형 단면해석을 통하여 각 실험체별로 모멘트-곡률 곡선을 구한뒤, 지점에서 가력위치의 거리를 고려하여 처짐으로 변환하면 하중-변위곡선으로도 나타낼 수 있다. 이 때 최대강도를 제대로 묘사하기 위해서는 Figure 7과 같이 소성힌지의 길이를 적절히 고려하는 것이 필요하다.

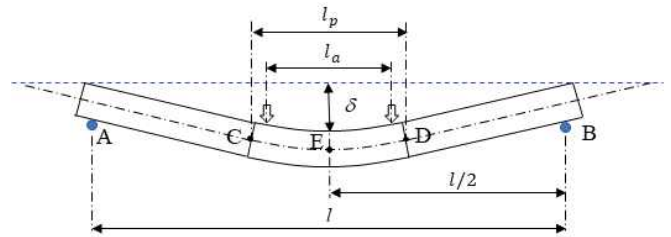
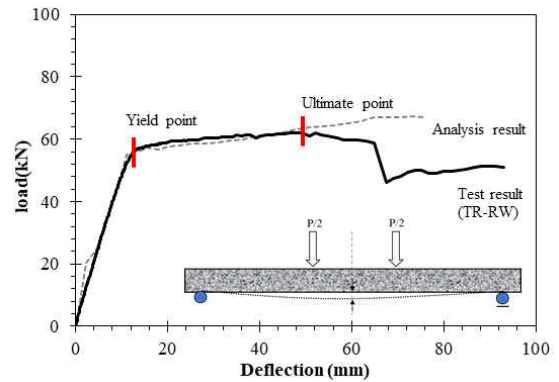
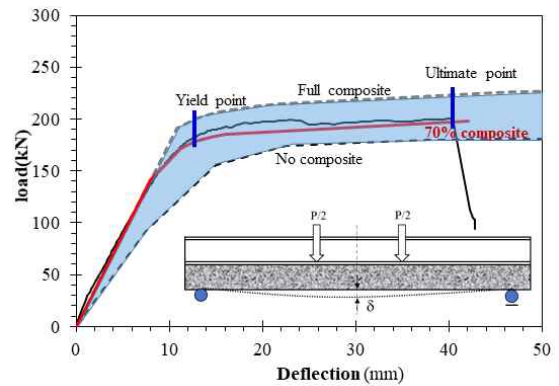


Figure 7. Deflection considering the plastic behavior of plastic zone

Figure 8은 이상의 단면해석을 통하여 구한 모멘트-곡률곡선을 하중-변위곡선으로 변환하고 이를 실험결과와 비교하여 나타낸 그래프이다. RW는 RC벽체로서 기본적으로 휨해석결과와 실험결과가 아주 좋은 대응을 보이고



(a) RW



(b) NB10

Figure 8. Load-deflection curves from the analysis (Seo & Kim 2020)

있다. NB010은 전단스터드로 H-pile과 콘크리트벽체가 연결된 합성지하벽의 해석결과를 나타낸다. 완전히 합성된 경우와 합성이 전혀 되지 않은 경우의 해석결과를 보면, 각각 실험결과를 과대평가하거나 과소평가하고 있다. 반면에 실제 전단연결재에 작용하는 인장응력을 고려하여 전단연결재의 전단강도를 저감시켜 해석한 결과를 보면, 실제 실험결과와 매우 유사함을 알 수 있다.

4. 합성지하벽의 휨 해석 및 설계결과의 비교

전술한 휨설계와 비선형 단면해석결과를 실제 실험결과 (Kwon et. al. 2001)와 비교하면, Table 1과 같다. 인장응력상태에서 전단연결재의 전단강도 저감을 고려한 비선형 단면해석결과는 항복강도 및 최대강도를 적절하게 묘사함을 알 수 있다. 또한, 역시 인장응력작용에 따른 전단연결재의 전단강도 저감을 적절히 고려할 경우, 합성부재의 휨설계프로세스에 따라 산정한 휨강도도 실제 실험결과와 좋은 대응을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

1) 전단연결재에 작용하는 인장응력의 크기에 따른 전단강도 저감을 적절히 고려할 경우, 비선형 단면해석결과는 실제 실험결과와 좋은 대응을 보이는 것으로 나타났다. 따라서, H-pile과 콘크리트 벽체를 연결하는 전단연결재의 합성율과 작용하는 인장응력을 적절히 고려할 경우, 하이버 모델기반의 비선형 휨해석을 통하여 합성지하벽의 강도 및 휨거동을 적절하게 묘사할 수 있는 것으로 판단된다.

2) 벽체의 강성에 따른 H-pile과의 벌어짐 변형을 고려하여 전단스터드에 작용하는 인장응력의 영향을 반영하여 설계기준의 합성부재 휨설계 프로세스에 따라 내력을 산정하면, 합성지하벽의 휨강도를 적절히 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Johnson, R. P. (1975). Composite Structures of Steel and

Concrete", John Wiley & Sons, New York.  
 2. Kim, S., Lee, C., Seo, S. & Lee, L. (2002). Shear Capacity of Composite Basement Walls, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 14(3), 321-330.  
 3. Kwon, Y., Li, C., Seo, S., & Lee, L. (2001). Flexural Capacity of Inverted T-Shaped Composite Basement Wall, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 17(2), 61-68.  
 4. Lee, B., Seo, S. (2021). Top-Down Method and Vertical Extension Technology for Underground Space in Building, *Megazine of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection (KSMI)*, 25(3), 38-51.  
 5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017). Design code for steel structure, KDS 14 31 10.  
 6. Mirza, S. A. & Furlong, R.W. (1985). Design of Reinforced and Prestressed Concrete Inverted T Beams for Bridge Structures, *PCI Journal*, July-August, 112-136.  
 7. Seo, S., Hwang, K., Choi, C. & Lee, L. (2005). Behavior and Design of Hubrid Basement Wall System in Building Compositied with Architectural Retaining Wall and Sheet H-Pile, *Concrete Megazine of the Korea Concrete Institute*, 17(6), 8-55.  
 8. Seo, S. & Kim. (2020). Analysis and Design on the Flexural Behavior of Composite Basement Wall Through Nonlinear Sectional Analysis *Journal of Architectural Institute of Korea*, 36(2), 145-1538.  
 9. Seo, S., Kim, S. & Yoon, Y. (2010). The Effect of Composite Ratio and Wall Thickness on the Shear Behavior of Composite Basement Wall, *Journal of Korea Institue for Structural Maintenance and Inspection*, 14(1), 93-101  
 10. Seo, S., Park, J., & Lee, L. (2006). Verification on the Flexural Behavior of Inverted T-Shaped Composite Basement Wall Subjected to Lateral Earth Load, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 22(2), 11-18.  
 11. TRC Bridge Design Software (2007). XTRACT program v.3.0.8.  
 12. Yoon, Y., Seo, S. & Kim, S. (2009). Shear Strength of Composite Basement Wall with Various Shear Span-to-Depth Ratio, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 25(11), 61-70.

Table 4 Comparison with test and analysis results

Specimen name	Test		Analysis		Calculation	$\frac{P_y}{P_{ya}}$	$\frac{P_u}{P_{ua}}$	$\frac{P_u}{P_{uc}}$
	Yield load, $P_y$ (kN)	Peak load, $P_u$ (kN)	Yield load, $P_{ya}$ (kN)	Peak load, $P_{ua}$ (kN)	Peak load, $P_{uc}$ (kN)			
NB10	175.68	200.86	179.1	198.1	202.44	0.98	0.98	0.99
TW100	156.82	178.15	156.1	174.2	202.44	1.00	1.00	1.01
TW200	199.97	237.40	208.6	240	202.44	0.96	0.96	0.94
NL10	217.25	250.04	231.5	250.1	179.73	0.94	0.94	0.99
NL15	267.32	298.23	281.2	290.5	226.14	0.95	0.95	1.05
RW	54.71	62.10	55.0	63.51	258.73	0.99	0.99	0.97