

PHC-W말뚝 흙막이와 결합된 지하증설벽체 테스트베드 구축을 위한 실대형 지하증설벽체의 휨강도 및 전단강도 설정 연구

Study on Bending and Shear Strength Setting of Full-scale Model Additional Walls for Additional Wall Test Bed Combined with PHC-W Pile Retaining Wall

우 종 열¹ Woo, Jong Youl 유 충 근² Yoo, Choong Geon
김 성 수³ Kim, Sung Su 최 용 규⁴ Choi, Yongkyu

Abstract

Test bed additional wall combined with PHC-W pile retaining wall has been constructed. To determine the dimensions of test bed additional wall, bending and shear tests of full scale core members of additional wall were tested. Basement additional walls utilizing PHC-W pile retaining wall, which were developed by modifying the cross-section of PHC piles, were classified into the composite additional wall and the non-composite additional wall. Their tests were conducted to obtain bending strength and shear strength of basement additional walls utilizing PHC-W pile retaining wall. Since bending strengths and shear strengths of the composite additional wall and the non-composite additional wall were similar, it could be confirmed that the non-composite additional wall could be applied instead of the composite additional wall. Full-scale model additional wall was 200 mm thick, thus the thickness of additional wall combined with PHC-W pile retaining wall could be reduced by 100~200 mm.

요 지

PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 테스트베드를 구축중에 있다. 지하증설벽체의 제원을 결정하기 위하여 실대형 지하증설벽체의 핵심 부재를 제작하여 휨강도실험 및 전단강도실험을 실시하였다. 원형 PHC말뚝의 단면 형상을 개량하여 개발된 PHC-W 흙막이벽체를 건축물 지하벽체로 활용하기 위하여 합성증설벽체와 비합성증설벽체를 제작하여 휨강도 및 전단강도 실험을 수행하였다. 합성증설벽체와 비합성증설벽체에서 휨모멘트 강도 실험값 및 전단강도 실험값이 유사한 수준으로 나타났으므로 합성증설벽체 대신에 시공이 간편하고 비용이 절감될 수 있는 비합성증설벽체를 적용할 수 있다는 것을 확인하였다. 실대형 모형 증설벽체는 두께 200mm로 제작되었는데, PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 경우 동등 지하실 규모의 통상적인 지하벽체보다 두께를 100~200mm 정도 절감할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

1 정회원, 힐엔지니어링 대표이사 (Member, Representative Director, Hill Engrg. Corp.)

2 정회원, 힐엔지니어링 이사 (Member, Director, Hill Engrg. Corp.)

3 정회원, 무성토건(주) 전무이사 (Member, Senior Managing Director, Musung Construction Industrial Co. Ltd.)

4 정회원, 경성대학교 공과대학 건설환경도시공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environmental and Urban Engrg., Kyungshu Univ., Tel: +82-51-663-4753, Fax: +82-51-624-0729, ykchoi@ks.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Keywords : PHC-W pile retaining wall, the composite additional wall, the non-composite additional wall, full-scale model, bending strength, shear strength

1. 서론

흙막이 공법은 지반의 붕괴와 지하수 용출을 차단하도록 하며, 안전하고 경제적이며 공해가 없어야 한다. 기존의 현장타설 흙막이 벽체는 시공상의 내적, 외적 측면으로 문제점을 지니고 있다. 외적 측면으로는 콘크리트의 시공 불량 및 누수, 구조적 신뢰성 저하 등의 문제점을 지니고 있으며, 내적 측면으로는 강재 H빔 매몰, 철근 조립, 콘크리트 타설, 면파기 및 흠메우기에 필요한 재료 구득 및 과도한 현장 인력 시공 공정 등의 문제점을 들 수 있다. 이러한 문제점들에 대한 대안으로 PHC-W말뚝을 이용한 흙막이공법이 개발되었다(Kim et al., 2017; Choi et al., 2017). 또한 PHC-W 흙막이에 벽체를 증설하여 건축물의 지하벽체로 사용할 수 있도록 PHC-W 흙막이겸용 건축물 지하영구벽체공법을 개발하였다(Musung construction co. Ltd., 2017).

일반 원형 PHC말뚝의 단면 형상을 개량하여 개발된 PHC-W 흙막이벽체에 지하증설벽체를 타설하여 지하실 외벽으로 사용하려는 연구를 진행하고 있다. 이렇게 할 경우 통상적인 지하실 외벽보다 두께를 100~200mm 정도 줄일 수 있어 지하실 내부 공간도 더욱 넓게 확보할 수 있을 뿐만 아니라 시공 비용도 절감할 수 있어 경제적이 될 수 있다.

건축물 지하벽체로서의 활용성을 검증하기 위하여 지하증설벽체 테스트베드를 구축 중에 있다. KDS 14 20 00(KCSC, 2016)에 따라 지하증설벽체의 재원을 설계하고 PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체를 모사할 수 있도록 2개의 PHC-W말뚝과 결합된 지하증설벽체 일부에 대한 실험 모형 제작하여 휨강도 실험 및 전단강도 실험을 실시하여 휨강도 및 전단강도를 평가하였다.

2. PHC-W 흙막이벽체를 이용한 건축물 지하증설벽체공법

2.1 PHC-W 흙막이벽체

흙막이 가시설로 활용하기 위해 PHC말뚝의 단면 형상을 개량하여 개발된 PHC-W말뚝(Fig. 1 참조)의 측면

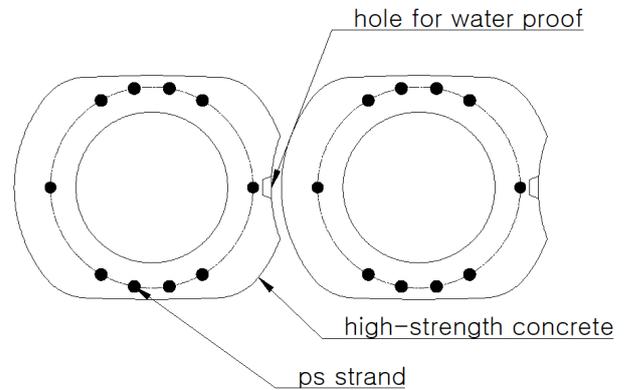


Fig. 1. PHC-W pile

부는 주열식 시공에 유리할 수 있도록 오목부와 볼록부로 이루어졌다. 또한 겹침부에 지하수 유출을 차단하기 위해 차수재를 설치하여 별도의 차수공법이 필요하지 않도록 하였다.

PHC-W말뚝을 주열식으로 시공하여 형성된 PHC-W 흙막이벽체는 흙막이 겸용 건축영구벽체공법으로 활용할 수 있으며 다음의 장점을 가질 수 있다. 굴착 시 지하수의 유입을 방지하기 위한 별도의 차수공법을 적용하지 않아도 된다. 건축물 지하벽체의 두께가 줄어들게 되므로 도심지 인접 건물과의 거리를 좀 더 확보할 수 있어서 공사할 때 발생하는 진동 및 소음에 대한 민원 발생이 줄어든다. 지하외벽의 두께가 줄게 되므로 건축물 지하층 공간의 실제 사용 면적이 늘어나서 공간 활용성이 좋아진다. 건축물이 말뚝 기초로 설계되어 있을 경우 지하벽체와 일체로 시공하여 지하 외측벽체로 설계한 PHC-W말뚝을 기초말뚝으로 활용할 수 있다. 따라서 공기단축 및 공사비 절감이 가능할 수 있다.

2.2 PHC-W 흙막이벽체를 이용한 건축물 지하증설벽체공법

PHC-W 흙막이벽체와 결합된 건축물 지하증설벽체공법이 개발되었다(Fig. 2 참조). PHC-W 흙막이벽체를 건축지하벽체로 활용할 경우 PHC-W말뚝과 증설벽체 사이에 케미칼 약액 또는 전단연결재를 이용하여 일체화하여 합성증설벽체로 사용할 수 있었으며(Fig. 3(a) 참조), PHC-W말뚝과 증설벽체 사이에 케미컬 약액 또는

전단연결재로 일체화하지 않은 상태로 비합성증설벽체로 사용할 수 있었다(Fig. 3(b) 참조).

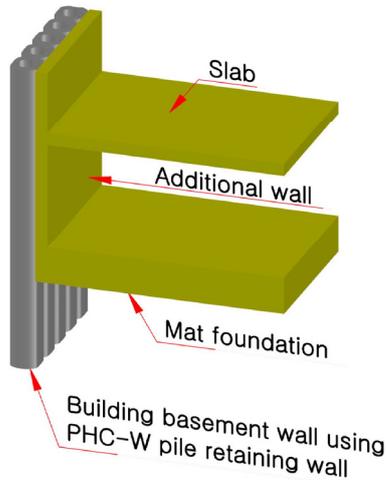
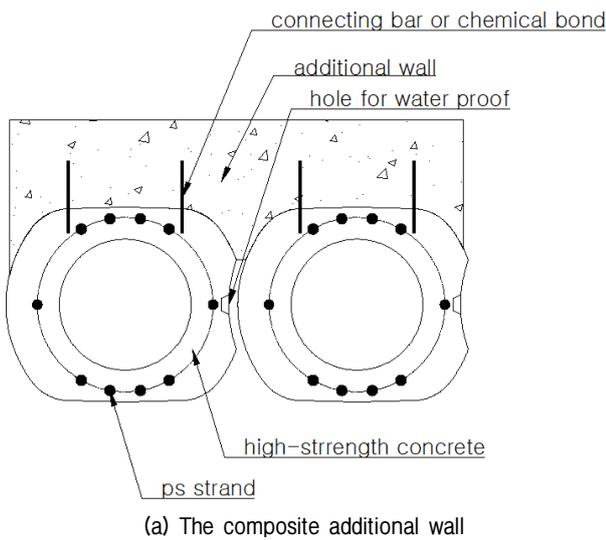
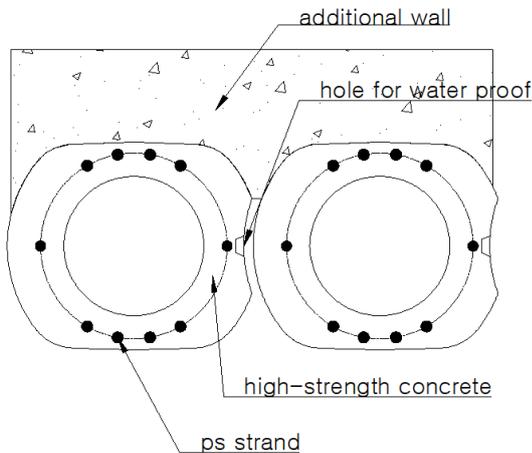


Fig. 2. The conceptual diagram of basement wall method using PHC-W pile retaining wall



(a) The composite additional wall



(b) The non-composite additional wall

Fig. 3. Diagram of the additional wall

3. 증설벽체의 휨모멘트 및 전단강도 산정

테스트베드 구축을 위하여 합성증설벽체 및 비합성증설벽체의 휨강도 및 전단강도를 산정하였다. PHC-W 말뚝의 콘크리트, 말뚝 보강철근, 증설벽체의 콘크리트와 철근 등 재료적 특성을 반영하여 휨강도와 전단강도를 산정할 수 있었으며 이 때 사용하는 계산식을 Table 1(a)에 나타내었다. 휨모멘트강도 및 전단강도 계산에 사용된 부재들의 특성치를 Table 1(b)에 나타내었다.

PHC-W말뚝의 경우 콘크리트는 압축 강도 80N/mm^2 을, PS강선은 SBPD 1,275/1,420을 사용하였으며 0.2% 영구 신장도에 대한 내력응력값으로 $1,275\text{N/mm}^2$ 을 적용하였다. KDS 14 20 00(KCSC, 2016)에서 콘크리트구조의 경우 내력응력값으로 콘크리트는 60N/mm^2 , 철근이나 철선은 600N/mm^2 으로 제한을 하고 있지만, 프리스트레스 콘크리트로서 품질에 대해 충분히 성능을 발휘할 것으로 판단하여 재료강도에 대한 제한사항에 대해 고려하지 않았다. 증설벽체의 경우 내력응력값으로 콘크리트는 24N/mm^2 , 철근은 400N/mm^2 으로 일반적으로 사용하는 재료강도를 적용하였다.

PHC-W 흠막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 경우 등가직사각형 응력블록 깊이(a)는 $(A_s \cdot f_y / 0.85 \cdot f_{ck} \cdot b)$ 로 산정할 수 있다. 여기서, A_s 는 철근의 단면적, f_y 는 철근의 항복강도, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, b 는 콘크리트 폭이었다. 압축강도 C 와 인장강도 T 는 각각 $0.85f_{ck}ab$ 및 $A_s f_y$ 로 산정할 수 있었다. 공칭휨강도(M_n)는 $C(d-a/2)$ 또는 $T(d-a/2)$ 로 산정할 수 있었으며 설계휨강도 ϕM_n 은 단면의 공칭휨강도에 0.85를 곱하여 계산할 수 있었다.

Table 1. Calculation formula and material's properties

(a) Calculation formula

Bending moment strength formula	$\phi M_n = \phi A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right)$
Shear strength formula	$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s$ $= \phi \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d + \frac{A_v f_y d}{s}$ <i>(Ignore the ϕV_s of PHC-W)</i>

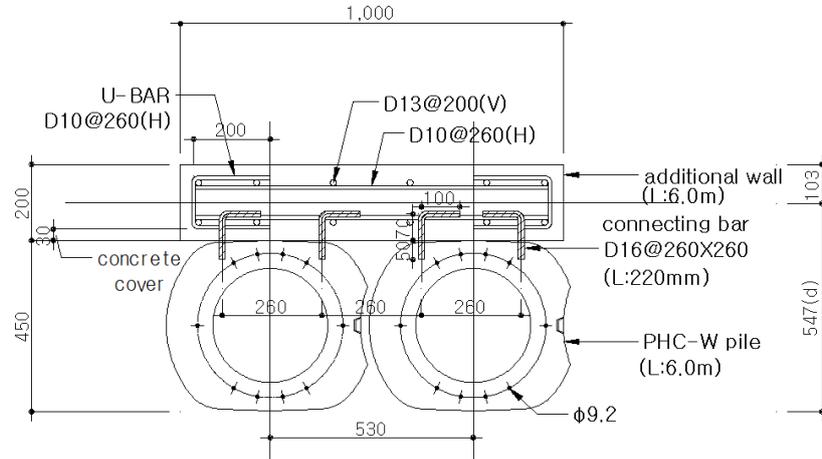
(b) material's properties

Classification	Materials	Properties
PHC-W pile	Concete	$f_{ck} = 80\text{N/mm}^2$
	ps strand	$f_y = 1,275\text{N/mm}^2$
The additional wall	Concrete	$f_{ck} = 24\text{N/mm}^2$
	Steel reinforcement	$f_y = 400\text{N/mm}^2$

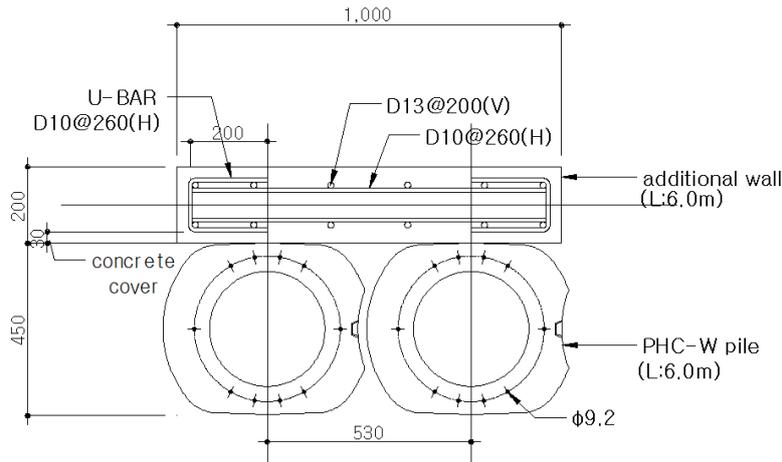
여기서, PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 경우 단면의 유효깊이 d 는 (h -피복두께-주철근 직경-1/2 단 철근의 중심 사이 간격)이었다. 공칭전단강도 (V_n)는 ($\sqrt{f_{ck}} b_w d / 6$)으로 계산할 수 있었으며 설계전단강도 ϕV_n 은 단면의 공칭전단강도에 0.75를 곱하여 계산할 수 있

었다. 여기서, b_w 는 복부의 폭이었다.

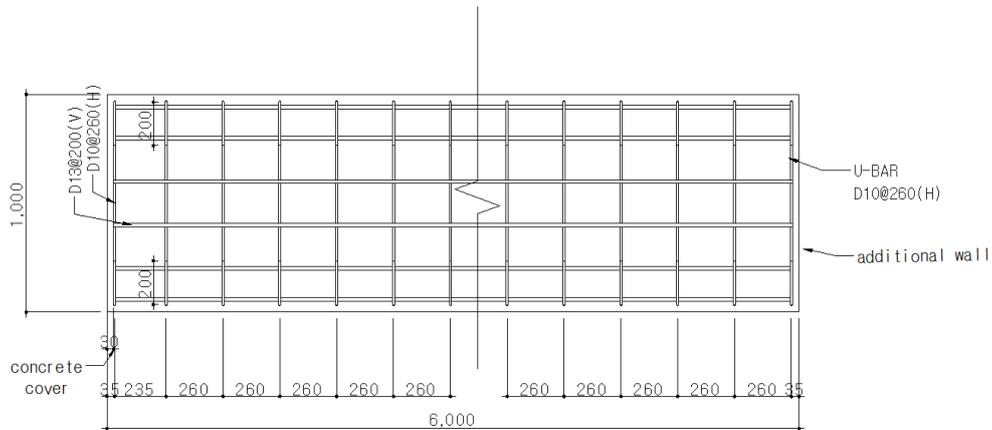
PHC-W 흙막이벽체와 결합된 건축물 지하증설벽체의 경우 흙막이 내부에 합성증설벽체 또는 비합성증설벽체를 설치할 수 있었다. 합성증설벽체의 경우 증설벽체가 인장측이 되었으며 Fig. 4(a)와 같은 합성증설벽체



(a) Vertical cross section of composite additional wall



(b) Vertical cross section of non-composite additional wall



(c) Longitudinal cross section

Fig. 4. Detail diagrams for calculation of bending and shear strength

의 단면을 설정하여 휨모멘트 및 전단강도를 산정할 수 있었다. 비합성증설벽체의 경우 증설벽체가 인장측이 되었으며 Fig. 4(b)와 같은 단면을 설정하였다. 비합성증설벽체는 PHC-W말뚝과 증설벽체가 인접되어 시공되지만 일체화 되어있지 않았기 때문에 PHC-W말뚝과 증설벽체에 대한 강도를 각각 산정하여 그 합으로 강도를 결정할 수 있었다. 또한 가상적인 경우이지만 합성증설벽체의 일체화 거동을 분석하기 위하여 PHC-W말뚝이 인장측이 될 때의 휨모멘트 및 전단강도를 산정할 수 있었다. 어느 경우이든 PHC-W말뚝에 설치되는 콘크리트 부분만 설계에 고려하였고, 나선철근 (ϕV_s)의 영향은 고려하지 않았다. 합성증설벽체와 비합성증설벽체의 휨강도 및 전단강도 산정 결과를 Table 2에 요약하여 나타내었다.

4. 지하증설벽체의 휨강도 및 전단강도 실험 결과 및 분석

4.1 실험 계획

건축지하벽체로의 활용성을 검증하기 위하여 지하증설벽체 테스트베드를 구축 중에 있으며 PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체를 모사할 수 있도록 2개의

PHC-W말뚝과 지하증설벽체 일부를 결합시킨 실대형 모형을 제작하여 실험을 통하여 휨강도 및 전단강도를 평가하고자 하였다.

PHC-W 흙막이벽체와 결합된 건축지하증설벽체의 2가지 유형(즉, PHC-W말뚝과 증설벽체를 전단연결재로써 일체화한 합성증설벽체와 PHC-W말뚝과 증설벽체 사이에 전단연결재를 시공하지 않은 비합성증설벽체)에 대하여 휨강도 및 전단강도 실험을 실시하였으며 그 계획을 Table 3에 나타내었다(Moosung construction co. Ltd. & Hill engineering Corp., 2018). 지하증설벽체의 경우 외벽에는 자중으로 인한 축방향 압축력과 토압에 의한 횡력이 조합된 외력으로 작용하게 되었는데 따라서 지하증설벽체의 경우 증설벽체가 인장측이 되었으므로 증설벽체의 외측에서 인장이 발생할 수 있도록 실대형 모형을 제작하였다. 여기서, 합성증설벽체의 경우 가상적인 경우이지만 PHC 흙막이벽체와 증설벽체와의 합체 거동을 분석하기 위하여 가상적으로 PHC-W 흙막이벽체가 인장측으로 되는 경우에 대한 실험(C-B-1~3, C-S-1~3)도 추가로 실시하였다. 여기서 각 실험은 3회씩 수행되었다.

4.2 실험 방법

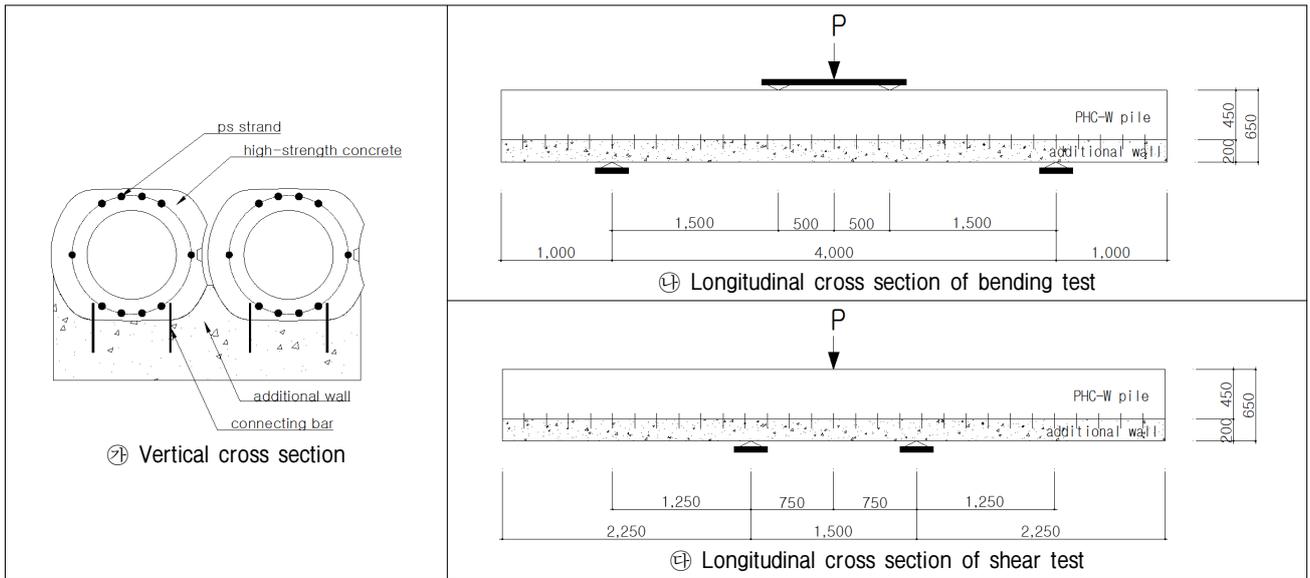
PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 경우

Table 2. Summary of calculated values

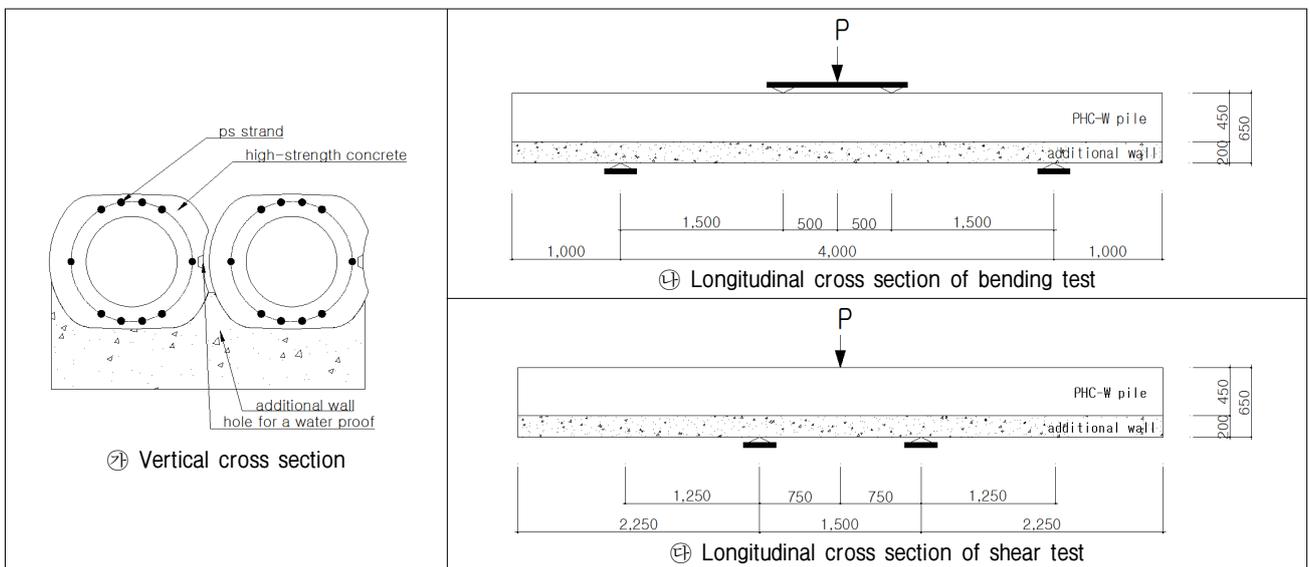
Test items		Calculated values		Bending strength (kN·m)	Shear strength (kN)
Composite additional Wall	Condition that additional wall is tensile			280.0	611.8
	Condition that PHC-W pile is tensile			261.8	
Non-composite additional wall	PHC-W pile			174.5	430.4
	Extension wall			40.0	94.6
	Sum			214.5	525.0

Table 3. Test plan

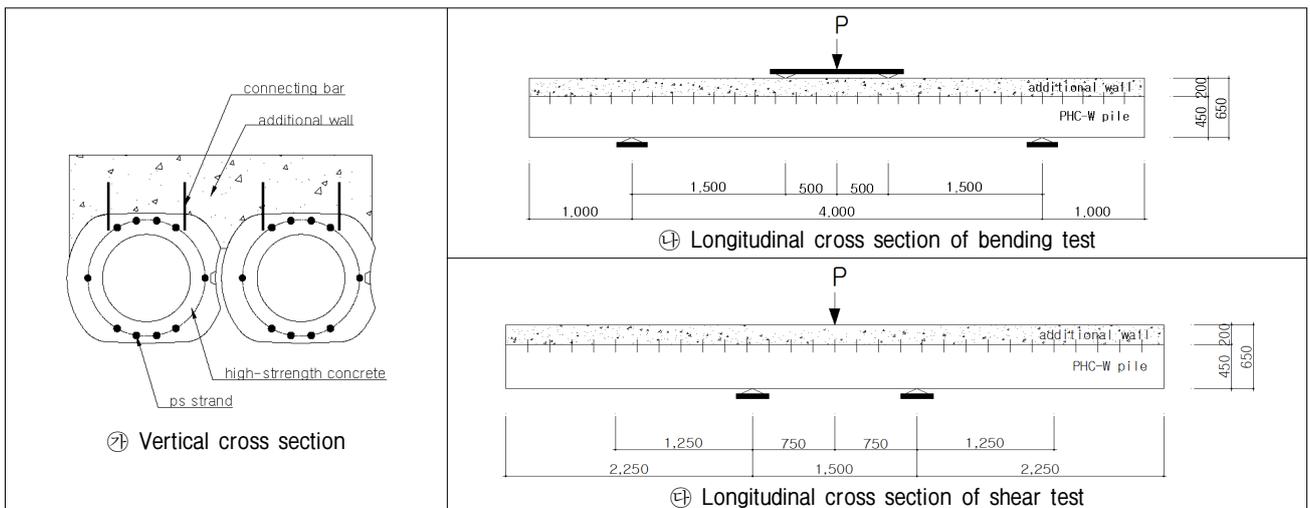
Test items		Bending moment test		Shear test		Purpose
		Times	Specimen number	Times	Specimen number	
Composite additional wall	Condition that additional wall is tensile	3	C-B-4~6	3	C-S-4~6	· Bending and shear strength analysis
	Condition that PHC-W pile is tensile	3	C-B-1~3	3	C-S-1~3	· Assumed case · Unification behavior analysis
Non-composite additional wall	Condition that additional wall is tensile	3	N-B-1~3	3	N-S-1~3	· Bending and shear strength analysis
	Condition that PHC-W pile is tensile	-	-	-	-	· Assumed case · Tests didn't be executed (∴ Separation behavior)



(a) Composite additional wall in the case of additional wall is tensile



(b) Non-composite additional wall



(c) Composite additional wall in the case of PHC-W pile is tensile

Fig. 5. Schematic diagram of bending tests and shear tests

합성 부재이었으므로 KS F 2408(콘크리트 휨 강도 시험 방법)에 따라 휨강도시험을 실시하는 것은 합리적인 방안이 아니라고 판단하였다. 일반 건축물의 지하 1개 층의 층고가 3.0~4.0m인 점을 감안하여 휨강도시험에서 지간길이를 안전측으로 4.0m로 설정하였으며 지간의 중앙에서 재하 하였다. 전단력에 의해 지배되어 수직 전단 균열을 유도할 수 있는 최대 지점 간격은 0.65m로 산정되었으나 실험에 사용한 재하장치에서 조절할 수 있는 최소 지점 간격이 1.5m이었으므로 전단강도시험에서 지점간격을 1.5m로 설정하였다. 이 경우에는 실험에 사용한 보가 상용보 (usual beam)로 거동하게 되었으므로 수직 휨 균열이 먼저 발생한 후 사인장 균열이 발생하게 되어 파괴에 이르게 되었다. 전단강도시험에서는 지간의 중앙에서 재하 하였다.

지점 간격의 중앙에 연직 하중 P를 작용시켜 실험을 진행하였다. 재하 시험기의 용량은 1.5MN이었고 하중

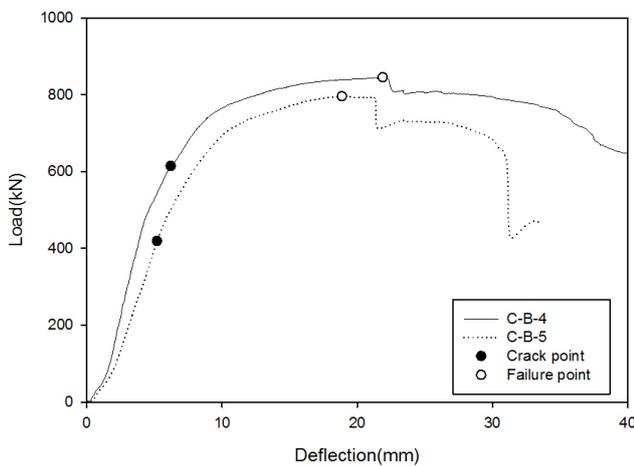
제어는 단조가력방식으로 하였으며, 시험체 변위 측정을 위해 시험체 중앙부, 양 지점, 하중 재하점의 중간 지점에 각각 LVDT를 설치하였다.

PHC-W 흙막이벽체를 이용한 증설벽체의 경우 흙막이 외측에서 수평토압이 작용하게 되었으므로 합성증설벽체 및 비합성증설벽체의 실험 개요도를 각각 Fig. 5(a), Fig. 5(b)에 나타내었다. 가상적인 경우이지만 합성증설벽체의 일체화 거동을 분석하기 위하여 PHC-W 흙막이벽체가 인장측이 되는 경우에 대한 실험도 실시하였으며 그 개요도를 Fig. 5(c)에 나타내었다.

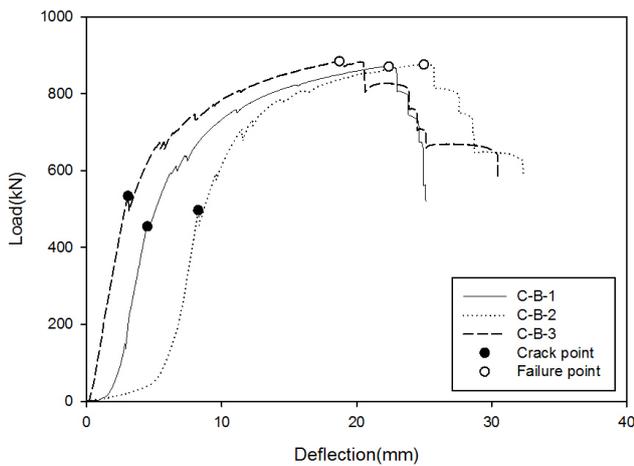
4.3 휨강도 및 전단강도 실험 결과 및 분석

(1) 합성증설벽체

Fig. 6에는 합성증설벽체의 휨강도 실험 시 지점 중앙의 변위와 재하 하중과의 관계를 도시하였다. 여기서, 균열 발생 시점 및 파괴 시점을 각각 표시하였다. Fig.



(a) Condition that additional wall is tensile



(b) Condition that PHC-W pile is tensile

Fig. 6. Test results of Bending Moment of the composite additional wall



(a) Condition that additional wall is tensile (C-B-5)



(b) Condition that PHC-W pile is tensile (C-B-3)

Photo 1. Cracks of composite additional wall during bending test

6(a)에는 증설벽체가 인장측이 되는 경우에 대한 실험 자료를 나타내었으며 가상적인 상황이지만 Fig. 6(b)에는 PHC-W 흠막이벽체가 인장측이 되는 경우의 실험 자료를 나타내었다. 휨강도 실험에서는 증설벽체(또는 PHC-W말뚝)에 균열이 발생할 때의 실험값을 휨균열강도로 설정하였다. 증설벽체(또는 PHC-W 흠막이벽체)에서 관찰된 균열의 대표적인 사진을 Photo 1에 나타내었다.

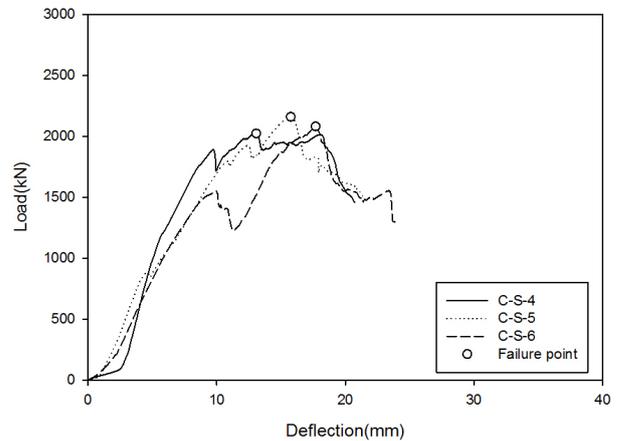
Table 4에는 증설벽체(또는 PHC-W 흠막이벽체)의 외측에 균열이 관찰될 때의 실험에 의한 휨강도값을 나타내었고 여기에 산정공식에 의한 계산치도 함께 나타내었다. 증설벽체가 인장측이 되는 경우 실험에 의한 휨강도의 평균치는 517.1kN·m이었고 산정공식에 의한 휨강도 계산값은 280.0kN·m이었으므로 실험값의 평균치는 계산값보다 1.8배 크게 나타났다. 가상적인 경우이지만 PHC-W 흠막이벽체가 인장측이 되는 경우 실험에 의한 휨강도의 평균치는 495.5kN·m이었고 이론식에 의한 휨강도 계산값은 261.8kN·m이었으므로 실험값의 평균치는 휨강도 계산값보다 1.9배 크게 나타났다.

증설벽체가 실제 지하벽체로 사용되는 상황인 증설벽체가 인장측이 되는 경우와 가상적인 상황인 PHC-W 흠막이벽체가 인장측이 되는 경우의 휨강도 실험값은 유사한 수준으로 나타났으므로 합성증설벽체의 경우 PHC-W 흠막이벽체와 증설벽체가 일체화 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있었다.

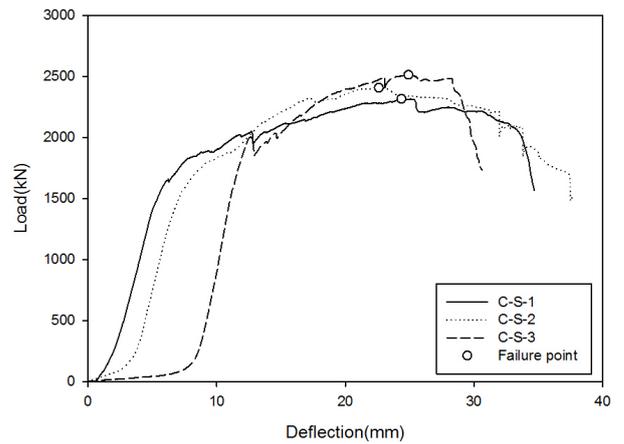
Fig. 7에는 합성증설벽체의 전단강도 실험 시 지점 중앙의 변위와 재하 하중과의 관계를 도시하였다. 여기서, 균열 발생 시점은 확인할 수 없었으며 파괴 발생 시 극한 하중은 확인할 수 있었으므로 그 점을 표시하였다. 극한 하중에 접근해 감에 따라 사인장 균열도 점진적으로 진

행되었다. 전단강도 실험에서는 증설벽체(또는 PHC-W 흠막이벽체)에 파괴가 발생할 때의 실험값을 전단강도로 설정하였다. 증설벽체에서 관찰된 파괴의 대표적인 사진을 Photo 2에 나타내었다.

Table 4에는 증설벽체(또는 PHC-W 흠막이벽체)가



(a) Condition that additional wall is tensile



(b) Condition that PHC-W pile is tensile

Fig. 7. Shear test results of the composite additional wall

Table 4. Summary of test results

Test items	Values	Specimen number	Bending moment strength (kN·m)				Specimen number	Shear strength (kN)			
			Test result (1)		Calculated value (2)	(1)/(2)		Test result (3)		Calculated value (4)	(3)/(4)
			Each	Ave.				Each	Ave.		
Composite additional wall	In the case of the additional wall is tensile	C-B-4	614.7	517.1	280.0	1.8	C-S-4	2,022.7	2,087.6	611.8	3.4
		C-B-5	417.4				C-S-5	2,159.4			
		C-B-6	-				C-S-6	2,080.6			
	In the case of the PHC-W pile is tensile	C-B-1	455.2	495.5	261.8	1.9	C-S-1	2,316.1	2,412.1	611.8	4.0
		C-B-2	497.2				C-S-2	2,406.7			
		C-B-3	534.2				C-S-3	2,513.6			
Non-composite additional wall		N-B-1	568.0	476.0	214.5	2.2	N-S-1	2,042.0	2,136.3	525.0	4.0
		N-B-2	429.1				N-S-2	2,124.2			
		N-B-3	431.0				N-S-3	2,242.6			

파괴될 때의 실험에 의한 전단강도값을 나타내었고 여기에 산정공식에 의한 계산치도 함께 나타내었다. 증설벽체가 인장측이 되는 경우 실험에 의한 전단강도의 평균치는 2,087.6kN·m이었고 산정공식에 의한 전단강도 계산값은 611.8kN·m이었으므로 실험값의 평균치는 산정공식에 의한 계산값보다 3.4배 크게 나타났다. 가상적인 경우이지만 PHC-W 흙막이벽체가 인장측이 되는 경우 실험에 의한 전단강도의 평균치는 2,412.1kN·m이었고 이론식에 의한 전단강도 계산값은 611.8kN·m이었으므로 실험값의 평균치는 산정공식에 의한 계산값보다 3.9배 크게 나타났다.

증설벽체가 실제 지하벽체로 사용되는 상황인 증설벽체가 인장측이 되는 경우와 가상적인 상황인 PHC-W 흙막이벽체가 인장측이 되는 경우의 전단강도 실험값은 유사한 수준으로 나타났으므로 합성증설벽체의 경우 PHC-W 흙막이벽체와 증설벽체가 일체화 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있었다.



(a) Condition that additional wall is tensile (C-S-5)



(b) Condition that PHC-W pile is tensile (C-S-1)

Photo 2. Failures of composite additional wall during shear test

(2) 비합성증설벽체

Fig. 8에는 비합성증설벽체 휨강도 실험 시 지점 중앙의 변위와 재하 하중과의 관계를 도시하였다. 여기서, 균열 발생 시점 및 파괴 시점을 표시하였다. Fig. 8(a)에는 증설벽체가 인장측이 되는 경우에 대한 실험 자료를 나타내었으며 가상적인 상황이지만 Fig. 8(b)에는 PHC-W 흙막이벽체가 인장측이 되는 경우의 실험 자료를 나타내었다. 증설벽체에서 관찰된 균열의 대표적인 사진을 Photo 3에 나타내었다. 휨강도 실험에서는 증설벽체에 균열이 발생할 때의 실험값을 휨균열강도로 설정하였으며 Table 4에 수록하였다. Table 4에는 증설벽체의 외측에 균열이 관찰될 때의 실험에 의한 휨강도값을 나타내었고 여기에 산정공식에 의한 계산치도 함께 나타내었다. 실험에 의한 휨강도의 평균치는 476.0kN·m이었고 산정공식에 의한 휨강도 계산값은 214.5kN·m이었고

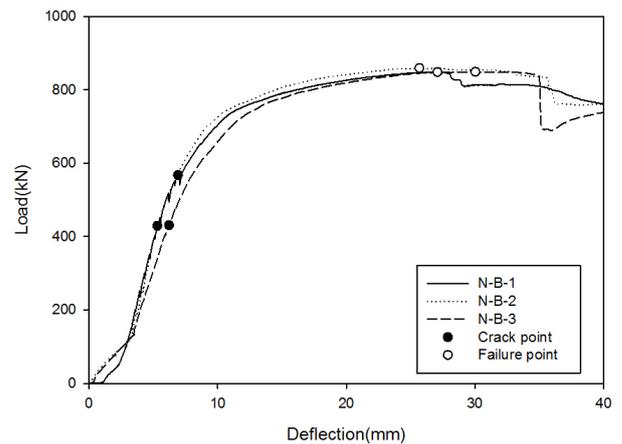


Fig. 8. Test results of bending moment for non-composite additional wall



Photo 3. Cracks of non-composite additional wall during bending test (N-B-3)

으므로 실험값의 평균치는 이론식에 의한 휨강도보다 2.2배 크게 나타났다.

Fig. 9에는 비합성증설벽체 전단강도 실험 시 지점 중앙의 변위와 재하 하중과의 관계를 도시하였다. 여기서, 균열 발생 시점은 확인할 수 없었으며 파괴 발생 시 극한 하중은 확인할 수 있었으므로 그 점을 표시하였다. 극한 하중에 접근해 감에 따라 사인장 균열도 점진적으로 진행되었다. 증설벽체에서 관찰된 파괴의 대표적인 사진을 Photo 4에 나타내었다. 전단강도 실험에서는 증설벽체에 파괴가 발생할 때의 실험값을 전단강도로 설정하였다. Table 4에는 증설벽체의 외측에 파괴가 발생할 때의 실험에 의한 전단강도값을 나타내었고 여기에 산정공식에 의한 계산치도 함께 나타내었다. 실험에 의한 휨강도의 평균값은 2,136.3kN이었고 이론식에 의한 휨강도 계산값은 525.0kN이었으므로 실험값의 평균치는 산정공식에 의한 전단강도 계산값보다 3.2배 크게 나타났다.

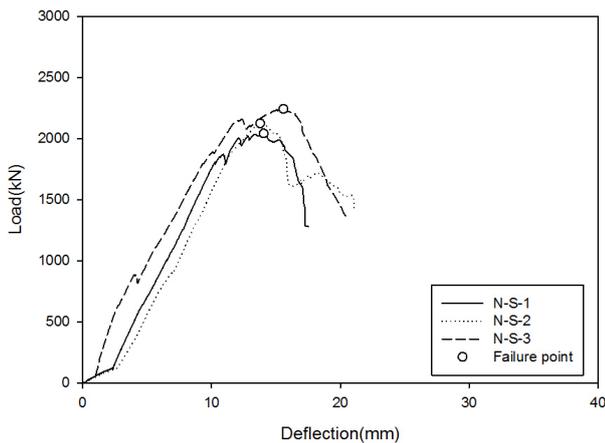


Fig. 9. Shear test results of non-composite additional wall



Photo 4. Failures of non-composite additional wall during shear test (N-S-1)

(3) 요약

Table 4에는 합성증설벽체와 비합성증설벽체에 대한 휨강도실험 결과 및 전단강도실험 결과를 나타내었다. 합성증설벽체와 비합성증설벽체의 휨모멘트 강도 실험값은 유사한 수준으로 나타났으며 전단강도 실험값의 수준도 유사한 수준으로 나타났다. 따라서 합성증설벽체 대신에 시공이 간편하고 비용이 절감될 수 있는 비합성증설벽체를 적용할 수 있다는 것을 확인하였다.

가상적인 경우이지만 합성증설벽체의 PHC-W 흠막이벽체가 인장축이 되는 경우 및 증설벽체가 인장축이 되는 경우 모두 휨강도와 전단강도의 실험값이 유사한 수준으로 나타났으므로 합성증설벽체에서는 PHC-W 흠막이벽체와 증설벽체가 일체화 거동을 유지할 수 있는 수준으로 판단되었다.

균열 발생 시 휨강도 성능 실험값은 산정공식에 의한 계산값보다 1.8~2.2배 정도 크게 나타났다. 파괴 상태에서 전단강도 성능 실험값은 산정공식에 의한 계산값보다 3.4~4.0배 정도 크게 나타났다. 실험값이 KDS 14 20 00(KCSC, 2016)의 극한하중설계법에서 규정하고 있는 산정공식에 의한 계산값의 차이가 나는 것은 균열 발생 시 휨강도 및 파괴 발생 시 전단강도에 적용가능한 안전율 수준 정도인 것으로 분석되었다. 산정공식을 적용하여 휨강도 및 전단강도 산정 시 다음과 같은 한계가 있었다. 실험 재료의 실제 물성치를 고려할 수 없어 재료 물성표에서 제시하는 최소값을 사용할 수밖에 없었으며 실험 대형 모형 증설벽체에 대한 실제 실험조건을 정확하게 반영할 수 없었다. 또한 중립축 근처에 있는 PC 강선 및 철근의 강도를 고려할 수 없었다.

상기의 분석 자료들에 근거하면 실험 대형 모형 증설벽체는 두께 200mm로 제작되었는데, PHC-W 흠막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 경우 동등 지하실 규모의 통상적인 지하벽체보다 두께를 100~200mm 정도 절감할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 제언

PHC-W 흠막이벽체와 합체된 합성증설벽체와 PHC-W 흠막이벽체와 합체되지 않은 비합성증설벽체를 제작하여 휨강도 및 전단강도 실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 합성증설벽체와 비합성증설벽체에서 휨모멘트 강도

실험값 및 전단강도 실험값이 유사한 수준으로 나타났으므로 합성증설벽체 대신에 시공이 간편하고 비용이 절감될 수 있는 비합성증설벽체를 적용할 수 있다는 것을 확인하였다.

- (2) 가상적인 경우이지만 합성증설벽체의 PHC-W 흙막이벽체가 인장측이 되는 경우 및 증설벽체가 인장측이 되는 경우 모두 휨강도와 전단강도의 실험값이 유사한 수준으로 나타났으므로 합성증설벽체에서는 PHC-W 흙막이벽체와 증설벽체가 일체화 거동을 유지할 수 있는 수준으로 판단되었다.
- (3) 비합성증설벽체의 경우 PHC-W 흙막이벽체와 증설벽체가 합체 거동을 하지 않으므로 외력인 토압은 일차적으로 PHC-W 흙막이벽체가 부담하였으며 증설벽체도 함께 부담하였다. 따라서 휨강도 및 전단강도 산정 시 PHC-W 흙막이벽체와 증설벽체에서 각각 산정하여 합산하였다.
- (4) 실대형 모형 증설벽체는 두께 200mm로 제작되었는데, PHC-W 흙막이벽체와 결합된 지하증설벽체의 경우 동등 지하실 규모의 통상적인 지하벽체보다 두께를 100~200mm 정도 절감할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 균열 발생 시 휨강도 성능 실험값은 산정공식에 의한 계산값보다 1.8~2.2배 정도 크게 나타났다. 파괴 상태에서 전단강도 성능 실험값은 산정공식에 의한 계산값보다 3.4~4.0배 정도 크게 나타났다. 실험값이 KDS 14 20 00(KCSC, 2016)의 극한하중설계법에서 규정하고 있는 산정공식에 의한 계산값의 차이가 나는 것은 균열 발생 시 휨강도 및 파괴 발생 시 전단강도에 적용가능한 안전율 수준 정도인 것으로 분석되었다.
- (6) 산정공식을 적용하여 휨강도 및 전단강도 산정 시 다음과 같은 한계가 있었다. 실험 재료의 실제 물성치를 고려할 수 없어 재료 물성표에서 제시하는 최

소값을 사용할 수밖에 없었으며 실대형 모형 증설벽체에 대한 실제 실험조건을 정확하게 반영할 수 없었다. 또한 중립축 근처에 있는 PC강선 및 철근의 강도를 고려할 수 없었다.

- (7) PHC-W 흙막이벽체와 결합된 합성 및 비합성 지하증설벽체의 테스트베드가 구축 중에 있으므로 그 자료들을 분석하여 더욱 향상된 연구 결과를 학술지에 게재할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(16TBIP-C111426-01).

참고문헌 (References)

1. Choi, J. P., Jin, H. M., Kim, C. M., Kim, S. S., and Choi, Y. K. (2017), "A Study on Behavior of PHC-W Retaining Wall Method Based on the Numerical Analysis Results", *Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.2, 2017. 1., pp.2-3, ISSN 1229-2427. (in Korean)
2. Kim, C. M., Kim, S. S., Jeon, B. H., and Choi, Y. K. (2017), "A Study on Performance Improvement of a PHC-W Pile for PHC-W Retaining Wall", *Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.2, 2017. 1., pp.27-34, ISSN 1229-2427. (in Korean)
3. KCSC (2016), KDS 14 20 00. (in Korean) Concrete structure design (Ultimate design method). (in Korean)
4. Musung construction co. Ltd. (2017), Annual performance plan, Korea Agency for infrastructure Technology Advancement, pp.19-22. (in Korean)
5. Musung construction co. Ltd & Hill Egnrg. Corp. (2018), Institute For Research & Industry Cooperation of KSU (2018), Report on Structural Design and Performance Test of PHC-W Pile and Additional Wall, 2018. 4., p.3. (in Korean)

Received : May 29th, 2018

Revised : December 1st, 2018

Accepted : December 4th, 2018