

PHC-W 흠막이용 PHC-W말뚝의 성능개선에 관한 연구

A Study on Performance Improvement of a PHC-W Pile for PHC-W Retaining Wall

김 채 민¹ Kim, Chae Min 김 성 수² Kim, Sung Su
전 병 한³ Jeon, Byeong Han 최 용 규⁴ Choi, Yongkyu

Abstract

Various earth retaining wall methods were used on the domestic construction sites and a cast in place pile (C.I.P) method was mostly applied at deep excavation. Because of a lot of shortcomings in the C.I.P method, a new method using PHC-W earth retaining wall was developed. The earth retaining wall method using PHC-W piles has a lot of advantages including that it is safer than other earth retaining wall methods due to uniform quality and high rigidity. PHC-W was designed to effectively resist lateral earth pressure by alternating cross section of PHC pile. And increment of bending moment and shear strength were verified through KS F 4306 tests, and were increased by 42% and 98% more than KS standards.

요 지

국내 건설 현장에서는 다양한 흠막이 공법이 적용되고 있으며 깊은 지하굴착에는 연속주열식공법(C.I.P)이 많이 적용되고 있다. 그러나 여러 단점들이 있어 이를 보완하기 위하여 PHC 말뚝을 이용한 흠막이 공법이 개발되었다. PHC 말뚝을 이용한 흠막이 공법은 품질이 균질하고 강성이 우수하여 안정성의 확보에 유리한 장점이 있다. PHC-W 말뚝은 PHC 말뚝의 단면을 변경한 제품으로, 수평 토압에 저항하기 위한 최적 설계를 통해 제작되었다. 그리고 KS F 4306 시험을 통하여 휨 모멘트 및 전단강도의 증가효과를 검증하였으며 휨 모멘트와 전단강도는 KS 기준보다 약 42%, 98% 증가되었다.

Keywords : Cast-in Place Pile method, PHC-W pile, PHC-W earth retaining wall, Bending moment, Shear strength

1. 서 론

국내건설 시공현장에는 다양한 흠막이 공법이 적용되고 있다. 깊은 지하굴착의 경우 일반적으로 연속주열 말뚝 공법(C.I.P, Cast-in Place Pile method)을 많이 사용

한다. C.I.P 공법은 지반 굴착 후 조립철근 또는 강재를 반입하여 현장에서 콘크리트 말뚝을 타설하는 공법이다. C.I.P 공법은 자갈 및 암반지반을 제외한 대부분의 지반에 적용이 가능하며 장비가 소형이므로 협소한 장소에서도 시공이 가능하고, 비교적 저진동·저소음 공법

1 정희원, 경성대학교 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environment Engrg., Kyungsoong Univ.)

2 정희원, 무성토건(주) 전무이사 (Member, Senior Managing Director, Musong Construction Industrial Co. Ltd.)

3 정희원, 경성대학교 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environment Engrg., Kyungsoong Univ.)

4 정희원, 경성대학교 공과대학 건설환경도시공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban, Environment Engrg., Kyungsoong Univ., Tel: +82-51-663-4753, Fax: +82-51-621-0729, ykchoi@ks.ac.kr, corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

으로 많은 지하구조물 시공현장에서 사용하고 있다(Oh and Cho, 2004). 강재 매물로 공사비가 고가이고, 현장 타설말뚝이므로 균질한 품질확보가 어렵다(Choi, 2014) 는 단점을 보완하기 위하여 PHC 말뚝(Pretensioned spun High strength Concrete Pile)를 이용한 흠막이 공법이 개발되었다. PHC 말뚝을 이용한 흠막이 벽체는 벽체 강성이 우수하여 안정성 확보에 유리하고 기성제품 사용으로 균질한 품질 확보가 가능하며 H형강을 사용하지 않아 경제적이다. 기존 PHC 흠막이 공법의 경우 지하수가 존재하는 지반에서는 별도의 차수공법을 사용하여야 하고 원형 형상으로 말뚝의 연직도 확보 및 겹침시공에서 불리하다. PHC-W(Pretensioned spun High strength Concrete-Wall) 흠막이 공법은 PHC 말뚝을 이용한 흠막이 공법의 장점을 최대한 이용할 수 있어 강성은 높고, 별도의 차수공법을 적용하지 않아 경제적이고, 단면의 개선을 통하여 겹침시공이 가능하여 연직도를 유지하기에 유리하다. 이 연구에서는 PHC-W 흠막이 공법에 필요한 PHC-W 흠막이용 말뚝의 성능 향상에 관한 연

구를 수행하였다.

2. PHC-W 흠막이용 PHC-W 말뚝

2.1 PHC-W 흠막이 벽체 단면의 개선

PHC 말뚝은 강성이 크고 공장에서 제작하여 품질이 균질하므로 이를 이용한 흠막이 공법은 다양하게 개발되었다(Han, 2006). 그러나 원형 PHC말뚝을 사용하였으므로 연속시공시 연직도를 유지하기 어렵고, 지하수가 존재하는 지반에서는 별도의 차수공법이 필요하였다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 PHC 말뚝의 형상을 Fig. 1과 같이 개선하였다. 연속시공이 할 수 있도록 오목부와 볼록부를 두어 겹침시공이 가능하게 하였으며 연직도 확보 및 지보공 설치에 유리하게 하였고 겹침시공이 가능할 수 있게 하였다(Choi, 2014). 그리고 PHC 말뚝을 영구벽체로 사용할 경우 기존에 사용하는 공법은 흠막이 공사와 지하외벽 공사를 서로 분리하여 시공

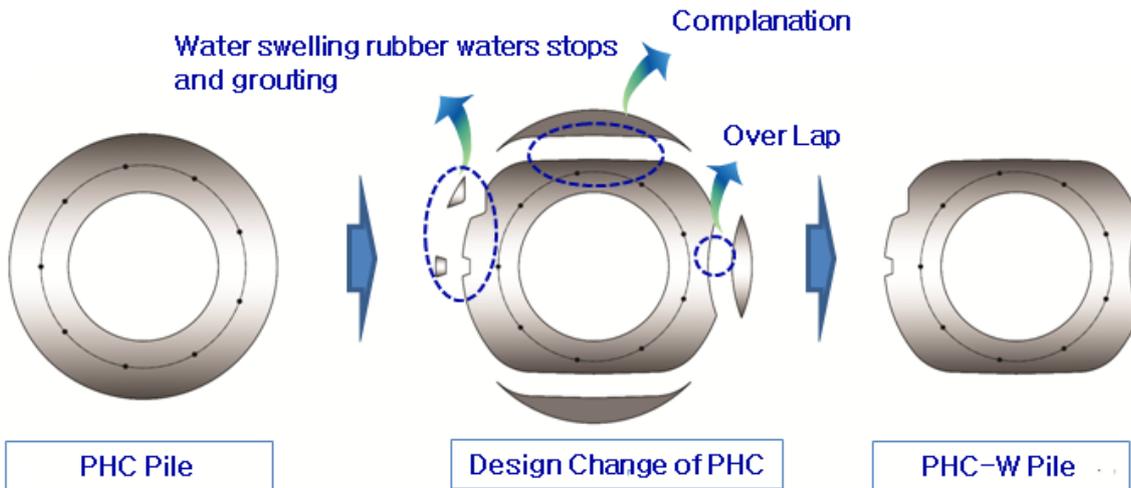


Fig. 1. Improved section of PHC pile

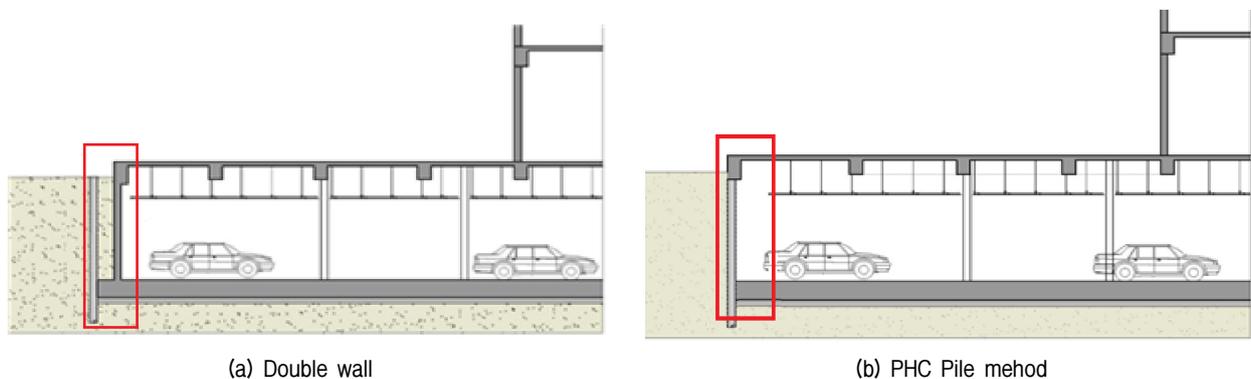


Fig. 2. Comparison With construction design of underground parking lot (Ryu, 2015)

하므로 시공성과 경제성이 불리하고 두 번의 공사로 인해 공기가 지연되며 흠막이와 지하외벽이 각각의 공간을 차지하므로 공간 활용면에서도 손실이 발생한다(Fig. 2)(Ryu, 2015). PHC-W 말뚝은 시공과 공간의 측면에서 효율성을 제고하기 위하여 PHC 말뚝의 단면을 평면화하였다.

2.2 PHC-W 흠막이 공법의 차수

PHC-W 흠막이 공법에서는 별도의 차수공법이 필요하지 않게 되는데 지수재를 설치할 수 있도록 PHC-W 말뚝의 단면 형상을 개선하였으며 PHC-W 말뚝의 흠에 팽창성 고무지수재를 부착하여 지하수들의 유동을 방지시킬 수 있게 하였다. 즉 팽창성 고무지수재는 물과 접촉하여 5배 이상 팽창하는 제품으로 지하수에 의해 팽창성 고무지수재가 팽창하여 벽체와 벽체 사이의 공간에서 지하수 유동을 방지하도록 하였다. 팽창성 고무지수재의 사용으로 별도의 차수공법이 필요하지 않음

므로 경제적이다. 팽창성 고무지수재의 품질 시험은 KS M 6793을 기준으로 시험하며, KS M ISO 188의 노화 촉진 시험을 통하여 인장 강도 변화율, 신장률 변화율 정도 변화에 대하여 시험하고 KS 기준을 통과한 제품을 사용하여 지하수유출을 방지하도록 하였다.

3. PHC-W 흠막이 용 PHC-W 말뚝의 성능 개선

PHC-W 말뚝의 벽체로서의 성능을 향상시키기 위하여 수치해석 결과를 이용하여 강선 배치를 최적화하였으며 그 결과에 따라, PHC-W 말뚝의 강선을 재배치하여 KS F 4306(Korea Standards Association, 2014)에 따라 휨강도 및 전단강도 시험을 실시하였다(Choi, 2015).

3.1 수치해석 결과를 이용한 강선배치의 최적화

PHC-W 말뚝의 PC강봉 재배치를 위하여 MIDAS사의 구조해석프로그램인 MIDAS FEA를 이용하여 수치

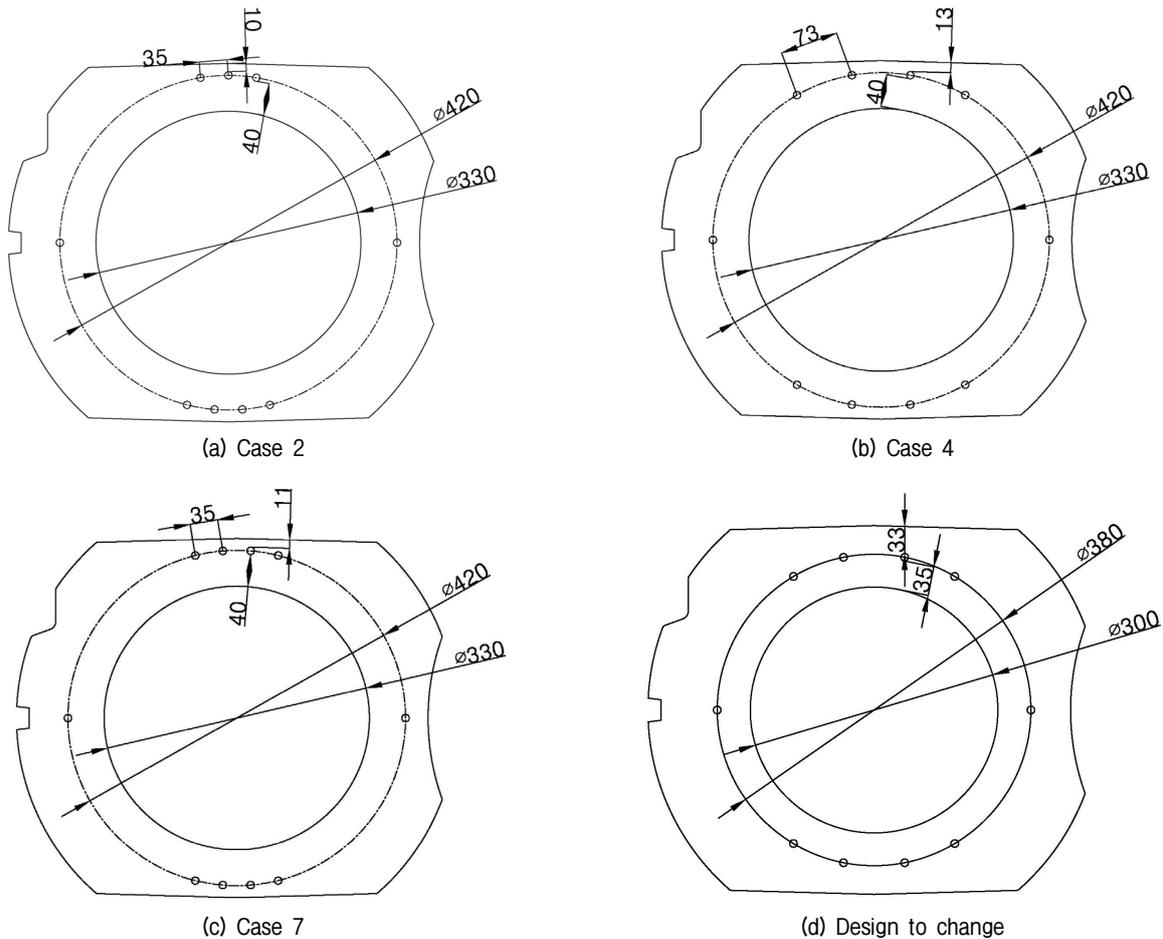


Fig. 3. Cross section of each case

Table 1. Input data of numerical analysis

	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Compression strength (MPa)	Unit weight (kN/m ³)	Poisson's ratio
Concrete	27,389.0	5.5	80.0	25.0	0.167
Steel wire	196,133.0	930.0 ~ 1200.0	-	78.5	0.300

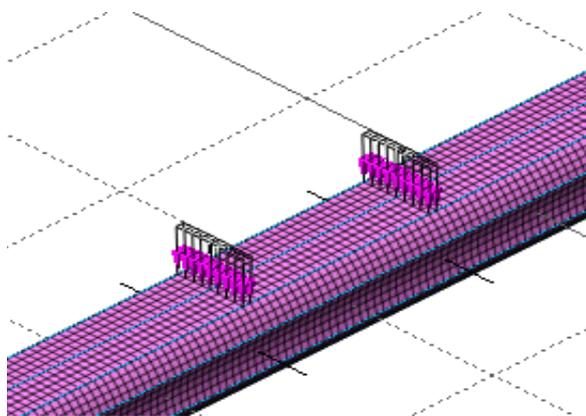
해석을 실시하였다. PHC-W 말뚝에는 수평방향으로 힘이 작용하는 특성을 이용하여 굴착측과 지반측에 강선을 추가적으로 배치하고 수평력이 작게 작용되는 부분에는 강선의 수를 줄여서 해석을 실시하였다. 콘크리트 및 강선의 물성치는 Table 1의 값을 이용하였으며, 강선의 수와 간격은 Fig. 3과 같이 배치하였다.

3.2 수치해석 결과

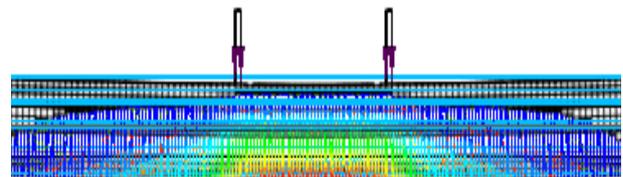
PHC-W 말뚝의 수치해석을 위하여 Fig. 4(a)와 같이 모델링을 실시하였고 KS F 4306의 휨 강도 측정 방법의 절차를 모사할 수 있도록 해석하였다. 이때 Fig. 4(b)와 같이 하부(굴착측)에 많은 응력이 발생하여 파괴되는 양상이 나타났다. 수치해석에서는 여러 사례 Table

2에 대하여 해석 하였다. 즉 PC 강선의 개수, 지반 측 강선의 배치 개수, 굴착 측 강선의 배치 개수, 좌·우측 강선의 배치 개수, 강선의 배치 간격을 달리하여 7개의 해석 사례를 설정 하였다.

파괴 휨모멘트의 경우 사례 2에서 235kN·m, 굴착측에 강선이 적게 배치된 사례 1에서 211kN·m로 나타났으므로 사례 2가 높은 휨 모멘트를 가진다는 것을 알 수 있었다. 그리고 사례 2~6은 PC 강선의 수와 분배양상은 동일하고 배치 간격을 35~130mm로 조정할 경우 인데 강선간의 간격이 좁을수록 높은 휨강성이 나타났다. 강선의 수가 각각 9개와 10개인 사례 2와 사례 7에서는 휨 모멘트가 각각 235kN·m, 236kN·m로 나타났으므로 휨 강도는 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 각 사례의 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.



(a) Modeling of PHC-W pile



(b) Analysis result of PHC-W pile

Fig. 4. An example of numerical analysis modeling and analysis results of PHC-W pile

Table 2. Steel wires placing of each case

	Total (EA)	Bottom (EA)	Top (EA)	Left (EA)	Right (EA)	Space of steel wires (mm)
Case 1	9	3	4	1	1	35
Case 2	9	4	3	1	1	35
Case 3	9	4	3	1	1	65
Case 4	9	4	3	1	1	73
Case 5	9	4	3	1	1	93
Case 6	9	4	3	1	1	130
Case 7	10	4	4	1	1	35

3.3 PHC-W 말뚝 생산

PHC-W 흠막이 벽체에서는 굴착측과 지반측 모두에서 하중이 작용하기 때문에 강선의 수를 짝수로 하고 굴

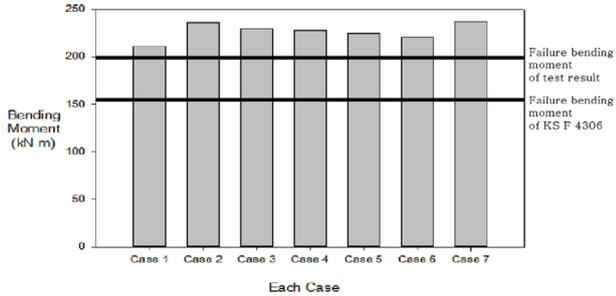


Fig. 5. Crack bending moment results of each case



Fig. 6. Produced PHC-W piles

착측과 지반측에 같은 수의 강선을 배치하는 것으로 결정하였다. 그리고 공장에서의 생산성을 고려하여 73mm로 강선의 간격을 결정하였다. 시험을 위하여 생산된 PHC-W 말뚝을 Fig. 6에 나타내었다. 시험을 위하여 생산된 PHC-W 말뚝은 콘크리트구조설계기준(2012)에서 제시하는 프리캐스트콘크리트의 흠에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출되는 콘크리트 D35 이하의 철근, 지름 40mm 이하인 긴장재 및 지름 16mm 이하의 철선의 최소 피복 두께 20mm로 제시되어 있으며(Korea Concrete Institute, 2012) 현재의 시험 말뚝은 이를 만족하지 못하는 것으로 검토되었다. 하지만 시공을 위한 생산되는 제품은 Fig. 3(d)와 같이 최소 피복 두께를 만족하게 생산할 계획이다.

3.4 PHC-W 말뚝의 휨 강도 및 전단강도 시험 결과 분석

PHC-W 말뚝의 휨 강도 및 전단강도 시험은 KS F 4306 ‘프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝’의 시험법을 참고하여 실시되었으며 그 표준내용을 요약하여 Fig. 7 및 8에 나타내었다. 또한 각 시험의 기준값을 Table 3 및 4에 나타내었으며 여기서 휨 강도 및 전단강도의

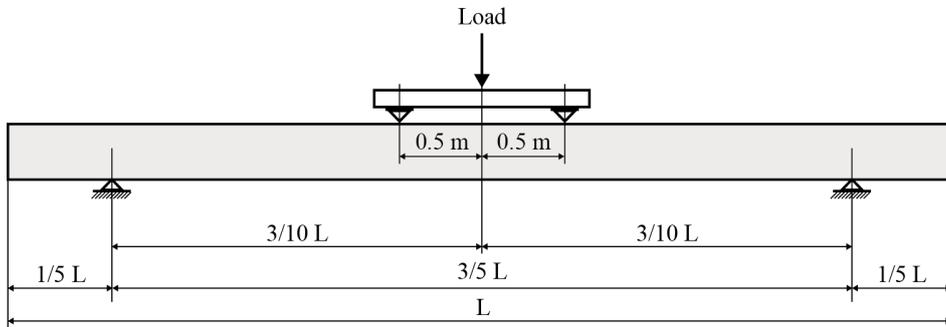


Fig. 7. Bending moment test of KS F 4306

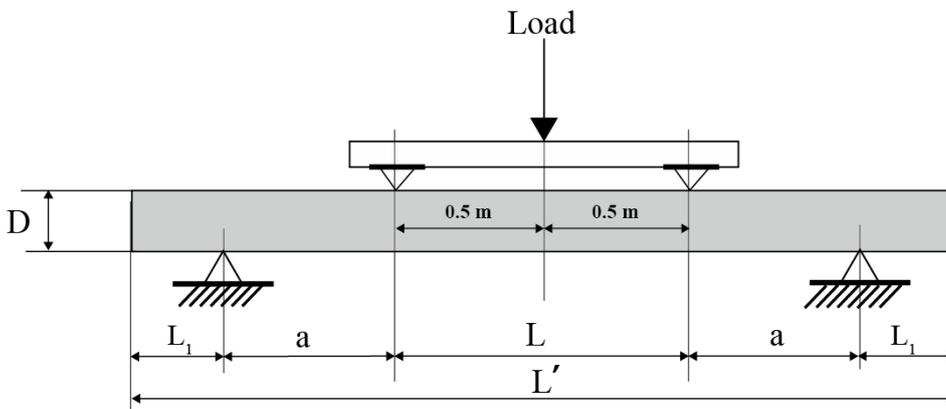


Fig. 8. Shear strength test of KS F 4306

기준 값은 KS 기준에 제시된 PHC 500 A종의 최소기준 값을 참고하였다. KS 기준에 제시된 A종은 9개의 강선을 사용하므로 이 연구에서 선정된 PHC-W 말뚝의 10개 강선을 사용하는 경우와 동일한 시험이라고 볼 수 없다. 그러나 수치해석 사례 2와 7의 결과에서 동일한 수준의 휨 강도 값을 나타내었으므로 10개의 강선을 사용하더라도 휨강도가 변하지 않는 것으로 가정하였다.

Table 3. Minimum reference values quoted in KS 4306

(a) Bending moment

External diameter (mm)	Type	Cracking bending moment kN·m	Failure bending moment kN·m
500	A	103.0	155.0
	B	147.2	264.9
	C	166.8	333.5

(b) Shear strength

Type	External diameter (mm)	Shear strength (kN)
A	500	228.6
B	500	288.4
C	500	313.9

Table 4. Test result of PHC-W about KS F 4306

Cracking bending moment kN·m	Failure bending moment kN·m	Shear strength (kN)
146.3	199.8	452.9



Fig. 9. Bending moment test of PHC-W pile



Fig. 10. Shear strength test of PHC-W pile

휨 강도 시험은 Fig. 9와 같이 진행하였으며 여기서 공인시험기관의 시험 장치의 기능이 미흡하여 하중 - 변위 관계 그래프를 측정할 수 없었으며 균열 및 파괴 단계를 육안으로 파악하여 그 때의 하중만을 확인할 수 있었다. PHC-W 말뚝의 균열 휨 모멘트는 146.3kN·m로 나타났으며 기준값 103.0kN·m 보다 약 42% 증가되었다. 그리고 파괴 휨 모멘트는 199.8 kN·m로 나타났으며 기준값 155.0kN·m 보다 약 29% 증가되었다.

전단강도 시험은 Fig. 10과 같이 진행하였으며 여기서 공인시험기관의 시험 장치의 기능이 미흡하여 하중 - 변위 관계 그래프를 측정할 수 없었으며 전단 시의 하중만을 확인할 수 있었다. PHC-W 말뚝의 전단강도가 KS 452.9kN으로 나타났으며 기준값 228.0kN 보다 약 98% 증가되었다. 각 시험 결과를 Table 4에 정리하였다.

3.5 PHC-W 말뚝 연직 이음부의 휨 강도 시험 결과 분석

PHC-W 흙막이 벽체에서는 지하구조물의 깊이에 따라 2개 이상의 PHC-W 말뚝을 이음하여 시공해야 한다. KS F 4306에서는 연직 이음부의 휨 강도도 PHC-W 말뚝체에 준하여 시험하도록 규정하였다.

PHC-W 말뚝은 볼트 이음과 용접 이음으로 연결시킬 수 있다. 볼트이음과 용접이음 한 PHC-W 말뚝의 연결 부에 대하여 각각 휨강도 시험을 실시했는데 여기서 볼트 이음 시험을 수행한 공인시험기관의 시험 장치의 기능이 미흡하여 하중 - 변위 관계 그래프를 측정할 수 없었으며 용접이음을 수행한 공인시험기관에서는 하중 - 변위의 측정이 가능하였으므로 Fig. 11에 용접이음에

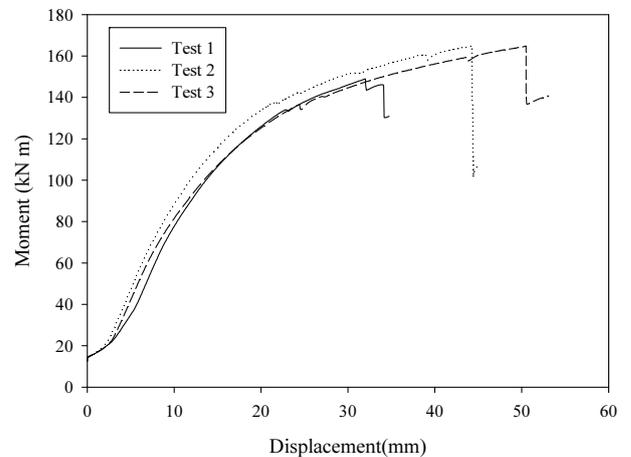


Fig. 11. Moment-Displacement graph

서의 휨 강도에 따른 변위 그래프는 나타내었다. 볼트이음 시험에서는 각각 132.2, 158.3kN·m의 결과를 얻었으며 용접이음 시험에서는 각각 148.9, 164.8, 164.7kN·m이었다. 따라서 볼트이음보다 용접이음이 이음부 휨 강도가 크다는 것을 알 수 있었다.

볼트이음에서는 볼트와 PHC-W 말뚝체와의 결속부분이 파괴되는 것으로 나타났으며 용접이음에서는 용접부의 파괴가 아닌 PHC-W 말뚝체의 균열에 의하여 파괴되는 것으로 나타났다.

PHC-W 말뚝의 휨 강도 보다 이음부의 휨 강도가 작다는 것을 알 수 있었다. 그러나 PHC-W 흙막이 벽체의 해석시 PHC-W 말뚝의 입력치로 PHC-W 말뚝의 균열 휨 모멘트 값을 사용하므로 설계시 문제가 되지 않는 것으로 판단되었다.

4. 수치해석 결과를 이용한 전단력과 휨 모멘트의 비교

PHC-W 말뚝을 이용한 흙막이 벽체는 현재 개발 단계의 제품으로 시공실적이 없어 현장 계측을 을 통하여 얻어진 전단력과 휨 모멘트 값과의 직접 비교는 실시하지 못하였다. 그래서 현 개발단계에서 현장의 지반조건을 가정하여 수행한 PHC-W 흙막이 벽체에 대한 수치해석 결과를 이용하여 PHC-W 말뚝의 전단력과 휨 모멘트의 실험값을 비교하는 것으로 하였다.

PHC-W 흙막이벽체의 수치해석에서는 MIDAS GEOX를 사용하였으며 탄소성보법으로 해석 하였다. 지하수위는 GL(-)3.0m로 적용하였고 배면하중으로는 도로하중(13kPa)을 적용하였으며, 보일링과 히빙에 대한 근입깊

이는 고려하지 않았다. N치가 30이상의 비교적 양호한 지반을 대상으로 분석하였으며 분석에서 사용된 PHC-W 말뚝의 물성치 및 지반특성치는 Table 5, 6에 나타내었다.

해석 결과 약 17.0m가 굴착 가능한 것으로 나타났으며 최대 수평 변위는 -1.79cm/m, 최대 전단력은 -278kN/m, 최대 휨 모멘트는 255kN·m/m로 나타났으며 Fig. 11에 수치해석 결과를 나타내었다. 2D의 수치해석에서는 1m의 설치간격으로 해석되었고 PHC-W말뚝은 0.53m 간격으로 설치되었으므로 수치해석 결과는 각각 최대 수평 변위는 0.95cm/m, 최대 전단력은 -147kN/m, 최대 휨 모멘트는 135kN·m/m로 표현할 수 있었다.

PHC-W 말뚝의 시험결과가 수치해석에서 나타난 최대 전단력, 최대 휨 모멘트값을 상회하는 것으로 나타났으므로 안정성은 확보되는 것을 알 수 있었다. 최대 수평 변위는 국내·외 여러 학자들의 연구를 통하여(0.2~1.0)%H(여기서, H = 최대 굴착 깊이)로 제안하고 있으며(Jin, 2011), 17m 굴착 시 최소 36mm의 수평 변위를 허용할 수 있었으므로 수평 변위 값은 만족하는 것으로 파악되었다(Fig. 12).

5. 결론 및 제언

기존 PHC 말뚝을 이용한 흙막이 벽체의 시공보다 개선된 PHC-W 흙막이공법을 개발하였다. 이 연구에서는 이 공법에 사용되는 PHC-W 말뚝에 대한 성능 개선을 확인 할 수 있는 시험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수치해석 결과를 통하여 PHC-W 말뚝의 강선 배치

Table 5. Specifications of PHC-W pile

Outer diameter (mm)	Concrete area A_c (m ²)	Concrete geometrical moment of inertial I_c (m ⁴)	Section modulus Z_e (m ³)	Specific weight (kN/m)	Modulus of elasticity (kN/m ²)
530	0.135	0.00262	0.01112	3.51	35,000,000

Table 6. Soil input parameters

Type	Total unit weight	Soil parameter		Coefficient of horizontal subgrade reaction
	γ_t (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	K_h (kN/m ³)
GW	18	0	30	21,000
GW	18	0	30	23,000
GC	19	10	35	29,000
SM	19	15	35	30,000
GC	19	15	35	33,000

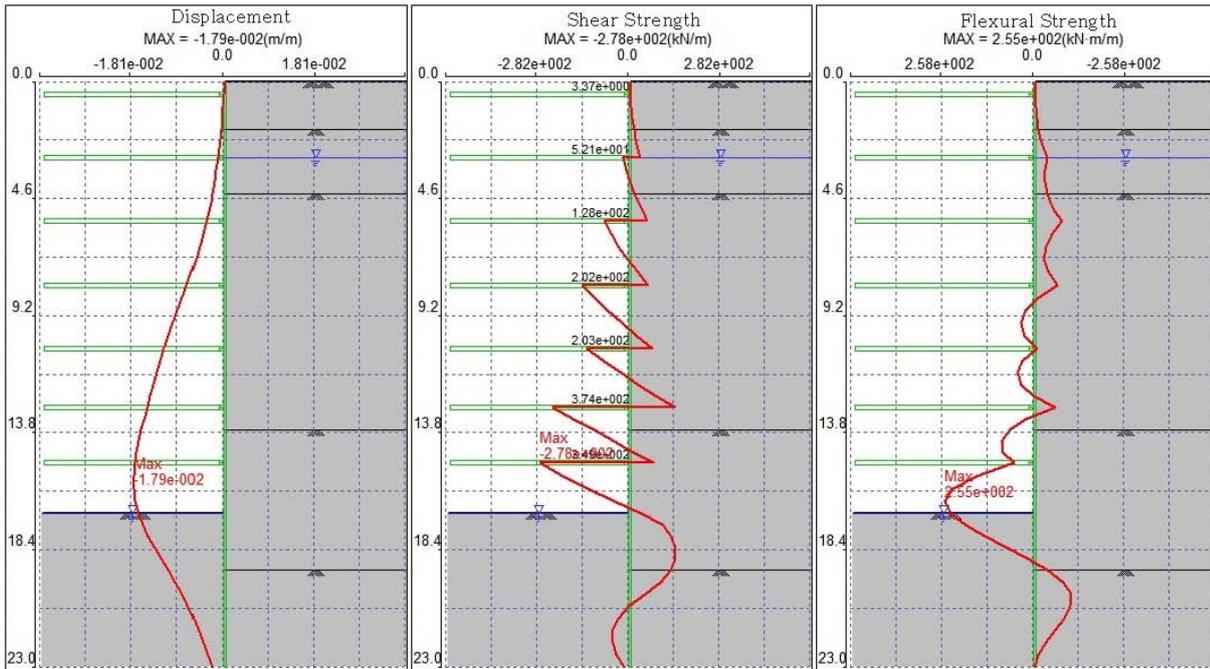


Fig. 12. Distribution of horizontal displacement, shear strength, and flexural strength at maximum excavation depth

를 최적화 하였으며 강선의 간격이 좁고 굴착측에 강선이 많이 배치될수록 휨 강도가 크다는 결과를 얻었다. 수치해석 결과와 생산성을 고려하여 지반 층과 굴착측에 각각 4개 썸의 강선을 배치하고 볼록 부와 오목부에 1개씩을 배치하였다.

- (2) PHC-W 말뚝의 휨 강도시험과 전단강도시험 결과를 기존 KS에서 제시하는 PHC 500 A종 말뚝의 최소기준값과 비교하였다. 균열 휨모멘트 시험값은 146.3kN·m로 나타났으며 KS에서 제시하는 최소기준값 보다 약 42%로 증가되었다. 파괴 휨 모멘트 시험값은 199.8kN·m로 나타났으며 KS에서 제시하는 최소기준값 보다 약 29% 증가되었다. 전단강도 시험값은 452.9kN로 나타났으며 KS에서 제시하고 있는 최소 기준값 보다 약 98% 증가되었다.
- (3) PHC-W 말뚝의 연결 이음부는 볼트이음과 용접이음에 대하여 시험하였으며 볼트이음보다 용접이음에서 휨 강도가 크게 나타났으며 용접이음이 약 9.8% 큰 것으로 나타났다.
- (4) PHC-W 흙막이 벽체의 연구 및 실용화를 위하여 말뚝의 하중에 따른 변위를 측정하여 말뚝의 파괴시의 거동을 파악하고, 말뚝사이의 차수성능 평가시험, 시험시공 및 계측을 통한 PHC-W 흙막이 벽체의 거동분석에 대한 연구가 추가로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

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

참고문헌 (References)

1. Choi, J. P. (2014), Study on the economic analysis of retaining PHC-W method, Pusan National Univ. Master's Thesis, pp.6-25.
2. Choi, Y. K. (2015), Industrialization and quality upgradability of PHC-W earth retaining wall method, pp.20-22.
3. Han, J. H. (2006), Case study on application of PHC pile to earth retaining and retention wall, Journal of the Korea Geosynthetics Society, Vol.5, No.3, pp.37-44.
4. Jin, H. M. (2011), Analysis of characteristics behavior of beaced excavation in the Deagu Region, Keimyung Univ. Master's Thesis, p.9.
5. Korea Concrete Institute (2012), KIC concrete design code, Korea Concrete Institute, p.87.
6. Korea Standards Association (2014), Pretensioned spun high strength concrete piles.
7. Oh, J. H, Cho, C. W. (2004), Retaining engineering, Goomi bookstore, pp.32-33.
8. Ryu, S. H. (2015), Permanent basement wall convergence method using a PHC pile, Journal of the Korea Convergence Society, Vol.6, No.6, pp.163-169.

Received : December 13th, 2016

Revised : January 4th, 2017

Accepted : January 31st, 2017