

옹벽겸용 흙막이벽으로 PHC말뚝의 적용 사례 연구

Case Study on Application of PHC Pile to Earth Retaining and Retention Wall

한 중 근^{1*} Han, Jung-Geun

홍 기 권² Hong, Ki-Kwon

어 윤 원³ Eo, Yun-Won

김 상 귀⁴ Kim, Sang-Kwi

ABSTRACT

The construction of earth retaining wall and structure which get environmental element have to applying at the same time, then construction period and construction cost increase. These system which is presented to overcome shortcoming and have function of earth retaining wall and retention wall at the same time. However, because existing method has limit excavation depth, the advanced design pattern more than existing method, rows of pile was applied. The workability and stability of applied design method are evaluated through analyze of construction case. The results confirmed that application design method can solve displacement of pile and limit excavation depth in existing earth retaining wall.

요 지

지반굴착에 의한 일반적인 흙막이공과 친환경성을 만족시키기 위한 조경 및 보강옹벽 등의 시공을 동시에 적용하게 되면 시공기간이 증가하고, 이에 따른 비용도 커지게 된다. 이러한 단점을 극복하여 흙막이벽과 옹벽구조물의 기능을 동시에 가지는 옹벽겸용 흙막이벽 공법이 제시된 바 있다. 하지만 기존에 제시된 공법은 굴착깊이에 대한 한계성을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 기존 공법을 응용한 설계패턴을 제시하였고, 시공사례를 통하여 응용설계법에 대한 시공성 및 안정성을 평가하였다. 그 결과, 배면의 여유공간이 부족한 현장의 경우 일반적인 흙막이벽이 갖는 말뚝의 변위 및 굴착한계깊이가 다소 해결될 수 있는 공법으로서의 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

Keywords : Earth retaining wall and retention wall, Limit excavation depth, PHC, Workability

1. 서 론

최근 국내에서는 지반굴착에 따른 흙막이공사와 옹벽공사가 급격히 증가함으로써 건설현장에서의 지반굴착시 다양한 흙막이공법들이 사용되고 있다. 하지만 도심지의 굴착공사는 주택, 도로 및 빌딩 등이 인접되어 있어 굴착배면의 여유공간이 부족하여 공사시 상당한 어려움이 따른다. 이러한 경우는 산악지에서의 도로·택지개발공사 등에서도 마찬가지이다. 따라서 지반굴착시 굴착배면의 지

반 및 각종 구조물의 안정성을 유지하기 위한 흙막이 공법으로 지중연속벽 및 각종 주열식(CIP) 공법과 같은 현장타설공법이 적용되고 있다. 이와 같은 현장타설공법은 대부분이 기초공으로 포함되지만 흙막이공이 제거될 경우에는 강말뚝을 이용한 가설흙막이공이 많이 사용되고 있다(홍원표 외, 1998). 이는 강말뚝을 제거 후 구조물배면에 뒤채움에 의한 안정성 유지방법과 가설흙막이공 제거를 위해 사전옹벽구조물을 설치하여 안정성을 유지하는 방법으로 구분될 수 있다. 하지만 최근에는 친환경성을 바탕으로 하

1* 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 조교수 (Member, Assist. Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ., E-mail: jghan@cau.ac.kr)

2 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ.)

3 비회원, 건일엔지니어링 사원 (None Member, Kunil Engineering)

4 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ.)

는 조정공사 및 보강옹벽들이 적용되고 있는 추세여서 앞서 언급한 여러 가지 공법들과 동시에 시공할 경우 시공기간이 장기화되고, 이에 따른 경제적 손실이 크다고 할 수 있다. 또한 강재의 수요가 증가함으로써 시공자재도 함께 증가하여 공사비용의 부담도 커지고 있는 실정이다(최용규, 2004).

국내 건설현장에서 많이 사용되고 있는 재료인 시멘트는 국내에 그 매장량이 풍부하여 재료수급과 더불어 콘크리트말뚝의 생산이 비교적 용이하다. 하지만 콘크리트말뚝은 재료적 특성에 의해 연직력 보강에 주로 사용되고 있으며, 휨저항을 위한 사용은 극히 드물다. 그러나 철근을 이용한 철근콘크리트의 경우는 휨에 있어서 상당한 저항력을 발휘할 수 있기 때문에 철근콘크리트옹벽과 같은 구조물로서 빈번히 사용되고 있다. 그리고 이러한 특성을 이용하여 굴착깊이가 비교적 깊지 않은(4~5m) 현장에서 기성콘크리트말뚝인 PHC말뚝을 시공하고 추가적으로 보조공을 이용하여 흠막이벽 뿐만 아니라 옹벽구조물로서의 기능을 발휘할 수 있는 공법이 제시되었다(한중근 외, 2005). 그러나 기존에 제시된 공법은 굴착깊이가 보다 깊어지는

경우, PHC말뚝의 횡압력이 증가하게 되고 이때 말뚝균열 등의 안정성문제가 대두되게 된다.

따라서 본 연구에서는 경기도 OO지구 신축공사현장에 기존에 제시된 공법을 응용·적용한 시공사례를 통하여 적용공법의 시공성 및 안정성을 평가해보고자 한다.

2. 옹벽겸용 흠막이벽 공법

2.1 공법의 개요

PHC말뚝을 이용한 옹벽겸용 흠막이벽은 시공 목적 및 지지방식 유무에 따라 각각 두가지 유형으로 나눌 수 있는데, 먼저 시공 목적에 따른 유형은 그 목적이 지하구조물 설치일 경우의 흠막이공과 옹벽설치를 목적으로 하는 경우의 옹벽겸용 흠막이벽으로 구분될 수 있다. 이와 같은 경우 흠막이벽의 안정성은 흠막이공에서 확보하게 되고 옹벽겸용 흠막이벽은 흠막이공의 시공상황에 따라 치장옹벽이나 조정블록 등으로 마감처리를 하여 옹벽으로 사용하게 되는데 옹벽겸용 흠막이벽의 마감방식에 따른 단면

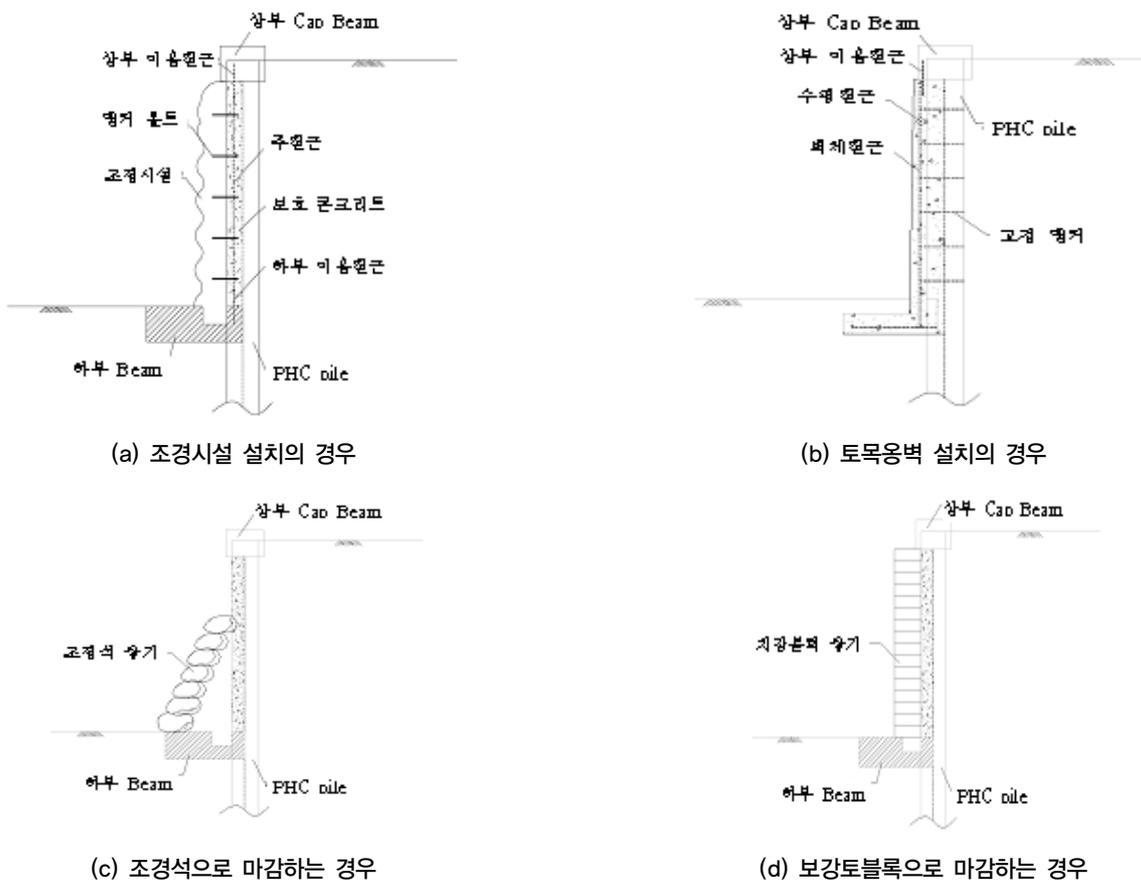


그림 1. 옹벽겸용 흠막이벽의 마감방식에 따른 단면도 예

도를 나타내면 그림 1과 같다.

한편, 지지방식의 유무에 따라 분류를 할 경우는 완전 자립식으로 시공되는 경우와 연직방향 Earth Anchor로 보강된 경우로 나누어지는데 이는 굴착깊이나 지반 조건에 의해 결정된다. 즉, PHC말뚝 자체의 강성만으로 굴착면과 흩막이벽의 안정성을 확보하기 어려운 경우 연직방향 Earth Anchor로 보강을 하게 되는데 이는 인접대지를 침범하지 않기 위한 방법이며, 유효프리스트레스(σ_{ex})와 축하중의 작용에 따라 일반적으로 강관말뚝과는 다른 거동을 보이는 것으로 알려져 있는 PHC말뚝의 거동특성에 따른 것이다.

말뚝내력은 일반적으로 중심축압내력 또는 순 휨균열 모멘트 및 순 휨파괴 모멘트로 평가되지만, 실제 시공에서는 축 방향력 및 휨 모멘트를 동시에 받는 것이 보통이다. 따라서 휨과 축압의 조합을 곡선으로 표시한 I.C(Interaction Curve)로 말뚝의 역학적 내력을 평가하는 것이 바람직하다. PHC말뚝과 강관말뚝의 상대비교를 위하여 허용지하력을 같게 하면 강관말뚝은 축력이 0에서 휨 모멘트가 최대이고 축력이 커지면 휨모멘트는 감소하므로 축방향 하중작용 시 파괴에 대한 내력은 PHC말뚝이 더 크게 된다. 따라서 PHC말뚝 거동특성은 축방향력에 의한 압축력이 증가 할수록 말뚝부재의 휨모멘트내력이 증가하는 것으로 나타났다(변근주, 2004).

2.2 기존 공법의 설계 System

옹벽겸용 흩막이벽의 설계시에는 굴착깊이, 토질정수 및 지반특성, 말뚝의 강성과 간격비 등의 안정성에 영향을

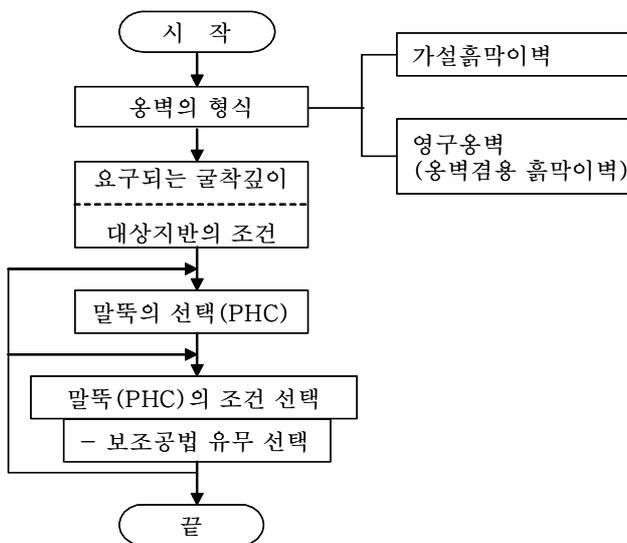


그림 2. PHC 말뚝을 이용한 옹벽겸용 흩막이벽의 설계 순서도

미치는 요소를 고려하여야 한다. 그리고 설계순서는 그림 2에서 보는바와 같이 먼저 굴착깊이와 대상지반의 물리적 특성 등을 결정하고 말뚝의 치수, 강성 및 설치간격을 선정하게 된다. 마지막으로 말뚝의 구속조건 및 보조공법 선택의 유무를 결정하는 순으로 설계가 이루어진다.

옹벽겸용 흩막이벽 공법에 대한 일반적인 설계의 타당성 검증은 사질토지반과 점성토지반에 대하여 그림 3과 같은 대표단면에 대해 parameter 연구를 실시한 결과 객관적인 설계패턴이 제시된 바 있다(한중근 외, 2005). 굴착깊이는 3m, 4m, 5m를 고려하고 지반특성에 대해서는 내부마찰각과 비배수전단강도를 적용하였고 말뚝과 지반사이의 상호작용 고려를 위해 말뚝변위에 따른 상대토압을 고려할 수 있도록 지반반력계수를 영향계수로 하였으며 배면지반의 주위환경을 고려하여 상재하중을 고려하였다.

사질토지반의 경우, 내부마찰각과 지반반력을 동시에 고려하여 해석을 수행하였다. 그 결과, 그림 4에서 보는바와 같이 안정성은 선형적인 증가를 보였고 5m 굴착시까지 모두 안정한 것으로 나타났지만 기준안전율($F_s=1.3$)을 고려하는 경우에는 내부마찰각이 35° 이상의 지반에서만 안정한 것으로 나타났다. 이는 4~5m 이상의 굴착깊이가 요구될 경우, 지보공의 필요성을 의미한다. 또한, 발생변위량은 현장안전관리기준치인 1/200을 적용하였을 경우 지반반력이 500t/m² 이상인 경우에 안정함을 알 수 있었다. 그러나 이 경우는 Slopile의 프로그램 특성상 사면이 파괴되는 시점인 말뚝의 극한안전상태를 나타낸 것으로서 실제 발생하는 토압을 고려하여 말뚝의 허용강성을 낮추어서 보정을 하면 변위는 약 50%정도 감소하기 때문에 말뚝에 대한 안정성을 만족할 것으로 판단되었다.

한편, 점성토지반의 경우, 지반의 상태를 지반반력과 비배수전단강도를 통하여 고려하였고 굴착깊이에 따라 안전

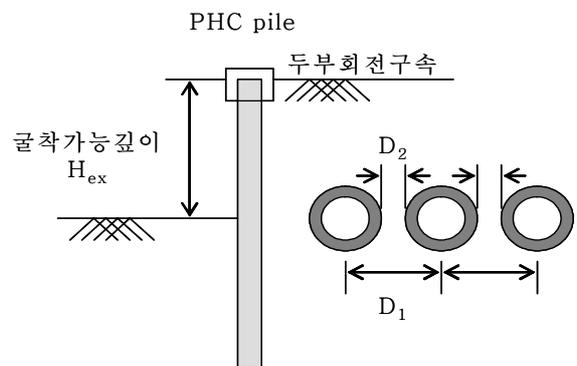


그림 3. 대표단면 설계시 고려단면

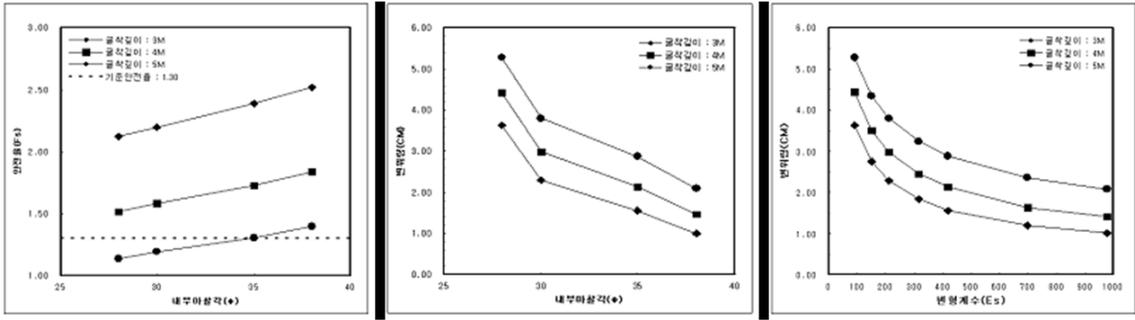


그림 4. 사질토지반의 안정성 및 말뚝변위 해석 결과

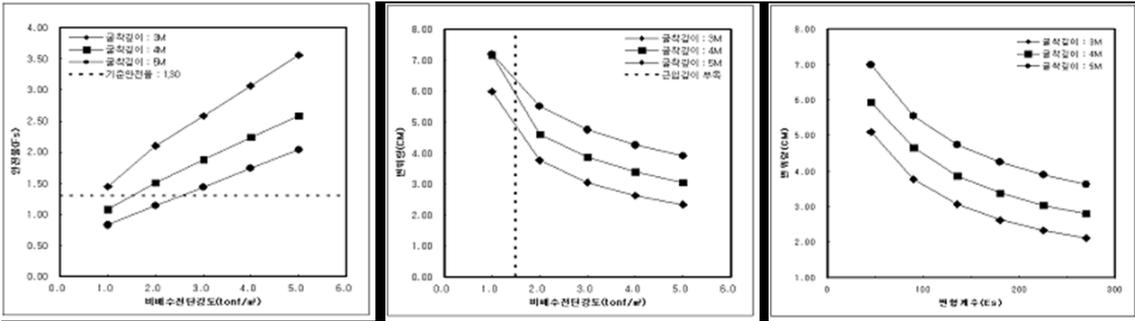


그림 5. 점성토지반의 안정성 및 말뚝변위 해석 결과

율은 선형적 증가를 나타내었다. 하지만 기준안전율($F_s = 1.3$)을 고려하는 경우에는 그림 5에서 보느냐와 같이 비배수전단강도가 $1t/m^2$ 이상인 경우, 3m 굴착이 가능하며, 4m 및 5m 굴착시는 비배수전단강도가 각각 $1.5t/m^2$ 이상과 $3.0t/m^2$ 이상이 되는 지반에 시공 가능한 것으로 나타났다. 그리고 말뚝의 변위상태로 볼 때 사질토지반에 비해 약 2배의 변위 발생이 예상되어 말뚝의 상태가 안정하지 못한 것으로 나타났지만, 실제작용토압을 고려하여 보정하게 되면 약 50%의 변위감소가 예상되므로 사면의 안전율을 만족하는 경우 말뚝의 안정 역시 만족하게 되는 것으로 판단되었다.

3. 굴착깊이를 고려한 PHC말뚝을 이용한 옹벽 겸용 흙막이벽의 시공

연구대상 현장은 배면의 여유공간이 부족하여 지보공이 배면으로 설치될 수 없는 경우 및 기존 PHC말뚝을 이용한 옹벽겸용 흙막이벽 시공조건보다 굴착깊이가 깊어지는 경우로서 PHC말뚝의 휨저항을 보다 향상시킬 수 있는 방법으로 그림 8에서 보느냐와 같이 2열의 말뚝을 설치하고 말뚝사이의 연직Anchor를 통해 2열 말뚝이 동시에 거동토록 시공하였다.

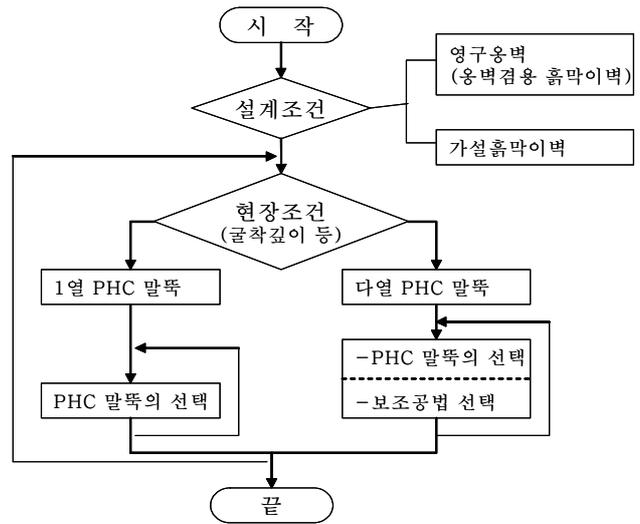


그림 6. 응용 설계법의 순서도

3.1 옹벽겸용 흙막이벽의 응용 설계법

본 절에서는 굴착깊이가 다소 깊은 현장상태를 위해 기존의 설계법에서 응용된 설계방법을 제시하고자 한다. 응용설계법의 설계패턴은 그림 6과 같이 현장상태를 통해 굴착깊이가 깊은 경우 다열 PHC 말뚝으로 시공이 결정되면 말뚝의 치수, 강성 및 보조공법을 선정하게 된다. 그리고 기존 설계법과 동일한 방법으로 말뚝과 보강사면에 대한 안정성 여부를 판단하여 설계를 마무리한다.

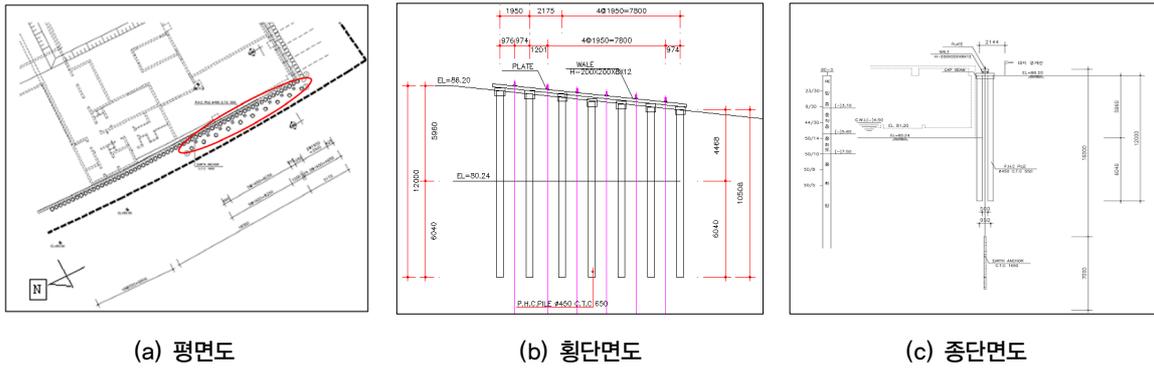


그림 7. 2열말뚝+연직Anchor 보강구간 상세도

표 1. 현장조사 결과에 의한 토질특성

구분	심도	N	단위중량			ϕ	c
			γ_t	γ_{sat}	γ		
매립층	3.1	17	1.7	1.8	0.8	25	-
충적층	5.6	44	1.8	1.9	0.9	28	-
풍화토	7.5	50	1.9	2.0	1.0	33	-
풍화암	~	50	2.0	-	-	33	1.5

3.2 시공현황 및 토질특성

앞서 언급한바와 같이 연구대상 현장은 경기도 OO지구 신축공사현장으로서 공법적용 구간은 지하구조물 시공을 위한 굴착깊이가 4.5m이하인 구간과 4.5m~6m인 구간으로 구분되며 일반적인 자립식 흠막이벽이 설치되기에는 깊이가 다소 깊은 현장이다. 따라서 최초 H-Pile+토류판과 지보공으로 Earth Anchor로 계획되어 있었지만 공기단축의 필요성에 의해 2열 말뚝과 더불어 그림 8과 같이 연직 방향의 Earth Anchor를 이용하여 보강하는 옹벽겸용 흠막이벽 공법으로 변경하였다.

본 현장은 말뚝과 배면지반의 거동을 계측하고 해석결과와의 비교를 위하여 그림 9와 같이 4개의 경사계가 설치되었다. 그리고 PHC말뚝을 이용한 옹벽겸용 흠막이벽의 시공시 당시 현장의 지하수위를 고려하여 LW그라우팅 차수를 실시하였다.

한편, 사례현장의 지반은 상부로부터 매립층, 충적층, 풍화토층, 풍화암층 순서로 분포되어 있다. 지반특성조사는 SPT(표준관입시험)로 실시되었고, 표 1에서 보는바와 같이 매립층은 표층으로부터 3m 가량 분포되어 있으며 N치가 8~23 정도로 느슨한 실트질 모래층으로 구성되어 있다. 충적층은 2~3m의 두께로 N치는 44로 중간정도의 조밀한 사질토 층이며 풍화토층은 약 2m 두께의 실트질 모래층으로 N치가 50이상인 매우 조밀한 상태이다. 풍화

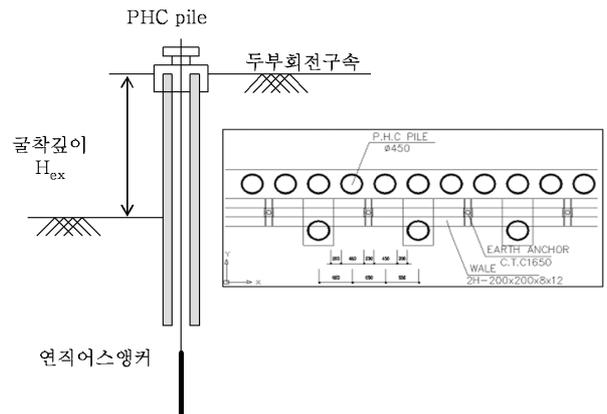


그림 8. 2열 PHC 옹벽겸용 흠막이벽 시공시 설계고려 단면

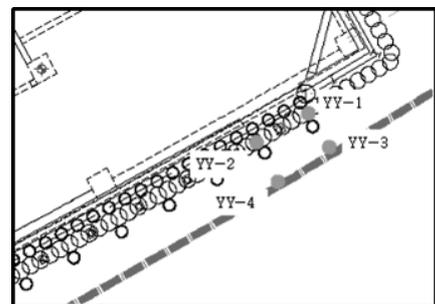


그림 9. 계측기 설치평면도

암층 역시 N치가 50이상의 조밀한 상태로 PHC 말뚝의 선단부와 연직Anchor를 지지하기에 적당한 상태로 조사되었다. 또한, 현장의 지하수위상태는 지표로부터 약 4.5m

가량의 깊이에 위치하고 있어 5m 굴착 후 안정화 기간을 거쳐 남은 깊이를 굴착해야 할 것으로 판단되었다.

4. 해석 및 계측자료 분석·비교

4.1 해석 조건

계측결과와 해석결과를 비교·분석하기 위하여 말뚝의 거동과 사면의 안정성을 동시에 해석할 수 있는 범용프로그램인 Slopile을 사용하였으며 말뚝의 거동을 파악할 수 있는 프로그램인 Xpile을 이용하였다.

해석에 적용된 지반조건은 현장조사결과를 이용하였고, 지반반력계수와 지반탄성계수는 표 2와 같이 적용하였다. PHC말뚝의 제원은 표 3에서 보는바와 같고 특히, Xpile을

이용한 해석에 사용된 말뚝의 제원은 2열의 말뚝을 1열로 환산한 단면(그림 10 참조)을 통하여 표 4와 같이 적용함으로써 해석의 가능여부를 확인해 보았다. 그리고 지지력을 보완하기 위하여 사용된 연직방향 Earth Anchor의 경우, Xpile에서는 연직Anchor의 해석이 불가능하여 말뚝에 작용하는 연직방향의 하중으로 고려하여 해석을 실시하였다. 또한 굴착배면에 구조물이 없는 점을 감안하여 상재하중은 해석시 고려하지 않았다.

4.2 해석결과 및 분석

말뚝 자체의 거동과 배면지반의 거동을 모두 살펴보기 위하여 그림 9에서 나타낸바와 같이 두 열의 말뚝 중 1열 말뚝 뒤에 2개의 경사계를 설치하고, 배면지반에 2개의 경

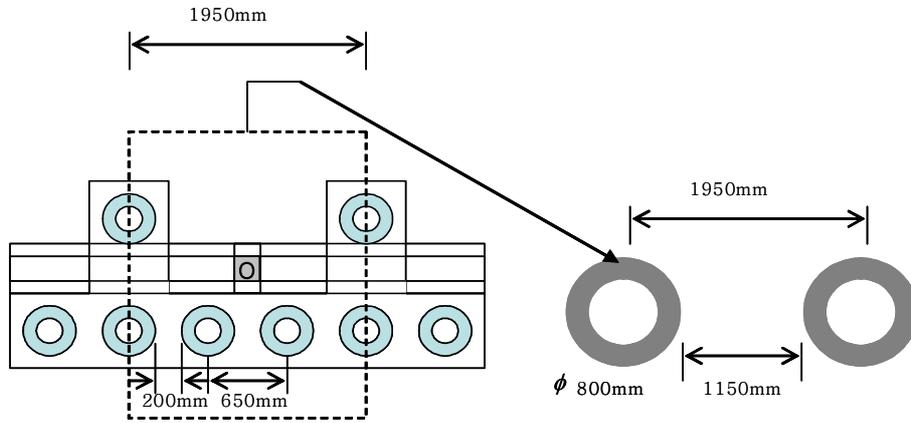


그림 10. 2열 말뚝의 단면환산

표 2. 지반반력계수 및 지반탄성계수

구분	N	k_h		E_s
		Hukuoka	XPile	
매립층	17	1,795	449	90/175
충적층	44	3,212	803	300/700
풍화토	50	3,382	846	500/980

표 3. 적용된 PHC말뚝의 제원

직경 (mm)	단면적 (cm^2)	환산 단면적 (cm^2)	단면2차 모멘트 (cm^4)	탄성계수 (kg/cm^2)	허용압축 응력 (kg/cm^2)	허용인장 응력 (kg/cm^2)	허용전단 응력 (kg/cm^2)	유효 프리스트레스 (kg/cm^2)
450	836	881	165313	400000	280	-	8.5	83.5

표 4. Xpile을 이용한 해석 시 사용된 환산단면의 말뚝 제원

직경 (mm)	단면적 (cm^2)	환산 단면적 (cm^2)	단면2차 모멘트 (cm^4)	탄성계수 (kg/cm^2)	허용압축 응력 (kg/cm^2)	허용인장 응력 (kg/cm^2)	허용전단 응력 (kg/cm^2)	유효 프리스트레스 (kg/cm^2)
800	2384	2510	1541864	400000	280	-	8.5	81.95

사계를 설치하였다. 말뚝의 발생변위는 굴착깊이 5.5m 지점(Y1)과 굴착깊이 5.0m(Y2)지점에서 계측하였다. 굴착 시 발생된 2열의 말뚝변위는 -0.56mm~0.37mm로 계측되었으며 소량의 (-)변위는 굴착깊이가 다소 깊은 곳에서 굴착시 굴착기계에 의한 수동토압의 증가로 인하여 짧은 굴착기간에 의해 즉시 탄성회복이 되었던 것으로 판단되었다. 말뚝의 최대변위는 그림 11에서 보는바와 같이 각각 7.03mm, 5.32mm이었으며 굴착이 완료된 이후 말뚝의 수평변위가 약 7mm와 5mm로서 80일 동안 지속된 후 안정된 값을 유지하였다. 이는 굴착깊이에 따른 추가 변위 이외에 PHC말뚝의 발생변위는 외력이 없는 경우 더 이상 발생하지 않는 안정한 상태로 유지되는 것으로 판단되었다.

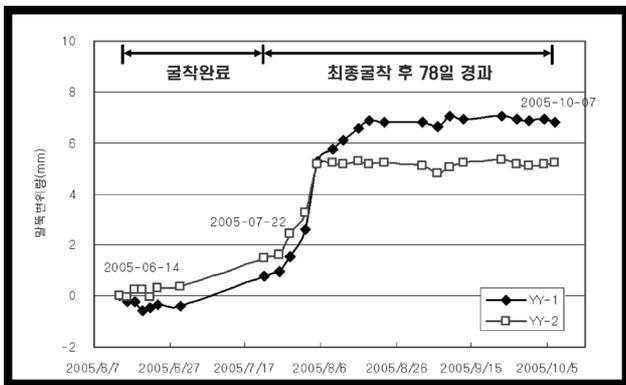
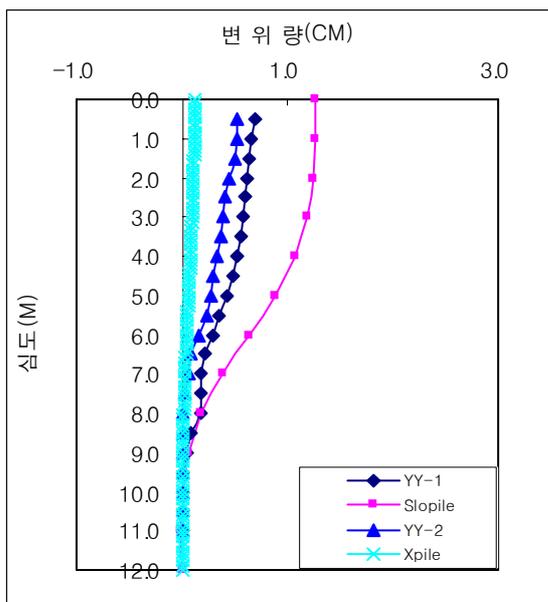


그림 11. 1열 말뚝에 발생한 최대수평변위

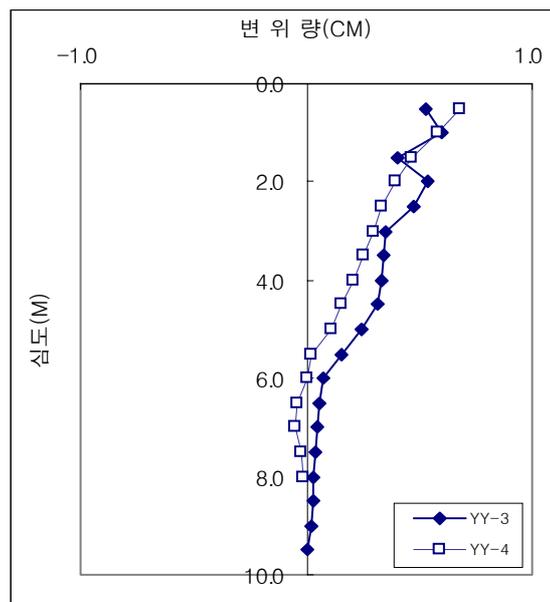
그림 12(a)에서 보는바와 같이 현장계측자료를 해석치와 비교한 결과를 살펴보면 Slopile 해석결과인 PHC말뚝의 극한상태 변위량보다 작게 나타났으며 말뚝의 변위는 수렴되었다. 2열의 말뚝을 1열의 말뚝으로 환산하여 해석을 시도한 Xpile의 해석결과는 실제 계측치보다 현저히 작은 값을 보였다. 이는 1열로 된 말뚝의 경우 해석결과의 50%정도를 적용한 결과와 거의 일치하고 있으므로 PHC말뚝은 최대허용변위의 약 50%정도를 부담하고 있는 것으로 판단되었다. 그리고 계측결과로 예상컨대 현재 지반의 상태도 말뚝사이의 Mohr-Coulomb 소성파괴 거동을 보이지 않는 정도의 미소변위량을 나타내고 있어 안정한 상태를 유지하고 있고 말뚝의 발생수평변위는 7mm이하로 PHC말뚝의 균열이 발생될 수 있는 한계를 넘지 않고 있기 때문에 2열 말뚝과 연직Anchor 시공에 따른 약간의 PHC말뚝의 휨강성 증가 및 균말뚝체로서 거동함으로서 일반적인 흙막이벽이 갖는 굴착한계깊이를 다소 해결할 수 있는 방안이 될 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 굴착시공 시 일반적인 흙막이공법이 가지고 있는 굴착깊이에 대한 문제를 해결해 보고자 2열의 PHC말뚝을 이용한 옹벽겸용 흙막이벽으로서의 시공성 및 안정성을 검토해보았다. 2열의 PHC말뚝을 이용한 옹



(a) 2열 말뚝 중 1열의 변위량



(b) 배면지반의 거동

그림 12. 해석결과와 계측결과 비교

벽겸용 흠막이벽의 시공 시 Slopile 해석결과를 이용하는 경우 말뚝의 최대발생변위량의 예측이 가능하였으며 말뚝에 발생하는 응력을 이용하는 Xpile의 해석결과를 현장의 말뚝계측변위와 비교하면 현재 상태에서의 말뚝이 받는 응력조건 및 변위발생정도가 예측이 가능함을 알 수 있었다. 또한 적용공법의 경우 기존의 주열식 공법에 비해 제한된 깊이를 갖는 굴착시공시 경제성 및 시공성이 좋음을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 배면의 여유공간이 부족한 현장의 경우 말뚝의 변위 및 굴착깊이가 다소 해결될 수 있는 공법으로서의 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서울지방중소기업청이 주관하는 2005년도 산학연 공동기술개발 컨소시엄사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 변근주 (2004), “PHC 말뚝의 내구성, 고강도 콘크리트의 특징”, *PHC 파일의 설계 및 시공 심포지엄*, pp.10-13.
2. 송영석 (1999), *연약지반 굴착으로 인한 자립식 흠막이벽의 안정성에 관한 연구*, 석사학위논문, 중앙대학교.
3. 최용규 (2004), “말뚝기초의 지반지지력 예측방법”, *PHC 파일의 설계 및 시공 심포지엄*, pp.61-92.
4. 한중근, 조용량, 김상귀, 박상철, 어윤원 (2005), “기성콘크리트말뚝(PHC)을 이용한 옹벽겸용 흠막이설계사례”, *한국환경복원녹화기술학회지*, 제8권, 제3호, pp.33-42.
5. 한중근, 조용량, 김상귀, 어윤원 (2005), “PHC 말뚝을 이용한 옹벽겸용 흠막이벽의 거동”, *2005년도 대한토목학회 정기 학술대회*, pp.3483-3486.
6. 홍원표, 윤중만, 한중근, 송영석 (1998), “줄말뚝을 이용한 자립식 흠막이벽의 변형거동”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp.413-416.

(논문접수일 2006. 8. 30, 심사완료일 2006. 9. 8)