

무용접 복합말뚝의 항타관입성 분석에 관한 연구 Driveability Analysis of Non Welding Composite Pile

신윤섭¹⁾, Yunsup Shin, 김남호²⁾, Namho Kim, 부교탁³⁾, Kyotag Boo, 이종수⁴⁾, Jongsoo Lee

1) (주)유신코퍼레이션 지반공학부 차장, Geotechnical Engineering Division of Yooshin Corporation

2) (주)유신코퍼레이션 지반공학부 상무, Geotechnical Engineering Division of Yooshin Corporation

3) 삼표이앤씨(주) 파일사업팀 상무, Geotechnical Engineering Division of Sampyo E&C

4) 삼표이앤씨(주) 대표이사, Geotechnical Engineering Division of Sampyo E&C

SYNOPSIS : As increasing demand on marine structures and skyscrapers, a deep shaft pile foundation is more to be used for the place having weak ground strength. Because heavy horizontal force is generally applied on upper part of pile foundation used in civil or architectural construction, steel pile is largely used with its high resistance to shear force and bending moment, and its capability to carry heavy loads. The steel pile has advantage in good constructibility, high applicability on site and easy handing, but has disadvantage in cost, more expensive than other material pile. This study is about the Composite pile that makes economical construction possible by reducing material cost of pile; using steel and PHC pile simultaneously while preserving the advantage of steel pile that large resistance to horizontal force and bending moment. A Non Welding connection method is applied to this composite pile and this method could reduce the cost and period of construction and could increase the quality of construction by solving the problem of current welding method and by improving the workability of pile connection.

In this study, characteristics of driveability of non welding composite pile is analyzed prior to main project while the purpose of main project is proving the applicability of Non Welding Composite Pile by conducting various kind of loading test to analyze the characteristics behaviour of Non Welding Composite Pile and by verifying stability of non welding connection pile.

Key words : bending moment, steel pile, PHC pile, non welding composite pile, driveability,

1. 서 론

최근 해상공사 및 초고층 빌딩에 대한 수요가 늘어나면서 지반강도가 작은 지역에 심도가 깊은 말뚝을 시공하는 사례가 증가하고 있는 추세이다. 토목 및 건축분야에서 사용하는 말뚝은 일반적으로 상부에 큰 수평력이 작용하므로 전단 및 휨모멘트에 대한 저항력이 크고 하중지지력이 우수한 강관말뚝을 많이 적용하고 있다. 강관말뚝은 시공성이 우수하며 이음이나 절단도 용이하므로 현장적용성이 뛰어난 장점이 있으나 비용이 고가라는 단점이 있다.

본 연구에서는 큰 수평력과 휨모멘트에 저항할 수 있는 강관말뚝의 기능을 유지하면서 수평력이 작게 작용하는 심도에서는 PHC말뚝을 사용하여 말뚝의 재료비를 경감시켜 경제적인 시공을 할 수 있는 복합말뚝(Composite Pile)에 대한 것이며, 기존 용접방식이 가지고 있는 문제점을 해결하고 말뚝 이음시공에 대한 작업성을 개선하여 말뚝 공사에 소요되는 공사비와 공기를 단축시키고 시공품질을 향상시킬 수 있는 무용접 이음방식(Non Welding)에 대한 말뚝거동특성을 분석하고자 한다.

이러한 무용접 복합말뚝(Non Welding Composite Pile)에 대한 거동특성을 분석하기 위해 각종 재하

시험을 계획하고 있으며 무용접 이음부에 대한 안정성을 검증하여 무용접 복합말뚝 적용가능성을 검증하는 것이 과업의 목적이며 본 연구에서는 이에 대한 선행과업으로 무용접 복합말뚝의 휨에 대한 저항 특성 및 항타관입특성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 기본이론

2.1 복합말뚝 이론

토목 및 건축구조물 말뚝기초는 상부 구조에서 전달되는 수평력, 축력, 휨모멘트를 지반에 전달하여 구조물을 안전하게 지지하는 역할을 수행하는 것으로 작용력 크기와 작용형태 및 지반조건에 따라 강관말뚝과 PHC말뚝이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 강관말뚝은 단위 면적당 하중지지능력이 우수하고, 시공성이 우수하며 이음과 절단이 용이하기 때문에 지층 변화가 심한 현장에 적용성이 뛰어난 장점이 있다. 그러나 비용이 고가라는 단점이 있으며 국내에서 강재를 전량 외국 수입에 의존하므로 수급 및 가격의 변화가 심할 수밖에 없으므로 강관말뚝 재료비의 증가는 전체공사비의 증가로 이어져 국가적으로도 큰 손실이 되고 있는 실정이다.

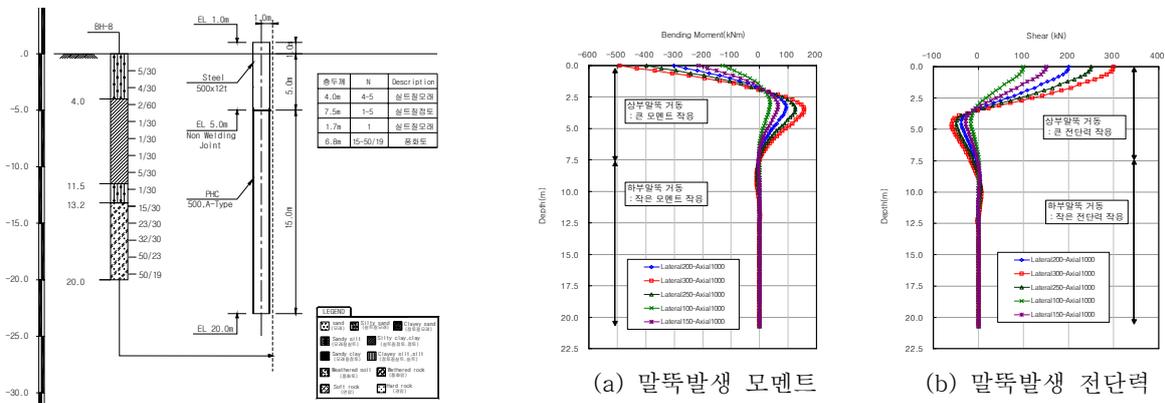


그림 1. 하중 변화에 따른 말뚝 거동양상

토목 및 건축구조물 기초로 사용하는 말뚝은 상부에 작용하는 수평력에 의해 큰 휨모멘트 및 인장력에 저항하게 되며, 이러한 휨모멘트 및 인장력은 말뚝하부로 내려갈수록 급격하게 감소하면서 말뚝하부에서는 축력이 지배적으로 작용하게 된다.

복합말뚝(Composite Pile)이란 이러한 하중조건에 적절하게 대응할 수 있는 방안으로 휨모멘트 및 인장력이 크게 작용하는 말뚝상부에는 강관말뚝을 사용하고, 축력이 크게 작용하는 말뚝하부에는 PHC말뚝을 사용하여 부재를 효율적인 배치하고 이질 재료의 장점을 최대한 활용하는 공법으로 말뚝의 기능을 유지하면서 말뚝의 재료비를 경감시켜 경제적인 시공을 할 수 있는 시공 방안이다.

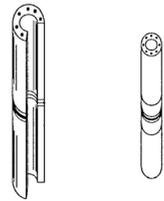
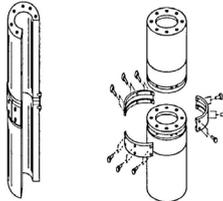
2.2 무용접 복합말뚝의 개념

현재 국내·외에서 사용되고 있는 말뚝 연결방법은 크게 용접방식과 무용접방식으로 구분될 수 있는데 용접방식의 경우 현재까지 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 방법이나 기후조건 및 풍속 등에 영향을 받을 수 있으며 규정된 작업속도를 준수해야 하는 등 시공상 제약조건으로 용접시간이 장기화 되어 공기가 길어질 수 있다.

반면 무용접 말뚝 이음방식은 특수한 형태의 말뚝 연결장치를 이용하여 상부말뚝과 하부말뚝을 조립식으로 연결하는 시공방식이다. 이러한 조립방식은 상부말뚝과 하부말뚝에 설치되어 있는 볼트구멍에

말뚝연결관을 일치시키고 상부와 하부를 볼트로 고정시켜 2개의 말뚝을 연결하는 시공방법으로 시공관리가 용이하며 기후조건에 관계없이 시공이 가능하여 시공 품질이 균일하다. 이러한 무용접 말뚝 이음 방식은 말뚝 직경이 클수록 시공성 및 경제성에서 우수한 특성을 나타낸다.

표 1. 말뚝 이음방식에 대한 특징

구 분	용접방식		무용접 방식	
	개념도	상세 연결부	개념도	상세 연결부
개념도				
순 서	▪ 상부말뚝거치→상부금구 하부금구간 용접→완료		▪ 상부말뚝거치→말뚝연결관결합→볼트체결→완료	
원 리	▪ 선단금구와 두부금구를 용접함으로 말뚝을 연결 ▪ 인장력과 휨모멘트는 상부말뚝→선단금구→용접부→두부금구→하부말뚝으로 전달		▪ 3조각으로 구성된 말뚝 연결관을 이용하여 두부금구와 선단금구를 볼트 결합으로 말뚝 연결 ▪ 인장력과 휨모멘트는 상부말뚝→선단금구 돌기→말뚝연결관→두부금구 돌기→하부말뚝으로 전달	
장 점	· 시공실적이 많음. · 시공 관리기준이 있음.		· 시공품질이 일정하고 시공관리 용이 · 말뚝 직경이 클수록 경제성이 우수함	
단 점	· 작업시간 길고 품질 불균일, 시공관리 어려움 · 시공성이 기후조건에 영향 받음. · 말뚝 직경이 커질수록 작업시간 및 비용 증가함.		· 국내에서는 시공경험이 없어 현장시험을 통한 검증이 필요	

기존 용접방식이 가지고 있는 문제점을 해결하고 말뚝 이음시공에 대한 작업성을 개선하여 말뚝 공사에 소요되는 공사비와 공기를 단축시키고 시공품질을 향상시킬 수 있는 무용접 이음방식(Non Welding)은 용접방식과 비교할 때 여러 가지 장점을 보유하고 있다. 하지만 이러한 무용접 이음장치를 강관말뚝과 PHC말뚝을 연결하여 사용하는 복합말뚝(Composite Pile)에 적용하기 위해서는 무용접 말뚝 이음방식으로 연결된 말뚝에 휨시험을 수행하여 휨에 대한 안정성이 확보되어야 하며, 항타시 안정성에 문제가 없는지 여부가 검토되어야 한다.

3. 연구 방법

3.1 무용접 복합말뚝 현장 재하시험

말뚝을 시공하는 방법은 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 항타공법과 매입공법으로 구분할 수 있으며, 검토하고자 하는 무용접 복합말뚝(Non Welding Composite Pile)에 대하여 항타공법과 매입공법을 적용할 수 있어야 한다. 최근 국내에서는 환경문제인 진동, 소음 등으로 인해 말뚝 시공방법이 항타말뚝에서 매입말뚝으로 그 추세가 이동하고 있지만, 본 연구에서 거동을 분석하고자 하는 무용접 복합말뚝의 경우 항타 관입성에 문제가 없어야 함은 물론 강관말뚝과 콘크리트 말뚝이 접합되는 접합부 역시 항타 응력에 의한 파손이 없이 안정성을 유지해야 한다.

이러한 항타 관입성 문제와 접합부 안정성 유지 여부를 확인하기 위해 무용접 복합말뚝에 대한 재하시험을 수행할 계획이며, 말뚝의 거동을 분석하며 연결부 안정성을 확인하여 무용접 복합말뚝의 사용가능성을 평가해볼 필요가 있다. 수행하고자 하는 현장 재하시험의 종류 및 수량은 다음과 같다.

표 2. 무용접 복합말뚝 현장 재하시험 종류 및 수량 계획

시공 방법	말뚝 번호	지지층	상부 지층	말뚝 종류	말뚝재하시험(회)				연결부 평가(회)		
					동재하 시험	정재하 시험	수평재하 시험	인발 시험	연결부 위치	항타 관입분석	휨 시험
항타 공법	#1	풍화토	점성토	φ500	1	1			상부	1	1
	#2	풍화토	점성토	φ500	1		1		하부	1	
	#3	풍화토	사질토	φ500	1		1		하부	1	
	#4	풍화토	사질토	φ500	1			1	하부	1	
	#5	풍화토	점성토	φ500	1		1		상부	1	
	#6	풍화토	점성토	φ500	1		1		하부	1	
매입 공법	#7	풍화암	사질토	φ500	*1		1		하부	1	
	#8	풍화암	사질토	φ500	*1	1			하부	1	

*1 : #7~#8의 동재하시험은 재하시험 직전 실시하는 Restrike 시험임

무용접 복합말뚝은 상부 강관말뚝 φ500×12t 규격이며 하부 PHC500×80t(A-Type)로 구성되어 있으며 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝은 연결 Joint(무용접 이음방식)로 결합되는 구조를 가지고 있다. 현장 지반조건에 따라 지지층이 상이할 수 있으므로 강관말뚝의 길이 및 PHC 말뚝의 길이는 위치에 따라 달라질 것이며 현장 상황에 따라 조정될 수 있다.

3.2 수치해석을 통한 말뚝 거동분석

본 연구에서는 무용접 복합말뚝(Non Welding Composite Pile)에 대한 거동특성을 분석하고 무용접 이음방식에 대한 안정성을 검증하며, 현장 적용성을 검증하여 시공성 및 경제적이 뛰어난 새로운 말뚝 공법에 대한 설계기법을 마련하는 것으로 본 연구과업의 내용 및 범위를 정리하면 다음과 같다.

- (가) 수치해석을 통한 무용접 복합말뚝(강관말뚝 + PHC 말뚝) 거동 분석
 - 말뚝의 연직, 수평거동 분석을 위한 비선형 해석 (TZPILE, LPILE, FB-Perir)
 - 상용 Program을 이용한 말뚝 연속체 해석 (ABAQUS, FLAC-3D)
- (나) 말뚝 연결부 안정성 평가
 - 연결 Joint (무용접 이음방식) 휨 시험 수행
 - 연결 Joint 수치해석 (ABAQUS, FLAC-3D)
 - 연결 Joint 안정성평가
- (다) 설계 및 해석기법 개발
 - 무용접 복합말뚝 거동예측 Program 개발
 - 시공성 및 경제성을 확보할 수 있는 최적의 무용접 복합말뚝 설계기법 개발

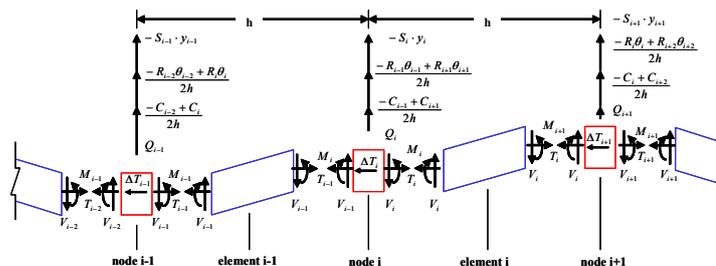


그림 2. 수평하중을 받는 보-기둥(beam-column) 모델

4. 현장재하시험 결과

4.1 말뚝 휨 재하시험

말뚝 휨재하시험은 PHC말뚝과 강관말뚝을 무용접으로 연결하는 복합말뚝의 무용접 이음부분에 대한 건정성 여부를 확인하기 위한 시험으로, 균열휨모멘트 및 파괴휨모멘트에 상응하는 하중 재하시 복합말뚝의 무용접 연결부의 안정성을 평가하고자 하는데 목적이 있다. 말뚝 휨시험은 말뚝의 변형성과 연성 및 균열특성을 측정하는 굽힘균열시험으로 하중재하시 변형율게이지를 설치하여 단계별 하중재하(6 Steps)에 따른 무용접 복합말뚝 접합부에서의 처짐량을 산정하였다. 시험하중은 단계별로 1단계(6ton), 2단계(8ton), 3단계(10ton), 4단계(12ton), 5단계(14ton), 6단계(16ton)로 구분하여 재하하였으며, 하중 재하 및 제거시 말뚝의 휨거동을 분석하였다.

표 3. 무용접 복합말뚝 휨 재하시험

말뚝휨시험 개요도	휨 재하시험	무용접 연결부	변형측정 Dial gauge

수행한 말뚝 휨시험은 말뚝의 변형성과 연성 및 균열특성을 측정하는 굽힘균열시험으로 하중재하시 변형율게이지를 설치하여 단계별 하중재하에 따른 무용접 복합말뚝 접합부에서의 처짐량을 산정하였다.

시험 결과 하중 12ton 재하시 PHC말뚝 보강밴드 부분에 일부 벌어짐 현상이 발생하였고, 하중 14ton 재하시 PHC말뚝 하단부에서 인장균열이 10.0cm 정도 길이로 발생하였음. 파괴시까지 하중을 재하하였을 때 하중 재하에 따라 처짐량이 증가하면서 하중 19.8ton 재하시 약 35.0cm정도의 인장균열이 발생하였고, 하중 22ton 재하시 약 15.0cm의 사인장 균열이 발생하여 파괴에 이르렀음. 무용접 복합말뚝 휨 재하시험결과 PHC 파일에 균열이 발생하기 시작하여 파괴에 이르기까지 하중을 재하 하였으나 PHC말뚝과 강관말뚝을 연결하는 무용접 이음장치에서는 항복징후가 발생하지 않았음.

표 4. 무용접 복합말뚝 휨 재하시험 결과분석

2단계(8ton)	4단계(12ton)	6단계(16ton이상)	하중변위곡선
<ul style="list-style-type: none"> 말뚝 접합부 처짐 6.0mm 균열 및 파괴 조짐 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 말뚝 접합부처짐 10.0mm PHC말뚝 보강밴드 일부 벌어짐 현상 	<ul style="list-style-type: none"> 접합부처짐 최대 40.0mm 약35.0cm의 인장 균열이 발생(19.8ton) 	

따라서 무용접 복합말뚝의 경우 균열휨모멘트 및 파괴휨모멘트에 상응하는 하중을 재하 하였을 경우에도 말뚝 연결부에서의 안정성이 확보되는 것으로 나타났음.

4.2 말뚝 동재하시험

4.2.1 시험개요

본 연구에서는 광양현장에서 무용접 복합말뚝 3본에 대하여 PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용한 동재하 시험을 실시하여 유압해머 직항타 시 말뚝의 시공성 및 지지력을 확인하고 무용접 연결부의 안정성을 확인하고자 한다. 또한 직항타 시공 중 발휘된 지지력을 평가하는 동재하시험의 특성을 고려하여 일정시간 경과 후 Restrike 시험을 실시하여 시간경과에 따라 지반의 Setup 효과 발휘 여부를 확인하여 무용접 복합말뚝의 허용지지력을 보다 합리적으로 평가하고자 하였다.

본 연구를 위해 3본의 무용접 복합말뚝에 대하여 강관과 PHC 연결부의 위치를 변화시키면서 동재하시험을 수행하였으며 말뚝 및 시험제원은 다음과 같다.

표 5. 무용접 복합말뚝 동재하시험 제원

말뚝 번호	항종	시험 일자	관입 깊이 (m)	시험 구분	유압해머		최종 관입량 (mm/타)
					램중량 (ton)	낙하고 (m)	
#1	상부 강관(Φ500×12t, 12m)	08.08.18	23.5	*E.O.I.D	7.0	0.7	3.0
	+ 하부 PHC(Φ500 A-Type, 13m)	08.08.20	23.5	*Restrike	7.0	0.7	0.0
#2	상부 강관(Φ500×12t, 6m)	08.08.18	23.6	E.O.I.D	7.0	0.7	1.5
	+ 하부 PHC(Φ500 A-Type, 19m)	08.08.20	23.6	Restrike	7.0	1.0	0.0
#3	상부 강관(Φ500×12t, 6m)	08.08.18	23.4	E.O.I.D	7.0	0.7	2.0
	+ 하부 PHC(Φ500 A-Type, 19m)	08.08.20	23.4	Restrike	7.0	0.7	0.0



*E.O.I.D : End of Initial Driving 초기항타 종료전 측정된 결과, *Restrike : 일정시간 경과후 Setup효과 확인 위한 재항타 시험

4.2.2 항타관입성 분석

표 6. 무용접 복합말뚝 항타관입성 분석

말뚝 번호	관입 깊이(m)	시험 구분	*CSX (ton/cm ²)	*CSB (ton/cm ²)	*EMX (ton·m)	*RMX (ton)	*BTA (%)	항타관입성 분석 Data (PDI PLOT)	
								CSX	CSB
#1	23.5	E.O.I.D	1.601	0.256	4.4	250	81.0		
		Restrike	1.540	0.244	4.7	328	84.0		
#2	23.6	E.O.I.D	1.362	0.229	3.2	204	82.0		
		Restrike	1.963	0.281	6.1	300	84.0		
#3	23.4	E.O.I.D	1.518	0.291	3.7	232	75.0		
		Restrike	1.677	0.329	4.7	326	82.0		

*CSX : Maximum Compression Stress on gauge, *CSB : Maximum Compression Stress on Bottom

*EMX : Maximum Energy, *RMX : Case 방법에 의한 최대 정적지지력, *BTA : 건전도 지수

4.2.3 허용지지력 산정

허용지지력 판정은 CAPWAP 분석 결과 도출된 전체지지력을 Davisson's offset을 적용하여 항복 하중을 평가하고 안전율 2.0을 적용하여 허용지지력을 산정하는 것과 CAPWAP 분석결과 도출된 전체지지력을 KSF 2591 및 도로교설계기준의 안전율 2.5를 적용하여 허용지지력을 산정한 것을 비교하였다.

표 7. 무용접 복합말뚝 허용지지력 산정

Pile No	관입 심도 (m)	시험 구분	CAPWAP 분석결과			Davisson's Method		도로교설계기준	
			전체지지력 (ton)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	항복지지력 (ton)	허용지지력 (ton)	CAPWAP 지지력(ton)	허용지지력 (ton)
#1	23.5	E.O.I.D	320.2	79.9	240.3	300.5	150.2	320.2	128.1
		Restrike	363.5	151.4	212.1	363.5	181.8	363.5	145.4
#2	23.6	E.O.I.D	250.0	77.4	172.6	228.7	114.4	250.0	100.0
		Restrike	360.0	203.0	157.0	359.0	179.5	360.0	144.0
#3	23.4	E.O.I.D	292.0	26.0	265.9	270.2	135.1	292.0	116.8
		Restrike	392.1	94.9	297.2	392.1	196.1	392.1	156.8

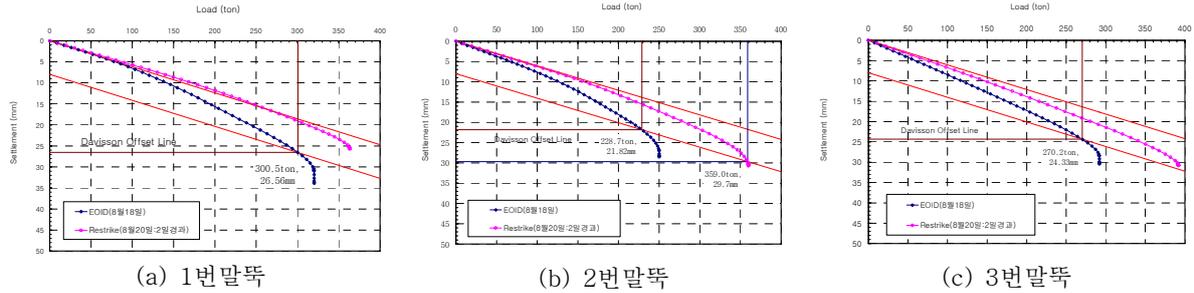


그림 1. Davisson's Offset에 의한 지지력 산정

4.2.4 E.O.I.D 및 Restrike 결과 비교

무용접 복합말뚝의 동재하 시험에서는 E.O.I.D 시험과 Restrike 시험을 병행하여 수행하였으며 시험시 측정된 최종 관입량과 시간경과에 따른 침하량 및 지지력증가 현상을 분석하였다.

분석결과 측정된 최종관입량은 E.O.I.D 시험시 1.5~3.0mm에서 2일 경과후 Restrike 시험시 관입량이 거의 발생하지 않았으며 측정된 전체지지력은 23.0~30.6% 증가한 경향을 나타내므로 무용접 복합말뚝의 경우도 시간경과에 따른 Setup효과가 나타났음을 알 수 있었다.

표 8. 무용접 복합말뚝 Setup 효과 분석

Pile No	관입 심도 (m)	시험 구분	시험 일자	Test Condition			CAPWAP 분석방법			지지력 증가
				최종관입량 (mm)	리마운드량 (mm)	낙하고 (m)	전체지지력 (ton)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	
#1	23.5	E.O.I.D	08.08.18	3.0	17.0	0.7	320.2	79.9	240.3	28.4%
		Restrike(2일)	08.08.20	0.0	15.0	0.7	363.5	151.4	212.1	
#2	23.6	E.O.I.D	08.08.18	1.5	16.0	0.7	250.0	77.4	172.6	30.6%
		Restrike(2일)	08.08.20	0.0	15.0	1.0	360.0	203.0	157.0	
#3	23.4	E.O.I.D	08.08.18	2.0	20.0	0.7	292.0	26.0	265.9	23.0%
		Restrike(2일)	08.08.20	0.0	19.0	0.7	392.1	94.9	297.2	

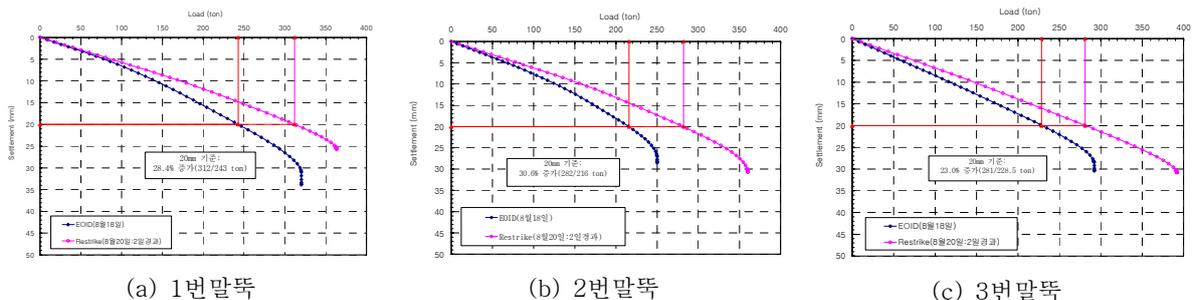
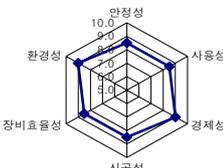
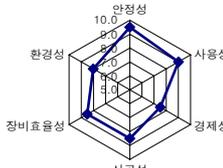
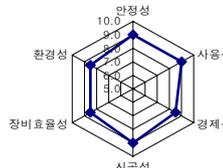


그림 1. 무용접 복합말뚝 허용지지력 산정

5. 적용성 평가

무용접 복합말뚝의 적용성을 시공성 및 경제성을 중심으로 비교한 결과 작용 전단력 및 모멘트에 대한 저항력이 우수하며 현장여건에 따라 적정하게 적용할 수 있어 사용성이 뛰어나며, 강관의 사용을 최소화 하므로 경제성도 매우 우수한 것으로 나타났다.

표 9. 무용접 복합말뚝 적용성 비교

구분	PHC말뚝	강관말뚝	무용접 복합말뚝
사용성	·분당 허용휨압축 응력이 작음 ·모멘트에 대한 저항력이 작음	·허용휨압축 응력 크고 전단력 및 모멘트 저항력이 큼	·휨강관말뚝과 동일한 허용휨압축응력발휘 가능
시공성	·이음이 어려우며, 절단시 Pre-stress 해방, 설계 조건 상이	·이음, 절단시 용접기 이용 ·용접이음으로 기후, 숙련도 영향	·무용접으로 이음, 절단, 운반이 가장 용이, Pile길이 무제한
재료 특성	·재료부식 없어 내구성 좋음 ·항타시 균열발생, 강도저하	·부식에 취약하므로 부식방지 대책 수립 필요	·하부 말뚝의 경우 재료부식이 없어 내구성과 환경성이 좋음
*경제성	2,700천원/본(30m기준)	5,200천원/본(30m기준)	3,400천원/본(30m기준)
경제성 시공성 분석			

*경제성 분석시 말뚝 본당 가격은 개략금액으로 현장여건에 따라 변경됨.

6. 결론

본 연구에서는 강관말뚝과 PHC말뚝을 무용접 이음방식으로 연결하여 말뚝 공사에 소요되는 공사비와 공기를 단축시키고 시공품질을 향상시킬 수 있는 무용접 복합말뚝(Non Welding Composite Pile)에 대한 휨거동 특성 및 항타관입성에 대한 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 상부강관말뚝과 하부 PHC말뚝을 무용접으로 연결하는 말뚝 이음장치에 대한 건정성 여부를 확인하기 위해 수행한 말뚝 휨시험 결과, 하중 12ton 재하시 PHC말뚝 보강밴드 부분에 일부 벌어짐 현상이 발생하였고, 하중 14ton 재하시 PHC말뚝 하단부에서 인장균열이 10.0cm 정도 길이로 발생하였음.
2. 파괴시까지 하중을 재하하였을 때 PHC 말뚝에 균열이 발생하기 시작하여 파괴에 이르러나 말뚝을 연결하는 무용접 말뚝이음부에서는 항복징후가 발생하지 않아 무용접 복합말뚝의 경우 균열휨모멘트 및 파괴휨모멘트에 상응하는 하중을 재하 하였을 경우에도 말뚝 연결부에서의 안정성이 확보되는 것으로 나타났다.
3. 말뚝을 풍화암지반까지 항타하면서 동재하시험 수행결과 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝을 연결하는 무용접 이음부에서 균열 및 분리 징후가 나타나지 않았으며, 육안확인 및 건전도시험결과 이상 징후가 발견되지 않아 무용접 복합말뚝의 항타 관입성에 문제가 없는 것으로 나타났다.
4. 동재하시험 허용지지력 판정은 Davisson's offset 방법과 CAPWAP 분석결과 도로교설계기준을 적용하여 지지력을 산정하였으며, 산정결과 E.O.I.D 시험시 100.0~150.2ton, Restrike 시험시

144.0~196.1ton이 산정되어 일반 강관 및 PHC말뚝 연직지지력을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

5. 초기항타와 재항타 시험 분석결과 측정된 최종관입량은 E.O.I.D 시험시 1.5~3.0mm에서 2일 경과후 Restrike 시험시 관입량이 거의 발생하지 않았으며 측정된 전체지지력은 23.0~30.6% 증가한 경향을 나타내므로 무용접 복합말뚝의 경우도 시간경과에 따른 Setup효과가 나타났음을 알 수 있었다.
6. 무용접 복합말뚝의 적용성을 시공성 및 경제성을 중심으로 비교한 결과 작용 전단력 및 모멘트에 대한 저항력이 우수하며 현장여건에 따라 적정하게 연결위치를 변경하여 현장에 적용할 수 있어 사용성이 뛰어나며, 강관의 사용을 최소화 하므로 경제성도 매우 우수한 것으로 나타났다.
7. 추후 연구과제로는 현재 진행하고 있는 무용접 복합말뚝 수평 및 연직 재하시험이 완료되면 무용접복합말뚝의 거동특성을 분석하여 현장지반조건, 하중조건 및 말뚝 연결부 위치 등에 따라 무용접복합말뚝의 거동을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 현장지반 및 하중조건을 고려한 무용접 복합말뚝 설계기법을 마련하고자 한다.

감사의 글

본 연구수행에 많은 도움을 주고 계신 협동연구기관인 서울대학교 지반연구실, 연세대학교 지반연구실 및 현대기술연구소 관계자 여러분들과 기술개발에 참여해주신 모현피씨택(대표이사 최승선)에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국도로공사(2001), 도로설요령 제3권, 한국도로공사, pp.497~502.
2. 日本道路協會(2002), 杭基礎設計便覽, 日本道路協會, pp.330~334.
3. American Society for Testing and Materials (ASTM). "Standard method of testing piles under axial compressive load." Annual Book of ASTM Standards, D1143-81, 1994.
4. American Society for Testing and Materials (ASTM). "Standard method of testing piles under lateral loads." Annual Book of ASTM Standards, D3966-90, 1995.
5. Evans, L.T., and J.M. Duncan. "Simplified analysis of laterally loaded piles." UCB/GT/82-04, University of California, Berkeley, CA, 1982.
6. Pando, M., G. Filz, C. Ealy, and E. Hoppe. "Axial and lateral load performance of two composite piles and one prestressed concrete pile." Proceedings, TRB 2003, Annual Meeting, CD-ROM, 2003, 20 pp.
7. Pando, M., G. Filz, E. Hoppe, C. Ealy, and M. Muchard. "Performance of a composite pile in a full scale Statnamic load testing program." Proceedings, 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal, Canada, I, 2000, pp. 909-916.