

복합말뚝의 국내현장 적용

Application of a Composite Pile in local Practice

이장덕¹⁾, Chang-Tok Yi, 박수용¹⁾, Su-Yong Bak, 김재수¹⁾, Jae-Soo Kim, 이명환¹⁾, Myung-Whan Lee

¹⁾ (주)파일테크 Piletech, Co., Ltd.

SYNOPSIS : A composite pile has been defined as a pile consisted of two different materials in the same pile, which is not used in local practice. A steel tubular pile has been widely used for the foundation of civil structures. As the raw material price in the word has been increase dramatically since 2004, the cost of piling would have influenced on the total construction cost. Therefore a composite pile is suggested for replacing the steel tubular pile, and it combine two different materials: a steel tubular pile for upper portion of the pile and a concrete pile for lower portion of the pile. To verify joint between materials by welding, drivability of the pile test, bending test, FEM analysis, and lateral loading test were performed. Several trial tests and application on the foundation of the bridge of the highway indicated that the HCP (Hybrid Composite Pile) is more economical and applicable than the steel tubular pile.

Keywords : 복합말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝, 말뚝연결부

1. 서 론

복합말뚝(composite pile)이란 2개 이상의 이질의 말뚝재료로 구성된 말뚝을 말하며, 일반적인 말뚝 형태로 분류되고 있다(FHWA-DP-66-1, NAVFAC DM-7.2).

오래된 복합말뚝 형태로 항만 구조물에서 적용된 상부는 콘크리트말뚝을 적용하고 수면하부는 나무말뚝을 적용하는 복합말뚝이 있는데, 이는 수면상부로 노출된 나무말뚝의 부식문제를 해결하기 위해 적용된 예이다. 이러한 복합말뚝의 적용은 말뚝의 기능향상이 목적이 우선이지만 부수적으로 경제적인 효과도 상당히 큰 것으로 알려져 있다(Prakash, 1990).

이러한 복합말뚝의 적용 및 연구가 활발하게 진행되고 있는 나라가 일본이다. 내진 설계 시 작용하는 수평력에 대해 효과적으로 대처하기 위해 상부에 강성이 큰 말뚝 재료, 말뚝하부에는 현장타설 콘크리트 말뚝이나 콘크리트 기성말뚝을 사용하고 있다. 동경전력에서는 진동하중이 작용하는 원자력 발전소 부지에서 복합말뚝 적용을 위한 시험을 성공적으로 수행하고 이 결과를 원자력 발전소 설비 설계에 적용하고 있는 실정이다(Ishida 등, 2002).

미국에서는 항만구조물의 Fender나 안벽 구조물 기초에 기존의 강관말뚝을 대신할 수 있는, 부식에 반영구적인 재질을 이용한 복합말뚝에 대한 연구가 2000년 이후에 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 FRP(Fiber Reinforced Polymers)나 탄소섬유로 원형말뚝 안쪽에 PC나 RC콘크리트를 채운 복합말뚝을 구성하여 항만구조물의 유지비용을 획기적으로 줄일 수 있는 복합말뚝에 대한 연구가 진행되고 있다(Pando 등, 2002).

국내에서는 현장타설말뚝, 고강도콘크리트말뚝(PHC), 강관말뚝이 주로 사용되고 있는데, 건축현장에서

는 말뚝 두부에 축하중이 주로 작용하므로 대부분 콘크리트말뚝을 사용하고 있으며, 토목현장에서는 수평하중이 작용하지 않는 기초라 하더라도 콘크리트 말뚝의 시공관리의 어려움을 이유로 강관말뚝을 주로 사용하고 있는 실정이다. 이렇듯 국내에서는 복합말뚝의 필요성이 크게 대두되지 않고 있으며 이에 대한 연구 역시 미미한 상태이다. 본 논문에서는 국내현장에 필요한 복합말뚝의 제안 및 이론적 배경에 대해 설명하고 실제 시험시공과 적용 사례를 중심으로 그 적용성을 평가하고자 한다.

2. 복합말뚝 제안

우리나라에 강관말뚝이 사용되기 시작한 것은 1970년대 초반으로 강관말뚝은 단위 면적당 하중지지능력이 현재 사용 중인 모든 말뚝의 재료 중에 가장 우수하고 같은 하중을 지지하는데 필요한 말뚝재료의 중량도 가장 경량이며 또한 시공성도 우수하고 이음이나 절단도 용이하기 때문에 지층 변화가 심한 현장에 소요길이까지 시공할 수 있어 현장적용성이 뛰어난 장점이 있다.

이처럼 강관말뚝은 많은 장점을 가지고 있지만 치명적인 약점이 말뚝재료가 고가라는 것이다. 또한 국내에서 강재를 전량 외국 수입에 의존하므로 수급 및 가격의 변화가 심할 수밖에 없다. 2002년을 기준으로 볼 때 강관말뚝 대비 콘크리트말뚝의 재료비는 약 2배에 해당되었으나 세계원자재의 급등으로 인하여 2004년을 기준으로 강관말뚝 대 콘크리트말뚝의 재료비는 3배에 달하다가 최고 4배 가까이 이르는 등 그 가격이 고가로 공사를 수행하는 시공회사의 고통이 가중되고 있는 실정이다. 또한 강관말뚝 재료비의 증가는 전체공사비의 증가로 이어져 국가적으로도 큰 손실이 되고 있는 실정이다.

국내에서 적용되고 있는 강관말뚝은 토목현장에서 주로 수평력이 작용하는 구조물의 기초, 또는 지반 조건상 콘크리트말뚝의 적용이 곤란한 지반조건에 적용되는 것이 일반적이다. 수평력이 작용하는 구조물기초의 말뚝 두부에 수평력이 작용하는 경우 말뚝깊이에 따른 모멘트분포를 나타낸 것이 그림 1이다. 말뚝에 수평력이 작용할 때 말뚝의 거동을 해석하는 방법은 말뚝에 작용하는 극한수평력을 계산하는 방법(Brinch Hansen, 1961; Broms, 1964)과 작용하중하에서 수평변위를 계산하는 방법(Reese and Matlock, 1956; Poulos, 1971)으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석을 위해 범용 프로그램인 L-Pile을 사용하였고, Reese and Matlock의 이론을 적용하여 수평력이 작용하는 말뚝의 거동특성을 분석하였다.

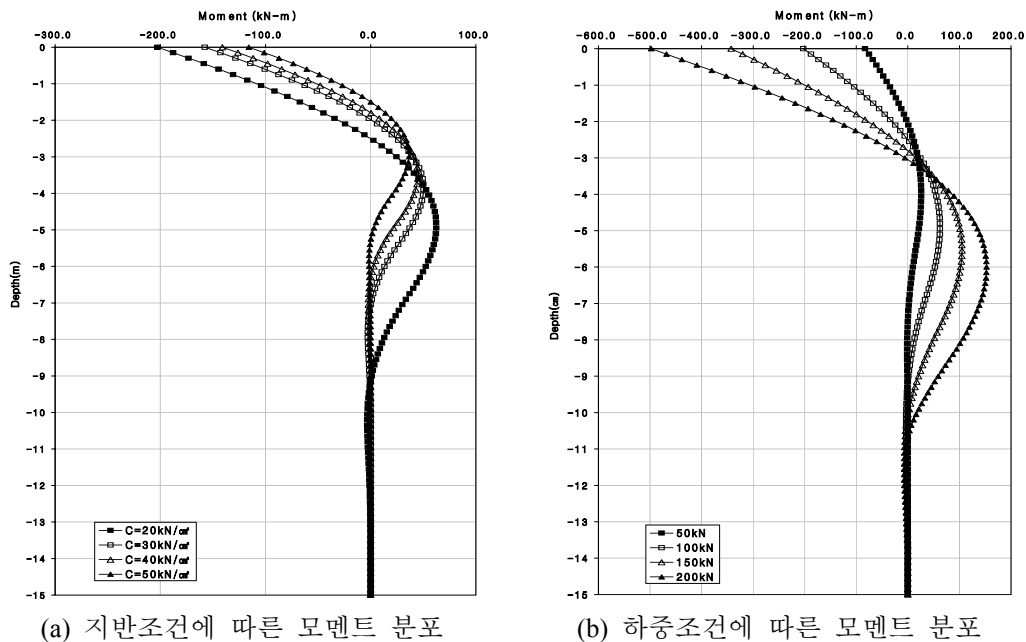


그림 1. 지반 및 하중조건에 따른 깊이별 모멘트 분포

그림 1에서의 조건은 상부 10m는 점성토층이고 그 하부는 풍화토층으로 구성되어있는 지반에서 길이 15m의 강관말뚝($\phi 508-12t$)이 회전구속되어 있는 경우를 가정하여 점성토층의 비배수전단강도(10, 20, 30, 40 kN/cm²)와 수평하중(50, 100, 150, 200kN) 조건에 따른 모멘트분포의 경향을 평가하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 말뚝에 작용하는 모멘트의 분포는 말뚝상부에 주로 작용하고 말뚝하부로 내려갈수록 모멘트가 급격히 줄어들면서 축하중에 의해 지배되는 형상을 보이는 것으로 분석되었다.

이러한 모멘트 분포의 경향은 지반조건, 하중조건 등에 크게 영향이 없는 것으로 그림 1에서 평가되었다. 그러므로 기존의 강관말뚝을 대신할 수 있는 보다 경제적인 개념의 복합말뚝인 상부모멘트가 주로 작용하는 말뚝부분은 강관말뚝으로 축하중이 주로 작용하는 하부는 콘크리트말뚝으로 구성된 복합말뚝을 제안하였으며 이를 HCP(Hybrid Composite Pile)이라 하였다. HCP의 개요도는 그림 2와 같다.

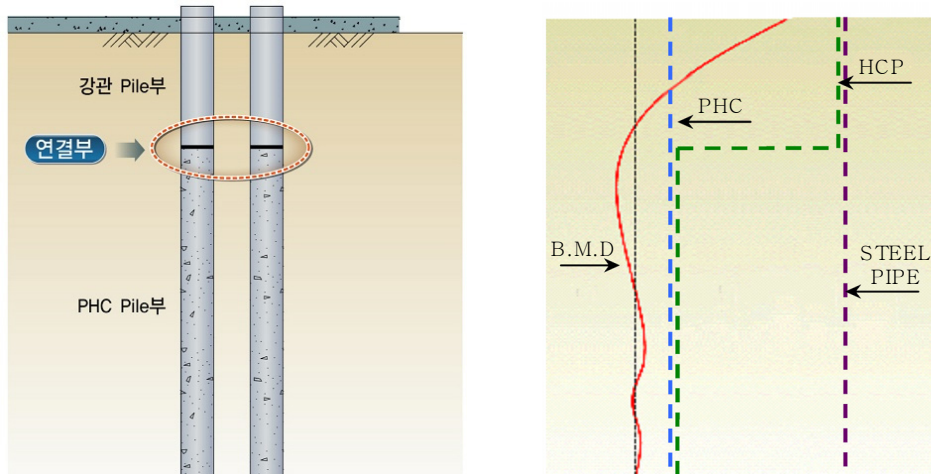


그림2. HCP말뚝의 개요도

3. 복합말뚝(HCP)의 연결부와 건전성 평가

3.1 연결이음부 위치

국내에서 복합말뚝 연결부 위치에 대한 시방규정은 복합말뚝이 사용되지 않은 실정이므로 명확한 정의가 없지만 ‘도로설계요령 제3권(한국도로공사, 2001)’에는 그림 3과 같이 현장타설말뚝에서의 주철근의 단면 변화 위치를 정하는 방법이 있어 이를 참고할 수 있을 것이다.

한편 일본에서는 내진설계 시 과도한 수평력에 저항하기 위한 기능성 말뚝과 수평력이 크게 작용하는 말뚝 상부에 단면 변화 말뚝 및 SC(Steel Composite Concrete)말뚝을 조합한 복합말뚝 등 복합말뚝의 적용이 활발한 일본에서는 이러한 연결부 위치에 대한 명확한 시방규정이 있다.

일본도로협회에서 발간한 ‘杭基礎設計便覽(1992)’에서는 말뚝단면이나 말뚝재질이 바뀌는 상부말뚝의 최소길이는 최대모멘트(M_{max})가 발생하는 위치의 1/2이하로 규정하고 있다. 일본의 토질공학회(1990)에서 발간한 ‘말뚝기초의 조사, 설계에서 시공까지’에서는 상부말뚝 최소길이(l_1)를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$l_1 = \frac{1}{2} M_{max} + 1.0 (m) \quad (1)$$

그러므로 복합말뚝의 상부연결부의 위치를 식 (1)에 근거하여 정하도록 하였다.

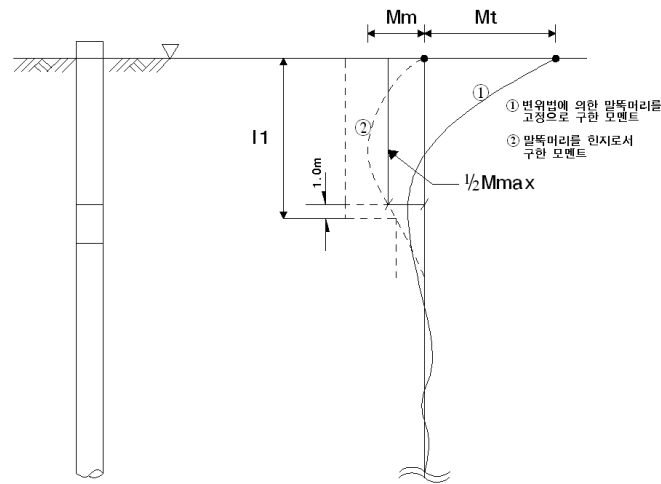


그림 3. 말뚝 연결부 위치 선정

3.2 연결부의 건전성 평가

강관말뚝이나 콘크리트말뚝의 연결은 국내에서 용접이음을 기본으로 하고 있다. 그러나 강관말뚝과 콘크리트말뚝은 단면적이 다르므로 연결 시 건전성과 안정성이 확보되어야 한다. 특히나 말뚝의 기본개념은 항타관입이므로 항타 시 상부강관말뚝에 작용하는 항타응력이 콘크리트말뚝으로 전달되면서 응력 집중 등으로 인해 콘크리트말뚝에 손상이 되지 않아야 함은 물론 정적인 하중재하 하에서의 장기적 거동 역시 하부의 콘크리트말뚝에 손상이 없어야 한다. 또한 횡하중 작용 시 연결부의 건전성 역시 확보되어야 하는 개념에서 콘크리트말뚝과 강관말뚝의 연결부를 제안하였다. 제안한 말뚝 연결부의 개념은 그림 4와 같다.

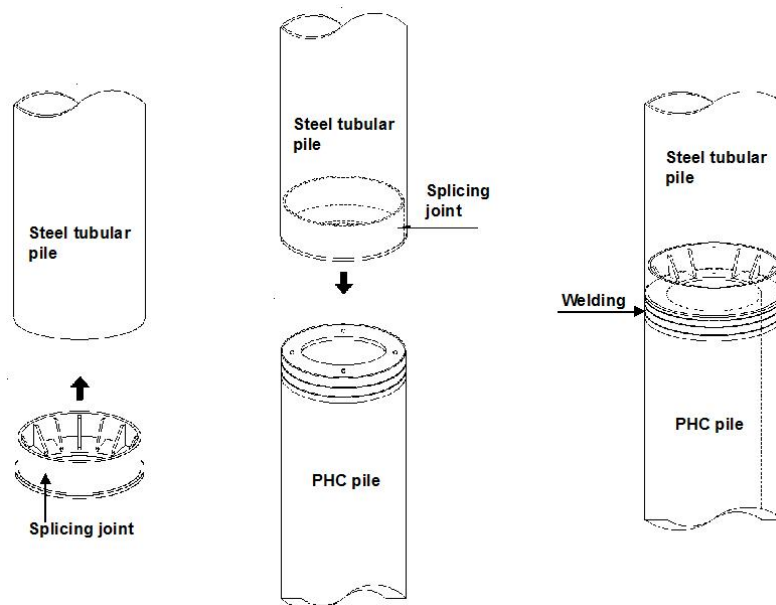


그림 4. 복합말뚝 연결부 보강 및 이음

이러한 말뚝연결부의 건전성을 평가하기 위해 다음과 같은 방법을 적용하였다.

3.2.1 현장적용을 통한 말뚝연결부 건전성 평가

PDA를 이용하여 응력전달 mechanism을 규명하였으며 풍화암 상단까지 말뚝을 관입하여 hard driving 을 통해 연결부의 건전성을 PDA 측정 결과를 분석하고 복합말뚝의 연결부위까지 굴착 후 육안으로 확인하여 연결부의 건전성을 평가하였다. 이러한 결과를 정리한 것이 표 1이며 HCP 항타 후 굴착 전경을 보인 것이 그림 5이다.

표 1. HCP의 항타응력 측정

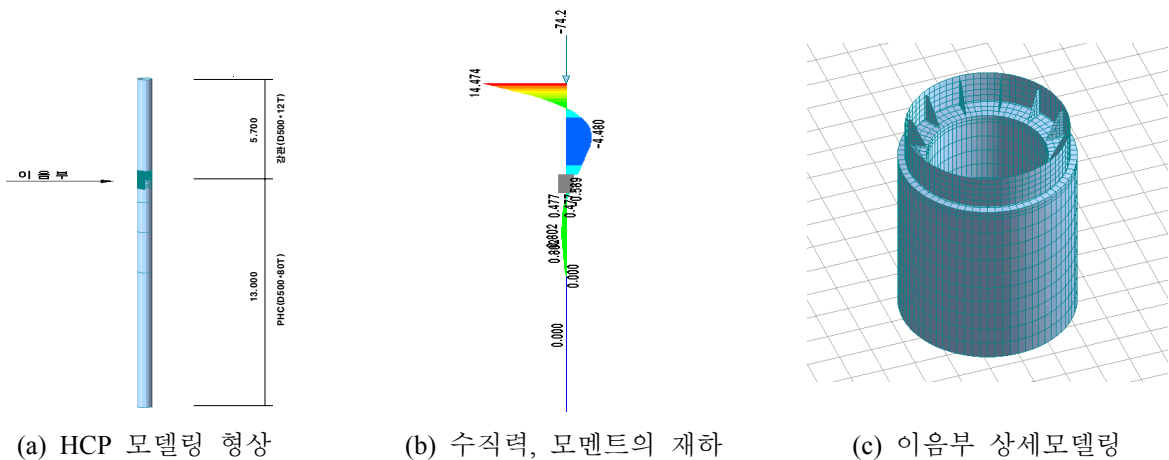
말뚝 번호	관입 깊이(m)	관입량 (mm/打)	항타에너지 (tonf · m)	압축응력 (kgf/cm ²)	
TP-1	9.4	6	6.7	강관 : 1148	콘크리트 : 435
TP-2	8.0	5	6.5	강관 : 1319	콘크리트 : 450



그림 5. HCP말뚝 항타 후 굴착 전경

3.2.2 FEM해석을 통한 말뚝연결부 건전성 평가

콘크리트말뚝과 강관말뚝이음부에 대해 구조적으로 정적인 설계하중이 작용하였을 경우 연결부에 대한 구조적 안정성을 분석하기 위해 FEM해석을 수행하였다. 실제로 지반에 관입된 말뚝은 말뚝과 흙의 구조적 상호작용까지 모델링하여야 하나 흙과 구조물의 모델링의 복잡성 및 한계로 인하여 단순히 말뚝만 모델링하였다. 이음부 위치를 중심으로 상, 하 각 50cm를 3차원으로 모델링하고 콘크리트말뚝에는 40kgf/cm²의 프리스트레스를 적용하였다. 그림 6은 3차원 모델링의 형상과 외부하중 조건이다.



(a) HCP 모델링 형상
(b) 수직력, 모멘트의 재하
(c) 이음부 상세모델링

그림 6. 하중조건 및 모델링

그림 7은 해석수행결과를 나타낸 것이다. 해석결과에 의하면 상부의 강관말뚝은 허용응력값이 상당한 여유가 있는 반면 연결부 하단의 콘크리트말뚝의 경우 허용응력의 여유치는 크지 않았다. 이는 상부의 강관말뚝의 하중이 콘크리트말뚝으로 전달되면서 단면적의 차이로 인하여 응력집중이 발생하는 것으로 판단되며, 이러한 응력집중은 연결부의 보강재를 통해 많이 해소되는 것으로 분석되었다. 즉 분석결과를 통해 강관과 PHC의 연결부의 구조적 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

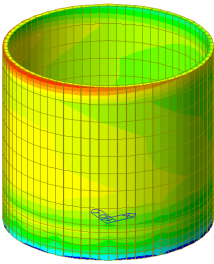
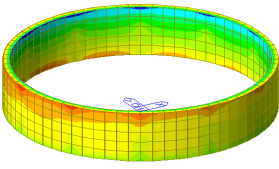
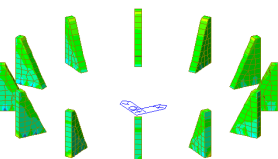
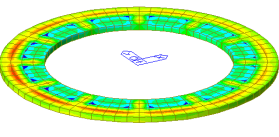
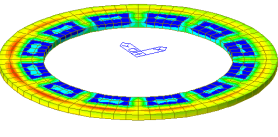
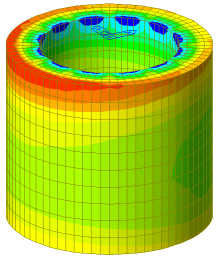
응력검토 01 - 강관말뚝 (OK)		응력검토 02 - 결합구 강관 (OK)	
			
$f_{c(min)} = -68\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(max)} = -711\text{kgf/cm}^2$	$f_{t(max)} = +79\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(max)} = -345\text{kgf/cm}^2$
$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = +1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$
응력검토 03 - 결합구 보강리브 (OK)		응력검토 04 - 결합구 원형보강관 (OK)	
			
$f_{t(max)} = +450\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(max)} = -373\text{kgf/cm}^2$	$f_{t(max)} = +61\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(max)} = -263\text{kgf/cm}^2$
$f_a = +1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = +1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$
응력검토 05 - PHC말뚝 두부보강관 (OK)		응력검토 06 - PHC말뚝 (OK)	
			
$f_{c(min)} = -11\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(max)} = -228\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(min)} = -42\text{kgf/cm}^2$	$f_{c(max)} = -173\text{kgf/cm}^2$
$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -1400\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -200\text{kgf/cm}^2$	$f_a = -200\text{kgf/cm}^2$

그림 7. 이음부 FEM 해석결과

3.2.3 Bending시험을 통한 말뚝연결부 건전성 평가

콘크리트말뚝과 HCP말뚝의 연결부에 대해 bending 시험을 수행하여 연결부에 대한 하중지지능력 뿐만 아니라 건전성을 평가하였다. 실험 전경을 보인 것이 그림 8이다.



그림 8. HCP말뚝 bending 시험 전경

시험 방법은 8.17~13.10tonf를 총 5단계에 걸쳐서 하중을 재하하고 하중에 따라 말뚝이음부에 대한 말뚝변형을 측정하였으며 균열 발생 시 균열의 진행양상을 측정하였다. 시험 결과 12.86 tonf · m 모멘트 작용 시 연결부가 아닌 콘크리트말뚝(기준휨균열모멘트=10.5 tonf · m) 표면에 미세균열이 그림 9와 같이 발생하였다.

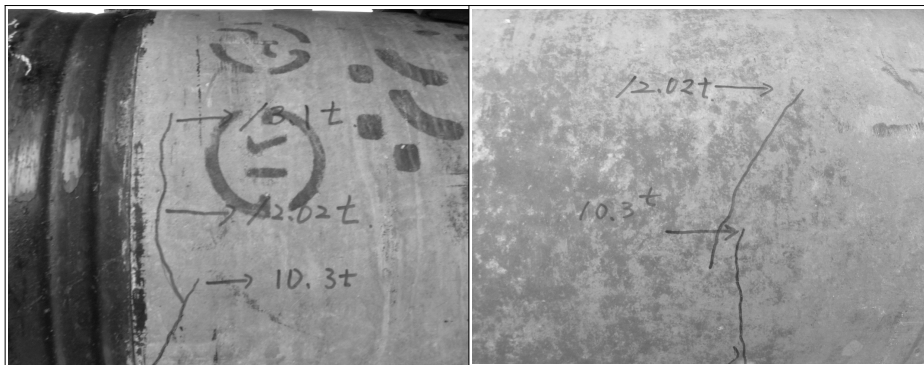


그림 9. 연결부 bending 시험시 PHC 말뚝 균열 발생 사진

휨모멘트에 의한 콘크리트말뚝의 파괴가 진행되었지만 강관말뚝과 콘크리트말뚝의 이음부에서는 16.38tonf·m의 모멘트 작용 시에도 균열 및 파괴의 징후는 발견되지 않았으며 콘크리트말뚝에 균열이 발생하더라도 강관말뚝과 콘크리트말뚝의 용접이음부는 안정성을 그대로 유지하고 있어 연결부가 구조적으로 작용하는 휨모멘트에 저항하는 안정성을 충분히 확보하는 것으로 평가할 수 있다.

3.2.4 수평재하시험을 통한 말뚝연결부 건전성 평가

HCP말뚝의 수평저항능력을 평가하기 위하여 수평재하시험을 수행하였다. 시험말뚝은 HCP $\phi 500$ 과 강관말뚝 $\phi 508 \times 12t$ 를 사용하여 그림 10과 같이 강관말뚝과 HCP말뚝 사이에 유압장치를 설치하여 수평하중증가에 따라 강관말뚝과 HCP말뚝의 수평변위를 동시에 측정하여 수평거동을 분석하였다. HCP말뚝은 상부에 강관말뚝 $\phi 500$ 길이 4.2m와 하부에 PHC A-type의 콘크리트말뚝이 연결되어 23.2m까지 항타관입하였다. 강관말뚝은 $\phi 508 \times 12t$ 를 46m까지 항타관입하였는데 불과 2.5m 떨어진 곳에서 이렇게 강관말뚝과 HCP말뚝의 관입심도가 차이를 보이는 것은 지표 하 23m 깊이에 N치 40~50에 해당되는 실트질점토의 견고한 층이 존재하고 있어 말뚝하단이 콘크리트말뚝으로 되어있는 HCP말뚝과 강관말뚝과의 항타관입성의 차이 때문이다. 즉 강관말뚝은 N치 50/18까지 관입된 반면 콘크리트말뚝은 N치 40~50인 견고한 층을 관통하지 못하였다.



그림 10. 수평재하시험 전경

이렇게 관입심도에 차이를 보이는 두 말뚝에 대한 수평 재하시험 결과를 보인 것이 그림 11이다. 그림에서 보는 바와 같이 수평력과 수평 변위 관계가 거의 일치하는 형상을 보이다가 잔류침하에 약간의 차이를 보이는 것으로 계측되었다. 이러한 수평력과 변위의 관계로부터 평가해볼 때 상부 4.2m가 강관이고 하부는 콘크리트 말뚝으로 구성되어 있는 HCP가 전체길이 46m까지 관입된 $\phi 508$ -12t 강관말뚝과 비교하여 전체길이 23.2m 수평저항력은 동일하다는 것을 보일 뿐 아니라 25.7ton의 수평력이 말뚝 두부에 작용할 때 지표면에서 4.2m 하부에 있는 용접 연결부는 수평력에 저항할 수 있는 충분한 안전성을 확보한 것으로 평가할 수 있다.

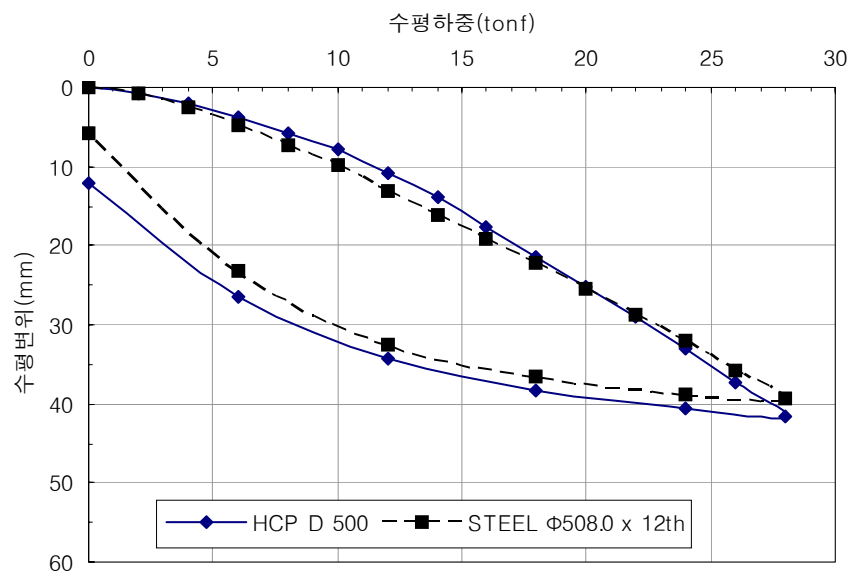


그림 11. 수평재하시험 결과

4. HCP의 현장적용

HCP의 거동분석을 위한 5차례의 시험시공을 통해 항타 관입성, 연결부의 건전성 평가를 위한 수평재하, 인발시험 등을 수행하여 현장 적용성을 평가하였다. HCP의 현장 적용을 위해 어려운 점은 이미 계산된 상부 강관말뚝의 길이를 시공 시 허용 범위 안에 맞추는 것이다. 국내에 말뚝 시공 방법은 항타 말뚝과 매입 말뚝으로 구분되며 점차 환경문제로 인해 매입 말뚝의 시공이 늘고 있는 추세이다. 말뚝의 지지층 변화가 심한 항타 말뚝의 경우 상부 강관말뚝의 길이를 모멘트 분포에 맞추기 위해 상부 강관말뚝에 많은 여유를 주어야 하기 때문에 HCP말뚝에 대한 경제성이 낮아지게 되는 경향이 있다.

실제 고속도로 현장에 적용한 HCP의 경우는 말뚝 상부에 작용하는 하중조건과 지반조건을 근거로 상

부 $\phi 500 \times 12t$ 강관말뚝의 길이가 4.3m로 계산되었으며 총 말뚝길이는 14.6m로 매입 말뚝 형식으로 시공하였다. 그림 12는 고속도로 현장에 적용 HCP말뚝 길이 선정을 위한 모멘트 분포를 보인 것이다. 그림 13은 HCP 시공 후 말뚝 상부가 지반에 노출된 상태를 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상부 노출된 강관말뚝의 길이 변화는 크지 않아 상부 강관말뚝의 길이를 이론적으로 구한 값과 차이 없이 시공이 가능하였다.

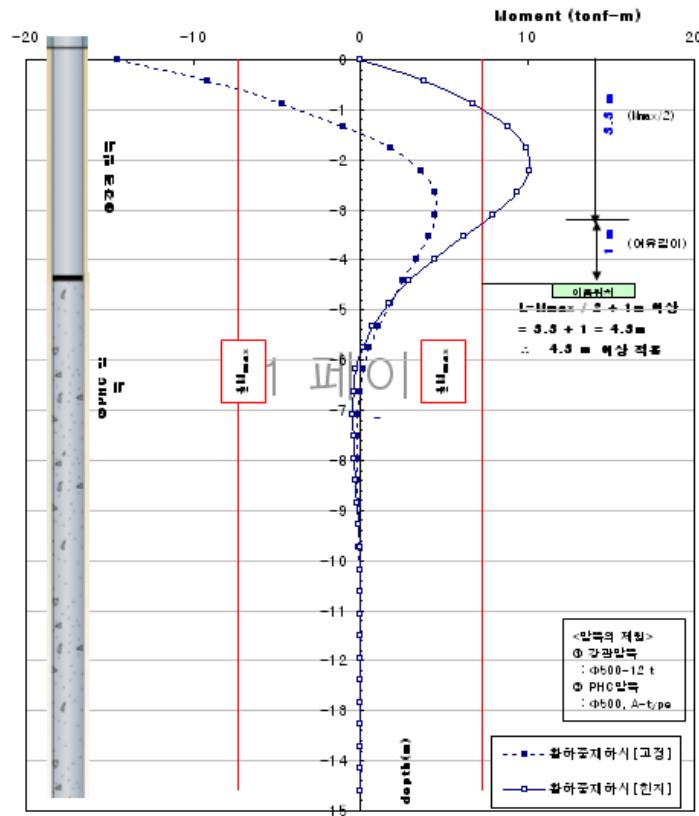


그림 12. 말뚝 연결부 위치 선정 사례



그림 13. 복합말뚝 시공 사례

강관말뚝을 매입말뚝으로 시공하는 경우 개단 말뚝의 폐색효과에 대한 문제 해결을 위해 많은 노력이 필요하다. HCP인 경우 폐색효과 확보뿐 아니라 말뚝주면에 주입하는 시멘트 모르타르량도 강관말뚝보다 현저히 줄어 HCP말뚝의 경제성을 확보할 수 있었다. 시공된 말뚝에 대해 정·동재하시험, 수평재하시험을 통한 검증은 통해 기존의 강관말뚝을 대신하여 적용할 수 있는 것으로 평가되었다.

5. 결론

국내 건설현장에 적용되고 있는 강관말뚝의 물량은 건설공사 수주물량의 감소에도 불구하고 연 40~50만 톤이 요구되고 있다. 하지만 2004년을 기점으로 불기 시작한 세계 원자재 가격의 급등으로 인하여 강관말뚝의 자재비가 동일 직경의 콘크리트 말뚝에 비해 4배 가까이 달하는 등 강관말뚝의 재료비 증가가 공사비 증가로 이어져 국가적으로 큰 손실을 초래하고 있는 실정이다. HCP는 기존 강관말뚝의 기능을 대신할 수 있는 기능성말뚝으로 상부는 강관, 하부는 콘크리트말뚝으로 구성되어 있으며 획기적인 말뚝재료비 절감을 위해 제안하였다.

콘크리트말뚝과 강관말뚝의 연결부는 용접으로 연결하였으며 용접연결부의 신뢰성을 확보하기 위해 bending시험, FEM해석, 항타관입성, 수평재하시험을 수행하였다. 또한 실제 고속도로현장의 교대기초에 적용하여 HCP에 대한 현장 적용성을 평가하였다.

연구결과 HCP연결부의 안정성 확보에는 문제가 없는 것으로 평가되었으며 HCP가 강관말뚝을 대신할 수 있으며 매입말뚝의 경우 완전한 폐색효과 및 주입되는 시멘트 모르타르의 감소 등으로 인하여 경제성뿐만 아니라 시공성까지 확보되는 것으로 확인하였다.

참고문헌

1. 한국도로공사(2001), **도로설계요령 제3권**, 한국도로공사, pp.497~502.
2. 日本道路協會(1992), **杭基礎設計便覽**, 日本道路協會, pp.330~334.
3. FHWA, *Manual on Design and Construction of Driven Pile Foundation*, FHWA-DP-66-1, pp.91~115.
4. Ishida et al(2002), "Static Horizontal Loading Tests of Steel and Concrete Composite Pile Group", *Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan, Architectural Institute of Japan*. pp.591~598.
5. NAVFAC(1982), *Soil Mechanics-Design Manual*, NAVFAC DM-7.2, pp.178~183.
6. Pando, M., Filz, G., Dove, J., and Hoppe, E.(2002), "Interface Shear Tests on FRP Composite Piles", *Proceedings, International Deep Foundations Congress, American Society of Civil Engineers*, Orlando, Florida. pp.1486~1500.
7. Prakash, Sharma(1990), *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, Canada, pp.59~60.