

복합말뚝 연결부 안정성 평가 및 수평거동특성 분석 Joint Stability and lateral behavior of composite piles

신윤섭¹⁾, Yunsup Shin, 박재현²⁾, Jaehyun Park, 황의성³⁾, Uiseong Hwang,
조성현⁴⁾, Sunghan Cho, 정문경⁵⁾, Moonkyung Chung, 부교탁⁶⁾, Kyo-Tag Boo

- 1) (주)GS건설 기술본부 지반팀 과장, Geotechnical Engineering Team, GS E&C
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Geotechnical Research Division of KICT
- 3) 삼표이앤씨(주) 파일사업팀 대리, Pile Business and Engineering Division, Sampyo E&C
- 4) (주)GS건설 기술본부 지반팀 부장, Geotechnical Engineering Team, GS E&C
- 5) 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원, Geotechnical Research Division of KICT
- 6) 삼표이앤씨(주) 파일사업팀 상무, Pile Business and Engineering Division, Sampyo E&C

SYNOPSIS : The behavior of composite piles composed of steel pipe pile in the upper part and concrete pile in the lower part by a mechanical splicing joint was examined by field lateral load tests and bending tests. A total of 7 piles including two instrumented piles for bending test were installed. The soil profile consists of soft clay with weak silt with shallow groundwater level. Laboratory tests were carried out to determine the basic soil characteristics and the strength parameters. This paper presents the composite pile behavior with various portions of the upper steel pile: 0, 20, 30, and 45% of the pile embedded pile length. Three-point bending tests were performed to investigate the stress-strain relation at the mechanical joint. Based on these test results, the behavior of composite piles with various upper steel pile length are evaluated and the stability of mechanical joints are examined. Through comparisons with results of field load tests, it was found that lateral load carrying capacity of the composite piles increased and deflections of the composite piles decreased with increasing the upper steel piles. The mechanical joint was proved to retain its structural stability against the tested load conditions. Economical benefits of composite pile of this kind can be gained by setting adequately the length of the upper steel pipe piles.

Key words : composite pile, lateral load test, three point bending test, mechanical joint

1. 서 론

최근 토목 및 건축구조물의 대형화 추세에 따라 기초의 형식도 점차 대형화되고 있으며, 말뚝기초 재료도 다양화되고 있다. 심도에 따라 상이하게 작용하는 하중에 대하여 효과적으로 저항하기 위해 이질의 재료, 즉 강관말뚝과 pretensioned high spun concrete(PHC) 말뚝을 활용한 복합말뚝의 경우 그 안정성과 성능이 확인되어 점차 적용범위가 확대되고 있는 추세이다. 중구경(직경 500mm) 복합말뚝의 경우 이질의 말뚝을 용접으로 연결하는 방식(Lee, 2007)과 무용접 방식으로 연결하는 방식에 대한 연구가 진행되었으며, 대구경(직경 1000mm) 복합말뚝의 경우 현장 시공성을 고려한 무용접 복합말뚝에 대한 성능 및 지지력을 평가하는 연구가 진행되어 왔다(Shin, 2010).

강관말뚝과 PHC말뚝을 이용한 복합말뚝의 경우 말뚝 재료 및 두께가 서로 상이하여 말뚝 연결부 안정성에 대한 평가가 매우 중요하며, 말뚝 연결부 위치 및 상태가 말뚝 전체의 거동특성에 영향을 미칠

수 있다. 이처럼 말뚝 연결부에 대한 중요성에도 불구하고, 복합말뚝의 거동을 평가할 때 말뚝 연결부 안정성 평가 및 위치에 따른 말뚝 거동특성에 대한 연구가 전무한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 중구경 및 대구경 무용접 복합말뚝의 말뚝 연결부 거동특성 및 안정성 평가를 말뚝 휨시험을 통하여 분석하였고, 연결부 위치에 따른 말뚝의 거동특성을 분석하기 위해 현장 재하시험을 수행하였다. 말뚝 휨시험과 현장 재하시험을 바탕으로 말뚝 연결부 위치가 말뚝 거동특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 복합말뚝의 현장 적용시 적절한 말뚝 연결부 위치를 제안하였다.

2. 지반조사 결과

복합말뚝 연결부 안정성 및 수평거동특성을 평가하기 위해서 말뚝 휨시험 및 말뚝 수평재하시험을 수행하여야 한다. 말뚝 휨시험은 말뚝 생산공장에서 3점 재하 시험기를 이용하여 수행하였으며, 수평재하시험은 연약한 점성토 지반을 대상으로 현장재하시험을 수행하였다. 현장 재하시험에 앞서 현장 지반조사 및 실내시험을 수행하여 지반특성을 분석하였다.

현장 지반조건은 대체로 상부 3.0m까지 모래질 또는 모래질 자갈층으로 매립되어 있으며, 매립토 하부에 N치 5이하의 연약한 점성토 지반이 약 20.0m 두께로 분포하며, GL-30.0m 이하에서 풍화암이 나타나는 지반이다. 연약한 점성토 지반의 함수비는 50.4%, 액성한계 및 소성한계는 각각 62.7%, 27.5%로 일부 과압밀 특성을 나타내는 소성상태 지반특성을 나타내고 있다. 강도시험 및 압밀시험 결과 비배수 전단강도(c_{uu}) 31.0kPa, 압축지수(C_c) 0.61, 선행압밀지수(P_c)가 96.0kPa로 나타났다.

3. 말뚝시공 방법

중구경 복합말뚝 시공은 하부 PHC 말뚝을 유압해머(hydraulic hammer, 70kN)를 이용하여 항타시공하였다. 일정한 깊이 관입 후 상부 강관말뚝을 무용접 기계식 방식을 이용하여 연결, 연속적으로 항타시공을 수행하여 계획 심도까지 도달 후 최종 관입량을 확인(1mm/blow)하여 시공을 마무리하였다.

대구경 복합말뚝 시공방법으로 대구경 말뚝 내부에 오거(auger)를 관입하여 지반을 굴착함과 동시에 말뚝을 관입하는 중굴공법을 사용하였다. 중굴공법으로 대구경 복합말뚝을 시공하는 경우 하부 PHC 말뚝 내부에 오거를 관입하여 굴착시공 후, 오거를 제거하고 상부 강관말뚝을 무용접 방식으로 연결한다. 최종 심도에 도달 후 오거 선단에 장착한 비트(bit)의 air nozzle을 통하여 고압의 공기, 물 및 시멘트를 교반, 분사하여 말뚝을 고정하였으며, 최종 경타를 수행하여 지지력을 확보하였다. 중굴공법으로 대구경 말뚝을 시공하기 위해서 상부 및 하부에 오거 장착기(120~200마력)를 부착한 DH-658항타기 및 DH-900 크레인을 이용하였으며, 직경 650mm 오거는 선단부에 확경 비트를 장착하여 말뚝 내부로 관입한 오거가 말뚝 선단에서 지반을 950mm~1,050mm까지 확경할 수 있도록 특별 제작하였다.

4. 말뚝 재하시험

수평재하시험의 목적은 연결부 안정성 평가 및 연결부 위치에 따른 복합말뚝의 수평거동특성을 분석하는 것이다. 말뚝 직경과 무용접 연결부 위치에 따라 발생하는 수평변위 및 수평지지력을 확인하기 위해 말뚝 5본에 대하여 수평재하시험을 수행하였다. 5본의 시험말뚝은 중구경의 경우 상부강관말뚝 길이 비율을 20%, 30%, 45%로 증가시켜 시험을 수행하였으며, 대구경 말뚝은 상부강관말뚝 길이가 30%인 복합말뚝과 강관말뚝을 연결하지 않은 대구경 PHC말뚝을 대상으로 재하시험을 수행하였다.

말뚝 두부 수평변위 측정은 시험말뚝 부근에 1개의 reference beam을 설치하여 말뚝 몸체에 직각으로 magnetic holder를 설치하여 2개의 다이얼 게이지로 측정하였으며, 반력말뚝에도 직각방향으로 1개의 다이얼 게이지를 설치하여 하중재하에 따른 수평 변위를 측정하였다. 또한 복합말뚝의 경우 시험말뚝 두부 수평변위 측정뿐 아니라 말뚝 선단까지 하중단계별로 수평 변위를 측정할 필요가 있으므로 사전에

경사계 관입을 위한 강봉을 말뚝 내부에 관입하고 cement milk grouting으로 말뚝과 일체화 시키는 작업을 수행하였다. 하중 재하 단계별로 무용접 복합말뚝과 일체화된 강봉에 경사계를 관입하여 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝의 변위거동을 측정하며 무용접 연결부에서의 변위거동을 주의 깊게 계측하였다. 말뚝 직경 및 연결부 위치를 변화시키면서 수행한 수평재하시험 수량 및 복합말뚝의 재원을 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 수평재하시험 종류 및 수량

말뚝 번호	말뚝 종류	수평재하 시험수량	말뚝직경 (mm)	전체말뚝 길이(mm)	강관말뚝 길이비율*
Pile-1	Steel 12t(L=4.6m) + PHC 80t(L=19.0m)	1회	500	23.6	20%
Pile-2	Steel 12t(L=5.0m) + PHC 80t(L=12.0m)	1회	500	17.0	30%
Pile-3	Steel 12t(L=10.5m) + PHC 80t(L=13.0m)	1회	500	23.5	45%
Pile-4	Steel 16t(L=10.0m) + PHC 130t(L=25.0m)	1회	1,000	35.0	30%
Pile-5	Steel 16t(L=0.0m) + PHC 130t(L=30.0m)	1회	1,000	30.0	0%

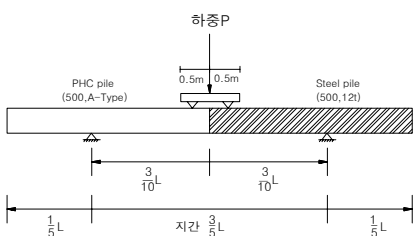
* 강관말뚝길이비율(%)=(강관말뚝길이/전체말뚝길이)×100



(a) 중구경 말뚝 시공 (b) 대구경 말뚝 시공 (c) 수평재하시험 전경 (d) 경사계 변위측정
그림 1. 중구경(직경 500mm) 및 대구경(직경 1,000mm) 복합말뚝 시공 및 재하시험 전경

5. 말뚝 휨시험

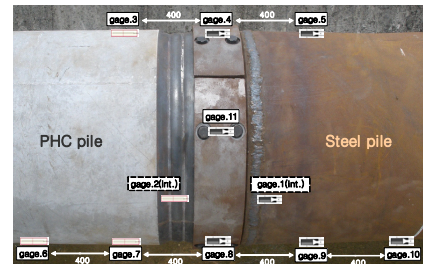
말뚝 휨재하시험은 PHC말뚝과 강관말뚝을 무용접으로 연결하는 이음부분에 파괴 휨모멘트에 상응하는 하중 재하시 발생하는 변형량 및 거동특성을 분석하고 연결부의 안전성을 평가하기 위한 시험이다. 다이얼게이지를 이용하여 말뚝 중심부 처짐량을 산정하였으며, 말뚝 연결부 내, 외부에 부착한 변형률 게이지(electric resistance strain gages)를 이용하여 부위별 발생 변형률을 산정하였다. 하중재하는 단계별로 6~8cycles로 구분하여 재하 및 제거과정을 반복하면서 연결부 거동특성을 분석하였다.



(a) 말뚝 휨시험 개념도



(b) 복합말뚝 휨시험 전경



(c) 변형률 게이지 설치 위치

그림 2. 중구경(직경 500mm) 및 대구경(직경 1,000mm) 복합말뚝 말뚝 휨시험 전경

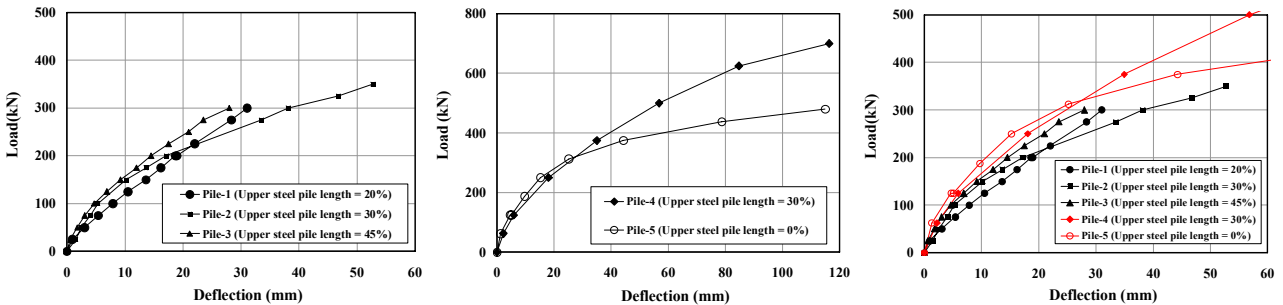
6. 시험결과 분석

6.1 말뚝 재하시험 결과

말뚝 재하시험은 중구경(직경 500mm) 복합말뚝 3본과 대구경(직경 1,000mm) 복합말뚝 2본에 대하여 상부 강관말뚝의 길이를 변화시키면서 수평재하시험을 수행하였다. 재하하중은 설계하중의 250% 또는 말뚝이 항복상태에 도달할 때까지 반복 하중을 재하하면서 시험을 수행하였다.

중구경 및 대구경 수평재하시험 결과 무용접 말뚝 연결부의 위치에 따라 동일한 직경 및 하중에 대하여 말뚝의 수평거동이 상이하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그림 3.(a)에서와 같이 중구경 복합말뚝의 경우 100kN 수평하중에 대하여 상부강관말뚝 길이 비율이 20%, 30%, 45%인 말뚝은 각각 7.88mm, 5.3mm, 4.65mm의 수평변위를 나타냈다. 일정한 수평변위 15.0mm 기준으로 작용하중을 분석한 결과 상부강관말뚝 길이 비율 20%, 30%, 45%인 말뚝이 각각 162.5kN, 185kN, 205kN의 수평 지지력을 나타내었다. 그림 3.(b) 대구경 말뚝의 경우 250kN 수평하중에 대하여 상부강관말뚝 길이 비율이 30%인 복합말뚝과 상부에 강관말뚝을 연결하지 않은 대구경 PHC말뚝이 각각 15.23mm, 18.10mm의 수평변위를 나타냈으며, 일정한 수평변위 15.0mm 기준으로 작용하중을 분석한 결과 각각 220kN, 246kN의 수평 지지력을 나타내었다. 수평하중이 300kN 이상 작용할 경우, 대구경 PHC 말뚝의 변위량이 상부강관말뚝 길이 비율이 30%인 대구경 복합말뚝 변위량보다 현저하게 큰 값을 나타내고 있는데, 이는 콘크리트 말뚝이 큰 수평력에 저항하지 못하고 균열이 발생했기 때문인 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합해 보면 중구경(직경 500mm) 및 대구경(직경 1,000mm) 복합말뚝의 경우 상부 강관말뚝의 길이가 길어질수록 수평변위가 작게 발생하는 것을 알 수 있었다. 즉, 말뚝을 연결하는 무용접 말뚝 연결부의 위치가 하중 재하 위치에서 멀어질수록 말뚝에 발생하는 변위량은 감소하였으며, 일정한 심도 이하(전체 말뚝길이의 약 30~40%이하)에서는 말뚝 연결부가 말뚝 수평거동에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.



(a) 중구경 말뚝 하중-변위곡선 (b) 대구경 말뚝 하중-변위곡선 (c) 전체 재하시험 결과 비교

그림 3. 상부 강관말뚝 길이 비율에 따른 하중-변위 곡선

6.2 말뚝 휨시험 결과

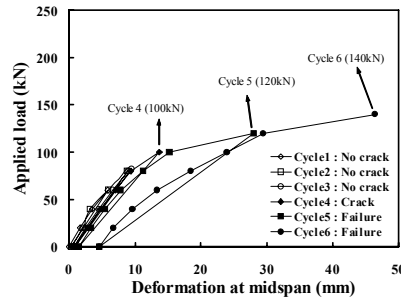
말뚝 휨시험은 말뚝의 변형성, 연성 및 균열특성을 측정하는 굽힘 균열시험으로 말뚝 연결부 거동특성을 분석하기 위하여 하중 단계별로 말뚝 연결부에서 발생하는 처짐량 및 변형률을 측정하였다.

시험 결과 중구경 복합말뚝의 경우 3단계 하중 82.6kN 작용시 처짐이 9.46mm 발생하였고, 4단계 100kN 작용시 변위가 13.72mm 발생하면서 일부 균열이 발생하였다. 5단계 120kN 작용시 변위가 28.07mm 발생하면서 PHC말뚝 연결부에서 인장균열이 발생하여 파괴에 이르렀다. 대구경 복합말뚝의 경우 6단계 하중 400kN 작용시 처짐이 17.42mm 발생하였고, 7단계 450kN 작용시 변위가 22.51mm 발생하면서 일부 균열이 발생하였다. 8단계 490kN 작용시 변위가 40.12mm 발생하면서 PHC말뚝 연결부

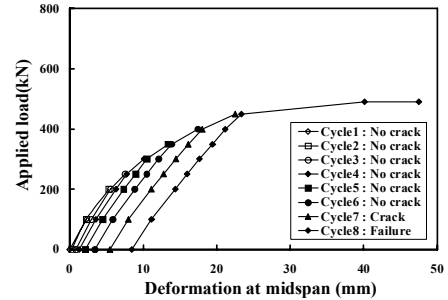
에서 균열이 발생하여 파괴에 이르렀다. 이는 중구경 말뚝의 균열 휨모멘트 기준(62kN)과 대구경 말뚝의 균열 휨모멘트 기준(400kN)을 만족하는 값이며, PHC 파일에 균열이 발생하기 시작하여 파괴에 이르기까지 PHC말뚝과 강관말뚝을 연결하는 무용접 연결부에서는 항복징후가 발생하지 않았다. 그러나 재하하중이 커질수록 말뚝 연결부에 발생하는 변형량 및 잔류변형량이 크게 나타나는 것으로 관찰되었다.



Steel(φ1,000mm,16t)+PHC(130t)



(b) 중구경말뚝(하중-변형곡선)

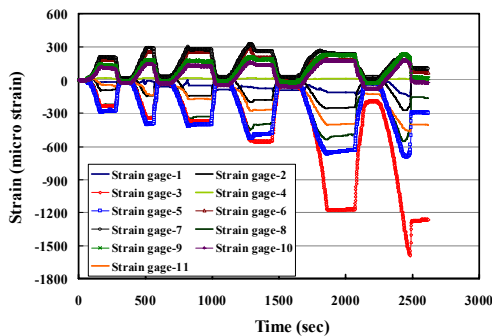


(c) 대구경말뚝(하중-침하곡선)

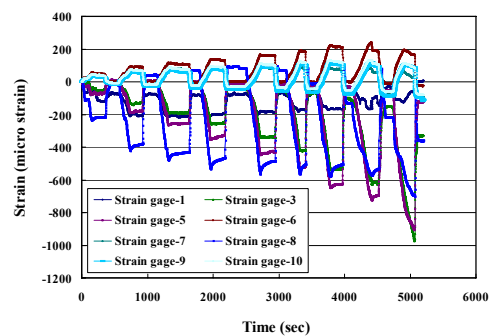
(a) 복합말뚝 연결부 휨시험

그림 4. 말뚝 휨시험 결과 하중-변형곡선

변형을 게이지는 무용접 말뚝 연결부 내,외부 총 11곳에 부착하였으며, 하중 재하단계별로 말뚝 연결부에서 발생한 변형을 값을 계측하였다. 게이지 1번과 2번은 말뚝 연결부 내부에 부착하였으며, PHC말뚝의 압축 및 인장변형율은 게이지 3번, 6번, 7번, steel 말뚝에는 게이지 5번, 9번, 8번을 부착하였고, 게이지 4번, 8번, 11번은 말뚝 연결 측면 plate에 부착하였다.



(a) 중구경말뚝 하중단계별 변형율 값



(b) 대구경말뚝 하중단계별 변형율 값

그림 5. 중구경 및 대구경 복합말뚝 휨시험 결과 변형율 분포

무용접 말뚝 연결부에서 하중단계별 변형율 계측결과 3단계 하중 82.6kN 작용시 말뚝하부에서 인장변형률 280×10^{-6} 이 발생했고, 말뚝상부에서 압축변형률 413×10^{-6} 이 발생하였다. PHC말뚝에 균열을 발생하기 시작한 4단계 100kN 작용시 PHC말뚝 인장변형률은 320×10^{-6} 이 발생했고, 강관말뚝 인장 변형률은 208×10^{-6} 이 발생하여 균열발생시 콘크리트 말뚝의 허용 휨응력기준(160×10^{-6})을 만족하였다. PHC말뚝에 균열이 발생한 이후, 콘크리트 말뚝 압축부에 응력이 크게 집중되는 것으로 나타났으며, 측면 plate 부분에 작용하는 압축변형률을 통하여 수평하중 작용시 측면 plate 감압부가 큰 구속력을 발휘하여 말뚝 연결부의 건전성을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 대구경 복합말뚝의 경우도 일부 균열이 발생하기 시작한 7단계 450kN 작용시 PHC말뚝 인장변형률은 210×10^{-6} 이 발생하여 휨응력기준을 만족하였고, 8단계 490kN 하중 이후 콘크리트 말뚝 압축부에 응력이 집중되어 말뚝이 파괴된 것을 확인할 수 있었다.

무용접 말뚝 연결부 계측을 통하여 말뚝 연결부에 발생하는 변형률 값을 정량적으로 산정할 수 있었으며, 이를 통하여 미세 균열을 발생시킨 하중단계를 산정하여 허용 휨모멘트 기준과 비교할 수 있었으며, 말뚝 연결부 요소별로 발생하는 변형률 분포를 확인하여 응력전달 메커니즘을 확인할 수 있었다.

7. 결 론

본 연구에서는 중구경 및 대구경 무용접 복합말뚝의 말뚝 연결부 거동특성 및 안전성 평가를 수행하기 위해 말뚝 휨시험 및 현장 재하시험을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 연구 결과를 도출할 수 있었다.

1. 수평재하시험 결과, 중구경 복합말뚝 경우 100kN 수평하중에 대하여 상부강관말뚝 길이 비율이 20%, 30%, 45%인 말뚝은 각각 7.88mm, 5.3mm, 4.65mm의 수평변위를 나타냈으며 일정한 수평변위 15.0mm 기준으로 작용하중을 분석한 결과 상부강관말뚝 길이 비율 20%, 30%, 45%인 말뚝이 각각 162.5kN, 185kN, 205kN의 수평 지지력을 나타내었다.
2. 대구경 말뚝의 경우 250kN 수평하중에 대하여 상부강관말뚝 길이 비율이 30%인 복합말뚝과 상부에 강관말뚝을 연결하지 않은 대구경 PHC말뚝이 각각 15.23mm, 18.10mm의 수평변위를 나타냈으며, 일정한 수평변위 15.0mm 기준으로 작용하중을 분석한 결과 각각 220kN, 246kN의 수평 지지력을 나타내었다.
3. 재하시험 결과를 바탕으로 중구경(직경 500mm) 및 대구경(직경 1,000mm) 복합말뚝의 경우 말뚝을 연결하는 무용접 말뚝 연결부의 위치가 하중 재하 위치에서 멀어질수록 말뚝에 발생하는 변위량은 감소하였으며, 일정한 심도 이하(전체 말뚝길이의 약 30~40%이하)에서는 말뚝 연결부가 말뚝 수평 거동에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.
4. 말뚝 휨시험 결과, 무용접 말뚝 연결부에 발생하는 변형률 값을 정량적으로 산정하여 미세 균열을 발생시킨 하중단계를 산정할 수 있었으며, 이를 허용 휨모멘트 기준과 비교하여 말뚝 연결부 품질 상태를 확인 할 수 있었다.
5. 말뚝 휨시험을 통한 연결부 응력전달 메커니즘 확인 결과, PHC말뚝에 미세 균열이 발생한 이후, 콘크리트 말뚝 압축부에 응력이 크게 집중되는 것을 알 수 있었으며, 측면 plate 부분에 작용하는 압축 변형률을 통하여 수평하중 작용시 측면 plate 감압부가 큰 구속력을 발휘하여 말뚝연결부의 안전성을 유지하고 있음을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. Lee, C. T., and Bak, S. Y., "Application of a composite pile in local practice." KAPE in soil mechanics & foundation engineering, Autumn National conference, 2007.
2. Shin, Y. S., Park, J. H., and Hwang, U. S., "Bearing capacity of large diameter PHC pile and large diameter composite pile." KGS Spring National Conference 2010 .
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. Bowles, J.E. Foundation Analysis and Design, 5th edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.
5. Duncan, J.M., and Chang, C-Y., "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." Journal of Soil Mechanics Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1970, pp. 1629-1653.
6. Iskander, M.G., and Stachula, A., "Wave equation analyses of fiber-reinforced polymer composite piling." Journal of Composites for Construction, ASCE, 6(2), 2002, pp. 88-96.