

## 대구경 PHC말뚝 및 대구경 복합말뚝( $\phi 1,000\text{mm}$ ) 지지력 산정에 관한 연구

### Bearing capacity of large diameter PHC pile and large diameter composite pile

신윤섭<sup>1)</sup>, Yunsup Shin, 박재현<sup>2)</sup>, Jaehyun Park, 황의성<sup>3)</sup>, Uiseong Hwang,  
조성한<sup>4)</sup>, Sunghan Cho, 정문경<sup>5)</sup>, Moonkyung Chung, 이진영<sup>6)</sup>, Jinyoung Lee

- 1) (주)GS건설 기술본부 지반팀 과장, Geotechnical Engineering Team, GS E&C
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, 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 책임연구원, Geotechnical research division of KICT
- 6) (주)신일기초 기술영업부 이사, Pile Business and Engineering Division, Shinil

**SYNOPSIS** : Large PHC piles with a diameter of 1,000mm or larger were recently introduced for the first time in Korea. This paper presents full-scale static and dynamic pile load tests performed on two 1,000mm PHC piles and two composite piles with steel pipe piles of the same diameter in the upper portion, installed by driving and pre-boring. The objectives of the tests include evaluating pile drivability, load-settlement relation, allowable bearing capacity, and the stability of mechanical splicing element for the composite pile(a.k.a. non-welding joint). The performance of the large diameter PHC piles were thought to be satisfactory compared to that of middle sized PHC piles with a long history of successful applications in the domestic and foreign markets.

**Keywords** : Large PHC pile, composite pile, full-scale static load test, dynamic load test, allowable bearing capacity.

## 1. 서론

최근 대규모 토목공사 및 초고층 건축현장이 증가하면서 연직력과 수평력에 대해 큰 지지력을 발휘할 수 있는 말뚝의 수요가 증가하고 있다. 말뚝의 본당 지지력을 증가시키기 위해서 말뚝의 직경 및 근입심도가 큰 현장타설말뚝이 많은 시공현장에서 사용되고 있다. 현장타설말뚝은 말뚝 본당 지지력이 우수하고, 시공경험이 풍부하며 현장 적용성이 뛰어난 장점이 있으나 비용, 공기 및 현장에서의 품질관리 측면에서 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 토목 및 건축현장에서 보편적으로 사용되고 있는 PHC 말뚝을 국내 최초로 직경 1,000mm 대구경으로 제작하고, 이에 대한 현장 시공성을 상세히 검증함으로써 대구경 PHC말뚝의 적용성을 평가하였다. 또한 대구경 PHC말뚝 상단에 대구경 강관말뚝을 기계식 결합방식으로 연결한 복합말뚝에 대한 거동특성을 분석하였다. 대구경 PHC 말뚝 및 대구경 복합말뚝에 대한 현장 시공성 평가를 위해서 말뚝 매입시공과 항타시공을 병행하여 수행하였으며, 동재하시험 및 연직 정재하시험을 통하여 말뚝의 지지력을 평가하였다. 이러한 결과를 바탕으로 기존에 많이 사용하고 있는 동일한 직경의 강관말뚝을 기준으로 대구경 PHC말뚝 및 대구경 복합말뚝의 시공성, 경제성 및 현장 적용성을 평가하였다.

## 2. 대구경말뚝의 생산 및 시공방법

### 2.1 대구경말뚝의 생산

중구경 PHC말뚝( $\phi 500\sim 600\text{mm}$ )은 이미 토목현장이나 건축현장에서 많이 사용되고 있는 기초형식으로서, 재료에 대한 강도기준 및 품질성능이 확인되어 있으며 현장 적용성에 대해서도 이미 검증이 되어 있는 상태이다. 그러나 대구경 콘크리트말뚝( $\phi 1000\text{mm}$ )의 경우 일본에서는 사용되는 사례가 많이 있으나, 국내에서는 적용된 사례가 없기 때문에 말뚝 생산 공정에서부터 각별한 주의가 필요하며 제품 생산 후 강도에 대한 시험 및 재료 품질에 대한 검증 작업이 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 현장재하시험에 앞서 대구경 PHC말뚝을 일본 JIS 규정을 준수하여 생산하였으며, 강도시험과 품질시험을 수행하여 말뚝 자체의 성능을 검증하였다.

표 1. 대구경 PHC말뚝( $\phi 1000\text{mm}$ ) 생산 및 품질 시험 과정

| 1단계   | 2단계   | 3단계  | 4단계   |
|---|---|--|---|
|   |   |   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>PC강봉을 절단하여 철근망을 편성함.</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>철근롤 조립시 대구경 경우 직경11.2mm 강봉19개 사용</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>대구경 말뚝 두께는 130mm로 일정 콘크리트 투입 중요</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>몰드를 조립하고 인장샤프트에 인장력을 가함</li> </ul>             |
| 5단계   | 6단계   | 7단계  | 8단계   |
|  |  |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>원심성형시 초속,저속,중속 및 고속의 시간을 유지함</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>대구경 말뚝 규정에 따라 일정한 프리스트레스 도입</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>제품탈형 후 제품의 치수 측정 및 압축강도 측정</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>최종 적정 강도 발현을 확인하기 위한 휨시험 수행</li> </ul>         |

### 2.2 대구경말뚝의 시공

대구경 말뚝 시공방법으로 대구경 말뚝 내부에 오거(auger)를 관입하여 지반을 굴착함과 동시에 말뚝을 관입하는 중굴공법을 사용하였다. 중굴공법으로 대구경 말뚝을 시공하기 위해서 상부 및 하부에 오거 장착기(120~200마력)를 부착한 DH-658항타기 및 DH900 크레인을 이용하였으며, 직경 650mm 오거는 선단부에 확장 비트를 장착하여 말뚝 내부로 관입한 오거가 말뚝 선단에서 지반을 950mm~1,050mm까지 확장할 수 있도록 특별 제작하였다. 또한 견고한 지층에 말뚝을 관입할 경우 비트(bit)에 장착한 air nozzle을 통하여 고압의 공기와 물을 분사하여 지반을 일부 교란시켜 말뚝 관입성을 향상시켰으며 배토시 말뚝 내부에 발생하는 응력을 최소화하였다. 말뚝과 말뚝을 연결할 때는 대구경 말뚝의 연결시 공기 단축을 위해 무용접 기계식 말뚝 연결방법을 사용하여 시공속도 및 말뚝 연결부의 품질을 향상시켰다.

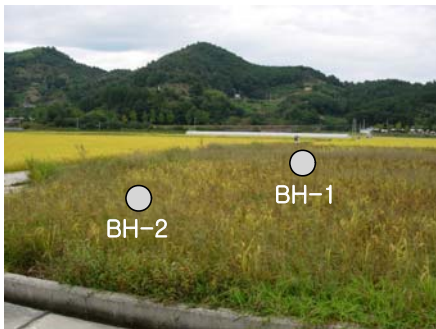


그림1. 중굴공법 시공전경

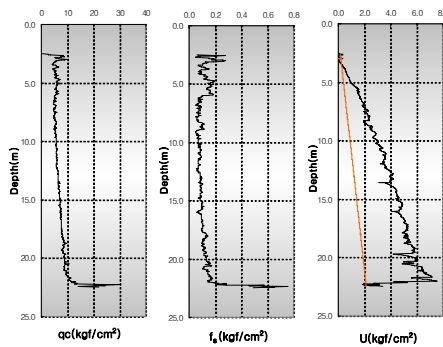
### 3. 현장재하시험

#### 3.1 지반조건

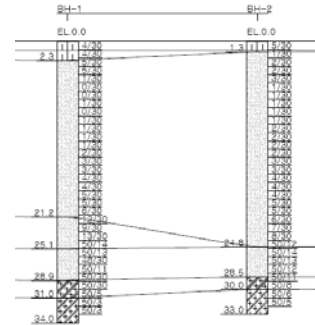
본 연구는 진주~광양간 복선화 전철 시공현장에서 수행하였으며, 재하시험 부지에서 시추조사 및 콘관입시험을 수행한 결과 상부 1.3~2.3m까지 실트질 모래층으로 매립되어 있으며, 매립토 하부에 N치 5 이하의 연약한 점성토 지반이 18.9~23.5m 두께로 분포하며, GL-30.0~31.0m 이하에서 풍화암이 나타났다. 또한 풍화토 상단 GL-24.8~25.1m 심도에서 약 3.8m 두께의 모래섞인 자갈층이 존재하였다.



(a) 현장 시험 전경



(b) Cone penetration test 결과



(c) 시추조사 결과

그림 2. 현장시험말뚝 배치도 및 지반조사 결과

#### 3.2 재하시험 조건

본 연구에서는 대구경 복합말뚝 및 대구경 PHC말뚝에 대하여 동재하시험과 정재하시험을 수행하여 말뚝의 항타관입성 분석, 연직 지지력 산정 및 말뚝 연결부에 대한 안정성을 평가하였다. 동재하시험은 유압 해머(160kN)을 이용하여 낙하고(stroke)를 0.5~1.5m까지 조절하면서 수행하였고, 정재하시험은 풍화암 이하까지 시공한 이스앵커(16공)의 반력을 이용, 4단계 반복재하시험을 수행하여 최대 시험하중 12,000kN까지 재하를 실시하였다. 재하시험 종류, 수량 및 현장 시험 말뚝 배치도는 다음과 같다.

표 2. 대구경 PHC말뚝 및 대구경 복합말뚝(φ1,000mm) 현장 재하시험 종류 및 수량

| 시공 방법          | 말뚝 번호  | 말뚝 종류                                   | 말뚝재하 시험회수(회) |        |
|----------------|--------|---|--------------|--------|
|                |        |   | 동재하 시험*      | 정재하 시험 |
| 매입공법<br>(중굴공법) | Pile-1 | Steelφ1,000×16t<br>+ PHCφ1,000 (A-Type) | 1set         | -      |
|                | Pile-2 | PHCφ1,000 (A-Type)                      | 1set         | -      |
|                | Pile-3 | Steelφ1,000×16t<br>+ PHCφ1,000 (A-Type) | -            | 1회     |
| 항타공법           | Pile-4 | PHCφ1,000 (A-Type)                      | 1set         | -      |

\* : 동재하시험은 총 15회 수행

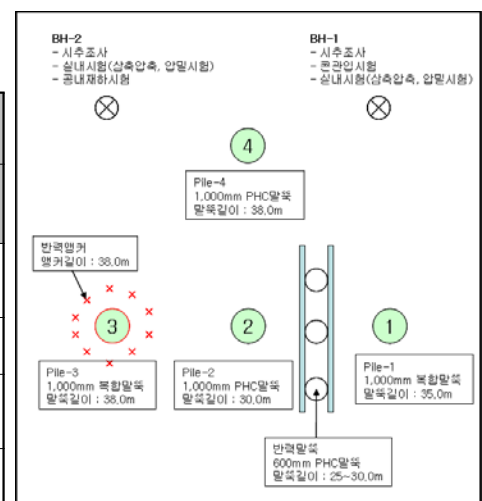


그림 3. 현장시험말뚝 배치도

## 4. 재하시험 결과

### 4.1 동재하시험 결과

#### 4.1.1 개요

본 연구에서는 대구경 복합말뚝 및 대구경 PHC말뚝에 대하여 PDA(Pile Driving Analyzer)를 이용한 동재하 시험 총 15회를 실시하였다. 동재하시험에서는 160kN 유압 해머와 DH658 항타기를 이용하였으며 말뚝 항타시 말뚝의 지지력 및 말뚝의 항타시공성을 확인하고 연결부 안정성을 평가하였다. 또한 말뚝 시공법으로는 굴착과 시공을 동시에 진행하는 중굴공법과 유압 해머를 이용한 직항타 공법을 도입하여 각각의 시공법에 따른 지지력 차이를 비교 검토하였다.

동재하시험은 3본의 대구경 복합말뚝 및 PHC말뚝에 대하여 표 3과 같은 조건(말뚝 관입심도, 하중조건 등)을 적용하여 현장 재하시험을 수행하였다.

표 3. 대구경 복합말뚝 및 대구경 PHC말뚝 동재하시험 조건

| 말뚝 번호       | 말뚝 종류  | 관입 심도 (GL-m) | 유압해머     |         | 최종 관입량 (mm/타) | 시험 종류     | 시험 날짜     |
|-------------|--|--------------|----------|---------|---------------|-----------|-----------|
|             |  |              | 램중량 (kN) | 낙하고 (m) |               |           |           |
| Pile-1 (매입) | 상부 Steel ( $\phi 1,000 \times 16t$ , 10.0m)<br>+하부 PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 25.0m) | 32.0         | 160.0    | 0.7     | 10.0          | *E.O.I.D  | '09.12.24 |
|             |  | 33.0         | 160.0    | 2.0     | -             | *Restrike | '10.02.04 |
| Pile-2 (매입) | PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 30.0m)  | 27.5         | 160.0    | 1.0     | 5.2           | E.O.I.D   | '09.12.24 |
|             |  |              | 160.0    | 1.5     | 14.0          | E.O.I.D   | '09.12.24 |
|             |  | 28.5         | 160.0    | 0.7     | 1.2           | E.O.I.D   | '09.12.24 |
|             |  |              | 160.0    | 1.0     | 1.5           | E.O.I.D   | '09.12.24 |
|             |  | 29.0         | 160.0    | 0.5     | 2.0           | E.O.I.D   | '09.12.25 |
|             |  |              | 160.0    | 1.0     | 4.0           | E.O.I.D   | '09.12.25 |
| Pile-4 (항타) | PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 47.0m)  | 32.5         | 160.0    | 0.5     | 10.0          | E.O.I.D   | '09.12.25 |
|             |  |              | 160.0    | 1.0     | 20.0          | E.O.I.D   | '09.12.25 |
|             |  |              | 160.0    | 1.5     | 30.0          | E.O.I.D   | '09.12.25 |
|             |  | 37.5         | 160.0    | 0.7     | 1.0           | E.O.I.D   | '09.12.26 |
|             |  |              | 160.0    | 1.0     | 4.2           | E.O.I.D   | '09.12.26 |
|             |  |              | 160.0    | 1.5     | 8.0           | E.O.I.D   | '09.12.26 |

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



(a) 160kN급 유압 해머 (b) 대구경 말뚝 항타시공 (c)대구경 복합말뚝 동재하 (d) 대구경 PHC말뚝 동재하  
그림 4. 대구경 PHC말뚝 및 대구경 복합말뚝 동재하시험 전경

### 4.1.2 항타관입성 분석

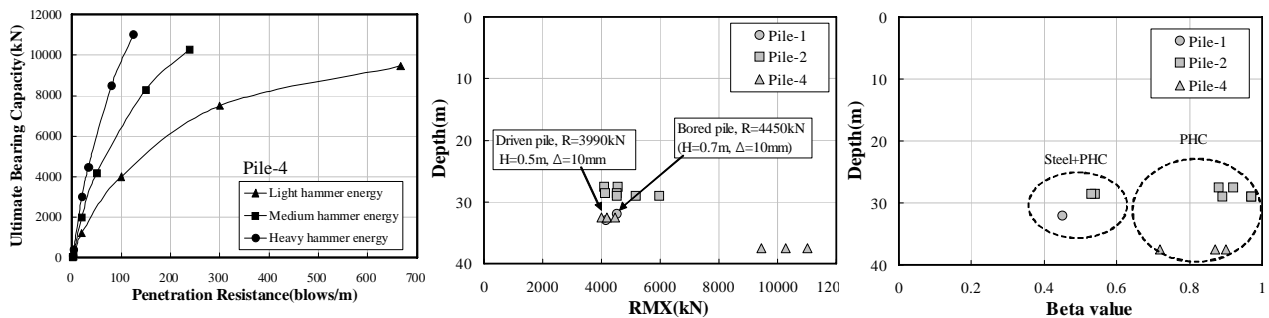
Pile-1과 Pile-2는 중굴공법을 사용한 매입말뚝으로 마무리 항타과정에서는 유압 헤머를 이용하여 항타 시공을 병행하였으며, 이때 PDA시험기를 이용하여 동재하시험을 수행하였다. 반면에 항타말뚝인 Pile-4의 경우 초기부터 항타시공을 하면서 동재하시험을 수행하였다. 대구경 PHC말뚝에 대한 항타시공 결과 말뚝의 파손 없이 성공적으로 수행되었으며, 항타관입성 분석결과 항타에너지가 증가함에 따라 관입저항력에 따른 극한 지지력의 값이 크게 산정됨을 확인할 수 있었다(그림4.(a)). 시공방법에 따른 지지력 차이를 분석하기 위해 동일 심도, 동일 에너지 작용시 지지력의 크기를 산정해 본 결과 중굴공법에 의해 시공한 말뚝과 항타시공한 말뚝의 지지력에는 거의 차이가 없는 것으로 나타나 중굴공법으로 시공시 주면마찰력에 충분히 발휘되고 있는 것을 확인하였다(그림4.(b)). 또한 동일한 말뚝 Pile-2를 대상으로 가속도계와 변위계 측정 위치를 변화시켜 상부 강관말뚝과 하부 PHC말뚝의 연결부에서의 파형의 특성과 말뚝의 건전도를 나타내는 Beta value 값을 산정해 본 결과, 상부 강관말뚝에 측정계를 부착하여 시험을 수행한 경우 말뚝의 건전도 지수가 매우 낮게 측정된 반면 동일한 말뚝에 대하여 하부 PHC말뚝에서 측정된 결과는 매우 양호하게 나타난 것을 알 수 있었다(그림4.(c)). 이는 말뚝의 상태에는 손상이 없으나 무용접 말뚝이음 부위의 미세한 불연속면으로 인해 응력파가 경계면에서 굴절 또는 반사되어 건전도 지수가 낮게 나타난 것임을 확인하였다.

표 4. 대구경 복합말뚝 및 대구경 PHC말뚝 동재하시험 결과

| 말뚝 번호       | 말뚝 종류  | 심도 (GL-m) | Hammer 낙하고 (m) | 출력치 결과값   |           |           |          | 시험 종류     |
|-------------|--|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|             |  |           |                | CSX (MPa) | CSB (MPa) | EMX (kJm) | RMX (kN) |           |
| Pile-1 (매입) | 상부 Steel ( $\phi 1,000 \times 16t$ , 10.0m)<br>+하부 PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 25.0m) | 32.0      | 0.7            | 16.6      | 6.6       | 113.3     | 4,510    | *E.O.I.D  |
|             |  | 33.0      | 2.0            | 33.8      | 0.0       | 314.3     | 4,150    | *Restrike |
| Pile-2 (매입) | PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 30.0m)  | 27.5      | 1.0            | 1.9       | 1.1       | 103.4     | 4,100    | E.O.I.D   |
|             |  |           | 1.5            | 2.6       | 1.4       | 153.6     | 4,540    | E.O.I.D   |
|             |  | 28.5      | 0.7            | 18.9      | 7.5       | 98.6      | 4,130    | E.O.I.D   |
|             |  |           | 1.0            | 20.0      | 8.1       | 117.4     | 4,520    | E.O.I.D   |
|             |  | 29.0      | 0.5            | 2.2       | 1.7       | 92.7      | 4,530    | E.O.I.D   |
|             |  |           | 1.0            | 2.5       | 2.0       | 118.6     | 5,180    | E.O.I.D   |
| Pile-4 (항타) | PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 47.0m)  | 32.5      | 0.5            | 1.4       | 1.1       | 50.4      | 3,990    | E.O.I.D   |
|             |  |           | 1.0            | 1.8       | 1.4       | 76.5      | 4,170    | E.O.I.D   |
|             |  | 37.5      | 1.5            | 2.7       | 1.8       | 143.0     | 4,470    | E.O.I.D   |
|             |  |           | 0.7            | 2.7       | 1.7       | 98.5      | 9,460    | E.O.I.D   |
|             |  | 37.5      | 1.0            | 3.2       | 2.5       | 143.8     | 10,280   | E.O.I.D   |
|             |  |           | 1.5            | 3.8       | 3.6       | 198.3     | 11,030   | E.O.I.D   |

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

\*EMX : Maximum Energy, \*RMX : Case 방법에 의한 최대 정적지지력



(a) 항타저항치별 추정극한강도 (b) 말뚝별 심도에 따른 RMX값 (c) 말뚝별 건전도지수

그림 5. 동재하시험을 통한 말뚝의 항타 관입성 분석 결과



### 4.1.3 허용지지력 산정

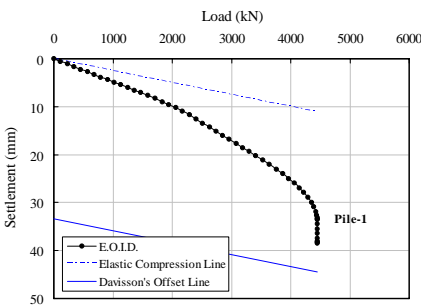
동재하시험을 통한 허용지지력 판정은 CAPWAP 분석 결과 도출된 전체지지력을 Davisson's Method를 적용하여 항복 하중을 평가하고 안전율 2.0을 적용하여 산정된 허용지지력과 CAPWAP 분석결과 도출된 전체지지력을 KSF 2591 및 도로교설계기준의 안전율 2.5를 적용하여 산정된 허용지지력을 비교하였다.

Pile-1과 Pile-2는 중굴공법을 이용하여 근입 심도를 풍화토 하단에 위치시켰으며, 1,620kN~3,061kN 정도의 허용지지력이 산정되었다. 또한 Pile-4의 경우 항타 시공한 말뚝으로 중간에 모래섞인 자갈층 3.8m를 관통하여 풍화암 하부 6.0m까지 관입시켰으며 최대 허용지지력이 최대 5,660kN 까지 산정되었다. 이는 초기항타(E.O.I.D) 시험결과로서 연약한 점성토 지반의 시간경과에 따른 setup 효과를 고려한다면 이보다 더 큰 허용지지력이 발휘될 수 있을 것이라 판단된다. Setup 효과에 따른 지지력 상향정도를 파악하기 위해서 Pile-1에 대하여 재항타(restrike) 시험을 수행하였으나, 현장 여건상 드롭해머를 사용하여 재하시험을 수행하였으므로 유압해머를 통해 산정한 지지력 결과와의 비교는 다소 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다. Davisson's Method로 말뚝의 허용지지력을 산정한 결과는 그림 6에 나타내었다.

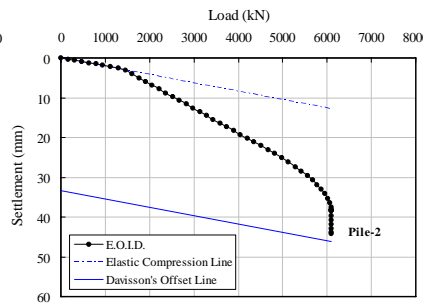
표 5. 동재하시험을 통한 대구경 복합말뚝 및 대구경 PHC말뚝 지지력 산정

| 말뚝 번호       | 말뚝 종류  | 관입 심도 (GL-m) | Hammer 낙하고 (m) | 출력치 결과값     |             |             |                  |                    |
|-------------|--|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------|--------------------|
|             |  |              |                | 주면 마찰력 (kN) | 선단 지지력 (kN) | 전체 지지력 (kN) | 허용지지력            |                    |
|             |  |              |                |             |             |             | CAPWAP (S.F=2.5) | Davisson (S.F=2.0) |
| Pile-1 (매입) | 상부 Steel ( $\phi 1,000 \times 16t$ , 10.0m)<br>+하부 PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 25.0m) | 32.0         | 0.7            | 1,040       | 3,410       | 4,450       | 1,780            | 2,225              |
|             |  | 33.0*        | 2.0            | 2,902       | 3,220       | 6,122       | 2,449            | 3,061              |
| Pile-2 (매입) | PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 30.0m)  | 27.5         | 1.0            | 880         | 3,170       | 4,050       | 1,620            | 2,025              |
|             |  |              | 1.5            | 900         | 3,630       | 4,530       | 1,812            | 2,265              |
|             |  | 28.5         | 0.7            | 900         | 3,270       | 4,170       | 1,660            | 2,085              |
|             |  |              | 1.0            | 970         | 3,560       | 4,530       | 1,812            | 2,265              |
|             |  | 29.0         | 0.5            | 910         | 3,639       | 4,549       | 1,820            | 2,275              |
|             |  |              | 1.0            | 1,010       | 4,190       | 5,200       | 2,080            | 2,600              |
| Pile-4 (항타) | PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 47.0m)  | 32.5         | 0.5            | 670         | 3,260       | 3,930       | 1,572            | 1,965              |
|             |  |              | 1.0            | 730         | 3,460       | 4,190       | 1,676            | 2,095              |
|             |  |              | 1.5            | 780         | 3,700       | 4,480       | 1,792            | 2,240              |
|             |  | 37.5         | 0.7            | 4,390       | 5,270       | 9,660       | 3,864            | 4,830              |
|             |  |              | 1.0            | 4,560       | 5,960       | 10,520      | 4,208            | 5,260              |
|             |  |              | 1.5            | 4,890       | 6,430       | 11,320      | 4,528            | 5,660              |

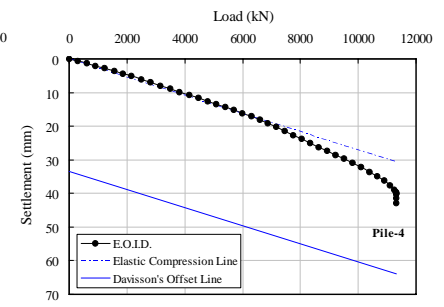
\* : 드롭해머를 이용한 재항타(restrike) 시험



(a) Pile-1 동재하시험 결과



(b) Pile-2 동재하시험 결과



(c) Pile-4 동재하시험 결과

그림 6. Davisson's Method를 이용한 동재하시험 지지력 산정

## 4.2 정재하시험 결과

### 4.2.1 개요

정재하시험은 Pile-3을 대상으로 수행하였으며 목적은 대구경 복합말뚝의 허용지지력 확인, 상부강관 말뚝과 하부 PHC말뚝을 연결하는 무용접 연결부 안정성 확인 및 동재하시험 결과와의 비교 분석을 통하여 동재하시험 결과 검증 및 신뢰성 있는 지지력을 산정하고자 한다.

정재하시험을 위한 말뚝은 대구경 복합말뚝으로 중굴공법을 이용하여 풍화암 6.0m 하부에 근입시켰으며 예상 설계하중의 300%까지 재하하는 것으로 계획하여 총 12,000kN의 하중을 4cycles로 반복재하 하였다. 재하시험을 위한 반력 시스템은 본 당 설계 인반력 800kN의 어스앵커 16본을 시공하여 하중 재하시 충분한 반력을 발휘할 수 있도록 시공하였다.

표 6. 대구경 PHC말뚝 정재하시험 제원

| 말뚝 번호       | 말뚝 종류  | 관입 심도 (GL-m) | 지지층 | 최종 시험하중 (kN) | 시험 종류            | 반력앵커 시공일자             | 시험 날짜               |
|-------------|--|--------------|-----|--------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| Pile-3 (매입) | 상부 Steel ( $\phi 1,000 \times 16t$ , 15.0m)<br>+하부 PHC ( $\phi 1,000$ A-Type, 25.0m) | 38.0         | 풍화암 | 12,000       | 반복재하시험 (4cycles) | '10.1.12<br>~'10.1.20 | '10.2.3<br>~'10.2.4 |



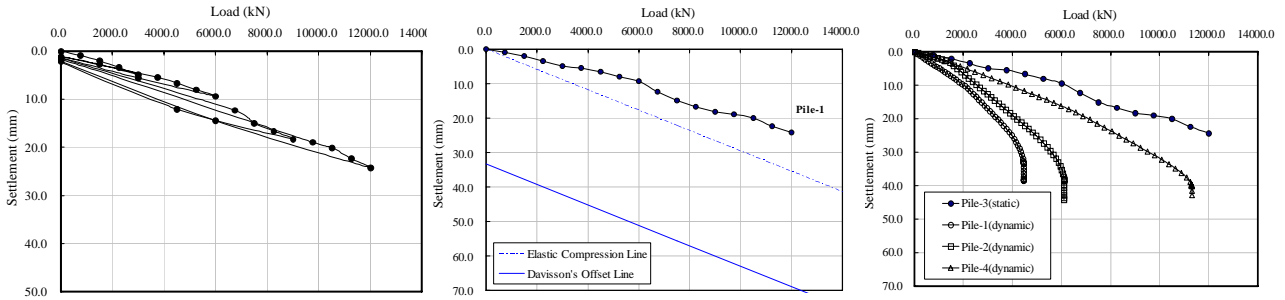
그림 7. 정재하시험 전경

### 4.2.2 허용지지력 산정

정재하시험 결과 반복하중을 통하여 12,000kN 재하시 전체 침하량은 24.2mm 발생하였으며, 하중 제거 시 잔류침하량은 2.1mm, 탄성회복량은 22.2mm로 측정되었다. 항복-극한하중분석법 및 Davisson 분석법에 의해 허용지지력을 분석한 결과 최대 작용하중을 항복하중으로 평가할 수 있으며, 안전율 2.0을 적용하였을 경우 허용지지력은 6,000kN 이상인 것으로 나타났다.

표 7. 대구경 PHC말뚝 정재하시험 허용지지력 산정결과

| 분석방법        |           | 항복하중 분석법  |                 |                |              | 극한하중 분석법  | Davisson 분석법 | 허용지지력 산정 |
|-------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|--------------|-----------|--------------|----------|
|             |           | P-S Curve | logP-logS Curve | S-log(t) Curve | P-ds/d(logt) | P-S Curve |              |          |
| Pile-3 (매입) | 하중(kN)    | 12,000    | 12,000          | 12,000         | 12,000       | -         | 12,000       | 12,000   |
|             | 안전율       | 2.0       | 2.0             | 2.0            | 2.0          | 3.0       | 2.0          | 2.0      |
|             | 허용지지력(kN) | 6,000 이상  | 6,000 이상        | 6,000 이상       | 6,000 이상     | -         | 6,000 이상     | 6,000 이상 |



(a) 반복재하시험(Pile-3)      (b) Davisson 허용지지력      (c) 정재하 및 동재하시험결과  
 그림 8. 정재하시험 지지력 산정 및 동재하시험과 비교 결과

### 4.2.3 동재하 및 정재하시험 결과 비교

정재하시험 및 동재하시험 비교 결과 지지층 심도가 동일한(GL-38.0m) Pile-4의 동재하시험과 Pile-3의 정재하 시험결과 하중에 따른 침하곡선의 경향이 비교적 유사한 것을 알 수 있으며, 지지력 값의 크기는 정재하 시험에서 구한 지지력이 다소 큰 것을 알 수 있다. 동재하시험의 경우 시간경과에 따른 setup효과를 고려하지 않았기 때문이며 setup 효과를 고려한다면 정재하시험 지지력 크기와 거의 유사한 결과를 나타낼 것이라 판단된다.

## 5. 적용성 평가

대구경 PHC말뚝과 대구경 복합말뚝의 적용성을 시공성 및 경제성을 중심으로 강관말뚝과 비교하였으며, 비교 결과 수평력이 크게 작용하지 않는 구조물의 경우 대구경 PHC말뚝이 동일한 직경의 강관말뚝을 대체할 수 있을 것이라 사료되며 가격 경쟁력에서 46% 정도 재료비 절감이 가능한 것으로 나타났다. 또한 수평력이 크게 작용하는 구조물의 경우 큰 전단력 및 모멘트에 대한 저항력이 우수한 대구경 복합말뚝을 적용한다면 동일한 직경의 강관말뚝 또는 소구경 현장타설말뚝을 대체할 수 있을 것이며, 현장 여건에 따라 공기 단축 및 원가절감 효과를 증대시킬 수 있을 것이라 판단된다.

표 8. 대구경 PHC말뚝 및 대구경 복합말뚝 적용성 평가

| 구분     | 강관말뚝 (φ1,000mm)                        | 대구경 PHC 말뚝 (φ1,000mm)                  | 대구경 복합말뚝 (φ1,000mm)  |
|--------|--|--|--|
| 사용성    | • 허용휨압축 응력 크고 전단력 및 모멘트 저항력이 큼         | • 분당 허용 압축응력은 크나 모멘트 저항력은 강관 비해 작음     | • 강관말뚝의 휨강도를 발휘하여 전단력 및 모멘트 저항 큼                             |
| 시공성    | • 용접 이음시 품질관리 필요<br>• 대구경 용접시 시간 많이 소요 | • 중굴공법 이용하여 지지력확보<br>• 무용접 이음방식으로 시공간단 | • 중굴공법 이용하여 지지력확보<br>• 무용접 이음방식으로 시공간단<br>• 강관과 PHC 연결부 검증완료 |
| 재료 특성  | • 부식에 취약하므로 부식방지 대책 수립 필요              | • 재료부식 없어 내구성 좋음<br>• 무리한 항타시 균열발생 가능  | • 강관말뚝과 PHC말뚝의 복합적인 재료특성 나타냄                                 |
| 말뚝제원   | φ1,000mm / t=16.0mm                    | φ1,000mm / t=130.0mm                   | φ1,000mm<br>t=16.0(steel), 130.0mm(PHC)                      |
| m당 단가  | 349,420원/m(30m기준)                      | 167,400원/m(30m기준)                      | 275,300원/m(30m기준)  |
| 본당 재료비 | 10,682,600원*                           | 5,822,000원*                            | 8,259,000원*  |
| 상대 재료비 | 100%                                   | 54% (▼ 46%)                            | 77% (▼ 23%)  |

\* 말뚝 연결비가 포함되어 본당 재료비 결정됨. (말뚝 길이와 현장여건에 따라 다소 변동 가능)



## 6. 결론

본 연구는 국내 최초로 1,000mm 대구경 PHC말뚝 및 대구경 복합말뚝(대구경 PHC+대구경 강관말뚝)에 대한 현장 적용성 평가를 위해서 대구경 말뚝의 매입시공(Pile-1, 2, 3) 및 항타시공(Pile-4)을 각각 수행하였으며, 동재하시험(15회)과 연직 정재하시험(1회)을 통하여 말뚝의 관입성 분석 및 허용 지지력을 평가한 것으로 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 동재하시험 결과 두부 보강 대구경 PHC말뚝에 대한 항타시공 결과 말뚝의 파손 없이 성공적으로 시험이 수행되었으며, 항타관입성 분석결과 항타에너지가 증가함에 따라 관입저항력에 따른 극한 지지력의 값이 크게 산정됨을 확인할 수 있었다
2. 대구경 말뚝 시공방법에 따른 지지력 차이를 분석하기 위해 동일 심도, 동일 에너지 작용시 지지력의 크기를 산정해 본 결과, 중굴공법으로 시공한 말뚝과 항타시공한 말뚝의 지지력에 거의 차이가 없는 것으로 나타나 중굴공법으로 시공한 말뚝에서는 충분한 주변마찰력이 발휘되고 있는 것을 확인하였다.
3. 말뚝선단을 풍화토 하단에 위치한 말뚝(Pile-1, 2)의 경우 허용지지력은 최대 3,061kN 정도로 나타났으며, 말뚝을 풍화암 하부 6.0m까지 관입한 말뚝(Pile-4)의 경우 최대 허용지지력이 5,660kN정도 산정되었다.
4. 정재하시험 결과 최대하중 12,000kN 재하시 전체 침하량은 24.2mm 정도 발생하였으며, 잔류침하량은 2.1mm, 탄성회복량은 22.2mm로 측정되었다. 항복-극한하중분석법 및 Davisson' Method를 이용한 허용지지력 산정 결과 안전율 2.0을 적용하였을 경우 허용지지력은 6,000kN 이상인 것으로 나타났다.
5. 대구경 PHC말뚝과 대구경 복합말뚝은 시공성 및 경제성이 우수하여 지반조건과 현장 여건에 따라 대구경 강관말뚝 및 동일한 직경의 현장타설 말뚝을 대체할 수 있을 것이라 판단되며, 이에 따라 현장에서의 공기절감 및 원가절감 효과를 증대시킬 수 있을 것이라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구수행에 많은 도움을 주신 진주~광양간 복선화 노반건설공사 5공구 현장 여러분들께 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

## 참고문헌

1. American Society for Testing and Materials (ASTM). "Standard method of testing piles under axial compressive load." Annual Book of ASTM Standards, D1143-81, 1994.
2. Bowles, J.E. Foundation Analysis and Design, 5th edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.
3. Duncan, J.M., and C-Y. Chang. "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." Journal of Soil Mechanics Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1970, pp. 1629-1653.
4. Iskander, M.G., and A. Stachula. "Wave equation analyses of Fiber-Reinforced Polymer Composite Piling." Journal of Composites for Construction, ASCE, 6(2), 2002, pp. 88-96.
5. Kozera, D.W. "Dynamic pile testing services, fiberglass/concrete composite piling." Lancaster Composite, Inc., Lancaster, PA, 1996.