

## 3차원 수치해석을 이용한 대구경 무용접 복합말뚝의 지지거동 분석

박재현\* · 김성렬\*\* · Le, Chi-Hung\*\* · 정문경\*

\*한국건설기술연구원 SOC 성능연구소 Geo-인프라 연구실

\*\*동아대학교 공과대학 토목공학과

# Evaluation of Bearing Capacities of Large Size Non-welded Composite Piles by 3-Dimensional Numerical Analysis

Jae-Hyun Park\*, Sung-Ryul Kim\*\*, Chi-Hung Le\*\* and Moon-Kyung Chung\*

\*Geotech. Eng'g Research Div., SOC Research Inst., KICT, Goyang-Si, Korea

\*\*Dept. of Civil Eng., Dong-A University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Large size PHC pile 대구경 PHC 말뚝, Non-welded composite pile 무용접 복합말뚝, Finite element analysis 유한요소해석, Bearing capacity 지지력, Pile load test 말뚝재하실험

**ABSTRACT:** Recently, as large structures, which should support large design loads have been constructed, the study on the large diameter composite pile becomes necessary. The large diameter composite pile has the diameter over 700mm and consists of two parts of the upper steel pipe pile and the lower PHC pile by a mechanical joint. In this research, to analyze the bearing capacity and the material strength of the composite pile, three dimensional numerical analyses were performed. First, the numerical modeling method was verified by comparing the calculated load-movement curves of the pile with those of the field pile load tests. Then, a total of twelve analyses were performed by varying pile diameter and loading direction for three pile types of PHC, steel pipe and composite piles. The results showed that the vertical and the horizontal load-movement curves of the composite pile were identical with those of the steel pipe pile and the horizontal material strength of the composite pile was 60-80% larger than that of the PHC pile.

### 1. 서 론

국내 기성말뚝 중에서 고강도 콘크리트 말뚝인 PHC 말뚝은 높은 경제성으로 인하여 토목 및 건축현장에서 사용빈도가 지속적으로 증가하고 있다. 최근 PHC 말뚝의 말뚝직경에 따른 시장점유율을 분석해보면 대부분 직경 600mm 이하가 사용되고 있는데, 이 중 직경 450mm 이하의 소구경 PHC 말뚝의 점유율은 낮아지고 있으며 500mm와 600mm PHC 말뚝의 점유율이 점차적으로 증가하고 있다. 이는 말뚝 1본당 지지력과 시공비용 측면에서 대구경 말뚝을 적용하는 것이 경제적이기 때문이다. 최근 대규모 토목공사 및 초고층 빌딩 등의 시공사례가 급증하는 것을 고려할 때 대구경 PHC 말뚝 수요는 계속 증가할 것으로 예상된다.

그런데, PHC 말뚝은 강관말뚝에 비하여 인장 및 휨에 대한 저항력이 작기 때문에 수평력 또는 모멘트가 크게 작용하는 구조물에는 적용하기 어려운 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 수평력 및 휨모멘트가 크게 발생하는 말뚝 상부는 강관말뚝을 적용하고 압축력이 주로 발생하는 말뚝 하부는 PHC 말뚝을 적용하는 복합말뚝이 최근 개발되었다(선석운, 2007; (주)과일테크 등, 2008; 김동민, 2010).

복합말뚝의 연결방법은 기존의 용접식 이음과 함께 기계식 연결장치를 적용한 볼트 조립식 무용접 이음방법이 개발되어 현장에 시공되고 있다. 무용접 이음 방식은 상부말뚝과 하부말뚝에 설치되어 있는 볼트구멍에 말뚝 연결판을 일치시키고 상부와 하부를 볼트로 고정시켜 상하부 말뚝을 연결하는 시공방법으로서 시공관리가 용이하고 기후조건에 영향을 받지 않으며 시공품질이 균일한 장점이 있다. 또한, 말뚝 직경이 클수록 시공성 및 경제성이 큰 것으로 평가되고 있다.

중구경 복합말뚝은 현장시험과 해석적 연구결과를 바탕으로 그 적용성이 입증되었고 다양한 현장에서 사용되고 있다. 그러나, 최근 대구경 PHC 말뚝의 시장확대에 따라 대구경 복합말뚝에 대한 안전성 검토와 설계기법 제정의 필요성이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 수치해석을 수행하여 대구경 무용접 복합말뚝의 지지거동을 분석하고자 하였다. 기존 수치해석 연구들은 대부분 말뚝과 지반을 2차원적으로 모델링하고 있으나(김남익과 서영교, 2007; 김홍택 등, 2011), 본 연구에서는 말뚝과 지반의 상호작용을 정밀하게 고려하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 그리고, 무용접 기계식 이음부에 대한 기존 연구 결과 복합말뚝 이음부는 용접 이음부와 동등한 안정성을 확보하는 것으로 나타났으므로(연세대학교, 2009; 박재현 등, 2010;

교신저자 김성렬: 사하구 하단 2동 840번지, 051-200-7622, sungryul@dau.ac.kr

Shin, 2011), 말뚝간 이음부는 상하부 단면이 접합된 것으로 모델링 하였다. 재료특성에 따른 복합말뚝의 지지거동을 분석하기 위해서는 강관과 PHC 등 말뚝재료의 항복거동을 현실적으로 고려하는 것이 중요하다. 그러므로, 강관말뚝과 PHC 말뚝 재료에 대하여 탄소성 항복모델을 적용하여 재료별 항복거동을 적절히 모사하였으며, 실제 말뚝 재하시험 사례에 적용하여 해석모델의 적용성을 검증하였다. 그리고, 말뚝종류, 말뚝직경, 하중재하 방향 등을 달리하여 총 12가지 경우에 대한 변수연구를 수행하였다.

## 2. 수치해석 조건

### 2.1 해석조건

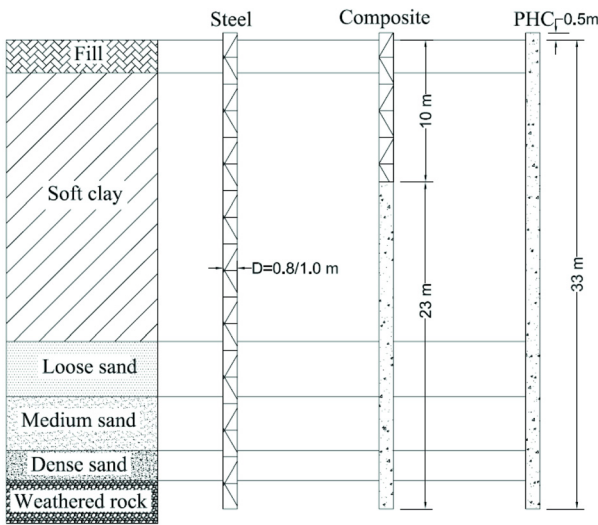


Fig. 1. Soil and pile conditions simulated in the study (ground water level=2.3m)

본 연구에서는 PHC 말뚝, 강관말뚝, 그리고 복합말뚝(상부 강관-하부 PHC)에 대하여 3차원 수치해석을 수행하여 복합말뚝의 축방향 및 횡방향 지지거동을 분석하였다. Fig. 1은 해석에 적용된 지층과 말뚝조건을 보여준다. 2.3m두께의 모래층 하부에 약 20m 두께의 두터운 연약점토층이 존재하며, 말뚝은 31m 깊이에 나타나는 풍화암층에 약 2m 근입되었다.

Table 1은 본 연구에서 적용한 해석조건이다. 복합말뚝(Composite pile), 강관말뚝(Steel pipe pile), PHC 말뚝(PHC pile)의 말뚝종류 3가지, 직경 0.8m와 1.0m의 2가지, 그리고 수직과 수평의 재하방향 2가지 등 총 12가지 해석조건을 고려하였다. 복합말뚝은 표 1에 나타낸 바와 같이 상부 10m는 강관, 그리고 하부 23m는 PHC로 구성된 말뚝이다. 이 중 직경 1.0m의 복합말뚝과 PHC 말뚝에 대하여는 Fig. 1의 지반조건에서 수행된 수평방향 말뚝재하시험 결과를 이용하여(박재현 등, 2010) 해석모델링기법을 검증하였다.

지반 구성모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다. 지층구분과 해석에 이용된 지반물성값은 지반조사 결과에 근거하여 Table 2와 같이 결정하였다. 이 때, 말뚝의 선단지지력은

그 극한값이 존재하지 않고 변위에 따라서 계속 증가하는 것으로 알려져 있다(Fellenius, 2004). 그러므로, 선단지지력의 현실적인 거동을 모사하기 위해 팽창각을 적용하여 항복 이후의 부피팽창에 의한 강도 증가현상을 모사하였다(Pott, 2003).

Table 1 Pile properties for the study

	Embedded depth	Diameter(D) / thickness(t)	Loading direction	Remarks
Composite pile	33m (Upper 10m: Steel Lower 23m: PHC)	· Upper: same as steel pile · Lower: same as PHC pile	Vertical / Horizontal	Horizontal field load tests (D=1.0m)
Steel pipe pile	33m	· D=1.0m / t=16mm · D=0.8m / t=14mm	Vertical / Horizontal	-
PHC pile	33m	· D=1.0m / t=130mm · D=0.8m / t=110mm	Vertical / Horizontal	Horizontal field load tests (D=1.0m)

Table 2 Input soil properties for numerical analyses (model)

Layer	Depth	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$	Dilation angle	c (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
Fill	0~2.3	18	25	-		15,000	0.3
Soft clay	2.3~21.2	18		-	20	3,000	0.49
Loose sand	21.2~25.1	19	28	-		20,000	0.3
Medium sand	25.1~28.9	20	35	5		40,000	0.3
Dense sand	28.9~31.0	21	35	5		70,000	0.3
Weathered rock	31.0~34.0	25	40	10	100	100,000	0.25

where, E= Young's modulus,  $\gamma$ = unit weight,  $\nu$ = Poisson's ratio, c=cohesion,  $\phi$ =internal friction angle

본 해석은 동일한 지반조건에서 말뚝종류에 따른 지지거동 차이를 분석해야 하기 때문에, 말뚝재료의 탄소성 거동을 정확히 모사하는 것이 중요하다(김성렬 등, 2009). Table 3은 해석에 적용된 강관과 PHC 재료의 입력물성값이다. 각 재료의 구성모델은 강관의 경우 Tresca 모델, PHC의 경우 Mohr-coulomb 모델을 적용하였다. 강관의 항복 재료강도는 41 MPa을 적용하였다. PHC 말뚝의 Mohr-Coulomb 강도정수는 Chen(1982)이 제시한 식 (1)과 식 (2)를 적용하여 산정하였다.

기초와 인접지반 사이에는 Fig. 2의 인터페이스 모델을 적용하여 기초-지반간의 미끄러짐과 분리현상을 모사하였다. 미끄러짐의 경우 Fig. 2(a)와 같이 Coulomb의 마찰이론을 적용하여

접촉면에서 발생하는 전단응력이  $\mu \times$ (접지압)로 계산되는 전단강도보다 커질 때 미끄러짐이 발생한다. 이 때, 전단강도값은 한계값  $\bar{\tau}_{\max \text{ limit}}$ 을 지정할 수 있으며, 접지압은 구속압에 비례하여 증가하므로 전단강도가 깊이에 따라 증가되는 현상을 구현한다. 분리현상은 Fig. 2(b)의 hard contact 조건을 적용한다. 이 조건은 기초와 인접지반이 붙어있는 경우에는 법선방향의 구속응력이 크기에 관계없이 서로 전달되며, 인장력 등에 의해 기초와 인접지반이 분리되는 경우에는 응력이 전달되지 않는다.

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{f_c - f_t}{f_c + f_t} \right) \quad (1)$$

$$c = \frac{f_c(1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad (2)$$

여기서,  $f_c$  = 말뚝압축강도= (콘크리트 압축강도)-(강선 Prestress)=80-6.24= 73.76 MPa

$f_t$  = 말뚝인장강도=  $0.8 \sqrt{f_{ck}} + \text{강선유효Prestress} = 0.8 \sqrt{800} + 40 = 62.4(\text{kg/cm}^2) = 6.24 \text{ MPa}$

Table 3. Input pile properties for numerical analyses

Material	Model	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\phi$	c ( $\text{kN/m}^2$ )	E ( $\text{kN/m}^2$ )	$\nu$
Steel pipe pile	Tresca	78	0	205,000	$210 \times 10^6$	0.3
PHC pile	M-C	23	53.1	12,000	$35 \times 10^6$	0.2

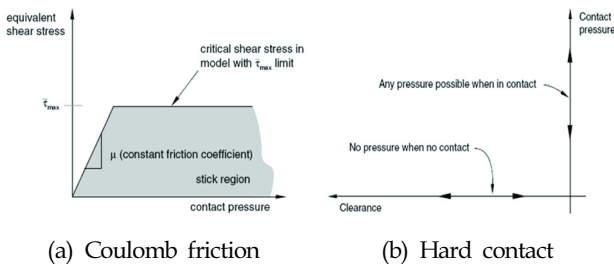


Fig. 2 Interface modeling for soil-structure interaction

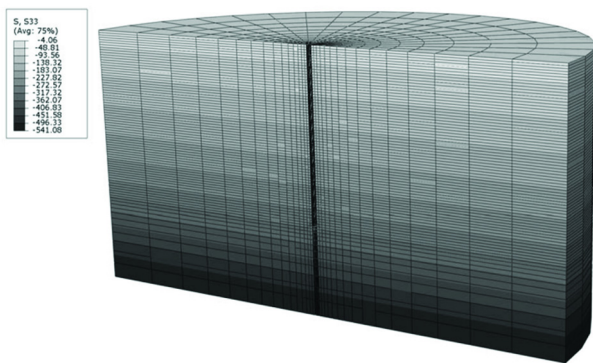


Fig. 3 Typical mesh and simulation of geostatic condition

본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS (2010)를 이용하였다. 수치모델링 절차는 (1) 요소망 작성 및 초기응력의 구현, (2) 말뚝기초의 설치, (3) 하중재하의 3단계로 이루어진다.

(1) Fig. 3은 수치해석에 이용된 요소망 및 초기응력을 보여준다. 대칭조건을 고려하여 반단면만을 모델링하였다. 그리고, 경계면의 구속조건이 기초의 지지거동에 영향을 미치지 않도록 말뚝과 좌우경계면의 거리를 60m로 결정하였다. 요소망의 크기는 기초 인접지반에서의 응력과 변형률의 변화를 정밀히 고려하기 위해 기초 인접지반에 가까워질수록 요소크기를 작게 적용하였다. 지반과 기초모델링에 적용된 요소는 Eight noded-linear brick elements with reduced integration(C3D8R)이다. 초기응력 조건 (Geostatic condition)은 토체의 자중에 의해 지반내에 존재하는 구속압을 구현하는 것이다. 그러므로, 기초부분에 해당하는 요소들을 제거하고 기초와 인접지반사이의 절점에 변위 구속조건을 적용하여 기초의 형상이 유지되도록 하였다. 그리고, 중력가속도를 작용시켜 지반구속압을 구현하였다. 이 때, ABAQUS 프로그램에서 지원하는 Geostatic option을 적용하여 중력가속도에 의한 자중과 지반구속압이 균형이 되고, 요소 절점의 변위가 0으로 안정화되는 조건을 구현하였다. 수치해석의 초기응력 값은 이론적으로 계산한 값과 일치하는 것을 확인하였다.

(2) 말뚝의 지반내 관입거동 및 관입에 의한 인접지반의 응력 변화는 본 해석에서 고려하지 않았으며, 기초설치가 완료된 후의 상태를 가정하였다. 기초요소를 활성화시키고, 기초와 인접지반 사이에 앞서 언급된 인터페이스 요소를 설치하였다. 그리고, 기초 자중에 의한 지중 응력증가를 구현하였다.

(3) 본 해석에서는 재하시험 조건을 모사하기 위하여 수평방향 재하의 경우 말뚝두부의 회전을 허용하면서 말뚝측면의 한 절점을 Reference point로 지정한 후에 이 점의 변위를 서서히 증가시키면서 재하하였다. 수직방향의 경우 말뚝두부의 수직방향 변위를 증가시키면서 재하하였다.

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 수치해석 모델링의 검증

박재현 등(2010)은 동일한 현장에서 대구경(D=1.0m) 복합말뚝과 PHC 말뚝에 대한 현장 수평재하시험을 수행한 바 있다. 그러므로, 본 수치해석에서 얻어진 하중-변위 곡선과 재하시험 결과를 비교하여 수치해석 모델링 기법을 검증하였다. 본 해석에 적용된 지반 및 말뚝조건은 각각 Table 1과 Table 2의 조건과 동일하다.

Fig. 4는 현장재하시험과 수치해석에서 얻어진 수평방향 하중-변위 곡선을 비교한 것으로 점선은 재하시험 결과, 그리고 실선은 수치해석 결과를 나타낸다. 수치해석 결과는 재하시험의 하중-변위 곡선을 동일하게 예측하였으며, 특히, PHC 말뚝의 극한 지지력을 정확히 예측하였다.

Fig. 5는 깊이별 말뚝수평변위로서 현장재하시험에서 경사계를 이용하여 측정된 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 수평변위가 크게 발생하기 시작하는 깊이는 복합말뚝의 경우 약 9m, PHC 말뚝의 경우 약 5 m로서 수치해석이 이를 잘 예측하였다.

다만, 경사계 측정결과와 경우 경사 측정의 누적오차 등으로 말뚝두부의 변위가 LVDT 측정결과보다 큰 것으로 나타났다.

본 비교로부터 연구에 적용된 수치 모델링 기법이 말뚝종류별 특성과 지반의 하중-변위 거동을 잘 모사할 수 있는 것으로 판단된다.

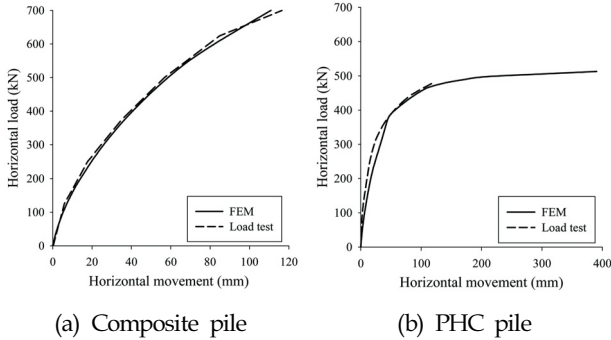


Fig. 4 Comparison of load-movement curves between load tests and numerical analyses (D=1.0m)

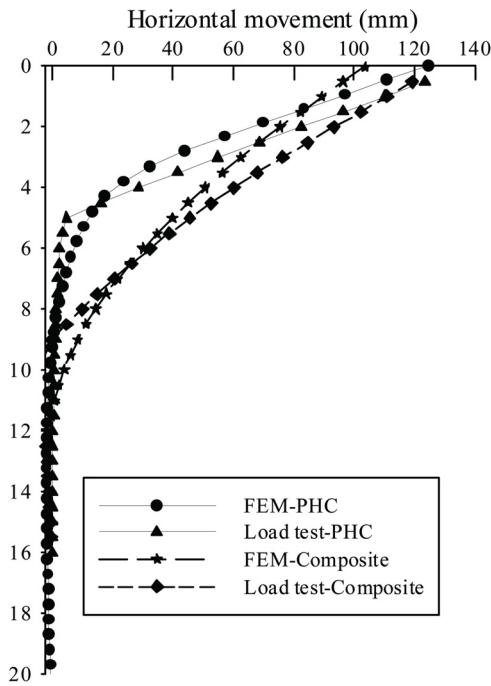


Fig. 5 Comparison of horizontal pile movements between load tests and numerical analyses (D=1.0m)

3.2 변수연구 결과

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 말뚝종류에 따른 수평방향 하중-변위 곡선과 수직방향 하중-변위 곡선으로서 말뚝 직경 1m의 결과이다. 그림에서 복합말뚝은 'Composite', 강관말뚝은 'Steel', PHC말뚝은 'PHC' 로 나타내었다.

수평방향 항복하중은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 'tangent intersection method'(Mansur and Kaufman, 1956)를 적용하여 곡선의 초반부와 후반부에 대한 두 접선의 교차점에 해당하는

하중으로 산정하였다. 그 결과, 항복하중은 복합말뚝 810 kN, 강관 1260kN, PHC 말뚝 486 kN으로서 복합말뚝이 PHC 말뚝에 비하여 1.6배 큰 것으로 나타났다.

수직방향 재하 결과의 경우 Fig. 7과 같이 복합말뚝과 강관말뚝의 지지력 곡선은 일치하고, PHC 말뚝의 지지력은 약간 작은 것으로 나타났다. 그 이유는 강관말뚝의 축강성값이 PHC 말뚝에 비하여 작기 때문에 큰 하중에서 말뚝압축량이 약간 증가하였기 때문이다. 그러나, 말뚝종류에 따른 지반지지력 차이는 없으며 말뚝재료의 항복은 발생하지 않았다.

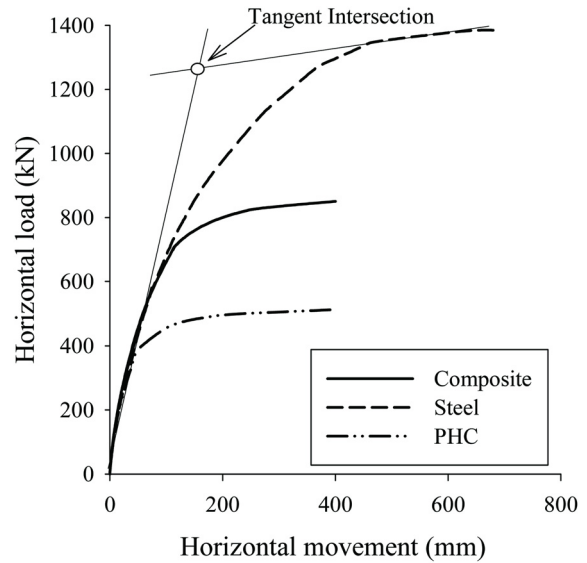


Fig. 6 Comparison of horizontal load-movement curves (D=1.0m)

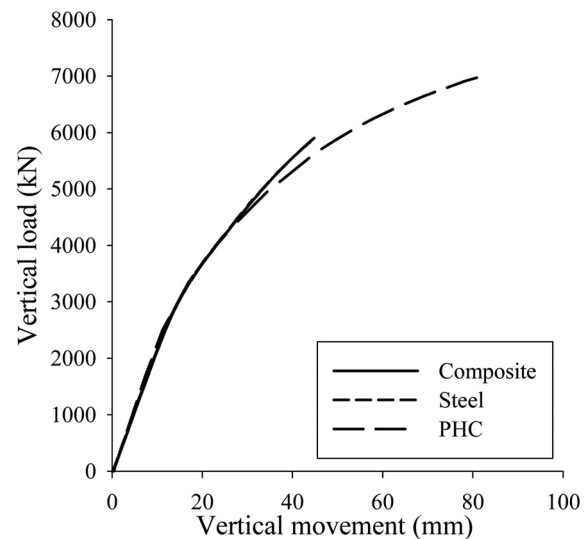
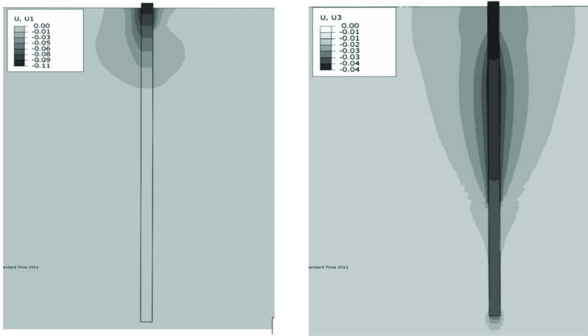


Fig. 7 Comparison of vertical load-movement curves (D=1.0m)

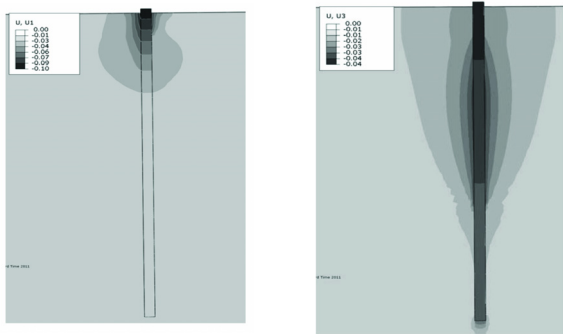
Fig. 8~10은 말뚝종류에 따른 수평방향과 수직방향 재하시의 말뚝과 지반의 변위등고선을 보여준다. 수평방향 변위 등고선의 경우 복합말뚝과 강관말뚝은 동일한 경향을 보여주었다. 그러나, PHC 말뚝의 경우 수평방향 재하시 말뚝과 지반의 수평변위가

지표면 근처에서만 발생하는 것으로 나타났다. 그리고, 수직방향 변위등고선은 말뚝종류에 관계없이 동일하였다.



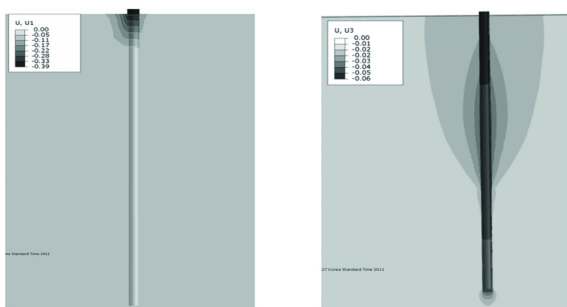
(a) Horizontal (700kN) (b) Vertical (6000 kN)

Fig. 8 Displacement contours of pile and soil (Composite pile, D=1.0m)



(a) Horizontal (700kN) (b) Vertical (6000 kN)

Fig. 9 Displacement contours of pile and soil (Steel pipe pile, D=1.0m)



(a) Horizontal (510kN) (b) Vertical (6000 kN)

Fig. 10 Displacement contours of pile and soil (PHC pile, D=1.0m)

Fig. 11은 동일한 하중크기(510kN)에서 얻어진 말뚝 수평방향 변위를 비교한 것이다. 지표면에서의 말뚝변위는 복합말뚝과 강관말뚝의 경우 63mm, 그리고 PHC 말뚝의 경우 390mm로 나타났다. 또한, 상부 8m이내에서 수평변위가 주로 발생하는데 복합말뚝의 경우 상부 10m 깊이까지 강관말뚝이 적용되었으므로 강관말뚝과 동일한 수평지지력을 보여주는 것으로 판단된다.

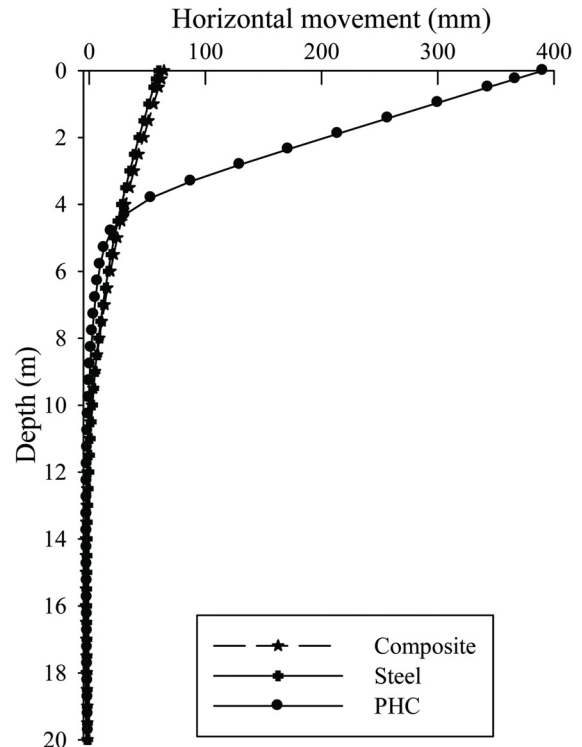


Fig. 11 Comparison of horizontal pile movements with depth (D=1.0m, 510kN)

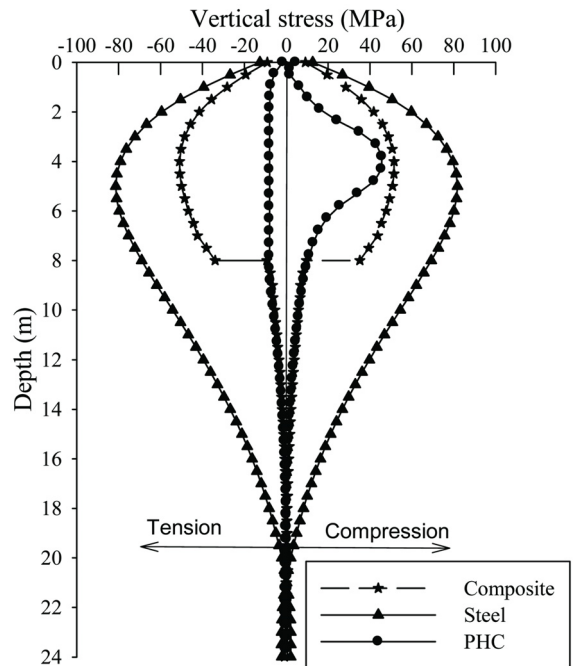


Fig. 12 Comparison of vertical stresses developed in piles (D=1.0m, 510kN)

동일한 하중에서 PHC 말뚝의 수평변위가 크게 발생한 이유는 Fig. 12의 말뚝응력과 Fig. 13의 재료 항복거동 결과에서 분석할 수 있다. Fig. 12의 말뚝응력값은 인장측(-부호)과 압축측(+부호)에서



깊이별로 발생한 응력값을 보여준다. 강관말뚝과 복합말뚝(상부 10m 강관)의 경우 항복이 발생하지 않아 인장측과 압축측에서 동일한 응력이 발생하였다. 그리고, 복합말뚝의 경우 상부 강관 부에서 큰 응력을 지지하고 하부 PHC 말뚝부에서 부담하는 응력이 작기 때문에 접합부에서 응력차가 크게 발생하였다. PHC 말뚝의 경우 최대 압축응력은 45 MPa, 최대 인장응력은 -8.0 MPa로서 인장측의 응력이 82% 작는데 그 이유는 인장응력이 PHC말뚝의 유효 Prestress(=6.24MPa)에 도달하면서 재료 항복이 발생하였기 때문이다.



Fig. 13 Horizontal deformation and yielding of PHC pile (D=1.0m, 510kN)

실제, 강관말뚝과 복합말뚝에서는 최대하중에서 항복영역이 발생하지 않고 탄성거동을 유지하였지만, PHC 말뚝은 최대 인장응력이 발생하는 깊이에서 Fig. 13과 같이 흰색으로 표시한 항복영역이 발생하였다.

말뚝 직경의 영향을 분석하기 위하여 직경 0.8m에 대하여 동일한 해석을 수행하였다. Fig. 14는 직경 0.8m 말뚝에 대하여 얻어진 말뚝재료에 따른 수평방향 하중-변위 곡선이다. 항복하중의 경우 복합말뚝 600kN, 강관 800 kN, 그리고 PHC 말뚝 325 kN으로서, 복합말뚝의 항복하중이 PHC 말뚝의 항복하중에 비하여 1.8배 큰 것으로 나타났다. Fig. 15는 수직방향 재하에 대한 하중-변위 곡선으로서 말뚝재료에 상관없이 모두 동일한 하중-변위 곡선을 보여주었다.

PHC 말뚝의 수평지지력이 작은 이유는 앞서 직경 1.0m의 결과와 동일하게 PHC 말뚝의 인장측에서 재료항복이 발생하였기 때문이다(Fig. 16 참조). 다만, 직경 0.8m의 결과에서는 복합말뚝에서 최대 620 kN의 하중이 작용하였을 때 하부 PHC 말뚝의 상단 이음부에서 항복이 발생하였다. 이것은 상하부 재료특성이 다른 말뚝 이음부에서 응력이 급격히 변하기 때문에, 이음부 인장응력이 PHC 말뚝의 항복응력에 도달하였기 때문이다.

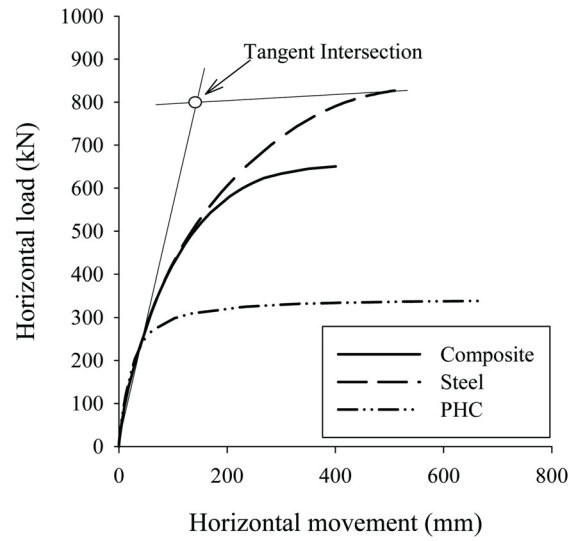


Fig. 14 Comparison of horizontal load-movement curves (D=0.8m)

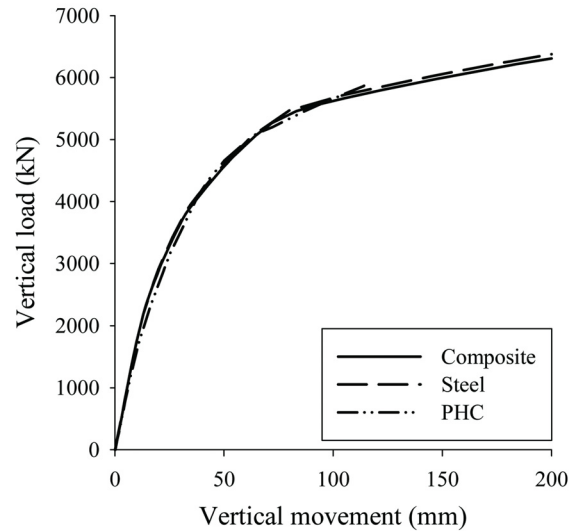


Fig. 15 Comparison of vertical load-movement curves (D=0.8m)



Fig. 16 Horizontal deformation and yielding of PHC pile (D=0.8m, 338kN)

## 6. 결 론

본 연구에서는 대구경 무용접 복합말뚝의 지지거동 및 재료 항복특성 등을 분석하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 강관과 PHC 말뚝의 항복거동을 모사하기 위하여 각각 Tresca와 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였으며, PHC 말뚝의 Mohr-Coulomb 강도정수는 Chen(1982)이 제안한 방법을 이용하여 산정하였다. 그 결과, 본 연구의 수치해석 모델링이 재하실험에서 얻어진 말뚝두부 하중-변위, 깊이별 말뚝변위, 그리고 PHC 말뚝의 재료항복거동 등을 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

(2) 복합말뚝과 강관말뚝, PHC 말뚝의 수직방향 지지거동의 경우 말뚝 축강성 차이에 의하여 말뚝 압축량의 미소한 차이만 발생하고 재료별 지지거동은 동일한 것으로 나타났다.

(3) 복합말뚝과 강관말뚝, PHC 말뚝의 수평방향 지지거동을 분석한 결과, 강관말뚝, 복합말뚝, PHC 말뚝 순으로 항복하중이 크게 나타났으며, 복합말뚝은 PHC 말뚝에 비하여 약 1.6배-1.8배의 항복하중을 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 삼표이앤씨(주)와 (주)CS건설의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김남익, 서영교 (2007). "샌드쿠션을 고려한 말뚝지지 전면기초의 수치해석", 한국해양공학회지, 21(5), pp 25-32.  
 김동민 (2010). 현장시험을 통한 복합말뚝의 수평거동특성에 관한 연구, 박사학위논문, 상지대학교 일반대학원.  
 김성렬 이주형, 박재현, 정문경 (2009). "수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석 (I)-재료강도", 대한토목학회 논문집, 26(11), pp 29-38.

김홍택, 이명재, 박지웅, 윤순중, 한연진 (2011). "수치해석을 통한 FRP 콘크리트 합성말뚝 적용성 평가", 한국지반환경공학회 논문집, 12(8), pp 59-67.

박재현, 유찬호, 신윤섭, 황의성, 이진영, 정문경 (2010). "수평하중을 받는 대구경 무용접 복합말뚝의 횡방향 거동분석", 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp 1058-1061.

선석운 (2007). 복합말뚝의 수평 거동 분석, 석사학위 논문, 서울시립대학교 산업대학원.

연세대학교 (2009). 재하시험 및 수치해석을 통한 무용접 복합말뚝 거동 특성 연구, 삼표이앤씨(주) 연구보고서.

파일테크(주), 두산중공업(주), (주)한백기술, (주)한국종합기술 (2008). 강관말뚝과 PHC말뚝을 결합구조로 용접시킨 매입형 복합말뚝의 설계 및 시공 방법, 건설신기술 제556호.

ABAQUS (2010). User's Manual. Version 6.10-1.

Chen, W.F. (1982). Plasticity in Reinforced Concrete, Mc Graw-Hill.

Fellenius B.H. (2004). "Unified Design of Piled Foundations With Emphasis on Settlement Analysis", Geo-Trans Conference, Los Angeles, ASCE Geotechnical Special Publication 125, pp 253-275.

Mansur, C.I. and Kaufman, J.M. (1956). "Pile Tests, Low-Sill Structure, Old River, Louisiana", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 82(SM5), pp 1-33.

Pott, D.M. (2003). Numerical analysis: a virtual dream or practical reality?. Geotechnique, Vol 53(6), pp 535-573.

Shin, Y.S. (2011). Nonlinear behavior of mechanical jointed composite pile by field load tests and numerical analyses, Ph.D. dissertation, Seoul National University.

2011년 11월 15일 원고 접수

2011년 12월 1일 심사 완료

2011년 12월 23일 게재 확정