

3차원 수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석

Analysis of Reinforcement Effect of Steel-Concrete Composite Piles by 3-Dimensional Numerical Analysis

김성렬¹⁾, Sung-Ryul Kim, 이시훈²⁾, Si-Hoon Lee, 정문경³⁾, Moon-Kyung Chung, 이주형⁴⁾, Ju-Hyung Lee

¹⁾ 동아대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University

²⁾ 동아대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University

³⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

⁴⁾ 한국건설기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : The steel pipe of steel-concrete composite piles increases the pile strength and induces the ductile failure by constraining the deformation of the inner concrete. In this research, the load-movement relations and the reinforcement effect by the outer steel pipe in the steel-concrete composite pile were analyzed by performing three-dimensional numerical analyses, which can simulate the yielding behavior of the pile material and the elasto-plastic behavior of soils. The parameters analyzed in the study include three pile materials of steel, concrete and composite, pile diameter and loading direction. As the results, the axial capacity of the composite pile was 1.9 times larger than that of the steel pipe pile and similar with that of the concrete pile. At the allowable movement criteria, the horizontal capacity of the composite pile was 1.46 times larger than that of the steel pile and 1.25 times larger than that of the concrete pile. In addition, the horizontal movement at the pile head of the composite pile was about 78% of that of the steel pile and about 53% of that of the concrete pile, which showed that the movement reduction effect of the composite pile was significant and enables the economical design of drilled shafts.

Keywords : steel-concrete composite pile, numerical analysis, drilled shaft, steel casing, yield behavior

1. 서 론

최근 구조물이 장대화 됨에 따라 구조물을 지지하는 기초 공법으로 대구경 현장타설말뚝의 사용이 증가되고 있다. 현장타설말뚝의 일반적인 시공방법은 강관 케이싱으로 굴착공벽을 유지하면서 굴착한 후 콘크리트 타설과 함께 강관케이싱을 제거한다. 최근 희생강관과 같은 외부강관을 구조재로서 활용하여 말뚝기초의 재료강도와 지지력을 증가시키려는 연구가 진행 중에 있다(한국건설기술연구원, 2008). 이 연구에서는 기존의 콘크리트 또는 강관말뚝과 비교하여 콘크리트와 외부강관이 합성된 강관합성말뚝의 지지력 증가 및 변위억제 효과, 그리고 외부강관의 구조재로서의 적용방법에 대하여 연구하고 있다. 그 결과, 강관합성말뚝은 강관이 내부 콘크리트의 변형을 구속하는 역할을 하여 콘크리트의 강도를 증가시키고 변위를 감소시키는 보강효과가 있는 것으로 나타났다(이주형 등, 2008). 더욱이, 미국 시방기준(AASHTO, 2004)에서는 강관 케이싱의 두께가 3mm 이상인 경우에는 강관에 의한 재료강도 증가효과를 고려하여 설계하도록 규정하고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 지반공학 분야에 널리 이용되는 범용 수치해석 프로그램을 이용하여 지반에

근입된 강관합성말뚝의 보강효과를 분석하고자 한다. 기존에 많은 연구자들이 지반에 근입된 말뚝에 대한 수치해석을 수행하였지만 대부분의 경우 말뚝을 탄성체로 모사하여 말뚝재료의 탄소성 거동을 무시하고 있다. 그러나, 본 연구에서는 강관합성말뚝의 재료거동을 합리적으로 모사하고 외부강관에 의한 보강효과를 분석하기 위하여 선행논문의 결과를 이용하여 말뚝재료의 항복거동과 지반의 탄소성 거동을 함께 모사하였다. 해석대상은 해상 연약지반에 설치되는 말뚝기초를 가정하였으며, 말뚝재료, 말뚝직경, 그리고 재하방향 등에 대한 변수연구를 수행하여 말뚝의 하중-변위 거동과 강관합성말뚝의 보강효과 등을 분석하였다.

2. 해석조건

해석대상은 그림 1과 같이 해상 지반조건을 가정하여 약 20m 두께의 연약지층 하부에 풍화암이 있는 것으로 가정하였다. 말뚝은 해상부에 20m 돌출되어 있으며, 풍화암에 근입되는 길이의 경우 강관말뚝은 1m, 콘크리트 말뚝은 10m, 그리고 강관합성 말뚝은 10m (강관케이싱은 풍화암 1m 근입)이다.

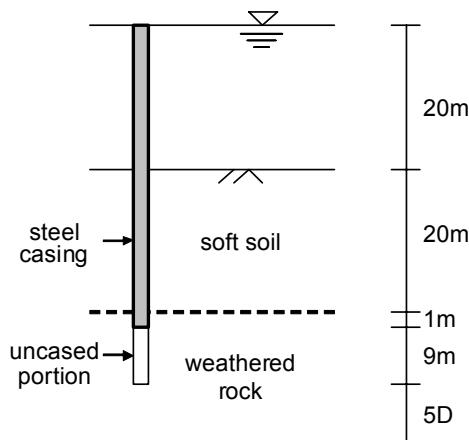


그림 1. 해석지반의 조건

표 1은 해석지반의 해석모델 및 입력물성값으로서 지반의 탄성계수와 강도정수는 인천대교의 설계자료를 참조하여 연약지층과 풍화암에 대한 평균적인 값을 적용하였다. 표 1에서 경계면 요소는 지반과 말뚝 사이의 분리현상 및 미끄러짐을 모사하는데 이용된다. 그리고, 경계면 요소의 법선방향(Kn), 전단방향(Ks) 강성은 Comodromos 등(2004)이 제안한 바와 같이 인접지반 강성의 약 10배를 적용하여 지반요소가 말뚝구조체 내로 겹치지 않도록 하였다. 또한, 깊은 기초의 선단지지력은 그 극한값이 존재하지 않고 변위에 따라서 계속 증가하는 것으로 알려져 있으므로(Fellenius, 2004), 현실적인 거동을 모사하기 위해 팽창각을 적용하여 항복 이후의 부피팽창에 의한 강도 증가현상을 모사하였다(Pott, 2003). 말뚝선단의 풍화암에는 팽창각 10° 를 적용하여 항복 이후에 암의 부피가 팽창되면서 선단지지력이 증가하는 현상을 모사하였고, 연약지층은 팽창각 0을 적용하여 항복이후에 강도가 일정해지도록 모사하였다.

표 2는 말뚝제원 및 하중조건을 나타낸다. 말뚝재료는 강관, 콘크리트, 강관합성의 3가지, 말뚝직경은 1.0m~4.0m의 7가지, 그리고 하중조건은 수직/수평방향 재하의 2가지를 적용하여 총 42가지 조건에 대한 해석을 수행하였다.

말뚝재료의 해석모델 및 입력물성값은 표 3~표 5과 같이 적용하였다. 해석모델의 경우 강관은 von-Mises 모델, 콘크리트는 변형률 연화모델, 콘크리트 내부 철근은 항복모멘트를 적용 항복 모델을 이용하여 모델링하였으며 철근면적비는 2%를 적용하였다. 강관합성말뚝은 동일한 외경의 강관과 철근 콘크리트 말뚝들을 쳐진 조건모델, 콘크였다. 각 모델의 입력 물성값은 강관, 콘크리트, 강관합성말뚝의 시험체(크기: 직경 20cm, 높이 40cm)에 대한 압축재하 시험의 하중-변위 곡선 결과와 비교하여 검증하였다.

표 1. 해석지반의 입력물성값

구분	모델	E (kPa)	γ_{sub} (kN/m ³)	ν	c (kPa)	ϕ (deg.)	팽창각 (deg.)	경계면 요소			
								Kn (kPa/m)	Ks (kPa/m)	c (kPa)	ϕ (deg.)
연약층	M-C	14710	7.65	0.40	32.36	15	0	147,100	147,100	32.36	15
풍화암	M-C	196133	9.61	0.30	98.07	35	10	1,961,330	1,961,330	98.07	35

표 2. 말뚝제원 및 하중조건

말뚝재료	강관, 철근 콘크리트, 강관합성(강관+철근콘크리트 충진)						
말뚝직경 (m)	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0						
강관두께 (m) (부식효과 무시)	0.018 0.020 0.022 0.024 0.026 0.028 0.030						
하중조건	① 수직방향: 변위제어로 항복시까지 재하 ② 수평방향: 말뚝재료 항복하중의 28%의 수직하중을 재하 후 수평방향 변위제어로 항복시까지 재하						

표 3. 강관의 수치해석 입력자료

구분	해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	σ_y (kPa)
강관	von-Mises 모델	1.532×10^8	0.3	76.98	250,000

표 4. 콘크리트의 수치해석 입력자료

해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	c ¹⁾ (kPa)	$\phi^{1)}$ (deg.)	팽창각(deg.)
변형률연화모델 (M-C 모델)	1.84×10^7	0.2	22.75	7.63×10^3	42	42(관련 유동법칙) 0(비관련 유동법칙)

¹⁾ 변형률 연화모델에서 c, ϕ 값을 콘크리트의 소성변형률에 따라 감소시킴

표 5. 철근의 수치해석 입력자료

해석모델	E (kPa)	ν	단면적(m ²)	I _x , I _y (m ⁴)	σ_t (kPa)	P _{moment} (Pa · m)
beam 모델	1.532×10^8	0.3	실단면적의 1-1/100	4.908×10^{-10}	392265	65.37

여기서, I_x, I_y= 철근단면의 단면2차 모멘트, σ_t =철근 항복응력, P_{moment}=철근 항복모멘트

해석프로그램은 지반공학 분야에서 널리 이용되는 범용 3차원 유한차분 수치해석 프로그램인 FLAC 3D 프로그램(Itasca, 2006)을 이용하였다. 경계면 거리가 해석결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 말뚝과 경계면사이의 거리를 5D~20D로 변화시키며 해석한 결과 말뚝과 경계면 사이의 거리에 관계없이 모두 동일한 하중-변위 곡선이 얻어졌다. 이것은 지표면으로부터 20m 노출된 말뚝두부에 수평하중이 가해질 경우 말뚝의 변형이 캔틸레버 형태로 발생하여 지반의 변형이 크지 않기 때문으로 판단된다. 이 후의 해석에서는 정밀한 해석을 위하여 재하방향의 경계면-말뚝 거리는 20D로 유지하고, 재하직각 방향의 경계면-말뚝 거리는 5D로 모델링하였다.

3. 해석결과 - 수직방향 재하

그림 2는 말뚝직경별 말뚝두부에서의 수직방향 하중-변위 곡선을 보여주는데, 수직방향의 극한지지력을 산정할 때의 변위기준(Terzaghi, 1943)을 적용하여 말뚝두부의 변위가 말뚝직경의 최소 10%이상이 될 때까지 해석을 수행하였다. 그림을 보면 강관합성말뚝이 강관 및 콘크리트 말뚝에 비하여 수직강성 및 강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고, 말뚝직경이 증가할수록 강관합성 말뚝과 콘크리트 말뚝의 수직강성 및 강도가 점차 비슷해졌는데, 이것은 강관합성말뚝에서 콘크리트가 차지하는 단면적이 증가되었기 때문으로 판단된다.

그리고, 수직하중이 증가함에 따라 강관합성말뚝은 계속하여 하중이 증가하는데 비하여 강관말뚝은 모든 직경에서 재료항복이 발생하였고, 콘크리트 말뚝은 직경 2.5m이하에서 재료항복이 발생하였다. 강관합성말뚝의 재료강도가 큰 것은 강관과 콘크리트의 재료강도가 더해질 뿐만 아니라 강관이 내부 콘크리트를 구속하는 보강효과에 의해 강관합성말뚝의 재료강도가 증가하기 때문이다.

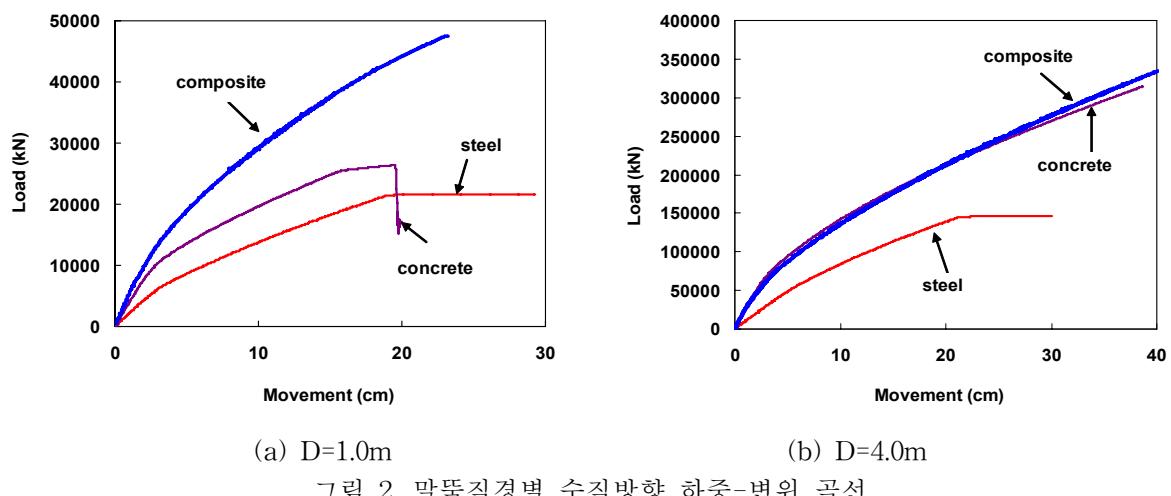


그림 2. 말뚝직경별 수직방향 하중-변위 곡선

강관합성말뚝의 수직방향 보강효과를 분석하기 위해 강관합성 말뚝의 극한지지력을 강관과 콘크리트의 극한지지력으로 각각 나누어 그림 3에 나타내었다. 그 결과, 말뚝직경이 증가함에 따라 강관합성말뚝의 극한지지력 증가 효과는 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 강관합성말뚝의 극한지지력은 강관말뚝의 평균 1.90배, 콘크리트 말뚝과는 평균적으로 동일한 것으로 나타났다. 즉, 본 해석조건에서 콘크리트 말뚝과 비교하여 강관합성말뚝의 수직방향의 지반 지지력 증가효과는 없는 것으로 나타났다.

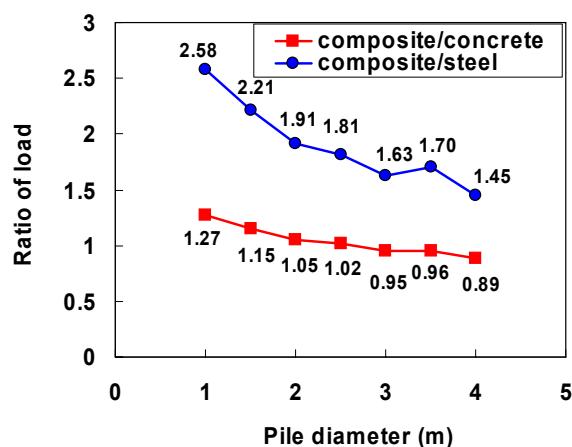


그림 3. 강관합성말뚝의 극한지지력 증가 효과

4. 해석결과 - 수평방향 재하

그림 4는 수평방향 재하시 각 말뚝의 직경별 하중-변위 곡선을 보여준다. 강관합성말뚝이 강관 및 콘크리트 말뚝에 비하여 수평강성 및 강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고, 동일한 변위에서의 하중을 비교해보면, 수평변위가 작은 초기부분의 경우 콘크리트 말뚝의 하중이 강관보다 커지만 수평변위가 증가함에 따라 콘크리트의 하중이 강관보다 작아졌다.

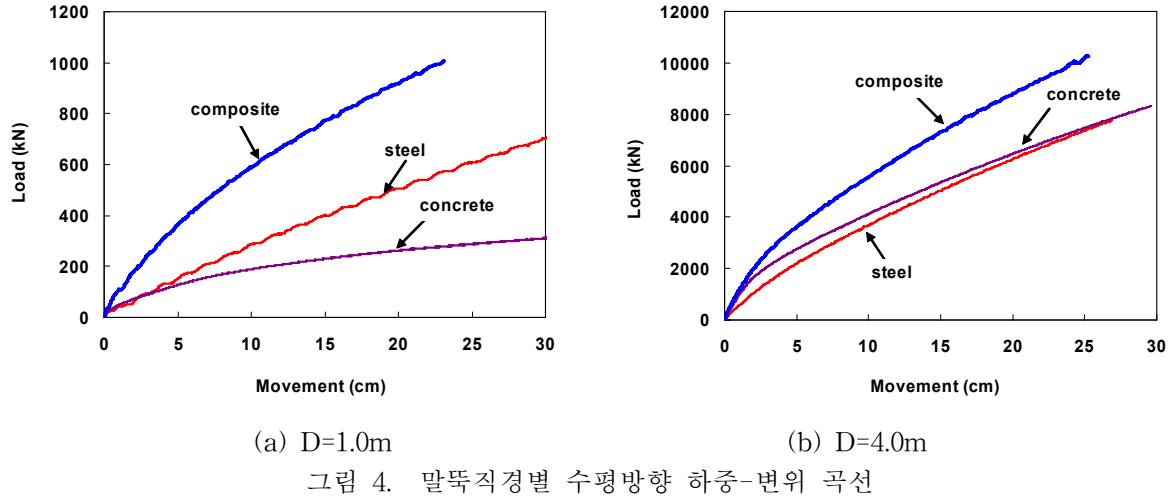


그림 5는 각 말뚝의 허용변위 기준에 따라 지표면에서의 수평변위가 대한토목학회(2001)에서 제시된 허용변위 기준인 [말뚝직경의 1%, 최소 1.5cm]에 도달하였을 때의 말뚝의 깊이별 수평변위 곡선을 보여 준다. 지반내에서의 말뚝 수평변위는 지표면에서 약 10m 깊이 이내의 얕은 깊이에서만 발생하였으며 대부분의 수평변위는 지표면 상부의 노출된 말뚝부분에서 발생하였다.

그림 6과 그림 7은 지표면에서의 수평변위가 허용변위 기준(대한토목학회, 2001)에 도달하였을 때 말뚝두부에서의 하중(수평 지지력) 및 수평변위를 보여준다. 말뚝직경이 증가함에 따라 지지력은 증가하는 경향을 보여주었으며, 강관합성말뚝, 콘크리트 말뚝, 그리고 강관말뚝의 순으로 지지력이 큰 것으로 나타났다. 이 때의 수평변위는 강관합성말뚝, 강관 말뚝 그리고 콘크리트 말뚝 순으로 변위가 작은 것으로 나타났다.

그림 8은 허용변위 기준에서 강관합성말뚝의 수평방향 변위억제 효과 및 수평 지지력 증가 효과를 분석하기 위해 강관합성 말뚝의 말뚝두부 수평변위 및 지지력을 강관과 콘크리트의 수평변위 및 지지력으로 나눈 비율을 나타내었다. 그림 8(a)의 변위비율을 보면 말뚝직경이 증가함에 따라 비율이 점차 증가하므로 강관합성말뚝의 변위억제 효과가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 강관합성말뚝의 변위는 평균적으로 강관말뚝 변위의 약 78%, 콘크리트 말뚝 변위의 약 53%로 나타나 강관합성말뚝의 변위억제 효과가 매우 큰 것으로 나타났다. 그림 8(b)의 지지력 비율도 말뚝직경이 증가함에 따라 점차 감소하여 강관합성말뚝의 지지력 증가효과가 감소하였지만 강관합성말뚝의 지지력이 강관말뚝에 비하여 평균 1.46배, 콘크리트 말뚝에 비하여 평균 1.25배 큰 것으로 나타났다. 그러나, 강관합성말뚝의 지지력은 강관과 콘크리트 말뚝의 지지력 합의 평균 약 0.67배로 나타났다.

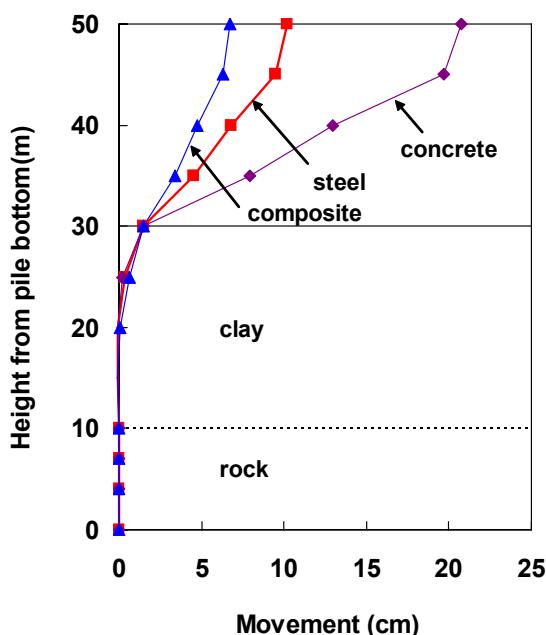


그림 5. 허용변위기준에서의 깊이별 말뚝 수평변위 (말뚝직경=1m)

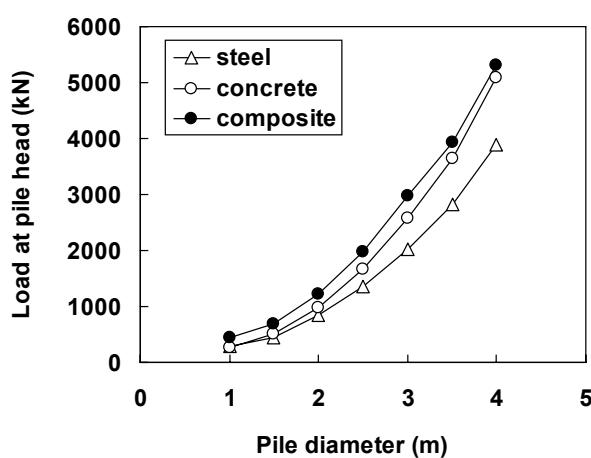


그림 6. 허용변위기준에서의 수평방향 말뚝두부 재하하중

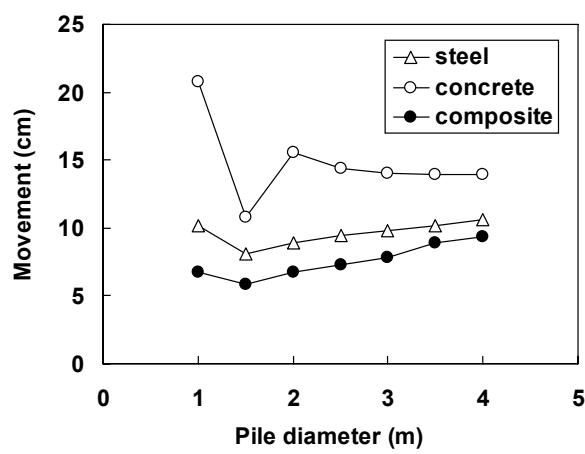
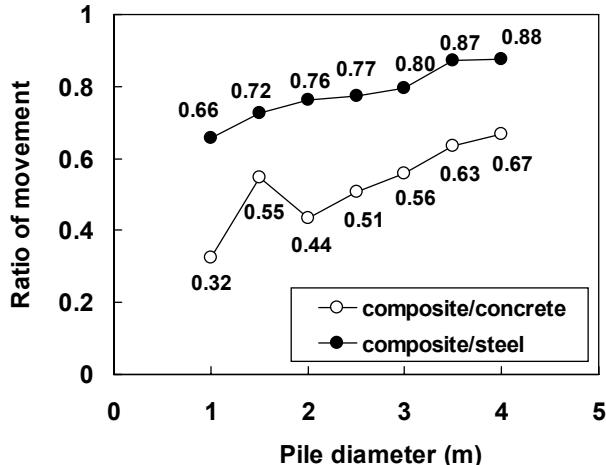
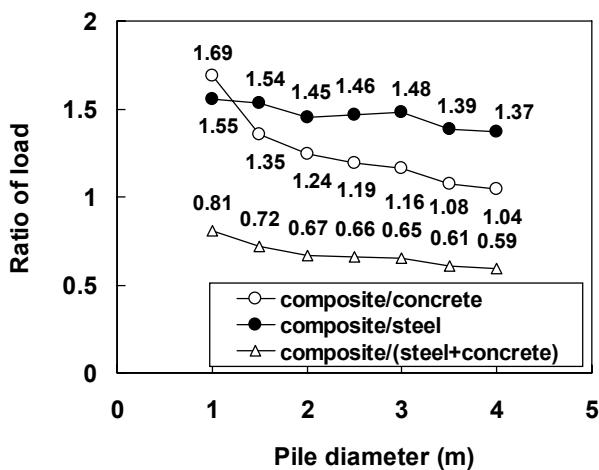


그림 7. 허용변위기준에서의 수평방향 말뚝두부 변위



(a) 변위 억제 효과



(b) 지지력 증가 효과

그림 8. 강관합성 말뚝의 변위억제 및 지지력 증가 효과

5. 결론

본 연구는 지반에 근입된 말뚝의 탄소성 거동 및 강관합성 말뚝의 보강효과를 분석하기 위하여 지반 공학 분야에서 널리 이용되는 수치해석 모델들을 적용하여 해상지반에 근입된 말뚝을 가정하여 해석을 수행하였으며, 그 결과 다음의 결론을 도출하였다.

1. 강관합성말뚝이 강관 및 콘크리트 말뚝에 비하여 수직강성 및 강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고, 말뚝직경이 증가할수록 강관합성말뚝에서 콘크리트가 차지하는 단면적이 증가하기 때문에 강관합성 말뚝과 콘크리트 말뚝의 수직강성 및 강도가 점차 비슷해지는 것으로 나타났다.
2. 수직방향 지반 극한지지력의 경우 강관합성말뚝은 강관말뚝과 비교하여 평균 1.90배, 콘크리트 말뚝에 대하여는 평균적으로 동일한 지지력을 보여주었다.
3. 허용변위 기준에서의 수평방향 지지력의 경우 강관합성말뚝은 강관말뚝에 비하여 평균 1.46배, 콘크리트 말뚝에 비하여 평균 1.25배 큰 것으로 나타났다. 그리고, 허용변위 기준에서의 강관합성말뚝의 말뚝두부 변위는 평균적으로 강관말뚝의 약 78%, 콘크리트 말뚝의 약 53%로 나타나 강관합성말뚝의

변위억제 효과가 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 ‘고효율 하이브리드 대형 기초 공법 개발 (II)’ 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 대한토목학회(2001), *도로교 설계기준 해설(하부구조편)*.
2. 이주형, 신흐성, 박민경, 박재현, 곽기석(2008), “수치해석을 이용한 국내 해상교량 현장타설말뚝의 강관지지효과”, *대한토목학회 논문집*, 제 28권 제 3C호, pp. 149~158.
3. 한국건설기술연구원(2008), *고효율 하이브리드 대형 기초 공법 개발 (II)*.
4. AASHTO(2004), *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
5. ASCE(1997), *Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations*, ASCE 20~96, ASCE.
6. Comodromos, E.M. and Pitilakis, K.D.(2004), “Response evaluation for horizontally loaded fixed-head pile groups using 3-D non-linear analysis”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.29, pp.597~625.
7. Davisson, M.T.(1973), “High capacity piles”. *Proceedings, Innovations in Foundation Construction*, ASCE.
8. Fellenius B.H.(2004), “Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis”, *Geo-Trans Conference*, Los Angeles, ASCE Geotechnical Special Publication Vol.125, pp.253~275.
9. Itasca(2006), *FLAC 3D ver. 3.1 User's Guide*.
10. Pott, D.M.(2003), “Numerical analysis: a virtual dream or practical reality?”, *Geotechnique*, Vol 53(6), pp.535~573.
11. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.