수치해석을 이용한 강관합성 군말뚝의 보강효과 분석

Analysis of Reinforcement Effect of Steel-Concrete Composite Group Piles by Numerical Analysis

김성렬¹⁾, Sung-Ryul Kim, 이시훈²⁾, Si-Hoon Lee, 정문경³⁾, Moon-Kyung Chung, 이주형⁴⁾, Ju-Hyung Lee, 곽기석⁵⁾, Ki-suk Kwak

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 책임연구원, Chief Researcher, Korea Institute of Construction Technology
 ⁴⁾ 한국건설기술연구원 책임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology
 ⁵⁾ 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 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, pile distance and loading direction. As the results, the axial capacity of the composite pile was about 73% larger than that of the steel pipe pile and about 14% larger than that of the steel pile. In addition, the horizontal movement at the pile head of the composite pile was about 51% of that of the steel pile and about 19% of that of the concrete pile.

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

1. 서 론

강관합성말뚝은 강관 내에 콘크리트를 충진한 말뚝으로 내부 콘크리트의 변형을 외부 강관이 억제하는 보강효과에 의해 말뚝강도가 커지고, 연성파괴 거동이 발생한다. 기존의 연구결과, 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. 김성렬 등(2009)은 강관, 콘크리트, 강관합성말뚝의 3가지 조건의 단말뚝에 대하여 수직 하중, 수평하중에 대한 3차원 수치해석을 수행한 결과 강관합성말뚝이 강관 말뚝 및 콘크리트 말뚝에 대해 수직방향 강관말뚝과 비교하여 평균 1.90배, 콘크리트 말뚝과 대하여 평균적으로 동일하고, 수평방향 강관말뚝과 비교하여 평균 1.46배, 콘크리트 말뚝과 비교하여 평균 1.25배 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서는 해상 지반에 근입된 강관합성 군말뚝에 대하여 말뚝재료의 항복거동 및 지반의 탄소성 거동을 함께 고려할 수 있는 3차원 수치해석을 수행하여 강관합성 군말뚝의 보강효과를 분석하였다. 이 를 위하여 말뚝간격, 말뚝직경, 말뚝재료 그리고 재하방향 등을 달리하여 변수연구를 수행하였다.

2. 해석조건

해석대상은 그림 1과 같이 해상 지반조건을 가정하여 약 20m 두께의 연약지층 하부에 풍화암이 있는 것으로 가정하였다. 말뚝은 지표면에 1m 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 설계자 료를 참조하여 연약지층과 풍화암에 대한 평균적인 값을 적용하였다. 표 1에서 경계면 요소는 지반과 말뚝 사이의 분리현상 및 미끄러짐을 모사하는데 이용된다. 그리고, 경계면 요소의 법선방향(Kn), 전단 방향(Ks) 강성은 Comodromos 등(2004)이 제안한 바와 같이 인접지반 강성의 약 10배를 적용하여 지반 요소가 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). 말뚝선 단의 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, 2.0m, 3.0m의 3가지를 적용하였다. 또한, 군말뚝 효과를 분석하기 위해 3×3 군말뚝을 모델링하고, 말뚝중심간 간격을 3D, 6D, 8D로 변화시켰다. 하중조건은 수직/수평방향 재하의 2가지를 적용하였으며, 총 72가지 경우에 대하여 해석하였다.

	모델	Б	24	ν	c (kPa)	φ (deg.)	패차가	경계면 요소			
구분			l'sub				(deg.)	Kn	Ks	CI	ϕ_{I}
		(kPa)	(kN/m°)					(kPa/m)	(kPa/m)	(kPa)	(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 1. 해석지반의 입력물성값

여기서, E= 탄성계수, γ_{sub}= 수중 단위중량, ν= 포아송비, c, φ= Mohr Coulomb 강도정수 Kn= 경계면의 법선방향 강성, Ks= 경계면의 전단방향 강성

 $c_{I, \phi_{I}}$ 경계면에서 Mohr-Coulomb 전단강도를 정의하는 점착력 및 마찰각

말뚝재료의 해석모델 및 입력물성값은 표 3~표 5과 같이 적용하였다. 해석모델의 경우 강관은 von-Mises 모델, 콘크리트는 Mohr-Coulomb 모델, 콘크리트 내부 철근은 항복모멘트를 적용한 보 모델 을 이용하여 모델링하였으며 철근면적비는 2%를 적용하였다. 강관합성말뚝은 동일한 외경의 강관과 철

근 콘크리트 말뚝이 합쳐진 조건으로 모사하였다. 각 모델의 입력 물성값은 강관, 콘크리트, 강관합성말 뚝의 시험체(크기: 직경 20cm, 높이 40cm)에 대한 압축재하 시험의 하중-변위 곡선 결과와 비교하여 검 증하였다.

표 2는 말뚝제원 및 하중조건을 나타낸다. 말뚝재료는 강관, 콘크리트, 강관합성의 3가지, 말뚝직경은 1.0m, 2.0m, 3.0m의 3가지를 적용하였다. 또한, 군말뚝 효과를 분석하기 위해 3×3 군말뚝을 모델링하고, 말뚝중심간 간격을 3D, 6D, 8D로 변화시켰다. 하중조건은 수직/수평방향 재하의 2가지를 적용하였으며, 총 72가지 경우에 대하여 해석하였다.

표 2. 말뚝제원 및 하중조건

말뚝재료	강관, 철근 콘크리트, 강관합성(강관+철근콘크리트 충진)						
말뚝직경 (m)	1.0	2.0	3.0				
강관두께 (m)	0.019	0.022	0.026				
(부식효과 무시)	0.018	0.022					
말뚝간격	단말뚝, 3×3 군말뚝: 3D, 6D, 8D 간격						
하중조건	수직방향과 수평방향으로 말뚝재료 항복시까지 재하						

말뚝재료의 해석모델 및 입력물성값은 표 3~표 5과 같이 적용하였다. 해석모델의 경우 강관은 von-Mises 모델, 콘크리트는 Mohr-Coulomb 모델, 콘크리트 내부 철근은 항복모멘트를 적용한 보 모델 을 이용하여 모델링하였으며 철근면적비는 2%를 적용하였다. 강관합성말뚝은 동일한 외경의 강관과 철 근 콘크리트 말뚝이 합쳐진 조건으로 모사하였다. 각 모델의 입력 물성값은 강관, 콘크리트, 강관합성말 뚝의 시험체(크기: 직경 20cm, 높이 40cm)에 대한 압축재하 시험의 하중-변위 곡선 결과와 비교하여 검 증하였다.

표 3. 강관의 수치해석 입력자료

구분	해석모델	E (kPa)	ν	$\gamma~(\mathrm{kN/m^3})$	$\sigma_y({\rm kPa})$
강관	von-Mises 모델	2.0×10^{8}	0.3	66.98	250,000

여기서, γ = 단위중량, σ_y = 항복응력

표 4. 콘크리트의 수치해석 입력자료

해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	c(kPa)	φ(°)	ψ(°)	팽창각(deg.)
M-C 모델	2.76×10^{7}	0.3	14.00	7.63×10^{3}	42	0	비관련 유동법칙

표 5. 철근의 수치해석 입력자료

beam 모델 2.0×10 ⁸ 0.3 실단면적의 2.504×10 ⁻¹⁰ 392265 3.947e4	해석모델	E (kPa)	ν	단면적(m ²)	Ix,Iy(m ⁴)	σ_t (kPa)	$\begin{array}{c} P_{moment} \\ (Pa \cdot m) \end{array}$
	beam 모델	2.0×10 ⁸	0.3	실단면적의 1/100	2.504×10^{-10}	392265	3.947e4

여기서, Ix, Iy= 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. 그림 2는 군말뚝 해석에 적용된 해석 요소망을 보여준다. 대칭 조건을 적용하여 중앙 반단면만을 모델링하였다.



그림 2. 군말뚝의 해석요소망 (말뚝직경=2m, 강관합성말뚝, 말뚝간격 3D)

3. 해석결과 - 수직방향 재하

그림 3은 단말뚝과 군말뚝의 수직방향 하중-변위 곡선을 비교하여 보여준다. 말뚝간격이 3D에서 8D 로 증가함에 따라 군말뚝의 하중-변위 곡선이 단말뚝과 유사해지는 것을 알 수 있다. 그리고, 하중크기 가 6D이상인 경우 단말뚝의 하중-변위 곡선과 거의 일치하여 수직방향 군말뚝 효과가 발생하지 않는 것으로 판단된다.



그림 3. 말뚝간격에 따른 수직방향 하중-변위 곡선 비교 (말뚝직경=2m, 단말뚝 하중×9배)

그림 4는 모든 해석경우에 대하여 얻어진 수직방향 극한지지력을 보여준다. 수직방향 극한 지지력은 대구경 현장타설말뚝에 적용되는 ASCE 방법(1997)을 이용하여 산정하였다. 지지력값은 말뚝직경이 증 가함에 비례하여 증가하며, 말뚝중심간 간격이 3D, 6D, 8D로 증가함에 점차 단말뚝의 극한지지력과 유 사해지는 것으로 나타났다.



그림 4. 말뚝직경별, 말뚝간격별 수직방향 말뚝두부 항복하중 (군말뚝 항복하중/9)

그림 5는 강관합성말뚝의 수직방향 보강효과를 분석하기 위해 강관합성 말뚝의 극한지지력을 강관과 콘크리트의 극한지지력으로 각각 나누어 나타내었다. 모든 경우에 대하여 (강관합성말뚝 지지력)/(강관 말뚝 지지력) 비율과 (강관합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 평균적으로 각각 1.73 및 1.14로 나타나 강관합성말뚝의 지지력 증가효과가 있는 것으로 나타났다.



그림 5. 말뚝직경별, 말뚝간격별 수직방향 말뚝두부 항복하중 (군말뚝 항복하중/9)

4. 해석결과 - 수평방향 재하

그림 6은 말뚝 간격에 따른 하중-변위 곡선을 보여준다. 단말뚝의 수평강성 및 강도가 가장 컸으며, 군말뚝의 말뚝간격이 3D, 6D, 8D로 증가할수록 점차 군말뚝의 하중-변위 곡선이 점차 단말뚝의 곡선과 유사해졌다.



그림 7은 수평방향 지지력으로서 이 지지력은 지표면에서의 말뚝변위가 수평방향 허용변위 기준인 말 뚝직경의 1%(최소 1.5cm)에 도달하였을 때의 말뚝두부 재하하중으로 정의하였다. 수평방향 지지력은 말 뚝직경에 비례하여 증가하였으며, 말뚝중심간 간격이 3D, 6D, 8D로 증가함에 점차 단말뚝의 지지력과 유사해졌다.



(c) 강관합성그림 7. 허용변위기준에서의 수평방향 말뚝두부 재하하중

그림 8은 강관합성말뚝의 수평방향 보강효과를 분석하기 위해 강관합성 말뚝의 지지력을 강관과 콘크 리트의 지지력으로 나누어 나타내었다. 모든 경우에 대하여 (강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비 율과 (강관합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 각각 1.51 및 1.19로 나타나 강관합성말뚝의 지지력 증가효과가 있는 것으로 나타났다.



5. 결 론

본 연구는 해상연약지반에 근입된 군말뚝의 보강효과를 분석하기 위하여 지반공학 분야에서 널리 이 용되는 수치해석 모델들을 적용하여 지반에 근입된 말뚝을 가정하여 해석을 수행하였으며, 그 결과 다 음의 결론을 도출하였다.

- 수직방향 재하시 강관합성말뚝의 강성 및 강도가 강관 및 콘크리트 말뚝에 비하여 가장 큰 것으로 나타났다. 말뚝간격이 3D에서 8D로 증가함에 따라 군말뚝의 하중-변위 곡선이 단말뚝과 유사해졌다. 그리고, 말뚝간격이 6D이상인 경우 수직방향 군말뚝 효과가 발생하지 않는 것으로 판단된다. 그리고, ASCE 방법으로 강관합성 군말뚝의 보강효과를 분석한 결과, 강관합성말뚝의 지지력이 강관말뚝과 콘크리트 말뚝에 비하여 평균적으로 각각 73%와 14% 큰 것으로 나타났다.
- 2. 수평방향 재하시 단말뚝의 수평간성 및 강도가 가장 컸으며, 군말뚝의 말뚝간격이 증가할수록 군말뚝 과 단말뚝의 하중-변위 곡선이 점차 유사해졌다. 그리고, 말뚝간격이 8D인 경우에는 군말뚝 효과가 없는 것으로 판단된다. 그리고 허용변위 기준에서의 수평방향 지지력을 이용하여 강관합성말뚝의 보 강효과를 분석한 결과, 강관합성말뚝의 지지력이 강관말뚝과 콘크리트 말뚝에 비하여 평균적으로 각 각 51%와 19% 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김성렬, 이주형, 박재현, 정문경(2009), "수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석(I) -재료 강도", 대한토목학회 논문집, 29(6C): 259-266.
- 김성렬, 이시훈, 정문경, 이주형(2009), "수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석(Ⅱ) -지반 지지력", 대한토목학회 논문집, 29(6C): 269-275.
- 이주형, 신휴성, 박민경, 박재현, 곽기석(2008), "수치해석을 이용한 국내 해상교량 현장타설말뚝의 강 관지지효과", 대한토목학회 논문집, 28(3C): 149-158.
- 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. CGS(2006), Canadian Foundation Engineering Manual
- 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*, 29:592–625.
- 8. Fellenius B.H.(2004), Unified design of piled foundations with emphasis on settlement analysis. Geo-Trans Conference, Los Angeles, ASCE Geotechnical Special Publication 125:253–275.
- 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*, 53(6):535–573.