

수치해석을 이용한 강관합성 무리말뚝의 보강효과 분석

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

정 문 경¹ Chung, Moonkyung

이 시 훈² Lee, Si-Hoon

이 주 형³ Lee, Ju-Hyung

곽 기 석⁴ Kwak, Ki-Seok

김 성 렬⁵ Kim, Sung-Ryul

Abstract

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. The results showed that the axial capacity of the composite pile was about 90% larger than that of the steel pipe pile while similar to that of the concrete pile. At the allowable movement criteria, the horizontal capacity of the composite pile was about 50% larger than that of the steel pile and about 22% larger than that of the concrete pile.

요 지

강관합성말뚝은 외부 강관의 합성 구속효과에 의해 말뚝강도가 커지고, 연성파괴 거동이 발생한다. 본 연구에서는 해상 지반에 근입된 무리말뚝에 대하여 말뚝재료의 항복거동 및 지반의 탄소성 거동을 함께 고려할 수 있는 3차원 수치해석을 수행하여 하중-변위 거동 및 강관합성말뚝의 보강효과를 분석하였다. 이를 위하여 강관, 콘크리트, 강관합성말뚝에 대하여 각각 말뚝간격, 말뚝직경 그리고 재하방향을 달리한 변수연구를 수행하였다. 그 결과 수직방향 지지력의 경우 강관합성말뚝은 강관말뚝과 비교하여 평균 90% 큰 것으로 나타났고, 콘크리트 말뚝에 대하여는 평균적으로 동일하게 나타났다. 그리고 허용변위 기준에서의 수평방향 지지력의 경우 강관합성말뚝은 강관말뚝보다 평균 50%, 콘크리트 말뚝보다 평균 22% 더 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Drilled shaft, Numerical analysis, Steel-concrete composite pile, Steel casing, Yield behavior

1. 서 론

강관합성말뚝은 강관 내에 콘크리트를 충전한 말뚝

으로 내부 콘크리트의 변형을 외부 강관이 억제하는 보강효과에 의해 말뚝강도가 커지고, 연성파괴 거동이 발생한다. 기존의 연구결과, 강관합성말뚝은 동일직경의

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

2 정회원, 동아대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Dong-A Univ.)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

4 정회원, 한국건설기술연구원 기획조정처 연구위원 (Member, Research Fellow, Planning & Coordination Dept., KICT)

5 정회원, 동아대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engr., Dong-A Univ., sungryul@dau.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

콘크리트 말뚝에 비하여 말뚝 강도가 증가하고 변위가 감소하는 보강효과가 있는 것으로 나타났다(이주형 등, 2008). 국내의 경우 특수한 시공조건을 만족시키기 위해 현장타설말뚝에 외부강관이 시공되더라도 이를 희생강관으로 고려하여 보강효과를 무시하여 왔다. 그러나, 미국 시방기준(AASHTO, 2004)에서는 강관 케이싱의 두께가 3mm 이상인 경우에는 강관에 의한 재료강도 증가효과를 고려하여 설계하도록 규정하고 있다.

건축구조에서는 외부강관에 콘크리트를 충전한 구조형식을 CFT(Concrete Filled Tube)로 지칭하며, 건축 구조물의 기둥형식으로 많이 적용하고 있다. 지금까지 강관-콘크리트 합성재료와 관련된 대부분의 연구는 구조분야를 중심으로 수행되어 왔으며, 건축구조의 기둥부재 또는 토목구조의 교각 등을 대상으로 모형체 실험(엄진호 등, 2000) 또는 수치해석 방법(방춘석 등, 2002, 2003)을 통하여 연구되어 왔다.

지반공학 분야에서는 강관합성말뚝의 보강효과 등에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았는데, 그 이유는 말뚝의 재료강도가 커서 지반의 지지력이 설계를 지배하고 이에 따라 말뚝을 탄성체로 고려하였기 때문으로 판단된다. 그러나, 최근의 대구경 현장타설말뚝은 단단한 압반에 근입되어 지반의 지지력이 말뚝의 재료강도보다 큰 경우가 빈번히 발생하고 있다. 그러므로, 지반공학 분야의 설계에서도 강관-콘크리트 합성거동 및 말뚝재료의 소성거동 등을 고려하여 말뚝재료의 강도 및 변형특성을 연구하는 것이 필요해지게 되었다.

김성렬 등(2009a, 2009b)은 강관, 콘크리트, 강관합성 말뚝의 3가지 조건의 단말뚝에 대하여 3차원 수치해석을 수행한 결과 강관합성말뚝의 수직방향 극한 지지력은 강관말뚝의 평균 1.90배, 콘크리트 말뚝에 대하여는 평균적으로 동일하고, 허용변위기준에서의 수평방향 지지력은 강관말뚝과 비교하여 평균 1.46배, 콘크리트 말뚝과 비교하여 평균 1.25배 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서는 이러한 수치해석 연구를 확장하여 무리말뚝으로 시공되는 강관합성 말뚝을 대상으로 말뚝재료의 항복거동 및 지반의 탄소성 거동을 함께 고려할 수 있는 3차원 수치해석을 수행하고 강관합성 무리말뚝의 보강효과를 분석하고자 한다. 이를 위하여 말뚝간격, 말뚝직경, 말뚝재료 그리고 재하방향 등을 달리하여 총 72가지 경우에 대한 변수연구를 수행하였다.

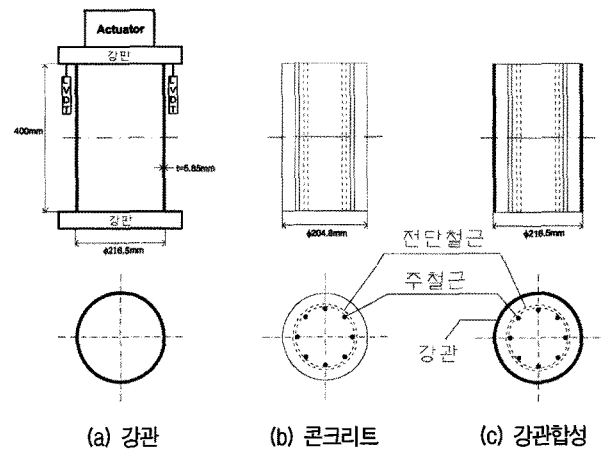


그림 1. 시험체의 단면과 압축시험 모식도(한국건설기술연구원, 2008)

2. 해석조건

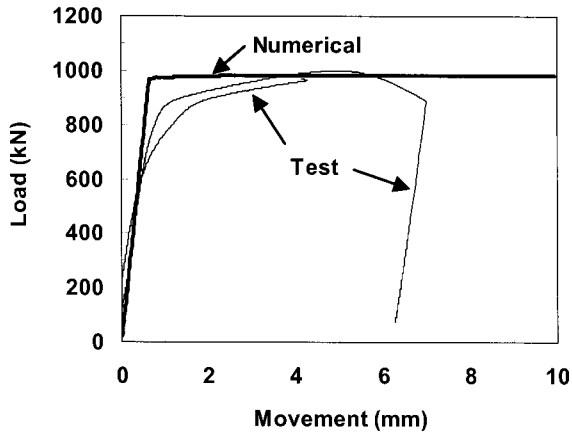
2.1 시험체 압축강도 실험을 이용한 수치해석 모델 검증

본 연구에서는 탄소성모델을 적용하여 말뚝 재료의 항복거동을 모사하고자 하였다. 이를 위하여, 공시체 압축강도 실험 결과를 이용하여 말뚝재료에 적용되는 해석모델 및 입력 물성값을 검증하였다.

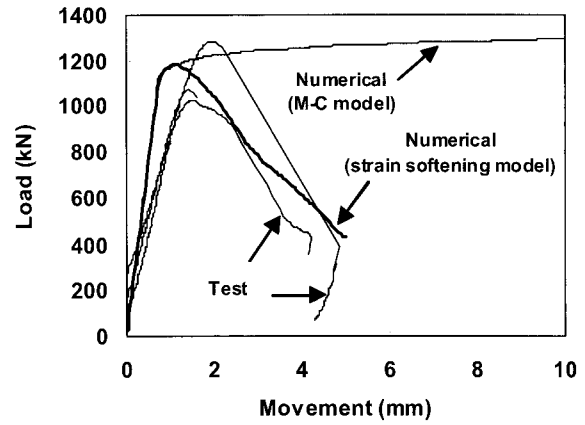
공시체의 압축강도 실험은 그림 1에 나타난 바와 같이 직경 20cm, 높이 40cm의 강관, 콘크리트, 강관합성 공시체를 제작하여 수행하였다. 실험 결과 그림 2에 나타난 바와 같이 각 재료에 대한 압축 하중-변위 곡선(그림 2에서 "Test"로 표시)을 얻었다. 강관 시험체는 약 1,000kN, 콘크리트 시험체는 약 1,000~1,300kN, 그리고 강관합성 시험체는 약 2,700kN의 하중에서 항복이 발생하였다. 강관합성 시험체가 강관과 콘크리트의 각 항복하중의 합인 2,000~2,300kN보다 더 큰 재하하중에서 항복되어 강관합성말뚝의 보강효과를 실험에서 확인할 수 있었다(한국건설기술연구원, 2008).

본 연구에서는 지반공학 분야에서 널리 이용되는 범용 3차원 유한차분 수치해석 프로그램인 FLAC 3D 프로그램(Itasca, 2006)을 이용하였다. 말뚝재료의 입력물성값은 표 1~표 3에 나타내었다. 각 말뚝재료에 적용된 탄소성모델은 강관의 경우 von-Mises 모델, 콘크리트의 경우 Mohr-Coulomb 모델을 이용하였으며 콘크리트 내부의 철근 면적비는 2%를 적용하였다. 강관합성말뚝에는 강관과 콘크리트 재료에 적용된 해석모델 및 입력물성값을 동일하게 적용하였다.

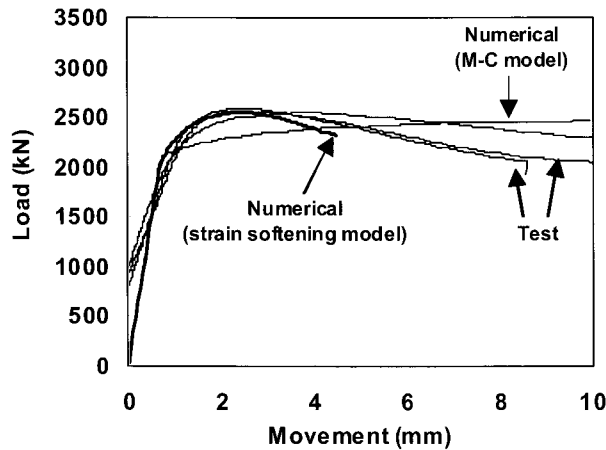
강관말뚝의 경우 그림 2(a)에 보는 바와 같이 von-



(a) 강관 시험체



(b) 콘크리트 시험체



(c) 강관합성 시험체

그림 2. 압축재하 실험의 수치해석 모사

표 1. 강관의 수치해석 입력자료

구분	해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	σ_y (kPa)
실험체 모사	von-Mises 모델	1.5×10^8	0.3	76.98	250,000
무리말뚝 모사		2.0×10^8		66.98	

여기서, E= Young 탄성계수, ν = 포아송비, γ = 단위중량, σ_y = 항복응력

표 2. 콘크리트의 수치해석 입력자료

구분	해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)
실험체 모사	변형률연화모델	1.84×10^7	0.2	23	소성변형률에 따라 감소	42	소성변형률에 따라 감소
	M-C 모델				7.63×10^3		0
무리말뚝 모사	M-C 모델	2.76×10^7		14	7.63×10^3		0

여기서, c, ϕ = Mohr Coulomb 강도정수, ψ = 팽창각

표 3. 철근의 수치해석 입력자료

구분	해석모델	E (kPa)	ν	단면적 (m ²)	I_x, I_y (m ⁴)	σ_t (kPa)	P_{moment} (Pa·m)
실험체 모사	beam 모델	1.5×10^8	0.3	실단면적의 1/100	4.908×10^{-10}	392,265	65.37
무리말뚝 모사		2.0×10^8			$1.565 \times 10^{-11} \sim 1.268 \times 10^{-9}$		$4.933 \times 10^3 \sim 1.332 \times 10^5$

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

Mises 모델을 적용하여 얻어진 수치해석 결과(그림에서 “Numerical”로 표시)가 실험에서 얻어진 하중-변위 곡선을 잘 묘사할 수 있었다. 콘크리트 말뚝의 경우 실험 곡선이 변형에 따라 강도가 감소하는 변형을 연화거동을 보였다. 그러므로, 초기 해석에서는 이러한 콘크리트 재료의 변형을 연화거동을 묘사하기 위해 변형을 연화 모델(그림에서 “strain softening model”로 표시)을 적용하여 그림 2(b)와 그림 2(c)에서 보는 바와 같이 콘크리트 및 강관합성말뚝의 하중-변위 거동을 잘 묘사할 수 있었다. 그러나, 콘크리트 재료의 해석모델로서 최종적으로 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였는데 그 이유는 ① 변형을 연화모델의 해석시간이 Mohr-Coulomb 모델에 비하여 매우 길었고, ② 변형을 연화모델이 무리말뚝해석에서 불안정한 결과를 보여주었으며, ③ 이에 반해 Mohr-Coulomb 모델은 안정되고 경향성있는 결과를 보여주었으며 재료의 항복시점을 묘사할 수 있었기 때문이다.

수치해석 결과, 그림 2에서 보는 바와 같이 콘크리트 재료에 적용된 Mohr-Coulomb 모델(그림에서 “M-C model”로 표시)이 변형을 연화거동은 묘사할 수 없었지만 콘크리트 재료의 항복하중을 묘사할 수 있으며 강관합성말뚝에서는 실제 실험의 하중-변위 결과와 유사한 곡선을 보여주었다. 본 검증연구에 대한 자세한 사항은 김성렬 등(2009a)의 논문에 기술되어 있다.

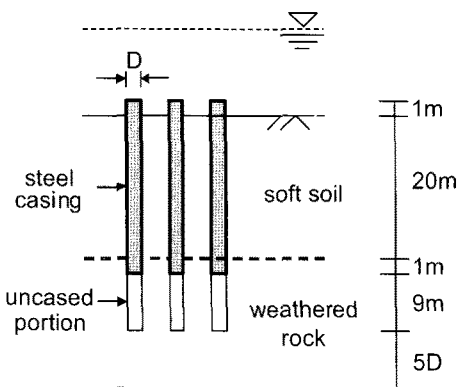


그림 3. 해석지반 및 말뚝의 조건(강관합성말뚝 조건)

2.2 무리말뚝 해석조건

해석조건은 그림 3과 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. 강관말뚝은 실제 시공조건에서 일반적으로 암 1m 깊이 정도 근입되므로 이 깊이를 적용하였다. 말뚝선단으로부터 해석바닥면까지의 거리는 말뚝직경(D)의 5배로 모델링하였다. 그리고 좌우로 동일한 간격을 가진 3×3 무리말뚝을 가정하였다.

표 4는 해석지반의 해석모델 및 입력물성값으로서 지반의 탄성계수와 강도정수는 인천대교의 설계자료를 참조하여 연약지층과 풍화암에 대한 평균적인 값을 적용하였다. 표 4에서 경계면 요소는 지반과 말뚝 사이의 분리현상 및 미끄러짐을 묘사하는데 이용된다. 그리고, 경계면 요소의 법선방향(K_n)과 전단방향(K_s) 강성은 지반 요소와 말뚝요소의 연결하는 인터페이스 스프링 요소의 강성을 나타내는데 Comodromos 등(2004)이 제안한 바와 같이 인접지반 강성의 약 10배를 적용할 경우 지반과 말뚝구조체 간에 상대변위가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 깊은 기초의 선단지지력은 그 극한값이 존재하지 않고 변위에 따라서 계속 증가하는 것으로 알려져 있으므로(Fellenius, 2004), 현실적인 거동을 묘사하기 위해 팽창각을 적용하여 항복 이후의 부피팽창에 의한 강도 증가현상을 묘사하였다(Pott, 2003). 그러므로, 말뚝선단의 풍화암에는 팽창각 10°를 적용하여 항복 이후에 암의 부피가 팽창되면서 선단지지력이 증가하는 현상을 묘사하였고, 연약지층은 팽창각 0을 적용하여 항복이후에 강도가 일정해지도록 묘사하였다.

표 5는 본 연구에서 수행된 해석종류로서 총 72가지의 경우에 대하여 해석하였다. 말뚝재료는 강관, 콘크리트, 강관합성의 3가지, 말뚝직경은 1.0m, 2.0m, 3.0m의

표 4. 해석지반의 입력물성값

구분	모델	E (kPa)	γ_{sub} (kN/m ³)	ν	c (kPa)	ϕ (°)	ψ (°)	경계면 요소			
								K_n (kPa/m)	K_s (kPa/m)	c_i (kPa)	ϕ_i (°)
연약층	M-C	14,710	7.65	0.40	32.36	15	0	147,100	147,100	32.36	15
풍화암	M-C	196,133	9.61	0.30	98.07	35	10	1,961,330	1,961,330	98.07	35

여기서, γ_{sub} = 수중 단위중량, K_n = 경계면의 법선방향 강성, K_s = 경계면의 전단방향 강성

c_i , ϕ_i = 경계면에서 Mohr-Coulomb 전단강도를 정의하는 점착력 및 마찰각

표 5. 말뚝제원 및 하중조건

말뚝재료	강관, 철근 콘크리트, 강관합성(강관+철근콘크리트 충전)		
말뚝직경(m)	1.0	2.0	3.0
강관두께(m) (부식효과 무시)	0.018	0.022	0.026
말뚝간격	단말뚝, 3×3 무리말뚝: 3D, 6D, 8D 간격		
하중조건	수직방향 / 수평방향		

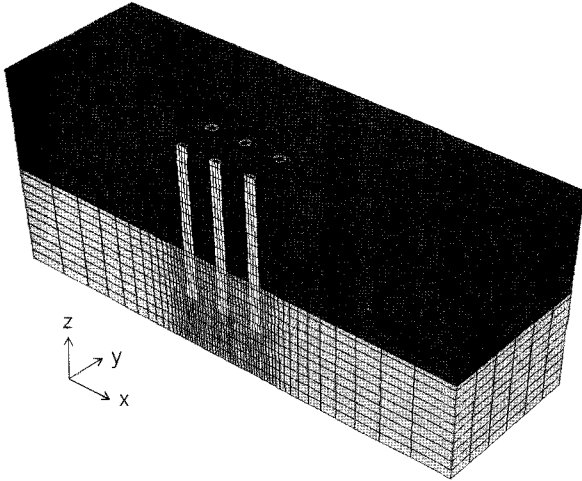
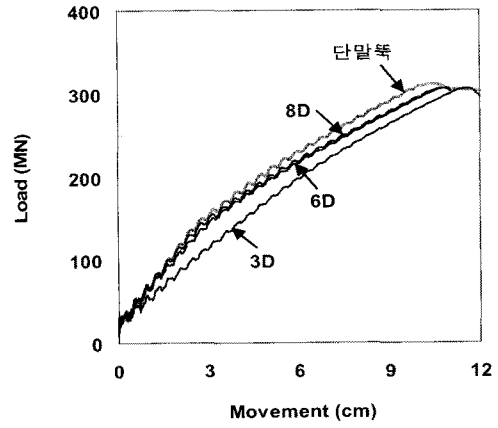


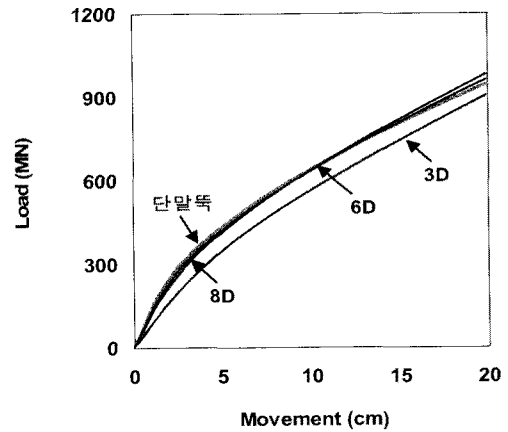
그림 4. 무리말뚝의 해석요소망(말뚝직경 2m, 강관합성말뚝, 말뚝 간격 3D)

3가지를 적용하였다. 강관합성말뚝의 보강효과를 분석하기 위해 강관 및 콘크리트 말뚝의 제원(두께 및 지반 근입깊이)은 강관합성말뚝에 적용된 것과 동일한 제원을 적용하였다. 그러므로, 해석에 적용된 강관말뚝의 두께는 말뚝구조체로서 실제 적용되는 강관의 두께와 다를 수 있다. 또한, 무리말뚝 효과를 분석하기 위해 3×3 무리말뚝을 모델링하고, 말뚝중심간 간격을 3D, 6D, 8D로 변화시켰다. 하중조건은 수직/수평 방향 재하의 2가지를 적용하였다.

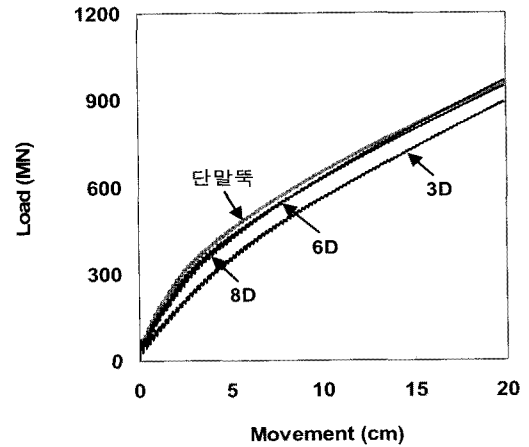
그림 4는 무리말뚝 해석에 적용된 해석 요소망을 보여준다. 3×3 무리말뚝에 대해 대칭조건을 적용하여 중앙 반단면만을 모델링하였다. 무리말뚝 및 단말뚝의 말뚝캡은 모델링하지 않았다. 즉, 말뚝캡이 완전강체라는 가정하에 말뚝캡의 변형 및 말뚝캡과 지반간의 상호작용은 고려하지 않았다. 수직방향 재하의 경우 모든 말뚝에 대하여 지표면에서 1m 돌출된 말뚝두부면의 절점 변위를 일정한 속도로 z방향 아래로 이동시키면서 하중을 가하였다. 수평방향 재하는 말뚝두부의 회전이 발생하지 않도록 말뚝두부면 절점의 z방향 변위를 고정시킨 상태에서 절점 변위를 x 방향으로 일정한 속도로 증가시키면서 하중을 가하였다.



(a) 강관말뚝



(b) 콘크리트 말뚝



(c) 강관합성말뚝

그림 5. 말뚝간격에 따른 수직방향 말뚝두부 하중-변위 곡선 비교 (말뚝직경 2m, 단말뚝 하중은 무리말뚝 하중으로 환산함)

무리말뚝으로부터 해석영역 경계면까지의 거리는 재하 방향으로 5D~20D, 재하직각 방향으로 5D~10D로 변화시키면서 해석을 수행한 결과 재하 방향으로 20D, 재하 직각방향으로 10D를 적용하였을 때 해석영역 크기가 말뚝의 하중-변위곡선에 미치는 영향이 없는 것을 확인하였다.

3. 해석결과 - 수직방향 재하

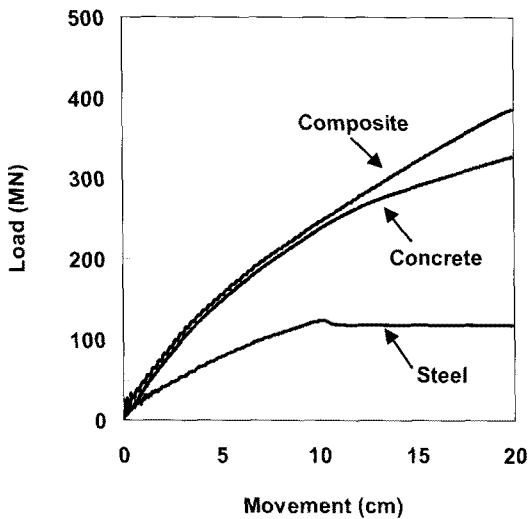
그림 5는 수직방향 재하에 의한 단말뚝과 무리말뚝의 말뚝두부 하중-변위 곡선을 비교하여 보여준다. 말뚝간격이 3D에서 8D로 증가함에 따라 무리말뚝의 하중-변위 곡선이 단말뚝과 유사해지는 것을 알 수 있다. 강관 말뚝의 경우 지반지지력에 비해 재료강도가 작아서 약 10cm의 말뚝두부 변위에서 재료항복이 발생하였다. 전체적인 경향은 말뚝간격이 6D이상인 경우 무리말뚝과 단말뚝의 하중-변위 곡선과 거의 일치하여 수직방향 무리말뚝 효과가 발생하지 않는 것으로 판단된다.

그림 6은 말뚝간격이 3D인 조건에 대하여 각 재료별 말뚝두부 하중-변위 곡선을 비교한 그림이다. 말뚝재료의 강성 및 강도는 강관합성말뚝, 콘크리트, 강관 말뚝 순서대로 큰 것으로 나타났다. 그리고, 말뚝직경이 커질수록 전체 단면적에서 콘크리트가 차지하는 단면적이

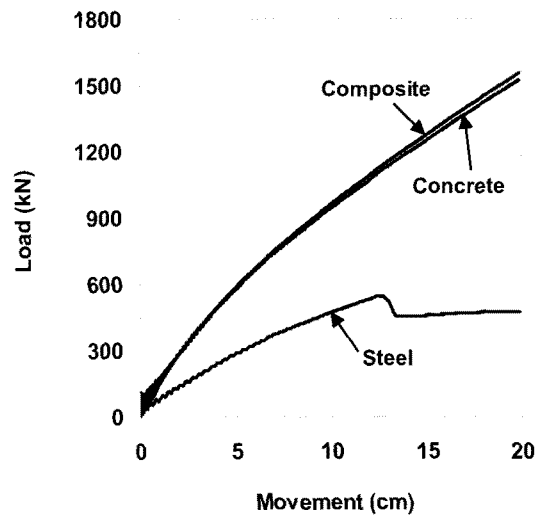
커졌기 때문에 강관합성말뚝과 콘크리트의 하중-변위 곡선이 유사해졌다.

그림 7은 무리말뚝의 전체 변위 등고선도를 나타내었다. 풍회압에 근입된 말뚝선단부에서 상당한 변위가 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구의 해석 조건에서는 수직방향 재하에 대하여 지반의 변형이 상당히 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

그림 8은 모든 해석경우에 대하여 얻어진 수직방향 극한지지력을 보여준다. 수직방향 극한 지지력은 대구경 현장타설말뚝에 적용되는 ASCE 방법(1997)을 이용하여 산정하였다. ASCE 방법은 말뚝의 하중-침하 곡선과 [말뚝의 탄성압축량 + offset값]으로 정의되는 offset 직선이 교차하는 점에서의 하중을 극한지지력으로 정의한다. 여기서, offset값은 $[0.381\text{cm} + D/100]$ 으로 산정되며 이 값은 항타말뚝에 널리 적용되는 Davisson 방법(1973)에서 제시한 $[0.381\text{cm} + D/120]$ 과 유사하다. 말뚝

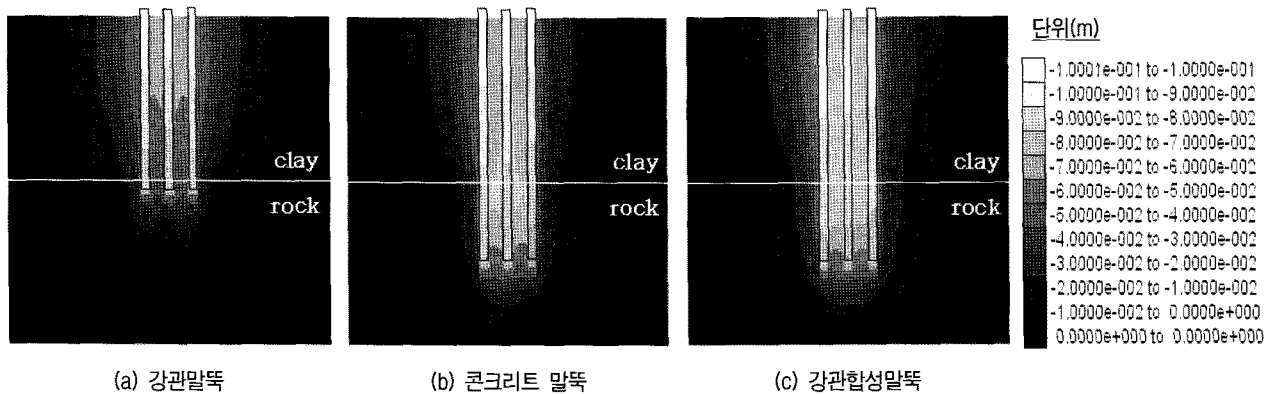


(a) 말뚝직경 1m



(b) 말뚝직경 3m

그림 6. 말뚝재료에 따른 수직방향 말뚝두부 하중-변위 곡선 비교(말뚝간격 3D)



(a) 강관말뚝

(b) 콘크리트 말뚝

(c) 강관합성말뚝

그림 7. 강관, 콘크리트, 강관합성말뚝의 변위 contour(직경 1m, 말뚝간격 3D, 두부변위 10cm)

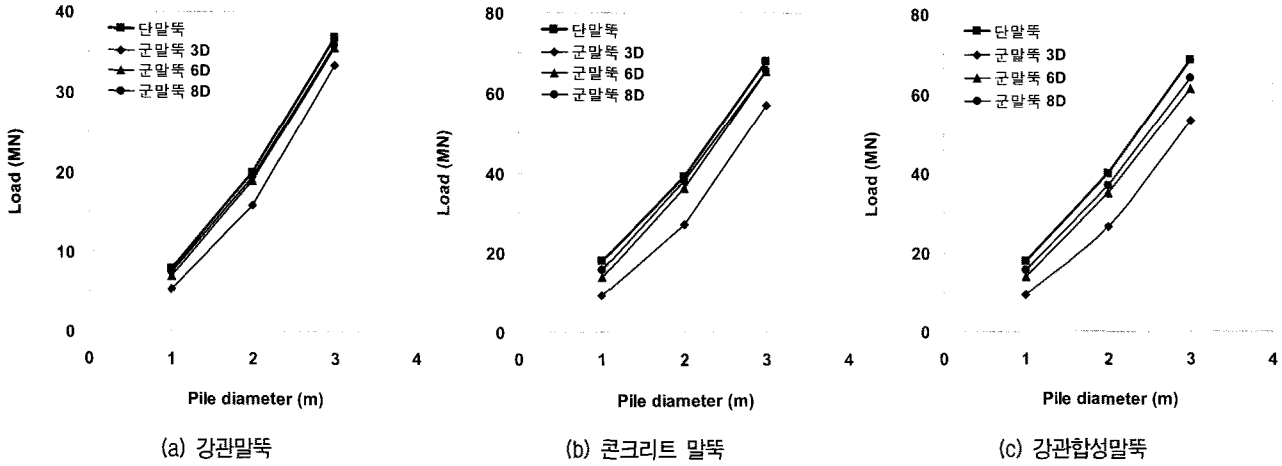


그림 8. 말뚝직경별, 말뚝간격별 말뚝 1본당 수직방향 지지력

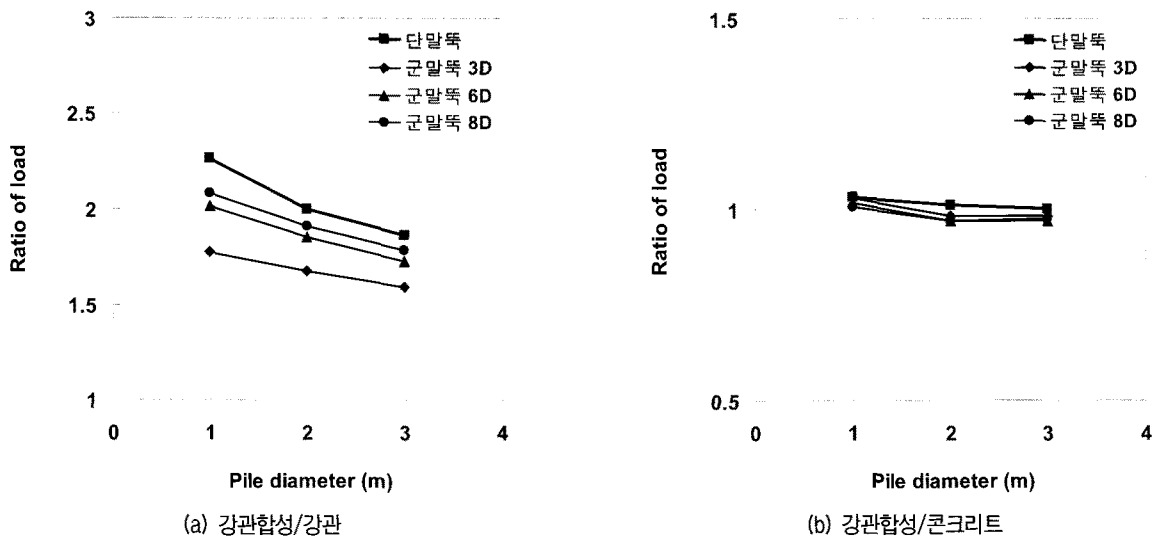


그림 9. 수직방향 강관합성말뚝 보강효과

의 극한 지지력값은 말뚝직경이 증가함에 비례하여 증가하며, 무리말뚝의 지지력은 말뚝중심간 간격이 3D, 6D, 8D로 증가함에 점차 단말뚝의 극한지지력과 유사해지는 것으로 나타났다.

그림 9는 강관합성말뚝의 수직방향 보강효과를 분석하기 위해 강관합성 말뚝의 극한지지력을 강관과 콘크리트의 극한지지력으로 각각 나누어 나타내었다. 단말뚝에 대한(강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비율과(강관합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 평균적으로 각각 2.04 및 1.01, 그리고, 무리말뚝에 대한(강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비율과 (강관합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 평균적으로 1.82, 0.98로 나타나 단말뚝에서 강관합성말뚝의 보강효과가 더 크게 나타났다. 콘크리트 말뚝의 지지력과 강관합성 말뚝의 지지력 차이가 크지 않은 것으

로 나타났는데, 그 이유는 말뚝 전체 단면적에서 콘크리트가 차지하는 단면적이 매우 크며, 말뚝재료가 아닌 선단지반에서 먼저 항복이 발생하였기 때문이다. 모든 경우에 대하여(강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비율은 평균적으로 1.90,(강관합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율은 평균적으로 동일하게 나타났다.

4. 해석결과 - 수평방향 재하

그림 10은 수평방향 재하에 대한 말뚝 간격에 따른 말뚝두부 하중 변위 곡선을 보여준다. 수평변위가 20cm 이상 발생하여도 콘크리트 말뚝에서 뚜렷한 항복파괴가 발생하지 않았는데, 이것은 본 해석에서 콘크리트 재료에 적용한 Mohr-Coulomb 모델이 콘크리트의 변형률 연화거동을 모사하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그

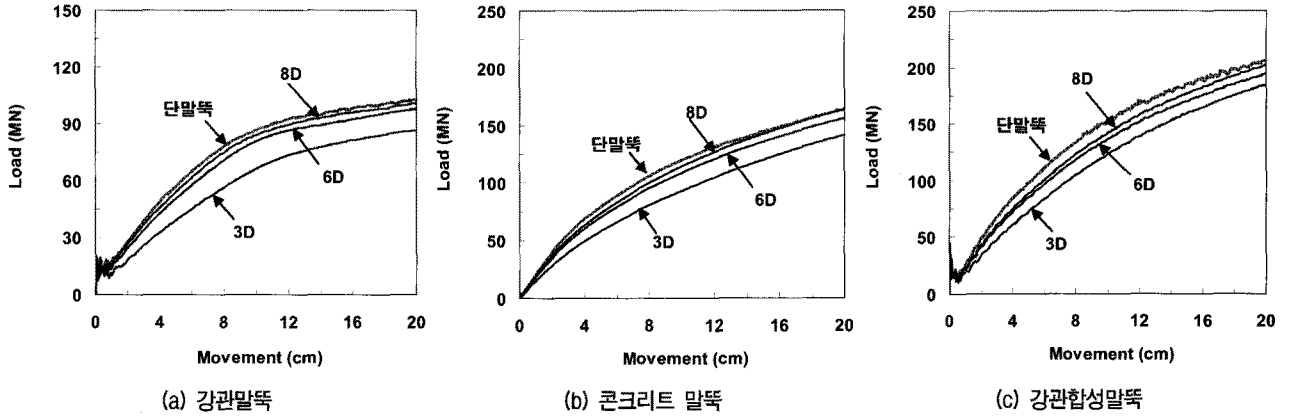


그림 10. 말뚝간격에 따른 수평방향 말뚝두부 하중-변위 곡선 비교(말뚝직경 3m, 단말뚝 하중은 무리말뚝 하중으로 환산함)

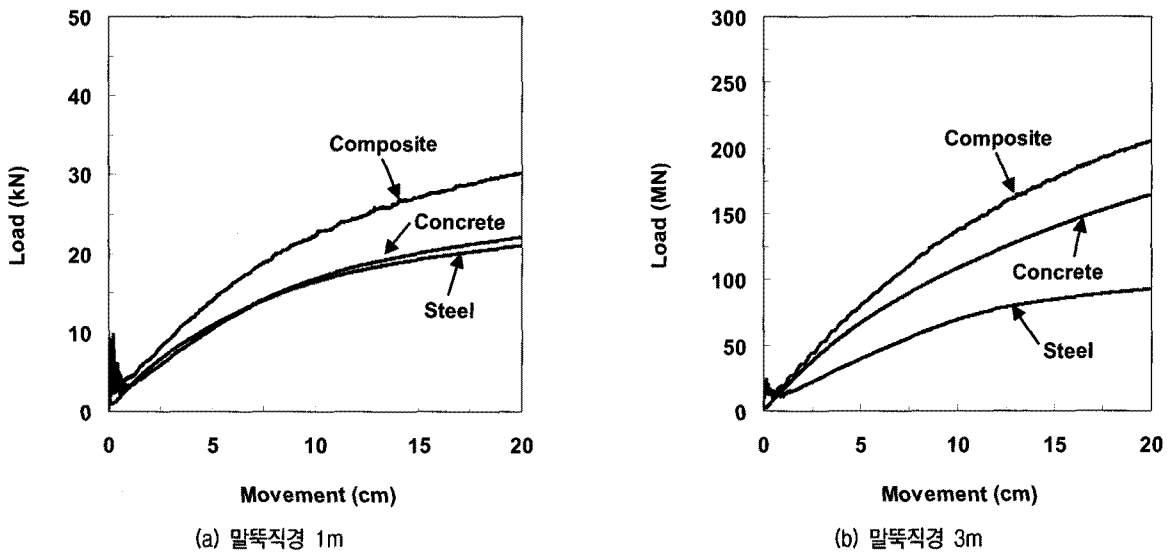


그림 11. 말뚝재료에 따른 수평방향 말뚝두부 하중-변위 곡선 비교(말뚝간격 3D)

리나, 본 논문에서는 수평방향 재하에 대하여 재료파괴가 발생하지 않은 1.5cm~3cm의 허용 수평변위 기준에서의 지지력을 분석하였기 때문에 분석결과에는 영향을 미치지 않았다.

말뚝두부 하중-변위 곡선의 변화 경향을 보면 단말뚝의 수평강성 및 강도가 가장 컸으며, 무리말뚝의 말뚝간격이 3D, 6D, 8D로 증가할수록 무리말뚝의 하중-변위 곡선이 점차 단말뚝의 곡선과 유사해졌다. 그리고, 말뚝간격이 8D인 경우에는 단말뚝의 곡선과 거의 유사해져서 무리말뚝 효과가 작아지는 것으로 판단된다. 이러한 무리말뚝 효과는 강관, 콘크리트, 강관합성 등 말뚝재료별로 큰 차이는 발생하지 않았다.

그림 11은 무리말뚝 간격 3D 조건에 대하여 각 재료별 하중-변위 곡선을 비교한 그림이다. 그림을 보면 강관합성말뚝의 강성 및 강도가 강관 및 콘크리트 말뚝에 비하여 가장 큰 것으로 나타났다. 말뚝직경이 커질수록 전체

단면적에서 콘크리트가 차지하는 단면적이 커져서 콘크리트 말뚝의 강도가 증가하였다. 수직방향 하중 변위 곡선에서는 콘크리트 말뚝과 강관합성말뚝이 유사한 하중-변위 곡선을 보여주었지만, 수평방향 재하시에는 콘크리트 말뚝이 강관합성말뚝보다 강성 및 강도가 작았다. 그 이유는 콘크리트 재료가 수평방향 재하시 발생하는 인장응력에 취약하여 콘크리트 말뚝의 수평저항력은 작지만, 강관합성말뚝은 내부 콘크리트가 외부 강관의 구속효과에 의하여 보다 큰 수평저항력을 발휘하였기 때문이다.

그림 12는 각 말뚝의 허용변위 기준에 따라 지표면에서의 수평변위가 허용변위 기준(말뚝직경의 1%, 최소 1.5cm)에 도달하였을 때의 깊이별 말뚝 수평변위 곡선을 보여준다. 지반 내에서의 말뚝 수평변위는 상부 20m 두께의 연약층에서 주로 발생하였으며 콘크리트와 강관합성 등 말뚝강성이 큰 말뚝은 암반부에서도 수 mm의 수평 변위가 발생하였다.

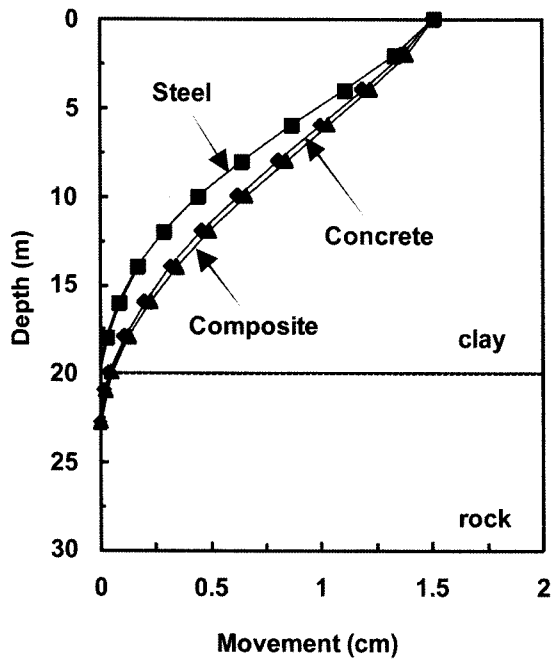


그림 12. 허용변위기준에서의 깊이별 말뚝 수평변위(말뚝직경 1m, 말뚝간격 3D, 중앙말뚝)

그림 13은 수평방향 지지력으로서 이 지지력은 지표면에서의 말뚝변위가 수평방향 허용변위 기준(대한토목학회, 2001)인 말뚝직경의 1%(최소 1.5cm)에 도달하였을 때의 말뚝두부 재하하중으로 정의하였다. 그림 10(a)와 (c)과 같이 일부 경우의 하중-변위 곡선에서 해석초반 불안정한 경향이 나타났지만 허용변위 기준을 전후해서는 모든 해석결과가 안정된 경향을 보여주어 수평방향 지지력 산정값에는 영향을 미치지 않았다. 수평방향 지지력은 말뚝직경에 비례하여 증가하였으며, 무리말뚝의 지지력은 말뚝중심간 간격이 3D, 6D, 8D로 증가함에 점차 단말뚝의 지지력과 유사해졌다.

그림 14는 강관합성말뚝의 수평방향 보강효과를 분석하기 위해 강관합성 말뚝의 지지력을 강관과 콘크리트의 지지력으로 각각 나누어 나타내었다. 단말뚝에 대한(강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비율과(강관합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 평균적으로 각각 1.54 및 1.24, 그리고, 무리말뚝에 대한

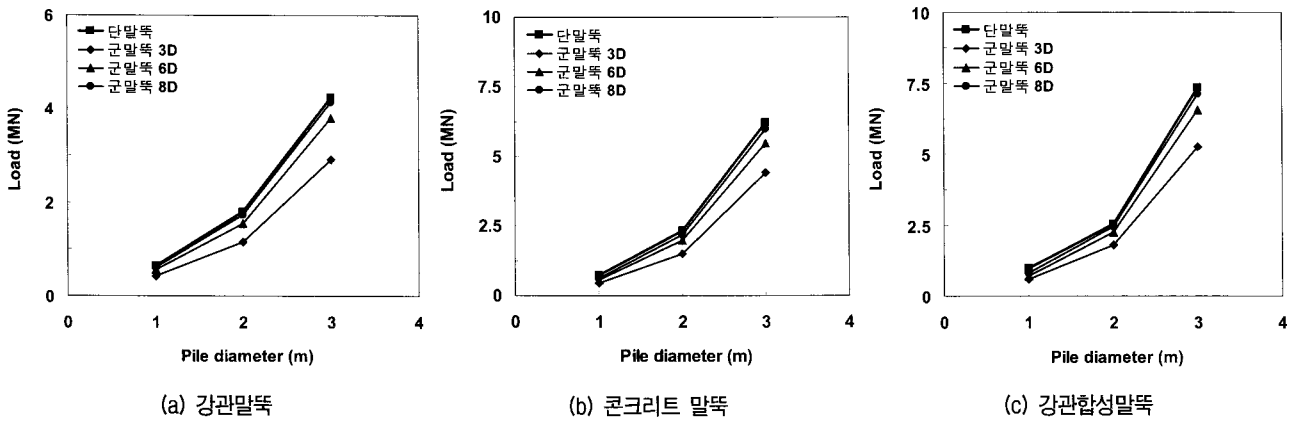


그림 13. 허용변위기준에서의 말뚝 1본당 수평방향 지지력

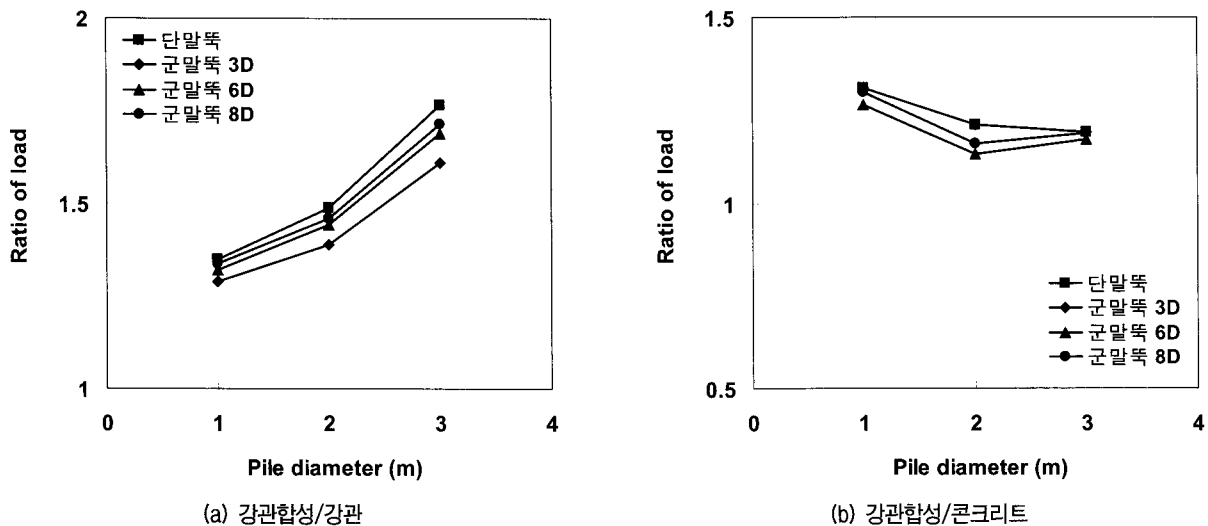


그림 14. 수평방향 강관합성말뚝 보강효과

(강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비율과(강관 합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 평균 적으로 1.47, 1.20으로 나타나 단말뚝에서 강관합성말뚝 의 보강효과가 더 크게 나타났다. 모든 경우에 대하여 (강관합성말뚝 지지력)/(강관말뚝 지지력) 비율과(강관 합성말뚝 지지력)/(콘크리트 말뚝 지지력) 비율이 평균 적으로 각각 1.50 및 1.22로 나타나 강관합성말뚝의 수 평방향 지지력 증가효과가 큰 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 풍화암에 지지되는 무리말뚝의 보강효과 를 분석하기 위하여 지반공학 분야에서 널리 이용되는 수치해석 모델들을 적용하여 해상지반에 근입된 말뚝 을 가정하여 해석을 수행하였다. 다만, 본 연구에서는 강관합성말뚝의 보강효과를 분석하기 위해 강관합성말뚝과 동일한 재원을 가진 강관 및 콘크리트 말뚝조건을 적용하였으므로, 실제 말뚝구조체로서 적용되는 강관 및 콘크리트 말뚝에 대한 해석결과와 달라질 수 있다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 말뚝재료의 탄소성 거동을 모사하기 위해 강관재료는 von-Mises 모델, 콘크리트 재료는 Mohr-Coulomb 모델, 그리고 철근은 보 모델을 적용하였다. 이들 모델 및 해 석에 적용된 입력물성값은 각 재료에 대하여 수행된 시험체 압축강도 실험결과와 비교하여 검증하였다.
- (2) 지반조건은 풍화암 상부에 20m 두께의 연약층이 있는 해상지반 조건을 가정하였으며, 근입깊이는 강관말뚝 의 경우 풍화암에 1m 근입, 콘크리트 말뚝과 강관합성 말뚝의 경우 풍화암에 10m 근입되는 조건을 적용하였 다. 수직방향 재하시 강관합성말뚝의 강성 및 강도가 강관 및 콘크리트 말뚝에 비하여 가장 큰 것으로 나타 났다. 말뚝간격이 3D에서 8D로 증가함에 따라 무리말뚝 의 하중-변위 곡선이 단말뚝과 유사해졌다. 그리고, 말뚝간격이 6D이상인 경우 수직방향 무리말뚝 효과가 발생하지 않는 것으로 판단된다. 그리고, ASCE 방법 으로 강관합성 무리말뚝의 보강효과를 분석한 결과, 강관합성말뚝의 지지력이 강관말뚝에 비하여 평균적 으로 90% 큰 것으로 나타났고, 콘크리트 말뚝에 대하 여는 평균적으로 동일하게 나타났다.
- (3) 수평방향 재하시 단말뚝의 수평강성 및 강도가 가 장 컸으며, 무리말뚝의 말뚝간격이 증가할수록 무

리말뚝과 단말뚝의 하중-변위 곡선이 점차 유사해 졌다. 그리고, 말뚝간격이 8D인 경우에는 무리말뚝 효과가 없는 것으로 판단된다. 그리고 허용변위 기 준에서의 수평방향 지지력을 이용하여 강관합성말뚝 의 보강효과를 분석한 결과, 강관합성말뚝의 지 지지력이 강관말뚝과 콘크리트 말뚝에 비하여 평균적 으로 각각 50%와 22% 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김성렬, 이주형, 박재현, 정문경(2009a), “수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석(I) -재료강도”, *대한토목학회 논문집*, 제29권 6C호, pp.259-266.
2. 김성렬, 이시훈, 정문경, 이주형(2009b), “수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석(II) -지반 지지력”, *대한토목학회 논문집*, 제29권 6C호, pp.267-275.
3. 대한토목학회(2001), *도로교 설계기준 해설(하부구조편)*.
4. 방춘석, 이준석, 송하원(2002), “연화 거동을 갖는 콘크리트의 3 차원 탄소성 해석”, *대한토목학회 논문집*, 제22권 6A호, pp.1449-1457
5. 방춘석, 송하원, 변근주(2003), “다축 압축응력을 받는 콘크리트의 파괴거동 해석에 관한 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제23권 4A호, pp.785-793.
6. 엄진호, 송준엽, 윤석구, 권영봉(2000), “콘크리트 충전 합성기둥의 거동에 대한 실험적 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제20권 1A호, pp.107-114.
7. 이주형, 신휴성, 박민경, 박재현, 광기석(2008), “수치해석을 이용한 국내 해상교량 현장타설말뚝의 강관지지효과”, *대한토목학회 논문집*, 제28권 3C호, pp.149-158.
8. 한국건설기술연구원(2008), *고효율 하이브리드 대형 기초 공법 개발 (II)*
9. AASHTO(2004) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
10. ASCE(1997) *Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations*, ASCE 20-96, ASCE.
11. Comodromos, E.M. and Ptilakis, 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.592-625.
12. Davison, M.T.(1973), *High capacity piles. Proceedings, Innovations in Foundation Construction*, ASCE.
13. 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.
14. Itasca(2006) *FLAC 3D ver. 3.1 User's Guide*.
15. Pott, D.M.(2003) “Numerical analysis: a virtual dream or practical reality?”, *Geotechnique*, Vol.53, No.6, pp.535-573.

(접수일자 2010. 4. 27, 심사완료일 2010. 10. 27)