

수치해석을 통한 FRP 콘크리트 합성말뚝 적용성 평가

Verification of Applicability of Hybrid CFFT Pile for Numerical Analysis

김 홍 태¹⁾ · 이 명 재²⁾ · 박 지 웅³⁾ · 윤 순 종⁴⁾ · 한 연 진[†]

Kim, HongTaek · Lee, MyungJae · Park, JeeWoong · Yoon, SoonJong · Han, YeonJin

ABSTRACT : The interaction of the ground deformation and composite piles, which is made of fiber glass, was analyzed for the effective pile application under vertical loads. This study was performed to conduct experimentation test and propose the material characteristics of the new type concrete injection circular FRP pile for the improvement of the defect of CFFT-Concrete composition piles and FRP-Concrete composition piles(FRP reinforced column direction). Additionally, in order to analyze the behaviour characteristics of composite pile and steel pile the numerical analyses were carried out.

Keywords : Compression test, Hybrid CFFT pile, Numerical analysis, Tensile test, Vertical load

요 지 : 유리섬유복합관을 이용한 FRP-콘크리트 합성말뚝에 대하여 연직하중을 받는 FRP-콘크리트 합성말뚝의 지반의 변형과 말뚝의 복합적인 상호거동을 분석하여 현장에 적용할 수 있는 효과적인 말뚝의 적용성을 평가하고자 한다. 이 연구에서는 CFFT-콘크리트 합성말뚝과 FRP를 원주방향으로 보강한 FRP-콘크리트 합성말뚝(CFFT)과 관련하여 발생하는 문제점들을 완화시키기 위해 새롭게 제안된 콘크리트 채움 원형 FRP 말뚝(HCFFT)의 구조적 거동에 대한 실내시험을 통한 FRP-콘크리트 합성말뚝의 재료의 역학적 성질을 규명하여 해석 및 설계에 필요한 역학적 성질을 제시하였다. 아울러 실내시험 결과를 유한차분 수치해석 기법을 적용하여 연직하중 작용 시 단일말뚝인 경우 강관말뚝과 FRP-콘크리트 합성말뚝에 거동을 비교분석하여 적용성을 확인해 보았다.

주요어 : 압축시험, FRP-콘크리트 합성말뚝, 수치해석, 인장시험, 연직하중

1. 서 론

말뚝은 주로 수평하중과 수직하중을 받는 구조물을 지지하는데 사용되며 수직하중-말뚝의 선단지지력은 입지조건, 흙의 특성, 말뚝의 재료적 특성, 말뚝의 치수 및 말뚝 시공 방법에 좌우된다. 최근에는 2개 이상의 이질재료로 구성된 복합말뚝이 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서는 FRP 말뚝의 현장 적용사례는 미비한 실정이다. 미국에서는 강의 부식, 콘크리트의 열화 및 해양환경에서 목재 말뚝의 취약성은 개발자들이 목재, 콘크리트 또는 강으로 만들어진 말뚝의 대체로서 FRP와 같이 높은 열화 저항력을 가진 복합재료를 고려한 장기적인 연구가 진행되고 있다. 또한 사회기반시설에 FRP복합선단지지 말뚝 사용의 가능성을 평가하는데 흥미를 가지고 있으며, 수직하중과 선단지지 말뚝 관계에서 FRP 복합 선단지지 말뚝 사용의 가능성을 평가하기 위해서 FRP 말뚝의 동적 및 정적 하중 시험을 포함한 실험실 시험과 full-scale 실험이 실시되었다(FHWA, 2006).

이 연구에서는 HCFFT(Hybrid Concrete Filled FRP Tube

pile)의 압축강도를 평가하기 위해 CFFT(Concrete Filled FRP Tube pile)와 HCFFT에 대한 시험을 실시하여 그 결과를 비교분석하였으며, HCFFT는 말뚝뿐만 아니라 교각 등의 휨과 압축력을 동시에 받는 부재에 다양하게 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 이에 FRP-합성말뚝의 실내시험 결과를 이용하여 수치해석에 적용하였으며, 미 연방도로 관리청(Federal Highway Administration; FHWA, 2006) FRP 및 강관 말뚝의 현장 정재하시험 결과를 토대로 수치해석기법에 말뚝요소에 모델링하여 지반강도정수를 적용하여 수행하였다. 그 결과 말뚝의 축력, 전단력, 휨모멘트를 분석하여 FRP-합성 콘크리트 말뚝의 적용성을 평가하고자 한다.

2. FRP 콘크리트 합성말뚝

2.1 일반적인 특성

FRP-콘크리트 합성말뚝(Concrete Filled FRP Tube Pile, CFFT pile)은 외부에 FRP를 사용하여 제작하고 그 내부를

1) 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수, 공학박사

2) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정

3) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정

4) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 교수, 공학박사

† 정희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : pollk1@naver.com)

콘크리트로 충전한 합성부재이다. CFFT는 강재-콘크리트 합성말뚝(concrete filled steel tube pile)에 비하여 부식에 대한 저항성이 높기 때문에 연약지반에 시공되는 구조물이나 해양 또는 수중구조물에 대한 적용성이 높아 그에 대한 관심이 증가하고 있다.

이 연구에서는 길이에 제한이 없이 연속생산이 가능하며 부재의 축방향으로 보강섬유가 배치되는 PFRP를 도입하여 CFFT의 장점을 그대로 유지하는 반면 휨 및 전단에 대해서도 충분한 구조성능을 확보할 수 있는 HCFFT를 제안하였다. 제안한 HCFFT를 제작하기 위한 FFRP(Filament winding FRP)-PFRP(Pultruded FRP) 합성부재를 그림 1과 같이 나타내었다. 즉, 여러 개의 PFRP 단면을 결합했을 때 원통형태의 단면을 구성할 수 있도록 제작하고 외부를 FFRP로 보강하게 되면 휨 및 전단에 대해서는 PFRP부재가 저항하고 FFRP는 콘크리트를 구속하여 축방향 성능을 향상시킬 수 있게 된다. 이 연구에서 제안한 HCFFT의 단면형상은 그림 1과 같으며, HCFFT의 단면은 소구경과 대구경으로 구분되는데 소구경일 경우 PFRP를 일체로 제작하게 되며, 대구경일 경우는 펄트루전 제조공정상 대형 단면의 제작이 어려워 단위 모듈화 시켜 PFRP를 제작한 후 서로 연결하여 원통형태로 제작한 뒤 FFRP로 외부를 보강한다. 또한 다른 건설재료와 마찬가지로 PFRP는 단면이 커질수록 역학적 성질이 감소되는 경향이 있기 때문에 일정한 품질을 확보하기 위해 소규모 단면을 접합시켜 부재를 구성하는 방법을 채택하였다. HCFFT의 부재 길이방향 연결방법의 개요는 그림 3과 같이 나타내었다. 그림 3에 나타난 방법은 PFRP를 연결재로 직접 이용하는 방법과 PFRP의 중공단면을 이용하는 방법으로 분류되며, 부착과 연결재에 의한 기계적 접합으로 구조적 신뢰성을 확보할 수 있다.

또한 FRP의 역학적 성질은 보강섬유의 종류, 보강량, 보강방향에 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 그림 3에 나타난 HCFFT는 동일 단면크기에 대하여 지중매설깊이 등의 외부 조건에 대한 하중 조건의 변화에 맞는 부재설계가 가능하다.

2.2 FRP 말뚝의 연구

기존의 FRP-콘크리트 합성말뚝은 강재-콘크리트 합성말뚝에 비해 부식에 대한 저항성이 뛰어나기 때문에 해안 매립지와 같은 해양환경 등 강재나 콘크리트가 부식되거나 중성화되기 쉬운 환경에서 많이 사용되고 있다. 그러나 FRP-콘크리트 합성말뚝은 보강섬유가 원주방향으로 배치된 필라멘트 와인딩 FRP를 주로 사용하기 때문에 구속효과에 의한 압축강도의 향상은 기대할 수 있으나 휨 및 전단에 대하여 취약한 부재가 될 가능성이 있다. 이러한 휨 및 전단 거동에 대한 안전성을 확보해야 하며, FRP-콘크리트 합성말뚝에 압축력이 편심 재하될 경우 종방향 철근 등 별도의 휨 보강재가 필요하다. 이에 국외에서는 건설재료로서의 FRP는 미국, 캐나다, 일본, 유럽 등의 기술선진국에서 1970년대부터 이미 보수, 보강재로 생산하여 사용하고 있다.

FRP 내의 보강섬유는 주로 하중을 전달하는 역할을 하는 요소로서 현재 국내의 건설분야에서 주로 사용되며, 콘크리트 구조부재의 보강용으로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드 섬유가 대부분을 차지하고 있으나 경제적 효율성과 레진과의 부착성 때문에 건설분야에서는 주로 유리섬유가 사용되며 두 종류 이상의 보강섬유를 혼합하여 사용한 Hybrid 복합재도 있다(문환두, 2006).

FRP 구속 콘크리트 합성 압축재(CFFT)는 콘크리트 충전 강관부재(Concrete Filled Steel Tube, CFT)에서 진보된 건설부재라고 할 수 있다. CFFT가 최초로 건설분야에 적용된 사례는 1879년에 완공된 영국의 Severn 철도교의 교각으로 알려져 있다. 이후, 1901년 Sewell은 강관 내부의 녹을 방지하기 위해 콘크리트를 충전하였는데 콘크리트를 충전하면 강성이 증가하는 것을 확인하였다(이명, 2002).

이 연구에서 수행한 HCFFT는 CFFT와 같은 기존에 제안 또는 개발된 복합재 말뚝에 비해 구조적 성능이 우수하기 때문에 사용성이 우수할 것으로 판단된다. 따라서 HCFFT는 일반 말뚝뿐만 아니라 해상파일, 해상말뚝 등과 같이 휨에 대한 저항성이 요구되는 분야의 건설구조재로 다양하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. FHWA(2006)에서 FRP 재



그림 1. FFRP-PFRP 합성부재

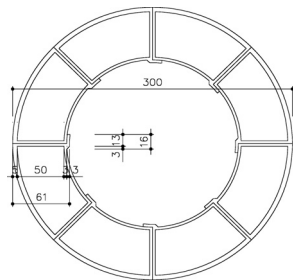


그림 2. FRP-콘크리트 합성말뚝의 단면 및 형상

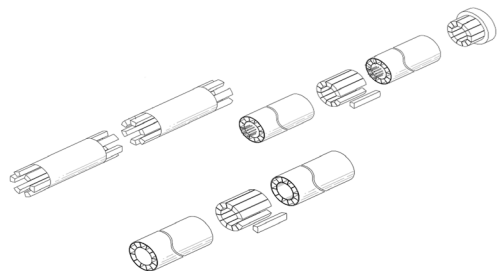
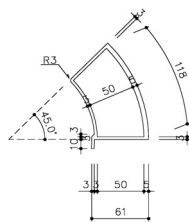


그림 3. HCFFT의 연결방법

료를 이용한 말뚝을 제작하여 말뚝의 거동특성을 분석하고자 4종류의 말뚝에 대하여 현장 재하시험을 통한 역학적 특성 거동 연구를 수행하였다.

3. 실내시험

3.1 FRP-콘크리트 합성말뚝 실내시험

3.1.1 실내 강도시험 방법

이 연구에서는 FRP-콘크리트 합성말뚝의 필요한 재료의 역학적 성질을 조사하기 위한 시험으로 FFRP 인장강도, FFRP 원통관 압축강도, HCFFT 압축강도, 콘크리트 압축강도 등 총 4종류의 실내시험을 통한 역학적 특성을 분석하고자 강도시험을 수행하였으며, 각각의 시험 조건은 표 1과 같이 나타내었다. 또한 UTM(Universal Testing Machine, 30,000kN)을 이용하여 하중을 재하하였으며, 각 시편의 중앙부분에 길이방향과 길이 직각방향으로 변형률게이지를 부착하였으며, 측

정값은 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.

3.1.2 FFRP 인장강도 시험

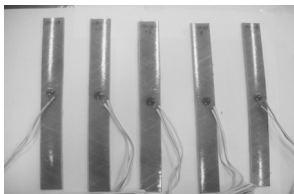
FFRP 탄성계수와 포아송 비를 평가하기 위하여 FFRP 인장강도시험을 수행하였으며, 인장시편의 형태 및 시험방법은 그림 4에 나타난 것과 같다. 그 결과 모든 시편은 그림 4(c)에 나타난 바와 같이 섬유배치방향으로 취성파괴가 일어났고, 시험결과는 표 2에 정리하였으며, 직경 300mm 시편 중 대표적인 응력-변형률 관계를 그림 5에 나타내었다. FFRP의 길이방향 탄성계수는 ASTM D 3039/D 3039M-08에서 제안하고 있는 방법으로 탄성계수 및 포아송 비를 결정하였다.

3.1.3 FFRP 원통관 압축시험

FFRP 원통관 압축시험 시편은 그림 6(a)과 같으며, 각 시편은 중앙부분에 길이방향과 길이 직각방향으로 변형률게이지

표 1. 실내강도 시험 조건

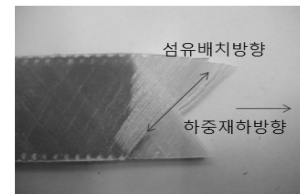
구 분	치수(mm)	시편수	제어방식
FFRP 인장강도	직경 300 두께 2.8, 4.2, 5.6	4, 6, 8겹 적층 3종류, 5개씩	변위제어방식 3mm/min
FFRP 원통관 압축강도	직경 300, 길이 600 두께 2.8, 4.2, 5.6	4, 6, 8겹 적층 3종류, 3개씩	변위제어방식 3mm/min, 변위계(LVDT) 50mm
콘크리트 압축강도	직경 150×300	7일, 14일, 28일 3개씩	변위제어방식 300kN/min, 변위계(LVDT) 100mm
HCFFT 압축강도	직경 300×600 두께 2.8, 4.2, 5.6	CFFT 및 HCFFT 4, 6, 8겹 적층 3개씩	



(a) 인장시험 시편



(b) 인장강도 시험

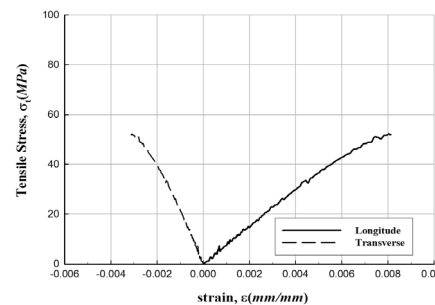


(c) 파괴형태

그림 4. FFRP 인장시험

표 2. FFRP 인장강도시험 결과

구 분	시편 종류			평균 값
	300-2.8	300-4.2	300-5.6	
인장강도 (f_{Lmax} , MPa)	63.23	56.27	50.19	59.32
인장 탄성계수 (E_x , GPa)	9.88	8.77	9.07	9.97
포아송 비 (ν_{xy})	0.35	0.36	0.39	0.36

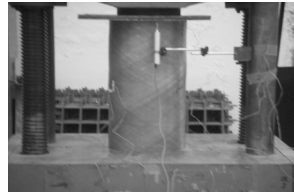


(a) 직경 300mm(300-4.2)

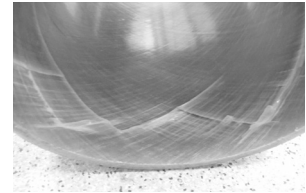
그림 5. FFRP 인장강도 시험의 응력-변형률 관계



(a) 직경 300mm 시편

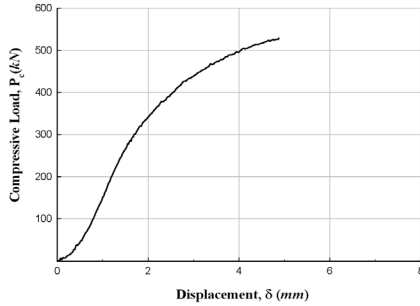


(b) 직경 300mm 압축시험



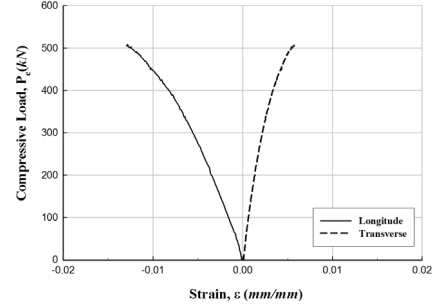
(c) 파괴형태

그림 6. FRP 원통관 압축시험



(a) 직경 300mm 시편(300-4.2)

그림 7. FRP 원통관의 하중-변위 관계



(a) 직경 300mm 시편(300-4.2)

그림 8. FRP 원통관의 하중-변형을 관계

표 3. FRP 원통관 압축시험 결과

구 분	시편 종류		
	300-2.8	300-4.2	300-5.6
최대하중(P_{fmax} , kN)	252.92	507.36	647.11
최대변위(δ_{fmax} , mm)	6.27	6.18	8.95

및 50mm의 변위계(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)를 설치하여 길이방향 압축변위를 측정하였다. FRP 원통관 압축시험과정은 그림 6(b)과 같으며, 그림 6(c)에 나타난 바와 같이 섬유배치방향으로 취성파괴가 일어났다. 압축시험결과는 표 3과 같으며, 대표적인 하중-변위 및 하중-변형률 관계를 그림 7~8과 같다.

3.1.4 콘크리트 압축강도 시험

HCFFT 압축강도시험은 설계기준강도가 30MPa인 콘크리트를 사용하였기 때문에 시편제작에 사용된 콘크리트는 공시체를 제작하여 압축강도시험을 실시하였으며, 압축강



(a) 시험 과정



(b) 파괴형태

그림 9. 콘크리트 압축강도 시험

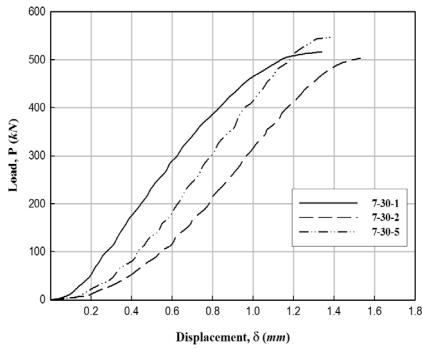
도 시험은 KS F 2405(콘크리트 압축 강도 시험방법)를 참고로 하여 수행하였다. 각 공시체는 100mm의 용량을 가지고 있는 LVDT를 설치하여 길이방향 압축변위를 측정하였으며, 콘크리트 압축강도시험과정 및 파괴형태는 그림 9에 나타내었다. 압축강도 시험결과 모든 공시체는 취성파괴가 일어났으며, 시험결과는 표 4와 같으며, 하중-변위 관계는 그림 10과 같다.

3.1.5 HCFFT 압축강도 시험

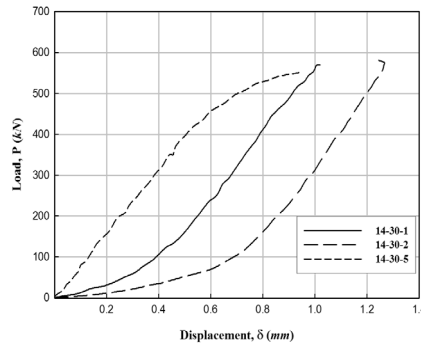
이 연구에서는 HCFFT의 압축강도를 기존의 CFFT와 비교하기 위하여 압축강도시험을 실시하였으며, 압축강도시험에 사용된 UTM과 시험과정은 그림 11과 같으며, CFFT와 HCFFT의 파괴형태는 그림 12와 같다. 압축강도시험 결과 시편의 파괴는 심부의 콘크리트가 파괴된 후 구속압에

표 4. 콘크리트 압축강도시험 결과

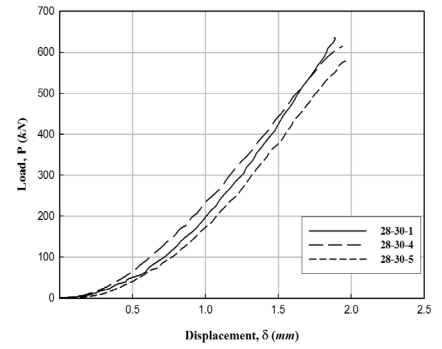
양생일수 (day)	시편번호	최대하중 (P_{max} , kN)	평균하중 (P_{max} , kN)	평균응력 (σ_c , MPa)
7	7-1	516.02	521.85	29.53
	7-2	503.13		
	7-5	546.39		
14	14-1	569.33	567.69	32.12
	14-2	581.63		
	14-5	552.12		
28	28-1	635.04	610.21	34.53
	28-4	614.38		
	28-5	581.21		



(a) 7일 강도

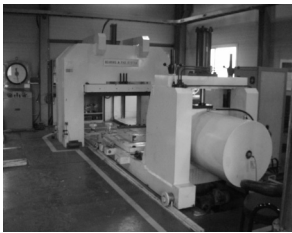


(b) 14일 강도

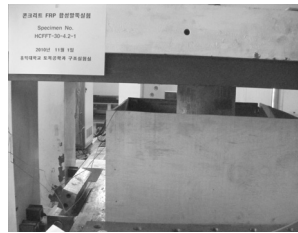


(c) 28일 강도

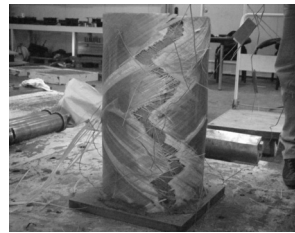
그림 10. 콘크리트 압축강도 하중-변위 관계



(a) UTM



(b) 시험과정



(a) CFFT



(b) HCFFT

그림 11. HCFFT 압축강도시험 과정

그림 12. CFFT 및 HCFFT 시편의 파괴형태

표 5. CFFT 및 HCFFT 압축강도시험 결과

FRP 두께(mm)	시편번호	CFFT 강도(MPa)	평균(MPa)	HCFFT 강도(MPa)	평균(MPa)
2.8	1	34.90	39.08	51.14	51.40
	2	31.89		50.58	
	3	39.08		51.92	
4.2	1	52.99	47.12	69.67	69.25
	2	38.08		69.04	
	3	50.28		69.04	
5.6	1	61.95	61.07	69.11	67.86
	2	62.66		67.06	
	3	58.59		67.41	

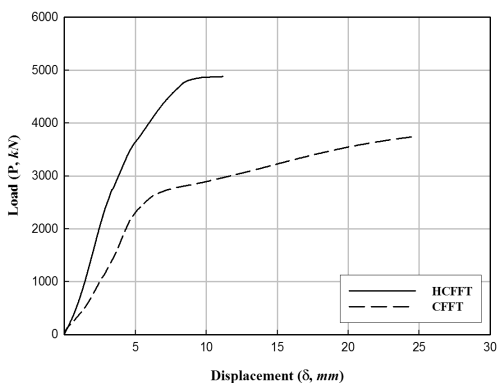


그림 13. 하중-변위관계

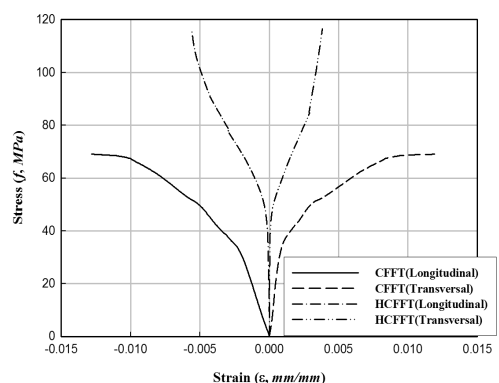


그림 14. 응력-변형률관계

의한 추가적인 강도 증가를 보인 후 FRP가 섬유배치방향으로 파괴되는 순으로 진행되었다. 또한 HCFFT는 CFFT에 비하여 약 11~47%의 압축강도 증가를 보이는 것으로 평가

되었다. 시편의 파괴강도 결과는 표 5에 정리하였으며, 시험 결과의 대표적인 하중-변위, 응력-변형률 관계를 그림 13~14와 같다.

4. 수치해석

4.1 개요

수치해석은 FRP 합성말뚝의 활용성 및 적용성을 알아보기 위하여 수행하였으며, 합성말뚝과 일반적으로 사용하는 강관말뚝을 비교, 검토하였다. 수치해석은 말뚝과 지반의 경계면 요소에 대한 고려가 가능하도록 FLAC 2D 프로그램을 이용하였으며, 각각의 말뚝거동을 정확하게 모사하고자 FHWA(2006)에서 수행한 미국 해안지역 현장 정재하시험 결과를 이용하여 말뚝의 요소 특성치를 평가하였다.

수치해석은 현장 정재하시험의 지층조건과 동일하게 모형지반을 모사하였으며, 강관말뚝의 경우 현장에 적용된 말뚝의 조건을 동일하게 적용하였으며, 현장에서 측정된 지반 및 말뚝의 변위를 이용하여 경계면 요소의 특성치를 평가하여 수치해석에 적용하였다.

지반과 말뚝의 모사 후에는 말뚝의 재하판에 단계별 하중을 주어서 연직하중이 작용하는 동안의 지반과 말뚝의 거동을 중점적으로 검토하였다.

4.2 해석 조건 및 지반강도정수

수치해석 시 지반강도 정수는 FHWA(2006)에서 수행한 미국의 지층조건과 동일하게 적용하였다. 또한 강관말뚝의 경우는 현장시험에 적용된 강관말뚝이 일반적으로 사용하는 $\phi 419\text{mm}$ 을 적용하여 동일한 특성치를 적용하였고, 복합말뚝의 경우 이 연구에서 수행한 실내시험으로 평가된 말뚝 재료의 특성치를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 조건은 표 6과 같으며, 지반강도정수는 표 7과 같다. 아울러 말뚝-지반의 경계면요소의 특성치 및 말뚝의 제원을 표 8~9와 같이 나타내었다.

4.3 해석모델링 및 경계 조건

수치해석 모델링에서 지반은 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 모델을 이용하였으며, 말뚝재료로 말뚝과 지반의 상호작용을 모사할 수 있는 Pile 요소로 모델링하였다. 수치해석에서 지반의 경계조건은 좌우경계면은 x방향의 변위를 구속하였으며, 바닥면 역시 y방향의 변위를 구속하였다. 또한 하부경계와 좌우경계면이 접하는 곳은 힌지를 두어 x, y방향 변위

표 6. 하중 조건

구 분	연직하중(kN)	구 분	연직하중(kN)
Load 1	10	Load 5	160
Load 2	20	Load 6	320
Load 3	40	Load 7	640
Load 4	80	Load 8	1,280

표 7. 지반조건 및 지반강도정수

구 분	심도(m)	단위중량(kN/m ³)	점착력(cu', kPa)	내부마찰각(ϕ' , °)	탄성계수(MPa)	포아송비	비 고
매립토	0~4.6	20.0	6.0	35	21	0.35	
유기질토	4.6~6.7	14.9	1.0	22	5	0.37	
모래질 실트	6.7~12.2	20.0	6.0	37	30	0.35	
점토질 실트	12.2~23.2	19.4	1.0	23	15	0.35	
풍화암	23.2~25.9	21.0	30.0	34	250	0.33	
연암	25.9~29.7	23.0	50.0	37	1,500	0.27	
콘크리트	-	23.0	100	45	24,500	0.30	시험값 적용
FRP 말뚝	-	6.41	-	-	10,600	0.12	시험값 적용

표 8. 수치해석에 적용한 말뚝-지반 경계면요소의 특성치

구 분	Cs_sstiff(kN/m)	Cs_scoh(kPa)	Cs_sfric(°)	Cs_nstiff(kN/m)	Cs_ncoh(kPa)	Cs_nfric(°)
강관말뚝	15.0	5.00	33.0	15.0	3.00	24.6
FRP-콘크리트 합성말뚝	13.4	2.55	18.4	15.0	3.00	24.6

표 9. 말뚝의 제원

구 분	직경(m)	길이(m)	단면2차모멘트(I, m ⁴)	단면적(A, m ²)	탄성계수(E, MPa)
강관말뚝	0.419	20.0	5.75×10^{-4}	1.87×10^{-4}	2.10×10^5
FRP-콘크리트 합성말뚝	0.419	19.0	0.0345	0.0015	4.1×10^4

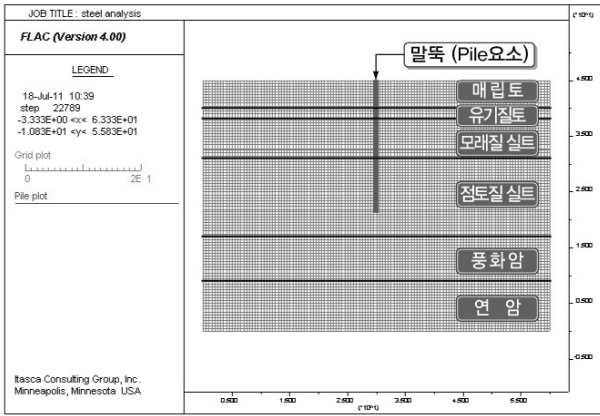


그림 15. 해석에 이용된 격자요소망

를 모두 구속하였다. 수치해석에 적용된 모델요소의 격자망은 그림 15에 나타내었다.

5. 결과분석

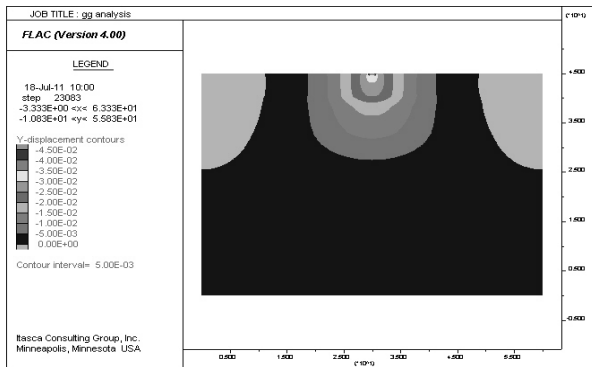
5.1 말뚝조건에 따른 하중-변형 특성분석

이 연구에서는 FRP-콘크리트 합성말뚝의 적용성을 알아

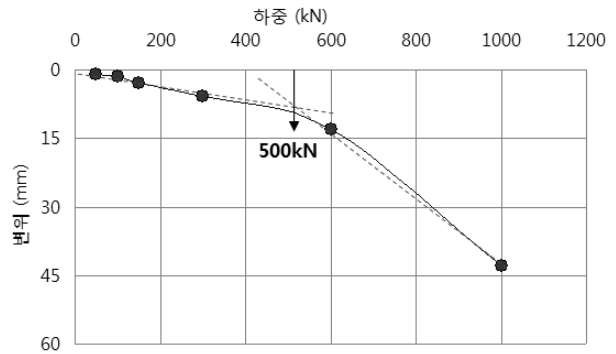
보고자 실내강도시험결과를 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 연직하중이 작용하는 동안의 말뚝의 거동특성을 평가하였다. 또한, 일반적으로 사용하는 강관말뚝과 비교하여 그 특성을 분석하였다. 우선, 말뚝에 연직하중이 작용하는 경우의 하중-변형곡선은 그림 16과 같이 나타내었다.

그림 16 및 17의 결과를 살펴보면, 복합말뚝의 경우 연직하중이 작용하는 경우 약 4.5cm의 최종침하량을 보이는 것으로 평가되었으며 강관말뚝의 경우에는 최대 약 5.0cm의 최종침하량을 보이는 것으로 평가되었다. 하중-변형 곡선으로부터 얻어지는 허용지지력을 평가한 결과, 허용지지력은 각각 500kN 및 480kN으로 평가되어 합성말뚝을 사용하는 경우에도 강관말뚝과 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

이 연구에서 수치해석으로 평가된 말뚝의 종류별 하중-침하곡선과 FHWA(2006)에서 수행한 현장시험결과로 얻어진 하중-침하곡선은 그림 18에 도시되어 있다. 그림 18에 나타난 바와 같이, 합성말뚝의 경우 현장시험으로 평가된 말뚝의 허용지지력은 560kN이며, 수치해석에서 평가된 허용지지력은 500kN으로 평가되어 비슷한 크기의 허용지지력을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 강관말뚝을 사용한 경우에도, 현장 정재하 시험결과와 수치해석 결과가 각각 489kN

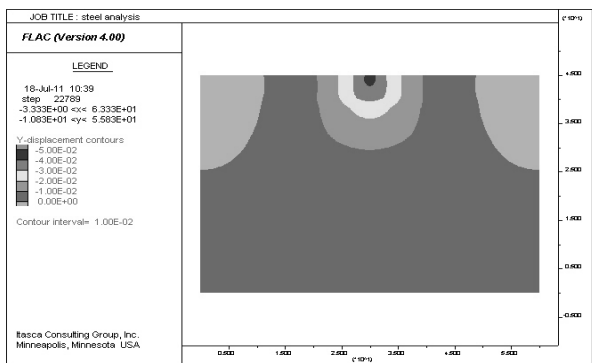


(a) FRP-콘크리트 합성말뚝의 침하분포도

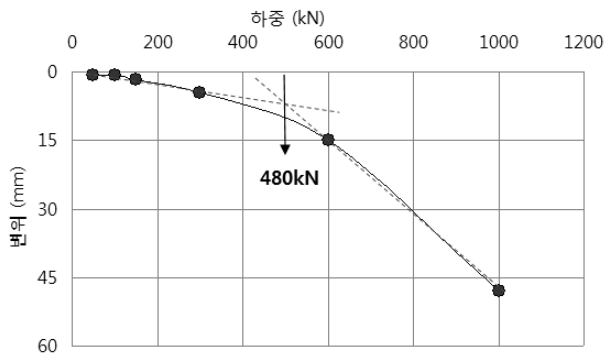


(b) FRP-콘크리트 합성말뚝의 하중-침하 곡선

그림 16. FRP-콘크리트 합성말뚝의 하중-변형 분석결과

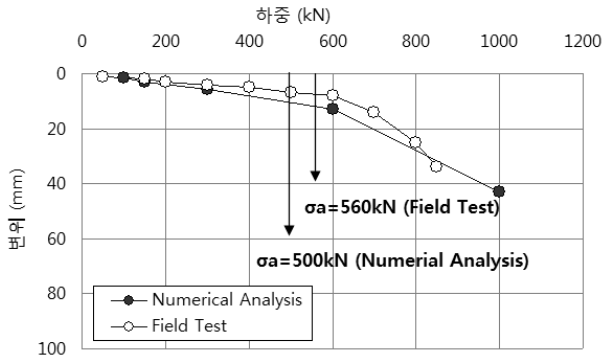


(a) 강관말뚝의 침하분포도

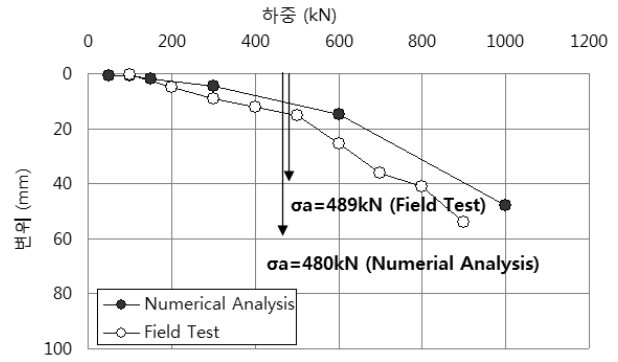


(b) 강관말뚝의 하중-침하 곡선

그림 17. 강관말뚝의 하중-변형 분석결과



(a) 현장시험 및 수치해석 하중-침하곡선(FRP-콘크리트 합성말뚝)



(b) 현장시험 및 수치해석 하중-침하곡선(강관말뚝)

그림 18. 말뚝종류별 하중-침하 곡선

및 480kN으로 평가되어 유사한 지지력을 보이는 것으로 나타났다.

수치해석 결과를 종합적으로 분석한 결과, 수치해석으로 평가된 말뚝의 지지력 특성은 현장에서 수행된 지지력과 유사한 정도를 보이므로 말뚝의 변형거동 역시 현장시험결과와 유사하게 나타나 수치해석의 신뢰성은 어느 정도 확보하고 있는 것으로 생각된다. 동일한 지층조건에서 합성말뚝과 강관말뚝의 지지력 특성을 분석한 결과, 합성말뚝을 사용하는 경우에도 강관말뚝의 허용지지력과 유사한 정도의 허용지지력을 보이는 것으로 나타나 합성말뚝도 강관말뚝과 유사한 성능의 지지력 확보가 가능할 것으로 생각되어 효과적인 기초공법의 하나로 적용이 가능할 것으로 생각된다.

6. 결론 및 제언

이 연구에서는 기존의 CFFT 말뚝의 휨 및 전단 거동에 대한 취약점을 보완하기 위한 새로운 형식의 HCFFT 말뚝을 제안하였고, HCFFT 말뚝에 사용될 FRP와 PFRP에 대한 다양한 시험을 실시하여 재료의 역학적 성질을 비교분석하였다. 아울러 실내시험 얻은 강도정수를 FRP-콘크리트 합성 및 강관 말뚝 적용하여 수치해석을 수행하였다.

이 연구를 통해 얻어진 주요 내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) HCFFT 압축강도시험 결과는 HCFFT는 기존의 CFFT보다 약 11~47%의 압축강도 증가를 보였으며, 이는 말뚝 표면의 FRP에 추가적으로 내부에 PFRP를 보강하였기 때문에 추가적인 압축강도 증가가 있는 것으로 생각된다.
- (2) 복합말뚝의 경우 연직하중이 작용하는 경우 약 4.5cm의 최종침하량을 보이는 것으로 평가되었으며 강관말뚝의 경우에는 최대 약 5.0cm의 최종침하량을 보이는 것으로

평가되었다. 하중-변형 곡선으로부터 얻어지는 허용지지력을 평가한 결과, 허용지지력은 각각 500kN 및 480kN으로 평가되어 복합말뚝을 사용하는 경우에도 강관말뚝과 유사한 성능의 지지력 확보가 가능한 것으로 나타났다.

- (3) 복합말뚝과 강관말뚝이 300kN이 작용하는 경우에 대한 전단력의 분포에 대한 수치해석결과, 강관말뚝의 경우 23.15kN의 전단력이 작용하는 것으로 나타났으며, 복합말뚝의 경우 상부에서 10.22kN으로 나타났다.
- (4) 복합말뚝과 강관말뚝이 300kN이 작용하는 경우에 대한 휨모멘트의 분포에 대한 수치해석결과, 강관말뚝의 경우 3.97kN·m의 휨모멘트가 작용하는 것으로 나타났으며, 복합말뚝의 경우 상부에서 0.697kN·m으로 평가되었다.
- (5) 말뚝에 작용하는 특성을 분석한 결과, 전단력과 휨 모멘트의 분포가 말뚝의 재료에 따라서 거동이 명확하게 차이가 나는 것으로 분석되었다. 강관말뚝의 경우에는 중립점을 중심으로 말뚝의 압축과 인장이 명확하게 나타나며, 상부에서 인장거동이 하부에서 압축거동이 나타나는 반면에, 복합말뚝의 경우에는 상부에서 압축거동이 일어나며 하부에서는 인장거동이 발생하는 것으로 분석되었다.
- (6) 복합말뚝의 경우, 말뚝 자체의 강성이 강관말뚝과 비교할 때 크지 않아서 말뚝에 작용하는 응력거동은 다소 차이가 있으나 허용지지력과 침하량 관점에서는 충분히 효과를 발휘할 수 있을 것으로 생각된다.
- (7) 현재 휨강도시험을 실시하여 HCFFT의 구조적 거동특성을 파악할 수 있도록 연구를 진행하고 있으며, 이 논문에서 제시한 시험결과와 휨강도 시험결과를 함께 분석하여 종합적인 하중재하성능을 조사할 예정이다. 또한 정확한 말뚝의 거동특성 분석을 위하여 콘크리트 말뚝과 비교함으로써 다양한 기성말뚝과의 비교를 통한 거동특성에 대한 다각적인 연구가 후속되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(No. R01-2008-000-21103-0)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 문환두(2006), *FRP-콘크리트 합성바닥판 개발에 관한 실험적 연구* 박사학위논문, 홍익대학교, pp. 25~50.
2. 이명(2002), *콘크리트충진 복합소재 합성부재의 거동분석과 세장비 특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 국민대학교, pp. 44~81.
3. 최진우, 주형중, 남정훈, 윤순중(2010), *FRP-콘크리트 합성 말뚝의 개발*, *한국복합신소재구조학회논문집*, Vol. 1, No. 2, pp. 20~28.
4. ASTM(2008), *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, American Society for Testing and Materials, pp. 1~13.
5. FHWA(2006), *Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Composite Piles under Vertical Load*, Publication No. FHWA-HRT-04-107, pp. 1~84.

(접수일: 2011. 6. 1 심사일: 2011. 6. 13 심사완료일: 2011. 7. 20)