

복합말뚝의 수평 거동 분석

Analysis of lateral behavior of composite pile

선석윤¹⁾ , Seon, Seok-Yun, 콧노경²⁾ , Kwak, No-Kyung, 이 송³⁾ , Lee, Song

- 1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Member. Candidate Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul.
- 2) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Member. Candidate Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul.
- 3) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수, Member, Ph.D. Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul.

SYNOPSIS : Composite piles have been used in ground conditions where conventional piles are unsuitable or uneconomical. They may consist of a combination of timber and concrete pile in Europe. One method of doing this was to drive a steel tube to just below water level, and a concrete pile was lowered down it and driven to the required level where corrosion was susceptible in U.K. Recently, a fiber reinforced polymer (FRP) composite pile was developed to use in many marine locations for piers and waterfront buildings in the USA(Hoy,1995; Phair, 1997). A steel composite (SC) pile reinforced concrete spun pile with steel tube was also proposed and used for the foundation acting a high lateral earthquake load. Composite piles have been developed and researched to increase lateral resistance or to prevent corrosion in marine structures.

In paper, the composite pile consisting of the steel upper portion and the concrete lower portion is proposed and are carried out several tests to confirm the capacity of the pile such as lateral load test, dynamic load tests and bending test. It is noted that the composite pile would be a economical pile being capable of increasing lateral resistance.

Key words : lateral resistance, bending test, composite pile

1. 서론

1.1 연구 목적

횡방향 힘을 받는 하중조건하에서 복합말뚝을 사용하여 기능은 유지하면서 말뚝의 재료비를 경감시킬 수 있는 즉, 안전성은 강관말뚝의 능력과 동등이상을 유지하면서 강관말뚝보다 훨씬 경제적인 말뚝에 대한 연구가 필요하다. 이러한 목적으로 이미 말뚝두부는 횡력에 대한 저항력을 크게 하기위해 강관 말뚝을 사용하고 말뚝하부는 수직력에만 저항할 수 있는 콘크리트 말뚝을 연결한 복합말뚝이 제안되었으며 이러한 복합말뚝에 현장적용을 위한 실험 등 이론연구 등이 국내에서 활발하게 이루어지고 있는 실정이다.

1.2 연구 방법

말뚝은 항타 시공하는 것이 필요하므로 강관말뚝과 콘크리트 말뚝의 연결부가 항타 중 하부 콘크리트 말뚝의 파손이 발생할 수 있으므로 실제 현장에서 항타시 접합부에 항타응력의 전달에 대해 Pile Driving Analyzer통해 검증하였다. 또한, 말뚝연결부의 건전성을 확인 하기위하여 Bending 실험을 수행 하여 연결부의 횡력 저항능력에 대한 분석을 수행 하였다. Bending 실험은 연결부의 구조적 건전성을 확인 하기위한 실험이며 실제 말뚝의 횡력이나 모멘트에 대한 저항력 평가는 말뚝 항타후 수평재하 시험을 통해 평가 할 수 있다.

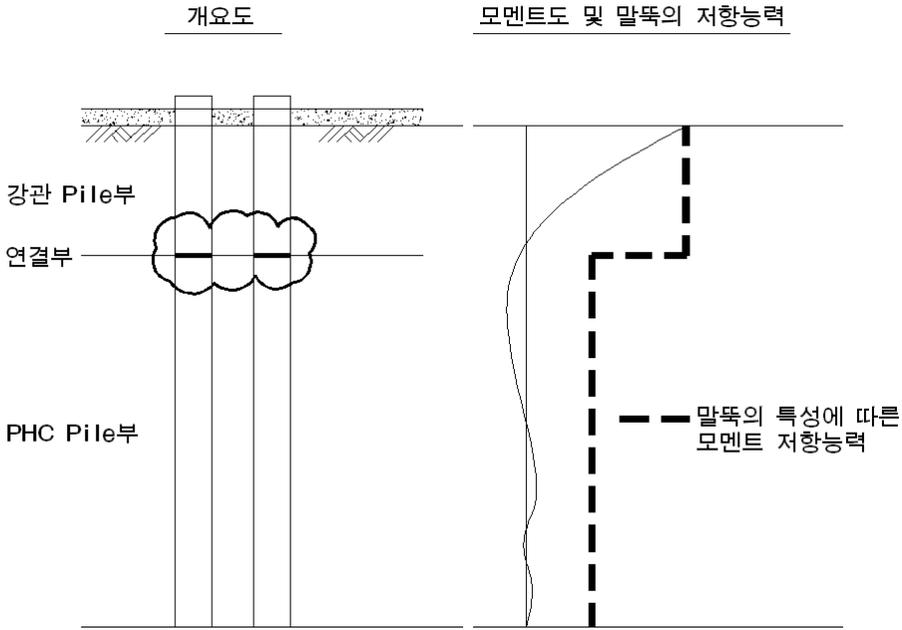
본 연구에서는 실제 현장에 항타 관입한 복합말뚝과 같은 직경의 강관 말뚝 또는 콘크리트 말뚝에 대한 수평재하 시험을 수행 하여 복합말뚝과 일반 말뚝의 수평저항능력을 평가 분석 하므로 복합말뚝의 현장 적용성을 증가 시키고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 복합말뚝의 정의

현재까지 제안된 복합말뚝은 횡방향 지지력을 필요로 하는 하중조건하에서 강관말뚝을 대신할 수 있도록 고안되고 있다. 일반적으로 횡방향 지지력을 필요로 하는 조건하에서 적용되고 있는 강관말뚝 상부에는 수평력에 의한 모멘트에 저항하도록 하고 하부는 연직지지력을 확보하도록 설계되고 있다 .이러한 모멘트 때문에 말뚝상부에 인장응력이 작용한다. 콘크리트 말뚝의 경우 인장응력이 작용하게 되면 인장응력에 취약한 콘크리트말뚝의 특성 때문에 구조적으로 불리하다. 하지만, 강관말뚝에 작용하는 모멘트는 말뚝상부에서는 크게 작용하나 말뚝하부로 내려갈수록 모멘트 분포는 급격하게 감소하

게 된다. 이러한 말뚝 길이에 따른 모멘트의 분포를 나타낸 것이 [그림 2.1]이다.



[그림 2.1] 복합말뚝의 개요도

그림에서 보는바와 같이 모멘트가 크게 작용하는 말뚝의 상부는 모멘트 저항능력이 뛰어난 강관말뚝으로, 압축력이 주로 작용하는 하부는 콘크리트 말뚝인 고강도 콘크리트말뚝으로 구성하여 용접 등으로 연결시켜 복합 말뚝형태로 말뚝을 합성시킴으로써 2 가지 재료의 장점을 최대한 활용하여 경제성 및 말뚝두부에 작용하는 횡방향 저항력과 말뚝하부에 작용하는 연직지지력을 확보하여 기초의 안정성을 확보하는 것이 복합말뚝의 주요 특징이다.

2.2 수평력이 작용하는 말뚝의 해석 방법

2.2.1 말뚝의 수평 허용지지력 산정 방법

말뚝의 수평재하시험 결과로부터 수평 허용지지력을 결정하는 데에는 다음 두 가지 방법에 의하여 결정할 수 있다.

- ① 극한상태에 도달하면 극한하중에 적절한 안전율을 적용하여 허용수평하중을 구한다.
- ② 말뚝의 허용 수평변위에 대응하는 허용수평하중을 구한다.

분석절차는 아래와 같이 수평재하시험에 의한 하중-변위량으로부터 수평방향 지반반력계수 K_h 를 산정한 후, 두부고정 및 균말뚝 조건에서의 최종 허용수평하중을 판정한다.

2.2.2 수평지반반력계수 kh 의 산정

① 요코야마 방법

요코야마는 말뚝직경이 30cm 이상되는 말뚝의 수평재하 시험으로부터 얻은 말뚝두부나 지표면에서의 하중-변위곡선 및 실측 휨 변형율로 수평지반반력계수를 역산하고 지표면에서 $1/\beta$ 깊이까지 구간의 평균 N 치와 관계를 다음과 같이 제시하였다.

[표 2.5] 요코야마의 수평지반반력계수

수평지반반력계수	사질토	점성토
kh	$0.2N$ (kg/cm^3)	$1.5qu$ (kg/cm^3)

② 후쿠오카 방법

$$kh = 0.691 \times N^{0.406} (\text{kg}/\text{cm}^3)$$

③ 도로교 표준시방서 방법(1996, p612)

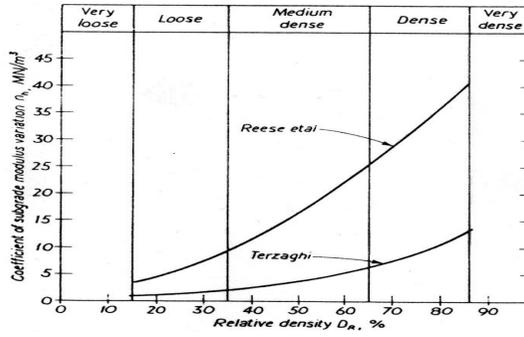
$$kh = k_h \times (BH/30)^{-3/4} = 0.34(aE_0)1.1D^{-0.31}(EI)^{-0.1} (\text{kg}/\text{cm}^3)$$

2.2.3 균말뚝 효과에 의한 수평지반반력계수의 보정

균말뚝에 수평력이 작용할 때 각 말뚝이 지반내 응력을 통하여 상호간섭되기 때문에 각 말뚝의 하중분담이 서로 다르고, 전체적인 효율도 단말뚝의 경우에 비해 저하되는 복잡한 거동을 보이는데 이러한 현상을 수량적으로 표시한 것을 균말뚝효율이라 한다. 본 검토에서는 구조물기초 설계기준에서 제시된 방법을 적용하였다.

2.2.4 수평지반반력상수 n_h 의 산정

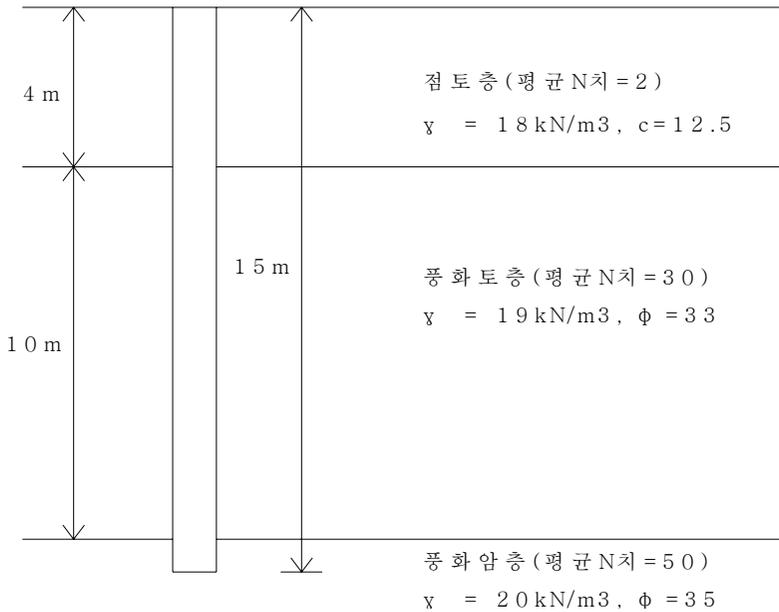
지하수위 아래 사질토에 대한 수평지반반력상수는 Reese et al과 Terzaghi에 의해 제시되었다.



[그림 2.3] 사질토지반에서 상대밀도와 수평지반반력계수 관계

2.3 말뚝에 작용하는 모멘트 분포

말뚝에 작용하는 모멘트분포를 개략적으로 판단하기 위하여 아래그림과 같은 지반조건에서 지하수위는 지표면과 동일하게 분포하는 것으로 가정하고 말뚝두부는 구속되지 않은 조건하에서 LPILE program을 이용하였다.



[그림 2.4] 복합말뚝에 작용하는 모멘트분포 평가를 위한 지반 단면

(1) 가정조건 및 해석결과

- ① 말뚝종류는 강관Φ508*12T이다.
- ② 하중조건은 수직력 0, 수평력 10ton, 모멘트 0 이다.
- ③ 수평지반반력계수 kh 산정은 도로교 표준시방서 기준으로 산출하였다.
(강관말뚝 기초공법 세미나 1996.11.12 p64참조) → E₀ 산정시 10N적용

kh 산정(kN/m ³)		
Φ508*12T	풍화토층	39630
	풍화암층	69630

- ④ 균말뚝 감소계수는 고려하지 않았다.
- ⑤ 해석 결과
말뚝에 작용하는 최대모멘트는 말뚝두부에서 약 4.2m에서 발생하는 것으로 나타났다.

3. 복합말뚝 현장 시험

3.1 지반특성

시험항타전 시험타 현장의 지반조건을 파악하기 위하여 지반조사를 수행하였다. 풍화암은 지표면으로부터 11.0m에 위치하며 지표면에서부터 매립층, 붕적층, 풍화토층으로 구성되었다. 매립토층은 조립의 모래질 뿐 아니라 약간의 자갈로 구성되어 있다.

3.2 항타관입성 평가 및 동재하시험

항타시 연결부에 항타응력의 집중 파손문제 등을 파악하기 위해 시험항타를 수행하였다.

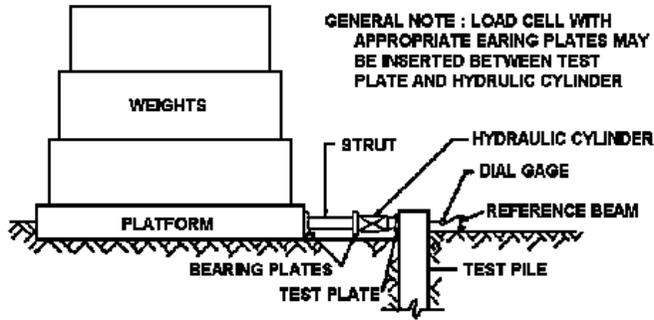
[표 3.2] 시험내용 요약

말뚝 번호	게이지 부 착 위 치	시험구분	시험시 관입깊이 (m)	낙하고 (m)	타격당 관입량 (mm/打)	비 고	
TP-1	PHC	EOID (End of Initial Driving)	0.0 ~ 7.8	0.2 ~	~ 12		
			7.8 ~ 9.4		최대(1.2)		12 ~ 6
	STEEL		0.0 ~ 5.8	0.2 ~			~ 10
			5.8 ~ 8.0	0.2 ~ (최대)1.2	10 ~ 5		
TP-3	PHC		0.0 ~ 5.8	0.2 ~	~ 40.0		
			5.8 ~ 8.0		최대(1.2)		
	STEEL		0.0 ~ 5.8	0.2 ~			
			5.8 ~ 8.0		최대(1.2)		

이질의 재료로 구성된 복합말뚝의 경우 이질재료에 따른 물성치를 신뢰성있게 평가하기 위하여 정밀해석방법인 Case Pile Wave Analysis Program 방법으로 분석하여 지지력, 항타응력을 평가하고자 한다.

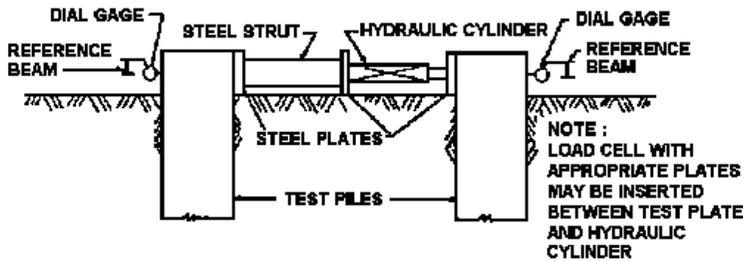
3.3 수평재하 시험

말뚝의 수평재하시험은 시험말뚝 부근에 사하중 또는 중장비를 반력으로 하여 유압 jack으로 하중을 가하거나, 반력말뚝을 사용하여 2개의 말뚝을 동시에 시험한다.



+

사하중을 반력으로 사용



반력 말뚝 사용

[그림 3.2] 말뚝의 수평재하시험

본 검토에서 수평재하시험은 경남 00 지역에서 반력말뚝을 이용하여 실시하였으며 복합말뚝 D500m/m 1본, D600m/m 3본과 고강도 콘크리트 말뚝 D400m/m 1본, D500m/m 2본, D600m/m 3본 및 강관말뚝 $\phi 914.4 \times 16t$ 1본, H-300x305 1본을 시험하였다.

3.4 복합말뚝의 연결부 벤딩 시험

연결부위에 대한 검증을 위해 Bending 시험을 계획하여 수행하였다. 복합말뚝은 연결 보강판으로 용접이음을 하였으며 용접형태는 강관말뚝과 콘크리트말뚝 사이에 연결 보강판으로 보강하였다. 시험방법은 최대모멘트가 콘크리트말뚝의 모멘트 저항능력을 초과하는 것을 확인하기 위해 콘크리트말뚝 부위에 균열이 발생할때까지 하중을 가하여 복합말뚝에 대한 휨능력을 평가하였다.

4. 현장 시험 결과 분석 및 고찰

4.1 복합말뚝의 항타응력 에너지전달 및 연직지지력에 대한 분석

시험 말뚝의 관입깊이는 약 12.0m 정도이며 복합말뚝은 풍화토층에 관입되었으며 항타 종료후 약 4일후에 강관말뚝과 고강도 콘크리트 말뚝의 접합부위가 항타 중 손상이 발생하였는지의 여부를 판단하기 위하여 백호를 이용하여 굴착하여 보았다.

[표 4.1] CAPWAP 분석결과

시험 말뚝 번호	게이지 부 착 위 치	시험시 관 입 깊 이 (m)	타격당 관입량 (mm/打)	EMX (tonf-m)	FMX (tonf)	CSX (tonf/cm ²)	TSX (tonf/cm ²)	CAPWAP Capacity (tonf)			비고
								주면 마찰력	선단 지지력	전체 지지력	
TP-1	PHC	7.8	12	6.7	442	0.435	0.017	50.0	181.0	231.0	
	STEEL	7.8	12	6.9	420	1.235	0.039	50.8	181.2	232.0	
		9.4	6	6.7	398	1.148	0.048	64.5	267.5	331.9	
TP-2	PHC	5.8	10	2.2	253	0.238	0.014	7.8	38.2	46.0	
	STEEL	5.8	10	2.2	261	0.748	0.047	11.0	40.0	51.0	
		8.0	5	6.5	457	1.319	0.044	56.0	210.0	266.0	
TP-3	PHC	5.8	40	5.9	417	0.401	0.050	15.4	84.6	100.0	
	STEEL	5.8	40	6.5	439	1.270	0.054	18.0	84.0	102.0	
		8.0	30	6.4	424	1.218	0.031	20.6	111.4	132.0	

CAPWAP지지력이란 말뚝 시공종료시 지지력으로 일반적으로 말뚝의 지지력은 시간의 경과에 따라 변화하는데 말뚝의 지지력이 시간의 경과에 따라 증가하는 현상을 "Set-up"이라 하고 말뚝의 지지력이 시간의 경과에 따라 감소하는 현상을 "Relaxation"이라한다.

최종 관입량은 거의 1~2mm/blow로 관리되어 일종의 과잉항타 인 것으로 평가되지만 실제로 말뚝에 작용하는 항타응력은 AASHTO 기준에 정한 프리텐션 콘크리트 말뚝의 기준치인 640 kgf/cm² 보다 훨씬 작은 것으로 평가되어 말뚝의 건전성에는 아무런 문제가 없는 것으로 판단된다. 또한 상부의 강관말뚝의 경우에도 강관말뚝의 항타응력

이 재료의 항복강도의 90%까지 허용하는 것으로 판단해 볼때 강관말뚝의 허용항타응력은 2160kgf/cm²으로 [표 4.2]에무런 문제가 없는 것으로 평가되었고 고강도 콘크리트 말뚝에서도 최대항타응력이 435kgf/cm²으로 한국도로공사와 AASHTO에서 제시한 허용응력 기준을 만족하였다.

[표 4.2] 고강도 콘크리트 말뚝의 최대항타응력

말뚝번호	콘크리트 말뚝의 압축항타응력 (kgf/cm ²)	항타에너지 (tf-m)	한계압축응력 (kgf/cm ²)	비 고
TP-1	435	6.7	480/640	도로공사 / AASHTO
TP-2	238	2.2	480/640	
TP-3	401	5.9	480/640	

여기서, AASHTO의 고강도 콘크리트 말뚝에 대한 한계압축응력: 640kgf/cm²

말뚝의 지지력은 EOID시험 후 일정기간 경과후에 Restrike을 수행하지 않아 시간경과효과를 고려한 말뚝의 지지력 평가는 수행되지 않았지만 CAPWAP 분석결과만으로 평가하더라도 말뚝의 지지력은 고강도 콘크리트 말뚝 ϕ 500 A-Type 재료의 지지력인 173tonf을 상회할 것으로 판단된다.

결론적으로 말뚝에 작용한 항타응력은 허용치 범위안에 있어 복합말뚝의 관입중에 말뚝의 파손등 말뚝의 항타관입성에 문제가 없는 것으로 판단된다.

4.2 복합말뚝의 수평 저항능력 평가

수평력을 받는 복합말뚝에서 고강도 콘크리트 말뚝이 부담할 수 있는 모멘트를 초과할 경우에는 상부 강관말뚝이 저항하고 말뚝 하부 모멘트가 작게 발생하는 조건에서는 수평력에 대하여 복합말뚝이 성능을 충분히 발휘 할 수 있을 것이다.

4.3 복합 말뚝의 이음부 위치에 대한 분석

시험하중은 8.17tonf ~ 13.10tonf 으로 총 5단계에 걸쳐 하중을 재하하였으며 고강

도 콘크리트 말뚝의 균열하중은 재하중 7.85tonf으로 규정하고 있으며, 본 시험에서는 10.29tonf 재하시 고강도 콘크리트 말뚝 표면에 미세 크랙이 발생하기 시작하였다. 재하하중이 증가할수록 크랙의 개수가 늘어나고 틈새가 벌어지는 경향을 나타냈으며, 고강도 콘크리트 말뚝의 보강밴드와 콘크리트접합부의 벌어짐 현상이 발생하였지만 시험의 주목적인 강관말뚝과 고강도 콘크리트 말뚝 사이 용접구간에서는 파괴 및 균열의 징후를 찾아 볼 수 없어 연결부에 대한 항타, 모멘트의 저항능력에 대해 신뢰성이 확보되는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

말뚝에 작용하는 모멘트 분포는 말뚝두부에서 소정의 깊이까지는 크게 작용하나 어느 한계깊이 이상에서는 급격히 감소하는 것으로 해석결과 판단되었으며 항타관입성 및 연직지지력을 판단하기 위한 동재하시험 데이터를 정밀해석 방법인 Case Pile Wave Analysis Program 방법으로 분석한 결과 연직지지력과 항타관입성을 충분히 확보할 수 있으며 말뚝의 기능에 우선하여 말뚝이음부가 안전하여야 하며 따라서, 항타시험 시공 후 굴착 확인한 결과 연결부에서 이상이 없는 것으로 확인되었다.

복합말뚝의 수평저항능력은 수평하중 작용시 말뚝의 변위에 따라 지반저항능력과 말뚝의 저항능력이 달라지며 말뚝의 허용수평응력은 수평재하시험결과 말뚝 재질 특성에 결정되는 것으로 판단된다.

복합말뚝의 연결안정성을 확인하기 위하여 이음부에 대한 벤딩시험을 실시한 결과 재하하중에 강관말뚝과 고강도 콘크리트말뚝의 용접이음부보다 고강도 콘크리트 말뚝에 균열이 발생하는 것으로 볼 때 복합말뚝의 휨모멘트에 대한 저항능력은 연결부위가 아니라 고강도 콘크리트 말뚝의 저항성에 좌우된다고 판단된다.

따라서, 복합말뚝에 대한 동재하시험, 수평재하시험, 이음부 벤딩시험결과로 판단하면 수평력을 받는 조건에서 상부강관말뚝이 휨모멘트에 저항하고 하부고강도 콘크리트 말뚝이 연직력을 확보할 수 있기 위해서는 말뚝 이음부 위치 및 이음부 강성이 중요하다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 제정 구조물 기초설계기준 해설 ((사)한국지반공학회 2003.2)
2. 항타말뚝의 하중-침하량 곡선 특성분석 (천변식, 조천환, 이명환, 이원재, 엄재경)
3. HCP(Hybrid Composite Pile)의 관입성 분석 및 연결부의 건전성 연구성과 보고서 (국립 환경대학교 공학 연구소 2006. 8)
4. Design and Construction of Driven Pile Foundations, Workshop Manual - Volume I, FHWA HI-97-013, 1998 National Highway Institute
5. Foundations Design Construction, 6th edition, M J Tomlinson, 1995