

## 펄스파워를 이용한 현장타설말뚝의 지지력 특성

### Bearing Capacity of In-situ Pile Installed using Pulse Power

김태훈<sup>1)</sup>, Tae-Hoon Kim, 채수근<sup>2)</sup>, Soo-Geun Chai, 정규점<sup>3)</sup>, Gyu-Geom Jeong

<sup>1)</sup> (주)대우건설기술연구소 전임연구원, 공학박사, Associate Researcher, Daewoo Institute of Construction Technology, Daewoo E&C Co, Ltd.

<sup>2)</sup> 지에스이앤씨(주) 대표이사, 토질 및 기초기술사, President, P.E., GS E&C Co, Ltd

<sup>3)</sup> (주)세원리타 대표이사, President, Sewon Rita Co, Ltd.

**SYNOPSIS** : In the past decades, complain about ground vibration and noise induced by pile driving has been quickly increased. Because of that, auger drilled piling methods have frequently used specially in urban area. However, the present auger drilled piling methods induce inevitable ground disturbance as well as a certain degree of vibration and noise due to the final hammering. For these reasons, a new auger drilled piling method is required to be developed. This paper introduces PDT(Pulse Discharge Technology) piling method and presents the characteristics of bearing capacity. The PDT piling method is to install in-situ piles using electric power so called Pulse. The pile installed by PDT appears to be able to develop shaft and end bearing capacity efficiently.

**Keywords** : PDT piling method, Electric power, bearing capacity

## 1. 서론

1990년대 이후 기초말뚝을 타입시공할 때 발생하는 지반진동과 소음으로 인한 민원이 급증하면서 선굴착방식에 의한 저소음·저진동 공법의 매입말뚝시공법이 보편화되어 왔다(이명환, 2003). 그러나 이러한 선굴착 공법은 지반 굴착시 지반교란과 응력이완을 수반하게 됨에 따라 Cement milk에 의해 주변 마찰력을 기대할 수 있더라도 그 효과는 불확실할 뿐만 아니라 말뚝의 지지력 증대를 위해 최종 경타시 발생하는 소음과 진동이 불가피하고 아울러 경타시 말뚝재료 파손 등의 문제점을 내포하고 있다(이명환, 2003; 홍현성 등, 1997; De Beer, 1988; Broms et al, 1988). 이러한 단점을 보완하기 위해서 SDA매입말뚝시공법이 제안(채수근, 2000, 홍원표 등, 2002)되어 사용되고 있는데, 대부분의 경우 현장에서 압입방식 대신 경타방식을 채택하기 때문에 경타시 발생하는 소음이나 진동조차도 허용되지 않는 환경조건에서는 적용에 한계가 있다. 또한 오메가 공법과 같은 비배토 말뚝 공법이나 Auger로 선굴착을 시행하고 최종적으로 굴착용 비트가 부착된 강관말뚝을 회전하여 견고한 지반 내에 근입시키는 공법도 대부분 특정의 공사에서 부분적으로 적용된 이후 활성화되지 못하고 있다. 이와 같이 지지력의 불확실성 및 두부 파손의 위험요소를 제거하고 매입말뚝의 장점을 충분히 발휘할 수 있는 새로운 공법의 개발이 요구되고 있으며, 최근 들어 저공해 공법인 소구경 현장타설공법이 새롭게 주목받고 있다. 특히 러시아는 펄스방전을 이용해서 말뚝을 조성하는 공법이 개발하였으며 현재 그 활용도가 매우 높는데 펄스방전을 이용하면 소음과 진동이 거의 없고 말뚝의 지지력을 크게 개선할 수 있다. 이 공법은 지반 천공시 지반의 교

란이나 응력의 이완이 발생하더라도 펄스라는 높은 압력에 의해 지반을 밀어 넣으므로 지반을 다지는 효과가 있기 때문에 큰 주변마찰력을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 천공시 발생하는 슬라임에 의한 선단 지지력의 저감도 최소화 시킬 수 있는 장점이 있는 공법이다. 본 논문에서는 현장시험과 말뚝 재하시험을 통해 PDT(Pulse Discharge Technology)말뚝의 지지력 특성을 알아보고자 한다.

## 2. PDT(Pulse Discharge Technology) 말뚝 공법

### 2.1 펄스 파워(Pulse Power)

펄스파워(Pulse power)란 전기방전 현상을 이용한 에너지 압축 기술로서 단위시간당 에너지 변화량을 나타내는 물리량( $dE/dt$ , 여기서 E와 t는 각각 에너지 및 시간)으로 그 크기는 주어진 에너지를 얼마나 짧은 시간 내에 방출하느냐에 의해 결정된다. 그림 1과 같이 1J(joule)의 에너지를 1초 동안에 방출하면 1W(watt)의 파워가 되지만  $1\mu s$  ( $10^{-6}$ 초)의 짧은 시간에 방출 하면 단위 시간당의 에너지변화량이 아주 큰 1MW ( $10^6$ Watt)에 이르는 큰 파워를 가지게 된다. 즉 펄스파워 기술은 에너지 보존 법칙의 원리에 의한 것으로 에너지 저장장치를 통하여 전력변환 혹은 에너지 압축을 이용 하는 기술이다. 다시 말하면, 절연 매질 내부에 있는 양 전극 사이에 수십  $\mu s$  내에 고전압을 가하면 양극 사이에 큰 에너지가 발생하고 이 에너지로 인해 높은 온도의 열 에너지가 생성되게 된다. 이와 같은 고온의 열에너지는 내부 매질의 부피 팽창을 유발하게 된다. 고온으로 인한 부피팽창은 주위의 차가운 매질을 만나면서 저항을 받게 되며, 이러한 저항으로 인해 고온의 매질과 저온의 매질 경계에서 높은 압력차가 발생하게 된다. 마지막으로 이러한 높은 압력차는 충격파(Shock wave)로 변환되어 주위 매질을 매개체로 전달되게 된다. 그림 2는 에너지 변환단계의 모식도를 보여준다.

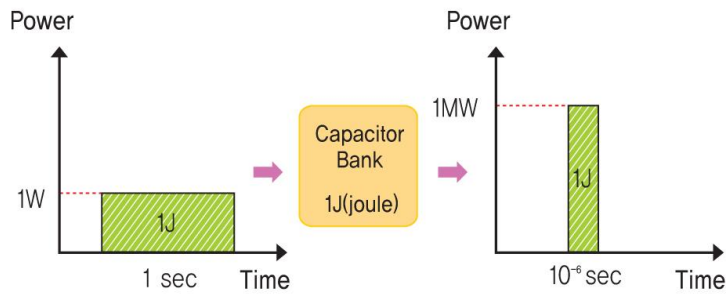


그림 1. 펄스파워 발생 개념



그림 2. 에너지 변환단계 모식도

### 2.2 공법 개요 및 시공 순서

PDT말뚝공법은 고전압에 의한 에너지 전환에 의해 발생하는 펄스파워를 이용하여 그림 3에서와 같이 천공벽을 충격파로 확장시켜 기초 말뚝을 현장에서 조성하는 공법을 말한다. 시공순서는 그림 5와 같으며 펄스 생성장치와 방전장치는 그림 4와 같다. 지반을 직경 250 또는 300mm 정도의 소구경으로 천공한 후 Auger Rod 구멍을 통해 고강도 몰탈을 천공홀에 충전하고 철근망을 삽입한다. 철근망이 삽입 완료되면 펄스 방전 장치를 천공홀 바닥까지 내린 다음 방전 장치를 일정 간격으로 상승시키면서 펄스 방전을 시행하여 최종적으로 말뚝체를 형성시킨다. 그림 5는 PDT 말뚝설치의 일련의 과정을 보여주고 있다.



그림 3. 펄스 방전에 의한 지반 확장



그림 4. 펄스 생성 및 방전 장치

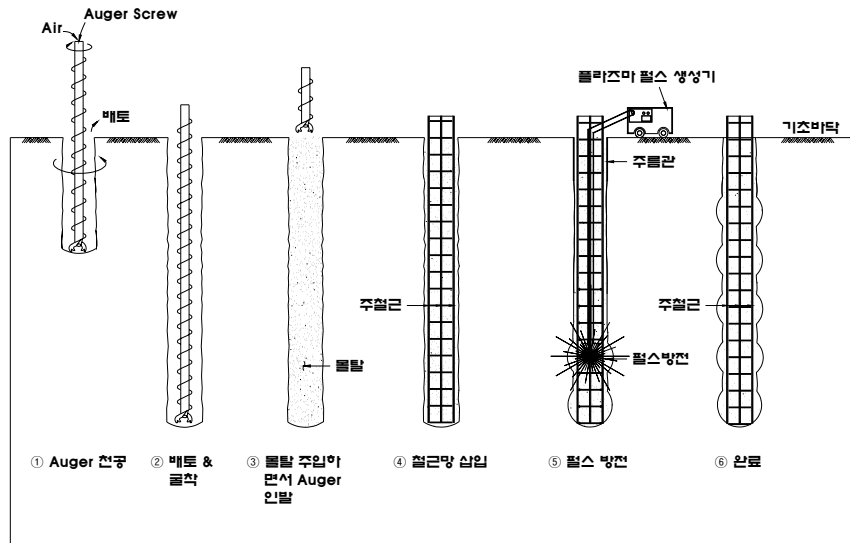


그림 5. PDT말뚝 시공순서

### 3. 시험시공, 확공율 분석 및 지지력 특성

#### 3.1 시험시공

확공률과 지지력 특성을 파악하기 위해서 국내 대표적인 지반 중에 하나인 퇴적층에서 시험시공을 하였다. 그림 6은 시험시공 현장의 대표적인 지층 구성을 보여주고 있다. 지층은 지표면으로부터 매립층, 퇴적층, 풍화산류토층 및 풍화암반층으로 구성되어 있다. 기초시공기준면으로부터 3.8m~4.7m 두께로 분포되어 있는 매립층은 대체로 쉘트질 모래, 세립 자갈 및 쉘트질 점토로 구성되어 있다. 또한 퇴적층은 쉘트질 점토(CL)층, 쉘트질 세립 내지 조립 모래(SM)층 및 세립 내지 조립자갈(GP)층으로 대별되며 약 12.8~13.3m 정도의 두께로 분포되어 있다.

총 18본의 말뚝을 시험시공하였으며, 말뚝의 직경은  $\phi 250$ ,  $\phi 300$  및  $\phi 340$ mm, 말뚝길이는 13.9~16.0m 이다. 사용된 몰탈은 일축압축강도가  $400 \text{ kg/cm}^2$  이상되는 고강도 몰탈로써 그 배합비는 표 1과 같다.

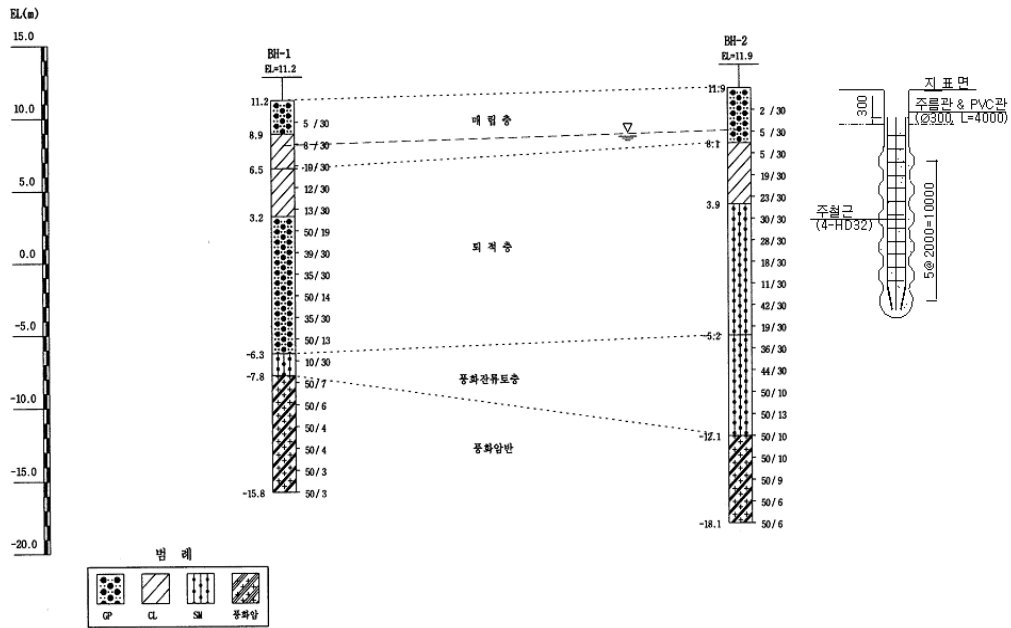


그림 6. 지층 단면도 및 구성 성분

표 1. 몰탈 표준배합비 (단위 : kg)

시료명	모래	시멘트	물	SSA	유동화제	계	비고
표준 PDT	600	370	200	30	2.80	1002.80	믹서 생산제품

주) SSA: 자기응력혼화제

### 3.2 확공률 분석

퇴적층의 확공률을 파악하기 위해 퇴적층을 세립토 구간과 조립토 구간으로 구분하였으며 각 구간에 대해서도 표준관입시험 N치에 따라 10~19, 20~29, 그리고 30 이상인 층으로 분류하였다. 각 구간에 대해서 펄스방전 횟수를 바꾸어 가면서 몰탈의 하강 깊이를 측정하였다. 펄스방전은 선단에서부터 평균 1.0m 간격으로 상향식으로 시행하였으며, 각각의 경우에 대한 정확한 몰탈의 하강깊이를 측정하기 위해서 매번 계획된 펄스를 방전한 후 작업을 멈추고 몰탈의 하강깊이를 측정하였다. 측정한 후에는 다시 몰탈을 초기 위치까지 채운다음 위 작업을 반복하였다.

그림 7은 펄스방전 횟수를 각각 10회, 20회 그리고 40회 주었을 때의 확공률을 표준관입시험, N치에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 펄스방전 횟수가 적을수록 확공률이 작게 나타라고 횟수가 증가 할수록 확공률이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 각 지층은 전반적으로 N치가 증가 할수록 확공되는 효율이 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 특이한 점은, 펄스방전 횟수가 10에서는 확공률이 20% 이하로 전반적으로 낮은 값을 나타내고 감소율도 완만한 곡선을 나타내는 반면 펄스방전 횟수가 20회 이상이 될 경우는 확공률이 대체적으로 큰 값을 나타내며 기울기도 더 급한 것으로 나타났다. 더 자세히 살펴보면, N치가 작을 경우에는 펄스방전 횟수에 따른 확공률의 차이가 큰 반면, N치가 25 이상이 될 경우는 펄스 횟수가 25회 이상 되면 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 펄스방전 횟수가 10 이하에서는 큰 효율이 없으며 따라서 N치에 민감하지 않은 것으로 판단된다.

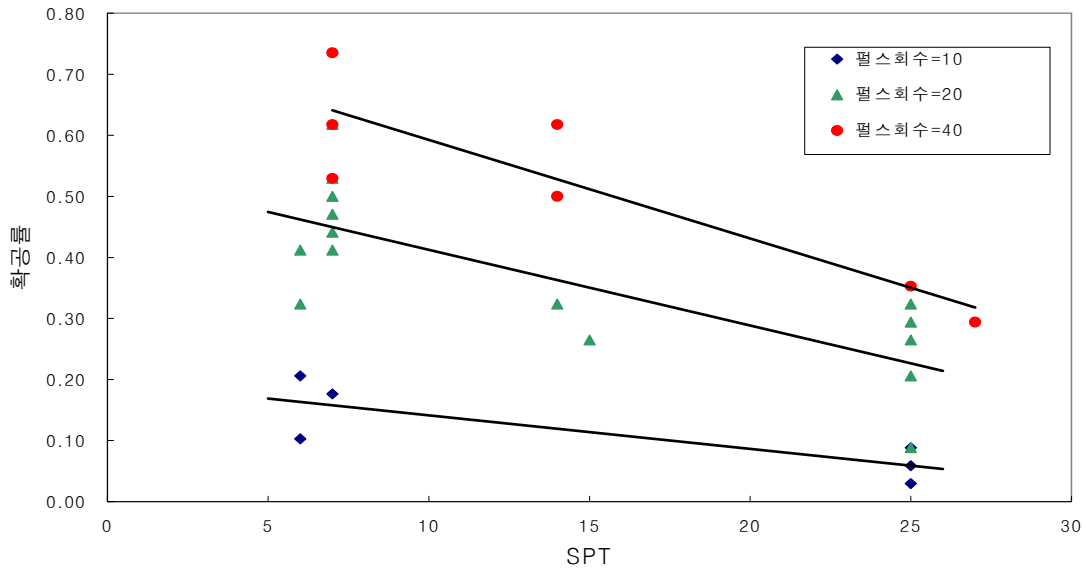


그림 7. 확공률 VS 표준관입 타격 횟수(N)

### 3.3 지지력 특성

PDT말뚝의 지지력 특성을 알아보기 위해서 시험시공 말뚝 중 4본에 대해 동재하시험을 실시하였다. 시험말뚝에 대한 제원, 시험방법 및 CAPWAP 해석결과는 표 2에 제시하였다. 또한 3본의 말뚝에 대해 정재하시험을 실시하였으며 시험 내용과 결과는 표 3에 제시하였다. 정재하시험 최대하중은 120.0ton 재하 하였으며 주변말뚝의 마찰력을 반력으로 이용하여 재하 하는 방법을 채택하였다. 실험 결과 최대하중까지 항복이나 극한상태가 발생되지 않았다. 다만, 전침하량과 잔류침하량을 비교해보면 모두 침하량 기준보다 훨씬 작음을 알 수 있고 따라서 실질적 허용지지력은 60t 보다 훨씬 클 것으로 예상할 수 있다.

표 2. 시험말뚝 제원 및 동재하시험 결과

항목 말뚝 번호	말뚝직경 (mm)	시공 길이 (m)	시험방법	지지력(ton)		
				주면마찰력	선단지지력	전체지지력
PDA.- 1	φ300	14.7	Restrike	127.0 (65.0%)	68.3 (35.0%)	195.3
PDA - 2	φ250	13.9	Restrike	153.5 (84.1%)	29.1 (15.9%)	182.6
PDA.- 3	φ250	16.0	Restrike	117.5 (71.2%)	47.6 (28.8)	165.1
PDA.- 4	φ340	15.2	Restrike	129.3 (72.5%)	49.1 (27.5%)	178.4

※ ( ) 전체 지지력 대비 부담율

표 3. 시험말뚝 제원 및 정재하시험 결과

분석 방법 \ 시험 번호		PLT-1		PLT-2		PLT-3	
		말뚝직경(mm)	340	말뚝직경(mm)	250	말뚝직경(mm)	300
		길이(m)	16.0	길이(m)	11.8	길이(m)	10.4
P-S곡선법	허용지지력(t)	60.0 이상		60.0 이상		60.0 이상	
	안전율	2.0		2.0		2.0	
LogP-LogS 곡선법	허용지지력(t)	60.0 이상		60.0 이상		60.0 이상	
	안전율	2.0		2.0		2.0	
S-Log(t) 곡선법	허용지지력(t)	60.0 이상		60.0 이상		60.0 이상	
	안전율	2.0		2.0		2.0	
Davisson's 곡선법	허용지지력(t)	60.0 이상		60.0 이상		60.0 이상	
	안전율	2.0		2.0		2.0	
전침하량에 의한 방법	전침하량(mm)	2.46		13.79		10.16	
	전침하량기준(mm)	34.0		25.0		30.0	
	허용지지력(t)	60.0 이상		60.0 이상		60.0 이상	
잔류침하량에 의한 방법	전침하량(mm)	0.27		2.12		1.88	
	전침하량기준(mm)	8.5		6.25		7.5	
	허용지지력(t)	60.0 이상		60.0 이상		60.0 이상	

그림 8은 표준관입시험치(N)에 따른 말뚝의 단위 주면마찰력의 관계를 보여주고 있다. 그림에 의하면 전반적으로 N치가 증가함에 따라 단위 주면마찰력도 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 동일한 표준관입 시험치에도 단위 주면마찰력이 깊이에 따라 차이가 나고 있음을 알 수 있는데 이와 같은 현상은 깊이가 깊을수록 높은 연직응력이 작용하기 때문에 펄스 방전시 그 효과가 충분히 수평 방향으로 작용하여 지반의 확장이나 다짐을 유도하는 것으로 보인다. 이러한 경우, 지반과 말뚝의 부착력은 커지며 따라서 높은 단위 주면마찰력을 발휘하는 것으로 판단된다. 반면에 깊이가 얕으면 그 만큼 연직응력이 작기 때문에 힘이 양방향으로 분산되어 상대적으로 작은 단위 주면마찰력을 나타내는 것으로 보인다. 이런 관점에서, 말뚝의 단위 주면마찰력( $f_s$ )은 최소  $0.15N_s$ 에서 최대  $0.81N_s$ 의 변화를 보이며 평균적으로  $f_s=0.4N_s$ 의 상관관계를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

그림 9는 단위 선단지지력과 표준관입시험치(N)의 상관관계를 보여준다. 단위 주면마찰력과는 달리 선단지지력은 말뚝 한 본당 하나의 값 밖에 얻을 수 없기 때문에 자료가 상대적으로 매우 부족하여 정확한 상관관계를 유추해 낸다는 것이 용이하지 않다. 그러나 제한된 자료를 이용하여 분석해 본 결과 그림 9에서 나타난 바와 같이  $f_b=17N_b$ 의 상관관계가 있음을 유추할 수 있다.

또한 PDT말뚝의 선단지지력과 마찰지지력의 지지력 특성을 동재하시험 결과를 이용하여 분석해 보면 주면마찰력이 전체지지력 대비 평균 72.5%로 선단지지력에 비해 상대적으로 큰 주면마찰지지력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 결론적으로 PDT말뚝은 상대적으로 큰 주면마찰지지력을 나타내고 있어 말뚝의 길이를 줄일 수 있다.

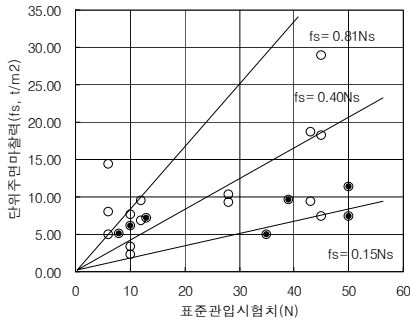


그림 8. 단위 주면마찰력과 N치의 관계

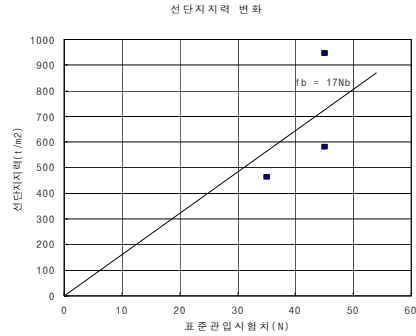


그림 9. 단위선단지지력과 N치의 관계

#### 4. 결론

퇴적층에 시공된 PDT말뚝의 확공률과 지지력 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 펄스방진 횟수 및 표준관입시험치(N)에 따른 지반의 확공률을 분석한 결과, 펄스방진 횟수가 적을수록 확공되는 효율(확공률)이 적게 나타라고 횟수가 증가 할수록 효율이 커짐을 알 수 있었다. 또한 퇴적층중 점토층, 모래 및 자갈층 모두 N치가 증가 할수록 확공되는 효율이 줄어드는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있었다.
2. 동재하시험 결과로부터 단위 주면마찰력( $f_s$ )을 분석한 결과, 단위 마찰력은 표준관입시험치(N)에 따라 일정비율로 증가하는 경향을 파악할 수 있었으며,  $f_s=0.4N_s$ 의 상관관계를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 단위 선단지지력 역시 표준관입시험치(N)에 따라 일정한 비율로 증가하며,  $f_b=17N_b$ 의 상관관계가 있음을 유추할 수 있었다.
3. 동재하시험 결과로부터 PDT말뚝은 주면마찰력이 전체지지력 대비 평균 72.5%로 선단지지력에 비해 상대적으로 큰 주면마찰지지력을 나타내고 있어 말뚝의 길이를 줄일 수 있기 때문에 경제적인 공법이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 이명환, 홍헌성, 조천환 (2003), "매입말뚝의 설계 및 시공현황",
2. 이명환 (2003), "우리나라 말뚝기초의 설계와 시공상의 문제점과 대책", 2003 현장 기술자를 위한 워크샵, 한국지반공학회 기초 기술위원회, pp. 19-29.
3. 채수근(2000), "Q&A 매입말뚝 시공법", '지반', 한국지반공학회지, Vol. 16, No.7, pp.63~68
4. 채수근(2000), "SDA매입말뚝 시공법 -한국고속철도 3공구 평택고가 적용사례 중심으로-", '토목', 대한토목학회지 제48권 제9호 pp.54~62
5. 홍원표, 채수근, 한중근 (2002), "SDA 매입말뚝의 마찰지지력", 2002 정기학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 5-8.
6. 홍헌성, 조천환, 김성희, 이명환 (1997), "선굴착 말뚝공법의 문제점"
7. PDT말뚝공법협의회(2004), "광명 경륜동경기장 DECK기초공사 PDT말뚝 재하시험보고서"
8. Broms, B.B., Chang, M.F. and Goh, A.T.C. (1988), "Bored Piles in Singapore", Proceedings of the 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, pp.17-34.
9. De Beer, E (1988), "Different Behavior of Bored and Driven Piles", Proceedings of the 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, pp. 47-78.