

사질토지반에 근입된 벨타입 인발말뚝의 하중-변위 특성

Load-displacement characteristics of belled tension piles embedded in cohesionless soils

홍원표¹⁾, Won-Pyo Hong, 최용성²⁾, Yong-Sung Choi, 임대성³⁾, Dae-Sung Lim

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University

²⁾ 삼보E&C(주) 기술연구소 연구원, Researcher, Technical Research Center, Sambo E&C

³⁾ 삼보E&C(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Technical Research Center, Sambo E&C

SYNOPSIS : Pile foundations have been used for upholding superstructure's loads. The researches on pile foundations subjected to compressive forces or horizontal loads have been actively carried out. However, recently, pile foundations, which are subjected to pull-out forces, are getting increased. The study on the pull-out resistance of piles becomes to be important.

In addition, it is expected that belled piles will be used more and more, since the belled piles are effective to resist the pull-out forces. But there is still a lack of research on pull-out resistance of belled piles.

Therefore, in order to investigate the resisting effect against pull-out of belled piles which is embedded in cohesionless soil, a series of pull-out test is performed on belled piles in field. Especially, the relation between load and displacement is analyzed through the pull-out test.

Keywords : Belled pile, pull-out test, load-displacement

1. 서 론

흙의 지지력이 상부 구조물의 하중을 지지하기에 충분하지 못할 경우 일반적으로 말뚝 기초가 널리 사용되고 있다. 특히, 축방향 압축력과 수평하중을 받는 말뚝에 대한 연구가 활발히 진행되어 온 결과 말뚝의 거동을 해석하는 것이 점차 정도 높게 가능하게 되었다.

하지만 최근에는 인발력을 받는 해안 구조물 및 지하수위가 높은 곳에 설치되는 기초말뚝의 시공이 증가하면서 말뚝의 인발저항에 관한 연구의 필요성이 증가되고 있는 추세이다.

종래의 인발말뚝에 관한 연구는 압축하중 또는 수평하중을 받는 말뚝에 비해 그 예가 매우 드물고 균일단면말뚝에 대한 실내실험수준에 불과하다.

또한 전체 인발력에 효과적인 저부확대형태의 Bell타입 말뚝의 필요성이 증가될 것으로 예상되지만 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Bell타입 인발말뚝이 인발저항력에 저항하는 효과와 이로 인한 인발지지력 특성을 연구할 필요성이 증가될 것으로 예상되는바 사질토에 근입된 Bell타입 말뚝에 연직인발시험을 수행하여 하중-변위 관계를 통해 Bell 타입말뚝의 인발 특성을 살펴보고 이를 분석하여 말뚝 선단부 Bell형태의 인발저항효과를 알아보하고자 한다.

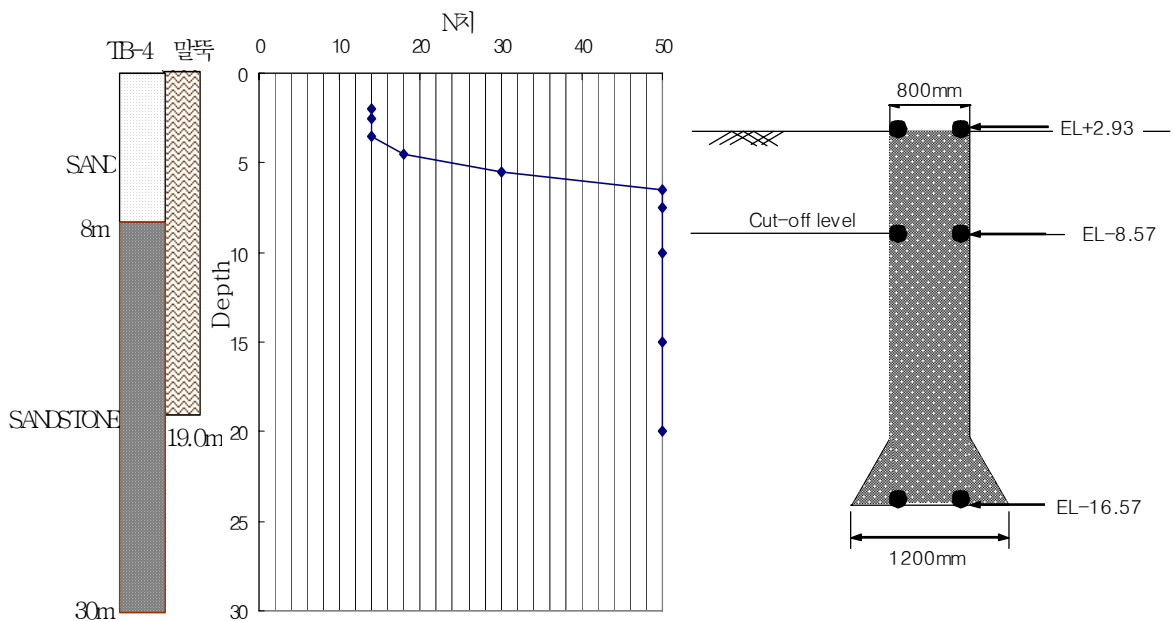
이를 위하여 중동지역 사질토 지반에 Straight Shaft 부분이 $\Phi 800\text{mm}$, Bell부분이 $\Phi 1200\text{mm}$ 인 시험말뚝 5개를 시공 설치하여 연직인발시험을 실시하였으며 그 시험결과를 분석하였다.

2. 현장재하시험

2.1 현장 개요

본 연구 대상은 중동지역에 위치한 현장으로 인근에 해안가가 존재하여 양압력에 저항토록 인발말뚝을 시공계획 되었으며 인발말뚝의 거동특성을 분석하고자 시험말뚝을 설치하여 연직인발시험을 실시하였다. 총 5개 시험파일의 하중-변위 관계를 분석하였으며, 대상부지 지층은 전반적으로 상부에 모래층 그 이하로 사암층으로 비교적 간단한 구조를 보인다. 모래층은 실트내지 석회암이 주 구성성분으로 형성된 지층이며, 사암층의 구성성분을 분석하면 중간정도 풍화된 사암으로 분류된다. 그림 1에 시험말뚝-1의 지층분포 및 변위측정기 위치를 표시하였고 표 1에는 시험말뚝 5개의 제원을 표시하였다.

시험은 ASTM D 1143의 표준재하방법 및 반복하중재하방법을 혼합하거나 수정된 방법으로 수행하였다.



(a) Strain Gauges

(b) 변위 측정기

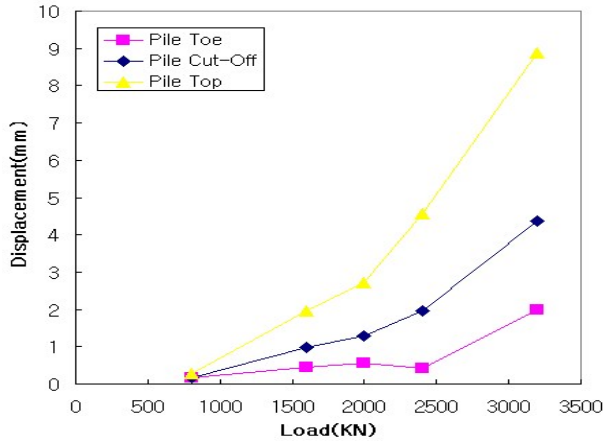
그림 1. 시험말뚝-1 지층분포 및 변위 측정기

표 1. 시험 말뚝 제원

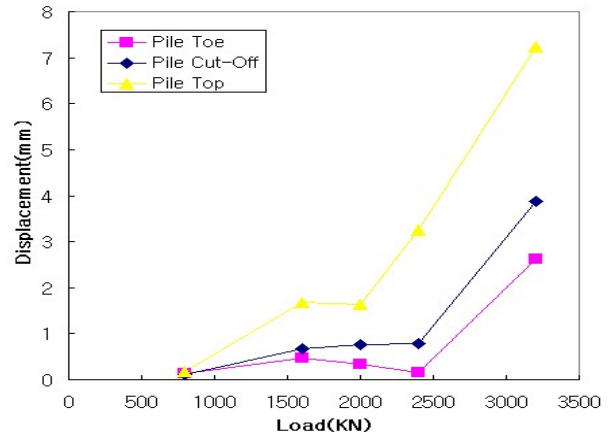
말뚝번호	규격	근입깊이	허용 인발 지지력	설계 인발 하중	최대시험하중
시험말뚝-1	Bell Shaft 1200mm	8.0m	1600KN	1733KN	3200KN
시험말뚝-2		6.5m		2006KN	3200KN
시험말뚝-3	6.5m	2006KN		3200KN	
시험말뚝-4	Straight 800mm	6.5m		2006KN	3600KN
시험말뚝-5		6.5m		2006KN	3200KN

2.2 재하 시험 결과

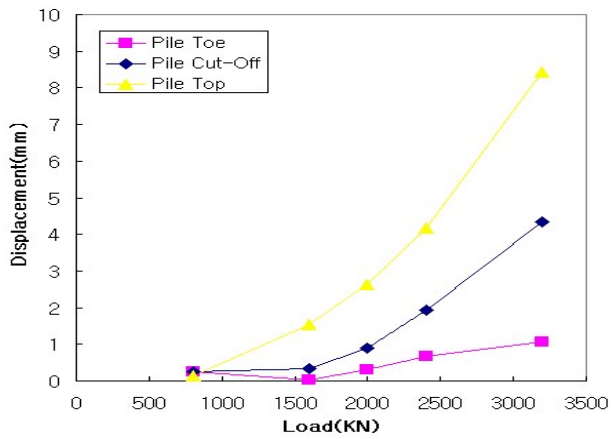
연직인발하중 재하시 말뚝의 움직임을 측정하기 위하여 시험말뚝에 Tell-Tale Rods를 설치하여 Pile Toe, Cut-off, Top에서 발생하는 변위를 측정하여 하중-변위 관계를 그래프로 나타낸 것이다.



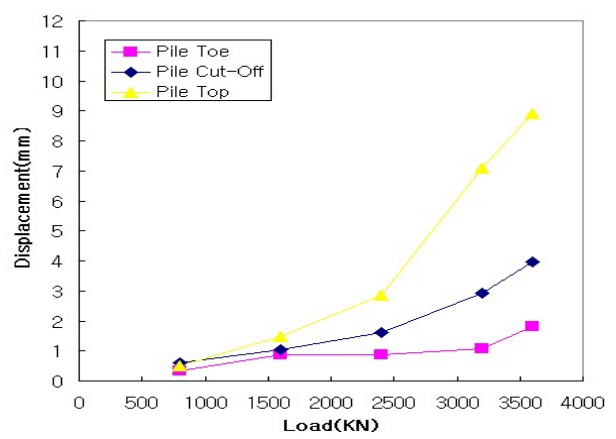
(a) 시험말뚝-1



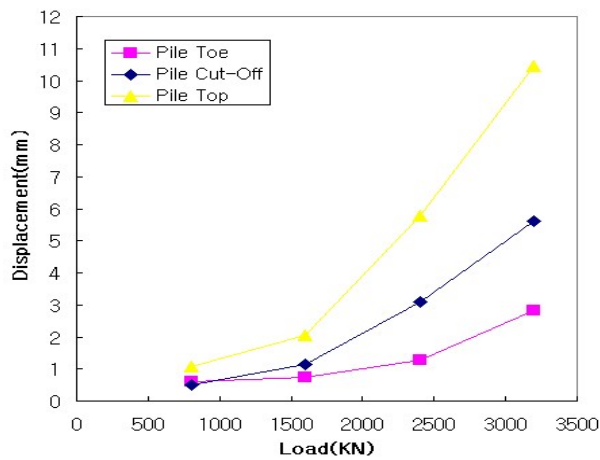
(b) 시험말뚝-2



(c) 시험말뚝-3



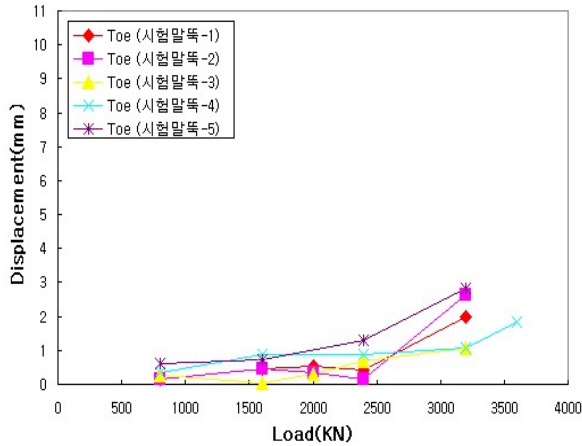
(d) 시험말뚝-4



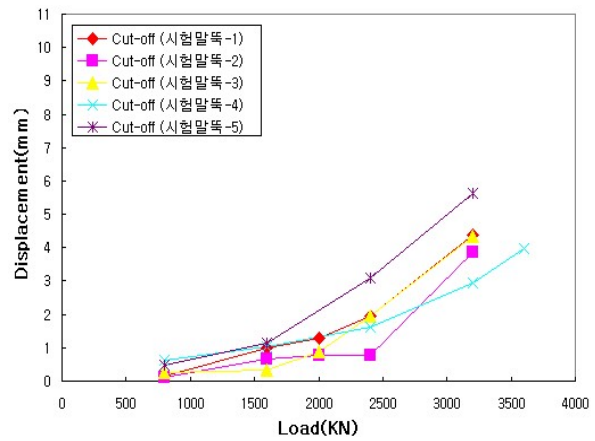
(e) 시험말뚝-5

그림 2. 말뚝의 인발하중-변위량 관계

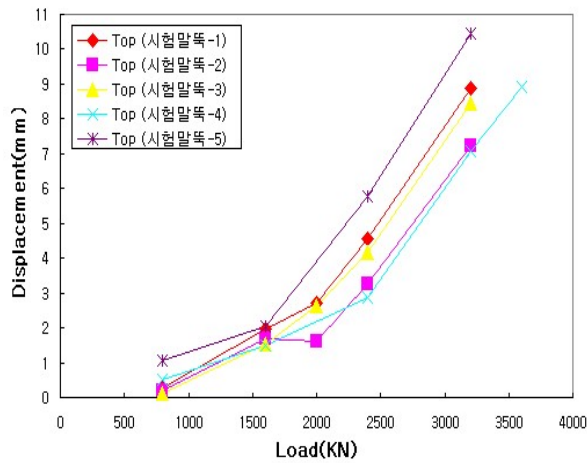
그림 2와 같이 시험말뚝 5개의 하중-변위량 곡선을 비교분석한 결과 인발하중이 증가할수록 변위량도 증가하였으며, 변위측정위치가 지표에 가까울수록 증가 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 즉 Pile Top의 하중-변위 곡선의 기울기가 급한 경향을 나타냈다. Pile Toe에서 인발하중이 설계하중의 100% 및 200% 인 경우 시험말뚝-1은 0.44mm와 1.99mm 변위가 발생하였으며, 시험말뚝-2는 0.46mm와 2.62mm, 시험말뚝-3은 0.03mm와 1.07mm, 시험말뚝-5는 0.74mm와 2.83mm가 발생했으며, 시험말뚝-4는 설계하중의 100% 및 225%인 경우 0.86mm와 1.83mm의 변위가 발생하였다. 이는 설계하중 100% 및 200%, 225% 경우 최대 변위량 1.5mm 및 3.0mm 요구를 충족시킨다. 따라서 시험말뚝은 인발시험에 관한 모든 조건을 만족시키며 적은 변위량과 최소의 Creep 양으로 완전히 발휘되지 않은 것으로 나타났다.



(a) Pile Toe “하중-변위”



(b) Pile Cut-off “하중-변위”



(c) Pile Top “하중-변위”

그림 3. 측정위치별 하중-변위관계

그림 3은 시험말뚝 5개의 위치별 하중-변위량 관계를 그래프로 표시한 그림이다. 모든 측정위치에서 인발하중이 증가할수록 말뚝에 측정된 변위도 증가하는 모습을 보이며, 특히 Pile Top부분에서는 변위 증가추세가 Pile Toe보다 더 크게 나타남을 명확히 알 수 있으며, 말뚝이 지표에 가까울수록 더 큰 인발하중을 받고 대부분의 하중이 Straight Shaft에서 발생되며 최소하중만 Bell로 옮겨짐을 추측할 수 있다. 이는 여러 가지 인발력 이론식 중 Chattopadhyay & Pise 이론과 유사한 양상을 보이는 것으로 순인발

저항력 (Pu)은 말뚝 지름이 증가할수록 인발저항력 값은 커지므로 저단확대부(Bell)형태의 인발말뚝은 흙의 자중증가 및 전단저항력을 크게 할 수 있어 인발저항력에 효과적인 것으로 나타났다.

$$P_u = A\gamma\pi dL^2 - \frac{\pi d^2}{4}\gamma L = \gamma\pi dL^2\left(A - \frac{1}{4\lambda}\right) = A_1\gamma\pi dL^2 \quad (1)$$

3. 항복인발력 산정

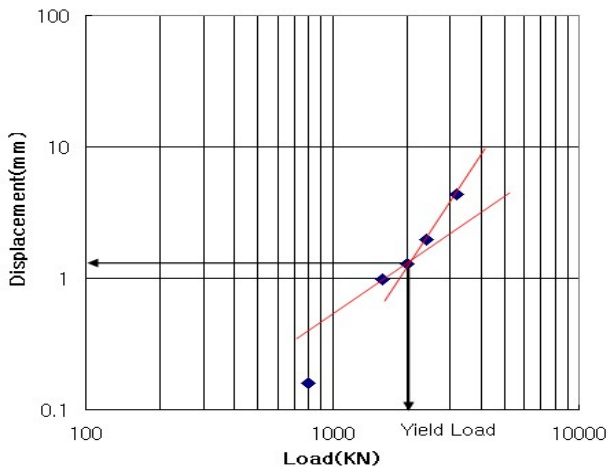
항복인발지력을 결정하기 위해 여러 분석법 중 log P - log S 방법을 이용 시험결과를 분석하였으며 말뚝 5개의 항복하중은 표 2와 같이 대체적으로 1600KN~2400KN으로 나타났다. 항복변위량은 지지층의 근입깊이가 8m인 시험말뚝-1에서 2.5mm로 가장 많이 발생했으며 근입깊이 6.5m일 경우는 0.6mm~2.0mm의 변위량 분포를 나타냈다. 또한 항복하중 이후에도 변위 값들이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있고 모든 시험말뚝의 항복변위량이 3mm이내 인 것으로 추측하여 볼 때 시험과일은 설계하중에 충분한 인발저항력을 가지는 것으로 나타났다.

표 2. Cut-off level 항복인발력

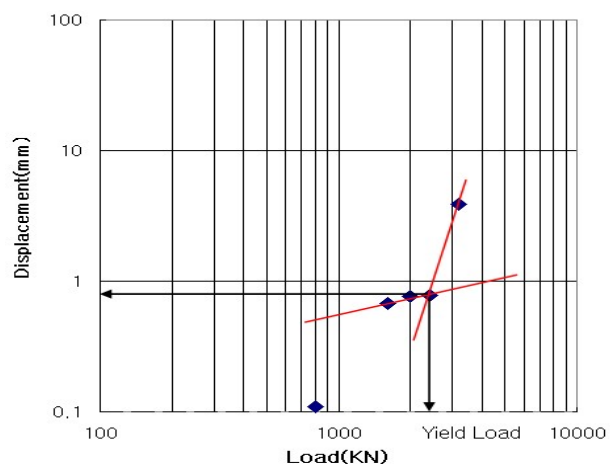
시험말뚝	Sandstone층 근입깊이 (m)	최대시험하중 (KN)	최대 변위량 (mm)	항복하중 (KN)	항복변위량 (mm)
시험말뚝-1	8	3200	4.37	2000	2.5
시험말뚝-2	6.5	3200	3.88	2400	0.9
시험말뚝-3	6.5	3200	4.33	1600	0.6
시험말뚝-4	6.5	3600	3.97	2100	2.0
시험말뚝-5	6.5	3200	5.63	1600	1.5

4. 결론

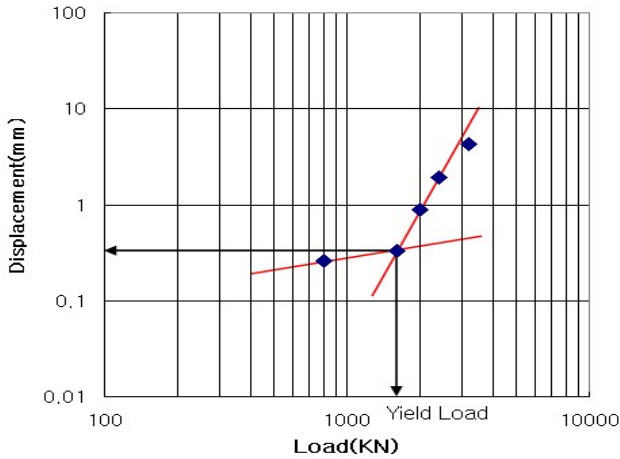
중동지역 사질토 지반에 근입된 저단확대부(Bell)형태의 말뚝에 Tell-tale rod 및 변위측정기를 설치하고 위치별 하중-변위 관계를 분석하여 시험말뚝의 거동특성을 분석한 결과를 종합하면 다음과 같다.



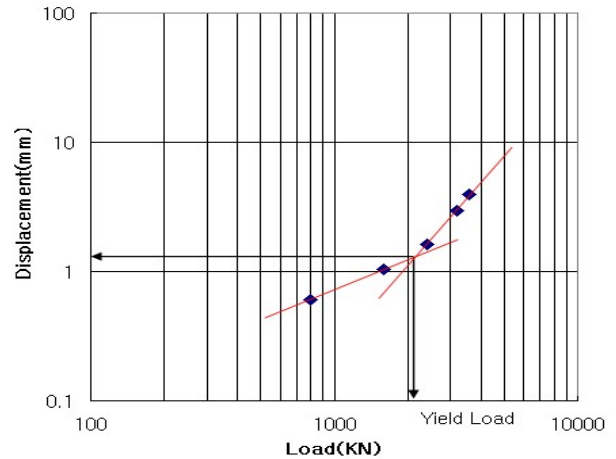
(a) 시험말뚝-1 항복 인발력



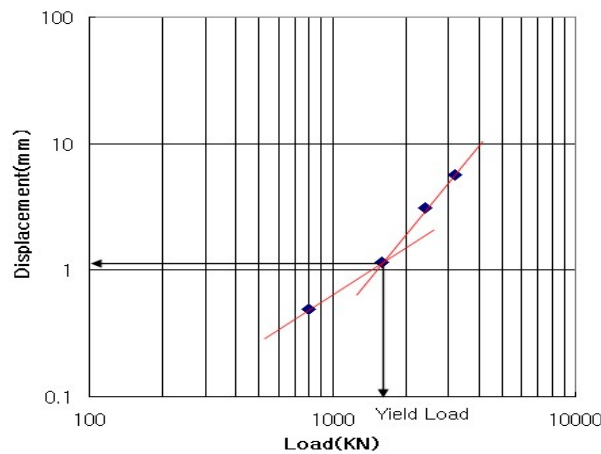
(b) 시험말뚝-2 항복 인발력



(c) 시험말뚝-3 항복 인발력



(d) 시험말뚝-4 항복 인발력



(e) 시험말뚝-5 항복 인발력

그림 4. 시험말뚝의 항복인발력

- (1) 시험말뚝의 하중-변위량은 인발하중이 증가할수록 측정된 변위도 증가하는 양상을 보이며, Pile Toe에서 최대변위는 2.83mm 측정되었고 이는 기준치 3.0mm를 만족하므로 설계하중 이상의 허용인발 지지력을 확보하는 것으로 나타났다.
- (2) 시험말뚝의 하중-변위량 관계를 해석하기 위하여 $\log P - \log S$ 방법을 이용 항복인발지지력을 산정한 결과 대체적으로 1600KN~2400KN으로 나타났으며 항복변위량도 3mm이내로 나타나 설계하중 대비 시험말뚝은 안전한 것으로 나타났다.
- (3) 시험말뚝의 거동양상은 Chattopadhyay & Pise 이론식과 유사한 것으로 나타났고, Bell의 영향으로 파괴포락선이 커져서 흙의 자중이 증가하는 동시에 전단저항력을 증가시키므로 저단확대부(Bell)형태의 말뚝은 인발저항력에 효과적인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한국지반공학회 기초기술위원회(2007) “말뚝의 연직인발 재하시험기준”
2. Chattopadhyay, B. C. and Pise, P. J.(1986), "Uplift Capacity of Piles in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112. No.9, pp.888~904