

근입비와 인발속도가 콘크리트 향타말뚝의 인발부착계수에 미치는 영향

Effect of Embedment Ratio and Loading Rate on Uplift Adhesion Factor of Concrete Driven Pile

신은철* · 김종인* · 박정준*

Eun-Chul Shin · Jong-In Kim · Jeong-Jun Park

Abstract

Pile foundations are utilized when soil is so weak that shallow foundations are not suitable or point load is concentrated in small area. Such soil can be formed by the land reclamation works which have extensively been executed along the coastal line of southern and western parts of the Korean Peninsula. The working load at pile is sometimes subjected to not only compression load but also lateral load and uplift forces. But in most of the practice design, uplift capacity of pile foundation is not considered and estimation of uplift capacity is presumed on the compression skin friction. This study was carried out to determine that the effect of embedment ratio and loading rate on uplift adhesion factor of concrete pile driven in clay. Based on the test results, the critical embedment ratio is about 9. Adhesion factor is constant under the critical embedment ratio, and decreasing over the critical embedment ratio. Also, adhesion factor is increased with the loading rate is increased.

Keywords : Uplift Capacity(상향인발저항력), Embedment Ratio(근입비), Loading Rate(인발속도), Adhesion Factor(부착계수), Concrete driven Pile(콘크리트 향타말뚝), Undrained Shear Strength(비배수전단강도)

1. 서론

국내에서는 인천국제공항, 가덕도 부산 신항만, 울촌 공단, 여수산업단지조성, 송도신도시개발을 비롯해 여러 가지 항만시설 등 매립을 통한 국가기간산업의 부지확보가 활발하게 이루어지고 있다. 이런 매립지역의 경우 양질의 매립재 확보의 어려움과 경제적인 이유로 인해 육상의 매립재보다는 연안에 퇴적된 실트나 점토를 준설하여 매립하고 있다.

준설 매립을 통해 형성된 연약지반이나 연약점토지반은 연약지반안정처리를 한다고 하더라도 안정성이 요구되는 주요 구조물 및 큰 지지력이 필요한 구조물에는 지반안정 처리로는 충분한 지지력을 발휘하지 못하고, 액상화 현상 등의 문제로 인해 말뚝기초의 사용이 불가피하다. 철도하중의 경우도 반복하중이 주를 이루고 노반자체의 하중, 차

량하중, 속도하중이 작용한다. 연약지반상에 궤도를 시공할 경우 지지력 및 침하관리를 위해 성토지지말뚝 등의 형태로 말뚝기초가 사용될 수 있다.

말뚝기초는 일반적으로 하향의 압축력, 수평력, 상향인발력에 대해 지지력을 확보할 수 있는 기초처리공법이다. 지금까지의 말뚝기초에 대한 연구를 살펴보면 하향의 압축력과 수평력에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 인발저항력에 관한 연구는 활발히 진행되지 못하고 있다.

기존 연구는 사질토지반일 경우, Meyerhof와 Adams(1968)는 한계마찰이론을 바탕으로 하고, Chattopadhyay와 Pisc(1986)는 해석적 방법으로 인발저항력 산정에 관한 공식을 제안하였다. 또한, 점토지반에 대해서는 비배수 전단강도에 대한 부착계수를 곱하여 산정하는 방법으로, Vijavergiya와 Focht(1972)가 제안한 λ 방법, α 방법, β 방법이 있다. 국내에서는 신은철 등(2001)이 점토지반에서 타입말뚝의 인발저항력과 크리프 특성에 관하여 연구하였고, 이재동(2001)은 화강풍화토 지반에서의 매입말뚝에 대한 인발저항력에 관하여 연구하였다. 본 연구에서는 현장실험을 통해 서로 다른 근입비 4가지와 인발속도 3가지로 하여 총 12

* 책임저자 : 정회원, 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수
E-mail : ecshin@incheon.ac.kr

TEL : (032)765-6551 FAX : (032)770-8460

* 인천대학교 일반대학원 토목환경시스템공학과 박사과정

본의 말뚝에 대해 근입비와 인발속도가 콘크리트 말뚝과 점토의 부착계수에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

2. 말뚝기초의 인발저항력

여러 가지 형태의 기초 중 말뚝기초는 일반적으로 상당한 깊이에 있는 지층에 상향과 하향 또는 수평방향으로 하중을 전달한다. 상향의 하중에 말뚝이 저항하는 힘을 상향인발저항력이라 하며 이는 말뚝표면과 주변에 위치한 흙의 마찰이나 부착에 의해 발휘되는 것으로 흙의 내부마찰각, 점착력, 단위중량, 아터버그한계, 자연함수비, 지하수위, 간극수압 등과 같은 물리적 특성치 및 외부조건과 상당한 관계가 있다.

포화점토지반에 근입된 말뚝의 순극한인발저항력은 Das와 Seeley(1982)에 의해 연구되었다. 이 연구에 의하면 포화 또는 거의 포화된 점토에 근입되어 있는 말뚝의 순극한인발저항력은 말뚝의 근입깊이, 말뚝의 직경, 점토의 비배수전단강도, 말뚝사이의 간격과 같은 인자의 영향을 받는다. 점토지반에서는 말뚝과 주변점토와의 접촉마찰각이 거의 존재하지 않으므로 파괴면이 말뚝과 흙의 접촉면이라는 점을 이용하면 다음과 같은 방정식을 세울 수 있다.

$$T_{un} = Lp\alpha'c_u \quad (1)$$

여기서, T_{un} 은 말뚝의 순극한인발저항력이고, L 은 말뚝의 길이이고, p 는 말뚝의 윤변, α' 은 흙과 말뚝 접촉면에서의 부착계수, c_u 는 점토의 비배수전단강도이다. Das와 Seeley(1982) 등은 실내모형실험을 통해 현장타설 콘크리트말뚝과 강관말뚝에 대해 흙과 말뚝 접촉면에서의 부착계수를 다음과 같이 비배수 점착력에 대한 함수로, 어떤 비배수 점착력 이하에서는 1차 함수로 그 이상에서는 일정한 값으로 제시하였다. Table 1에서와 같이 한계 비배수점착력은 표면이 거친 현장타설 콘크리트 말뚝이 강관말뚝에 비해 더 높음을 알 수 있다.

Table 1. Adhesion factors with pile types

말뚝의 종류	비배수 점착력의 범위	부착계수, α'
현장타설 콘크리트 말뚝	$c_u \leq 8.163 \text{ t/m}^2$	$\alpha' = 0.9 - 0.06125c_u$
	$c_u > 8.163 \text{ t/m}^2$	$\alpha' = 0.4$
강관말뚝	$c_u \leq 2.755 \text{ t/m}^2$	$\alpha' = 0.715 - 0.18718c_u$
	$c_u > 2.755 \text{ t/m}^2$	$\alpha' = 0.2$

3. 항타말뚝의 인발실험

3.1 현장시험부지의 지반특성 및 인발실험장치

지반조성은 5×10×1.5m(가로×세로×깊이)의 지반을 백호우를 이용하여 굴착한 후 인천지역의 해성점토로 채우고 고란된 점토가 원상태로 회복할 수 있도록 3개월간 방치하여 균질하고 안정된 점토지반을 조성하였다. 또한, 점토지반에 말뚝을 타입한 후 시간경과효과 등을 배제하기 위해 12개월 동안 안정화 시킨 후에 말뚝의 인발시험을 실시하였다.

말뚝은 직경 10cm로 콘크리트로 제작하였으며 가운데에 이형철근은 삽입하여 인발 시험시 편리하게 하였다. 말뚝의 인발실험을 실시하면서 지반의 전단강도는 배인전단시험과 휴대용 정적 콘관입시험을 병행하였다.

Fig. 1은 시험에 사용된 말뚝의 지반심도에 대한 설치위치와 길이 및 현장시험 부지의 비배수전단강도를 도시한 것이며, 그 결과 지표면에서 약 40cm까지는 비배수전단강도가 감소하다가 40cm이후에는 조금씩 증가하는 경향을 보였다. 상부 40cm까지의 비배수전단강도의 평균값은 0.325 kgf/cm²로 나타났고, 40cm이하의 하부에서의 평균값은 0.33kgf/cm²로 나타나 평균값은 서로 비슷한 값을 보였다.

표면에서 40cm를 전후하여 비배수전단강도가 감소하다가 증가한 이유는 지표면에서의 수분의 자연증발로 인해 점토가 소성화된 것으로 판단된다.

또한 지반조성에 사용된 해성점토의 물리적 특성은 Table 2와 같다. 자연함수비는 26.69~28.55%로 액성한계와 유사한 값을 가지고 있으며, 통일분류법으로 실트질 점토(CL)로 나타났다.

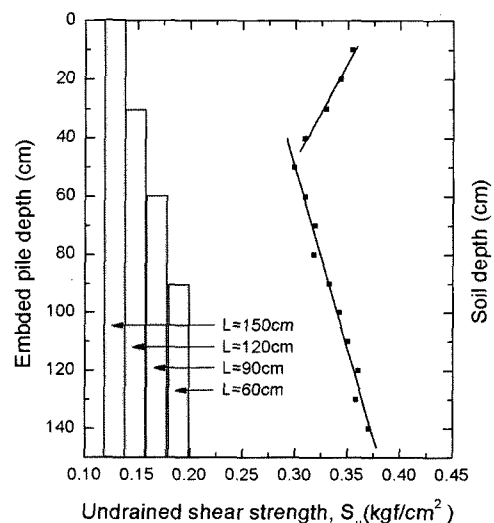


Fig. 1. Undrained shear strength with soil depth

Fig. 2는 인발시험장치의 모식도를 나타낸 것이다. 윈치어는 모터에 의해 구동되며 스위치를 통해 속도를 조절할 수 있게 하였다. 시험방법은 윈치어의 속도를 조절한 후 시험 대상 말뚝에 설치하고 인발실험을 수행하였다. 인발하중은 말뚝의 선단과 윈치어 사이에 설치된 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 인발변위는 윈치에 샤프트 상부에 설치된 다이얼 게이지를 이용하여 직접 측정하였다. 리액션 플레이트는 면적이 넓은 것으로 사용하였으며 시험이 끝난 말뚝의 두부와 지표면에 설치하였으며 예비시험을 통해 플레이트에서 발생하는 무시할 수 있을 정도의 인을 확인하였다.

3.2 실험결과 및 분석

(1) 근입비에 의한 실험결과

말뚝의 직경에 대한 길이의 비를 근입비라 한다.

Table 2. Property of marine clay

자연함수비, ω_n	26.69 ~ 28.55%
비중, G_s	2.68
최대건조단위중량, $\gamma_{d(max)}$	1.79 tf/m ³
최적함수비, ω_{opt}	17.0%
액성한계, LL	26.38%
소성한계, PL	15.4%
소성지수, II	10.9%
통일분류법	CL

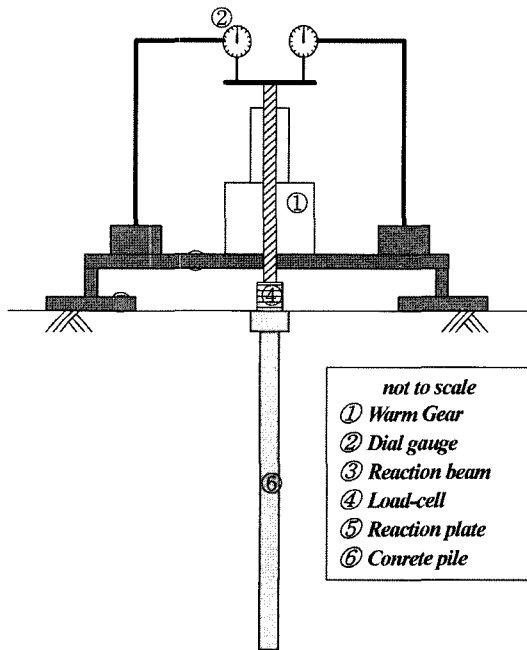
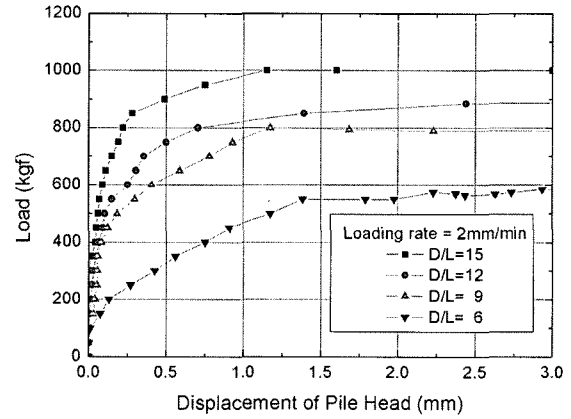


Fig. 2. Schematic diagram of test device

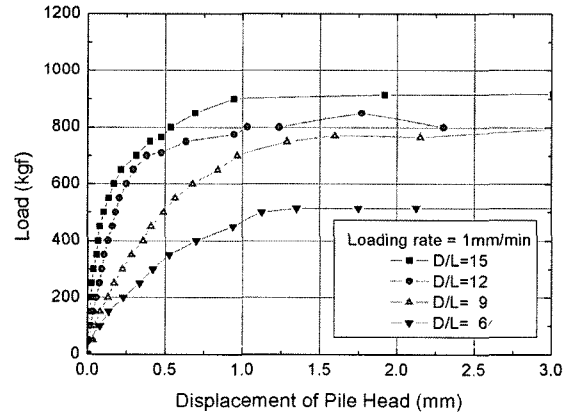
$$\eta = L / D \quad (2)$$

여기서, η 는 근입비이고, L 은 말뚝의 길이, D 는 말뚝의 직경이다.

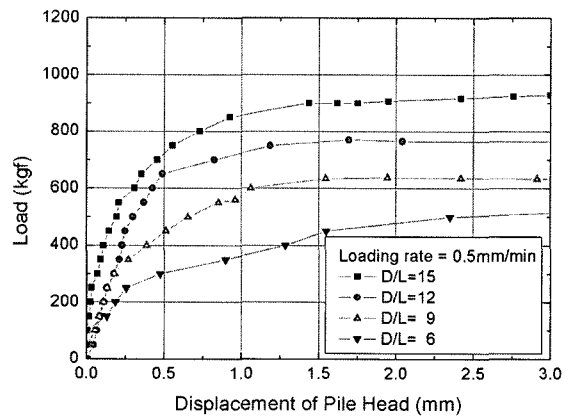
근입비에 따라 인발저항력을 산정하기 위해 근입비를 6, 9, 12, 15로 4가지를 사용하여 실험하였다. 그 결과는 Fig. 3



(a) Loading rate = 2mm/min

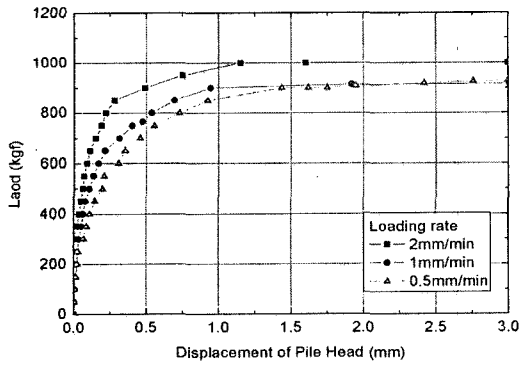


(b) Loading rate = 1mm/min

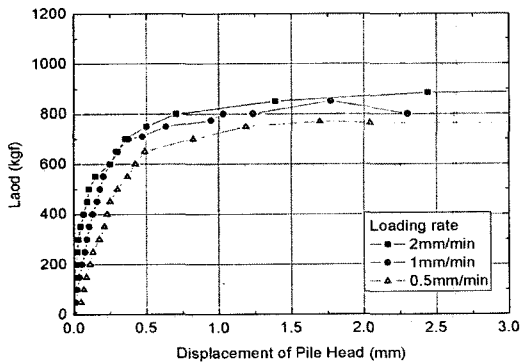


(c) Loading rate = 0.5mm/min

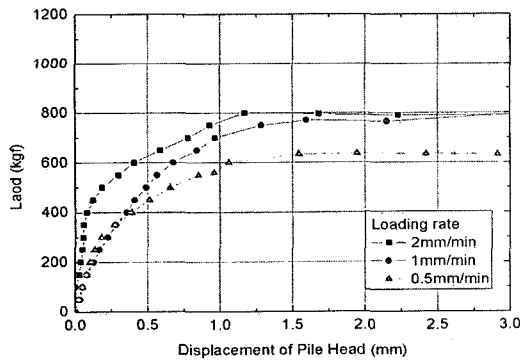
Fig. 3. Uplift capacity of piles for embedment ratio



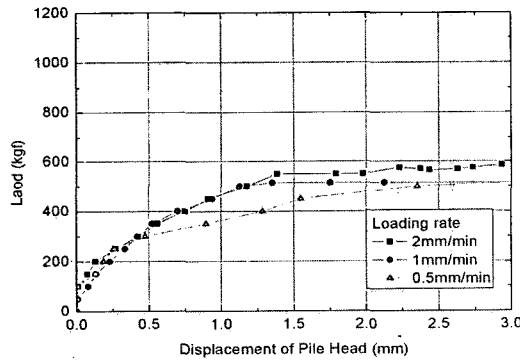
(a) D/L = 15



(b) D/L = 12



(c) D/L = 9



(d) D/L = 6

Fig. 4. Uplift capacity of piles with loading rate

과 같이 L/D이 클수록 인발저항력이 큼을 알 수 있었다.

극한인발저항력이 발휘될 때의 말뚝머리 변위는 모두 1.5mm 내외로 나타나 극한인발력이 발휘될 때의 인발변위를 말뚝직경에 대한 비로 나타내기는 무리가 있었으며, Whitaker and Cook(1966)이 점토지반에서 극한인발저항력이 발휘되기 위한 최대변위는 5mm 이내라는 것과 일치하는 것으로 나타났다.

(2) 인발속도에 의한 실험결과

말뚝의 인발속도는 지반내에서의 간극수압을 증가시키고, 말뚝표면에서의 구속압을 감소시켜 말뚝과 지반의 부착력을 감소시킨다. 이러한 set-up 효과를 배제하기 위하여 말뚝 타입후 약 12개월이 경과한 후 시험을 실시하였다. 항타말뚝의 인발속도가 인발저항력에 미치는 영향을 평가하기 위해 인발속도를 2mm/min, 1mm/min, 0.5mm/min의 3가지로 변화를 주었다. 시험 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 인발속도가 말뚝기초의 인발저항력에 미치는 영향으로는 인발속도가 빠를수록 인발저항력은 크게 나타났다.

(3) 실험결과 분석

Table 3은 서로 다른 근입비에서 인발속도에 따른 인발저항력과 부착계수의 실험결과를 나타낸 것이다.

부착계수는 인발저항력을 비배수전단강도와 말뚝의 주변적으로 나누어 구하였으며, 근입비에 따른 부착계수는 말뚝의 인발속도와는 관계없이 근입비가 클수록 작아지는 것으로 나타났고, 임계근입비 이하에서는 일정하게 되는 경향이

Table 3. Adhesion factor for test condition

근입비, λ	평균 비배수 전단강도, S_u (kgf/cm ²)	인발속도 (mm/min.)	극한 인발력 (kgf)	단위인발 저항마찰력 (kgf/cm ²)	부착 계수, α
6	0.356	2	554.3	0.826	0.826
		1	515.4	0.768	0.781
		0.5	440.9	0.657	0.657
9	0.344	2	798.7	0.822	0.822
		1	759.7	0.781	0.768
		0.5	632.3	0.650	0.650
12	0.338	2	851.7	0.668	0.668
		1	823.3	0.645	0.645
		0.5	763.3	0.598	0.598
15	0.341	2	1000	0.623	0.623
		1	908.3	0.566	0.566
		0.5	853.7	0.532	0.532

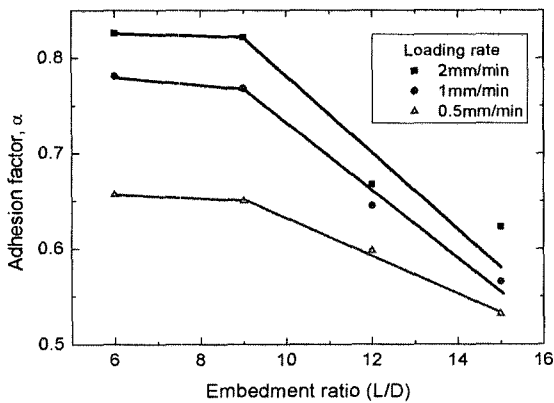


Fig. 5. Adhesion factor with embedment ratio

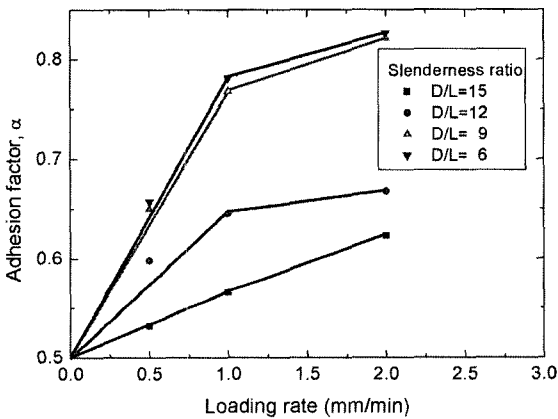


Fig. 6. Adhesion factor with loading rate

있다. Fig. 5에서 말뚝의 근입비가 증가하여도 부착계수가 변하지 않는 임계근입비, L/D_c 은 9 정도로 나타났다. 이는 말뚝의 주면마찰력이 임계 근입비 이상에서는 비배수전단 강도와 유효응력에 선형적인 관계가 있지 않음을 의미한다. 따라서 β 방법(Burland, 1973)과 λ 방법(Vijayvergiya and Focht, 1972)보다는 α 방법(Tomlinson, 1971)이 보다 말뚝의 인발저항거동에 근접한다고 할 수 있다. 인발속도에 따른 부착계수는 임계근입비 이하에서는 인발속도가 같을 때 비슷한 값으로 나타나고 임계근입비 이상에서는 인발속도가 클수록 부착계수도 커짐을 알 수 있었다(Fig. 6). 이상의 결과로 말뚝기초의 정확한 인발부착계수를 산정하기 위해서는 임계근입비와 인발속도를 고려해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 점토지반에서 근입비와 인발속도가 콘크

리트 말뚝의 인발부착계수에 미치는 영향을 파악하기 위해 현장모형시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험에서 임계근입비는 9로 나타났으며, 임계근입비 이하에서는 부착계수가 일정하고, 임계근입비 이상에서는 부착계수가 근입비가 증가할수록 작아지는 경향을 나타내었다.
- (2) 인발속도에 따른 부착계수는 임계근입비 이하에서는 인발속도가 같을 때 비슷한 값으로 나타나고 임계근입비 이상에서는 인발속도가 클수록 부착계수도 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 이상의 결과로 말뚝기초의 인발저항력 산정시 부착계수는 근입비와 말뚝의 인발속도에 따라 영향을 받으며 정확한 부착계수의 산정을 위해서는 근입비와 인발속도에 대한 고려가 필요하다.

참고 문헌

1. 신은철, 김중인, 박정준, 이학주, (2001), "점토지반에 타입된 콘크리트 말뚝의 인발저항 및 크리프 거동", 한국지반공학회 학술 발표회논문집, pp.371-378.
2. 이재동 (2001), "현장모형시험을 통한 화강풍화토 지반에서의 매입말뚝의 인발저항력" 충북대학교 박사학위논문
3. Burland, J.B. (1973) "Shaft friction of Piles in Clay-A Simple Fundamental Approach", Ground Engineering, Vol.6, No.3, pp.30-42.
4. 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.
5. Das, B.M., and Seeley, G.R. (1982), "Uplift Capacity of Pipe Piles in Saturated Clay", Soils and Foundations, The Japanese Society and Foundation Division, ASCE Vol.89, No.SM3, pp.63-94.
6. Meyerhof G.G. and Adams, J.I. (1968), "The Ultimate Uplift Capacity of Foundation", Canadian Geotechnical. Journal., Vol.5, No.4, pp.225-244.
7. Tomlinson, M.J.(1971), "Some Effects of Pile Driving on Skin Friction", Proceedings of Conference on Behaviour of Piles, ICE, London, pp.107-144.
8. Vijayvergiya, V.A. and Focht Jr., J.A. (1972), "A New Way to Predict Capacity of Piles in Clay", Proceedings, 4th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2, pp.856-874.
9. Whitaker T. and Cooke R.W., (1966), "Large Board Piles" Proceedings of the Symposium organized by the Institution of Civil Engineers and the Reinforced Concrete Association at the Institution of Civil Engineers, London, February, pp.6-49