

정규압밀 점토 지반에서 매입말뚝의 수평거동에 관한 모형 실험 연구

Model Testing on the Behavior of Laterally Loaded Pile in NC Clay Soils

김 병 탁*¹

Kim, Byung - Tak

이 상 웅*²

Lee, Sang - Woong

김 영 수*³

Kim, Young - Su

Abstract

The purpose of the present paper is to estimate the effects of constraint condition of pile head, ground condition(dry unit weight, γ_d) and embedded pile lengths on the behavior of single pile which is embedded in normally consolidated clay. Experiment functions can be quantified to these effects obtained from the results of model tests. The ground of model tests is normally consolidated(NC) clay under three kinds of effective vertical stress.

The results of the model tests using the steel pile of two different embedded pile length and of free-head and fixed-head show that the lateral load-deflection relationship is to be elasto-plastic behavior below $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.84$ and that the reduction of lateral load of beyond maximum lateral load(Q_{max}) at each model test is significantly time-dependent. In this study, it is shown that the relationship of yield lateral load and maximum bending moment of yield state obtained from each relationship of $\log Q - \log y/D$ and $\log M_{max} - \log y/D$ seems to be more linear. The lateral load-displacement relationship can be fitted to exponential function of time by model test results.

The effect of ground conditions on the ultimate and yield lateral load is fitted to exponential function including the ratio of dry unit weight to maximum dry unit weight. When test by results are compared with those from Broms and Budhu et al., the predicted results are over-estimated about 27-87%. In effectivity of constraint condition of pile head on the lateral load-deflection response, the $Q_{fixed}/Q_{free} - y/D$ relationship is highly non-linear and fitted to parabolic function.

*1 정희원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*3 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

요 지

본 논문은 정규압밀된 점성토 지반에서 강관 매입 말뚝의 수평 거동에 영향을 미치는 여러 인자들 중에서 말뚝의 근입길이, 지반조건(건조단위 중량 γ_d), 말뚝 두부의 구속조건의 영향에 관하여 모형실험을 수행하였으며, 이러한 영향을 정량화 할 수 있는 경험식을 그 결과들로부터 얻었다. 모형실험에 사용한 지반은 3종류의 정규압밀 점토이다.

2종류의 말뚝 근입길이와 말뚝 두부의 고정·자유조건의 모형실험결과들에 의하여 수평하중-변위 관계는 $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.84$ 이하에서 완전 탄소성체의 거동형상을 보일 것으로 나타났으며, 각 실험에서 최대 수평하중(Q_{max}) 이후의 수평하중 감소는 상당한 시간 의존성을 보였다. 본 연구에서는 수평하중-변위관계($\log Q - \log y/D$)와 최대 휨 모멘트-변위관계($\log M_{max} - \log y/D$)에서 각각 구한 항복 수평하중(Q_y)과 항복 최대 휨 모멘트(M_y)가 직선적인 관계로 밝혀졌다. Relaxation에 의한 수평하중은 모형실험 결과들로부터 시간을 변수로 한 지수 함수식으로 회귀분석 하였다.

수평 극한하중과 항복하중에 대한 지반조건의 영향은 γ_d/γ_{dmax} 의 변수로 한 지수함수식으로 모델화 하였으며, Broms와 Budhu et al.에 의한 결과와의 비교에서 예측결과가 26-78%정도 과대평가 되었다. 수평하중-변위 관계에 대한 말뚝 두부의 고정조건 영향에서 $Q_{max}/Q_{free} - y/D$ 의 관계는 상당히 비선형적으로 나타났으며, y/D 를 변수로 한 지수함수식으로 모델화하였다.

Keywords : Model test, Normally consolidated(NC), Relaxation, Ultimate lateral load

1. 서 론

지하층을 가지는 고층 건축 구조물 등에서는 지하층 주변지반의 수동저항과 마찰저항에 의해 수평하중의 대부분이 부담되는 것으로 가정하여 말뚝기초에 작용하는 수평력은 거의 무시되고 있다. 그러나, 지진, 풍하중, 파랑, 수위차, 수평토압 등의 하중을 받는 해양 구조물, 항만시설, 교량등의 토목구조물은 말뚝기초의 설계시 수평하중의 고려가 필수적이다.

특히, 점성토층이 30-50m 깊이까지 분포하고 있는 포항지역은 고층 건축구조물과 대규모 토목 구조물을 건설할 경우 외부하중을 충분히 지지 지반까지 전달시키기 위하여 말뚝의 시공이 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 포항지역을 비롯한 우리나라 해안의 점성토 지반에서 말뚝 기초의 수평거동과 지지력에 영향을 미치는 인자들에 대한 명확한 이해와 정확한 거동예측 연구가 경제적인 설계와 상부 구조물의 안전을 위하여 요구되어지고 있다.

수평방향 하중을 받는 말뚝을 해석하는데 있어서 기존의 해석방법으로는 Broms(1960)에 의하여 말뚝기초의 극한 수평저항의 설계법이 제안되었고, 그에 의하면 점성토지반의 수평 최대 지반반력이 비배수 점착력의 9배와 같다는 가정에 근거하여 거동을 예측하고 있다.

Budhu와 Davies(1988)는 점성토 지반에서 수평하중을 받는 말뚝의 거동예측에 경제요소 해석법을 적용하였으며, 말뚝과 지반의 항복을 고려하는 간편한 해석방법을 제안하였다. Matlock(1970)는 연약점토 지반에서 Reese & Welch(1975)는 지하수 위의 과압밀 점토에서 그리고 Reese et al.(1975)는 지하수 아래의 과압밀 점토지반에서 정적하중과 반복하중에 의한 수평거동 연구를 수행하였다. Mayne et al.(1995)는 말뚝두부가 자유조건이며, 정적하중과 반복하중을 받는 콘크리트 drilled shaft의 수평거동을 정규압밀 점토(comell clay) 지반에 대하여 실험연구를 수행하였다.

Duncan et al.(1994)는 단일말뚝이나 drilled shaft 거동해석에 p-y 해석보다 간편한 Characteristic Load Method(CLM)방법을 제안하였다. 그에 의하면, 이 방법은 "사질토 또는 점성토 지반에 그리고 말뚝두부가 고정 또는 자유조건 모두에 적용 가능하며 P-y 해석 결과와 잘 일치하였다"고 발표하였다.

본 연구에서는 포항지역의 이암 풍화토를 이용하여 말뚝의 수평거동에 미치는 말뚝의 근입 길이, 지반의 건조단위중량, 말뚝두부의 구속조건 등의 영향들을 모형실험으로서 파악하고, 이러한 영향들을 정량화하여 말뚝기초 설계에 도움을 주고자 한다.

임의 수평변위에서의 수평하중과 항복하중, 극한하중, 그리고 최대 휨모멘트에 대한 각 영향인자들에 의한 영향을 고찰하였다. 그리고 모형실험에서 지반의 응력 감소현상(relaxation)을 각 실험조건들에 대하여 관찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결과들은 Broms이론(1960)과 Budhu & Davies(1988)에 의하여 제안된 해석방법을 이용한 거동예측 결과와 비교하였다.

2. 모형실험

본 연구에서 수행한 모형실험은 현장상태의 1/33.4배로 축소하여 수행하였다. 모형실험의 한계점인 내적 크기효과(internal scale effect)로 인하여 수평거동에 영향을 줄 수 있으나, 본 실험에서는 사용한 유효경($D_{10}=0.009\text{mm}$)에 대한 말뚝직경의 비가 Peterson(1988)이 제안한 내적 크기효과를 무시할 수 있는 50보다 훨씬 크기 때문에 내적 크기효과를 무시할 수 있다.

2.1 실험장치

본 실험에서 모형지반의 성형을 위하여 사용한 모형토조의 크기는 $40\text{cm} \times 27.5\text{cm} \times 80\text{cm}$ 이며, 앞면은 말뚝의 거동 관찰을 용이하게 하

기 위하여 2cm두께의 투명 아크릴이고 나머지 면은 5mm두께의 스테인레스강으로 제작되었다. 그리고 지반의 성형시압밀시간의 단축을 위하여 토조의 압밀하중 재하방향과 재하방향의 직각방향에 배수시설을 설치하여 양면배수 압밀을 실시하였다.(Fig.2)

수평하중의 재하장치는 변위제어가 가능한 전기모터를 사용하였으며, 수평하중의 증가로 인하여 발생하는 말뚝의 변위는 1/100mm의 정밀도를 갖는 반도체 레이저를 이용하여 측정하였다. 그리고, 수평하중의 측정은 0.1g의 정밀도를 갖는 하중계를 이용하였다.

말뚝의 변형을 측정하기 위하여 말뚝의 7개 지점에 5%의 변형까지 측정할 수 있는 변형게이지를 설치하였으며, 게이지와 물의 접촉을 막기 위하여 게이지 표면을 방수처리 하였다(Fig.2)

2.2. 실험조건

모형지반 성형시 시료는 포항지역에 널리 분포하고 있는 이암 풍화토(weathered mudstone)를 사용하였으며, #40체를 통과한 시료의 비중(G_s)은 2.59, 유효경은 0.009mm, 액성한계(w_L)는 48.2%, 소성지수(PI)는 23.7%, 최대 건조단위중량(γ_{dmax})은 1.08g/cm^3 으로 나타났다.

사용한 말뚝의 재료는 스테인레스 강이며, 탄성계수는 $2.14 \times 10^6\text{kg/cm}^2$ 이다. 말뚝의 직경 및 두께는 각각 1.2cm, 0.25mm이다. 휨강성(EI)은 $3.41 \times 10^{-3}\text{ton} \times \text{m}^2$ 이다. 그리고, 말뚝의 근입길이는 21cm, 36cm로 2가지를 사용하였다.

#40체를 통과한 이암 풍화토를 중류수와 같이 장기간 방치하여 교반한 현탁액(slurry)으로 준비한 후, 모형토조 안에 넣어서 소요 건조단위중량(γ_d)의 지반 성형때까지 3종류($\sigma'_v = 2, 4, 5.67\text{t/m}^2$)의 압밀하중(σ'_v)에 의하여 양면배수 압밀조건으로 정규압밀시켜 모형지반을 3종류($\gamma_d = 0.950; \omega = 65.23\%, \gamma_d = 0.973; \omega$

=63.24%, $\gamma_s=1.032\text{g/cm}^3$; $\omega=58.64\%$.)로 성형하였다. 압밀된 지반의 함수비를 깊이에 따라 나타낸 것은 Fig.1과 같으며, 건조단위중량은 모형토조내의 깊이별 단위중량의 평균값을 이용하였다.

말뚝의 실험조건에서 선단은 모두 자유조건이며 두부는 2종류(free, fixed-head)로 각각 수행하였다. 본 연구의 모형지반조건과 모형말뚝의 조건 그리고 모형실험 결과들을 요약하면 Table 1과 같다.

2.3 실험방법

실험에서 제작한 모형토조내에 말뚝선단은 자유조건으로 말뚝을 수직으로 유지시켜 설치한 후 준비한 현탁액을 채운다. 이때 짧은 말뚝의 사용시 압밀시간 단축을 위한 지반의 깊이조절은 모형토조의 아랫부분을 상대밀도 95%이상의 모래층을 두어 조절하였다.

지반의 소요 건조단위중량을 위한 지반 압밀시 압밀하중의 증가비($\Delta\sigma'_v/\sigma'_v$)는 1로 하였으며, 각 단계별 $e-\log t$ 곡선을 그려서 완전히 2차 변곡이 나타난 후에 다음 압밀 단계로 압밀하중을 증가하였다. 각 단계별 압밀하중에서

의 압밀 침하곡선과 압밀계수(C_v)는 Fig.1에 나타났다. 본 실험에서의 지반의 성형시 평균 압밀 소요시간은 $\sigma'_v=2.0\text{t/m}^2$ 때 14일, $\sigma'_v=4.0\text{t/m}^2$ 때 20일, $\sigma'_v=5.67\text{t/m}^2$ 때 30일이 걸렸다.

본 연구에서는 말뚝의 시공상태를 지반 천공후 매입말뚝(embedded pile)의 상태로 모형 실험하기 위하여, 소요 압밀시간까지 압밀하는 동안에 수평거동에 대한 말뚝과 지반의 접촉력 증가로 인한 영향을 방지하기 위하여 말뚝의 표면에 그리스를 미리 발라두어 압밀하였다. 그리고 수평하중을 받는 매입말뚝과 지반 사이에 발생하는 마찰력에 의한 수평방향 지지력에 대한 영향은 없는 것으로 가정한다. 최종압밀 하중이 가해진 후에 관입되어 있는 말뚝두부에 변위계 반사판과 하중계 등의 각종 계측기를 모형토조내에 설치하였다.(Fig.3)

그리고, 정규압밀된 시료의 압밀응력 해방 후 장기간에 걸친 지지력의 이완을 최대한 줄이기 위하여 압밀하중이 제거된 후 최단시간에 실험을 수행하였으며, 각 실험에서의 최대 수평변위 발생 후 수평하중의 지속시간에 따른 지반의 이완에 의한 지지력의 감소현상을 관찰 하였다.

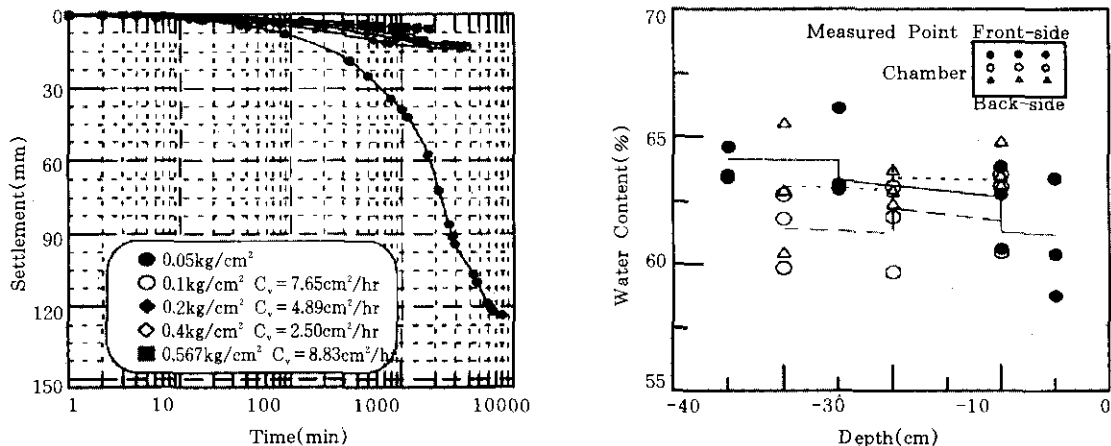


Fig.1 e-logt curves throughout the model tests and change of water content with depth

Table 1. Summary of the pile condition, ground conditions, and model tests results

Test code	σ_v (kg/cm ²)	Condition of pile head	L (cm)	γ_a (g/cm ³)	γ_a/γ_{dmax}	Q_u (kg)	Q_v (kg)	M^*y (kg * cm)	a^*	b^*	Time for residual lateral load (min)
KL01	0.2	Free	21.0	0.950	0.875	1.25	1.50	9.1	-	-	-
KL02	0.4	Free	21.0	0.973	0.897	2.01	3.00	2.9-	2.93	-0.041	20
KL03	0.4	Free	36.0	0.973	0.897	-	3.40	30.8	4.83	-0.016	20
KL04	0.4	Fixed	36.0	0.973	0.897	-	4.30	28.5	6.18	-0.024	37
KL05	0.4	Fixed	21.0	0.973	0.897	2.05	3.10	-	2.38	-0.049	40
KL06	0.567	Fixed	36.0	1.032	0.951	-	6.05	37.4	9.37	-0.025	40
KL07	0.567	Fixed	21.0	1.032	0.951	3.09	5.99	22.5	5.38	-0.036	25
KL08	0.567	Free	36.0	1.032	0.951	-	4.60	30.5	3.95	-0.011	33
KL09	0.567	Free	21.0	1.032	0.951	4.30	7.48	31.5	5.42	-0.019	36

* a, b and M.B.M are independent coefficient of Eq. 5 and maximum bending moment, respectively.

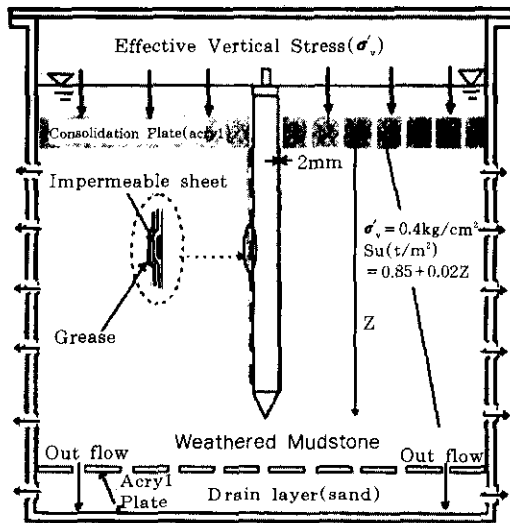


Fig. 2 Preparation of ground clay

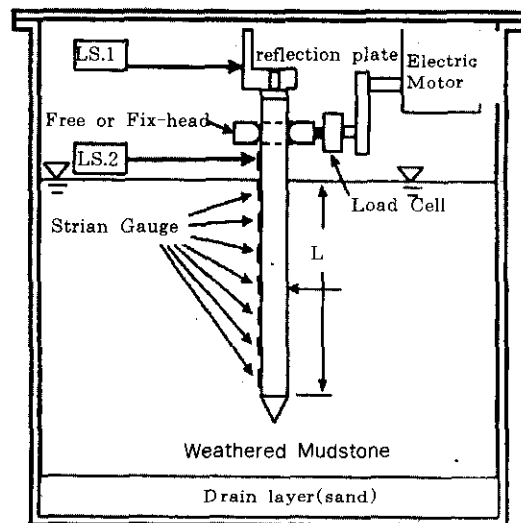


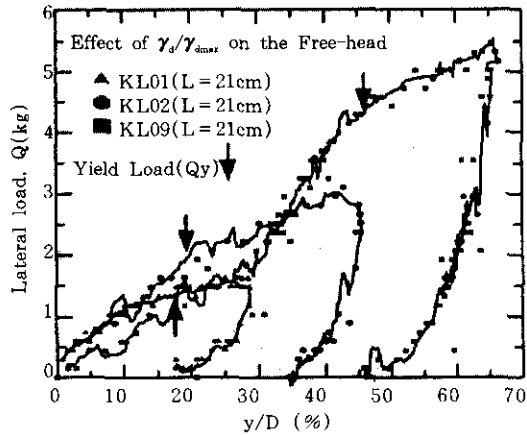
Fig. 3 Schematic of the Test Setup

3. 모형실험 결과분석

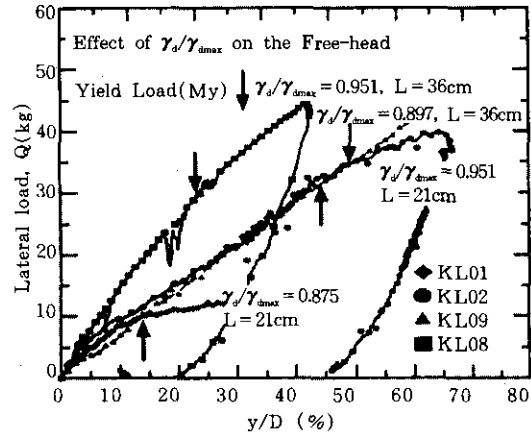
본 연구에서는 동일한 재하속도에 따른 수평거동 특성을 고찰 하였으며, 재하속도의 영향은 다음 연구에서 고찰할 계획이다. 수평거동은 각 실험조건별로 y/D 가 10, 20, 30% 때

의 수평하중과 최대 휨모멘트 및 발생위치 그리고 극한하중(Q_u)과 항복하중(Q_v)의 변화에 대하여 고찰되었다.

그 결과, 수평하중-변위관계는 다른 연구결과들(Jamioliowski & Garassino, 1977; Manoliu et al., 1985; Mayne & Kulhawy,



(a) Q-y/D relationship



(b) M_{max} -y/D relationship

Fig.4 Behavior of single pile under model tests

1991)에 의하여 제안된 쌍곡선(hyperbolic) 함수식보다 2차 곡선(2nd polynomial)에 근접하여 나타났다. 사질토 지반에 대하여 모형실험한 김영수의 3인(1977)의 결과에서 Q-y/D 관계가 2차 곡선으로 식(1)과 같이 분석되었다. 그러나, p-y곡선 함수식은 쌍곡선 함수식으로 여러학자가 제안한 것과 같은 것으로 나타났다(김영수의 1인, 1988).

$$Q = K_1 y/D + c(y/D)^2 \quad (1)$$

여기서, K_1 는 초기강성이며 c 는 계수이다.

Fig. 4는 모형실험의 결과들중 말뚝두부가 자유조건인 수평변위와 최대 휨모멘트 및 수평하중 관계를 나타낸 것이다. 그림에서의 항복하중과 항복 최대 휨모멘트(M_y)는 $\log Q - \log y/D$ 와 $\log M_{max} - \log y/D$ 곡선으로 부터 결정하였다.

$\gamma_d/\gamma_{dmax} = 0.875$ 의 경우, y/D 가 0.25 정도에서 극한하중 1.5kg이 나타나며 하중제하시의 소성 변위가 0.21cm($y/D = 0.175$)로 최대 수평변위의 약 54%정도이다. $\gamma_d/\gamma_{dmax} = 0.897$, $L = 36$ cm인 경우와 $\gamma_d/\gamma_{dmax} = 0.951$, $L = 21$ cm인 경우의 최대 휨모멘트는 $y/D = 0.40$ 까지 항복이 일어

나지 않으며, 강성이 큰 $\gamma_d/\gamma_{dmax} = 0.951$, $L = 21$ cm인 경우가 먼저 항복하였다. 그리고 발생위치도 말뚝 직경의 8.33으로 거의 동일하게 나타났다.

지반조건에의 영향

본 연구에서의 극한하중과 항복하중 그리고 $y/D = 10, 20, 30\%$ 의 수평하중에 대한 지반조건, 즉 최대 건조단위중량에 대한 모형지반의 건조단위중량비(γ_d/γ_{dmax})의 영향을 Fig.5와 같이 고찰하였다. 그리고, 수평 극한, 항복하중은 각각 실험결과를 회귀분석한 결과 식(2)와 같이 포물선식($R^2 = 0.98$ 이상)으로 얻어졌으며 최대 지반반력이 비배수 점착력과 같다는 가정에 근거한 Broms(1964)이론과 경계요소 해석에 의한 Budhu et al.(1988)의 결과를 비교하면 Fig.5-(a)와 같다.

$$Q_u \text{ or } Q_y = C_1(\gamma_d/\gamma_{dmax})^{c_2} \quad (2)$$

여기서, c_1 과 c_2 는 독립상수들이다.

Fig.5(a)에서와 같이, 극한 하중에 대한 예측결과들은 26% (Budhu et al., 1988)에서 87%(Broms, 1964)정도까지 과대평가 되었다.

Broms(1964)이론은 최대 지반반력이 비배수 점착력(C_u)의 9배와 같다는 가정과 근입된 말뚝의 지반반력 분포가 깊이에 따라 직선적으로 증가한다고 가정하였다. 이는 실제 말뚝의 지반반력 분포가 깊이에 따라 곡선적인 증가를 보이는 것으로 알려져 있는 것(김영수의 2인, 1997; 김영수의 3인, 1997; Mayne, et al., 1991)과는 차이를 보이고 있어서, 직선적인 지반반력 분포가 곡선적인 분포보다 말뚝의 깊은 지점에서 더 큰 지반반력을 갖는다. 이로 인하여 동일 지반에서의 극한하중이 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

압밀하중이 $2.0t/m^2$ 에서 $4.0t/m^2$ 으로 2배 증가함에 따라 전조단위중량은 2.4% 증가하며, 항복하중은 0.6배 증가하였다. 그리고 회귀곡선에 의하면, $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.84$ 에서 극한하중과 항복하중이 같아지는 것으로 나타나 $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.84$ 이하의 지반에서는 수평하중-변위관계에서 항복과 동시에 파괴에 이르는 완전 탄소성체의 거동형상을 보일것으로 판단된다.

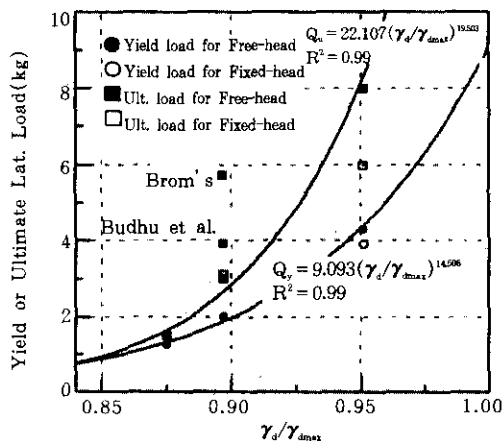
Fig.5(b)에서와 같이 말뚝두부가 자유조건인 경우 수평하중($y/D = 20\%$ 때)은 γ_d/γ_{dmax} 가

0.875에서 0.897로 증가함에 따라 29% 증가하였으며 γ_d/γ_{dmax} 가 0.897에서 0.951로 증가하는 경우 24% 증가하였다. 김영수의 3인(1997)에 의하면, 상대밀도 증가에 따른 수평하중의 증가($y/D = 10\%$ 때)는 중간정도의 상대밀도 이하($D_r \leq 60\%$)에서 보다 이상($D_r > 60\%$)에서 더 크게 나타났다. 이와 같이 지반의 강성이 증가함에 따라 임의 수평변위에서의 수평하중 증가는 사실로 지반과 점성토 지반이 다른 양상으로 나타나는 것을 알 수 있다.

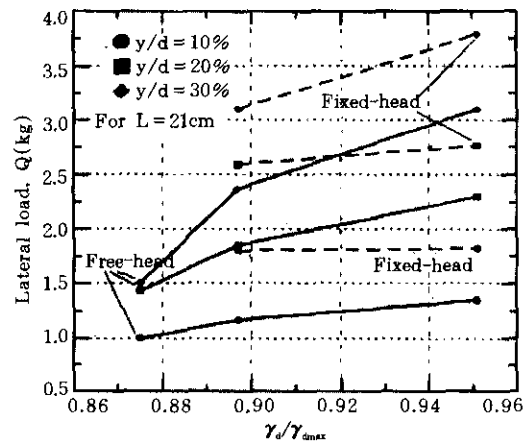
말뚝 근입길이에 대한 최대 휨모멘트의 발생깊이 비(z/L)는 지반의 강성이 증가할수록 0.33에서 0.57로 말뚝의 선단으로 이동하고 있다.

말뚝두부조건의 영향

대부분의 이론 연구에서 말뚝두부의 구속이 말뚝의 거동에 많은 영향을 주고 있는 것으로 알려져 있으나, 이를 정량화할 수 있는 결과는 국내에서 거의 없다고 할 수 있다(김영수의 3인, 1997). 이에 본 연구에서는 점성토 지반에서의 수평하중-변위관계, 항복하중-항복 최대



(a) Ultimate and yield lateral load(for $L/D = 17.5$)



(b) Lateral load at $y/D = 10, 20, 30\%$

Fig.5 Effect of γ_d/γ_{dmax} on the ultimate and yield lateral load and lateral load at $y/D = 10, 20, 30\%$

휨모멘트 관계 그리고 수평변위의 증가에 의한 수평하중비(Q_{fixed}/Q_{free})에 대한 말뚝 두부조건에 영향을 고찰하였다(Fig. 6, 7, 8).

말뚝 두부조건에 영향을 근입길이 21($\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.951$), 36cm($\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.897, 0.951$)의 지반에 대하여 수평하중을 재하(loading)와 제하(unloading)를 3회 반복해서 가하며 실험을 실시하였다.

Fig.6(a), (b)와 같이 말뚝두부의 고정조건이 자유조건보다 $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.951$ 에 대하여 수평하중($y/D=10\%$)이 1.8배 증가하였다. 그리고 하중제하 후 재하에 의한 동일하중에 대하여 수평변위의 변화가 고정조건이 자유조건보다 큰 증가가 나타났다.

Fig.7은 각 실험에서 구한 항복하중-항복최대 휨모멘트 관계를 각 말뚝 두부조건에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 항복하중에 대한 항복 최대 휨모멘트의 비는 직선식으로 회귀분석($R^2=0.97$) 되었다. 분석한 결과, 자유조건에 대한 고정조건보다 약 1.1배 크게 나타났다.

Fig.8는 말뚝 두부의 고정으로 인한 수평하중의 증가를 수평변위에 따라 나타낸 것이며, 회귀분석($R^2=0.87-0.90$) 되었다. 그림에서처럼 말뚝 두부의 고정으로 인한 수평하중의 증가비는 수평변위가 증가할수록 급격히 감소하는 양상으로 나타났으며, 지반의 건조단위중량이 증가할수록 그리고 말뚝 근입길이가 길어질수록 수평하중비(Q_{fixed}/Q_{free})가 1.3 이상으로 나타났다.

특히, $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.951$, $L=36$ cm인 경우 수평변위의 변화에 따른 하중증가비는 크게 변화되지 않았으며, 평균 Q_{fixed}/Q_{free} 는 1.76으로 나타났다. Budhu et al.(1988)에 의하면, 항복하중에서의 말뚝 두부의 고정에 의한 수평하중의 증가비는 다음과 같이 제안하였다.

$$Q_{fixed \text{ at yield}}/Q_{free \text{ at yield}} = 1.6\beta \quad (3)$$

여기서, $\beta = \exp(-2 f^{0.4} n^{-1/4})$, $f=e/D$, $n=\sigma_c/cD$, e 는 수평하중의 작용점과 지표면과의 거

리, D 는 말뚝의 직경, σ_c 는 말뚝 재료의 항복응력, c 는 비배수 전단강도의 깊이에 대한 증가비이다.

말뚝두부의 고정에 의한 수평하중의 증가비에 대한 예측결과(Budhu, et al.)는 $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.897$ 인 경우, 1.76(항복시)으로 나타나 1.27의 실험결과보다 38% 과대평가 되었다. 이는 점성토 지반에서 하중 재하속도가 증가함에 따라 전단강도는 증가하는데, Budhu, et al.의 경계요소 해석에서는 재하속도에 대한 해석변수를 포함하고 있지 않기 때문이다.

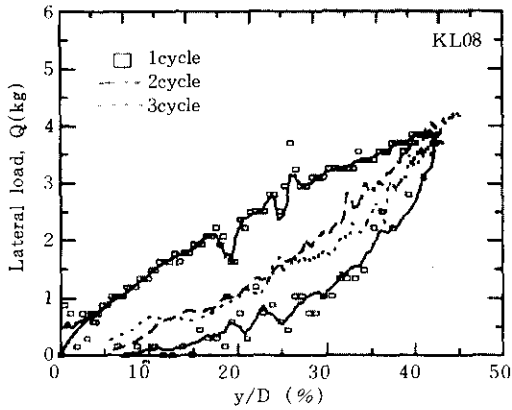
말뚝의 해석에서 중요한 부분은 지반과 말뚝의 상호 작용에 의한 지반반력(K_h)의 산정이며, 이는 흙의 전단강도 시험에서 얻어지는 값(K_h)들을 말뚝 수평거동의 예측에 적용하기 위하여는 감소계수가 필요하다.(김영수 외 3인, 1998). 따라서, 수치해석시 말뚝의 상호작용 관계를 정확히 적용시키는 것이 중요하나, Budhu, et al.(1988)에 의한 경계요소해석에서는 지반과 지반의 상호작용 관계를 해석에 적용하여 실험결과보다 과대평가 되었다고 판단된다.

이와같이, 수평변위의 증가에 대하여 말뚝 두부조건에 영향을 감소하고 있지만, 지반의 건조 단위중량이 클수록 그리고 말뚝 근입길이가 길수록 지반내 반력의 합과 주면 마찰력의 증가로 인하여 적은 변위에서 다소 감소한 후 증가하는 것으로 나타났다.

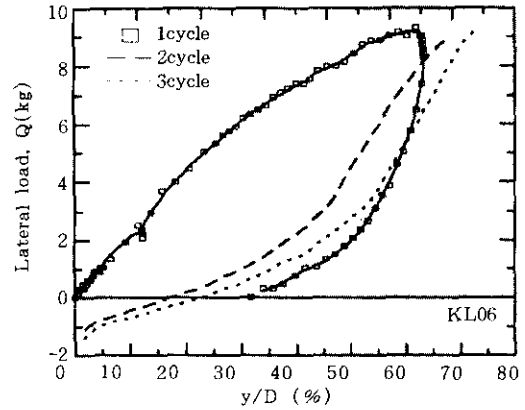
말뚝조건에 의한 영향

동일 말뚝강성과 지반의 건조단위중량에서 말뚝의 근입길이에 따라 휨성 및 강성말뚝으로 구분된다. 본 연구에서는 $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.897, 0.951$ 인 지반의 하중-변위관계에서의 초기 기울기(Q/y)와 임의 수평변위($y/D=10, 20, 30, 40\%$)의 수평하중에 대하여 말뚝 근입길이에 영향을 고찰하였다.

Fig.9(a)는 말뚝 근입길이의 증가에 따른 말뚝의 전길이에 가해지는 지반반력의 합이 증가하는 영향을 보여주는 것으로, $y/D=40\%$ 일때



(a) Pile with free-heads



(b) Pile with fixed-heads

Fig.6 Effect of pile head constraint conditions on the lateral behavior($\gamma_s/\gamma_{dmax} = 0.951$, $L/D = 30$)

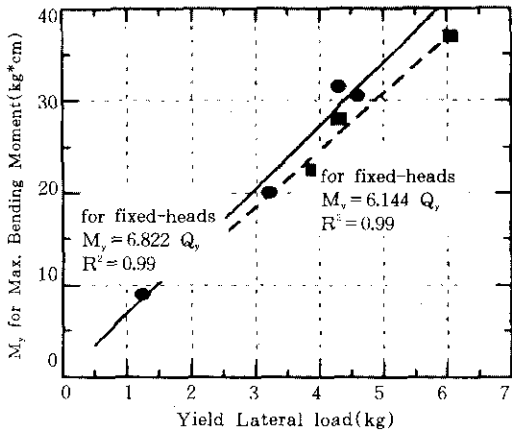


Fig.7 Q_y - M_y relationship

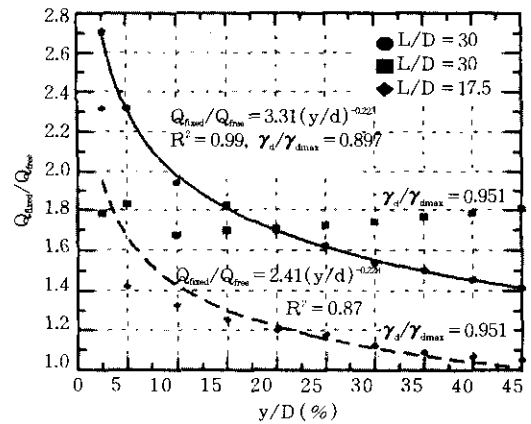


Fig.8 Change of Q_{fixed}/Q_{free}

L/D가 17.5에서 30으로 증가함에 따른 수평 지지력의 증가비는 말뚝두부가 자유조건일때 1.18배 (free-head), 고정조건일때 1.7배 (fixed-head)로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Fig.9(b)는 하중-변위관계의 초기 기울기에 대한 근입길이의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 $\gamma_s/\gamma_{dmax} = 0.897$, 말뚝두부가 자유조건인 경우가 근입길이의 영향을 가장 적게 받고 있으며 말뚝두부가 고정조건인 경우에는 지반의 건

조단위중량에 관계없이 L/D가 1.7배 증가에 의하여 초기 기울기, $(Q/y)_{ini}$ 는 약 1.4배 증가하였다.

이상과 같이 점성토 지반의 건조단위중량이 증가할수록 그리고 말뚝두부가 자유조건인 경우보다 고정조건인 경우가 말뚝의 수평거동에 대하여 근입길이의 영향이 약 8-50%정도 큰 것으로 나타났다.

잔류 수평하중(Q_{res})

본 연구에서 실시한 모형실험은 변위제어로 수평하중을 가하였다. 따라서, 임의 변위 발생 후 장시간 변위가 유지될 경우 응력은 점성토 지반의 압축변형으로 인하여 서서히 감소하게 될 것이다. 이러한 현상을 응력연화(relaxation) 현상이라 한다.

이에 본 연구에서는 각 실험조건의 모형실

험들에서 최대 수평변위 후 장시간 변위를 유지하며 수평지지력의 변화를 관찰하였다. 지속 시간에 따른 수평하중(Q_p)의 변화는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_p = Q_{max} - [Q_{max} - Q(t)] \quad (4)$$

여기서, Q_{max} 는 최대 수평변위때의 수평하중이며, $Q(t)$ 는 relaxation 수평하중이다.

Fig.11는 최대 수평변위(y_{max})후의 수평지지력의 변화를 하중 반복횟수와 시간에 따라 나타낸 것이며 실험결과들을 이용하여 회귀분석한 결과 다음과 같이 표현되는 지수(exponential) 함수식을 얻었다.

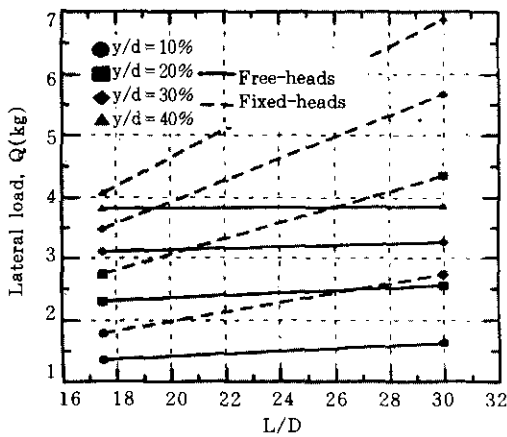
$$Q(t) = a t^b \quad (5)$$

여기서, a 와 b 는 각 실험에서 얻어지는 독립상수들이며, t 는 지속시간이다.

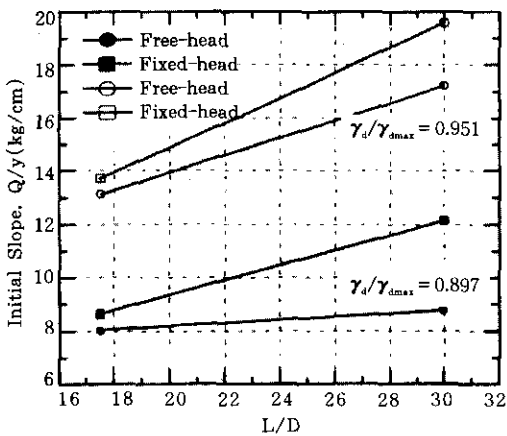
Fig.10(a)는 실험 KL06($L/D = 30$) 경우의 하중 반복횟수에 따른 수평하중의 변화를 나타낸 것이며, 그림에서 시간이 지속됨에 따라 잔류 수평하중(Q_{res})은 8.12kg($Q_{max} = 9.16$ kg: 1cycle), 8.1kg($Q_{max} = 9.02$ kg: 2cycle), 그리고 8.6kg($Q_{max} = 9.36$ kg: 3cycle)로 각각 수렴하고 있다. 최대 수평변위 이후의 수평하중 감소비, $((Q_{max} - Q_{res})/Q_{max})$, 는 0.07(3cycle) - 0.12(1cycle)의 범위로 나타났다.

Fig.10(b)는 실험 KL07, 09 경우 ($L/D = 17.5$)의 수평하중의 변화를 나타낸 것이며, 그림에서 최대 수평하중에 대한 잔류 수평하중의 비 (Q_{res}/Q_{max})는 말뚝두부 고정조건인 경우 0.89 (3cycle; $Q_{max} = 3.7$ kg) - 0.76(1cycle; $Q_{max} = 4.9$ kg)의 범위로 나타났으며, 자유조건인 경우 0.89(1cycle; $Q_{max} = 4.05$ kg)로 나타났다.

일정 변위에서 지속시간에 따른 응력감소 현상은 말뚝두부가 자유조건보다 고정조건일 때 그리고 근입길이 비(L/D)가 작을수록 크게 나타났으며, 하중반복에 따른 영향은 지반 구조의 재배열에 의한 압축성 감소의 영향으로 최대 수평하중에 대한 잔류 수평하중비가 3회 반복때가 1회 반복때 보다 4-17%의 범위로 서

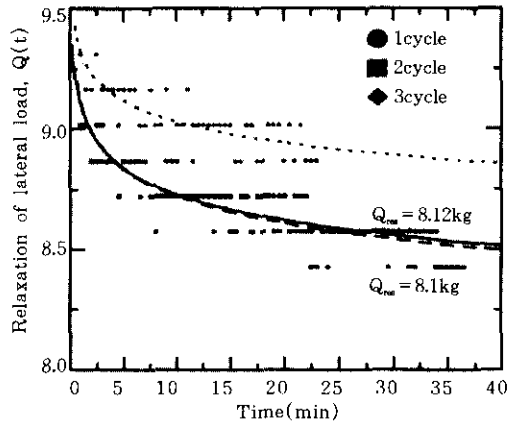


(a) for Lateral load at $y/D = 10, 20, 30, 40\%$
($\gamma_d/\gamma_{dmax} = 0.951$)

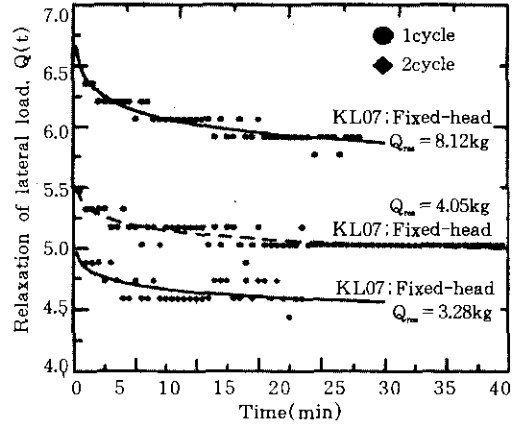


(b) for initial slope of $Q-y/D$ relationship

Fig.9 Effect of pile length on lateral load and initial slope



(a) for KL06
(fixed-head, $L/D = 30$, $\gamma_s/\gamma_{dmax} = 0.951$)



(b) for the effect of pile head condition
($L/D = 30$, $\gamma_s/\gamma_{dmax} = 0.951$)

Fig.10 Change of lateral load after Q_{max} with time

서히 증가하여 나타났다.

Fig.11은 각 수평하중 반복횟수에서의 $Q_{res}/Q_{max} - y_{max}/D$ 관계를 나타낸 것이다. 그림에서, 본 모형실험의 결과는 하중 반복횟수가 3cycle 이상에서는 최대 수평하중에 대한 잔류 수평하중의 비가 최소 0.9 이상이며, 말뚝두부가 고정인 경우가 하중 반복횟수의 증가에 대

하여 Q_{res}/Q_{max} 값이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 초기 수평하중에 대한 최소 Q_{res}/Q_{max} 값은 최대 수평변위에 관계없이 0.76(fixed-head, $L/D = 17.5$, $\gamma_s/\gamma_{dmax} = 0.951$)으로 나타났다.

4. 결론

정규압밀된 점성토 지반에서 강관말뚝의 수평거동에 영향을 미치는 인자들과 시간에 따른 잔류 수평하중의 변화에 대한 모형실험의 연구 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 김영수 외 3인(1997)의 연구결과와 같이 점성토지반에서도 수평거동들은 변위와 초기 기울기($K_i = Q/y$)를 변수로 하는 2차 곡선으로 분석되었다.
2. 극한, 항복 수평하중은 최대 건조단위 중량에 대한 건조단위중량 비(γ_s/γ_{dmax})의 지수 함수식으로 모델화 하였으며, 말뚝 두부가 구속됨에 따라 그리고 근입길이가 길어짐에 따라 증가하였다.
3. $\gamma_s/\gamma_{dmax} = 0.84$ 이하의 점성토 지반에서는 수평하중-변위관계가 항복과 동시에 말뚝

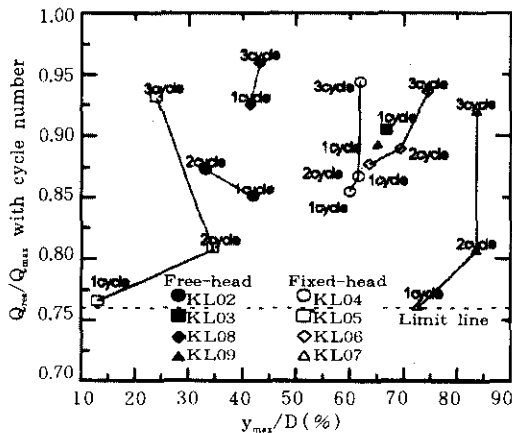


Fig.11 Change of the ratio of residual lateral load to maximum lateral load with number of cyclic loading

- 의 파괴에 이르는 완전 탄성체의 거동을 보일 것으로 판단된다.
- 본 실험에서의 결과에 의하면, 항복 수평 하중-항복 최대 휨모멘트의 관계는 직선적으로 나타났으며, 그 기울기는 자유조건이 고정조건보다 약 10% 크게 나타났다.
 - 말뚝두부의 고정에 의한 최소수평하중 비 (Q_{fixed}/Q_{free})는 $\gamma_d/\gamma_{dmax}=0.951$ 이고 $L/D=17.5$ 인 경우 1.3으로 나타났다.
 - Relaxation에 의한 수평하중의 변화는 지수함수 식으로 분석되었다. 최대 수평하중에 대한 잔류 수평하중 비(Q_{res}/Q_{max})는 3회 하중반복 이상에서는 최소 0.9 이상으로 나타났으며, 1회 반복에서의 최소 Q_{res}/Q_{max} 은 0.76으로 나타났다.
 - 극한하중과 말뚝두부의 고정에 의한 수평하중 증가비에 대한 예측결과와 실험결과의 비교에서, 예측결과들은 각각 26-87% 정도 그리고 38%가 되었다.

참 고 문 헌

- 김영수의 3인(1996), 수평하중에 의한 강관말뚝에 관한 연구, 95035, 포항제철
- 김영수의 2인(1996), "원심모형실험에 의한 강관말뚝의 수평거동 연구", 한국지반공학회, 제12권, 제6호, pp.5-20
- 김영수의 2인(1997), "수정 Vlasov 모델에 의한 휨성 강관말뚝의 수평거동 연구", 대한토목학회, 제17권, 제Ⅲ-3호, pp.249-260
- 김영수의 3인(1997), "강관말뚝의 수평거동에 대한 모형실험 연구", 한국지반공학회, 제13권, 제5호, pp.59-74
- 김영수의 3인(1997), "이암 풍화토지반에 관한 관입된 강관말뚝의 수평거동 연구", 1997년도 대한토목학회 발표논문(Ⅲ), pp.425-428
- 김영수, 김병탁(1998), "원심모형실험에 의한 사질토지반의 p-y 곡선에 관한 연구", 대한토목학회, 게재예정.
- 김영수의 3인(1998), "Behavior and Analysis of Laterally Loaded Deep Foundations in

Nak-dong river fine Sand", 한국지반공학회, 제14권 제3호, pp.25-46

- Briaud, J.L. and Garland, E.(1985), "Loading rate method for pile response in clay." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 111(3), 319-335
- Broms, B.B.(1964b), "Lateral resistance of pile in cohesionless soils", *J. of Soil Mech. and Foun. Engrg.*, ASCE, Voi90, SM.3, pp.123-156
- Budhu, M.B. and Davies, T.G.(1988), "Analysis of laterally load piles in soft clays." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 114(1), 21-39
- Chen, Y.I. and Hsiung, Y.M(1997), "Simplified method for analyzing laterally loaded single piles in clays." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 123(11), 1018-1029
- Dunnavant, T.W. and O'Neill, M.W.(1989), "Experimental p-y model for submerged, stiff clay." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 115(1), 95-114.
- Edil, T.B. and Mochtar, I.B.(1988), "Creep response of model pile in clay." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 114(11), 1245-1260
- Jamiolkowski, M. and Garassino, A.(1977), "Soil modulus for laterally loaded piles." *Proc. 9th Int. Conf. On Soil Mech. And Found. Engrg. Specially Session 10, JSMFE, Tokyo, Japan*, 43-58
- Manoliu, I., Dimitriu, D., Radulescu, N., and Dobrescu, G.(1985), "Load-deformation characteristics of drilled piers." *Proc. 11th Int. Conf. On Soil Mech. And Found. Engrg.*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol.3, 1553-1558.
- Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H.(1991), "Load-deformation behavior of laterally loaded rigid drilled shafts in clay." *Proc. 4th Int. Conf. On Pilling and Deep Found.*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol. 1, 409-413
- Mayne, P.W. and kulhawy, F.H., and Trautmann, C.H.(1995) "Laboratory modeling of laterally-loaded drilled shafts in clay." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 121(12), 827-835

18. Peterson, R.W.(1988), " Laboratory investigation of the penetration resistance of fine cohesionless materials." *Proc. Of 1st Int. Symp. On Penetration Testing*, Orlando, 895-901
19. Poulos, H.G., Chen, L.T., and Hull, T.S.(1995), "Model tests on single piles subjected to lateral soil movement." *Soils and Foundation, JGS*, 35(4), 85-92
20. Prasad, Y.V.S.N. and Rao, S.N.(1996), "Lateral capacity of helical piles in clays." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 122(11), 938-941

(접수일자 1998. 3. 24)