

사질토 지반에서 함수비 변화에 따른 모형말뚝의 수평거동에 대한 기초적 연구

Fundamental Study on the Behavior of Laterally Loaded Model Pile with Varying Water Content in Sand

김 병 탁^{*1} Kim, Byung-Tak
김 영 수^{*2} Kim, Young-Su

Abstract

The purpose of this paper is to evaluate the effect of water contents on the lateral behavior of a single pile in saturated or moistured sands. To investigate the lateral behavior of a single pile, four different types of model sand deposits with varying water contents and four different types of piles with varying head and tip constraint conditions were used in this study.

The results of model tests for saturated or moistured sand were compared with that of dry sand. The lateral load capacity decreased about from 26% to 45% for the saturated sand and increased from 20% to 36% for the moistured sand. In case of the conditions with head fixed and tip free, compared with dry sand, the maximum bending moment for 1mm of lateral deflection increases by 48% in moistured sand with water content of 25% but decreases by 68% in saturated sand. The change of lateral deflection and maximum bending moment with maintained lateral loading can be measured in saturated and moistured sands.

요 지

본 연구에서는 지금까지 수행한 건조토 지반에 대한 말뚝의 수평거동 연구의 연속된 연구로서 지반내에 함수비가 존재하는 포화토 및 습윤토 지반에서의 수평거동에 대한 지반내 함수비의 영향성을 평가하고자 함이 목적이다. 말뚝의 수평거동을 고찰하기 위하여 각각 다른 함수비를 갖는 네 종류의 지반과 말뚝의 두부 및 선단 구속조건이 다른 네 종류의 말뚝조건으로 모형실험을 수행하였다.

본 연구에서 1회의 지하수 상승과 하강을 반복하는 모형실험결과에 의하면, 포화토와 습윤토 지반의 수평지지력은 건조토 지반에 비하여 각각 26%~45% 감소와 20%~36%정도 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝두부 고정과 선단 자유조건의 경우, 동일 수평변위 1mm에서의 최대 휨모멘트는 건조토 지반에 비하여 25%의 함수비를 갖는 습윤토 지반에서 약 48% 증가하나, 34.06%의 함수비를 갖는 포화토 지반에서는 반대로 68% 감소하였다. 이는 지하수의 존재로 인한 입자간 인력에 의한 유효응력과 겉보기강도의 증가 그리고 단위중량의 증가로 설명할 수 가 있다. 지속 수평하중에 대한 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 포화토 및 습윤토 지반에서 관찰할 수 있었다.

Keywords : Lateral deflection, Laterally loaded pile, Moistured sand, Saturated sand, Water content

*1 정희원, 한국해양연구원, Post-Doc 연구원

*2 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

수평하중을 받는 말뚝에 있어 중요한 것은 정확한 수평변위의 예측과 말뚝의 항복 휨모멘트에 대한 지반내 말뚝의 최대 휨모멘트의 구조적 안정성 확보라고 할 수 있다. 수평하중을 받는 말뚝의 수평거동은 말뚝의 휨강성(EI_p), 말뚝 직경(D), 그리고 지반반력계수(E_h)를 변수로 하는 상대강성계수(K_r)에 의하여 큰 영향을 받는 것으로 Meyerhof와 Sastry(1995)가 밝히고 있다. 또한, 지반의 물리적 성질 및 상대밀도 그리고 지하수 유무에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

최근, 말뚝기초의 수평거동과 지지력에 영향을 미치는 인자들에 대한 명확한 이해와 정확한 수평거동 예측 연구가 경제적인 설계와 상부 구조물의 안정을 위하여 필수적으로 요구되어지고 있으며 그에 따른 다양한 실험들이 수행되고 있다. 그리고, 강관말뚝을 주로 사용하는 경부고속철도, 신공항, 고속도로, 일반도로공사 등의 교량구조물에 대한 말뚝기초를 설계할 경우, 내진설계 개념이 도입·시행되면서 수평하중에 대한 말뚝기초 설계의 중요도가 점차 증가하는 추세이다. 그러나, 대부분 현장에서 시공되어지는 말뚝기초의 주변지반은 건조상태로만 존재하지 않고 지하수의 유입 및 유출에 의한 지반 포화 및 습윤상태로 장기간 존재하는 경우가 많으나, 기존의 연구는 실험상의 어려움으로 대부분이 건조토 지반에 국한되어 수행하여 온 실정이다. 따라서, 이를 고려하여 지반내의 함수비에 따른 수평거동에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다.

Ochoa 등(1989)은 단단한 점토상에 중간정도 이상의 조밀한 모래가 놓인 지반위 약 0.3m 위치에 지하수가 있는 현장지반에 관입한 강관말뚝의 균말뚝 거동에 관하여 연구하였다. 이외에도 지하수가 존재하는 지반에 대한 연구가 외국에서는 꾸준히 수행되고 있다.

이에 본 연구는 지반내 함수비에 따른 수평거동의 변화를 말뚝의 두부 및 선단 구속조건과 습윤토 및 포화토 지반의 평균함수비에 대하여 분석하고 그 특성을 규명하였다. 그리고, 습윤토 및 포화토 지반에서 수평하중 지속시간에 따른 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 각 실험조건에 대하여 검토하였다. 본 연구는 기존의 건조토 지반의 현장 적용성 한계를 극복하고 모래지반에서 함수비에 따른 저항성 변화가 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 평가하기 위한 기초적 연구로 수행하였다.

2. 모형실험

모형실험에서의 말뚝과 주변지반과의 관계는 지반 성형 이전에 말뚝을 수직상태로 유지하여 지반을 성형함으로써 주변지반과의 접촉을 100% 허용하며 본 연구에서는 매입말뚝에 대하여만 실험을 수행하였다.

2.1 지반시료

본 연구에서 사용한 모래는 낙동강유역에서 채취한 것으로서, 비중은 2.675, 균등 및 곡률계수는 각각 2.0, 1.23 그리고 최소간극비와 최대간극비는 1.19와 0.81로 나타났다. 최소간극비는 50Hz의 진동판에서 모래의 상부에 14kPa의 상재하중을 가한 상태하에 약 10분간 수평진동을 가하여 결정하였으며 최대간극비는 평균 낙하높이 25.4mm을 유지하면서 자유낙하시켜 결정하였다. 본 연구에서 사용한 낙동강 모래와 모형말뚝의 내적크기 효과(internal scale effect)는 무시할 수 있다 (Peterson, 1988; 김영수의 1인, 1998).

모형실험에 사용된 모래의 반복 사용에 의한 구성성분의 변화 가능성을 분석하기 위하여 XRF(X-Ray Refraction) 시험을 모형실험 전과 최종적으로 완료한 후의 모래에 대하여 각각 수행하였다. 그 결과, 포화 및 습윤지반의 성형 후 건조의 단계를 반복함에 따른 성분의 변화는 거의 나타나지 않았으며 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 90%이상을 차지하였다.

2.2 모형말뚝 및 토조

모형실험에서의 모형 말뚝은 스테인레스의 강관을 사용하였으며, 직경은 1.2cm, 두께는 0.25mm, 탄성계수는 $2.1 \times 10^6 kg/cm^2$, 항복 휨모멘트는 $70kg \times cm$, 휨강성은 $34,090kg \times cm^2$ 이다. 모형실험에 앞선 모형 말뚝에 대한 검증과 모형말뚝의 표면에 부착한 변형 게이지에 대한 휨 모멘트(M)와 변형률(ϵ)의 상관관계수(α , $M=EI \epsilon/y = \alpha \epsilon$) 결정은 김영수의 1인(1998, 1999a)에서 상세히 설명하였다.

모형실험에 사용된 모형토조의 크기는 길이 45cm, 폭 30cm 그리고 높이 50cm의 크기로서 4면용 25mm 두께의 투명 아크릴 판으로 제작하여 성형지반의 포화상태를 관찰할 수 있도록 하였다.

2.3 지반성형 및 실험 Setting

본 연구에서의 사질토 지반의 성형방법은 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 이용하는 공중낙하법을 사용하였다. 균질지반의 성형방법에 대한 설명은 김영수와 1인(1998)에서 상세히 설명하였다. 실험지반의 성형은 먼저 건조토로 공중낙하법에 의하여 소요 두께만큼 성형하였으며, 포화토 지반의 경우에는 건조토에 의한 지반성형 후 모형토조 양 측면에 설치한 수조에 물을 토조 높이의 1/4씩 단계적으로 채워 지반을 포화하였다. 건조토 지반내로 유입되는 유입수로 인한 건조토 지반의 급격한 수축과 지반의 교란을 방지하기 위하여 모형토조 양 측면에 필터 페이퍼를 부착하여 포화하였다. 45cm 두께의 지반 포화에 걸린 시간은 평균 18시간 정도이다(김병탁, 2000).

지반 포화시 모래의 체적 수축으로 인한 말뚝과 지표면 수직 변위량의 측정을 위하여 변위계를 말뚝 상단과 지표면상에 설치하였다. 측정된 평균 수직 변위량은 말뚝의 경우 0.14mm 정도 침하하여 말뚝 근입길이의 0.06%로 아주 미세하며, 지표면의 경우도 0.15mm 정도 침하하여 성형 지반두께의 0.04%로 미세하게 나타났다. 지반내 함수비의 변화에 따른 수평거동의 변화를 고찰하기 위하여 지반을 완전 포화 후 모형토조 양 측면에 있는 배수구를 통하여 지반내의 유입수를 12, 24, 48시간의 3가지로 달리하여 습윤토 지반을 성형하고 모형실험을 수행하였다.

이때도 지반을 포화하는 경우와 마찬가지로 말뚝 상단과 지표면상에 변위계를 설치하여 배수하는 동안의 수직 변위량을 측정하였으며, 측정된 평균 변위량은 말뚝의 경우 0.05mm이고 지표면의 경우 0.13mm 정도로 미세하게 발생하였다. 본 연구에서의 성형 지반의 종류를 나타내면 그림 1과 같다.

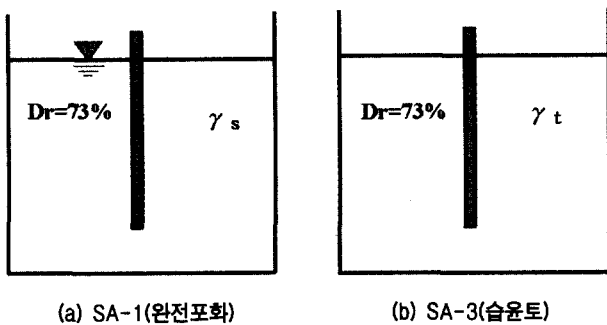


그림 1. 모형실험 지반의 종류

말뚝의 수평거동에 영향을 미치는 영역이 거의 최대 휨모멘트 발생깊이까지로 Briaud(1997)가 밝힌바 있다. 그리고, Hsiung와 Chen(1997)가 말뚝두부 자유조건에서 말뚝-지반의 상대강성과 하중조건에 의존하여 말뚝의 최대 휨모멘트가 말뚝 근입길이의 0.1 - 0.4배 깊이에서 발생하고 있음을 밝힌바가 있으며, 본 저자가 건조토 지반에 대하여 약 200회의 모형실험을 수행한 결과 최대 휨모멘트가 말뚝 근입길이의 약 0.14 - 0.58정도로 나타났다. 또한, 배수 후 깊이별 함수비를 측정된 결과, 말뚝 직경의 약 8배 이상에서의 함수비 변화가 크게 나타나지 않았다. 이들을 고려하여 본 연구에서는 말뚝두부 자유 및 고정과 선단 자유조건에 있어서 얻어진 모형실험결과에 근거하여 지반내 평균 함수비를 지표면과 말뚝 직경의 8배(말뚝 근입길이의 약 0.46배)되는 깊이의 범위에서 결정하였다. 그리고, 모형실험 전 지반의 단위중량과 평균 함수비를 각 배수시간에 따라 나타내면 표 1과 같다. 모형실험에서 지반이 포화되는 상태 및 모형 말뚝과 지반의 변화 측정을 위하여 변위계를 설치한 장면은 사진 1과 같다. 본 실험에서 지반성형한 후 수평하중은 200g/분의 속도로 재하하였다.

습윤토 지반을 성형한 후 지반의 건조 단위중량을 건조토 지반의 단위중량과 비교한 결과, 지반의 단위중량 변화가 최대 1.4%정도 발생하는 것으로 나타났다.

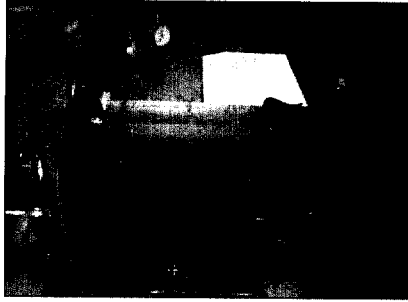
수평거동 모형실험을 수행하기 위하여 필요한 각종 장치들에 대한 제원과 연결계통(그림 2) 및 그림은 김영수와 1인(1998)에서 상세히 설명하였다. 본 모형실험에서의 지반조건 및 말뚝조건 그리고 배수조건을 요약하면 표 2와 같으며, 본 연구는 부득이하게 포화지반의 성형을 위하여 지반 상대밀도를 73%로 유지하여 실험하였다.

표 1. SA-3 조건에서의 평균함수비와 건조단위중량

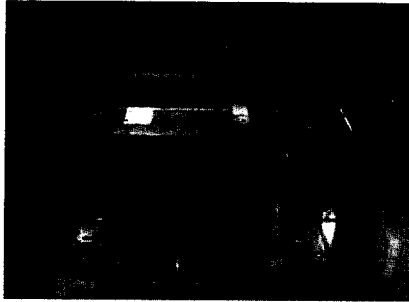
배수시간	평균 함수비 ^{*)} (%)	습윤 단위중량 (t/m ³)	건조 단위중량 (t/m ³)	오차 ^{**)} (%)
12 시간	25.0	1.615	1.420	1.4
24 시간	17.5	1.639	1.395	0.3
48 시간	15.0	1.588	1.381	1.4

^{*)} 평균함수비는 실험 후 모형토조 전체 5개 지점에서 측정하고 말뚝 직경의 8배 깊이까지에서 결정하였다.

^{**)} (습윤토 성형시 건조 단위중량 - 건조토의 단위중량) / 건조토 단위중량 × 100(%)



(a) 지반 포화과정



(b) 완전 포화장면

사진 1. 모형실험 전 모형지반의 포화과정 및 장치 설치

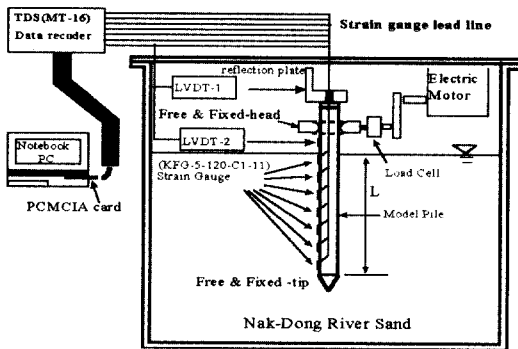


그림 2. 모형실험 장치도

표 2. 모형실험의 조건들 요약

Test	지반상태	시공방법	말뚝구속조건		배수시간(Hr)
			두부	선단	
SD-01	건조토	매입말뚝	자유	자유	0.0
SD-02				고정	
SD-03			고정	자유	
SD-04				고정	
SD-05	포화토 (SA-1)		자유	자유	
SD-06				고정	
SD-07			고정	자유	
SD-08				고정	
SD-09	습윤토 (SA-3)		자유	자유	12
SD-10					24
SD-11					48
SD-12					12
SD-13					24
SD-14					48

3. 모형실험 결과 및 분석

3.1 수평거동에 대한 지반의 포화상태 영향

단일말뚝의 수평거동은 다양한 인자들에 의하여 상당한 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다. 그리고, 대부분 현장의 지반은 건조상태로만 존재하지 않고 지반이 완전 포화되는 상태 또는 포화된 후 배수된 상태로 존재하고 있다. 이에 본 연구에서는 말뚝의 수평거동에 대한 지반의 포화상태 영향을 파악하기 위하여 지반의 조건을 완전 포화된 상태(SA-1)와 완전 포화한 후 배수된 상태(SA-3)로 달리하여 L/D=17.5인 말뚝에 대하여 모형실험을 수행하고 건조토 지반의 결과와 비교 분석하였다. 모형실험을 수행함에 있어 지반의 포화와 배수에 장시간이 소요됨에 따라 본 연구에서는 1회의 지하수 상승과 하강을 반복하는 경우에 국한하여 실험을 수행하였다. 따라서, 현장과 같이 계속된 지하수 상승과 하강을 반복한 지반에서는 본 연구결과와 다소 다른 양상을 나타낼 수 있음을 미리 밝혀두고자 한다. 따라서, 본 연구의 후속과제로서 지하수의 반복에 의한 거동 변화를 연구할 계획이며 본 모형실험은 이에 대한 기초연구로서 수행하였다.

각 말뚝의 경계조건에서 수평하중 4kg을 기준으로 건조토 지반에 대한 포화토 지반과 습윤토 지반의 수평하중 및 최대 휨모멘트 비 그리고 지속 수평 변위량을 모형실험결과로부터 요약하면 표 3과 같다. 그리고, 수평 변위는 수평하중 재하시 지표면에서의 변위를 이용하였다.

3.1.1 수평하중 - 변위 관계

(1) 말뚝구속조건의 영향

포화토와 습윤토 그리고 건조토 지반들의 수평하중 - 변위 관계 곡선을 각 말뚝 구속조건에 대하여 나타내면 그림 3과 같다. 지반이 완전히 포화된 상태에서 수평하중 - 변위 관계 곡선은 건조토의 경우보다도 상당히 완만한 곡선 형태를 나타내고 있다. 그리고, 지반이 완전 포화된 후 12시간 배수로 인하여 성형된 습윤토 지반의 곡선은 건조토의 경우보다 급한 기울기의 곡선 형태를 보이고 있다. 수평변위 2mm에서 지반 포화에 따른 수평하중의 변화는 지반내 유효응력의 급격한 감소를 가져와 수평하중 재하시 지반의 저항력을 감소시

표 3. 각 모형실험조건에서의 수평변위와 최대 휨모멘트 비 그리고 지속 수평변위량

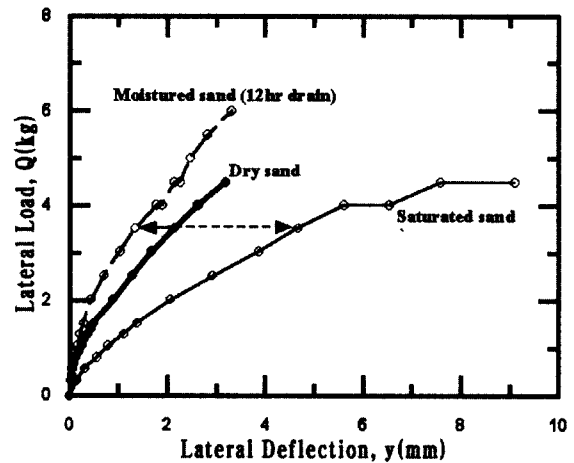
말뚝 경계 조	수평변위 비				최대 휨모멘트 비				지속 수평변위 (mm)			
	SA-1	SA-3			SA-1	SA-3			SA-1	SA-3		
		$\omega=15\%$	17.5%	25%		$\omega=15\%$	17.5%	25%		$\omega=15\%$	17.5%	25%
Free - Free	2.14	0.47	0.53	0.67	0.77	0.75	0.69	0.70	0.92	0.03	0.04	0.12
Fixed - Free	2.35	0.34	0.42	0.55	0.86	1.08	1.01	0.91	0.38	0.001	0.02	0.04
Free - Fixed	1.62	-			1.14	-			0.08	-		
Fixed - Fixed	1.99	-			1.20	-			0.17	-		

킴으로서 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 반대로 지반이 지표면까지 포화된 후 배수한 상태의 습윤토 지반에서는 물분자의 인력으로 인한 겔보기 강도증가와 단위중량의 증가로 동일 수평변위에서의 수평 저항력은 크게 발생하고 있다. 이러한 이유로 인하여 포화토 지반에서 각 말뚝 구속조건에서의 수평저항력 감소는 26% ~ 45% 범위로 나타났으며, 말뚝두부와 선단 모두 자유조건인 경우에서 가장 크게 수평저항력이 감소하였다. 그리고, 말뚝 선단이 고정조건인 경우가 가장 적은 수평저항력의 감소를 나타냈다. 포화 후 12시간 배수로 성형된 습윤토 지반에서는 말뚝두부와 선단 모두 자유조건에서 20% 그리고 말뚝두부 고정조건에서 36%의 수평저항력 증가 결과를 보였다.

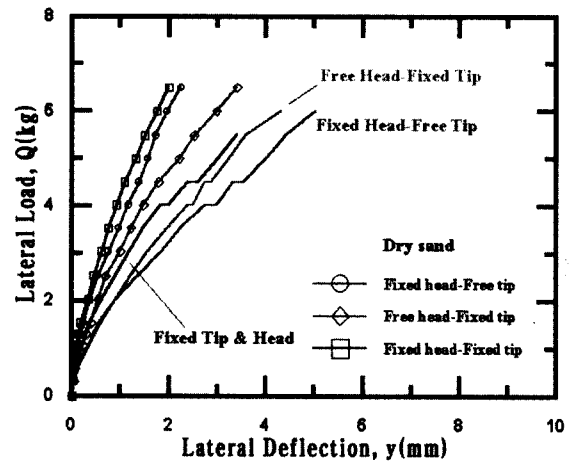
그리고 지하수가 존재하는 경우 지반내 흙 입자의 유효응력이 상당히 감소하여 저항력의 감소를 유발하는데, 이로 인한 동일 수평하중에서의 말뚝의 수평변위는 시간에 의존하여 계속적인 증가를 보이고 있다(그림 3). 4kg의 지속 수평하중에서 시간에 의한 수평변위의 증가는 건조토에서는 거의 관찰할 수 없었으나, 표 3에서와 같이 포화토 지반에서는 0.083 ~ 0.921mm로, 그리고 습윤토 지반에서는 포화토 지반에 비하여 상당히 적은 0.046 ~ 0.12mm로 나타났다.

(2) 지반내 함수비의 영향

사질토 지반에서 함수비에 따른 하중(Q) - 변위(y) 관계 곡선의 변화를 말뚝두부와 선단 자유조건 그리고 말뚝두부 고정 및 선단 자유조건에 대하여 나타내면 그림 4와 같다. 실험결과에서와 같이, 말뚝 구속조건에 관계없이 성형지반 포화 후 배수시간이 길어짐에 따라, 즉 지반내 함수비가 감소함에 따라, 4kg의 수평하중에 대한 수평변위는 지반내 함수비가 15%인 경우 약 33% ~ 45% 정도의 큰 감소변화를 보이고 있으며, 함수비가 34.06%의 경우에는, 즉 완전 포화토의 경우, 수평변위가 약 114% ~ 135% 정도의 큰 증가변화를 나타내고



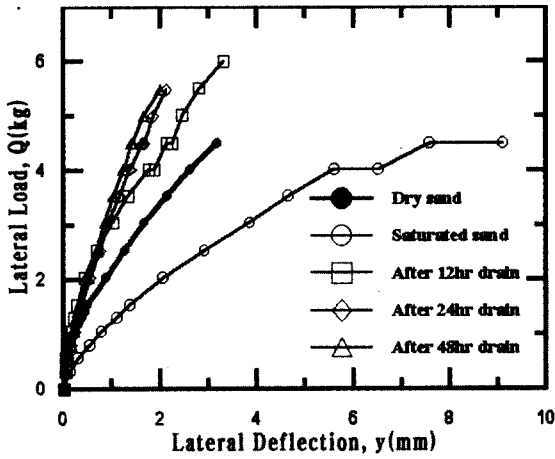
(a) 말뚝 두부 자유와 선단 자유 조건



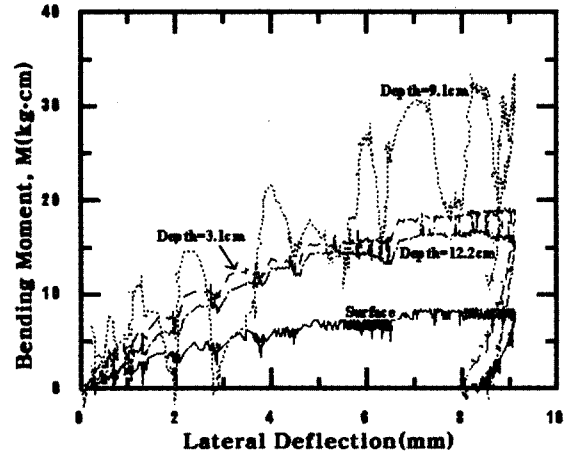
(b) 포화토지반에서 각 말뚝구속조건

그림 3. 포화토 및 습윤토 지반에서 각 말뚝구속조건에 따른 Q-y 관계

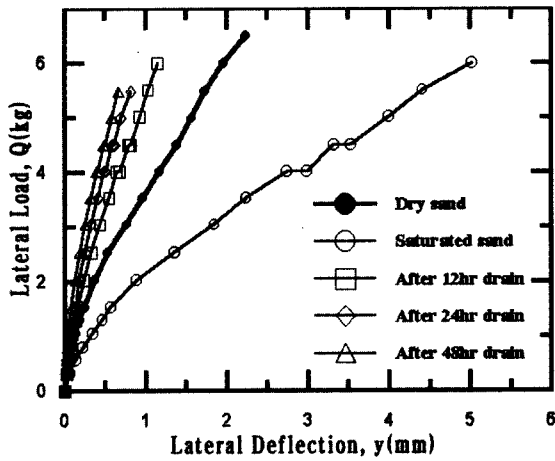
있다. 그리고, 말뚝두부 고정 및 선단 자유조건의 하중 - 변위 곡선은 건조토 지반의 경우보다 습윤토 지반에서 보다 선형적인 거동을 보여주고 있다. 이는 포화토 지반에서 배수시간이 증가함에 따라 지반내 메니스커스 반경의 감소로 인한 유효응력의 증가와 지반 자중의 증가로 인한 유효 상재하중의 증가에 따른 것으로 판단된다. 말뚝두부와 선단 자유조건에서의 하중 - 변위 곡선은 말뚝두부 고정 및 선단 자유조건의 경우와 달리 3kg의 수



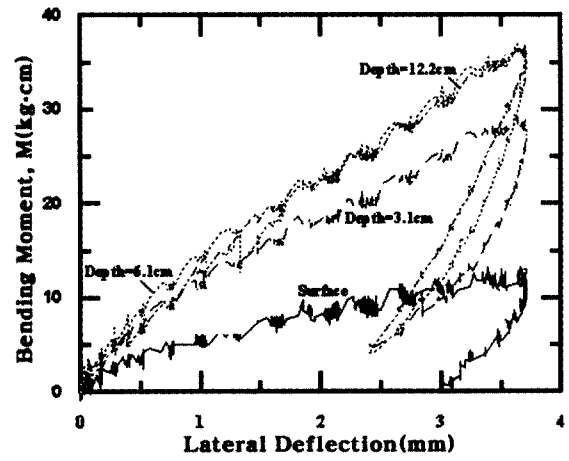
(a) 말뚝 두부 자유와 선단 자유 조건



(a) 말뚝 두부 자유와 선단 자유 조건



(b) 말뚝 두부 고정과 선단 자유 조건



(b) 말뚝 두부 자유와 선단 고정 조건

그림 4. 지반내 함수비에 따른 Q - y 관계

그림 5. 말뚝의 깊이별 M - y 관계

평하중까지는 습윤토의 함수비에 관계없이 거의 비슷한 거동을 나타내고 있으나, 3kg 이상의 하중에서는 함수비에 따른 명확한 거동 차이를 나타내고 있다. 이는 물론 말뚝 구속조건 특성으로서 말뚝두부와 선단 자유조건인 경우 지반의 저항영역이 지표면 부근에서 발생하여 상대적으로 지반 저항력이 약한 습윤토($\omega=25\%$) 지반에서 수평변위의 증가가 뚜렷이 증가하는 것으로 사료된다.

3.1.2 최대 휨모멘트 - 변위 관계

(1) 말뚝구속조건의 영향

포화토 지반에서의 휨모멘트(M) - 수평변위(y) 관계를 말뚝두부와 선단 자유조건인 경우 그리고 두부 자유와 선단 고정조건인 경우의 각 말뚝 깊이에 대하여 나타내면 그림 5와 같다. 포화토 지반에서 휨모멘트 - 수평

변위 관계 곡선은 실험전 말뚝의 방수처리로 인하여 대부분 변형 게이지에서 불규칙 측정값(noise)을 나타내지 않았으나, 말뚝두부와 선단 자유조건인 9.1cm 깊이에서는 방수처리에 문제가 있어 불규칙 측정값이 나타났다. 그림에서와 같이, 동일 수평하중의 지속에 의한 휨모멘트는 말뚝두부와 선단 자유조건인 경우 약간의 증가를 나타내고 있어 수평변위의 과도한 증가에 비하여 휨모멘트는 아주 작은 증가를 나타내어 거의 발생하지 않은 것으로 간주하여도 무방할 것이다. 이는 지반 포화에 따른 상부 지반의 유동성이 증가하고 하부 지반의 말뚝 구속성이 감소하여 수평하중의 지속에 따른 수평변위 발생시 말뚝 전체의 회전을 억제하여 주지 못하기 때문으로 판단된다. 그러나, 말뚝 선단 고정조건에서는 말뚝두부와 선단 자유조건인 경우 보다 상부 지반의 유동성이 적으며 지속 수평변위도 8%정도 발생하여 15% 정도의 최대 휨모멘트 증가를 나타내고 있다. 그리고, 수평

변위 3.5mm에서 12.2cm 깊이에서의 휨모멘트는 말뚝 선단이 구속됨에 따라 자유조건인 경우 보다 2.6배정도 크게 나타났다.

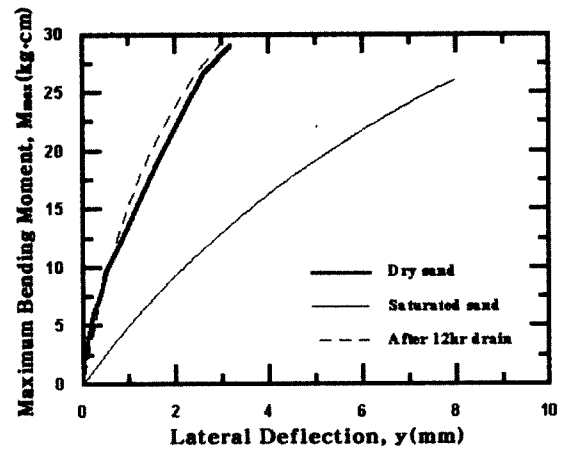
포화토 및 습윤토 그리고 건조토 지반들의 최대 휨모멘트(M_{max}) - 수평변위(y) 관계를 각 말뚝두부 및 선단 구속조건에 대하여 나타내면 그림 6과 같다. 그림 6의 관계곡선은 실험결과를 회귀 분석한 쌍곡선 함수식으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 습윤토 지반에서의 휨모멘트 - 수평변위 곡선은 포화토 지반의 관계곡선 보다 급한 기울기를 갖으며, 동일 수평변위 1mm에서 포화토 지반에 대한 습윤토 지반의 최대 휨모멘트 증가는 말뚝두부와 선단 자유조건에서 3.2배이며 말뚝두부 고정 및 선단 자유조건에서 4.2배로 크게 나타났다.

수평변위 1mm에서 건조토 지반에 대한 포화토 지반과 습윤토 지반에서의 최대 휨모멘트의 변화는 포화토의 경우 지반 수평 저항력의 감소로 56%와 68%의 감소를 각각 말뚝두부와 선단 모두 자유조건과 말뚝두부 고정 및 선단 자유조건에서 나타냈으며, 습윤토의 경우에는 말뚝두부 고정조건에서 112%로 크게 증가하는 결과를 보였다. 이는 앞서 설명한 지하수의 존재로 인하여 입자간의 상호인력이 수평저항에 상당한 영향을 주고 있기 때문이다.

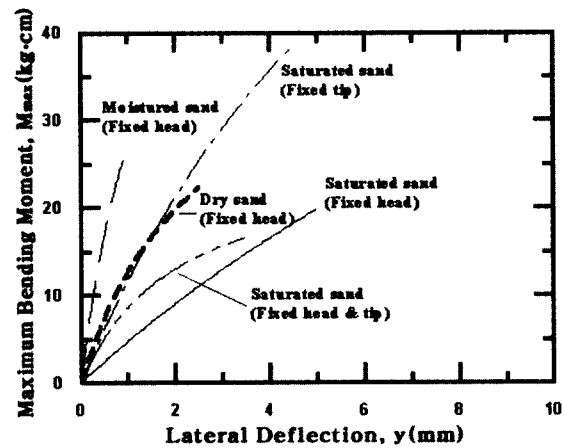
이와 같이, 건조토 지반에 1회의 지하수가 유입되어 포화되거나 지하수가 유출되어 습윤상태로 지반이 형성되는 경우에서 수평하중에 저항하는 말뚝기초에 동일 하중이 가해진다면 포화토 지반에서는 수평력에 저항하는 역할을 충분히 발휘할 수 없는 경우가 발생할 수 있으며, 휨모멘트 측면에서는 포화토 지반이 습윤토 지반보다 안전한 것으로 나타났다.

(2) 지반내 함수비의 영향

사질토 지반에서 함수비에 따른 $M_{max} - y$ 관계 곡선의 변화를 말뚝두부와 선단 자유조건 그리고 말뚝두부 고정과 선단 자유조건에 대하여 나타내면 그림 7과 같다. 그림에서 말뚝두부 고정과 선단 자유조건에 해당하는 24시간 배수한 습윤토 지반의 $M_{max} - y$ 관계 곡선은 실험에서 변형 게이지의 노이즈 발생과 말뚝 표면의 방수 처리 문제로 포함하지 않았다. 실험결과에서와 같이, 습윤토 지반의 최대 휨모멘트 증가양상은 동일 수평변위에서 말뚝두부 고정과 선단 자유조건의 경우가 크게 나타났다. 그리고, 말뚝두부와 선단 자유조건의 경우, 습



(a) 말뚝 두부 자유와 선단 자유 조건



(b) 각 말뚝 구속조건에 따른 경우

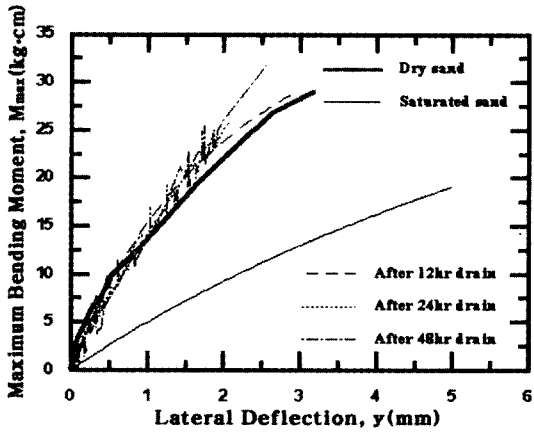
그림 6. 포화토 및 습윤토지반에서 각 말뚝구속조건에 따른 $M_{max} - y$ 관계

윤토 지반의 함수비 증가에 따른 최대 휨모멘트의 증가는 수평변위 1.5mm 이하에서 거의 발생하지 않았으나, 1.5mm 수평변위 이상에서는 뚜렷한 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

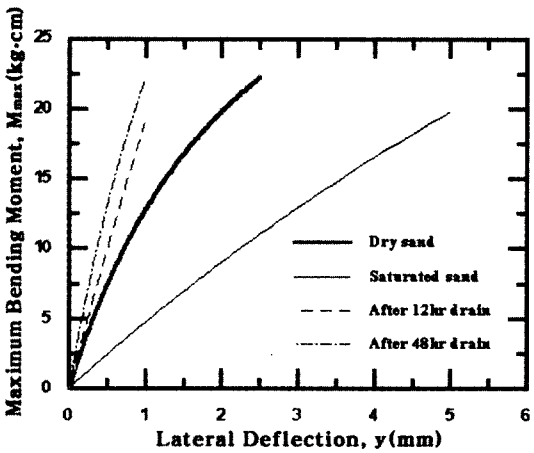
말뚝두부 고정과 선단 자유조건의 경우, 동일 수평변위 1.0mm에서 48시간 배수한 습윤토 지반($\omega=15\%$)의 최대 휨모멘트는 건조토 지반에 비하여 75%의 증가를 나타내고 있다.

3.2 함수비에 따른 수평변위 및 최대 휨모멘트 변화

포화토 및 습윤토 지반에서 수평거동의 변화는 건조토의 경우와 같이 수평변위와 최대 휨모멘트에 대하여만 검토하였으며, 건조토 지반을 기준으로 지반내 함수비의 증가에 따른 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 검토하였다. 그리고, 지반의 함수비는 습윤토에서 지반



(a) 말뚝 두부 자유와 선단 자유 조건



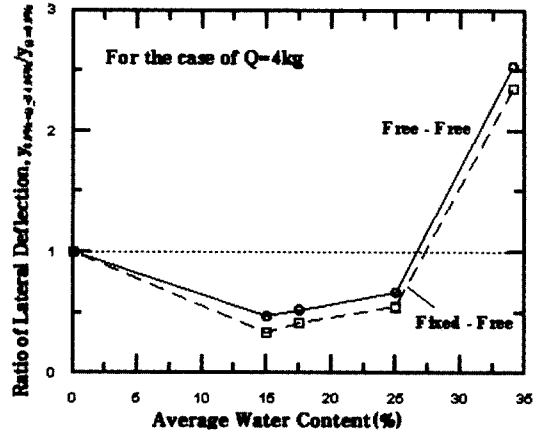
(b) 말뚝 두부 고정과 선단 자유 조건

그림 7. 지반내 함수비에 따른 $M_{max} - y$ 관계

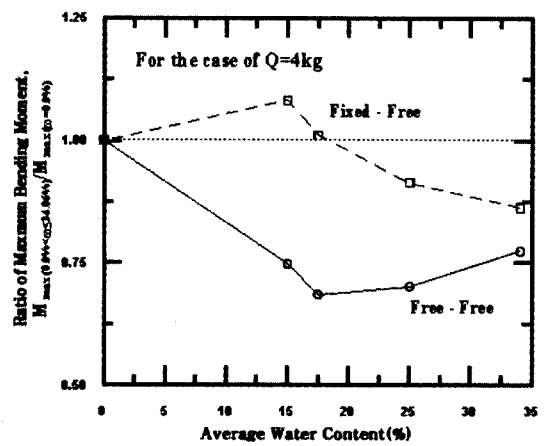
의 배수시간에 의존하여 변화하였다.

그림 8은 건조토 지반에서 지반내 평균 함수비가 증가하여 습윤토 그리고 포화토로 지반특성이 변화하는 과정에서 말뚝의 최대 휨모멘트(M_{max})와 수평변위의 변화를 수평하중 4kg의 경우에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 습윤토 및 포화토 지반의 수평변위는 건조토 지반의 수평변위로 정규화하여 나타내었다. 실험결과에 의하면, 수평변위는 함수비가 15%인 경우에서 최소의 수평변위가 발생한 후 25%의 함수비까지 수평변위가 완만하게 증가하였으며 함수비 25%와 34.06%(완전포화) 사이에서는 매우 급격하게 증가하였다. 이 결과는 말뚝두부 구속조건에 관계없이 동일하게 나타났다. 그리고, 말뚝두부와 선단 자유조건에서는 습윤토 지반의 경우($\omega < 34.06\%$) 수평변위가 최대 53% 그리고 말뚝두부 고정과 선단 자유조건에서는 최대 66%로 감소하였다.

지반내 함수비가 증가함에 따른 최대 휨모멘트 비는 동일 수평하중 하에서 말뚝두부와 선단 자유조건의 경



(a) 수평변위 비



(b) 최대 휨모멘트 비

그림 8. 지반내 함수비에 따른 수평변위와 최대 휨모멘트 비의 변화

우 감소하여 나타나며, 함수비 17.5%의 습윤토 지반에서 최소이며 건조토에 비하여 31.5% 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 말뚝두부 고정 및 선단 자유조건인 경우 함수비 15%의 습윤토 지반에서는 건조토 지반보다 8% 증가하여 나타나며, 함수비 15% 이상에서는 함수비 증가에 따라 최대 휨모멘트가 완만하게 감소하여 완전 포화된 지반의 최대 휨모멘트는 건조토 지반보다 14% 감소하여 나타났다. 이는 말뚝두부가 고정조건인 경우는 자유조건과는 달리 수평하중의 재하에 대한 지반반력 저항심도가 깊게 나타나며 간극수의 존재로 유효응력이 증가하기 때문에 함수비 15%까지는 최대 휨모멘트가 증가하나, 함수비가 15% 이상으로 증가함에 따라 유효응력이 상대적으로 감소하고 말뚝 주변에서의 토립자 흐름현상이 발생하여 최대 휨모멘트가 점차 감소하는 것으로 사료된다.

3.3 하중 지속에 따른 수평변위 및 최대 휨모멘트 변화

건조토 지반에서는 일정한 수평하중 하에서의 지속 수평변위를 거의 관찰할 수 없었으나, 지반내 함수비의 증가에 따른 지속 수평변위와 최대 휨모멘트의 발생정도를 파악하기 위하여 4kg, 4.5kg의 수평 하중단계에서 각각 지속하중 재하시간을 1.5분으로 가하여 수행하고 지속 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 관찰하였다.

그림 9는 습윤토 및 포화토 지반에서 4kg의 지속하중 실험에 의한 수평변위의 변화를 지반의 평균 함수비에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 지속 수평변위의 변화는 말뚝 구속조건에 관계없이 평균 함수비의 증가함에 따라 증가하나, 평균 함수비 25%까지는 아주 완만하게 증가하여 나타났으나, 평균 함수비 25% 이상에서는 매우 급격하게 증가하였다.

말뚝두부 고정과 선단 자유조건의 경우의 지속 수평변위량은 포화토 지반에서 수평하중에 대한 지반반력 저항영역의 증가로 인하여 말뚝두부와 선단 자유조건의 경우보다 59%의 감소를 나타내고 있다.

이와 같이, 동일 수평하중에 대한 지속 수평변위는 포화토 지반의 경우 상당히 증가하여 상부 구조물의 안전성에 심한 피해를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 이러한 지속 수평하중에 의한 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 습윤토와 포화토에서 말뚝두부와 선단 자유조건에 대하여만 고찰하였으며, 이에 대한 연구는 지금 계속 수행중에 있으며 차후 다양한 조건들에 대하여 연구 발표할 예정이다. 본 연구에서 수행한 지속하중 실험으로부터 얻어진 지속시간에 따른 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화는 그림 10과 같다. 그리고

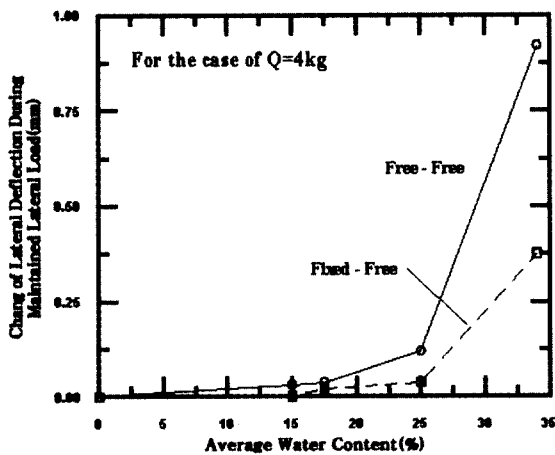


그림 9. 지반내 함수비에 따른 지속 수평변위의 변화

지속시간에 따른 수평변위(y_p)와 최대 휨모멘트($M_{\max(p)}$)의 변화는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$y_p = y_o + y(t) \quad (1)$$

$$M_{\max(p)} = M_{\max(o)} + M_{\max}(t) \quad (2)$$

여기서, y_o 와 $M_{\max(o)}$ 는 하중재하시의 수평변위와 최대 휨모멘트이고, $y(t)$ 와 $M_{\max}(t)$ 는 지속시간에 따른 수평변위와 최대 휨모멘트이다.

본 연구에서는 수평하중 지속시간(약 90초) 동안의 수평 변위와 최대 휨모멘트의 변화를 y_o 와 $M_{\max(o)}$ 로 정규화한 실험결과들에 근거하여 회귀분석한 결과 다음과 같이 표현되는 지수 함수식을 얻었다.

$$\frac{y_p}{y_o} = 1 + \frac{y(t)}{y_o} = 1 + \alpha_y t^{\beta_y} \quad (3)$$

$$\frac{M_{\max(p)}}{M_{\max(o)}} = 1 + \frac{M_{\max}(t)}{M_{\max(o)}} = 1 + \alpha_m t^{\beta_m} \quad (4)$$

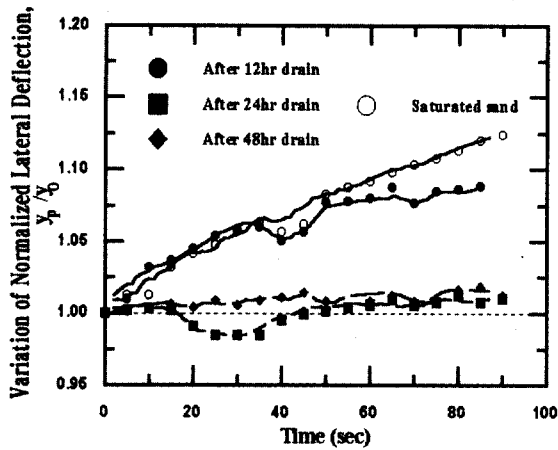
여기서, α_y , β_y 와 α_m , β_m 는 독립 상수들로서 말뚝 구속조건과 지반조건들에 따라 독립된 값을 가진다. 이들 상수를 실험결과에 근거하여 결정하면 표 4와 같다.

지속시간에 따른 수평변위의 변화를 지반조건에 따라 나타내면 그림 10-(a)와 같으며, 그림에서와 같이 포화토 지반에서 지속시간에 따른 수평변위의 증가는 거의 직선적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 배수시간의 증가에 따른 지반내 함수비의 감소로 y_p/y_o 값은 감소하여 나타나고 있다. 특히, 24시간 이상의 배수시간에서는, 즉 함수비 17.5%이하, y_p/y_o 값은 거의 증가하지 않음을 알 수 있다. 본 실험결과에 의하면, 말뚝두부와 선단 자유조건에서 지속 수평하중에 의한 수평변위는 평균 함수비 17.5%이하의 경우에서 하중재하시 변위의 약 2.5%이내로 나타났다.

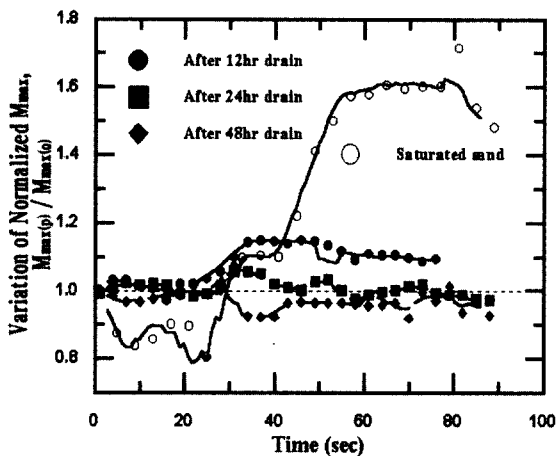
지속시간에 따른 최대 휨모멘트의 변화를 지반조건에 따라 나타내면 그림 10-(b)와 같으며, 그림에서와 같

표 5. 식(3)과 (4)의 매개변수들 요약

매개변수	지 반 조 건			
	SA-1	SA-3		
		$\omega = 15\%$	17.5%	25%
α_y	0.95	0.99	-	0.98
β_y	0.034	0.005	-	0.023
α_m	0.40	0.98	0.99	0.97
β_m	0.31	-0.001	0.005	0.031



(a) y_p/y_0 의 변화



(b) $M_{max(t)}/M_{max(0)}$ 의 변화

그림 10. 포화토 및 습윤토 지반에서 시간에 따른 y_p/y_0 와 $M_{max(t)}/M_{max(0)}$ 의 변화

이 지속 최대 휨모멘트 변화는 지속 수평변위의 변화 양상과 거의 유사하다고 할 수 있다. 그림에서 포화토 지반과 12시간 배수의 습윤토 지반의 실험결과에 과도한 노이즈 현상이 발생하였으나, 본 실험결과에 의하면 말뚝두부와 선단 자유조건에서 지속 최대 휨모멘트는 지반내 함수비 17.5%이하의 경우, 즉 24시간이상의 배수시간을 갖는 습윤토 지반, 초기 지속시간에서 하중재하시 최대 휨모멘트($M_{max(0)}$)의 약 5% 이내로 증가하지만 지속시간이 증가함에 따라 거의 $M_{max(0)}$ 에 가까워지는 것으로 나타났다.

4. 결론

포화토 및 습윤토 지반에서 함수비에 따른 말뚝의 수평거동 특성의 변화를 고찰하기 위하여 말뚝 구속조건

과 함수비를 달리한 모형실험을 수행하였으며 지속하중에 의한 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 고찰하였다. 본 연구에서 수행한 모형실험에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 모형실험동안에 지반의 포화와 배수에 의한 지반과 말뚝의 침하 및 수직변위는 각각 0.04% 그리고 0.06% 이하였으며, 습윤토 지반의 건조단위중량이 건조토 지반에 비하여 최고 1.4% 정도 차이로서 상대밀도는 포화전 상태와 약 6%의 차이를 보였다.
- (2) 본 연구에서 1회의 지하수 상승과 하강을 반복하는 실험결과에 의하면, 15%~25%의 함수비를 갖는 습윤토 지반의 수평 지지력은 건조토 지반의 경우에 비하여 약 20% ~ 36% 정도 증가하였다. 이는 포화토 지반에서 배수시간이 증가함에 따라 지반내 메니스커스 반경의 감소로 인한 유효응력의 증가와 지반자중의 증가로 인한 유효상재하중의 증가에 따른 지반 탄성계수의 증가에 의한 것으로 판단된다.
- (3) 말뚝두부 고정과 선단 자유조건인 경우, 동일 수평변위 1mm에서의 최대 휨모멘트는 건조토 지반에 비하여 25%의 함수비를 갖는 습윤토 지반에서 약 48% 증가하나, 34.06%의 함수비를 갖는 포화토 지반에서는 반대로 68% 감소하였다. 이는 지하수의 존재로 인한 입자간의 상호인력에 기인하기 때문이다.
- (4) 지속 수평하중에 대한 수평변위와 최대 휨모멘트의 변화를 포화토 및 습윤토 지반에서 관찰할 수 있었으며, 이러한 변위와 최대 휨모멘트의 변화는 재하시 변위와 최대 휨모멘트로 정규화한 결과들에 근거하여 지속시간을 변수로 하는 지수함수의 실험식을 회귀분석으로 얻었다. 말뚝두부와 선단 자유조건에서 지속 수평하중에 의한 수평변위와 최대 휨모멘트는 평균 함수비 17.5% 이하의 경우에서 각각 하중재하시 변위와 최대 휨모멘트의 약 2.5%와 5.0%로 증가하였다.

참고 문헌

1. 김영수, 김병탁(1998), "균질지반과 비균질지반에서 강관 모형 말뚝의 수평거동 특성에 관한 모형실험", 한국지반공학회지, 제 14권, 제6호, pp.153-166.
2. 김영수, 김병탁 (1999a), "사질토 지반에서 말뚝의 수평거동 연구 (초청강연)", 한국지반공학회 가을학술발표논문집, pp.29-44.

3. 김영수, 정성관, 김병탁 (1999b), "비균질 사질토 지반에서 단일 휨성말뚝의 수평거동에 대한 말뚝두부 구속효과 연구", 한국지반공학회지, 제15권, 제5호, pp.65-80.
4. 김병탁 (2000), "비균질 사질토 지반에서 말뚝의 수평거동 연구", 박사학위논문, 경북대학교.
5. Briaud, J.L. (1997), "Simple approach for lateral loads on piles; SALLOP", *J. of Geotech. and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol.123, No.10, pp.958-964.
6. Hsiung, Y.M. and Chen, Y.L. (1997), "Simplified method for analyzing laterally loaded single piles in clays", *J. of Geotech. and Geoenv. Engrg.*, ASCE, 123(11), 1018-1029.
7. Meyerhof, G.G. and Sastry, V.V.R.N. (1995), "Behaviour of flexible piles in layered clays under eccentric and inclined loads", *Canadian Geotech. J.*, Vol.32, pp.387-396.
8. Ochoa, M. and O'Neill, M.W. (1989), "Lateral pile interaction factors in submerged sand", *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 115(3).
9. Peterson, R.W. (1988), "Laboratory investigation of the penetration resistance of fine cohesionless materials", *Proc. of 1st Int. Symp. on Penetration Testing*, Orlando, pp.895-901.

(접수일자 2000. 10. 13)