

측방변형을 받는 수동군말뚝의 거동분석

-모형토조실험-

Analysis of Passive Pile Groups Subjected to Lateral Soil Movements -A Study on the Model Test-

장 서 용*¹
Jang, Seo-Yong

원 진 오*²
Won, Jin-Oh

정 상 섬*³
Jeong, Sang-Seom

Abstract

In this study, experimental work has been carried out to investigate the effect of lateral soil movement on passive piles. This paper consists mainly of two parts: the first, performance of a series of laboratory experiments on a single pile and one-row pile groups, and the second, comparison between the measured and the predicted results. In the laboratory experiments, a quadrilateral soil movement profile was imposed on model piles embedded in both sandy soils and weathered soils. The maximum bending moment and pile deflection induced in passive piles were found to be highly dependent on pile stiffness, pile spacing, relative densities and pile head fixity condition. It was shown that the group effect might either increase or decrease the maximum bending moment and pile deflection, depending on the aforementioned influence factors. Based on the results obtained, a spacing-to-diameter ratio of 7.0 seems to be large enough to eliminate the group effect, and a pile in such a case behaves essentially the same as a single pile.

요 지

본 논문에서는 측방변형을 받는 수동 군말뚝의 거동특성을 연구하기 위해 말뚝의 휨강성, 말뚝중심간격, 상대밀도와 두부구속조건을 변화시킨 단독말뚝과 말뚝 중심간격이 말뚝직경(D)의 2.5, 5.0, 7.0배가 되는 1

*1 정회원, 연세대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*2 정회원, 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*3 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수

열 군말뚝에 대한 모형실험을 실시하였다. 실내모형실험은 주문진 표준사와 화강 풍화토에 근입된 수동말뚝에 직사각형 형태의 측방변위를 점진적으로 가하여 주문진 표준사에 대해 총 32회, 화강풍화토에 대해 총 16회의 실험을 실시하였다. 주문진 표준사에 대해서는 알루미늄과 PVC말뚝을, 화강풍화토에 대해서는 PVC 말뚝만을 사용하였다. 그 결과 수동말뚝에서 발생하는 최대 휨모멘트와 말뚝변위는 말뚝의 휨강성, 말뚝중심간격, 지반조건, 두부구속조건에 따라 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 1열 군말뚝은 두부구속조건에 상관없이 말뚝중심간격 7.0D 이하에서 그룹효과가 나타났으며, 7.0D에서 거의 단독말뚝과 같은 거동을 보임을 알 수 있었다. 말뚝의 간격이 좁아짐에 따라 말뚝의 변위와 휨모멘트 모두 감소하였다. 아울러 말뚝의 휨강성이 클수록 휨모멘트는 증가하나 변위는 감소하고, 상대밀도가 클수록 휨모멘트와 변위는 커지는 경향을 보였다. 상대밀도에 대한 휨모멘트의 크기 변화는 고정단에 의한 실험보다 자유단에 의한 실험에서 더 크게 나타났다.

Keywords : Passive piles, Single pile, One row pile groups, Group effect, Pile stiffness, pile spacing, Relative densities, Head fixity

1. 서론

수평력을 받는 말뚝의 과도한 변위나 파괴는 상부구조물에 손상을 미칠수 있으므로 이에 대한 검토가 수반되어야 한다. 최근에는 교량을 지지하기 위한 교대, 항만시설을 위한 잔교, 도로의 성토 등이 연약지반상에 실시되는 경우가 많아지고 있다. 따라서 이러한 구조물이 연약지반상에 축조될 경우, 지반의 측방유동을 유발시키게 된다. 또한 성토나 절토로 형성된 사면지반의 안정 측면에서도 매우 불안정하게 되는 경우가 많다. 성토에 근접한 교대지지말뚝, 말뚝 항타시 근접한 말뚝기초 그리고 활동면에 있는 말뚝기초일 때는 측방변형을 받는 수동말뚝의 거동을 간과한 채, 구조물의 배면토압이나 구조물의 수평재하 하중만을 대상으로한 주동말뚝으로 처리함으로써, 구조물이 완성된 후에 피해가 발생하는 일이 대부분이다. 일반적으로 수동말뚝의 해석기법에는 측방유동압에 근거한 방법(Begemann & DeLeeuw, 1972; DeBeer & Wallays, 1972; Tschebotarioff, 1973; Fedders, 1977; Franke, 1977; Springman,

1989; Stewart, 1992; 홍원표, Ito & Matsui, 1975, 77, 79, 81, 82)과 측방변위에 의한 방법(Poulos, 1973; Marche, 1973; Bourges, Frank & Mieussens, 1980; Chen, L.T., Poulos, H.G. & Hull, T.S., 1997)을 들수있는데 측방유동압에 근거한 방법은 말뚝에 작용하는 측방토압의 분포형태를 비교적 간단히 구할 수 있으며, 그 결과 최대 휨모멘트를 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있으나 단순하고 실제적용에 제한이 있는 단점이 있다. 반면에 측방변위에 근거한 방법은 지반조건과 하중상태를 적절히 추정하는 장점이 있으나 횡방향 변위를 직접 측정하거나 유한요소해석을 통한 측방변위해석을 수행해야하는 단점이 있다.

측방변위에 근거한 수동말뚝의 거동은 말뚝-지반의 상호작용, 지반조건, 말뚝중심간격, 말뚝의 휨강성과 두부구속조건 등에 따라 서로 상이하게 나타나며 그외 역학적으로 규명하지 못한 불확실한 요인들이 존재하기 때문에 이와 같은 불확정요소를 배제시킬 수 있는 현장 또는 실내모형실험에 의한 거동파악이 필수적으로 요구된다. 따라서

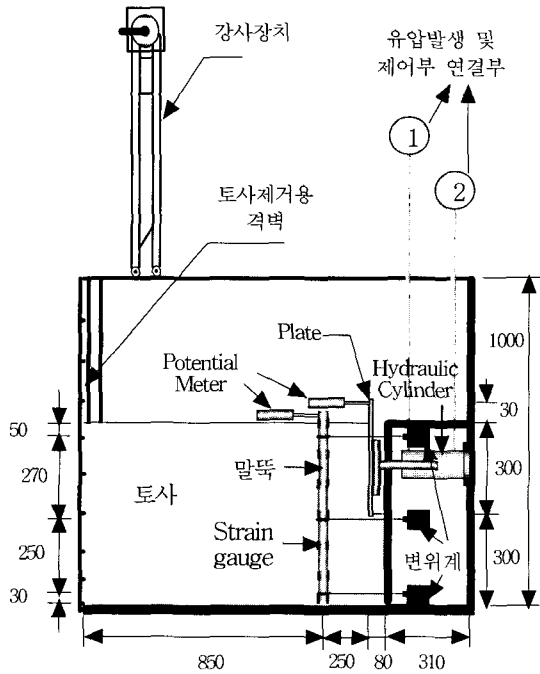


그림 1. 모형토조와 실험장치의 횡단면도

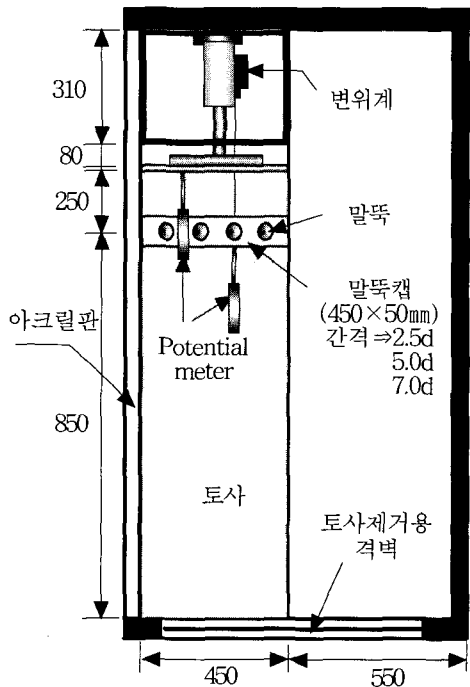


그림 2. 모형토조와 실험장치의 평면도

본 연구에서는 실내모형실험을 통해 측방변위에 따른 말뚝의 휨모멘트와 변위를 실측하여 그 거동을 파악하고자 한다.

2. 수동군말뚝 모형실험

2.1 실험장치 및 계측장비

수동군말뚝의 모형실험을 위해 모형토조를 제작하여 측방변형을 받는 수동 군말뚝 실험을 수행하였다. 모형토조의 크기는 가로 1.0m×세로 1.5m×높이 1.0m로, 토조 벽측면에 아크릴로 된 투명창을 설치하여 벽마찰에 대한 영향을 줄였고, 측방변형으로 인한 지반의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 지반의 측방변형을 위해 모형토조의 내부에 가로 45cm×세로 31cm×높이 60cm의 프레임을 제작하여 하중재하장치를 연결하였다. 또한 토조벽면에는 실험이 끝난 후 토사제거의 편의를 위해 격벽을 설치하였다. 그림 1은 모형토조의 횡단면도이고, 그림 2는 평면도를 도시한 것이다. 재하판을 전·후로 작용하여 지반을 일정한 3cm로 측방변형 시키기 위하여 하중재하장치를 사용하였다. 하중재하계는 그림 3에 나타내었다. 유압발생을 위하여 solenoid valve를 열

표 1. 수동군말뚝 모형실험용 계측기기

계측항목	계측기기명	측정개소	측정범위	정밀도
말뚝의 수평변위측정	displacement transducer	3	0~1000mm	0.01mm
말뚝캡의 변위측정	potential meter	1	0~50mm	0.01mm
재하판의 수평변위측정	potential meter	1	0~50mm	0.01mm
말뚝의 휨모멘트측정	strain gauge	14	0~10000 μ	0.01 μ
데이터 입출력기	data logger	20	-	-

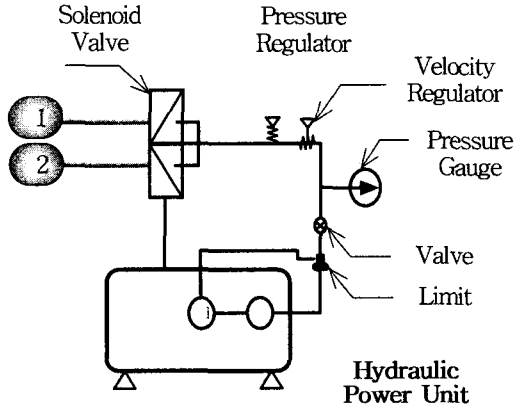


그림 3. 측방변위발생 및 제어부

고, 압력조절기와 속도조절기를 작동시켜 일정한 압력을 가한다. 이때 압력은 압력계에 의하여 측정되므로 매 실험마다 동일한 압력을 가할 수 있도록 제작되었다. 가해진 압력이 Hydraulic cylinder에 연결된 재하판을 전·후로 작동시켜 지반을 변형시킬수 있게 한다. 재하판 단면은 450mm×330mm 이고, 재하판의 주변부는 고무패드를 설치하여 토사유출을 방지하도록 하였다. 모형실험을 통한 주된 관심사는 측방지반변형에 따른 말뚝의 수평변위와 휨모멘트의 변화이다. 이에 의거하여 수동군말뚝의 지반변형 모형실험을 위한 계측장비는 그림 1과 2 (단위 mm)에 나타내었고 제원은 표 1과 같다.

2.2 모형실험용 시료 및 모형말뚝

본 실험에서는 국내에 널리 알려진 주문진 표준사와 화강 풍화토를 사용하였다. 시료의 공학적인 성질을 파악하기 위해서 흡입자의 크기와 그 입도 분포(그림 4, 5) 및 기본물성에 대한 실험을 실시하였다. 기본물성의 실험결과는 표 2와 같다. 실험결과 주문진 표준사는 균등한 입도분포를 가지고 통일분류법상 SP로 분류되었고, 화강풍화토는 입도분포가 좋은 사질토로 통일분류법상 SW

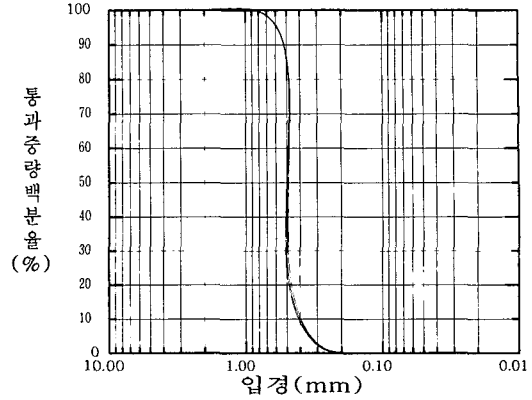


그림 4. 주문진표준사의 입도분포 곡선

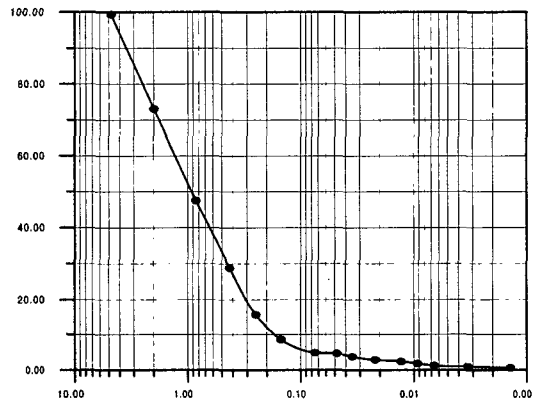


그림 5. 화강풍화토의 입도분포 곡선

로, 액소성 한계는 비소성으로 나타났다. 국제 지질학회(Geological Society)에서 제안한 풍화토 분류법에 의하면 대부분이 완전히 풍화되었지만 모암의 구조가 입자에 남아 있는 CW 등급으로 분류되었다.

모형실험에 사용된 시료의 전단강도 특성치를 산정하기 위하여 C. K. Chen type의 자동화 진동 삼축압축시험기를 이용하였다. 시험조건은 배수 상태이며 구속압은 5t/m²~15t/m²세단계로 증가시켜 전단실험을 수행하였다. 강도정수 산정시 Mohr-Coulomb 파괴곡선을 이용하였다. 그 결과 표 3과 같은 시료의 전단강도 특성치를 얻을 수 있었다.

표 2. 실험용 시료의 실험결과

입도분포		주문진 표준사	화강풍화토
최대 입경 (mm)	D_{max}	0.850 (No. 20)	4.750 (No. 4)
최소 입경 (mm)	D_{min}	0.075 (No. 200)	0.0014
통과중량백분율 10% 입경 (mm)	D_{10}	0.41	0.185
통과중량백분율 60% 입경 (mm)	D_{60}	0.48	1.650
균등계수	C_u	1.17	8.90
곡률계수	C_c	1.23	1.20
최대 건조단위중량 (g/cm^3)	γ_{dmax}	1.609	1.713
최소 건조단위중량 (g/cm^3)	γ_{dmin}	1.382	1.402
비중	G_s	2.63	2.63
함수비 (%)	w	0.3	10.18
통일분류	Unified System ASTM D2487	SP	SW

표 3. 실험용 시료의 삼축압축실험 결과

지반종류	평균 상대밀도 (%)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각 ($^\circ$)
느슨한 모래지반	24	0	32
조밀한 모래지반	79	0	38
느슨한 화강풍화토	24	0	31
조밀한 화강풍화토	79	0	37

표 4. 모형실험용 말뚝의 종류와 제원

모형 말뚝 재료	길이 (mm)	외경 (mm)	두께 (mm)	탄성계수(E_p) (kg/cm^2)	휨강성 $E_p I_p$ ($kg \cdot cm^2$)
알루미늄	630	19	1	7.2×10^5	165404.85
PVC	630	22	2.5	3.82×10^4	28264.89

모형말뚝은 휨강성($E_p I_p$)을 변화한 알루미늄 튜브관과 PVC 파이프관을 사용하였다. 각 말뚝의 휨모멘트를 측정하기 위해 그림 6과 같이 양면에 총 14개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 말뚝 양면에 게이지를 부착한 이유는 실험상 오류로 인한 축력 발생 가능성을 배제하기 위함이다. 또한 모형실험에 사용된 말뚝의 강성을 측정하기 위해 5개의 시편을 제작하여 인장실험을 실시하였다. 그 결과 모형실험용 말뚝의 종류와 제원에 대해 표 4와 같이 정리할 수 있었다. 여기서 알루미늄

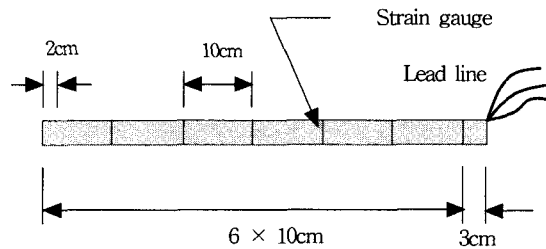


그림 6. 게이지가 부착된 모형말뚝

말뚝의 탄성계수는 PVC 말뚝보다 약 19배 정도, 휨강성(flexible stiffness)은 약 6배 정도 큰 값을 나타내었다.

모형말뚝의 강성과 휨성 판정을 위해 Broms (1964)와 Briaud(1992)가 제안한 방법을 사용하여 판정하였다. Broms는 강성말뚝의 범위를 $L/R \leq 2$, 휨성말뚝의 범위는 $L/R \geq 3.5$ 로 보았다. 여기서 L은 지반에 관입된 말뚝의 길이이며 R의 값은 식 (1)과 같다. E_p 는 말뚝의 탄성계수,

표 5. Broms와 Briaud의 방법에 의한 강성·휨성말뚝 판정결과

모형말뚝 재질	L (cm)	R	ℓ_0	Broms 방법	Briaud 방법
알루미늄 말뚝	60	12.83	18.15	L/R = 4.68 > 3.5	L/ ℓ_0 = 3.31 > 3
PVC 말뚝	60	7.95	11.25	L/R = 7.55 > 3.5	L/ ℓ_0 = 5.33 > 3

I_p 는 말뚝의 2차모멘트, k_h 는 지반반력상수, b 는 말뚝의 직경이다.

$$R = \left(\frac{E_p I_p}{k_h b} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

Briaud는 강성말뚝의 범위를 $L/\ell_0 \leq 1$, 휨성 말뚝의 범위는 $L/\ell_0 \geq 3$ 로 보았다. 여기서 L 은 지반에 관입된 말뚝의 길이이며 ℓ_0 의 값은 식 (2)와 같다. E_p 는 말뚝의 탄성계수, I_p 는 말뚝의 2차모멘트, k_h 는 지반반력상수, b 는 말뚝의 직경이다.

$$\ell_0 = \left(\frac{4E_p I_p}{k_h b} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

여기서 미지값인 k_h 값은 N 치를 이용하여 지반 반력계수를 구할 수 있는 Fukuoka의 제안식을 이용하여 산정하였고, 주문진 표준사의 삼축압축 실험 결과인 표 3에서 내부마찰각이 결정되었으므로 사질토 지반의 N 치와 내부마찰각 사이의 관계식을 제안한 Dunham(1954) 식에 의해 N 치를 추정하였다. 그 결과 k_h 값은 상대밀도 24%시에 2.511 kg/cm^3 , 상대밀도 79%시에 3.212 kg/cm^3 으로 산정되었다. k_h 값과 표 4의 $E_p I_p$ 를 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 계산한 결과는 표 5와 같다. 이와 같은 기준으로 모형실험에 사용된 알루미늄 말뚝과 PVC 말뚝은 모두 휨성말뚝으로 판정되었다.

2.3 실험방법 및 종류

모형지반을 성형하기 전에 strain gauge가 부

착된 모형말뚝을 토조내에 수직으로 거취하고, 말뚝 선단부는 자유조건인 말뚝에 링(ring) 형태의 변위계를 끼워 넣었으며, 계측장비의 설치가 완료된 후 토조내에 모형지반을 형성하기 위하여 강사기를 통해 시료를 포설하였다. 일정한 높이에서 토사유출구가 넓어짐에 따라 포설된 토사의 간극률은 증가하며 반면에 일정한 유출구를 유지하며 강사 높이만을 증가시키면 간극률이 감소하게 된다. 그러므로 본 실험에서는 유출구 크기와 낙하높이를 일정하게 조절할 수 있는 강사장치(raining-sand device)를 사용하였다. 본 실험에 앞서 20회의 예비실험을 통하여 조밀한 그리고 느슨한 지반을 형성할 수 있는 강사장치의 낙하 간격 크기를 결정하였다. 예비실험을 근거로 지반을 조성하였고, 지반 조성시 깊이에 따라 10cm 크기의 원통형 용기를 설치하여 실험이 끝난 후 이를 회수하여 깊이별 상대밀도를 측정하였으며 이를 통해 조성시료의 균질성을 확인하였다. 본 연구에서 강사장치로 조성한 배면지반의 종류는 대표적으로 상대밀도 24%의 느슨한 시료, 상대밀도 79%의 조밀한 시료를 조성하였다. 상대밀도를 구하기 위해 최소 건조단위중량은 ASTM D4253-91에서 제시한 깔대기식 강사기구를 이용하여 몰드 내에 시료를 형성하는 방법으로, 최대 건조단위중량은 ASTM D4253-93에서 제시한 오븐에 건조시킨 시료와 전자기식 수직진동 테이블을 사용하는 방법으로 산정하였다.

모형말뚝의 설치와 지반 성형이 완료된 후 지반 위의 계측장비인 말뚝선단부와 하중재하장치 재하관의 변위를 계측하기 위해 potential meter를 모형토조내에 고정시켰다. 그 후 하중재하장치

표 6. 모형 수동 균말뚝 실험종류

말뚝재질과 시료	상대밀도 (Dr)	두부구속조건	말뚝형태	말뚝중심간격
① 알루미늄 말뚝 (사질토)	24%	고정단	단독말뚝	-
			1열 균말뚝	2.5D
				5.0D
		자유단	단독말뚝	-
			1열 균말뚝	2.5D
				5.0D
② PVC 말뚝 (사질토, 화강풍화토)	79%	고정단	단독말뚝	-
			1열 균말뚝	2.5D
				5.0D
		자유단	단독말뚝	-
			1열 균말뚝	2.5D
				5.0D
				7.0D

를 이용해서 재하판을 일정간격 3.0cm로 변형시켜 data logger를 사용하여 strain값과 말뚝의 변위를 측정하였다. 본 실험에서는 표 6과 같이 말뚝의 휨강성, 말뚝중심간격, 상대밀도와 두부 구속조건을 변화시킨 단독말뚝과 말뚝중심간격 2.5D, 5.0D, 7.0D인 1열 균말뚝에 대한 총 48회의 모형실험을 실시하였다.

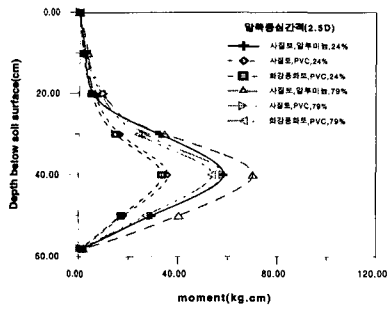
3. 실험결과 비교 분석

3.1 두부구속조건이 자유단인 경우

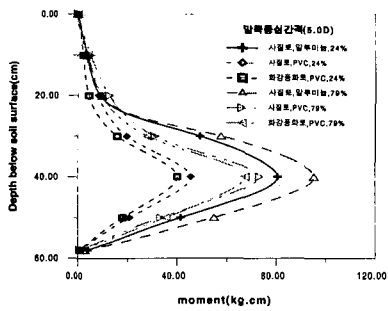
두부구속조건이 자유단인 경우 지반의 종류와 말뚝의 휨강성을 변화시켰을 때의 상대밀도 24%와 79%시의 휨모멘트를 비교 분석하였다. 그림 7은 상대밀도 24%와 상대밀도 79%시의 지반조건과 휨강성에 따른 단독말뚝을 포함한 말뚝중심간격에 따른 휨모멘트를 비교한 것이다.

상대밀도 24%인 경우 사질토 지반에서 말뚝

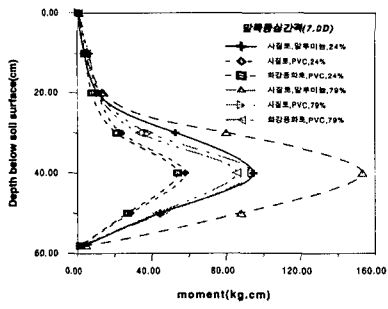
의 휨강성을 변화시킨 말뚝의 최대 휨모멘트 크기를 비교하면 알루미늄 말뚝이 PVC 말뚝보다 약 1.6~1.8배 정도 큰 값을 나타내는 경향을 보였다. 다음으로 휨강성이 같은 PVC 말뚝에 상대밀도 24%인 사질토와 화강풍화토를 포설한 모형 실험결과를 비교하면 휨모멘트의 크기가 약 1.06~1.08배 정도로 거의 일치하는 경향을 보였다. 상대밀도 79%인 경우 사질토 지반에서 말뚝의 휨강성을 변화시킨 말뚝의 최대 휨모멘트 크기를 비교하면 알루미늄 말뚝이 PVC 말뚝보다 약 1.3~1.7배 정도 큰 값을 나타내는 경향을 보였다. 휨강성이 같은 PVC 말뚝에 상대밀도 24%인 사질토와 화강풍화토를 포설한 실험결과를 비교하면 휨모멘트의 크기가 약 1.07~1.1배 정도이고 상대밀도 79%인 경우에도 1.05~1.07배 정도로 거의 일치하는 경향을 보였다. 즉 상대밀도와 휨강성이 클수록, 말뚝중심간격이 늘어날수록 휨모멘트는 증가하고 말뚝의 그룹효과는 그림 7 (c)와 (d)에서 보듯이 단독말뚝과 말뚝중심간격 7.0D



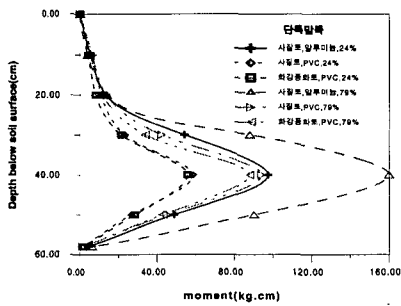
(a) 말뚝중심간격 2.5D



(b) 말뚝중심간격 5.0D

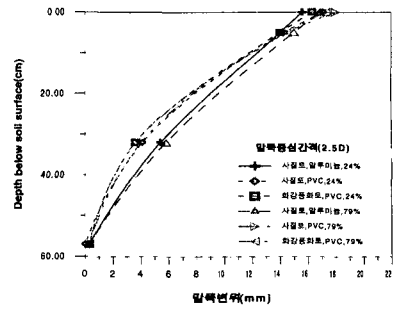


(c) 말뚝중심간격 7.0D

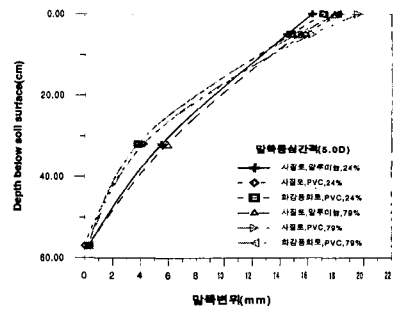


(d) 단독말뚝

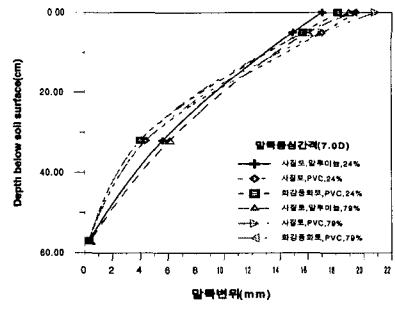
그림 7. 지반조건과 말뚝의 휨강성에 따른 휨모멘트 비교 (자유단)



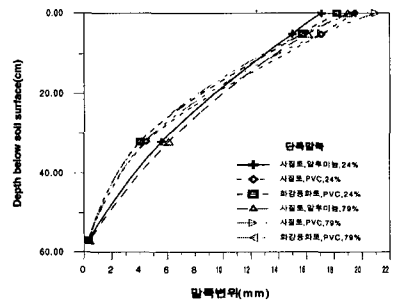
(a) 말뚝중심간격 2.5D



(b) 말뚝중심간격 5.0D



(c) 말뚝중심간격 7.0D



(d) 단독말뚝

그림 8. 지반조건과 말뚝의 휨강성에 따른 말뚝변위 비교 (자유단)

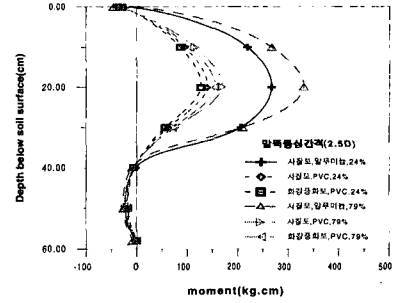
에서 거의 일치하므로 말뚝의 그룹효과는 7.0D 이하에서 발생한다는 것을 예측할 수 있었다.

말뚝의 변위는 그림 8에서 보듯이 휨강성이 큰 알루미늄 말뚝의 경우는 순수한 휨에 의해 발생한 변위가 아니라 상당한 변위량이 말뚝 선단부에서의 회전에 의해 발생하였음을 알 수 있었다. 그리고 상대밀도가 같은 사질토와 화강풍화토에 대한 모형실험 결과 말뚝의 변위는 말뚝간격에 따라 거의 비슷한 거동을 하는 것으로 분석되었다. 상대 밀도가 클수록, 말뚝중심간격이 늘어날수록 변위는 증가하였다.

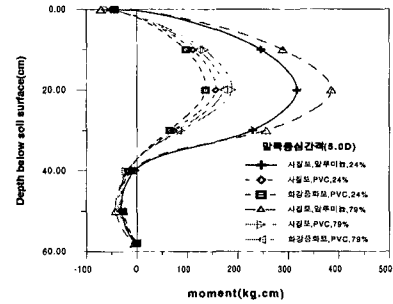
아울러 그림 8(c)와 (d)에서 보듯이 휨모멘트 결과와 같이 단독말뚝과 말뚝중심간격 7.0D에서 거의 일치하므로 그룹효과는 7.0D 이하에서 발생함을 알 수 있었다.

3.2 두부구속조건이 고정단인 경우

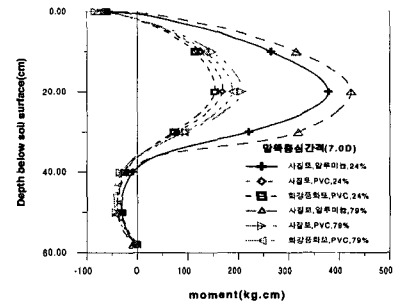
두부구속조건이 고정단인 경우 역시 지반조건과 말뚝의 휨강성을 변화시켜 상대밀도 24%와 79%시의 휨모멘트를 비교 분석하였다. 그림 9는 상대밀도 24%와 79%시의 단독말뚝을 포함한 말뚝중심간격에 따른 휨모멘트를 비교한 것이다. 상대밀도 24%인 경우 사질토 지반에서 말뚝의 휨강성을 변화시킨 말뚝의 최대 휨모멘트 크기를 비교하면 알루미늄이 PVC 말뚝보다 약 1.9~2.2 배 정도 큰 값을 나타내었다. 휨강성이 동일한 PVC 말뚝에 대한 상대밀도 24%인 사질토와 화강풍화토의 모형실험결과를 비교하면 휨모멘트의 크기가 약 1.06~1.1배 정도로 거의 일치하는 경향을 보였다. 상대밀도 79%인 경우 사질토 지반에서 휨강성을 변화시킨 말뚝의 휨모멘트 크기를 비교하면 알루미늄이 PVC 말뚝보다 약 1.94~2.05배 정도 큰 값을 나타내었다. 휨강성이 같은 PVC 말뚝에 상대밀도 24%인 사질토와 화강풍화토를 포설한 실험결과를 비교하면 휨모멘



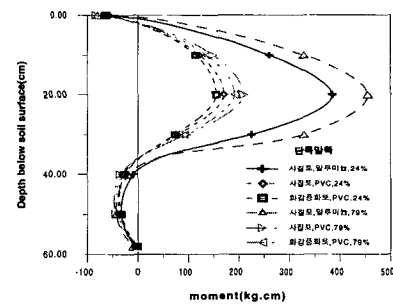
(a) 말뚝중심간격 2.5D



(b) 말뚝중심간격 5.0D

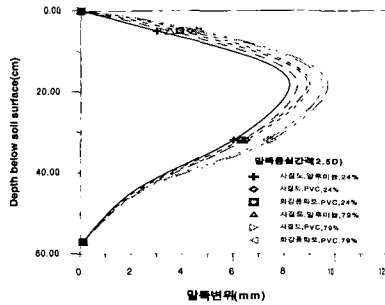


(c) 말뚝중심간격 7.0D

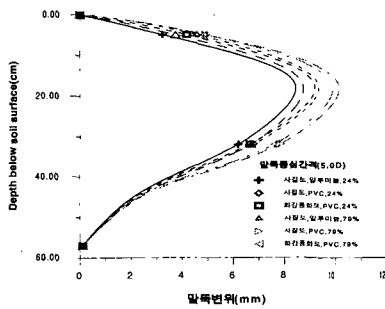


(d) 단독말뚝

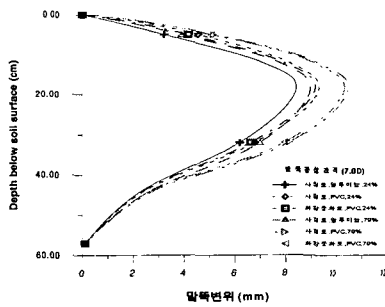
그림 9. 지반조건과 말뚝의 휨강성에 따른 휨모멘트 비교 (고정단)



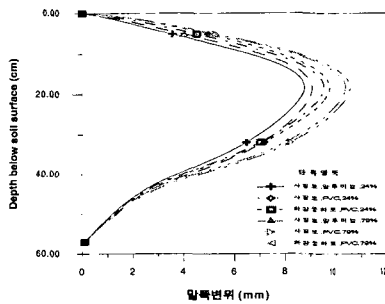
(a) 말뚝중심간격 2.5D



(b) 말뚝중심간격 5.0D



(c) 말뚝중심간격 7.0D



(d) 단독말뚝

그림 10. 지반조건과 말뚝의 휨강성에 따른 말뚝변위 비교 (고정단)

트의 크기가 약 1.05~1.09배 정도이고 상대밀도 79%인 경우에도 1.08~1.11배 정도로 거의 일치하는 경향을 보였다. 위와 같이 고정단의 경우는 자유단의 경우와 마찬가지로 상대밀도와 휨강성이 클수록, 말뚝중심간격이 늘어날수록 휨모멘트는 증가하나, 자유단에 비해 상대밀도에 따른 휨모멘트 크기변화는 적은 경향을 보였다. 그림 9 (c)와 (d)에서 보듯이 말뚝의 그룹효과 역시 자유단과 같이 단독말뚝과 말뚝중심간격 7.0D에서 거의 일치하므로 말뚝의 그룹효과는 7.0D에서 발생한다는 것을 예측할 수 있었다.

말뚝의 변위는 그림 10에서 보듯이 휨강성이 큰 알루미늄 말뚝의 경우에 더 작았다. 상대밀도가 같은 사질토와 화강풍화토에 대한 모형실험 결과 변위는 말뚝중심간격에 따라 각기 거의 비슷한 거동을 하는 것으로 분석되었다. 자유단의 실험결과와 마찬가지로 말뚝의 변위는 상대밀도 24%인 느슨한 지반보다 79%인 조밀한 지반에서 더 커지는 경향을 보였고, 말뚝중심간격이 늘어날수록 증가하였다.

아울러 그림 10(c)와 (d)에서 보듯이 휨모멘트 결과와 같이 단독말뚝과 말뚝중심간격 7.0D에서 거의 일치하므로 그룹효과는 7.0D 이하에서 발생함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 주문진 표준사와 화강풍화토 지반에 말뚝의 휨강성, 상대밀도, 말뚝중심간격 및 두부구속조건을 변화시킨 단독말뚝과 말뚝중심간격이 2.5D, 5.0D, 7.0D인 1열 군말뚝에 대한 일정한 축방변위(3cm)를 가하여 수동말뚝실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 내용은 다음과 같다.

- 1) 두부구속조건이 자유단인 경우 휨강성이 클수록 휨모멘트는 증가하고 변위는 감소하였으며,

말뚝중심간격이 늘어날수록 휨모멘트와 변위는 증가하는 경향을 보였다. 또한 상대밀도가 증가함에 따른 휨모멘트와 변위 역시 증가하는 경향을 보였다. 두부구속조건이 고정단인 경우 역시 자유단과 같이 상대밀도와 말뚝중심간격이 증가함에 따라 휨모멘트와 변위는 증가하였으나, 상대밀도에 대한 휨모멘트의 크기변화는 자유단인 경우에 비해 그 영향이 크지 않았다. 또한 자유단과 달리 두부를 구속시키는 강성캡의 영향으로 부(-)모멘트가 발생함을 알 수 있었다.

- 2) 1열 군말뚝은 두부구속조건에 상관없이 말뚝중심간격이 7.0D 이하에서 그룹효과가 나타났으며, 말뚝중심간격 7.0D에서 거의 단독말뚝과 같은 거동을 하는 경향을 나타내었다.
- 3) 주문진 표준사와 화강풍화토에 대한 실험에서 모형지반을 상대밀도가 비슷하게 조성했을 때, PVC 말뚝의 변위와 최대 휨모멘트 크기변화는 상대밀도와 두부구속조건에 따라 큰 차이를 보이지 않고 서로 비슷한 양상을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 '97건설교통기술연구개발사업 "산지사면과 급경사면 안정성 평가 및 보강대책 시스템 개발"의 연구비 지원으로 수행된 연구결과와 일부로 연구수행이 가능하도록 지원하여 주신 건설교통부 관계자분께 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. Brown, D.A., Clark, M., and Reese, L.C. (1988), "Lateral load behavior of pile group in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol 114, No. 11, November, pp. 1261-1277.
2. Chen, L.T., Poulos, H.G. and Hull, T.S. (1997), "Model tests on pile groups subjected to lateral soil movement", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 37, No. 10, pp. 1-12.
3. Finno, R.J., Lawrence, S.A., Allawh, N.F. and Harahap, I.S. (1991), "Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol 117, No. 6, pp. 934-955.
4. Goh, A.T.C., Teh, C.I. and Wong, K.S. (1997), "Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol 123, No. 9, September, pp. 792-801.
5. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P. (1982), "Earth pressures on piles in a row due to lateral soil movements", *Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 22, pp. 71-81.
6. 장서용 (1999), "측방변형을 받는 수동군말뚝의 거동 분석", 연세대학교 대학원 석사논문
7. 정상섭 (1998), "수동말뚝의 해석기법", 98 가을학술 발표회논문집, pp86-89.
8. 홍원표 (1982), "점토지반속의 말뚝에 작용하는 측방 토압", 대한토목학회논문집, 제2권, 제1호, pp45-52.
9. 홍원표 (1983), "모래지반속의 말뚝에 작용하는 측방 토압", 대한토목학회논문집, 제3권, 제3호, pp63-69.
10. 홍원표 (1984), "측방변형지반속의 줄말뚝에 작용하는 토압", 대한토목학회논문집, 제4권, 제1호, p59-68.

(접수일자 1999. 9. 10)