

수평하중이 작용하는 단독말뚝의 배면지반의 저항거동 특성

Behavior of Back Ground of the Laterally Loaded Single Pile

배 종 순¹ Bae, Jong-Soon

김 성 호² Kim, Sung-Ho

Abstract

In this study, various kinds of behavior characteristics such as deformation area zone of back ground, failure angle and rotation point are examined on the laterally loaded single pile in the homogeneous ground through a model test. The main obtained conclusions are summarized as follows; In the back ground of single pile to which the lateral load is applied, failure surface shows almost linear movement characteristics and it is inclined to converge to constant values no matter how the length of pile and the pile head displacement.

요 지

본 연구에서는 균질 지반에 매설된 단독말뚝에 수평하중이 작용할 경우 말뚝 배면지반에서 발생하는 여러 가지 거동 특성, 즉 말뚝 배면지반의 변형영역, 파괴면의 경사각, 그리고 회전절점과 같은 거동 특성을 모형실험을 통하여 규명하고자 모형실험을 수행하였다. 이는 말뚝의 휨력에 대한 저항력 산정에 매우 중요한 사항이다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 수평하중이 작용하는 단독말뚝 배면지반에서 썩기 파괴면은 거의 선형적인 거동 특성을 나타내고, 말뚝과 파괴면이 이루는 경사각은 말뚝 길이, 말뚝 두부의 변위에 상관없이 지반의 상대밀도 증가에 따라 조금씩 증가하다 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타낸다.

Keywords : Deformation area zone, Model test, Rotation point

1. 서 론

최근 건설 현장의 부지확보 어려움에 따른 약조건 지반에서의 구조물을 시공하는 사례가 많아지고 특히 구조물의 대형화에 따라 말뚝기초 시공의 중요성이 더욱 커지고 있는 실정이다. 말뚝 기초 상부의 구조물이 토압, 풍압, 파력 등 횡방향 수평하중을 받게 되면 말뚝 두부에서는 구조물에 따른 연직하중과 수평하중을 동시에 받게 된다. 이와 같이 상부구조물에 작용된 수평하중은 말뚝으로 하중이 전이 되고 이때 전이된 하중에

의하여 말뚝 두부에서는 과도한 수평변위와 모멘트로 인하여 말뚝기초 파괴의 주요 원인으로 작용하게 되며, 이는 다시 상부구조물의 불안전 요소로 영향을 미치므로, 실제 말뚝 설계시 수평하중에 의한 말뚝 거동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

수평하중이 작용하는 말뚝에 관한 연구는 Chang(1937), Matlock & Reese(1960), Broms(1964a ; 1964b ; 1965), Poulos(1971) 등이 이론적 결과를 바탕으로 한 수평하중의 거동특성에 관한 연구 결과를 발표하였고, Ashour 등(1999;2004)과 Ashour & Norris(2003)는 다층지반에

1 정회원, 경상대학교 건설공학부 토목공학과 교수, 경상대학교 공학연구원 연구원 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute)

2 정회원, 경상대학교 공학박사, 경상대학교 공학연구원 연구원, KD이엔씨 기술이사 (Member, Doc., Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute, Director of KD E&C, shkim9107@paran.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

매설된 말뚝에 수평하중이 작용할 경우 하중-변형 거동 특성을 썬기 이론을 접목하여 해석한 결과를 발표하였다. 그리고, Wang- Reese(1999)는 말뚝에 작용하는 수평하중에 대한 저항 영역을 썬기 모델로 가정하여 극한상태의 수평저항력을 산출하는 식을 제안하였다.

이상에서 보듯이 수평하중을 받는 단독말뚝의 거동 특성에 관한 이론적 연구는 활발히 진행되고 있지만, 여러 가지 불분명한 요소, 즉 말뚝-흙 경계요소의 불확실성, 지반의 비균질성, 지하수 변동에 따른 미세 토립자들의 이동 등으로 인하여 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 최근 연구들에 의하면 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 여러 가지 해석 모델을 제시하였고, 그 중 하나가 SW(Sand Wedge) 모델이다(Ashour 등 ; 1999,2004 ; Ashour & Norris ; 2003 ; Wang-Reese ;1999). 하지만 대부분 제시된 SW(Sand Wedge) 모델은 토압론을 이론적 근거로 한 이론적 제시일 뿐 이에 대한 실험적인 검증 또는 확인이 되지 않은 상태이다. 따라서 SW 모델에 관한 현장실험을 통하여 수평하중에 의한 말뚝의 거동 특성을 파악하여 이를 근거로 한 해석 모델을 제시하는 것이 바람직하나, 이는 많은 실험 비용과 지반조건의 불일치성으로 인하여 반복적인 작업의 수행이 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 모형실험을 통하여 수평하중이 작용하는 단독말뚝 배면지반에서 발생하는 저항거동특성을 규명하고자 한다.

2. 모형실험

수평하중이 작용하는 단독말뚝 배면지반의 거동특성을 관찰하기 위한 모형실험 장치는 그림 1과 같다. 그림 1에서 ①은 강체 토조(Soil tank) ; $1000 \times 200 \times 550 \text{mm}^3$ 를, ②는 진동다짐 장치를, ③은 모형말뚝을, ④는 재하장치를, ⑤는 하중(추)을, ⑥은 연직하중을 수평하중으로 변환시키는 수평하중변환장치를, ⑦은 변위계를 나타낸다.

모형실험에 사용된 강체토조의 크기는 높이×길이×너비가 $550 \times 1000 \times 200 \text{mm}$ 인 강재로 제작하였으며, 모형토조의 전면판은 말뚝의 거동 특성을 관찰하기 위하여 두께가 20mm인 투명아크릴 판을 사용하였다. 그리고 토조 전면판의 우측은 말뚝의 변형에 따른 지반의 거동 관찰을 위하여 눈금자를 부착하였다.

모형말뚝은 그림 2와 같이 정방형 동관을 사용하였으며, 말뚝의 재원은 표 1과 같다.

모형지반의 제작에 사용된 재료는 주문진 표준사로, 기건 상태에서 건조한 모래를 사용하였으며, 지반재료

의 함수비는 0.06%이었다. 재료의 물리적 성질은 표 2와 같고 입도분포곡선은 그림 3과 같다. 모형지반의 제작은 강체 토조 저면의 일정한 위치에 밀도 측정용 용기를 매설한 후 모래를 포설한다. 이때 모래의 낙하에 따른 다짐 방식을 위하여 강체 토조 벽면을 타고 흘러내리

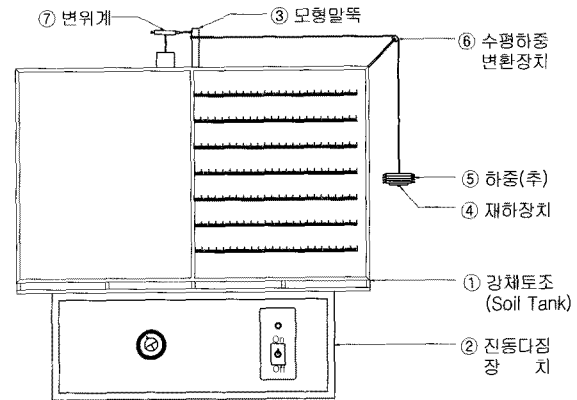


그림 1. 모형실험 장치 개요도

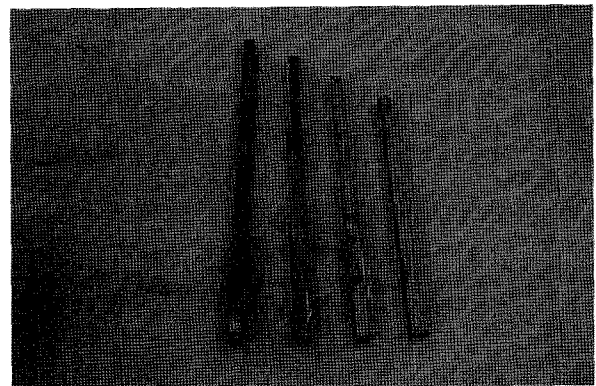


그림 2. 모형말뚝

표 1. 모형말뚝의 재원

Shape	L (mm)	B (mm)	T (mm)	E (kgf/cm ²)	I (cm ⁴)
Square	400	11.5	1.27	1.25×10^6	1.02027
	450				
	500				
	550				

표 2. 주문진 표준사의 물리적 특성

기 호	값
최대 건조밀도, γ_{dmax} (g/cm ³)	1.60
최소 건조밀도, γ_{dmin} (g/cm ³)	1.43
비중, G_s	2.57
유효경, D_{10}	0.32
균등계수, C_u	1.438
곡률계수, C_g	0.930

도록 모래를 포설하고 각각의 경우에 따라 30초, 60초, 300초의 진동시간으로 다짐을 실시한다. 진동다짐 완료 후 밀도 측정용 용기를 회수하여 밀도를 측정하고, 이상의 방법으로 밀도 측정 실험을 수차례 반복수행한 결과

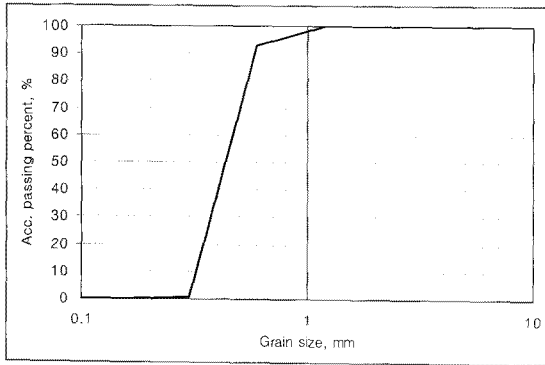


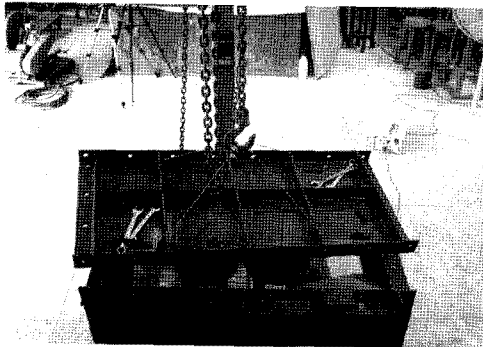
그림 3. 재료의 입도분포곡선

진동시간별 측정된 모형지반의 상대밀도는 표 3과 같다. 이 때 측정된 모형지반의 상대밀도는 각각의 진동시간에 대한 상대밀도를 대표하는 것으로 간주하였다.

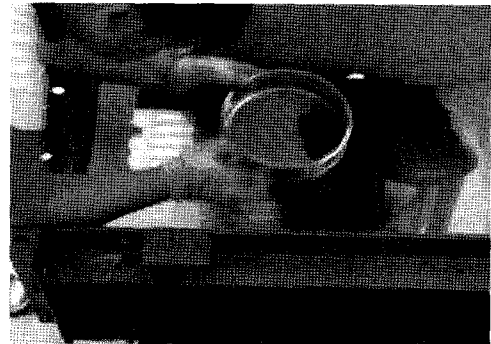
수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 거동특성을 관찰하기 위한 모형실험 방법은 먼저 그림 4(a)와 같이 강제토조 상부에 상부결합판을 결합한 후 토조의 전면부가 아래로 향하도록 토조를 눕힌 후 강제토조 후면판을 분리하고 그림 4(b, c)와 같이 말뚝을 토조의 중앙부

표 3. 모형지반의 상대밀도

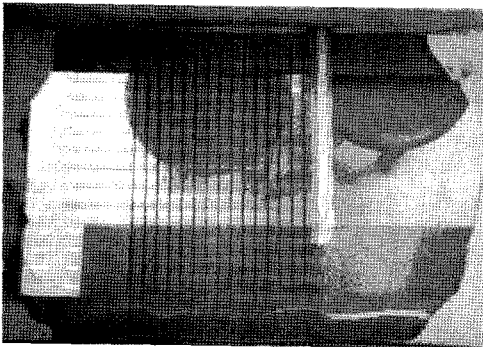
Vibrating time (sec.)	Range of D_r (%)	Ave. D_r (%)	Classification
30	36.66 ~ 38.94	37	느슨(loose)
60	53.21 ~ 56.15	54	보통(mediaum)
300	69.43 ~ 70.92	70	조밀(dense)



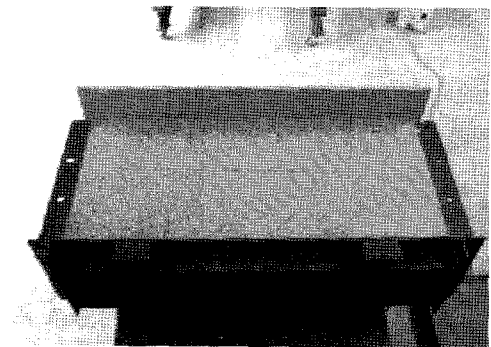
(a) 강제토조 후면판 분리



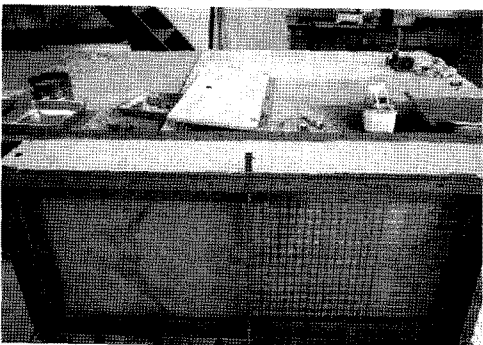
(b) 색사 삽포



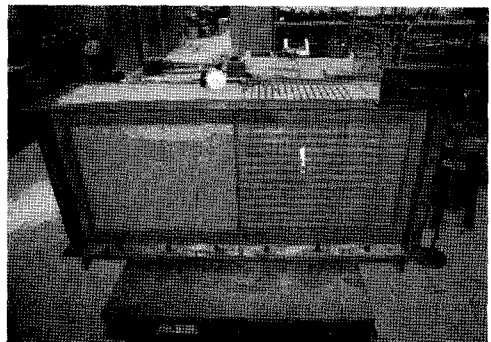
(c) 줄눈 성형 완료



(d) 시료 채움



(e) 진동다짐 후 사진



(f) 기타 실험장치 부착 후 사진

그림 4. 모형실험 방법

에 위치시킨 후 검은색의 색사를 #50체를 이용하여 토조 전면판에 줄눈을 성형한다. 그리고 성형된 줄눈이 흐트러지지 않게 그림 4(d)와 같이 시료를 살포 한 후 분리된 토조 후면판을 결합, 강제토조를 충격이 가하지 않게 일으켜 세운다. 각각의 실험 경우에 따라 진동다짐을 실시한 후 지표를 고르고 난 후 기타 실험 장치를 결합하고 실험을 수행한다. 줄눈 성형 및 실험 장치를 모두 장치한 모습은 그림 4(e, f)와 같다.

모형실험의 조건은 지하수의 영향은 없으며, 말뚝의 지지형식은 마찰말뚝으로 제한하며, 동일한 하중을 중

첩적으로 재하하는 하중제어방식으로 모형실험을 수행하였으며, 실험 종류는 표 4와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

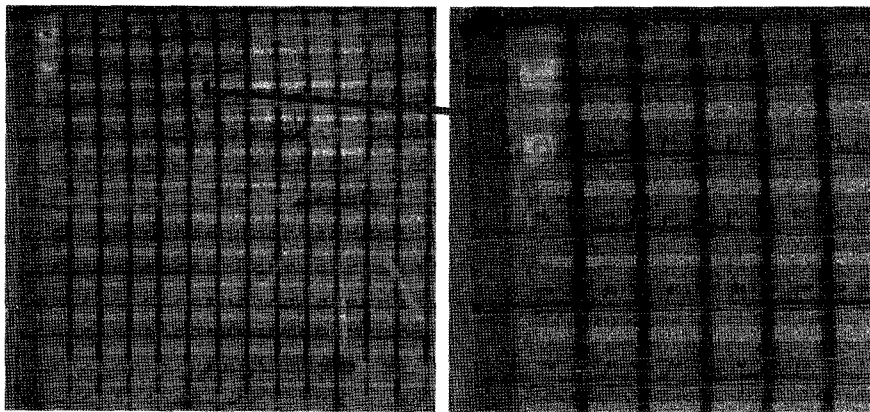
그림 5는 수평하중이 작용하는 단독말뚝 배면지반의 말뚝 거동에 따른 지반의 변형형상을 나타낸 사진이다.

수평하중이 작용하는 단독말뚝의 말뚝 변형에 따른 지반의 연직 변형은 그림 5에서 보는 바와 같이 수평하중을 가하기 전, 후의 세로줄눈의 위치를 기록, 이를 이용하여 각각의 가로 줄눈에서 발생된 지반의 변형량을 정량적으로 표시한 결과는 그림 6과 같이 나타났다. 여기서 δ 는 말뚝 두부의 변위를 나타낸다.

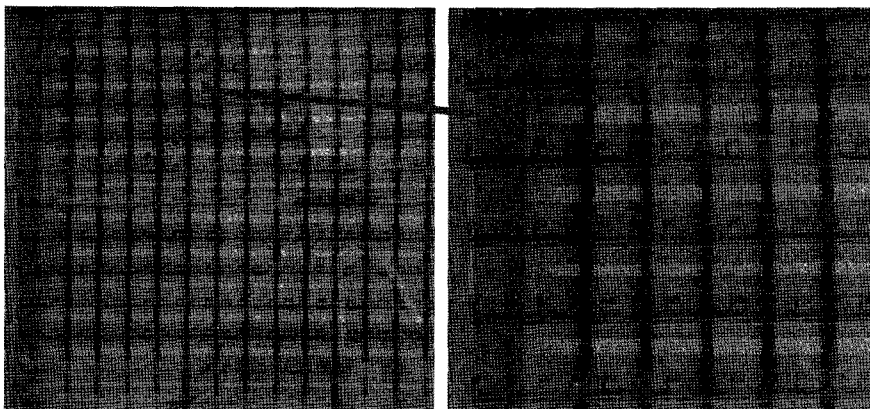
그림 6에서 지반의 상대밀도, 말뚝의 길이 변화에 상관없이 말뚝 두부의 변위 δ 가 증가할수록 지반의 변형 영역은 점차 확대되고 있고, 그 깊이도 점차 깊어지고 있다. 그리고 수평하중이 작용하는 말뚝의 배면지반에서 지반의 변형형상은 거의 선형적인 썪기 형태의 파괴양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 말뚝 두부에 수평하중이 가해지면 하중은 말뚝을 통해 지반에 전달

표 4. 모형실험 계획

Shape	Pile		Relative density D_r , %	Test name
	Breadth, mm	Length, mm		
Square	11.5	400	54	VD-L400-DR54
		450	54	VD-L450-DR54
		500	54	VD-L500-DR54
		550	37	VD-L550-DR37
			54	VD-L550-DR54
			70	VD-L550-DR70

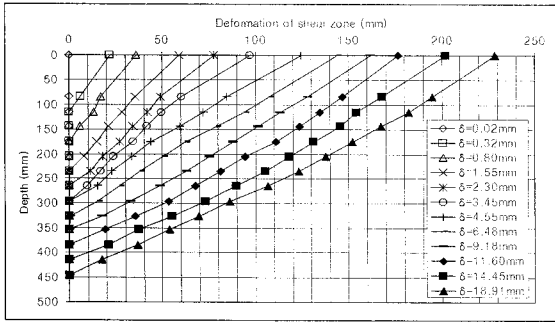


(a) 시험 전

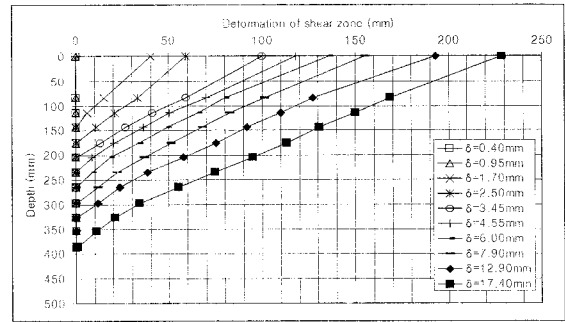


(b) 시험 후

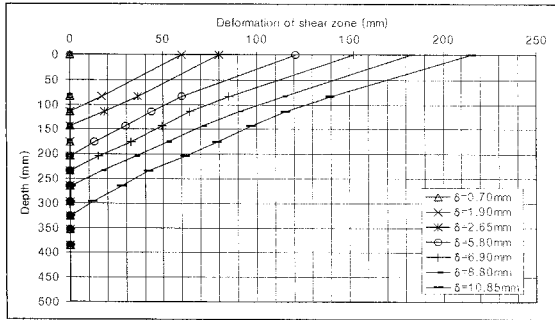
그림 5. 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 변형



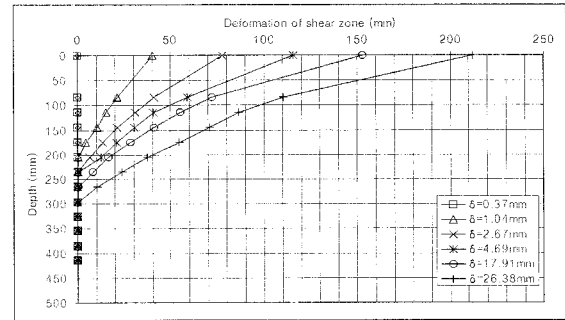
(a) Test No. VD-L550-DR37



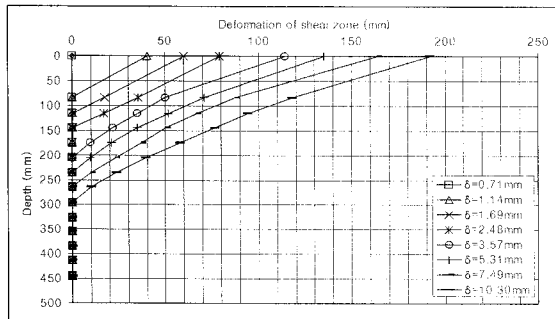
(b) Test No. VD-L550-DR54



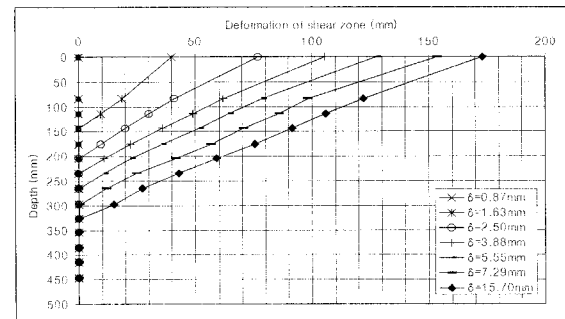
(c) Test No. VD-L550-DR70



(d) Test No. VD-L400-DR54



(e) Test No. VD-L450-DR54



(f) Test No. VD-L500-DR54

그림 6. 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 수평변형량

되고, 지반에 전달된 하중에 의하여 지반 거동은 발생하게 된다. 이때 토압론에 근거하여 보면, 말뚝 배면지반에서 지층의 깊이가 깊어질수록 유효수직응력이 증가하므로 저항력도 거의 선형적으로 증가하게 되고, 따라서 저항력이 작은 지표부근에서부터 지반의 거동 영역은 크게 발생하게 되고, 지중으로 깊어질수록 지반의 거동 영역은 작게 발생하게 된다. 그리고 말뚝 두부의 변위 즉, 말뚝 두부에 가해지는 하중이 점차 증가할수록 그 영역도 점차 선형적으로 확대된다고 생각된다.

이상의 결과에서 각각의 실험 경우에 있어 말뚝 두부의 변위 δ 가 일정할 때 지반의 변형영역을 선형식으로 가정하여 회귀분석을 실시하였고, 그 결과 표 5, 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

여기서 말뚝 두부의 회전각 θ 는 말뚝 두부의 변위량

을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 말뚝과 지반의 파괴면이 이루는 경사각 β_m 은 수평면과 지반의 파괴면이 이루는 경사각과 말뚝의 회전각을 이용하여 구한 결과이며, 말뚝의 회전절점비는 말뚝 배면지반에서 수평하중에 의하여 지반의 변형이 발생한 지점까지의 깊이를 말뚝의 길이로 나눈 비를 말한다.

$$\theta = \frac{360^\circ \times \delta}{2\pi \times (l_0 + l)} \quad (1)$$

여기서,

δ : 말뚝 두부의 수평변위, mm

θ : 말뚝 두부의 변위각, °

l_0 : 지표에서 말뚝 회전절점까지의 거리, mm

l : 지표에서 말뚝 두부까지의 거리, mm

표 5. 말뚝 길이가 일정할 때 말뚝 두부의 회전각, 말뚝과 파괴면이 이루는 경사각 및 말뚝의 회전절점비

Test No. VD-L550-DR37				
Pile head displacement δ , mm	Incline of SW failure surface $^{\circ}$	Angle of pile head Dips. θ , $^{\circ}$	Angle of pile and failure surface β_m , $^{\circ}$	Ratio of rotation point h_p/L_0
0.32	0.14	-5.26	10.87	0.23
0.80	0.24	-4.88	11.71	0.35
1.55	0.35	-4.54	12.61	0.47
2.30	0.46	-3.52	16.25	0.53
3.45	0.63	-3.14	18.24	0.57
4.55	0.83	-2.41	23.72	0.58
6.48	0.99	-2.35	24.40	0.66
9.18	1.40	-2.21	25.90	0.73
11.60	1.65	-2.15	26.60	0.81
14.45	1.90	-2.04	28.07	0.87
18.91	2.34	-1.89	30.29	0.91
Test No. VD-L550-DR54				
1.70	-3.53	0.59	15.64	0.28
2.50	-2.95	0.74	18.68	0.35
3.45	-2.03	0.88	27.38	0.43
4.55	-1.93	1.02	28.60	0.48
6.00	-1.91	1.21	28.71	0.53
7.90	-1.90	1.44	28.66	0.59
12.90	-1.69	2.13	31.69	0.67
17.40	-1.65	2.29	32.39	0.71
Test No. VD-L550-DR70				
1.90	0.81	-1.93	29.75	0.23
2.65	0.92	-1.82	31.56	0.29
5.80	1.48	-1.86	30.78	0.39
6.90	1.55	-1.55	36.86	0.45
8.80	1.60	-1.55	36.96	0.53
10.85	1.79	-1.53	37.41	0.61

표 6. 지반의 상대밀도가 일정할 때 말뚝 두부의 회전각, 말뚝과 파괴면이 이루는 경사각 및 말뚝의 회전절점비

Test No. VD-L400-DR54				
Pile head displacement δ , mm	Incline of SW failure surface $^{\circ}$	Angle of pile head Dips. θ , $^{\circ}$	Angle of pile and failure surface β_m , $^{\circ}$	Ratio of rotation point h_p/L_0
1.04	-5.12	0.23	10.93	0.57
2.67	-2.97	0.60	18.66	0.62
4.69	-2.02	0.94	27.45	0.62
17.91	-1.69	3.26	30.61	0.66
26.38	-1.40	4.80	36.19	0.75
Test No. VD-L450-DR54				
1.14	-2.10	0.49	26.78	0.21
1.69	-1.94	0.50	28.99	0.29
2.48	-1.84	0.74	30.42	0.37
3.57	-1.74	0.93	31.90	0.47
5.31	-1.70	1.19	32.56	0.54
7.49	-1.60	1.51	34.21	0.62
10.30	-1.53	1.87	35.57	0.67
Test No. VD-L500-DR54				
1.63	-3.64	0.81	14.93	0.33
2.50	-2.65	0.92	20.67	0.42
3.88	-2.22	1.48	24.36	0.51
5.55	-2.07	1.55	26.05	0.58
7.29	-1.95	1.60	27.83	0.64
15.70	-1.90	1.79	28.38	0.71
Test No. VD-L550-DR54				
1.70	-3.53	0.59	15.64	0.28
2.50	-2.95	0.74	18.68	0.35
3.45	-2.03	0.88	27.38	0.43
4.55	-1.93	1.02	28.60	0.48
6.00	-1.91	1.21	28.71	0.53
7.90	-1.90	1.44	28.66	0.59
12.90	-1.69	2.13	31.69	0.67
17.40	-1.65	2.29	32.39	0.71

그림 7은 말뚝의 길이가 550mm로 일정할 때 각각의 상대밀도에서 말뚝 두부의 회전각 θ 의 변화에 따른 쉐기 파괴면 경사의 변화관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 말뚝 두부의 회전각 θ 가 증가함에 따라 지반의 상대밀도 변화에 상관없이 파괴면의 경사가 점차 증가하지만, 말뚝 두부의 회전각 θ 의 값이 1이후부터는 파괴면의 경사가 조금씩 증가하는 하지만 그 증가폭이 매우 작음을 알 수 있다. 여기서 말뚝 두부의 회전각 θ 가 1보다 작은 값은 실제 지반의 거동이 파괴에 이르렀다고 보기 힘들 정도의 매우 작은 변위이다. 따라서 말뚝 두부의 회전각 θ 의 1후의 값을 평균한 값을 파괴면의 경사로 대표하고, 이때 말뚝과 쉐기 파괴면이 이루는 경사각 β_m 을 산출하였고 그 결과는 그림 8과 같다.

그림 8에서 지반의 상대밀도 $D_r = 37\%$ 인 경우 말뚝과 지반 파괴면이 이루는 경사각 β_m 은 약 27° , $D_r = 54\%$ 인 경우 β_m 은 약 32° , $D_r = 70\%$ 인 경우 약 β_m 은 35° 로 정도로 나타났고, 이를 도시한 결과 지반의 상대밀도가 작을 경우에는 말뚝과 지반 파괴면이 이루는 경사각 β_m 의 증가폭이 크게 나타나지만, 지반의 상대밀도가 증가할수록 말뚝과 지반 파괴면이 이루는 경사각 β_m 의 증가폭이 점차 감소하는 포물선적인 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 여기서 지반의 상대밀도 변화에 따른 말뚝과 지반 파괴면이 이루는 경사각을 회귀분석을 실시하였고, 그 결과는 식 (2)와같이 나타났으며, 이때 계수 α_1 , α_2 , α_3 는 서로 독립적인 변수이며, 그 값은 표 7과 같다.

$$\lambda_{\beta(m)} = \alpha_1 \cdot D_r^2 + \alpha_2 \cdot D_r + \alpha_3 \quad (2)$$

여기서,

D_r : 지반의 상대밀도, %

그림 9는 지반의 상대밀도가 54%로 일정할 경우, 각각의 말뚝길이에 있어서 말뚝 두부의 변위에 따른 말뚝과 쉐기 파괴면이 이루는 경사각 β_m 의 변화관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 각각의 말뚝 매설 길이에서 말뚝 두부의 변위 δ 가 증가할수록 경사각 β_m 의 값은 증가하는 양상을 나타내고 있다. 하지만 말뚝의 매설 길이 L_0 의 변화에 따른 경사각 β_m 의 변화는 어떤 경향을 나타내고 있지 않음을 알 수 있다. 따라서 말뚝과 지반 파괴면이

표 7. 계수 α_1 , α_2 및 α_3

α_1	α_2	α_3
-0.0025	0.4965	11.964

이루는 경사각 β_m 은 말뚝의 매설 길이 L_0 의 변화에 상관없음을 알 수 있고, 따라서 경사각 β_m 은 지반의 상대밀도 변화에 따른 함수임을 알 수 있다.

그림 10은 일정한 말뚝 매설 길이에서 말뚝 두부의 변위 변화에 따른 회전절점비의 변화관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 말뚝의 매설 길이에 상관없이 말뚝 두부의 변위 δ 가 증가할수록 회전절점비는 조금씩 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만 말뚝 매설 길이 L_0 가 35cm인 경우와 나머지 경우에 있어 회전절점비의 증가 경향은 상이하게 나타나고 있는데, 말뚝의 매설 길이가 40cm, 45cm, 50cm인 경우 말뚝의 매설 길이에 상관없

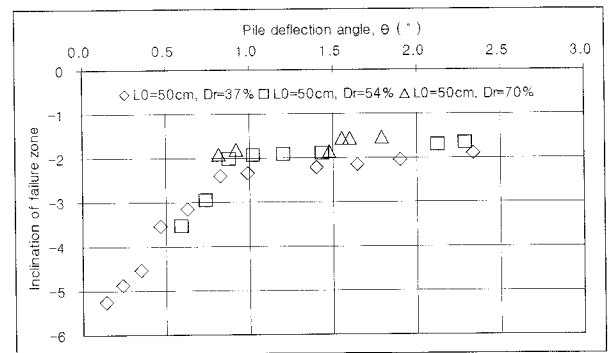


그림 7. 말뚝 두부의 회전각 θ 와 쉐기 파괴면의 경사각의 관계

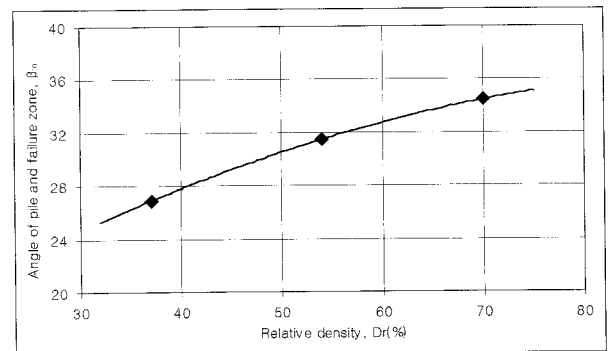


그림 8. 지반의 상대밀도와 말뚝과 쉐기파괴면이 이루는 경사각의 관계

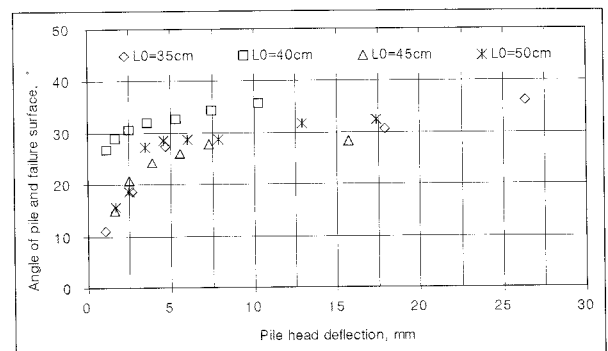


그림 9. 말뚝 두부의 변위 δ 와 말뚝과 쉐기 파괴면이 이루는 경사각 β_m 의 관계

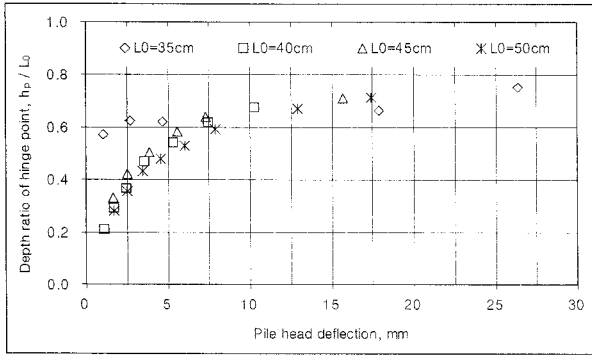


그림 10. 말뚝 두부의 변위 δ 와 회전절점비의 관계

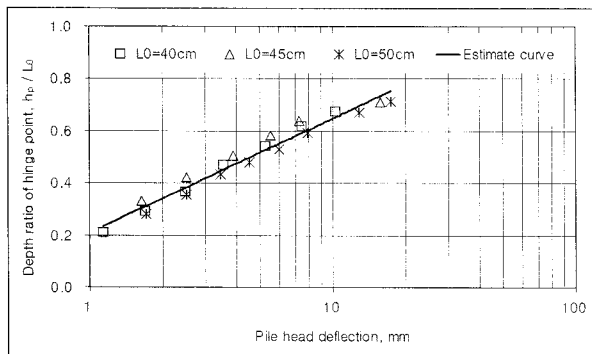


그림 11. 회전절점비의 회귀분석

이 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 이는 말뚝 매설 길이가 35cm인 경우 짧은 말뚝의 거동 특성에 의하여 말뚝 전체가 회전을 하는 특성을 나타내기 때문에 회전 절점의 발견이 명확하게 나타나지 않기 때문이라 생각 된다. 여기서 말뚝의 매설 길이 L_0 가 40cm, 45cm, 50cm 인 경우의 회전절점비를 모두 포함하여 말뚝 두부의 변위 δ 에 따른 회전절점비의 변화 관계를 도식한 결과는 그림 11과 같고, 이때 그림 11을 회귀분석한 결과 식 (3) 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

$$\frac{h_p}{L_0} = 0.1899 \ln(\delta) + 0.2101 \quad (3)$$

여기서,

h_p : 지표에서부터 회전절점까지의 거리, mm

L_0 : 지중에 매설된 말뚝의 매설 길이, mm

δ : 말뚝 두부의 변위, mm

와 같으며, 이 때 식 (3)을 수평하중이 작용하는 단독말뚝에서 말뚝 두부의 변위에 따른 말뚝의 회전절점비를 구하는 식으로 표현하고자 한다.

4. 결론

본 논문에서는 모래지반에 매설된 단독말뚝에 수평 하중이 작용할 경우 말뚝 배면지반에서 발생하는 지반 변형을 관찰하기 위하여 모형실험을 수행하였고, 실험 결과를 분석 고찰하여 다음과 같은 결론을 제시한다.

- (1) 수평하중이 작용하는 단독말뚝에서 말뚝 배면지반의 거동 특성은 썩기의 파괴형상을 나타내고 있었다.
- (2) 수평하중이 작용하는 단독말뚝에서 말뚝과 썩기 파괴면이 이루는 경사각은 지반의 상대밀도 변화에 따른 함수임을 확인하였고, 식 (2)와 같이 지반의 상대밀도를 활용하여 말뚝과 썩기 파괴면이 이루는 경사각을 구할 수 있는 식을 표현하였다.
- (3) 수평하중이 작용하는 단독말뚝에서 수평하중에 의하여 발생하는 말뚝의 회전절점은 말뚝 두부의 변위에 따른 함수임을 확인하였고, 그 결과 식 (3)과 같이 말뚝 두부의 변위를 활용하여 말뚝의 회전절점을 구할 수 있는 식을 표현하였다.

참고 문헌

1. Broms, B. B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.27-63.
2. Broms, B. B. (1964), "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.90, No.SM3, pp.123-156.
3. Broms, B. B. (1965), "Design of Laterally Loaded Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.91, No.SM3, pp.79-99.
4. Chang, Y. L. (1937), "Lateral Pile-Loading Tests", *Trans. ASCE*, Vol.91, pp.272-278.
5. Wang and Reese, L. C. (1999), *Geotechnical Engineering Circular No.4, Ground Anchor and Anchored Systems*, Federal Highway Administration, pp.B1-B8.
6. Ashour, M., Norris, G., and Pilling, P. (1999), "Lateral Loading of a Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, No.4, pp.303-315.
7. Ashour, M., and Norris, G. (2003), "Lateral Loaded Pile Response in Liquefiable Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.6, pp.404-414.
8. Ashour, M., Pilling, P., and Norris, G. (2004), "Lateral Behavior of Pile Groups in Layered Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.6, pp.580-592.
9. Matlock, H., and Reese, L. C. (1960), "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.86, No.SM5, pp.63-91.
10. Poulos, H. G. (1971), "Behavior of Laterally Loaded Piles : I-Single Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.97, No.SM5, pp.711-731.

(접수일자 2008. 2. 22, 심사완료일 2008. 8. 5)