

경사모래지반의 사각형 수동 열말뚝에 관한 실험적 연구

A Study on the Rectangular-Shaped Passive Row Piles in Inclined Sand-Ground by Model Test

배 중 순¹ Bae, Jong-Soon

김 지 성² Kim, Ji-Seong

권 민 재³ Kwon, Min-Jae

Abstract

This is a study on rectangular-shaped passive row piles in inclined sand-ground by model tests. The experiment controlled the angle of inclination of ground and induced the ground destruction. We also measured the behavior of row piles, by adjusting the shape, position and spacing of piles. As a result, we confirmed the earth pressure, the lateral resistance, and the effect of depressing on the ground variation working on passive pile. The effect of B-type pile of which the front width is wide is bigger than that of H-type pile of which the side width is wide. We can find out the failure angle of slope, the shared force of pile and soil by using the lateral resistance graph based on slope angle.

요 지

본 연구는 지반변형을 일으키는 경사모래지반에 매설된 사각형 수동열말뚝의 모형실험에 대한 것이다. 실험은 지반의 경사각을 조절하여 지반파괴를 유도 하였고, 말뚝의 형상, 위치, 간격을 달리하여 말뚝 거동을 측정하였다. 그 결과 수동말뚝에 작용하는 토압과 수평저항력 그리고 지반변형억제 효과를 확인하였다. 전면 폭이 넓은 B-type 말뚝이 측면 폭이 넓은 H-type 말뚝보다 지반변형억제 효과가 크게 나타났다. 사면경사에 따른 수평저항력 그래프를 이용하여 사면의 파괴각, 말뚝과 지반의 분담력을 알 수 있다.

Keywords : Failure surface inclination, Lateral resistance force, Passive pile, Slope angle

1. 서 론

경사지반에서 지반활동이 발생함으로써 지반의 측방변형이 일어나며 측방변형에 의해 발생하는 측방토압을 받는 말뚝을 수동말뚝이라 한다. 수동말뚝은 경사지반과 수평지반에 설치될 수 있으며, 경사지반에 설치되는 경우는

활동사면 내에 있는 억지말뚝이나 구조물 기초말뚝 등이 있다. 억지말뚝을 이용한 사면안정 해석 기법으로는 Poulos (1995)와 Chen et al.(1997)가 Bishop방법으로 구한 사면안전율이 1.5가 확보되기 위해 필요한 말뚝의 저항력을 구하여 억지말뚝을 설계하는 방법이 있다. Hassiotis et al.(1997)는 Ito and Matsui(1975)가 제안한 측방토압식을 이용하

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

2 경상대학교 토목공학과 박사과정, 경상대학교 공학연구원 연구원 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute, sea166@naver.com, 교신저자)

3 정회원, 청경E&D 이사 (Member, Director of Chunggyung E&D)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

여 측방토압을 포함한 안정수를 개발해 사면안정해석을 하였으며, 손규만(1999)은 측방토압에 Bishop의 간편법을 활용하여 억지말뚝이 보강된 사면안정해석을 제안하였다. 김병철(2000)은 측방토압을 지반반력법으로 유한차분하여 말뚝의 변위와 깊이별 말뚝의 휨모멘트, 전단력, 지반반력을 결정한 후 균말뚝 상호계수를 적용하여 사면의 안전율을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 그러나 아직까지 측방변형을 받는 수동말뚝의 거동을 명확히 규명하기에는 부족한 면이 있다. 이는 수동말뚝의 경우는 말뚝의 중심간격, 상대밀도, 배열형태 등에 따라 말뚝과 지반의 상호작용이 아주 복잡하게 나타나기 때문이다.

본 연구에서는 경사지반에 설치된 열말뚝의 거동을 파악하기 위하여 열말뚝의 중심 간격과 형태를 변화시켜가며 모형실험을 실시하였고, 변형에 따른 수평저항력과 휨모멘트를 이용하여 단독말뚝과 열말뚝의 거동특성을 비교 분석하였으며 특히 말뚝의 형상을 전면폭이 넓은 B-type과 길이가 긴 H-type으로 나누어 지반의 변형억제 효과와 사면경사에 따른 수평저항력을 산출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

그림 1은 경사지반 실험이 가능하도록 배중순과 권민

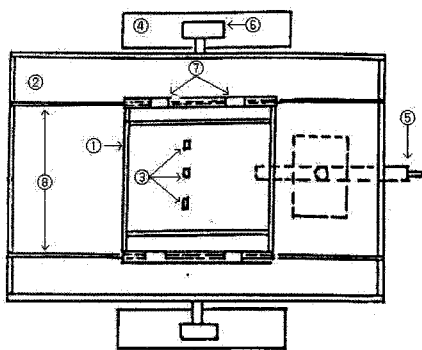
재(2008)의 모형토조 하부에 스크류잭을 설치하여 경사지반을 형성할 수 있도록 설계하였다. 그림 1(a), (c)에서 ①은 상부 토조, ②는 하부 토조, ③은 모형말뚝, ④는 토조 지지대, ⑤는 경사조절 스크류잭, ⑥은 회전축, ⑦은 슬라이딩 바퀴, ⑧은 슬라이딩 유도레일을 나타낸다.

2.1.1 모형말뚝

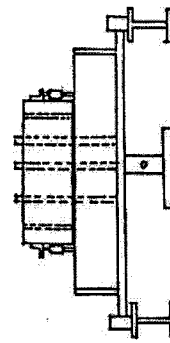
그림 2의 말뚝 형상에서 지반변형 방향에 수직하고 있는 면의 길이를 전면폭(B)이라 하고 지반변형 방향과 나란한 면의 길이를 측면폭(H)이라 할 때, 실험에서는 B와 H비가 2:1인 전면폭이 넓은 형태(B-type)와 B와 H비가 1:2인 측면폭이 넓은 형태(H-type)의 말뚝을 사용하였으며 말뚝의 제원은 표 1과 같다. 여기서, L은 말뚝 길이, T한 말뚝두께, E는 탄성계수, Z는 단면계수를 나타낸다. 말뚝의 위치별 특성을 분석하기 위하여 열말뚝을 내부와 외부로 구분하여 설치하였으며, 내부에 설치된 말뚝을 inner pile이라 하고 외부에 설치된 말뚝을 outer pile이라 명명하였고, CL을 중심으로 4개의 말뚝이 대칭구조를 이루도록 배열하였다. 스트레인 게이지한 그림 3과 같이 0.2L의 등간격으로 말뚝의 인장부에 4개를 설치하였으며, 지반변형 방향은 화살표 방향이다.

2.1.2 토조 및 모형지반

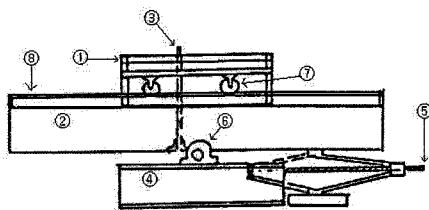
토조의 폭은 단독말뚝의 경우와 수평간격(S_h)을 달리



(a) 평면도



(b) 측면도



(c) 정면도



(d) 설치 후 전경

그림 1. 모형실험장치

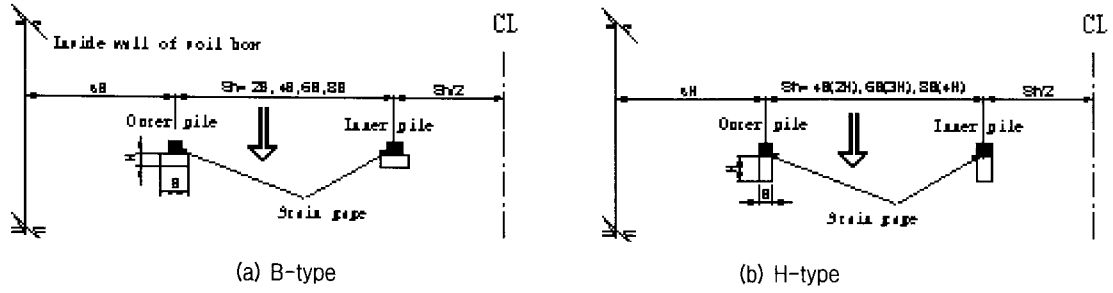


그림 2. 말뚝의 형상

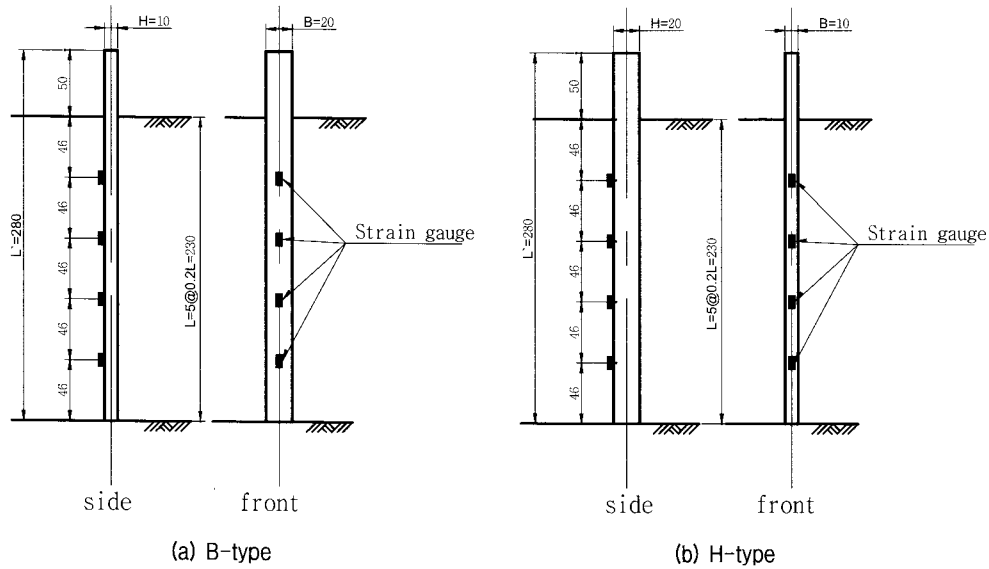


그림 3. 스트레인게이지의 위치

표 1. 말뚝의 제원

	B (Breadth) (mm)	H (Height) (mm)	L (Length) (mm)	T (Thick) (mm)	E (Young's Modulus) (kPa)	Z (Section Modulus) (cm ³)
B-type	20	10	230	1.5	71,588,180	0.278
H-type	10	20	230	1.5	71,588,180	0.422

표 2. 수평간격에 따른 토조 폭(cm)

	Single	Spacing of Row Pile S_h			
		2B	4B	6B	8B
B-type	20	32	44	56	68
H-type	10	-	32	38	44

표 3. 모형지반

C_s	2.75
γ_d (kN/m ³)	14.71
γ_{dmax} (kN/m ³)	15.69
γ_{dmin} (kN/m ³)	14.02
D_r (%)	43.9
C_u	1.45
C_g	0.92
ϕ	30

한 열말뚝의 경우 변화하게 되며, 변화되는 토조의 폭은 표 2에 표기하였다. 상부토조의 이동에 따른 마찰을 최대한 줄이기 위해 상부토조 외곽에 볼베어링이 들어있는 바퀴를 부착하여 하부토조 틀 위에 부착된 레일 위를 따라 전단면과 평행 이동하게 하였으며, 상부토조의 이동에 따라 하부지반에 상부토조의 앞부분이 삽입되는

것을 막기 위해 슬라이딩 바퀴와 유도레일을 설치하였다. 모형지반은 주문진 표준사를 사용하였으며, 물리 역학적 특성은 표 3과 같다.

2.2 실험방법

모형실험은 말뚝이 없을 때(Non pile)와 단독말뚝(Single pile)일 때 그리고 열말뚝(Row piles)일 때의 경우로 나누어 표 4와 같이 실시하였다. 실험 방법은 그림 4, 5와 같이 경사지반을 형성하기 위해 토조 하부에 설치된 스크류 잭으로 토조 옆면에 부착되어있는 경사각도계를 확인하면서 소정의 각도로 증가(0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 23°, 25°, 26°...(이후 1°씩 증가))시키면서 들어 올릴 때마다 말뚝의 수평변위와 변형률 그리고 토조 변위를 기록하였고 측정치가 일정한 값을 나타내면 다음 단계를 진행하였다. 경사조절은 최대 45°까지 들어 올릴 수 있도록 설계하였다. 그리고 본 실험은 경사지반에 말뚝이 경사지게 설치가 되어있지만, 해석시 좌표변환에 의해 경사지반에 연직으로 설치된 것으로 변환할 수 있다.

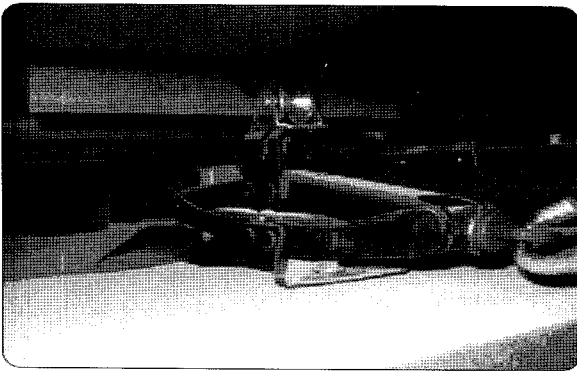


그림 4. 경사조절 Screw Jack

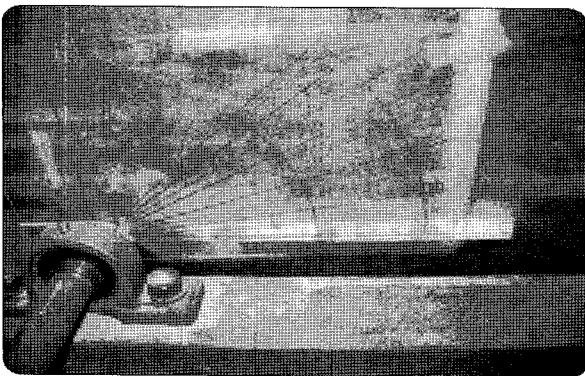


그림 5. 경사각도계

표 4. 실험횟수

Pile	Non	Single	Row piles	Sum	
B-type	5회	1회	4회 ($S_h = 2B, 4B, 6B, 8B$)	(5+1+4)=10회	18×2(repeat) = 36회
H-type	4회	1회	3회 ($S_h = 2H, 3H, 4H$)	(4+1+3)=8회	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평형방정식

흙자중(W_s)에 의해 발생하는 전단면(剪斷面)(□ABCD)의 수평성분은 활동력인 전단력으로, 수직성분은 저항력으로 계산되어 전단면의 활동과 저항에 영향을 주게 된다. 그러나 실험모델에서는 토조사중(W_b)에 의해 발생하는 연직성분이 바퀴축으로 전달(이때 토조 바퀴축과 레일의 마찰력은 무시한다고 가정)되어 전단저항에 영향을 주지 못하게 되고, 수평성분만 활동력에 영향을 주게 된다. 따라서 실험모델에서는 토조의 크기에 따라 자연사면의 파괴각(i_f)이 조금씩 다르게 나타난다.

그림 6은 경사지반에서 힘의 분력을 나타낸 것이다. 그림 6에서 흙 자중과 토조 자중에 의해 전단면(□ABCD)에 발생하는 수평분력(전단력)과 수직분력(수직력)은 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i = W \sin i = (W_s + W_b) \sin i \quad (1)$$

$$N = (W_s) \cos i \quad (2)$$

여기서, T_i : 전단면에 발생하는 수평분력(전단력)

N : 전단면에 발생하는 수직분력(수직력)

W_s : 흙의 자중

W_b : 토조의 중량

전단면에 발생하는 전단강도(S')와 전단응력(τ)은 식 (3), (4)와 같다.

$$S' = c + \sigma \tan \phi = c + \left(\frac{N}{A}\right) \tan \phi \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T_i}{A} \quad (4)$$

여기서, A : 전단면의 면적

σ : 전단면에 작용하는 수직응력

τ : 전단면에 작용하는 전단응력

안전율 f_s 는 식 (3), (4)에 의해서 식 (5)와 같이 나타

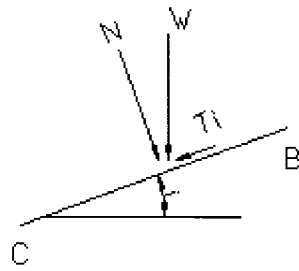
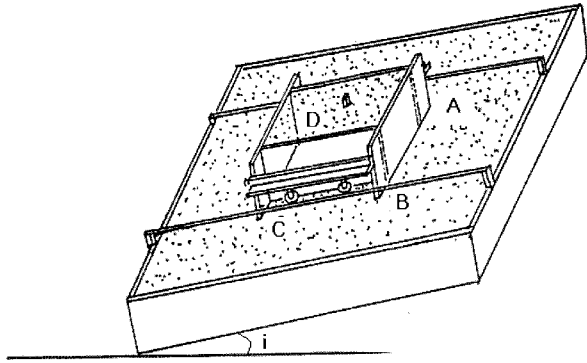


그림 6. 경사지반의 힘의 분력

표 5. 토조의 폭에 따른 임계각과 파괴각

Breadth of soil box (b, cm)	single	2S	4S	6S	8S
	22	32	44	56	68
$i_c (^{\circ})$	24.8	26.3	27.3	27.8	28.2
$i_f (^{\circ})$	25.4	26.5	27.5	28.5	29.2

낼 수 있다.

$$f_s = \frac{S'}{\tau} = \frac{c + \sigma \tan \phi}{\tau} \quad (5)$$

힘의 평형방정식을 이용하여 안전율을 구하면 식 (6)과 같으며, 안전율에 따른 사면경사각을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

만약, $c=0$ 이면

$$f_s = \frac{\sigma \tan \phi}{\tau} = \frac{N}{T_i} \tan \phi$$

$$= \frac{W_s \cos i}{(W_s + W_b) \sin i} \tan \phi = \frac{W_s}{(W_s + W_b)} \frac{\tan \phi}{\tan i} \quad (6)$$

$$i = \tan^{-1} \left(\frac{W_s}{(W_s + W_b)} \frac{\tan \phi}{f_s} \right) \quad (7)$$

식 (7)에서 $f_s=1$ 일 때의 경사각은 이론상의 임계각 (i_c)이 될 것이다. 여기서 임계각은 실험에서 사면활동을 일으키는 파괴각(i_f)과 유사하게 나타나며 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_c = \tan^{-1} \left(\frac{W_s}{(W_s + W_b)} \tan \phi \right) \quad (8)$$

표 5는 이론상의 임계각(i_c)과 파괴각(i_f)을 나타낸 것이다. 실제 실험파괴각과 임계각은 최대 1°정도의 차이를 보이고 있어 비교적 실험정밀도가 양호한 것으로 파악된다.

표 5에서 S는 토조의 폭을 나타내는 것으로 말뚝의 폭 또는 높이를 기준으로 큰 값을 의미한다. 예를 들어 B-type pile의 경우는 폭이 넓으므로, 2S의 경우는 2B 간격을 의미하고, H-type pile의 경우는 높이가 크므로 2S는 2H 즉 4B를 의미한다. 따라서 토조의 크기가 B-type pile의 2B와 H-type pile의 2H(4B)와 같다는 의미이다.

그림 7은 각 간격별 말뚝이 없는 자연사면의 토조에 사면의 경사(i)를 증가시키면서 상부 토조의 이동량을 측정하여 파괴에 이를 때 까지 측정된 것을 도시한 것이다. 이 상부 토조의 이동량은 전단면의 전단 변위량과 전단면 상부지반의 변위량이 된다.

그림 7에서 사면의 활동은 파괴각까지 서서히 변형을 일으키다가 어느 시점에서 무한변형이 일어나는 양상을 띠고 있다. 여기서 S는 토조의 크기를 나타내며 말뚝 사이의 간격에 의해 결정된다. B-type 에서는 B를 기준

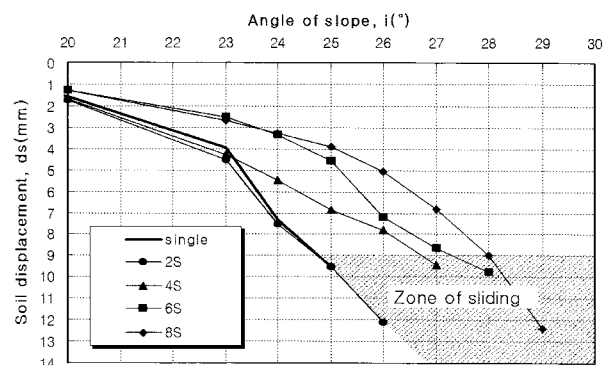


그림 7. 경사에 따른 토조변위

으로 H-type 에서는 H를 기준으로 결정한 값이다.

그림 7에서 single과 2S의 토조는 경사에 따른 변위가 거의 일치하고 있으나, 파괴각은 2S일 때 크게 나타나고 있는 특징이 있으며, 토조의 크기가 커질수록 즉, 넓은 간격의 말뚝을 설치할 토조일수록 파괴각이 증가함을 알 수 있다.

실제 single, 4S, 6S의 토조변위가 9mm를 초과한 후 급격한 변위를 일으키며 파괴되었다. 지반변위가 9mm를 초과할 경우 언제든지 파괴위험이 있는 것으로 파악되어 활동위험영역(zone of sliding)으로 표시하였다.

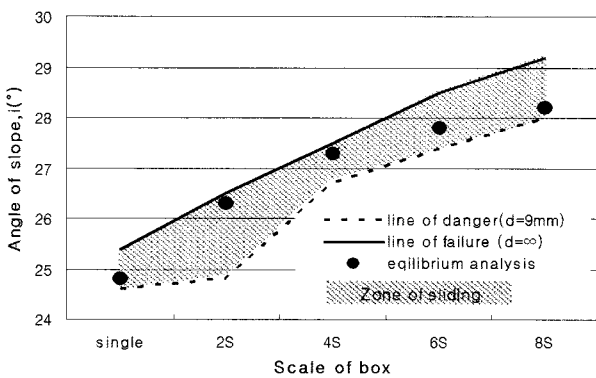
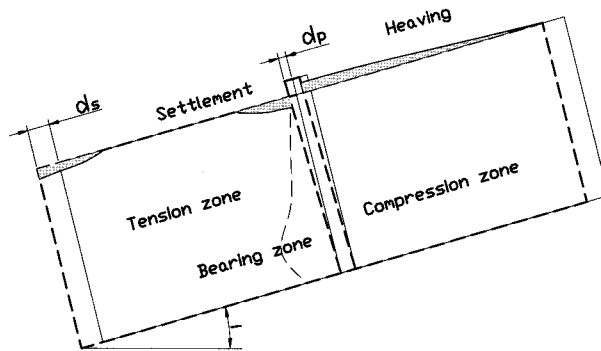


그림 8. 활동위험영역

그림 8은 활동위험영역(zone of sliding)을 도시한 것으로, 점선은 토조 변위가 9mm인 경우이며, 실선은 토조가 무한변위를 일으킬 때의 파괴각도(i_f)를 표현한 경계선이다. 점은 평형방정식을 이용해 이론적으로 해석한 임계각(i_c)을 도시한 것이다. 실험에서 나타난 활동위험영역 안에 이론값이 분포하고 있어 비교적 실험적 정도는 신뢰할 만하며, 9mm이후 파괴조짐이 있을 수 있다는 경향을 잘 나타내 주고 있다.

3.2 지반변형 및 지지 형태

그림 9(a)는 모형사면의 활동시 지반의 수직변위와 수평변위를 형상화한 것이다. 경사지반에 수평력을 가하면 말뚝에 의해 지반의 움직임이 제약을 받게 되면서 그림 9(a)와 같이 말뚝의 변위(d_p)가 토조의 변위(d_s)보다 적어 말뚝 상부지반은 압축영역(Compression zone)이 발생하고 하부지반은 인장영역(Tension zone)이 발생하게 된다. 이때 경사가 증가함에 따라 이들 영역은 확장하는 반면, 지지영역(Bearing zone)은 점점 축소하는 형태가 된다. 사면이 파괴각에 이르렀을 때에는 지반도 움직이게 되므로 지지영역은 거의 사라지게 되고 인



(a) 수직변위 형상

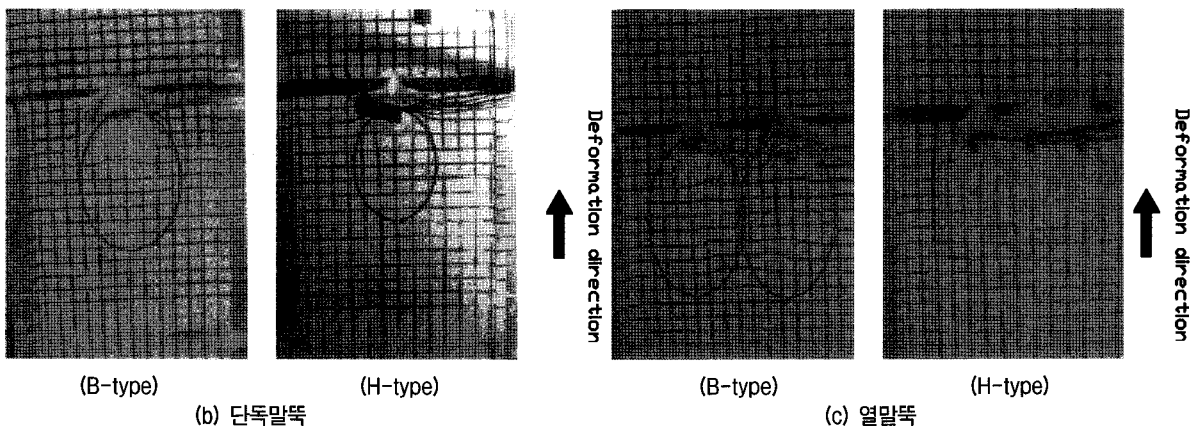


그림 9. 지반 변형

장영역과 압축영역이 뚜렷해지게 되는 양상을 나타낸다. 그림 9의 (b)와 (c)는 단독말뚝과 열말뚝의 수평변위를 말뚝형상별로 나타낸 것이다. B-type과 H-type의 압축구간은 응력구근처럼 볼록한 원형의 형태를 하고 있으며, B-type의 경우가 H-type보다 원형의 길이와 폭이 조금 큰 것으로 나타났다. 그리고 열말뚝에서는 압축영역의 형태가 중첩되고 있다는 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

3.3 단독말뚝(Single pile)

3.3.1 지반변위

그림 10은 사면경사에 따른 지반변위의 관계를 도시한 것이다.

그림 10에서 모든 경우에 약 20° 이후부터 경사증가에 따른 토조변위량이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 말뚝이 없는 자연사면(no pile)의 경우 25°에서, H-type의 경우는 약 27°를 초과한 후에, B-type 경우는 파괴각이 29°를 초과할 때 큰 변위를 일으키면서 파괴되어 전면폭이 넓은 말뚝의 경우가 파괴각(if)이 커 지반의 변형저항에 더 효과적임을 알 수 있었다.

말뚝이 있는 경우(약 15mm)가 없는 경우(약 9mm)보다 큰 변형에서 지반의 파괴가 유도되는 것으로 확인되어 말뚝의 존재 여부가 지반파괴를 지연시켜 파괴시의 지반변형량이 증가됨을 확인할 수 있었다. 단독말뚝에서 파괴시의 변형량은 거의 동일하나, 말뚝의 전면폭이 넓은 경우가 좁은 경우보다 경사각의 증가를 보이기 때문에 지반변형에 대한 저항성은 말뚝의 전면폭(B)이 넓은 경우가 우세한 것으로 나타났다.

3.3.2 휨모멘트

그림 11은 단독말뚝의 경사각과 변위에 따른 최대휨

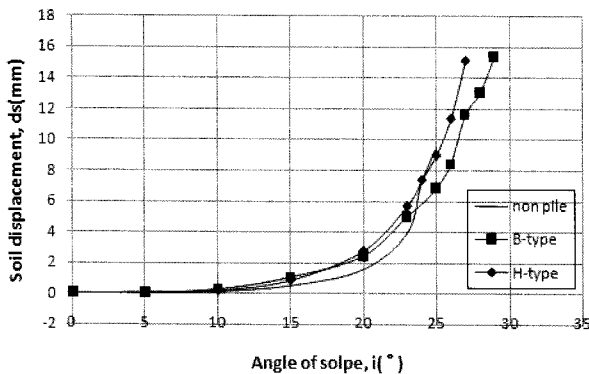
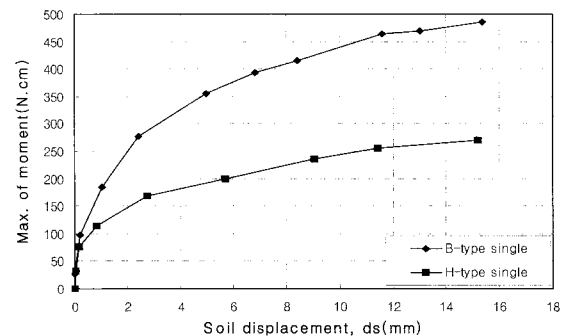


그림 10. 사면경사(i)와 지반변위(ds)의 관계도

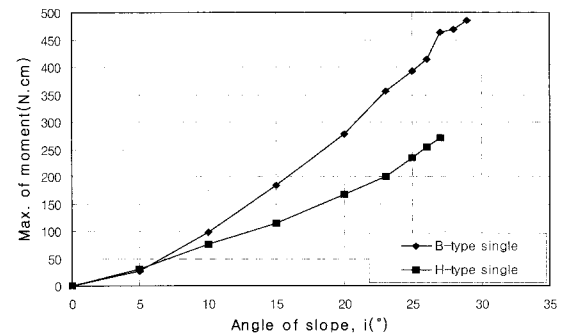
모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 그림 11(a)에서 B-type이 H-type보다 지반변형에 따른 모멘트의 증가가 큼을 알 수 있으며 두 경우 모두 약 15mm에서 파괴가 일어났다. 그림 11(b)에서 경사각 증가에 따른 모멘트의 증가가 B-type이 H-type보다 활동력에 대한 저항이 크다는 것을 알 수 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 사면경사가 증가하게 되면 점차 지반의 변형량이 증가하면서 지반의 활동가능성이 커지게 되고, 말뚝에 가해지는 힘이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 토괴의 활동력은 일정한 경사에서는 동일한 물체력 즉 활동력을 지니게 된다. 그러나 말뚝이 설치될 경우, 말뚝형태에 따라 같은 경사에도 말뚝이 받는 토압의 형태와 크기가 다를 수 있어 휨모멘트의 크기가 다르게 나타날 뿐만 아니라 지반의 변형의 형태가 다르게 나타난다. 사면활동력의 일부는 지반변형에, 일부는 말뚝에 가해짐으로써 말뚝이 설치될 경우 보다 큰 변형에서 지반이 파괴에 이르게 되며, 휨모멘트와 파괴각이 다르게 나타나는 것은 말뚝 형태에 따라 말뚝에 가해지는 토압의 크기와 형태가 다르다는 것을 말해준다.

3.3.3 토압

그림 12는 단독말뚝의 경사각에 따른 깊이별 수평응

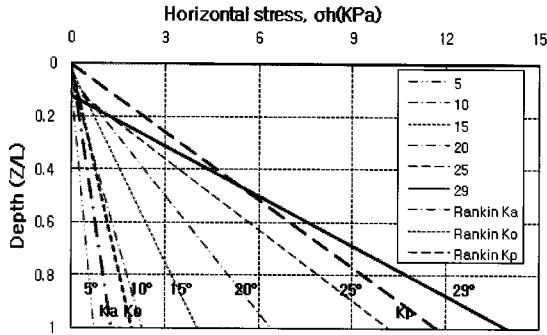


(a) 지반변위

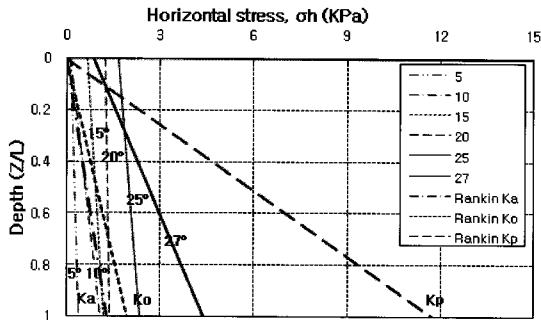


(b) 사면경사

그림 11. 단독말뚝에서 사면경사(i)와 변위(ds)에 따른 최대휨모멘트

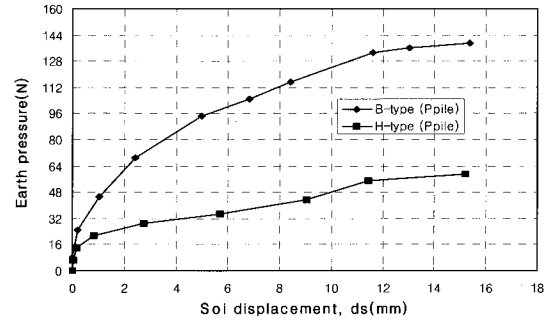


(a) B-type

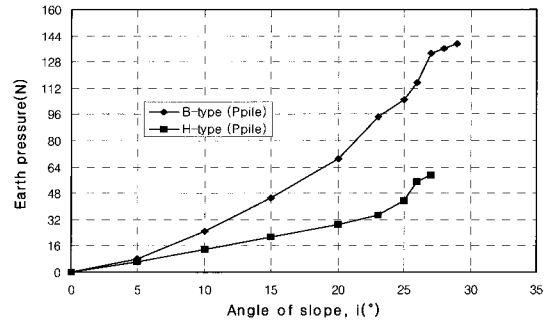


(b) H-type

그림 12. 깊이별 수평응력(σ_h)



(a) 지반변위



(b) 사면경사

그림 13. 단독말뚝에서 사면경사(i)와 변위(d_s)에 따른 토압

력의 크기를 나타낸 것이다. B-type의 경우는 삼각형 분포를 띄고 있으며, H-type의 경우는 사다리꼴분포양상을 지니고 있다. 이는 지반이 변형을 일으킬 때 B-type의 경우는 전면폭이 넓어 상대적으로 측면마찰력보다는 전면토압의 영향이 많아 전면토압이 증가할 때의 분포양상인 삼각형 분포형태를 띄고 있으며, H-type의 경우는 초기변형에서는 삼각형 분포양상을 띄고 있으나 변형증가와 함께 측면마찰력의 크기가 증가하면서 사면형으로 변화되는 과정을 거치는 것으로 사료된다.

Rankine의 토압론에 의해 산정한 주동정지·수동토압계수를 활용하여 구한 수평응력과 비교해 볼 때, B-type의 경우는 주동토압을 능가하는 것으로 나타났고, 이에 반해 H-type은 분포형태도 다를 뿐 아니라, 수동토압에 못 미치는 것으로 나타났다. 이와 같이 다르게 나타나는 것은 Rankine의 수동토압의 경우 파괴면이 저면에서 $45+\phi/2$ 의 각도로 가정하여 전개하는 반면, 본 실험에서는 파괴면이 전단면 즉 저면으로 되어있어 보다 큰 토압이 발생된 것으로 판단된다. 따라서, 사면의 토압은 파괴면을 기준으로 한 활동력으로 산정하는 것이 바람직하며 아울러 Rankine의 토압을 적용할 시에는 일반적인 Rankine 토압으로 단순 산정하여 적용하기에는 곤란하고, 추가적인 이론을 가미한 접근법이 필요한 것으로

판단된다.

그림 13은 지반변위와 사면각에 따른 말뚝에 작용하는 토압(P_{pile})변화를 나타낸 것이다. 여기서 구한 토압의 크기는 그림 12에서 나타나는 수평응력(σ_h)의 합력 즉 면적으로 나타낸 것이다. 그림 13(a)에서 변위에 따른 토압의 크기가 B-type이 H-type보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 말뚝에 전달되는 토압의 크기가 측면에 생기는 측면마찰력과 전면부에 가해지는 전면토압의 합이라 할 때, 전면토압의 크기가 상대적으로 측면마찰력보다 크다는 것을 말해 주고 있다. 아울러 같은 변위에서 B-type의 크기가 크다는 것은 지반이 변형할 때 생기는 물체력 즉 활동력이 B-type에서 보다 많이 전달된다는 것을 의미한다. 이와 같은 현상은 경사에 따라 증가되는 토압을 나타낸 그림 13(b)에서도 나타난다. 그림 13(b)에서 경사각에 따른 토압이 B-type에서 크게 나타나고 있고, 그림 10에서 경사각에 따른 지반변형이 상대적으로 B-type이 작게 나타나고 있으므로 B-type이 지반의 변형을 보다 억지함으로써 보다 큰 토압을 받고 있는 것으로 나타났다. 따라서 단독말뚝에서는 B-type의 형태가 보다 효과적으로 지반변형을 억지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.3.4 수평저항력

그림 14는 활동력(T_i)과 흙의 전단저항력(F_{st}) 그리고 말뚝의 수평저항력(F_p)을 사면경사별로 도시한 것이다.

활동력은 활동토괴의 전단력과 같은 힘으로 식 (1)에 의해 산정할 수 있다. 흙의 전단저항력은 활동토괴의 수직력에 의해 발생하는 전단저항력으로 식 (3)의 전단강도에 전단면을 곱해 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$F_{st} = S' \times A = (c + \sigma \tan \phi) \times A \quad (9)$$

만약, $c=0$ 이면

$$F_{st} = \sigma \tan \phi \times A = \frac{N}{A} \tan \phi \times A = N \tan \phi \quad (10)$$

말뚝의 수평저항력(F_p)은 실험결과에서 측정된 말뚝에 작용하는 토압(P_{pile})과 같다. 그림에서 T_i 선형과 F_{st} 선형이 교차하게 되는데 이 지점이 말뚝이 없을 때의 파괴각에 해당한다. 말뚝을 설치할 경우 이점을 초과하는 저항력이 발생하게 되는데 그 이유는 저항력에 말뚝의 저항력이 더해지기 때문이다. 경사에 따른 지반의 분단력 즉 지반수평저항력(F_g)은 F_i 와 F_p 의 차이가 될 것이며, 그림에서는 F_i 와 F_p 의 사이의 영역이 이 값에 해당한다. 잠재적인 지반의 수평저항력은 F_{st} 가 될 것이나, 지반이 파괴전이므로 F_g 는 F_{st} 에 이르지 않는 것이다. 다시 말해 F_{st} 는 F_g 의 최대수평저항력에 해당한다.

3.4 열말뚝(Row piles)

3.4.1 지반변위

그림 15는 사면경사에 따른 지반변위를 나타낸 것이다.

B-type에서는 말뚝의 간격이 가장 넓을 때 일정한 각도에 대해 지반 변형이 작은 것으로 나타났으나, H-type

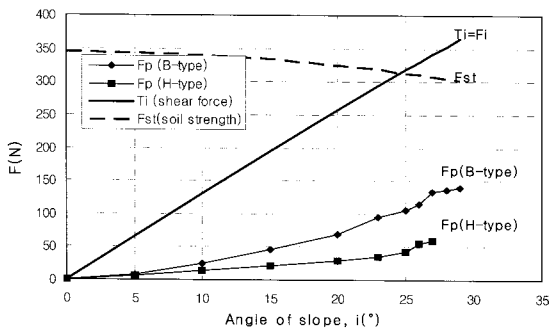


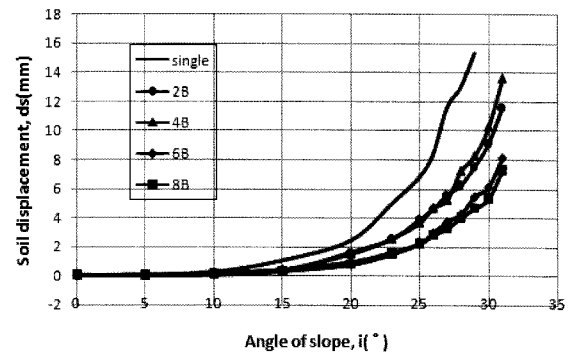
그림 14. 수평저항력과 사면경사 관계도

일 때는 가장 좁은 간격인 4B(2H)일 때 변위가 작은 것으로 나타났다. 특이한 사항은 H-type의 경우 6B(3H)이후는 다시 간격이 넓어질수록 커지는 경향을 나타내주는 것이다. 이는 좁은 간격일 때 아칭효과로 말뚝에 전달되는 힘이 상대적으로 커졌을 가능성이 있다는 것을 의미한다.

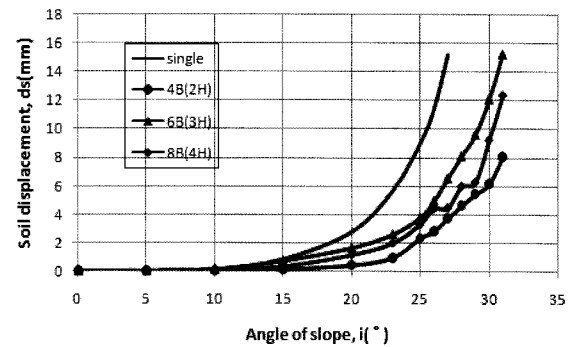
3.4.2 휨모멘트

그림 16은 사면경사각에 따른 최대휨모멘트를 inner와 outer로 구분하여 말뚝 형상별로 도시한 것이다.

그림 16(a), (b) 모두 내부말뚝의 경우가 사면경사각 증가에 따른 간격별 차이 즉 기울기편차가 크고, 외부말뚝의 경우는 비교적 적은 편차량을 보였다. 이는 힘의 변화는 말뚝의 위치가 외부보다 내부에서 좀 더 커다는 것을 말해준다. 사면경사에 따른 모멘트의 크기변화는 B-type보다 H-type가 훨씬 복잡한 경향을 나타내고 있다. 특이한 사항은 H-type의 4B(2H)의 경우 모멘트의 크기가 가장 작다가 가장 크모멘트변환되는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향분석을 힘과 변위관계로 나타내 불위해 그림 17에 토조 변위에 따른 최대휨모멘트의 상관관계를 도시하였다.

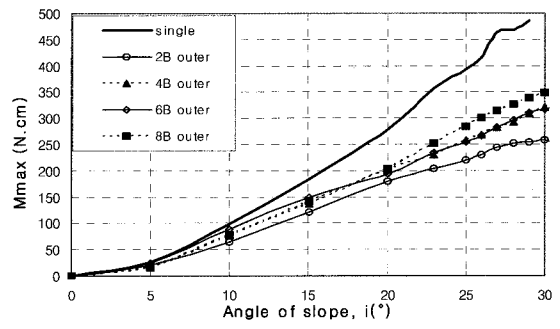
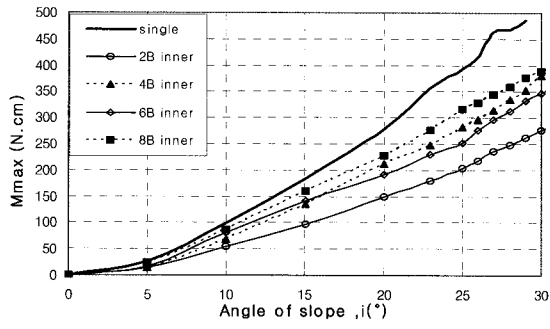


(a) B-type

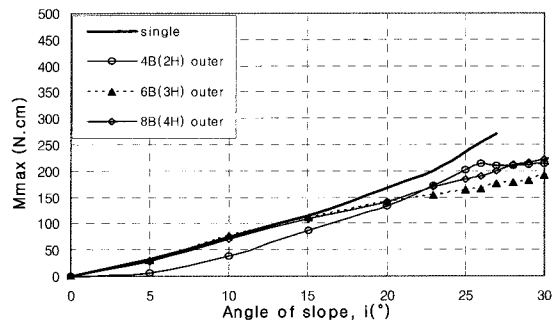
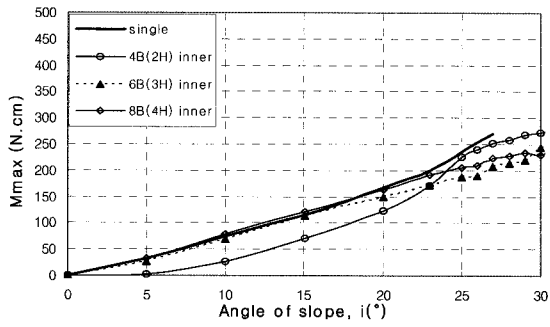


(b) H-type

그림 15. 열말뚝에서 지반변위(ds)와 사면경사(i)의 관계도

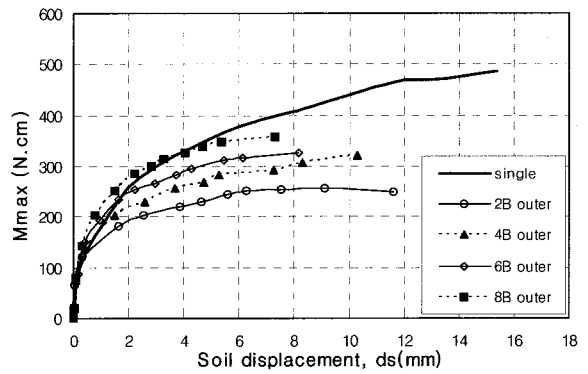
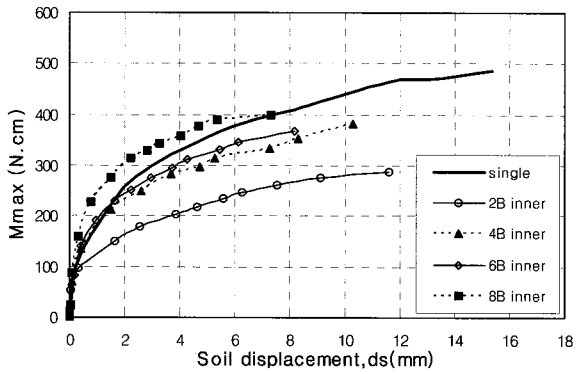


(a) B-type

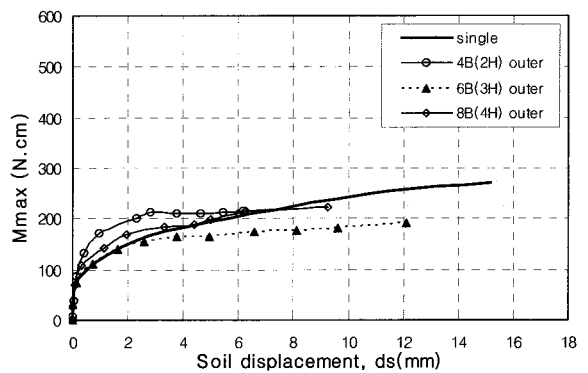
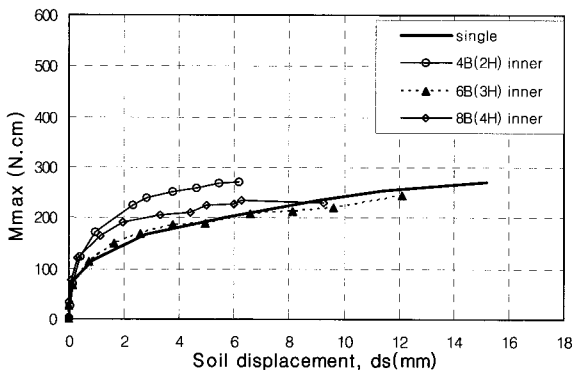


(b) H-type

그림 16. 사면경사(i)와 최대휨모멘트 관계도



(a) B-type



(b) H-type

그림 17. 지반변위(d_s)와 최대휨모멘트 관계도

그림 17(a)에서 말뚝의 간격이 넓어질수록 그 크기가 증가함을 볼 수 있다. 내부말뚝의 경우가 외부말뚝의 경우보다 약간 크게 나타났으며, 8B의 경우 단독말뚝의 경우보다 크거나, 비슷하며, 그 외의 간격에서는 단독말뚝보다 작은 경향을 나타내었다. 그림 17(b)에서는 4B(2H)의 경우가 변위에 따른 모멘트의 크기가 가장 큰 것을 알 수 있다. 6B(3H)를 제외하고 대부분의 경우 초기 변위에 대한 최대휨모멘트의 크기가 단독말뚝의 경우보다 크게 나타나, B-type과는 다른 양상을 나타내었다.

3.4.3 토압

그림 18은 지반의 변위에 따른 토압의 변화를 inner와 outer으로 구분하여 말뚝 형상별로 도시한 것이다. B-type에서 간격이 증가할 수록 토압의 크기가 커지고 있음을 알 수 있으며 inner pile이 out pile보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 8B와 6B의 inner pile을 제외하고는 단독말뚝보다 작게 나타났다.

H-type에서는 모든 경우가 단독말뚝보다 우세하거나 거의 같은 경향을 나타내고 있으며 특이한 사항은 말뚝에 작용하는 토압이 4B(2H)의 경우가 가장 토압이 크게 나타났다는 것이다. 이는 명확히 설명하기 힘든 부분이지만 앞서 언급한 것과 같이 지반의 아칭효과와 관련이

있는 것 같다. 지반의 간격이 가장 좁은 4B 간격에서 가장 큰 아칭효과가 발생했으며 아울러 모든 경우가 단독말뚝보다 큰 토압이 산정되었으므로 측면폭이 넓은 H-type의 경우는 B-type과는 달리 말뚝사이의 구속된 지반이 변위가 발생함에 따라 소정의 토압(측면마찰력)을 발생시키는 효과가 있음을 말해준다.

3.4.4 수평저항력

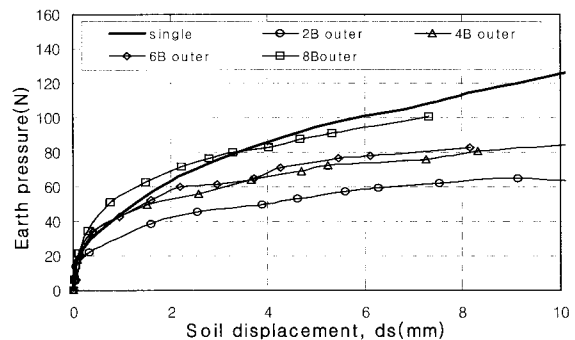
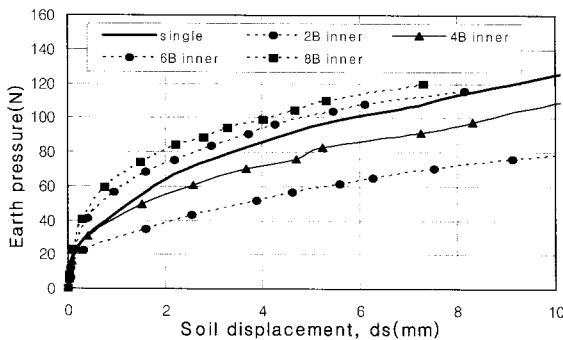
그림 19는 사면각에 따른 수평력의 변화 과정을 말뚝 형상별로 나타낸 그림이다.

F_i 는 열말뚝을 설치한 경우 사면경사에 의해 발생한 수평저항력을 나타내며, 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. F_g 는 지반의 수평저항력을 말하며 F_{pr} 은 열말뚝의 수평저항력을 나타낸다.

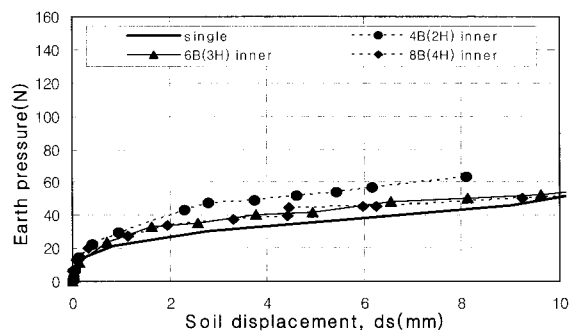
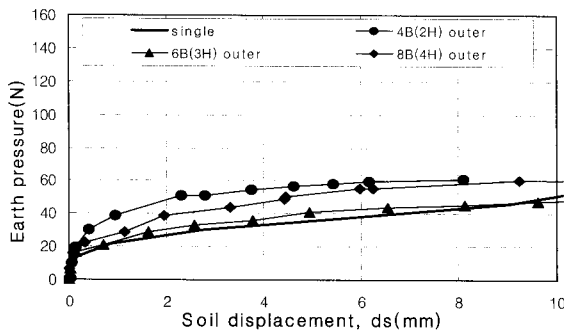
$$T_i = F_i = F_g + F_{pr} \quad (11)$$

F_{st} 는 지반이 가지고 있는 전단강도에서 구한 전단저항력을 의미하며 F_r 은 식 (12)와 같이 F_{st} 와 F_{pr} 의 합으로 열말뚝이 설치된 지반의 잠재적인 수평저항력으로 다시 말해 최대수평저항력을 의미한다.

$$F_r = F_{st} + F_{pr} \quad (12)$$



(a) B-Type



(b) H-Type

그림 18. 토압과 지반변위(ds)의 관계도

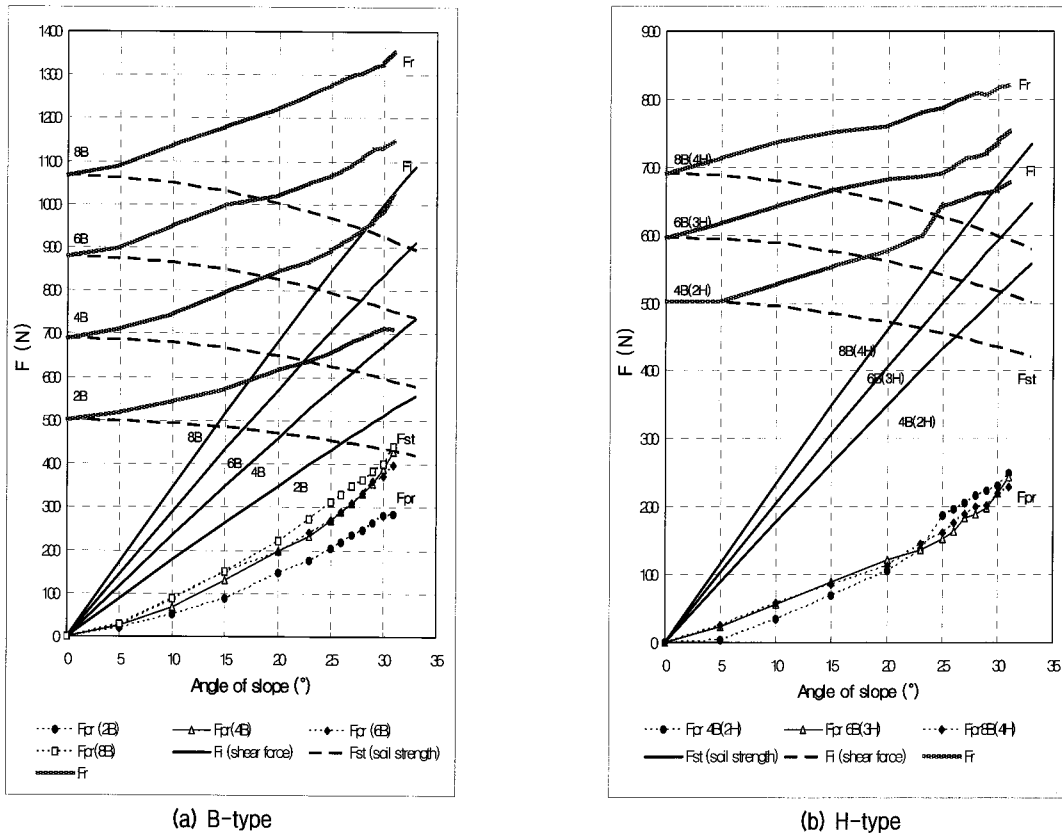


그림 19. 수평저항력과 사면경사(θ) 관계도

열말뚝이 없을 때는 F_i 와 F_{st} 의 선형이 만나는 점이 파괴각이 될 것이며 열말뚝이 있을 때는 F_i 와 F_{pr} 의 선형이 만나는 점이 파괴각이 될 것이다. 따라서 이러한 특성을 이용해 사면의 안전율을 산출할 수 있다. 그러나 실제 실험에서는 이러한 각에 이르기 전에 표면부의 활동이 전개되었다. 따라서 말뚝이 설치될 경우의 파괴각은 말뚝전면부의 사면 활동이 안정할 때 발휘할 수 있을 것이다. 열말뚝이 있는 지반의 분담력 즉 지반의 전단저항력(F_g)은 지반에 가해진 수평력($T_i=F_i$)에서 열말뚝에 가해진 전체수평력(F_{pr})을 뺀 값으로 나타내며 식 (13)과 같으며 그림 19에서는 F_i 선형과 F_{pr} 선형 사이 값에 해당한다.

$$F_g = F_i - F_{pr} \quad (13)$$

4. 결론

지반 경사에 따른 수동 열말뚝의 모형실험을 통해 지반변위와 수평간격에 따른 말뚝의 형상별, 위치별 특성을 고찰하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝의 지반변형 억지 효과는 자연사면의 경우 25°, H-type에서는 27°, B-type에서는 29°를 초과할 때 지반 파괴양상을 보여 전면폭이 넓은 말뚝이 지반변형저항에 더 효과적임을 알 수 있다.
- (2) 휨모멘트는 H-type, B-type 모두 inner pile의 경우 기울기편차의 변화가 크고 outer pile의 경우는 비교적 적은 편차량을 보였다. 이는 힘의 변화는 말뚝의 위치가 외부보다 내부에서 좀 더 크다는 것을 알 수 있다.
- (3) 토압은 B-type의 경우 말뚝간격이 증가할수록 커짐을 알 수 있었고 inner pile이 outer pile보다 더 큰 값을 나타내고 있다. H-type의 경우 지반의 간격이 가장 좁은 4B 간격에서 가장 큰 아칭효과가 발생했다. 측면폭이 넓은 H-type의 경우는 B-type과는 달리 말뚝사이의 구속된 지반이 변위가 발생함에 따라 소정의 토압을 발생시키는 효과가 있음을 알 수 있다.
- (4) 수평저항력과 사면경사 관계도에서 수평저항력, 지반의 전단저항력, 최대수평저항력 값을 이용하여 사면의 파괴각과 말뚝과 지반의 분담력을 산출할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김병철 (2000), *사면보강용 억지말뚝의 간편설계법*, 석사학위논문, 연세대학교.
2. 배중순과 권민재 (2008), “수평모래지반에서 측방변형을 받는 사각형 수동 열말뚝에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 24권, 4호, pp.23-36.
3. 손규만 (1999), *Bishop 간편법을 활용한 억지말뚝의 사면안정효과에 대한 평가*, 석사학위논문, 중앙대학교.
4. Chen, L. T. Poulos, H. G. and Hull T. S. (1997), “Model tests on pile groups subjected to lateral soil movements”, *Soil and Foundations. Japanese Geotechnical Society*, Vol.37, No.1, pp.1-12.
5. Hassiotis S., Chameau J. L. and Gunaantne M. (1997), “Design method for stabilization of slope with pies”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.123, No.4, pp.314-323.
6. Ito, T. and Matsui, T. (1975), “Methods to estimate lateral force action on stabilizing piles”, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.4, pp.43-59.
7. Poulos, H. G. (1995), “Design of reinforcing piles to increase slope stability”, *Canadian Geotechn. Journal*, Vol.32, pp.808-818.

(접수일자 2009. 7. 21, 심사완료일 2009. 11. 16)