

수평모래지반에서 측방변형을 받는 사각형 수동 열말뚝에 관한 실험적 연구

A Study of Rectangular-shaped Passive Row Piles in Horizontal Sand-ground under Lateral Soil Movement by Model Test

배 종 순¹ Bae, Jong-Soon

권 민 재² Kwon, Min-Jea

Abstract

This study describes model tests on instrumented rectangular-shaped passive row piles embedded in horizontal sand-ground undergoing lateral soil movement. We tried to find the property of row piles dependent on the shape of pile, including the position of the pile in row, pile spacing, and soil movement. The results of test are as follows. The lateral earth pressure diagram variously appeared to be triangle, trapezoid and rectangular by shape and position of pile. The outer pile has a larger bending moment than the inner pile in the case of B-type, the inner piles has larger one than outer pile in case of H-type. R_f (the ratio of resistance to lateral soil movement) was found to increase with increasing pile spacing irrespective of pile-shape. Y/L (location of action of lateral resistance force) for d_s (displacement of soil) and S_h (spacing of pile) appeared to be nearly regular position, and H-type is higher than B-type.

요 지

본 연구는 측방변형을 일으키는 수평모래지반에 매설된 사각형 수동열말뚝의 모형실험에 대한 것이다. 말뚝의 형상, 열말뚝의 위치, 말뚝의 간격과 지반변형에 따른 열말뚝의 특성을 고찰하고자 하였다. 실험결과는 다음과 같다. 수평응력의 분포양상은 말뚝의 형상과 위치에 따라 삼각형, 사다리꼴, 사각형의 형태로 다양하게 나타났다. 휨모멘트는 B-type의 경우 outer pile이 inner pile보다 크게 나타났으나, H-type의 경우는 inner pile이 outer pile 보다 크게 나타났다. 수평저항력비(R_f)는 말뚝의 형상에 관계없이 열말뚝의 수평간격이 증가함에 따라 증가하는 경향으로 나타났다. 수평저항력의 작용점위치(Y/L)는 지반변위와 수평간격에 따라 큰 변화를 보이지 않으며, H-type이 B-type보다 조금 크게 나타났다.

Key words : Lateral movement, Lateral resistance force, Passive pile, Row piles

1. 서 론

측방변형은 지반의 유동에 의해 발생하며, 이러한 측방유동은 연약지반위의 교대기초나 건물기초 및 사면의 억지말뚝 등에 영향을 줄 수 있다. 국외에서는 일찍이

수동말뚝의 경우는 Heyman(1965), Leussink & Wens(1969) 등이 측방변형에 의한 피해사례를 보고한 바가 있으며, 성토에 근접한 구조물 기초말뚝에 작용하는 측방토압에 대한 연구는 Tschebotaioff(1973), Franx & Boonstra(1948) 등이 진행하였으며, 억지말뚝에 대해 Yamada

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

2 정회원, 경상대학교 공학박사, 경상대학교 공학연구원 연구원, KD이앤씨 대표 (Member, Doc., Dept. of Civil Eng., Gyeongsang Univ., Researcher, Eng. Research Institute, President of KD E & C, kminjea@paran.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

(1971), Fukumoto(1975), Ito et al.(1975) 등이, 억지말뚝을 이용한 사면안정해석기법으로는 Poulos(1995), Cartier(1983) 와 Hassiotis (1997) 등이 연구하였다. 국내에서는 홍원표 (1984), 김영인(1994)이 측방토압 산정식을 제안한 이래 최근에는 억지말뚝을 설치하였을 때 사면안전을 산정할 수 있는 방법을 손기만(1999), 김병철(2000)등이 제안하였다. 그러나 아직까지 측방변형을 받는 수동말뚝의 거동을 명확히 규명하기에는 부족한 면이 있다. 이는 수동말뚝의 경우는 말뚝의 중심간격, 상대밀도, 배열 형태 등에 따라 말뚝과 지반의 상호작용이 아주 복잡하게 나타나기 때문이다. 따라서 현장 및 모형실험에 의한 경험적 자료의 축적을 통한 분석이 향후 수동말뚝의 해석에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

기존 연구에서는 측방토압을 구할 때 지반이 소성변형상태에 이른다고 가정하였으나, 불안정한 지반에 수동말뚝을 설치하여 지반의 변형을 억지할 경우 지반은 소성변형상태를 벗어날 수 있으므로, 다양한 지반변형에 따른 측방토압의 산정방법이 별도로 검토되어야 할 것이다.

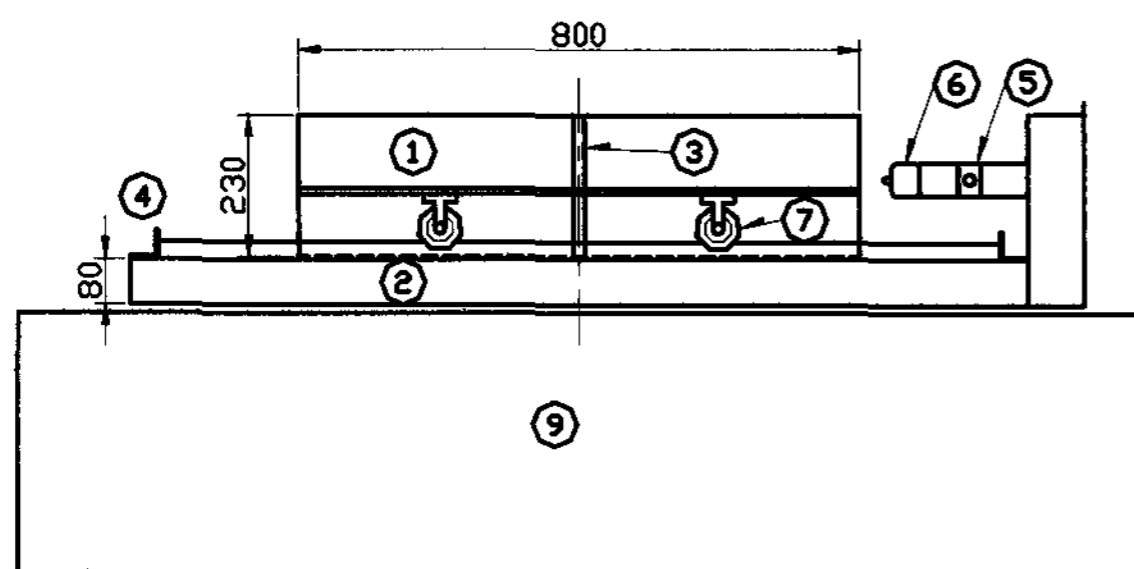
본 연구에서는 수동말뚝의 효과를 고찰하기 위해 말뚝이 없는 지반의 경우와 말뚝이 있는 지반의 경우를 비교하였으며, 단독말뚝과 수평간격이 다른 열말뚝의 실험을 실시하여 말뚝의 수평간격에 따른 수평토압의 크기와 분포를 고찰하였다. 측방변형을 받는 모래지반

속에 설치된 열말뚝의 거동특성을 파악하기 위하여 열말뚝의 중심간격, 말뚝의 형태를 변화시켜가며 실내 모형실험을 실시하였고, 변형에 따른 수평저항력과 휨모멘트를 이용하여 단독말뚝과 열말뚝의 거동특성을 비교 분석하였으며, 특히 말뚝의 형상을 전면폭이 넓은 B-type과 측면폭이 넓은 H-type으로 나누어 전면토압과 측면마찰력에 대해 고찰하고자 하였으며, 지반변형에 따라 변화되는 말뚝의 수평저항력과 휨모멘트 크기를 고찰 할 수 있는 경험식을 제안하였다.

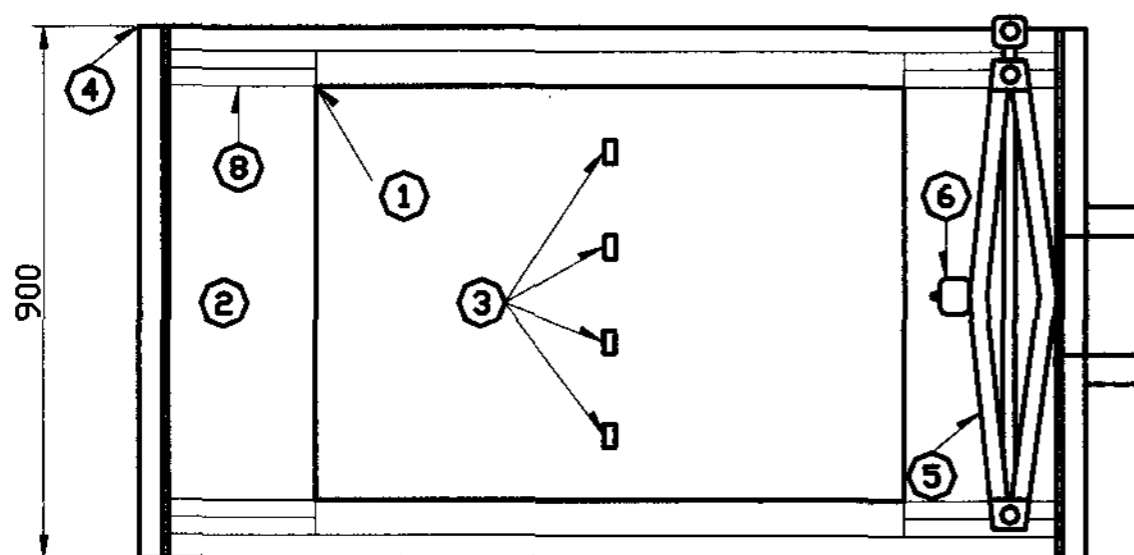
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

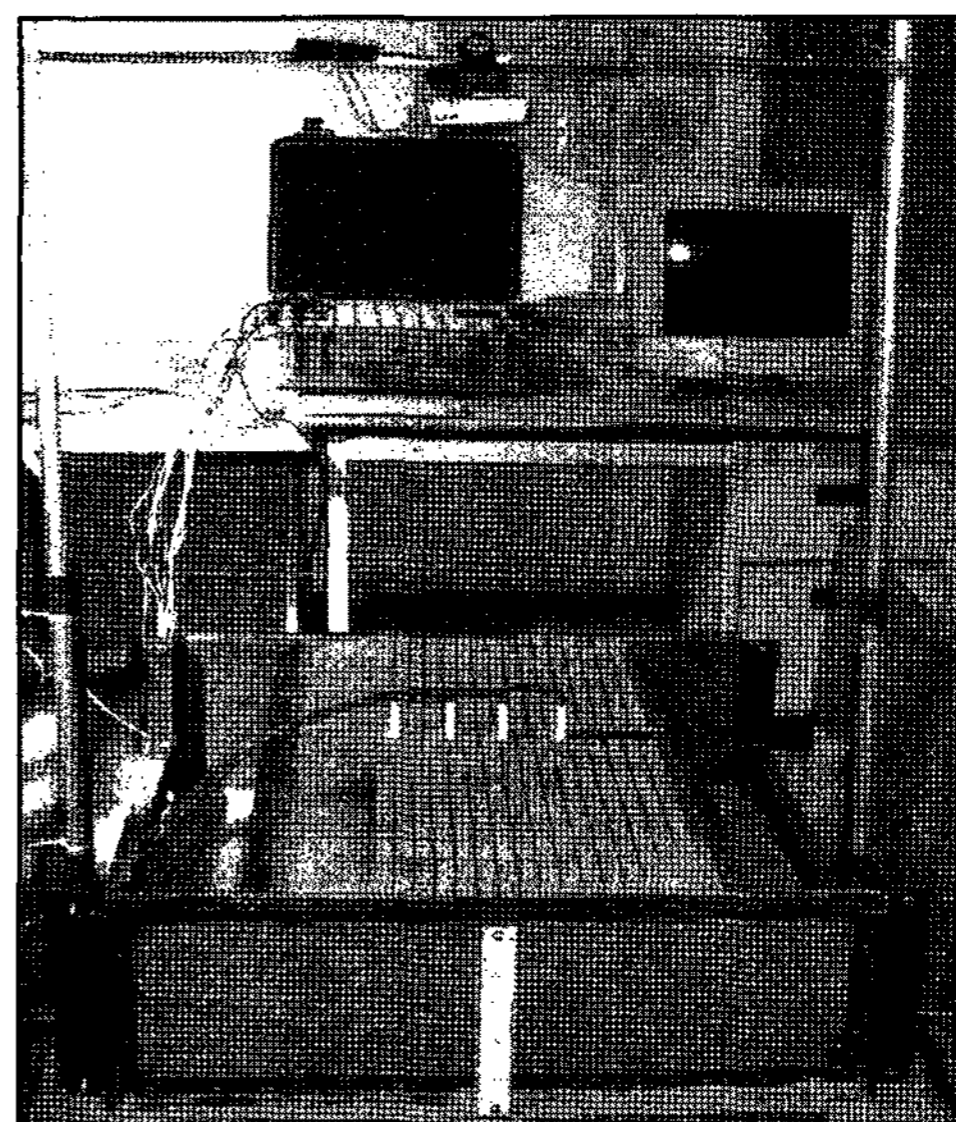
그림 1은 모형실험에 사용된 실험장치로서 모형실험시 토조하단에서 일정전단면이 형성되도록 장치되어 있으며, 그림1(a), (b)에서 ①은 토조, ②는 밀판, ③은 모형말뚝, ④는 미끄럼방지턱, ⑤는 수평가압 스크류잭, ⑥은 하중계 ⑦은 슬라이딩 바퀴, ⑧은 슬라이딩 유도 레일⑨는 토조거치대를 각각 나타낸다. 말뚝의 구속조건은 선단은 고정이며 두부는 자유가 되도록 하였다. 모형토조는 말뚝의 설치간격에 따라 변화되도록 설계될 수 있도록 설계되었다.



(a) 측면도



(b) 평면도



(c) 설치 후 전경

그림 1. 모형실험장치

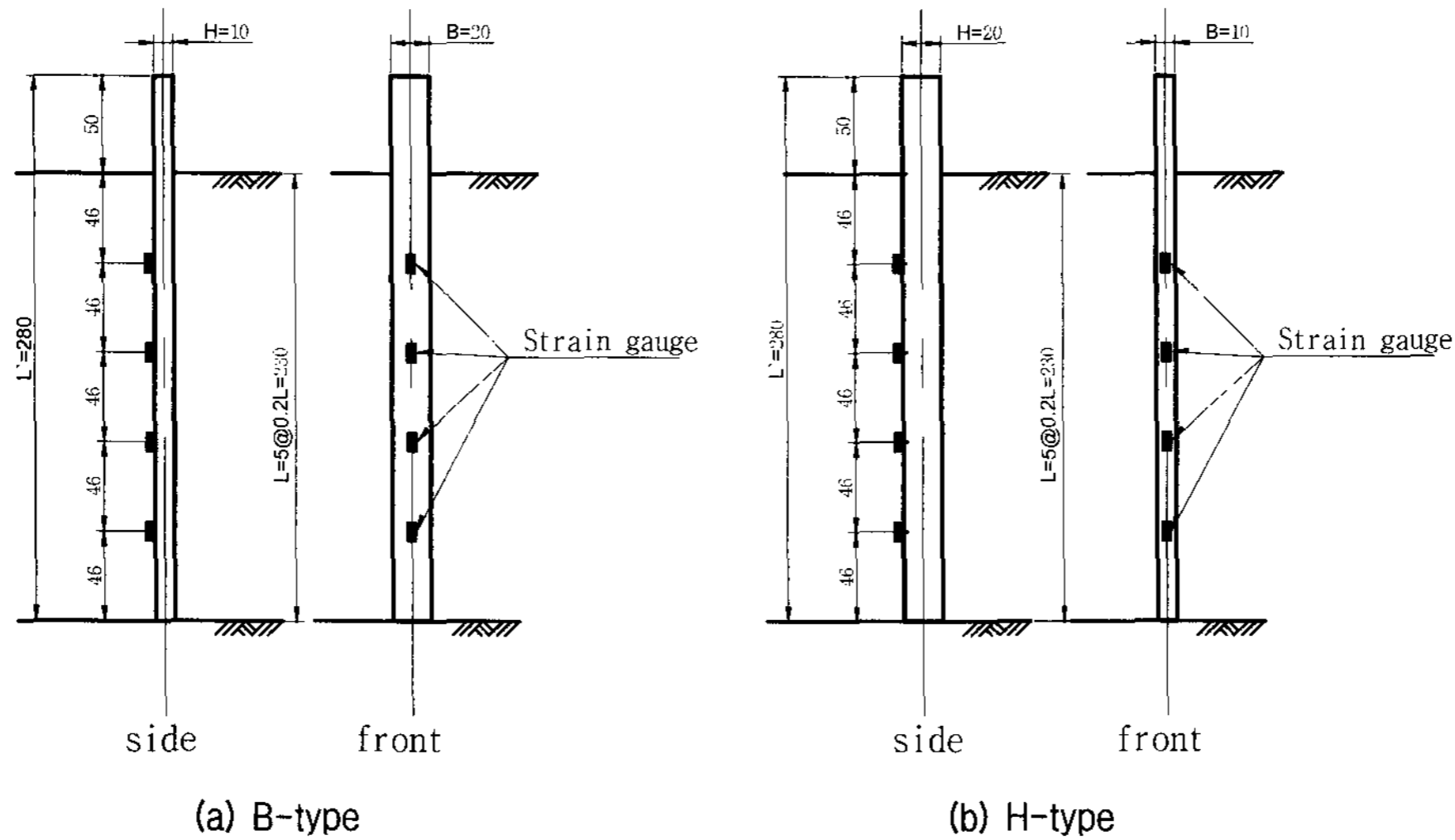


그림 2. 스트레인게이지의 위치

표 1. 말뚝의 제원

Pile	B(mm)	H(mm)	L(mm)	T(mm)	E(kgf/cm ²)	Z(cm ⁴)
B-type	20	10	230	1.5	730,000	0.278
H-type	10	20	230	1.5	730,000	0.422

2.1.1 모형말뚝

실험에서 사용한 사각형 모형말뚝의 재질은 지반변형 시 말뚝이 충분히 변형될 수 있도록 상대적으로 강성이 약한 알루미늄을 사용하였으며, 단면형상에서 지반 변형 방향에 연직하고 있는 면의 길이를 전면폭(B)이라고 하고 지반변형 방향과 나란한 면의 길이를 측면폭(H)이라 할 때, 실험에서는 B와 H 비가 2 : 1인 전면폭이 넓은 형태(B-type)와 B와 H 비가 1 : 2인 측면폭이 넓은 형태(H-type)의 말뚝을 사용하였다. 말뚝의 제원은 표 1에 명시하였다. L은 전단층에 매설된 말뚝의 길이를 나타내며, 스트레인 게이지는 그림 2와 같이 0.2L의 등 간격으로 말뚝의 인장부에 4개를 설치하였다.

2.1.2 모형지반

두 개의 망(#4체)을 4cm 상하간격으로 겹친 후 그림 3과 같이 주문진 표준사가 일정한 높이(토조상부에서 12cm)에서 자유낙하 되도록 유도하여 전단실험 시 동일한 조건의 모형지반이 조성되도록 하였으며, 이렇게 조성된 모형지반의 물리 역학적 특성은 표 2와 같다.

2.2. 실험방법 및 순서

2.2.1 실험방법

모형실험은 말뚝이 없을 때(Non pile)와 단독말뚝일 때(Single pile)와 열말뚝(Row piles)일 때의 경우로 나누어 표 3과 같이 실시하였다. 전단실험 시 토조의 변위제어는 스크류잭으로 2mm 씩 단계별로 가했으며, 2mm

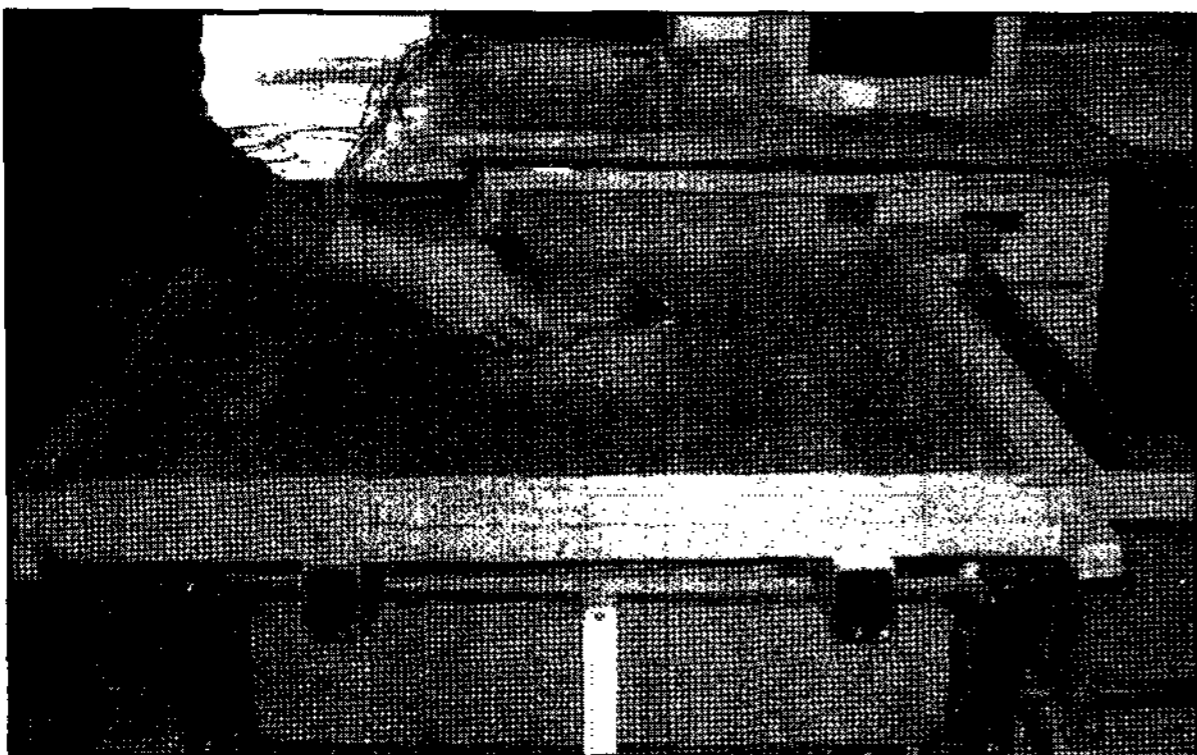


그림 3. 모형지반조반 조성

표 2. 모형지반

G_s	2.75
γ_d (g/cm ³)	1.50
γ_{dmax} (g/cm ³)	1.60
γ_{dmin} (g/cm ³)	1.43
D_r (%)	43.9
C_u	1.45
C_g	0.92
ϕ	30

표 3. 실험횟수

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

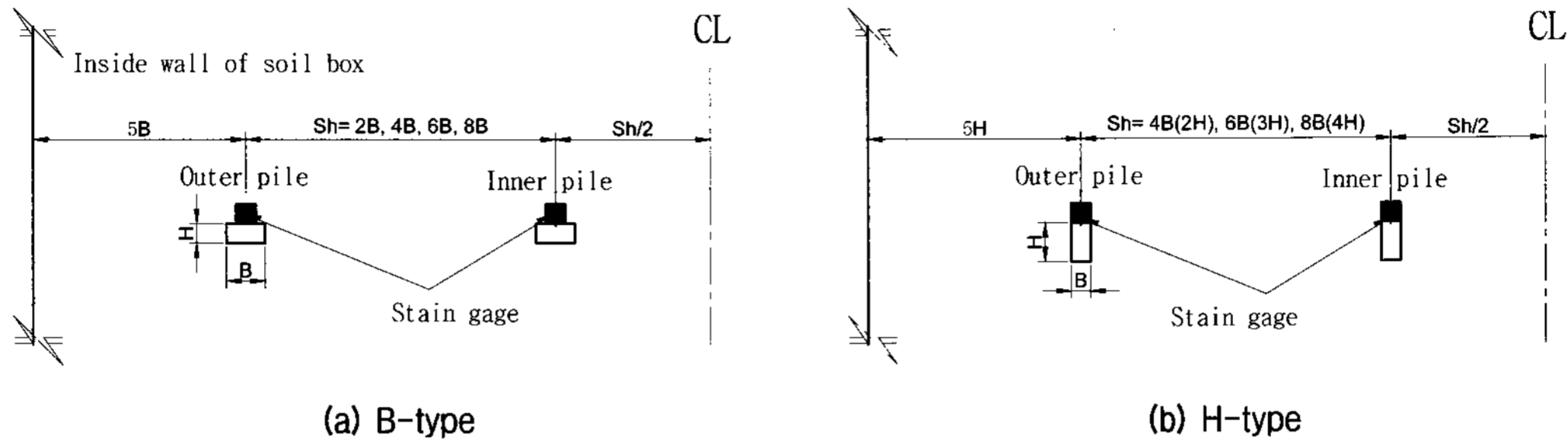


그림 4. 수평간격에 따른 열말뚝의 배열

변형 발생 후 일정시간동안(약 45초) 수평력 및 변형율의 변화가 없을 때 재차 변위를 가하고 수평력 및 변형율의 기울기가 감소하는 30mm까지 토조변위를 제어하였다. 말뚝이 없을 때의 실험은 지반의 순수 전단저항력을 알아내기 위한 실험으로 실험순서는 토조에 모형지반을 조성한 다음 토조의 수평변위계 및 로드셀(Load cell)을 설치한 후 초기화하고, 2mm 변위 시 마다 수평력과 수평변위를 측정하고 후 토조변위가 최대 30mm 일어 날 때까지 수평력을 가해 실험한다. 말뚝이 있을 때는 모형말뚝을 먼저 설치한 후 말뚝주변에 격자망을 조성한 후, 말뚝이 없을 때의 실험과정과 같은 방법으로 실험을 한다.

배종순(2002), Wang(1986) 등에 따르면 수동말뚝은 설치위치에 따라 모멘트 및 저항력비의 특성이 다르게 나타났다. 본 실험에서도 말뚝의 위치별 특성을 분석하기 위하여 열말뚝을 내부와 외부로 구분하여 설치하였다. 내부에 설치된 말뚝을 inner pile이라 하고 외부에 설치된 말뚝을 outer pile이라 명명하였다. outer pile과 벽체의 간격은 일정하게 두어 말뚝의 수평간격(S_h)과 관계없이 outer pile이 같은 조건이 되도록 하였다. outer pile과 벽체의 간격은 수동말뚝을 연구한 김병철(2000)의 균말뚝상호계수(μ), 배종순(2002)의 한계간격(S_L)과 Wang 등(1986)의 저감계수(Reduction factor)를 고려하여 열말뚝이 거의 단독말뚝과 비슷한 경향을 띠는 수평간격과 지반변형 시 벽체와 말뚝의 상호간섭이 최소화 되는 간격을 고려해 적용하였다. 열말뚝의 경우 4개의 말뚝이 CL(Center line)을 중심으로 대칭구조를 이루도록 형상별로 그림 4의 (a), (b)와 같이 배열하여 각각

표 4. 수평간격에 따른 토조의 크기

Pile	Single	Row piles, S_h (cm)			
		2B	4B	6B	8B
B-type	20	32	44	56	68
H-type	10	-	32	38	44

실험하였다. 토조의 폭은 단독말뚝의 경우와 수평간격(S_h)을 달리한 열말뚝의 경우 변화하게 되며, 변화되는 토조의 폭은 표 4에 표기하였다. 지반의 순수전단저항력을 알기위해 실시하는 말뚝이 없을 때의 실험은 표 4에 표기한 모든 경우에 대해 실험을 실시하였으며 이는 말뚝이 있을 때와 없을 때 같은 조건(토조의 폭)에서 비교하기 위해서이다.

2.2.2 실험측정장치 및 이용방법

그림 5는 실험측정장치를 나타낸 것이다. 토조변형(d_s)은 Dial gage로 측정하였고, 지반에 가해지는 수평력

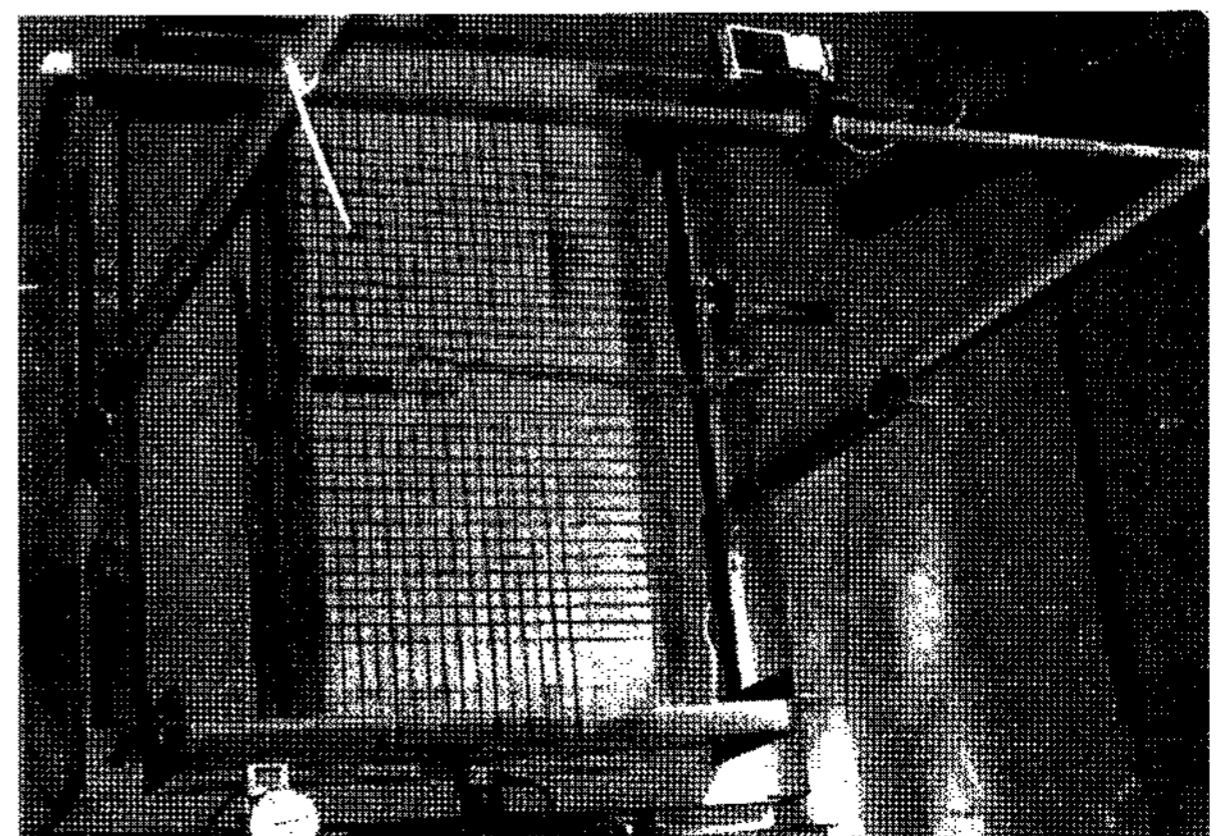


그림 5. 실험 측정 장치

표 5. 계측장비의 제원

장비명	모델명	제조사	비고
Dial gage	DDP-50A	TML	50mm
Load cell	MN-200L	CAS	200kgf
Strain gage	FLA-5-11	TML	Ggae factor=2.12
Digital Camera	Q25 Wide	CAS	510만 화소
Data logger	MDL-M5G	미래ENG.	

(T_i)은 스크류잭 전면부에 설치된 Load cell로, 측정하였으며, 지반의 변형은 지표에 격자망을 설치하여 각 단계별로 상부에 있는 디지털 카메라로 촬영하여 지반변위에 따른 지표변화를 분석을 하였으며 수치화하기에는 어려움이 있어 정성적 자료로 활용하였다. 말뚝의 변형률(ϵ)을 Strain gage로 측정하여 말뚝에 작용하는 휨모멘트($M=(E \cdot \epsilon \cdot I)/y$), 수평응력(σ_h)과 토압(P)을 산정하였다. 표 5는 계측장비의 제원에 대해 표기하였다.

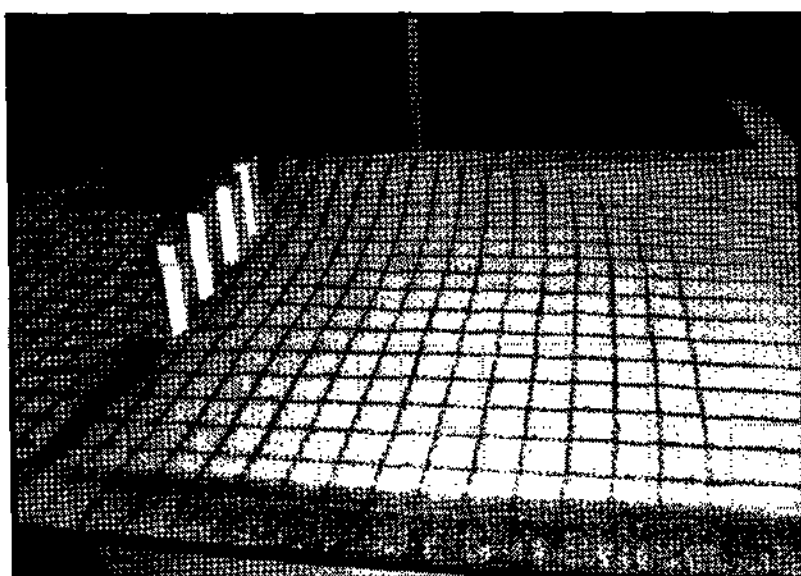
$$\sigma_h = \frac{dS}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dM}{dx} \right) \quad (1)$$

$$P = \int_0^L \sigma_h \quad (2)$$

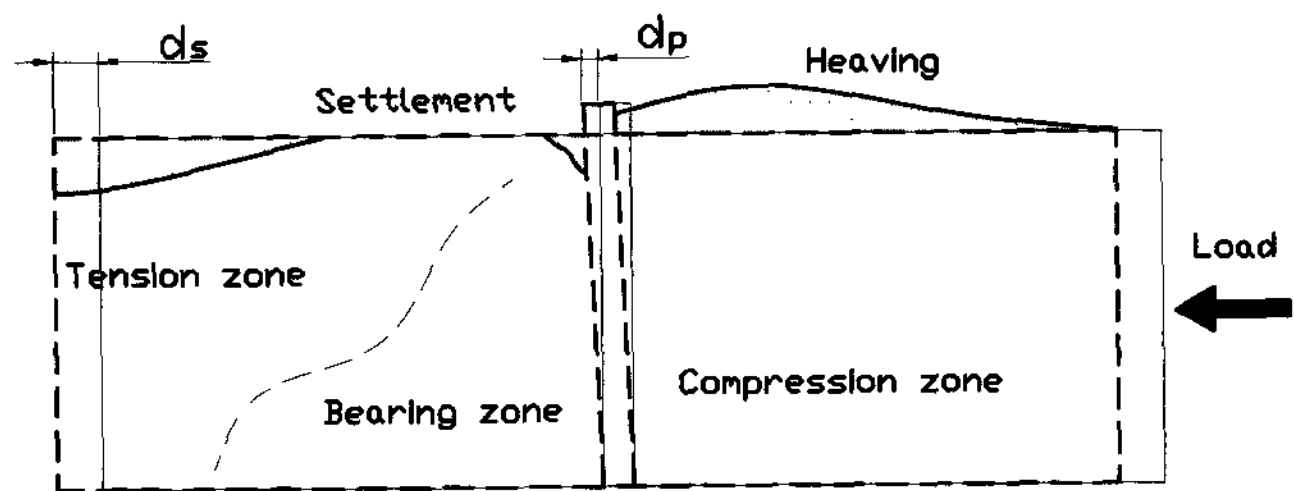
3. 실험결과 및 고찰

3.1 지반변형 및 지지 형태

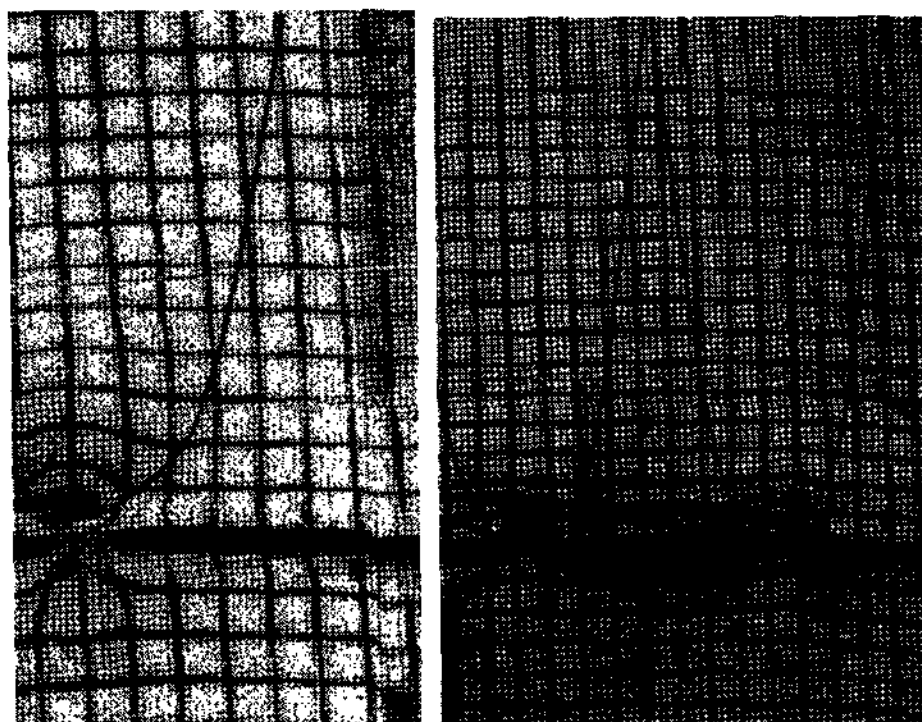
그림 6은 지반변형과 연직 및 수평변위를 형상화 한 것이다. 지반에 수평력을 가하면 말뚝에 의해 지반의 움직임이 제약을 받게 되면서 그림 6의 (a), (b)와 같이 말뚝 전면부에는 압축영역(Compression zone)이 발생해 지반은 융기하며, 말뚝의 후면부에는 토조가 강제인 이유로 인해 후면에도 토조변위(d_s)가 발생하여 토조 제일 끝단에서부터 지반이 침하하게 되면서 인장영역(Tension zone)이 발생하게 된다. 그림 6의 (a)는 최종적인 형상을 분석하기 위해 약 150mm정도 토조변위를 일으켰을 때의 그림이다. 말뚝의 뒷면에는 말뚝변위(d_p)에 의해 수동영역이 발생하며 이 영역에서 말뚝을 지지하는 수평력이 발생하게 된다. 이렇게 수평지반에서는 수평력이 가해지면 지반에 여러 가지 힘이 복합적으로 작용하게 되면서 다양한 변형을 일으키게 된다. 실험에서 측정된 말뚝의 휨모멘트는 이러한 말뚝전면부에 가해지는 수평력과 말뚝과 말뚝사이의 마찰력 그리고 말뚝뒷면의 지지력 등이 복합적으로 작용하여 발생하게 되며, 이러한 힘을 규명하는 것은 매우 어려운 문제라 할 수 있다. 압축영역은 그림 6의 (c)와 같이 형상화하였으며, 굽은



(a) 지반변형 형상



(b) 연직변위 형상



(c) 수평변위 형상

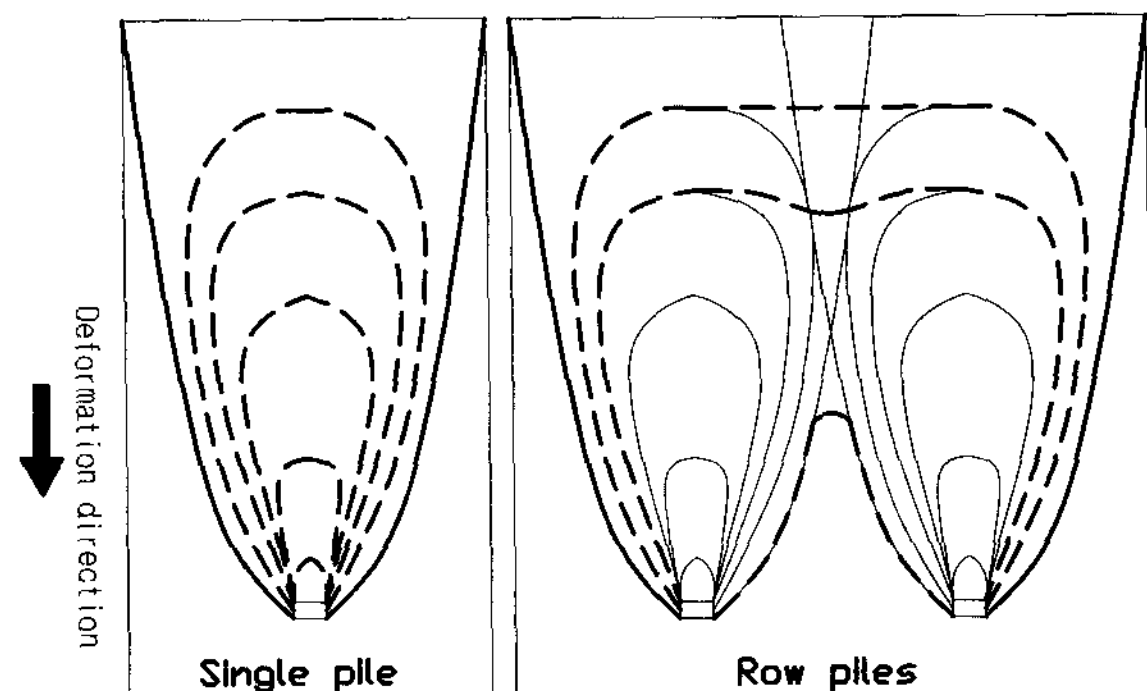


그림 6. 지반 변형

실선은 압축부의 외부영역을 형상화 한 것이고, 굵은 점선은 내부영역을 형상화 한 것이다. 그리고 열말뚝에서 얇은 실선은 single 일 때의 점선을 중복시켜놓은 것이다. 열말뚝의 경우 압축영역의 중첩현상이 발생하는 것으로 나타났다.

3.2 단독말뚝(Single pile)

3.2.1 지반 수평변위

그림 7은 지반의 수평변위에 따른 수평력의 관계를 도시한 것이다. non pile의 경우는 말뚝이 없는 지반이 전단변형을 일으킬 때의 수평력(T_{np})으로 순수 지반의 저항력에 의해 발생하는 힘이다. 그림에서 non pile의 경우는 peak점이 나타났으나, 말뚝이 있는 경우는 기울기가 점진적으로 감소할 뿐 뚜렷한 peak 점이 나타나지 않았다. 따라서 말뚝의 존재 여부가 파괴변위를 증가시켜 주는 효과가 있음을 알 수 있다. 수평력의 크기는 임의의 변위에 대해 B-type single이 H-type single 보다 크게 나타났음을 알 수 있어 전면폭이 넓은 말뚝이 수평력을 더 크게 분담하는 것으로 나타났다.

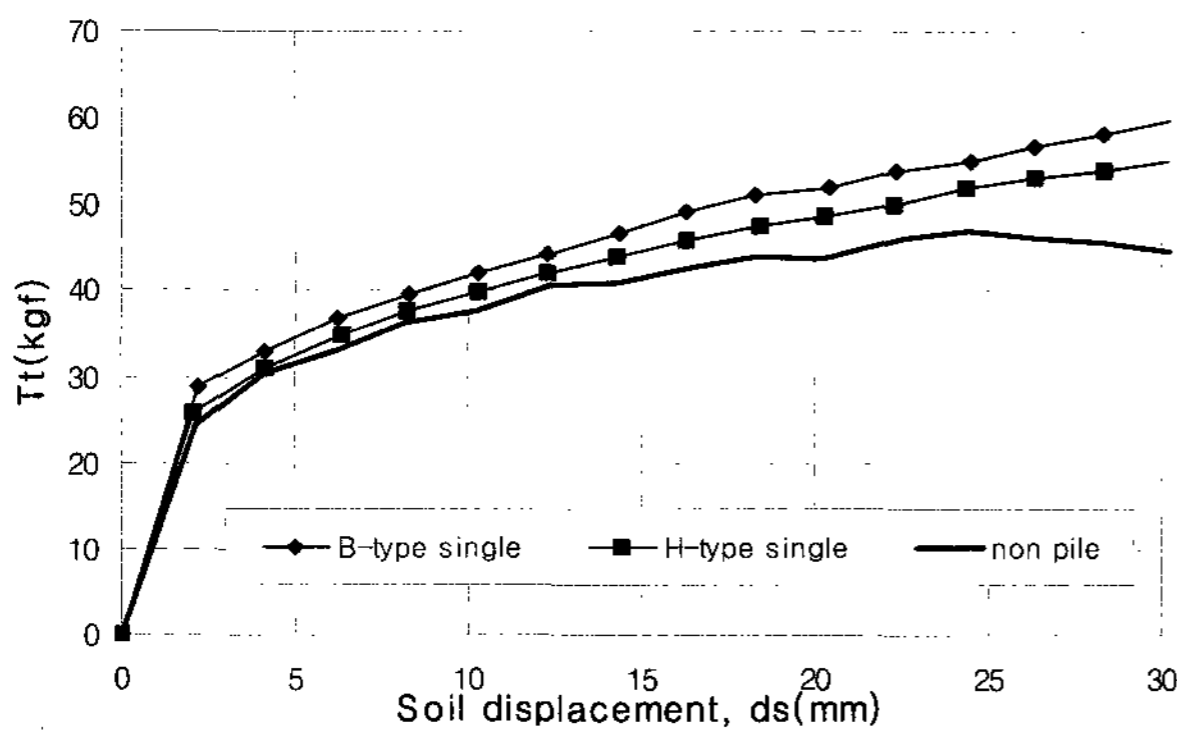


그림 7. 수평력(T_t)과 지반변위(d_s)의 관계도

3.2.2 휨모멘트

그림 8은 변위 증가에 따른 최대휨모멘트비를 나타낸 것이다. 최대휨모멘트비는 B-type의 최대휨모멘트비를 H-type의 최대모멘트를 나눈 값이다. 처음 4mm 이전에는 비교적 큰 차이를 보이고 있으나, 그 이후로는 변위 증가에 따른 모멘트비의 증가는 큰 변화 없이 1.4정도로 일정한 값을 나타내, B-type의 최대모멘트가 H-type보다 약 1.4배 정도 큰 것으로 나타났다. 이는 변위증가에 따른 모멘트의 증가비율이 크게 변화되지 않는 것을 의미하며 이는 곧 힘의 증가량이 일정한 비율로 증가되는 것을 말해준다.

3.2.3 토압 및 수평저항력

그림 9는 깊이별 수평응력의 크기를 식 (1)로 구한 것이다. B-type의 경우는 지표가 거의 0인 삼각형 분포를 띄고 있으나, H-type의 경우는 초기변형에는 삼각형이나 점차 지표에 압력이 전달되어 사다리꼴의 형태로 변해가고 있다. 이는 측면마찰력에 의해 발생하는 수평력의 증대 때문인 것으로 판단된다. B-type의 경우는 Rankine의 수동토압을 초과한 토압이 발생하였으며,

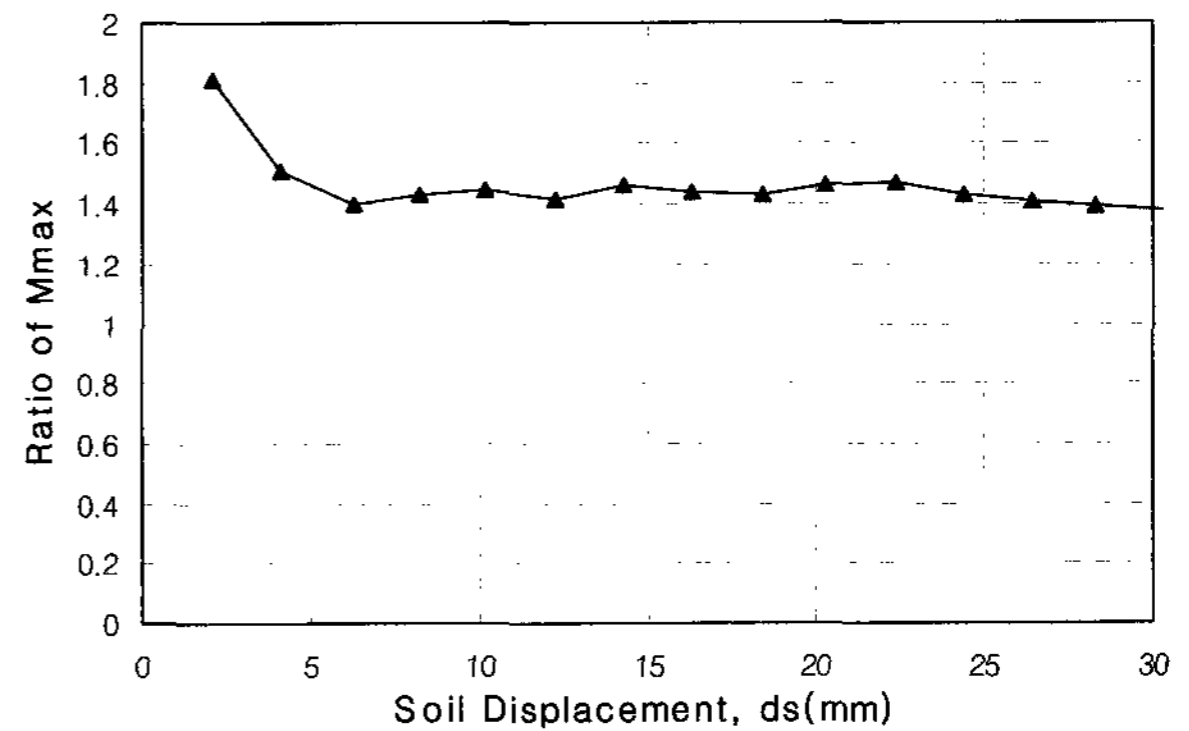
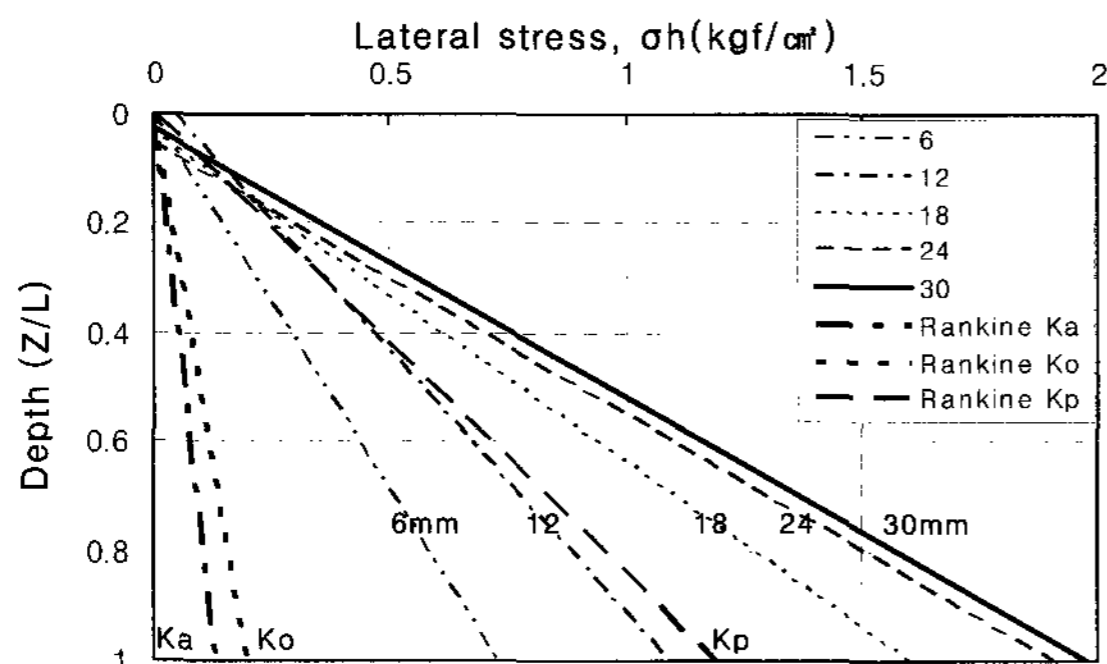
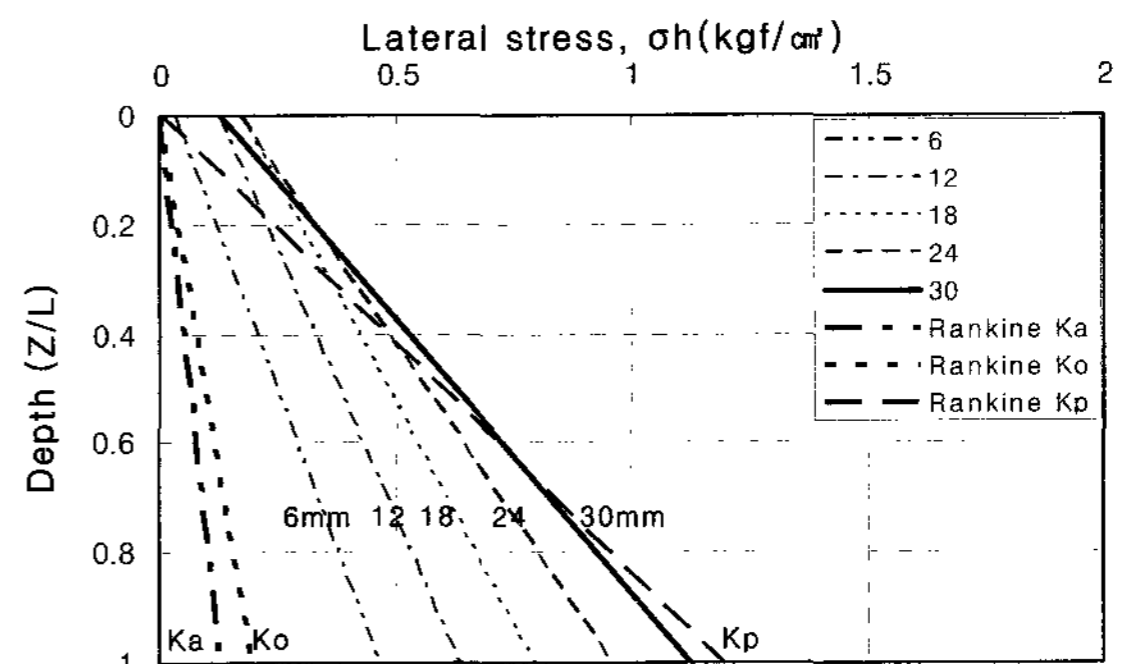


그림 8. 최대휨모멘트비와 지반변위(d_s)의 관계도



(a) B-type



(b) H-type

그림 9. 깊이별 수평응력(σ_h)

H-type의 경우는 Rankine의 수동토압과 크게 차이가 나지 않았다. 그러나 수평지반 역시 Rankine의 토압을 적용하기는 곤란해 보이며, 변위와 수평력간의 관계에서 토압을 구하는 방법이 보다 합리적인 수평력산정방법이 될 것이다.

그림 10은 변위에 따라 말뚝에 가해지는 수평토압(P)을 나타낸 것이다. 그림 9의 삼각형 혹은 사다리꼴 선형의 면적으로 식 (2)를 이용해 구한 것이다.

그림에서 굵은 실선으로 표시된 것은 말뚝이 있을 때의 수평력(T_{ep})에서 말뚝이 없을 때 (T_{np})때의 수평력을 뺀 값($T_{ep} - T_{np}$)으로 말뚝에 가해지는 수평력을 의미한다. 단순한 개념에서는 수평력($T_{ep} - T_{np}$)과 말뚝에 가해지는 토압의 크기(P)와 같아야 하지만, 그림에서 보는 바와 같이 실제 말뚝에 가해진 토압(P)이 좀 더 크게 나왔다. 이는 앞서 언급한 것과 같이 말뚝이 설치됨으로써 지반은 보다 큰 변형에 대해 저항성을 지니게 되어 아직 지반이 항복점에 이르지 않은 상태여서 지반이 받아야 하는 힘의 일부를 말뚝이 분담하기 때문인 것으로 판단된다. 만약 지반이 항복에 이룬다면, 설사 말뚝이 설치되었다 할지라도 모멘트나 토압이 항복점을 나타내겠지만 그렇지 않을 경우는 그림 7과 같이 수평력이 일정량 계속해서 증가하는 응력경화현상이 발생할 것이다. 이와 같은 가정 하에 다시 정리하면 지반에 가해진 수평력을 말뚝과 지반이 분담하는 형태로 나타낼 수 있으며, 식으로 표현 하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있을 것이다. 지반에 가해진 수평력(T_t)과 수평저항력(F_t)은 작용반작용의 법칙에 의해 같은 크기이며, 이러한 수평저항력(F_t)을 말뚝과 지반의 수평저항력 합으로 나타낸 것이다. 여기서 말뚝이 분담해야 할 수평저항력(F_p)은 말뚝에 가해진 토압(P)과 같은 크기가 될 것이다.

$$T_t = F_t = F_g + F_p \quad (3)$$

여기서, F_t : 말뚝이 설치된 지반의 전체수평저항력

F_g : 지반의 수평저항력

F_p : 말뚝의 수평저항력

그림 11은 지반에 가해진 수평력(T_t)과 말뚝에 가해진 토압(P)을 근거로 하여 수평저항력(F_t)과 지반저항력($F_g = F_t - F_p$)의 관계를 도시한 것이다.

그림 11에서 B-type 수평저항력(F_t)과 B-type 지반의 수평저항력(F_g)의 차이는 두선형의 공간차로 나타나며, 이는 말뚝에 가해진 토압 즉 말뚝의 수평저항력(F_p)에 해당할 것이다.

3.2.4 말뚝에 작용하는 힘

지반변형에 의해 말뚝에 전달되는 수평력(T_p)은 말뚝에 작용하는 토압(P)으로 작용하게 되고 이 힘은 곧 말뚝이 분담해야 할 수평저항력(F_p)이 된다. 이러한 수평저항력은 전면폭(B)에 작용하는 전면수평저항력(F_{pf})과 측면폭(H)에 작용하는 측면마찰저항력(F_{pl})의 합으로 표현할 수 있을 것이다. 이 관계를 식 (4)에 나타내었다.

$$F_p = F_{pf} + F_{pl} \quad (4)$$

전면수평저항력과 측면마찰저항력은 각각 말뚝의 폭(B)과 측면폭(H)에 비례관계가 있다고 가정할 때 B-type일 때와 H-type 일 때의 수평저항력을 식 (5)와 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{p1} = B_1 \cdot f_{pf} + 2H_1 \cdot f_{pl} \quad (5)$$

$$F_{p2} = B_2 \cdot f_{pf} + 2H_2 \cdot f_{pl} \quad (6)$$

F_{p1} 과 F_{p2} 는 실험에서 알고 있는 값이고, H-type과

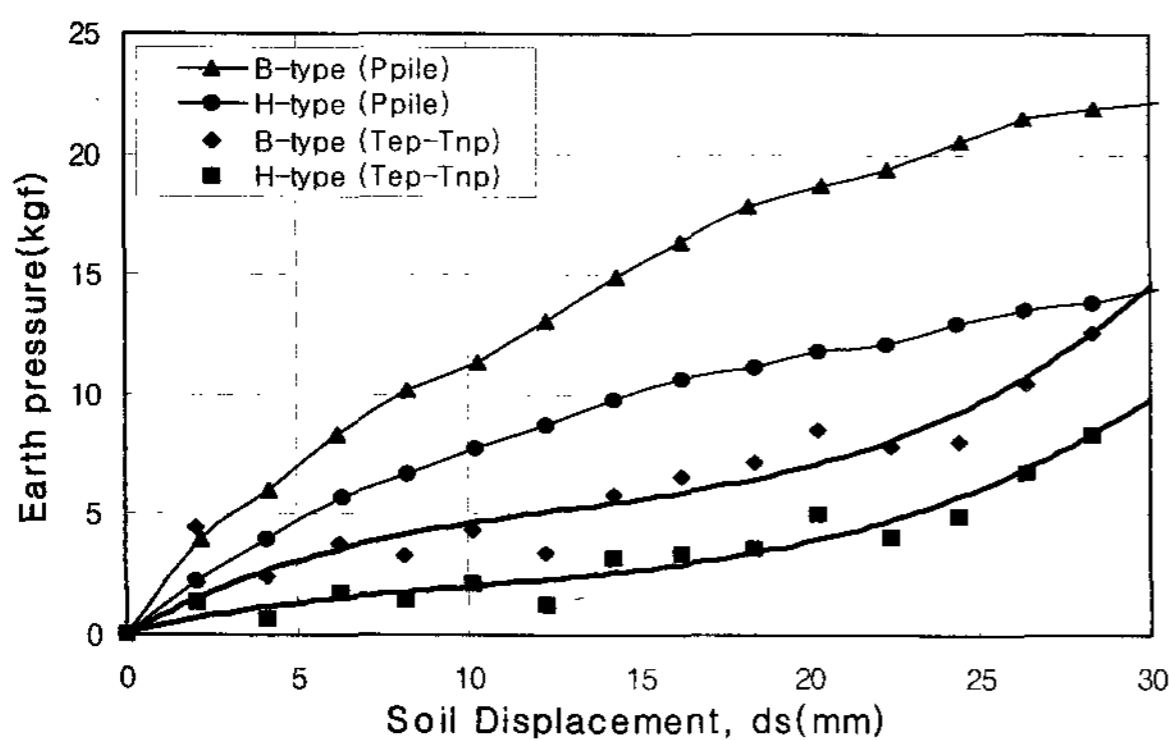


그림 10. 말뚝에 작용하는 토압

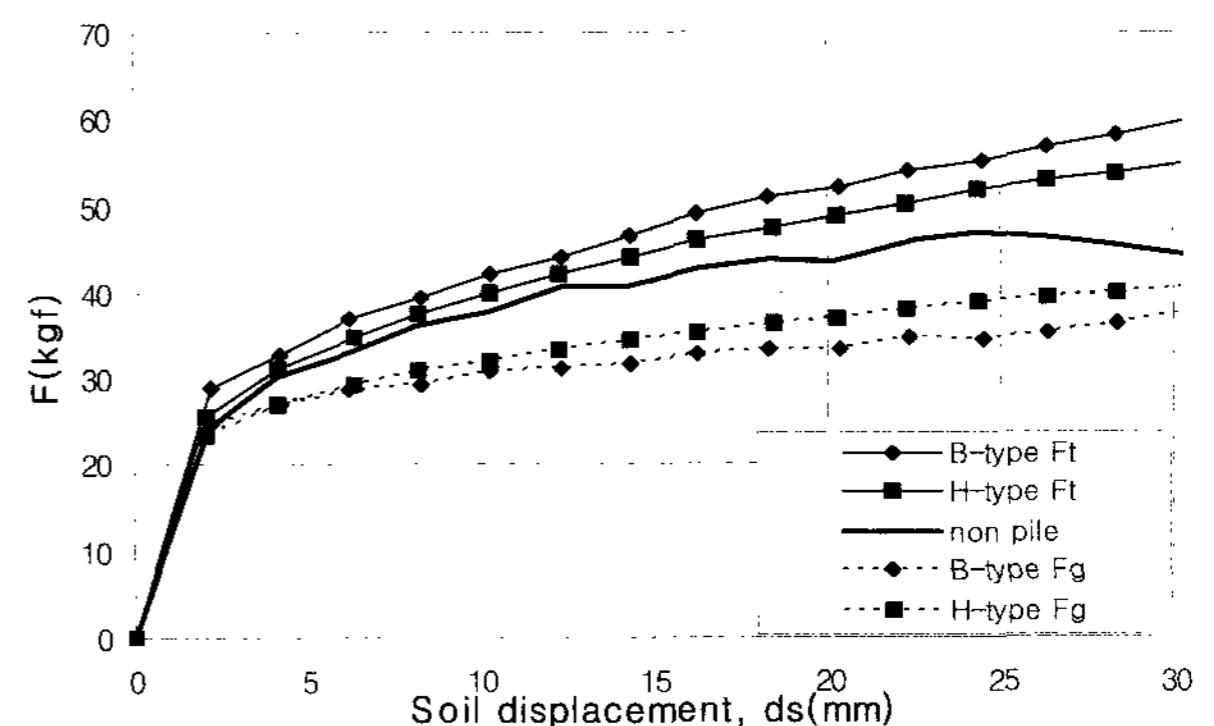


그림 11. 지반변위와 수평저항력의 관계도

B-type의 전면폭과 측면폭을 대입해, 식 (5)와 식 (6)을 연립해서 풀면 전면 단위폭 당 수평저항력과 측면 단위폭 당 마찰저항력을 식 (7), 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$f_{pf} = \frac{(2F_{p1} - F_{p2})}{3} \quad (7)$$

$$f_{pl} = \frac{(2F_{p2} - F_{p1})}{6} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에서 구한 f_{pf} 와 f_{pl} 을 이용해 말뚝의 수평저항력을 F_{pf} 와 F_{pl} 로 분리해서 저항력을 구할 수 있다. 말뚝의 전면수평저항력비와 측면마찰저항력의 비는 식 (9)와 식 (10)과 같이 나타내었다.

$$\mu_f = \frac{F_{pf}}{F_p} \quad (9)$$

$$\mu_l = \frac{F_{pl}}{F_p} \quad (10)$$

그림 12는 지반변위와 수평저항력비의 관계를 도시한 것이다.

그림에서 괄호안의 숫자는 전면폭과 측면폭의 비인

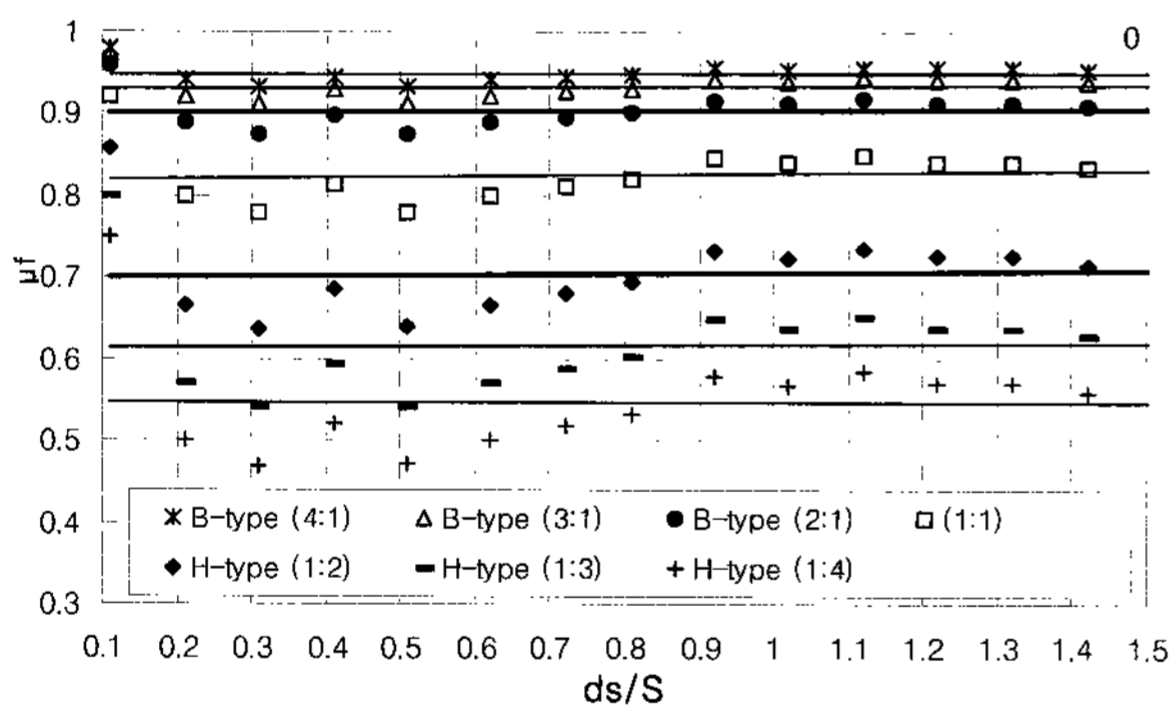
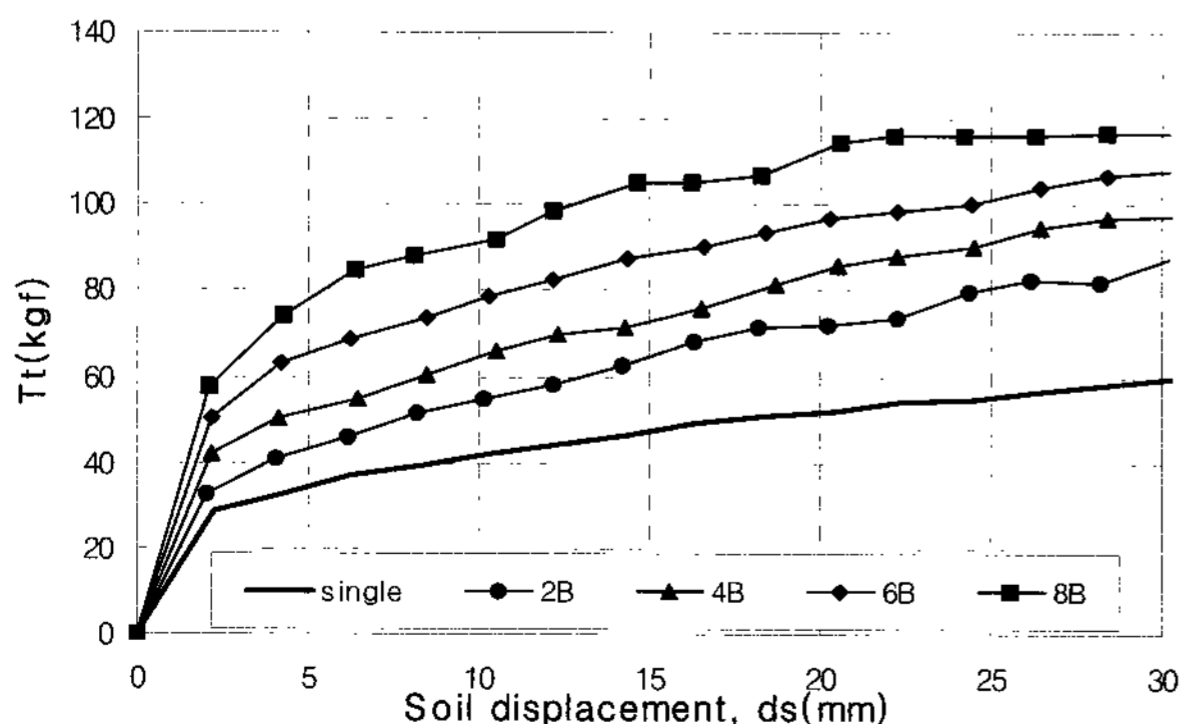


그림 12. 지반변위와 전면수평저항력비의 관계도



(a) B-type

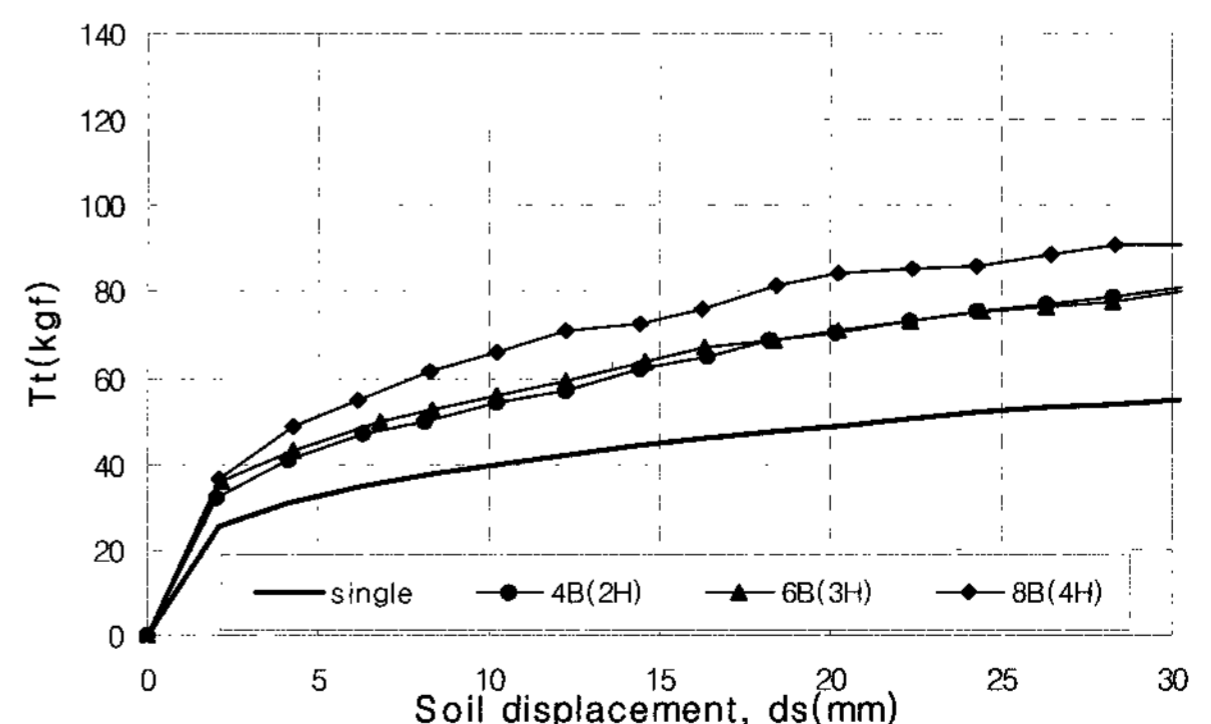
(B, H)를 의미한다. S는 B와 H 중 큰 값을 나타낸 것으로 B-type의 경우는 $d_s/S = d_s/B$ 가 되고 H-type의 경우는 $d_s/S = d_s/H$ 에 해당한다. B-type(2:1)과 H-type(1:2)는 실험값이며, 나머지의 경우는 식 (7)과 식 (8)에서 구한 f_{pf} 와 f_{pl} 을 이용해 도시한 것이다.

전면수평저항력비의 값은 전면폭(B)이 넓을수록 크게 나타나며, 지반변위에 대해서 큰 변화가 없는 것으로 나타났으며, B-type(2:1)의 경우는 0.9 H-type(1:2)의 경우는 0.7로 나타났다. 측면폭이 비교적 넓은 H-type(1:4)의 경우도 전면수평저항력비가 0.55정도인 것으로 보아 단독말뚝의 저항력은 측면마찰저항력보다는 전면수평저항력에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.3 열말뚝(Row piles)

3.3.1 지반 수평변위

Fig. 13은 지반에 가한 수평력과 지반변위 관계를 도시한 것이다. 모든 말뚝의 경우 변위증가에 따라 점진적으로 수평저항력이 증가함을 볼 수 있으며, B-type의 8B의 경우는 약 20mm에서 수렴하는 것으로 나타났다. B-type의 경우는 말뚝의 수평간격이 넓어질수록 수평저항력이 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 H-type의 경우 6B(3H)가 4B(2H)보다 약간 크나 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 이는 말뚝의 측면폭이 넓은 경우 말뚝사이의 지반이 마찰력에 의해 구속되어 생기는 아칭현상 때문인 것으로 판단된다. 지반의 아칭현상은 정확히 규명되지는 않았지만 토압분포 등으로 확인할 수 있으며, B-type의 경우는 발생하지 않았으나, H-type의 경우는 말뚝의 수평간격이 좁을수록 두드러지게 나타나는 것으로 확인되었다. 지반의 아칭현상은 전면폭이 넓은 말뚝



(b) H-type

그림 13. 열말뚝에서 지반변위와 수평력의 관계도

보다는 측면폭이 넓은 말뚝에 발생할 가능성이 많은 것으로 확인되었다.

3.3.2 휨모멘트

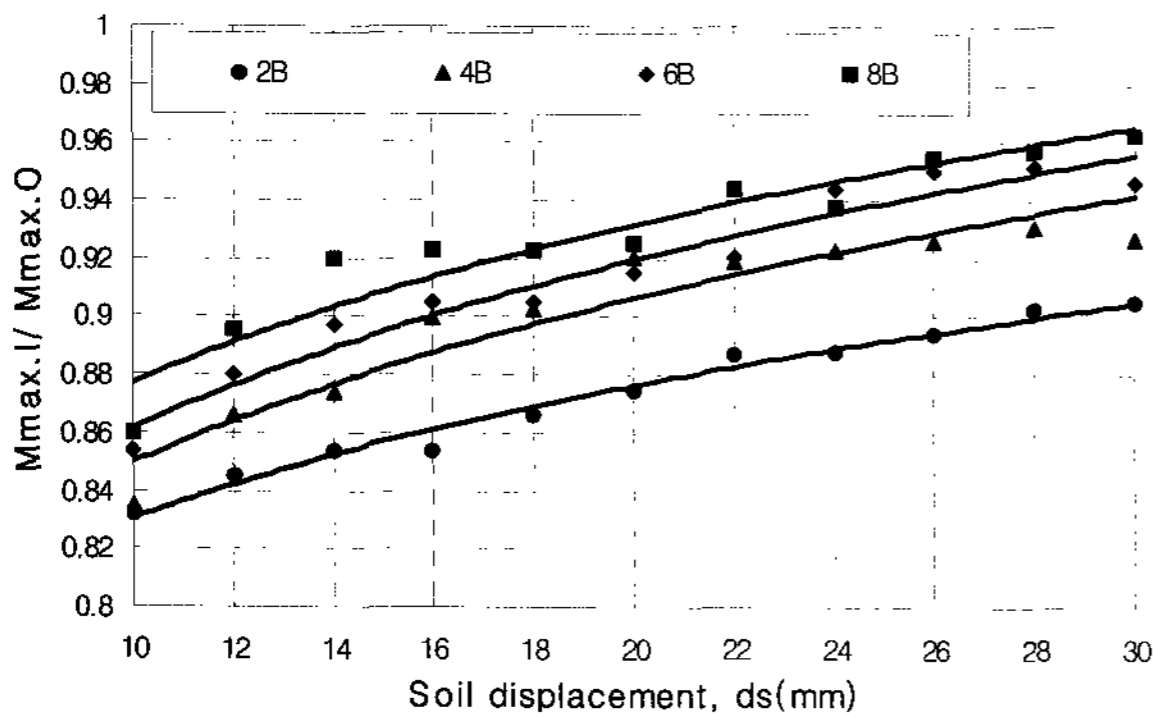
그림 14는 지반변위증가에 따른 inner pile의 최대휨모멘트($M_{max.I}$)와 outer pile 최대휨모멘트($M_{max.O}$)의 비를 말뚝의 수평간격별로 도시한 것이다.

B-type의 휨모멘트비를 살펴보면 변위가 증가할수록 모멘트비가 다소 증가하는 것을 볼 수 있고 또한 수평간격이 넓어질수록 모멘트비가 크고 선형간의 간격차이가

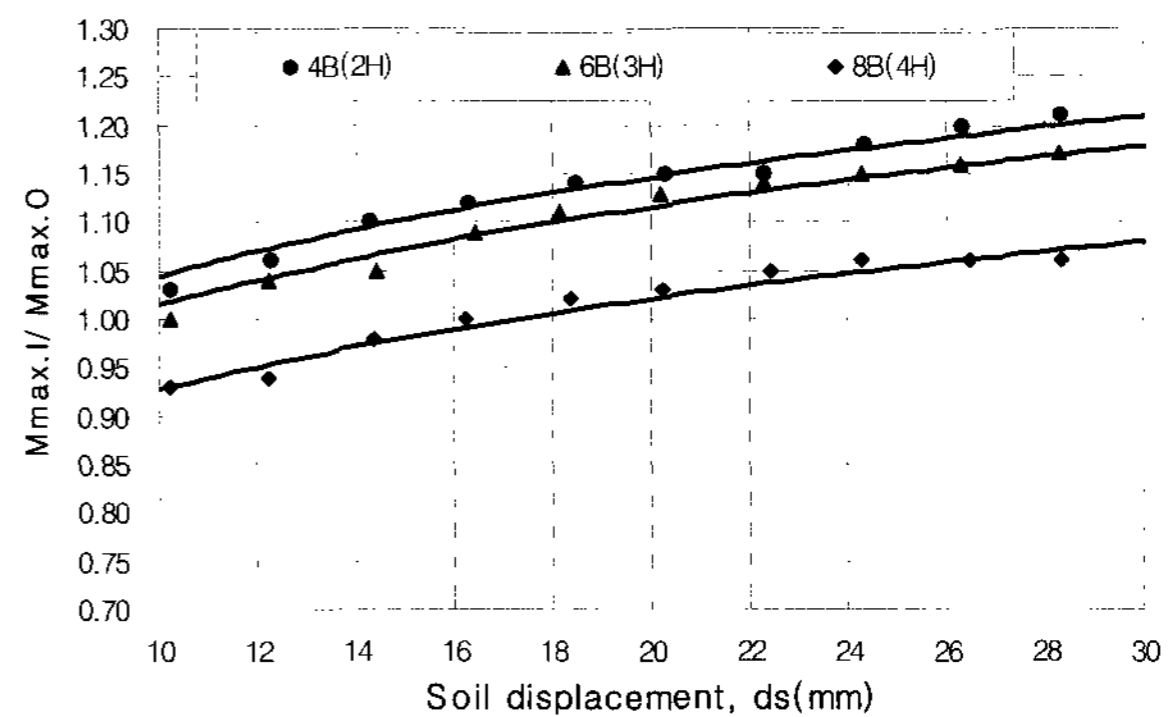
가 줄어들음을 알 수 있다. 휨모멘트비가 1을 초과하지는 않아 outer pile이 inner pile보다 큰 것으로 나타났다. 반면 H-type의 경우는 오히려 휨모멘트비가 수평간격이 증가할수록 작은 값을 나타내고 있고, 변위증가에 따라 간격별 모멘트비가 1을 초과해 inner pile이 outer pile보다 크게 나타났다.

그림 15는 지반변위에 따른 단독말뚝의 최대휨모멘트($M_{max.S}$)와 열말뚝의 최대휨모멘트($M_{max.R}$)의 비를 inner와 outer로 구분하여 말뚝 형상별로 도시한 것이다.

그림 15(a)의 B-type에서, inner pile의 경우는 outer

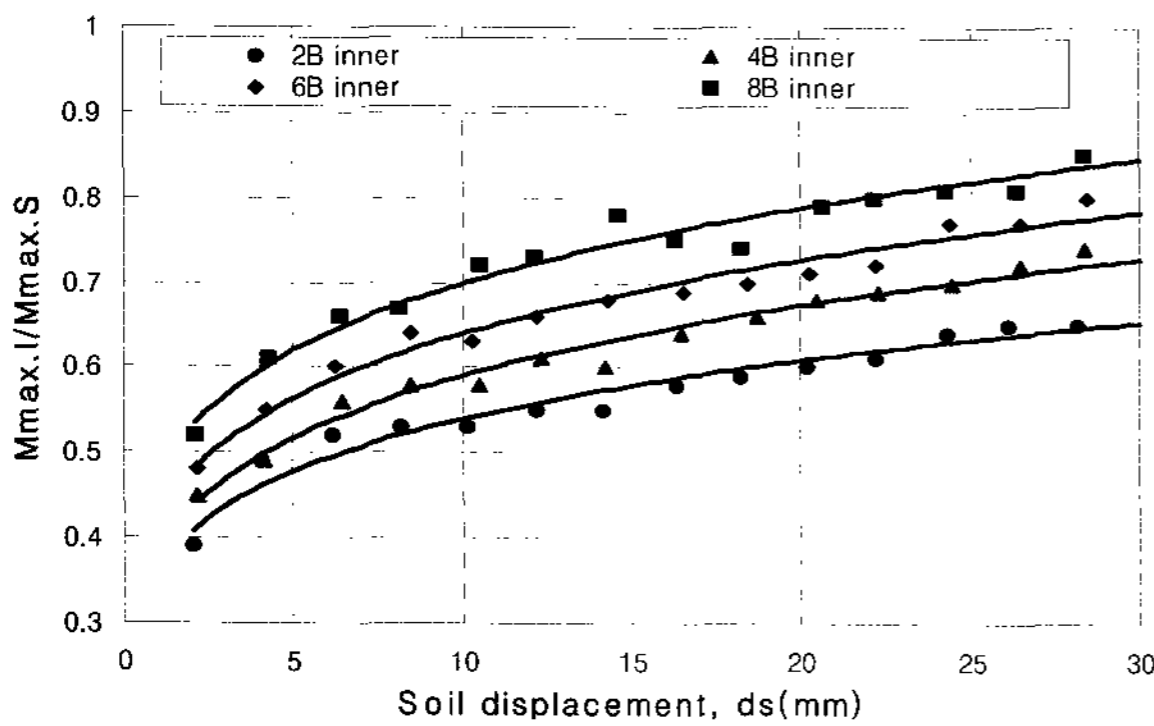


(a) B-type

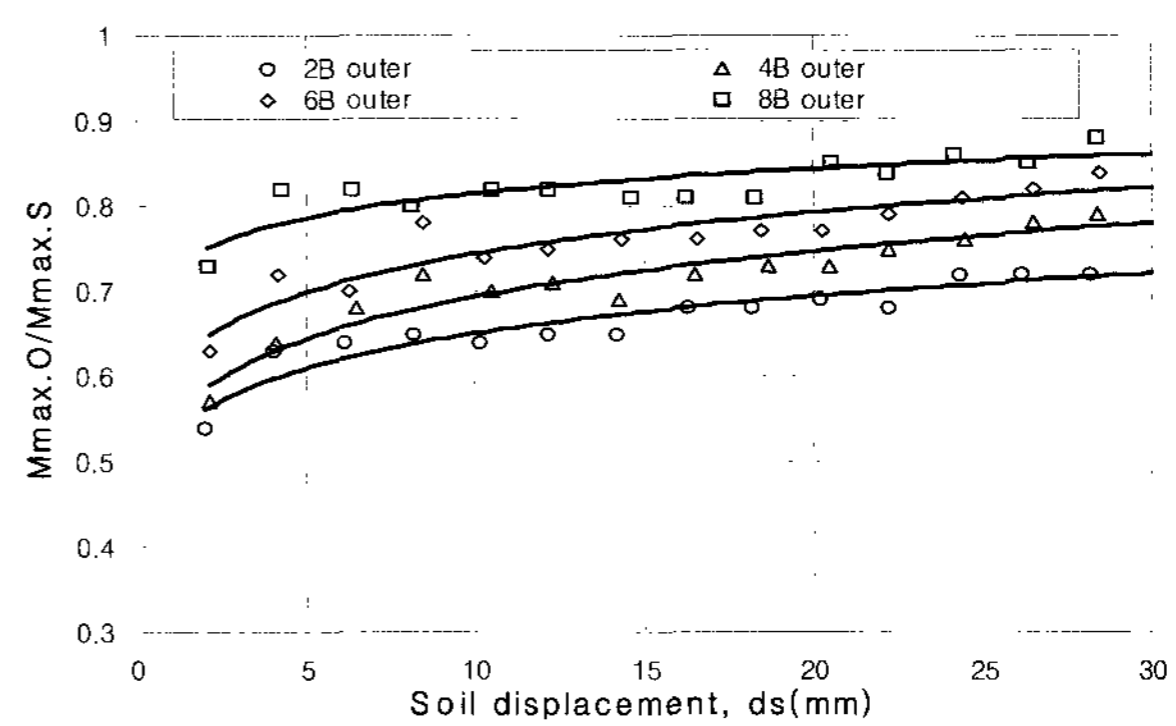


(b) H-type

그림 14. 휨모멘트비($M_{max.I}/M_{max.O}$)와 지반변위(d_s)의 관계도



(a) B-type



(b) H-type

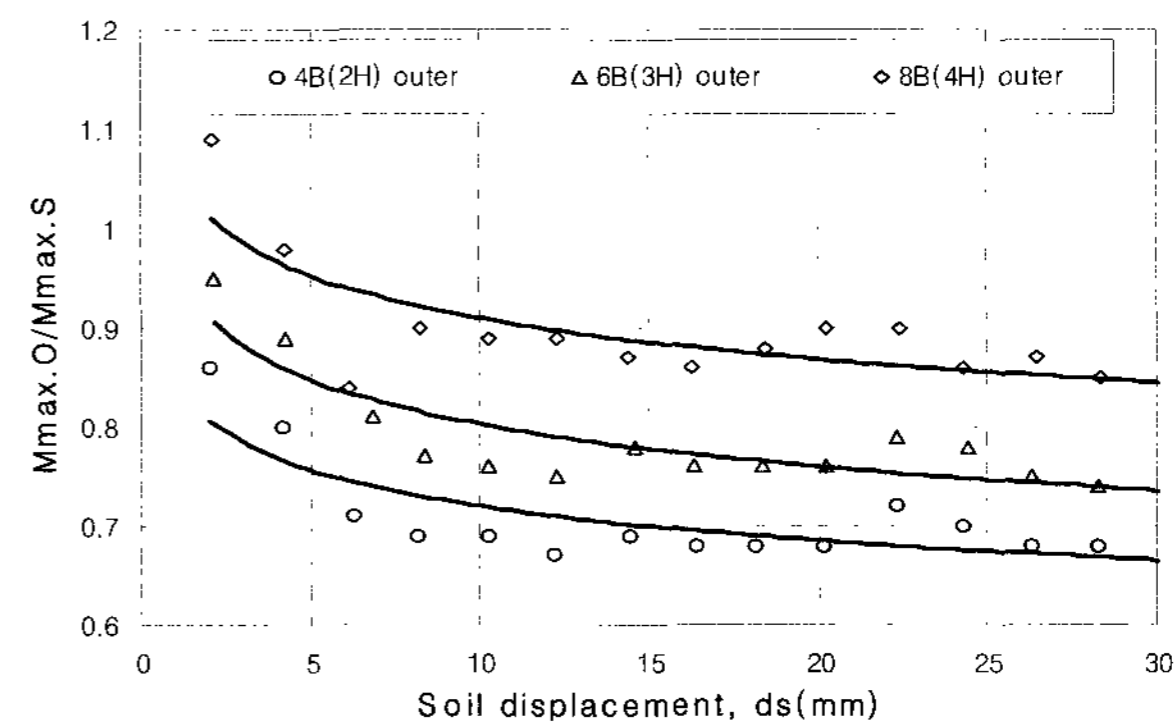
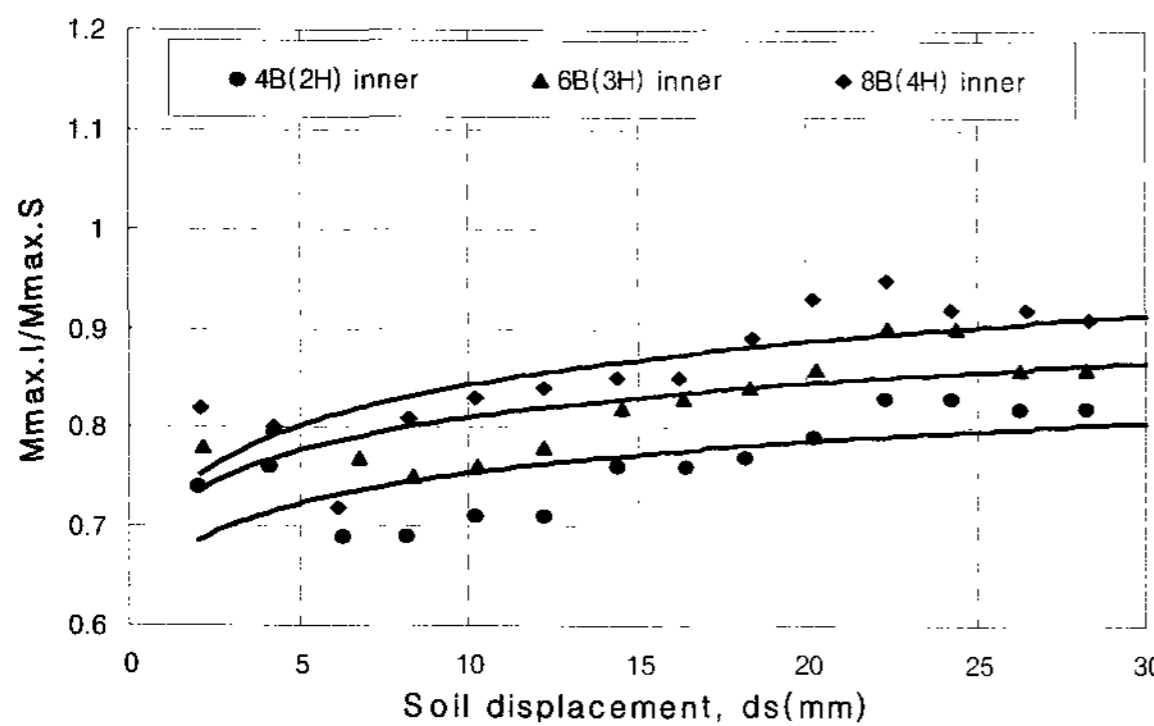


그림 15. 휨모멘트비 $M_{max.R}/M_{max.S}$ 와 지반변위(d_s)의 관계도

pile보다 휨모멘트비가 작은 것으로 나타났다. inner pile의 경우는 기울기가 급한 것으로 보아 변위증가율에 따른 휨모멘트비 증가율은 큰 것으로 나타났다. 이에 반해 outer pile의 증가율은 상대적으로 떨어짐을 알 수 있다. 간격에 따른 증가율은 일정변위에 대해 선형의 간격이 거의 일정하므로 증가율이 큰 차이를 보이고 있지는 않다. 이는 수평간격이 증가할 때 inner와 outer pile이 각각 일정비율에 가까운 증가를 보여주는 것이라 하겠다.

그림 15(b)의 H-type의 경우는 B-type의 경우보다 보다 명확한 선형이 나타나지 않지만, 경향을 파악해보면 inner pile의 경우는 증가하는 경향이며, outer pile의 경우에는 지속적으로 줄어드는 것을 알 수 있다.

휨모멘트비가 증가하여 1의 값에 접근한다는 것은 단독말뚝(single pile)에 접근한다는 것을 말해주고 있다. inner piles의 경우 변위가 증가할수록 단독말뚝에 접근하면서 모멘트비가 점차 증가하나 outer pile의 경우는 오히려 반대 경향을 나타내고 있다. 지반의 변형이 증가할수록 말뚝과 지반사이의 마찰력이 어느 정도 커져 말뚝에 전달하는 힘이 커지고 있음을 보여주고 있다.

3.3.3 토압 및 수평저항력

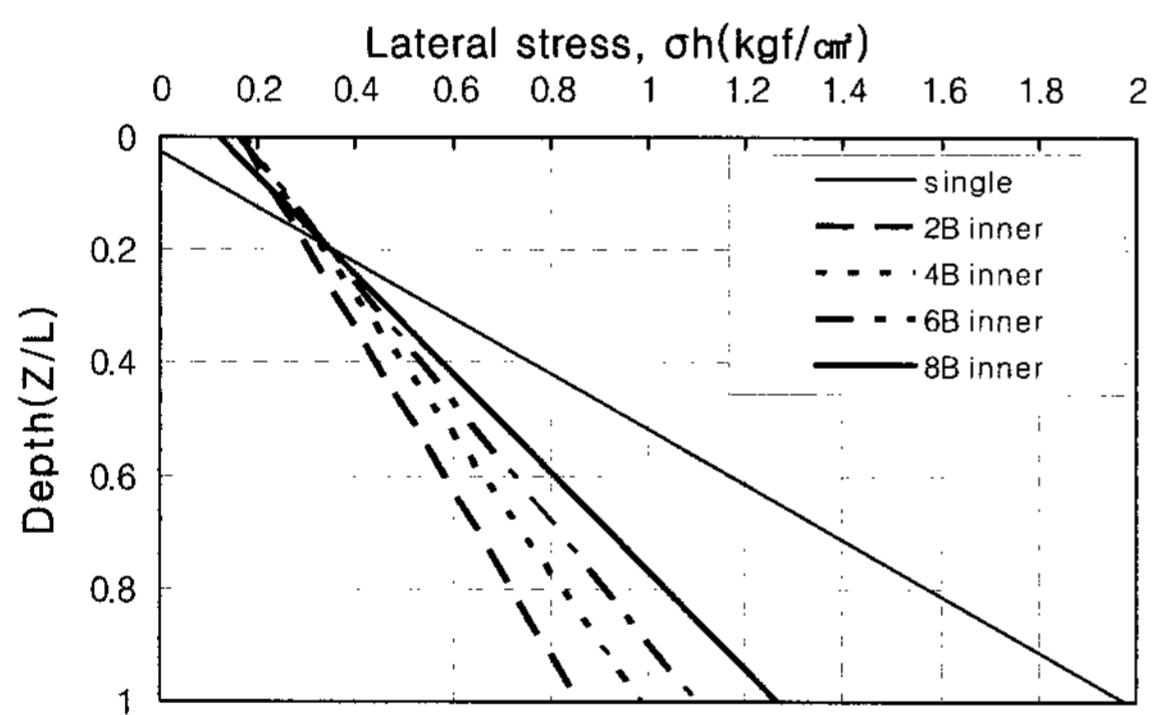
Fig. 16은 깊이별 수평응력을 도시한 것이다.

간격이 증가 할수록 수평응력의 크기가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. H-type의 inner는 사각형에 가까운 수평응력분포를 보이고 나머지의 경우는 위쪽의 수평응력이 좁은 사다리꼴 형상을 하고 있다. 단독말뚝은 거의 삼각형에 가까운 분포를 하고 있는 것과는 차이가 있으며 이는 말뚝사이의 지반에 의해 힘의 분포형태가 달라졌음을 시사하고 있는 부분이라 하겠다. H-type의 inner의 수평응력분포양상은 지반아칭에 대한 영향으로 인한 것으로 판단된다.

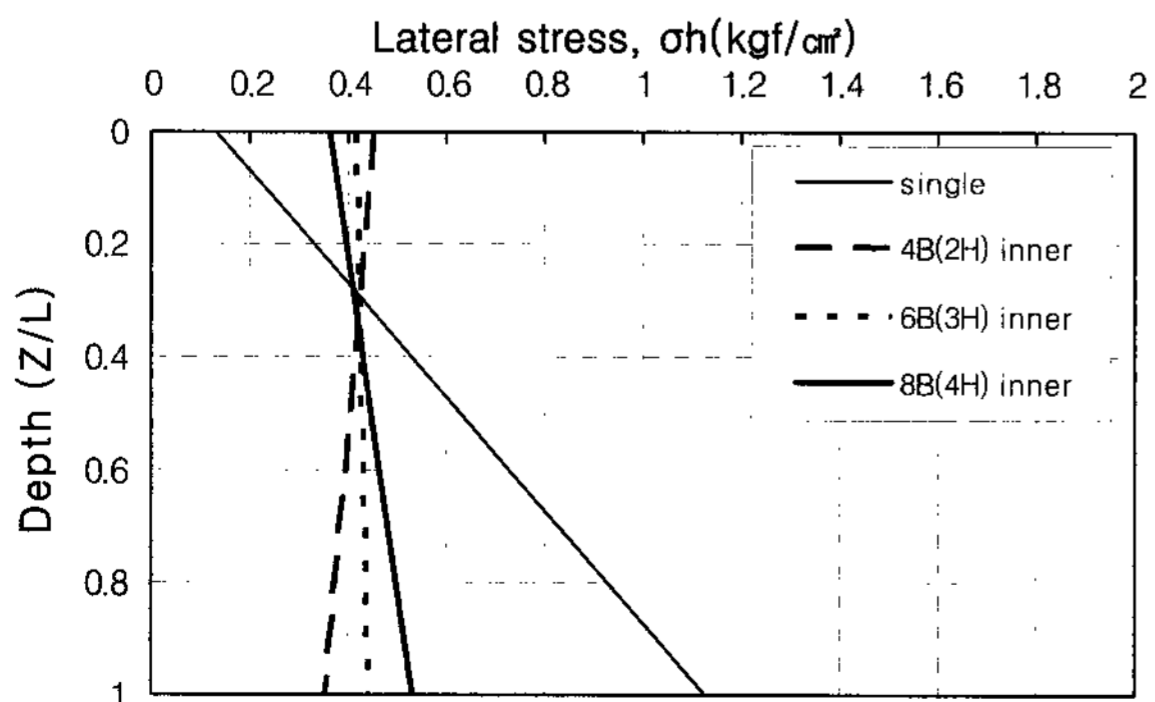
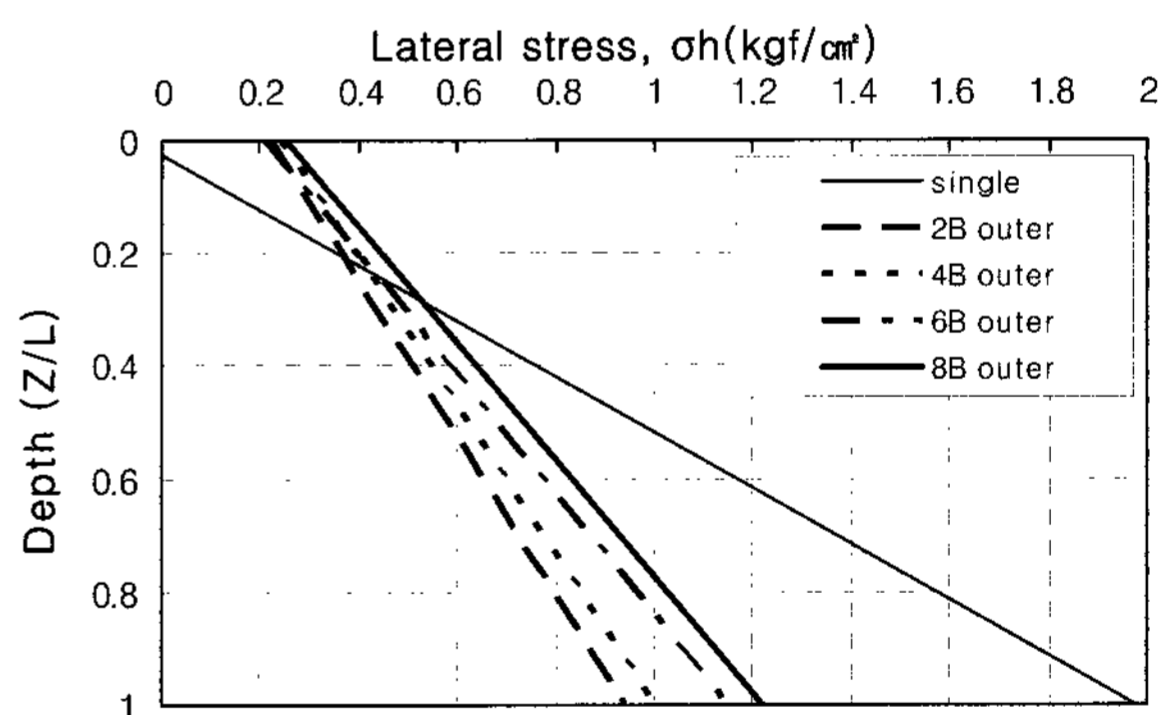
그림 17은 변위 증가에 따른 열말뚝의 전체수평저항력(F_{pr})을 도시한 것이다. 열말뚝 전체수평저항력(F_{pr})은 inner pile과 outer pile에 가해진 수평응력을 합산한 것으로 실제 열말뚝 전체에 가해진 토압을 의미하며 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{pr} = \sum_{n=1}^4 F_p = \sum_{n=1}^2 F_{po} + \sum_{n=1}^{4-2} F_{pi} = 2 \times F_{po} + 2 \times F_{pi} \quad (11)$$

그림 17에서 B-type pile의 수평저항력이 H-type pile의 수평저항력 보다 큰 것으로 나타나 말뚝분담력이 큰



(a) B-Type



(b) H-Type

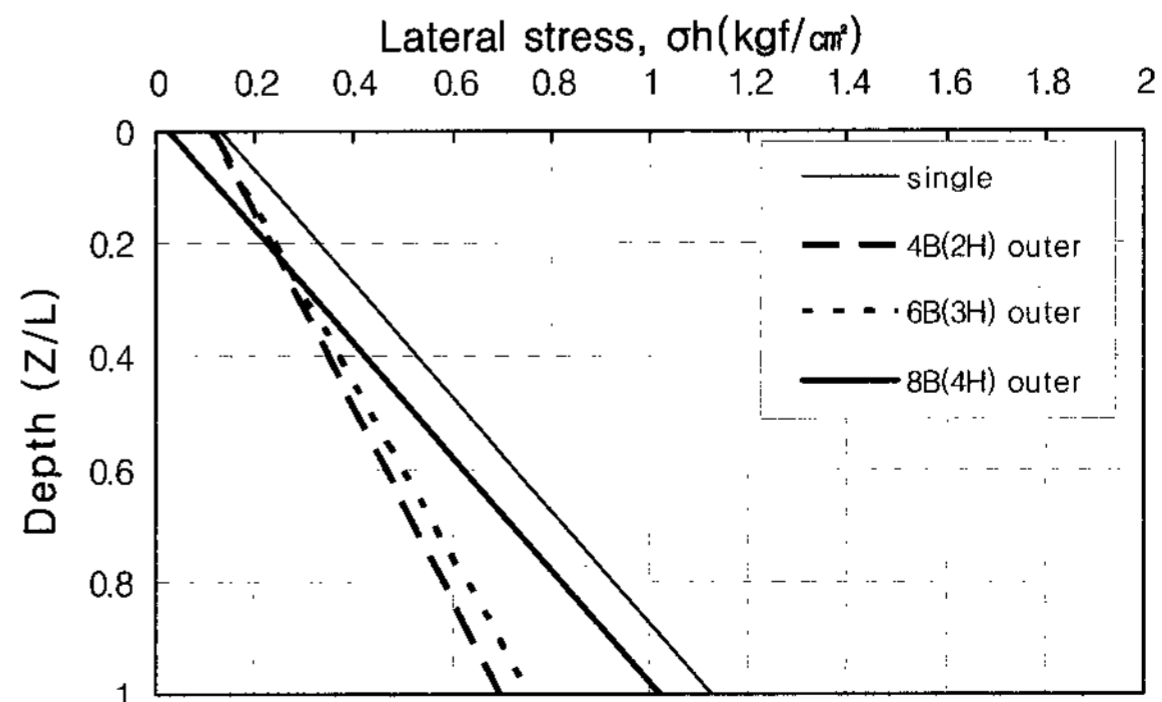


그림 16. 깊이별 수평응력 분포도

것으로 산정되었다.

말뚝에 작용하는 토압은 지반과의 상호작용으로 인해 발생한 토압이므로 전면토압과 지지지반의 토압, 말뚝과 지반과의 마찰력 등의 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하여 생기는 힘에 의해 나타난 것이다.

이러한 여러 가지 요인들 중 열말뚝이 설치된 지반에 가해지는 수평력(T_t)을 지반이 분담하는 힘과 말뚝이 분담하는 힘의 관계로 식 (12)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$T_t = F_t = F_{gr} + F_{pr} \quad (12)$$

따라서, 열말뚝이 있는 지반의 전단저항력(F_{gr})은 지반에 가해진 수평력($T_t = F_t$)에서 열말뚝의 수평저항력(F_{pr})을 뺀 값으로 나타내며 식 (13)과 같다.

$$F_{gr} = F_t - F_{pr} \quad (13)$$

그림 18은 수평간격이 6B일 때 지반변형에 따른 수평저항력의 관계를 형상별로 도시한 것이다. 그림에서 F_{np} 는 말뚝이 없는 순수 지반을 전단했을 때의 지반의

전단저항력의 크기를 나타내며, F_t 와 F_{gr} 은 앞서 설명했듯이 열말뚝이 설치된 지반의 전체수평저항력과 열말뚝이 설치된 지반의 수평저항력을 말한다. 열말뚝이 있을 때의 지반저항력(F_{gr})은 변위에 따라 초기 값을 제외하고는 거의 큰 변화를 보이지 않고 있다. 그림 11에서 single pile의 F_g 값이 변위에 따라 증가하는 것과는 비교해 볼 때 열말뚝의 경우는 지반변형에 대해 말뚝의 역할이 상대적으로 더 크다는 것을 알 수 있다. F_{gr} 은 말뚝의 간격이 넓어질수록 전단면이 넓어지므로 점차 커지는 것으로 나타났다. 그림 18에서 F_t 와 F_{pr} 의 차이는 식 (12)에서 알 수 있듯이 실제 측정된 말뚝이 분담하는 힘(F_{pr})의 크기에 해당하며 두 선형의 공간차로 나타난다. 이 F_{pr} 의 크기 또한 말뚝의 간격이 증가할수록 커진다는 것을 알 수 있다. 말뚝을 설계할 때는 F_{pr} 의 힘을 고려하여 전단 설계를 해야 할 것이다.

그림 19는 간격비 증가에 따른 수평저항력비(R_f)를 도시한 것이다. 여기서 수평저항력비는 식 (14)에 나타내었으며, n 은 말뚝의 개수를 의미한다.

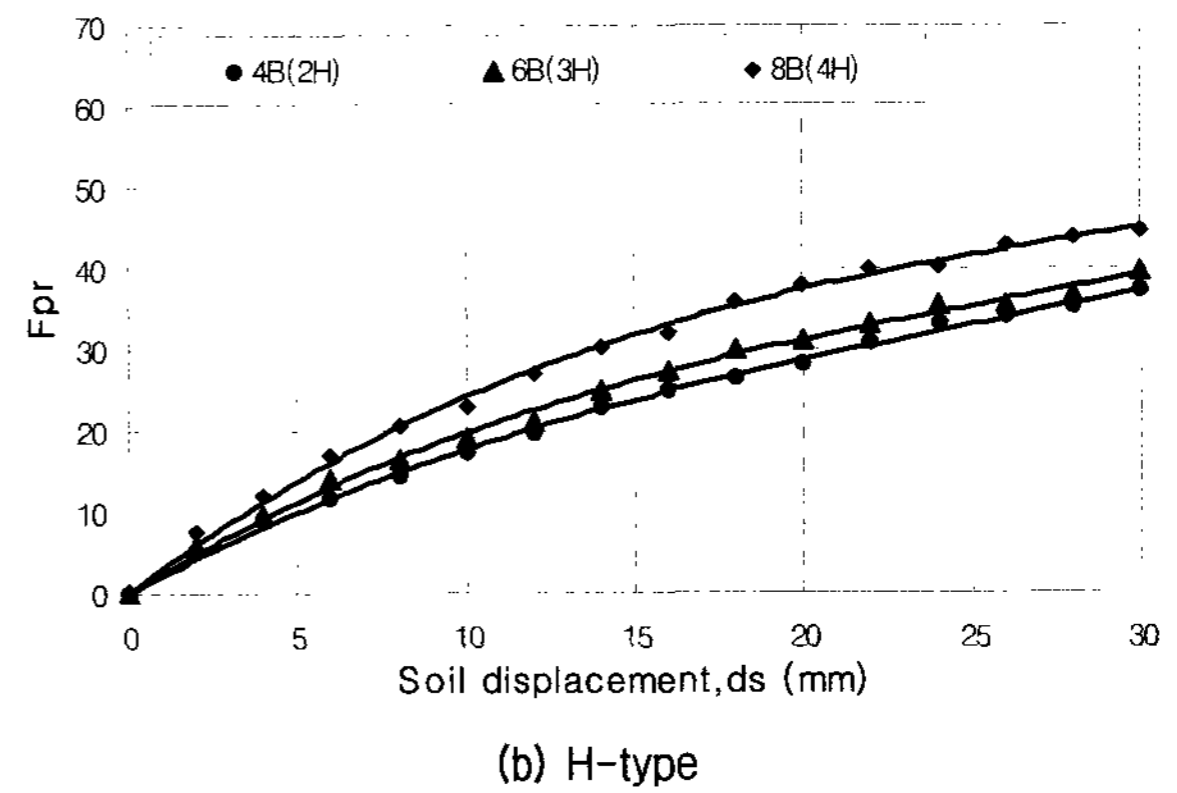
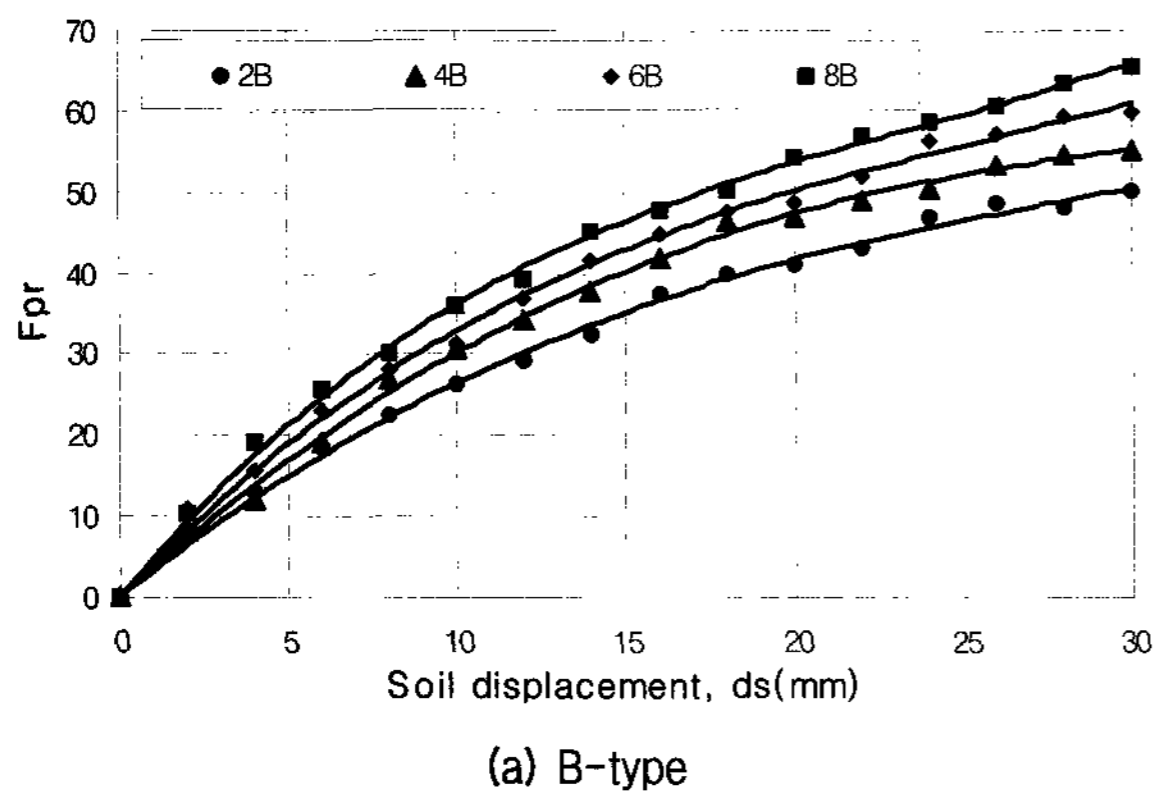


그림 17. 열말뚝 전체수평저항력(F_{pr})과 지반변위의 관계도

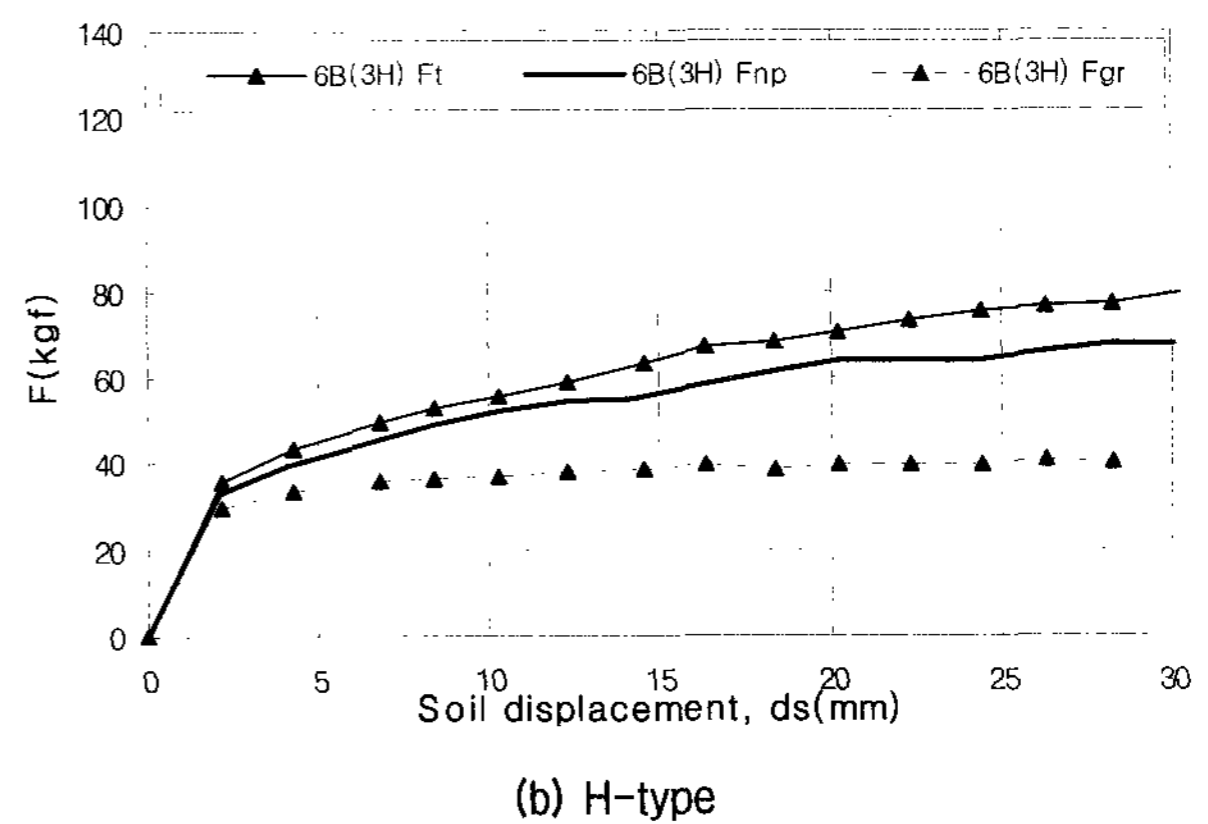
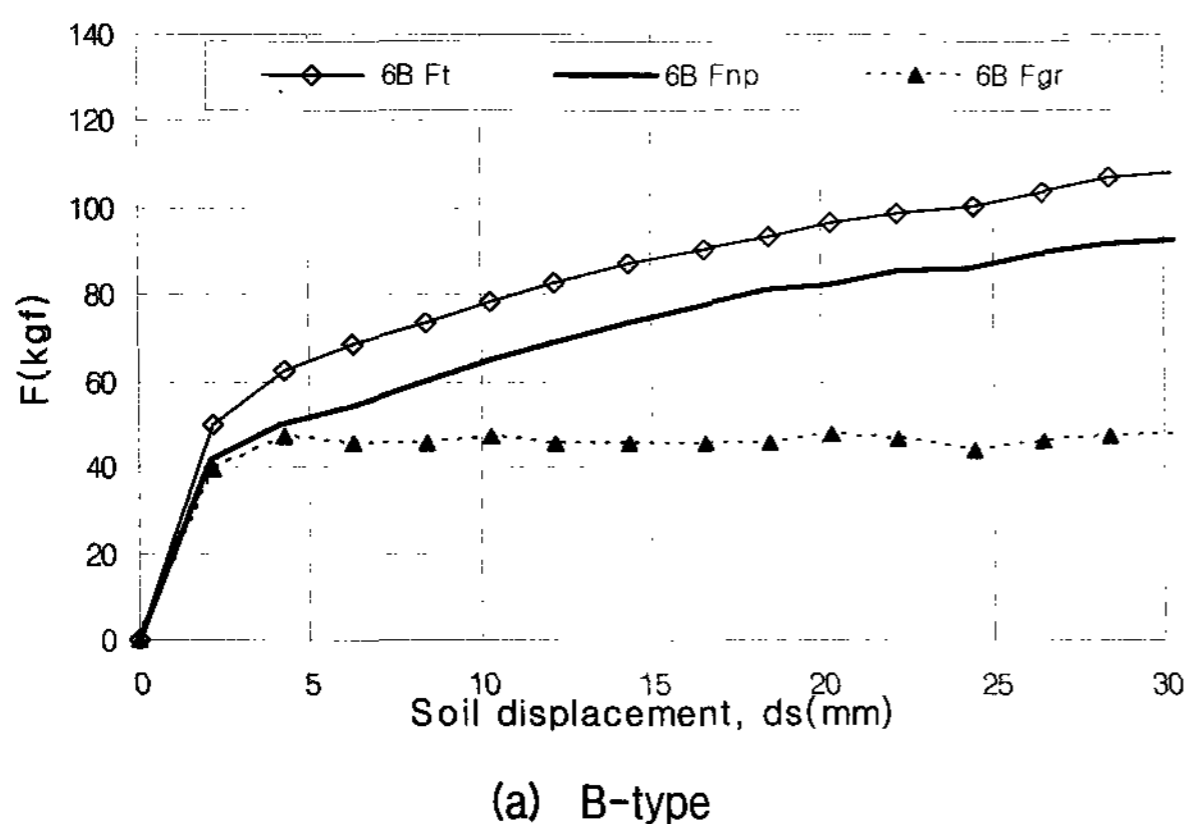


그림 18. 6B간격일대의 수평저항력(F)과 지반변위의 관계도

$$R_f = \frac{F_{pr}}{F_{ps} \times n} \quad (14)$$

모든 경우 간격비 증가에 따른 수평저항력비가 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 B-type pile의 경우는 간격비의 값이 변위에 대해 일정한 값을 나타내고 있으며, H-type pile의 경우는 수평간격이 넓어질수록 수평저항력비의 차이가 거의 줄어들음을 알 수 있다.

사각형 말뚝의 수평저항력을 그림 20과 같이 홍원표(1981)와 김영인(1994)의 제안식을 실험값과 비교해 볼 수 있다. 실험값은 지반변형(d_s)과 전면폭(B)이나 측면폭(H)중 큰 값과 비교하여 1, 2, 3배의 변형에 대해 대중소변형으로 구분하여 제안식과 비교하였다.

그림 20에서 B-type의 경우는 홍의 값이 본 실험값과 비교해 볼 때 2B간격에서 크게 나왔으며, 4B이후는 오히려 작게 나타났으며, 김의 경우는 수평면의 소변형과 대변형의 값 사이에 있었다. 경사면의 값은 수평면의 중변형과 가장 비슷하게 나타났다. H-type 에서는 김 값이 실험값보다 크게 나타났으며, 4B를 제외하고는 홍의 값이 실험값의 범위와 비슷하였다. 홍원표(1984)의 실험

값은 B-type이 큰 토압을 받으며, 김영인(1994)의 경우는 H-type이 큰 토압이 받는 것으로 나타났다.

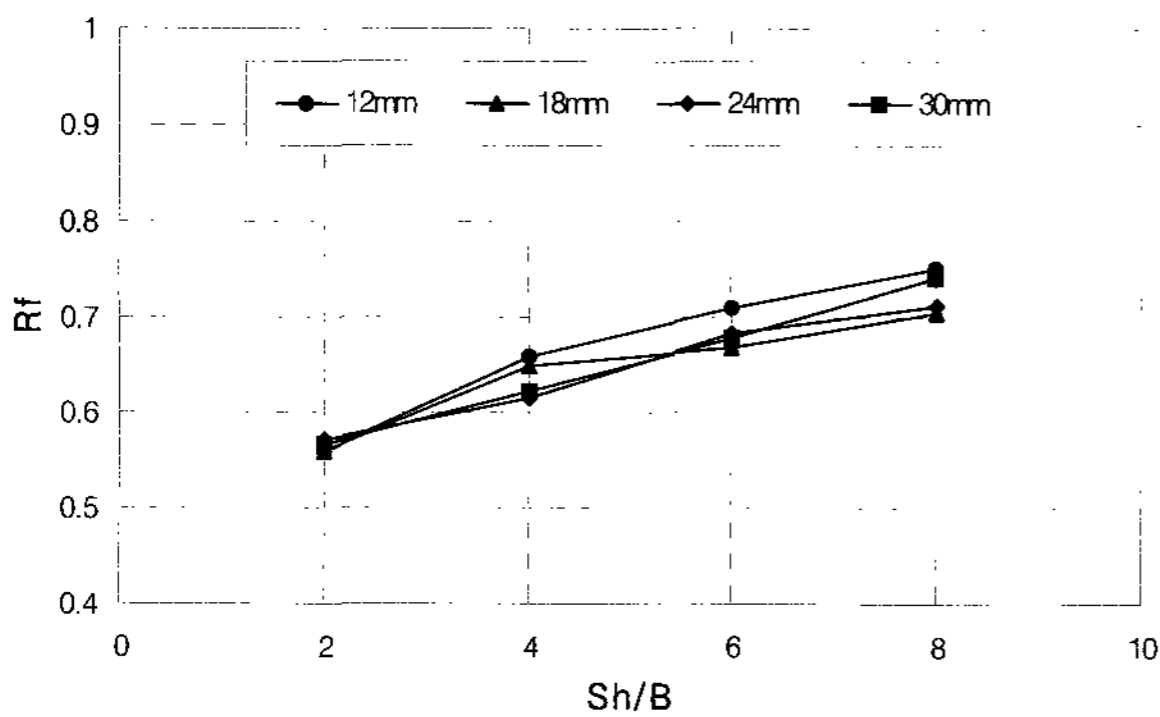
3.3.4 최대휨모멘트와 최대수평저항력

그림 21과 22는 최대휨모멘트와 최대수평저항력을 3차포물선으로 가정하여 지반변위의 함수인 식 (15)와 같이 나타내어 말뚝의 형태별로 도시한 것이다. 이때 3차함수의 각 계수는 다시 수평간격의 함수인 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 회귀분석으로 알아낸 3차포물선식과 실험값이 잘 일치 하고 있음을 볼 수 있다.

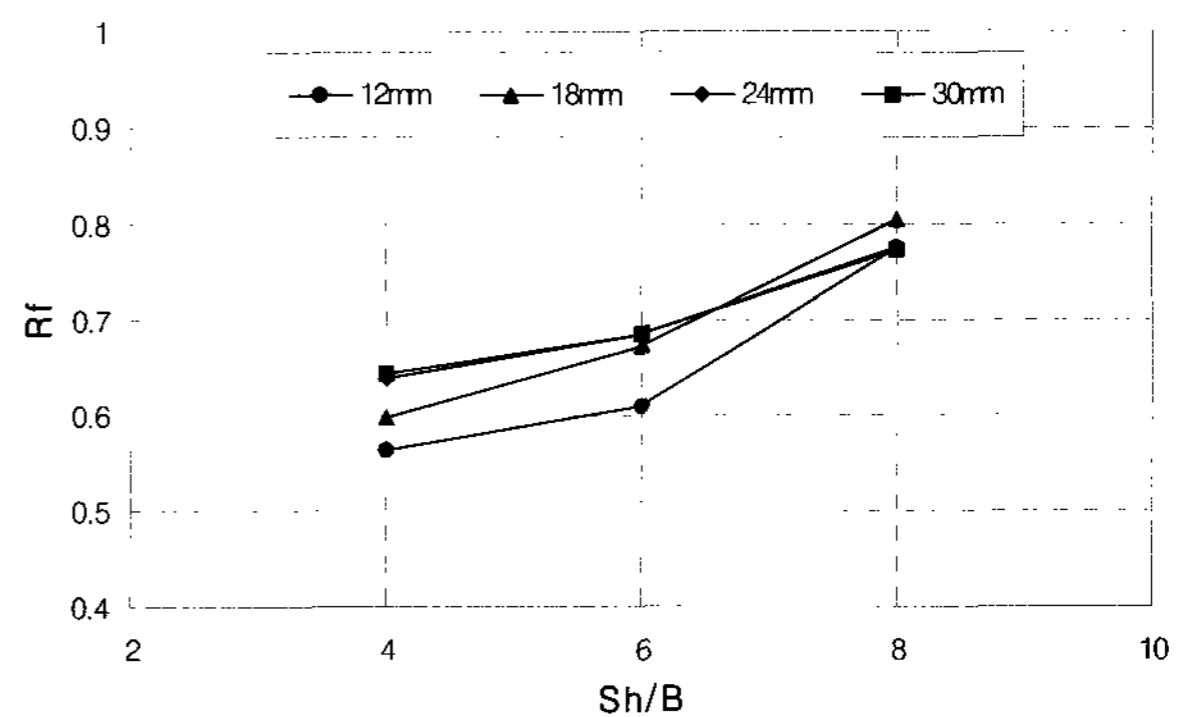
$$M_{\max,r}, F_{\max,r} = f(d_s/B) = a_{(m,f)}(d_s/B)^3 + b_{(m,f)}(d_s/B)^2 + c_{(m,f)}(d_s/B) \quad (15)$$

$$a_{(m,f)}, b_{(m,f)}, c_{(m,f)} = f(S_h/B) = \alpha_{(m,f)}(S_h/B)^2 + \beta_{(m,f)}(S_h/B) + \gamma_{(m,f)} \quad (16)$$

표 6, 7은 B-type일 경우의 3차포물선의 계수값을 나타낸 것이다. 상관도가 비교적 양호 것으로 나타났다.

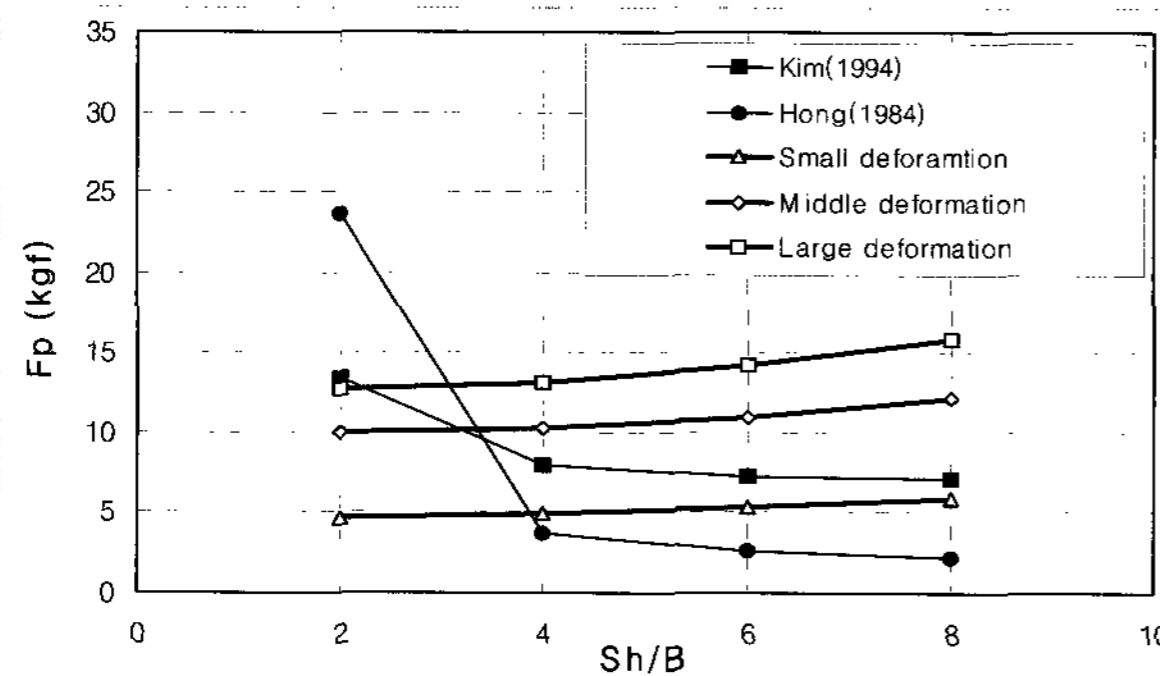


(a) B-type

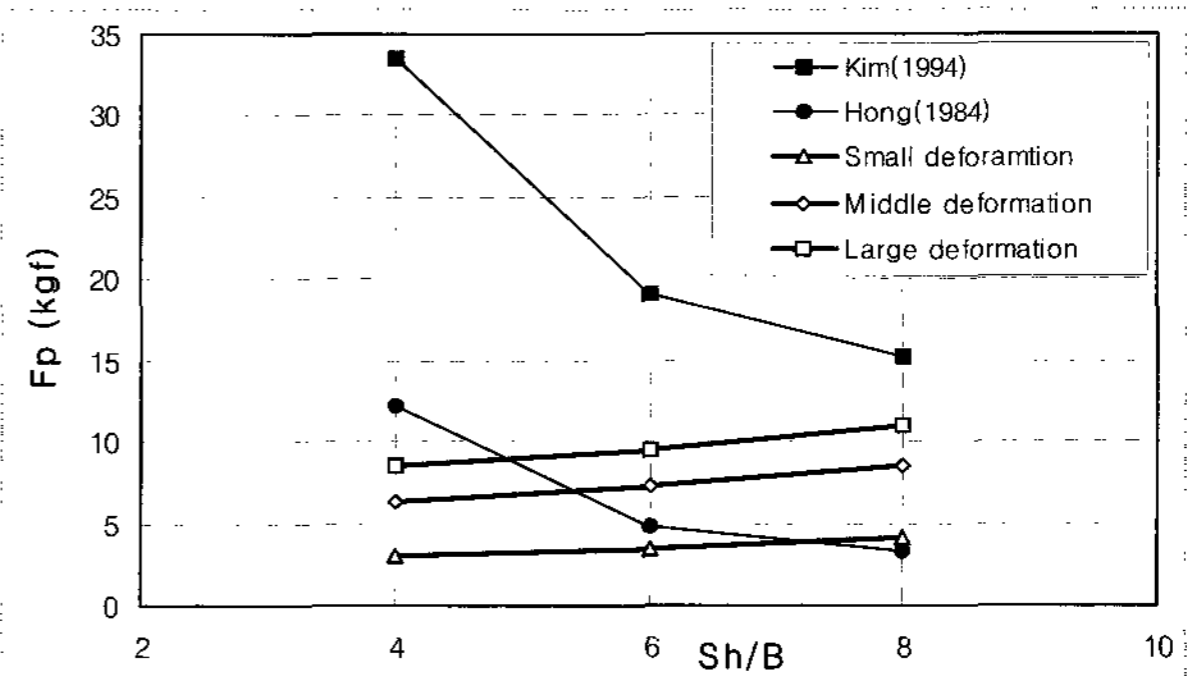


(b) H-type

그림 19. 수평저항력비(R_f)와 간격비(S_h/B)의 관계도

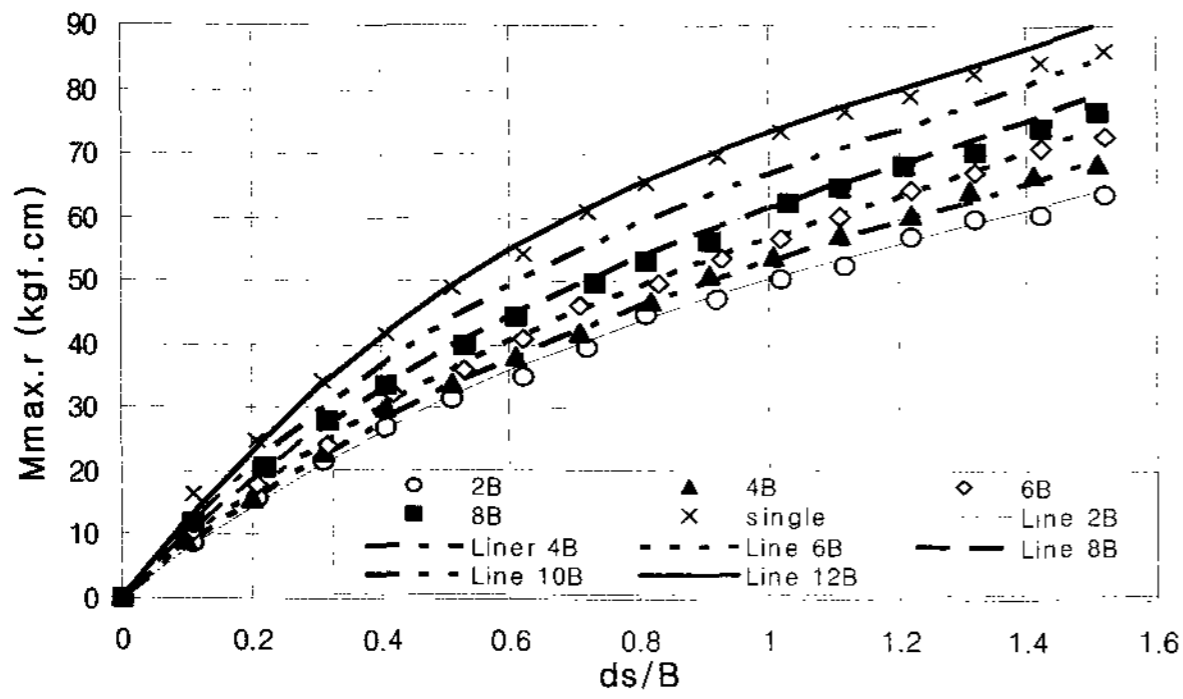


(a) B-type

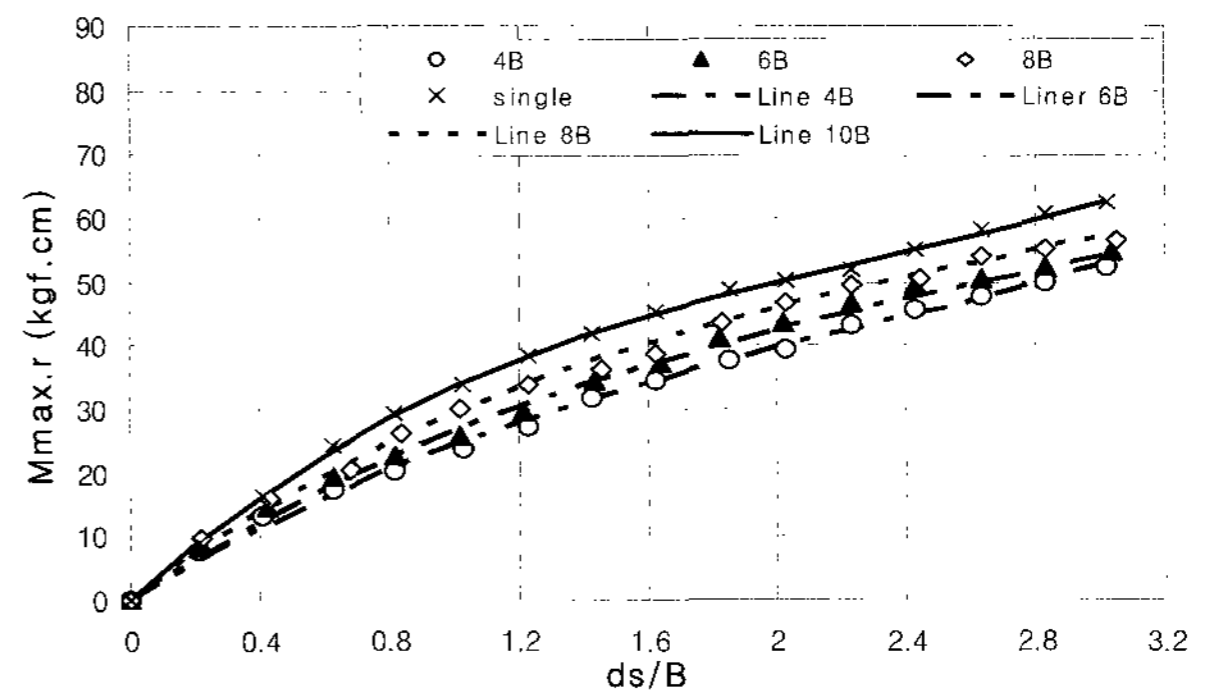


(b) H-type

그림 20. 수평간격에 따른 말뚝의 저항력

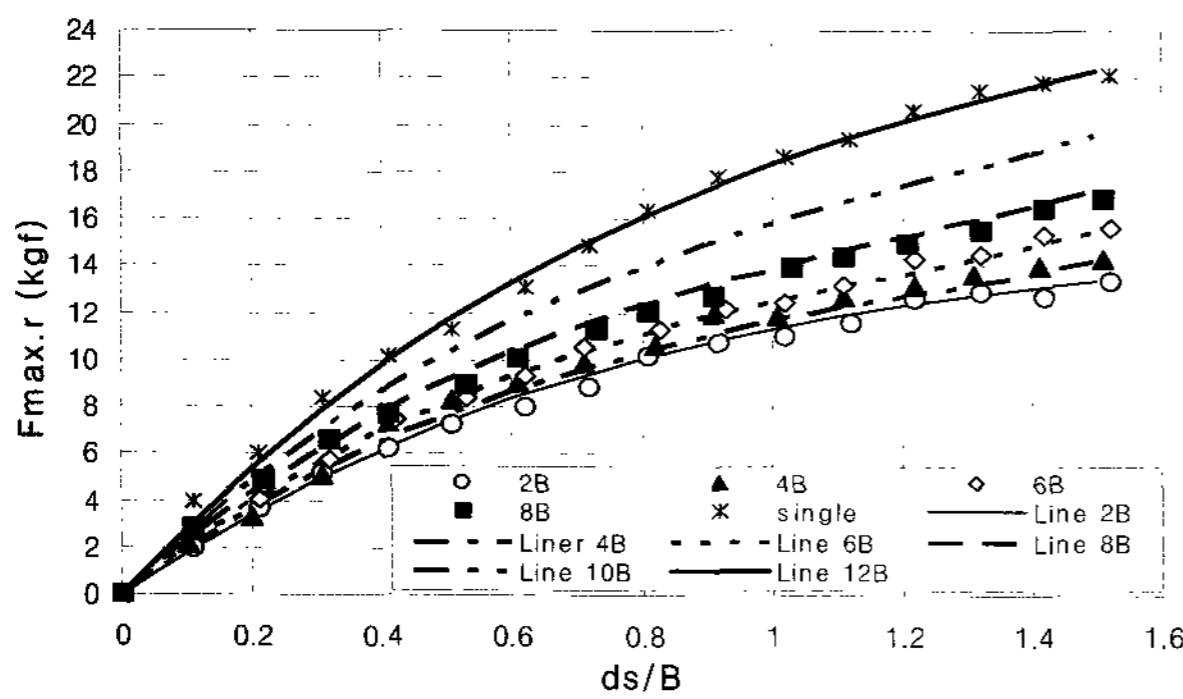


(a) B-type

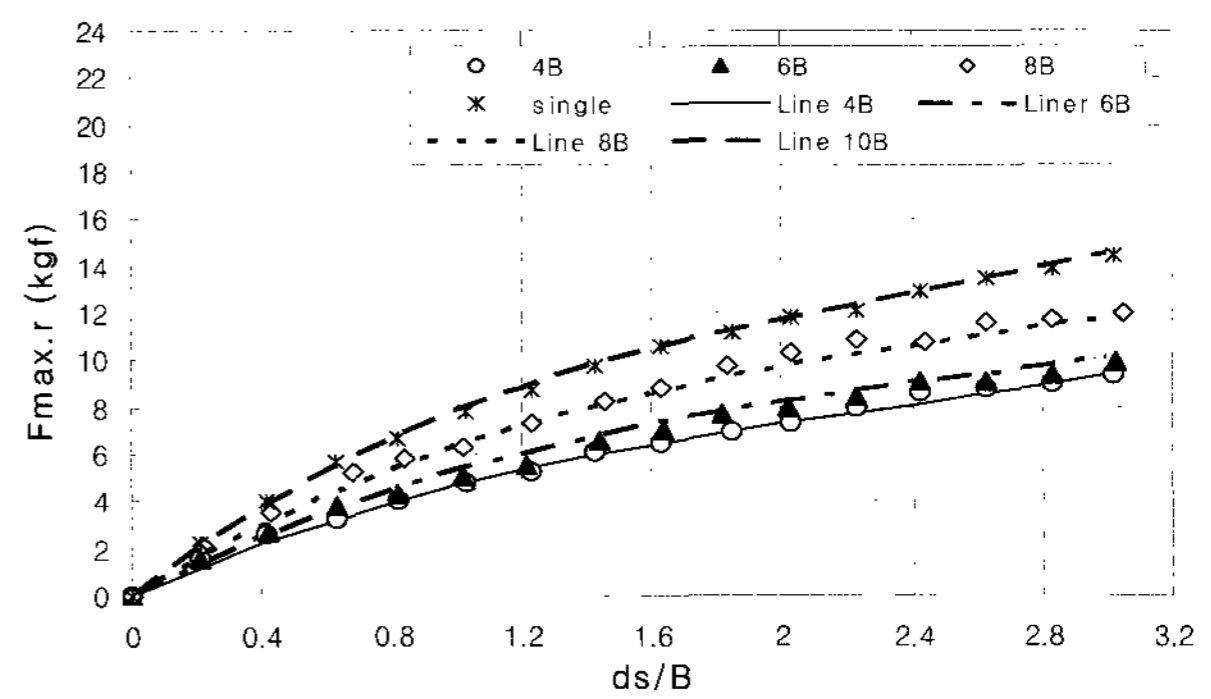


(b) H-type

그림 21. 말뚝의 최대 휨모멘트



(a) B-type



(b) H-type

그림 22. 말뚝의 최대수평저항력

표 6. 실험 계수값(a , b , c)

Space		coefficient of line equation			R^2
$M_{max,r}$	S_h/B	a_m	b_m	c_m	
	2	9.7753	-39.42	79.49	0.9991
	4	12.091	-45.4	87.014	0.9989
	6	13.119	-48.47	91.844	0.9989
	8	15.801	-58.16	102.91	0.9985
	12	18.85	-77.08	130.81	0.9987
$F_{max,r}$	S_h/B	a_f	b_f	c_f	R^2
	2	2.0295	-9.533	18.603	0.9966
	4	2.4266	-11.13	20.76	0.9966
	6	3.535	-13.05	22.071	0.9979
	8	4.2559	-15.1	24.371	0.9998
	12	2.9651	-14.42	29.871	0.9969

표 7. 실험 계수값(α , β , γ)

		coefficient of line equation			R^2
$M_{max,r}$		α_m	β_m	γ_m	
	a_m	-0.0083	1.0224	7.8223	0.9897
	b_m	-0.1965	-0.9812	-37.0510	0.9947
	c_m	0.3120	0.6810	77.5840	0.9971
$F_{max,r}$		α_f	β_f	γ_f	R^2
	a_f	-0.0549	0.9006	0.1799	0.8508
	b_f	0.0840	-1.7142	-6.1107	0.9571
	c_f	0.0395	0.5509	17.522	0.9968

차이 역시 크지 않다.

3.3.5 수평저항력의 작용점

말뚝에 작용하는 토압의 작용점 즉 수평저항력의 작용점은 식 (17)에서 구하였으며, 지반변위(d_s/B)에 대한 큰 변화를 보이지 않아, 이를 평균하여 적용하여 말뚝 수평간격에 따라 변화되는 것을 그림 23에 도시하였다. 말뚝간격에 따라 B-type은 약간씩 감소하고 H-type의 경우는 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으나 그 값의

$$Y = \frac{M_{max,r}}{F_{max,r}} = \frac{M_{max,r}}{S_{max,r}} = \frac{\max[M_{max,O} M_{max,I}]}{\max[S_{max,O} S_{max,I}]} \quad (17)$$

다만 말뚝의 형태에 따라 작용점의 위치가 다소 차이를 보이고 있으며 이를 평균하여 나타내면 약 B-type의 경우는 0.36으로 H-type의 경우는 0.39로 나타나 H-type의 작용점의 위치가 조금 높은 것으로 나타났다. 이는 단독말뚝의 수평응력을 도시한 그림 7에서 나타난

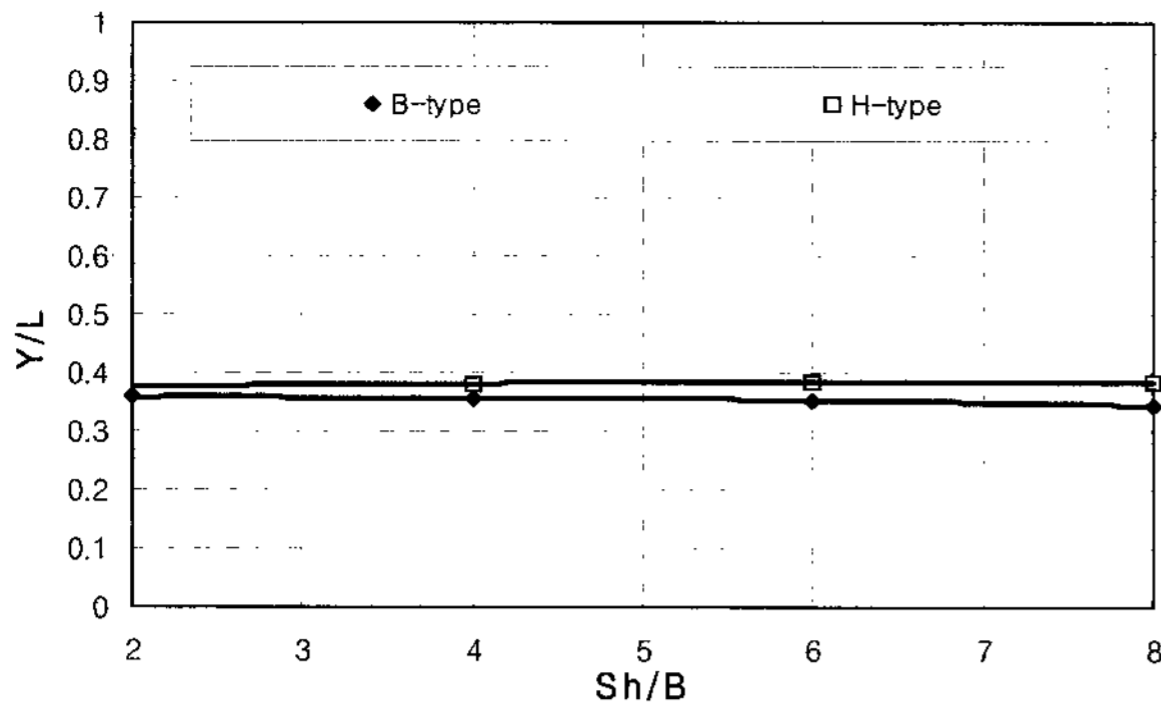


그림 23. 간격과 말뚝에 작용하는 토압의 작용점

B-type의 경우는 거의 삼각형에 가까운 토압분포를 보이고 있고, H-type의 경우는 사다리꼴 분포를 보이는 것과 연관이 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

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

- (1) 지반변형에 따라 변화되는 말뚝의 최대수평저항력과 최대휨모멘트 크기를 고찰 할 수 있는 경험식을 3차 포물선 식으로 제안하였다
- (2) 단독말뚝의 수평저항력은 측면마찰저항력보다는 전면수평저항력에 더 큰 영향을 받으며, 전면수평저항력비가 B-type의 경우는 0.9, H-type의 경우는 0.7로 나타났다.
- (3) 단독말뚝에 작용하는 수평응력은 B-type의 경우는 삼각형에 가까웠으며, H-type의 경우는 윗변이 짧은 사다리꼴 형태로 나타났으며, 열말뚝의 경우는 H-type의 경우는 사각형에 가깝게 나타났고, 나머지의 경우의 윗변이 짧은 사다리꼴의 형태로 나타나, 형상별 위치별로 수평응력 분포형상이 다르게 나타났다.
- (4) 휨모멘트비($M_{max.I} / M_{max.O}$)는 B-type의 경우 변위에 따른 수평간격(S_h)이 넓어질수록 크게 나타났고, 휨모멘트비가 1을 초과하지 않아 outer pile이 inner pile보다 크게 나타났으나, H-type의 경우는 휨모멘트비가 오히려 수평간격이 증가할수록 작은 값을 나타냈으며, 변위증가에 따라 휨모멘트비가 1을 초

과해 inner pile이 outer pile 보가 크게 나타났다.

- (5) 수평저항력비(R_f)는 말뚝의 형상에 관계없이 열말뚝의 수평간격이 증가함에 따라 증가하는경향으로 나타났다.
- (6) 말뚝에 작용하는 수평저항력의 작용점위치(Y/L)는 지반변위와 수평간격에 따라 큰 변화를 보이지 않으며, B-type의 경우는 0.36, H-type의 경우는 0.39로 나타나 H-type이 조금 높은 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 김병철 (2000), 사면보강용 역지말뚝의 간편설계법, 석사학위논문, 연세대학교.
2. 김영인 (1994), 소성변형 지반중의 H형 강말뚝에 작용하는 수평력에 관한 연구, 박사학위논문, 경상대학교.
3. 배중순 (2002), "제형하중에 의한 측방토압을 받는 열말뚝의 거동분석", 대한토목학회논문집, 제22권, 제 5-C호, pp.517-524.
4. 손기만 (1999), Bishop 간편법을 활용한 역지말뚝의 사면안정효과에 대한 평가, 석사학위논문, 중앙대학교.
5. 홍원표 (1984), "수동말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회 논문집, Vol.4, No.2, pp.77-88.
6. Catier, G. and Gigan J. P. (1983), "Experiments and observation on soil nailing structures", Proc. 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, pp.308-311.
7. Derek H. Cornforth (2004), Landslides in practice, Willey, pp. 472.
8. Franx and Boostatra, G.C. (1948), "Horizontal pressure on pile foundations", Proc., 2nd Int. conf. SMFE, Vol.1, pp.131-135.
9. Hassiotis S., Chameau J. L. & 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
10. Heyman, L. (1965), "Measurement of influence of lateral earth pressure on pile foundation", Proc. 6th ICSMFE. Vol.2 : 257-260.
11. 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.
12. Leussink, H. and Wens, K. P. (1969), "Storage yard foundation on soft cohesive soils". Proc. 7th ICSMFE. Vol. 2 : 149-155.
13. Poulos, H. G. (1995), "Design of reinforcing piles to increase slope stability", Canadian Geotechn. Journal, Vol. 32, 808-818.
14. Tschebotaioff, G.P. (1973), Foundations, retaining and earth structures, McBraw-Hill Kogakusha, Tokyo, pp.389-414.
15. 山田剛二, 小橋澄治. (1971), 地すべり斜面崩壊の實態と對策, 山海堂 : 167-182.
16. 福本安政. (1975), 地すべり防止抗打工法について, 地すべり 11(2) : 21-29.

(접수일자 2007. 6. 15, 심사완료일 2008. 4. 15)