

사면에 설치된 억지말뚝의 활동억지효과에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Stabilizing Effect of Piles against Sliding

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

송 영 석² Song, Young-Suk

Abstract

In order to investigate the stabilizing effect of piles against sliding, a series of model tests were carried out. The model apparatus was designed to perform the model test of slope reinforced by stabilizing piles. The instrumentation system was used to measure the deflection of stabilizing piles during slope failure. The stabilizing effect of the piles in a row with some interval ratio is larger than the isolated pile without interval ratio. Because the prevention force of piles in a row increased due to the soil arching effect between piles during slope failure. Especially, the maximum value of prevention ratio was presented at 0.5 of interval ratio. If the required prevention ratio is 1.1, the interval ratio must be installed from 0.5 to 0.8. Also, the stabilizing effect of piles against sliding is excellent at the interval ratio between 0.5 and 0.8. This value can be proposed as the criterion of the interval ratio between piles against slope failure.

요 지

억지말뚝의 활동억지효과를 조사하기 위하여 일련의 모형실험을 수행하였다. 이를 위하여 억지말뚝이 설치된 사면에 대한 모형실험장치를 고안하였다. 그리고, 모형실험시 각종 계측시스템을 이용하여 사면활동에 따른 억지말뚝의 변형거동을 조사하였다. 모형실험결과 말뚝간격비가 1인 단독말뚝의 경우보다 일정한 간격비를 가진 줄말뚝에서 사면활동에 대한 억지효과가 더 우수함을 확인할 수 있다. 즉, 사면활동시 말뚝과 말뚝사이의 지반아칭효과로 인하여 사면활동에 대한 억지말뚝의 저항효과가 증가하게 된다. 억지말뚝의 간격비가 작아질수록 사면활동에 대한 억지율은 증가하며, 간격비가 0.5일 때 사면활동에 대한 억지율이 가장 우수한 것으로 나타났다. 억지말뚝의 소요억지율을 1.1로 하면 말뚝간격비는 0.5~0.8사이로 설치되어야 한다. 그리고, 억지말뚝의 간격비가 0.5~0.8일 경우 억지말뚝이 휨응력을 크게 받으므로 억지말뚝의 사면활동에 대한 저항효과가 우수함을 알 수 있다. 따라서, 사면활동에 저항하기 위한 합리적인 억지말뚝의 간격비는 0.5~0.8로 제안할 수 있다.

Keywords : Model test, Stabilizing piles, Bending stress, Interval ratio, Soil density, Preventive ratio

1. 서 론

억지말뚝공법은 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치하므로써 사면의 활동하중을 말뚝

의 수평저항으로 받아 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(Passive pile)의 대표적인 예중의 하나로 활동토괴에 대하여 역학적으로 저항하는 공법이다. 그리고, 타공법들과 비교하여 지중

1 정희원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geo. & Environ. Hazards Div., Korea Inst. Geo. & Mineral Res., yssong@kigam.re.kr)

깊은 곳까지 활동이 발생하는 중규모 혹은 대규모 산사태에 저항할 수 있다는 장점을 가지고 있다(홍원표 등, 2003; 송영석, 2004). 이 공법은 사면안전율의 증가 효과가 커서 일본, 미국, 유럽 등의 외국에서는 예로부터 많이 사용되어 오고 있다(De Beer & Wallays, 1970; Viggiani, 1981; Winter et al., 1983; Popescu, 1991; Schuster, 1992; Ergun, 2000). 특히, 일본의 경우는 강관 말뚝을 사용하여 산사태를 방지하려는 시도가 매우 활발하게 실시되었다(福本安正, 1976; Ito et al., 1981; Ito et al., 1982). 최근에는 우리나라에서도 억지말뚝의 사용하여 산사태를 방지하려는 사례가 늘어나고 있다(홍원표 등, 1995; Hong & Park, 2000; 홍원표 등, 2003).

억지말뚝을 합리적으로 설계하는 것은 결코 용이한 일이 아니다. 억지말뚝의 설계에 있어서 종래 취급이 곤란함으로 인하여 경시되어 온 중요한 요소중의 하나는 줄말뚝의 말뚝간격에 대한 영향이다. 실제의 억지말뚝은 줄말뚝으로 사용되고 있음에도 불구하고 종종 단일말뚝으로 해석하여 줄말뚝으로서의 영향을 수정계수에 의하여 개략적으로 고려하는 경우가 있다. 실제 억지말뚝에서 말뚝주변지반의 변형은 줄말뚝의 영향을 받으므로 단일말뚝에 작용하는 측방토압과 당연히 다른 값을 가질 것이다. 왜냐하면 억지말뚝에 작용하는 측방토압은 지반과 말뚝사이의 상호작용의 결과로서 정하여지기 때문이다. 따라서, 억지말뚝의 설계에서는 처음부터 줄말뚝의 문제로서 취급하여야 할 필요가 있다(홍원표, 1991).

한편, 억지말뚝에 작용하는 측방토압을 정확하게 산정하는 것은 억지말뚝을 안전하게 설계하기 위한 가장

중요한 기본사항이다. 실제로 말뚝주변에서 지반의 파괴는 지중에 형성된 지반아치영역중 외부아치의 천장부에서 파괴가 먼저 진행되어 말뚝주변부의 캡쌓기부로 발전하게 된다. 억지말뚝에 작용하는 측방토압은 말뚝주변지반의 파괴형태에 따라 정상파괴시 측방토압(홍원표 & 송영석, 2004)과 캡파괴시 측방토압(Matsui et al., 1982)으로 분류할 수 있다. 이러한 억지말뚝에 작용하는 측방토압은 억지말뚝의 시공조건, 즉 지반조건, 말뚝의 두부구속조건, 말뚝강성, 말뚝간격 등에 따라 변화하게 될 것이다. 그러나, 억지말뚝의 시공조건에 따른 활동억지효과에 대한 연구는 매우 미흡한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 억지말뚝의 간격비 및 사면지반의 강도에 따른 억지말뚝의 활동억지효과를 조사하여 억지말뚝에 대한 설계 및 시공기준을 마련하고자 한다. 억지말뚝의 시공조건에 따른 활동억지효과를 조사하기 위하여 일련의 모형실험을 수행하였다. 이를 위하여 억지말뚝이 설치된 사면에 대한 모형실험장치를 고안하였으며, 모형말뚝을 제작하고 모형사면지반을 조성하였다. 그리고, 모형실험시 각종 계측시스템을 이용하여 사면활동에 따른 억지말뚝의 변형거동을 조사하였다. 이를 통하여 억지말뚝의 간격비 및 사면지반의 강도에 대한 영향을 조사하고, 이에 따른 억지말뚝의 활동억지효과를 고찰하고자 한다.

2. 억지말뚝에 작용하는 측방토압

말뚝이 소성변형지반속에 일렬로 설치되어 있는 경우, 그 지반이 부근의 상재하중 등으로 인하여 말뚝열과

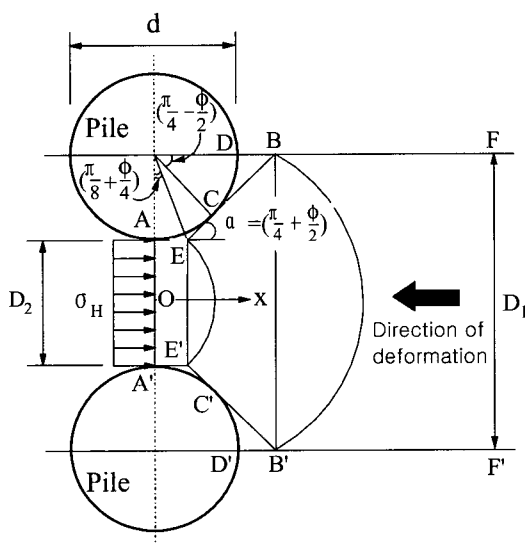


그림 1. 캡파괴시 측방토압의 산정(Matsui et al., 1982)

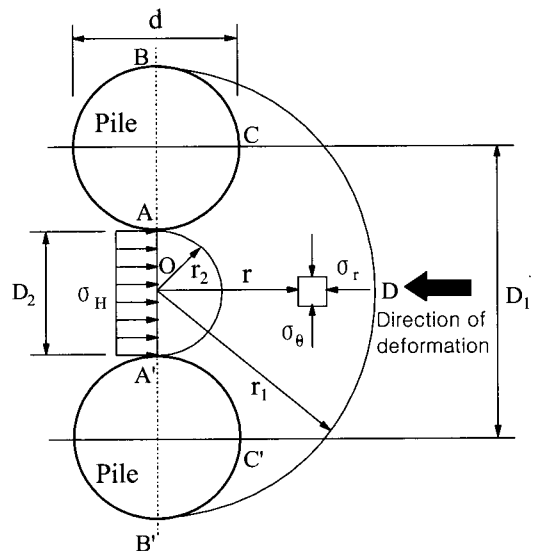


그림 2. 정상파괴시 측방토압의 산정(홍원표 & 송영석, 2004)

직각방향으로 측방변형을 하게 되며 말뚝주변지반에는 소성영역이 형성되어 말뚝은 측방토압을 받게 될 것이다. 실제로 말뚝주변에서 지반의 파괴는 지중에 형성된 소성영역 즉, 지반아칭영역중 외부의 천장부에서 파괴가 먼저 진행되어 말뚝주변부의 캡쌓기부로 발전하게 된다. 이 경우 천장부에서 시작되는 파괴형태를 정상파괴(crown failure)라 하고, 캡쌓기부에서의 파괴형태를 캡파괴(cap failure)라고 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 캡파괴시 측방토압은 말뚝주변부에 형성된 쌓기부에서 유도되며, Matsui et al.(1982)에 의해 제안되었다. 그리고, 그림 2에서 보는 바와 같이 정상파괴시 측방토압은 지반아칭영역중 외부아치의 천장부에서 유도되며, 원주공동확장이론을 적용하여 홍원표 & 송영석(2004)에 의해 제안되었다. 또한, 캡파괴에 의한 측방토압과 정상파괴에 의한 측방토압의 이론식을 이용하여 줄말뚝에 작용하는 측방토압의 항복범위를 정의하였다(홍원표 & 송영석, 2004).

3. 모형실험

3.1 모형실험장치

사면에 설치된 억지말뚝의 간격비와 사면지반의 강도에 따른 억지말뚝의 활동억지효과를 확인하기 위하여 모형실험장치를 제작하였다. 그림 3은 모형실험장치의 계통도를 도시한 것으로서 지반변형제어장치, 모형사면지반토조 및 데이터입력장치의 세부분으로 구성되어 있다. 여기서 지반변형제어장치와 모형사면지반토조

를 모형사면실험장치라고 한다.

지반변형제어장치는 사면지지판과 롤러 및 동력장치(모터)로 이루어져 있으며, 속도조절이 가능하도록 제작하였다. 모형사면지반토조는 모형말뚝과 모형사면으로 이루어져 있으며, 모형말뚝의 거동과 휨응력을 측정하기 위하여 각각 말뚝변위측정기와 변형률계를 설치하였다. 그리고, 데이터입력장치는 변형률계, 데이터기록장치(U-CAM) 및 컴퓨터로 이루어져 있다.

그림 4 및 그림 5는 모형사면실험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모형사면실험장치는 길이 215cm, 높이 140cm, 폭 54cm이며, 모형사면지반토조와 지반변형제어장치로 구성되어 있다. 모형사면지반토조는 길이 170cm, 높이 130cm, 폭 50cm의 크기를 갖는다. 모형실험시 모형사면지반토조 내부의 지반변형을 관찰하기 위하여, 두께가 2cm인 투명아크릴 판을 사용하여 제작하였다. 그리고, 사면지반의 경사를 자유롭게 조절하기 위하여 사면경사조절장치를 설치하였으며, 모형사면의 경사는 최소 16.5°에서 최대 45°까지 조절이 가능하도록 제작하였다. 한편, 모형사면지반의 깊이는 30cm로 조성하여 실험을 수행하였다.

모형말뚝의 재원은 표 1에 나타나 있으며, 직경이 $2.5 \times 10^{-2}m$ 이고 두께가 $0.1 \times 10^{-2}m$ 인 알루미늄관을 사용하였다. 표에서 보는 바와 같이 알루미늄관의 탄성계수 E 는 $7 \times 10^9 kg/m^2$ 이며, 단면적은 $0.3848 \times 10^{-4}m^2$ 이다. 그리고, 모형말뚝은 지반변형제어판으로부터 30cm떨어진 곳에 설치되도록 하였다. 말뚝의 간격비에 대한 영향을 조사하기 위하여 다양한 간격비에서 실험이 가능하도록 말뚝두부 및 선단부에 고정장치를 고안하여 설치하였다.

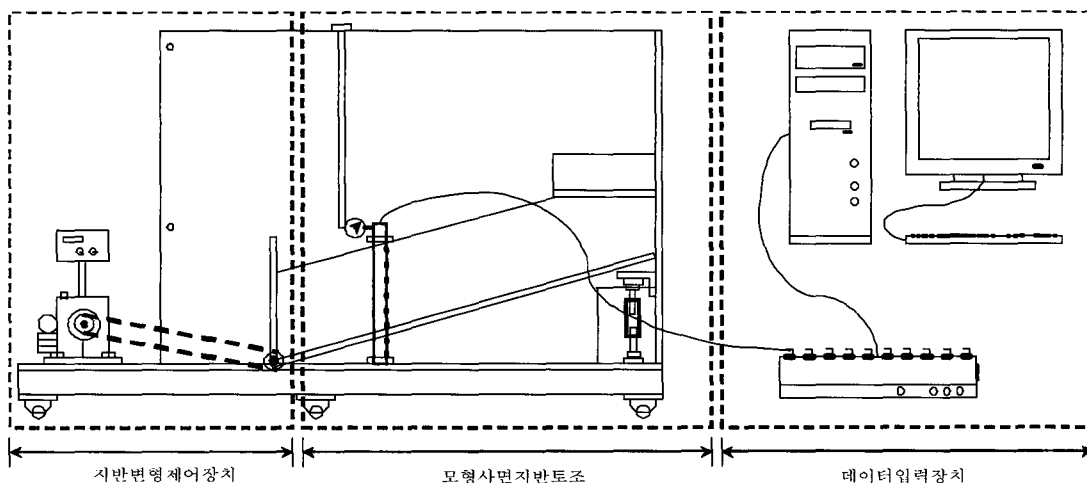


그림 3. 억지말뚝으로 보강된 모형사면실험장치 계통도

표 1. 모형말뚝의 재원

| 재질 | 직경(m) | 두께(m) | E (kg/m ²) | EI (kg · m ²) | 단면적(m ²) |
|------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 알루미늄 | 2.5×10^{-2} | 0.1×10^{-2} | 7.0×10^9 | 42.9513 | 0.3848×10^{-4} |

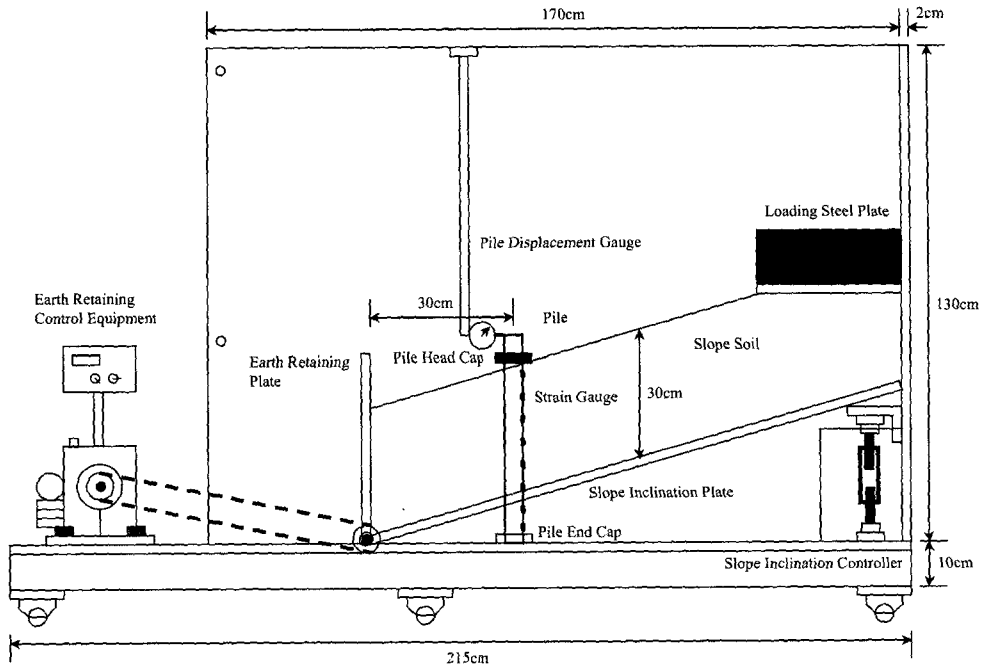


그림 4. 역지말뚝으로 보강된 모형사면실험장치

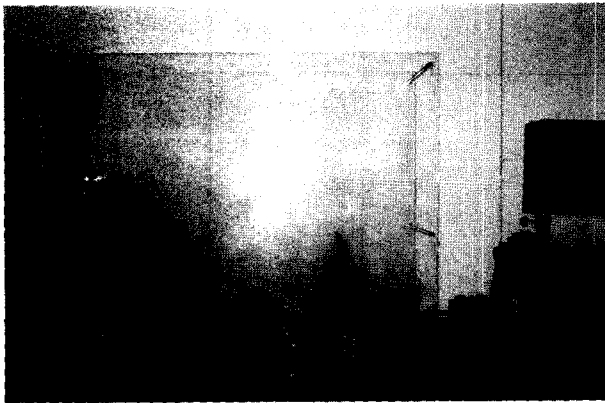


그림 5. 모형실험장치

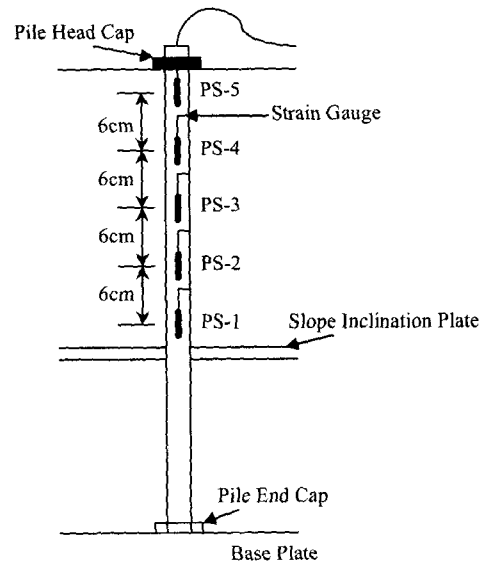


그림 6. 변형률계 설치개략도

모형말뚝의 두부에서 변위를 측정하기 위하여 말뚝변위측정기를 고안하여 설치하였으며, 모형말뚝의 휨응력을 측정하기 위하여 변형률계를 설치하였다. 그림 6은 말뚝에 설치된 변형률계를 나타낸 것으로 사면활동지반에서 모형말뚝의 휨응력을 측정할 수 있도록 설치한 것이다.

지반변형제어장치는 사면지지판과 롤러 및 동력장치(모터)로 구성되어 있다. 사면지지판은 동력장치에 의한 회전속도를 롤러를 통하여 전달받게 되며, 이를 통하여 사면지지판이 회전하게 된다. 사면지지판은 최대 90°까

지 회전이 가능하도록 고안되었으며, 동력장치는 각속도를 다양하게 변화시킬 수 있도록 고안되었다. 본 실험에서는 사면지지판은 1.5°/min의 각속도로 회전하며, 사면지반의 파괴를 유발하도록 하였다. 사면지지판의 회전속도는 사질토에 대한 직접전단시험(KSF 2343)시

전단속도(0.25~1.9mm/min)를 고려하여 결정하였다(이상덕, 1996). 한편, 사면지반의 파괴를 유발하기 위하여 모형사면지반의 상단에 하중재하판을 설치하여 상재하중을 가하도록 하였다. 한편, 토조면과 사면경사조절판 및 사면지지판 사이의 접촉부는 실리콘을 이용하여 사면지반의 유출을 방지하였다.

데이터입력장치는 변형률계, 데이터기록장치 및 컴퓨터로 구성되어 있다. 변형률계는 크기가 5mm이며, 저항이 12 Ω인 Steel용이며, 일본 KYOWA사 제품이다. 그리고, 데이터기록장치는 일본 KYOWA사의 U-CAM으로서 30채널의 데이터를 동시에 입력할 수 있다.

3.2 모형사면지반

본 모형실험에서는 모형사면지반의 재료로 주문진 표준사를 사용하였다. 주문진 표준사의 공학적인 특성을 조사하기 위하여 각종 토질시험을 수행하였다.

3.2.1 주문진 표준사의 물리적 특성

주문진 표준사의 공학적 특성을 조사하기 위하여 채 분석시험과 비중시험, 단위중량시험을 실시하였으며,

표 2. 주문진 표준사의 물리적 특성

| | | |
|----------------------------|-----------------|-------------------------|
| 입도분석 | D ₁₀ | 0.38 |
| | D ₃₀ | 0.5 |
| | D ₆₀ | 0.65 |
| | C _u | 1.71 |
| | C _c | 1.01 |
| 비중(G _s) | | 2.61 |
| 최대건조밀도(kg/m ³) | | 1.571 × 10 ³ |
| 최소건조밀도(kg/m ³) | | 1.373 × 10 ³ |

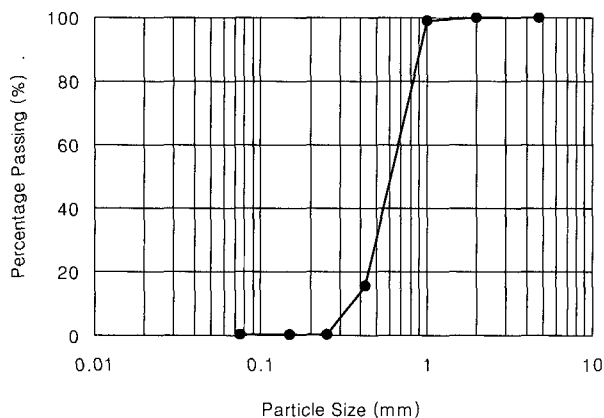


그림 7. 주문진 표준사의 입도분포곡선

이들 시험결과를 정리하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 비중은 2.61이며, 균등계수 및 곡률계수는 각각 1.71 및 1.01로 조사되었다. 그리고, 최대건조단위중량과 최소건조단위중량은 각각 $1.571 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 과 $1.373 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 으로 나타났다. 그림 7은 주문진 표준사의 체분석시험 결과로부터 구한 입도분포곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 주문진 표준사의 입도분포가 매우 균등함을 알 수 있다.

3.2.2 상대밀도에 따른 내부마찰각

모형사면지반의 상대밀도에 따른 내부마찰각을 측정하기 위하여 일련의 압밀배수 삼축압축시험을 수행하였다. 본 모형실험에서 적용되는 모형사면지반의 상대밀도는 40%, 60% 및 80%이다. 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 삼축압축시험결과를 p-q도를 작도하였으며, p-q도로부터 상대밀도(40%, 60% 및 80%)에 따른 주문진 표준사의 내부마찰각을 결정하였다. 표 3 및 그림 8은 압밀배수 삼축압축시험 결과로부터 얻은 상대밀도에 따른 주문진 표준사의 내부마찰각을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 상대밀도가 40%일 때 주문진 표준사의 내부마찰각은 35.8°이고, 상대밀도가 60%일 때 내부마찰각은 38.5°이며, 상대밀도가 80%일 때 내부마찰각은 41.2°인 것으로 나타났다. 그리고, 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 내부마찰각에 대하여 회귀분석

표 3. 주문진 표준사의 삼축압축시험 결과

| 조건 | 상대밀도 | 내부마찰각 |
|---------|------|-------|
| CD-Test | 40% | 35.8° |
| | 60% | 38.5° |
| | 80% | 41.2° |

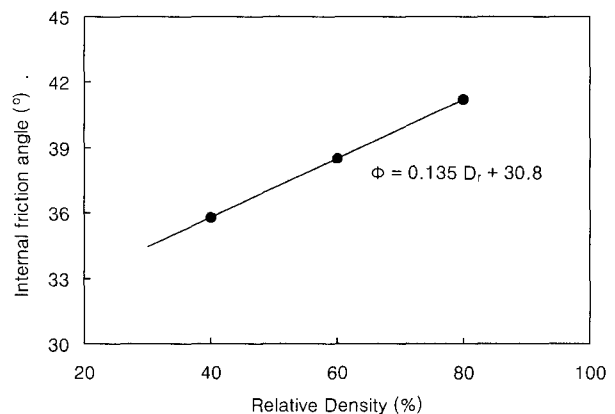


그림 8. 상대밀도에 따른 내부마찰각

을 실시한 결과 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\phi(^{\circ}) = 0.135D_r + 30.8 \quad (1)$$

여기서, D_r : 주문진 표준사의 상대밀도

3.2.3 강사법에 의한 상대밀도

본 모형실험에서는 일정한 높이에서의 자유낙하를 실시하여 균질한 사면지반을 조성하고자 하였다. 이때 일정한 직경($D=1\text{cm}$)을 가진 특수갈때기를 제작하여 사용하였다. 특수갈때기에 적용할 경우 주문진 표준사의 낙하높이에 따른 사면지반의 상대밀도를 조사하기 위하여 일련의 낙하시험을 실시하였다. 낙하시험은 주문진 표준사의 낙하높이를 30~110cm까지 20cm간격으로 일정규격의 몰드(직경 $D=71\text{mm}$, 높이 $H=100\text{mm}$)에 자유낙하시켜 실시하였다.

그림 9는 주문진 표준사의 낙하높이에 따른 상대밀도 측정시험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 회귀분석결과를 통하여 자유낙하높이에 따른 상대밀도를 추정할 수 있으며, 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_r = 4.9 e^{(2.65/100)h} \quad (2)$$

여기서, D_r 은 상대밀도이고 h 는 낙하고(cm)이다.

따라서, 모형실험시 사면지반의 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 식 (2)를 이용하여 낙하높이를 구하였다. 그 결과 상대밀도가 40%, 60% 및 80%인 경우 특수갈때기를 이용한 주문진 표준사의 낙하높이는 각각 70cm, 90cm 및 110cm임을 알 수 있다.

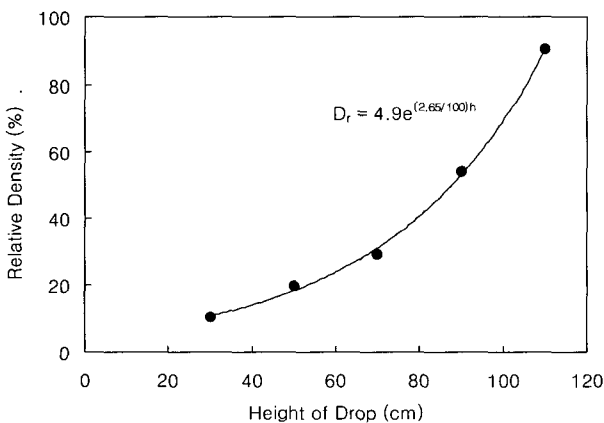


그림 9. 낙하높이에 따른 상대밀도

4. 실험방법 및 계획

4.1 실험방법

모형실험은 다음과 같은 순서로 수행하였다.

- 1) 필요한 경사각에 맞추어 사면경사조절장치를 조절한 후 사면경사조절판을 설치한다.
- 2) 모형말뚝에 변형률계를 부착한 후 모형실험에 필요한 소요간격비에 따라 모형말뚝을 설치한다.
- 3) 강사법을 이용하여 필요한 상대밀도에 따른 모형 사면지반을 형성한다.
- 4) 모형사면상부에 상재하중이 작용할 수 있도록 하중재하판을 이용하여 일정한 하중을 재하한다.
- 5) 지반변형제어장치를 작동시켜 사면지지판을 움직이게 하여 사면파괴를 유발시킨다. 이와 동시에 모형말뚝에 부착한 변형률계를 통하여 휨응력을 측정하며, 말뚝변위측정기를 이용하여 말뚝두부 변위를 측정한다.

이와 같은 모형실험방법에 대한 실험 세부사항을 열거하면 다음과 같다.

- 1) 모형사면지반토조에 모형말뚝 설치
 - 사면경사조절판에 모형말뚝의 간격과 배치에 맞게 미리 천공
 - 사면경사조절판에 스프레이 풀을 이용하여 모형지반과의 마찰력 유발
 - 천공한 구멍에 모형말뚝을 통과시키고 토조바닥면의 말뚝고정장치에 설치
- 2) 모형사면지반 조성
 - 강사법을 이용하여 사면경사조절판위에 상대밀도에 따른 모형사면지반을 조성
- 3) 사면파괴유발단계
 - 지반변형제어장치의 모터를 이용한 사면지지판을 일정한 속도로 회전
 - 사면지지판의 회전속도 조절가능
- 4) 모형말뚝 변형률 측정
 - 보강재에 설치된 변형률계로부터 보강재의 변형률 측정
- 5) 결과 분석
 - 측정된 변형률(ϵ)로부터 모형말뚝의 휨응력(σ)을 계산

4.2 실험계획

억지말뚝은 말뚝주변지반과의 상호작용에 의하여 3차원적으로 거동하기 때문에 억지말뚝의 사면안정효과는 지반과 말뚝에 관련된 여러 요인에 영향을 받는다. 이미 이전의 연구에서 억지말뚝의 사면안정효과는 말뚝의 설치간격, 말뚝머리의 구속조건, 말뚝의 직경, 두께 및 강성, 지반의 내부마찰각 및 점착력의 영향을 받고 있음을 밝힌 바 있다(홍원표, 1984a; 홍원표, 1984b).

본 모형실험에서는 말뚝의 간격비 및 사면지반의 상대밀도에 따른 영향을 조사하고자 한다. 표 4는 억지말뚝으로 보강된 사면의 모형실험계획을 나타낸 것으로 총 12가지 경우의 실험을 실시한다.

먼저, 말뚝의 간격비에 따른 영향을 검토하기 위하여 사면지반의 상대밀도를 60%, 말뚝두부를 회전구속조건으로 동일하게 하고, 말뚝의 간격비를 0.33, 0.50, 0.67, 0.75, 0.78 및 0.83으로 변화시키면서 실험을 수행한다. 여기서, 말뚝의 간격비는 D_2/D_1 으로 나타내며, D_1 은 말뚝의 중심간격이고 D_2 는 말뚝의 순간격이다(그림 1 및 그림 2 참조). 그리고, 지반의 상대밀도에 따른 영향을 검토하기 위하여 말뚝의 간격비를 0.67, 말뚝두부를 회전구속조건으로 동일하게 하고, 사면지반의 상대밀도를 40%, 60% 및 80%로 변화시키면서 실험을 수행한다. 각각의 실험에 대하여 사면의 경사는 30° , 사면지반의 회전속도는 $1.5^\circ/\text{min}$ 으로 동일한 상태에서 실험을 실시한다.

표 4. 주요변수를 고려한 실험계획

| 구분 | 주요변수 | | 사면경사각 | 지지판 회전속도 |
|--------------|---------------|------|------------|------------------------|
| | 간격비 D_2/D_1 | 상대밀도 | | |
| 단독말뚝 | - | 60% | 30° | $1.5^\circ/\text{min}$ |
| 말뚝 간격비 영향 | 0.50 | 60% | | |
| | 0.67 | 60% | | |
| | 0.75 | 60% | | |
| | 0.78 | 60% | | |
| | 0.83 | 60% | | |
| 사면지반 상대밀도 영향 | 0.67 | 40% | | |
| | 0.67 | 60% | | |
| | 0.67 | 80% | | |

5. 실험결과

5.1 억지말뚝의 간격비

실제의 억지말뚝은 대부분 줄말뚝으로 사용되고 있음에도 불구하고 종종 단일말뚝으로 해석하여 줄말뚝의 영향을 경험적인 수정계수를 이용하여 고려하고 있다. 억지말뚝에서 말뚝주변지반의 변형은 줄말뚝의 영향을 받으므로 단일말뚝에서의 거동과 상이하게 나타날 것이다. 왜냐하면 억지말뚝의 거동은 지반과 말뚝사이의 상호작용의 결과로 정하여지기 때문이다. 이러한 이유에서 억지말뚝의 간격비에 따른 말뚝의 거동을 관찰하기 위하여 말뚝의 간격비를 변화시킨 경우에 대한 실험을 실시하였다.

그림 10은 단독말뚝의 경우에 대한 모형실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사면지반의 바로 위에 설치되어 있는 PS-1위치에서 휨응력이 가장 크게 발생되며, 최대휨응력은 $53.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다. 그리고, 지표면으로부터 깊이 설치되어 있는 PS-1, PS-2, PS-3, PS-4 및 PS-5순으로 휨응력이 크게 발생하는 것으로 나타났다.

그림 11은 줄말뚝의 간격비가 0.50인 경우에 대한 모형실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사면지반의 바로 위에 설치되어 있는 PS-1위치에서 휨응력이 가장 크게 발생되며, 최대휨응력은 $68.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다. 그리고, 단독말뚝의 경우와 동일하게 지표면으로부터 깊이 설치되어 있는 순으로 휨응력이 크게 발생되었다. 한편, 단일말뚝에서의 휨응력과 줄말뚝에서의 휨응력을 비교하여 보면 줄말뚝의 휨응력이 더 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서, 줄말뚝으로 설치될

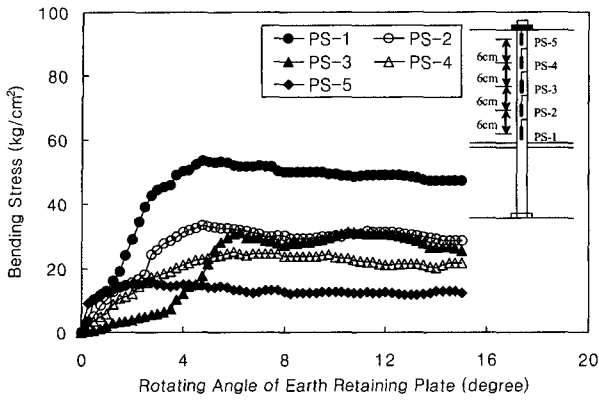


그림 10. 단독말뚝의 휨응력 변화

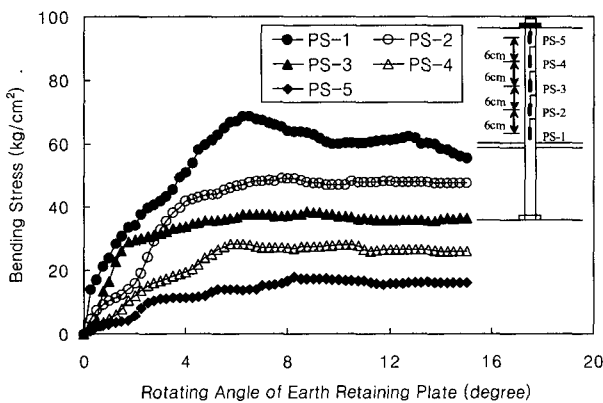


그림 11. 줄말뚝의 휨응력 변화(간격비 0.50)

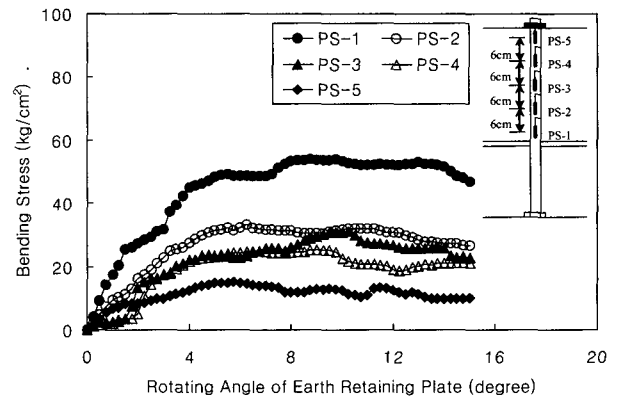
경우 지반아칭현상에 의하여 사면활동토괴에 대한 저항력이 더 크게 작용함을 알 수 있다.

5.2 사면지반의 상대밀도

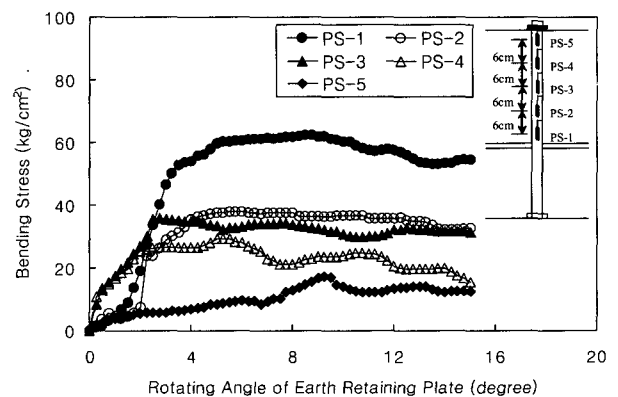
지반의 상대밀도가 증가함에 따라 지반의 내부마찰 각이 증가하게 되고, 이로 인하여 말뚝에 작용하는 측방 토압도 증가하게 된다. 사면에 설치된 역지말뚝의 경우 사면지반의 상대밀도에 따른 영향을 조사하기 위하여 말뚝의 간격비를 0.67로 하고 말뚝의 두부구속조건을 회전구속으로 모두 동일하게 하였다. 그리고, 지반의 상대밀도는 40%, 60% 및 80%인 경우를 대상으로 모형실험을 수행하였다.

그림 12는 상대밀도가 각각 40%, 60% 및 80%인 경우에 대한 모형실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 PS-1위치에서 휨응력이 가장 크게 발생된다. 그리고, 최대휨응력은 상대밀도가 40%인 경우 53.9kg/cm²이고, 상대밀도가 60%인 경우 62.5kg/cm²이

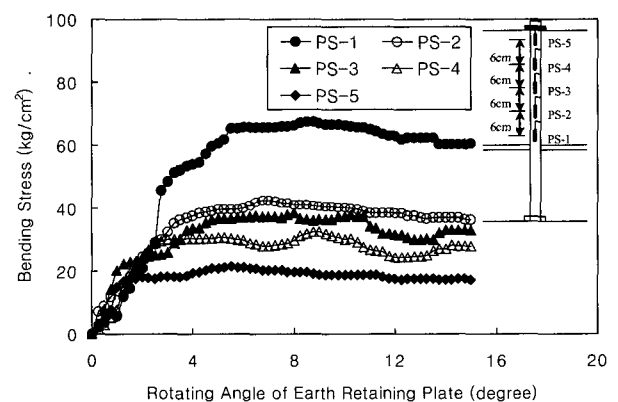
며, 상대밀도가 80%인 경우 67.6kg/cm²으로 나타났다. 따라서, 지반의 상대밀도가 클수록 말뚝에 작용하는 측방토압이 증가하며, 이로 인하여 말뚝의 휨응력도 크게 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 상대밀도 40%인 경우



(b) 상대밀도 60%인 경우



(c) 상대밀도 80%인 경우

그림 12. 상대밀도에 따른 실험결과

6. 억지말뚝의 활동억지효과

6.1 말뚝의 간격비에 의한 영향

6.1.1 말뚝의 휨응력

그림 13은 말뚝간격비에 따른 억지말뚝에 작용하는 휨응력을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 사면지지판의 바로 위의 PS-1위치에서 말뚝에 작용하는 최대휨응력이 발생되며, 지표면부근의 PS-5위치에서 말뚝에 작용하는 최소휨응력이 발생되는 것으로 나타났다. 말뚝에 작용하는 최대휨응력은 간격비가 0.8이상에서는 일정하고, 간격비가 0.5~0.8에서는 증가하며, 간격비가 0.5이하에서는 일정하게 나타났다. 그러나, 말뚝에 작용하는 최소휨응력은 간격비에 상관없이 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

사면활동시 억지말뚝에서의 휨응력이 크다는 것은 억지말뚝에 작용하는 측방토압이 크다는 것이다. 그리고, 억지말뚝에 작용하는 측방토압이 크다는 것은 사면활동에 대한 억지말뚝의 저항효과가 크다는 것이다. 즉, 억지말뚝에 작용하는 최대휨응력이 크면 사면활동에 대한 억지말뚝의 저항효과가 크다는 것을 의미한다. 따라서, 억지말뚝의 간격비가 0.5~0.8일 경우 사면활동에 대한 억지효과가 우수함을 알 수 있으며, 이는 억지말뚝의 설계 및 시공기준으로 제안할 수 있다.

한편, 말뚝의 간격비가 1인 단독말뚝의 경우보다 일정한 간격비를 가진 줄말뚝에서 휨응력이 크게 발생함을 알 수 있다. 이를 통하여 사면활동시 말뚝주변지반의 상호작용, 즉 말뚝과 말뚝사이의 지반아칭효과로 인하여 사면활동에 대한 억지말뚝의 저항효과가 발생됨을 확인할 수 있다.

원래 지반속의 말뚝에는 정지토압이 작용하고 있으

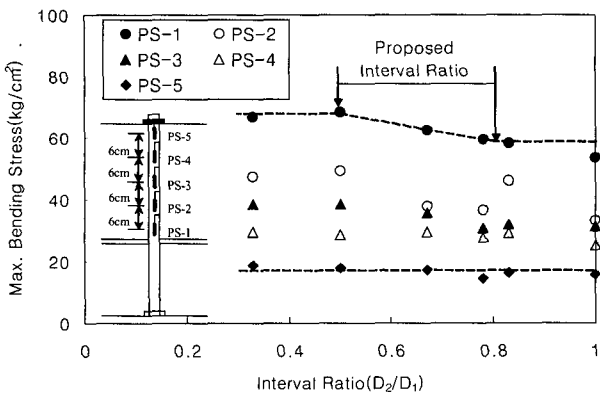


그림 13. 말뚝간격비에 따른 말뚝의 휨응력

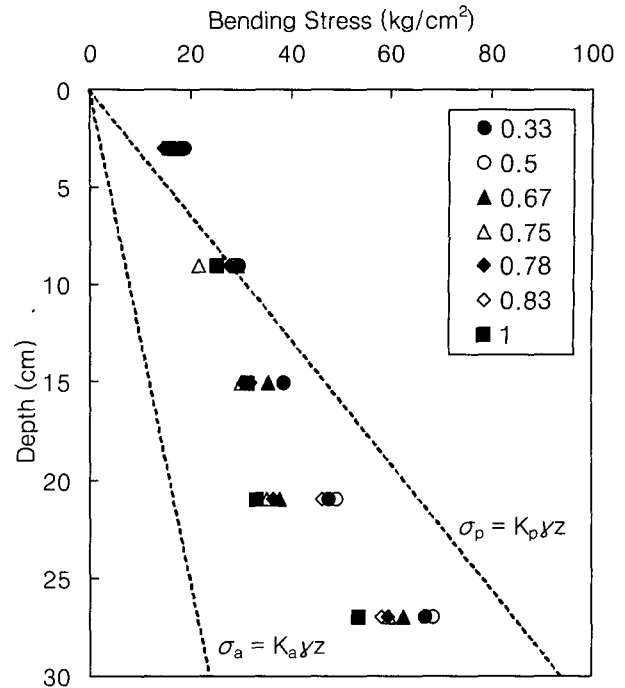


그림 14. 깊이에 따른 말뚝의 휨응력

나 지반의 측방변형으로 인하여 말뚝열 전후면에 토압의 불균형상태가 발생하게 된다. 이때 말뚝열 후면지반이 전면지반의 변형방향과 동일하게 변형하게 되면 말뚝열 후면지반은 정지토압에서 주동토압상태로 변화된다고 생각할 수 있을 것이다. 한편, 말뚝열 후면지반이 전면지반의 변형방향과 동일방향으로 이동하지 않고 저항한다면 후면지반은 정지토압상태에서 수동토압상태에 접근한다고 생각할 수 있을 것이다. 그러나, 사면안정을 위한 억지말뚝의 경우 사면지반에서 측방변형이 발생하게 되면 말뚝열 전면지반은 소성변형에 의한 아칭현상으로 인하여 사면지반의 활동에 저항하게 된다. 따라서, 말뚝열 후면지반은 주동토압상태가 되고, 전면지반은 수동토압상태가 될 것이다(홍원표, 1984b).

그림 14는 깊이에 따른 억지말뚝의 휨응력을 나타낸 것으로, 간격비에 따른 모형실험결과를 도시한 것이다. 모형실험에서는 억지말뚝의 휨응력을 측정하기 위하여 변형률계를 사면활동의 역방향(말뚝열 전면지반)에 설치하였다. 그림을 살펴보면 말뚝열 전면지반에 발생하는 휨응력은 주동토압상태와 수동토압상태의 사이에 위치하고 있으며, 수동토압상태에 더 근접하는 것으로 나타났다. 따라서, 사면활동시 말뚝열 전면지반은 수동토압상태에 있음을 확인할 수 있다.

6.1.2 이론치와의 비교

홍원표 & 송영석(2004)에 의해 제안된 정상파괴시 말뚝에 작용하는 측방토압과 본 모형실험에서 측정된 말뚝의 휨응력을 서로 비교하여 제안된 이론식의 타당성을 확인하고자 한다. 그림 15는 말뚝간격비에 따른 말뚝에 작용하는 단위면적당 하중에 대하여 이론치와 실험치를 비교한 것이다. 그림에서 검은 원으로 표시한 것이 실험치이고, 실선으로 표시한 것이 이론치이다. 이론치의 경우 말뚝간격비가 작아짐에 따라 말뚝에 작용하는 하중은 급격하게 증가하는 것으로 나타났으며, 실측치는 말뚝간격비 작아짐에 따라 말뚝에 작용하는 하중이 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 말뚝간격비가 0.6이상에서는 이론치와 실험치가 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 정상파괴시 말뚝에 작용하는 측방토압에 대한 이론식은 실제 역지말뚝 설계시 적용이 가능하며, 이를 통하여 제안된 이론식의 합리성을 확인할 수 있다.

6.2 지반의 상대밀도에 의한 영향

말뚝에 작용하는 측방토압에 대한 이론식(Matsui et al., 1982; 홍원표 & 송영석, 2004)을 살펴보면 지반의 내부마찰각이 증가하게 되면 말뚝에 작용하는 측방토압은 증가한다. 즉, 지반의 상대밀도가 증가함에 따라 내부마찰각이 증가하게 되며, 이로 인하여 말뚝에 작용하는 측방토압은 증가하게 된다.

그림 16은 지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 휨응력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 사면활동으로 인하여 말뚝에 발생하는 휨응력은 지반의 상대밀도가 증가

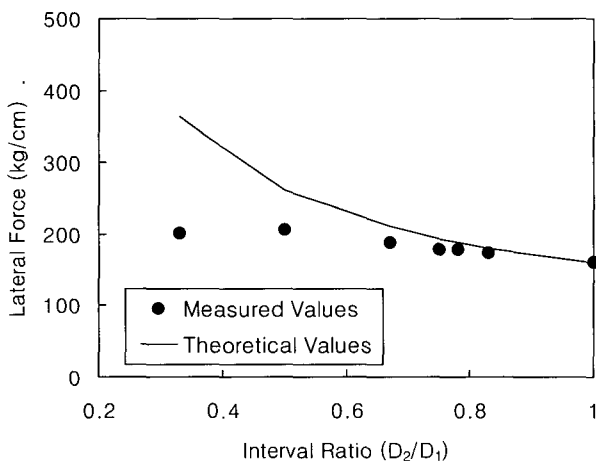


그림 15. 실험치와 이론치의 비교

함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 모형실험의 결과에서도 지반의 상대밀도가 증가함에 따라 내부마찰각이 증가하여 말뚝에 작용하는 측방토압이 증가되었음을 알 수 있다.

6.3 사면활동역지효과

그림 17은 말뚝간격비와 사면활동에 대한 역지율과의 관계를 나타낸 것이다. 역지율(Preventive ratio, η)이란 단독말뚝일 경우 사면역지효과를 1이라고 할 때 줄 말뚝 가운데 말뚝 1본에서의 사면역지효과를 나타낸 것으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(木村, 1993). 그림을 살펴보면 말뚝간격비가 1에서 0.5사이에서 말뚝간격비가 작을수록 역지율이 증가하는 것으로 나타났으며, 말뚝간격비가 0.5이하에서는 역지율이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 말뚝간격비가 0.5일 때 사면활동에 대한 역지율이 가장 크게 발휘됨을 알 수 있다. 그리고,

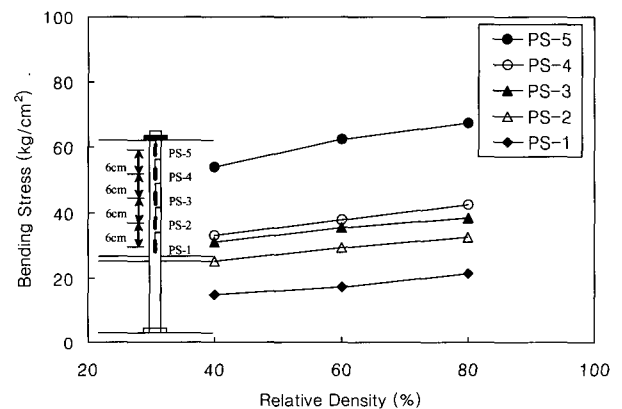


그림 16. 지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 휨응력

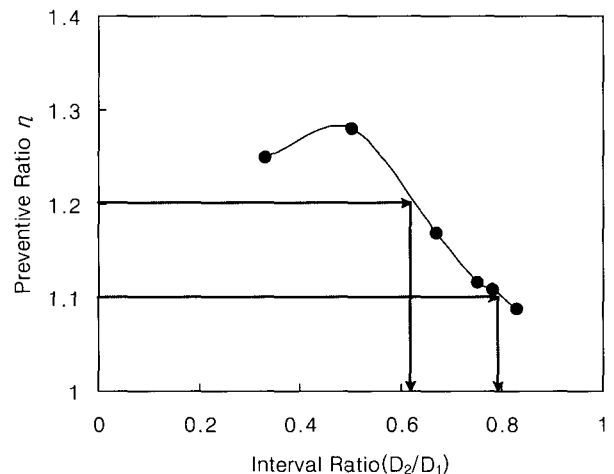


그림 17. 말뚝간격비에 따른 말뚝의 역지율

말뚝간격비가 1인 단독말뚝일 경우보다 줄말뚝일 경우가 사면활동에 대한 억지율이 더 크게 발휘됨을 알 수 있다. 이는 말뚝과 말뚝사이에서 발생하는 지반의 아칭 효과로 인하여 사면활동에 대한 억지율이 더 크게 발휘되기 때문이다. 그러나, 말뚝과 말뚝사이의 간격이 너무 작을 경우 말뚝에 작용하는 측방토압은 상대적으로 크게 되어 말뚝의 사면활동에 대한 억지율이 감소하게 된다. 그리고, 말뚝간의 간격이 너무 클 경우 말뚝에 작용하는 측방토압은 상대적으로 작게 되어 말뚝의 억지율도 감소하게 된다.

$$\eta = \frac{\text{줄말뚝 1본의 억지력}}{\text{단독말뚝의 억지력}} \quad (3)$$

말뚝간격비가 너무 작을 경우 사면활동에 대한 억지율이 감소하는 것을 고려하고, 말뚝의 소요억지율을 적용하여 억지말뚝의 설계 및 시공기준을 제안하고자 한다. 만약 말뚝의 소요억지율을 1.2로 가정할 경우 말뚝간격비는 0.65이하로 설치되어야 하며, 소요억지율을 1.1로 가정할 경우는 말뚝간격비를 0.8이하로 설치되어야 할 것이다. 따라서, 억지말뚝의 소요억지율을 1.2로 하면 말뚝간격비를 0.5~0.65사이로 설치하여야 하며, 소요억지율을 1.1로 하면 말뚝간격비는 0.5~0.8사이로 설치하여야 할 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 모형실험을 통하여 사면에 설치된 억지말뚝의 간격비 및 사면지반의 강도에 따른 억지말뚝의 활동억지효과를 검증하였으며, 억지말뚝에 대한 설계 및 시공기준을 마련하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝간격비가 1인 단독말뚝의 경우보다 일정한 간격비를 가진 줄말뚝에서 사면활동에 대한 억지효과가 더 우수함을 확인할 수 있다. 즉, 사면활동시 말뚝과 말뚝사이의 지반아칭효과로 인하여 사면활동에 대한 억지말뚝의 저항효과가 증가됨을 알 수 있다.
- (2) 억지말뚝의 간격비가 0.5~0.8일 경우 억지말뚝이 힘응력을 크게 받으므로 억지말뚝의 사면활동에 대한 저항효과가 우수함을 알 수 있다.
- (3) 억지말뚝의 간격비가 작아질수록 사면활동에 대한

억지율은 증가하며, 간격비가 0.5일 때 사면활동에 대한 억지율이 가장 우수함을 알 수 있다. 그리고, 억지말뚝의 소요억지율을 1.1로 가정할 경우 말뚝간격비는 0.5~0.8사이로 설치됨이 바람직하다.

- (4) 억지말뚝의 말뚝간격비 0.5~0.8사이에서는 정상과괴시 말뚝에 작용하는 측방토압의 이론치와 모형실험 결과치가 매우 유사하므로 제안된 이론식의 합리성을 확인할 수 있으며, 정상과괴시 측방토압을 설계에 적용이 가능함을 알 수 있다.
- (5) 사면활동시 억지말뚝에 작용하는 측방토압 및 말뚝의 억지율을 토대로 억지말뚝의 말뚝간격비에 대한 설계 및 시공기준을 0.5~0.8로 제안할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2001년 산학연 공동연구개발사업(R&D 2001-B04 : 활동억지시스템으로 보강된 사면의 설계법 및 안정해석 프로그램 개발연구)에 의하여 실시된 연구 결과임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

참고 문헌

1. 송영석 (2004), 활동억지시스템으로 보강된 사면의 설계법, 중앙대학교 일반대학원 박사학위논문, pp.317-327.
2. 이상덕 (1996), 토질시험 - 원리와 방법 -, 세론, pp.267-278.
3. 홍원표 (1984a), "측방변형지반속의 줄말뚝에 작용하는 토압", 대한토목학회논문집, 제4권, 제1호, pp.59-68.
4. 홍원표 (1984b), "수동말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회논문집, 제4권, 제2호, pp.77-88.
5. 홍원표 (1991), "말뚝을 사용한 산사태 억지공법", 한국지반공학회지, 제7권, 제4호, pp.75-87.
6. 홍원표, 송영석 (2004), "측방변형속 줄말뚝에 작용하는 토압의 산정법", 한국지반공학회논문집, 제20권, 제3호, pp.13-22.
7. 홍원표, 한중근, 송영석, 신도순 (2003), "대결토사면에 보강된 억지말뚝의 활동억지효과에 관한 연구", 한국지반공학회 사면안정학술발표회 논문집, pp.65-81.
8. 홍원표, 한중근, 이문구 (1995), "억지말뚝으로 보강된 절개사면의 거동", 한국지반공학회지, 제11권, 제4호, pp.111-124.
9. De Beer, E. and Wallays, M. (1970), "Stabilization of slope in schist by means of board piles reinforced with steel beams", *Proc. 2nd International Congress Rock Mechanics, Belgrade, Vol.3*, pp.361-369.
10. Ergun, M. U. (2000), "Stabilization of landslides using piles", *Proc. of 8th ISL, Cardiff*, pp.513-518.
11. Hong, W.P. and Park, N.S. (2000), "A design of slope stabilization using piles; A case study on the slopes of Hwangryung-mountain in Pusan, Korea", *Proc. of 8th ISL, Cardiff*, pp.725-730.
12. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P. (1981), "Design method for

- stabilizing piles against landslide-one row of piles”, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.21-37.
13. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P. (1982), “Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslides”, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.1-13.
 14. Matsui, T., Hong, W. P. and Ito, T. (1982), “Earth pressure on piles in a row due to lateral soil movements”, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.71-81.
 15. Popescu, M. E. (1991), “Landslide control by means of a row of piles”, *Slope Stability Engineering*, London, pp.389-394.
 16. Schuster, R. L. (1992), “Keynote paper : Recent advances in slope stabilization”, *Proc. of 6th ISL, Christchurch, New Zealand*, pp.1715-1745.
 17. Viggiani, C. (1981), “Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides”, *Proc. of 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3*, pp.555-560.
 18. Winter, H., Schwarz, W. and Gudehus, G. (1983), “Stabilization of clay slopes by piles”, *Proc. of 8th European Conf. on SMFE, Helsinki*, pp.545-550.
 19. 木村 亮 (1993), 水平力を受ける群抗の挙動に関する基礎的研究, 京部大學校 大學院 博士學位論文, pp.188-196.
 20. 福本安正 (1976), “地スベリ防止グイの挙動について”, 土質工學會論文報告集, Vol.16, No.2, pp.91-103.

(접수일자 2004. 9. 7, 심사완료일 2005. 1. 20)