

대규모 절개사면에 설치된 억지말뚝의 거동

송영석^{1*} · 홍원표²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

The Behavior of Stabilizing Piles installed in a Large-Scale Cut Slope

Young-Suk Song^{1*} and Won-Pyo Hong²

¹Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University

본 연구에서는 대규모 절개사면에서 억지말뚝의 효과를 확인하고, 사면과 억지말뚝의 거동을 조사하였다. 먼저, 사면의 절토공사시 경사계를 이용하여 사면지반의 거동을 조사하였다. 계측결과 사면지반의 수평변위는 점차적으로 증가하고, 사면활동면의 발생위치에서 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 사면활동깊이의 예측이 가능하였다. 사면활동면의 예측을 통하여 억지말뚝의 설계와 시공이 수행되었다. 그리고, 억지말뚝으로 보강된 절개사면에 대하여 각종 계측시스템을 적용하여 억지말뚝의 거동을 조사하였다. 계측결과 억지말뚝의 수평변위는 캔틸레버보의 변형형상과 유사하게 발생되었으며, 말뚝두부의 철근콘크리트보의 설치로 인하여 두부의 수평변위 억제효과를 확인할 수 있다. 억지말뚝의 최대휨응력이 발생하는 깊이는 대상지반의 상부토사층이 존재하는 깊이와 유사한 것으로 나타났다. 또한, 쏘일네일링 시공을 위한 억지말뚝 전면부 사면굴착시 억지말뚝의 수평변위가 증가함을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 대규모 절개사면에 대하여 억지말뚝의 적용성 및 효과를 확인할 수 있다.

주요어 : 휨응력, 수평변위, 현장계측, 산사태, 대규모 절개사면, 억지말뚝

The effect of stabilizing piles on cut slopes is checked and the behavior of slope soil and piles are observed throughout the year by field measurements on the large-scale cut slopes. First of all, the behavior of the slope soil was measured by inclinometers during slope modification. Landslides occurred in this area due to the soil cutting for slope modification. The horizontal deformations of slope soil are gradually increased and rapidly decreased at depth of sliding surface. As the result of measuring deformation, the depth of sliding surface below the ground surface can be known. Based on the measuring the depth of the sliding surface, some earth retention system including stabilizing piles were designed and constructed in this slope. To check the stability of the reinforced slope using stabilizing piles, an instrumentation system was installed. As the result of instrumentation, the maximum deflection of piles is measured at the pile head. It is noted that the piles deform like deflection on a cantilever beam. The maximum bending stress of piles is measured at the soil layer. The pile above the soil layer is subjected to lateral earth pressure due to driving force of the slope, while pile below soil layer is subjected to subgrade reaction against pile deflection. The deflection of piles is increased during cutting slope in front of piles for the construction of soil nailing. As a result of research, the effect and applicability of stabilizing piles in large-scale cut slopes could be confirmed sufficiently.

Key words : bending stress of piles, deflection of piles, field measurement, landslides, large-scale cut slope, stabilizing piles

서 론

산업사회가 변화하면서 도시의 과밀화 현상이 나타나고,

인간생활의 편리를 위해 보다 많은 사회기반 구조물의 건설이 요구되고 있다. 그리고, 구조물의 규모가 증가되어가고 있어 토지의 입체적 공간 활용과 평면적 확장이

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

요구됨에 따라 열악한 환경에서 구조물 건설이 이루어지고 있다. 특히, 국토개발이 다양하게 진전됨에 따라 이에 부응한 토지수요를 충족하기 위하여 산지나 구릉지를 절개하는 사례가 빈번하여지고 있다. 이로 인하여 수많은 절개사면이 생성되었고, 인명과 재산을 재해로부터 보호하기 위하여 사면안정의 중요성에 대한 인식이 점점 강조되고 있는 실정이다. 이와같이 절개사면을 형성하여 구조물이 건설되는 경우 절개사면에 대한 적절하지 못한 대응으로 인하여 사면활동이 시작되고 대규모 산사태로 이어지면서 많은 인명과 재산상의 피해를 주게 되는 것을 종종 볼 수 있다. 따라서, 지반공학적 입장에서의 산사태 재해에 대한 원인을 규명하고 그 대처 방안을 마련하는 것은 인간생활 측면에서 매우 중요하다 할 수 있다.

효과적인 산사태방지를 위하여는 대상지역의 지질학적, 지형학적, 기상학적 및 지반공학적 특성에 따라 차이가 크므로 각 지역의 특성에 적합한 안정대책공법을 개발할 필요가 있다(홍원표, 1990). 특히 우리나라에서 발생하는 산사태는 그 발생원인이 대부분 장마철 집중강우에 의한 경우가 대부분이고, 이로 인한 피해가 날로 증가하고 있는 실정이다. 즉, 연평균 강우량의 대부분이 6월에서 9월 사이에 편중되어 있어 집중호우로 인한 사면붕괴나 산사태의 발생이 빈번하다(홍원표 외 4인, 1990).

최근에 이르러 우리나라에서는 이러한 산사태의 발생을 더 이상 방치하여 둘 수 없는 시점에 도달하였다는 인식을 가지고 각종 공사에서 산사태 발생을 예측하고 그 산사태를 예방할 수 있는 대책공법을 연구 개발하고 있다(송영석, 2004). 이미 주택단지 조성공사, 도로건설공사, 건축물부지 조성공사 등에서 발생한 산사태의 복구공사에 몇몇 공법을 적용한 예도 있다(송영석, 2006; Song & Hong, 2008). 종래의 사면안정공법으로는 경사면을 식물이나 블록으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 소규모의 공법이나, 사면의 구배를 완만하게는 단순한 공법이 많이 사용되었다(김성환 외 2인, 1996). 그러나, 최근에 이르러서는 이들 사면안정대책공법으로 산사태를 억지시키기에는 한계가 있으므로 억지말뚝, 앵커, 쏘일 네일링, 옹벽 등으로 절개사면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있으며 이에 대한 설계법 및 해석법 등이 제안되기도 하였다(송영석, 2004). 특히, 억지말뚝에 의한 사면보강공법은 중규모 및 대규모 절개사면의 보강공법으로 좋은 효과가 있는 것으로 인식되어 많이 활용되고 있는 실정이다. 억지말뚝에 작용하는 측방토압과 합리적인 설계법에 대한 연구도 계속 지속되어 오고 있으며, 이에 대한 설계 및 시공도 계속적으로 시행

되고 있다(홍원표 외 2인, 1998; 홍원표 & 송영석, 2002).

따라서, 본 연구에서는 도로시공을 위한 대규모 사면 절개시 발생된 산사태 현장에 대하여 주요한 보강대책 공법으로 억지말뚝공법이 적용되었으며, 억지말뚝으로 보강된 절개사면에 대한 현장실험을 수행하였다. 이를 위하여 억지말뚝과 사면지반에 각종 계측시스템을 적용하여 억지말뚝의 거동을 조사한다. 즉, 억지말뚝 및 사면지반의 수평변위와 억지말뚝의 휨용력을 통하여 억지말뚝의 저항메카니즘을 규명하고자 한다.

현장개요

현장상황

본 연구대상 현장은 동해~주문진간 동해고속도로 4차로 확장공사구간으로 연구대상사면에 대한 평면도는 Fig. 1과 같다. 본 구간내 N1교의 P2 기초터파기 공사중 공사차량 진입도로와 인근 상부사면이 도로방향으로 활동이 진행됨에 따라 N1교와 보강토옹벽 구조물에 치명적인 손상을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

대상사면의 시점은 Sta. No. 2+730, 종점은 Sta. No. 2+830이므로 사면연장은 100m, 사면의 길이는 87m, 사면의 경사는 20~45°의 범위이며, 전체면적은 9,550cm²이다. 한편, 지질은 주로 세일이 광역변성작용에 의해 형성된 천매암이며, 부분적으로 사암 및 석회암이 분포하고 있다.

2001년 4월 27일 N1교의 P2(주문진방향) 기초시공을 위한 사면절토시 공사차량 진입도로 및 사면상부에 총 3개소의 인장균열이 발생되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 3개소의 인장균열을 하부에서부터 각각 균열(crack) 1, 2 및 3으로 나타내었다. 균열 1은 기초터파기 과정에서

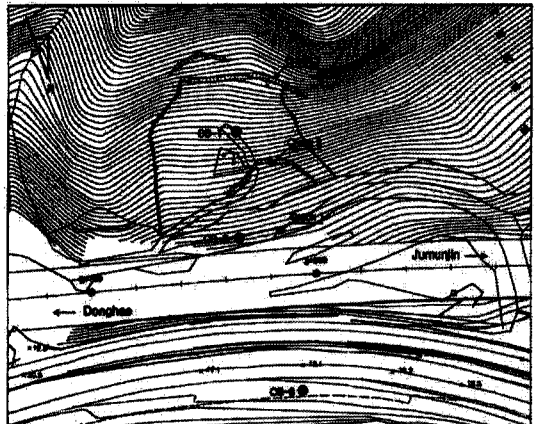


Fig. 1. Plan view of the study area.

발생된 것으로 현재는 변위가 없는 상태이며, 균열 2 및 3은 현재에도 계속적으로 변위가 약간씩 진행되고 있는 상태이다.

인장균열면 현황

사면활동의 이력, 범위, 이동상황을 파악하기 위하여 현재 육안으로 구별가능한 균열면에 대해 균열폭, 단차, 발달방향 및 경사를 조사하였다. 사면활동 토괴의 이동 방향은 N19W~N95E 사이에서 여러 방향으로 나타나고 있으나 대표적인 사면활동 토괴는 N15E~N25E 범위내에서 활동하고 있다. 그리고, 균열폭은 0.1~0.4m, 단차 0.1~2.0m까지 위치별로 심한 차이를 보여주고 있으며, 활동면의 중심에서 양측방으로 인장균열이 진행되고 있다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 3개의 인장균열면이 발생되었다. 그리고, Fig. 2는 관찰된 인장균열을 나타낸 것이다. 이들 인장균열면에 대한 실제 육안관찰을 통하여 대상지역의 사면활동이 과거에서부터 발생되어 계속 진행중인 것으로 추정되었다.

지반조건

지형학적 특성

본 연구대상 지역은 행정구역상 강원도 옥계면 낙풍리에 해당하며, 한반도의 동북쪽에 위치한다. 그리고, 본 지역의 동쪽에 국도 7호선이 남북방향으로 지나가고 있다. 그리고, 서쪽에 청학산(337m), 피래산(753.9m) 및 화산(307.6m)이 남북방향으로 형성되어 있으며, 동쪽에 가마봉(383m) 및 망운산(338.4m)이 위치하고 있다. 본 지역의 수계는 낙풍천, 정동천, 주수천 및 옥계저수지 등 소지류들이 수지상 수계(Dendritic drainage pattern)의 특징을 보인다.

본 현장에서 자연사면의 경사방향은 N26E 방향이 우세하며, 대체로 사면의 경사각은 21~45° 정도를 보이고,

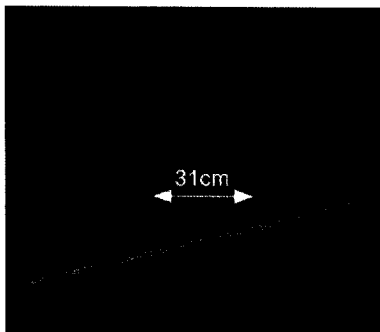


Fig. 2. Tension crack.

사면활동 예상부분은 약 20° 정도의 구배를 보이는 것으로 예상된다. 현재 사면 활동부를 중심으로 3개소에서 연장성을 가진 균열을 보이며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 등고선도가 부분적으로 이완되어 있으므로 과거로부터 계속적으로 사면활동이 진행중인 것으로 추정가능하다.

지질학적 특성

본 연구대상 현장의 지질은 시추조사시 채취된 코어 등으로 기반암을 판단하였다. 그 결과 평안계(Pyeongang system)의 고방산층, 사동층, 홍점층과 조선계(Joseon system)의 석빙산 석회암층이 분포하고 있으며, 이를 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 본 지역은 고생대 석탄기에서 페름기에 걸쳐 퇴적된 평안누층군의 하부 지층인 만항층(과거에는 홍점층이라 칭함)에 해당하는 퇴적암류이다. 이 지역은 남한에 분포하는 탄전 중에서 가장 북동부에 위치한 소위 강을탄전에 해당하는 부분으로 이 지역의 지질조사는 1962년 태백산 지구 지하자원 조사단에 의해 체계적으로 조사 발간되었으며 그 후 탄광을 중심으로 단편적으로 조사된 바 있다. 일반적으로 만항층은 약 250~300m의 두께로 조선누층군의 석회암층을 부정합으로 덮는다. 강릉탄전에서 이 층은 담회색~유백색, 담록색 조립사암, 담록색~녹색, 회색의 중립내지 세립사암, 적자색, 녹회색, 암회색의 셰일 및 실트암, 박층의 탄질셰일 등으로 구성되어 있으며 수매의 렌즈상의 분홍 및 석회암을 협재하기도 한다. 이 층은 금천층에 의해 정합적으로 피복된다. 본 지역의 만항층 퇴적암류에 비해 변성작용을 받아 천매암질로 되어 있으며, 층리 뿐만아니라 엽리도 매우 잘 발달되었다.

지층구성

Fig. 3은 대상사면의 지층구조를 나타낸 것으로 상부로부터 붕적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 그리고, 이들 지층에 대한 특성은 다음과 같다.

1) 붕적토층 : 상부사면이 붕괴, 또는 침식되어 쌓인 층으로 전석, 모래, 암편, 점토 등으로 구성되어 있다. 습윤상태이며, 갈색~회색을 띠고 있다. 표준관입시험 결과 N치가 13/30~50/3으로 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이나, 자갈의 분포정도에 따라 N치가 과대 측정되는 경향이 있다. 분포심도는 GL(-)0.0~6.5m이며 완전 누수 상태이다.

2) 풍화잔류토층 : 토사와 연암이 교호하는 층으로서 이 층은 천매암의 차별 풍화에 의해 형성되었다. 연직투수성은

크지 않을 것으로 판단되나 수평방향으로는 파쇄가 심한 연암층의 영향으로 투수성이 매우 큰 것으로 나타났다. 지표면으로부터 GL(-)12.0~15.5 m 부분은 활동의 예상 층으로서 함수비가 높은 편이다. 이 층은 입도시험결과 실트섞인 점토층(CL)으로 구별할 수 있다. 표준관입시험 결과 N치가 13/30~50/26로 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이며, 부분적으로 누수현상이 심한상태이다.

3) 풍화암층 : CB-2 및 CB-3위치에서 나타나며 습윤, 회색의 천매암이 상부 풍화대로 모래, 실트 및 암편 등으로 이루어져 있으며, 표준관입시험 결과 N치가 50/2로 상대밀도는 매우 조밀한 상태이다. 풍화정도는 완전풍화 상태이며, 층후는 2.3~5.7 m이다.

4) 파쇄심한 연암층 : 천매암의 파쇄대로서 회색~갈색을 띠며 시추시 주로 암편으로 채취된다. 부분적으로 풍화 암대도 나타나며 시추시 누수현상이 심한 상태를 보인다. 채취된 코아의 TCR=14~80%이나 RQD는 평균적으로 0% 정도로 파쇄가 심하다. 분포심도는 GL(-)15.5-23.0 m이다.

5) 연암층 : 회색~갈색의 천매암 및 일부 석회암으로 구성되어 있고, 시추시 암편~주상의 코아로 채취된다. 채취된 코아의 TCR=42.1~100%, RQD는 평균적으로 50% 정도로 비교적 신선한 편이다. 분포심도는 GL(-)23.0 m 이하이다.

지하수위

본 연구대상 지역에 대한 지하수위 측정은 시추작업이 완료된 후 24-48시간이 경과된 후 안정된 지하수위를 얻을 수 있도록 관찰하였으며, 측정된 지하수는 조사지역의 지하수위 분포현황을 파악하기 위한 자료로 이용한다. 측정 결과 지하수위는 지표면으로부터 GL(-)11.65~23.65 m 에 위치하는 것으로 조사되었다. 지하수위는 상부사면부의 경우 연암층에 분포하며 하단부의 경우에는 자갈층내에

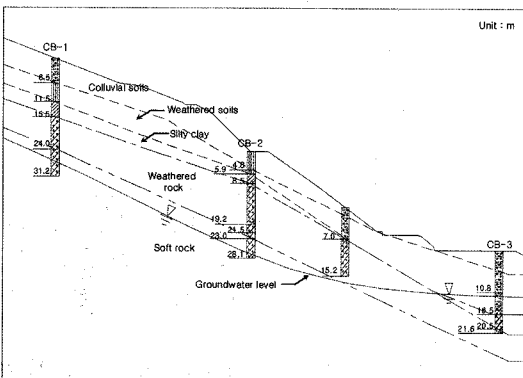


Fig. 3. Ground layers of the study area.

분포하고 있다. 그러나, 건기나 우기 등으로 인한 기후 변화에 따라 지하수위 변화가 발생할 것으로 예상된다.

강우에 따른 사면지반의 활동

산사태는 대부분 지형적으로 구릉지역과 산지 등에서 일어나며, 이러한 지역은 특정한 지역으로만 국한되는 것이 아니다. 대부분의 산사태는 지각운동으로 인한 파쇄대가 많은 지역과 같은 지형 지질의 악조건하에 호우나 폭설이 자주 발생하는 영향에 의해 발생된다. 이와 같은 산사태의 발생은 지질, 토질, 지질구조, 지형 등의 내적요인과 강우, 용설, 지하수, 하천해안의 침식, 지진 등의 외적요인이 바로 원인이 된다. 또한, 우리나라에서 발생되는 산사태의 대부분은 7월~9월사이의 우기철에 집중되어 있고 자연적 요인인 강우와도 많은 관련이 있음은 알고 있는 바와 같다.

강우기록

앞에서 설명한 바와 산사태의 발생은 강우에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서, 본 연구대상 지역에서도 지속적으로 강우기록을 조사하였으며, 이를 정리하면 Fig. 4와 같다. 이는 2001년 7월과 8월의 강우기록을 정리한 것이며, 산사태가 주로 발생하는 우기철에 측정된 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 7월부터 계속적으로 일일강우량이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 8월 8일에는 98 mm로 조사기간중 최대 강우량을 기록하였다.

본 현장의 경우 약 40일간의 조사기간동안 일일강우량이 10 mm 이상인 경우는 7회, 20 mm 이상인 경우는 4회, 그리고 30 mm 이상인 경우는 2회가 발생되었다. 또한, 8월 5일부터 11일까지 계속된 강우에서 최대시간강우강도는 8월 8일 16시에 13.5 mm로 기록되었고, 당일 최대시간

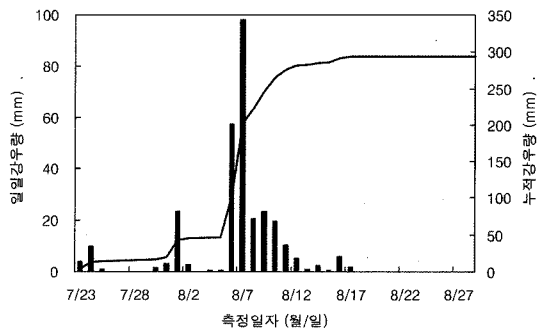
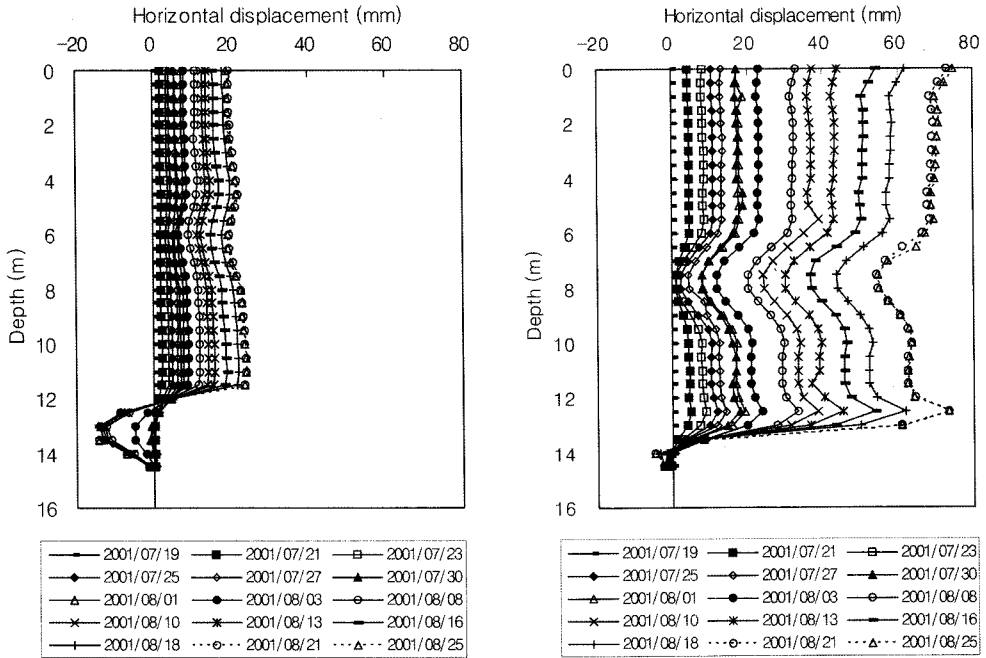


Fig. 4. The daily rainfall and the accumulative rainfall of the study area.



(a) S-1 at the upper part of slope

(b) S-2 at the middle part of slope

Fig. 5. Sliding of slope soils.

강우강도가 10 mm/hr이상인 경우도 2회로 조사되었으며, 일일강우량도 98 mm를 기록하였다. 따라서, 조사기간동안 연구대상지역의 강우형태는 집중호우성으로 예상하였다.

사면지반의 거동

강우에 따른 사면지반의 거동을 조사하기 위하여 사면 활동이 예상되는 본 연구대상지역에 경사계를 설치하였다. 경사계의 설치위치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 사면상단부의 S-1위치와 사면중앙부의 S-2위치에 각각 설치하였다.

Fig. 5는 시간에 따른 사면지반의 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라 사면지반은 계속적으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 우기철의 지속적인 강우로 인하여 발생된 것이라 할 수 있다. 즉, 강우시 지표수의 지중침투로 인하여 지표부의 지반이 습윤상태로 무거워지고 단위체적중량이 증가되므로 사면의 이동은 계속적으로 증가하게 된다. 그리고, 사면상단부인 S-1위치에서의 변위보다 사면중앙부인 S-2 위치에서의 변위가 더 큰 것으로 나타났다. 강우에 따른 S-2 위치에서 변위는 8월 3일부터 13일까지의 강우시(Fig. 4) 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 8월 13일 이후에는 강우가 거의 없음에도 불구하고 지속적으로 변위가 발생하는

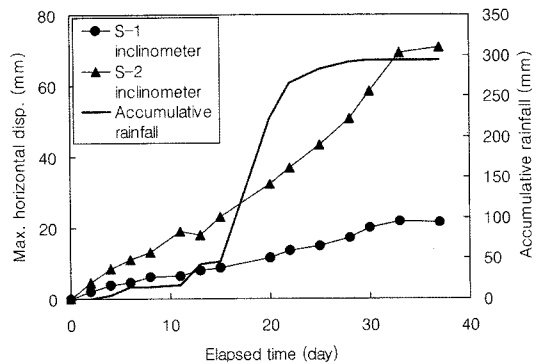


Fig. 6. Maximum horizontal displacement of slope soils according to the accumulative rainfall.

것으로 나타났다. Fig. 5(a)는 사면상단부인 S-1위치에서 사면지반의 거동을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 지표면으로부터 약 12m아래의 위치에서 사면지반의 변위가 급속하게 감소되고 음의 값을 갖는다. 이러한 이유는 이 위치에서 사면활동이 일어났기 때문이며, 이 깊이를 사면 활동깊이로 예상할 수 있다. 그리고, Fig. 5(b)는 사면중앙부인 S-2위치에서의 사면지반의 거동을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 S-1위치에서와 마찬가지로 지표면으로

부터 약 14m 아래의 위치에서 사면지반의 변위가 급속하게 감소되었다. 따라서, 이 깊이를 사면활동깊이로 예상할 수 있다. 이상에서와 같이 지층구성, 강우기록과 사면지반의 거동을 통하여 본 연구대상 지역의 사면규모와 사면활동깊이를 예측할 수 있다. 즉, 본 연구대상에서 발생한 산사태는 대규모의 산사태에 속하며, 사면활동깊이는 지표면으로부터 약 12~14m임을 알 수 있다(송영석과 홍원표, 2007).

한편, Fig. 6은 누적강우량에 따른 사면지반의 최대수평변위를 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 누적강우량이 증가함에 따라 사면지반의 최대수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 누적강우량이 일정해지는 경우에는 사면지반의 최대수평변위도 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서, 누적강우량과 사면지반의 수평변위는 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 사면지반의 거동은 지하수위 상승에 의한 원인 보다는 강우시 지표수의 지중침투로 인한 지반의 단위체적중량의 증가에 의한 원인으로 발생함을 확인할 수 있다.

사면보강공법의 선정

사면보강공법

사면안정공법은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 상부사면의 경우 1열의 억지말뚝과 영구앵커를 설치하고, 하부사면의 경우 2열의 억지말뚝, 쏘일네일링을 시공하는 것으로 하였다. 상부사면의 억지말뚝은 1열로 시공되며, 억지말뚝의

두부에 앵커를 시공한다. 그리고, 하부사면의 억지말뚝은 2열로 지그재그형태로 시공한다. 억지말뚝의 제원은 단면력의 보강을 위하여 합성말뚝으로 강관말뚝(φ508) 내부에 H말뚝(250×255×14×14)을 삽입하고 시멘트 그라우팅으로 속채움을 실시한다. 말뚝의 길이는 26m이고, 연암층까지 설치하여 소켓형태로 시공되도록 한다. 그리고, 말뚝과 말뚝사이의 중심간 간격은 1.5m이며, 말뚝의 간격비는 0.67로 하였다. 상부사면의 앵커는 자유장 21m, 정착장 8m이며, 설치각도는 30°, 설치간격 1.5m, 강선수 7개로 시공된다. 그리고, 억지말뚝의 시공방법은 주변지반의 교란억제 및 공벽 유지의 문제점을 보완한 속파기 말뚝으로 시공한다. 하부사면 보강토구간의 도로 성토시 안정성 확보를 위하여 하부 억지말뚝 2열 아래의 사면부에 쏘일네일링을 설치하는 것으로 하였다. 쏘일네일링의 길이는 12m, 설치각도는 30°, 설치간격 1.5m이다. 지하수 상승억제 및 침출수의 유도를 위하여 수평배수공을 설치하였고, 기존 균열부위는 우수유입을 방지하기 위하여 인장균열 상부에는 산마루층구를 설치하고, 인장균열부에는 복토후 다짐을 실시하여 주변지반과 일체화될 수 있도록 하였다.

보강사면의 안정해석

지반물성치 산정

해석에 사용한 지반의 토질정수는 토사층의 경우에는

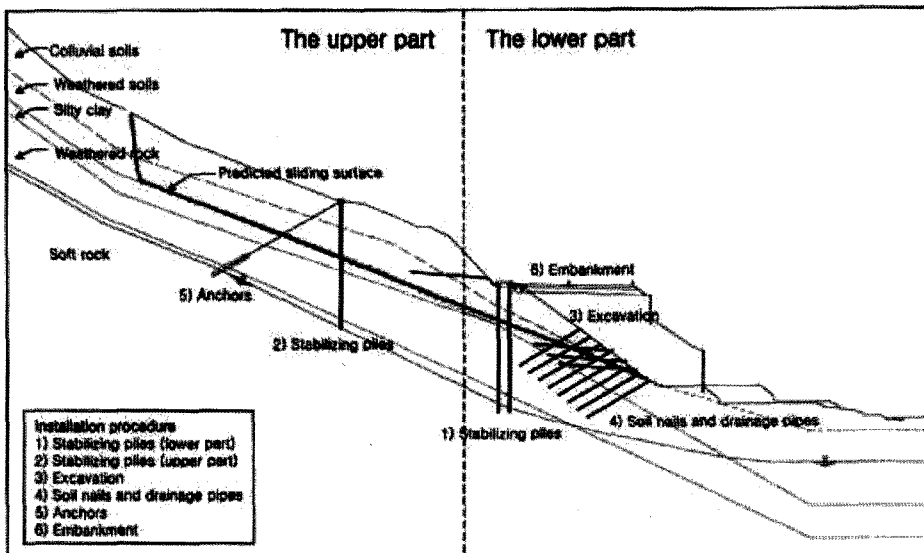


Fig. 7. The countermeasures of the slope.

Table 1. Soil properties for slope stability analysis.

layer	parameter	γ_t (t/m ²)	c (t/m ²)	ϕ (Deg.)
Coluvial soils		1.85	0.5	27
Weathered residual soils		1.9	1.0	30
Clay		1.7	1.5	20
Highly weathered soft rock		2.2	5.0	35
Soft rock		2.5	10.0	40

실내시험결과와 역해석 및 일반적인 값을 참조하고 암반의 경우에는 Hoek & Bray 경험치, 도로설계실무편람 등에 제안된 강도정수를 비교, 검토하여 적용하였다. 또한 사면안정 해석기준(한국도로공사)에 제시된 값으로 적용하였다. 해석에 적용된 토질정수는 Table 1과 같다.

사면안정해석

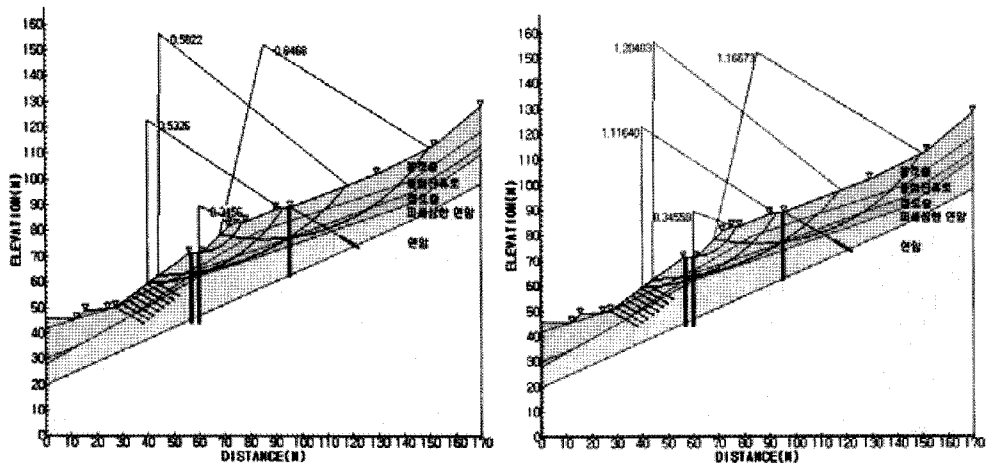
본 사면의 안정성을 검토하기 위하여 SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램을 이용한 사면안정해석을 수행하였다. 본 현장의 지반은 수일간 계속된 강우로 발생된 지표수의 지중침투와 지중지하수위의 상승으로 인하여 사면지반은 포화 상태에 이르게 되었다. 이로 인하여 지반의 단위체적중량은 증가하게 되었으며, 지반의 저항력보다 사면의 활동력이 크게 되어 산사태가 발생된 것이다. 따라서, 사면안정해석 수행시 지하수위는 지표면에 위치한 것으로 가정하였다. 그리고, 사면활동면은 점토층에서 발생하는 것으로 가정하였다.

사면안정해석은 상부사면 즉, 1열의 억지말뚝과 앵커보강사면과 하부사면 즉, 2열의 억지말뚝과 쏘일네일링보강사면으로 구분하여 수행하였다. 만약 상부사면에서 사면활동이 발생될 경우 하부사면에서도 연쇄적으로 사면활동이 발생하게 될 것이다. 따라서, 상부사면의 사면활동에 대한 안정이 확보되어야만 하부사면의 사면활동에 대한 안정이 확보될 수 있다. 즉, 상부사면의 안정을 먼저 검토한 후 하부사면의 안정을 검토하여야 할 것이다.

Fig. 8은 본 대상현장의 사면에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 상부사면, 하부사면 및 전체사면에 대한 사면안정해석을 수행하였다. Fig. 8(a)는 사면보강전의 안정해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과 사면보강전 사면안전율은 각각 상부사면의 경우 0.85, 하부사면의 경우 0.53 및 전체사면의 경우 0.58로 나타났다. 따라서, 보강전의 대상사면은 불안정한 것으로 예측할 수 있다. 한편, Fig. 8(b)는 사면보강후의 안정해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과 사면보강후 사면안전율은 각각 상부사면의 경우 1.17, 하부사면의 경우 1.12 및 전체사면의 경우 1.20으로 나타났다. 따라서, 보강후의 대상사면은 안정한 것으로 예측할 수 있다.

현장계측

본 현장에 설치된 억지말뚝과 사면지반의 거동을 파악하기 위하여 각종 계측기(경사계, 지하수위계, 변형률계 등)를 설치하였으며, 시공중에 주기적인 현장계측을 수행하였다. 사면보강을 위한 억지말뚝에는 경사계와 변형률계를



(a) Before reinforcing slope

(b) After reinforcing slope

Fig. 8. Results of slope stability analysis.

설치하였으며, 사면지반에는 경사계와 지하수위계를 설치하였다. 경사계는 억지말뚝과 사면지반의 수평변위를 측정할 수 있으며, 변형률계는 억지말뚝에 작용하는 휨용력을 측정할 수 있다. 그리고, 지하수위계는 사면지반의 지하수위 변화를 측정할 수 있다.

Fig. 9는 본 현장에 적용되는 현장계측 계획을 나타낸 평면도이다. 그림에서 보는 바와 같이 총 3개의 단면을 선정하고, 전술한 각종 계측기를 이용하여 억지말뚝과 사면지반에 대한 거동을 조사하였다.

경사계 및 지하수위계

Fig. 10은 경사계와 지하수위계의 설치평면도를 도시한 것으로 사면지반 및 억지말뚝의 거동을 파악하기 위하여 설치한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 경사계는 억지말뚝의 수평변위를 측정하기 위하여 억지말뚝의 내부에 설치하였다. 그리고, 사면지반의 수평변위를 측정하기 위

하여 억지말뚝사이 소성변형영역의 지반에 설치하였다. 이때 지반의 소성변형영역에 설치된 경사계는 구공동확장 이론에 의한 외부아치와 내부아치의 중간지점인 0.75 m에 설치하였다. 경사계는 B-B단면의 경우 지표면으로부터 27.0 m, 사면지반의 경우 지표면으로부터 28.0 m의 깊이에

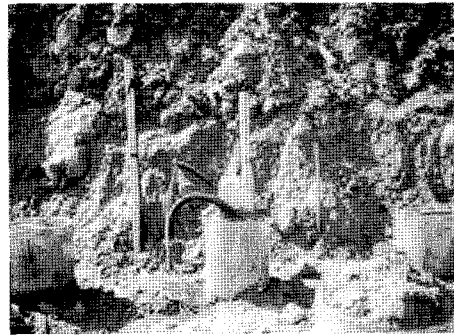


Fig. 11. Photo of installing the inclinometer and piezometer.

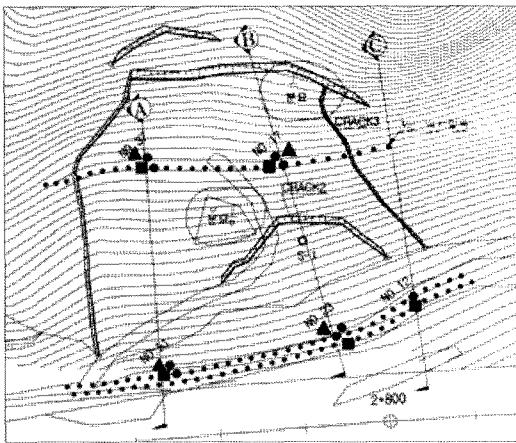


Fig. 9. Plan view of the field monitoring system.

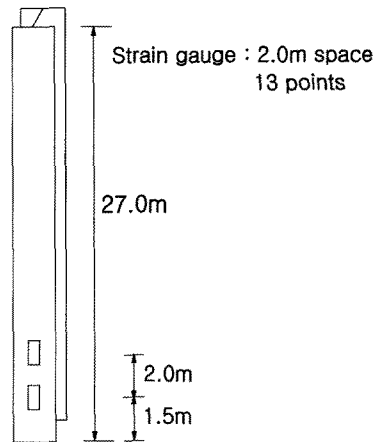


Fig. 12. Plan view for installation of the strain gauge.

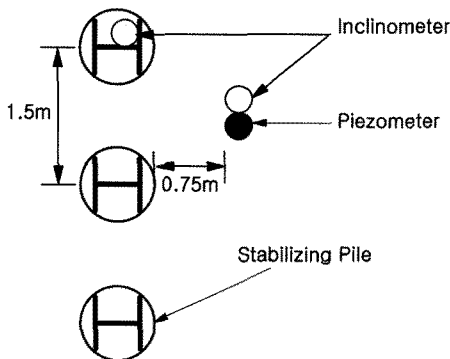


Fig. 10. Plan view for installation of the inclinometer and piezometer.



Fig. 13. Photo of installing the strain gauge.

설치되었다. 한편, 강우 및 시공상황에 따른 사면의 지하수위 변화를 파악하기 위하여 사면지반에 지하수위계를 설치하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 지하수위계는 사면지반에 경사계와 인접하여 설치하였다. 그리고, 경사계 및 지하수위계의 설치모습은 Fig. 11에 나타내었다.

변형률계

변형률계는 억지말뚝에 작용하는 휨응력을 측정하기 위하여 설치된 것으로, Fig. 12는 억지말뚝에 설치된 변형률계의 설치평면도 및 단면도를 도시한 것이다. 변형률계는 강관말뚝내에 설치된 H말뚝의 플랜지 부분에 설치하였다. B-B단면의 경우 억지말뚝은 지표면으로부터 27.0m깊이에 설치하였으며, 하부에서부터 1.5m지점을 기준으로 2.0m 간격으로 변형률계를 설치하였다. 그리고, 억지말뚝의 전면에 13개의 변형률계를 설치하였으며, 2개소에 총 26개의 변형률계를 설치하였다. Fig. 13은 억지말뚝에 설치된 변형률계의 모습과 이의 시공모습을 나타낸 것이다. 사진에서 보는 바와 같이 억지말뚝의 설치된 변형률계에 충격을 주지않기 위하여 천공후 말뚝을 일정깊이까지 삽입하도록 하였다.

계측결과

B-B단면은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 상부의 No.17 억지말뚝과 하부의 No.23 억지말뚝으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 B-B단면에서 측정된 억지말뚝의 수평변위와 휨응력 및 지하수위에 대하여 분석 및 고찰하고자 한다.

수평변위

Fig. 14는 B-B단면에서 상부 억지말뚝인 No.17말뚝의 시간에 따른 수평변위의 거동을 나타낸 것이다. 이는 억지말뚝 내부에 설치된 경사계를 이용하여 측정하였으며, 억지말뚝의 깊이에 따른 수평변위 거동을 측정할 수 있다. 그림을 살펴보면 시간이 경과함에 따라 억지말뚝의 수평변위는 점차적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 억지말뚝의 최대수평변위는 6.3mm로 말뚝두부로부터 1m부근에서 발생되었다. 억지말뚝의 수평변위형상은 켈틸레버보의 변형형상과 매우 유사하게 발생하는 것으로 나타났으며, 말뚝두부의 철근 콘크리트 보의 설치로 인한 수평변위 억제효과를 확인할 수 있다. 본 현장의 억지말뚝은 설치후 상부를 철근 콘크리트보로 연결하여 가급적 두부가 회전되지 않게 하고 수평방향으로 이동만 하도록 한 것이다. 특히, 두열이상의 말뚝열을 설치할 경우 트러스

모양으로 말뚝두부를 강제로 연결시킴으로서 두부 회전 구속조건을 만들 수 있다. 한편, 억지말뚝의 선단에서 수평변위는 미소하게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 말뚝의 선단이 지지층에 관입되어 있기 때문이며, 이를 통하여 억지말뚝의 선단조건은 힌지 혹은 고정상태라고 할 수 있다.

Fig. 15는 B-B단면에서 하부 억지말뚝인 No.23말뚝의

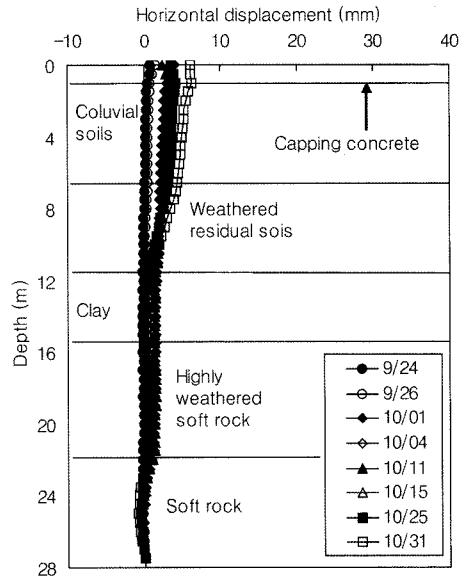


Fig. 14. Horizontal displacement of No.17 pile at the upper part of slope.

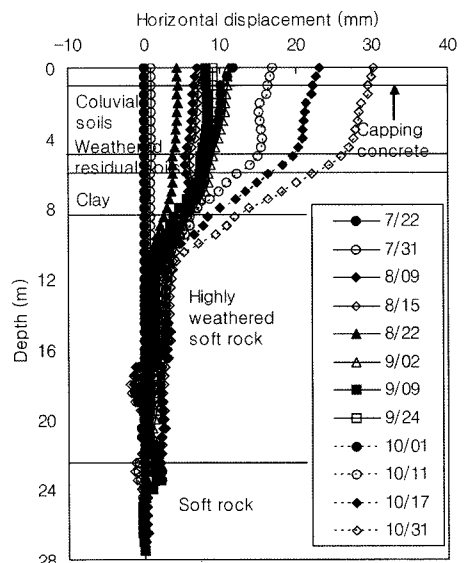


Fig. 15. Horizontal displacement of No.23 pile at the lower part of slope.

시간에 따른 수평변위의 거동을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 시간이 경과함에 따라 억지말뚝의 수평변위는 점차적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 현재까지 억지말뚝의 최대수평변위는 30.3mm로 말뚝두부에서 발생되었다. 억지말뚝의 수평변위는 10월중에 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 본 억지말뚝의 전면에 쏘일네일링 시공을 위한 사면의 절토작업으로 인하여 발생된 것으로 판단된다. 그러나, 상부 억지말뚝의 수평변위는 이에 대한 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 상부사면이 상부 억지말뚝에 의해 안정화되었기 때문으로 판단된다.

휨응력

Fig. 16은 B-B단면에서 상부 억지말뚝인 No.17말뚝의 시간에 따른 휨응력의 변화를 나타낸 것이다. 이는 억지말뚝 내부에 있는 H말뚝의 배면(사면방향)에 2m간격으로 설치된 변형률계를 이용하여 측정하였으며, 억지말뚝의 깊이에 따른 휨응력의 거동을 측정할 수 있다. 그림을 살펴보면 시간이 경과함에 따라 억지말뚝의 휨응력은 점차적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 사면활동방향에 대한 억지말뚝의 최대휨응력은 81.9 kg/cm²로 말뚝두부로부터 11.5m부근에서 발생되었다. 최대휨응력이 발생하는 깊이는 대상현장의 점토층이 존재하는 위치의 부근으로 추정할 수 있다. 이는 점토층의 상부 토사층이 측방변형이 발생되어 억지말뚝에 측방토압이 작용하여 발생된 것이다. 그리고, 억지말뚝은 점토층의 아래 암반층에서 지반반력을 크게 받지 않고 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 14의 수평변위에서 보는 바와 같이 파쇄심한 연암에서도 수평변위가 발생되어 억지말뚝의 선단이 견고하게 지지되고 있지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 17은 B-B단면에서 하부 억지말뚝인 No.23 말뚝의 시간에 따른 휨응력의 변화를 나타낸 것이다. 이는 억지말뚝 내부에 있는 H말뚝의 배면에 2m간격으로 설치된 변형률계를 이용하여 측정하였으며, 억지말뚝의 깊이에 따른 휨응력의 거동을 측정할 수 있다. 그림을 살펴보면 시간이 경과함에 따라 억지말뚝의 휨응력은 점차적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 사면활동방향에 대한 억지말뚝의 최대휨응력은 270.9 kg/cm²로 말뚝두부로부터 7.5m 부근에서 발생되었다. 최대휨응력이 발생하는 깊이는 대상현장의 점토층이 존재하는 위치의 부근으로 나타났다. 점토층의 상부 토사층이 측방변형으로 인하여 억지말뚝에 측방토압이 작용하고, 점토층의 아래 억지말뚝은 암반층으로 지반반력을 크게 받게 된다.

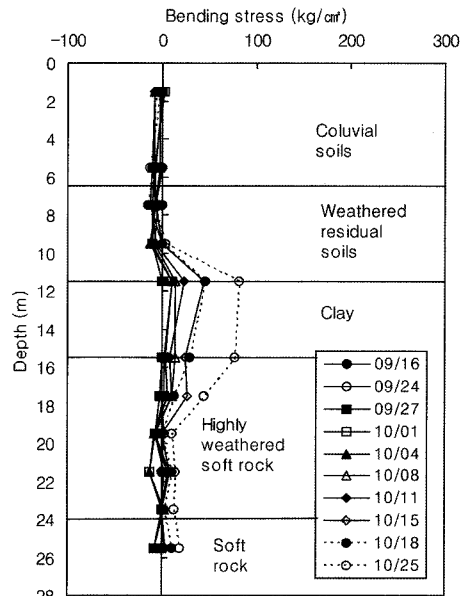


Fig. 16. Bending stress of No.17 pile.

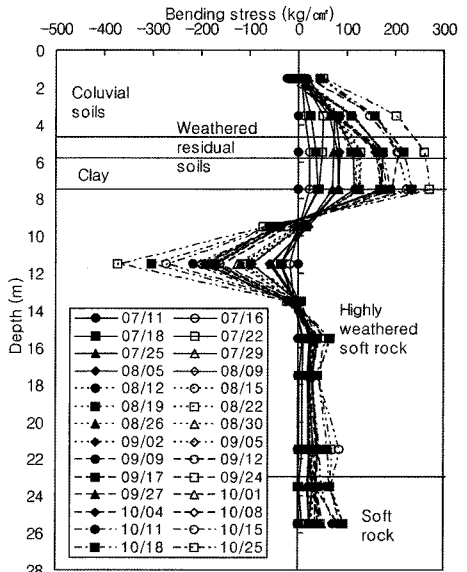


Fig. 17. Bending stress of No.23 pile.

따라서, 대상현장의 점토층을 경계로 응력이 크게 변화하고 있으며, 최대휨응력은 지지층의 지반반력에 의해 발생됨을 알 수 있다. 한편, 최대휨응력의 크기는 No.17 말뚝보다 매우 큰 것으로 나타났다. 본 억지말뚝의 전면에 쏘일네일링 시공을 위한 사면의 절토작업으로 인하여 수평변위가 증가되었으며, 이로 인하여 휨응력도 증가되었

다. 그러나, 현재 No.17말뚝 및 No.23말뚝에서 발생한 휨응력은 허용휨응력(1,333 kg/cm²)내에서 안정적인 거동을 보임을 알 수 있다.

억지말뚝의 수평변위와 휨응력에 대한 측정결과를 토대로 사면지반내 예상활동면 깊이를 확인할 수 있다. 대상사면인 B-B단면의 경우 예상활동면의 깊이는 상부사면 및 하부사면에서 각각 16m 및 8m로 정의할 수있으며, 이는 점토층의 하부깊이와 일치함을 알 수 있다.

분석 및 고찰

강우에 의한 영향

Fig. 18은 누적강우량에 따른 억지말뚝의 최대수평변위를 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 누적강우량이 증가함에 따라 억지말뚝의 최대수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 집중호우시 최대수평변위는 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 한편, 60일 이후 수평변위의 지속적인 증가는 본 억지말뚝의 전면에 쏘일네일링 시공을 위한 사면의 절토작업으로 인한 것이다.

Fig. 19는 누적강우량에 따른 억지말뚝의 최대휨응력을

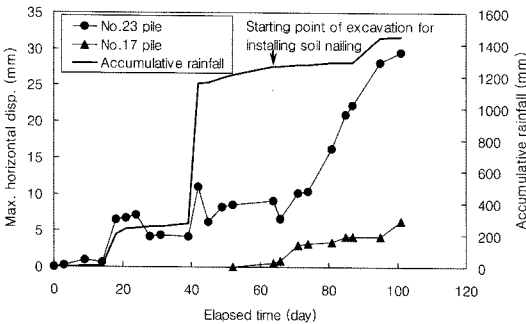


Fig. 18. Maximum horizontal displacements of piles according to the accumulative rainfall.

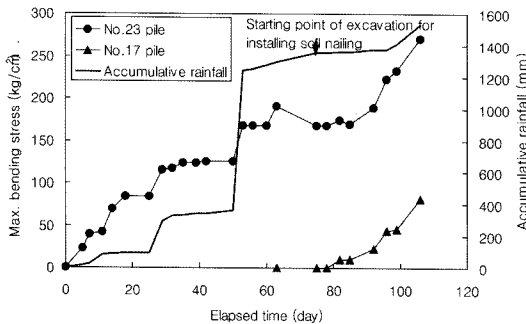


Fig. 19. Maximum bending stresses of piles according to the accumulative rainfall.

도시한 것이다. 그림을 살펴보면 누적강우량이 증가함에 따라 억지말뚝의 최대휨응력도 증가하는 것으로 나타났으며, 집중호우시 최대휨응력은 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 쏘일네일링 시공을 위한 사면의 절토작업에 의하여 휨응력이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 대상사면의 억지말뚝의 변형은 사면절토와 같은 시공단계 및 강우에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 20은 누적강우량에 따른 대상사면의 지하수위 변화를 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 대상사면의 지하수위는 강우에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 즉, 일시적인 집중강우로 인한 지표수는 지반에 깊이 유입되지 못하고 지표면에서만 지반이 포화되어 단지 상부토사층의 단위중량만 증가시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서, 실제 억지말뚝과 사면지반의 거동 및 안정은 지하수위의 상승보다는 지표면으로 부터의 지반습윤대 하강에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

굴착에 따른 영향

억지말뚝으로 보강된 사면의 전면부에 쏘일네일링 시공을 실시하는 동안 배면지반에 설치된 억지말뚝의 수평변위 및 휨응력을 조사하였다. 쏘일네일링을 시공하기 위하여 사면전면부에 대한 일부 굴착을 실시하였으며, 총 4단계에 걸쳐 굴착을 실시하였다. 쏘일네일링은 총 8단으로 시공되었으며, 단계별 굴착을 실시하면서 네일을 시공하였다. 그리고, No.23 말뚝은 쏘일네일링 시공위치로부터 수평으로 약 10m정도 떨어져 있으며, No.17 말뚝은 쏘일네일링 시공위치로부터 수평으로 약 35m정도 떨어져 있다. 쏘일네일링 시공과정을 단계별로 분류하면 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) 굴착전 : 쏘일네일링 시공전
- 2) 1단계굴착 : 쏘일네일링 시공없이 굴착만 진행됨

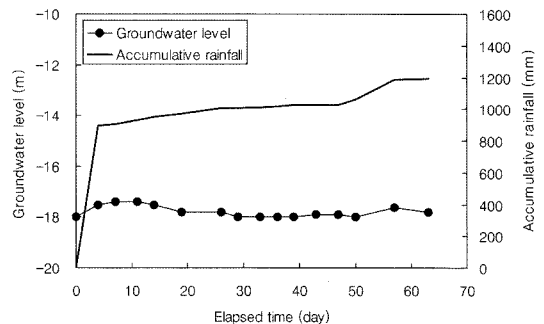


Fig. 20. Variation of ground water level according to the accumulative rainfall

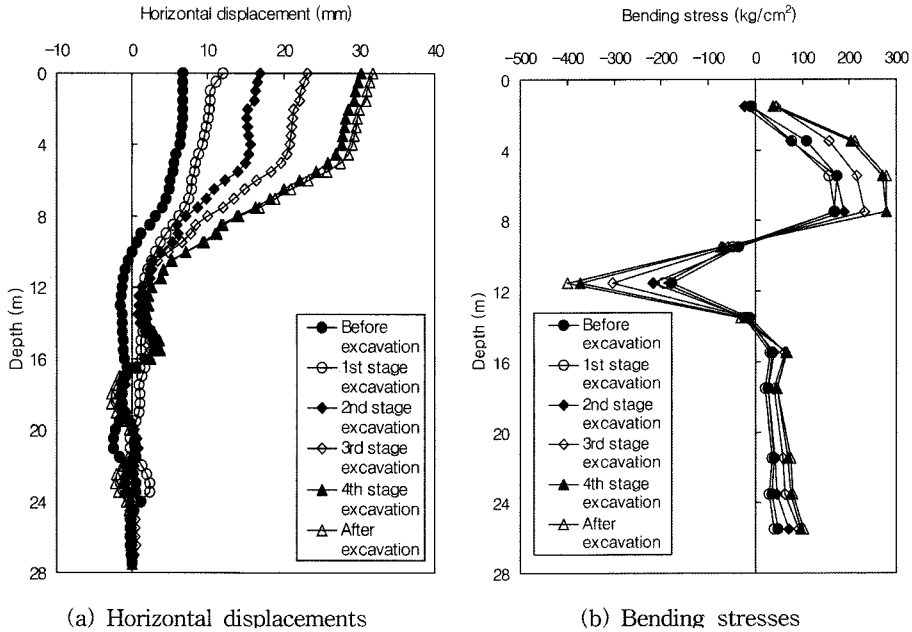


Fig. 21. Behavior of piles induced by the excavation(No.23 pile).

- 3) 2단계굴착 : 쏘일네일링 1, 2열 천공 및 삽입
- 4) 3단계굴착 : 쏘일네일링 3, 4, 5열 천공 및 삽입, 그라우팅 실시
- 5) 4단계굴착 : 쏘일네일링 6, 7, 8열 천공 및 삽입, 그라우팅 실시
- 6) 굴착완료후 : 그라우팅 양생이후

Fig. 21(a)는 No.23 말뚝의 전면부에 쏘일네일링 시공에 따른 억지말뚝의 수평변위를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 단계별 굴착이 수행됨에 따라 억지말뚝의 수평변위는 증가하는 것으로 나타났으며, 굴착으로 인한 수평변위 증가량은 약 25 mm인 것으로 나타났다. 특히 단계별 굴착에 따른 수평변위의 증가량은 일정한 것으로 나타났으며, 4단계굴착시 말뚝의 수평변위가 가장 크게 발생함을 알 수 있다. 그리고, 굴착을 완료한 이후에는 억지말뚝의 변위는 수렴되는 것으로 나타났다. 한편, Fig 21(b)는 No.23말뚝의 전면부에 쏘일네일링 시공에 따른 억지말뚝의 휨응력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 쏘일네일링 시공으로 인한 단계별 굴착이 진행됨에 따라 억지말뚝의 휨응력은 증가하는 것으로 나타났으며, 굴착이 완료된 이후에는 수렴하는 것으로 나타났다. 단계별 굴착으로 인하여 억지말뚝에 수평변위가 증가하고, 이로 인하여 말뚝의 휨응력이 증가하게 되는 것이다. No.23말뚝에서 굴착으로 인하여 발생한 휨응력증가량은 약 120 kg/cm²인

것으로 나타났다. 따라서, 억지말뚝에 발생하는 휨응력은 억지말뚝의 수평변위와 비례관계가 있음을 알 수 있다.

결론

본 연구는 도로시공을 위한 사면절개시 대규모 산사태가 발생되어 이에 대한 대책공법으로 억지말뚝을 적용하였다. 절개사면에 설치된 억지말뚝의 저항메카니즘을 규명하기 위하여 현장실험을 수행하였으며, 이를 통해서 얻은 결과를 분석고찰 하였다. 이에 대한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 사면보강전 산사태 발생시 측정된 사면지반의 수평변위는 사면활동면의 발생위치에서 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그리고, 사면지반의 수평변위는 강우시 지표수의 지중침투로 인한 지반의 단위체적증량의 증가에 의한 원인으로 발생된 것이다.
2. 사면안정대책공을 적용한 사면안정해석시 1열의 억지말뚝과 앵커로 보강된 상부사면과 2열의 억지말뚝과 쏘일네일링으로 보강된 하부사면을 나누어 수행하여야 한다. 즉, 상부사면의 사면활동에 대한 안정이 확보되어야만 하부사면의 사면활동에 대한 안정이 확보될 수 있기 때문이다.
3. 억지말뚝의 수평변위는 쉐넬레버보의 변형형상과

유사하게 발생되며, 말뚝두부의 철근콘크리트 보의 설치로 인하여 두부의 수평변위 억제효과를 확인할 수 있다. 이 경우 두부구속조건은 회전구속상태라 할 수 있다.

4. 억지말뚝의 최대휨응력이 발생하는 깊이는 대상지반의 점토층이 존재하는 깊이와 유사한 것으로 나타났다. 즉, 점토층의 상부토사층에서 측방변형이 발생되어 억지말뚝에 측방토압이 작용하게 되고, 점토층의 아래 억지말뚝은 지지층으로부터 지반반력을 크게 받게된다.

5. 억지말뚝의 수평변위와 휨응력은 강우 및 전면지반의 굴착에 의해 영향을 받으며, 억지말뚝의 수평변위가 증가함에 따라 휨응력이 증가함을 알 수 있다.

6. 기록적인 집중호우에도 불구하고 사면지반의 지하수위의 상승은 미소한 것으로 조사되었다. 이는 일시적인 집중호우로 지표수가 지반에 깊이 유입되지 못하고 지표면에만 지반이 포화되어 상부 흙의 단위체적중량만 증가시키기 때문이다. 따라서, 사면지반과 억지말뚝의 거동에 영향을 미치는 요인은 저면지하수위의 상승보다 상부지표면으로 부터 지반습윤대의 하강에 의한 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

김성환, 유병옥, 조성로, 1996, 사면보호용 식생공법과 적용사례, 96년도 사면안정학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 167-181.
 송영석, 2004, 활동억지시스템으로 보강된 사면의 설계법, 중앙대학교 대학원 박사학위논문.
 송영석, 2006, 사면붕괴가 발생한 절개사면에서의 억지말뚝 보강사례 연구, 지질공학, 16(2), 189-199.

송영석, 홍원표, 2007, 퇴적암 지역에서의 산사태 원인 및 특성분석에 대한 사례연구, 지질공학, 17(1), 101-113.
 홍원표, 1990, 산사태 및 방지대책, 사면안정강좌(VIII), 대한토질공학회지, 6(3), 93-99.
 홍원표, 송영석, 2002, 우리나라에서의 사면안정대책공법 적용사례 연구, 02년도 사면안정위원회 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 1-28.
 홍원표, 한중근, 김상규, 김마리아, 김윤원, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회, 6(2), 55-63.
 홍원표, 한중근, 윤중만, 1998, 사면안정용 억지말뚝의 해석법 및 적용사례, 98년도 사면안정학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 7-49.
 Song, Y. S. and Hong, W. P., 2008, Earth pressure diagram and field measurement of an anchored retention walls on a cut slope, Landslides, 5(2), 203-211.

2009년 5월 1일 원고접수, 2009년 6월 16일 게재승인

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
 305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92
 Tel: 042-868-3035
 Fax: 042-868-3414
 e-mail: yssong@kigam.re.kr

홍원표

중앙대학교 공과대학 건설환경공학과
 156-756, 서울특별시 동작구 흑석동 221
 Tel: 02-820-5258
 Fax: 02-817-8050
 e-mail: wphong@cau.ac.kr