
절개사면에 설치된 억지말뚝의 거동분석에 관한 연구

홍원표, 한중근, 이문구
중앙대학교

1. 서론

최근 급속한 도시팽창 및 국토개발에 따라 다양하게 요구되는 토지수요에 부응하기 위하여 산지나 구릉지를 절개하여 활용하는 경우가 빈번하여지고 있다. 따라서 지금까지 균형을 유지하여 안정된 상태에 있던 산지나 구릉지에서 사면의 균형이 인위적으로 붕괴되어 산사태가 유발되는 경우가 점차 증가되고 있다.

이와같이 인위적인 요인으로 발생하는 사면붕괴재해를 방지하기 위하여 지금까지 많은 대책공법들이 적용되어오고 있다. 특히, 부산지방과 같은 지역에서는 인구집중으로 인한 택지부족 현상을 해결하기 위하여 산지를 절개하여 택지를 공급할 수밖에 없는 실정에 놓이게 되었다. 따라서 절개사면의 안정성을 확보하기 위하여 적절한 산사태방지공법의 개발적용이 시급한 실정이다.

이러한 절개사면의 사면안정대책공법의 일환으로 최근에 억지말뚝을 사용하여 절개사면의 사면안정성을 확보하려는 현상이 늘어나고 있다. 그러나 억지말뚝공을 효과적으로 활용하기 위하여 사면속에 설치된 억지말뚝의 사면안정효과 및 거동을 면밀히 조사분석하여야 할 것이다. 이에 본 연구에서는 억지말뚝을 설치한 한 산사태사례 사면을 선정하여 각종 계측기를 설치하여 억지말뚝의 거동을 조사하고자 한다. 본 연구의 대상사례 사면으로는 1993년 8월19일 수일간 계속된 강우로 산사태가 발생한 부산직할시 영도구 동삼동 산43-2번지에 위치하는 E아파트 신축부지의 절개사면을 선택하였다. 본 절개사면에는 복구공사중 대책공법의 효과적인 성과와 사면안정대책공의 연구목적에 의해 당 현장의 사면에 지하수위계, 경사계, 스트레인게이지를 각각 부착·설치하였다.

본 논문에서는 우선 부산에서의 산사태발생형태를 간략히 소개하고 산사태발생기구의 규명을 위해 상기에서와 같이 설치된 계측기를 통해 얻어지는 자료를 당 현장의 시공상황 및 강우자료와 연관시켜 억지말뚝의 거동을 분석한다. 즉 산사태 발생원인중 강우로 기인한 경우가 상당히 많으므로 강우의 영향을 고려하여 장기간 계측을 하므로써 억지말뚝 및 지반의 거동, 억지말뚝의 사면안정효과 및 강우와의 상호연관성을 조사하여 보았다. 본 해석에 사용된 자료는 1994.2.16 - 1994.8.12 간 계측을 통해 얻어진 결과이다.

2. 역지말뚝거동 현장계측

2.1 산사태방지대책공법

산지를 절개하여 주택단지를 조성하고 산간에 도로를 건설할 경우 절개사면에 대한 안정성 문제가 더욱 절실하게 요구되고 있다. 이때 만약 사면안정성이 확보되지 않음이 예상될 때는 보다 효과적인 산사태 방지대책이 마련되어야 한다. 그러나 효과적인 산사태방지대책은 대상지역의 지질학적, 지형학적 및 지반공학적 특성에 따라 다를 수 있다. 즉 국가나 지역에 따라 기상특성, 지반특성 및 산사태 발생기구특성이 달라질 수 있으므로 각 지역의 특성에 적합한 대책공법을 개발할 필요가 있다. 종래의 사면안정공법으로는 경사면을 식물이나 블럭으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 소규모의 공법이나 사면의 구배를 완만하게 하는 공법이 많이 사용되었다. 그러나 최근에 이르러서는 이들 공법으로 산사태를 억지시키기에 한계가 있어 역지말뚝, 앵커, 옹벽등으로 사면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있다.

이와같이 적용되는 사면안정공법은 여러가지 방법으로 분류할 수 있다. 즉 Schuster(1992)³⁾는 사면안정공법을 배수공(Drainage), 절토공(Slope modification), 압성토공(Earth buttresses) 및 지반보강공(Earth retention systems)의 4가지로 구분한 바 있다. 한편 山田(1982)⁴⁾는 산사태방지대책공법을 억제공(抑制工)과 억지공(抑止工)의 두가지로 구분하였다. 그밖에도 여러가지방법으로 산사태방지대책공법을 분류할 수 있을 것이다. 그러나 가장 합리적인 분류방법은 산사태가 발생하는 경우를 고찰하여 분류하는 방법일 것이다. 즉 산사태가 발생하는 경우는 원래 사면이 안정된 상태인 경우와 원래부터 사면이 불안정한 것이 예상되는 경우의 두가지로 구분된다. 즉 전자는 원사면이 안전된 상태였던 것이 우수의 침투나 세굴에 의하여 사면안전율이 원래보다 상당히 감소되어 산사태가 발생하는 경우이며 후자는 절성토등을 실시할 사면의 안전성이 확보되지 못하거나 충분하지 못한 경우 강우등의 외적요인이 가하여져서 산사태가 발생하는 경우이다.

이상과 같은 고찰에 의거하여 산사태가 발생하지 않게 하기 위한 대책공법을 방지가능별로 구분하여 보면 그림 2.1과 같이 안전율감소방지법과 안전율증가법의 두가지로 크게 구분할 수 있다¹²⁾. 즉 강우, 융설등과 같은 물의 영향으로 사면의 안

전율이 감소하는 것을 방지하는 전자의 방법과 불안전하게 판단된 사면의 안전율을 말뚝등의 저항력을 이용하여 증가시켜 주는 후자의 방법이다. 전자는 산사태를 발생시키는 직접적 유인으로부터 사면을 보호하는 소극적 대책방법이라 할 수 있으며 후자는 산사태의 잠재적 취약성을 개선시키려는 적극적 대책방법이라 할 수 있다.

이러한 적극적 대책방법으로는 두가지 종류의 방법이 이용될 수 있다. 하나는 사면의 활동력에 저항시키기 위한 저항력을 증가시켜 주는 방법이고 다른 하나는 사면이 안전하도록 사면의 활동력을 감소시켜 주는 방법이다. 우선 저항력증가법으로는 말뚝, 앵커, 옹벽, 흙등을 사용하여 이들 재료의 전단, 휨, 인장, 압축등의 역학적 저항특성을 이용하는 물리적 방법과 지반안정약액을 사용하여 직접 지반의 강도를 증가시켜줌으로써 사면활동에 저항하도록 하는 화학적 방법을 들 수 있다.

한편, 활동력감소법으로는 사면상부의 흙을 제거시키는 절토공과 사면의 경사를 보다 완만하게 변경시키는 사면구배 변경법을 들 수 있다.

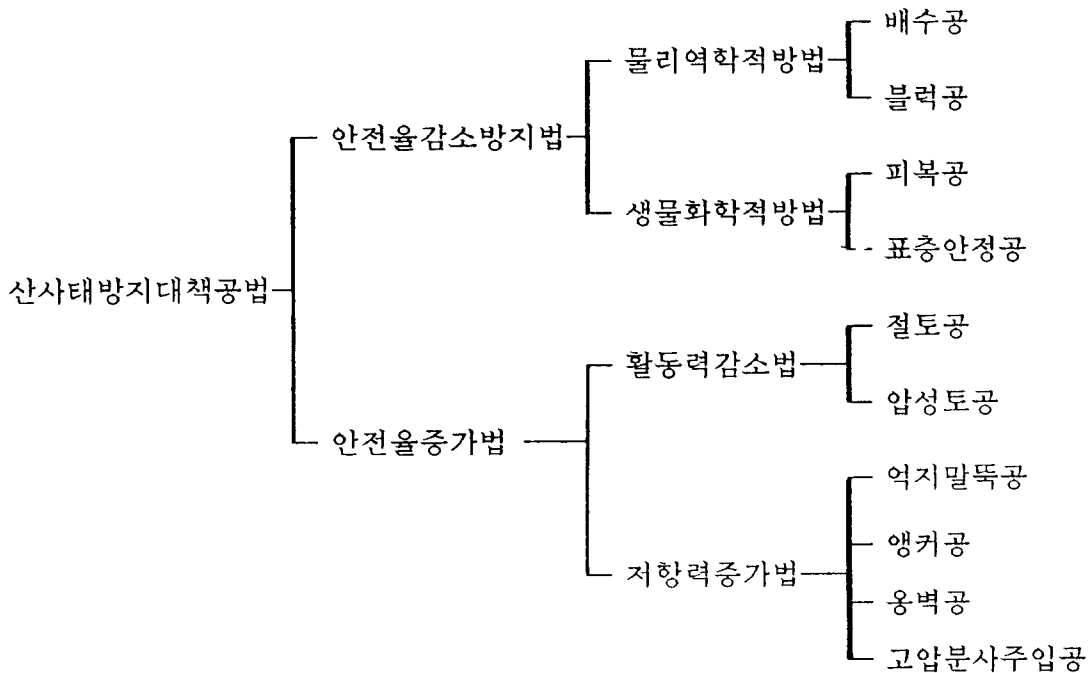


그림 2.1 산사태방지대책공법

그림2.1과 같이 분류된 산사태안정공법중 본 연구대상사면에는 사면안전율증가 효과가 커서 우리나라에서 최근에 사용하는 회수가 늘어나고 있는 억지말뚝공을 채택하여 시공설치하였다.

억지말뚝공은 사면의 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치하므로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 받아 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(Passive pile)의 대표적 예중에 하나로 활동토괴에 대하여 역학적으로 저항하는 공법이다.^{7,10)}

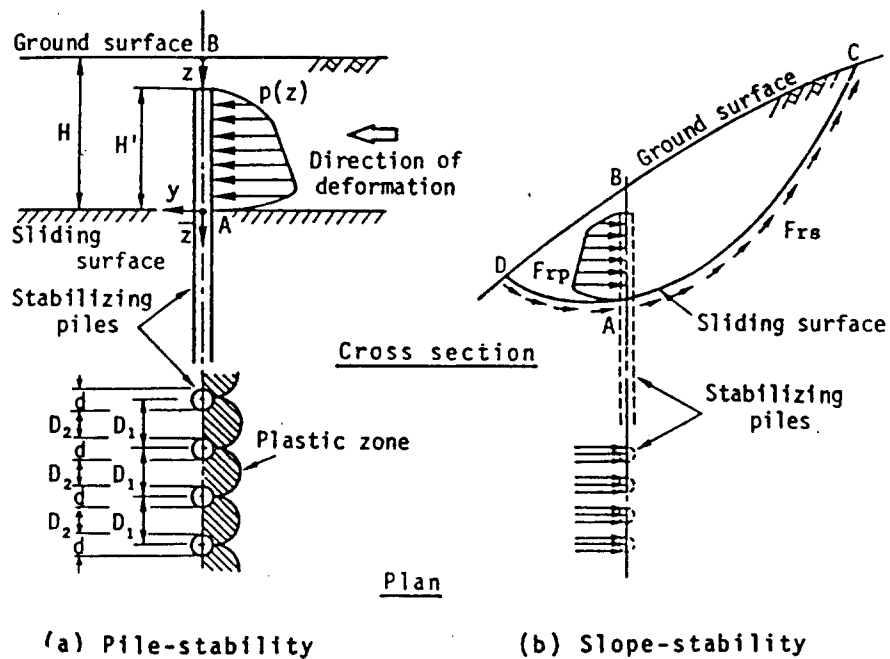


그림 2.2 억지말뚝공

말뚝의 거동은 말뚝과 주변지반의 상호작용에 의하여 결정된다. 말뚝의 사면안정효과를 얻기 위하여는 말뚝과 사면 둘다의 안정성이 충분히 확보되도록 말뚝의 설치위치, 간격, 직경, 강성, 근입깊이 등을 결정하여야만 한다. 억지말뚝을 일렬로 설치하여 사면안정을 도모한 경우의 개략도가 그림 2.2와 같다. 억지말뚝으로 사용되는 말뚝은 강관말뚝, H 말뚝, PC 말뚝, PHC 말뚝등을 들 수 있다. 최근에는 Micropile을 사용하는 사례도 보고되고 있다.

2.2 현장개요

본 연구대상 현장은 부산직할시 영도구에 위치한 E아파트 공사현장이다. 1993년 8월19일 공사중 수일간 계속된 강우로 아파트 배면 절개사면이 붕괴되어 억지말뚝을 이용하여 붕괴사면을 복구하였다.

본 아파트는 경사가 급한 산지를 절개정지하여 3동의 고층아파트(25층 2동, 18층 1동)와 부속건물을 신축하도록 되어 있다. 산사태 발생전 절개사면은 후방의 산지가 1:1의 급경사로 절개되어 있고 옹벽예정위치에 연직으로 12.5m 깊이를 굴착하였다. 굴착면은 5단의 어스앵커로 지지된 흙막이벽으로 지지되어 있었다.

부산지방에는 93년 7월26일 부터 8월19일까지 25일동안 4일(8월4-6, 11일)을 제외하고는 계속해서 530.3mm의 강우량을 기록하였으며 특히 8월12-18일까지는 누적 강우량이 169mm, 파괴당일 강우량은 30.6mm를 기록하였다. 9월19일 낮12시40분경 비가 오는 가운데 어스앵커로 지지된 옹벽의 곡선부 위치에서 3-4단 어스앵커로부터 앵커의 절단소리와 더불어 1차로 붕괴되기 시작하였다. 특히 3-4단의 띠장위치에서 용출수가 솟아나고 후방의 산사태로 인하여 토사가 공사중인 아파트 위치까지 밀려왔다. 그리고 16:45분경에 1차 붕괴된 위치의 좌우에서 2차붕괴가 발생하였고 8월20일 밤 00:30분경 3차붕괴가 계속해서 발생하였다. 연직벽 후방의 사면은 사면활동으로 인해 인장균열이 흙막이벽과 평행하게 5-6단계에 걸쳐 발생하였으며 균열폭은 30-50cm, 균열깊이는 1.0-1.5m의 규모로 연직벽 후방 약 40m 위치까지 활동면이 연장되어 있었다.

한편 본현장의 지층구성을 보면 지질은 중생대 경상누층군에 속하는 안산암류로 구성되어 있고 주로 암회색의 색상을 지니고 있으며 치밀한 비정질로 이루어져 있다. 또한 상부층으로 부터 표토층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층의 순으로 구성되어 있고 표토층은 0.3-6.7m두께로 실트질모래 혹은 모래질 실트로 구성되어 있다. 풍화토층은 1.8-14.0m두께로 분포되어 있고 대체적으로 실트내지 모래 및 암편으로 구성되어 있고 조밀한 상태로 풍화암층 상부에 깔려있다. 또한 풍화암층은 비교적 진전된 풍화작용을 받은 상태로 모암의 조직을 그대로 유지하고 있고 1.5-4.4m두께로 분포하고 있다. 연암층은 기반암의 풍화대층 하부에 분포되어 파쇄 절리면 및 약선대를 따라 초기 풍화작용이 진행되고 있는 상태로 5.7-17.8m깊이에서 분포되고 있고 RQD가 낮을 뿐 아니라 암질이 매우 불량한 상태에 있다.

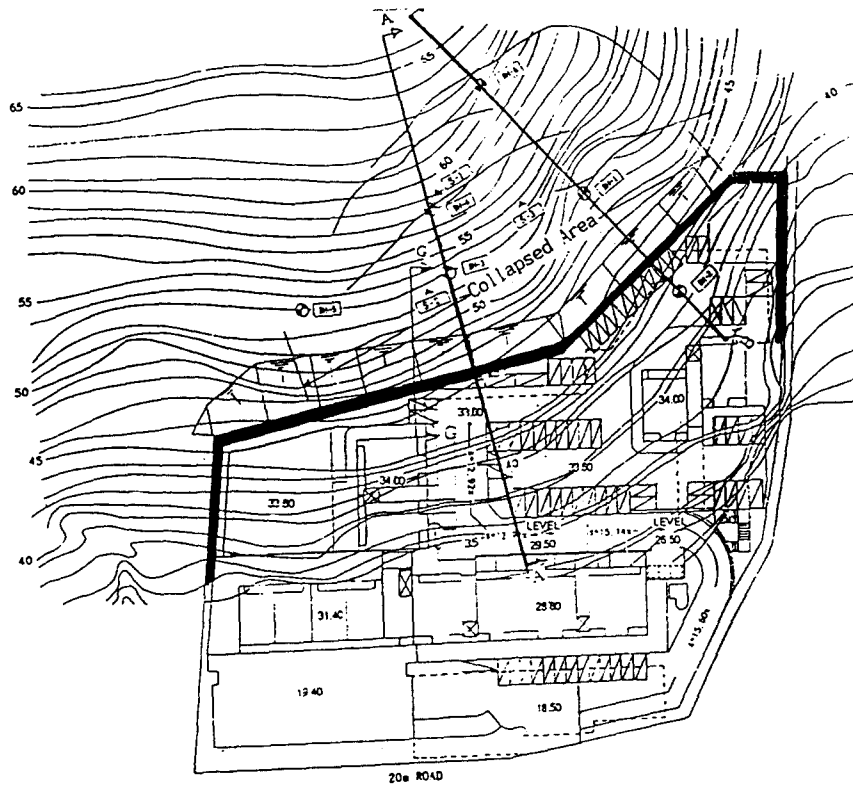


그림 2.3 현장 평면도

2.3 사면안정공

역지말뚝이 사면에 일정한 간격으로 일렬로 설치된 줄말뚝은 사면붕괴 역지효과를 상당히 가질 수 있다. 따라서 본 사면의 안정화를 위하여 역지말뚝을 일렬로 설치하였다. 일반적으로 사면붕괴 방지용 역지말뚝의 설계에 있어서는 말뚝과 사면 모두의 안정에 대하여 검토하여야 한다.

우선 파괴면 상부의 붕괴토괴의 이동에 의하여 말뚝에 작용하는 측방토압을 산정하여 말뚝이 측방토압을 받을 때 발생될 최대휨응력을 구하고 말뚝의 허용휨응력과 비교하여 말뚝안전을 $(F_s)_{pile}$ 을 산정한다.

한편 사면의 안정에 관하여는 말뚝이 받을 수 있는 범위까지의 측방토압을 산출하여 사면안정에 기여할 수 있는 저항력으로 생각하고 사면안전을 $(F_s)_{slope}$ 를 선정한다.

이와 같이 하여 산정된 말뚝과 사면의 안전율이 모두 소요안전율 이상이 되도록 말뚝의 치수를 결정한다. 여기서 말뚝의 소요안전율은 1.0으로 하고 사면의 소요 안전율은 1.2로 한다. 억지말뚝의 설계에는 줄말뚝의 사면안정효과를 고려할 수 있도록 개발된 프로그램(SPILE)을 사용하였다.

A-A단면과 B-B단면에서의 억지말뚝 설치상태는 그림 2.4 및 그림 2.5에서 보는 바와 같다. 즉 옹벽배면에서 16.5m 되는 위치에 H-300×300×10×15 규격의 억지말뚝을 중심간격 1.5m로 연암층에 1.5m 깊이까지 소켓트 형태가 되도록 설치하였으며 억지말뚝 두부는 띠장을 대고 철근콘크리트 지중보를 두어 회전구속 효과를 가지도록 하고 이 지중부위에 사면의 소단이 설치되도록 하였다.

이때 H말뚝을 설치하기 위하여 항타공법을 실시할 경우 사면지반을 교란시키게 되므로 이를 지양하고 천공($\Phi=450\text{mm}$) 후 H말뚝을 삽입하도록 하였다. H말뚝을 삽입한 후에는 시멘트그라우팅으로 천공내 공간을 메꾸어 강재가 직접 지반과 접하지 않게하여 H말뚝의 부식을 방지하였다.

또한 사면구배는 현재 지표면의 형상을 최대한 유지하도록 하여 붕괴구간에서는 옹벽배면으로 부터 1:1.5구배가 되도록 하였으며 5m높이마다 폭1m, 4%의 횡단구배의 소단을 두도록 하였다.

한편, 옹벽의 예정위치에 흙막이벽을 붕괴이전 높이로 재설치하지 않고 흙막이벽과 옹벽의 높이를 지표면 높이 만큼으로 조정하도록 하였다. 흙막이벽은 억지말뚝(H-250×250×9×14)를 2m간격으로 설치하고 4단의 앵커(2m 높이간격으로)로 지지시켰다. 억지말뚝의 시공방법은 억지말뚝과 동일한 방법으로 하였고 앵커는 부식을 방지하기 위해 영구앵커로 시공하였다. 단기적으로는 흙막이벽이 지지할 수 있게 하나, 장기적으로는 앵커의 이완등을 고려하여 옹벽이 전체의 50%를 지지할 수 있도록 하였다. 또한 옹벽이 시공이 끝난후 옹벽과 아파트사이에 지하7m를 굴착하여 2층의 지하주차장을 건설하였다.

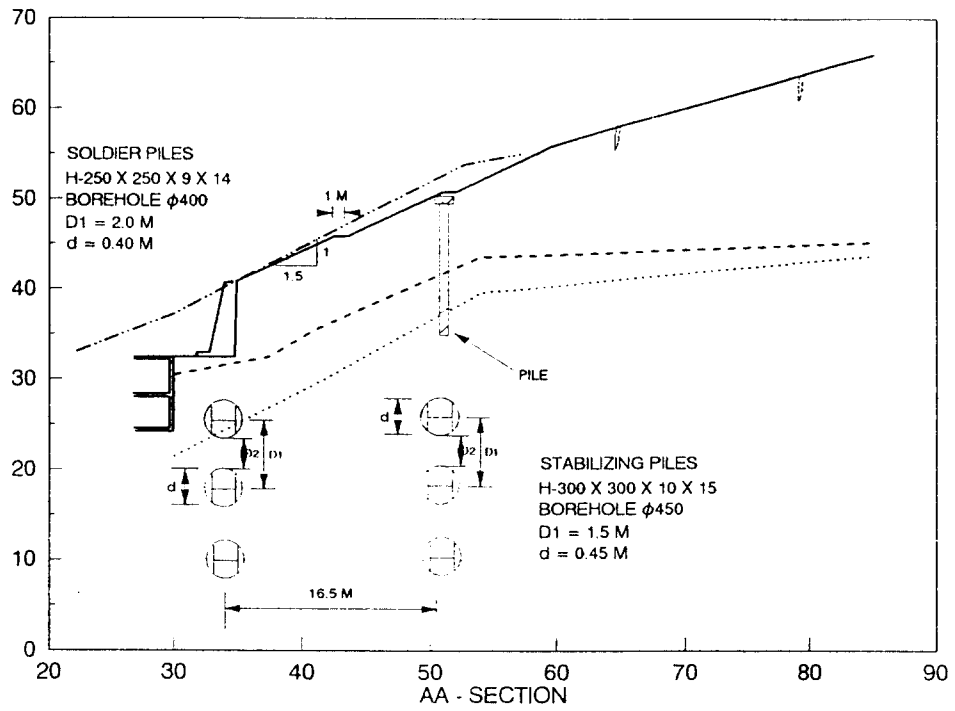


그림 2.4 AA단면(보강후)

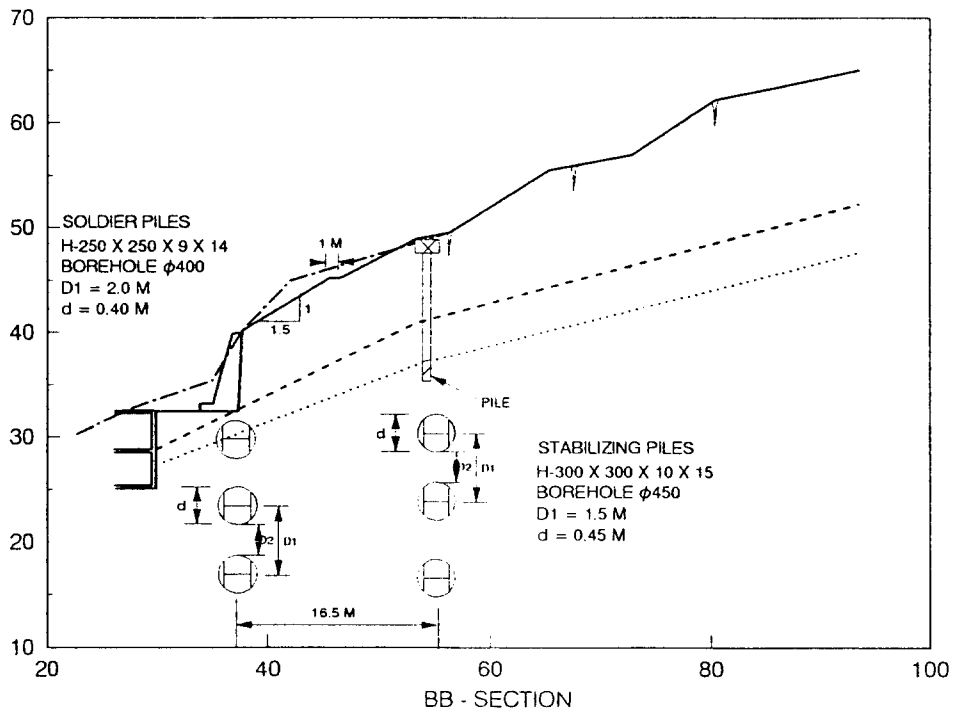


그림 2.5 BB단면 (보강후)

2.4 계측기 설치현황^{1,2)}

산사태방지대책으로 설치되는 억지말뚝의 거동 및 사면지반의 거동을 파악하기 위해 여러가지 계측장비를 활용하였다. 즉, 절개사면에 산사태억지말뚝공으로 설치된 억지말뚝에는 스트레인게이지와, 경사계를 그리고 지반에는 경사계 및 지하수 위계를 설치하였다. 본 적용단면에 설치된 계측기들은 A-A단면과 B-B단면에 똑같이 설치되어 있다.

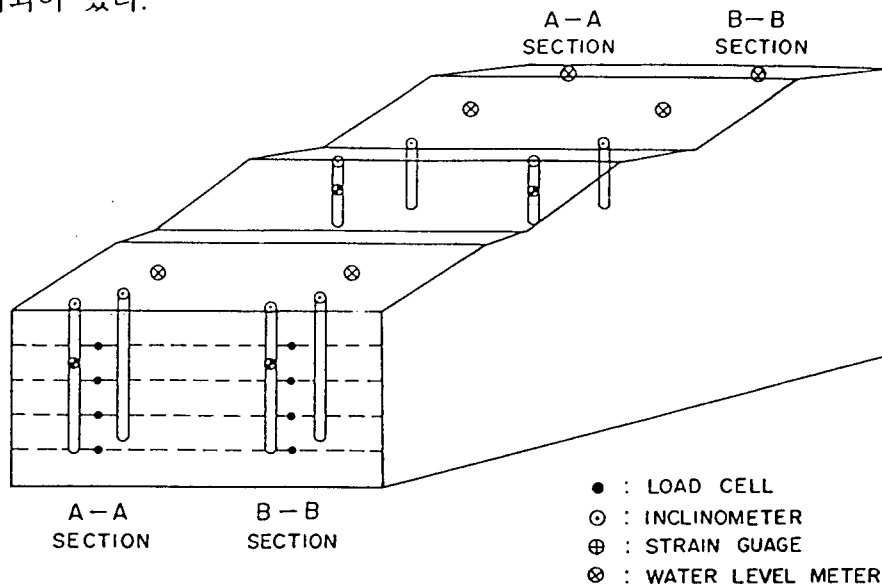
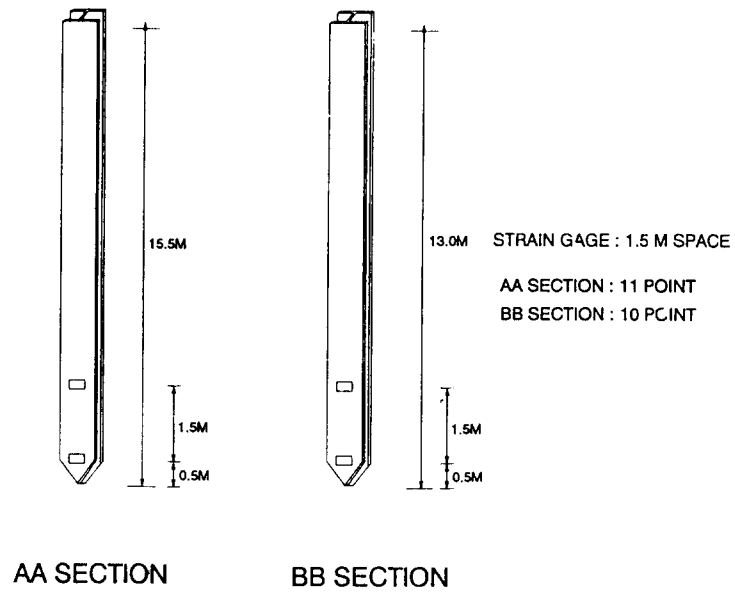


그림 2.6 계측기 설치현황도

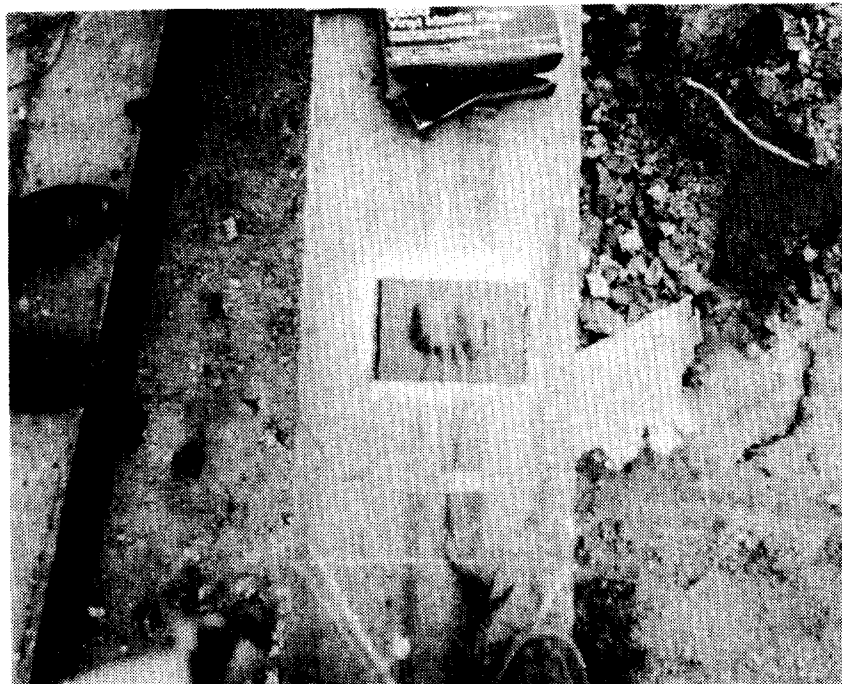
(1) 스트레인게이지

스트레인게이지는 그림 2.3의 A-A단면과 B-B단면상의 말뚝에 각각 설치하였으며 스트레인게이지의 설치단면은 그림 2.7(a)에서 보는 바와 같다. 즉 억지말뚝 전면과 배면에 스트레인게이지를 각각 설치하였으며 그림에서 보는 바와 같이 A-A단면의 경우 억지말뚝은 15.5M관입되어 있고 관입된 말뚝에 깊이 1.5M간격으로 전면(아파트쪽으로 통칭)11곳, 배면(사면쪽으로 통칭)11곳에 설치되어 총44곳에 설치되어 있다. B-B단면은 13.0M 관입되어 있으며 말뚝당 1.5M간격으로 전면과 배면 각각 10곳에 설치되어 총40개의 스트레인게이지를 설치하였다. 스트레인게이지가 부착된 말뚝의 설치모습은 그림 2.7(b)에서 보는 바와 같다.

설치된 스트레인게이지는 휘스톤브리지 방식을 채택, FULL BRIDGE로 하여 온도 및 습도의 보정을 피하도록 하였으며 SWITCH BOX를 이용하여 계측가능토록 하였다.



(a) 설치단면도



(b) 설치모습

그림 2.7 스트레인게이지 설치단면

(2) 경사계

사면 및 억지말뚝의 거동을 파악하기 위해 경사계를 A-A단면과 B-B단면에 각각 그림 2.8과 같이 설치하였다. 설치된 경사계는 말뚝의 변위를 알기 위해 억지말뚝 내부에 1개, 억지말뚝사이 지반의 변위를 파악할 수 있도록 말뚝과 말뚝사이 지반의 소성변형영역내 1곳에 설치하다. 억지말뚝공이 시공된 곳에 모두 4개의 경사계가 설치되었다. 설치된 경사계는 A-A단면의 경우 말뚝과 지반에 각각 15.5M, 14.5M 관입되어 있고 B-B단면의 경우 말뚝과 지반 모두 15.0M관입되어 있다.

(3) 지하수위계

사면의 지하수위 상승에 따른 영향을 파악하기 위해 지하수위계를 그림2.9에서 보는 바와 같이 설치하였다. 즉 A-A단면과 B-B단면 각각에 억지말뚝 배면으로 3M지점, 억지말뚝 배면 3M지점 그리고 억지말뚝 배면 21M지점에 설치하므로서 모두 6개소에 설치하였다.

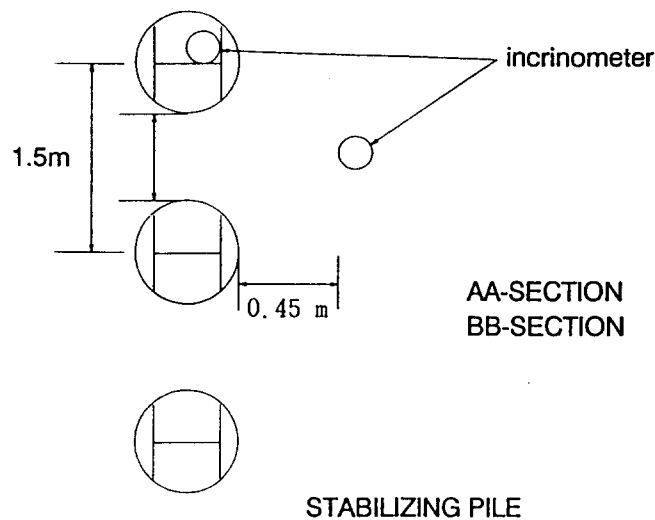


그림 2.8 경사계 설치단면도

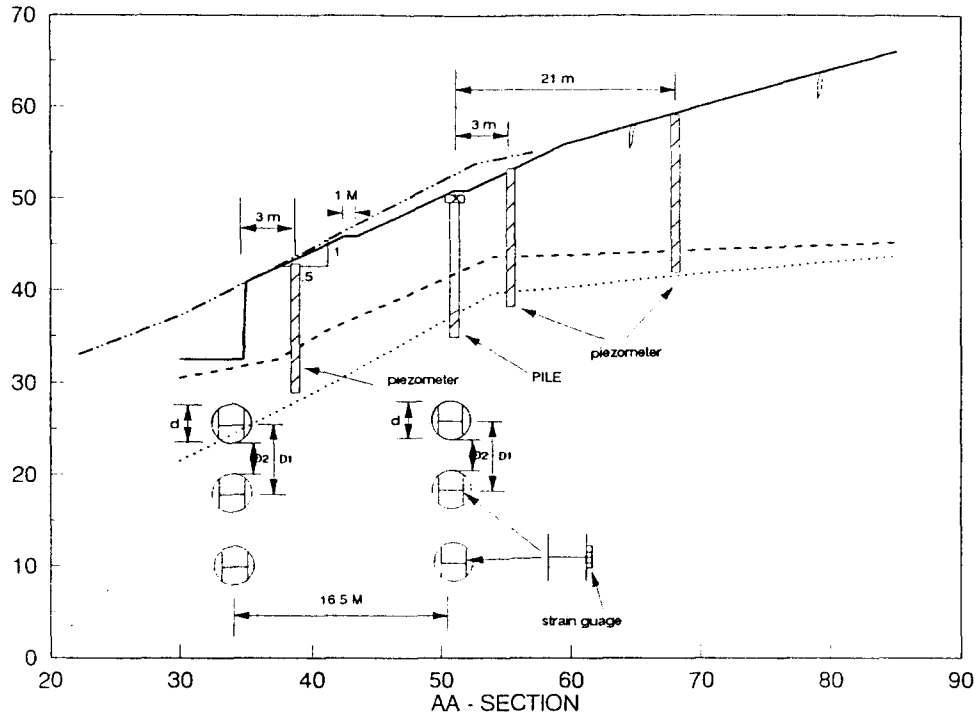


그림 2.9 지하수위계 설치 단면(AA단면)

3. 계측결과 및 강우특성

본 실험현장에 설치된 계측기들의 현황은 2장에서 설명된 바와 같다. 따라서 3장에서는 절개사면에 설치된 계측기들의 계측결과를 이용하여 억지말뚝거동 및 억지말뚝사이 지반의 거동을 검토하여 본다.

억지말뚝을 사면상부에 먼저 설치하고 억지말뚝과 흙막이말뚝 사이의 사면을 정지작업 한 후 흙막이말뚝을 설치하였으며 흙막이말뚝의 전면을 4단계에 걸쳐 굴착을 실시하였다. 이때 안정된 상태에 있던 지반이 먼저 거동을 하게 되고 지반변형이 억지말뚝에 측방토압을 유발시켜 억지말뚝이 거동을 하기 시작할 것이다. 이는 곧 말뚝과 지반사이의 거동이 서로 상호작용에 의하여 발생됨을 의미한다. 따라서, 억지말뚝의 사면안정효과는 말뚝과 지반사이의 상호작용에 의하여 판단될 수 있을 것이다. 이러한 억지말뚝과 지반의 거동은 사면에 설치된 계측기들을 통해 자료를 얻을 수 있다. 또한 이들 자료를 강우와 연결시켜 비교 검토하므러서 산사태의 발생기구를 파악할 수 있을 것이다.

먼저 부산지방의 강우특성을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 부산지역의 강우특성

우리나라는 기후적 측면으로 보면 열대지역과 한대지역의 경계지역에 위치하고 있으므로 전선, 고기압, 저기압등의 통과가 빈번하다. 따라서 기후적 특색에 따라 다음과 같은 특징을 갖는다.

첫째, 년평균 강우량이 1,100mm - 1,400mm로 세계적인 다우지역에 속한다.

둘째, 하계에는 온난다습한 북태평양고기압의 남동몬순의 영향으로 강우량이 많은 우기가 되고 동계에는 건조한 북서몬순의 시베리아고기압의 영향으로 건기와 우기의 구별이 뚜렷하다.

셋째, 강우량이 지역적으로 크게 차이를 보이고 있다.

넷째, 계절적으로 강수량의 차이가 심하며 짧은 기간에 많은 강우를 동반한다.

우리나라의 강우는 년평균 강수량의 약70%가 6월에서 9월사이에 집중강우 형태로 발생하고 있다. 이때 집중되는 강우는 그 형태나 규모에 따라 다음과 같이 크게 두가지로 나눌수 있다. 그 하나는 집중호우 형태인 이동성 저기압에 의한 영향(혹은 장마성 호우를 포함하는 기압골에 의한 전선성 집중호우)이고 다른하나는 강우강도에 영향을 받는 태풍에 의한 집중호우의 형태로 구별할 수 있다.

부산지역의 최근 10년간(1982년-1991년)의 호우 및 태풍피해로 인한 주요 산사태 발생빈도를 살펴보면 표1⁸⁾과 같다. 표에서 보는 바와 같이 부산지역은 7,8월의 호우, 태풍의 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있다. 또한 산사태발생빈도는 1985년 1회, 1987년 6회, 1989년 7회, 1991년 9회를 기록하였다.

이들 산사태발생시 강우기록과 산사태발생규모의 관계를 도시하면 그림3.1과 같다. 그림3.1은 원래 우리나라에서 발생된 산사태의 10년간 자료⁸⁾를 근거로 하여 산사태발생규모별 최대시간강우강도와 누적강우량의 관계를 살펴본 결과이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 부산지역은 85년도의 경우 파괴규모는 중규모이며 87년, 89년, 91년의 파괴형태는 대규모파괴에 속함을 알 수 있다.

이들 산사태발생시간 전후의 시간강우량을 조사하여보면 그림 3.2에서 보는 바와 같다. 이 결과에 의하면 시간강우량이 최대인 경우 대부분의 산사태가 발생함을 알 수 있다.

표1. 부산지역의 최근 10년간 호우 및 폭풍피해로 인한 산사태 발생빈도 (1982-1991)

일	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
1 - 7							1						1
8 - 14													
15 - 21													
22 - 28								9					9
29 - 31							7	6					13
계							8	15					23
率(%)							35	65					100

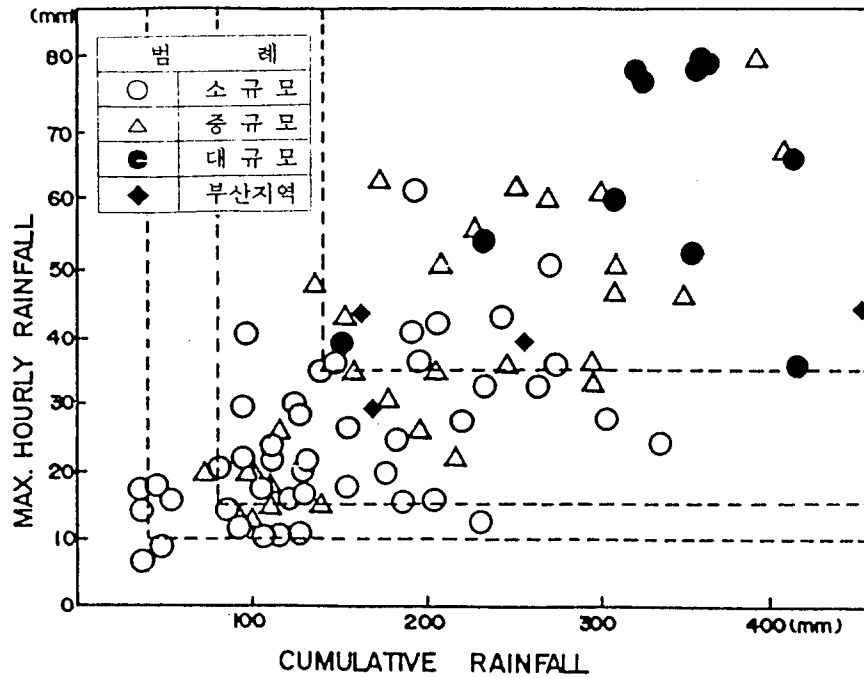


그림3.1 산사태 발생규모별 최대시간 강우강도와 누적강우량 (전일 + 당일)의 상관도

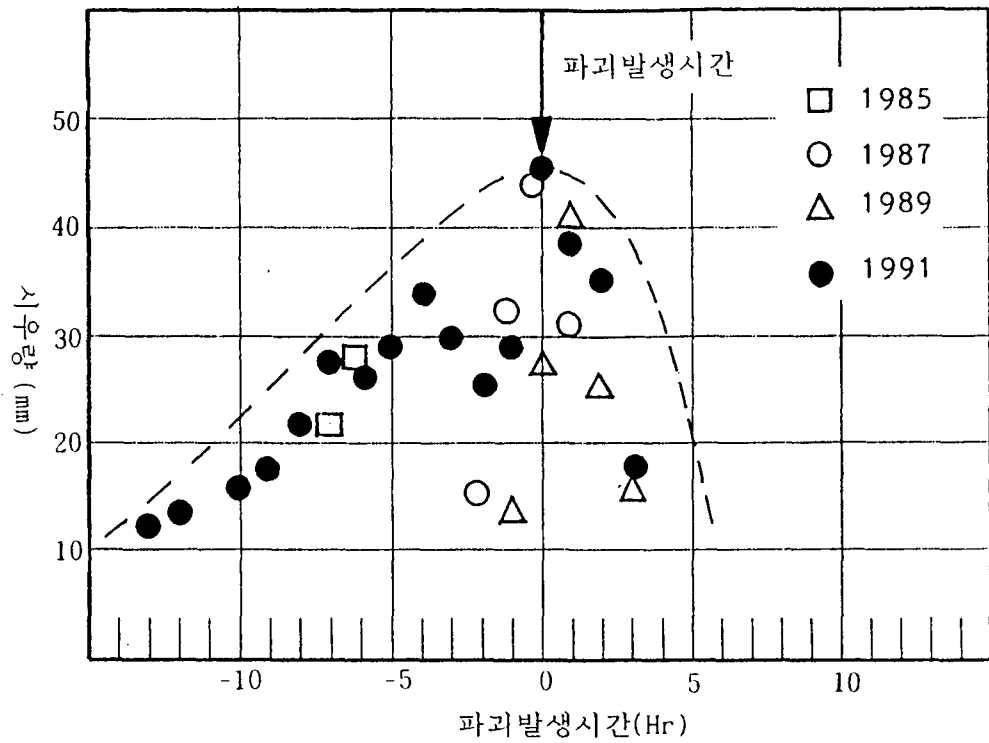


그림 3.2 산사태발생전후의 시우량

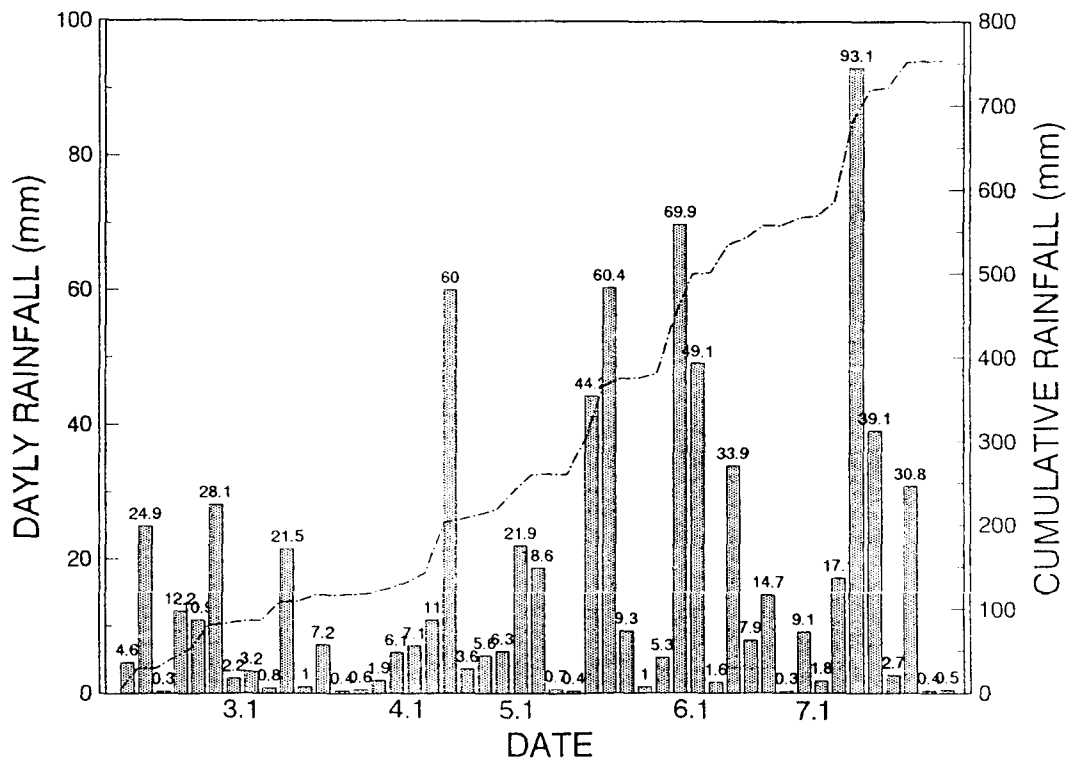


그림 3.3 최대시간강우강도 및 누적강우량의 관계

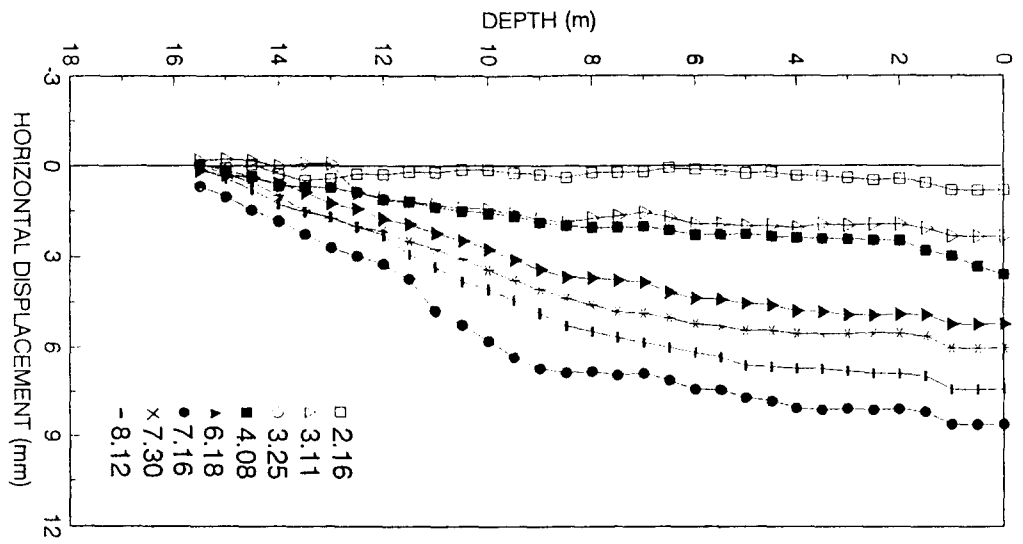
한편, 1994년 강우기록을 보면 그림3.3과 같다. 94년도 강우형태는 기상이변으로 인하여 장마및 태풍의 영향이 아주 미소하고 일일집중호우성 강우가 빈번하였다. 94년1월부터 8월12일까지의 강우량을 최대시간강우강도와 누적강우량으로 나타내면 그림 3.3과 같다. 그림3.1에서 보는 바와 같이 최대시간강우강도가 10mm, 누적강우량이 40mm를 초과하는 경우 소규모 산사태가 발생할 가능성이 있다고 하는 기준을 토대로하여 강우강도가 10mm이상 혹은 연속우량이 40mm이상인 경우만 고려하기로 한다.

3.2 시공과정

본 절개사면에 설치된 각종 계측자료를 활용하여 억지말뚝과 사면지반의 변형거동을 조사분석하면 다음과 같다. 이 분석시 억지말뚝의 거동과 지반의 거동을 강우와 관련지어 검토하기로 한다. 표2는 사면대책공을 포함한 공사의 시공일자를 정리한 결과이다. 이 시공일자에 맞추어 계측을 실시하였다. 또한 옹벽이 완성된 이후는 장기간계측으로 구분하여 계측을 계속 실시하였다.

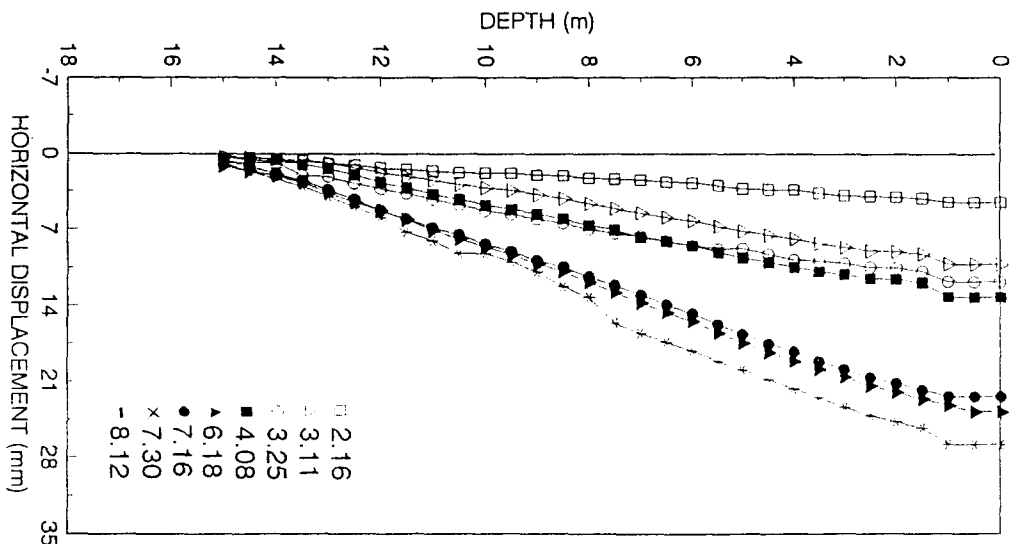
표2 각 단면별 시공일지

작업내용	AA 단 면	BB 단 면
1 단계 굴착	1994. 2. 15 1단 굴착(GL-2.2m) 3.11 1단E/A인장	1994. 2. 15 1단 굴착 (GL-2.2m) 3.11 1단E/A인장
2 단계 굴착	1994. 3. 16 2단 굴착 (GL-4.2m) 3.26 2단E/A인장	1994. 3. 16 2단 굴착 (GL-4.2m) 3.26 2단E/A인장
3 단계 굴착	1994. 3. 30 2단 굴착 (GL-6.2m) 3.26 2단E/A인장	1994. 3. 30 2단 굴착 (GL-6.2m) 4.05 2단E/A인장
4 단계 굴착	1994. 4. 17 2단 굴착 (GL-8.4m) 4.20 2단E/A인장	1994. 4. 17 2단 굴착 (GL-8.4m) 4.20 2단E/A인장
지하주차장 굴착단계	1994. 5. 20 지하주차장 굴착 (GL-15.4m) 6.02 지하주차장 뒤채움	1994. 4. 20 지하주차장 굴착 (GL-15.4m) 6.02 지하주차장 뒤채움
옹 벽 공	1994. 6. 15 옹벽타설 6.22 옹벽거푸집 제거	1994. 6. 29 옹벽타설 7.04 옹벽거푸집 제거



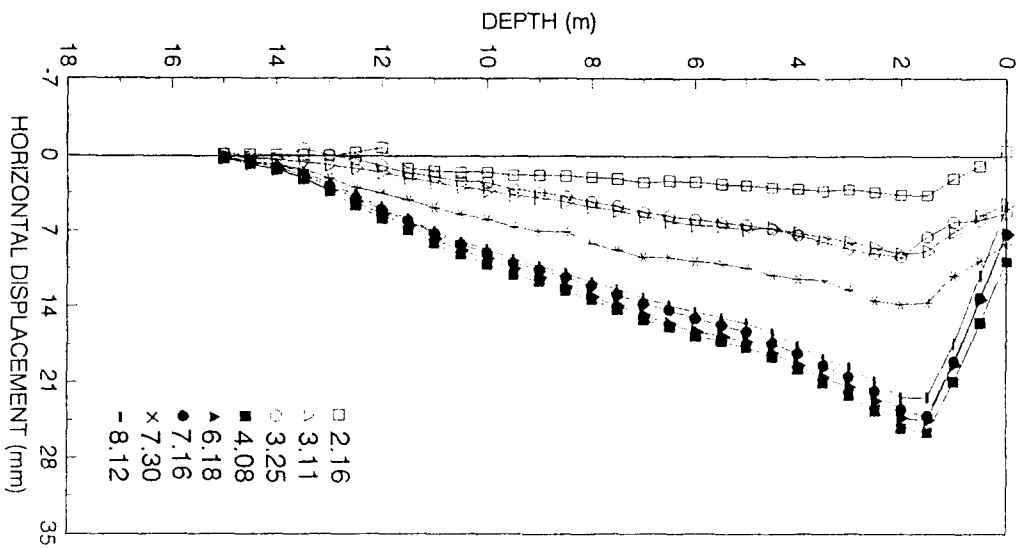
(A) 13

그림 3. 4 경사계변위



(B) 15

그림 3. 5 팔뚝사이 소성지역에 설치된 경사계변위(BB단면)



3.3 경사계 (Inclinometer)계측결과

AA단면 및 BB단면 각각에 경사계를 2개씩 설치하였으며 억지말뚝내부와 억지말뚝사이 지반에 각각 1개씩 모두 4개의 경사계를 설치하였다.

억지말뚝의 AA단면에 설치된 경사계 I3, BB단면에 설치된 I5의 변위도는 그림 3.4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 경사계의 변위는 시간이 지남에 따라 증가하며 말뚝두부에서 변위량은 최대값을 나타내고 있다. I3, I5 경사계는 억지말뚝에 설치되어 있으므로 억지말뚝의 변위를 나타내는 것이라 볼 수 있으므로 AA단면에 설치된 억지말뚝은 최대 8.6mm, BB단면에 설치된 말뚝은 최대 26.8mm의 변위를 기록하고 있다. SPILE에 의해 해석된 억지말뚝의 기준변위량은 AA단면 157.29mm, BB단면 167.2mm이므로 계측치는 기준치의 5.47%, 16.06%의 변위를 나타내고 있다. 이러한 결과는 억지말뚝의 효과를 보여주고 있다는 것이라 할 수 있다.

한편, 억지말뚝사이 지반의 소성영역이 접한곳에 위치한 I4, I5의 변위량을 보면 그림 3.5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 BB단면의 억지말뚝 배면에 설치된 경사계 I6의 최대변위량은 G.L-1.5m에서 25.525mm로 나타났다. 경사계 상부에서의 변위량이 급격히 줄어들어 두부에서 변위량이 작은 이유는 억지말뚝의 두부가 철근콘크리트로 지중보로 되어 있어 그 사이 지반의 변형이 억제되어 나타나는 결과라 할 수 있다. BB단면의 경우 말뚝의 최대변위량이 지반의 최대변위량보다 큰 이유는 그림 3.6에서 보는 바와 같이 건조기의 장기화로 지반의 탄성회복이 크게 발생한 것으로 보인다.

3.4 지하수위계 계측결과

그림 2.8에서 보는 바와 같이 절개사면의 AA단면, BB단면에 각각 3개의 지하수위계를 설치하였으나 억지말뚝에 영향을 미치는 지하수위계는 WA2와 WB2로 억지말뚝 배면 3m에 설치된 지하수위계이다. 억지말뚝배면 21m지점에 설치된 지하수위계는 계측결과 변화가 없으므로 해석대상에서 제외시켰다.

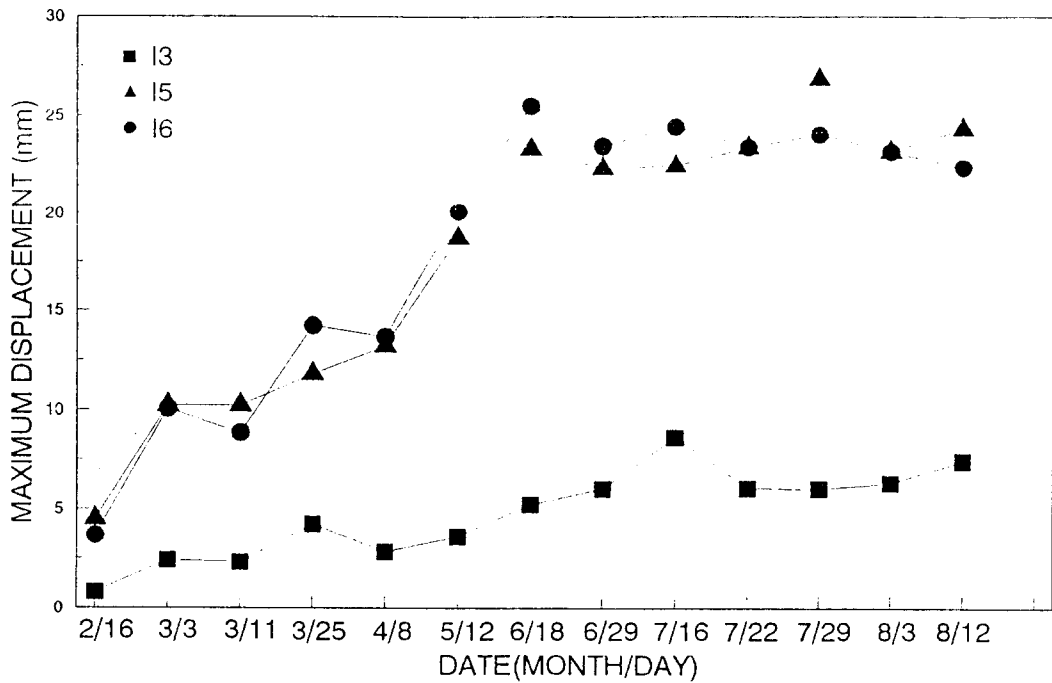


그림 3.6 경사계최대변위 증가분포도

지하수위변화를 최대시간강우강도와 시간에 따라 나타내면 그림 3.7과 같다. WA2의 경우 초기 지하수위는 GL-15.3mm이었으나 초기굴착단계에서는 지하수위는 감소하다가 옹벽이 완성된 이후인 5월 10일부터 3차례에 걸친 집중호우가 44.6mm, 69.7mm, 119.0mm를 기록하였을때 지하수위는 급격히 증가하며 최대 지하수위는 AA 단면은 GL-12.95mm를 기록하였으며 다시 지하수위는 서서히 줄어들었다. 7월 26일 3일간 강우량이 134.9mm기록하여 지하수위는 15.29mm에서 15.13mm로 약간 증가하였으나 지속적인 강우가 기록되지 않아 더 이상의 지하수위 상승은 없었다.

WB2의 경우도 마찬가지로 초기 지하수위 GL-15.2mm에서 굴착단계동안은 감소하다가 옹벽이 완성된 이후 급격히 증가하여 최대GL-13.24mm를 기록하였으며 이후 점차 감소하다가 7월 26일 집중호우에 의해 지하수위는 15.52에서 15.38mm 약간 증가하였다가 이내 지하수위는 일정한 상태로 낮아졌다.

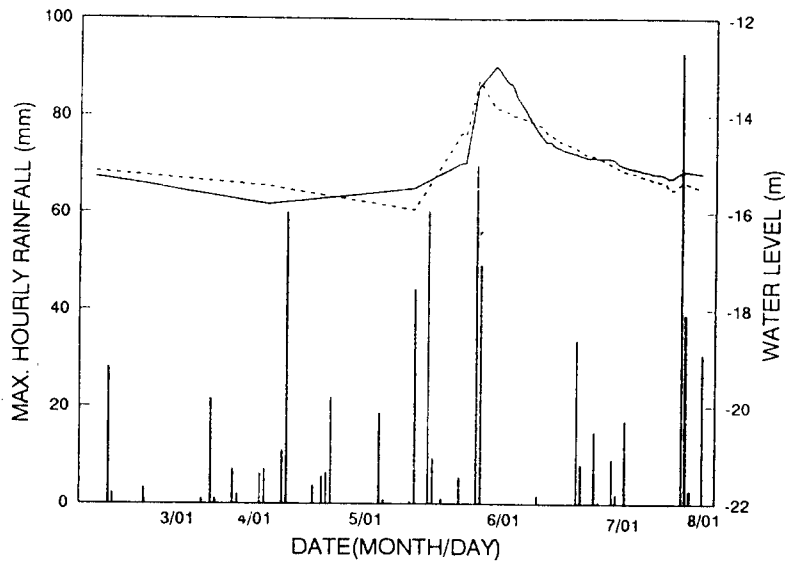


그림 3.7 최대시간강우강도 및 지하수위계 변화 (역지말뚝 배면 3m지점)

상기에서와 같이 최대시간강우강도가 50mm가 넘고 누적강우량에 150mm가 넘는 집중호우에도 불구하고 지하수위의 증가량이 없이 계속 감소한 이유는 장기간 가뭄이 지속되어 일시적인 집중강우로는 지표수가 지반에 깊이 유입되지 못하고 지표면에서만 지반이 포화되어 단지 흙의 단위중량만 증가시키는 결과를 초래한 것으로 판단된다.

3.5 스트레인게이지(Strain gauge)계측결과

스트레인게이지는 앞절에서 이미 설명한 경사계I3, I5가 설치된 역지말뚝과 이에 인접한 역지말뚝의 배면과 전면에 설치된 스트레인게이지의 계측자료를 이용하여 응력상태를 조사하여 보았다. 스트레인게이지가 설치된 각깊이의 역지말뚝전면에서 측정된 응력값을 나타내면 그림3.8 및 그림3.9와 같다. 그림3.8은 AA단면에 설치된 스트레인게이지 값이고 그림3.9는 BB단면에 설치된 스트레인게이지 값이다.

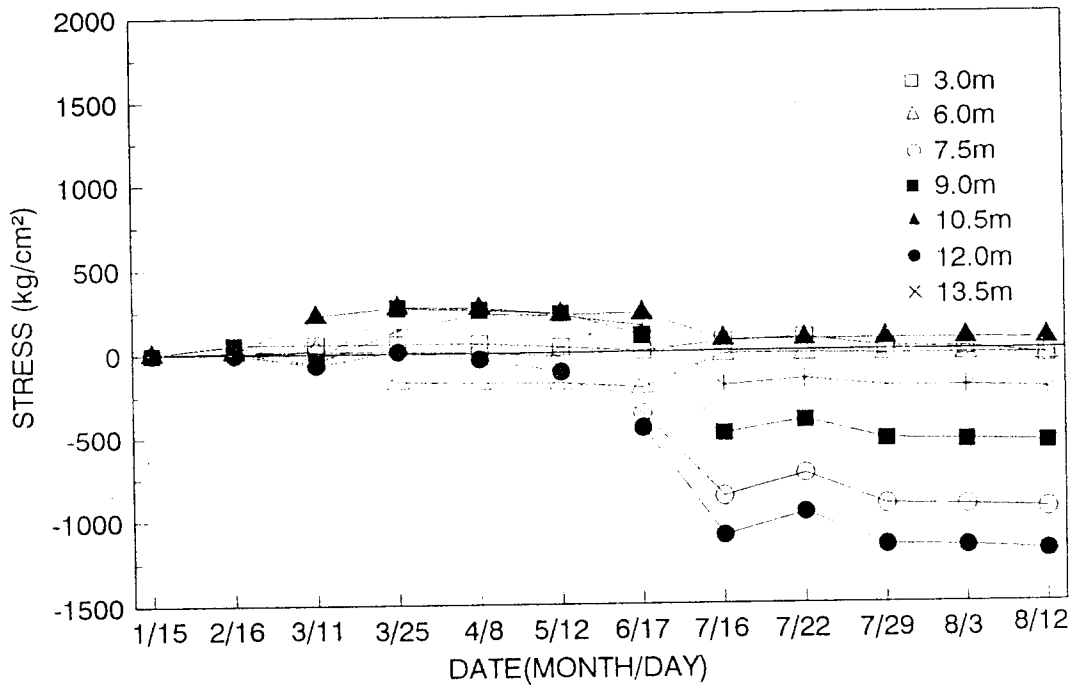


그림 3.8 AA단면에 설치된 스트레인게이지의 응력도

각 단면의 계측자료는 총 21회의 계측결과를 토대로 그림에서 보는 바와 같이 표 2의 시공일지에 따라 혹은 사면하단부의 굴착단계에 따라 계측값을 대표적으로 표시한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 두 단면 모두 초기에는 응력의 변화가 작다가 사면하단부의 굴착이 진행됨에 따라 응력의 증가가 크게 나타나고 있으며 굴착이 완료되고 옹벽이 완성되는 시기인 5/12~6/17에 응력은 급격히 변화하여 옹벽이 완성된 후 역지말뚝의 응력은 안정된 값을 보여주고 있다.

역지말뚝의 응력을 깊이별로 살펴보면 그림 3.10과 같다. 이 그림에서 보면 지층 경계선 부근에서 응력이 크게 변화하고 있음을 볼 수 있다. 즉 토사층과 풍화암층의 경계면으로 이 경계면 상부의 토사층이 측방변형이 발생되어 역지말뚝에 측방토압이 작용하게 되고 이 경계면 하부의 역지말뚝 부분은 지반으로 지반반력을 받고 있음을 보여주고 있다. 지반반력부에서의 말뚝응력은 상당히 크게(허용응력보다 크게)나타나고 있으며 굴착에 의거 일시적으로 상당히 큰 응력이 발생하고 있다.

이는 말뚝하부와 두부에서의 구속조건에 의해 응력분포가 변위모양과는 약간의 차이를 보이고 있지만 실제 계측된 응력분포는 해석시 고려될 수 있는 단면형상 즉, 지층 경계선을 지점으로 고려하고 각 지층의 지반계수를 고려한 그림 3.11과 비교하여 볼때 비슷한 경향을 보이고 있다. 단 말뚝두부는 Unrotated, 말뚝하부는 Hinge로 고려하였다.

또한 이 분포로부터 억지말뚝의 사면안정발생기구는 파괴면 상부 말뚝구분의 휨저항에 의한 것임을 알 수 있다. 따라서, 억지말뚝설계시 억지말뚝의 저항을 파괴면에서의 말뚝의 전단저항으로 취급하는 이론은 옳바르지 못하다고 할 수 있다.

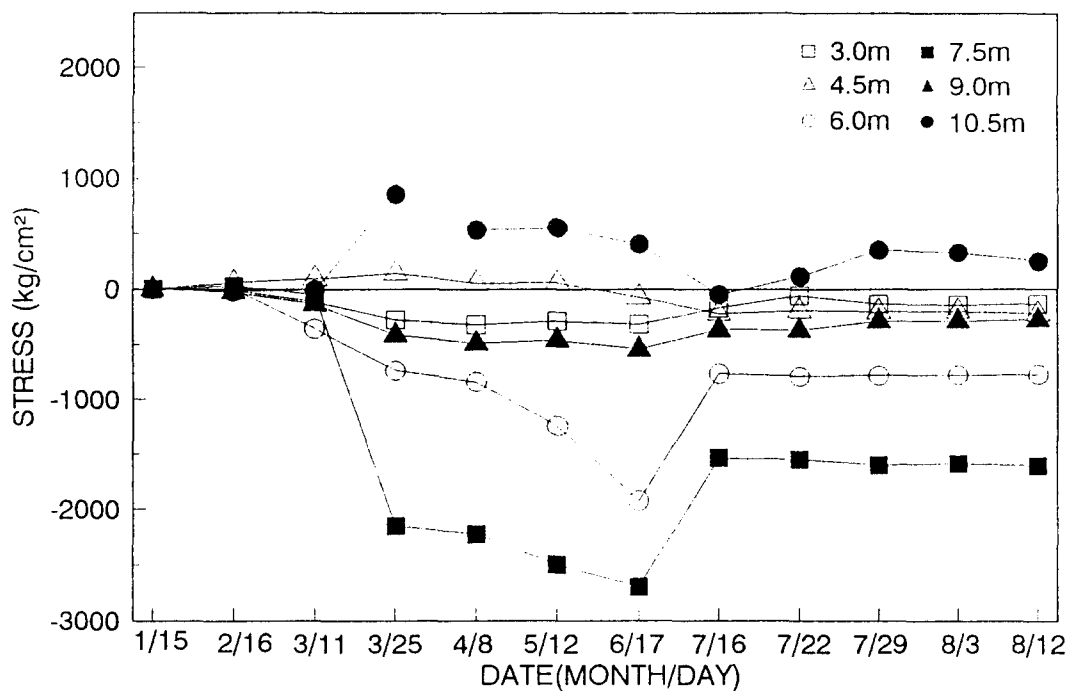


그림 3.9 BB단면에 설치된 스트레인게이지의 응력도

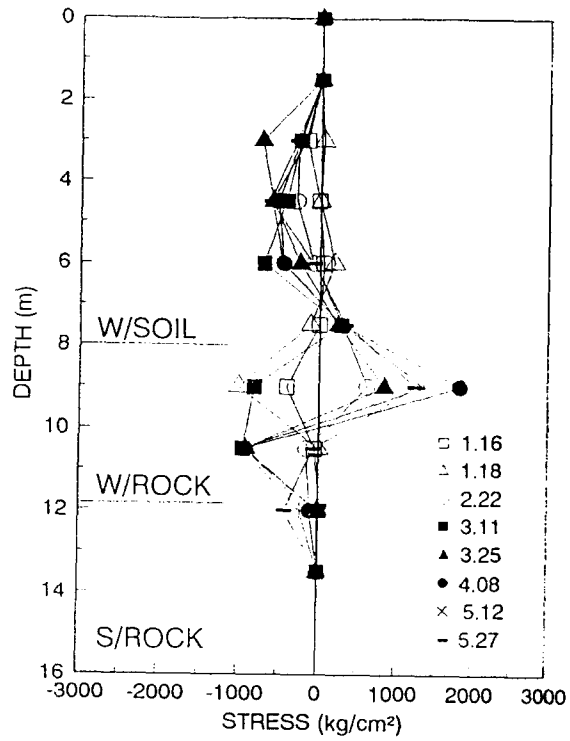
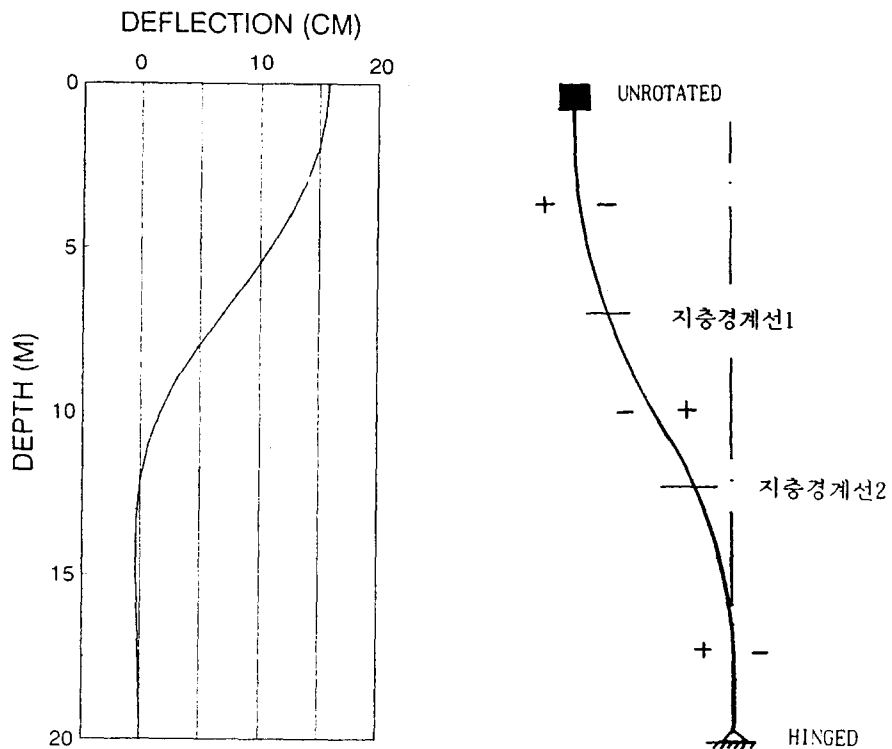


그림 3.10 깊이별 응력변화(BB단면)



(A) SPILE 프로그램해석 변위예상도 (B) 말뚝변형시 응력해석모형 단순도

그림 3.11 응력해석 단순모형도

5. 결론

아파트배면 절개사면 사례를 선정하여 억지말뚝을 시공하고 억지말뚝이 설치된 절개사면의 거동과 이를 억지하고 있는 말뚝의 거동을 계측자료를 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절개사면에 설치된 억지말뚝은 설계시 예상변위량에 비해 상당히 적게 나타나고 있다. 따라서, 억지말뚝의 효과는 상당히 좋은 것으로 평가할 수 있다.
2. 절개사면의 사면상부에 억지말뚝을 설치하고 사면하단부를 굴착할 경우 굴착이 완료된 후 혹은 굴착중 강우가 미치는 영향은 굴착이 변위에 미치는 영향보다 크다.
3. 최대강우강도와 누적강우량을 고려하여 볼때 지속적으로 강우가 내릴경우 지하수위 상승의 영향을 고려하여야 하겠으나 건조기가 지속적으로 계속된 경우 일시적인 집중호우는 지반의 상부층으로 부터 지반의 습윤단위중량만을 증가시켜 사면의 활동력을 증가시켜 억지말뚝에 측방토압을 증가시키고 있다.
4. 강우와 건조기가 반복될 경우 지반의 탄성회복량은 말뚝의 탄성회복량보다 크게 나타났다.
5. 억지말뚝의 사면안정발생기구는 억지말뚝의 전단저항이 아니라 휨저항에 의한 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 92특정기초연구과제“산사태 및 사면재해에 관한 연구”중 제4세부과제인 “우리나라 산사태방지를 위한 효과적 대책공법”의 연구결과이다. 또한 본 연구를 수행함에 있어 (주)금호건설의 지원도 있었음을 밝혀두는 바이다. 따라서, 한국과학재단과 (주)금호건설)에 감사를 드리며 본 논문을 작성하는데 도움을 주신 (주)금호건설의 신민호박사, 위동인, 강희복씨 그리고 중앙대학교 대학원의 하용구, 이재호군에게 감사를 드리는 바이다.

참고문헌

- 1) Fukumoto, Y. (1976) : " The behavior of piles for preventing land slides '. Jour., JSSMFE, Vol.16, No.2, pp.91-103
- 2) Fukumoto, Y. (1977) : Report on Landslides Investigation, Forestry Conservancy Section, Niigata Prefecture
- 3) Schuster, R. I. (1992) : " Recent advances in slope stabilization" 6th ISL, Christchurch
- 4) 山田邦光(1982) : 最新の斜面安定工法(設計, 施工), 理工圖書, 東京
- 5) 洪元杓(1983) : " 水平력을 받는 말뚝" 大韓土木學會誌, 第31卷, 第5號, pp. 32-36
- 6) 홍원표(1991) : "말뚝을 사용한 산사태 억지공법", 한국지반공학회, 제7권 4호, pp. 75-87
- 7) 홍원표(1994) : 수동말뚝, 중앙대학교
- 8) 백한기(1993) : " 부산지역의 산사태와 강우특성에 관한 연구 ", 중앙대학교 건설대학원 공학석사논문
- 9) 홍원표, 한중근, 조성한, 최문택(1993): " 산사태 억지말뚝의 사면안정효과" 1993年度 學術發表會概要集(I), 大韓土木學會, pp. 569-572.
- 10) 홍원표, 한중근(1993) : " 말뚝을 사용한 사면안정공법", 사면안정, 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회 제2집, pp. 119-152
- 11) 한국지반공학회(1994) : " 사면안정" 지반공학시리즈 5, pp. 319-360.
- 12) 홍원표, 한중근(1994) : "한국에서 실시되고 있는 산사태방지대책공법" Proceedings of the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows Pre-session, June 28-July 16, 1994, Seoul, Korea, KGC., pp.155-210.
- 13) Won-Pyo Hong, Jung-Geun han, Byung-Hee Kang, Hong-Taek Kim, In-Sik Choi(1994) : " A Case Study on the Reinforcement of Cut Slopes Using Stabilizing Piles and Anchored-Earth Walls "Proceedings of the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows , June 28-July 16, 1994, Seoul, Korea, KGC., pp. 155-210.