

제 3 장 사면안정공법

3.1 서론

산사태의 발생요인은 내적요인(잠재적소인)과 외적요인(직접적유인)의 두 가지로 크게 나눌 수 있으며 이들 두 요인이 함께 구비되었을때 산사태가 비로서 발생된다. 즉 내적으로 취약한 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토등의 외적유인이 가하여 질 경우 산사태가 발생되기 쉽다. 최근에 발생하는 대부분의 산사태는 구릉지와 산지개발에 따른 인위적인 유인에 의한 경우가 대부분이다. 따라서 산사태발생을 방지할 대책을 마련하려면 이들 발생요인을 잘 파악하여 이에 대한 효과적인 대책을 결정하여야 할 것이다.

최근에 우리나라에서도 산사태를 방지하고자 많은 대책공법이 채택 적용되고 있다. 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 블록으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 소규모의 공법이나 사면의 구배를 완만하게 하는 공법이 많이 사용되었다. 그러나 최근에 이르러서는 이들 공법으로 산사태를 억지시키기에는 한계가 있어 억지말뚝, 앵커, 옹벽등으로 사면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있다.

본장에서는 현재까지 우리나라에서 적용된 이들 산사태방지대책공법을 체계적으로 정리하여 보고자 한다. 산사태방지대책공법의 정리방법으로는 여러 가지 방법이 있을 수 있다. Schuster는 사면안정공법을 배수공, 절토공, 압성토공 및 지반보강공의 4가지로 크게 구분하였다²¹⁸⁾. 한편 山田는 산사태방지대책공을 억지공과 억제공의 두가지로 크게 구분하였다.²⁵⁹⁾ 그러나 이들 대책공법은 기능상으로 분류한다면 현재의 사면안전율이 확보되어 있는가에 따라 구분될 수 있을 것이다. 즉 현재 사면안전율이 확보되어 있는 경우는 안전율이 감소되지 않게 하여야 할 것이고 사면안전율이 확보되지 않은 경우는 안전율이 확보되도록 하여야 할 것이다.

따라서 산사태방지대책공법을 안전율유지법과 안전율증가법의 두가지로 크게 구분정리하고자 한다. 즉 현재의 사면안전성은 확보되어 있으나 우수의 침투, 세굴등에 의하여 사면안전율이 감소되는 것을 방지하기 위하여 적용되는 사면안전율유지법과 사면안전성이 확보되지 못 할 것이 미리 예정되는 사면에 적용할 수 있는 사면안전율증가법의 두가지로 크게 구분 정리하고자 한다.

3.2 산사태방지대책공법의 분류

3.2.1 공법의 분류

Schuster²¹⁸⁾는 사면안정공법을 배수공(Drainage), 절토공(Slope modification), 압성토공(Earth buttresses) 및 지반보강공(Earth retention systems)의 4가지로 구분한 바 있다. 한편 山田²⁵⁹⁾는 산사태방지대책공법을 억제공(抑制工)과 억지공(抑止工)의 두가지로 구분하였다. 그밖의 여러 분류방법중 합리적인 분류방법은 산사태가 발생하는 경우를 고찰하여 분류하는 방법일 것이다. 즉 산사태가 발생하는 경우는 원래 사면이 안정된 상태인 경우와 원래부터 사면이 불안정한 경우의 두가지로 구분된다. 즉 전자는 원사면이 안정된 상태였던 것이 우수의 침투나 세굴에 의하여 사면안전율이 원래보다 상당히 감소되어 산사태가 발생하는 경우이며 후자는 절토등을 실시할 사면의 안전성이 확보되지 못하거나 충분하지 못한 경우 강우등의 외적요인이 가하여져서 산사태가 발생하는 경우이다. 이들 산사태를 방지하기 위하여는 전자의 경우는 사면의 안전성을 계속 유지할 수 있도록 대책을 마련할 필요가 있으며 후자의 경우는 부족한 사면안전성을 보완하여 소요안전성을 확보할 수 있는 대책을 마련하여야 할 것이다.

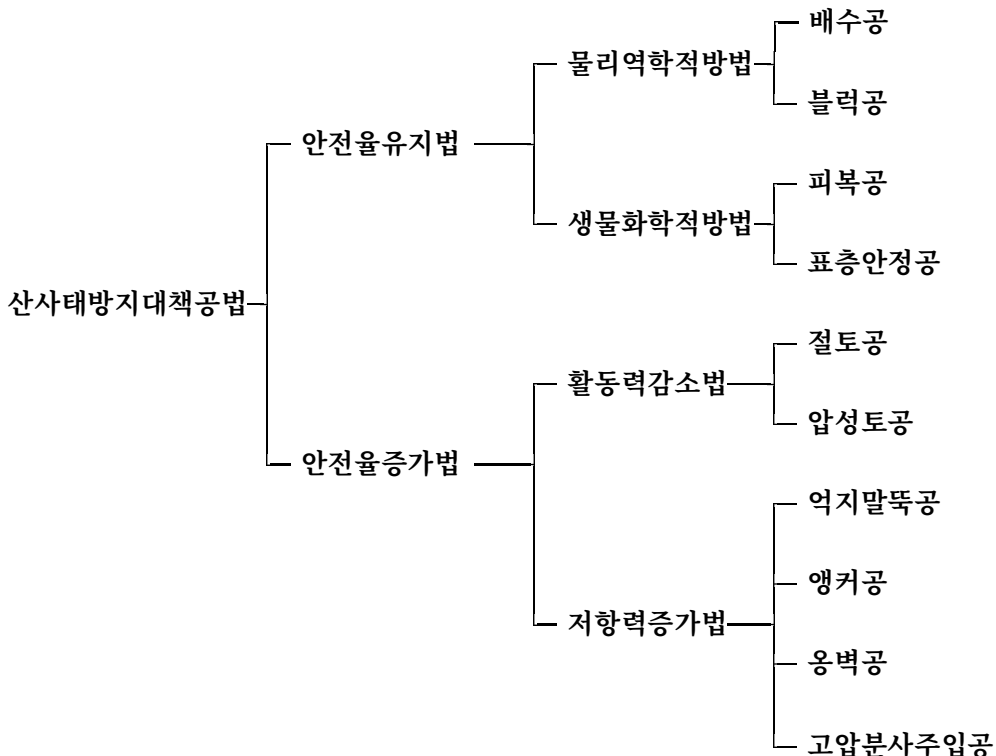


그림 3.1 산사태방지대책분류기준^{147,148)}

이상과 같은 고찰에 의거하여 산사태가 발생하지 않게 하기 위한 대책공법을 방지기능별로 구분하여 그림 3.1과 같이 안전율유지법과 안전율증가법의 두가지로 크게 구분할 수 있다.^{147,148)} 즉 강우, 융설등과 같은 물의 영향에 의하여 사면의 안전율이 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.

3.2.2 안전율유지법

평상시 안전한 사면이라도 여러가지 자연적 원인에 의하여 사면의 안전성이 감소되어 종국에는 산사태가 발생할 수 있다. 따라서, 산사태를 방지하려면 이러한 자연적 유인으로 부터 사면을 보호하여야 한다. 자연적 작용의 대표적 예로는 우수나 융설수의 침식작용과 비탈면의 풍화작용을 들 수 있다. 이러한 작용으로 부터 사면을 보호하기 위하여는 비탈면을 공기중에 노출시키지 말고 여러가지 방법으로 피복시켜 줄 필요가 있다. 또한 지중에 침투된 물은 즉각 배수될 수 있게 하여 사면의 활동력과 저항력에 물의 영향이 미치지 못하게 처리하여야 한다. 즉 사면지반이 포화되면 활동력이 증가하고 저항력이 감소하게 되어 산사태가 유발된다. 이 영향을 최소화 시킬 수 있는 대책공법을 안전율유지법이라 할 수 있다. 안전율유지법은 물리역학적방법과 생물화학적방법의 두가지로 크게 구분할 수 있다. 물리역학적방법으로는 배수공과 블럭공을 들 수 있으며 생물화학적방법으로는 피복공과 표층안정공을 들 수 있다.

(1) 배수공

자연사면의 안정성에 있어서 물의 영향은 매우 크다. 왜냐하면, 사면속의 물은 지반의 강도를 저하시켜 사면의 활동을 촉진시키기 때문이다. 따라서, 사면의 안정에 영향을 미치는 요소인 이 물의 영향을 되도록 받지 않도록 강구하는 것이 사면의 안정을 유지시킬 수 있는 방법중의 하나일 것이다.

배수공으로는 지하에 물이 침투하지 않도록 하는 방법과 사면에 침투한 물을 지하로부터 효율적으로 배제하는 두가지가 있다. 전자를 지표수배제공이라고 하고 후자를 지하수 배제공이라 한다.^{20,35,49)}

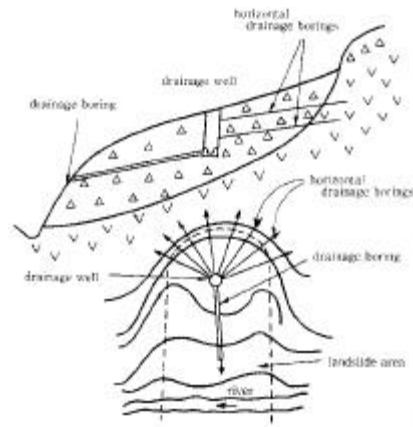
배수공은 사면안전율을 증대시키는 역할을 할 수 있으므로 두번째 방법인 안전율증가법으로 생각할 수도 있으나, 이는 원래 안전율이 높은 상태에 있는 사면이 물의 영향으로 안전율이 일시적으로 감소된 것을 회복하는 것에

지나지 않으므로 안전율감소방지법으로 분류함이 타당할 것이다. 또한 이 방법은 수로가 변하거나 배수파이프가 막히는 등 미래까지 확실한 효과를 발휘할 수 있는가 의문이다. 따라서, 배수공은 어디까지나 안전율증가법의 보조공으로 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 사면안정을 위하여 배수공법을 적극적으로 사용하는 예도 있다. New Zealand Clyde 댐의 담수로 인하여 주변 산의 지하수위가 상승하게 되어 산사태가 발생될 것이 예상된 지역에 지하배수터널을 뚫어 사면안정을 시도한 예는 배수공법을 적극적으로 사용한 대표적 사례라 할 수 있다.¹³⁰⁾

지표수배제공으로는 침투방지법, 수로공, 암거공 등을 들 수 있으며 지하수 배제공으로는 횡보링공, 집수정공 및 배수터널 등을 들 수 있다.



(a) 지표수배제공



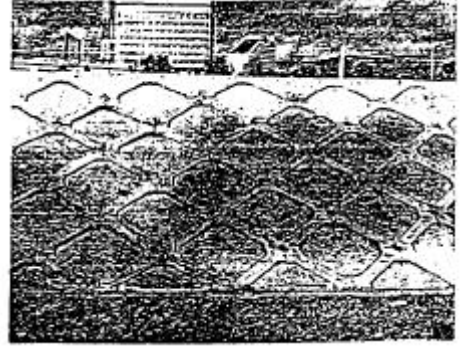
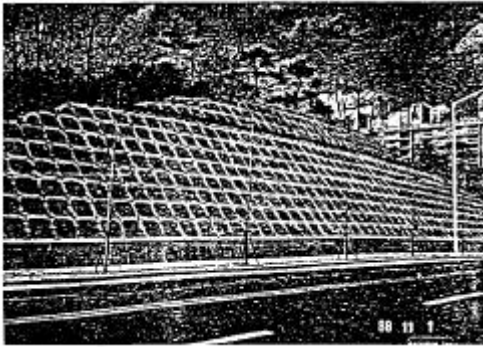
(b) 지하수배제공

그림 3.2 배수공

(2) 블럭공

사면의 지표면이 공기중에 노출된 상태 그대로 방치되면, 풍우나 지하수 등에 의하여 침식되어 종국에는 붕괴하게 된다. 따라서, 사면을 블럭이나 격자모양 블럭등으로 덮어서 사면안정을 도모하는 공법이 블럭공법 및 격자블럭공법이다.^{18,35,52)}

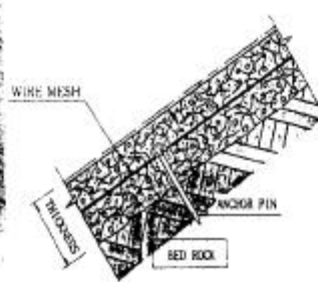
블럭공법에는 프리캐스트 콘크리트 블럭(precast concrete block)이나 블럭석 이외에 동일한 목적으로 설치되는 연속콘크리트보와 같은 것도 블럭공법에 포함된다.



(a) 블럭공 그림 3.3 블럭공 (b) 격자블럭공

(3) 피복공

경사면을 식물, 인조섬유, 돌, 슛크리트등으로 피복하므로써 우수에 의한 침식을 방지하여 경사면을 보호하려는 공법이다.^{4,21,22,53,55} 경사면 보호공으로 식생공과 돌부침공이 가장 보편적으로 사용되며 아직까지도 사용빈도가 높은 공법이다. 그 가장 큰 이유는 비교적 경제적인점과 경사면 보호공으로 효과가 있기 때문으로 생각된다. 식생공법으로는 Seed spray 나 Texsol등이 많이 사용되고 있다. 그밖에도 슛크리트로 경사면을 피복하는 슛크리트 공법도 효과적인 것으로 보고되고 있다.



(a) Seed Spray

(b) Texsol

(c) Shotcrete

그림 3.4 피복공

(4) 표층안정공

주입재를 주입하여 불안정한 토질의 안정도를 향상시키고 지하수나 침투수의 유입을 막아 사면지반이 불안정하게 되는 것을 막아주는 공법이다.^{37,38)} 이 공법중에는 주입공법만이 아니라 어느정도의 강도나 강성을 가지는 재료를 병용하여 강도를 보강시키는 공법도 있다.

주입공법에 사용되는 주입재에는 많은 종류가 있으나 시멘트계(현탁액 그라우트) 시멘트약액계(입자용액 그라우트), 약액계(용액 그라우트)로 크게 나눌 수 있다. 시멘트그라우트가 가장 사용하기 쉽고 신뢰성이 높으며 경제적이다. 주입은 통상 보링공을 통하여 지반내에 압입하나, 재료는 지반에 따라 주입가능한 것을 선택하지 않으면 안된다. 또한 주입한 것이 피압수나 지하수, 침투수등에 의하여 흘러가면 안된다.

또한 주입압이 지나쳐서 지반을 파괴하거나 전단강도를 저하시키지 않도록 주의하여야 한다. 따라서, 효과적인 주입을 실시하기 위하여는 주입재의 종류, 주입압, 주입의 크기와 양, 목적, 경제성등을 신중히 고려하여야 한다.

이 방법을 보다 적극적으로 사용할 경우 안전율증가법으로도 분류될 수 있다. 특히 최근 고압분사주입공법의 개발로 개량체의 강도가 어느 정도 확보되므로 인하여 안전율증가법으로도 활용이 가능하게 되었다. 그러나 종래의 저압약액주입공법의 경우는 주입액의 효과기대가 아직 불명확하여 보조적인 수법만으로 사용됨이 안전하다.

3.2.3 안전율증가법

현장조사 등에 의하여 사면안정성이 충분하지 못함이 판명된 사면에 대하여는 산사태발생을 방지하기 위하여 사면의 안전율을 증가시킬 수 있는 대책이 마련되어야 할 것이다. 이러한 대책으로는 두가지 종류의 방법이 이용될 수 있다. 하나는 사면의 활동력에 저항시키기 위한 저항력을 증가시켜주는 방법이고 다른 하나는 사면이 안전하도록 사면의 활동력을 감소시켜주는 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.

(1) 절토공

절토공은 산사태 토괴중 활동하려는 토사를 제거하여 활동하중을 경감시

킴으로서 사면안정을 도모하는 공법이다(그림3.5참조).^{18,57)} 활동토괴를 제거함으로서 확실한 안정공법으로 여겨지나 절토를 실시하였음에도 불구하고 수차례에 걸쳐 파괴가 발생하여 결국에는 억지말뚝이나 앵커로 지지시킨 예가 많으므로 (그림 3.6 참조) 지중의 잠재적인 내적 취약점을 명확히 조사하기 이전에는 안심을 할 수 없는 공법이다. 특히 대규모 산사태의 경우, 굴착토량이 막대하고, 경제성, 시공성의 면에서 어려운 점이 있다. 그러나, 중소규모의 산사태의 경우에는 용이하게 적용할 수 있을 것이다.

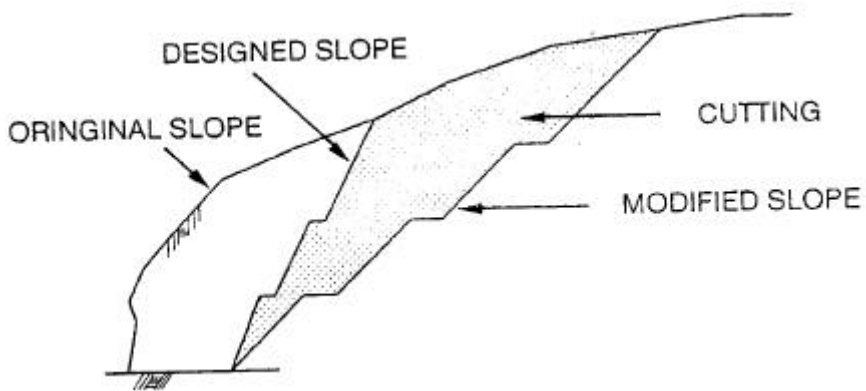


그림 3.5 절토공

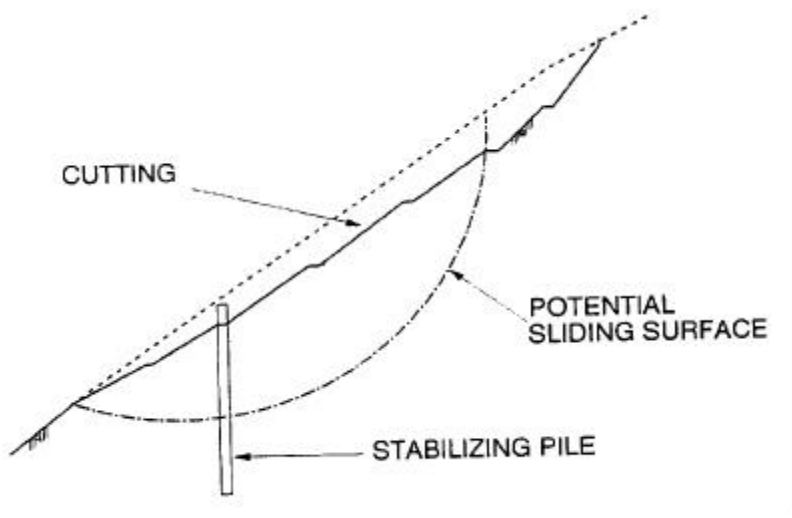


그림 3.6 절토공과 억지말뚝공

(2) 압성토공

이 공법은 산사태가 우려되는 자연사면의 하단부에 토사를 성토하여 활동력을 감소시켜 주는 공법이다. ^{7,18)}(그림 3.7 참조)

그러나, 이 공법을 사용하는데는 여러가지 제약을 받는다. 예를 들어 사면하단부가 하천에 연하여 있거나 민가 혹은 도로에 근접하여 있어 성토할 수 있는 용지가 없거나 성토용 토사를 조달하기가 곤란할 경우 등이다. 그러나 대규모 절토에 의하여 발생한 산사태의 경우에는 토사를 다시 성토할 수 있으나 이는 일시적일 뿐이다.

이 공법의 문제점은 압성토에 의하여 사면선단부의 투수성이 나빠져서 지하수위가 상승하는 경우가 많다. 이로 인하여 사면파괴에 대한 저항력을 감소시키는 경우도 발생하게 된다. 따라서, 집수정이나 수평보링에 의하여 지중수를 배제할 필요가 있다.

(3) 억지말뚝공법

이 공법은 사면의 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치함으로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 받아 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(Passive pile)의 대표적 예중에 하나로 활동토괴에 대하여 역학적으로 저항하는 공법이다. 이 공법은 사면안전율증가 효과가 커서 우리나라에서도 최근에는 사용하는 회수가 늘어나고 있는 경향이다. ^{7,20,24,30,51)}

말뚝의 거동은 말뚝과 주변지반의 상호작용에 의하여 결정된다. 말뚝의 사면안정 효과를 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 2.8과 같다. 억지말뚝으로 사용되는 말뚝은 강관말뚝, H 말뚝, PC 말뚝, PHC 말뚝등을 들 수 있다. 최근에는 Micropile을 사용하는 사례도 보고되고 있다.

(4) 앵커공법

앵커공법은 고강도 강재를 앵커재로 하여 보링공내에 삽입하여 그라우트 주입을 실시함으로써 앵커재를 지반에 정착시켜 앵커재 두부에 작용한 하중을 정착지반에 전달하여 안정시키는 공법이다. ^{5,6,20 22)} 이 공법은 구미 각국에서 오래전부터 많이 사용되어 오고 있다.(그림 3.9 참조)

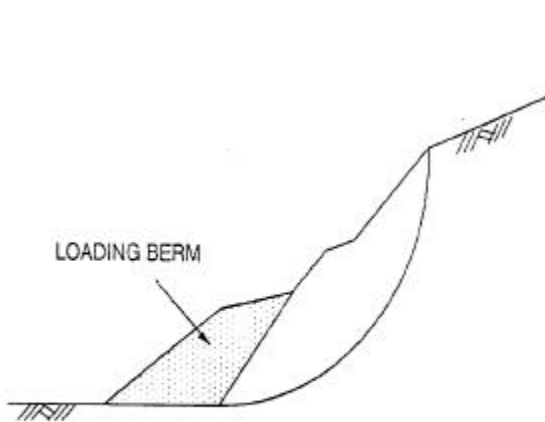


그림 3.7 압성토공

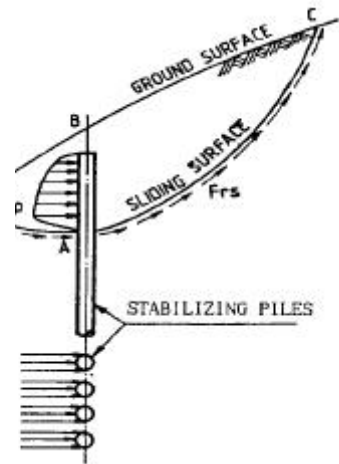


그림 3.8 억지말뚝공

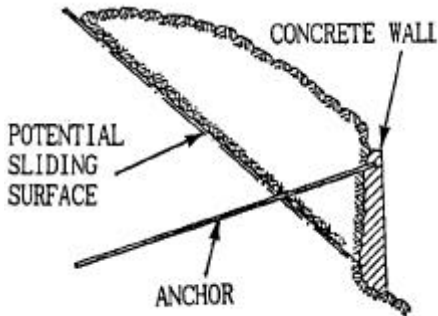


그림 3.9 앵커의 효과

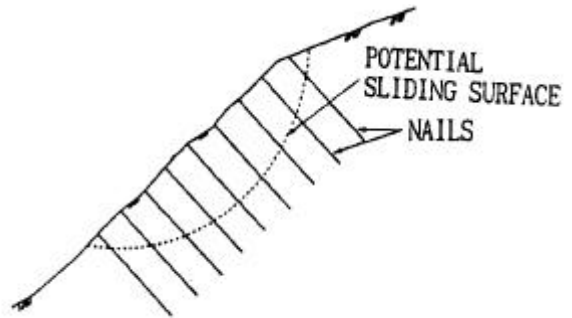


그림 3.10 Soil Nailing

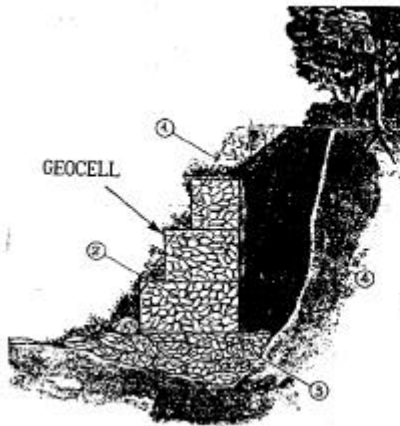
앵커공법은 고강도의 강재를 사용하여 프리스트레스를 가하는 점에 공법의 특징이 있다고 생각된다. 이 프리스트레스를 가하는 장점은 정착된 구조물에 하중이 작용하는 경우 구조물의 변위를 영으로 하거나 혹은 미소하게 할 수 있는 점이다. 암반사면의 경우 록볼트를 사용하여 사면의 안전성을 얻기도 한다.

또한 최근에는 철근이나 철봉을 그림 3.10에서 보는 바와 같이 가상파괴면

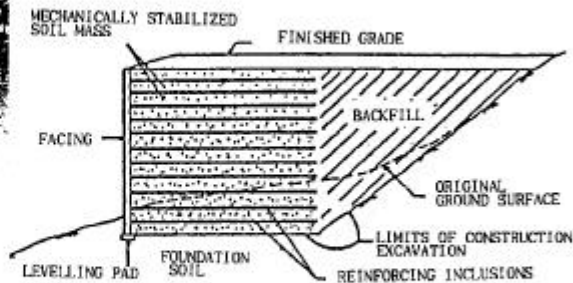
보다 깊이 사면내에 삽입하여 사면안정을 기하는 Soil nailing공법도 사용되고 있다.

(5) 옹벽공

옹벽은 주로 자연사면 하단부에 도로를 축조하거나 주택단지를 조성할 경우 사용한다.^{17,35,55,59)} 그러나, 이 옹벽 자체로는 배면의 자연사면의 안정을 기대할 수 없다. 따라서, 이 경우는 반드시 배면의 안정을 검토한 후 불안정으로 판단되면 억지말뚝공이나 앵커공 등으로 배면의 사면안정을 도모하여 준 후 옹벽을 설치하여야 한다. 옹벽공에 활용되는 옹벽으로는 통상적인 L형, T형등의 옹벽이 있으며⁵⁹⁾ 최근에는 쇄석을 철망에 넣어 옹벽모양으로 쌓는 지오셀공법(Geoweb, Gabion등)도 있다.⁵⁵⁾ 그외에도 사면의 절개지에 연직벽을 설치하는 보강토옹벽도 이 범주에 속한다 하겠다.⁸⁾



(a) 지오셀옹벽



(b) 보강토옹벽

그림 3.11 옹벽공

(6) 고압분사주입공

최근 효과적인 지반개량공법으로 개발된 고압분사주입공법(Jet grouting)을 사면에 적용하여 사면지반의 개량은 물론이고 기둥모양의 지반개량체가 사면활동에 저항할 수 있도록 하는 공법이다.^{17,35,37,38,59)} 이 공법으로 시공할 경우 사면안정효과원리를 활동면과 교차하는 부분에서의 지반전단강도를 증대시키고 활동면상부토괴를 개량체기둥이 지탱하므로써 억지말뚝과 유사한

추가적 저항력을 발휘하도록 한 공법이다. 다만 이 경우 개량체는 인장응력이 약하므로 개량체기둥에 큰 휨모멘트가 발생시에는 억지말뚝과 같은 충분한 효과를 얻을 수 없다. 고압분사방법은 단관 분사방식(CCP공법등), 2중관 분사방식(JSP공법등) 및 3중관 분사방식(SIG공법등)의 3가지가 있으나 현재 2중관 분사방식과 3중관 분사방식이 많이 사용되고 있다.^{37,38)}

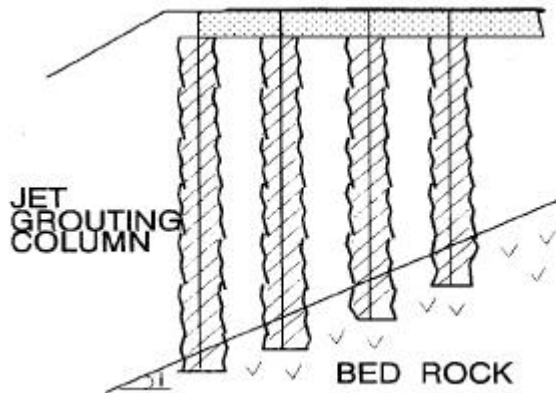


그림 3.12 고압분사주입공법

3.3 사면보강사례

우리나라에서는 산사태가 발생되었거나 예상되는 지역에서는 현장조건에 따라 앞장에서 분류설명한 공법중 적절한 공법을 선정하여 적용하고 있다. 이들 공법중 적절한 공법 한가지를 독립적으로 사용하기도 하고 때로는 두 개이상의 공법을 효과적으로 병용하기도 한다. 즉 산사태방지대책공은 예상 산사태의 규모, 사면의 토질특성(흙사면 혹은 암반사면), 절토·성토여부등의 현장여건과 사면특성에 따라 산사태방지대책공법을 적절히 선정 사용하는 것이 바람직하다.

본절에서는 한국에서 실시되고 있는 산사태방지대책공법을 설명하기 위하여 지금까지 실시된 사면보강사례를 취합 정리하고자 한다. 사례사면은 절개사면, 성토사면 및 암반사면의 세가지로 구분하여 각각의 사면에 대하여 적용된 대책공법별로 사례를 선정 설명하고자 한다. 보강대책공법을 두개이상 복합적으로 사용한 경우는 주공법과 보조공법이 있으므로 여기서는 주공법을 기준으로 분류하고자 한다. 또한 안전율감소방지법은 대체적으로 보조공법으로 많이 사용되는 관계로 여기서는 안전율증가법을 중심으로 설명하고자 한다.

3.3.1 절개사면사례

(1) 억지말뚝공사례

사면안정대책공법중 억지말뚝공법을 채택한 사례는 최근에 많이 보고되고 있다.^{18 20,24,28,30,50,51)} 이들 사례는 아파트등의 건축물건설용 토지조성을 위한 사면절개공사중 산사태가 발생되었거나^{19,20,24,25)} 도로확장으로 인하여 발생한 절개사면에서 산사태가 발생한 사례등이다.^{19,51)}

이들 사례중 먼저 아파트부지 절개사면 붕괴복구사례는 본 논문에서 주요 연구대상으로 한 현장의 예제가 이에 속하므로 5장 이후에서 중점 논의되므로 본 절에서는 생략하기로 하고 도로절개사면의 복구사례만을 예로 들어 설명하고자 한다.⁵¹⁾

가. 도로절개사면

충무시 외곽진입로 4차선도로 신설공사 현장의 도로절취사면으로 1993.8.10 일 전후의 계속된 강우로 인하여 절개사면의 일부가 붕괴되어 억지말뚝공법을 이용 복구하였다.

1) 산사태 발생상황

본 도로공사 공사구간의 사면 중 일부구간은 절개공사가 완료되어 있는 상태인바, 절개공사가 완료된 구간의 법면 하단옹벽은 완성되어 있으나 법면 보호공이나 조경은 되어 있지 않은 상태이다. 절개공사는 토층이나 암층에 관계없이 사면구배 1:1 로 설계되어 있으며 높이 매 5m 마다 소단 1m 를 두고 있다. 충무시에서는 1993.8.1 부터 사면이 붕괴된 8.10 일까지 10일간에 걸쳐 내린 누적강우량은 약 270mm이고 최대시간강우강도는 17mm에 달한다. 파괴는 주로 사면상단부에 퇴적되어 있는 붕적토층이 그 하부에 있는 잔류토층과의 경계면을 따라 발생되었는바, 붕괴지점은 후사면(원지반)구배가 비교적 급하고 붕적토층의 두께가 두터운 지점이다. 또한, 이 지점부근의 사면은 붕적토층과 잔류토층 사이에서 지하수의 유출이 현저하다.

사면파괴규모를 사면 붕괴지점 및 규모별로 살펴보면, 길이 10m, 높이 25m, 두께 4.2m, 및 구배 1:3.2로 파괴가 발생하였다. 신설도로를 위한 사면의 절개는 N27W 에서 N50W 의 방향과 약 1 : 1 의 구배로 시행되어 있다.

본 지역의 잔류토층 및 풍화암층은 모암의 조직과 구조 (불연속면, 암상 등) 를 보유하고 있으며, 잔류토층과 풍화암층에서 모암에 발달하였던 절리면을 따라 전도파괴(Toppling Failure)와 유사한 형태의 표면 박리가 관찰되었다. 또한 연암층이 발달한 지역중 일부구간에서 절리면을 따라 표면 박리현상이 진행되고 있다. 대표적인 사면의 그림에서 보는 바와 같이 사면을 절취하여 시공하였으나 상부 붕적토층에서 파괴가 발생하였다. 이에 대한 단면도는 그림 3.13과 같다.

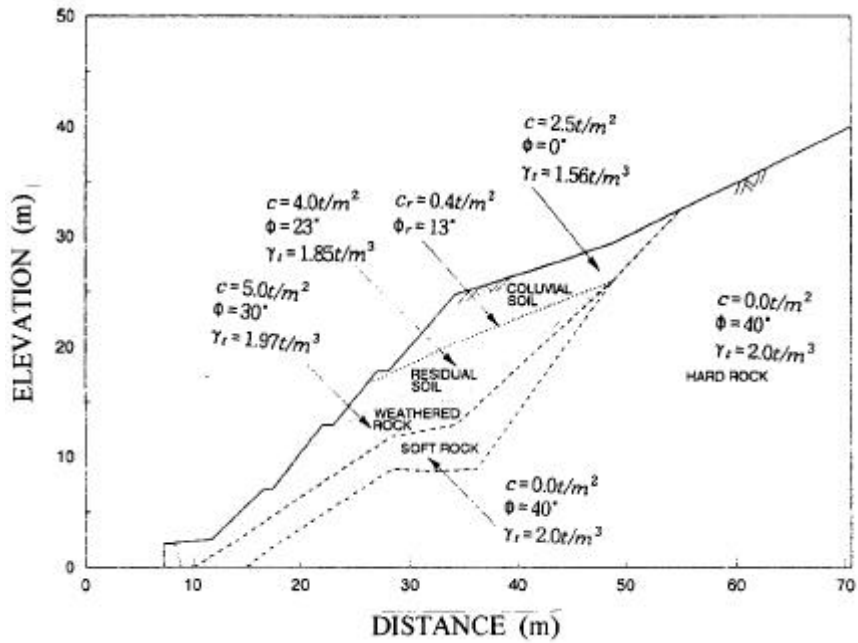


그림 3.13 설계단면

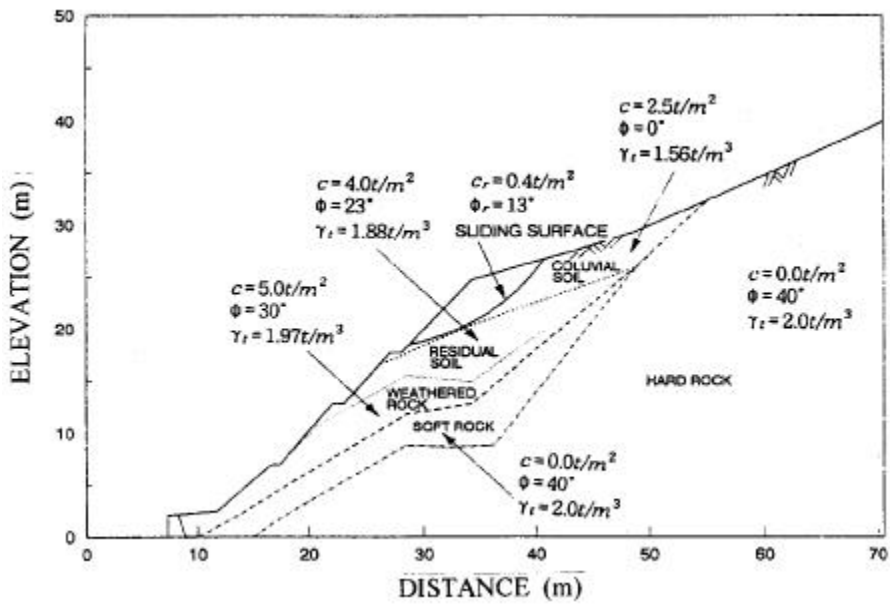


그림 3.14 붕괴단면

2) 기반특성

본 지역의 기반암 (Bedrock) 은 우리나라 지층 생성시기중 중생대 백악기 (Mesozoic Era Cretaceous Period) 의 유천층군에 해당하는 안산암질 응회암 (Andesitic Tuff) 및 안산암 (Andesite) 이며, 중생대 백악기 말의 산성 암맥류 (Acidic Dike) 인 규장암 암맥 (Felsite Dike) 이 드물게 관입되어 있다. 기반암으로는 안산암이 분포하고 있다.

본 지역의 기반암은 암산암으로 분출 (Lava flow) 에 의해 생성된 것으로, 색깔은 암회색 내지 암녹회색으로 비현정질 (Aphanitic) 의 석기 (Ground mass)에 미약하게 방향성을 가지는 반정 (Phenocrysts) 을 함유한다.

반상구조 (Porphyritic texture) 를 가지는 본 안산암의 석기를 구성하는 광물은 사장석, 녹니석, 녹염석 및 철산화물 등이고, 반정은 사장석 및 휘석 (Pyroxene) 이다. 특히, 사면붕괴가 발생한 지역 부근에 소규모의 협곡 (Gully)이 발달하고, 일부구간에서는 봉적토층이 비교적 두꺼운 두께로 봉적되어 있다.

산사태가 발생한 대표적인 단면의 지층구조는 그림 3.14와 같다. 붕괴지역의 경계부에 소규모의 협곡이 발달하며, 상부로 부터 두꺼운 두께의 봉적토층 (약 4 m), 잔류토층, 풍화암층 그리고 연암층의 순서로 지층이 발달한다.

3) 사면붕괴원인

본 지역의 사면붕괴사고는 강우가 계속되는 날씨속에서 발생한 관계로 지하수위를 고려하지 않을 수 없을 것이다. 8월 7일부터 사면붕괴가 발생한 8월 10일까지 매일 강우가 계속되었다. 이 결과 사면은 상당히 습윤상태에 있었으며 지하수위도 상승하여 상당히 높게 존재하고 있었을 것으로 예측된다.

즉, 사면붕괴사고 삼일전인 8월 7일부터 9일까지 3일간 100mm이상의 강우로 사면은 상당히 습윤상태에 있었을 것이며 지하수위도 높아 봉적토층과 잔적토층사이의 경계면에서 간극수압이 상당히 높게 발생되었고 유효전단강도도 상당히 감소된 상태에 있었음을 예측할 수 있다. 이러한 상태에 있는 사면지반에 8월 10일의 100mm에 달하는 추가강우는 지하수위를 거의 지표면에 도달하게하고 사면토괴의 중량을 증가시켜 사면붕괴를 유발시켰을것이 예측된다. 이 기간중 내린 강우는 최대 시간강우강도가 17 mm/hr이고 파괴발생시기 이전 48시간 누적강우량은 101mm로 나타났다. 이 결과는 우리나라의 산사태와 강우특성에 따라 나타내면 중규모의 산사태가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

또한 강우강도가 흙의 투수계수의 5배가 넘게되면 우수가 지중에 침투하

기 시작하여 침윤전선(Wetting front)이 지층에 형성되기 시작하고 이 상태가 계속되면 하부에서 부터 지하수위가 상승하면서 동시에 간극수압이 증가되는 것으로 밝혀졌다. 따라서 이러한 지하수위가 지표면에 도달하였을 때를 추정하여 사면안전율을 구하여 보도록 한다. 만수위일때의 간극수압비(r_u)는 과잉간극수압이 발생되지 않았다고 가정할 경우 0.53정도가 되어 사면안전율이 소요안전율보다 작아 사면파괴가 발생하는 것으로 판명되었다.

(4) 사면안정공

억지말뚝이 사면에 일정한 간격으로 일렬로 설치된 경우 줄말뚝은 산사태 억지효과를 가지고 있다. 따라서, 본 사면의 안정화를 위하여 억지말뚝을 일렬로 설치하고자 억지말뚝 설계프로그램인 SPILE(Ver.1.0)을 사용하였다.

말뚝안전율과 사면의 안전율이 모두 소요안전율 이상이 되도록 말뚝의 치수를 결정한다. 여기서 말뚝의 소요안전율은 1.0으로 하고 사면의 소요안전율은 1.3으로 하였다.

억지말뚝의 설치로는 그림 3.15와 같으며 말뚝설치위치는 그림에 표시된 위치에 설치한다. 억지말뚝은 H-300x300x10x15규격의 H말뚝을 중심간격 1.5m - 2.0m간격으로 연암층에 2.0m깊이 까지 혹은 절개사면하단부표고아래 2.0m깊이까지 소켓트형태가 되도록 설치한다.

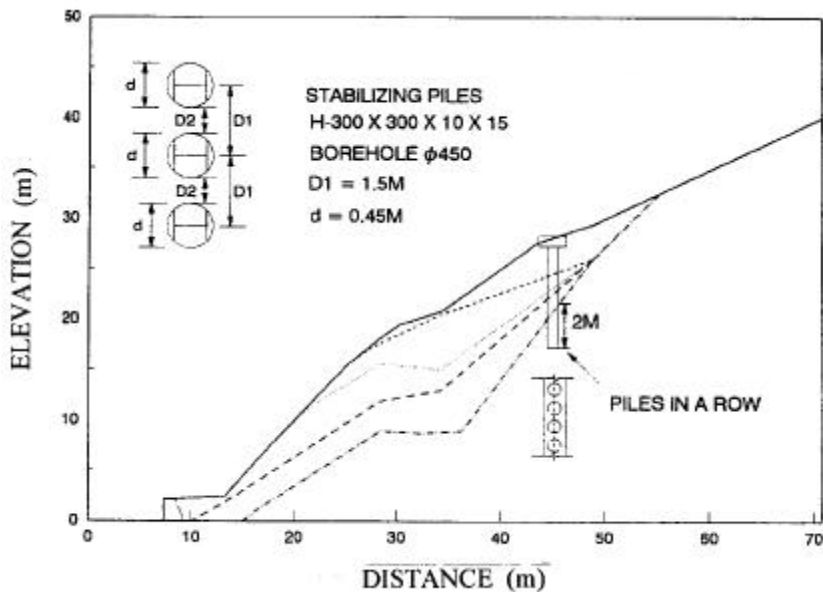


그림 3.15 보강사면

역지말뚝 두부는 띠장을 대고 철근콘크리트 지중보를 설치하여 회전구속효과를 가지도록 한다. 이때 이 지중보의 상면은 지표면과 일치하도록 한다.

H말뚝을 설치하기 위하여 항타공법을 실시할 경우 사면지반을 교란시키게 되므로 이를 지양하고 반드시 천공($\Phi = 450\text{mm}$)후 H말뚝을 삽입하도록 한다. H말뚝을 삽입한 후에는 시멘트 그라우팅이나 무근콘크리트로 천공내 구멍을 메꾸어 강재가 직접 지반과 접하지 않게하여 H말뚝의 부식을 방지시킨다.

(2) 앵커공 사례

앵커공법은 주로 암반사면절개시 산사태대책공법으로 많이 활용되고 있다.^{10,21,28,46,50)} 그러나 흙사면의 경우에도 일부 사용되었다. 이들 사례중 앵커공을 채택한 부산 D아파트 신축부지배면 절개사면의 복구사례를 예로 들어 설명한다.²¹⁾

1) 사면상황

D 아파트를 신축하기 위하여 산지경사면을 절개하여 그림 3.16과 같이 아파트 부지를 조성하였기 때문에 아파트의 후면 전체와 좌우면 일부가 급경사의 절개사면 형태를 이루게 되었다. 따라서 이 급경사면은 자연상태의 안전유지가 어렵고 상부토사의 흘러내림이나 암편의 붕락, 붕괴등으로 향후 사면붕괴로 발전될 재해의 위험성을 내포하고 있었다. 따라서 이를 방지하기 위하여 절개사면에 슛크리트, 록볼트, 앵커를 시공하고 최하단에 옹벽설치등으로 안전대책을 수립하였다.

2) 지반특성

부지 인근의 기반암은 불국사 화강암류로써 흑운모화강암과 화강반암이 분포되어 있다. 대부분의 지역이 점토 및 암편이 불규칙하게 혼합된 토사에 의해 피복되어 있으며 일부는 미풍화된 암괴가 노두형태로 지표에 노출되어 있다. 토사는 2-3m 두께로 점토 자갈 호박돌로 구성되어 있고 하부에는 풍화잔류토가 3-4m, 풍화암이 2-3m, 연암이 2-3m로 하부는 신선한 경암이 형성되어 있다. 풍화를 받은 부분은 절리 균열이 발달되어 있고 기계적인 풍화작용보다는 화학적인 풍화작용을 받아 화강암류의 장식성분이 점토화되어 점토성분이 많음이 특징이다. 암석의 구성성분은 중립-조립의 입상으로 석영, 장석, 흑운모 등이 주광물이고 부분적으로 반상구조를 보이기도 한다.

아파트의 부지는 산계 중턱에 위치하고 지맥의 형성이 미약하여 좌우 변화 보다는 상하변화가 높은 산지경사부에 부지를 조성하였다. 좌우의 변화가

적은 관계로 수계의 발달이 빈약하고 따라서 계곡천의 지배를 벗어나고 있다. 산림의 상태는 양호한 편으로 강우에 의한 침식도도 낮고 침투의 상태도 빈약하여 갈수기 지하수의 유출량도 미흡한 편이다.

수직적인 지하지질구조상태는 토사층, 풍화암층, 연암층, 경암층으로 구분되고 지하수의 침투는 각 층내로의 침투 보다는 층경계면을 따라 유입율이 높을 것으로 판단된다. 따라서 각 지층의 경계면이 판상의 연속면을 이루며 절리 균열등은 불연속면을 이루고 있다.

3) 사면안정공

본 사면의 사면안정공의 정면도와 구조도는 각각 그림 3.17 및 그림 3.18과 같다. 이 사면안정공을 각각 설명하면 다음과 같다. 절개사면의 굴곡면을 따라 와이야매쉬(규격 85×100×100)를 전면에 피복하고 그 위에 이형철근(φ19)을 200×200 형태로 덧씌운후 록볼트로 고정시키고(앵커 부분은 앵커로 고정) 숏크리트로 시공되었다.

록볼트는 경암부분에서 비교적 절리와 균열이 없는 신선한 부분과 암괴형태의 독립개소로 존재하는 부분 및 하단 옹벽 전구간에 걸쳐 설치시공되었다. 이 록볼트를 경암부분에서는 3m×3m 간격으로 종횡 등분포시공하였고 옹벽구간에서는 옹벽상단으로 부터 1.0m 위치에 횡방향으로 2m 간격으로 1열 설치 시공되었다. (그림 3.9참조)

절개사면 정상부에 노출된 암괴부분과 암굴착시 발생된 균열부분에는 간격구분없이 록볼트를 불규칙하게 배치하여 총 727개소에 설치시공되었다.

록볼트의 표준간격은 천공 40mm에 이형철근(φ25mm)을 길이 3-4m로 하였으며 지압판은 300×300×10로 하였고, 급결재료는 레진을 사용하였다.

앵커는 최상부 토사부분에서부터 연암부분까지의 구간으로 비교적 활동가능성이 높다고 판단되는 부위에 대하여 시공되었다.

록앵커의 배치는 종방향으로 2m 간격 횡방향으로 3m 간격으로 시공하였으나 위험성이 높은 부분은 추가공을 실시 총 270개공을 시공하였다.

록앵커의 천공경은 76mm, 길이는 12m (자유장 5.0m, 정착장 7.0m)로 하였으며 스트랜드는 12.7mm 강연선을 4가닥 사용하였으며 지압판은 300×300×20 이상으로 허용인장력이 본당 40T on이 되게 하였다.

배수구는 옹벽구간에서는 직경 50mm의 PVC파이프를 횡방향 간격 2m로 설치되었고 사면부위에 대해서는 직경 50-100mm 배수구를 50개소 설치하였다.

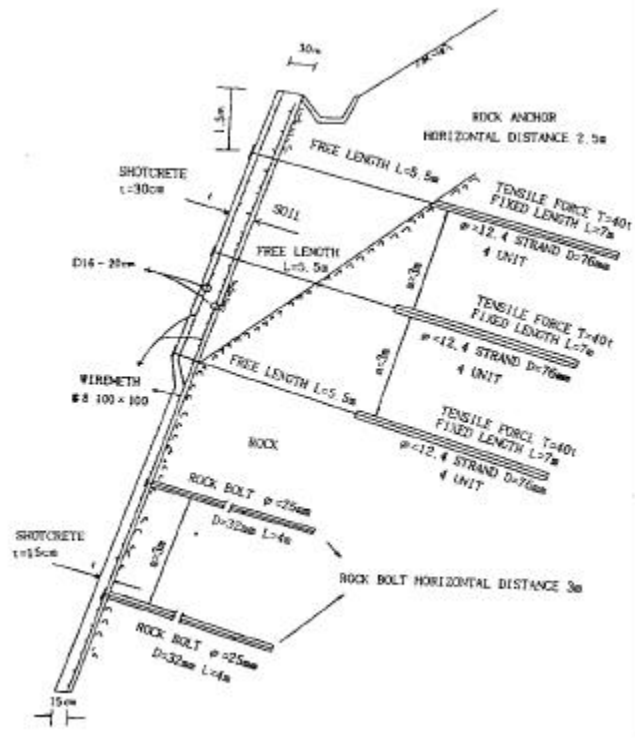


그림 3.18 사면안정공 구조도

(3) 옹벽공사례

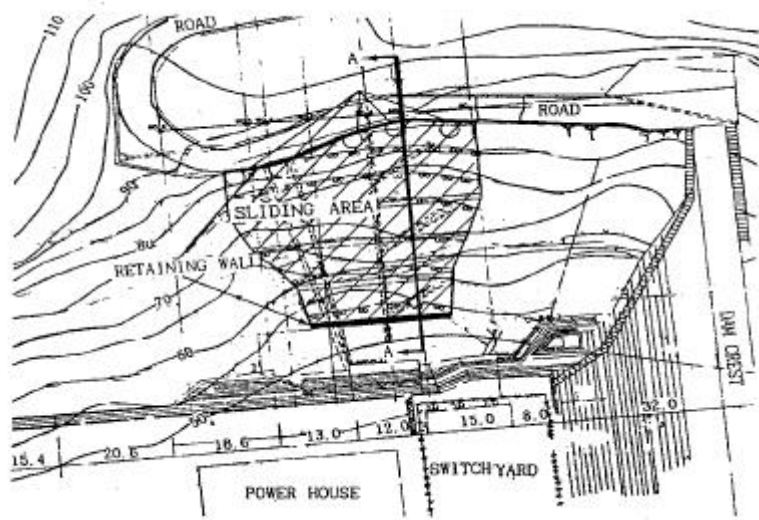
가.통상적 옹벽공

옹벽공을 이용한 사면안정사례는 많다.^{8,17,35,49,53)} 이들 사례중 대표적으로 한 다목적댐의 우안옹벽사례를 들어 설명하고자 한다. 댐우안 연결도로 하부에 옹벽을 설치하여 사면안정공을 실시하였다(그림 3.19(b)참조). 그러나, 1980년과 1981년의 하절기 호우로 인하여 사면 및 하부옹벽이 붕괴되는 사고가 발생하고 상부옹벽에 균열이 발생하였다.³⁵⁾

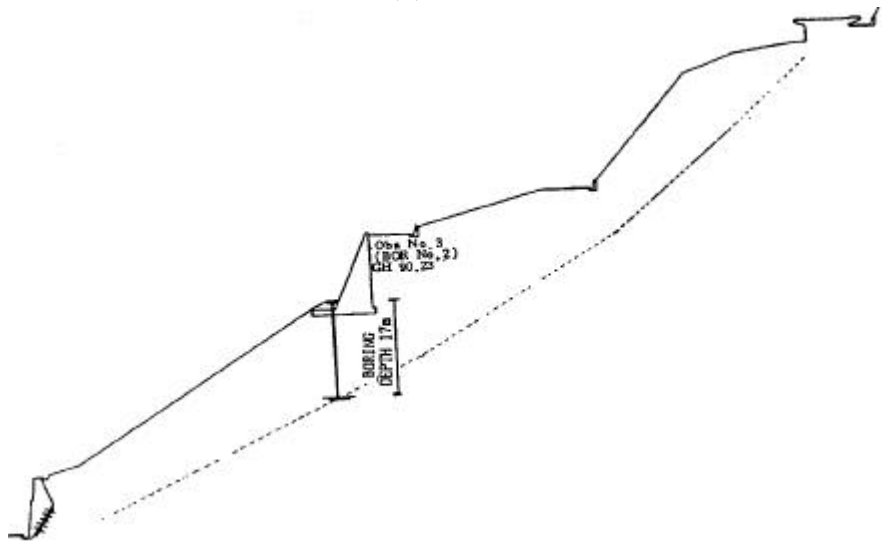
1) 산사태 발생상황

다목적댐의 하류우안 사면과 댐우안의 연결도로아래 콘크리트 옹벽이 높이 2.5 15m, 길이80m로서 댐시공시 가도로를 위해 축조되어 있다. 본 사면은 급경사가 50 60%인 협곡을 이루고 있고 옹벽 좌우단은 경암에 고착되어 있다. 그러나 상부옹벽은 협곡부 약 20m 구간에 걸쳐 15m의 버력층 위

에 중력식으로 시공되었다. 이 옹벽하부 사면은 폭 50m 사면길이 60m, 표고차 33m의 급사면을 이루고 있다. 하단부의 옹벽은 높이 11m 길이 40m로 설치되어 있고 그 옆에 발전소(지상3층,지하3층)가 위치하고 있다.(그림 3.19 참조)



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 3.19 사례지역 상황도

하부옹벽과 사면이 1980년, 1981년 두해에 걸쳐 하절기 집중호우로 인해서 붕괴가 발생하였다. 즉 1980년 7월22일 호우로 인해 이들 두 옹벽사이 경사면과 하부옹벽이 붕괴되었다. 이에 대한 복구대책으로 콘크리트 조경블럭의 표면피복공을 실시하였다. 그러나, 1981년 6월말 또다시 산사태가 발생하여 콘크리트 조경블럭이 모두 유실되고 상부옹벽의 2개소에 균열이 발생되었다.

2) 지반특성

본 지역은 협곡과 사면구배가 50 ~ 70%의 급경사를 이루고 있고 특히, 우안담 정상부는 케이블 가동단 및 가설도로 공사시 많은량의 토석이 계곡에 유입 붕적되어 사면을 이루고 있다. 버력층의 두께는 15 ~ 20m로 추정되고 현 지표면에서 경암층까지 두께는 3 ~ 17m로 추정된다.

본 지역은 암반이 노출되어 있고 풍화침식도가 낮아 자연수로의 발달이 미약하므로 집중호우시 협곡을 통해 대부분의 우수가 유출되는 지역이다.

3) 사면붕괴원인

1980년 7월22일의 집중호우는 200년 빈도의 강우로 최대시간강우강도가 84.7mm, 1일누적강우량이 209.1mm 내리므로서 지표수가 우안하류발전소 우측계곡으로 범람하여 파괴가 발생하였다. 1차붕괴는 지표수처리의 불비로 인하여 발생된 것이다. 즉 배수용 측구가 산사태로 메워지면서 과대한 지표수가 사면으로 유출되어 사면토사를 유실한 것이다. 유입되는 유수가 집수면적의 2배에 달해 급경사의 계곡을 토석류와 함께 미끄러지며 옹벽을 파괴시켰다.

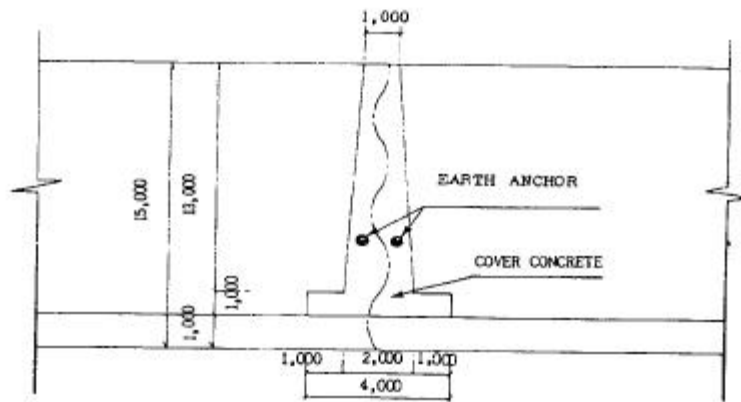
2차붕괴는 1차붕괴시 보강대책으로 시공된 콘크리트 조경블럭으로 인하여 지하수처리가 용이하지 않아 발생되었다. 1981년 7월 111.6mm의 집중호우와 사고당시 42.8mm의 호우로 인해 암반의 절리 및 발파시 사면 틈새로 우수가 유입되었다. 그러나 콘크리트 조경블럭으로 피복 시공한 사면부위가 지하로 유입된 지하수의 과포화상태를 유발하여 붕괴가 발생된 것으로 생각되었다.

4) 사면안정공

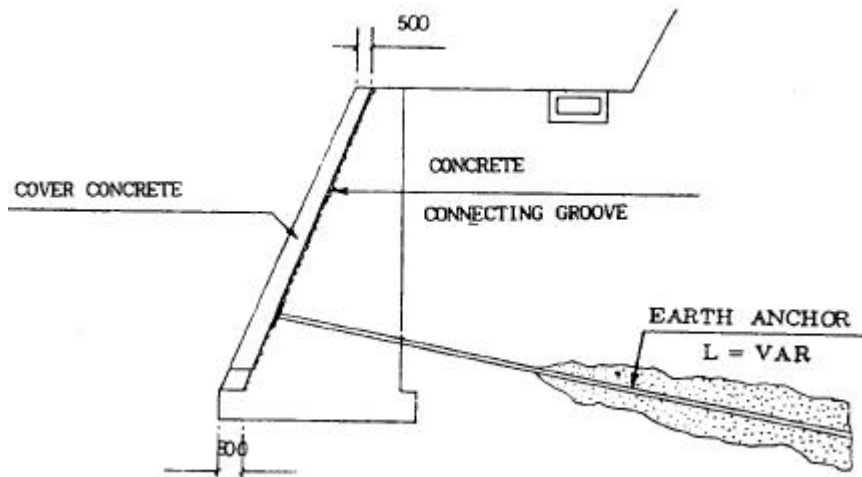
1차붕괴에 대한 복구대책으로 하부옹벽을 재시공하고 콘크리트 조경블럭으로 사면안정블럭공을 실시하였다. 즉 사면의 표면에 콘크리트 조경블럭을 두께 20cm, 면적 1,880m²에 걸쳐 실시하였으며 하부암반에는 앵커볼트를 보강한 후 하부옹벽을 높이 11m 길이 40m로 재시공하였다.

한편 2차붕괴에 대한 복구대책은 다음과 같은 2가지를 마련하였다.

- ① 상부옹벽아래 경사면에는 콘크리트 조경블럭을 제거하고 사면의 종방향과 경사방향으로 맨암거돌망태의 배수구와 나무말뚝($\Phi=150\text{mm}$, $L=3\text{m}$) 180본을 설치하고 잣나무 아카시아등으로 사면부 조경을 실시하였다. 이로써 지표수의 처리는 물론 지하수의 배수처리도 용이하게 하였다.
- ② 상부옹벽의 보강대책으로는 균열이 발생된 부위의 양쪽에 앵커를 실시하고 미관을 보호하기 위하여 균열부위 1 4m 폭구간을 콘크리트 피복을 실시하였다(그림3.20참조)



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 3.20 보강 단면도

옹벽공은 사면절개시등에 사면안정공으로 많이 사용되고 있으나 이상의 검토에서 알 수 있는 바와 같이 시공후 문제가 발생하는 경우가 많이 있으므로 충분한 검토와 안정성 확보가 요구된다.

나. 특수옹벽공

그림 3.21의 사면은 시공완료후 산사태가 발생된 후 지오셀(Geoweb, Gabion등)로 복구한 사례이다. 즉 고속도로 건설시 절개사면에 대하여 지오셀을 이용한 중력식옹벽으로 보강하였다.⁵³⁾ 본 사면파괴에 대한 단면도는 그림 3.21과 같으며 그림에 보는 바와 같이 옹벽위사면은 설계시 사면구배를 1:1.05가 되도록 계획되었으나 시공시 사면구배를 수정하여 1:1로 하였으며 사면에는 2개의 소단을 두었다.

사면파괴가 발생한 사면의 사면구배는 1:1 1:1.05였으며 그림에서 보는 바와 같다. 사면파괴가 발생한 사면에 대한 보강은 시공완료시점의 사면구배를 비교적 그대로 유지하도록 하여 시공하도록 하였으며 시공이 완료된 원사면보다 사면상부를 낮추도록 하여 상재하중의 부담을 감소시켰다.

사면에 대한 보강은 지오셀옹벽을 이용한 중력식 옹벽으로 채택하였다. 이 옹벽은 당초의 옹벽배면에서 수평거리 1.3m지점에 높이 12.8m로 각각 5단의 지오셀을 단위로 하여 5단에 걸쳐 옹벽의 법면 구배가 1:1.05가 되도록 보강하였다. 또한 옹벽표면의 표층부는 식생공으로 표면처리하였다. 한편, 지오셀과 배면에는 배수성이 좋은 골재를 이용하여 뒤채움을 행하였다. (그림 3.22 참조)

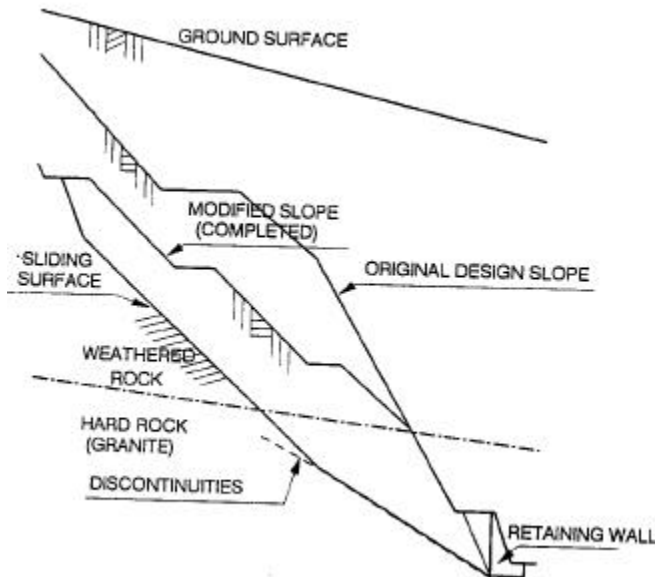


그림 3.21 붕괴전 사면단면도

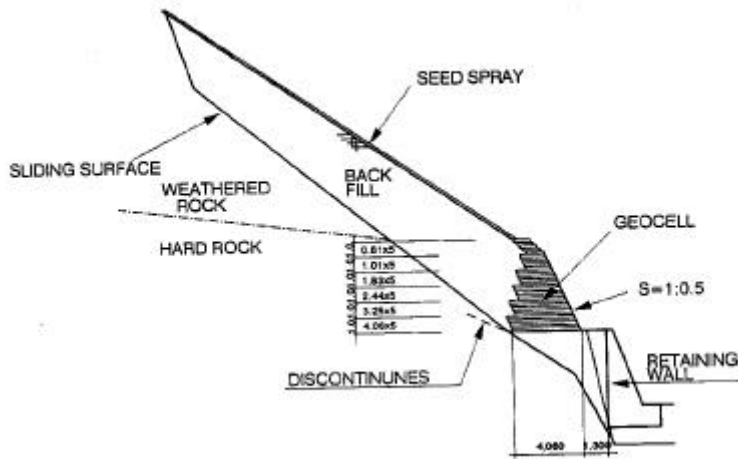


그림 3.22 보강사면단면도

(4) 피복공사례

피복공이 실시된 사례로는 그림 3.23와 같은 주택단지사면을 예로 들어 설명한다. 사면절개부에 대한 평면도는 주택단지를 중심으로 그림 3.23에서 보는 바와 같다.¹⁸⁾ 단지과 인접하고 있는 지반은 제3기층인 이암편과 이암의 풍화토로 구성되어 있고 하부층의 지질구성은 풍화암 및 연암 순으로 발달되어 있다. 본 사면은 급경사를 이루고 있으며 산사태는 그림중 사선으로 표시된 바와 같이 아파트 20 및 22동 후면에서 발생하였다. 그리고 사면활동은 1984년 3월 1차파괴가 발생하였다.

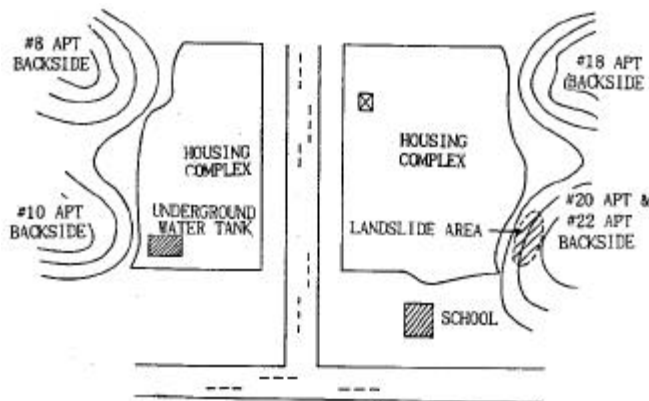


그림 3.23 현장 평면도

이에 대한 대책공으로 압성토를 실시하고 사면상단부에 토사측구를 설치하였으며 사면하단부에 배수로를 설치하였다.

이와 같이 대책을 마련한 본 사면은 이암층으로 구성되어 있어 지하수 유입시 점토화 되는 경향이 있으므로 집중호우시 불안전성을 내포하고 있다. 따라서 본 절개사면은 1987.7.30. 토석류현상에 의해 외곽담장이 파손되는 2차파괴가 발생하였다. 이에 대한 보강대책으로 1988년 4월 소단을 설치하고 슛크리트 피복공이 실시되었으며 사면의 구배를 1:1로 조정·시공하여 보강하였다.(그림 3.23참조)

(5) 절토공을 이용한 사례

그림 3.24는 수목보전지구 부근 아파트내 절개사면에 파괴가 발생하여 절토공을 이용 보강한 사례이다.¹⁸⁾

1) 산사태 발생상황 및 원인

원지형은 대체로 급경사를 이루고 있고 지형의 고저차는 20m로 수목이 울창하게 존재하고 있다 (그림 3.24참조). 수목보전지구의 사면은 높이 5m마다 소단을 설치하고 사면구배를 1:1로 시공하였다. 이와같이 시공된 사면이 1985년 5.4-5.6(3일간) 274mm의 집중호우로 인해 지하저수조의 계획고보다 낮은 해발83m 부근에서 관리소측으로 처음 인장균열이 발생하였고 아파트 13동 배면의 사면(D-D단면)이 완전히 붕괴되는 대규모 산사태가 7월 5일 발생되었다. 그밖에 이 아파트단지내 지반에 발생한 상황은 그림3.25과 같다.

(2) 지반특성

지층의 상부는 점토층과 붕적토층으로 구성되어 있고 하부로 갈수록 자갈층, 점토층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 또한, 부지 전역에는 연암질의 노두가 발견되고 있다.

(3) 사면안전공

사면붕괴의 대책공으로 수목보전지구의 높이를 해발89m에서 해발55-65m 이하로 변경하고 사면구배를 1:2로 완만하게 조정하여 인공수목림을 조성하고 인공공원을 조성함으로써 사면의 안정을 도모하였다. (그림 3.26참조)

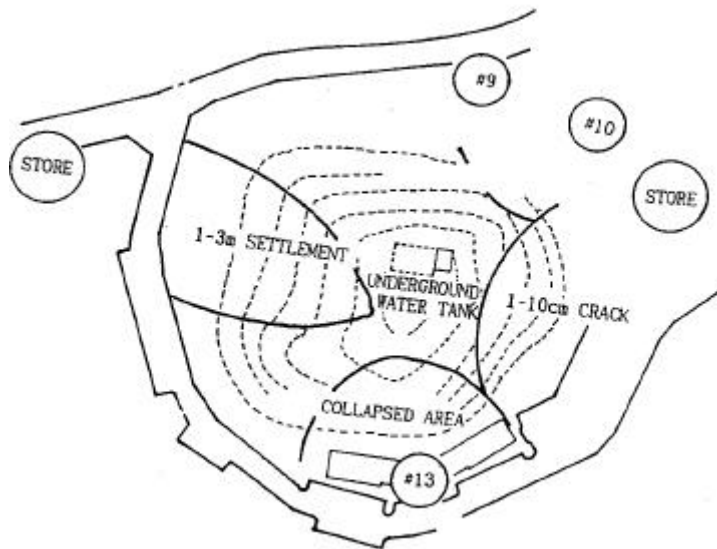
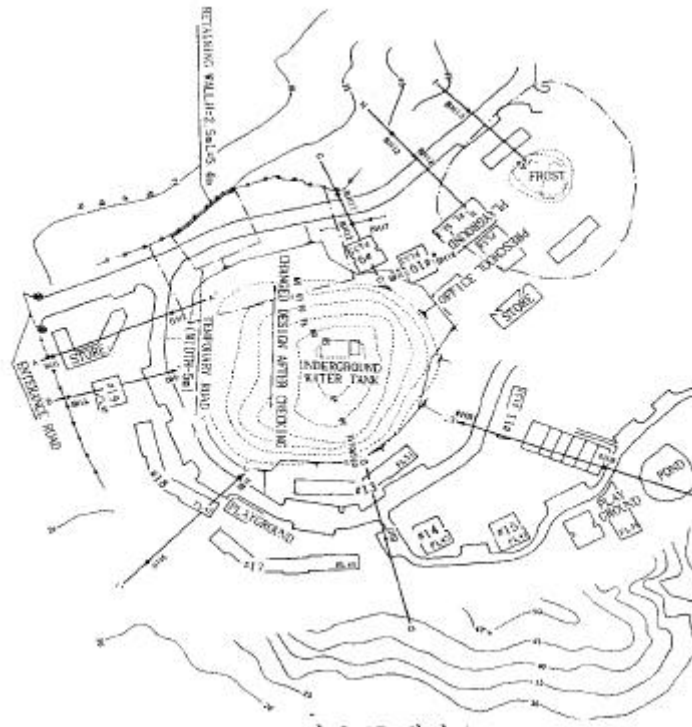


그림 3.25 사면파괴현황도

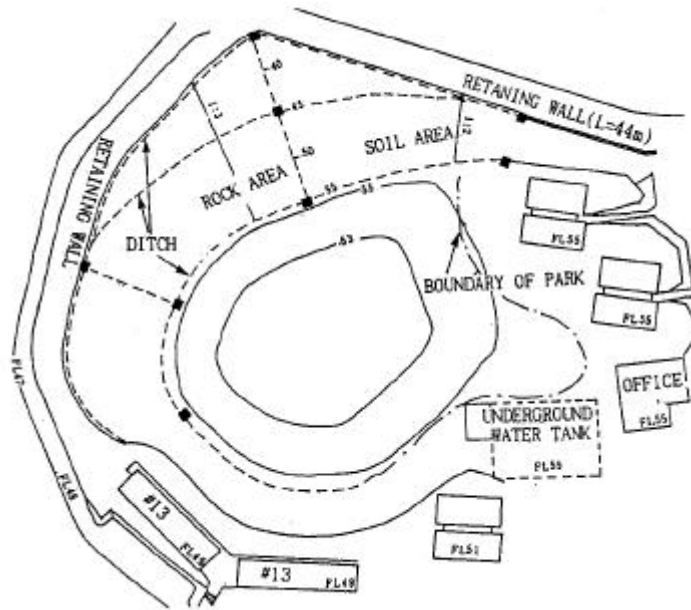


그림 3.26 복구대책 현황도

(6) 고압분사주입공사례

그림 3.27은 도로의 절개사면에서 발생한 사면파괴 현장을 고압분사주입 공법으로 보강한 사례이다.^{37,38)}

1) 산사태 발생상황

본 사례는 기존 비포장도로의 로폭협소와 로면불량을 해결하기 위해 도로 확폭 및 아스팔트포장을 실시한 도로현장이다. 절토된 사면구배는 토사의 경우 1:1, 리핑암 1:0.3, 성토법면 구배는 1:1.5로 되어있고 유수 유입을 방지하기 위해 산지배면에 측구를 설치하였다. 그러나 여름철 집중호우로 인하여 급경사부에 설치된 본 도로가 구간별로 전폭 혹은 반폭구간으로 재차 사면파괴를 일으켰다. 또한 본 지역에 설치된 도로횡단암거와 도로절토측의 무근콘크리트옹벽과 측구가 균열되었으며 부분전도의 가능성이 잠재하고 있었다. (그림 3.27참조)

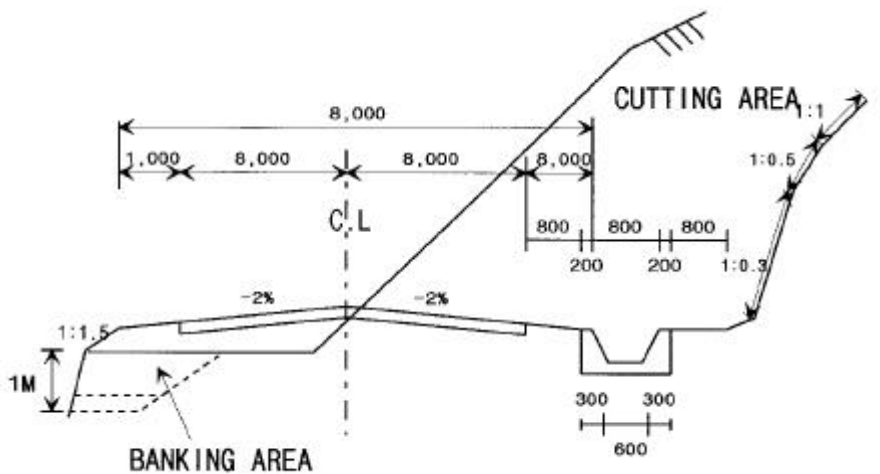


그림 3.27 도로 횡단면도

2) 지반특성

토층은 저부로부터 기반암인 경질의 석탄암, 풍화암, 점토질 자갈로 구성되어 있는 붕적토, 도로를 처음 만들기 위해 산측의 풍화암과 붕적토를 절취하여 성토된 성토층으로 구성되어 있다. 특히 상부에 존재하고 있는 붕적토층은 집중호우시 급속히 지하수위가 상승하는 경향을 나타내고 있어 집중호우가 내릴 경우 산사태가 예상된 지역이다. 또한 자갈과 전석은 박편이나 길쭉한 모양을 하고 있어 석탄암의 표면이 비교적 미끄러운특성으로 역학적으로 불안한 토층이라 하겠다.

3) 사면붕괴원인

본 구간의 붕적토층은 지반조사시 보링용수가 대부분 누수되어 회수되지 않는 구간이 있을 정도로 안정되지 못하고 느슨한 상태이며, 그 구성물질은 석회암이 풍화된 토사와 자갈, 전석이 불규칙하게 혼합되어 있어 포화가 비교적 잘되는 편이라 할 수 있고, 도로 윗쪽의 광산에서 내려오는 물이 끊임 없이 도로쪽으로 흐르고 있다. 따라서 본 사면은 역학적으로 매우 불안정하며 토층 자체가 느슨하고 포화가 잘 되는 토질이기 때문에 집중호우시 토층 전체가 빠른 속도로 포화된다. 포화도에 비례하여 흙의 단위중량이 커지고 흙의 전단강도의 저하가 급속하게 진행됨에 따라 그 중량을 이기지 못하고 붕괴되었다고 할 수 있다. 또한 집중호우로 인하여 토층내부에 급투수류가 생겨 이에 의한 토립자의 유실도 붕괴원인에 가세한 것으로 판단된다.

4) 사면안정공

본 산사태발생지역의 적절한 방지대책으로 도로를 전면차단하지 않고 시행할 수 있는 방법인 주입경화재를 이용한 방법을 채택하였다. 즉 소구경을 천공하여 주입재인 Cement Paste를 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 초고압으로 지중에 수평으로 분사시켜 지반을 개량하는 動ENERGY를 이용하는 고압분사주입방법을 사용하였다.

사면보강구간 단면도는 그림 3.28과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 활동 사면의 활동면은 암반선과 붕적토 혹은 풍화암의 경계면을 따라 발생하는 것으로 하였다. 보강구간의 경우 종방향 C.T.C 2.0m 횡방향 C.T.C 1.8m로 하여 ZIG-ZAG로 그림 3.28과 같이 설치 시공하였으며 기초암층에 확실한 정착을 위해 암반선 이하 1m까지를 시공심도로 하였다.

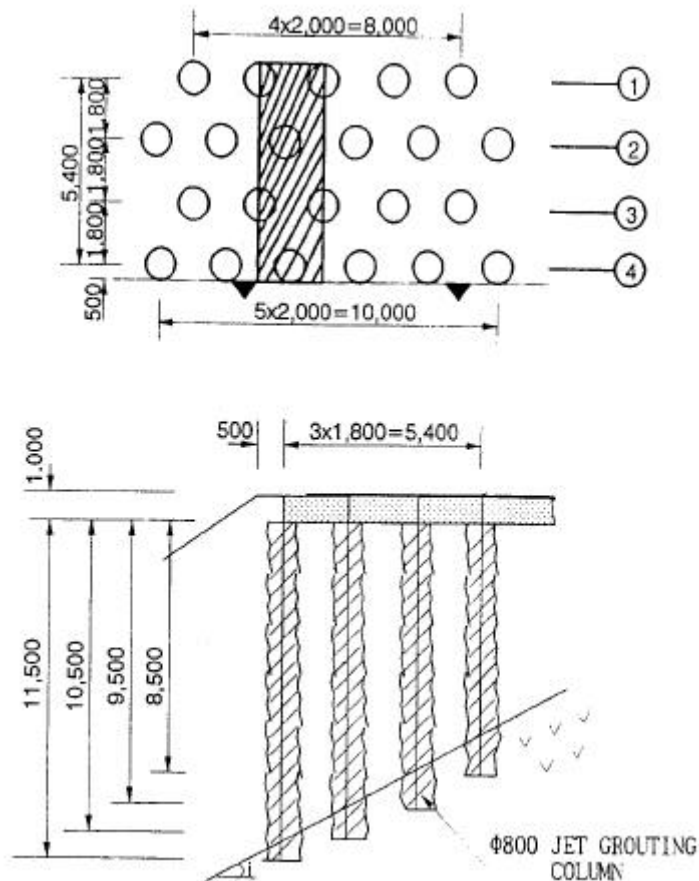


그림 3.28 보강단면도

3.3.2 성토사면사례

(1) 블럭공사례

그림 3.29는 마산시 주택단지조성 성토사면이 유실된데 대하여 블럭을 이용하여 복구한 사례이다.⁴¹⁾ 성토사면은 1985.5.4 - 5.7(4일간)까지 내린 집중호우(누적강우량 : 194mm)로 인해 법면에 설치된 블럭이 파손되고 사면의 표토부의 일부가 사면하단을 따라 유실되었다. (그림 3.29참조)

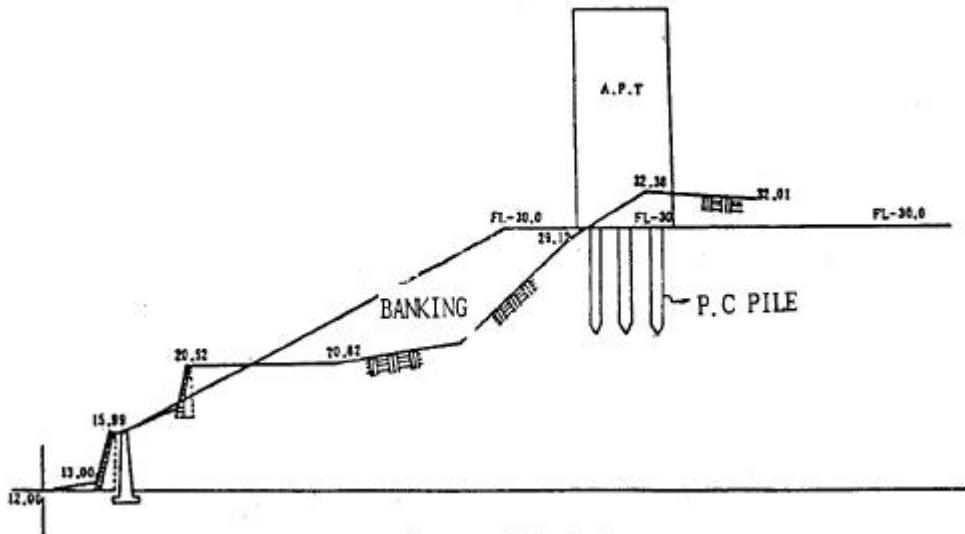


그림 3.29 현황 단면도

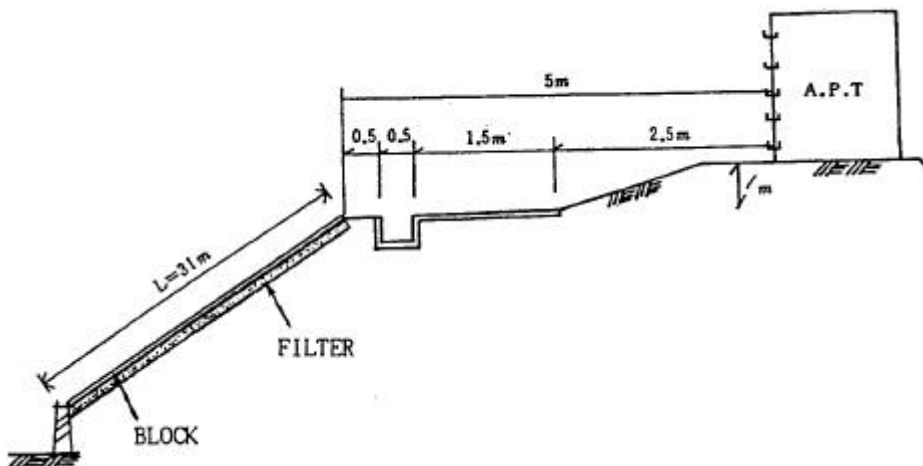


그림 3.30 복구후 단면도

대책공으로는 블록의 주변 지반의 유실을 방지하기 위해 토사를 되메움하고 다짐을 실시하였으며 우수가 직접지표에 침투하지 못하도록 시공하였고 지하수의 배수를 위해 필터를 블록과 함께 설치하였다. (그림 3.30참조)

(2) 고압분사주입공사례

그림 3.31은 주택단지 건축기초공사중 여러곳의 사면에 인장균열이 발생하여 고압분사주입공법을 이용 보강한 사례이다.⁴¹⁾

1) 산사태발생상황

1980.9.9 - 9.12사이의 태풍에 의한 집중호우(시간강우강도 102mm)와 장기적인 장마로 인하여 사면의 붕괴가 여러곳에서 발생하였으며 사면활동이 발생한 지역의 평면도는 그림 3.31과 같다. 붕괴된 사면은 그림 3.32 단면에서 보는 바와 같이 잔적토층으로 구성된 원지반 위에 최대 15m, 최소 4m, 평균 12m로 성토한 인공사면이다.

사면의 파괴형태는 그림 3.31에서 보는 바와 같이 성토사면의 여러개소에 침식 및 인장균열이 발생하였다. 또한 역T형옹벽과 사면상단에 설치된 각종 구조물, 아파트앞 도로, 암거를 포함한 배수구조물, 석축등의 파괴가 발생하였다.

성토재료는 느슨한 상태의 사질점토 및 점성토로 구성되어 있으며 부분적으로 자갈과 전석층을 함유하고 있다.

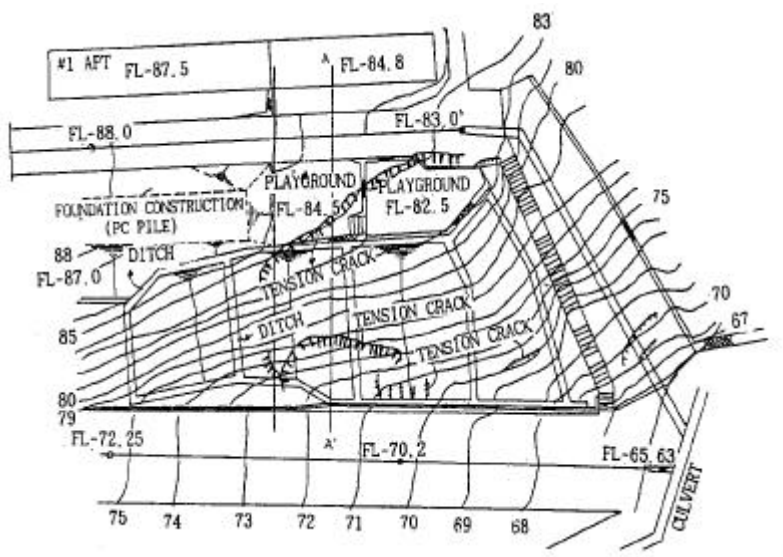


그림 3.31 사면파괴현황 단면도

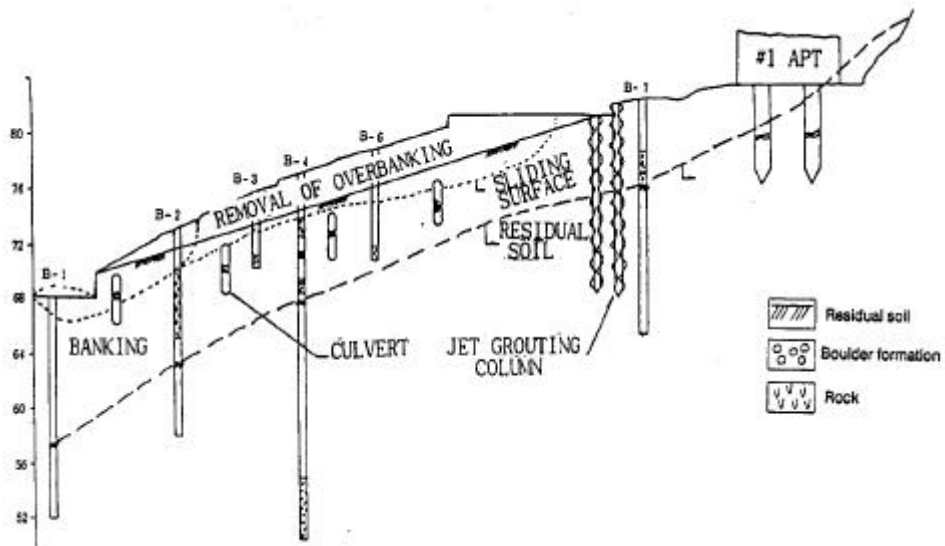


그림 3.32 보강 단면도

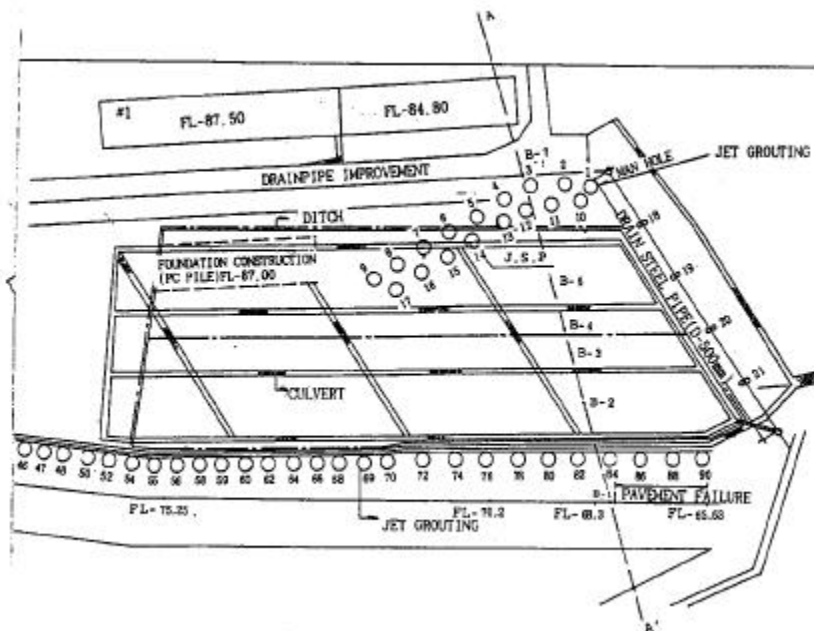


그림 3.33 보강 평면도

2) 사면안정공

본 사면파괴에 대한 복구대책으로 U형측구 및 맹암거를 격자형태로 설계, 시공하였으며 과잉성토층 일부를 제거하고 맹암거를 설치하였으며 다짐에 의해 강도를 증진시켰다.(그림 3.32참조) 또한 중요구조물인 아파트의 안전을 위해 고압분사주입공법을 도입하여 그림 3.33에서 보는 바와 같이 사면상단부에 2열로 총66본을 시공하였으며 옹벽 하단부의 보강을 위해 1열로 90본을 설치하였다. 한편 옹벽구조물의 안정을 위해 옹벽하단부에도 고압분사주입공법을 이용하여 옹벽에서 발생하는 변위와 기초지반침하에 대해 저항하도록 하였다.

3.3.3 암반사면사례

암반사면은 암반내에 발달된 불연속면을 따라서 거동하게 되므로 암반사면의 안정성은 암반의 물성 및 불연속면의 모양, 위치의 특성등에 의해 주로 지배된다. 암반사면의 보강대책은 절토공, 억지말뚝공, Nailing공, 앵커공에 의해 주로 보강되어지지만 독립적으로 사용되기보다는 두개 이상의 대책공이 복합적으로 사용된다. 따라서 주체를 이루는 공법에 따라 사례를 열거한다.^{6,7,11,46,48,50,54,59)}

(1) 지오셀옹벽공

그림 3.34는 아파트건축시 생성된 절개사면을 지오셀옹벽으로 보강한 사례이다. 절개사면의 횡단면도 및 암사면에 대한 보강단면도는 그림 3.34와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 사면의 높이는 8.1m - 12.1m에 이르고 있으며 지오셀옹벽은 사면구배를 따라 4m 높이에 소단을 두도록 시공하였다. 사면구배는 상부와 하부구배를 각각 1:1.2, 1:2.8이 되도록 하였다. 각 사면구배마다 2단의 록앵커를 설치하였으며 상단의 앵커력은 14KN/m^2 , 하부의 앵커 37KN/m^2 의 앵커력을 받도록 하여 지오셀옹벽과 암반과의 정착을 향상시키도록 하였다. 또한 배수를 촉진시키기 위해 지오셀속과 뒤표흙재에 배수효과가 좋은 골재를 채웠으며 하부에는 배수를 위해 100mm의 PVC파이프를 매설하여 배수를 촉진시키도록 하였다. 표면은 식생공을 이용하여 처리하였다.

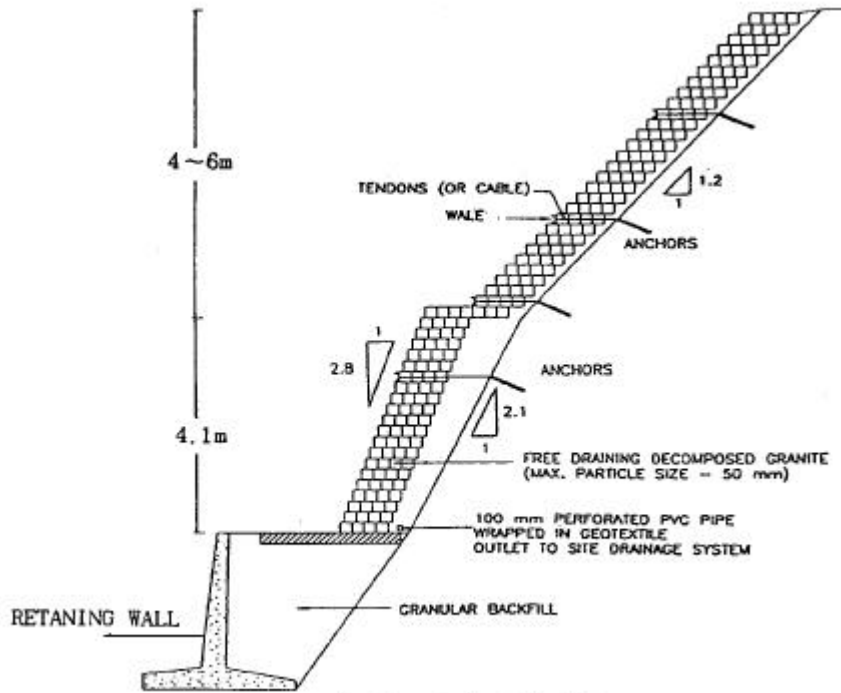


그림 3.34 보강 사면단면도

(2) 절토공

그림 3.35는 도로개설구간중 암반절개사면에 파괴가 발생하여 절토공으로 복구한 사례이다.^{58,59)}

1) 산사태 발생상황

본 지역은 정상 해발고도가 629m이고 연평균 강우량은 1414mm이고 여름 호우시에는 하루 300mm의 집중호우가 내리기도 하는 집중호우예상지역이며 인근 지역은 산사태 다발지역이기도 하다. 지난 1987년 20명의 인명손실이 발생한 시흥2동 산사태는 본 지역의 좌측계곡에 속한다. 붕괴된 사면의 붕괴범위는 그림 3.26의 평면도와 같다. 사면은 도로변 옹벽 상부로 부터 1:0.5, 1:1의 경사면으로 절개하도록 설계되었으나 그림 3.36에서 보는 바와 같이 1:0.5사면에서 접선을 따라 50도의 각도로 붕괴되었으며 상면상부에는 여러 개의 인장균열이 발생되었다.

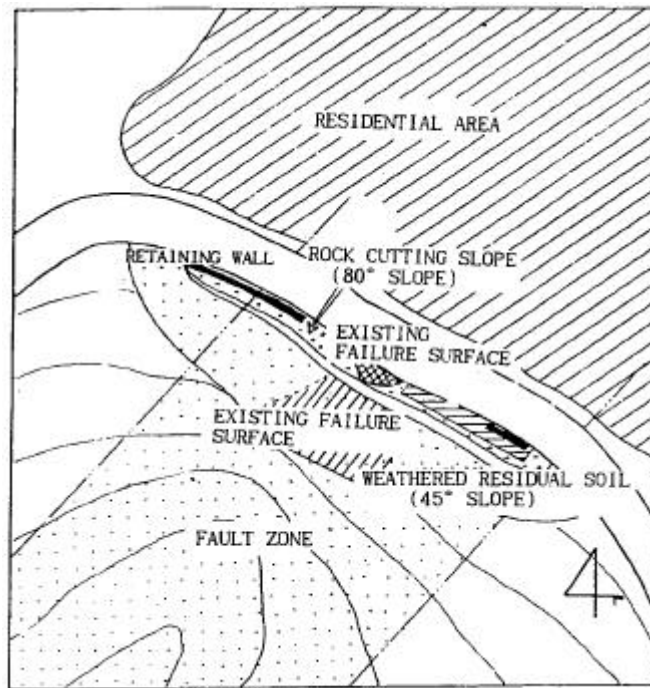


그림 3.35 현황 단면도

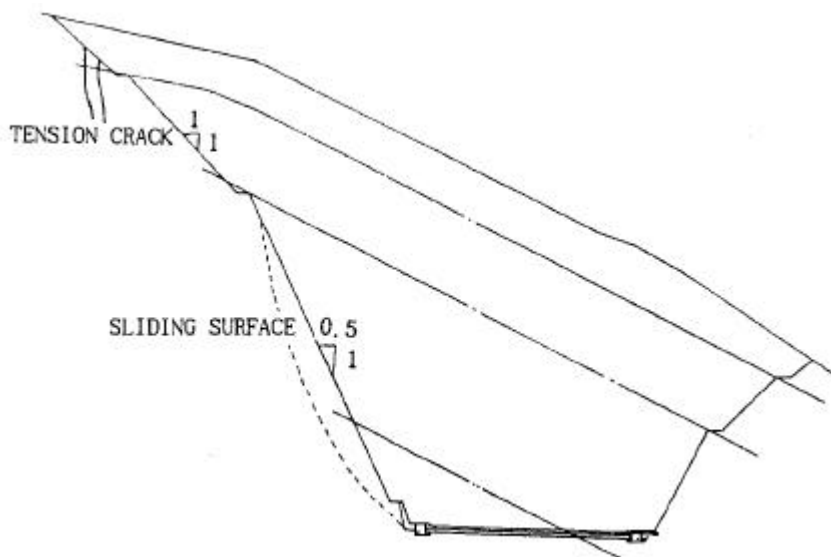


그림 3.36 도로상의 붕괴현황

2) 지반특성

한편, 산 주변부는 낮은 지형을 이루고 있고 화강암과 편마암복합체로 이루고 있다. 이와 같은 암반의 경계부는 산 하부능선의 약 150m 해발고도를 따라 존재하고 있다. 또한 산 화강암이나 주변 편마암복합체에서는 여러 방향의 작은 규모 단층들과 N 35 E 방향의 대규모 단층대가 지나고 있고 이 대규모 단층은 산에 우세하게 발달한 절리방향과 비슷한 방향을 이루고 있다.(그림 3.35참조)

암반절개면에서 붕괴가 발생된 지역은 약 100m 정도로 매우 불량한 암상을 보이고 있으며 변성암에서 흔히 관찰되는 단층구조로 크고 작은 단층들이 존재하고 있는 것이 특징이다. 그림 3.35서 보는 바와 같이 그림의 좌측 부근에서 뚜렷한 단층대를 볼 수 있는 단층 Gouge의 상태로 약 10m의 폭으로 발달되어 있다. 또한 우측부근에서는 절리면을 따라 5 - 10cm 정도의 점토층진이 되어 있고 절리주면부는 불규칙한 절리면을 갖고 있다

(3) 사면안정공

이 절취면의 붕괴는 단층파쇄대가 이 부분으로 지나고 있어 설계경사면으로 안정되기는 무리였다고 판단되어 파괴가 발생한 옹벽상부의 암반을 그림 3.28과 같이 절토하여 하중을 경감시키므로써 보강대책을 마련하였다.

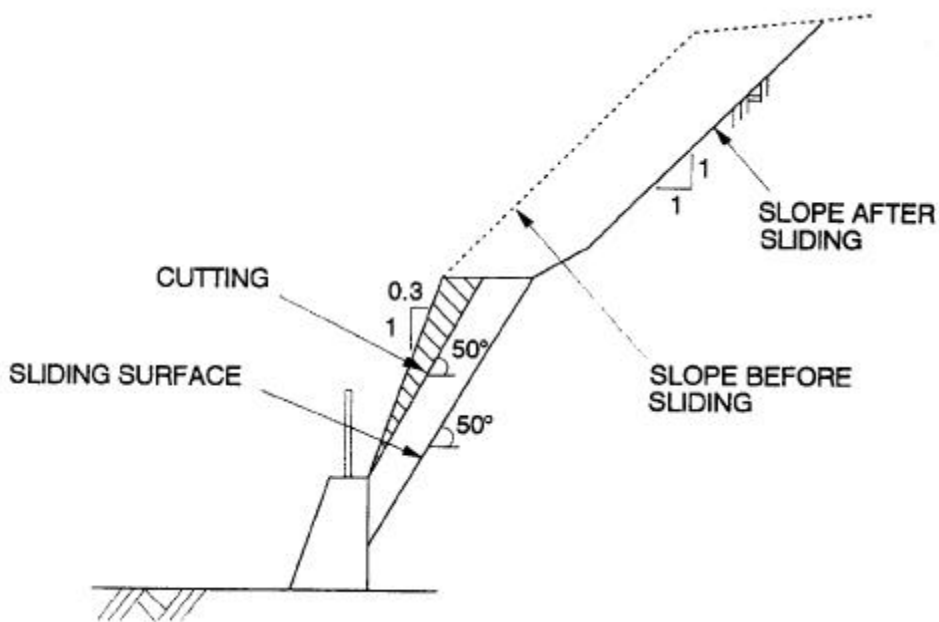


그림 3.37 도로 보강단면도

(3) 억지말뚝공 (Micro Pile)

그림 3.38은 도로확장 및 포장공사 구간중에 위치한 절토사면구간내 사면 파괴가 발생하여 억지말뚝(Micro Pile), Nailing 및 녹화토를 이용하여 복구한 사례이다.^{6,7)}

1) 산사태 발생상황

본 절토사면은 토사층, 풍화암층 및 암반층으로 구성되어 있으며 각각의 절취사면구배는 1:1.2 - 1:1.5, 1:1.2, 1:0.5를 이루고 있다.

본 사면의 하부에 위치한 풍화암층은 기반암의 구조적 특성이 절리 및 균열이 매우 발달되어 있고 절리면들은 대체로 이완되어 있으며 붕괴구간은 불연속면을 따라 풍화작용이 진전되어 있는 상태이다. 상부토사층이 하절기 집중호우 후 큰 변위를 수반한 사면파괴가 발생하였다. 또한 하부 풍화암층의 대부분이 지표면에 노출됨에 따라 수차례의 켜기파괴가 발생하였다. 사면 파괴 규모는 길이 280m 사면높이 15 - 35m 사면구배 1:1.2로 발생하였다.

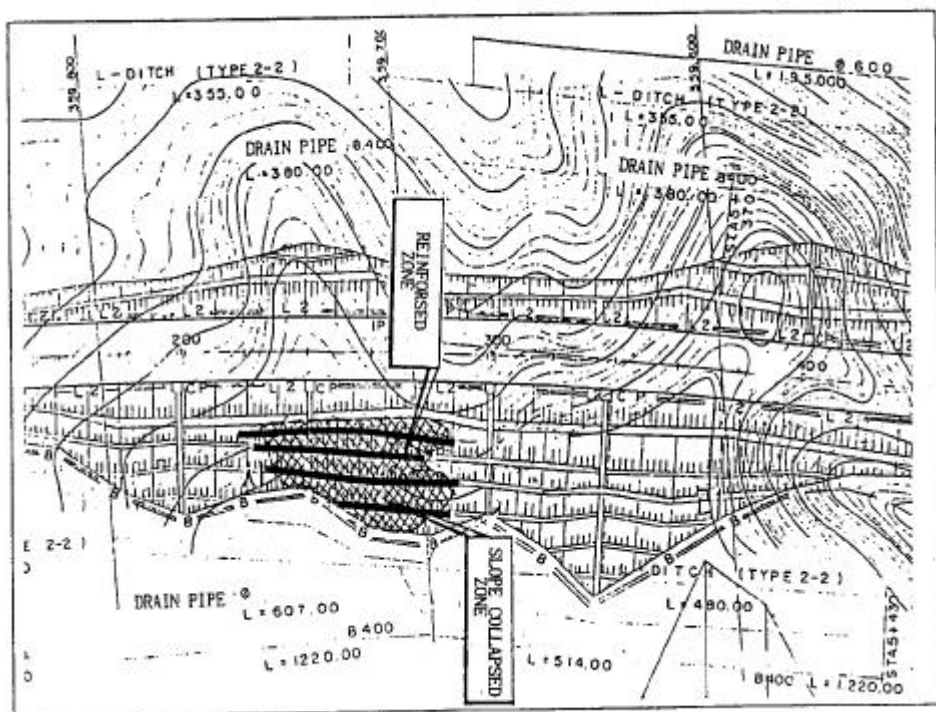


그림 3.38 사면붕괴구간 및 보강대상 사면평면도

2) 사면안정공

사면파괴가 발생된 토사사면은 부지의 한계성으로 활동토괴를 제거할 수 없으므로 사면안전율을 증가시키기 위해 억지말뚝공법으로 대책공을 마련하였다. 또한 전사면에 대한 표면처리는 녹화공법을 적용하였다.

암반절개사면과 토사붕괴구간에 대해 각각 다르게 보강대책을 선정하였는바 암반사면의 안정을 위하여는 Nailing공법을 이용하였고 토사사면의 경우는 Micro Pile을 이용하여 사면을 보강하였다. 절개사면의 사면붕괴구간 및 사면보강단면에 대한 평면도는 그림 3.38과 같다.

암반사면의 보강에 대한 대표적인 단면도는 그림 3.39와 같다. 연암, 풍화암 및 토사층의 각각의 사면구배는 1:0.5, 1:1.2 및 1:1.5로 하였으며 그림에서 보는 바와 같이 록볼트($\phi 25\text{mm}$)를 길이 2m, 간격 1-1.5m로 설치하였다.

한편 토사붕괴사면의 경우에 대한 보강은 그림 3.40에서 보는 바와 같이 사면의 활동을 억제키 위한 억지말뚝(Micro Pile)을 적용하여 시공하였으며 표면의 안정을 위해 Nailing공법을 적용 Rock Bolt로 표면을 보강하였다. 또한 표면쇄굴현상을 방지하기 위해 연속장 섬유를 혼합하는 녹화토공법을 시공하였다.

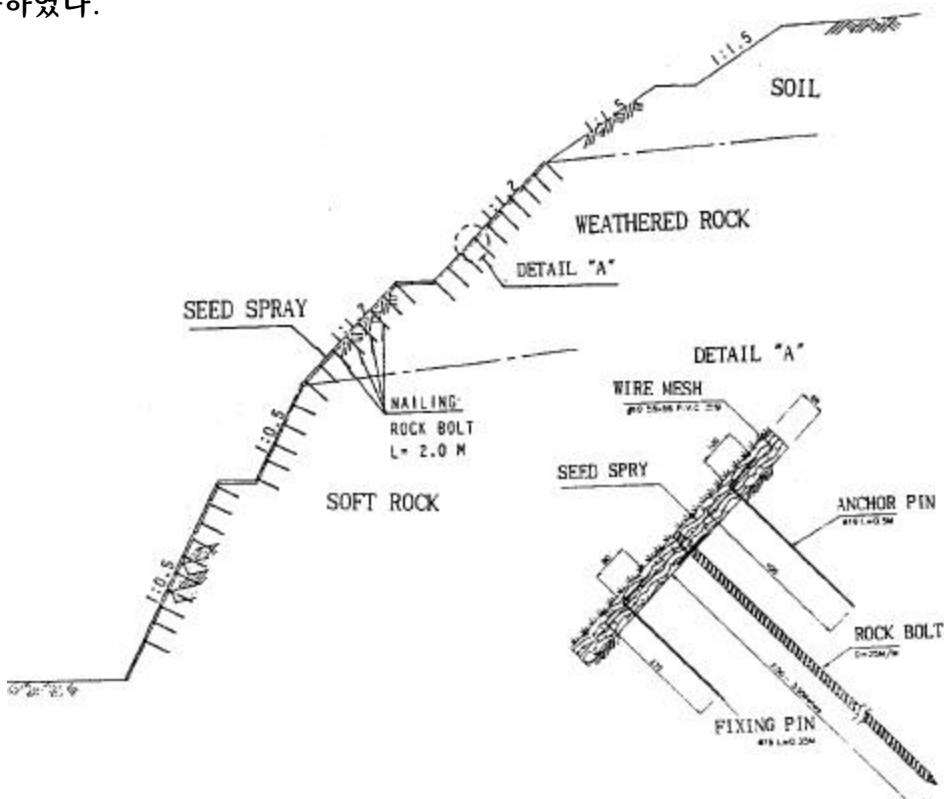


그림 3.39 Nailing공법 대표단면도

한편, 억지말뚝의 시공은 그림 3.40(a)에서 보는 바와 같이 2종류의 말뚝을 4열로 설치하였다. 사면 상부에 설치된 Micro Pile은 일렬의 말뚝을 말뚝중심간격 0.8m, 말뚝길이 9.3m로 설치하였으며 그림 3.40(b)의 평면도에서 보는 바와 같다.

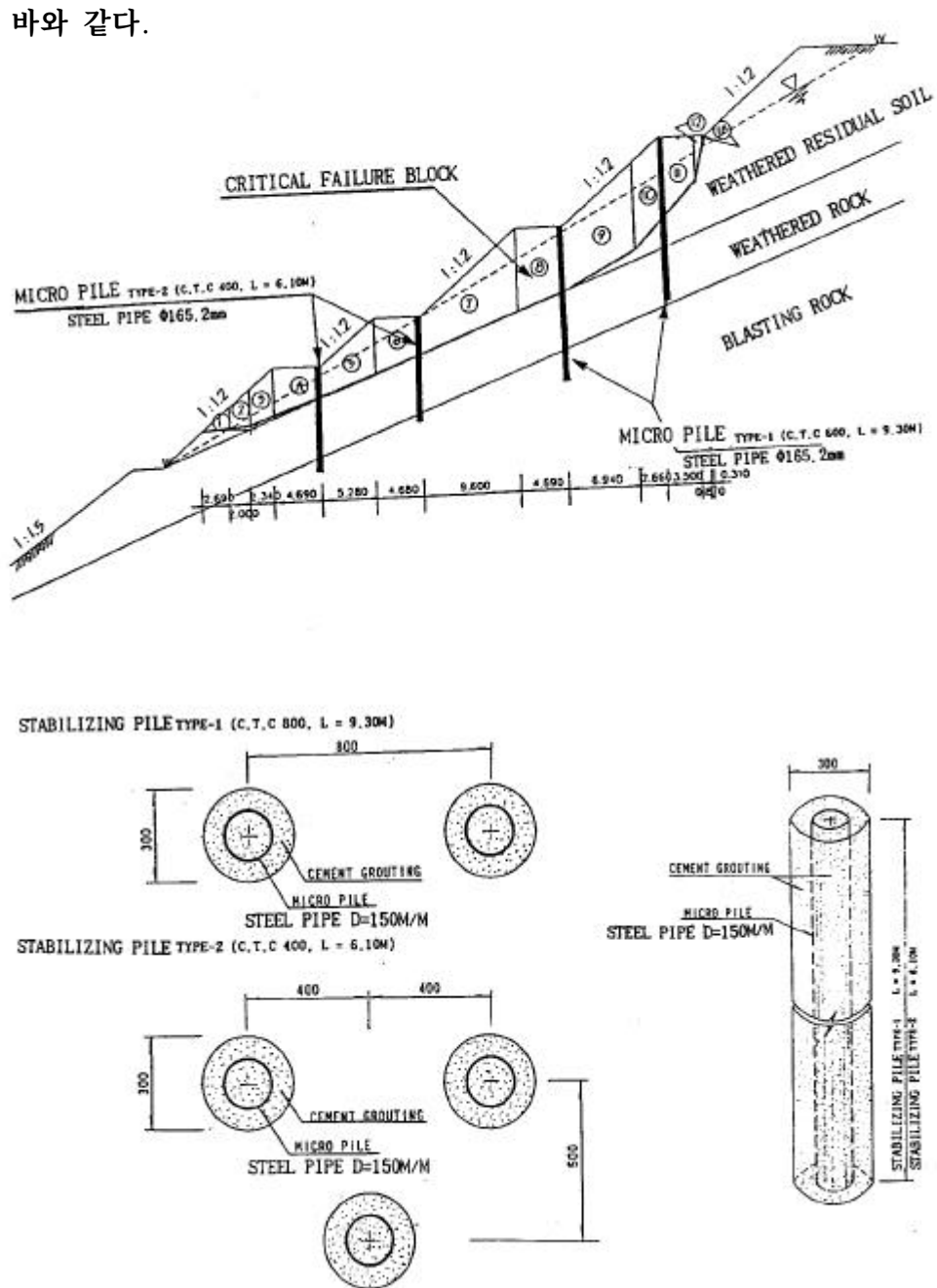


그림 3.40 (b) 억지말뚝 평면도

한편, 사면하부에 설치된 억지말뚝은 그림 3.40(b)의 평면도에서 보는 바와 같이 2열의 말뚝을 말뚝중심간격 0.8m, 말뚝열간격 0.5m로 2열의 말뚝을 배치하여 시공하였다. 말뚝두부조건은 모두 두부의 회전을 자유단으로하여 녹화토 취부에 용이하도록 하였다. 또한 표면의 안정을 위해 Nailing공법을 적용 Rock Bolt로 표면을 보강하였고, 표면쇄굴현상을 방지하기 위해 연속장섬유를 혼합하는 녹화토공법으로 피복시공하였으며 녹화토 취부두께는 발파암의 경우 10cm, 풍화암의 경우 6cm로 하였다.

사면파괴에 대한 2단계 대책공으로 사면상부와 하부의 대책공을 각기 분류하여 그림 3.41에서 보는 바와 같이 실시하였다.

사면상부의 사면파괴에 대한 대책공으로는 표층부의 잔류토층과 예상 임계활동면에 대한 대책공을 동시에 실시하였는데 잔류토층의 보강대책으로는 Nailing공법과 녹화토로 보강하였다. Nailing공법으로 사용된 록앵커는 길이 2.5-3.0m, 간격 1.0-1.5m로 시공하였다. 또한 억지말뚝(Micro pile)을 복열로 설치하고 말뚝두부는 회전을 구속하였다.

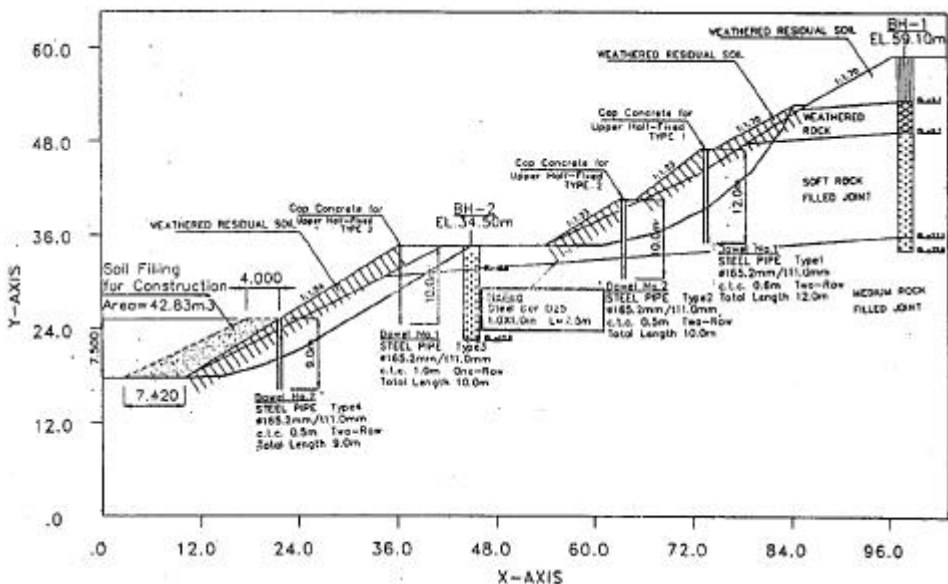


그림 3.41 2단계 보강단면도

한편, 사면하부의 사면파괴에 대한 대책공으로는 사면상부와 마찬가지로 표층부의 잔류토층은 Nailing공법과 녹화토로 처리했으며 억지말뚝(Micro pile)을 사면정상부에는 1열로 사면 중앙부에는 2열의 말뚝을 일치가 되도록 설계 시공하였다. 또한, 사면의 활동을 억지키 위한 압성토를 사면선단부에 실시하여 활동력은 억지시켰다. 압성토는 아래 2열말뚝의 두부까지 총 42.83m³을 실시하였다.

(4) Nailing공법

그림 3.42는 유료고속화도로 공사중 기 시공된 절개사면 상단부 풍화암층 일부가 국부적으로 표면탈락되는 현상이 발생하였으며 이에 대한 대책으로 Nailing공을 이용하여 복구한 사례이다.⁵⁾

1) 산사태 발생상황

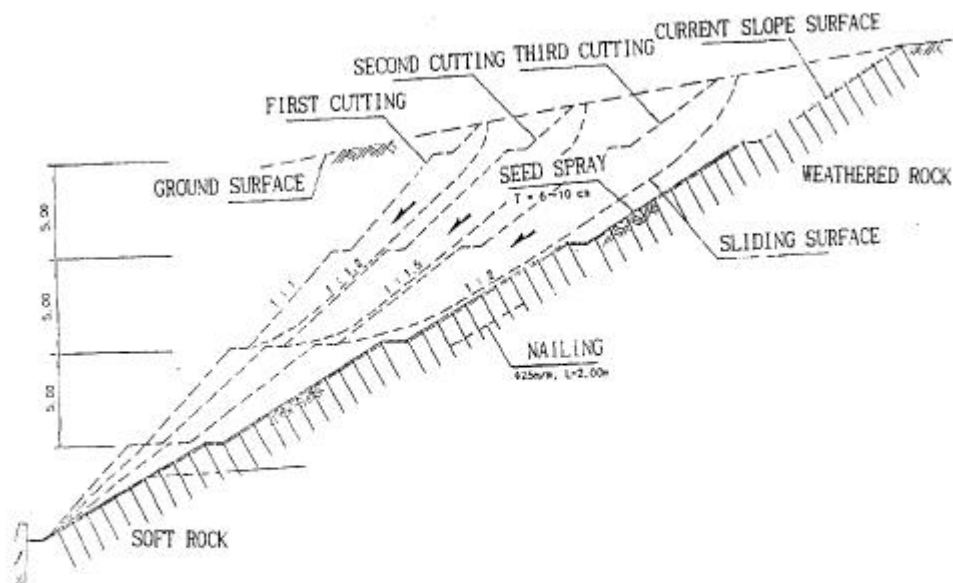
1992.6 - 1992.11사이 산사태가 발생한 사면의 규모는 길이 220m 높이 25-30m 사면구배는 1:1.2이며 토질조건에 따라 각각 연암 1:0.3, 풍화암 1:0.5, 토사 1:1.2의 사면구배로 절개시공되었다. 절개된 노출사면의 과다한 풍화작용으로 기반암의 절리방향으로 국부적인 표면파괴가 자주 발생하였다.

2) 사면안정공

본 사면에 대한 대책공으로는 절개사면의 국부적인 표면붕괴 발생을 억제하기 위하여 절개사면구배를 1:2로 완만하게 시공하는 절토공과 향후 우수침투 및 동결 융해로 인한 풍화작용을 방지하기 위해 Nailing공법을 적용하였다. 사면에는 Rock Bolt로 보강하고 표면의 쇄굴현상을 막기 위하여 연속장섬유를 혼합하여 녹화하는 녹화토공법을 그림 3.42에서 보는 바와 같이 시공하였다.

① 록볼트

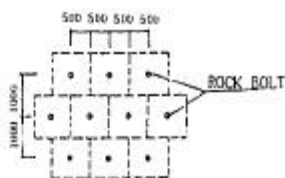
위험압괴를 제거하고 이완된 표면을 제거하기 위해 전 사면에 대해 절토공을 한 후 록볼트를 터널하행선 시점부 우측사면은 1m²당 2개소, 길이 2.0m, 터널 하행선 종점부 우측사면은 1m²당 2개소, 길이 3.0m, 터널 종점부 사면은 1m²당 1.43개소, 길이 3.0m로 총 3,000개소에 설치 시공하였다. 록볼트는 이형철근(Φ 25mm)을 길이 2-3m로 하였으며 지압판은 150x150x5로 하였고 급결재로 레진을 사용하였다.



DETAIL(NAILING)



DETAIL
(SOIL & WEATHERED ROCK)



DETAIL
(SOFT ROCK & HARD ROCK)

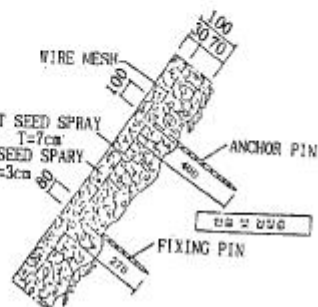
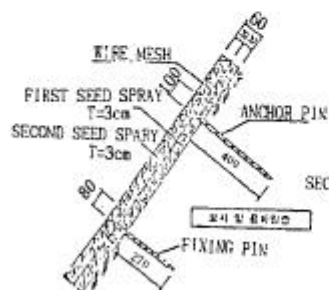


그림 3.42 사면보강 단면도

② 연속장섬유녹화토

록볼트 시공완료후 법면 낙석방지 및 녹화토 부착의 용이성을 위해 부착망을 앵커핀, 착지핀으로 결속하고 지압판을 부착망 상단에 체결하였다. 녹화토 취부두께는 사면구배가 완만하도록 전 지역에 걸쳐 두께가 6.0cm가 되도록 동일하게 시공하여 보강하였다.

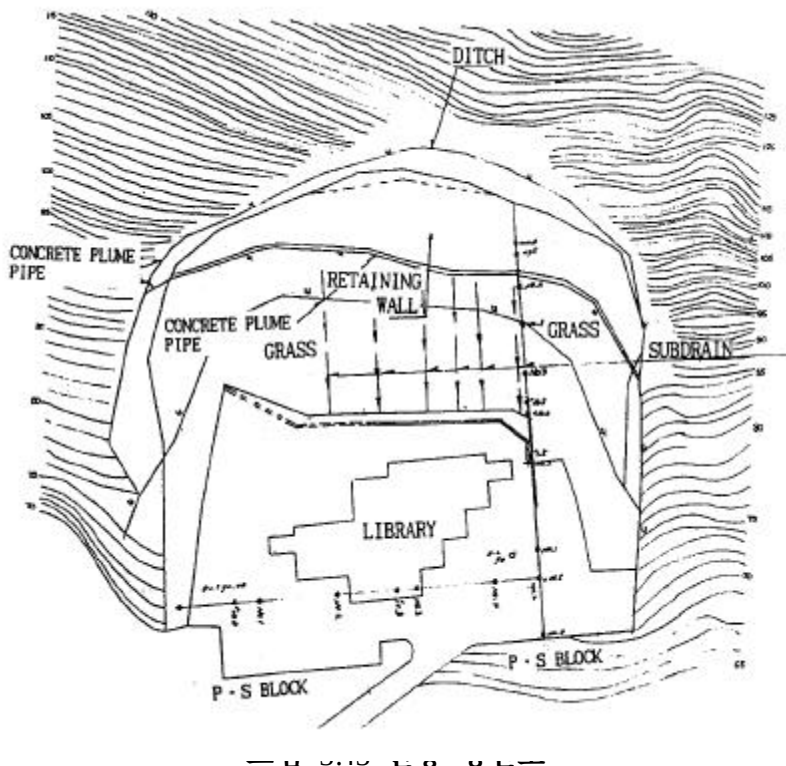
(5) 앵커공

그림 3.43은 시립도서관 신축공사부지 서측 암반절개사면에 산사태가 발생하여 앵커공을 이용하여 대책을 마련한 사례이다.

1) 산사태 발생상황

본 지역의 도서관 부지의 정지표고는 해발 70m이고, 절개사면이 위치한 부지 서쪽의 산능선은 EL.135m 정도로써 매우 급한 사면경사를 이루고 있다.(그림 3.43 참조)

본 절개사면은 중앙부에 소단 폭 5-9m로 도서관 부지 서측 상부사면에 산사태가 발생하여 신축중인 도서관 동쪽 비상계단의 탈착과 건물 일부가 완전파괴 및 부분적 파괴가 발생된 적이 있다.



2) 지반특성

본 지역은 수암봉(389m), 수락산(474.8m)를 잇는 험준한 산계가 발달되어 있고 제4기층인 충적퇴적암층이 넓게 분포하고 있다. 또한 서측은 비교적 풍화작용에 대한 저항력이 강한 규암으로 구성되어 있으나 동측은 비교적 풍화작용에 약한 편암, 안구상편마암으로 구성되어 있다.

한편, 본 지역의 지층분포는 지표로 부터 봉적층, 풍화암 및 기반암순으로 구성되어 있다. 봉적층은 실트질모래, 실트질점토 및 쇄석자갈로 구성되어 있고 절토구간 좌우측은 0.6 - 3.6m 산사면은 0.5-0.7m로 분포하고 있다. 풍화암층은 주로 편마암, 편암 및 규암이 풍화작용을 받아 실트질모래, 실트질 점토 및 소편으로 나타나고 있다. 또한 지표면하 14- 14.05m, 19.5- 19.66m구 간에 5- 16cm의 단층점토가 협재되어 있다. 대체로 본 지역은 암체의 변성 잔유물을 포함한 복잡한 변성퇴적암층으로 되어 있고 3상의 절리군과 2상의 엽리군으로 나타나 있다.

3) 사면붕괴원인

이와같은 지층으로 구성된 본 절개사면은 사면의 주절리면 N78W/76 SW 을 따라 파괴가 발생된바 장기간의 강우 및 폭우로 인한 수압의 증가로 불 연속면내에 협재된 점토광물의 전단력 감소가 주 원인이라 할 수 있다. 또 한 높은 각도의 엽리면과 상호작용이 부수적으로 작용하였을 것으로 추측된 다. 이에 대한 붕괴사면과 암반의 불연속면을 토대로 가정파괴면을 결정할 수 있다.

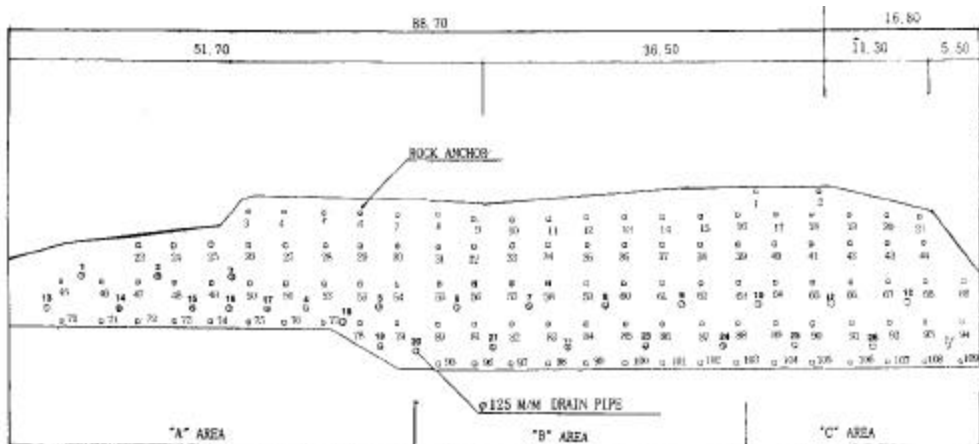


그림 3.44 보강사면 정면도

4) 사면안정성

본 절개사면파괴에 대한 보강대책으로 그림 3.44에서 보는 바와 같이 옹벽을 $L=120\text{m}$, $H=6\sim 20\text{m}$ 설치하고 록앵커를 109공 및 배수공 34공(길이 30m)을 설치하였으며 록앵커는 107.8t의 설계인장력, 5도의 경사로 27m천공되었다. 사면에 보강된 앵커의 단면도는 그림 3.45와 같다. 또한 신축도서관과 인접한 하부사면의 사면구배는 1:2로 하였고 4-6m의 옹벽을 설치하였다. 옹벽설치구간 하부의 사면은 경관조성을 고려하여 우수등의 사면내 침투로 인한 위험을 최소화할 수 있도록 측구 및 배수구등의 배수시설을 하였다. 한편 표층처리공법으로 블록, 콘크리트격자블록을 설치하였다.

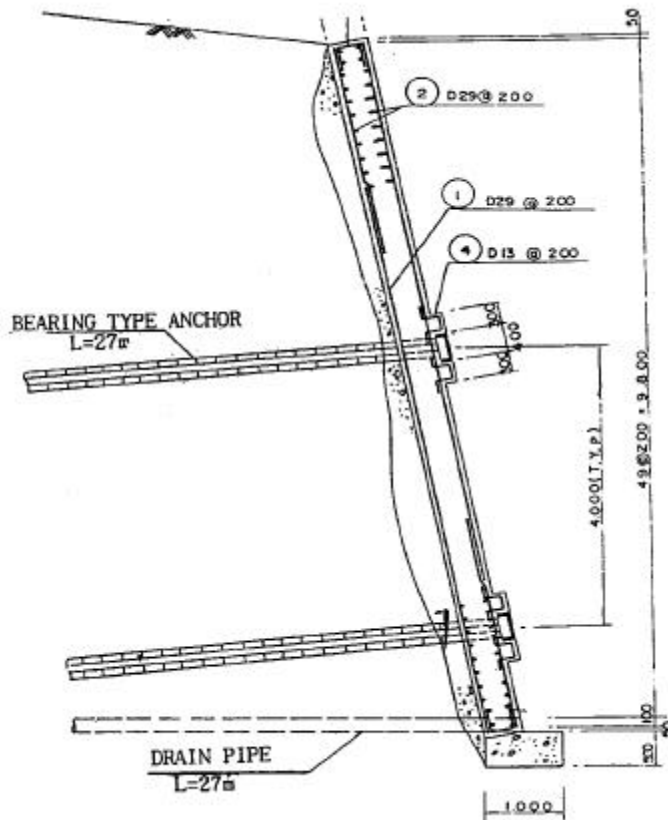


그림 3.45 앵커보강 단면도

3.4 요약

본 장에서는 산사태가 발생하는 사면을 크게 흠사면과 암반사면으로 구분하였으며 흠사면의 경우는 절개사면과 성토사면으로 구분하였다. 이와같이 3가지로 구분된 사면의 각각의 경우에 대해 우리나라에서 적용되고 있는 산사태방지대책을 조사하여 그 사례들을 제시하였고 그림3.1에서와 같이 산사태방지대책에 관한 합리적인 분류기준을 마련할 수 있었다.

산사태방지대책은 안전율유지법과 안전율증가법으로 구분하였으며 전자의 경우는 물리역학적방법과 생물화학적방법으로 구분할 수 있었다. 또한 후자는 활동력감소법과 저항력증가법으로 구분하였다.

한편, 우리나라의 산사태는 흠사면을 절개할 경우 만들어 지는 절개사면에서 많이 발생되고 있다. 이때 적용되는 산사태방지대책은 안전율증가법이 많이 적용되고 있으며 이중 저항력증가법이 주체가 되거나 적극적으로 사용되는 사례가 많았다. 저항력증가법이 주체가 되어 보강된 사면의 경우 보완대책공으로 안전율유지법 및 활동력감소법이 보조공으로 사용되는 사례가 빈번하였다.

암반사면에 대한 보강대책으로 사용되는 공법들은 과거에는 생물화학적방법들이 많이 사용하여 왔지만 절개사면의 규모가 거대해지고 보다 열악한 환경에 대한 시공이 증가됨으로써 점점 저항력증가법을 주체로 사용하는 대책공이 증가되고 있다.

상기와 같이 우리나라에서 지금까지 적용되고 있는 산사태방지대책공을 사면의 종류에 따라 조사함으로써 차후에 발생될 수 있는 산사태를 미리 예측하고 이때 각각의 현장상황 및 지반특성등을 정확히 파악함으로써 상황에 적절한 방지대책공을 선택할 수 있을 것이다. 따라서, 차후에 발생될 수 있는 산사태를 적절한 방지대책공을 적용 시공함으로써 재해를 억제 혹은 줄이는데 도움이 되고자 한다.