

우리나라 주요 댐 좌우안 사면의 특징

Charateristics of Abutment Slopes of Four Dams in Korea

신동훈¹⁾, Dong-Hoon, Shin, 이종욱²⁾, Jong-Wook Lee

¹⁾ 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원, Senior Researcher, WRRI, KOWACO

²⁾ 한국수자원공사 수자원연구소 연구원, Researcher, WRRI, KOWACO

개요(SYNOPSIS) : Slopes near a dam body can be categorized into 4 groups, such as right and left abutment slopes, reservoir slopes, slopes along the access road and slopes along the relocated road. For each of the geological investigation, the design standards, the evaluation methods of safety and the maintenance methods, both abutment slopes in the four dams have different characteristics from the conventional cut slopes in that they can severely affect the dam safety. From this point of view this study compares and analyzes the geological investigation methods, the status of design and construction, evaluation method of safety, and monitoring & maintaining methods for four major dams in Korea, such as Soyanggang dam, Andong dam, Chungju dam and Boryong dam.

주요어(Key Words) : 댐, 지질조사, 우안사면, 설계기준, 안정성평가

1. 서론

댐 주변의 사면은 크게 댐의 좌우안 사면, 저수지 사면, 진입도로 및 이설도로 사면 등으로 구분할 수 있다. 이 중 댐의 좌우안 사면의 경우에는 일반적인 굴착사면의 특징과 함께 저수지 및 댐체와 접해 있어 댐의 안전에 영향을 미칠 수 있다는 점 때문에 댐 지점의 지형 및 지질적인 특성, 댐의 형식과 규모 등에 따라서 지질조사의 방법 및 범위, 설계기준, 안정성평가 방법, 유지관리 방법 등에 있어 다소 차이를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 주요 다목적댐 중 소양강댐, 안동댐, 보령댐(이상 중심코아형석괴댐), 충주댐(중력식 콘크리트댐)의 좌우안 사면을 대상으로 지질조사의 방법, 설계 및 시공현황, 안정성평가방법, 계측 및 유지관리 방법 등을 기존 자료를 토대로 조사분석하며, 향후 댐의 좌우안 사면의 설계 및 시공에 참고자료로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 댐 좌우안 사면의 특징

댐의 좌우안 사면은 댐체와 접합되는 부분과 그 상부의 사면으로 구성되며, 일반적인 절취사면(도로나 철도 건설을 위한 사면, 주택 또는 기타 구조물 건설을 위한 사면 등)과는 다음과 같은 점에서 다른 특징을 갖고 있다.

- 암반사면이다.
- 저수지에 접하여 있으면서 저수위 변동에 의해 안정성에 영향을 받는다.
- 지형 및 지질조사의 범위가 넓고, 수량 및 빈도가 많다.
- 차수목적의 지반개량 및 처리에 많은 노력과 비용이 필요하다.
- 활동과피시 댐체에 손상을 입혀 대규모의 재산 및 인명피해를 유발할 수 있다.
- 계측 및 유지 관리가 어렵다.
- 보수·보강이 어렵다.

댐 지점으로 선정된 곳의 지형은 콘크리트댐의 경우 양안이 견고한 암반으로 되어 있고 폭이 좁은 경우에 적합하며, 필댐의 경우에는 지형적인 여건에 크게 구애받지 않으며 대형 중장비의 작업이 용이하도록 작업공간이 넓어야 하고, 여수로가 별도로 설치되므로 여수로 위치에 대해서는 다소의 제약을 받는다. 한국수자원공사에서 건설 및 관리하고 있는 대부분의 필댐은 양호한 암반 위에 축조되어 있다. 한편, 댐체와 접합되는 암벽부는 급경사를 이룰 경우 댐축조 후 체체에 전단응력이 발생하여 누수의 원인이 되거나 부동침하로 체체단면에 균열이 발생하거나 코아재와 필터존간에 응력전이에 의한 아칭현상 및 수압할렬이 발생하여 댐안전에 영향을 미칠 수 있으므로 가능한 한 1:1.6 정도의 완만한 경사로 발파에 의해 굴착하고 심한 요철부가 발생하지 않도록 한다.

필댐의 경우에 댐체와 분리하여 설치하는 여수로의 사면은 대부분 암반으로 이루어진 장대사면인 경우가 많으며 굴착과정에서 활동과피가 일어나거나 설계시 예상하지 못했던 단층과쇄대나 불량암이 노출되어 기존 설계(예: 토사 및 풍화암 1:1, 암 1:0.5)의 변경 및 보강대책 수립에 따라서 공사비가 대폭 증대하기도 한다. 그러나 아직까지는 정밀한 지질조사와 안정검토 등이 이루어지지 않은 상태에서 공사가 진행되고 있는 실정으로 향후 개선되어야 할 부분으로 사료된다.

담수중 또는 담수후 댐체 부근의 사면붕괴로 인해 큰 피해가 발생했던 예는 우리나라에는 아직 없으나 외국에서는 적지 않다. 이탈리아 북부지역의 Vajont댐은 1960년에 준공된 double-arch dam으로서 높이가 265m이었고, 그해 2월부터 담수를 개시하자마자 상류측 사면에서 변위가 관측되었으며, 결국 1963년 10월 9일 오후 10시 39분에 약 2억5천만 m^3 의 암괴가 댐저수지내로 순식간에 밀려들어 저수지 물이 댐을 월류하여 하류지역을 덮쳐 7분만에 약 2,600명의 인명피해와 막대한 재산피해가 발생하였다. 이때 사면의 변위속도는 3년 동안 평균 약 7cm/week이었으나 대규모 활동이 일어날 즈음에는 약 25~40cm/day의 무서운 속도로 활동이 일어났다. 이밖에도 Malpasset댐, St. Francis댐 등에서는 암반의 불연속면특성(절리, 층리, 단층 등)과 담수시 물의 영향을 받으면서 대규모 사면붕괴 및 댐과피가 일어나 각각 400명과 425명의 인명피해와 많은 물적피해가 난 바 있다.

콘크리트 댐 지점에 대한 지질조사는 예비조사의 경우 댐축상에서는 좌우로 각각 댐높이 H의 2배, 상하류 방향으로 각각 4배의 면적에 대하여 실시하며, 본 설계시에는 댐축을 중심으로 약 H의 1.0배 정도 되는 넓이와 깊이에 대하여 조사를 실시한다.

이때 조사항목으로는 원격탐사, 현장지질조사, 지구물리탐사(주로 탄성과탐사와 전기비저항탐사, 드물게 물리검층), 시추조사, 현장시험(표준관입시험, Lugeon시험, 공내재하시험, 수압과쇄시험), 실내시험(채취된 코아에 대한 비중, 흡수율, 일축압축강도, 인장강도, 탄성계수, 포아송비, 삼축압축시험, 점하중강도시험 등) 등을 실시하며, 이밖에도 최근에는 수리지질 및 누수가능성 등을 함께 조사하고 있다. 초기 단계에서는 예상만수위를 기준으로 좌우안측으로 300~500m, 상류방향으로는 상류 끝까지, 하류방향으로는 상류 끝까지 거리의 약 1/2 정도 까지 조사하며, 이때 사용되는 지형도 및 지질도는 현장의 경우 축척 1:10,000~1:5,000을 사용한다. 중간단계에서는 지표지질조사의 경우 축척 1:1,000~1:500의 지형도 및 지질도를 사용하고, 최종단계에서는 상류측으로는 댐 높이의 약 1/2 정도를 포함하는 범위, 하류측으로는 댐높이에 해당하는 넓이에 저수심도의 약 1/2~1/3에 해당하는 깊이까지 조사한다. 시공중에는 축척 1/500~1/200 정도의 상세한 지형도 및 지질도를 사용한다.

댐 사면의 경우 일반적인 사면과 달리 저수지의 물이 댐기초암반 또는 양안의 암반 등을 통해 누수되는 것을 차단하기 위하여 차수그라우팅(curtain grouting)을 실시하여 1 Lugeon이하(콘크리트댐) 또는 3 Lugeon이하가 되도록 개량을 하게 되므로 이 공정에 해당하는 만큼의 추가비용이 소요된다. 대개의 경우 차수 그라우팅 심도는 $d = H_1/3 + c$ 또는 $d = \alpha H_2$ (d : 천공깊이, H_1 :공 위의 댐 높이, c :상수(8~25m), H_2 :댐의 최대수심, α : 상수(0.5~1.0))로 한다.

댐천단 보다 위에 있는 좌우안 사면은 지형 및 질조건에 따라서 장대사면 또는 급사면이 되는 경우가 있어 굴착공사 중 또는 완공 후에도 계속적으로 계측 및 유지관리에 신경을 써야 하는 경우가 있다. 후술하는 충주댐 우안사면과 보령댐 좌안사면의 경우에는 댐 준공 이후 지금까지 사면내에 수많은 계측기를 설치하여 계측을 실시해오고 있는 실정이다. 다음은 우리나라의 4개 댐 좌우안 사면의 조사, 설계 및 시공현황을 살펴보고자 한다.

3. 사례

3.1 소양강댐

(1) 댐의 제원

- 위 치 : 우안-강원도 춘성군 신북면 용전리, 좌안-강원도 춘성군 신북면 월곡리
- 형 식 : 중심코아형 사력댐
- 댐높이 : 123m (댐마루표고=EL.203m)
- 댐길이 : 530m
- 댐체적 : 9,591,200 m³
- 공사기간 : 1967년 4월 ~ 1973년 12월
- 주요기능 : 홍수조절 500백만m³, 용수공급 1,213백만m³/년, 발전 353GWh/년

(2) 댐 지점의 지질

본댐 지점의 좌안측은 1:1.0의 경사로서 산봉우리의 표고는 EL.330m의 첨두형이며 우안측은 1:1.0의 경사로서 산봉우리의 표고는 EL.460.0m이다.

지질조사는 시추조사가 39개공(연직 31개소, 10° ~ 45° 경사 7개소, 수평 1개소)으로 총연장 1,080m이며, 경도굴진은 12개소에 총176회이었고, 발전소 취수탑 등 댐 중심선 위치에서는 단성파탐사를 실시되었다. 이들 조사는 댐축을 중심으로 댐축의 상하류 방향으로 각각 댐높이의 약 3배(총6배), 좌우안 방향으로 약 4배의 범위에 대하여 실시되었다.(그림-1 참조)

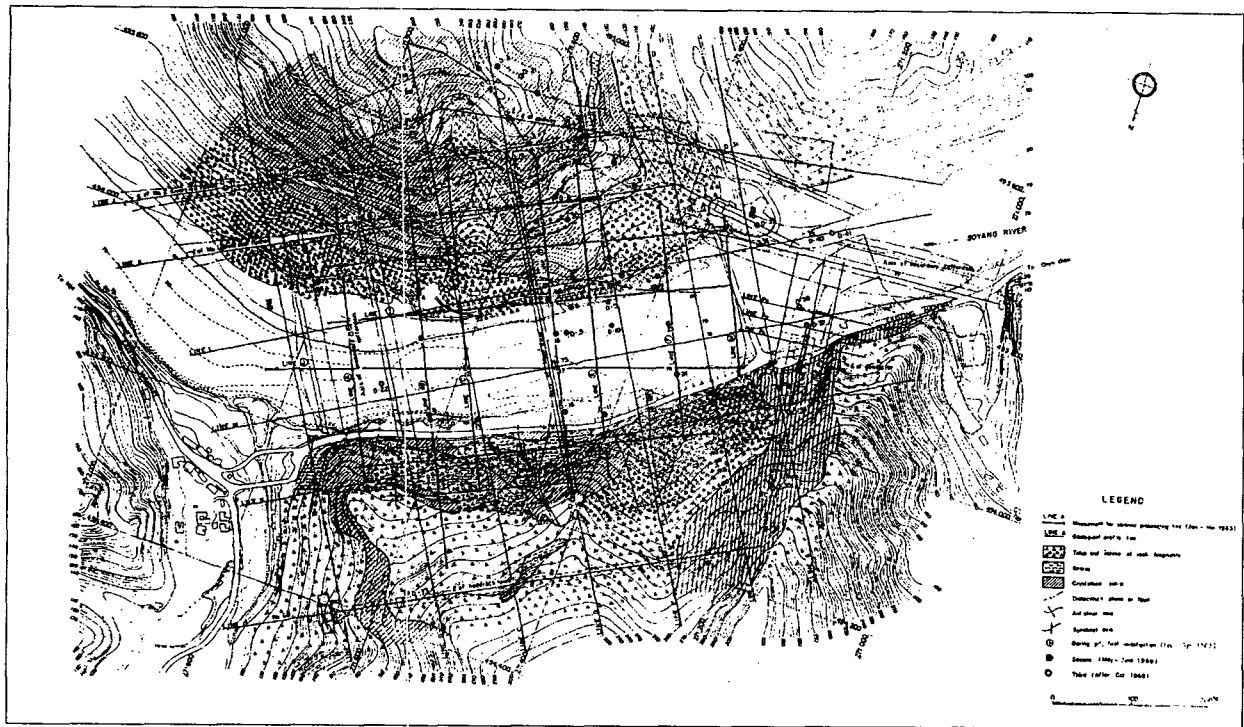


그림-1 소양강댐의 지질조사

댐 지점 일대의 지질은 주로 시생대 흑운모 편마암, 백운모 편마암, 석영질 흑운모 편암, 백운모 석영 편암, 흑운모 편암등의 결정편암계 및 이들 암층에 관입한 백악기 화강암 빈암 및 제 4기 충적층으로 구성되어 있다.

(3) 좌안사면 및 여수로 사면의 처리

댐지점의 지형은 좌안이 구배가 완만하고 안부(鞍部)모양의 구릉인 반면 우안은 구배가 급하고 단애로 되어 있어 지형적인 견지에서 볼 때 여수로 지점은 굴착량이 우안 보다 훨씬 적은 좌안으로 선정되었다. 댐 지점 일대에 시험보링을 실시한 결과 여수로 지점에는 경암이 지면에 비교적 얇게 노출되어 있으며 기초 암반상부에 심도 약 5~10m이 풍화암이 있고 심도 2~3m의 점토 및 sandy loam이 덮여져 있다. 암반은 거의 편암 및 편마암으로 구성되어 있다. 편마암은 층상으로 형성되어 있으며 이 층의 주향 및 경사는 각각 N30~70S, 30~50SE이다. 점토로 채워져 있는 약 10~20cm의 단층과 심한 파쇄와 풍화로 유지된 박층이 많이 있다. 많은 균열과 절리가 암반 위에 발달되어 있으므로 댐 기초와 같이 여수로 기초에는 저수된 물의 누수를 방지하기 위하여 충분한 curtain grouting을 실시하였다.

한편, 좌안에는 접근수로(forebay)를 설치하기 위하여 EL.198.0m의 설계고수위보다 16.0m가 낮은 EL182.0m에 한쪽의 거대한 사면(사면의 높이 약 50m)을 굴착하였다.(그림-2~그림-4) 사면의 하단부는 여수로의 월류부와 접속이 되도록 하고 물의 흐름을 적절하게 유도할 수 있도록 하였다. 굴착사면의 암은 연암 정도로 평가되었으며, 매 10m 마다 폭 2m의 소단을 두었으며 풍화방지를 위하여 Gunite Coating(오늘날의 Shotcrete)가 타설되었다.

- 사면활동의 원인 : 사면활동과괴 없었음.
- 사면안정대책의 주요 개념 : 적정 구배(1:0.5)에 의한 사면안정성 확보
- 총굴착량 : 약 89만³m (뎀체적의 약1/10)
- 보조 안정대책 :
 - Shotcrete에 의한 표면보호
 - 높이 10m 마다 폭 2m의 소단 설치

- 계측관리 : 미 실시
- 안정성 평가방법 : 미 상

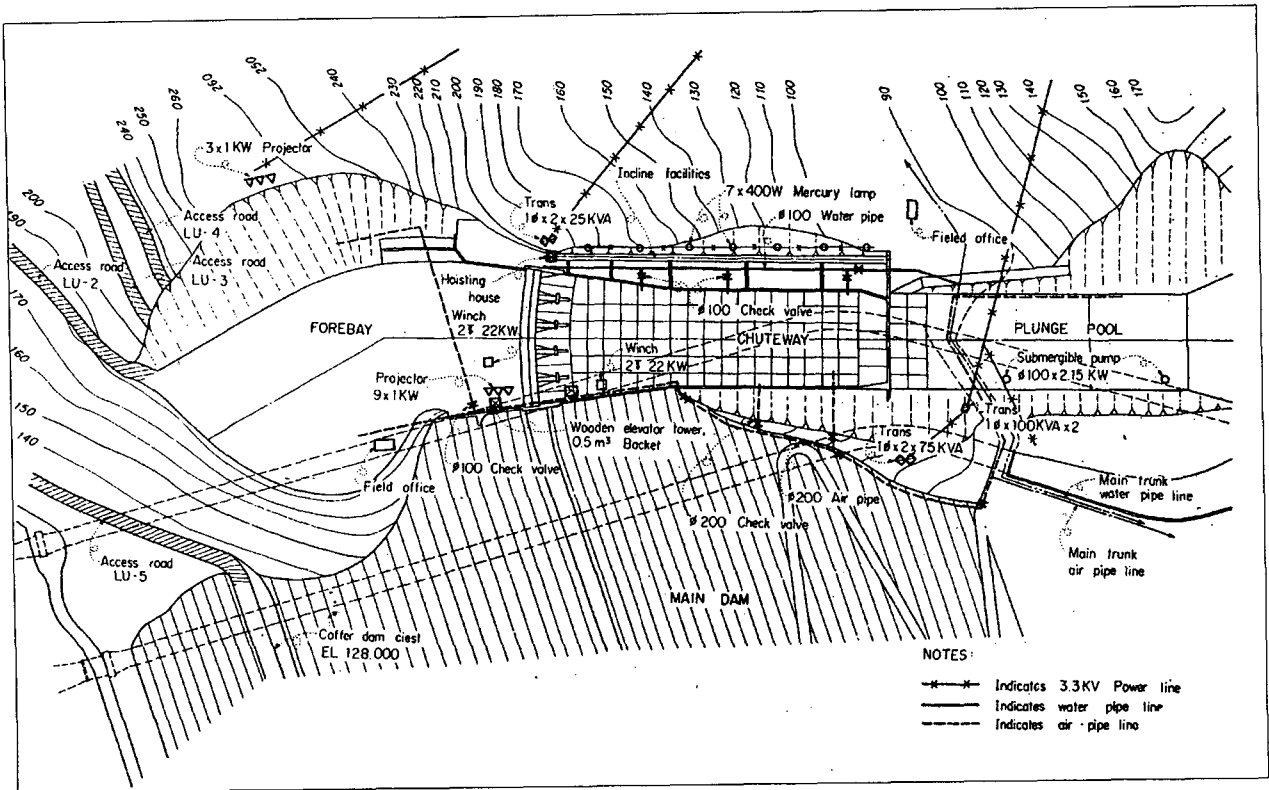


그림-2 소양강댐 좌안 Forebay 사면

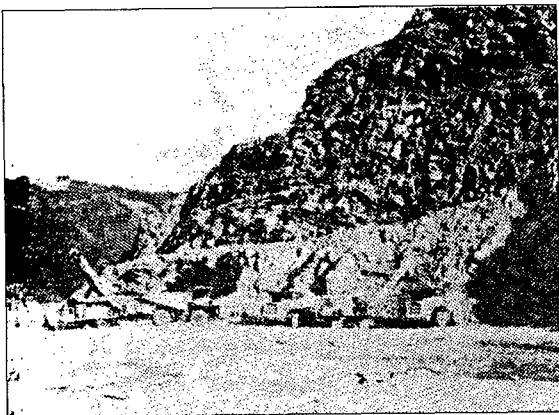


그림-3 Forebay 암굴착 전경



그림-4 Forebay 암축완료 전경

3.2 충주댐

(1) 댐의 제원

- 위치 : 우안-충북 중원군 동량면 조동리, 좌안-충북 충주시 중민동
- 형식 : 콘크리트 중력식댐

- 댐높이 : 97.5m (댐마루표고=EL.147.5m)
- 댐길이 : 447m
- 댐체적 : 902,000 m³
- 공사기간 : 1978년 6월 3일 ~ 1985년 12월 31일
- 주요기능 : 홍수조절 616백만m³, 용수공급 3,380백만m³/년, 발전 844.1GWh/년

(2) 댐 지점 및 우안 Landslide지역의 지질

충주댐 지역의 지질은 하부로부터 주로 선캠브리아기의 견운모편암(sericite schist), 녹니석편암(chlorite schist), 천매암(phyllite), 규암(quartzite), 각섬편암(amphibolite schist), 백운질석회암(dolomite limestone) 및 이들 암층을 덮고 있는 제4기 충적층 등으로 구성되어 있다.

충주댐 우안사면은 건설당시부터 대규모 사면파괴의 가능성이 인지되어 그동안 많은 안정성에 대한 논란과 함께 조사와 검토가 이루어져 왔다. 건설당시에는 정밀지질조사를 통해 사면활동 발생의 원인과 가능지역의 범위 등에 대한 규명이 있었으며, 항구적인 사면안정성 확보를 위한 보강방안과 지속적인 계측관리 시스템을 구축한 바 있다. 또한 최근(1998년~2000년)에는 정밀안전진단 및 국내외 지질전문가들에 의한 정밀지질조사 및 재조사가 이루어져 본 사면에는 더 이상 안정성에 문제가 없음을 재확인한 바 있다.

댐 우안의 landslide 지역의 경우에는 EL.400m 까지 rock slide재료가 분포하며, 상류측에는 slump지역이 분포하고 있다. 우안 landslide지역을 형성하는 지층은 주로 선캠브리아기에 속하는 편암으로 이 편암은 흑운모녹니석편암과 녹니석편암으로 세분된다. 전자는 어두운 회색이며 단단하고 치밀하며, 후자는 녹색을 띤 어두운 갈색의 편암계통이다.

이 구간 사면의 불연속면은 주향이 바뀌나 주로 EW방향인 편리와 N50W방향 및 N20~40E방향의 절리로 구성된다. 전체적으로 풍화도는 slightly weathered~fresh이며, 암반등급은 RMR이 40~80, Q값이 4~40범위로서 fair~good rock에 속한다. 한편 단층과 파쇄대와 같은 지질학적 구조선이 자주 관찰되었고, 댐 우안 끝에서 산 위쪽으로 약 360m 부근에 주향 N75W 경사 80NE인 단층(F1)이 있으며, 평면상으로 볼 때 댐축과 약 130°의 각도를 이루면서 교차하고 있고 규모로서는 가장 크다. 이외에도 F2단층(주향 N75W 경사 30 SW~45SW)과 F3단층(주향 N30E 경사 20NW~40NW)이 있으며 이들 단층은 본 사면의 사면활동에 어느 정도의 영향을 준 것으로 보인다.

(3) Landslide지역의 처리방법

충주댐 우안 지역은 공사 시작 무렵 이미 사면활동이 발생하고 있는 상태였으며, 그 원인은 층상구조 토질층 또는 암반에 발달해 있는 층리면에 평행하게 또는 그 층리면을 따라서 발생하는 일종의 전단작용 때문으로 분석되었다.

우안사면의 안정대책은 IBRD의 추천을 받아 댐지질전문가(J.S. Dodd)와 댐설계전문가(A.D. McConell) 등의 자문을 받아 사면 상단부인 EL.412m에서 하부로 굴착을 시행하여 총550만m³의 암석을 제거하였다. 다음은 사면활동의 원인 및 안정대책의 주요사항을 요약한 것이다.(그림-5 참조)

- 사면활동의 원인 :
 - 굴착에 의한 상부하중 제거에 따른 암반의 응력이완(stress relief)
 - 암반에 발달해 있는 층리면에 평행하게 또는 그 층리면을 따라서 발생하는 일종의 전단작용
 - (- 충주댐 우안사면의 경우 담수에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단됨)
- 사면안정대책의 주요 개념 : 활동토괴의 제거 및 구배완화를 통한 사면안정성 확보
- 사면구배완화 : 1:1.7~1:1.8 정도(약30°)로 변경
- 총굴착량 : 약 550만m³ (댐체적의 6.1배)
- 보조 안정대책 :
 - Rock anchor(응력이완 및 계곡부)

- Concrete옹벽
 - 낙석방지용 소단 2개소(EL.325m에 폭35m×길이120m, EL.285m에 폭20m×길이100m)
 - 계속적 계측관리
- 안정성 평가방법 : 평사투영해석법, 한계평형개념에 바탕을 둔 사면안정해석법

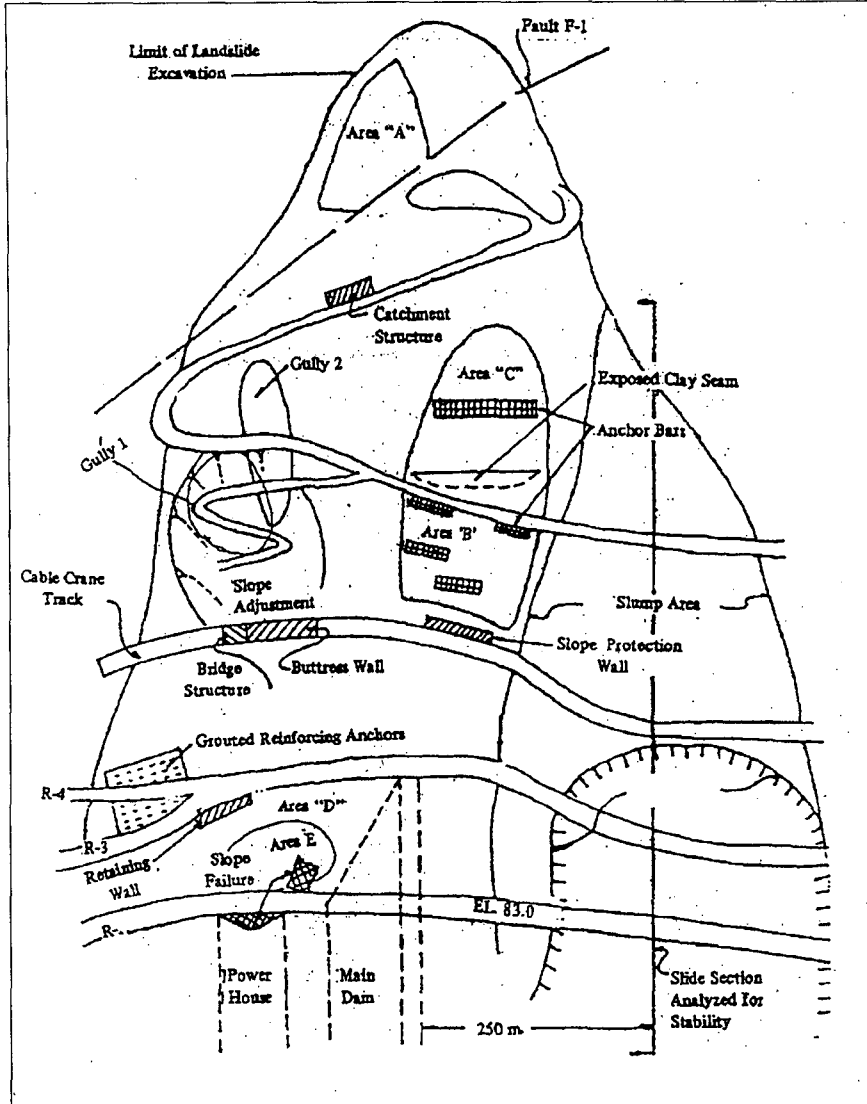


그림-5 충주댐 우안 Landslide지역 평면도

(4) 계측 및 유지 관리

공사 후에도 사면활동의 가능성이 있었으므로 사면활동이 예상되는 지역을 중심으로 Ⅱ-1과 같은 계측기를 1983년에 설치하여 2000년 11월 현재까지 지속적으로 관측하고 적기에 안정대책을 수립할 수 있도록 하였다.

표-1 충주댐 우안 Landslide지역 계측기설치 현황

계측기	설치현황	측정빈도	안정 판단기준	비고
Inclinometer	4 sets	1회/주	$\theta < 20 "$	잠재변동
			$\theta \geq 20 "$	이상변동
			$\theta > 100 "$	확정변동
Extensometer	4 sets	1회/주	$L < 2mm$	잠재변동
			$L \geq 2mm$	이상변동
			$L > 100$	확정변동
Ground Water Level Unit	10 holes	1회/월	기준없음	-
Surface Settlement	21 points	1회/월	기준없음	-
Automatic Slope Movement Surveying System	1 set	1회/월	기준없음	-1998년 설치 -좌안측에서 자동 관측 및 기록

계측결과 1985년 8월 까지 약간의 변위가 발생(초기이완에 의한 영향으로 보임)하였으나 그 이후에는 대부분 수렴되어 현재는 안정한 상태로 판단된다. 이러한 사실은 1998년 J.S. Dodd 등이 1996년 및 1998년의 조사결과를 비교분석하여 내린 결론("현재의 사면에서는 어떠한 추가 위험요소도 인지되지 않았으며, 계측자료 등을 종합적으로 검토하여 볼 때 본 지역은 더 이상의 변위가 발생하지 않는 수렴영역에 도달하여 사면의 안정성에는 아무런 문제가 없다")과 일치한다.

3.3 보령댐

(1) 댐의 제원

- 위 치 : 우안-충남 보령시 미산면 용수리, 좌안-충남 보령시 주산면 동오리
- 형 식 : 중심코아형록필댐
- 댐높이 : 50.0m (댐마루표고=EL.79.0m)
- 댐길이 : 291m
- 댐체적 : 1,131,000 m³
- 공사기간 : 1990년 9월 ~ 1998년 12월
- 주요기능 : 용수공급 10,950천m³/년

(2) 좌안사면 지역의 지질

보령댐 좌안사면은 1992년 8월에 굴착을 개시하였으며, 1993년 3월18일에 EL.140~EL.79m 구간에서 약 20,00m³의 발생되어 중앙건설심식(건교부)를 거쳐 당초의 설계(사면구배 1:0.5~1:0.7)를 변경(사면구배 1:1.2)하여 굴착을 하였으며, 1994년 4월에 굴착을 완료하였을 때 사면내에 초대형 썩기가 있는 것이 발견되어 긴급히 국내외 관련전문가들에 의한 조사 및 대책안이 논의되었다. 초대형 썩기의 활동과피는 곧 댐체에 치명적인 손상을 가할 수 있으므로 신중한 조사와 대책이 필요하였다.

1994년에 초대형 썩기가 발견된 이후 1995년에는 국내외 전문가(한국수자원공사 기술심의위원 및 Mr. J.S. Dodd 외 1인)의 자문결과에 따라 약 4개월에 걸쳐 상세한 지질조사(10공의 보령조사, 지표지질조사, 지하지질도 작성 및 안정해석 등)를 실시하였다.

좌안사면의 지질은 과거의 복잡한 구조운동을 받은 곳으로 지괴가 불안정한 곳으로서 사면의 대부분은 역암, 사암 및 혈암이 교호하면서 나타나고 국부적으로 맥암류가 충전되어 있다. 사면의 대부분을 구성하고 있는 사암 및 역암에는 층리, 절리 및 단층 등이 3~4개의 주그룹과 2~3개의 부그룹으로 발달되어 있어 암반내에는 많은 파쇄구조선이 발달하여 있다.

지질조사는 좌측사면, 중앙사면 및 우측사면의 3개 사면으로 구분하여 실시되었다. 먼저 좌측사면의

경우에는 총450개의 불연속면을 측정하 π -diagram 및 contour diagram상에 도시하여 본 결과 최대밀집 구역이 strike/dip=240/30으로서 사면의 자세인 strike/dip=255/35.5와 거의 일치하였으며, 불연속면은 총 3개 그룹(제1군=사면과 거의 일치하는 그룹, 제2군=strike가 30도 내외로 사교하면서 사면경사와 반대방향의 경사를 갖는 그룹, 제3군=사면과 거의 직각으로 사교하면서 고각도의 경사를 갖는 그룹)으로 구성된다. 사면의 변위양상은 경사방향이 상이한 2개 그룹에 의한 썩기파괴, 제2군의 opening, 사면과 수직으로 발달해있는 선구조를 중심으로 한 불연속면 등이 굴착에 의한 상부하중 제거로 응력의 불균형 또는 응력이완 현상이 발생하고, 동시에 기존의 약대인 tension gash부분의 opening이 일어나고 이들이 상호작용을 일으켜 사면의 운동이 발생한 것으로 볼 수 있다.

중앙사면은 strike/dip=350/35.5으로서 층리면의 주향과 사교하고 있어 퇴적층의 단면관찰이 용이하며, 73개의 불연속면을 관찰하여 분석한 결과 240/33(제1군, 층리면) 방향으로 최대밀집 구역을 나타내고, 좌측사면과 동일한 제2, 3군의 불연속면이 관찰된다. 그러나 조사당시 open crack을 발견되지 않았다.

우측사면은 195/35.5의 자세를 가지며, 좌측 및 중앙사면에서 발견되는 제1군의 불연속면이 주로 관찰되나 제2, 3군의 불연속면은 관찰되지 않으며, 대체적으로 안정한 상태로 나타났다.

(3) 사면의 안정대책

○ 사면활동의 원인 :

- 굴착에 의한 상부하중 제거에 따른 암반의 응력이완(stress relief)
- 경사방향이 상이한 2개 그룹에 의한 썩기파괴, 제2군의 opening, 사면과 수직으로 발달해 있는 선구조를 중심으로 한 불연속면 등이 굴착에 의한 상부하중 제거로 응력의 불균형 또는 응력이완 현상이 발생하고, 동시에 기존의 약대인 tension gash부분의 opening이 일어나고 이들이 상호작용을 일으켜 사면의 운동이 발생
- 보령댐 좌안사면의 경우 담수에 의한 영향은 없었음.

○ 사면안정대책의 주요 개념 : 활동토피의 제거, 구배의 완화, 대규모 소단(catchment berm)의 설치 및 하부사면의 보강(Ground Anchor) 등을 통한 사면안정성 확보

- 외국자문단의 의견 : J.S. Dodd 등은 썩기부에 대형못박기공법을 제시한 바 있으며, 일본 공영의 지질전문가 등은 PC Anchor 및 Free Frame공법을 제시한 바 있음.
- 국내 전문가 의견 : 한국자원연구소에서는 사면구배를 암반의 내부마찰각(26.5도) 이하로 낮추는 방안, EL.199m 상부를 완전제거하고, 하부에 PC Anchor를 시공하는 방안 등을 제시한 바 있음.
- 채택안 : EL.154m 상부에 있는 예상활동면에 포함되어 있는 암피를 제거하고, EL.154m 에 폭 35m의 소단을 설치하며, 그 하부에는 부분적으로 압성토를 실시하고, 최하단부에는 Ground Anchor 등을 설치

○ 사면구배완화 : 1:0.5 → 1:1.2 → 1:1.4로 완화

○ 총굴착량 : 약 274만 m^3 (댐체적의 약 2.5배)

○ 보조 안정대책 :

- Ground anchor(응력이완 및 계곡부)
- 압성토
- 강우시 배수기능 고려(사면 하단부)
- 계속적 계측관리

○ 안정성 평가방법 : 평사투영해석법, 한계평형개념에 바탕을 둔 사면안정해석법, 수치해석(FDM 및 BEM)

(4) 계측 및 유지관리

좌안사면의 안정관리 및 사면거동으로 인한 여수로 구조물의 안정성 여부를 판단하기 위하여 사면거동분석에 필요한 계측시스템을 구축하여 관리해오고 있다.(그림-6과 7 참조) 계측기의 종류와 설치위치는 표-2와 같다 계측기는 사면의 움직임이 예상되는 축선을 상정하여 그 축선을 따라 설치하였으며, 사면내부의 변위, 지하수 변화, 표면변위 등을 종합적인 거동을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 계측기들은 수동뿐만 아니라 자동계측이 이루어지도록 하여 계측의 정밀도를 높이고, 계측관리 프로그램을 이용하여 유지관리가 용이하도록 하였다.

한편, 보령댐 좌안사면 굴착공사 완료 이후 현재까지의 계측결과는 사면내 이상변위가 발생하지 않고 있어 사면은 안정한 상태로 판단된다.

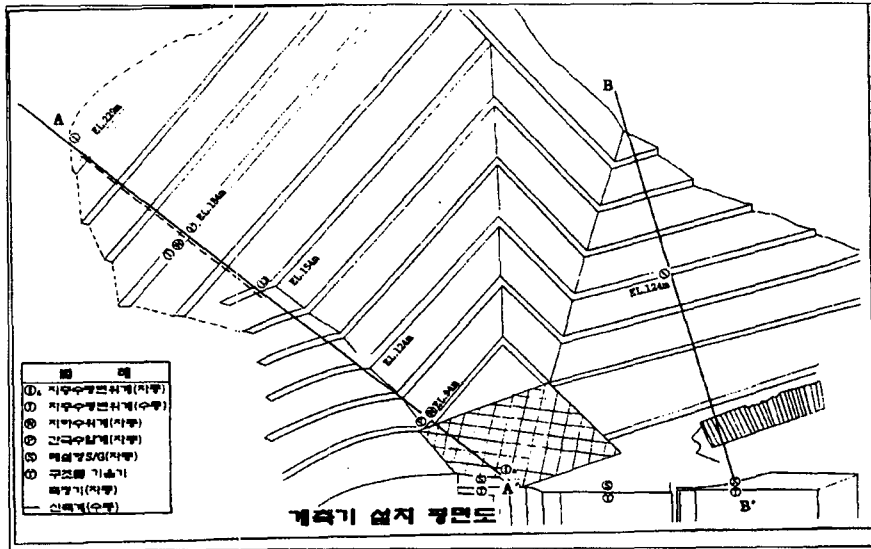


그림-6 보령댐 좌안사면내 계측기 설치 평면도

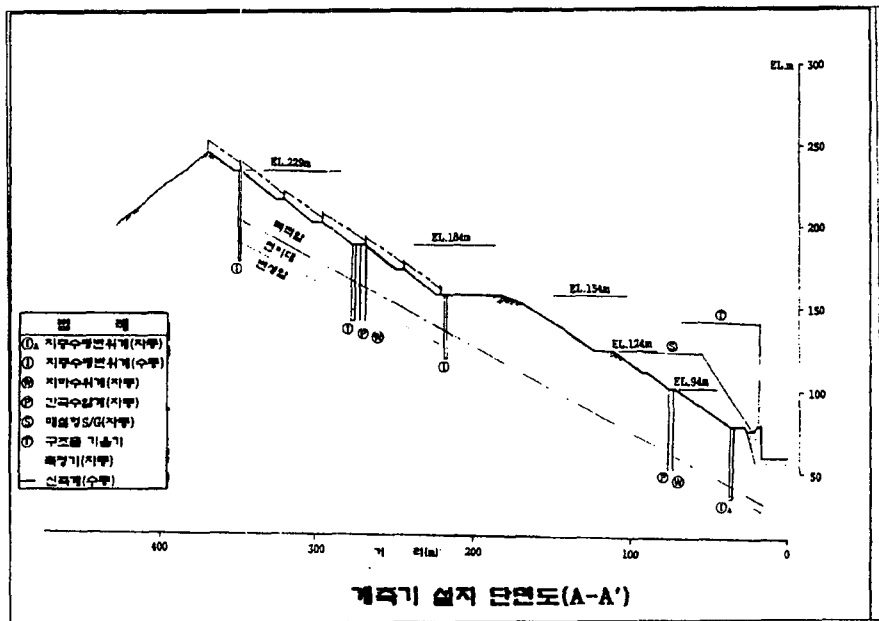


그림-7 보령댐 좌안사면 내 계측기 설치 단면도(A-A')

표-2 보령댐 좌안사면에 설치된 계측기 현황

계측기 종류	단위	수량	설치위치	비고
지중수평변위계 (지중경사계)	개소	4 (수동)	-EL.229m(최상부 소단) -EL.184m(최상부 소단과 Berm의 중간) -EL.154m(Berm) -EL.124m(우측사면 중간소단)	사면내부의 변위 계측
		1 (자동)	-EL.79m(여수로 옹벽 배후)	
지하수위계	개소	2 (자동)	-EL.184m(최상부 소단과 Berm의 중간) -EL.79m(여수로 옹벽 배후)	사면내 지하수변화 계측
간극수압계	개소	2 (자동)	-EL.184m(최상부 소단과 Berm의 중간) -EL.79m(여수로 옹벽 배후)	사면내 간극수압변화 계측
매설형 스트레인 게이지	개소	3 set (15개)	-여수로 옹벽 배후 Concrete내	사면거동에 의한 옹벽거동 계측
		1 set	-여수로 옹벽 배후 Concrete내	
구조물 경사계	개소	3 (자동)	-여수로 옹벽표면, 스트레인 게이지 근처	"
신축계	개소	6 (반자동)	-EL.154m 상부사면	"

3.4 안동댐

(1) 안동댐 제원

- 형 식 : 중심차수벽형 석피댐
- 댐높이 : 83m (댐마루표고=EL.166.0m)
- 댐길이 : 612m
- 댐체적 : 4,013,976 m³
- 공사기간 : 1971년 4월 ~ 1977년 5월
- 주요기능 : 홍수조절 110백만m³, 용수공급 926백만m³/년, 발전 89GWh/년

(2) 지형 및 지질특성

안동댐 지점의 계곡은 NW방향에서 SW로 그 방향을 바꾸어 댐 축은 계곡이 만곡으로 되어 있는 곳에 위치한다. 우안은 하상에서 EL.130m 높이까지 약 38°의 경사를 형성하고 있으며 암반으로 되어 있다. EL.130m에서 260m까지의 능선까지는 약 45°로 더욱 급경사를 형성하고 있으며 이 능선의 표고는 댐마루의 높이보다 약 100m 높다. 댐 축 양안은 가파른 경사면을 형성하고 있다. 하상은 평탄하고 사질로 덮여 있으며 하폭은 약 200m가 된다. 좌안의 일부는 하상 30°에서 40°로 EL.157m인 좁은 능선까지 증가하는 삼각사면으로 되어 있고 어떤 곳은 계곡으로 되어 있으며 이 가파른 지역에는 보다 완만한 경사지도 있다. 댐 축제는 이 삼각사면 위까지 올라올 것이며 이 삼각사면 상하류의 경사계곡을 채웠다. EL.159m의 남측에는 EL.153m에 넓은 안부가 있다. 이 안부를 지나서 능선은 다시 EL.185m로 증가하여 두 번째 안부가 시작되기 전에 여수로가 위치한다.

지질조사 결과 표토층은 붕적층 애추 그리고 하상층적층으로 나타났으며, 좌안 하상부에는 렌즈형의 2~3m 폭의 풍화각섬석편암이 협재되어 있다.(표-3 및 그림-8 참조) 암층은 대부분이 시대미상의 흑운모각섬석화강암이고 부분적으로 화강편마암질인 것과 화강암으로 되어 있다. 또한 소규모인 화강암(Aplite), 변성석회암 각섬암의 분포도 볼 수 있다. 특히 흑운모화강암과 화강편마암이 분포하는 지대는 풍화작용에 의하여 풍화심도가 깊어 20m이상인 곳도 있으나 평균 10여m에 이른다. 이곳의 가장 큰 단층 중의 하나는 댐 지점 상류 약 5km에서 낙동계곡을 가로지른다. 댐공사 지역 그 자체에는 수많은 단층이 있었으나 이러한 단층들은 거의 대부분이 작은 것이었고 가장 큰 것은 그 폭이 13m인 것도 있다.

기원 27년 이후 댐지점 중심선으로부터 50km 내에 11개의 지진이 기록된 바 있다. 댐 지점에서 북동쪽 약 20km 지점을 진앙으로 하는 11개중의 가장 큰 것은 Richter규모로 6.0~6.4 범위였다. 지형 및 지질 조사는 10여년에 걸쳐 현지에서 실시되었으며 그 수량 및 내용은 다음과 같다.

표-3 안동댐 지점의 지질조사 현황

	위 치	형 식	수 량
시추조사	-댐지점 좌안 -댐지점 하상 -역조정지댐 지점 -가물막이댐 지점 -발전소 지점	-Wash boring -충격식 boring -Hand auger boring -Test pit	
물리탐사	발전소 지점	탄성과 탐사	4개선 (총 701m)
수압시험	전 시추공		

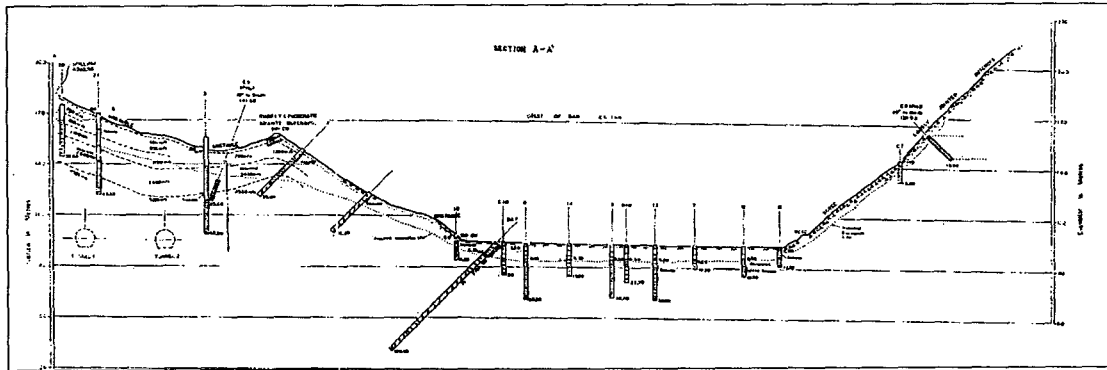


그림-8 안동댐 댐 지점의 시추조사 현황

(3) 좌우안 사면의 처리

지형적으로 안동댐의 좌우안 사면은 규모가 작아 사면처리에 큰 문제가 없었다고 할 수 있다. 다만 여수로 설치를 위한 암반굴착 및 여수로 옹벽 배면의 암반사면에 대한 조사 및 안정성 평가 등이 실시된 바 있다.

여수로의 중심선은 댐체의 좌안부에 접하여 거의 동서방향으로 놓여져 있다. 지표는 암설(Residum)과 gully퇴적물로 덮혀있고 암반은 주로 흑운모각섬암의 화강암, 우백색화강암이 많으나 거정화강암편마암 및 대리석으로 구성되어 있는 것으로 조사되었다. 암은 깊게 풍화되고 절리가 많으며 신선함 암반선은 지표면하 15~25m이었다. 접근수로는 길이 약 70m의 개수로이며 댐 좌안부의 산을 굴착하여 건설하였다. 여수로의 좌측옹벽 설치부는 1:2로 굴착하였고, 우측은 옹벽 없이 굴착시공 되었다. 또한 저수지로부터의 누수는 월류언의 상류단에 실시하는 차수그라우팅을 실시하였다. 이 그라우팅의 중심선은 좌안의 굴착암의 경사면까지 곧장 연결된다.

여수로 사면(여기서 여수로 사면이라 함은 여수로 콘크리트 슬라브 설치를 위해 굴착되어 만들어지는 사면을 말함)에는 기초처리를 위한 그라우팅 공사가 실시되었다. 설계는 당초의 폭 15m→8m, 8m→좌안 조정 및 기념탑, 주차장 등을 고려한 service area의 확보 등을 위하여 3차에 걸쳐 변경시행되었고, 사면구배는 토사 1:1.5, 암석 1:0.5로 시공하였으며, 높이 매 10m마다 폭 2.0m의 소단을 두어 비탈면을 보호하는 것으로 하였다.

1987년에는 지질조사를 통해 여수로 옹벽 배후 암반사면에 대하여 RMR평가, Q-system에 의한 평가

및 평사투영법에 의한 안정성 평가 등이 실시된 바 있으며, 우수 및 여수로 조작시 물보라에 의한 침식과 붕괴를 방지하기 위하여 wire mesh와 shotcrete 등에 의한 사면보호 공법이 추천된 바 있다.

4. 결론

댐 좌우안 사면의 특징을 국내의 4개 댐을 중심으로 살펴보았으며, 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

- 댐 좌우안 사면의 특징은, ①암반사면이며, ②저수지에 접하여 있으면서 저수위 변동에 의해 안정성에 영향을 받고, ③지형 및 지질조사의 범위가 넓고, 수량 및 빈도가 많으며, ④차수목적의 지반개량 및 처리에 많은 노력과 비용이 필요하고, ⑤활동과괴시 댐체에 손상을 입혀 대규모의 재산 및 인명피해를 유발할 수 있으며, ⑥계측 및 유지 관리가 어렵고, ⑦보수·보강이 어렵다는데 있다.
- 댐 좌우안 사면의 안정성 평가방법은 과거에는 주로 평사투영법에 의한 도해적 방법, 한계평형해석법 등이 사용되었으나 최근에는 전산기의 발달로 유한차분법 또는 개별요소법 등의 수치해석적 방법에 의하여 사면활동의 메카니즘의 규명 및 대책수립에 활용되고 있다. 그러나 후자의 경우 적절한 입력파라메타의 선정을 위한 현장조사 및 공학적 판단이 매우 중요할 것으로 사료된다.
- 댐 좌우안 사면은 댐체의 안전에 상당한 악영향을 줄 수 있으므로 설계단계 또는 시공단계에서 충분한 지질조사를 수행하여 적절한 댐 지점의 선정 및 사면안정대책을 수립할 필요가 있다.
- 사면활동의 우려가 있거나 공사중 붕괴의 경험이 있었던 댐 양안 사면은 사면내에 존재하고 있던 절리와 균열 등의 불연속면이 상부하중이 제거되어 응력이 이완되면서 발생하는 것으로 나타났으며, 국내에서는 아직까지 저수지 담수 또는 수위변동 등에 의한 문제는 없었던 것으로 나타났다.
- 사면활동에 의하여 댐체에 손상이 예상되는 경우에는 사면내에 각종 계측기를 설치하여 계측관리를 함으로써 사면의 유지관리를 원활히 할 수 있으나 이 경우 사면활동 메카니즘의 이해 및 각 계측기의 원리 및 특성 등에 대한 이해가 필요하다.

참고문헌

- (1) 산업기지개발공사(1974), 소양강 다목적댐 공사지.
- (2) 산업기지개발공사(1977), 안동 다목적댐 공사지.
- (3) 산업기지개발공사(1986), 충주 다목적댐 공사지.
- (4) 산업기지개발공사(1987), 다목적댐 진입도로 사면안정성평가 연구보고서.
- (5) 권기옥(1999), “댐 건설과 지질기술자들의 역할”, 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 대한지질학회 제15차 공동학술강연회 발표논문집(댐과 지질환경), pp.173~235.
- (6) 윤운상, 김정환(1999), “댐 주변 암반사면의 안정성 평가”, 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 대한지질학회 제15차 공동학술강연회 발표논문집(댐과 지질환경), pp.263~285.
- (7) 한국수자원공사(1989), 충주댐 우안 Rock Slide 원인 및 처리대책에 관한 연구보고서.
- (8) Dodd, J.S. and Vircol, A.C.(1998), Technical Consultation on Investigation of Right Abutment Landslide Area.
- (9) Goodman, R.E.(1993), Engineering Geology : rock in engineering construction, John Wiley & Sons, Inc., pp.170~174, pp.324~330.