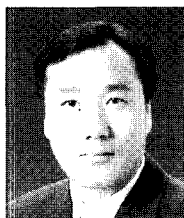


# 댐의 지진피해 현황과 보수·보강 사례

## (대만 921 집집지진과 석강댐을 중심으로)



권혁기 | 한국시설안전기술공단 진단본부 차장

### 1. 서론

1999년 9월 21일 오전 1시 47분 대만에서 발생한 집집지진(진원지의 지명이 집집(Chi-Chi)이라 (921집집지진)이라 부름)은 규모 7.3(대만중앙기상국발표)의 강진으로 엄청난 인적, 물적 피해를 야기하였으며, 많은 시설물의 피해 중에 대만의 중부 타이쑹 부근에서 콘크리트 중력식댐인 석강댐(Shih-Gang dam)이 붕괴된 사례가 있어 이에 대한 피해 현황과 보수 및 보강 방법에 대한 내용을 자료와 현

지 방문을 통해 얻은 사진을 중심으로 소개하고자 한다.

지진 발생은 '99년에 발생하였지만 보수 및 보강을 완료한 상태를 견학한 시점은 금년 4월에 이루어졌으며, 현재의 댐은 정상적인 운영을 통해 기능을 수행하고 있고 대만 경제부 수리처 중구 수자원국에서 관리하고 있다.

921 집집 지진과 석강댐의 간략한 제원은 표 1과 같다.

표 1. 921 집집 지진과 석강댐 제원

구 분	내 용	제 원	비 고
921 집집 지진	발 생 일 시	1999년 9월 21일	(대만중앙기상국발표)
	규 모	M=7.3	
	진 앙 위 치	북위 23.85도, 동경 120.81도	
	진 원 깊 이	6.99km	
석강댐	형 식	중력식 콘크리트댐	
	높 이	25m	
	길 이	357m	
	상 시 만 수 위	EL. 267.1m	
	방 류 능 력	8,000m <sup>3</sup> /s	
	수 문 게 이 트	레디얼 게이트	

## 2. 본론

### 1.1 대만의 지질구조

921 집집지진은 사망자 2,405명, 부상자 10,718명, 행방불명자 79명의 인적 피해와 가옥과 공공시설 등에 막대한 물적 피해를 가져왔으며, 이번 지진으로 인한 지질 학적인 특징은 단층의 활동 면적이 80km × 20km 정도 발생한 것이다.

이러한 원인은 대만이 일본 열도와 같이 판 구조론에 근거한 플레이트 경계부에 위치하고 있고, 필리핀해 플레이트가 북서 방향으로 년 약 8cm 정도 이동하면서 유라시아 플레이트 내의 대만 남동부 해안산맥 부근에서 충돌하기 때문에 집집지진과 같은 큰 지진이 발생하고 있는 것으로 알려져 있다.

대만 부근의 플레이트 경계 및 집집지진의 진앙과 단층에 대한 모식도는 그림 1과 같으며, 지진이 발생한 장소는 대만 서부산림대의 퇴적물로 쌓인 평야와 접하는 곳이다. 플레이트의 상대운동은 서부산림대 아래의 역단층과 접하는 경계면에서 발생하였고, 집집지진시 활동한 단층은 첼룽포(Chelungpu) 단층이다.

대만의 경제부 중앙 지질조사소가 1998년에 출판한 <대만 활성단층 개론>에 의하면 길이 5km 이상의 활단층이 51개로 알려져 있고 제1류 활성단층, 제2류 활성단층, 존의성(存疑性) 활성단층의 3종류로 분류하고 있으며, 각각 9개, 15개, 27개로 구분하고 있다.

- 제1류 활성단층

- 과거 10,000년 이내에 변위를 발생한 단층
- 현재의 구조물에 변위를 발생한 단층

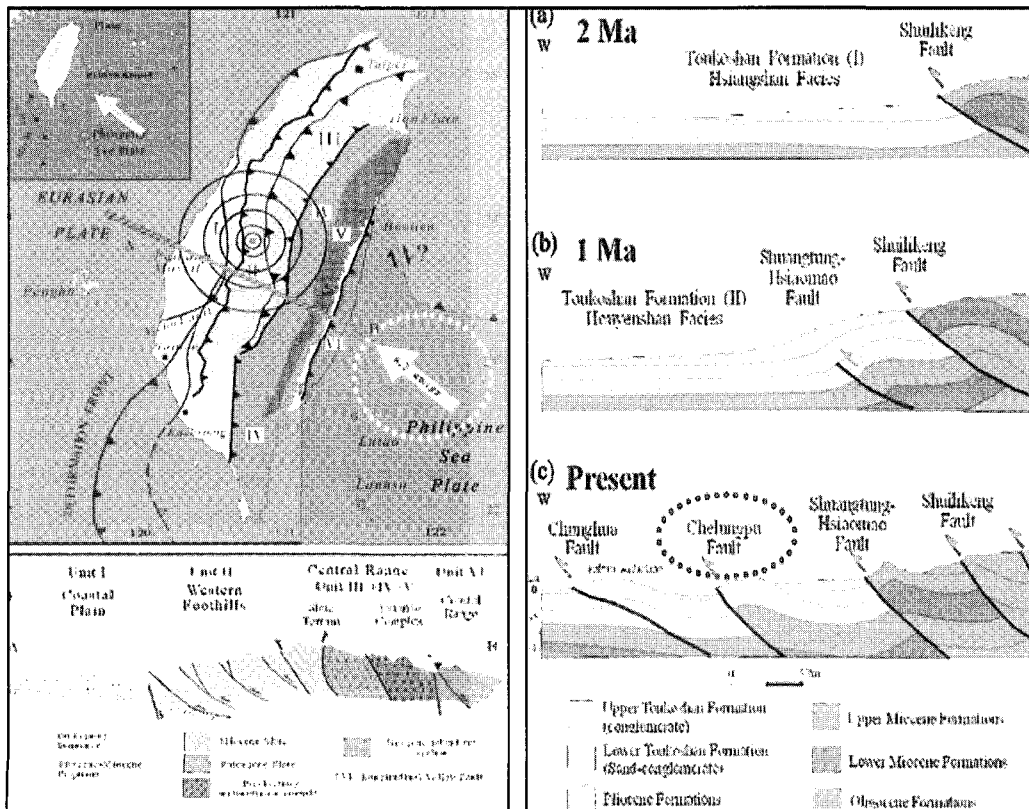


그림 1. 대만 부근의 플레이트 경계와 집집지진 진앙

- 지진에 의해서 발생한 단층
- 충적층에 변위를 발생한 단층
- 지형관측에 의해 변위가 확인된 단층
- 제2류 활성단층
  - 과거 100,000년 이내에 변위를 발생한 단층
  - 퇴적층에 변위를 발생한 단층
- 존의성 활성단층
  - 제4기의 지층에 변위를 발생하고 있는 단층
  - 라테라이트 기복면에 변위를 발생하고 있는 단층
  - 활동단층의 지형적 특징을 가지고 있는 지질적 증거가 있는 것

## 2.2 지진동

집집지진의 지진동은 그림 2와 같이 대만국립지진공학연구소가 진앙에 근접한 집집의 서쪽 13.2km에 위치하고 있는 지진 관측점 CU067에서 관측한 최대가속도 EW 성분은 981.0gal이었고, NS성분은 610.7gal, 연직 성분은 335.0gal로 나타났다.

수평방향 성분의 가속도 중 EW 성분의 최대가속도는 981gal로서 약 1g에 해당하는 값이며, NS성분의 최대가속도는 610gal로서 EW성분의 약 62% 정도로 나타났다. 또한, 수직성분의 최대가속도는 335gal로서 0.34g 정도로서 수평 최대가속도의 34% 정도로 나타났다.

따라서, 지진에 의한 3성분 방향별 최대가속도의 비율은 1 : 0.62 : 0.34로 나타났다. 이는 내진설계 및 내진성능 평가에서 일반적으로 고려하는 수평방향 최대가속도와 수직방향 최대가속도의 비가 30%를 적용하는 것과 거의 비슷한 결과를 나타낸 것이다.

## 2.3 석강댐 주변의 단층활동과 지반변위

그림 3은 지진이 발생한 후 석강댐 주변의 지표에 나타난 활동 단층의 위치와 개략적인 이동방향, 지반의 변위 등을 나타낸 것으로 대만의 경제부 수자원청 수자원국에 의한 실측치이다.

A단층은 댐 하류에서 우안부까지 활동하여 약 3~4m의 수평상대변위와 약 5~6m의 수직상대변위

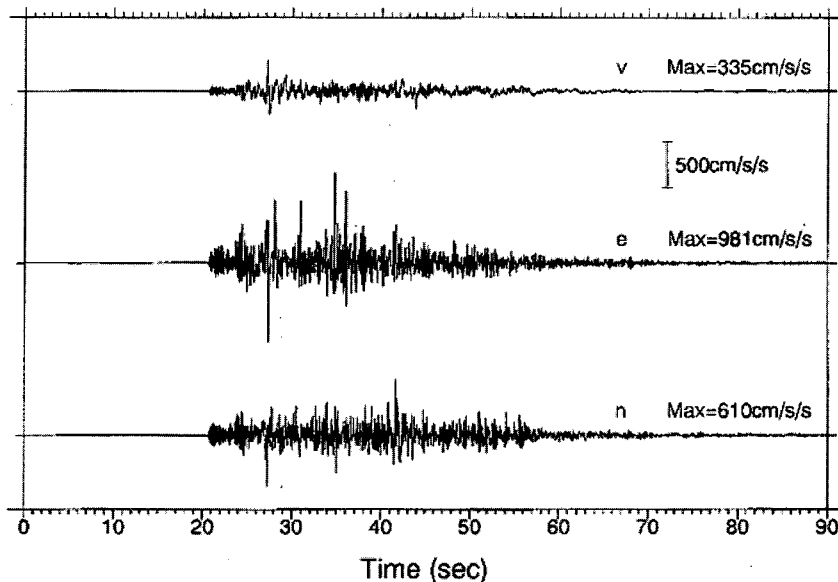


그림 2. 집집지진의 지진동(CU067 지점)



## 기술분야

를 발생시켰으며, B단층은 댐 하류에서 좌안 상류까지 활동하여 수평상대변위를 약 3m, 수직상대변위를 약 3.5m 정도가 발생시켰다.

댐에 직접적인 파괴 원인을 제공한 C단층은 댐체 우안부를 가로질러 상류까지 활동하였으며, 수평상대변위는 약 3m, 수직상대변위는 약 8~10m 정도 발생한 것으로 나타났다.

또한, 주변 현황은 댐체 하류에 하천을 가로질러 설치된 교량이 붕괴되었고, 하천을 가로지르는 단차로 인해 폭포가 형성되었다.

### 2.4 석강댐의 피해

석강댐은 1974년 착공하여 1977년 완공된 콘크리트 중력식댐으로 관개 및 수도용수 공급을 목적으로 하고 있으며, 담수면적 1,061km<sup>2</sup>, 유효저수용량 2,700,000m<sup>3</sup>, 댐 높이 25m, 댐 길이 357m이다.

석강댐의 평면도와 단면도는 그림 4와 같으며, 세부제원은 표 2에 나타내었다.

석강댐은 921 집집 지진에 의해 댐 제체, 피어 및 웨어부 균열, 기초지반 균열, 게이트 손상, 관개 및 수도용수 공급 관로 파괴 등의 심각한 피해를 입었으

며, 댐체 피해 상황은 사진 1, 2, 3과 같다.

그림 5와 같이 지진 후 석강댐을 측량한 결과, 전체적으로 표고가 상승한 것으로 나타났으며, 여수로 NO.18을 기준으로 좌안측은 댐 마루 표고가 EL. 272.0m에서 EL. 283.05m로 약 11m 정도 상승하고, 우안측은 EL. 272.0m에서 EL. 273.01m로 약 1m 정도 상승하여 상대적인 표고 차이가 약 10m 정도 발생된 것으로 조사되었다.

따라서, 기초 지반이 지진에 의한 단층 활동으로 댐체 지반의 변화와 함께 댐체가 붕괴되었으며, 붕괴가 발생되지 않은 일반적인 댐체의 경우도 그림 6과 같이 피어에 균열을 동반하거나 피어와 웨어의 연결부에 균열이 발생되었다.

댐체 피어 및 웨어부에 나타난 균열은 전반적으로 상·하류 방향의 수평균열로서 수 mm부터 수십 mm의 균열 폭을 가지고 있으며, 균열깊이는 콘크리트 표면 몇 mm에서 피어를 관통하여 발생한 것도 있다. 피어의 균열이 상·하류 방향의 수평 방향성을 가지고 있는 것은 댐체의 기하학적 특성상 댐축 방향으로의 단면이 얇고 피어와 웨어의 연결부는 단면이 급변하는 변 단면으로서 댐체의 자중이 지진시 관성력으로

표 2. 석강댐의 제원

구분	내용	제원	비고
댐	형식	중력식 콘크리트댐	
	제고	25m	
	정상표고	EL. 272.00m	
	월류정 표고	EL. 259.50m	
	댐 길이	357m	
저수지	집수면적	1,061km <sup>2</sup>	
	상시 만수위	EL. 267.10m	
	최고홍수위	EL. 267.25m	
	총저수용량	3,380,000m <sup>3</sup>	
여수로	형식	게이트식 자유월류	(폭12.8m×높이8m×18문)
	홍수처리능력	8,000m <sup>3</sup> /s	
	게이트	레디얼 게이트	
공사기간	1974년 착공, 1977년 완성		

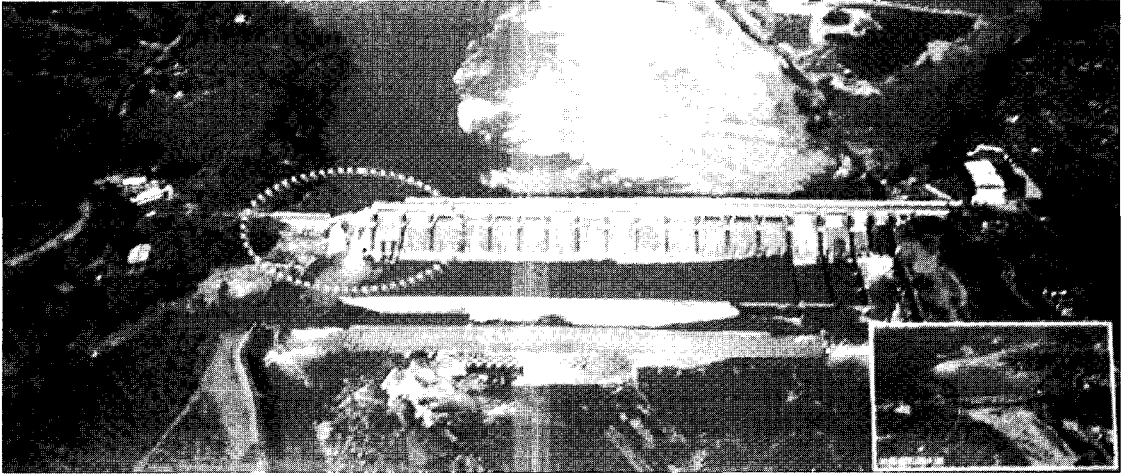


사진 1. 석강댐 피해 현황

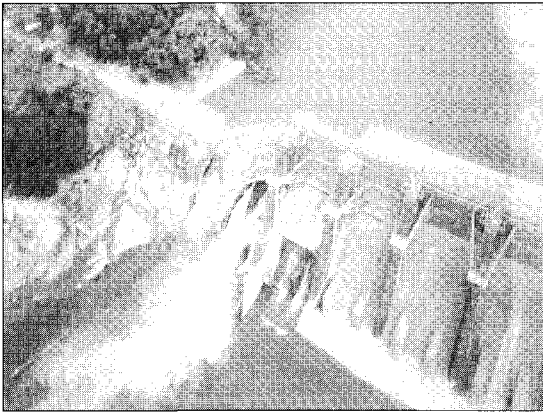


사진 2. 댐체 우안부 붕괴

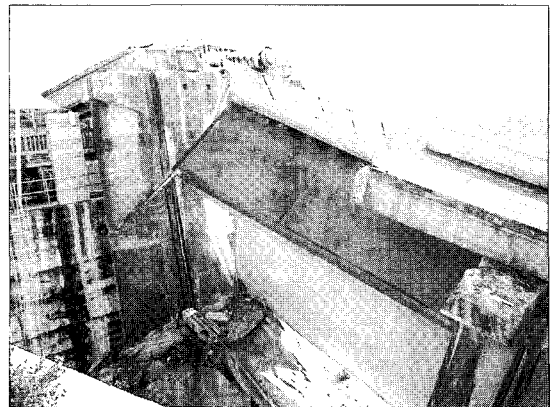


사진 3. 우안 월류부 및 비월류부 붕괴

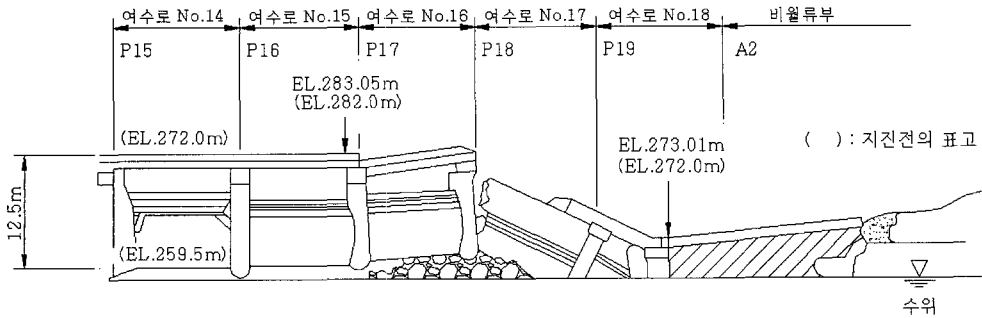


그림 5. 댐체 여수로(NO.15~NO.19) 및 우안 비월류부 변위 모식도

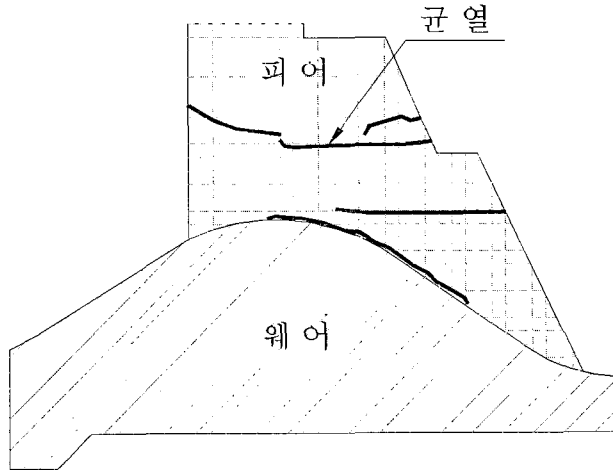


그림 6. 피어 및 웨어에 발생된 일반적인 균열 형태

전환되어 나타나는 외적인 힘에 의해 의한 것으로 판단되었다.

또한, 그림 7과 같이 균열은 웨어와 피어를 연하여 발생하거나 댐체의 한개 블록을 관통하여 발생한 것도 있으며, 방향성은 수평 또는 사선 방향으로 주로 발생하여 지진동의 주 방향성과 상관성이 있는 것으로 판단되었다.

집집 지진의 수평방향에 대한 주된 지진동은 동서

방향이고 댐축은 남동쪽에서 북서쪽으로 놓여 있어 지진의 주된 방향과 약 15° 정도 기울어져 있어 균열의 양상이 주로 댐축과 경사를 이루고 있는 것으로 판단된다.

한편, 댐체의 균열 뿐 만 아니라 댐체의 블록 사이에는 수십 mm에 이르는 이음부 개도 현상(Joint Open)이 발생하여 저류수의 누수가 심하게 발생하였으며, 그 이외에 도류벽, 여수로 엔드실과 에이프론,

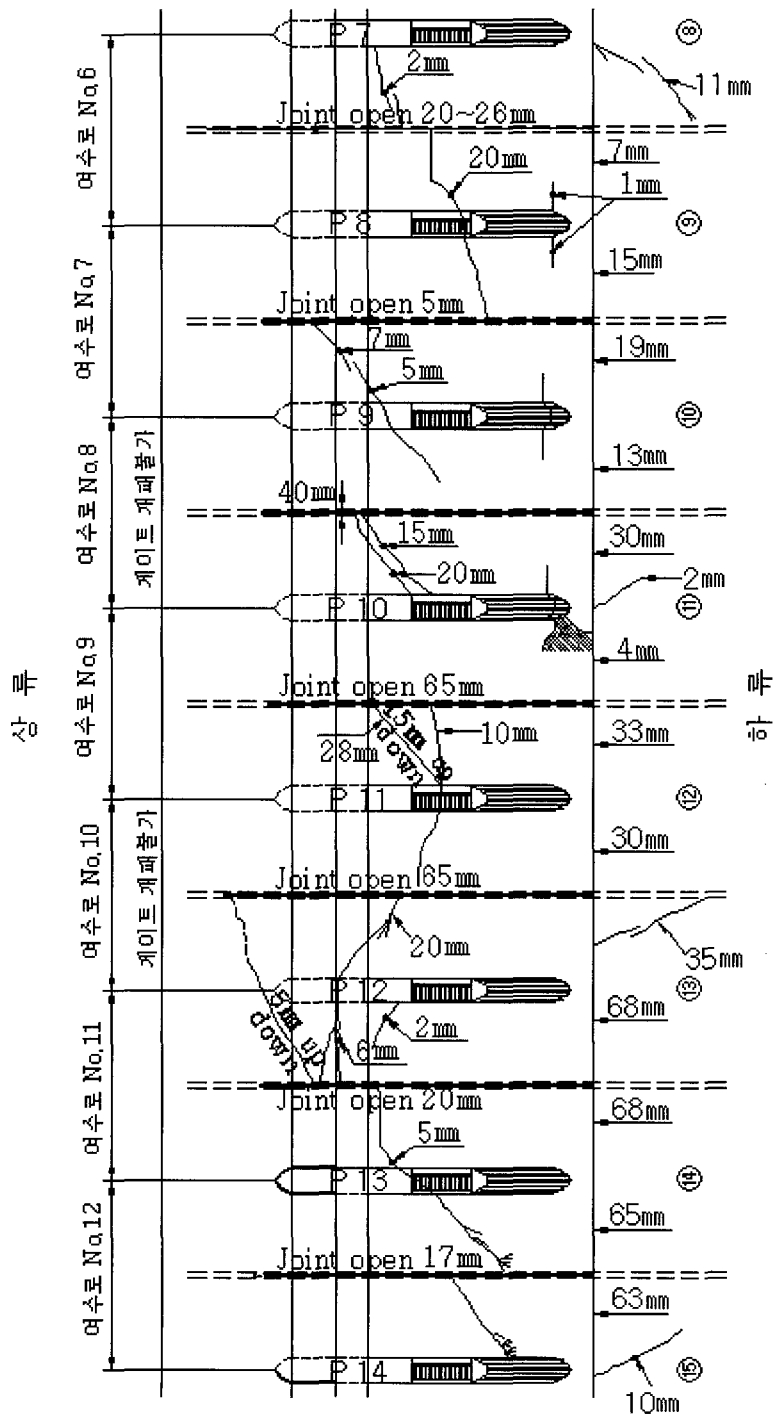


그림 7. 댐체에 발생한 균열의 방향성(여수로 NO.6~12)



취수문과 도수터널 등에도 부분적인 붕괴 및 균열과 누수 등이 심각하게 나타났다.

### 2.5 석강댐의 보수 및 보강

921 집집지진에 의해 피해를 입은 석강댐의 보수 및 보강은 기존 석강댐의 기능을 회복하는 측면에서 수행이 되었으며, 가능한 수준에 따라 시급성을 고려하여 단기적, 중기적, 장기적으로 구분하여 보수 및 보강을 수행하였으며, 최종 보수 및 보강이 완료된 댐의 전경은 사진 4와 같다.

#### • 단기적 목적

- 댐 상류 측면에 인공수로 설치를 통한 용수공급
- 댐체 상류에 가물막이 설치 및 댐체 보수
- 용수공급용 도수 터널 복구

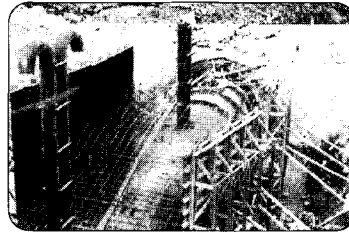
#### • 중기적 목적

- 댐체의 피어 및 웨어 부분 손상부위 그라우팅
- 기초지반 균열부위 그라우팅
- 여수로 수문 보수
- 댐하류 엔드실 보수
- 양안부 옹벽 보수
- 기존 용수공급 관로 복구

#### • 장기적 목적

- 피해 복구 후의 댐의 안전성 확보 여부 점검 및 진단
- 지진 관련 자료 수집 및 분석

#### 1) 용수공급용 도수 터널 복구



B단층이 연직방향으로 약 3.5m 활동함에 따라 단층과 직교하여 매설되어 있던 용수공

급용 도수터널이 절단되었다. 이를 복구하기 위해 강관 파이프를 사용하였으며, 단층의 연직변위에 의해 단차가 발생한 구간은 S-형태의 강관을 사용하여 지반의 변위에 적합하도록 연결하였으며, 나머지 구간은 일반강관으로 교체하여 매설하였다.

또한, 강관의 안전성을 확보하기 위해 강관의 배면은 콘크리트로 채워 안전성을 확보하는 보강 공사를 실시하여 용수공급을 통한 댐의 기능을 회복하고자 하였다.

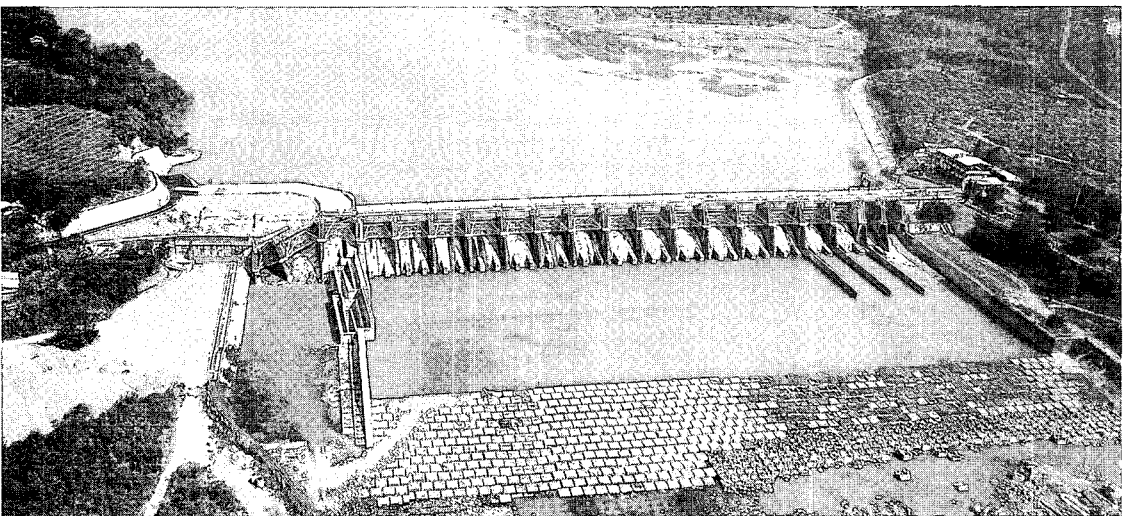
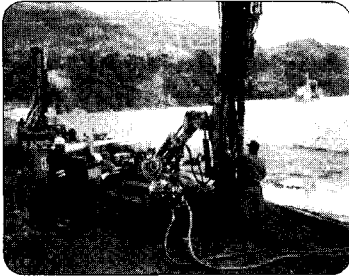


사진 4. 보수 및 보강 공사 완료후의 전경

2) 댐체의 복구



댐체는 여수로 17과 18을 기준으로 좌안부는 약 11m 상승하고 우안부는 약 1m상승하여 상대적인

표고차가 10m정도 발생하였으며, 전반적으로 댐체의 피어, 웨어 및 기반암도 요철이 심한 상태로 균열이 발생하였다.

이를 위해 댐체 피어와 웨어 및 기반암에 시멘트 밀크를 주입하여 지수 및 견고성을 강화하는 그라우팅을 실시하였고, 그라우팅 후에는 전단에 대한 저항력을 증가하기 위해 강재를 삽입하였다.

3) 댐체 우안 파괴 부분 복구

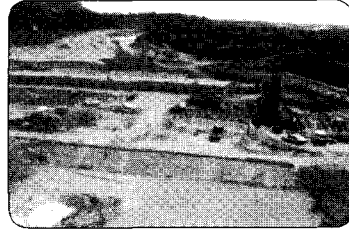


우안부 여수로 17과 18은 완전히 파괴되어 기존 구조물을 활용한 복구는 불가능한 것으로 판단되었으며, 지진에 대한 피해를 그대로 유지 및 전시하여 국민교육 장소로 활용하는 방안이 검토되었다.

따라서, 파괴된 댐체 상류에 슈트 파일을 34m 설치하고 파괴된 댐체와의 공간을 콘크리트로 채움으로서 파괴된 부분은 그대로 유지하고 저류수의 흐름을 막아 비월류부로 전환하는 방법을 채택하여 시공하였다.

따라서, 2개의 여수로를 폐쇄함으로써 홍수시 방류하여야 할 홍수량 부족 부분은 댐체 좌안부에 홍수 조절용 관로를 만들어 이를 대체하는 방법을 사용하여 해결하였다.

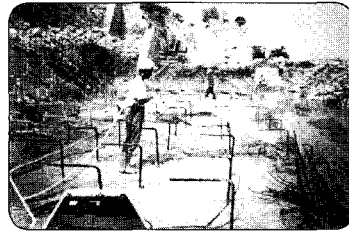
4) 댐체 하류부 복구



댐체 하류부는 저류수의 방류시 유속감소와 침식방지를 위한 Plunge Pool이 필요하다

따라서 기반암에 균열이 발생한 부분에 대해서는 그라우팅을 실시하여 보강하고 그 위에 새롭게 콘크리트를 타설하여 보를 만들고 물이 고일 수 있도록 하였다.

5) 댐체 좌안 하류 옹벽 및 월류부 수문 복구



댐체 좌안 하류 옹벽은 붕괴에 의해 약 53m 정도 보수가 필요하여 전부 재시공을 하였으며, 수문 게이트는 대부분 튀틀리거나 비틀어져 정상적인 기능을 할 수가 없어 세부적으로 손상조사를 실시하여 손상의 정도에 따라 보수 정도 또한 달리 하였다.



비교적 손상이 덜하고 개패시 콘크리트와 마찰이 있는 게이트는 고무 패드를 새로 교체하여 지수를 하거나 피어의 콘크리트를 부분적으로 제거하여 게이트가 움직이는 공간을 확보하였고, 손상이 심한 게이트는 전면 교체하거나 현장에서 부분적으로 분해하여 새로 제작하는 방법으로 보수를 하였다.

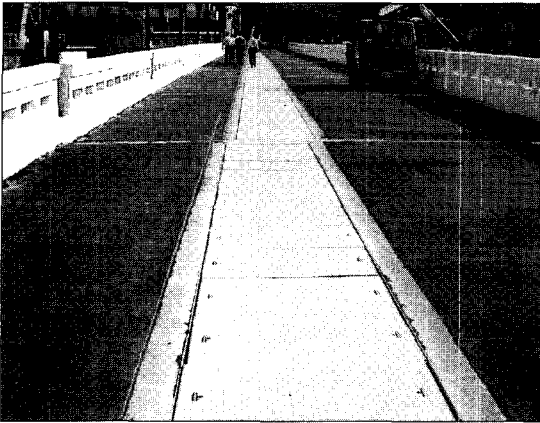


사진 5. 블록별 댐축의 선형 불일치

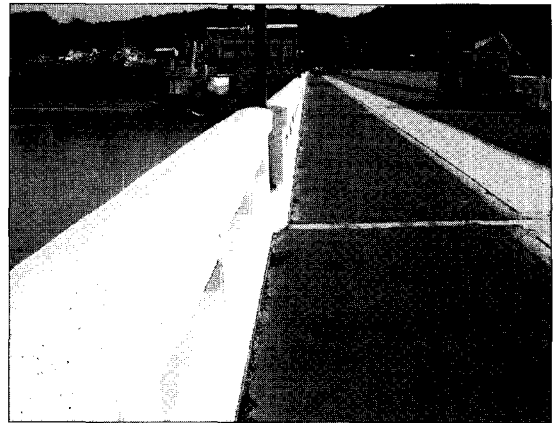


사진 6. 댐 상류측 경계석 선형 불일치

이상과 같이 완전히 파괴되어 기능 수행이 불가능 하였던 석강댐을 다양한 보수 및 보강 방법을 통하여 개선하고 경제적인 측면에서도 효율을 최대로 하는 방법을 통하여 현재 다시 정상적인 기능을 수행하고 있다.

다만, 지진에 의해 파괴되었던 대부분의 큰 문제들은 보수하였으나 사진 4와 같이 댐축이 블록별로 일치되지 않고 지진동에 의해 변위가 발생되었던 모습 그대로 남아 있는 등의 미세한 부분들에 대해서는 아직도 문제점들을 그대로 안고 있다.

### 3. 결론

이상과 같이 대만에서 발생한 921 집집 지진의 현황과 그로 인해 피해를 입은 여러 시설물 중 콘크리트 중력식댐인 석강댐을 중심으로 보수 및 보강에 대한 내용에 대해 간략하게 소개를 하였다.

하나의 댐을 예로 들어 지진시 콘크리트 중력식댐의 붕괴에 대한 특성을 논하기에는 무리가 있지만 전반적으로 기초지반에 대한 조사를 철저히 하여야 한다는 점은 강조해도 지나침이 없을 것 같다.

댐체의 경우에는 피어를 중심으로 균열 등이 발생

하는 것으로 나타났으며, 이 중에서도 특히 단면이 급변하는 부위를 중심으로 균열이 발생하고 댐 축방향의 지진동에 취약한 특성을 보이는 것으로 조사되었다.

이는 실제 지진동이 3축 방향으로 모두 발생하나 댐체의 구조가 저류수를 방류하도록 되어 있어 형상이 댐축 방향으로 얇은 구조를 가지고 있는 기하학적 특성 때문에 상하류 방향의 지진동에 의한 손상 보다는 댐축 방향의 지진동에 의해 피해가 더 클 것으로 판단된다.

한편으로, 아무리 거대하고 튼튼한 구조물이라 하여도 자연의 거대한 힘 앞에서는 미약한 사물에 지나지 않는다는 교훈과 엔지니어로서 깊이 생각해야 할 것은 구조물 설계와 시공시 기초 지반의 상태를 충분히 조사하고 신중히 판단하여야 한다는 사실이다.

또한, 아무리 기술과 과학이 발달하였다 하더라도 한번 손상을 입은 구조물은 이전과 같은 구조물로 돌려놓기에는 현실적으로 어려움이 많고 경제적으로도 엄청난 비용이 투입 되어야 된다는 사실이다.

따라서, 최초 설계와 시공을 충실히 하여 영구적으로 활용할 수 있는 구조물이 될 수 있도록 하고 자연 재해가 발생하더라도 피해를 최소화 할 수 있는 시설물이 될 수 있도록 고민하고 실천하여야 할 것이다.