

불리한 조건에서의 콘크리트 표면차수벽형 석피댐 설계 및 시공

박동순^{*)} · 김형수¹⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소

Study on Design and Construction of CFRD under Unfavorable Conditions

Dong-Soon Park^{*)} · Hyung-Soo Kim¹⁾

¹⁾Dam Engineering Research Center, Korea Water Resources Corporation

콘크리트 표면차수벽형 석피댐(CFRD; Concrete Faced Rockfill Dam)은 기존의 중심코어형 락필댐(ECRD; Earth Cored Rockfill Dam)과 대별되는 우수한 구조적, 재료적 특성으로 현재 가장 널리 활용되는 댐 형식이다. 본 고에서는 불리한 조건에서의 CFRD의 설계와 시공에 있어 최근에 부각된 최신 기술들을 정리하여 향후 활용에 도움을 줄 수 있도록 하였다. 예를 들어, 연약한 암을 이용한 댐체 축조, sand-gravel fill, 연결 슬래브 공법, 충전층 기초의 처리 공법등에 대한 간략한 기술적 동향을 고찰하여 관련 기술자들의 이해를 돕고자 하였다.

주요어: 표면차수벽형 석피댐, 사력재, 충전층, 기초 처리

On this study, prevailing design and construction methods of dam under various unfavorable conditions are summarized. For example, foundation treatment with large scale alluvium site or weathered rock mass, dam constructing techniques with unfavorable topographic conditions are studied for the better understanding of relating engineers. Also, zoning by using weak rocks and sand-gravel fill techniques are summed up.

Key words : CFRD, Concrete Faced Rockfill Dams, Sand-gravel fill, Foundation Treatment

서 론

한국에는 이미 수많은 댐들이 건설되었기 때문에 이제는 좋은 지질조건을 가지고 있는 신규 댐 지점을 찾기가 점점 어려워지고 있다. 지형적으로, 지질학적으로 나쁜 조건이어서 과거에는 댐 지점으로 선정되지 않았던 지점에도 최근에는 댐이 건설되고 있다. 예를 들자면 최근 화북댐 대안설계에서 고려되었던 하상(riverbed)에 직접 제체를 앉히는 경우나, 충전층(alluvium)이나 잔

류층(residual soil)에 CFRD 기초를 설계해야 하는 경우가 빈번해지고 있는 추세이다. 따라서 CFRD의 설계에 있어 댐체의 안전은 물론 기초암반의 안정성에 대한 충분한 사전검토가 시행되어야 하며, 이를 위해서는 충전층이나 연약한 풍화암질 기초에 대한 이해가 선행되어야 한다. 또한 국내에는 아직 사력 CFRD 축조사례가 없으나, 실제 해외에서는 하상 사력재도 배수 시스템만 적절히 고려되어진다면 충분한 강도와 우수한 성능을 발휘하는 것으로 알려졌다.

* Corresponding author : fulgent@kowaco.or.kr

따라서 향후 CFRD의 설계와 시공에 있어서 불리한 기초와 축조재료를 갖는 부지의 처리 사례를 고찰하는 것은 매우 의미있는 일이라 하겠다.

불리한 기초의 처리

CFRD 기초설계에 있어 가장 중요한 plinth 기초지반에 대한 굴착은 대상지반의 지질특성, 즉 연암 내지는 경암, 풍화암, 잔적토(residual soil), 충적토(alluvium)와 같은 굴착지반 종류에 따라 달라진다. 원칙적으로 plinth 기초는 신선하고 그라우팅 가능하며 침식을 일으키지 않는 암반을 기준으로 한다. 그러나 plinth가 질이 낮은 암반(Khao Laem 댐)에 시공되거나, Colombia Salvajina 댐과 같이 전체 plinth 기초의 대부분이 심하게 풍화된 암반과 품질이 낮은 충적층 위에 시공된 극단적인 예들도 있다. 대표적인 예로 Chile의 Santa Juana와 Puclaro, 아르헨티나의 Pichi Picun Leufu 등에서는 diaphragm wall을 사용하여 plinth 기초부를 보강 처리하였다. 현재까지 아르헨티나의 Los Caracoles(1999), 모로코의 Chakoukane 댐(1999)에서 볼 수 있듯이 침투수를 조절하기 위해 깊은 심도의 콘크리트 다이어프램과 연결식 plinth를 두터운 충적층상에 시공한 댐은 매우 흔해졌다. 특히 충적토 지반을 굴착할 때는 다져진 자갈위에 plinth를 시공하고, 상부층 재료를 다짐 필터층으로 치환시키는 방법을 쓸 수 있다. 이와 같은 예는 Chile의 Santa Juana에서 찾아볼 수 있다.

특히 하상이 자갈층일 때 이 층이 낮은 컨시스턴시

나 쉽게 액성을 띠 수 있는 경우에는 이 층을 제거하는 것이 바람직하다. Alto Anchicaya 댐이나 Saloajina 댐에서는 자연하상을 부분적으로 남겨 놓았는데, 이는 하상재료의 거동이 댐의 주 성토재의 거동과 유사했기 때문이다. 침식 가능성이 크고 점토나 실트가 끼어있는 경우 파이핑을 유발할 수 있는 층은 제거하거나 필터 처리해야 한다.

충적층(Alluvium) 기초

전 세계적으로 충적토층(Alluvium)상에 시공된 CFRD 댐들의 숫자가 해마다 늘고 있으며, 그에 따라 기술력도 비례하여 고양되고 있다. 충적층(alluvium)은 하천 유수의 흐름에 의해 퇴적되는 느슨한 자갈이나 모래, 실트, 혹은 점토질의 토층을 말하며, 간혹 하상의 중하류부에 댐 부지를 선정하는 경우 충적층 기초를 불가피하게 설계해야 하는 경우가 발생한다.

하상 충적층에 CFRD 기초를 구성할 수 있는 가능성은 다음의 두가지 고려사항을 만족할 때이다.

- ① 충적층은 낮은 압축성을 가져 담수후에도 변형이 거의 일어나지 않을 것.
- ② 수하중으로 인한 지반이 겪는 변형을 흡수할 수 있도록 유연한 구조물(flexible structure)이 설계되어야 함.

충적층 기초를 가진 해외의 대표적인 댐들의 현황은 다음 Table 1과 같다.

충적층 기초상에 시공된 대표적인 몇 개의 댐 사례를 들면 다음과 같다.

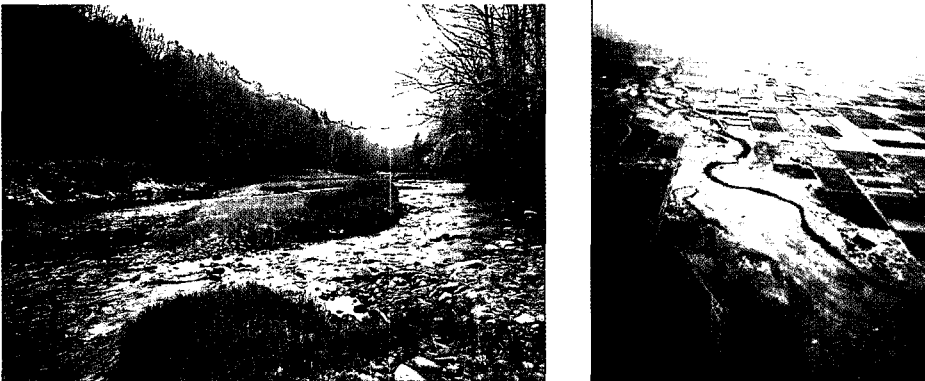


Fig. 1. Picture example of alluvium.

Table 1. CFRD Foundation Treatment in the alluvium (Choi, 2004).

Dam name	Country	Dam height (m)	Plinth foundation	Upstream dam foundation	Central part of dam foundation	Downstream dam foundation
Bakun	Malaysia	205	Founded on rock; alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium excavated
West Seti	Nepal	190	Founded on 50m deep gravel deposit; gravel unexcavated	Gravel unexcavated; high resistance to seismic loads (+)	Gravel unexcavated; high resistance to seismic loads (+)	Gravel unexcavated; high resistance to seismic loads (+)
Hongjiadu	China	187	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Aguamilpa	Mexico	183	Gravel completely excavated	Gravel excavated	Gravel unexcavated	Gravel unexcavated
Mazar	Ecuador	183	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Miel 1	Colombia	183	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Salvajina	Colombia	148	Founded on rock; alluvium completely excavated	Alluvium of boulders and gravels in sandy silty matrix; unexcavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Alto Anchicaya	Colombia	140	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Gojeb	Ethiopia	135	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Khao Laem	Thailand	130	Founded on rock; dirty boulders completely excavated	Dirty boulders excavated	40m deep dirty boulders in clay matrix unexcavated	40m deep dirty boulders in clay matrix unexcavated
Golillas	Colombia	130	Alluvium completely excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Siah Bishe lower dam	Iran	130	Founded on rock; dirty alluvium completely excavated	Dirty alluvium excavated	Dirty alluvium excavated	Dirty alluvium excavated
Reece	Australia	122	Founded on rock; river gravel completely excavated	River gravel excavated	River gravel unexcavated	River gravel unexcavated
Santa Juana	Chile	113	Founded on gravel; gravel unexcavated	Gravel unexcavated	Gravel unexcavated	Gravel unexcavated
Cethana	Australia	110	Founded on rock; alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Xibeikou	China	95	Founded on rock; gravel+sand completely excavated	River gravel + sand excavated	River gravel + sand unexcavated	River gravel + sand unexcavated
Siah Bishe upper dam	Iran	90	Founded on rock; dirty alluvium completely excavated	Dirty alluvium excavated	Dirty alluvium excavated	Dirty alluvium excavated
Kanan	Philippines	70	Alluvium excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium excavated
Kangaroo Creek	Australia	59	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium excavated
Pichi Picun	Argentina	54	Alluvium completely excavated	Alluvium excavated	Alluvium unexcavated	Alluvium unexcavated
Merowe	Sudan		Fine sand + silt completely excavated	Fine sand + silt excavated	Fine sand + silt excavated	Fine sand + silt excavated
Puclao	Chile		Founded on gravel unexcavated	Gravel unexcavated	Gravel unexcavated	Gravel unexcavated

Santa Juana, Puclaro 댐

칠레의 Santa Juana와 Puclaro 댐의 경우 최대 30m와 113m 깊이의 하상 충적층상에 기초를 두고 있다. 둘 다 연직 콘크리트 다이어프램 지수벽(concrete diaphragm cutoff wall)을 하상 자갈층에 시공하였다. 1995년 106m 높이의 Santa Juana 댐이 암반까지 35m 깊이의 연직 지수벽과 함께 시공되었다. 또한 Puclaro 댐은 1999년 83m의 높이로 부분적인 지수벽 60m와 함께 시공되었다. Puclaro에서 충적층은 113m 깊이였고 경제성을 만족시키면서 누수를 제한하기 위해 60m 깊이의 지수벽을 선택하여 시공하였다. 이 부분적 지수벽의 깊이는 누수가 경제적으로 중요하지 않고 수직 동수경사가 무시할만하였기 때문에 선택할 수 있었다.

일반적으로 칠레의 계곡부 충적층은 다짐된 gravel-fill 댐과 비슷한 품질을 보이는데, 전반적으로 낮은 압축성, 강도특성과 자유 배수 특성을 지닌다. 강의 상대적으로 가파른 경사 때문에 자갈층은 전형적으로 10%이하의 낮은 세립분 함유율을 가지며 따라서 별도의 처리 없이도 그 자체가 좋은 축조재의 역할을 가능케 하였다. 충적 퇴적층은 낮은 침투성과 압축특성을 보여서 CFRD 기초지반으로서 좋은 조건을 형성하였다. Gravelfill에 대한 평균적인 물성 특성은 다음과 같다.

- 현장 하상 자갈의 자연 단위중량 : $1.95 \sim 2.2t/m^3$
- 평균 댐 단위중량 : $2.3t/m^3$

CFRD의 plinth는 암반기초에 직접 붙이는 경우가 일반적이거나 락필이나 gravelfill 콘크리트 차수벽 댐이 충적층 기초상에 놓여질 경우 댐 아래의 침투수를 줄이기 위해 충적층으로부터 기반암에 이르기까지 콘크리트 다

이어프램 월을 콘크리트 페이스와 연결시키는 시공방법을 쓰게 되었다.

지수벽은 댐 기초에 자갈 충적층보다 압축성이 낮다. 따라서 지수벽의 캡 부분은 담수하는 동안 콘크리트 페이스와 인접한 댐 제방의 움직임으로 인해 부등침하와 변위를 경험할 수 있다. 안정성 분석 결과에 비추어 보면 지수벽 캡과 콘크리트 차수벽과 연결하는데 유연한 부재(flexible element)가 필요함을 알 수 있다. 이 유연한 부재는 연결 슬래브(connection slab)의 명칭으로 도입되었다.

Kekeya 댐

중국의 경우도 적지 않은 사례가 하상 충적층 상의 불리한 지대에 댐 기초를 시공하였다. 이러한 경험을 바탕으로 중국은 현재 다양한 충적층 기초처리에 대한 처리

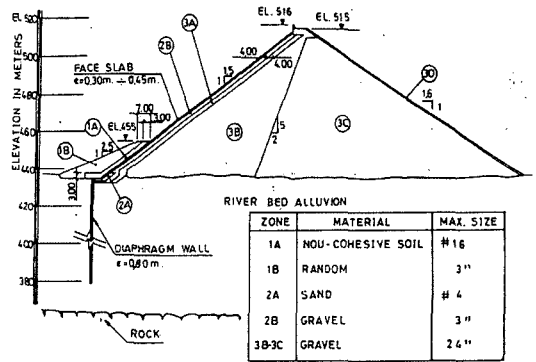


Fig. 2. Cross section of Puclaro dam.

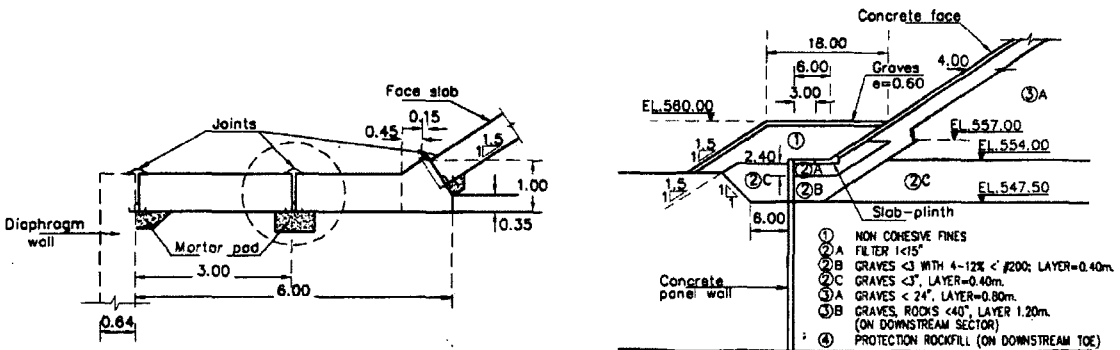


Fig. 3. Plinth - foundation treatment in the Santa Juana dam.

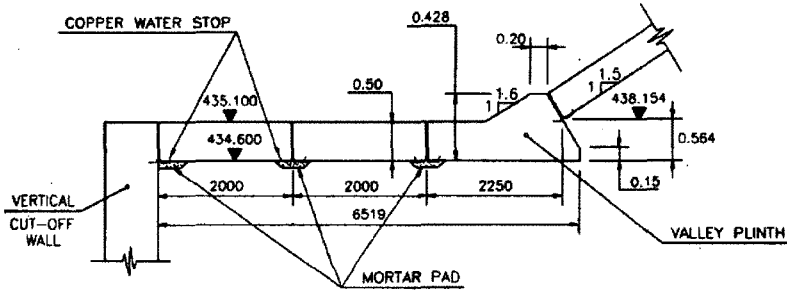


Fig. 4. Connection slab in the puclaro dam.

Table 2. CFRDs with concrete diaphragm wall in China (2000).

NO	Name	Height (m)	Length (m)	Slope		Face area m ²	Alluvium depth m	Concrete diaphragm wall			Comple-tion
				US	DS			depth m	width m	number	
1	Kekeya	41.5	120	2.0/2.75	1.5/1.75	12000	37.5		0.8	1	1986
2	Hengshan raised	70.0	382	1.4	1.3	10500	11.0	72.3	0.8	1	1992
3	Tongjiezi saddle	48.0	1085	1.75	1.7	20000	77.0	70.0	1.0	2	1992
4	Caoyutan	16.0	477	1.6	1.5	12200	10~22		0.8	1	1995
5	Lianghui	35.4	385	1.4	1.4	21786	39		0.8	1	1997
6	Meixi	40.0	652	1.4	1.3	37310	8~30	20	0.8	1	1997
7	Cengang	27.6	287	1.4	1.4	11500	39.5	35.3	0.8	1	1998
8	Tangpu East	29.6		1.4	1.4		20	25	0.8	1	1999
9	Tangpu West	37.2		1.4	1.4		20	25	0.8	1	1999
10	Tasite	43.0	180	1.6	1.6				0.8	1	u/c
11	Chusong	40.0	312	1.8	1.3				0.8	1	u/c

기술을 축적하고 있으며, 향후 국내 층적층 기초 설계시 유용한 자료로 활용가능하다고 판단된다.

모래와 자갈이 퇴적된 층적층(sand-gravel alluvium)에 시공된 댐으로, Kekeya 댐이 있다. 이 댐은 1982년 준공하였고 성능은 양호하다. 이 댐의 주요특징은 다음과 같다.

- ① 이 댐은 흙댐과 비슷하게, 상류사면경사가 1:2.0이며, 사력재료로 축조되어졌다.
- ② 최대 층적층의 깊이는 27.5m로서 소성콘크리트 diaphragm wall로 치환되었고, 굽어진 콘크리트 toe slab에 의해 차수벽과 연결되었으며, 댐의 heel에서 23m 상류쪽에 시공되었다.
- ③ 콘크리트 차수벽은 매스틱 재료로 지수된 연직 및

수평 조인트에 의해 분할되어 있다.

Tongjiezi 댐 사례

층적층이 두터운 기초지반을 갖는 Tongjiezi 수력발전용 댐은 48m 높이의 CFRD이다. Tongjiazi 수력발전 프로젝트에는 두 열의 콘크리트 다이어프램 월을 그림과 같이 콘크리트 중력식 옹벽을 지지하고, 침투를 방지하기 위해 설치하였다. 정부 길이는 434.5m이며, 150m 정도가 깊이 30~73.5m의 깊은 층적 퇴적층위에 건설되었다. 침투성 기초를 두 줄의 콘크리트 diaphragm wall로 처리하였다.

호소는 1992년 4월 담수되었고, 심각한 누수나 균열

없이 만족스러운 거동을 나타냈다. 따라서 만족할만한 기술과 합리적인 설계가 바탕이 된다면, 이러한 어려운 조건하에서도 CFRD는 훌륭히 건설될 수 있음을 입증해 주었다.

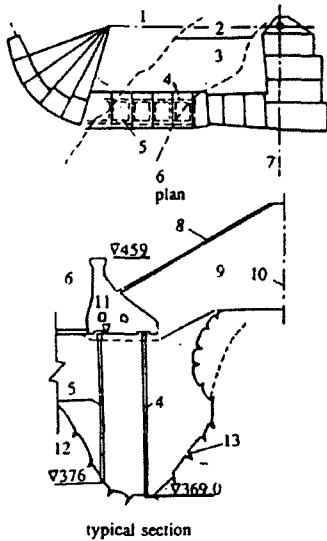


Fig. 5. Left saddle dam of Tongjiezi (1. axis of rockfill dam, 2. boundary of bed rock, 3. left deep trench, 4. concrete diaphragm #2, 5. concrete diaphragm #1, 6. diversion channel, 7. axis of main dam, 8. concrete face slab, 9. rockfill dam, 10. dam axis, 11. concrete plinth, 12. bed rock, 13. boundary of left deep trench).

Pichi Picun Leufu 댐

Pichi Picun Leufu는 50m 높이에 1000m 연장의 CFRD로서 1999년 완공되었으며, 아르헨티나에서 건설된 최초의 표면차수벽형 사력댐(concrete faced gravel-fill dam)이다. 이 댐의 경우 사력 채움(gravelfill)재는 plinth 밑과 하류방향 10m 폭 지역을 제외하고, 거의 대부분의 저면 폭에 걸쳐 발달된 두꺼운 자연 충적층(최대 25m)상에 시공되었다.

충적층은 얇은 실트질 모래층을 가진 모래질 자갈이다. Plinth에서 하류방향으로 10m 폭을 제거하고 보다 잘 조절되고 다짐된 채움재로 대체시켰다. 사력축조재는 느슨한 충적층을 굴착한 뒤 채워졌고, 10kN의 진동 롤러로 다졌다. 사력재의 변형과 자연 충적층 기초의 변형은 매우 작았으며 콘크리트 슬래브의 최대 처짐은 1, 2cm에 불과하였다.

풍화대 기초

블리한 기초상에 성공적으로 CFRD를 시공한 첫 번째 사례 중의 하나가 1985년 콜롬비아에서 건설된 Salvajina 댐이다. 댐의 상부 2/3 정도에 대해 plinth는 관입 siltstone과 부서지기 쉬운 sandstone과 잔적으로 구성된 심하게 풍화된 기초를 가졌다. Salvajina 댐의 경우에는 abutment 상부의 풍화대로 인해 연결식 plinth와 얇은 콘크리트 다이어프램을 사용하게 되었다. 다음 그림에서 보듯이 기초재료로서 모두 효과적인 것으로 입증되었는데, 전체 누수량을 보더라도 정상적 수준인 50 l/s의 값을 보였다.

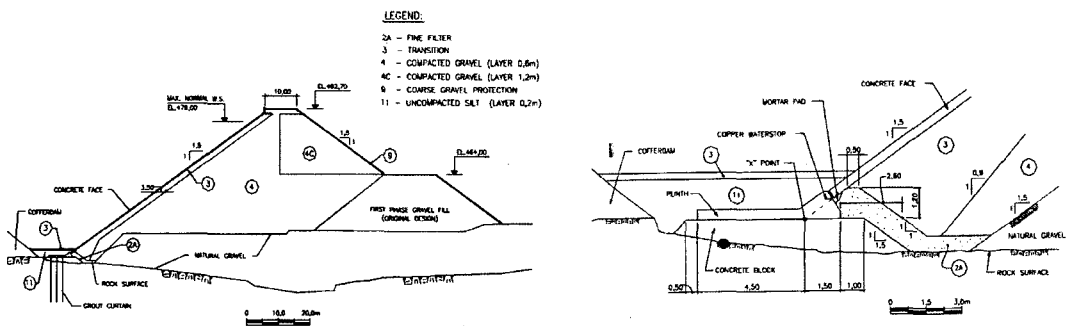


Fig. 6. Cross section(left) and plinth(right) of Pichi Picun Leufu dam.

이러한 설계는 수두의 1/16 (보다 심하게 부서지는 암과 심하게 풍화된 암 쪽에 대해서는 1/9 H와 1/6 H를 적용)에 해당하는 보다 보수적인 값으로 침투 유선을 확장시키기 위해 plinth 폭을 변화하는 방법을 적용한다. Saprolite 관입 기초를 가진 plinth에 대해서는 plinth 균열과 뒤따르는 침투에 의한 흙의 침식을 야기할 수 있는 부등침하가 발생할 수도 있다.

풍화암 기초에서 plinth 폭을 줄이기 위한 또다른 대안으로서 plinth 하류부에 필터층과 결합되는 슛크리트 층을 두는 방법이 있다. Bakun 댐의 경우 기초부는 다양하게 풍화된 greywacke와 mudstone으로 이루어져 있으며, 이 댐의 plinth는 보수적인 plinth 폭을 선택하는 방식 외에 하류부를 슛크리트로 보호하고 필터로 덮어서

시공하였다.

콜롬비아의 Sogamoso 댐(1999)에서의 기초 조건은 더욱더 불리한 구조를 지닌다. 결국 이 댐은 그림과 같이 sandstone이 50m 깊이까지 풍화되어 있어 콘크리트 벽체와 깊은 그라우팅을 병행하여 기초 처리 하였다.

지형적으로 불리한 기초

Xiaogangou 댐 부지는 CFRD 시공에는 부적합한 지질조건을 갖추고 있다. 우선 plinth를 앉히기에는 양쪽 접합부의 기반암 표고가 너무 낮았으며, 상류측 제방 우측의 지형조건이 대규모 굴착과 차수벽의 불리한 응력 조건으로 대단히 안좋은 상태에 있었기 때문이다. 높이가 55m인 이 댐은 역 S자형태의 강 단면에 위치하는 데

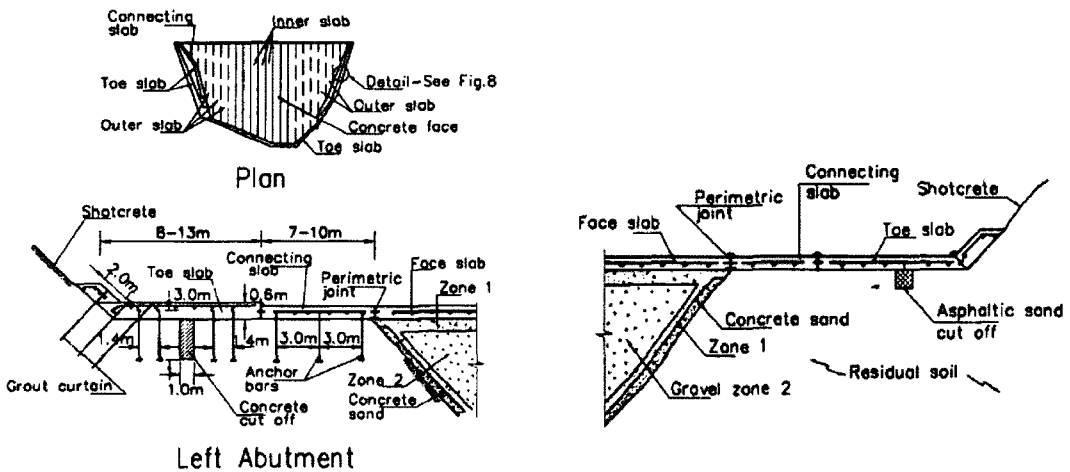


Fig. 7. Plinth of Salvajina dam(left; weak foundation, right; residual foundation).

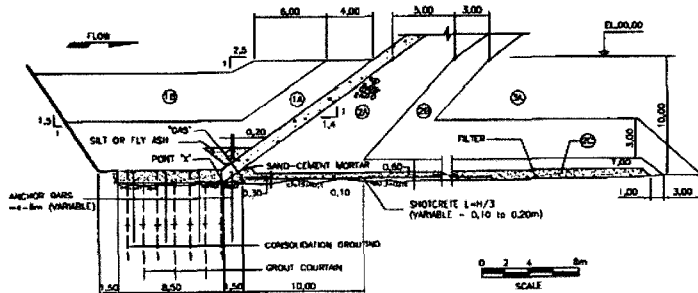


Fig. 8. Upstream toe on Greywacke in the Bakun dam.

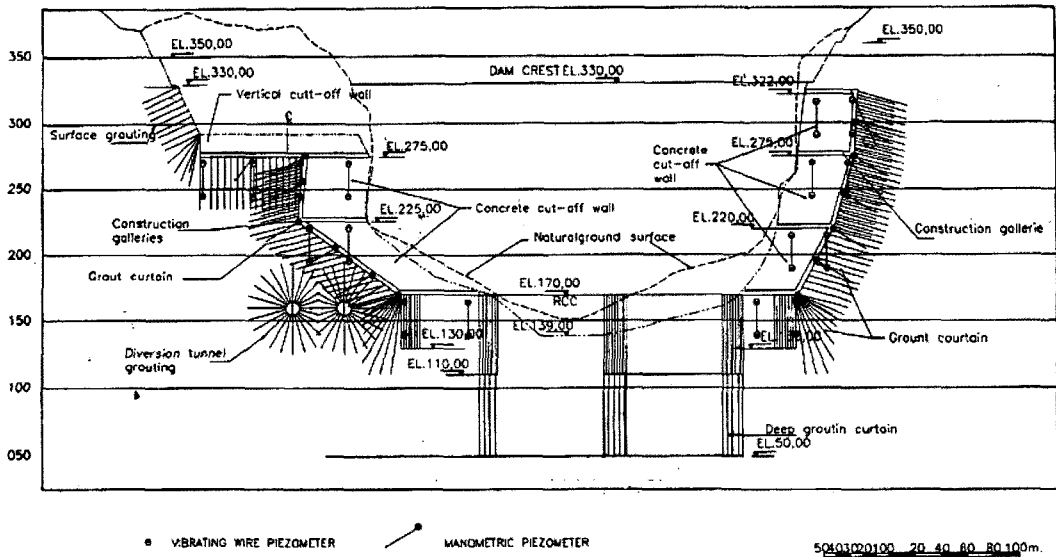


Fig. 9. Foundation treatment of Sogamoso dam.

다가 상류측 우안부에 지형적 결함이 있었다. Plinth는 상류까지 확장되었어야 했고, 이는 굴착량이 증가하고 코퍼댐과 가배수 터널의 유입부 사이의 시공간섭을 야기하고 있었다.

결국 기술자들은 이러한 지형조건을 극복하기 위해 high toe wall을 생각해냈다. 좌안부와 우안부, 그리고 상류측 toe wall의 높이는 4.2m, 6.2m, 25.2m였다. 콘크리트 슬래브는 toe wall에 연결되었다. 3차원 비선형 유한요소해석과 원심모형실험 결과 상류측의 높은 plinth는 저수지 담수시 12mm 하류 쪽으로 이동하고, 저수지 수위 강하시에는 13.2mm 상류 쪽으로 변위가 발생함을 알게 되었다. 이 수치들은 주변이음부의 개도 허용치 이내에 있는 값이었다. 결국 1991년 4월에 담수된 이 댐의 누수량은 3 //s를 넘지 않았고, 퇴적에 의해 점차적으로 감소하였다. 이로써 설계는 성공적으로 이루어졌음이 입증되었다.

연약한 암 및 사력 CFRD (Sand-Gravel Fill)

연약한 암을 이용한 축조

석산에서 개발되는 경암이 CFRD의 주 축조재료로 사용되지만, 연암과 사력재료도 활용가능하다. 연암은

통상적으로 하류측 락필 존에 주로 사용된다. 하류측 락필존의 변형이 face slab에 덜 영향을 미치므로, 암 재료의 품질을 덜 엄격하게 적용하는 일이 가능하다. 중국에서 경암의 경우, 최대입경 600~800mm, 균등계수(Cu)는 5~10 이상, 그리고 5mm 통과분은 고밀도를 얻을 수 있도록 7~15% 이상 함유하는 것이 좋다고 명시하고 있다. 그러나 이보다 연약한 암 재료로도 CFRD의 체체로서 양호한 성능을 발휘하는 것으로 보고되고 있다.

호주에서는 Kangaroo Creek 댐이 연암(soft rock)을 사용하여 성공적으로 시공한 첫 번째 사례이다. 그 뒤 Mangrove Creek 댐의 경우에도 지역에 생산가능한 낮은 강도의 sandstone과 siltstone을 깨서 다량의 세립분을 함유하도록 다져서 축조재료로 활용하였다. 재료의 습윤상태를 조절하면서 약 45cm 두께로 다졌을 때, 그 재료는 매우 낮은 투수성을 가진 매우 강하고 조밀한 축조재료로서 성능을 발휘하였다. 이에 더하여 주의 깊은 chimney drain 시스템을 설계하여 하류사면 쪽으로 배수를 허용해 줄 수 있도록 하였다.

사력 CFRD (Sand-Gravel Fill)

높이가 높은 CFRD에서 축조재의 형식은 다음의 세 가지 유형을 사용할 수 있다.

- ① 신선하고 단단하며 입도가 좋거나 균등한 암을 이

용한 축조하되, 댐의 하류쪽에는 작은 연암 종류로 축조하는 방법

- ② 댐의 상류와 주 제체에는 입도분포가 좋은 자갈로 채우고 댐의 하류에는 암재료로 축조하는 방법
- ③ 상류에는 입도분포가 좋은 자갈을, 하류쪽에는 암이 섞인 자갈재료로 축조하는 방법

실제로 미국의 Oroville, 캐나다의 Portage와 멕시코의 댐들, 그리고 최근에 콜롬비아의 Golillas와 Salvajina 댐의 시공과정에서 얻은 자갈층의 거동은 압축성과 배수, 강도와 변형은 암재료로 축조한 경우보다 우수한 것으로 드러났다. 따라서 현재에는 시공비용이 경제적인 경우, 자갈을 이용한 축조가 보편화되기 시작했다. 또한 암과 자갈의 복합재료를 이용해 제체를 축조하기도 하

는데, 자갈을 이용해 시공한 Aguamilpa 댐의 경우, 댐상류측에는 다져진 자갈을, 하류측에는 굴착재료로부터 얻어진 석재를 배치하였다. 이와 같은 형식이 Salvajina 댐에서도 적용되었다. 특별히 암 굴착량이 임의의 zone 을 다 채울 수 없는 경우에 자갈과 암을 적절히 혼합하고, 상류측은 자갈로 채우는 방식을 쓰기도 한다. 다짐된 sand-gravel 재료의 변형계수는 락필재료의 몇 배나 되며, 락필 재료와 유사하게 높은 전단강도를 나타낸다. 따라서 현재에는 CFRD 건설에 있어 매우 각광받는 재료로 사용되기에 이르렀다. 중국에서는 2000년 기준으로 완공되었거나 시공중인 70개의 CFRD 중 sand-gravel 재료로 축조된 15개의 댐이 있으며 100m가 넘는 시공중인 댐도 4개소나 된다. 가장 높은 sand & gravel CFRD

Table 3. Sand-gravel fill CFRD.

Dam	Country	Height(m)	Upstream slope	Downstream slope	Completion
Gollilas	Colombia	130	1.6	1.6	1978
Mohammed B.A.K	Morocco	40	1.9	2.2	1981
Crotty	Australia	82	1.3	1.5	1980
Xiaogang Gou	China	55	1.55	1.6	1990
Baiyanghe	China	37	1.7	1.5	1994
Santa Juana	Chile	110	1.5	1.6	1995
Pichi-Picun-leufu	Argentina	40	1.5	1.5	1995
Caoyutan	China	16	1.6	1.5	1995
Yacambu	Venezuela	162	1.5	1.6	1996
Chalong	China	39	1.8	1.8	1996
Meixi	China	38	1.4	1.3	1996
Lianghui	China	35	1.4	1.4	1997
Liangchahe	China	43	1.5	1.6	1998
Puclaro	Chile	80	1.5	1.6	1999

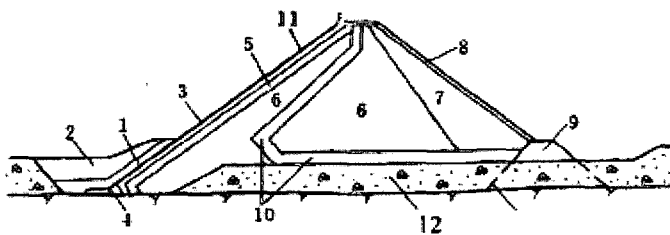


Fig. 10. Zoning of CFRDs with gravel fill on alluvium (1. cohesive soil, 2. random fill, 3. bedding zone, 4. special bedding zone, 5. transition zone, 6. main gravelfill zone, 7. downstream gravel or rockfill zone, 8. downstream riprap, 9. toe drain rockfill, 10. chimney drain and horizontal drain, 11. face slab, 12. alluvium).

는 Wuluwati로서 138m에 이른다. 중국에는 최초 Xiaogangou 댐과 Gouhou댐에 사력재가 사용되었다. 이 형식의 댐에는 잠재적인 누수량을 억제하기 위한 경사배수체계(chimney drain)가 도입되었다. 잘 다져진 사력재료는 암재료보다 변형계수(deformation modulus)가 크면서 전단강도는 암재료와 거의 유사하기 때문에 우수한 댐 축조재 중 하나로 인식되어 가고 있다. 하지만, 사력재 축조인 경우에는 침투수로 인한 댐파괴를 방지하기 위해 침투수 억제책이 필요하다. 사력재료의 경우, 사면을 따라 구르기 쉬운 특성이란든지, 억물림(interlocking)에 의한 결합력이 작기 때문에 소규모의 사면 붕락을 일으키기가 쉬우므로, 경사배수(chimney drain), 사면경사의 완화, 그리고 사면보호등의 대책이 마련되어야 한다.

최근에 많이 시공되는 충적층(alluvium)상에 gravelfill 축조일 경우의 표준 단면도는 다음과 같다 (Chinese Design Code for CFRDs, 1999).

토 의

현재까지 국내에서 CFRD를 설계, 시공하는 경우, 해외의 사례에 비해 비교적 양호한 암질의 기초에 양호한 암으로 축조하는 것이 일반적이었다. 그러나 언제까지나 양호한 조건하에서 건설되기는 어려운 실정이며, 특히 최근에 화북댐 부지와 같이 설계시 충적층(alluvium) 기초에 사력 축조재를 고려해야 하는 상황에서의 설계 사례가 없는 실정이다. 해외의 경우 매우 다양한 기초조건, 이를테면 연약한 잔류토 풍화암층이나 하상의 충적층과 같은 불리한 조건하에서 설계 및 시공된 사례가 빈번하다. 게다가 제체 축조재 자체도 국내의 경우 모두 양호한 암질의 축조재를 사용하여 시공되었지만, 보다 불리한 풍화암 축조나 사력재 축조도 충분히 그 우수성이 입증되고 있어 향후 국내 CFRD 설계 및 시공시 이에 대한 충분한 검토와 연구가 병행된다면, 부지 특성과 경제성을 최대한 살릴 수 있을 것이라 사료된다.

결 론

이제까지 논의한 불리한 조건 하에서 건설되는 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD, Concrete Faced Rockfill Dam)에 대한 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. CFRD 설계 및 시공에 있어 충적층이나 풍화대 등의 불리한 기초 조건은 콘크리트 다이어프램 월이나 플린스와 표면 차수벽을 연결하는 연결 슬래브 공법 등을 적용하여 충분히 극복될 수 있다.

2. 연약한 암이나 사력 축조재(sand-gravel fill)를 이용한 CFRD 축조 경험을 토대로 볼 때, 강도와 침하 등의 변형 측면에서 만족스러운 거동을 나타내는 것으로 드러났다.

3. 사력 축조재를 사용할 경우에는 경사배수(Chimney drain)나 수평배수, 그리고 사면경사의 완화등을 설계에 고려해야 한다.

4. 불리한 기초와 축조 조건을 적절한 대책으로 극복시킨 CFRD는 경험적으로 만족스러운 성능을 나타내고 있다.

참고문헌

- 최형식, 1997, 중국의 CFRD형 사력댐의 건설기술(연재), 토목, 45(4~8), 대한토목학회
- 최형식, 1995, 세계에서 제일높은 CFRD형 사력댐(높이210m)을 설계하면서, 토목, 43(7), 대한토목학회
- 한국수자원공사, 1998, 화북댐 기본계획 보고서
- 한국수자원학회, 2003, 댐설계기준
- 坂本忠彦, 松本徳久, 福永和久, 2000, 海外のCFRDの動向, ダム技術, NO 162, 財 法人 ダム技術センター
- Amaya, F. and Marulanda, A., 2000, Colombian Experience in the Design and Costruction of CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Auguiat, P., Alvarez, L. and Vidal, L., 1993, Two Chilean CFRD Designed Riverbed Alluviums, Proceedings; International Symposium on High Earth-rockfill Dams, Beijing, China
- Casinader, R., 1993, Special Features of Some CFRDs, Proceedings; International Symposium on High Earth-rockfill Dams, Beijing, China
- Cooke, J. B., 2000, The High CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Cooke, J. B., 1997, Developments in High CFRDs, The International Journal on Hydropower & Dams, 4(4)
- Giudici, S., Herweynen, R. and Quinlan, P., 2000, HEC experience in CFRDs - Past, Present And

- Future, Proceedings; International Symposium on CFRDs, 18 Sep., Beijing, China
- Good, R. J., Bain, D. L. W. and Parsons, A. M., 1985, Weak Rock in Two Rockfill Dams, Concrete Face Rockfill Dams - Design, . Construction, and Performance, ASCE
- Hacelas, J., Ramirez, C. A. and Regalado, G., 1985, Construction and Performance of Salvajina Dam, Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance, ASCE
- Lagos, P. M. and Machado, B. P., 2000, Foundation Treatments, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Liu, L., Shi, L. and Chen, Z., 1993, The Slope Stability Analysis of a CFRD with Poor Quality Embankment Materials, Proceedings; International Symposium on High Earth-rockfill Dams, Beijing, China
- Lu, S., He, Z. and He, Z., 1993, Design and Application on CFRD on Thick Alluvium Deposit in Tongjiezi, Proceedings; International Symposium on High Earth-rockfill Dams, Beijing, China
- Mackenzie, P. R. and McDonald, L. A., 1985, Mangove Creek Dam: Use of Soft Rock for Rockfill, Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance, ASCE
- Marulanda, L., Nelson, L. and Pinto, D. S., 2000, Recent Experience on Design, Construction, and performance of CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Materon, B. and Mori, R. T., 2000, Construction Features of CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Navarro, O. E. and Bechis, E. E., 1998, Progress at the Pichi Picun Leufu Project in Argentina, The International Journal on Hydropower & Dams, 5(1)
- Noguera, G., Pinilla, L. and Martin, L. S., 2000, CFRD Consturcted on Deep Alluvium, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Pan, J. and He, J., 2000, Large Dams in China; A Fifty - Year Review, China WaterPower Press
- Sierra, J. M., Ramirez, C. A. and Hacelas, J. E., 1985, Design Features of Salvajina Dam, Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance, ASCE
- Zeng, F., 2000, Study on Application of Sandy Gravel to Gudonkou CFRD, Proceedings; International Symposium on CFRDs, 18 Sep., Beijing, China

투 고 일	2006년	2월	1일
심 사 일	2006년	2월	2일
심사완료일	2006년	3월	10일

박동순(Dong-Soon Park)
 한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소
 305-730, 대전시 유성구 전민동 462-1
 Tel : 042-860-0324
 Fax : 042-860-0592
 E-mail : fulgent@kowaco.or.kr

김형수(Hyoung-Soo Kim)
 한국수자원공사 수자원연구원 댐기술연구소
 305-730, 대전시 유성구 전민동 462-1
 Tel : 042-860-0330
 Fax : 042-860-0592
 E-mail : hskim@kowaco.or.kr