

CFRD의 최근 설계·시공기술 동향

박동순^{*1)} · 김형수¹⁾ · 임정열²⁾

¹⁾한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소, ²⁾한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소

Recent Techniques for Design and Construction of CFRD

Dong-Soon Park^{*1)} · Hyoung-Soo Kim¹⁾ · Jeong-Yeul Lim²⁾

¹⁾Groundwater and Geotechnics Resesarch Center, Korea Water Resources Corporation

²⁾Dam Safety Research Center, Korea Water Resources Corporation

CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam)는 기존의 중심코어형 락필댐과 대별되는 우수한 구조적, 재료적 특성으로 현재 가장 널리 활용되는 댐 형식이다. 본 고에서는 그동안 이루어져온 기술의 축적을 바탕으로 CFRD의 설계와 시공에 있어 최근에 부각된 최신 기술들을 정리하여 향후 활용에 도움을 줄 수 있도록 하였다. 특별히 본 고에서는 최근 경험을 바탕으로 실무에서 적용되고 있는 연약한 암을 이용한 댐체 축조 사례, 대단히 큰 입경의 락필재 대신 도입된 sand-gravel fill 댐에 대한 경험, plinth와 face slab를 연결하기 위해 새롭게 채택된 연결 슬래브 공법, 기존 댐의 증고사례, 역침투 현상, 댐 하류의 환경친화존, 차수벽 슬래브의 두께와 철근비의 변화 추이, 충적층 기초의 처리, 최근 적용되기 시작한 curb element 공법등에 대한 간략한 기술적 동향을 고찰하여 관련 기술자들의 이해를 돕고자 하였다.

주요어: 표면차수벽형 석괴댐, 차수벽, 플린스, 커브 엘리먼트

CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam) is in widespread use because this type of dam has superior characteristics in structural, material aspects comparing with earth cored rockfill dam. On this paper, up-to-date researches and techniques are summed up to be available for future needs in design and construction of CFRD. For example, such items as embankment using weak rock, experience of sand-gravel fill CFRD, connecting slab applied between plinth and face slab, raising experience of old dam, inverse filtration problem, environmental friendly zone, thickness and reinforcing of face slab, alluvial foundation treatment, and curb element method, are summarized for understanding of related engineers.

Key words: CFRD, concrete faced rockfill dams, face slab, plinth, curb element

서 언

연약한 암을 이용한 축조

CFRD(Concrete Faced Rockfill Dam)는 국내에서 최근 10여년간 7개소에서 완공되었고, 2005년 현재 8개의 대형 CFRD 댐들이 설계 혹은 건설중이다. 암석 자원이 풍부한 국내 현실과 공기, 경제성 면에서 우월한 CFRD는 이제 댐 설계에 있어 우선적으로 고려하는 형식이 되었다. 따라서 그 동안 설계와 시공에 있어서 상당한 기술의 축적이 있어 왔다. CFRD 형식의 내용에 있어서는 그동안 몇 차례 연재기사로 소개(최형식, 2000)된 사례가 있으므로, 본 고에서는 CFRD의 최근 기술동향을 실제 사례 중심으로 정리하여 국내 토목기술자들의 이해를 돕고자 한다. CFRD는 현재 전 세계적으로 댐 기술의 중심을 이루고 있으며, 향후에도 분명 유력한 댐 형식임에 틀림없으며, CFRD의 최신 기술들 중 많은 부분은 아직 우리나라에 도입되지 못한 사항들이므로 향후 활용 가능성은 그만큼 크다 하겠다.

최근 CFRD에서 가장 주된 특징 중 하나는 그동안 경암만을 축조재료로 고집하였던 편견을 깨고, 연암과 풍화암도 축조재료로서 충분히 성능을 발휘할 수 있음을 알게 된 사실이다. 몇몇 예에서도 그러한 사실은 명확히 입증되고 있다. 중국의 Zhushuqiao와 Shisanling댐에서는 풍화된 연암을 주 축조재료로 사용하였다. Zhushuqiao댐은 총 축조량의 1/3 가량에 해당하는 풍화암 존을 댐 하류측에 사용하였다. 풍화 압축강도는 약 10~25Mpa이며, 하류경사는 1:1.7로 완만하다. Shisanling 댐의 경우 최소 풍화 압축강도가 11Mpa인 풍화 안산암류가 분포하는 저수지에서 굴착한 재료로 채워져 있다(Jiang, 2000).

또한 댐높이가 178m에 이르는 Tianshenqiao No.1 댐의 경우 댐축에서 하류측으로 많은 양의 석회암(limestone)과 이암(mudstone), 사암(sandstone)들로 축조되어 있다.

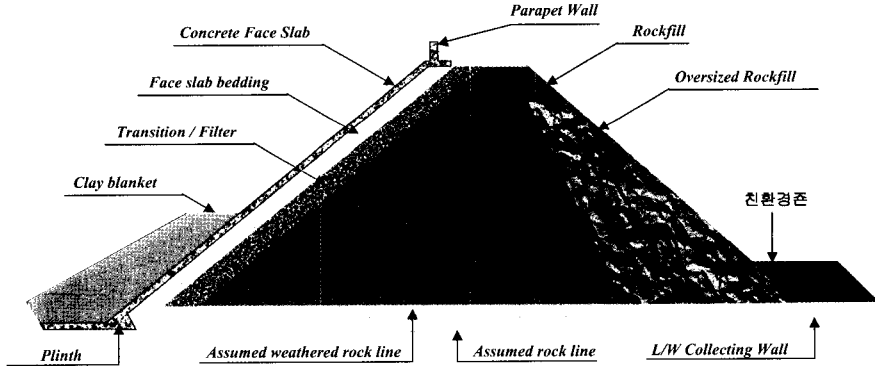


Fig 1. Typical design section of CFRD

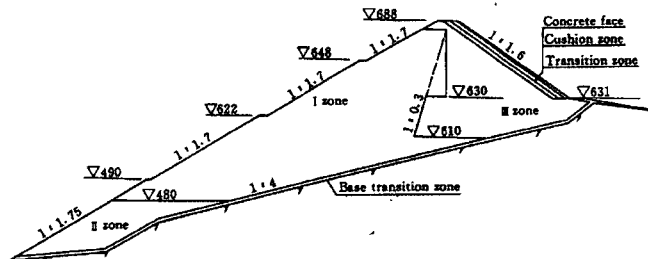


Fig 2. Zoning of Shisanling CFRD (I. weathered andesite, II/III. moderately weathered andesite zone, after Jiang, 2000)

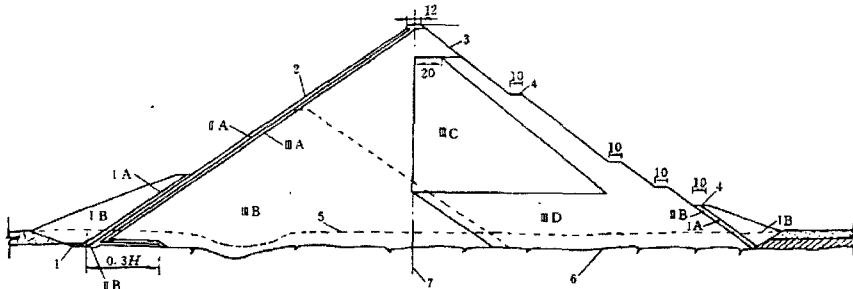


Fig 3. Zoning of TSQ-1 CFRD (1. toe plate, 2. concrete face slab, 3. slope protection 4. access road, 5. ground line, 6. bedding rock, 7. dam axis, I A. clay blanket, I B. random fill, II A. bedding zone, II B. bedding zone, $d_{max} < 40mm$, III A. transition zone, III B. main rockfill zone, III C. downstream rockfill, III D. drainage rockfill zone, after Jiang, 2000)

Sand-Gravel Fill

최근 CFRD 설계에 있어서는 하상이 충전층 기초로 이루어진 경우가 많으며, 이 경우 sand-gravel fill 기술이 발전하고 있다. Sand-gravel fill CFRD에 있어 기본적인 세가지 형태를 요약하면 다음과 같다(Jiang, 2000).

① Kekeya, Gouhou댐과 같이 전 체체를 sand-gravel 재료로 축조하는 형식

② 높은 변형계수를 가진 sand-gravel 재료를 상류측 주 암석존(main rockfill zone)에 배치하고 하류측 락필 존은 Wuluwati, Heiquan댐과 같이 보다 가파른 경사를 유지하기 위해 얇은 슬라이딩과 하류면 경사를 따라 자갈이 구르는 현상을 방지토록 단면을 구성하는 형식

③ 락필존은 가능한 누수를 효과적으로 배수시킬 수 있도록 단지 트랜지션 존의 하류부에 배치하고, sand-gravel 존을 두고, 하류측 락필 존을 두는 방식으로, 이렇게 댐의 중앙부에 sand-gravel 존을 위치한 예는 Shanxi, Gudonkoou 댐에서 찾아볼 수 있다. Concrete face gravel 댐과 락필댐의 차이점은 침투 억제와 표면 침식에 있다.

• 댐체에서 안정성을 유지하기 위해서는 발생가능한 누수에 대해 표면부 침식이나 하류 출구부에서의 파이프이 없어야 한다. bedding zone은 두 번째의 불투수층(anti-seepage) 역할을 해야 한다. bedding zone의 투수계수는 $10^{-3} \sim 10^{-4} cm/s$ 범위여야 하며 트랜지션존을 따라 배수가 잘 되게 하고, 역침투를 막기 위해 트랜지션존보다 1~2 order 정도 작은 것이 바람직하다.

• 만약 sand-gravel 재료가 자유 배수 조건을 만족시

키지 못한다면, 침투를 억제하고 하류측 댐체를 건조한 상태로 유지하기 위해 내부 연직 배수층과 수평 배수층을 두어야 한다.

• 또한 댐체를 sand-gravel 재료를 채울 때에는 shallow sliding과 자갈이 하류 경사면을 따라 구르는 것을 막기 위해 하류사면에 구속조건을 정해줘야 한다. 이는 sand-gravel 재료의 전단강도가 낮은 구속응력에서 락필 재료보다 작기 때문이다. 이 경우에는 보통 보다 완만한 1:1.5나 1:1.6 정도가 채택된다.

• 또한 sand-gravel은 침식성 재료이기 때문에 표면부 침식에 민감하다. 따라서 face slab와 parapet wall 사이에 있는 joint의 지수 시스템이 중요하다. 상하부에는 두 줄의 지수판을 설치해야 하고 품질 또한 좋아야 한다. 이 경우에는 parapet wall의 높이가 제한된다. 수평 joint의 표고가 normal high storage water level보다 높아야 한다.

연결 슬래브(Connecting Plate, Connecting Slab)

연결 슬래브는 plinth와 페이스 슬래브를 연결하기 위해 종종 사용될 수 있다. 특수한 지형조건이나 지질조건 문제를 해결할 때, 전체적인 평면의 배치에 문제가 생길 경우가 있다. 이 때, plinth와 face slab를 연결하기 위해 연결 슬래브(connecting plate)가 효과적으로 사용될 수 있다. Kekeya 댐이 대표적인 경우로서 face slab와 콘크리트 다이어프램 월을 연결시키기 위해 아치형의 연결 슬래브를 설치하였다. 연결 슬래브는 충전층 기초상

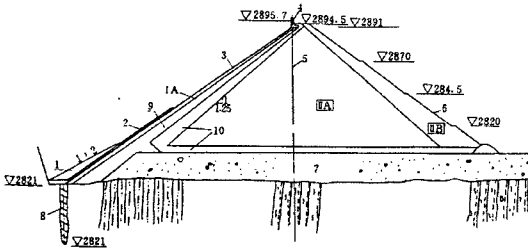


Fig 4. Zoning of Heiquan CFRD (1. random fill, 2. clay blanket, 3. concrete face, 4. parapet wall, 5. dam axis, 6. slope protection, 7. alluvium, 8. curtain grouting, 9. transition zone, 10. drainage zone, I A. bedding zone, II A. sand-gravel zone, II B. downstream rockfill zone, after Pan and He, 2000)

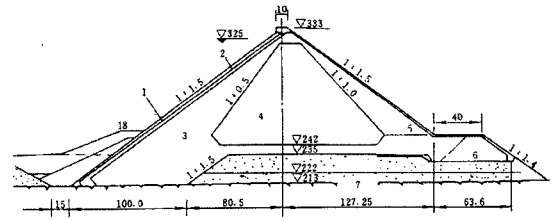


Fig 5. Zoning of Gudongkou CFRD (1. bedding zone, 2. transition zone, 3. main rockfill zone(limestone), 4. main rockfill zone(sand-gravel), 5. downstream rockfill, 6. large rock block zone, 7. alluvium, after Pan and He, 2000)

에 시공되는 페이스 슬래브와 충전층에 있는 콘크리트 다이어프램 월을 연결시키거나, 침투선을 증가시키기 위해 plinth와 face slab 사이를 연결시킬 목적으로 사용한다. 그 후 연결 슬래브는 Zhushuqiao댐, Meixi댐, Qingang댐, Hengshan댐의 증고와 같이 다이어프램 월을 가진 CFRD에 빈번히 사용되고 있다(Jiang and Cao, 2000).

기존댐 증고

Hengshan 댐과 같이 기존에 중심코어형 사력댐을 별도의 목적 때문에 하류측 면을 증고하는 데에도 CFRD는 좋은 대안이 된다. Hengshan 댐의 경우 1966년 48.6m 높이로 준공되었으나, 70.2m까지 증고하면서 중심 코어부에서 상단에서 기반암까지를 침투 방지를 위해 콘크리트 다이어프램 월을 설치하되 콘크리트 다이어프램 월과 콘크리트 페이스 슬래브를 연결 슬래브로 접속하는 방식을 취하였다(Jiang and Cao, 2000).

역침투현상(Inverse Filtration)

중국의 경우 bedding zone에서 흔히 볼 수 있는 현상 가운데 상류사면상에 보호된 층, 특별히 콘크리트 차수벽조차도 하류측 수위가 시공 피트(construction pit)의 상류측 수위보다 높아서 역류하는 물에 의해 피해를 입는 경우가 있다. 이를하여 “역침투(inverse filtration) 현상”이다. 이 현상에 기여하는 두가지 요소가 있다. 첫 번째는 하류측 수위보다 훨씬 낮은 상태로 플린스 기초 굴

착으로 깊게 형성된 상류측 시공 피트(pit)이다. 두 번째는 기반암의 지형적인 조건과 관계된다. 단면을 볼 때 암반표면이 상류측을 향하도록 경사져 있다. 침투수가 상류측을 향해 흐르게 되고 완충층과 보호층, 그리고 콘크리트 슬래브에 수압이 작용하게 되면서 피해들이 발생한다. 이러한 경우 수압을 해소시킬 수 있는 침투수 배수 시스템이 필요하다(Jiang and Cao, 2000).

댐하류 환경친화존의 설치

전통적인 CFRD 단면구성에 최근에는 댐체의 자연환경적인 조화를 고려하여 댐체체 하류 비탈면부에 조경식재등을 위한 환경친화존을 설치하고 있으며, 점점 증가하는 추세이다. 환경친화존의 사면은 가급적 완만한 경사를 이루도록 하며 토질은 조경식재가 가능한 토양으로 하여야 한다.

친환경존의 사면경사는 구조물의 안정여부와 직접적인 관련이 없으나, 환경친화적인 측면과 안전측면을 고려하여 일반적인 성토단면을 기준으로 통상 1:1.8~1:2.5 정도로 설계한다. 성토높이는 댐높이와 시공성을 고려하여 적절히 결정한다. 이 존은 암석존과 경계하고 있으므로 재료가 암석층으로 흘러들지 못하도록 암석층과 접하는 부위에는 필터매트를 부설하는 것이 타당하다. 토양은 다소 투수성이 높은 모래질 점토가 섞인 재료가 좋으며, 수목의 성장에 필요한 일반적 조건은 다음과 같이 고려한다.

- ① 최대입경은 수목의 활착정도 및 시공성등을 감안 150mm 미만으로 한다.
- ② 보수력과 통기성이 좋고 양분의 흡수력과 점착력을 갖춘 토양으로 한다.

- ③ 부식이 많은 단립구조의 토양으로 한다.
- ④ 토성은 중성(pH 7.5)을 띤 양토로 한다.

차수벽 두께의 변화

차수벽의 두께는 충분한 강도와 지수성을 가질 수 있고 각종 차수재료의 설치가 가능하며 내구성이 확보되도록 하여야 한다. 초기의 비다짐 압축조법의 경우 두께는 0.3m+0.0067H로 비교적 두껍게 하여 콘크리트 저부의 일부 변형에 의해서도 차수벽에 영향을 주지 않도록 하였다. 다짐공법이 발달되지 않은 초기형태의 콘크리트 차수벽은 두께를 비교적 크게하여 콘크리트 저부에 받쳐 있던 돌이 빠져나갈 경우에도 차수벽에 영향을 크게 주지 않도록 설계하였으나, 최근에는 콘크리트 차수벽 지지층을 사력재 또는 쇄석재 등으로 고르게 다져 시공하는 다짐공법이 적용됨에 따라 콘크리트 차수벽 두께가 (0.3m+0.004H)~(0.3m+0.002H) 정도로 감소되었다.

철근비의 변화

철근배근은 콘크리트의 건조수축과 시공과정에서 지층의 불균등으로 인한 예측할 수 없는 국부적인 인장영역에서 발전되는 차수벽 균열의 폭을 억제시키며, 또한 주어진 차수벽의 두께로 가능한 한 슬래브 판을 유연하게 하여 양방향으로 동등한 휨저항을 받도록 하기 위한 목적을 지닌다. 그리고 과거의 비다짐 공법에 의한 콘

크리트 차수벽의 철근량은 콘크리트 두께의 0.50% 정도를 적용하였다. 보강은 기본적으로 온도 철근이었고, 록 필재의 압축성에 있어서 국부적인 변화에 의해 유발될 수 있는 휨 모멘트에도 대처하기 위해 철근을 보강하였다.

그러나 최근의 연구결과와 전문가들의 조언을 참고하면, 현재 사용하고 있는 bedding zone은 균질하고 압축이 어렵기 때문에 기존의 배근량 0.5%는 과대하다는 의견이 지배적이다. 이론적으로는 양방향으로 0.35~0.40%가 적당(기존의 방법은 80kg/m²에 대하여 58~65kg/m²)한 것으로 보고 있다. 또한 댐 높이가 낮거나 암의 변형이 작을 때에는 철근량을 그만큼 줄일 수 있다. 최근의 관측에 의하면 대부분의 표면 슬래브는 2축 압축으로 댐하류, 댐마루, abut 주변 가까이에서 발생하는 인장력이 매우 작아 시간이 흐르면서 점차 소멸하는 것으로 밝혀졌다. 가장높은 CFRD 댐 중 하나인 Aguamilpa 댐의 경우 철근비는 0.3%에 지나지 않는다. 따라서 근래의 다짐공법에 의한 CFRD는 각 방향 모두 같이 0.35%~0.40%로 적용하고 있다. ICOLD(1989)와 Cooke & Sherard(1987)는 슬래브의 철근비를 다음과 같이 추천하고 있다.

- 일반적으로 각 방향으로 콘크리트 단면적의 0.4%의 철근비를 적용한다.
- 명확하게 압축을 받는 곳에서는 0.3~0.35%의 철근비를 적용한다.
- 주변이음 근처와 스타터베이 부근에서는 0.45%의 철근비를 적용한다.

Table 1. Thickness and reinforcing of face slab in CFRD, Korea

dam name	desing year	height (m)	equation of slab thickness	slab thickness (m)	reinforcing (%)	비고
Namgang	1989	34.0	constant	0.35	0.50	D25,D22@20cm
Buan	1990	49.0	0.3m+0.003H	0.30~0.45	0.40	D22,D19@20cm
Milyuang	1991	89.0	0.3m+0.003H	0.30~0.60	0.45	D25,D22@20cm
Yongdam	1991	70.0	0.3m+0.003H	0.30~0.55	0.50	D29,D25@25cm
Upper Sancheong-yangsu	1995	97.0	0.3m+0.003H	0.30~0.56	0.40	D22,D19@20cm
Lower Sancheng-yangsu	1995	67.5	0.3m+0.003H	0.30~0.50	0.40	D22,D19@20cm
Tamjin	1996	53.0	0.3m+0.003H	0.30~0.45	0.40	D22,D19@20cm
Daegok	1996	52.0	constant	0.30	0.40	D22,D19@20cm
Yangyang-yangsu	1997	95.5	0.3m+0.003H	0.30~0.50	0.40	D22,D19@20cm
Youngwall	1997	98.0	0.3m+0.003H	0.30~0.59	0.40	D25,D22@20cm
Peace (raised)	2003	125.0	0.3~0.453	0.3~0.453	0.40	

최근의 CFRD는 효율적이다
 짐장비의 도입과 차수벽 지준이 보편적으로 설치되고
 있음을 고려해 볼 때 철근비는 0.4% 정도가 일반적이다.

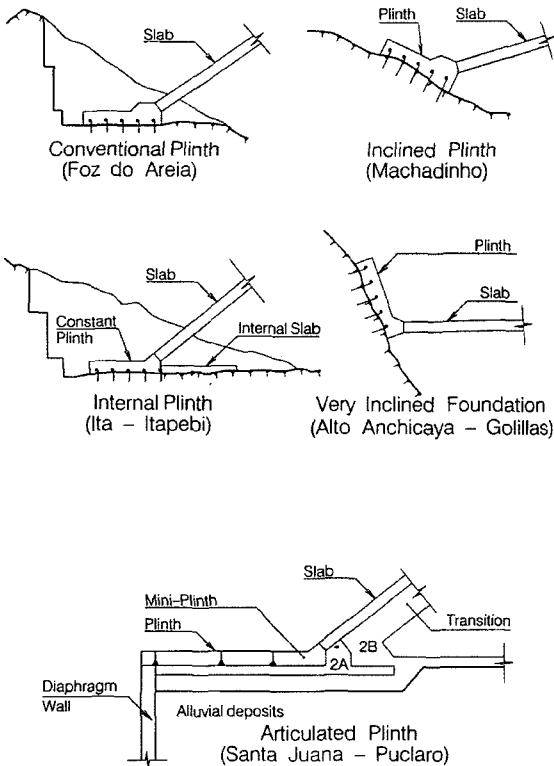
Plinth 구조 및 배치의 다양성

고전적인 Plinth의 설계는 견고한 암반상에 수평으로
 얹히는 개념이 지배적이었으나, 양안부의 경사라든지,
 지질 조건에 따라 매우 다양하고 불리한 조건하에서도
 적용가능한 설계와 시공법들이 개발되었다. 다음 Fig. 6
 은 다양한 plinth의 구조 및 배치를 나타낸 사례이다.

충적층 기초의 처리

지형적으로, 지질학적으로 나쁜 조건이어서 과거에

는 댐 지점으로 선정되지 않았던 지점에도 최근에는 댐
 이 건설되고 있다. 예를 들자면 하상(riverbed)에 직접
 제체를 얹히는 경우나, 충적층(alluvium)이나 잔류층
 (residual soil)에 CFRD 기초를 설계할 경우가 빈번해지
 고 있는 추세이다. 특별히 원칙적으로 plinth 기초는 신
 선하고 그라우팅 가능하며 침식을 일으키지 않는 암반
 을 기준으로 한다. 그러나 plinth가 질이 낮은 암반
 (Khao Laem)에 시공되거나, Colombia Salvajina 댐과
 같이 전체 plinth 기초의 대부분이 심하게 풍화된 암반
 과 품질이 낮은 충적층 위에 시공된 극단적인 예들도 있
 다. 대표적인 예로 Chile의 Santa Juana와 Puclaro, 아르
 헨티나의 Pichi Picun Leufu 등에서는 diaphragm wall
 을 사용하여 plinth 기초부를 보강 처리하였다(Noguera
 et al., 2000). 현재까지 아르헨티나의 Los Caracoles
 (1999), 모로코의 Chakoukane 댐(1999)에서 볼 수 있듯
 이 침투수를 조절하기 위해 깊은 심도의 콘크리트 다이
 어프램과 연결식 plinth를 두터운 충적층상에 시공한 댐
 은 매우 흔해졌다. 특히 충적토 지반을 굴착할 때는 다져
 진 자갈위에 plinth를 시공하고, 상부층 재료를 다짐 필
 터층으로 치환시키는 방법을 쓸 수 있다. 이와 같은 예는
 Chile의 Santa Juana에서 찾아볼 수 있다. 특별히 하상이
 자갈층일 때 이 층이 낮은 콘시스턴스나 쉽게 액성을 띠
 수 있는 경우에는 이 층을 제거하는 것이 바람직하다.
 Alto Anchicaya 댐이나 Salvajina 댐에서는 자연하상을
 부분적으로 남겨 놓았는데, 이는 하상재료의 거동이 댐
 의 주 성토재의 거동과 유사했기 때문이다. 침식 가능성
 이 크고 점토나 실트가 끼여있는 경우 파이핑을 유발할
 수 있는 층은 제거하거나 필터 처리해야 한다.



상류사면 보호공법의 개선

기존공법

CFRD에 있어 bedding zone은 콘크리트 차수벽을 직
 접 받치고 있는 지지층(최대입경 75mm)으로 수압에 따
 른 댐의 거동과 침하에 직접적으로 영향을 받게 됨으로
 CFRD 댐체 중에서 매우 중요한 기능을 갖는 부분으로
 서 시공단계에서 사면다짐은 매우 중요한 공종이다. 상
 류사면다짐 직후, 즉 차수벽 콘크리트 타설되기 전까지
 강우와 시공작업으로 인한 침식으로부터 상류사면을 보
 호하여야 한다. 종래에 사용해 오던 방법으로는 bed-
 ding zone의 여성토를 제거하고 인력으로 면고르기를
 한 후 크레인에 부착된 6톤급 진동로울러를 4회 통과하
 여 상류사면을 일정 높이별로 다지는 고전적인 방식과

Fig 6. Various types of plinth (after Lagos and Machado, 2000)

bedding zone의 여성토를 제거하고 인력으로 면고르기를 한 후 백호우에 compactor plate(일명 mighty pac)를 부착하여 상류사면을 일정 높이별로 다지는 방식이 있다.

Curb Element 공법

페이스 슬래브 지지층에 대한 중대한 변화는 125m 높이의 Ita 댐에서 curb element 공법을 사용하면서부터이다. Concrete curb는 트랜지션 재료의 거치에 앞서 표면부를 균질하게 만들기 위해 댐 표면을 따라 시공하는 기법이다. Curb element 공법은 2003년 청송 양수 CFRD의 사면처리 공법에 처음으로 국내 도입되었다.

도로의 중앙분리대를 설치하는 것과 비슷한 사출기를 이용하여 제체 내에서 이루어진다. 보통 40cm의 curb 단면은 사면의 경사(1.3 : 1)만큼 기울어진 외부 표면과 트랜지션 재료를 다질 때 형으로 지지하는 작용을 해주는 거의 수직에 가까운 내부 표면으로 구성되어 있다. 상단부는 10~12cm로서 연속적으로 curb 벽체를 올릴 수 있도록 해 준다. 일반적으로 해외에서는 75 kg/m^3 의 시멘트 함유, 최대 골재치수 1.9mm, 50%의 모래와 125 l/m^3 의 물을 혼합하여 대략 40~60m/hr의 속도로 시공한다. curb 시공 후 한시간이 지나면 트랜지션 재료를 포설하고 진동롤러로 다진다. 표면부를 따라 다짐하던 기존의 공정이 필요 없다. 표면부는 콘크리트 선형이 잘 나오게 되어 침식을 방지하기 위한 더 이상의 조치가 필요 없게 된다.

표면부의 기하학적 형상은 매우 규칙적이며 페이스 슬래브 시공작업이 매우 촉진된다. 철근 보강 작업과 조

인트 지수판 설치작업도 고르고 안정된 표면부위에서는 보다 간편해진다. curb 시공은 결과적으로 페이스 콘크리트 파괴를 최소화하기 때문에 대단히 경제적이면서 규칙적인 표면을 만든다. face slab 콘크리트 타설 전에 수하중 하에서 록필의 변형에 의해 유발되는 콘크리트 표면부의 인장을 감소시키기 위해 돌출된 curb element 표면을 아스팔트로 칠하는 것이 좋다. 아스팔트칠한 curb 는 curb와 슬래브 사이의 접착력을 또한 감소시킨다.

주의할 점은 curb에 대한 시공상세가 적절히 설계에 반영되어야 하는데, 이는 curb 설치시 사출기의 한쪽 끝에서만 밀어 나오기 때문에 plinth에까지 정확히 닿아서 끝나는 것이 아니기 때문에 끝부분의 공간은 인력으로 끝내야 한다는 점 때문이다. 인력작업을 함으로써 사출기로 밀어낸 경우보다 낮은 변형성을 가진 고강도 콘크리트를 얻게 된다. 추가적으로 동지수판 아래의 sand asphalt 혼합물을 설치하기 위해 curb와 plinth 사이에 공간을 남겨놓기 위한 목적도 있다. 이러한 노력들은 페이스 뒷부분 재료들의 변형특성을 바꾸어 인장하중을 유발시킬수도 있기 때문에 적절한 보강방법도 함께 강구되어야 한다(Marulanda and Pinto, 2000).

CFRD의 미래

CFRD는 발전되어 온 역사만큼이나 짧은 시간에 많은 기술의 축적이 있었다. 그러나 매우 다양한 설계와 시공방법의 변화에도 불구하고 CFRD 댐의 기본적인 설계는 모든 댐에 대해 매우 유사한 특성을 지닌다. 설계에는 주로 세가지 측면, 즉 plinth, 단면구성(zoned 록필 sec-

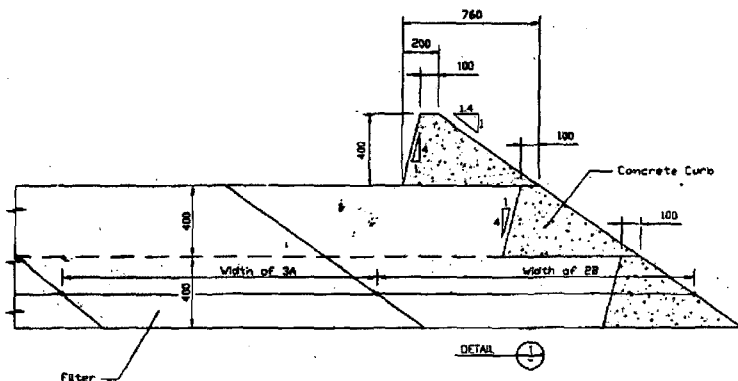


Fig. 7. Curb element layout of Mohale dam (Godde and Droste, 2001)

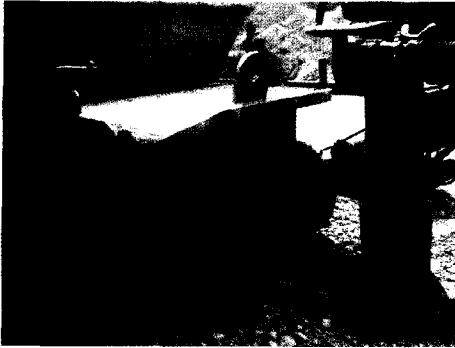


Fig. 8. Curb machine

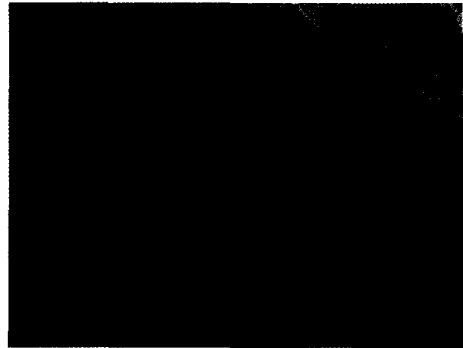


Fig. 9. Shape of Curb element after spreading

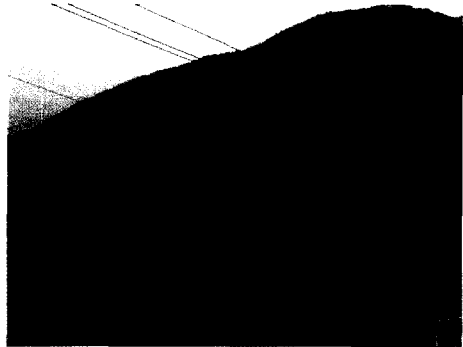


Fig. 10. Upstream face of curb element

tion), 그리고 콘크리트 face의 요소로 이루어진다 (Cooke, 2000).

- Plinth는 비침식성의 차수 요소(non-erodible cut-off element)이다. 비침식성의 암반상에 기초처리를 직접 수행한다.

- 록필 단면은 구조적인 요소이다. 이 존은 최소의 침하량으로 수하중을 허용해 줄 수 있게 한다. 또한 콘크리트 차수벽의 균열로 인한 누수 발생시 침투수의 흐름을 안전하게 처리해 준다.

- 콘크리트 face는 불투수층이다. 즉 차수역할을 수행한다. 그러나 perimeter joint의 누수나 face 균열을 통한 누수는 발생할 수 있다. face 누수는 통상적으로 허용되며, 또는 비용을 들여 감소시킬 수 있다. 그러나 그것은 안전에 관계되는 문제는 아니다.

현재까지 joint와 face 균열부에서 발생하는 누수는 관측된 사례가 많지만, 경험적으로 향후 보다 높은 CFRD 댐들의 설계와 시공에 있어 중대한 변화를 필요

로 하지는 않는다. Cooke (2000)은 가장 높은 댐들에 대한 향후 세가지 설계요소를 간단히 다음과 같이 제안하였다.

- Plinth

- Plinth와 plinth 하류부의 주의깊은 기초처리는 현재나 미래에도 중요하다. 기초부에 이제까지 경험했던 것보다 더 큰 압력 조건은 abutment 하부 영역에서 기초 처리에 보다 더 큰 주의를 기울일 필요가 있음을 시사해 준다.

- 록필

- 각각의 존들을 똑같은 층두께와 다짐으로 처리하는 것이 일반적이다. 가장 높은 댐들은 규모가 매우 크기 때문에 양안부(abutment) 근처의 선택층이 다짐이나 비용을 증가시키기보다는 높은 계수값을 갖도록 시방기준을 정하는 것이 바람직하다. 10톤 진동롤러가 경험적으로 사용되어오고 있다. 높은 압력을 가진 지대가 많지 않은 지역에서와 양안 상부 15m 정도에서는 perimeter

joint 근처에서만 사용하던 세립질 필터 존이 사용되어야 할 것이다.

- 콘크리트 차수벽

- 콘크리트 차수벽의 두께는 현재 통상적으로 $t = 0.30 + 0.002H$ 식이 가장 만족스러우며, 앞으로도 이 기준을 쓰는 것이 적절하다. 철근비에 대해서도 수평으로 0.3%, 연직으로는 0.35%나 0.4%를, perimeter joint에서 약 15m 이내에 대해서는 두 방향 모두 0.4%가 적용되는 것이 바람직하다. Plinth 경사가 가파른 곳에서 상대적으로 완만한 경사로 변화하는 부위는 perimeter에서 약 20m 이내의 균열은 또다른 균열들을 유발하므로, 이런 경우에는 경험적으로 0.5%의 철근비를 양방향에 대해 사용하는 것이 좋다.

결론적으로 현재까지 건설된 사례를 바탕으로 150m 가 넘는 미래의 CFRD에 대한 일반적인 결론은 다음과 같이 제시될 수 있다(Cooke, 2000)

- 안전성은 충분히 확보되고 있다.
- 약간의 차수벽 균열과 누수는 발생할 수 있다.
- 반투수성 록필존은 누수량을 제한시킨다.
- 누수는 수중에 세립분의 불투수성 실트질 모래를 채움으로써 효과적으로 감소시킬 수 있다.
- 현재의 설계 원칙들은 향후에도 거의 변화가 없을 것이다.

결 론

다양한 관점에서 그동안 CFRD의 최신 설계와 시공, 거동을 조명해 볼 수 있었던 것은 새로운 학문적 영역에 있어서 대단히 축복이 아닐 수 없다. 현재와 미래에 가장 사랑받는 댐 형식으로서 CFRD는 어느새 지질공학 및 토목 기술자들 사이에 성큼 다가와 있다. 본 고에서는 CFRD의 설계와 시공에 있어서 실제 적용되고 있는 최신 기술 동향과 주요 특징들을 정리해 봄으로써 향후 설계나 시공에 유용한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 양승필, 2003, Concrete Faced Rockfill Dam의 상류비탈면 보호공법 개선(Curb Element 공법), 토목 제51권 제5호, 대한토목공학회, 77-82
- 최형석, 2000, CFRD형 댐의 최신기술(연재), 토목 제48권 제7호~제9호, 대한토목학회
- 한국수자원공사, 2002, 한국의 댐
- 한국수자원학회, 2003, 댐설계기준
- 坂本忠彦, 松本徳久, 福永和久, 2000, 海外のCFRD의

動向, ダム技術, NO 162, 財 法人 ダム技術センター

- A. Marulanda, N. L. S. Pinto, 2000, Recent Experience on Design, Construction and Performance of CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- B. Materon, R. T. Mori, 2000, Construction Features of CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- D. Godde, M. Droste, 2001, CFRD Mohale, Lesotho Some Aspects of Face Slab Construction, Proceedings, ICOLD - 69th Annual Meeting, Dresden, Germany
- F. Resende, B. Materon, 2000, ITA Method - New Construction Technology for the Transition Zone of CFRD's, Proceedings; International Symposium on CFRDs, 18 Sep., Beijing, China
- G. Noguera, L. Pinilla, L. San Martin, 2000, CFRD Constructed on Deep Alluvium, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- International Water Power & Dam Construction, 1991, Recent Experience with CFRDs Worldwide, Vol.43, NO1
- J. A. Sobrinho, A. E. Dardinha, S. C. Albertoni, H. H. Dijkstra, 2000, Development Aspects of CFRD in Brazil, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- J. Barry Cooke, special lecture, 2000, The High CFRD Dams, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- J. Barry Cooke, 1991, The Concrete-faced Rockfill Dam, International Water Power & Dam Construction, Vol.43, NO1
- Jiang Guocheng, Cao Keming, 2000, The CFRD Dams in China, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- Jiang Guocheng, Zhao Zengkai, 2000, High Concrete Face Rockfill Dams in China, Proceedings; International Symposium on CFRDs, 18 Sep., Beijing, China
- Jianzheng Pan, Jing He, 2000, Large Dams in China; A Fifty - Year Review, China WaterPower Press
- P. M. Lagos, B. P. Machado, 2000, Foundation Treatments, J. Barry Cooke volume, Concrete face rockfill dams, Beijing
- R. Casinader, 1993, Special Features of Some CFRDs,

Earth-rockfill Dams, Oct., Beijing, China
 The International Journal On Hydropower & Dams,
 2004, Special Issue: ICOLD Seoul 2004, Vol. 11,
 Issue 2

투 고 일 2004년 11월 15일
 심 사 일 2004년 11월 16일
 심사완료일 2005년 1월 23일

김형수
 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소
 305-730, 대전시 유성구 전민동 462-1
 Tel : 042-860-0330
 Fax : 042-860-0592
 E-mail : hskim@kowaco.or.kr

임정열
 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소
 305-730, 대전시 유성구 전민동 462-1
 Tel : 042-860-0326
 Fax : 042-860-0592
 E-mail : passion@kowaco.or.kr

박동순
 한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소
 305-730, 대전시 유성구 전민동 462-1
 Tel : 042-860-0324
 Fax : 042-860-0592
 E-mail : fulgent@kowaco.or.kr