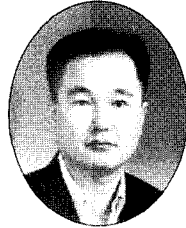


특 집

|| 수리 및 항만 콘크리트 구조물의 신기술 ||

댐 콘크리트의 신기술

- Advanced Technology of Dam Concrete -



장봉석*
Jang Bong Seok



박한규**
Park, Han Gyu



배수호****
Bae, Soo Ho

먼저 댐 콘크리트를 이야기하기 전에 먼저 '댐'에 대한 이해를 위하여 댐의 정의를 간단히 알아보면, 댐은 하천을 가로질러 저수(貯水)·취수(取水)·토사유출방지(土砂流出防止) 등의 목적을 위해 축조하는 구조물로 각각의 목적에 따라 저수댐·취수댐·사방댐으로 불리는데 일반적으로는 저수댐을 말한다. 저수댐의 목적은 하천 유량의 변동을 인위적으로 조절하는 것으로, 유량이 많을 때 물을 가두어 갈수시(渴水時)에 댐으로부터 물을 방류, 농업·발전(發電)·수도·공업·운송 등에 필요한 물을 공급한다. 또한 홍수유량의 일부 혹은 전부를 저수해서 하류의 홍수유량을 감소시키고 홍수재해를 막기 위해서도 이용된다. 이와 같이 저수댐은 여러 가지 목적으로 쓰이는데, 이중 하나의 목적에만 쓰이는 것을 전용댐, 둘 이상의 목적에 이용되는 것을 다목적댐이라고 한다. 취수댐은 하천수를 용수로 끌어들이기 위해 수위를 높이는 것이 목적인 댐으로, 높이가 낮은 것이 많다. 사방댐은 산지와 계곡에서 유출되는 토사를 막아 하류로의 유출토사량을 감소시키기 위해 만들어진 댐이다. 댐은 사용재료에 따라 콘크리트댐과 필댐(fill dam)으로 분류된다. 필댐은 다시 흙을 재료로 하는 흙댐(earth dam)과 석괴(石塊)를 재료로 하는 사력댐(rockfill dam) 등이 있다. 콘크리트댐은 구조에 따라 중력댐·중공중력(中空重力)댐, 부벽댐(buttress dam) 및 아치댐으로 분류된다.^{12),13),14)}

1. 서 론

세계적으로는 19세기 말경부터 콘크리트가 댐의 축조재료로서 사용되었고 설계이론도 정비되어, 본격적인 중력댐이 프랑스 등 유럽 여러 나라에서 발전·홍수조절·운송 등을 위해 건설되었다. 그 뒤 콘크리트를 절약하기 위해 중력댐 속에 빈 공간을 둔 중공중력댐이 고안되었다. 미국에서는 중서부 개척시 교통조건이 나쁜 곳에 댐을 건설함에 있어 콘크리트를 절약할 수 있는 아치댐의 건설이 추진되었다. 이 외에도 세계적으로 많은 콘크리트 댐들이 건설되었다.

본고에서는 국내에서 시공 사례가 없으며 최초로 한탄강 댐의 설계에 채택된, 또한 세계적으로 댐 콘크리트의 역사에서 있어서 상대적으로 최신기술이라고 할 수 있는 롤러다짐 콘크리트(roller compacted concrete, RCC)에 대해서 소개하고자 한다. 또한, 롤러다짐 콘크리트 이외에 일본에서 많이 사용되고 있는, 건설비용 감축, 환경부하 경감에 유리한 CSG(cemented sand and gravel) 공법에 대해서도 간략히 소개하고자 한다.

2. 중력식 콘크리트댐의 설계

댐 콘크리트는 19세기 말에서 20세기 초에 "Middle Third 이론", "Arch 및 Crown 외팔보 이론" 등의 발표로 중력댐 및 아치댐의 설계가 합리화 되었다. 1934년 안전율에 관한 Henny 식이 발표되고, 재료면에서도 시멘트의 품질, 골재세척 그리고 콘크리트 강도에 대한 물-시멘트비 이론 등이 발표되면서부터 중력식 댐의 단위 시멘트량은 묵시적으로 223 kg/m³이 정해졌고

* 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 선임연구원

** 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소 소장

*** 정희원, 안동대학교 토목공학과 교수

굵은 골재 최대치수가 76 mm로 일반화되었다.

현대 콘크리트 댐 개념의 기초를 확립한 것은 미국의 Hoover 댐이며, 당시 적용된 설계이론, 시공법, 재료 등에 대한 실험 및 연구 결과를 토대로 많은 기술발전이 이루어져 오늘날 댐 공학의 기초가 되었다. 그 주요 기술 사항은 다음과 같다.⁷⁾

- ① 시험하중에 의한 응력 계산
- ② 연간 122만 m³ 시공 설비 사용
- ③ 내부진동기 사용 다짐
- ④ 파이프쿨링(pipe cooling)을 통한 냉각
- ⑤ 블록(block) 공법 도입과 조인트그라우팅(joint grouting)
- ⑥ 합리적인 안전을 고려

우리나라의 「댐설계기준」에서는 설계 시 다음과 같은 사항을 고려하도록 하고 있다.

중력식 콘크리트 댐의 설계에서 구조적 검토 사항은 댐에 작용하는 힘과 이에 대한 안정성 검토가 주된 부분이다. 댐에 작용하는 힘으로는 댐의 자중, 정수압, 동수압, 풍하중, 온도하중, 양압력, 파압, 빙압, 퇴사압, 지진력 등이 있으며, 최근에는 미사일 등의 충돌하중에 대해서도 고려하기도 한다.

댐 마루의 표고는 최대 홍수위 등의 수문자료를 토대로 결정하고, 작용하는 하중들을 고려하여 표준단면을 결정하게 되며, 경제적인 최소 단면으로 댐 축방향으로 단위 폭을 갖는 기본 삼각형의 단면이 일반적이다. 기본 단면형에 있어서는 전도에 대한 안정조건으로 결정하고 나머지 항목에 대해서는 안전율을 검토하여 기본 단면을 수정하는 순서로 이루어진다.

댐의 안정성은 전도, 활동, 체체 콘크리트와 기초암반의 사용 응력이 허용응력을 초과하지 않는 등의 세 가지 조건을 만족해야 한다.

- ① 외력의 합력이 체체 수평단면의 중앙 1/3 이내여야 함
- ② 전단마찰 안전율이 4 이상을 만족
- ③ 압축응력이 허용응력을 초과하지 않도록 결정

또한, 댐의 안정계산은 댐의 단면형상 및 댐과 기초암반의 접촉면에 관하여 외력 및 자중에 대해서 다음 조건을 만족하여야 한다.

- ① 상류면에는 연직방향의 인장응력을 일으키지 않을 것
- ② 전단에 대해서 안전할 것
- ③ 허용 압축응력 및 허용 인장응력을 넘지 않도록 할 것

댐의 응력해석은 댐에 작용하는 댐의 자중, 정수압, 동수압, 양압력, 파압, 빙압, 퇴사압 및 지진력 등의 크기와 방향에 따라

응력상태를 적절히 판단하여 행한다.

중력식 댐의 응력해석은 댐 축에 직각인 방향의 2차원 응력계산을 행하는 것이 일반적이다. 중력식 댐에서 저수량이 거의 없는 경우에 지진 관성력을 고려한 경우와 체체 하류측 또는 3차원 응력작용을 고려한 경우 댐체 일부에 인장응력이 일어나는 경우가 있다. 인장응력과 댐체의 기초암반의 접촉면에 연직한 방향의 인장력 이외에는 응력의 크기, 방향, 위치 등이 댐의 안정에 중요한 영향을 미치지 않는 한도 내에서 지장을 초래하지 않는다. 월류부의 마루 인근에서 인장응력이 생길 경우는 철근으로 보강한다. 특히, 현저한 기초변형이 예상되는 댐에서는 저면부근에 연직방향과 수평방향의 인장응력이 일어날 수도 있어 이 경우에는 이에 대응하는 적절한 대책을 강구해야 한다. 한편 댐의 정확한 응력해석을 위해서는 적절한 모형실험도 실시해야 한다.

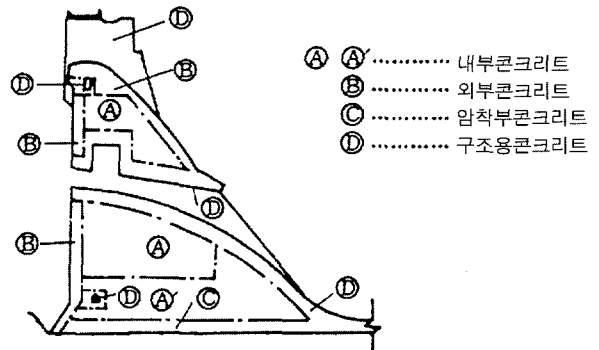


그림 1. 댐 콘크리트 배합 구분도

3. 롤러다짐 콘크리트(RCC)

롤러다짐 콘크리트 댐은 1964년 이탈리아의 Alpe Gera 댐에서 172 m 높이의 댐을 건설하면서 필댐 시공 장비인 덤프트럭과 도저, 트랙터를 이용하고 내부 진동을 통해 다짐을 실시하면서 시작되었다. 이후 1970년 Jerome Raphael은 그의 논문에서 롤러를 통한 다짐으로 단면을 줄이는 효과를 얻을 수 있고 흙댐에 적용되는 연속 타설 방법을 사용한다면 기존의 중력댐과 비교할 때 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이라고 밝혔다. 이를 계기로 많은 연구들이 진행되었고 1970년대 초반 Time Ford 댐의 Tennessee Valley Authority와 Lost Creek 댐의 미국 공병대 기술진의 연구를 통해 롤러다짐 콘크리트 댐 공법의 경제적 적용 가능성이 밝혀졌고 타설 방법 역시 크게 발전하였다. 일본의 경우는 자체적으로 이를 Roller Compacted Dam(롤러 다짐 콘크리트 댐; RCD)이라 명하고 지역적 특성에 맞는 RCD 댐을 계속 적용·발전시켰다. 세계에서 최초로 현재 개념의 롤러다짐 콘크리트를 본 댐에 적용한 것은 1974년에 시작된 시마지가와(島地川) 댐이었으며, 댐의 높이는 89.0 m, 댐 마루의 폭은 240.0 m, 체적은 31만 7,000 m³에 이른다. 이후 1980년대에

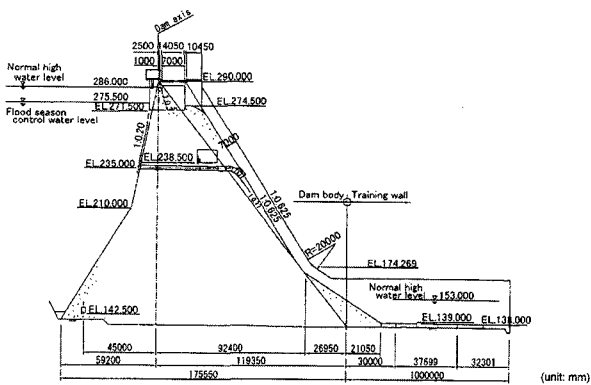


그림 2. 중력식 RCD 댐의 단면(일본 Miyagase 댐)

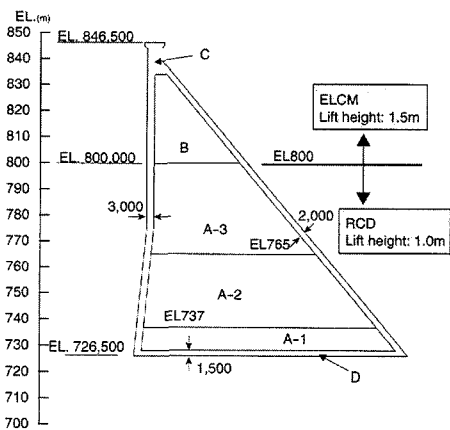


그림 3. RCD 댐의 배합구분 예(일본)

들어 미국과 일본 등지에서 많은 성공적인 시공이 이루어졌으며, 중국에서도 RCC 댐이 42개 건설되었고, 14개가 현재 건설 중에 있다. 이 중에서 적어도 8개가 100 m 이상으로 건설되었다.¹¹⁾

3.1 롤러다짐 콘크리트의 일반

롤러다짐 콘크리트 댐은 콘크리트 댐의 장점을 살리고 필댐의 단점을 보완하면서, 콘크리트 댐의 시공상 문제점을 개선하여 건설공기의 단축과 경제성을 높이고 콘크리트 댐의 축조가 적합한 지점에서 댐 건설을 쉽게 하고 댐 지점의 지형, 지질 등의 폭넓은 조건변화에도 대응할 수 있는 합리적인 댐 시공법을 확립하기 위해서 개발된 공법이다.

롤러다짐 콘크리트 댐은 콘크리트 중력식 댐을 기초로 시공상의 문제점을 개선하고 경제성을 높이면서 공사기간을 단축시켜 댐 건설을 용이하게 하는 공법이다. 그러므로 일반 댐 콘크리트와는 다른 시공기계의 채용과 더불어 시공방법을 개량할 수 있고 이에 적합한 재료의 선택과 배합변경이 필요하다. 롤러다짐 콘크리트의 특징은 다음과 같다.¹⁾

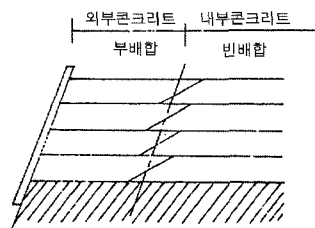
- ① RCC는 일반 콘크리트에 비해서 매우 된 배합이다.
- ② 일반적으로 단위시멘트량이 적다.

- ③ 콘크리트 타설능력과 수화열을 고려하여 제체 전면의 layer 타설방식에 의한 콘크리트 타설을 표준으로 한다.
- ④ 1 리프트(lift)의 높이는 다짐효과를 고려하여 정하지만, 제체 부분에서는 약 70 cm 정도를 표준으로 한다.
- ⑤ 가로수축이음은 콘크리트 다짐 전·후에 이연도금철판으로 절단 또는 압입하는 방법으로 시공하며, 세로수축이음은 일반적으로 설치하지 않는다.
- ⑥ 파이프쿨링의 시공은 일반적으로 실시하지 않는다.
- ⑦ 댐 상·하류면은 콘크리트의 내구성 확보를 위하여 거푸집을 이용한 일반 콘크리트를 타설 한다.

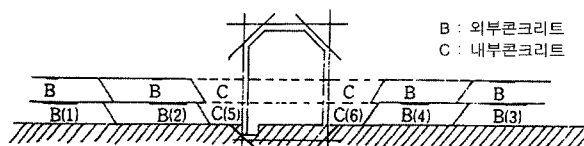
롤러다짐 콘크리트는 세계적으로 1960년대부터 활발히 적용되어온 비교적 최신의 기술이고 국내에는 그 적용이 전무하였으며 현재 한탄강댐이 롤러다짐 콘크리트를 사용한 콘크리트 중력식 댐으로 설계되어 시공될 예정으로 있다. 롤러다짐 콘크리트는

외부콘크리트		내부콘크리트					
(14)	(13)						비비리
(9)	(8)	(12)					
(5)	(4)	(7)	(11)				
(2)	(1)	(3)	(6)	(10)			

a. 콘크리트 치기순서의 예



b. 내부콘크리트와 외부콘크리트의 접합부의 콘크리트 치기의 예



c. 검사통로 주변의 콘크리트 치기순서의 예

그림 4. 댐 콘크리트의 블록 타설 순서

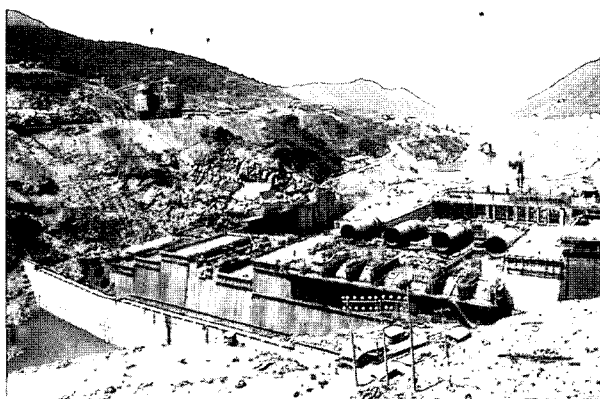


사진 1. 댐 콘크리트의 블록(block) 타설 장면

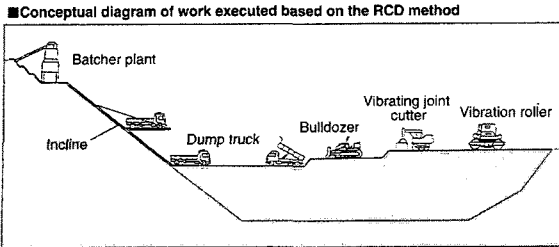
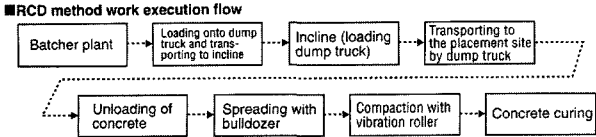


그림 5. RCD 콘크리트의 시공 개념도⁵⁾

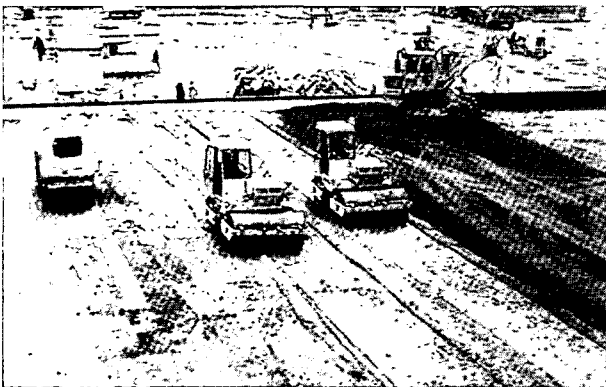


사진 2. RCD 콘크리트의 시공장면⁵⁾

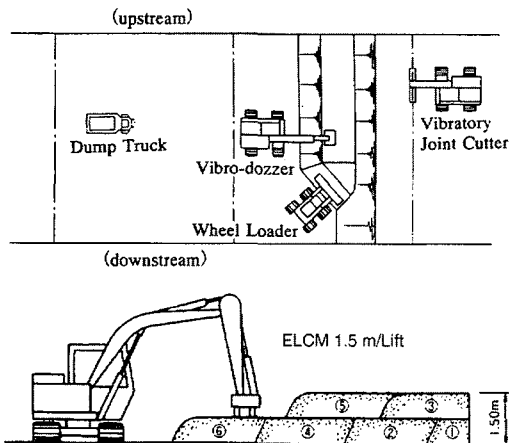


그림 6. extended layer construction method⁵⁾

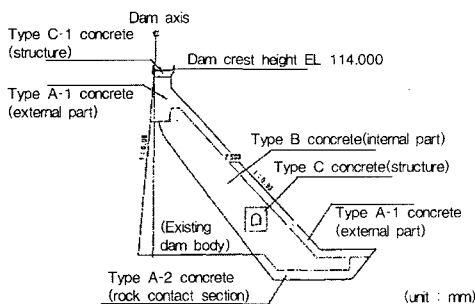


그림 7. RCD를 이용한 댐 증고 사례⁵⁾

주로 콘크리트 중력식 댐의 본체 내부 콘크리트에 적용되거나, 또는 손상 받은 댐의 안정성 확보 또는 댐의 치수증력 증대를 위한 증고 등을 위한 댐의 재개발에 적용된 사례가 보고 되어있다.

롤러다짐 콘크리트의 가장 큰 장점은 일반 콘크리트를 사용하는 경우에 고려해야 하는 여러 가지 문제점들을 해결할 수 있고, 급속 시공이 가능하다는 점 등이 있다. 주지의 사실이지만, 일반 콘크리트를 사용하는 경우의 문제점이라고 함은 일반콘크리트는 블록 형태의 매스콘크리트로 타설함으로써 많은 수화열이 발생하고 이를 제어하기 위하여 프리쿨링(pre-cooling), 포스트쿨링(post-cooling) 등을 고려하여야 하며, 파이프쿨링이 필수적으로 수반되어 공정이 복잡하고 한 리프트를 타설 한 후 파이프쿨링을 위한 일정한 시간이 소요된다. 또한 블록 경계에서의 지수처리 등의 추가 공정을 수반하게 된다.

이에 비해, 롤러다짐 콘크리트는 단위 시멘트량도 매우 적으며, 슬럼프(slump)가 없는 빈배합의 콘크리트를 사용하여 수화열발생이 매우 적고, 흙다짐 장비를 이용하여 층 다짐 형태로 시공함으로써 필댐의 신속한 시공방법을 이용하여 축조할 수 있는 장점이 있다. 따라서 롤러다짐 콘크리트는 파이프쿨링이 필요 없고 블록 경계의 지수처리 공정 등이 없어서 공정이 단순하고 시공속도 또한 향상된다.

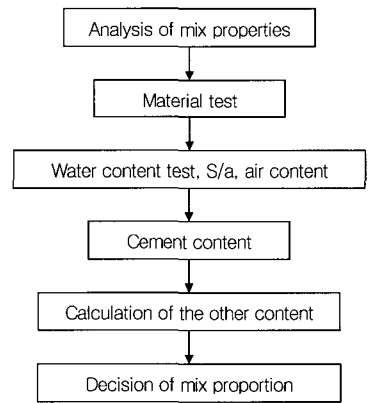
3.2 롤러다짐 콘크리트의 배합설계

롤러다짐 콘크리트의 배합설계는 미공병단의 배합설계방법과 일본 RCD 연구회의 배합설계방법이 있다.

미국에서 RCD를 댐에 적용하기 위한 연구는 1970년대 초반부터 정부 기관이 주가 되어 실시되었다. 특히 공병대가 중심이 되어 실시된 연구가 많았으며 이러한 연구

의 결과 오랜 기간에 걸쳐 누적된 데이터를 표와 그래프로 체계적으로 정리해 이를 배합설계에 적용하고 있다. 미국 공병대의 배합설계 방식을 <그림 8>에 간략히 나타내었다. 총 10단계로 이루어진 미국 공병대의 배합설계방법은 단위수량, 잔골재율 및 단위시멘트량 등의 기본 값을 표와 그래프를 이용해 결정하고 잔여재료의 절대용적을 산출하는 방식이다. 본 방법의 장점은 배합설계에 들어가는 시간을 최소화 할 수 있고 신속하고 편리하게 적용할 수 있다는 것이다.²⁾

일본의 경우는 지역적으로 지질 조건이 큰 차이가 나는 현장 조건을 고려해 시공 재료와 여러 가지 조건에 맞추어 여러 번의



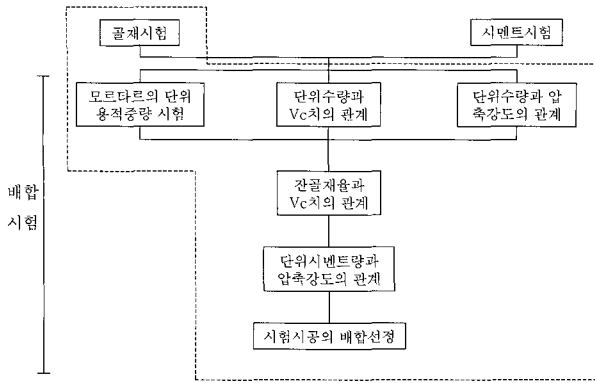


그림 9. 일본의 배합설계 방법

반복 실험을 통해 배합을 결정하였다. 본 방법은 적용성과 시공 측면에서 유리한 반면 실험 초기 재료량의 범위를 산정하는데 있어 어려움이 있으며 배합을 도출하는데 장기간의 시간이 소요된다는 단점이 있다. 배합설계 방식은 기본적으로 <그림 9>와 같은 순서로 진행된다.

3.3 롤러다짐 콘크리트의 품질관리

3.3.1 댐 콘크리트 일반

댐 콘크리트는 현재 우리나라의 「댐설계기준」과 「콘크리트 표준시방서」의 댐 콘크리트의 사용재료에 대한 규정이 있으며, 일반적으로 사용되는 콘크리트와 차이는 굵은 골재의 최대치수가 150 mm 이하까지로 규정되어 있다. 또한 내구성 등의 확보를 위하여 댐체 외부의 콘크리트는 일반 콘크리트를 적용하도록 하고 있으며, 발생하는 수화열에 대한 고려, 시공방법 등이 제시되어 있다. 댐 콘크리트의 배합강도는 재령 91일 강도를 기준으로 하며, 배합압축강도는 설계응력, 안전율, 변동계수의 곱으로 결정한다. 이때, $\phi 150 \times 300$ mm 표준공시체를 사용한 경우 안전율은 5 이상으로 하도록 되어있다.

$$\text{배합압축강도} = (\text{설계응력}) \times (\text{안전율}) \times (\text{변동계수})$$

이 외에도 이음(joint)부, 지수관, 배수공에 대한 사항이 필요하며, 댐의 건설 기간 동안 품질확보 및 준공 후 운영 시에 안전 확보를 모니터링하기 위하여 각종 측정계기(누수량, 양압력, 퇴사량, 기상상황, 온도, 균열, 비틀림, 내부응력, 지진력, joint opening, 변위)의 설치를 고려하여 한다.

3.3.2 롤러다짐 콘크리트

앞서 설명했듯이, 롤러다짐 콘크리트는 적은 단위시멘트량을 사용하며 반죽의 질기(consistency) 즉, 슬럼프가 '0'인 콘크리트를 사용하여 롤러다짐을 통하여 소요의 품질을 확보한다. 이때 중요한 것은 반죽질기가 너무 된 경우에는 다짐횟수를 증가시키

더라도 다짐이 잘 이루어지지 않아 콘크리트 강도 등 소요의 품질을 확보하기가 어려우며, 반죽이 너무 질 경우에는 다짐장비가 빠져서 다짐을 실시할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 롤러다짐 콘크리트의 가장 중요한 것은 효과적인 다짐을 실시하여 소요의 품질을 확보할 수 있는 컨시스턴시의 확보가 매우 중요하다.

적은량의 시멘트계 재료를 사용하는 롤러다짐 콘크리트는 페이스트량의 증가를 통하여 공극을 채우기 위하여 200번 체를 통과하는 재료의 요구량이 일반적인 콘크리트 보다 크다. 이를 위하여 미공병단, ASCE 등에서 페이스트량/모르타르량(V_p/V_m)의 비를 0.42 이상으로 확보할 것을 규정하고 있다.

<표 1>과 <표 2>를 비교해보면 알 수 있듯이 일반 콘크리트는 물론 댐 콘크리트에 비해서 200번 체를 통과하는 미립분의 요구량이 많음을 확인할 수 있다.

롤러다짐 콘크리트의 컨시스턴시를 관리하기 위한 방법으로, 미국에서는 Vebe 시험기를 변형한(modified Vebe) 방법인 ASTM C 1170 "Standard test methods for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table"을 따르며, 약 10 ~ 25초 정도의 Vebe time을 가져야 하는 것으로 제시하고 있다.

일본의 경우는 슬럼프 관리를 위하여 미국과 유사한 시험방법인 VC(vibrating compaction) 시험방법을 이용하여 반죽의 질기를 관리하며, VC 시험에는 사용 용기의 크기에 따라 대형 VC 시험과 소형 VC 시험 두 가지 방법이 있다. 소형 VC 시험은 실내 시험에서 주로 사용되며, 대형 VC 시험은 주로 현장배합의 품질관리를 위하여 사용한다. 일반적으로 소형 VC치(vibrating

표 1. 롤러다짐 콘크리트용 골재 입도 표준(USACE, ASCE)

a. coarse aggregates		b. fine aggregates	
sieve size	cumulative percent passing	sieve size	cumulative percent passing
75 mm	100	9.5 mm	100
63 mm	88	4.75 mm	95 ~ 100
50 mm	76	2.36 mm	75 ~ 95
37.5 mm	61	1.18 mm	55 ~ 80
25.0 mm	44	600 μ m	35 ~ 60
19.0 mm	33	300 μ m	24 ~ 40
12.5 mm	21	150 μ m	12 ~ 28
9.5 mm	14	75 μ m	8 ~ 18
4.75 mm	-	FM	2.10 ~ 2.75

표 2. 댐 콘크리트 골재의 입도 표준

a. coarse aggregates		b. fine aggregates	
체의 크기(mm)	입경별 백분율(%)	체의 크기(mm)	입경별 백분율(%)
80 ~ 40	40 ~ 20	10 ~ 5	0 ~ 8
40 ~ 20	40 ~ 20	5 ~ 2.5	5 ~ 20
20 ~ 10	25 ~ 15	2.5 ~ 1.2	10 ~ 25
10 ~ 5	15 ~ 10	1.2 ~ 0.6	10 ~ 30
		0.6 ~ 0.3	15 ~ 30
		0.3 ~ 0.15	12 ~ 20
		0.15 ~	2 ~ 15

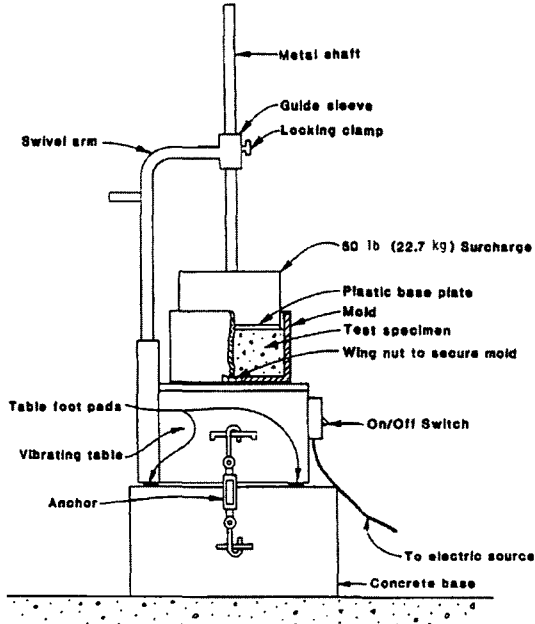


그림 10. 진동 테이블 (미국, ASTM⁹⁾

표 3. 진동대의 주요 사양 비교

항목	미국 (ASTM C 1170)	일본 (VC 시험)	비고
용기크기(mm)	Φ241 ± 2, 197 ± 2	Φ240, H200 Φ480, H400	
진동수(vpm)	3,600 ± 100 (60 ± 1.67 Hz)	3,000 ~ 4,000	
진폭(mm)	2 × (0.43 ± 0.08)	1.0	
추하중(kgf)	22.7 ± 0.5	10 ~ 20	

compaction value)를 20 ± 10 sec 범위를 만족하도록 규정하고 있다.

미국의 시험규격과 일본의 VC시험기에서 요구하고 있는 진동 테이블의 주요 사양은 다음의 <표 3>에 나타내었다. 일본 RCD 연구회의 보고에 따르면 진동수 3,000 ~ 4,000 vpm 사이에서는 소정의 다짐효과를 충분히 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다.

일본 RCD 연구회의 경우, 별도로 강도시험용 공시체의 제작에 대한 언급은 없으나, 미국의 경우는 강도시험용 공시체의 제작은 ASTM C 1176 "Standard practice for making roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating table" 또는 ASTM C 1435 "Standards practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer"에서 규정하고 있다.

3.4 시공설비의 고려사항

시공설비 계획은 댐 지점의 지형, 지질, 기상조건, 댐의 규모, 공기, 공사비 등에 의하여 많이 달라지며, 시공 중에도 연구 검토하여 경제적이고 능률적인 시공이 가능하도록 설비계획을 수정하여야 한다. 이때 고려되는 주요 인자는 공기를 고려한 타설 평

표 4. 공시체 제작방법

항목	ASTM C 1176	ASTM C 1435	비고
공시체크기 (mm)	Φ150 × H300	Φ150 × H300	
다짐	vebe table	hammer (2,000 impact/min 이상)	
다짐 하중 (kgf)	9.1 ± 0.25	hammer mass ≥ 10 ± 0.2 tamping plate = 3.0 ± 0.1	
다짐시간	when the mortar forms completely around the surcharge	20 sec 이내 (when the mortar forms completely around the tamping plate)	

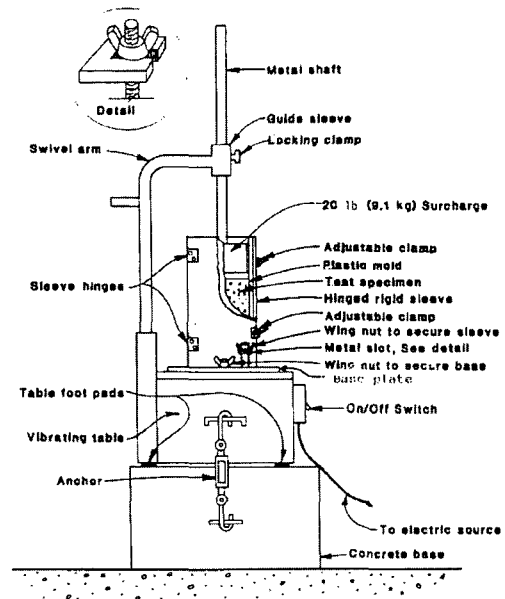


그림 11. ASTM C 1176 방법⁹⁾

균량과 운반 사항이며, 골재, 시멘트 등 재료의 수송 및 저장도 중요한 부분이다.

롤러다짐 콘크리트에서 주요 사항은 콘크리트의 운반용 트럭 이동의 고려, 포설장비 및 다짐장비의 효율, 포설 층 사이의 청소 및 모르타르층 포설 공정 그리고 상·하류면 일반 콘크리트의 타설 공정 등이 있다.



사진 3. ASTM C 1435 방법¹⁰⁾

4. CSG의 현황

4.1 CSG 현황

CSG란 cemented sand and gravel의 약자로, CSG 공법은 하상 사력 등의 암석질의 모재를 기본적으로 체가름 등의 조정을

표 5. 사다리꼴 CSG 댐의 본체에의 적용 사례³⁾

댐명	사업주체	당초계획 댐 형식	댐 높이(m)	사다리꼴 CSG댐 형식 대상모재
역수(億首)댐	오기나와 종합사무국(북부댐 사무국)	중력식 콘크리트댐	약 40	굴착암(CL급 이상)
산루댐	홋카이도 개발국(산루댐 건설사무소)	"	약 50	하상사력
본명천(本明川)댐	큐슈지방정비국(나가사키 하천국도 사무소)	Rcok Fill댐	약 70	굴착암(CL급 이상)

표 6. 댐형식과 체적, 요구되어지는 기초암반강도, 필요한 체제강도의 관계³⁾

	댐 체적	요구되는 기초암반 강도	필요한 체제강도
아치댐	少	大	大
직각삼각형댐	↓	↓	↓
사다리꼴댐	多	小	小

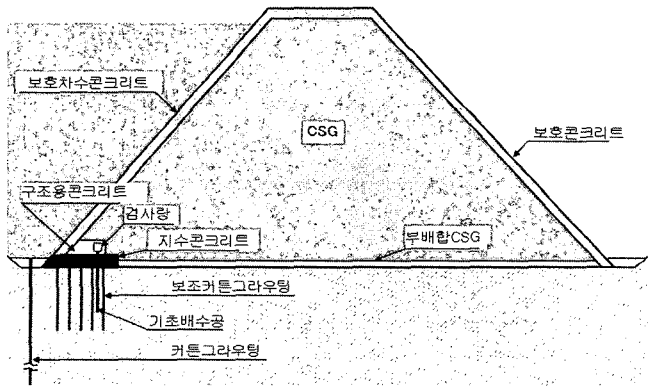


그림 12. 사다리꼴 CSG 댐 단면도³⁾

실시하지 않고 물과 시멘트를 가하여 혼합 하는 것으로서, 1992년에 일본의 나가사키댐 상류가물막이에서 처음으로 실시된 이래 일본에서 꾸준히 시공설적이 축적되어 왔으며, 1999년에 CSG 댐 연구회가 발족하여 2000년에 CSG 재료를 사용한 댐 해석 및 설계방법이 발표되었다.

한편 댐 사업뿐만 아니라 공공사업 전반에 있어서 보다 더 한층 건설비용의 감축, 사업실시에 따른 환경부하의 경감이 중요한 과제로 되었다. 이와 같은 상황에서 건설비용 감축, 환경부하 경감에 유리한 CSG 공법의 댐 본체에의 적용이 요구되어 '사다리꼴 CSG 댐'이 고안되었다.³⁾

CSG를 이용한 댐 설계로서 제안된 것이 사다리꼴 형상의 단면을 갖는 댐, '사다리꼴 댐'이다. 사다리꼴 댐은 종래의 직각 삼각형 단면의 댐(중력식콘크리트댐)에 비하여 체제적은 크나 ①전도, 활동에 대하여 안정성이 높고 ②체제내부의 발생응력이 적은 등 특징을 갖고 있다. 또한 CSG 공법은 ①효율이 좋은 모재확보가 가능, ②CSG 제조가 간편한 설비로 가능, ③급속시공이 가능한 등의 특징을 가지며, 건설비용의 감축, 환경영향 감소가 가능하다.

이와 같은 '사다리꼴 댐'과 'CSG 공법'을 조합한 것이 '사다리꼴 CSG 댐'이다. 사다리꼴 CSG 댐은 사다리꼴 댐과 CSG 공법의 여러 특징을 살려, '재료의 합리화'를 주로하여 '설계의 합리화', '시공의 합리화'의 3개의 합리화가 시도됨과 아울러 환경부하

를 경감시킬 수 있는 새로운 형식의 댐이다.

CSG 공법은 댐 건설 예정지의 하상 재료를 그대로 사용하여 체체를 축조에 사용함으로써, 석산개발이 필요 없어 친환경적이며 사다리꼴 형의 체체를 적용하여 침하, 활동, 전도와 내진에 대한 안정성이 확보가 유리하다. 따라서 일본에서는 CSG 공법의 적용 초기에는 상류 가물막이 또는 저사댐 등의 소규모에 댐체에 적용하였으나, 최근에는 댐 본체에도 적용하고 있는 최신기술이다.

4.2 사다리꼴 CSG 댐의 특징

사다리꼴 형상을 갖는 댐은 일반적인 중력식 콘크리트댐 과 같은 직각 삼각형단면을 갖는 댐과 비교하여, 다음과 같은 특징이 있다.

첫째, 하중조건의 변화에 대하여 발생응력의 변동이 적고, 지진시에 있어서도, 체체저면의 연직응력이 기본적으로 압축영역에 있다. <그림 13>은 정적하중 및 지진시 하중을 고려한 경우의 체체 저면에 생기는 연직응력 분포를 나타낸 것이다. 사다리꼴 형상은 지진이나 홍수에 따라 급격한 하중변동에 대하여 체체 및 기초암반에 발생하는 응력의 변동폭이 적고, 지진시에 있어서도 체체 저면의 연직응력이 기본적으로 압축영역에 있다.

둘째, 전도 및 활동에 대한 안전성이 높다. <그림 13>에 나타난 것과 같이 사다리꼴 댐에서는 지진시에 있어서도 체체저면의 연직응력이 기본적으로 압축영역으로 되는 형상을 채택하고 있고, 폭넓은 체체형상 때문에 전도 및 활동에 대한 안전성이 높다.

셋째, 체체 내에 발생하는 응력이 적고 체체재료에 요구되는 강도가 적다. <그림 14>는 직각삼각형 형상과 사다리꼴 형상에

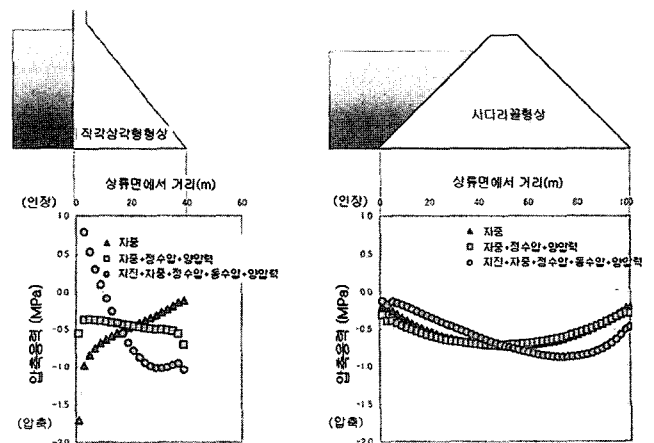


그림 13. 댐 체체에 작용하는 연직응력분포³⁾

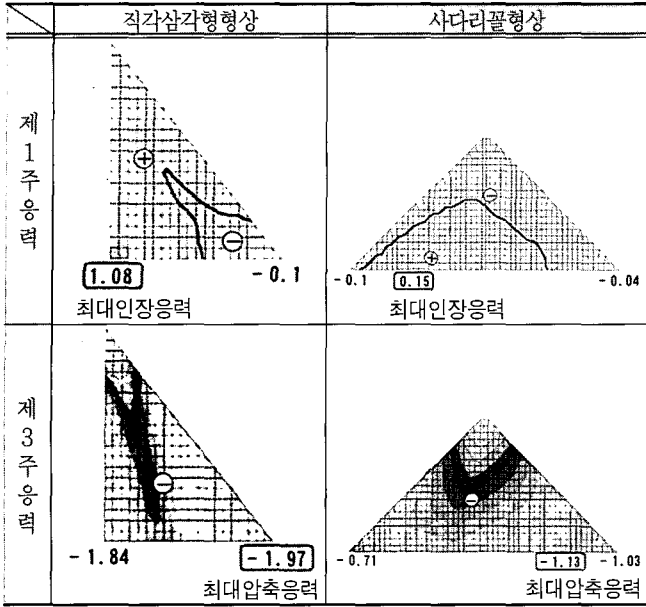


그림 14. 제체 내의 응력분포(제고 50m, 저수심 45m, $E_c/E_r=2$, 자중+정수압+지진시 관성력. 동수압 작용시, 일고파 250 gal)³⁾

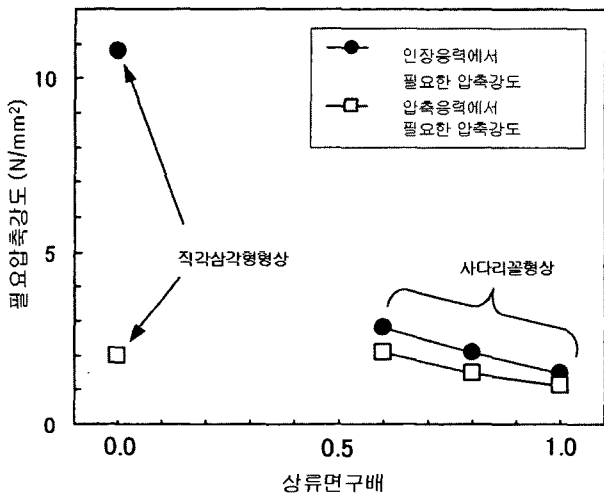


그림 15. 필요압축강도와 제체형상³⁾

있어서 제체 내에 발생하는 최대 주응력 분포도(지진시)를 나타낸 것이다. 사다리꼴 형상은 직각삼각형 형상에 비하여 발생하는 응력이 적고, 특히 최대 인장응력은 약 1/7로 저감 된다. <그림 15>는 가정으로 제체재료의 인장강도가 압축강도의 1/10로 되었을 때 최대인장응력으로부터 필요로 하는 압축강도와 최대 압축 응력으로부터 필요로 하는 압축강도를 사다리꼴 형상과 직각삼각형형상으로 비교한 결과이다. 사다리꼴 형상에서는 인장응력으로

부터 필요로 하는 압축강도는 직각삼각형 형상에 비하여 훨씬 작다. 또한 사다리꼴 형상에서는 압축응력과 인장응력으로부터 필요로 하는 압축강도가 거의 같게 되며, 지진시에 제체 내에 발생하는 응력에 대하여 합리적인 제체 형상이라 말할 수 있다.

5. 맺음말

이상에서 설명한 롤러다짐 콘크리트 및 CSG를 적용한 콘크리트 댐의 시공은 콘크리트 댐의 안정성과 사력댐의 경제적인 측면을 모두 추구할 수 있는 공법으로, 앞으로 국내 전문가들에 의해서 이에 대한 많은 연구가 이루어지기를 희망한다.

현재 계획되어 있는 한탄강 댐이 건설되면 국내에서도 롤러다짐 콘크리트 댐에 대한 많은 기술 축적과 기술 발전을 이룩할 수 있을 것으로 기대된다. □

참고문헌

1. 한국수자원학회, "댐 설계기준", 2003.
2. 한국수자원공사, "롤러다짐 콘크리트댐의 국내 적용에 관한 연구", 2003.
3. 사다리꼴 CSG 댐 기술자료 작성 위원회, "사다리꼴 CSG 댐 기술자료", 2003.
4. 건국대학교, "댐 콘크리트의 최적배합비 도출 및 성능평가에 관한 연구", 2002.
5. JCOLD, "Current Activities on Dams in Japan," 2003.
6. ASCE, "Roller-Compacted Concrete," 1994.
7. 산업기지개발공사, "Rolled Concrete 공법에 의한 댐 시공", 1985.
8. ASTM C 1170-91, "Standard test methods for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table," Reapproved 1998.
9. ASTM C 1176-92, "Standard practice for making roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating table," Reapproved 1998.
10. ASTM C 1435-99, "Standards practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer".
11. Baile Wang, Jianping Zhou & Guanfu Chen, "高RCC 중력식댐의 특별 설계 요구사항".
12. 야후 백과사전, "http://kr.100.yahoo.com/".
13. 한국 브리태니커 온라인, "http://preview.britannica.co.kr/".
14. 네이버 백과사전, "http://100.naver.com/".