

RCD 콘크리트의 특성 및 발전방향

2011.10.13

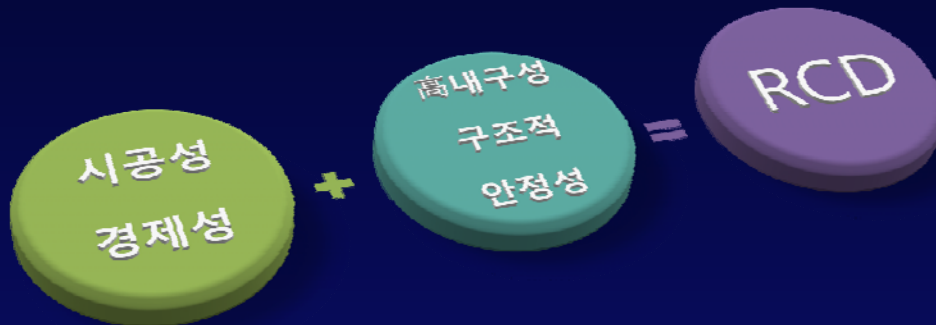
건국대학교 사회환경시스템공학과
원 종 필

발표순서

- RCD 공법의 개요
- RCD 콘크리트의 특성
 - ✓RCD 콘크리트의 사용재료
 - ✓RCD 콘크리트의 배합설계
 - ✓RCD 콘크리트의 역학적 성능
 - ✓RCD 콘크리트의 내구성
- RCD 콘크리트의 발전방향
- 결론

Roller Compacted Concrete for Dam (RCD) 공법

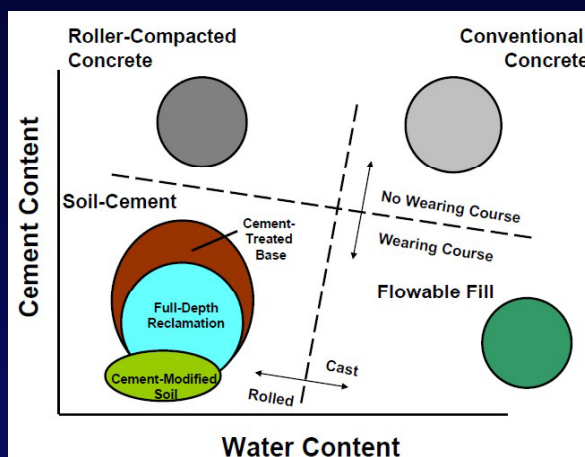
- ✓ 1970년대부터 적용된 댐 시공방법
- ✓ 제방형 댐과 콘크리트 댐의 장점을 병합



RCD 콘크리트

Roller Compacted Concrete (RCC)의 정의

- ✓ 진동롤러로 다져 시공하는 빈배합의 無슬럼프 콘크리트
 - 낮은 단위시멘트량, 건조한 반죽



▪ RCD 공법의 장점

재료비 감소

- ▶ 제방형 댐에 비해 사용되는 재료의 부피가 적음

시공기간 단축

- ▶ 無슬럼프의 건조한 배합
- ▶ Layer by layer 형식의 종방향 시공

부속 구조물

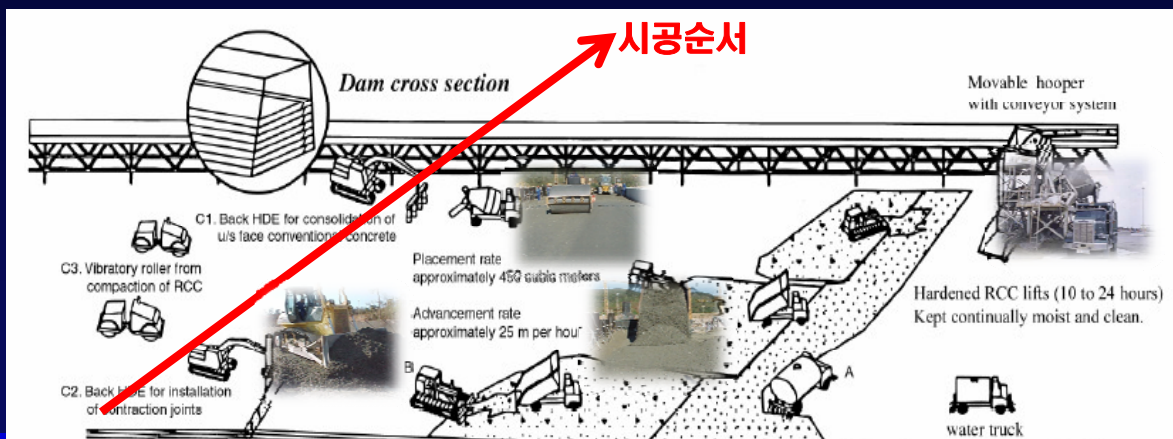
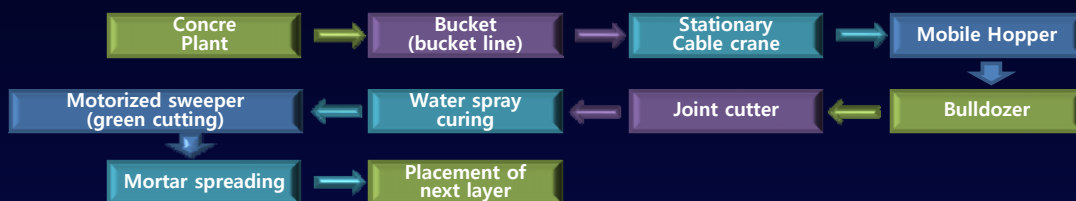
- ▶ 댐의 기초 길이가 짧아 도랑과 수로규모 감소
- ▶ 취수탑 및 측구여수로의 위치 및 규모 조절 용이

기타

- ▶ 친환경적 공법
- ▶ 수화열 저감대책 불필요
- ▶ 침식, 월류 및 지진에 대한 저항성 우수
- ▶ 건조수축, 크리프 등의 부피변화가 적음

RCD 공법의 시공

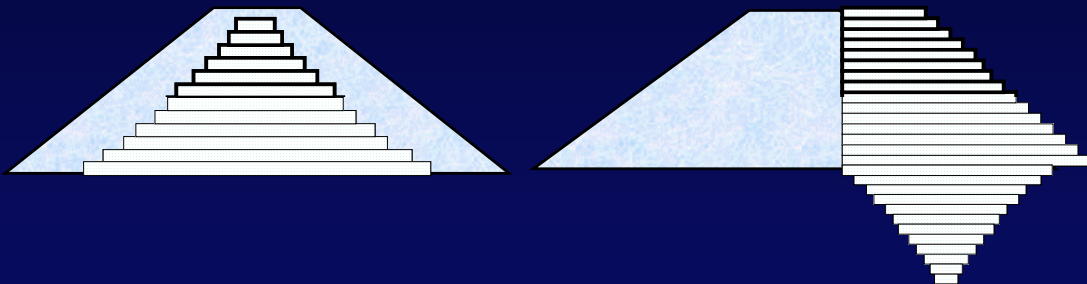
▪ RCD 공법의 시공순서



▪ 시공범위에 따른 RCD의 분류

✓ 부분형

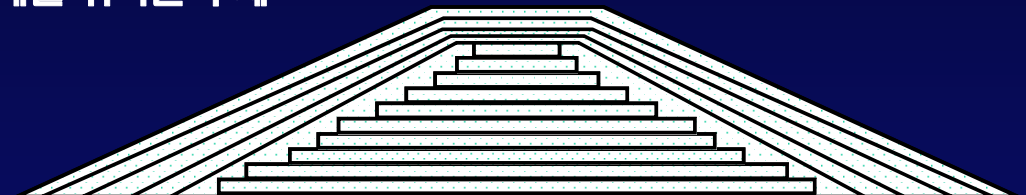
- 주로 일본에서 적용되는 방식
- RCC를 코어와 같은 형식으로 타설하고 외부를 매스콘크리트 타설
- 일본 Shigajawa 댐, Mano 댐, Tamajiga 댐



▪ 시공범위에 따른 RCD

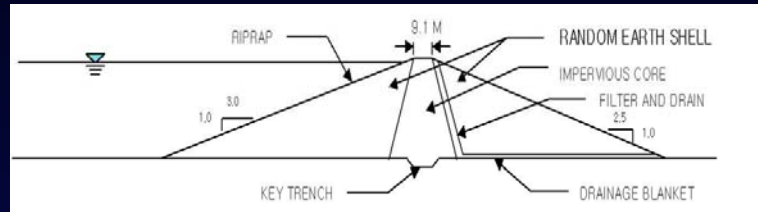
✓ 전체형

- 미국 및 기타 지역에 적용되는 방식
- 댐 제체 전체를 RCC로 타설
- 미국 Willow creek 댐
- 최근 매끄러운 표면과 내구성 문제로 표면에 일반콘크리트를 시공하는 부분형 형태를 취하는 추세

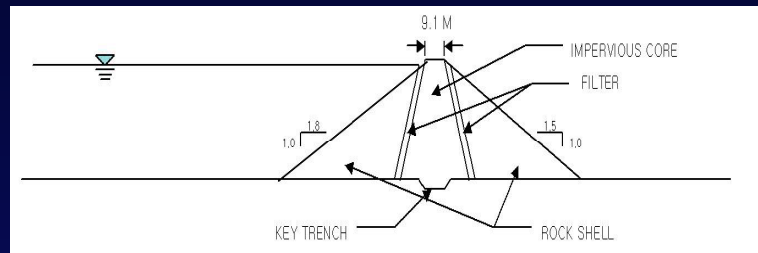


■ 시공형식에 따른 단면비교

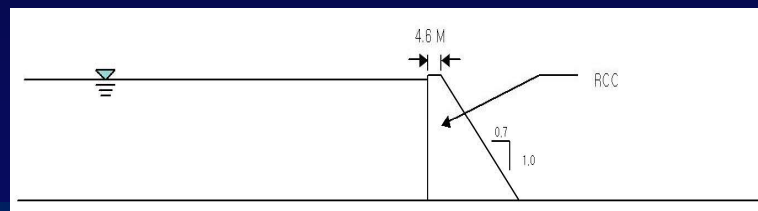
✓ EARTHFILL Dam



✓ ROCKFILL Dam

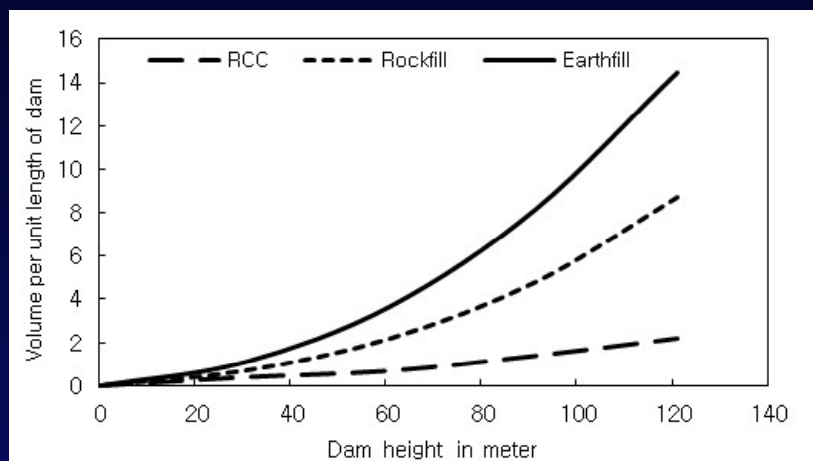


✓ RCC Dam



■ 시공형식에 따른 체적 대 높이 비

✓ 제방댐의 경우 댐의 높이에 따라 급격한 체적 증가



▪ RCD 댐과 제방형 댐의 비교

✓ Concrete faced rockfill dam(CFRD)에서 더욱 경제적이고 빠른 RCD로 시공경향 변화

- 요르단의 Al Wehdah 댐의 경우 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 규모를 19개월에 완공되었으며 Top 12 fastest constructed RCD에 기록됨
 - CFRD의 경우 4년 소요
- 미국, south california의 CFRD인 Saluda 댐의 경우 지진으로 인해 제체가 붕괴되어 긴급공사 필요
 - RCD 콘크리트 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 을 이용하여 복구
 - 13,000 m^3 를 타설하는데 24시간 소요

▪ RCD 댐과 제방형 댐의 비교

✓ 친환경적인 시공법

- CFRD에 비해 작은 foot print 필요
 - foot print 굴착을 위한 자연훼손량이 적음
 - CFRD나 earthfill에 비해 약 절반 정도의 환경유출 발생

✓ 설계 및 시공에 따른 장점

- 댐 제체의 크기를 줄일 수 있어 경제성도 함께 확보
- 전체적인 시공계획의 최소화
 - 홍수시에도 구조체에 손상없이 월류가능

▪ RCD의 기초

- ✓ 일반적으로 콘크리트 중력댐과 동일한 장소와 기초 선정
- ✓ RCD의 단위부피당 비용이 저렴함
 - 광범위한 장소 및 기초의 선정이 가능
- ✓ 다양한 암반기초 시공사례
 - 현무암, 석회암, 화강암, 이회암, 사암, 규암 등
- ✓ 非암반기초도 적용가능 (실트, 모래, 자갈 등)
 - 낮은 높이만 적용

▪ RCD 설계시 고려사항

- ✓ 구체화된 설계단계가 필요함
 - RCD의 경우 현장에서 설계되고 구조계산을 통해 그 특성이 정의됨
 - 상부 layer와 하부 layer 사이의 joint에서 발생하는 수직응력이 설계의 주요 인자
 - 특히, 지진활동이 있는 지역의 경우 critical factor로 고려됨
 - 또한 열응력에 대해서도 구조해석을 통해 미리 고려해야 함
 - 급속시공과 수화열 발생 가능성에 대한 대비

▪ RCD 시공 Methodology

✓ RCD 시공은 속도 및 품질에 초점을 둠

- 다음 요인들에 대한 정확성 제어에 따라 결정된

① 골재의 공급

- RCD는 최대한로 타설할 수 있는 양을 연속적으로 시공
- 골재 사용량이 높아 타설기간 동안 많은 양의 골재 비축이 필요
- 비축된 골재는 트럭이나 컨베이어 시스템을 이용한 운반에 비해 경제적인

② RCD 콘크리트 배치플랜트의 위치

- 배치플랜트의 위치는 저수지의 상류에 위치
 - 골재 저장고에 가깝게 위치해야 운반비를 최소화 할 수 있음
- 시멘트계 재료운반 및 수송에 용이한 접근성을 가져야 함

③ 시험방법

- 기존 매스콘크리트와 크게 다르지 않으나 정밀한 시험을 통해 비용 절감을 도모할 수 있음
- 체크사항 : 배합성능측정, 콘크리트의 밀도, 재료분리저항성, 다짐 및 양생, 장비의 성능, 플랜트의 생성 및 작동, lift joint 전처리 등

④ Facing 시스템과 기술

- 입자화된 RCD콘크리트의 경우 수직 또는 경사면에서 고정이 안됨
→ 마무리면을 가짐으로써 수직 또는 경사면에 고정가능
- RCD 표면의 내구성 제공
- 표면의 수분침투를 제어
→ Pannel을 매립하거나 membrane을 붙임으로써 침투제어
- 여수로 및 외부표면에 부식저항성을 제공하고 높은 유속에 견딜 수 있는 형상을 제공

⑤ Lift 표면처리

- 구조물의 안정성과 침투저항성능 향상을 위한 처리
- Lift joint에서의 전단강도와 인장강도를 결정

⑥ 타설

- RCD 콘크리트의 성공적인 타설을 위해 최소두께 150mm 이상 확보
- Lift의 두께는 배합비, 플랜트와 운반량, 타설률, 포설 및 다짐과정 등에 따라 다름
- 최초 lift의 두께는 300mm로 타설

⑦ 균열의 제어

- 댐의 경우 누수에 대한 위험성으로 균열제어가 반드시 요구됨
- 균열은 주로 체적변화와 열응력에 의해 발생됨
- 균열제어방법 : 타설시 온도제어 (precooling), 횡방향 줄눈설치, 기초 및 안쪽으로 굽은 모서리의 균열발생 제어, 지수판이나 membrane의 설치

⑧ 그라우팅 및 배수를 위한 galleries

- 누수의 배수 및 조사, 그라우팅을 위한 gallery가 필요함
- 주변의 RCD가 경화후 굴착을 통해 자갈이나 모래를 채워 생성
- 주로 시공시 slip-form을 이용하여 미리 생성

⑨ 통합 여수로와 부속구조물

- 외부로 나와있는 관이나 여수로를 RCD 댐 내부로 통합함으로써 타설지연을 최소화하고 비용을 절감

⑩ RCD 콘크리트 생산에 대한 제어

- RCD 콘크리트의 품질 및 생산율에 대한 우려
- RCD 콘크리트의 경우 다른 재료에 비해 경제성을 가짐
 - 경제성은 곧 높은 생산성으로 직결
- 작은 규모의 RCD 댐의 경우 $280 \sim 1200 \text{ m}^3/\text{day}$
- 큰 규모의 경우 $1200 \sim 2800 \text{ m}^3/\text{day}$ 생산

⑪ RCD 콘크리트 생산 플랜트

- 골재 저장고, 재료 공급시스템, 믹서, 배출시스템을 확보하여야 함
- 골재 저장 : 취급함에 있어 편석(segregation)을 피해야 함
- 재료공급시 원격제어나 컨베이어 시스템을 이용함으로써 운반거리를 최소화함
- 믹서 : the twin horizontal shaft mixer를 주로 사용
 - 균일한 배합이 좋은 품질의 RCD 콘크리트 생산

⑫ RCD 콘크리트 운반시스템

- Lift 표면의 품질은 운반되어온 재료의 사용에 의해 영향
- 높은 강도 및 품질의 lift를 시공하기 위해 주로 컨베이어 시스템을 이용하여 운반
- 실제 시공시 주로 트럭 운반시스템과 컨베이어를 함께 사용하고 있어 매우 효과적

■ RCD 시공상 특징

- ✓ 시공계획에 있어 콘크리트 중력담과는 다른 개념
 - 열용력을 최소화하기 위해, 일반 매스콘크리트는 한 block씩 타설
 - RCC는 연속적인 시공으로 하나의 수평 lift를 동시에 시공
- ✓ RCC를 위한 batching & mixing 장비가 필요없음
 - 기존 매스콘크리트와 동일한 장비사용
 - 無슬럼프 콘크리트로 레미콘을 이용한 운반이 필요없음 (경제성 ↑)
 - 단, RCC의 빠른 타설과 압밀을 위한 장비 필요

▪ RCD 시공시 주의사항

✓ 타설높이의 결정

- 1회 타설하는 lift의 두께가 너무 얇으면 RCC를 이용할 필요없음
- 너무 두꺼우면 다짐이 충분치 않음
 - 높은 공극율을 가지는 수평 layer
 - 강도 및 내구성의 손실유발
- 일반적으로 0.15~0.90m/a lift 두께로 타설
 - 미국의 경우 0.3m로 주로 타설

▪ RCD 시공시 주의사항

✓ RCC의 다짐 및 양생

- Lift의 다짐을 위해 진동 롤러 필요
- Lift의 다짐은 가능한한 빠르게 진행
 - 일반적으로 타설 후 10분안에 진행
 - 혼합 후 40분이 경과해서는 안됨
- 다짐한 표면의 마무리를 위해 좋은 양생조건이 필수적
 - 다음 lift 타설까지 표면의 수분상태를 유지시켜야 함

▪ RCD 시공시 주의사항

✓ 이어치기

– 건조한 반죽질기의 RCC는 경화된 콘크리트와의 부착이 어려움

– 계면의 부착을 향상시키기 위해

→ lift와 lift 사이의 타설시간을 줄임

→ 배합의 페이스트양을 증가시킴

→ 일반적인 바닥콘크리트 { 단위시멘트량 360~460 kg/m³
플라이 애시 170~220 kg/m³
골재 크기 4.75mm

▪ RCD의 다짐특성

✓ 외부의 높은 에너지를 가진 압축을 통해 다짐 실시

→ 낮은 공극량, 높은 밀도로 콘크리트의 강도와 내구성 확보

✓ 진동롤러로 다짐 실시

	RCD 다짐조건
미국	- 10ton 더블드럼 진동롤러 - 4~8회 다짐 - 낮은 횟수와 높은 진폭을 이용함
일본	- 7ton 더블드럼 진동롤러 - 최대 12회 다짐 - 높은 횟수와 높은 진폭을 이용함

→ 최근에는 14~15ton의 중장비 사용

■ 시멘트계 재료

✓ RCD의 경우 매스구조물로 수화열에 대한 영향고려

∴ 포졸란 재료의 사용이 일반적

✓ 구조물의 부피, 요구특성, 노출조건에 따라 결정

– 현존하는 RCD에 사용된 시멘트계 재료의 양

Min. (Urugrai Dam)	Max. (Upper stillwater Dam)
60kg/m ³	248kg/m ³

■ 시멘트계 재료

✓ 시멘트

– 낮은 발열량은 갖는 시멘트 사용

– 중용열, 저발열, 포틀랜드+포졸란 등

구분	용해열 (cal/g)	수화열(cal/g)		
		7일	28일	91일
보통시멘트	614.2	71.7	87.8	96.3
조강시멘트	610.4	81.1	95.1	101.9
중용열시멘트	598.7	59.0	75.5	84.0

가장 일반적으로 사용 : 낮은 발열량, 상대적으로 긴 응결시간

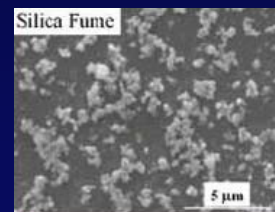
■ 시멘트계 재료

✓ 포졸란 재료

- 다짐을 하는 동안 윤활작용과 충전작용 (내구성 증가)
- 일반적으로 플라이 애시 사용

→ 시멘트를 치환하여 사용시 비용절감 및 수화열 억제

→ 광물충전재, 용결지연 (워커빌리티, 내구성 향상)



■ 골재

✓ 골재의 품질이 콘크리트의 강도결정

- 높은 강도 및 동결융해 노출환경 : 고품질의 골재사용
- 그렇지 않은 경우 : 근방의 재료를 채취, 사용 가능

✓ 일반적인 G_{max} 는 75~80mm

- 일본 Tamagawa댐은 150mm 사용

✓ 잔골재의 경우 200번체 통과량이 높은 것을 선호

- 미립분↑ : 페이스트↑, 공극↓, 워커빌리티↑

■ 배합수

- ✓ 단위수량 $89 \sim 119 \text{ kg/m}^3$ ($G_{\max} = 50 \text{ mm}$ 이상)
- ✓ 일부 연구 결과 : 배합수원이 RCC 성능에 영향미침
 - 응결시간, 강도발현에 영향
 - 알칼리, 산 및 유기물 등이 과도하게 있지 않아야 함

■ 혼화제

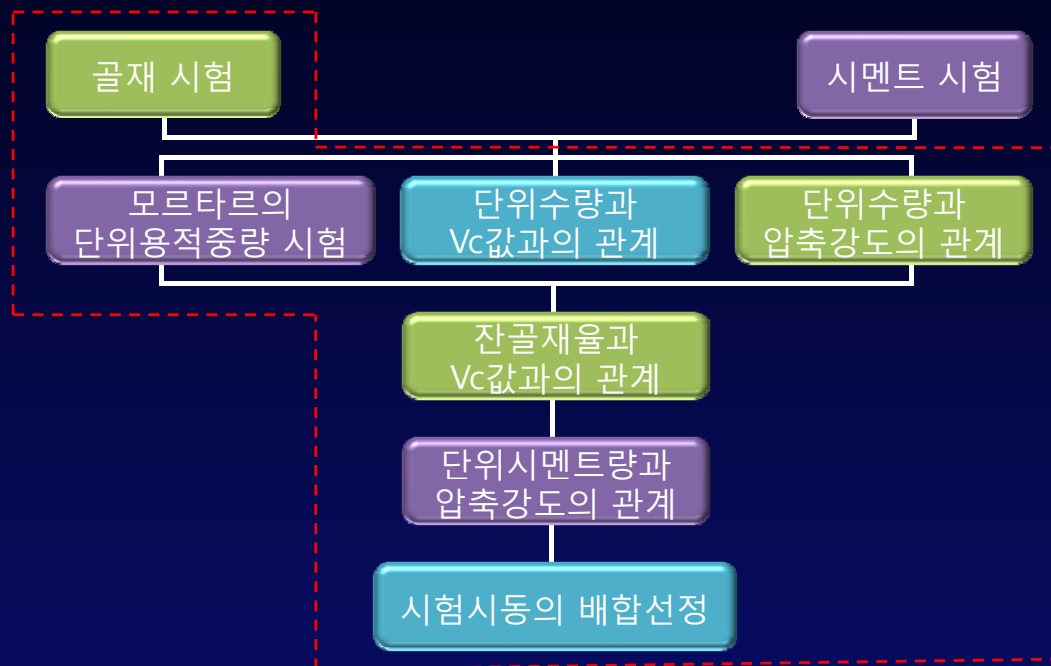
- ✓ 단위수량 감소, 응결시간 조절 목적으로 사용
- ✓ 워커빌리티↑, 응결시간↑ : 초기 시공성 확보 (내구성↑)

RCD 콘크리트의 배합설계

■ 미국 공병대의 방법



■ 일본의 배합설계방법



RCD 콘크리트의 역학적 특성

■ 강도 (Strength)

✓ 압축강도 (Compressive strength)

- 빈배합 콘크리트의 사용으로 고강도는 기대하기 어려움
- 우수한 품질의 골재 사용시 일반 콘크리트와 동일한 성능
- 골재의 수급이 가변적임으로 강도의 범위가 다양함
- 재령 1년의 압축강도 범위는 6.9~27.6MPa
- 일반적으로 사용되는 RCC의 강도 범위는 13.8~20.7MPa

내구성 문제로 최소한으로 확보해야 함

■ 강도 (Strength)

✓ 인장강도 (Tensile strength)

- 인장강도는 압축강도의 5~15% 정도
- But, 압축강도보다 골재의 부착특성에 의해 결정
 \therefore 골재의 최대크기와 종류에 따라 매우 광범위함
- RCD의 경우 Lift joint가 취약부
 \therefore Lift joint의 인장강도가 임계인장강도

■ 강도 (Strength)

✓ 전단강도 (Shear strength)

- 전단강도는 RCD의 가장 중요한 성능
- 압축강도의 20%
- 부착(cohesion)과 마찰저항의 관계로 표현

$$S = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{Mohr envelope})$$

where, S : shear strength, MPa

c : cohesion, Mpa (0.5~4.1)

σ : normal stress, MPa

ϕ : friction angle, deg (40~60)

■ 탄성특성 (Elastic properties)

✓ 탄성계수 (Modulus of elasticity)

- 일반 콘크리트의 21~38GPa
- RCC의 경우 동일하거나 더 큰 값의 탄성계수를 나타냄
 - 압축강도와 마찬가지로 골재의 품질에 따라 그 범위가 다양함
 - 수화도, 골재의 종류와 체적, 물-시멘트비의 영향 받음

✓ 포아송비 (Poisson's ratio)

- 일반 콘크리트와 동일함
- 0.17~0.22 범위

■ 크리프 (Creep)

✓ 크리프 변형을

- 골재의 종류와 양, 물-시멘트비, 재하시기 및 기간에 따른 영향
- RCC의 경우 낮은 압축강도, 낮은 탄성계수
 - ∴ 높은 크리프 변형률을 나타냄

Load rate-Age of loading	TSC* range (millionths)	
	CMC**	RCC
Slow-7 to 90days	88-237	-
Normal-7das	40-105	20-140
Normal-90days	73-138	-

* TSC : tensile strain capacity, **CMC : conventional mass concrete

■ 체적 변화 (Volume change)

✓ 건조수축 (Drying shrinkage)

- 단위수량과 골재의 특성에 따라 결정됨
- 보통강도 일반콘크리트의 경우 760×10^{-6} strain
- 낮은 단위수량으로 인해 일반 콘크리트와 동일

■ 열 특성(Thermal properties)

✓ 열팽창계수

- 일반 콘크리트의 경우 $7 \sim 14 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$, RCC는 $9 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}$

✓ 비열, 열전도율

- 골재의 종류와 양에 따라 다름

■ 투수성(Permeabilty)

✓ 투수계수

- $1.5 \sim 150 \times 10^{-8} \text{ mm}/\text{sec}$
- core 채취를 통해 평가함으로 매우 광범위함

▪ 마모저항성능 (Abrasion resistance)

- ✓ 압축강도와 골재의 품질에 의해 결정
- ✓ 마모율 3~15%정도가 가장 이상적

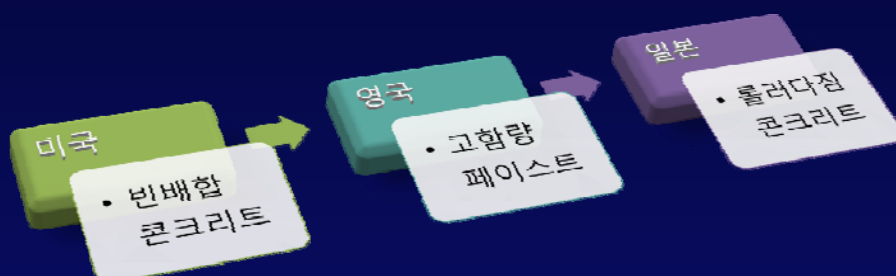
▪ 동결융해저항성 (Resistance to freezing & thawing)

- ✓ 공기량 부족으로 상대적으로 낮은 동결융해 저항성
- ✓ 구조물이 완전포화상태가 아니라면 내구성 확보
 - 성공적인 현장시공 사례가 많음

RCD 콘크리트의 발전방향

▪ RCD의 발전방향

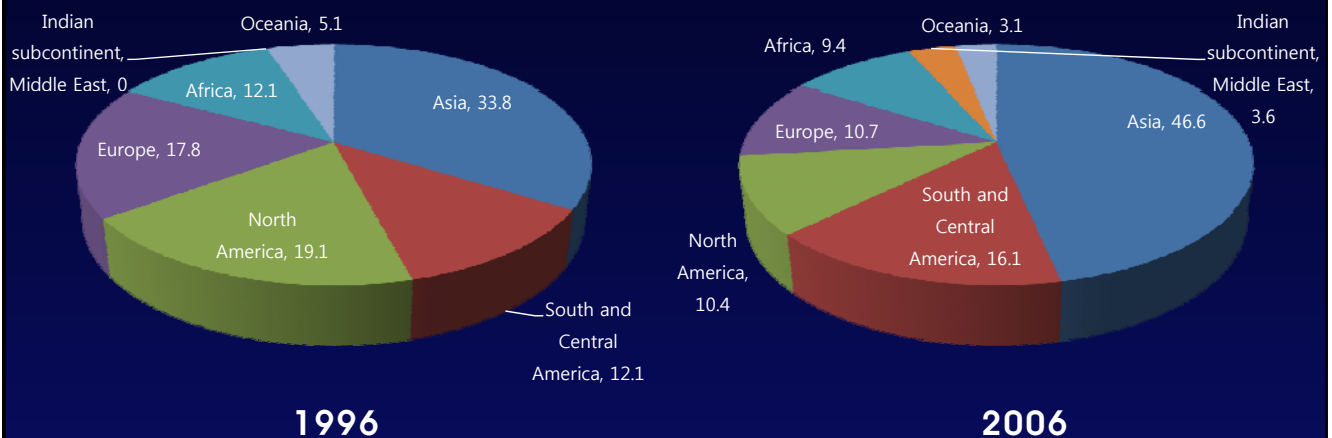
- ✓ 1970년대 이후 3가지 방향으로 발전
 - 토질에 기초한 빈배합 콘크리트
 - 낮은 단위시멘트량+높은 플라이 애시
 - 낮은 건설비용과 빠른 타설



■ RCD의 발전

- ✓ 1970년대 중반 파키스탄의 Tabela 댐이 최초
 - “Rollcrete” 라고 불리움
- ✓ 1980년대 초 미국, 호주 및 아시아에서 최초의 RCD 댐이 시공됨
 - 1985년말 15m보다 높은 7개의 댐 시공
 - 1990년대 말 59개의 RCD 댐 시공
 - 2010년대 들어 450개의 RCD 댐 시공
 - 현재 전세계적으로 300m 규모의 50여개의 댐이 계획 및 시공 중

■ RCD의 분포현황



▪ Lean RCC Dam의 발전

✓ 빈배합 콘크리트

- 1970년대 미국 공병대에 의해 개발
- 토질기술에 근간을 둔 soil-cement 공법 개념
- 배합설계 : 최적 함수량-최대건조밀도 곡선으로 결정
- Willow Creek Dam (1982) : 최초의 RCD

▪ Lean RCC Dam의 발전

✓ 빈배합 콘크리트

- Willow Creek Dam (1982) : 미국 최초의 RCD



▪ High-paste RCC Dam의 발전

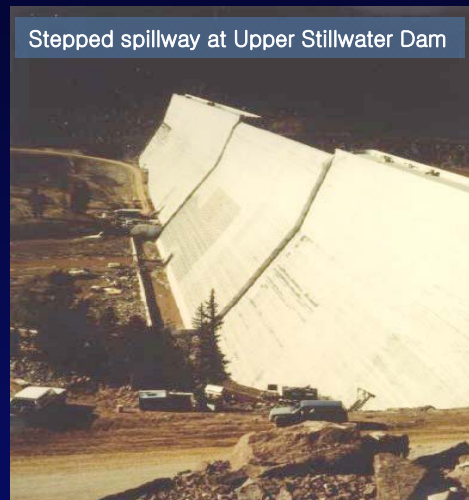
✓ 고함량 페이스트

- 1970년대 Tennessee Valley Authority에 의해 시도, Macolm Dunstan에 의해 발전
- 콘크리트 기술에 근간을 둔 개념
- 배합설계 : 낮은 물-시멘트비 및 압밀
저함량 시멘트와 고함량 플라이 애시 적용
- Upper stillwater Dam (1988)

▪ High-paste RCC Dam의 발전

✓ 고함량 페이스트

- Upper stillwater Dam (1988)



Stepped spillway at Upper Stillwater Dam

■ 일본 RCD의 발전

✓ 롤러다짐공법의 도입

- 1970년대말 미국 RCC와는 독립적인 연구 진행
- 미국 RCC 비해 경제성과 시공성을 향상시킨 공법
- 배합설계 : 낮은 물-시멘트비 및 압밀

RCC에 비해 저함량 플라이 애시(30%)

기존 중력댐 배합설계법을 RCD에 적용

- Shimajigawa Dam(1982) ; 최초의 RCD댐

■ 일본 RCD의 발전

✓ 롤러다짐공법의 도입

- Shimajigawa Dam(1982) ; 최초의 RCD댐



▪ RCD 시공사례



- ✓ Riou Dam
- France, 1990
- 댐높이 : 22m
- Stepped spillway
- 최초의 exposed geo-membrane system 도입

▪ RCD 시공사례



- ✓ Klong Tha Dan Dam
- Thailand, 2004
- 댐높이 : 230m
- 댐길이 : 2,720m
- 세계에서 가장 큰 RCD댐
- 수력발전 및 홍수조절

▪ RCD 시공사례



✓ Karoun 4 Dam

- Iran, 2011
- concrete double curvature arch-type
- 댐높이 : 230m
- 수력발전 및 홍수조절

결론

▪ RCD 시공의 증가추세

✓ 건설비용의 감소

- 짧은 건설기간, 시멘트계 재료의 감소

✓ CFRD와 비교시 경제적이고 빠른 시공

- 이는 댐 제체의 크기를 줄임으로써 가능
- 따라서 자연훼손량이 적어 친환경적임
- 또한 홍수시에도 제체의 손상없이 월류도 가능

▪ 합리적이고 경제적인 공법으로의 발전이 필요

감사합니다!!