

콘크리트댐의 온도응력 해석

Thermal Analysis of Concrete Dams



장봉석*



차수원**



김진근***

* 한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원
** 울산대학교 건설환경공학부 조교수
*** KAIST 건설 및 환경공학과 교수

1. 개요

최근 들어 콘크리트댐의 건설이 활발해지면서 현장 품질 관리 및 설계 자료의 검토를 위한 온도응력 해석이 다양하게 수행되고 있다. 국내에서 콘크리트댐은 1989년 합천댐 준공 이후 약 20년 동안 공백기가 있어 콘크리트댐의 시공 뿐만 아니라 온도응력 해석에 대한 검토사항에 대한 자료가 부족하여, 통상적인 매스콘크리트의 해석 절차에 따라 온도응력 해석을 수행하고 있는 실정이다. 댐 콘크리트는 보통의 건설공사에서 사용되는 매스콘크리트보다 수심배에 이르는 큰 단면을 갖고 있어서, 온도응력 해석시에 고려해야 할 주요 항목에 있어 일반 매스콘크리트와는 다른 점이 존재한다.

콘크리트댐의 온도응력 검토시에 일반 매스콘크리트와 다르게 필수적으로 검토해야 하는 사항으로는, 댐체 내부 온도가 최종 수렴하는 단계에서의 온도응력과 시공단계에서 댐 하부의 컷 리프트의 타설을 고려한 온도응력이 매우 중요한 항목이다. 통상 댐체 내부의 온도가 수렴하는 데에는 10~20년 정도가 걸리며, 댐체 기초부의 컷 리프트 콘크리트의 타설을 시작하는 계절에 따라서 최종단계에서의 온도응력 발생이 크게 달라지기 때문이다.

최근 한국수자원공사에서 시공중인 콘크리트댐의 수화열 해석 사례를 통하여 콘크리트댐의 수화열 해석에 중요하게 검토하여야 하는 사항들을 다루어 향후 콘크리트댐의 온도응력 해석의 자료로 활용되기를 기대해 본다.

2. RCD댐의 수화열 해석

2.1 개요

롤러다짐 콘크리트댐은 댐체 전체길이를 여러 리프트로 나누어 연속적으로 타설하는 특징을 가지고 있으며, 이에 따라 RCD댐은 시공단계를 고려하는 것이 콘크리트댐에서의 온도응력을 실제적으로 예측하는 데에 중요한 항목이 된다. 시공단계를 고려한다고 함은 여러 가지 요인중에서 특히, 각 리프트의 타설 간격을 어떻게 고려하는가가 중요하다.

본 절에서는 국내에서 처음 RCD로 계획된 H댐을 대상으로 RCD공법의 배합 및 시공 특성을 고려하여 수화열 및 온도응력 해석을 수행한 사례를 다루어 그 차이점을 나타내었다.

2.2 해석조건 및 방법

해석의 대상 구조물은 롤러다짐 콘크리트댐으로 계획되었던 H댐으로 해석단면은 그림 1과 같이 본댐의 비월류부로 선정하였다. 댐의 제원은 하단부 폭 74.3m, 상단부 폭 12.0m, 높이 85.5m로, 1층의 타설높이는 0.75m로 총 114층으로 구성되어 있다. 이때 1층 타설에 소요되는 시간은 100시간으로 구조물의 완공은 총 19개월이 소요되는 것으로 가정하였다. 구조물의 설계기준강도는 RCD 내부 12MPa, RCD 외부 및 압착부 18MPa로 사용시멘트는 보통시멘트에 플라이애쉬 30% 혼입한 경우를 대상으로 하였다.

해석의 요소분할과 결과 출력 위치는 그림 2와 같고, 평면 변형률 요소(plane strain element)를 사용하였다. 또한 온도 및 응력해석의 정확도를 위하여 댐하부에 폭 300m, 깊이 200m의 지반을 모델링하였고, 지반의 탄성계수는 5000MPa

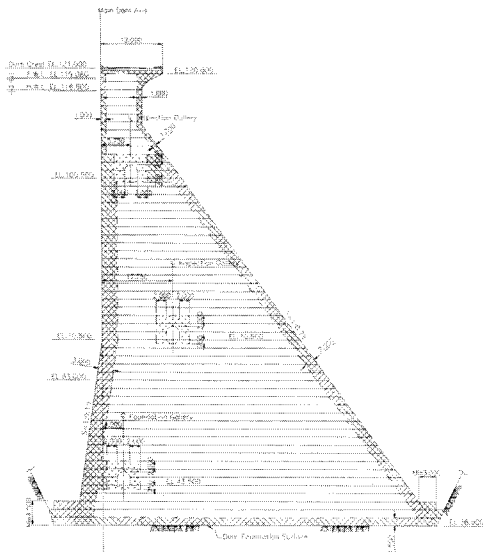


그림 1 RCD 비월류부 단면 검토위치

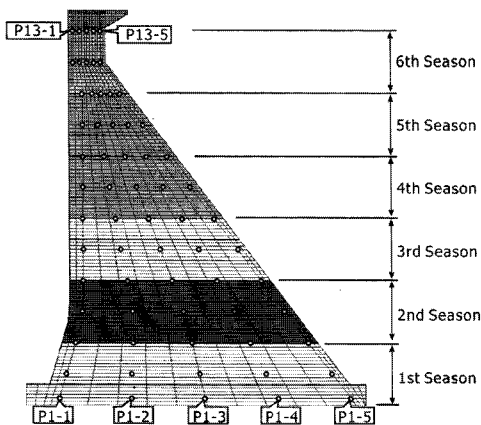


그림 2 기하학적 모델링 및 검토위치

을 가정하였다.

본 수화열 해석 및 온도응력 해석은 범용 유한요소 해석 프로그램인 DIANA를 이용하여 콘크리트의 역학적 특성 변화, 즉 수화도(α , degree of hydration)를 이용한 성숙도 개념을 적용하여 수행하였다.²⁾ 수화도에 따른 압축강도의 발현은 다음 식과 같다.

$$\frac{f'_c(\alpha)}{f'_c(\alpha=\alpha_{28})} = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^a = \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{28} - \alpha_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

여기서, $f'_c(\alpha)$ 는 수화도가 α 일때의 압축강도이고, $f'_c(\alpha=\alpha_{28})$ 는 28일 표준양생시 수화도인 $\alpha=\alpha_{28}$ 일때의 압축강도이고, α_0 는 임계수화도(critical degree of hydration)이다.

해석은 먼저 타설온도와 대기온도를 10°C로 고정하고 1회 타설높이가 0.75m로 시공단계가 114단계인 경우(RCD1)와 해석을 단순화하기 위하여 6층 4.5m를 1개의 시공단계로 타설하여 총 19단계인 경우(RCD2)를 비교하여 그 결과를 비교하였다. 또한 RCD2의 기하학적 모델을 이용하고

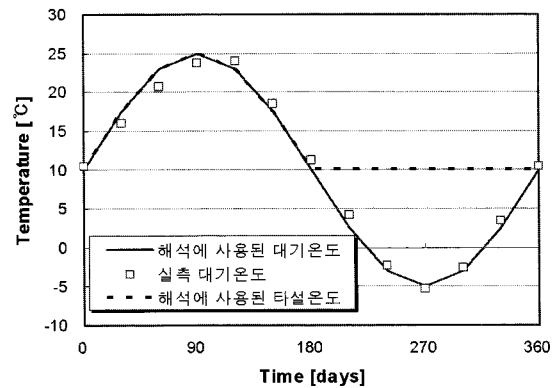


그림 3 대기온도 및 타설온도

표 1 해석조건 및 재료특성

해석조건 및 재료특성	입 력 값	
	RCD 내부	RCD 외부
• 해석부위	RCD 내부	RCD 외부
• 설계기준강도 (MPa)	12	18
• 콘크리트 탄성계수 (MPa)	16,432	20,125
• 콘크리트 인장강도 (MPa)	1.53	1.88
• 포아송비	0.18	
• 단열온도상승량, Q_{∞} (°C) 및 반응속도계수, r	$Q_{\infty} = 21.68$ $r = 0.1762$	$Q_{\infty} = 34.4$ $r = 0.473$
• 단위결합재량 (kg/m^3)	114	220
• 밀도 (kg/m^3)	2,500	
• 열전도율 ($kcal/mh^{\circ}C$)	2.3	
• 비열 ($kcal/kg^{\circ}C$)	0.25	
• 열팽창계수 ($1/^{\circ}C$)	10×10^{-6}	
• 대류계수 ($kcal/m^2h^{\circ}C$)	12	

구조물의 시공이 여름철에 시작하고 경우(SM2)와 겨울철에 시작하는 경우(WT2)를 통하여 계절별 온도변화를 고려한 해석 결과를 분석하였다.

SM2와 WT2에서 사용된 대기온도와 콘크리트 타설온도는 그림 3과 같이 철원지역 기온자료를 사용하였고, 이때 대기온도가 10℃이하인 경우는 온수를 이용하여 10℃가 되도록 관리하도록 가정하였다. 또한 완공 후 댐의 상류부는 담수가 시작되고, 이때 온도는 5℃로 하류부는 연평균

온도인 10℃로 일정하게 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 입력에 사용된 콘크리트의 온도 및 응력과 관계되는 물성은 다음 표 1과 같다.

2.3 해석 결과

그림 4~7은 구조물이 완공시 단면의 온도분포와 해석종료시점인 20년이 경과한 시점의 주인장응력의 분포를 나타

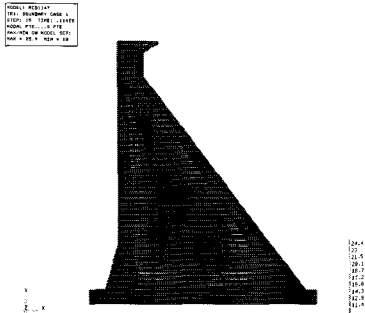


그림 4 완공시 온도분포 (RCD1)

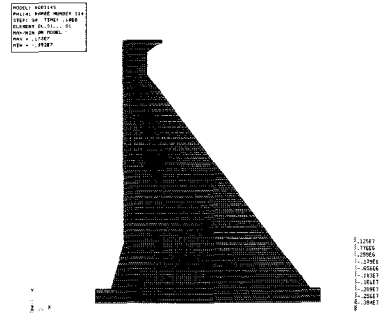


그림 5 20년후 주응력분포 (RCD1)

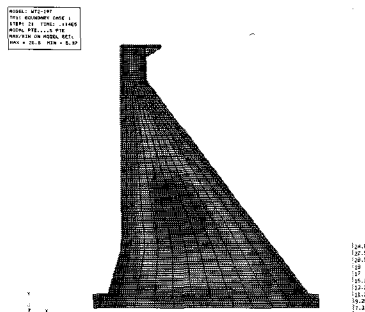


그림 6 완공시 온도분포 (WT2)

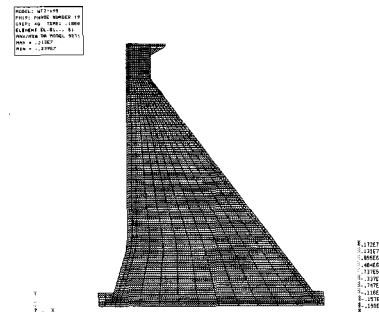


그림 7 20년후 주응력분포 (WT2)

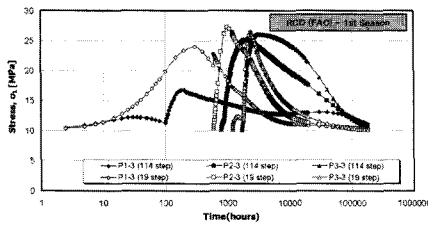


그림 8 RCD1과 RCD2의 온도 비교

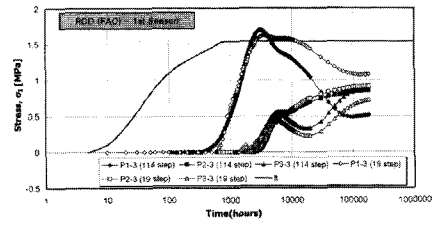


그림 9 RCD1과 RCD2의 주응력 비교

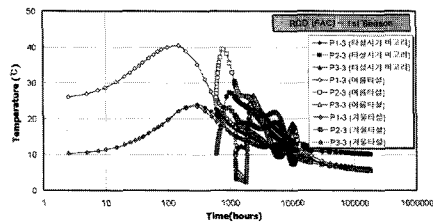


그림 10 SM2와 WT2의 온도 비교

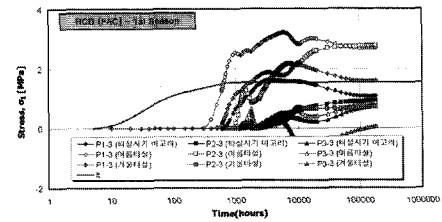


그림 11 SM2와 WT2의 주응력 비교

표 2 온도 및 응력 해석 결과의 요약

구조물 위치	모델명	최대온도(°C)	최대 주응력(MPa)	온도균열지수(Icr)
1st Season	RCD1 - 시공114단계	26.3	1.70	0.90
	RCD2 - 시공19단계	27.2	1.63	0.94
	SM2 - 초기 여름타설	43.2	3.88	0.40
	WT2 - 초기 겨울타설	26.0	2.18	0.70
2nd Season	RCD1 - 시공114단계	26.2	1.12	1.37
	RCD2 - 시공19단계	27.7	0.92	1.66
	SM2 - 초기 여름타설	24.0	0.95	1.61
	WT2 - 초기 겨울타설	31.5	1.35	1.13
3rd Season	RCD1 - 시공114단계	26.2	1.13	1.36
	RCD2 - 시공19단계	28.1	0.96	1.59
	SM2 - 초기 여름타설	23.7	0.95	1.62
	WT2 - 초기 겨울타설	42.8	2.38	0.64
4th Season	RCD1 - 시공114단계	26.2	1.05	1.46
	RCD2 - 시공19단계	28.4	0.86	1.79
	SM2 - 초기 여름타설	27.8	0.75	2.04
	WT2 - 초기 겨울타설	31.5	1.55	0.99
5th Season	RCD1 - 시공114단계	26.3	0.91	1.68
	RCD2 - 시공19단계	28.8	1.06	1.45
	SM2 - 초기 여름타설	41.5	1.65	0.93
	WT2 - 초기 겨울타설	24.9	0.98	1.57
6th Season	RCD1 - 시공114단계	24.0	0.91	1.68
	RCD2 - 시공19단계	21.0	0.80	1.91
	SM2 - 초기 여름타설	35.3	1.17	1.31
	WT2 - 초기 겨울타설	17.9	0.56	2.73

낸 것이다. 온도와 응력해석을 수행한 결과를 요약하면 표 2와 같다.

2.4 소결

롤러다짐콘크리트댐을 대상으로 배합 및 시공특성, 대기 온도 및 타설온도의 계절별 변화를 고려하여 수화열 및 온도응력 해석을 수행하였다. 해석결과 6층 타설을 한 개의 시공단계로 해석하더라도 주응력의 크기는 크게 변화하지 않으므로 해석의 편리성을 위하여 시공단계를 간소화할 수 있고, 계절별 대기온도 및 타설온도의 영향을 고려한 경우 온도균열 위험성이 더 큰 것으로 나타났다.

3. 블록 타설식 댐의 해석

3.1 개요

성덕 다목적댐은 저열 포틀랜드 시멘트를 사용한 저발열형 콘크리트 중력식 댐으로 2011년 완공 예정에 있다. 댐과 같은 수밀성을 요하는 구조물은 수화열에 의한 온도균열이 매우 중요한 사항이다. 따라서 본 연구는 성덕 다목적댐의

수화열 및 수화열에 의한 온도균열 발생 유무를 타설 간격에 따라 비교·분석하고자 한다.

3.2 해석조건 및 방법

수화열 해석을 위한 성덕 다목적댐의 유한요소 메쉬는 그림 12와 같다. 타설 간격은 현장 타설 조건을 반영하여 15일 28일로 구분하여 해석을 수행하였고, 댐 내부 온도가 외기 온도에 수렴하도록 15년 동안의 해석 결과를 나타내었다. 온도응력 해석에 사용된 특성값은 표 3과 같다.

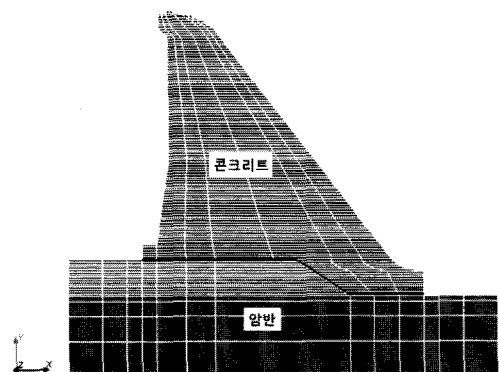


그림 12 구조물 모델링

표 3 콘크리트의 열특성값 및 양생조건

특성값		입력값
열전도율	kcal/m · hr · °C	2.3
비열	kcal/kg · °C	0.25
밀도	kg/m ³	2,400
콘크리트 타설온도	°C	17.5 (1, 2차 타설) 20 (3, 4차 타설)
양생조건 및 대류계수	상부	kcal/m ² · hr · °C
	측면	kcal/m ² · hr · °C
양생기간 (거푸집준치)	일	5
열팽창계수		10.3E-6

3.3 해석결과

수화열 해석결과 출력 위치는 타설 시작 후 첫 여름철 타설 구간의 중심부로 정하였다. 타설 간격에 따른 수화열 및 온도응력 해석 결과는 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이 중심부 최고 온도는 타설 간격에 따라 큰 차이를 보이지 않지만 타설 간격이 짧을수록 외기온도에 수렴하는 속도가 늦어짐을 알 수 있다. 이 영향으로 온도응력 15일 간격으로 타설할 경우 훨씬 높게 나타났으며, 15일 간격으로 타설하는 경우 발생하는 온도

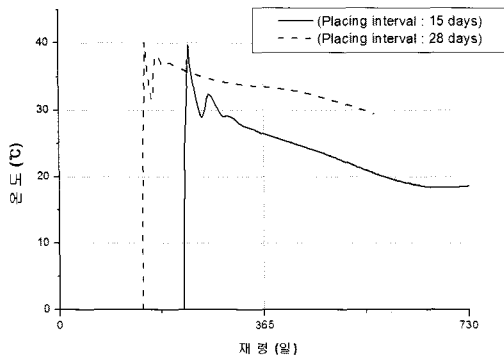


그림 13 수화열 해석결과

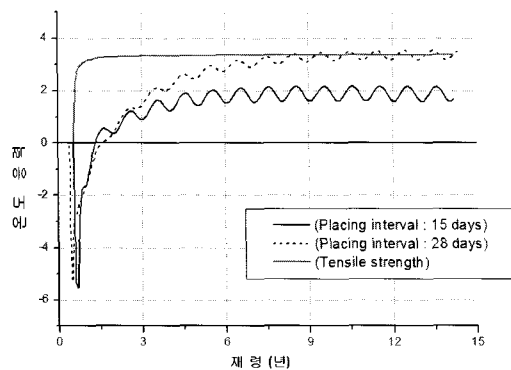


그림 14 온도응력 해석결과

응력이 인장강도를 초과하여 온도균열이 발생할 가능성이 높게 나타났다.

3.4 소결

성덕 다목적댐의 타설 간격에 따른 수화열 해석 수행 결과를 통해 타설 간격이 짧을수록 콘크리트 내부 온도가 외기온도에 수렴하는 속도가 늦어지며, 이로 인해 발생하는 장기 온도응력 또한 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서, 매스 콘크리트 구조물의 수화열 검토 시 현장 타설 일정 등을 충분히 고려하여 온도응력 검토를 실시하여야 하며, 시공계획을 수립하여야 한다.

4. 결론

앞 절의 해석 사례에서 확인할 수 있듯이, 콘크리트댐의 온도응력 해석시에는 시공단계와 댐체 내부 온도가 최종 안정화 단계까지 온도응력을 검토하여, 댐체에 온도응력에 의한 균열이 발생하지 않도록 고려하여야 한다. 만약 이러한 검토 단계에서 균열이 발생하는 것으로 나타나면, 골재 사전냉각 시스템을 도입하거나 첫 리프트의 타설시기 등을 고려하여 온도응력에 의한 균열을 제어할 수 있도록 사전에 계획을 수립하여야 한다.

참고 문헌

1. 추인엽, 장봉석, 김진근, 박병국, “타설 간격을 고려한 콘크리트 댐의 수화열 해석특성”, 한국콘크리트학회 2009년 봄 학술발표회 논문집, 2009
2. 차수원, 장봉석, 임정열, “롤러다짐콘크리트의 시공단계를 고려한 수화열 해석”, 한국구조물진단학회 가을학술발표회 논문집, 2005
3. 김진근, 추인엽, 장봉석, 하재담, 박병국, 김정수, “성덕 다목적댐 가물막이댐의 수화열 해석, 한국콘크리트학회 2008년 가을 학술발표회 논문집, 2008
4. 한국콘크리트학회, “수처리콘크리트 구조물의 균열저감을 위한 설계시공 지침”, 2004
5. 한국수자원공사, “롤러 다짐 콘크리트의 품질향상 방안 연구”, 2004
6. DIANA User's Manual, TNO Bilding and Construction Research, 2002

[담당 : 최인길, 편집위원]