

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 균열원인 분석

장동일 · 채원규* · 원일석* · 조광현 · 김광일 · 손영현**

한양대학교 토목공학과 · *신구대학 토목과 · **현대건설(주) 기술연구소

1. 서론

콘크리트구조물은 비교적 경제적인 시공이 가능하며 구조물의 수명 또한 안정적인 관계로 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근 콘크리트의 고강도화 및 설계의 최적화에 따른 부재단면의 최소화 경향, 새로운 공법의 적용 등에 따른 균열문제가 빈번하게 대두되고 있는 실정이다. 특히 다양한 토목구조물중 매스콘크리트구조물, 벽체구조물 등과 같은 종류에서의 균열문제가 자주 언급되고 있으며, 균열에 따른 심리적 불안감과 콘크리트 내구성의 저하, 궁극적으로는 구조물의 안전성에 대한 불안심을 가증시키고 있다.

이에 본 연구에서는 다양한 댐형식중 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD, Concrete Faced Rockfill Dams)에서의 균열사례를 고찰·분석함으로써, 추후 동일한 구조물에서의 균열발생을 예방하는 방안을 모색함으로써 궁극적으로 구조물의 안전성을 높여주는 데에 연구의 목적이 있다.

2. 구조물 및 콘크리트 타설현황

표면차수벽 콘크리트의 표고는 E.L 212.500 ~ E.L 127.325m이며, 경사는 1:1.4이다 (수직고 $h = 85.175\text{m}$, 경사길이 $l = 119.245\text{m}$, 최대경사길이 = 146.014m). 표면차수벽 콘크리트의 댐 상부쪽 슬래브의 단면두께는 30cm이며, 하부로 내려올 수록 두께가 증가하는 변단면으로서 하부의 단면 최대두께는 57cm이다. 현재 Zone 5는 시공되어 있지 않은 상태이며, 담수 또한 되어 있지 않은 상태에 있다. 이에 대한 제원을 간략하게 나타내면 그림 1과 같다.

표면차수벽 콘크리트의 하부에는 두께 5cm로 슛크리트(강도 200kg/cm^2 이상)를 타설한 후 표면차수벽 콘크리트를 타설하였다. 표면차수벽 콘크리트는 총 31개 구획으로 나누어 타설하였는데, 그 폭은 15m이고, 짧은 쪽의 길이는 17.621m이며 최대 146.014m에 달한다. 콘크리트 타설량은 $102\sim 1,455\text{m}^3$ 이고, 90m 간격으로 contraction joint가 설

치되어 있다(표 1 참조). 콘크리트 타설시간은 타설길이에 따라 8~106.5시간 소요되었으며, slip form공법을 이용하여 연속타설하였다.

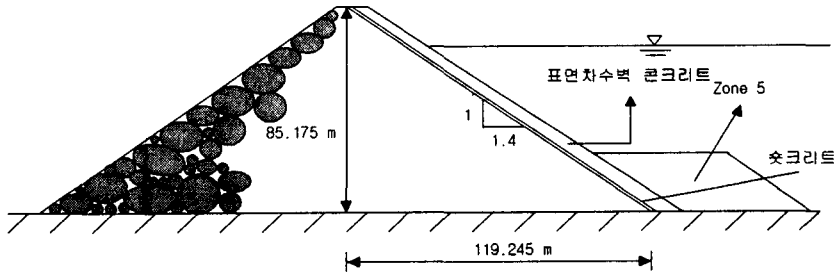


그림 1. 콘크리트 표면차수벽형 석피댐의 단면제원

3. 균열조사 방법 및 현황

본댐 표면차수벽 콘크리트에서 수행한 균열조사에서는 균열의 폭, 깊이, 길이 등을 조사하였다. 표면차수벽 콘크리트에 발생한 균열의 깊이는 균열의 폭과 더불어 내구성 진단 및 보수/보강 대책상 매우 중요한 요소이다. 현재 균열의 깊이를 검사하는 방법으로는 초음파가 가장 유효하며, 본 조사에도 초음파를 이용하여 균열의 깊이를 조사하였다. 균열심도 조사방법은 파의 전파시간을 검출하여 균열깊이를 조사하는 T_c-T_0 법을 이용하였으며, 발진자와 수신자의 거리 L 를 20cm로 일정하게 하였다.

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{\left(\frac{T_c}{T_0}\right)^2 - 1}$$

여기서, d : 균열심도 (cm)

L : 균열이 없는 부분에서의 발진자와 수신자의 거리 (cm)

T_c : 균열선단부를 회절한 초음파의 전파시간 (μsec)

T_0 : 균열이 없는 부분에서의 발진자와 수신자의 거리 L 에서의 전파시간 (μsec)

한편, 기 발생한 균열양상을 살펴보면 표면차수벽 콘크리트의 중앙부 이하의 하부쪽에 발생개소가 많은 점과 추후 시공될 Zone 5를 고려하여 E.L. 150 이하에서 발생한 균열에 대한 깊이를 우선 조사하였다.

표면차수벽 콘크리트에서 발생된 균열현황은 표 1과 같다. 발생된 균열을 살펴보면, 대부분 표면차수벽 콘크리트 상부로부터 약 20~40m 아래 지점부터 횡방향으로 발생되었으며, 대략 10m간격으로 규칙적으로 발생되었고, 그 폭은 0.1~0.3mm가 대부분이다. 또한, 모두 조사된 상황은 아니지만 수직방향의 균열이 13번 차수벽에서 3개소가 발생되어 있었다. 이 부위는 12번 차수벽의 contraction joint에서 약 22m 떨어진 지점이다. 한편, 균열의 발생시점은 콘크리트 타설 후 72시간 이후에 대부분 발생되었고, 횡방향이나 수직균열 모두 콘크리트 표면균열인 것으로 조사되었다.

4. 균열원인 추정

콘크리트에서 발생할 수 있는 일반적인 균열발생시기를 표 2에 정리하였다. 앞서 언급했듯이 균열의 발생시기는 대부분 콘크리트 타설후 72시간 이후에 발생되었고, 콘크리트의 수화열을 실측한 결과 27℃에서 57℃까지 상승하다가 타설후 90시간후에 대기온도와 유사한 상태로 조사되었다. 초음파탐사에 의한 균열깊이를 분석한 결과 표면균열인 상태로, 표면차수벽 콘크리트 단면의 중앙에 배근된 철근까지는 대부분 도달하지 않은 것으로 나타났다.

표 1. 표면차수벽 콘크리트의 구획별 타설현황 및 균열조사 결과

BL. No.	길이 (m)	타설량 (m ³)	타설 시기	타설 순서	균열발생 개소	균열폭 (mm)	T _c (μsec)	T _o (μsec)	균열깊이 (cm)
4	111.972	819	98. 10. 20	14	8	0.1~0.3	53.0	45.3	6.1
5	134.782	1125	99. 3. 27	30	-	-	48.1~51.9	43.2~45.4	4.3~5.5
6	141.027	1072	98. 9. 26	13	7	0.2~0.3	52.9~86.5	48.0~51.0	4.6~14.1
7	141.027	1233	99. 3. 17	28	13	0.1~0.3	50.0~71.6	44.5~65.0	4.2~11.9
8	142.196	1356	98. 7. 7	1	18	0.05~0.3	49.6~79.2	46.6~53.2	2.8~13.7
9	144.903	1149	98. 10. 30	16	23	0.1~0.25	47.4~87.0	43.1~50.3	0.9~16.8
10	145.925	1455	98. 7. 18	2	36	0.15~0.4	56.2~92.8	46.0~54.4	4.6~15.6
11	146.014	1307	99. 3. 10	27	20	0.15~0.3	75.2~88.0	47.3~71.2	5.5~15.7
12	144.981	1340	98. 7. 28	3	15	0.15~0.25	70.2~80.4	45.4~72.1	2.6~14.0
13	142.485	1048.5	98. 11. 5	17	15	0.15~0.35	48.6~56.2	44.8~54.2	1.4~6.3
14	139.749	1058	98. 8. 6	4	12	0.15~0.3	51.8~76.7	46.4~55.8	5.0~11.8
15	137.017	1034	98. 11. 10	18	9	0.15~0.25	48.2~55.1	43.5~49.8	3.1~6.7
16	134.274	1024	98. 8. 15	5	8	0.15~0.3	51.1~72.8	44.8~52.2	3.9~12.8
17	130.661	967	98. 11. 16	19	4	0.1~0.2	47.7~53.8	43.7~45.9	2.8~7.2
18	126.926	947	98. 8. 21	6	3	0.15~0.2	55.0~72.3	47.6~51.9	3.5~11.3
19	123.138	900	98. 11. 22	20	10	0.1~0.3	57.2~84.5	46.3~54.0	7.0~14.2
20	118.551	874	98. 8. 26	7	13	0.1~0.3	91.9~127.0	50.0~55.3	15.4~21.5
21	113.962	829	98. 11. 27	21	16	0.15~0.3	73.8~97.8	45.8~49.3	11.1~18.7

- 비고 : 1) Block Number 9, 13 : 에폭시주입 보수부분
 2) Block Number 10 : 방수액 처리부분

표 2. 콘크리트의 일반적인 균열발생시기

Steel corrosion					○○○○●●●●
Drying shrinkage			○○●●●●	●●○○○○	○○
Heat of hydration		○○●●●●●●	○○		
Plastic shrinkage	●●●●○○○				
Plastic settlement	●●●●○○○				
Service load		○○○○○○○	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

시간 일 주 월 년 50년

한편, 표 1에서 알 수 있듯이 균열깊이는 0.9~21.5cm의 분포로서 평균 8.6cm의 균열 깊이를 갖고 있는 것으로 조사되었다. 코어채취에 의한 균열깊이를 실측한 결과, 기 발생된 균열은 콘크리트 단면을 관통하지 않은 것으로 확인되었으며, 육안에 의해 관찰될 수 있는 균열깊이는 표면에서 약 2~3cm인 것으로 조사되었고, 단면의 하부로 갈수록 그 폭이 감소되는 양상을 나타내었으며, 표면차수벽 콘크리트 단면의 중심에 배근된 철근까지 도달되지 않은 것으로 확인되었다.

차수벽에서의 콘크리트 타설시기는 98년 7월부터 99년 4월로서 31개소의 블록마다 상이한 타설시기와 길이를 갖고 있다. 현재 기 발생된 차수벽의 균열원인을 재료적인 문제로 국한하여 추정하여 보면 다음과 같다.

콘크리트의 타설은 폭 15m, 길이 18~146m의 각 블록을 slip form공법에 의하여 시간당 평균 3m의 속도로 연속타설하였다. 현장조사 결과, 각 블록의 횡방향으로 약 50cm마다 joint로 추정되는 부위가 다수 발생되어 있었으며, 이러한 취약한 부위를 기점으로 균열이 대부분 횡방향으로 발생되어 있었고 대략 10~15m의 간격으로 발생되어 있는 양상을 나타내고 있다. 콘크리트 수화열에 의한 체적변형은 수일에서 길게는 수주간에 걸쳐 진행되지만, 콘크리트의 건조수축은 수주에 걸쳐 대부분 진행하여 길게는 몇 년에 걸쳐 체적변형을 일으킨다.

현재 콘크리트를 타설한지 약 6개월에서 1년 3개월 정도가 경과되었으므로 콘크리트 건조수축에 의한 체적변형은 거의 진행되었다고 사료되나, 건조수축은 장기간에 걸쳐 진행되는 경향을 나타내므로, 추후 균열의 진행성 및 관통여부를 면밀하게 조사하여야 할 것이다.

따라서, 이러한 표면차수벽 콘크리트에 발생된 균열은 균열폭, 발생시기, 균열형상 등을 고려하여 볼 때, 구조적 요인에 의하여 발생된 균열은 아니라고 사료된다. 즉, 균열 발생시기가 콘크리트 타설후 72시간 이후에 대부분 발생된 점과 균열발생 대부분의 부위가 slip form공법에 의하여 콘크리트를 타설한 연후에 발생한 것으로 추정되는 joint 부위에서 횡방향으로 발생되었고 이러한 취약한 부위를 기점으로 콘크리트 단면의 내부로 진행된 것으로 볼 때, 초기균열의 발생원인은 콘크리트 수화열에 의하여 발생된 체적변형에 따른 균열인 것으로 추정되며, 건조수축 또한 추가적인 원인이라고 사료된다. 따라서 이러한 균열을 최소화시키기 위해서는 콘크리트 배합비에서의 단위시멘트량의 조정, 단위수량의 조정, 적절한 혼화재료의 사용, 양생 등을 들 수 있으나, 무엇보다도 콘크리트 타설시 joint가 발생되지 않도록 하는 방안이 중요하다고 판단된다.

한편, 본 표면차수벽 콘크리트의 주요한 역할이 본댐의 차수를 목적으로 설치된 것이고, 향후 본댐에 담수를 한 연후에는 기 발생된 균열부위에 커다란 수압이 작용할 것이며, 수위의 변동에 따른 압력의 변화도 발생될 것이다. 이에 따라 비록 현재는 차수벽 콘크리트 표면부위에 국한되어 발생되었다고는 하나, 추후 큰 수압이 걸리는 특수한 경우가 발생되므로 일반 콘크리트구조물의 경우와는 달리 약간의 누수현상도 발생되지 않도록 완벽한 보수공법을 도입하여 면밀한 공사를 수행하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

- 1) 본 차수벽콘크리트에 발생된 균열은 균열폭, 발생시기, 균열패턴 등을 고려하여 볼 때, 구조적 요인에 의하여 발생된 균열은 아니라고 사료된다. 즉, 각 블록의 횡방향으로 약 50cm마다 joint로 추정되는 부위에 다수 발생되어 있었으며, 이러한 취약한 부위를 기점으로 콘크리트 수화열 및 건조수축에 의한 체적변형으로 인하여 균열이 발생되었다고 추정된다.
- 2) 따라서 이러한 균열을 최소화시키기 위해서는 콘크리트 배합비에서의 단위시멘트량의 조정, 단위수량의 조정, 적절한 혼화재료의 사용, 양생 등을 들 수 있으나, 무엇보다도 콘크리트 타설시 joint가 발생되지 않도록 하는 방안이 중요하다고 판단된다.
- 3) 현재는 차수벽콘크리트 표면부위에 국한되어 발생되었다고는 하나, 추후 큰 수압이 걸리는 특수한 경우가 발생되므로 일반 콘크리트구조물의 경우와는 달리 약간의 누수현상도 발생되지 않도록 완벽한 보수공법을 도입하여 면밀한 공사를 수행하여야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Dong-Il Chang, Won-Kyu Chai, Kwang-Hyun Jo, Kwang-Il Kim & Young-Hyun Son, "Temperature and Crack Control for Massive Concrete Structure," 22nd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 1997. 8, pp. 113 ~ 118.
2. Korea Concrete Institute, "Hot Weather and Cold Weather Concreting", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 9, No. 4, 1997, pp. 14-19.
3. ACI 207.2R, "Effect of Restraint Volume Change and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete" ACI Manual of Concrete Practice, 1996.
4. "매스콘크리트 온도해석시스템 개발," 현대건설 기술연구소 최종보고서, 1995.
5. "콘크리트표준시방서," 건설교통부, 1999.