

Fly Ash 및 강섬유를 사용한 CFRD 터널 콘크리트의 균열발생 가능성 분석

Crack Analysis of CFRD Tunnel Concrete Using Fly Ash and Steel Fiber

우 상 균^{*} 노 재 명^{**} 조 명 석^{***} 송 영 철^{****}
Woo, Sang Kyun Noh, Jea Myoung Cho, Myong Seok Song, Young Chul

ABSTRACT

The main purpose of this research was to enhance the durability in both the design and construction of dams. Especially, in case of rockfill dams, the durability of tunnel concrete in a concrete-faced rockfill dam(CFRD) is achieved by optimizing the fly ash replacement for cement and application of steel fiber. The effect on durability and thermal property corresponding to the increasing replacement of fly ash and application of steel fiber was evaluated, and the optimum value of fly ash replacement and steel fiber application was recommended. The results show that 15% of fly ash replacement and 20kg/m³ of steel fiber application was found to be an optimum level and demonstrated excellent performance in durability and thermal property.

1. 서 론

표면차수벽형 석피댐(CFRD: Concrete Faced Rockfill Dam)은 체체를 석피로 축조한 후 저수지 측 사면에 콘크리트 차수벽을 설치하는 형식의 댐으로서, 상류사면에 시공하는 슬래브(face slab)는 저수지의 물을 차단시키고 수압에 의한 응력을 체체에 전달하며 체체의 구조적 안정을 얻기 위한 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 표면차수벽 콘크리트는 차수효과 및 내부응력 발생 등에 대하여 안전하고 시공성에 문제가 없도록 최적의 콘크리트 배합을 선택하여 콘크리트의 물리·역학적인 특성을 우수하게 하고 균열발생 가능성을 최소화 하여야 한다(임정열, 윤영수, 2003, 1999). 국내에서는 CFRD가 국내 지질구조상 댐 건설에 주요 구성 재료인 암석질원이 풍부하고 취득이 쉬우며 댐 축조에 계절적 영향을 적게 받으면서 시공기간이 짧고 댐 체체가 우수에 대한 안정성이 좋기 때문에 건설에 가장 유리하다고 판단되어 널리 사용되고 있다.

청송양수댐 터널 라이닝은 매스 콘크리트 구조물로서 콘크리트 타설 환경을 고려할 때 시공 초기에 자기수축 및 수화열에 의한 균열발생 가능성이 높다. 따라서 이와 같은 구조 및 환경조건 등을 고려하여 사전에 균열발생을 억제하고자 시멘트의 일부분을 Fly Ash로 치환하고 강섬유를 사용한 터널 라이닝 콘크리트의 균열제어 및 발생 가능성을 평가하였다. 특히 강섬유와 Fly Ash를 동시에 사용한

* 정희원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

** 정희원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

*** 정희원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

**** 정희원, 한국전력공사 전력연구원 수석연구원

터널 라이닝 콘크리트의 열특성 및 균열발생 가능성을 평가함으로써 궁극적으로 터널 라이닝 콘크리트의 내구성 향상방안을 제시하였다.

2. 연구계획 및 방법

2.1. 연구계획

본 연구는 CFRD 터널 라이닝 콘크리트의 열특성 및 균열발생 가능성을 분석하고 터널 라이닝 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위하여 강섬유와 Fly Ash 치환율에 따른 열특성 실험과 수화열 해석을 수행하였으며, 강섬유는 0, 20, 40 kg/m³을 사용하였고, Fly Ash의 치환율은 시멘트 중량의 0%, 15%를 치환하였다. 본 연구에서 사용된 터널 라이닝 콘크리트의 배합설계는 표 1과 같다.

표 1 터널 라이닝 콘크리트 배합설계

설계기준강도 (MPa)	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프의 범위 (cm)	공기량의 범위 (%)	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위 재료량(kg/m ³)							
						물	시멘트	Fly Ash	잔골재	굵은골재	혼화제	강섬유	
30	25	15±2.5	4±1.5	42	50	183	436	0%	-	809	806	1.74	-
							436		-				20
							436		-				40
							371	15%	65				-
							371		65				20
							371		65				40

2.2. 연구방법

2.2.1. 자기수축

배합수 이외의 물을 첨가하지 않고 외기로의 수분 손실이 없을 때 콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의하여 건조하기 시작한다. 이러한 현상은 낮은 물-시멘트 비를 가지는 콘크리트에서 수화가 일어나는 동안 물이 내부에서 소모되면서 나타난다. 이와 같은 현상을 자기건조(self-desiccation)라고 하며, 자기건조에 의해 발생하는 거시적인 체적 감소를 자기수축(autogenous shrinkage)이라고 한다. 자기수축은 건조수축과 유사한 메커니즘에 의해 발생하는 것이지만, 건조수축이 외부로의 수분손실에 의해 발생하는 것과는 다르게 자기수축은 단지 물이 내부에서 소모된다는 차이를 갖고 있다.

자기수축 실험을 위하여 실험체는 10cm×10cm×40cm의 직육면체로 제작하였으며 외부로의 수분유실을 방지하기 위해서 실링 테이프, 그리스, 비닐 랩 등을 사용하여 전단면을 밀폐시켰다. 실험체 중심 위치에 매립게이지를 설치하고 실험체 양 끝단에 LVDT를 설치하여 수축량을 측정하였다. 실험은 타설된 후 온도 20℃, 습도 60%가 유지되는 항온항습조에서 수행하였다.

2.2.2. 단열온도상승

단열온도상승 실험은 콘크리트의 수화열로 인한 내부의 온도상승량을 파악하여 콘크리트의 온도응력에 의한 균열발생 가능성을 분석하는데 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 Fly Ash 및 강섬유의 혼입에 따른 터널 라이닝 콘크리트의 수화열 특성을 분석하기 위해 단열온도상승 시험기(Concrete Calorimeter)를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 실험장치는 1개 시편에 대한 단열온도상승 실험을 수행할 수 있으며, 시편의 용적은 50ℓ이다. 계측은 타설 직후부터 30분 간격으로 실시하였으며, 타설 후 약 7일간 측정하였다. 측정된 데이터는 컴퓨터에 자동으로 저장되며, 식 (1)에 의해 회귀분석을 통해 최대 단열온도 상승값과 반응속도를 구하였다.

$$T = K*[1 - e^{(-\alpha*t)}] \quad (1)$$

여기서, T = 단열온도 상승치(°C), K = 최대 상승 온도치(°C), α = 반응속도(°C/hr), t = 재령(일)

2.2.3. 수화열 해석

터널 라이닝 콘크리트에 균열이 발생하면 일반적으로 투수성이 증가하여 내구성능이 저하되므로 터널 본래의 기능을 상실하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fly Ash 첨가량 및 강섬유의 사용여부 등을 변수로 정하고 위에서 수행한 자기수축 및 단열온도상승 실험결과를 이용하여 터널 라이닝 콘크리트의 수화열에 의한 내부의 온도상승 형상과 온도응력에 의한 균열발생 가능성을 분석하였다. 터널 라이닝 콘크리트의 온도응력해석은 전력연구원에서 개발한 “콘크리트 구조물 수화열 해석 프로그램”을 이용하여 수행하였으며, 본 구조물의 해석은 3차원 Solid 모델을 이용하여 수행하였다.

3. 연구결과

3.1. 자기수축

양수댐 터널 라이닝 콘크리트의 자기수축 실험결과는 그림 1과 같다. 실험결과 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 자기수축이 더 작게 일어나는 것으로 나타났다. 또한, 강섬유 혼입율이 증가할수록 자기수축이 더 작게 일어났는데, 이는 골재가 시멘트 페이스트의 자기수축량을 억제하듯이 강섬유도 자기수축량을 억제하는 역할을 하기 때문인 것으로 분석된다.

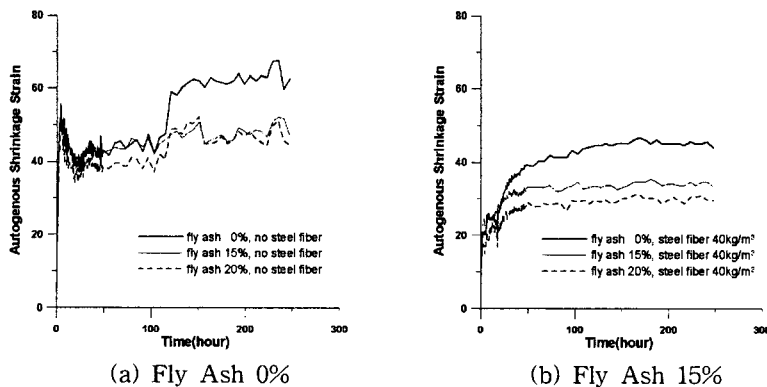


그림 1 양수댐 터널 라이닝 콘크리트의 자기수축 실험결과

3.2. 단열온도상승

실험결과 Fly Ash 혼입율이 증가할수록 단열온도상승값과 반응속도는 감소하는 경향을 보였다. 이것은 시멘트 대체 결합재로 사용된 Fly Ash 가 수화반응을 일시적으로 억제하거나 지연시킴으로서 반응속도를 저하시키는 것이며, 이 경향은 Fly Ash 혼입율이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 한편 강섬유의 혼입율이 증가할수록 단열온도상승값과 반응속도는 증가하는 것으로 나타났다.

3.3. 수화열 해석

양수댐 터널 라이닝 콘크리트의 수화열 해석결과 외기온도 15°C, 25°C의 경우, 각각 타설 2일 후에

바닥판 두께가 가장 두꺼운 부분에서 최대온도가(52.1℃, 59.7℃) 발생하는 것으로 나타났다. 또한 현장 시공조건(타설 후 살수 양생)과 터널 내부의 기후 조건을 고려하여 외기습도를 90%로 가정하여 해석을 수행하였는데, 건조수축에 의한 표면 균열은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 응력해석 결과, 터널 중앙 바닥부에서 종방향 응력보다는 횡방향 응력이 다소 높게 발생하였으나, 이는 바닥부의 외부구속에 의한 응력으로 분석되며, 이에 대한 수화열 및 부동전조수축에 의한 균열발생 가능성은 없는 것으로 판단된다.

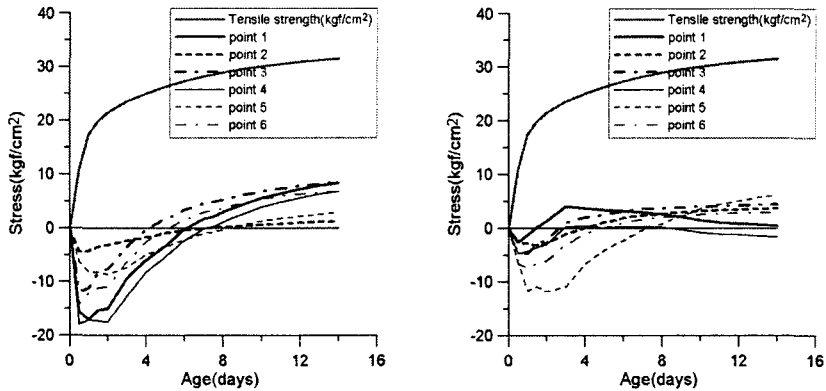


그림 2 양수댐 터널 라이닝 콘크리트의 시간에 따른 응력이력(25℃)

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험결과 Fly Ash + 강섬유 콘크리트가 일반 콘크리트(OPC) 및 Fly Ash 콘크리트에 비하여 열특성 측면에서 보다 우수한 결과를 보여 주었다.
- 2) 수화열에 의한 균열발생 가능성 분석결과 일반 콘크리트(OPC) 및 Fly Ash 콘크리트에 비하여 Fly Ash + 강섬유 콘크리트가 더 우수한 결과를 보여 주었다.
- 3) 따라서 본 연구에서는 양수댐 터널 라이닝 콘크리트의 내구성 향상과 경제성 제고를 위하여 Fly Ash 치환율은 15%, 강섬유는 20kg/m³을 혼입한 배합을 선정하여 시공에 활용할 것을 제시하고자 한다.

참고문헌

1. 윤영수, 손유신, 원종필, 이상균, 송영철, “Fly Ash 첨가에 따른 댐 콘크리트의 내구성 향상에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제19권 제I-5호, pp. 707-714, 1999.
2. 이상균, 송영철, “청송양수댐 콘크리트의 최적배합비 결정 및 균열저감 방안 연구(최종보고서)”, 한국서부발전주식회사 청송건설처, 2004.
3. S. P Shah. M. G. Karaguler and M. Sarigaphuti., “Effect of Shrinkage -Reducing Admixtures on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete”, ACI Materials Journal, May-June, pp. 289-295, 1992.