

댐콘크리트의 내구성 향상에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Improvement of Durability of Dam Concrete

윤영수*

원종필**

송영철***

우상균****

손유신*****

Yoon, Young Soo Won, Jong Pil Song, Young Chul Woo, Sang Kyun Sohn, Yu Shin

ABSTRACT

Dam concrete should have sufficient durability in wet and dry repetition and abrasion due to water level variance and also in freezing and thawing resistance as well as water penetration capacity. This study presents various experimental performance to enhance the durability of face slab concrete in concrete face rockfill dam by varying the fly ash substitution of 0%, 10%, 15% and 20% in cement quantity. The effect on durability corresponding to the increasing amount of fly-ash was evaluated and the optimum quantity of fly-ash substitution was finally recommended. The results show that 15% fly-ash substitution was found out to be an optimum quantity and demonstrated an excellent performances in durability.

1. 서론

콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)은 댐 본체를 석괴로 축조한 후 저수지 사면에 콘크리트 차수벽을 설치하는 형식의 댐으로서, 상류사면에 시공하는 Face Slab는 저수지의 물을 차단시키고, 수압에 의한 응력을 본체에 전달하며 본체의 구조적 안정을 취득케하는 중요한 역할을 하게된다. 따라서 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)에서는 Face Slab의 차수효과, 내부응력 발생 등에 대하여 안정하고 시공성에 문제가 없도록 최적의 콘크리트의 배합, 타설방법, 타설속도, 양생방법을 선택하여 콘크리트의 물리 역학적인 특성 및 양생방법에 따른 균열 발생의 가능성을 최소화하여야 한다.

일반적인 콘크리트댐 손상의 주요 원인으로서는 동결, 열화 및 변형, 누수 그리고 침식 등으로 나타나고 있으며, 이들에 대한 내구성 증진이 필요하다고 판단된다. 콘크리트의 내구성을 증진시키기 위하여 여러 가지 사항을 고려하여야 하는데 그 중에서도 콘크리트에 플라이애쉬를 첨가한 콘크리트는 미립자의 포졸란 반응으로 인해 일반 시멘트를 사용하였을 경우에 비해 굳지 않은 콘크리트와 경화된 콘크리트의 물성을 모두 증진시킨다.

따라서 본 연구에서는 국내지질구조상 댐 건설에 주요 구성재료인 암석질원이 풍부하고 취득이 쉬우며, 댐 축조의 계절적 영향을 적게 받으면서도 시공 기간이 짧고, 댐 제체가 우수에 대한 안전성이 좋아 댐 건설에 가장 유리하다고 판단되는 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)의 수밀성 및 내구성 향상을 위하여 차수벽의 재료로 사용되는 콘크리트에 플라이애쉬를 첨가, 이에 대한 콘크리트의 공학적 성질 및 내구성의 영향을 검토하고 플라이애쉬의 최적 첨가량을 결정하려한다.

* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

** 정회원, 건국대학교 농공학과 교수

*** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

**** 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

***** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원

2. 실험종류 및 방법

플라이애쉬 혼입율에 따른 댐콘크리트의 내구성을 평가하기 위하여 콘크리트에 무기 혼화제인 플라이애쉬를 시멘트량의 0%, 10%, 15%, 20%의 비율로 치환하여 염소이온 투과에 의한 전하량 측정 실험, 마모 저항성 실험, 건조-습윤 반복 실험, 피로실험, 투수실험 및 동결융해실험을 실시하였다.

2.1 염소이온 투과에 의한 전하량 측정 실험

본 실험은 콘크리트내의 철근의 부식에 영향을 주는 염소이온의 투과량을 측정하여 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 투수계수를 결정하기 위한 것으로서 ASTM C 1202-94 (Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration) 와 AASHTO T227(Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete)의 방법에 따라 실험을 실시하였으며 실험방법은 전하량 측정 장치를 이용하여 28일 91일 수중양생시킨 콘크리트 시편에 직류 60V를 공급하고, 6시간 동안 염소이온을 투과시켜 통과하는 양을 측정하였다.

2.2 마모저항성 실험

콘크리트의 내구성 평가요소로서 중시되는 마모에 대한 저항성 실험은 콘크리트 표면의 깎임(패임)에 대한 콘크리트의 영향을 분석하기 위한 것이다. 콘크리트의 마모저항성 시험은 ASTM C 779-89a(Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces)의 방법 중 B 방법으로 마모실험기계는 드레싱 휠(Dressing Wheel)을 사용하며 콘크리트의 마모에 대한 저항성 실험의 방법 및 저항성의 결정은 300×300×150mm의 콘크리트 시편을 28일과 91일간 수중양생하고 드레싱 휠의 속도를 16~17rpm/min으로 하여 실험을 실시하였다. 마모에 대한 저항성 측정은 30, 60분 단위로 실시하며 마모 깊이를 측정하여 결정하였다.

2.3 건조-습윤 반복 실험

본 실험은 자연상태에서 비가 온 후 햇빛에 노출되는 상태 또는 수위의 변동에 따른 상황을 재현하여 콘크리트의 물리적, 화학적인 열화를 촉진시키는 실험이다. 본 실험은 규정된 실험방법이 없으며, 본 실험에서는 미국 미시간대 재료연구실 실험방법을 토대로 하여 다음과 같은 실험방법과 주기로 실험을 실시하였다. 본 시험에 사용되는 시험체는 30℃의 온도 하에서 12시간동안 습윤상태로 두며, 60℃의 온도 하에서 12시간동안 건조시킨다. 본 실험은 이와 같은 주기로 25회 반복 실시하였다. 실험 공시체는 압축강도용 몰드 사용이 가능하며 건조 반복 실험 후 압축강도 실험을 수행하여 물리적 변화를 조사하고, XRD(X-Ray Diffract : X선 회절시험) 분석을 통해 화학적 변화를 조사하였다.

2.4 피로실험

본 실험은 양수발전에 의하여 수압이 변동함에 따라 발생하는 콘크리트의 피로저항성을 분석하기 위하여 수행하였다. 실험방법은 휨강도 측정을 15×15×60cm 공시체를 사용하여 KS F 2408에 따라 실험하고, 휨강도 시험에서 얻은 파괴하중의 75%, 65%, 55%를 반복재하하중으로 선정하여 피로실험을 수행한다. 피로시험에서의 시편은 15×15×150cm 공시체를 이용하였으며 반복재하하중에 의한 파괴시의 사이클을 측정하여 각 시편에서의 S_{max} (max. applied load / ultimate load)와 N(사이클)을 구하여 S-log N diagram을 분석함으로써 각 시편의 피로특성을 분석하였다.

2.5 투수실험

본 실험은 콘크리트의 초기강도나 내구성에 절대적인 영향을 미치는 콘크리트의 투수특성을 규명하기 위한 실험으로 콘크리트의 투수계수를 결정하는 것이다. 본 실험은 규정된 실험방법이 없으며, U.S. Department of the Interior-Bureau of Reclamation method를 토대로 하였다. 본 실험에 사용한 외압식 투수시험장치는 재료의 한쪽면에 밀폐된 공간을 마련하고 이 공간을 통하여 물을 가압한 후 시료의 반대편으로 수분이 흘러나오도록 되어있는 장치이다. 따라서 기본적인 Darcy의 법칙과 연속방정식을 이용하여 그 흘러나오는 수분량을 측정함으로써 투수계수를 측정하였다.

2.6 동결융해 저항실험

본 실험은 콘크리트의 품질변화가 특정 동결융해 사이클에 대한 콘크리트의 저항에 미치는 영향을 구하는데 있다. ASTM C 666-92(Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid

Freezing and Thawing)의 방법에 따라 동결융해 실험장치를 이용하여 콘크리트 시편에 간극수의 빙점이하의 온도(-18℃), 빙점이상의 온도(4℃)를 주기적으로 가하는 실험이다. 이 실험은 콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받아 콘크리트의 팽창압력이 인장강도를 초과했을 때 콘크리트에 가해지는 손상 정도를 파악하기 위하여, 동결융해 cycle의 진행에 따른 공시체의 중량 변화 및 주파수를 측정 한 후, 상대 동탄성 계수 및 내구성 지수를 산출하였다.

3. 실험재료

표 1은 본 실험에 사용된 플라이애쉬 치환율에 따른 배합표를 나타내었다.

표 1 댐 콘크리트의 배합표

| 치환율 (%) | σ_{28} | Max. Size | Slump | Air(%) | W | C | FA | W/C | S/A | S | G | | AD |
|---------|---------------|-----------|-------|--------|-----|-----|----|------|-----|-----|------|------|-----|
| | | | | | | | | | | | 25mm | 40mm | |
| 0 | 210 | 25 | 6±1.5 | 4±1.5 | 159 | 326 | 0 | 48.8 | 43 | 783 | 1085 | - | 489 |
| 10 | 210 | 25 | 6±1.5 | 4±1.5 | 164 | 274 | 27 | 54.5 | 44 | 804 | 1065 | - | 602 |
| 15 | 210 | 25 | 6±1.5 | 4±1.5 | 164 | 263 | 39 | 54.2 | 44 | 802 | 1062 | - | 755 |
| 20 | 210 | 25 | 6±1.5 | 4±1.5 | 164 | 251 | 50 | 54.4 | 44 | 801 | 1061 | - | 903 |

4. 실험결과 및 분석

4.1 염소이온 투과에 의한 전하량 측정 실험

통과전하량은 투수계수의 정확한 값을 구하기 위한 것이 아니라 콘크리트의 개략적인 투과 특성을 추정하는 것으로서 플라이애쉬 치환율에 따른 28일과 91일 수중양생 후 측정된 결과를 그림 1에 나타내었다. 재령 28일 및 91일에 측정된 통과전하량은 플라이애쉬 치환율이 15%일 때 투과저항성이 가장 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 플라이애쉬 나 고로슬래그 등을 첨가하면 콘크리트의 구조가 치밀해져 투과성이 낮은 것으로 나타나는데 본 실험에서도 이러한 일반적인 경향을 따랐다.

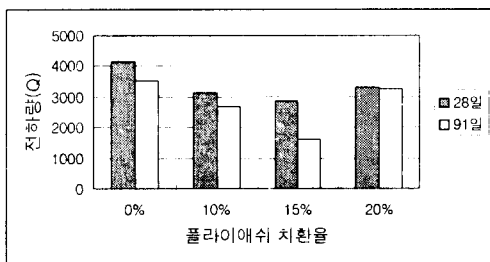


그림 1 플라이애쉬 치환율에 따른 투과전하량

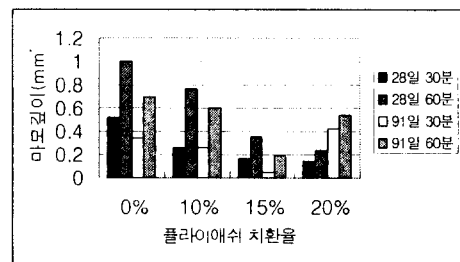


그림 2 마모시험 결과

4.2 마모저항성 실험

마모에 대한 저항성 시험 결과는 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이 28일 수중양생후의 마모 실험결과는 플라이애쉬의 치환율이 높을수록 마모저항성이 뛰어난 것을 알 수 있었으며, 전반적인 결과는 마모시간이 30분에서는 플라이애쉬의 치환율이 0%일 때 보다 10%가 약 2배, 15%에서는 약 3.2배, 20%에서 약 3.55배임을 알 수 있다. 마모 시간 1시간에서는 플라이애쉬 치환율이 0%일 때 보다 10%가 약 1.31배 15%에서는 2.82배, 20%에서는 4.27배임을 알 수 있었다. 그러나 15%와 20%를 비교하면 마모량은 30분 마모시간에는 거의 동일하며 1시간마모 시간에도 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 재령 91일의 마모시험결과는 플라이애쉬의 치환율이 15%일 때 가장 좋은 결과를 나타냈으며 20%의 경우에는 오히려 재령 28일의 결과보다 마모량이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 플라이애쉬를 첨가하면 수밀성이 증가되고 내구성이 증가되지만 본 연구의 마모시험결과는 플라이애쉬의 치환율이 15%일 때 가장 좋은 결과를 나타냈다.

4.3 건조-습윤 반복 실험

그림 3은 각 재령에서의 평균압축강도비를 나타내고 있다. 또한 그림 4와 5는 재령 28일 공시체의 건조-습윤 반복시험을 실시한 공시체와 습윤양생한 공시체의 XRD 분석결과를 보여 주고 있다. 여기서 평균압축강도비란 건조-습윤 반복 시험 공시체의 압축강도와 습윤양생한 공시체의 압축강도비를 말한다. 그림 3을 참고하여 볼 때 재령 28일과 91일에서 모두 플라이애쉬 치환율이 클수록 평균압축강도비가 감소함을 알 수 있었다. 특히 재령 28일에서 보다 재령 91일에서의 평균압축강도비가 상당히 낮은 것으로 분석되어 건조-습윤이 재령 91일의 압축강도에 상당히 영향을 미쳤음을 알 수 있었다. 또한 그림 4와 5에서와 같이 습윤양생한 공시체의 XRD 분석결과는 플라이애쉬의 치환율에 관계없이 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 또한 건조-습윤 반복시험 후의 XRD 분석의 결과를 살펴보면 플라이애쉬의 치환율이 0%, 10%, 15%, 20%에서는 습윤양생한 공시체와 거의 변화가 없어 건조-습윤 반복시험 후에도 콘크리트의 안정성을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

그림 3 재령에 따른 건조-습윤반복 시험 결과

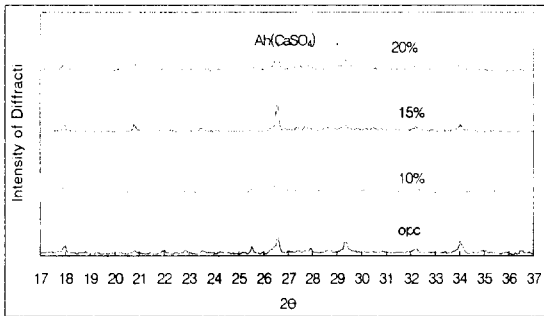


그림 4 습윤양생한 공시체의 XRD 분석결과

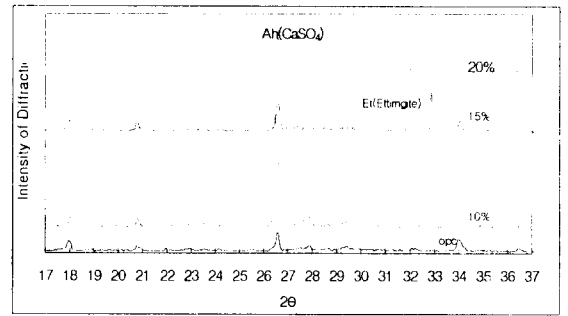


그림 5 건조-습윤 반복 시험 공시체의 XRD 분석결과

4.4 피로실험

피로시험 전에 수행되어야 하는 휨강도 시험의 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 의하면 플라이애쉬 치환율이 10%인 경우 가장 큰 휨강도 값을 나타내고 플라이애쉬 양이 증가함에 따라 휨강도는 다시 저하되는 양상을 보였다.

그림 7은 플라이애쉬 치환율에 따른 S-N 곡선을 도시한 것으로 S_{max} 가 75%일 때는 플라이애쉬 치환율이 10%인 경우 가장 큰 사이클을 보이고 있으며 S_{max} 가 55%일 경우에는 치환율이 0%, 10%, 15%, 20%의 순으로 감소하는 경향을 보이거나 20%를 제외하고는 거의 유사한 값을 보였다.

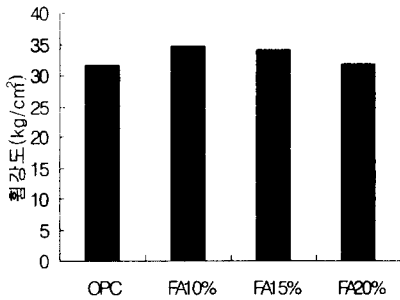


그림 6 휨강도 시험 결과

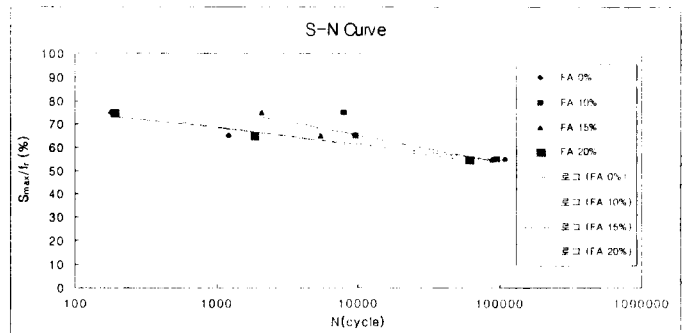


그림 7 플라이애쉬 치환율에 따른 피로시험 결과

4.5 투수실험

표 2는 플라이애쉬 치환율에 따른 투수성능을 살펴보기 위하여 각 재령에서의 단위시간당 유출유량과 투수계수값을 나타낸 것이다. 표 2를 보면 각 재령에서의 투수계수값은 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 감소되어 투수성능을 높여줌을 알 수 있었다. 댁 콘크리트의 기본 양생재령인 91일에서는 10% 및 20%가 OPC와 15%에 비하여 상당히 크게 나왔는데 이는 다른 투수시험기를 사용한 결과로 판단된다. 또한 각 양생재령에 대해서는 재령이 증가할수록 투수계수가 감소함을 알 수 있었다.

시험체의 개수 및 시험기기의 상이성에 따라 플라이애쉬 치환율에 따른 정량적인 투수성능을 비교하기는 어려우나 위의 결과를 토대로 플라이애쉬 치환율이 높을수록 그리고 재령이 증가할수록 투수성능은 좋아진다고 결론내릴 수 있었다.

표 2 플라이애쉬 치환율에 따른 투수성능 비교

| 시험체명 | 재령 | 단위시간당 유출유량(Q) (mm ³ /sec) | 투수계수(K) (× 10 ⁻¹¹ mm/sec) | 비고 |
|------|-----|---|---|---------------------|
| | (일) | | | |
| 15% | 56 | 1.86 | 12.55 | 본 시험만 다른 시험기를 사용하였음 |
| 20% | | 1.19 | 8.15 | |
| 20% | | 1.29 | 8.83 | |
| 10% | 91 | 6.01 | 35.40 | |
| 10% | | 6.49 | 38.23 | |
| 20% | | 5.45 | 31.85 | |
| OPC | | 0.95 | 6.73 | |
| 15% | | 0.24 | 1.75 | |
| 15% | 105 | 0.36 | 2.63 | |
| OPC | | 0.45 | 3.18 | |
| OPC | | 0.35 | 2.47 | |
| 10% | | 0.30 | 2.12 | |

4.6 동결융해 저항실험

그림 8과 9는 4개의 시험 조건에 대하여 300사이클까지 각 cycle에 해당하는 평균무게감소율과 평균상대동탄성계수 값을 나타낸 것이다.

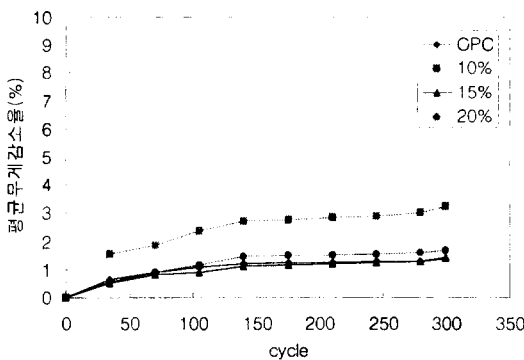


그림 8 해당 cycle에 대한 평균무게감소율

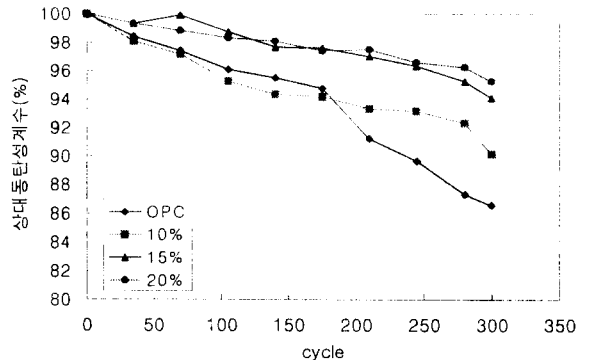


그림 9 해당 cycle에 대한 상대동탄성계수

각 치환율에 따른 내구성지수는 300사이클에서 모든 시험이 종료되었으므로 300사이클에서 상대동탄성계수값이 각 내구성지수값이 된다. 300사이클까지 측정된 동결융해시험의 무게감소율은 그림 8에서와 같이 플라이애쉬 10%에 대해서만 상대적으로 높게 나오고 나머지 배합에 대해서는 비슷한 양상

을 보여주었다. 또한 상대 동탄성 계수값은 그림 9에서와 같이 플라이애쉬 치환율이 15%와 20%의 경우 상당히 양호한 결과를 보여주고 있으며 0%인 OPC와 치환율이 10%인 경우 상대적으로 낮은 값을 보여주고 있다. 내구성 평가에 기준이 되는 내구성지수를 비교해 보았을 경우 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 내구성지수가 증가하였으나 전반적으로 300cycle까지 모든 시험체에 대하여 내구성지수가 85% 이상 보여주고 있는 것을 토대로 분석할 때 동결융해에 대한 저항성능은 상당히 양호한 것으로 판단된다.

5. 결론

(1) 염소이온 투과에 의한 전하량 측정의 결과, 재령 28일 및 91일에 측정된 통과전하량은 플라이애쉬 치환율 15%일때가 가장 좋은 결과를 나타냈다. 일반적으로 미분말의 플라이애쉬를 첨가하면 콘크리트의 조직이 치밀해져 염소이온의 투과성이 낮아지지만 본 실험에서는 20% 치환율일 때보다는 15%일 때가 더 좋은 결과를 보여주었다.

(2) 플라이애쉬 치환율에 따른 마모 시험결과는 재령 28일의 경우에는 플라이애쉬 치환율이 높아질수록 마모저항성이 증가하였으나, 재령 91일의 마모시험 결과를 살펴보면 플라이애쉬 치환율이 15%일 때까지는 마모저항성이 증가하지만 20%의 경우에는 오히려 28일의 결과보다 마모량이 증가하는 경향을 보여주었다.

(3) 플라이애쉬 치환율에 따른 건조-습윤 반복시험의 결과는 재령 28일의 경우 치환율이 15%일 때가 가장 효과적임을 알 수 있었다. 또한 재령 28일의 습윤양생한 공시체와 건조-습윤반복시험후 공시체의 XRD 분석은 습윤양생한 공시체와 건조-습윤반복시험후가 거의 변화가 없어 건조-습윤반복시험 후에도 콘크리트가 안전함을 알 수 있었다.

(4) 휨강도 시험은 플라이애쉬 치환율이 10%인 경우 가장 큰 휨강도 값을 나타내고 플라이애쉬 양이 증가함에 따라 휨강도는 다시 저하되는 양상을 보였으며, 피로시험의 결과는 S_{max}/f_r 이 55%인 경우는 플라이애쉬 치환율이 20% 경우를 제외하고는 피로수명의 차이가 크지 않음을 보이며, S_{max}/f_r 이 75%인 경우는 플라이애쉬의 치환율에 따라 피로수명이 상당한 차이를 보이며 플라이애쉬 치환율 10%의 경우 피로수명이 향상되고 플라이애쉬 치환율이 증가되면 감소함을 알 수 있었다.

(5) 투수 실험에서는 플라이애쉬 치환율에 따라 정량적인 투수성능을 비교하지는 못하였으나, 플라이애쉬 치환율이 높을수록 그리고 재령이 증가할수록 주어진 배합에서 콘크리트 투수성능은 좋아짐을 알 수 있었다.

(6) 300사이클까지의 상대동탄성계수값은 치환율이 높을수록 상대적으로 우수한 것으로 판명되었고 내구성지수가 각 치환율에 대하여 모두 85%를 넘어서서 동결융해에 대한 저항성능이 전반적으로 우수한 것으로 판단되었다.

결론적으로 플라이애쉬 치환율이 15% 배합이 댐 콘크리트 내구성 향상 측면에서 우수한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 노병철(1996), “응력비·재하형태·골재치수·재하속도가 무근콘크리트의 피로특성에 미치는 영향”, 석사학위논문, 연세대학교.
2. 안상로(1998), “댐 유지관리 및 제측”, 대한토목학회, 제 46권, 11호, pp. 35-42.
3. 이진용, 이인대, 김광우, 배성용(1998), “재생콘크리트의 강도발현 및 동결융해 저항성 특성”, 한국콘크리트학회지, 제 10권, 4호, pp. 163-169.
4. A. M. Neville(1995), *Properties of Concrete*, 4th Edition, Longman.
5. ASTM Committee C-9(1983), “Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surface”, Annual Book of Astm standards, Vol. 04. 02., C 779-95.
6. ASTM Committee C-9(1983), “Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, Annual Book of Astm standards, Vol. 04. 02., C 1202-94.
7. ASTM Committee C-9(1983), “Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing”, Annual Book of Astm standards, Vol. 04. 02., C 666-92.