

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 준공 후 정부침하와 슬래브 변형 및 누수 거동에 관한 연구

A Study On The Deformation Behavior of Post-Construction Crest Settlement, Face Slab Deformation, and Leakage of Concrete Faced Rockfill Dams

김 유 성¹ Kim, You-Seong 최 재 선^{2*} Choi, Jae-Seon
원 명 수³ Won, Myoung-Soo 이 희 훈⁴ Lee, Hee-Hun

ABSTRACT

The purpose of present study performed 27 CFRD cases analyses to predict and effectively use post-construction crest settlement, face slab deformation, and leakage as indexes for the maintenance and management of concrete faced rockfill dams(CFRD). The results showed that the range of post-construction crest settlement suggested by Sherard and Cooke (1987), and Clements (1984) had a good agreement in the case analyses using rockfills with very high intact strength, but it had a trend which underestimated crest settlement in the cases using rockfills with medium to high intact strength. The leakage case analyses showed that leakage is mainly caused by face slab deformation due to the water load, the maximum leakage in general was observed during the first reservoir filling, and leakage was rapidly increasing when the dam height exceeds 125m.

요 지

본 연구에서는 준공 후 정부침하, 콘크리트 슬래브 변형, 누수량 등의 CFRD 거동 예측과 유지·관리 지표로 유용하게 활용될 수 있도록 하기 위해 국내외 27개의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 사례를 분석하였다. 검토결과 Sherard와 Cooke(1987)과 Clements(1984) 등이 제안한 준공 후 정부침하 범위는 록필 재료의 강도가 매우 양호한 경우에는 적합하나, 보통에서 양호한 경우는 과소평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 누수량 사례분석결과 CFRD에서 누수량의 주원인은 담수하중에 의한 슬래브의 변형이고, 최대 누수량은 주로 최초 담수중에 발생하고, 댐 높이가 125m보다 커지게 되면 누수량이 급증하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

Keywords : CFRD, Concrete faced slab, Rockfill, Crest settlement, Leakage

1. 서 론

제체 중앙에 투수성이 작은 토질재료로 차수기능을 갖는 중심 코아형 록필댐과는 달리 차수기능을 댐 상류표면의 콘크리트 슬래브(차수벽)에 의해 확보하는 형식의 록필댐을 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(concrete faced rockfill dam,

CFRD)이라 칭하고, 용어가 길기 때문에 짧게 하여 CFRD로 표기하는 것이 일반적이다. 그림 1에 나타낸 바와 같이, CFRD 제체의 주요 단면은 파라페트 월, 콘크리트 슬래브(차수벽), 트랜지션존(차수벽 지지존, 2존), 선택존(3A존), 록필존(3B&C존), 그리고 프린스로 구성되어 있고, 불투수존(1존)은 콘크리트 슬래브의 균열 및 주변이음부의 변

1 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National University)
2* 정회원, SK건설(주) 부장 (Member, General Manager, SK E&C Co., LTD., E-mail: iseonc@yahoo.co.kr)
3 정회원, 평화지오택(주) 연구개발실 기술연구소장 (Member, Chief Researcher, Dept. of R&D, Pyonghwa Geotec., LTD.)
4 비회원, (주)도화종합기술공사 지반부 부장 (Non-Member, General Manager, Dept. of Geotechnical Engrg., Dohwa Consulting Engineers Co., LTD.)

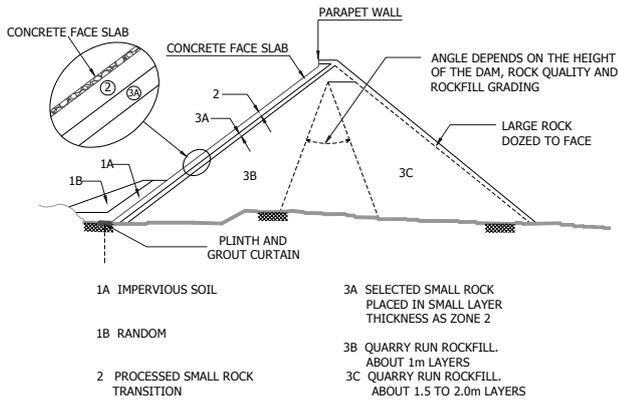


그림 1. 전형적인 CFRD단면(Cooke와 Sherard, 1987)

형에 의한 차수를 목적으로 필요에 따라 설치하고 있다. 록필의 입경은 하류에서 상류비탈면으로 근접할수록 작아지며, 2존과 3C존에서의 최대입경은 각각 75~150mm와 1,500mm이하로 하고 있다(건설교통부, 2003).

CFRD는 1850년대 미국 캘리포니아 주의 소위 골드러시 시대에 기원되었으며, 1960년 대 중반까지는 투석공법(록을 20~30m의 높은 곳에서 낙하시켜, 그 충격에 의해 하층을 다짐하는 공법)에 의해 건설되었다. 투석공법에 의해 건설된 CFRD의 경우 최초담수시의 담수하중에 의한 침하와 슬래브 변형에 기인한 누수문제로 주목을 받지 못하였으나, 1960년 대 중반 이후 투석다짐에서 롤러에 의한 전압다짐으로 건설되면서부터 담수하중으로 인한 침하와 누수문제가 점진적으로 개선되면서 점차 주목을 받기 시작하였다. 현재 CFRD는 여러 댐의 형식 중 가장 경제적인 댐으로 인식되고 있고, 시공 및 현장 적용성의 우수성으로 세계적으로 가장 주목 받는 댐 형식중의 하나이나, 이론보다는 경험적인 방법에 근거하여 설계와 시공이 이루어지고 있다(Khalid 등, 1990; Sherard와 Cooke, 1987; Uddin와 Gazetas, 1995; Xing 등, 2006). 국내의 경우 1985년 높이가 45m인 동북CFRD가 준공된 이후 17개의 댐이 준공되었거나 건설 중에 있다. 국내의 경우 소개된 역사가 짧아 대부분의 연구가 축조중과 담수초기의 CFRD 거동과, 수치해석 및 모형실험에 국한된 경향이 있고(김용성 등, 2004; 박동순 등, 2005, 2004; 박한규 등 2005; 윤덕중 등, 2006; 이종욱 등, 2003; 하익수 등, 2006; Park 등, 2005), 댐의 유지·관리지표로 많이 활용되고 있는 장기 정부침하와 장기 누수량에 대한 분석은 미미한 상태이다. 또, 국내에서 계측된 현장계측 데이터의 경우 자료공개가 제한적이고, 아직까지 체계적인 연구를 수행할 만큼 충분한 자료를 축적하지 못한 상태이다. CFRD는 침투류 해석

시 콘크리트 슬래브 이음부의 변형 및 크랙 등으로 발생할 수도 있는 누수특성을 반영하기가 곤란하므로 실제와 다른 결과를 도출할 수도 있으나 장기 누수량에 대한 데이터 부재로 수치해석 결과에 의존하는 경향이 있다. 이와 같은 배경 하에 본 연구에서는 준공 후 정부침하와 콘크리트 슬래브 변형 및 누수거동에 대한 이해를 돕고, 댐의 유지·관리시 관리지표로 유용하게 활용될 수 있도록 하기위해, 진동롤러에 의한 전압으로 다짐 시공된 국내외 27CFRD에 대해 준공 후 정부침하와 슬래브의 변형 및 누수거동특성을 규명하였다.

2. 준공 후 제체의 거동

2.1 준공 후 정부침하

Clements(1984)은 68개의 록필 댐(membrane-faced(dumped and compacted rockfill), sloping, and central core dams)에 대한 자료를 바탕으로 준공 후 정부 침하량 예측에 사용되는 경험식의 유용성 여부에 대해 검토하였다. 검토 결과 기존의 경험식은 단순하게 변위와 높이 또는 시간에 근거하기 때문에 많은 에러의 가능성이 있어 합리적인 변형 예측은 곤란한 것으로 보고하고 있다. 경험식에 대한 대안으로 그는 유사 특성을 갖는 기존의 댐에 대한 침하곡선을 이용할 것을 제안하였고, 롤러로 다짐 시공된 CFRD의 경우 준공 후 정부침하의 발생 범위는 댐 높이의 0~0.25%인 것으로 보고하였다. Sherard와 Cooke(1987)은 1985년 미국 뉴욕에서 개최된 CFRD의 설계와 시공 및 수행에 관한 심포지엄(Cooke와 Sherard, 1985)에 발표된 논문들을 분석한 결과에 근거하여 준공 후 3~30년이 경과하게 되면 롤러에 의한 다짐시공에 비해 투석공법으로 시공된 CFRD에서 약 3~8배 정도 큰 정부침하가 발생하고, 현대식 다짐장비로 높이가 100m인 CFRD를 시공할 경우 준공 후로부터 5년이 경과하면 정부침하는 10~15cm가 발생하고, 100년 후에는 15~25cm가 발생할 것으로 예측하였다. 이는 Clements(1984)가 보고한 CFRD에서의 준공 후 정부침하 범위와 일치한다.

표 1은 국내외 27 CFRD에 대한 개략적인 정보와 준공 후 정부침하와 콘크리트 슬래브의 변형 및 누수량 등을 보여주고 있다. 표 1에서 전체 침하량(TS)과 슬래브의 전체 법선방향 변형(TD)은 준공후로부터 계측기간 동안 계측된 각각의 데이터 중 최대치를 의미하고, 최초 담수 중 침하량(SFF)과 담수중 슬래브의 법선방향 변형(DFF)는 최

표 1. CFRD 사례분석

| 번호 | 댐 명 | 위치 | 준공 년도 | 댐 | | | IRSC | 준공 후 정부 침하 | | | | | 준공 후 콘크리트 슬래브 변형 | | | 누수량 (l/sec) | | |
|----|-------------------|-----------|----------|------------|------------|---|------------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------|------------------|------------|-------------|---------------|----------|-------|
| | | | | 높이 H(m) | 길이 L(m) | 기 초 | | 관측기간 (년) | TS (mm) | TS (% of H) | SFF (mm) | SFF (% of H) | SFF/TS (%) | TD (mm) | DFD (mm) | DFD/TD (%) | 최대 | 장기 |
| 1 | Aguamilpa | Mexico | 1993 | 186 | 475 | Rock-gravels in part of river section | VH | 0,4~5,7 | 307 | 0,185 | 222 | 0,133 | 72 | 320 | - | - | FF 200 | 160,0 |
| 2 | Alto Anchicaya | Columbia | 1974 | 140 | 260 | Gravels in river section | VH | 0,11~10,3 | 153 | 0,109 | 15 | 0,011 | 10 | 160 | 130 | 81 | FF 1,800 | - |
| 3 | Bastyan | Australia | 1983 | 75 | 430 | Rock | VH | 0,2~7,5 | 50 | 0,066 | 15 | 0,020 | 30 | 68 | - | - | FF 10 | 5,0 |
| 4 | Cethana | Australia | 1971 | 110 | 213 | Rock | VH | 0~28,6 | 137 | 0,124 | 46 | 0,043 | 34 | 170 | - | - | 70,0 | 7,5 |
| 5 | Cheongsong(Lower) | Korea | 2007 | 90 | 400 | Rock | h to VH | 0~3,2 | 67 | 0,112 | - | - | - | - | - | - | FF 43,0 | 1,5 |
| 6 | Cheongsong(Upper) | Korea | 2007 | 62 | 300 | Rock | VH | 0~3,3 | 117 | 0,130 | - | - | - | - | - | - | FF 43,0 | 10,0 |
| 7 | Crotty | Australia | 1991 | 83 | 240 | Rock | VH | 0~8,5 | 55 | 0,066 | 16 | 0,019 | 29 | 46 | - | - | 45,0 | 33,0 |
| 8 | Foz Do Areia | Brazil | 1979 | 160 | 828 | Rock | h to VH | 0~11 | 328 | 0,205 | 73 | 0,046 | 22 | 780 | 620 | 79 | FF 240 | 70,0 |
| 9 | Golillas | Columbia | 1978 | 125 | 108 | Rock | VH | 0,46~6,4 | 52 | 0,042 | 20 | 0,016 | 38 | 160 | - | - | FF 1,080 | 385,0 |
| 10 | Kangaroo Creek | Australia | 1969 | 60 | 178 | Rock, some gravels | VH | 0~26 | 116 | 0,193 | 26 | 0,043 | 22 | - | - | - | FF 11 | 2,5 |
| 11 | Kotmale | Sri Lanka | 1984 | 90 | 560 | Rock | h to VH | 0~2,46 | 255 | 0,283 | 96 | 0,107 | 38 | 98 | - | - | FF 10 | - |
| 12 | Little Para | Australia | 1977 | 53 | 225 | Rock | M | 0~22,6 | 152 | 0,288 | 22 | 0,042 | 14 | - | - | - | 19,2 | - |
| 13 | Mackintosh | Australia | 1981 | 75 | 465 | Rock | M to h | 0~20,6 | 333 | 0,444 | 99 | 0,132 | 30 | 228 | 173 | 76 | FF 21 | 10,0 |
| 14 | Mangrove Creek | Australia | 1981 | 80 | 380 | Weathered Rock | h | 0,67~15 | 287 | 0,359 | <287 | <0,359 | - | - | - | - | FF 5,6 | 2,5 |
| 15 | Miryang | Korea | 2001 | 89 | 535 | Rock | - | 0(?)~3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 77,0 | 9,0 |
| 16 | Murchison | Australia | 1982 | 94 | 200 | Rock | VH | 0,08~17,6 | 104 | 0,111 | 9 | 0,010 | 9 | 77 | 28 | 36 | FF 3,5 | 2,0 |
| 17 | Namgang | Korea | 1999 | 34 | 1,126 | Rock, some gravels | - | 0(?)~5 | - | - | - | - | - | - | - | - | 51,0 | 4,0 |
| 18 | Reece | Australia | 1986 | 122 | 374 | Gravels in river section | VH | 0,12~15 | 221 | 0,181 | 85 | 0,070 | 38 | 264 | 215 | 81 | 12,0 | 1,5 |
| 19 | Salvajina | Columbia | 1984 | 148 | 362 | Rock and Soil, gravels in river section | M(?) to VH | 0,33~0,75 | 99 | 0,061 | <90 | <0,061 | 91 | 55 | - | - | 74,0 | - |
| 20 | Segredo | Brazil | 1972 | 145 | 720 | Rock | h to VH | ?~0,4(?) | 229 | 0,158 | 약 200 | 0,138 | 87 | 340 | - | - | FF 390 | 45,0 |
| 21 | Serpentine | Australia | 1971 | 38 | 134 | Rock, gravels in river section | M to h | 0,24~25,5 | 77 | 0,203 | 35 | 0,092 | 45 | - | - | - | - | - |
| 22 | Shiroro | Nigeria | 1983 | 125 | 560 | Rock | VH | 0~1,8 | 166 | 0,133 | <66 | <0,053 | 40 | 90 | - | - | 1,800,0 | 100,0 |
| 23 | Tianshengqiao-1 | China | 1999 | 178 | 1,168 | Rock | M to VH | 0,05~0,8 | 926 | 0,520 | <926 | <0,052 | - | - | - | - | FF 53 | - |
| 24 | Tullabadine | Australia | 1979 | 25 | 214 | Rock | h | 0,2~12,8 | 19 | 0,076 | 2 | 0,010 | 11 | - | - | - | 2,0 | 0,8 |
| 25 | White Spur | Australia | 1989 | 43 | 146 | Rock | VH | 0,04~5,9 | 58 | 0,135 | 7 | 0,016 | 12 | 38 | 15 | 39 | FF 7 | 2,0 |
| 26 | Winneke | Australia | 1978 | 85 | 1,050 | Rock | h | 0,17~16,2 | 207 | 0,244 | 105 | 0,124 | 51 | 160 | 145 | 91 | FF 58 | 13,0 |
| 27 | Xingo | Brazil | 1993 | 140 | 850 | Rock, gravels in lower river bed | h to VH(?) | 1~6,2 | 526 | 0,376 | 302 | 0,216 | 57 | 510 | 290 | 57 | 200,0 | 140,0 |

• IRSC : 록필 암의 무결점 강도 분류(Classification of unconfined compressive strength of intact rock used in rockfills (Australian Standard AS 1726-1993));
 -, VH(Very high) : 70~240MPa, -, h(high) : 20~70MPa, -, M(Medium) : 6~20MPa, • TS : 전체 침하량(Total Settlement), • SFF : 최초 담수 중 침하량(Settlement on First Filling),
 • TD : 슬래브의 전체 법선방향 변형(Total deformation), • DFF : 담수중 슬래브의 법선방향 변형(Deformation on first filling), • FF : 최초담수(First filling)

초 담시기간동안 관측된 최대변형을 의미한다. 누수량에서 최대와 장기는 관측기간 동안 관측된 누수량 중 최대와 평균값을 각각 의미하고, 최대 앞에 나타난 FF는 최초담수 중 또는 최초담수 직후에 최대값이 관측된 경우를 의미한다. 표 1에서 계측기간은 댐 축조완료 후부터 측정된 것이므로 제체와 누수량의 계측기간과는 다소 차이가 있을 수도 있고, 계측시점은 준공년도와도 다소 다를 수도 있다. 그림 2와 3은 표 1에 나타난 CFRD중 계측기간이 제체 구축후로부터 10년과 제체구축후로부터 10년 이상 경과한 CFRD에서 전체 정부침하량과 최초 담수중 발생한 정

부침하량의 관계를 보여주고 있다. 이들 그림에 나타난 숫자는 표 1의 첫 번째 칼럼에 나타난 댐에 대한 일련의 번호를 의미하고, M, h, VH는 록필 암 재료의 무결점 일축 압축강도를 의미하고, 이에 대한 설명은 표 1의 하부에 나타내었다. 10년 전·후의 정부 침하에 대한 혼돈을 방지하기 위해 본 논문에서는 편의상 계측기간이 제체구축후로부터 10년 미만인 경우를 단기 정부침하라고 정의하고, 10년 이상 계측된 정부침하량을 장기 정부침하로 기술하고자 한다.

그림 2와 3에 나타난 CFRD의 정부 침하량은 댐 높이보

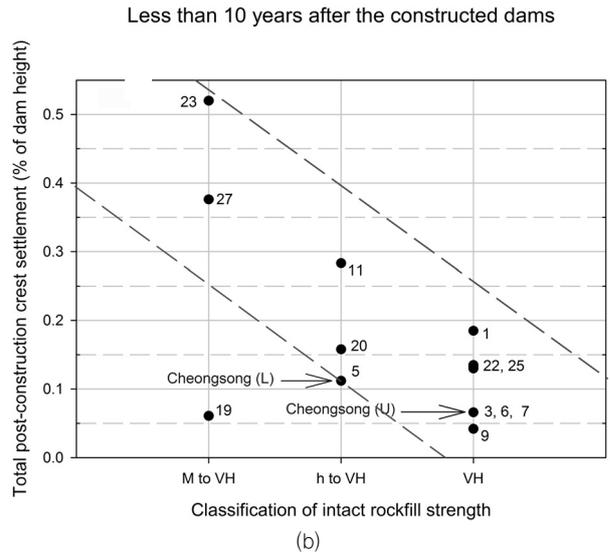
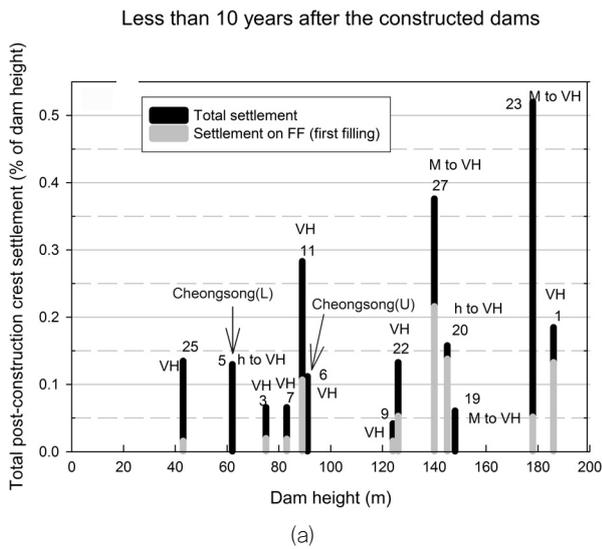


그림 2. 최초 담수중 정부침하와 단기(10년 미만) 정부침하

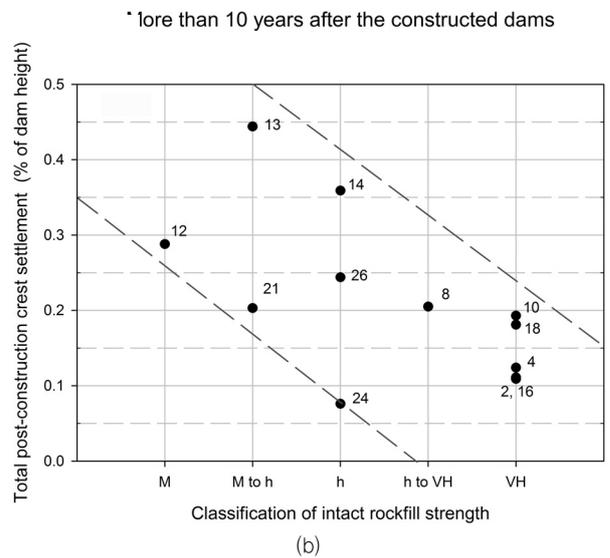
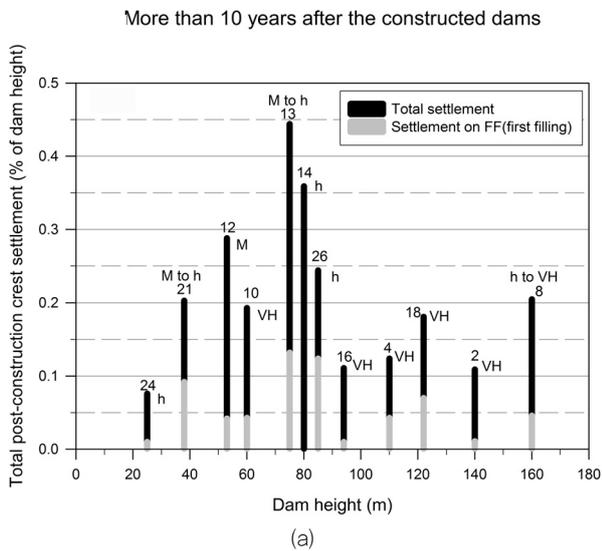


그림 3. 최초 담수중 정부침하와 장기(10년 이상) 정부침하

다는 록필 재료의 강도 특성의 영향을 크게 받고 있음을 보여주고 있다. 즉, 그림 2(b)와 그림 3(b)에 나타난 바와 같이, 보통(M)에서 양호(h)한 록필 재료에 비해 매우 양호(VH)한 강도를 갖는 록필로 준공된 CFRD에서의 정부침하가 2배 정도 작게 나타났다. 그림에 나타난 단·장기 정부침하는 매우 양호한 록필 재료의 경우는 댐 높이의 0.05~0.20%이고, 보통에서 양호한 경우는 댐 높이의 0.05~0.50% 범위에 있다. 따라서, Sherard와 Cooke(1987)과 Clements(1984) 등이 제안한 정부침하 범위(댐 높이의 0~0.25%)는 매우 양호한 록필 재료의 경우에는 적합하나, 보통에서 양호한 록필 재료의 경우는 실제보다 과소평가할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 그림 4와 5는 최초 담수

중 정부침하와 단·장기 정부침하에 대한 비를 나타낸 것이다. 단기 정부침하의 경우는 전체 단기 정부침하의 10~90%정도가 최초 담수중에 발행하고, 장기 정부침하의 경우는 전체 장기 정부침하의 10~50%정도가 최초 담수중에 발생하는 것으로 나타났다. 단기 정부침하의 경우 계측기간이 장기보다 짧아 최초 담수중 침하량에 대한 정부침하량의 비가 장기보다 크게 나타난 것으로 생각된다. 최초 담수중 정부침하량은 록필의 강도보다는 댐 높이의 영향을 크게 받고, 댐 높이에 비례하여 커지는 경향이 있는 것으로 나타났다. 댐 높이가 높을수록 담수하중이 체체에 미치는 영향이 크고, 최초 만수위에 의한 담수하중이 작용한 후로 추가되는 외력이 없기 때문에 최초 담수중 정부침하

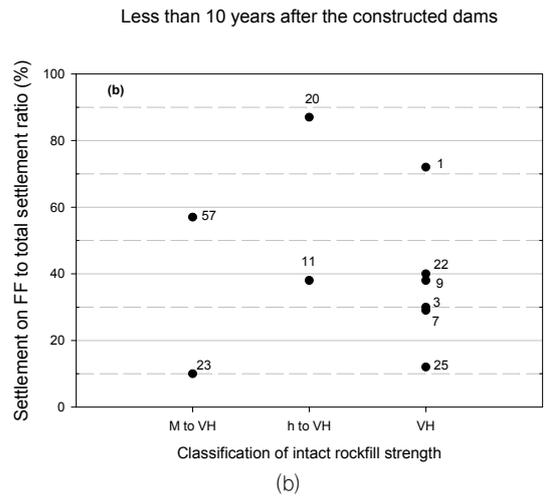
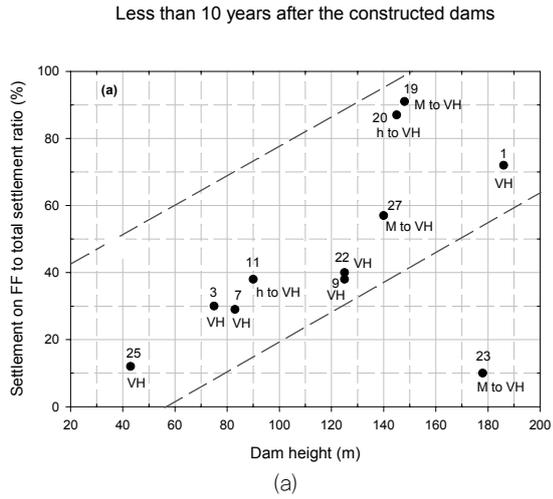


그림 4. 최초담수중 정부침하와 단기(10년 미만) 정부침하에 대한 비

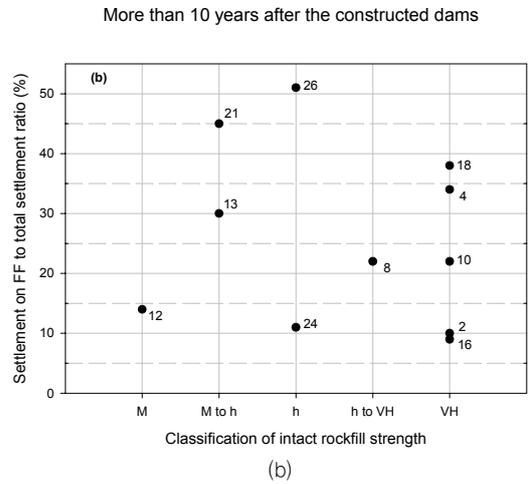
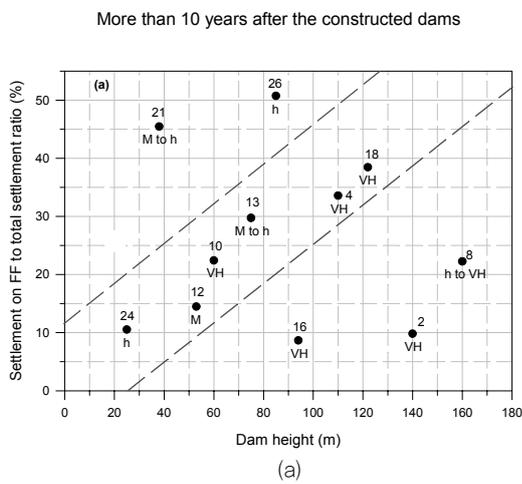


그림 5. 최초 담수중 정부침하와 장기(10년 이상) 정부침하에 대한 비

표 2. 콘크리트 슬래브 변형률

| 댐 이름 | 댐 높이(m) | 준공년도 | 계측기간(년) | 최대변형률($\times 10^{-6}$) | 비고 |
|------------------|---------|------|---------|---------------------------|------------------------|
| Cheongsong Lower | 62 | 2007 | 최초담수기간 | 압축 : 96, 인장 : 135 | |
| Cheongsong Upper | 90 | 2007 | 최초담수기간 | 압축 : 385, 인장 : 121 | |
| Cethana | 110 | 1971 | 10 | 압축 : 665, 인장 : - | Fitzpatrick 등(1986) |
| Winneke | 85 | 1978 | 5 | 압축 : 500, 인장 : 200 | Casinader와 Watt (1985) |
| Shiroro | 125 | 1983 | 최초담수기간 | 압축 : 500, 인장 : 200 | Bodtman과 Wyatt (1985) |
| Salvajina | 148 | 1984 | 최초담수기간 | 압축 : 400, 인장 : 90 | Hacelas 등 (1987) |

*. 파괴시 변형률 (Fitzpatrick, 1986) : $(1,000\sim 3,000)\times 10^{-6}$

는 록필의 강도보다는 댐 높이의 영향을 많이 받고, 최초 담수 이후 정부침하는 댐 높이보다 록필 강도의 영향을 크게 받는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

2.2 콘크리트 슬래브 변형

Hacelas 등(1987)은 Salvajina댐의 제체 구축 후와 최초

담수완료 후에 분석한 결과를 통해 슬래브의 변형은 담수 하중의 영향을 현저하게 받고, 인장변형은 방사방향으로

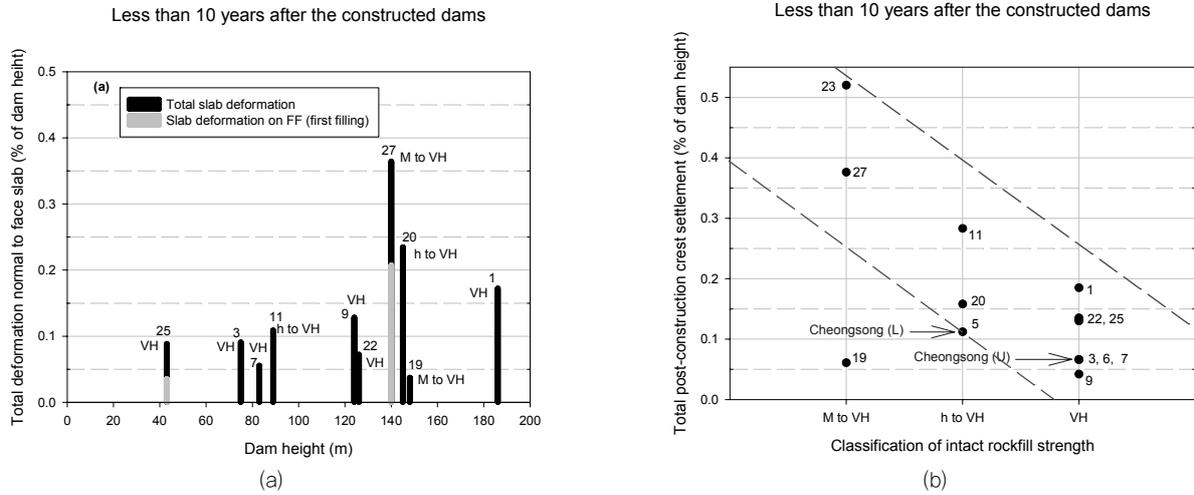


그림 6. 최초 담수중과 준공 후 단기(10년 미만) 콘크리트 슬래브의 법선방향 변형

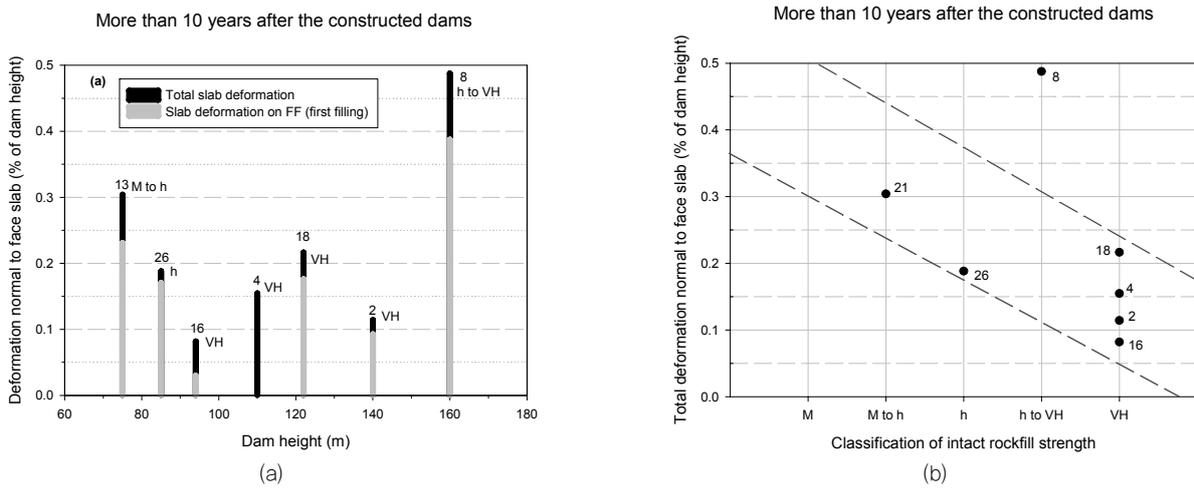


그림 7. 최초 담수중과 준공 후 장기(10년 이상) 콘크리트 슬래브의 법선방향 변형

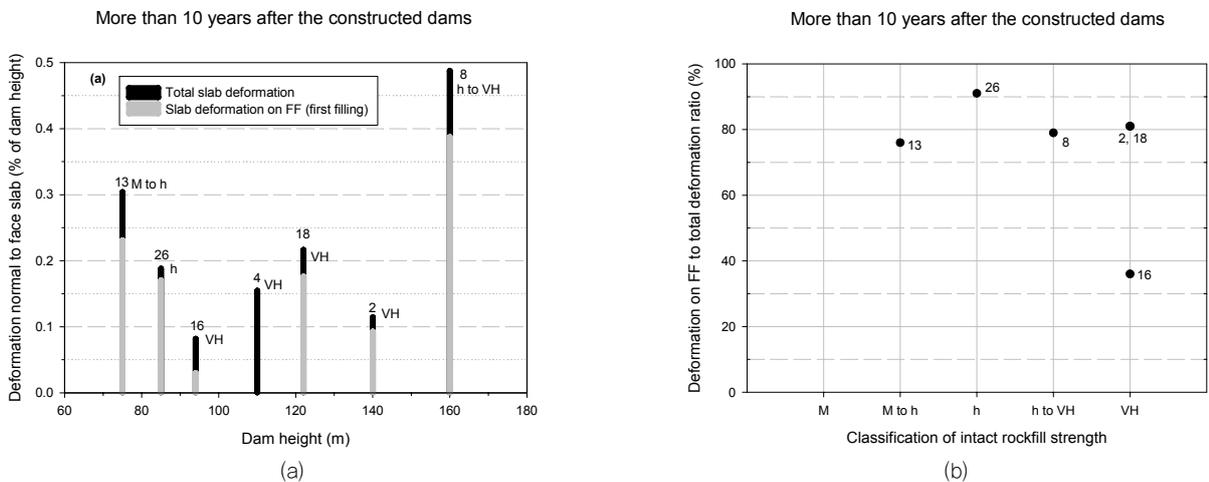


그림 8. 최초 담수중과 준공 후 장기(10년 이상) 콘크리트 슬래브의 법선방향 변형 비

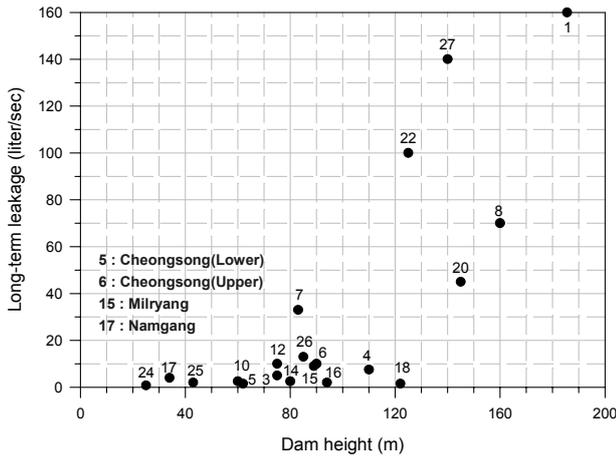


그림 9. 댐 높이 별 장기 누수량 측정결과와 침투류 해석(FEM) 결과 비교

슬래브의 하단부분에서 발달하는 것으로 보고하고 있다. 표 2는 계측기간동안 콘크리트 슬래브에서 발생된 최대 변형을 정리한 것이다. 표 2에 나타난 바와 같이, Fitzpatrick(1986)는 슬래브의 파괴시 변형률의 범위는 $(1,000\sim3,000)\times 10^{-6}$ 이고, 취성과파괴일수록 $1,000\times 10^{-6}$ 에 가깝고, 연성과파괴일수록 $3,000\times 10^{-6}$ 에 근접하는 것으로 보고하고 있다. 표 2에서, 10년 간 계측된 최대 변형률은 665×10^{-6} 이고, 최초 담수중 발생한 최대 변형률은 500×10^{-6} 로, Fitzpatrick(1986)가 보고한 파괴시 변형률과 비교할 경우 안전한 범위 내에서 거동함을 알 수 있다.

그림 6~8은 표 1에 나타난 최초 담수중과 제체구축 후 콘크리트 슬래브의 법선방향 변형과 변형비를 보여주고 있다. 슬래브 법선방향 변형의 크기는 정부침하와 유사하게 댐 높이의 0.05~0.5%범위이고, 록필의 강도가 클수록 변형이 작아지는 경향을 보여주고 있다. 제체구축 후로부터 10년 미만 동안 계측한 슬래브 변형의 경우 최초 담수중 계측한 변형이 2개로 최초 담수중과 전체 변형간의 경향을 파악하기에는 경우수가 부족한 것으로 생각되어, 장기의 경우에만 변형비를 분석하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이, 장기 콘크리트 슬래브의 법선방향 전체 변형의 약 80%가 최초 담수중에 발생하고 있어, 콘크리트 슬래브의 경우 대부분의 변형이 최초 담수중에 발생하고, 최초 담수기간동안 슬래브에서의 변형이 정부침하에서 보다 빠르게 진행되는 것으로 판단된다. 그림 9는 높이가 160m인 Foz Do Areia댐에서의 최초 담수개시 후부터 콘크리트 슬래브 법선 방향 변형과 정부침하를 나타낸 것으로 앞에서 설명한 현상을 잘 보여주고 있다(Pinto 등, 1985). 최초담수는 1980년 4월에 시작하여 1980년 10월에 완료되었으며, 이 기간 중 대부분의 변형이 발생하고 있다. 담수기간

동안 발생된 슬래브의 최대변형은 최대 정부침하량보다 5배정도로 크고, 이는 댐 높이의 약 0.48%이다.

3. 누수거동 분석

Sherard와 Cooke(1987)와 다수의 연구자들(방기성 등, 2006; Amaya와 Marulanda, 1985; Arrau 등, 1985; Hunter, 2003; Leps 등, 1985; Millet 등, 1985)은 CFRD에서 누수는 주로 담수하중에 의한 주변 이음부의 변형, 콘크리트 슬래브의 균열, 양안부에서 프린스와 접합되는 부분에서의 균열 또는 틈 등을 통해서 발생하나, 중심 코아형 록필댐과는 달리 파이핑이 발생할 수 있는 점토 코아존이 없기 때문에 누수가 제체의 안정성에 미치는 영향은 미미한 것으로 보고하고 있다. 이들은 누수가 발생하게 되면 경제적인 손실이 커지고, 심할 경우 댐 기능을 상실할 수도 있는 것으로 보고하고 있다. CFRD에서 최대 누수량은 표 1에 나타난 바와 같이, 최초 담수중에 발생하는 데, 이는 주로 담수하중에 기인한 슬래브의 변형에 의한 것으로 보고되고 있다(Amaya와 Marulanda, 1985; Arrau 등, 1985; Hunter, 2003; Leps 등, 1985; Millet 등, 1985; Sherard와 Cooke, 1987).

그림 9는 표 1에 나타난 각 댐에서의 장기 누수량과 댐 높이의 관계를 보여주고 있다. 여기서, 장기 누수량은 관측기간 동안의 평균 누수량을 의미한다. 국내에서 준공된 청송 상·하부댐, 밀양댐, 남강댐 등에서의 누수량은 외국사례와 유사하나, 외국사례와 비교할 때 그다지 큰 편이 아님을 알 수 있다. Sherard와 Cooke(1987)에 의하면 대부분의 경우에 다소 큰 저수지에서 수십 L/sec의 누수량은 무시할 수 있는 경제적인 손실인 것으로 보고하고 있다. 그림 9에서 Crtoty와 Winneke를 제외한 높이 122m 이하인 댐의 경우 장기 누수량은 10 L/sec이하의 결과를 보여주고 있으나, 댐 높이가 125m 이상인 경우는 45~160 L/sec로 급격하게 커지고 있다. Alto Anchicaya(Materon, 1985; 140m), Foz Do Areia (Pinto 등, 1985; 160m), Golillas(Amaya와 Marulana, 1985; 125m), New Exchequer(Leps 등, 1985; 145m), Shiroro(Bodtman와 Wyatt, 1985; 125m) 등 댐 높이가 125m 이상인 대표적인 이들 CFRD의 경우, 제체의 안정성과 관련된 이상 징후는 없었지만 최초 담수중 과다한 누수로 인해 주로 콘크리트 슬래브 주변이음부 등을 보수한 이력이 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, CFRD의 경우 댐 높이가 125m 커지게 되면 누수량이 커지는 경향이 있는 것으로 생각된다.

4. 결론

CFRD의 준공 후 정부침하와 슬래브의 변형 및 누수거동 분석 등을 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) Sherard와 Cooke(1987)과 Clements(1984) 등이 제안한 준공 후 정부침하 범위는 록필 재료의 강도가 매우 양호한 경우에는 적합하나, 보통에서 양호한 경우는 실제보다 과소평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.
- (2) 준공 후 정부침하는 최초 담수중에는 록필 재료의 강도보다는 댐 높이의 영향을 많이 받고, 최초 담수완료 후에는 댐 높이보다는 록필 재료의 영향을 크게 받는 경향이 있는 것으로 나타났다.
- (3) 최초 담수동안 콘크리트 슬래브에서 발생된 최대 변형률은 $(135\sim 500)\times 10^{-6}$ 이고, 콘크리트 슬래브 법선방향 변형의 크기는 댐 높이의 0.5%이하로 준공 후 정부침하와 유사하나, 최초 담수하중의 영향을 정부침하보다 크게 받는 것으로 나타났다.
- (4) CFRD에서의 최대 누수량은 슬래브의 변형에 기인하여 주로 최초 담수중에 발생하고, 댐 높이가 125m보다 커지게 되면 누수량이 급증하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2003), *댐 설계 기준*, 한국수자원학회.
2. 김용성, 서민우, 하익수, 신동훈 (2004), “CFRD(콘크리트 표면차수벽형 석괴댐)의 정적 및 동적 거동 해석”, *2004년도 대한토목학회 정기학술대회*, 지반, pp.2525-2530.
3. 박동순, 김형호, 정구열 (2004), “용담 CFRD 댐의 초기 담수 및 방류에 따른 성능 특성”, *2004년도 대한토목학회 정기학술대회*, 지반, pp.1422-1427.
4. 박동순, 정우성, 김형수 (2005), “콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 누수량 및 침투 패턴 연구”, *2005년도 대한토목학회 정기학술대회*, 지반, pp.4430-4433.
5. 박한규, 김용성, 임희대(2005), “콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 축조 중 거동 특성”, *2005년도 대한토목학회 정기학술대회*, 지반, pp.5485-5488.
6. 방기성, 송영철, 원명수, 김유성 (2006), “콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 특성”, *2005년도 대한토목학회 정기학술대회*, 지반, pp.199-202.
7. 윤덕중, 방기성, 송영철, 한영길 (2006), “청송 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 거동에 관한 분석”, *2006년도 대한토목학회 정기학술대회*, 수공, pp.339-403.
8. 이종욱, 임정열, 오병현, 임희대 (2003), “2003년도 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 초기담수 거동에 관한 연구”, *2003년도 대한토목학회 정기학술대회*, 지반, pp.3843-3848.
9. 하익수, 서민우, 김형수 (2006), “CFRD 차수벽지지존 강성이 콘크리트차수벽 거동에 미치는 영향”, *대한토목학회 논문집*, 제26권, 제 5-C호, pp.351-358.
10. Amaya, F. and Marulanda, A. (1985), “Golilla dam-design, construction and performance”, *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp. 98-120.
11. Arrau, L., Ibarra, I. and Noguera, G. (1985), “Performance of COGOTI dam under seismic loading”, *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.1-14.
12. Bodtman, W.L. and Wyatt, J.D. (1985), “Design and performance of Shiroro rockfill dam”, *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.231-251.
13. Casinader and Watt(1985), “Concrete face rockfill dams of the Winneke project”, *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.140-162.
14. Clements,R.P.(1984), “Post-construction deformation of rockfill dams”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.7, pp.821-840.
15. Cooke, J.B. and Sherard, J.L.(1985), “Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance”, *Proc. Symposium sponsored by Geotechnical Engineering Division of ASCE*, ASCE, New York, N.Y.
16. Cooke, J.B. and Sherard, J.L.(1987), “Concrete-Face Rockfill Dam: II”, *Design. Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No.10, pp.1113-1132.
17. Fitzpatrick, M.D.(1986), “Discussion of Progress in Rockfill Dams”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.2, pp.221-223.
18. Hacelas, J.E., Ramirez, C.A., and Regalado, G. (1987), “Discussion of Design of Concrete-Faced Rockfill Dams”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.10, pp.1182-1187.
19. Hunter, G.J. (2003) *The Pre- and Post-Failure Deformation Behavior of Soil Slopes*, Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Australia.
20. Khalid, S., Singh, B., Nayak, G.C., and Jain, O.P. (1990) “Non-linear analysis of concrete face rockfill dam”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116, No.5, pp.822-837.
21. Leps, T.M., Cashatt, C.A., and Janopaul, R.N. (1985) “NEW EXCHEQUER DAM, CALIFORNIA”, *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Per-*

- formance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.15-26.
22. Materon, B. (1985) "Alto Anchicaya dam: ten years performance", *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.73-87.
 23. Millet, J.C., Louis, F., and Robert, F. (1985) "DESIGN, CONSTRUCTION & PERFORMANCE OF FADES DAM", *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.27-39.
 24. Park, H.G., Kim, Y.S., Seo, M.W., and Lim, H.D. (2005) "Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period Case of Daegok Dam-", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.7, pp.91-105.
 25. Pinto, N.L. de S., Marques Filho, P.L., and Maurer, E. (1985) "Foz do Areia dam-design, construction, and behavior", *Proc., Symp. on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, edited by J.B. Cooke and J.L. Sherard, eds., ASCE, New York, pp.173-191.
 26. Sherard, J.L. and Cooke, J.B. (1987) "Concrete-Face Rockfill Dam: I", Assessment. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.10, pp.1096-1112.
 27. Uddin, N. and Gazetas, G. (1995) "Dynamic response of concrete-faced rockfill dams to strong seismic excitation", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.2, pp.185-197.
 38. Xing, H.-F., Gong X.-Y., Zhou X.-G., and Fu H.-F. (2006) "Construction of concrete-faced rockfill dams with weak rocks", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.6, pp.778-785.

(논문접수일 2009. 5. 1, 심사완료일 2009. 6. 22)