

증고에 따른 기존 CFRD 댐체의 변형거동

Deformation Behavior of Existing Concrete-Faced Rockfill Dam due to Raising

신 동 훈[†] · 조 성 은¹⁾ · 전 제 성²⁾ · 이 종 욱³⁾

Shin, Donghoon · Cho, Sungeun · Jeon, Jesung · Lee, Jongwook

ABSTRACT : In this study, deformation behavior of existing concrete face rockfill dam, which is raised to a certain height to enhance storage capacity or to improve hydraulic and hydrologic stability, is examined using numerical analysis method. The results obtained from FEM analysis show a possibility that additional fill at downstream slope of existing CFRD dam body may lead undesirable deformations and stresses in existing dam body, especially in face concrete, such as settlements in upper part and bulging in lower part, excessive bending moments, and eventually tensile cracks. Therefore, in designing multi-staged raising construction of CFRD, it is essential to consider deformations and stresses to be developed within and between existing dam body and added parts due to additional fill, and to prepare a proper measure to prevent abnormal deformations and stresses in the dam body including added parts.

Keywords : Deformation Behavior, CFRD, Raising, Existing Dam, FEM

요 지 : 본 논문에서는 이미 사용 중인 콘크리트표면차수벽형석괴댐(이하 CFRD)에 대하여 저수용량 확대 또는 수리·수문학적 안정성을 증대할 목적 등으로 하류측에 추가 축조하여 댐의 높이를 높이는 경우에 대하여 추가 축조과정에 기존 댐체 및 추가 축조 부분의 변형거동을 유한요소해석법으로 검토하였다. 해석결과 기존 댐체의 하류측에 덧붙여 추가 축조할 경우 기존 댐체 전반에 걸쳐 추가 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 상류사면은 침하(댐마루측)와 융기(댐체 하부측)가 동시에 발생하며, 이 경우 CFRD의 특성상 상류사면에 시공되어 있는 콘크리트 차수벽에는 휨모멘트에 의한 인장균열이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 기존 CFRD에 증고를 하는 경우에는 시공전에 반드시 기존 차수벽의 변형량과 휨모멘트 발생량 등을 검토하고 경우에 따라서는 적절한 보완대책의 수립이 필요한 것으로 나타났다.

주요어 : 변형거동, CFRD, 증고, 기존 댐, FEM

1. 서 론

우리나라는 UN이 물 부족국가로 분류하고 있어 장기적으로 수자원확보를 위한 대책이 필요한 실정이다. 수자원을 확보하는 방법으로 댐 건설이 일반적인 방법이다. 그러나 신규 댐의 건설은 댐 개발 적지가 감소하고 환경변화를 우려하는 환경단체 및 지역 주민들의 반대가 심하여 실질적으로는 불가능한 실정이다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로서 기존 댐의 재개발 방안이 적극적으로 검토되고 있다. 한편, 우리나라에는 약 18,000개의 댐 또는 저수지가 있으며, 그 중 56%가 건설된지 60년이 경과한 노후된 댐들로서 국가적인 차원에서의 안전관리가 시급한 실정이다(국립방재교육연구원, 2006). 또한 최근에는 기상 이변에 의하여 집중호우가 증가하는 추세에 있어 수리·수

문학적인 안정성에 문제가 있는 것으로 나타나고 있어 기존 댐의 안정성을 확보하기 위한 대책이 필요하다.

기존 댐에 대하여 구조적·수리수문학적 안정성을 증대시키는 방안의 하나로 기존 댐을 증고하는 방법이 국내외를 막론하고 널리 이용되고 있다(한국수자원공사, 2005; 장옥성 등, 2004; Engineering News-Record, 2006) 이러한 형태의 댐 재개발은 신규 댐 건설에 비하여 많은 비용을 절감할 수 있고, 공사기간 동안에도 안정적인 용수공급을 할 수 있는 장점이 있다. 실제로 재개발한 댐의 저수용량 1톤당 건설단가는 신규댐의 20~80% 수준으로 알려져 있다(김홍균, 2004), 한편, 기존 댐을 재개발 하기 위한 것은 아니나 경제적 또는 사회·정치적 이유로 수년간의 시차를 두고 기존 댐체에 덧붙여서 추가 축조하는 경우도 있다(한국수자원공사, 2005; Wu 등, 2000).

† 정회원, 한국수자원공사 댐기술연구소 지방구조시험팀장·공학박사(E-mail : shindh@kwater.or.kr)

1) 비회원, 한국수자원공사 댐기술연구소 선임연구원·공학박사

2) 정회원, 한국수자원공사 댐기술연구소 책임연구원·공학박사

3) 비회원, 한국수자원공사 댐기술연구소 선임연구원

이와 같이 기존 댐체에 덧붙여 추가 축조하는 경우 추가 축조하중에 의하여 기존 댐체에는 침하나 수평변위 등의 추가변형이 발생하고, 축조 형태나 순서 등에 따라, 담수시 물하중 등에 의하여 기존 댐체 내부에 응력 및 변형의 재분배가 발생하게 된다. 이 경우 설계자, 시공자 및 관리자들은 과연 추가 축조가 기존 댐체에는 어떻게 얼마큼 영향을 미칠지에 대한 예측과 확인이 필요하나 이러한 부분에 대해서는 대부분 검토가 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 기존 콘크리트표면차수벽형석괴댐(이하 CFRD)의 하류측에 추가 축조하여 댐의 높이를 높이는 경우에 대하여 추가 축조하중에 의한 기존 댐체의 내·외부, 기존 댐체와 추가 축조부의 경계면 등에서의 변형거동을 유한요소해석을 통하여 검토하고자 한다.

2. 해석대상 댐의 시공순서

해석대상 댐은 그림 1과 같이 콘크리트 차수벽(Face Concrete)을 지지하는 층은 Bedding ZONE 외에 Transition ZONE,

Graded Rockfill ZONE 및 Rockfill ZONE으로 구성된다. 시공은 기존댐체(0)에 3단계로 나뉘어 순차적(1⇒2⇒3)으로 추가 축조하는 순서로 이루어졌다. 기존 댐체에는 3단계에 걸친 추가 축조에 의하여 추가적인 침하 및 수평변형이 발생하였다. 한편, 시공시 각 ZONE별 포설두께, 다짐횟수 및 다짐장비는 표 1과 같다.

3. 축조재료의 강도 및 응력-변형 특성

3.1 축조재료의 기능

CFRD의 축조재료는 그림 2에 나타난 바와 같이 각 ZONE별로 입도분포가 다르다. 이들 축조재료는 점착성이 없는 조립의 입상재료로서 점성을 갖는 일반 토질재료와는 상이한 강도 및 변형 특성을 갖는다. ZONE-1 재료는 Bedding ZONE재료로서 최대입경은 75mm로서 차수벽을 균등하게 균등하고 견고하게 지지할 수 있고, 차수벽에 균열이 발생하여 누수가 발생할 경우에도 침투수를 제어하

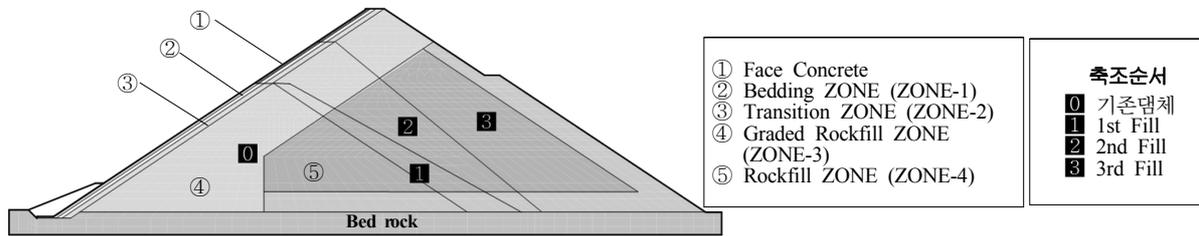


그림 1. 해석대상 댐 단면 및 시공순서

표 1. 각 ZONE별 다짐시공 방법

ZONE	포설두께(m)	다짐횟수(회)	다짐장비	비고
ZONE-1	0.4	6 (동절기 8)	10톤 진동롤러	
ZONE-2	0.4	6 (동절기 8)	10톤 진동롤러	
ZONE-3	1.0	4 (동절기 6)	10톤 진동롤러	삼수 : 암축조량의 20%
ZONE-4	1.6	4 (동절기 6)	10톤 진동롤러	

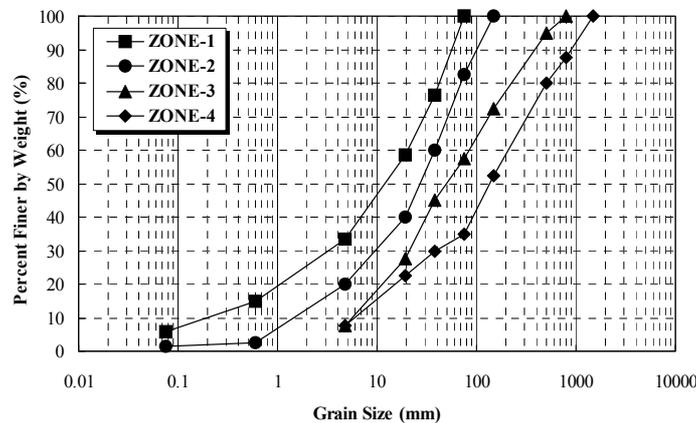


그림 2. 각 ZONE별 입도분포 곡선(중앙입도)

여 다량의 누수가 발생되지 않도록 한다. ZONE-2 재료는 Transition ZONE 재료로서 최대입경은 150mm이며, 차수벽에 균열이 발생하여 누수가 발생할 경우의 Filter역할과 Bedding ZONE과 Graded Rockfill ZONE사이의 응력완충 지역으로서의 역할을 한다. ZONE-3재료는 차수벽을 통해 전달되는 물하중에 저항할 뿐만 아니라 그 물하중을 기초 지반에 전달하는 기능을 하며, 최대입경은 800mm이다. ZONE-4재료는 댐축의 하류부에 배치되어 ZONE-3재료와 함께 상류측의 물하중에 저항력을 제공한다. 그러나 수압의 영향을 직접적으로 받지 않으며, 상대적으로 압축성이 큰 재료를 사용할 수도 있고, 최대입경은 1,500mm이다.

차수벽은 댐축조가 끝난 후에 시공되며, 두께는 $t=0.3+0.003H$ (H =댐높이, m)이며, 설계기준강도는 210kgf/cm^2 , 철근량은 약 0.4~0.5%로 단면의 중앙부에 설치되었다.

3.2 강도특성

축조재료의 전단강도특성은 대형삼축시험을 수행하여 구하였다. 그림 3은 시험에 사용한 대형삼축시험기로서 직경 30cm, 높이 62cm의 원주형 공시체를 사용하였다. 이때 각 ZONE별 시험재료의 최대입경은 50.8mm(공시체 직경의 약 1/6)로 하여 그림 2의 원래의 입도분포를 작은입경으로 평행이동한 상사입도로 조제된 시료에 대하여 공시체를 제작하였다. 각 ZONE별 재료에 대하여 제작된 공시체는 2, 4 및 6kgf/cm^2 의 구속압 하에서 압밀배수(CD) 삼축시험을 실시한 후 Mohr-Coulomb의 파괴기준에 따른 강도정수(내부마찰각과 점착력)를 산정하였다. 시험재료의

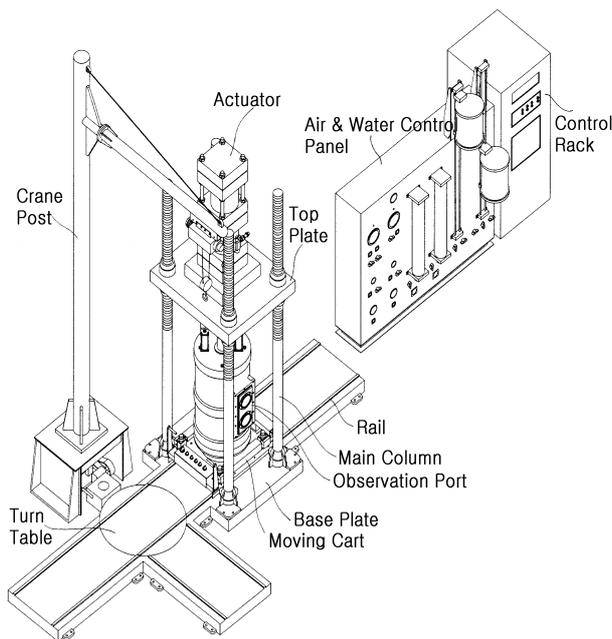


그림 3. 시험에 사용한 대형삼축시험기

강도정수는 표 2와 같으며 내부마찰각은 $38.4\sim 40.2$ 도, 점착력은 $0.44\sim 1.654\text{kgf/cm}^2$ 이다. 한편, 댐축조재료와 같은 조립재료의 경우에는 점성토와 같은 세립재료와 달리 구속압이 증가함에 따라서 내부마찰각이 감소하는 구속압 의존성을 나타내며, 본 연구에 사용된 재료의 경우에도 그림 4에 나타난 바와 같이 유사한 경향을 나타내었다(한국수자원공사, 2003).

3.3 응력-변형 특성

댐 축조재료의 응력-변형특성을 나타내는 구성모델은 일반적으로 Kondner(1963)에 의해 최초로 제안되었고, Duncan과 Chang(1970), Janbu(1963) 등에 의하여 수정된 쌍곡선 모델(Hyperbolic Model)이 사용되고 있다. 쌍곡선모델은 비선형탄성모델로서 응력-변형을 관계로 식 (1)과 같은 쌍곡선 식으로 나타낸다. 식 (1)에서 a, b 등은 삼축시험시험결과를 근사(fitting)시키는 방법으로 구하게 되는데 이에 대한 상세한 방법은 Duncan 등(1980)의 문헌을 참조하기 바란다. 한편, Duncan과 Chang이 제안한 방법에 따르면 궁극적으로는 응력수준에 따라서 변화되는 즉, 임의의 응력수준에서의 접선탄성계수와 포아송비를 각각 식 (2)와 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_a}{a + b \cdot \epsilon_a} \quad (1)$$

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\phi + 2\sigma_3 \cdot \sin\phi} \right]^2 \cdot K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

표 2. 대형삼축시험으로 구한 축조재료의 강도정수

	내부마찰각(도)	점착력(kgf/cm ²)
ZONE-1	38.4	1.654
ZONE-2	40.2	1.007
ZONE-3	39.7	0.52
ZONE-4	39.7	0.44

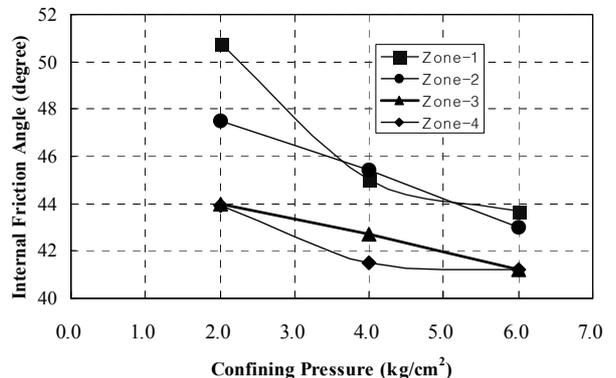


그림 4. 축조재료의 구속압 의존성 평가 결과

$$\nu_i = \frac{G - F \cdot \log\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)}{\left\{ 1 - \frac{d \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}{\left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos\phi + 2\sigma_3 \cdot \sin\phi} \right] \cdot K \cdot p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n} \right\}^2} \quad (3)$$

여기서, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 는 삼축시험시의 축차응력, ϵ_a 는 축변형률, a와 b는 삼축시험으로부터 결정되는 파라미터로서 각각 초기접선탄성계수 E_i 와 극한주응력차 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 의 역수, R_f 는 극한주응력차 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 와 파괴시의 주응력차 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 의 비, ϕ 와 c 는 Mohr-Coulomb의 강도정수, K 와 n 은 각각 변형계수와 변형계수 지수, p_a 는 대기압, G , F 및 d 는 각각 포아송비의 구속압 의존성을 나타내는 실험정수들이다.

표 3은 본 연구에 사용된 각 ZONE별 재료의 쌍곡선모델 입력정수를 나타낸 것으로서 각 입력정수의 산정과정은 참고문헌(한국수자원공사, 2003)에 상세히 수록되어 있다.

4. 변형거동 해석

4.1 수치해석방법

단계별 분할 추가축조에 따른 기존 댐체의 변형거동을 검

토하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SIGMA/W ver. 5.0(Geoslope, 2003)를 사용하였으며, 해석단면은 그림 5와 같고, 요소의 수는 1893개, 절점의 수는 1867개이다. 경계조건 설정시 일반적으로 댐체는 단단한 기초암반 위에 놓이게 된다. 따라서 단면 최하단부는 기초암반으로서 변위를 허용하지 않으므로 x-y방향을 구속하였고, 양단은 x-방향만 구속하였다. 해석은 시공단계를 고려하기 위하여 증분해석방법(Incremental Analysis Method)을 사용하였으며, 기존 댐체의 경우에도 증분방법으로 축조과정을 재현하였다. 추가축조(증고)에 따른 영향을 검토하기 위해서는 기존 댐에 기 발생한 침하량 및 수평변위량 등을 0으로 초기화하여 추가 축조하중에 따른 증분을 검토하는 것으로 하였다. 이 과정에서 댐체의 변형량은 축조과정에서의 각 요소에서의 응력수준의 변화량이 반영되며, SIGMA/W에서는 식 (2)와 (3)을 사용하여 계산되어진다.

주요 검토 항목으로는 3단계의 추가 축조시 기존댐체의 상류사면의 연직변위(침하량) 및 수평변위량, 댐체 중앙부분에서의 연직변위 및 수평변위량을 검토하였다. 이밖에 추가축조에 따른 기존댐체 및 추가 축조 부분의 응력 및 변위분포 양상을 검토하였다. 본 해석의 목적은 제체의 거동을 분석하는 것이 주 목적이며 해석의 편의를 위해 차수벽은 차수벽지지층과 동일한 요소로 모델링하였다.

표 3. 축조재료의 쌍곡선모델 입력정수

파라메타 ZONE	$\gamma_d(\text{tf/m}^3)$	$\phi(\text{도})$	$E_i(\text{tf/m}^2)$	K	n	R_f	K_b	m	ν	$c(\text{kgf/cm}^2)$
Bedding	2.24	38.4	13,700	1,385	-0.10	0.76	1,246	-0.53	0.40	1.654
Transition	2.18	40.2	10,870	881	0.10	0.79	598	-0.29	0.38	1.007
Graded rockfill	2.15	39.7	7,140	368	0.34	0.75	187	0.27	0.30	0.521
Rockfill	2.15	39.7	7,460	424	0.29	0.73	210	0.21	0.29	0.437
Concrete face			2.63×10^7						0.30	

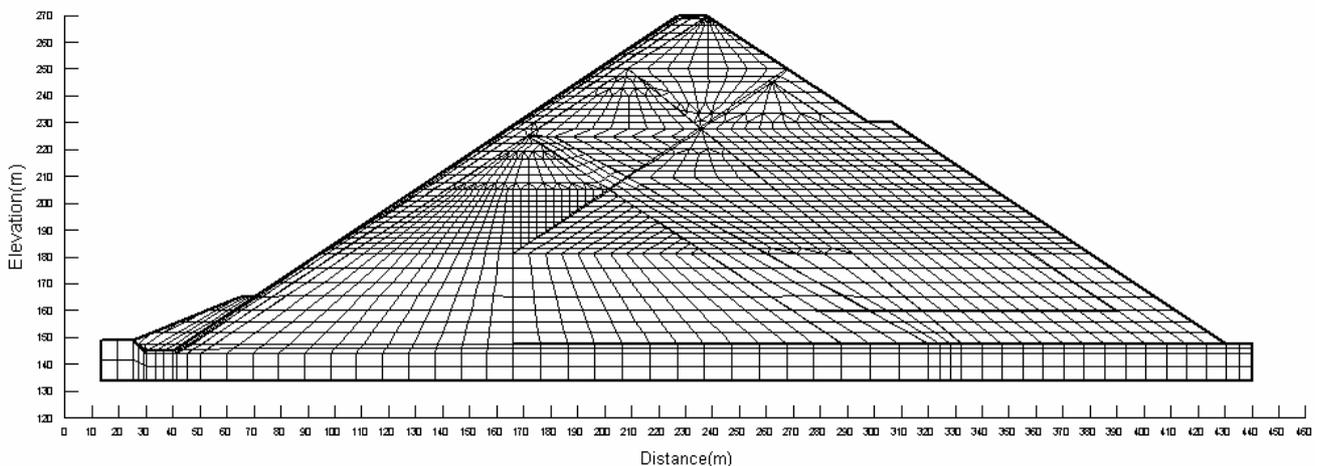


그림 5. 해석에 사용된 유한요소망

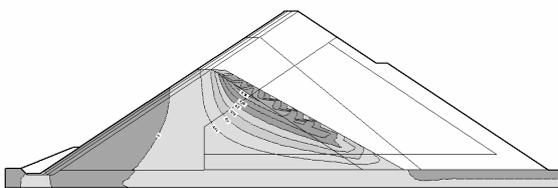
5. 해석결과 및 고찰

5.1 침하량 증분 및 수평변위량 증분

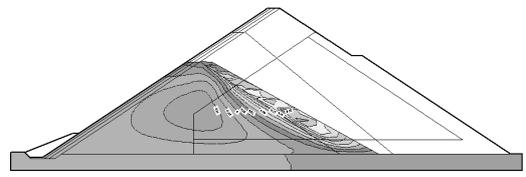
그림 6~8은 증분방법을 사용하여 기존 댐체 부분의 축조과정을 재현한 후 발생된 침하량 및 수평변위량 등을 0으로 초기화 한 후 3단계에 걸친 추가 축조과정에 발생하는 연직변위량(침하량) 증분 및 수평변위량 증분 분포를 나타낸 것이다. 한편, 본 연구에서는 추가 축조에 의하여 기존댐체 및 추가 축조부분에서의 변형 및 응력의 발생 패턴을 살펴보는 것에 중점을 두고 있으므로 침하량 및 응력 등에 대한 정량적인 분석은 제외하였다. 다만, 본 해석의 최

대침하량은 약 2.7m로서 Khalid 등(1990)의 연구와 유사하게 $0.65H$ (여기서 H =댐높이)에서 발생하는 것으로 나타났다.

결과그림에서 보는 바와 같이 추가 축조에 의하여 주로 기존댐체 하류측의 침하량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 수평방향으로는 상류측으로 변형량이 증가하여 기존댐체 상류사면의 아래부분에 배부름 현상이 발생함을 알 수 있다. 3단계 추가 축조시에는 수평변위 증분량 등변위도(그림 8의 b)에 나타난 바와 같이 2단계와 3단계 경계면에서 침하와 수평변위가 불연속적으로 발생하거나 억제되는 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 변위구속 현상으로 인하여 축조경계면에는 응력 분포가 불균등해지는 것으로 보인다(그림 9 참조).

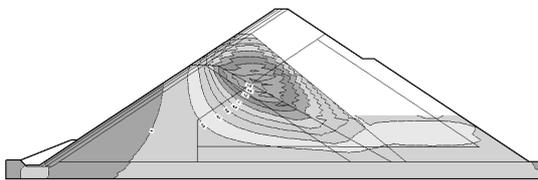


(a) 침하량 증분

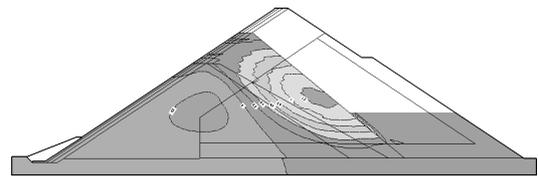


(b) 수평변위량 증분

그림 6. 1단계 후 축조시 증분변위 분포

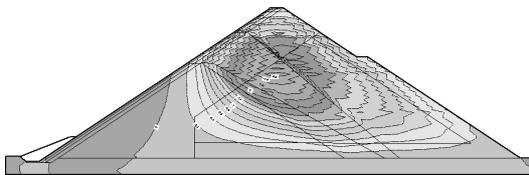


(a) 침하량 증분

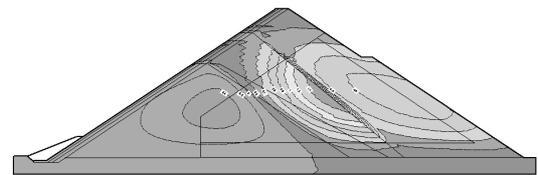


(b) 수평변위량 증분

그림 7. 2단계 추가 축조시 증분변위 분포

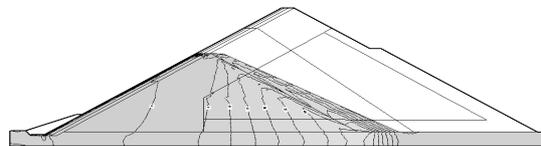


(a) 침하량 증분

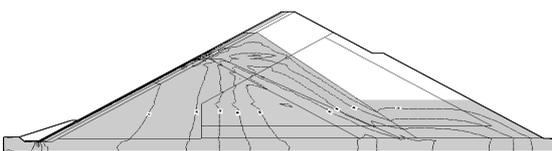


(b) 수평변위량 증분

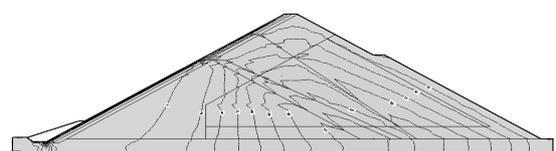
그림 8. 3단계 추가 축조시 증분변위 분포



(a) 1단계 축조시



(b) 2단계 축조시



(c) 3단계 축조시

그림 9. 추가 축조에 의한 연직응력 증분 분포

5.2 연직응력 및 수평응력 증분

그림 9는 세 단계에 걸친 추가축조 과정에 발생하는 연직응력 증분 분포를 나타낸 것으로서 증분응력은 거의 연직방향으로 전달되고, 시공경계면 부근에는 응력전이가 발생함을 알 수 있다. 이는 축조 경계면에서의 수평방향 변위의 발생 모양(사면방향으로 누운 삼은 계란형)과 구속효과에 기인한 것으로 볼 수 있다. 또한, 이러한 거동은 담수시 발생하는 수하중에 의해 댐체에 유발되는 연직응력 증분 분포가 댐체 사면에 거의 직각방향으로 작용하는 것과 다른 것이다.

5.3 기존댐체 상류사면 및 중앙 부근에서의 변형량 증분

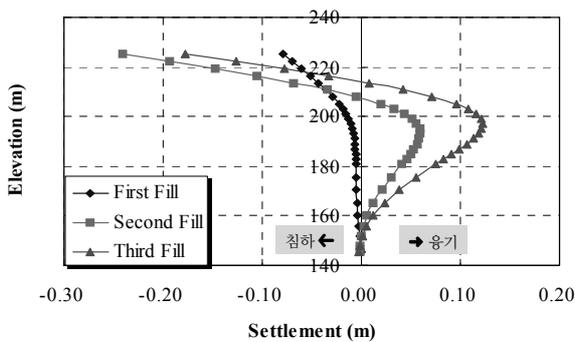
그림 10은 추가축조에 의해 기존댐체의 상류사면에 발생하는 침하량과 수평변위량 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 1단계 추가축조시에는 상류사면이 전반적으로 미소하게 침하하고, 하류측으로 수평변위가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 2, 3단계 축조가 이루어짐에 따라서 상류사면의 최상단부를 제외하고 대부분이 융기 및 상류측으로 변형이 발생하는 것으로 나타났다.

이러한 거동은 기존댐체의 상류사면에 차수벽이 설치되

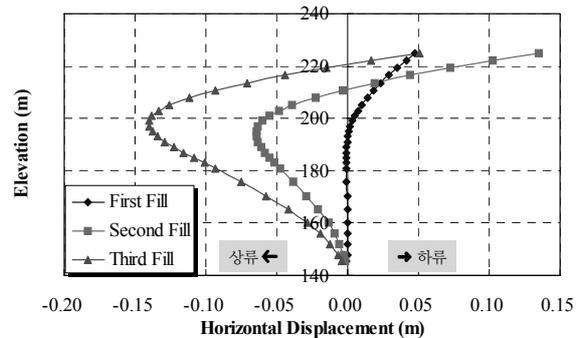
어 있는 경우 차수벽의 상단부는 변위방향이 급격하게 변동(즉, (+)에서 (-)로, 또는 그 반대로)하여 차수벽의 표면에 휨모멘트에 의한 휨인장응력이 발생하여 차수벽에 인장균열이 발생할 수도 있음을 나타낸다. 이는 CFRD의 특성상 차수벽에 균열이 발생할 경우에는 저수지 물이 차수벽을 통과하여 댐체의 내부로 침투되어 댐체의 안정성을 위협할 수 있음을 고려할 때 하류측에 덧대어 증고하는 경우 차수벽의 변형량과 휨모멘트 발생량 등을 검토하여 필요한 대책을 수립하여야 함을 시사한다.

그림 11은 추가축조에 의하여 기존댐체 중앙 부근에서의 침하량과 수평변위량 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 추가축조에 의하여 침하량이 크게 증가하고, 상류측으로 수평변위량도 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 주목할 것은 상류측으로의 수평방향 최대변위 발생 높이가 크게 위쪽으로 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 거동은 그림 10에서 확인한 2, 3단계 추가 축조에 의해 기존댐체의 상류사면이 저수지 측으로 블록해지는 현상과 일치하는 것으로 볼 수 있다.

한편, 수치해석을 통해 파악된 추가축조에 의한 기존댐체의 이러한 변형거동은 실제 댐에서도 매우 유사하게 나타나는 것으로 보고된 바 있다(Wu 등, 2000).

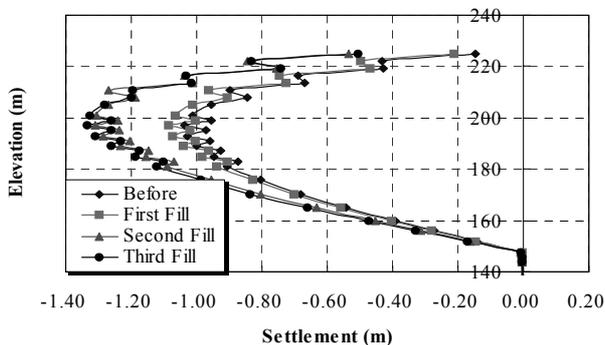


(a) 침하량

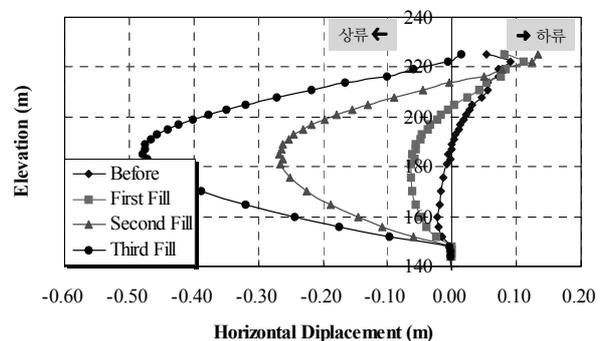


(b) 수평변형량

그림 10. 기존댐체의 상류사면에 유발된 변형



(a) 침하량



(b) 수평변형량

그림 11. 기존댐체 중앙부분에 유발된 변형

6. 결 론

본 논문에서는 이미 사용 중인 콘크리트표면차수벽형식 괴담(이하 CFRD)에 대하여 저수용량 확대 또는 수리·수문학적 안정성을 증대할 목적 등으로 하류측에 추가 축조하여 댐의 높이를 높이는 경우에 대하여 추가 축조하중에 의한 기존 댐체의 내·외부, 기존 댐체와 추가 축조부의 경계면 등에서의 변형거동을 유한요소해석법으로 검토하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존 댐체의 하류측에 덧붙여 추가 축조할 경우 기존 댐체와의 경계면에는 기존 댐체와 동일한 재료로 축조한다고 하여도 응력과 변위의 전이가 매우 급격하고 크게 발생하며, 특히 수평변위가 구속되는 현상이 발생하는데 이는 축조 방향이 수평방향으로 이루어지기 때문이다.
- (2) 기존 댐체의 하류측에 덧붙여 추가 축조할 경우 기존 댐체의 상류사면은 침하(댐마루측)와 융기(댐체 하부측)가 동시에 발생하며, CFRD의 특성상 상류사면에 시공되어 있는 콘크리트 차수벽에는 휨모멘트에 의한 인장균열이 발생할 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) CFRD의 특성상 차수벽에 균열이 발생할 경우에는 저수지 물이 차수벽을 통과하여 댐체의 내부로 침투되어 댐체의 안정성을 위협할 수 있음을 고려할 때 하류측에 덧붙여 증고할 때는 기존 차수벽의 변형량과 휨모멘트 발생량 등을 검토하고 필요에 따라서는 적절한 보완대책을 수립하여야 하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 국립방재교육연구원(2006), *저수지 안전관리 및 재해예방 방안* 국립방재교육연구원. pp. 7~19.
2. 김흥균(2004), *댐 재개발로 물 부족 해결한다*, 환경일보, 2004년 7월 8일.
3. 장옥성, 이종규(2004), “비균질 재료로 승상(嵩上)한 흙댐의 변형특성”, *한국지반공학회논문집*, 제20권 8호, pp. 1~14.
4. 한국수자원공사(2003), *필댐 수치해석을 위한 댐재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구(I)*, 수자원연구원 KIWE-DRC-04-4, 한국수자원공사, pp. 63~90.
5. 한국수자원공사(2005), *평화의댐 공사지*, 한국수자원공사.
6. Duncan, J.M., Byren, P. and Mabry, P.(1980), *Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses*, University of California, Berkeley, Report No. UCB/GT/80-01, August, 1980.
7. Duncan, J.M. and Chang, C.Y.(1970), “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM5, September, 1970, pp. 1629~1653.
8. <http://enr.construction.com/news/powerIndus/archives/030804.asp>, *Engineering News-Record.com*.
9. Janbu, M.(1963), “Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests”, *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wissbaden, Germany, Vol. 1, pp. 19~25.
10. Khalid, S., Singh, B., Nayak, G.C. and Jain, O.P.(1990), “Nonlinear Analysis of Concrete Face Rockfill Dam”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 5, May, 1990, pp. 822~837.
11. Kondner, R.L.(1963), “Hyperbolic Stress-Strain Response : Soils” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 89, No. SM1, February, 1963, pp. 115.
12. Wu, G.Y., Freitas, M.S. Jr., Araya, J.A.M, Huang, Z.Y and Mori, R.T.(2000), “Tianshenqiao 2 CFRD-Monitoring & Performance-Lessons & New Trends for Future CFRDs(China)”, *Proc., International Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams*, 18 Sept., 2000, Beijing, China, pp. 573~585.
13. Geo-slope, *SIGMA/W Version 5, User's Guide*, Geo-slope Inc.

(접수일: 2007. 9. 27 심사일: 2007. 10. 10 심사완료일: 2007. 11. 12)