

비균질 재료로 승상(嵩上)한 흙 댐의 변형 특성

Deformation Characteristics of Earth Dam Raised by Non-Homogeneous Fill Materials

장 옥 성¹ Chang, Ock-Sung

이 종 규² Lee, Chong-Kyu

Abstract

In this study finite element analysis using hyperbolic model was performed to predict the characteristics of stress-strain behaviour on concrete face earth dam (CFED : a tentative name) raised with coarse-grained materials corresponding to the face slab bedding zone of concrete face rockfill dam (CFRD). The results of finite element analysis were compared with field monitoring data, and the comparison showed a good agreement. And, the analysis results including locus of maximum displacement, maximum stress, stress concentration, and irregular load transfer would be used to devise rational field monitoring schemes for construction management and quality control during construction of CFED.

요 지

기존 흙댐의 저수 용량 확대를 위하여 댐의 높이를 승상(嵩上)하는 경우 기존 댐체의 축조 재료와 동일한 재료가 아닌 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)의 차수벽 지지층에 대응하는 조립의 재료로 추가 성토를 수행하였다. 이를 가칭 콘크리트 표면 차수벽형 흙댐(CFED)이라 하고, 이런 형식의 댐에 대한 응력 및 변형 특성을 예측하기 위하여 Hyperbolic 모델을 이용한 유한요소 해석을 수행하였다. 수치 해석에 의한 예측치와 현장 계측치를 비교·분석한 결과 비교적 서로 잘 일치하는 것으로 나타나 댐체의 응력-변형 거동에 대한 유한요소 해석 결과는 신뢰성이 매우 높은 것으로 평가되었다. 따라서 해석 결과 나타난 최대 변위와 응력의 발생 지점 및 응력 집중 현상이 발생되거나 하중전이가 불규칙하게 나타나는 부분 등을 중심으로 댐체 시공시 정밀 현장 계측 관리를 수행한다면 합리적이고 효과적인 시공 관리 및 품질 관리가 될 것으로 기대된다.

Keywords : Coarse-grained materials, Concrete face earth dam(CFED), Concrete face rockfill dam(CFRD), Stress-strain behaviour

1. 서 론

최근 산업 발달 및 인구 증가에 따른 물 수요의 급증으로 충분한 수자원 확보가 요구되고 있으며, 이를 위해 보다 큰 규모의 신설 댐을 건설할 수도 있을 것이다. 그러나 이 경우 경제성뿐만 아니라 댐 건설을 위한 열

악한 입지 조건 등을 고려하여 중·소규모의 댐들에 대해서는 기존 댐체를 승상(嵩上)함으로써 저수 용량을 확대하는 방안이 경제적이고, 효율적일 수도 있을 것이다.

연구 대상 댐은 경기도 양주군에 위치한 00댐으로 1966년에 계획하여 1968년에 완공된 높이 19m의 흙댐

1 정회원, 한국해외기술공사 지반공학부 전무 (Member, Managing Director, Geotechnical Engrg. Dept. of KCI, oschang@kcieng.com)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 명예교수 (Member, Emeritus Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Dankook Univ.)

이다. 상수원 확보가 주 목적인 본 댐은 확장 계획 당시 (1994년)를 기준으로 26년이 경과된 노후화된 댐으로서 특별한 침하 현상이나 댐 사면의 활동 파괴에 대한 흔적은 없었으나 하루 사면 댐체에 누수 흔적이 있었다. 댐의 구조적 안정성 확보와 저수 용량 확대를 위하여 1994년에 댐의 높이를 승상하는 방안을 적용하여 설계하고, 1999년 10월에 완공되었다. 댐의 확장 규모는 기존 댐의 높이보다 6m를 올린 높이 25m(1m 높이의 parapet wall을 포함한 댐 높이는 26m), 길이 195m, 유역 면적 3.93km^2 로서 총 저수량은 약 $87\text{만}\text{m}^3$ 정도이다.

기존 댐이 흙 댐인 점을 고려하여 새로운 댐 설계를 위하여 점토 코어의 시공 현황을 파악하고자 현장 시추 조사와 시험굴 조사를 수행하였으나, 점토 코어는 시공되어있지 않은 것으로 확인되었다. 새로운 댐의 형식은 기존 댐의 상태를 고려하여 중심 코어형이 아닌 경사 코어형으로 계획하고자 기존 댐의 주변에서 댐 설계 기준에 적합한 코어 재료에 대한 조사를 수행하였으나, 경제성 있는 코어 재료의 확보가 불가능하였다. 따라서 새로운 댐의 형식은 기존 흙 댐의 상류부 일부분을 절취하고 그 위에 콘크리트 표면 차수벽형 석괴 댐(concrete face rockfill dam : 이하 CFRD)의 차수벽 지지층(face slab bedding zone)에 대응하는 조립의 재료를 성토하고, 그 위에 콘크리트 차수벽을 설치하는 변형된 콘크리트 표면 차수벽형 석괴 댐의 형식 즉 가칭 콘크리트 표면 차수벽형 흙댐(concrete face earth dam : 이하 CFED)으로 계획하였다(그림 1).

이와 같은 댐 형식의 경우 시공 후 자중에 의한 응력 및 변형 특성뿐만 아니라 담수시 물 하중에 의한 거동

특성은 매우 복잡하게 나타날 것으로 판단되어 응력과 변형에 대한 거동 특성을 수치 해석을 통하여 예측하고, 실측치와 비교·분석하여 가칭 CFED의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 현장 조사 및 시험

기존 댐체 및 기초 지반의 지반 공학적 특성을 파악하기 위하여 시추 조사, 시험굴 조사, 재료원 및 골재원 조사를 수행하였으며, 표준 관입 시험, 현장 수압 및 투수 시험과 실내 물리적·역학적 특성 시험을 수행하였다.

시추 조사 및 시험굴 조사 결과 점토 코어는 확인되지 않았으며, 기존 댐체의 축조 재료는 실트 섞인 세립 내지 조립의 모래(SM)로서, 200번 체 통과량은 20~30% 정도, 균등 계수(C_u)는 28~30정도 이고 비중(G_s)은 2.67~2.68이다.

댐체의 역학적 특성을 파악하기 위하여 시험굴 조사 시 채취한 불교란 시료(block sample)에 대하여 직접 전단시험과 변수위 투수시험을 수행하였으며, 교란시료에 대해서는 실내 다짐시험(D 다짐)을 실시하고, 90%와 95% 다짐에 대응하는 전단 시료와 투수시험 시료를 성형하여 각각 직접 전단시험과 실내 투수시험을 실시하였으며, 시험 결과는 표 1과 같다. 또한 시추 조사시 수행한 현장 투수시험 결과 투수 계수(k)는 $9.573 \times 10^{-5} \sim 5.268 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 측정 되었다.

그리고 시추 조사 결과 댐의 기초 지반은 경기 편마암 복합체(Gyeonggi gneiss complex)에 해당하는 호상 편마암(banded gneiss)으로서 RQD는 70~100%의 범위

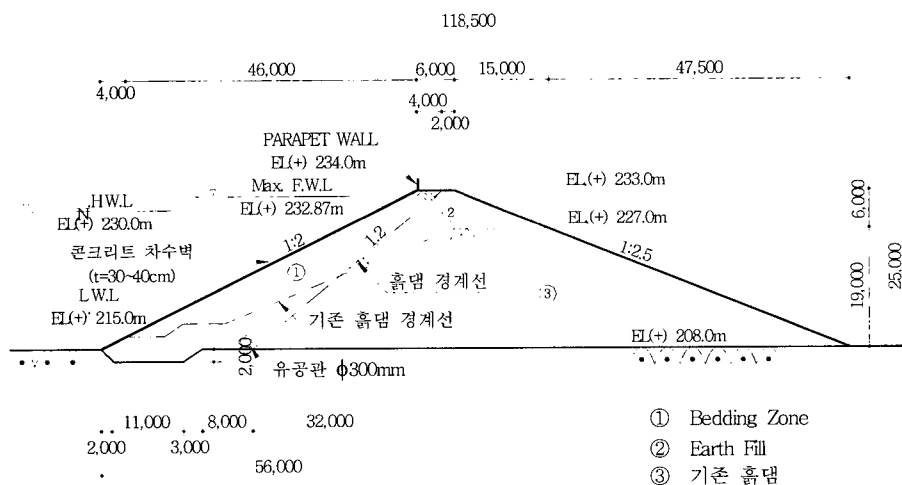


그림 1. 댐의 단면도

표 1. 직접 전단 시험 및 투수 시험 결과

구분	w _n (%)	OMC (%)	γ _d max (t/m ³)	90% of γ _d max		95% of γ _d max		투수계수(cm/sec)	
				C (kg/cm ²)	φ (deg)	C (kg/cm ²)	φ (deg)	90%다짐시	95%다짐시
TP 4	15.5	14.4	1.888	0.13	36.5	0.15	39.0	8.967×10 ⁻⁵	7.775×10 ⁻⁵
Block Sample	13.8	-	γ _i =1.875 γ _d =1.648 G _s =2.67	자연상태의 시료				자연상태의 시료	
				C = 0.16 φ = 33				8.171×10 ⁻⁵	

로 양호한 상태이며, 일축 압축 강도는 500~800kg/cm² 이상인 보통암내지 경암의 기반암 상태인 것으로 조사되었다.

3. 축조 재료

댐 설계 기준(한국수자원학회, 2003)에 의한 CFRD의 표준 단면은 그림 2에 제시되어 있다. 그림 2에서 차수벽 지지존은 차수벽을 직접 지지하고 있는 기초 지반층으로서 차수벽의 균열이나 결함이 있는 지수판을 통한 누수를 댐체의 손상없이 안전하게 통과시키는 것이 목적이다.

또한 차수벽 지지존은 차수벽 및 지수판의 손상에 의해 발생할 수 있는 누수를 감소시켜 댐체의 안정성 저하를 방지할 수 있는 저 투수성(semi-pervious)과 소요 지지력을 갖는 구조로서 다음과 같은 특성이 요구된다고

하였다(배 등, 1996).

- ① 콘크리트 차수벽의 누수시 세립토의 이동에 의한 체 변위를 억제할 수 있는 투수 계수 유지
- ② 댐 축조시 재료 분리를 방지하고 사면 형상 유지 및 시공성 보장
- ③ 콘크리트 차수벽을 균등하게 지지할 수 있는 지지력 확보
- ④ 시공중 사면 안정을 위한 소요 전단 강도 확보
- ⑤ 슛크리트 및 표면 스투브(face slab) 등의 시공을 위한 안정성 시공 기면 제공

우리나라의 댐 설계 기준 및 세계적으로 CFRD의 설계 기준이 되고 있는 Sherard (1987)가 제안한 차수벽 지지층 재료의 입도분포 및 투수계수는 다음 표 2와 같다.

CFRD는 만일의 경우 차수벽을 통한 누수가 있거나 불특정 지하수의 유입 등이 발생한다고 할지라도 주된 댐체가 암석으로 구성되어 있어 투수성이 매우 크며, 댐

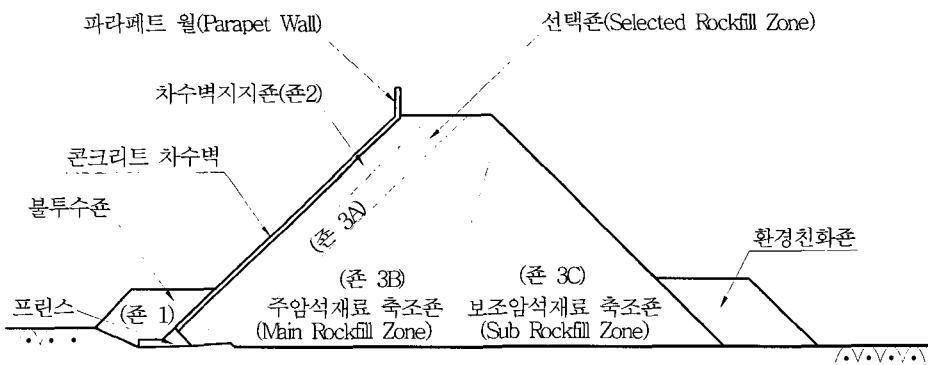


그림 2. CFRD 댐체의 일반적인 구성

표 2. 차수벽 지지존의 입도 분포 및 투수 계수

체 규격 (mm)	101.6	76.2	38.1	19.1	4.76	0.59	0.075	k (cm/s)
한국댐 설계 기준	100	-	70~100	55~80	35~55	9~30	3~15	1×10 ⁻⁴ below
Sherard 설계 기준	-	90~100	70~95	55~80	35~55	8~30	2~12	1×10 ⁻³ below

지면에는 배수 시설을 설치하여 유입된 지하수 등이 댐체 하류 쪽으로 쉽게 배수가 될 수 있도록 계획하고 있으므로 유입된 누수나 지하수 등에 의한 과잉 간극 수압은 발생되지 않을 것이다. 따라서 콘크리트 차수벽이 댐체 내에서 발생하는 과잉 간극 수압에 의하여 파괴될 가능성은 거의 없다고 볼 수 있다. 연구 대상의 댐인 경우 투수성이 매우 낮은 기존의 흙 댐 상류부에 차수벽 지지층에 대응되는 조립의 재료를 쌓고 그 위에 콘크리트 차수벽을 시공하는 형태이므로 차수벽을 통한 누수가 발생하거나 불특정 지하수 내지는 지표수가 유입된다면 차수벽과 기존 댐체 사이에서 과잉 간극 수압이 발생하게 되고, 이로 인하여 자중이 크지 않고, 인장력에 취약한 콘크리트 차수벽은 담수된 수위가 갑자기 낮아질 경우 파손될 가능성이 높다. 따라서 본 댐의 경우와 같이 CFED 형식의 댐을 축조하기 위해서는 댐체 내에서 발생하는 과잉 간극 수압을 원활하게 소산 시키는 것이 필요하다.

본 연구에서는 댐체 내에서 발생 될 수 있는 과잉 간극 수압을 원활하게 소산시키기 위하여 새로이 축조되는 댐체 하부에 유공관을 매설하여 집수한 다음 기존 댐체에 매설되어 있는 방류구를 통하여 댐체 하류로 방류될 수 있도록 계획하였다. 또한 차수벽 지지층의 기능을 발휘하면서 상대적으로 투수성이 커서 누수내지 불특정 유입수 등이 신축 댐체 하부에 설치된 유공관으로 원활하게 배수될 수 있도록 축조 재료 중 200번 체를

통과하는 세립자(0.075mm이하)의 함유량이 3~15%가 표준이지만 본 댐에서는 최 하한선인 3% 내외가 되도록 품질 관리도 수행하였다.

실제로 외국의 경우 암석을 작은 입자로 파쇄 할 때 많은 비용이 소요되므로 세립자의 함유율을 5% 까지 허용한 사례도 있으며, 이런 재료는 특히 강우량이 많은 지역에서 소나기가 내린 후에도 표면이 쉽게 배수되고 곧바로 계속 성토할 수 있으므로 공사 기간을 단축시키는데 유리하나, 투수계수가 5×10^2 에서 $5 \times 10^3 \text{cm/sec}$ 로서 규정된 재료의 투수계수 보다 10~100배나 높아 반 투수성 조건을 만족시키지 못하고 있다. 이로 인하여 인장 응력이 발생하는 댐의 표면에 지수관이 많이 벌어질 때 누수량이 크게 증가할 우려가 많으므로 댐의 상류쪽 주 록필층의 응력 특성을 고려해서 1회 성토고를 감소시켜 양호하게 다져서 저수후의 댐 상류 구간에 부등 침하가 발생하는 것을 방지하도록 계획한 경우도 있다(최, 2002).

연구 대상의 댐인 경우 상기한 바와 같이 차수벽 지지층의 투수성을 상대적으로 높게 관리하고, 현장 다짐 관리를 철저히 수행하여 부등 침하 발생을 억제하였으며, 기존 댐체와의 경계면 상에는 누수에 의해서 기존 댐체의 세립자들이 유실 되지 않도록 기존 댐의 상류 사면에 슛크리트(shotcrete)를 타설하여 보호하였다.

본 댐 축조에 적용된 성토 재료의 입도 분포는 표 3과 같고, 우리나라 댐 설계 기준과의 관계는 그림 3에 나타나 있다.

표 3. 본 댐 축조 재료의 입도 분포

체 규격 (mm)	76.2	38.1	19.1	4.76	0.59	0.075
중량 통과 백분율 (%)	100	83	62	36	14	3

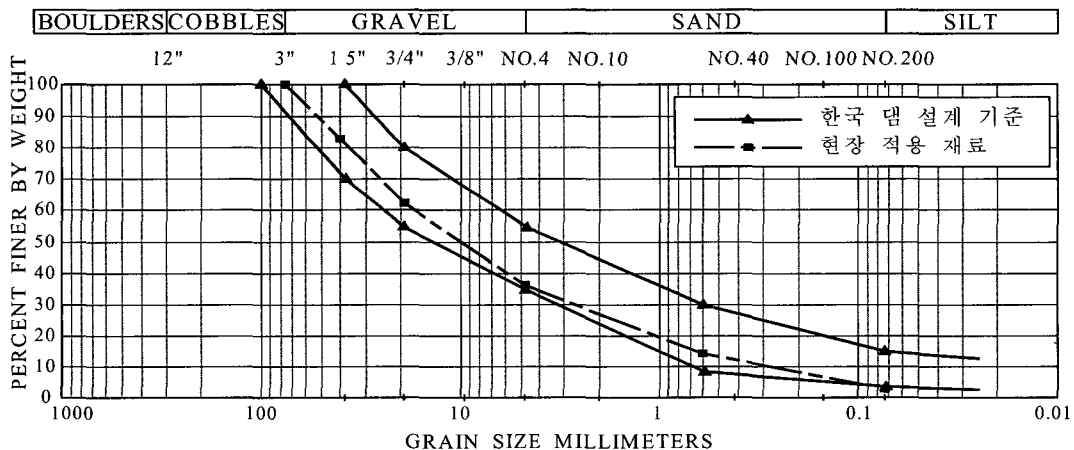


그림 3. 댐 축조 재료의 입도 분포 곡선 비교

그림 3에서 빗금친 부분은 댐 설계 기준에서 제시하고 있는 차수벽 지지층에 대한 표준 입도 분포의 범위를 나타낸다. 본 연구 대상의 댐에 적용한 재료의 입도 분포 곡선은 표준 입도 분포 범위의 아래쪽 경계 라인에 가깝게 분포되어 있으며, 균등 계수(C_u)는 60 정도이다. 이는 댐 설계 기준에서 제시하고 있는 차수벽 지지층 재료의 평균치보다 전반적으로 굵은 입경을 가진 입자들로 구성되어 있으면서 표준 시료와 유사한 균등 계수를 가지고 있는 양호한 입도 분포 상태를 나타내고 있다는 것을 알 수 있으며, 다만 200번 체(0.075mm)를 통과하는 세립자가 3% 정도로서 표준 시료의 평균치보다 작게 포함되어 있음을 뜻한다. 따라서 연구 대상 댐의 축조 재료로 사용한 조립 재료는 상대적으로 투수성이 크며, 세립자의 유실 가능성이 작고, 또한 입도 분포가 양호하므로 현장 다짐 효과가 우수하며, 현장 시공 및 품질 관리가 용이하여 부등 침하 발생 가능성이 거의 없는 양호한 댐 축조 재료라고 평가 할 수 있다.

4. 현장 계측 및 결과

댐 축조 중 시공 관리와 완공 후 유지 관리를 목적으로

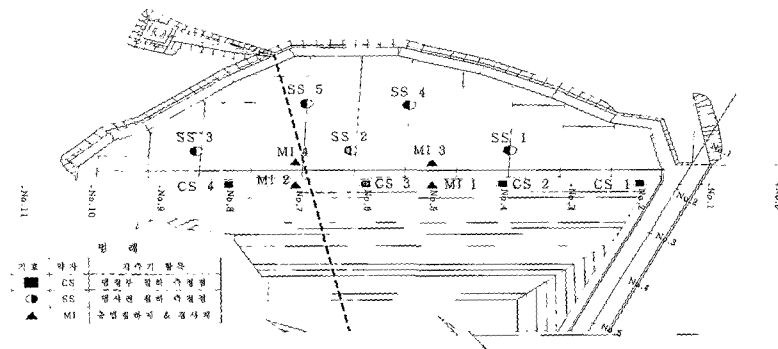
로 댐체 거동을 파악하기 위한 댐 정부 침하 측정점, 층별 침하계, 액상 침하계 및 경사계와 차수벽의 거동을 파악하기 위한 차수벽 경사면 변위 측정계, 차수벽 수직 이음부 변위 측정계, 차수벽 변형률 측정기, 차수벽 무응력 변형률 측정기, 주변 이음부 변위 측정계 및 차수벽 표면 침하 측정점등 총 10개 종류의 현장 계측기기를 매설하였으며, 그중 수평 변위와 연직 변위를 측정하기 위한 계측기기의 매설 위치도는 그림 4와 같다.

4.1 댐 정부에서의 침하

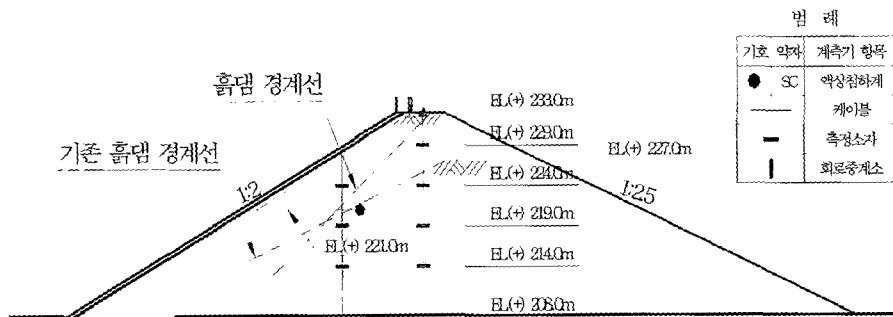
댐 정부 침하 측정점으로 부터 계측한 결과 그림 5와 같이 댐 정부에서 최소 13mm, 최대 40mm의 침하가 발생한 것으로 나타났다.

4.2 층별 침하계에 의한 연직 변위

댐체 내에서 발생하는 침하 현황을 파악하기 위하여 설치된 층별 침하계에 의한 실측 결과는 표 4 및 그림 6과 같이 나타났으며, 특히 POINT 3에서 각각 110mm 및 295mm의 최대 침하량이 발생하였다.

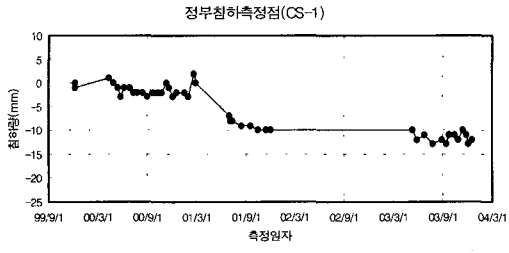


(a) 평면도

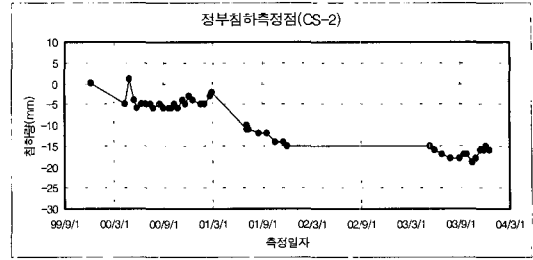


(b) 단면도

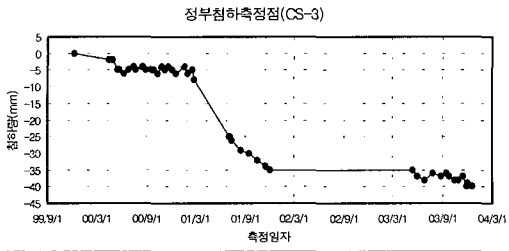
그림 4. 계측기기 매설 위치도



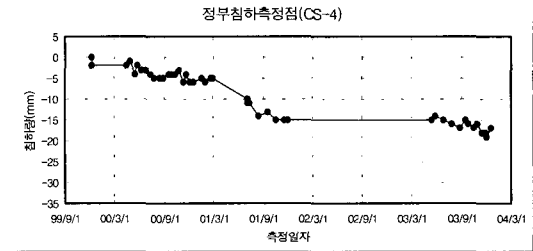
(a) CS - 1



(b) CS - 2



(c) CS - 3



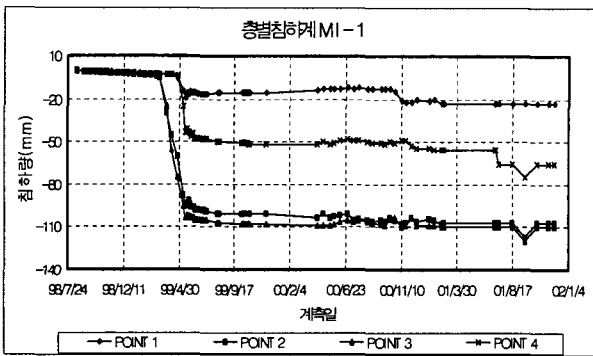
(d) CS - 4

그림 5. 댐 정부에서의 침하

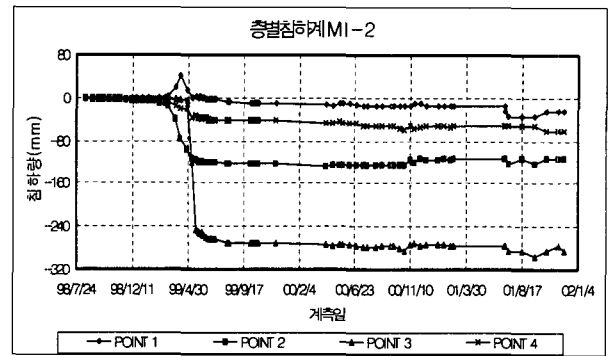
표 4. 층별 침하계에 의한 지점별 최대 침하량

(mm)

계 측 기 번 호	POINT 1	POINT 2	POINT 3	POINT 4
	EL(+)214.0m	EL(+)219.0m	EL(+)224.0m	EL(+)229.0m
MI - 1	23	107	110	75
MI - 2	35	123	295	62

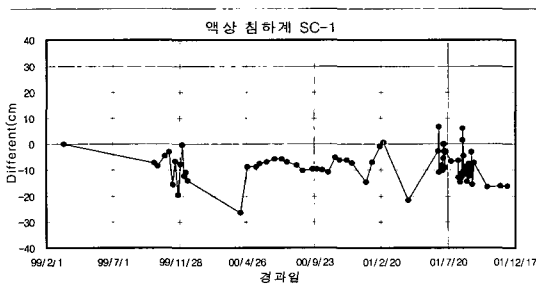


(a) MI - 1

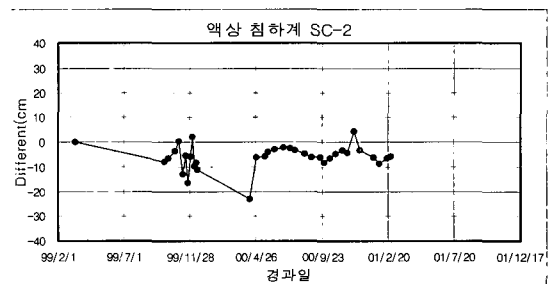


(b) MI - 2

그림 6. 층별 침하계에 의한 연직 변위



(a) SC - 1



(b) SC - 2

그림 7. 액상 침하계에 의한 연직 변위

4.3 액상 침하계에 의한 연직 변위

액상 침하계는 동일한 레벨상의 서로 다른 위치에 대한 부등 침하 발생을 파악하기가 매우 용이한 기기이며, 본 댐에서는 층별 침하계와 함께 댐체 내의 침하 발생 현황을 파악하기 위하여 설치하였다. 실측 결과 그림 7과 같이 각각 최대 263.4mm 및 230.7mm의 침하가 발생하였다.

4.4 경사계에 의한 수평 변위

층별 침하계와 인접하여 설치된 경사계의 실측 결과는 그림 8과 같이 댐 단면상의 중·상부에서 각각 30mm 및 72mm의 최대 수평 변위가 발생하였다. 전반적인 수평 변위 발생 양상은 댐체 축조 후까지 증가하다가 담수 후에는 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 댐체 축조 시 댐 단면의 상류부에서는 상류 방향으로 발생하던 수

평 변위가 담수 후에는 물 하중의 영향으로 인하여 수평 변위가 하류 방향으로 전환되어 나타나는 것이다.

5. 유한 요소 해석

5.1 수치 해석을 위한 구성식과 유한 요소망

흙의 변형에 대한 응력-변형률 관계는 비선형적 거동으로 나타난다. 비선형적 거동을 하는 흙의 응력-변형률 관계를 해석하기 위하여 응력과 변형률 사이의 관계는 Hook의 탄성 법칙(Hook's law of elastic deformations)에 지배된다는 가정하에 비선형을 일련의 선형 증분으로 모델화하여 각 증분을 선형으로 해석하는 방법이 Duncan(1970) 등에 의해 개발되었다.

본 연구에서 유한 요소 해석을 위한 구성식은 Kondner(1963)가 제안하고 Duncan(1978) 등이 발전시킨 Hyperbolic 모델을 적용하였으며, 수치 해석시 사용된 프로그램은

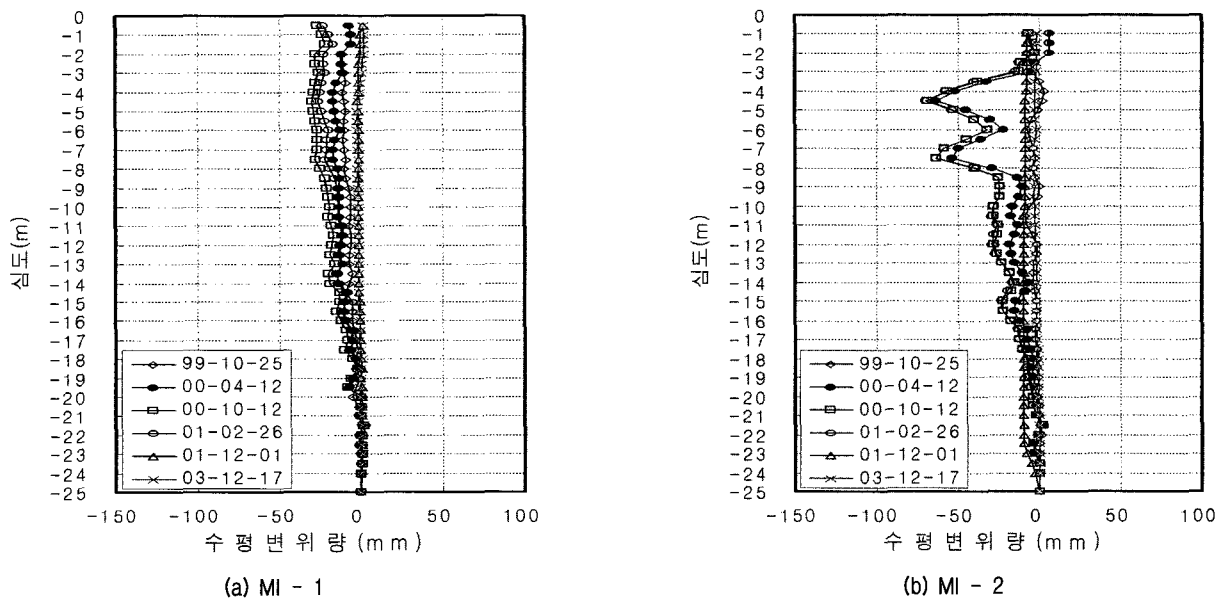


그림 8. 경사계에 의한 수평 변위

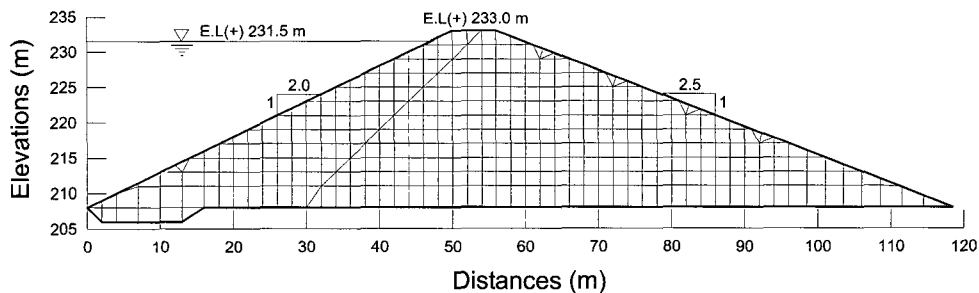


그림 9. 유한 요소망

캐나다의 GEO-SLOPE사에서 개발한 SIGMA/W(version 5.0)이다. 또한 유한 요소 해석에서 유한 요소망의 작성은 매우 중요하므로 해석 대상 단면의 기하학적 형태를 고려하여 그림 9와 같이 사각형 또는 삼각형으로 작성하였으며, 요소의 수는 408개, 절점의 수는 434개로 구성하였다.

5.2 Hyperbolic 모델의 매개 변수

Hyperbolic 모델의 매개 변수들은 삼축 압축 시험 결과 응력-변형률 곡선과 체적-변형률 곡선으로부터 쉽게 구할 수 있으나 댐 설계시 현실적인 여건에 기인하여 조립의 댐 축조 재료에 대한 실내 삼축 압축 시험을 실시하지 못하였다. 그러나 Hyperbolic 모델의 적용에 필요한 매개 변수들에 대해서는 기존 댐들의 해석에 사용된 자료들이 많이 축적되어 있을 뿐만 아니라 특히 Marachi(1972) 등은 암 축조 재료(rockfill materials)의 입도 분포에 따른 매개 변수들의 특성을 제시하였고, Duncan(1980) 등은 축조 재료를 통일 분류법으로 분류하여 시험 조건, 입도 분포, 다짐 특성 및 입자의 모양 등에 따른 매개 변수들의 특성을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 국내·외 댐들의 해석에 기 적용되었던 자료(김 등, 1987 ; Choi, 1997 ; 최, 2000 ; 김 등, 2001)들과 Marachi(1972) 및 Duncan(1980) 등이 제시한 자료들을 종합·검토하여 본 댐의 축조 재료와 유사한 입도 분포 및 특성을 나타내는 재료에 대응하는 매개 변수들을 결정하였으며, 그 결과는 표 5와 같다.

5.3 하중 재하 방법

댐체의 거동 해석은 순간 성토 개념으로서 한번에 댐 전체가 시공되는 것(single lift construction)으로 가정하여 수행하는 중량 의존 해석 방법(gravity turn-on analysis, single step analysis)과 댐체 축조 공정이 실제로는 단계별로 진행되는 것(Incremental construction)을 감안하여

각 성토 단계를 하중 증분 형태로 고려하는 증분 해석 방법(Incremental analysis)으로 구분할 수 있다.

위의 두 가지 방법에 의한 해석 결과를 비교하면, 응력은 다소의 차이가 있으나 전반적으로 유사하며, 변위는 매우 크게 차이가 나고 있어 축조 공정(Construction process)에 의한 영향이 큰 것으로 나타난다. 특히 수평 변위는 두 가지 경우 모두 유사하게 산정되나 연직 변위는 완전히 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다. 즉 중량 의존 해석 방법에 의한 연직 변위는 댐체 전체 높이에서 발생하는 변위가 누적되어 단순히 댐의 정상부에서 나타나게 되므로 댐 정상부에서 최대 침하가 일어나는 것으로 계산되며, 반면에 증분 해석 방법에 의한 연직 변위는 각 성토 단계별로 변위 발생이 완료되어 댐 정상부에서는 최종 성토 단계인 자체 중량의 영향에 의한 변위만 발생하게 되므로 댐 정상부에서의 연직 변위는 거의 없으나, 댐체의 중앙부에서는 그 위에 작용되는 전 하중이 중앙 하부에서 발생하는 모든 연직 변위에 영향을 주게 되므로 댐체의 중앙부에서 최대 변위가 발생하게 된다. 따라서 증분 방법이 중량 의존 방법보다 합리적이며, 실측치와 더 유사한 것으로 발표된 바 있다(Clough와 Woodward, 1967 ; Kulhawy 등, 1972 ; Duncan, 1996).

연구 대상 댐은 기존 흙 댐 위에 성토를 수행하여 댐을 승상(嵩上)하도록 계획되어 있으며, 기존 흙 댐은 자중 및 상류부의 수압에 대하여 이미 안정이 이루어진 상태이다. 그러므로 해석시 하중 재하 방법에 있어 기존 흙 댐에 대해서도 신축 부분과 동일한 개념으로 단계 성토를 수행하는 것으로 고려하는 것은 실제 조건과 일치하지 않는다. 따라서 기존 흙 댐에 대해서는 댐체가 한번에 시공된 경우(single lift construction)로 가정하고 중량 의존 해석 방법(gravity turn-on analysis)을 적용하여 응력-변형 해석을 수행한 다음 계산된 응력을 평형 상태에 있는 기존 댐체 내의 초기 응력으로 정의하고, 계산된 변위는 0(零)으로 환원하여 초기 조건으로 정의한 다음 새로이 축조되는 댐체 만이 단계 성토(Incremental construction)되는 것으로 모사한 증분 해석 방법(Incremental analysis)을 적용

표 5. 쌍곡선 모델 매개 변수

Zone	γ_s (kN/m ³)	ϕ (deg)	C (kN/m ²)	Eo (kN/m ²)	ν	K	n	K _b	m	R _i	Pa (kN/m ²)
차수벽 지지존	22.0	42	0	60,000	0.30	400	0.4	100	0.2	0.7	100
성토층및 기존댐체	19.0	33	15	30,000	0.33	200	0.5	75	0.4	0.7	100

하여 응력-변형 해석을 수행하였다(Case I). 또한 비교 검토를 위해서 기존 댐체가 안정되어 있는 상태를 고려하지 않고 단지 서로 다른 두 가지의 성토 재료로 댐을 완전히 신축하는 개념으로서 단계 성토되는 것으로 모사한 증분 해석 방법을 적용하여 응력-변형 해석을 수행하였다(Case II).

수치 해석시 댐 완공후 담수시에 콘크리트 표면 차수벽에 의하여 댐체 내로 물의 침투는 발생하지 않으며, 따라서 물 하중은 댐 상류 사면에 순간 재하되는 것으로 가정하였으며, 물 하중 적용 단계를 포함하여 13단계로 나누어 해석을 실시하였다.

6. 수치 해석 결과 및 실측치와의 비교 분석

6.1 연직 변위

댐체는 단계 성토에 의하여 축조되며 선행하여 축조된 부분은 자중에 의한 변위와 다음 단계의 성토 하중에 의하여 추가 변위가 발생하게 되고, 완공시까지 반복적인 과정이 되풀이 되면서 최종적으로 안정된 상태에 도달하게 된다.

댐체 단면이 좌·우 대칭이고, 축조 재료의 물성치가 균질하다면 Khalid(1990) 등은 최대 연직 변위가 댐의 기초 지반으로부터 0.65H(H=댐의 높이)정도 높이의 댐체 단면 중앙부에서 발생한다고 하였다.

그림 10과 그림 11은 댐 완공 후 각각 CASE I과 CASE II에 대한 수치 해석 결과 산정된 연직 변위의 등변위도이다. CASE I의 경우 최대 연직 변위는 28.1cm 이고, 발생 지점은 기존 댐체의 상류측 상부이며, 이는

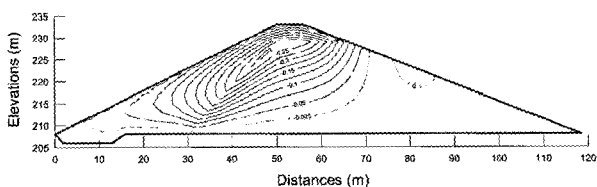


그림 10. 완공 후 연직변위(m)(CASE I)

비 균질 축조 재료와 기존 댐체의 자중에 의한 변위를 구속한 것에 기인한 것으로서 연구 대상 댐의 실제 현장 조건과 일치하는 경우이다. CASE II의 경우 최대 연직 변위는 41.4cm이고 발생 지점은 댐체의 기초 지반으로부터 0.65H정도 높이에서 발생되었으나 댐 단면상 중심축으로부터 상류쪽으로 다소 이동되어 있으며, 이는 비대칭인 댐 단면과 비 균질인 댐 축조 재료에 기인한 결과인 것으로 판단된다.

한편, 그림 12와 그림 13은 담수 후 각각 CASE I과 CASE II에 대한 수치해석 결과 산정된 연직 변위의 등변위도이다. CASE I의 경우 최대 연직 변위는 30.6cm로서 물 하중에 의한 추가 연직 변위는 2.5cm정도 발생하는 것으로 나타났으며, CASE II의 경우 최대 연직 변위는 42.3cm로 산정되었으며, 물 하중에 의한 추가 연직 변위는 0.9cm정도 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 물 하중에 의한 추가 변위는 매우 작게 발생하였으며, 물 하중의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

그리고 그림 14는 댐의 중심축선 상에서 수치 해석 결과 산정된 예측치와 층별 침하계(MI-2)에 의한 실측치를 함께 나타낸 것이고, 그림 15는 최대 연직 변위(30.6cm)가 발생하는 지점(상류 사면 선단에서 44m 지점)을 포함하는 연직선 상에서의 예측치와 실측치를 함께 도시한 것이다. 층별 침하계에 의한 현장 계측 결과 최대 연직 변위는 29.5cm로 측정되었으며, 전반적인 연직 변위 발생 양상은 예측 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

또한 그림 16은 댐의 최대 단면상 임의의 연직선 상에서 댐 완공 후 및 담수 후 해석 결과 예측된 연직 변위와 층별 침하계, 정부 침하 측정점 및 액상 침하계 등으

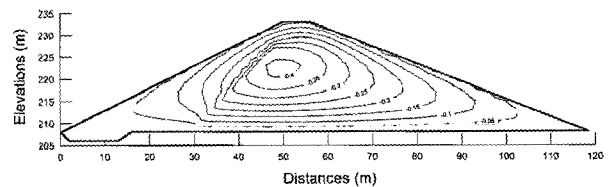


그림 11. 완공 후 연직변위(m)(CASE II)

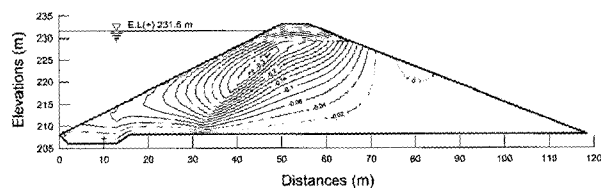


그림 12. 담수 후 연직변위(m)(CASE I)

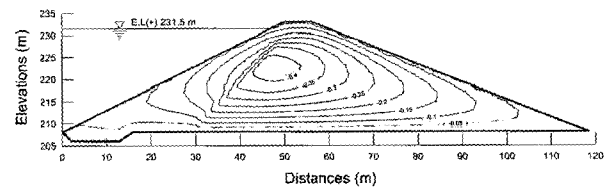


그림 13. 담수 후 연직변위(m)(CASE II)

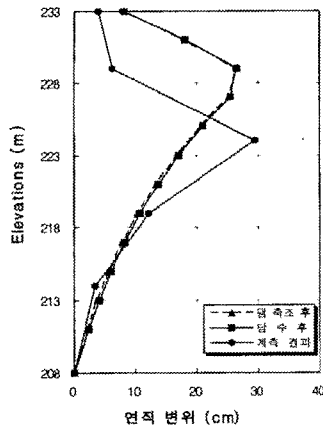


그림 14. 댐 중심축선 상에서 연직변위

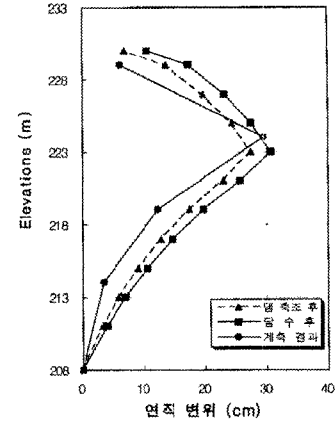


그림 15. 최대변위 발생지점을 포함한 연직선상에서 연직변위

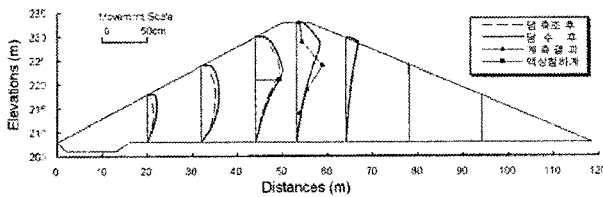


그림 16. 임의 연직선상 연직변위

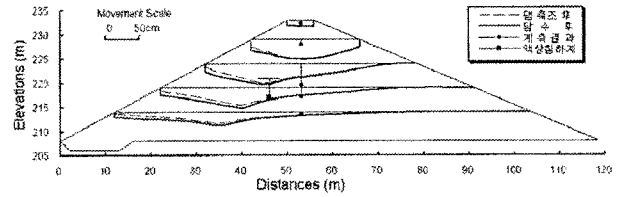


그림 17. 임의 수평선상 연직변위

로부터 실측된 연직 변위를 함께 도시한 것이며, 그림 17은 층별 침하계의 위치를 포함한 수평선 상에서의 연직 변위를 표시한 것이다. 이들 그림에서 나타난 바와 같이 예측치와 실측치가 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 기존 댐체가 위치하는 하류부에서는 자중에 의한 변위가 구속되어 있으므로 변위의 발생량이 매우 작다는 것을 보여주고 있다.

6.2 수평 변위

댐체의 단면이 좌·우 대칭이며, 축조 재료의 물성치가 균질하다면 수평 변위는 대칭축을 중심으로 상·하류측 변위가 대칭 상태로 발생되고, 상류측 댐체는 상류 방향으로, 하류측 댐체는 하류 방향으로 변형이 발생될 것이다. Khalid(1990) 등에 의하면 수평 변위는 댐 단면상의 중심축선 상에서 0(零)이며, 최대 수평 변위는 상·하류측 모두 각각의 댐체 단면 중앙부 기초 지반으로

부터 0.45H 정도의 높이에서 발생한다고 하였다.

그림 18과 그림 19는 각각 댐 완공 후 CASE I과 CASE II에 대한 수치 해석 결과 산정된 수평 변위의 등변위도이다. CASE I의 경우 최대 수평 변위는 상류측으로 4.3cm, 하류측으로 7.4cm가 발생하였으며, 발생 지점은 댐 단면의 중앙·상부쪽으로 각각 다소 이동되어 나타났다. 또한 CASE II의 경우 최대 수평 변위는 상류측으로 18.9cm, 하류측으로 8.8cm가 발생하였고, 발생 지점은 상류부는 신축 댐체와 기존 댐체의 경계면상이고, 하류부는 하류측 댐 단면의 중앙부 0.45H정도 높이에서 발생하여 Khalid(1990) 등의 결과와 유사하게 나타났다.

CASE I과 CASE II에 대한 해석 결과 기존 댐체의 자중에 의한 초기 변위를 구속한 경우인 CASE I의 경우 CASE II에 비하여 수평 변위가 크게 감소되었음을 알 수 있었고, 특히 상류부의 경우 14.6cm만큼 수평 변위가 크게 감소한 것은 댐 단면의 중심축을 기준으로 상류부

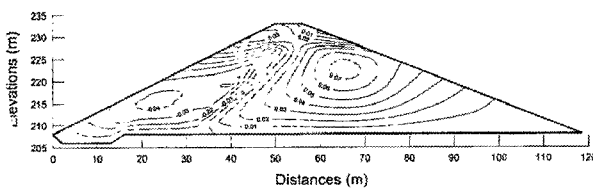


그림 18. 완공 후 수평변위(m)(CASE I)

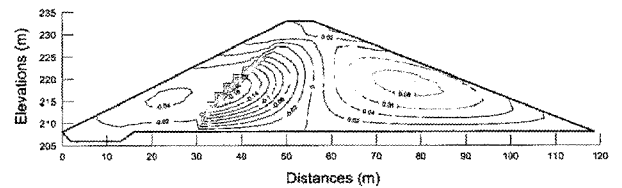


그림 19. 완공 후 수평변위(m)(CASE II)

에 해당하는 기존 댐체에서의 초기 변위를 구속한데 따른 영향이 상대적으로 크게 나타났기 때문이다.

그림 20은 담수 후 CASE I에 대한 수평 변위의 등변위도이다. 변위의 발생 방향은 상류 사면 하부 일부를 제외하고 전반적으로 하류 방향으로 전환되었으며, 완공 후에는 상류 방향으로 4.3cm의 변위가 발생하였으나 담수 후에는 1.0cm정도 하류방향으로 발생되어 물 하중에 의하여 최대 5.3cm정도의 추가 변위가 발생된 것으로 나타났다. 하류부는 9.4cm의 최대 수평 변위가 발생되었으며, 담수에 의해 2cm정도의 추가 변위가 발생되어 하류부에 대한 물 하중의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 21은 담수 후 CASE II에 대한 수평 변위의 등변위도로서 완공 후의 경우와 유사한 상태로 나타났으며, 상류부에서의 최대 수평 변위는 14.7cm로 산정되어 담수로 인한 물 하중에 의해서는 4.2cm의 수평 변위가 발생되었고, 하류부에서는 최대 9.8cm로서 1cm의

추가 변위가 발생되었다.

그림 22는 댐 단면의 중심축 선상에서 예측치와 경사계에 의한 실측치를 도시한 것이고, 그림 23은 상류 사면 선단으로부터 44m 정도 떨어진 지점에서의 연직선상에서 예측치와 실측치를 도시한 것이며, 그림 상에서 부(負)의 기호는 변위가 상류 방향으로 발생하는 것을 의미한다. 댐의 중·상부에서는 실측치가 예측치보다 2~6 cm정도 다소 크게 측정되었으나 하부에서는 예측치가 실측치보다 2~5cm정도 다소 크게 나타났으며, 전반적으로 예측치와 실측치의 편차는 댐체의 규모에 비하여 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 24는 댐의 최대 단면상 임의의 연직선 상에서 댐 완공 후 및 담수 후 수치 해석 결과 산정된 수평 변위와 경사계로부터 측정된 수평 변위를 함께 도시한 것이며, 연직선 좌측은 변위가 상류 방향으로 발생하는 것을 의미한다. 그림 25는 층별 침하계의 위치를 포함한 수평

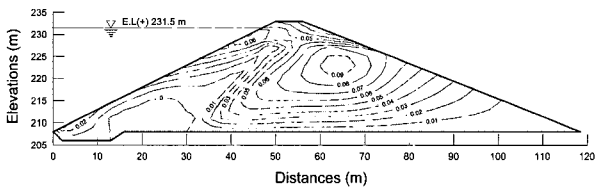


그림 20. 담수후 수평변위(m)(CASE I)

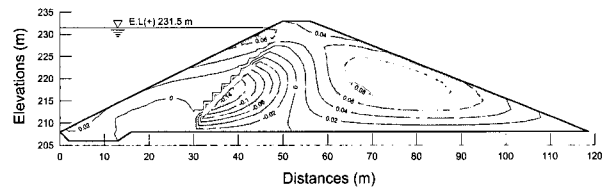


그림 21. 담수후 수평변위(m)(CASE II)

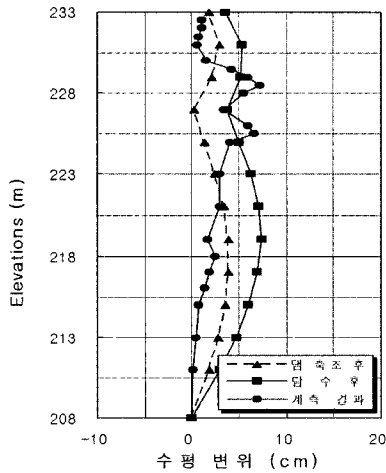


그림 22. 댐 중심축에서 수평변위

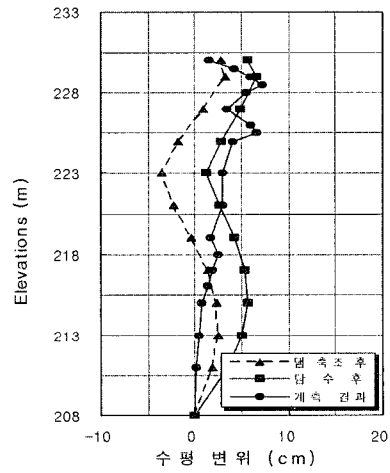


그림 23. 상류사면 선단에서 44m 지점의 연직선상에서 수평변위

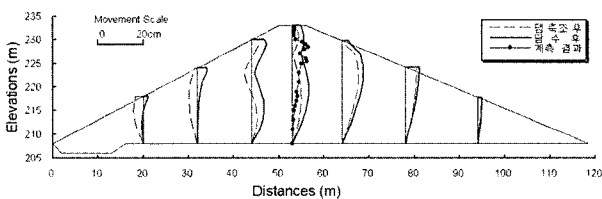


그림 24. 임의 연직선상 수평변위

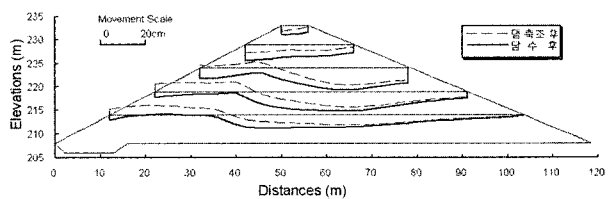


그림 25. 임의 수평선상 수평변위

선 상에서 수평 변위를 도시한 것이고, 수평선 상에서 위쪽은 변위가 상류 방향으로 발생하는 것을 의미한다. 이들 그림으로부터 신축 댐체의 거동에 있어서 완공 후 상류 방향으로 발생하던 변위가 담수 후에는 하류 방향으로 전환되는 현상이 뚜렷하게 나타났으며, 담수에 의한 물 하중은 연직 변위 보다는 수평 변위에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

6.3 댐체내의 응력 분포

댐은 일반적으로 계곡부에 축조되므로 댐 종축의 양쪽 가장자리(abutments)로 갈수록 단면은 작아지며, 종축 중앙부의 횡단면이 댐의 최대 단면이 된다. 댐의 정상부 아래 수평적으로 일정한 위치에서의 수평 응력은 댐의 종축 중앙부보다 양쪽 가장자리에 근접할수록 더 커진다. 이러한 현상은 댐 종축의 가장자리에서는 원 지반과의 마찰 저항으로 인하여 댐의 수평 방향 거동이 상대적으로 제한되기 때문이며, 댐 종축의 중앙 단면에서는 상대적으로 더 많은 수평 거동이 이루어지므로 수평 응력이 감소되는 결과를 가져온다고 한다(Khalid 등, 1990).

그림 26과 그림 27은 댐의 최대 단면에서 각각 완공 후와 담수 후에 대한 수평 응력의 분포를 등압선으로 표시한 것이다. 신축부와 기존 댐체와의 경계부에서 불규칙한 응력 분포 상태를 보이고 있으며, 담수후 물 하중에 의해서는 상류 사면에 가까울수록 응력의 증가폭이 커지고 하류 일수록 증가폭이 작아짐을 알 수 있다.

한편, 연직 응력의 경우 댐 단면에서 수평적으로 동일한 위치의 서로 다른 지점에서 댐 축조 재료에 의한 상

재 하중(γH : γ =댐 축조 재료의 단위 중량, H =댐의 높이)과 댐체 내에서 발생하는 연직 응력(σ_y)의 비는 댐 단면의 중앙부에서 작고, 상·하류측 사면에 가까울수록 증가한다. 이것은 연성의 성토 재료로 축조된 댐에 있어서 중앙 하부로 작용되어야 할 성토 재료의 자중의 일부가 상·하류측 사면 방향으로 전이되기 때문이라고 한다(Khalid 등, 1990).

그림 28 및 그림 29는 댐의 최대 단면에서 각각 완공 후와 담수 후에 대한 연직 응력의 등압선도를 나타낸 것이다. 완공 후의 경우 재료의 비 균질성에 기인하여 댐축을 중심으로 대칭 형태는 아니나 상·하류측 사면으로 갈수록 응력의 등압선이 사면과 평행함을 나타내고 있다. 담수 후의 경우 물 하중의 영향을 직접적으로 받는 상류 사면에서 응력의 증가폭이 크며, 하류로 갈수록 증가폭이 작게 나타나 하류로 갈수록 하중 전이의 영향이 작은 것으로 나타났다. 또한 담수시 신축 댐체와 기존 댐체와의 최하부 경계부에서 응력의 증가 현상이 뚜렷하게 나타나 이곳에서 응력 집중 현상이 발생되고 있음을 알 수 있었다.

그리고 Khalid(1990) 등에 의하면 댐의 단면이 중심축을 기준으로 상·하류측이 서로 대칭이고, 댐체 축조 재료의 물성치가 일정하다면 댐체 축조 직후 전단 응력은 댐체 단면의 중심축 선상에서는 0(零)이며, 상·하류측의 단면에서는 작용 방향이 서로 반대일 뿐 크기가 같은 대칭적이 분포 형태를 나타낸다고 한다.

그림 30 및 그림 31은 댐의 최대 단면에서 각각 완공 후와 담수 후에 대한 전단응력의 등압선도이다. 축조 재료가 비 균질이므로 전단 응력의 분포가 대칭 형태는 아니나 하류부에서는 Khalid(1990) 등의 결과와 유사하

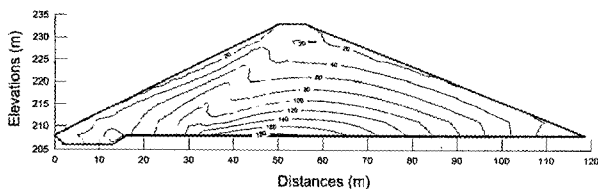


그림 26. 완공 후 수평응력(kN/m²)

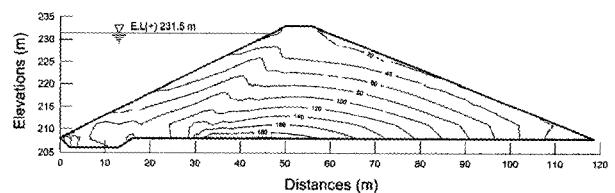


그림 27. 담수 후 수평응력(kN/m²)

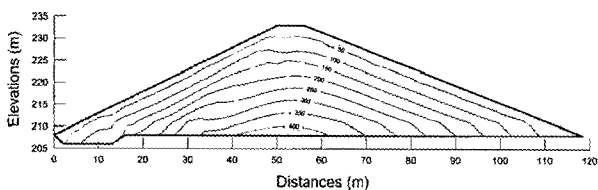


그림 28. 완공 후 연직응력(kN/m²)

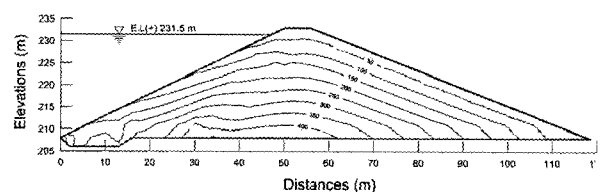


그림 29. 담수 후 연직응력(kN/m²)

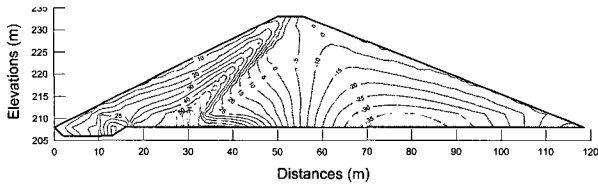


그림 30. 완공 후 전단응력(kN/m²)

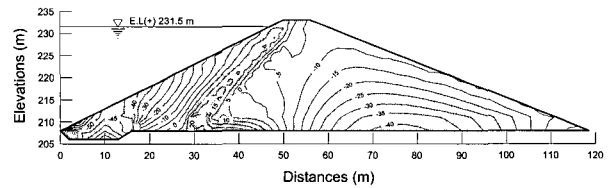


그림 31. 담수 후 전단응력(kN/m²)

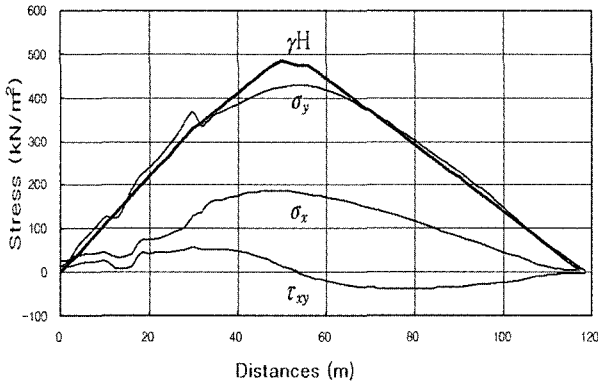


그림 32. 완공 후 댐의 기초 지반선상에서 응력분포

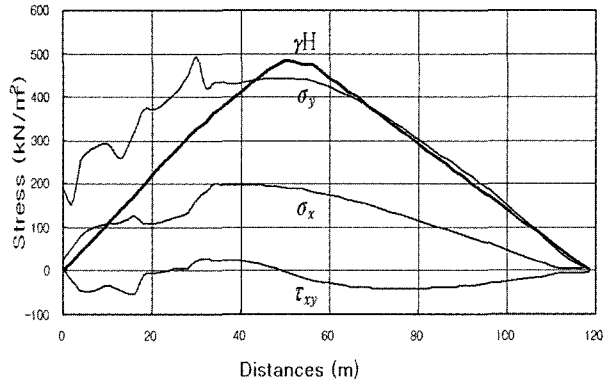


그림 33. 담수 후 댐의 기초 지반선상에서 응력분포

게 나타나고 있으며, 신축부와 기존 댐체와의 경계부에서 매우 불규칙한 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

한편, 그림 32 및 그림 33은 각각 댐체 완공 후와 담수 후에 대하여 유한 요소 해석을 수행한 결과 댐의 기초 지반선 상에서 예측된 연직 응력, 수평 응력 및 전단 응력을 댐체의 자중(γH : γ =댐 축조 재료의 단위 중량, H =각각의 위치에서 댐의 높이)과 비교 검토하기 위해서 함께 도시한 것이다.

댐 축조 후 예측된 연직 응력은 댐의 정상부 하부 지반에서는 γH 에 대한 백분율이 87~90%정도, 상·하류 사면의 중앙 하부 지반에서는 105~110%정도로 나타났다. 담수 후에 산정된 연직 응력은 댐의 정상부 하부 지반에서는 γH 에 대한 백분율이 92%정도, 상류 사면의 중앙 하부 지반에서는 150%정도로 나타났으며, 하류 사면의 하부 지반에서는 담수된 물 하중의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

수평 응력의 γH 에 대한 백분율은 댐의 정상부 하부 지반에서는 38%정도, 상류 사면의 하부 지반에서는 35~40%정도, 하류 사면의 하부 지반에서는 40%정도로 예측되었다. 담수 후에는 γH 에 대한 백분율이 댐의 정상부 하부 기초지반에서는 40%정도, 상류 사면의 중앙 하부 기초지반에서는 50%정도로 나타났으며, 하류 사면의 하부 지반에서는 연직 응력의 경우와 같이 담수된 물 하중의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

댐체 완공 후 기초 지반선 상에서의 전단 응력 작용 방향은 상·하류부가 서로 반대 방향이었으나 담수 후 물 하중에 의하여 상류 사면 선단으로부터 25m정도까지는 응력의 작용 방향이 하류부와 동일하게 전환되었으며, 기존 댐체와 신축 댐체의 경계부 근처에서는 최대 30kN/m²정도의 변화가 있었으나 작용 방향은 완공 후와 동일한 것으로 나타났다. 따라서 이러한 결과는 담수된 물 하중의 규모가 댐체 전체의 거동에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않다는 것을 의미한다. 또한 담수 후의 경우 상류 사면 선단으로부터 30m정도 떨어진 신축 댐체와 기존 댐체와의 최하부 경계부에서 응력의 증가 현상이 뚜렷하여 이곳에서 응력 집중 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

7. 결론

본 논문에서는 저수 용량을 확대하기 위하여 기존에 이미 시공되어 있는 흙댐을 송상(嵩上)하는데 있어서 기존 댐체의 축조 재료와 동일한 재료가 아닌 콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐(CFRD)의 차수벽 지지층에 대응하는 조립의 재료로 추가 성토를 수행할 경우 가칭 콘크리트 표면 차수벽형 흙댐(CFED)의 응력 및 변형 특성을 예측하기 위하여 Hyperbolic 모델을 이용한 유한 요소 해석을 수행하였으며, 계산된 예측치와 현장 계측

결과 측정된 실측치를 비교·분석하여 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 해석시 기존 댐체를 신축으로 고려한 경우와 기존 댐체의 초기 변위를 0(零)으로 구속한 경우 예측된 각각의 최대 연직 변위를 실측치와 비교·검토한 결과 후자의 경우와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 기존 댐체가 안정되어 있어 초기 변위를 구속하고 추가 하중에 의해서만 변위가 발생하는 것으로 고려한 수치 해석 방법이 타당한 것으로 나타났다. 또한 최대 수평 변위의 경우 발생 위치에는 다소 차이를 보이는 것으로 나타났으나 측정치는 예측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- (2) 수치 해석시 댐 축조 후와 담수 후의 경우 모두 신축 댐체와 기존 댐체와의 최 하부 경계부에서 응력의 증가 현상이 뚜렷하게 나타났는데 이는 응력 집중 현상에 기인된 것으로 판단된다.
- (3) 댐체의 자중에 대한 연직 응력의 백분율은 댐 중앙 하부 기초지반 상에서 완공 후에는 87~90%, 담수 후에는 92% 정도로 예측되었으며, 수평 응력의 경우에는 완공 후 38% 정도, 담수 후에는 40% 정도로 예측되었다.
- (4) 댐체 완공 후와 만수위까지 담수한 경우 응력과 변형에 대한 거동을 비교할 때 큰 변화가 나타나지 않았으며, 따라서 담수에 의한 물의 하중은 댐체의 응력과 변형 거동에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- (5) 댐체의 응력-변형 거동에 대한 유한요소 해석결과 산정된 예측치와 실측치를 비교·분석한 결과는 신뢰성이 매우 높은 것으로 평가되며, 따라서 해석결과 나타난 최대변위 및 응력의 발생 지점, 응력집중 현상이 발생되거나 하중 전이가 불규칙하게 나타나는 부분 등을 중심으로 댐체 시공시 정밀 현장 계측 관리를 수행한다면 합리적이고 효과적인 시공관리 및 품질관리가 될 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구 결과 기존에 이미 시공되어 운용 중에 있는 많은 중·소규모의 댐들에 대하여 저수 용량의 확대를 위하여 댐체를 승상(嵩上)할 경우 본 연구 대상 댐의 형식과 같은 가칭 콘크리트 표면 차수벽형 흙댐(CFED)의 형식을 적용할 수도 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 립희대 (1987), "소양강 댐의 거동에 대한 유한 요소 해석과 실측치와의 비교", 대한 토목 학회 논문집, 제7권 제1호, pp.141-150.
2. 김상규, 한성길, 이민형, 안상로 (2001), "수위 변동에 따른 Earth-Rockfill 댐의 거동 및 균열 원인에 대한 평가", 한국 지반 공학회 논문집, 제17권 제6호, pp.149-162.
3. 배종순, 성영두 (1996), "콘크리트 표면 차수벽형 석괴댐 지지층의 토질 특성", 한국 지반 공학 회지, 제12권 제1호, pp.47-62.
4. 사단 법인 한국 수자원 학회 (2003), "건설 교통부 승인 댐 설계 기준", pp.198-200, pp.217-277.
5. 의정부시 (1994), "홍북 저수지 확장 기본 및 실시 설계 보고서".
6. (주)신풍 컨설턴트 (2000), "홍북 저수지 계측 보고서".
7. (주)이케이 텍 (2001), "홍북 저수지 계측 관리 보고서".
8. (주)제일 지오텍 엔지니어링 (2003), "홍북 저수지 계측 관리 보고서".
9. 최형식 (2000), "CFRD형 댐의 최신 기술(연계)", 대한 토목 학회지, 제48권 제7호-제9호.
10. 최형식 (2002), "CFRD의 최근 공법과 국제 입찰", 대한 토목 학회지, 제50권 제3호, pp.17-22.
11. Choi, Peter H.S. (1997), "Deformation Behaviours of High Concrete Face Rockfill Dams", *Seventh International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 19-21 August 1997, Seoul, Korea, pp.1887-1892.
12. Clough, R.W., and Woodward, R.J. (1967), "Analysis of Embankment Stresses and Deformations", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.93, No.SM4, pp.529-549.
13. Duncan, J.M. (1996), "State of the Art : Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.122, No.7, pp.577-596.
14. Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S., and Mabry, P. (1980), "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element analysis of Stresses and Movements in Soil Mass", Report No. UCB/GT/80-01, pp.1-65.
15. 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, pp.1629-1653.
16. 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, pp.822-837.
17. Kulhawy, F.H., and Duncan, J.M. (1972), "Analysis of Embankment Stresses and Deformations", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.98, No.SM7, pp.653-665.
18. Marachi, N.D., Chan, C.K., and Seed, H.B. (1972), "Evaluation of Properties of Rockfill Materials", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.98, No.SM1, pp.95-114.
19. Sherard, J.L., and Cooke, J.B. (1987), "Concrete-Face Rockfill Dam : II. Design", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.113, No.10, pp.1113-1132.

(접수일자 2004. 8. 23, 심사완료일 2004. 9. 16)