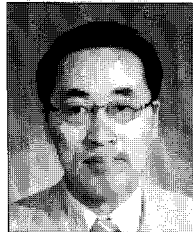


필댐의 거동분석을 위한 실험 및 수치해석

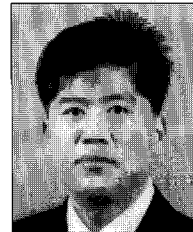
Laboratory Tests and Numerical Analysis for Behavior of Fill Dam



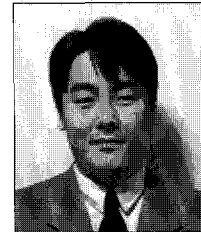
신 동 훈*



조 성 은**



김 재 흥**



임 은 상**

* 한국수자원공사 K-water 연구원 댐조사진단 팀장
 ** 한국수자원공사 K-water 연구원 선임연구원

1. 서 론

댐(Dam)은 “하천의 흐름을 막아 그 저수를 생활 및 공업 용수, 농업용수, 발전, 홍수조절, 기타의 용도(특정용도)로 이용하기 위해 흙, 암석 또는 콘크리트 등으로 만든 인공의 차수구조물”을 말한다. 우리나라의 댐으로 가장 오래된 것은 벽골제(전북 김제, AD 330년 완성, 높이 6m, 길이 약 3km 이상)이며, 현재 전국적으로 약 18,000개의 댐이 있으며, 가장 높은 댐은 평화의 댐(높이=125m)이며, 이들 댐 중 약 98% 이상이 흙댐이나 록필댐 등의 필댐(fill dam) 형식이다. 현존하는 세계에서 가장 오래된 댐은 BC 2550년경에 축조된 Sadd-el-Kafara 댐으로서 이집트의 나일강 동부 강변에 있는 Wadi Garawi 지역에 있으며, 연구조사 결과 용수공급용이 아닌 홍수방지용으로 건설된 것으로 추정되고 있다.

댐은 많은 물을 담고 있어 붕괴시에는 수많은 인명과 재산피해를 유발할 수 있으므로 지진을 포함한 다양한 하중 조건에 대하여 구조적으로 충분한 안정성을 확보할 수 있어야 한다. 이 때문에 현대의 댐 설계자들은 건설할 댐의 제원(주로 댐의 높이와 길이)과 형식(필댐, 콘크리트댐 또는 복합식댐) 등을 결정할 때, 댐을 건설할 장소의 지형과 지질 조건, 수리학적·수문학적 조건, 지진하중 조건 등을 조사하고, 축조에 사용할 재료의 역학적 성질 등을 각종 현



그림 1 벽골제의 장생거 수문

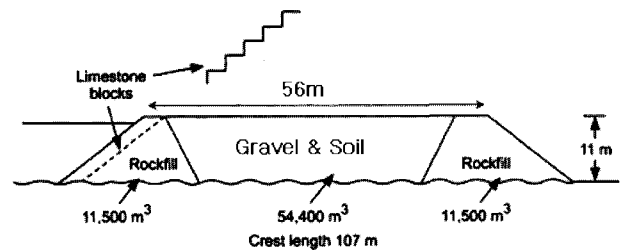


그림 2 Sadd-el-Kafara 댐의 단면도

장 및 실내 시험을 통해 파악한 후 수치해석적 방법으로 검토를 한다. 특히, 선정된 댐의 단면과 하중조건에 대한

수치해석을 실시하는데 있어서 정확한 입력물성치를 적용하는 것은 댐의 거동을 예측하고, 그에 따른 문제점들을 사전에 도출하여 당초 설계 또는 시공계획 등을 보완함으로써 궁극적으로 안전한 댐을 건설하는데 있어서 매우 중요하다.

따라서, 여기서는 필댐을 대상으로 하여 필댐의 정적 거동분석을 위하여 수치해석을 하고자 할 때 사용되는 입력물성치를 산정하기 위한 최근의 주요 실내 시험방법, 산정된 입력물성치를 이용한 수치해석 사례를 기술하고자 한다.

2. 필댐 축조재료의 전단강도 및 변형 특성 시험방법

필댐은 사용목적, 구성재료, 시공방법 등에 따라 분류할 수 있으며, 이중 구성재료에 따라 분류하면 크게 흙댐(earth dam)과 록필댐(rockfill dam)이 있다. 이들 필댐은 차수를 하는 부위의 구조 및 배치 형태에 따라서 균일형, 준형, 표면차수벽형으로 구분되며, 축조재료로서 토질재료(soil materials), 록필재료(rockfill materials) 및 콘크리트재료(차수벽용) 등이 사용된다. 이들 축조재료는 소요의 차수성(또는 투수성; permeability), 전단강도(shear strength) 및 변형성(deformability 또는 stiffness)을 가져야 한다.

축조재료의 전단강도와 변형성을 파악하기 위한 시험방법으로는 표 1과 같은 것들이 있다. 맨축조재료로 사용되는 흙, 모래-자갈 및 록필재료는 모두 입자들로 구성되어 있으며, 입자들의 크기는 작게는 1 μ m에서 크게는 1,500mm에 이르기까지 매우 다양하다. 이와 같은 축조재료의 입도분포 때문에 시험기의 크기도 소형과 대형이 함께 사용되고 있

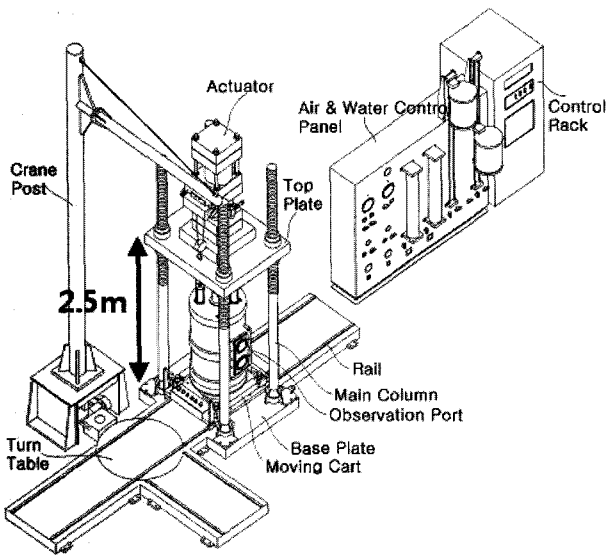


그림 3 대형삼축압축시험기 (한국수자원공사)

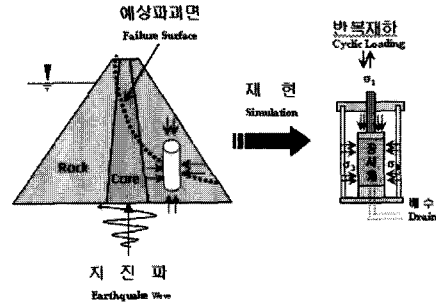


그림 4 대형삼축시험의 원리

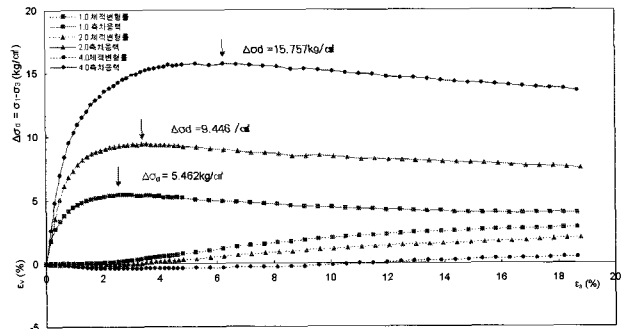


그림 5 대형삼축시험에 의한 록필재료의 응력-변형을 관계

다. 그러나 필댐 설계에 있어서 안정성과 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 재료는 자갈이나 쇄석과 같이 입경이 큰 조립재료(coarse materials)들이며, 이 때문에 대형 시험기를 사용한다. 그림 3은 한국수자원공사의 대형삼축압축시험기를 나타낸 것으로서 직경 300mm, 높이 620mm의 원주형 공시체를 사용한다.

그림 4와 그림 5는 각각 대형삼축시험의 원리와 전형적인 시험결과를 나타낸 것이다.

2.1 전단강도

전단강도는 Mohr-Coulomb의 파괴규준식으로 나타내며, 그림 6과 같이 Mohr원을 작도하여 파괴포락선으로부터 점착력(cohesion)과 내부마찰각(internal friction angle)을 산정한다.

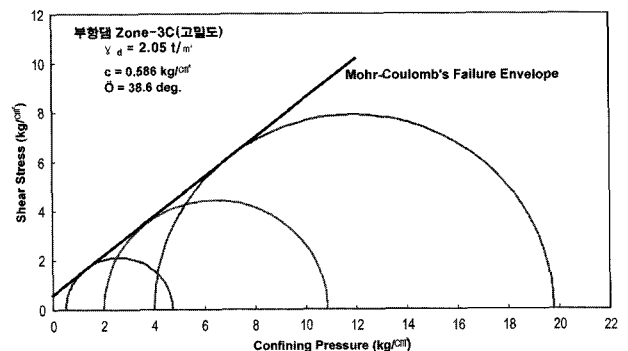
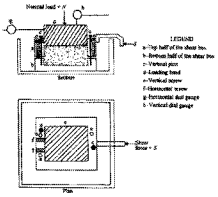
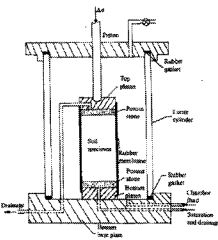
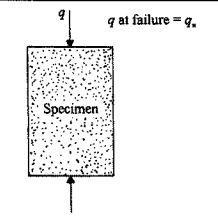
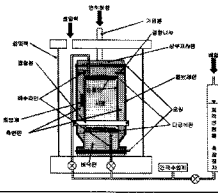
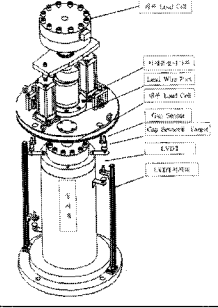
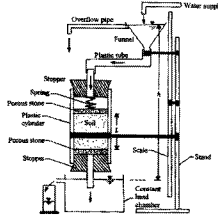
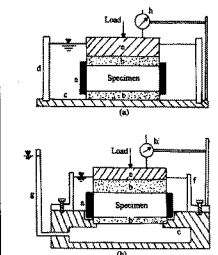


그림 6 Mohr원 및 파괴포락선의 예

표 1 필름 축조재료에 대한 실내시험

시험명	시험 메커니즘	시험방법	시험결과와 활용	특징
직접전단시험 (direct shear test)		<ul style="list-style-type: none"> - 상하로 나누인 전단상자에 시료를 넣고, 가압판을 통해 연직압을 가하고, 수평력(전단력)을 가해서 전단 - 연직압 3개 이상에 대하여 시험 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 강도정수 산정 : <ul style="list-style-type: none"> - 점착력, - 내부마찰각 	<ul style="list-style-type: none"> - 대부분의 토질에 사용가능 - 구속이 상대적으로 심하고, 전단면이 지정되어 있으며, 배수조절이 곤란 - 시험방법이 간단 - 시료량이 적어도 됨
삼축압축시험 (triaxial test)		<ul style="list-style-type: none"> - 원통형 시료에 고무멤브레인을 씌워 구속압을 가하고 있는 상태에서 축방향 하중을 증가 시켜서 압축전단 - 구속압 3개 이상에 대하여 시험 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 강도정수 산정 : <ul style="list-style-type: none"> - 점착력, - 내부마찰각 ▪ 수치해석용 파라메타 산정 <ul style="list-style-type: none"> - 탄성계수, 포아송비 - 주응력비 	<ul style="list-style-type: none"> - 대부분의 토질에 사용가능 - 조작이 다소 복잡
일축압축시험 (uniaxial test)		<ul style="list-style-type: none"> - 원통형시료를 구속압 없이 상하방향으로 압축하여 전단 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 비배수강도 산정 	<ul style="list-style-type: none"> - 점성토에만 적용 - 조작법 가장 간단
평면변형을 시험 (plane strain test)		<ul style="list-style-type: none"> - 직육면체 시료의 한 측면의 변형을 구속시킨 평면변형률 상태에서 액압에 의한 구속압을 작용시켜서, 시료에 연직 방향의 변형을 가하여 압축 전단 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 강도정수 산정 : <ul style="list-style-type: none"> - 점착력, - 내부마찰각 ▪ 수치해석용 파라메타 산정 <ul style="list-style-type: none"> - 탄성계수, 포아송비 - 주응력비 	<ul style="list-style-type: none"> - 실제 댐의 파괴시의 전단 강도에 가장 가까운 시험 결과를 얻을 수 있는 방법 - 시험법이 복잡
반복재하 삼축시험 (cyclic triaxial test)		<ul style="list-style-type: none"> - 원통형 시료에 고무멤브레인을 씌워 구속압을 가하고 있는 상태에서 축방향으로 sine파 형태의 반복하중 하중을 가하면서 축변형률, 간극수압, 체적변형률 등을 측정 - 전단탄성계수, 감쇠정수, 액상화저항강도 등 산정 - 구속압 3개 이상에 대하여 시험 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 내진해석용 파라메타 산정 <ul style="list-style-type: none"> - 최대전단탄성계수, 감쇠정수 - 전단탄성계수-감쇠 정수-전단변형률 관계도 - 액상화저항강도 등 	<ul style="list-style-type: none"> - 미소변형률 및 과잉간극수압 측정, 변형률/응력 제어 등이 정밀하여야 함 - 시험이 복잡
투수시험 (permeability test)		<ul style="list-style-type: none"> - 원통형 시료에 물을 흘려보내 단위 시간당 수두의 변화량 또는 유입-유출량의 변화량을 측정 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 침투류해석용 파라 메타 산정 - 투수계수 	<ul style="list-style-type: none"> - 불포화 시료의 흐름특성은 불포화 투수시험기 필요
압밀시험 (oedometer test)		<ul style="list-style-type: none"> - 축방향 변형이 구속된 철재 압밀링에 시료를 넣고 소정의 연직방향 하중을 시료의 압축 침하량이 일정해질 때까지, 재하 - 대개 8단계의 하중을 재하 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 흙의 압축특성 파라메타 산정 <ul style="list-style-type: none"> - 압축지수, 압밀계수, 투수계수 등 	<ul style="list-style-type: none"> - 시험이 비교적 간단하나 전체시험 완료에 8-10일 정도의 시간이 걸림

2.2 변형특성

댐 축조재료와 같은 조립재료의 응력-변형거동은 일반적으로 Duncan 등(1980)이 제시한 쌍곡선 모델(hyperbolic model)이 잘 묘사하는 것으로 알려져 있으며, 필요한 파라메타를 삼축시험 결과로부터 비교적 쉽게 구할 수 있어 필댐의 응력-변형해석 등에 널리 사용되고 있다. 실제로 댐체의 침하나 수평변형 거동은 탄성계수나 포아송비와 같은 재료의 변형에 관한 파라메타에 의해 크게 좌우되며, 상대적으로 강도정수(내부마찰각 및 점착력)의 영향은 크지 않다.

식 (1)은 삼축시험결과를 사용하여 흙재료의 응력-변형 관계를 쌍곡선식으로 나타낸 것으로서 임의의 응력 또는 변형율에서의 접선탄성계수는 식 (2)와 같이 나타낸다.

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

여기서, σ_1, σ_3 : 각각 최대 및 최소 주응력,

ϵ_a : 축 변형율,

a, b : 삼축시험을 통해 결정되는 상수(무차원)

$$E_t = \left(1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c\cos\phi + 2\sigma_3\sin\phi} \right)^2 KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

3. 유한요소법에 의한 필댐의 응력-변형 해석 일반

3.1 필댐 거동분석 CASE

유한요소법(FEM)을 필댐해석에 적용한 것은 Clough (1967)가 최초로 알려져 있다. 그 이후 Kulhaway & Duncan (1969), Kondner(1963) 등의 여러 연구자들에 의해 많은 연구가 이루어졌다.

댐체의 거동은 크게 역학적 관점에서 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ① 축조 중 및 축조 직후의 거동 : 침하와 수평변위, 응력의 증가
- ② 축조 후 담수에 따른 거동 : 변위 및 응력의 재배열 발생
- ③ 지진시의 동적 응답거동
- ④ 시간경과에 따른 장기적 creep 거동

댐체의 거동해석은 주로 2차원 평면 변형조건(2-D plane strain condition)을 기초로 이루어지고 있으며, 간혹 3차원

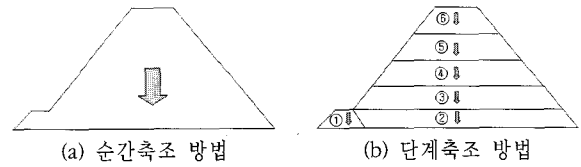


그림 7 FEM에 의한 댐 거동의 묘사방법

해석이 시도되기도 하나 아직 보편적으로 적용되고 있지는 않다. 건설중의 댐 거동해석은 보통 자중에 의한 변형을 고려하는 방법으로 이루어지는데, 여기에 건설장비를 비롯한 특별한 시공요인의 영향은 고려하기 어렵다. 따라서 그 영향은 제외되는 것이 일반적이다. 건설중 거동을 고려하는 방법에는 그림 7에 나타낸 바와 같이 순간축조방법(gravity turn-on method)과 단계축조방법(incremental method) 등의 두 가지 방법이 있다.

그림에서 보는 바와 같이 순간축조 방법은 댐 전체가 순간적으로 성토되는 것으로 보아 한 번에 댐 전체를 해석하는 방법으로, 이 해석에 따르면 통상 댐 마루에서 최대침하, 댐 사면에서 최대수평변위가 일어나는 것으로 계산된다. 이 방법은 계산시간이 적게 걸려 간단하게 댐 거동을 고찰하는 데는 유용하나 정확성은 떨어지고 댐의 실제거동

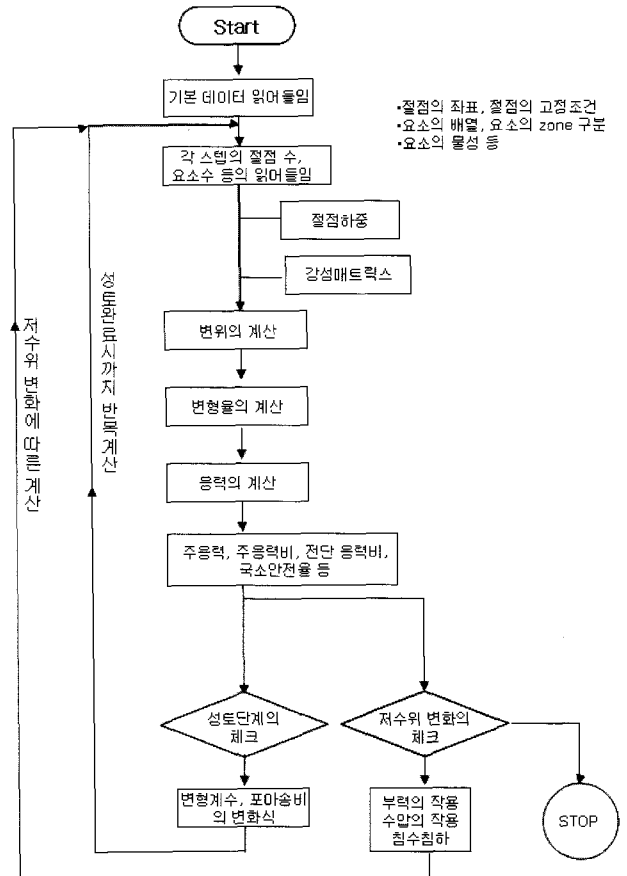


그림 8 필댐의 FEM해석 흐름

과도 차이가 있다(Kulhawy 등 1969; Duncan, 1996).

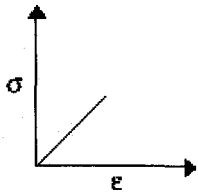
단계축조방법은 순간축조방법과 달리 건설 단계를 하중 증분형태로 고려하는 방법으로 보다 정확한 해석방법으로 평가되며 현재는 거의 모든 댐 거동해석에서 이 방법을 사용하고 있다(Kulhawy 등 1969; Duncan, 1996).

유한요소해석에 의한 필댐의 거동분석은 그림 8과 같은 흐름으로 수행한다.

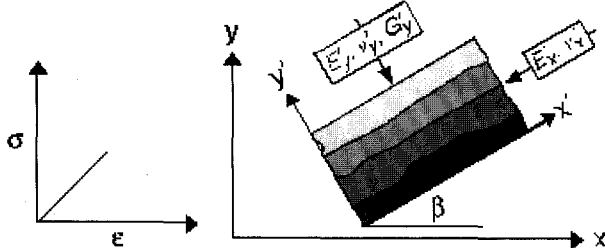
3.2 해석 프로그램

해석프로그램은 캐나다의 Geo-Slope사가 개발하였으며, 댐, 사면, 터널, 지하굴착 및 옹벽 구조물 등의 지반구조물의 응력-변형 해석과 압밀해석 등과 같이 범용적으로 사용할 수 있는 유한요소해석 프로그램인 SIGMA/W Ver.5.0를 사용하였다. SIGMA/W는 선형탄성모델(linear elastic model),

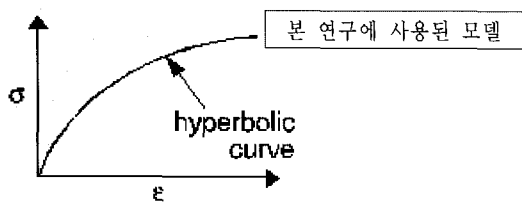
- Linear Elastic



- Anisotropic Linear Elastic



- Nonlinear Elastic (Hyperbolic)



- Elastic Plastic (Mohr-Coulomb or Tresca)

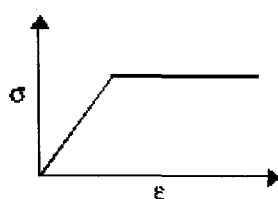


그림 9 SIGMA/W의 구성모델

비등방탄성모델(anisotropic elastic model), 비선형탄성모델(non-linear elastic model), 탄소성모델(elasto-plastic model), 변형유연화모델(strain softening model) 등 다양한 구성모델(constitutive models)을 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 비선형탄성모델인 쌍곡선모델(hyperbolic model)을 사용하였다(그림 9 참조). 전술한 바와 같이 쌍곡선모델은 필댐의 거동을 비교적 잘 모사하는 것으로 검증되어 있는 모델이다.

한편, SIGMA/W는 크게 3개의 실행 프로그램으로 구성되어 있다. 즉, ① **DEFINE** : 문제를 정의(Defining Problems) 하며, 대상 구조물의 스케치, 메쉬 형성, 해석파라메타 입력, 경계조건 설정, 해석조건(2D or Symmetric) 등을 하며, ② **SOLVE** : 계산(computing)을 실행하고, ③ **CONTOUR** : 해석결과를 contour와 graph 등으로 나타낸다. 또한 SIGMA/W는 Geo-Slope사가 만든 SLOPE/W, SEEP/W, QUAKE/W 등의 사면안정해석, 침투해석, 지진해석 프로그램과 연계하여 해석을 할 수 있는 장점이 있다.

4. 필댐의 응력-변형해석 사례

4.1 해석대상 필댐의 제원 및 입력데이터

해석대상 댐은 그림 10과 같이 높이 45m의 표면차수벽형 석괴댐으로서 상류사면에는 담수(impounding)시 차수를 위하여 콘크리트 차수벽(concrete face slab)이 시공되며, 상하류 사면의 구배는 약 1:1.5정도이다.

검토대상 댐의 유한요소망도는 그림 11과 같으며, 해석의 정확도를 높이기 위하여 기반암을 포함하였으며, 총 46단계에 걸쳐 축조하는 것으로 모델링하였다. 표 2는 해석에 사용된 축조재료의 입력 파라메타이며, 대형삼축시험 결과를 반영하는 것으로 하였다.

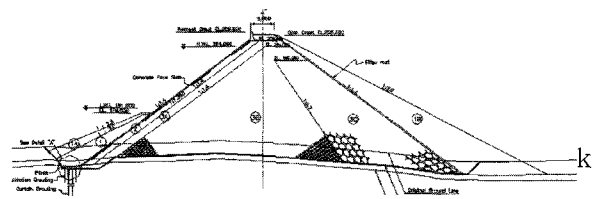


그림 10 해석대상 댐

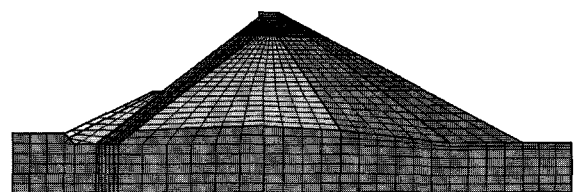


그림 11 검토대상 댐의 유한요소망도

표 2 입력 파라메타

Zone	γ_d (tf/m^3)	hyperbolic model parameters		
		E (tf/m^2)	K	n
Random Fill	1,800	5,000	540	0.43
Impervious Fill	1,850	3,000	500	0.39
Bedding Zone	2,142	19,695	1,439	0.41
Rockfill (150mm)	2,100	4,928	519	-0.08
Rockfill (800mm)	2,15	5,000	500	0.10
Rockfill (1500mm)	2,00	5,500	700	0.20
Random Fill	1,900	4,500	400	0.35

Zone	hyperbolic model parameters			
	R_f	K_b	m	ν
Random Fill	0.64	150	0.34	0.25
Impervious Fill	0.67	300	0.05	0.26
Bedding Zone	0.82	4,485	-0.91	0.40
Rockfill (150mm)	0.76	445	-0.77	0.30
Rockfill (800mm)	0.75	400	0.25	0.25
Rockfill (1500mm)	0.70	450	0.15	0.30
Random Fill	0.70	400	0.20	0.30

4.2 해석결과

해석결과는 축조 직후와 담수시에 대하여 댐축, 상류사면, 약 1/3 높이에서의 변형량 및 응력 분포 등에 대하여 검토하였다.

4.2.1 축조 직후

① 변위

완공 직후의 변위를 벡터로 나타내면 그림 12와 같다. 변위는 댐체의 상부와 중앙부에서는 거의 수직으로 발생하고, 하단부에서는 상하류 방향으로 원호상으로 변위가 발생하는 것으로 나타나 일반 사력댐과 유사한 패턴을 보였다.

그림 13은 축조 직후의 침하량 분포를 나타낸 것으로서, 최대변위는 약 24.2cm가 발생하였고, 발생 위치는 댐체 중간 높이 보다 약간 위쪽에 발생하는 것으로 나타났다. 그림 14는 수평변위 분포를 나타낸

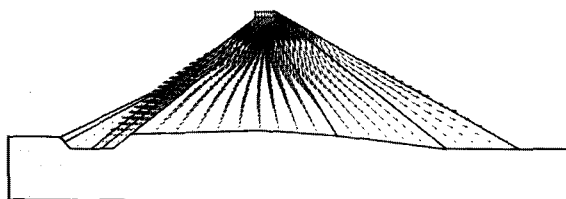
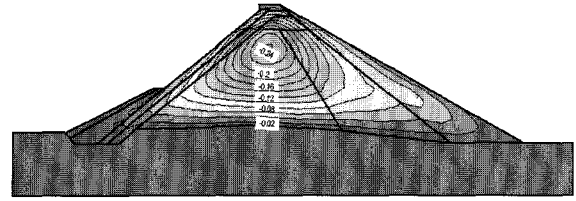


그림 12 축조직후의 변위 벡터



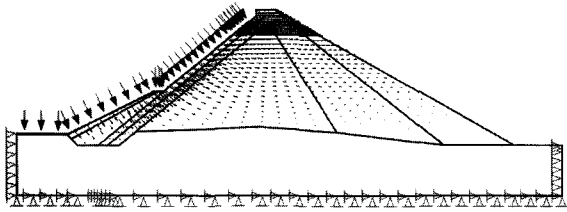


그림 17 담수시의 변위벡터 분포

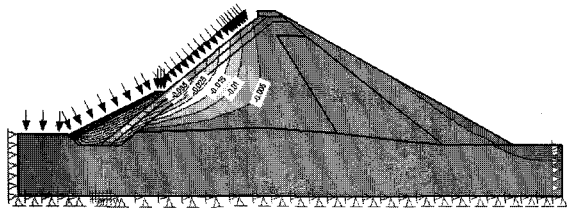


그림 18 담수시 연직침하량 증분 분포(단위: m)

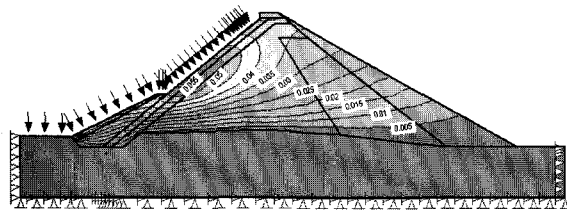


그림 19 담수시 수평변위 증분량 분포(단위: m)

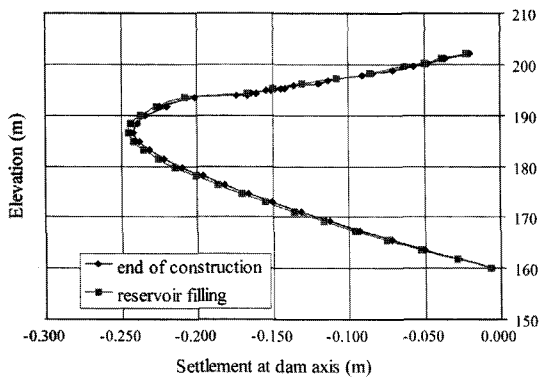


그림 20 축조직후와 담수시의 침하량 비교

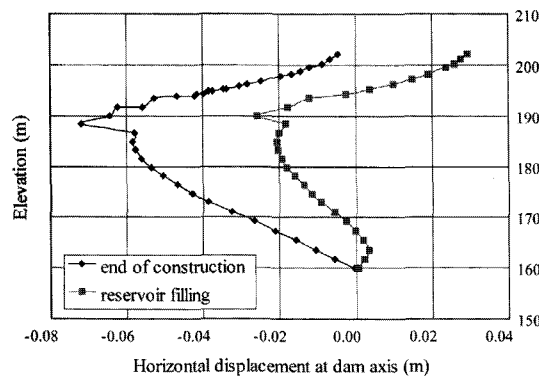


그림 21 축조직후와 담수시의 수평변위량 비교

변위 증분벡터의 방향이 상류측에서 하류측으로 향하는 것으로 나타났다. 이때 변위 벡터가 주로 댐체의 상류측에서 크게 발생하는 것은 댐체의 상류측이 정수압에 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 또한 변위벡터가 댐체의 하단부에서 거의 발생하지 않는 것은 댐체가 기초암반에 의해 구속되어 있기 때문이다. 그림 18은 담수에 의해 증가하는 침하량 증분 분포로서 물 하중에 의해 댐체의 상류측이 집중적으로 영향을 받음을 알 수 있다. 그러나 담수에 의한 수평 변위는 그림 19와 같이 하류측 까지 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 그림 17의 변위벡터 발생 범위와 일치한다.

담수에 의하여 발생하는 침하량 및 수평변위량은 각각 그림 20 및 21과 같으며, 담수에 의하여 침하량이 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

② 응력

그림 22와 23은 각각 담수에 의해 발생하는 연직응력 증분과 수평응력 증분 분포를 나타낸 것이다. 그

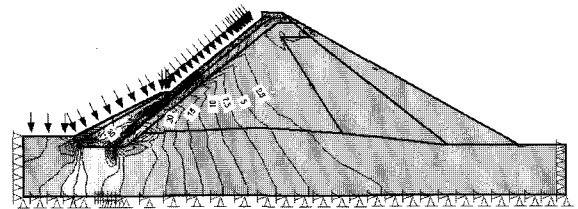


그림 22 담수시 연직응력 증분 분포

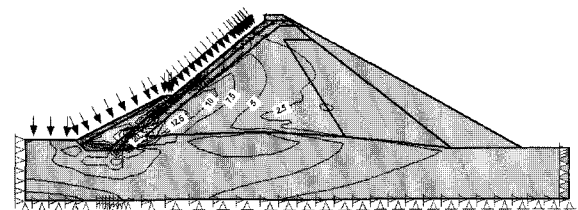


그림 23 담수시의 수평응력 증분 분포

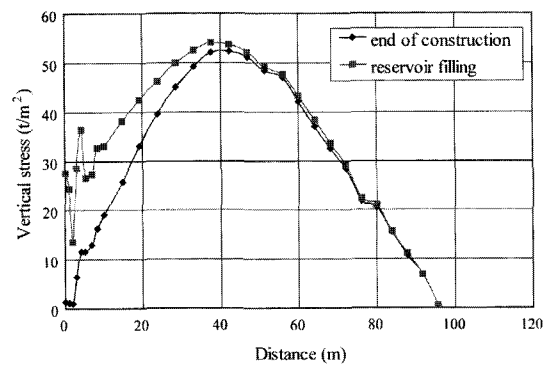


그림 24 담수전후의 연직응력 비교(높이=1/3H)

림에서 보는 바와 같이 물 하중에 의하여 응력은 주로 상류측에서 영향을 받으며, bedding zone, transition zone 등에서 많은 응력변화가 발생하며 특히, 상류댐체 하단부 상류측에서는 불투수zone의 영향으로 인하여 이 부분의 응력이 매우 복잡하게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 응력은 댐체의 안정성에 악영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 판단된다. 한편, 담수에 의한 응력의 변화량을 댐체의 1/3 높이에 대하여 살펴보면 그림 24와 같으며, 상류측에서는 정수압의 영향을 직접적으로 받아 증가응력이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 결 언

댐(Dam)은 하천의 흐름을 막아 그 저수를 생활 및 농업용수, 농업용수, 발전, 홍수조절, 기타의 용도(특정용도)로 이용하기 위해 흙, 암석 또는 콘크리트 등으로 만든 인공의 차수구조물이며, 필댐은 흙과 록필재료를 주재료로 하는 가장 일반적인 댐형식이다.

본 고에서는 필댐이 지진을 포함한 다양한 하중조건에 대하여 구조적으로 충분한 안정성을 확보할 수 있도록 설계 및 시공하는데 필수적인 축조재료의 실내시험방법, 그들 실내시험결과를 이용한 수치해석 방법에 대하여 검토하였다.

최근에는 계측 및 제어기술의 발달에 힘입어 각종 토질시험들이 대형화 및 초정밀화 되어가고 있으며, 컴퓨터를 이용한 계산능력이 눈부시게 발달하고 있다. 이들 첨단 대형의 토질시험장치를 사용하여 필댐 축조재료의 전단강도와 변형특성을 보다 정밀하게 산정·평가하고, 보다 정밀한 구성모델 등을 적용한 수치해석적 기법을 활용하여 댐의 거동을 예측하거나 특정한 문제의 원인을 분석하는 것

은 안전한 필댐 구조물의 건설과 유지관리를 위해 꼭 필요한 일이라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 허유만, 김주창 역, 역사속의 댐, (사)한국관개배수위원회 (KCID), 2003
2. Clough, R.W. and R.J. Woodward, "Analysis of Embankment Stress and Deformation", Proc. of ASCE, 93, SM4, 1967
3. Duncan, J.M. and Chang, C.Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils," Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96. No. SM5, pp.1629-1653, 1970
4. Duncan, J.M., Bryne, P. Wong, K.S. and Marry, P., Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Soil Masses, University of California at Berkeley, Report No. UCB/GT/ 80-01, p.70, 1980
5. Geo-Slope Inc., User's Guide, SIGMA/W for Deformation Analysis, Ver.5.0, 2002
6. Geo-Slope Inc., User's Guide, SLOPE/W for Slope Stability Analysis, Ver.5.0, 2002
7. Kondner, R.L., "A Hyperbolic Stress-Strain Dormulation for Sands", Proc. of 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, 1963
8. Kulhaway, F.H., J.M. Duncan and H.B. Seed, "Fincite Element Analysis of Stress and Movements in Embankment during Construction", Geotechnical Engineering Research Report, No. TE-69-4, Dept. of Civil Eng. Univ. of California, Berkeley, 1969

[담당 : 최인길, 편집위원]