

복합댐 접합부의 안정성 평가

The Evaluation for Stability at Joint Part in Composition Dam

김 재 흥*

Kim, Jae-Hong

오 병 현**

Oh, Byung-Hyun

Abstract

Research dam is consisted of concrete gravity dam that right bank department is built to concrete material, left bank department is composition dam that is consisted of rockfill dam that consist of rockfill material In domestic case, composition dam form of storage of water facilities of about 17,000 does not exist hardly in dam of irrigation water · industry · drinking water purpose that manage local government or other institution, Even if exist, is real condition that there is total nonexistence administrator fare of facilities, Choose unique dam of domestic multipurpose dam and analyzed conduct special quality of con/c gravity dam and rockfill dam joint part To analyze dynamic conduct special quality of composition dam by analytic method in this research, Do modelling via axis of dam and achieved static(Psuedo-static, modify Psuedo-static) and dynamic analysis, When achieving earthquake response analysis, analyzed seismic response analysis between concrete part and rockfill's part

요 지

연구대상댐의 우안부는 콘크리트구조물로 축조된 콘크리트 중력식댐으로 이루어져 있고, 좌안부는 사력재료로 이루어진 사력댐으로 구성되어 있는 복합댐이다. 이런 형식의 댐 거동에 대한 연구에 있어서 국내는 물론 선진외국의 참고자료도 희소한 실정이다. 국내의 경우 약 17,000의 저수시설물중 복합댐 형식은 지자체나 기타 기관에서 관리하는 생·공·용수댐의 경우 거의 존재하지 않으며, 설혹 존재하더라도 시설물의 관리자료가 전무한 실정으로, 국내 다목적댐 중 유일한 복합댐을 선정하여 중력식댐과 사력댐 접합부의 거동특성을 분석하였다. 본 연구에서는 해석적 방법에 의하여 복합댐의 동적 상호거동특성을 분석하기 위하여 댐 축을 기준으로 모델링하여 정적(유사정적법, 수정진도법) 및 동적해석을 수행하여, 지진시 콘크리트댐과 사력댐 접합부의 지진 응답해석을 분석하였다.

Keywords : Composition dam, Modify Psuedo-static, Psuedo-static, Seismic response analysis

핵심 용어 : 복합댐, 수정진도, 유사정적, 지진 응답해답

* 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

** 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원

E-mail : kjhpmk@kwater.or.kr 042-870-7623

•본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내 지진발생의 증가로 인하여 댐시설물의 내진 안정성 검토가 요구되고 있다. 그러나 댐시설물에 대한 내진 안정성 연구는 대부분 형식인 필댐과 요즘 유행하고 있는 표면차수벽형석괴댐에 많이 국한되어 있으나, 국내외적으로 거의 형식이 없는 콘크리트 중력식댐과 사력댐이 혼합된 복합댐에 대한 연구가 필요하게 되었다. 콘크리트 중력식댐 및 석괴댐으로 형성된 복합댐의 지진시 콘크리트댐과 사력댐의 접합부에 대한 상호 거동특성을 분석하기 위하여 정적상태에 대하여 응력, 변위, 안전율을 검토하였고, 이 정적상태에서 지진동을 고려한 유사정적(진도법)으로 구분하였다. 또한, 유사정적의 경우 다시 0.12g, 0.18g 지진동 상태의 응력, 변위, 안전율을 비교·검토하였다.

또한, 정적 및 유사정적의 검토시 댐 수평방향, 댐 수직(수심)방향, 댐 축방향으로 구분하여 정적상태와 각 지진동시의 상태를 중력식댐과 사력댐의 접합부 거동을 분석하였다.

2. 해석방법과 사용프로그램

2.1 해석방법의 일반

지진에 의한 구조물의 해석방법으로는 대표적으로 등가정적해석법과 수정진도법 및 응답스펙트럼해석법과 시간이력해석법을 포함하는 동적해석법을 들 수 있다.

2.1.1 정적해석법

지진에 대한 구조물의 안전성을 평가하기 전에 정적인 상태에서의 응력상태를 평가해야 한다. 평상시의 응력상태에서 지진시의 응력상태로 변한다고 했을 때의 비교결과를 낼 필요가 있다.

2차원 유한요소 지반변형해석과 사면의 평상시의 안정성을 평가하기 위한 해석을 실시한다.

또, 축제이후 제체배면에 담수가 되었을 때 제체내부의 침윤선을 확인하기 위하여 침투류 해석을 하고, 제체의 자중에 의해 변형을 일으켰을 것으로 예상되므로

압밀해석을 실시한다. 이것은 현재의 상태가 변형을 일으킨 이후가 되므로 현재의 안전성 평가에는 변형된 이후의 단면을 이용하여 안정성을 평가하는 것이다.

2.1.2 등가정적해석법

등가정적해석법은 진도법이라고도 하는데 구조물에 작용하는 불규칙적인 진동인 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중의 일부분을 수평 또는 수직력으로 재하하여 정적해석을 수행하는 방법을 등가정적해석법이라고 한다. 지진시 구조물의 안정이나 부재의 응력계산을 평상시의 해석과 같이 간단히 할 수 있기 때문에 많은 구조물의 내진설계에 채용되어 있다.

설계지진계수의 산정이 중요한 역할을 하는데 설계지진계수의 선정에 대해서는 다음의 가정이 필요하다.

- i) 지진은 정적외력으로서 구조물의 각부분의 질량에 작용한다.
- ii) 지진력의 크기는 질량에 비례한다. 수평방향 지진력의 크기를 중량으로 나눈값을 지진계수라고 한다. 따라서 구하는 수평방향 지진력은 지진계수를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_h = k_h mg$$

여기서 F_h : 수평방향 지진력

k_h : 지진계수(설계진도)

m : 질량

g : 중력가속도

여기서, 지진계수(설계진도) k_h 는 댐시설기준의 내용을 근거로 설계진도를 각각 0.12와 0.18로 설정하고 작용방향은 수평으로 작용하는 것으로 하였다.

iii) 지진계수의 값은 각 질량에 대하여 같은 크기이다.

iv) 지진시에 심한 연직진동을 받을 것으로 예상되는 구조물에 대해서는 연직방향의 지진력을 고려해야 한다. 그 크기를 정하는 방법은 수평진동의 경우와 동일하다.

이상의 가정을 기초로 한 해석기법을 등가정적해석법이라고 한다.

2.1.3 수정진도법

일반설계에서 진도는 댐상부에서 저면에까지 같다고 가정한다. 그러나 이 가정은 지진시 댐관측의 정밀도에 의문시 된다. 모든 관측결과에 의하면, 댐 상부진동은 저부진동에 비하여 크며, 그 비도 매우 크다. 그러므로 높은 댐의 경우에 댐 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 것은 합리적이라고 생각된다.

2.1.4 동적해석방법

구조물의 형상이 단순하여 일차 진동모드가 탁월하고 고차모델의 영향을 무시할 수 있는 경우에는, 진도법이나 수정진도법에 의해 구조물의 실제의 지진시의 응답을 정밀도 있게 근사할 수 있다. 그러나 진동성상이 복잡한 구조물이나 댐과 같은 중요도가 높은 구조물에 대해서는 상세한 내진검토가 요구되기 때문에 동적해석이 사용된다.

동적해석법은 대상으로 하는 구조물 혹은 구조물과 지반을 진동모델로 모델화 하여 지진입력으로 지진동파형 혹은 응답 스펙트럼을 입력하여 해석하는 방법이다. 이 방법은 등가정적해석법에 비해, 보다 실제 현상에 가까운 거동을 재현할 수 있고, 원리적으로 어떠한 구조물에도 적용할 수 있는 방법이다.

응답스펙트럼 해석방법은 단자유도계에서 각각의 하중에 대한 구조물의 최대변위, 최대속도, 최대가속도 등의 응답을 나타낸 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 응답의 구하는 방법이다. 응답스펙트럼 해석법은 해석법은 시간이력응답 해석법에 비하여 다소 오차가 발생하는 근사적인 방법이지만 대형구조물이거나 정밀한 결과를 원하지 않는 경우에는 간편하게 구조물의 동적특성을 비교적 잘 파악할 수 있다. 현재 대부분의 구조물에 대한 지진해석은 응답스펙트럼 해석법에 의하여 수행되고 있다.

시간이력응답 해석은 모드 중첩법과 직접적분법으로 분류할 수 있다. 일반적으로 구조물이 탄성거동을 하는 경우에는 모드 중첩법이 편리하게 사용되며 구조물이 비선형거동을 하는 경우에는 직접적분법이 사용된다.

주파수응답해석법은 진동계의 운동방정식을 주파수영역에서 계산하여 구조물의 시각력응답을 구하는 방법이다. 시각영역에서 주파수영역으로, 또는 그 반대

의 변환은 일반적으로 고속 후리에 변환(FFT)이 사용된다.

최근에는 지반과 구조물의 상호작용을 고려한 지진 응답해석을 실시하는 것이 종종 있다. 이 경우 지반반력이 주파수에 의존하여 변화하는 복수강성으로 표현되기 때문에 이 해석법에 의하여 해석할 필요가 있다.

2.2 해석 프로그램

2.2.1 2차원 지반변형해석

2차원 지반변형해석은 지반해석 전용 프로그램인 AFIMEX-SANC을 이용하였고, 동 프로그램은 선형탄성해석, 비선형탄성해석, 탄소성해석, 점탄성해석, No-Tension해석의 5종류의 해석을 할수 있다. 평면변형을 요소로는 3각형요소 일정변형율사변형요소 및 아이소파라메트릭 사변형요소가 취급되고, 지반과 구조물벽면 등의 불연속한 부분을 조인트 요소로 표현할 수 있다. 조인트 요소는 인장에 대하여 저항하고, 전단강도를 넘은 전단강도가 가해질 경우에는 전단강성이 저감하는 특성을 가진다. 필립등의 제방, 터널등의 굴착을 시공과정을 더하여 단계적으로 해 가는 것이 가능하다. 이 때, 제거하는 중에 요소의 재료특성을 변경하는 것에 의해서 약액주입의 효과와 재료경화의 경향을 고려하는 것이 가능하다.

(1) 해석수법

해석수법으로는 본 사력댐 부분에 적용한 모델은 비선형 탄성해석 모델인 Duncan-Chang의 해석모델을 사용하였다. Duncan-Chang 모델은 초기에는 자중에 의한 응력 상태를 가정한다.

사질토와 점토에 있어서 응력과 변형율의 관계는 일반적으로 Fig. 1과 같이 된다. 이와 같은 응력과 변형

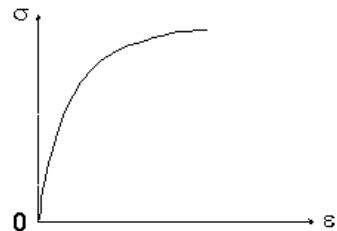


Fig. 1 응력~변형율 관계

율의 곡선을 도입하기 위해서는, 하중을 어떤 단계로 분할 하여 적용시키는 하중점증법을 사용한다.

각 하중단계에서는, $\{d\} = [De] \{d\epsilon\}$ 의 관계가 성립된다. 여기에서 $[De_j]$ 는 각 하중단계의 응력 레벨로 결정된다.

여기에는 응력-변형을 곡선을 쌍곡선으로 근사한 Duncan과 Chang의 수식표시법을 사용한다. 각 응력 레벨에 있어서 접선탄성계수 E_t , 접선 프야송비 ν_t 는 삼축압축시험의 결과와, Mohr-Coulomb의 파괴규준에 의해 다음의 식으로 표시된다.

$$E_t = \left\{ 1 - \frac{Rf(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right\}^2 KP_o \left[\frac{\sigma_3}{P_o} \right]^o \quad (1)$$

$$\nu_t = \frac{G - F \cdot \log(\sigma_3 / P_o)}{(1 - A)^2} \quad (2)$$

$$A = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{KP_o \left[\frac{\sigma_3}{P_o} \right]^o \left\{ 1 - \frac{Rf(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2C \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right\}} \quad (3)$$

여기에서

C : 점착력 Rf : 파괴식
 ϕ : 내부마찰각 Pa : 대기압

$$E_i = KP_a \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \quad (4)$$

Kn : Janbu의 실험식의 파라메터

2.2.2 침투류 해석

(1) 기능과 특징

AFIMEX-SEEPAGE에서는 정상해석과 비정상 해석을 할 수 있다. 이 Solver에서의 해석 모델은 다음의 4모델을 취급할 수 있다.

- ① 이차원 연직문제(일반적인 연직단면 문제)
- ② 축대칭 문제(우물내 수위를 지정)
- ③ 축대칭 문제(양수량을 지정)
- ④ 이차원 평면 문제(광역지하수역문제)

불포화 투수계수와 Suction압을 고려함으로써 영역과 불포화영역이 동시에 존재하는 흙 속의 침투류 해석과 강우의 침투에 대하여 고려하였다.

(2) 해석수법

포화불포화상태의 흙속을 이동하는 물에 대한 연속 방정식은 질량보존법칙으로 유도되는 Richards의 방정식은 다음의 식으로 표현된다.

$$-\nabla \rho w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \theta) \quad (5)$$

여기서, $\nabla : \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$
 ρ : 물의 밀도
 ν : 평균유속
 θ : 체적함수율

운동 방정식은 투수계수 K가 체적함수율 θ 또는 Suction압 hp의 함수로 하는 Darcy의 법칙과 같다고 할 때 다음의 식으로 고려된다.

$$V = -K(\theta) \cdot \nabla h = -K(\theta) \cdot \nabla (hp + he) \quad (6)$$

여기서, h : 전수두

hp: 압력수두(불포화 상태에서는 Suction압)

he: 위치수두

$$\nabla [\rho \cdot K(\theta) \cdot \nabla (hp + he)] = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \theta) \quad (7)$$

체적함수율 θ 는 흙의 간극율 n 과 포화도 S_w ($0 < S_w \leq 1$)를 적분하면 $\theta = n \cdot S_w$ 로 표시된다.

압력수두 hp가 단 하나의 독립변수의 방정식으로 변환하면,

$$\begin{aligned} \nabla [\rho \cdot K(hp) \cdot \nabla (hp + he)] &= \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot n \cdot S_w) \\ &= \frac{d}{dhp} (\rho \cdot n \cdot S_w) \frac{\partial hp}{\partial t} \\ &= \left\{ n \cdot S_w \cdot \frac{d\rho}{dhp} + \rho \cdot S_w \cdot \frac{dn}{dhp} + \rho \cdot n \cdot \frac{dS_w}{dhp} \right\} \frac{\partial hp}{\partial t} \end{aligned} \quad (8)$$

압력수두변화에 의한 압축을 무시하고, 불포화 영역에 있어서는 압력 수두변화에 의한 간극율의 변화가 발생하지 않는 것으로 가정하면, 포화불포화영역내의 침투류의 지배 방정식은 다음의 식으로 표현된다.

$$\nabla [K(h_p) \cdot \nabla(h_p + h_e)] = (C(h_p) + aS_s) \frac{\partial h_p}{\partial t} \quad (9)$$

$$a = \begin{cases} = 0 & : \text{불포화 영역} \\ = 1 & : \text{포화 영역} \end{cases}$$

여기서, $S_s = \frac{dn}{dh_p}$: 비저류계수

$$C(h_p) = \frac{d\theta}{dh_p} : \text{비수분용량}$$

2.2.3 사면안정 계산 프로그램 COSTANAK

원호활동면계산 및 복합활동면 계산을 하였고 해석은 최소안전율, 최대역지력(가정한 안전율에 필요한 역지력을 구한다), 하중의 고려는 집중분포하중을 가정하였다. 등수압선에 의한 간극수압을 고려하였고, 점착력의 강도증가를 고려하였다. 동 프로그램의 기능은 모델도, 안전율도, 등안전율도(안전율 콘타도), 수평내력분포도 등이다.

3. 정적 FEM해석

본 복합댐 수치해석시 적용 물성치는 연구대상댐 거동분석 및 안정해석보고서(1988. 12), 거동분석 및 안전도평가 연구(1996. 12)와 정밀안전진단보고서(2000. 12)를 참조하여 Table 1과 같이 결정하여, Hyperbolic 매개변수를 적용하였으며 콘크리트부분은 탄성적거동을 보이는 것으로 고려하여 선형탄성체로 해석

하였다. 특히, 정적 해석은 시공직후와 담수후 수압에 의한 영향을 고려하여 해석하였다. 축제 해석단계를 13단계로 하고 댐의 수위를 고려하지 않은 경우의 결과값이다. 또한 댐의 축제해석에 의한 응력의 전달을 원활히 하기 위하여 댐하부의 기반암의 깊이를 70m로 하였으며 넓이를 520.0m로 하였다.

록필댐으로 된 댐체의 내부의 중앙부에 콘크리트가 위치하고 있는 형상에 대하여 모델링하였다. 표시된 변위의 수치의 단위는 모두 cm단위이며, 모든 해석결과는 마지막 해석단계의 결과만을 표시하였다. 복합댐의 시공직후 정적F.E.M를 적용한 결과 수평방향 변위는 댐체의 범면부 하단의 1/3지점에서 가장 크게 발생하였고 최대연직방향 침하량은 콘크리트 블럭과 접해있는 코아부의 중앙에서 발생하였다.

담수에 의한 정수압을 고려한 F.E.M해석을 수행한 결과 정수압의 영향에 의하여 상류측 범면부에 발생한 약간의 수평방향 변위의 변화를 제외하고는 변위양상의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

메쉬의 변위 발생 경향은 수위를 고려하지 않은 경우와 거의 유사하게 산출되었는데 그것은 댐체의 중앙

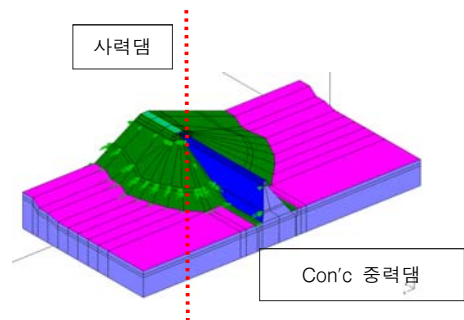


Fig. 2 연구대상댐의 모델링도

Table 1 접합부의 정적FEM해석 물성값

| 항 목 | 포아슨비 | 점착력 (t/m ²) | 내부 마찰각(φ) | 단위체적 중량(t/m ³) | 선형탄성 계수(Et) | 탄성계수(Et) | | | |
|---------------|------|-------------------------|-----------|----------------------------|-------------|----------|-----------|-----------|------------|
| | | | | | | 파괴비 (Rf) | Janbu's K | Janbu's n | Janbu' Kur |
| Con'c | 0.18 | 50 | 45 | 2.30 | 3.0E+6 | - | - | - | - |
| Core | 0.35 | 4.00 | 28 | 1.80 | - | 0.85 | 150 | 0.45 | 300 |
| Rock (Fine) | 0.3 | 0.00 | 38 | 1.90 | - | 0.7 | 300 | 0.6 | 650 |
| Rock (Coarse) | 0.3 | 0.00 | 38 | 1.90 | - | 0.7 | 300 | 0.6 | 650 |

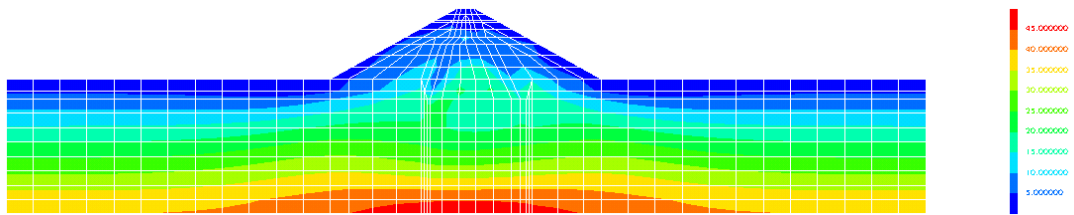
부의 콘크리트 블럭에 의한 영향을 받은 것으로 판단되며, 수평방향 변위의 크기는 수위를 고려하지 않은 경우보다 더 크게 발생되었다.

3.1. 지점별 변위

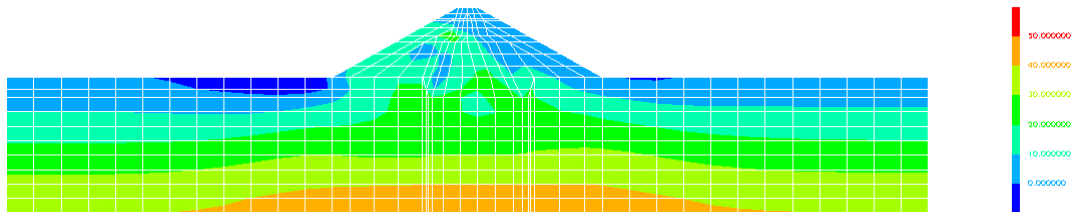
변위의 발생 양상을 다른 경우와 비교검토 하기 위하여 변위의 색분리도와는 별도로 댐마루부의 양끝단 지점과 중앙부, 댐체의 중앙부와 댐 사면의 중앙지점, 댐하부의 양끝단 지점과 중앙부로 하여 모두 9개 지점에 대하여 변위를 검토하였고, 그 결과는 Table 2와 같다.

담수에 따른 절점별 변위를 분석한 결과 X방향 변위는 상류상단에서 약 (-)0.45cm 정도 증가하고, 상류중단에서는 담수후 하류측으로 4.8cm과 하류중단은 상류방향으로 (-)2cm의 변위가 발생하여, 담수로 인한 X방향 변위는 댐 높이중단에서 변위가 최대가 되었다. 하단에서는 하류방향으로 변위가 발생하였으나, 변위량은 미비하였다. Y방향의 변위는 상하단 높이에 관계없이 미미하게 나타났지만 중심부 상단에서 담수후 하류측으로 약 4.7cm 변위가 감소하였다.

이로써 복합댐의 담수후에는 댐 높이 방향인 Y방향으로는 변위가 미비하였으나, 댐 축방향인 X방향으로는 변위가 큰 것으로 나타났다.



(a) 시공직후 X방향 응력도(σ_x)



(b) 담수후 X방향 응력도(σ_x)

Fig. 3 담수에 따른 응력과 안전율도

Table 2 절점별 변위값

단위 : cm

| 구분 | 시공직후 | | 담수후 | | 변위차 | |
|------|---------|---------|---------|----------|-------|-------|
| | X방향변위 | Y방향변위 | X방향변위 | Y방향변위 | X방향변위 | Y방향변위 |
| 상류상단 | (-)1.57 | (-)8.20 | (-)2.01 | (-)8.20 | 0.44 | - |
| 중앙상단 | (-)1.82 | (-)7.68 | (-)1.82 | (-)7.68 | - | - |
| 하류상단 | (-)1.87 | (-)6.02 | (-)1.78 | (-)5.95 | 0.09 | 0.07 |
| 상류중단 | (-)3.34 | (-)8.32 | 1.42 | (-)13.02 | 4.76 | 4.7 |
| 중앙중단 | (-)0.03 | (-)0.29 | 0.02 | (-)0.30 | 0.05 | 0.01 |
| 하류중단 | (-)0.05 | (-)8.00 | (-)1.99 | (-)8.01 | 1.94 | 0.01 |
| 상류하단 | 0.02 | (-)0.04 | 0.06 | (-)0.08 | 0.04 | 0.04 |
| 중앙하단 | (-)0.01 | (-)0.26 | 0.02 | (-)0.27 | 0.03 | 0.01 |
| 하류하단 | (-)0.02 | (-)0.04 | (-)0.02 | (-)0.04 | - | - |

3.2 응력분포

Y방향 응력도는 깊이에 따라 비례적으로 증가함을 보여 주고 있으며, 코아와 록재료의 경계부에서 약간의 비균질적으로 응력이 발생하고 있다.

안전율도는 전체적으로 안전율이 1.5이상을 확보하고 있으나 코아부분 일부와 경사면 표면의 일부부에서 안전율이 낮은 영역으로 나타나고 있다.(Fig. 3 참조)

담수후 X방향 응력도(σ_x)는 응력발생은 상부에서부터 깊이에 따라 증가하나 수압에 의하여 수압이 작용하지 않을 때보다 높게 나타났고, Y방향 응력도(σ_y)는 깊이에 따라 비례적으로 증가하고 있으나 수위가 없을 때와는 약간 다르게 나타난다. 그리고 전반적으로 응력이 약간 높게 나타나고 있다.

수압에 의해 제체 배면으로 발생하는 안전율이 낮은 영역은 발생하지 않고, 전체적으로 안전율이 낮은 영역도 감소하였다.

시공직후 응력변위를 확인한 결과 X방향 응력도는 깊이에 따라 거의 비례적으로 증가하는 것으로 나타나고 있으나 코아의 하부와 기반암이 만나는 부근에서 상부보다 더 큰 응력이 발생하고 있다. 이것은 기반암이 변형을 일으키지 않기 때문에 상부에서 전달되는 변위가 응력으로 발생된 것으로 평가된다.

3.3 사면안정

담수에 따른 복합댐의 사면거동을 분석하기 위하여 사면안정 계산을 시행하였다. 계산식은 Bishop계산식과 Tschebotarioff계산식을 사용하였다.(Table 3. 참조)

사면안정 계산결과 동 연구대상 댐에서는 담수후 하류사면의 안전율이 크게 나왔다.

이는 단순히 안전율만 비교하면 이상할 수 있으나, 담수전 하류사면은 하단측에서 활동면이 나타나고, 담수후에는 하류사면 상단측으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 실질적으로도 하류에선 압축현상이 증가되어 가능한 결과로 사료된다.

3.4 침투류 해석

사력댐에서는 담수시 제체내 및 기초암반에 침투현상이 수반되며, 침투수의 작용에 의해 제체내의 간극수압이나 양압력이 발생하고, 침투파괴 혹은 전단저항력의 저하 등 댐의 안정을 손상하려는 현상이 일어나고, 제체 파괴의 큰 인자가 될 우려가 있다.

댐제체의 침투수에 의한 침투파괴 혹은 전단저항력의 저하 등으로 댐의 안정을 손상하는 현상이 일어나

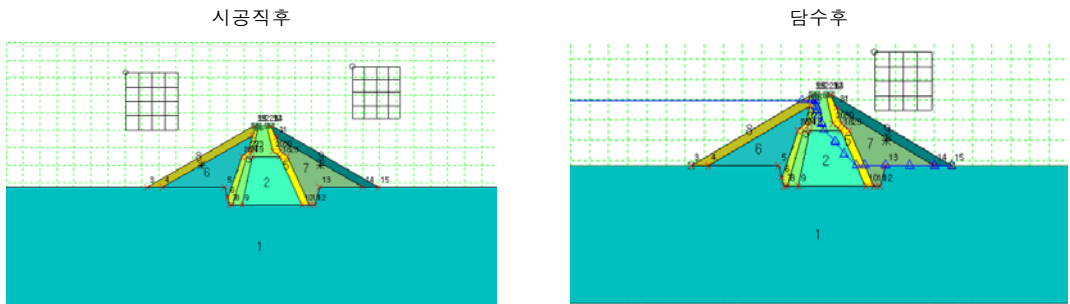


Fig. 4 사면안정 계산결과

Table 3 안전율 계산결과

| 해석방법 | Bishop법 | | Tschebotarioff법 | |
|------|---------|-------|-----------------|-------|
| | 상류사면 | 하류사면 | 상류사면 | 하류사면 |
| 시공직후 | 2.094 | 1.918 | 2.014 | 1.803 |
| 담수후 | - | 1.975 | - | 1.784 |

고 지진시에 댐체체 파괴의 주요 인자가 될 가능성이 있어 침투류해석을 수행하여 댐체체에 생성되는 침윤선을 혹은 간극수압 등을 구하여 댐체체의 안정성 계산에 사용하는 것이 바람직하다.

본 연구대상댐의 축제이후 체체배면에 담수가 되었을 때 사력댐의 체체내부의 침윤선을 확인하였다.

아래와 같이 본 연구에서 침투류 해석을 위하여 복합댐중 록필댐 부분만 침투류 해석을 실시하였으며, 이 때 해석을 위하여 사용한 물성값은 Table 4와 같다.

체체를 통과하는 침윤선은 Fig. 5와 같으며, 그림에서 보는 바와 같이 core부에서 침윤선이 급경사를 이루며 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

4. 진도법을 적용한 안정해석

지진에 대한 구조물의 안전성을 평가하기 전에 정적인 상태에서의 응력상태를 평가해야 한다. 평상시의 응력상태에서 지진시의 응력상태로 변한다고 했을 때의 비교결과를 낼 필요가 있다.

4.1. 유사 정적 FEM 해석

구조물에 작용하는 불규칙적인 진동인 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중의 일부분을 수평 또는 수직력으로 재하하여 정적해석을 수행하는 방법이며, 지진시 구조물의 안정이나 부재의 응력계산을 평

Table 4 록필댐부분의 침투류 FEM해석 물성값

| 재 료 | 투수계수 (cm/sec) | 재 료 | 투수계수 (cm/sec) |
|-------|------------------|--------------|------------------|
| con'c | 8.64E-7 | Rock(Fine) | 8.64E-2 |
| Core | 2.94E-5 | Rock(Coarse) | 6.64E-1 |

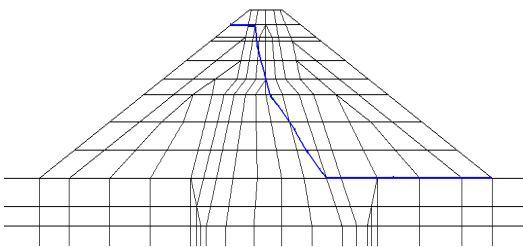


Fig. 5 침윤선도

상시의 해석과 같이 간단히 할 수 있기 때문에 많은 구조물의 내진설계에 적용한다.

본 연구대상댐의 집합부 대해 수평진도 0.12(g)와 0.18(g)를 적용하여 수평진도의 효과를 고려하기 위하여 지반의 양측방을 수평방향으로는 자유롭게 움직이게 하였고 수직방향으로만 구속하였다.

지진력을 고려하지 않은 평상시의 해석결과에 비하여 댐체가 상류측에서 하류측으로의 변위가 발생하고 있음을 알 수 있으며 체체 천단의 직하부와 하류측 범면부의 하부에서 변위가 집중적으로 발생하였다

4.1.1 절점별 변위

변위의 발생 양상을 비교검토 하기 위하여 댐마루부의 양끝단과 중앙부, 댐체의 중앙부와 댐 사면의 중앙부, 댐하부의 양끝단과 중앙부로 하여 모두 9개 지점에 대하여 변위를 검토하였다.

그 결과는 0.12g보다 0.18g를 적용하였을 때 Y방향보다 X방향이 큰 변위가 발생했고, 상단은 큰 변위가 발생하였지만, 하단은 거의 변위 발생이 없어 복합댐의 경우 지진시 하단보다는 상단이 취약하다는 결과를 얻을수 있었다.

4.1.2 해석결과

(1) 수평진도 0.12g 적용시

Y방향 응력도 정적해석결과와 거의 유사한 결과이다. 수평진도만을 고려하였기 때문에 수직방향의 응력 변화는 거의 없을 것이라 예상된다. 전단 응력도는 체체 전면의 하부에서 발생하는 전단응력이 정적해석 결과보다 두배 정도 크게 나타났으며, 배면에서는 전단 응력의 크기는 같으나 그 영역이 현격히 줄어들었다.

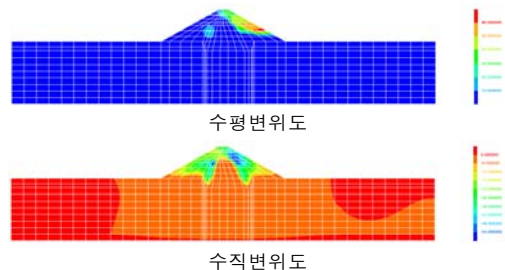


Fig. 6 수평진도 0.12g 적용시 변위도(진도법)

즉, 전단응력의 영향이 줄어들었다고 할 수 있다. 안전율이 낮은 영역이 넓게 나타난다. 이것은 수평진도를 크게 적용한 경우는 제체 상부가 위험하게 나타난다.

(2) 수평진도 0.18g 적용시

수평진도 0.12g를 적용한 해석결과에 비하여 하류측 범면부에 매우 큰 수평방향 변위가 발생함을 알 수 있으며 댐 천단의 하류측에서 매우 큰 연직변위가 발생하였다. Y방향 응력도는 정적해석결과와 거의 유사한 결과이다. 수평진도만을 고려하였기 때문에 수직방향의 응력변화는 거의 없을 것이라 예상된다.

전단 응력도는 제체 전면의 하부에서 발생하는 전단 응력이 정적해석 결과보다 매우 크게 나타났다.

안전율도는 안전율이 낮은 영역이 넓게 나타나고 있다. 수평진도를 크게 적용한 경우는 제체 상부가 위험하게 나타난다. 이 안전율이 낮은 영역을 근거로 가상활동면을 결정하여 안전율을 계산하면 다음과 같다.

하류측 활동면은 수평진도 0.12g 적용시 1.589이며, 수평진도 0.18g일 때의 가상활동면상의 점안전율은 1.367로 나타나, 일반적으로 지진동이 클수록 안전율이 낮아지는 결과를 나타내었다.

(3) 사면안정 해석

지반해석 범용 프로그램인 Afimex에 내장되어 있는 사면안정계산프로그램인 Costanak에서 사면안정 해석을 시행하였고, 그 결과는 Table 5와 같이, Tschebotarioff법 보다는 Bishop법이 안전율이 크게 나왔다.

Table 5 사면안정해석 결과(등가정적)

| 해석방법 | Bishop법 | | Tschebotarioff법 | |
|-------|---------|-------|-----------------|-------|
| | 상류사면 | 하류사면 | 상류사면 | 하류사면 |
| 0.12g | - | 1.564 | - | 1.467 |
| 0.18g | - | 1.410 | - | 1.347 |

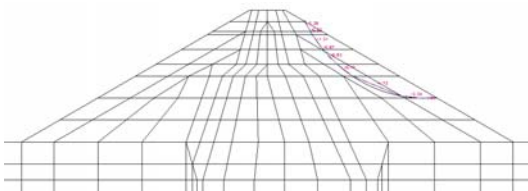


Fig. 7 가상활동면상의 점안전율(수평진도 0.12g)

4.2. 수정진도법을 적용한 안정해석

일반설계에서 진도는 댐상부에서 지면에까지 같다고 가정한다. 그러나 이 가정은 지진시 댐관측의 정밀도에 의문시 된다. 모든 관측결과에 의하면, 댐 상부진동은 저부진동에 비하여 크며, 그 비도 매우 크다. 그러므로 높은 댐의 경우에 댐 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 수정진도법의 해석도 필요하다.

Y방향 변위 분포도 진도법을 적용한 경우에 비하여 수평방향 변위의 크기가 전체적으로 증가하고 있으며 하류측 범면부의 아래쪽에서 집중적으로 큰 변위가 발생하고 있다. 이것은 사력댐부분서 발생한 변위의 경향과 유사한 것이다. 그러나 전체적으로 사력댐부분보다는 변위의 발생크기는 작다.

4.2.1 절점별 변위

변위의 발생 양상을 비교검토 하기 위하여 진도법과 같이 절점별 변위를 검토하였고, 그 결과는 0.12g보다 0.18g를 적용하였을 때 Y방향보다 X방향이 큰 변위가 발생했고, 상단은 큰 변위가 발생하였지만, 하단은 거의 변위 발생이 없어 진도법과 비슷한 결과를 나타내었다.

4.2.2 해석결과

(1) 수평진도 0.12g 적용시

전단 응력도는 전체적으로 나타난 응력의 발생 추이를 살펴보면 진도법을 적용한 경우에 비하여 지진력에

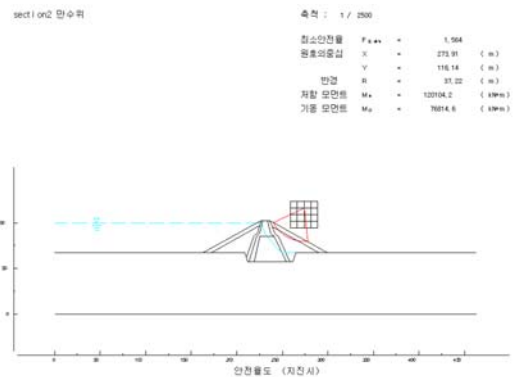


Fig. 8 Bishop법에 의한 원호활동

의한 응력의 크기가 증가하였으나 전체적인 경향은 거의 유사하다. 안 전율도는 전체적으로 안전율이 1.5 이상을 확보하고 있으나 코아부분 일부와 경사면 표면의 일부분에서 안전율이 낮은 영역이 나타나고 있다.

(2) 수평진도 0.18g 적용시

Y방향 변위 분포도 진도법을 적용한 경우에 비하여 댐체체의 하류측 상부에서 수평방향 변위와 연직변위가 크게 증가하였다. 안전율도 전체적으로 안전율이 매우 낮아졌음을 알 수 있다.

수평진도 0.12g 적용시 가상활동면상의 하류측사면 점안전율은 1.389이고 0.18g 적용시는 1.286으로 나타나 진도법과 비슷한 결과를 나타내었다.

4.2.3 사면안정 해석

수정 진도법에 의한 원호활동 계산결과 설계진도 0.12g 적용시 하류사면의 안전율은 1.179이며, 설계진도 0.18g 적용시는 1.002로 나타났다.

5 동적해석

5.1 동적해석에 적용한 물성값

본 댐의 동적해석을 수행하기 위하여 댐재료의 동적 물성값을 댐의 축제재료와 댐 표면에서의 깊이별로 수

개의 존(Zone)으로 나누어 해석을 수행하였다.

기반의 좌우 양단은 에너지 전달경계로 설정했으며 기반암의 하단부는 경암입을 고려하여 완전 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 또한 지진파는 기반의 하단에서 입사되는 것으로 하였다. 그리고 응력은 정적축제해석과 합산한 응력결과를 사용하였으며, 동수압의 영향은 부가질량법을 사용하여 적용하였다.

5.1.1 지진동 0.12g를 적용한 해석결과

색분리도로 나타낸 각 해석결과는 지진동이 적용된 시간이력에서 가장 큰 값이 발생하였을 때를 추출하여 나타내었다.

X방향 가속도는 시간이력에 따라 본댐의 천단에서 가장 크게 발생한 것으로 나타났으며 밀도가 높아 구속압이 큰 체체의 중앙부는 가속도가 작게 발생하였다.

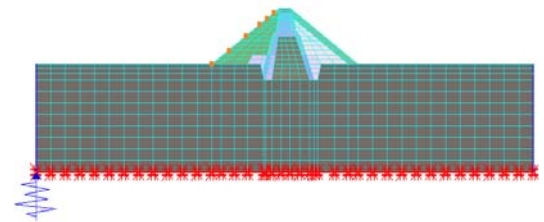


Fig. 10 동적해석 모델링

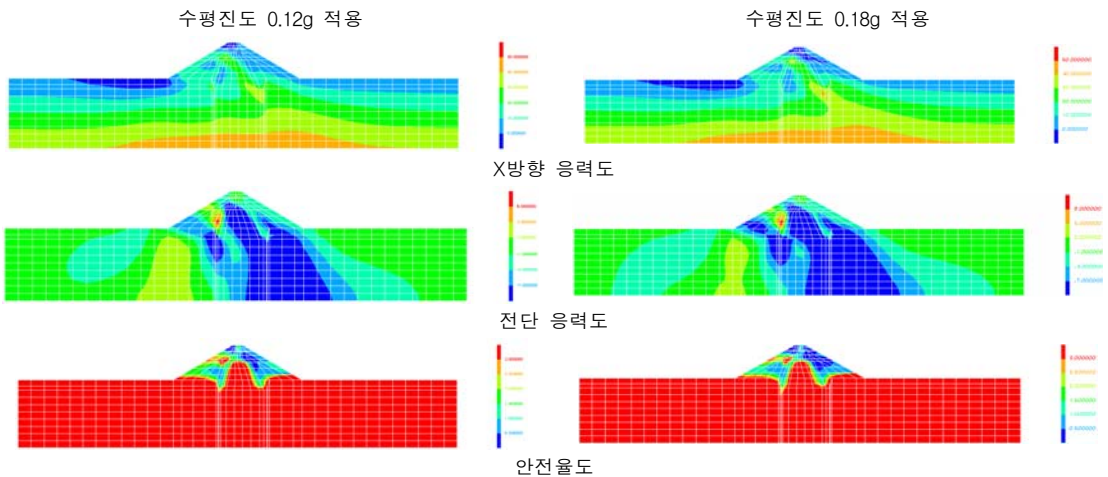


Fig. 9 수평진도 0.12g 및 0.18g 적용시 응력도(수정진도법)

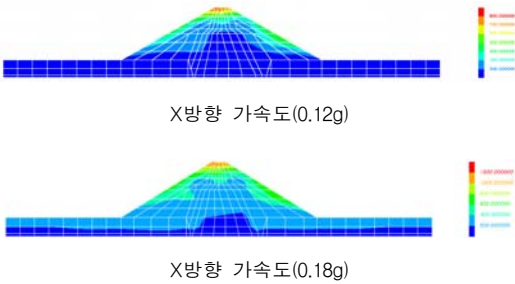


Fig. 11 지진동을 적용한 가속도

Y방향 가속도는 시간이력에 따라 그 분포가 댐의 천단에 집중되어 있으며 중앙의 코어부에 비하여 사력 재료에서 더 큰 최대 Y방향 가속도가 발생하였다. 또한 전체적으로 코어재에 비하여 사력재료에서 큰 가속도가 발생하였다.

5.1.2 지진동 0.18g를 적용한 해석결과

X방향 최대가속도는 시간이력에 따라 본댐의 천단에서 가장 크게 발생한 것으로 나타나 밀도가 높아 구속압이 큰 제체의 중앙부는 가속도가 작게 발생하였다.

Y방향 최대가속도는 시간이력에 따라 댐의 천단에 집중되어 있다. 또한 전체적으로 코어재료와 콘크리트 재료에 비하여 사력재료에서 큰 가속도가 발생하였다.

댐의 천단에서 최대변위 및 가속도가 발생한 시간에서의 응력은 지진파가 적용된 시간전체를 통해서 가장 큰 값에 해당하는 경향을 보이고 있다. 각 응력은 주로 사력댐의 중앙하부에 있는 콘크리트댐부에 큰 값을 나타내고 있는데 그것은 콘크리트댐부가 변위에 저항하고 있기 때문이다. 또한 가속도의 최대값이 발생한 시간과 최대변위가 발생한 시간이 시차를 두지 않는 것은 사력댐 내부의 콘크리트부의 강성에 의한 영향으로 판단된다.

5.2 절점별 최대변위값

댐축에서 상단, 중앙, 하단, 저부 4개 지점에 대하여 시간에 따른 응답변위를 검토한 결과 Table 6 및 Fig. 13과 같이 상단에서 변위량이나 가속도가 큰 결과가 나왔다.

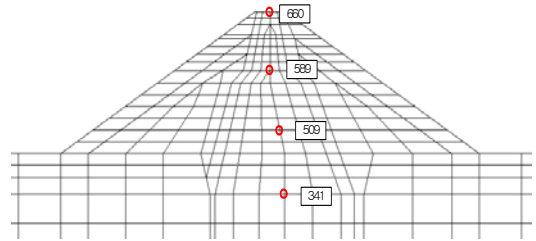


Fig. 12 변위 표시 대상 절점 위치도

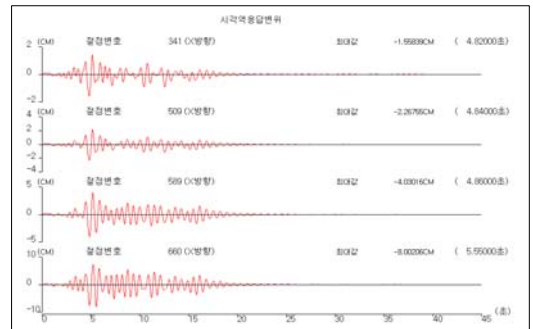


Fig. 13 시간에 따른 X방향 응답변위도

Table 6 절점별 최대 변위값 및 가속도

| 구분 | x방향 최대변위 (cm) | 발생 시간 (sec) | x방향 최대가속도 (gal) | 발생 시간 (sec) | |
|-------|---------------|-------------|-----------------|-------------|------|
| 절점 번호 | 660 | -8.00 | 5.55 | 896.46 | 5.55 |
| | 589 | -4.03 | 4.86 | -348.06 | 5.22 |
| | 509 | -2.27 | 4.84 | -215.91 | 5.18 |
| | 341 | -1.56 | 4.82 | 153.27 | 4.80 |

상단과 저부와의 최대변위는 약 4.5배 가 차이가 났고, 가속도 역시 약 1.2배의 상단이 크게 나와 저부와 댐의 내진해석시 상단과 저부까지 일정한 진동을 주는것보다 상단을 크게 주는 것이 유리할 것으로 사료된다.

6. 결 론

- 1) 복합댐의 시공직후 정적 F.E.M를 적용한 결과 수평방향 변위는 댐체의 법면부 하단의 1/3지점에서 가장 크게 발생하였고 최대연직방향 침하량은 콘크리트 블럭과 접해있는 코어부의 중앙에서 발생

하였다.

- 2) 담수에 의한 정수압을 고려한 F.E.M해석을 수행한 결과 수평방향 변위의 거의 없으며, 수위를 고려하지 않은 경우와 거의 유사하며, 수평방향 변위의 크기는 수위를 고려하지 않은 경우보다 더 크게 발생되었고, 담수후에는 Y방향으로는 변위가 미비하였으나, X방향으로는 댐 중간위치에서 변위가 큰 것으로 나타났다.
- 3) 안전율도는 전체적으로 안전율이 1.5이상을 확보하고 있으나 코어부분 일부와 경사면 표면의 일부에서 안전율이 낮은 영역이 나타나고 있고, 사면 안전율은 Bishop계산식이 Tschebotarioff계산식보다 안전율이 크게 나왔다.
- 4) 지진동시 Y방향보다 X방향이 큰 변위가 발생했고, 상단은 큰 변위가 발생하여 복합댐의 경우 지진시 하단보다는 상단이 취약하다는 결과를 얻을 수 있었고, 이는 일반 사력댐의 결과와 비슷하다. 하류측 활동면은 유사정적보다 수정진도법이 보수적으로 나왔다. 이는 높은 댐의 경우 댐 상부진동은 저부진동에 비하여 크며, 그 비도 크기 때문에 댐 상부에 대하여 높은 값의 설계진도를 채택하는 것은 합리적이기 때문이다.
- 5) 동적해석 결과 X방향 최대가속도는 시간이력에 따라 본댐의 천단에서 가장 크게 발생하였고, 중앙부에서 가속도가 작게 발생하였다. Y방향 최대가속도는 시간이력에 따라 댐의 천단에 집중되어 있다. 또한 전체적으로 코어재료와 콘크리트재료에 비하여 사력재료에서 큰 가속도가 발생하였다.
- 6) 콘크리트 중력댐과 사력댐의 접합부에서 콘크리트

댐 부분에서는 안전율이 2.0이상을 확보하고 있어 기준안전율보다 상당히 높은 것으로 나타났지만, 콘크리트 댐위에 놓인 흙의 경우는 수평지진력을 적용하였을 때 안전율이 1.2정도로 상대적으로 낮은 안전율을 나타내었다.

- 7) 복합댐의 경우 사력댐과 콘크리트댐의 접합부에서 댐의 특성상 다른 부위보다 상대적 낮은 안전율이 나타나고 있어 보다 내진성능을 향상시키기 위해서는 본 접합부의 하류측 사력댐 부분에 자연친화적 성토층을 조성하는 것을 검토할 수 있겠고, 복합댐 접합부의 동적 상호거동특성을 분석하기 여러 규모의 지진동으로 3차원 수치해석을 시행하여 응력, 변위, 안전율의 비교·검토가 필요한 실정이다.

참고문헌

1. 한국수자원공사, “대청다목적댐 거동분석 및 안정해석 보고서”, 1988.
2. 한국수자원공사, “3개댐(소양강댐, 대청댐, 안동댐) 거동분석 및 안전진단평가 보고서”, 1995.
3. 한국수자원공사, “대청 다목적댐 정밀안전진단보고서”, 2000.
4. 산업기지개발공사, “대청다목적댐 공사지”, 1981.
5. 한국수자원공사, “수자원시설물의 내진성능평가 연구”, 2001.
6. 오병현, 김재홍, “복합댐의 담수에 따른 거동분석에 관한 연구” 한국지반공학회, 2007년 가을 정기학술발표회, 2007.

(접수일자 : 2007년 8월 13일)