

3차원 유한요소해석에 의한 필 댐의 3가지 단면 형상을 고려한 지진해석

Dynamic Analysis of 3 Different Cross-Sectional Shapes of a Fill Dam using 3D FEM Analysis

최 병 일[†]
Byoungil Choi

Received: June 5th, 2015; Revised: June 15th, 2015; Accepted: June 25th, 2015

ABSTRACT : Dam movements are identified in real-time with measuring instruments for dam maintenance. However, for dams that have aged, the measuring instruments that were installed during the dam construction are frequently malfunctioning or completely failing altogether. Precision safety diagnosis is being executed for dams that are national facilities Type 1. During the diagnosis, a safety assessment is conducted for the dam body. Normally, during the analysis of dam safety, the widest cross-section is selected and a two-dimensional numerical analysis is taken place for the cross-section. However, numerous researchers have recently looked into applying the 3-dimensional numerical analysis program developments to precisely analyze the structure of the dam, as well as the surrounding strata, and the lower dam strata. In this study, PLAXIS 3D, a geotechnical generic FEM analysis program, was used to conduct dam safety assessments for earthquakes. The following were compared and analyzed: considering the seismic properties of the dam body with all zoned structures reflected as one rock-fill zone together with the dam body, considering the dam body as the rock-fill zone and the core zone, and the numerical analysis results. Thus, the study was aimed to analyze the impact properties of seismic waves according to the different zones.

Keywords : Dam maintenance, FEM analysis, 3-dimensional numerical analysis, Seismic properties

요 지 : 댐 유지관리 측면에서 계측기를 통해 실시간 댐 거동을 파악하고 있으나 노후 댐의 경우 댐 축조 시 설치한 계측기가 오작동하거나 작동되지 않는 경우도 빈번히 발생하고 있다. 1종 국가시설물인 댐은 정밀안전진단을 통해 주기적으로 댐의 상태를 파악하고 있으며, 정밀안전진단 시 댐체의 안정성 평가를 실시하고 있다. 일반적으로 댐 안정성평가 시 가장 큰 단면을 대표단면으로 적용해 2차원 수치해석으로 결론을 도출하고 있으나 최근 많은 연구자들이 3차원 수치해석 프로그램 기술 발달에 기인해 댐 형상, 주변지형 및 댐 하부지형 형상을 정확히 반영한 3차원 수치해석에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 지진에 대한 댐 안정성 평가를 위해 지반공학 범용 FEM 해석 프로그램인 PLAXIS 3D를 이용하여 준별 형상을 모두 반영한 댐체의 지진 특성과 댐체를 사력존 하나로 가정한 경우, 댐체를 사력존 및 코어존으로 가정한 경우와 수치해석 결과를 비교·분석하여 준별 형상에 따른 지진파 영향 특성을 분석하고자 한다.

주요어 : 댐 유지관리, 유한요소해석, 3차원 수치해석, 지진특성

1. 서 론

지진의 경우 전 세계적으로 사람들이 느낄 수 있는 규모 3.5 이상의 지진은 연간 37,000회 정도이고 건물 등 상당한 피해를 입히는 규모인 규모 6.2 이상의 지진은 연간 100회 이상 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 국내에서도 1978년부터 2004년까지 27년간 규모 3.0 이상의 지진이 641회 관측되는 등 최근 지진발생 빈도가 급증하는 것으로 나타났다. 댐 건설 시 지반조건, 댐체 재료의 구성, 수치해석 결과 및 주변 환경요건 등 여러 가지 조건을 반영해 축조하지만

건설 후 댐 안정성 평가는 댐체 내부 대표 단면을 이용한 2차원 수치해석 결과를 바탕으로 결론을 도출하는 것이 일반적이다. 하지만 2차원 해석으로는 댐체 내·외부조건 및 하부 지반의 계곡 형상 등을 정확히 반영하는데 한계가 있어 일부 연구자들은 3차원 해석을 적용하여 보다 정확한 댐 안정성 평가를 수행하기 위해 노력하고 있으며 이와 관련하여 많은 연구가 수행되었다.

2차원, 3차원 지진응답해석을 통해 댐의 가속도 응답 특성을 비교·분석하기 위해 횡성댐에 최대가속도 0.098g, 0.11g, 0.154g인 Hachinohe 지진파를 입력 지진하중으로 하여 지

[†] Korea Infrastructure Safety Corporation (Corresponding Author : bichoi@kistec.or.kr)

진응답해석을 수행하였고, 그 결과 정상부에서 응답가속도 시간이력곡선 파형이 유사함을 알 수 있었으며 정상부 최대 응답가속도 크기 차는 입력 지진의 PGA가 클수록 차가 감소하는 것으로 나타났다(Ha et al., 2009a). Mohr-Coulomb 모델과 Hysteretic Damping 모델로 구분하여 지진응답해석에 의한 가속도 응답특성에 대해 연구가 수행되었으며, 연구결과 입력 지진하중의 크기에 따라 각 모델별 댐 정상부 가속도 응답특성은 두 모델 다 입력파속도 수준이 커질수록 정상부에서의 가속도 증폭은 감소하는 것을 알 수 있었지만 고유진동수, 증폭비는 모델에 따라 다른 결과를 나타내는 것으로 나타났다(Ha et al., 2009b).

국내지진 발생빈도가 급증하는 것을 반영하여 비교적 작은 구조물인 저수지 댐을 대상으로 내진 성능평가를 수행하였으며 그 결과를 가지고 저수지 댐의 지반 액상화에 대한 안정성 해석을 수행하고 또한 간극수압-지반 상호작용을 고려한 완전연계해석(Fully coupled analysis)을 수행하여 과잉 간극수압변화와 지반 동적 변형 특성을 검토하였다(Park et al., 2006). Park(2014)은 필 댐의 내진 평가를 위해 Newmark 기반의 동적해석을 적용하여 국내 4개 필 댐(중심코어형 사력댐 3개소, 표면 차수벽형 석괴댐 1개소)에 대한 내진 안정성을 평가하였다.

해외에서도 댐 지진에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 지진파에 의한 댐의 변위 및 간극수압의 변화에 따른 연구와 액상화에 의한 댐 마루 최대변위에 대한 연구(Chakraborty & Choudhury, 2011)를 진행하였고 2D와 3D 비선형 해석으로 락필댐 아스팔트 콘크리트 코어의 거동을 비교·분석한 연구(Akhtarpour & Khodaii, 2012) 등이 있다.

본 연구에서는 안동에 있는 다목적 A 댐을 대상으로 국내에서 주로 3차원 해석 시 매쉬반영의 어려움으로 인해 사력존으로만 가정한 형태 혹은 사력존과 코어존의 형태만 반영한 해석과 달리 Zone별 형상, 계곡부 형상, 댐체 주변지형 및 하부 지층 등을 축조된 형태와 유사하게 3차원으로 모델링 후 지역에 해당하는 인공지진파를 생성하여 댐체에 적용하고 변위특성 및 가속도 증폭 특성 등을 분석하고자 한다.

2. 국내·외 댐 내진설계기준

주변국가의 심각한 지진(2011 일본 Tohoku 지진 : 규모 9.0, 2008 중국 Sichuan 지진 : 규모 7.9)으로 인해 흙댐의 붕괴, 콘크리트 댐의 손상 등 다양한 형태의 피해가 발생하였다. 이와 더불어 최근 국내에서도 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 높아져서 시공 중이거나 시공 예정인 시설물에 대해서는 내진설계가 이루어지고 있다.

댐 설계기준(국토해양부, 2011)은 종래의 정역학적 설계방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 하고, 진도법으로 설계된 댐체 단면의 상세 검토가 필요하다면 동역학적 해석 방법에 의한 검토를 수행하도록 권장하였다. 동역학적 해석 시 개정된 댐 설계기준(국토해양부, 2011)에서는 내진 특등급 댐에 대해 기존재현주기를 1000년 빈도에서 2400년 빈도로 내진 1등급 댐 역시 500년에서 1000년 빈도로 상향 변경하였으며 설계지반운동도 수평지반운동 뿐만 아니라 수직지반운동도 동시에 고려해야 한다고 명시하였다. 지진하중은 시간이력하중을 적용하는데 이때 하중은 댐 지역 인근에서 발생된 지진 또는 인공지진을 활용한 3개의 시간이력하중을 채택하라고 되어있으나 현재 우리나라에는 강진의 지진데이터가 전무한 상황이어서 내진성능평가 시 구조물이 시공될 지역의 지진구역계수, 지반의 종류, 위험도 계수를 고려하여 설계응답스펙트럼에 맞는 인공지진파를 생성하여 내진성능을 평가하고 있다. 필 댐의 내진해석의 경우 상시만수위를 검토 수위로 하며 필요 시 기타 낮은 수위에서도 검토한다고 되어있으며, 댐 형식별 수치해석 모델링은 필 댐과 콘크리트 중력댐의 경우 2차원으로 아치댐은 3차원으로 모델링 하라고 되어있다.

해외사례로 Wieland(2012)는 대댐의 지진에 대한 영향을 살펴보기 위해 기능수행지진(OBE)과 안정성평가지진(SEE)으로 구분하였다. 댐의 경우 기능수행지진(OBE)에 대해서는 댐 운영에 영향을 주는 구조적인 피해(균열, 변형, 누수 등) 혹은 저수지가 허용할 수 있는 수준을 넘어서는 피해가 없어야 하며, 안전 관련 구조물과 설비들은 지진 전·후 온전한 기능이 보장되어야 한다고 권장하고 있다. 안정성평가 지진(SEE)에 대해서는 댐의 안전이 보장되는 한 구조적인 피해(균열, 변형, 누수 등)는 허용되 댐 하류 지역에 홍수를 일으킬 수 있는 저수지 물이 통제 불가능할 정도의 대량 방출은 없어야 하며, 안전 관련 구조물과 설비들의 경우 적절한 기능에 영향을 주지 않는다면 경미한 뒤틀림은 허용한다고 명시되어 있다. 국내 내진성능평가(한국시설안전기술공단, 2004) 시 Fig. 1과 같이 예비평가, 1단계 평가, 2단계 평가로 구성된다. 하위평가단계에서는 보다 보수적인 평가 방법을 적용하고 상위평가단계로 갈수록 고등해석기법을 적용하여 평가의 합리성과 경제성을 고려하고 있다. 예비평가단계에서는 공사지, 설계자료, 준공도, 수리 수문 자료, 기존안정성 평가 자료 등을 검토한 후 현장답사를 병행하여 내진 성능 평가 1단계의 필요 여부를 결정한다. 여기서 조사된 자료는 내진성능평가 1단계 및 2단계를 위한 참고자료로도 활용된다. 내진성능평가 1단계는 현장 조사형태로 이루어지며 육안 조사, 현장 시험 등을 이용하여 댐의 현재 상태를 파악하기 위해 실시되고 댐 제체 시료를 채취하여 실

내 시험을 병행하며, 수행된 실내시험 결과값과 현장 조사 결과를 가지고 간편 해석을 수행하게 된다. 이때 수치해석은 액상화에 대한 간편 해석과 제체의 유사 정적해석을 수행하여 안정성을 평가하며, 제체 및 기초 지반의 내진성능이 불안정하다는 결과가 나왔을 경우 내진성능 평가 2단계인 정밀 해석을 수행한다. 정밀 해석을 수행하기 위해서는 시추조사, SPT 및 CPT, 크로스홀 및 다운홀 시험 등을 통하여 시료의 채취와 함께 동적 전단탄성계수 등의 물성을 수

집하며 실내 시험을 수행하고, 흙의 동적 물성 및 콘크리트의 정밀한 물성을 확보하여 상세해석을 수행하게 된다.

3. 3차원 FEM 수치해석 조건

수치해석 대상구조물은 높이 73m, 길이 515m, 총 저수량 5억 9,500만³의 제원을 가진 안동에 위치한 다목적 사력댐이며, 1984년 12월에 착공하여 1993년 12월 31일 준공되었다.

3차원 FEM 수치해석을 위해 상부 댐체 존별 형상, 주변 지반, 댐 하부형상 및 하부지반을 고려하였으며, 댐체 하부지반은 댐체의 높이와 동일한 EL. 22m까지 적용하였다. 댐체의 존 구성에 따른 지진파의 영향을 살펴보기 위해 (1) 존별 형상을 모두 반영한 형태의 해석(Normal, Case 1), (2) 댐체를 사력존 형태로 반영한 해석(Sand & Gravel, Case 2), (3) 사력존의 형태에 코어만 반영한 해석(Sand & Gravel with Core, Case 3)의 3가지 조건에서 댐체, 댐체 주변지반, 댐체 하부지반의 형상을 반영하여 Mohr-Coulomb Model을 적용하여 수치해석을 실시하였다. Fig. 2는 대상 댐의 상세 단면 형상을 나타내고 있으며, Fig. 3은 3차원 해석 프로그램에 적용된 댐체의 형상을 나타내고 있다.

각기 다른 존별 형상의 최대한 동일한 위치에 해당하는 부분의 특성을 파악하기 위해 댐 마루 부분은 좌표(260.9, 272.6, 168)를 기준으로 Z축 방향으로 145m, 120m, 95m 지점 및 Bed Rock 하단부분 22m 지점을 포함한 5점을 선택하였다. 3차원 해석에 적용된 Mesh 중 Case 1의 경우 30,461개의 Element와 44,374개의 node로 구성되었으며 본 해석에 적용된 물성치는 Table 1과 같이 요약할 수 있다. 수치해석 대상 범위는 X축으로 482.6m, Y축으로 730m, Z축으로는 댐 사면 높이를 고려한 바닥면(EL.22m)에서 172m를 적용하였으며, X, Y축은 지진파의 반사 영향을 제외하기 위해 Viscous Boundary를 이용한 반무한사면 형태를 가정하였다. Viscous Boundary는 경계면을 고정하는 대신 Damper 역할을 하는 조건으로 경계면에 응력을 증가시켜 지진파의

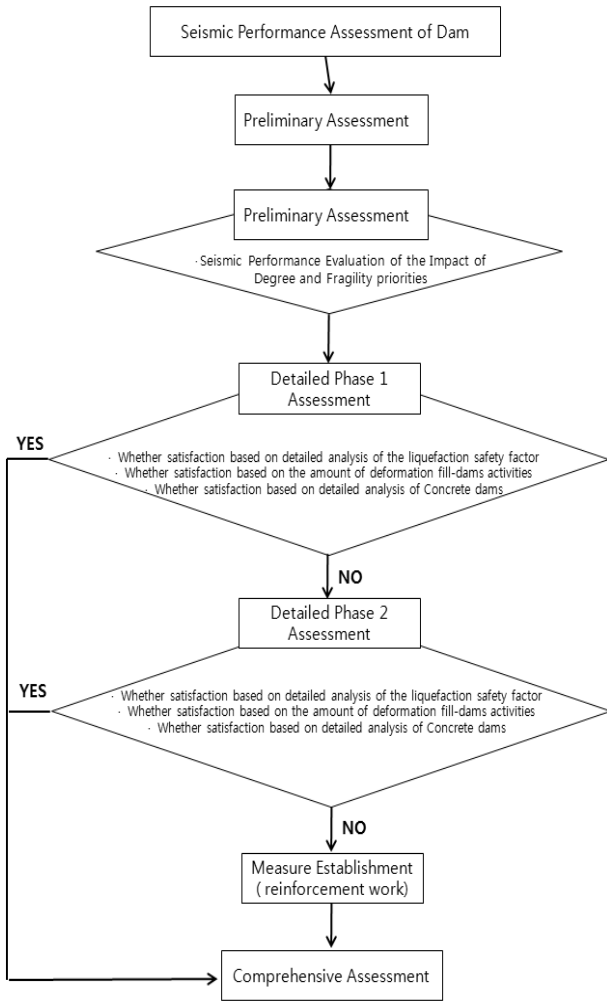


Fig. 1. Seismic performance evaluation procedure

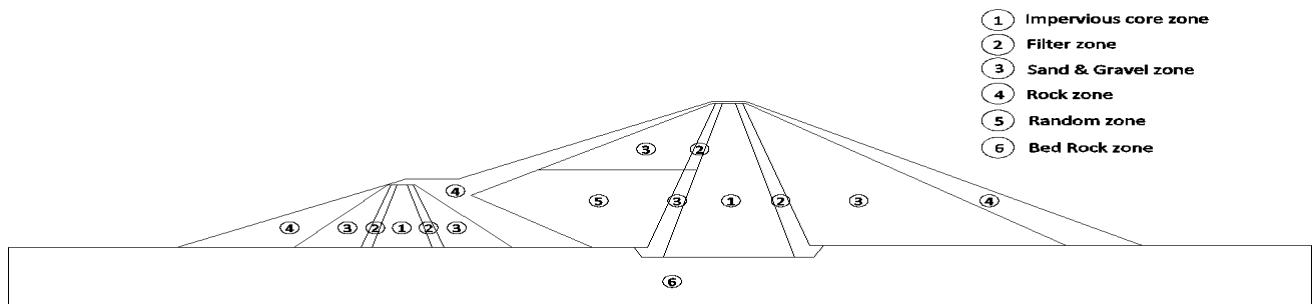
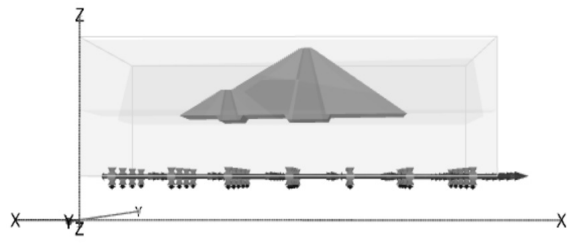
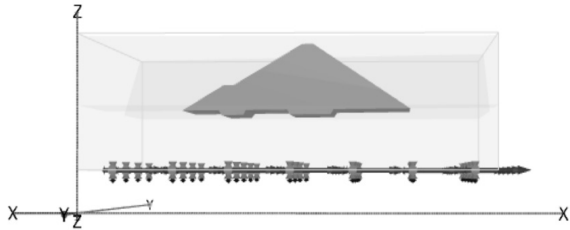


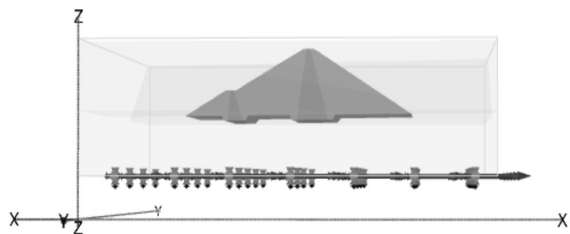
Fig. 2. Cross-section view of dam body



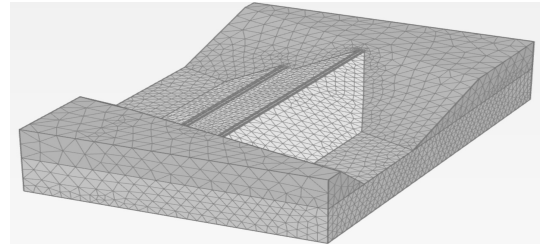
(a) Case 1 (Normal)



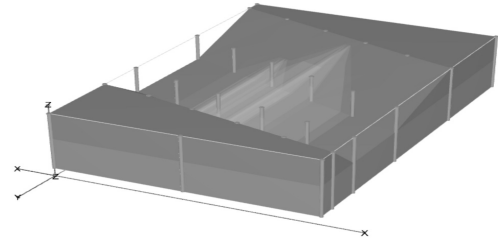
(c) Case 2 (sand&gravel)



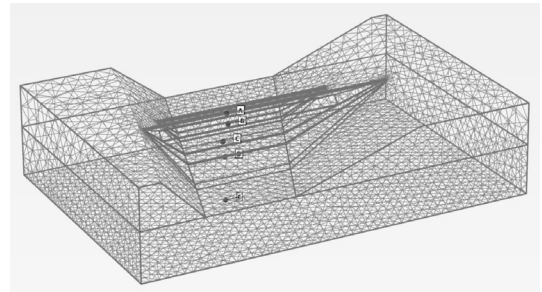
(e) Case 3 (sand&gravel with core)



(b) Mesh



(d) Strata



(f) Coordinate positions

Fig. 3. Cross-section view of dam body with numerical analysis applied

Table 1. Engineering properties

| Parameter | Core | Filter | Sand and gravel | Rock | Random | Bed rock | Mountain slope |
|---|---------|---------|-----------------|---------|---------|-----------|----------------|
| γ_{sat} (KN/m ³) Wet unit weight | 20.67 | 21.61 | 21.65 | 21.56 | 21.56 | 23.52 | 21.65 |
| G (KN/m ²) Shear modulus | 655,600 | 684,500 | 504,600 | 417,600 | 417,600 | 3,577,000 | 504,600 |
| C (KN/m ²) Cohesion | 49.9 | 9.8 | 9.8 | 9.8 | 9.8 | 9.8 | 9.8 |
| Φ (Friction angle) | 31 | 37 | 38 | 42 | 37 | 45 | 38 |

반사를 흡수하는 역할을 한다. 프로그램에 적용한 Viscous Boundary 조건은 Lysmer & Kuhlmeyer(1969)에 의해 정의 되었으며, X 방향의 Damper로 인하여 흡수된 축응력과 전단응력요소들은 다음과 같다.

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p U_x \quad (1)$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s U_y \quad (2)$$

ρ 는 재료의 밀도를 나타내고 V_p , V_s 는 압축파 속도 및 전단파 속도를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{ocd}}{\rho}}, \quad E_{ocd} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \rho = \frac{\gamma_{unsat}}{g} \quad (3)$$

E_{ocd} 는 탄성계수를 나타낸다.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \rho = \frac{\gamma_{unsat}}{g} \quad (4)$$

G 는 전단탄성계수를 나타낸다.

4. 시간영역 인공지진파 적용

일반적으로 지진응답해석을 위한 가속도 시간이력은 내진설계를 하고자 하는 지점에서 기록된 지진기록을 사용하는 것이 가장 이상적이지만 이러한 경우는 극히 드물며, 특

히 국내의 경우에는 사용할 수 있는 지진기록이 거의 없기 때문에 인공지진 및 여러 지역에서 계측된 지진기록을 이용하여야 한다. 이러한 지진기록은 내진설계 대상지역에서 발생 가능한 모든 지진의 주파수대역을 포함해야 하기 때문에 인위적으로 지진파를 생성해야 한다. 지진해석에 앞서 대상 A 댐의 상시만수위인 163m에 대한 정상류(Steady State) 조건에서 van Genuchten Model을 이용하여 3차원 침투해석을 실시하고, 그 결과를 가지고 지진해석을 수행하였다. 대상 댐은 지진구역상 제1구역에 기초지반의 종류는 보통암(Sb)으로 구분되고 이를 고려한 설계 지진계수 Ca와 Cv 모두 0.11이며, 2,400년 재현주기의 위험도 계수(I)는 2.0에 해당된다. Earthquake Maker를 이용하여 지진지속시간이 20초이고, 강진지속시간은 15초, PGA가 0.22g인 인공지진파를 생성하였으며 Fig. 4는 생성된 인공지진파와 설계스펙트럼을 나타내고 있다. 3차원 수치해석 적용 프로그램은 지반공학 범용 FEM 해석 프로그램으로 댐 지진해석이 가능한 네덜란드 Plaxis社에서 개발한 Plaxis 3D를 이용하였으며, 해석을 위해 Rayleigh Damping을 사용하였다. 감쇠정수(Damping ratio)는 일반적으로 2%~5%가 적정하며 본 연구에서는 5%를 적용하여 등가선형해석을 실시하였다.

5. 수치해석 결과

준별 특성을 반영한 FEM 시간이력 동해석 결과는 Fig. 5~9와 같이 나타났다. Fig. 5는 인공지진파를 댐 하부 기초 암반부에 적용하였을 때 Case 별 댐 마루 중앙부의 가속도 시간이력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대응

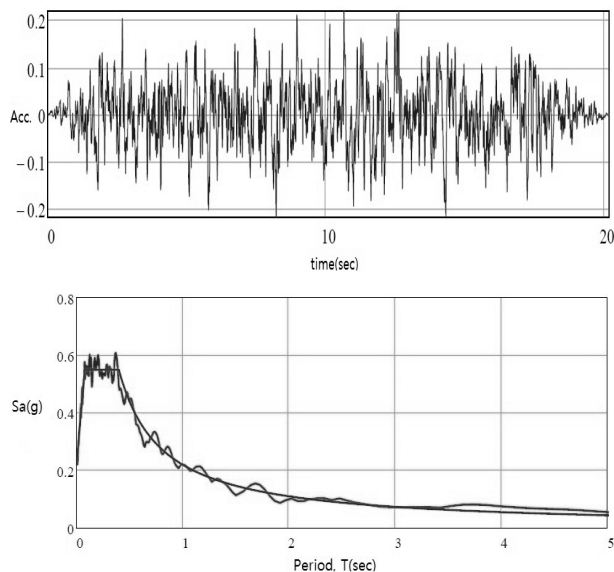
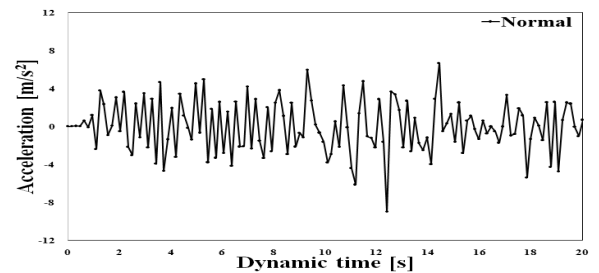
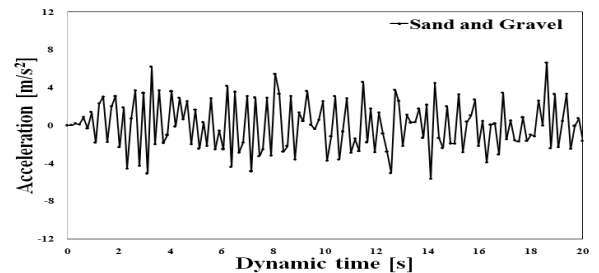


Fig. 4. Artificial seismic wave/design response spectrum

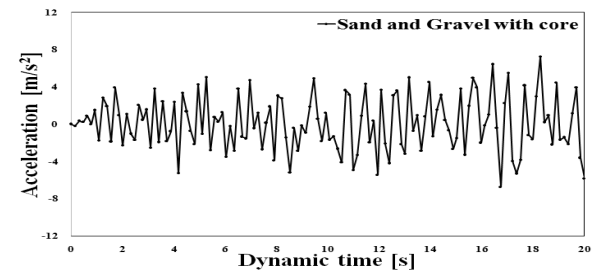
답가속도는 Case 1의 경우 약 8.9m/sec^2 , Case 2는 6.6m/sec^2 , Case 3은 7.5m/sec^2 정도로 나타났다. Fig. 5(d)는 각 Case의 깊이별 응답가속도 증폭량을 나타내고 높이 95m는 Bed Rock 상단 부분으로 22m 부분에 적용한 지진파가 탄성이 큰 동일매질이기 때문에 Case 별 증폭량이 유사하게 나타났으며, 댐 저부에서 댐 마루로 갈수록 증폭량이 커지는 것으로 나타났다. 코어가 존재하는 Case 1과 3의 경우 증폭특성이 비교적 크게 나타났으며 Case 2의 증폭이 상대적으로 작은 것으로 나타났다. Fig. 6은 Frequency 분석 결과이며 증폭현상을 보여주는 주파수 값이 Case마다 다르게 나타났다. 1.5Hz



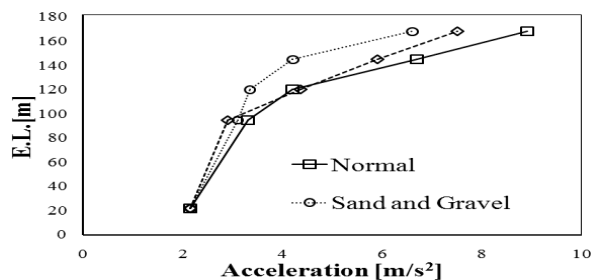
(a) Case 1 (Normal)



(b) Case 2 (sand&gravel)



(c) Case 3 (sand&gravel with core)



(d) Amplification of horizontal response acceleration by depth

Fig. 5. Time history of horizontal response acceleration at center of dam crest

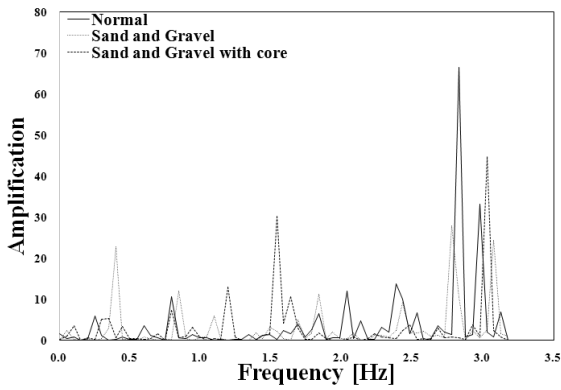


Fig. 6. Frequency analysis

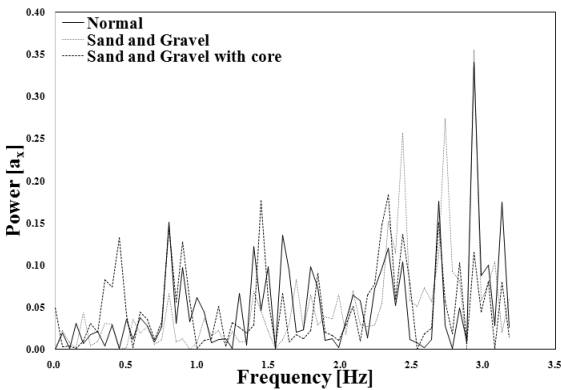


Fig. 7. Transfer function

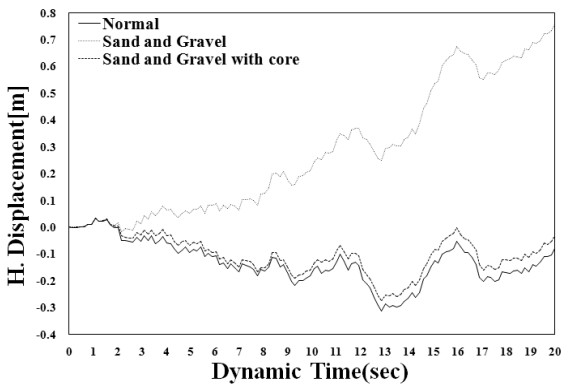


Fig. 8. Horizontal displacement time history

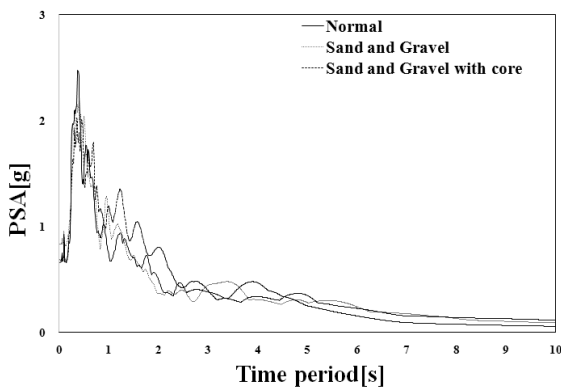


Fig. 9. Pseudo-acceleration response spectrum

이하 저주파에서는 모든 Case의 증폭현상이 작게 나타났으나 1.5Hz를 넘어서는 영역에서는 증폭현상이 큰 것으로 나타났다. 특히 Case 2의 경우 주파수 2.7Hz와 3.0Hz 영역에서 가장 크게 증폭되는 것으로 나타났다. 이는 2개 이상의 매질로 구성된 Case 1과 3의 증폭특성이 불규칙하고 복잡한 데 비해 하나의 매질로 구성된 Case 2는 증폭특성이 비교적 단순하여 특정 주파수 영역에서 크게 반응하는 것으로 사료된다. Fig. 7은 인공지진파에 대한 댐체 하단부의 진동과 댐마루 중앙부에서의 응답 비를 보여주는 전달함수이다. Case 1의 경우 주파수 2.8Hz, 주기 0.35sec에서 가장 큰 응답 비를 가지며 Case 3은 주파수 3.2Hz, 0.312sec에서 가장 큰 응답 비를 가진다. Case 2는 Case 1과 3에 비해 큰 응답 비를 가지지 않으며, 비교적 응답특성이 규칙적인 것으로 나타났다. 댐체 매질의 단순성과 코어의 존재 유·무에 따라 응답 비의 크기와 규칙성이 달라지는 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 입력 지진에 의한 댐 마루 중앙부의 수평응답변위 시간이력을 보여준다. 해석결과 최대수평변위는 Case 2에서 발생하였으며 크기는 78cm이며 변위 패턴이 다를 수 있었다. Core가 존재하는 Case 1과 Case 3은 거의 동일한 변위 특성을 나타냈으며, 최대변위는 31cm, 27cm로 나타났다. 구조물의 감쇠비가 20% 이하이므로 가속도 응답스펙트럼 대신 유사가속도 응답스펙트럼을 사용하였으며, 결과는 Fig. 9와 같이 나타났다. 전체적으로 비슷한 특성을 나타냈으며 댐 실제 형상을 반영한 Case 1에서 최고 값을 나타냈으며, 사력존 형태를 반영한 Case 2의 경우 가장 작게 나타났다. 이는 코어의 존재 유·무가 댐체의 거동특성에 영향을 주는 것을 의미하며 댐체에서 코어가 차지하는 체적의 비중이 작고, 실제 형상을 고려하기 힘들다는 이유로 내진해석 시 코어부분을 고려하지 않는다면 신뢰할 수 있는 결론에 도달하기 힘들 것으로 판단된다.

6. 결론 및 요약

본 연구에서는 댐체의 보다 정확한 안정성 평가를 위해 실제 존재하는 존별 구성을 최대한 현실적으로 반영한 경우와 존을 단순하게 반영한 경우에 대하여 내진 해석을 실시하였으며, 결과값 비교를 통해 필 댐의 3D 해석을 통한 내진성능 평가 시 고려할 사항에 관한 검토를 실시하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 가속도 증폭의 경우 95m 이하는 Bed Rock 부분으로 Case별 증폭량이 유사한 경향을 나타냈으며 댐 저부에서 댐 마루로 갈수록 증폭이 커지는 것을 알 수 있다.

코어가 존재하는 Case 1과 3의 증폭특성은 비슷하고 크게 나타났으며 Case 2의 증폭이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는 코어가 존재하는 댐이 코어가 존재하지 않는 댐보다 동일한 지진에 대해서 더 많은 증폭을 일으키는 것을 나타낸다.

- (2) Frequency 분석결과 Case 2의 주파수 2.7Hz와 3.0Hz 영역에서 가장 크게 증폭되는 것으로 나타났다. 이는 2개 이상의 매질로 구성된 Case 1과 3의 증폭특성이 불규칙하고 복잡한 데 비해 하나의 매질로 구성되어있는 Case 2는 비교적 증폭특성이 단순하기 때문에 특정 Hz 영역에서 반응하는 것으로 나타났다.
- (3) 댐 마루 암반 기초부에 대한 댐 마루 중앙부의 전달함수의 경우 Case 1의 경우 주파수 2.8Hz, 주기 0.35sec에서 가장 큰 응답 비를 가지며 Case 3은 주파수 3.2Hz, 0.312sec에서 가장 큰 응답 비를 가진다. Case 2가 Case 1과 Case 3에 비해 단순한 매질로 구성되어 규칙적인 응답을 나타내며 코어의 존재 유·무에 따라 응답의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다.
- (4) 시간이력에 따른 수평응답변위 결과를 살펴보면 최대 수평변위는 Case 2에서 발생하였으며 크기는 75cm이다. Core가 존재하는 Case 1과 Case 3은 거의 동일한 변위 특성을 나타냈으며, 최대변위는 31cm, 27cm로 나타났으며 코어의 존재 유·무에 따라 크게 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

국내 내진성능 평가 시 아치댐을 제외한 필 댐과 콘크리트 중력댐의 경우 2차원으로 해석을 권장하고 있지만, 일부 연구자들은 보다 정확한 댐의 성능평가를 위해 3차원 해석을 수행하고 있다. 하지만 매쉬 형성의 어려움으로 인해 상대적으로 작은 부피를 차지하는 코어를 제외하고 댐체를 사력존 형태로만 가정하거나 사력존 및 코어존만 모델링 하여 해석결과를 도출하고 있는 실정이다. 본 연구에서 댐 3차원 지진해석 수행결과 존의 형태, 매질의 종류 등 모든 요소가 해석결과에 영향을 주는 것으로 나타났다. 댐체의 경우 여

리 종류의 매질로 하나의 형상을 이루는 만큼 각 재료별 형상 및 특성을 최대한 현실적으로 모델링 하여 수치해석을 실시해야 올바른 해석 결과를 도출할 수 있을 것이라고 판단된다. 추후 연구에서는 검증된 2차원 수치해석 대상 댐 자료를 바탕으로 댐 존별 단계 축조를 모두 반영 후 3차원 지진해석을 수행하고 2차원 지진해석 결과와 비교·평가하여 3차원 해석결과와 신뢰성을 검증하고자 한다.

References

1. 국토해양부 (2011), 댐 설계기준, pp. 216~218.
2. 한국시설안전공단 (2004), 국내 내진성능평가, pp. 26~48, pp. 162~165.
3. Akhtarpour, A. and Khodaii, A. (2012), 2d&3d nonlinear dynamic analysis of asphaltic concrete core rockfill dam (a Case study), Proceedings of International Symposium on Dams for a changing world, paper No. 237.
4. Chakraborty, D. and Choudhury, D. (2011), Seismic behavior of tailings dam using flac3d, Proceedings of Geo-Frontiers 2011, pp. 3138~3147.
5. Ha, I. S., Lee, J. W. and Oh, B. H. (2009a), Comparison of characteristics of dam acceleration response by 2-d and 3-d dynamic analysis, Proceedings of Korean Geo-Environmental Conference 2009, KGES, Incheon, pp. 247~253 (in Korean).
6. Ha, I. S., Lee, J. W. and Oh, B. H. (2009b), Characteristics of response of rockfill dam by 3-d Seismic response analysis, Proceedings of 35th Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Hoengseong, pp. 2886~2889 (in Korean).
7. Lysmer, J. and Kuhlmeyer, R. L. (1969), Finite dynamic model for infinite media, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 95, No. 4, pp. 859~878.
8. Park, D. S. (2014), A study on the seismic resistance of fill-dams by newmark-type deformation analysis, The Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 18, No. 4, pp. 161~170 (in Korean).
9. Park, I. J., Kim, S. W., Jang, W. H., Kim, H. T. and Yoo, C. H. (2006), Evaluation of aseismic performance for reservoir dams in Korea, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 7, No. 6, pp. 89~100 (in Korean).
10. Wieland, M. (2012), Seismic design and performance criteria for large storage dams, 15th World Conference on Earthquake Engineering Lisboa, Vol. 638, pp. 24~28.