



국내 저수지에 대한 정역학적 및 동역학적 안정해석방법의 비교 및 고찰

Comparing and Consideration of Static and Dynamic Stability Analysis Methods for Domestic Reservoirs

이무재^a · 김용성^{b,†} · 허준^c · 박민우^d · 타망비벡^e · 안성수^f

Lee, Moojae · Kim, Yongseong · Heo, Joon · Bark, Minwoo · Bibek, Tamang · An, Sungsoo

ABSTRACT

In this study, we compared and analyzed the static and dynamic analysis method for agricultural reservoirs. In addition, we assumed the aging of reservoir as the deterioration of the internal friction angle and cohesion. The internal friction angle and cohesion were applied by dividing into 4 case for each reservoir. As a result of comparing the stability of the reservoir embankment, it was found that the dynamic stability analysis method showed a greater risk than the static stability analysis method when dynamic loads such as earthquakes were applied. Therefore, when detailed review such as liquefaction is required, it is considered that the dynamic stability analysis method should be applied first. If a study on the change in material properties due to the aging of the reservoir is conducted, the stability analysis of the reservoir due to the aging of the reservoir can be performed more accurately. In addition, if a study comparing the results of dynamic stability analysis and static stability analysis for earthquakes with various characteristics for more reservoirs is conducted, detailed criteria for the case where dynamic stability analysis should be considered can be presented.

Keywords: Earthquake; poorly-compacted raised reservoir levee; static and dynamic stability analysis method; liquefied

1. 서론

전 세계적으로 기후변화에 의한 자연재해의 발생빈도가 증가하고 있고 국내 지진의 경우 계기지진 관측이 시작된 1978년 이후의 한반도 지진 발생분포를 보면 규모 2.0 이상의 지진의 발생횟수는 연평균 50회를 나타내며, 1978년 이후 규모 5.0 이상의 지진은 총 10회 발생한 것으로 관측되고 있다. 특히 2016년 9월 12일 경주에서 계기지진 관측 사상 최대 규모인 규모 5.8이 발생했으며 2017년 11월 15일에는 규모 5.4의 포항지진이 발생하면서 우리나라도 지진의 안전지대가 아니라는 견해가 지배적이다.

지진 발생 시 피해의 대부분은 사회기능 유지의 근간이 되는 시설물의 기능이 중지되거나 붕괴되어 이를 복구하기 위한 기간에 발생 되는데, 복구를 위한 사회·경제적 비용을 최소화하기 위해 가장 중요한 대비책 중의 하나가 시설물의 내진설계 및 내진보강이다

한국농어촌공사 농업생산기반정비사업 통계연보 (2018)에 따르면 공사 관리 농업용저수지 총 3,406개소 중 내진설계 및 보강이 의무적으로 이루어져야 하는 저수지 1,197개소 (「지진·화산재해대책법 시행령」 제10조 제1항 제5호에 따른 총저수량 30만 m³ 이상인 저수지 및 그 부속시설)중에서 내진성능평가 필요 저수지는 120개 저수지, 내진성능 미확보 저수지는 30개로서 내진설계 및 보강 대책마련이 시급한 것으로 나타났다.

2020년 현재 한국농어촌공사에서는 내진설계 기법에 따라 정역학적 안정해석방법을 내진설계의 기본으로 하고 있는데 이 방법은 간편하고 정역학적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 점착력과 내부마찰각의 수평진도만을 사용함으로 반복적인 진동 재하에 의한 변형률의 변화 등 비선형적인 재료적 특성과 액상화에 의한 체체 강도저하 등을 명확하게 분석하지 못해 정확한 해석 결과를 도출할 수 없다.

최근 개정된 농업용 필댐설계 (KDS 67 10 20, 2019.07)에 따르면 진도법으로 설계된 체체 단면에 대하여 체체 액상화 검토를 비롯한 상세한 검토가 요구되는 경우에는 동역학적 안정해석방법에 의한 검토를 수행해야 한다고 명시하고 있다.

^a Researcher, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^b Associate Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^c Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

^d Researcher, Department of Regional Infrastructure Engineering, Konkuk University

^e Researcher, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^f Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

† **Corresponding author**

Tel.: +82-33-250-6463 Fax.: +82-33-251-6463

E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

Received: August 19, 2020

Revised: September 18, 2020

Accepted: September 18, 2020

Lee et al. (2014)은 원심모형실험과 동역학적 해석방법을 통하여 수위상승시 필댐의 거동에 대한 연구를 진행하였고, Kim (2017)은 지진 발생시 증고저수지의 동적거동 특성을 원심모형실험과 동적해석이 가능한 수치해석 프로그램을 이용한 방법으로 연구하였다. 또한 Shim (2020)은 코어불량 저수지 제체에 대하여 원심모형실험과 동적해석을 진행하여 지진 발생시의 제체의 거동 특성을 연구하였다. 이러한 동역학적 해석을 통한 제체의 거동 연구는 활발히 진행되어 왔으나 동역학적 안정해석과 정역학적 안정해석 방법을 비교한 연구는 진행되지 않았으며, 이러한 연구를 통해 동역학적 안정해석방법이 검토되어야 하는 세부기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 저수지 내진설계 방법으로서 정역학적 안정해석방법과 동역학적 안정해석방법을 적용하여 달창저수지와 보문저수지 (2016년과 2017년 발생한 경주와 포항 지진 발생지와 근접)에 대하여 수치해석을 수행하고 지진 시 저수지 안정해석기법에 대하여 고찰하였다. 본 연구는 향후 지반의 액상화 현상이 예상되는 지역의 내진설계 시 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 재료 및 방법

1. 대상저수지

국내 저수지에 대한 정역학적 및 동역학적 안정해석 방법을 비교하기 위하여 대구광역시 달성군 유가면 한정리 551에 위치한 달창저수지와 경주시 보문동 998에 위치한 보문저수지를 대상저수지로 선정하였다. 달창저수지와 보문저수지는 각각 한국농어촌공사에서 관리하는 1종 저수지로서 2016년 9월12일 발생한 경주지진, 2017년 11월 15일 발생한 포항지진의 영향을 받았고, 지진가속도계, 침하량계 등의 계측기가 설치되어 정역학적 및 동역학적 안정해석방법을 수행하기 위한 자료가 충분히 확보되어있다.

달창저수지와 보문저수지의 제원은 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Reservoir Characteristics

| Characteristic | Reservoir | |
|--------------------------------|-----------|----------|
| | DALCHANG | BOMOON |
| Dam length(m) | 524 | 308 |
| Dam height(m) | 20.7 | 22 |
| Storage(1,000 m ³) | 8,649 | 9,855 |
| Irrigation area(ha) | 540 | 1081.6 |
| Management | Dalseong | Gyeongju |

2. 동역학적 안정해석방법

LIQCA는 일본 Kyoto University에서 개발한 프로그램으로 동역학적 안정해석방법을 통해 제체의 거동을 분석 할 수 있다. 이 모델은 불포화영역으로 확장된 Oka (1999)의 반복 탄소성구성식을 기반으로 하고 있으며, 다양한 모래의 반복 거동을 재현하기 위해 Taguchi et al. (1995)이 제안한 방법에 여러 가지 확장을 수행하였다.

반복 탄소성구성식은 응력파라미터로서 상대응력비를 일반화한 회전경화를 사용하고 응력의 회전 등의 다차원 응력 상태를 고려할 수 있으며, 비선형 이동경화법칙을 사용하여 반복 재하시의 응력반전시 경화파라미터를 초기화할 필요가 없고 과압밀경계면의 도입으로 변상응력을 결정하여 다일레인시량의 감소 등을 표현할 수 있다.

또한 LIQCA는 해석 모델 기초에서 지진파의 입력을 통해 지진파가 지면에 전파될 때 각 요소의 가속도, 변형률, 응력, 수압, 강도 등의 특성을 계산하며, 유한요소법이 사용되어 기초, 제방 등과 같은 구조물을 상세하게 모델링 할 수 있다. 또한, 다양한 토양 재료의 기계적 특성을 고려할 수 있으며, 지진 발생 후 구조물의 거동을 분석할 수 있다.

가. 동역학적 안정해석방법을 위한 입력설계정수의 결정

LIQCA를 통한 지진해석을 수행하기 위해서는 제체의 절점과 요소를 정의하는 과정이 필요하다. 입력한 토질정수 및 매개변수는 실내실험결과와 사용프로그램에서 제안한 재료에 대한 일반적인 특성값을 참고하여 결정하였다. LIQCA를 이용하여 달창저수지와 보문저수지의 지진 해석을 수행하기 위해 입력한 설계정수는 다음 Table 2, Table 3과 같다.

USSD “The Aging of Embankment Dams” 및 한국수자원공사 “댐 노후도 평가 요소기술 및 장수명화 전략기술”에 따르면 제체의 강도 저하의 원인으로 점착력의 대폭 감소, 응력변화라고 서술하였다. 또한 Kim et al. (2019)은 농업용 저수지 축조재료의 습윤-건조 반복이 전단강도에 미치는 영향을 연구하고 풍화에 의한 시료의 점착력과 내부마찰각의 감소를 직접전단시험기를 이용하여 검증한 바 있다. 이를 근거로 저수지 제체의 정상상태와 노후화를 점착력과 내부마찰각 두 토질정수 값의 저하로서 가정하였다. Table 4는 노후화가 진행된 한국농어촌공사 소관 저수지 10개소 제체의 토질정수를 나타내고 있으며 축조시의 토질정수 값보다 현재의 토질정수의 값이 낮아진 상태를 보이고 있다. 이를 바탕으로 Table 5, Table 6과 같이 4개 Case의 토질정수를 적용함으로써 제체의 노후화를 가정하였다. Case 1의 경우 실측된 현재 제체의 물성치를 나타내며 Case 4는 극한상황을 가정한 것으로 기존

Table 2 Analysis model parameters and material properties of DALCHANG

| Parameter | Material | | |
|--|----------|----------|-------|
| | Shell | Core | |
| Specific gravity (G_s) | 2.219 | 2.673 | |
| Water content (%) | 16.14 | 20 | |
| Density (g/cm^3) | ρ_d | 1.774 | 1.703 |
| | ρ_t | 2.076 | 2.006 |
| Elastic modulus, E (kN/m^2) | 30,000 | 15,000 | |
| Poisson's ratio, ν | 0.35 | 0.45 | |
| Permeability, k (cm/sec) | 6.25E-06 | 6.81E-08 | |
| USCS | SM | CL | |
| Swelling index, κ | 0.021 | 0.019 | |
| Normalized shear elastic modulus, G_0/σ_{m0}' | 150 | 100 | |
| Stress ratio at phase transformation, M_m | 1.270 | 1.270 | |
| Stress ratio at failure, M_f | 1.270 | 1.270 | |
| Hardening parameter, B_1 | 35 | 25 | |
| Hardening parameter, C_f | 50 | 600 | |
| Anisotropy disappearance parameter, C_d | 2,000 | 2,000 | |
| Quasi-overconsolidation ratio, OCR | 1.0 | 1.0 | |
| Dilatancy coefficient parameter, D_0 | 0.0 | 1.0 | |
| Referential strain parameter (in plastic), γ_{rp} | 0.015 | 0.008 | |
| Referential strain parameter (in elastic), γ_{re} | 0.01 | 0.08 | |
| Dilatancy coefficient parameter, n | 9.0 | 10.0 | |
| van Genuchten's parameter, α | 9.81 | 1.28 | |
| van Genuchten's parameter, n' | 5.00 | 1.65 | |

연구를 바탕으로 각각의 재료에 대한 토질정수의 한계 값을 사용하였다. Case 2와 Case 3은 Case 1과 Case 4 사이의 값으로 일정간격으로 저하시킨 토질정수 값을 사용하였다.

나. 인공지진파의 작성 및 적용

저수지의 지진 해석을 위한 지진 파형 데이터는 내진설계 기준(KDS 17 10 00)에서 제시하고 있는 국내 설계 기준에

Table 3 Analysis model parameters and material properties of BOMOON

| Parameter | Material | | |
|--|----------|----------|-------|
| | Shell | Core | |
| Specific gravity (G_s) | 2.223 | 2.652 | |
| Water content (%) | 15.98 | 20 | |
| Density (g/cm^3) | ρ_d | 1.650 | 1.667 |
| | ρ_t | 1.952 | 1.970 |
| Elastic modulus, E (kN/m^2) | 25,000 | 15,000 | |
| Poisson's ratio, ν | 0.35 | 0.45 | |
| Permeability, k (cm/sec) | 3.18E-07 | 9.05E-09 | |
| USCS | SM | CL | |
| Swelling index, κ | 0.025 | 0.019 | |
| Normalized shear elastic modulus, G_0/σ_{m0}' | 150 | 100 | |
| Stress ratio at phase transformation, M_m | 1.270 | 1.270 | |
| Stress ratio at failure, M_f | 1.270 | 1.270 | |
| Hardening parameter, B_1 | 35 | 25 | |
| Hardening parameter, C_f | 50 | 600 | |
| Anisotropy disappearance parameter, C_d | 2,000 | 2,000 | |
| Quasi-overconsolidation ratio, OCR | 1.0 | 1.0 | |
| Dilatancy coefficient parameter, D_0 | 0.0 | 1.0 | |
| Referential strain parameter (in plastic), γ_{rp} | 0.015 | 0.008 | |
| Referential strain parameter (in elastic), γ_{re} | 0.01 | 0.08 | |
| Dilatancy coefficient parameter, n | 9.0 | 10.0 | |
| van Genuchten's parameter, α | 9.81 | 1.28 | |
| van Genuchten's parameter, n' | 5.00 | 1.65 | |

적합한 방법에 따라 500년 빈도의 지진에 해당하는 인공 지진 파를 작성하여 적용하였다.

대상 저수지들은 지진구역 구분에서 I구역으로 분류되어 지진구역계수 0.11을 적용하였고 지반은 연암지반으로 지반 계수 1.2를 적용하여 Eq-Maker를 통해 인공지진파를 작성하였다.

Fig. 1은 작성된 인공지진파를 나타내며 인공지진파의 최

Table 4 Material parameter of aging dam (Korea Rural Community Corporation)

| Reservoir | Shell | | Core | | Reservoir | Shell | | Core | |
|-----------|------------------|--------------|------------------|--------------|-----------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | c (kN/m^2) | ϕ (deg) | c (kN/m^2) | ϕ (deg) | | c (kN/m^2) | ϕ (deg) | c (kN/m^2) | ϕ (deg) |
| UA | 18.64 | 22 | 13.73 | 18 | MA | 23.54 | 21 | 24.53 | 20 |
| MP | 7.85 | 33 | 33.35 | 8 | YH | 33.51 | 16 | 4.41 | 31 |
| PJ | 11.77 | 18 | 13.73 | 18 | DM | 13.73 | 26 | 34.34 | 15 |
| SN | 5.88 | 12 | 14.71 | 22 | SC | 29.43 | 18 | 14.72 | 20 |
| SA | 5.89 | 17 | 19.62 | 17 | JS | 3.90 | 31 | 4.90 | 29 |

Table 5 Analysis model parameters and material properties of DALCHANG

| Case | Material | Cohesion, c (kN/m ²) | Shear resistance angle, ϕ (deg) |
|------|----------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Shell | 24.59 | 35.25 |
| | Core | 29.91 | 29.5 |
| 2 | Shell | 17.06 | 31.33 |
| | Core | 20.94 | 24.67 |
| 3 | Shell | 9.53 | 27.42 |
| | Core | 11.97 | 19.83 |
| 4 | Shell | 2.00 | 23.5 |
| | Core | 3.00 | 15 |

Table 6 Analysis model parameters and material properties of BOMOON

| Case | Material | Cohesion, c (kN/m ²) | Shear resistance angle, ϕ (deg) |
|------|----------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Shell | 30.30 | 30.3 |
| | Core | 17.65 | 19.58 |
| 2 | Shell | 20.90 | 25.2 |
| | Core | 12.40 | 18.05 |
| 3 | Shell | 11.50 | 20.1 |
| | Core | 7.20 | 16.53 |
| 4 | Shell | 2.00 | 15 |
| | Core | 2.00 | 15 |

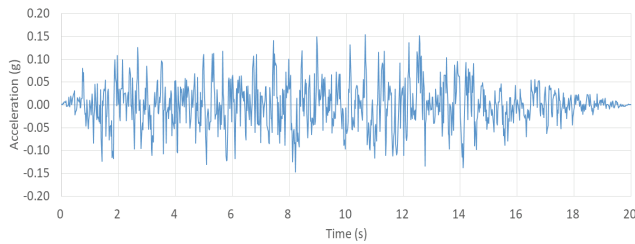


Fig. 1 Artificial earthquake

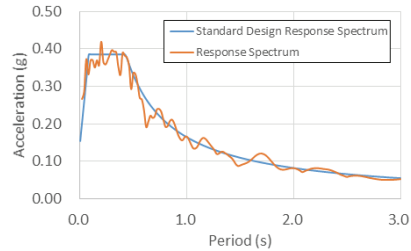


Fig. 2 Response spectrum

대 가속도는 0.154 g를 나타내고 있다. Fig. 2는 5% 감쇠비를 적용하고 있는 인공지진파의 응답스펙트럼곡선과 표준설계 응답스펙트럼곡선을 나타내고 있으며 두 곡선이 잘 부합함을 알 수 있다.

3. 정역학적 안정해석방법

농업용 필댐설계 (KDS 67 10 20) 및 댐내진설계기준 (KDS 54 17 00)에 따르면 내진설계에 있어 가장 중요한 부분은 사면안정성 검토이며 현재 한국농어촌공사에서 사면안정성검토 방법으로서 캐나다의 Geo-slope사에서 개발되어 널리 보급된 Seep/W, Slope/W를 사용하고 있다. 캐나다 Geo-slope사에서 개발된 Seep/W (침투류해석), Slope/W (사면안정해석)는 정역학적 안정해석방법을 수행할 수 있으며 댐 및 저수지 내진설계시 이용되고 있는 상용프로그램이다. Geo-slope사의 Slope/W 사면안정해석의 해석조건에 대해 살펴보면 해석방법에는 Spencer법, Morgenstern-Price법, Bishop법이 있으며

해석단면에는 제체 표준단면, 침윤선에는 침투류 해석에서 구한 Data값을 적용하며 만수위, 일부저수위, 수위 급강하시로 구분하여 해석조건을 수행한다.

정역학적 안정해석방법의 경우 설계 지진력은 작용 정하중에 대한 구체의 관성력만 고려하고 동수압은 영향이 미비하므로 제외한다.

동역학적 지진 해석 결과와의 비교를 위해 동일한 저수지에 대하여 정역학적 지진 해석을 수행하였으며, 동일한 조건으로 모델링을 수행하였다. 정역학적 해석은 침투류 해석 결과를 활용하였고, 해석방법으로는 Spencer법, Morgenstern-Price법, Bishop법을 사용하였다.

정역학적 안정해석방법에서는 수평, 수직방향의 지진계수를 입력하여 지진하중으로서 지진을 고려해주었다. 이때, 수평, 수직방향의 지진계수는 구역계수, 위험도계수, 지반계수를 곱함으로써 구할 수 있고 댐 형식에 따라 20%의 할증을 적용하였다.

Table 7 Seismic coefficient determination

| Seismic zone factor | Risk factor | Site coefficient | Extra coefficient | Seismic coefficient | |
|---------------------|-------------|------------------|-------------------|---------------------|----------|
| | | | | Horizontal | Vertical |
| 0.11 | 1.0 | 1.2 | 0.2 | 0.158 | 0.079 |

III. 결과 및 고찰

1. 동역학적 안정해석방법을 통한 제체의 거동 분석

가. 침하량 분석

Fig. 5 및 Fig. 6은 지진 해석 프로그램 (LIQCA)으로 모의한 500년 빈도의 지진 발생 시 Case 1의 달창저수지와 보문저수지에서 발생한 제정부의 침하거동을 나타낸다. 달창저수지와 보문저수지 모두 지진동 부가와 함께 침하가 발생하기 시작하였고, 지진동 부가 후 약 6초까지 미세한 침하가 일어나다가 이후 급격한 침하가 발생하는 것으로 나타났다.

이 때, 달창저수지의 경우 제정부에서 최대 155.33 mm의 침하가 발생하였고, 보문저수지의 경우 제정부에서 최대 272.55 mm의 침하가 발생하였다.

달창저수지에서의 최대 침하는 저수지 높이 (20.7 m)의 0.75%로 나타났고, 보문저수지에서의 최대 침하는 저수지 높이 (22.0 m)의 1.24%로 나타났다.

Fig. 7~Fig. 12는 지진 해석 프로그램 (LIQCA)으로 모의한 500년 빈도의 지진 발생 시 노후화상태를 가정한 달창저수지와 보문저수지에서 발생한 제정부의 침하거동을 나타낸다. 달창저수지와 보문저수지 모두 지진동 부가와 함께 침하가

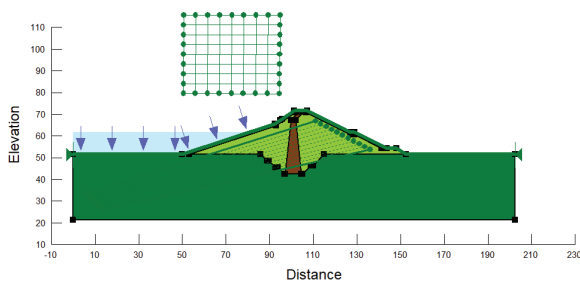


Fig. 3 Modeling of DALCHANG reservoir

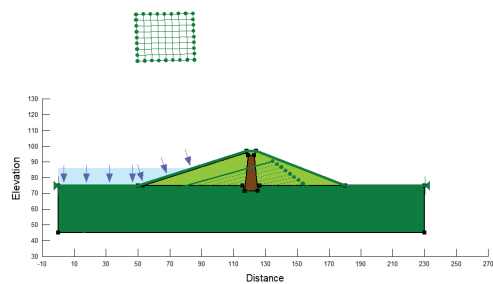


Fig. 4 Modeling of BOMOON reservoir

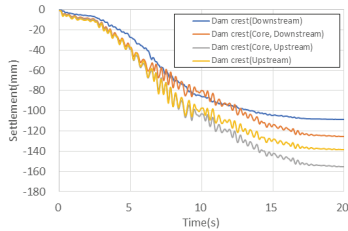


Fig. 5 Settlement of DALCHANG reservoir (Case 1)

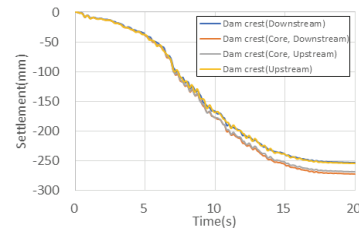


Fig. 6 Settlement of BOMOON reservoir (Case 1)

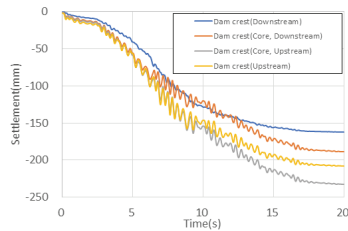


Fig. 7 Settlement of DALCHANG reservoir (Case 2)

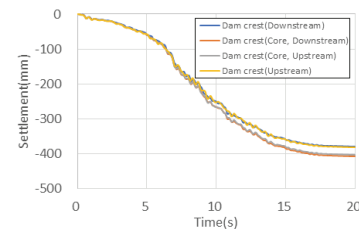


Fig. 8 Settlement of BOMOON reservoir (Case 2)

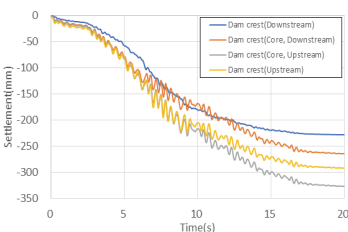


Fig. 9 Settlement of DALCHANG reservoir (Case 3)

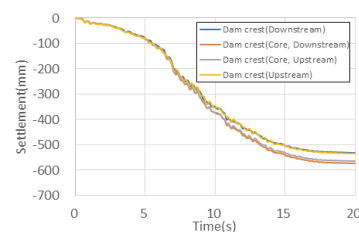


Fig. 10 Settlement of BOMOON reservoir (Case 3)

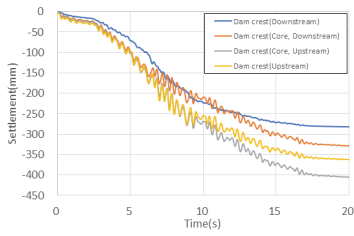


Fig. 11 Settlement of DALCHANG reservoir (Case 4)

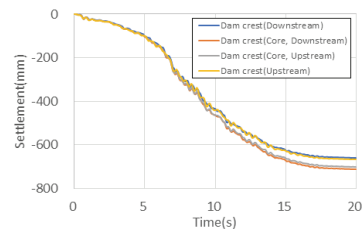


Fig. 12 Settlement of BOMOON reservoir (Case 4)

발생하기 시작하였고, 지진동 부가 후 약 6초까지 미세한 침하가 일어나다가 이후 급격한 침하가 발생하는 것으로 나타났다.

각각의 Case에 따른 달창저수지와 보문저수지의 최대 침하량과 제체 높이에 대한 침하량의 비율은 다음과 같다.

달창저수지와 보문저수지의 정상상태와 노후화를 가정한 단계별로 500년 빈도 지진에 대한 동역학적 해석을 수행한 결과, 달창저수지의 최대침하는 저수지 높이 (20.7 m)의 0.75%~1.96%로 Case 1의 상태에서는 안전한 것으로 해석되었지만 이외의 상태에서는 불안정한 것으로 해석되었다. 보문저수지의 경우, 최대침하는 저수지높이 (22.0 m)의 1.24%~3.23%로 모든 상태에서 불안정한 것으로 해석되었다.

나. 응답가속도 분석

동역학적해석 방법을 통해 Case 1에서 저수지의 지진가속도의 전파 특성을 해석한 결과는 다음 Fig. 13, Fig. 14와 같다.

달창저수지의 경우 제체 저면에서 0.154 g, 코어중간부에서 0.188 g, 제정부에서 0.296 g의 최대 응답가속도가 확인되었고, 제체 저면의 가속도에 비해 코어중간부와 제정부의 최대 응답가속도는 각각 1.22배와 1.92배로 증폭되었다.

보문저수지의 경우 제체 저면에서 0.154 g, 코어중간부에서 0.173 g, 제정부에서 0.260 g의 최대 응답가속도가 확인되었고, 제체 저면의 가속도에 비해 코어중간부와 제정부의 최대 응답가속도는 각각 1.12배와 1.69배로 증폭되었다.

이러한 응답가속도의 증폭은 제체의 높이 증가에 따라 비선형탄성체의 가속도 특성을 나타내며, 제정부에서 최대값을 나타내고 있다.

노후화상태를 가정한 저수지의 지진가속도 전파 특성은 다음과 같은 그래프를 나타낸다.

각각의 Case에서 코어중간부와 제정부에서의 최대응답가속도와 증폭비는 다음과 같다.

Table 8 Maximum settlement and ratio of settlement and dam height

| Case | DALCHANG reservoir | | BOMOON reservoir | |
|------|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | Maximum settlement (mm) | Ratio of settlement and dam height (%) | Maximum settlement (mm) | Ratio of settlement and dam height (%) |
| 1 | 155.33 | 0.75 | 272.55 | 1.24 |
| 2 | 232.99 | 1.13 | 408.83 | 1.86 |
| 3 | 326.19 | 1.58 | 437.30 | 2.60 |
| 4 | 405.41 | 1.96 | 711.36 | 3.23 |

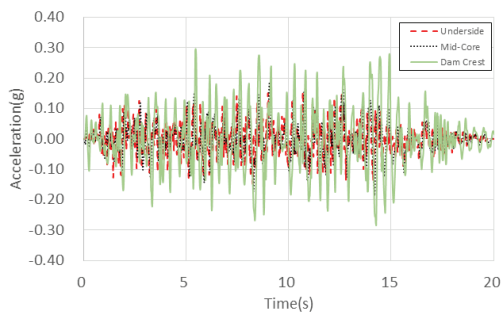


Fig. 13 Acceleration response (DALCHANG reservoir, Case 1)

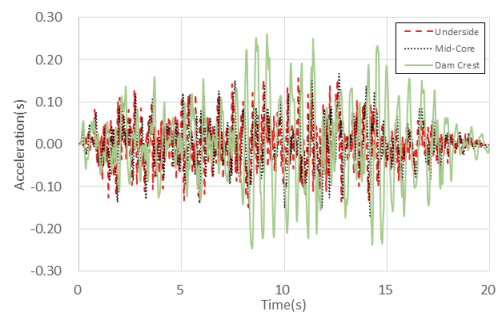


Fig. 14 Acceleration response (BOMOON reservoir, Case 1)

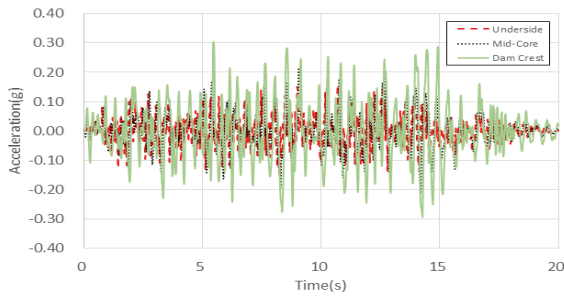


Fig. 15 Acceleration response (DALCHANG reservoir, Case 2)

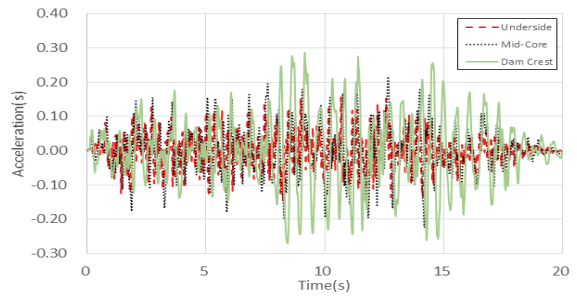


Fig. 16 Acceleration response (BOMOON reservoir, Case 2)

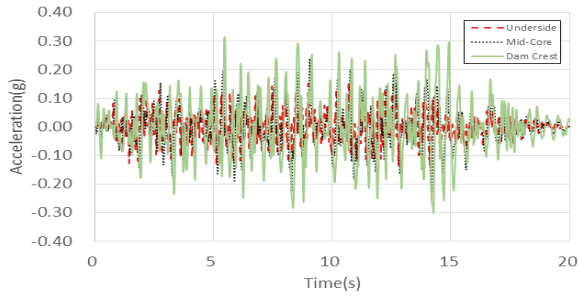


Fig. 17 Acceleration response (DALCHANG reservoir, Case 3)

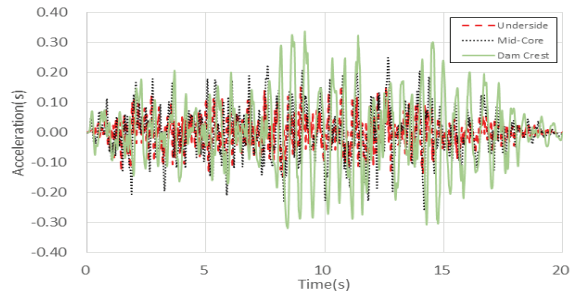


Fig. 18 Acceleration response (BOMOON reservoir, Case 3)

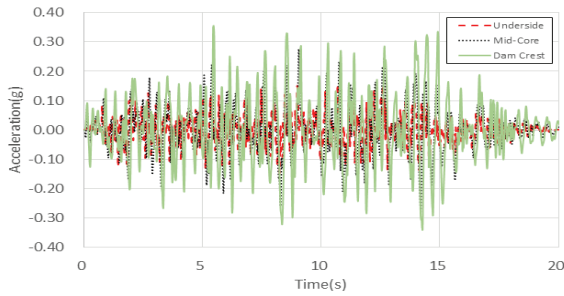


Fig. 19 Acceleration response (DALCHANG reservoir, Case 4)

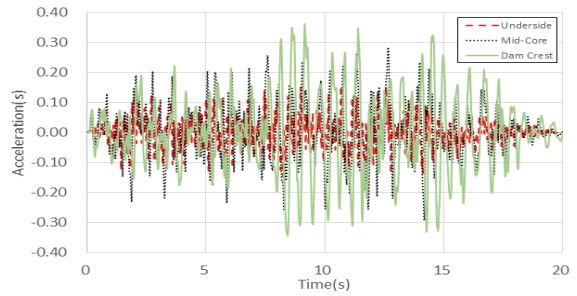


Fig. 20 Acceleration response (BOMOON reservoir, Case 4)

Table 9 Maximum response acceleration and amplification ratio

| Case | DALCHANG reservoir | | | | BOMOON reservoir | | | |
|------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
| | Mid core | | Dam crest | | Mid core | | Dam crest | |
| | Maximum response acceleration (g) | Amplification ratio | Maximum response acceleration (g) | Amplification ratio | Maximum response acceleration (g) | Amplification ratio | Maximum response acceleration (g) | Amplification ratio |
| 1 | 0.188 | 1.22 | 0.296 | 1.92 | 0.173 | 1.12 | 0.260 | 1.69 |
| 2 | 0.214 | 1.39 | 0.305 | 1.98 | 0.225 | 1.46 | 0.286 | 1.89 |
| 3 | 0.244 | 1.58 | 0.314 | 2.04 | 0.259 | 1.68 | 0.338 | 2.19 |
| 4 | 0.281 | 1.83 | 0.356 | 2.31 | 0.294 | 1.91 | 0.364 | 2.36 |

Fig. 21은 본 연구에서 얻어진 가속도 증폭특성을 나타낸 것이다. 범례의 D_C1부터 D_C4까지는 달창저수지의 Case 1부터 Case 4까지의 가속도 증폭특성 결과이며, B_C1부터 B_C4까지는 보문저수지의 Case 1부터 Case 4까지의 가속도

증폭특성 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 나타난 응답가속도의 증폭은 체체의 높이 증가에 따라 가속도가 비선형탄성체의 가속도 특성을 나타내고 있으며, 이러한 특성은 Kim (2017)과 Shim (2020)의 원심모형실험의 결과와 유사한 것

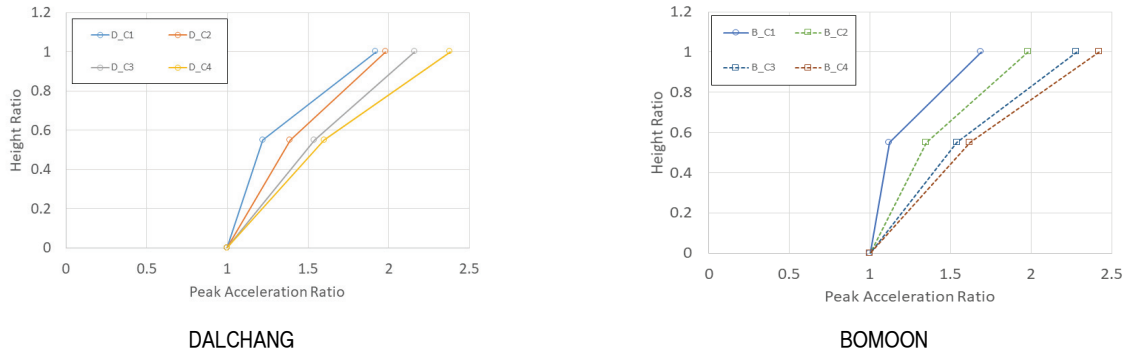


Fig. 21 Acceleration response by reservoir height

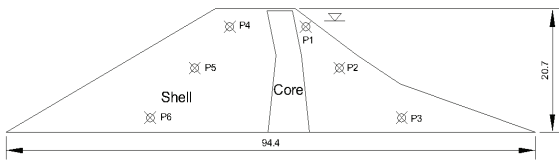


Fig. 22 Model layout (DALCHANG)

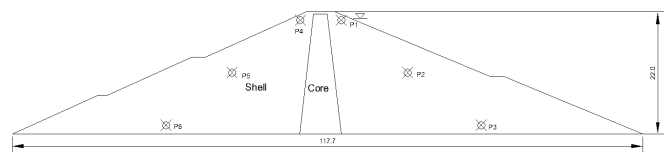


Fig. 23 Model layout (BOMOON)

Table 10 Slope safety of DALCHANG

| Case | Spencer | | Morgenstern-Price | | Bishop | |
|------|----------|------------|-------------------|------------|----------|------------|
| | Upstream | Downstream | Upstream | Downstream | Upstream | Downstream |
| 1 | 1.547 | 1.609 | 1.542 | 1.607 | 1.522 | 1.599 |
| 2 | 1.252 | 1.317 | 1.245 | 1.225 | 1.316 | 1.308 |
| 3 | 0.957 | 1.035 | 0.945 | 1.034 | 0.930 | 1.026 |
| 4 | 0.641 | 0.690 | 0.636 | 0.690 | 0.624 | 0.687 |

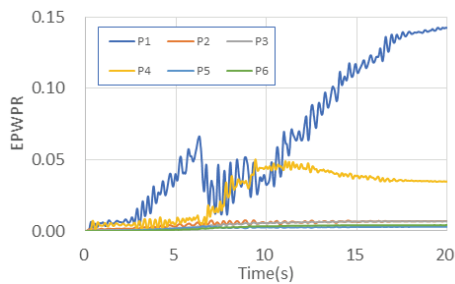


Fig. 24 EPWPR (DALCHANG, Case 1)

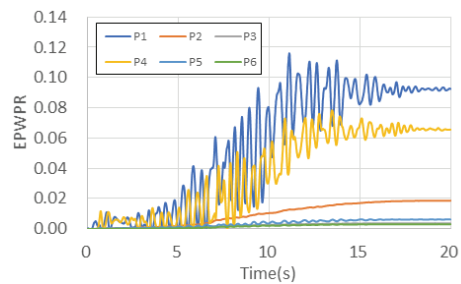


Fig. 25 EPWPR (BOMOON, Case 1)

로 나타났다. 또한 제체가 노후화 될수록 가속도의 증폭비는 커지는 것으로 나타났으며 이러한 가속도의 증폭은 제체의 안전에 위협한 영향을 끼칠 것으로 판단된다.

다. 과잉간극수압비 분석

동역학적인 해석방법을 통하여 제체의 과잉간극수압비를

해석한 결과는 Fig. 24~Fig. 31과 같이 나타났다. Fig. 22와 같이 달창저수지의 간극수압비 그래프에서 P1, P2, P3 지점은 상류부 측의 제체 상부, 중간부, 하부를 뜻하며 P4, P5, P6 지점은 하류부 측의 제체 상부, 중간부, 하부를 의미한다. Fig. 23과 같이 보문저수지의 간극수압비 그래프에서 P1, P2, P3 지점은 상류부 측의 제체 상부, 중간부, 하부를 뜻하며 P4, P5,

P6 지점은 하류부 측의 제체 상부, 중간부, 하부를 의미한다.

Case 1의 달창저수지 과잉간극수압비는 상류에서 0.007~0.143의 범위를 나타내며 하류에서 0.004~0.050의 범위를 나타낸다. 보문저수지의 과잉간극수압비는 상류에서 0.003~0.116의 범위를 나타내고 하류에서 0.003~0.078의 범위를 나타낸다.

노화 상태의 달창저수지의 과잉간극수압비는 Case 2에서 상류측 0.013~0.288, 하류측 0.008~0.102의 범위를 나타내며, Case 3에서는 상류측 0.030~0.431, 하류측 0.019~0.255, Case 4에서는 상류측 0.030~0.647, 하류측 0.019~0.305의 범위를 각각 나타내고 있다. 노화 상태의 보문저수지의 과잉간극수압비는 2단계에서 상류측 0.009~0.290, 하류측 0.008~0.196의 범위를 나타내며, 3단계에서는 상류측 0.014~0.469, 하류측 0.012~0.315, 4단계에서는 상류측 0.021~0.698, 하류측 0.012~0.473의 범위를 각각 나타내고 있다.

과잉간극수압비는 모든 상태의 저수지에서 상류측이 하류

측보다 큰 값을 나타내고 있으며, 제체의 상부로 갈수록 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과를 보이는 이유는 코어로 인해 침투가 억제되는 것과 지진파의 응답가속도가 제체 상부로 갈수록 커지는 경향을 보이는 것과 연관된 것으로 판단된다.

2. 정역학적 안정해석방법을 통한 제체의 거동 분석

각각의 Case에서 제체에 대한 정역학적 안정해석방법을 수행한 결과는 다음과 같다.

달창저수지 제체의 안전율은 Spencer법, Morgenstern-Price법, Bishop법으로 검토한 결과, 상류사면의 안전율은 0.624~1.547, 하류사면의 안전율은 0.687~1.609로 현 설계기준 (1.15)과 비교할 때 Case 1과 Case 2의 상태를 제외하고 모두 불안정한 것으로 해석되었다.

보문저수지 제체의 안전율은 Spencer법, Morgenstern-Price법, Bishop법으로 검토한 결과, 상류사면의 안전율은 0.459~

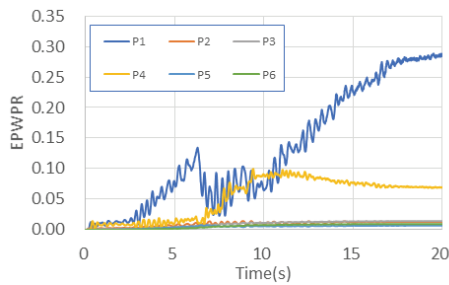


Fig. 26 EPWPR (DALCHANG, Case 2)

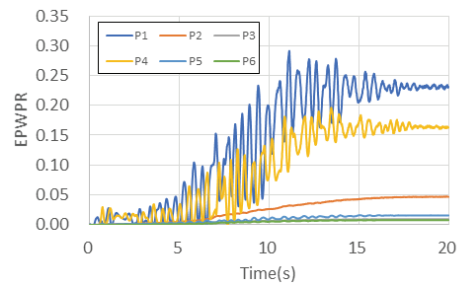


Fig. 27 EPWPR (BOMOON, Case 2)

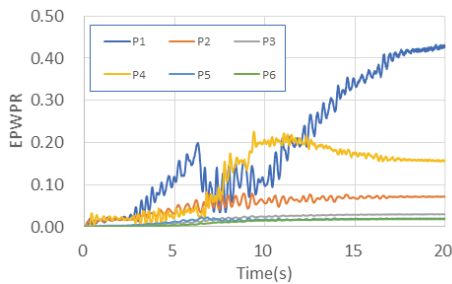


Fig. 28 EPWPR (DALCHANG, Case 3)

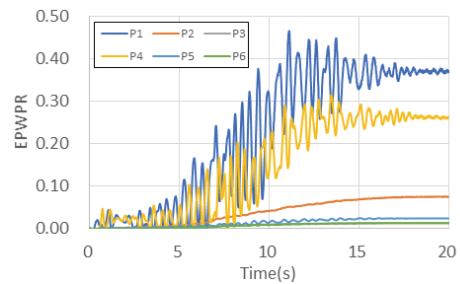


Fig. 29 EPWPR (BOMOON, Case 3)

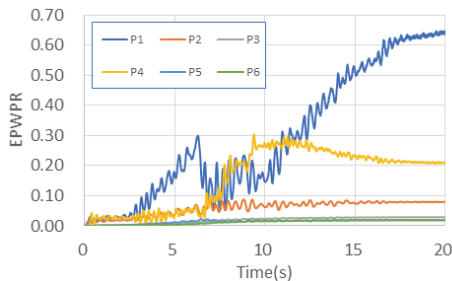


Fig. 30 EPWPR (DALCHANG, Case 4)

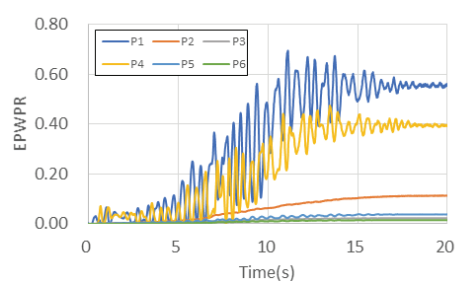


Fig. 31 EPWPR (BOMOON, Case 4)

1.197, 하류사면의 안전율은 0.479~1.242로 현 설계기준 (1.15)과 비교할 때 Case 1의 상태를 제외하고 모두 불안정한 것으로 해석되었다.

3. 비교 및 고찰

동역학적 안정해석방법과 정역학적 안정해석방법을 통해 500년 빈도 지진 시 달창 저수지와 보문 저수지의 제체의 안전여부를 판단한 결과는 Fig. 32와 같다. 국토교통부에서는 “기존 제방의 내진성능 평가 및 향상요령”을 통해 제방의 변형에 대한 허용범위를 제체 높이의 1%로 제시하였고, 농업용 필댐설계(KDS 67 10 00)에서는 사면안전의 기준으로 1.15를 제시하고 있다. 이러한 서로 다른 판단방법을 비교하기 위하여 동역학적 안정해석방법의 결과를 침하가 일어난 후의 제체의 높이와 침하가 일어나지 않은 저수지의 높이 비율로서 나타내고 비율이 99% 이상이라면 제체가 안전하다고 판단하였다.

달창저수지의 경우 정역학적 안정해석을 통해서 Case 2의 상태까지는 제체가 안전함을 나타냈지만, 동역학적 안정해석의 경우 Case 1을 제외한 모든 경우에서 불안정한 상태를 나타냈다. 보문저수지의 경우 정역학적인 해석을 통해서 Case 1의 제체는 안전함을 보이지만 노후화를 가정한 해석

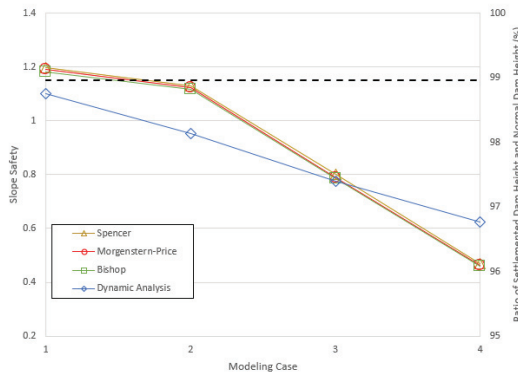
수행 시 모든 경우에서 제체가 불안정함을 나타냈고, 동역학적인 해석의 경우 모든 경우에서 제체가 불안정함을 나타냈다.

이는 정역학적 안정해석의 경우 점착력과 내부마찰각의 수평진도만을 사용함으로써 반복적인 진동 재하에 의한 변형률의 변화 등 비선형적인 재료적 특성과 액상화에 의한 제체 강도 저하 등을 명확하게 분석하지 못하여 지진 위험도 해석에 있어서 그 안정성이 더 높게 해석되는 것으로 판단된다. 동역학적 안정해석의 경우 입력된 지진의 특성에 따라 시간에 따른 제체의 거동을 더 세밀하게 관찰 할 수 있으며, 같은 최대 가속도를 지닌 지진이라도 그 특성에 따라 다른 결과 값을 보여 줄 수 있을 것으로 판단되며 지진에 대한 위험성을 더 정확하게 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

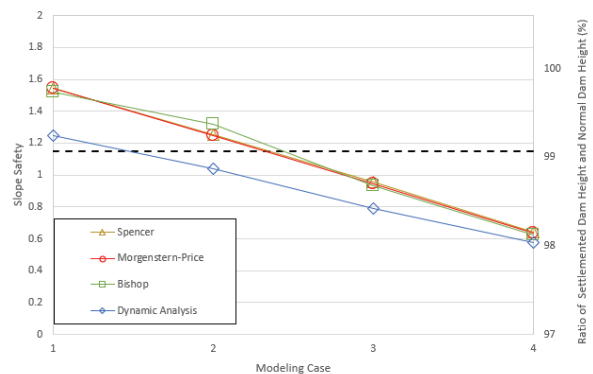
최근 개정된 농업용 필댐설계 (KDS 67 10 20) 4.4.5.1 (내진 설계방법)에 따르면 “진도법으로 설계된 댐체 단면에 대하여 액상화 검토를 비롯한 상세한 검토가 요구되는 경우에는 동역학적 해석방법에 의한 검토를 수행해야 한다”라고 개정이 되었으며 국내저수지는 붕괴 시 하류부의 인명 및 경제적 손실을 초래하므로 지진에 대한 해석에 있어 지진에 대해 세밀한 해석이 가능한 동역학적해석방법의 적용이 검토되어야 한다.

Table 11 Slope Safety of BOMOON

| Case | Spencer | | Morgenstern-Price | | Bishop | |
|------|----------|------------|-------------------|------------|----------|------------|
| | Upstream | Downstream | Upstream | Downstream | Upstream | Downstream |
| 1 | 1.197 | 1.242 | 1.190 | 1.239 | 1.182 | 1.231 |
| 2 | 1.130 | 1.136 | 1.123 | 1.134 | 1.117 | 1.129 |
| 3 | 0.801 | 0.813 | 0.789 | 0.813 | 0.785 | 0.810 |
| 4 | 0.469 | 0.480 | 0.464 | 0.479 | 0.459 | 0.481 |



DALCHANG



BOMOON

Fig. 32 Slope safety and ratio of settled dam height and normal dam height

IV. 결론

본 연구에서는 달창저수지와 보문저수지에 대해 500년 빈도의 지진 발생 시 제체의 정상상태와 노후화 상태를 가정하여 수치해석을 수행하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 달창저수지와 보문저수지를 4가지 Case로 나누어 500년 빈도 지진에 대한 동역학적 안정해석방법을 수행한 결과, 달창저수지의 최대침하하는 저수지높이 (20.7 m)의 0.75%~1.96%로 Case 1에서는 안전한 것으로 해석되었지만 이외의 상태에서는 불안정한 것으로 해석되었으며, 보문저수지의 최대침하하는 저수지높이 (22.0 m)의 1.24%~3.23%로 모든 상태에서 불안정한 것으로 해석되었다.
- (2) 달창저수지와 보문저수지의 지진파 전파 특성을 해석한 결과 제체의 높이와 증폭비가 비선형탄성체의 가속도 특성을 나타내며, 제체의 노후화에 따라 지진파의 증폭비 또한 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 동역학적 해석 방법을 통해 제체의 과잉간극수압비를 해석한 결과 달창저수지와 보문저수지 모두에서 상류부의 과잉간극수압비가 하류부의 과잉간극수압비보다 큰 값을 나타냈다.
- (4) 달창저수지와 보문저수지 제체의 안전율을 Spencer법, Morgenstern-Price법, Bishop법의 정역학적해석을 통해 검토한 결과, 달창저수지의 상류사면은 0.624~1.547, 하류사면은 0.687~1.609로 현 설계기준(1.15)과 비교할 때 Case 1, 2를 제외하고 모두 불안정한 것으로 해석되었으며, 보문저수지의 상류사면은 0.459~1.197, 하류사면은 0.479~1.242로 현 설계기준(1.15)과 비교할 때 Case 1를 제외하고 모두 불안정한 것으로 해석되었다.
- (5) 달창저수지와 보문저수지의 제체의 지진 안전도 평가를 위하여 동역학적 안정해석과 정역학적 안정해석을 수행한 결과 서로 다른 결과 값을 나타내었으며 동역학적 안정해석 결과가 정역학적 안정해석의 결과에 비해 안정성이 더 낮은 상태를 나타내었다.
- (6) 이러한 안정해석 결과의 차이는 정역학적 안정해석 방법은 지진을 단순 하중으로 가정하기 때문에 지진파의 특성을 고려하지 못한다는 점에 기인한 것으로 판단되며, 동역학적 안정해석 방법을 이용하여 서로 다른 특성의 지진에 대한 해석을 진행한다면 지진에 대한 위험성을 더 정확하게 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

저수지의 제체는 붕괴시 그 피해의 규모가 굉장히 큰 구조물이므로 지진에 대한 안정성을 판단하는 것은 보다 세밀하

고 면밀할 필요성이 있으며, 저수지가 축조된 후 많은 기간이 지난 노후화 저수지는 정역학적인 안정해석보다는 동역학적인 안정해석을 통해 그 안정성을 검토할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

추후 제체의 노후화에 따른 내부 물성치의 변화를 다룬 연구가 진행된다면 저수지의 노후화에 따른 제체 안정 해석을 보다 정확하게 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 추후 더 많은 저수지에 대해 여러 가지 특성을 가진 지진들에 대한 동적안정해석 결과와 정적안정해석 결과를 비교하는 연구를 진행함으로써 현행 설계기준에서 나타난 동적안정해석을 고려해야 하는 경우에 대한 세부 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 116114-03).

REFERENCES

1. Kim, D. G., 2017. A study on dynamic behavior of raised reservoir dam using dynamic centrifuge tests. Ph.D. diss., Kangwon University (in Korean).
2. Kim, M. H., C. S. Song, S. J. Eom, O. H. Park, and J. C. Kim, 2019. Characteristics evaluation of repetitive wetting-drying on shear strength on materials for agriculture reservoir construction. *Korean Society of Agricultural Engineers Conference 2019(0)*: 170 (in Korean).
3. Korea Rural Community Corporation, 2019. Statistical yearbook of land and water development for agriculture (in Korean).
4. Lee, C. W., J. M. Kim, Y. B. Moon, and Y. S. Kim, 2014. Behavior characteristics of poorly-compacted raised reservoir levee with water level raising. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 113-119 (in Korean).
5. Ministry of Environment, 2019. Dam Seismic Design (KDS 54 17 00) (in Korean).
6. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, 2019. Agricultural Fill Dam Design (KDS 67 10 20) (in Korean).
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2018. Seismic Design in General (KDS 17 10 00) (in Korean).

8. Oka, F., A. Yashima, A. Tateishi, Y. Taguchi, and S. Yamashita, 1999. A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus. *Géotechnique* 49(5): 661-680.
9. Shim, H. G., 2020. Dynamic behavior characteristics of reservoir embankment with deteriorated core by using dynamic centrifuge model tests. Ph.D. diss., Kangwon University (in Korean).
10. Shin, D. H., 2017. Development of technology for evaluating degree of deterioration and strategy for life extension of aged dams. Korea Water Resources Corporation (in Korean).
11. Taguchi, Y., A. Tateishi, F. Oka, and A. Yashima, 1995. A cyclic elasto-plastic model based on the generalized flow rule and its application. In *Proc. 5th Int. Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Davos, Switzerland, Pande, G. N., and Pietruszczak, S. eds., Balkema: 57-62.
12. The Aging of Embankment Dams, 2010. United States Society on Dams.
13. The LIQCA Research and Development Group (Representative: Oka, F. of Kyoto University), 2009. User's manual for LIQCA2D09 (2009 released print).