

댐 계측지진 활용 사력존 물성 역산법 검증 사례 연구

A Case Study on Verification of Inverse Calculation of Dynamic Properties of Rockfill Zone using Microearthquake Records

하익수¹⁾, Ik-Soo Ha, 오병현²⁾, Byung-Hyun Oh

¹⁾ 한국수자원공사 댐안전연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Engineering Research Center, Korea Water Resources Corporation(K-water)

²⁾ 한국수자원공사 댐안전연구소 소장, Director, Dam Engineering Research Center, K-water

SYNOPSIS : In this study, from the comparison of the results obtained by 3 dimensional dynamic analyses using the inverse-calculated properties and those by calculating using the real earthquake records, the inverse calculation method for obtaining the dynamic properties of rockfill materials was verified. The fundamental frequency of the dam was determined by analyzing the response spectrum of observed records. By repeated dynamic analyses for various shear moduli of rockfill material, the shear moduli in the rockfill zone that satisfy the relationship between the fundamental frequency obtained by analysis of the observed records and that by numerical analyses were determined. Using the determined shear moduli, the 3 dimensional dynamic analyses for the dam were carried out and the result were compared with the real response characteristics on the crest of the dam.

Keywords : 3 dimensional dynamic analysis, dynamic property, dam, inverse-calculation, fundamental frequency

1. 서론

댐 축조재료로 사용되는 사력재료의 경우, 입경이 매우 커서 시료에 대한 직접적인 실내시험이 시험기 크기 한계로 인해 수행이 어렵고, 시추공을 이용한 현장시험은 대입경 특성에 의해 시추공 형성이 어려워 시험이 거의 불가능하고, 비파괴 표면파 탐사의 경우에도 대입경 조립재료의 불연속성으로 인한 측정 신호의 품질에 대한 신뢰성 문제와 반무한 평면 가정에서 출발된 표면파 기법의 한계로 인해 현장 시험에 의한 물성 취득도 용이하지 않다.

1981년 미국 캘리포니아 수자원국(California State Water Project)은 Oroville dam에 대한 동적 유한요소해석을 수행하기 위하여 계측지진기록을 이용한 2차원 유한요소해석을 이용한 반복적 방법에 의해 사력존 입력물성을 산정한 바 있다(Vrymoed, 1981). 중약진지역에 해당되는 우리나라의 경우, 상기와 같은 경우처럼 많은 빈도의 큰 지진기록 계측은 어렵고, 그 빈도 역시 많지 않다.

본 연구에서는 댐에서 계측된 미소지진기록을 이용한 사력존의 동적물성 역산법을 역산에 의해 산정된 물성을 이용한 3차원 지진응답해석 결과와 실제 계측으로 나타난 결과를 비교하는 방법에 의해 비교해 보았다. 이를 위하여 현재 운영 중인 댐의 기초부와 정상부에서 계측된 지진기록을 이용하여 댐의 고유진동수를 산정하고, 사력존의 물성을 변화시킨 반복적 2차원 수치해석으로 해석에 의한 고유진동수를 계측에 의한 진동수와 일치시키는 방법에 의해 사력존의 깊이별 동적물성을 산정하였다. 산정된 동적물성을 이용하여 운영 중인 댐에 대한 3차원 지진응답해석을 수행하고, 해석 결과로 나타난 정상부의 응답특성을 대상댐에서 실제 계측된 응답특성과 서로 비교해 봄으로써 계측지진을 이용한 사력존의 동적물성 역산법을 검증해 보고자 한다.

2. 대상댐 및 계측지진 개요

물성 역산법을 검증하기 위해 대상으로 한 댐은 강원도 횡성에 위치한 다목적댐이다. 댐은 높이가 48.5m이며, 댐 정상부, 댐 하류사면 하단, 댐 기초 어버트에 각각 1개씩 총 3개의 지진계가 설치되어 있다. 계측된 지진기록은 2006년 1월 19일 강원도 영월군 인근에서 발생한 규모 3.2의 지진으로 횡성댐의 지진계에 감지된 기록이다. 일정감쇠비(본 연구에서는 5% 감쇠비 사용)에 대한 댐 저부와 정상부에서의 가속도 계측기록의 응답스펙트럼을 각각 구한 후, 댐 정상부 응답스펙트럼을 댐 저부 응답스펙트럼으로 나누어 응답스펙트럼비를 산정하고, 산정된 응답스펙트럼비에서 첨두값을 보이는 주기를 산정하고 주기값으로부터 대상댐의 고유진동수를 산정할 수 있다(하익수 등, 2008). 이러한 절차에 의해 응답스펙트럼비가 최대가 되는 주기는 0.36sec로 산정되었고, 이로부터 산정된 고유진동수는 2.78Hz였다.

3. 댐 사력존 전단파속도 역산

댐 사력존의 동적물성은 반복적인 2차원 동적해석을 이용하여 산정할 수 있다(하익수 등, 2008). 최초 정적해석 수행 후에 각 절점의 초기변위와 속도를 초기화한 후 해석영역 바닥면에 횡성댐 어버트에서 계측된 가속도시간이력을 입력하중으로 한 동적해석이 수행된다.

동적해석을 위한 입력물성으로는 기초암반의 경우에는 정적해석 입력물성을, 코어존의 경우 전체 댐 부피의 약 8%내로서 전단탄성계수는 Sawada 등(1975)의 코어존의 깊이별 전단파속도 중 하한값에 밀도값을 곱하여 최대전단탄성계수를 정하고 포아송비는 0.3을 적용하여 체적탄성계수를 산정하여 일정값으로 입력하였다. 사력존의 경우, 최대전단탄성계수는 식 (1)로 표현될 수 있는데, 본 연구에서는 $k_{2,max}$ 를 여러 가지로 변화시킨 값을 사용하였으며, 체적탄성계수는 산정된 전단탄성계수에 포아송비 0.3을 적용하여 산정하였다.

$$G_{max}(Pa) = k_{2,max} \cdot 1000 \cdot \sqrt{\sigma_m'} \quad (\sigma_m' \text{ in Pa}) \quad (\text{Vrymoed, 1981}) \quad (1)$$

여기서, σ_m' 은 평균유효구속응력이다.

사력존의 깊이별 전단파속도를 역산정하기 위하여 $k_{2,max}$ 를 여러 가지 값으로 변화시킨 반복적인 동적수치해석이 수행된다. 실제 댐에서의 계측기록으로 산정된 횡성댐의 고유진동수는 2.78Hz이고, 이 값은 3차원 효과가 고려된 실제 댐의 고유진동수이므로 2차원 동적해석의 경우에는 이 값보다 10~20% 범위에서 작은 값을 나타내는 고유진동수를 가지게 될 때의 최대전단탄성계수, G_{max} 를 선정한다(Hatanaka, 1955; Ambraseys, 1960; Makdisi, 1976).

본 연구에서 해석결과, $k_{2,max}$ 를 105로 입력한 경우에 2차원 동적해석에 의한 고유진동수가 2.50Hz로서 2.78Hz보다 약 10% 작은 값으로 10~20% 범위에 해당되는 것으로 나타났다(그림 1 참조). 수치해석 결과를 통해 사력존의 깊이별 최대전단탄성계수를 산정하고 산정된 최대전단탄성계수는 식 (2)를 이용하여 깊이별 전단파속도를 산정한다. 여기서 ρ 는 밀도(= γ/g , γ 는 단위중량, g 는 중력가속도)이다.

$$v_s = \sqrt{G_{max}/\rho} \quad (2)$$

그림 2는 위와 같은 절차에 의해 산정된 횡성댐 사력존 깊이별 전단파속도 분포를 나타낸 것이다.

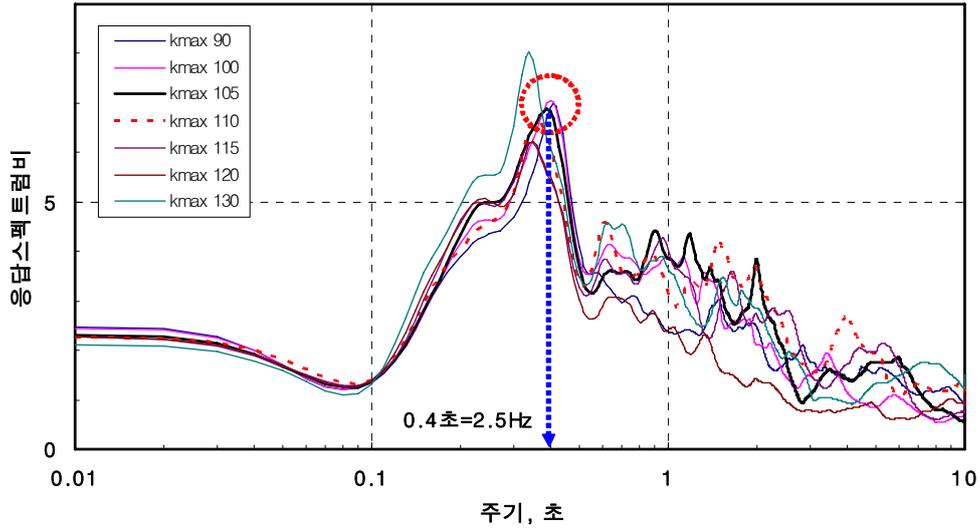


그림 1. 동적해석에 의한 사력존 강성 변화에 따른 응답스펙트럼비 산정 결과

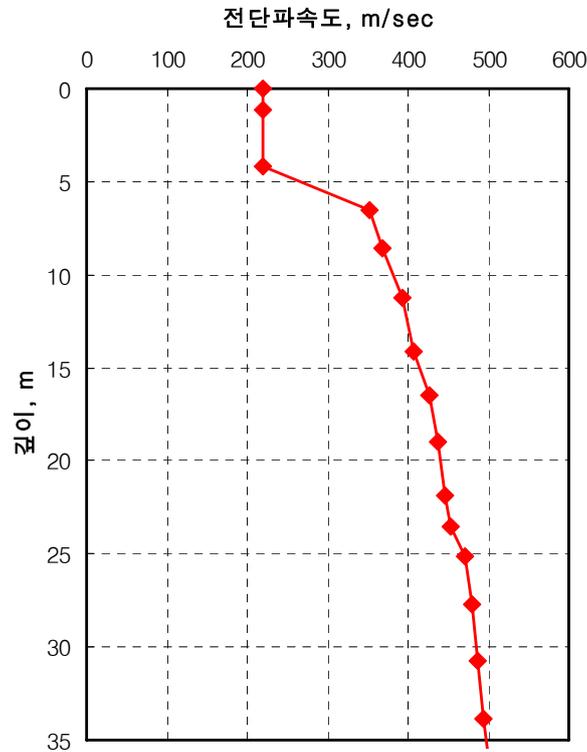


그림 2. 수치해석에 의해 역산된 사력존 심도별 전단파속도 분포

4. 역산결과에의 검증

물성산정 결과는 산정물성을 입력값으로 한 3차원 동적해석을 수행하고 해석결과로부터 얻어진 응답 함수와 정상부에서의 가속도 응답거동을 실제 계측된 지진기록으로부터 얻어진 결과와 비교해 봄으로써 그 결과를 검증해 보았다.

4.1 해석조건

경계조건은 해석경계에서의 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 자유장 경계조건(free field boundary condition)을 사용하였다. 해석에 사용된 입력지진파는 횡성댐의 어버트먼트에서 실제 계측된 지진파 중 1~30초 간의 파형을 사용하였다. 해석요소망은 그림 3과 같다.

지진응답해석을 위한 입력물성은 물성역산을 위해 수행된 2차원 동적해석에 사용된 입력물성을 동일하게 사용하였다.

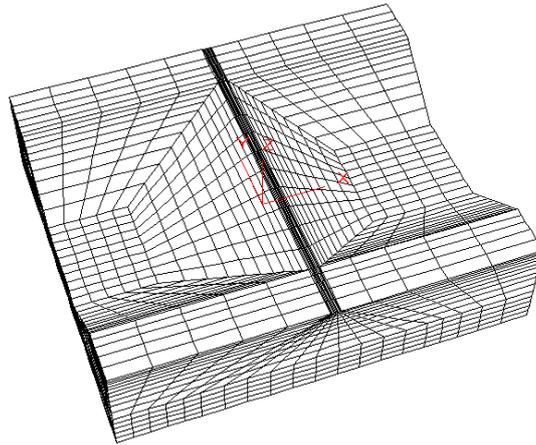


그림 3. 횡성댐 3차원 지진응답해석 요소망

4.2 응답함수(응답스펙트럼비) 결과 비교

그림 4는 3차원 지진응답해석 결과 나타난 응답함수(응답스펙트럼비, 정상부에서의 응답스펙트럼/댐바닥에서의 응답스펙트럼)를 실제 계측된 응답함수와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 역산된 물성을 사용하여 수행된 3차원 지진응답해석에 의한 응답함수는 실측값에 의해 산정된 응답함수와 그 곡선 형태는 거의 유사함을 확인할 수 있다. 고유진동수의 경우에는 실측값에 의한 경우가 2.78Hz인 반면에 해석에 의한 고유진동수는 2.9Hz로 나타났지만, 그 차는 5% 이내로 미미한 것으로 나타났다.

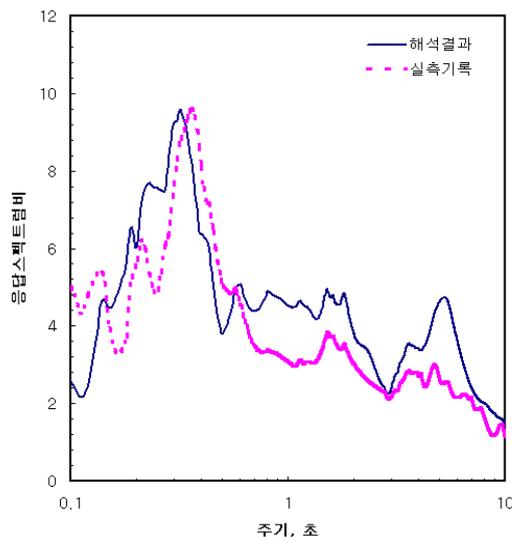


그림 4. 해석결과와 실측결과 응답함수 비교

4.3 정상부 가속도 응답거동 비교

그림 5는 3차원 지진응답해석 결과 나타난 댐 정상부에서의 가속도 시간이력을 실제 계측된 가속도 시간이력과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 역산된 물성을 사용하여 수행된 3차원 지진응답해석 결과에 의한 댐 정상부에서의 가속도 시간이력은 실제 계측된 가속도 시간이력과 최대 진폭은 물론, 그 파형이 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 그림 6은 이러한 정상부에서의 가속도 시간이력의 주파수 특성을 파악하기 위해 일정 감쇠비(여기서는 5%)에 대한 응답스펙트럼을 실측치와 계산치를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 주기 0.15초(주파수로는 $1/15 \approx 7\text{Hz}$)이하에서 큰 차이를 보이는 데, 이는 실제 댐의 응답을 표현할 수 있는 의미있는 주기 이하이며, 이는 실제 계측 자료에 포함될 수 있었던 주변 잡음 내지는 계측기 자체의 기계적 잡음에 기인된 것으로 판단된다. 이러한 의미에서 실제 큰 의미를 가지는 7Hz 이하 즉, 주기로는 0.15초 이상에서의 주파수 특성만을 살펴보았을 때에는 그 주파수 특성은 거의 유사함을 확인할 수 있다.

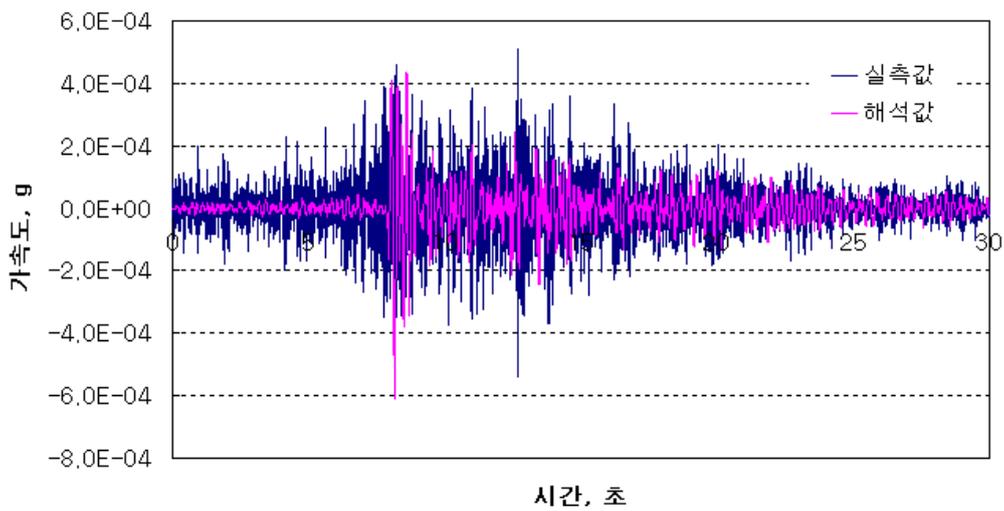


그림 5. 해석결과와 실측에 의한 정상부 응답가속도 시간이력 비교

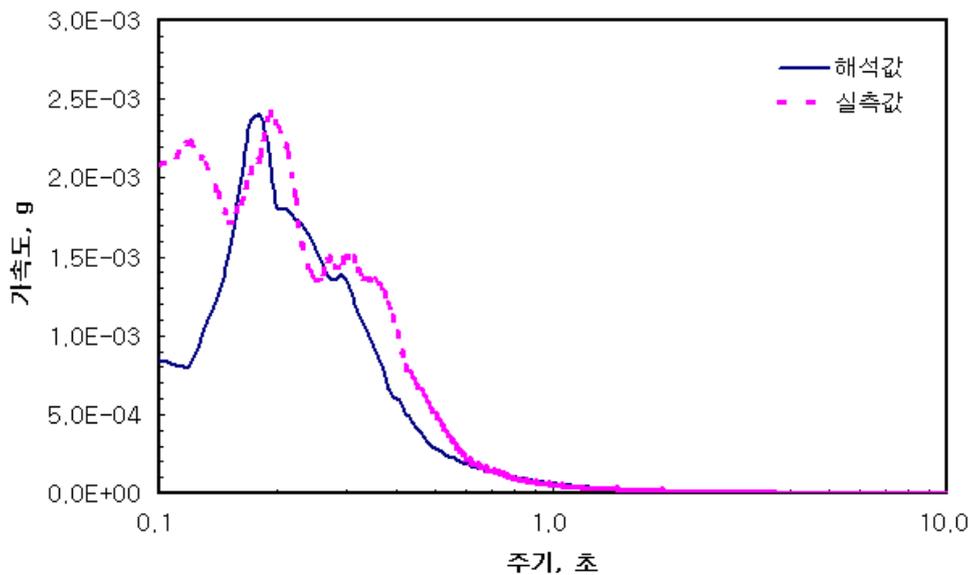


그림 6. 해석과 실측에 의한 정상부 가속도 주파수 특성 비교

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 댐에서 계측된 미소지진기록을 이용한 댐 사력존의 동적물성 역산법을 역산에 의해 산정된 물성을 이용한 3차원 지진응답해석 결과와 실제 계측으로 나타난 결과를 비교하는 방법에 의해 검증해 보았다.

- (1) 역산된 물성을 사용하여 수행된 3차원 지진응답해석에 의한 응답함수는 실측값에 의해 산정된 응답함수와 그 곡선 형태는 거의 유사함을 확인할 수 있다. 고유진동수의 경우에도 실측값에 의한 경우와 비교해도 그 차는 5% 이내로 미미하였다.
- (2) 역산된 물성을 사용하여 수행된 3차원 지진응답해석 결과에 의한 댐 정상부에서의 가속도 시간이력은 실제 계측된 가속도 시간이력과 최대 진폭은 물론, 그 파형이 거의 유사하였고, 주파수 특성 또한 거의 유사하게 나타났다.

현재, 국내 주요 대댐인 다목적댐과 용수전용댐에는 지진감지를 위한 지진계가 전 댐에 설치되어, 실시간으로 각 댐에서 감지되는 지진파형을 모니터링하고 있다. 이러한 현재 실정을 감안할 때, 본 연구에서 제시하는 미소지진기록을 이용한 사력존의 물성산정법은 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 산정법에 이용되는 계측자료의 신뢰성을 확보할 수 있기 위해서는 계측지진기록의 잡음제거 등 신호처리에 대한 추가적인 연구가 향후 지속적으로 이루어져야 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F045)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. 하익수, 오병현(2008), “미소지진 계측기록을 활용한 사력댐 사력존 전단파속도 역산”, **대한토목학회 정기학술대회**, pp.3051~3054.
2. Ambraseys, N. N.(1960), "On the shear response of a two dimensional wedge subjected to an arbitrary disturbance", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 50, pp.45~56.
3. Hatanaka, M.(1955), "Fundamental consideration on the earthquake resistant properties of the earth dam", *Bulletin No. 11*, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Japan.
4. Makdisi, F. I.(1976), "Performance and analysis of earth dams during strong earthquake", thesis presented of the University of California, at Berkeley.
5. Sawada, Y. and Takahashi, T.(1975), "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams", *Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symp.*, pp.695~702.