



3차원 수치해석을 통한 복합하중이 작용하는 농업용저수지의 거동 분석 Analysis of Behavior of Agricultural Reservoir with Combined Load by 3-D Numerical Analysis

송창섭* · 우제근* · 안광국** · 김명환*[†]

Song, Chang Seob · Woo, jea keun · Ahn, kwangkuk · Kim, Myeong Hwan

Abstract

The object of this paper was to analyze combined load acting on agricultural reservoir. This study was carried out to 3-D numerical modeling for displacement characteristic and seismic acceleration characteristic. The results of study were analyzed and summarized as follow. It was found that the displacement caused by combined load acting on railway and agricultural reservoir did not reflect the effect of load and the seismic wave consistently. The ground accelerations that occur in railway and dam were amplified because 3-D numerical analysis program interprets ground as an elastic body. Actual ground shows characteristics of elasticity and plasticity, so measured values will show different tendency. As a result of analyzing displacement characteristics, it is considered to be related to stiffness. The Ofunato seismic wave, the displacement (77.1 mm) of the body satisfied the allowable displacement (220 mm), but The Hachinohe seismic wave (282.8 mm) did not. It is considered that displacement caused by combined load is affected not only by acceleration but also by characteristics of materials.

Keywords: 3-D numerical analysis; agricultural reservoir; combined load

1. 서 론

최근 전 세계적으로 강진의 발생빈도가 증가하고 있는 추세이며, 한반도도 마찬가지로 과거에 비해 중소규모의 지진의 발생이 잦아지고 있다. 이러한 사실은 더 이상 한반도가 지진의 안전지대가 아니라는 점을 알려주고 있으며 우리나라도 내진설계에 대한 연구를 활발히 이루어져야 함을 의미한다.

현재 우리나라에는 약 1만7천개의 농업용 저수지가 건설되어있으며, 농업용 저수지 중 흙댐이 99% 이상이고 축조 후 50년 이상 경과된 저수지가 전체의 약 88%를 차지하고 있는 것으로 조사된 바 있다. 이와 같이 농업용 저수지는 공용연수가 증가함에 따라 저수지의 노후화, 축조기술의 상대적 저하, 환경변화에 따른 안전성 저하 등의 문제가 노출되어 있다 (Shin and Lee, 2012).

지진으로 인해 동반되는 피해로는 토석류, 댐 및 건물의 붕괴가 있으며, 이는 대형 재난으로 연결되게 된다. 특히 저수지 댐의 경우에는 지진으로 인하여 붕괴되거나, 지반 액상화로

인하여 댐 제체에 급격한 변위를 유발시켜 붕괴되는 것이 단순히 저수지 댐 붕괴로 그치지 않고 홍수로 연결되게 되어 큰 인명 및 재산피해를 일으킬 수 있다 (Park et al., 2006).

지진이 저수지에 미치는 영향에 대한 국내의 최근 연구 동향으로는 수위에 따른 파괴확률을 추정하는 것에 중점을 두고 있다. 미국, 유럽 등의 선진국의 경우 일찍이 2000년대 이후로 기본적인 안정성 분석방법에 나아가 파괴모드, 파괴확률, 다양한 하중조건 등을 통한 위험도 해석을 실시한 것을 보면 우리나라는 지진으로부터 저수지의 거동을 통한 안정성을 분석하는데 있어서 기술과 지식이 부족한 실정이다 (Ha et al., 2016).

그 동안 우리나라에서 농업용 저수지의 안정성에 대한 연구는 주로 수문학적 관점에서 이루어져왔다. 하지만 산업화 및 도시화로 인해 전국적으로 분포해있는 농업용 저수지 부근도 개발됨에 따라 각 중 구조물이 설치되어 저수지에 하중 영향을 미칠 수 있는 가능성이 늘고 있다.

최근 하드웨어 및 소프트웨어 발달로 인하여 수치해석방법이 간편화됨에 따라 3차원 수치해석방법을 이용한 지반 및 구조물 거동분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 해석대상 지반 및 구조물과 인접구조물의 안정성을 효율적으로 평가할 수 있게 되었다 (Jeong et al., 2016).

따라서 본 연구에서는 울산지역 복선전철 구간 내의 철로를 진동하중을 발생시키는 시설물로 선정하여 인근에 위치한 농업용저수지를 대상으로 어떠한 거동을 발생시키는지 3차

* Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

** Civil Engineering, Chungbuk National University

† Corresponding author

Tel.: +81-43-261-2572 Fax: +81-43-271-5922

E-mail: d@cbnu.ac.kr

Received: September 19, 2017

Revised: November 29, 2017

Accepted: December 1, 2017

원 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 지진하중과 철로에서 발생하는 진동하중을 복합하중으로 설정하였으며, 제체에서 발생하는 변위와 가속도를 도출해내었다.

II. 분석대상 및 방법

1. 분석대상

분석에 적용된 농업용저수지는 울산-포항 복선전철 구간 내의 철로선이 통과하는 곳에 위치한 OO저수지로 선정하였다. Table 1은 농업용저수지의 제원을 나타낸 것이다. 저수지는 1974년에 준공하였으며 제원은 필댐 형식으로 총저수량 1,161 t, 유역면적 506 ha, 수혜면적 261.5 ha, 제체길이 288 m, 제체높이 22 m로 설계되었다. 제체의 중심코어는 점토 및 실트로 구성되어 있으며 습윤한 상태를 나타냈다.

Fig. 1은 수치해석에 적용된 제체의 단면을 나타낸 것으로 철도가 접촉하는 면적에 따라 구분하였다. 제체에서 발생하는 특성을 파악하기 위해 철도가 가장 넓게 접촉하여 복합하중의 영향을 제일 많이 받는 부분 (Section 1)과 가장 적게 받는 부분 (Section 3), 그리고 중간부분 (Section 2)을 선정하여

적용하였다.

Table 2는 제체의 3차원 수치해석을 위해 ‘Mohr-Coulomb’ 유한요소 모델링에 적용된 토질정수 값과 물성치를 표로 나타낸 것이다. 제체의 코어부분은 현장에서 채취한 시료의 토질실험결과 평균값으로 적용하였다. 철도부와 제방부는 Rail Design Standards (Korea Rail Network, 2013)를 참고하여 현장여건에 가장 적합한 토질정수와 물성치를 선정하였다.

2. 복합하중 조건

가. 철도 하중

수치해석에 적용된 진동하중은 철도하중과 지진파로 구성되었다. Fig. 2는 Rail Design Standards (Korea Rail Network, 2013)에 제시된 KRL-2012 표준열차하중을 적용한 것을 나타낸 것이며, 표준열차하중을 구성하는 집중하중은 효과적인 해석을 위해 분포하중으로 변경하여 수치해석에 적용하였다. 분포하중은 양방향 철도하중으로 철도상부의 면적으로 나눈 등분포하중으로 34.47 kN/m의 크기로 적용하였다. 반복되는 철도하중이 농업용저수지 제체에 미치는 영향을 확인하기 위해 1일 100회 작용, 10년 기간에 대한 반복하중으로 철도부 상부에 적용하였다.

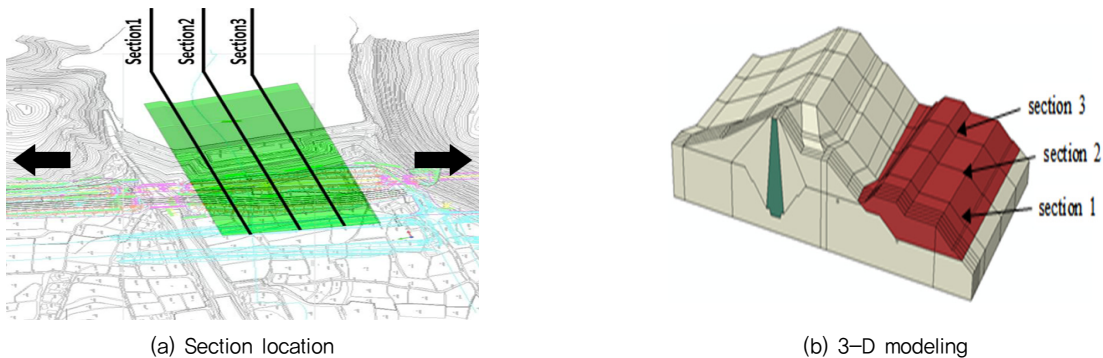


Fig. 1 Numerical modeling sections

Table 1 Reservoir specifications

Division	Total reservoir capacity (t)	Drainage area (ha)	Benefit area (ha)	Length (m)	Height (m)
Fill dam	1,161	506	261.5	288	22

Table 2 Input data

Division	Unit weight (kN/m ³)	Internal friction angle (°)	Cohesion (kN/m ²)	Poisson's ratio	Modulus of elasticity (kN/m ²)
Embankment	19.34	31.5	29.42	0.35	4.20E+04
Core	17.17	27.2	7.45	0.45	2.10E+07
Railway	25.89	37.5	9.45	0.4	2.50E+03

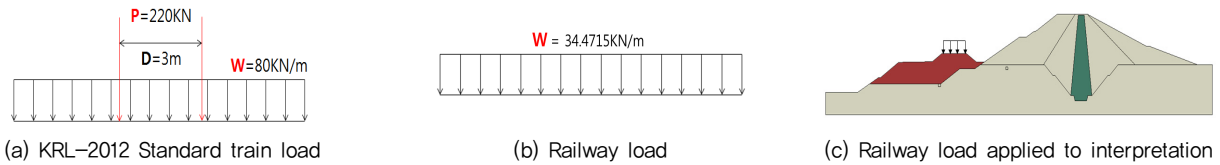


Fig. 2 Railway load

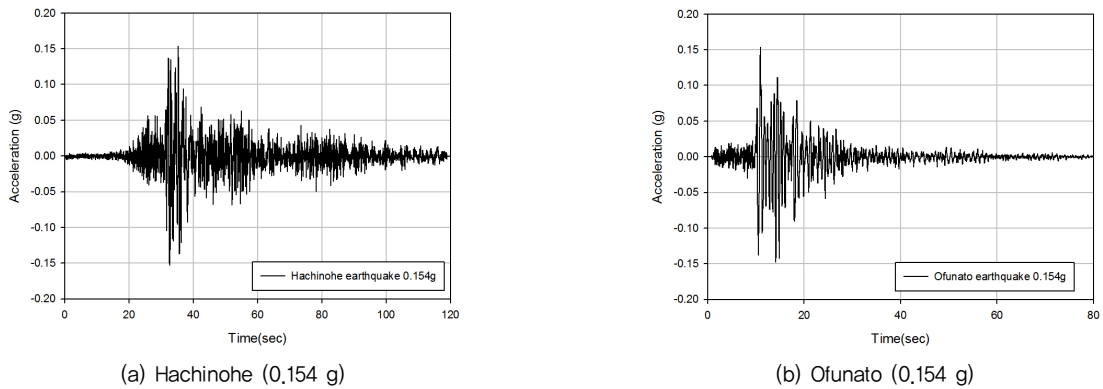


Fig. 3 Input seismic wave

나. 입력 지진파

지진파로 인해 발생하는 지진가속도의 크기는 일반적으로 중력가속도 (g)를 이용하여 나타내며 매질의 종류에 따라 전파양상이 다르게 나타난다. 따라서 여러 종류의 재료로 이루어진 제체의 지진하중으로부터 안정성을 판단하기 위해서 수치해석 프로그램에 지진파를 적용하였다. 수치해석에 적용된 입력 지진파는 장주기 특성으로 대표되는 Hachinohe 지진파와 단주기 특성으로 대표되는 Ofunato 지진파다. 입력 지진파의 경우 국내 내진설계기준연구와 OO저수지의 2014년 정밀안전진단 결과를 고려하여 설계 지진계수는 내진 1등급, 지진구역 1구역(울산) 계수 0.11, 붕괴방지 수준의 위험도 계수를 1.4로 적용하여 기반암 최대가속도를 식(1)을 통해 산정하였다. Fig. 3 (a)는 지진가속도가 0.154 g인 장주기 지진파의 시간에 따른 가속도 크기를 나타냈고, Fig. 3 (b)는 동일한 지진가속도를 가진 단주기 지진파의 시간에 따른 가속도 크기를 나타낸 것이다. 장주기 지진파는 20~40초 사이에 가장 큰 가속도를 나타냈으며, 단주기 지진파는 20초 이전에 가장 큰 가속도를 나타내었다.

$$a_{max} = Zone\ coefficient \times Risk\ coefficient$$

$$= 0.11 \times 1.4 = 0.154g \tag{1}$$

다. 수치해석 적용

3차원 수치해석을 수행할 때 적용한 제체의 규모는 전체

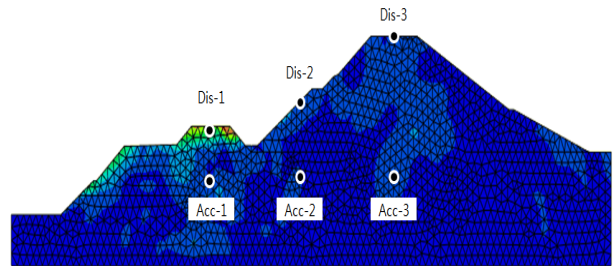


Fig. 4 Measurement location

길이인 288 m로 하였다. 수치해석 상의 경계조건으로 단면 하단은 하부에서 침하가 발생하지 않도록 전 자유도에 대하여 고정조건으로 설정하였으며, 측면은 침하가 발생하지 않도록 자유조건으로 그 외의 자유도에 대해서는 고정조건으로 설정하였다. OO저수지의 수위는 따로 적용하지 아니하였으며, 입력지진파는 경계조건으로 해석단면 하부에 적용하였다. 철도하중은 철도 성토부 상부에 적용하였으며, 결과분석은 중간단면인 Section 2 단면을 기준으로 분석하였다.

Fig. 4는 수치해석 수행을 위해 설정한 포인트를 나타낸 것이다. 제체에 작용하는 장기적인 변위 특성을 확인하기 위하여 철도부 (Dis-1), 제방사면부 (Dis-2), 제방상부 (Dis-3)를 데이터 측정위치로 설정하였으며 가속도 특성을 확인하기 위해 철도부 (Acc-1), 제체 (Acc-2, Acc-3)의 하단부분을 데이터 측정위치로 설정하였다.

유한요소해석에 의한 농업용 저수지에 발생하는 변위 및 가속도 측정은 ABAQUS 6.13 (2005) 프로그램을 사용하였고 철도하중과 지진파로 인한 지진하중을 동시에 적용하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

본 연구에서는 OO저수지 제체의 복합하중으로 인한 거동 분석을 위해 3차원 모델링을 통해 수치해석을 수행하였다. 지진하중과 철도하중이 제체에 작용함으로써 철도부 (Railway), 제방사면부 (Embankment)와 제방상부 (Core)에 발생하는 가속도와 변위 특성을 통해 제체의 거동을 분석하였다.

1. 지반가속도 특성

Table 3은 3차원 수치해석의 최대 지반가속도 결과 값을 표로 나타낸 것이다. 단주기 지진파의 경우 철도부 및 저수지에서 발생하는 지반 가속도의 최댓값은 Section1, Section 3에서 각각 0.329 g, 0.333 g으로 Section 2를 제외하고 철도부에서 나타났으며 최솟값은 제방사면부에서 0.314 g (Section 1), 0.191 g (Section 3)으로 나타났다. Section 2의 철도부, 제방사면부, 제방상부의 지반 가속도 값은 각각 0.373 g, 0.444 g, 0.360 g으로 철도하중이 발생하는 장소이기 때문에 복합하중의 영향을 가장 많이 받는 Section 1의 지반 가속도 값보다 크게 나타났다. 이러한 경향은 장주기 지진파가 포함된 복합하중에서도 동일하게 나타났다.

장주기 지진파의 경우 지반 가속도의 최댓값은 Section 2의 철도부, 제방사면부, 제방상부가 각각 0.447 g, 0.434 g, 0.458 g으로 Section1, Section 3보다 전부 크게 나타났으며

최솟값은 Section 3에서 각각 0.271 g, 0.282 g, 0.283 g으로 나타났다. 단주기 지진파와 장주기 지진파가 포함된 복합하중이 제체에 작용함으로써 생긴 지반 가속도 값의 경향은 Section 2의 값이 가장 크고 복합하중이 발생하는 장소로부터 가장 먼 곳에 위치한 Section 3의 값이 가장 작게 나타났다.

제체와 저수지에 작용하는 가속도 분석결과 복합하중의 영향을 제일 많이 받는 Section 1의 지반 가속도 값이 가장 크게 나타나지 않았으며 제방사면부에 위치한 Section 2의 값이 전반적으로 크게 나타났다. 이는 수치해석 상 제체를 이루고 있는 지반은 탄성으로 설정되었기에 가속도증폭 경향을 나타낸 것으로 사료된다. 따라서 실제 지반의 경우 수치해석 프로그램 환경과 탄성과 소성의 특성을 동시에 가지고 있어서 같은 조건의 복합하중이 작용하더라도 결과의 경향은 다소 차이를 나타낼 것으로 판단된다.

2. 수직변위 특성

Table 4는 3차원 수치해석의 단주기 지진파와 장주기 지진파가 각각 철도하중과 복합하중으로 제체에 작용하였을 때 나타난 최대 수직변위 결과 값을 나타낸 것이다. 단주기 지진파와 100회의 철도하중이 동시에 작용하는 복합하중 조건에서 Section 1~3 단면의 변위는 철도부에서는 27.8 mm~39.6 mm, 제방사면부에서는 27.8 mm~38.3 mm, 제방상부에서는 29.2 mm~77.1 mm로 나타났다. 제방상부의 Section 1과 Section 3 변위는 각각 58.5 mm, 77.1 mm로 철도부, 제방사면부보다 크게 나타났다. 중간부분인 Section 2의 최대변위는 제방사면부에서 38.3 mm로 가장 큰 수직변위를 나타냈는데, 이는 데이터 측정위치가 제방사면부에 위치하기 때문에 크게 나타난 것으로 사료된다. 복합하중의 영향을 가장 적게 받는 부분인 Section 3의 수직변위 값은 Section 2의 제

Table 3 Composit load – Maximum acceleration

Division	0.154 g Ofunato Maximum acceleration (g)			0.154 g Hachinohe Maximum acceleration (g)		
	Section 1	Section 2	Section 3	Section 1	Section 2	Section 3
Railway	0.329	0.373	0.333	0.303	0.447	0.271
Embankment	0.314	0.444	0.191	0.320	0.434	0.282
Core	0.322	0.360	0.294	0.310	0.458	0.283

Table 4 Composit load – Maximum displacement

Division	0.154 g Ofunato Maximum displacement (mm)			0.154 g Hachinohe Maximum displacement (mm)		
	Section 1	Section 2	Section 3	Section 1	Section 2	Section 3
Railway	31.3	27.8	39.6	24.8	30.9	60.1
Embankment	27.8	38.3	29.0	43.3	30.8	23.4
Core	58.5	29.2	77.1	282.8	23.4	80.8

방사면부를 제외하고 모든 부분에서 Section 1과 Section 2보다 크게 나타났다. Section 3의 수직변위 데이터는 제방상부에서 측정하였는데, 제방상부를 구성하고 있는 코어부의 탄성계수는 철도부와 제방사면부를 구성하는 재료보다 값이 작다. 따라서 탄성계수가 재료의 강성도와 비례한다는 사실을 고려하여 Section 3의 강성도 값이 다른 Section에 비해 작기 때문에 전반적으로 수직변위 값이 더 크게 나타난 것으로 사료된다. 단주기 지진파와 철도하중이 동시에 작용하는 복합하중 조건하에 발생한 가장 큰 수직변위 값은 77.1 mm로 「기존 댐의 내진성능 평가 및 향상요령」에서 제시하는 허용 변위량(제체 높이의 1%, 220 mm)을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 철도하중이 지속적으로 발생하는 저수지 제체에 단주기 지진파가 영향을 미치더라도 안전하다고 사료된다.

장주기 지진파와 100회의 철도하중이 동시에 작용하는 복합하중 조건의 경우 단주기 지진파와 동일하게 Section 2를 제외하고 제방상부의 최대 수직변위 값이 각각 282.8 mm, 80.8 mm로 다른 부분에 비해 제일 크게 나타났다. 이는 단주기 지진파 경우와 마찬가지로 제방상부가 철도부와 제방사면부에 비해 낮은 강성도를 가지는 제방코어재를 포함함으로써 나타난 것이라고 사료된다. 장주기 지진파가 포함된 복합하중 조건 하에 Section 1~3중 나타난 가장 큰 변위는 Section 1의 제방상부 수직변위 값인 282.8 mm로 허용변위량 220 mm

를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 수치해석은 지반 물성 값을 상수로 가정하므로 해석 중 토층의 공진 진동수는 일정하다. 따라서 입력한 운동의 주파수와 토층의 공진진동수가 일치하게 되면 값이 커지는 경우가 생긴다(Lim et al., 2015). 각 Section의 지반 물성 값은 다르게 설정되었으며 Section 1은 철도부의 물성 값이 적용되었다. 따라서 Section 1을 구성하는 철도부의 공진 진동수와 수치해석 시 입력한 운동의 주파수가 일치하여서 Section 1의 제방상부 수직변위 값이 크게 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 5는 단주기 지진파와 철도하중의 복합조건이 적용된 모델링에서 철도부와 제방사면부, 제방상부의 각 Section에 따른 최대변위와 최대가속도를 그래프로 나타낸 것이다. 최대가속도는 모든 부분이 Section 2에서 최댓값을 나타내고 Section 1, 3에서 감소하는 경향을 보인 반면 최대변위는 철도부와 제방사면부, 제방상부 각각 다른 양상을 나타냈다.

Fig. 6은 위 그래프와 동일한 조건하에 장주기 지진파에서의 변위를 나타낸 것이다. 단주기 지진파와 마찬가지로 제방사면부의 최대변위 값은 다른 부분과 비교해봤을 때 대체적으로 최대변위 값이 낮은 경향을 나타내었다. 전단강도 요소 값이 가장 작은 제방코어재가 포함된 제방상부의 경우 대체적으로 최대변위 값이 가장 큰 경향을 나타내었다. 이러한 결과를 종합해봤을 때 지진파와 철도하중의 복합하중이 제체에 작용하여 발생하는 수직변위는 지반가속도의 크기뿐만 아니

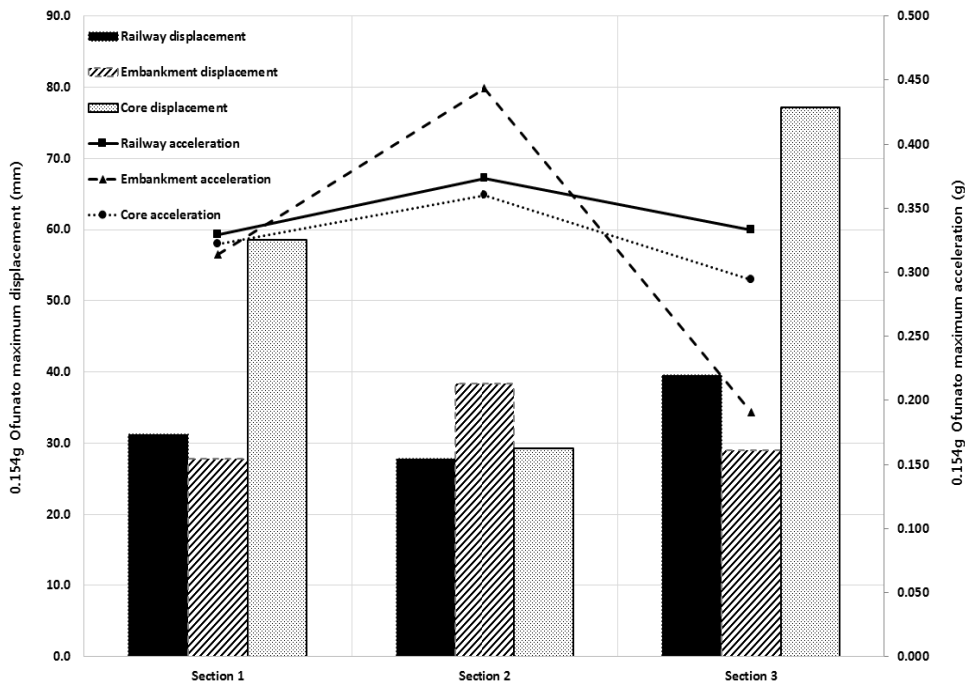


Fig. 5 Composite load - 0.154 g Ofunato maximum displacement & acceleration

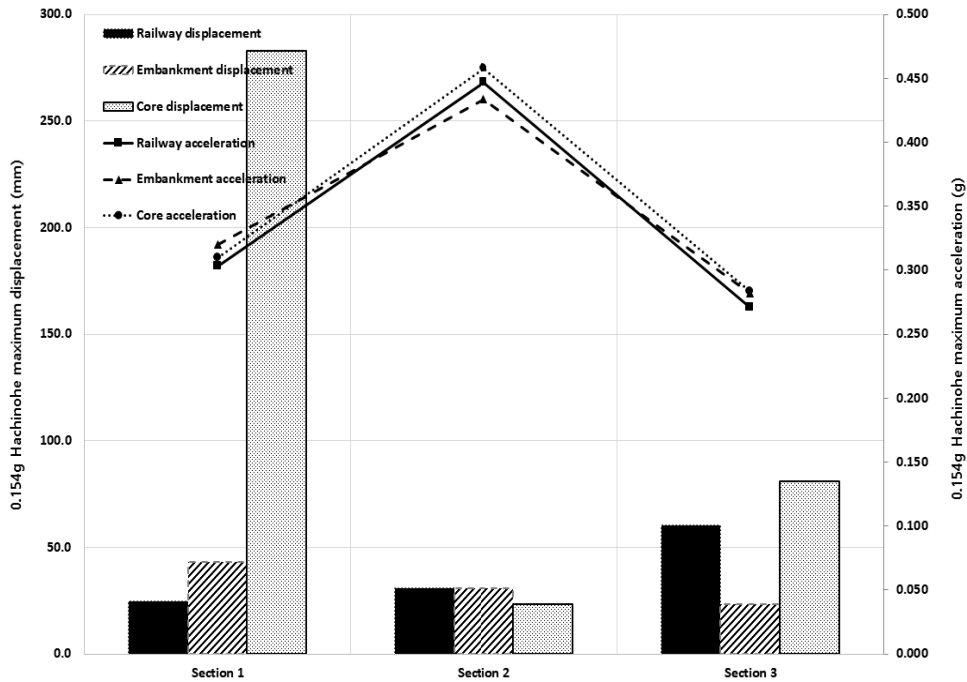


Fig. 6 Composite load - 0.154 g Hachinohe maximum displacement & acceleration

라 제체를 구성하고 있는 재료의 강성도와 같은 특성도 영향을 미치는 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 지진파와 철도하중의 복합하중으로 인한 농업용저수지의 거동을 분석하기 위해 3차원 수치해석을 실시하였으며 철도부 (Railway)와 제방사면부 (Embankment) 및 제방상부 (Core)의 지반가속도, 수직변위를 도출 및 분석하였다.

1. 철도하중과 지진하중이 같이 발생하는 복합하중으로 인해 생기는 지반가속도는 지진파의 종류와 상관없이 복합하중의 영향을 제일 많이 받는 Section 1이 아닌 중간지점인 Section 2에서 전체적으로 가장 크게 나타났다. 이는 수치해석 시 탄성지반내의 가속도증폭으로 인해 나타난 것으로 사료된다.
2. 단주기 지진파와 장주기 지진파가 적용된 철도하중은 Section 2를 제외하고 공통적으로 제방상부의 수직변위 값이 가장 크게 나타났다. 단주기 지진파의 경우 복합하중의 영향을 가장 적게 받는 부분인 Section 3의 변위 값이 철도부, 제방사면부, 제방상부에서 Section 1과 Section 2에 비해 대

체적으로 크게 나타났으며 가장 큰 수직변위 값은 77.1 mm로 「기존댐의 내진성능 평가 및 향상요령」에서 제시하는 허용 변위량 (제체 높이의 1%, 220 mm)을 만족하는 것으로 나타났다.

3. 장주기 지진파의 경우 제방사면부와 제방상부의 수직변위 값은 Section 1이 Section 2와 Section 3보다 전반적으로 크게 나타났다. 장주기 지진파에서 나타난 가장 큰 수직변위는 복합하중의 영향을 가장 많이 받는 Section 1의 제방상부 수직변위 값 282.8 mm로 수치해석 시 분석을 실시하는 토층의 공진진동수와 입력운동의 주기파가 동일함에 따라 값이 증폭된 걸로 사료된다.
4. 단주기 및 장주기 지진파와 철도하중의 복합하중이 제체에 작용하여 나타난 최대 수직변위를 각 부분 구성 재료의 특성 중 하나인 강성도와 관련지었을 때 강성도가 작을수록 최대 수직변위가 크게 나타나는 경향을 나타내었다. 따라서 복합하중으로 인해 발생하는 최대변위는 제체를 구성하는 재료특성에 영향을 받는 것으로 사료된다.
5. 지진하중과 철도하중의 복합하중이 농업용저수지 제체에 작용하여 나타난 지반가속도와 수직변위를 분석한 결과, 각 결과 값의 양상은 서로 다르게 나타났다. 이러한 결과를 통해 지반가속도가 제체의 변위에 영향을 미치지만 제체를 구성하고 있는 재료의 성질도 또한 제체의 수직변위에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Ha, I. S., S. G. Lee, J. Y. Lim, and Y. H. Jung, 2016. Seismic failure probability of the Korean disaster risk fill dams estimated by considering freeboard only, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 36(3): 451-461. doi:10.12652/ksce.2016.36.3.0451 (in Korean).
2. Jeong, S. S., J. U. Sim, and S. J. Lee, 2016. A study on the rational application of 3D numerical analysis for anchored earth retaining wall, *Journal of the Korean geotechnical society*, 32(4): 29-39. doi:10.7843/kgs.2016.32.4.29 (in Korean).
3. Korea Rail Network (KORAIL), 2013. Rail design standards, pp. 298 (in Korean).
4. Korea Infrastructure Safety Corporation (KISTEC), 2004. Assessment and improvement of seismic performance of existing dam, pp. 61 (in Korean).
5. Lim, S. Y., C. S. Song, and M. H. Kim, 2015. Evaluation of agricultural reservoir behavior by seismic shaking table test, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(3): 55-63. doi:10.5389/ksae.2015.57.3.055 (in Korean).
6. Park, I. J., S. W. Kim, W. H. Jang, H. T. Kim, and C. H. Yoo, 2006. Evaluation of aseismic performance for reservoir dams in Korea, *Journal of Korean Geo-Environment Society*, 7(6): 89-100 (in Korean).
7. Shin, E. C. and J. K. Lee, 2012. Safety management improving way of small agricultural reservoir, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, 12(3): 53-58. doi:10.12814/jkgss.2012.11.3.053 (in Korean).