

뒤채움지반에서의 과잉간극수압 발생이 중력식 안벽구조물의 동적특성에 미치는 영향 분석

Dynamic Characteristics of Gravity Quay Wall during Generation of Excess Pore Pressure in Backfill Soils

황 재 익¹ Hwang, Jae-Ik

김 명 모² Kim, Myoung-Mo

Abstract

In this research, shaking table tests for three types of gravity quay wall system were performed to analyze the influence of excess pore pressure in backfill soils on the natural frequency of gravity quay wall systems. The elastic modulus of backfill soils was also estimated from the back analyses using the results of the shaking table tests. From the test results, it was observed that as the magnitude of excess pore pressures increased, the natural frequency of the gravity quay wall system decreased and vice versa. The natural frequency was about 44Hz when no excess pore pressure was generated in backfill soils, and decreased to about 16Hz at the pore pressure ratio of 0.55. The elastic modulus of backfill soils reached the constant maximum value when the pore pressure ratio was less than 0.2, and abruptly decreased as the pore pressure ratio became larger than that. The elastic modulus of backfill soils decreased to 10% of the maximum value when the pore pressure ratio was 0.55.

요 지

본 연구에서는 세 종류의 안벽시스템에 대해 랜덤파를 이용한 진동대 실험을 수행하여 진동 중 뒤채움지반에서 발생하는 과잉간극수압이 중력식 안벽구조물 시스템의 고유진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 진동대 실험 결과를 이용한 역해석을 통하여 과잉간극수압의 크기에 따른 뒤채움지반의 탄성계수를 추정하였다. 그 결과, 뒤채움지반에서 과잉간극수압이 증가하면 안벽시스템의 고유진동수는 감소하고 과잉간극수압이 감소하면 고유진동수가 증가하는 경향을 보였으며, 안벽시스템의 고유진동수는 뒤채움지반에서 과잉간극수압이 발생하지 않을 때 약 44Hz이었으며 간극수압비가 0.55일 때 약 16Hz까지 감소하였다. 또한 뒤채움지반의 탄성계수는 간극수압비가 약 0.2이하에서는 최대값으로 거의 일정하지만 간극수압비가 약 0.2이상으로 증가하면 급격히 감소하여 간극수압비가 0.55일 때 간극수압비가 0일 때의 탄성계수의 약 10%까지 감소하였다.

Keywords : Excess pore pressure, Gravity quay wall, Natural frequency, Shaking table test

1. 서 론

중력식 안벽의 동적거동은 진동 중 벽체에 작용하는

여러 가지 힘들에 의해 크게 영향을 받는다. 진동 중 벽체에 작용하는 힘에는 벽체전면과 배면의 물에 의해 발생하는 동적수압, 벽체의 관성력, 그리고 뒤채움 흙

1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사 후 연구원 (Member, Post-doc., School of Civil, Urban & Geosystem Engng, Seoul National Univ., jorba71@snu.ac.kr)
2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engng, Seoul National Univ.)

에 의한 동적토압 등이 있으며, 벽체의 거동은 이러한 힘들의 복잡한 상호작용에 의해 결정된다. 김성렬(2003), 김성렬 등(2003) 그리고 Kohama(2000)는 중력식 안벽구조물에 대한 진동대 실험을 수행하여 배면에 작용하는 동적토압과 관성력간의 위상변화를 배면지반 내의 과잉간극수압의 크기에 따라서 분석하고 이를 모사하기 위한 간편식을 제안한 바 있다.

벽체에 작용하는 동적수압과 관성력은 벽체의 가속도 크기에 큰 영향을 받으며, 벽체의 가속도는 중력식 안벽구조물 시스템의 고유진동특성들의 영향을 받는다. 그리고 동적토압은 벽체와 뒤채움지반사이의 동적상호작용에 의해 결정되는데, 이때 뒤채움지반 내에 발생하는 과잉간극수압의 크기에 의해 큰 영향을 받는다. 또한, 안벽시스템의 고유진동수와 뒤채움지반 내에 발생하는 과잉간극수압은 진동 중 서로 영향을 주고받으면서 변화하기 때문에, 중력식 안벽구조물의 동적거동을 분석할 때에는 안벽시스템의 고유진동수와 과잉간극수압의 상관관계를 이해하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 중력식 안벽구조물에 대해 랜덤파를 이용한 진동대 실험을 수행하여 뒤채움지반에서의 과잉간극수압과 시스템의 고유진동수사이의 관계를 분석하였으며, 이러한 실험 결과를 수치해석으로부터 구한 뒤채움지반의 탄성계수 변화에 따른 안벽시스템의 고유진동수 변화와 비교하여 뒤채움지반에서의 과잉간극수압 발생에 의한 뒤채움지반의 탄성계수의 변화를 추정하였다.

2. 진동대 실험

2.1 실험 개요

지진동에 의해 지반 내에서 발생하는 과잉간극수압이 중력식 안벽구조물의 동적특성에 미치는 영향을 분

석하기 위하여 중력식 안벽구조물에 대해 진동대 실험을 수행하였다. 실험 대상구조물은 그림 1과 같이 벽체+기초지반 시스템, 벽체+기초지반+물 시스템, 그리고 벽체+기초지반+물+뒤채움지반으로 이루어진 안벽구조물 시스템 등 3 종류이다. 그림 1(a)의 벽체+기초지반 시스템에 대한 실험은 고유진동수와 점성감쇠비를 구한 후 유한요소해석을 통하여 기초지반의 탄성계수를 추정하기 위해 수행하였으며 그림 1(b)의 벽체+기초지반+물 시스템에 대한 실험은 벽체 전면과 배면에 존재하는 물이 안벽시스템의 동적특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 수행하였다. 그리고 그림 1(c)의 벽체+기초지반+물+뒤채움지반으로 이루어진 안벽구조물 시스템에 대한 실험은 본 연구의 주목적인 진동 중 뒤채움지반에 발생하는 과잉간극수압의 변화가 안벽구조물 시스템의 고유진동수에 미치는 영향을 분석하기 위한 것이다.

실험에 이용한 토조는 크기가 150cm(길이)×70cm(높이)×100cm(폭)이고, 2cm 두께의 투명 아크릴판으로 제작하였다. 모래는 주문진 표준사로서 유효입자크기 D_{10} 은 0.37mm, 평균입자크기 D_{50} 은 0.60mm, 균등계수 C_u 는 1.77, 비중은 2.64, 그리고 최대·최소 건조단위중량은 각각 16.27 kN/m^3 과 13.03 kN/m^3 이다. 기초지반은 20Hz, 0.4g의 sine파를 이용하여 1분간 진동다짐으로 매우 조밀하게 다졌다. 뒤채움지반은 기초지반위에 벽체를 설치한 후 토조의 수위를 50cm로 일정하게 유지하고, 수면 위 20cm 높이에서 주문진표준사를 조심스럽게 낙하시켜 느슨하게 조성하였다. 이렇게 조성된 기초지반의 상대밀도와 포화단위중량은 각각 80%와 19.40 kN/m^3 이었고, 뒤채움 지반의 경우 각각 30.6%와 18.42 kN/m^3 이었다. 벽체는 강재로 제작하였고, 크기는 16.6cm(폭)×25cm(높이)×32cm(길이)이며, 단위중량은 20 kN/m^3 이다. 벽체는 총 3개를 제작하여 그림 1과 같이 각각의 벽체가 독립적으로 거동하도록 1열로 배치한 후 벽체와 뒤채움지반간의 마찰영향을 가장 작게 받는 중간벽체

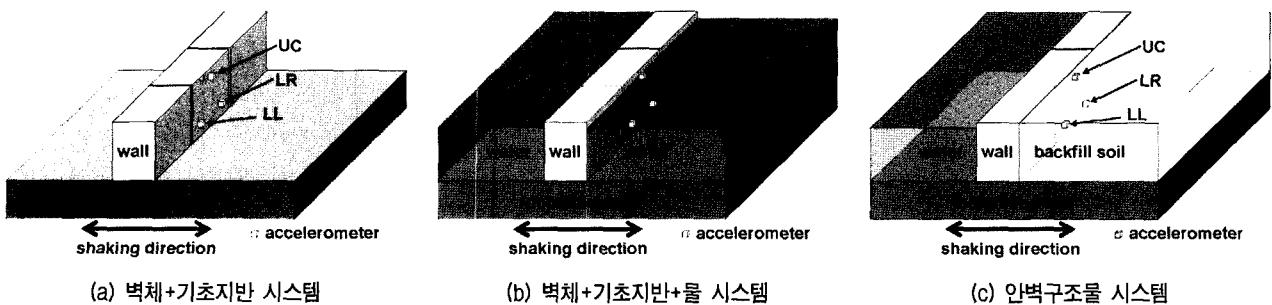


그림 1. 진동대 실험의 대상구조물

에 대하여만 계측을 실시하였다. 벽체와 벽체사이, 벽체와 토조 옆면 사이는 실험도중 모래가 빠져나가는 것을 방지하기 위해 스폰지를 부착하였다. 그림 2는 본 연구에 이용된 중력식 안벽구조물의 실험단면과 계측기배치를 보여준다. 기초지반의 높이는 7.5cm, 뒤채움지반의 높이는 25cm, 그리고 물의 깊이는 22cm이며, 뒤채움지반에 간극수압계 4개를 설치하여 진동 중에 뒤채움지반에서 발생하는 과잉간극수압을 계측하였고, 가속도계는 중간벽체의 상단중앙에 1개, 하단 좌우측에 1개씩 총 3개를 설치하여 벽체의 가속도를 계측하였다.

본 실험에서는 안벽시스템의 동적특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같은 랜덤파를 가하여 실험을 수행하였다. 뒤채움지반에 과잉간극수압이 발생함에 따라 뒤채움지반의 강성이 변화하고 그 결과로 구조물의 고유진동수가 변하게 되는데, 이러한 고유진동수의 변화를 입력가속도와 벽체가속도 비교를 통하여 분석하였다. 랜덤파의 최대진폭은 약 0.1g부터 0.6g까지 변화시켰다.

2.2 실험결과

(1) 고유진동수와 점성감쇠비 결정 방법

랜덤파를 이용한 진동대 실험으로부터 안벽시스템의 고유진동수와 점성감쇠비를 결정하기 위하여 다음과

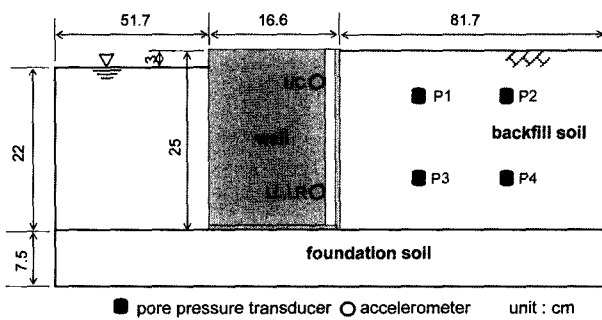


그림 2. 중력식 안벽구조물의 실험단면과 계측기 배치

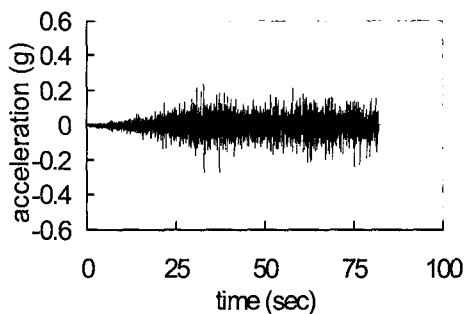


그림 3. 입력가속도로 사용된 랜덤파

같은 방법을 이용하였다.

- ① 진동대 실험으로부터 획득한 벽체응답가속도와 입력가속도에 대하여 1~50Hz 대역통과필터링(band pass filtering)을 수행하여 관심 밖의 주파수를 제거한다.
- ② 필터링된 벽체응답가속도와 입력가속도에 대하여 푸리에변환을 수행한다.
- ③ 벽체응답가속도의 푸리에진폭을 입력가속도의 푸리에 진폭으로 나누어 주파수응답함수를 구한다(이장무, 2000).
- ④ 이렇게 구해진 주파수응답함수로부터 최대값을 결정하기 위하여 이 함수곡선에 평활화(smoothing)과정을 수행한다. 이동평균이나 푸리에변환 필터를 이용하는 방법 등 많은 평활화 방법이 있는데, 본 연구에서는 256개의 점에 대한 푸리에변환 필터를 사용하여 주파수응답함수를 평활화하였다.
- ⑤ 평활화된 주파수응답함수에서 최대값 A_{max} 에 해당하는 진동수가 고유진동수이며 점성감쇠비 ξ 는 반동력 대역폭 방법(half power bandwidth method) (Prakash, 1981)을 이용하여 식 (1)로부터 구한다.

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{f_2 - f_1}{f_n} \right) \quad (1)$$

그림 4는 위에서 설명한 랜덤파를 이용한 진동대 실험으로부터 안벽시스템의 고유진동수와 점성감쇠비를 구하는 과정을 보여주고 있으며, 그림에서의 번호는 위 방법의 절차 번호와 일치한다.

실험 대상구조물이 벽체+기초지반 시스템(그림 1(a)) 또는 벽체+기초지반+물 시스템(그림 1(b))인 경우에는 기초지반을 상대밀도 80%로 아주 조밀하게 조성하였기 때문에 진동 중에 기초지반의 강성이 거의 변하지 않는다고 판단할 수 있다. 따라서 진동 중 이 시스템들의 고유진동수가 변하지 않는다고 가정하여 전체 계측시간에 해당하는 전체 계측데이터에 대해 주파수응답함수를 구하여 한 개의 고유진동수를 결정하였다. 그러나 그림 1(c)의 뒤채움지반이 존재하는 안벽시스템의 경우 진동 중 뒤채움지반에서의 과잉간극수압이 발생하여 지반의 강성이 변하기 때문에 이 시스템의 고유진동수는 시간에 따라 변한다고 예상할 수 있다. 따라서 이 시스템의 시간에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보기 위하여 그림 5와 같이 전체 계측데이터에서 N개(그림 5에

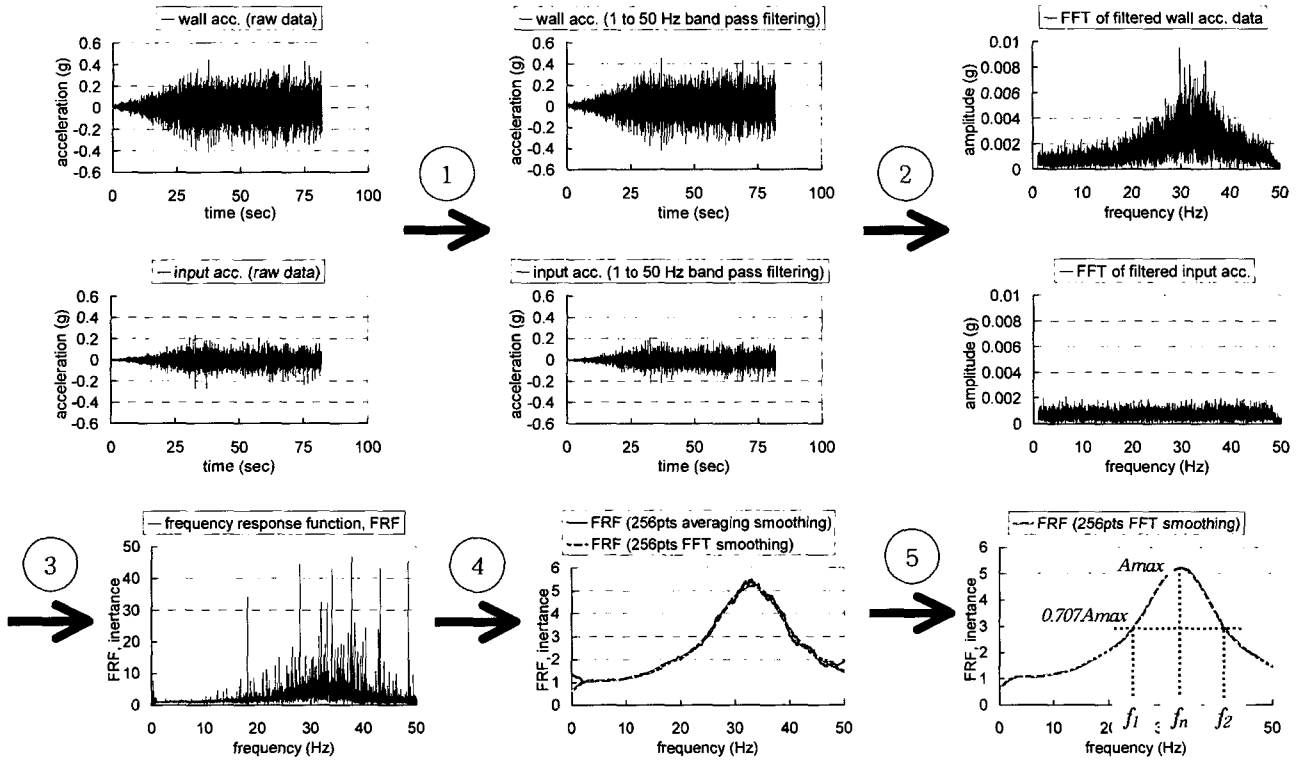


그림 4. 랜덤파 실험을 이용하여 고유진동수와 점성감쇠비를 구하는 과정

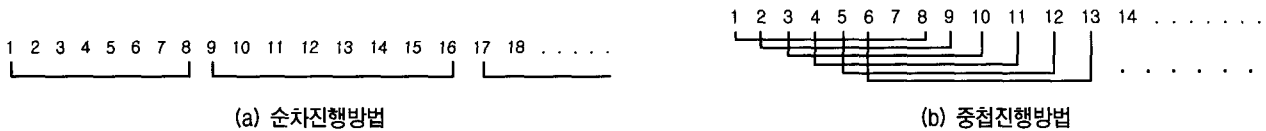


그림 5. 고유진동수의 시간변화를 분석하기 위한 데이터 선택방법

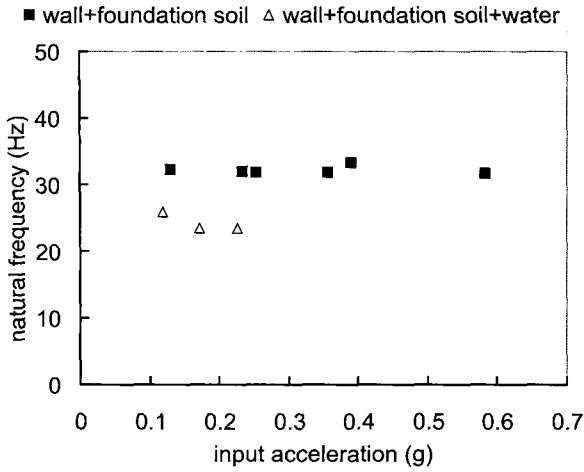
서는 8개)를 선택하고 선택된 N개의 데이터에 대해 그림 4에서 설명한 방법으로 고유진동수를 구하고, 또 다음 N개의 데이터를 선택하여 고유진동수를 구하는 방법으로 시간이 진행함에 따라 변하는 주파수응답함수와 고유진동수를 연속적으로 결정하였다. 전체측정데이터에서 N개를 선택하는 방법은 그림 5와 같이 순차진행방법과 중첩진행방법이 있는데, 본 연구에서는 중첩진행방법을 사용하였다.

(2) 뒤채움 지반이 없는 경우의 안벽시스템 동적특성 분석

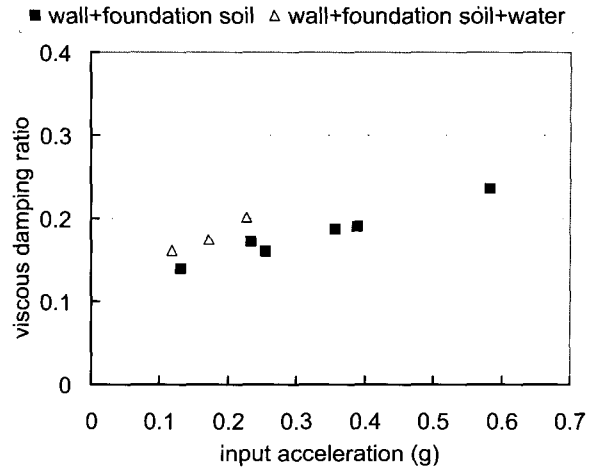
그림 6(a), 6(b)는 벽체+기초지반 시스템과 벽체+기초지반+물 시스템의 입력가속도 크기에 따른 고유진동수와 점성감쇠비 변화를 보여준다. 그림에서 가로축인 입력가속도의 크기는 랜덤파 입력가속도의 최대값과 최소값의 절대값의 평균값으로 결정하였다. 그림을 살펴보면 고유진동수는 벽체+기초지반 시스템의 경우 입력

가속도의 크기에 무관하게 거의 일정하지만 벽체+기초지반+물 시스템의 경우 입력가속도의 크기가 증가할 때 고유진동수는 얼마간 작아지는 경향을 보여준다. 점성감쇠비는 벽체+기초지반 시스템과 벽체+기초지반+물 시스템 모두 입력가속도의 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 고유진동수와 점성감쇠비의 이러한 경향은 흙의 전단변형률에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 변화곡선을 생각할 때, 입력가속도 크기가 증가할 경우 흙의 전단변형률이 증가하여 흙의 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

벽체+기초지반 시스템과 벽체+기초지반+물 시스템의 고유진동수와 점성감쇠비의 크기를 비교하면 그림 6(a)와 6(b)에서 알 수 있듯이 벽체+기초지반 시스템 경우 입력가속도의 크기에 따라 고유진동수는 32.1~36.4Hz이고 점성감쇠비는 14~24%이며, 벽체+기초지반+물 시스템의 경우 입력가속도의 크기에 따라 고유진



(a) 고유진동수



(b) 점성감쇠비

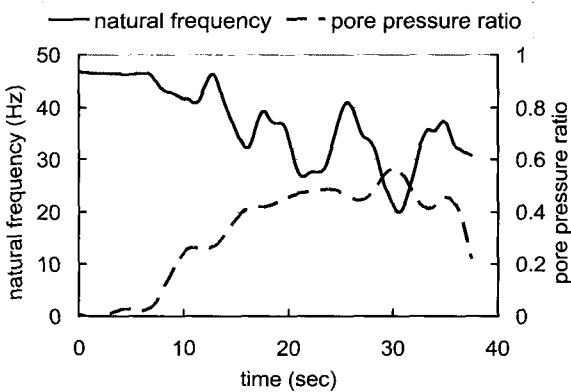
그림 6. 벽체+기초지반과 벽체+기초지반+물 구조물의 동적특성

동수는 24.8~26.8Hz이고 점성감쇠비는 16~20%이었다. 같은 크기의 입력가속도에 대해 벽체+기초지반+물 시스템의 경우가 벽체+기초지반 시스템의 경우보다 고유진동수는 작고 점성감쇠비는 큰 것으로 나타났는데, 그 이유는 벽체+기초지반+물 시스템에 존재하는 물은 강성은 없고 질량만 있기 때문에 물의 존재는 시스템에 질량만 추가하는 역할을 하기 때문이며 물에 의해 발생하는 동적수압에 의해 벽체 및 기초지반의 전단변형률이 벽체+기초지반 시스템의 경우보다 더 크게 발생하여 기초지반의 강성이 벽체+기초지반 시스템의 경우보다 작아졌기 때문으로 판단된다.

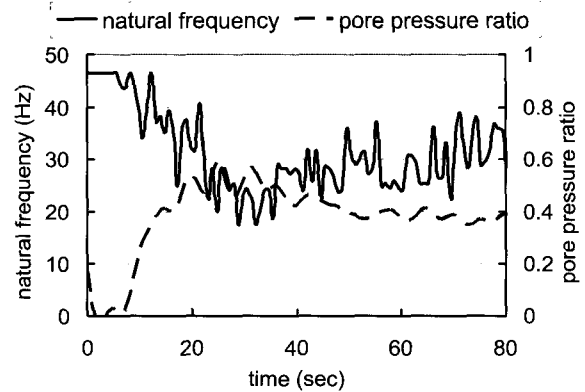
(3) 뒤채움지반이 있는 경우 안벽시스템의 동적특성 분석

진동 중 뒤채움지반에서 발생하는 과잉간극수압의

크기에 따른 안벽시스템의 고유진동수 변화를 분석하기 위해 벽체+기초지반+물+뒤채움지반으로 구성된 중력식 안벽시스템에 대해 진동대 실험을 수행하였다. 실험의 불확실성을 없애기 위해 진동대 실험을 2번 수행하였으며 전체 진동시간을 변화시켰다. 그림 7(a)와 7(b)는 전체 진동시간이 각각 37초와 80초일 때 시간경과에 따른 뒤채움지반에서 발생한 간극수압비와 안벽시스템의 고유진동수의 변화를 보여준다. 본 그림으로부터 뒤채움지반에서 발생하는 과잉간극수압의 크기가 최대일 때 시스템의 고유진동수가 가장 작으며, 과잉간극수압이 증가하면 고유진동수가 감소하고 과잉간극수압이 감소하면 고유진동수가 증가하는 경향이 나타남을 알 수 있다. 그림 7(a)의 첫 번째 실험의 경우 안벽시스템의 고유진동수는 간극수압비가 0일 때, 즉 과잉간극수압이 발생하지 않을 때 약 46Hz이며, 간극수압비가 최대값인



(a) 첫 번째 실험



(b) 두 번째 실험

그림 7. 시간에 따른 간극수압비와 고유진동수의 변화

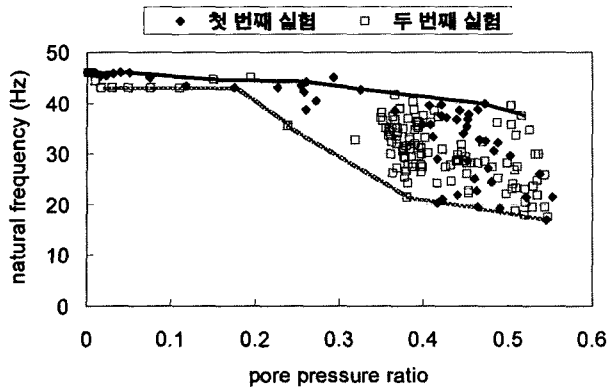


그림 8. 간극수압비와 고유진동수와의 관계

0.55일 때 약 20Hz까지 감소하였으며, 그림 7(b)의 두 번째 실험의 경우 고유진동수는 간극수압비가 0일 때 약 43Hz이며, 간극수압비가 최대값인 0.55일 때 약 16Hz까지 감소하였다. 본 실험에서는 뒤채움지반에서 발생한 최대 간극수압비가 0.55였기 때문에 간극수압비가 0.55 이상일 때의 고유진동수는 구하지 못하였다.

그림 8은 안벽시스템의 고유진동수를 간극수압비에 대하여 도시한 그림이다. 간극수압비가 약 0.2이하 일때 고유진동수는 거의 일정하지만 간극수압비가 0.2이상으로 증가하면 고유진동수가 급격히 감소하며 분산폭도 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 유한요소해석을 이용한 지반의 탄성계수 추정

그림 1의 세 종류의 진동대 실험 대상구조물에 대한 유한요소해석을 이용하여 각각의 시스템의 고유진동수와 지반(기초지반, 뒤채움지반)의 탄성계수와의 관계를 결정한 후, 이를 실험으로부터 구한 고유진동수와 비교하여 기초지반의 탄성계수, 물을 단지 벽체에 추가되는 질량으로 간주할 때 물에 해당하는 추가 질량밀도의 크기 그리고 뒤채움지반에서의 과잉간극수압의 크기와 뒤채움지반의 탄성계수의 관계 등을 결정하였다. 유한요소해석에서는 기초지반, 뒤채움지반, 그리고 벽체를 선형탄성모델로 모형화하였으며, 그림 1(a)의 벽체+기초지반 시스템의 경우 기초지반의 탄성계수를, 그림 1(b)의 벽체+기초지반+물 시스템의 경우 벽체의 질량밀도를, 그리고 그림 1(c)의 벽체+기초지반+물+뒤채움지반 시스템의 경우 뒤채움지반의 탄성계수를 변화시키면서 각각의 시스템의 고유진동수를 고유치 문제를 풀어 산정하였다.

3.1 기초지반의 탄성계수 추정

그림 1(a)의 벽체+기초지반 시스템에 대한 진동대 실험으로부터 구한 고유진동수와 점성감쇠비, 그리고 유한요소해석을 통해 구한 기초지반의 탄성계수와 시스템의 고유진동수와의 관계를 이용하여 기초지반의 탄성계수를 추정하였다. 진동대 실험으로부터 구한 벽체+기초지반 시스템의 고유진동수 f_{nd} 는 감쇠계의 고유진동수이며, 식 (2)처럼 비감쇠계의 고유진동수 f_n 과 점성감쇠비 ξ 로 나타낼 수 있다.

$$f_{nd} = f_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2)$$

유한요소해석에서 기초지반과 벽체는 탄성 연속체로 모델링하였으며, 감쇠가 없는 비감쇠계에서 시스템의 고유진동수 f_n 을 구하였다. 실험으로부터 구한 감쇠 고유진동수 f_{nd} 와 점성감쇠비 ξ 를 식 (2)에 대입하여 비감쇠계의 고유진동수 f_n 을 구한 후, 이를 유한요소해석으로부터 구한 기초지반의 탄성계수와 시스템의 고유진동수와의 관계에 대입하여 기초지반의 탄성계수를 추정하였다.

표 1은 해석에 이용된 벽체와 기초지반의 물성값을 보여준다. 벽체의 탄성계수와 포아송비는 일반적인 쇠의 대표값을 사용하였으며, 기초지반은 상대밀도 80%의 조밀한 포화지반의 단위중량을 사용하였으며 포아송비는 조밀한 모래에 해당하는 0.33을 사용하였다.

그림 9와 그림 10은 표 1의 물성값을 이용한 벽체+기초지반 시스템에 대한 유한요소해석 결과로 각각 기초지반의 탄성계수와 포아송비에 따른 벽체+기초지반 시스템의 고유진동수 변화를 보여준다. 그림으로부터 벽체+기초지반 시스템의 고유진동수는 기초지반의 탄성계수의 제곱근에 비례하여 증가하였지만, 포아송비에는 그다지 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

표 2는 입력가속도에 따른 벽체+기초지반 시스템의 비감쇠 고유진동수와 기초지반의 탄성계수를 보여준다. 기초지반의 탄성계수는 입력가속도 크기에 관계없이

표 1. 벽체와 기초지반의 물성값

물리량	벽체(쇠)	기초지반
탄성계수	200 GPa	?
포아송비	0.285	0.33
단위중량	20 kN/m ³	19.80 kN/m ³

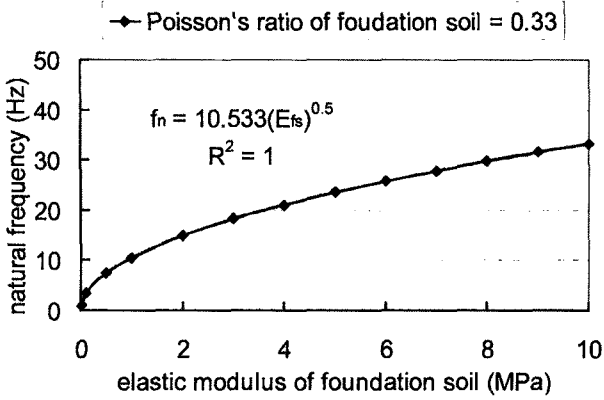


그림 9. 탄성계수와 고유진동수와의 관계

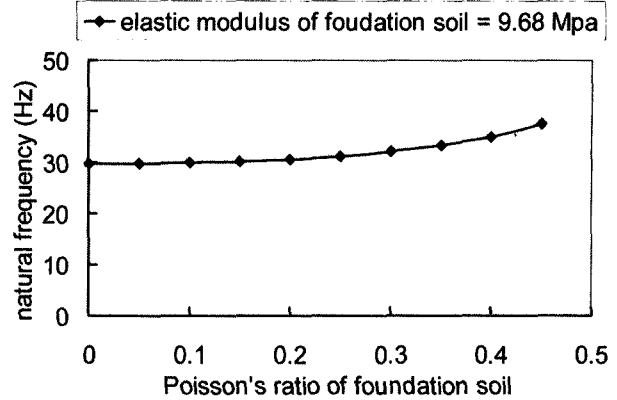


그림 10. 포아송비와 고유진동수와의 관계

표 2. 기초지반의 탄성계수 추정

	입력가속도 (g)	비감쇠 고유진동수 (Hz)	기초지반의 탄성계수 (MPa)
벽체+기초지반	0.13	32.68	9.63
	0.23	32.52	9.53
	0.25	32.24	9.37
	0.36	32.50	9.52
	0.39	34.02	10.43
	0.58	32.62	9.59
평균			9.68

거의 일정하였으며, 평균값은 약 9.68MPa이었다.

$$m = \frac{7\gamma_w H^2}{12g} = \frac{7\rho_w H^2}{12} \quad (4)$$

3.2 벽체 전면과 배면의 물이 고유진동수에 미치는 영향

일반적으로 벽체에 작용하는 동수압은 식 (3)에 나타난 Westergaard의 해(Westergaard, 1933)를 이용하여 산정한다. 벽체 전면과 배면에 작용하는 동수압은 벽체의 관성력과 항상 동일한 위상을 가지기 때문에(김성렬, 2003; 김성렬 등, 2003; Kohama, 2000) 물의 영향을 집중질량으로 간주하여 벽체에 추가할 수 있다. 물에 해당하는 벽체에 추가되는 질량의 크기는 식 (3)에서 수평방향 가속도 항인 a_h 를 제외한 나머지 항으로 간주할 수 있으므로, 식 (4)에서 물의 깊이 H 를 대입하여 산정하였다. 그림 1(b)의 두 번째 대상구조물인 벽체+기초지반+물 시스템은 벽체 전면과 배면에서 동시에 동수압이 발생하기 때문에 식 (4)로부터 구한 질량의 2배를 벽체에 추가시켜야 한다. 따라서 벽체 양쪽에 존재하는 물에 의한 벽체의 질량밀도 증가량은 1360 kg/m^3 로서 물을 포함한 벽체의 질량밀도는 3360 kg/m^3 이 된다.

$$P_w = \frac{7}{12} \frac{a_h}{g} \gamma_w H^2 = \frac{7}{12} \frac{1}{g} \gamma_w H^2 \cdot a_h = m \cdot a_h \quad (3)$$

그림 11은 물에 해당하는 질량을 벽체에 추가시키면서 유한요소해석으로 구한 고유진동수의 변화와 Westergaard의 해로부터 구한 물에 해당하는 질량밀도인 1360 kg/m^3 을 벽체에 추가시켜 유한요소해석으로부터 구한 고유진동수 결과, 그리고 진동대 실험으로부터 구한 벽체+기초지반+물 시스템의 최대, 최소 고유진동수를 보여준다. Westergaard의 해로부터 구한 물에 해당하는 질량밀도인 1360 kg/m^3 을 벽체에 추가시켜 구한 시스템의 고유진동수는 25.2Hz로 진동대 실험으로부터 구한 고유

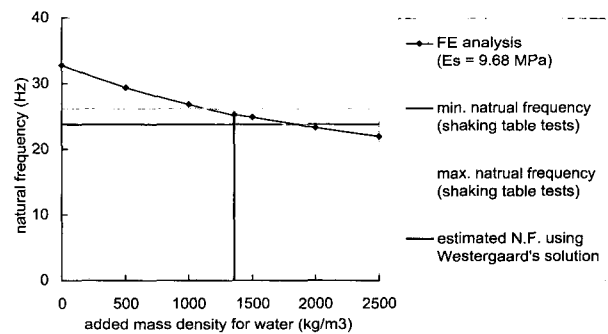


그림 11. 물에 해당하는 질량밀도 크기 산정

표 3. Westergaard의 해를 이용한 물에 해당하는 질량밀도 크기 산정

	입력 가속도 (g)	비감쇠 고유진동수, f_n (Hz)	Westergaard의 해		유한요소해석을 이용한 물에 해당하는 질량밀도 (kg/m^3)
			물에 해당하는 질량밀도 (kg/m^3)	고유진동수 (Hz)	
벽체+기초지반+물 시스템	0.12	26.2	1360	25.2	1120 ~ 1760
	0.17	23.7			
	0.23	24.0			

진동수와 잘 일치한다. 따라서 물에 해당하는 추가질량 밀도의 크기는 Westergaard의 해를 이용하여 합리적으로 결정할 수 있다. 표 3에서는 Westergaard의 해와 유한요소해석으로부터 구한 물에 해당하는 질량밀도 크기를 보여준다. 이 때 유한요소해석에 이용된 기초지반의 탄성계수는 3.1절에서 추정된 값인 9.68MPa이며, 유한요소해석을 이용하여 구한 물에 해당하는 질량밀도 ($1120 \sim 1760 kg/m^3$)는 진동대 실험으로부터 구한 벽체+기초지반+물 시스템의 비감쇠 고유진동수의 범위 (23.7~26.2Hz)에 해당하는 값이다.

3.3 과잉간극수압 발생에 따른 뒤채움지반의 탄성계수 변화 추정

유한요소해석을 이용하여 진동대 실험으로부터 구한 뒤채움지반의 간극수압비와 안벽시스템의 고유진동수의 관계(그림 8)로부터 과잉간극수압 발생에 따른 뒤채움지반의 탄성계수의 변화를 추정하였다. 그림 12는 유한요소해석으로부터 얻은 뒤채움지반의 탄성계수와 시스템의 고유진동수의 관계를 보여준다. 기초지반의 탄성계수 E_b 는 3.1절에서 구한 9.68MPa과 뒤채움지반에 의해 증가된 구속압을 고려하여 보정해준 26.02MPa을 이용하였다. 뒤채움지반에 의한 기초지반의 구속압 증가에 따른 기초지반의 탄성계수는 탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다(Seed 등, 1970)는 것을 이용하여 보정하였다.

그림 8에서 알 수 있듯이 뒤채움지반의 간극수압비가 작을 때 안벽시스템의 고유진동수는 약 44Hz이었다. 그림 12에서 기초지반의 탄성계수가 9.68MPa인 경우 안벽시스템의 고유진동수인 44Hz에 해당하는 뒤채움지반의 탄성계수는 약 21MPa로 느슨한 뒤채움지반의 탄성계수가 조밀한 기초지반의 탄성계수인 9.68MPa보다 더 커지는 모순이 발생하지만 기초지반의 탄성계수가 구속압에 대해 보정한 26.02MPa인 경우 뒤채움지반의 탄성계수가 7MPa로 뒤채움지반보다 더 조밀한 기초지반

의 탄성계수인 26.02MPa보다 작기 때문에 구속압에 대해 보정한 26.02MPa을 기초지반의 탄성계수로 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

그림 13은 기초지반의 탄성계수가 26.02MPa일 때 그림 8의 뒤채움지반의 간극수압비와 고유진동수의 관계와 그림 12의 뒤채움지반의 탄성계수와 고유진동수와 관계를 이용하여 구한 뒤채움지반의 간극수압비에 따른 뒤채움지반의 탄성계수 변화를 보여준다. 뒤채움지반의 탄성계수는 간극수압비가 약 0.2이하인 경우에는 간극수압비가 0일 때의 탄성계수로 정의되는 최대탄성계수의 약 90~100%로 거의 일정하다가 간극수압비가 약 0.2 이상의 범위에서는 급격히 감소하여 하한경계

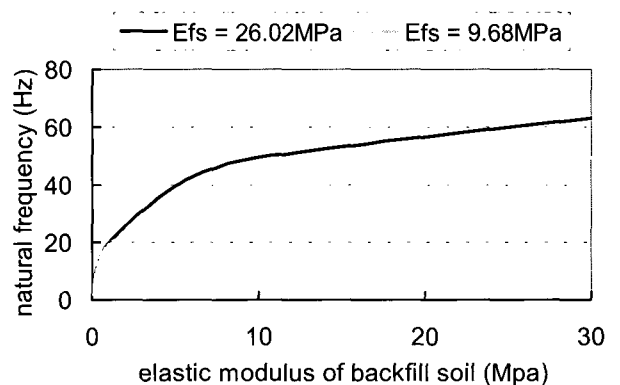


그림 12. 뒤채움지반의 탄성계수와 고유진동수와의 관계

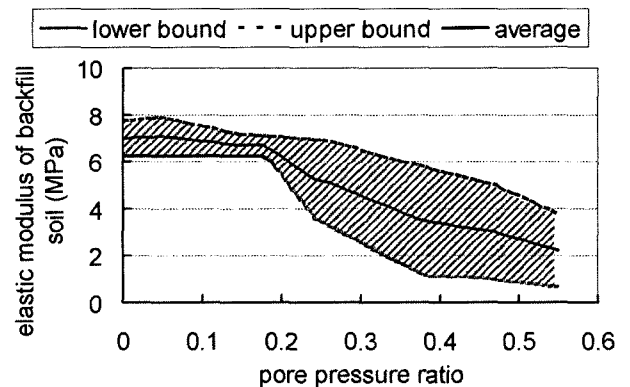


그림 13. 뒤채움지반의 간극수압비와 뒤채움지반의 탄성계수와의 관계

의 경우 간극수압비가 0.55일 때 최대탄성계수의 약 10%까지 감소하며 상한경계인 경우 약 60%까지 감소하였다.

4. 결론

세 종류의 안벽시스템에 대하여 진동대 실험과 유한요소해석을 수행하여 뒤채움지반에서의 과잉간극수압 크기에 따른 안벽시스템의 고유진동수의 변화와 뒤채움지반의 탄성계수 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 뒤채움 지반이 없는 경우 입력가속도의 크기가 증가할수록 안벽시스템의 고유진동수는 감소하고, 점성감쇠비는 증가하는 경향을 보였다. 벽체전면과 배면에 물이 있는 경우에는 물의 영향으로 인하여 물이 없는 경우보다 고유진동수는 더 작아지고, 점성감쇠비는 더 증가하였다.
- (2) 뒤채움 지반이 설치된 안벽시스템의 경우 뒤채움지반내의 과잉간극수압이 증가하면 고유진동수는 감소하고 과잉간극수압이 감소하면 고유진동수가 증가하는 경향을 보였으며, 안벽시스템의 고유진동수는 뒤채움지반의 간극수압비가 0일 때 약 44Hz이었으며 간극수압비가 0.55일 때 약 16Hz까지 감소하였다. 간극수압비가 약 0.2이하일 때에는 고유진동수가 거의 일정하지만 0.2이상으로 증가하면 고유진동수는 급격히 감소하며 그 변화폭이 증가하였다.
- (3) 벽체+기초지반 시스템에 대한 고유진동수는 기초

지반의 탄성계수의 제공근에 비례하여 증가하지만, 포아송비에는 그다지 큰 영향을 받지 않았다.

- (4) 벽체에 작용하는 동수압을 벽체의 추가질량으로 고려하여 유한요소해석을 수행한 결과 고유진동수의 실험값과 해석값이 거의 일치하여, Westergaard 해의 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- (5) 뒤채움지반의 탄성계수는 간극수압비가 약 0.2이하의 작은 범위에서는 간극수압비가 0일 때의 탄성계수로 정의되는 최대탄성계수의 약 90~100%로 거의 일정하지만 간극수압비가 약 0.2이상으로 증가하면 급격히 감소하여 간극수압비가 0.55일 때 하한값의 경우 최대탄성계수의 약 10%까지 감소하며, 상한값의 경우 약 60%까지 감소하였다.

참고 문헌

1. 김성렬 (2003), 진동대 실험을 이용한 중력식 안벽의 지진거동 분석, 박사학위논문, 서울대학교, pp.154-172.
2. 김성렬, 권오순, 김명모 (2003), "지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분의 모델링", 한국지반공학회, 제19권, 2호, pp.107-121.
3. 이장무 (2000), 모드해석의 이론과 응용 제 2판 수정본 2000, 서울대학교 공과대학 기계설계학과, pp.7-23.
4. Kohama, E. (2000), *A study on the stability of gravity type quay wall during earthquake*. Ph.D. Thesis, Hokkaido University, Japan.
5. Prakash, S. (1981), *Soil dynamics*, McGraw-Hill Book Company, pp.34-35.
6. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*, Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
7. Westergaard, H.M. (1933), "Water pressures on dams during earthquakes", *Trans. of ASCE*, Vol.98, pp.418-432.

(접수일자 2004. 12. 31, 심사완료일 2005. 2. 19)