

지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분의 모델링

Modeling of Force Components Acting on Quay Walls During Earthquakes

김 성 렬*¹ Kim, Sung-Ryul

권 오 순*² Kwon, O-Soon

김 명 모*³ Kim, Myoung-Mo

Abstract

When the seismic stability of quay walls is analyzed, the magnitudes of force components acting on quay walls during earthquakes and the phase relations among these force components must be properly evaluated. In general, force components include inertia force of the quay wall, lateral earth force, and water force. The magnitude and the phase relation of each force component vary according to the magnitude of the excess pore pressures developed in backfill soils of the quay wall. The dynamic thrust mobilized at the contact surface between the backfill soil and the wall develops as a result of the interactions among these force components. We propose a simple model to evaluate the magnitude and phase variation of the dynamic thrust on the back of the wall in terms of the excess pore pressure. The proposed model can predict the dynamic thrust by summing the magnitudes of force components calculated from design equations for seismic pressures on the wall. The proposed model was verified by comparing its results with the results from a series of shaking table tests.

요 지

중력식 안벽의 내진 안정성을 분석할 때, 중력식 안벽에 발생하는 하중성분의 크기와 위상관계를 명확히 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 안벽에 발생하는 하중성분은 안벽 관성력, 토압 그리고 수압으로 구성되어 있으며, 각 하중성분들의 크기와 위상관계는 배면지반에 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따라 변한다. 벽체배면과 뒤채움 토체 사이의 접촉면에서 발생하는 동적작용력은 이러한 힘들의 상호작용에 의하여 발생한다. 본 연구에서는 벽체 작용하중 산정식들로부터 구한 각 하중성분들의 크기를 조합하여 배면 동적작용력의 크기와 위상변화를 배면 과잉간극수압의 함수로써 산정하는 간단한 하중산정 모델을 제안하였으며, 진동대 실험결과와 이 모델의 예측결과를 비교하여 모델의 적용성을 검증하였다.

Keywords : Earthquake, Force component, Liquefaction, Phase contrast, Shaking table test, Quay wall

1. 서 론

1995년 고베 지진에 의하여 항만의 중력식 안벽 구조

물에 막대한 피해가 발생한 이후로, 안벽에 발생하는 지진하중과 변위거동을 진동대 실험 및 이론적 연구를 통하여 정확히 산정하려는 연구가 많이 진행되어 왔

*1 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ., yawnful@hananet.net)

*2 정회원, 한국 해양연구소 연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Ocean Research and Dept. Institute)

*3 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Eng., Seoul National Univ.)

다. 중력식 안벽과 관련된 여러 연구주제 중에서 특히 안벽 배면에 작용하는 배면 동적작용력, 배면 지반내에 발생하는 과잉간극수압, 그리고 벽체 관성력간의 상호관계를 규명하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 Kohama(2000)는 소형 진동대 실험을 수행하여 안벽 배면 동적작용력의 진동성분과 안벽 관성력이 과잉간극수압 발생량이 작은 경우에는 서로 반대방향으로 작용하다가, 액상화가 발생한 후에는 동일한 방향으로 작용하는 것을 관찰하였다. 또한 액상화가 발생한 이후의 배면 동적작용력 진동성분의 크기는 동적수압을 산정하는 Westergaard 해(Westergaard, 1933)에서 물의 단위중량 대신 흙의 포화단위중량을 입력하여 산정할 수 있음을 밝혀내었다(Kohama, 2000; Sato, 2000; Fujiwara, 2000). 실험을 통하여 이러한 상호관계들이 많이 밝혀졌지만, 벽체 배면 동적작용력의 크기와 위상의 변화를 시간경과에 따라서 연속적으로 모사할 수 있는 모델은 아직 개발되어 있지 않다.

본 연구에서는 배면 동적작용력의 크기와 위상의 변화를 시간경과에 따라 연속적으로 고려할 수 있는 모델을 개발하고, 일련의 진동대 실험을 수행하여 이 모델의 적용성을 검증하고자 한다. 이 모델은 벽체 가속도와 배면지반 내에 발생하는 과잉간극수압의 시간이력을 이용하여 중력식 안벽배면에 작용하는 동적 작용력의 크기와 위상변화를 시간에 따라 연속적으로 산정할 수 있다. 이 모델을 검증하기 위하여 두가지 종류의 진동대 실험을 수행하고자 한다. 첫번째 실험은 소형토조를 이용한 실험으로서 본 모델이 과연 과잉간극수압과 가속도 크기를 반영하여 동적작용력을 적절히 산정할 수 있는지를 확인하기 위한 실험이고, 두번째 실험은 대형토조를 이용한 실험으로서 상사법칙을 엄밀히 적용한 진동대 실험을 통하여 본 모델이 실제 지진하의 동적작용력 산정에 적용될 수 있는지를 확인하는 실험이다.

2. 하중성분의 크기 산정

안벽에 발생하는 하중성분을 살펴보면 지진발생 전에는 정적토압과 정적수압만이 존재하며, 지진시에는 안벽 관성력, 동적토압 그리고 동적수압이 추가적으로 발생한다. 이 중 동적토압과 동적수압은 그림 1과 같이 주파수 성분분석을 통하여 진동하지 않는 성분과 진동하는 성분으로 분리할 수 있다. 즉, 안벽에 발생하는 하중성분은 안벽의 관성력, 정적토압, 정적수압, 동적토압

의 진동성분과 비진동성분 그리고 동적수압의 진동성분과 비진동성분으로 구성되어 있다. 안벽 배면과 배면 토체간의 접촉면에서 실제 발생하는 배면 작용력은 이러한 각 하중성분들의 상호작용의 결과이다.

각 하중성분들의 크기는 다음과 같이 산정한다. 관성력(F_I)은 안벽의 질량과 벽체 가속도를 곱하여 산정한다. 그리고, 벽체 단위 폭당 동적토압의 진동성분(F_{ED})은 Mononobe-Okabe 방법으로 구한 동적 주동토압계수(K_A)에서 Coulomb 이론으로 구한 정적 주동토압계수(K_{AS})를 빼서 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

$$F_{ED} = \frac{1}{2} \gamma_{sub}(1 \mp k_v)(K_A - K_{AS})H^2 \quad (1)$$

여기서, γ_{sub} : 배면흙의 수중단위중량

K_{AS} : 정적 주동토압계수

K_A : Mononobe-Okabe식으로 구한 주동토압계수 (Mononobe et al.,1929; Okabe, 1924)

H : 안벽의 높이

k_v : 수직방향 지진계수

식 (1)의 K_A 는 아래 식 (2)로부터 산정할 수 있다.

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi - \psi - \alpha)}{\cos \psi \cos^2 \alpha \cos(\delta + \alpha + \phi) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta - \psi)}{\cos(\beta - \alpha) \cos(\delta + \alpha + \phi)}} \right]^2} \quad (2)$$

여기서, α : 수직방향에 대한 벽체배면의 기울어진 경사각

δ : 벽체와 배면흙간의 마찰각

β : 배면지반의 경사각

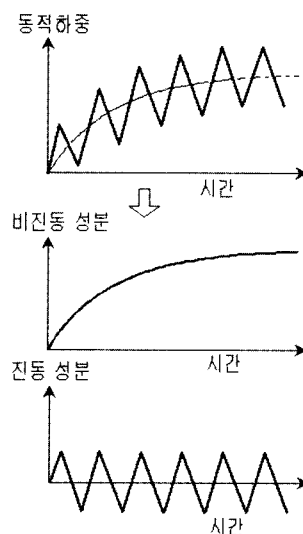


그림 1. 진동 성분과 비진동 하중성분의 분리

ϕ : 배면흙의 내부마찰각

ψ : 식 (3)과 식 (4)에서 정의되는 계수

윗 식에서 지진하중을 나타내는 ϕ 는 배면지반의 투수성에 따라 식 (3)과 (4)와 같이 각각 다르게 산정된다 (CEN, 1994). ϕ 는 배면지반의 투수성이 작아서 배면지반내의 물과 흙이 함께 진동하는 경우에는 물과 흙질량의 진동영향을 포함하여 산정하며, 배면지반의 투수성이 커서 물과 흙이 따로 진동하는 경우에는 흙질량에 의한 진동영향만을 고려하여 산정한다. 즉,

배면지반 투수성이 작은 경우 :

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (3)$$

배면지반 투수성이 큰 경우:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (4)$$

여기서, γ_{sat} , γ_d : 배면흙의 포화단위중량과 건조단위중량

γ_w : 물의 단위중량

k_h : 수평방향 지진계수

또한 배면지반내의 벽체 단위 폭당 작용하는 동적수압의 진동성분(F_{WD})도 배면지반의 투수성에 따라 2가지로 나누어 산정한다. 물과 배면흙이 함께 진동하는 경우에는 동적토압의 진동성분(F_{ED})에 물의 진동영향이 포함되어 있으므로 동적수압의 진동성분(F_{WD})을 따로 고려하지 않으며, 물과 배면흙이 따로 진동하는 경우에는 아래 식 (5)와 같이 Westergaard해를 이용하여 동적수압의 진동성분(F_{WD})을 산정한다. 벽체전면에 작용하는 물에 의한 전면동적수압의 진동성분(F_{FWD}) 역시 식 (5)를 이용하여 산정한다.

$$F_{WD} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H'^2 \quad (5)$$

여기서, H' : 배면 또는 전면의 수위

본 연구에서는 진동대 실험결과분석을 위하여 동적토압 및 동적수압 진동성분의 시간이력을 계산할 때 지진계수 k_h 항에 무차원으로 만든 가속도 시간이력(=측정된 가속도/1g)을 입력하고자 한다. 이렇게 계산된 동적토압과 동적수압의 진동성분은 벽체 관성력과 동일한 방향으로 작용한다.

벽체 배면의 동적토압과 동적수압의 비진동성분은 배면지반내에 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따라 변화하지만, 실제 안벽을 설계할 때에는 배면지반의 과잉간극수압 발생을 고려하지 않으므로 동적토압과 동적수압의 비진동성분 역시 고려하지 않는다. 그러나, 배면지반내에 과잉간극수압이 발생하면 발생한 과잉간극수압만큼 동적수압의 비진동성분은 증가하고, 배면흙이 점차 물과 같이 거동하게 되므로 정적토압과 동적토압 비진동성분의 합력은 점차 감소한다. 액상화 후에는 과잉간극수압이 흙이 받고 있는 유효응력(= γ_{sub} ×흙의 깊이)크기까지 증가하게 되므로, 동적수압 비진동성분의 크기는 정수압 식에서 γ_w 대신 γ_{sub} 를 입력하여 산정한 정적수압의 크기가 되고, 반면에 정적토압과 동적토압 비진동성분의 합력은 0이 된다.

3. 동적작용력을 산정하기 위한 모델의 개발

이 절에서는 벽체 뒷면과 배면 토체간의 접촉에 의하여 벽체 배면에 실제 작용하는 배면 동적작용력을 비진동성분과 진동성분으로 구분하여 산정하는 간단한 모델을 제시하고자 한다. 앞에서 이미 언급한 바와 같이 이 모델에서는 진동중 배면 동적작용력의 크기와 위상변화를 안벽에 발생하는 각 하중성분들의 크기와 배면 과잉간극수압 크기의 함수로서 산정하며, 그 산정과정은 다음과 같다.

3.1 배면 동적작용력 비진동 성분의 산정

이론적으로 보면 과잉간극수압 발생 전에는 배면 정적작용력과 배면 동적작용력 비진동 성분의 합(F_s)의 크기가 정적 주동토압과 γ_w 를 대입하여 구한 정적수압의 합과 같고, 액상화 후에는 γ_w 대신 γ_{sat} 를 대입하여 산정한 정적수압의 크기와 동일하게 된다. 그리고 본 연구의 진동대 실험결과 F_s 의 크기가 배면 과잉간극수압의 크기에 따라 거의 선형적으로 변하는 것을 관찰하였다.

이러한 사실들을 토대로 본 연구에서는 과잉간극수압 비(=과잉간극수압/초기 유효수직응력, r_u)에 따른 정적토압과 동적토압 비진동 성분의 합력(F_{ES})과 배면 정적수압과 배면 동적수압 비진동성분의 합력(F_{WS})의 크기변화를 산정하는 식 (6)과 (7)을 제안한다. 이 식에서 보면, F_{ES} 는 과잉간극수압 발생 전($r_u=0$)에는 Coulomb 정적 주동토압이 되고, 과잉간극수압이 발생함에 따라($0 < r_u < 1$) 선형적으로 작아지다가 액상화 후($r_u=1$)에는 0이 된다. F_{WS} 는

정적수압 산정식을 이용하여 산정하며, 식의 단위중량값이 과잉간극수압 발생 전에는 γ_w 가 되고, 과잉간극수압이 증가하는 중간단계($0 < r_u < 1$)에서는 γ_w 에서 γ_{sat} 로 선형적으로 커지며, 액상화 후에는 γ_{sat} 가 된다. 그러므로, F_{ES} 와 F_{WS} 의 합력인 F_s 는 과잉간극수압 발생에 따른 동적작용력 비진동성분의 크기 변화를 나타낼 수 있다.

$$F_{ES} = \frac{1}{2} \gamma_{sub} \times K_A \times H^2 \times (1 - r_u) \quad (6)$$

$$F_{WS} = \frac{1}{2} (\gamma_w(1 - r_u) + \gamma_{sat} \times r_u) \times H^2 \quad (7)$$

3.2 배면 동적작용력 진동성분의 산정

최근 연구결과(Kohama, 2000)에 의하면 배면 동적작용력의 진동성분과 안벽의 관성력은 과잉간극수압 발

생량이 작은 경우에는 서로 반대방향으로 작용하다가 과잉간극수압이 특정크기 이상으로 증가한 후에는 동일한 방향으로 작용하며, 액상화가 발생한 이후의 배면 동적작용력 진동성분의 크기는 동적수압을 산정하는 Westergaard 해에서 물의 단위중량 대신 흙의 포화단위중량을 입력하여 산정할 수 있다.

과잉간극수압 발생 전 안벽 관성력이 안벽 전면의 물 쪽을 향할 때 관성력의 부호를 (+)로 보고 시간에 따른 관성력과 배면 동적작용력 진동성분의 크기를 나타내면 그림 2와 같이 된다. 여기서보면 관성력과 배면 동적작용력의 진동성분은 이 그림에서 180° 위상차를 보이는데 그 이유는 과잉간극수압이 작게 발생한 때에는 벽체의 변위가 배면 토체의 변위보다 크게 발생하기 때문에, 벽체가 (+)방향(물쪽방향)으로 가면 토체가 벽체를 따라가지 못해서 작용력이 감소하고, (-)방향(배면쪽)으

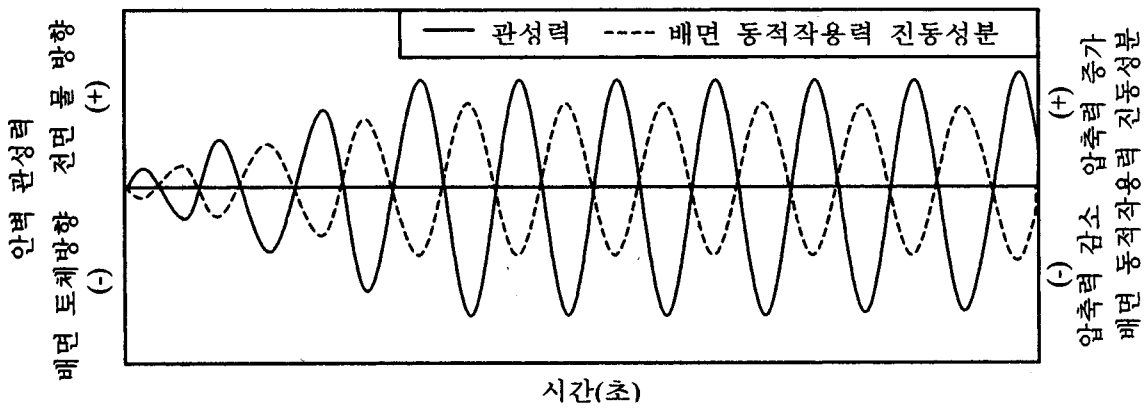


그림 2. 과잉간극수압 발생 전 배면 동적작용력 진동성분과 안벽 관성력간의 위상관계

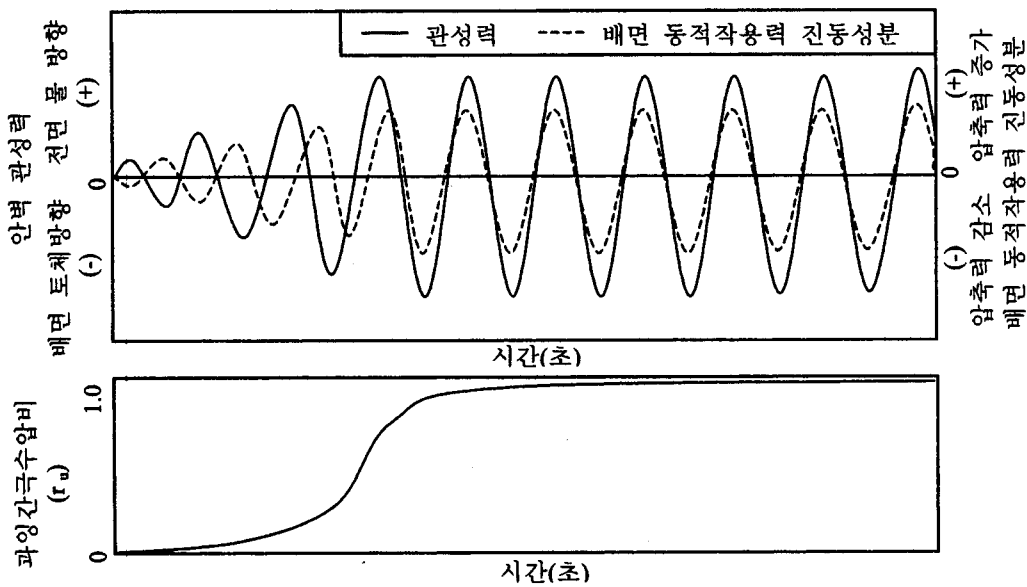


그림 3. 과잉간극수압 증가에 따른 배면 동적작용력 진동성분과 안벽 관성력간의 위상관계

로 가면 역시 벽체가 배면토체보다 더 움직여서 작용력이 증가하기 때문이다.

그림 3은 배면 토체내에 발생한 과잉간극수압의 크기에 따른 관성력과 배면 동적작용력 진동성분간의 위상 변화를 보여주는데, 관성력과 배면 동적작용력의 진동 성분은 과잉간극수압 크기가 작은 경우에는 서로 반대 방향으로 작용하다가 과잉간극수압이 일정수준 이상으로 커지면 동일한 방향으로 작용한다. 그 이유는 과잉간극수압이 일정값 이상으로 커지면 배면토체가 유체와 같은 거동을 보이면서 배면토체의 변위가 벽체 변위보다 크게 발생하여 벽체가 물쪽으로 움직일 때 토체가 벽체보다 더 많이 움직여 배면 동적작용력이 증가하고 배면쪽(-)방향으로 가도 토체가 더 많이 움직여 배면 동적작용력이 감소하기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 관찰을 토대로 과잉간극수압 발생에 따른 배면 동적작용력 진동성분의 크기와 위상 변화를 정량적으로 고려할 수 있는 간단한 하중모델을 과잉간극수압 발생 전($r_u=0$)과 과잉간극수압이 발생하는 경우($0 < r_u \leq 1$)로 나누어 다음과 같이 제안한다.

(1) 과잉간극수압 발생 전($r_u = 0$)

과잉간극수압 발생 전 배면 동적작용력 진동성분의 크기와 안벽 관성력과의 위상차이는 안벽에 발생하는 각 하중성분의 크기조합으로서 결정할 수 있다. 그림 4는 배면토체내에 과잉간극수압이 발생하기 전 안벽 관성력의 방향이 전면 물쪽일 때 각 하중성분들의 작용 방향을 보여주고 있다. 만일 가속도의 작용방향이 반대가 되면 각 동적하중들의 작용방향 역시 반대로 바뀌게 될 것이다. 이 때 벽체뒷면과 배면토체의 경계면에 발생하는 동적 접촉응력 즉, 배면 동적작용력의 진동성분(F_{DI})의 크기는 안벽의 관성력(F_I)과 전면 동적수압의 진동성분(F_{FD})이 전면물쪽(+)방향으로 작용하면 감소하고, 배면토체와 배면간극수에 의해 발휘되는 배면 동적도

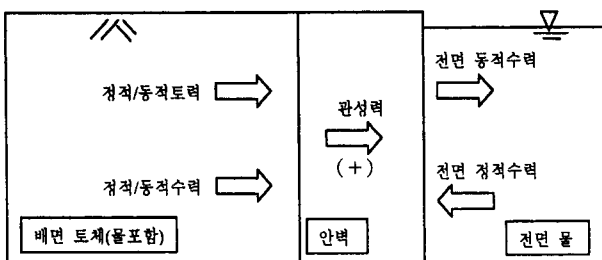


그림 4. 과잉간극수압 발생 전 중력식 안벽에 발생하는 하중성분

압의 진동성분(F_{ED})과 배면 동적수압의 진동성분(F_{WD})이 전면물쪽(+)방향으로 작용하면 증가하게 되므로 과잉간극수압이 발생하기 전의 배면 동적작용력의 진동성분, F_{DI} 는 아래 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{DI} = + F_{WD} + F_{ED} - (F_I + F_{FD}) \quad (8)$$

여기서, F_I , F_{ED} , F_{WD} , F_{FD} 의 부호는 벽체 관성력과 동일하다.

(2) 과잉간극수압이 발생하는 경우($0 < r_u \leq 1$)

배면 지반내에 과잉간극수압이 발생하는 경우, 과잉간극수압이 증가함에 따라 배면토체는 점차 물과 같이 거동하고 액상화가 발생하면 배면토체는 단위중량이 γ_{sat} 인 유체로 거동하게 된다. 그러므로, 액상화가 발생한 후의 최종 배면 동적작용력의 진동성분(F_{DF})은 식 (9)와 같이 Westergaard 해에서 γ_w 대신 γ_{sat} 를 입력하여 산정할 수 있으며, 벽체 관성력과 동일한 부호를 가진다.

$$F_{DF} = \frac{7}{12} k_h \gamma_{sat} H^2 \quad (9)$$

과잉간극수압이 증가하여 액상화에 이르기 전까지 중간단계의 배면 동적작용력 진동성분(F_D)의 크기는 과잉간극수압 발생 전의 F_{DI} 에서 액상화 후의 F_{DF} 사이에서 변하는데 이 과정에서 F_{DI} 는 과잉간극수압비(r_u)의 증가에 따라 감소하여 0이 되고 F_{DF} 는 0에서부터 증가하여 F_{DF} 가 되므로 이들의 증가와 감소가 r_u 와 각각 선형적 관계에 있다고 가정하여 F_D 를 산정하는 식 (10)을 제안한다.

$$F_D = F_{DI}(1-r_u) + F_{DF}r_u \quad (10)$$

그림 5는 식 (10)에서 나타내는 과잉간극수압비 변화에 따른 F_D 의 크기와 위상변화를 보여준다. 그림 5(a)를 보면 과잉간극수압이 증가함에 따라 안벽의 관성력과 반대방향으로 작용하는 힘 ($F_{DI}(1-r_u)$)의 진폭은 점차 감소하고 관성력과 동일한 방향의 작용력($F_{DF}r_u$)의 진폭은 점차 증가하게 되는데, $F_{DI}(1-r_u)$ 와 $F_{DF}r_u$ 의 합이 0보다 커지는 순간 F_D 의 작용방향은 그림 5(b)와 같이 관성력과 반대방향에서 관성력과 동일한 방향으로 바뀌게 된다. 또한 F_D 는 특정 과잉간극수압비하에서 진동하는 가속도 크기에 따라 결정된 F_{DI} 와 F_{DF} 의 조합이므로 진동하중 형태로 나타내면 그림 5(c)와 같다.

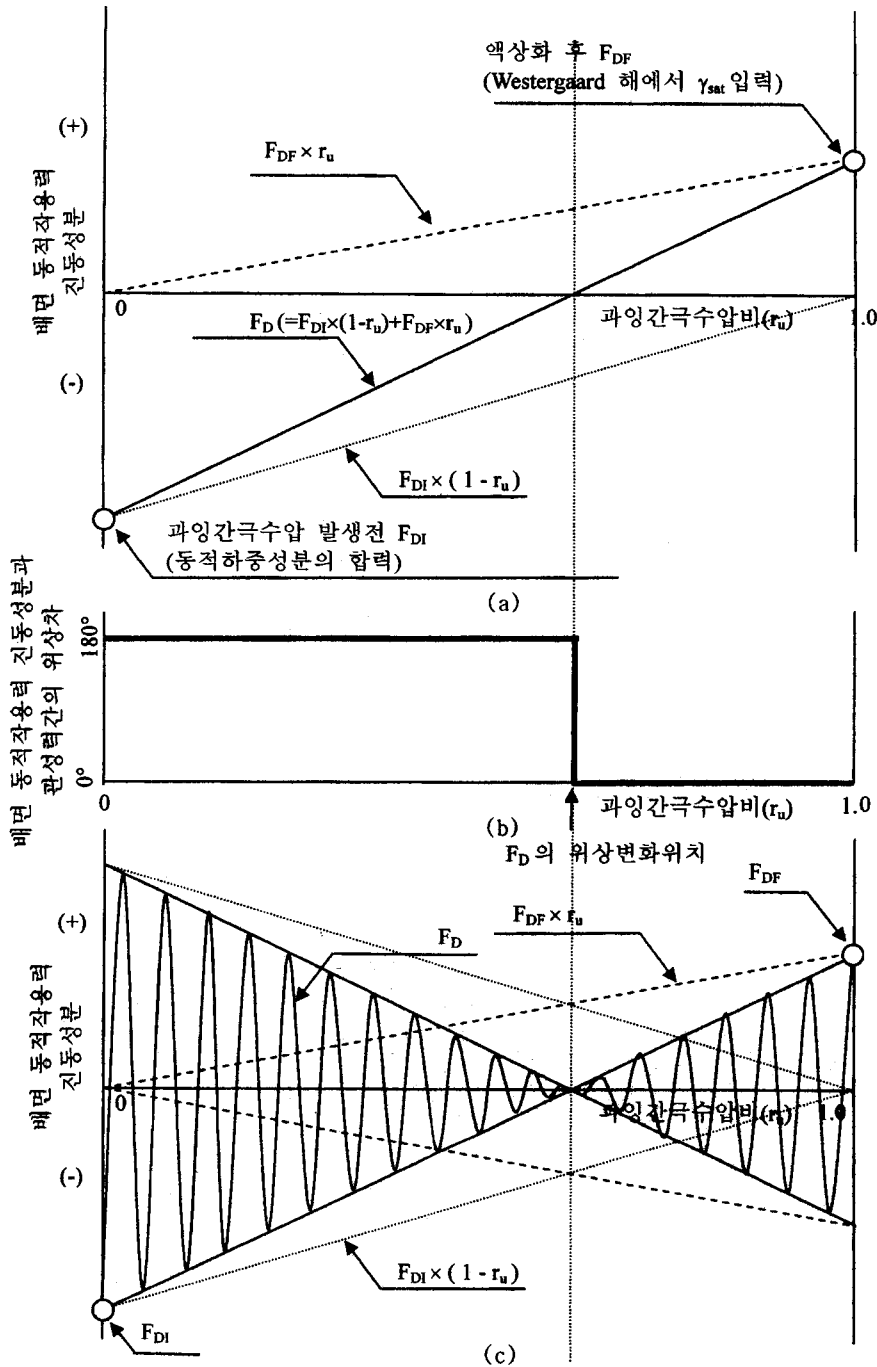


그림 5. 과잉간극수압비에 따른 배면 동적작용력 진동성분의 크기와 위상 변화

4. 진동대 실험

4.1 개요

본 연구에서 개발한 모델의 적용성을 검증하기 위하여 2가지 종류의 진동대 실험을 수행하였다. 첫번째는 소형토조(길이 194cm, 폭 44cm, 높이 60cm)를 이용한 실험으로서, 이 연구에서 개발한 안벽 배면 동적작용력 산정모델이 배면지반 내에 발생한 과잉간극수압과 입력

가속도 크기변화를 고려하여 하중성분들의 크기와 위상 관계를 잘 예측할 수 있는지 평가하는데 목적이 있다.

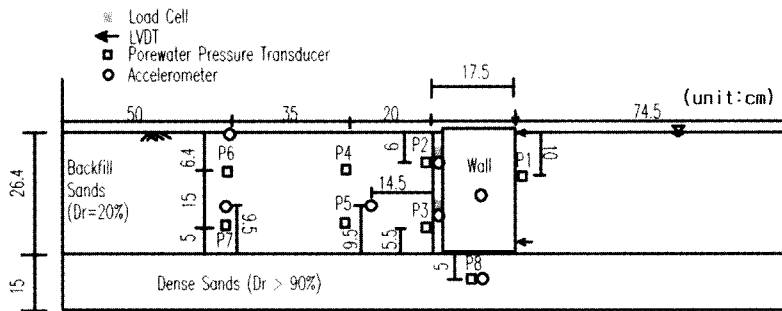
두번째는 대형토조(길이 300cm, 폭 125cm, 높이 120cm)를 이용한 실험으로서, 개발된 모델이 실제 지진하중이 작용할 때 배면작용력의 크기변화를 정량적으로 잘 묘사할수 있는지 검증을 하는 실험이다. 이를 위하여 고베 지진시 피해가 발생한 중력식 안벽(Inagaki, 1996)을 원형구조물로 선정하였고, Iai(1989)가 제시한 1g 진동대 실험에서 요구되는 상사법칙을 엄격히 적용하여 실험

을 수행하였다. Iai 등(1999)은 고베 지진시 피해가 발생한 중력식 안벽에 대하여 상사법칙을 적용한 진동대 실험을 수행한 결과 원형 구조물과 일치하는 정량적 변위 거동을 얻었다고 주장한 바 있다.

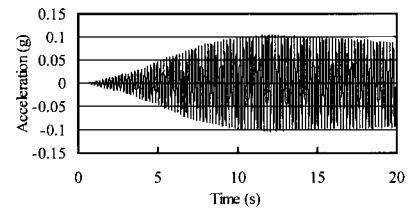
그림 6은 소형토조를 이용한 진동대 실험 단면과 계측기 배치 그리고 입력지진파를 보여준다. 사용된 계측기는 간극수압계 9개, 가속도계 8개, LVDT 3개 그리고 로드셀 3개이며, 로드셀은 모형안벽 본체와 배면판 사이에 설치하여 배면 작용력을 측정하는데 이용하였다. 입력가속도는 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 진동수 5Hz의 sin파를 초기 10초간은 최대 진폭크기까지 선형적으로 증가시키고 나머지 10초 동안에는 진폭크기를 일정하게 유지하였으며, 최대진폭크기는 0.1g와 0.2g로 변화시켰다. 모형지반 구성에 이용한 모래의 평균 유효입경은

0.32mm, 균등계수는 1.53 그리고 최대 건조밀도(γ_{max})와 최소 건조밀도(γ_{min})는 각각 $1.66t/m^3$ 과 $1.40t/m^3$ 이다. 안벽의 크기는 높이 26cm, 길이 17cm, 폭 42cm이고, 안벽의 평균단위중량은 $2.5t/m^3$ 이다. 배면지반과 기초지반의 상대밀도는 각각 약 20%와 90%이다.

그림 7은 대형토조를 이용한 진동대 실험 단면과 계측기 배치 그리고 실험에 이용된 실제진파를 보여준다. 안벽의 크기는 높이 58cm, 길이 38cm, 폭 40cm이고 안벽 평균단위중량은 $2.0t/m^3$ 이다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 토조 측벽과 배면 토체간의 마찰영향을 감소시키기 위하여 40cm폭의 안벽을 3개 제작하여 토조에 일렬로 설치한 후 마찰의 영향을 가장 적게 받는 중간 안벽에 대하여 가속도, 변위, 그리고 동적작용력을 계측하였다. 길이에 대한 상사비는 25가 되도록 모형의 크기를

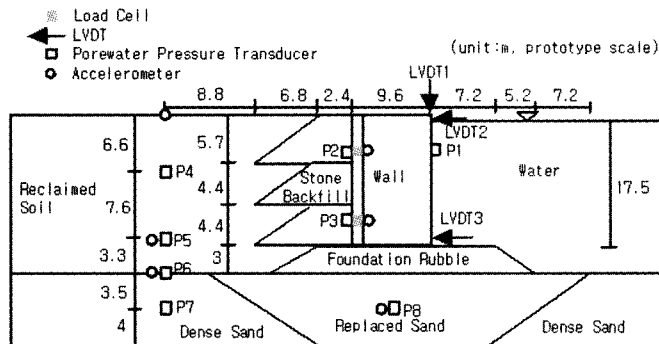
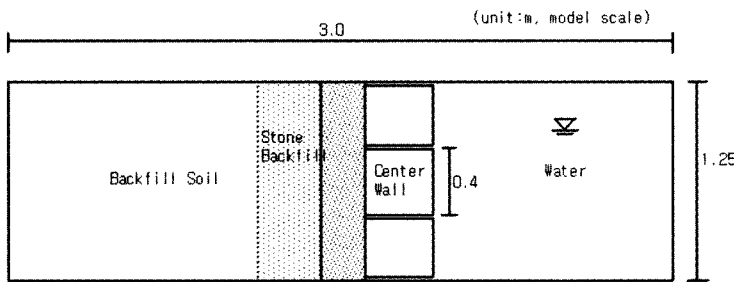


(a) 진동대 실험단면과 계측기 배치

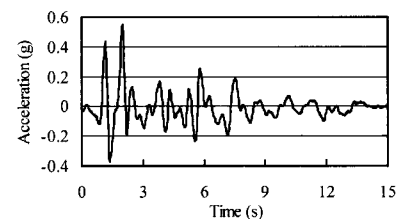


(b) 진동대 입력파

그림 6. 진동대 실험단면과 진동대 입력파



(a) 진동대 실험단면과 계측기 배치



(b) 진동대 입력파(원형 스케일)

그림 7. 상사법칙을 적용한 실험단면과 진동대 입력파

표 1. 대형토조 진동대 실험에 이용된 각 변수들의 상사비

구분	상사비(원형/모형)	적용 상사비
길이	λ	25
시간	$\lambda^{0.75}$	11
가속도	1	1
변위	$\lambda^{1.5}$	125
응력/간극수압	λ	25
힘	λ^3	15625

조절하였으며, 표 1은 상사법칙에 따라 계산된 각 물리량의 상사비를 보여준다.

4.2 실험결과

여기서는 소형진동대 실험결과로부터 배면 동적작용력의 크기와 위상변화를 분석하고자 한다. 배면 동적작용력은 배면지반내에 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따라 위상관계가 변화하므로 과잉간극수압 발생량이 작은 경우(입력가속도 최대진폭: 0.1g)와 큰 경우(입력가속도 최대진폭: 0.2g)로 나누어 정리한다.

(1) 과잉간극수압 발생량이 작은 경우 (입력가속도 진폭 : 0.1g)

그림 8은 배면 지반에 발생한 최대 과잉간극수압비 분포도를 보여주는데, 배면지반내에서의 과잉간극수압 발생량이 아주 작음을 알 수 있다.

그림 9는 로드셀을 이용하여 측정한 배면 동적작용력

(그림 9(a))을 비진동성분(그림 9(b))과 진동성분(그림 9(c))으로 분리하여 정리한 것이다. 그림 9에 나타난 배면 동적작용력은 진동대 실험전 로드셀 계측값을 0으로 초기화시킨 후 측정한 값으로 진동전의 정적토압 및 정적수압은 반영되어 있지 않다. 배면 동적작용력의 (+)부호는 벽체배면에 작용하는 힘이 증가됨을 의미하고 (-)부호는 감소함을 의미한다. 그림을 보면 진동중 배면 동적작용력의 비진동 성분의 증가량이 작는데, 이것은 배면지반의 과잉간극수압 발생량이 작기 때문이다.

그림 10은 관성력과 배면 동적작용력 진동성분의 위상관계를 보여준다. 여기서, 관성력의 (+)부호는 관성력이 전면 물쪽으로 작용함을 의미하고, (-)부호는 배면토체쪽으로 작용함을 의미한다. 관성력이 전면 물쪽으로 작용할 때 배면 동적작용력이 감소하는데(즉, 관성력과 배면 동적작용력 진동성분은 반대위상), 이것은 현재 일반적인 안벽설계에서 관성력과 배면 동적작용력 진동성분이 같은 방향으로 작용한다는 가정과 부분적으로 상치되는 결과이다.

그림 11은 관성력과 배면-전면 동적수압 진동성분의 위상관계를 보여주는데, 전면과 배면 동적수압의 진동성분이 관성력과 반대의 위상을 가진다. 관성력이 (+)부호일 때 벽체 전면에서 작용하는 전면수압이 감소하는데, 전면수압이 감소하면 결과적으로 벽체가 불안정해진다. 그리고, 배면 동적수압의 진동성분이 배면 동적작용력 진동성분과 동일하게 관성력과 반대의 위상을 가지는 이유는 흙의 투수성이 작아서 배면흙과 물이 함께 움직이기 때문으로 판단된다.

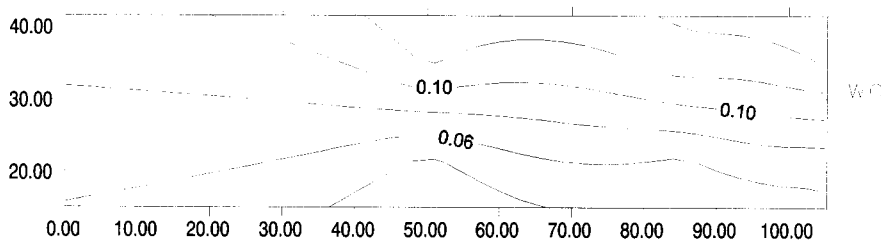


그림 8. 배면 지반의 과잉간극수압비 분포도(입력가속도 최대진폭 : 0.10g)

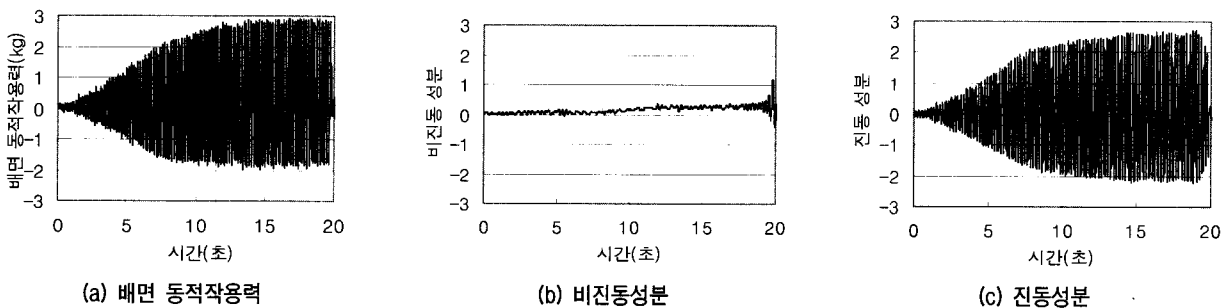


그림 9. 배면 동적작용력의 진동성분과 비진동성분

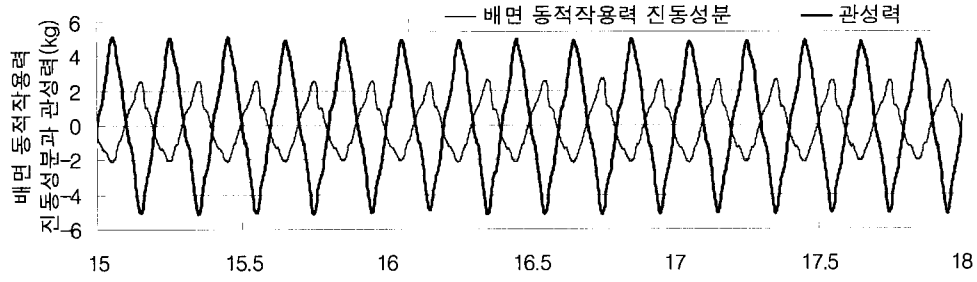


그림 10. 관성력과 배면 동적작용력 진동성분의 위상관계

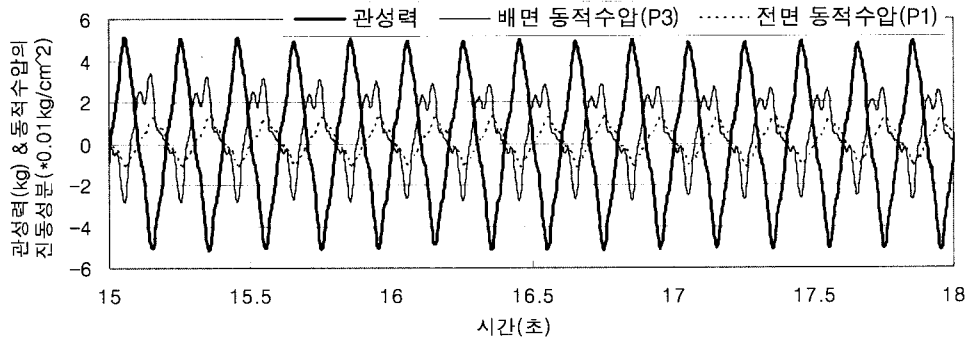


그림 11. 관성력과 배면-전면 동적수압 진동성분의 위상관계

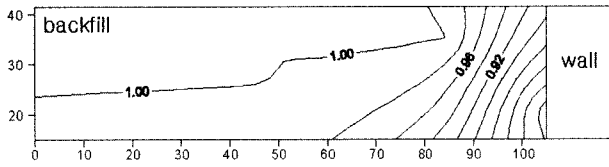


그림 12. 배면 지반의 과잉간극수압비 분포도(입력가속도 최대진폭 : 0.2g)

(2) 과잉간극수압 발생량이 큰 경우 (입력가속도 최대진폭 : 0.2g)

그림 12는 입력가속도 최대진폭이 0.2g인 경우 배면 지반의 최대 과잉간극수압비 분포도로서 과잉간극수압비가 1이 되어 배면 지반에 액상화가 발생하였음을 알 수 있다.

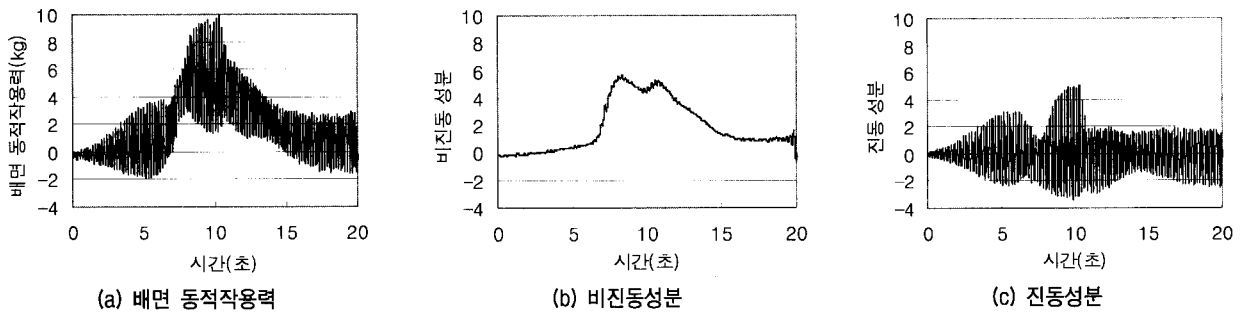


그림 13. 배면 동적작용력의 비진동성분과 진동성분

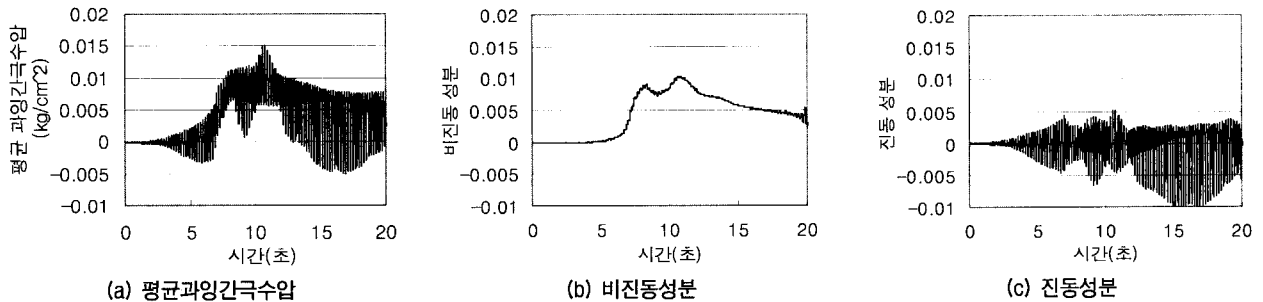


그림 14. 벽체 배면 평균과잉간극수압의 비진동성분과 진동성분

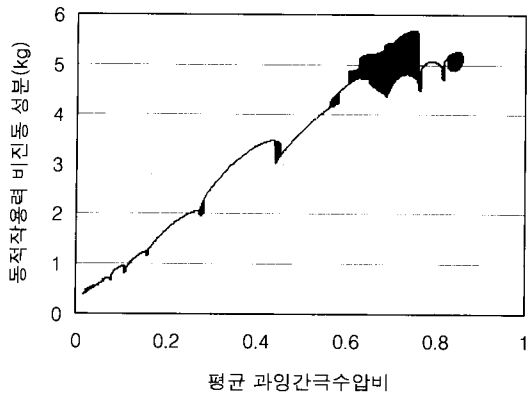


그림 15. 과잉간극수압의 크기 변화에 따른 동적작용력 비진동성분의 크기 변화

그림 13과 그림 14는 배면 동적작용력과 벽체 배면에 작용하는 평균 과잉간극수압을 정적성분과 동적성분으로 분리하여 정리한 그림이다. 평균과잉간극수압은 벽체배면에 설치한 2개의 간극수압계 계측값의 평균을 의미한다. 배면 동적작용력의 비진동 성분을 살펴보면 크기가 점차 증가하여 10초 정도에 최대값에 도달한 후 감소하는 경향을 보이는데, 평균과잉간극수압의 비진동 성분에서도 동일한 변화경향을 관찰하였다. 배면 동적작용력의 진동성분은 평균과잉간극수압이 급격히 증가하는 7초 부근에서 최소가 되며, 평균과잉간극수압값이 최대가 되는 10초 부근에서 최대가 된다.

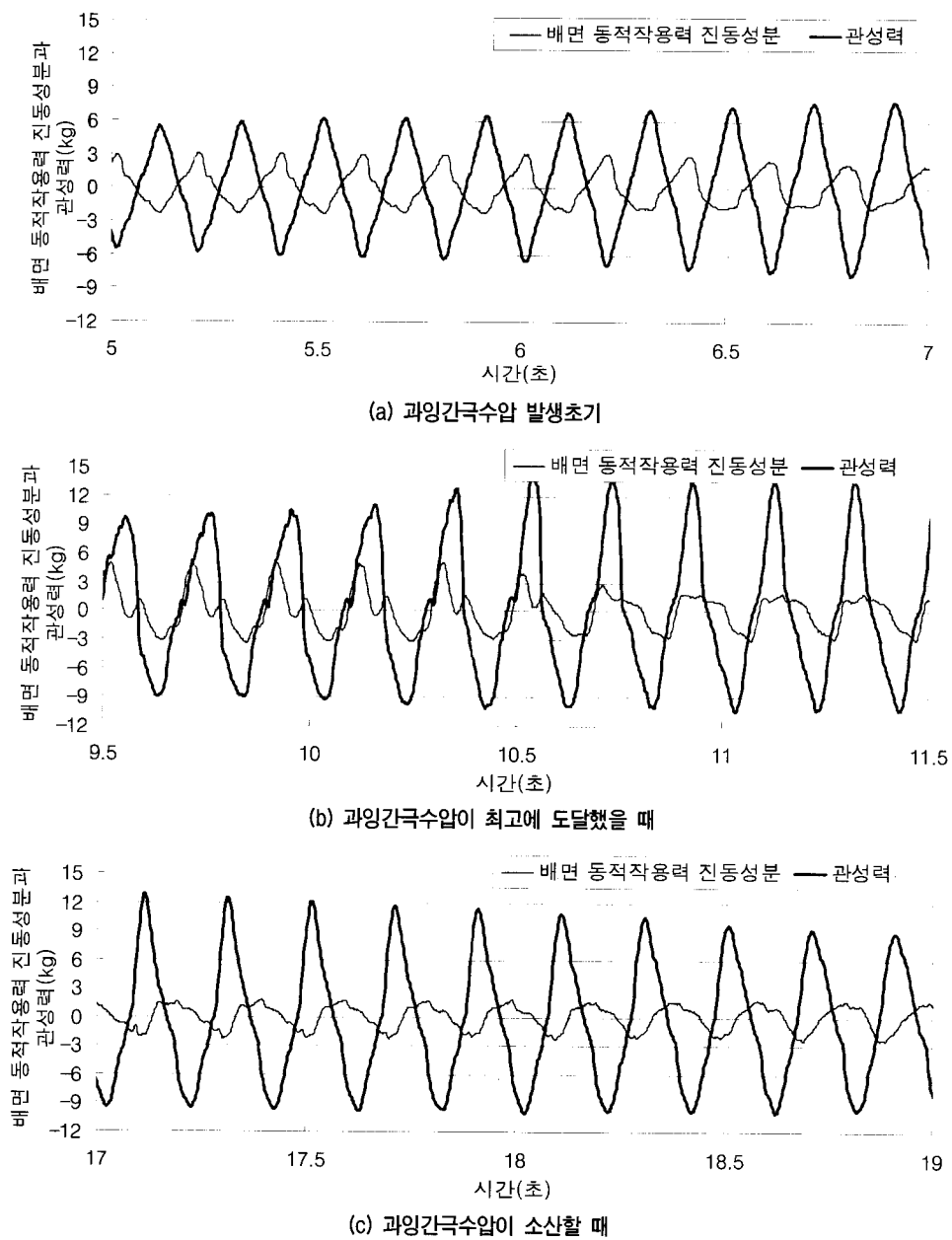


그림 16. 관성력과 배면 동적작용력 진동성분간의 위상관계

그림 15는 동적작용력 비진동성분의 측정값을 벽체 배면에서 측정한 평균과잉간극수압비에 대하여 나타낸 것으로, 동적작용력 비진동성분의 크기가 배면지반 과잉간극수압비에 대하여 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 16과 그림 17은 각각 관성력과 배면 동적작용력의 진동성분, 관성력과 배면-전면 동적수압 진동성분간의 위상관계를 과잉간극수압 발생초기, 과잉간극수압이 최대값에 도달한 후 그리고 과잉간극수압이 소산할 때

등 3단계로 나누어 보여준다. 그림 16을 보면 배면 동적작용력의 진동성분과 관성력간의 위상이 과잉간극수압 크기에 따라 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 과잉간극수압 발생초기에는(그림 16(a)) 관성력과 배면 동적작용력 진동성분이 서로 반대의 위상을 가지며, 과잉간극수압이 증가하여 최대값에 도달하였을 때에는(그림 16(b)) 동일한 위상이 되었다가, 과잉간극수압이 소산할 때에는(그림 16(c)) 다시 반대의 위상을 가지게 된다. 이렇게 관성력과 배면 동적작용력 진동성분의 위상관계가 변

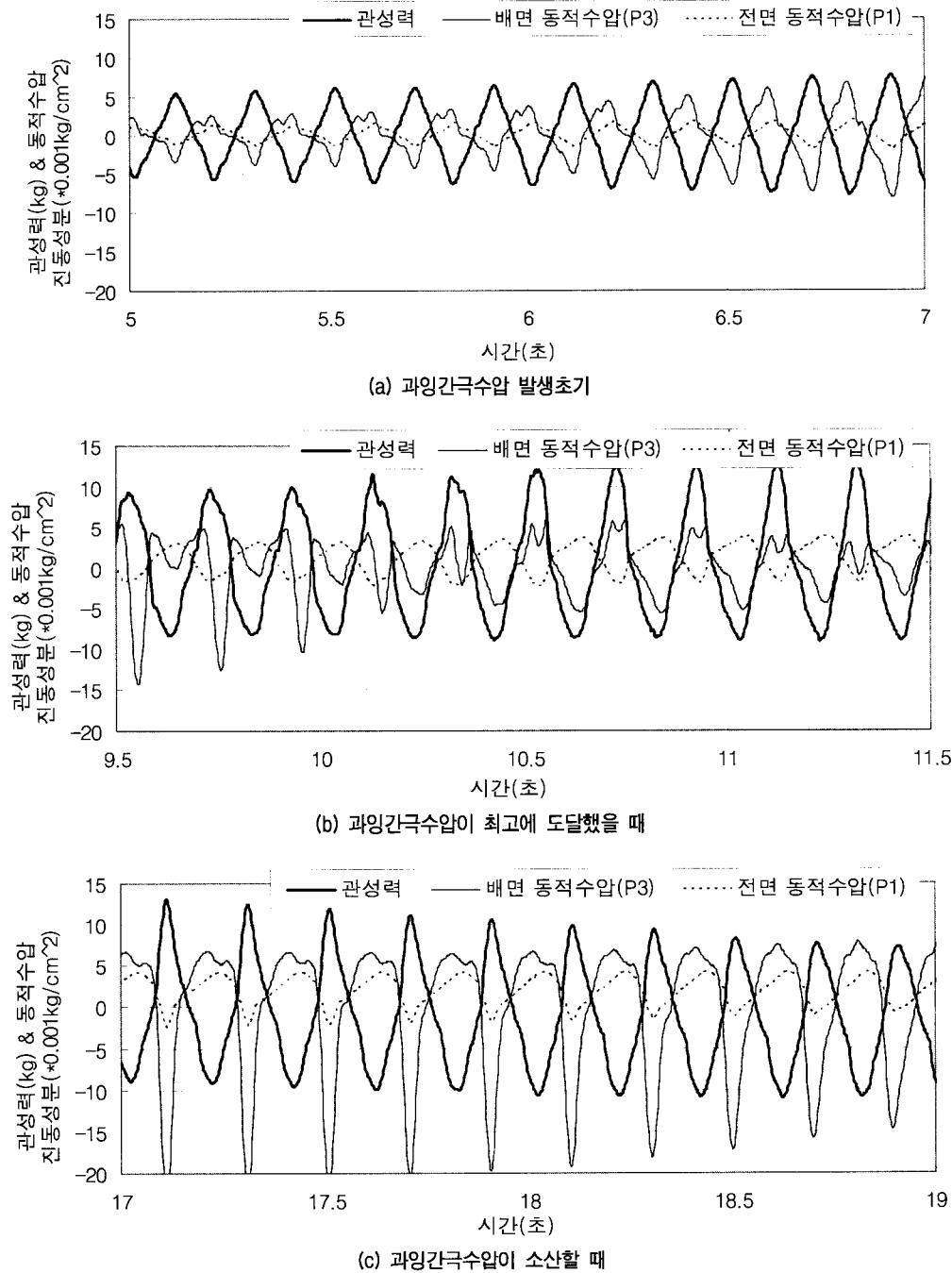


그림 17. 관성력과 배면-전면 동적수압 진동성분간의 위상관계

화하는 것은 과잉간극수압이 어느 일정한 값 이상으로 증가하면 배면 토체의 전단강도가 감소하면서 물과 같이 움직이려는 경향을 가지기 때문이다.

그림 17을 보면 배면 동적수압의 진동성분도 과잉간극수압이 증가함에 따라 배면 동적작용력 진동성분과 동일한 위상변화의 경향을 보이는데, 이것은 흙의 투수성이 작아서 배면의 흙과 물이 같이 거동하기 때문으로 판단된다. 전면 동적수압의 진동성분은 과잉간극수압의 변화에 관계없이 관성력과 항상 반대의 위상을 가진다.

5. 개발 모델의 적용성 평가

본 연구에서 제시한 하중모델을 이용하여 계산한 배면 동적작용력의 시간이력을 진동대 실험결과와 비교하여 이 연구에서 개발한 모델의 적용성을 평가하고자 한다. 동적작용력 비진동성분(F_s)은 각각 식 (6)과 식 (7)로부터 계산된 F_{Es} 와 F_{Ws} 의 합으로 산정한다. 동적작용력 진동성분(F_D)는 식 (10)을 이용하여 산정한다. 계산에 이용한 입력값은 벽체 배면 평균과잉간극수압비 시간이력, 벽체 가속도 시간이력, 흙의 내부마찰각, 그리고 흙과 안벽의 단위중량 등이다. 배면 동적작용력의 진동성분을 계산할 때 진동대 입력가속도가 아닌 벽체 가속도 시간이력을 적용하였는데 이것은 벽체와 배면 지반 그리고 벽체와 물의 상호작용 때문에 벽체 가속도의 크기가 입력가속도와 달라졌기 때문이다. 또한 본 진동대 실험의 경우 배면 토체와 물이 함께 움직이는 것으로 나타나 Mononobe-Okabe 식의 ϕ 값 산정시 배면 지반 투수성이 작은 경우의 식 (3)을 적용하였다.

5.1 소형토조실험 결과

그림 18은 배면 동적작용력 비진동성분의 계산값과 측정값을 비교한 그림으로서 0.1g일 때 비진동성분(그림 18(a))의 측정값이 계속 증가하는 반면, 계산값은 약 13초 이후에 감소한다. 이 차이는 실제 동적작용력이 입자의 재배열과 같은 다른 요소때문에 작은 크기의 과잉간극수압하에서 과잉간극수압에 비례하여 변화하지 않은 반면, 계산값은 과잉간극수압의 변화만을 고려하여 계산되므로 과잉간극수압과 동일한 변화경향을 가지기 때문으로 생각된다. 0.2g인 경우(그림 18(b))에는 계산값과 측정값 사이에 얼마간의 크기차이는 있으나 전체적인 변화경향은 서로 잘 일치한다.

그림 19는 배면 동적작용력 진동성분의 계산값과 측정값을 비교한 그림으로서, 배면지반내의 과잉간극수압 발생량이 작은 경우(그림 19(a))의 전체 진동시간과 그림 19(b)의 진동후 초기 약 7초간에 측정값의 진폭이 계산값의 진폭보다 작은 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 아마도 배면토체와 토조간의 마찰간섭 또는 벽체와 기초지반간의 마찰력 때문으로 판단된다. 0.2g의 경우 과잉간극수압이 급격히 증가되었다가 약간 감소하는 약 8~10초 사이에 계산값의 진폭이 측정값보다 오히려 작는데, 이것은 실제 동적작용력의 진동성분이 이 때의 과잉간극수압 감소에 그다지 영향을 받지 않은 반면, 계산값은 동적작용력이 관성력과 동일한 위상일 때 입력된 과잉간극수압비에 비례하므로 과잉간극수압의 감소에 따라 크기가 감소하였기 때문이다. 배면작용력 비진동성분과 마찬가지로 계산값과 측정값의 전체적인 변화경향은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 20과 그림 21은 배면 동적작용력 진동성분의 측

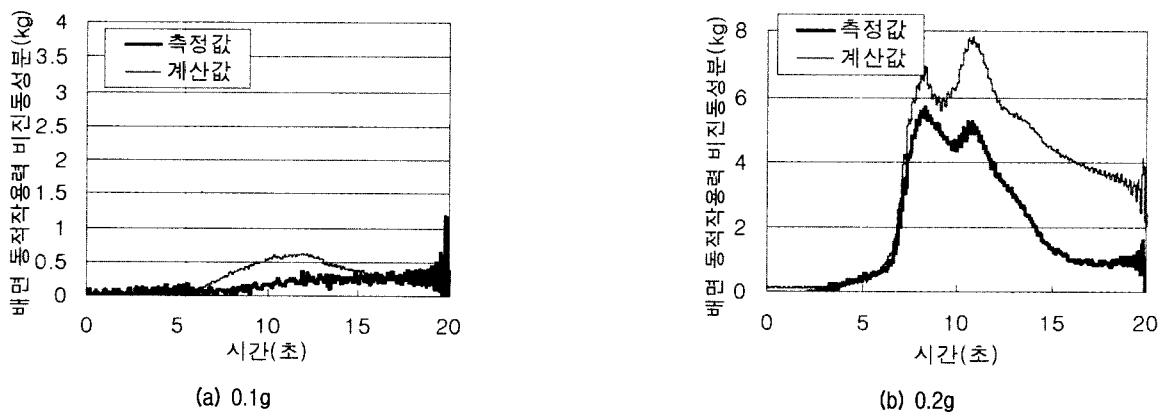
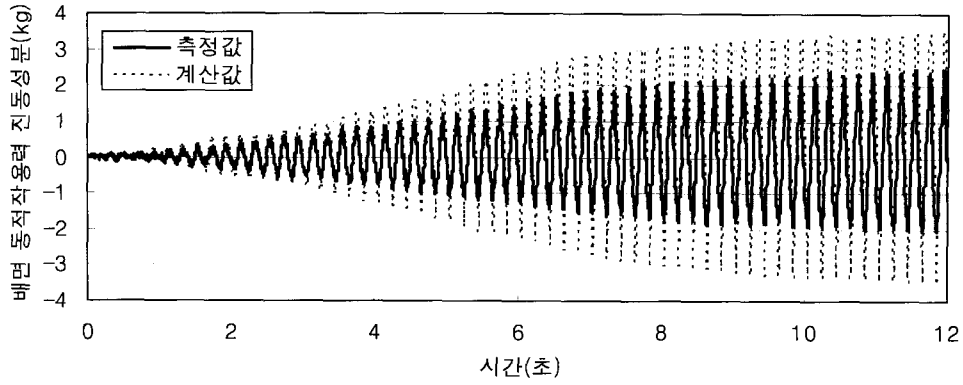
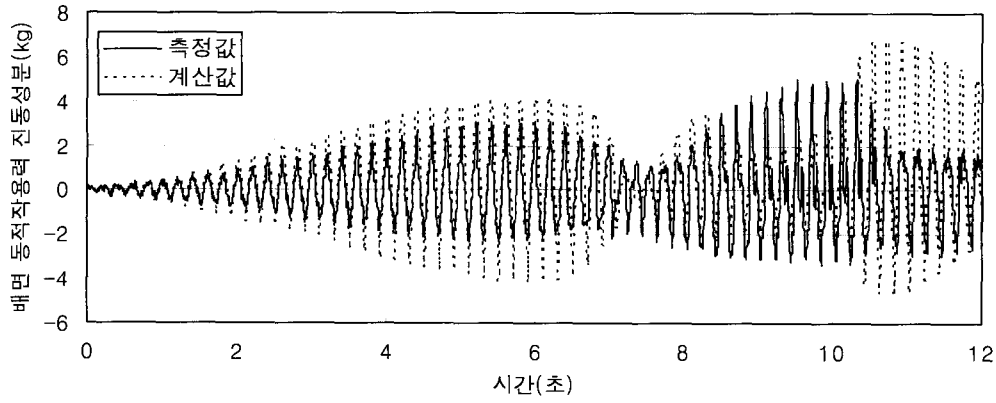


그림 18. 배면 동적작용력 비진동성분의 계산값과 측정값의 비교



(a) 0.1g



(b) 0.2g

그림 19. 배면 동적작용력 진동성분의 계산값과 측정값의 비교

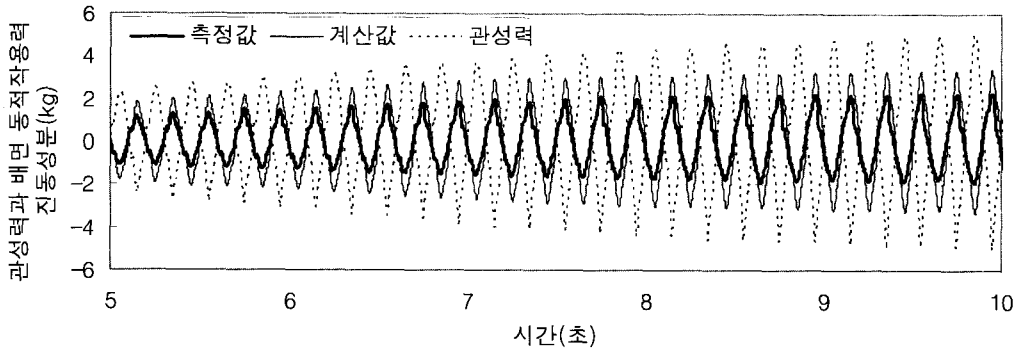


그림 20. 배면 동적작용력 진동성분과 관성력의 위상관계(입력가속도 최대진폭 : 0.1g)

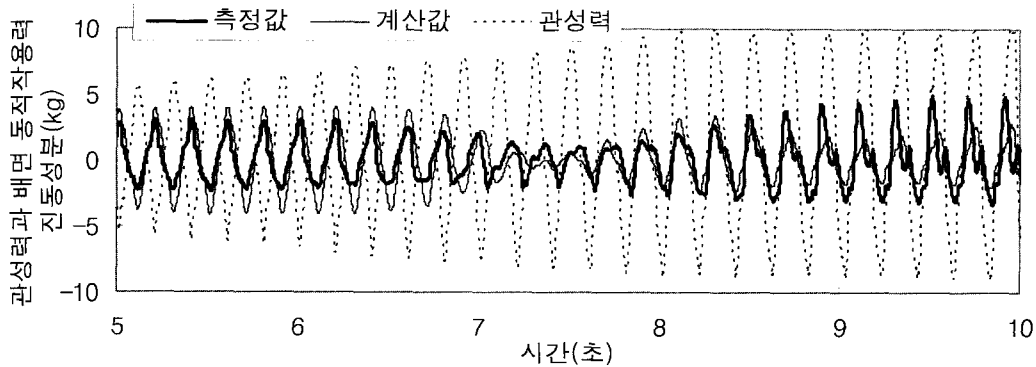


그림 21. 배면 동적작용력 진동성분과 관성력의 위상관계(입력가속도 최대진폭 : 0.2g)

정값과 계산값의 시간축을 확대하여 나타낸 그림이다. 입력가속도 최대진폭이 0.1g인 경우(그림 20) 계산값과 측정값 모두 관성력과 반대의 위상을 가짐을 알 수 있다. 입력가속도 최대진폭이 0.2g인 경우(그림 21)에는 배면 동적작용력 진동성분의 계산값과 측정값이 초기에는 관성력과 반대의 위상을 가지다가 과잉간극수압이 증가함에 따라 관성력과 동일한 위상으로 변화하였다. 이러한 결과는 제안된 모델이 과잉간극수압의 변화에 따른 동적작용력의 위상변화를 잘 예측할 수 있음을 보여준다.

그림 22는 배면 동적작용력 진동성분의 계산값과 측정값을 벽체 가속도와 배면 평균과잉간극수압비에 대하여

등고선 형태(그림 22(a)) 및 3차원(그림 22(b))으로 나타낸 그림이다. 그림 22(a)를 살펴보면 벽체 가속도값이 0일 때 계산값은 0의 값을 가지는데 비하여, 측정값은 0의 값을 가지는 구간이 일정하지 않다. 이것은 측정값과 벽체 가속도의 위상차가 제안한 모델과 달리 정확히 0° 또는 180°가 아니고, 위상이동(phase shift)이 발생하였기 때문으로 생각된다. 그러나, 그림 22(b)에서 볼 수 있듯이 측정값과 계산값의 전체적인 변화경향은 과잉간극수압비 0.5~0.6을 기준으로 과잉간극수압비가 이 기준보다 작을 경우에는 벽체 가속도가 (+)방향일 때 배면 작용력이 감소하며, 과잉간극수압비가 이 기준보다 큰 경우에는 배

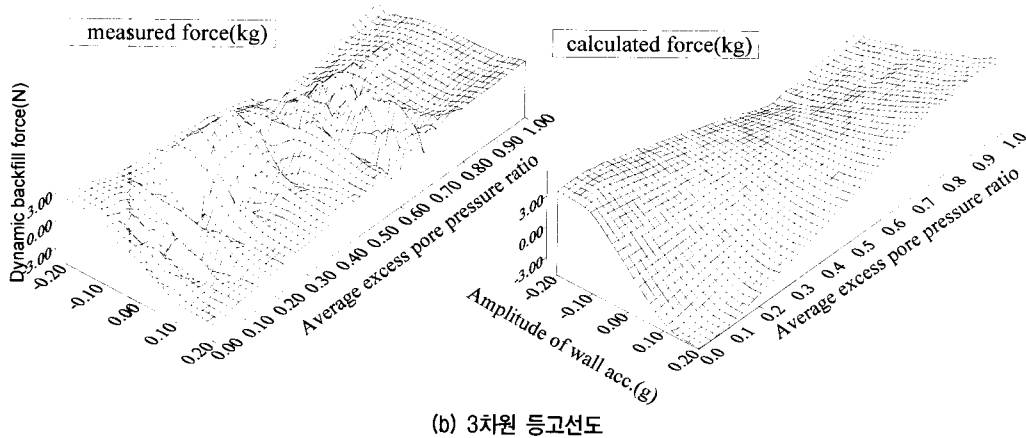
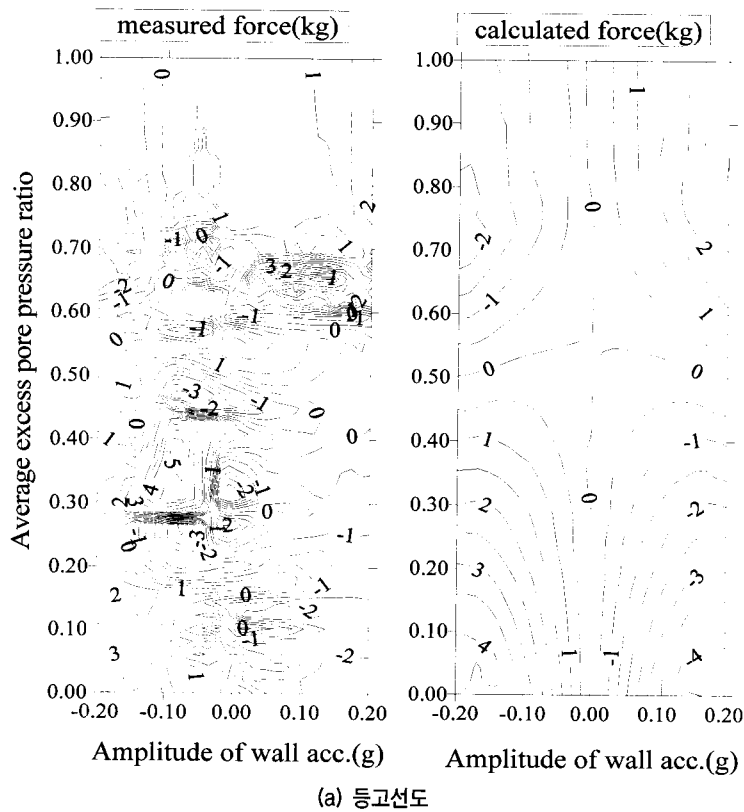


그림 22. 벽체 배면 평균과잉간극수압비-벽체 가속도-배면 동적작용력 진동성분관계

면 동적작용력 진동성분의 위상이 변화하여 벽체 가속도가 (+)방향일 때 배면 작용력이 증가함을 알 수 있다.

5.2 대형토조실험 결과

본 실험은 개발된 하중모델이 실제 지진하중하에서 동적작용력을 잘 예측할 수 있는지의 여부를 분석하기 위한 실험이다. Iai(1989)가 제안한 1g 진동대 실험에 대한 상사법칙을 엄밀히 적용하여 입력가속도의 지속시간과 모형의 크기를 결정하였다. 그림 23은 벽체배면의 동적수압과 동적작용력의 위상관계를 보여주는데 서로 동일한 위상을 가지므로 자갈 뒤채움재를 포함한 배면 토체(그림 7(a))와 간극수가 서로 함께 움직이는 것으로 판단되어 소형토조실험에서와 마찬가지로 식 (3)의 배면 지반의 투수성이 작은 경우의 식을 적용하였다.

동적작용력은 이 연구에서 제안한 모델에서 소형토조실험과 동일한 절차와 입력값을 이용하여 산정하였다. 그림 24는 배면 동적작용력의 계산값과 측정값을 비교한 그림이다. 이 그림을 보면 제안된 모델에 의한 계산값이 동적작용력의 시간에 따른 크기변화를 비교적 작은 오차범위안에서 예측하고 있다. 계산값과 측정값의 상대오차는 동적작용력 측정값이 최소가 되는 약 2.3초에 22%이고 측정값이 최대가 되는 약 7.0초에 약 28%로 나타나 제안된 모델이 실질지진하중하에서의 동적작용력을 정량적으로 예측할 수 있다고 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 벽체 가속도와 배면지반 내에 발생하는 과잉간극수압의 시간이력을 이용하여 중력식 안벽 배면에 작용하는 동적 작용력의 크기와 위상변화를 시간에 따라 연속적으로 산정하는 간단한 모델을 제안하였다. 이 모델에서, 과잉간극수압 발생 전의 초기 동적작용력의 크기는 안벽에 작용하는 하중성분들의 합으로서 산정하고, 액상화 후의 최종 동적작용력의 크기는 Westergaard 해를 이용하여 산정한다. 초기 동적작용력은 안벽 관성력과 180도 위상차를 가지고, 최종 동적작용력은 안벽 관성력과 동일한 위상을 가진다. 과잉간극수압이 발생하는 중간단계에서의 동적작용력은 작용력이 배면지반에서 발생하는 과잉간극수압의 크기에 비례하여 초기 동적작용력으로부터 최종 동적작용력까지 변화한다는 가정하에서 산정한다.

제안된 모델의 적용성은 2가지 종류의 진동대 실험을 수행하여 검증하였다. 첫번째 진동대 실험은 소형토조를 이용한 실험으로서 본 모델이 과잉간극수압과 가속도 크기를 반영하여 동적작용력을 적절히 산정할 수 있음을 확인하였다. 그리고 두번째 진동대 실험은 대형토조를 이용한 실험으로서 동적작용력을 정량적으로 산정하기 위하여 진동대 실험의 상사법칙을 엄밀히 적용하여 수행하였다. 그 결과, 본 모델이 실제 지진하에서의 동적작용력을 정량적으로 산정하는데 이용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2001년 해양수산부에 지원한 '신형내진 안벽구조물 연구' 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 해양수산부에 감사드립니다.

참고 문헌

1. European Committee for Standardization (CEN)(1994), *Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures Part 5*.
2. Fujiwara, T., Horikoshi, K., Higuchi, Y. and Sueoka, T.(2000), "Estimation of dynamic displacement of gravity type quay walls based on centrifuge modeling", *Proc. 12th World Conf. on Earthquake Engrg.*, The New Zealand Society for Earthquake Engrg., Upper Hutt, New Zealand, Paper No.2429.
3. Iai, S. (1989), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, JGS, Vol.29(1), pp.105-118.
4. Iai, S. & Sugano, T.(1999), "Soil-structure interaction studies through shaking table tests", *Proc. of The Second International Conference On Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol.3, pp. 927-940.
5. Inagaki H., Iai S. Sugano T., Ymazaki H. and Inatomi T.(1996), "Geotechnical aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu earthquake: performance of caisson type quay walls at Kobe Port", *Soils and Foundations*, Special Issue, Jan. 1996, pp.119-136.
6. Kohama, E. (2000), *A study on the stability of gravity type quay wall during earthquake*, PhD.Thesis, Hokkaido University.
7. Mononobe, N. and Matsuo, H.(1929), "On the determination of earth pressures during earthquake", *Proc., World Engrg Conf.*, Vol.9.
8. Okabe, S.(1926), "General theory of earth pressures", *Journal of the Japan Society of Civil Engineering*, JSCE, Vol.12(1).
9. Sato, M., Watanabe, H., Takeda, T. and Shimada, M.(2000), "Simplified method to evaluate caisson type quay wall movement", *Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engrg.*, The New Zealand Society for Earthquake Engrg., Upper Hutt, New Zealand, Paper No.1440.
10. Westergaard, H.M.(1933), "Water pressures on dams during earthquakes", *Trans. of ASCE*, Vol.98, pp.418-432.

(접수일자 2002. 10. 26, 심사완료일 2003. 2. 25)