

옹벽의 활동에 따른 배면 동적토압의 변화

Variation of Dynamic Earth Pressure Due to Sliding of Retaining Walls

윤 석 재¹ Yoon, Suk-Jae

김 성 렬² Kim, Sung-Ryul

황 재 익³ Hwang, Jae-Ik

김 명 모⁴ Kim, Myoung-Mo

Abstract

Mononobe-Okabe method is generally used to evaluate dynamic earth pressure for the seismic design of retaining walls. However, Mononobe-Okabe method does not consider the effects of dynamic interactions between backfill soil and walls. In this research, shaking table tests on retaining walls were performed to analyze the phase and magnitude of dynamic earth pressure. The unit weight of walls, the amplitude of input acceleration and the base friction coefficient of walls were varied to analyze the influence of these factors on the dynamic earth pressure. Test results showed that the dynamic earth pressure was 180 degrees out of phase with the wall inertia force for the low sliding velocity of the wall, whereas small peaks of the dynamic earth pressure, which are in phase with the wall inertia force, were developed for the high sliding velocity of the wall. The amplitude of dynamic earth pressure was proportional to that of wall acceleration and the unit weight of the wall. In addition, the dynamic earth forces calculated by the Mononobe-Okabe method were the upper limit of the dynamic earth pressures.

요 지

현재 옹벽의 배면 동적토압을 산정할 때 주로 등가정적해석법인 Mononobe-Okabe 식이 이용되고 있다. 하지만 이 식은 벽체와 뒤채움 지반간의 동적상호작용을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 벽체와 뒤채움 지반간의 동적상호작용을 분석하기 위하여 건조 사질토로 뒤채운 옹벽에 대하여 진동대 시험을 수행하였다. 벽체 단위중량, 입력가속도의 진폭 그리고 벽체 바닥면 거칠기를 변화시키면서 이들 각 인자가 동적토압에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 벽체의 활동속도가 작은 경우에는 동적토압과 관성력간은 180도 위상차를 가졌지만 활동속도가 큰 경우에는 동적토압에 관성력과 동일한 위상을 가지는 작은 정점이 발생하였다. 동적토압의 크기는 벽체가속도와 벽체 단위중량의 크기에 비례하였다. 또한 Mononobe-Okabe 방법으로 계산된 동적토압은 측정된 동적토압의 상한값으로 나타났다.

Keywords : Dynamic earth pressure, Earthquake, Inertia force, Phase relation, Retaining wall, Shaking table test

1. 서 론

현재 옹벽의 내진설계를 수행할 때 벽체에 작용하는

동적토압은 주로 등가정적해석법인 Mononobe와 Matsuo (1929)와 Okabe(1926)가 제안한 방법을 이용하여 산정하고 있다. 이 방법은 Coulomb의 토압이론(1776)을

1 정회원, 삼안 엔지니어링 대리 (Member, Engineer, Saman Engrg. Consultants Co.)

2 정회원, 동아대학교 토목해양공학부 전임강사 (Member, Full-time Rectorer, Dept. of Civil Engrg., DongA Univ., sungryul@dau.ac.kr)

3 정회원, 서울대학교 BK 21 박사후 연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Brain Korea 21, Seoul National Univ.)

4 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., The School of Civil, Urban & Geo-Systems, Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다. 단, 건전한 토의 문화 정착을 위하여 학회에서 내용을 조정할 수 있음을 알려드립니다.

확장한 것으로 정적인 힘외에 파괴 흠뻐기에 작용하는 관성력을 추가적인 정적인 힘으로 고려하여 힘의 평형 방정식으로부터 동적토압을 산정한다. 또한, 실제 옹벽을 설계할 때에는 보수적인 설계를 위하여 벽체 관성력과 동적토압의 위상이 동일하다고 가정하여 설계하고 있다.

하지만 실제 지진하중이 작용할 때 벽체 배면에 발생하는 토압은 벽체와 뒤채움 지반간의 동적인 상호작용에 의해서 결정된다. Watanabe 등(1999)은 진동대 시험을 수행하여 옹벽에 작용하는 관성력과 동적토압간에는 위상차가 존재하며, 이 위상관계는 벽체의 미끄러짐 여부에 따라서 달라짐을 관찰하였다. 그러나, 현재까지 벽체와 뒤채움 토체간의 동적 상호작용이 매우 복잡하여 동적토압에 영향을 미치는 인자들이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 동적토압은 벽체-뒤채움 토체-기초지반의 동적 상호작용에 의하여 발생하게 된다. 동적토압에 영향을 미치는 인자로는 벽체의 관성력, 뒤채움 흙의 강도/진동 특성과 과잉간극수압 발생여부 그리고 기초지반과 벽체저면간의 마찰특성 등이 있다.

본 연구에서는 진동대 시험을 수행하여 이러한 영향 인자 중에서 벽체 관성력과 기초지반-벽체저면간 마찰 특성이 동적토압에 미치는 영향을 분석하였다. 대상모형은 건조 사질토를 뒤채움흙으로 사용한 중력식 옹벽으로 결정하였다. 벽체 관성력의 크기는 벽체의 단위중량과 입력가속도의 진폭에 비례하여 증가하므로 벽체의 단위중량과 입력가속도 진폭을 변화시켜 벽체 관성력의 크기를 변화시켰으며, 벽체 바닥면의 거칠기는 3가지로 변화시켰다. 실험으로부터 벽체와 배면지반 가속도, 토압 그리고 벽체 변위를 계측하여 이러한 영향인자들이 동적토압의 크기와 위상변화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 시험 절차

2.1 모형체 제작 및 계측기 설치

일반적인 옹벽의 배면지반은 양질의 뒤채움재를 사용하여 다짐도 90%이상으로 다짐을 수행하기 때문에 전단시 팽창성 흙의 거동을 나타낼 것으로 판단한다. 본 시험은 작은 크기의 모형시험이기 때문에 원지반의 거동을 정확히 모사하기 어렵지만, 모형체 배면지반을 매우 조밀하게 조성하여 원지반과 비슷한 팽창성 거동을

모사하고자 하였다.

시험에 사용한 토조는 2cm두께의 투명 아크릴로 만든 토조로서, 크기는 길이 192cm, 폭 44cm 그리고 높이 60cm이다. 토조의 진동 방향 양단에는 진동중 흙과 강성벽체의 충돌로 발생하는 충격파를 최소화하기 위하여 5cm 두께의 스펀지를 부착하였다.

그림 1은 시험단면과 계측기 배치를 보여준다. 모형 벽체는 철재로 제작한 강성 벽체로서 크기는 길이 17.7cm, 폭 42.2cm 그리고 높이 27.5cm이다. 본 시험에 이용된 계측기는 3개의 로드셀, 9개의 가속도계 그리고 3개의 변위계이다. 3개의 로드셀은 뒤채움 토체와 접촉하는 배면판과 벽체 본체 사이에 삼각형 형태로 벽체 상부에 1개, 하부에 2개를 설치하여 뒤채움 토체와 벽체의 상호작용에 의하여 벽체배면에 발생하는 토압을 측정하였다. 토압계측은 모형체 제작이 완료된 후 정적 토압을 측정후에 토압 측정값을 0으로 초기화하여 진동 중의 동적토압 변화를 측정하였다. 토압 측정값의 (+)부호는 배면으로부터 벽체를 미는 토압이 증가함을 의미한다. 가속도계는 벽체의 관성력과 지반가속도 특성을 분석하기 위하여 벽체상부에 1개, 벽체하부에 2개, 지반 내에 5개 그리고 진동대에 1개를 각각 설치하였다. 가속도 측정값의 (+)부호는 가속도가 뒤채움 지반에서 벽체 쪽으로 작용함을 의미하며 (-)부호는 배면지반쪽으로 작용함을 의미한다. 변위계는 3개를 설치하여 벽체 상부의 수평, 수직변위 그리고 벽체하부의 수평변위를 측정하였다.

모형제작 순서는 다음과 같다. 먼저 20cm두께의 기초지반을 진동대를 이용한 진동다짐으로 조밀하게 조성하였다. 그 후 모형벽체를 설치하고 고정판을 이용하여 벽체가 진동에 흔들리지 않도록 고정시킨 후 뒤채움 모래를 넣고 진동 다짐하였다. 진동다짐은 진동대를 이용하여 0.5g, 10Hz의 sine파를 가하여 지반을 최대한 조밀하게 다졌다. 기초지반과 뒤채움 지반으로 사용한 모래는 건조 주문진 표준사로서 최대 건조단위중량과 최소 건조단위중량은 각각 16kN/m³과 14kN/m³이다. 진동다짐을 통해 얻어진 뒤채움 지반과 기초지반의 상대밀도는 약 80%이며, 이 때의 흙의 내부마찰각은 삼축실험결과 38°로 나타났다.

지반조성이 완료된 후 진동 중 벽체의 변위를 억제하였던 벽체고정판을 제거하였는데, 이 고정판의 제거 여부에 따라 벽체 배면토압의 크기가 달라지는 것을 관찰하였다. 고정판 제거 전에는 배면토압크기가 정지상태

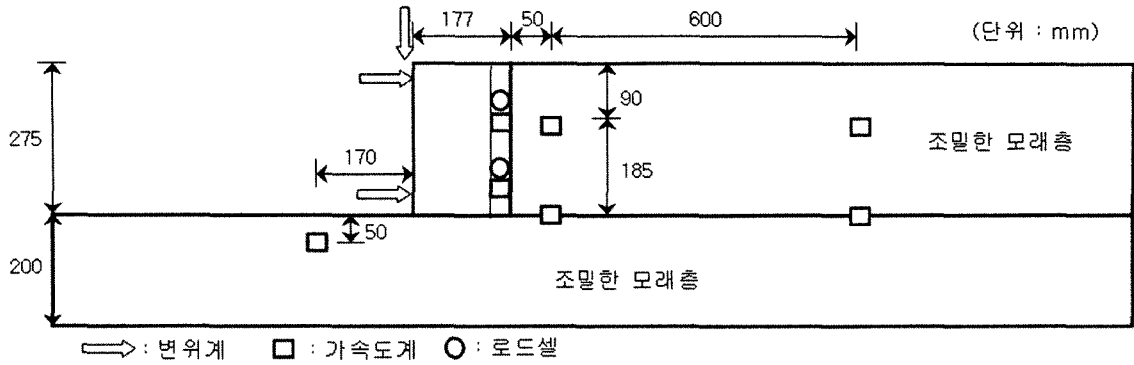


그림 1. 시험 단면 및 계측기 배치도

토압크기를 나타내었지만, 고정판을 제거한 후에는 미소한 벽체변위가 발생하여 토압이 주동파괴상태의 토압크기로 감소하였다.

2.2 시험 조건

본 시험에서는 벽체 단위중량, 입력가속도 진폭 그리고 바닥면 거칠기의 세 가지 인자가 동적토압에 미치는 영향을 분석하였으며, 각 시험조건을 표 1에 정리하였다. 벽체의 단위중량은 18.5kN/m^3 , 23kN/m^3 그리고 26kN/m^3 의 3가지로 변화시켜 동일한 입력가속도 진폭에서 벽체의 단위중량 증가에 따른 벽체 관성력의 증가가 동적토압에 미치는 영향을 분석하였다.

또한, 벽체 단위중량 23kN/m^3 의 벽체에 대하여 거칠기가 다른 2종류의 사포를 벽체 바닥면에 부착하여 사포가 부착되지 않은 매끈한 철판바닥면인 경우, 거친 사포를 부착한 경우 그리고 매우 거친 사포를 부착한 경우의 3가지의 바닥면 거칠기에 대하여 실험하였다. 바닥면 거칠기에 따른 마찰계수값은 기초지반위에 뒤채움 지반없이 벽체만을 설치한 후 로드셀이 부착된 벽체면에 횡방향 하중을 재하여 벽체에 작용하는 횡하중과 벽체 횡변위와의 관계로부터 산정하였다. 그 결과 마찰계수 값은 매끈한 바닥면인 경우 0.54, 거친 사포를 부

착한 경우 0.59 그리고 매우 거친 사포를 부착한 경우 0.64로 측정되어 바닥면이 거칠어질수록 마찰계수가 증가함을 확인하였다.

입력가속도는 주파수 5Hz, 진동 지속시간 10초인 sine파이며, 최대진폭을 $0.1\text{g} \sim 0.5\text{g}$ 로 변화시켰다. 또한 벽체의 횡방향 변위가 발생하기 시작하는 항복가속도 (yield acceleration)를 구하기 위하여 5Hz의 동일한 주파수에서 입력가속도의 진폭을 점진적으로 증가시키는 진폭 스위프(sweep) 시험을 각 시험 조건별로 1회 실시하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 벽체의 항복가속도

모형에 작용하는 입력가속도 진폭을 점차 증가시킬 때 입력가속도 진폭이 특정한 크기에 도달하면 벽체의 영구변위가 발생하기 시작하는데 이 때의 입력가속도 진폭을 벽체의 항복가속도로 정의한다. 그림 2는 벽체 단위중량이 26kN/m^3 이고, 입력가속도 진폭이 0.5g 일 때 입력가속도와 벽체가속도의 시간이력을 나타낸다. 이

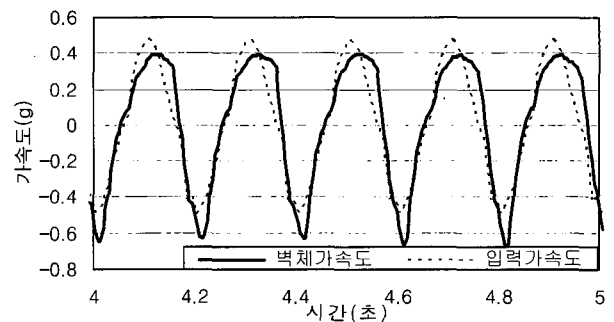


그림 2. 항복가속도(단위중량 26kN/m^3 , 0.5g)

표 1. 시험 조건

벽체단위중량 (kN/m^3)	18.5	26	23	
바닥면 (마찰계수)	매끈함 (0.56)		거칠 (0.59)	매우 거칠 (0.64)
입력가속도	sine파: 5Hz / 10초 / 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g 진폭 스위프파: 5Hz의 sine파 진폭을 점진적으로 증가시킴			

표 2. 시험 조건별 항복가속도

벽체단위중량 (kN/m ³)	18.5	26	23		
바닥면 (마찰계수)	매끈함 (0.56)		거칠 (0.59)	매우 거칠 (0.64)	
항복가속도(g)	0.43	0.40	0.42	0.44	0.47

그림에서 벽체가속도가 뒤채움 지반쪽으로 작용하는 경우(가속도의 (-)부호) 벽체가속도는 입력가속도보다 다소 증폭되어 최대크기가 0.6g가 되었지만 벽체가속도가 벽체 전면쪽으로 작용하는 경우(가속도의 (+)부호) 벽체의 미끄러짐이 발생하여 벽체가속도가 0.4g이상으로는 증가하지 않았다. 이와 같이, 벽체가 미끄러지기 시작할 때의 가속도인 0.4g가 벽체의 항복가속도이며, 표 2에 각 시험 조건별 항복가속도를 정리하였다. 표를 보면 모든 벽체가 0.4g이상의 항복가속도를 가지며, 벽체 바닥면 거칠기가 증가함에 따라 항복가속도 크기는 0.42g에서 0.47g로 증가하였으며, 벽체 단위중량이 18.5kN/m³에서 26kN/m³으로 증가함에 따라 벽체의 관성력이 증가하므로 항복가속도 크기는 0.43g에서 0.40g로 감소하였다.

입력가속도 진폭이 0.1g와 0.3g일 때에는 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않았다. 입력가속도 진폭이 0.4g일 때는 바닥면이 매우 거친 벽체를 제외한 모든 시험조건에서 벽체의 미끄러짐이 발생하였다. 이것은 벽체-지반 동적상호작용 효과때문에 입력가속도 진폭이 0.4g일 때 벽체가속도의 진폭은 0.4g이상으로 커졌기 때문이다. 입력가속도 진폭이 0.5g일 때는 모든 시험조건에서 미끄러짐이 발생하였다.

벽체가속도가 항복가속도 크기에 도달하여 미끄러짐이 발생하기 시작하면 뒤채움 흙에도 소성변형이 발생하게 된다. 이 때 뒤채움 흙의 강도가 저하되어 뒤채움 흙이 움직이기 쉬운 상태가 되므로 동적토압의 크기와

위상이 벽체의 미끄러짐 여부에 따라 다르게 변화하였다. 그러므로 본 연구에서는 실험결과를 벽체의 미끄러짐 발생 여부에 따라 2가지로 나누어 분석하였다.

3.2 배면 동적토압 분석

3.2.1 벽체의 미끄러짐 발생 전(입력가속도 진폭 : 0.1g, 0.3g)

그림 3은 벽체의 미끄러짐 변위가 발생하지 않았을 때의 전형적인 벽체가속도-동적토압 시간이력을 나타낸 것이다. 본 결과분석에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 동적토압을 점진적으로 변화하는 비진동 성분과 진동하는 진동 성분으로 나누어 분석하였다. 동적토압의 비진동 성분이 진동 초기에 증가하였는데 이것은 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않는 경우 벽체에 인접한 흙입자들이 진동하중에 의해 다져져서 동적토압이 증가하는 것으로 판단된다. 동적토압의 진동 성분은 배면지반쪽으로 작용할 때 증가하여 최대값을 가지고 벽체가속도가 벽체전면 방향으로 작용할 때 감소하여 최소값을 가졌다. 즉, 벽체의 미끄러짐이 발생하기 전에는 벽체 관성력과 동적토압은 180도 위상차를 유지하며 진동하였다. 이는 벽체가속도가 벽체 전면쪽으로 작용할 때 벽체의 변위가 인접 뒤채움 지반에 비하여 더 많이 발생하려는 경향 때문에 동적토압이 감소하고, 벽체가속도가 배면 지반쪽으로 작용할 때에는 벽체가 뒤채움 흙과 충돌하여 동적토압이 증가하기 때문으로 판단된다. 벽체 관성력과 동적토압간의 이러한 위상관계는 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않은 다른 시험 조건에서도 모두 동일하게 관찰되었다.

그림 4는 진동을 가하기 전의 정적 토압과 진동 중 발생한 동적토압의 비진동 성분을 더한 전체토압을 나타낸 것이다. 입력가속도 진폭이 0.1g일 때에는 동적토

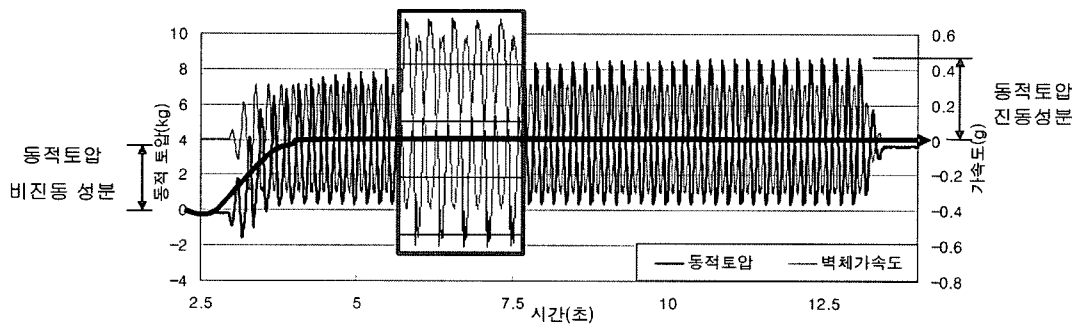


그림 3. 벽체 미끄러짐 발생 전의 벽체 가속도-동적토압 시간이력(입력가속도 진폭: 0.3g, 벽체 단위중량: 18.5kN/m³)

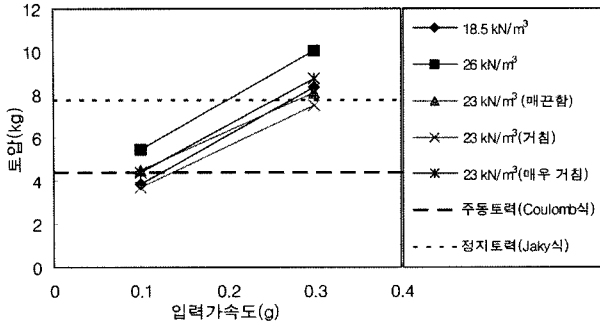
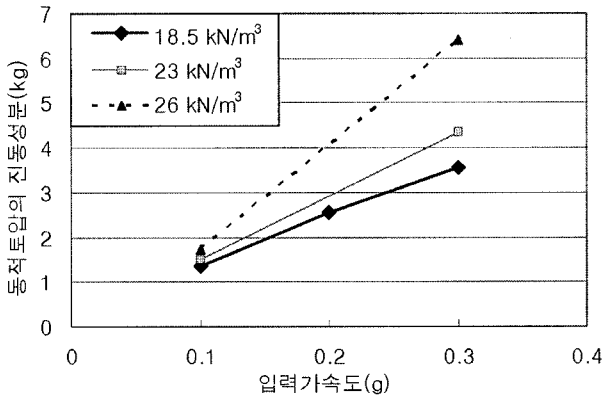
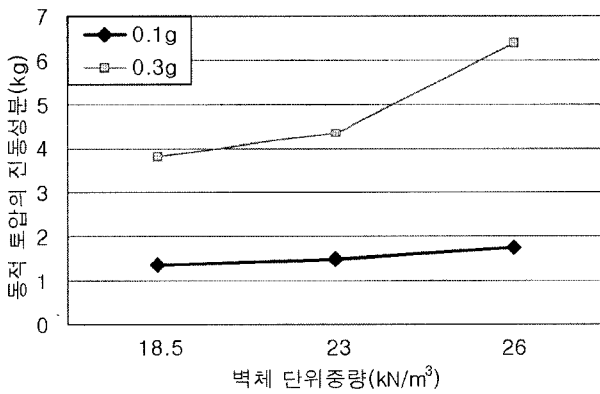


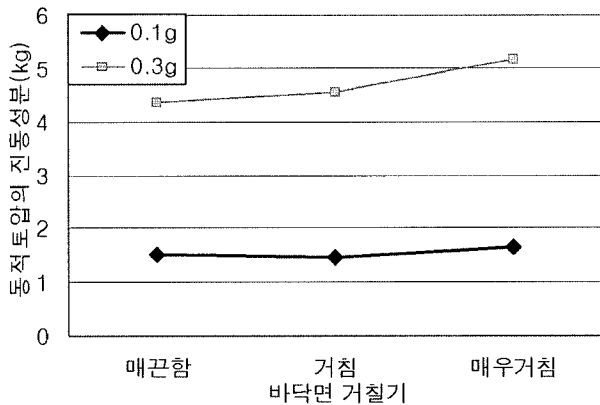
그림 4. 각 시험 조건별 전체토압의 크기



(a) 입력가속도 변화



(b) 벽체단위중량 변화



(c) 바닥면 거칠기 변화

그림 5. 동적토압 진동 성분의 진폭변화

압의 비진동 성분은 증가하지 않았으며, 이 때의 전체토압은 Coulomb 식으로 구한 주동토압 크기와 비슷하였다. 입력가속도 진폭이 0.3g인 경우에는 동적토압의 비진동 성분이 증가하여 전체토압이 Jaky(1944)의 공식 (수평 토압계수=1-sinφ, φ=흙의 내부마찰각)으로 구한 정지상태 토압과 거의 일치하였다. 이러한 현상은 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않는 경우 지진동이 가해지면 벽체에 인접한 뒤채움 흙의 다짐으로 인하여 뒤채움 흙의 상태가 주동상태에서 정지상태로 변화하기 때문에 발생하였다.

그림 5는 각각 입력가속도 진폭, 벽체 단위중량 그리고 바닥면 거칠기의 변화에 따른 동적토압 진동 성분의 진폭변화를 나타낸다. 그림 5(a)와 그림 5(b)의 결과에서 알 수 있듯이, 동적토압의 진폭은 입력가속도 진폭과 벽체의 단위중량이 증가함에 따라 증가하였는데 이것은 벽체관성력이 증가하여 벽체의 변위발생 경향이 커지기 때문이다. 또한, 그림 5(c)에서 알 수 있듯이 동적토압은 벽체 저면 거칠기에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.2.2 벽체의 미끄러짐 발생 후(입력가속도 진폭 : 0.4g, 0.5g)

그림 6은 벽체 단위중량이 23kN/m³이고, 입력가속도 진폭이 0.5g일 때 측정된 벽체가속도와 동적토압의 시간이력을 보여준다. 입력가속도 진폭이 0.5g인 경우에는 벽체의 횡방향 변위가 급격하게 발생하였다. 벽체 관성력이 벽체 배면쪽으로 작용할 때에는 동적토압이 벽체의 미끄러짐 발생 전과 마찬가지로 증가하였지만 벽체 관성력이 벽체 전면쪽으로 작용할 때에는 벽체 관성력과 동일한 위상을 가지는 작은 정점이 나타났다. 이러한 토압성분이 나타난 이유는 벽체의 미끄러짐이 급격히 발생할 때 뒤채움 흙이 움직이기 쉬운 상태가 되어

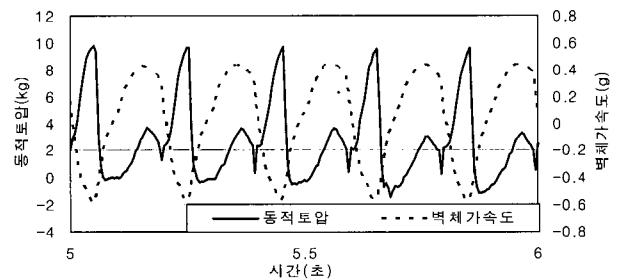


그림 6. 급격한 벽체 미끄러짐 발생시 동적토압과 벽체가속도간의 위상관계(변위속도: 11mm/sec, 벽체 단위중량: 23kN/m³, 입력가속도 진폭: 0.5g)

뒤채움 흙이 벽체를 밀어주는 현상이 나타났기 때문이다. 벽체 관성력과 동일한 위상을 가지는 이러한 정점은 크기는 작지만 벽체관성력이 벽체전면 방향으로 작용하여 벽체가 가장 불안정할 때 발생하므로 중요한 의미를 가진다.

그림 7은 벽체 단위중량이 23kN/m^3 이고, 입력가속도 진폭이 0.4g 일 때의 벽체가속도와 동적토압의 시간이력을 나타낸다. 이 때 벽체의 미끄러짐은 급격히 발생하지 않고 서서히 누적되어 나타났다. 그림을 보면 벽체 관성력이 벽체 전면쪽으로 증가할 때 약간의 토압증가는 관찰되었으나 벽체 미끄러짐 발생 전과 비슷하게 관성력과 동적토압의 위상차가 거의 180° 였으며, 벽체 관성력과 위상이 동일한 토압정점은 발생하지 않았다.

그림 8은 벽체 관성력이 벽체 전면방향으로 최대가 되었을 때 발생한 동적토압값들을 벽체 변위의 증가속도에 대하여 나타낸 것이다. 벽체 변위속도 1mm/sec 이하에서는 변위속도가 증가함에 따라 동적토압은 음의 값에서 양의 값으로 급격하게 증가하였다. 변위속도 1mm/sec 이상에서는 동적토압값이 거의 일정한 것으로 나타났는데 이것은 벽체의 변위속도가 일정값 이상으

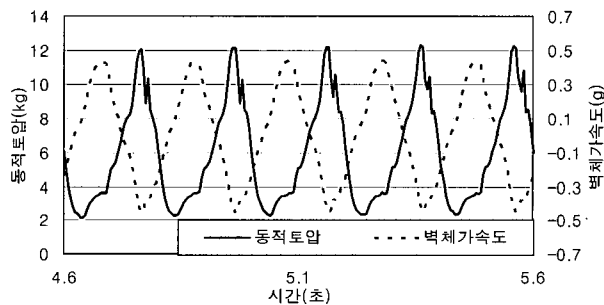


그림 7. 점진적인 벽체 미끄러짐 발생시 동적토압과 벽체가속도간의 위상관계(변위속도: 0.5mm/sec , 벽체 단위중량: 23kN/m^3 , 입력가속도 진폭: 0.4g)

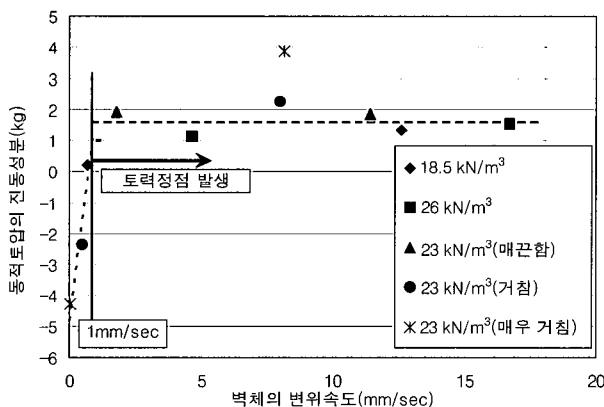


그림 8. 벽체 변위속도에 따른 동적토압의 변화

로 커지면 뒤채움 지반이 벽체를 밀어주는 효과가 계속적으로 증가하지 않기 때문으로 판단된다.

3.3 기존 토압식과의 비교

계측된 동압을 Coulomb식, Jaky의 정지상태 토압식 그리고 Mononobe-Okabe 식을 이용하여 계산한 토압과 비교하였다. 토압 계측값은 벽체가 가장 불안정한 순간인 벽체 관성력이 벽체전면방향으로 최대가 될 때의 값을 이용하였고 Mononobe-Okabe 식으로 토압을 계산할 때 이용된 수평방향 지진계수는 항만 및 어항시설의 내진설계표준서(1999)에 제시된 바와 같이 뒤채움 지반에서 계측된 가속도 최대값의 $1/2$ 값으로 결정하였다.

그림 9는 벽체 관성력이 벽체 전면 쪽으로 최대가 될 때의 동적토압 진동 성분의 측정값과 Mononobe-Okabe 식으로 구한 동적토압을 비교하여 나타내었다. 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않은 입력가속도 진폭 0.1g 와 0.3g 인 경우에는 관성력과 동적토압이 180° 의 위상차를 유지하기 때문에 동적토압 측정값은 (-)값을 가지고, 0.1g 에서 0.3g 로 입력가속도 진폭이 증가함에 따라 동적토압의 크기가 작아졌다. 입력가속도 진폭이 0.4g 와 0.5g 인 경우에는 벽체의 관성력과 동일한 위상을 가지는 작은 토압정점이 발생하여 동적토압 계측값이 증가하였다. Mononobe-Okabe 식으로 구한 동적토압값은 모든 입력가속도 크기에서 실제 계측값보다 크므로 Mononobe-Okabe 식으로 구한 토압은 동적토압의 상한값으로 판단된다.

그림 10은 정적토압과 동적토압을 더한 전체토압값과 Coulomb 식, Jaky 식 그리고 Mononobe-Okabe 식으로 구한 계산값을 비교하여 나타내었다. 입력가속도 진폭이 0.1g 인 경우 동적토압이 관성력과 180° 의 위상차를 가지고 진동 중에 동적토압 비진동 성분이 거의 발생

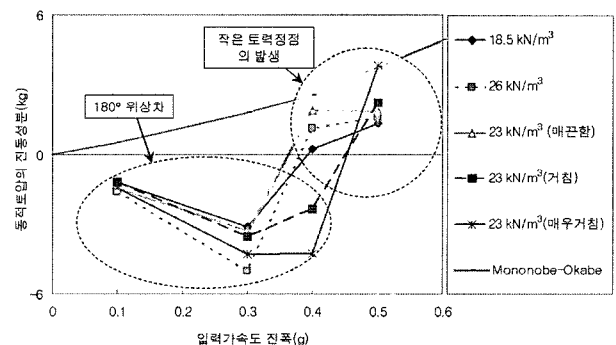


그림 9. 동적토압 진동 성분의 측정값과 Mononobe-Okabe 계산값의 비교

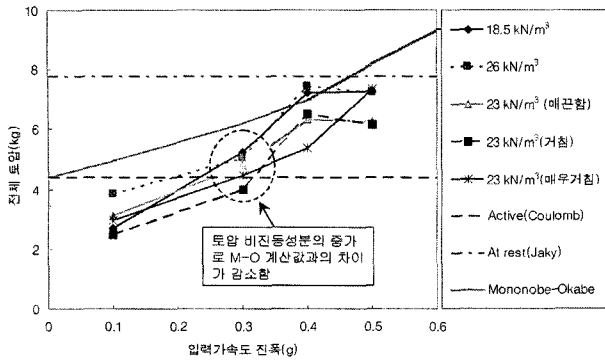


그림 10. 동적토압 측정값과 계산값의 비교

하지 않았기 때문에, 측정값은 Mononobe-Okabe 식과 Coulomb 식으로 산정한 주동토압보다 작은 값을 가졌다. 입력가속도 진폭이 0.3g인 경우에는 동적토압 진동 성분은 0.1g의 경우보다 감소하지만 동적토압의 비진동 성분이 증가하여 전체 크기는 0.1g의 경우보다 커졌다. 입력가속도 진폭이 0.4g인 경우에는 동적토압의 위상이 변화하고 벽체 관성력과 동일한 위상을 가지는 작은 토압정점이 발생하여 결과적으로 Mononobe-Okabe 식으로 계산된 값과 비슷해졌다. 입력가속도 진폭이 0.5g의 경우에는 모든 시험조건에서 벽체의 미끄러짐이 급격하게 발생하였으며 토압크기는 0.4g인 경우와 비슷하였다. 실제 측정값은 0.5g의 결과에서 보듯이 Mononobe-Okabe 식의 계산결과와는 달리 입력가속도 진폭이 증가함에 따라 계속적으로 증가하지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 옹벽에 대한 일련의 진동대 시험을 수행하여 입력가속도 진폭, 벽체 단위중량 그리고 바닥면 거칠기가 배면 동적토압 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 진동대 시험결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않는 경우, 벽체 관성

력과 동적토압은 180도 위상차를 가졌다. 또한, 입력가속도 진폭이 0.3g일 때 동적토압의 비진동 성분은 주동상태에서 정지상태로 변화하였다.

- (2) 벽체의 미끄러짐이 발생하지 않는 경우, 동적토압 진동성분의 진폭은 입력가속도 진폭이 커질수록 벽체 단위중량이 증가할수록 커졌다.
- (3) 동적토압의 위상은 벽체의 속도에 따라서 변화하였다. 벽체의 미끄러짐이 급격히 발생하는 경우 관성력과 동일한 위상을 가지는 작은 토압정점이 발생하였다. 그러나, 벽체의 속도가 작은 경우에는 동적토압은 관성력과 180도의 위상차를 유지하였다.
- (4) 동적토압의 크기는 벽체의 속도에 영향을 받았다. 벽체의 변위속도가 1mm/sec 이하인 경우에는 동적토압이 변위속도에 비례하여 급격하게 증가하였다. 변위속도가 1mm/sec 이상인 경우에는 동적토압의 크기가 거의 일정하였다.
- (5) Mononobe-Okabe 식으로 구한 동적토압은 동적토압의 상한값으로 판단된다.

참고 문헌

1. 항만 및 어항시설의 내진설계표준서 (1999), 해양수산부.
2. Coulomb, C.A. (1776), Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. Memoires de l'Academie Royale pres Divers Savants Vol.7.
3. Jaky, J (1944), "The coefficient of earth pressure at-rest", Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, pp.355-358.
4. Mononobe, N., and Matsuo, H. (1929), "On the determination of earth pressures during earthquake", Proc., World Engrg Conf., Vol. 9
5. Okabe, S. (1926), "General theory of earth pressures", Journal of the Japan Society of Civil Engineering, JSCE, Vol.12(1)
6. Watanabe K., Kobayashi Y., and Towhata I. (1999), "Shaking table tests on seismic earth pressure exerted on retaining wall model", Proc., the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.297-302

(접수일자 2005. 4. 21, 심사완료일 2005. 10. 10)