

중력식 옹벽에 작용하는 배면 동적 토력의 영향 인자 분석  
Analysis of influence factors on the seismic earth pressure  
acting on gravity walls

윤석재\*                  김성렬\*\*                  김명모\*\*\*  
Yoon, Suk Jae      Kim, Sung ryul      Kim, Myoung Mo

ABSTRACT

The Mononobe-Okabe method is generally used to evaluate the dynamic earth force for the seismic design of retaining walls. However, the Mononobe-Okabe method does not consider the effects of the dynamic interactions between the backfill soil and the wall. In fact, a phase difference exists between the inertia force and the seismic earth pressure. In this study, shaking table tests were performed on gravity walls retaining dry backfill sand to analyze the influence of several parameters (the unit weight of the wall, the input acceleration and base friction) on the development of the seismic earth pressure. The experiments revealed that the magnitude of the inertia force mobilized during seismic loading affected the seismic earth pressure. The difference in the phase angles between the inertia force and the seismic earth pressure was retained at 180 degrees before the wall failed but its magnitude changed significantly as the wall began to fail.

1. 서론

현재 옹벽의 내진설계시 벽체에 작용하는 토력을 평가하기 위한 방법으로 등가 정적 해석법인 Mononobe-Okabe(이하 M-O)방법이 널리 이용되고 있다. 이 방법은 정적인 Coulomb의 주동 흩쇄기에, 작용 관성력을 추가적인 등가정적 힘으로 고려하고 정적인 한계 평형 상태 개념을 이용하여 토력을 산정한다. 하지만 한계 평형 상태의 가정과 달리 지진하중에 의한 관성력과 배면 동적 토력간에는 위상차가 존재하고, 이 위상차는 벽체의 항복으로 인한 뒷채움 지반의 파괴여부에 따라 달라진다(K.Watanabe et al. 1999).

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정

\*\* 학생회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

\*\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

지금까지 지진시 토력 변화 메커니즘을 규명하기 위한 많은 연구가 진행되었으나 동적 상호작용의 복잡성으로 인해 동적 토력에 영향을 미치는 인자들이 명확히 밝혀지지 않고 있다. 본 연구에서는 건조 사질토를 뒷채움재로 사용한 중력식 벽체에 대하여 일련의 진동대 시험을 수행하여, 입력가속도 크기, 벽체 단위중량 그리고 바닥면 거칠기가 배면 토력 변화에 미치는 영향을 분석하고, 계측된 토력을 M-O 방법으로 산정된 토력과 비교하고자 한다.

## 2. 시험 절차

### 2.1 모형 제작 및 계측기 설치

시험에 이용된 진동대는 최대 테이블 가속도 1g, 최대 상재하중 5ton의 진동대로서, 여기에 길이 192cm, 폭 44cm, 높이 60cm의 아크릴 토조를 설치한 후 시험을 수행하였다. 토조의 진동 방향 양단에는 파의 반사를 최소화하기 위하여 5cm 두께의 스펀지를 설치하였다.

모형 벽체는 길이 17.7cm, 폭 42.2cm, 높이 27.5cm의 철제 강성벽체를 이용하였다. 토력이 가해지는 배면판과 벽체 본체 사이에 3개의 로드셀을 삼각형 형태로 벽체 상부에 1개, 하부에 2개를 설치하여 뒷채움토와 벽체의 동적 상호작용에 의한 토력을 측정하였다.

기초지반과 뒷채움 지반 구성에 이용된 모래는 건조 주문진 표준사로서 최대 건조단위중량( $\gamma_{dmax}$ )은 1.6ton/m<sup>3</sup>, 최소 건조단위중량( $\gamma_{dmin}$ )은 1.4 ton/m<sup>3</sup>이다. 기초지반과 뒷채움지반은 진동대를 이용하여 0.5g, 10Hz의 진동을 가하여 최대한 조밀하게 조성하였다. 모형제작 순서는 다음과 같다. 먼저 벽체를 위치시키기 전에 기초지반 높이까지 모래를 넣고 진동다짐한 후 모형 벽체를 설치하였다. 다음으로 고정판을 이용하여 벽체를 고정시킨 후 모래를 넣고 진동 다짐하여 뒷채움지반을 조성하였다. 진동다짐을 통해 얻어진 배면지반과 기초지반의 상대밀도는 약 80%, 이때 시료의 내부마찰각은 38.3°였다.

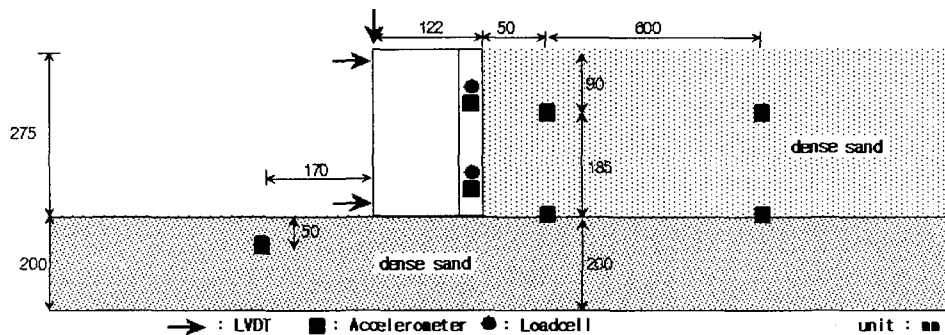


그림 1. 시험 단면 및 계측기 배치도

본 시험에는 로드셀, LVDT, 가속도계의 계측기가 사용되었으며 본 시험의 시험단면과 계측기 배치를 그림 1에 제시하였다. 먼저 벽체 배면에 작용하는 토력을 측정하기 위하여 3개의 로드셀을 벽체 본체와 배면판 사이에 설치하였다. 이때 측정값이 (+)이면 압축력을 의미하며, 지진하중을 가하기 전 정적 상태에서의 토력값을 측정된 후에 0으로 초기화하여 지진하중이 작용할때의 동적 토력을 계측하였다. 지반과 벽체의 응답 가속도 측정을 위하여 총 9개의 가속도계를 벽체에 3개,

지반내에 5개, 진동대에 1개씩 각각 설치하였다. 가속도가 벽체 전면으로 작용할때에 측정값은 (+) 값을 가진다. 마지막으로 벽체의 수평변위량, 연직변위량, 회전량을 측정하기 위하여 3개의 변위계(LVDT)를 설치하였다.

### 2.1 시험 종류

본 시험에서는 벽체 단위중량, 입력가속도 크기, 바닥면 거칠기의 세 가지를 인자로 하여 진동중 배면 동적 토력 변화를 관찰하였다. 벽체의 단위중량은 각각 1.85ton/m<sup>3</sup>, 2.3ton/m<sup>3</sup>, 2.6ton/m<sup>3</sup>로서 벽체 관성력의 증가가 배면 토력 변화에 미치는 영향을 관찰하였고, 단위중량 2.3ton/m<sup>3</sup>의 벽체에 대해서는 거칠기가 다른 2종류의 사포를 바닥에 부착하여 바닥면 거칠기가 토력변화에 미치는 영향을 관찰하고자 하였다.

입력 가속도는 주파수 5Hz, 진동 지속시간 10초인 정현파이며, 최대진폭을 0.1g, 0.3g, 0.4g, 0.5g로 변화시켜 입력가속도 크기가 배면 토력에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 벽체가 미끄러지기 시작하는 항복 가속도의 측정을 위하여 가속도 진폭을 점진적으로 증가시키는 진폭 sweep 시험을 각 벽체 종류별로 1회 실시하였다. 본 시험 조건들은 표 1에 각 벽체 종류별 항복가속도와 함께 정리하였다.

### 3. 시험 결과 및 분석

그림 2는 단위중량 2.6ton/m<sup>3</sup> 벽체에서의 입력 가속도 0.5g가 작용할 때의 입력 가속도와 벽체 가속도를 도시한 것이다. 벽체 가속도가 벽체 배면지반을 향하여 작용할 때(이하 수동 방향 관성력 작용시) 벽체 가속도는 다소 증폭되어 최대 가속도가 0.6g에 이르고 있지만 벽체 가속도가 벽체 전면을 향하여 작용하는 경우에는(이하 주동 방향 관성력 작용시) 벽체의 미끄러짐(항복)으로 인해 벽체가속도가 0.4g 이상 증가하지 않는다. 이때 벽체의 주동방향 최대 가속도를 벽체의 항복가속도로 정의하며, 표 1에 각 시험 조건별 항복가속도를 제시하였다. 벽체의 항복가속도는 0.4g에서 0.46g 사이의 값을 가졌으며, 바닥면 거칠기를 증가시킨 경우에는, 바닥면 마찰 저항의 증가로 인하여 보다 높은 가속도 수준에서 벽체가 항복하였다. 지반 응답에 따른 가속도 증폭에 의해 벽체 가속도가 입력 가속도에 비해 다소 증폭되었으며, 이러한 증폭현상으로 인해 입력 가속도 크기가 0.4g 일때 바닥면이 매우 거친 경우를 제외한 모든 경우에서 벽체가 파괴되었다.

표 1. 시험 조건 및 항복가속도

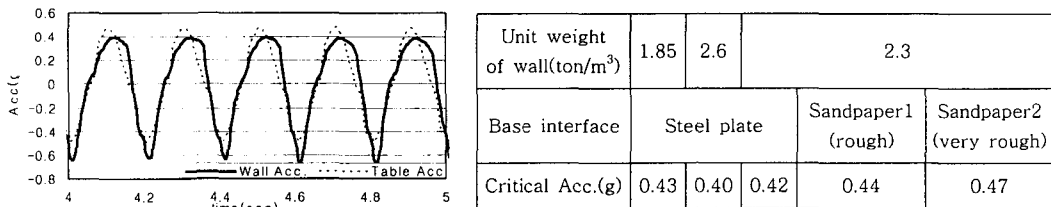


그림 2. 항복가속도(단위중량 2.6ton/m<sup>3</sup>)

\* 0.1g, 0.3g, 0.4g, 0.5g. sweep test for each type of wall

벽체가 항복가속도에 이르러 미끄러짐이 발생하기 시작하면 벽체 배면 지반에도 소성 파괴가 발생하게 되는데, 이는 곧 배면 지반의 강성 저하를 유발하여 진동중 배면 동적 토력이 벽체 항복

전과는 다르게 변화하게 된다. 그러므로 배면 동적 토력을 분석함에 있어 벽체의 항복 여부는 중요한 의미를 가지며, 본 논문에서는 시험결과를 벽체 항복전과 벽체 항복후로 나누어 각 시험 인자가 배면 동적 토력에 미치는 영향을 분석하였다.

### 3.1 벽체 항복전(0.1g, 0.3g)

입력가속도 크기가 0.1g와 0.3g인 경우, 벽체의 항복은 일어나지 않았다. 그림 3은 벽체 항복 전의 전형적인 가속도-배면토력 시간이력을 나타낸 것이다. 그림 3에서 보는 바와 수동 방향 관성력이 작용할 때 토력은 증가하여 최대정점을 보이고 수동 방향 관성력이 감소하며 주동 방향 관성력으로 바뀔때 토력은 계속 감소하여 최소값을 보인다. 즉, 벽체 항복전에 벽체 가속도(관성력)와 배면 토력은 180도 위상차를 유지한다. 이는 주동 관성력이 작용할 때 벽체의 주동방향 변위가 인접 뒷채움 지반에 비하여 많이 발생하고, 수동 관성력이 작용할 때 벽체가 뒷채움 지반과 충돌하기 때문으로 판단된다. 주목할 것은 관성력이 벽체의 항복을 유발하는 방향(이하 주동방향)으로 작용할때에, 벽체와 뒷채움 지반의 동적인 상호작용에 의하여 토력은 오히려 감소하고 있다는 사실이다.

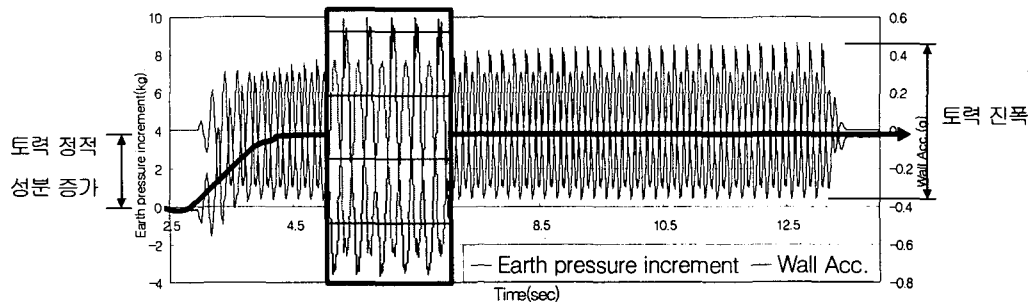


그림 3. 배면지반 파괴전의 가속도-토력 시간이력

그림 3을 보면 토력이 진동 초기에 전체적으로 증가(토력 정적 성분의 증가)하고 있음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 작은 지진하중에 의하여 벽체에 소성변위는 발생하지 않는 반면, 벽체에 인접한 뒷채움 지반의 흙입자에 지진하중에 의한 재배열이 발생되기 때문으로 판단된다.

그림 4, 그림 5, 그림 6은 각각 입력 가속도, 벽체 단위중량, 바닥면 거칠기를 변화시켰을 때의 토력 정적 성분의 증가량을 보여주고 있다. 그림 4는 단위중량  $1.85t/m^3$ 의 벽체에 대하여 입력가속도 크기를 증가시켰을 때에 토력 계측값을 보여주며, 토력 정적 성분의 증가량은 입력가속도 크기가 커질수록 증가하였다. 그림 5는 입력가속도 0.3g일 때에 벽체 단위중량 변화에 따른 토력 계측값을 나타낸 것으로, 벽체 단위 중량 변화에 무관하게 토력 정적 성분의 증가는 거의 일정하게 나타났다. 그림 6은 입력가속도 0.3g일 때 바닥면 거칠기에 따른 토력 계측값을 도시한 것으로, 바닥면 거칠기와는 무관하게 토력 정적 성분이 거의 같은 크기로 증가하였다. 결과적으로 진동중에 토력 정적 성분의 증가량은, 입력 가속도 크기에 비례하여 증가되며 벽체의 단위중량, 바닥면 거칠기에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 제시된 결과 외의 시험에서도 모두 같은 경향성을 나타내었다.

그림 7은 진동을 가하기 전의 정적 토력 측정값에 진동중 발생한 토력 정적 성분 증가량을 더

하여 토력 정적 성분의 전체 크기를 나타낸 것이다. 입력가속도 0.1g일 때에는 그림 4에서와 같이 토력 정적 성분의 증가는 거의 나타나지 않았으며 정적 성분의 크기는 Coulomb의 방법으로 구한 주동토력과 비슷하였다. 입력가속도 0.3g의 경우에는 정적 성분이 상당히 증가하였으며, 진동중 증가된 정적 성분의 크기는 Jacky의 공식으로 구한 정지토력에서 Coulomb 주동토력을 뺀 값과 거의 일치하였다.

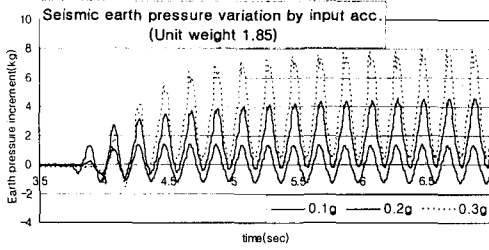


그림 4. 입력가속도별 토력 정적 성분 증가

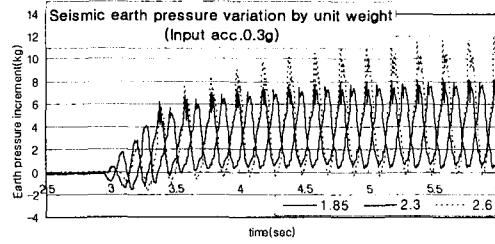


그림 5. 벽체 단위중량별 토력 정적 성분 증가

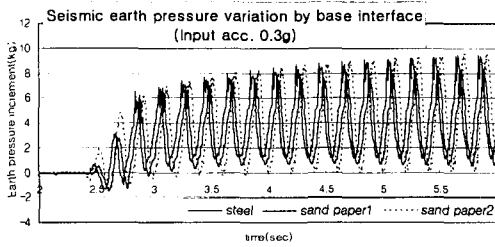


그림 6. 바닥면 종류별 토력 정적 성분 증가

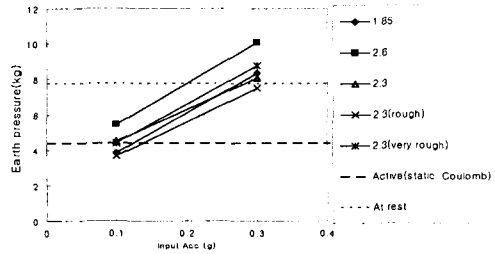


그림 7. 각 시험 조건별 정적 토력 성분 크기

그림 8 ~ 그림 10은 각각 입력가속도, 벽체 단위중량, 바닥면 거칠기에 따른 진동중 토력진폭의 변화를 나타낸다. 입력 가속도 크기가 증가할수록 토력 진폭이 증가하였는데, 이것은 입력가속도가 증가하면 벽체 관성력이 증가하여 주동 방향 관성력 작용시 벽체의 변위가 증가하므로 토력 감소가 커지고 반대로 수동 방향 관성력 작용시 배면 지반을 밀어주는 힘이 증가하여 토력 증가가 커지기 때문이다. 벽체 단위중량을 변화시킨 경우에도, 입력가속도를 증가시킨 경우와 마찬가지로, 벽체 단위중량의 증가에 따른 벽체 관성력의 증가로 인해 토력 진폭이 증가하였다. 바닥면 거칠기의 변화는 토력 진폭에 대해서 이렇다 할 경향성을 나타내지 않았다. 결과적으로 지진하중에 의한 토력 진폭은 벽체 관성력의 크기에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

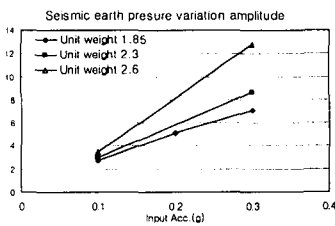


그림 8. 토력진폭 변화(입력가속도)

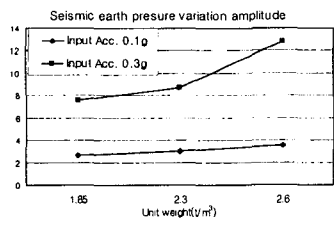


그림 9. 토력진폭 변화(벽체 단위중량)

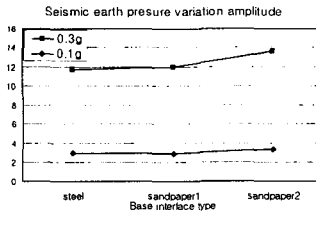


그림 10. 토력진폭 변화(바닥면 거칠기)

### 3.2 벽체 항복후(0.4g, 0.5g)

입력 가속도 크기가 0.4g일때 벽체의 응답가속도는 다소 증폭되어 나타났으며, 이로 인해 바닥면이 매우 거친 벽체를 제외한 모든 벽체에 미끄러짐이 발생하며 파괴되었다. 입력 가속도 크기가 0.5g인 경우에는 모든 벽체가 급격한 변위를 일으키며 파괴되었다.

그림 11은 단위 중량 2.3ton/m<sup>3</sup>인 벽체를 입력가속도 0.5g의 지진파로 진동시켜 벽체가 파괴되었을때의 벽체 가속도와 배면 토력의 시간이력을 나타낸 것으로 이때 벽체는 항복 가속도를 훨씬 초과하는 높은 벽체 가속도로 인해 벽체가 급격한 변위를 일으키며 파괴되었다. 관성력이 수동방향(벽체가속도가 (-)의 부호를 가짐)으로 작용할때 벽체 가속도와 배면 토력은 벽체 항복전과 마찬가지로 180도의 위상차를 유지하고 있으나 관성력이 주동방향(벽체가속도가 (+)의 부호를 가짐)으로 작용할때 벽체 가속도 방향과 동일한 작은 토력 정점(이하 주동영역 토력정점)이 나타났다. 이는 매우 큰 가속도가 작용하여 벽체가 급격히 파괴될때, 배면 지반도 파괴가 발생하면서 움직이기 쉬운 상태가 되어 주동 방향 관성력이 작용할때에 벽체보다 뒷채움 지반이 더 많이 움직이면서 벽체를 뒤에서 밀어주기 때문에 나타나는 현상이다. 주동영역 토력정점의 크기는 수동 방향 관성력이 작용할 때 나타나는 토력정점에 비해 상대적으로 작지만, 관성력이 벽체안정에 불리한 주동방향으로 작용할 때 나타나기 때문에 중요한 의미를 가진다.

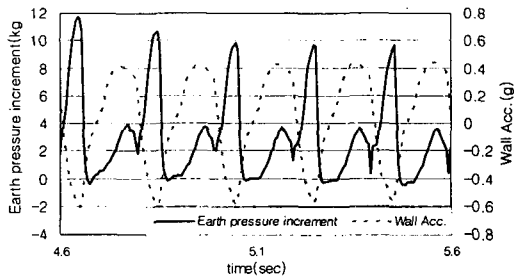


그림 11. 급진 파괴시 위상

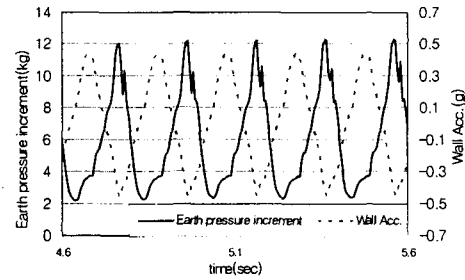


그림 12. 점진 파괴시 위상

그림 12는 벽체 단위 중량 2.3ton/m<sup>3</sup>인 벽체에 입력 가속도 0.4g의 지진파로 진동시켰을때의 벽체 가속도와 배면 토력 변화를 도시한 것으로, 벽체에 미세한 변위가 서서히 누적되어 파괴가 진행되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 벽체 항복전과 유사하게 관성력과 토력의 위상차가 거의 180도를 유지하고 있으며, 벽체의 파괴가 급격히 진행되는 경우에 나타났던 주동영역에서의 토력정점은 나타나지 않았다.

표 2. 시험조건별 동적 주동 토력 크기(주동 방향 관성력이 최대일때)

Unit weight of wall(ton/m <sup>3</sup> )	1.85	2.6	2.3		
Base interface	Steel plate			Sandpaper1 (rough)	Sandpaper2 (very rough)
Dynamic active earth pressure(kg)(0.4g)	1.61	1.16	1.94	3.35	no failure
Dynamic active earth pressure(kg)(0.5g)	1.36	-0.39	1.87	2.27	3.88

표 2는 각 시험 조건별로 벽체 항복시 주동 관성력이 최대일때의 동적 토력의 측정값을 정리한 것이다. 벽체 단위중량과 입력가속도 크기에 대하여 뚜렷한 경향성은 나타나지 않았으며, 다만 바

닥면 거칠기가 증가함에 따라 주동영역에서의 토력정점도 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이는 바닥면이 거칠수록 벽체의 변위가 억제되어 파괴된 배면 지반에 비해 상대적으로 더 작은 변위가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 기존 토압식으로 구한 토력과의 비교

진동대 시험을 수행하여 측정된 토력값들을 정적인 Coulomb식, Jacky의 정지토압식, 그리고 M-O 방법을 이용하여 산정한 토력과 비교하였다. 벽체가 파괴에 가장 취약한 순간은 관성력이 주동방향으로 최대일때이므로 이때의 동적 토력값에 진동 전의 정적 토력값을 더하여 계산값과 비교해 보았다. M-O 방법으로 토력을 계산할 때 필요한 수평방향 지진계수는 국내 내진 시방서에 제시된 바와 같이 지반 배면에 설치된 가속도계의 최대 응답 가속도 값의 1/2을 취하여 이용하였다.

그림 13에 토력 비교 결과를 도시하였다. 입력 가속도 0.1g의 경우 시험 토력 측정값은 M-O 방법과 Coulomb의 방법으로 산정한 주동토압보다 작은 값을 가졌다. 이는 벽체 항복 전에는 배면 동적 토력이 관성력과 180도의 위상차를 유지하기 때문에 관성력이 주동방향으로 작용할때 토력이 최소값을 가지기 때문이다. 또한 0.1g의 경우 진동중에 토력 정적 성분의 증가가 거의 나타나지 않았기 때문이기도 하다. 반면에 0.3g의 경우에는 입력 가속도 크기의 증가로 인한 토력 감소폭의 증가에 비해 진동중 토력 정적 성분의 증가가 상대적으로 크게 나타났기 때문에 0.1g의 경우보다 큰 토력값을 나타냈으며 그 크기는 정적인 주동 토력에 근사하였다. 0.4g 입력가속도 하에서는 대부분의 경우에 벽체항복으로 인한 주동영역에서의 토력증가의 영향으로 최대 주동 관성력 작용시의 토력이 증가하였고 이때 동적 주동 토력의 크기는 M-O 예측치에 근사하였다. 단, 바닥면이 매우 거친 벽체에 0.4g 가속도가 작용할 때에는 0.3g의 결과와 마찬가지로 토력 정적 성분이 증가하여 토력이 증가되었을뿐 벽체가 파괴되지는 않았다. 모든 벽체가 급격하게 파괴에 이른 가속도 크기 0.5g의 경우에 토력은 가속도 크기 0.4g의 결과와 비슷한 크기를 가지거나 다소 감소하였다. 이는 입력가속도가 0.5g로 증가함에 따라서 벽체의 파괴가 급격하게 진행되어 주동영역에서의 토력증가가 억제되기 때문으로 판단된다.

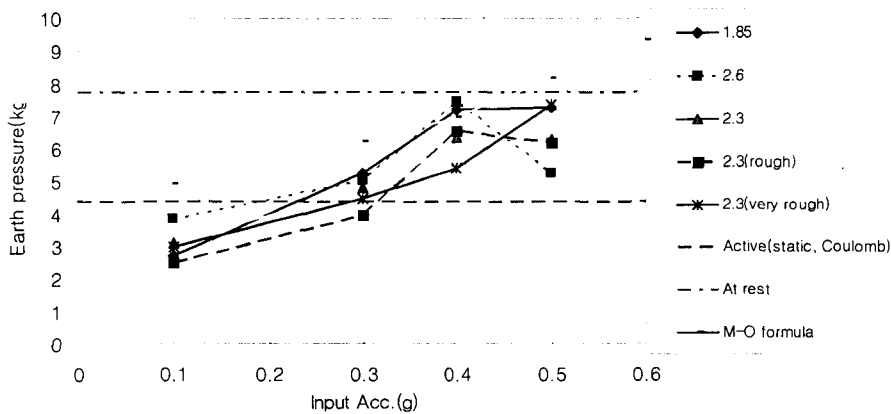


그림 13. 측정 토력과 기존 토력의 비교

측정된 토력과 기존 토력 산정 방법을 이용하여 구해진 토력을 비교해본 결과, 관성력이 주동방

향으로 작용할때의 작용 토력은 뒷채움 지반의 파괴를 유발하지 않는 낮은 가속도 수준에서는 M-O 예측치보다 작게 나타났으며, 벽체가 항복에 이르면 이로 인한 주동영역에서의 토력증가로 인하여 M-O 예측치와 비슷하지만, 0.4g보다 더 큰 입력가속도를 가하였을때 토력은 더 이상 증가하지 않았다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 중력식 옹벽에 대하여 일련의 진동대 시험을 수행하여, 입력가속도 크기, 벽체 단위중량 그리고 바닥면 거칠기가 배면 토력 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 진동대 시험결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 벽체의 항복전 벽체 관성력과 배면 동적 토력은 180도 위상차를 보인다. 즉, 벽체 관성력이 배면 토체쪽으로 작용할 때 배면 동적토력은 증가하여 최대 토력정점이 나타나고, 벽체 관성력이 방향이 바뀌어 전면벽체쪽으로 작용할 때 배면 동적토력은 감소하여 최소값을 보인다.
2. 벽체의 항복이 발생하지 않는 경우 진동 중에 토력의 정적 성분이 증가하는 현상이 나타났다. 이는 상대적으로 작은 지진하중에 의하여 벽체에 소성변위는 발생하지 않는 반면, 벽체에 인접한 뒷채움 지반의 흙입자에는 지진하중에 의한 재배열이 발생되기 때문으로 판단된다. 정적 성분의 증가량은 입력가속도 크기에 비례하여 증가하였으며, 벽체 단위중량과 벽체 바닥면 거칠기에는 큰 영향을 받지 않았다. 입력 가속도 크기가 0.1g인 경우에 토력 정적 성분의 증가는 거의 관찰되지 않았으나, 0.3g의 경우에는 상당한 정적 성분의 증가가 나타났으며 증가된 정적 토력의 크기는 Jacky의 방법으로 구한 정지토력값에 근사하였다.
3. 벽체의 항복이 발생하기전 동적 토력의 진폭은 입력가속도 크기가 커질수록, 벽체 단위중량이 증가할수록 커졌으며, 바닥면 거칠기는 토력 진폭에 큰 영향을 미치지 않았다. 즉, 벽체 관성력의 크기가 동적 토력의 진폭에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
4. 벽체가 항복에 이르면 뒷채움 지반 역시 파괴되어, 동적 토력은 벽체 항복 전과는 다른 형태를 보인다. 벽체가 급격한 변위를 일으키며 파괴되는 경우(0.5g의 입력가속도)에는 관성력이 벽체 배면 방향으로 작용할 때 나타나는 최대 토력정점 외에 관성력이 벽체 전면방향으로 작용할 때에도 토력이 증가하여 작은 토력정점이 나타났다. 반면에 벽체 변위가 서서히 누적되며 파괴가 진행되는 경우(0.4g의 입력가속도)에는 이러한 토력정점은 나타나지 않았으며 벽체 항복전과 유사하게 관성력과 토력의 위상차가 거의 180도를 유지하였다.

#### 참고문헌

1. 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서, 해양수산부, 1999.
2. E. Cascone, S. L. Grasso and M. Maugeri "Dynamic model tests on L-shaped gravity retaining walls" Proc. 12th World Conference On Earthquake Engineering, Auckland, 2000.
3. Kramer, S. L., "Geotechnical earthquake engineering", Prentice Hall, 1996.
4. K. Watanabe, Y.Kobayashi & I.Towhata, "Shaking table tests on seismic earth pressure exerted on retaining wall model" Earthquake Geotechnical Engineering, Proc. the Second International Conference on, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, 1999, pages 297-302