

지진시 배면지반 조건이 중력식 안벽의 하중성분에 미치는 영향

Influence of Backfill Condition on Force Components of Gravity Walls During Earthquakes

김 성 렬¹ Kim, Sung-Ryul
 황 재 익² Hwang, Jae-Ik
 김 명 모³ Kim, Myoung-Mo

Abstract

During earthquake, force components acting on quay walls consist of inertia force, earth pressure and water pressure. The earth pressure is largely influenced by the backfill condition such as soil density and the installation of gravel backfill. Therefore, shaking table tests were performed by using four different model sections, which were designed by varying the soil density and the backfill materials. The magnitude and the phase of force components acting on quay wall were analyzed. Test results showed that the gravel backfill and the soil compaction were effective to reduce the excess pore pressure in backfill and the magnitude and phase of backfill thrust were much influenced by the excess pore pressure in backfill. When the input acceleration was 0.10 g, the average ratios of the inertia force, the front dynamic water force and the thrust to the total force were 64%, 21% and 16%, respectively. As the excess pore pressure increased, the ratio of the thrust to the total force increased.

요 지

지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분은 벽체 관성력, 토압 그리고 수압으로 구성되어 있는데 이러한 하중성분은 배면지반의 밀도, 자갈 뒤채움 등 배면지반 조건에 큰 영향을 받게 된다. 그러므로, 본 연구에서는 배면지반의 다짐정도, 자갈 뒤채움재의 설치여부를 달리한 총 4가지 배면지반 조건에 대한 진동대 실험을 수행한 후, 중력식 안벽에 작용하는 벽체 관성력, 수압 그리고 배면토압의 크기와 위상관계를 분석하였다. 그 결과 자갈 뒤채움과 지반 다짐이 과잉간극수압 발생을 억제하는데 효과적이며, 배면 동적작용력의 크기와 위상은 과잉간극수압의 크기에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 입력가속도 진폭이 0.1g 일때 전체하중에서 관성력, 전면동적수압 그리고 배면 작용력이 차지하는 비율은 각각 64%, 21% 그리고 16%로 나타났으며 과잉간극수압의 크기가 증가함에 따라 전체합력에서 배면작용력이 차지하는 비율이 증가하였다.

Keywords : Earthquake, Force component, Gravel backfill, Liquefaction, Quay wall, Shaking table test

1. 서 론

1995년 고베 지진에 의하여 항만의 중력식 안벽 구조

물에 막대한 피해가 발생한 이후 중력식 안벽의 파괴원인을 분석하기 위해 전세계적으로 진동대 실험 (Ghalandarzadeh et al, 1998; Iai and Sugano, 1999;

1 정회원, 동아대학교 토목해양공학부 전임강사 (Member, Full-time lecturer, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ., sungryul@dau.ac.kr)

2 정회원, 서울대학교 BK 21 박사후 연구원 (Member, Post Doc. Researcher, Brain Korea 21)

3 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 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Kohama 2000) 및 원심력 모형실험(Kuwano et al, 1999; Dewoolkar et al, 2000) 그리고 각종 수치해석(Iai, 2001)을 수행하여 중력식 안벽의 지진거동을 분석하려는 연구가 많이 수행되어 왔다. 국내에서도 항만구조물의 내진설계가 일반화되고 항만구조물의 건설이 증가하면서 내진설계에 대한 관심이 높아지고 있으며 진동대 모형실험(김성렬 등, 2000; 김성렬 등, 2003; 황재익 등, 2004)등을 수행하여 중력식 안벽의 지진거동을 분석하고 있다. 중력식 안벽과 관련된 대부분의 논문들은 안벽과 배면지반간의 동적상호작용 거동 및 상사법칙의 검증 등에 대하여 중점적으로 연구되어 왔다.

안벽구조물의 정밀한 내진설계를 위해서는 안벽하중성분에 대한 연구가 필요하다. 안벽하중성분은 배면지반의 밀도 및 자갈 뒤채움재 설치 등 배면지반 조건에 큰 영향을 받게 된다. 그러나, 이러한 배면지반 조건이 안벽 하중성분에 미치는 영향에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

중력식 안벽에 작용하는 하중성분은 평상시 배면 정적토압, 벽체 전면과 배면의 정적수압이 있으며, 지진시에는 배면 동적토압, 전면과 배면의 동적수압, 그리고 벽체의 관성력 등이 추가로 발생하게 된다. 이러한 하중성분 중에서 특히 배면 동적토압은 배면지반의 밀도, 자갈 뒤채움재 설치 등 배면지반 조건에 많은 영향을 받게 된다. 지진시 배면지반내에 과잉간극수압이 발생하게 되면 지반의 강성이 저하되어 배면토압이 증가하게 되고, 자갈 뒤채움재가 있는 경우에는 투수성 증가 및 강성 증가로 배면토압이 감소할 것이다. 배면지반조건이 진동중 안벽 하중조건에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 4가지 배면지반 조건에 대하여 토압 및 수압 등 안벽의 하중성분들을 계측함으로써 배면지

반 조건이 안벽의 하중성분들에 미치는 영향을 분석하였다. 로드셀, 수압계 등의 계측기를 설치하여 배면 작용력 및 벽체 전면과 배면에 작용하는 수압을 측정하였다. 배면지반 조건은 지반이 느슨한 경우와 조밀한 경우 그리고 벽체 배면에 자갈 뒤채움재가 있는 경우와 없는 경우의 총 4가지 조건에 대한 실험을 수행하였다.

2. 진동대 실험 프로그램

본 실험은 1-g 상태하의 실험이므로 지반의 구속압이 매우 작다. 원지반은 매우 높은 구속압을 받으므로 진동중 압축성 거동을 보일 가능성이 높다. 그러므로, 본 실험에서는 낮은 구속압하에서 지반의 압축성 거동을 나타내기 위해 느슨한 배면지반의 경우 이보다 최대한 느슨하게 조성하였으며, 조밀한 배면지반의 경우 상대적으로 조밀하게 조성하였다.

그림 1은 실험단면, 계측기 배치 그리고 입력 지진파를 보여준다. 실험에 이용된 계측기는 간극수압계, 가속도계, LVDT 그리고 로드셀 등이다. 로드셀은 모형안벽 본체와 배면판 사이에 삼각형 형태로 3개를 설치하여 배면 작용력을 측정하였다. LVDT는 철선의 길이변화를 측정하는 방식으로 고정된 LVDT로부터 벽체 3곳의 상대적 길이변화를 측정하여 벽체의 횡변위, 침하량 그리고 회전각 등을 계산하였다. 표 1은 진동대 실험계획을 요약한 표이다. 입력지진파의 진동수는 5Hz이고 진폭은 초기 10초 동안에는 선형적으로 증가시키다가 나머지 10초 동안에는 최대진폭을 일정하게 유지하였다(그림 1(b)). 입력가속도의 최대진폭은 0.1g, 0.2g, 0.3g로 변화시켰다. 본 실험에서는 일반적으로 사용하는 수중포설 방법의 원리를 사용하되, 실제 현장에서 준설된 모래로 매립하는 경우에는 포화된 모래 내지는 젖은 모

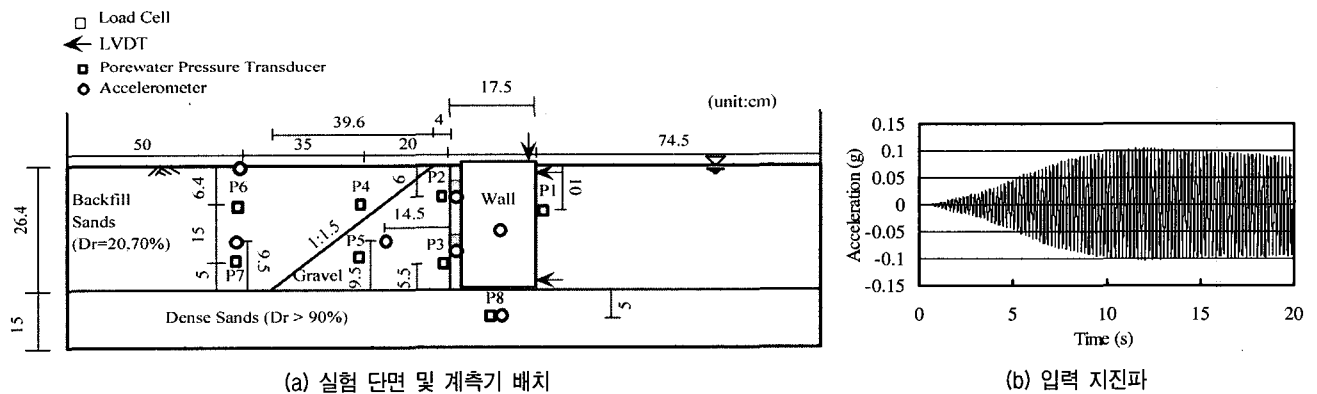


그림 1. 실험단면, 계측기 배치 및 입력 지진파

표 1. 진동대 실험계획

모형벽체	단위중량 : 25kN/m ³ 치수(L×W×H, cm) : 17×42×26			
토조	치수(L×W×H, cm) : 192×44×60			
입력 가속도	진폭	진동수	지속시간	
			sine 파	0.10g, 0.20g, 0.30g
모래	인천지역 모래	D ₅₀	γ _{max} (dry)	γ _{min} (dry)
		0.32mm	16.6kN/m ³	14.0kN/m ³
자갈	입자크기 : 2mm - 20mm			
모형지반의 상대밀도	배면지반		기초지반	
	20%, 70%		90%	

래로 살포하기 때문에 본 실험에서도 미리 포화된 모래를 사용하여 포설하는 방법을 선택하였다. 뒤채움 지반의 상대밀도는 지표면 위의 물높이를 조절하여 조정하였다. 뒤채움 지반을 조밀하게 조성하는 경우에는 지표면 위의 물높이를 약 4cm로 일정하게 유지하면서 모래를 낙하시켰고, 느슨하게 조성하는 경우에는 토조에 물을 최대한 가득채운 후 모래를 낙하시켰다. 실험중 깊이 별로 여러 위치에 캔을 설치하여 밀도를 조사한 결과 상대밀도의 차이가 거의 없음을 확인하였다. 느슨한 모래층 하부의 조밀한 모래층은 진동대로 가속도 크기 0.4g, 5Hz의 sine파로 약 1분 동안 진동을 가하여 조성하였다. 하부 조밀한 기초지반의 상대밀도는 약 90%이고, 뒤채움 지반의 경우 조밀한 지반은 약 70%, 느슨한 지반은 약 20%이다. 모형벽체는 높이 26.4cm, 길이 17.5cm, 그리고 폭 42cm의 철판으로 만들어졌으며 벽체의 전체 단위중량이 25kN/m³이 되도록 제작하였다. 토조의 강성이 지반 및 물의 진동에 영향을 미치지 않도록 진동방향의 토조경계면에 진동을 흡수하도록 5cm 두께의 스펀지를 부착하였고, 수파의 반사를 막기 위해 철부스러기를 이용하여 수파감쇄장치를 제작하여 설치하였다. 실험조건은 배면지반이 느슨한 경우와 조밀한 경우, 그리고 배면 뒤채움 자갈이 있는 경우와 없는 경우의 총 4가지이다.

3. 실험결과

3.1 과잉간극수압 측정결과

입력가속도가 0.1g일 때에는 모든 경우에 대하여 배면지반내 과잉간극수압비의 최대크기가 0.10 정도로 과잉간극수압 크기가 매우 작았다. 그림 2~그림 5는 입

력가속도 진폭이 0.2g일 때의 배면지반내 최대 과잉간극수압비 분포도를 보여준다. 자갈 뒤채움이 없는 경우 배면지반에서 액상화가 발생하였는데 지반이 조밀한 경우에는 지표 근처에서만 액상화가 발생하여 느슨한 배면지반의 경우와 비교하여 액상화 발생영역이 감소하였다. 벽체인접 지반에서의 최대 과잉간극수압비는 자갈 뒤채움이 있을 때 자갈 뒤채움이 없는 경우에 비하여 느슨한 지반인 경우 0.86에서 0.23으로 약 73% 감소

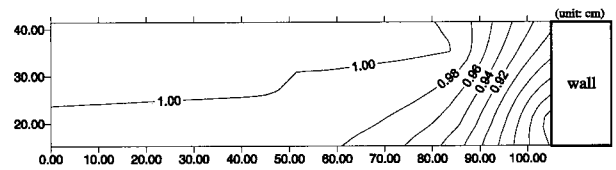


그림 2. 과잉간극수압비 분포도(자갈 뒤채움X/느슨/0.2g)

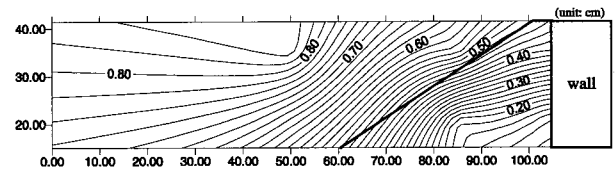


그림 3. 과잉간극수압비 분포도(자갈 뒤채움O/느슨/0.2g)

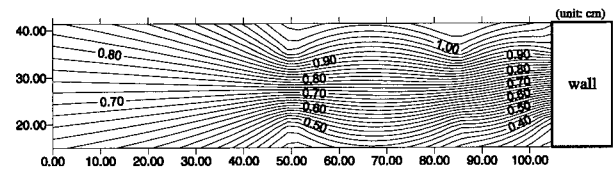


그림 4. 과잉간극수압비 분포도(자갈 뒤채움X/조밀/0.2g)

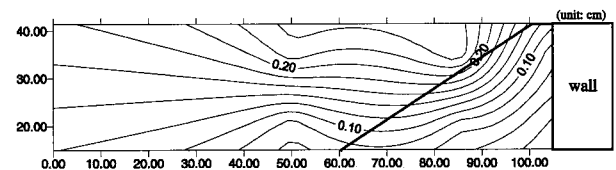


그림 5. 과잉간극수압비 분포도(자갈 뒤채움O/조밀/0.2g)

하였고 조밀한 지반인 경우에는 0.64에서 0.06으로 약 90% 감소하였다. 이러한 현상은 자갈의 배수효과로 과잉간극수압 발생이 억제되었기 때문으로 판단된다. 조밀한 지반에 자갈 뒤채움이 있는 경우는 자갈의 배수효과와 조밀한 지반의 다짐때문에 과잉간극수압 크기가 가장 작게 발생하였다.

3.2 배면 동적작용력과 평균 과잉간극수압 측정결과

배면 동적작용력은 3개의 로드셀에서 측정된 하중을

더하여 구하였고 진동전 로드셀의 계측값을 0으로 초기화시켜 진동중 발생하는 동적압력 변화를 측정하였다. 평균 과잉간극수압은 벽체 배면에 부착된 간극수압계 P2와 P3에서 측정된 과잉간극수압을 평균하여 구하였다.

그림 6~10은 로드셀을 이용하여 측정한 배면 동적작용력을 주파수 필터링 방법을 이용하여 진동하는 성분과 진동하지 않는 성분으로 분리하여 나타내었다. 그림 6은 자갈 뒤채움이 없는 느슨한 배면지반의 경우 입력가속도 진폭이 0.1g일 때의 결과로서 동적작용력(그림 6(a))의 비진동성분 크기(그림 6(b))가 작고 동적 작

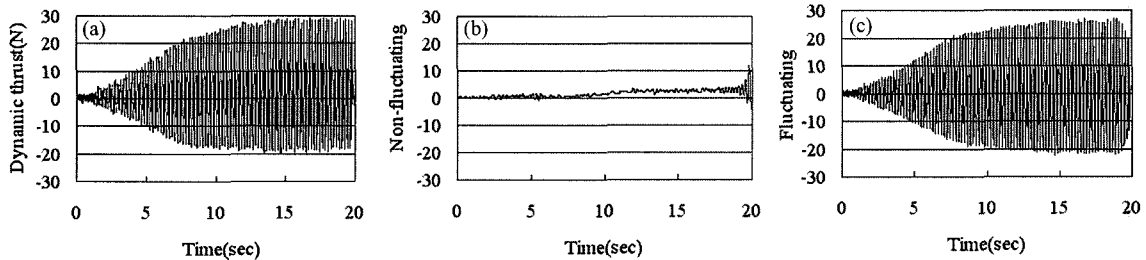


그림 6. 배면 동적작용력의 비진동성분과 진동성분(자갈 뒤채움X/느슨/0.1g)

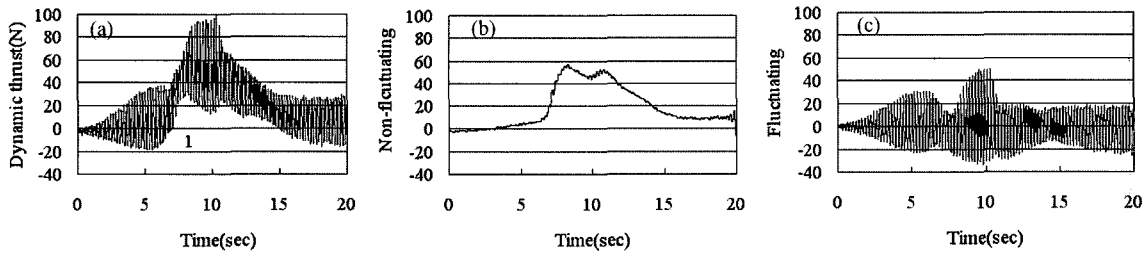


그림 7. 배면 동적작용력의 비진동성분과 진동성분(자갈 뒤채움X/느슨/0.2g)

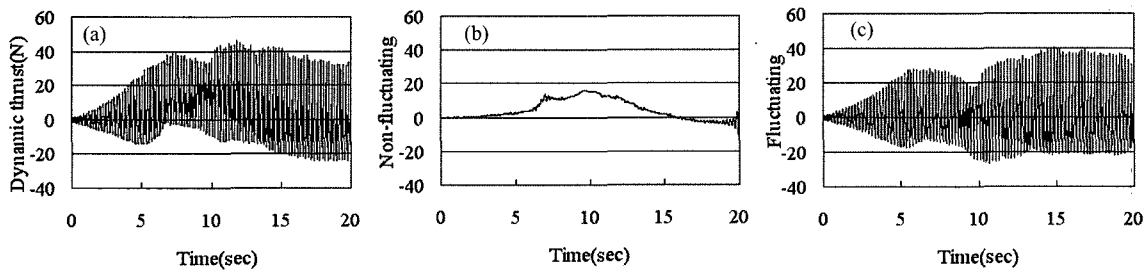


그림 8. 배면 동적작용력의 비진동성분과 진동성분(자갈 뒤채움O/느슨/0.2g)

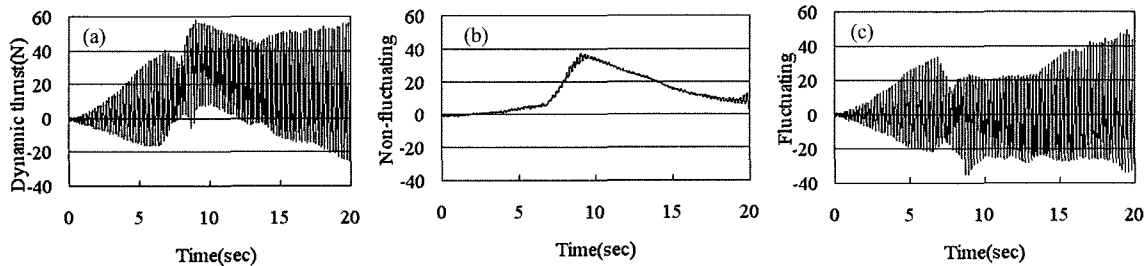


그림 9. 배면 동적작용력의 비진동성분과 진동성분(자갈 뒤채움X/조밀/0.2g)

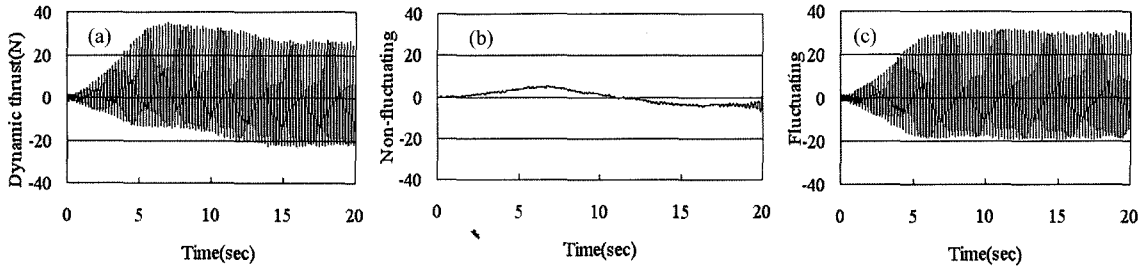


그림 10. 배면 동적작용력의 비진동성분과 진동성분(자갈 뒤채움O/조밀/0.2g)

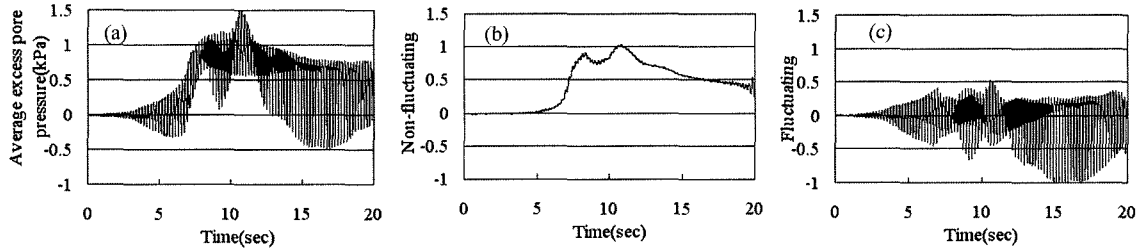


그림 11. 평균과잉간극수압의 비진동성분과 진동성분(자갈 뒤채움X/느슨/0.2g)

용력의 진동성분의 크기(그림 6(c))는 입력가속도 크기에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 입력가속도가 0.2g로 증가하였을 때(그림 7) 평균 과잉간극수압(그림 11)과 비교해보면 배면 동적작용력 비진동성분의 크기는 배면지반내 과잉간극수압 크기에 비례함을 알 수 있다. 배면작용력 크기를 살펴보면 자갈 뒤채움이 없는 느슨한 배면지반의 경우 가장 크고 그 다음으로 자갈 뒤채움이 없는 조밀한 배면지반, 자갈 뒤채움이 있는 느슨한 배면지반, 자갈 뒤채움이 있는 조밀한 배면지반의 순으로 나타났다. 이 크기순서는 3.1절에서 나타난 벽체 인접지반 과잉간극수압비 크기 순서와 일치하는 것으로 배면 동적작용력은 과잉간극수압 크기와 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다. 진동성분들을 살펴보면 과잉간극수압 증가 및 배면지반과 안벽본체간의 상호작용 등에 의하여 주진동성분인 1Hz의 진동성분 외에 2Hz의 진동성분이 나타나는 double frequency 경향이 나타났다. 이로 인하여 (+)와 (-)값들의 진동폭이 달라지게 되었다.

그림 12를 보면 배면 동적작용력의 비진동성분이 평균 과잉간극수압비에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이것은 배면지반내의 과잉간극수압이 증가하기 때문이며 액상화가 발생하게 되면 비진동 성분의 크기는 이론적으로 흙의 유효응력과 같아지게 된다. 동적작용력의 비진동성분은 배면지반의 밀도 및 자갈 뒤채움재의 설치 여부 등 배면지반 조건에는 영향을 작게 받으며 주로 배면 과잉간극수압 크기에 영향을 받음을 알 수 있다.

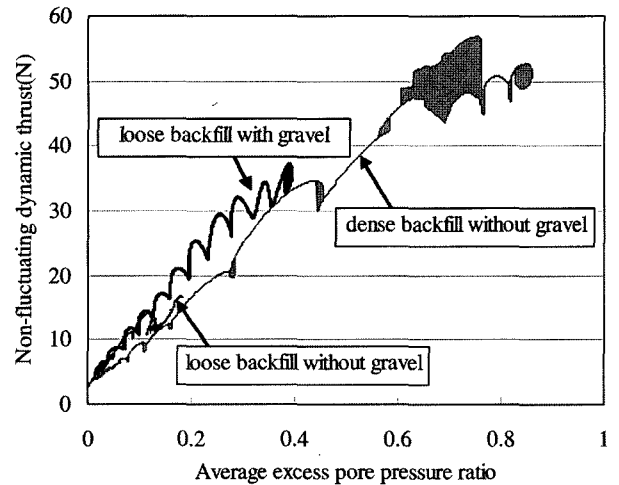
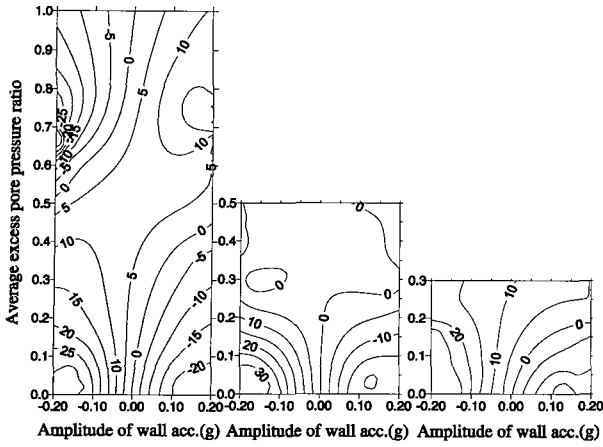


그림 12. 배면 동적작용력의 비진동성분과 평균 과잉간극수압비의 관계

그림 13은 동적작용력의 진동성분을 관성력과 평균 과잉간극수압비에 대하여 나타낸 것이다. 자갈 뒤채움이 없는 느슨한 배면지반의 경우(그림 13(a)), 배면 동적작용력과 벽체 가속도간의 위상차이는 과잉간극수압비가 약 0.4~0.5 이하일 때 벽체가속도가 증가하면 동적작용력은 감소하므로 180° 였다. 그러나, 이러한 위상차이는 과잉간극수압비가 0.4~0.5 이상으로 증가하였을 때 벽체가속도가 증가할 때 동적작용력도 증가하므로 0°가 되었다. 자갈 뒤채움이 있는 느슨한 배면지반의 경우에는 과잉간극수압비의 크기가 약 0.3 일 때 배면 동적작용력의 위상변화 경향이 나타났다. 이러한 결과는 자갈 뒤채움재의 설치 등 배면지반 조건이 동적작용력



(a) 느슨/자갈 뒤채움X (b) 느슨/자갈 뒤채움O (c) 조밀/자갈 뒤채움X
 그림 13. 배면 평균 과잉간극수압비-벽체가속도-배면 동적작용력 진동성분관계(0.2g)

과 관성력간의 위상차가 변화하는 과잉간극수압 크기에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 자갈 뒤채움이 있는 느슨한 배면지반의 경우와 자갈 뒤채움이 없는 조밀한 배면지반의 경우 과잉간극수압 크기가 작았기 때문에 동적작용력은 벽체가속도와 180° 위상차이를 보였으며, 과잉간극수압량 발생량이 작아서 완전한 위상변화 경향은 관찰하지 못하였다.

3.3 벽체 전면에 작용하는 동적수압

그림 14는 벽체 전면에 작용하는 동적수압의 계산값과 측정값을 비교한 것으로 진동하는 값 중 최대값들을 표시하였다. 동적수압은 Westergaard 해(1933)에 벽체가속도의 시간이력을 입력하여 계산하였다. 입력가속도

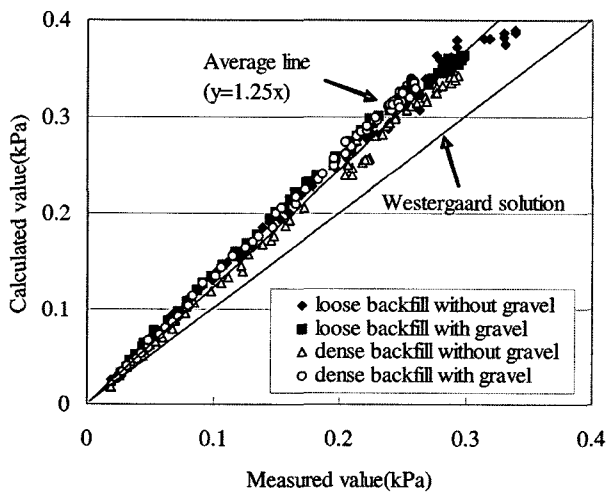


그림 14. 벽체전면에 작용하는 동적수압(0.2g)

대신 벽체가속도를 이용한 것은 벽체, 배면지반 그리고 물간의 상호작용의 결과로서 벽체가속도가 입력가속도의 크기와 달라지기 때문이다. 벽체가속도를 입력하여 계산된 동적수압값은 그림에서 바와 같이 측정된 값보다 크지만 측정값에 일정하게 비례하는 것으로 나타났다. Kawamura(1979)는 $L/Hw=2.7$ (L 은 수조길이; Hw 는 수심)인 수조를 사용하여 동적수압을 조사한 결과 측정된 수압은 Westergaard 해로 계산된 값의 75%~93%이며 벽체의 변형양상에는 거의 영향을 받지 않음을 관찰하였다. Werner와 Sundquist(1943)은 수직벽체에 작용하는 동적수압을 계산하기 위한 공식을 유도한 결과 계산된 수압은 L/Hw 값이 감소함에 따라 감소하였으며 L/Hw 가 3이상이 될 때 Westergaard 계산값과 동일해짐을 관찰하였다. 본 실험에서 $L/Hw=2.4$ 였으며 측정된 동적수압은 Westergaard 계산값의 약 80%였다. 그러므로, 동적수압의 측정값이 토조의 제한된 폭 때문에 Westergaard 해의 계산값보다 더 작은 것으로 판단된다.

3.4 벽체배면에 작용하는 동적수압

자갈 뒤채움이 있는 경우 간극수가 자갈과 따로 진동하며 움직였기 때문에 자갈 뒤채움이 있는 경우에 대해서만 Westergaard해를 이용하여 배면 동적수압을 계산하였다. 그림 15는 자갈 뒤채움이 있는 경우 동적수압의 계산값과 측정값을 비교한 것이다. 여기서, 측정된 동적수압은 벽체배면에 작용하는 평균 과잉간극수압의 진동성분을 나타낸 것이다. 간극수가 배면지반으로부터 완전히 자유롭게 거동하지 못하였기 때문에 입력가속도

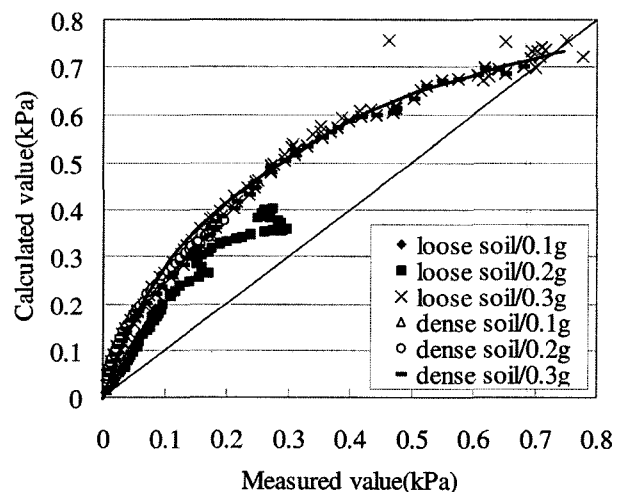


그림 15. 벽체배면에 작용하는 동적수압

크기가 작은 경우 동적수압의 측정값은 계산값보다 작게 나타났다. 그러나, 입력가속도 크기가 0.3g로 커지는 경우 측정된 값은 급속히 증가하여 계산값과 비슷해졌다. 이러한 현상은 과잉간극수압 증가와 뒤채움 자갈의 부피 팽창(dilatancy) 경향 때문에 나타난 것으로 판단된다.

3.5 하중성분들의 크기 분석

벽체에 작용하는 하중성분들은 관성력, 벽체전면에 작용하는 동적수압, 배면 정적작용력과 배면 동적작용력으로 구성된다. 본 실험으로부터 측정된 하중성분 크기를 표 2와 3에 정리하였다. 이 표에 제시된 값들은 전체합력이 최대가 되었을 때 동일한 시점에서 얻어진 값들이다. 입력가속도 크기가 0.1g일 때(표 2), 배면 과잉간극수압 크기가 작아서 동적작용력의 비진동성분의 크기는 작으며 진동성분은 관성력과 180°의 위상차를 가졌다. 입력가속도 크기가 0.2g일 때는(표 3) 과잉간극수압 크기가 증가하여 자갈 뒤채움이 없는 느슨한 배면지반의 경우 동적작용력의 비진동성분은 크게 증가하고 진동성분은 관성력과 동일한 위상을 가졌다. 그러나, 자갈 뒤채움이 있는 조밀한 배면지반의 경우 동적작용력의 비진동성분의 크기는 작고 동적작용력의 진동성분은 관성력과 반대의 위상이 되었다. 전체 합력의 크기

표 2. 벽체에 작용하는 하중성분의 크기(0.1g) (unit : N)

	동적 작용력		관성력	전면 동적수압	정적 작용력	합력
	비진동 성분	진동 성분				
느슨 / 자갈X	2.9	-20.0	54.2	17.5	34.4	89.1
느슨 / 자갈O	-3.9	-15.0	58.4	18.8	29.2	87.5
조밀 / 자갈X	3.2	-18.4	48.0	15.5	34.4	82.8
조밀 / 자갈O	-5.9	-15.1	62.4	20.1	29.2	90.7

표 3. 벽체에 작용하는 하중성분의 크기(0.2g) (unit : N)

	동적 작용력		관성력	전면 동적수압	정적 작용력	합력
	비진동 성분	진동 성분				
느슨 / 자갈X	50.3 (0.83*)	15.2	139.1	44.9	34.4	284.1
느슨 / 자갈O	15.3 (0.61*)	0.6	118.2	38.1	29.2	201.6
조밀 / 자갈X	2.8 (0.46*)	-10.5	108.7	35.1	34.4	170.6
조밀 / 자갈O	0.7 (0.01*)	-17.7	108.6	35.1	29.2	156.0

* : 벽체 인접지반에서의 평균 과잉간극수압비

는 배면 과잉간극수압의 크기가 증가함에 따라 동적작용력이 증가하여 커졌다.

그림 16과 그림 17은 전체 합력에 대한 동적 작용력, 관성력 그리고 벽체전면의 동적수압의 비를 보여준다. 입력가속도 크기가 0.1g일 때, 전체합력에 대한 관성력, 동적수압 그리고 동적작용력의 평균비율은 각각 64%, 21% 그리고 16%였다. 각 성분들중에서 관성력의 크기가 가장 큰 것으로 나타났다. 입력가속도 크기가 0.2g일 때 과잉간극수압 크기가 증가함에 따라 전체합력에서 배면 작용력이 차지하는 비율이 늘어나고, 관성력의 비율은 감소하였다. 관성력, 동적수압 그리고 배면작용력의 평균비율은 각각 60%, 20% 그리고 20%로 나타났다. 그림 17을 살펴보면 하중성분의 크기는 배면지반 조건에 따른 배면 과잉간극수압 크기에 주로 영향을 받으며 배면지반 조건이 미치는 영향은 작은 것을 알 수 있다.

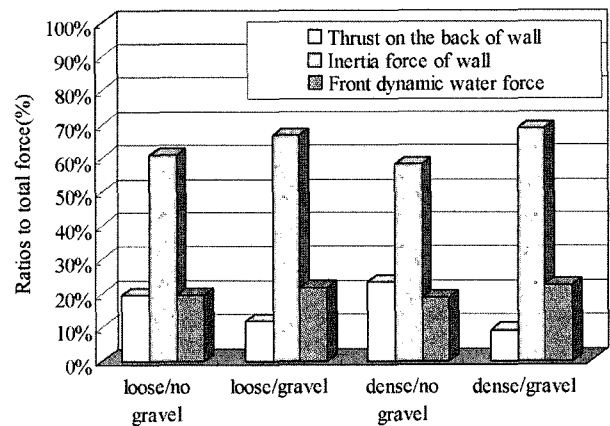
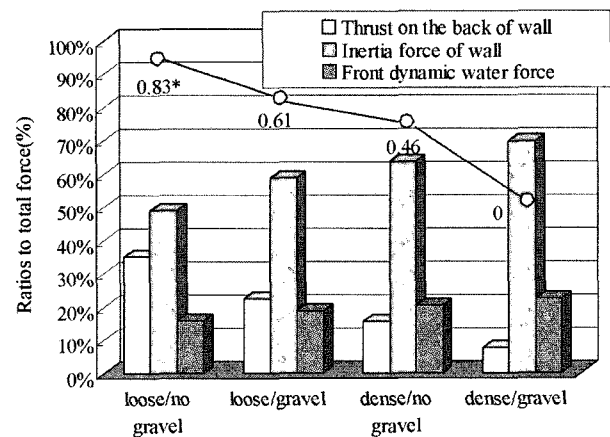


그림 16. 각 하중성분들이 차지하는 비율(0.1g)



* average excess pressure developed in the backfill

그림 17. 각 하중성분들이 차지하는 비율(0.2g)

3.6 벽체의 변위

그림 18은 모든 실험에서 관찰된 벽체의 최종 수평변위 값을 나타낸다. 입력가속도 크기가 0.1g인 경우 벽체의 변위는 발생하지 않았다. 입력가속도의 크기가 0.2g인 경우 자갈 뒤채움이 없는 느슨한 배면지반의 경우에 가장 큰 변위가 발생하였다. 다른 시험조건들의 경우 배면지반이 조밀하거나 자갈 뒤채움의 큰 강성 때문에 변위가 작게 발생하였다. 입력가속도 크기가 0.3g 일 때, 자갈 뒤채움이 있는 조밀한 배면지반의 수평변위가 자갈의 배수영향과 조밀한 지반의 다짐영향으로 가장 작게 발생하였다.

그림 19는 벽체에 작용하는 전체합력에 대한 벽체의 수평변위를 보여준다. 벽체의 변위크기는 전체합력에 비례하여 증가하였다. 이 그림에서 수직점선은 벽체바닥면에서의 마찰력을 나타낸다. 마찰력은 벽체의 유효중량과 마찰계수를 곱하여 계산하였다. 계산에 이용된 내부 마찰각은 27°와 32°로써 이 값들은 각각 기초지반 내부마찰각 40°의 2/3에서 4/5에 해당하는 값이다. 벽체

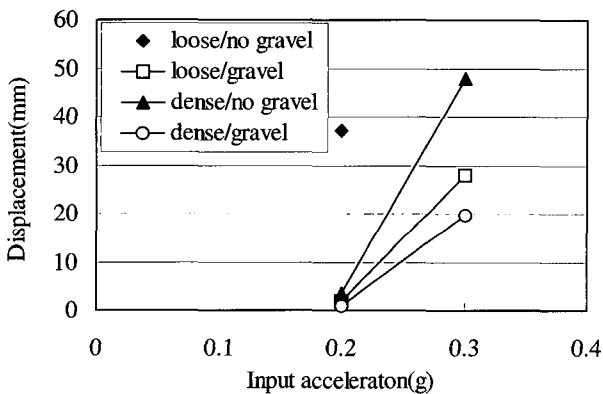


그림 18. 벽체의 수평변위

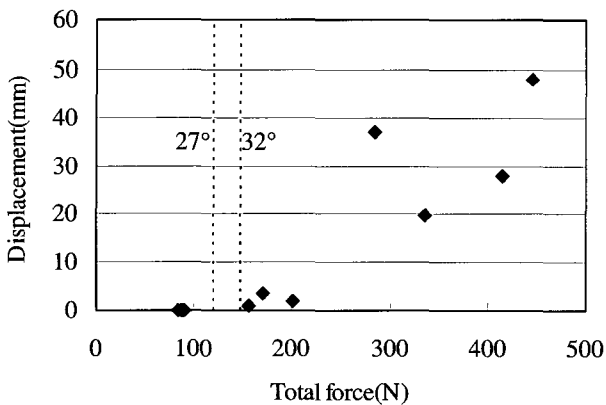


그림 19. 전체합력에 대한 벽체의 수평변위

의 미끄러짐이 발생할 때의 내부마찰각은 정적상태의 설계마찰각보다 큰 약 32°로 나타났다. 그 이유는 진동시 기초지반에 대한 벽체의 상대적인 수평변위 속도가 컸고 벽체의 회전운동에 의하여 마찰력이 증가하였기 때문으로 판단된다.

4. 결론

중력식 안벽에 대한 진동대 실험을 수행하여 배면지반 조건이 중력식 안벽의 하중성분에 미치는 영향을 분석하였다. 배면지반이 느슨한 경우와 조밀한 경우 그리고 자갈 뒤채움이 있는 경우와 없는 경우의 총 4가지 조건에 대한 실험을 수행하여 벽체에 작용하는 각 하중성분들의 크기와 위상변화를 분석한 후 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 자갈 뒤채움이 있는 경우 자갈 뒤채움이 없는 경우에 비하여 벽체 인접지반의 과잉간극수압비는 느슨한 지반의 경우 0.86에서 0.23으로 약 73%, 조밀한 지반의 경우 0.64에서 0.06으로 약 90% 감소하였다. 이러한 현상은 자갈의 배수효과 때문으로 판단된다. 자갈 뒤채움이 있는 조밀한 지반의 경우, 자갈의 배수효과와 조밀한 지반의 다짐효과 때문에 과잉간극수압의 크기가 가장 작았다.
- (2) 동적작용력의 비진동성분은 배면지반 조건에 관계없이 벽체배면에 작용하는 평균 과잉간극수압의 크기에 선형적으로 비례하였다. 배면지반내의 과잉간극수압이 작은 경우, 동적작용력의 진동성분은 관성력과 180° 위상차를 가졌지만, 과잉간극수압 크기가 일정수준 이상으로 증가할 경우 배면지반의 유동성이 증가하여 동적작용력의 진동성분은 관성력과 동일한 위상으로 변화하였다.
- (3) 벽체배면에 작용하는 동적수압의 경우 측정된 동적수압은 간극수가 배면지반으로부터 완전히 독립적으로 움직이지 못하기 때문에 Westergaard 해로 계산된 값보다 작게 나타났지만, 입력가속도가 증가함에 따라 과잉간극수압 증가와 전단변형시 자갈의 팽창경향으로 인하여 동적수압의 진폭이 급격히 증가하였다.
- (4) 벽체에 작용하는 하중성분은 벽체 관성력, 전면동적수압 그리고 배면 작용력으로 구성되어 있다. 하중성분의 크기는 배면지반 조건에 따른 배면 과잉

간극수압 크기에 주로 영향을 받으며 배면지반 조건이 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. 입력가 속도 크기가 0.1g인 경우, 벽체 관성력, 전면동적수압 그리고 배면작용력의 평균값은 각각 64%, 21% 그리고 16%로 나타났다. 과잉간극수압이 증가함에 따라 전체합력에서 배면작용력이 차지하는 비율이 증가하고 관성력이 차지하는 비율은 감소하였다.

(5) 벽체의 변위는 벽체에 작용하는 전체합력에 비례하여 증가하였다. 벽체의 변위가 발생하기 시작할때의 내부마찰각은 정적상태보다 증가하였는데 이것은 진동시 벽체의 수평변위속도가 커지고 벽체의 회전운동에 의하여 마찰력이 증가하였기 때문으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김성렬, 박영호, 권오순, 김명모 (2000), “안벽 구조물의 내진성 평가를 위한 진동대 시험”, *한국 지반공학회지*, 제16권, 제5호, pp.75-81.
2. 김성렬, 권오순, 김명모 (2003), “지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분의 모델링”, *한국 지반공학회지*, 제19권, 제2호, pp.107-121.
3. 황재익, 김성렬, 김명모 (2004), “1-g 진동대 모형시험을 위한 상사법칙의 적용성 평가”, *한국 지반공학회지*, 제20권, 제3호, pp.141-150.
4. Dewoolkar, M.M., Ko H.Y., and Pak R.Y.S. (2000), “Seismic behavior of cantilever retaining walls with liquefiable backfills”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.5, pp.424-435.
5. Ghalandarzadeh, A., Towhata, I., Orita T., and Yun, F. (1998), “Shaking table tests on seismic behavior of quay walls during earthquakes”, *Proc. of 3rd Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Dakoulas, P. and Yegian M. ed., Seattle, USA, pp.1045-1056.
6. Iai, S. (2001), “Recent studies on seismic analysis and design of retaining structures”, *Proc. of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering*, Prakash, S. ed., San Diego, USA, No. SOAP4 (CD-form).
7. Iai, S. and Sugano, T. (1999), “Soil-structure interaction studies through shaking table tests”, *Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, P.S. Seco e Pinto ed., Lisbon, Portugal, Vol.3, pp.927-940.
8. Kawamura, M. (1979), *Studies on lateral earth pressures on retaining walls during earthquakes and heavy rain falls*, Ph.D. Thesis, Nagoya University, Japan (in Japanese).
9. Kohama, E. (2000), *A study on the stability of gravity type quay wall during earthquake*, Ph.D. Thesis, Hokkaido University, Japan.
10. Kuwano J., Takahashi, A., Hiro-oka, A., and Yamauchi K. (1999), “Shaking table tests on caisson type quay wall in centrifuge”, *Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, P.S. Seco e Pinto ed., Lisbon, Portugal, Vol.1, pp.365-370.
11. Werner, P.W. and Sundquist, K.J. (1943), “On hydrodynamic earthquake effects”, *Trans. of American Geophysical Union*, Vol.30, No.5, pp.636-657.
12. Westergaard, H.M. (1933), “Water pressures on dams during earthquakes”, *Trans. of ASCE*, Vol.98, pp.418-432.

(접수일자 2005. 5. 18, 심사완료일 2005. 12. 22)