

지진동을 받는 안벽 구조물의 내진 성능 평가

Evaluation of Seismic Performance of Quay Walls during Earthquakes

김성렬* 권오성** 권오순*** 김명모****
Kim, Sung-Ryul Kwon Oh-Sung Kwon, Oh-Sun Kim, Myoung-Mo

Abstract

The shaking table tests for 5 different model sections are performed to investigate the behaviors of quay walls during earthquakes and to evaluate the seismic performance of quay walls with countermeasures.

5 different model sections describe the cases of dense soil and loose soil in the foundation, respectively, the case to which gravel backfill was applied, and the cases to which light material replacement method and sand compaction pile method was applied respectively for seismic countermeasure methods.

Pore water pressures, accelerations and deformations in quay walls and grounds are analyzed. As a result, the softening of foundation and backfill soils have much influence on the behaviors of quay walls. Also light material replacement method and sand compaction pile method are effective in improving the seismic performance of quay walls.

1. 서 론

1995년 고베지진시 안벽 구조물에 작용하는 동적토압의 증가 및 기초지반과 뒤채움 지반의 연약화로 인하여 안벽 구조물과 뒤채움 지반위에 건설된 항만 구조물들에 대규모 피해가 발생하였다. 고베항의 안벽구조물들은 기초지반의 변형을 고려하지 않고 설계되었지만, 지진시 기초지반이 변형되어 미끄러짐과 함께 침하, 회전의 파괴형태가 발생하였다. 안벽 구조물의 침하 및 회전은 과잉간극수압의 증가로 인한 기초지반의 강성감소가 주원인으로서 최근 이러한 파괴 메커니즘이 체계적으로 연구되고 있다.

Abbas Ghalandarzadeh(1997) 등의 연구에 따르면, 중력식 안벽 구조물의 경우 그림 1에 나타난 바와 같이 지진시 3가지의 파괴형태가 존재한다. 첫번째 파괴형태는 기초지반에 변형이 발생하지 않고 안벽과 기초지반 사이의 경계면에서 항복이 발생하는 경우로서 미끄러짐 파괴(slip failure, 그림 1(a))로 정의한다. 또 다른 파괴형태는 뒤채움 지반과 기초지반의 변형에 의한 파괴로서 2가지로 나누어진다. 안벽 바닥의 변위가 상부의 변위보다 큰 경우 회전파괴(rotational failure, 그림 1(b))로 정의하며, 안벽 바닥의 변위가 상부의 변위보다 작은 경우에는 전도파괴(overturning

* 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정, 학생회원

** 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정

*** 한국 해양연구소 연구원, 정회원

**** 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수, 정회원

failure, 그림 1(c))로 정의한다. 회전파괴는 기초지반이 전체적으로 지지력을 상실하는 경우 발생하며, 전도파괴는 안벽전면의 기초지반이 부분적으로 지지력을 상실하면서 안벽이 앞으로 침하할 때 발생한다. 최근 고베 지진시 안벽 구조물의 파괴형태는 이러한 3가지 파괴형태의 한가지, 또는 두 가지 파괴형태가 복합되어 나타났는데, 주로 미끄러짐 파괴와 전도파괴가 발생하였다.

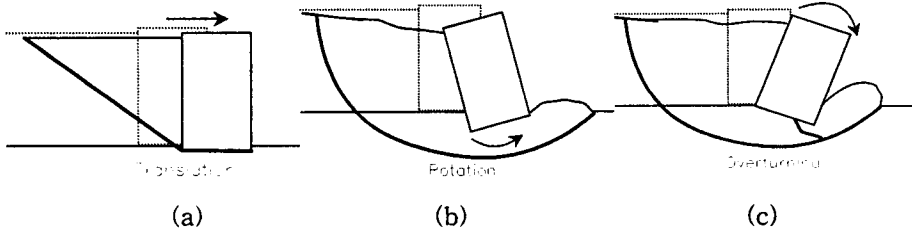


그림 1. 중력식 안벽구조물의 3가지 파괴형태

본 연구에서는 총 5가지의 시험단면에 대한 진동대 시험을 실시하여 안벽 구조물의 동적거동 및 지진 피해를 감소시키기 위한 대책공법의 성능을 분석하였다. 기초지반이 조밀한 경우와 느슨한 경우 그리고 자갈 뒤채움재를 설치하여 기초지반의 상대밀도와 자갈 뒤채움재의 배수효과가 안벽구조물의 동적거동에 미치는 영향을 분석하고, 경량재 치환공법과 모래다짐말뚝 공법을 뒤채움 지반에 적용하여 내진성능 향상 효과를 비교·분석하였다.

2. 진동대 시험준비 계획 및 절차

본 시험에서 사용한 모형토조의 크기는 길이 192cm, 폭 44cm, 높이 60cm이고 두께 2cm의 투명 아크릴 판으로 제작하였으며 한쪽 벽면에는 5cm 간격의 격자로 줄을 그어 진동대 시험 중 지반 및 구조물의 거동을 면밀히 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 토조의 양 끝단에는 진동시 벽체 강성의 영향을 줄이기 위해 5cm 두께의 스폰지를 설치하였다.

그림 2는 시험단면의 종류를 나타낸 것으로 총 5가지의 시험단면을 보여준다. 이 그림의 Case 1과 Case 2에서는 자갈 뒤채움재와 내진대책공법을 적용하지 않고, 안벽 구조물의 하부 기초지반의 상대밀도를 달리하여 각각 조밀, 느슨하게 조성하였다. 조밀한 기초지반은 변형이 발생하지 않는 지반조건을, 느슨한 기초지반은 고베 지진시 발생한 안벽의 회전거동을 모사하기 위해 변형이 발생할 수 있는 지반조건을 마련하기 위한 것이다. Case 3, Case 4 그리고 Case 5에서는 모두 안벽 구조물을 느슨한 기초지반위에 놓고 자갈 뒤채움재를 설치하였는데 Case 4와 Case 5의 경우에는 뒤채움 지반에 내진대책공법으로 각각 경량재 치환공법과 모래다짐말뚝 공법을 적용하였다.

계측기의 설치위치는 그림 2에 나타내었다. 총 12개의 간극수압계, 4개의 가속도계 그리고 1개의 LVDT를 설치하였으며, 뒤채움 지반과 기초 지반에 염색 모래 및 염료를 이용하여 10cm간격으로 수직, 수평선을 그어 투명한 벽체를 통하여 지반의 변형양상을 관측하였다.

모형지반 조성시 사용된 모래는 해안의 준설탁토로서 평균 유효입경 D_{50} 은 0.17mm, 균등계수는 1.9, 비중은 2.63 그리고 최대 건조밀도(γ_{max})와 최소 건조밀도(γ_{min})는 각각 1.35과 1.62이다. 자갈 뒤채움재와 자갈 마운드에 사용된 자갈은 최소 입경 3mm이며, 최대 입경 5mm로서 균일한 크기의 세립자갈이다.

모형 안벽구조물은 나무로 제작하였고, 안벽구조물과 토조 벽면사이에는 약 2mm정도의 간격을 유지하여 마찰력 효과를 감소시켰으며, 이 틈으로 모래가 스며드는 것을 방지하기 위하여 안벽 뒷면에 투명한 OHP 필름을 부착하여 과잉간극수압의 소산 및 모래의 유입을 방지하였다. 안벽구조물의 단위중량은 뒤채움 모래지반보다 다소 작은 값을 가지도록 하였는데, 이것은 안벽 구조물의 거동이 안벽 자체의 관성력에 의하여 지배되는 것을 방지하기 위한 배려이다.

안벽 뒤채움부와 기초부의 느슨한 모래지반은 토조에 물을 채운 후 젖은 모래를 물속에서 가볍게 분산시켜 조성하였으며 이렇게 조성된 지반의 상대밀도는 약 20%로 균일함을 확인하였다. 조밀한 모래층은 느슨한 층을 먼저 형성한 뒤 가속도 크기 0.3g, 4Hz의 sin파로 30초동안 진동을 가하여 조성하였다. 기초지반 조성이 끝나면 자갈 마운드와 안벽구조물을 조심스럽게 설치하고 안벽 구조물 뒤편에 느슨한 모래지반을 조성하였다.

Case 4의 경량재 치환공법에 이용된 경량 재료의 포화 단위중량은 1.25 t/m^3 이며, 지반조성이 완료된 후 뒤채움 지반의 일부를 제거하고 설치하였다. Case 5의 모래다짐말뚝은 12본(4열×3행)을 설치하였으며, 약 3cm 직경의 선단이 막힌 관을 진동을 주면서 삽입한 후 관 선단을 열고 모래를 다지면서 뽑아내었다. 새로운 모래의 충전 및 다짐으로 인한 지반 침하로 모래층의 밀도가 증가하며, 이렇게 다져진 지반의 평균상대밀도는 약 90% 이상이다.

진동대 입력파는 결과분석이 용이하도록 4Hz sin파로 5초동안 진동을 주었다. 입력가속도의 진폭은 0.10g부터 시작하여, 모형 안벽이 파괴될 때까지 진폭을 0.05g씩 증가시켰다.

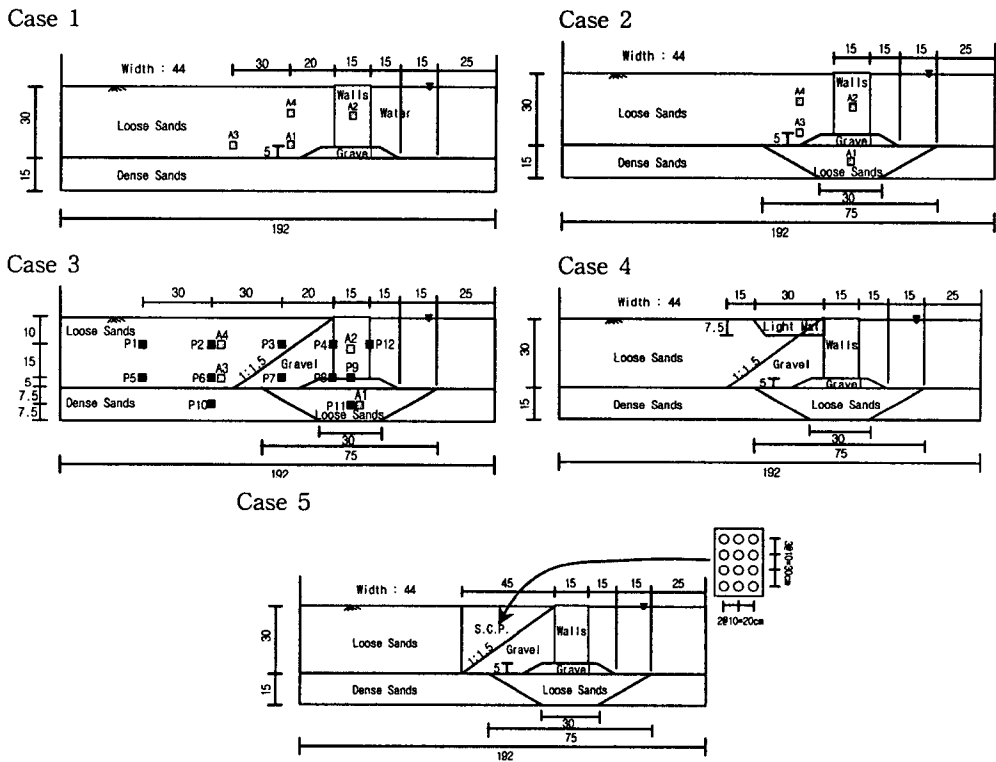


그림 2. 시험단면 및 계측기의 설치위치

3. 진동대 시험결과 및 분석

3.1 안벽 구조물의 동적거동

가속도 크기 0.10g의 경우 모든 시험단면에서 안벽 구조물의 변형이 관측되지 않았다. 자갈 뒤채움 없이 조성한 조밀한 기초지반(Case 1)과 느슨한 기초지반(Case 2)의 경우, 가속도 크기 0.15g에서 미끄러짐 파괴가 발생하였으며, 느슨한 기초지반위에 자갈 뒤채움을 실시한 경우(Case 3)에는 0.15g에서 약간의 회전과 함께 미끄러짐 파괴가 발생하였다. 경량재 치환공법(Case 4)과 모래다짐말뚝 공법(Case 5)을 적용한 경우에는 0.20g에서 완전파괴가 발생하였는데, 경량재 치환

공법의 경우 회전파괴가 발생하였고 모래다짐말뚝 공법을 적용한 경우 미끄러짐 파괴가 발생하였다. 안벽의 단위중량이 뒤채움 지반보다 큰 경우에는 전도파괴가 발생할 수 있지만 본 연구에서는 안벽 무게가 안벽의 동적거동에 미치는 영향을 고려하지 않았다.

표 1은 각 진동단계에서 시험종료 후 안벽, 기초지반 그리고 뒤채움 지반의 변형량을 관측한 후 안벽의 파괴형태를 분류한 것이다. 안벽 무게중심의 횡변위량은 입력가속도 크기 0.15g에서 평균 3.5cm, 0.20g에서 추가적으로 평균 4.6cm가 발생하였고, 느슨한 기초지반의 횡변위량은 0.15g에서 평균 1.2cm, 0.20g에서 추가적으로 평균 1.7cm가 발생하였다. 그러므로 지진시 안벽의 변위는 기초지반의 변형과 안벽과 기초지반 사이에서 발생하는 미끄러짐이 복합되어 발생함을 알 수 있다.

표 1. 시험종류별 안벽과 지반의 변형량 및 파괴형태

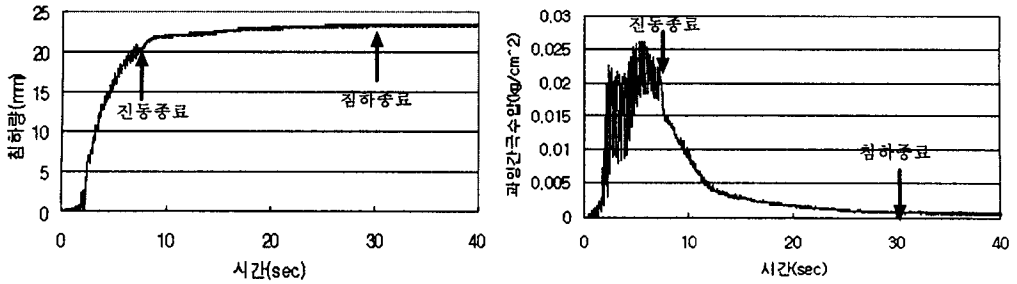
시험종류	구분	안벽 무게중심 변위		기초지반 횡변위(cm)	벽체의 파괴형태
		횡변위(cm)	침하(cm)		
Case 1	0.15g	5	없음	없음	미끄러짐
Case 2	0.15g	5	없음	1	미끄러짐
	0.20g	7	1	2	미끄러짐
Case 3	0.15g	5	없음	2	미끄러짐 +회전
	0.20g	4.5	없음	1	미끄러짐 +회전
Case 4	0.15g	1.5	없음	1	-
	0.20g	2	1.5	3	회전
	0.25g	2.5	1.5	1	회전
Case 5	0.15g	1	없음	1	-
	0.20g	5	없음	1	미끄러짐
	0.25g	3	2	2	회전

표 2는 뒤채움 지반의 침하량을 분석한 것으로 뒤채움 지반에서 발생한 총침하량을 진동시의 침하량과 진동이 끝난 후의 추가적인 침하량으로 구분하였다. 이 표를 살펴보면 침하량의 대부분이 진동중에 발생하였으며, 진동이 끝난 후 발생한 침하량은 최대 3.1mm, 평균적으로 총 침하량의 약 12.7%정도이다.

그림 3은 뒤채움 지반의 침하량 발생곡선으로서 진동 중 침하량이 급격히 증가하다가 진동이 끝난 후 침하량 증가속도가 점차 감소하고 과잉간극수압의 소산이 완료되는 진동 발생 약 30초 후에는 침하가 완료된다. 이것으로부터 진동 후 발생한 침하량은 과잉간극수압의 소산과 직접적으로 관련되며, 진동 중에 발생한 침하량은 안벽의 이동에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

표 2. 시험종류별 뒤채움 지반의 침하량

시험종류	구분	뒤채움 지반 침하량(mm)	
		진동시 침하량	진동종료후 추가 침하량
Case 1	0.15g	20.4	3.1
Case 2	0.15g	24.4	1.8
	0.20g	15.7	2.1
Case 3	0.15g	17.1	1.6
	0.20g	15.0	2.7
Case 4	0.15g	0	2.1
	0.20g	25.3	2.1
	0.25g	13.8	2.1
Case 5	0.15g	1.2	0.2
	0.20g	8.5	0.6
	0.25g	12.6	1.2



(a) 침하량 시간이력곡선(LVDT) (b) 과잉간극수압 시간이력곡선(간극수압계 P7)
 그림 3. 뒤채움 지반의 침하량과 과잉간극수압 시간이력곡선(Case 1, 0.15g)

그림 4는 안벽의 파괴시 발생한 안벽의 횡변위량과 뒤채움 지반의 침하량 사이의 관계를 나타내는데 평균적으로 대략 선형관계에 있음을 알 수 있다. 미끄러짐 파괴의 경우(Case 1, Case 2, Case 3, Case 5)에는 침하량과 횡변위량은 평균 1:2.8 ($R^2=77\%$)의 비율로 발생하며, 회전파괴의 경우(Case 4) 약 1:1.3($R^2=90\%$)의 비율로 발생한다. Case 4(경량재 치환)의 경우에 이와 같이 큰 기울기를 가지는 것은 안벽의 회전파괴로 인하여 횡변위 발생이 억제되었기 때문이다. 또한 그림 4에서 경량재 치환공법(Case 4)과 모래다짐알뜰 공법(Case 5)을 적용한 경우 0.15g에서 내진대책 공법을 적용하지 않은 경우에 비하여 변위가 크게 억제되고 있음을 볼 수 있는데 이로서 내진보강효과를 확인하였다.

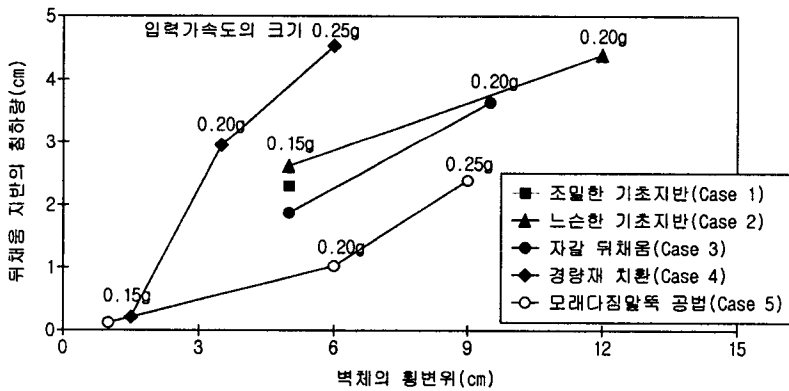
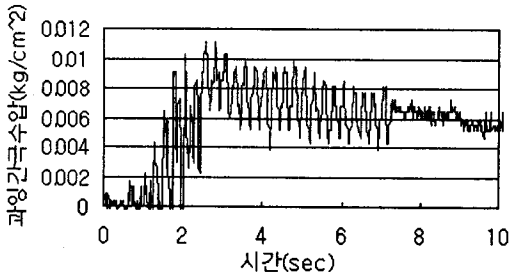


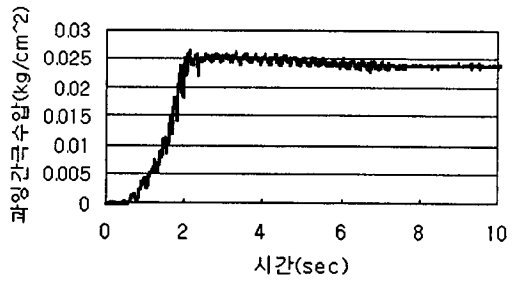
그림 4. 안벽의 횡변위량과 뒤채움 지반의 침하량 사이의 관계

3.2 과잉간극수압 반응과 가속도 반응

그림 5와 그림 6은 각각 기초지반이 조밀한 경우(Case 1)에 대한 과잉간극수압 시간이력곡선과 가속도 시간이력곡선을 나타낸다. 간극수압계 P3와 가속도계 A4, 간극수압계 P6과 가속도계 A3는 뒤채움 지반 내의 동일한 위치에 설치되었으며, 가속도계 A1은 자갈 마운드 뒤편에 가속도계 A2는 안벽의 무게중심에 설치되었다(그림 2 참조). 간극수압계 P3와 P6의 경우 가속도계 A4, A3의 측정결과에서도 알 수 있듯이(액상화 후 지반강성이 감소하여 가속도가 0이 됨) 진동 후 약 1.5초 후에 액상화에 도달하였음을 알 수 있다. 가속도계 A1과 A2의 결과를 살펴보면 뒤채움 지반의 액상화가 발생한 약 1.5초 후부터 가속도가 (+)방향으로 치우치므로 이 때부터 안벽이 바깥쪽으로 이동하였음을 알 수 있고, 이로부터 뒤채움 지반의 연약화로 인하여 벽체에 작용하는 토압이 증가하여 벽체가 파괴됨을 알 수 있다.

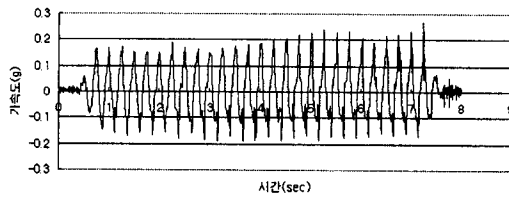


간극수압계 P3

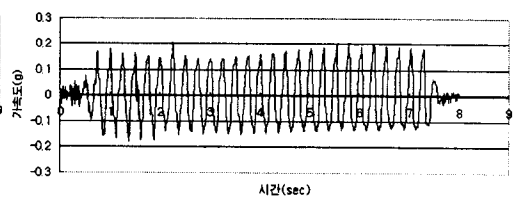


간극수압계 P6

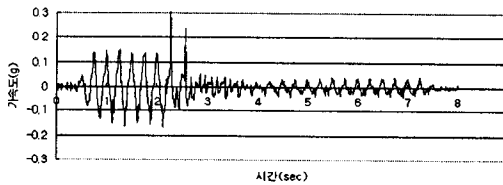
그림 5. 과잉간극수압 시간이력곡선(Case 1, 0.15g)



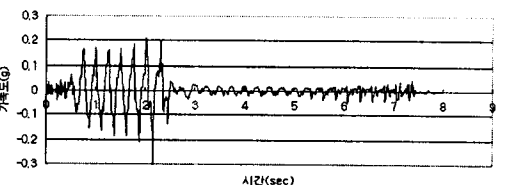
가속도계 A1



가속도계 A2



가속도계 A3



가속도계 A4

그림 6. 가속도 시간이력곡선(Case 1, 0.15g)

그림 7은 가속도 크기 0.15g에서 뒤채움 지반내의 과잉간극수압이 최대가 되는 시점에서의 과잉간극수압비 분포를 나타낸다.

어느 경우를 막론하고 뒤채움 지반은 0.15g에서부터 액상화가 발생하였으며, 자갈 배수재의 설치여부에 상관없이 안벽에 가까워질수록 과잉간극수압 발생이 억제되었는데 이러한 경향은 진동시 안벽이 바깥쪽으로 이동하면서 지반 내의 구속압이 감소하기 때문으로 생각된다. Case 1, Case 2, Case 3의 경우 0.15g에서 뒤채움 지반내에 액상화가 발생하면서 안벽에 작용하는 동적토압이 증가하여 미끄러짐 파괴가 발생하였으며, 특히 Case 3의 경우 자갈 배수재가 있음에도 불구하고 Case 2와 비교하여 과잉간극수압이 그다지 억제되지 않았다. 이것은 지진시 자갈 배수재내에서도 과잉간극수압이 크게 발생할 수 있음을 의미하며 장차 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

경량재 치환공법을 실시한 경우(Case 4)에는 0.15g에서 파괴가 발생하지 않았는데 이것은 안벽에 인접한 뒤채움 지반의 과잉간극수압이 크게 억제되었고, 경량재 치환으로 안벽 배면에 작용하는 전체 토압이 감소되었기 때문으로 판단된다. 모래다짐말뚝 공법을 적용한 경우(Case 5)에는 0.15g에서 뒤채움 지반내의 과잉간극수압 발생이 크게 억제되었고, 다짐으로 인한 지반강성의 증가로 파괴가 발생하지 않았다.

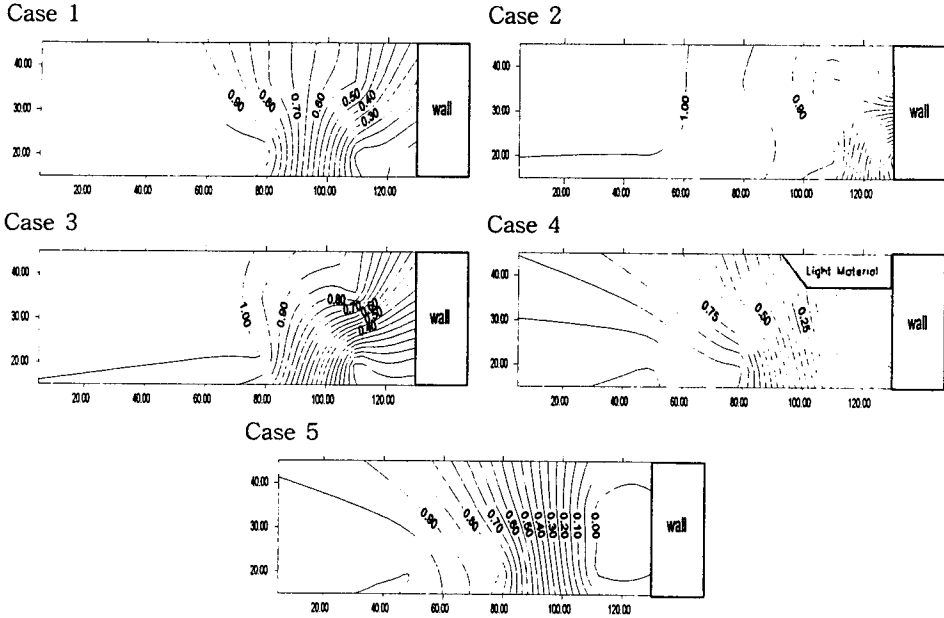


그림 7. 뒤채움 지반의 파인간극수압비 곡선(가속도 크기 0.15g)

3.3 동수압의 분석

안벽 전면에 작용하는 동수압 p_w 은 일반적으로 Westergaard(1931)가 제안한 근사해를 이용하여 산정한다. Westergaard(1931)가 제안한 식은 다음과 같다.

$$p_w = \frac{7}{8} \frac{a_h}{g} \gamma_w \sqrt{z_w H}$$

- 여기서, H : 토조내의 수위로서 본 시험에서는 35cm
- z_w : 수압이 작용하는 깊이로서 본 시험에서는 10cm
- a_h : 수평입력 가속도

그림 8은 안벽 전면에 작용하는 동수압의 측정값과 계산값을 비교한 것이다. 동수압 측정값은 간극수압 진폭의 평균을 취하였다.

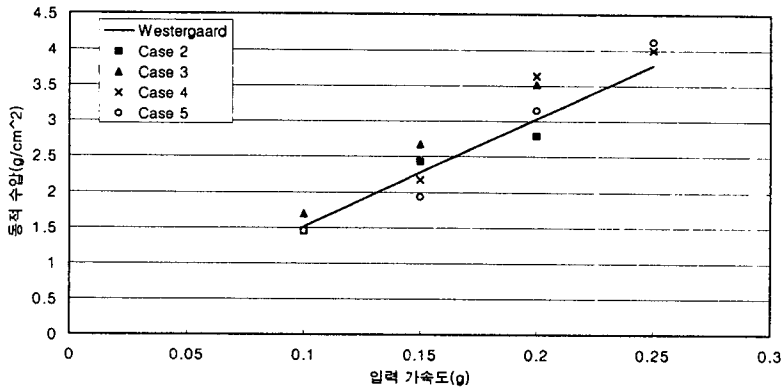


그림 8. 입력가속도 크기에 따른 안벽에 작용하는 동수압

이 그림에서 보면 모든 가속도 크기에서 동수압 측정값이 Westergaard 방법으로 구한 값과 대체로 일치하는 결과를 보여주므로 Westergaard 방법이 신뢰성이 있음을 알 수 있다. 측정값은 Westergaard 방법으로 구한 값에 비하여 $\pm 4 \sim 15\%$ 오차범위를 가진다. 이러한 오차는 토조의 강성에 의한 수파의 반사효과와 안벽의 이동 및 침하에 의해서도 일부 발생했을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 진동대 시험을 실시하여 지진동에 대한 일반 안벽구조물과 내진 보강된 안벽구조물의 동적거동을 분석하고 내진보강기법의 성능을 평가하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 안벽의 파괴는 진동시 뒤채움 지반의 연약화로 인하여 안벽에 작용하는 토압이 증가하면서 발생한다. 안벽의 기초지반이 조밀한 경우에는 기초지반의 변형이 크게 발생하지 않으므로 미끄러짐 파괴가 발생하였고, 기초지반이 느슨한 경우에도 경량재 치환공법을 적용한 경우를 제외하면 미끄러짐 파괴가 발생하였다. 경량재 치환공법을 적용한 경우에는 회전파괴가 발생하였는데, 이것은 상부의 경량재 때문에 토압의 작용위치가 하부로 이동하였기 때문으로 판단된다.
- 2) 자갈 뒤채움재의 설치여부에 상관없이 뒤채움 지반내의 과잉간극수압은 안벽에 인접할수록 그 크기가 억제되는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 진동시 안벽의 이동으로 인한 지반 내의 구속압 감소때문으로 판단된다.
- 3) 진동중 뒤채움 지반의 침하량은 안벽 무게중심의 횡변위량에 비례하여 발생하며, 진동이 끝난 후에도 과잉간극수압이 소산되면서 총침하량의 약 12.7%의 침하량이 추가적으로 발생하였다.
- 4) 뒤채움 지반의 침하량과 안벽 무게중심의 횡변위량은 미끄러짐 파괴의 경우에는 약 1:2.8의 비율로 발생하고, 회전파괴의 경우에는 안벽의 회전으로 인하여 횡변위량 발생이 억제되므로 약 1:1.3의 비율로 발생하였다.
- 5) 경량재 치환공법과 모래다짐따둑 공법을 적용한 경우 보강공법을 적용하지 않은 안벽 구조물에 비하여 동일한 입력 가속도에서 안벽과 뒤채움 지반의 변위가 크게 억제되어, 안벽의 내진 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.
- 6) 안벽 전면에 작용하는 동수압의 측정값은 Westergaard의 방법으로 계산한 결과와 잘 일치하여 Westergaard 방법의 신뢰성을 확인하였다.

참고문헌

1. Abbas Ghalandarzadeh(1997), "Shaking Table Tests on Seismic Displacements of Water Front Structures", Ph. D. Thesis, University of Tokyo
2. Steven L. Kramer(1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, Inc.
3. Abbas Ghalandarzadeh, Ikuo Towhata, Takashi Orita and Fang Yun(1998), "Shaking Table Tests on Seismic Behavior of Quay Walls During Earthquakes", Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, pp.1045~1056