

1-g 진동대 실험을 통한 사석마운드의 상대밀도에 따른
중력식 안벽의 동적거동 분석
Evaluation on the dynamic behavior of gravity quay wall
with different relative density of rubble mound
from 1-g shaking table tests

이용재¹⁾ 한진태²⁾ 장인성³⁾ 김명모⁴⁾
Lee, Yong Jae Han, Jin Tae Jang, In Sung Kim, Myoung Mo

ABSTRACT

The vibrohammer compaction methods had been applied more and more to the rubble mound lying under the gravity quay wall in Korea. 1g Shaking table tests were performed to evaluate on the dynamic behavior of gravity quay wall with different relative density of rubble mound. The settlements, relative displacements and accelerations of gravity quay wall were measured and analysed.

1. 서론

중력식 안벽이나 방파제 구조물에서 사석마운드나 뒤채움 지반의 다짐 정도가 중력식 구조물의 정적인 거동 및 동적인 거동에 큰 영향을 미친다는 것은 어느 정도 알려진 사실로서, 1995년 일본 고베 지진 발생 시 사석마운드를 다져 시공한 내진강화 안벽이 다른 안벽과는 달리 피해를 거의 입지 않은 것에서 확인할 수 있다. 한편, 국내에서 육상 공사 시 활용되는 모래나 점토 지반의 다짐 효과에 대한 연구는 상당히 많이 수행되어 그 결과를 실제 현장에 상당부분 활용하고 있으나, 해상 공사 중 그 중요성이 예측되는 사석마운드에 대한 다짐 효과를 실규모로 확인한 예는 거의 없다. 또한, 국내의 중력식 케이슨 안벽이나 케이슨 방파제의 경우 사석마운드를 다져서 시공하도록 되어 있지 않아 향후 정적인 성능 개선 이외에도 동적 내진성능 향상을 위해 이에 대한 개선의 필요성이 제기되고 있다.

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
2) 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
3) 한국해양연구원 연안항만공학 연구본부, 선임연구원
4) 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

지금까지 시행되어 온 국내 중력식 안벽의 경우 대부분 사석마운드의 침하 대책으로 사석마운드 더듬기를 시행한 후 상재하중에 의한 침하를 유도하는 방식을 적용해 왔다. 이러한 방법은 케이스 거치 후 재하에 의한 변위가 과도하게 발생할 경우 케이스를 재거치 하여야 하므로 공사비 및 공기가 많이 드는 단점이 있다. 반면, 사석 투하 단계에서 사석마운드를 강제적으로 다짐하는 진동다짐공법을 적용하면 공기단축 및 시공비가 상대적으로 저렴하면서도 사석마운드의 잔류침하 제어 및 안정성 확보라는 장점이 있다.

사석마운드의 진동다짐 작업의 순서는 다음의 그림 1과 같다. 먼저 사석을 선적하고, 사석의 규격을 확인한 후 사석 투하위치를 결정하고 장비를 설치한다. 이후 사석을 투하하고 다짐 전에 수심을 확인한다. 사전에 제작한 다짐판을 진동다짐판 바이브로 햄머에 체결하여 사석을 다지고 마지막으로 다짐정도를 확인하게 된다.



그림 1. 사석마운드의 진동다짐 순서

본 연구의 목적은 대형 진동대 실험을 통하여 사석마운드의 다짐에 따라 케이스 모형 안벽의 동적 거동이 어떻게 달라지는가를 분석하고, 이러한 분석 결과를 향후 중력식 안벽의 설계 및 시공에 활용하여 내진성능을 개선하고자 하는데 있다.

2. 실험 조건

일본 고베항 단면을 원형으로 결정하고, 이에 14.5의 길이에 대한 상사비를 적용하여 높이 1m의 모형안벽을 제작하였다. 사석마운드의 두께는 상사비에 따라 20cm로 결정되었고, 이러한 규모의 모형단면을 조성할 수 있도록 대형 토조를 제작하였다. 사석마운드를 다지기 위한 진동다짐기 또한 별도로 제작하였다. 입력지진파로는 상사비를 적용한 인공지진파를 사용하였고, 인공지진파의 최대가속도 크기는 0.154g 및 0.380g 등으로 달리하여 각각 중진 및 강진에 대한 모형안벽의 동적 거동을 모사하도록 하였다. 사석마운드의 상대밀도는 전혀 다지지 않은 30%, 2층 다짐을 한 50%, 4층 다짐을 한 70%, 진동대로 흔들어서 다진 100% 등 총 4가지로 달리 하였다. 따라서, 총 실험 조건의 종류는 모두 8가지이다. 모형안벽 및 모형지반에는 변위계, 가속도계, 간극수압계, 로드셀 등의 계측장치를 설치하여 진동대가 흔들리는 동안 모형단면에 발생하는 물리적 현상들을 측정하였고, 이를 분석하여 사석마운드의 상대밀도에 따른 모형안벽의 동적거동 차이를 살펴보았다.

2.1 입력지진파

입력지진파로는 설계응답스펙트럼을 따르는 지속시간 40초의 인공지진파를 만들어서 이를 원형의 입력지진파로 결정하였다. 이에 상사비를 적용하여서 실제 진동대에 입력되는 인공지진파의 지속시간은 5.38초이며, 그림 2에 진동대에 입력된 사용된 두 가지 입력지진파를 나타내었다. 입력지진파의 최대가속도 크기 0.154g(중진)는 지진 I 구역에 위치한 1등급 붕괴방지수준의 구조물에 요구되는 지표면 최대설계가속도에 해당하며, 이때의 C_a 및 C_v 값은 모두 0.154이다. 입력지진파의 최대가속도 크기 0.380g(강진)는 아래의 관계식 (1)(Cornell et al., 1979)에서 지진규모 M 을 국내 기준에서 강진에 해당하는 6.5라 가정하고, 진앙으로부터의 거리 R 을 10km라고 가정할 때의 PHA 값에 해당한다.

$$\ln(PHA) = 6.74 + 0.859M + 1.8\ln(R + 25) \quad (1)$$

PHA : 최대 수평방향 가속도 (gals), M : 지진규모, R : 진앙으로부터의 거리 (50km 미만)

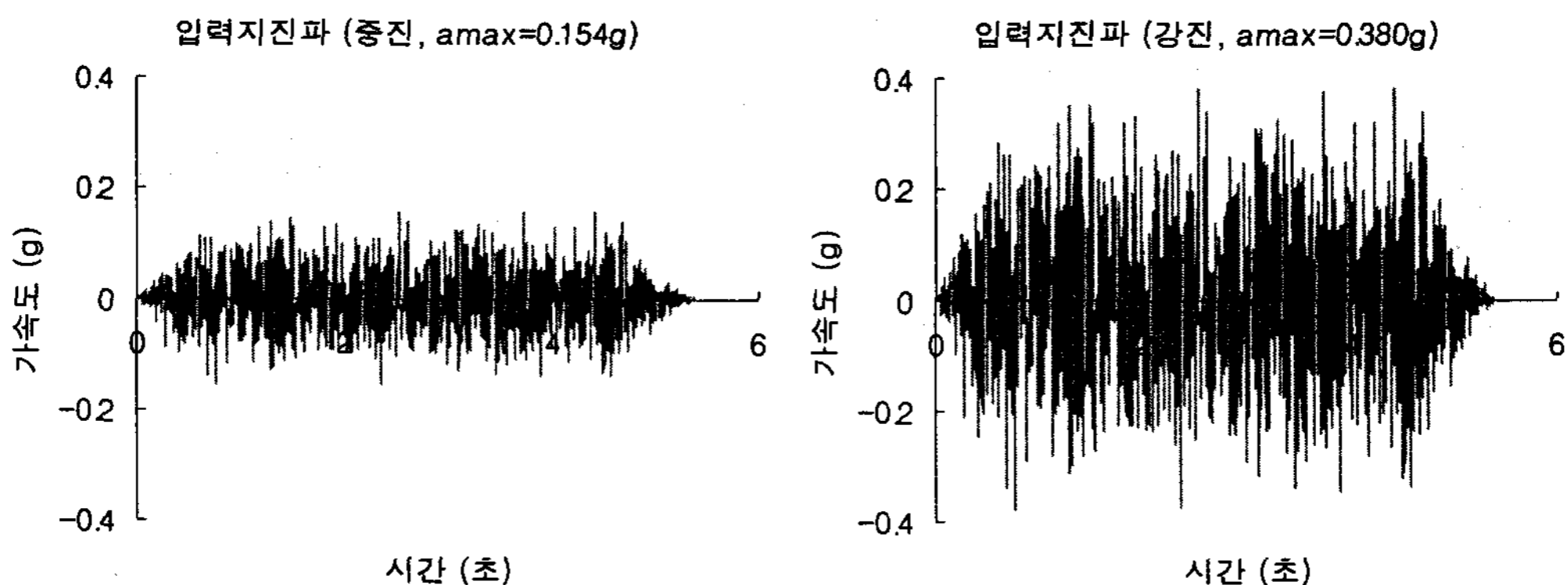


그림 2. 입력지진파

2.2 실험 장비

본 실험에서는 현대건설기술연구소의 1축 진동대를 사용하였으며, 그 재원은 가로 5m, 세로 3m, 최대 상재하중 25ton, 최대가속도 1g 등이다. 실험에 사용한 토조는 그림 3과 같으며, 내부규격은 가로 3m, 세로 1m, 높이 1.6m이다. 모형 안벽은 그림 4와 같으며, 규격은 가로 99cm, 세로 72.6cm, 높이 1m,, 전체 무게 1.33ton, 전체부피에 대한 단위중량 $2\text{ton}/\text{m}^3$ 이다. 사석마운드의 다짐을 위해 제작한 진동 다짐기는 그림 5와 같으며, 크게 속도 조절 장치와 다짐 장치로 나눌 수 있고, 다짐 장치는 철재 다짐판과 램머, 그리고 회전모터 등으로 구성된다. 다짐 장치의 무게는 50kg 정도이고 다짐을 하는 동안 사람의 손에 의해 상하좌우로 이동시켜가면서 다지게 된다.

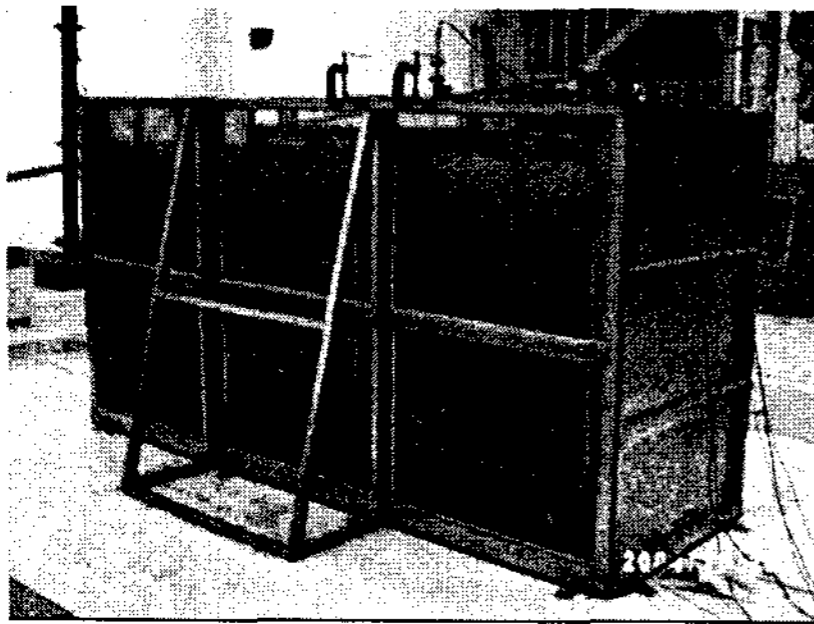


그림 3. 토조

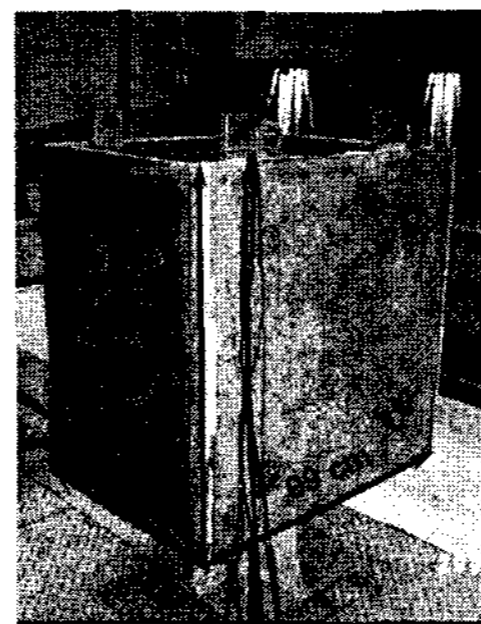


그림 4. 모형 안벽

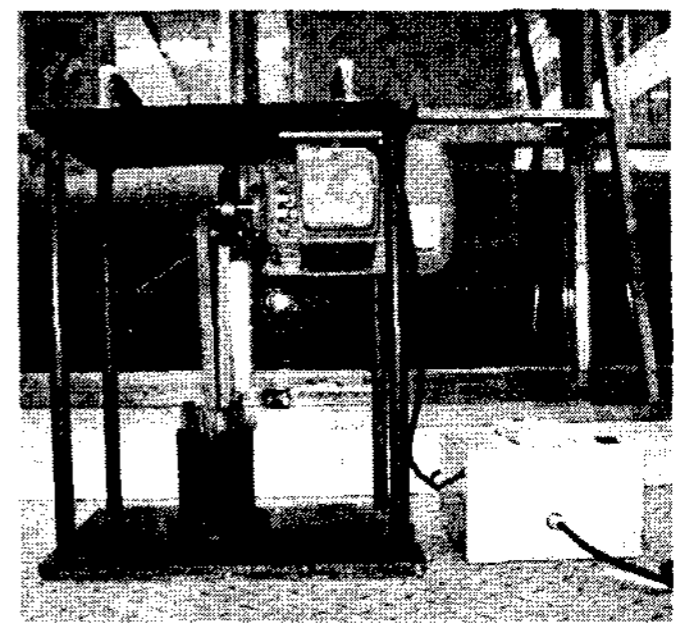


그림 5. 진동 다짐기

2.3 사석마운드 조성

사석마운드에 사용되는 골재에 대한 표준은 국내의 경우 $0.015\sim 0.03\text{m}^3/\text{EA}$, 즉 부피에 대한 규정만 제시되어 있다. 계산 및 부피 측정 등의 과정을 통하여 22.4~31.5mm 사이의 사석들이 상사비 14.5를 적용하는 경우에 위의 표준을 잘 만족하는 것으로 판명되었다. 여러 번의 시행착오를 거쳐 결정한 사석마운드의 상대밀도를 달리하는 4가지 조성방법은 다음의 그림 6과 같다. 첫 번째는 사석을 천천히 부은 후 전혀 다짐을 하지 않고 사석마운드의 모양을 만드는 방법으로 이때의 상대밀도는 30%에 해당한다. 두 번째는 사석의 두께를 10cm 씩 2번에 걸쳐 진동다짐기로 충분하게 다지는 방법으로 이처럼 2층 다짐에 의해 조성된 사석마운드의 상대밀도는 50%에 해당한다. 세 번째는 사석의 두께를 5cm 씩 4번에 걸쳐 진동다짐기로 충분하게 다지는 방법으로 이처럼 4층 다짐에 의해 조성된 사석마운드의 상대밀도는 70%에 해당한다. 네 번째는 원하는 사석마운드의 두께만큼을 토조 전체에 대하여 진동대의 강한 진동에 의하여 조성한 후 원하는 사석마운드 모양의 바깥 부분을 제거하는 방법으로 이 때의 상대밀도는 100%에 해당한다.

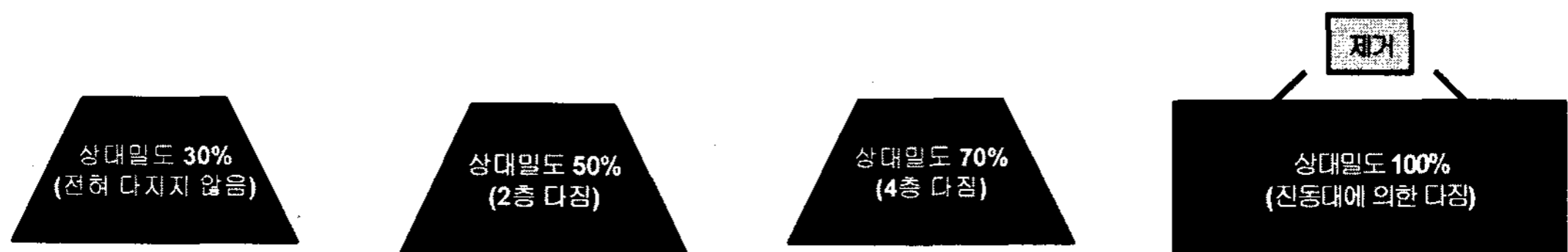


그림 6. 사석마운드의 4가지 조성방법

2.4 실험 단면

그림 7은 안벽 모형에 대한 진동대 실험 단면을 나타낸다. 먼저 토조 바닥에서부터 포화된 실트질 모래를 5cm씩 쌓아 가면서 총 6층으로 층다짐을 하여 기초지반 조성하였다. 층다짐 방법은 진동대를 강한 Sin파(4~5Hz, 최대가속도 0.5g 이상, 지속시간 5분 이상)로 흔들어서 상대밀도 90% 이상의 단단한 기초지반이 되도록 하였다. 기초지반 위에 20cm 두께의 사석마운드 형태의 사석마운드를 조성하였으며, 그 조성방법은 앞에서 그림 6에 대하여 언급한 바와 같다. 뒤채움 혹은 기초지반과 동일한 실트질 모래로서 포화된 흙을 일정 깊이의 물속으로 투하한 후 안벽에 변위가 발생하지 않는 범위에서 10cm씩 층다짐하여 상대밀도가 60% 이상이 되도록 하였다. 안벽의 폭은 배면지반의 동적 작용력을 측정하기 위한 로드셀 4개를 장치함으로써 72.6cm가 되었고, 변위계 3개, 가속도계 7개, 간극수압계 7개 등을 곳곳에 설치하여 계측하였다.

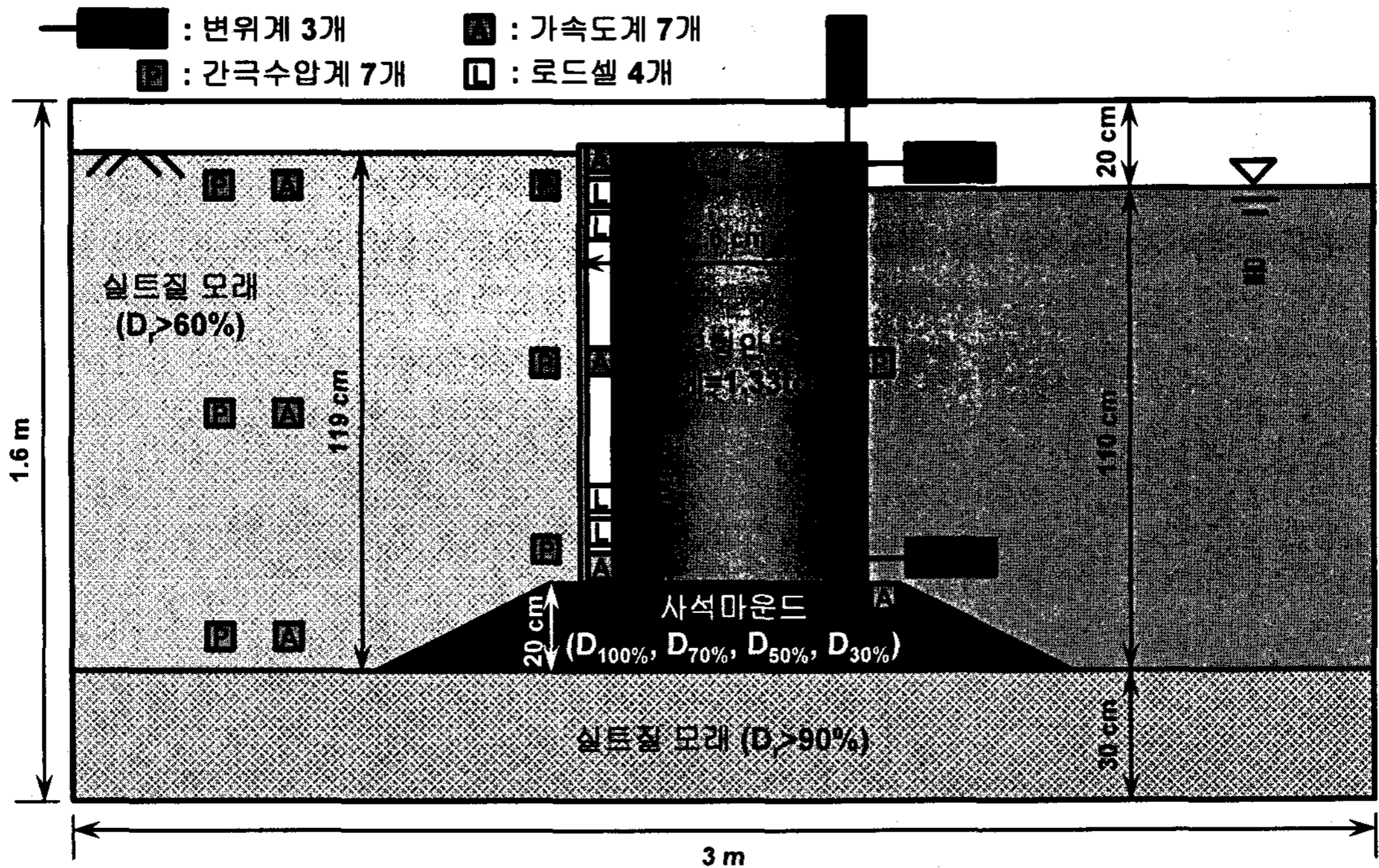


그림 7. 진동대 실험 단면

3. 실험 결과

3.2 변위 측정 결과

다음의 표 1은 중진 및 강진에 대한 안벽의 최종변위 결과이며, 사석마운드의 상대밀도가 증가함에 따라 모형 안벽에 발생하는 변위량이 줄어드는 경향을 보인다. 특히, 안벽의 동적거동 중 가장 관심이 가는 부분인 안벽의 침하량과 안벽 상단에서의 수평변위량, 그리고 회전각을 살펴보면

사석마운드를 전혀 다지지 않는 경우(상대밀도 30%)에 비해서 사석마운드가 약간 다져지는 경우(상대밀도 50%)에 변위가 감소하는 정도가 가장 크다. 현장에서 진동다짐공법 등에 의해 사석마운드를 다지게 되면 최소 상대밀도 50% 이상이 될 것으로 판단되며, 이는 사석마운드를 전혀 다지지 않는 상대밀도 30%에 비하여 안벽의 침하는 21% 이상, 상단의 수평변위는 9% 이상, 하단의 수평변위는 7% 이상, 회전각은 5% 이상 감소될 것이다.

표 1. 모형 안벽의 최종변위 결과

사석의 상대밀도	침하량(mm)		상부수평변위(mm)		하부수평변위(mm)		회전각(°)	
	중진	강진	중진	강진	중진	강진	중진	강진
100%	0.5	1.1	2.0	6.5	1.3	4.5	0.04	0.13
70%	0.6	1.5	2.8	7.4	1.9	5.3	0.05	0.13
50%	0.9	2.8	3.0	7.7	2.0	5.3	0.06	0.15
30%	1.7	3.5	3.9	8.6	2.2	6.0	0.11	0.16

한편, 그림 8은 일정 조건에서의 안벽 상부 및 하부의 변위 시간이력을 나타낸 것으로 안벽 상단의 수평변위와 안벽 하단의 수평변위는 서로 180°의 위상차를 보이며 진행되는 것을 알 수 있으며, 다른 조건에 대하여도 이와 동일한 경향을 보인다. 따라서, 그림 9에서와 같이 안벽의 회전운동 중심은 일반적인 예상처럼 안벽 전면의 선단이 아니라 안벽 자체의 무게 중심과 일치할 것으로 생각된다.

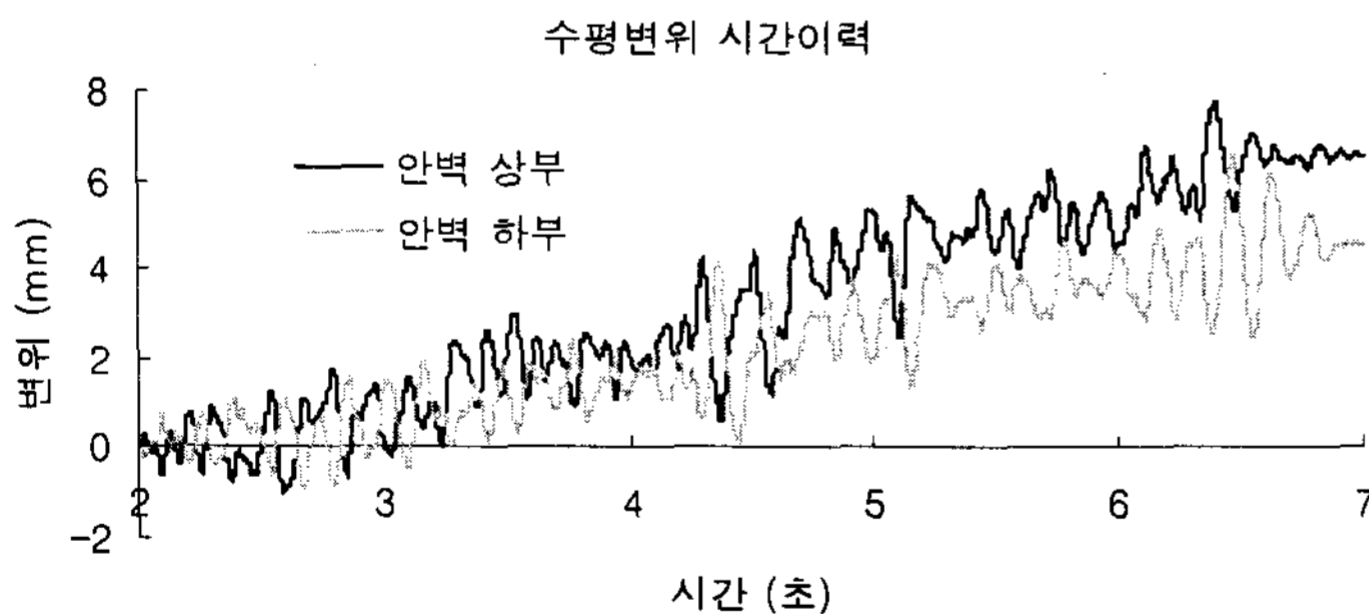


그림 8. 안벽 상부 및 하부의 수평변위 발생 양상

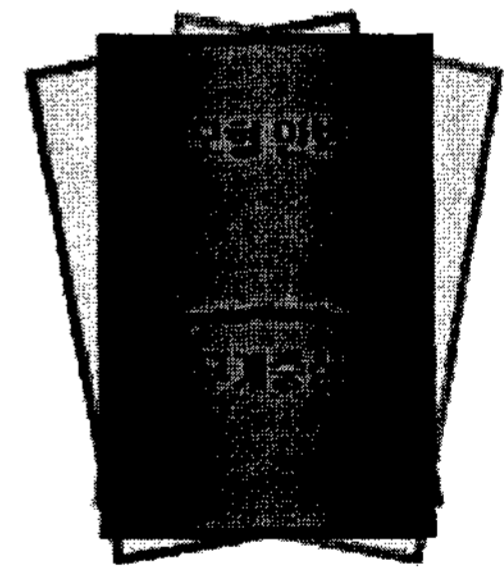


그림 9. 회전운동

안벽 상단에 발생한 수평변위는 크게 두 가지 성분으로 나눌 수 있다. 먼저 안벽 전체의 수평이동에 의한 성분으로서 이는 안벽의 무게중심에 발생한 수평변위에 해당하며 “미끄러짐에 의한 안벽 상단의 수평변위”로 정의한다. 무게중심의 위치는 안벽 바닥에서 43.4cm 높이에 위치하므로 이곳의 수평변위는 안벽 상·하부에서 측정된 수평변위 결과로부터 보간법에 의하여 구할 수 있다. 다음은 안벽 전체의 회전에 의한 성분으로서 이는 안벽 상단에 발생한 수평변위와 무게중심에 발생한 수평변위의 차이에 해당하며, “회전에 의한 안벽 상단의 수평변위”로 정의한다. 표 1의 최종

변위 결과로부터 안벽 상단에 발생한 수평변위 중 각각 안벽의 미끄러짐에 의한 비율과 안벽의 회전에 의한 비율을 계산한 결과는 아래의 표 2와 같다. 여기서, 안벽의 회전운동은 위에서 언급한 바와 같이 안벽의 전면하단을 중심으로 회전하지 않고 안벽의 무게중심을 축으로 회전하는 것으로 가정하였고, 이를 바탕으로 미끄러짐 및 회전에 의한 상부 수평변위 발생 비율을 각각 계산하였다. 표 2를 살펴보면 가해지는 지진하중의 크기가 커지면 미끄러짐에 의한 수평변위의 발생이 회전에 의한 수평변위 발생에 비하여 차지하는 부분이 커진다는 것을 알 수 있다. 한편, 사석마운드의 상대밀도가 30%이고 중진이 가해지는 경우의 값들이 다른 경우들과 비교하여 상대적으로 미끄러짐에 의한 변위 발생이 차지하는 비율이 작고 회전에 의한 변위 발생이 차지하는 비율이 크다는 점이 주목된다. 이는 사석마운드의 다짐이 전혀 없이 매립에 의해서만 조성하게 되면 일반적인 내진설계기준에 해당하는 중규모의 지진에 대하여 안벽의 전도에 의한 파괴가 발생할 가능성이 진동다짐공법을 적용하는 경우에 비하여 크다는 것을 의미한다. 바꾸어 말하면, 사석마운드를 어느정도 다져서 상대밀도를 50% 이상으로 증가시키면 안벽의 전도에 대한 안정성이 효과적으로 증가된다는 것이다.

표 2. 안벽 상단 최종 수평변위의 구성 요소

사석마운드 상대밀도	중진($a_{max}=0.154g$)		강진($a_{max}=0.380g$)	
	미끄러짐(%)	회전(%)	미끄러짐(%)	회전(%)
100%	85.2	14.8	86.5	13.5
70%	86.7	13.3	88.0	12.0
50%	85.5	14.5	86.3	13.7
30%	81.0	19.0	87.0	13.0

3.3 가속도 측정 결과

안벽 벽체의 상·중·하부에서 측정된 가속도의 결과를 표 3에 정리하였으며, 여기서 “± 최대가속도 평균값”이란 각각의 가속도 시간이력 그래프에 대하여 양의 최대값과 음의 최대값의 절대값을 평균한 것을 의미한다. 표 3에서 먼저 안벽 상·중·하부에서의 가속도 차이를 살펴보면 안벽 중앙부에서의 가속도가 상부 및 하부에서의 가속도에 비하여 매우 작으며, 이는 그림 8 및 그림 9에서 안벽 상·하부 수평변위의 위상차를 분석하면서 언급한 바와 마찬가지로 안벽이 자신의 무게중심을 회전축으로 하여 운동하기 때문으로 판단된다. 다음으로 중진의 경우와 강진의 경우를 비교해 보면 강진의 경우 안벽 하부의 가속도가 상대적으로 크며, 이는 표 2에서와 마찬가지로 강진이 작용하면 안벽의 수평변위 중 미끄러짐에 의한 부분이 증가한다는 것을 증명한다. 한편, 안벽 상부의 가속도가 안벽 하부의 가속도에 비하여 매우 큰 경우로는 사석마운드의 상대밀도가 30%이고 중진이 가해진 경우가 해당한다. 이는 역시 표 2에서와 마찬가지로 사석마운드의 다짐이 전혀 없이 매립에 의해서만 조성하게 되면 일반적인 내진설계기준에 해당하는 중규모의 지진에 대하여 안벽의 파괴양상이 전도에 대한 안정성에 지배적인 영향을 받는다는 것을 의미한다.

표 3. 안벽 상·중·하부에서의 ± 최대가속도 평균값

가속도계 위치	중진 ($a_{max}=0.154g$)				강진 ($a_{max}=0.380g$)			
	± 최대가속도 평균값				± 최대가속도 평균값			
	100%	70%	50%	30%	100%	70%	50%	30%
안벽 상	0.271g	0.254g	0.247g	0.237g	0.406g	0.396g	0.347g	0.357g
안벽 중	0.193g	0.181g	0.158g	0.153g	0.328g	0.317g	0.260g	0.251g
안벽 하	0.280g	0.272g	0.203g	0.182g	0.593g	0.592g	0.353g	0.324g

4. 요약 및 결론

- 사석마운드의 상대밀도가 증가할수록 안벽의 최종 변위는 감소하고 가속도는 증가하는 양상을 보인다. 국내 설계기준에 해당하는 중진에 대하여 사석마운드를 전혀 다지지 않았을 때 안벽 상단의 수평변위 중 회전에 의한 부분이 다른 경우에 비하여 크게 나타났으며, 강진에 대하여는 안벽 상단의 수평변위가 주로 미끄러짐에 의해 발생하였다. 강진의 경우 중진의 경우에 비하여 안벽 하부의 가속도가 상대적으로 크며, 이는 변위에 대한 결과에서와 마찬가지로 강진이 작용하면 안벽의 수평변위 중 미끄러짐에 의한 부분이 증가한다는 것을 의미한다.
- 안벽 상단의 수평변위와 안벽 하단의 수평변위는 서로 180°의 위상차를 가지고 진행된다는 점과 안벽 중앙부에서의 가속도가 안벽 상부 및 하부에서의 가속도에 비하여 작다는 점으로부터 모형 안벽의 회전운동이 일반적인 예상처럼 전면의 선단을 기준으로 하지 않고 자신의 무게중심을 기준으로 하여 이루어진다는 것을 알 수 있다.
- 사석마운드를 다져서 상대밀도 50% 정도에 이르게 되면 전혀 다지지 않았을 때의 상대밀도 30%인 경우에 비하여 안벽의 침하는 21% 이상, 상단의 수평변위는 9% 이상, 하단의 수평변위는 7% 이상, 회전각은 5% 이상 감소하였다. 사석마운드의 상대밀도가 30%이고 중진이 가해진 경우에는 안벽 상부의 가속도가 안벽 하부의 가속도에 비하여 매우 크므로 전도에 대한 안정성이 취약하며, 이는 사석마운드를 진동다짐공법 등으로 다져서 상대밀도를 50% 이상으로 증가시킴으로써 효과적으로 개선할 수 있다.

감사의 글

본 연구에 아낌없이 지원을 해준 한국해양연구원 측에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. 항만 및 어항시설의 내진설계표준서 (1999), 해양수산부
2. 김성렬, 권오순, 김명모 (2003). 지진시 중력식 안벽에 작용하는 하중성분의 모델링, 한국지반공학회논문집, 제19권 2호, pp. 1-15
3. Cornell, C.A., & Banon, H., & Shakal, A.F. (1979). Seismic motion and response prediction alternatives, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, No. 4, pp. 295-315.