

## 경사말뚝이 있는 잔교식 안벽의 내진 성능 평가 Seismic Performance of Landing Pier with Batter Pile

권오순<sup>1</sup> · 장인성<sup>1</sup> · 박우선<sup>1</sup>

O-Soon Kwon<sup>1</sup>, In-Sung Jang<sup>1</sup>, and Woo-Sun Park<sup>1</sup>

### 1. 서 론

1995년 일본 고베지진 이후 우리나라에서도 지진에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 현재 국내 여러 기간시설에 대한 내진안전성 평가와 내진설계가 실시되고 있다. 국내 기존 항만시설에 대해서도 내진 안전성 평가가 수행되고 있으며 현재 계획·시공되고 있는 항만에서도 내진설계가 반영되고 있다. 중요한 항만시설물 중 하나인 잔교식 안벽은 연직말뚝과 경사말뚝을 조합하여 사용하고 있으나, 최근 내진설계에서 경사말뚝이 지진과 같은 동적 하중에 취약하다는 이유로 사용에 제한을 받고 있다.

본 연구에서는 연직말뚝과 경사말뚝이 설치된 잔교식 안벽에 대한 진동대실험과 3차원 유한요소해석을 통해 경사말뚝의 경사로 인한 영향을 고찰하였으며, 연직말뚝에 비해 정적 하중에 대하여 지지력이 큰 경사말뚝을 지진 하중에서도 활용하기 위해 경사말뚝 두부에 고무면진장치를 설치하여 그 효과를 검증하였다. 내진성능 평가 방법으로 경사말뚝 경사각의 변화 및 말뚝과 상판연결부에 고무로 구성된 면진장치 설치 유무, 지반의 두께에 따른 설계응답스펙트럼 분석과 시간이력해석을 수행하였다.

### 2. 잔교식 안벽의 내진설계

#### 2.1 내진설계

말뚝으로 지지되는 잔교식 안벽의 내진설계는 중요도에 따라 1등급 및 2등급, 내진성능 수준에 따라 기능수행수준과 붕괴방지수준으로 구분하여 적절한 해석방법을 사용한다(해양수산부, 1999). 지진해

석방법으로는 구조물에 작용하는 지진력에 의한 영향을 해석하기 위하여 자중에 비례하는 임의의 수평력 또는 수직력을 지진하중으로 두고 정적 해석을 수행하는 등가정적해석법과 응답스펙트럼법 및 시간이력해석법으로 구분되는 동적 해석방법이 있다.

단일모드해석법은 지반의 종류에 따라 결정된 표준 설계응답스펙트럼(Fig. 1)에서 잔교식 안벽의 첫 번째 고유 진동모드에 해당하는 고유 주기에 해당하는 가속도응답  $S_a$ 를 구한 후, 아래 식을 이용하여 설계 지진하중을 구하는 방법이다.

$$P_e = S_a I W$$

여기서,  $I$ 는 지진등급에 따른 중요도계수이며,  $W$ 는 구조물 자중을 나타낸다. 응답스펙트럼법은 단자유도계에서 각각의 하중에 대한 구조물의 최대변위, 최대속도, 최대가속도 등의 응답을 나타낸 응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 최대 응답을 구하는 방법으로 시간이력해석법에 비해 다소 오차가 발생하는 근사적 방법이지만 아주 정밀한 결과를 원하지 않는 경우에는 간편하게 구조물의 최대 응답을 추정할 수 있다. 시간이력해석법은 다자유도계의 운동방정식을 수치적으로 푸는 방법으로 아주 정밀한 해석을 요구하는 경우에 적용할 수 있다

#### 2.2 내진성능강화 잔교식 안벽

항만에 시공되는 기존의 경사말뚝이 가지고 있는 부적합한 내진성능을 향상시키기 위하여 경사말뚝에 추가 장치를 설치한 복합시스템이 최근에 개발되어 사용되고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 미국의

<sup>1</sup> 한국해양연구원 연안항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute, Sadong 1270, Ansan-si Gyeonggi-do 425-744, Korea)

Long Beach 항에서는 상판과 경사말뚝의 연결부에 내진 휴즈 장치인 수평 강철 빔을 설치하여 지진으로 인한 축하중을 강철 빔의 휨을 이용하여 상판에 전달 시키고자 하였다(seismic fuse link; Roth, et. al., 1992). Los Angeles항에서는 경사말뚝의 내진 성능 향상을 위하여 말뚝 연결부에 격리장치(base-isolation)를 도입하였는데, 초기 강성으로 정적 하중에 대한 과도한 평방향 변위를 제어하고 강한 지진파에 대해서는 연결부가 함복하도록 하여 말뚝 두부의 움직임과 상판의 움직임을 서로 분리시키고자 한 것이다(Zmuda, et. al, 1995).

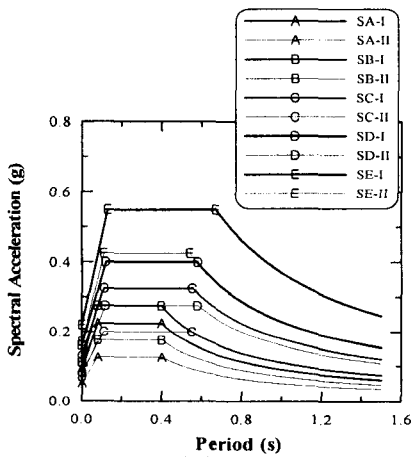


Fig. 1. 표준설계 응답스펙트럼.

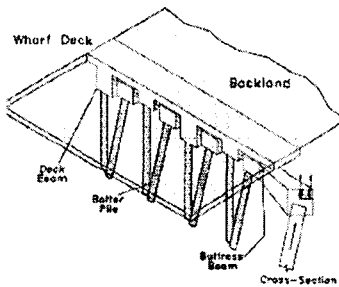


Fig. 2. 내진휴즈 연결장치(Roth et. Al, 1992).

### 3. 진동대실험 및 수치해석

#### 3.1 진동대실험

Table 1과 같이 경사말뚝의 경사각, 말뚝 두부의 변진장치인 고무 설치 유무, 지반 두께 등 다양한 조건에 대하여 진동대실험을 수행하였다. 이때 사용한 모형 토조는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 길이 150cm, 폭

100cm, 두께 70cm, 말뚝과 상판은 각각 직경 1.7cm, 두께 0.1cm의 알루미늄 관 및 길이 30cm, 폭 30cm, 두께 1cm의 강판을 사용하여 제작하였으며, 지반은 상대밀도 70%의 주문진 표준사를 이용하여 조성하였다.

진동대실험은 모형구조물의 고유주파수를 찾기 위한 정현파를 이용한 진동실험(sweep test; 해양수산부, 2001)을 비롯하여, 0.1g의 진폭을 가지는 주기 0.1초의 정현파, 실제 지진인 Imperial Valley 지진과 Tokachi-oki 지진을 최대 지진 가속도 0.11g로 조정된 시계열을 이용하여 실시하였다(Fig. 4 참조).

Table 1. 모형실험 조건

지반 두께(cm)	말뚝 경사	말뚝두부조건
0	0 : 8	
18	1 : 8	고정
36	2 : 8	고부40
54	3 : 8	고부20
	4 : 8	

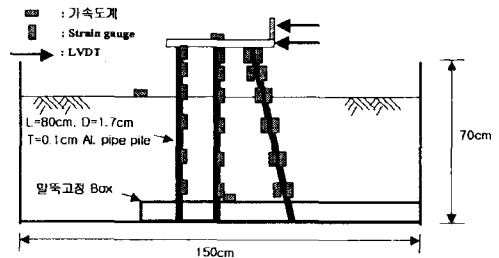
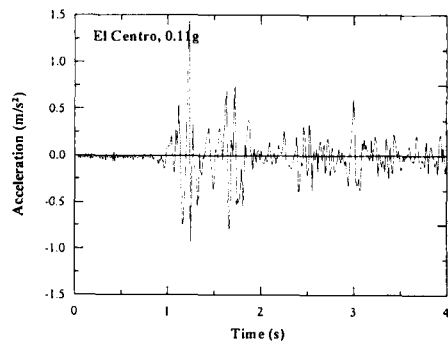
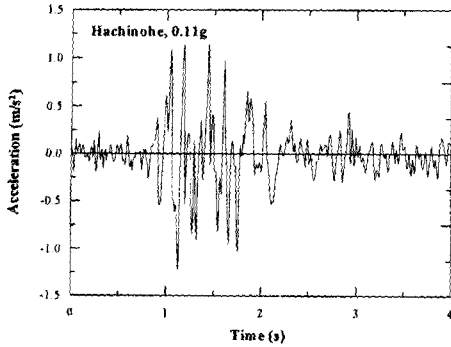


Fig. 3. 진동대실험 모형.



(a) Imperial Earthquake



(b) Tokachi-Oki Earthquake

Fig. 4. 진동대실험에서 사용한 지진파 시계열.

### 3.2 수치해석

실험으로 검토하지 못했던 다양한 조건에 따른 결과를 비교·분석하기 위하여 수치해석을 병행하였으며, 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 지반은 4절점 brick 요소, 말뚝과 고무는 2절점 beam 요소, 상판은 4절점 shell 요소를 사용하여 모델링하였고, 지반을 비롯하여 말뚝 및 상판 등 모든 부재는 탄성체로 모델링하였다. 그리고 시간이력해석법 중 직접분법을 이용하여 지진해석을 수행하였다. Fig. 5는 지반의 심도가 36cm, 말뚝 경사가 2:8인 조건에 대한 수치해석 mesh를 나타낸 것이다. 바닥은 완전 고정으로 처리하였고 측면 부분은 횡방향 경계부에서 파가 반사하지 않도록 횡방향 무한요소(infinite element; quite boundary)를 사용하였다. Table 2는 수치해석에 사용한 지반, 말뚝, 상판의 물성을 나타낸

Table 2. 수치해석에 사용한 지반, 말뚝, 상판, 고무의 입력값

구분	탄성계수 (kPa)	포아송비	건조단위중량 (kN/m³)	비고
지반	10,000	0.3	14.9	
말뚝	7.0~107	0.33	26.5	알루미늄 (길이:70cm, 외경:1.7cm, 내경 1.5cm)
상판	2.1~108	0.27	74.5	Steel (두께 : 1cm)
고무 20	1,300	0.49	9.8	경도 20
고무 40	3,000	0.49	9.8	경도 40

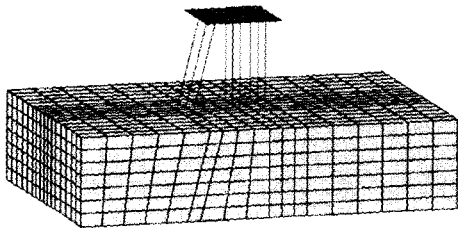


Fig. 5. 해석 mesh (지반두께 36cm, 2:8).

것으로 진동대실험에서 사용한 물성치를 적용하였다. 수치해석에서 사용한 입력가속도는 진동대실험에서 사용한 정현파(0.1g)와 Imperial Valley 지진, Tokachi-oki 지진과 함께  $S_B$  지반조건(보통암 지반)에 해당하는 인공지진을 제작하여 해석에 사용하였다(Fig. 6 참조).

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 고유진동수 분석결과

진동대실험과 3차원 유한요소해석법을 이용하여 연직말뚝만으로 이루어진 잔교와 경사말뚝과 조합된 잔교의 고유진동수를 산정하여 첫 번째 고유진동 모드에서의 주기의 변화를 고찰하였다. Table 3은 진동대실험에서 얻어진 고유진동수와 수치해석 결과에서 얻어진 고유진동수를 정리한 것이다. 표를 보면 수치해석에서 얻어진 고유진동수가 진동대실험에 얻어진 고유진동수보다 대략 10~20% 정도 더 크게 나타나고 있다. 표에서 보정 후 고유진동수는 진동대실험에서 사용한 잔교식 안벽 모형과 실제 잔교식 안벽과의 상사가 적절하지 않아 직접적인 비교에 어려움이 있어 실제 안벽의 첫 번째 고유진동수에 맞도록 안벽 모형 상판의 중량을 증가시켜 해석을 수행한 결과를 의미한다((財)沿岸開發技術研究センター, 2000). Fig. 7은 수치해석에 얻어진 첫 번째 고유진동모드에 해당하는 변형 형상이다. 말뚝의 횡방향 거동이 지배적임을 알 수 있다.

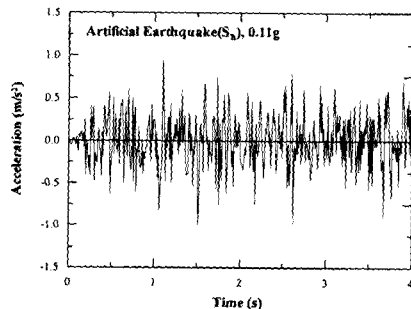
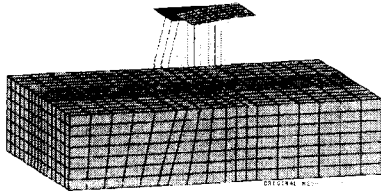


Fig. 6. 인공지진파 시계열( $S_B$  지반조건).

**Table 3.** 진동대시험과 수치해석(보정 전후)에서 얻어진 고유진동수

지표면 심도	말뚝 경사	두부 구속조건	고유진동수 (Hz)			지표면 심도	말뚝 경사	두부 구속조건	고유진동수 (Hz)		
			진동대 시험	수치해석					진동대 시험	수치해석	
				보정 전	보정 후					보정 전	보정 후
0cm	0 : 8	고정	10	11.1	0.67	36cm	0 : 8	고정	18.3	22.6	0.33
		고무40	4.9	5.5	1.33			고무40	8.4	9.8	0.75
		고무20	4.8	5.1	1.45			고무20	7.9	7.8	0.95
	1 : 8	고정	-	16.9	0.41		1 : 8	고정	22.6	27.6	0.26
		고무40	-	5.7	1.27			고무40	-	10.1	0.74
		고무20	-	5.2	1.41			고무20	-	8.1	0.92
	2 : 8	고정	22.4	25.7	0.27		2 : 8	고정	-	35.0	0.20
		고무40	6.2	6.2	1.27			고무40	10.0	10.4	0.72
		고무20	5.4	5.4	1.47			고무20	9.3	8.3	0.91
	3 : 8	고정	-	34.6	0.20		3 : 8	고정	-	40.8	0.16
		고무40	-	6.7	1.11			고무40	-	10.8	0.71
		고무20	-	5.7	1.33			고무20	-	8.5	0.91
4 : 8	고정	-	43.1	0.16	4 : 8	고정	-	41.6	0.14		
	고무40	-	7.4	1.04		고무40	-	11.2	0.71		
	고무20	-	6.1	1.30		고무20	-	8.7	0.92		
18cm	0 : 8	고정	11	14.7	0.50	54cm	0 : 8	고정	-	28.5	0.14
		고무40	5.4	7.4	1.03			고무40	15.8	13.6	0.55
		고무20	5.2	6.2	1.18			고무20	15.6	9.4	0.79
	2 : 8	고정	23.5	28.5	0.24		2 : 8	고정	-	28.8	0.12
		고무40	6.5	7.7	0.96			고무40	19.6	13.4	0.52
		고무20	5.8	6.6	1.14			고무20	18.0	10.6	0.76

나, 말뚝 두부에 고무 면진장치가 설치된 경우의 고유진동수는 말뚝의 설치 경사에 크게 영향을 받지 않는 것을 발견할 수 있다. 진동대시험의 결과도 수치해석의 결과와 거의 동일하게 나타났다.



**Fig. 7.** 첫번째 고유진동모드의 변형형상.

#### 4.1.1 말뚝경사의 영향

Fig. 8 은 진동대시험과 3 차원 수치해석의 결과에서 얻어진 말뚝의 경사에 따른 고유진동수를 도시한 것으로 말뚝의 경사가 급해질수록 고유진동수가 증가하고 있다. 이것은 경사가 급해질수록 경사말뚝의 길이방향 강성이 구조물의 횡방향 강성에 더욱 크게 기여하여 전체 횡방향 강성이 증가하기 때문이다. 말뚝이 설치된 지반의 두께가 두꺼운 경우보다는 지반의 두께가 얇은 경우가 말뚝 경사의 증가가 고유진동수에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 또한, 말뚝의 두부가 상판과 강결된 경우에는 경사의 증가로 인해 고유진동수가 급격하게 커지는 것을 관찰할 수 있

#### 4.1.2 토층 두께의 영향

Fig. 9는 말뚝이 설치된 토층의 두께에 따른 고유진동수를 도시한 것으로 토층의 두께가 증가할수록 고유진동수도 증가함을 알 수 있다. 연직말뚝인 경우와 경사말뚝이 설치된 경우에서 그 크기에는 차이가 있지만 동일한 경향을 보이고 있다.

#### 4.1.3 말뚝두부조건에의 영향

Fig. 10은 말뚝 두부와 상판이 강결된 경우와 고무 면진장치가 설치된 경우에 대한 진동대시험과 수치해석 결과를 토층의 두께와 경사말뚝의 경사에 따라 도시한 것이다. 말뚝 두부와 상판이 강결된 경우와 비교하면 말뚝 두부에 고무면진장치가 설치된 경우의 고유진동수가 급격하게 줄어든 것을 관찰할 수 있다. 말뚝이 설치된 토층의 두께와 경사말뚝의 경사에 따라 절대적인 값의 차이는 있지만 모든 경우에

있어서 고무면진장치는 고유진동수를 급격하게 감소시킴을 알 수 있다.

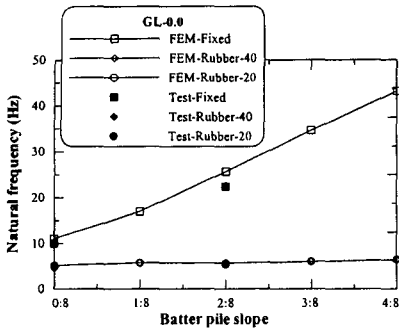


Fig. 8. 경사말뚝의 경사에 따른 고유진동수의 변화.

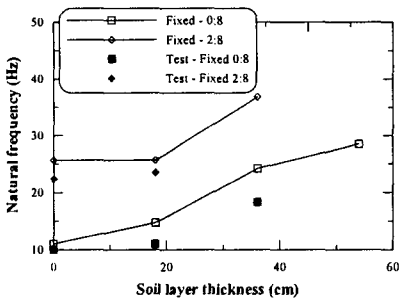


Fig. 9. 토층의 두께에 따른 고유진동수의 변화.

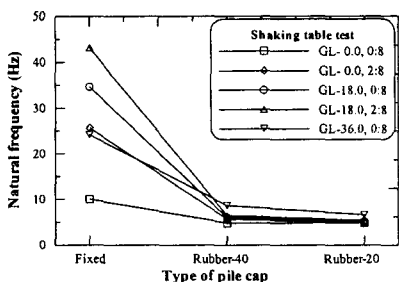


Fig. 10. 말뚝두부조건에 따른 고유진동수의 변화.

#### 4.1.4 고무 면진장치 도입에 따른 하중계수 변화

말뚝의 내진설계에 사용되는 표준 설계응답스펙트럼에서 말뚝시스템의 첫 번째 고유진동모드에 해당하는 주기가 말뚝의 경사, 말뚝 두부 조건 및 말뚝이 설치된 지반의 두께 등에 따라 어떠한 변화를 보이는지 고찰하기 위해  $S_B$  지반(보통암 지반) 조건을 가정하여 설계응답스펙트럼 상에서 말뚝 시스템의 고유주기의 변화와 그에 따른 설계지진하중계수의 변화를 관찰하였다.

Fig. 11은 경사말뚝의 경사에 따른 고유주기의 변화를 설계응답스펙트럼 위에 도시한 것이다. 그림에서 설계하중계수가 연직말뚝은 1차 고유진동모드에서  $0.17C_a$  정도이지만 경사말뚝이 설치되면서 최대 값인  $2.5C_a$ 에 해당함을 알 수 있다. 이것은 경사말뚝을 갖는 잔교를 등가정적해석법으로 해석할 경우 하중계수를  $2.5C_a$ 로 사용하는 것이 적절하다는 것을 의미한다. Fig. 12는 말뚝 두부에 고무면진장치가 설치되었을 때 설계응답스펙트럼 상에서 고유 주기의 변화를 도시한 것으로, 연직말뚝으로 이루어진 잔교식 안벽에 경사말뚝을 설치함에 따라 고유 주기가 짧아져 설계하중의 증가효과를 보이지만, 경사말뚝 두부에 면진장치를 설치할 경우 고유 주기를 길어지게 만들 수 있고, 고무의 높은 감쇠비로 인해 응답 가속도가 작아지는 효과를 볼 수 있기 때문에 내진설계에서 경사말뚝을 보다 효율적으로 활용할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

#### 4.2 시간이력해석

Fig. 13은 잔교식 안벽의 각 해석조건별로 시간에 따른 가속도 응답과 주파수영역에서의 거동 특성을 입력지진에 대하여 각각 비교한 것이다. 그림을 보면, 경사말뚝이 설치되지 않은 경우에는 굽은 선으로 나타난 상판의 가속도 응답이 입력가속도에 비해 상당히 완만해지는 저주파 특성을 보이지만(Fig. 13(a)), 경사말뚝이 설치되면 상대적으로 덜 완만한 다소 고주파 특성으로 바뀌는 것(Fig. 13(b))을 알 수 있다. 이것은 연직말뚝만으로 구성된 경우와 비교하여 경사말뚝이 설치된 경우는 수평방향 강성이 증가되어 고유진동 주파수가 높게 되어 나타난 현상이다. 말뚝두부에 고무면진장치를 설치한 경우에는 말뚝두부가 고정인 경우와 비교하여 뚜렷한 감쇠특성을 관찰할 수 있었다(Fig. 13(c), (d)).

Fig. 14는 보정한 단면에 대한 수치해석에서 얻어진 잔교 상판의 최대 가속도 응답과 최대 변위 응답을 각 조건별로 비교한 것이다. 그림에서 잔교에 설치된 경사말뚝의 기울기가 증가할수록 상판의 가속도 응답은 증가하지만 변위는 감소하는 것으로 나타났다, 말뚝두부에 설치된 고무면진장치로 인해 최대 가속도는 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 말뚝이 설치된 지반의 두께에 따라 상판의 최대 가속

도는 증가하고 최대 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 각 조건별 고유주파수의 변화를 설계 응답스펙트럼에 적용한 결과와 일치하는 경향이다.

말뚝 두부조건 변화에 따른 결과를 살펴보면, 말뚝 두부가 고정일 때보다 고무를 사용하게 되면 상판의 최대 응답가속도는 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 말뚝 경사가 0:8일 때보다 2:8일 때 더욱 뚜렷이 나타나고 있다. 반면 최대 변위는 말뚝 경사가 0:8인 경우 약간 감소하였으나 2:8인 경우는 상대적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 고무면진장치를 설치한 경우, 최대 가속도와 변위 응답 모두 말뚝 경사에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다.

연직말뚝에 대하여 지반 두께에 따른 해석을 수행한 결과를 나타낸 Fig. 14(c)를 보면, 지반두께가 커짐에 따라 최대 가속도 응답은 커지고 최대 변위 응답은 감소하는 경향을 보임을 알 수 있는데, 이는 당연한 결과로 지반의 두께가 증가할수록 노출된 말뚝의 길이가 짧아지고 이에 따라 수평방향의 강성이 증가되어 발생된 것이다.

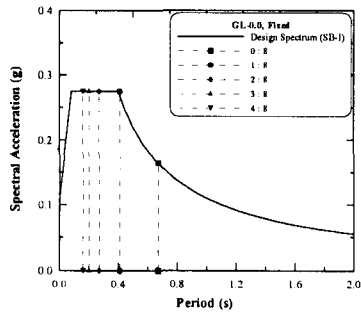


Fig. 11. 경사말뚝의 경사에 따른 고유진동수의 변화.

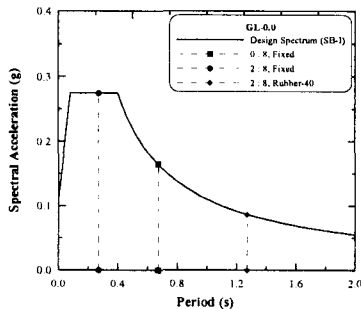


Fig. 12. 고무면진장치의 효과.

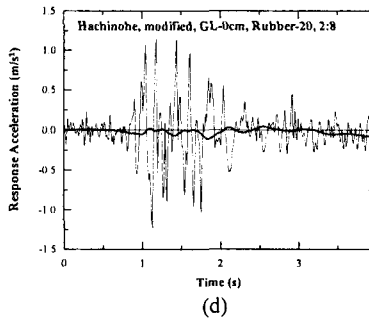
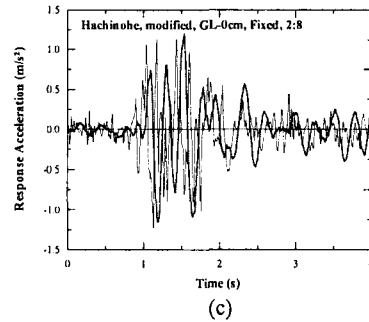
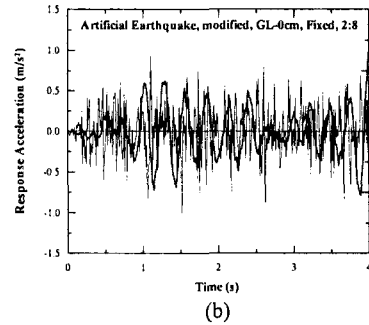
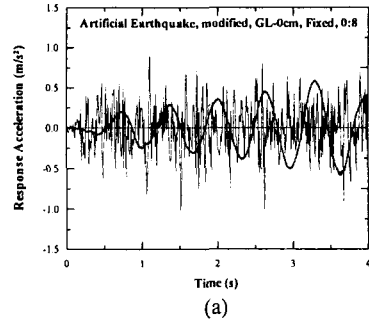


Fig. 13. 상판의 가속도응답 시계열.

## 5. 결 론

본 연구에서는 진동대실험과 3차원 유한요소해석을 통하여 경사말뚝이 설치된 잔교식 안벽의 내진성능에 대해서 검토하였다. 실험과 수치해석을 통하여 도출된 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

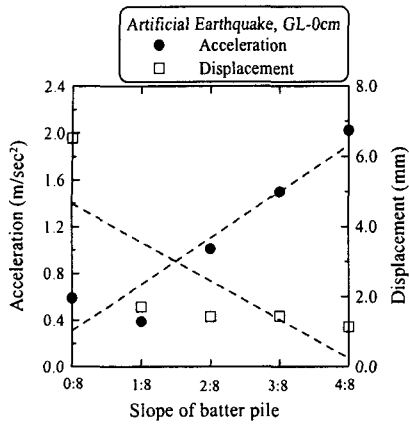
1. 경사말뚝을 사용함에 따라 잔교식 안벽의 고유진동 주기는 짧아지고 잔교 상판의 가속도 응답 시계열은 저주파 특성에서 다소 고주파 특성으로 바뀌며, 경사말뚝의 경사가 커질수록 최대 응답 크기는 증가한다.
2. 경사말뚝을 갖는 잔교식 안벽의 경우 첫 번째 고유진동주기가 설계하중계수가 최대 값인 2.5C<sub>a</sub>에 위치하게 된다. 이번 연구에서 사용한 경사말뚝이 설치된 안벽 단면에서는 등가정적해석에서 제시된 하중계수 2.5C<sub>a</sub>가 적절하다는 것을 의미하는 것이다.
3. 경사말뚝의 두부에 고무 면진장치를 설치하면 구조물에 영향을 주는 첫 번째 고유진동 주기가 길게 되어 구조물 응답이 저주파 특성을 보이게 되며 최대 응답도 감소하게 된다.

## 사 사

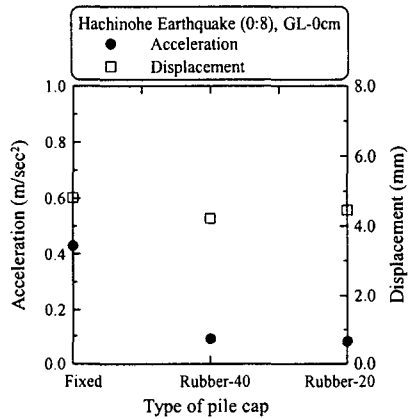
본 연구는 해양수산부 “지진대비향만구조물 보강 기법 및 내진안벽 개발” 연구용역의 일환으로 수행된 것입니다.

## 참고문헌

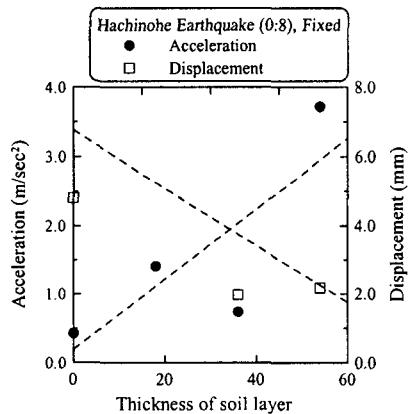
- 권오순, 장인성, 박우선, 2002. 잔교식 안벽의 내진성능 평가 및 개선 (I). 대한토목학회 논문집, 22(3-B): 353~363
- 해양수산부, 1999. 항만 및 어항시설의 내진설계표준서. 78~90
- 해양수산부, 2001. 지진대비향만구조물 보강기법 및 신형안벽개발(IV). 105~242
- (財)沿岸開發技術研究センター, 2000. 港灣構造物設計事例集. pp. 4-1~5-45
- Iai, S. and Sugano, T., 1999. Soil-structure interaction studies through shaking table tests. *Proceedings of the Second International Conference On Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol. 3, pp. 927~940.
- Roth, W.H., Fong, H. and Rubertis, C., 1992. Batter piles and the seismic performance of Pile-Supported Wharves. *Proceedings of Ports '92*, American Society of Civil Engineers, Seattle, WA, pp.



(a) 말뚝의 경사에 따른 비교



(b) 말뚝두부조건에 따른 비교



(c) 지반의 두께에 따른 비교

Fig. 14. 여러 가지 조건에 따른 상판의 응답가속도 및 최대 횡방향 변위.

336~349.

Zmuda, R., Weismar, M. and Caspe, M., 1995. Base isolating a wharf using sliding friction isolator at the Port of Los Angeles. Proceedings of Ports '95, American Society of Civil Engineers, Tampa Florida, pp. 1263~1274.