

## 잔교식 안벽에서 말뚝 두부형식에 따른 내진성능 평가 Evaluation of Seismic Performance for Various Types of Pile Head of Landing Pier

장인성\* · 권오순\* · 박우선\* · 정원무\*

In-Sung Jang\*, O-Soon Kwon\*, Woo-Sun Park\* and Weon-Mu Jeong\*

**요 지** : 국내 잔교식 안벽의 거의 대부분은 연직말뚝과 함께 경사말뚝을 활용하고 있는데, 정적인 상태의 횡방향 지지 효과를 크게 볼 수 있는 경사말뚝을 잔교식 안벽 구조물에 적용하는데 있어 말뚝 두부에 면진장치를 설치함으로써 내진성능 또한 증대시키고자 하는 시도가 꾸준히 이어져 오고 있다. 본 연구에서는 잔교식 안벽 중 경사말뚝의 내진성능 증대를 위한 목적으로 말뚝 두부를 고무 또는 볼베어링을 이용하여 보강하는 시스템을 개발하고, 진동대 실험 및 3차원 수치해석으로부터 새로운 개념의 두부보강기법에 따른 내진성능 평가를 수행하였다. 진동대 실험 및 수치해석 결과로부터 새로운 두부보강기법의 내진성능 효과를 파악하였고, 또한 고무와 볼베어링 시스템의 비선형성을 고려한 3차원 수치해석의 신뢰성을 확인하였다.

**핵심용어** : 잔교식 안벽, 경사말뚝, 면진장치, 내진성능, 진동대 실험, 3차원 수치해석

**Abstract** : Most of landing piers in Korea employ the combination of vertical piles and batter piles, which shows good efficiency in static lateral resistance but poor seismic performance. Many attempts have continuously been made to increase the seismic performance of batter piles with various aseismatic systems. In this study, new types of aseismatic system were developed by use of rubber and ball bearing, and shaking table tests and 3 dim. numerical analyses were performed in order to compare the seismic performance for various types of pile head. The test and numerical analysis results show the high seismic performance of newly proposed systems and the applicability of 3 dim. numerical analysis considering the non-linear behaviour of rubber and ball bearing systems.

**Keywords**: landing pier, batter pile, aseismatic system, seismic performance, shaking table test, 3 dim. numerical analysis

### 1. 서 론

현재 국내에 설치되어 있는 잔교식 안벽 중 대부분은 연직말뚝과 함께 경사말뚝을 혼용하고 있다(해양수산부, 2002b). 이는 파랑하중이나 선박의 접안력 등 외부의 횡방향 하중에 대하여 경사말뚝의 횡방향 지지력이 연직말뚝에 비해 상당히 크기 때문이다. 하지만 경사말뚝의 경우, 최근 들어 중요성이 증대되고 있는 지진과 같은 동적인 하중에 대해서는 말뚝 두부에 과도한 축력이 발생하여 말뚝 두부와 상판과의 연결부가 손상될 가능성이 큰 구조라는 문제점을 가지고 있는데, 이러한 이유로 정적인

상태의 횡방향 지지 효과를 크게 볼 수 있는 경사말뚝을 잔교식 안벽 구조물에 적용하는데 있어 말뚝 두부에 면진장치를 설치하여 내진성능 또한 증대시키고자 하는 시도가 꾸준히 이어져 오고 있다(Roth et al., 1992; Zmuda et al., 1995; 해양수산부, 2001). 한편, 권오순 등(2002a, 2002b)은 진동대 실험 및 수치해석을 통하여 경사말뚝의 경사각 및 말뚝 두부 조건 등에 따른 내진성능 평가를 수행한 바 있지만 여기서는 면진장치를 고무에만 국한시켰을 뿐만 아니라, 고무에 대한 수치해석에 있어서도 경도에 따른 영향을 선형적인 탄성 거동으로 가정하여 해석하였다는 한계를 가지고 있다.

\*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: In Sung Jang, Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. isjang@kordi.re.kr)

본 연구에서는 먼저 잔교식 안벽에 대한 진동대 실험을 통해 새로운 개념의 두부 내진 보강 기법에 따른 성능평가를 수행하였는데, 여기서 두부 내진 보강 기법으로는 고무 연결 시스템과 볼베어링 연결 시스템을 구분하여 적용하였다. 또한 고무와 볼베어링 시스템의 비선형성을 고려한 3차원 수치해석을 수행하여 진동대 실험 결과와 비교를 통해 수치해석의 신뢰성을 확인함으로써 향후 실제 조건에 대한 두부보강기법의 적용성 확인 및 다양한 변수들의 영향을 파악하는데 활용하고자 하였다. 각 두부 형식에 대한 고유 진동수를 설계응답스펙트럼에 적용하여 하중계수를 서로 비교하였으며, 또한 정현파 및 인공지진 등의 입력 지진에 대하여 시간에 따른 상판의 변위 및 가속도, 그리고 말뚝의 부재력 등의 변화를 비교한 시간이력해석으로부터 말뚝 두부형식에 따른 내진성능 평가를 수행하였다.

**2. 새로운 개념의 경사말뚝 두부 내진보강기법**

지진과 같은 동적 횡방향 하중에 대해 경사말뚝 두부에 과도한 축력이 발생하지 않으면서도 정적인 하중에 대해서도 연직말뚝에 비해 큰 지지력을 가질 수 있는 형태의 경사말뚝 두부 내진보강기법으로 고무연결 시스템과 볼베어링연결 시스템을 도입하였다. 먼저 고무연결 시스템의 경우, Fig. 1에서 보는 바와 같이 경사말뚝 두부와 상판과의 연결부에 일정한 두께의 고무를 삽입하는 것으로 하중에 대한 응력-변형을 관계는 Fig. 2와 같이 나타날 것

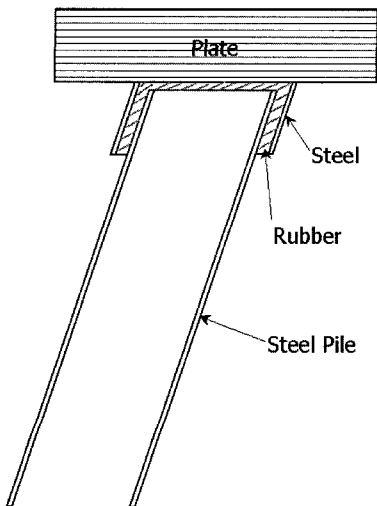


Fig. 1. Pile-cap connecting system with rubber.



Fig. 2. Predicted stress-strain behavior of rubber connecting system.

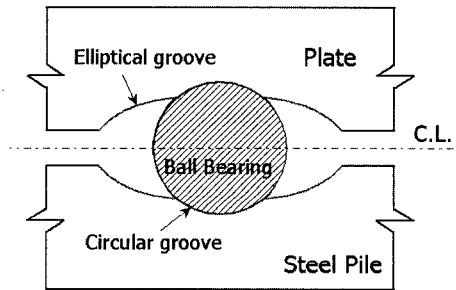


Fig. 3. Pile-cap connecting system with ball bearing.

으로 예상된다. 즉, 처음에는 횡방향 하중에 대하여 낮은 강성의 고무가 변형을 쉽게 일으켜서 상부에 전해지는 지진에너지를 상당부분 흡수하는 효과를 보이다가 하중이 어느 정도 커져서 고무의 변형이 더 이상 일어나지 않는 경우에는 말뚝 본래의 높은 강성에 따라 거동하게 되어 과도한 변위가 발생하지 않는 시스템을 말하는 것이다.

두 번째로 볼베어링 시스템은 Fig. 3과 같이 말뚝 두부와 상판의 연결부에 서로 다른 크기의 2개의 홈(원형의 1차 홈, 타원형의 2차 홈)이 있는 것으로, 중간에 있는 1차 홈에 볼베어링이 위치하고 있다가 지진하중과 같이 횡방향으로 특정한 하중 이상이 가해질 경우 1차 홈에 있던 볼베어링이 이탈하여 타원형의 2차 홈으로 이동함에 따라 급격한 변위를 허용하여 지진에너지를 감소시키는 효과를 나타내게 된다. Fig. 4는 볼베어링 시스템에 대해서 예상되는 응력-변형을 관계를 나타낸 것으로 초기에는 볼베어링이 1차 홈에 위치하고 있을 때의 높은 강성을 보이다가 과도한 지진하중이 작용할 경우 볼베어링이 1차 홈을 이탈하여 낮은 강성에 따라 거동하는 형태를 보일 것으로 예상된다.

한편, 이용재 등(2003)은 기존의 말뚝 두부 연결방법인

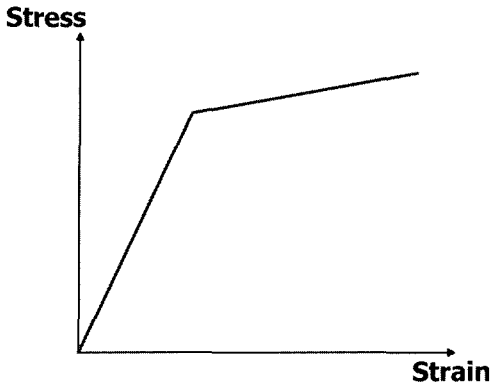


Fig. 4. Predicted stress-strain behavior of ball bearing connecting system.

고정연결방법을 포함하여 고무 연결방법 및 볼베어링 연결방법에 대해 실제 크기의 모형체를 제작하여 수평 재하실험을 수행하여 하중-변위 이력곡선으로부터 수평강성 및 감쇠비를 산정하여 거동을 비교 분석한 결과, Fig. 2 및 Fig. 4에서의 거동을 확인한 바 있다.

### 3. 진동대 실험

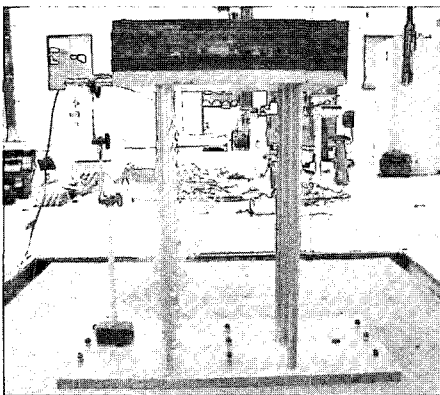
잔교식 안벽의 말뚝 두부 보강기법에 대한 동적 거동을 살펴보기 위하여 2 m×2 m 크기의 진동대 실험을 수행하였다. Fig. 5는 연직말뚝만으로 이루어진 경우(Vertical-Fixed)와 경사말뚝과 혼용한 경우에 대한 안벽 모형(실제 잔교식 안벽 구조물의 일부에 대하여 상사비 1/20을 적용)을 나타낸 것으로, 경사말뚝의 경우 말뚝 두부와 상판이 서로 고정 연결된 경우(Batter-Fixed)를 비롯하여 앞에

서 설명한 2가지 새로운 두부 보강 시스템을 적용한 경우(Batter-Rubber, Batter-Ball Bearing)에 대한 실험을 함께 수행하였다. 말뚝의 재질은 스테인레스 스틸이고 지름은 31.8 mm, 두께는 0.8 mm이며, 진동방향과 평행하여 2개씩, 진동방향에 수직으로 3개씩 총 6개의 말뚝을 사용하였다. 경사말뚝의 경사는 4:1로 두었고, 상사비를 적용하여 350 kgf의 상재하중을 가하였다((財)沿岸開發技術硏究센터, 2000). 2개의 경사말뚝에 스트레인게이지를 부착하여 말뚝의 부재력을 계산하였으며, 상판의 가속도와 상대변위를 측정하기 위하여 가속도계와 LVDT를 각각 1개씩 설치하였다. 또한 말뚝 두부 보강기법에 따른 영향만을 분석하기 위해 지반은 배제한 실험을 수행하였다.

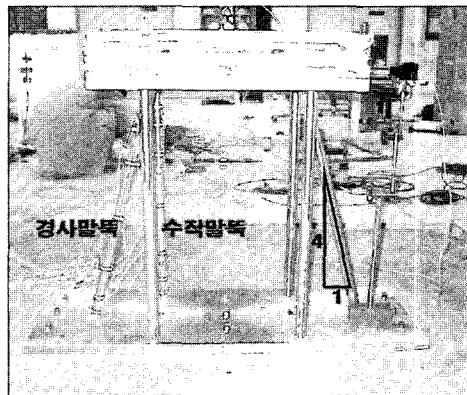
4가지 종류의 말뚝 두부 조건에 대하여, 각 조건에 따른 모형구조물의 고유진동수를 찾기 위한 sweep test(해양수산부, 2001)를 비롯하여 Table 1에 나타난 바와 같이 다양한 주파수 및 진폭의 정현파와 SB 조건에서의 설계 응답스펙트럼을 만족하면서 최대 지진가속도를 0.11 g로 조정된 인공지진파를 입력파로 한 진동대 실험을 수행하였다. Fig. 6은 시간에 대한 상사비가 적용된 인공지진파의 시간이력을 나타낸 것이다.

Table 1. Types of shaking table tests

Pile head conditions	Input waves		
	Sine wave Frequency	Maximum Acceleration	Artificial earthquake
Vertical-Fixed	5		
Batter-Fixed	7.5	0.1 g	최대 가속도 : 0.11 g
Batter-Rubber	10	0.2 g	
Batter-Ball Bearing			



(a) Landing pier model without batter piles



(b) Landing pier model with batter piles

Fig. 5. Landing pier models for shaking table test.

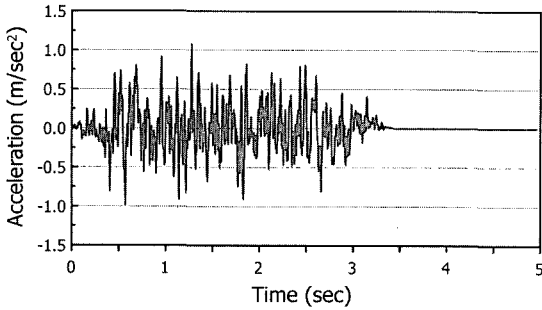


Fig. 6. Input wave (artificial earthquake).

#### 4. 수치해석

진동대 실험 이외에도 유한요소 상용프로그램인 ABAQUS 6.2(2002)를 이용한 3차원 수치해석을 수행하였다. 이는 진동대 실험 결과와의 정성적인 비교를 통해 수치해석의 신뢰성을 확보하는데 그 목적이 있는 것으로, 이를 바탕으로 진동대 실험에서는 제대로 구현하지 못한 실제 현장 조건에 대한 다양한 해석을 위한 것이다. 수치해석은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 진동대 실험 단면과 유사하게 모델링하였다. 말뚝 두부 보강기법에 따른 각 구조물 형식에 대해 고유 진동모드를 산정하였고, 또한 시간이력해석법 중 직접적분법( $t=0.01$ 초)을 이용하여 지진해석을 수행하였다. 여기서의 입력 지진파는 Table 1과 Fig. 6에 나

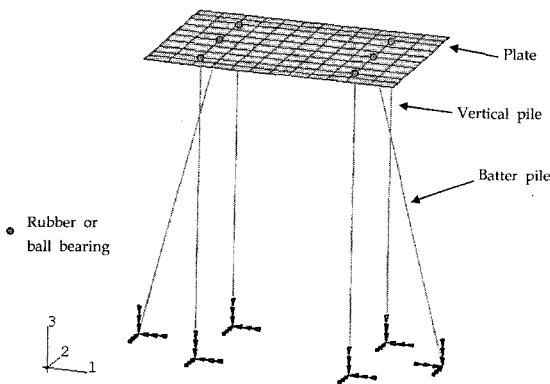


Fig. 7. Finite element mesh.

타난 바와 같이 진동대 실험에서 사용한 것과 동일한 정현파와 인공지진파를 사용하였다.

말뚝과 상판은 진동대 실험에서 사용한 재료와 같은 스테인레스 스틸의 탄성체로 모사하였고, 새로운 두부보강 기법인 고무연결 방식과 볼베어링 연결방식의 경우 앞서 Fig. 2와 Fig. 4에서 예상한 바와 같은 쌍일차(Bilinear) 탄성 거동을 고려한 입력값을 산정하였다. 여기서, 급격한 강성의 변화를 보이는 기준인 한계변형률(critical strain)은 고무 연결조건인 경우 고무를 둘러싸고 있는 강관이 고무의 변형을 억제해 주어야 하는 순간의 변형률을, 그리고 볼베어링 연결조건인 경우 볼베어링이 원형인 1차 홈에서 탈출하여 말뚝두부와 상판사이에 상대 변위를 발생시키는 순간의 변형률을 말하는데, 각각 2등급 봉괴방지 수준에서의 설계가속도 0.11 g의 90%에 해당되는 가속도 값인 0.1 g에서의 변형률로부터 산정하였다(해양수산부, 1999). 한계변형률 산정방법과 관련한 구체적인 내용은 해양수산부(2002a)에 자세히 나타나 있다. Table 2는 수치해석에 사용한 입력값을 정리하여 나타낸 것이다. 한편, 본 수치해석에서는 직접 적분법에 의한 동적 해석시에너지 소산을 고려하기 위해 질량비례감쇠 및 강성비례감쇠 등 재료감쇠(Rayleigh damping)를 고유 진동수로부터 산출하여 해석에 적용하였다.

한편, 진동대 실험의 경우 말뚝 선단부와 진동대에 강결되어 있는 캡과의 연결 시스템이 완전 고정인 상태가 아닌 상태에서 수행되었는데, 수치해석에서는 이를 고려하기 위하여 말뚝 선단부에 스프링 요소를 적용하여 실제 조건과 유사하게 모사하고자 하였다.

#### 5. 결과 및 분석

##### 5.1 두부 조건에 따른 고유 진동수

Fig. 8은 연직-고정, 경사-고정, 경사-고무, 경사-볼베어링 등의 4가지 조건에 대한 고유 진동수를 진동대 실험과 수치해석 결과로 구분하여 나타낸 것으로 그림을 보면, 각 조건에 따른 진동대 실험 결과와 수치해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 연직말뚝으로만 이

Table 2. Input values for numerical analysis

Types	Elastic modulus, $E$ (kPa)	Poisson's ratio	Dry unit weight $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Comments
Plate	$2.1 \times 10^8$	0.27	7.85	B×L×H (650×450×152.8)
Pile	$2.1 \times 10^8$	0.27	7.85	$\phi = 15.9$ mm, $t = 0.8$ mm
Rubber	2,350	0.475	1.17	Critical strain = 1.64%
Ball bearing	$2.1 \times 10^8$	0.27	7.85	Critical strain = 0.0055%

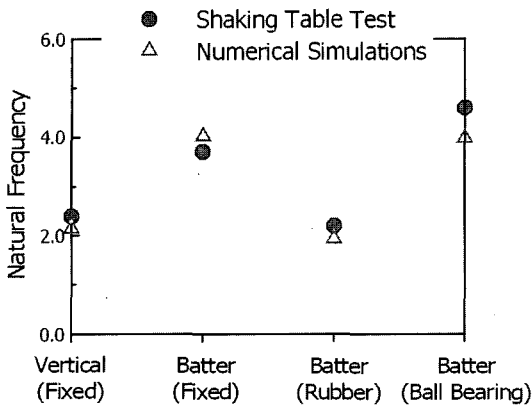


Fig. 8. Natural frequency for various pile-cap conditions.

루어진 안벽 시스템의 고유진동수에 비해 경사말뚝이 상판에 고정된 안벽 시스템에서 상대적으로 큰 고유 진동수를 보이지만, 경사 말뚝 두부가 고무로 연결된 시스템에서는 경사-고정인 경우에 비해 약 60% 정도로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 잔교식 안벽에 경사말뚝을 설치함으로써 인해 고유 주기가 짧아져서 설계응답스펙트럼(해양수산부, 1999) 해석상 상판에 작용하는 설계하중이 증가하는 효과를 보이지만, 말뚝 두부와 상판을 고무로 연결하여 안벽 시스템의 고유 주기를 길어지게 하고, 따라서 고무의 높은 감쇠비로 인해 응답 가속도가 작아지는 효과를 볼 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 권오순 등(2002b)의 연구내용과 부합되는 것이다. 볼베어링 연결 시스템의 경우에는 볼베어링이 1차 흡을 이탈하기 전의 고유진동수는 경사-고정 조건과 비슷한 값을 나타내는데, 이는 초기 강성이 경사-고정일 때와 유사하기 때문이다. 하지만 볼베어링이 1차 흡을 이탈하였을 때의 Sweep test 결과를 보면 고무 연결시와 거의 유사한 값을 보이는 것을 알 수 있었다.

### 5.2 정현파에 대한 시간이력해석 결과

말뚝의 두부 조건에 따른 동적 거동을 비교 분석하기 위하여 다양한 주기 및 가속도 크기의 정현파를 이용한 진동대 실험 및 수치해석을 수행하였다. Fig. 9는 다양한 두부 조건에 따른 응답 가속도와 상판의 상대변위를 진동대 실험 및 수치해석 결과로 구분하여 각각 나타낸 것으로, 여기서 입력파는 0.1 g의 크기에 대한 3개의 주파수 영역에서의 정현파를 사용하였다. 먼저 5 Hz 주파수에 대한 진동대 실험 결과를 나타낸 Fig. 9(a)를 보면, 연직-고정 조건과 경사-고무 조건에서의 응답 가속도와 상판

에서의 상대변위 모두 유사하게 나타나는 반면 경사-고정 조건에서는 응답 가속도의 경우 5~7배 정도 큰 값을, 변위의 경우 2배정도 큰 값을 보이고 있다. 이는 경사-고정이나 경사-볼베어링 조건의 경우 초기 강성이 크기 때문에 다른 조건에 비해 보다 큰 응답가속도를 보이는 이유도 있지만, 앞서 5.1절에 나타내었듯이 경사-고정이나 경사-볼베어링 조건에서의 고유 진동수가 5 Hz에 가까운 값을 보여 공진에 가까운 현상을 보이는 것으로 판단된다. 이렇듯 고유 진동수에 따른 경향성은 다른 진동대 실험 결과 및 수치해석 결과에서도 나타나는데, 특히 5 Hz의 주파수에 대한 수치해석 결과를 도시한 Fig. 9(d)를 보면, Fig. 8에 나타난 바와 같이 경사-고정이나 경사-볼베어링 조건에서의 고유 진동수가 다른 조건에 비해 5 Hz에 가깝기 때문에 응답이 그만큼 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 볼베어링 조건의 경우 다른 조건에 비해 변위는 상당히 증가하지만 응답 가속도는 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 앞서 Fig. 3과 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 공진에 가까운 고유진동수로 인한 응답의 증폭 때문에 볼베어링이 1차 흡을 이탈하여 낮은 강성에 따라 거동하는 형태를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 경사말뚝에서 말뚝 두부 조건에 따른 최대변위를 서로 비교하여 나타낸 Fig. 10을 보면 더욱 명확하게 구분할 수 있는데, 그림을 보면 경사-고정 조건에 비해 경사-볼베어링 조건에서 약 1초 이후에는 변위의 증폭이 명확하게 나타나고 있다.

한편, 7.5 Hz나 10 Hz의 다른 주파수의 입력 지진파의 경우에는 두부조건에 따른 경향이 뚜렷하게 보이지 않고 있다. 이로부터 구조물의 지진응답 특성은 고유 진동 모드에 큰 영향을 받을 수밖에 없고, 따라서 말뚝 두부조건에 따른 내진성능 평가를 정량적·정성적으로 분석하는데 있어 특정 주파수에 한정되어 있는 정현파에 대한 해석 결과만을 이용하는 것은 한계가 있음을 확인할 수 있다.

### 5.3 인공지진에 대한 시간이력해석 결과

#### 5.3.1 개요

정현파를 입력지진으로 하는 동적 거동은 앞서 설명한 바와 같이 안벽 시스템의 고유진동수와 밀접한 관련이 있기 때문에 다양한 두부 조건을 가지는 시스템 간의 내진성능을 비교하기에는 한계가 있을 수 있다. 따라서 다양한 진동수 성분을 가지고 있는 실제 지진을 이용한 해석이 필요한데, 본 연구에서는 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진을 이용한 진동대 실험 및 수치해석을 수행

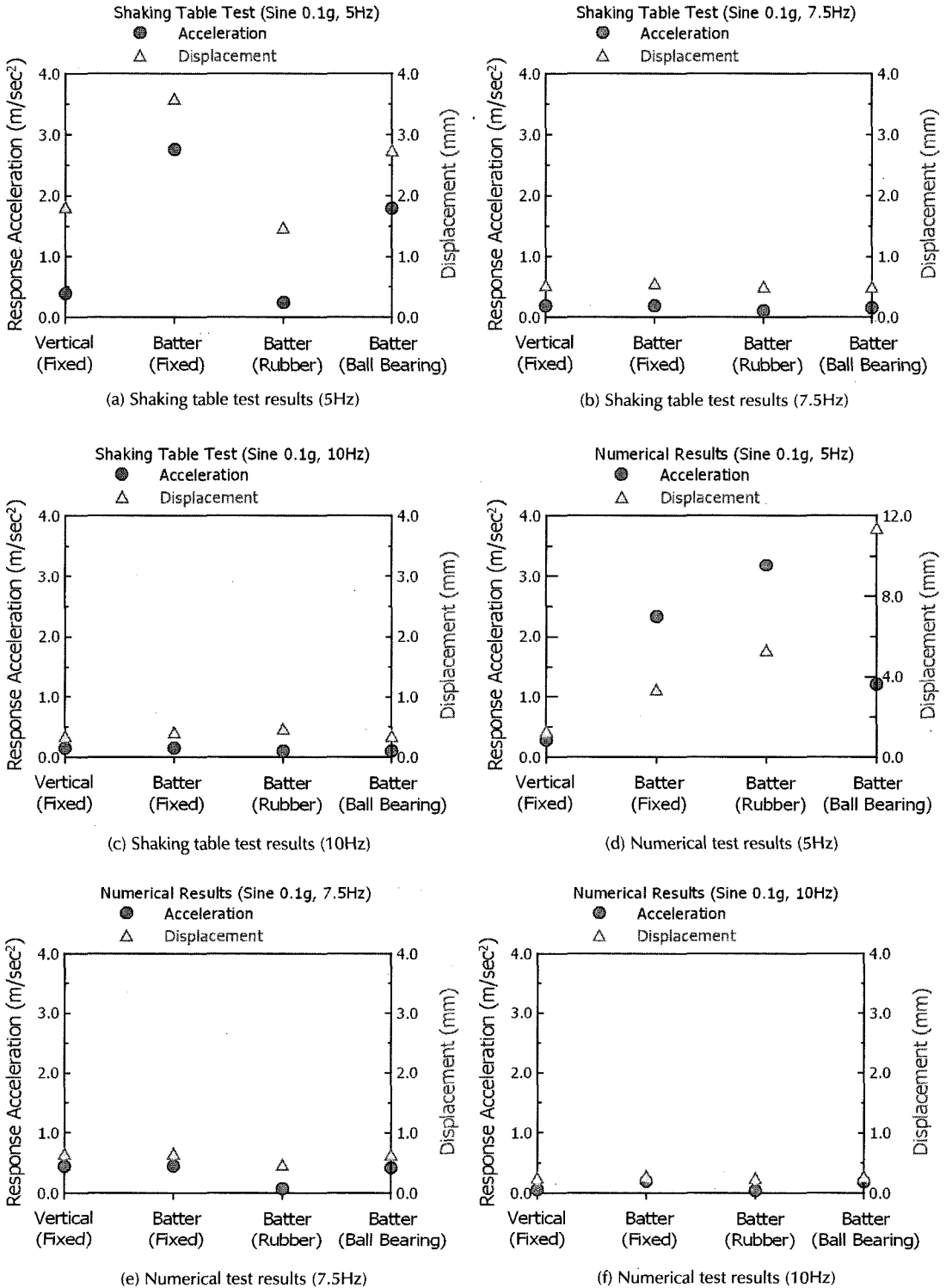


Fig. 9. Response acceleration and relative displacement for various pile-cap conditions (Sine wave of 0.1g acceleration).

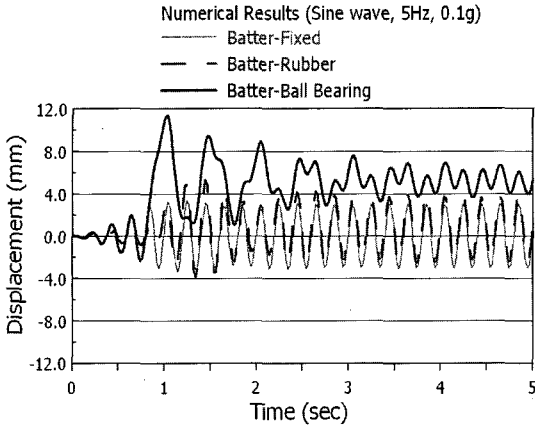


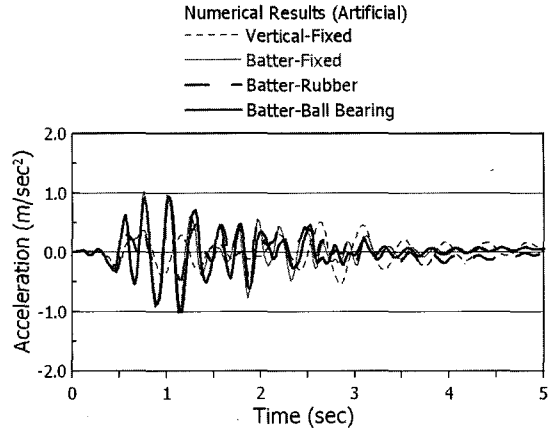
Fig. 10. Maximum relative displacement for various pile-cap conditions of batter pile (Sine wave of 0.1 g acceleration, 5 Hz).

하였다. 인공지진에 의해 상판에 작용하는 가속도와 상대 변위, 그리고 말뚝 부재에 작용하는 축력과 모멘트 등의 부재력을 서로 비교하여 두부 조건에 따른 내진성능을 비교·분석하였다.

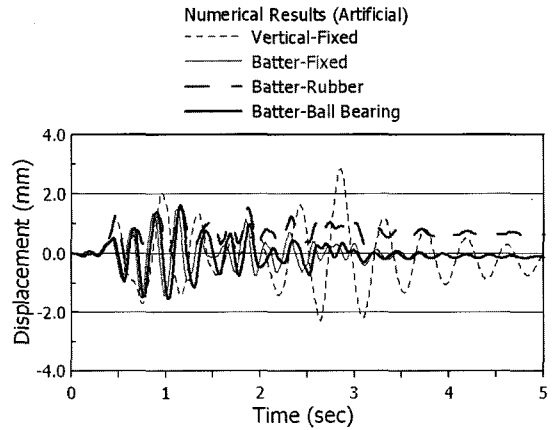
5.3.2 말뚝 두부 형식에 따른 상판의 응답가속도 및 상대변위

Fig. 11은 인공지진에 대한 수치해석 결과로서, 시간에 따른 상판의 응답가속도 및 상대변위를 다양한 말뚝 두부 형식에 대하여 나타낸 것이다. 먼저 가속도 응답을 나타낸 Fig. 11(a)를 보면, 모든 조건에 대해 Fig. 6의 입력과(최대 가속도 0.11 g)보다는 가속도가 증폭되는 경향을 보이고 있지만 말뚝 두부가 경사-고정일 경우 가장 큰 응답 가속도를 나타내고 있다. 반면, 같은 경사말뚝이라 하더라도 말뚝 두부에 고무나 볼베어링을 연결하였을 경우 Fig. 2와 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 면진 시스템의 특성상 지진에너지를 상당부분 흡수하게 되어 가속도 응답이 줄어들게 되는 결과를 확인할 수 있다.

그리고 인공지진에 대한 변위응답을 나타낸 Fig. 11(b)를 보면, 똑같이 경사말뚝을 혼용한 경우라 하더라도 경사-고정 조건에서의 변위는 다른 조건들에 비해 가장 작게 나타나고 경사-고무 조건과 경사-볼베어링 조건은 상대적으로 큰 상대변위를 나타내고 있다. 이는 경사-고정 조건의 경우 높은 강성으로 인해 연직-고정 조건에 비해 상대 변위가 억제되지만, 경사말뚝에 고무나 볼베어링을 설치하였을 경우에는 고무의 낮은 강성과 볼베어링의 원형 1차 흡 이탈로 인해 큰 변형이 발생하게 되기 때문인



(a) Response acceleration



(b) Relative displacement

Fig. 11. Response accelerations and relative displacements with time for various pile-cap conditions (Artificial earthquake, Numerical results).

것으로 판단된다. 한편 이렇듯 큰 변형의 발생은 지진과 같이 큰 횡방향 하중이 가해질 경우에 발생하는 것으로, 접안력과 파력 등 정적에 가까운 하중 조건 하에서는 볼베어링 연결 시스템의 경우 1차 흡을 이탈하지 않기 때문에 경사-고정과 유사한 변위 양상을 보일 것으로 기대되고, 고무 연결 시스템에서는 고무의 두께를 조절함으로써 실제 발생 변위를 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 12는 말뚝 두부 형식에 따른 가속도 및 상대변위를 서로 비교하여 나타낸 것으로, 진동대 실험 결과와 수치해석 결과를 각각 구분하여 도시하였다. 먼저 시간에 따른 결과인 Fig. 11의 곡선에서 최대값을 각각의 조건에 대해 구하여 나타낸 Fig. 12(a)를 보면, 경사-고무 조건의 경우, Fig. 11에서 예측할 수 있는 바와 같이 고무 시스

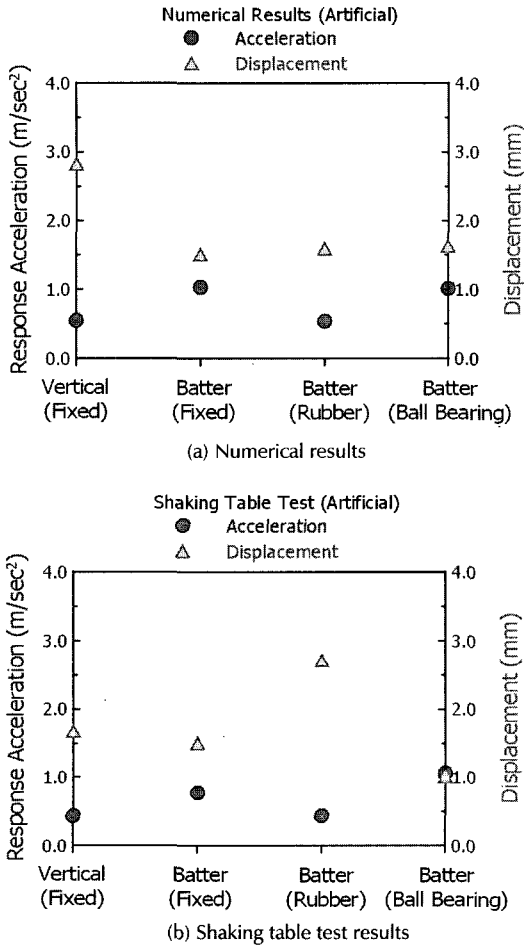


Fig. 12. Comparisons of response accelerations and relative displacements for various pile-cap conditions.

템의 특성으로 인해 가속도는 경사-고정 조건의 0.5배 정도로 작게 나타나고 변위는 10% 정도 큰 값을 보이고 있다. 하지만, 경사-볼베어링 조건은 경사-고정 조건과 거의 유사한 값을 보이고 있는데, 이는 본 연구에서 진동대 실험 및 수치해석에서 입력지진파로 활용한 인공지진파의 크기가 볼베어링이 1차 흡을 빠져나와 큰 변형을 일으킬 만큼 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 진동대 실험 결과를 도시한 Fig. 12(b)를 보면, 수치해석 결과와 비교해 볼 때 가속도의 크기나 상대변위 모두 절대값에는 약간의 차이를 보이고 있지만, 정성적인 경향성은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 쌍일차 관계식을 이용한 본 수치해석이 잔교식 안벽 및 말뚝 두부 형식에 대한 내진 해석에서 신뢰성을 확보하고 있는 것으로 판단되고, 본 기법을 이용하여 실제 잔교식 안벽 구조물에 대

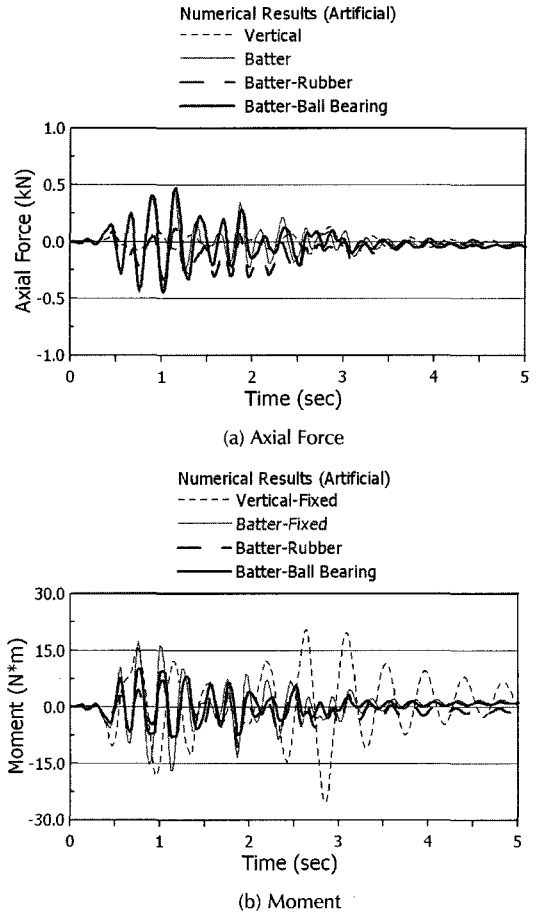


Fig. 13. Axial forces and moments with time for various pile-cap conditions (Artificial earthquake, Numerical results).

한 모델링 및 다양한 변수 분석에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5.3.3 말뚝 두부 형식에 따른 말뚝의 부재력

Fig. 13은 인공지진파가 작용할 때 말뚝에 발생하는 축력 및 부재력을 시간에 따라 나타낸 것으로, 다양한 말뚝 두부 형식에 대하여 수치해석을 수행한 결과이다. 먼저 두부 형식에 따라 축력을 비교한 Fig. 13(a)를 보면, 경사말뚝에서 내진 보강이 없는 경사-고정이나 경사-볼베어링 조건에 비해 경사-고무 조건은 연직-고정 조건과 유사하게 낮은 축력을 나타내고 있다. 이로부터 잔교식 안벽에서 경사말뚝을 활용할 경우 지진시 말뚝의 과도한 축력으로 인한 파괴를 상당부분 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 시간에 따른 모멘트의 변화를 나타낸 Fig. 13(b)를 보면, 연직-고정의 경우 가장 큰 모멘트를 보이고 경사-고정의 경



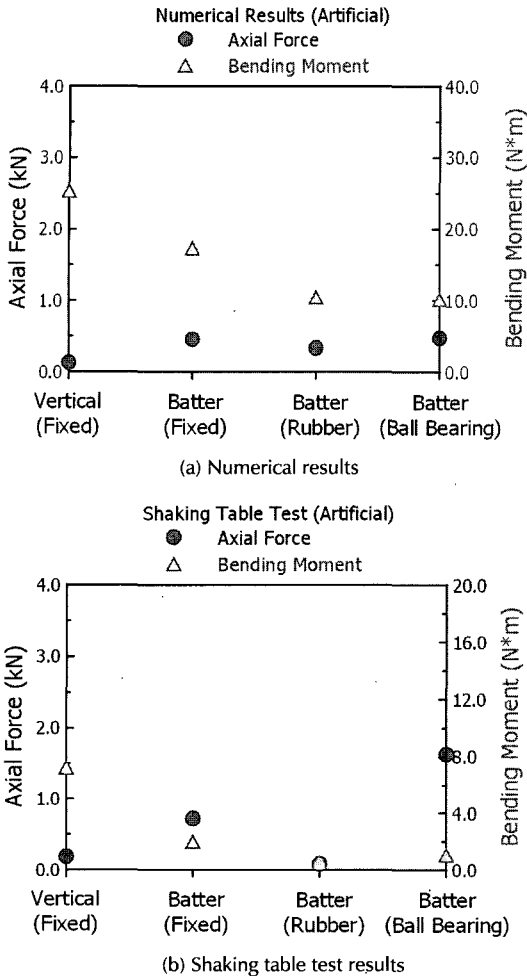


Fig. 14. Comparisons of axial forces and moments for various pile-cap conditions.

우 그 값이 많이 줄어들지만 경사-고무나 경사-볼베어링에 비하면 그 값 또한 큰 값을 보이는 것을 알 수 있다.

이러한 경향은 말뚝 두부 형식에 따라 말뚝 두부에서의 축력 및 모멘트의 최대값을 서로 비교하여 나타낸 Fig. 14로부터 다시 한번 더 확인할 수 있는데, Fig. 14는 수치해석 결과와 진동대 실험 결과를 각각 구분하여 도시하였다. 수치해석 결과를 나타낸 Fig. 14(a)를 보면 Fig. 13에서 설명한 바와 같이 경사-고무 조건이나 경사-볼베어링 조건 모두에서 모멘트의 경우 가장 큰 값을 보이는 연직-고정 조건에 비해 40% 정도로 작게 나타나고, 축력의 경우에는 경사-고무 조건에서 경사-고정 조건에 비해 73% 정도의 축력값을 보이고 있다. 이러한 경향은 Fig. 14(b)의 진동대 실험 결과에서도 나타나는데, 두 결과가

정량적인 크기에서는 약간의 차이를 보이고 있긴 하지만 정성적인 경향 면에서 아주 유사하게 나타나 수치해석의 적용성을 다시 한번 더 확인할 수 있다.

전체적으로 살펴볼 때, 잔교식 안벽구조물에 경사말뚝을 사용하게 되면 구조물 전체의 강성이 증가로 인해 강한 지진이 발생할 때 과도한 축력이 말뚝 두부 근처에서 작용하게 되기 때문에 말뚝과 상판의 연결부가 파괴될 위험성이 높아지지만, 경사말뚝의 두부에 고무 또는 볼베어링 연결조건을 적용하게 된다면 구조물 전체의 유연성이 증가하여 말뚝에 발생하는 축력 및 모멘트가 크게 감소하기 때문에 강진에 대한 구조물의 파괴 위험성이 줄어들게 된다는 사실을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

잔교식 안벽 중 경사말뚝의 내진성능 증대를 위한 목적으로 말뚝 두부를 고무 또는 볼베어링을 이용하여 보강하는 시스템을 개발하고, 진동대 실험 및 3차원 유한요소해석을 수행하여 말뚝 두부 형식(연직-고정, 경사-고정, 경사-고무, 경사-볼베어링)에 따른 내진성능을 비교·분석한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 말뚝 두부 형식에 따른 고유 진동수를 비교한 결과, 경사-고정 조건에 비해 경사-고무 조건의 고유진동수가 60% 정도로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이로부터 말뚝 두부와 상판을 고무로 연결한다면, 고무의 높은 감쇠비로 인해 응답 가속도가 작아지는 효과를 볼 수 있다는 것을 알 수 있다.

(2) 정현파를 입력지진으로 하는 동적 거동은 안벽 시스템의 고유진동수와 정현파의 진동수와의 관계에 의해 크게 달라지기 때문에 다양한 두부 조건을 가지는 시스템 간의 내진성능을 직접적으로 비교하기에는 한계가 있음을 확인하였다.

(3) 진동대 실험과 수치해석으로부터 각각 구한 상판의 응답가속도, 상대변위, 그리고 말뚝의 부재력을 서로 비교한 결과, 정성적인 경향성이 유사하게 나타남을 확인할 수 있었고 따라서 쌍일차 관계식을 이용한 본 수치해석 기법을 이용하여 실제 잔교식 안벽 구조물에 대한 모델링 및 다양한 변수 분석에 어느 정도의 신뢰성을 가지고 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 인공지진파를 이용한 진동대 실험 및 수치해석 결과, 경사-고무 조건의 경우, 고무 시스템의 특성으로 인해 가속도는 경사-고정 조건의 0.5배 정도로 작게 나타나고

변위는 10% 정도 큰 값을 나타내 그만큼의 면진 효과를 보이고 있다. 한편, 경사말뚝의 두부에 고무 또는 볼베어링 연결조건을 적용하게 된다면 구조물 전체의 유연성이 증가하여 말뚝에 발생하는 축력 및 모멘트가 감소하기 때문에 강진에 대한 구조물의 파괴 위험성이 줄어들게 될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 해외 Post-Doc. 연수지원 및 해양수산부의 “지진대비 항만구조물 보강기법 및 신형안벽개발(V)” 사업에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

권오순, 장인성, 박우선 (2002a). 잔교식 안벽의 내진성능 평가 및 개선(Ⅰ)-고유 진동모드 관점에서. 대한토목학회 논문집, 22(3-B), 353-363.

권오순, 장인성, 박우선, 조성민 (2002b). 잔교식 안벽의 내진성능 평가 및 개선(Ⅱ)-시간이력해석 관점에서. 대한토목학회 논문집, 22(4-B), 551-563.

이용재, 한진태, 장인성, 김명모 (2003). 잔교식 안벽의 말뚝 두부 내진보강기법에 따른 수평재하실험. 2003년도 추

계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 한국지진공학회, 98-106.

해양수산부 (1999). 항만 및 어항시설의 내진설계표준서. 78-90.

해양수산부 (2001). 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신형안벽개발(Ⅳ). 105-242.

해양수산부 (2002a). 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신형안벽개발(Ⅴ). 133-302.

해양수산부 (2002b). 전국주요항만 안벽구조물 간이평가 보고서(Ⅱ). 699p.

ABAQUS manual (2002). Version 6.1, Hibbit, Kalsson and Sorensen Inc.

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, 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, 1263-1274.

(財)沿岸開發技術研究センター (2000). 港灣構造物設計事例集. 4-1~5-45.

Received February 26, 2005

Accepted April 19, 2005