

# 잔교식 안벽의 말뚝 두부 내진 보강기법에 따른 수평제하실험 Lateral Load Test for Various Aseismic Methods of Pile Heads of Pier Type Quay Walls

이용재\*      한진태\*\*      장인성\*\*\*      김명모\*\*\*\*  
Lee, Yong Jae    Han, Jin Tae    Jang, In Sung    Kim, Myoung Mo

---

## ABSTRACT

To construct pile-supported wharf structures that must support heavy horizontal loads, both vertical piles and batter piles are used. Batter piles are used to secure the bearing capacity against the horizontal loads. However, past case histories have shown that the heads of batter piles are vulnerable because these heads are subjected to excessive axial loads during earthquakes. Therefore, the aseismic reinforcement method must be developed to prevent batter pile heads from breaking due to excessive seismic loads.

Two different connecting methods of either inserting rubber or ball-bearing between batter pile head and upper plate were proposed to improve the aseismic efficiency. Three large-scale pile head models(rubber type model, ball-bearing type model, and fixed type model) were manufactured and horizontal loading tests were performed for these models.

The results showed that the force-displacement relationship of the fixed type model was linear, but that of the rubber type model and the ball-bearing type model was bilinear. The increase in the horizontal displacement led to the increase in the horizontal stiffness of the rubber type models and the decrease in that of the ball-bearing type model. Compared with the values for fixed type model, the damping ratios of the rubber type model and the ball-bearing type model increased about 33~185% and 263~269%, respectively.

---

## 1. 서론

항만의 주요 시설 중의 하나인 안벽에 작용하는 하중은 파랑 하중이나 접안력 등 횡방향 하중이 대부분인데, 자중을 이용하는 중력식 안벽과는 달리 잔교식 안벽은 횡방향 지지력을 확보하기

---

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정  
\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정  
\*\*\* 한국해양연구원 연안항만공학연구본부, 책임연구원  
\*\*\*\* 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

위해 연직말뚝과 경사말뚝을 조합하여 사용하기도 한다. 경사말뚝은 정적인 상태에서의 횡방향 지지력은 연직말뚝에 비해 크게 나타나지만, 지진 등의 동적 하중에 대해서는 두부에 과도한 축력이 발생하고, 이로 인해 말뚝두부의 파괴 및 나아가 잔교식 안벽구조물 전체의 파괴를 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다.

이렇듯 기존의 경사말뚝이 가지고 있는 내진성능에 대한 한계를 극복하기 위하여 다양한 형태의 시스템에 대한 연구가 이루어져 왔는데, Roth 등(1992)은 강철 빔을 내진휴즈 연결장치로 사용하는 방법을 제시한 바 있고, Zmuda 등(1995)은 상판과 말뚝 연결부에 격리(base-isolation) 시스템을 미국 LA항에 적용한 바 있다. 한편, 권오순 등(2002a; 2002b)은 말뚝 두부를 고무로 연결한 경사말뚝에 대하여 진동대 실험 및 유한요소해석을 수행하여 고유진동모드 및 시간이력해석 관점에서 그 성능을 확인한 바 있다. 이 외에도 교량기초 및 건물 기초에는 납-고무 면진장치(Lead-Rubber Bearing, LRB)의 적용이 활발히 이루어지고 있다(서주원 등, 2002).

본 연구에서는 지진과 같은 동적 횡방향 하중에 대해 경사말뚝 두부에 과도한 축력이 발생하지 않으면서, 정적 횡방향 하중에 대해서도 큰 지지력을 가질 수 있는 두가지 형태의 새로운 경사말뚝 두부보강방법, 즉 말뚝과 상판 사이에 고무나 볼베어링을 넣어 상부구조물에 전달되는 지진에너지를 감소시키는 효과를 기대할 수 있는 고무 연결방법과 볼베어링 연결방법을 제안하였다. 그리고 기존의 말뚝두부 연결방법인 고정연결방법을 포함한 세 가지 경사말뚝 두부 연결방법에 대하여 실제 크기의 모형체를 제작하여 수평 재하실험을 수행하였다. 실험에서 구한 하중-변위 이력곡선으로부터 수평강성 및 감쇠비를 산정하여 말뚝두부 연결방법에 따른 거동을 비교·분석하여 새롭게 제안한 말뚝 두부 내진 보강기법에 대한 성능을 확인하였다.

## 2. 재하 실험

### 2.1 말뚝두부 연결방법

말뚝두부 보강기법에 따른 거동특성을 파악하기 위하여 세 가지 형태의 모형체를 제작하였다. 첫 번째 형태는 기존의 연결형태를 모사하기 위한 것으로 그림 1과 같이 상판과 말뚝두부를 용접하여 강결한 것이다. 두 번째 형태는 그림 2에 나타난 바와 같이 말뚝과 상판 사이에 고무를 부착하여 고무의 면진특성을 이용한 말뚝두부의 결합형태인데, 지진시 상부에 전해지는 지진에너지를 고무가 상당부분 흡수하여 내진 성능을 확보하고, 하중이 어느 정도 커질 경우에는 강관말뚝 본래의 강성으로 거동하는 시스템이다(그림 3).

마지막으로 세 번째 형태는 그림 4와 같이 상판과 말뚝 사이에 볼베어링을 넣고, 볼베어링이 위치하는 곳의 기하학적 형태에 의하여 과도한 하중에서 일정한 변위를 허용함으로써 말뚝두부의 파괴를 방지하기 위한 모형체이다.

그림 5는 1개의 볼베어링 및 볼베어링이 위치하는 홈에 대한 수직 단면을 나타낸 것으로, 홈의 모양은 원형과 타원형의 이중구조로 되어있다. 말뚝두부에 원형의 볼베어링이 놓이게 되면 기하학적인 이유와 상재하중으로 인해 어느 정도의 횡방향 하중까지는 변형이 거의 발생하지 않지만, 과도한 지진하중이 전달되면 볼베어링이 원형 홈을 이탈하여 타원형 홈으로 이동하게 된다. 이때, 갑작스러운 변위 발생을 허용함으로써 상부구조물에 전달되는 지진에너지를 급격히 감소시키는 효과가 나타나게 된다. 그리고 지진하중이 끝나면 기하학적인 형상과 위치에너지의 증가로 인해 배

어령이 본래의 위치로 되돌아가게 된다. 그림 6은 이러한 일련의 과정에 따른 볼베어링 연결조건 의 말뚝두부 모형체의 예상되는 응력-변형률 관계를 나타낸다.

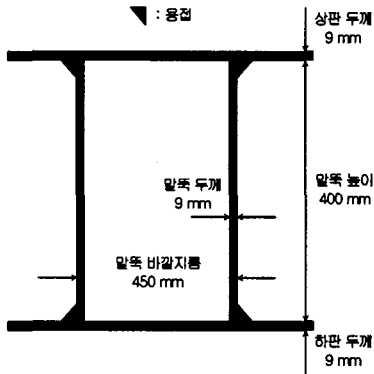


그림 1. 강결 연결조건 의 말뚝두부 모형체

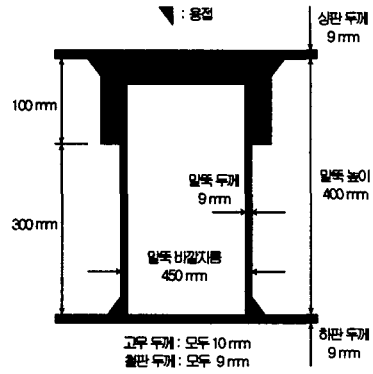


그림 2. 고무 연결조건 의 말뚝두부 모형체

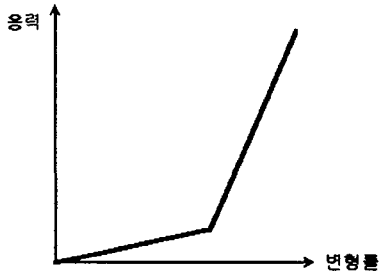


그림 3. 고무 연결조건에서 말뚝두부의 응력-변형률 관계

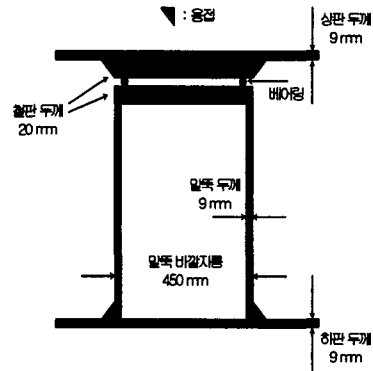


그림 4. 볼베어링 연결조건 의 말뚝두부 모형체

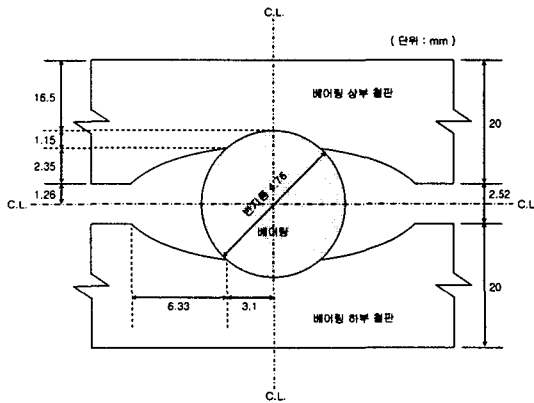


그림 5. 볼베어링 및 홈에 대한 수직 확대 단면

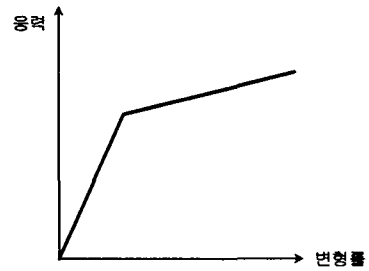


그림 6. 볼베어링 연결조건에서 말뚝두부의 응력-변형률 관계

## 2.2 실험장치

그림 7은 수평방향 정적 및 유사동적 실험을 수행하기 위한 실험장치로서, 이 실험장치는 수직 압력을 받는 상태에서 전단방향으로 실험을 수행할 수 있도록 설계되어 있다. 왼쪽 상단에 나타난 바와 같이 바닥판이 매끄럽게 이동할 수 있도록 제작되었으며, 진폭 250 mm, 수평하중 50 ton, 수직하중 750 ton의 범위 내에서 실험이 가능하다. 먼저 원하는 수직하중을 재하하고, 미리 정한 변위에 의해 바닥판이 움직이면서 수평하중 크기의 변화를 측정하게 된다.

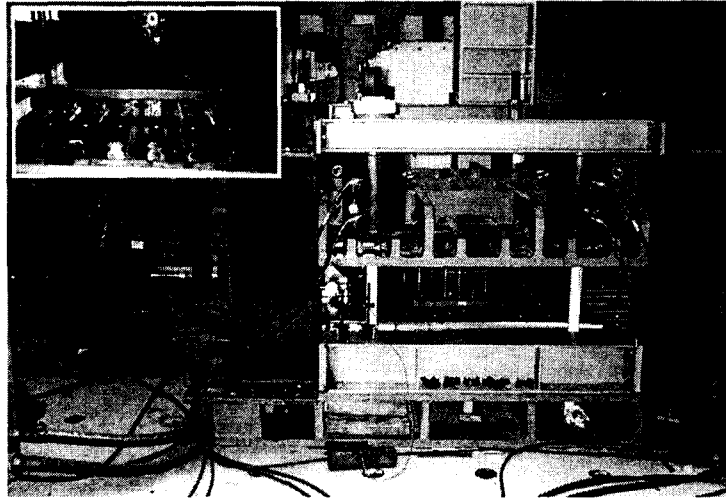


그림 7. 수평재하 실험장치

실험을 통하여 수평하중( $P$ )과 수평변위( $\delta$ ) 사이의 이력곡선(Hysteresis loop)을 구하고, 이로부터 수평유�효강성  $K_{eq}$  및 감쇠비  $\xi_{eq}$ 를 식 (1), (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$K_{eq} = \frac{P_{max} - P_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (1)$$

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} \delta_{max}^2} \quad (2)$$

여기서,  $\delta_{max}$ 와  $\delta_{min}$ 은 이력곡선에서 최대 및 최소 변위이고,  $P_{max}$ 와  $P_{min}$ 은 최대 및 최소 하중, 그리고  $\Delta W$ 는 이력곡선의 면적을 나타낸다.

## 2.2 실험 종류

표 1은 본 연구에서 수행한 수평 재하실험의 종류를 나타낸 것이다. 세가지 형태의 두부연결조건에 대하여 상재하중을 3~30ton으로 달리하여 수평 재하실험을 수행하였다. 이 때 재하 진동수는 0.2Hz로 하였는데, 이는 실제 지진파의 시간에 따른 변위 기록을 주파수 영역에서 살펴보면 0.2Hz가 주된 성분이기 때문이다.

표 1. 수평 재하 실험 종류

진동수(Hz)	두부연결조건	변위(mm)	상재하중(ton)
0.2 (5회 반복)	강결연결조건	± 3	3
			10
			20
			30
	고무연결조건	± 3	3
			10
			20
			30
	볼베어링 연결조건	± 5	10
			20

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 강결 연결조건

그림 8은 강결 연결조건에서 상재하중 20ton인 경우에 대하여 수평하중과 수평변위의 이력곡선을 나타낸 것으로, 다른 상재하중에 대해서도 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 이력곡선과 식 (1), (2)를 이용하여 계산한 수평유효강성( $K_{eq}$ ) 및 감쇠비( $\zeta_{eq}$ )를 상재하중에 대하여 표 2에 나타내었다. 일반적으로 상재하중이 증가할수록 연직방향의 구속효과에 의해 수평유효강성  $K_{eq}$ 은 증가하고, 감쇠비  $\zeta_{eq}$ 는 감소하는 경향을 보인다.

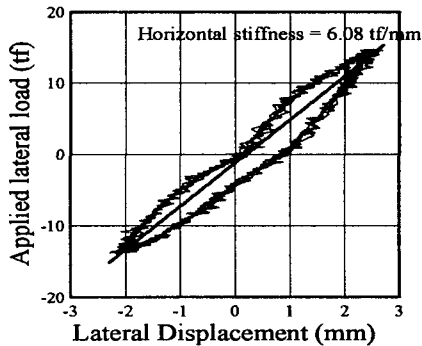


그림 8. 강결 연결조건에 대한 수평 재하실험 결과 (상재하중 20tons)

표 2. 강결 연결조건에 대한 수평유효강성 및 감쇠비

상재하중(ton)	수평유효강성 (ton/mm)	감쇠비(%)
3	5.47	9.1
10	5.59	7.5
20	6.08	5.7
30	6.87	4.1

#### 3.2 고무 연결조건

상판과 말뚝 두부가 고무 연결조건일 때 수평재하 실험결과인 상재하중에 따른 수평변위-수평하중 이력곡선은 그림 9와 같은데, 여기서는 상재하중 20ton에 대한 결과만을 나타내었다. 고무연결조건인 경우는 강결 연결조건인 경우와는 다르게 수평변위가 일정 수평변위보다 작은 경우와 큰 경우의 수평변위-수평하중 관계, 즉 수평강성이 다르다는 것을 알 수 있다. 이 때의 일정 수평

변위를 '고무압축 한계변위'라고 정의를 하며, 수평변위가 고무압축 한계변위 이하일 때의 수평강성을 '소변위 수평강성', 이상일 때의 수평강성을 '대변위 수평강성'이라고 정의하였다. 본 실험에서는 수평강성이 변하는 고무압축 한계변위는 2mm였다. 이러한 경향은 다른 상재하중에 대해서도 나타나고 있다.

수평변위-수평하중 이력곡선으로부터 계산한 수평유효강성  $K_{eq}$  및 감쇠비  $\xi_{eq}$ 에 대한 결과는 표 3과 같은데, 강결 연결조건과 마찬가지로 상재하중이 증가할수록 수평유효강성  $K_{eq}$ 은 증가하고, 감쇠비  $\xi_{eq}$ 는 감소하는 경향을 보이지만, 초기 거동에 지배적인 영향을 미치는 고무의 강성으로 인해 수평유효강성의 크기는 강결 조건에 비해 작은 값을 나타내고 있다. 그리고 앞에서 정의한 대로 수평변위가 고무압축 한계변위 2 mm보다 작은 경우의 수평강성인 소변위 수평강성과 큰 경우의 수평강성인 대변위 수평강성을 비교해 보면, 대변위 수평강성이 소변위 수평강성보다 항상 크게 나타나며, 앞의 수평유효강성과 같이 상재하중이 증가할수록 소변위 수평강성과 대변위 수평강성 모두 증가하였다.

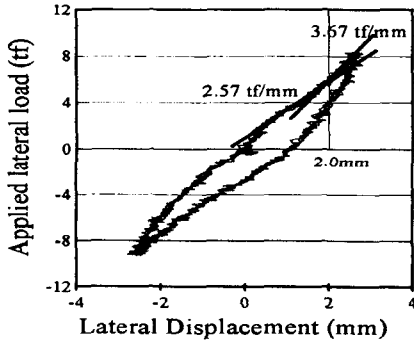


그림 9. 고무 연결조건에 대한 수평 재하실험 결과 (상재하중 20tons)

표 3. 고무 연결조건에 대한 수평유효강성 및 감쇠비

상재 하중 (ton)	수평 유효강성 (ton/mm)	감쇠비 (%)	소변위 수평강성 (ton/mm)	대변위 수평강성 (ton/mm)
3	2.49	12.1	2.10	2.68
10	2.70	12.0	2.25	2.93
20	3.05	11.9	2.57	3.67
30	4.05	11.7	3.40	4.84

### 3.3 볼베어링 연결조건

세가지 형태의 말뚝두부 연결 조건 중 볼베어링 연결조건에 대한 수평재하 실험결과는 그림 10과 같다. 여기서는 상재하중 20ton에 대한 결과만을 나타내었다. 상재하중에 따른 수평변위-수평하중 이력곡선을 보면, 볼베어링 연결조건인 경우는 앞의 고무연결조건인 경우와 유사하게 수평변위의 크기에 따라 수평강성이 달라진다는 것을 알 수 있다. 수평변위가 아주 작은 경우, 즉 볼베어링이 1차 홈 내에서 움직이기 시작할 때의 수평강성을 '초기 수평강성'이라고 정의하고, 볼베어링이 원형 홈(1차 홈)을 완전히 탈출하고 타원형 홈(2차 홈)위에 있는 경우의 수평강성을 '탈출 후 수평강성'이라고 정의할 수 있다. 본 실험에서는 초기 수평강성은 수평변위가 0.4mm 이하인 경우의 수평강성으로 정의하였고, 탈출 후 수평강성은 그림 5의 기하학적 형상으로부터 수평변위가 3.1mm 이상인 경우의 수평강성으로 정의하였다. 한편, 다른 상재하중에 대해서도 같은 경향을 보이고 있다.

그림 10을 보면, 초기 수평강성은 상대적으로 큰 값을 가지며 수평변위가 원형 홈을 완전히 탈출하기 전까지는 수평강성이 비선형적으로 변하다가 볼베어링이 원형 홈을 완전히 탈출한 후의

수평강성인 탈출 후 수평강성은 상대적으로 작은 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

표 4는 수평변위-수평하중 이력곡선으로부터 수평유효강성  $K_{eq}$  및 감쇠비  $\xi_{eq}$ 을 구한 결과인데, 강결 및 고무 연결조건과 마찬가지로 상재하중이 증가할수록 수평유효강성  $K_{eq}$ 은 증가하고, 감쇠비  $\xi_{eq}$ 는 감소하는 경향을 보인다.

수평변위가 0.4 mm이하인 경우의 수평강성인 초기 수평강성과 수평변위가 3.1 mm보다 큰 경우의 수평강성인 탈출 후 수평강성을 비교해보면, 초기 수평강성은 말뚝과 볼베어링의 초기 강성으로 인해 탈출 후 수평강성보다 항상 크게 나타나며, 앞의 수평유효강성과 같이 상재하중에 따라 초기 수평강성과 탈출 후 수평강성 모두 증가하는 경향을 보이고 있다.

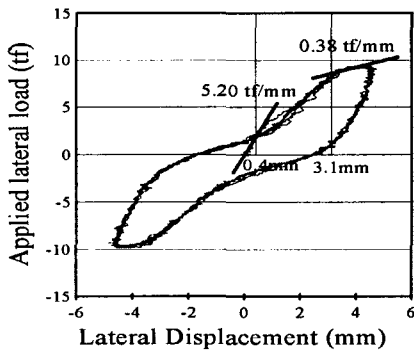


그림 10. 볼베어링 연결조건에 대한 수평재하실험 결과 (상재하중 20tons)

표 4. 볼베어링 연결조건에 대한 수평유효강성 및 감쇠비

상재하중 (ton)	수평 유효강성 (ton/mm)	감쇠비 (%)	초기 수평강성 (ton/mm)	탈출 후 수평강성 (ton/mm)
10	1.29	27.7	4.85	0.32
20	1.79	20.7	5.20	0.38

### 3.4 말뚝두부 연결조건에 따른 수평강성 및 감쇠비 비교

그림 11은 말뚝두부 연결조건에 따른 수평유효강성과 감쇠비를 비교하여 나타낸 것이다. 그림을 보면, 모든 상재하중에 대하여 수평유효강성의 크기는 강결 > 고무 > 볼베어링의 순서로 나타났다. 고무 연결조건인 경우 고무의 두께를 줄이거나 압축강성이 더 큰 고무를 사용함으로써, 볼베어링 연결조건인 경우 볼베어링의 크기 또는 개수를 증가시키거나 홈의 깊이를 더 깊게 함으로써 수평유효강성의 크기를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 감쇠비에 대한 결과를 살펴보면 고무 연결조건의 감쇠비가 강결 연결조건에 비해 33~185 % 증가하였고, 볼베어링 연결조건의 감쇠비는 강결 연결조건에 비해 263~269 % 증가하였다. 이로부터 새롭게 제안한 두 가지 방법의 말뚝두부 연결조건에서 동적 수평하중에 대한 감쇠특성이 기존의 강결 연결조건에 비하여 매우 우수함을 확인할 수 있다.

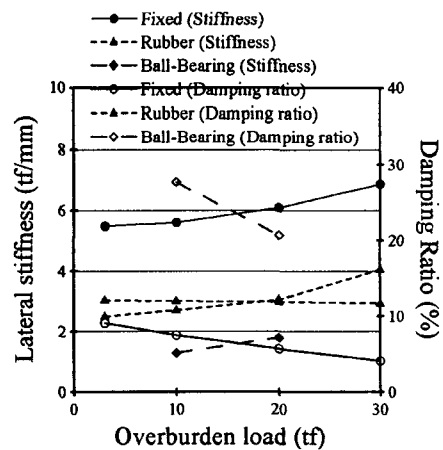


그림 11. 말뚝두부 연결조건에 따른 수평유효강성과 감쇠비

한편, 새롭게 제안한 두 가지 형태의 말뚝두부 연결조건, 즉 고무 연결조건과 볼베어링 연결조건의 경우는 강결 연결조건과는 달리 발생하는 변위에 따라 수평강성의 크기가 변하게 된다. 고무 연결조건인 경우 처음에는 고무의 압축변형이 쉽게 발생하다가 수평변위가 증가할수록 고무의 압축변형이 발생하기 어려워지므로 결국 steel로 제작한 말뚝 자체의 수평강성에 가까워질 것이다. 볼베어링 연결조건인 경우에는 수평변위가 증가함에 따라 볼베어링과 홈 사이의 기하학적 위치가 변하므로 수평강성 또한 달라지게 된다. 따라서 힘-변위 이력곡선의 기울기를 나타내는 수평유효강성만으로 말뚝두부 연결조건 간의 수평강성을 비교하는 것은 큰 의미가 없다.

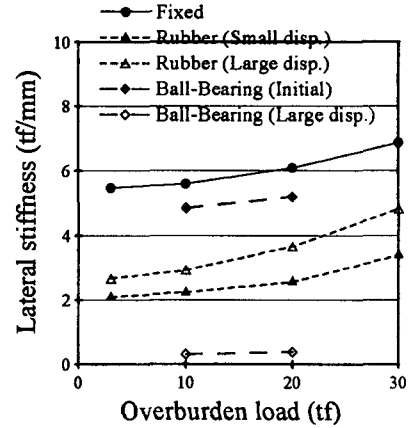


그림 12. 말뚝두부 연결조건에 따른 수평강성의 비교

그림 12는 변위에 따른 수평강성의 변화를 고려하여 말뚝두부 연결조건에 따른 수평강성을 비교한 것이다. 고무 연결조건인 경우 대변위 수평강성이 소변위 수평강성보다 항상 크고, 상재하중이 커질수록 즉, 고무의 수평방향으로의 압축변형이 일어나기 어려울수록 대변위 수평강성이 강결 연결조건인 수평유효강성에 근접하고 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 고무 연결조건 말뚝두부의 거동은 처음에는 강성이 작아서 변위를 쉽게 허용하다가 어느 정도 변위가 커지면 강성이 증가하여 변위를 억제하게 되며, 이는 고무 연결조건 말뚝두부에 대하여 예상한 거동특성(그림 3)과 잘 일치한다. 또한 볼베어링 연결조건인 경우를 살펴보면, 볼베어링이 처음의 위치에서 이동을 시작할 때의 강성, 즉 초기 수평강성은 매우 커서 강결 연결조건인 수평유효강성과 비슷한 값을 가지는 반면에 1차 홈(원형 홈)을 완전히 이탈한 이후의 탈출 후 수평강성은 상대적으로 매우 작은 값을 가진다. 이는 볼베어링 연결조건 말뚝두부의 예상되는 거동(그림 6)과 잘 일치하는 것으로 수평하중에 대하여 처음에는 강성이 커서 변위를 잘 허용하지 않다가 일정 크기 이상의 하중에 대해서는 변위를 쉽게 허용하여 말뚝두부의 파괴를 방지하려는 목적과 부합된다.

#### 4. 결론

세가지 형태의 말뚝 두부 연결방법에 대하여 실제 크기의 모형체를 제작하여 수평 재하실험을 수행하여 거동을 비교·분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강결, 고무 및 볼베어링 연결조건 모두 상재하중이 증가할수록 수평유효강성  $K_{eq}$ 는 증가하고, 감쇠비  $\xi_{eq}$ 는 감소하는 경향을 보인다.
2. 고무연결조건인 경우 수평변위에 따라 수평강성이 다르게 나타나는데, 일정값 이상일 때의 수평강성인 대변위 수평강성이 일정값 이하일 때의 수평강성인 소변위 수평강성보다 항상 큰 값을 보인다.
3. 볼베어링 연결조건 또한 고무연결조건인 경우와 유사하게 수평변위의 크기에 따라 수평강성이 달라진다. 수평변위가 아주 작은 경우, 즉 볼베어링이 1차 홈 내에서 움직이기 시작할 때의 수평강성을 '초기 수평강성'이라고 정의하고, 볼베어링이 1차 홈을 완전히 탈출하고 2차 홈 위에



있는 경우의 수평강성을 '탈출 후 수평강성' 이라고 정의할 때, 초기 수평강성이 탈출 후 수평강성보다 항상 크게 나타난다.

4. 말뚝두부 연결조건에 따른 수평유효강성을 비교하면 강결 > 고무 > 볼베어링의 순서이다. 하지만, 이는 단순히 힘-변위 이력곡선의 기울기에 대한 비교로서 고무 및 볼베어링 연결조건인 경우 변위에 따라 기울기, 즉 수평강성이 변하므로 수평유효강성에 대한 비교만으로는 큰 의미가 없다.
5. 고무 연결조건인 감쇠비가 강결 연결조건에 비해 33~185 % 증가하였고, 볼베어링 연결조건인 감쇠비는 강결 연결조건에 비해 263~369 % 증가하였다. 이로부터 새롭게 제안한 두 가지 방법의 말뚝두부 연결조건인 동적 수평하중에 대한 감쇠특성이 기존의 강결 연결조건에 비하여 매우 우수함을 확인할 수 있다.
6. 고무 연결조건인 말뚝두부의 거동은 처음에는 강성이 작아서 변위를 쉽게 허용하다가 어느 정도 변위가 커지면 강성이 증가하여 변위를 억제하게 되며, 이는 고무 연결조건인 말뚝두부에 대하여 예상한 거동특성과 잘 일치한다.
7. 볼베어링 연결조건인 경우 초기 수평강성은 매우 커서 강결 연결조건과 비슷한 값을 가지는 반면에 탈출 후 수평강성은 상대적으로 매우 작은 값을 가진다. 이는 볼베어링 연결조건인 말뚝두부의 예상되는 거동과 잘 일치하는 것으로 수평하중에 대하여 처음에는 강성이 커서 변위를 잘 허용하지 않다가 일정 크기 이상의 하중에 대해서는 변위를 쉽게 허용하여 말뚝두부의 파괴를 방지하려는 목적과 부합된다.

#### 감사의 글

본 연구는 해양수산부 "지진대비항만구조물 보강기법 및 내진안벽 개발" 연구용역의 일환으로 수행된 것입니다.

#### 참고문헌

1. 권오순, 장인성, 박우선, 2002. 잔교식 안벽의 내진성능 평가 및 개선(I)-고유진동모드 관점에서. 대한토목학회논문집, 제22권, 제3-B호, pp. 353- 363
2. 권오순, 장인성, 박우선, 2002. 잔교식 안벽의 내진성능 평가 및 개선(II)-시간이력해석 관점에서. 대한토목학회논문집, 제22권, 제4-B호, pp. 551- 563
3. 서주원, 김남식, 임진석, 유문식, 2002. LRB 댐퍼 조합형 지진격리장치 개발 및 특성평가실험. 한국지진공학회 2002년 춘계학술발표회 논문집, Vol. 6, No. 1, pp. 389-390
4. 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. 336~349.
5. 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.