

경사말뚝의 동적거동과 내진성능 향상을 위한 실험적 고찰

Dynamic Analysis of Inclined Piles and Countermeasures against their Vulnerability

김재홍*

황재익**

한진태**

김명모***

Kim, Jae-Hong

Hwang, Jae-Ik

Han, Jin-Tae

Kim, Myoung-Mo

ABSTRACT

When group pile supporting structures are to be subjected to large lateral loads, generally, batter piles are used in group pile with vertical piles. It is well known that batter piles resist lateral static loads which are acted upon the piles as axial forces quite well but, they show a poor performance under seismic loads. However, it is not yet known how the batter piles behave under dynamic loading and how to strengthen the batter piles to improve the seismic performance.

Shaking table tests were performed to investigate the seismic behavior of the batter pile and to bring up the countermeasures to improve the seismic performance. As the result of the shaking table tests, batter piles failed due to not only the excessive increase of compressive force near the pile head but also that of tensile force. In case that the pile head was connected with pile cap by rubber joint, the max. acceleration at the pile cap was reduced due to the high damping ratio of rubber and the max. moment and max. axial force at the pile head was decreased remarkably. When the inclinations(V:H) of the batter pile were 8:3 and 8:4, max. moment, max. shear force, and max. axial force were reduced notably and max. acceleration and max. displacement at the pile cap was diminished, too.

1. 서론

연약지반위에 구조물을 설치할 때, 말뚝기초는 시공성, 경제성, 그리고 지지력이 우수하여 많은 구조물에 사용되어 왔다. 또한, 말뚝기초가 큰 횡방향 하중을 받을 때, 일반적으로 수직말뚝과 함께 경사말뚝이 많이 사용되어 왔다. 그러나, 경사말뚝은 횡방향 하중을 축력으로 저항하기 때문에 정적 횡방향 하중에 대해서는 저항성이 크지만, 지진하중과 같은 동적 횡방향 하중에 대

* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정

** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정

*** 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

해서는 과도한 축력이 발생하여 말뚝부두에서 파괴될 가능성이 높다. 과거 지진피해 사례를 보더라도 수직말뚝보다 경사말뚝이 지진하중에 대해 파괴된 사례들이 훨씬 많다. 이러한 이유로 지진이 자주 발생하는 지역에서는 경사말뚝보다는 수직말뚝을 사용하도록 권장하고 있다. 그러나 현재 지진하중하에서 경사말뚝의 동적거동에 대한 분명한 영구 결과가 없으며, 또한 경사말뚝의 내진성을 향상시킬 수 있는 보강방법에 대해서도 잘 알려진 바가 없다.

본 연구에서는 첫째, 정적 횡방향 하중재하 시험을 통해 얻은 하중-변위 관계를 분석하여 경사말뚝이 수직말뚝보다 정적 횡방향 하중에 대해 더 큰 저항성이 있음을 확인하고, 둘째, 진동대 모형실험을 통해 지진시 경사말뚝과 수직말뚝의 동적거동을 비교한 다음, 마지막으로, 경사말뚝의 내진성능 향상을 위한 보강방법을 제안하고자 한다.

2. 진동대 모형 실험

그림 1은 진동대 모형실험 장치의 모식도이다. 모형토조는 크기가 150cm(길이)×100cm(폭)×70cm(높이)이고, 2cm 두께의 아크릴판으로 제작되었다. 모형토조 길이방향 양측면에는 완충제를 설치하여 토조벽체의 강성을 최소화하고 전달파의 반사를 막았다. 실험대상은 3×3 균말뚝으로 수직말뚝만으로 구성된 경우(‘수직말뚝’이라 칭함)와 1열(3개의 말뚝)의 경사말뚝과 2열(6개의 수직말뚝)을 포함하는 경우(‘경사말뚝’이라 칭함)로 이루어졌다. 모형말뚝은 길이가 70cm, 지름이 17mm, 그리고 두께가 1mm인 알루미늄 관을 이용하여 제작하였으며, 말뚝간의 간격은 6D(D:말뚝지름)로 하였다. 말뚝 선단의 구속조건은 고정이고, 말뚝두부의 구속조건을 고정, 힌지, 고무로 변화시켰고, 경사말뚝의 경사각은 V : H = 4 : 1로 하였다. 그림 2는 말뚝두부 구속조건이 각각 힌지, 고무의 경우를 보여준다. 입력가속도로는 진동수와 크기가 각각 다른 Sin 파와 크기가 다른 실제 지진파를 사용하였다. Sin 파의 경우 진동수는 5 Hz, 10 Hz, 그리고 20Hz로 변화시켰고, 크기는 0.05 g, 0.1 g, 0.2 g, 0.3g로 변화시켰다. 실제 지진파의 경우 크기가 0.11 g와 0.3 g인 El Centro 지진파와 Hachinohe 지진파를 사용하였다. 모형지반은 주문진 표준사를 사용하였고, 크기가 0.4g이고 진동수가 20Hz인 Sin 파로 1분간 진동 다짐하여 상대밀도 70%로 조성하였다. 그리고, 말뚝상판과 지표면 사이 간격을 16 cm, 34 cm, 52 cm, 70 cm로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

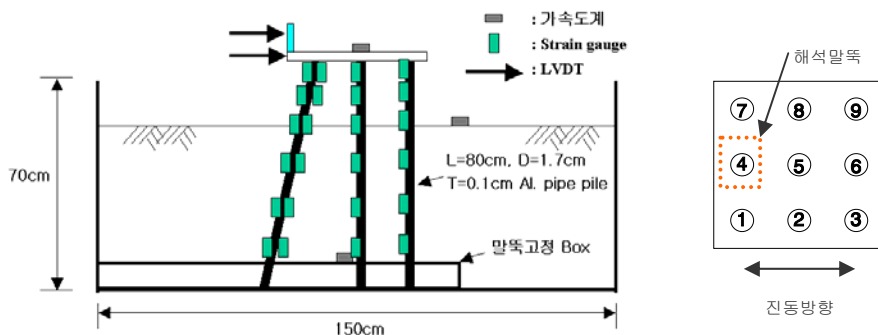


그림 1. 모형실험의 모식도

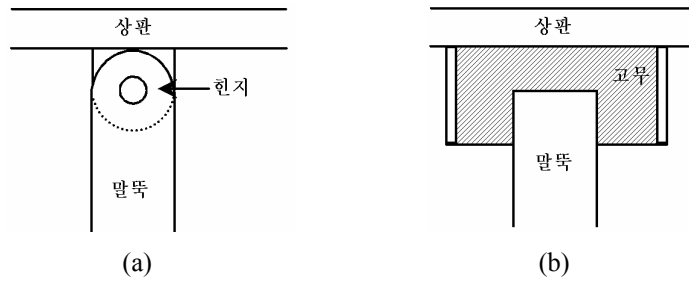


그림 2. 말뚝머리 구속조건 (a) 한지, (b) 고부

3. 실험결과

3.1 경사말뚝과 수직말뚝의 거동 비교

그림 3 은 지반높이 36cm, 말뚝두부 구속조건이 고정인 경우 정적 횡방향 하중재하시험으로부터 얻은 하중-변위 곡선이다. 그림 3 으로부터, 정적 횡방향 하중재하시 경사말뚝의 강성이 수직말뚝의 강성보다 큼을 알 수 있으며, 이로부터, 경사말뚝에 발생하는 응력이 항복응력보다 작은경우, 횡방향 정적하중에 대해 경사말뚝이 수직말뚝에 비해 효과적임을 확인할 수 있다.

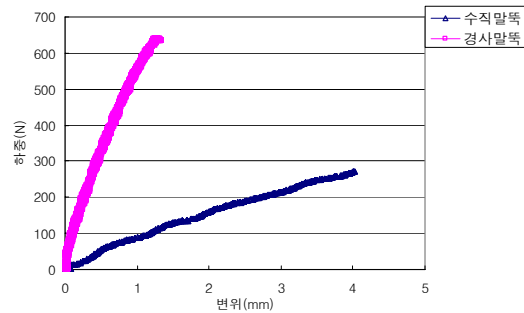


그림 3. 정적하중재하시 하중-변위 곡선

그림 4 는 말뚝상판과 지표면 사이 간격이 34 cm 일 때, 말뚝두부 구속조건이 고정이고 진동수와 크기가 각각 10Hz, 0.1g 인 Sin 파를 입력한 경우의 수직말뚝과 경사말뚝에 발생하는 최대모멘트, 최대전단력, 그리고 최대축력(압축력과 인장력)을 나타낸다. 그림 4 에서 보면, 경사말뚝에는 동적 횡방향 하중하에서 수직말뚝에 비해 경사말뚝에서 압축력 뿐만 아니라 인장력도 크게 발생한다. 표 1 과 그림 5 는 수직말뚝과 경사말뚝의 두부와 지표면 위치에서 말뚝에 작용하는 하중 및 상판에서의 최대가속도와 최대변위를 비교한 것이다. 표 1 과 그림 5 로부터, 경사말뚝이 수직말뚝에 비해 상판에서의 가속도와 변위를 감소시키는 효과는 있지만, 모멘트와 축력의 증가로 인해 동적하중에 대해 취약해짐을 확인할 수 있다.

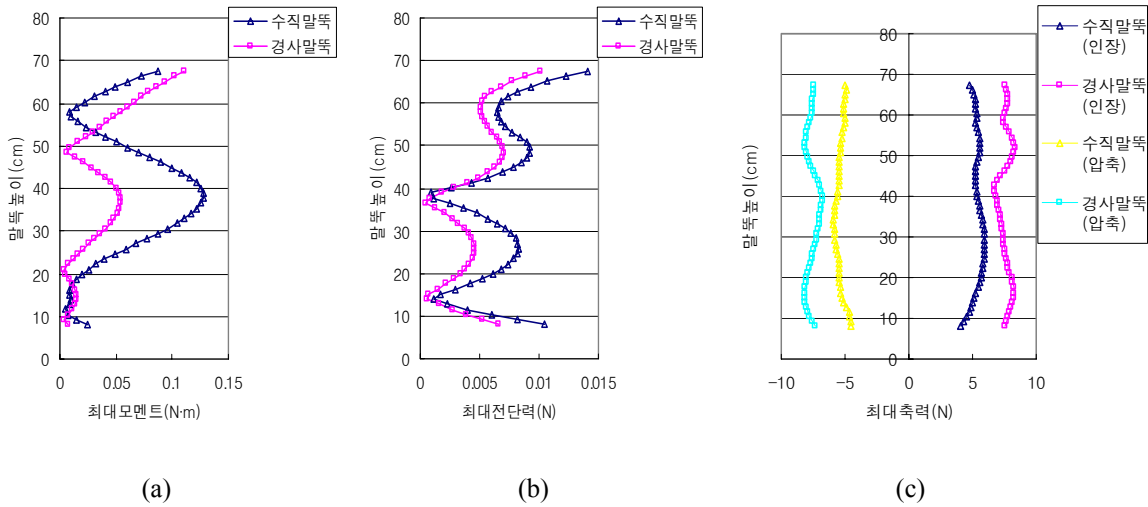


그림 4. 동적하중시 말뚝에 작용하는 최대모멘트(a), 최대전단력(b), 최대축력(c)

표 1. 동적하중시 말뚝두부와 지표면 위치에서 수직말뚝과 경사말뚝에 발생하는 하중 및 상판에서의 최대가속도와 최대변위 비교

| | 말뚝두부 | | | 지표면 | | | 상판 | |
|--------|--------------|------------|-----------|--------------|------------|-----------|------------|------------|
| | 최대 모멘트 (N·m) | 최대 전단력 (N) | 최대 축력 (N) | 최대 모멘트 (N·m) | 최대 전단력 (N) | 최대 축력 (N) | 최대 가속도 (g) | 최대 변위 (mm) |
| 수직말뚝 | 0.087 | 0.014 | 4.824 | 0.126 | 0.002 | 5.635 | 0.136 | 0.103 |
| 경사말뚝 | 0.111 | 0.010 | 7.586 | 0.054 | 0.000 | 7.092 | 0.091 | 0.014 |
| 증가율(%) | 27.1 | -28.8 | 57.3 | -56.9 | -80.6 | 25.9 | -33.4 | -86.3 |

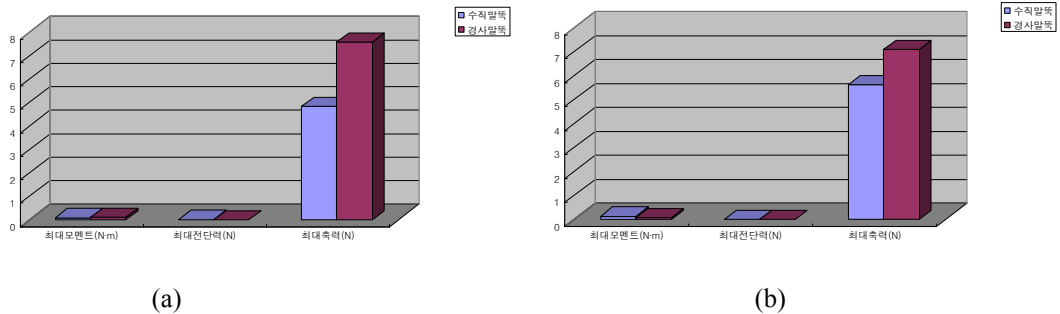


그림 5. 동적하중시 말뚝두부(a)와 지표면(b) 위치에서 수직말뚝과 경사말뚝에 작용하는 하중비교

3.2 경사말뚝의 내진성능 향상을 위한 대안

3.2.1 말뚝머리 구속조건 변화

앞의 3.1 절에서 보인 것 처럼, 경사말뚝은 수직말뚝보다 동적 하중하에서 불리한 거동을 보인다. 이러한 경사말뚝의 내진성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 말뚝두부 구속조건을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 말뚝과 말뚝캡의 결합조건을 고정, 힌지, 고무 20(경도 20), 고무 40(경도 40)으로 변화시켰다. 실험조건은 말뚝상판과 지표면 사이간격이 34 cm, 입력하중은 크기가 0.3g 인 EL Centro 지진, 그리고 경사말뚝의 경사각은 V:H=4:1 이다.

그림 6 은 경사말뚝의 두부 구속조건에 따른 정적 횡방향재하 실험결과이다. 그림 6 으로부터, 말뚝두부 조건이 고정일 때에 비하여 힌지, 고무 20, 그리고 고무 40 일 때의 정적 횡방향 강성이 작음을 알 수 있다. 그러나 말뚝두부 구속조건이 힌지나 고무일 때 발생하는 변위가 허용변위내 라면 말뚝두부 구속조건이 힌지나 고무인 경우에 말뚝에 발생하는 응력이 말뚝두부 구속조건이 고정인 경우에 말뚝에 발생하는 응력보다 작기 때문에 힌지나 고무를 말뚝의 두부에 사용할 수 있을 것이다.

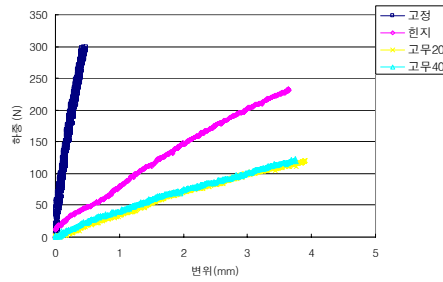


그림 6. 정적하중시 경사말뚝의 두부 구속조건에 따른 하중-변위 곡선

그림 7 은 지진하중하에서 말뚝두부 구속조건에 따라 말뚝에 작용하는 하중을 나타내고, 표 2 와 그림 8 에서 각각 말뚝두부 구속조건이 고정, 힌지, 고무 20, 그리고 고무 40 일 때 말뚝두부와 지표면 위치에서 말뚝에 작용하는 하중, 최대가속도, 그리고 최대변위를 비교하였다. 그림 7, 8 과 표 2 로부터, 두부조건이 고정일 때에 비해 고무 20 과 고무 40 일 때, 말뚝두부에서의 최대전단력은 증가하였지만 최대모멘트와 최대축력은 크게 감소하였고, 지표면 위치에서의 최대모멘트와 최대전단력은 증가하였으나 그림 8 을 보면 그 증가정도가 비교할 수 없을 정도로 작으며, 최대축력은 말뚝 두부에서와 마찬가지로 크게 감소하였다. 그리고 고무의 높은 감쇠비로 인하여 상판에서의 최대가속도 또한 상당히 작아지는 것을 알 수 있다. 상판에서의 변위는 두부조건이 힌지나 고무일 때가 고정일 때보다 크게 나타났으나 그 증가량이 미소하여 고무가 경사말뚝의 내진성능을 향상시키는 역할을 한다고 볼 수 있다.

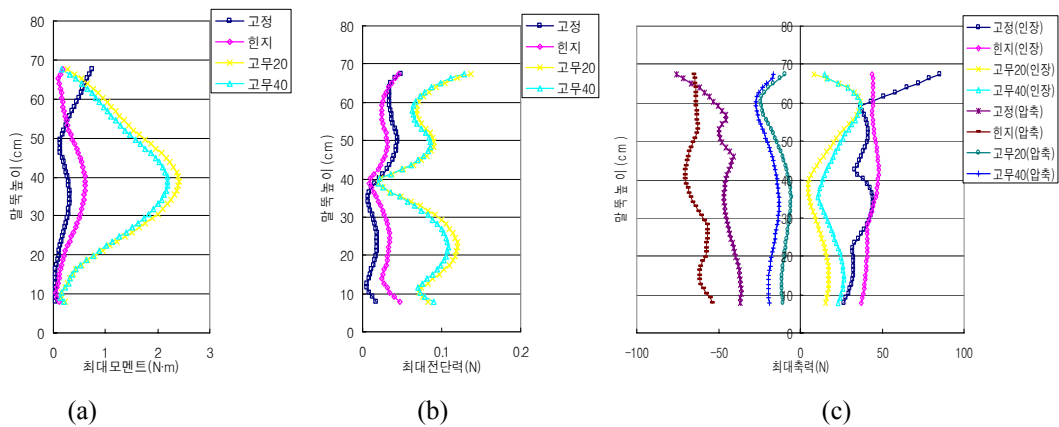


그림 7. 지진하중시 말뚝두부 구속조건에 따른 경사말뚝에 발생하는 최대모멘트(a), 최대전단력(b), 최대축력(c)

표 2. 말뚝두부 구속조건에 따른 말뚝두부와 지표면 위치에서의 지진하중시 하중, 최대가속도 및 최대변위 비교

| | 말뚝두부 | | | 지표면 | | | 상판 | |
|--------|--------------|------------|-----------|--------------|------------|-----------|------------|------------|
| | 최대 모멘트 (N·m) | 최대 전단력 (N) | 최대 축력 (N) | 최대 모멘트 (N·m) | 최대 전단력 (N) | 최대 축력 (N) | 최대 가속도 (g) | 최대 변위 (mm) |
| 고정 | 0.738 | 0.048 | 84.971 | 0.312 | 0.008 | 43.616 | 0.790 | 0.051 |
| 힌지 | 0.173 | 0.046 | 43.926 | 0.605 | 0.014 | 46.465 | 0.324 | 0.581 |
| 고무 20 | 0.264 | 0.138 | 8.452 | 2.373 | 0.035 | 4.502 | 0.551 | 2.048 |
| 고무 40 | 0.168 | 0.129 | 14.782 | 2.168 | 0.035 | 11.200 | 0.592 | 1.798 |
| 증가율(%) | -76.6 | -3.6 | -48.3 | 93.8 | 63.3 | 6.5 | -58.9 | 1042.6 |
| | -64.2 | 187.6 | -90.1 | 660.4 | 316.0 | -89.7 | -30.2 | 3924.3 |
| | -77.3 | 168.6 | -82.6 | 594.8 | 324.6 | -74.3 | -25.0 | 3433.5 |

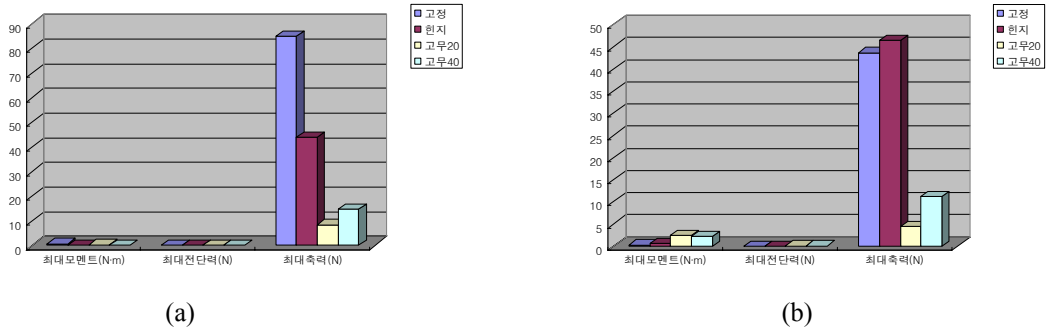


그림 8. 말뚝두부 구속조건에 따른 말뚝두부(a)와 지표면(b) 위치에서의 하중 비교

3.2.2 경사말뚝의 경사각 변화

경사말뚝의 내진성능향상을 위한 두 번째 방법으로서 경사말뚝의 경사각을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 일반적으로 경사말뚝은 경사각 V:H=4:1(8:2)로 시공되고 있다. 본 연구에서는 경사말뚝의 경사각을 V:H=8:1, 8:2, 8:3, 그리고 8:4 로 실험을 수행하여 경사말뚝의 내진성능을 향상시킬 수 있는 최적의 경사각을 찾고자 하였다. 말뚝 상판과 지표면사이 간격은 34 cm, 두부조건은 고정이고, 0.1g · 10Hz 의 Sin 파를 입력하였다. 그림 9 는 경사각의 변화에 따른 정적 횡방향하중재하 실험결과이다. 그림 9 로부터, 경사말뚝의 경사각이 커질수록 정적 횡방향하중에 대한 강성이 커지는 경향을 보였다.

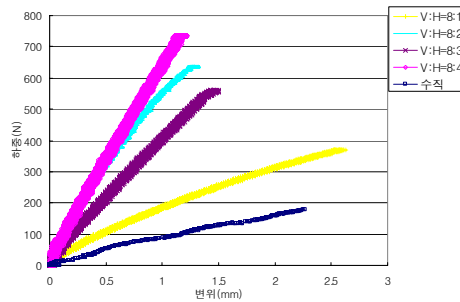


그림 9. 정적하중시 경사각의 변화에 따른 하중-변위 곡선

그림 10 은 경사각의 변화에 따른 동적 하중재하 실험결과를 보여준다. 그림 10 에서 보면, 경사각이 8:3 과 8:4 인 경우에 최대모멘트, 최대전단력 및 최대축력이 크게 감소하였다. 그러나 경사각이 8:1 과 8:2 인 경우에는 최대축력은 오히려 수직인 경우보다 증가하였다.

표 3 과 그림 11 은 경사각 변화에 따른 말뚝두부와 지표면 위치에서의 하중, 최대가속도 및 최대변위를 비교한 결과이다. 말뚝위치에 상관없이 경사말뚝의 경사각이 V:H=8:3 인 경우에 최대모멘트, 최대전단력 및 최대축력이 가장 크게 감소하였으며 그다음으로 경사각이 V:H=8:4 인 경우에 크게 감소하였다. 말뚝상판에서의 최대가속도와 최대변위는 수직일 때에 비해 일제히 감소하였으며, 경사각이 V:H=8:1 인 경우 가장 감소되었다.

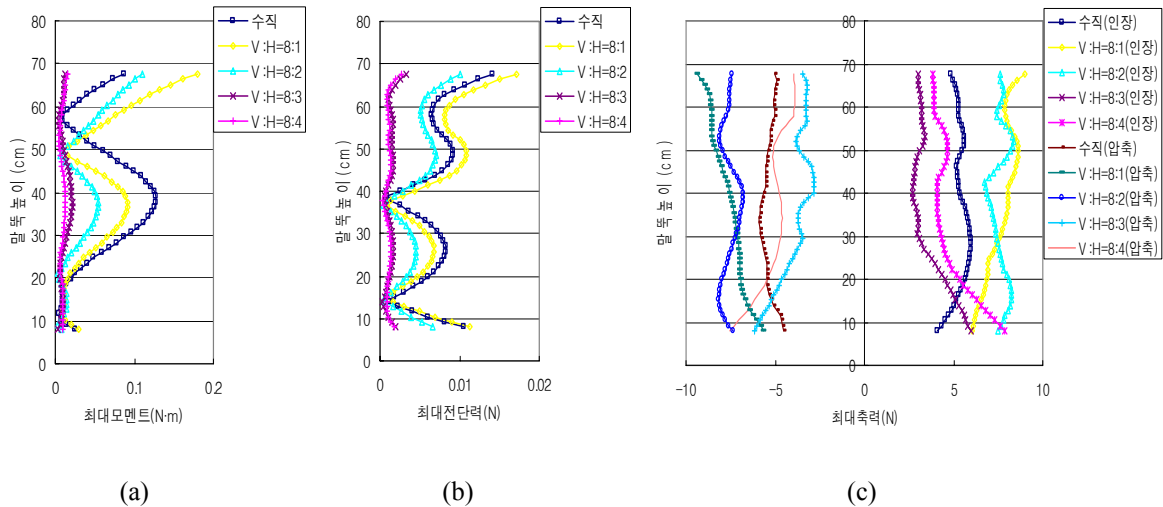
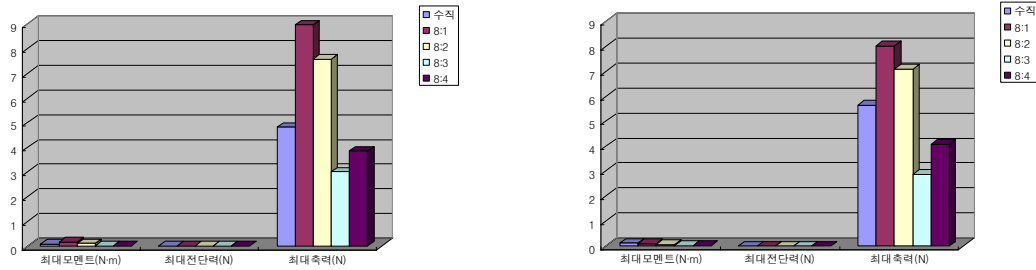


그림 10. 지진하중시 경사말뚝의 경사각의 변화에 따른 경사말뚝에 발생하는 최대모멘트(a), 최대전단력(b), 최대축력(c)

표 3. 경사각 변화에 따른 말뚝두부와 지표면 위치에서의 하중, 최대가속도 및 최대변위 비교

| 경사도 V:H | 말뚝두부 | | | 지표면 | | | 상판 | |
|------------|--------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| | 최대 모멘트 (N·m) | 최대 전단력 (N) | 최대 축력 (N) | 최대 모멘트 (N·m) | 최대 전단력 (N) | 최대 축력 (N) | 최대 가속도 (g) | 최대 변위 (mm) |
| 수직 | 0.087 | 0.014 | 4.824 | 0.126 | 0.002 | 5.635 | 0.136 | 0.103 |
| 8:1 | 0.180 | 0.017 | 8.969 | 0.091 | 0.001 | 8.023 | 0.091 | 0.014 |
| 8:2 | 0.111 | 0.010 | 7.586 | 0.054 | 0.000 | 7.092 | 0.116 | 0.034 |
| 8:3 | 0.012 | 0.003 | 3.008 | 0.021 | 0.001 | 2.864 | 0.105 | 0.022 |
| 8:4 | 0.015 | 0.003 | 3.852 | 0.013 | 0.000 | 4.088 | 0.097 | 0.027 |
| 증가율(%) | 106.8 | 20.9 | 85.9 | -27.3 | -62.8 | 42.4 | -33.4 | -86.3 |
| | 27.1 | -28.8 | 57.3 | -56.9 | -80.6 | 25.9 | -14.6 | -67.1 |
| | -85.9 | -77.0 | -37.6 | -83.3 | -71.0 | -49.2 | -22.5 | -78.5 |
| | -83.0 | -81.0 | -20.1 | -90.0 | -82.4 | -27.5 | -28.7 | -73.4 |



(a)

(b)

그림 11. 경사각의 변화에 따른 말뚝두부(a)와 지표면(b) 위치에서의 하중 비교

4. 결론

경사말뚝과 수직말뚝에 대한 진동대 모형실험으로부터, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지진하중하에서 경사말뚝에는 수직말뚝보다 모멘트와 축력이 크게 발생하며, 이로 인하여 말뚝의 파괴가 일어남을 예측할 수 있었다.
2. 경사 말뚝의 두부와 말뚝캡사이의 연결은 고무를 사용하였을 때 힌지 연결보다 효과적으로 말뚝두부의 모멘트와 축력을 감소시킴을 확인 하였다.
3. 지진하중하에서 경사 말뚝의 경사각이 수직:수평=8:3 일 때 말뚝에 작용하는 모멘트와 축력이 가장 크게 감소하였으며, 경사각이 수직:수평=8:1 하에서 상판의 가속도와 변위가 최소가 되었다.

참고문헌

1. Stuart D. Werner(1998), "Seismic Guidelines for Ports," Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph No. 12, March 1998, ASCE.
2. J.M. Ferritto(1997), "Design Criteria for Earthquake Hazard Mitigation of NAVY Piers and Wharves, " Technical Report., TR-2069-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center.
3. Joseph E. Bowles(1997), "Foundation Analysis and Design," Fifth Edition, The McGraw-Hill Companies.
4. H.G.Poulos & E.H.Davis(1980), "Pile foundation Analysis and Design," John Wiley & Sons.
5. Shamsheer Prakash & Hari D. Sharma(1990), "Pile Foundations in Engineering Practice," John Wiley & Sons.