

지반-말뚝-구조물 상호작용을 고려한 동적 원심모형시험의 현황 및 방향

State-of-the-art in Dynamic Centrifuge Test considering Soil-pile-structure Interaction

김현욱* · 유민택** · 한진태*** · 김명모****

Kim, Hyun Uk · Yoo Min Taek · Han, Jin Tae · Kim, Myoung Mo,

1. 서론

지진 시 지반-말뚝-구조물 상호작용은 일반적으로 수치해석이나 동적 p-y 방법 등을 이용하여 해석한다. 그러나, 아직까지 지진 시 지반-말뚝-구조물 상호작용을 해석하기 위한 진정한 의미에서의 동적 p-y 곡선이 결정되어 있지 않기 때문에 기존에 제시된 정적 API 곡선(American Petroleum Institute, 1987) 또는 Reese의 p-y 곡선(Reese, 1974)을 이용하고 있다. 따라서 유한요소해석과 같은 수치적 방법의 결과를 검증하고 정확한 동적 p-y 곡선을 결정하기 위해서는 원심모형시험과 같은 정량적인 시험을 통하여 지반-말뚝-구조물의 동적응답을 분석하고 추가적인 매개변수 연구를 수행해야 한다. 본 논문에서는 기존의 지반-말뚝-구조물에 대한 원심모형시험 연구 논문들을 분석하여 흙의 종류에 따른 지반조성 방법, 모형말뚝을 설치하는 방법과 그에 따른 거동차이 및 지반-말뚝-구조물의 동적응답에 대한 영향 인자들에 관하여 기술하였다.

2. 원심모형 시험에서의 지반조성

2.1 사질토 지반조성

사질토 지반에서 원심모형 시험을 수행 할 경우 조성되는 지반은 깊이에 따라 일정한 상대밀도로 분포하며 반복되는 여러 시험에 있어 재현성이 유지되어야 한다. 낙하고 조절이 가능한 강사장치를 이용하면 깊이에 따라 균질하며 재현성 있는 지반을 조성할 수 있다. 이 때, 강도특성 분포와 상대밀도 확인은 소형 콘 관입 시험기를 이용한다(이철주, 2002). 포화지반에 대한 동적 원심모형시험에서는 실제 침투현상이나 압밀현상에 대한 동적 시간 상사비(N)를 고려하여 물보다 점성이 N배 큰 점성유체를 이용하는 것이 일반적이며, 이산화탄소를 주입한 뒤 진공압 상태에서 포화시킨다. 포화상태는 P와 테스트를 통해 확인한다(Wilson, 1998). 사질토 지반에서의 원심모형 시험 시 주의해야 할 점은 사용된 모래가 재활용 될 경우 aging effect로 인해 내부마찰각이 감소(McVay, 2000)한다는 점이다.

2.2 점성토 지반조성

원심모형시험에서 가장 많이 사용되는 Kaolin Clay는 투수계수가 커서 압밀소요 시간이 짧고 공학적 특성이 잘 알려져 있다는 장점 때문에 점토지반에서의 원심모형시험에 널리 쓰이고 있다. Kaolin Clay를 이용한 지반 조성방법은 일반적으로 다음과 같다. 액성한계의 2배 정도의 함수비를 갖도록 물과 점토를 혼합하여 slurry를 만들고 진공상태에서 교반시키며 공기를 제거한다. 교반된 slurry에 공기가 들어가지 않도록 튜브 등을 이용하여 시험상자에 넣고 원하는 압밀상태를 만들기 위해 시료를 압밀시킨다(Garnier, 2006). 일반적으

* 비회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · 공학박사 · E-mail: gomzee@snu.ac.kr

** 비회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · 공학박사 · E-mail: zesymt85@snu.ac.kr

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사 후 연구원 · 공학박사 · E-mail: jimmy76@snu.ac.kr - 발표자

**** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 정교수 · 공학박사 · E-mail: geotech@snu.ac.kr

로 정규압밀 상태의 지반을 조성하기 위해서는 상사비정도의 원심가속도에서 자중 압밀을 시키며, 양면배수를 통하여 압밀속도를 증가시키기 위해 점토층 아래로 필터 페이퍼와 배수 사질토층을 2cm~3cm정도 깔아 준다(N. Loganathan, 2000). 조성이 끝난 점성토층의 비배수 전단강도 분포는 일반적으로 배인전단시험, T-bar test 및 소형 콘 관입 시험기 등을 이용하여 구한다(이철주, 2002). 대부분의 원심모형시험에서 점토지반의 간극유체로는 점성유체가 아닌 물이 이용되며 포화상태는 P와 테스트를 통하여 확인할 수 있다. 또한, 점토지반에서 모형말뚝을 이용한 원심모형시험을 수행할 경우 말뚝 주변부에 원치 않는 부마찰력이 발생할 수 있으므로 주의해야 한다.

3. 원심모형시험에서의 모형말뚝 설치방법에 의한 거동차이

3.1 1g 상태에서의 설치방법 (Hajjalilue, 2007)

1g상태에서 모형말뚝은 설치방법에 따라 향타말뚝, 매입말뚝(그림1(a),(b)) 및 Jacking 말뚝으로 분류한다. 매입말뚝은 강사기를 이용하여 목표로 하는 말뚝의 선단 위치까지 모래를 채우고 나일론 끈 등을 이용하여 모형말뚝을 공중에 매달아 고정 시킨 후 다시 최종적인 목표 지반고까지 강사하여 설치한다. 향타말뚝은 미리 지반조성을 끝낸 뒤 향타기를 이용하여 설치하며 향타 중 단위 깊이당 타격횟수를 측정하면 조성된 지반의 균질성을 확인할 수 있다. Jacking 말뚝의 경우는 유압잭을 이용하여 설치한다. 각각의 방법으로 설치한 말뚝들은 그림 2(a),(b)와 같이 고유진동수와 감쇠비의 차이를 보인다.

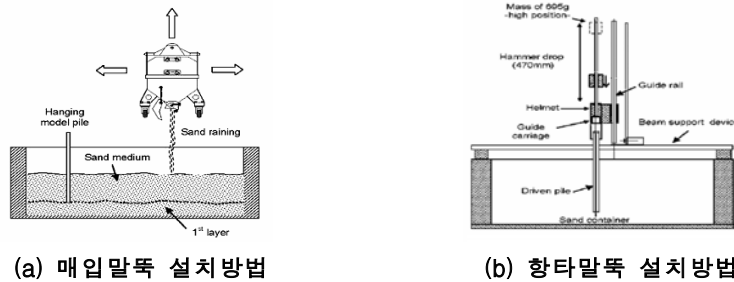
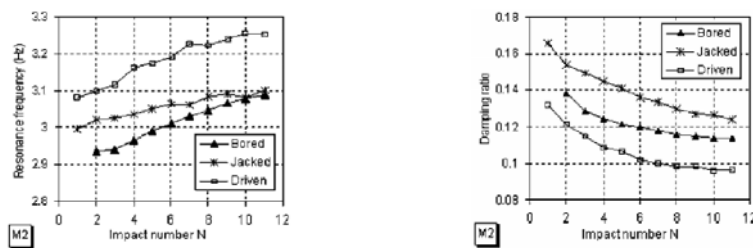


그림 1. 1g 상태에서의 말뚝 설치방법 (Hajjalilue, 2007)

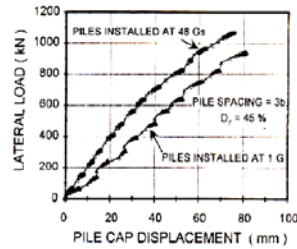
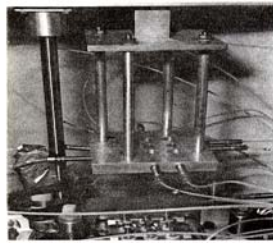


(a) 설치방법에 따른 고유진동수 차이 (b) 설치방법에 따른 감쇠비 차이

그림 2. 1g 상태에서의 말뚝 설치방법에 따른 고유진동수와 감쇠비 차이 (Hajjalilue, 2007)

3.2 Ng 상태에서의 설치방법

1g 상태에서 설치한 말뚝은 초기거동을 제외하면 전체적으로 원형에 비해 강성 및 저항값이 작으므로 원형의 거동을 정확히 모사할 수 없다(McVay, 1994). Bloomquist(1991)는 Ng 상태에서 말뚝을 향타하고 축 방향 하중을 재하 할 수 있는 장치를 개발 하였으며, McVay(1994)는 Bloomquist의 장치를 개선한 그림 3(a)의 장치를 이용하여 Ng 상태에서 더 많은 말뚝의 향타와 균말뚝 내 각 말뚝열의 하중 분포 및 변위 측정이 가능하도록 하였다. Ng 상태에서 설치한 말뚝은 그림 3(b)와 같이 1g 상태에서 설치한 말뚝에 비해 횡방향 저항력과 강성이 더 크게 나타난다.



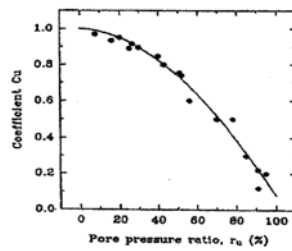
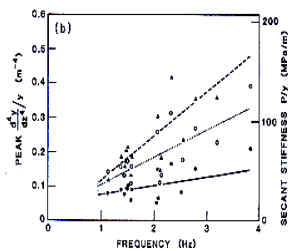
(a) Ng 상태에서의 말뚝항타 장치

(b) 항타조건에 따른 횡방향 저항차이

그림 3. Ng 상태에서의 말뚝항타 장치와 항타조건에 따른 횡방향 저항력 차이 (McVay, 1994)

4. 지반-말뚝-기초구조물의 동적응답에 대한 영향 인자

지진 시 지반-말뚝-구조물에 대한 수치적 해석방법의 결과를 검증하고, 정확한 동적 p-y 모델을 제시하기 위해서는 원심모형시험을 이용하여 지반-말뚝-구조물의 동적 응답을 분석하여야 한다. 지반-말뚝-구조물 동적응답의 영향 인자에 대한 기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다. 동하중에 의한 실험 p-y곡선의 활성 강성은 그림4(a)와 같이 하중 진동수와 깊이에 정비례(Ting, 1987)하며 과잉간극수압이 증가 할수록 그림4(b)와 같이 지반반력 p값이 감소한다(Liu & Dobry, 1995).



(a) 하중진동수와 깊이의 영향(Ting, 1987)

(b) 간극수압의 영향(Liu and Dobry, 1995)

그림 4. 지반-말뚝-구조물의 동적 응답에 대한 하중진동수, 깊이 및 간극수압의 영향

Mostafa(2002)의 연구에 의하면 지반-말뚝의 동적 응답은 말뚝 중심간격, 두부변위, 하중진동수, 전단파속도, 두부조건, 설치방법 및 재료와 기하학적 형상의 영향을 받으며, NCHRP 보고서(National Cooperative Highway Research Program, 2001)에 의하면 지반-말뚝의 동적응답은 말뚝지름, 지반의 전단파속도, 하중진동수 및 정적상태에서의 말뚝의 횡방향 거동과 관계가 있기 때문에 동적 p-y곡선의 영향 인자는 정적 p-y곡선의 영향 인자와 밀접한 관련이 있다. 일반적인 사질토 지반에서 정적 p-y곡선의 강성은 상대밀도에 비례하며, 정적 p-y곡선의 강성은 말뚝의 휨 강성과 말뚝 폭의 영향을 받지만 일정 크기 이상에서는 영향을 받지 않는다(Terashi, 1989).

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 동적 원심모형시험에서의 지반조성 방법, 모형말뚝의 설치방법과 그에 따른 거동차이 및 지반-말뚝-구조물의 동적응답에 대한 영향 인자에 대해 기술하였으며 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동적 원심모형시험에서 모형지반은 원 지반의 종류와 현장조건 등을 고려하여 조성해야 한다.
- (2) 말뚝의 설치 방법은 고유진동수와 감쇠비에 영향을 끼치며 설치 조건에 따라 말뚝의 횡방향 저항력과 강성이 변할 수 있으므로 반드시 현장응력 상태에서 적절한 방법으로 설치해야 한다.
- (3) 지반-말뚝-구조물의 동적응답은 하중진동수, 두부조건, 설치방법, 말뚝 중심간격 및 말뚝 두부변위, 깊이, 과잉간극수압, 말뚝의 재료, 기하학적 형상, 지반의 전단파 속도 및 상대밀도 등의 영향을 받으며 말뚝의 지름과 휨 강성은 일정 크기 이상에서는 영향을 미치지 않는다.

후기: 지반-말뚝-구조물에 대한 동적 원심모형시험에 관한 많은 연구가 해외 연구자들에 의해 진행 되어 왔지만, 아직까지 지반-말뚝-구조물에 대한 동적응답을 표현할 수 있는 진정한 의미의 동적 p-y 곡선이 제시 되어 있지 않다. 최근 국내에서는 수자원연구원에 설치된 대형 원심모형시험기를 이용한 지반-말뚝-구조물의 동적 원심모형시험이 준비 중에 있다. 앞으로 동적 원심모형시험에 대한 다양한 연구를 통해 시험 중 말뚝 설치를 위한 다자유도 로봇 개발, 데이터 처리 및 해석 기법 개발, 그리고 시험 중 지반 및 구조물의 응력과 변위를 쉽게 나타낼 수 있는 시각화 기법 개발 등이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 건설부문 및 과학기술부 한국과학재단 국가지정연구실 사업(R0A-2007-000-10004-0)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이철주(2002), "Geotechnical centrifuge technology 소개", 한국지반공학회지 Vol 18. No. 8, pp. 31-37
2. American Petroleum Institute (1987), "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", API Recommended Practice 2A(RP-2A), 17th edn.
3. Bloomquist D., Feld, T., Townsend, F.C., Gavgaard, J., and Gill, J.(1991). "Development of a multiple pile driver/load test device for pile group studies." Centrifuge 91, H-Y. Ko and F.G. McLean, Eds., A. A. Balkema Publishers Rotterdam, Netherlands, pp. 355-359
4. D.W.Wilson.(1998). "Soil-Pile-Superstructure Interaction in Liquefying Sand and Soft Clay", Ph.D. Dissertation,
5. Garnier J.(2006), "Development of Centrifuge Modelling in Geotechnics." KWATER International Seminar on Geo-centrifuge 2006
6. John M. Ting, Claudia R. Kauffman, and Maryann Lovicsek(1987)., "Centrifuge static and dynamic lateral pile behaviour", Can. Geotech. J. 24. 198-207
7. Liu, L. and Dobry, R. (1995), "Effect of liquefaction on lateral response of piles by centrifuge model tests", Report submitted to NCEER
8. Loganathan, N., Poulos, H.G. & Stewart, D.P.(2000). "Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations", Geotechnique 50, No. 3, 283-294
9. Masoud Hajjalilue-Bonab, Jean-Louis Chazelas, and Daniel Levacher, "Procedures used for dynamically laterally loaded pile tests in a centrifuge." Geotechnical Testing Journal, Vol.30, No.1
10. M. Terashi, M. Kitazume, K. Kawabata(1989), "Centrifuge modeling of a laterally loaded pile" Proceedings of the 12th International conference on soil mechanics & foundation engineering vol. 2 pp. 991-994
11. McVay M.C., Bloomquist, D., Vanderlinde, D., and Clausen, J., "Centrifuge modeling of laterally loaded pile groups in sands." Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.17, No. 2, June 1994, pp.129-137
12. McVay M.C., Zhang L., Han S. & lai P.(2000). "Experimental and numerical study of laterally loaded pile groups with pile caps and variable elevations." Transp. Research Record 1736, Paper N 00-1409, 12-18
13. National Cooperative Highway Research Program (2001), "Static and dynamic lateral loading of pile groups". NCHRP Report 461, Transportation Research Board - National Research Council
14. Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974), "Analysis of laterally loaded piles in sand", Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2(OTC 2080), 473-685
15. Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1975), "Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay", Proceedings of the VII Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2(OTC 2312), 672-690
16. W.D.L. Finn and N.Fujita(2002). "Piles in liquefiable soils : seismic analysis and design issues", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22 (2002) 731-742.
17. Yasser E. Mostafa and M. Hesham El Nagggar(2002). "Dynamic analysis of laterally loaded pile groups in sand and clay." Can. Geotech. J. 39: 1358-1383