

### 3차원 수치해석을 이용한 군말뚝기초의 반복수평하중재하실험에 대한 연구 3D numerical simulation of group-pile foundation subjected to horizontal cyclic loading

진영지<sup>1)</sup>, Youngji-ji Jin, 김진만<sup>2)</sup>, Jin-man Kim, 최봉혁<sup>3)</sup>, Bong-hyuck Choi, 이대영<sup>4)</sup>, Dea-young Lee

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>2)</sup>한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원, Research Fellow, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>3)</sup>한국건설기술연구원 지반연구실 전임연구원, Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

<sup>4)</sup>한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**SYNOPSIS** : Horizontal forces may form a major part of the loading system for structures supported on pile groups. It is known that during a strong earthquake, the dynamic behavior of a group-pile foundation is related not only to the inertial force coming from the superstructures but also to the deformation of the surrounding ground. Therefore, it is necessary to understand the behaviors of the group-pile foundations and superstructures during major earthquakes. In this paper, numerical simulation of real-scale group-pile foundation subjected to horizontal cyclic loading is conducted by using a program named as DBLEAVES. In the analysis, nonlinear behaviors of ground and piles are described by *cyclic mobility model* and *axial force dependent model* (AFD model). The purpose of this paper is to prove availability of the analysis method by comparing numerical results and test results.

**Key words** : group-pile foundation, horizontal cyclic loading, 3D numerical simulation, soil-water coupling analysis

## 1. 서 론

지진과 같은 수평반복재하력은 군말뚝 기초 및 상부구조물에 큰 영향을 미친다. 이때, 지중에서 발생하는 군말뚝의 피해는 상부구조물과는 달리 지진에 의한 피해상황을 정확하게 판단하는 것이 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 구조물의 안정성 확보를 위해서는 지진 발생 시 말뚝기초의 역학 거동을 정확하게 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 9개의 파일로 구성된 실물 크기 군말뚝기초의 반복수평하중재하실험 결과를 대상으로 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 수치해석은 흙/물 연성해석 프로그램인 DBLEAVES(Ye, 2007)를 이용하여 유효응력해석을 실시하고자 한다. 여기서, 지반은 흙의 밀도효과, 구조 및 응력유도이방성을 통일적으로 설명할 수 있는 이동경화형탄소성 구성모델인 cyclic mobility 모델(Zhang et al., 2007)로, 말뚝은 축력 변동에 의한 휨강성의 영향을 고려할 수 있는 AFD 모델(Zhang and Kimura, 2002)을 이용하

여 계산하였다. 수치해석 결과를 실물 크기 군말뚝기초의 반복수평하중재하실험결과와 비교함으로써 해석방법의 유용성을 검토하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 해석 조건

### 2.1 실물크기 군말뚝 기초의 수평재하실험의 개요

본 연구에서는 일본 Kishiwada 대교의 가설 벤트에 이용한 9개의 파일로 구성된 군말뚝의 반복 수평 재하 실험(Hanshin 고속도로공단, 1994)을 대상으로 하였다. 본 실험은 실제 구조물에 큰 수평 변위가 발생했을 때 각 말뚝의 종국 거동을 파악하기 위해 실시되었다. 재하실험의 개요는 그림 1에 나타난다. 실험 말뚝은 직경 1.2m, 길이 30.4m의 현장 타설 콘크리트 군말뚝으로 3개의 군말뚝 기초 중 2개를 연결시켜 반력말뚝으로 하였다. 그리고 재하 하중은 그림 2와 같이 최대 20.5MN까지 9번 반복하였다.

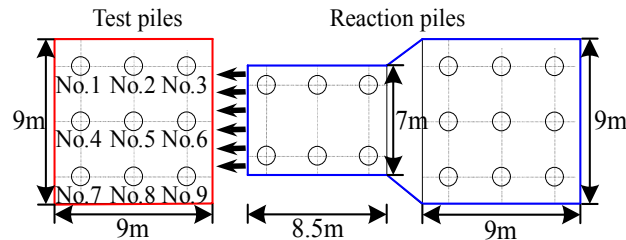


그림1. 재하실험의 개요

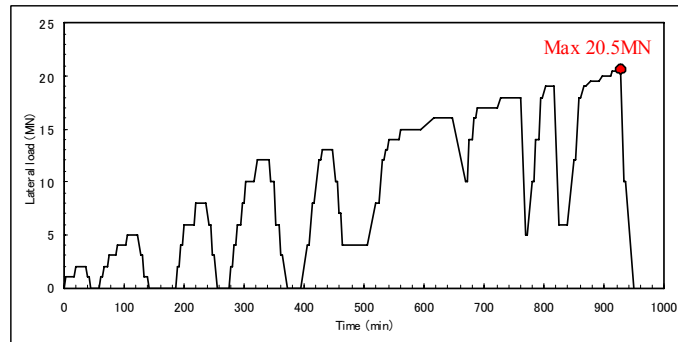


그림2. 반복재하하중-시간관계

### 2.2 해석 메쉬와 재하방법

해석 메쉬는 그림 3과 같이 토성도를 바탕으로 여섯 개의 층으로 나뉜 3차원의 반단면으로 작성하였다. 반복 하중은 실험과 같이 기초의 우측 지표면에서 높이 0.9m에 위치하는 모든 절점을 x, y, z방향으로 등변위 경계를 설정하여 강체로 한 후 가운데 한 점에 집중재하하였다. 지하수면은 지표면 이하 1m에 배수 경계 조건을 설정하였고, 지반의 초기 응력은 말뚝의 영향을 고려하지 않는 성층지반의 초기 응력분포로부터 구하였다.

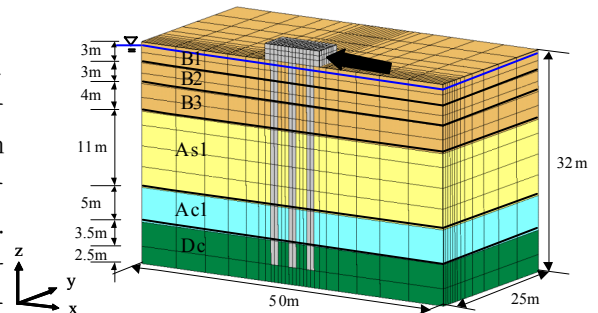


그림 3. 해석 메쉬

### 2.3 재료물성치의 결정

매립층(B층)에서 채취한 시료를 이용한 배수삼축압축실험 결과를 바탕으로 요소 시뮬레이션(그림 4)

을 수행하였다. 저구속압에서는 체적 변형율이 다소 과대평가되나 전체적으로는 실험 결과를 잘 재현하고 있다. 표 1과 표 2는 지반 재료의 물성치를 표 3은 말뚝의 제원을 나타낸다.

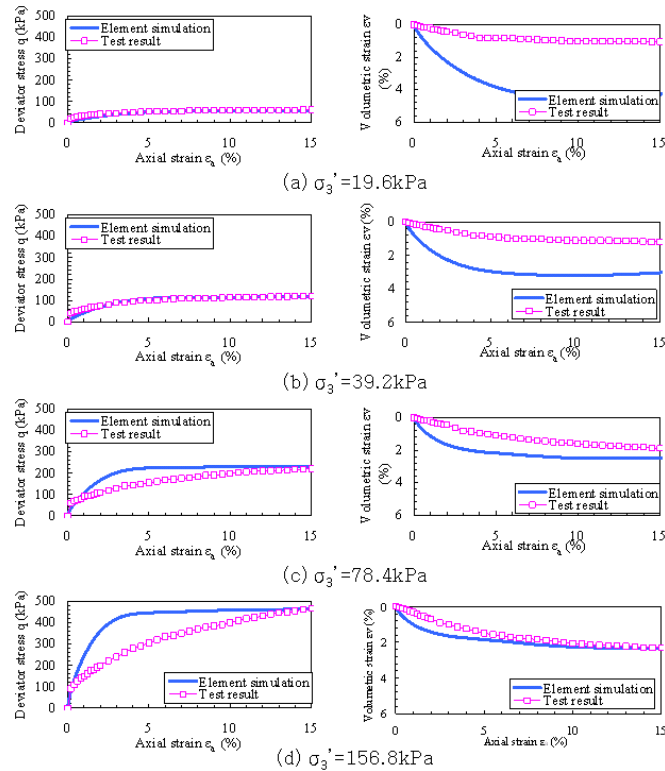


그림 4. 요소 시뮬레이션의 결과

표 1. 지반 재료 정수

|                                      | B1~B3   | As1   | Ac1   |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|
| Compression index                    | λ 0.055 | 0.23  | 0.23  |
| Swelling index                       | 0.001   | 0.046 | 0.046 |
| Stress ratio at critical state $R_f$ | 3.9     | 3.69  | 4.0   |
| Void ratio N                         | 0.9     | 0.8   | 0.7   |
| Poisson's ratio $\nu$                | 0.3     | 0.3   | 0.38  |
| Parameter of overconsolidation $m$   | 0.25    | 0.65  | 1.5   |
| Parameter of structure $a$           | 0.6     | 1.3   | 0.5   |
| Parameter of anisotropy $b_r$        | 0.5     | 0.5   | 0.5   |

표 2. 지반재료의 초기치

|                                    | B1   | B2    | B3   | As1  | Ac1       |
|------------------------------------|------|-------|------|------|-----------|
| Initial structure $R_0^*$          | 0.2  | 0.2   | 0.2  | 0.55 | 0.5       |
| Initial over-consolidation $1/R_0$ | 5.0  | 5.0   | 5.0  | 10.0 | 2.0       |
| Initial anisotropy $\beta_0$       | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0       |
| $\rho$ (t/m)                       | 1.97 | 1.97  | 1.97 | 1.80 | 1.70      |
| $k$ (cm/s)                         | 0.66 | 0.036 | 0.11 | 0.02 | $10^{-6}$ |

표 3. 말뚝의 제원

|   |
|---|
| 1. Physical properties of RC  |
| Compressive strength of concrete : $\sigma_c = 3.8 \times 10^4$ kPa |
| Young's modulus of concrete : $E_c = 2.5 \times 10^7$ kPa           |
| Young's modulus of steel : $E_s = 2.1 \times 10^8$ kPa              |
| Yield stress of steel : $\sigma_y = 3.8 \times 10^3$ kPa            |
| 2. Arrangement of the reinforcement :                               |
| D29-24 (upper part : 14.5m from the surface of the ground)          |
| D22-12 (lower part: 15.9m)  |
| Overburden of the reinforcement : 15cm                              |

### 3. 해석 결과

해석에는 실험과 동일한 그림 2의 하중을 재하하였다. 기초상부의 한 절점에서 측정된 수평변위를 그림 5에 나타낸다. 해석결과로부터 얻어진 최대 변위와 잔류 변위가 실험결과를 잘 재현하고 있으며, 특히 초기의 반복 하중재하시에는 실험결과와 거의 같은 수평변위를 나타낸다. 하지만 그 이후의 변위가 과소평가되는 이유는 실험에서는 하중이 반복될수록 말뚝 주변 지반에 균열이 많이 발생하나 본 해석에

서는 균열이 재현되지 않고, 제하에서 다시 재하할때까지의 0하중시의 변위가 과대평가되어 다소의 차가 발생했다고 생각된다.

3 사이클째 재하 하중 8MN시의 말뚝의 단면력 분포를 그림 6에 나타낸다. 군말뚝의 배치는 그림 1을 참조한다. 지중부에서 발생하는 휨 모멘트 및 축력의 최대치는 front(No.4)>middle(No.5)>rear(No.6)파일 순으로, front(No.4)파일에서는 압축 축력의 증가로 휨 내력이 커지지만, rear(No.6)파일에서는 인장 축력이 증가하므로 휨내력이 상대적으로 저하하므로 AFD모델을 사용함으로써 부재에 발생하는 단면력을 높은 정도로 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 6(c)는 매립층 내부에서 발생하는 축력의 평균 실험치와 해석결과를 비교하고 있으나, 해석결과가 실험결과를 잘 재현하고 있다.

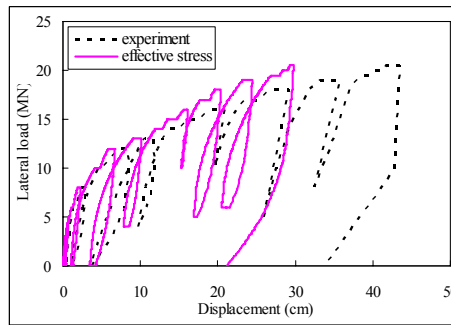
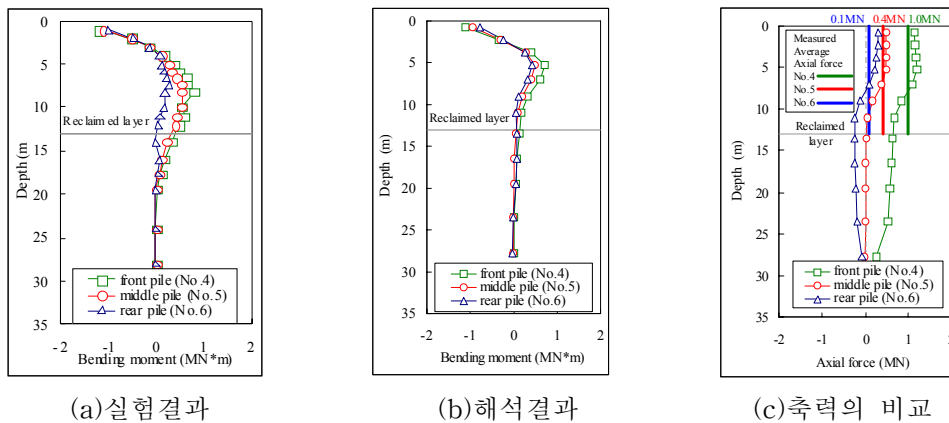


그림 5. 재하하중-수평변위관계



(a)실험결과

(b)해석결과

(c)축력의 비교

그림 6. 재하 하중 8MN시의 말뚝의 단면력 분포

#### 4. 결론

흙/물 연성 해석 프로그램인 DBLEABES를 이용해 실물 크기 군말뚝을 대상으로 반복수평 하중재하 실험의 유한요소해석을 실시한 결과, 수평변위, 말뚝의 단면력으로부터 해석결과가 실제 지반과 구조물의 거동을 정확하게 표현하고 높은 정도로 실험결과를 재현하는 것이 검증되었다.

#### 참고문헌

1. Hanshin 고속도로공단 (1994), "Kishiwada Kyuko 실제말뚝수평재하실험 · 실험보고서" (in Japanese)
2. Ye, B. (2007), "Experiment and Numerical Simulation of Repeated Liquefaction -Consolidation of Sand", Doctoral Dissertation, Gifu University.
3. Zhang, F., Ye, B., Noda, T., Nakano, M. and Nakai, K. (2007), "Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy", Soils and Foundations, Vol.47, No.4, 635-648.
4. Zhang, F. and Kimura, M. (2002), "Numerical prediction of the dynamic behaviors of a RC group-pile foundation", Soils and Foundations, Vol.42, No.3, pp.77-92.