

## 지반-말뚝 동적 상호 작용을 고려한 말뚝의 수치 모델링 : 메쉬 크기와 형상에 대한 매개 변수 연구

### Parametric Study with the Different Size of Meshes in Numerical Analysis Considering the Dynamic Soil-Pile Interactions

나선홍<sup>1)</sup>, Seon-Hong Na, 김성환<sup>2)</sup>, Seong-Hwan Kim, 김명모<sup>3)</sup>, Myoung-Mo Kim

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>3)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

**SYNOPSIS** : Numerical analysis is a powerful method in evaluating the soil-pile-structure interaction under the dynamic loading, and this approach has been applied to the practical area due to the development of computer technology. Finite Difference Method, one of the most popular numerical methods, is sensitive to the shape and the number of mesh. However, the trial and error approach is conducted to obtain the accurate results and the reasonable simulation time because of the lack of researches about mesh size and the number.

In this study, FLAC 3D v3.1 program(FDM) is used to simulate the dynamic pile model tests, and the numerical results are compared with the 1G shaking table tests results. With the different size and shape of mesh, the responses of pile behavior and the simulation time are estimated, and the optimum mesh sizes in dynamic analysis of single pile is studied.

**Keywords** : FLAC 3D, numerical analysis, finite difference method, dynamic soil-pile interaction, 1G shaking table model test.

## 1. 서론

말뚝, 굴착, 사면, 내진 해석 등에 널리 이용되는 FLAC 3D(유한차분 수치해석 프로그램)를 이용하여 말뚝 기초의 동적 거동 분석 방법의 하나인 지반 및 지반 구조물을 연속체로 모델링하는 동적 해석을 수행하였다. 유한 차분법을 이용한 동적 해석법은 지반-기초 구조물의 동적 상호 작용을 엄밀하게 평가하고자 할 때 이용되고 있다. 그러나 유한차분해석법은 메쉬의 크기 및 형상에 따라 응답에 차이를 보인다. 특히 말뚝-지반 거동 해석에 있어서는 상호작용의 복잡성으로 인해 메쉬 크기와 형상이 응답에 큰 영향을 미치며, 메쉬 크기를 작게 할 경우 기하학적 복잡성 때문에 해석 시간이 증가한다. 그러나 합리적인 해석 시간이 소요되면서도 정해에 가까운 해석 결과를 얻기 위한 메쉬 크기에 대한 연구가 부족하여, 해석 수행 시 시행착오를 거쳐 메쉬 크기를 찾을 수밖에 없다.

본 연구에서는 FLAC 3D를 이용하여 1g 조건에서 수행한 동적 모형말뚝실험을 모사하고 수치해석으로부터 산정한 말뚝 상부 구조물에서의 변위-시간이력과 깊이에 따른 말뚝 변위를 1g 진동대 실험 결과와 비교하였다. 메쉬 크기와 형상에 따른 응답과 수치 해석 시간을 분석하고 말뚝 기초 동적 해석 시 최

적의 메쉬 크기를 연구하였다.

## 2. 1g 진동대 실험

길이와 폭이 각각 1.8 m, 0.6 m이고 높이가 1.2 m인 아크릴 토조가 사용되었으며, 알루미늄 재질의 중공 말뚝과 지반을 그림 1과 같이 설치하였다. 두께 50 mm의 스펀지를 강성 벽체의 반사파를 막기 위해 지반과 토조 사이에 설치하고 토조 바닥면에서 지진파를 가하였다. 말뚝 및 지반의 재원과 지진파 특성은 표 1과 같다.

표 1. 1g 진동대 실험 개요

말뚝	재질	근입깊이	외경	두께	탄성계수	휨강성	상부질량	
	알루미늄	110mm	32mm	5mm	67.82 Gpa	2.7 kNm <sup>2</sup>	96kg	
지반	USCS	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	C <sub>u</sub>	G <sub>s</sub>	γ <sub>dmax</sub>	γ <sub>dmin</sub>	상대밀도
	SP	0.38mm	0.58mm	1.68	2.65	1.66t/m <sup>3</sup>	1.33t/m <sup>3</sup>	80%
입력 지진파	0.154g 6Hz Sine wave							

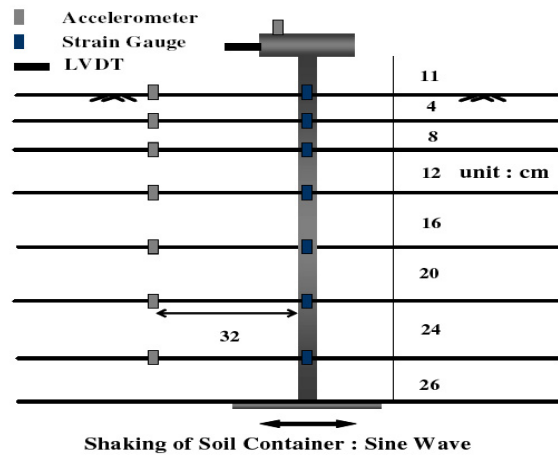
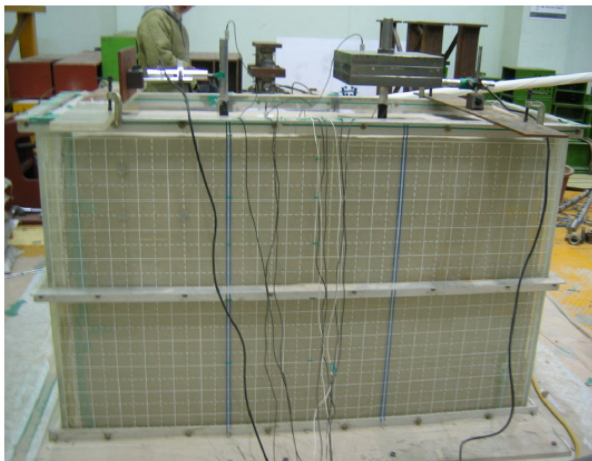


그림 1. 1g 진동대 실험 및 계측기

## 3. 수치 해석

### 3.1 모델링

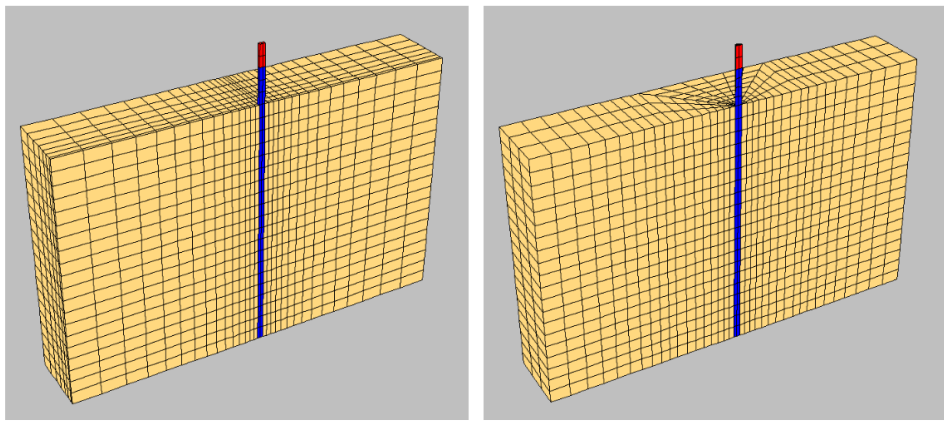
유한차분해석 프로그램인 FLAC 3D v3.1을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 인텔코어2쿼드 Q9550(2.3G, 12MB)의 CPU로 해석을 수행하였다. 지반 및 말뚝은 1g 진동대 실험과 같은 크기로 모델링을 하였으며, 해석 시간의 단축을 위해서 반대칭 조건을 이용하여 진동축을 기준으로 절반(half-mesh)을 모사하였다. 지반과 말뚝은 각각 Mohr-Coulomb 완전 탄소성 모델과 탄성 모델을 사용하였다. 1g 진동대 실험에서는 알루미늄 재질의 중공 원형 말뚝이 사용되었으나, 수치 계산의 안정성을 위하여 중공 말뚝을 휨강도가 동일한 등가의 중실 말뚝으로 대체하였다. 메쉬의 형상에 따른 거동을 분석하기 위해 말뚝을 등가의 사각형과 원형 말뚝으로 치환하였으며, 기하학적 조건을 만족하기 위해 brick 요소, cylinder 요소, radytunnel요소 그리고 radcylinder요소를 이용하였다(그림 2). 상부하중은 실제의 위치에

집중 질량을 입력하는 방식으로 모델링을 함으로써 해석의 효율성을 높이고자 하였다.

지반-말뚝 인터페이스 모델을 적용하여 slip 및 gap과 같은 지반과 말뚝의 접촉면에서의 상호작용을 모사하였다. Cundall(1976)은 접촉면에서 발생하는 힘과 상대 변위가 선형관계에 있도록 수직, 수평력과 각각의 상대 변위의 관계를 정의했다. 힘과 상대 변위의 관계를 결정하는 계수 값은 각각  $k_n$ ,  $k_s$ 로 Expanding infinite cylinder theory에 의해 유도되며, 식 (1), (2)와 같다.

$$k_n = \frac{\overline{\Delta\sigma}_n}{\Delta r} = \frac{E_m}{1+\nu_m} \frac{1}{r} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{(F_s)_{\max}}{A u_{\max}} = \frac{K \overline{\sigma}_n \tan \delta + c A}{u_{\max}} \quad (2)$$



(1) 사각 말뚝

(2) 원형 말뚝

그림 2. 3차원 요소망

### 3.2 입력 물성값

지반의 물성치는 삼축 실험을 통해 얻어진 결과를 적용하였으며, 말뚝은 알루미늄 합금의 물성치를 사용하였다. 말뚝과 지반의 인터페이스에서의 마찰각은 지반의 내부 마찰각의 3분의 2를 적용하였으며, 입력 변수는 표 2와 같다.

표 2. 입력 변수

	탄성계수 (MPa)	포아송 비	단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	내부 마찰각(°)	점착력 (Mpa)	상대밀도 (%)	$k_n$ (Mpa)	$k_s$ (Mpa)
말뚝	67820	0.33	2.70	-	0	-	-	-
지반	8.2	0.30	1.58	42	0	80	-	-
인터페이스	-	-	-	28	0	-	31.86	100

## 4. 해석 결과

### 4.1 메쉬 크기에 따른 결과 비교

메쉬의 형상을 brick 요소로 하여 지반과 사각 말뚝을 모델링하고 메쉬 크기에 따른 결과를 비교하였다. 표 3은 메쉬 크기 조건과 지진 하중 1초를 해석하는데 걸리는 계산 시간, 그리고 말뚝의 지표면 최대 변위를 나타내었다. 동일한 기하학적 조건이므로 메쉬의 크기가 작을수록 형성되는 grid-point와 zone의 개수는 증가한다.

표 3. 메쉬 크기에 따른 해석 결과

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	실험
Zones	906	1956	4490	6310	12614	-
Grid-points	1327	2690	5679	7856	14860	-
해석 시간	1시간 30분	6시간 15분	13시간 27분	19시간 56분	41시간 12분	-
최대 변위(mm)	10.26	4.11	2.75	2.03	1.80	1.38

해석 결과 메쉬 크기가 증가함에 따라 최대 변위가 실험에 비해 최소 30%에서 최대 680% 크게 예측되었고, 해석 시간은 메쉬 크기가 작아짐에 따라 증가하여 최대 40배의 차이를 보였다. 메쉬의 크기가 작을수록 실험 결과에 근접하는 경향을 보였다. 그림 3은 메쉬의 크기에 따른 말뚝 변위의 시간 이력이다. 변위의 시간 이력에서는 메쉬의 크기 변화와 경향의 유사성 간의 상관성은 나타나지 않았다. Case1, 2는 최대 변위가 실험에 비해 크게 예측되어 세로축의 단위를 조정하였다.

그림 3에서 Case1, 2에서는 최대 변위가 실험 결과에 비해 각각 640%, 198% 크게 예측되었고, 말뚝 변위 시간 이력의 경향이 실험 결과와 상이하다. 또한 비교적 최대 변위가 실험값에 근사하게 예측된 Case4, 5는 변위이력이 실험 결과와 달리 일정한 진폭을 보이지 않는다. Case 3의 경우는 최대 변위가 2배 크게 예측되었지만 거동의 경향성이 유사하고 해석 시간의 단축 측면 등을 감안할 때 가장 적합한 해석 조건으로 판단된다.

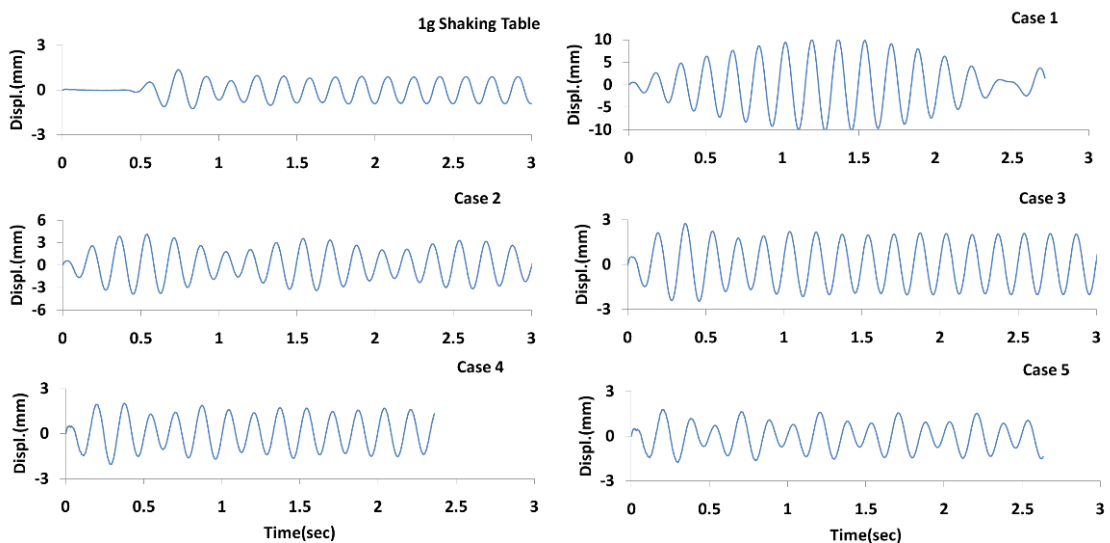


그림 3. 메쉬 크기에 따른 말뚝 변위-시간 이력

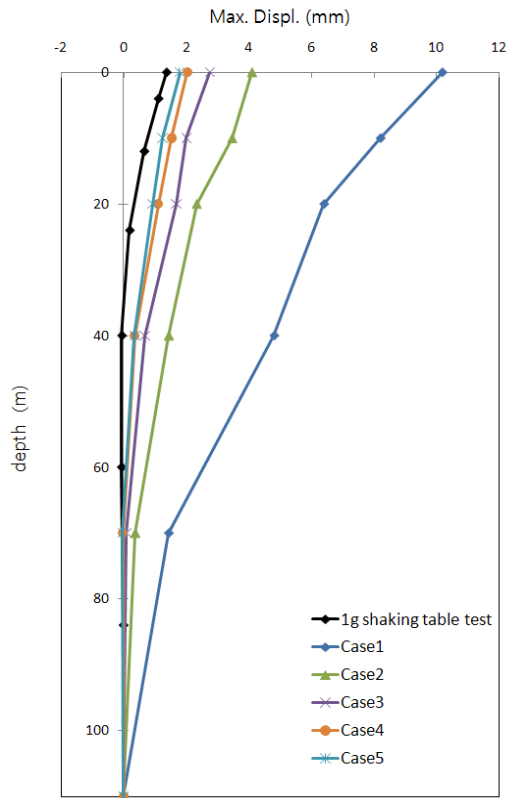


그림 4. 메쉬 크기에 따른 깊이별 말뚝 변위

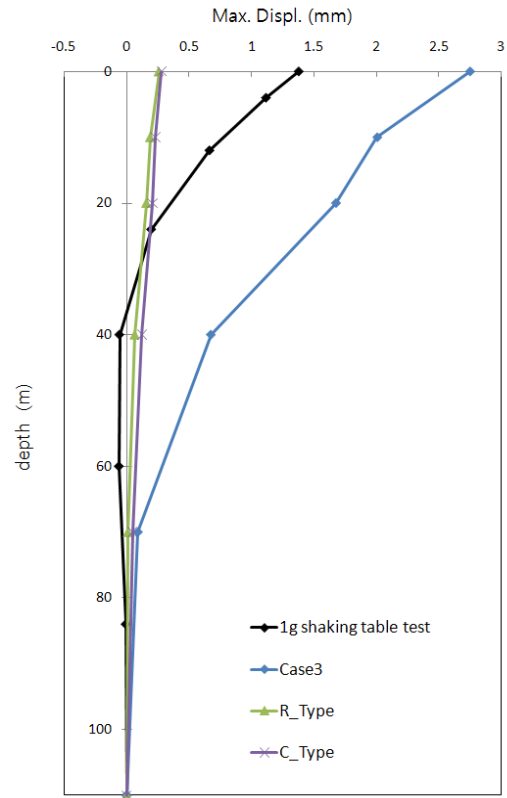


그림 5. 메쉬 형상에 따른 깊이별 말뚝 변위

## 4.2 메쉬 형상에 따른 결과 비교

Case3을 기준으로 메쉬 형상의 영향을 평가하기 위해 사각(말뚝)-방사형(지반) 메쉬 형상(R\_Type)과 원형(말뚝)-방사형(지반) 메쉬 형상(C\_Type)으로 해석한 결과를 비교하였다. 표 4는 메쉬 형상에 따른 해석 결과이다. 방사형 지반 조건인 R\_Type, C\_Type에서 최대 변위가 각각 0.26 mm, 0.28 mm로 실험 결과에 비해 작게 예측되었다. 동일한 해석 조건에서 지반 형상이 방사형으로 바뀐 결과 변위가 약 10 배 감소하였고, 원형 말뚝 형상으로 해석한 경우 해석 시간이 약 50 % 증가하였다. 그림 5와 6에서 지반 메쉬 형상에 대한 민감도가 말뚝의 경우보다 크기 때문에 말뚝의 메쉬 형상보다 지반 메쉬 형상이 말뚝의 변위에 미치는 영향이 크다고 판단된다.

표 4. 메쉬 형상에 따른 해석 결과

	Case3	R_Type	C_Type	실험
Zones	4490	3168	3432	-
Grid-points	5619	4287	4515	-
해석 시간 (1초 기준)	13시간 27분	12시간 18분	18시간 46분	-
최대 변위 (mm)	2.75	0.26	0.28	1.38
메쉬 형태	사각 말뚝 + 사각형 지반	사각 말뚝 + 방사형 지반	원형 말뚝 + 방사형 지반	-

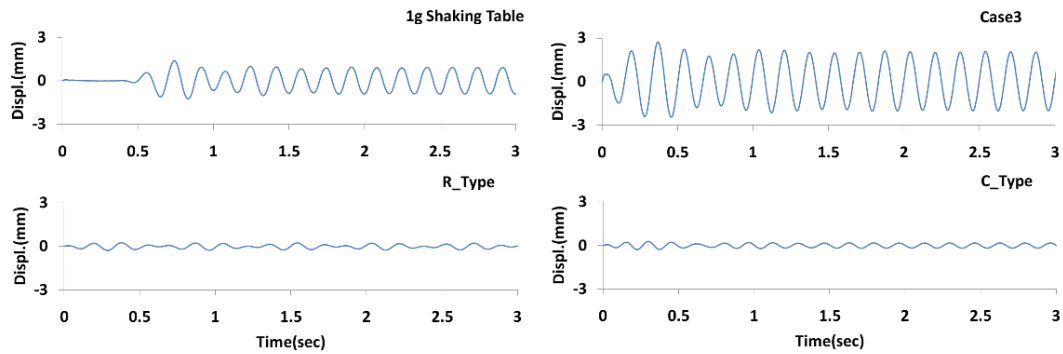


그림 6. 메쉬 형상에 따른 말뚝 변위-시간 이력

## 5. 결론 및 향후 연구

유한 차분 해석 프로그램 FLAC 3D v3.1을 이용하여 1g 조건에서 수행한 동적 모형말뚝실험을 모델링하고, 메쉬의 크기 및 형상 조건에 따른 말뚝의 최대 변위 및 말뚝 변위의 시간 이력을 비교해 해석의 정확도를 평가하고, 동하중 1초에 대한 해석에 소요되는 시간을 평가하였다.

(1) 말뚝 최대 변위는 실험 결과에 비해 30% ~ 680% 크게 예측되었고, 메쉬의 크기가 작을수록 말뚝 최대 변위가 감소하여 실험 결과에 수렴하는 경향을 보였다. 메쉬 크기 조건이 바뀔에 따라 말뚝의 변위-시간 이력은 다양한 경향성을 보였고, 최대 변위, 변위-시간 이력의 경향성 및 해석 시간 등을 감안했을 때 메쉬 크기를 말뚝 직경의 약1.7배로 모델링했을 때 가장 합리적인 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 메쉬 형상에 따른 영향을 분석하기 위해 말뚝을 사각 또는 원형, 지반을 사각 또는 방사형 형상으로 모델링하고 해석을 수행하였다. 말뚝을 원형으로 모델링한 경우 사각형에 비해 최대 변위는 8%의 차이를 보였으며 해석 시간이 약 50% 증가하였다. 지반을 방사형으로 모델링한 경우 사각형에 비해 최대 변위가 약 10배 감소하였고 해석 시간에는 큰 영향이 없었다. 말뚝의 최대 변위의 크기에 미치는 영향은 말뚝 메쉬의 형상보다 지반 메쉬 형상이 더 크다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R0A-2007-000-10004-0(2009)).

## 참고문헌

1. 사단 법인 한국 지반 공학회(2002), "지반 구조물의 내진 설계",
2. 양의규(2009), "1g 진동대 실험을 이용한 사질토 지반의 동적 p-y 곡선 평가", 학위논문(박사), 서울대학교 대학원, 서울.
3. Cundall, P.A.(1976), "Explicit finite difference methods in geomechanics", *In Numerical Methods in Engineering, Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Blascburg, VA, Desai, C.S.(ed.) Vol. 1, pp. 132~150.
4. Itasca Consulting Group, Inc. (2002). *FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) User's Guide*, Minnesota, USA.