

임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 극한지지력의 평가

Estimation of Ultimate Bearing Capacity for Randomly Installed Granular Compaction Pile Group

신 방 응*¹ Shin, Bang-Woong

채 현 식*² Chae, Hyun-Sik

김 홍 택*³ Kim, Hong-Taek

Abstract

Granular compaction piles increase the load bearing capacity of the soft ground and reduce the settlement of foundation built on the reinforced soil. Also the granular compaction piles accelerate the consolidation of soft ground using the granular materials such as sand, gravel, stone etc. However, this method is one of unuseful methods in Korea. In the present study, the estimation procedure for the ultimate bearing capacity of randomly installed granular compaction pile group is proposed. Also, carbon rod tests have been performed for verifying the group effect of granular compaction piles and the behavior characteristics such as bulging failure zone on granular compaction piles. From the test results, it is found that bulging failure shape of granular compaction piles was conical shape and the ultimate bearing capacity increased as the spacing of piles became gradually narrow. Also, from the proposed method in this study, the optimal locations of granular compaction piles with various installed cases are analyzed. The results were shown that the bearing capacity was increased in the case concentrated on the central part of pile group.

요 지

조립토 다짐말뚝 공법은 자갈이나 쇄석 등의 조립질 재료를 진동기로 다지면서 지중에 조립토 말뚝을 형성하여 지반을 보강하는 공법으로 연약한 기초지반의 지지력 증가와 침하량 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량 효과 등이 있으나, 국내에서는 아직 널리 활용되고 있지 않은 공법이다. 본 연구에서는 정방형 대칭형태 뿐만 아니라 다양한 임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대해서도 극한지지력의 평가가 가능한 방법을 제시하였으며, 탄소봉을 이용한 실내모형실험을 통해 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 파괴메커니즘의 규명과 조립토 다짐말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따른 지지력의 변화양상에 대한 규명이 이루어졌다. 탄소봉을 이용한 조립토 다짐말뚝의 모형실험결과, 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 있어서 파괴형상은 팽창파괴의 중심점을 서로 연결할 때 중심부로 갈수록 깊어지는 원추형태의 양상을 나타냈으며, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 원추형태의 경사각도는 급해지는 경향을 알 수 있었다. 또한 탄소봉실험에 있어서 모형말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 인접한 말뚝에 의한 구속효과 및 변형억제 등의 상호작용 효과로 지지력이 증가하였다. 본 연구에서 제안한 극한지지력 평가방법을 이용하여 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 최적 배치형태를 검토한 결과, 지지력 측면에서 조립토 다짐말뚝의 최적배치형태는 중앙부에 집중적으로 설치된 경우로 나타났다.

*1 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Civil Engrg., Chung-Buk National Univ.)

*2 정희원, 한국종합기술개발공사 상무 (Member, Managing Director, Korea Engrg., Consultants Corp.)

*3 정희원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Civil Engrg., Hong-Ik Univ.)

1. 서론

조립토 다짐말뚝(*granular compaction piles*) 공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 자갈, 쇄석 또는 모래 등의 조립질 재료를 사용하여 연약한 기초지반을 10~35% 정도 치환함으로써, 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량 효과 등을 도모하며, 특히 사질토 지반에 적용할 경우에는 지진 발생시 액상화 방지에도 효과적인 공법이다.

조립토 다짐말뚝의 거동특성 등에 대한 실험적·이론적 접근은 Hu 등(1997)을 비롯한 여러 연구자들에 의해 유럽 및 미국 등을 중심으로 지난 20여년 동안 이루어져 왔으며, 연구결과 무리형태의 조립토 다짐말뚝은 단일(*single*)말뚝의 경우와는 달리 인접하여 설치된 조립토 다짐말뚝간의 구속효과 및 변형억제 등과 같은 상호작용과 조립토 다짐말뚝과 하부 기초지반과의 상호작용이 복합적으로 작용하여 복잡한 거동특성을 나타낸다고 보고하고 있다. 또한 조립토 다짐말뚝과 관련하여 국내의 연구결과로는 김홍택 등(1998)이 정방향으로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 파괴형상을 원추형으로 가정하여 인접한 말뚝에 의한 지반보강 효과 및 상호간섭효과를 고려하여 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가방법을 제시한 바 있으며, 강관 스커트(*skirt*)로 보강된 경우를 포함하여 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 지지력 평가방법을 아울러 제시한 바 있다(김홍택 등, 1999).

그러나 기존의 연구는 정방향 대칭형태에 한해서 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 극한지지력을 평가할 수 있는 정도로서, 조립토 말뚝의 다양한 배치형태에 대한 극한지지력을 평가하기에는 어려운 한계성이 있었다. 따라서 본 연구에서는 향후 수행될 지지력 및 침하량에 대한 조립토 다짐말뚝의 최적설계를 위한 선행단계로서, 정방향 대칭형태 뿐만 아니라 다양한 임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대해서도 극한지지력의 평가가 가능한 방법을 제시하고, 조립토 다짐말뚝의 다양한 배치형태에 대한 극한지지력을 평가하여 지지력 측면에서 최적 배치형태를 제시하였다. 또한 탄소봉을 이용한 실내모형실험(*carbon rod test*)을 통해 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 있어서

파괴메커니즘에 대한 규명과 조립토 다짐말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따른 지지력의 증가양상에 대한 규명이 이루어졌다.

2. 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 거동특성

2.1 파괴형태

조립토 다짐말뚝은 콘크리트 말뚝이나 강관 말뚝과 같이 그 구성재료들의 입자들간 움직임이 구속되어 있는 강결상태가 아니므로 일반 말뚝과는 다른 파괴양상을 나타내며, 여러 실험결과에 의하면 다짐말뚝의 제원 및 지반조건 등에 따라 그림 1과 같이 전반전단파괴(*general shear failure*), 국부전단파괴(*local shear failure*) 및 팽창파괴(*bulging failure*) 등의 세가지 형태로 나타난다.

단일말뚝형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 파괴형태는 말뚝의 길이가 짧은 경우 국부전단파괴 및 전반전단파괴가 일반적인 파괴형태이며, 말뚝의 길이가 길 경우에는 팽창파괴의 양상이 일반적인 파괴형태이다. 또한 무리형태로 설치된 조립토 다짐말뚝에서의 파괴양상은 그림 2와 같이 팽창파괴 및 활동파괴 등의 두가지 형태로 나타나며, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 주변지반이 조밀해지면서 지지력이 증가하고 침하량은 감소되는 경향이 있다.

무리형태로 설치된 조립토 다짐말뚝에서의 팽창파괴는 단일말뚝형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 경우와는 달리 그림 2(a)와 같이 기초의 중앙부로 갈수록 팽창파괴의 중심부가 점점 깊어지는 원추형 형태를 나타낸다. 즉 최외곽 말뚝의 팽창으로 인해 조립토 다짐말뚝 주변의 구속응력이 인접한 조립토 다짐말뚝으로 전이되면서 중앙부에 설치된 말뚝은 외곽부에 설치된 말뚝에 비해 더 큰 구속압이 작용하여 중앙부로 갈수록 팽창파괴의 중심부가 점점 깊어지는 경향을 보이게 된다. 또한 활동파괴는 조립토 다짐말뚝의 설치폭에 비해 말뚝의 길이가 짧을 경우 예상되는 파괴형태로도 기초지반의 보강 및 매립공사 등과 같은 대단위 규모의 지반보강시에 예상되는 파괴형태이다.

따라서 건물 기초지반의 보강 등과 같은 소규모 지

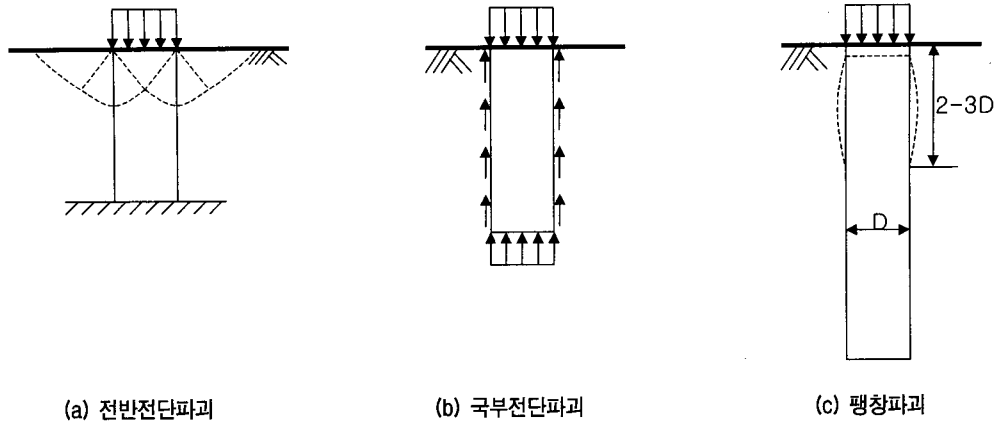


그림 1. 조립토 다짐말뚝의 파괴형태

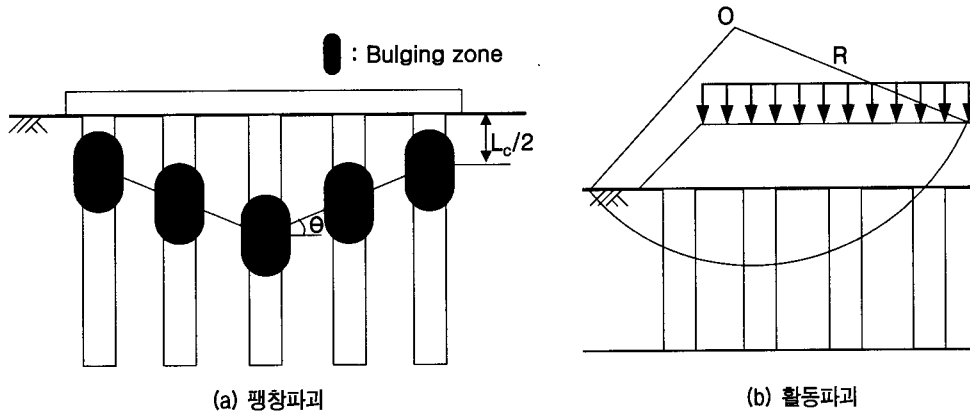
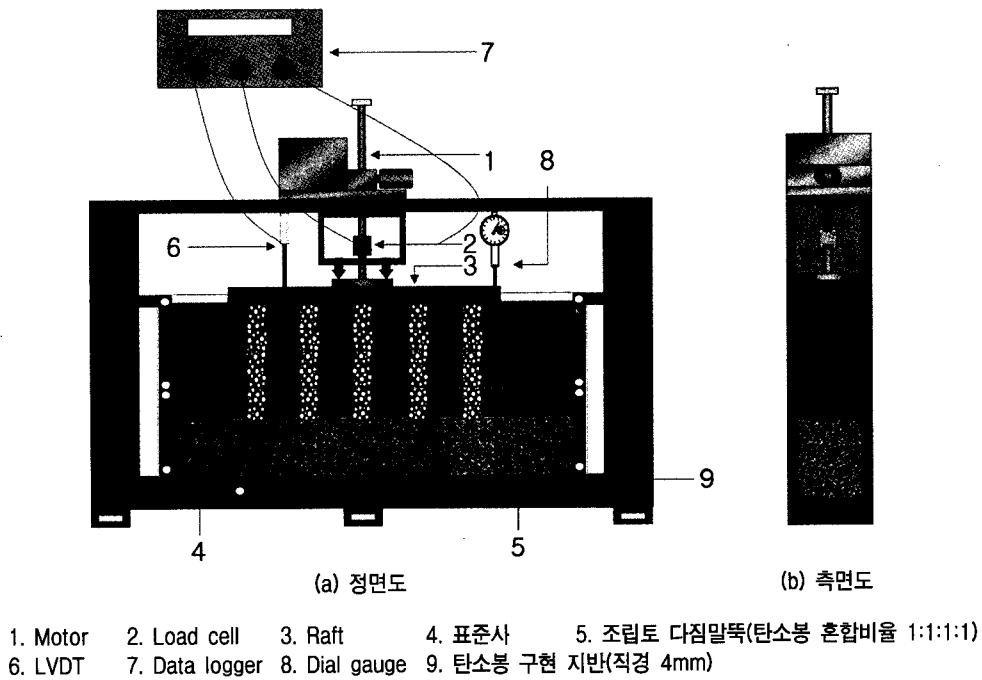


그림 2. 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 파괴형태



1. Motor 2. Load cell 3. Raft 4. 표준사 5. 조립토 다짐말뚝(탄소분 혼합비율 1:1:1:1)
 6. LVDT 7. Data logger 8. Dial gauge 9. 탄소분 구현 지반(직경 4mm)

그림 3. 탄소분 실험장치 개요도

반보강시 무리형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 파괴 형태는 대부분 팽창파괴 형태로 나타나며, 본 연구에서는 팽창파괴에 한하여 임의의 배치형태로 설치된 무리 형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 극한지지력을 결정하였다.

2.2 탄소봉실험 결과

2.2.1 실험개요

본 연구에서는 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 파괴메커니즘을 규명하고 조립토 다짐말뚝의 중심간격의 변화에 따른 지지력의 변화양상을 규명하기 위해 탄소봉실험(carbon rod test)을 수행하였다. 탄소봉실험장치의 개요도는 그림 3과 같으며, 토조의 내부는 폭 1140mm, 높이 650mm, 두께 65mm의 크기로 제작하였고, 전면은 파괴양상을 관찰할 수 있도록 두께 15mm의 아크릴판으로

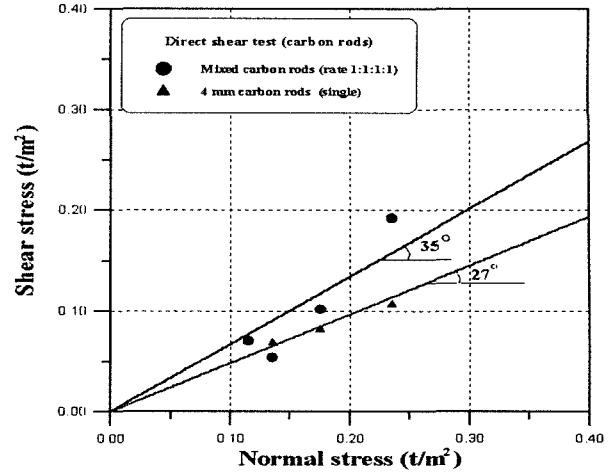
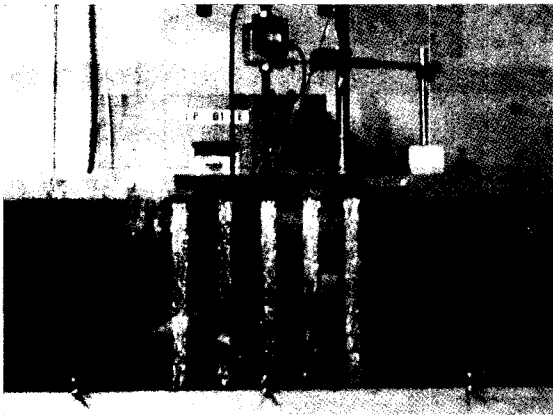
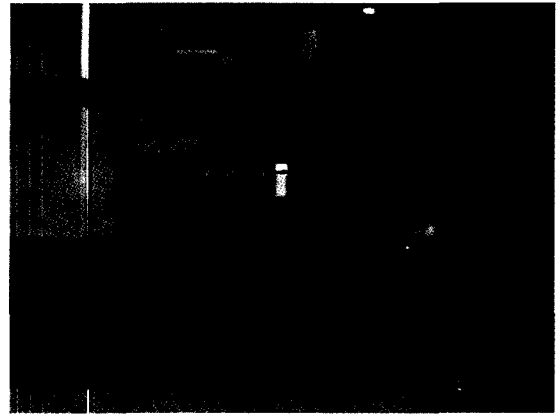


그림 4. 직접전단시험 결과

로 제작하였다. 또한 하중재하판은 길이 400mm, 폭 50mm, 두께 15mm의 강판을 사용하였으며, 하중은 변위제어방식으로 1mm/min의 속도를 유지하면서 일정하게 재하

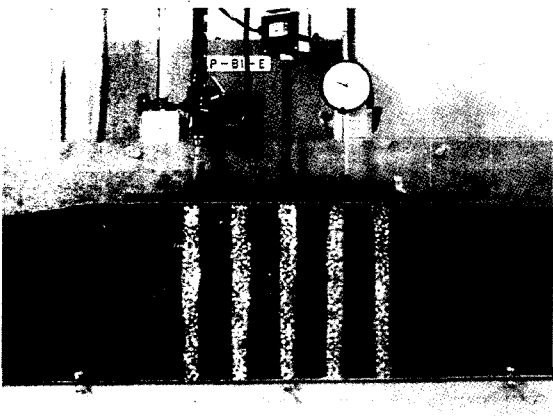


(a) 초기상태



(b) 실험종료 후

사진 1. 탄소봉 실험결과(말뚝의 중심간격이 3.0D인 경우)



(a) 초기상태



(b) 실험종료 후

사진 2. 탄소봉 실험결과(말뚝의 중심간격이 3.5D인 경우)

표 1. 실험에 사용한 탄소봉의 특성치

구 분	주변지반을 모사한 탄소봉	조립토 다짐말뚝을 모사한 탄소봉
단위중량 (t/m ³)	1.27	1.44
내부마찰각 (°)	27	35

하였다.

탄소봉실험에 있어서 조립토 다짐말뚝과 주변지반을 모사하기 위해 본 연구에서는 직경 3, 4, 6, 8mm의 탄소봉을 각각 1:1:1:1의 비율로 혼합하여 탄소봉 모형말뚝(직경 20mm, 길이 250mm)을 모사하였으며, 주변지반은 직경 4mm의 탄소봉만을 사용하여 모사하였다. 각 경우에 대한 직접전단시험결과 및 특성치는 그림 4 및 표 1과 같다.

2.2.2 파괴메커니즘

본 실험에서는 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 파괴메커니즘을 규명하기 위해 폭(D) 20mm로 탄소봉 모형말뚝을 총 5본 설치하고 말뚝의 중심간격을 각각 60mm(=3D)와 70mm(=3.5D)로 변화시켜 파괴형상을 살펴보았으며, 실험결과는 사진 1 및 2와 같다.

탄소봉을 이용한 조립토 다짐말뚝의 모형실험결과, 하중을 증가시키에 따라 탄소봉 모형말뚝의 파괴양상은 최외곽 말뚝에서 부터 팽창파괴가 발생하여 파괴가 진행되면서 팽창파괴가 중앙부의 말뚝으로 발전되는 양상을 나타냈으며, 파괴양상도 앞서 언급했던 원추형의 파괴양상과 상당히 유사함을 확인할 수 있었다. 중심간격에 따라 팽창파괴의 중심점을 연결한 직선이 수평면과 이루는 각도(θ)는 중심간격이 3.0D인 경우에는 26.0°로 나타났으며, 3.5D인 경우는 24°로 관찰되었다. 이를 통해서 볼 때, 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 있어서 파괴형상은 팽창파괴의 중심점의 위치를 서로 연결할 때 무리형태의 중심부로 갈수록 깊어지는 원추형태의 양상을 나타내며, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 원추형태의 경사각도는 급해지는 경향을 알 수 있었다.

2.2.3 말뚝의 중심간격에 따른 지지력의 변화

본 실험에서는 모형말뚝의 중심간격이 변화함에 따른 지지력의 변화양상을 규명하기 위해 폭(D) 20mm로 탄소봉 모형말뚝을 총 3본 설치하고 말뚝의 중심간격을 각각 40mm(=2D), 60mm(=3D) 및 80mm(=4D)로 변화시켜 하중-침하특성을 분석하였다. 실험결과, 그림 5와 같

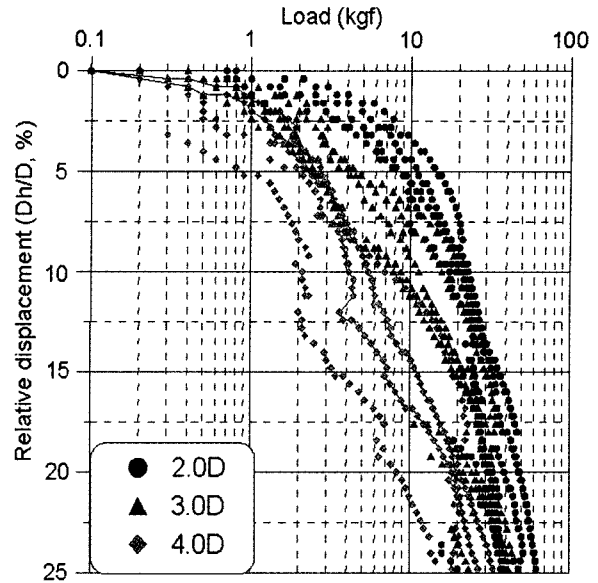


그림 5. 탄소봉 모형말뚝의 중심간격에 따른 하중-침하특성

이 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 지지력이 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 인접한 말뚝에 의해 구속효과 및 변형억제 등의 상호작용 효과가 증대되어 지지력이 증가한 것으로 판단된다.

3. 극한지지력의 평가절차

3.1 수정된 극한공동압의 평가

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 임의의 배치형태를 고려하여 그림 6과 같이 i 번째의 조립토 다짐말뚝의 위치에서 각도변화에 따른 i 번째 조립토 다짐말뚝의 소성영역내에 설치되어 있는 j 번째 조립토 다짐말뚝의 내부 통과길이는 식 (1)과 같다.

$$L_{pj}(\Psi_j) = \frac{2\sqrt{(R_i^2 - u_j^2)\sin^2\Psi_j + (R_i^2 - v_j^2)\cos^2\Psi_j + u_jv_j\sin 2\Psi_j}}{\quad} \quad (1)$$

여기서, u_j, v_j : j 번째 조립토 다짐말뚝의 중심점 좌표

Ψ_j : L_{pj} 에 대응하는 j 번째 조립토 다짐말뚝의 방사방향 각도

또한 i 번째 조립토 다짐말뚝의 소성영역 내에 설치된 j 번째 조립토 다짐말뚝에 의해 그림 6과 같이 i 번째 조

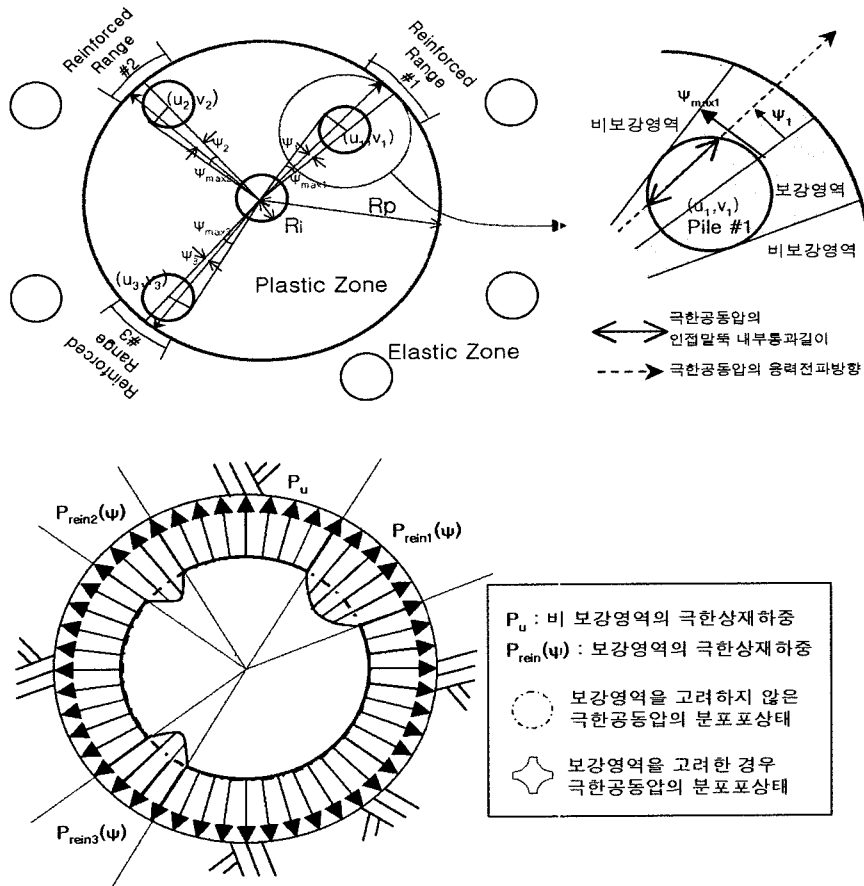


그림 6. 임의의 배치형태를 고려한 보강영역의 개요도

립토 다짐말뚝의 구속압이 증가하는 영향범위를 정의하는 각도 ψ_j 를 토대로 하여 등가의 합성탄성계수 E_{eq_j} 를 계산하면 식 (2)와 같다.

$$E_{eq_j}(\psi_j) = \frac{L_{pj}(\psi_j)}{R_p - R_i} (E_p - E_s) + E_s \quad (2)$$

여기서, E_s : 주변지반의 탄성계수

E_p : 조립토 말뚝재료의 탄성계수

R_e : 조립토 말뚝의 영향반경

식 (2)에서 각각 정의된 등가의 합성탄성계수는 각도 ψ_j 의 변화에 따라 그 크기가 다양하게 바뀌게 되므로 i 번째 조립토 다짐말뚝과 인접해 있는 j 번째 조립토 다짐말뚝에 의해 증가되는 극한공동압 (P_{rein_j})은 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{rein_j} = \frac{\int_0^{\psi_{max_j}} P_u [E_{eq_j}(\psi_j)] \cdot d\psi_j}{R_i \cdot \psi_{max_j}} \quad (3)$$

따라서 조립토 다짐말뚝이 정방형 대칭배열이 아닌 임의의 배열형태로 시공되는 경우, 중심말뚝의 영향반경 내에는 인접말뚝들에 의한 여러 개의 보강영역이 존재하며, i 번째 조립토 다짐말뚝에 작용하는 극한공동압 (P_i)은 식 (4)와 같이 소성영역 내에 설치된 N 개의 인접한 조립토 다짐말뚝에 의해 증가되는 극한공동압 (ΔP_{rein})과 단일말뚝에 해당하는 극한공동압 (P_u)의 합으로 평가할 수 있다.

$$P_i = P_u + \Delta P_{rein} = P_u + \sum_{j=1}^N \frac{\psi_{max_j}}{\pi} \cdot (P_{rein_j} - P_u) \quad (4)$$

3.2 극한지지력의 평가절차

무리형태로 설치되는 조립토 다짐말뚝의 팽창파괴 중심점은 원추형태로 발생되며, 본 연구에서 수행된 탄소봉실험결과 및 Hu 등 (1997)에 의해 수행된 축소모형실험결과에서도 입증된 바 있다. 또한 탄소봉실험결과에 의하면 원추형 파괴면의 중심깊이는 조립토 다짐말뚝

간의 설치거리, 즉 조립토 다짐말뚝에 의한 원지반의 치환율에 의해 결정되므로 조립토 다짐말뚝에 의한 원지반 치환율의 평가가 무리말뚝의 극한지지력 평가시 중요한 사항이다. 정방형 배치형태와 같이 일정한 배치형태를 지니는 무리말뚝의 경우 무리말뚝의 영향범위에 해당하는 유효면적의 형상이 기하학적으로 명확하므로 유효면적에 의한 치환율의 평가가 용이하다. 그러나 임의의 배치형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 경우에는 유효면적의 형상이 명확하지 않으므로 조립토 다짐말뚝의 팽창파괴 중심점까지의 깊이를 계산하기 위한 치환율의 평가가 용이하지는 않다. 따라서 본 연구에서는 유효면적 개념에 의한 치환율을 다음과 같은 절차를 통하여 정량화하고 이를 이용하여 임의의 형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 평가하는 방법을 제안하고자 한다.

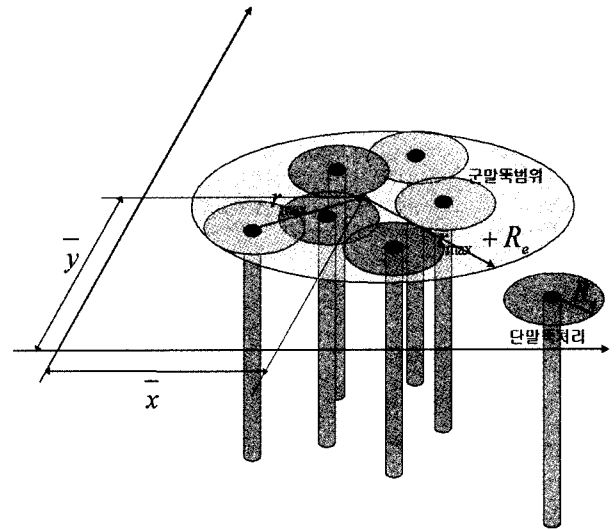


그림 7. 임의의 배치형태로 설치된 조립토 다짐말뚝

(1) 조립토 다짐말뚝의 영향반경 및 한계치환율의 계산

조립토 말뚝의 영향반경이란 말뚝의 팽창파괴가 진행될 경우, 말뚝의 팽창압이 주변지반에 미치는 영향범위를 의미하며, 이는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있고, 이 때의 한계 치환율은 식 (6)과 같다.

$$R_e = \sqrt{\frac{R_i^2 \cdot E_s \cdot \sec \phi}{2 \cdot (1 + \nu)(c + q \tan \phi)}} \quad (5)$$

$$a_c = \frac{A_p}{\pi \cdot R_e^2} \quad (6)$$

일반적으로 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 한계치환율은 팽창파괴시 방사방향으로 발생하는 응력이 미치는 최대의 영향범위에 대한 조립토 다짐말뚝의 치환율을 의미하며, 이는 말뚝들간에 상호 간섭효과가 유발되어 무리효과가 나타나는 최소 치환율을 의미하기도 한다.

(2) 임의의 배치형태로 설치된 무리말뚝의 도심 평가

무리형태의 조립토 다짐말뚝을 각각 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ 라고 할 때, 각 말뚝중심의 좌표가 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 이고, 각 말뚝의 면적이 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 일 때, 그림 7에서 무리형태의 조립토 다짐말뚝 전체에 대한 도심의 좌표는 식 (7)과 같이 결정할 수 있다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7)$$

여기서, \bar{x} : 무리말뚝 전체에 대한 도심의 x 축 좌표
 \bar{y} : 무리말뚝 전체에 대한 도심의 y 축 좌표

(3) 조립토 다짐 말뚝의 치환율 평가

무리말뚝 전체에 대한 도심의 위치가 결정되면 그림 7과 같이 임의의 형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대하여 도심에서 가장 멀리 떨어져 있는 최외곽 조립토 다짐말뚝까지의 거리 (r_{max})와 최외곽 조립토 다짐말뚝의 영향반경 (R_e)을 더한 길이를 반경으로 하여 형성되는 원의 면적($= \pi(r_{max} + R_e)^2$)을 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 유효면적으로 우선 가정할 수 있다. 또한, 말뚝의 면적을 A_p 라 하고 설치본수를 n 이라고 하면, 조립토 말뚝의 총 면적은 nA_p 가 된다. 따라서, 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 치환율 a 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{n \cdot A_p}{\pi \cdot (r_{max} + R_e)^2} \quad (8)$$

임의의 형태로 배치된 조립토 다짐말뚝의 유효면적을 평가하기 위해 식 (8)에서 구한 치환율과 식 (6)에서 구한 한계치환율을 비교하여 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 치환율이 한계치환율 보다 작은 경우, 가정한 무리형태의 조립토 다짐말뚝 중 최외곽에 위치한 말뚝 1분을 단일말뚝으로 보고 무리말뚝에서 제외하여 무리

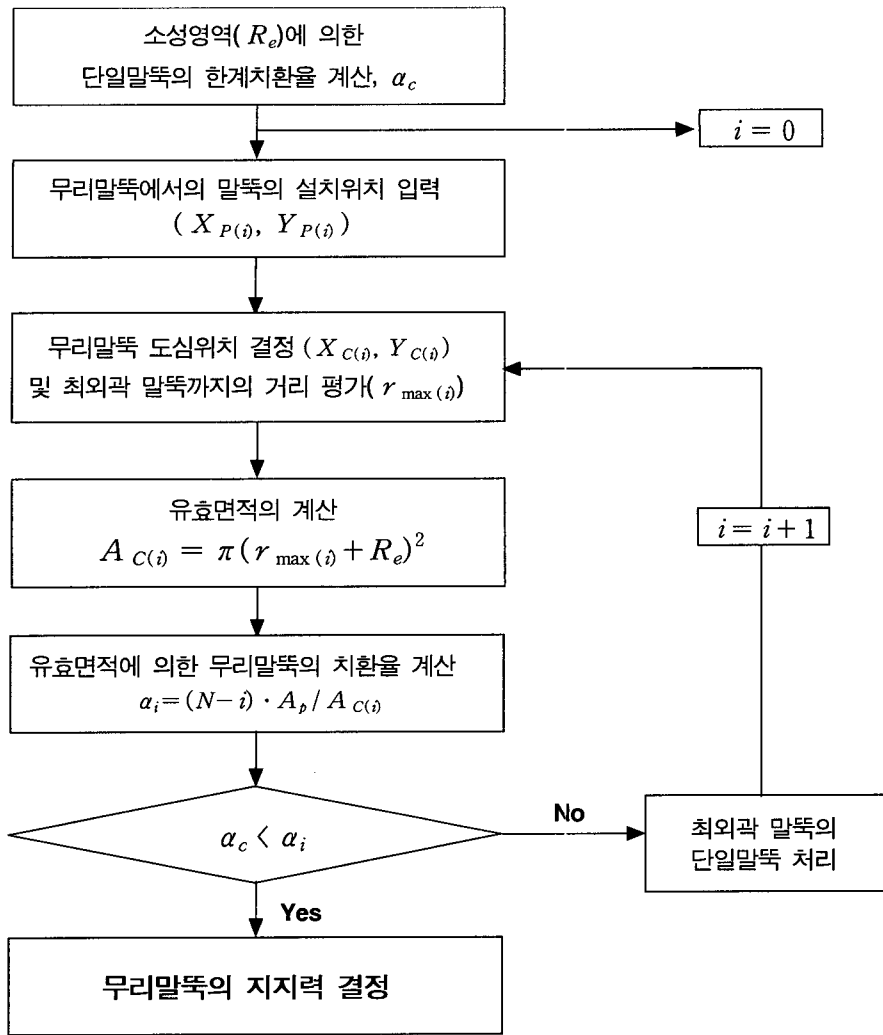


그림 8. 극한지지력의 평가절차

말뚝의 도심과 치환율을 식 (7) 및 (8)로부터 다시 결정한다.

식 (8)로부터 구한 치환율이 한계치환율보다 클 때까지 이상의 과정을 그림 8과 같이 반복하여 계산하여 최종적으로 임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 치환율을 결정한다. 이러한 과정을 통해서 임의의 배치형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 상호간섭에 따른 유효면적을 구하고 이를 근거로 무리

말뚝의 팽창파괴 깊이 및 극한지지력의 평가가 이루어진다(김홍택 등, 1998).

4. 분석 및 고찰

4.1 배치형태에 따른 지지력 분석

본 분석에서는 총 9본이 설치된 조립토 다짐말뚝에

표 2. 조립토 다짐말뚝의 제원 및 주변지반 특성치

조립토 다짐말뚝				
길이(m)	직경(m)	탄성계수(t/m ²)	포아슨비	내부마찰각(°)
8.0	1.0	5000	0.3	35
주변지반				
내부마찰각(°)	점착력(t/m ²)	포아슨비	단위중량(t/m ³)	탄성계수(t/m ²)
0	2.0	0.3	1.8	600

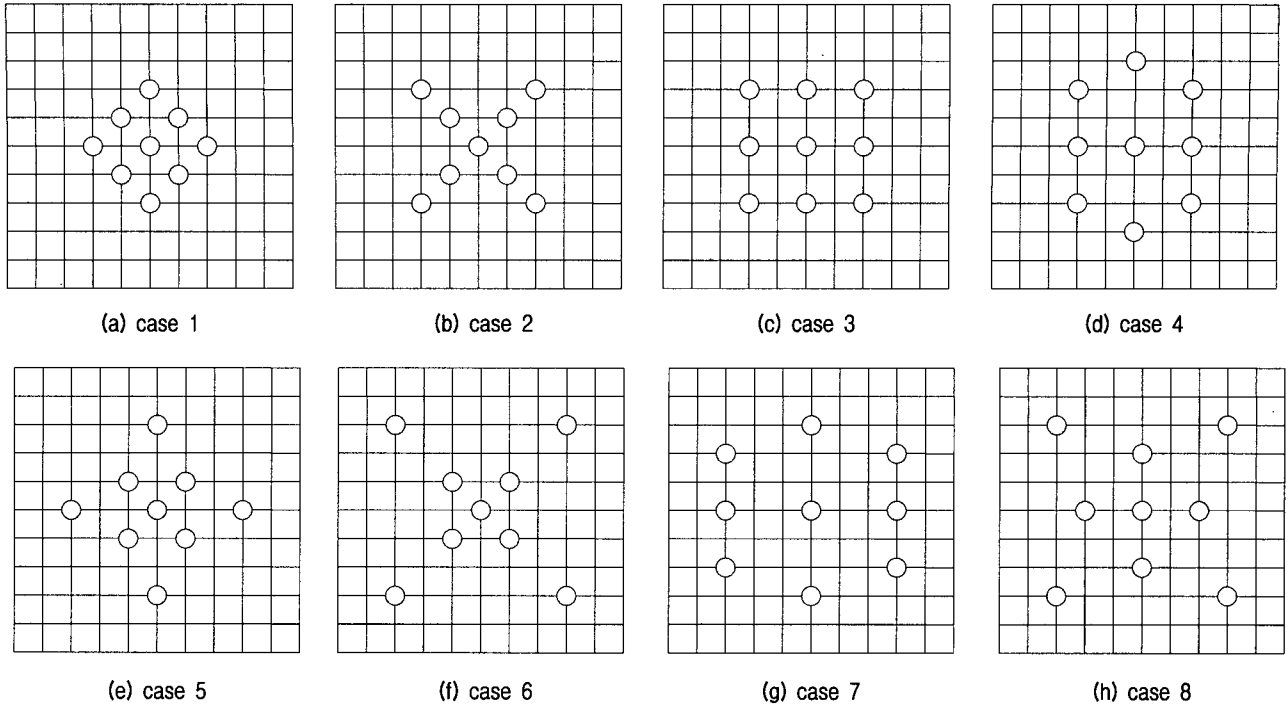


그림 9. 분석에 사용된 조립토 다짐말뚝의 배치형태

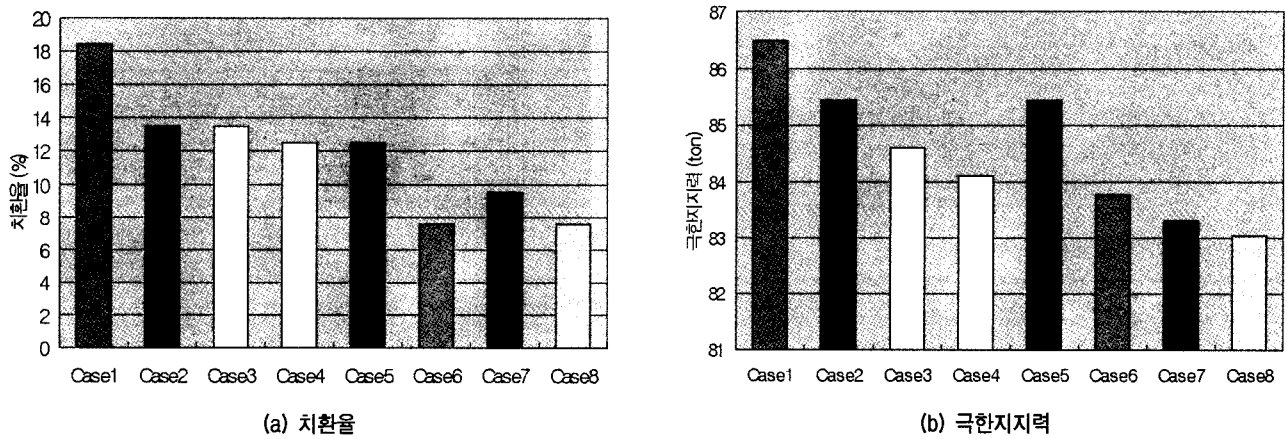


그림 10. 임의의 배치형태에 따른 치환율 및 극한지지력

대하여 그림 9와 같이 임의의 배치형태로 설치된 무리 형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 치환율과 극한지지력의 변화를 살펴봄으로써, 지지력 측면에서 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 최적 배치형태를 검토하였다.

본 분석에서 사용한 조립토 다짐말뚝의 제원 및 지반 특성치는 표 2와 같으며, 그림 9와 같이 총 8가지의 임의의 배치형태에 대해 각각의 치환율 및 극한지지력을 본 연구에서 제안한 평가방법에 의해 계산한 결과 그림 10과 같다.

그림 10의 결과를 살펴보면, Case 1의 경우에 18.4%로 가장 큰 치환율을 보였고, 이때의 극한지지력은 86.5 ton으로 가장 큰 값을 나타내었다. 반면에 Case 8의 경

우 7.5%로 가장 낮은 치환율을 나타내었으며, 이때의 극한지지력은 83.0ton으로 분석한 총 8가지의 배치형태 중 가장 작은 값을 나타냈다. 그림 10에서 알 수 있듯이 치환율이 커질수록 조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 대체적으로 증가하는 경향을 나타냈으나, 치환율이 증가함에도 극한지지력은 오히려 감소하는 경우도 나타났다. 이러한 경향은 Case 5 및 Case 6의 경우 비록 치환율은 상대적으로 작지만 다수의 조립토 다짐말뚝이 중심부에 집중적으로 설치되어 있기 때문에 중심부근에 설치된 조립토 다짐말뚝의 팽창 파괴 발생 깊이가 깊어져 전체적인 극한지지력이 증가한 것으로 판단된다. 따라서 조립토 다짐말뚝의 배치형태는 Case 1과 같이 중

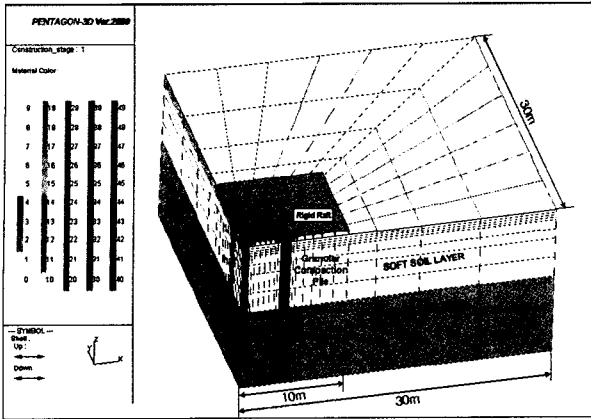


그림 11. 해석영역의 전체 개요도

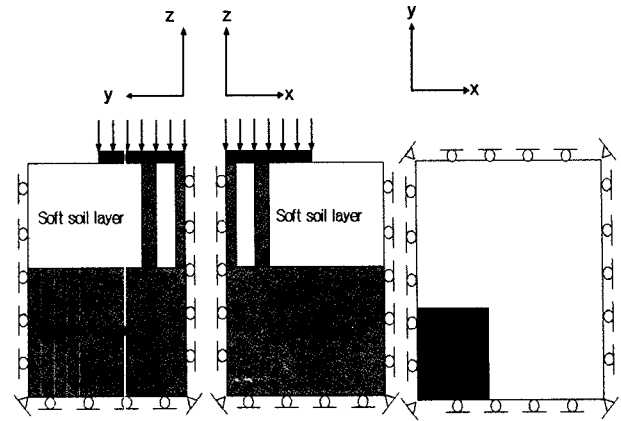


그림 12. 해석에 사용된 경계조건 개요도

표 3. 유한요소해석에 사용한 제반 입력변수

연약지반							
체적탄성계수(t/m ²)	전단탄성계수(t/m ²)	단위중량(t/m ³)	포아송비	전단저항각(°)	점착력(t/m ²)		
454.54	1,234.38	1.6	0.3	0	3		
조립토말뚝							
체적탄성계수(t/m ²)	전단탄성계수(t/m ²)	단위중량(t/m ³)	포아송비	전단저항각(°)	점착력(t/m ²)	말뚝길이(m)	말뚝직경(m)
4,166.67	1,923.08	2.0	0.3	45	0	10	1.0
지지 암반층							
탄성계수(t/m ²)	전단탄성계수(t/m ²)	단위중량(t/m ³)	포아송비	전단저항각(°)	점착력(t/m ²)		
98,039.21	37,593.98	2.5	0.25	35	20		
강성매트기초							
탄성계수(t/m ²)	포아송비	단위중량(t/m ³)	두께(m)	폭(m)	넓이(m)		
2.06×10 ⁷	0.167	2.5	0.5	10	10		

표 4. 조립토 균말뚝의 평균 극한지지력 비교

구 분	조립토 말뚝의 평균극한지지력, $q_{ult}(t/m^2)$		오차율(%)
	3차원 유한요소해석	본 연구 제시기법	
Case1	89.7	76.188	14.3
Case3	86.9	74.454	14.3
Case7	81.1	72.353	10.8

양부에 집중적으로 배치되는 경우가 지지력 측면에서 효과적인 것으로 판단된다.

4.2 해석방법의 검증

4.2.1 해석개요

본 연구에서 제시한 임의 배치된 조립토 균말뚝의 극한지지력 평가방식에 대한 적합성 및 타당성 확인을 위해 그림 9의 조립토 말뚝의 배치형태 중 조립토 말뚝의 극한지지력 값이 가장 큰 Case 1, 가장 작은 Case 7, 중간 정도인 Case 3의 경우에 대하여 3차원 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON-3D Ver. 2000 프로그램을 이

용하여 극한지지력을 비교·검토했다. 본 해석에서, 조립토 균말뚝은 7m 두께의 연약층에 설치되어 있고 하부에 지지 암반층이 존재하며, 조립토 말뚝의 상부에는 강성매트기초가 설치되어 등분포 형태의 하중이 재하되는 경우로 모델링 하였다. 해석영역은 하중 재하시 해석 결계면의 영향을 최소화 하기 위해 재하영역의 3배로 설정하였으며, 해석에 사용된 격자요소망 및 경계조건은 그림 11 및 그림 12와 같다.

본 해석에서 조립토 말뚝 및 주변지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 8-nodes 육면체요소(hexahedral solid element)로 모델링하였으며, 강성매트기초는 셸(shell) 요소로 모델링하였다. 또한 강성매트 기초와 지반 사이

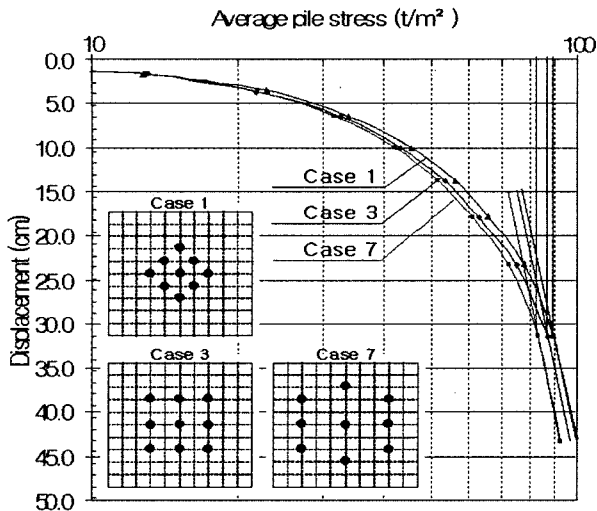


그림 13. 조립토 말뚝의 평균 연직응력-평균 침하량 관계곡선

의 연결은 스프링 요소로 모델링하였으며, 해석에 사용한 제반 입력변수는 표 3 및 표 4와 같다.

4.2.2 해석결과

해석은 조립토 말뚝 상부의 강성매트에 초기 $1.0t/m^2$ 의 등분포 하중을 작용시키고, 단계별로 등분포 하중을 점차적으로 늘여가며 각 단계에서, 조립토 말뚝의 두부에서 발생하는 평균 연직응력과 평균 침하량을 도시하면 그림 13과 같다.

Case 1, 3, 7의 각 경우에 대한 극한지지력(q_{ult})을 결정하기 위해 S-logP 법(沈保漢, 1983)을 이용하여 조립토 다짐말뚝의 평균 극한지지력과 본 연구의 해석기법을 토대로 계산한 평균 극한지지력을 비교하면 표 4와 같다.

표 4의 결과를 살펴보면 유한요소해석결과가 본 연구의 해석결과에 비해 $8.7 \sim 13.5t/m^2$ 정도 크게 평가되었으나, 전체적으로 볼 때 일치되는 경향을 나타내었다.

5. 요약 및 결론

본 연구를 토대로 얻어진 주요 결과들을 정리·요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 정방형 대칭형태 뿐만 아니라 다양한 임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대해서도 극한지지력의 평가가 가능한 방법을 제시하였다.
- (2) 탄소봉을 이용한 조립토 다짐말뚝의 모형실험결과, 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 있어서 파괴형상은 팽창파괴의 중심점의 위치를 서로 연결할 때 무리형

태의 중심부로 갈수록 깊어지는 원추형태의 양상을 나타냈으며, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 원추형태의 경사각도는 급해지는 경향을 알 수 있었다. 또한 탄소봉 실험에 있어서 모형말뚝의 중심간격의 변화에 따른 지지력의 변화를 분석한 결과, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 인접한 말뚝에 의한 구속효과 및 변형억제 등의 상호작용 효과가 증대되어 지지력이 증가하였다.

- (3) 지지력 측면에서 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 최적 배치형태를 검토한 결과, 조립토 다짐말뚝의 최적배치형태는 중앙부에 집중적으로 배치되는 경우로 나타났다.
- (4) 본 연구에서 제시된 임의 배치된 조립토 다짐말뚝의 지지력 산정기법에 대한 적합성 및 타당성을 확인하기 위해 3차원 유한요소해석을 실시한 결과, 3차원 유한요소해석 결과가 본 연구 제시기법에 비해 약간 큰 지지력 값을 보였으나, 전체적으로 일치되는 경향을 나타내었다.

향후 다양한 현장계측자료의 축적을 통한 지속적인 검증작업과 침하량 및 지지력 측면에서 조립토 다짐말뚝의 최적배치형태에 대한 연구가 진행될 계획이다. 또한 신뢰도 분석을 이용한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가방법과 설계기법의 정립에 관한 연구도 진행될 예정이다.

참고 문헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), "조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, 제14권, 제5호, pp.143~161.
2. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), "강관스커트 보강 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제1호, pp.79~98.
3. 신방용, 채현식, 김홍택, 강인규, 박사원(2000), "조립토 Piled Raft의 상호작용계수에 관한 연구", 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp.269~276.
4. Hu, W., Wood, D. M., and Stewart, W.(1997), "Ground Improvement Using Stone Column Foundation : Results of Model Test", International Conf. on Ground Improvement Techniques, Balkema, New York, pp.246~256.
5. Kim, H. T., Hwang, J. S., Kang, I. K., and Koh, Y. I.(1998), "Estimation of Ultimate Bearing Capacity for Bulging Failure of Granular", Proc. of the 3rd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, Belgium, pp.449~456.
6. 沈保漢(1983), "The Evaluation of The Vertical Bearing Capacity of Bored Case-in-place Concrete Pile in China", Soils and Foundations, Vol.31, No.12, pp.57~63.

(접수일자 2001. 9. 18, 심사완료일 2001. 12. 6)