

유전자 알고리즘을 이용한 조립토 다짐 군말뚝의 최적설계

Optimum Design for Granular Compaction Group Piles Using the Genetic Algorithm

김홍택* · 황정순** · 김찬동*** · 강 윤****

Kim, Hong-Taek · Hwang, Jung-Soon · Kim, Chan-Dong · Kang, Yun

Abstract

Granular compaction piles increase the load bearing capacity of the soft ground and reduce the settlement of foundation built on the reinforced soil. The granular compaction group piles also accelerate the consolidation of the soft ground and prevent the liquefaction caused by earthquake using the granular materials such as sand, gravel, stone etc. However, this method is one of unuseful method in Korea. In the present study, the optimum locations of granular compaction group piles using genetic algorithm are proposed. The results were shown that the bearing capacity was increased in the case concentrated on the central part of the group piles. Also, the optimum design for total weight of granular compaction group piles was carried out in consideration of the economical efficiency and parametric studies were performed to examine the effects of parameters at the design of granular compaction group piles.

Keywords : Granular compaction group piles, Genetic algorithm, Optimum design technique, Ultimate bearing capacity

요 지

조립토 다짐말뚝 공법은 비교적 강성이 큰 쇄석, 자갈 및 모래 등과 같은 조립질 재료를 사용하여 원지반을 치환하여 보강하는 공법으로, 기초지반의 침하를 감소시키며, 연약지반의 지지력 증가 및 압밀배수를 촉진하고, 또한 지진에 의한 액상화의 방지에도 효과가 큰 공법으로 알려져 있으나, 국내에서는 아직 널리 사용되지 않고 있다. 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 균형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 최적배치 기법을 제시하고자 한다. 분석결과, 조립토 말뚝의 배치가 중앙부에 집중될 때 조립토 군말뚝의 지지력은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 경제적인 측면을 고려하여 조립토 군말뚝의 총중량에 대한 최적설계를 수행하였으며, 조립토 군말뚝 설계변수의 변화가 최적설계에 미치는 영향을 알아보기 위해 parametric study를 수행하였다.

주요어 : 조립토 다짐 군말뚝, 유전자 알고리즘, 최적설계기법, 극한지지력

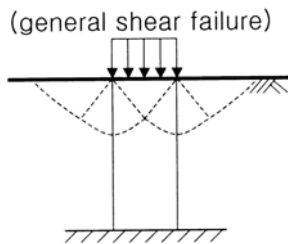
- * 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수
- ** 정회원 · (재)한국철도기술공사 대리
- *** 정회원 · (주)삼보기술단 터널부 사원
- **** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정

1. 서론

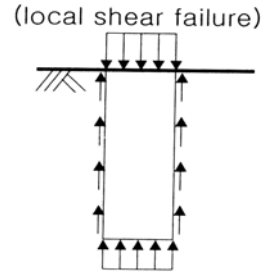
조립토 다짐말뚝(*granular compaction pile*)공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 자갈, 쇄석 및 모래 등의 조립질 재료를 사용하여 연약한 지반에 말뚝을 조성하는 공법으로, 기초지반의 지지력 증가, 침하량 감소 및 압밀배수 촉진 등에 의한 지반개량 효과뿐 아니라, 사질토 지반에 적용시 지진에 의한 액상화 방지효과도 큰 공법으로 알려져 있으나 국내에서는 아직까지 널리 사용되지 않고 있다.

대부분의 조립토 다짐말뚝은 상부에 Raft와 더불어 군(*group*)형태로 설치된다. 따라서 단(*single*)말뚝의 경우와는 달리, 인접말뚝에 의한 구속 및 변형억제 등 상호작용에 따른 복합적인 거동특성을 보이게 되므로, 이와 같은 상호작용을 정량적으로 평가하기에 여의치 않은 점이 많다. 본 연구에서는 기존에 연구되었던 임의의 형태로 배치된 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 대한 해석기법을 토대로 새로운 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘을 도입하여 조립토 군말뚝의 지지력을 최대화할 수 있는 최적의 배치형태를 제시하였으며, 경제적인 측면을 고려하여 최소의 중량으로 소요의 지지력을 확보할 수 있는 조립토 군말뚝의 배치형태와 각 설계변수들의 변화가 조립토 군말뚝의 총중량에 미치는 영향 및 이에 따른 조립토 군말뚝의 배치형태 등을 비교·분석하였다.

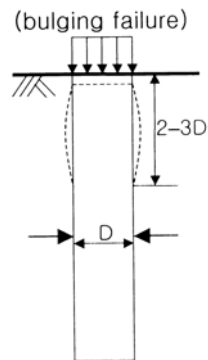
2. 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 거동특성



(a) 전반전단파괴



(b) 국부전단파괴



(c) 팽창파괴

그림 1. 조립토 다짐말뚝의 파괴형태

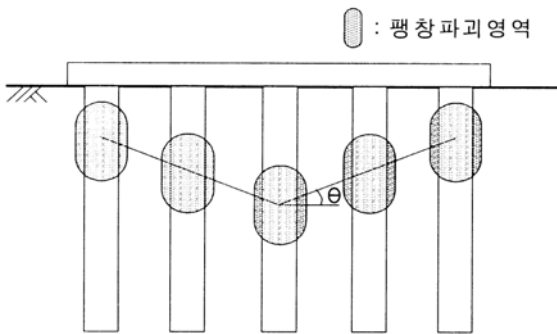
2.1 파괴형태

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.

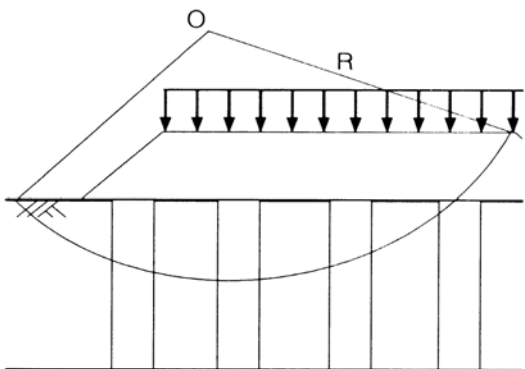
단일말뚝형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 파괴형태는 말뚝의 길이가 짧은 경우 국부전단파괴 및 전반전단파괴가 일반적인 파괴형태이며, 말뚝의 길이가 길 경우에는 팽창파괴의 양상이 일반적인 파괴형태이다. 또한 무리형태로 설치된 조립토 다짐말뚝에서의 파괴양상은 그림 2와 같이 팽창파괴 및 활동파괴 등의 두가지 형태로 나타나며, 말뚝의 중심간격이 좁아짐에 따라 주변지반이 조밀해지면서 지

지력이 증가하고 침하량은 감소되는 경향이 있다.

무리형태로 설치된 조립토 다짐말뚝에서의 팽창과괴는 단일말뚝형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 경우와는 달리 그림 2(a)와 같이 기초의 중앙부로 갈수록 팽창과괴의 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 팽창과괴의 중심부가 점점 깊어지는 경향을 보이게 된다. 또한 활동과괴는 조립토 다짐말뚝의 설치폭에 비해 말뚝의 길이가 짧을 경우 예상되는 파괴형태로, 그림 2(b)와 같이 도로 기초지반의 보강 및 매립공사 등과 같은 대단위 규모의 지반보강시에 예상되는 파괴형태이다.



(a) 팽창과괴



(b) 활동과괴

그림 2. 무리 형태의 조립토 다짐말뚝의 파괴형태

따라서 건물 기초지반의 보강 등과 같은 소규모 지반보강시 무리형태로 설치된 조립토 다짐말뚝의 파괴형태는 대부분 팽창과괴 형태로 나타나게 된다. 김 등(1998)은 일정한 배치형태의 조립토 다짐말뚝에 대해 극한지지력을 평가하는 방법을 제시하였고, 신&김 등(2001)은 이 방법을 확장하여 임의의 형태로 배치된 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 평가하는 방법을 제안하였다. 신&김 등에 의하여 제시된 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

2.2 극한지지력의 평가절차

2.2.1 수정된 극한공동압의 평가

조립토 다짐말뚝의 임의의 배치형태를 고려하여 그림 3과 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.

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

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 3과 같이 i 번째 조립토 다짐말뚝의 구속압이 증가하는 영향범위를 정의하는 각도 Ψ_j 를 토대로 하여 등가의 합성탄성계수 E_{eqj} 를 계산하면 식(2)와 같다.

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

여기서, E_s : 주변지반의 탄성계수

E_p : 조립토 말뚝재료의 탄성계수

R_e : 조립토 말뚝의 영향반경

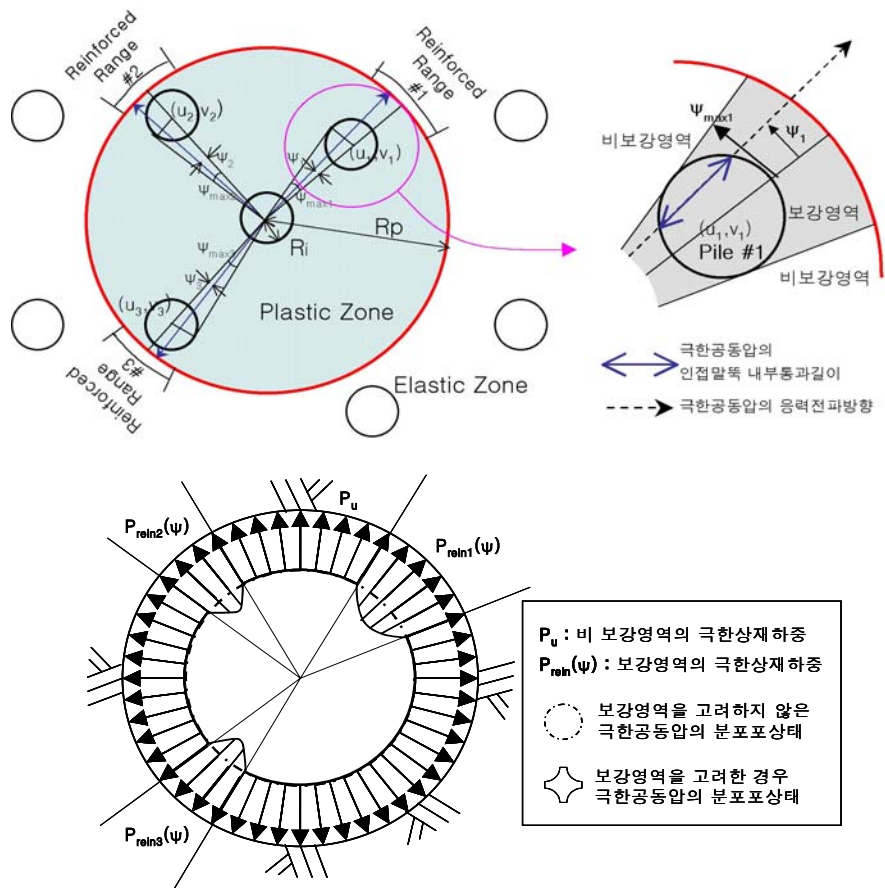


그림 3. 임의의 배치형태를 고려한 보강영역의 개요도

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_{reinj})은 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{reinj} = \frac{\int_0^{\psi_{maxj}} P_u [E_{eqj}(\psi_j)] \cdot d\psi_j}{R_i \cdot \psi_{maxj}} \quad (3)$$

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.

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

2.2.2 극한지지력의 평가절차

무리형태로 설치되는 조립토 다짐말뚝의 팽창과괴 중심점을 연결하면 원추형태로 발생되며, 신&김 등에 의해 수행된 탄소봉실험결과 및 Hu 등(1997)에 의해 수행된 축소모형실험결과에서도 입증된 바 있다. 또한 탄소봉실험결과에 의하면 원추형 파괴면의 중심깊이는 조립토 다짐말뚝간의 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 팽창과괴 중심점까지의 깊이를 계산하기 위한 치환율의 평가가 용이하지는 않다. 따라서 신&김 등에 의하면, 유효면적 개념에 의한 치환율을 다음과 같은 절차를 통하여 정량화하고, 이를 이용하여 임의의 형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 평가하는 방법을 제안하였다.

(1) 조립토 다짐말뚝의 영향반경 및 한계치환율의 계산

조립토 말뚝의 영향반경(그림 4)이란 말뚝의 팽창과괴가 진행될 경우, 말뚝의 팽창압이 주변지반에 미치는 영향범위를 의미하며, 이는 식(5)와 같이 나타낼 수 있고, 이때의 한계치환율은 식(6)과 같다.

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

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

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

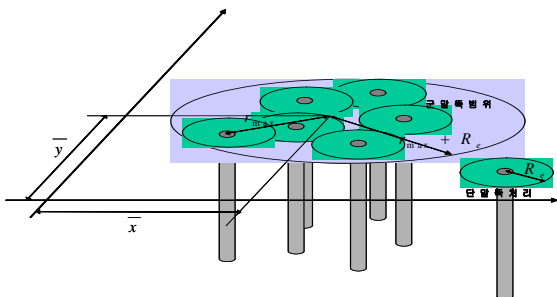


그림 4. 임의의 형태로 배치된 조립토 다짐말뚝

(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 4에서 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 x축 좌표

\bar{y} : 무리말뚝 전체에 대한 도심의 y축 좌표

(3) 조립토 다짐 말뚝의 치환율 평가

무리말뚝 전체에 대한 도심의 위치가 결정되면 그림 4와 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 총면적은 nA_p 가 된다. 따라서, 무리형태의 조립토 다짐말뚝의 치환율 α 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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, 가장한 무리형태의 조립토 다짐말뚝 중 최외곽에 위치한 말뚝 1본을 단일말뚝으로 보고 무리말뚝에서 제외하여 무리말뚝의 도심과 치환율을 식(7) 및 (8)로부터 다시 결정한다.

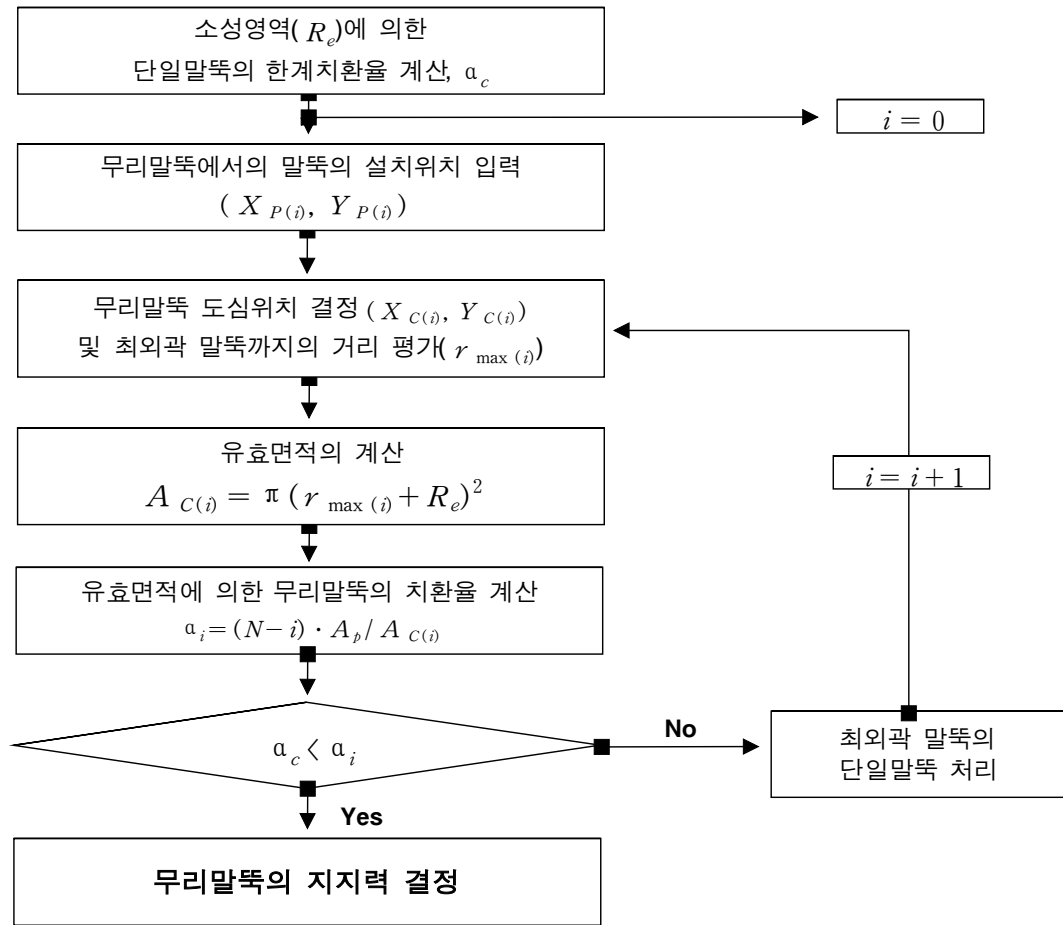


그림 5. 극한지지력의 평가절차

식(8)로부터 구한 치환율이 한계치환율보다 클 때까지 이상의 과정을 그림 5와 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 무리말뚝의 팽창과피 깊이 및 극한지지력의 평가가 이루어진다.

3. 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계

3.1 기본개념

유전자 알고리즘(genetic algorithm)은 Darwin이 주장한 자연진화 법칙인 적자생존(survival of fittest)과 자연도태(natural selection)의 원리를 토대로 Holland

(1975)에 의해 개발된 전역적(global)인 최적화 알고리즘으로, 공학적으로는 Goldberg 등 (1987)이 가스 파이프라인의 최적설계에 최초로 적용하였다. 유전자 알고리즘은 자연계의 유전과정을 모방하여 생물학적인 유전인자인 염색체와 유사한 구조를 가지는 문자열(string) 사이에서 선택(selection), 교배(crossover) 및 변이(mutation) 등의 연산을 통해 현재의 조건에서 보다 적합한 조건을 찾아가는 과정을 반복하면서 결국 가장 적합한 형질의 개체를 형성하게 되는 알고리즘이다.

고전적인 최적화 기법은 함수가 연속적이고 미분 가능한 경우의 최적해 탐색에 사용되므로 최적점의 위치에서 주어진 목적함수는 해석이 가능하고 미분이 가능하여야 한다는 제약조건이 따르게 된다. 하지만 유전자 알고리즘은 미분값이나 그 외의 다른 정보를 이용하지 않고 목적함수와 제약조건의 값만을 이용하는 직접탐색방법을 이용하므로 실

제 구조물의 설계와 같이 복잡하고 다양한 환경의 최적화 문제에 적합한 방법이다. 또한, 대부분의 최적화 기법이 하나의 설계점을 가지는 국부적인 탐색과정을 수행하는 반면에 유전자 알고리즘은 여러 개의 설계점들이 집단 (population)을 이루어 확률론적인 탐색을 수행하므로 전체 최적점에 수렴할 확률이 기존의 방법에 비해서 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다.

3.2 설계변수의 결정

최적설계를 수행하기 위해 가장 먼저 해결하여야 하는 문제는 설계변수의 결정과 이를 고려한 목적함수의 결정이다. 일반적으로 조립토 군말뚝의 설계변수들은 표 1과 같다. 표 1의 설계변수들 중 원지반의 토질정수, 하중조건, Raft의 제원 및 조립토 말뚝의 재료특성 등은 구조물의 조건에 의해 결정되는 고정변수이다. 따라서, 조립토 군말뚝의 지지력에 대한 최적설계는 설계자의 판단에 의해 결정이 가능한 가변변수를 대상으로 수행되어야 하므로, 본 연구에서는 조립토 말뚝의 배치위치 및 조립토 말뚝의 직경을 지지력의 최적화를 위한 가변변수로 결정하였다. 가변

변수들에 대한 범위 및 정밀도는 표 2와 같다. 표 2에서, D_{ini} 은 초기에 입력한 조립토 말뚝의 직경이며, S_{ini} 은 초기에 입력한 조립토 말뚝의 간격이다. 가변변수에서 조립토 말뚝의 배치위치는 중앙에 배치된 조립토 말뚝은 고정시키고, 중앙에 배치된 조립토 말뚝으로부터의 거리 (S)가 동일한 조립토 말뚝에 대하여 중앙에 배치된 조립토 말뚝을 기준으로 하여 대칭으로 변화시켰으며, 같은 방법으로 조립토 말뚝의 직경 (D)도 중앙에 배치된 조립토 말뚝을 기준으로 하여 대칭으로 변화시켰다.

3.3 목적함수와 제약조건의 결정

본 연구에서 최적설계를 위한 접근방법은 크게 소극적인 최적설계 접근방법과 적극적인 최적설계 접근방법으로 구분하여 접근하였다. 소극적인 최적설계 접근방법은 조립토 군말뚝의 총중량 및 조립토 말뚝의 제원이 결정된 상태에서 조립토 군말뚝의 지지력을 목적함수로 하여 조립토 군말뚝의 극한지지력을 최대화 하는 조립토 군말뚝의 최적 배치위치를 결정하는 방법을 말하며, 적극적인 최적설계 접근방법은 조립토 군말뚝의 총중량 및 조립토 군말뚝의 제

표 1. 조립토 군말뚝의 설계변수

조립토 말뚝	내부마찰각	점착력	탄성계수	포아손비
	배치위치	말뚝의 길이	말뚝의 직경	말뚝개수
원지반	내부마찰각	점착력	탄성계수	포아손비
기타	스커트길이	Raft의 폭	Raft 넓이	

표 2. 가변설계변수의 변화범위 및 정밀도

설계변수	말뚝의 직경	말뚝의 배치위치
변수범위	$0.7 \cdot D_{ini} \sim 1.4 \cdot D_{ini}$ ($D_{ini} = 1.0\text{m}$)	$0.5 \cdot S_{ini} \sim 2.0 \cdot S_{ini}$ ($S_{ini} = 3.0\text{m}$)
정밀도	0.0027(m)	0.0059(m)

표 3. 조립토 군말뚝의 최적설계를 위한 목적함수와 제약조건

구분	소극적인 최적설계 접근방법	적극적인 최적설계 접근방법
목적함수	▶ 조립토 군말뚝의 말뚝 1분당 평균극한지지력 (Maximize) $Q_{obj.} = Q_{(ult., ave.)}$	▶ 조립토 군말뚝의 총중량 (Minimize) $Q_{obj.} = W_{total} = \sum_{i=1}^N W_{pile, i}$
제약조건	군말뚝으로의 거동여부	조립토 군말뚝의 지지력

원이 결정되지 않은 상태에서 조립토 균말뚝의 총중량을 목적함수로 하여 경제적인 측면을 고려한 최적설계를 수행하는 경우를 의미한다. 조립토 균말뚝의 최적설계를 위한 2가지 접근방법에 대한 목적함수 및 제약조건을 정리하면 표 3과 같다.

4. 분석 및 고찰

4.1 조립토 균말뚝의 최적배치위치

본 연구에서 제안한 유전자 알고리즘을 이용한 조립토 균말뚝의 최적설계기법에서 조립토 균말뚝에 대한 해석방법은 신&김 등이 제시한 임의의 형태로 배치된 조립토 균말뚝에 대한 지지력 산정기법을 사용하였다. 본 절에서는 유전자 알고리즘을 이용한 소극적인 최적설계 접근방법으로서, Raft 기초하부에 조립토 말뚝 9본이 배치된 경우에 대하여 말뚝 1본당 평균극한지지력에 대한 조립토 말뚝의 최적배치위치를 분석하였다. 본 분석에 사용된 조립토 말뚝 및 지반의 제원은 표 4와 같으며, 조립토 말뚝의 위치를 그림 6과 같이 각각의 조립토 말뚝별로 번호를 붙여 본 연구에 대한 분석시에 보다 효과적으로 표현할 수 있도록 표시하였다.

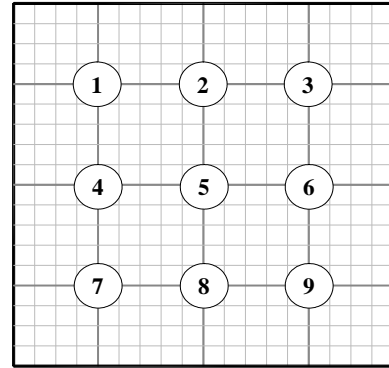


그림 6. 조립토 말뚝의 위치

그림 7은 각 세대수별로 조립토 균말뚝의 평균극한지지력 값의 변화를 나타낸 것이다.

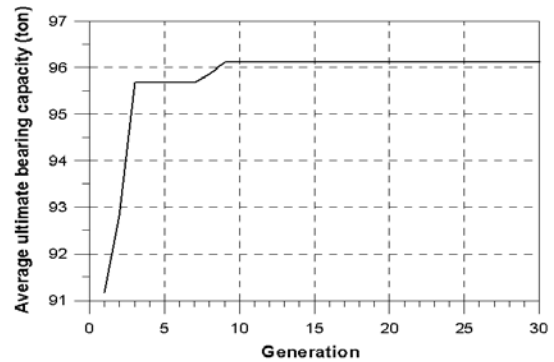
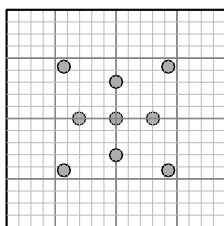


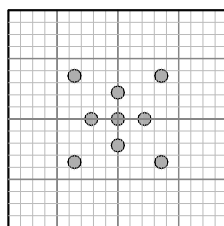
그림 7. 세대수-조립토 균말뚝 평균극한지지력

표 4. 최적배치위치 분석에 사용된 제원

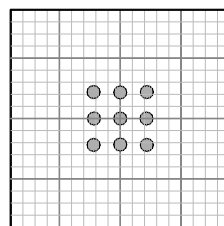
조립토 말뚝		지반 조건	
내부마찰각(°)	35	내부마찰각(°)	0
탄성계수(t/m ²)	5000	탄성계수(t/m ²)	600
포아슨비	0.3	포아슨비	0.3
말뚝길이(m)	10	단위중량(t/m ³)	1.6
말뚝직경(m)	1.0	점착력(t/m ²)	3.0



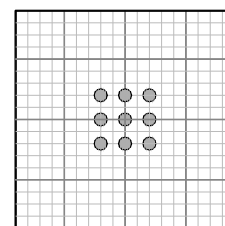
Generation 1



Generation 2~7



Generation 8



Generation 9~30

그림 8. 각 세대수별 조립토 균말뚝의 극한지지력에 대한 최적배치위치 변화

그림 7을 보면, 세대수가 증가하면서 조립토 균말뚝의 말뚝 1본당 평균극한지지력은 91.175ton에서 96.124ton으로 증가되는 것으로 나타났다. 그림 8은 각 세대수에 대한 조립토 균말뚝의 배치위치를 나타낸 것이다. 그림 8을 보면, 분석초기에는 조립토 균말뚝이 Raft 하부에 비교적 균등하게 분포되어 있는 반면, 세대수가 증가할수록 조립토 균말뚝은 중앙부로 집중되어, 세대수가 9를 넘어가면서, 조립토 균말뚝의 최적배치위치는 그림 8과 같이 일정한 배치형태로 수렴되는 것을 볼 수 있다.

4.2 조립토 균말뚝의 중량최적화

본 분석에서는 유전자 알고리즘을 이용한 적극적인 최적설계의 접근방법으로, Raft 기초하부에 정방형의 초기 배치형태를 가지는 9본의 조립토 균말뚝에 대해서 조립토 말뚝 1본당 평균극한지지력 100ton을 발휘할 수 있는 조립토 균말뚝의 총중량에 대한 최적화를 수행하였다. 본 분석에 사용된 조립토 말뚝 및 지반의 제원은 표 4와 같다.

그림 9는 각 세대수별로 조립토 균말뚝의 총중량의 변화를 나타낸 것이다.

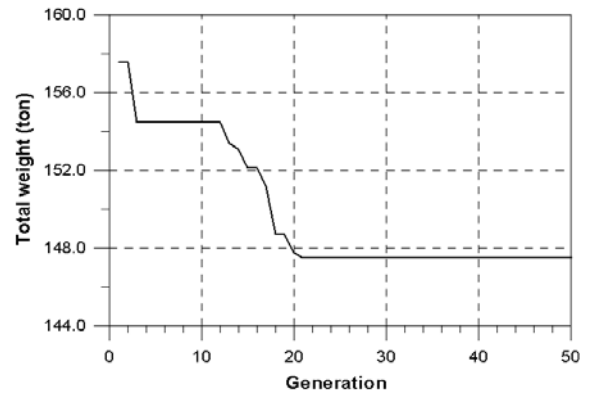
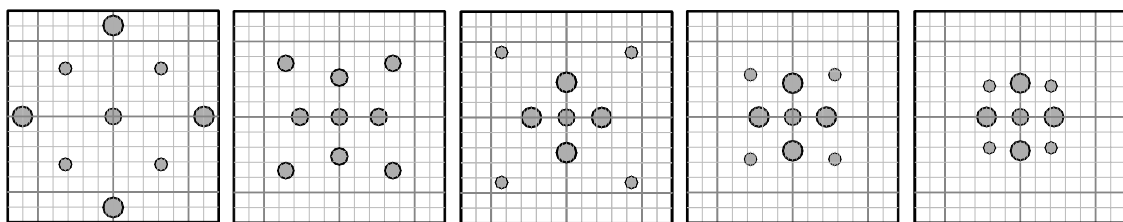


그림 9. 세대수-조립토 균말뚝 총중량

그림 9에서 보면, 세대수가 증가하면서 조립토 균말뚝의 총중량은 157.55ton에서 146.47ton으로 단계적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그림 10은 각 세대수에서의 조립토 균말뚝의 배치위치 및 조립토 말뚝의 직경을 나타낸 것이다. 그림 10에서, 분석초기에 입력한 조립토 말뚝의 직경 1.0m와 최적설계된 조립토 말뚝의 직경을 비교해 볼 때, 상, 하, 측면(그림 6의 2, 4, 6, 8번 말뚝)에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 1.2m~1.3m의 범위로서 증가하는 경향으로 나타났으며, 중앙(그림 6의 5번 말뚝)에 배

표 5. 설계변수분석에 사용된 제원

조립토 말뚝						
길이(m)	단위중량 (t/m ³)	개수	탄성계수 (t/m ²)	포아슨 비	내부마찰각(°)	설계극한지지력 (ton)
10.0	2.0	9	5000	0.3	27~39°	80
지반 조건						
내부마찰각(°)	점착력 (t/m ²)	포아슨 비	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)		
0	1.0~5.0	0.3	1.2~1.8	600		



Generation 1~2 Generation 3~12 Generation 13~14 Generation 15~20 Generation 21~50

그림 10. 각 세대수별 조립토 균말뚝의 총중량에 대한 최적배치위치 및 조립토 말뚝의 직경 변화

치된 조립토 말뚝의 직경은 변화가 거의 없었으며, 모서리(그림 6의 1, 3, 7, 9번 말뚝)에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 0.75m~0.8m의 범위로서 감소하는 경향으로 나타났다. 본 분석에서는 4.1절에서 분석한 소극적인 최적설계 접근방법보다 수렴속도가 늦어져서, 세대수가 21이 되어야 조립토 균말뚝의 최적배치위치 및 조립토 말뚝의 직경은 일정한 값으로 수렴하게 된다. 또한, 세대수가 증가할수록 조립토 균말뚝의 최적배치위치는 4.1절에서 분석한 최적배치위치와 마찬가지로 중앙부에 집중적으로 배치되는 정방형 배치형태로 나타났다.

4.3 주요 설계변수에 대한 영향

조립토 균말뚝의 최적설계는 일반적으로 경제성을 고려한 적극적인 최적설계 접근방법의 측면에서 최적설계가 이루어지므로, 본 분석에서는 조립토 균말뚝의 주요설계변수인 지반의 단위중량, 지반의 점착력 및 조립토 말뚝의 내부마찰각의 변화에 따른 조립토 균말뚝의 총중량의 변화 및 조립토 균말뚝의 배치형태에 대한 분석을 시도하였다. 분석에 사용한 입력자료는 표 5와 같다.

4.3.1 지반의 단위중량에 따른 영향

유전자 알고리즘 기법에 의해 지반의 단위중량 변화에 대하여 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량의 변화량은 그림 11과 같다.

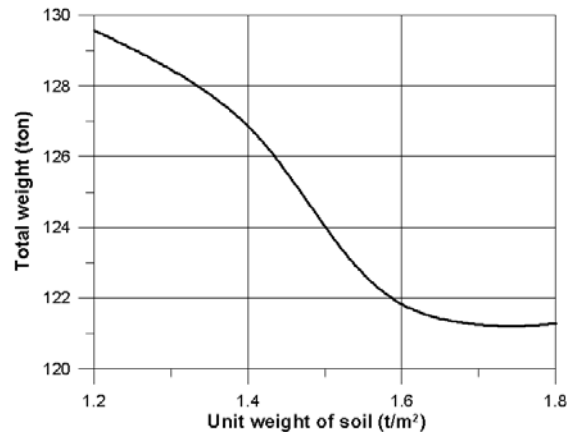


그림 11. 지반의 단위중량에 따른 영향

그림 11에서 보면, $\gamma_s = 1.2 \text{ t/m}^3$ 일 때 조립토 균말뚝의 총중량은 129.6ton이었으며, $\gamma_s = 1.6 \text{ t/m}^3$ 일 때 조립토 균말뚝의 총중량은 121.8ton으로서, 지반의 단위중량이 증가함에 따라 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량은 줄어드는 경향을 보였다. 반면, $\gamma_s = 1.8 \text{ t/m}^3$ 일 때 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량은 121.3ton으로서, $\gamma_s = 1.6 \text{ t/m}^3$ 인 조건과 비교해 보면, 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량은 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이를 통해서 볼 때, 지반의 단위중량이 증가할수록 조립토 균말뚝의 총중량은 줄어드는 경향으로 나타났으며, 지반의 단위중량이 일정한 값을 넘어서게 되면, 조립토 균말뚝의 총중량은 변화가 거의 없는 것을 알 수 있었다.

그림 12는 지반의 단위중량에 대한 최적설계 후의 조립토 균말뚝의 배치위치 및 조립토 말뚝의 직경을 나타낸 것이다. 그림 12에서 보면, $\gamma_s = 1.2 \text{ t/m}^3$ 일 때, 중앙(그림 6의 5번 말뚝)에 배치된 조립토 말뚝은 직경의 변화가 없었

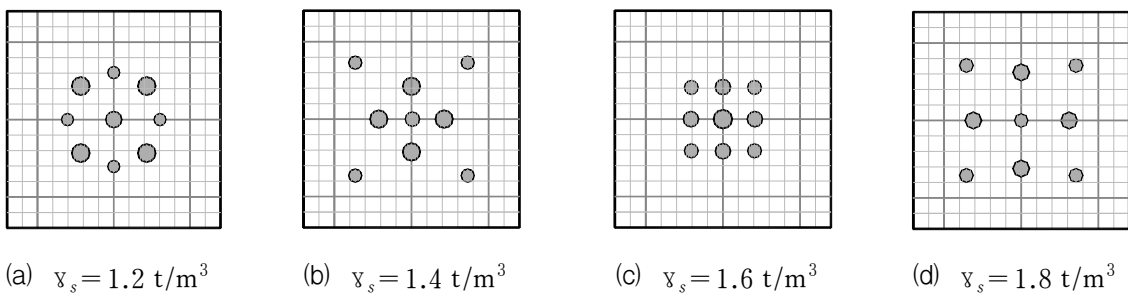


그림 12. 지반의 단위중량 변화에 따른 조립토 말뚝의 최적배치형태 변화

으며, 모서리(그림 6의 1, 3, 7, 9번 말뚝)에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 1.12m, 상, 하, 측면(그림 6의 2, 4, 6, 8번 말뚝)에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 0.74m로 수렴되었으나, $\gamma_s = 1.8 \text{ t/m}^3$ 일 때, 중앙에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 0.81m, 모서리에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 0.76m, 상, 하, 측면에 배치된 조립토 말뚝의 직경은 1.02m로 수렴되었다. 또한 조립토 균말뚝의 배치형태는 지반의 단위중량에 따라서 각각 다른 모양의 배치형태로 수렴되는 것으로 나타났다.

4.3.2 지반의 점착력에 따른 영향

유전자 알고리즘 기법에 의해 지반의 점착력 변화에 대하여 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량의 변화량은 그림 13과 같다.

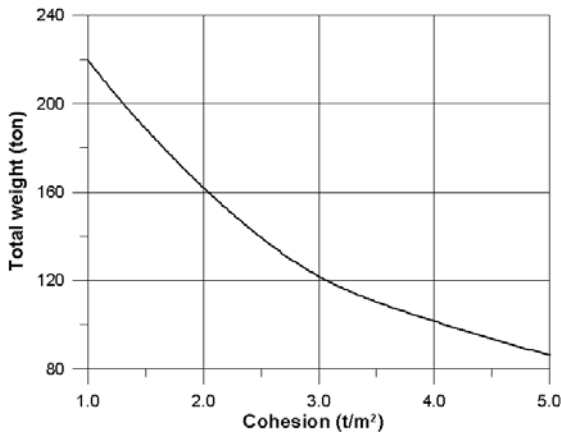


그림 13. 지반의 점착력에 따른 영향

그림 13에서 보면, $c = 1.0 \text{ t/m}^2$ 일 때, 조립토 균말뚝의 총중량은 219.8ton로 나타났으며, $c = 5.0 \text{ t/m}^2$ 일 때, 조립토 균말뚝의 총중량은 86.4ton인 것으로 나타났다.

이를 통해서 볼 때, 지반의 점착력 값이 커질수록 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량은 줄어드는 것을 알 수 있었다.

그림 14는 지반의 점착력에 따른 최적설계 후의 조립토 균말뚝의 배치위치 및 조립토 말뚝의 직경을 나타낸 것이다. 그림 14에서 보면, $c = 1.0 \text{ t/m}^2$ 일 때, 가장자리(그림 6의 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9번 말뚝)에 위치한 조립토 말뚝의 직경은 1.20m ~ 1.32m의 범위로 나타났으며, $c = 5.0 \text{ t/m}^2$ 일 때, 가장자리에 위치한 조립토 말뚝의 직경은 0.70m ~ 0.77m의 범위로 나타났으나, 지반의 점착력에 대한 모든 조건에 대하여 중앙(그림 6의 5번 말뚝)에 위치한 조립토 말뚝의 직경은 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 지반의 점착력 값이 커질수록 조립토 균말뚝의 배치형태는 대체로 정방형 배치형태에 가까워짐을 알 수 있었다.

4.3.3 조립토 말뚝의 내부마찰각에 따른 영향

유전자 알고리즘 기법에 의해 조립토 말뚝의 내부마찰각의 변화에 대하여 최적설계된 조립토 균말뚝의 총중량의 변화량은 그림 15와 같다.

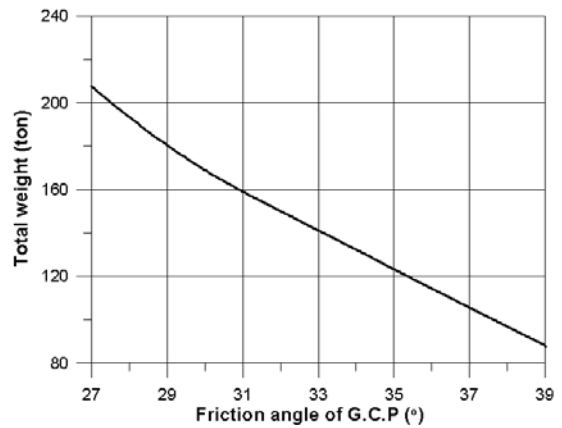
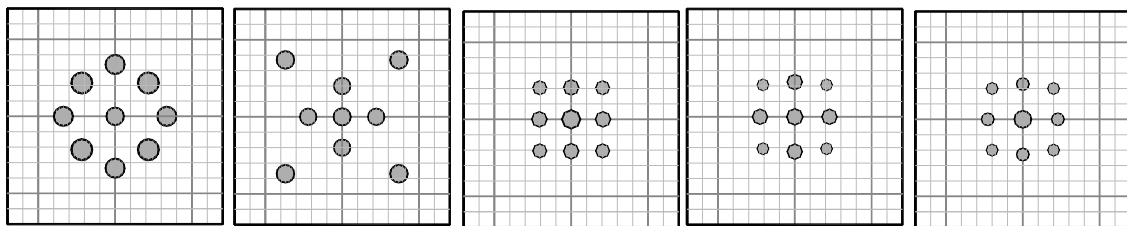
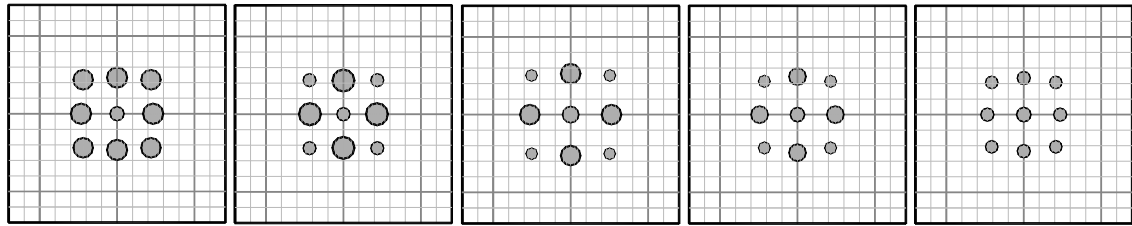


그림 15. 말뚝의 내부마찰각에 따른 영향



(a) $c = 1.0 \text{ t/m}^2$ (b) $c = 2.0 \text{ t/m}^2$ (c) $c = 3.0 \text{ t/m}^2$ (d) $c = 4.0 \text{ t/m}^2$ (e) $c = 5.0 \text{ t/m}^2$

그림 14. 지반의 점착력 변화에 따른 조립토 말뚝의 최적배치형태 변화



(a) $\phi_p = 27^\circ$ (b) $\phi_p = 30^\circ$ (c) $\phi_p = 33^\circ$ (d) $\phi_p = 36^\circ$ (e) $\phi_p = 39^\circ$

그림 1.6 조립토 말뚝의 내부마찰각 변화에 따른 조립토 말뚝의 최적배치형태 변화

그림 15에서 보면, $\phi_p = 27^\circ$ 일 때, 조립토 말뚝의 총 중량은 207.7ton으로 나타났으며, $\phi_p = 39^\circ$ 일 때, 조립토 균말뚝의 총중량은 88.2ton으로 작아지는 것으로 나타났다. 이를 통해서 볼 때, 조립토 말뚝의 내부마찰각이 커질수록 조립토 균말뚝의 총중량은 선형적으로 줄어드는 것을 알 수 있었다.

그림 16은 조립토 말뚝의 내부마찰각의 변화에 따른 최적설계 후의 조립토 균말뚝의 배치위치 및 조립토 말뚝의 직경을 나타낸 것이다. 그림 16에서 보면, $\phi_p = 27^\circ$ 일 때, 조립토 말뚝의 직경은 1.23~1.27m의 범위를 나타냈으며, 조립토 말뚝의 내부마찰각이 커질수록 조립토 말뚝의 직경은 점점 감소하여, $\phi_p = 39^\circ$ 일 때, 조립토 말뚝의 직경은 0.75~0.80m의 범위를 나타냈다. 또한 조립토 균말뚝의 배치형태는 조립토 말뚝의 내부마찰각과 관계없이 대체로 정방형 배치형태를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구를 토대로 얻어진 주요 결과들을 정리·요약하면 다음과 같다.

1. 조립토 균말뚝의 극한지지력을 목적함수로 하여 Raft 기초하부에 배치되는 9본의 조립토 균말뚝에 대해 최적설계를 실시한 결과, 극한지지력에 대한 최적배치위치는 중앙부에 집중적으로 배치된 정방형 배열로 나타났다.
2. 최소중량의 조립토 말뚝으로 소요의 설계지지력을

확보할 수 있는 조립토 말뚝의 배치위치 및 조립토

말뚝의 직경을 평가한 결과, 중앙부에 집중적으로 배치되는 정방형배치로 되며, 상, 하, 측면(그림 6에서 2,4,6,8번 말뚝)의 조립토 말뚝은 직경이 증가하고 모서리 부분(그림 6에서 1,3,7,9번 말뚝)에 배치된 조립토 말뚝은 직경이 감소하는 것으로 나타났다.

3. 조립토 균말뚝의 효율적인 설계를 위하여 지반의 점착력과 지반의 단위중량 및 조립토 말뚝의 내부마찰각 등의 주요 설계변수들이 조립토 균말뚝의 허용설계지지력을 만족하는 범위 내에서 조립토 균말뚝의 총중량에 미치는 영향을 평가한 결과, 지반의 단위중량이 $\gamma_s = 1.2 \text{ t/m}^3$ 에서 $\gamma_s = 1.6 \text{ t/m}^3$ 로 증가할 때, 조립토 균말뚝의 총중량은 6%정도 감소하였으며, 지반의 점착력이 $c = 1.0 \text{ t/m}^2$ 에서 $c = 5.0 \text{ t/m}^2$ 로 증가할 때, 조립토 균말뚝의 총중량은 60.1%정도 감소되는 것으로 나타났으며, 조립토 말뚝의 내부마찰각의 값이 $\phi_p = 27^\circ$ 에서 $\phi_p = 39^\circ$ 로 증가할 때 조립토 균말뚝의 총중량은 57.5%정도 감소되는 것으로 나타났다.

향후 축적된 현장계측자료 및 실내모형실험을 통한 지속적인 검증작업과 이를 토대로, 지반내의 구속압 및 하중분담율의 변화에 따른 조립토 균말뚝의 극한지지력 증가에 관한 연구가 진행될 예정이다.

(접수일자 : 2003년 7월 1일)

참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제14권, 제5호, pp. 143 ~ 161.
2. 신방웅, 채현식, 김홍택(2001), 임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 극한지지력의 평가, 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제6호, pp. 181 ~ 191.
3. Goldberg, D. E., and Kuo, C. H.(1987), Genetic Algorithms in Pipeline Optimization, ASCE., Journal Computing in Civ. Engrg., 1(2), pp. 128 ~ 141.
4. Holland, J. H.(1975), Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press.
5. 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.