

조립토 다짐말뚝의 지지력 특성 분석 - 모형토조실험 결과를 중심으로

Analysis of Bearing Capacity Characteristics on Granular Compaction Pile - focusing on the Model Test Results

강 윤* · 김홍택**

Kang, Yun · Kim, Hong-Taek

Abstract

Granular compaction piles have the load bearing capacity of the soft ground increase and have the settlement of foundation built on the reinforced soil reduce. The granular compaction group piles also have the consolidation of the soft ground accelerate and have the liquefaction caused by earthquake prevent using the granular materials such as sand, gravel, stone etc. However, this method is one of unuseful methods in Korea. The Granular compaction piles are constructed by grouping it with a raft system. The confining pressure at the center of bulging failure depth is a major variable in relation to estimate for the ultimate bearing capacity of the granular compaction piles. Therefore, a share of loading is determined considering the effect of load concentration ratio between the granular compaction piles and surrounding soils, and varies the magnitude of the confining pressure.

In this study, method for the determination of the ultimate bearing capacity is proposed to apply a change of the horizontal pressure considering bulging failure depth, surcharge and loaded area. Also, the ultimate bearing capacity of the granular compaction piles is evaluated on the basis of previous study on the estimation of the ultimate bearing capacity and compared with the results obtained from laboratory scale model tests. And using the result from laboratory model tests, it is studied increase effect of the bearing capacity on the granular compaction piles and variance of coefficient of consolidation for the ground.

Keywords : Granular compaction pile, Boussinesq equation, Confining pressure, Load concentration ratio, Ultimate bearing capacity

요 지

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. 일반적으로 조립토 다짐말뚝은 Piled-raft system으로 시공되므로, 이 때 조립토 다짐말뚝의 극한지지력에 대한 평가는 팽창과피 중심부의 깊이에 따라 달라지게 된다. 또한 조립토 다짐말뚝과 주변지반과의 하중분담에 대한 영향 및 지반내에서 조립토 다짐말뚝에 작용하는 구속응력의 변화를 적절하게 고려하여 조립토 다짐말뚝의 극한지지력이 결정되어야 한다.

본 연구에서는, 김 등(1998)에 의하여 연구되었던 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가에 대한 해석기법을 토대로, 단일 말뚝에 대하여 상재하중의 크기, 재하면적의 크기 및 파괴깊이에 따른 수평구속응력의 변화를 고려하여 극한지지력을 산정하기 위한 기법을 제안하였다. 또한 제안된 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가기법의 타당성을 실내모형실험을 통하여 검증하였으며, 실험결과를 토대로 하여 균말뚝의 지지력 증가효과 및 압밀계수의 변화에 대하여 비교, 분석을 실시하였다.

주요어 : 조립토 다짐말뚝, 부시네스크 방정식, 구속응력, 하중분담비, 극한지지력

* 정희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Hongik Univ.

** 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik Univ.

1. 서론

조립토 다짐말뚝(*granular compaction pile*)공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 조립질의 재료인 자갈, 쇄석 및 모래 등을 사용하여 연약한 지반내에 말뚝체를 형성함으로써 기초지반을 효과적으로 보강하는 공법으로 (Hu 등, 1997), 점성토지반에서의 지반개량 효과뿐 아니라, 사질토 지반에 적용시 지진에 의한 액상화 방지효과도 우수한 공법으로 알려져 있으나 국내에서는 아직까지 널리 사용되지 않고 있다.

조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가는 말뚝의 파괴모드에 따라 달라진다. 일반적으로 조립토 다짐말뚝의 파괴는 설치깊이가 일정깊이 이상 될 경우 팽창파괴의 형태로 발생한다고 알려져 있다. 따라서 조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 팽창파괴에 대한 합리적인 평가가 매우 중요하다. 팽창파괴모드에 대한 지지력 평가시 팽창파괴를 일으키는 중심부 깊이에서의 지반구속응력(q)은 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 결정에 관련된 중요한 변수이다. 일반적으로 조립토 다짐말뚝과 Raft가 동시에 시공되는 현실을 고려할 때, Piled-raft system에 재하되는 하중은 상대강성 차이에 의해 전체하중을 말뚝과 지반이 상호분담하여 지지하게 된다. 이 때, 말뚝과 주변지반의 응력분담에 의해 주변지반의 상부에 재하되는 분담하중은 팽창파괴 중심부 깊이에서 지반구속응력의 크기를 변화시키며, 이로 인하여 조립토 다짐말뚝의 극한지지력이 크게 변화하게 된다. 김 등 (1998)은 지반이 분담하는 하중이 지반내의 응력증가를 유발하고 이로 인해 조립토 다짐말뚝의 극한지지력이 증가하는 것을 이용하여 극한지지력 평가기법을 제안한 바 있다. 그러나 이 경우에도 지반에 재하되는 하중에 의한 지반내에서 조립토 다짐말뚝에 작용하는 구속응력의 증가량 산정을 단순화하여 재하영역의 크기나 팽창파괴깊이에 따른 구속응력의 변화 등을 고려하지 못하는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는, 김 등(1998)에 의하여 연구되었던 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가에 대한 해석기법을 토대로, 단말뚝에 대하여 상재하중의 크기, 재하면적의 크기 및 팽창파괴깊이에 따른 수평구속응력의 변화를 적절하게 고려하여 극한지지력을 산정하기 위한 기법을 제안하였다. 또한 제안된 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가기법의 타당성을 실내모형실험 결과와 비교, 분석을 통해 검증하였으며, 실내모형실험 결과를 토대로 하여 조립토 다짐말뚝의

지지력 증가효과 및 보강된 지반의 압밀계수의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

2. 조립토 다짐말뚝의 극한지지력

2.1 Vesic 공동확장이론

조립토 다짐말뚝 두부에 연직하중이 재하되는 경우, 팽창파괴가 예상되는 깊이에서 조립토 다짐말뚝 주변지반의 소성파괴를 유발하는 한계압을 극한공동압이라 하며, Vesic (1972)은 이와 같은 극한공동압을 방사방향의 응력평형 조건 및 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 토대로 식(1)과 같이 정의하였다.

$$p_u = F_q \cdot q + F_c \cdot c \quad (1)$$

여기서,

q = 팽창파괴 중심부 깊이에서 지반내의 수평응력

c = 지반의 점착력

$$F_q = (I_{rr} \sec \phi)^{\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi}} (1 + \sin \phi)$$

$$F_c = c \cdot \cot \phi \cdot (F_q - 1)$$

$$I_{rr} = \frac{i_r}{1 + i_r \cdot \Delta \cdot \sec \phi}$$

$$i_r = \frac{E_s}{2(1 + \nu)(c + q \tan \phi)}$$

ϕ = 지반의 내부마찰각

Δ = 지반의 체적변형률

E_s = 지반의 탄성계수

ν = 지반의 포아슨비

위의 방법에 의한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 방사방향으로의 소성파괴를 유발하는 극한공동압의 연직성분으로 표현되며, 이를 정리하면 식 (2)와 같다.

$$Q_{ult} = (F_q \cdot q + F_c \cdot c) \left(\frac{1 + \sin \phi_p}{1 - \sin \phi_p} \right) A_p \quad (2)$$

여기서, ϕ_p = 조립토 다짐말뚝의 내부마찰각

$A_p =$ 조립토 다짐말뚝의 단면적

2.2 지반내의 응력에 따른 구속응력 결정

2.2.1 탄성론에 의한 수평구속응력 결정

팽창과괴모드에 대한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 팽창과괴가 발생하는 깊이의 수평구속응력에 크게 영향을 받게 된다. 현재까지 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 산정하기 위한 수평구속응력은 일반적으로 지반위에 설치된 Raft에 작용하는 상재하중 값에 수평토압계수를 곱한 값을 적용해왔다. 따라서 본 연구에서는 재하면적, 하중의 크기 및 파괴깊이의 변화에 따른 지반내의 수평구속응력의 변화에 대한 영향을 고려하기 위하여, 탄성론에 근거하여 유도한 Boussinesq 방정식을 사용하여 팽창과괴 중심부에서의 수평구속응력 증가량(Δq)을 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta q = \left[1 - \frac{l_c}{\sqrt{d_e^2 + l_c^2}} \times \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d_e}{\sqrt{d_e^2 + l_c^2}} \right)^2 \right) \right] \times q_s \quad (3)$$

여기서, $d_e =$ 재하영역에 따른 영향원의 반지름

$l_c =$ 팽창과괴 중심부의 깊이

$q_s =$ 지반분담 하중

이렇게 구한 수평구속응력의 증가량을 근거로 하여 팽창과괴 중심부에서 조립토 다짐말뚝에 작용하는 지반구속응력은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$q = K_0 \gamma_t l_c + \Delta q \quad (4)$$

여기서, $K_0 =$ 정지토압계수

$\gamma_t =$ 지반의 단위중량

2.2.2 혼합법에 의한 수평구속응력 결정

2.2.1절에서는 지반내에 작용하는 응력을 탄성론에 근거한 Boussinesq 방정식을 이용하여 수평구속응력을 결정하는 방법(이하 탄성론법)을 제시하였으며, 그림 1은 하중이 재하될 때 지반내의 발생하는 수직 및 수평구속응력

을 Boussinesq 방정식을 이용하여 구한 값을 나타내고 있다. 이 방법은 지반이 완전한 탄성체일 경우에는 비교적 정확하게 값을 구할 수 있다. 그러나 본 연구의 주된 대상이 되는 연약지반에서 수평구속응력을 평가할 때에는, 연약지반 자체가 탄성보다는 소성에 가까운 탄소성적인 거동을 보여주고 있으므로 탄성론법은 신뢰도가 상당히 떨어지는 방법이 될 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 탄성론에 근거하여 유도된 수직응력(σ_z)에 주동토압계수를 곱하여 지반내에서의 수평구속압을 구하고 이 값을 적용하여 팽창과괴 중심부에서 조립토 다짐말뚝에 작용하는 수평구속압으로 결정하는 방법(이하 혼합법)을 제안하고자 한다. 이러한 방법은 상재하중의 크기 및 재하위치의 변화에 따른 응력에 작용하는 토압을 계산하는 데에 주로 사용되고 있으며, 탄소성적 거동을 보이는 지반에 대하여 비교적 적용성이 양호한 것으로 알려져 있다.

우선, 탄성론에 근거하여 유도된 Boussinesq 방정식을 이용하여 팽창과괴 중심부에서의 수직응력 증가량($\Delta \sigma_v$)을 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta \sigma_v = \left\{ 1 - \left(\frac{l_c}{\sqrt{d_e^2 + l_c^2}} \right)^3 \right\} \times q_s \quad (5)$$

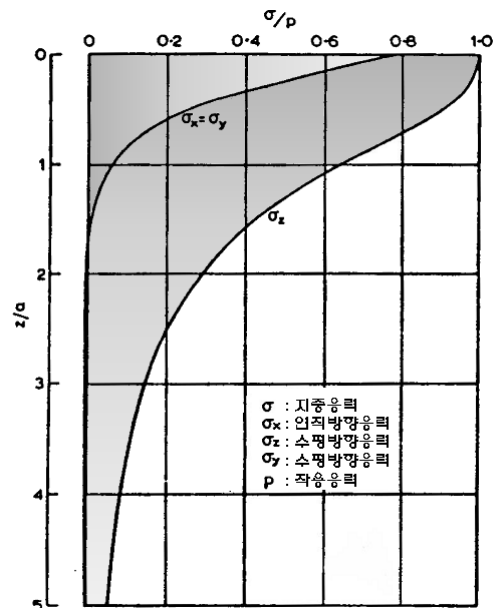
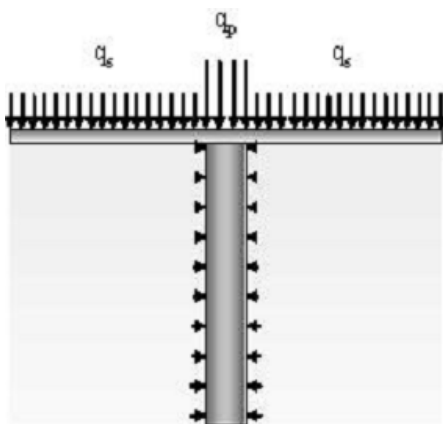


그림 1. 하중에 따른 지반내의 응력분포

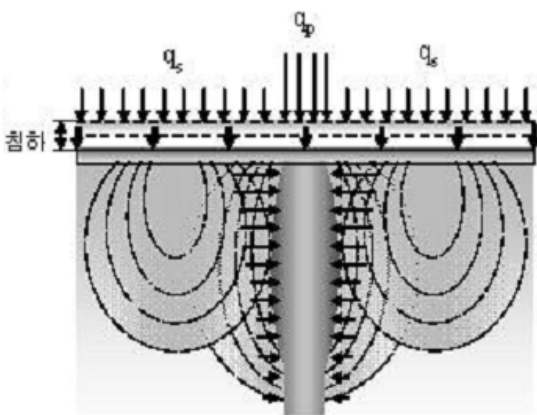
조립토 다짐말뚝의 팽창과괴 영역에서는 실제로 하중이 증가함에 따라서 외측으로 팽창하는 방향으로 변형이 유발되어 주동토압이 발생하게 되므로, 식 (5)에서 구한 수직 응력 증가량에 주동토압계수를 곱하게 되면, 지반내의 수평구속응력 증가량을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta q = \Delta \sigma_v \times K_a \quad (6)$$

여기서, $K_a =$ 주동토압계수



(a) 침하 발생 이전



(b) 침하 발생 이후

그림 2. Raft 하부에 설치된 조립토 다짐말뚝 및 주변지반의 거동

이렇게 구한 수평구속응력 증가량을 식 (4)에 대입하여 팽창과괴 중심부에서 조립토 다짐말뚝에 작용하는 지반구속응력을 구할 수 있다.

2.3 Raft와 함께 설치된 조립토 다짐말뚝의 극한지력 결정 방법

Raft 기초에 상재하중이 작용하기 이전에는 그림 2(a)와 같이 조립토 다짐말뚝은 정지토압을 받고 있게 된다. 그러나 상재하중이 작용하게 되면 조립토 다짐말뚝과 지반은 함께 침하가 발생하며, 동시에 지반내의 응력은 증가하게 되어 말뚝은 그림 2(b)와 같은 팽창과괴 양상을 보인다.

이 때 Raft에 전달되는 하중은 지반이 분담하는 하중과 말뚝이 분담하는 하중으로 구분할 수 있으며, 지반이 분담하는 하중과 조립토 다짐말뚝이 부담하는 하중의 비율을 하중분담비 (m)라 한다. Juran 등(1991)은 상재하중에 의하여 지반의 압밀이 진행됨에 따라서 조립토 다짐말뚝의 수동저항능력이 증가하게 되므로 m 값이 증가하게 되며, 조립토 다짐말뚝의 팽창과괴가 발생한 이후에는 m 값이 감소한다는 사실을 알아냈다. Rao 등(1985)이 제시한 하중분담비 개념을 바탕으로 강성기초하부에 설치된 조립토 다짐말뚝과 지반의 하중분담비를 간단하게 정리하면 식 (7)과 같다.

$$m = \frac{q_p}{q_s} = \frac{E_p}{E_s} \quad (7)$$

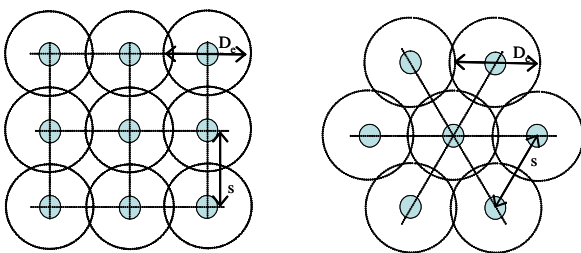
식 (7)에서 정의된 하중분담비와 식 (1)을 사용하여 구한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 이용하여 지반이 분담하는 응력을 구할 수 있다. 지반의 분담응력을 구한 다음, 말뚝에 작용하는 구속응력을 구하게 되는데, 지반내의 구속응력의 증가량은 식 (3)을 이용하여 구한다. 지반내의 응력은 그림 1과 같이 상재하중의 범위나 깊이에 따라서 변화하게 되며, 이에 의하여 말뚝의 팽창을 억제하는 구속응력도 변화하게 된다. 조립토 다짐말뚝은 팽창과괴의 중심부에 작용하는 지반의 수평구속응력이 극한지지력에 미치는 영향이 매우 크므로, 팽창과괴 중심부의 깊이와 상재하중의 범위의 결정이 조립토 다짐말뚝의 극한지지력의 결정에 있어서 매우 중요한 과정이다. 말뚝의 팽창과괴영역의 깊이는 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$L_c = \frac{2A_p \{N_c S_{u_s} (1 - \sin \Phi_p) - F_c S_{u_s} (1 + \sin \Phi_p)\}}{K_0 F_{q_s} A_p (1 + \sin \Phi_p) - 2\pi D S_{u_s} (1 - \sin \Phi_p)} \quad (8)$$

여기서,

S_{u_p} = 조립토 말뚝 주변지반의 비배수전단강도
 S_{u_i} = 조립토 말뚝 선단지반의 비배수전단강도
 N_c = 지지력 계수 (일반적으로 9 적용)

조립토 다짐말뚝의 하중재하영역은 각각의 조립토 다짐말뚝의 중심을 기준으로 원형하중 형태로 정의할 수 있다. 이 원형하중의 지름은 영향직경(D_e)으로 정의되며, 조립토 다짐말뚝의 영향직경은 조립토 다짐말뚝의 배치형태에 따라서 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 정사각형 배치형태 (b) 정삼각형 배치형태

$D_e = 1.128s$

$D_e = 1.050s$

여기서, s = 배치간격

그림 3. 조립토 다짐말뚝의 영향범위

하중재하영역 및 팽창과괴 영역의 깊이를 토대로 식 (3) 및 (6)을 이용하여 지반내의 수평구속응력의 증가량이 결정되면, 식 (4)를 이용하여 조립토 다짐말뚝에 작용하는 수평구속응력을 구할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 구해지는 수평구속응력은 식 (1)에서 보여지는 바와 같이 조립토 다짐말뚝의 극한지지력에 직접적인 영향을 미치게 되므로, 지반내의 수평구속응력을 결정할 때에 다양한 지반내의 응력조건을 고려하여 결정하여야 한다.

조립토 다짐말뚝에 작용하는 수평구속응력이 결정되면, 단말뚝의 경우에는 식 (1)에 대입하여 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 구하며, 군말뚝의 경우에는 김 등 (1998)이 제안한 방법을 토대로 조립토 다짐말뚝의 평균극한지지력을 구한다. 이러한 방법으로 구해진 조립토 다짐말뚝의 극한지지력값과 이전의 단계에서 구한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력값을 비교하여 두 값의 차이가 정해진 허용치를 만족하지 못할 경우, 이전의 단계에서 구한 극한지지력값 대신에 새롭게 구한 극한지지력값을 식(7)에 대입하여 지반의 분담하중을 재산정한 후 이전의 과정을 반복한다. 이러한 과정은 각 단계별로 산정된 극한지지력값이 허용치 이내로 수렴할 때까지 반복

적으로 계산을 수행한다. 그림 4는 위에서 서술한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가절차에 대한 흐름도를 나타내었다.

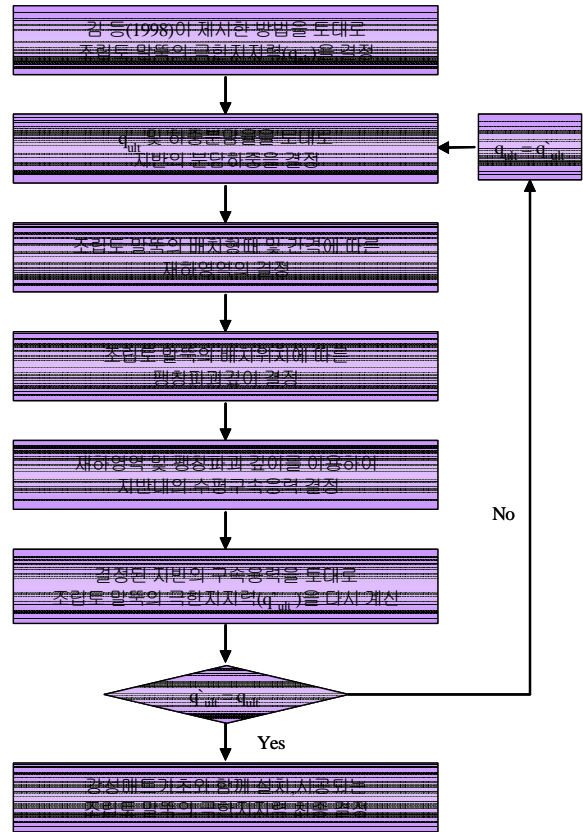


그림 4. 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가과정

3. 실내모형실험

조립토 다짐말뚝으로 보강된 연약지반에 하중이 재하되면, Raft에 하중이 작용하는 것으로 인한 지반내의 응력증가에 따라서 조립토 다짐말뚝의 측면에 작용하는 토압이 증가하게 되므로, 최종적으로 조립토 다짐말뚝의 지지력의 증가 및 Raft의 침하량 감소가 예상된다. 따라서 본 실내 모형실험을 통하여, 지반에 설치된 조립토 다짐말뚝 상부에 설치된 Raft에 하중이 작용할 때 이로 인하여 발생하는 Raft의 침하와 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 및 지반과 말뚝간의 하중분담관계에 대하여 비교, 분석하고자 한다.

3.1 장비 및 제원

본 연구에서는 그림 5에서 나타낸 바와 같이 점성토 지

반으로 이루어진 모형토조(600mm× 600mm×1300mm), 조립토 다짐말뚝 및 하중재하장치 등으로 구성된 실험장비를 사용하였다.

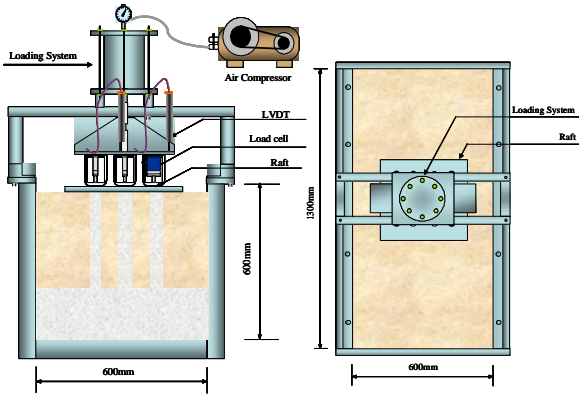


그림 5. 실내모형실험 장치 개요도

또한 Raft와 조립토 다짐말뚝이 부담하는 하중분담정도를 규명하기 위해 Raft 하부에 4개의 토압계(Prsssure cell)를 조립토 다짐말뚝을 중심으로 방사방향으로 지반에 설치하여 지반이 분담하는 하중을 직접적으로 측정할 수 있게 하였으며, 하중재하는 변위제어방식을 이용하였다.

실내모형실험에 사용된 시료는 연구목적에 적합한 우리나라에 많이 분포하고 있는 연약지반 지역을 대상으로 하여 선택하였는데, 실내모형실험에서 모형지반으로 사용된 흙은 경기도 화성시 마산포 시화지구에서 채취한 저소성의 silt이며 조립토 다짐말뚝으로는 경북 예천군 용궁면 대은리 일대에서 채취한 강모래를 사용하였다.

이들 시료는 우선 한국공업규격(KS)에 정해진 절차에 따라서 물리적 성질을 파악하기 위한 시험을 실시하였으며, 시험결과는 다음 표 1과 같으며, 입도분포는 그림 6과 같다.

표 1. 실험에 사용된 흙의 물리적 성질

	비중	#200체 통과량 (%)	LL (%)	PI (%)	USCS
조립토말뚝	2.63	2.3	-	N.P	SP
모형지반	2.71	91.3	24.2	18.9	ML

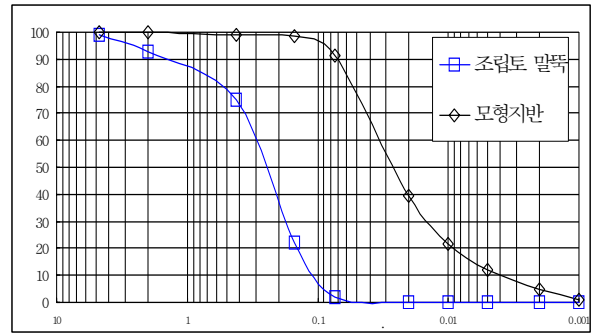


그림 6. 실험에 사용된 시료의 입도분포

본 실내모형실험에 사용된 조립토 다짐말뚝 및 모형지반의 물성치는 표 2와 같다.

표 2. 조립토 다짐말뚝 및 모형지반의 물성치

조립토 말뚝				
직경 (cm)	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아슨비	내부마찰각 (°)
5.0	2.0	4500	0.3	40
지반 조건				
점착력 (t/m ²)	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아슨비	내부마찰각 (°)
2.5~3.0	1.6	300	0.3	0

3.2 실험 방법

실내모형실험 과정은 그림 7과 같으며, 다음의 표 3과 같은 Case로 수행되었다. 모형지반내에 조립토 다짐말뚝체를 형성하는데 사용된 케이싱은 시중에서 구할 수 있는 플라스틱 관을 사용하였다. 또한 모형지반의 비배수전단강도는 간이 베인시험기로서 현장조사시 간단하게 지반의 비배수전단강도를 측정할 수 있는 장치인 토베인(Tor-vane)을 이용하여 측정하여, 재성형된 지반의 비배수전단강도가 2.5~3.0 ton/m²로 회복되는 시점에서 실험을 수행하였다.

표 3. 실내모형실험 Case

말뚝지름	말뚝의 형태	Raft의 크기	말뚝길이
5cm	단말뚝	15cm×15cm	30cm
		25cm×25cm	
		35cm×35cm	
3cm	군말뚝 (3×1)	30cm×15cm	30cm
		40cm×20cm	



(a) 케이싱 설치

(b) 모형지반조성



(c) Part 설치

(d) 하중 재하

그림 16. 실내모형토조실험 과정

4. 분석 및 고찰

4.1 재하판 크기에 따른 극한지지력의 변화

본 연구에서는 우선적으로 영향직경으로 인한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Raft의 한변의 길이를 15cm(3D), 25cm(5D) 및 35cm(7D)로 변화시켜가며 조립토 다짐말뚝에 작용하는 하중과 Raft의 침하량 관계를 구하였다. 각각의 조건별로 구한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력과 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4. 조립토 말뚝의 극한지지력 비교(kgf/cm²)

말뚝 형태	Raft의 크기	실험결과	제안식 (c=3.0 t/m ²)	
			탄성법	혼합법
단말뚝	15cm×15cm	0.946	0.807	1.081
	25cm×25cm	1.015	0.904	1.236
	35cm×35cm	1.113	0.974	1.265

표 4를 보면, 전체적으로 본 연구에서 제안한 식과 실험 결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 다만 탄성법의 경우가 혼합법의 경우보다 약간 작게 나타났는데 이는 평가된 수평구속압의 차이에 의한 결과로 판단된다. 또한, 제안식에 적용한 점착력(3.0 t/m²)보다 모형실험시 지반의 점착력(2.5~3.0 t/m²)이 작아 모형실험에서 구한 극한지지력도 상대적으로 작게 나타나는 것으로 볼 때, 혼합법에 의한 결과가 탄성법에 의한 결과보다 실험결과에 가깝게 나타난 것으로 판단된다.

그림 8은 각각의 경우에 대한 조립토 다짐말뚝의 파괴형상의 단면을 보여준다. 그림 8에서 보여주고 있는 바와 같이, Raft에 작용하는 하중에 따라 조립토 다짐말뚝이 팽창 파괴의 형태를 보이는 것을 알 수 있었으며, 특히 그림 8(c)에서는 전형적인 조립토 다짐말뚝의 팽창파괴 형태를 보여주고 있다. 그림 9는 조립토 다짐말뚝에 대하여 Raft의 크기에 따른 하중-침하량 곡선을 나타낸 것이다. 그림 9에서 보면, Raft의 한변의 폭이 3D 및 7D인 경우와 달리, 5D인 경우에는 조립토 다짐말뚝에 편심이 비교적 크게 작용되어 하중-침하량 곡선이 불규칙적인 값을 나타내고 있는 것으로 나타났으나, 전체적으로는 그림 9에서 얻은 하중-침하량 관계를 이용하여 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 및 하중분담비에 대한 평가에 적용하기에 무리가 없는 것으로 생각된다. 따라서 이를 토대로 Raft의 침하량에 따른 하중분담비의 변화를 나타내면 그림 10과 같다. 그림 10에서 보여주고 있는 바와 같이, 모든 경우에 하중분담비는 재하초기에는 큰 값을 가지다가 재하가 진행되면서 Raft의 침하가 발생할수록 점점 작아지는 것으로 나타났다. Juran 등(1991)의 실험결과에서는 하중재하가 진행됨에 따라서 하중분담비가 증가하는 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 삼축압축시험기에 시료를 넣고 물을 채워 넣어 측압을 가하는 원통모양의 압력셀을 개조하여 모형실험이 수행되었기 때문이라고 판단된다. 이는, 하중이 재하되더라



(a) B = 30(15cm)



(b) B = 50(25cm)

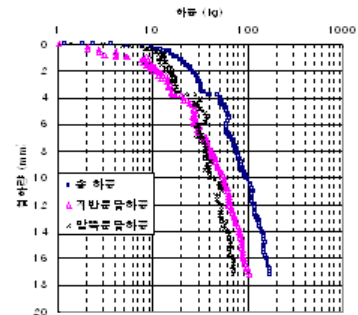


(c) B = 70(35cm)

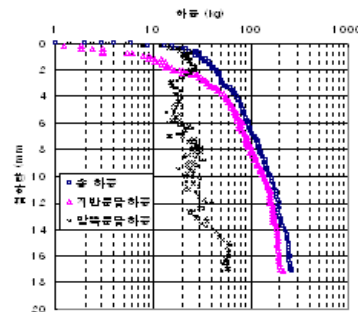
그림 19. 조립토 다짐말뚝의 파괴형상(정방형 Raft)

도 모형지반에 해당하는 점토가 구속되어 있는 상태로 유지되어 지반의 수평이동에 따른 파괴가 발생하지 않고 배

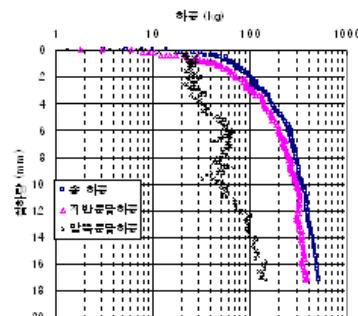
수로 인한 점토의 체적감소가 발생하였으며, 또한 하중이 아주 느린 속도로 재하되면서 배수가 진행되는 조건에서 실험이 수행되었으므로 지반의 압밀로 인하여 발생하는 지반의 강도증가보다 조립토 다짐말뚝의 강도증가가 현저하게 크게 나타났기 때문으로 생각할 수 있다. 그러나 본 실내모형실험에서는 지반이 구속되지 않은 상태에서 실제 시공되는 기초와 같은 조건에서 실험을 수행하였으므로 지반 내부에서 수평이동의 발생이 가능하였고, Juran 등(1991)이 수행한 시험보다는 상대적으로 하중의 재하속도가 빨라 지반의 압밀진행에 따른 지반분담하중의 증가에 대한 효과를 적절하게 고려하지 못했기 때문에 그림 10과 같은 결과가 나온 것으로 생각된다.



(a) B = 30(15cm)

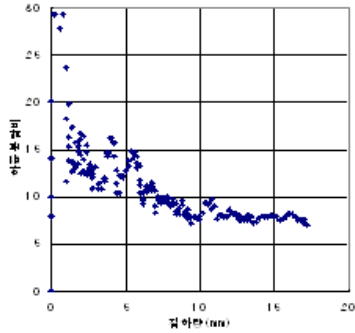


(b) B = 50(25cm)

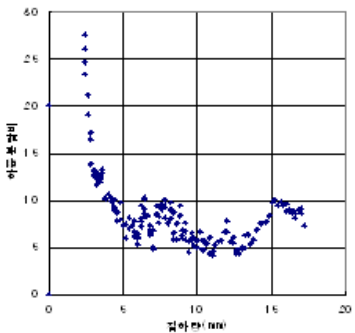


(c) B = 70(35cm)

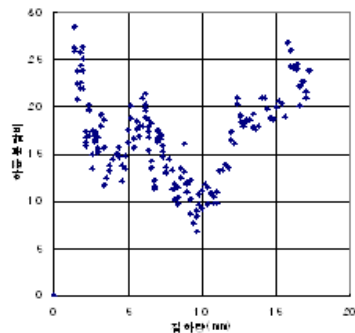
그림 22. Raft의 크기에 따른 조립토 다짐말뚝의 하중-침하량 곡선(정방형 Raft)



(a) B = 3D(15cm)



(b) B = 5D(25cm)



(c) B = 7D(35cm)

그림 25. 침하량에 따른 조립토 다짐말뚝의 하중분담비의 변화(정방형 Raft)

4.2 조립토 군말뚝의 지지력 증가효과

조립토 군말뚝의 경우에는 일반 말뚝과는 달리 영향직경 내에 위치하는 인접 조립토 말뚝들에 의한 원지반에 치환 효과를 추가적으로 고려하여야 한다. 이에 따라 김 등 (1998)은 방사방향으로 재하되는 극한공동압의 산정식에 보강영역의 합성탄성계수를 적용하여 인접 조립토 말뚝들에 의한 원지반 치환효과를 근사적으로 반영하였다. 본 연구에서는 이러한 연구결과를 근거로 하여, 조립토 군말뚝

의 지지력 증가효과를 알아보기 위하여 같은 영향직경을 가진 조립토 군말뚝에 대하여 동일 침하량을 가지는 단말뚝과의 지지력의 비를 계산하여 비교, 분석을 실시하였다. 그림 11에서는 조립토 군말뚝의 단면으로서 팽창과괴형태를 보여주며, 그림 12에서는 침하량에 따른 조립토 단말뚝과 군말뚝의 지지력비를 나타내었다.



그림 11. 조립토 군말뚝의 파괴형태 (s = 4D)

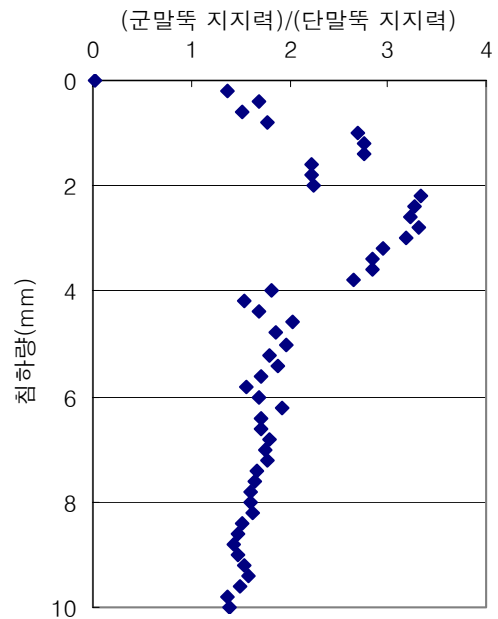


그림 12. 군말뚝의 지지력 증가효과

그림 12에서는, 군말뚝과 단말뚝의 지지력 비가 초기에는 큰 값을 나타내고 있으나 파괴발생이 예측되는 침하량을 지난 다음에는 점차로 줄어드는 경향을 보이고 있다. 순수한 지지력의 증가효과는 파괴이전임을 고려할 때 지지력 증가비는 약 3배에 이르는 것을 알 수 있으며 평균적으로

2배 정도로 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 주변말뚝의 팽창압이 말뚝에 미치는 영향이 매우 큰 것을 나타내며, 김 등(1998)이 제시한 결과와도 일치하는 결과이다. 그러나 추가적으로 다양한 영향직경에 대한 지지력비를 구하여 가장 효과적인 말뚝의 간격 및 Raft의 크기에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

4.3 말뚝간격에 따른 극한지지력의 변화

일반적으로 말뚝에서는 군말뚝의 효과가 간격이 작을수록 낮아져 일정한 간격 이상이 되어야 소정의 지지력을 확보하게 된다. 그러나 조립토 말뚝은 일반 말뚝과는 달리 간격이 멀어질수록 말뚝의 지지력은 감소하게 된다. 이는 말뚝의 상호간섭효과에 의하여 주변지반으로 말뚝의 방사방향으로 응력이 전달되어 결국 말뚝에 작용하는 수평구속응력을 증가시키게 되며 이에 따라서 조립토 말뚝의 지지력이 증가하게 되는 현상이다. 이러한 방사방향으로 전달되는 응력은 조립토 말뚝의 간격에 따라서 변화하게 되며, 본 연구에서는 이러한 현상을 실내실험을 통하여 검증해 보고자 하였다. 그림 13에서는 군말뚝의 설치간격에 따른 평균응력-침하량 곡선을 나타내었다.

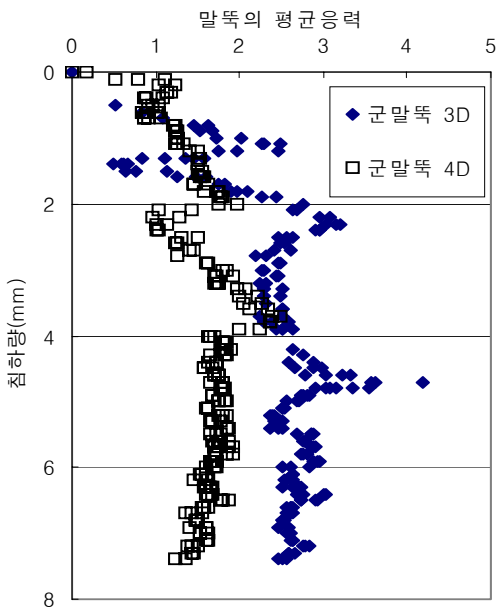


그림 13. 말뚝의 평균응력-침하량 분포

그림 13을 보면, 3D(9cm)의 간격으로 설치된 군말뚝에 작용하는 평균응력이 4D(12cm)의 간격으로 설치된 군

말뚝의 평균응력보다 대체적으로 크게 나타나는 경향을 보인다. 전체적인 경향으로 볼 때, 조립토 말뚝간의 상호작용에 대한 영향은 일반 말뚝과는 달리 간격이 줄어들수록 극한지지력의 증가를 가져오는 것으로 보이며, 이후에 다양한 간격에 대한 추가적인 실험으로 구체적인 연구를 수행할 계획이다.

4.4 하중분담비에 따른 압밀계수의 변화

조립토 다짐말뚝은 지반에 하중을 재하하고 동시에 지반 내의 물을 제거함으로써 지반의 압축성을 줄여 지반의 압밀을 촉진시키는 역할을 한다. 또한 연약지반의 개량을 목적으로 연약지반에 조립토 말뚝과 같은 원주형의 개량체를 지중에 형성함으로써 압밀을 유도하여 원지반의 지지력의 증가와 함께 침하량을 감소시키며, 지반에 상재하중이 작용할 때 조립토 다짐말뚝은 연직배수공법처럼 배수가 일어나는 통로의 역할을 한다. 지반의 압밀이 진행됨에 따라서 압밀계수가 변화하며 지반의 강도 또한 증가하게 되는데, 지금까지의 조립토 다짐말뚝의 극한지지력을 평가하는 방법들은 이러한 지반의 압밀에 의한 개량효과를 고려하지 않고 있다. 지반의 압밀은 조립토 말뚝의 극한지지력 평가 과정 중에 상수로 적용되는 하중분담비를 변화시키는 요인이 되므로, 압밀에 의한 지반의 강도증가는 하중분담비로 표현이 가능하며 이러한 하중분담비를 압밀의 진행에 따라 변화하는 계수인 압밀계수의 함수로서 나타낼 수 있다.

따라서 본 연구에서는, Han 등(2001)에 의해 제안된 보강지반에 대한 간편 압밀도 산정법을 응용하여 압밀에 따른 하중분담비의 변화의 영향을 확인할 수 있는 방법에 관하여 고찰을 수행하였다. 연직방향의 압밀도는 Terzaghi의 1차원 압밀방정식을 수정하였으며, 방사방향의 압밀도는 Barron에 의해 제시된 압밀방정식을 변형하여 압밀도를 산정하였다. 이에 대한 간략화한 모형도는 다음의 그림 14에서 제시하였다.

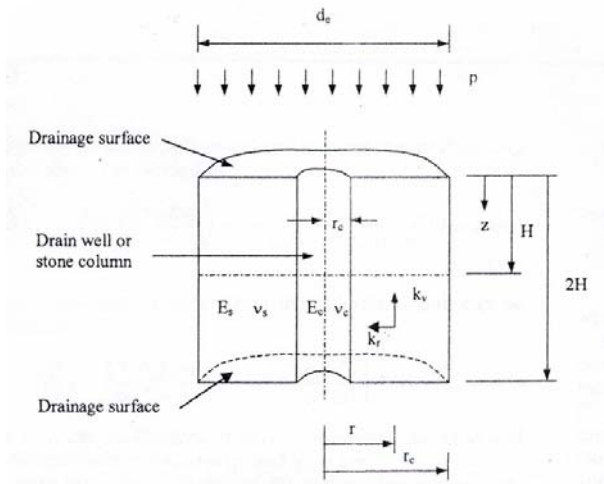


그림 14. 조립토 말뚝의 압밀방정식 모델

주변 흩이 물의 유출로 인하여 모든 체적변화가 발생하는 가정으로부터 시작하여 최종적으로 조립토 말뚝으로 보강된 지반의 수정압밀계수를 지반과 말뚝의 하중분담비를 이용하여 표현하게 되면 식 (9)와 같게 된다.

$$c'_v = c_v \left(1 + m \frac{1}{N^2 - 1} \right) \quad (9)$$

여기서, $N = d_e/d_c$ (직경비)

c'_v = 보강된 지반의 수정압밀계수

c'_v = 압밀계수

위의 식을 이용하여 실험결과를 근거로 한 모형지반의 수정압밀계수의 변화값을 구하였다. 그림 15는 조립토 단말뚝으로 보강된 지반에 대한 수정압밀계수의 변화를 나타내었고, 그림 16은 조립토 군말뚝으로 보강된 지반에 대한 수정압밀계수의 변화를 나타내었다.

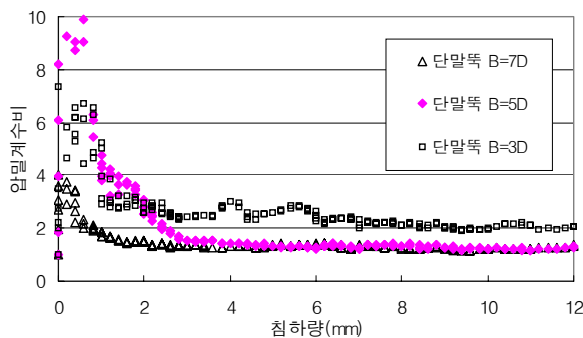


그림 15. 수정압밀계수의 변화(단말뚝)

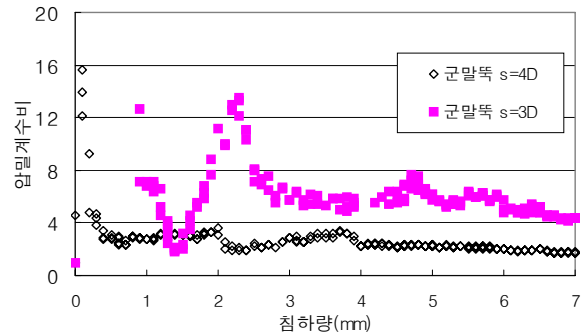


그림 16. 수정압밀계수의 변화(군말뚝)

그림 15를 보면, 조립토 단말뚝의 실험결과에서 Raft의 크기, 즉 영향직경이 3D일 경우에서 압밀계수의 증가현상이 뚜렷하게 나타나, 침하초기에 약 3배 이상의 증가를 보이고 있으며, 침하가 진행됨에 따라서 평균적으로 2배 이상의 증가된 값을 나타내고 있다. 그러나 Raft의 크기가 증가한 경우는 침하초기에는 약간의 압밀계수값의 증가현상이 나타나고 있으나, 침하가 진행됨에 따라서 압밀계수의 증가량은 현저하게 감소하여 예상과피 침하량 이후에는 원지반의 압밀계수값에 근접하는 경향을 나타내고 있다.

그림 16을 보면 조립토 군말뚝으로 보강된 지반의 수정압밀계수의 변화는 조립토 단말뚝의 경우와 마찬가지로 영향직경이 작을수록 수정압밀계수의 증가경향이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 조립토 단말뚝에서 영향직경이 3D인 조건과 동일 영향직경을 갖는 군말뚝의 간격이 3D인 경우에 대하여 수정압밀계수의 평균값을 비교하면 군말뚝의 경우가 단말뚝의 경우보다 수정압밀계수의 값이 약 2배 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 대한 조립토 군말뚝의 지반개량효과는 현재의 실험결과로서는 실험회수가 부족하여 명확한 비교, 분석을 수행하지 못하였으므로, 이후에 수행되는 연구를 통하여 수정, 보완할 계획이다.

5. 결론

본 연구에서는, 지표에 작용하는 하중의 크기 및 재하면적의 영향 등을 고려하여 조립토 다짐말뚝의 극한지점력을 산정하기 위한 기법을 제안하였으며, 제안된 평가기법의 타당성을 실내모형실험을 통하여 각각의 경우에 대한 다양한 비교, 분석을 수행하였다. 이상의 주요 연구결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 재하면적, 하중의 크기 및 조립토 다짐

말뚝의 파괴깊이의 변화에 따른 영향을 고려하기 위하여, Boussinesq 방정식을 이용하여 상재하중에 의하여 발생하는 지반내의 수평구속응력을 직접 구하는 탄성론법과 상재하중에 의하여 지반내에 작용하는 수직응력을 Boussinesq 방정식을 이용하여 구한 값에 토압계수를 곱하여 수평구속응력을 구하는 혼합법을 적용하여 작용하중에 의한 팽창과괴 중심부에서의 수평구속응력 증가량을 구하였으며, 이를 토대로 한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가기법을 제안하였다.

- (2) 실내모형실험 결과, Raft에 작용하는 하중에 따라 조립토 다짐말뚝이 팽창과괴의 형태를 보이는 것을 알 수 있었으며, 하중분담비는 재하초기에는 큰 값을 가지다가 재하가 진행되면서 Raft의 침하가 발생할수록 점점 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 Raft의 침하량이 10mm보다 커질 경우의 하중분담비는 일정한 값으로 수렴하거나 증가하는 경향을 보여 Juran 등 (1991)이 수행한 실험결과와 상이한 결과를 나타냈으나, 이와 같은 결과는 모형실험 조건의 차이 때문으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 제안한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가방법에 의한 결과와 실내모형실험 결과를 비교해 볼 때, 두 경우 모두 Raft의 크기가 증가함에 따라 조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 본 연구에서 제안한 방법이 충분한 적용성을 갖는 것으로 판단된다.

- (4) 조립토 군말뚝의 지지력 증가효과를 알아보기 위하여 같은 영향직경을 가진 조립토 군말뚝과 단말뚝에 대하여 동일 침하량에 따른 단말뚝과의 지지력의 비를 계산한 결과, 평균적으로 2배 이상의 지지력 증가효과가 나타나는 것을 알 수 있었으며, 또한 군말뚝의 설치간격에 따른 평균응력-침하량 곡선을 볼 때, 간격이 늘어남에 따라서 지지력 증가는 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 지반과 말뚝의 하중분담비를 이용하여 조립토 말뚝으로 보강된 지반의 수정압밀계수의 변화를 구한 결과, 영향직경이 작을수록 보강지반의 수정압밀계수는 증가하여 지반개량효과가 좋아지는 것으로 나타났으며, 같은 영향직경이라 하더라도 군말뚝에서 수정압밀계수의 증가현상이 뚜렷한 것으로 나타났다.

향후 연구과제로서, 본 연구의 결과를 근거로 하여, 조립토 군말뚝의 상호 간섭작용에 의한 지지력 증가량 및 하중에 의한 수평구속응력의 변화에 따른 지지력 증가현상 등을 복합적으로 고려하여, 조립토 군말뚝의 최적의 배치에 관한 연구를 추가적으로 수행하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 연구된 성과임을 밝히며, 이에 대하여 진심으로 감사드립니다.

(접수일자 : 2004년 5월 10일)

참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구, 한국지반공학회는문집, 제14권, 제5호, pp. 143~161.
2. Davis, E. H. and Poulos, H. G.(1974), Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York
3. 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.
4. Jie Han and Shu-Lin Ye (2001), Simplified Method for Consolidation Rate of Stone Column Reinforced Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 7, pp. 597~603.
5. Juran, I. and Riccobono, O.(1991), Reinforcing Soft Soils with Artificially Cemented Compacted-Sand Columns, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 7, pp. 1042~1060.
6. Rao, B.G., and Bhandari, R. K.(1977), Reinforcing of Non-Cohesive Soil by Granular Piles, Proceedings 6th ARC Soil Mechanics and Foundation Engineering, Singapore, Vol. 1, pp. 175~178.
7. Vesic, A. S. (1972), Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, Journal of Soil Mech. and Found. Eng'g. Div., ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265~290.