

조립토 Piled Raft의 상호작용계수에 관한 연구 A Study on Interaction Factor of Granular Compaction Piled Raft

신방웅¹⁾, Bang-Woong Shin, 채현식²⁾, Hyun-Sik Chae, 김홍택³⁾, Hong-Taek Kim
강인규⁴⁾, In-Kyu Kang, 박사원⁵⁾, Sa-Won Park

¹⁾ 충북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Chung-Buk National University

²⁾ (주)대동 토목담당 이사, Director, Daedong Construction Co., Ltd.

³⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik University

⁴⁾ (주)브니엘컨설팅 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

⁵⁾ 홍익대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik University

개요(SYNOPSIS) : Granular compaction piled raft systems have been effectively used in soft ground foundation to improve not only settlement but also bearing capacity. In the present study, to examine the behavior characteristics and bulging failure zone on granular compaction piled raft system, carbon rod tests have been performed. The test results are compared with the zone of bulging failure and the effects of pile-pile interaction obtained from the analytical approaches. In addition, parametric studies are performed with considering pile slenderness ratio, Poisson's ratio and load sharing ratio.

주요어(Key words) : granular compaction piled raft, bulging failure, carbon rod test, interaction factor

1. 서론

조립토 piled raft 기초는 raft 기초 하부의 연약지반을 조립토 다짐말뚝(granular compaction piles)으로 보강하여 침하를 감소시키고 상부에 raft 기초를 설치하여 충분한 지지력을 확보하여 상부구조물을 지지하는 기초이다. 조립토 다짐말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 자갈, 쇄석 또는 모래 등의 조립질 재료로 연약한 기초지반을 10~35% 정도 치환함으로써, 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량 효과를 도모하며, 특히 사질토 지반에 적용할 경우에는 지진 발생시 액상화 방지도도 효과적인 공법으로 알려져 있는 등, 향후 국내에서 활용성이 비교적 높은 공법으로 평가되고 있다.

조립토 piled raft 기초는 일반적인 piled raft 기초와는 달리 말뚝과 raft가 서로 강결되어 있지 않고 서로 독립된 상태로 존재하며, 설계는 주로 지지력의 관점에서 실시되고 있으나 구조물의 사용성 측면을 감안할 때, 침하량의 관점에서 설계하는 것이 보다 합리적인 접근방법이라고 판단된다. 따라서, 조립토 piled raft 기초의 사용성 확대차원에서 조립토 다짐말뚝과 주변지반 사이의 상호작용에 대한 평가가 선행되어야 하며, 본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 파괴모드 및 조립토 균말뚝의 팽창파괴 거동특성이 반영된 상호작용계수의 평가에 대한 접근방법을 모색하고자 한다.

따라서, 본 연구에서는 탄소봉 실험장치에 의한 실내모형실험을 실시하여 조립토 다짐말뚝의 하중-침하 특성 및 파괴모드에 대한 타당성 검증과 함께, 조립토 piled raft의 상호작용 등을 해석적인 접근방법과 비교·분석하였다.

2. 조립토 piled raft 기초

2.1 개요

조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 팽창파괴영역(bulging failure zone)의 위치에 따라 크게 좌우되며, 일반적으로 전단강도가 최소가 되는 지점에서 팽창형태의 파괴가 가장 쉽게 발생하는 것으로 알려져 있다. Hu 등(1997)이 수행한 균형태 조립토 말뚝의 모형시험결과에 의하면, 조립토 다짐말뚝 두부로부터 팽창영역까지의 깊이는 횡방향으로의 구속정도, 말뚝의 세장비 및 치환율 등에 복합적으로 연관되어 있다. 또한 Hu 등의 모형실험 관찰결과에 의하면, 강성매트기초 가장자리 부근에 위치한 말뚝에서 비교적 뚜렷이 정의되는 전단파괴면을 확인하였으며, 각각의 말뚝에 대한 최대변위 발생지점을 토대로 분석하면 팽창영역의 중심점은 아래쪽으로 또한 안쪽으로 즉 중앙에 위치한 말뚝쪽으로 점차 이동하는 양상을 보이고 있다. 이와 같은 양상은, 외곽에 위치한 말뚝의 팽창으로 인해 주변지반의 구속압이 인접된 말뚝으로 전이됨으로써, 안쪽에 설치된 말뚝은 외곽말뚝에 비해 더 큰 구속압을 받게 되는 데 원인이 있다. 결과적으로 조립토 piled raft 기초의 경우 예상되는 각 말뚝의 팽창영역 중심점을 연결하면, 전체적인 파괴형상이 원추형(conical)에 가까울 것으로 판단된다(그림 1 참조).

2.2 극한지지력 평가를 위한 이론적 접근

김 등(1998, 1999)은 강성매트기초 하부에 정방형 균형태로 설치되는 조립토 다짐말뚝의 경우에 대해 각 말뚝의 팽창파괴 발생지점까지의 깊이 및 극한지지력 등을 예측할 수 있는 기법을 제시한 바 있으며, 이 내용을 요약·정리하면 다음과 같다.

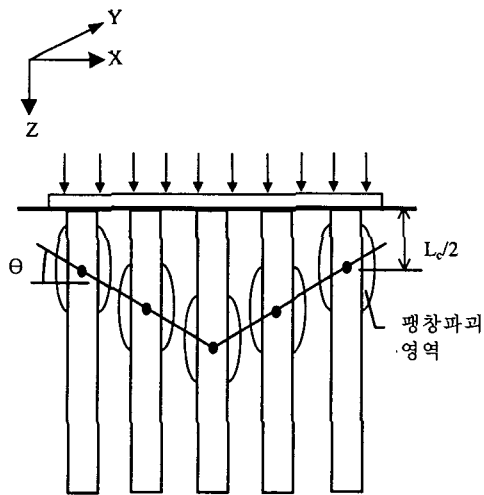


그림 1. 조립토 piled raft 기초의 파괴형상

1) 조립토 단말뚝에 대한 지배적인 파괴형태를 구분짓는 한계깊이(L_c) 즉, 팽창파괴 중심부까지의 깊이에 대한 정량적 예측기법을 우선 제시하고, 또한 raft기초 하부에 정방형 균형태로 설치되는 조립토 말뚝에 대해, 2) 상부 raft기초 재하 하중에 대한 기초지반의 하중분담효과를 고려하고, 말뚝간 상호간섭효과에 의거한 원추형상의 모델링 및 원지반의 치환율 등을 근거로 각 말뚝의 팽창파괴 중심부까지의 깊이를 결정하기 위한 기법, 3) 인접말뚝에 의한 원지반의 치환효과가 고려된 합성탄성계수 개념을 토대로 조립토 말뚝에 의해 보강된 지반 및 보강되지 않은 지반 전체의 평균 극한공동압을 평가하는 기법 등이 아울러 제시되었고 최종적으로 제시된 기법들을 종합적으로 이용하여 균형태 조립토 다짐말뚝 각각에 대한 극한지지력을 결정하는 절차가 제시된 바 있다. 이상과 같이 기 제시된 연구결과 중 가정사항을 이론적으로 체계화하고 또한 그 적용성 등을 더욱 확대하기 위한 차원에서, 본 연구에서는 탄소봉 실험장치에 의한 실내모형실험을 실시하여 조립토 piled raft의 파괴모드, 팽창파괴의 거동특성 및 하중-침하량 관계 등에 의한 상호작용계수의 평가방법 등을 살펴보고자 한다.

2.3 조립토 다짐말뚝의 상호작용계수

조립토 piled raft 기초의 하중-침하량 관계를 규명하기 위해서, 기존의 여러 연구자들에 의해 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 일반적으로 조립토 piled raft에서 고려하는 상호작용계수는 말뚝-말뚝 및 말뚝-raft 간의 상호작용계수 등으로 구분할 수 있으며, 이를 침하량 산정시 고려하게 된다.

Poulos(1968)는 인접한 서로 다른 두 개의 말뚝에서 임의의 단일말뚝에 발생하는 침하량은 인접한 말뚝에 의해서 침하의 영향을 받는다는 원리를 적용함으로써, 즉 일정한 하중이 재하되었을 때 말뚝은 하중에 의해 침하가 발생하게 되며, 인접한 말뚝에 의해서 추가적인 침하량이 유발된다는 이론을 전개한 바 있다. 이러한 현상은 상호작용계수(α_{pp})에 의해 표현가능하며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{pp} = \frac{w_a}{w_s} \quad (1)$$

여기서, w_a 는 인접말뚝에 의해서 추가로 유발되는 침하량, w_s 는 단일말뚝에 발생하는 침하량 등을 의미하며, 이와 같은 상호작용계수는 말뚝의 간격, 세장비(길이/말뚝반경) 및 지반강도정수에 영향을 받는다. 참고적으로, Viggiani(1998)가 제안한 근사식은 식 (2)와 같으며, A , B , C 는 하중의 재하방식에 따라 결정되는 상수 값(표 1 참조)을 s 및 d 는 각각 말뚝의 설치간격 및 직경을 나타낸다.

$$\alpha_{pp} = \frac{1}{\left[1 + A \left(\frac{s}{d} \right)^B \right]} + C \log \left(\frac{s}{d} + 10 \right) \quad (2)$$

표 1. 재하방식에 따른 상수값

상수 재하방식	A	B	C
Pile+raft	0.975	0.874	-0.032
Pile	1.008	1.059	-0.022

또한, piled raft 기초의 강성과 말뚝-raft의 하중분담비에 대한 근사식을 이용하여 말뚝-raft 간의 상호작용계수(α_{pr})를 예측할 수 있다. 이 때, Raft와 말뚝의 각각의 변위형태는 raft에 의한 말뚝의 영향과 말뚝에 의한 raft의 영향을 상호작용계수를 사용하여 고려하게 되며, raft는 강체로 간주한다. 따라서, 조립토 piled raft 기초의 하중-변위 관계를 다음의 식 (3)과 같이 행렬형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} w_p \\ w_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/K_p & \alpha_{pr}/K_r \\ \alpha_{pr}/K_p & 1/K_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_p \\ P_r \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, w_p : 조립토 말뚝의 침하량, w_r : raft의 침하량

K_p : 조립토 말뚝의 강성, K_r : raft의 강성

P_p : 말뚝에 작용하는 하중, P_r : raft에 작용하는 하중

α_{pr} : 조립토 균말뚝과 raft간의 상호작용계수

무리형태의 말뚝과 raft는 강결되어 있는 특징을 지니고 있으므로 하중에 대해서 발생하는 평균침하량은 동일하며, 결국 말뚝과 raft의 하중분담비(m)는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{P_r + P_p}{P_r} = 1 + m = \frac{K_p + (1 - 2\alpha_{pr})K_r}{(1 - \alpha_{pr})K_r} \quad (4)$$

따라서, 식 (4)에서 상호작용계수가 결정되면 raft로 강결된 조립토 다짐말뚝에 대한 해석이 가능하며, Randolph(1983)가 제안한 α_{pr} 는 식 (5)와 같다.

$$\alpha_{pr} = \frac{n r_0}{4 l} \left[\left(1 - \frac{1}{2(1-\nu)} \right) + \left(2 + \frac{1}{1-\nu} \right) \cdot \sinh^{-1}(l/n r_0) \right] \quad (5)$$

여기서, $n = B/2 r_0$, B 는 raft의 폭, r_0 는 말뚝의 반경, ν 는 지반의 포아슨 비, l 은 말뚝의 길이 등을 의미한다.

3. 탄소봉 실험

3.1 개요

본 연구에서는 조립토 군말뚝의 거동특성 중 파괴 메커니즘을 시각적으로 관찰하고, 말뚝-raft 사이의 상호작용계수에 대한 평가를 목적으로 탄소봉 실험을 수행하였다. 우선, 실내 모형지반의 재료를 표준사(상대밀도 60%) 및 4 mm 탄소봉 등으로 구성된 후, 모형지반 내부에 탄소봉(carbon rod)을 일정 비율로 혼합하여 조립토 다짐말뚝을 조성하였다. 이때 탄소봉의 내부마찰각을 측정하기 위하여 직접전단시험 상자를 탄소봉의 특성에 적합하도록 제작하여 직접전단시험을 수행하였다. 다양한 직경의 탄소봉에 대해서 실시한 직접전단시험 결과는 그림 2와 같으며, 직접전단시험을 토대로 측정된 표준사 및 탄소봉의 물성치 등을 정리하면 표 2와 같다.

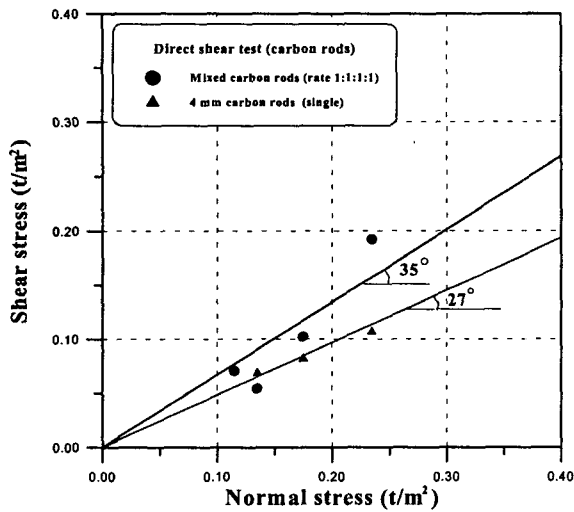


그림 2. 직접전단시험 결과(탄소봉)

표 2. 표준사 및 탄소봉의 물성치

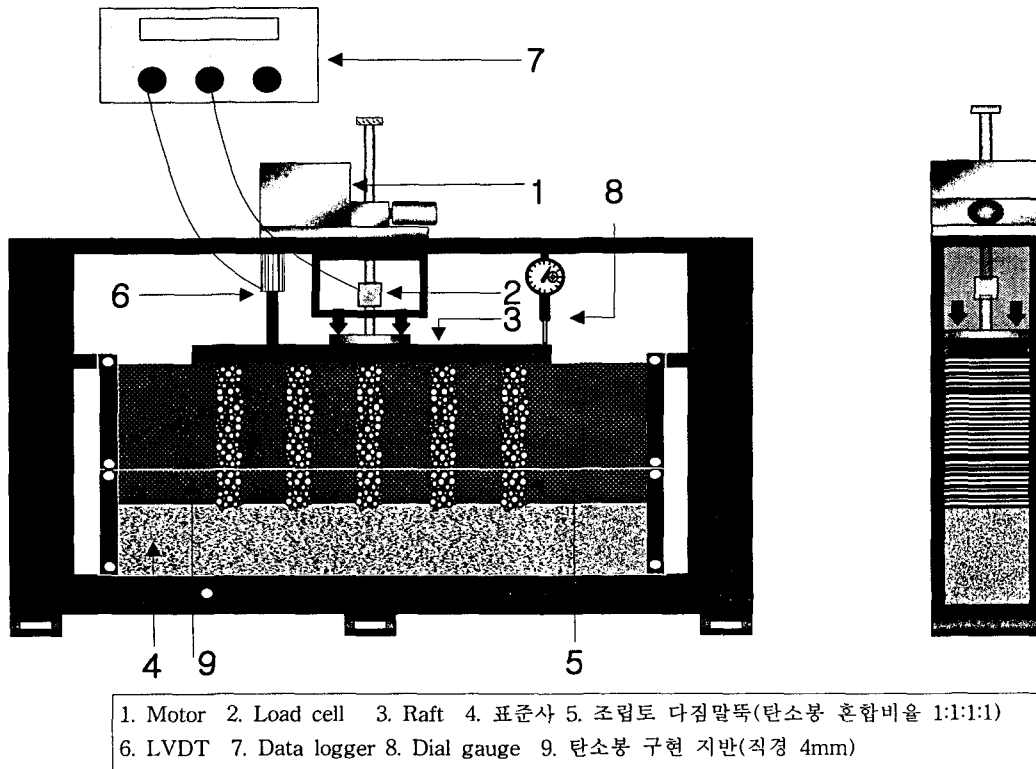
표준사	
단위중량	1.52 t/m ³
내부마찰각	28 °
비중	2.62
간극비	0.77
탄소봉(혼합비율 1:1:1:1)	
단위중량	1.44 t/m ³
내부마찰각	35 °
비중	1.72
간극비	0.19

3.2 실험방법

모형실험장치의 정면도 및 측면도는 그림 3과 같으며 모형틀은 ㄷ형강을 사용하여 150×110×10 cm의 크기로 제작하였다. 모형지반은 2개의 층으로 구성되어 있으며 하부지반은 표준사, 상부지반은 표준사와 거의 유사한 내부마찰각 값(27°)을 갖는 직경 4mm의 탄소봉으로 각각 모델링하였다(그림 2 참조). 조립토 다짐말뚝은 실험의 재현성이 우수한 직경 3, 4, 6, 8 mm의 탄소봉을 일정한 비율(1:1:1:1)로 혼합하여 일정한 세장비(l/r_0)를 갖는 탄소봉 모형말뚝($d=2.0$ cm)으로 재현하였다. Raft는 폭 40 cm, 두께 1.5 cm의 강판으로 제작하였으며, 전면부는 팽창과파의 양상을 관찰할 수 있도록 아크릴 판으

로 특수·제작되었다. 모든 실험은 1 mm/min의 속도로 변위제어방식에 의해 이루어졌으며 로드셀 및 LVDT에서 측정된 값을 data logger로 수집하였다.

또한, 조성된 모형지반은 평면-변형을 상태로 가정하였으며 일정한 간격($s=3.5d$)으로 5본이 설치된 균형태의 탄소봉 모형말뚝에 대해서 실험이 수행되었다. 본 실험에서는 식 (1)에 의한 상호작용계수를 평가하기 위해, 동일하중하의 단일 모형말뚝에 대한 실험결과(w_s)와 균형태의 모형말뚝 실험결과(w_a)를 서로 비교·분석하였으며, 말뚝의 길이는 세장비를 25, 30 등의 2종류로 실험을 실시한 후, 각 세장비에 대한 원추형 파괴면의 각도 및 상호작용계수 등을 살펴보았다.



(a) 정면도 (b) 측면도
그림 3. 조립토 piled raft 기초의 모형실험장치 개요도

4. 분석 및 고찰

4.1 파괴모드 분석

본 연구에서는 조립토 piled raft 기초의 거동특성 및 파괴 메커니즘 등을 평가하기 위해 하중을 가하지 않은 초기상태와 실험후의 탄소봉 모형말뚝의 변형양상을 비교해 보았다(사진 1 및 사진 2 참조). 실험결과를 살펴보면, 하중을 증가시킴에 따라 균형태로 구성된 탄소봉 모형말뚝에 팽창파괴가 발생하는 것으로 확인되었으며, 이는 '말뚝의 우선 팽창에 의해 인접한 주변지반이 소성파괴를 일으킨다'는 내용과 대체적으로 부합되는 결과이며, 파괴양상도 앞서 언급했던 원추형의 파괴양상과 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

또한, 세장비(l/r_0)가 25인 경우 팽창파괴 영역의 중심점을 연결한 직선이 수평면과 이루는 각도(θ)는 약 24° 정도인 것으로 관찰되었으며(사진 2 참조), 본 연구에서는 김 등(1998)의 연구결과에 제시되어 있는 이론식을 토대로 원추형 파괴면의 각도를 산정한 후, 이에 대한 검증차원에서 본 모형실험결과와의 비교·분석을 실시하였다(표 3 참조).

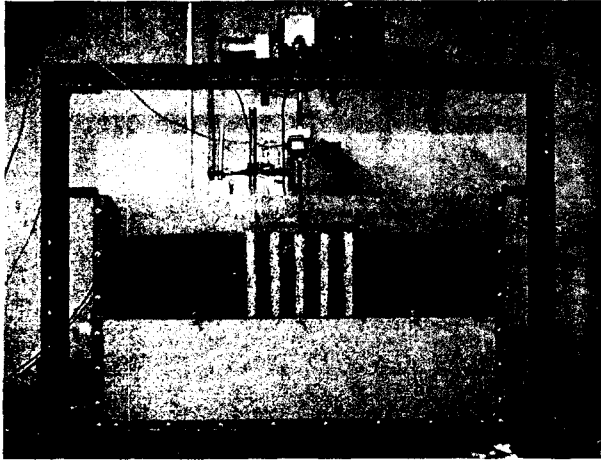


사진 1. 초기상태의 조립토 piled raft 기초의 모습 ($l/r_0=25$)

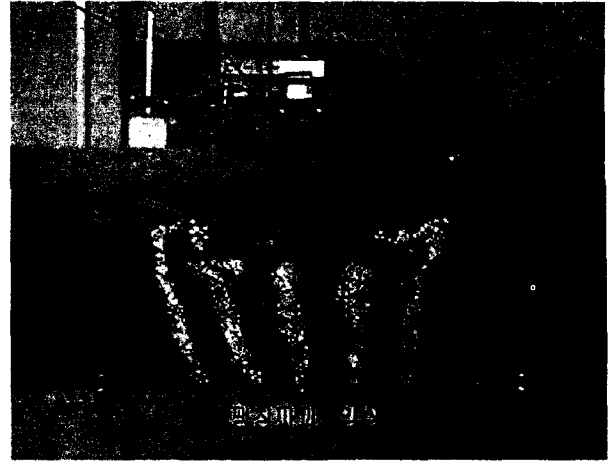


사진 2. 실험 후 조립토 piled raft 기초의 모습 ($l/r_0=25$)

표 3. 원추형 파괴면의 각도에 대한 예측치-실험치의 비교

원추형 파괴면의 각도(θ)		
	$l/r_0=25$	$l/r_0=30$
김 등(1998)의 연구결과	21.3°	20.7°
탄소봉 실험	24°	23°

분석결과, 예측치와 실험치간의 오차가 다소 존재하지만 비교적 유사한 결과임을 확인할 수 있다. 특히, 말뚝의 세장비(l/r_0)를 25 및 30 등의 두 종류로 증가시켜 가면서 실험을 실시한 결과, 사진 2에서 관찰된 양상보다 팽창파괴의 진행정도가 뚜렷이 관찰되었으며 파괴면의 각도도 근소하게 감소하는 것으로 나타났다(사진 3 및 사진 4). 이러한 현상의 주된 원인은 세장비가 증가함에 따라 팽창파괴 중심부까지의 깊이(L_c)가 점차 상향 이동하기 때문인 것으로 사료되며, 원추형 파괴면의 각도변화에 큰 영향을 주는 인자는 세장비 보다는 말뚝의 설치간격이 더욱 지배적일 것으로 유추할 수 있다.

4.2 하중-침하량 관계 및 상호작용계수(α_{pb})

실험진행 과정 중 조립토 piled raft 기초 상부에 하중을 가함에 따라, 서로 인접해 있는 탄소봉의 맞물림(interlocking)이 부분적으로 깨지는 현상이 유발된다. 이때 측정되는 하중 값이 순간적으로 감소하게 되며, 탄소봉의 재배열에 따른 하중증가가 다시 나타남을 확인할 수 있다. 실험진행과정에서 습득된 데이터를 토대로 하중-침하량 곡선을 도시하면 그림 4 및 그림 5와 같으며, 전술한 탄소봉의 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서는 모형실험결과를 이용한 α_{pb} 의 근사적인 평가방법(식(1) 참조)과 식(2)에 의한 예측치를 서로 비교·분석해 보았으며(표 4 참조), 계속해서 말뚝-raft간의 상호작용계수, α_{pr} 를 평가하기 위해 하중분담율 및 세장비에 따른 상호작용계수의 변화추이를 살펴보고, 이를 토대로 piled raft 기초의 최적설계에 필요한 주요 영향인자를 규명해 보았다(4.3절 참조).

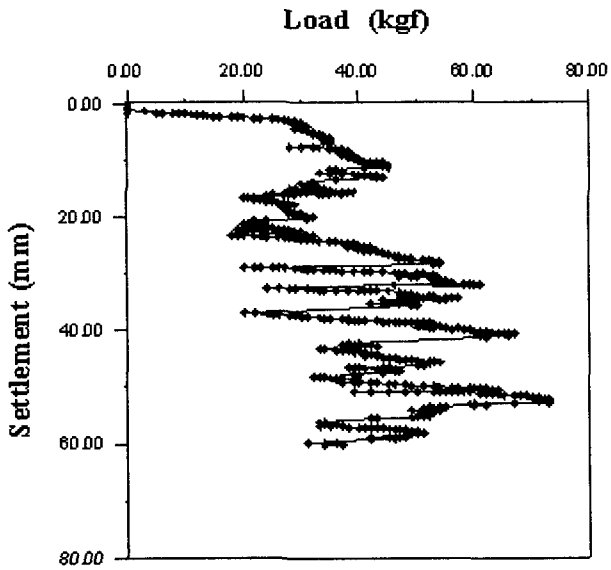


그림 4. 하중-침하량 곡선($l/r_0=25$)

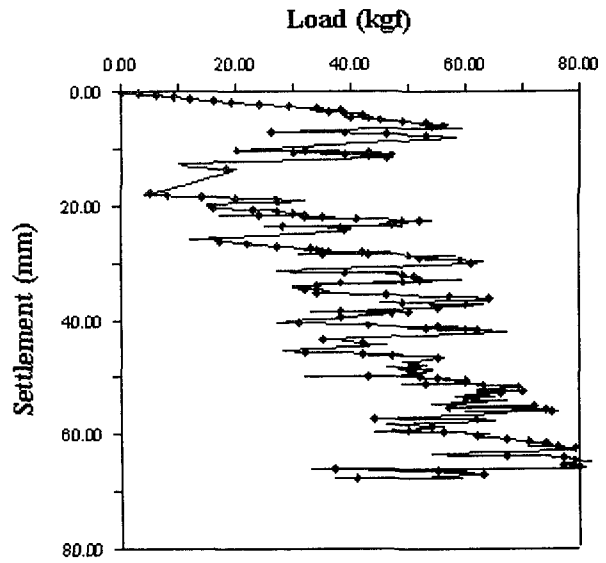


그림 5. 하중-침하량 곡선($l/r_0=30$)

표 4. α_{pp} 에 대한 예측치-실험치의 비교

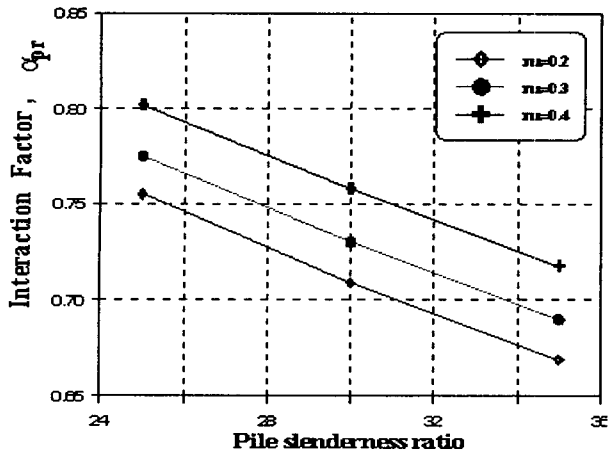
상호작용계수, α_{pp}				
	$l/r_0=25$		$l/r_0=30$	
Viggiani(1998) 의 근사식	0.22		0.22	
탄소봉 실험	$w_a=0.30\text{mm}$	0.18	$w_a=0.50\text{mm}$	0.25
	$w_s=1.63\text{mm}$		$w_s=2.01\text{mm}$	

표 4의 결과를 살펴보면, 이론치와 실험치 간에 큰 차이는 존재하지 않지만, 이론식(식 (2) 참조)에 의한 근사해는 말뚝의 길이를 고려할 수 없다는 단점과 식 자체가 조립토 piled raft를 대상으로 한 식이 아니라는 문제점을 지니고 있다. 즉, 조립토 piled raft에 대한 상호작용계수 α_{pp} 값을 이론적으로 유도하기 위해선 말뚝의 길이를 고려할 수 있도록 근사식의 수정이 필요하다고 판단된다.

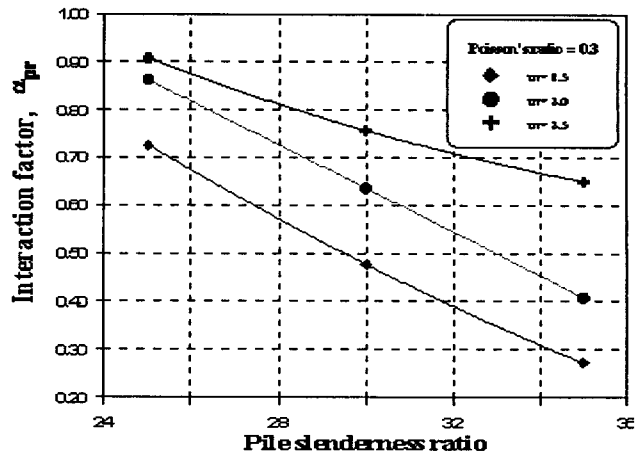
4.3 상호작용계수(α_{pr})의 영향인자 분석

상호작용계수 α_{pp} 와는 달리, 말뚝-raft 간의 상호작용계수 α_{pr} 은 모형실험을 토대로 유추하기가 상당히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 말뚝-raft간의 상호작용계수 α_{pr} 를 평가하기 위한 기초적인 노력의 일환으로, 하중분담율(m) 및 세장비 등에 따른 상호작용계수의 변화양상을 살펴보고, 이를 토대로 piled raft 기초의 최적설계에 필요한 주된 영향인자를 살펴보았다.

그림 6에 나타난 매개변수 분석결과, 말뚝-raft 간의 상호작용계수 α_{pr} 는 세장비에 따라 편차가 크게 발생하는 것으로 분석되었으며, 하중분담율이 증가할수록 매우 민감한 양상을 나타내고 있다. 즉, piled raft 기초에 침하량을 산정할 경우, 이러한 상호작용계수에 대한 민감도분석이 선행되어야 하며, 각각에 대한 주요 영향인자를 반영하여야 보다 효율적인 조립토 piled raft 기초의 설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한 실험 및 이론적인 연구를 토대로 말뚝과 raft에 작용하는 하중분담율을 규명할 경우, 조립토 piled raft 기초의 상호작용계수 α_{pr} 결정에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.



a) 지반의 포아슨 비에 따른 변화



b) 하중분담율(m)에 따른 변화

그림 6. 세장비에 따른 pile-raft간의 상호작용계수 (α_{pr} , Randolph, 1983)

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결과를 정리·요약하면 다음과 같다.

- 1) 실내 모형실험 결과, 균형태로 설치된 조립토 piled raft 기초의 파괴양상은 앞서 언급한 원추형 파괴 형태와 상당히 일치함을 확인할 수 있었으며, 조립토 다짐말뚝의 지지력은 말뚝의 팽창파괴에 대한 저항메커니즘으로 귀결된다는 이론에도 대체적으로 부합되는 결과를 보여주고 있다.
- 2) 원추형 파괴면의 각도변화에 큰 영향을 주는 인자는 세장비 보다는 말뚝의 설치간격이 더욱 지배적이며, 분석결과로 유추해볼 때 상호작용계수 α_{pp} 또한 설치간격 및 지반의 강도정수에 따라 큰 영향을 받을 것으로 예상된다.
- 3) 말뚝-raft 간의 상호작용계수, α_{pr} 는 세장비에 따라 편차가 크게 발생하는 것으로 분석되었으며, 하중분담율이 증가할수록 매우 민감한 양상을 나타내고 있다. 즉, piled raft 기초에 침하량을 산정할 경우, 상호작용계수에 대한 평가와 함께 각각에 대한 주요 영향인자를 반영하여야 보다 효율적인 조립토 piled raft 기초의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

향후, 다양한 설치간격별로 수행된 실험결과를 토대로 조립토 piled raft 기초 해석방법을 정립하고 지점별 침하량 예측 및 말뚝의 최적배치 등에 관련된 이론적, 실험적 연구가 계속해서 진행될 예정이다.

참고문헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), "조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제 14 권, 제 5 호, pp.143~161.
2. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), "강관스쿠트 보강 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제 15 권, 제 1 호, pp.79~98.
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*, pp.246~256.
4. Poulos, H. G.(1968), "Analysis of the Settlements of Pile Groups", *Geotechnique*, Vol. 18, No.3, London, pp.449~471.
5. Randolph, M. F.(1983), "Design of piled raft foundations", *Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, Bangkok, pp.525~537.
6. Viggiani, C.(1998), "Pile Groups and piled rafts behaviour", *Pro. of the deep foundations on bored and auger piles*, Ghent, pp.77~91.