

개량체 구조형상에 따른 지반보강효과 연구

A Study on Ground Reinforcement Effect with Structural Forms of Improved Soil

박 경 한¹⁾ · 장 기 수²⁾ · 이 송[†]
Kyunghan Park · Gisoo Jang · Song Lee

Received: August 26th, 2013; Revised: September 17th, 2013; Accepted: December 3rd, 2013

ABSTRACT : The aim of this study is to analyze the mechanical characteristics and settlement feature of the composite ground with structural form changes. The laboratory model test is a soil tanker to be contained with clay and grid form improved soil, which is conducted in total 9 case with the uniaxial compressive strength of improved soil and replacement ratio of improved soil. The numerical analysis for variation of stress distribution ratio with depth was performed in the same conditions which are the laboratory model test. As a result, stress distribution ratios in mid and high replacement ratio are increasing and settlement is decreasing, except low replacement ratio. This study is presented for form effect ratio and settlement reduction factor with change of structure form, which is able to be helpful in further research and reference for change of structural forms at composite ground.

Keywords : Composite ground, Improved soil, Replacement ratio, Stress distribution ratio

요 지 : 본 연구의 목적은 개량체 구조형상변화에 따른 복합지반에서의 역학 및 침하특성을 분석하는 것에 있다. 본 연구의 실험은 원형토조에 강도 및 치환율별로 격자형 개량체를 만들어 복합지반을 조성한 후 응력을 재하하는 방식으로 총 9 케이스를 수행하였다. 또한 심도별 응력분포 및 응력분담비 등을 분석하기 위해 유한요소해석을 실내 모형실험과 동일조건으로 모델링하여 해석하였다. 연구결과, 격자형 개량체로 구성된 복합지반은 원형 개량체에 비해 저치환율을 제외한 중간 및 고치환율에서 응력분담비가 증가하며 그 결과, 침하량은 감소하는 경향을 보였다. 본 연구는 구조형상 변화에 따른 형상효과비 및 침하저감계수 제시를 통해 부족한 복합지반의 개량체 구조형상에 대한 연구 참고자료 및 향후 추가 연구에 도움이 될 것으로 판단된다.

주요어 : 복합지반, 개량체, 치환율, 응력분담비

1. 서 론

우리나라는 반도체가 특성상 지리적으로 동북아시아 허브기능 역할이 대두되고 있으며, 해안항만사업의 확대가 이뤄지는 추세이다. 이에 따라 대형항만시설의 수요가 확대됨으로써 연약지반 기초처리공법이 필요하게 된다. 따라서 기초처리공법에 의한 복합지반형성 시, 개량체의 구조적 형상 변화에 따라 응력분담비 등의 파라미터 혹은 보강효과는 변형차이 및 응력전이 등의 이유로 변하게 된다.

초기 복합지반에 관련된 연구로는 모래다짐말뚝의 지지력, 침하 및 설계정수와의 같은 거동분석으로 시작되었으며, Murayama(1962)는 모래말뚝의 응력분담비에 관해 모래말뚝과 원지반간의 강도증가 효과와 복합응력관계를 제안하였고 Nakayama & Ueda(1967)는 실내시험에 의존한 응력분담비 관계를 실제 현장시험을 통하여 제시하였다.

복합지반 즉, 이질재료로 구성된 지반의 침하량산정에 있어, Priebe(1976)는 쇄석말뚝으로 개량된 복합지반 침하저감효과를 단위셀 개념에 근거하여 침하계량계수를 제시하였으며, Bergado et al.(1996)은 체적압축계수로부터의 복합지반 침하량을 산정하는 방법을 제시하였다.

국내의 경우 Shin(2005)은 저치환율의 SCP가 복합지반의 거동분석에 있어 단위셀 및 멀티셀 개념으로 실내시험을 고안하여 직접적인 응력분담비를 산정하였다. Shin(2008)은 DCM 공법의 배치형태조건을 달리하여 3차원 수치해석을 수행하고 동일한 치환조건에서 개량체 배치를 말뚝식 형태와 벽식 형태로 모형토조실험을 실시하여 그 차이점을 수치해석 결과와 비교하였다. 그러나 현재 시멘트계열 혼합처리공법이나 고압분사주입공법 등 시멘트-원지반의 복합계열 개량체와 원지반으로 형성된 복합지반의 역학적 특성과 개량체의 구조적 형상에 따른 응력분담비 및 침하저감계수 등

1) Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

2) KISTEC

† Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul (Corresponding Author : scugeo@uos.ac.kr)

의 설계와 시공적용 효과에 대한 명확한 근거, 설계정수 및 산정식에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 시멘트계열 개량체와 점토지반의 역학적 특성을 각각의 치환율에 따른 원형대비 격자형의 개량체구조형상 효과를 분석하기 위해 동일한 원지반, 개량체강도 및 치환율의 기존의 원형거동분석연구(Oh, 2012)를 참조하여 같은 강도조건의 개량체 및 원지반(5 kPa)을 조성한 후 원형토조에 개량체 및 원지반(점토)을 채움으로써 복합지반을 형성하였다. 또한, 각각의 치환율에 따른 형상변화 효과를 비교하기 위해 저치환율(11.5%), 중간치환율(35.0%), 고치환율(61.3%)로 변화시켜 총 9 케이스로 실내 모형실험 및 수치해석을 수행하여 원지반과 격자형 개량체에 분포하는 응력과 응력분담비, 침하량 등의 결과를 기존 원형 개량체 연구와 비교·분석하였다.

2. 복합지반의 지반보강 효과

복합지반은 시멘트, 물 및 원지반(점토)을 포졸란 반응을 통해 점토지반에 비해 상대적으로 강도가 큰 혼합토로 구성된 개량체를 형성시킨 것으로, 이는 일종의 치환으로써 점토와 시멘트를 교반하면서 원지반에 개량체를 조성하여 서로 다른 특성의 이질재료로 형성시킨다. 또한, 개량체는 벽식, 블록식 등의 구조형식으로 적용할 수 있다. 따라서 내부 마찰각, 개량체 구조형식 혹은 형상, 치환율에 따라 응력분담비 혹은 침하 즉, 지반보강 효과는 달라진다(Van Impe et al., 1983).

2.1 복합지반에서의 응력분담비

개량체와 원지반점토로 형성된 이질재료지반을 복합지반 개념으로 볼 때 Fig. 1과 같이 재료특성 및 강도, 응력

거동 등이 복합적인 거동으로 변하게 된다. 이는 두 이질 재료간의 강성차이가 존재하게 되고 또한, 상재응력으로 인해 개량체와 원지반의 변형특성의 차이로 아칭현상이 발생하게 된다. 이에 점토부지반의 응력이 개량체로 전이되어 결과적으로 점토지반에는 응력이 저감되고 개량체가 받는 연직응력은 상대적으로 커지게 된다. 따라서 복합지반에서 상재응력에 의해 점토원지반이 분담하는 응력과 개량체가 분담하는 응력의 비가 복합지반에서의 응력분담비이다.

Fig. 1과 같이 시멘트개량체와 원지반점토로 형성된 복합지반에 작용하는 응력은 주변 연약지반 및 개량체에 서로 다른 크기로 전달되며, 이를 수식화하면 Eq. (1)~(2)와 같다.

$$P = P_i + P_c = \sigma A = \sigma_i A_i + \sigma_c A_c$$

$$n = \frac{\sigma_i}{\sigma_c} \quad (1)$$

여기서, n = 응력분담비

σ_i = 개량체에 작용하는 응력

σ_c = 연약지반에 작용하는 응력

P_i = 개량체에 작용하는 힘

P_c = 점토에 작용하는 힘

$$\sigma A = n\sigma_c A_i + \sigma_c A_c = \sigma_c (nA_i + A_c)$$

$$\frac{\sigma_i}{\sigma} = \frac{n}{(n-1)a_s + 1} = \mu_i$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{1}{(n-1)a_s + 1} = \mu_c$$

$$\frac{\sigma_i/\sigma}{\sigma_c/\sigma} = \frac{\mu_i}{\mu_c} = n \quad (2)$$

여기서, σ = 원지반과 개량체 전체가 받는 응력

A = 원지반과 개량체 전체의 면적

σ_i = 개량체가 받는 응력

A_i = 개량체 면적

σ_c = 원지반이 받는 응력

A_c = 원지반의 면적

n = 응력분담비

a_s = 치환율

μ_c = 응력감소계수

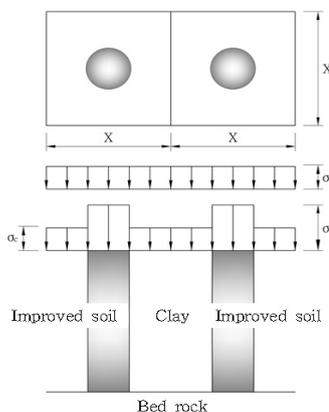


Fig. 1. Stress distribution of composite ground

일반적으로, 복합지반은 응력재하 시 압축응력 및 전단

응력이 상시 작용하여 압축전단변형과 압밀효과로 인한 응력 또한 복합적으로 발생한다. 다시 말해 연약점토층의 압밀이 진행되어 가면서 응력분담분포가 변하므로 응력분담 특성에 미치는 영향인자 또한 변하게 된다. 따라서 실제 현장에서는 경험적으로 약 2~6범위에서 적정 값을 선택하여 적용하고 있다(Korea Ocean Research & Development Institute, 2001).

2.2 복합지반의 침하

원지반 점토지반에 개량체를 적용한 복합지반의 침하는 점토지반에 작용하는 상부 응력이 개량체로 전이되면서 상대적으로 무처리 시에 작용하는 응력보다 작아져 이에 과잉간극수압이 작아지고, 결과적으로 발생하는 침하가 감소한다. 따라서 복합지반은 개량체 강성으로 인해 침하량이 감소하게 되는데 다음과 같이 무처리 지반의 침하량(S)에 대한 복합지반의 침하량(S_f)의 비를 침하저감계수라 한다 (Yoshikuni, 1979).

$$\beta = \frac{S_f}{S} \quad (3)$$

여기서, S = 무처리 지반의 침하량
 S_f = 복합지반의 침하량

시멘트계열 개량체의 경우 개량 후 침하저감 효과는 기대할 수 있으나 침하량 산정에 대한 명확한 학술적 근거를 찾기는 쉽지 않다. 현재 시멘트계열 개량체를 적용하는 공법 중에서 대부분이 모래다짐말뚝공법에서 적용하는 침하

계산식을 적용하고 있는 실정이다.

3. 실험 방법

본 연구에서는 Table 1과 같은 해성점토와 보통 포트랜드 시멘트 및 표준사를 이용하여 격자형 복합지반을 조성하고, 응력재하조건별로 치환율을 달리하는 방법으로 실내시험을 실시하였다.

실내시험 특성상 불교란 지반을 조성하기가 불가능하고 준설매립의 경우 교란강도를 가지고 있음을 착안하여, 개량체의 강도와 최대재하응력간의 이력관계를 고려해 점토의 일축압축강도를 5 kPa로 선정하였다. 선정된 압축강도를 재현할 수 있도록 함수비 및 단위중량을 조정하면서 제조하였다. 또한, 개량체의 압축강도를 25, 125 및 250 kPa이 되도록 물, 시멘트 및 점토의 혼합비를 시행착오법으로 수행하였다.

개량체 크기는 해상에서 적용되는 심층혼합처리공법의 개량체 직경 2.0 m를 기준으로 실내 모형실험에 적용하기 위하여 1/40로 축소하고 원형 토조의 높이는 80 cm로 하였다.

치환율은 20% 이하의 저치환율, 50% 이하의 중간치환율, 50% 이상의 고치환율로 선정하기 위해 Fig. 2와 같이 11.5%, 35.0% 및 61.3%로 선정하였으며, 각각 선정된 치환율에 따라 격자형으로 달리 형성시켜 원형 토조에 삽입시킨 후 치환율에 따라서 각각의 케이스별로 점토를 충전하였다.

복합지반을 조성한 다음 Fig. 3과 같이 개량체와 점토지반 상단에 Load Cell 2 EA 설치한 후 그 위에 10 cm의 배수층을 형성하기 위해 표준사를 포설하였다. 재하응력은 간극

Table 1. Characteristic of clay

LL	PI	#200, Passing (%)	Gs	USCS
41.0	19.3	95.7	2.70	CL

Table 2. Overview of the laboratory model test

Strength	25 kPa			125 kPa			250 kPa		
As (%)	11	35	61	11	35	61	11	35	61
Loading Condition	1 phase: 10 kPa			1 phase: 10 kPa			1 phase: 10 kPa		
	2 phase: 30 kPa			2 phase: 30 kPa			2 phase: 30 kPa		
	3 phase: 50 kPa			3 phase: 50 kPa			3 phase: 50 kPa		
Time	Phase by 4320 min Total: 9 days			Phase by 4320 min Total: 9 days			Phase by 4320 min Total: 9 days		

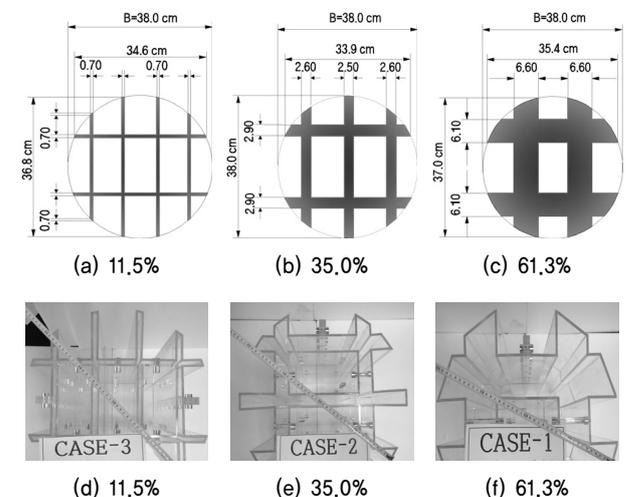


Fig. 2. Acrylic mold with replacement ratio for improved soil

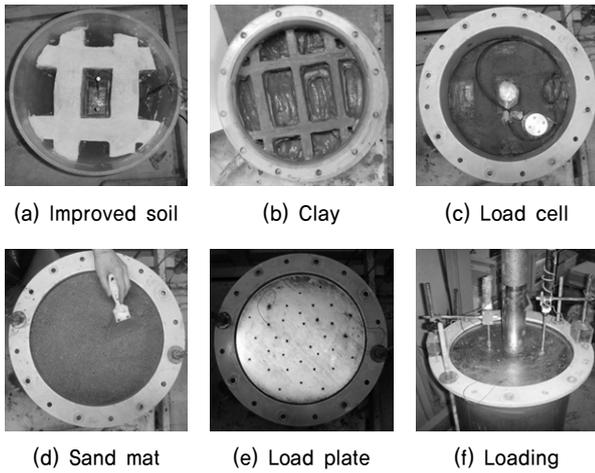


Fig. 3. Process of the laboratory model test

수압소산에 의한 침하량 발생을 고려해 단계별로 4,320분씩 10 kPa, 30 kPa 및 50 kPa 3단계 과정으로 재하하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 격자 및 원형 개량체간 구조형상에 따른 비교·분석

개량체의 치환율 및 강도는 복합지반 조성에 있어 주요 인자이다. 이에 따라 본 연구는 복합지반 치환율과 개량체 강도 조건을 다르게 하여 응력분담비 등의 응력전이 파라미터를 산출하고, 응력분포양상 및 침하량 등을 파악하였다. 그러나 응력분담비는 이질재료, 즉 점토와 개량체간의 서로 다른 강성비 차이에 따라 변형차이도 발생한다. 이러한 변형의 차이는 곧 아칭효과 등에 의한 응력전이현상을 일으키게 되고, 그 결과 상대적으로 강성이 더 큰 개량체에 응력이 집중되는 효과를 발휘하게 된다. 이러한 점을 착안할 때, 개량체의 구조형상(격자형)조건 또한 형상변화에 따라 응력전이의 영향요소로 판단되며, 이를 분석하기 위해 응력분담비와 침하량 등의 변화추이를 비교·검토하였다.

4.1.1 개량체 구조(격자)형상 변화에 따른 응력분담비 비교

원형 및 격자형 개량체의 응력분담비를 같은 치환율에 따른 응력분담비로 플롯팅하여 비교·분석하였다. Fig. 4는 재하응력 10 kPa일 때의 각각의 치환율에 따른 응력분담비를 서로 비교한 것이다. 재하응력이 10 kPa일 때, 전체적으로 격자형 개량체가 원형 개량체에 비해 약간 큰 응력분담비를 나타냈다. 그러나 저강도 개량체(25 kPa)에서 저치환율(11.5%)일 때 응력분담비는 원형에 비해 격자형이 상대적으로 작아 개량체에 응력이 집중되는 효과는 작은 것으로 판단된다. 이는 개량체를 하나의 단위셀로 가정할 때, 단면

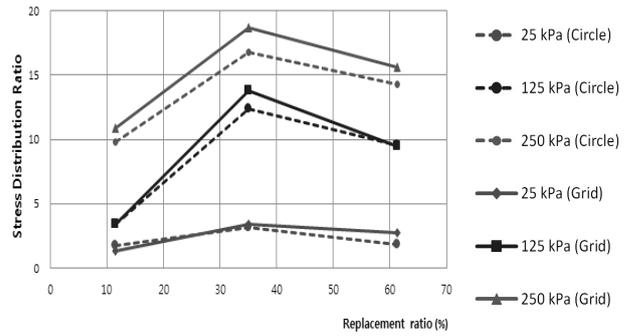


Fig. 4. Comparison of stress distribution ratio for circle and grid forms (10 kPa)

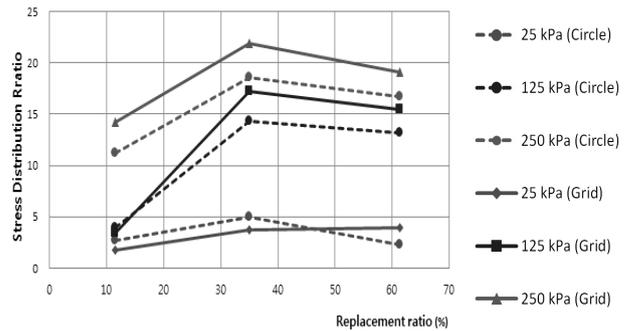


Fig. 5. Comparison of stress distribution ratio for circle and grid forms (30 kPa)

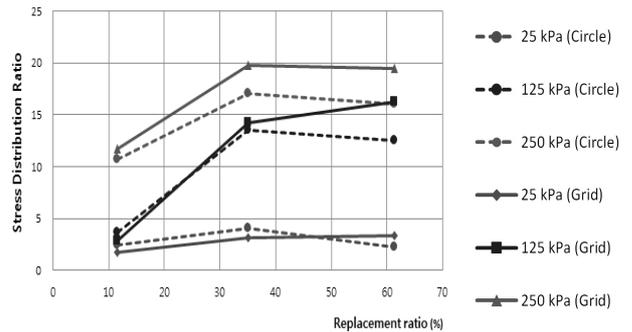


Fig. 6. Comparison of stress distribution ratio for circle and grid forms (50 kPa)

자체가 원형 개량체는 치환율이 변해도 원형으로 일정한 단면을 유지하는 반면, 격자형 개량체는 저치환율일 경우 최소 단면 폭이 0.7 cm로 전단에 매우 취약한 전단면을 가지고 있어 나타난 결과라 판단된다.

Fig. 5와 같이 재하응력이 30 kPa로 증가함에 따라 저강도 개량체(25 kPa)에서의 치환율 11.5%와 35.0%를 제외한 격자형 개량체의 응력분담비는 원형 개량체에 비해 큰 폭으로 증가한다. 따라서 개량체 구조형상이 격자형일 때 전단면이 외력에 저항하기 위해서는 적정 강도 및 치환율을 만족해야 할 것으로 판단된다.

고응력(50 kPa)재하일 때의 구조형상(격자형)변화에 따른 결과는 Fig. 6과 같다. 50 kPa의 응력 재하 시 격자형상

에 따른 응력분담비 증가 효과는 치환율이 높고 개량체의 자체 강도가 클수록 더 큰 응력집중 효과를 보였다.

결과적으로 원형보다 격자형으로 개량체를 조성할 경우, 개량체가 서로 하나로 연결되어 있는 격자형이 응력전 이효과가 탁월하여 개량체에 상대적으로 더 응력이 집중 하게 된다. 그러나 원형은 격자형 개량체에 비해 저치환율 (11.5%)일 때 불리한 전단 단면을 갖게 되어, 증가한 전단변 형에 의해 응력분담비는 감소하게 된다. 따라서 이를 보완 해 주는 소정의 치환율과 개량체 강도 조건을 만족한다면, 더욱 경제적이고 효과적인 복합지반을 조성할 수 있을 것으 로 판단된다.

4.1.2 구조형상 변화에 따른 형상효과비

각 개량체 강도(25 kPa, 125 kPa 및 250 kPa)에 따른 격 자형 개량체와 원형 개량체의 치환율에 따른 응력분담비를 구조형상(격자형)효과로 비교하면 Table 3~5와 같으며, 원 형 개량체의 응력분담비와 격자형 개량체의 응력분담비를 서로 나누어 구조(격자형)변화에 따른 형상효과비를 산정하 였다.

Table 3. Stress distribution ratio for circle and grid forms (Improved soil-25 kPa)

As (%)	Stress (kPa)	n (Circle form)	n (Grid form)	Form effect ratio
11.5	10	1.75	1.31	0.75
	30	2.72	1.76	0.65
	50	2.43	1.7	0.70
35.0	10	3.17	3.39	1.07
	30	4.94	3.74	0.76
	50	4.07	3.12	0.77
61.3	10	1.83	2.74	1.50
	30	2.28	3.91	1.72
	50	2.23	3.41	1.53

Table 4. Stress distribution ratio for circle and grid forms (Improved soil-125 kPa)

As (%)	Stress (kPa)	n (Circle form)	n (Grid form)	Form effect ratio
11.5	10	3.38	3.36	0.99
	30	3.93	3.40	0.87
	50	3.61	2.89	0.80
35.0	10	12.37	13.77	1.11
	30	14.36	17.27	1.20
	50	13.51	14.2	1.05
61.3	10	9.50	9.43	0.99
	30	13.23	15.42	1.17
	50	12.48	16.2	1.30

그 결과(Table 3) 저강도(25 kPa) 저치환율(11.5%) 개량 체일 경우 격자형은 원형 개량체에 비해 응력분담비에 대한 형상효과비가 0.75, 0.65 및 0.70으로 원형 개량체에서 격자 형구조 보다 오히려 우수한 형상효과 결과가 나타났다. 또 한, 치환율 35.0%에서도 재하응력 30 kPa 이상일 때에는 0.76 및 0.77로 격자형 개량체가 구조형상학적으로는 불리 한 조건이라 할 수 있다. 이와 같이 개량체 강도가 과도하게 낮을 경우에는 저치환율로 격자형 개량체를 조성하는 것을 지양해야 할 것으로 판단된다.

Table 4는 개량체 강도가 125 kPa일 때의 형상효과비를 비교한 결과이다. 개량체를 격자형으로 조성하였을 경우, 저치환율(11.5%)을 제외한 치환율 35.0%와 61.3%의 격자 형 개량체는 형상효과에 따라 응력분담비가 최고 1.3배까지 증가하는 결과를 나타냈다. 따라서 격자형 개량체는 원형 개량체와 달리 취약한 전단면 극복을 위해 소정의 치환율 및 개량체 강도 조건을 만족해야 할 것으로 판단되며, 구조 형상 자체가 원형에 비해 격자형이 형상 역학적으로 더 복 잡하기 때문이며, 개량체 강도 증가가 불가한 저치환율일 경우에는 최소 단면 폭을 늘려 전단면을 보완해야 할 것으 로 판단된다. 개량체 강도가 가장 높은 250 kPa에서는 앞서 언급하였던 개량체의 취약한 전단면의 강도가 높아짐에 따라 응력재하에 따른 변형량 자체가 줄어들어, 응력의 집중도가 향상되는 것을 바탕으로 구조형상 효과비가 1.09~1.27 (Table 5)로 분포되었다.

결과적으로 개량체 강도와 치환율이 높을수록 원형 개량 체 보다 격자형 개량체의 응력분담비가 증가하는 경향을 나 타냄을 알 수 있다.

4.2 격자형 및 원형 개량체간의 침하량 비교·검토

실험결과 개량체의 강도별 침하량 발생은 재하응력이 증 가할수록 증가하였다. 따라서 격자형과 원형 개량체간의 구

Table 5. Stress distribution ratio for circle and grid forms (Improved soil-250 kPa)

As (%)	Stress (kPa)	n (Circle form)	n (Grid form)	Form effect ratio
11.5	10	9.76	10.91	1.12
	30	11.24	14.27	1.27
	50	10.71	11.74	1.10
35.0	10	16.79	18.69	1.11
	30	18.62	21.94	1.18
	50	17.07	19.81	1.16
61.3	10	14.27	15.61	1.09
	30	16.75	19.14	1.14
	50	16.04	19.46	1.21

조형상변화가 복합지반에 미친 침하특성의 영향을 파악하고자, Fig. 7과 같이 침하데이터를 각 응력재하에 따른 최종 침하량만으로 대표 데이터로 선정하여 플롯팅하였다. 또한, 원형대비 격자형 구조형상변화에 따른 침하 효과를 분석하고자, 원형 및 격자형 개량체간의 침하량의 비인 침하 저감 계수($\beta' = \frac{S_{grid}}{S_{circle}}$)를 산정하였다.

개량체 강도 25 kPa에서 격자형과 원형 개량체는 치환율이 증가할수록 침하량이 점점 감소하는 경향을 보였다. Table 6과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 응력분담비와 비슷한 경향으로 저치환율일 때 침하저감계수(β')는 1.0 이상으로 오히려 침하량이 증가하는 경향을 나타냈다.

그러나 고치환율(61.3%)일 때 침하저감계수(β')는 0.60~0.67로 약 40%의 침하저감 효과를 보였다. 이는 응력분담비 분석에서 언급했듯이, 고치환율은 원형 개량체에 비해 격자형 개량체의 불리한 전단면을 보완해 주기 때문에 전단변형

을 감소시키고, 이에 따라 응력집중계수 또한 증가하는 결과를 보였다.

이러한 이유로 원지반 점토에 적용된 응력이 줄어들어 결과적으로 복합지반의 전체 침하량이 감소하는 결과를 나타냈다. Fig. 8은 개량체 강도 125 kPa일 때의 원형 및 격자형 개량체 간의 침하량을 나타낸 것이다. 저치환율(11.5%)일 때 원형과 격자형 개량체는 치환율 35.0%, 61.3%와 비교하면 상대적으로 큰 침하분포경향을 보였다.

Table 7과 Fig. 8과 같이 125 kPa 강도의 격자형 개량체는 저항도인 25 kPa에 비해 구조형상(격자형) 변화에 따른 침하저감 효과가 증대되었다.

결과적으로 저치환율인 11.5%를 제외하고는 모든 침하저감계수(β')는 1.0 이하이다. 특히, 고치환율인 61.3%에서는 약 40%의 침하저감 효과를 보였으며, 중간치환율인 35.0%에서는 약 30%의 침하저감 효과가 있었다. 원형대비 격자형 개량체 침하저감계수의 응력재하에 따른 변화양상은 개

Table 6. Settlement for circle and grid forms (Improved soil-25 kPa)

As (%)	Stress (kPa)	Settlement of Circle form (mm)	Settlement of Grid form (mm)	Reduction Factor (β')
11.5	10	26	27	1.04
	30	47	50	1.06
	50	71	74	1.04
35.0	10	20	18	0.90
	30	42	44	1.05
	50	58	61	1.05
61.3	10	15	10	0.67
	30	35	21	0.60
	50	48	31	0.65

Table 7. Settlement for circle and grid forms (Improved soil-125 kPa)

As (%)	Stress (kPa)	Settlement of Circle form (mm)	Settlement of Grid form (mm)	Reduction Factor (β')
11.5	10	9	8	0.89
	30	25	25	1.00
	50	38	40	1.05
35.0	10	4	3	0.75
	30	10	7	0.70
	50	14	10	0.71
61.3	10	3	2	0.67
	30	8	5	0.63
	50	11	7	0.64

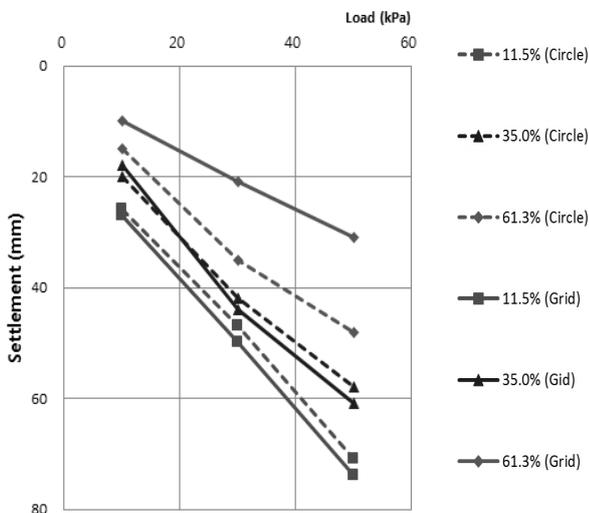


Fig. 7. Comparison of settlement for circle and grid forms (Improved soil-25 kPa)

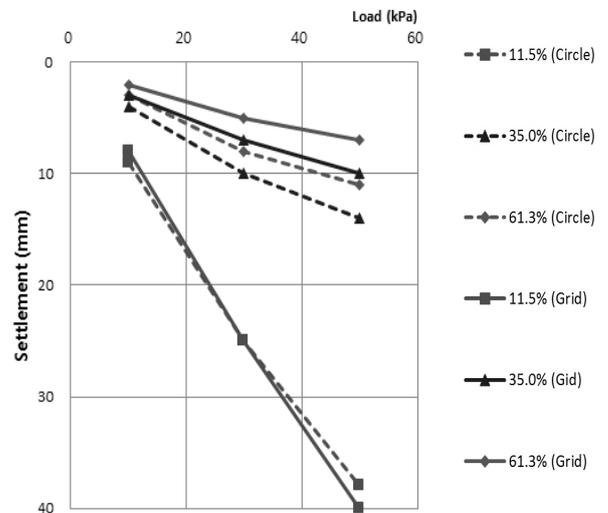


Fig. 8. Comparison of settlement for circle and grid forms (Improved soil-125 kPa)

량체 강도 25 kPa과 달리 치환율 35.0%에서 침하저감 효과가 증대되는 것으로 나타났다. 이는 재하응력이 클수록 응력집중 효과로 인하여 침하저감 효과가 증가한 결과이며, 따라서 격자형 개량체 강도 125 kPa일 때의 적정 치환율은 35.0% 이상으로 판단된다.

Fig. 9는 개량체강도 250 kPa인 고강도 격자형 개량체일 때 원형 개량체와 침하량 데이터를 나타낸 것이다. 다른 개량체 강도와 비교했을 때 250 kPa의 고강도 개량체인 경우 다소 불리한 치환율인 11.5%(상재응력-10 kPa)에서 격자형의 개량체는 5 mm의 침하량을, 원형 개량체는 7 mm 정도의 침하결과를 보였다. 이는 개량체 자체강도로 인해 점토부에 응력이 부담되는 것을 감소시킨 결과로 판단된다.

고강도 격자형 개량체일 경우 Table 8과 Fig. 9에서 알 수 있듯이, 모든 치환율에서 침하저감계수(β')의 값이 1.0 이하로 원형 개량체보다 격자형 개량체에서 침하저감에 효과가 있는 것으로 나타났다. 치환율별로 보았을 때 저치환율인 11.5%일 경우 약 20%의 침하저감 효과를 보였으며, 중간치환율인 35.0%에서는 약 35%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 고치환율인 61.3%의 같은 경우 침하저감계수(β')는 각각의 재하응력에 따라 1.00, 0.67 및 0.50의 결과로, 약 30%의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 원형 개량체와 격자형 개량체의 침하량이 1~4 mm 정도로 매우 작고, mm 단위로 측정함에 따라 침하저감 효과 분석 시 과대평가

할 요소가 있을 것으로 판단된다.

종합적으로 살펴볼 때, 격자형 개량체의 침하저감 효과는 응력분담비가 증가할수록, 구조형상 효과비가 증가할수록 침하저감계수(β') 또한 감소하여 응력-변형관계 이론 경향과 일치하는 결과를 보였으며, 이는 구조적으로 격자형이 원형보다 응력을 전이시키는데 유리한 구조형상임을 알 수 있다.

그 결과, 개량체에 응력이 더욱 집중하게 되고 이에 따라 점토부에는 응력을 덜 부담시키게 되어, 결국 점토와 개량체로 구성된 복합지반의 전체 침하량은 줄어들게 된다. 그러나 원형 개량체와 달리 격자형 개량체의 구조 특성상 단면 폭이 치환율에 따라 달라지며, 본 연구실험에 적용된 저치환율일 경우에는 최소 단면 폭이 0.7 cm로 전단에 매우 취약한 형상구조로 이뤄졌다. 따라서 격자형 개량체로 복합지반을 개량할 경우 전단파괴에 대한 취약 단면부를 고려하여 적정 치환율과 적정 개량체 강도를 선정해야 격자형 구조형상 효과를 이끌어 낼 수 있을 것으로 판단된다.

5. 수치해석

5.1 수치해석 개요 및 방법

본 연구에서 유한요소를 이용한 수치해석으로 실내 모형 실험에서 측정할 수 없는 심도별 응력 분포 및 응력분담비의 변화에 대한 분석에 활용하였으며, 이는 격자형 개량체일 경우 원형 개량체 보다 상대적으로 전단 단면이 불리하므로 심도별 응력분포도는 중요할 것으로 판단된다. 따라서 국내에서 일반적으로 3차원 해석에 많이 이용되고 있는

Table 8. Settlement for circle and grid forms (Improved soil-250 kPa)

As (%)	Stress (kPa)	Settlement of Circle form (mm)	Settlement of Grid form (mm)	Reduction Factor (β')
11.5	10	7	5	0.71
	30	17	15	0.88
	50	26	23	0.88
35.0	10	3	2	0.67
	30	6	4	0.67
	50	9	6	0.67
61.3	10	1	1	1.00
	30	3	2	0.67
	50	4	2	0.50

Table 9. Applied integers for numerical analysis

Division	E (kPa)	ν	Unit weight (kN/m ³)	Strength (kPa)
Sand	10,000	-	18.0	-
Improved soil	2,615.69	0.30	15.35	25
	28,776.72	0.30	14.85	125
	50,597.36	0.30	14.42	250
Clay	1,000	0.35	16.12	5

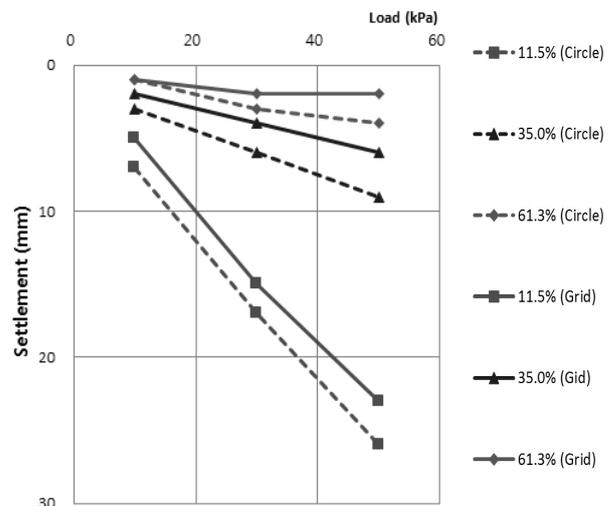


Fig. 9. Comparison of settlement for circle and grid forms (Improved soil-250 kPa)

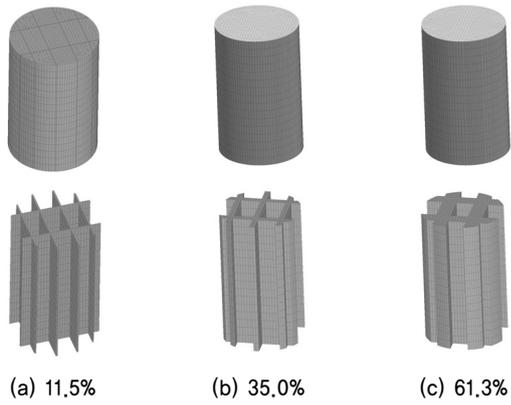


Fig. 10. Modeling composite ground with replacement ratios

VisualFEA/GEO를 이용하여 실내 모형실험에서 적용한 모델을 적용해 실내 모형실험의 한계인 심도 변화에 대한 응력분포와 응력분담비에 대한 결과를 수치적으로 모델링하여 검토하였다.

5.2 수치해석 결과 및 분석

본 연구의 수치해석은 실내시험과 같이 총 9가지 케이스에 대하여 같은 조건으로 수행하였다. 실내 모형토조실험으로 실시할 수 없는 심도별로의 전단, 응력분포와 응력분담비 측정을 목적으로 각각의 케이스에 대해 개량체 강도별 및 치환율, 최종응력재하에 따른 개량체와 점토지반에 분포하는 심도별 응력분포와 응력분담비를 해석하였으며, 응력분담비는 각각의 결과 값을 실내 모형실험 결과와 비

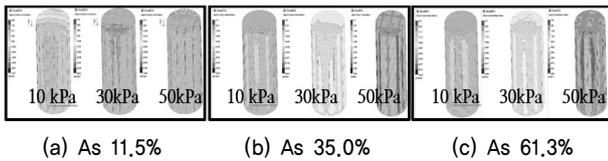


Fig. 11. FEM results with strength 25 kPa of improved soil

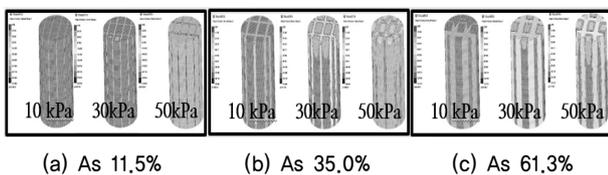


Fig. 12. FEM results with strength 125 kPa of improved soil

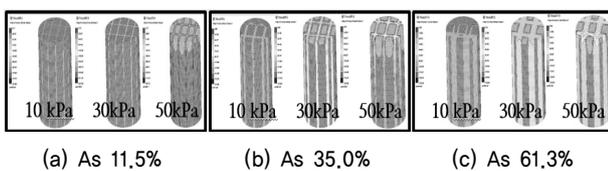


Fig. 13. FEM results with strength 250 kPa of improved soil

교하였다.

격자형 개량체와 점토지반 상단에 발생하는 응력분포와 그에 따른 개량체 파괴현상 혹은 변형을 예측할 수 있으며, 응력전이 파라미터인 응력분담비를 산정할 수 있다. 따라서 수치해석은 실내 모형실험과 같은 조건에서 수행하였기 때문에 응력분포와 응력분담비를 비교할 수 있으며, 실내시험을 보완하기 위해 심도별 응력분포와 응력분담비를 모델링하였으며 응력분포도 결과는 Fig. 11~13과 같다.

5.2.1 개량체 강도 25 kPa 분석

저강도체인 25 kPa 개량체를 수치해석에 의해 심도별 응력분포와 비교해 보면, 실내 모형실험 값이 72~90 kPa(치환율 11.5%(75 kPa), 35.0%(90 kPa), 61.3%(72 kPa))인 반면, 수치해석 값은 약 55~63 kPa의 응력분포를 보였다. 수치해석 값이 작게 산정된 이유는 실내시험의 경우 응력계를 개량체 위에 설치하는데, 이 응력계 바로 위에 실험 조건상 배수를 허용하기 위한 샌드매트를 포설하여 재하응력에 따라 배수를 허용하였다. 배수의 허용이 곧 침하 변형을 발생시키게 되어, 점토부는 상대적으로 개량체 보다 변형이 더 크게 발생하고, 시간에 따른 재하응력이 개량체에 더 집중하는 현상을 나타냈다. 그 결과, 수치해석의 결과는 실내시험과 비교해 전체적으로 약 30~40% 작게 산정된 결과를 보였다.

유한요소법을 이용한 수치해석은 심도별의 응력상태를 구현하는데 매우 유용하다. 이를 이용하여 격자형 개량체의 형상 특성상 불리한 전단면에 대해 치환율이 어떠한 영향을 미칠 수 있는지 쉽게 파악할 수 있게 된다. Fig. 14와 같이, 치환율 11.5%에서의 심도 약 20~30 cm에서 응력분담비가 심도에 따라 일정하게 유지하다가 급격히 떨어지는 것은, 이 부분에서 개량체가 전단 혹은 변형에 따른 결과라 판단된다. 따라서 격자형 개량체를 길이 방향(z)으로 볼 때, 응력이 집중되는 곳은 개량체의 중간 부분으로 판단된다.

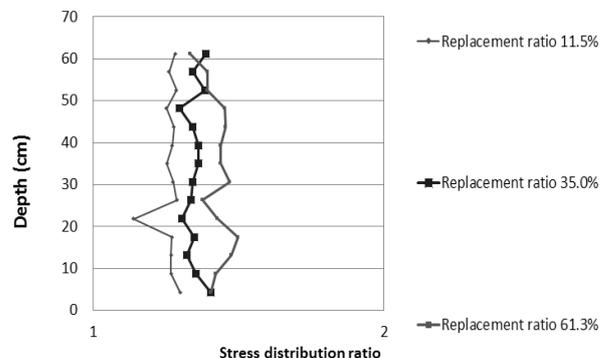


Fig. 14. Stress distribution ratio with depth for improved soil strength 25 kPa

5.2.2 개량체 강도 125 kPa 분석

중간 강도(125 kPa) 개량체의 응력분포는 실내시험의 응력 분포(약 80~125 kPa)와 비슷한 양상을 보였으나, 점토부(실내시험 5~41 kPa) 응력분포가 실내시험 배수 특성상 배수에 의한 변형으로 작게 산정되어, 결과적으로 수치해석의 점토부가 약 10% 정도 크게 산정된 결과를 나타내었다. 중간강도 개량체 역시 저치환율인 11.5%의 심도 20~30 cm에서 전단 파괴가 발생하였다. 이에 따라 점토부의 응력 또한 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 15는 125 kPa 개량체의 심도별 응력분담비를 나타낸 것으로 심도 변화에 따른 응력분담비는 다소 큰 변화가 있으며, 이는 개량체와 점토지반의 강성차이에 의하여 개량체에 작용하는 응력이 더 크기 때문으로 판단된다.

수치해석에 의한 심도별 응력분담비 또한 실내시험과 같이 치환율 35.0%에 가장 큰 응력분담비를 확인할 수 있다. 이는 25 kPa 개량체와 비교하여 응력분담비가 증가함은 상대적으로 개량체의 압축강도가 높아 개량체에 작용하는 응력이 증가하였고, 이에 개량체가 재하응력에 충분히 저항하였기 때문으로 판단된다. 따라서 전단변형이 없는 상태에서 격자형 개량체는 복합지반조성에 효과적인 것으로 판단할 수 있다.

5.2.3 개량체 강도 250 kPa 분석

전체적으로 개량체부는 치환율에 따른 면적의 영향을

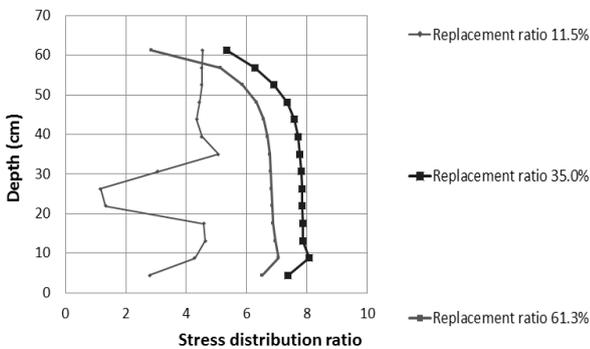


Fig. 15. Stress distribution ratio with depth for improved soil strength 125 kPa

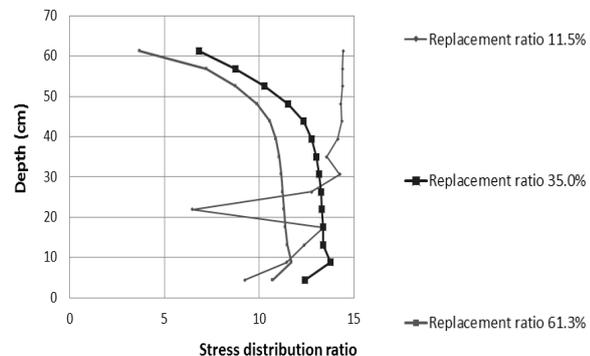


Fig. 16. Stress distribution ratio with depth for improved soil strength 250 kPa

점토부는 개량체 강도의 특성을 반영한 심도별 응력분포 경향을 나타내고 있다.

Fig. 16과 같이, 고강도인 250 kPa 개량체에 대한 수치해석결과 치환율(11.5%) 개량체가 응력개념(P/A)에 따라 심도별로 큰 응력분포를 보였으나, 역시 20~30 cm 구간에서 전단파괴가 일어난 것으로 보였다. 본 연구의 실내 시험분석결과와 같이 수치해석 상의 심도별 분석에서도 격자형 개량체는 치환율에 따른 불리한 전단면이라는 형상 특성상 변형이 발생하며, 결국 응력분담비가 감소하게 된다. 따라서 저치환율(11.5%) 격자형 개량체의 활용은 지양해야 할 것으로 판단된다.

5.3 수치해석에 의한 원형 및 격자형과 실내시험 비교

Table 10은 수치해석에 의한 원형 및 격자형 개량체의 응력분담비와 실내시험에 의한 응력분담비를 최종재하응력하에서 치환율에 따라 플롯팅하였다. 우선, 실내시험과 수치해석은 개량체 강도에 따라 약 10~35%의 차이가 생기는데, 이는 실내시험 배수조건 구현에 따라 포설된 샌드매트가 응력계 바로 위에 설치되어, 상대적으로 빠른 배수가 점토부의 빠른 변형을 발생시켜 개량체에 응력이 더 집중되고, 결과적으로 응력분담비가 더 크게 산정되는 결과를 보인 것으로 판단된다. 또한, 수치해석과 실내시험결과에서와 같이 저치환율(11.5%)과 중간치환율(35.0%) 구간에서 응력분담비가 급격히 증가하는 공통경향을 확인하였다. 원형과 격자형 저강도 개량체일 때 응력분담비 증가 효과 즉, 형상 변화효과가 거의 없으나 개량체 강도가 커짐에 따라 응력분담비 형상 효과는 점점 커지는 것으로 개량체의 구조형상은 응력분담비에 큰 영향을 미치는 것임을 알 수 있다.

수치해석 결과, 치환율이 높은 경우 대부분 개량체가 전체하중을 받고 있는 것으로 산정되었으며, 이에 따라 응력분포 및 응력분담비도 변화되어 치환율과 개량체 강도가 증가할수록 응력분담비도 증가하였다. 그러나 원형 개량체와 달리 격자형 개량체에 저치환율 적용 시 개량체의 폭 등 불

Table 10. Results of stress distribution ratio by numerical and laboratory test

Division	As (11.5%)			As (35.0%)			As (61.3%)		
	25 kPa	125 kPa	250 kPa	25 kPa	125 kPa	250 kPa	25 kPa	125 kPa	250 kPa
Test (grid)	1.70	2.89	11.74	3.12	14.20	19.81	3.41	16.20	19.46
FEM (grid)	1.25	5.06	12.0	1.36	7.77	14.0	1.44	7.88	13.0
FEM (circle)	1.41	4.60	11.61	1.52	6.79	11.19	1.56	6.02	9.59

리한 전단면을 고려해야 할 것으로 판단되며, 단순히 개량체 강도만으로 복합지반 기초 안정성을 평가해서는 안 될 것으로 판단된다.

6. 결 론

개량체 구조형상 변화에 따른 역학 및 침하특성을 연구하기 위해 실내 토조실험에서 수행하였으며, 선행(원형 개량체)연구와 같은 조건으로 개량체강도를 저강도, 중간강도, 고강도의 3가지 강도별로 선정하였다. 또한, 치환율은 저치환율, 중간치환율, 고치환율을 적용한 격자형의 개량체를 제작하여 총 9 케이스에 대하여 10, 30 및 50 kPa 재하응력을 가할 시 개량체와 점토지반에 작용하는 응력분포와 응력분담비, 침하량 등의 결과로부터 각각의 역학 및 침하 특성관계를 분석하였다. 그리고 실내 토조실험에서 실내시험 여건상 측정이 어려운 심도별 응력분포는 유한요소해석을 실시하여 보완하였다. 실내 실험과 유한요소해석 결과를 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 격자형 개량체와 점토로 복합지반을 조성하고 실내모형실험을 실시한 결과, 각 개량체 강도별 하중분담비는 개량체의 강도와 치환율이 증가할수록 개량체에 작용하는 하중은 점토지반에 작용하는 하중에 비해서 크게 증가하였다. 복합지반에서의 응력 분포 및 응력분담비 관계는 치환율에 따른 면적비와 개량체 강도에 따라서 변하며, 추가적으로 외력에 의한 개량체 변형에 따라 응력분담이 결정된다. 결과적으로 전단변형에 취약한 저치환율을 제외한 중간치환율에서 재하응력에 따라 격자형 개량체의 응력분담 효과가 크게 상승하였고, 상대적으로 점토부에 작용하는 응력분담은 감소하였다.
- (2) 응력분담비는 치환율에 따른 면적비와 개량체 강도에 따라 결정되며, 재하응력조건에 따라 조정되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구결과 중간치환율 35.0%, 격자형 개량체 최대강도 250 kPa에서 30 kPa 응력재하 시 최대 응력분담비는 21.94이며, 현장 시공성 및 시멘트량 등의 경제성을 고려한 최적의 응력분담비는 중간치환율 35.0%에서 격자형 개량체 중간강도인 125 kPa으로 판단된다(10, 30 및 50 kPa 단계별 응력재하 시 응력분담비 13~17).
- (3) 수치해석으로 심도별 응력분포와 응력분담비를 해석한 결과, 저치환율 조건일 때 응력 집중구간 특히, 불리한 최소전단면(폭 0.7 cm)에 전단변형이 발달하였고, 이에 응력분담비는 감소하는 경향을 확인하였다. 실내시험 또

한 저치환율 개량체를 실험종료 해체 시에 확인해본 결과 전단파괴가 발생함을 확인하였다. 결과적으로 격자형 개량체로 복합지반을 조성할 경우 단면 특성상 저치환율인 격자형 개량체 적용은 지양해야 할 것으로 판단된다.

- (4) 격자형 개량체는 형상자체가 개량체를 서로 일체화되어, 재하응력 또는 외력에 반응하는 복합지반이 받는 응력이 원형에 비해 전체 개량체로 잘 전이됨으로써 응력분담비는 증가한다. 그 결과, 응력분담비의 증가에 따라 원지반 점토에 비해 강성이 큰 개량체로 응력이 더욱 집중되어, 재하응력 혹은 외력에 의한 전단파괴가 일어나지 않는 한 복합지반의 전체침하량은 감소하였으며, 형상변화에 따른 침하저감계수(β')는 재하응력, 치환율 및 개량체 강도에 따라 약 0.7~0.9로 침하저감 효과를 보였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

1. Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N. and Balasubramaniam, A. S. (1996), Soft ground improvement in lowland and other environments, ASCE press, pp. 234-304.
2. Korea Ocean Research & Development Institute (2001), Design and construction guidelines of sand and gravel compaction piles and piles, Ministry of Oceans and Fisheries, pp. 19-27 (in Korean).
3. Murayama, S. (1962), A consideration on vibro-compozer method, Mechanization of Construction Works, No. 150, pp. 10~15 (in Japanese).
4. Nakayama, J. and Ueda, S. (1967), On measure result of stress concentration ratio of composite ground, The 22th Conf. of JSSMFE, pp. 97~104 (in Japanese).
5. Oh, P. J. (2012), A study on mechanical characteristics of composite ground by the strength variation of improved materials, University of Seoul, Ph D. dissertation, pp. 32~33, 225~226.
6. Priebe, H. (1976), Estimating settlements in a gravel column consolidation soil, Die Bautechnik 53, pp. 160~162.
7. Shin, H. Y. (2005), Analysis on the behavior of composite ground reinforced by sand compaction pile with low area replacement ratio, Chungang University, Ph D. dissertation, pp. 32~33, 225~226 (in Korean).
8. Shin, I. S. (2008), Analysis on the behaviour characteristics of the soil foundation with the arrangement type of deep cement mixing, Chonnam National University, Master's thesis, pp. 51~52 (in Korean).
9. Van Impe, W. F. and De Beer, E. (1983), Improvement of settlement behavior of soft layers by means of stone columns, Proc. 8th European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, Vol. 1, pp. 309~312.
10. Yoshikuni, H. (1979), Design and construction management of vertical drain method, Soil and Foundation Series, Gihoudou, pp. 208~210.