

# 지반보강용 그라우팅 말뚝의 응력분담비에 대한 수치해석적 연구

## Numerical Study on the Stress-distribution Ratio of Grouting Pile for Reinforced Ground

이 경 주<sup>1</sup> Yi, Gyeong-Ju 이 준 규<sup>2</sup> Lee, Joon-Kyu  
張 維 維<sup>3</sup> Zhang Weiwei 송 기 일<sup>4</sup> Song, Ki-Il

### Abstract

Underground structures, such as compacted sand piles applied as soft ground countermeasures, are analyzed for settlement and stability by the composite ground design method. The basic principle of the composite ground design method is the arching effect. The reinforcing effect of the pile is evaluated as the stress-distribution ratio. When applying grouting piles with elastic properties using the ground reinforcement method, the existing stress-distribution ratio was only considered when the pile was installed. This study shows that the method of applying the stress-distribution ratio applied in previous studies should be changed when the ground reinforcement pile is installed at an arbitrary location in the ground without raising it to the ground surface. When high strength jet routing is applied, the stress-distribution ratio ( $n$ ) to the in-situ ground generally ranges from 30 to 50. However, if the pile is located far from the surface and the depth goes down to the boundary depth of the stress sphere, the stress-distribution effect rapidly decreases, and the stress-distribution ratio converges to 1.5.

### 요 지

연약지반 대책공법으로 적용되는 다짐모래말뚝과 같은 지중구조물은 주로 복합지반 설계법에 의해 침하 및 안정성을 분석한다. 복합지반 설계법의 기본원리는 아칭효과이며 말뚝의 보강효과는 응력분담비로 평가한다. 탄성적 특성을 갖는 그라우팅 말뚝을 지반보강공법으로 적용할 때 기존의 응력분담비 평가는 말뚝이 지표까지 설치되어 상재하중이 말뚝과 원지반에 같이 직접 재하되는 경우만을 고려해 왔다. 본 연구에서는 지반보강 말뚝의 설치를 지표까지 올리지 않고 지중 어느 위치에서 마감할 때에는 지금까지의 연구들에 의해 적용된 응력분담비 적용 방법이 달라져야 한다는 것을 보여주었다. 고강도 Jet grouting이 적용되었을 때 원지반에 대한 그라우팅 말뚝의 응력분담비( $n$ )는 통상 30~50 범위의 값을 적용한다. 그러나 이는 지표까지 말뚝이 놓이는 경우이고 말뚝 상단의 위치가 지표로부터 멀리 깊게 위치될 경우 응력분담 효과가 급격히 저감되며 응력구(stress bulb) 경계가 되는 깊이부터는 정량적 값 1.5에 수렴했다.

**Keywords :** Ground-aching effect, Grouting pile, Jet-grouting method, Soft ground, Stress-distribution ratio

1 정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정, 에스큐엔지니어링 전무 (Member, Ph. D Student, Dept. of Civil Engrg, INHA Univ. / SQ Engineering, Executive Managing Director)

2 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg, University of Seoul)

3 비회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정 (Ph. D Student, Dept. of Civil Engrg, INHA Univ.)

4 정회원, 인하대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg, INHA Univ., Tel: +82-32-860-7577, [ksong@inha.ac.kr](mailto:ksong@inha.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

연약지반은 통상 재료적 측면에서는 느슨한 모래나 함수율이 높은 점성토 지반을 지칭하며 이를 기초지반으로 할 때 상부 하중을 지지할 수 없어 안정과 침하의 문제를 발생시킨다. 이때 적용할 수 있는 연약지반 대책 공법은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 상부하중 조절, 지반개량, 지중 구조물 설치가 연약지반 대책공법의 세 가지 범주라 할 수 있다. 연약지반에 지중 구조물을 설치하는 공법은 대표적으로 말뚝을 들 수 있다. 여기에는 일반적으로 구조물로 분류되는 말뚝기초도 포함시킬 수 있다.

본 연구는 이와 같은 연약지반 대책공법 중 그라우팅으로 조성하는 말뚝공법을 대상으로 하고 있다. 그라우팅 공법을 연약지반 대책공법으로 활용할 경우 고결공법 같은 지반개량이나 말뚝과 같은 지중 구조물 설치공법 두 종류로 분류된다. 지중말뚝 형식의 연약지반 대책공법은 모래다짐말뚝공법(Sand compaction pile)과 쇄석다짐말뚝공법(Gravel compaction pile) 등이 대표적으로 활용되었다. 국내의 경우 연약지반 내에 지반보강 말뚝이 설치된 지반의 침하와 안정에 대한 검토를 수행할 경우 통상 지반개량 개념으로 접근하여 말뚝과 원지반의 강도를 평균해서 적용하는 복합지반 이론을 적용하는 설계법이 “항만 및 어항설계 기준” 등에 제시되어 있다(항만 및 어항설계기준(2014) P.598). 그라우팅 말뚝이 모래나 쇄석 등 자연재료와의 확연한 차이는 강성

이 상대적으로 크고 등방, 탄성적 거동 특성을 갖는다는 것이다. 그럼에도 불구하고 그라우팅 말뚝에도 대체로 복합지반 이론을 적용하는 것에 대한 검증이 없었다.

아칭효과(arching effect)는 복합지반 설계법의 이론적 근거이고 말뚝과 같은 지반 개량체가 지반을 보강하는 기본원리이다. 본 연구는 그라우팅 말뚝이 연약지반 대책공법으로 활용될 경우의 지반보강 메커니즘과 지반보강 기능을 수행하기 위한 조건을 수치해석적 방법으로 검증한다. 이를 위해 말뚝의 아칭효과 특성을 확연하게 파악하기 위한 장치로 그라우팅 말뚝으로 보강된 원지반과 상재하중이 작용하는 성토체 사이에 비교적 단단한 지표층인 하중전달층을 도입하였다(Fig. 1). 하중전달층은 그 하부의 연약한 지층에 설치된 지반보강 말뚝의 아칭효과가 발현되는 층이다. 본 연구는 지반보강 말뚝의 강성, 하중전달층의 강도 및 두께 변화 그리고 상재하중의 크기 변화를 조합하여 그라우팅 말뚝의 지반보강 메커니즘을 수치해석으로 파악한다.

Fig. 2는 연약지반 대책공법으로 지반보강 말뚝이 설치된 일반적인 단면으로 이와 같이 지중에 지반보강 말뚝이 적용될 때 말뚝 재료로 모래나 쇄석 등이 사용되는 경우와 고강도 그라우팅이 사용되는 경우의 보강지반 거동은 달라진다. 그러므로 말뚝 재료를 탄성적 재료로 모델링할 것인지 아니면 탄소성 재료로 간주할 것인지에 따라 보강지반의 거동 특성 결과도 달라진다. 또한 말뚝 재료의 강도의 크기에 따라 원지반과 지반보강용 말뚝에 작용되는 응력 분담비도 달라진다. 그러므로 이

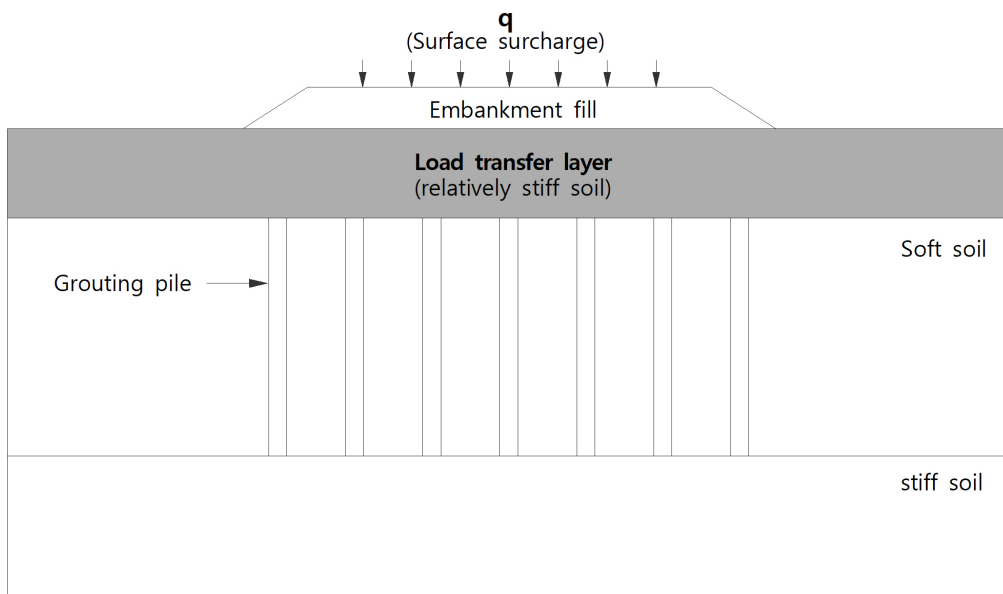


Fig. 1. Ground reinforcement pile application model with load transfer layer

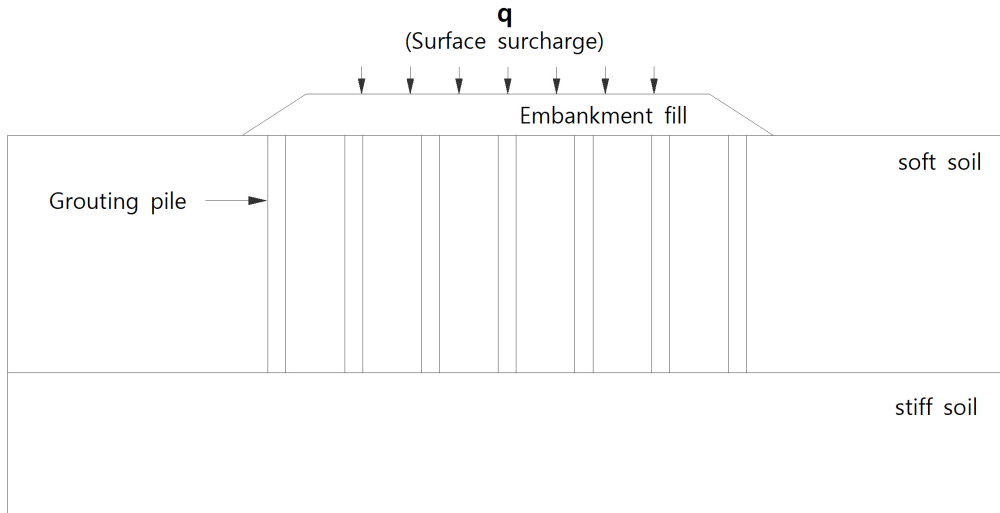


Fig. 2. Typical model with a ground reinforcing pile method

러한 차이점을 고려하지 않고 지반보강용 말뚝이 설치된 범위의 연약지반에 대해 말뚝의 강도, 크기 그리고 간격을 고려해 원지반과의 평균적 강도정수를 일괄적으로 적용하는 방식의 복합지반 이론은 지반보강용 말뚝으로 보강된 연약지반의 안정과 침하에 대해 예상과 다른 결과가 발생될 수 있다.

지반 아칭이론에 근거한 복합지반 거동과 특성에 대한 연구는 연약지반 대책공법의 일환으로 적용하고 있는 다짐모래말뚝공법과 다짐쇄석말뚝공법 등을 통해 그동안 꾸준히 연구되어왔다(Baumann & Bauer, 1974; Alamgia와 Miura, 1997; Barksdale과 Bachus, 1973 등). 하지만 이러한 연구들은 모두 Fig. 2와 같은 일반적 모델을 주 대상으로 하고 있고 상재하중과 보강지반 사이에 하중전달층이 있는 다층지반일 경우의 연구는 없었다. 본 연구는 Fig. 1과 같이 하중전달층이 있는 조건에서 지반보강 말뚝이 설치된 형상 그대로를 모델링하고 보강지반의 거동 연구에 영향을 줄 수 있는 하중전달층의 물성치와 상재하중의 변화를 통한 매개변수 연구와 하중전달층의 두께와 같은 기하학적 특성을 변수로 그 영향성을 분석하는 예민성연구 방법을 통해 2차원 평면 변형 조건의 수치해석 방법으로 실제적 거동 특성을 연구하였다.

그라우팅공법은 통상 지중에 원주형으로 설치되는데 말뚝의 강성이 원지반에 비해 매우 큰 경우 말뚝을 구조체로 보아 하부구조물로 취급하여 모든 하중을 말뚝이 지지하는 것으로 설계하게 된다. 하지만 대부분 지반보강용으로 지중에 그라우팅 말뚝을 설치할 경우 말뚝의 강도는 원지반 보다 월등히 우월하지는 않다. 하부구조

물로서의 콘크리트말뚝의 강도는 통상 24MPa 정도의 강도를 갖지만 지반보강 말뚝은 고압분사공법으로 계획할 경우에 4~5MPa를 설계기준 강도로 한다. 원지반과 시멘트를 혼합하는 교반식(DCM)은 그보다 작은 2.0MPa 수준의 비교적 저강도를 설계기준 강도로 계획한다. 원지반과 지반보강 말뚝은 상재하중에 대해 상호 영향을 일으키며 지중에서 각기 다른 응력을 일으킬 것이다. 그 상호 거동은 지층 구조와 같은 기하학적 형상이나 말뚝과 원지반의 강도 그리고 상재하중의 크기 등의 변화에 따라 다양하게 나타날 것이다. 본 연구는 비교적 상층이 단단한 지층을 형성하고 있어 그 하부까지만 지반보강 말뚝이 설치되는 경우를 가정하여 말뚝과 원지반의 상호 거동 특성을 연구한다. 그리고 이러한 경우에는 복합지반 설계법을 적용할 수 없음을 보여준다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 복합지반 이론

대부분의 그라우팅공법에 의한 지반보강 공법은 일정 간격의 원주형으로 계획된다. 말뚝의 배치가 원주간 중첩율이 높은 경우에는 지중벽체로, 원주형 개량체 지름 이상의 간격일 경우에는 단일말뚝으로 분류한다. 본 연구대상은 단일말뚝형 지반보강 말뚝을 대상으로 한다.

복합지반 설계법은 보강된 지반 위에 하중이 재하될 경우, 원지반과 지반보강 말뚝의 물리, 역학적 성질이 달라 각각 분담하는 응력이 다르고 강성이 큰 말뚝 쪽으로 응력이 집중된다. 이로 인해 원지반에 부담되는 응력

이 감소하며 침하량이 전체적으로 감소하게 된다. 복합지반 설계법은 아래의 이론식을 통해 복합지반을 구성하는 보강체와 원지반 각각에 부담되는 응력을 산정한다. Fig. 3과 같이 평균응력( $\sigma$ )이 재하 되면 지반반력으로 말뚝에  $\sigma_p$ , 점토에  $\sigma_c$ 의 응력이 발생하고 각각의 면적에는  $A_p$ ,  $A_c$ 의 범위 내에서 응력이 일정하다고 가정한다.

$$\sigma \times A = \sigma_p \times A_p + \sigma_c \times A_c$$

여기서, 응력분담비( $n = \sigma_p / \sigma_c$ )를 이용하여 식을 변형하면

$$\begin{aligned} \sigma \times A &= n \times \sigma_p \times A_p + \sigma_c \times A_c = \sigma_c (n \times A_p + A_c) \\ \sigma_c / \sigma &= A / (n \times A_p + A_c) = 1 / ((n-1)a_p + 1) = \mu_c \\ \sigma_p / \sigma &= nA / (nA_p + A_c) = n / ((n-1)a_p + 1) = \mu_p \end{aligned}$$

여기서,  $\mu_c$  : 응력감소계수,  $\mu_p$  : 응력집중계수,  $a_s$  : 치환율( $A_p/A$ )

따라서 원지반의 응력은  $\sigma_c = \mu_c \times \sigma$ 로 보강체의 응력은  $\sigma_p = \mu_p \times \sigma$ 로 나타낼 수 있다. 응력분담비(n)는 지중보강용으로 사용하는 말뚝 공법별 Table 1과 같은 값을 통상 적용한다. 현재 모래다짐말뚝의 응력분담비(n)에 대한 연구는 많은 사례 및 자료가 있으나 심층혼합공법 및 고압분사공법 등과 같은 지반보강 말뚝을 활용한 공법에 대한 연구 자료는 부족한 편으로 대부분 대상 시설물에 대한 수치해석과 기존 자료 그리고 모형실험 등을 실시하여 적용하고 있다.

## 2.2 아칭 이론

아칭효과(arching effect)는 지반 내에서 변위부의 토압이 정지부로 이동하는 토압 재분배 효과를 일컫는다.

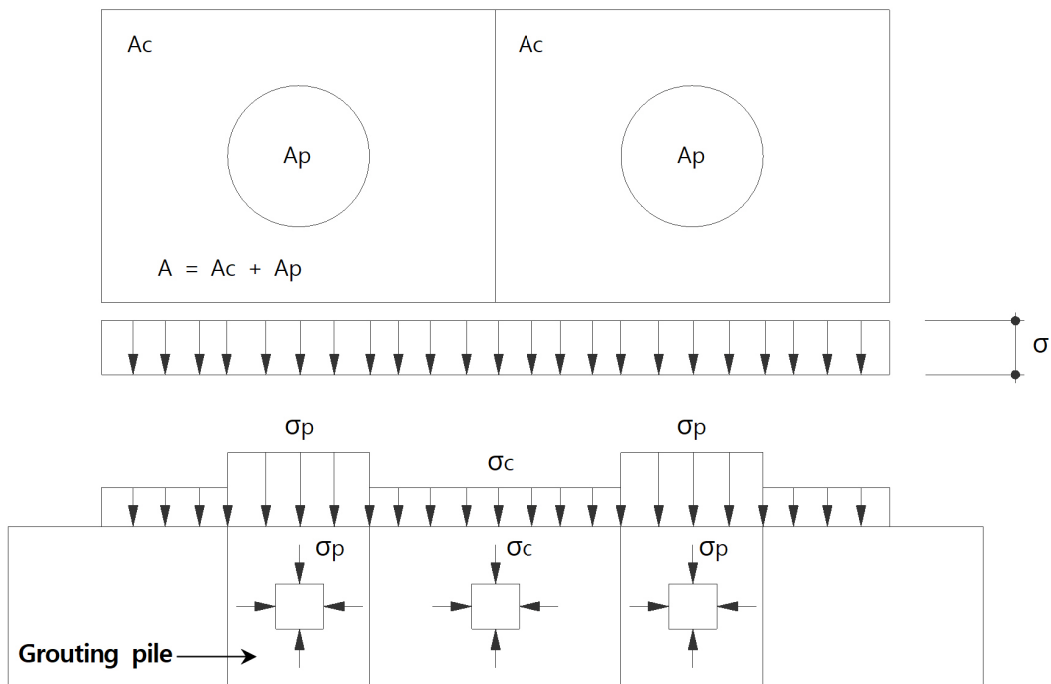


Fig. 3. Stress diagram acting on composite ground

Table 1. Stress distribution ratio by construction method

Characteristic		Sand compaction pile	Stone column	Deep cement mixing
Ratio of stress distribution (n)	Low-strength reinforcement	$a_s \leq 0.4 : n = 3$ $0.4 \leq a_s \leq 0.7 : n = 2$ $0.7 \leq a_s : n = 1$	5~10	10~20
	High-strength reinforcement	Jet-grouting : 30~50		

<sup>†</sup> $a_s$  : Replacement rate (a ratio that replaces the ground with a grouting material)

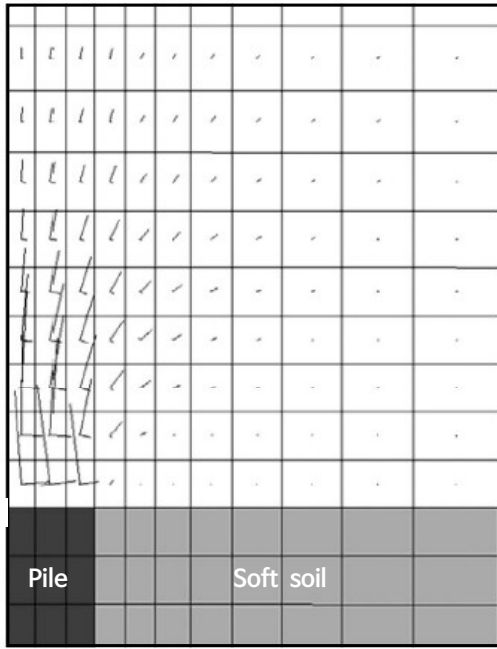


Fig. 4. Principal stress tensor around the pile head in the embankment fill The long and the short lines represent the major and minor principle stresses (Oriane Jenck et al., 2009, "Three Dimensional Numerical Modeling of a Piled Embankment", International Journal of geomechanics)

이는 지중에 매입된 재료와 지반 간의 강성 차이에 의해 발생되며 변위부에서는 토압이 감소하고 정지부에서는 토압이 증가한다. Fig. 4는 위와 같이 지중에 매입된 말뚝 상단에서 발휘되는 아칭현상을 수치해석 결과도의 응력 벡터를 통해 시각적으로 보여주고 있다. 원지반과 그라우팅 말뚝 조합과 같이 서로 다른 강성의 재료로 구성된 지반을 형성하고 있으면 지반 상부에서 작용되는 하중에 의해 발생하는 응력은 비교적 강성이 강한 지반보강 말뚝으로 집중적으로 이동되어 전체 침하량이 크게 감소된다.

### 3. 그라우팅 말뚝의 지반보강 효과에 대한 수치해석 연구

#### 3.1 모델링 형상 및 분석위치

본 연구의 지반모델은 비교적 단단한 모래층이 T의 두께로 지표층을 이루고 그 아래 15.0m 층후의 연약 점토층이 있으며 최하단에 실트층이 있는 원지반을 가정

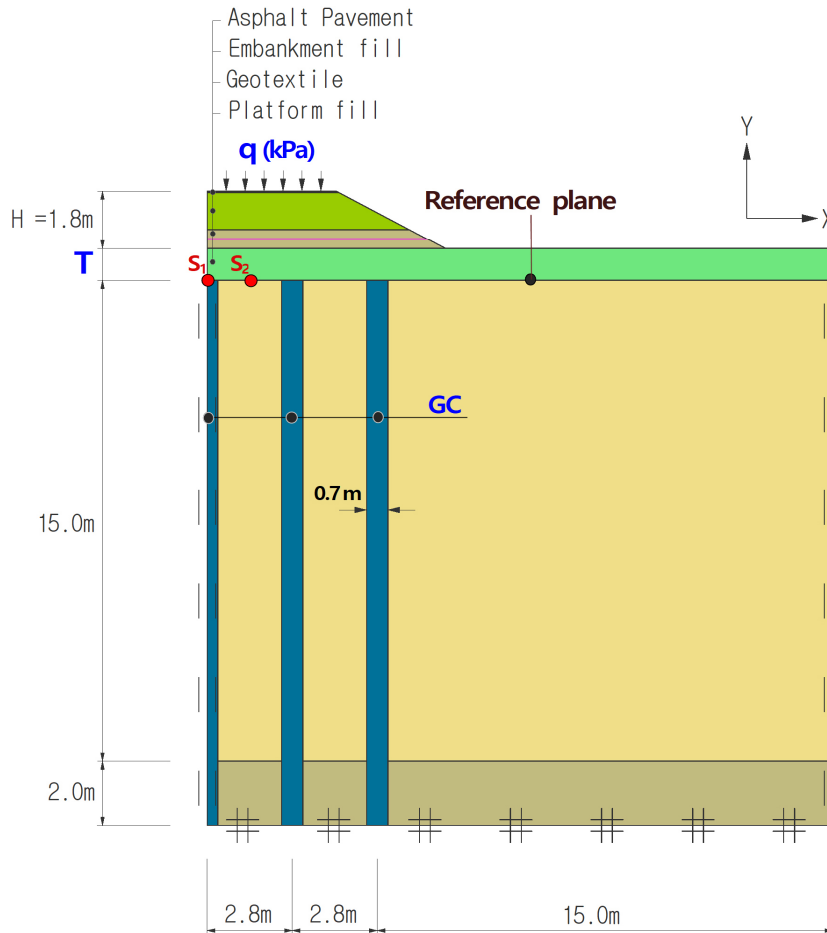


Fig. 5. Numerical modeling of study subjects

하였다. 두께 T의 모래층 위로 제방형 성토체를 높이(H) 1.8m로 쌓은 형상을 연구의 모델 형상으로 가정하였다. 그리고 성토체 및 상재하중에 대한 연약지반 대책공법으로 지반보강 그라우팅 말뚝을 연약한 점토층 지중에 설치하였다.

위의 모델링을 이용해 Table 2, 3과 같이 하중전달층의 역할을 하는 상부 원지반 모래층의 내부마찰각( $\phi$ ), 두께(T) 그리고 상재하중(q) 값들과 보강말뚝의 강성을 변수로 하여 각 변수들의 상호 조합들을 통해 기준면(Reference plane) 상에 나타나는 지반보강 그라우팅 말뚝과 원지반의 침하경향과 응력분포 변화를 검토한다. 각 변수들의 조합에 의해 기준면(reference plan) 상의 중앙부 그라우팅 말뚝 상단 S<sub>1</sub>과 인접한 중앙부 원지반 S<sub>2</sub>에 발생하는 침하량과 응력값들을 분석하여 야칭현상의 효과인 응력분담비에 대한 결론을 도출할 것이다. 본 연구는 지반보강 그라우팅 말뚝의 강성 변화에 따른 보강된 지반의 거동 특성과 말뚝과 주변 원지반의 하중분담율을 연구 대상으로 하므로 그라우팅 말뚝은 3가지로 강성의 변화를 주었고 GC로 표기하였다. GC-A는 문헌 사례(Table 2)를 적용해 Soil types - Clay의 Unconfined compressive strength(MPa) 상한값보다 조금 큰 7MPa를 적용하였다. 그리고 그라우팅 말뚝의 상대적 강성을 높여 GC-B와 GC-C는 각각 20MPa과 40MPa의 강

성을 갖는 말뚝으로 가정하였다. Jet grouting column's Elastic modulus는 여러 문헌사례가 있으나 본 연구에서는 그라우팅 말뚝의 상대적 강성차이에 따른 침하와 응력비에 대한 경향성만을 고려하므로 일반적으로 적용하는 아래의 Unconfined compressive strength -Elastic modulus 관계식을 참고하였다.

Jet grouting column's Elastic modulus

$$E_c = 0.043 W_0^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \text{ MPa}$$

$W_0$  :  $\gamma$  of the Jet grouting column

말뚝의 재료 모델은 통상 Mohr-Coulomb 모델을 적용하지만 Jet grouting column을 평면변형 조건의 탄성적 거동을 하는 지반보강 말뚝으로 가정하여 등가선형탄성(Elastic) 모델로 적용했다. 이는 ‘평면변형 조건의 수치해석에서 선형탄성해석과 탄소성해석의 결과는 큰 차이를 보이지 않는다(Aboshi, 1983)’는 연구를 근거로 본 연구를 위해 가정한 하중전달층의 두께와 상재하중의 증가에 의해 지반 모델이 파괴되는 경향을 방지하여 지반보강용 말뚝의 강도증가와 응력분담 효과와의 상관관계를 파악하기 위함이다.

본 연구는 압밀해석을 포함하고 있으며 압밀해석은

Table 2. The recommendations of strength and modulus<sup>†</sup>

Soil types	Unconfined compressive strength (MPa)	$E_u/q_u$	Average $E_u/q_u$	Average $E_u/C_u$
Gravel	10-30	300-1500	500	1000
Sand	10-30	200-500	300	600
Silty soils	1-10	100-750	250	500
Clay	2-6	50-250	100	200

<sup>†</sup>"Design concept of the soil improvement for road construction on soft clay", Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol4, October, 2003

Table 3. Analysis results (Fig. No) according to parameter changes ( $\phi$ , q, GC (A, B, C))

$\phi$ (°)	20				30				40			
	12	24	36	48	12	24	36	48	12	24	36	48
GC-A	-	-	-	-	Fig.7 Fig.11 Fig.17	Fig.8 Fig.12	Fig.9 Fig.13	Fig.10 Fig.14 Fig.16	-	-	-	-
GC-B	-	-	-	-	Fig.7 Fig.11	Fig.8 Fig.12	Fig.9 Fig.13	Fig.10 Fig.14 Fig.16	-	-	-	-
GC-C	-	-	-	Fig.15	Fig.7 Fig.11	Fig.8 Fig.12	Fig.9 Fig.13	Fig.10 Fig.14 Fig.15 Fig.16 Fig.18	-	-	-	Fig.15

Modified Cam Clay(MCC) 모델을 적용하였다. MCC 모델은 점토에 대해 탄성-소성 경화 재료로 묘사하는 Britto and Gunn(1987) 개념을 원리로 한다. 즉, 재료가 압력을 받으면 체적탄성계수(bulk modulus)가 증가하며 상관유동법칙을 적용하여 경화/연화 거동을 통해 항복면이 커지거나 작아질 수 있다. 또한 사용되는 응력은 모두 유효응력을 사용하며 비선형 탄성과 Euler's formula로 구현된다.

### 3.2 해석방법 및 절차

해석 프로그램은 지반과 구조물 상호 거동을 묘사할 수 있는 국내 유한요소해석(FEM) 프로그램인 MIDAS

GTS NX를 사용하였으며 대상 시설물은 대칭 단면으로 절반만 모델링 하였다. 해석의 경계조건은 좌·우 측면의 수직 침하량이 발생될 수 있도록 X 방향 고정, Y 방향 롤러(roller)로 하였다. 그리고 바닥면은 모두 고정(fix)으로 경계조건을 두었다. 하중전달층(Sand layer)의 최대 높이 결정은 재하 하중의 0.2배에 해당하는 응력이 전달되는 재하폭 1.5배 깊이의 응력구(stress bulb)를 고려하였다. 모델링의 하중 재하폭(fill층 중간 높이 폭)은 6.0m로 그 폭의 1.5배는 9.0m 이지만 보강 지반의 야칭 효과 임계점을 확인하기 위해 그 두 배의 높이인 18.0m로 하였다. 이는 기준면(reference plane)에서 쌓기체(platform fill과 embankment fill) 높이 1.8m의 10배의 높이에 상당한다. 하중의 증가에 따른 거동 특성을 연구하

Table 4. Properties of reinforcement material and surcharge load

Parameter	Symbol	GC-A <sup>†</sup>	GC-B <sup>‡</sup>	GC-C <sup>‡</sup>	Geotextile	Distributed load
Soil model		Elastic	Elastic	Elastic		
Poisson ratio	$\nu$	0.25	0.25	0.25		
Dry density (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$	20	20	20		
Tensile stiffness of geotextile (kN/m)	J				1,700	
Interaction coefficient between geotextile and sand	ci				0.8	
Interface shear stiffness between geotextile and sand (kN/m/m)	ks				85,000	
Unconfined compressive strength (MPa)	$f_{ck}$	7	20	40		
Load value (kPa)						12, 24, 36, 48

<sup>†</sup>Values used for FE model Verification, <sup>‡</sup>Values used for Parametric study

Table 5. Properties of ground and fill soil

Parameter	Symbol	Soil type				
		Silt	Soft clay	Sand	Embankment fill	Platform fill
Soil model		MCC <sup>†</sup>	MCC	MC <sup>‡</sup>	MC	MC
Slope of elastic swelling line	$\kappa$	0.006	0.051			
Shear modulus (GPa)	G				15	75.2
Bulk modulus (GPa)	K				39.2	19.6
Friction angle (deg)	$\phi'$			20°, 30°, 40°	38°	32°
Elastic modulus (kN/m <sup>2</sup> )	E			$1.8 \times 10^4$		
Cohesion (kPa)	$c'$			5	5	5
Total density (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$	20.00	14.80	18		
Dry density (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$				20,000	20,000
Poisson ratio	$\nu$	0.33	0.20	0.35	0.33	0.25
Slope of normal consolidation line	$\lambda$	0.12	0.36			
Frictional constant	M	1.20	0.98			
Specific volume at reference pressure (1 Pa)	$e\Gamma$	2.61	5.57			
Maximum elastic bulk modulus (kN)	$K_{max}$	30.40	4.48			
Preconsolidation pressure (kN/m <sup>2</sup> )	Pc	97.4	56.0			
Permeability (m/s)	kw	$6.34 \times 10^{-6}$	$6.34 \times 10^{-8}$			
Thickness of ground fill	m			0 ~ 18		

<sup>†</sup>Values used for FE model Verification, <sup>‡</sup>Values used for Parametric study

Table 6. Construction sequences in the finite element modeling

Stage	Detail	Elapsed time (day)
1	Grouting columns construction for ground improvement	20
2	Platform fill to (+ 0.6 m)	40
3	1st embankment fill to (+ 1.5 m)	240
4	2nd embankment fill to (+ 1.8 m)	30
5	Distribute load	1,470
Sum		1,800

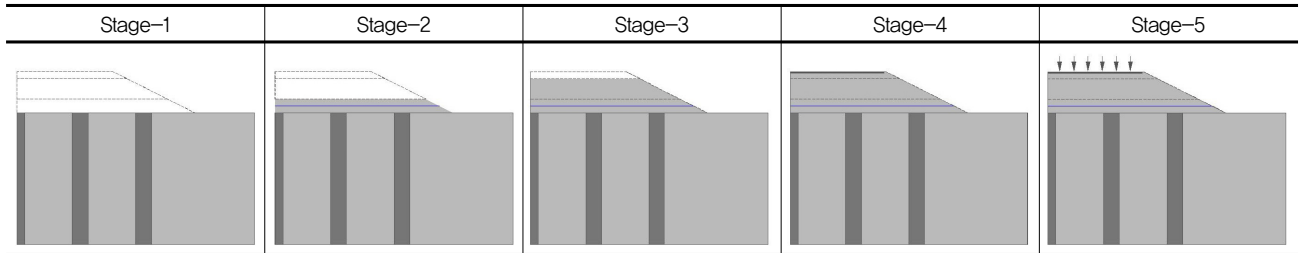


Fig. 6. Step of the analysis

기 위해 12kPa, 24kPa, 36kPa, 48kPa 4가지 하중을 가정 하였다.

시공단계는 Table 6과 같이 총 5단계로 모델링 하였고 각 단계별 공종과 방치기간은 다음과 같다. 1단계는 그라우팅 말뚝 설치(20일), 2단계는 0.6m 두께의 Platform fill 축조(40일), 3단계는 1차 Embankment fill 0.9m 쌓기 (240일) 그리고 4단계는 아스팔트 포장층이 포함된 2차 Embankment fill 0.3m 쌓기(30일)로 하였다. 마지막 5단계는 침하 완료를 고려하여 상재하중이 작용된 상태에서 방치기간(1,470일)을 두어 해석 기간이 총 60개월 (1,800일)이 되도록 하였다.

### 3.3 침하에 대한 해석결과

Fig. 7은 하중전달층인 모래층을 제거한 상태(No load transfer layer)에서 비교적 낮은 강도의 말뚝 GC-A Type

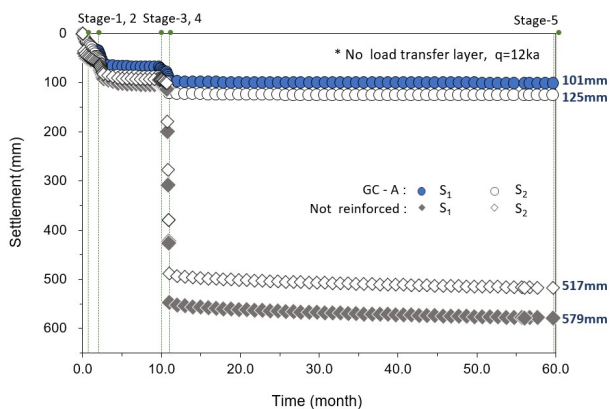


Fig. 7. Time-settlement curve in analysis for verification

설치 시 침하량 저감효과를 비교한 것이다. 상재하중 12kPa이 작용할 때 지반보강 말뚝이 설치되지 않았을 경우에 비해 말뚝 상단인 S<sub>1</sub> 위치에서 478mm와 원지반 S<sub>2</sub> 위치에서 392mm의 침하량 저감효과를 보이고 있다.

Fig. 5의 기본 모델에서 하중전달층 내부마찰각을 30°

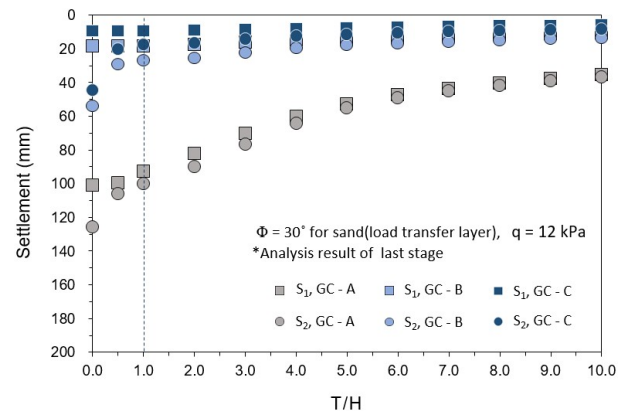


Fig. 8. Settlement at points S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> for various GC under q=12kPa

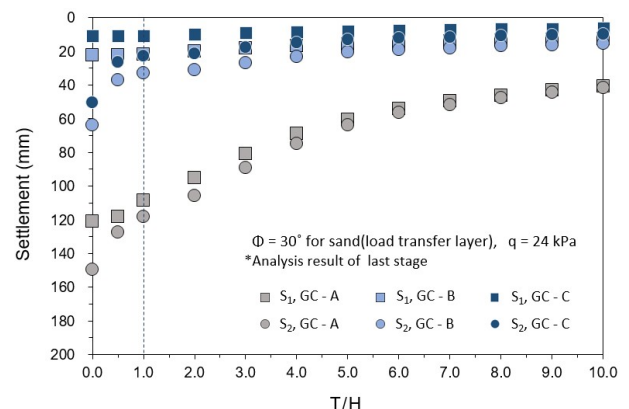


Fig. 9. Settlement at points S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> for various GC under q=24kPa



로 고정하고 상재하중  $q$ 는 12kPa~48kPa로 증가시키고 두께비(T/H, 성토층(H)에 대한 하중전달층(T)의 높이비)는 모델링 형상에서 응력구(stress bulb)의 깊이 2배에 해당하는 깊이까지 0~10 범위로 변화시켜 이에 따른 지반 보강 말뚝(GC)의 강성별 거동 특성을 검토해 보았다. Fig. 8, 9에서 상재하중이 12kPa에서 24kPa로 증가함에 따른 침하 거동에 큰 차이는 보이지 않는다. 그러나 말뚝(GC)의 강성이 큰 경우 절대 침하량이 훨씬 작아지며 T/H = 1.0 이후  $S_1$ 과  $S_2$ 의 침하량과 침하비가 수렴하는 경향을 보인다. Fig. 10, 11에서 상재하중이 더욱 증가하여 36kPa에서 48Pa로 증가함에 따라 침하의 절댓값은 커지고 있으나 상재하중이 12kPa, 24Pa로 작은 경우와 동일한 침하 경향을 보이고 있다. 상재하중  $q$ 가 12kPa~48kPa로 변화해도 말뚝의 강성에 관계없이 Fig. 12~15에서 보는 바와 같이 모두 T/H = 1.0 이후  $S_1$ 과  $S_2$ 의 침하비가 일정해지는 경향을 보이는 것은 결국 기준면에서 지반 아칭현상이 발현되는 범위가 한정적임을 나타내고 있다. 이러한 아칭효과의 발현 범위에 대한 연구는 아칭효과가 온전히 나타날 수 있는 한계높이(critical

height,  $H_c$ )라는 주제로 Mckelvey(1994), Naughton(2007), McGuire(2011), Zhuang and Cui(2015) 등의 연구가 있으나 모델링 구성 재료들에 대한 다양한 재료 물성치를 고려하지 못한 연구로 일반화할 수 없었다. 본 연구의 모델링에서는 그 한계높이( $H_c$ )가 T/H = 1.0로 나타났다 (Fig. 18, 19). 이는 본 연구의 모델링에서 말뚝 상단으로부터 1.8m 높이 이고 말뚝 간격의 60% 정도의 높이에 해당된다.

강성이 작은 말뚝(GC-A)이 적용된 경우는 하중전달층의 두께가 커짐에 따라 기준면의 원지반  $S_2$  지점과 말뚝 상단  $S_1$  지점의 침하비가 Fig. 12~15까지의 그래프에서 확인하듯 모든 두께의 하중전달층에 대해 거의 일정한 값을 보인다. 상재하중  $q$ 가 12kPa에서 48kPa까지 증가하는 경우 T/H = 0인 No load transfer layer 일 때와 침하비를 비교하면 낮은 강성의 말뚝이 설치된 지반은 하중의 증가에도 침하비는 전반적으로 1.0으로 일정한 값을 보인다. 이에 비해 강성이 큰 말뚝 (GC-B, C)이 적용된 경우는 하중전달층의 두께가 작은 경우 침하비의 증감 폭이 크게 나타나고 있으며, 기준면의 원지반

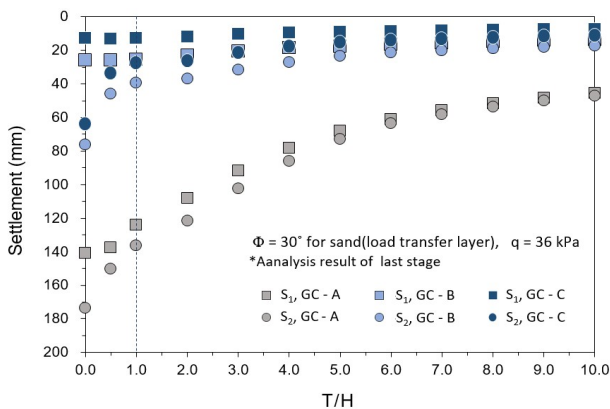


Fig. 10. Settlement at points  $S_1$ ,  $S_2$  for various GC under  $q=36kPa$

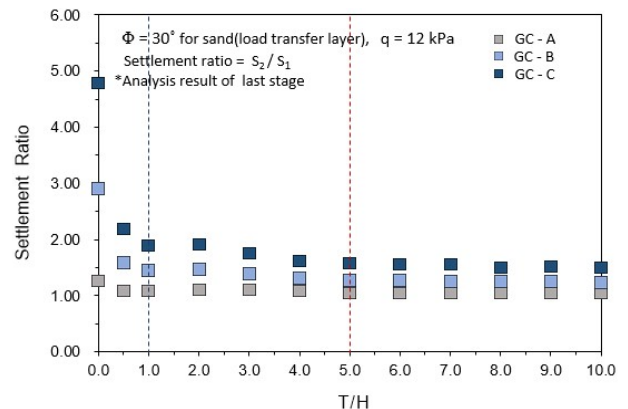


Fig. 12. Settlement ratio ( $S_2/S_1$ ) for various GC under  $q=12kPa$

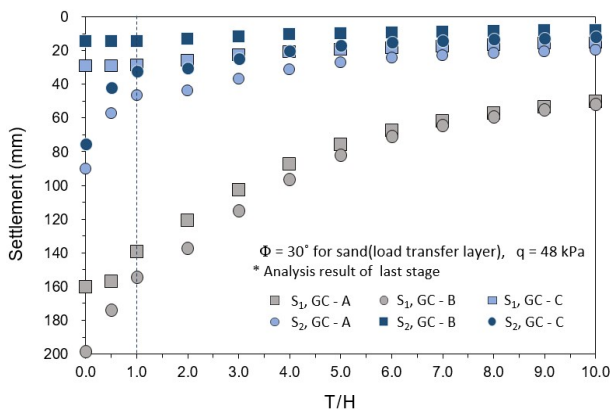


Fig. 11. Settlement at points  $S_1$ ,  $S_2$  for various GC under  $q=48kPa$

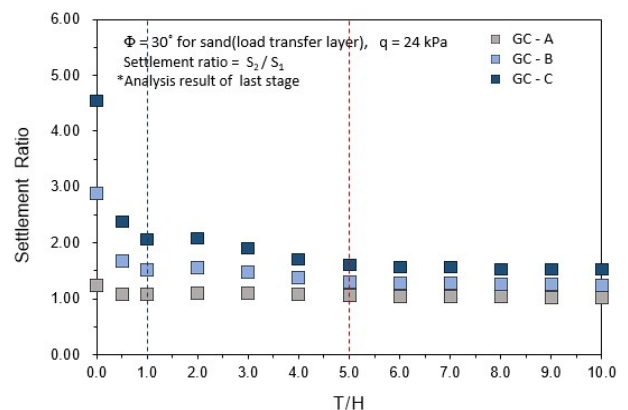


Fig. 13. Settlement ratio ( $S_2/S_1$ ) for various GC under  $q=24kPa$

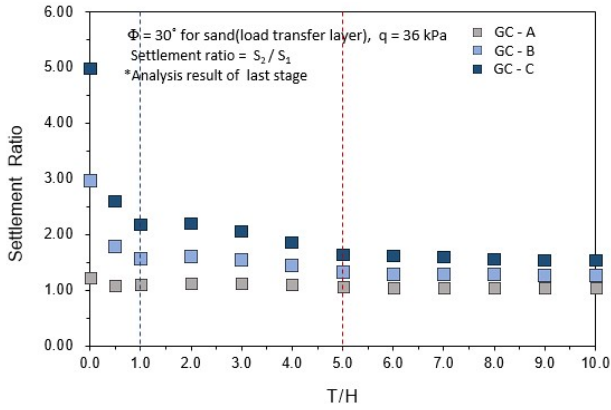


Fig. 14. Settlement ratio ( $S_2/S_1$ ) for various GC under  $q=36kPa$

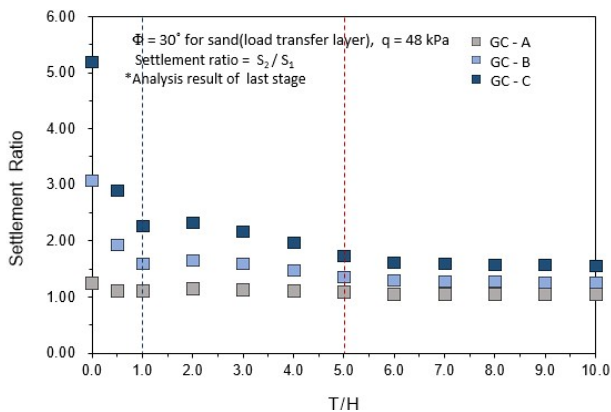


Fig. 15. Settlement ratio ( $S_2/S_1$ ) for various GC under  $q=48kPa$

$S_2$  지점과 말뚝 상단  $S_1$  지점의 침하비는 모든 하중에서  $T/H = 0$  인 No Load Transfer Layer 일 때 각각 3.0과 5.0 내외로 나타나고 있다. 그러나 모든 경우에서 하중 전달층의 두께비가  $T/H = 1.0$  이상이 되면 침하비는 급속히 작아지며 일정한 값에 수렴되는 경향을 보인다. 강성이 큰 말뚝이 설치된 모든 경우에서 공통적인 것은 하중전달층의 두께비가 하중전달층이 없는 상태에서  $T/H = 1.0$ 까지  $S_1$  지점과  $S_2$  지점의 침하비가 급격히 감소하는 경향을 보이며 이후 강성이 작은 말뚝이 설치된 경우와 같이  $T/H = 1.0$  이상인 두께에서 동일하게 수렴되는 경향을 보이고 있다.  $S_1, S_2$ 의 침하비가 크다는 것은 아칭 현상이 효과적으로 발휘되고 있다는 것을 보여주는 것을 반증하는 것이며 이 침하비가 급격히 감소한다는 것을 말해준다.

### 3.4 지중응력에 대한 해석결과

말뚝(GC)이 지중에 설치된 경우 상부 하중이 작용할 때 말뚝과 원지반에 작용되는 응력의 크기는 각각 다르

게 나타난다. 강성이 큰 말뚝에 보다 큰 응력이 발생되고 강성이 작은 원지반에 작은 응력이 발생된다. Fig. 16은 원지반과 말뚝의 응력분담 효과에 대한 특징들을 가장 민감하게 보여준 상재하중  $q = 48kPa$  일 때와 말뚝강성이 가장 큰 GC-C 조합일 경우에 대하여 하중전달층의 내부마찰각 크기가  $30^\circ \sim 40^\circ$ 로 강도 변화에 따른 말뚝과 원지반의 응력비(기준면상의 원지반  $S_2$ 의 수직 응력에 대한 말뚝 상단에 작용하는  $S_1$  지점의 수직응력의 비, stress ratio)를 보여준다. 응력비는 하중전달층이 없는 상태(No load transfer layer),  $T/H = 0$ 에서 하중전달층의 강도(내부마찰각)와 관계없이 55로 동일하였다. 이는 Table 1에서 보여주듯 고강도 Jet grouting에 대해 기존에 적용된 응력분담비(n)는 통상 30~50 범위 값과 유사한 결과이다. 그러나  $T/H$ 의 두께가 커져 말뚝 상단이 지표와 멀어질 경우, 응력비는 하중전달층의 강도 변화와 관계없이 모두  $T/H$ 가 1.0까지 급속히 감소하다 이후 완만한 감소를 보여주며 응력구(stress bulb) 경계 범

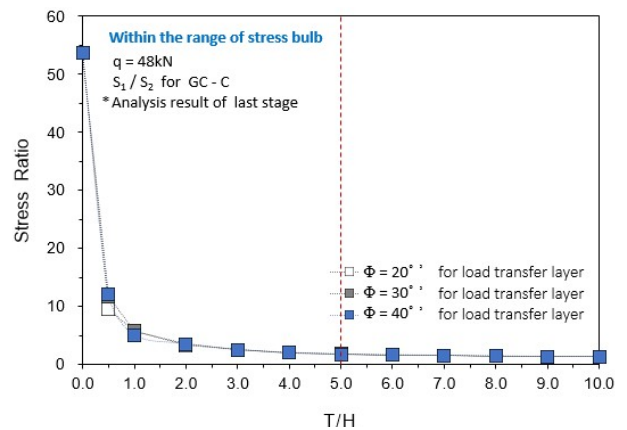


Fig. 16. Stress distribution ratio at ( $S_1/S_2$ ) under  $q=48kPa$  and GC-C

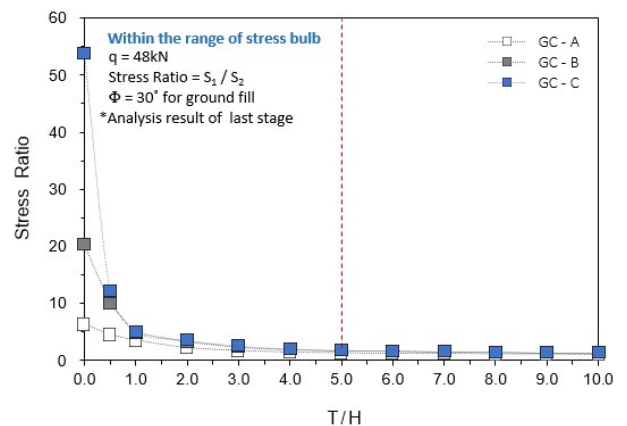


Fig. 17. Stress distribution ratio at ( $S_1/S_2$ ) for various GC under  $q=48kPa$

위 깊이인  $T/H = 5.0$ 부터 1.5 값에 수렴되고 있다.

Fig. 17은 동일한 상재하중  $q = 48\text{kPa}$ 일 때 말뚝(GC)의 강성에 따른 말뚝과 원지반의 응력분담비의 차이를 나타내고 있다.  $S_1$ 과  $S_2$ 의 응력분담비는 하중전달층이 없는 상태( $T/H = 0$ )에서 말뚝의 강성에 따라 하중분담율이 큰 차이를 보이고 있으나 Fig. 16과 같이  $T/H$ 가 1.0 이상에서 말뚝 강성에 따른 응력분담비가 거의 동일한 값을 나타내고 있으며 Fig. 15와 동일한 응력비 경향을 보인다. 이 결과는 지반아칭 효과를 보여주는  $S_1$ 과  $S_2$ 의 응력분담비는 하중전달층이 없는 상태(No load transfer layer),  $T/H = 0$ )에서 효과적으로 발휘되고 하중전달층 높이가 커질수록 상부 하중에 대해 말뚝(GC)이 분담하는 응력분담 효과가 급격히 저하된다는 결과를 보여준다. Fig. 18은 하중의 크기가 작고 말뚝 강성이 작은 경우의 원지반 상단에서 하중전달층 하단(기준면)까지 하중전달층에 작용되는 깊이별 응력의 분포양상으로 하중전달층의 높이가  $T/H = 10$ 과 같이 그라우팅 말뚝이 지중의 깊은 곳에 있는 경우는 하중전달층의 높이가  $T/H = 3$ 으로 상대적으로 얇게 설치된 경우와 비교할 때  $S_1$

과  $S_2$ 의 응력의 크기 차가 작다. Fig. 19와 같이 하중의 크기가 크고 말뚝 강성이 큰 경우의 깊이별 분포양상도 동일하게 나타난다. 이는 하중전달층이 깊어 지표로부터 전달해 오는 응력이 작아지면 아칭현상의 발현이 작아진다는 것을 보여준다. 그리고 Fig. 18, 19는 하중전달층의 높이, 상재하중의 강도 그리고 하중전달층 하부에 설치된 말뚝의 강성과 관계없이 아칭현상이 나타나기 시작하는 위치(한계높이,  $H_c$ )는 말뚝 상단으로  $T/H = 1.0$  범위에서 발휘되고 있다. 모든 경우에서 그라우팅 말뚝이 설치된 하중전달층의 끝단에서 높이  $T/H = 1.0$  크기에 해당하는 높이에서 원지반( $S_2$ )과 말뚝 상단( $S_1$ )의 응력이 달라지고 있는 것이다. 이는 아칭현상이 발휘되는 범위가 말뚝 상단에서  $T/H = 1.0$  높이 근처에서 나타나고 있다는 것을 의미하고 있다. 앞선 Fig. 4에서도 이러한 응력 벡터의 모습을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 그라우팅 말뚝으로 보강된 지반 위에 하중전달층이 있는 다층지반을 대상으로 하고 있다. 하중전달층을 매개로 한 보강지반 말뚝의 거동특성에 대한 이번 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 하중전달층의 강도, 두께( $T$ ) 그리고 상재하중( $q$ ) 값들과 지반보강 말뚝의 강성변화 등에 따른 말뚝과 지반의 거동은 두 재료의 평균적 강도로 치환된 균질한 복합지반 거동과 달리 보강된 지반 구성요소들 간 상이한 거동을 보이고 있으며 침하 등의 변형 특성을 좌우하는 주요인은 하중의 크기와 지반보강 말뚝의 강성임을 보여 주었다.

둘째, 지반보강용 그라우팅 말뚝으로 인한 아칭효과와 작용 범위는 말뚝 상단에서 일정 높이 이내에서 발휘되며 본 연구의 모델링에서는 그 높이가 지반보강 말뚝 상단으로부터 성토층의 높이에 대한 하중전달층의 높이비( $T/H$ )가 1.0인 위치로 나타났다. 이 범위 내에서 발생 응력의 크기가 작아질수록, 본 연구의 모델링에서는 지반보강용 그라우팅 말뚝 상단의 위치가 지표로부터 깊게 위치될 경우 응력분담 효과가 급격히 저감되며 응력구(stress bulb) 경계가 되는 깊이부터는 말뚝과 원지반이 분담할 수 있는 응력분담비가 1.5 정도에 수렴되는 것으로 나타났다. 이는 말뚝이 지표까지 설치되지 않고 지중에서 마감되는 경우 하중전달층을 통과하며 감소된 응력이 말뚝에 적용되기 때문에 응력분담비를 Table

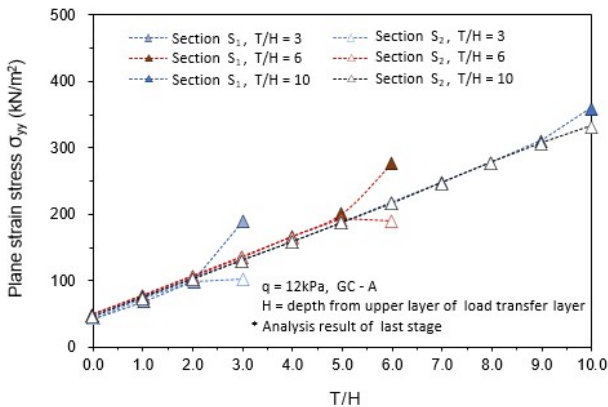


Fig. 18. Stress distribution ratio by depth for  $q=12\text{kPa}$

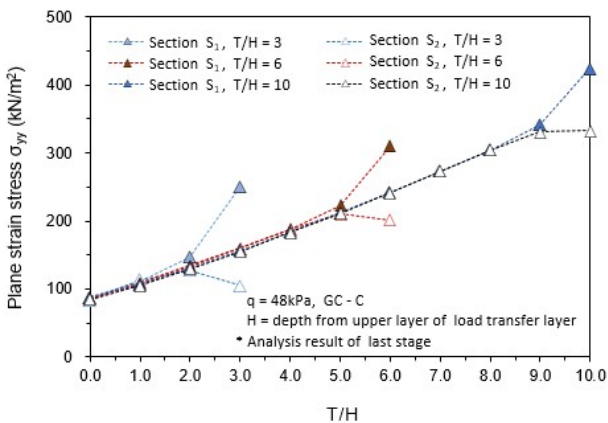


Fig. 19. Stress distribution ratio by depth for  $q=48\text{kPa}$

1에서 보듯 지표에 적용하는 것과 같은 30~50으로 적용하면 안 된다는 것을 보여준다.

그라우팅 말뚝으로 보강된 지반의 연구는 대체로 말뚝의 직경, 간격과 관련한 치환율과 원지반과 말뚝의 재료적 특성에 관계된 응력-변형에 관한 연구이다. 이는 그라우팅 말뚝의 치환율과 지반, 그라우팅 말뚝 각 재료의 변형 특성이 지반의 보강 효과에 가장 큰 영향 요인이기 때문이다. 본 연구는 특정한 치환율과 몇 가지만의 지반, 말뚝 재료의 응력-변형 특성을 전제로 한 연구 결과로 한계를 갖고있어 추가적인 연구가 필요하다.

자연 재료를 사용한 지반보강 말뚝보강 공법인 다짐 모래말뚝 공법과 다짐쇄석말뚝 공법도 위의 결과와 동일할 것으로 추정되지만 이러한 종류의 말뚝들은 탄성적 거동보다 탄소성 거동을 보이고 그 재료 특성을 아직은 정확히 확정할 수 없는 한계로 인해 본 연구에서는 강성 말뚝에 한정하여 응력분담 특성을 연구하였으며, 위의 자연 재료로 사용되는 말뚝의 경우는 향후 추가적인 연구를 수행하여 응력분담 특성 등을 규명해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 행정안전부 “산지(경사지) 태양광 발전시설의 전주기 스마트 안전관리 기술 개발(20018265)”의 지원을 받아 작성되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Aboshi, H., Fukuda, K., Ogura, T., Inoue, T., and Mukai, M. (1991), “The soil stabilization for final disposal site, Hiroshima, Japan”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol.30, No.1, pp.A47.
2. Bin Chen Benson Hsiung, Kuo Hsin Yang, Wahyuning Aila, and Ching Hung (2016), “Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands”, *Computers and Geotechnics*, Vol.80, pp.138-151.
3. Britto, A. M. and Gunn, M. J. (1987), ELLIS HORWOOD LIMITED.
4. Jaritngam Saravut (2003), “Design concept of the soil improvement for road construction on soft clay”, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.4, No.4, pp.313-322.
5. Jie Han, Sadik Oztoprak, Robert L. Parsons, and Jie Huang (2007), “Numerical analysis of foundation columns to support widening

- of embankments”, *Computers and Geotechnics*, Vol.34, No.6, pp.435-488.
6. Kim, D. E., Park, H. I., Lee, S. R., and Yoo, S. H. (2008), “Evaluation of Stress Distribution Ratio According to Clay Ground Condition and Stone Column Characteristics”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.11, pp.35-41.
7. Kozo Tagaya, Akiyoshi Tanaka, and Hisao Aboshi (1983), “Application of Finite Element Method to Pullout Resistance of Buried Anchor”, Vol.23, No.3, pp.91-104.
8. Lee, Sung-Jee, Yoo, Min-Taek, Lee, Su-Hyung, Baek, Min-Cheol, and Lee, Il-Wha (2016), “Analysis of Cyclic Loading Transferred Mechanism on Geosynthetic-Reinforced and Pile-Supported Embankment”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.12, pp.79-91.
9. Lee, Taehee, Lee, Su-Hyung, Lee, Il-Wha, and Jung, Young-Hoon (2016), “Transformation of Load Transfer Soil Arch in Geosynthetics-Reinforced Piled Embankment: A Numerical Approach”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.6, pp.5-16.
10. Manasi Wijerathna, D. S. Liyanapathirana (2021), “Simplified modelling approaches for DCM column supported embankments”, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.15, No.5, pp.553-562.
11. Ministry of Oceans and Fisheries (2014), “Design Criteria for Ports and Fishing Harbors”, pp.598.
12. Na, Seung-Ju, Kim, Min-Seok, Park, Kyung-Ho, and Kim, Daehyeon (2016), “Stress Concentration Ratio of GCP Depending on the Mixing Ratio of Crushed Stone and Sand”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.9, pp.37-50.
13. Oriante Jenck, Daniel Dias, and Richard Kastner (2009), “Three Dimensional Numerical Modeling of a Piled Embankment”, *International Journal of geomechanics*, Vol.9, No.3, pp.102-112.
14. Pitthaya Jamsawang, Panich Voottipruex, Pornkasem Jongpradist, and Dennes T. Bergado (2015), “Parameters affecting the lateral movements of compound deep cement mixing walls by numerical simulations and parametric analyses”, *Acta Geotechnica*, Vol.10, No.6, pp.797-812.
15. Pitthaya Jamsawang, Sittisak Jamnam, Pornkasem Jongpradist, Pornpot Tanseng, and Suksun Horpibulsuk (2017), “Numerical analysis of lateral movements and strut forces in deep cement mixing walls with top-down construction in soft clay”, *Computers and Geotechnics*, Vol.88, pp.174-181.
16. Valentina Lentini and Francesco Castelli (2019), “Numerical Modelling and Experimental Monitoring of a Full-Scale Diaphragm Wall”, *International Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.6, pp.659-672.
17. Walid El Kamash and Jie Han (2014), “Displacements of column supported embankments over soft clay after widening considering soil consolidation and column layout : Numerical analysis”, *Soils and Foundations*, Vol.54, No.6, pp.1054-1069.

Received : December 12<sup>th</sup>, 2022

Revised : February 3<sup>rd</sup>, 2023

Accepted : February 17<sup>th</sup>, 2023