

모래다짐말뚝지반의 응력분담비에 영향을 미치는 인자에 대한 해석적 연구 A Numerical Analysis for the Influential Factors on the Stress Concentration Ratio

최효원¹⁾, Hyo-Won Choi, 신현영²⁾, Hyun-Young, Shin, 유한규³⁾, Han-Kyu Yoo, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 한양대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng. Hanyang Univ.

²⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Chungang Univ.

³⁾ 한양대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng. Hanyang Univ.

⁴⁾ 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng. Hanyang Univ.

SYNOPSIS : The stress concentration ratio in accordance with area replacement ratios were considered as core elements of design. However, the stress concentration ratio will be vary depends on progress of consolidation in clay ground. And, since it is not sure to know the affecting factors accurately, the value is decided based on field experiences. To use SCP method more effective and correspond to soil improvement, the decision on proper area replacement ratio through the exact stress concentration ratio is very important. Accordingly, a numerical analysis on influence of various factors that needed to make rational designing guide for decision of proper area replacement ratio to stress concentration ratio was executed in this study.

Key words : Sand Compaction Pile, Composite Ground, Stress Concentration Ratio, Area Replacement Ratio

1. 서론

SCP 공법은 연약한 점성토 지반에 강성이 큰 모래말뚝을 설치하여 아칭효과를 유도한다는 원리에 근거하고 있으므로 적정 치환율 및 치환율에 따른 모래말뚝과 원지반 간의 응력분담비가 설계의 핵심요소로 고려된다. 그러나 응력분담비의 경우 연약지반과 모래다짐말뚝이 가지고 있는 정량적 성질에 따라 값이 달라지며 여러 문헌 및 논문에 의하면 SCP 공법에서의 응력분담비 및 적정치환율에 대한 이론적인 정해는 없고, 현장 계측값 역시 계측위치에 따라 크게 다른 값을 보이는 것으로 나타난다. 따라서 보다 효율적이고 지반개량 목적에 부합하는 SCP 공법의 사용을 위해서는 최적 치환율을 결정할 수 있는 합리적인 설계지침이 필요하다. 본 연구에서는 그러한 설계지침이 만들어지는데 필요한 SCP 공법에 의해 조성된 복합지반 내의 응력분담거동에 모래다짐말뚝의 다양한 조건이 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. SCP(sand compaction pile) 공법의 개요

2.1 SCP 공법의 치환율

SCP 공법을 이용한 지반개량효과를 결정하는데 있어 가장 중요한 요소인 치환율(a_s)은 모래다짐말뚝을 타설하기 전의 지반 면적과 타설된 모래다짐말뚝이 차지하는 면적의 비($a_s = A_1 / (A_1 + A_2)$)로 나타낼 수 있는데, 주로 모래다짐말뚝의 타설 간격에 의해 결정된다.

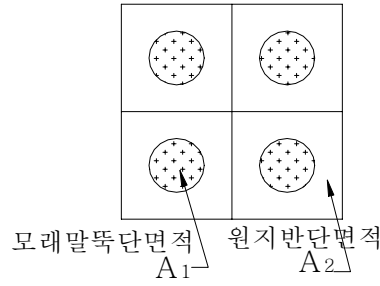


그림 1. 치환율(a_s)

이러한 SCP 공법의 치환율에 영향을 주는 모래말뚝의 배치는 다음과 같이 정방형이나 삼각형 및 평행사변형의 형태로 시공할 수 있다.

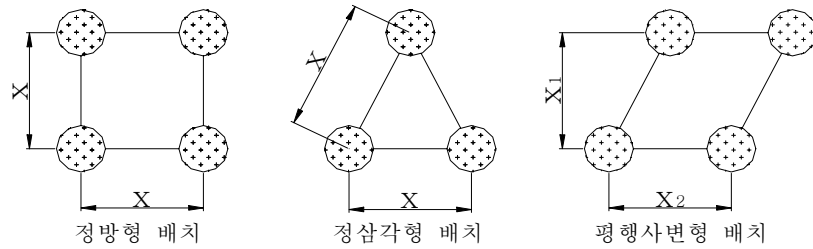


그림 2. 모래다짐말뚝공법에서 모래말뚝의 배치

2.2 등가원주(unit cell) 모델

일반적으로 모래말뚝이 연약한 점성토지반에 다수 조성되어 이루어진 복합지반에 상재하중이 재하되는 경우 아칭효과로 인하여 모래말뚝에 응력이 집중되며 점성토에서는 응력이 대폭 감소하게 된다. 이러한 모래다짐말뚝에 의한 여러 가지 효과를 알아보기 위해서는 단말뚝으로 해석단면을 고정시키고 일반적인 경향을 파악하지만 실제 시공되는 모래다짐말뚝의 경우는 군말뚝으로 조성되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서, 군말뚝에 의한 효과를 정량적으로 설명하기 위하여 사용되는 것이 무리모래말뚝 중 한 개의 모래말뚝과 그 영향범위내의 점성토 지반을 대상으로 하는 등가원주(unit cell)모델이다.

모래다짐말뚝의 침하와 안정해석을 목적으로 모래말뚝주위의 흙에 영향면적(tributary area)을 결합시키는 것이 편리한데, 다음과 같은 등가원의 형태 및 원통 모양으로 형상화 할 수 있다.

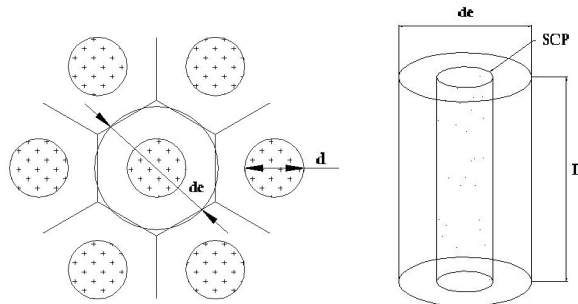


그림 3. 유효 등가원주 개념도 (GIT, 1983)

등가원주모델에서 원주의 직경을 산정하는 방법은 말뚝배열에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_e = 1.05s \quad (\text{정삼각형 배열}) \quad (1)$$

$$D_e = 1.13s \quad (\text{정사각형 배열}) \quad (2)$$

여기서, s : 모래말뚝사이의 중심간격

3. 수치해석

3.1 해석개요

모래다짐말뚝의 다양한 조건변화들이 복합지반 내에서 응력분담비에 미치는 영향을 규명하고자 한 본 연구에서 해석단면을 결정하기 위해 기본적인 점토지반을 결정한 후 모래다짐말뚝에서 발생 가능한 여러 변수들을 선정하여 해석단면을 설정하였다.

일반적으로 SCP 공법에 사용되는 표준모래말뚝의 직경은 60~80cm, 타설 간격은 1.8~2.2m, 시공한 계깊이는 30m정도이다. 앞으로는 안정성과 경제성을 동시에 고려한 최적 치환율 개념으로 SCP 공법이 발전될 것이므로, 본 연구에서는 타설 될 기본 모래말뚝의 직경을 일반적인 사용범위에서 가장 작은 60cm로 고려하였다. 그 내용은 다음과 같다.

표 1. 해석단면 적용변수

구분	고려가능 변수		적용범위	비고
외적 변수	하중 재하 조건	재하기간영향	0.5, 1, 2	day
		재하하중영향	0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6	kgf/cm ²
		재하형태	강성재하, 연성재하	
내적 변수	치환율(%)		10, 20, 30, 50, 70	
	다짐말뚝길이(m)		5, 10	지지층 미도달
	다짐말뚝길이(m)		15	지지층 도달
	$Dr(\%)$		40, 60, 80	

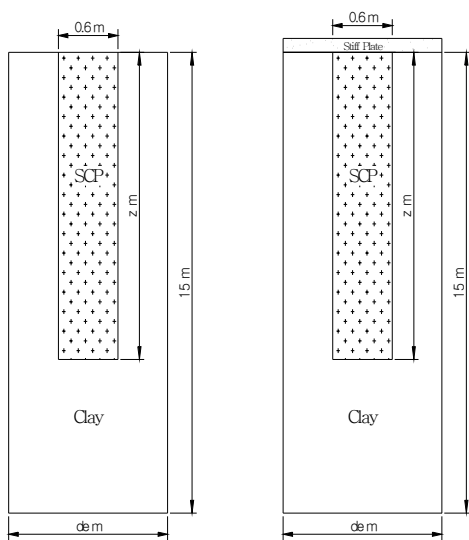


그림 4. 해석단면

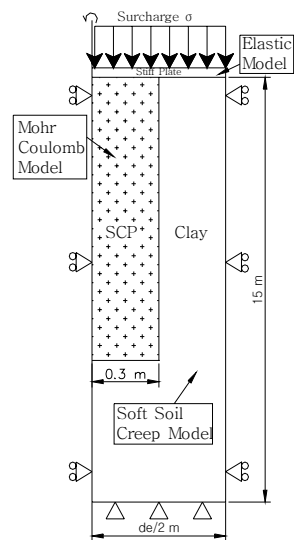


그림 5. 구성모델 및 경계조건

그림 4와 같이 해석단면에서 상부에 강관의 유무에 따라 연성재하와 강성재하의 재하형태를 구현하였고, 말뚝직경은 60cm로 일정하게 가정하고 대상지반의 깊이를 15m로 고려하여 $d_e \times 15m$ 내부에서 모래말뚝의 치환율과 말뚝길이 및 상대밀도 등의 변화가 복합지반 내에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실제 SCP 공법에 의해 시공된 복합지반은 균말뚝으로 조성되는데 이에 대한 효과를 고려하기 위하여 유효등가원주개념을 이용하여 균말뚝으로 조성된 지반을 단일말뚝지반으로 환산하여 해석 시 사용하였다. 단일말뚝으로 환산 시 영향반경의 산출은 복합지반에 조성된 말뚝이 정삼각형으로 배열되었다는 가정을 바탕으로 하였으며, 그 내용은 표 2와 같다.

표 2. 치환율에 따른 해석단면 등가원주 직경

치환율(%)	10	20	30	40	50	60	70
해석단면 등가원주 직경(cm)	328.6	232.4	189.7	164.3	147.0	134.2	124.2

3.2 입력물성치

SCP 공법에 의해 조성된 복합지반 내에서 모래다짐말뚝이 복합지반 전체의 응력분담 거동에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 수치해석을 실시하기 위해 해석대상이 될 연약한 점토지반을 Kaolinite로 이루어진 지반으로, 이 지반에 타설될 모래는 주문진 표준사로 가정하였다. 수치해석 시 입력해야 할 Kaolinite 및 주문진 표준사에 대한 기본 물성치는 각종 실내시험을 실시하여 구한 값을 적용하였다.

표 3. Kaolinite 입력 파라미터

구분	γ_{dry3} (kN/m ³)	γ_{sat3} (kN/m ³)	e	C_c	C_s	C_a	ν	c	ϕ (°)	K_o^{NC}
Kaolinite	14.18	18.451	0.771	0.1359	0.012	0.01	0.15	0	21.969	0.625

표 4. 상대밀도에 따른 모래말뚝 입력 파라미터

구분	E (kN/m ²)	e	γ_{dry3} (kN/m ³)	γ_{sat3} (kN/m ³)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (deg)
D_r 40%	31450	0.776	14.527	18.814	0.277	0	35.6
D_r 60%	44690	0.699	15.186	19.222	0.264	0	37.6
D_r 80%	56950	0.623	15.897	19.662	0.252	0	41.5

그림 6은 카올리나이트 삼축시험 결과와 모델의 해석결과를 서로 비교한 것으로, 각각의 구속압 조건에 대해 예측결과는 실험결과와 양호한 일치율을 보이고 있어, 본 연구에서 점성토에 대해 적용된 구성모델의 적용성을 입증할 수 있었다.

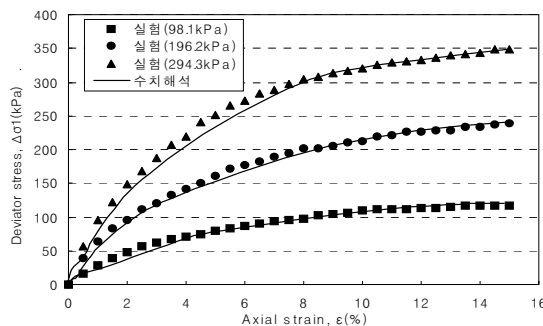


그림 6. 모델의 적용성

4. 해석결과

4.1 각 영향인자별 치환율에 따른 응력분담비 변화경향

그림 7~그림 10은 해석 결과를 제시하였다. 그림에서 기호 D_r 은 모래말뚝의 상대밀도를 나타내며 각각 40%, 60%, 80%에 해당한다. 기호 σ 는 재하응력의 크기를 나타내는 것으로 σ_1 은 1.0→2.0→3.0kgf/cm²의 단계로 하중이 재하된 경우이며, $\sigma_{0.5}$ 는 σ_1 의 절반 수준인 0.5→1.0→1.5kgf/cm², σ_2 는 σ_1 의 두배 수준인 2.0→4.0→6.0kgf/cm²의 하중을 부여한 것이다. 또한, 기호 p 는 하중 재하시간을 나타내는 것으로, p_1 은 매 하중단계 지속기간 1일에 해당하며, $p_{0.5}$ 와 p_2 는 각각 하중지속기간 12시간과 2일을 의미한다. 한편, 기호 z 는 말뚝의 관입깊이를 나타낸 것으로, 점성토지반의 총 깊이 15m에 대해 z_5 , z_{10} , z_{15} 는 각각 5m와 10m, 15m 관입된 말뚝을 의미한다.

타설된 모래말뚝의 상대밀도를 40, 60, 80%로 변화시켰을 경우 동일길이의 말뚝에서 각 치환율별로 약 0.5~2정도의 응력분담비 상승을 가져오는 것으로 나타났는데 상대밀도가 증가할수록 모래말뚝의 강성이 증가하여 재하되는 하중에 대한 저항능력이 커지기 때문으로 분석된다. 특히 타설된 말뚝의 길이가 길어질수록 그러한 경향은 더욱더 뚜렷하게 나타났으며, 미관통말뚝의 경우는 치환율 50%에서 응력분담비의 상승폭이 크게 나타났고, 관통말뚝의 경우는 치환율 30%에서 응력분담비의 상승이 크게 일어나 모래말뚝의 지지층 도달여부가 다른 여러 영향인자보다 응력분담비의 변화경향에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

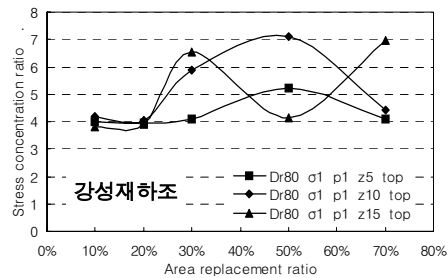
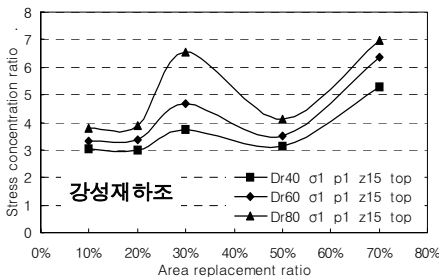
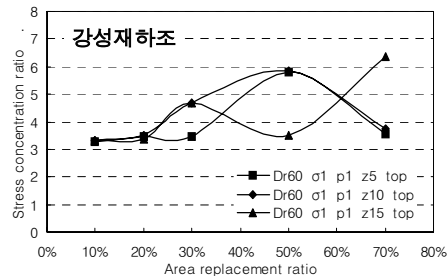
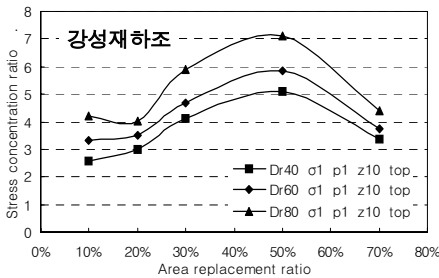
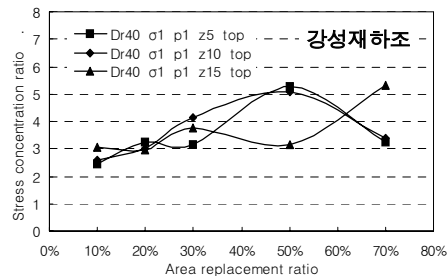
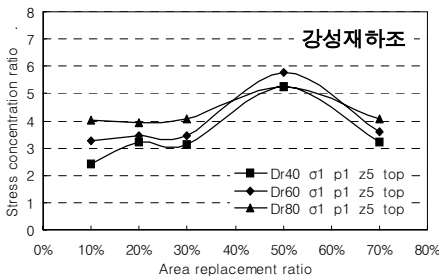


그림 7. 상대밀도의 영향

그림 8. 관입깊이의 영향

실제 시공 시 점토지반에 SCP(sand compaction pile)가 타설된 후 복합지반 상에 여러 단계의 단계 성토가 이루어지게 되는데, 그림 9 및 그림 10은 이와 같이 단계성토가 이루어질 경우 각 단계성토로 인한 재하하중과 재하기간이 복합지반의 응력분담비에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 분석한 결과이다.

재하하중의 경우 크기가 증가함에 따라 전체적인 응력분담비는 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 응력분담에 중요한 역할을 하는 모래말뚝 저항능력의 한계 때문인 것으로 분석되며, 특히 미관통 말뚝이 타설된 복합지반의 경우 치환율 50%에서, 관통말뚝이 타설된 지반에서는 치환율 30%에서 그러한 경향이 뚜렷하게 나타났다. 관통말뚝이 타설된 복합지반에서는 치환율 70%에서도 큰 응력분담비의 변화를 보였는데 이는 치환율이 70%이상이 되면 대상 점토지반이 거의 모래지반으로 치환된 것과 같아 점토가 재하되는 하중을 지지하는 역할이 매우 작아지기 때문에 나타나는 현상으로 고려된다.

본 연구에 의하면 재하기간은 응력분담비의 변화경향에 영향을 거의 못 미치는 것으로 나타났다.

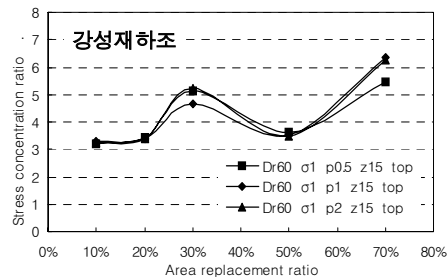
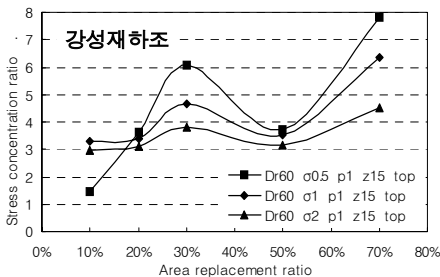
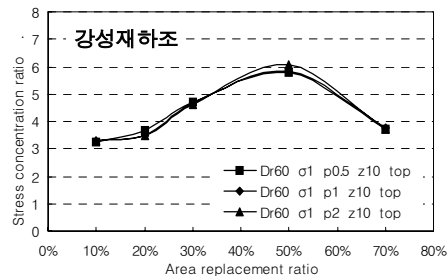
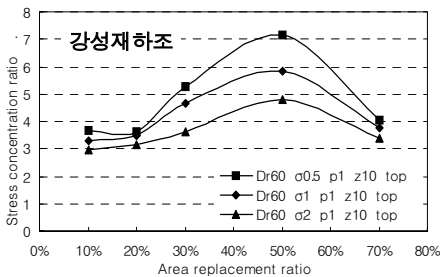
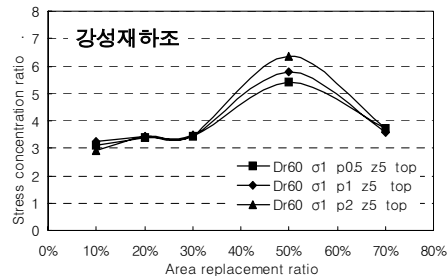
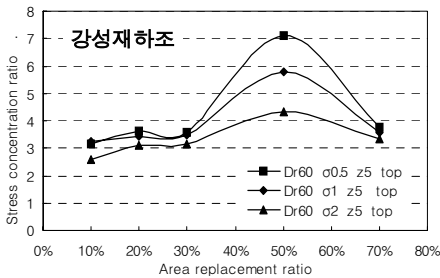


그림 9. 재하중 크기의 영향

그림 10. 재하기간의 영향

4.2 영향인자들과 응력분담비와의 상관관계

해석변수들(치환율, 모래말뚝의 상대밀도, 말뚝길이, 재하하중, 재하기간)이 응력분담비에 미치는 영향에 대하여 분석한 결과 그림 11과 같이 일반적으로 두 가지 경향을 보이는 것으로 나타났다.

응력분담비는 복합지반에서 모래말뚝과 점토지반 간의 강성차이에 의해 발생하는 응력집중현상에 의한 것이다. 따라서, 모래말뚝의 조건이 응력분담비에 중요한 변수로 작용하게 되는데 위와 같은 두 가지 응력분담비 분포경향에 가장 큰 요인으로 작용한 것이 모래말뚝의 지지층 도달여부인 것으로 나타났다. 즉, 점토지반에 모래말뚝을 조성할 경우 지지층까지 모래말뚝을 도달시키지 못한 경우는 모래말뚝의 주변마찰력만으로 상재하중을

지지하게 되는데 이때 치환율 50%정도에 도달하여야 재하하중에 대한 응력분담비 값이 최대로 나타나게 되는 반면, 선단 지지된 모래말뚝을 조성한 경우는 주변마찰력과 선단지지력의 이중효과로 치환율 30%만으로도 재하하중에 대해 최대의 응력분담 효과를 발현할 수 있는 것으로 나타났다.

모래말뚝의 상대밀도가 증가할 경우 말뚝기초의 강성증가로 인한 지지효과가 증대되기 때문에 위와 같은 두 가지 응력분담비 경향에는 변함이 없고, 단지 전체적인 응력분담비의 상승을 가져오는 것으로 나타났다.

연성재하의 경우는 강성재하와는 달리 특별한 경향을 보이지 않았고, 그림 12와 같이 응력분담비가 치환율의 변화에 상관없이 거의 1에 가까운 값을 가지는 것으로 나타났다.

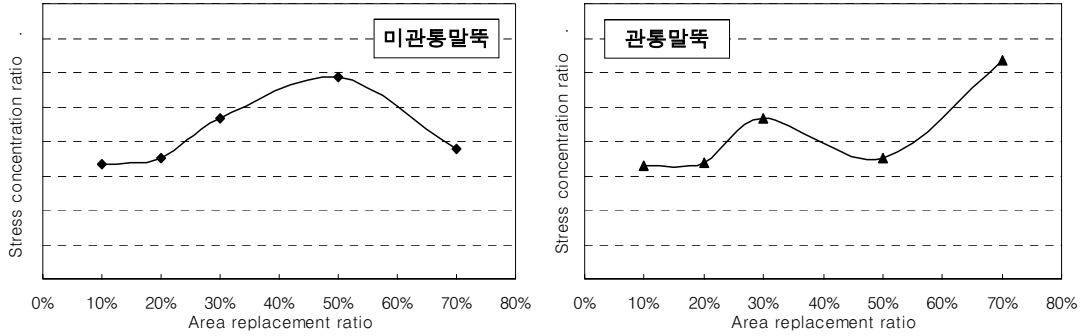


그림 11. 응력분담비 분포경향 (강성재하)

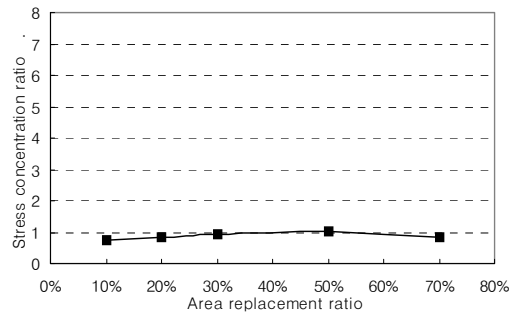


그림 12. 응력분담비 분포경향 (연성재하)

5. 결론

본 연구에서는 복합지반을 구성하고 있는 점토와 모래 중 모래말뚝의 여러 구성인자들이 복합지반 전체의 치환율에 따른 응력분담비 분포경향에 미치는 영향을 살펴보기 위해 수치해석을 실시하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 모래말뚝의 상대밀도가 큰 경우 응력분담비는 전체적으로 높은 것으로 예측되었다. 치환율에 따른 분포 경향을 살펴보면 미관통 말뚝의 경우 50%의 치환율에서 가장 높은 응력분담비를 나타냈으나, 관통말뚝인 경우에는 치환율 30%에서 최대 응력분담비를 보인 후 감소하다가 다시 치환율 70%에 이르러 응력분담비가 증가하는 2차함수의 형상을 나타내었다.
- 2) 재하중 크기가 큰 경우의 응력분담비는 하중 크기가 작은 경우에 비해 상대적으로 작은 것으로 예측되었다. 이는 과도 하중으로 인한 말뚝의 저항능력 손실에 기인한 것으로, 실제 조건에서는 말뚝의 파괴로 연관지어 고려할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 하중 지속시간이 긴 경우가 작은 경우에 비해 다소 응력분담비가 높게 예측되기는 하였으나, 말뚝 관입깊이와 치환율, 재하중 크기에 비해 그 영향은 작은 것으로 조사되었다. 점토지반의 거동에 하중지속시간이 미치는 영향이 상당히 큰 점을 감안하면, SCP 복합지반의 거동은 모래말뚝 자체의 강성에 크게 의존하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 大木仁史, 張惠文, 稻田倍穂, “砂柱を設置した粘性土の壓密性狀と應力分擔”, 第17回 土質工學研究 發表會, pp. 2421~2424, 1982
2. 福田和國, 二木正列, 室田博文, 金亨柱, “高置換と低置換を併用した SCP工法により改良された地盤の特性”, 第26回 土質工學研究 發表會, pp. 1971~1972, 1991
3. 山肩邦男, 福本和正, “複合地盤における砂抗部と粘性土部の應力分擔比について”, 第17回 土質工學研究 發表會, pp. 2417~2420, 1982
4. 小川充郎, 一本英三郎, “粘性土に對するバイプロコンポーザー工法の適用に ついて(粘性土の力學特性に與える影響について)”, 土と基礎, Vol. 13, No. 3, pp. 3~8, 1963
5. 日本建設機械化協會, 最近の軟弱地盤工法と施工例, pp. 169~190, 1991
6. Asaoka, A., Kodaka, T., Nozu, M., Hirao, T. (1995), "Increase of undrained shear strength and anisotropic characteristics of clay ground improved with sand compaction piles" *Numerical models in geomechanics*, pp.249-256
7. Jung, J. B., Moriwaki, T., Sumioka, N., Kusakabe, O. (1996), "An Experiment of Behavior of Partly and Fully Treated Soft Clay Deposit by Sand Compaction Piles", *Urban engineering in Asian cities in the 21st century*, pp.49-54
8. Kobayashi, H. ; Kogo, M. ; Suzuki, K. ; Saka, S. (1996), "Estimation of the Clay Ground Improved by Sand Compaction Piles at Kawasaki Man-Made Island", *Doboku Gakkai ronbunsh & umacr; Journal of construction management and engineering*, Vol. 6, No. 553, pp.41-48