

SCP

Study on Stress Sharing Mechanism Composition Ground Improved by SCP with Low Replacement Area Ratio

¹⁾, Seung-Kyong You, 松井保²⁾, Tamotsu Matsui, ³⁾, Won-Pyo Hong, ⁴⁾, Gil-Lim Yoon

1) , Researcher, Coastal & Harbor Engineering Division, Korea Ocean Research & Development Institute

2) , Professor, Dept. of Civil Engineering, Osaka University

3) , Professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Chung-Ang University

4) , Senior Researcher, Coastal & Harbor Engineering Division, Korea Ocean Research & Development Institute

SYNOPSIS : In order to design accurately sand compaction pile (SCP) method with low replacement area ratio, it is important to understand the mechanical interaction between sand piles and clays and its mechanism during consolidation process of the composition ground. In this paper, a series of numerical analyses on composition ground improved by SCP with low replacement area ratio were carried out, in order to investigate the mechanical interaction between sand piles and clays. The applicability of numerical analyses, in which an elasto-viscoplastic consolidation finite element method was applied, could be confirmed comparing with results of a series of model tests on consolidation behaviors of composition ground improved by SCP. And, through the results of the numerical analyses, each mechanical behaviors of sand piles and clays in the composition ground during consolidation was elucidated, together with stress sharing mechanism between sand piles and clays.

Key words : sand compaction pile, low replacement area ratio, composition ground, numerical analysis, stress sharing

1. 서 론

샌드컴팩션파일공법(SCP공법)에 의해 기대되는 지반개량효과중 주목할 만한 것은 모래말뚝의 강성에 의한 개량지반의 지지력증대효과나 침하저감효과이다. 특히, 주로 연약한 해성점토지반상에 건설되는 해안구조물의 경우, 기초지반개량에 본 공법을 적용함으로써 성토하중이나 구조물등의 상재하중을 지지하고 또한 그에 의해 지속적으로 발생하는 압밀침하를 억제하는 효과를 얻을 수 있다.

최근 치환율 약30% 이하의 저치환율 SCP공법은 육상공사는 물론 해상공사에서도 그 적용사례가 증가하고 있다(北詰, 1994). 그러나 이 공법에 의해 형성된 복합지반의 역학거동은 그 메커니즘이 상당히

복잡하다. 즉, 샌드드레인공법(SD공법)이나 고치환율 SCP공법이 적용된 복합지반의 역학거동은 모래말뚝부 또는 점토부의 어느 한쪽의 역학거동에 의해 지배되지만, 저치환율 SCP공법에 의한 복합지반의 역학거동은 모래말뚝부와 점토부 양자의 역학거동의 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 저치환율 SCP공법을 합리적으로 설계하기 위해서는 복합지반내부의 역학거동을 정확히 파악하고 그 메커니즘을 이해하여야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 저치환율 SCP공법의 합리적인 설계법 확립의 일환으로, 재하직후로부터 압밀종료시까지의 복합지반의 역학거동, 특히 응력분담 메커니즘을 일련의 수치해석을 통해 규명하고자 한다. 우선, 필자는 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 응력분담 메커니즘에 대한 실험적 연구에서 저치환율의 모래말뚝에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 일련의 실내모형실험을 실시한 바 있다(유 승경, 2003a). 또한, 유한요소해석에 의해 모형실험을 재현하여 본 연구에서 사용하는 수치해석기법의 타당성을 정량적으로 검증하였다(유 승경, 2003b). 본 논문에서는 일련의 수치해석결과를 토대로 하여 복합지반을 구성하는 모래말뚝과 점토 각각의 역학거동과 응력분담 메커니즘을 규명하고자 한다.

2. 수치해석의 개요

2.1 수치해석모델

수치해석에서는 탄점소성 축대칭 다차원압밀 유한요소법(Matsui, et al, 1996)을 사용하였다. 본 연구에서 수행한 수치해석의 해석모델에 대한 개요는 그림 1과 같다. 해석모델은 저치환율SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험(유 승경, 2003a)을 대상으로 작성하였으며, 모형지반 압밀거동의 대칭성을 고려하여 그림 2에서 파선으로 둘러싸여 있는 부분을 수치해석 대상(축대칭모델)으로 하였다. 또한 모형지반의 점토부만 다차원 압밀해석을 적용하였으며, 간극수에 관한 경계조건은 해석모델의 측면 및 저면에 대하여 비배수, 재하판과 모래말뚝에 접하는 부분의 경계를 배수조건으로 하였다.

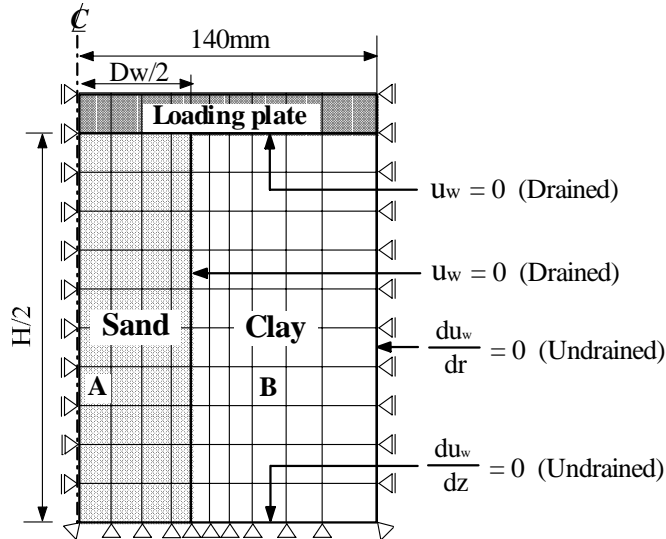


그림 1 수치해석모델

2.2 지반재료의 역학모델

모형지반을 구성하고 있는 점토는 고함수비, 저응력상태이기 때문에 이차원압밀을 포함하는, 모래말뚝에 비하여 압축성이 상당히 큰 복잡한 거동을 나타내리라 생각된다. 따라서, 점토의 역학거동은

Matsui-Abe(1986)에 의하여 제안된 탄점소성 구성모델에 의해 표현 하였다. 이 모델의 유동곡면(f)은 식(1)에 의해 표현된다.

$$f = \mu \ln \left| \frac{1}{\delta} \left[\left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\delta \dot{\nu}_r^v}{\mu} t \right) \right\} \exp \left(\frac{\nu^p}{\mu} \right) + \delta \exp \left(- \frac{\delta \dot{\nu}_r^v}{\mu} t \right) \right] \right| - \nu^{vp} = 0 \quad (1)$$

여기서, ν^{vp} , μ , $\dot{\nu}_r^v$, δ 및 t 는 각각 점소성체적변형률, 이차원압밀계수, 기준점소성체적변형률속도, 내부 구속변형률 및 시간을 나타내고 있다. 표 1은 수치해석에 사용한 점토의 모델특성치와 그 값을 나타내고 있다(Oda, et al, 2001).

표 1. 점토의 모델특성치

Parameters		Value
Compression index	λ	0.3777
Swelling index	κ	0.0354
Stress ratio at critical state	M^*	1.15
Stress ratio at K_o state	η_{k_o}	0.710
Poisson ratio	ν	0.341
Coefficient of secondary compression (1/min)	μ	2.2×10^{-3}
Reference viscous volumetric (1/min)	$\dot{\nu}_r^v$	2.2×10^{-4}
Internal confining strain	δ	0.001

한편, 본 연구에서는 모래의 역학모델로써 식(2)에 표시한 Drucker-Prager타입의 파괴기준을 항복함수(f)로 하는 구성모델을 사용하였다. 이 구성모델은 파괴에 따르는 비선형거동과 양(+의 다이레이턴시거동의 표현이 가능하고, 모래의 강성의 구속압 의존성을 고려할 수 있는 비교적 간단한 모델이다.

$$f = q - \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} p' - \frac{6 \cos \phi'}{3 - \sin \phi'} c' = 0 \quad (2)$$

여기서, ϕ' 및 c' 는 각각 유효응력에 기준하는 내부마찰각 및 점착력을 나타내고 있다. 또한, p' 및 q 는 각각 평균유효응력(Mean effective stress) 및 일반화 전단응력(Mises equivalent stress)을 나타내고 있다. 표 2는 수치해석에 사용한 모래의 모델특성치와 그 값을 나타내고 있다(Oda, et al, 2001).

표 2. 모래의 모델특성치

Parameters		Value
Elastic modulus at reference state (kPa)	E_o	2.54×10^4
Mean effective stress at reference state (kPa)	p'_o	98.0
Material constant	m	0.6
Internal friction angle (°)	ϕ'	36.0
Plastic strain increament ratio	η_d	0.15
Poisson ratio	ν	0.05

2.3 수치해석 조건

수치해석은 저치환율 SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험(유 승경, 2003)에서와 같이 치환율(As)의 변화 즉, As가 5%, 10% 및 25%인 경우에 대해서 하중단계별에 따라 모두 10가지의 경우에 대하여 수행하였다. 또한, 수치해석에서는 재하단계중 제1단계만을 소정의 초기상태로 하였고, 2단계이후는 각각 전단계의 수치해석 최종상태를 초기상태로 하였다.

3. 복합지반의 응력상태

3.1 복합지반의 응력경로

그림 2는 치환율 25%에 대한 모래말뚝(요소 A)과 점토(요소B)의 응력경로를 각각 나타내고 있다. 모래말뚝의 경우, 재하과정(제 1단계: ○→□, 제 2단계이후: ■→□)에서는 모두 일반화전단응력의 감소에 따라 평균유효응력이 증가하고 있다. 이것은 주변의 점토에 의해 모래말뚝의 반경방향의 변형이 구속되어 구속압이 증가하기 때문이라고 생각된다. 즉, 모형지반에 재하가 순간적으로 이루어지기 때문에 점토는 비배수 상태로 되며, 연직변형이 발생한다고 하더라도 체적변화가 거의 발생되지 않는 상태로 된다. 그러나 모래말뚝은 배수상태이기 때문에 개량지반 전체로써는 체적변화가 발생되어 침하가 발생되지만, 점토는 체적이 일정하게 구속되기 때문에 모래말뚝의 반경방향의 변형을 구속하고 그 결과 모래말뚝에 대한 구속압이 증가하게 된다. 따라서 모래말뚝에서는 평균유효응력이 증가한다. 그 후 재하종료(□)와 동시에 응력경로는 그 방향을 바꾸어 평균유효응력의 증가에 따라서 일반화전단응력도 현저히 증가된다. 응력경로는 즉시 파괴선에 도달(●)하며 그 후 일반화전단응력과 평균유효응력의 증가와 함께 과잉간극수압이 소산(■)될 때까지 파괴선상을 이동한다. 한편, 각 재하단계에서의 응력경로는 정성적으로 같은 거동을 나타내고 있다. 따라서 모래말뚝은 어떠한 재하단계에 대해서도 동일한 역학거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 점토부의 경우, 재하과정(제 1단계: ○→□, 제 2단계이후: ■→□)에서의 유효응력의 변화는 거의 볼 수 없으며 과잉간극수압만 상승하고 있다. 재하종료후 모래말뚝이 파괴상태(●)에 도달하기까지는 유효응력의 변화가 거의 보이지 않고 과잉간극수압만이 감소하고 있다. 그 후 과잉간극수압이 소산(■)될 때까지 유효응력경로는 K_0 선상을 이동하고 있다. 한편, 각 재하단계에서의 응력경로는 정성적으로 같은 거동을 나타내고 있다. 따라서 모래말뚝부와 마찬가지로 점토부는 어떠한 재하단계에 대해서도 동일한 역학거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

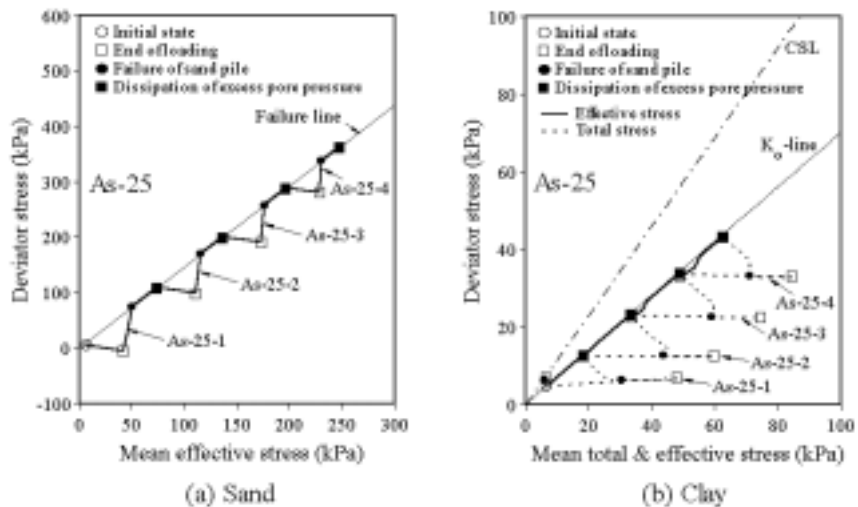


그림 2 모래말뚝과 점토의 응력경로

3.2 복합지반의 응력증분 변화

그림 3은 치환율 25%의 재하 1단계에 대한 모래말뚝(요소A)과 점토(요소 B)의 응력증분의 경시변화를 각각 나타내고 있다. 모래말뚝의 경우, 재하직후에 대한 응력증분을 보면 $\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_r$ 및 $\Delta\sigma_\theta$ 모두 거의 같은 값을 나타내고 있다. 이것은 앞에서도 언급한 바와 같이 주변의 점토에 의해 모래말뚝이 압축되기 때문이라고 생각된다. 모래말뚝이 파괴상태(●)에 도달하기까지 모든 경우의 $\Delta\sigma_z$ 는 압밀시간의 경과와 함께 급격하게 증가 하고 있다. 이와같이 $\Delta\sigma_z$ 가 현저하게 증가하는 것은 모래말뚝과 점토의 강성의 차이에 의한 응력집중에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 모래말뚝이 파괴상태(●)에 도달한 후 $\Delta\sigma_z$ 는 그 증가속도가 감소하지만 $\Delta\sigma_r$ 와 $\Delta\sigma_\theta$ 의 증가와 함께 과잉간극수압이 소산(■)될 때까지 증가하고 있다. 그리고 과잉간극수압이 소산된 후에는 어떠한 응력증분의 변화도 보이지 않는다. 점토의 경우, 재하과정에서는 비배수조건이 만족 되어지기 때문에 재하압력과 상등한 과잉간극수압이 발생되고 있다. 따라서, 재하직후에서는 $\Delta\sigma_r$ 을 제외한 유효응력성분의 변화는 거의 보이지 않는다. 그 후 모래말뚝이 파괴상태(●)에 도달하기 전까지 점토부의 과잉간극수압은 신속히 소산되지만, 유효응력성분의 변화는 거의 보이지 않는다. 한편, 모래말뚝이 파괴상태에 도달한 시점 이후, 과잉간극수압이 소산(■)되기까지 각 유효응력성분은 증가하고 있다. 특히, $\Delta\sigma'_z$ 와 $\Delta\sigma'_r$ 의 증가가 현저하다. 이것은 다이러턴시 현상에 의한 모래말뚝의 팽창으로 인해 점토가 압축 되기 때문이라고 생각된다.

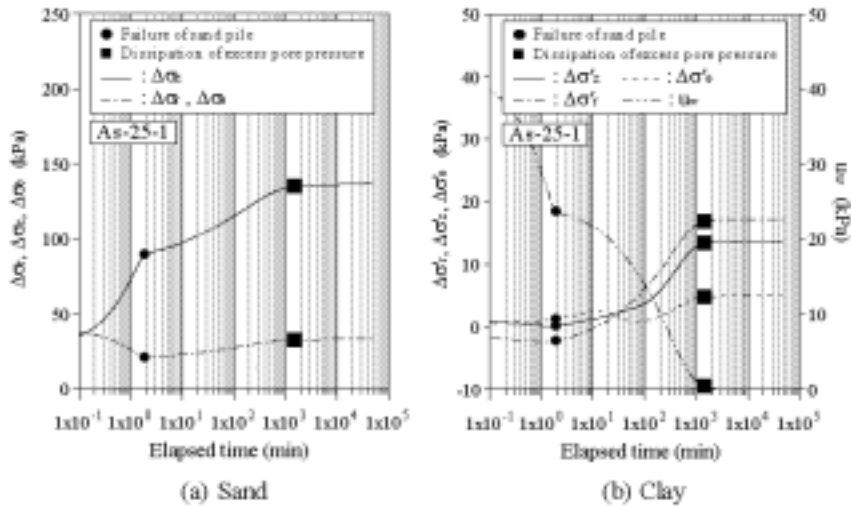


그림 3 모래말뚝과 점토의 응력증분의 경시변화

4. 복합지반의 응력분담 메커니즘

모래말뚝과 점토의 역학거동에 근거하여 압밀중에 발생하는 복합지반내의 응력분담거동에 대하여 고찰 한다. 복합지반에 대한 재하 직후에는, 모래말뚝에서는 재하압력과 거의 동일한 $\Delta\sigma'_z$ 의 증가가 발생하며(그림 3(a)), 점토부에서는 비배수조건이 유지되기 때문에 재하압력과 거의 동일한 과잉간극수압만이 발생한다(그림 2(b), 그림 3(b)). 따라서, 재하 직후에 복합지반 전체적으로는 모래말뚝의 연직응력과 점토부의 과잉간극수압에 의해 재하압력을 지지하게 된다. 그 다음으로 복합지반의 압밀과정 초기에서는, 과잉간극수압의 소산에 의하여 전화되는 유효응력의 증가는 응력집중 현상에 의해 모래말뚝에만 발생하고(그림 3(a)), 점토에는 거의 발생하지 않는다(그림 3(b)). 모래말뚝에의 응력집중은 즉시 모래말뚝을 파괴상태에 도달하게 하고(그림 2(a)), 그 결과 모래말뚝에 의한 재하압력의 지지메커니즘은 상실되게 된다. 모래말뚝의 파괴 이후 소산하는 과잉간극수압은 점토의 유효응력의 증가에도 전화되게 된다(그

림 3(b)). 그런데 모래말뚝은 다이러턴시 특성을 가지고 있기 때문에 복합지반의 침하에 의한 전단변형의 증가에 따라서 그 체적이 팽창 되려고 한다. 따라서 모래말뚝 주변의 점토는 측방으로부터의 압축을 받아 σ_r 이 증가한다(그림 3(b)). 한편 이러한 특성은 모래말뚝에 작용하는 구속압력을 증가시키고, 모래말뚝의 평균유효응력이 증가한다(그림 2(a)). 여기서 모래말뚝은 파괴상태에 있기 때문에 평균유효응력의 증가는 일반화전단응력의 증가를 피하여(그림 2(a)), 결과적으로 σ_z 의 증가를 피하게 된다(그림 3(a)). 따라서 재하직후를 제외하고 거의 모든 압밀기간에서 모래말뚝은 파괴상태에 있음을 알 수 있고, 그로 인하여 압밀중에 대한 복합지반의 역학거동은 모래의 다이러턴시 거동과 점토의 압축거동의 상호작용에 의해 지배된다고 생각할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 신뢰성을 검증한 수치해석의 결과를 이용하여 복합지반 내부의 응력분담 메커니즘을 고찰·규명하였다. 본 연구에 의해 얻은 결과를 다음과 같이 요약한다.

- (1) 재하과정에서, 점토부에서는 비배수조건을 유지하고 있기 때문에 재하압력에 거의 동일한 과잉간극수압이 발생하지만, 모래말뚝에서는 재하압력과 거의 동일한 연직응력의 증가를 나타낸다. 따라서 복합지반 전체로써는 이 양자에 의해 재하압력이 지지된다.
- (2) 압밀과정에서, 압밀초기에서의 과잉간극수압의 소산에 의한 유효응력 증가는 응력집중에 의해 거의 모래말뚝에 발생하고 점토부에는 거의 발생하지 않는다. 응력집중에 의해 모래말뚝이 파괴상태에 다다른 후 모래말뚝에 의한 재하압력의 지지메커니즘이 상실되고 이에 따라서 점토부의 유효응력이 증가를 시작한다. 복합지반전체의 침하와 모래말뚝의 다이러턴시 효과에 의해 점토부는 모래말뚝으로부터 압축응력을 받아 측방향 응력이 증가한다. 한편, 이러한 현상에 의해 모래말뚝에 작용하는 구속압력도 증가하여 결과적으로 연직응력의 증가도 피하게 된다.
- (3) 재하압력에 대한 지지역할을 모래말뚝만이 수행하는 압밀초기시를 제외하면, 대부분의 압밀기간중에서 모래말뚝은 파괴상태에 있다. 따라서 개량지반의 역학거동은 모래말뚝의 다이러턴시 거동과 점토의 압축거동의 상호작용에 의해 지배된다. 또한, 이러한 거동은 정성적으로 재하단계의 영향을 받지 않는다.

참고문헌

1. 유 승경 (2003b), 저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구, 한국지반공학회 논문집 제19권 5호, pp.253~261.
2. 유 승경 (2003a), 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 압밀 과정중에 발생하는 응력분담거동과 그 메커니즘, 한국지반공학회 논문집 제19권 5호, pp.301~310.
3. 北詰昌樹 (1994), 低置換率SCP工法の開発と港灣工事への適用, 土と基礎, Vol. 42, No. 2, pp. 31~36.
3. Matsui, T. and Abe, N. (1986), Flow Surface Model of Viscoplasticity for Normally Consolidated Clay, Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models Geotech. Ghent, pp. 157-164.
4. Matsui, T. , Oda, K. and Nabeshima(1996), Analytical Study on Settlement Behavior of Soft Ground Improved by SCP, Proceedings of ISOPE '96, Vol. 4, pp. 582-587.
5. Oda, K., Matsui, T. and You, S. K. (2001), Model Tests and Numerical Simulations on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by SCP with Low Replacement Area Ratio, International Symposium on Recent Developments of Ground Improvement (ISRDCI 2001), Special Technical Publication-2, pp. 9-12, 2001.