

모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 응력분담특성에 관한 비교 연구 Comparison Study on Stress Sharing Characteristics of Sand or Gravel Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio

유승경¹⁾, Seung-Kyong You, 조성민²⁾, Sung-Min Cho, 김지용³⁾, Ji-Yong Kim, 심민보⁴⁾, Min-Bo Shim

1) 명지전문대학 토목과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College

2) 평원엔지니어링 대표이사, President, Pyeong-Won Engineering co.

3) 평원엔지니어링 부장, General manager, Pyeong-Won Engineering co.

4) 평원엔지니어링 부장, General manager, Pyeong-Won Engineering co.

SYNOPSIS : The compaction pile methods with low replacement area ratio used sand(SCP) or gravel(GCP) has been usually applied to improvement of soft clay deposits. In order to design accurately compaction pile 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 and GCP 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 compaction piles and clays in the composition ground during consolidation was elucidated, together with stress sharing mechanism between compaction piles and clays.

Keywords : Soft ground improvement, Gravel compaction pile, Sand compaction pile, Low replacement area ratio, Stress sharing, Numerical analyses

1. 서 론

모래나 쇄석을 사용하는 다짐말뚝공법에 의해 기대되는 지반개량효과는 다짐말뚝의 강성에 의한 개량 지반의 지지력 증대 효과나 침하 저감 효과이다. 특히, 연약한 해성점토 지반 상에 건설되는 해안구조물의 경우, 기초지반 개량에 본 공법을 적용함으로써 성토하중이나 구조물 등의 상재하중을 지지하고 또한 그에 의해 지속적으로 발생하는 압밀침하를 억제하는 효과를 얻을 수 있다.

최근 우리나라에서는 다짐말뚝에 사용하는 지반재료의 부족으로 인하여 치환율이 약 30% 이하의 저치환율 다짐말뚝공법을 육상공사는 물론 해상공사에의 적용을 노력 하고 있는 실정이다. 그러나 저치환율의 다짐말뚝공법에 의해 형성된 복합지반의 역학거동은 그 메커니즘이 상당히 복잡하다고 알려져 있다(유 승경, 2003a). 즉, 고치환율의 다짐말뚝공법과 비교하여 저치환율 다짐말뚝공법에 의해 개량된 복합지반의 역학거동은 다짐말뚝과 점토지반 양방의 역학적 상호작용의 영향을 보다 현저하게 받는다. 따

라서 저치환율 다짐말뚝공법을 합리적으로 설계하기 위해서는 복합지반 내부에서의 다짐말뚝과 점토와의 역학적 상호작용을 규명하여야 하며 그 메커니즘을 이해하여야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 최근 다짐말뚝재료로 많이 사용되고 있는 모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 합리적인 설계법 확립의 일환으로, 상재하중의 재하 직후부터 압밀 종료 시까지의 복합지반의 역학 거동, 특히 응력분담 특성을 일련의 수치해석을 통하여 고찰하였다. 수치해석은 탄점소성 축대칭 다차원압밀 유한요소법을 적용하였으며, 그에 대한 신뢰성은 저치환율 모래다짐말뚝에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험 결과와의 비교를 통하여 검증할 수 있었다(유 승경, 2003b).. 본 논문에서는 수치해석의 결과들로부터 저치환율 다짐말뚝이 타설된 복합지반의 다짐말뚝과 점토에 대해 압밀 중에 발생하는 각각의 역학거동을 고찰하고 그 결과들로부터 복합지반 내부에 발생하는 응력분담특성을 규명하고자 한다.

2. 수치해석의 개요

2.1 수치해석모델

본 연구에서 수행한 수치해석에서는 탄점소성 축대칭 다차원압밀 유한요소법(Matsui, et al, 1996)을 사용하였으며, 수치해석모델에 대한 개요는 그림 1과 같다. 본 수치해석모델은 저치환율 SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험(유 승경, 2003a)을 대상으로 작성하였으며, 모형지반 압밀거동의 대칭성을 고려하여 축대칭모델로 하였다. 이 모델은 모형실험에서와 같이 중심부에 1본의 다짐말뚝이 표현되어 있고 그 주위는 연약점토에 의해 둘러싸여 있다. 또한 모형지반의 점토부만 다차원 압밀해석을 적용하였으며, 간극수에 관한 경계조건은 해석모델의 측면 및 저면에 대하여 비배수, 재하판과 모래말뚝에 접하는 부분의 경계를 배수조건으로 하였다.

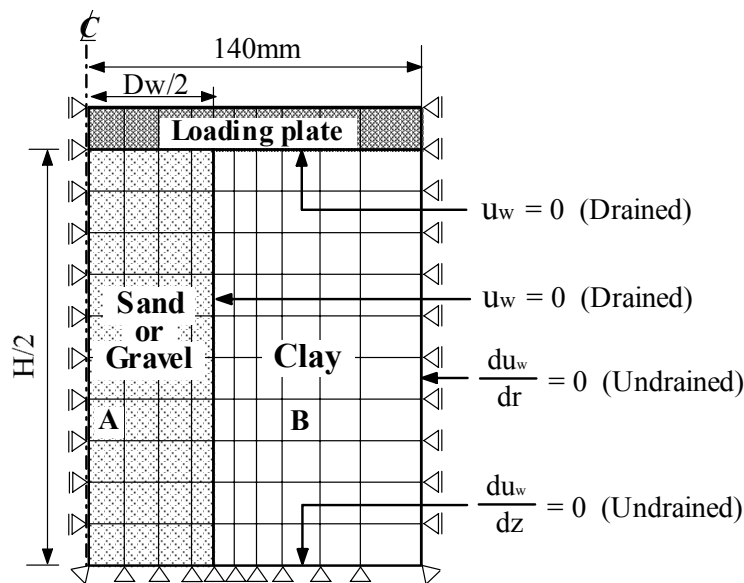


그림 1. 수치해석모델

2.2 지반재료의 역학모델

모형지반을 구성하고 있는 점토는 고함수비, 저응력 상태이기 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.

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

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

표 1. 점토의 모델 특성치

Parameters		Value
Compression index	λ	0.142
Swelling index	κ	0.017
Stress ratio at critical state	M^*	1.150
Stress ratio at K_o state	η_{k_o}	0.710
Poisson ratio	ν	0.341
Coefficient of secondary compression (1/min)	μ	2.4×10^{-3}
Reference viscous volumetric (1/min)	$\dot{\nu}_r^v$	8.3×10^{-9}
Internal confining strain	δ	0.001

한편, 본 연구에서는 다짐말뚝재료 즉, 모래와 쇄석의 역학모델로써 식(2)에 표시한 Drucker-Prager타입의 파괴기준을 항복함수(f)로 하는 구성모델을 사용하였다. 이 구성모델은 파괴에 따르는 비선형기동과 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 기준 하는 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 모래와 쇄석의 모델특성치와 그 값을 나타내고 있다(Oda, et al, 2001, 배우석 등, 2003).

표 2. 모래 및 쇄석의 모델특성치

Parameters		Value	
		Sand	Gravel
Elastic modulus at reference state (kPa)	E_0	2.54×10^4	7.84×10^4
Mean effective stress at reference state (kPa)	p_0'	98.0	98.0
Material constant	m	0.6	0.6
Internal friction angle (°)	ϕ'	36.0	42.0
Plastic strain increment ratio	η_d	0.15	0.15
Poisson ratio	ν	0.30	0.27

2.3 수치해석조건

본 논문에서의 수치해석은 모래다짐말뚝과 쇄석다짐말뚝에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대하여 실시하였다. 수치해석은 두 종류의 다짐말뚝에 대하여 치환율의 변화 즉, A_s 가 5%, 10% 및 25%인 경우에 대하여 모두 6가지의 경우에 대하여 수행하였으며, 복합지반의 초기상태에 대한 재하압력증분은 29.4kPa로 하였다. 다음의 표는 본 논문에서 실시한 수치해석 조건을 나타내고 있다.

표 3. 수치해석조건

Pile	Case	A_s (%)	Loading Stage	Pressure Before Applying Surcharge (kPa)	Incremental Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground H/2 (cm)
SCP	SCP-05	5	1	9.8	29.4	20
	SCP-10	10				
	SCP-25	25				
GCP	GCP-05	5				
	GCP-10	10				
	GCP-25	25				

3. 복합지반의 압밀거동

3.1 복합지반 침하의 시간에 따른 변화

그림 3-1은 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반의 시간 경과에 따른 지표면 침하량의 변화를 나타내고 있다. 모래말뚝과 쇄석말뚝에 의한 복합지반에서의 침하량의 변화로부터 복합지반 중 점토부에서의 압밀현상에 의한 체적변화가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 두 결과 모두 일차압밀현상이 종료된 후에도 2차압밀거동이 완만하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 일차 압밀의 종료가 빠르게 나타나고 있으며, 복합지반의 침하량도 적게 나타나고 있다. 한편, 모래말뚝과 쇄석말뚝의 치환율이 같은 각각의 경우 상대적으로 강성이 큰 쇄석말뚝에 의한 복합지반의 침하량이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

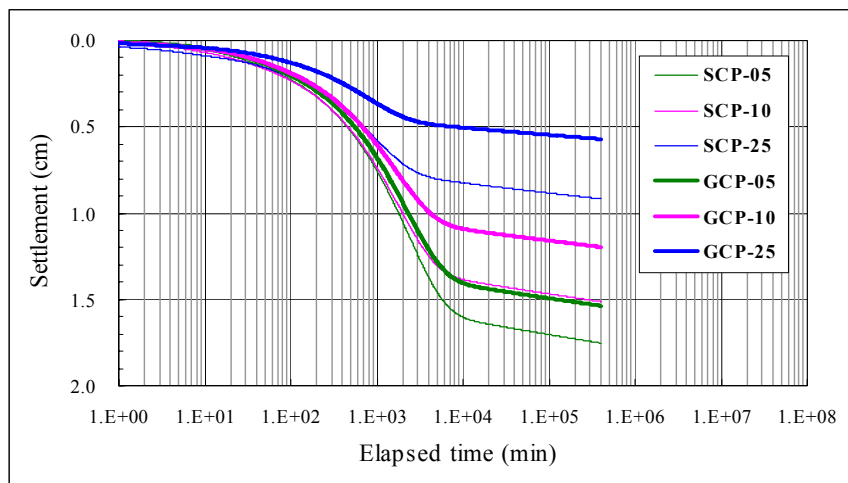


그림 2. 시간 경과에 따른 지표면 침하량의 변화

3.2 점토부 과잉간극수압의 시간에 따른 변화

그림 3은 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반 중 점토부(그림 1의 수치해석모델 요소 B)의 시간 경과에 따른 과잉간극수압의 변화를 나타내고 있다. 복합지반에서는 모래말뚝과 쇠석말뚝에 의한 배수효과로 재하로 인해 발생한 점토부의 과잉간극수압이 시간이 경과함에 따라 소산되고 있음을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 점토부의 과잉간극수압 소산이 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 한편, 두 경우 모두 과잉간극수압 소산의 진행곡선에서 각각 그 속도가 급격히 변하는 변곡점을 나타내고 있다. 이는 기존의 연구에서 고찰한 바와 같이 다짐말뚝의 재료적 파괴점을 나타내는 것으로써, 이 시점을 전후로 하여 다짐말뚝 및 점토부의 체적변화와 그에 따른 과잉간극수압 변화 양상이 크게 변화한다(유 승경, 2003b). 이러한 이유로부터 모래말뚝과 쇠석말뚝으로 형성된 복합지반 중 점토부의 과잉간극수압은 그 변화 양상에 정성적으로 차이를 보인다고 판단된다.

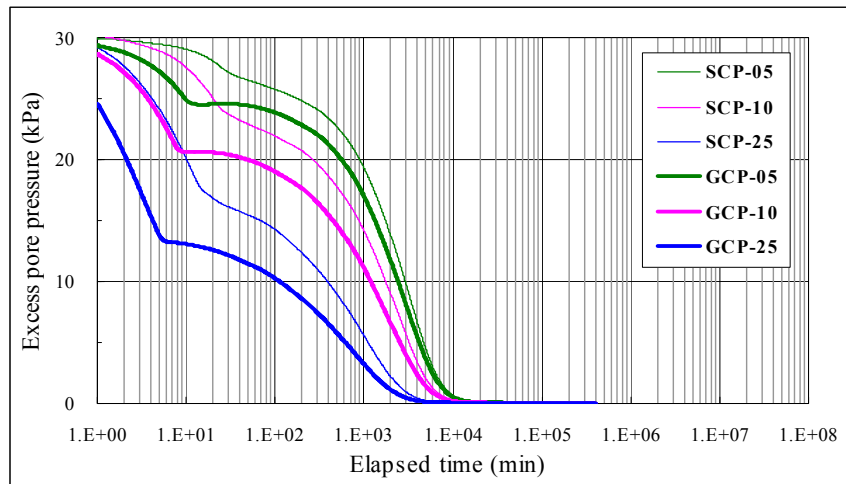


그림 3. 점토부의 시간 경과에 따른 과잉간극수압의 변화

3.3 유효응력증분의 시간에 따른 변화

그림 4와 5는 각각 다짐말뚝과 점토지반 내부의 유효응력증분의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 여기서 점토지반의 평균유효응력증분은 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$\bar{\Delta p}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_i' \quad (3)$$

$$\Delta p_i' = \frac{\Delta \sigma_{ni}' + \Delta \sigma_{zi}' + \Delta \sigma_{\theta i}'}{3} \quad (4)$$

여기서, $\Delta \sigma_{ni}'$, $\Delta \sigma_{zi}'$, $\Delta \sigma_{\theta i}'$ 는 각각 i 번째 점토 요소의 반경방향, 연직방향, 원주방향의 연직유효응력의 초기값으로부터의 증분이다.

그림 4로부터 알 수 있듯이 모든 경우의 다짐말뚝의 평균유효응력증분은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있으며 재료의 파괴시점을 전후로 하여 급격한 변화를 보이고 있다. 이러한 경향은 쇠석말뚝의 경우 더욱 현저하게 나타나고 있다. 한편, 쇠석말뚝 내부의 경우가 모래말뚝의 경우보다 더 큰 유효응력의 증가를 보였으며 이는 치환율이 작을수록 현저함을 알 수 있다.

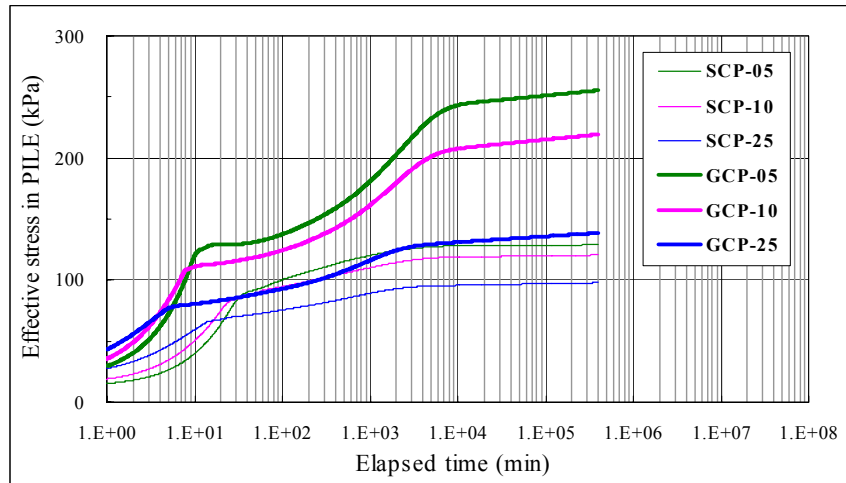


그림 4. 다짐말뚝의 시간 경과에 따른 평균유효응력증분의 변화

그림 5로부터 알 수 있듯이 모든 경우의 점토부의 평균유효응력증분은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있으나, 어느 시점에 도달하면 그 값이 일정하게 유지되는 정상상태를 보이고 있다. 또한, 다짐말뚝의 종류에 관계없이 치환율이 적을수록 정상상태에서의 유효응력증분은 크게 나타나고 있는데 이는 저치환율 일수록 점토부가 분담하는 응력분담율이 커짐을 나타낸다. 한편, 점토부의 일차압밀이 종료된 후의 유효응력증분을 비교해 보면 모래말뚝에 의한 복합지반의 경우가 쇄석말뚝의 경우보다 크게 증가하였음을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 모래말뚝과 쇄석말뚝 내부에서 유효응력증분의 비교와 반대되는 현상으로 모래말뚝에 의한 복합지반의 점토부가 쇄석말뚝의 경우보다 응력 분담율이 큼을 알 수 있다.

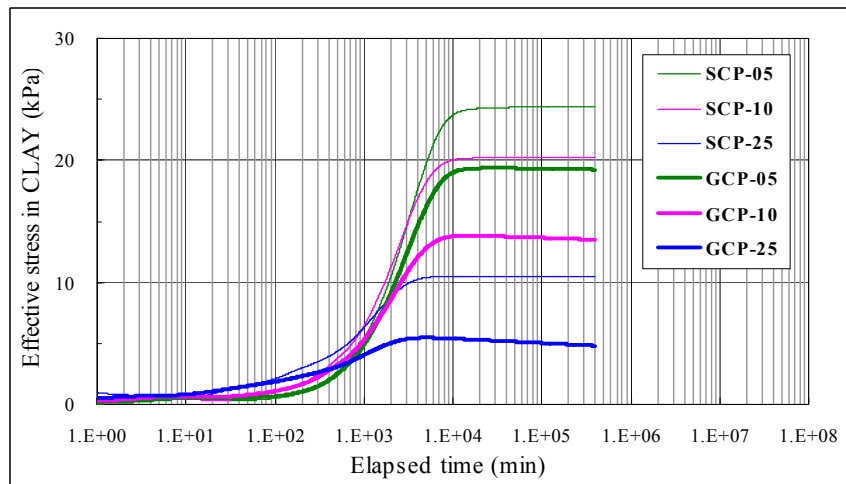


그림 5. 점토부의 시간 경과에 따른 평균유효응력증분의 변화

3.4 복합지반 압밀도의 시간에 따른 변화

그림 6은 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀도가 시간의 경과에 따라 변화하는 양상을 보여주고 있다. 여기서 압밀도 U_s 는 식 (5)와 같이 복합지반의 침하량의 시간에 따른 변화로부터 산정하였으며, 일차압밀종료시간은 점토부의 과잉간극수압이 거의 소산된 시점의 경과시간으로 결정하였다.

$$U_s(\%) = \frac{s}{s_f} \times 100 \quad (5)$$

여기서, s 및 s_f 는 각각 임의의 시간에서의 침하량과 일차압밀종료시점에서의 침하량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 모래다짐말뚝과 쇄석다짐말뚝에 의한 복합지반 모두 치환율이 커질수록 압밀이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 한편, 치환율이 같은 경우의 모래다짐말뚝과 쇄석다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀진행은 거의 일치하고 있는데 이는 앞 절에서 고찰한 점토부의 과잉간극수압의 소산 거동과 상이한 결과이다. 이러한 현상의 이유는 참고문헌 2에서 언급하고 있으며, 결과적으로 복합지반의 압밀도 산정의 방법은 다짐말뚝의 치환율에 따른 파괴거동을 고려하여 신중히 선정하여야 한다.

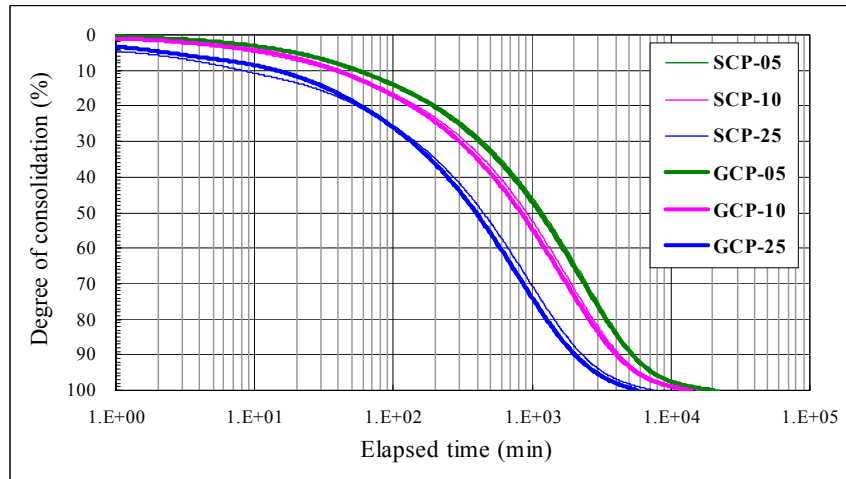


그림 6. 시간 경과에 따른 복합지반 압밀도의 변화

4. 다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담특성

4.1 응력분담비의 시간에 따른 변화

그림 7은 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반의 응력분담비의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 여기서 응력분담비 n 은 다음에 나타낸 식으로 산정하였다.

$$n = \frac{\Delta\sigma_z^s}{\Delta\sigma_z^c} \quad (6)$$

여기서, $\Delta\sigma_z^s$ 와 $\Delta\sigma_z^c$ 는 각각 다짐말뚝 요소와 점토부 요소의 연직응력증분을 나타낸다.

그림에는 기존에 실시한 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀거동에 관한 실내모형실험의 결과(유 승경, 2003a)도 함께 도시하였다. 그림으로부터 모래말뚝과 쇄석말뚝에 의한 저치환율 복합지반에서 n 은 치환율에 관계없이 복합지반의 압밀이 진행됨에 따라서 그 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 고치환율 복합지반의 경우와는 달리 저치환율 복합지반의 경우는 상대적으로 많은 부분을 차지하고 있는 점토부의 압밀 현상이 응력분담 메커니즘에 큰 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다(유 승경, 2003 a, b). 또한, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 치환율이 감소함에 따라서 n 은 감소하고 있다. 이러한 현상은 복합지반의 치환율이 작을수록 다짐말뚝에 집중되는 응력증분의 크기는 증가하지만 상대적으로 점토

부에 발생하는 압밀진행에 따른 유효응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율의 변화에 의해 n 이 감소한다고 판단된다. 한편, 기존의 모형실험과 수치해석의 결과를 비교해 보면 치환율이 25%인 경우 이외에는 경과시간 약 30분 이전을 제외하면 양자가 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서 치환율이 25%인 경우 모형실험에서 얻은 n 이 수치해석결과보다 전반적으로 크게 나타나고 있는 이유는 재하하중의 크기가 서로 다르기 때문이라고 판단된다.

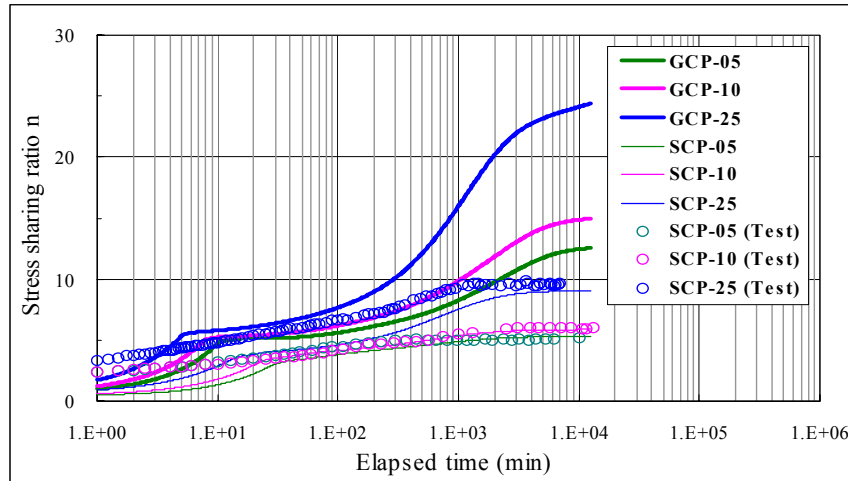


그림 7. 응력분담비의 시간에 따른 변화

4.1 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계

그림 8은 모래 및 쇄석다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 모래 및 쇄석다짐말뚝에 의한 복합지반의 n 은 압밀초기에서 모두 급격히 증가하고 있으며, 이러한 현상은 쇄석다짐말뚝의 경우가 더 현저하게 나타나고 있다. 즉, 복합지반의 n 은 다짐말뚝재료의 파괴 시점까지 급격한 증가를 보임을 알 수 있다. 또한, 각각의 복합지반에서 다짐말뚝재료의 파괴시점에서의 n 은 치환율에 관계없이 거의 비슷함을 알 수 있다. 한편, 복합지반의 다짐말뚝재료가 파괴된 이후에는 복합지반 전체의 압밀이 진행됨에 따라서 n 이 완만하게 근사 선형적으로 증가하고 있으며, 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반에서 치환율이 클수록 n 의 증가율이 커짐을 알 수 있다.

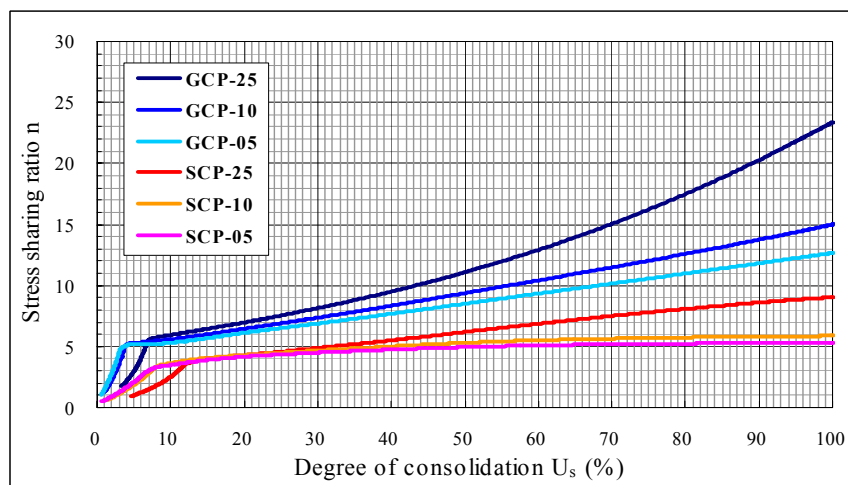


그림 8. 복합지반의 압밀도와 응력분담비의 관계

5. 결론

본 연구에서는 모래와 쇄석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법에 대한 보다 정확한 응력분담거동을 규명하기 위하여 다짐말뚝의 탄소성거동과 연약지반의 이차압밀거동을 표현할 수 있는 구성모델을 이용한 다차원 축대칭 압밀해석을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 저치환율 모래말뚝과 쇄석말뚝에 의한 복합지반의 침하량 변화로부터 점토부에서의 압밀현상에 의한 복합지반의 체적변화가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 일차압밀이 종료된 후에도 2차압밀거동이 완만하게 나타났다. 또한, 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 일차압밀의 종료가 빠르게 나타났으며, 복합지반의 침하량도 적게 나타났다. 한편, 모래말뚝과 쇄석말뚝의 치환율이 같은 경우 상대적으로 강성이 큰 쇄석말뚝에 의한 복합지반의 침하량이 적게 나타났다.
2. 모래말뚝과 쇄석말뚝에 의한 복합지반에서는 두 경우 모두 치환율이 증가할수록 점토부의 과잉간극수압 소산이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 한편, 다짐말뚝의 재료적 파괴 시점을 전후로 하여 복합지반 중 점토부의 과잉간극수압의 소산거동이 변화함을 알 수 있었다.
3. 모래말뚝과 쇄석말뚝 내부의 평균유효응력증분은 복합지반의 압밀이 진행함에 따라 증가함을 알 수 있었다. 이때 쇄석말뚝 내부의 경우가 모래말뚝의 경우보다 더 큰 유효응력의 증가를 보였으며 이는 치환율이 작을수록 현저함을 알 수 있었다.
4. 복합지반에서 점토부의 평균유효응력증분은 시간이 경과함에 따라 증가하고 있으나, 어느 시점에 도달하면 그 값이 일정하게 유지되는 정상상태를 보였다. 또한, 다짐말뚝의 종류에 관계없이 치환율이 적을수록 정상상태에서의 유효응력증분은 크게 나타났는데 이로 부터 저치환율 일수록 점토부가 분담하는 응력분담율이 커짐을 알 수 있었다. 한편, 점토부의 일차압밀이 종료된 시점에서의 유효응력증분은 모래말뚝에 의한 복합지반의 경우가 쇄석말뚝의 경우보다 크게 나타났다. 따라서 모래말뚝에 의한 복합지반의 점토부가 쇄석말뚝의 경우보다 응력 분담율이 큼을 알 수 있었다.
5. 모래말뚝과 쇄석말뚝에 의한 저치환율 복합지반에서 응력분담비는 치환율에 관계없이 복합지반의 압밀이 진행됨에 따라서 그 값이 증가하였다. 이는 고치환율 복합지반의 경우와는 달리 저치환율 복합지반의 경우는 상대적으로 많은 부분을 차지하고 있는 점토부의 압밀 현상이 응력분담 메커니즘에 큰 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다. 또한, 저치환율 복합지반에서 치환율이 감소함에 따라 응력분담비는 감소하였다. 그 이유는 복합지반의 치환율이 작을수록 다짐말뚝에 집중되는 응력증분의 크기는 증가하지만 상대적으로 점토부에 발생하는 압밀진행에 따라서 유효응력 또한 증가하여 그것들의 증가비율이 변화하기 때문이라고 판단된다.
6. 모래 및 쇄석다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담비는 말뚝재료의 파괴 시점까지 모두 급격한 증가를 보였으며, 이러한 현상은 쇄석다짐말뚝의 경우가 더 현저하게 나타났다. 또한, 각각의 복합지반에서 말뚝재료의 파괴시점에서의 응력분담비는 치환율에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타냈다. 한편, 복합지반의 다짐말뚝재료가 파괴된 이후에는 복합지반 전체의 압밀이 진행됨에 따라서 응력분담비가 완만하게 근사 선형적으로 증가하였으며, 각각의 다짐말뚝의 치환율이 클수록 응력분담비의 증가율이 커짐을 알 수 있었다.

이와 같은 결과들로부터 저치환율 다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 거동은 압밀이 진행됨에 따라서 그 특성이 변화함을 알 수 있었다. 그러나 모래말뚝에 의한 응력분담 메커니즘은 이미 규명된 바 있으나(유 승경, 2003), 쇄석말뚝에 의한 복합지반의 응력분담 메커니즘에 대하여는 아직 불명확한 부분이 많으며 따라서 이에 대한 실험적, 해석적 고찰이 추가적으로 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 유승경 (2003a), 저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구, 한국지반공학회 논문집 제19권 5호, pp.253~261.
2. 유 승경 (2003b), 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 압밀 과정중에 발생하는 응력분담거동과 그 메커니즘, 한국지반공학회 논문집 제19권 5호, pp.301~310.
3. 배우석, 오세욱, 이종규 (2003), 조립질 매트 두께가 복합지반의 거동에 미치는 영향, 대한토목학회 논문집 제23권 제2C호, pp.87~94.
4. 岡 二三生 (2000), 地盤の彈粘塑性構成式, 森北出版社, pp.44~71.
5. 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.
6. 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.
7. 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.