

모래말뚝이 타설된 연약점토지반의 압밀정수결정에 관한 연구 Study on Determining Consolidation Parameters of Soft Clay Ground Improved by Sand Pile

유승경¹⁾, Seung-Kyong You, 松井保²⁾, Tamotsu Matsui, 홍원표³⁾, Won-Pyo Hong,
김태형⁴⁾, Tae Hyung Kim

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

2) 오사카대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Osaka Univ.

3) 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Chung-Ang Univ.

4) 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 전임강사, Full Time Instructor, Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime Univ.

SYNOPSIS: Sand pile method, such as sand drain method and sand compaction pile method, has been popularly used as an improvement method for soft clay grounds. The effect of accelerating consolidation of soft clay grounds has been evaluated with Barron's solution. By the way, the consolidation behavior of soft clay ground with sand piles strongly depends on both the nonlinear mechanical interaction between sand piles and surrounding clays and the degradation permeability of clays. In this paper, the method for determining consolidation parameters of soft clay ground with sand drains by using Barron's solution was proposed, through a series of numerical simulations. Through the method, the change in both volume compressibility and permeability during consolidation was reasonably evaluated.

Key words : sand pile, soft clay ground, consolidation, volume compressibility, permeability, numerical simulation

1. 서 론

샌드드레인이나 샌드콤팩션파일과 같은 모래말뚝이 타설된 연약점토지반은 통상 복합지반이라고 불리워진다. 필자는 압밀 중에 발생하는 복합지반의 역학거동 특성, 특히 응력분담거동에 대하여 실내모형실험과 수치해석방법에 의해 검토하였다(유승경, 2003a, b). 그 결과 복합지반의 역학거동은 모래말뚝의 비선형 전단거동과 점토의 비선형 체적압축거동의 역학적 상호작용에 의해 지배된다는 것을 알게 되었으며, 복합지반의 압밀거동은 그 역학적 상호작용과 압밀중의 투수계수의 변화의 영향을 받는다는 것을 알게 되었다. 일반적으로 연약지반개량공법 설계에서는 모래말뚝이 타설된 연약점토지반의 압밀거동을 기존의 방사류 압밀이론(Barron의 이론해 등)을 이용하여 분석하고 있다. 그러나 이러한 이론해는 압밀의 진행에 따른 압밀계수의 변화를 고려할 수 없다. 따라서 엄밀히 말하면 필자가 규명한 복합지반의 압밀거동을 기존의 이론해를 이용하여 재현할 수 없다. 그러나 실무에서 사용하고 있는 이론해는 그 사용이 매우 간편하고 실제로 그 적용사례 실적도 풍부하다. 따라서 필자가 규명한 복합지반의 압밀거동 특성을 어떠한 형태로든 반영할 수 있다면 기존의 이론해를 사용하여 복합지반의 압밀거동 예측의 정도

를 향상시킬 수 있으리라고 판단된다.

본 연구에서는 기존의 이론해 즉, Barron의 이론해를 사용하여 모래말뚝이 타설된 연약점토지반 즉, 복합지반의 압밀거동을 보다 합리적으로 예측하기 위한 압밀정수의 결정법에 관하여 고찰하였다. 우선 점토의 비선형 거동특성과 투수성의 변화특성을 고려한 일련의 수치해석을 실시하여 모래말뚝이 타설된 연약점토지반의 압밀거동을 재현하였다. 한편, 이론해에 적용하기 위한 압밀정수의 결정방법 즉, 응력수준 의존특성을 고려한 체적압축계수의 결정방법과 간극의 변화를 고려한 투수계수의 결정방법을 몇 가지 검토하였다. 최종적으로 수치해석결과로부터 얻은 복합지반의 압밀시간을 가장 적절히 재현하는 체적압축계수와 투수계수의 결정방법을 제안하였다.

2. 수치해석의 개요

그림 1은 본 연구에서 수행한 수치해석의 모델과 그 경계조건을 나타내고 있다. 수치해석 모델은 중심에 1본의 모래말뚝이 있고 그 주위에 연약점토가 둘러싸여 있는 복합지반을 축대칭 모델로 표현하고 있다. 본 해석모델은 저치환율 SCP에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 대한 일련의 모형실험(유승경, 2003a)을 대상으로 작성하였다. 한편, 본 수치해석에서는 탄점소성 축대칭 다차원압밀 유한요소법(Matsui, et al, 1996)을 사용하였다. 또한 모형지반의 점토부만 다차원 압밀해석을 적용하였으며, 간극수에 관한 경계조건은 해석모델의 측면 및 상·하면에 대하여 비배수, 모래말뚝과 점토가 접하는 부분의 경계를 배수조건으로 하였다.

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. 또한 점토의 투수계수는 간극비의 변화에 대응하여 변화되도록 하였다. 한편, 모래에 대한 역학거동은 Drucker-Prager타입의 파괴기준을 갖는 탄소성체로써 모델화 하였다. 이상의 역학모델에서 사용한 파라미터와 그 적용성에 대해서는 참고문헌(유승경, 2003b)을 참조하기 바란다.

본 수치해석은 치환율(A_s)이 5%에서 30%인 경우에 대하여 재하압력증분($\Delta\sigma$)을 39.2kPa에서 117.6kPa까지 변화시키면서 모두 30가지의 경우에 대하여 수행하였다. 단, 수치해석에서의 초기압력상태는 모든 경우에 대하여 9.8kPa로 하였다.

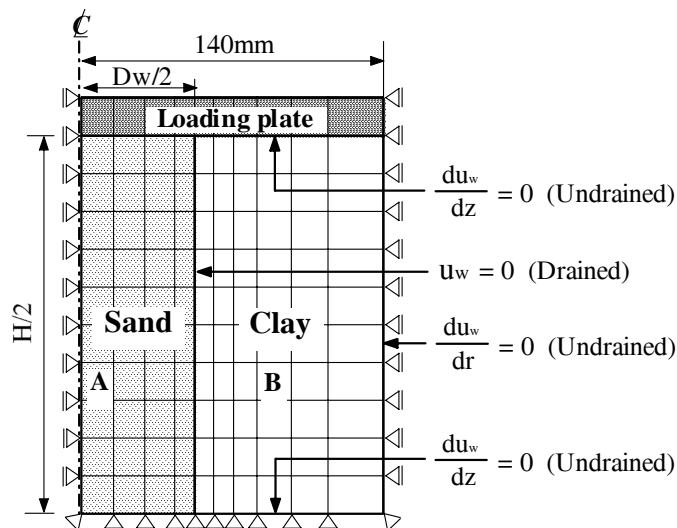
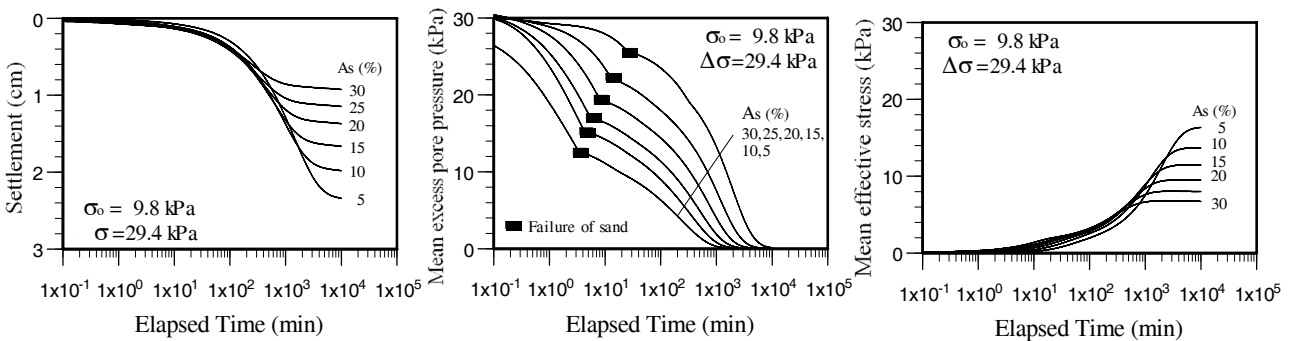


그림 1. 수치해석 모델과 경계조건

3. 수치해석 결과

3.1 복합지반의 압밀거동

그림 2(a)~(c)는 수치해석 결과로부터 얻은 재하압력증분이 29.4kPa인 경우의 복합지반 침하량, 점토부의 평균과잉간극수압, 점토부의 평균유효응력증분의 시간에 따른 변화를 각각 나타내고 있다. 그림 2(a)와 (b)로부터 치환율이 높을수록 복합지반의 침하량이 적게 나타나며, 점토부의 과잉간극수압 소산이 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 과잉간극수압의 소산 속도는 모래말뚝의 파괴시점을 전후로 하여 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림 2(c)로부터 수치해석의 최종시점의 단계에서 점토부의 평균유효응력증분은 치환율이 높을수록 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 치환율이 높을수록 모래말뚝이 지지하는 재하하중의 분담비율이 커져서 점토부에는 거의 하중이 작용하지 않기 때문이라 판단된다.



(a) 침하량의 변화

(b) 평균과잉간극수압의 변화

(c) 평균유효응력증분의 변화

그림 2. 시간의 경과에 따른 복합지반의 압밀거동

3.2 복합지반의 압밀시간

그림 3은 복합지반의 치환율에 따른 압밀시간의 관계를 나타내고 있다. 압밀시간은 그림 2(c)에 나타난 점토부의 평균유효응력증분의 변화특성으로부터 압밀도를 계산하여 압밀도 90%에 해당하는 시간 (t_{90})으로 결정하였다. 당연한 현상이겠지만 치환율이 높고 재하응력증분이 큰 경우일수록 t_{90} 은 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

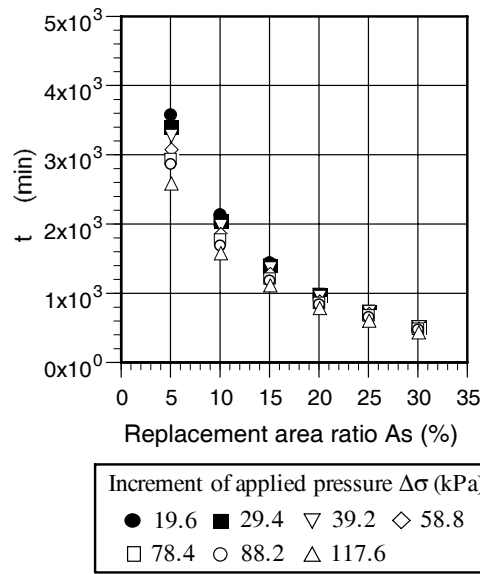


그림 3. 치환율에 따른 압밀시간의 변화

4. Barron식의 압밀정수 결정방법

4.1 Barron의 이론식

등침하조건에 대한 Barron의 평균압밀도(U)는 다음 식과 같이 계산되어진다. 즉,

$$U = 1 - \frac{\bar{u}}{u_o} = 1 - e^{-8T_h/F(n)} \quad (1)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (2)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (3)$$

$$T_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w} \frac{t}{d_e^2} = \frac{c_h}{d_e^2} t \quad (4)$$

여기서, d_e 와 d_w 는 각각 드레인에 의한 집수원의 직경과 드레인 직경을 나타내고 있으며, k_h 는 방사방향흐름에 대한 투수계수, m_v 는 체적압축계수를 나타내고 있다.

4.2 체적압축계수의 결정방법

연약점토의 체적압축계수는 응력레벨에 의존하며 압밀중의 유효응력 변화에 따라서 변화한다. 따라서 이하에 나타낸 바와 같이 점토의 체적압축계수를 결정한다. 우선, 점토의 압축곡선은 다음 식에 의해 표현된다.

$$e = e_o - \lambda \cdot \ln \frac{\sigma_v'}{\sigma_{vo}'} \quad (5)$$

여기서, σ_{vo}' 와 σ_v' 는 각각 초기상태와 현재작용하고 있는 연직방향 유효응력을 나타내며, e_o 와 e 는 초기상태와 현재의 간극비를 나타낸다. 또한 λ 는 점토의 압축계수이다. 한편 점토의 체적압축계수는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$m_v = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\partial e}{\partial \sigma_v'} \quad (6)$$

식 (6)에 식 (5)를 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$m_v = \frac{1}{1+e} \cdot \frac{\lambda}{\sigma_v'} \quad (7)$$

본 연구에서는 식 (7)을 이용하여 다음과 같은 네 가지의 m_v 를 결정하였다(그림 4 참조).

- 방법 ① : 초기상태에 대한 체적압축계수(m_{v0})
- 방법 ② : 압밀종료시에 대한 체적압축계수(m_{v1})
- 방법 ③ : σ_{v0}' 와 σ_{v1}' 의 대수평균치(σ_{v2}')에 대한 체적압축계수(m_{v2})
- 방법 ④ : 초기상태부터 압밀 종료까지의 압밀거동을 선형근사로 가정하여 결정하는 체적압축계수(m_{v3})

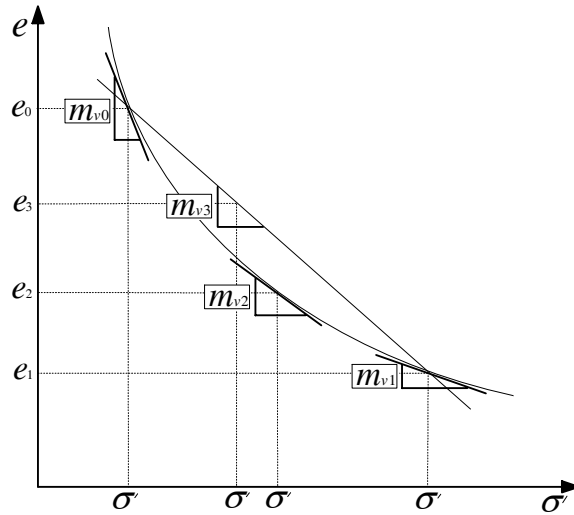


그림 4. 체적압축계수의 결정방법

4.3 투수계수의 결정방법

그림 5는 본 연구의 수치해석에서 가정한 점토의 투수계수와 간극비의 관계를 나타내고 있다. 이러한 관계에 근거하여 다음과 같은 세 가지 방법으로 투수계수를 결정하였다. 즉,

- 방법 I : 초기상태에 대한 투수계수(k_0)
- 방법 II : 압밀종료시에 대한 투수계수(k_1)
- 방법 III : k_0 와 k_1 의 대수평균치(k_2)

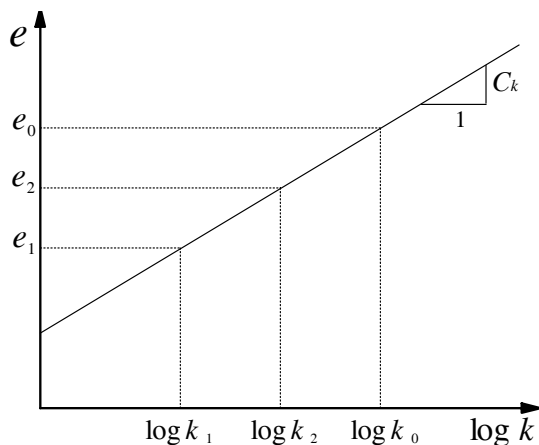


그림 5. 투수계수와 간극비의 관계

5. 압밀시간예측에 대한 압밀정수의 적용성

앞 절에서 설명한 방법에 의해 결정한 체적압축계수와 투수계수를 표 1에 나타난 바와 같이 조합하여 각각을 Barron의 이론해에 적용하였으며, 그 결과에 의해 t_{90} 을 각각의 적용방법에 따라 산출하였다.

표 1. 압밀정수 결정방법의 조합

적용방법	결정방법	
	체적압축계수	투수계수
1	방법 ①	방법 I
2	방법 ②	방법 II
3	방법 ③	방법 III
4	방법 ④	방법 III

그림 6(a)~(d)는 수치해석 결과와 Barron의 이론해에 각각의 압밀정수 적용방법을 적용하여 계산한 t_{90} 을 복합지반의 치환율에 따라 나타내고 있다. 그림으로부터 모든 압밀정수 적용방법에 의한 압밀시간은 치환율이 높을수록 감소하는 것을 알 수 있다. 단, 적용방법-1에 의한 압밀시간(그림 6(a))은 초기상태에 대한 체적압축계수와 투수계수를 사용하였기 때문에 Barron의 이론해에 의한 압밀시간은 $\Delta\sigma$ 의 영향을 받지 않고 있다. 그러나 그 밖의 적용방법에서는 압밀 진행에 따른 압밀정수의 변화를 고려하고 있기 때문에 $\Delta\sigma$ 가 커질수록 압밀시간도 작아지고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 특성은 수치해석으로부터 얻은 압밀시간의 변화 특성과 정성적으로 일치하고 있다.

그림 6(a)에 의하면 압밀 초기상태에 대한 압밀정수를 사용하는 적용방법-1에 의한 이론해의 압밀시간은 수치해석에 의한 것 보다 크게 나타나고 있다. 즉, 적용방법-1은 압밀촉진효과를 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 또한 압밀 종료시에 대한 압밀정수를 사용하는 적용방법-2의 경우(그림 6(b)), 이론해에 의한 압밀시간은 수치해석에 의한 것 보다 작게 나타나고 있다. 따라서 적용방법-2는 압밀촉진효과를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 한편, 적용방법-3의 경우(그림 6(c)), $\Delta\sigma$ 의 변화에 따른 압밀시간의 변화가 다소 작게 나타나고 있으나, 이론해에 의한 압밀시간은 수치해석에 의한 것과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 마지막으로 적용방법-4를 이용한 이론해의 압밀시간(그림 6(d))은 치환율 30%인 경우를 제외하면 이론해에 의한 압밀시간은 수치해석에 의한 것보다 작게 나타나고 있다. 이상의 고찰로부터 Barron의 이론해에 적용방법-3을 이용한 압밀정수를 적용함으로써 본 연구에서의 수치해석에 의한 압밀시간을 가장 적절히 추정할 수 있음을 알 수 있다.

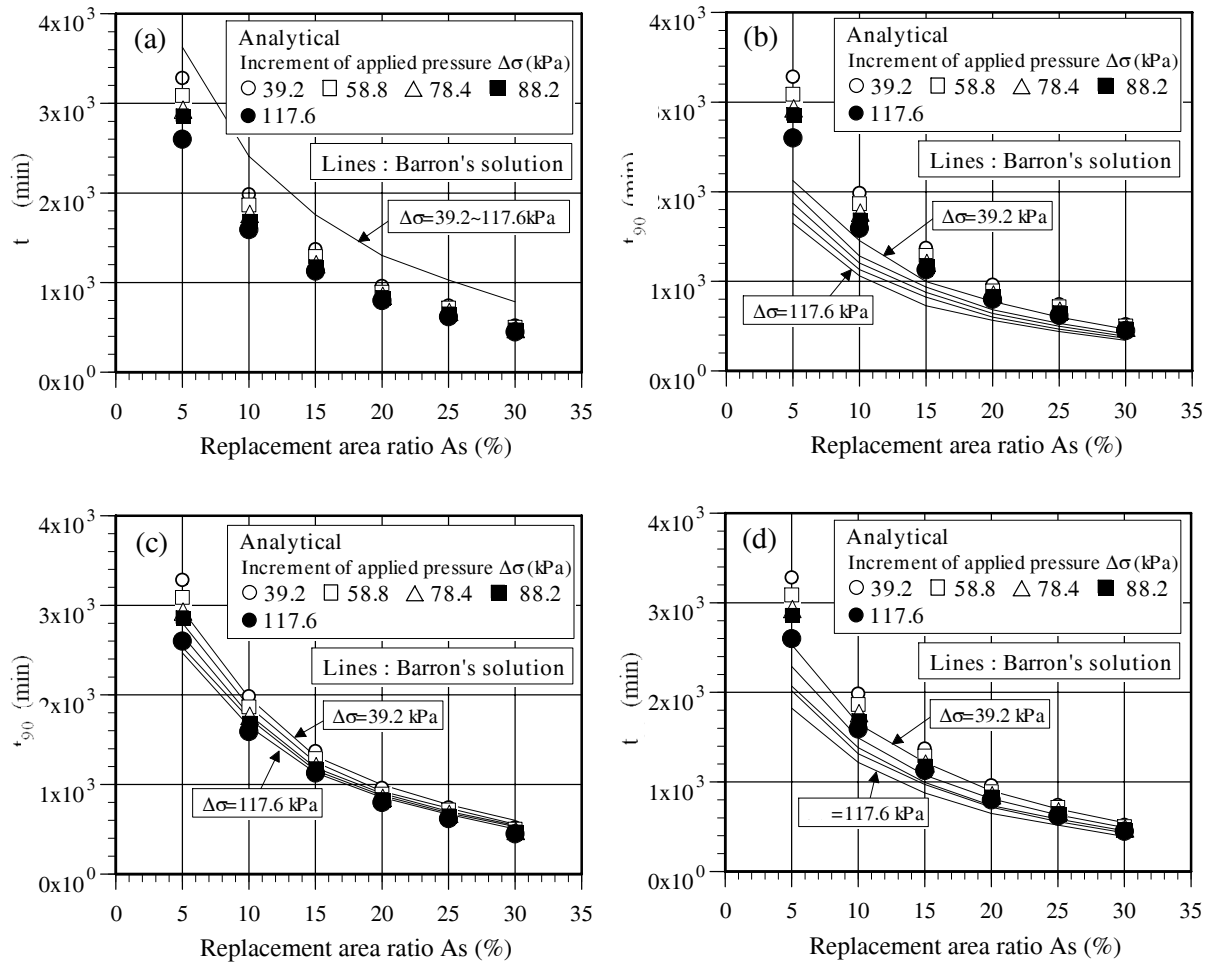


그림 6. 압밀정수의 적용방법에 따른 t_{90} 과 치환율의 관계

6. 결 론

본 연구에서는 모래말뚝이 타설된 연약점토지반의 압밀거동에 대한 수치해석의 결과를 이용하여 Barron의 이론해에 의한 압밀시간 예측을 위한 압밀정수의 결정방법에 대하여 고찰하였다. 본 연구에 의해 얻은 결과를 다음과 같이 요약한다.

- (1) 모래말뚝이 타설된 연약점토지반의 압밀시간은 재하압력증분이 클수록 빠르게 나타났으며 이러한 특성은 복합지반의 치환율이 낮을수록 현저하게 나타났다. 이것은 점토의 간극비 감소 즉, 투수성 저하에 의한 압밀시간 지연 효과보다도 압축 강성 증가로 인한 압밀시간 단축효과가 현저했기 때문이라고 판단된다.
- (2) Barron의 이론해를 이용하여 복합지반의 압밀거동을 추정할 경우 초기상태의 압밀정수 즉, 초기상태에서의 체적압축계수와 투수계수를 적용하면 압밀시간을 과대하게 예측하게 된다. 한편 압밀 종료시의 압밀정수를 적용할 경우는 복합지반의 압밀시간을 과소평가하게 된다.
- (3) 복합지반의 초기응력과 압밀종료시 응력의 대수평균치에 상응하는 체적압축계수와 초기상태와 압밀종료시에 대한 투수계수의 대수평균치를 각각 압밀정수의 대표치로 결정하여 Barron의 이론해에 적용한다면 복합지반의 압밀시간을 적절히 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 유승경 (2003b), 저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구, 한국 지반공학회 논문집 제19권 5호, pp.253~261.
2. 유승경 (2003a), 저치환율 SCP에 의한 복합지반의 압밀 과정중에 발생하는 응력분담거동과 그 메커니즘, 한국지반공학회 논문집 제19권 5호, pp.301~310.
3. Barron, R.A. (1948), Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 113, pp. 718-742.
4. 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.
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 (ISR DGI 2001), Special Technical Publication-2, pp. 9-12, 2001.