

## 다짐말뚝으로의 점토혼입현상에 관한 실험적 연구

### Experimental Study of Clays Mixed into Compaction Piles

유 승 경<sup>1\*</sup> You, Seung-Kyong  
김 주 현<sup>2</sup> Kim, Ju-Hyun

#### ABSTRACT

In this paper, a series of laboratory chamber tests were performed to evaluate the effects of clays mixed into compaction piles due to confining stress of ground on consolidation promoting. For the tests, various compaction piles such as SCP, GCP, and RAPP (Recycled-Aggregate Porous concrete Pile) were used. The ground condition was simulated at 50% and 100% of degree of consolidation. Also, confining stresses were applied to the composite ground corresponding to those of 5m depth. The amount of mixed clays into each compaction pile were estimated by measuring the drainage from the saturated compaction piles. From the test result, it was shown that the drainage area of compaction pile was changing according to the consolidation condition. GCP showed the most change of drainage area as it has relatively large void ratio; however, the amount of change was decreased by progressing consolidation of ground.

#### 요 지

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile, RAPP)을 비롯한 각종 다짐말뚝공법(SCP와 GCP)에 대하여 원지반의 구속압에 기인한 다짐말뚝으로의 점토혼입현상이 개량된 지반의 압밀축진효과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일련의 실내모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 모형지반의 압밀도를 50%, 100%의 상태로 원지반을 모사하였으며 다짐말뚝을 조성한 복합지반에 대해서는 심도 5m에 상응하는 구속압을 적용하였다. 또한 각각의 다짐말뚝으로의 점토 혼입량은 포화된 다짐말뚝으로부터의 배수량을 측정하여 추정하였다. 모형실험 결과를 통하여 다짐말뚝의 종류에 따라 원지반의 압밀 진행 상태에 따라서 연직배수기능을 담당하는 다짐말뚝의 통수 단면적이 변화하는 경향을 파악할 수 있었다. 즉, 상대적으로 큰 간극비를 갖는 쇄석다짐말뚝에서 가장 많은 통수 단면적의 변화가 관측되었으나 원지반의 압밀이 진행된 상태일수록 그 변화량은 감소함을 알 수 있었다.

**Keywords :** Recycled-aggregate porous concrete pile (RAPP), SCP, GCP, Consolidation promoting, Replacement area ratio

### 1. 서 론

최근 연약지반개량을 위한 다짐말뚝공법에는 모래다짐말뚝(SCP) 공법과 쇄석다짐말뚝(GCP) 공법이 일반적으로 적용되고 있다. 또한 최근에는 천연자원의 고갈을 대비하여 모래나 자갈 등을 대체하는 재료를 이용하고 기존 다짐말뚝공법의 공학적 문제점을 개선하고자 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)공법(유승경 등, 2008)이 제안되

었다. 이러한 다짐말뚝공법들에 대해서는 합리적 설계법 확립을 위하여 응력분담거동 특성이나 압밀축진효과에 관한 실내모형실험이나 수치해석적 연구가 다수의 국내외 연구자들에 의해 진행되어져 왔다. Matsuo(1968), Aboshi 등(1970), 유승경(2003), 유남재 등(2005)은 SCP공법의 역학적거동에 관한 모형실험 및 수치해석적 연구를 통하여 점토와 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동 및 압밀축진효과, 지지력 특성을 고찰하였다. 또한 모래말뚝

1\* 정회원, 명지전문대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, E-mail: yousk@mjc.ac.kr)  
2 비회원, 홍익대학교 토목공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, Hong-Ik University)

에 비해 상대적으로 다짐말뚝의 강성이 큰 GCP공법에 대하여도 다수의 연구자들이 응력집중현상이나 개량지반의 지지력 산정 방법, 침하량 예측 방법에 대하여 연구 결과를 발표하였다(Greenwood, 1970 ; Hughes 등, 1974 ; Priebe, 1976 ; Aboshi 등, 1979). 한편, 실내모형실험과 수치해석을 통하여 SCP공법과 GCP공법의 응력분담특성 및 압밀축진효과에 대하여 비교 평가한 연구 성과가 제시되었다(유승경 등, 2005 ; 유승경, 2009). 그러나 이들 공법에 대한 다수의 연구에서 시공 과정에서 발생되리라 추정되는 다짐말뚝의 기능성 변화에 대한 검토는 그다지 이루어지지 않고 있다. 특히 원지반의 구속압에 의해서 말뚝 주변의 점토가 말뚝 간극으로 혼입되면서 발생하는 배수 기능의 변화 즉, 통수 단면적의 변화에 대하여는 아직 검토되고 있지 않다.

본 논문에서는 RAPP를 비롯한 각종 다짐말뚝공법(SCP와 GCP)에 대하여 원지반의 구속압에 기인한 다짐말뚝으로의 점토혼입현상이 개량된 지반의 압밀축진효과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일련의 실내모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 모형지반의 압밀도를 50%, 100%의 상태로 원지반을 모사하였으며 다짐말뚝을 조성한 복합지반에 대해서는 심도 5m에 상응하는 구속압을 적용하였다. 또한 각각의 다짐말뚝으로의 점토 혼입량은 포화된 다짐말뚝으로부터의 배수량을 측정하여 추정하였다. 모형실험 결과를 통하여 다짐말뚝의 종류에 따라 원지반의 압밀 진행 상태에 따라서 연직배수기능을 담당하는 다짐말뚝의 통수 단면적이 변화하는 경향을 분석하였다.



그림 1. 실내모형실험장치의 모습

## 2. 실내모형실험

### 2.1 실험장치

그림 1과 그림 2는 각각 본 연구에서 사용한 실내 모형 실험 장치의 모습과 그 상세도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 원형 내부 토조는 내경 280mm, 내부심도 100mm이며 측면에 직경 10mm의 구멍을 다수 만들어 압력 공급 장치(컴프레서)로부터 외부 토조(내경 480mm, 내부심도 520mm)에 채워진 물로 전해지는 압력이 내부 토조 내의 점토 시료에 구속압으로 균등하게 전달될 수 있도록 하였다. 또한, 컴프레서와 외부 토조(압력셀) 사이에 압력 조절 장치를 설치함으로써 컴프레서로부터 공급되는 압력이 외부 토조를 통해 내부 토조의 점토 시료에 소정의 구속압으로 제어되며 전달될 수 있도록 하였다. 한편 모형실험에서는 점토 시료에 가해진 구속압에 의해 점토 시료의 중앙에 설치된 다짐말뚝의 간극으로 점토가 혼입되게 되는데 이때 혼입된 점토의 체적만큼 미리 포화시킨 다짐말뚝으로부터 물이 배수되게 된다. 이 과정에서 배수되는 물의 양을 측정하기 위해 압력셀 외부에 수집 실린더를 설치하고 다짐말뚝 상부와 연결하였다. 또한 압력셀의 역할을 하는 외부 토조의 상부에는 압력 공급 밸브와 배수용 밸브 이외에 압력셀로 전달된 압력이 일정하게 유지되고 있는 지 확인하기 위한 압력 확인용 밸브를 설치하였다.

### 2.2 사용 시료

본 연구에서 수행한 모형실험에서는 광양지역에서 채취한 점토를 사용하였으며 그 물리적 특성은 표 1에 나타난 바와 같다. 또한 다짐말뚝 제작에 사용된 재료는 선행

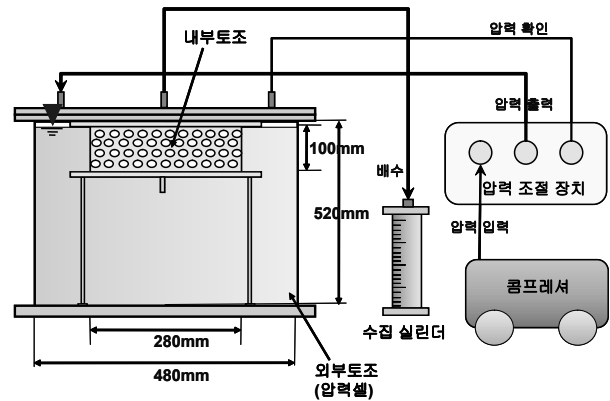


그림 2. 실내모형실험장치의 상세도

연구(유승경, 2009)에서와 동일한 물리적 특성을 갖는 모래와 순환골재를 사용하였으며 특히 GCP 제작에는 RAPP 제작에 사용한 순환골재를 사용하였다. 그림 3은 모형실험에 사용된 점토와 모래, 순환골재의 입도분포 곡선을 나타내고 있다.

### 2.3 모형지반 제작

본 연구에서 수행한 모형실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선, 이물질 제거를 위해 눈금 4.76mm의 체로 체가름을 실시한 자연 점토를 약 90%의 함수비로 반죽하고 멤브레인과 멤브레인 고정용 받침대가 설치된 내부토조와 예비압밀용 토조를 상하로 결합시켜 토조 내에 120mm 높이가 되도록 충전 하였다. 이후, 재하판과 재하추, 하중 전달 장치를 사용하여 점토가 5m 심도에 상응하는 응력상태와 압밀도를 나타내도록 압력을 가하여 예비압밀을 실시하였다. 예비압밀의 종료 시점은 일차압밀 침하가 끝나는 시점으로 결정하였고, 침하량은 LVDT를 사용하여 계측하였다. 또한 압밀이 종료된 후 시료의 높이를 80mm로 조성하기 위해 시료 상부를 줄뜰음으로 커팅하였다. 예비압밀 후 함수비는 약 60%였으며, 조성된 지반의 중심에 직경 150mm의 케이싱을 실시하여 생성된 원형의 구멍에 미리 준비된 말뚝 재료를 각각의 다짐 말뚝에 대하여 동일한 소정의 다짐에너지로 균질하게 다져 넣어 복합지반을 제작하였다. 점토가 말뚝 간극으로 혼

입되는 양을 측정하기 위해 말뚝은 물로 포화시킨 후 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 다짐말뚝은 SCP, GCP, RAPP의 총 세 가지로 하였으며, 예비압밀로 조성된 점토 중앙에 직경 150mm의 케이싱을 관입하여 말뚝을 타설하였다. 말뚝의 높이는 80mm이며, 조성된 지반에 대한 말뚝의 치환율은 29%이다. 그림 4는 본 연구에서 수행한 모형 실험에서 모형지반을 제작하는 과정을 나타내고 있다.

### 2.4 모형실험의 조건

본 모형실험에서는 원지반의 압밀 진행 상태에 따른 다짐말뚝의 종류 별 점토 혼입 양상을 비교·분석하기 위하여 각기 다른 세 가지 종류의 말뚝(SCP, GCP, RAPP)에 대하여 심도 5m에 상응하는 지중응력 상태를 갖는 모형지반을 각기 다른 압밀도(50%, 100%)로 조성한 후 실험을 수행하였다. 표 2는 본 연구에서의 모형실험 조건을 나타내고 있다.

## 3. 실내모형실험 결과

### 3.1 시간에 따른 다짐말뚝 배수량의 변화

그림 5는 모형지반에 대한 구속압 적용 후 시간에 따른 다짐말뚝으로부터의 배수량 변화를 나타내고 있다. 다짐말뚝의 종류와 원지반의 압밀 상태에 관계없이 다짐말뚝으로부터의 배수량은 약 10분 정도까지 급격하게 증가하였으며 그 이후에는 배수가 발생되지 않고 정상상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 현장에서의 구속압에 의한 점토 혼입 현상은 다짐말뚝의 타설 직후에 발생되며 그 이후에는 더 이상 진행되지 않는다고 판단할 수 있다.

표 1. 점토의 물리적 특성

$G_s$	$W_L$	$W_p$	$I_p$	흙 분류
2.65	56.5 %	31.2 %	25.3	CH

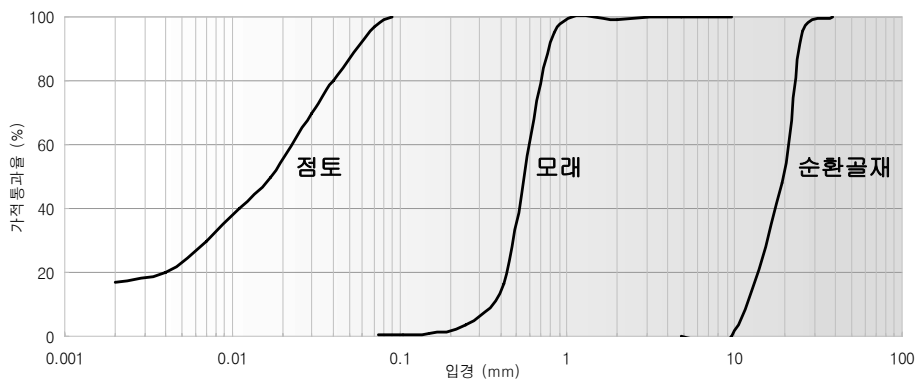
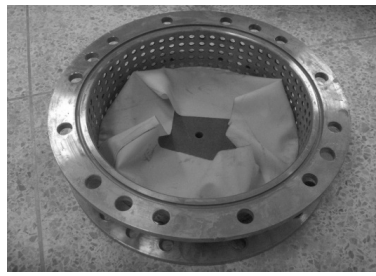


그림 3. 사용 시료의 입도분포곡선



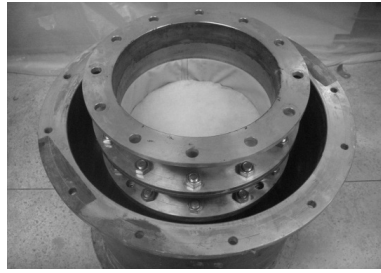
(a) 하부판에 멤브레인 고정



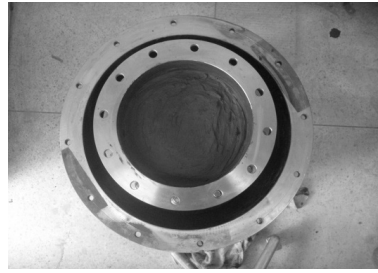
(b) 내부토조에 정치



(c) 외부토조에 거치



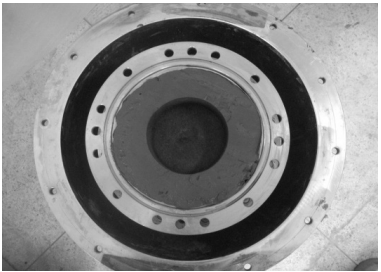
(d) 하부 배수재 설치 및 상단토조 조립



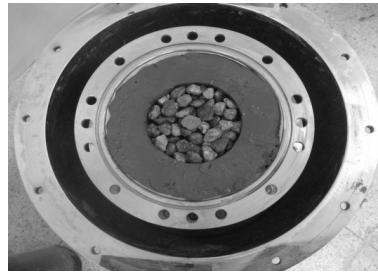
(e) 점토시로 충전



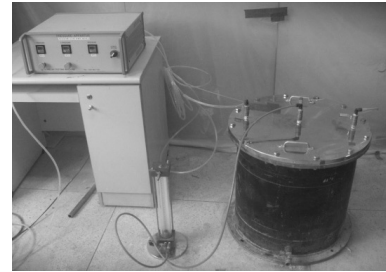
(f) 예비압밀 실시



(g) 다짐말뚝부 점토 제거



(h) 다짐말뚝 조성 및 포화



(i) 상부캡 설치 및 구속압 공급

그림 4. 모형지반 제작 과정

표 2. 모형실험 조건

실험 케이스	말뚝 종류	압밀도 (%)	치환율 (%)	말뚝 높이 (mm)	예비압밀압력 (kPa)	구속압 (kPa)
G-50	GCP	50	29	80	45	48
S-50	SCP					
R-50	RAPP					
G-100	GCP	100				
S-100	SCP					
R-100	RAPP					

한편, 각각의 다짐말뚝에 대하여 원지반의 압밀도가 50%인 경우에서 가장 많은 배수량이 관측되었으며 압밀도가 증가할수록 배수량은 적게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2 원지반의 압밀도 차이에 따른 점토 혼입량의 변화

그림 6은 모형실험결과로부터 추정된 다짐말뚝으로의 점토 혼입량을 원지반 압밀도에 따라 그 변화를 정리한 것이다. 여기서 점토 혼입량은 본 모형실험에서 측정된 다짐말뚝으로부터의 배수량과 그 양이 동일하다는 조건으로 산정하였다. 또한 점토 혼입율(%)은 다짐말뚝의 전체 체

적에 대한 점토 혼입량의 비율로 계산하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 압밀도가 100%인 지반에서는 약 2%이하의 낮은 점토 혼입율을 보였으며, 압밀도 50%인 지반에서는 압밀도 100%인 지반에 비해 상대적으로 높은 점토 혼입율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 점토 혼입율은 GCP가 가장 크고 SCP가 가장 작은 것을 확인할 수 있다.

### 4. 원지반의 심도에 따른 치환율의 변화 분석

본 실험에서 점토의 혼입으로 인해 다짐말뚝은 배수 기능을 가지는 통수 단면적이 변화하게 되된다. 그림 7은 초

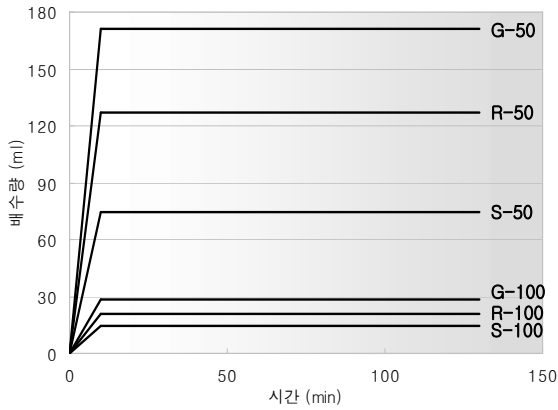


그림 5. 구속압 적용 후 경과 시간에 따른 다짐말뚝으로부터의 배수량 변화

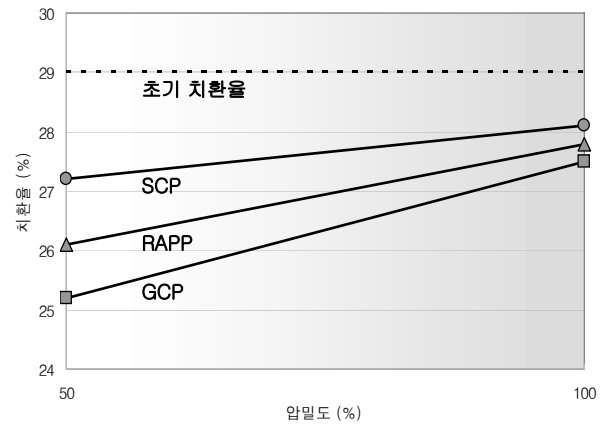


그림 7. 점토 혼입에 따른 치환율 변화

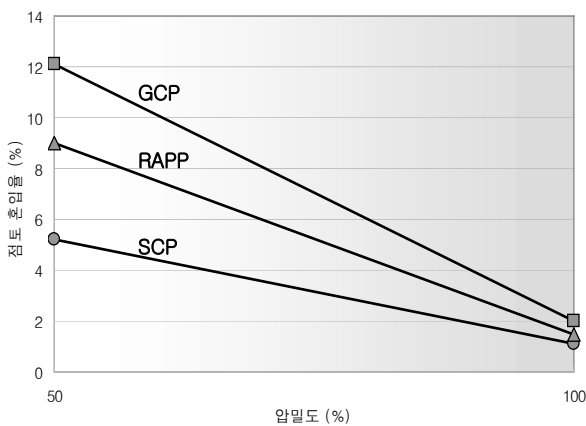


그림 6. 원지반의 압밀도에 따른 점토 혼입율의 변화

기 치환율에 대한 각 말뚝의 구속압 작용 후 치환율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 치환율은 점토의 혼입율에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며 압밀도 100%인 지반에 비해 압밀도 50%인 지반에서 다소 큰 폭의 치환율 감소가 발생한 것을 알 수 있다. 또한 치환율 변화의 크기는 GCP, RAPP, SCP의 순으로 크게 나타났다. 이는 원지반의 압밀이 진행 중인 상태이거나 상대적으로 큰 간극비를 갖는 다짐말뚝에서 구속압에 의한 점토혼입이 현저하게 나타남을 의미하며 이러한 사실에 따라 원지반의 압밀 상태 및 다짐말뚝의 종류에 따라 연직배수에 의한 압밀촉진 지연 효과를 정량적으로 판단하여 설계에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile, RAPP)을 비롯한 각종

다짐말뚝공법(SCP와 GCP)에 대하여 원지반의 구속압에 기인한 다짐말뚝으로의 점토혼입현상을 파악하기 위하여 일련의 실내모형실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압밀도 100%인 지반에서는 심도 5m에 작용하는 구속압에 의한 점토의 혼입 현상은 거의 발생하지 않았으며, 압밀도 50%인 지반에서는 말뚝으로의 혼입현상이 발생한 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 말뚝별로 점토의 혼입율을 살펴보면 GCP, RAPP, SCP의 순으로 크게 나타난 것을 알 수 있었으며 각각의 다짐말뚝에 대하여 원지반의 압밀도가 낮아질수록 말뚝에 혼입되는 점토의 양은 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 사실로부터 원지반의 압밀이 진행 중인 상태이거나 상대적으로 큰 간극비를 갖는 다짐말뚝에서 구속압에 의한 점토혼입이 현저하게 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 본 모형실험 결과에 의해 구속압에 의한 점토의 혼입으로 인해 각각의 다짐말뚝은 초기에 비해 치환율이 감소됨을 알 수 있었다. 이는 배수 기능을 가지는 통수 단면적이 줄어들게 됨을 의미하며 따라서 원지반의 압밀 상태 및 다짐말뚝의 종류에 따라 연직배수에 의한 압밀촉진 지연 효과를 정량적으로 판단하여 설계에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 수행한 모형실험의 결과로부터 원지반 구속압에 따른 다짐말뚝으로의 점토혼입양상이 발생된다는 사실을 확인하였다. 그러나 전반적인 양상의 규명을 위해서는 원지반의 심도와 압밀정도에 대한 다양한 조건에서

의 추가적인 연구가 필요하며 필자는 추후 연구에 반영하여 수행할 계획이다.

## 감사의 글

이 논문은 건설핵심기술연구개발사업 중 “순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발” 과제(06건설핵심 C06)에 대한 연구결과와 일부이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 유남재, 정길수, 김지성, 박병수, 고경환 (2005), “SCP 보강 점성토 지반의 지지력 및 응력분담특성”, *한국지반공학학회 논문집*, Vol.21, No.1, 2005 pp.81-91.
2. 유승경 (2003), “저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구” *한국지반공학학회 논문집*, 제19권, 제5호, pp.253-261.
3. 유승경, 조성민, 김지용, 심민보 (2005), “모래와 쇠석을 이용한 저치환율 다짐말뚝공법의 응력분담특성에 관한 비교 연구”, *한국지반공학학회 공동 학술대회 논문집*, pp.305.
4. 유승경, 이창민, 김세원, 최항석 (2008), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법에 대한 실내모형실험”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제7권, 제2호, pp.23-29.
5. 유승경 (2009), “SCP와 GCP의 압밀촉진효과에 관한 비교 고찰”, *한국토목섬유학회논문집*, 제8권 2호, pp.41-46.
6. Aboshi, H., Yoshikuni, H., and Maruyama, S. (1970), “Constant Loading Rate Consolidation Test”, *Soils and Foundations*, Vol. 10, No. 1, pp. 44-56.
7. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M. & Harada, K. (1979), “The Compozer- a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of larger diameter sand column”, *Proc. of Int. Conf. on Soil Reinforcement*, Paris, pp.211-216.
8. Greenwood, D. A. (1970), “Mechanical improvement of soils below ground surface”, *Proceedings, Ground Engineering conf., Institution of Civil Engineering, June*. pp.11-12.
9. Hughes, J. M. O. & Withers, N. J. (1974), “Reinforcing of soft cohesive soils withstone column”, *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, May, pp.42-49.
10. Matsuo, M., (1968), “Study on the uplift resistance of footing (II)”, *Soil and Foundation* VIII(1), pp.18-48.
11. Priebe, H. (1976), “Abschätzung des Setzungsverhaltens eins durch Stopfuerdichtung verbessertan Baugrandes”, *Die Bautechnik, H.S.*

(논문접수일 2009. 12. 3, 심사완료일 2009. 12. 19)