한국토목섬유학회논문집 제7권 3호 2008년 9월 pp. 25 ~ 30
J. Korean Geosynthetics Society Vol.7 No.3 September. 2008 pp. 25 ~ 30

# 순환골재 다공질 콘크리트말뚝으로 개량된 복합지반의 침하저감 및 압밀거동 특성

# Characteristics of Settlement Reduction and Consolidation Behavior of Composition Ground Improved by Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile

유 승 경[1]* You, Seung-Kyong　　김 세 원[2] Kim, Se-Won
최 항 석[3] Choi, Hang-Seok　　이 창 민[4] Lee, Chang-Min

**ABSTRACT**

In this research, the characteristics of settlement and consolidation behavior of the composite ground formation reinforced by Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile (RAPP) were evaluated by conducting a series of laboratory chamber tests. The effect of settlement reduction was verified by comparing the settlement of the composite ground formation with that of the unreinforced ground. In addition, it was studied how much the RAPP can accelerate consolidation in assessment of the degree of consolidation in the composite ground formation. The amount of settlement reduction was decreased with an increase on surcharge pressure, but it was greater than that of the SCP method. The RAPP and the SCP showed a similar rate of consolidation.

**요 지**

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)공법에 대한 실내모형실험의 결과를 바탕으로 RAPP로 개량된 복합지반의 침하 및 압밀 거동 특성을 분석하였다. 이를 위하여 실내모형실험에서 관측된 복합지반의 침하량과 무보강 지반의 침하량을 비교하여 복합지반의 침하저감효과를 분석하였으며 복합지반의 압밀도를 산정하여 RAPP공법으로 인한 압밀촉진효과를 검토하였다. RAPP공법으로 인한 복합지반의 침하저감효과는 상재하중증분이 증가할수록 감소하였으나 전반적으로 SCP공법에 의한 효과보다 크게 나타났으며 압밀촉진효과는 SCP공법과 유사하게 나타났다.

***Keywords*** **:** Recycled-aggregate, Porous concrete pile, Soft ground improvement, Laboratory chamber tests, Settlement, Consolidation

## 1. 서 론

현재 국내에서는 건설폐기물의 발생량이 급증하고 있어 이를 처리함에 있어 막대한 사회적, 경제적 비용이 소요되고 있다. 그러나 건설폐기물은 적절한 처리과정을 거친다면 새로운 골재자원으로 이용할 수 있다. 특히, 이러한 과정에서 얻을 수 있는 순환골재는 그 활용도가 양호한 것으로 평가되고 있으며, '건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률'에 따라 대형 공사현장에서는 순환골재를 의무적으로 사용해야 하기 때문에 현재까지 주로 도로공사에 한정적으로 적용되어 왔으나 최근 5년간 국내의 총 발생량에 대하여 9.5%의 매우 저조한 사용량을 나타내고 있는 실정이다(이세현, 2006). 선행 연구에 따르면 순환골재를 연약지반개량 분야 중 다짐말뚝분야에 천연골재의 대체

1* 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, E-mail: yousk@mjc.ac.kr)
2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental & Architectural, Korea Univ.)
3 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental & Architectural, Korea Univ.)
4 비회원, (주)평원엔지니어링 기술연구소 연구원 (Non-Member, Researcher, Technology Research Institute, Pyeong-Won Engineering)

재료로 사용한다면 연간 약 200억 원의 건설비 절감효과를 얻을 수 있다고 보고되고 있다(유승경 등, 2007). 따라서 순환골재를 이용한 신기술, 신공법 개발은 사회적, 경제적 측면에서 그 기여도가 매우 크다고 할 수 있다. 한편, 연약점토지반의 지지력 증대와 압밀촉진을 목적으로 채택되고 있는 연약지반 개량공법에는 천연재료를 이용하는 모래다짐말뚝(SCP)공법이나 쇄석다짐말뚝(GCP)공법 등이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 이러한 공법들은 천연재료의 부족으로 인한 재료비의 급증과 환경파괴라는 쟁점으로 인해 그 적용이 한계에 다다르고 있는 실정이다. 또한 이러한 공법들은 말뚝 선단부의 팽창파괴(Bulging Failure)나 말뚝표면의 간극막힘(Clogging) 현상 등의 결함이 우려된다. 따라서 이러한 기존 공법들의 단점들을 극복하기 위하여서는 재료적인 측면과 기능성 측면에서의 새로운 공법 개발이 시급한 실정이다.

본 연구의 목적은 천연자원을 보호하고 건설재료의 품귀현상을 극복하기 위하여 순환골재를 연약지반개량 분야에 적용함과 동시에 기존 다짐말뚝공법들의 재료적 측면과 기능적 측면의 단점을 개선하는 공법 개발에 있다. 본 논문에서는 기존에 실시한 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)공법에 대한 실내모형실험(유승경 등, 2008)의 결과를 통하여 연약지반의 개량효과를 분석하였다. 특히 실내모형실험으로부터 관측된 상재하중에 따른 역학거동 특성 분석을 통하여 RAPP공법에 의한 복합지반의 침하저감 및 압밀거동 특성을 검토하였다.

## 2. 모형실험의 개요

그림 1은 기존 연구에서 수행한 실내모형실험의 장치 상세도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 원형 토조는 내경 280mm, 내부심도 580mm이고, 토조 하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 상부로 부터의 배수성을 확보하였다. 또한 모

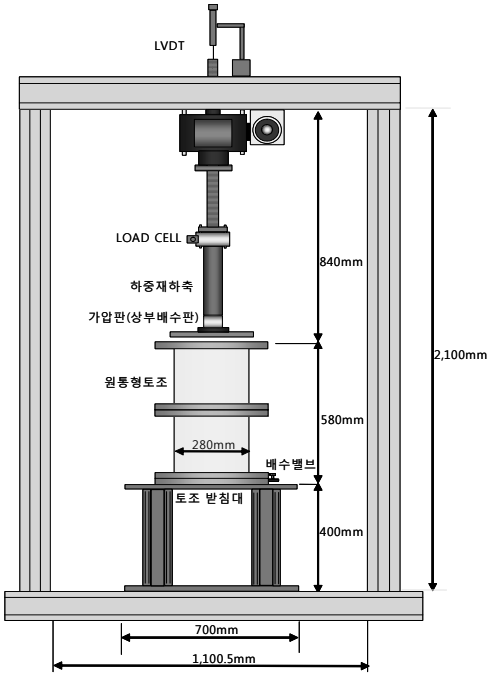



그림 1. 실내모형실험 상세도(유승경 등, 2008)

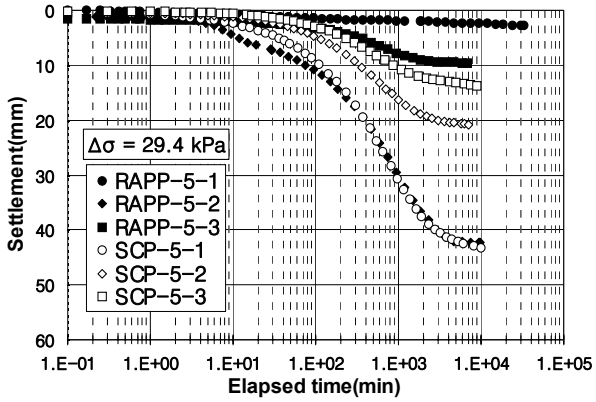
형실험에서는 통일분류법상 소성과 압축성이 큰 카오린(Kaolin) 점토를 사용하였다. 모형지반은 점토를 약 80%의 함수비로 반죽한 후 토조 내에 485mm의 높이가 되도록 충진하고 9.8kPa의 조건에서 예비압밀을 실시하여 약 2.16의 간극비를 갖는 점토지반을 제작하였다. 그 후 점토지반의 중심에 소정의 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 굴삭하고, 미리 제작된 RAPP를 삽입하였다. 이때 RAPP는 기존 연구결과(유승경 등, 2007)에 따라 최적 배합비로 제작하여 3일 양생 후 사용하였다. 한편 본 모형실험에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 치환율 5%인 경우에 대하여 소정의 재하응력에 도달하기까지 3단계로 나누어 단계재하를 실시하였다.

## 3. 모형실험 결과 및 분석

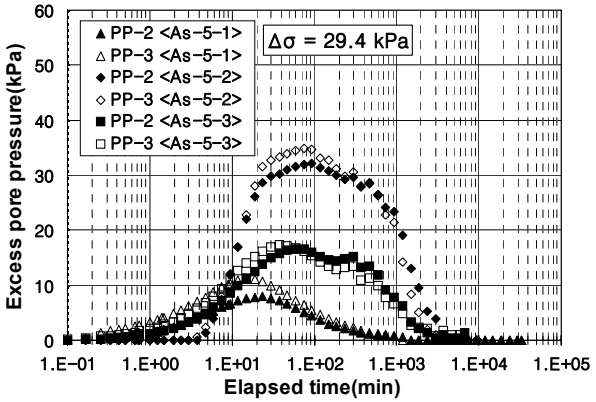
그림 2는 모형실험의 결과인 각 재하단계에서의 시간에

표 1. 실험조건

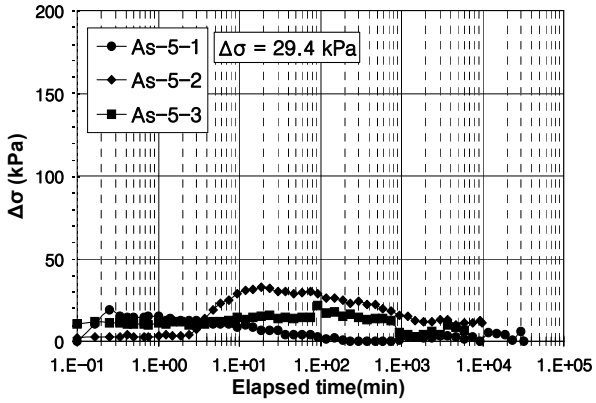
| Test Case | Replacement Area Ratio (%) | Loading Stage | Pressure before Applying Surcharge (kPa) | Total Surcharge (kPa) | Increment Pressure (kPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| As-5-1 | 5 | 1 | 9.8 | 39.2 | 29.4 |
| As-5-2 | | 2 | 39.2 | 68.6 | 29.4 |
| As-5-3 | | 3 | 68.6 | 98.0 | 29.4 |



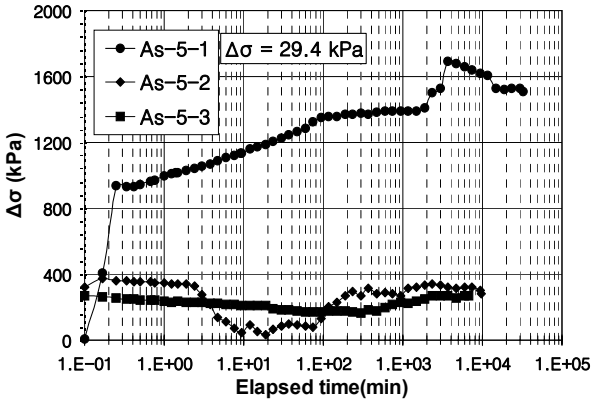

(a) 침하량의 변화




(b) 과잉간극수압의 변화




(c) 점토부의 연직응력증분의 변화




(d) RAPP 하단부의 연직응력증분의 변화

그림 2. 모형 실험의 결과(유승경 등, 2008)

따른 복합지반의 거동을 나타내고 있다. 그림 2(a)는 시간의 따른 침하량의 변화로써 SCP에 대한 실험결과(유승경, 2003)를 함께 도시하였다. 1단계 하중은 RAPP가 거의 지지하고 있어 복합지반 전체에서는 매우 적은 탄성 침하만 발생되었으며, 2단계 후부터 RAPP의 소성변형이 시작되면서 복합지반에 압밀침하 거동이 진행되고, 3단계의 경우 RAPP의 소성변형이 종료되어 재차 말뚝이 상재하중을 지지하는 양상이 관찰되었다. 그림 2(b)는 각각의 하중단계에 대한 과잉간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 1단계와 3단계 하중재하의 경우 점토부에 발생된 최대 과잉간극수압이 하중증가분에 비해 현저히 적게 나타나고 있다. 이러한 현상은 침하량의 변화 특성과 상응하는 것으로 1단계와 3단계 경우에는 강성으로 인한 RAPP의 소성변형이 억제되고 있으며 따라서 점토부에 재하하중이 충분히 전달되고 있지 않음을 알 수 있다. 그림 2(c)와 2(d)는 모형지반의 점토부와 RAPP 하단부의 연직응력증분의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 1단계의 경우 점토부와 RAPP 하단부 모두 재하 직후에 연직응력의 급격한 증가를 보이고 있으며 RAPP 하단부에서는 그 이후에도 계속 증가하는 양상을 보이고 있다. RAPP의 소성변형이 발생하는 2단계의 경우 점토부의 연직응력증분은 큰 변화가 보이지 않지만 RAPP 하단부에서는 재하 후 약 2분이 경과되면서 급격한 감소현상을 관찰할 수 있다. 시간이 흐른 후 약 100분에 다다를 때 다시 연직응력증분이 증가하여 재하 초기 시 발생된 값과 유사하게 유지됨을 관찰할 수 있다. 3단계 하중재하의 경우에는 점토부와 RAPP 하단부의 연직응력증분의 값이 비교적 안정된 상태를 유지하고 있다.

## 4. RAPP로 개량된 복합지반의 침하저감특성

RAPP로 개량된 복합지반의 침하저감특성을 분석하기 위하여 RAPP와 SCP로 개량된 복합지반의 침하량과 무보강 상태의 점토 지반 침하량을 비교하여 침하저감계수를 식 (1)로 산정하였다.

$$\beta = \frac{S}{S_0} \tag{1}$$

여기서, $S_0$ 및 $S$는 각각 무보강 지반의 침하량과 복합지반의 침하량을 나타낸다. 무보강 상태에 대한 침하량($S_0$)은 Terzaghi의 1차 압밀 침하량 공식(식 (2))으로 산정하였으며, $S$는 모형실험을 통하여 얻은 침하량이다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} H \log(\frac{P_0 + \triangle P}{P_0}) \tag{2}$$

여기서, $S$는 압밀침하량, $H$는 초기 점토 높이, $C_c$는 압축지수, $P_0$ 및 $\triangle P$는 각각 점토지반의 초기 응력과 응력증분을 나타내고 있으며 이들 값은 전술한 모형실험 조건을 사용하였다.

그림 3은 식 (1)로 산정한 하중 단계에 따른 침하저감계수를 나타내고 있다. 그림으로부터 RAPP로 개량된 복합지반의 1단계 하중 재하의 경우 RAPP가 하중을 거의 지지하는 탄성침하거동으로 SCP에 비해 매우 작은 침하저감계수가 나타났으며, 2단계와 3단계 재하의 경우 RAPP에 소성변형이 발생하여 1단계 하중 재하의 경우에 비해 침하저감계수가 증가하는 양상을 보였다. 또한 모든 재하하중에 따른 침하저감계수가 SCP에 비해 RAPP가 적게 나타남으로써 RAPP로 인한 침하저감효과가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 4는 하중단계에 따른 복합지반의 응력분담비 변화를 나타내고 있다. 그림에서의 응력분담비는 다음과 같은 식(日本地盤工學會, 2000)으로 산정하였다.

$$\beta = \frac{1}{1+(n-1)a_s} \tag{3}$$

여기서, $n$은 응력분담비를 $a_s$는 치환율을 나타낸다. 탄성침하거동을 보인 1단계 하중 재하의 경우 응력분담비는 SCP에 비해 현저히 크게 나타나고 있다. RAPP가 소성변형거동을 보이는 2단계와 3단계에서는 1단계 하중재하의 경우에 비해 응력분담비가 감소하는 양상을 보이고 있으나 모든 하중 단계에서 SCP보다 큰 응력분담비가 나타남을 알 수 있다.

## 5. RAPP로 개량된 복합지반의 압밀거동특성

연약지반에 타설된 RAPP공법은 그 자체로 지지력 증가 효과의 발휘와 동시에 배수재로서의 기능을 하게 되므로 연직배수 효과를 살펴볼 필요가 있다. 본 연구에서는 모형실험 결과로부터 얻은 RAPP와 SCP로 보강된 모형지반의 압밀도를 식 (4)에 의해 산정하고 이를 Barron(1948)의 이론식(식 (5))으로 얻은 압밀도와 비교하였다.

$$U_s(\%) = \frac{s_t}{s_f} \times 100 \tag{4}$$

여기서, $s_t$와 $s_f$는 각각 임의의 시간 t와 압밀종료시의 침하량을 나타낸다.

$$U = 1 - \frac{\bar{u}}{u_0} = 1 - e^{-8T_h/F(n)} \tag{5}$$

여기서, $F(n) = \frac{n^2}{n^2-1}\ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2}$, $n = \frac{d_e}{d_w}$,

$T_h = \frac{k_h}{m_v \gamma_w}\frac{t}{d_e^2} = \frac{c_h}{d_e^2}t$

또한 식 (5)에서 $\bar{u}$와 $u_0$는 과잉간극수압의 평균과 초기값을 나타내며, $d_e$와 $d_w$는 말뚝에 의한 간극수 집수원의 직경과 유효등가경으로 표 2에 나타낸 값을 적용하였다.

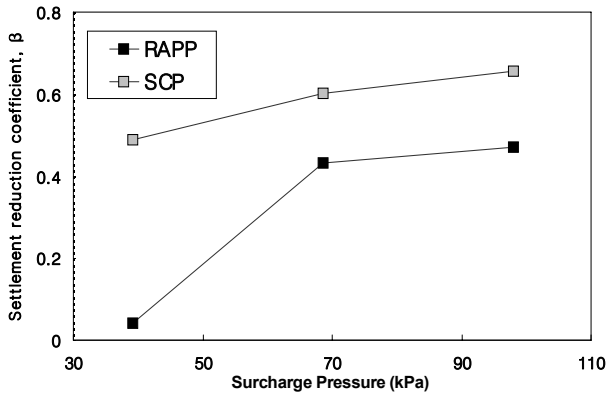



그림 3. 하중단계에 따른 침하저감계수

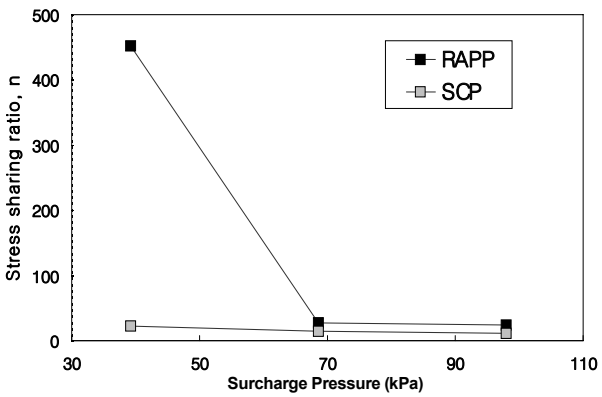



그림 4. 하중단계에 따른 응력분담비

표 2. 모형지반의 초기상태에 대한 정수

| $d_w(m)$ | $d_e(m)$ | $k_0(m/\min)$ | $C_k$ |
|---|---|---|---|
| 0.063 | 0.28 | $0.529\times10^{-6}$ | 1.57 |

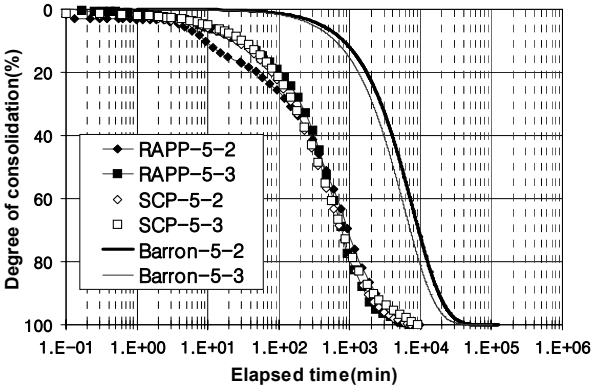



그림 5. 복합지반의 압밀거동

$T_h$와 $k_h$는 간극수 방사방향흐름에 대한 압밀시간 계수와 투수계수를 나타내고 있고, $m_v$와 $c_h$는 체적압축계수와 압밀계수를 나타내고 있다. 일반적으로 점토의 투수계수는 간극비에 의존함을 알 수 있다. 따라서, $k_h$ 값은 다음과 같은 식 (6)으로 산정할 수 있다(Tavenas, et al, 1983).

$$k_h = k_0 \exp\left(\frac{e-e_0}{C_k}\right) \tag{6}$$

여기서 $k_0$ 및 $e_0$는 각 재하단계에서 초기상태에 대한 투수계수와 간극비를 나타내며, $C_k$는 표준압밀시험의 결과로부터 얻은 투수계수 변화지수를 나타낸다. $e$는 모형실험의 각 재하단계에서 압밀 종료시의 간극비를 나타내고 있다.

한편 Barron의 이론해에 사용되는 체적압축계수는 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$m_v = -\frac{\triangle\varepsilon}{\triangle p} = \frac{1}{1+e_0} \cdot \frac{\triangle e}{\triangle p} \quad (\because \triangle\varepsilon = -\frac{\triangle e}{1+e_0}) \tag{7}$$

여기서 $\triangle\varepsilon$와 $\triangle p$는 각각 연직변형량증분과 재하압력증분을 나타낸다.

그림 5는 모형실험 결과로부터 얻은 RAPP로 개량된 복합지반의 시간에 따른 압밀도의 변화를 나타내고 있다. 그림에는 동일한 조건에서 수행한 SCP에 대한 실험 결과와 Barron의 이론해로부터 얻은 평균 압밀도를 함께 도시하였다. 그림에서 Barron의 이론해보다 모형실험에서의 압밀거동이 빠르게 나타나고 있는데 이는 모형실험과 이론해에 적용한 배수조건의 차이에 의한 결과라고 판단된다. 즉, 모형실험에서 모형지반 상·하면의 배수조건이 전체의 평균적 압밀거동에 영향을 미쳤다는 사실을 알 수 있다. 한편, RAPP로 개량된 복합지반의 압밀거동은 SCP에 의한 압밀거동과 거의 유사하게 나타나고 있다. 이러한 사실은 RAPP로 인한 압밀촉진효과가 SCP와 비교하여 차이가 없음을 시사하고 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP) 공법에 대한 일련의 모형실험 결과를 통하여 등침하 조건하에서 복합지반 전체의 침하거동, 점토부의 과잉간극수압 소산거동, 개량지반 내부의 응력상태의 시간에 따른 변화 특성을 고찰하였으며 그 결과로부터 복합지반의 침하저감 및 압밀거동 특성을 검토하였다. 이하에 본 연구에 의해 얻은 결과를 요약한다.

1. RAPP로 개량된 연약점토지반에서 비교적 작은 하중단계에서는 침하저감효과가 크게 나타났으나 재하하중이 커질수록 그 효과가 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 모든 재하하중에 대한 침하저감효과는 SCP에 비해 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있었다.
2. RAPP로 인한 응력분담비는 탄성침하거동을 보인 비교적 작은 하중 단계에서 현저히 크게 나타났으나 하중단계가 증가할수록 RAPP가 소성변형거동을 보이며 응력분담비가 감소하였다. 그러나 모든 하중 단계에서 RAPP로 인한 응력분담비는 SCP보다 크게 나타났다.
3. RAPP로 개량된 복합지반의 압밀거동은 SCP에 의한 압밀거동과 거의 유사하게 나타났다. 이러한 사실로부터 RAPP로 인한 연약점토지반의 압밀촉진효과가 SCP와 비교하여 차이가 없음을 알 수 있었다.
4. RAPP공법에 대한 모형실험 결과로부터 침하 및 과잉간극수압의 소산, 연직응력증분의 변화 특성을 고찰한 결과 RAPP로 개량된 연약점토지반은 복합지반의 거동특성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 향후 본 공법에 대한 합리적 설계법 확립을 위해 원지반 특성 및 RAPP의 치환율 등에 대한 다양한 조건을 고려하여 보다 정량적인 검토를 수행하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 한국건설교통기술평가원이 시행한 건설핵심기술연구개발사업 중 “순환골재를 재활용한 친환경 지반

개량공법 개발” 과제(06건설핵심C06)에 대한 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌


1. 유승경 (2003), “저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구” *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제5호, pp.253-261.
2. 유승경, 조성민, 심민보, 이응준, 김지용 (2007), “다짐말뚝 공법 분야에 대한 순환골재의 적용성”, *한국지반공학회 준설매립기술위원회 학술발표회 논문집*, pp.193-197.
3. 유승경, 유남재, 조성민, 심민보 (2007), “연약지반개량을 위한 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 역학특성”, *한국지반공학회 준설매립기술위원회 학술발표회 논문집*, pp.177-184.
4. 유승경, 이창민, 김세원, 최항석 (2008), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법에 대한 실내모형실험”, *한국토목섬유학회논문집*, 제7권 2호, pp.23-29.
5. 유승경, 조성민, 김일곤, 유남재, 윤길림 (2008), “연약지반 개량을 위한 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝공법”, *한국지반공학회 해양항만기술위원회 학술발표회 논문집*, pp. 173-182.
6. 이세현 (2006), “건설공사에서의 순환골재 재활용 기술과 정책현황”, *대한토목학회지*, 제54권 제4호, pp.135-140.
7. 日本地盤工學會 (2000)、*地盤改良効果の予測と實務*、地盤工學實務シリーズ11, pp.171-173.
8. Barron, R.A (1948), “Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions”, *American Society of Civil Engineers*, Vol.113, pp.718-742.
9. Travenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil S. (1983), “The permeability of natural soft clays. Part II : Permeability characteristics”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp. 645-660.


(논문접수일 2008. 8. 8, 심사완료일 2008. 8. 28)