

순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 의한 압밀촉진효과에 관한 고찰

A Study on the Effect of Promoting Consolidation by Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile

유 승 경^{1*} You, Seung-Kyong

ABSTRACT

In this paper, a series of laboratory chamber tests was carried out to evaluate promoting consolidation of a porous concrete pile fabricated with recycled aggregates (RAPP) method for soft ground improvement. Performing the laboratory chamber tests for the RAPP, characteristics of the surface settlement with time and the consolidation time were compared with those of SCP and GCP provided by You (2009) under the same experimental condition. In addition, the experimental results were compared with the numerical analysis in this study. As a test result, the effects for settlement reduction in both the primary and the secondary consolidation and promoting consolidation by RAPP were prominent comparatively.

요 지

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP : Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile)에 의한 압밀촉진효과를 파악하기 위하여 일련의 실내모형실험을 수행하였다. 본 연구에서 얻어진 실험 결과를 동일한 조건에서 수행한 모래다짐말뚝과 쇄석다짐말뚝에 대한 기존의 실험결과(유승경, 2009)와 비교하여 RAPP로 개량된 복합지반의 시간에 따른 침하량의 변화 특성과 압밀시간에 대하여 비교, 분석하였다. 또한 일련의 수치해석을 수행하여 실내모형실험 결과를 평가하였다. 분석 결과로부터 RAPP에 의한 일차압밀과 이차압밀에 대한 침하저감효과가 타 공법에 비해 탁월함을 알 수 있었으며 압밀 종료시간도 상대적으로 빠르게 나타나 RAPP에 의한 압밀촉진효과가 우수함을 입증할 수 있었다.

Keywords : Recycled-aggregate, Porous concrete pile, Consolidation, Compaction pile, Laboratory chamber test

1. 서 론

연약점토지반의 침하저감 및 지지력 증대, 압밀촉진을 목적으로 적용되고 있는 개량공법에는 일반적으로 모래를 이용하는 모래다짐말뚝(SCP)공법이 있다. 또한 최근에는 모래의 부족으로 인한 재료비의 급증 등의 이유로 인해 천연모래의 대체 재료로서 건설 발생토 등에서 얻을 수 있는 쇄석을 다짐말뚝 재료로 이용하는 쇄석다짐말뚝(GCP)공법의 적용사례가 점점 증가하고 있는 추세이다. 특히 최근에는 이러한 공법들의 해상공사에 대한 적용사례도 증가하고 있으며 보다 엄밀한 설계법의 발전으로 인해 치환율 약 30% 이하의 저치환율 공법이 적용되고 있는 실정이다

(北詰, 1994). 이러한 공법들은 원지반과 다짐으로 인하여 밀도가 조밀해진 모래 및 쇄석에 의해 복합지반을 조성하여 강도의 증가 및 압축성 즉, 침하량 등의 공학적 성질을 개선하기 위한 공법(Barksdale & Bachus, 1983)이며 이러한 지반개량효과를 규명하기 위하여 다수의 연구자들에 의해 실험적, 수치해석적 연구가 활발히 진행되어 왔다(Murayama et al., 1973; Ishizaki et al., 1989; 유승경, 2003; You et al., 2006). 그러나 이러한 공법들은 천연재료의 부족으로 인한 재료비의 급증과 환경파괴라는 쟁점으로 인해 그 적용의 한계에 다다르고 있는 실정이다. 또한 이러한 공법들은 말뚝 선단부의 팽창파괴(Bulging Failure)나 말뚝표면의 간극막힘(Clogging) 현상 등의 결

1* 정희원, 명지전문대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, E-mail: yousk@mjc.ac.kr)

함이 우려된다. 따라서 이러한 기존 공법들의 단점들을 극복하기 위하여서는 재료적인 측면과 기능성 측면에서의 새로운 공법 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구자는 천연자원의 고갈을 대비하여 모래나 자갈 등을 대체하는 재료를 이용하고 기존 다짐말뚝공법의 공학적 문제점을 개선하고자 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(이하 RAPP라고 칭함)공법을 제안한 바 있다(유승경 등, 2008(a)). RAPP공법은 건설폐기물로부터 소정의 처리과정을 통해 얻은 순환골재를 고화제와 빈배합하여 다짐말뚝형태로 타설함으로써 연약지반을 개량하는 공법으로 기존의 연구를 통해 본 공법에 의한 침하저감효과 및 응력분담특성 등을 검토하였다(유승경 등, 2008(b)). 연구 결과에 의하면 RAPP공법은 타 다짐말뚝공법에 비하여 말뚝재료의 입경이 크고 조성된 다짐말뚝의 강성이 크기 때문에 지지력 증대나 침하저감 효과가 우수하다고 함을 알 수 있었다. 이러한 사실로부터 RAPP공법은 재료비 절감 등의 효과를 얻기 위하여 비교적 저치환율로 설계할 수 있는 여지가 있다는 것을 판단할 수 있다. 본 공법이 저치환율로 시공될 경우 개량된 연약점토지반은 복합지반의 특성을 갖게 되며 그에 따라 연약지반에서는 RAPP의 연직 배수재 역할로 인한 압밀축진현상이 발생되게 된다. 그러나 본 공법에 대한 압밀축진효과에 대하여는 아직 충분히 규명되어 있지 않다. 특히 RAPP의 경우 재료의 입경이 상대적으로 크

기 때문에 주변 연약점토에 의한 말뚝표면의 간극막힘(Clogging) 현상이 우려되지만 이 또한 아직 명확히 밝혀지지 않은 현상이다.

본 논문에서는 저치환율의 RAPP와 기존의 다짐말뚝(SCP, GCP, SandyGCP)에 대한 압밀축진효과를 비교·평가하기 위하여 각각의 다짐말뚝이 적용된 복합지반에 대한 일련의 실내모형실험을 수행하였다. 모형실험에서는 치환율이 10%인 복합지반을 조성하였으며 각각의 복합지반에 하중을 재하 한 후 시간의 경과에 따른 침하거동을 관측하였다. 또한 RAPP로 개량된 복합지반의 시간에 따른 침하량의 변화 특성과 압밀시간에 대하여 비교, 분석하였으며 일련의 수치해석을 수행하여 실내모형실험 결과를 평가하였다.

2. 실내모형실험

2.1 모형실험 장치

그림 1은 본 연구에서 수행한 실내모형실험장치의 상세도를 나타내고 있다. 본 실험 장치는 SCP와 GCP의 압밀축진효과를 규명하기 위하여 수행된 기존의 연구(유승경, 2009)에서 사용한 것과 동일하다. 실험에 사용된 원형 토조는 내경 280mm, 내부심도 280mm이고 토조의 하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수가 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 상부로 부터의 배수성을 확보하였다. 하중이 전달되는 재하축은 원형 토조에 고정시킨 가이드를 통하여 재하판과 연결시킴으로써 원형 토조의 저면부와 수평을 유지하도록 하여 재하 중 재하판의 편심을 최소화하였고 복합지반의 침하량 계측을 위해 재하축에 고정시킨 침하판 위에 LVDT를 설치하였다. 또한 상재하중에 의한 복합지반의 과잉간극수압을 측정하기 위해 점토부의 중간 심도에 간극수압계를 설치하였다. 그 외의 모형실험 장치 및 계측시스템에 대하여는 참고 문헌(유승경, 2009)에 상세히 설명되어 있다.

2.2 사용시료 및 모형지반 제작

본 모형실험에서는 부산 지역의 자연점토를 사용하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 표 1에 나타낸 바와 같다. 또한 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하

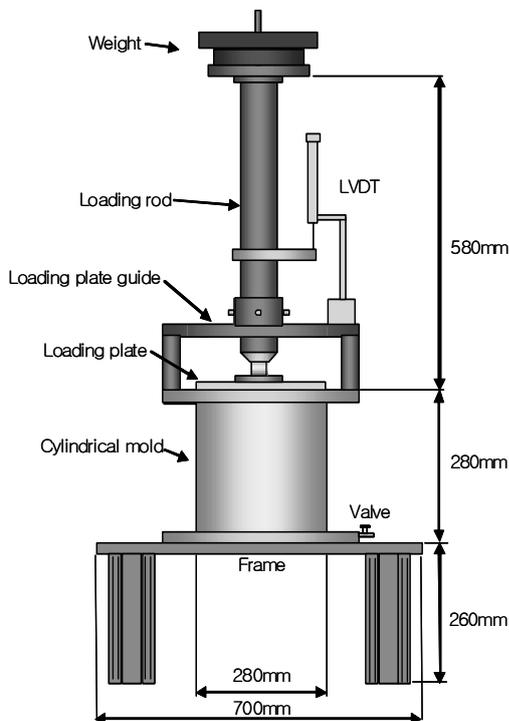


그림 1. 모형실험장치의 상세도(유승경, 2009)

표 1. 자연점토의 물리적 특성

G_s	W_L	W_p	I_p	C_c
2.68	41.8%	20.2%	21.6	0.554

였다. 우선, 자연 점토의 이물질을 제거하기 위해 눈금 4.76mm의 체로 체가름을 실시하였고 균등한 함수비를 갖는 모형지반 조성을 위해 진공상태로 배합할 수 있는 교반기를 이용하여 85%의 함수비로 반죽하였다. 토조 저면부에는 약 30mm 높이의 배수용 모래층을 포설하고 토조 내부에 240mm의 높이가 되도록 교반된 점토를 충전 하였으며 이때에 점토부의 소정의 위치에 간극수압계를 설치하였다. 그 후 9.8kPa의 조건에서 예비압밀을 실시하여 약 2.34의 간극비를 갖는 점토지반을 조성하였다. 그 후 점토지반의 중심에 소정의 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 굴삭하고 생성된 원형의 구멍에 빈배합하여 준비한 RAPP를 다져 넣어 복합지반을 제작하였다. RAPP를 조성 후 양생기간 3일을 경과시킨 후 다시 상재압 9.8kPa로 압밀을 실시함으로써 말뚝 타설에 의한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다.

2.3 모형실험 조건

표 2는 본 연구에서 수행한 실험조건을 나타내고 있다. 또한 표에는 기존에 수행한 SCP, GCP, Sandy GCP에 대한 실험 조건(유승경, 2009)도 함께 표기하였다. 모든 다짐말뚝에 의한 지반개량 효과를 비교하기 위해 다짐말뚝의 치환율은 10%, 복합지반의 초기 응력상태는 9.8kPa로 동일하게 하였으나 RAPP에 적용한 재하압력증분은 조성된 말뚝의 강성을 고려하여 비교적 크게 적용하였다.

3. 수치해석의 개요

본 연구에서는 표 2에 나타난 4가지의 다짐말뚝에 의한

복합지반의 거동에 대하여 각각 수치해석을 수행하였다. 그림 2는 본 연구에서 수행한 수치해석의 해석모델을 나타내고 있다. 해석모델은 본 연구에서 수행한 실내모형실험을 대상으로 작성하였으며, 모형지반 압밀거동의 대칭성을 고려하여 축대칭모델을 적용하였다. 이 모델에는 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 다짐말뚝에 접하는 부분의 경계를 배수조건으로 하였다. 수치해석은 세 종류의 다짐말뚝에 대하여 치환율이 10%인 경우에 대하여 모두 3가지의 경우에 대하여 수행하였으며, 복합지반의 초기상태에 대한 재하압력증분은 표 2에 나타난 실내모형실험의 조건과 동일하게 상정하여 수행하였다.

4. RAPP에 의한 복합지반의 압밀거동 분석

4.1 RAPP에 의한 복합지반의 압밀 침하 특성

그림 3은 모형실험에서 측정한 복합지반 침하량의 시간

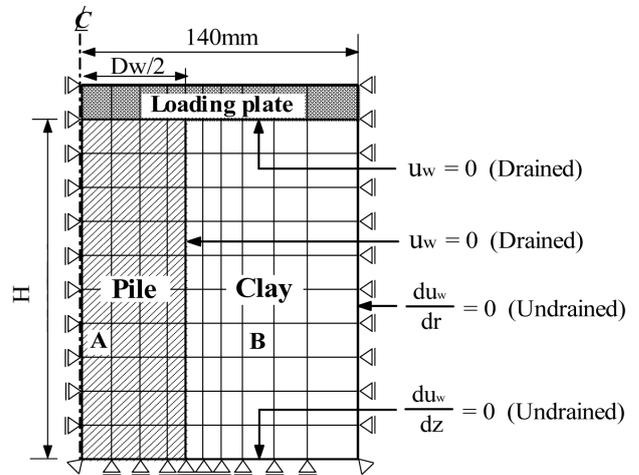


그림 2. 수치해석 모델

표 2. 모형실험 조건

Test Case	Replacement Area Ratio (%)	Pressure before Applying Surcharge (kPa)	Total Surcharge (kPa)	Increment Pressure (kPa)	Initial Height of Model Ground (mm)
RAPP	10	9.8	39.2	29.4	221
SCP					222
GCP			20.0	10.2	221
SandyGCP					220

에 따른 변화를 수치해석 결과와 함께 도시한 것이다. 모든 경우에 대하여 수치해석의 결과는 실내모형실험의 결과와 잘 일치하고 있다. 또한 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반에서의 침하량의 변화로부터 복합지반 중 점토부에서의 압밀현상에 의한 체적변화가 일어나고 있음을 유추할 수 있으며, 모두 일차압밀현상이 종료된 후에도 2차 압밀거동이 완만하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, 복합지반에서 발생된 침하량은 SCP, SandyGCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생되고 있지만 일차압밀이 종료되는 시점은 그와 반대로 RAPP, GCP, SandyGCP, SCP의 순으로 관측되고 있다. 또한 일차압밀침하가 종료된 이후 발생된 2차 압밀 침하량은 SCP, SandyGCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생되고 있다. 이러한 사실들로부터 RAPP에 의해 개량된 복합지반에서 일차압밀에 대한 침하저감효과가 비교적 탁월함을 알 수 있으며 2차 압밀 침하에 대해서도 저감효과가 크게 나타남에 따라 압밀침하거동에 대한 단기적, 장기적 안정성 확보에 유리하다고 판단할 수 있다.

4.2 RAPP에 의한 압밀도 변화의 비교 · 분석

그림 4는 실내모형실험과 수치해석 결과로부터 얻은 복합지반의 압밀도가 시간의 경과에 따라 변화하는 양상을 보여주고 있다. 여기서 압밀도 U_s 는 복합지반의 침하량의 시간에 따른 변화로부터 산정하였으며, 일차압밀종료시간은 점토부의 과잉간극수압이 거의 소산된 시점의 경과시간으로 결정하였다.

$$U_s (\%) = \frac{s}{s_f} \times 100 \quad (1)$$

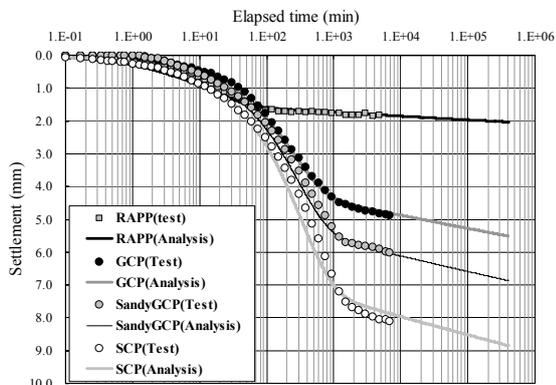


그림 3. 침하량의 시간에 따른 변화

여기서, s 및 s_f 는 각각 임의의 시간에서의 침하량과 일차압밀종료시점에서의 침하량을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 RAPP, GCP, SandyGCP, SCP에 의한 복합지반 순으로 압밀이 빠르게 진행됨을 보여 주고 있다.

4.3 RAPP에 의한 압밀시간의 비교 · 분석

그림 5는 본 연구에서 수행한 실내모형실험과 수치해석으로부터 얻은 복합지반의 압밀시간을 나타내고 있다. 즉, 각각의 경우에 대하여 압밀도 50%인 경우의 시간(t_{50}), 압밀도 70%인 경우의 시간(t_{70}), 압밀도 90%인 경우의 시간(t_{90})을 나타내었다. 수치해석의 결과로부터 얻은 압밀시간은 모형실험으로부터 얻은 결과보다 약간 작은 값을 나타내고 있지만 두 경우 모두 RAPP, GCP, SandyGCP, SCP의 순으로 빠른 압밀시간을 보이고 있다. 따라서 복합지반에서의 압밀은 RAPP로 개량된 경우가 가장 신속하게 발생되고 있다고 판단할 수 있다.

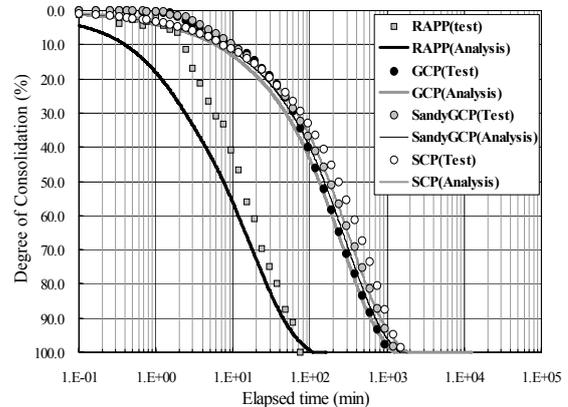


그림 4. 복합지반 압밀도의 시간에 따른 변화

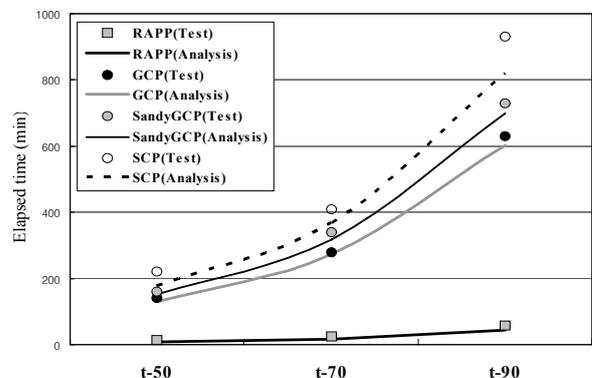


그림 5. 복합지반의 압밀시간

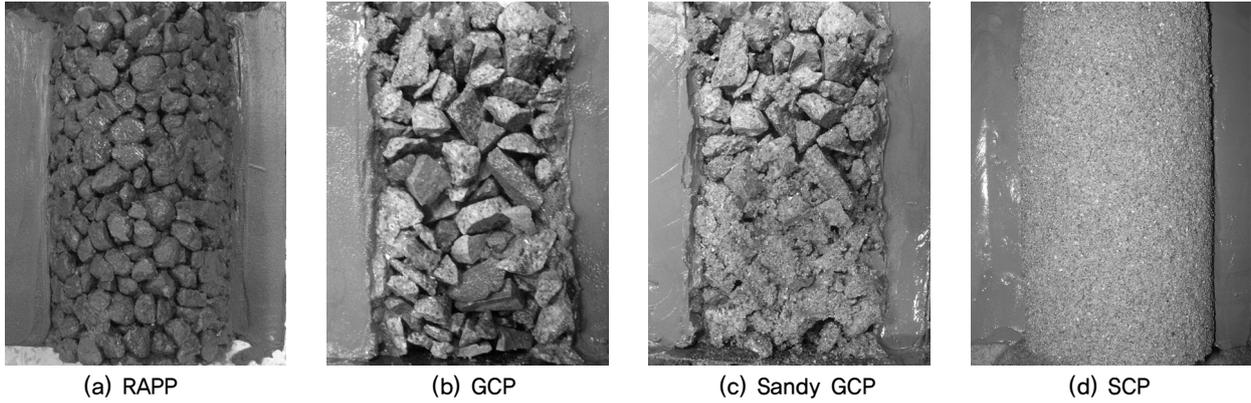


그림 6. 압밀 종료 후 복합지반의 종단면 모습

4.4 간극막힘(Clogging)현상에 대한 확인

본 연구의 대상인 RAPP는 사용되는 골재의 입경이 비교적 크기 때문에 복합지반의 압밀이 진행되면서 주변의 점토가 다짐말뚝 표면 간극을 막는 간극막힘(Clogging)현상이 우려된다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 사항에 대한 검토를 수행하고자 실내모형실험이 완료된 후 모형실험 장치를 해체하여 RAPP와 주변 점토부의 형상을 확인하였다. 그림 6은 모형실험 종료 후 RAPP에 의한 복합지반 종단면의 모습을 나타내고 있다. 그림에는 기존의 연구(유승경, 2009)에서 촬영한 다짐말뚝들의 형상도 함께 나타내었다. 모든 다짐말뚝에 대하여 주변 점토의 혼입 형상은 확인 할 수 없으며 따라서 본 모형실험의 범위에서는 RAPP에 대한 Clogging현상이 발생되지 않았음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 저치환율의 RAPP공법에 의한 압밀촉진 효과를 평가하기 위하여 일련의 실내모형실험과 수치해석을 수행하였다. 또한 기존의 다짐말뚝공법과의 개량효과를 비교, 평가를 위하여 선행된 GCP와 Sandy GCP, SCP에 대한 실내모형실험 결과와 비교하여 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실내모형실험과 수치해석 결과 복합지반의 침하량은 RAPP에 의한 복합지반에서 다른 다짐말뚝공법에 비하여 가장 적게 발생되었으며 일차압밀이 종료되는 시점도 RAPP에 의한 복합지반에서 가장 빠르게 나타났다. 한편, 모든 경우의 복합지반에서는 일차압밀침

하가 종료된 이후에도 2차압밀이 지속적으로 발생되었으며 발생된 2차 압밀 침하량은 SCP, Sandy GCP, GCP, RAPP의 순으로 크게 발생됨을 확인하였다.

- (2) 복합지반의 침하 거동을 분석한 결과 RAPP에 의해 개량된 복합지반에서 일차압밀에 대한 침하저감효과가 탁월한 것으로 나타났으며 2차 압밀 침하에 대해서도 저감효과가 크게 나타남에 따라 RAPP공법이 다른 다짐말뚝공법에 비하여 압밀침하거동에 대한 단기적 안정성 및 장기적 안정성 확보에 유리한 것으로 판단되었다.
- (3) 각각의 다짐말뚝에 의한 복합지반의 압밀도를 산정하여 비교한 결과 RAPP에 의한 복합지반에서 압밀이 빠르게 진행되었다. 또한 각각의 다짐말뚝에 의한 압밀의 진행에 따른 압밀시간을 산정하여 비교한 결과 압밀도 50%, 70%, 90%인 경우의 시간 모두 RAPP에 의한 복합지반에서 가장 빠르게 나타났다. 따라서 복합지반에서의 압밀은 RAPP로 개량된 경우가 가장 신속하게 발생되고 있음을 알 수 있었다.
- (4) 실내모형실험에서 복합지반의 일차압밀이 종료된 후 복합지반의 종단면의 모습을 확인한 결과 다른 다짐말뚝과 같이 RAPP에서도 주변 점토가 혼입된 모습을 관찰할 수 없었다. 따라서 본 연구의 범위에서는 RAPP에 대한 Clogging현상이 발생되지 않았으며 압밀 초기부터 종료 시 까지 모든 다짐말뚝의 통수능력이 일정하게 유지된 것으로 나타났다.

금번 모형실험에서 적용한 상재하중은 비교적 적은 수준에서 결정되었으므로 제약된 결과를 얻었다고 생각할 수 있다. 따라서 추후에는 보다 전반적인 결과를 얻기 위해서 적용하중의 규모를 크게 하여 고찰할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 한국건설교통기술평가원이 시행한 건설핵심 기술연구개발사업 중 “순환골재를 재활용한 친환경 기반 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, 이창민, 김세원, 최항석 (2008(a)), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법에 대한 실내모형실험”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제7권, 제2호, pp.23-29.
3. 유승경, 김세원, 최항석, 이창민 (2008(b)), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝으로 개량된 복합지반의 침하저감 및 압밀거동 특성”, *한국토목섬유학회논문집*, 제7권, 3호, pp.25-30.

4. 유승경 (2009), “SCP와 GCP의 압밀촉진효과에 관한 비교고찰”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제8권, 제2호, pp.41-46.
5. 北詰昌樹 (1994), 低置換率SCP工法の開發と港灣工事への適用, *土と基礎*, Vol.42, No.2, pp.31-36.
6. Barksdale & Bachus (1983), “Design and Construction of Stone Column”, *Georgia Institute of Technology*, Atlanta, Vol.1.
7. Murayama, S., Matsuoka, M. (1973), “Analysis on composition ground based on relationship of stress-strain behavior of soils”, *Proc. 8th Japan National conf. on SMFE*, pp.407-410.
8. Ishizaki N., Matsuoka, M., Nakai S. (1989), “Characteristic of stress-strain behavior under axi-symmetric pressure of clay ground improved by sand pile”, *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, No.406/III-11, pp.127-136.
9. S. K. You, K. Oda, T. H. Kim (2006), “Stress Sharing Behavior and Its Mechanism during Consolidation Process in Composite Ground Improved by Sand Compaction Piles with Low Replacement Area Ratio”, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol.24, No.4, pp.287-304.

(논문접수일 2009. 12. 3, 심사완료일 2009. 12. 18)