

순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP)에 의해 보강된 복합지반의 거동 특성

Characterization of Composite Ground Reinforced with Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile (RAPP)

유 승 경¹ You, Seung-Kyong

김 세 원² Kim, Sewon

이 철 호³ Lee, Chulho

최 항 석⁴ Choi, Hangseok

Abstract

In this paper, a series of laboratory chamber tests were carried out to evaluate the applicability of a porous concrete pile fabricated with recycled aggregates (RAPP) for the soft ground improvement. While performing the laboratory chamber tests for the RAPP, the surface settlement, excess pore pressure and vertical stress distribution with time were compared with those of SCP provided by You (2003) under the same experimental condition. In addition, the experimental results were compared with the numerical simulation using ABAQUS in this study. The results show that the settlement reduction is significantly enhanced due to the stress-sharing mechanism between the RAPP and soil formation by stress concentration on the RAPP. Furthermore, the comparison of consolidation rate shows that the RAPP can accelerate consolidation as well, which behaves as a vertical drain.

요 지

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile, RAPP)에 의한 지반개량효과를 파악하기 위하여 기존에 수행된 실내모형실험(유승경 등, 2008(a)) 결과를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 실험 결과를 동일한 조건에서 수행한 SCP 실험 결과와 비교하여 RAPP로 개량된 복합지반의 침하량과 과잉간극수압 및 연직응력증분의 시간에 따른 변화 특성과 복합지반의 거동 특성을 비교, 분석하였다. 또한, 수치해석을 통하여 실내모형실험 결과를 평가하였다. 그 결과, RAPP로 개량된 복합지반에서 하중재하시 응력분담이 뚜렷이 발생하여 침하저감 효과가 크게 얻어졌다. 또한, 복합지반의 압밀도를 산정하여 분석한 결과, RAPP는 배수재로서의 기능을 충분히 발휘하여 압밀촉진 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

Keywords : Composition ground, Laboratory chamber test, Porous concrete pile, Recycled-aggregate, SCP

1. 서 론

최근 세계적으로 산업화의 진행과 더불어 천연자원의 고갈 및 환경오염의 심화로 인하여, 기존자원의 절

약과 보존 그리고 대체자원의 개발과 폐자원의 효율적인 재활용이 시급하며 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 건설 산업의 경우 대량의 천연자원을 소비하는 동시에 막대한 양의 건설 폐기물을 발생시키

1 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Myongji College)

2 고려대학교 건축사회환경공학과 석사 (Graduate Student, School of Civil, Environmental & Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental & Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental & Architectural Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

고 있으나 이에 대한 재활용은 아직 미비한 실정이다. 특히 건설폐기물 중에서는 90%정도가 폐콘크리트, 폐아스팔트, 토사로 이루어져 있기 때문에 적절한 분리, 선별의 처리과정을 거친다면 새로운 골재자원으로 이용할 수 있을 것이다.

국내에서는 급증하는 건설폐기물의 효율적인 재활용을 위하여 2003년 12월에 “건설폐기물재활용촉진에 관한 법률”을 제정하여 2005년 1월부터 시행을 하고 있으며 대형 공사현장에서는 순환골재 사용을 의무화하고 있지만 현재까지는 주로 도로 포장공사에 한정적으로 적용되고 있다.

일본과 유럽 등 여러 나라에서는 1980년대 초부터 폐콘크리트를 골재로 사용하기 위한 노력을 기울여 도로의 기층 및 보조기층, 콘크리트 골재로 활용하고 있다. 특히 일본은 30년 전부터 순환골재에 대한 연구를 시작, 이에 대한 품질기준을 제정하여 포장의 노반재 등으로 사용되었고, 순환골재의 품질을 천연골재와 동등하거나 그 이상으로 제조하기 위한 연구가 꾸준히 지속되어 90년대 말에는 순환골재를 일반 구조용으로 사용하기 위한 인정 기준을 마련함으로써 천연골재에 대한 완전한 대체재로서 순환골재를 사용할 수 있는 토대를 마련하였다. 또한 미국의 FHWA에서는 콘크리트 포장의 재활용 시범사업을 1980년대 초, 중반에 시행하여 성공적인 결과를 도출하였으며 폐기물 처리에 따른 환경 문제의 발생 억제 및 골재 구입비 저감 등 괄목할 만한 성과를 거두었다. 미국의 콘크리트용 골재 관련 규격 ASTM C 33(Standard Specification for Concrete)와 ASTM C 125와 레디믹스트 콘크리트에 대한 규격 ASTM C 94에 따르면 순환 잔골재 및 순환 굵은골재 모두 콘크리트 배합에 사용할 수 있다고 명시되어 있다. 유럽 또한 건설 폐기물의 재활용에 대한 기준이 제정되어 있다. 이러한 기준들의 근간을 이루는 건설폐기물의 재이용과 재활용에 대한 국제표준인 RILEM TC 121-DGR(1994)에 따르면 순환골재를 환경조건 및 강도에 따라 구분하였으며 순환골재의 사용을 권고하였다. 이러한 배경으로 순환골재를 다양한 용도로 활용하기 위한 시험적 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Sagoe-Crentsil 등, 2001; Ajdukiewicz 등, 2002; Zaharieva 등, 2003). 그러나 대부분의 선행 연구는 순환골재와 재생 콘크리트의 공학적 특성과 강도 발현에 대한 시험적 연구에 국한되고 있다.

한편, 연약점토지반의 지지력 증대와 압밀축진을 목적으로 채택하고 있는 연약지반 개량공법에는 천연재료를 이용하는 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile; SCP)

공법이나 쇄석다짐말뚝(Gravel Compaction Pile; GCP) 공법 등이 대부분을 차지하고 있다. SCP공법은 1950년대 일본에서 개발된 후, 육상 및 해상 공사에서 하부 연약지반의 개량에 많은 시공실적이 있다. Aboshi 등(1970)은 SCP의 응력분담비에 대한 연구를 하였고, Matsuo(1968)는 연약지반과 모래지반에 의한 복합지반의 압밀시험을 실시하여 모래 말뚝의 응력분담과 압밀 축진 효과를 발표하였다. GCP 공법은 Balaam과 Booker(1981), Barksdale과 Bachus(1983)가 단위셀(Unit cell)개념을 도입하여 말뚝과 지반의 강성 차이에 의한 응력집중비를 제안하였다. Hughes와 Wither(1974)는 주로 상부에서 발생하는 팽창파괴(bulging failure)에 의하여 발생한 과도한 침하에 따른 극한 지지력을 계산하는 식을 제안하였다. GCP로 보강된 지반의 침하를 예측하는 방법들로는 경험적인 방법(Greenwood, 1970 등), 해석적인 방법(Priebe, 1976; Aboshi 등, 1979; Balaam 등, 1983) 및 수치해석을 이용한 방법(Michell 등, 1985) 등이 있다. 그러나 이러한 SCP 공법과 GCP 공법들은 천연재료의 부족으로 인한 골재 가격의 급등과 자연환경 훼손 가능성이 있어 그 적용성의 한계에 다다르고 있다. 또한, 이러한 공법들은 말뚝 선단부의 팽창파괴나 말뚝표면의 간극막힘(clogging) 현상 등의 기능적 결함이 우려된다.

본 연구에서는 고갈되는 천연자원을 보존하고 건설재료의 품귀현상을 극복하기 위하여 건설 폐기물인 순환골재를 연약지반개량 분야에 적용함과 동시에, 기존 다짐말뚝공법들의 재료적 측면과 기능적 측면의 단점을 개선하기 위해 제안된 공법(유승경, 2008(a))의 적용성을 평가하였다. 본 논문에서는 순환골재를 활용한 새로운 연약지반개량공법 개발의 일환으로 실내모형실험을 통하여 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 의한 지반개량효과를 분석하였다. 실내모형실험에서는 개량된 복합지반의 침하량과 과잉간극수압 및 연직응력증분을 관측하였으며 이를 본 모형실험과 동일한 조건에서 수행한 SCP 실험 결과(유승경, 2003)와 비교하여 시간의 경과에 따른 복합지반의 거동 특성을 분석하였다. 또한 유한요소 수치해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 실내모형 실험 결과를 비교, 검토하였다.

2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP) 공법의 개요

본 연구에서 적용된 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝

(RAPP) 공법의 대표적 특징은 다짐말뚝의 주재료로써 건설폐기물로부터 선별 처리된 순환골재를 사용한다는 점과 이 순환골재를 이용하여 다공질 콘크리트말뚝을 연약지반에 생성시킨다는 점에 있다. 순환골재란 건설 폐기물을 파쇄, 선별, 입자 조정 등과 같이 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 거쳐 품질 기준을 만족시키도록 하여 건설, 토목 공사 등에 재사용하는 건설재료이다. 본 연구에 사용된 순환골재는 폐 콘크리트를 파쇄·가공하여 제조된 것으로 기존의 천연골재와 다른 물리적 특성을 가지고 있으며 각종 이물질이 포함될 가능성이 크고, 골재 표면에 모르타르가 부착되어 있으며 품질편차가 크다.

순환골재의 파쇄 강도 및 마모감량 특성을 살펴보면 순환 굵은골재의 40 ton 파쇄치는 25~35%로 천연 강자갈보다 크지만 인공 경량골재나 연암보다 작은 값이다. 하지만, 순환골재는 가압시 모르타르 부분은 쉽게 부서지지만 원 콘크리트에 사용된 골재가 충분한 강도를 발휘하도록 한다. ASTM C 33에 의하면 로스엔젤레스 마모 손실율이 50%를 넘지 않으면 콘크리트용으로 사용될 수 있다고 되어 있으며, 도로공사용 골재의 경우는 40%로 규정하고 있어 순환골재는 일반적인 콘크리트에 적용이 가능하다.

그림 1은 일반적으로 알려져 있는 기존 다짐말뚝공법의 기능적 문제점들을 나타내고 있다. 즉, 기존 공법들은 상재하중으로 인한 다짐말뚝 선단부의 팽창파괴(bulging failure)와 주변지반의 미세한 토사 유입으로 인한 말뚝 표면 간극의 막힘(clogging)현상 등으로 인해 다짐말뚝의 기능 저하가 우려된다. 또한 시공 시, 연약지반의 측방유동에 의해 다짐말뚝의 단면이 끊기는 경우가 발생

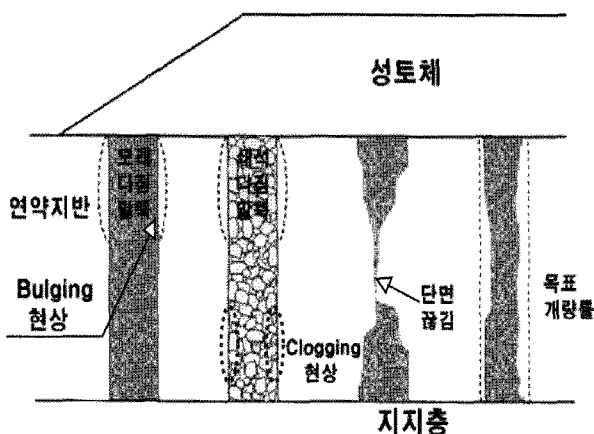


그림 1. 기존 다짐말뚝 공법의 문제점

하고 시공 후 목표 개량률에 미치지 못할 가능성 등의 문제점들이 제기되고 있다. 본 연구에서는 이러한 기존 다짐공법의 문제들을 최소화하기 위한 일환으로 그림 2에 제시된 순환골재를 소정의 고화재와 빈배합하여 제작한 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(Recycled Aggregate Porous Concrete Pile, 이하 RAPP로 칭함)공법을 제안하였다.

순환골재를 다짐말뚝에 적용함에 있어서, 유승경 등 (2007)은 실내실험을 통하여 순환골재 다공질 콘크리트의 일축압축강도와 투수성은 기존 다짐말뚝들의 공학적 특성을 상회한다고 보고하였다. 따라서 RAPP공법에서의 말뚝 전체의 팽창 및 전단 파괴에 대한 안정성과 투수성에 대한 우수성을 예측할 수 있다.

본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP) 공법에 대한 실내모형실험을 수행하여 상재하중에 따른 RAPP가 타설된 복합지반의 침하저감 및 압밀거동 특성을 검토함으로써 연약지반 개량시 치환율을 최소화하여 경제적 측면의 기대 효과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

3. 실내모형실험

3.1 실험장치

그림 3은 본 연구에서 사용한 실내 모형실험 장치와

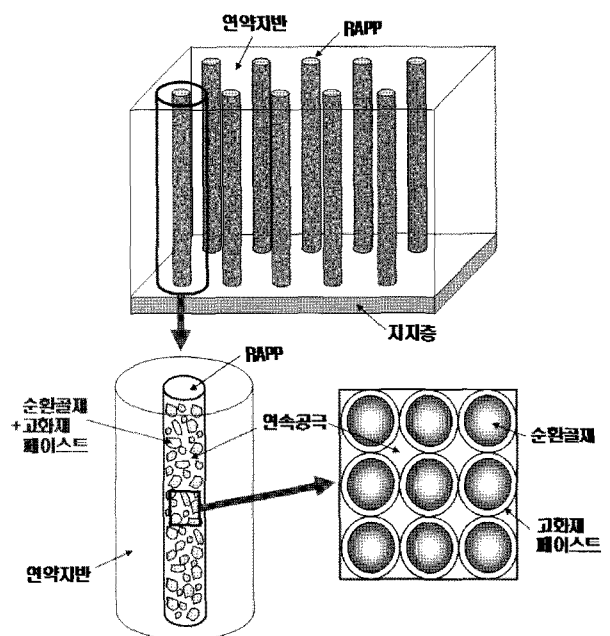


그림 2. 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP) 개요도(유승경, 2006)

토조 내부 상세도를 나타내고 있다. 표 1은 실내 모형시험의 측정 항목과 각각의 항목에 대응하는 계측기를 보여 주고 있다. 시험에 사용된 원형 토조는 내경 280mm, 내부심도 580mm이고 토조 내부는 시료와 토조 벽면 사이의 마찰을 감소시키기 위해 크롬으로 표면처리하였다. 토조 하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는 직경 2mm의 구멍을 다수 제작하여 모형지반 상부로부터의 배수성을 확보하였다. 모형지반에 대한 재하는 모터를 이용한 자동 시스템을 적용하였으며 하중 재하축의 모터에 자동센서를 설치하여 예상치 못한 하중재하가 발생하면 자동으로 멈추게 제작하여 압밀 시험 장치의 고장 및 시험 데이터의 손상을 최소화 하였다. 하중이 전달되는 로드셀과 가압판의 연결은 원형 토조의 최

상단과의 수평을 유지하도록 하여 편심을 최소화하고 침하량의 정확한 계측을 위해 가압판의 중심부에서 침하량을 계측하였다.

원형토조 내부에는 그림 3(b)에서 보듯이 토압계와 간극수압계를 모형지반의 중간 심도에 대하여 대칭이 되도록 설치하였다. 특히, 점토부에 계측기를 설치할 때는 소정의 위치에 신중히 설치 후 점토의 충전은 가능한 균등하게 소량으로 실시하여 점토 충전에 따른 계측기의 이동을 최대한 방지하였다. 그림 3(b)에서 복합지반의 응력분담효과를 고려하여 점토부에는 최대 허용측정치가 1MPa인 토압계(EP 2, EP 3)들을 점토를 3등분한 지점에 설치하여 점토에서 발생하는 연직응력증분을 측정하였고, 말뚝부에 발생하는 응력을 측정하기 위해 말뚝 하단부에는 응력집중 발생을 고려하여 최대 허

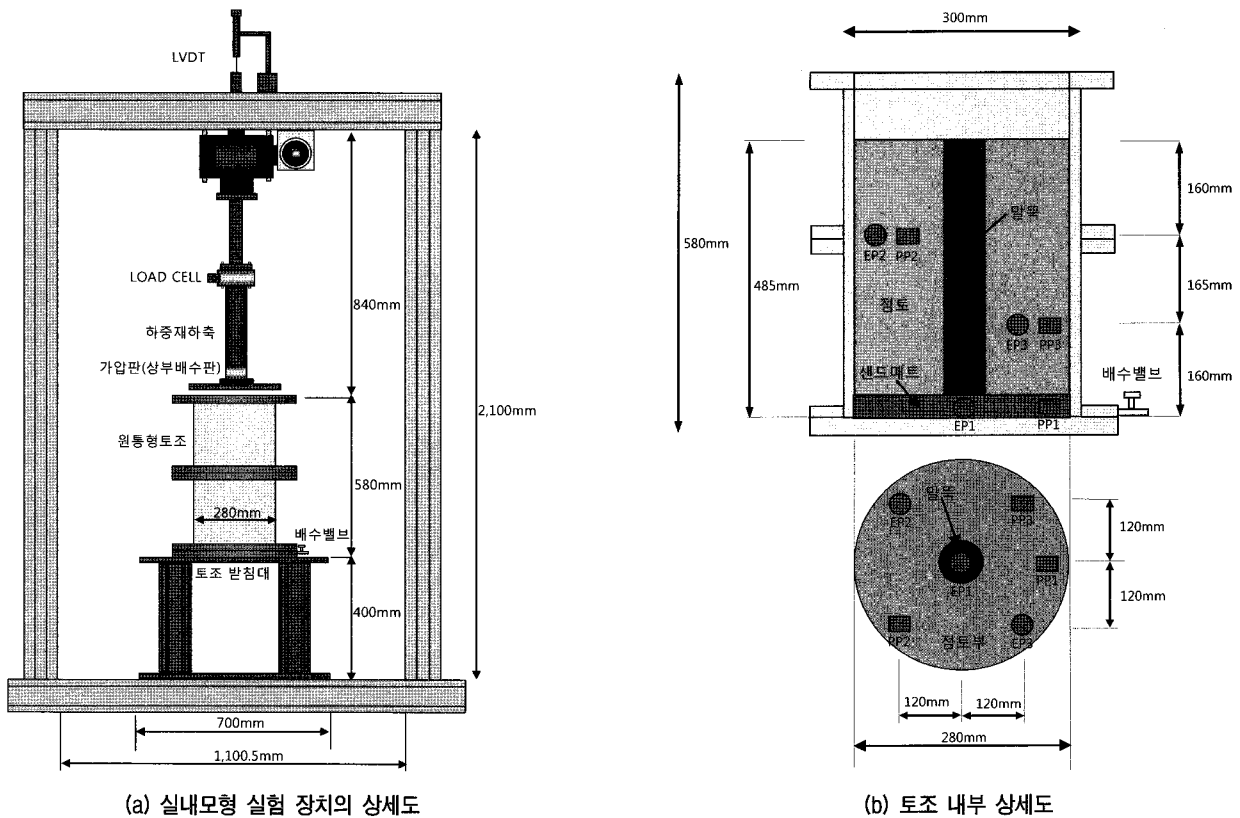


그림 3. 실내모형시험장치의 상세도와 토조 내부 상세도

표 1. 측정항목과 계측기

측정 항목	계측기
재하하중	Load cell
침하량	LVDT
말뚝부의 연직응력 증분	토압계 (BER-A-5MPa)
점토부의 연직응력 증분	토압계 (BER-A-1MPa)
과잉간극수압	간극수압계 (BED-A-500kPa, BED-A-200kPa)

용축정치가 5MPa인 토압계(EP 1)를 설치하였다. 그리고, 양면배수조건을 만족시키기 위해 하단부의 배수조건을 실시간으로 관측할 수 있도록 모형지반 하단부의 모래층에 간극수압계(PP 1)를 설치하였다. 또한, 본격적인 실험을 수행하기 전에 압력용기를 이용하여 토압계와 간극수압계를 보정하였다.

3.2 사용시료 및 모형지반 제작

3.2.1 사용 시료 및 순환골재

본 연구에서는 RAPP 공법으로 보강된 복합지반의 거동특성을 평가하기 위해 실내모형실험 결과를 본 모형실험과 동일한 치환율(5%)과 조건으로 수행한 모래다짐말뚝(SCP)에 대한 실험결과(유승경, 2003)와 비교하였다. 표 2에는 본 논문의 실내 모형실험에 사용된 시료들의 기본적인 물리적 특성을 정리하였고 또한, 유승경(2003)이 모래다짐말뚝(SCP)에 사용한 모래의 물리적 특성을 함께 정리하였다. 문헌에 의하면 실험에 사용된 모래는 배수재로서 그 기능을 충분히 발휘할 수 있음

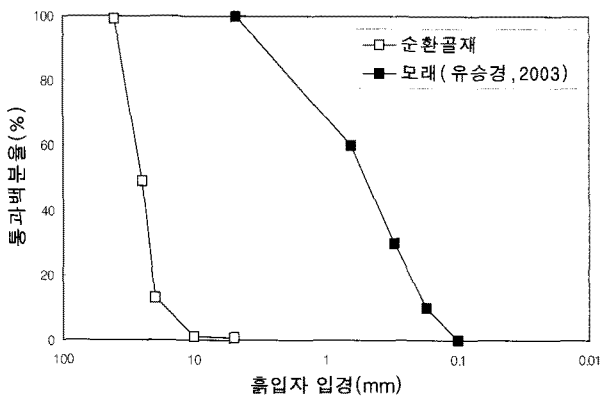


그림 4. 순환골재와 모래의 입도 분포 곡선

표 2. 시료의 물리적 성질

점토	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수	압축지수	
	2.62	82.6	28.6	54.0	0.54	
모래	비중	최대 간극비	최소 간극비	균등계수	곡률계수	
	2.64	0.87	0.58	3.71	0.84	
순환골재	절대건조밀도 (g/cm ³)	입자모양 판정 실적율 (%)	흡수율 (%)	마모감량 (%)	안정성 (%)	유기이물질 함유량 (%)
	2.28	56.8	3.6	35.4	6.7	0.08

표 3. RAPP 제작 조건

단위중량 (kg/m ³)	W/C	물 (kg/m ³)	시멘트 (kg/m ³)	순환골재 (kg/m ³)	직경 (m)	높이 (m)
1846	0.16	41.7	260.9	1543.5	0.0626	0.43

을 알 수 있다(일본 지반공학회, 1988). 그림 4는 본 실내 모형실험에 사용된 순환골재와 유승경(2003)이 SCP에 사용한 모래의 입도 곡선을 나타냈다. 모형실험에서는 시중에서 판매되는 플로리다산 EPK 카오린(Kaolin) 점토를 사용하여 모사하였고, 표 2와 같이 이 점토는 통일분류법상 소성과 압축성이 큰 점토(CH)로 분류된다. 또한, 본 모형실험에서 RAPP 제작에 사용된 순환골재의 물리적 특성 시험은 순환골재 품질 검사 기준의 콘크리트용 기준으로 수행하였고, 본 연구에서 RAPP의 제작에 사용된 최소입경 9mm과 최대입경 15mm를 만족하는 순환골재의 물리적 특성을 표 2에 나타냈다.

3.2.2 모형지반의 제작

본 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선, 점토를 진공상태로 배합할 수 있는 교반기를 이용하여 80%의 함수비로 교반하였다. 토조 바닥부에 약 50mm 높이의 배수용 모래층을 설치한 토조 내에 485mm의 높이가 되도록 배합한 점토를 충전하고, 이 때에 그림 3(b)에서 보여주는 바와 같이 토압계(EP 1, EP 2, EP 3)와 간극수압계(PP 1, PP 2, PP 3)를 설치하였다. 그리고, 상재압 9.8kPa의 조건에서 예비압밀을 실시하여 약 2.16의 간극비를 갖는 점토지반을 제작하였다. 그 후 점토지반의 중심에 미리 선정된 5% 치환율에 상당하는 면적의 원형 케이싱을 삽입하여 주변의 점토가 교란되지 않도록 굴착하고, 미리 제작된 RAPP를 삽입하였다. 이 때 RAPP는 표 3에 나타낸 조건으로 제작하여 3일 양생 후 사용하였다. 말뚝 타설 후, 다시 상재압 9.8kPa로 압밀을 실시함으로써 말뚝 타설에 의한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다.

3.3 실험조건

표 4는 실험 case와 실험조건을 나타낸다. 모형실험은 토조 단면적의 5%에 해당하는 RAPP를 제작하여 복합지반의 치환율이 5%인 경우에 대하여 실시하였다. 본 실험에서는 소정의 재하응력에 도달하기까지 3단계로 나누어 단계재하를 실시하였다.

4. 실내모형실험 결과

4.1 시간에 따른 침하량의 변화

그림 5는 모형실험의 각 재하단계에서의 시간에 따른 침하량 변화를 나타내고 있다. 본 실내 모형실험과 동일한 조건으로 유승경(2003)이 수행한 모래다짐말뚝(SCP)에 대한 실험결과를 함께 도시하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 1단계 하중을 재하한 경우, RAPP로 개량된 복합지반의 침하량은 거의 발생하지 않고 있으며 2단계 하중을 재하하면서부터 시간에 따른 변형 양상을 나타내며 침하가 진행되고 있다. 이러한 사실로부터 본 연구에서 1단계 하중은 RAPP가 거의 지지하고 있어 복합지반 전체에서는 매우 적은 탄성 침하만 발생되었으며 2단계 하중이 재하된 후부터 RAPP의 소성변형이 시작되면서 복합지반에 압밀침하 거동이 진행되었다고 판단된다. 한편 3단계 하중이 재하된 경우의 복합지반의 시

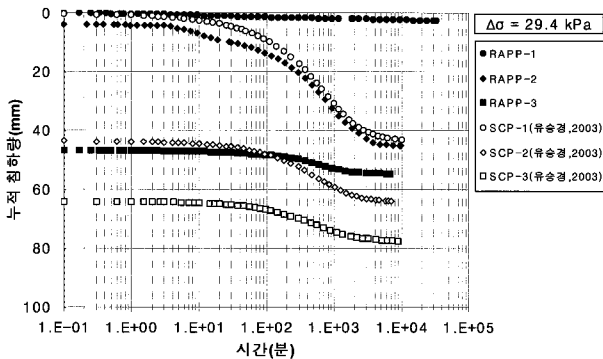


그림 5. 시간에 따른 침하량의 변화

간에 따른 침하량의 변화 양상은 2단계 하중이 재하된 경우와 유사하게 나타났지만 매우 적은 침하량이 발생되고 있다. 이는 2단계 하중 하에서 RAPP의 소성변형이 일단 종료되고 3단계 하중 재하시 소성 변형된 RAPP와 지반이 완전한 복합지반을 구성하여 새로운 응력평형 상태에 도달했다고 예측할 수 있다.

본 모형실험 결과를 SCP(유승경, 2003)의 경우와 비교한 결과 SCP의 침하량은 각 하중단계에서 비슷하게 나타나며 재하단계가 높을수록 적은 값이 나타났지만, RAPP의 경우 침하량은 하중 단계에 따라 변화하는 양상이 나타났다. 하지만, 그림 5에서 누적침하량을 비교한 결과, 3단계 하중재하가 종료된 시점에서 RAPP의 최종침하량은 SCP의 하중 재하 2단계까지 발생한 침하량보다 적게 나타나 RAPP로 보강된 지반이 SCP의 경우보다 침하저감 효과가 큼을 확인할 수 있다.

RAPP로 개량된 복합지반의 침하 특성을 분석하기 위하여 RAPP와 SCP로 개량된 복합지반의 침하량과 무보강 상태의 점토 지반 침하량을 그림 6에서 비교하였다. 그림 6은 하중 단계에 따른 각각의 누적침하량을 나타내고 있다. 여기서 무보강 상태에 대한 침하량은 Terzaghi의 1차 압밀 침하량 공식으로 산정하였다. 그림 6으로부터 모형실험에서는 SCP와 RAPP로 인한 침하저감 효과가 발생하고 있음을 알 수 있으며 RAPP로 인한 침하저감 효과가 SCP의 경우에 비하여 상대적으로 크다는 것

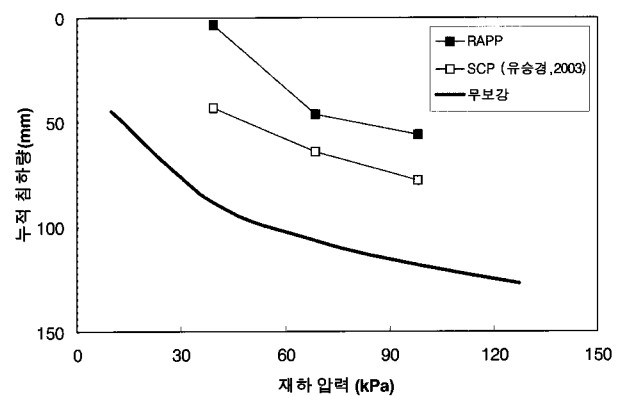


그림 6. 하중 단계에 따른 침하량의 변화

표 4. 실험 case와 실험 조건

실험 case	치환율	하중 단계	초기 하중 (kPa)	총 하중 (kPa)	재하 하중 (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

을 확인할 수 있다.

그림 7(a)는 RAPP와 유승경(2003)의 SCP로 보강된 모형시험에서 하중 단계별 발생된 침하량을 다음 식 (1)로 산정한 무보강시 침하량으로 정규화한 침하량비(α)를 나타낸다. 즉, 침하량비는 무보강시 발생되는 침하량에 대한 RAPP와 SCP로 보강시 발생이 예상되는 침하량의 비로서 기존의 침하저감계수(유승경, 2008(b))를 좀 더 명확히 표현한 것이다.

$$\alpha = \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

여기서, S_0 및 S 는 각각 무보강 지반의 침하량과 복합지반의 침하량을 나타낸다.

또한, 그림 7(b)는 본 연구의 RAPP와 유승경(2003)의 SCP에 대해 다음 식 (2)를 이용하여 구한 응력분담비(n)를 도시하고 있다

$$n = \frac{1}{a_s} \left(\frac{S_0}{S} - 1 \right) + 1 \quad (2)$$

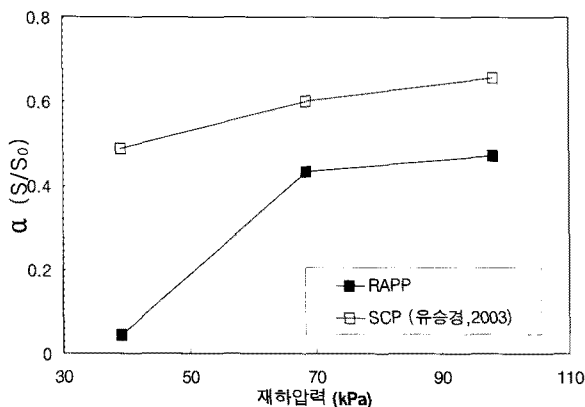
여기서, n 은 응력분담비를 a_s 는 치환율을 나타내며, 본 연구에서 a_s 는 5%를 적용하였다.

RAPP로 개량된 복합지반의 1단계 하중 재하의 경우 RAPP가 하중을 거의 지지하는 탄성침하거동으로 SCP에 비해 매우 작은 침하량비와 현저히 큰 응력분담비가 나타났다. 또한 2단계 재하의 경우 RAPP에 소성변형이 발생하여 1단계 하중 재하의 경우에 비해 침하량비는 증가하고 응력분담비는 감소하는 양상을 보이고 있다. 3단계 재하의 경우 2단계와 유사한 응력분담비를 보인

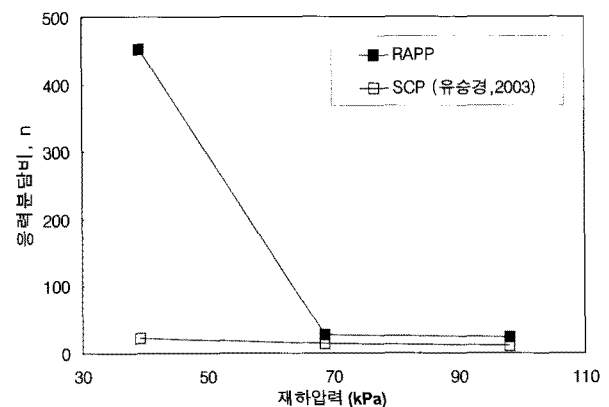
다. 한편, 모든 재하하중 단계에서 RAPP로 보강된 지반이 SCP의 경우보다 침하량비가 작게 나타났으며, 응력분담비는 크게 나타나, RAPP로 보강된 지반이 SCP보다 침하저감효과가 더 크다는 것을 알 수 있다.

4.2 시간에 따른 과잉간극수압의 변화

그림 8은 각각의 하중단계에 대한 과잉간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 1단계 하중재하 경우는 유승경(2003)의 SCP 실험 결과와 함께 도시하였다. PP 1은 모형토조 하단부의 배수 층에서 측정한 값으로 모든 재하단계에서 과잉간극수압이 발생하지 않는 것으로부터 하단부로의 원활한 배수가 이루어졌음을 알 수 있다. 또한, PP 2와 PP 3은 모형지반 중간 심도를 중심으로 상하부에 대칭되는 지점에서 과잉간극수압을 측정한 값으로 서로 거의 일치하고 있다. 따라서 본 모형실험에서는 모형지반의 상부면과 하부면의 배수조건에 의해서 모형지반의 상하부에 대칭적으로 과잉간극수압의 소산거동이 발생하였음을 알 수 있다. 한편, 모든 하중 단계에서 재하 직후부터 약 10분에서 100분 정도까지 과잉간극수압이 점차 증가하다가 그 후 감소로 전환되는, 즉 간극수압계의 반응이 지연되는 현상이 관찰되었다. 이것은 재하 장치에 의한 하중재하 과정에서 목표하고자 하는 재하하중에 도달하기까지의 지연시간과 모형지반과 간극수압계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화되지 못했기 때문이라고 사료된다. 본 모형실험에서는 각 하중단계에서 29.4kPa의 하중증가분을 적용하였다. 그러나 2단계 하중재하의 경우를 제외하면, 1단계와 3단계 하중재하의 경우에는 점토부에

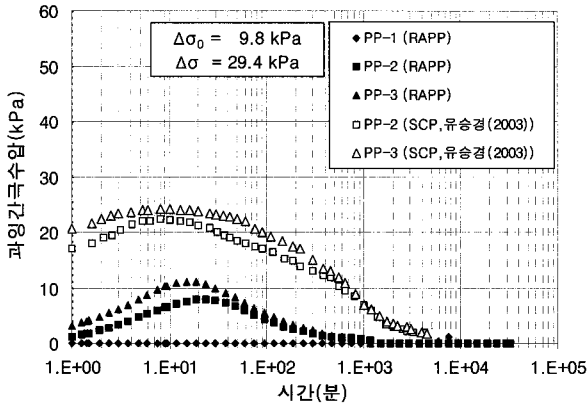


(a) 하중단계에 따른 침하량비

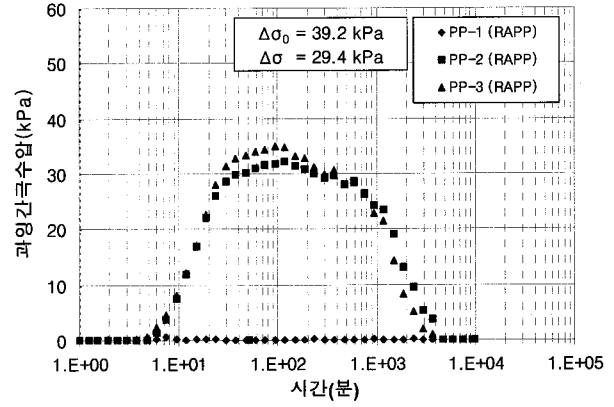


(b) 하중단계에 단계에 따른 응력분담비

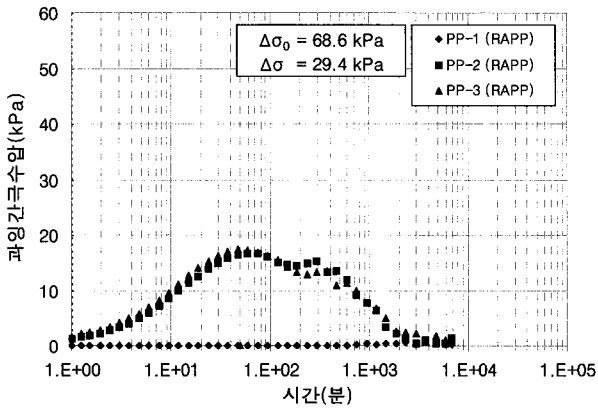
그림 7. 하중 단계에 따른 침하비와 응력분담비



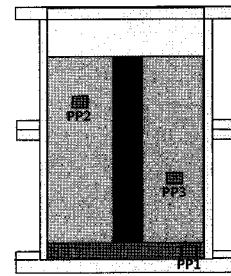
(a) 1단계 하중재하



(b) 2단계 하중재하



(c) 3단계 하중재하



간극수압계의 위치

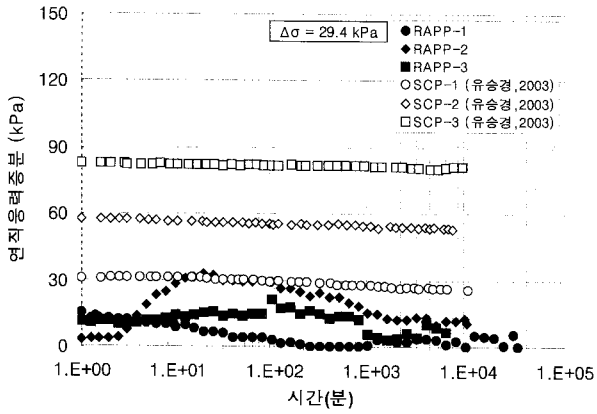
그림 8. 시간에 따른 과잉간극수압의 변화

발생된 최대 과잉간극수압이 하중증가분에 비해 현저히 작음을 알 수 있고, 특히 1단계의 경우 SCP 경우보다 과잉간극수압이 작게 나타났다. 이러한 현상은 앞 절에서 설명한 침하량의 변화 특성과 상응함을 알 수 있다. 즉 1단계 하중 재하시, 말뚝과 지반의 강성 차이로 인해 재하하중의 대부분이 RAPP로 하중 전이가 발생하였고, 이 하중 전이의 정도는 RAPP가 SCP보다 더 큼을 그림 8(a)의 결과를 통해 알 수 있다. 하지만, 2단계 하중 재하시 RAPP가 소성변형을 일으켜 지반으로 하중전이가 이루어져 복합지반에서 충분한 변위가 발생하였음을 예측할 수 있다. 마지막으로 3단계 하중 재하시, 점토 내부의 과잉간극수압이 다시 줄어든 사실을 통해 말뚝과 지반이 새로운 응력 평형 상태에 도달했음을 예측할 수 있다.

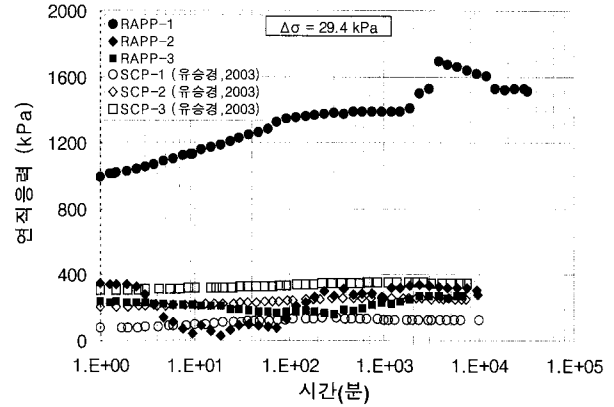
4.3 시간에 따른 연직응력증분의 변화

그림 9는 모형지반의 점토부와 RAPP 하단부에 설치

한 토압계로부터 측정한 연직응력의 시간에 따른 변화를 SCP 실험 결과(유승경, 2003)와 함께 나타낸다. 점토부의 연직응력은 점토부 상하부에 설치된 토압계(EP 2, EP 3)에서 측정한 값의 평균으로 나타났다. 하중 재하에 따른 말뚝부의 연직응력은 SCP의 경우 말뚝 내부에 설치된 토압계에서 측정한 값의 평균으로 나타내었지만, 본 RAPP 모형실험에서는 RAPP하단부(EP 1)에서 측정한 값을 사용하였다. SCP의 경우 말뚝부와 점토부 모두에서 하중 단계에 따라 연직응력이 증가하는 양상을 보이지만, RAPP의 경우 하중 단계별로, RAPP의 복합지반에서 거동특성에 따라 다른 연직응력 변화를 보여준다. 즉, 1단계 하중재하 시, RAPP 하단부에서 재하 직후에 연직응력의 급격한 증가를 보이고 있으며 하중 재하 이후에도 시간에 따라 계속 증가하는 양상을 보이고 있다. 이러한 현상은 앞 절에서 설명한 바와 같이, 복합지반의 전체 거동이 RAPP의 탄성변형에 지배되어 나타난 결과라고 판단된다. 즉, 재하 직후 점토부에 급격히 발생한 연직응력 증분은 RAPP의 탄성 변형량에 대응하는



(a) 점토부



(b) 말뚝부

그림 9. 시간에 따른 연직응력증분의 변화

값이며, RAPP의 변형이 종료된 후에는 점토부의 과잉 간극수압 소산(그림 8(a))으로 인해 압밀이 진행되면서 재하하중이 RAPP로 집중되어 RAPP 하단부의 연직응력이 추가로 증가된 것이라 사료된다. RAPP의 소성변형이 발생하는 2단계 하중재하의 경우, 점토부의 연직응력은 큰 변화가 보이지 않지만 RAPP 하단부에서는 재하 후 약 2분이 경과되면서 급격한 감소현상을 관찰할 수 있다. 이 때가 RAPP의 소성변형 시점이라고 판단된다. 하중 재하 후 100분 정도가 경과할 때 연직응력이 다시 증가하여 재하 초기 시 발생된 값과 유사하게 유지되는데 이는 RAPP의 소성변형이 종료되어 재차 재하하중을 지지하고 있음을 의미한다. 3단계 하중재하의 경우에는 점토부와 RAPP 하단부의 연직응력증분의 값이 비교적 안정된 상태를 유지하고 있다. 이것은 2단계 하중단계에서 RAPP의 소성변형이 끝난 후 말뚝의 내부구조가 안정한 상태를 이루어 3단계 재하하중이 재하되어도 복합지반이 새로운 응력 평형 상태에 도달했음을 알 수 있다. 모든 하중 단계에서 RAPP 하단부에서 발생하는 연직응력은 점토부에서 보다 매우 크게 나타나고 있다. 이로부터 RAPP와 점토로 이루어진 복합지반에서 하중재하 시 RAPP로 하중전이에 따른 응력분담거동이 발생되고 있음을 알 수 있다.

4.4 RAPP로 개량된 복합지반의 압밀거동 특성

연약지반에 타설된 RAPP는 복합지반 거동에 의한 지지력 증가뿐만 아니라 동시에 배수재로서의 기능을 수행하게 되므로 연직배수재로서 배수효과를 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 실내 모형실험 결과로부터 연

은 RAPP와 SCP로 보강된 모형지반(유승경, 2003)의 압밀도를 식 (3)에 의해 산정하고 이를 과잉간극수압소산에 따른 압밀수의 배수가 방사방향과 연직방향으로 동시에 발생하는 조건으로 해석하여 기존의 이론식들과 압밀도를 비교하였다.

$$U_s(\%) = \frac{s_t}{s_f} \times 100 \quad (3)$$

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

Carillo(1942)는 Rendulic(1935)의 미분방정식에서 1차원 압밀 침하와 연직방향, 방사방향 흐름을 모두 고려하여 식 (4)의 편미분 방정식을 해석적으로 풀어 과잉간극수압($u_{r,z}$)을 다음 식 (5)와 같이 구하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4)$$

$$u_{r,z} = \frac{u_r u_z}{u_0} \quad (5)$$

Carillo 제안식을 평균 간극수압으로 대체하여, Terzaghi와 Rendulic의 해에서 각각 구한 압밀도 U_s , U_r 를 조합하여 평균 압밀도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U = 1 - (1 - U_s)(1 - U_r) \quad (6)$$

여기서, U : 임의시간에서 점토층의 평균 압밀도

U_s : 연직방향 흐름에 의한 임의시간에서 점토층의 평균 압밀도

U_r : 방사방향 흐름에 의한 임의시간에서 점토층의 평균 압밀도

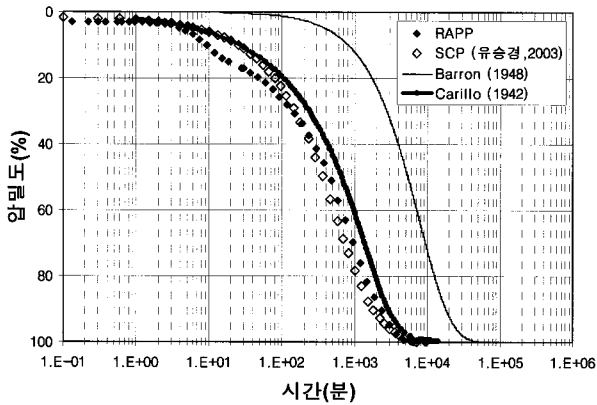
식 (6)에서 연직방향 흐름에 의한 평균 압밀도는 Terzaghi가 제안한 식을 이용하여 압밀도를 산정하였다. 이때, 시간계수를 산정하기 위한 압밀계수(C_v)는 모형 점토 지반에서 채취한 시료에 대한 CRS압밀시험을 실시하여 구한 $8.32 \times 10^{-6} (m^2/min)$ 을 사용하였다. 방사방향 흐름에 의한 임의시간에서 점토층의 평균 압밀도는 Rendulic(1935)과 동일한 해석을 하여 연직배수재가 타설된 지반의 방사방향 흐름만을 고려한 Barron(1948)의 이론식을 이용하여 압밀도를 산정하였다.

그림 10은 RAPP가 소성변형을 일으키며 복합지반 내에서 압밀거동이 나타났던 하중재하 2, 3 단계의 모형시험 결과로부터 얻은 RAPP로 보강된 모형지반과 유승경(2003)의 SCP에 대한 압밀도를 방사방향 압밀만 고려한 Barron과 방사방향과 연직방향을 모두 고려한 Carillo가 제안한 이론식에 의한 평균 압밀도를 하중단계별로 도시하였다. 그림 10에서 상하부 배수조건을 고려한 Carillo

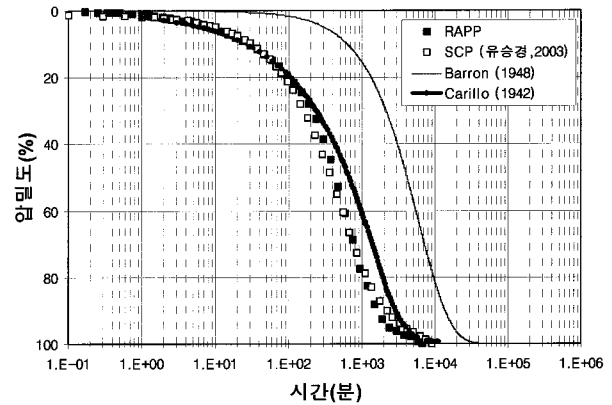
의 이론해는 모형실험과 유사한 압밀거동이 나타났으며, 방사방향만을 고려한 Barron의 이론해는 RAPP와 SCP의 실내 모형실험 결과와 Carillo의 이론해보다 압밀속도를 과소평가함을 보여준다. 이는 모형실험과 이론해에 적용한 배수조건의 차이에 의한 결과라고 판단된다. 즉, 모형실험에서 점토층의 두께가 485mm로, 방사방향 배수뿐만 아니라 상하부 연직방향을 배수도 모형지반의 전체적인 압밀거동에 영향을 주었음을 알 수 있다. 하지만, RAPP나 SCP를 실제 현장조건에 시공할 경우, 연약층의 두께가 모형시험의 경우보다 월등히 커지므로, 방사방향의 압밀이 모형지반의 전체적인 압밀을 지배할 것이라 예측된다.

4.5 압밀 종료 후 RAPP의 기능 평가

본 연구의 목적 중 하나는 기존 다짐말뚝 선단부의



(a) 2단계 하중 재하시 압밀도

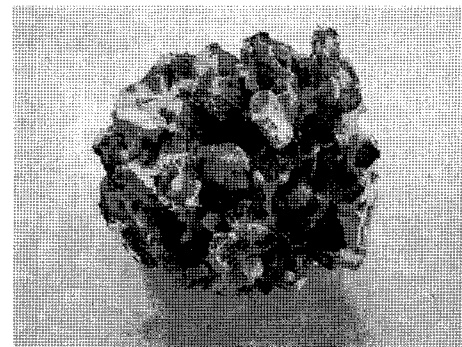


(b) 3단계 하중 재하시 압밀도

그림 10. 시간에 따른 연직응력증분의 변화



(a) 압밀 종료 후 RAPP의 종단면 모습



(b) 압밀 종료 후 횡단면 모습

그림 11. 압밀 종료 후 RAPP 모습

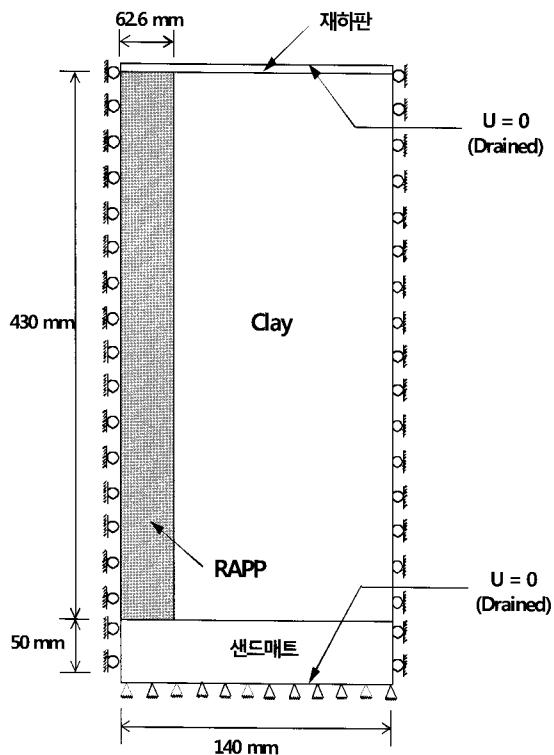
팽창과괴와 주변 지반의 미세한 토사 유입으로 인한 간극막힘 현상 그리고 압밀이 진행되면서 시공된 말뚝의 측방유동현상 등에 의해 단면이 끊기는 기능적 문제를 극소화하기 위함이다. 이러한 사항들을 검토하기 위하여 실내모형실험이 완료된 후 모형 실험 장치를 해체하여 RAPP의 형상을 확인하였다. 그림 11은 압밀 종료 후 RAPP의 종단면과 횡단면의 모습을 보여주고 있다. 압밀이 종료된 후 RAPP의 형상은 상부와 하부에서 다소 파괴가 확인 되었지만 말뚝 전체적으로 모형실험 전 RAPP의 형태를 유지하고 있었다. 따라서, 본 모형실험에서는 RAPP로 개량된 복합지반은 압밀이 진행됨에 따른 기존 다짐말뚝들이 측방유동 등에 의하여 단면이 끊기는 문제점에 대해 매우 우수한 기능을 발휘하여 그 자체로 지지력 증가에 효과가 있음을 예상할 수 있다. 또한 말뚝의 횡단면을 잘라 말뚝 내부를 확인한 결과, 말뚝 표면으로 아주 미세한 양의 토사가 유입되었지만 말뚝 내부는 주변 점토의 혼입 양상을 확인할 수 없었다. 이러한 형상은 앞 절의 시간에 따른 과잉간극수압의 변화와 압밀도를 분석한 결과에서 볼 수 있듯이 본 모형실험에서 RAPP로 개량된 복합지반에서 RAPP는 기존 다짐말뚝 공법에서 문제로 제기되었던 간극막힘 현상이 발생

되지 않아 배수재로서 기능을 충분히 발휘하며 복합지반에서 압밀축진 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

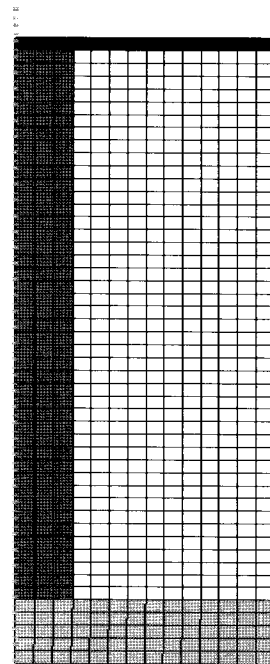
5. 수치해석

5.1 수치해석 모델링

수치해석에는 유한요소법을 적용한 상용프로그램인 ABAQUS v6.7-1을 사용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 수치해석의 해석모델에 대한 개요와 해석 격자는 그림 12와 같다. RAPP에 대한 수치해석 모델링에서 모형실험에서와 같이 중심부에 1본의 RAPP가 존재하고 그 주위에는 연약점토에 의해 둘러싸여 있는 축대칭 조건이 성립되므로 2차원 축대칭 모델로 해석을 수행하였다. 한편, 연계해석에 필요한 초기 수리 경계조건의 설정은 초기 지하수위를 점토층 상부에 위치하도록 하여 완전 포화상태로 가정하였다. 재하하중에 의한 과잉간극수압은 상부·저면에서의 간극수압이 '0'이 되도록 하여 배수조건으로 설정하였다. 재료의 모델링은 점토층은 Modified Cam-Clay(MCC) 모델을 적용하여 압밀시 연약점토지반의 침하특성이 모사되도록 하였으



(a) 축대칭 해석모델 및 경계조건



(b) 해석 격자

그림 12. 실내모형실험 해석 모델링

표 5. 해석에 적용된 물성치

구분	구성모델	단위중량 γ (kN/m ³)	탄성계수 E (kPa)	프아송비 ν	점착력 c (kPa)	내부마찰각 ϕ (°)	투수계수 (m/day)
RAPP	M.C	18.46	16400	0.3	727.9~801.1	32.7~34.2	-
모래층	M.C	20.0	10000~30000	0.2	0.1	38	-
점토층	M.C.C	14.8	$\lambda = 0.26, \kappa = 0.026, M = 1$				1.0×10^{-5} $\sim 7.6 \times 10^{-4}$
재하판	E	20.0	2×10^8	0.3	-	-	-

며, RAPP는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 점토층과 하부 모래 배수층 그리고 RAPP는 그림 12와 같이 축대칭 4절점 응력-간극수압 연계요소(CAX4P)로 모델링하였다.

표 5는 수치 해석시 필요한 점토와 RAPP의 입력 물성치들을 선행된 기본 물성실험 결과를 바탕으로 하여 정리한 것이다. 재하판은 탄성거동하는 것으로 가정하였고, 모형실험과 동일하게 배수가 원활히 되도록 투수계수를 선정하였다. RAPP의 탄성계수는 일축압축강도 실험 결과의 평균인 16.4MPa를 적용하였다. λ 는 CRS 시험결과를 통해 구한 C_c 값 0.54를 \ln 값으로 환산하여 사용하였고, $M=1$ 이라 가정하여 적용하였고, RAPP의 모델링에 요구되는 RAPP의 내부마찰각(ϕ)과 점착력은(c)은 기존의 연구결과(윤길림, 2008)에 의해 각각 32.7°~34.2°와 727.9kPa~801.1kPa의 범위의 값을 해석에 적용하였다.

5.2 수치해석 결과

그림 13은 본 모형실험의 침하거동을 검증하기 위해 모형실험의 시간에 따른 침하량 측정결과와 수치해석

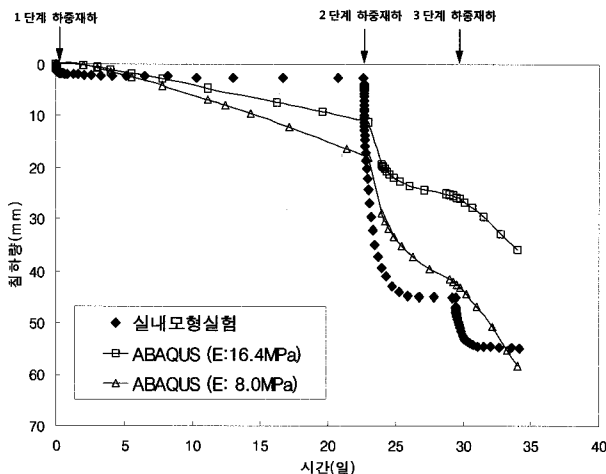


그림 13. 실내실험 계속 침하량과 수치해석 결과 비교

결과를 비교하여 보여주고 있다. 그림 13에는 일축압축 강도시험 결과로 산정한 탄성계수인 16.4MPa로 해석한 결과와 탄성계수를 반으로 줄인 8.0MPa로 해석한 두 가지 결과를 함께 도시하였다. 일축 압축강도 시험결과로부터 환산한 말뚝의 탄성계수 16.4MPa를 사용하여 해석한 경우, 수치해석 결과가 모형실험을 통해 관찰된 복합지반의 압밀거동 경향과 유사하지만, 각 하중단계에 따른 최종침하량이 측정값보다 작음을 알 수 있다. 이러한 수치해석과 측정값과의 상이함은 28일 양생 후 측정된 일축압축강도 실험 결과로부터 예측한 탄성계수 16.4MPa는 실제 모형실험에서 적용된 RAPP의 탄성계수보다 다소 과다하게 산정되었다고 가정할 수 있다. 왜냐하면, 실내실험에서 점토 지반에 삽입한 말뚝은 프리캐스트로 3일 양생 제작하여 실험을 하였기 때문에 말뚝의 강성이 28일 양생한 강도보다 작았음을 추론할 수 있다. 따라서, 말뚝의 탄성계수를 변화시키며 수치해석을 수행하였다. 그 결과 말뚝의 탄성계수가 8.0MPa인 경우 말뚝이 파괴되지 않고 탄성침하가 발생했던 복합지반의 1단계의 침하량과 다소 차이가 있었지만, 2단계와 3단계 하중재하에 따른 침하량 결과와 근접하게 재현할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 관한 일련의 모형실험을 실시하였다. 그 결과 복합지반의 등변형률 조건하에서 복합지반 전체의 침하거동, 점토부의 과잉간극수압 소산거동, 개량지반 내부의 응력상태의 시간에 따른 변화 특성을 본 연구와 동일한 조건에서 수행한 SCP(유승경, 2003) 실험 결과와 비교, 분석하였다. 또한, 수치해석을 통하여 실내모형실험 결과를 평가하였다. 이하에 본 연구에 의해 얻은 결과를 요약한다.

- (1) 본 모형실험에서의 복합지반의 침하거동 특성은 하중 단계에 따라 변화하였다. SCP(유승경, 2003)의 경우 각 하중단계의 침하 양상이 유사하게 나타나며 재하단계가 진행될수록 침하량은 작아짐을 알 수 있다. 하지만, 본 모형실험에서 1단계 하중을 재하한 경우 RAPP가 재하하중을 거의 지지하여 복합지반 전체에서는 매우 적은 탄성 침하만 발생되었으며, 2단계 하중이 재하 된 후부터 RAPP의 소성변형이 시작되면서 복합지반에 압밀침하 거동이 진행되었다. 한편 3단계 하중 재하의 경우 복합지반의 침하거동은 2단계 하중 재하의 경우와 유사하게 나타났다. 하지만, 2단계 하중 하에서 RAPP의 소성변형이 일단 종료되고 3단계 하중 재하시 소성 변형된 RAPP와 지반이 완전한 복합지반을 구성하여 새로운 응력평형 상태에 도달하여 매우 적은 침하량이 발생되었다. RAPP로 보강된 지반을 무보강 지반과 SCP로 보강된 지반과 비교한 결과, 3단계 누적침하량이 작았으며, 모든 재하하중 단계에서 RAPP가 SCP의 경우보다 작은 침하량비와 큰 응력분담비가 나타나 RAPP로 보강된 복합지반의 침하저감효과가 SCP 보다 큼을 알 수 있다.
- (2) 상재하중이 재하 됨에 따라 복합지반의 점토부에서 과잉간극수압이 발생하였으며 시간이 경과함에 따라 소산되어 복합지반에서 압밀현상이 발생되었음을 확인할 수 있었다. 한편, 2단계 하중재하의 경우를 제외하면, 1단계와 3단계 하중재하의 경우에 발생된 최대 과잉간극수압이 하중 증가분에 비해 현저히 작게 나타났다. 특히 1단계의 경우 SCP보다 과잉간극수압이 작게 나타났는데 이러한 현상은 말뚝과 지반의 강성 차이로 인해 RAPP로 하중 전이가 발생하기 때문이고, 이 하중 전이의 정도는 RAPP가 SCP보다 더 크기 때문이라고 예측할 수 있다. 2단계 하중 재하시 RAPP가 소성변형을 일으켜 지반으로 하중전이가 이루지면서 충분한 변위가 발생하여 점토부의 과잉간극수압이 증가하였지만, 3단계 하중 재하시 과잉간극수압이 다시 작아진 사실을 통해 말뚝과 지반이 새로운 응력 평형 상태에 도달했음을 예측할 수 있다.
- (3) 연약지반에 타설된 RAPP는 복합지반 거동에 의한 지지력 증가뿐만 아니라 배수재로서의 기능을 수행하게 된다. 모형실험 결과로부터 얻은 RAPP와 SCP로 보강된 모형지반의 압밀도를 산정하고 기존의

이론식들과 압밀도를 비교한 결과, 상하부 배수조건을 고려한 Carillo의 이론해는 모형실험과 유사한 압밀거동이 나타났으며, 방사방향만을 고려한 Barron의 이론해는 RAPP와 SCP의 실내 모형실험 결과와 Carillo의 이론해보다 압밀속도를 과소평가함을 보여준다. 즉, 모형실험에서 방사방향 배수뿐만 아니라 상하부 연직방향의 배수도 모형지반의 전체적인 압밀거동에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 하지만, RAPP나 SCP를 실제 현장 조건에 시공할 경우, 연약층의 두께가 모형실험보다 월등히 커지므로, 방사방향의 압밀이 모형지반의 전체적인 압밀을 지배할 것이라 예측할 수 있다.

- (4) 마지막으로 수치해석을 통하여 실내모형실험 결과를 비교, 평가하였다. 수치해석에 일축압축강도시험을 통해 산정한 말뚝의 탄성계수를 사용하여 해석한 경우, 수치해석 결과가 모형실험을 통해 관찰된 복합지반의 압밀거동 경향과 유사하지만 최종침하량이 측정값보다 작음을 알 수 있다. 이는 말뚝의 양생 기간이 말뚝의 강도에 영향을 주어 일축압축강도 실험결과로부터 예측한 탄성계수가 실제 모형실험에서 적용한 RAPP의 탄성계수보다 다소 과다하게 산정되었다고 가정할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 한국건설교통기술평가원이 시행한 건설핵심기술연구개발사업 중 “순환골재를 재활용한 친환경지반개량공법 개발” 과제(06건설핵심C06)에 대한 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

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), “다짐말뚝공법 분야에 대한 순환골재의 적용성”, *한국지반공학회 건설매립기술위원회 학술발표회 논문집*, pp.193-197.
3. 유승경, 유남재, 조성민, 심민보 (2007), “연약지반개량을 위한 순환골재 다공질 콘크리트말뚝의 역학특성”, *한국지반공학회 건설매립기술위원회 학술발표회 논문집*, pp.177-184.
4. 유승경, 이창민, 김세원, 최항석 (2008(a)), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법에 대한 실내모형실험”, *한국토목섬유학회논문집*, 제7권 2호, pp.23-29.
5. 유승경, 김세원, 최항석, 이창민 (2008(b)), “순환골재 다공질 콘크리트말뚝으로 개량된 복합지반의 침하저감 및 압밀거동 특성”,

한국토목섬유학회논문집, 제7권 3호, pp.25-30.

6. 윤길립, 윤여원, 강오람, 유승경, 이규환 (2008), "순환골재를 활용한 연약지반개량용 다공질 콘크리트 말뚝의 전단특성", *한국지반공학학회논문집*, 제24권 제12호, pp. 75~84.
7. 해양수산부 (2000), "대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(III)".
8. 日本 地盤工學會 (1988), "軟弱地盤對策工法", pp.548-551.
9. ABAQUS v6.7-1, Abaqus reference manual (2007).
10. Aboshi, H., Yoshikuni, H., and Maruyama, S. (1970), "Constant Loading Rate Consolidation Test", *Soils and Foundations*, Vol.10, No.1, pp.44-56.
11. 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.
12. Ajdukiewicz, A. (2002), "Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPC", *Cem. Concr. Compos.* 24 2, pp.269-279.
13. ASTM C 33, "Standard Specification for Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standards 2005.
14. ASTM C 94, "Specification for Ready-mixed Concrete", Annual Book of ASTM Standards 2005.
15. ASTM C 125, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate", Annual Book of ASTM Standards 2005.
16. Balaam, N. P. & Booker, J. R. (1981), "Analysis of rigid raft supported by granular piles", *Int J Numer Anal methods geomech*, 5(4), pp.379-403.
17. Balaam, N. P. & Poulos, H. G. (1983), "The behaviour of foundations supported by stone columns", *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng.*, Vol.8(1), pp.199-204.
18. Barkdal, R. D. & Bachus, R. C. (1983), "Design and construction of stone columns", Vol.1, *Report No. FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, Virginia*.
19. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol.113, pp.718-742.
20. Carillo, N. (1942), "Simple two- and three- dimensional cases in the theory of consolidation of soils", *J. of Math. & Phys.* 21(1), pp.1-5.
21. Greenwood, D. A. (1970), "Mechanical improvement of soils below ground surface", *Proceedings, Ground Engineering conf., Institution of Civil Engineering, June*. pp.11-12.
22. 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.
23. Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T. and Taylor, A. H. (2001), "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate", *Cem. Concr. Res.* 31. pp.707-712.
24. Matsuo, M. (1968), "Study on the uplift resistance of footing (II)", *Soil and Foundation VIII(1)*, pp.18-48.
25. Mitchell, J. K. & Huber, T. R. (1985), "Performance of a stone column foundation", *Journal of Geotechnical Eng., ASCE*, Vol. 111(2), pp.205-223.
26. Priebe, H. (1976), "Abschätzung des Setzungsverhaltens eins durch Stopfuerdichtung verbessertan Baugrandes", *Die Bautechnik, H.S.*
27. Rendulic, L. (1935), "Der hydrodyamische spannungsausgleich in zentral entwässerten tanzylindern Wasserwirtschaft and Technik", *Wein*, Vol.2, pp.250-253.
28. RILEM TC 121-DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry (1994), "Specifications for concrete with recycled aggregates", *Materials and Structures*, 27. pp.557-559.
29. Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., and Eric Wirquin (2003), "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete", *Cem. Concr. Compos.* 25, pp.223-232.

(접수일자 2009. 10. 27, 심사완료일 2009. 11. 25)