

순환골재 다공질 콘크리트말뚝 공법에 대한 실내모형실험

Experimental Study on Recycled-Aggregate Porous Concrete Pile Method

유 승 경^{1*} You, Seung-Kyong
김 세 원³ Kim, Se-Won

이 창 민² Lee, Chang-Min
최 항 석⁴ Choi, Hang-Seok

ABSTRACT

The purpose of this research is to assess the application of recycled-aggregate that is gained from construction wastes as the material of compaction pile method. At the same time, the development of the new technique rectifies defects of the existing compaction pile method for soft ground improvement. In this research, laboratory chamber tests were carried out analyzing the effect of the soft ground improvement by porous concrete pile using recycled aggregate. Through the results of the laboratory chamber tests, the variations of settlement, excess pore pressure, and increment of the vertical stress with time and the behavior of the composite ground were elucidated.

요 지

본 연구의 목적은 연약지반개량을 위한 다짐말뚝공법의 재료로써 건설폐기물에서 선별 처리된 순환골재의 적용성을 평가함과 동시에 기존 다짐말뚝공법들의 단점을 보완하는 새로운 공법을 개발하는 데 있다. 본 논문에서는 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 의한 지반개량효과를 분석하기 위하여 실내모형실험을 수행하였다. 실험결과로부터 개발된 복합지반의 침하량과 과잉간극수압 및 연직응력증분의 시간에 따른 변화 특성과 복합지반의 거동 특성을 분석하였다.

Keywords : Recycled-aggregate, Porous concrete pile, Soft ground, Improvement, Laboratory chamber test

1. 서 론

최근 우리나라에서는 건설폐기물의 발생량이 1996년에 1,030만 톤, 2002년에는 4,400만 톤으로써 연평균 70%의 급격한 증가율을 보여 이를 처리함에 있어 우려의 대상이 되고 있는 실정이다(이세현, 2006). 그러나 건설폐기물은 90%정도가 폐콘크리트, 폐아스팔트, 토사로 이루어져 있기 때문에 적절한 분리, 선별의 처리과정을 거친다면 새로운 골재자원으로 이용할 수 있다. 그러나 현재까지의 순환골재는 도로 기층(보조)재료나 콘크리트용, 아스팔트용으로 분류되어 주로 도로공사에 한정적으로 적용되어 왔으며 최근 5년간 국내의 순환골재는 총 발생량에 대하여

9.5%의 매우 저조한 사용량을 나타내고 있는 실정이다. 선행 연구에 따르면 순환골재를 연약지반개량 분야 중 다짐말뚝분야에 천연골재의 대체 재료로 사용한다면 연간 약 200억 원의 건설비 절감효과를 얻을 수 있다고 보고되고 있다(유승경 등, 2007). 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 순환골재를 이용한 신기술, 신공법에 대한 관심이 고조되고 있다.

한편, 연약점토지반의 지지력 증대와 압밀촉진을 목적으로 채택되고 있는 연약지반 개량공법에는 천연재료를

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

이용하는 모래다짐말뚝(SCP)공법이나 쇠석다짐말뚝(GCP) 공법 등이 대부분을 차지하고 있다. 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 결함이 우려된다. 따라서 이러한 기존 공법들의 단점들을 극복하기 위하여서는 재료적인 측면과 기능성 측면에서의 새로운 공법 개발이 시급한 실정이다.

이러한 배경으로부터 본 연구의 목적은 최근 건설재료의 수급으로 인해 고갈되는 천연자원을 보호하고 건설재료의 품귀현상을 극복하기 위하여 건설 폐기물인 순환골재를 연약지반개량 분야에 적용함과 동시에 기존 다짐말뚝공법들의 재료적 측면과 기능적 측면의 단점을 개선하는 공법 개발에 있다. 본 논문에서는 순환골재를 활용한 새로운 연약지반개량공법 개발의 일환으로 실내모형실험을 통하여 순환골재 다공질 콘크리트말뚝에 의한 지반개량효과를 분석하였다. 실내모형실험에서는 개량된 복합지반의 침하량과 과잉간극수압 및 연직응력증분을 관측하였으며 실험결과로부터 시간에 경과에 따른 복합지반의 거동 특성을 분석하였다.

2. 순환골재 다공질 콘크리트말뚝(RAPP) 공법의 개요

본 연구에서 개발하고자 하는 공법의 대표적인 특징은 다짐말뚝의 주재료로서 건설폐기물로부터 선별 처리된 순환골재를 사용한다는 점과 이 순환골재를 이용하여 다공질 콘크리트말뚝을 연약지반에 생성시킨다는 점에 있다. 따라서 본 공법의 개발로 인해 순환골재를 연약지반개량 분야에 적극 활용함으로써 모래나 자갈 등의 천연자원을 보호하고 건설재료의 품귀현상을 극복할 수 있는 사회적 기대효과를 얻을 수 있으며 기존 다짐말뚝공법들의 기능적 문제점을 보완하는 효과를 얻을 수 있다. 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 저하 현상이 우려되고 있는 실정이다. 또한 시공 시 연약지반의 측방유동현상 등에 의해 다짐말뚝의 단면이 끊기는 경우가

발생하고 시공 후 목표 개량률에 미치지 못하는 문제점들이 제기되고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제들을 극소화하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 순환골재를 소정의 고화재와 빈배합하여 제작한 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(Recycled Aggregate Porous Concrete Pile, 이하 RAPP로 칭함)공법을 개발하였다. 필자는 실내요소시험을 통하여 순환골재 다공질 콘크리트의 역학적 특성(유승경 등, 2007)을 조사한 바 있다. 그 결과 일축압축강도와 투수성은 기존 다짐말뚝들의 공학적 특성을 상회하는 것으로 나타났다. 따라서 RAPP공법에서의 말뚝 전체의 팽창 및 전단 파괴에 대한 안정성과 투수성에 대한 우수성을 확인할 수 있었다. 한편, 본 공법의 현장 적용에 있어서는 굳지 않은 빈배합 된 순환골재를 타설 장비를 이용하여 연약지

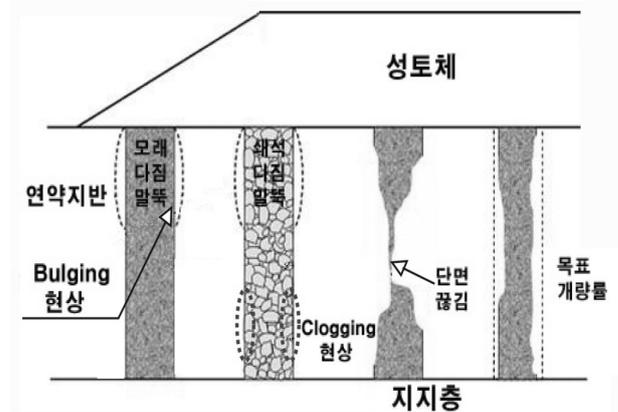


그림 1. 기존 다짐말뚝공법의 문제점

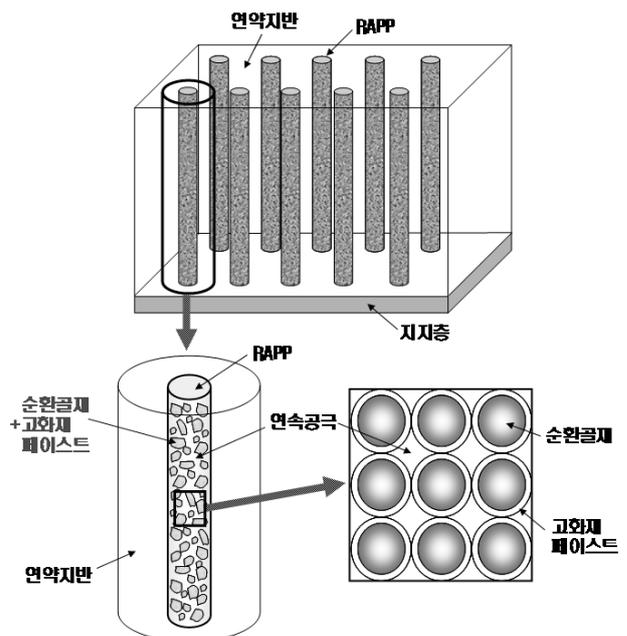


그림 2. 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP) 개요도

반에 타설하는 방법과 지상에서 미리 다공질 콘크리트 말뚝을 양생 제작하여 연약지반에 근입 시키는 방법을 생각할 수 있다. 따라서 지반 조건이나 시공 환경 등에 따라서 시공방법을 적절히 선택한다면 목표 개량률에 맞는 개량체를 균일하게 설치하는 것이 가능하리라 판단된다. 이러한 점들로부터 종합적으로 판단해 보면 본 개량공법의 적용으로 인해 사회적, 기능적 측면의 개선 효과를 기대할 수 있으며 궁극적으로 치환율의 최소화가 가능하여 경제적 측면의 기대 효과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

3. 실내모형실험

3.1 실험장치

그림 3과 그림 4는 각각 본 연구에서 사용한 실내모형 실험장치의 모습과 상세도를 나타내고 있다. 실험에 사용된 원형 토조는 내경 280mm, 내부심도 580mm이고 토조 내부의 측면마찰을 저감시키기 위해 크롬으로 표면처리하였다. 토조 하부는 배수용 파이프를 설치하여 모형지반의 하부로부터 배수를 가능하게 하였다. 또한, 재하판에는

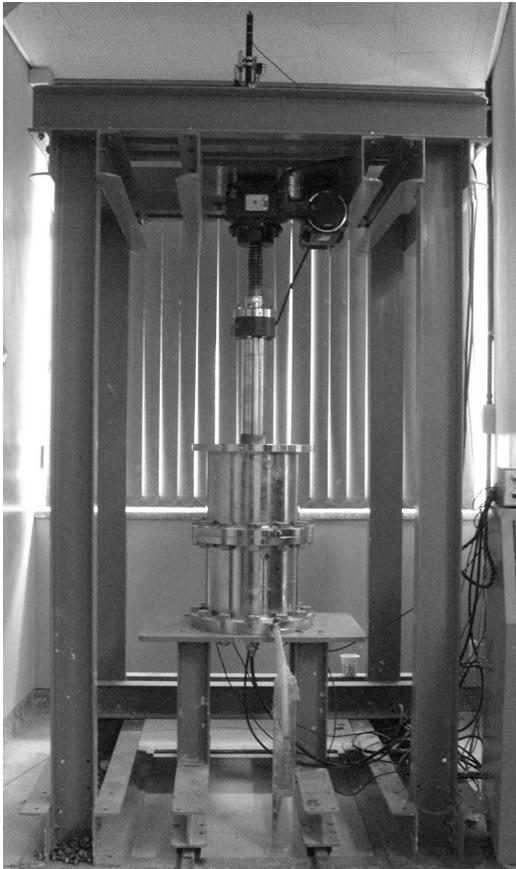


그림 3. 실내모형실험장치의 모습

직경 2mm의 구멍을 다수 만들어 모형지반 상부로 부터의 배수성을 확보하였다. 모형지반에 대한 재하는 모터를 이용한 자동 시스템을 사용하였으며 하중 재하축의 모터에 자동센서를 설치하여 예상치 못한 하중재하가 발생하면 자동으로 멈추게 제작하여 압밀 실험 장치의 고장 및 실험 데이터의 손상을 최소화 하였다. 하중이 전달되는 Load-Cell과 가압판의 연결은 원형 토조의 최상단과의 수평을 유지하도록 하여 편심을 최소화하고 침하량의 정확한 계측을 위해 하중 전달의 중심부에서 침하량을 계측하였다.

3.2 사용시료 및 모형지반 제작

3.2.1 사용 점토 및 순환골재

모형실험에서는 시판의 카오린(Kaolin) 점토를 사용하였으며, 본 점토의 물리적 특성은 표 1에 나타난 바와 같다. 표 1에서 알 수 있듯이 이 점토는 통일분류법상 소성과

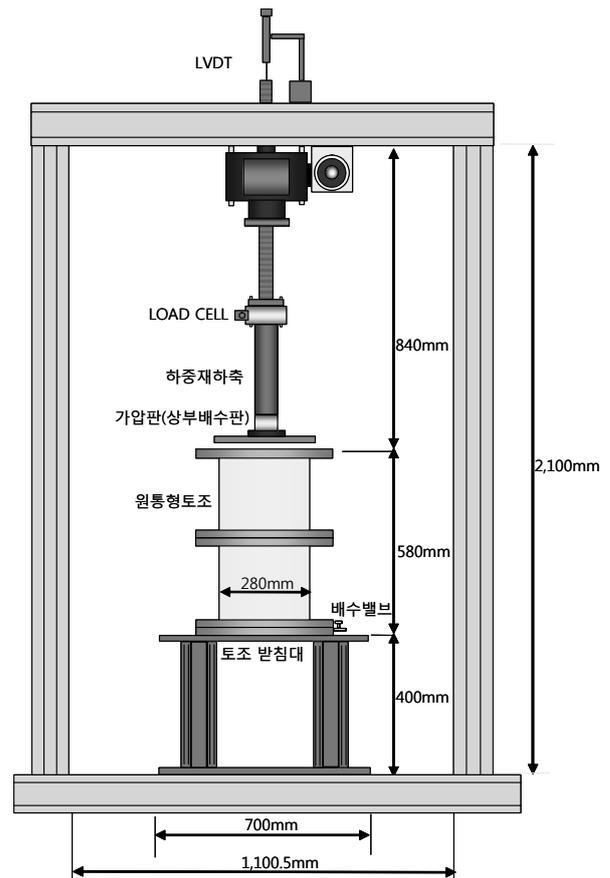


그림 4. 실내모형실험장치의 상세도

표 1. 점토의 물리적 특성

G_s	W_L	W_P	I_P	C_c
2.62	82.6%	28.6%	54.0	0.87

압축성이 큰 점토로 분류된다. 표 2는 말뚝용 순환골재의 물리적 특성 시험결과이다.

3.2.2 모형지반의 제작

본 실험에서는 다음의 순서에 의해 모형지반을 제작하였다. 우선, 점토를 진공상태로 배합할 수 있는 교반기를 이용하여 80%의 함수비로 반죽하였다. 토조 바닥부에 약 50mm 높이의 배수용 모래층을 설치한 토조 내에 485mm의 높이가 되도록 배합한 점토를 충전하고, 이때에 소정의

위치에 토압계와 간극수압계를 설치하였다. 그 다음 9.8 kPa의 조건에서 예비압밀을 실시하여 약 2.16의 간극비를 갖는 점토지반을 제작하였다. 그 후 점토지반의 중심에 치환율에 상당하는 원형 케이싱을 삽입하면서 주변의 점토가 교란되지 않도록 굴삭하고, 미리 제작된 RAPP를 삽입하였다. 이때 RAPP는 표 3에 나타난 조건으로 제작하여 3일 양생 후 사용하였다. 말뚝 타설 후, 다시 상재압 9.8 kPa로 압밀을 실시함으로써 말뚝 타설에 의한 응력변동을 제거하여 모형지반의 제작을 완료하였다.

표 2. 순환골재의 물리적 특성 시험결과

시험항목	시험방법	시험결과	
입도(%)	KS F 2502 : 2002	40mm	99.1
		25mm	49.1
		20mm	12.9
		10mm	1.2
		5mm	0.8
절대건조밀도(g/cm^3)	KS F 2503	2.28	
흡수율(%)		3.6	
입자모양판정실적율(%)	KS F 2527	56.8	
마모감량(%)	KS F 2508	35.4	
0.08mm체 통과량시험에서 손실된 양(%)	KS F 2511	0.2	
점토덩어리양(%)	KS F 2512	0.02	
안정성(%)	KS F 2507	6.7	
유기이물질 함유량(%)	KS F 2576	0.08	

3.3 실험조건

표 4는 실험조건을 나타내고 있다. 모형실험은 복합지반의 치환율이 5%인 경우에 대하여 실시하였다. 본 실험에서는 소정의 재하응력에 도달하기까지 3단계로 나누어 단계재하를 실시하였다.

3.4 계측 시스템

표 5는 모형실험에서의 측정항목과 각각의 항목에 대응하는 계측기를, 그림 5는 모형실험에서의 계측기들의 설치위치를 나타내고 있다. 원형토조 내부에는 토압계와 간극수압계를 모형지반의 중간 심도에 대하여 대칭이 되도록 설치하였다. 특히, 점토부에 계측기를 설치할 때는 수

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)	면적(m^2)	높이(m)	체적(m^3)
1846	0.16	41.7	260.9	1543.5	0.0626	0.003076	0.43	0.001323

표 4. 실험케이스와 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

표 5. 측정항목과 계측기

Measuring items	Measuring instruments
Applied load	Load cell
Settlement	LVDT
Vertical stress in pile	Earth pressure transducer (BER-A-5MPa)
Vertical stress in clay	Earth pressure transducer (BER-A-1MPa)
Excess pore pressure	Pore pressure trasducer (BED-A-500kPa, BED-A-200kPa)

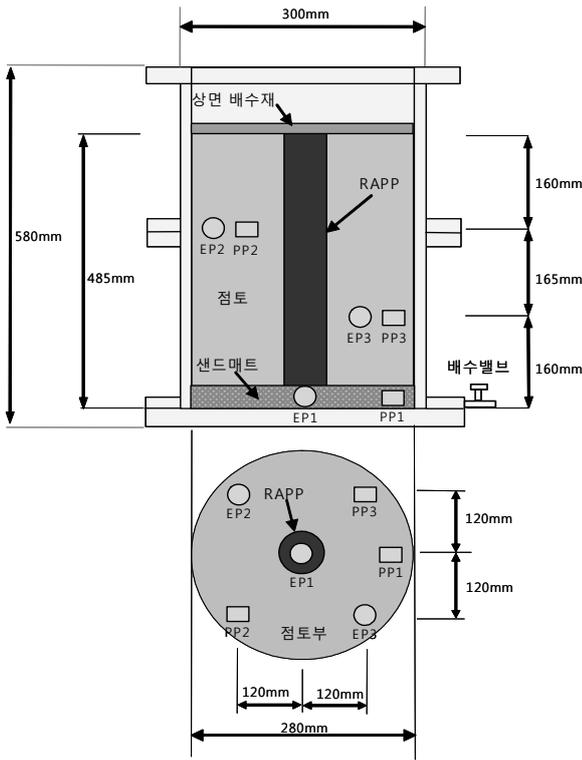


그림 5. 계측기의 설치도

압면을 소정의 위치와 방향이 되도록 신중히 설치하였으며 설치 후 점토의 충진은 가능한 한 균등하게 소량으로 실시하여 점토 충진에 따른 계측기의 이동을 최대한 방지하였다. 또한, 본 실험을 수행하기 전에 압력용기를 이용하여 토압계와 간극수압계의 캘리브레이션을 위한 예비실험을 실시한 후 각각의 교정계수를 산정하였다.

4. 모형지반의 거동

4.1 침하량의 시간에 따른 변화

그림 6은 모형실험의 각 재하단계에서의 시간에 따른

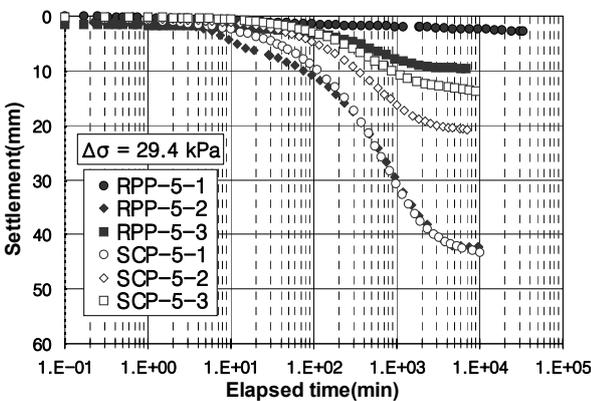


그림 6. 시간에 따른 침하량 변화

침하량 변화를 나타내고 있다. 그림에는 기존 연구에서 금번 모형실험과 동일한 조건으로 수행한 모래다짐말뚝(SCP)에 대한 실험결과(유승경, 2003)를 함께 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 1단계 하중을 재하한 경우 RAPP로 개량된 복합지반의 침하량은 거의 발생하지 않고 있으며 2단계 하중을 재하하면서부터 시간에 따른 압밀곡선을 나타내며 침하가 진행되고 있다. 이러한 사실로부터 금번 실험에서의 1단계 하중은 RAPP가 거의 지지하고 있어 복합지반 전체에서는 매우 적은 탄성 침하만 발생되었으며 2단계 하중이 재하 된 후부터 RAPP의 소성변형이 시작되면서 복합지반에 압밀침하 거동이 진행되었다고 판단된다. 한편 3단계 하중이 재하된 경우의 복합지반의 시간에 따른 침하량의 변화양상은 2단계 하중이 재하된 경우와 유사하게 나타났지만 매우 적은 침하량이 발생되고 있다. 이는 2단계 하중 하에서 RAPP의 소성변형이 일단 종료되고 3단계하중 하에서는 재차 말뚝의 지지기능이 증가되고 있다고 생각할 수 있다.

그림 7은 하중 단계 증가에 따른 무보강의 경우, RAPP와 SCP로 보강된 경우에 대한 각각의 누적 침하량의 변화를 나타내고 있다. 여기서 무보강 상태에 대한 침하량은 Terzaghi의 1차 압밀 침하량 공식(Braja M. Das, 1997)으로 산정하였다. 그림으로부터 SCP와 비교하여 RAPP로 인한 침하저감효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2 과잉간극수압의 시간에 따른 변화

그림 8은 각각의 하중단계에 대한 과잉간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. PP-1은 모형토조 하단부의 배수 층에서 계측한 값으로 모든 재하단계에서 과잉간극수압이 발생되지 않고 있으며 따라서 하단부로부터의 원활한 배수가 이루어졌음을 알 수 있다. 또한, PP-2와 PP-3

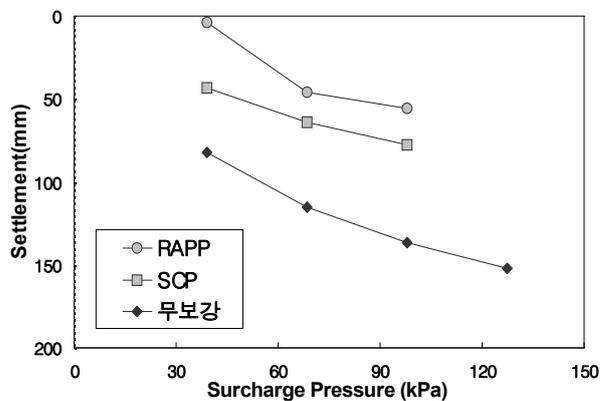


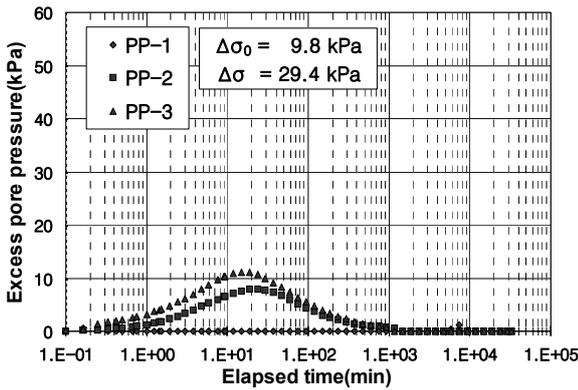
그림 7. 하중단계 증가에 따른 누적 침하량의 변화

은 모형지반 중간 심도를 중심으로 상하부에 대칭되는 지점에서 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 하

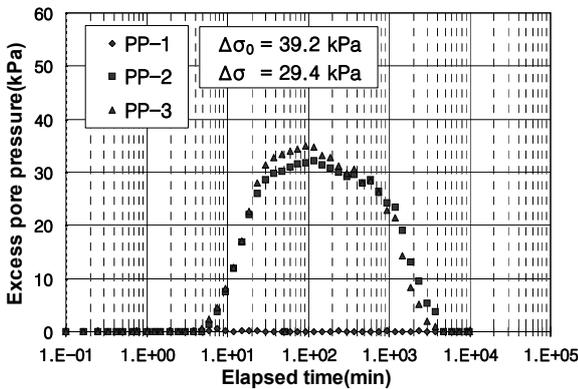
는 재하하중에 도달하기까지의 지연시간과 모형지반과 간극수압계에 미소량의 기포가 존재하여 완전하게 포화되지 못했기 때문이라고 생각된다. 본 모형실험에서는 각 하중 단계에서 29.4kPa의 하중증가분을 적용하였다. 그러나 2단계 하중재하의 경우를 제외하면, 1단계와 3단계 하중재하의 경우에는 점토부에 발생된 최대 과잉간극수압이 하중증가분에 비해 현저히 적게 나타나고 있다. 이러한 현상은 앞 절에서 설명한 침하량의 변화 특성과 상응하는 것으로 1단계와 3단계 하중재하의 경우에는 강성으로 인한 RAPP의 소성변형이 억제되고 있으며 따라서 점토부에 재하하중이 충분히 전달되고 있지 않음을 알 수 있다.

4.3 연직응력증분의 시간에 따른 변화

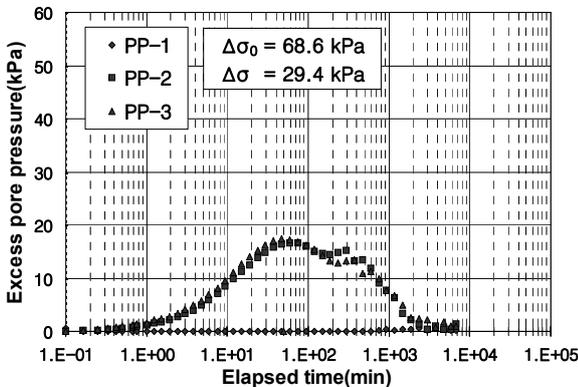
그림 9는 모형지반의 점토부와 RAPP 하단부에 설치한 토압계로부터 측정한 연직응력증분의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 여기서 점토부의 연직응력증분은 점토부 상하부에 설치된 토압계(EP-2, EP-3)에서 측�된 값의 평균으로 나타내었다. 1단계 하중재하의 경우 점토부와



(a) 1단계 하중재하

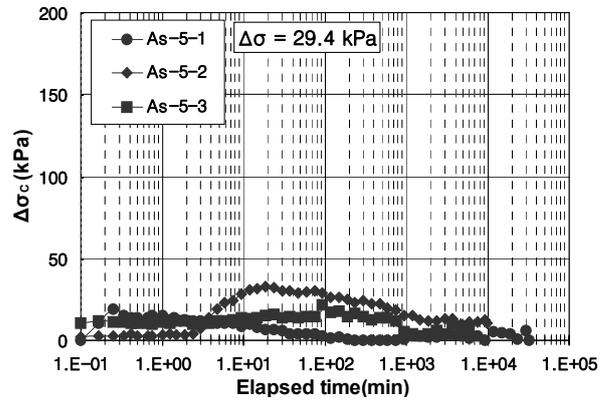


(b) 2단계 하중재하

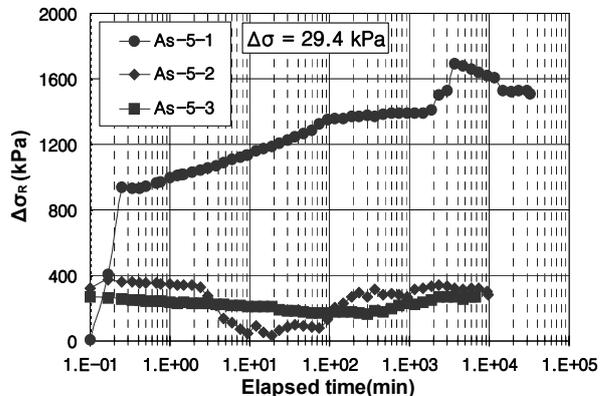


(c) 3단계 하중재하

그림 8. 시간에 따른 과잉간극수압의 변화



(a) 점토부



(b) RAPP 하단부

그림 9. 점토부와 RAPP 하단부의 시간에 따른 연직응력증분의 변화

RAPP 하단부 모두 재하 직후에 연직응력의 급격한 증가를 보이고 있으며 RAPP 하단부에서는 그 이후에도 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 발생된 연직응력증분은 RAPP의 탄성변형량에 대응하는 값이며, RAPP의 변형이 종료된 후에는 점토부의 과잉간극수압 소산(그림 8(a))으로 인해 압밀이 진행되면서 재하하중이 RAPP로 집중되는 현상이 증가되어 RAPP 하단부의 연직응력증분은 증가하고 있다고 생각할 수 있다. RAPP의 소성변형이 발생하는 2단계 하중재하의 경우 점토부의 연직응력증분은 큰 변화가 보이지 않지만 RAPP 하단부에서는 재하 후 약 2분이 경과되면서 급격한 감소현상을 관찰할 수 있다. 이때가 RAPP의 소성변형 시점이라고 판단된다. 시간이 흐른 후 약 100분에 다다를 때 다시 연직응력증분이 증가하여 재하 초기 시 발생된 값과 유사하게 유지됨을 관찰할 수 있는데 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 재하 되어도 복합지반의 지지구조가 안정한 상태임을 알 수 있다. 모든 하중 단계에 대하여 RAPP 하단부에서 발생하는 연직응력증분은 점토부에서 보다 매우 크게 나타나고 있다. 이로부터 RAPP와 점토로 이루어진 복합지반에서 하중재하로 인한 응력분담거동이 발생되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 순환골재 다공질 콘크리트 말뚝(RAPP)에 의해 개량된 복합지반의 압밀거동에 관한 일련의 모형실험을 실시하였다. 그 결과 등침하 조건하에서 복합지반 전체의 침하거동, 점토부의 과잉간극수압 소산거동, 개량지반 내부의 응력상태의 시간에 따른 변화 특성을 고찰하였다. 이하에 본 연구에 의해 얻은 결과를 요약한다.

1. 본 모형실험에서의 복합지반의 침하거동 특성은 하중 단계에 따라 변화하였다. 즉, 초기 하중단계에서는 RAPP가 재하하중을 거의 지지하여 복합지반 전체에서는 매우 적은 탄성 침하만 발생하였으나 2단계 하중이 재하

된 후부터 RAPP의 소성변형이 시작되어 복합지반에 압밀침하 거동이 나타났다. 한편 3단계 하중 재하의 경우 복합지반의 침하거동은 2단계 하중 재하의 경우와 유사하게 나타났지만 RAPP의 소성변형이 일단 종료되어 매우 적은 침하량이 발생되었다. 한편, 무보강의 경우, RAPP와 SCP로 보강된 경우의 일차압밀침하량을 비교한 결과 SCP와 비교하여 RAPP로 인한 침하저감 효과가 크게 나타났다.

2. 상재하중이 재하 됨에 따라 복합지반의 점토부에서 과잉간극수압이 발생하였으며 시간이 경과함에 따라 소산됨을 관측할 수 있었다. 따라서 본 모형실험에서의 복합지반에서 압밀현상이 발생되었음을 확인할 수 있었다. 한편, 2단계 하중재하의 경우를 제외하면, 1단계와 3단계 하중재하의 경우에 발생한 최대 과잉간극수압이 하중 증가분에 비해 현저히 작게 나타났다. 이것은 1단계와 3단계 하중재하의 경우에 RAPP의 자체 강성으로 인하여 소성변형이 억제되어 점토부에 재하하중이 충분히 전달되지 않았기 때문이라고 판단된다.
3. 본 모형실험에서는 모든 하중 단계에 대하여 RAPP 하단부에서 발생하는 연직응력증분은 점토부에서 보다 매우 크게 나타났다. 이러한 사실로부터 RAPP와 점토로 이루어진 복합지반에서 하중재하로 인한 응력분담 거동이 발생되고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 이세현 (2006), “건설공사에서의 순환골재 재활용 기술과 정책현황”, *대한토목학회지*, 제54권 제4호, pp.135-140.
2. 유승경, 조성민, 심민보, 이웅준, 김지용 (2007), “다짐말뚝 공법 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 (2003), “저치환율 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분담거동에 대한 실험적 연구” *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제5호, pp.253-261.
5. Braja M. Das (1997), *Advanced Soil Mechanics*, Second Edition, pp.243-247.

(논문접수일 2008. 5. 15, 심사완료일 2008. 6. 13)