

# 콘크리트궤도 하부 조립지반재료의 장기압축침하에 관한 연구

## Long-term Compression Settlement of Granular (Rock/Soil Mixture) Fill Materials under Concrete Track

이 성 진<sup>1</sup> Lee, Sung-Jin

이 일 화<sup>2</sup> Lee, Il-Wha

이 진 옥<sup>3</sup> Lee, Jin-Wook

이 준 석<sup>4</sup> Lee, Jun S.

### Abstract

This study was intended to identify the effect of the wetting on a long-term compression settlement of the rock/soil mixture used as fill material, depending on compaction and grading conditions. The relatively large settlement happened under the fully-submerged condition, and a repeated settlement was monitored when moisture content increased over and over again like the rainfall infiltration. In case of the materials without fine fractions or compacted in wet condition, the settlement caused by wetting was relatively low. In conclusion, the long-term compression settlement of granular (rock/soil mixture) fill material is more affected by the increase of water content and temperature change (freezing and thawing) than creep.

### 요 지

본 연구에서는 암석과 흙이 혼합된 성토재료를 대상으로 다짐 시 함수조건 및 입도조건 등에 따라 Wetting이 성토체의 장기압축침하에 미치는 영향을 중심으로 검토하였다. 그 결과 완전 침수를 모사한 경우 침하량이 상대적으로 매우 크게 나타났으며, 강우침투와 같이 반복적인 함수비의 증가 시에도 반복적인 침하가 관측되었다. 반면 습윤상태에서 다져진 시료나 세립분이 없는 재료의 경우에는 Wetting에 의한 침하량이 상대적으로 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 동결 융해가 반복되는 경우 입자파쇄의 가속화로 압축침하가 지속적으로 발생되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 이와 같은 재료에서의 장기적인 성토체 압축침하거동에는 크리프의 영향보다 함수비 증가나 반복적인 동결융해 조건이 더 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Creep, Embankment, Granular material, High speed railway, Temperature, Wetting-collapse

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

고속철도는 국내 뿐 아니라 해외에서도 중요한 교통

기반시설로 이용되고 있으며 많은 나라에서 추가적으로 건설 및 계획 중에 있다. 이처럼 증가추세에 있는 고속철도는 300km/h 이상의 고속으로 운행되기 때문에 일반철도 및 도로에서 허용되던 노반의 작은 부등침하도 큰 사고를 야기시킬 수 있어 주의를 기울여 시공 및

1 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, geolsj@krii.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)

3 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute)

4 한국철도기술연구원 차륜레도연구실 책임연구원 (Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

유지관리 되어야 한다. 또한 고속철도 궤도의 허용 침하 범위 내에서 유지보수가 거의 요구되지 않으며 구조적 안정성이 뛰어난 콘크리트궤도가 기존의 자갈궤도를 대체하고 있다. 그러나 콘크리트궤도의 경우 상대적으로 작은 허용침하량을 넘어서는 즉 궤도상부에서 조정 가능한 침하량 이상의 경우 복원방법이 매우 어려우며, 이에 따르는 유지 보수 비용이 크게 발생된다. 따라서 자갈궤도에 비해 상대적으로 엄격한 침하관리가 필요하며, 하부구조의 설계/시공 시 이에 대한 보다 폭 넓은 이해가 요구된다.

토공구간에서 침하는 크게 원지반의 침하, 성토체의 압축으로 인한 침하, 열차운행하중에 의한 침하로 분류한다. 이 중 대부분의 침하가 원지반에서 발생되나 이에 대한 연구는 많이 수행되어 왔으며, 이에 대한 예측과 대책공법도 다양하게 개발되어 설계, 시공에 활용되고 있다. 하지만 성토체 자체의 압축침하에 대한 연구는 그 침하량이 상대적으로 크지 않고 장기적으로 다양한 하중 및 환경조건에 의해 발생하는 특성으로 많은 연구가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 하지만 콘크리트궤도에서 허용잔류침하량은 여러 나라마다 차이는 있지만 대체로 30mm내외까지만 허용되고 있기 때문에 콘크리트궤도의 구간에서는 성토체의 침하가 상대적으로 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 따라서 성토체 자체 압축침하를 발생시키는 다양한 원인들과 그 영향 정도에 대한 검토가 요구된다.

## 1.2 조립재료의 장기 변형 거동

조립지반재료 자체의 장기적인 압축침하는 일정한 유효응력 하에서 시간에 따라 변형이 발생하는 크리프로 정의되고 있으며, 이러한 현상은 주로 다양한 영향인자들의 변화에 따라 입자 사이의 접촉점에서의 부서짐(crushing)에 의해 발생하는 것으로 이해되고 있다. Murayama 등(1984)은 모래의 크리프에 대한 유동학적 모델을 제안하였으며, Kuhn & Mitchell(1993)은 점성과 마찰로 움직이는 입자간의 슬라이딩이 크리프를 발생시킬 수 있

다는 것을 보이기도 하였다. 그리고, Leung 등(1996)과 Lade 등(1998)은 조립재료의 크리프가 입자의 부서짐과 함께 동반되는 것을 확인하였다. 또한 McDowell(2003)은 높은 응력수준 하에서 조립재료의 크리프가 입자강도의 시간의존적인 특성으로 이해될 수 있다고 설명하고 있다. 한편 붕괴성 토질(Collapsible soils)은 건조한 점토나 실트 등의 점성 재료와 조립재료가 느슨하게 결합되어 있는 것으로 설명되기도 한다. 이러한 흙의 구조는 Casagrande(1932)가 소개한 다음 그림 1과 같은 개념으로 설명될 수 있다. 과거 여러 고성토체가 붕괴를 경험하였으며, 이러한 일련의 현상들은 붕괴성 토질의 정의에 대해 보다 넓은 해석이 가능하도록 했다.

다짐모래, 자갈 암성토체의 압축성에 대한 연구는 Marachi 등(1969), Nobari & Duncan(1972) 등의 연구자들에 의해 수행된 바 있다. 이러한 연구들은 비점성토와 암성토체가 낮은 응력수준에서 낮은 압축성을 보이지만 높은 응력수준에서는 입자파쇄에 의해 상당한 압축성을 보일 수 있다고 지적하고 있다. 점성의 성토체의 경우 wetting에 의한 부피변화가 응력수준에 따라 팽창이나 압축이 모두 발생할 수 있다. Burland(1965)와 Mitchell(1993) 등이 지적한 바와 같이 부분 포화된 점성의 토질은 다른 조립재의 접촉점 사이에 세립분의 'Packets'을 갖게 되며, 이러한 'Packets'은 음의 간극수압을 갖고 있어 낮은 응력수준에서 물을 흡수했을 때 팽창할 수도 있다. 하지만 높은 응력수준에서는 미끄러짐이나 변형이 발생하여 조립재료의 전체적인 부피 감소(Collapse or hydrocompression)가 발생할 수 있다. 따라서 Wetting에 의한 유효응력의 감소가 세립분의 미시적인 팽창과 함께 조립재료의 접촉점의 미끄러짐으로 거시적 부피감소로 이어지게 된다. 이러한 팽창/붕괴의 메커니즘은 단단한 퇴적암으로 구성된 성토체에서 현저하게 발생할 수 있다. 즉 암석과 단단한 흙덩어리는 현장의 다짐상태에서 적절하게 부서지지 않고 시공 완료 이후 Wetting에 의해 약화되고 붕괴될 수 있는 것이다.

또 다른 조립재료의 압축 붕괴메커니즘으로는 다음 그림 2와 같이 설명될 수 있다. 그림은 입자파쇄에 따른

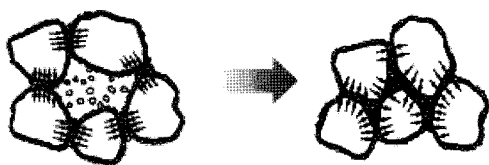


그림 1. 침수 전후의 흙입자 구조(Houston 등, 1993)

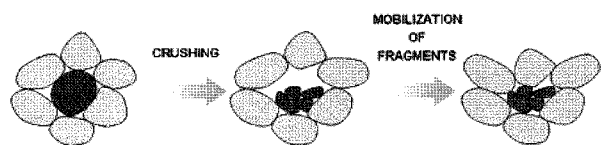


그림 2. 입자파쇄에 따른 흙입자 구조 변화(Feda, 2000)

흡입자 구조 변화의 두 단계를 보여주고 있다. 첫 번째 단계로서 가장 약한 입자가 응력 집중에 의해서 깨지게 된다. 이러한 입자 조각들은 더 이상 하중을 받을 수 없게 되면서 변형을 유발시키고 다음 단계로 흡구조의 압축과 함께 깨진 입자들도 다시 하중을 받는 구조로 입자가 재배열된다. 이 과정에서 전체적인 흡구조의 부피가 감소하게 되며, 이러한 현상은 연속적으로 이어질 수 있을 것이다.

### 1.3 연구 범위

본 연구에서는 국내 대규모 성토현장에서 사용되고 있는 암성토 재료를 대상으로 하중 조건과 Wetting 조건(입자종류, 수직응력, Wetting 정도, 반복적 하중증가 및 Wetting 등)에 따른 Wetting Collapse 실험을 수행하여 함수비 상승에 따른 재료 입자 붕괴와 재배열에 따른 침하경향을 평가하였다. 또한 실제 현장 조건에서의 장기간 동안 발생하는 장기침하경향을 평가하기 위해 사하중을 장기간 재하할 수 있는 실험을 수행하였다. 장기 압축침하시험에서도 장기간 동안 침하에 미치는 영향 요소로서 반복적 Wetting, 재료입도, 다짐함수비, 다짐 밀도 및 온도 조건 등의 영향 정도를 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 본 연구에서의 침하평가는 1차원적 압축침하를 대상으로 하였다.

## 2. 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 암석 종류와 암석재료의 유무에 따라 4개의 성토현장에서 실제 사용되고 있는 암석 및 흙을 활용하여 실험을 수행하였다. 실험 재료들은 현장에서 각각 경암(Hard Rock-Weathered Soil Mixture,

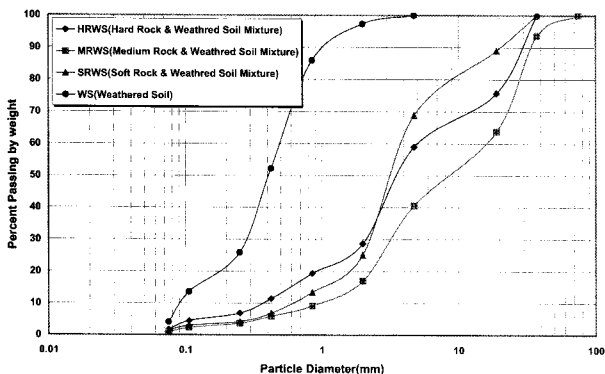


그림 3. 실험 재료별 입도분포곡선

HRWS), 보통암(Medium Rock-Weathered Soil Mixture, MRWS), 연암(Soft Rock-Weathered Soil Mixture, SRWS), 풍화토(Weathered Soil, WS)로 분류되어 시공되고 있는 재료들로서 그림 3과 같은 입도를 나타내고 있었다.

국내 고속철도 설계기준에 의하면 다짐도의 품질기준으로 상부노반은 최대건조밀도의 95% 이상, 하부노반은 최대건조밀도의 90% 이상으로 제시되어 있다(고속철도 설계기준, 2005). 따라서 본 연구의 실험에서도 재료에 따른 상대밀도 실험을 위해 다짐몰드에 기전상태의 시료를 투입한 후 소정의 다짐충수와 다짐횟수를 변화시키면서 밀도를 측정하여 최소/최대건조밀도를 얻었다(이성진 등, 2008). 각 시료의 최대건조밀도는  $20.6(\text{kN/m}^3) \sim 21.3(\text{kN/m}^3)$ 이었으며 1차 대형오이도미터 실험에서는 재료 최대건조밀도의 95% 수준으로  $20.0(\text{kN/m}^3)$ 을 선정하여 재료별로 일관된 밀도로 실험을 수행하였으며, 추가적으로 밀도 변화에 따른 경향 평가를 위한 실험도 수행하였다.

## 3. 압축침하 영향요소에 따른 Wetting Collapse와 장기압축침하특성

### 3.1 조립지반재료 및 Wetting 시 수직응력별 압축침하 평가(이성진 등, 2008)

이 실험은 재료의 응력수준별 지하수위 상승과 같은 완전 수침 조건에서 발생될 수 있는 최대 Wetting Collapse 압축침하량을 평가하기 위해 수행되었으며, 이에 대한 자세한 내용은 이성진 등(2008)에 소개되어 있다. 간략히 실험 내용과 결과를 요약하면 다음과 같다. 입경이 약 120-130mm 이하의 골재를 대상으로 한 본 실험에서는 직경 60cm, 높이 60cm의 오이도미터셀을 사용하였다.

실험 대상의 조건에 따라 하중에 따른 침하가 완료된 후 살수장치를 통해 물을 침투시켜 시료를 포화시킴으로써 물의 침투(혹은 포화)가 재료의 변형에 미치는 영향(Wetting Collapse)을 관찰하고자 하였다. 포화로 인한 영향 검토 후에도 마지막 하중단계까지 하중에 의한 영향을 검토하여 침수 유무에 따른 각 하중 단계에서의 재료 압축성을 파악하였다.

이 실험에서의 주된 관심사는 성토 후 Wetting Collapse에 의한 암성토체의 압축침하에 관한 내용이다. 이러한 Wetting Collapse를 발생시키는 요인으로는 강우 시 침투에 의해 부분포화상태에서 함수비가 증가하거나 완

표 1. 실험 재료 및 실험 조건

Test Type	Test Sample	Unit Weight	Normal Stress at Wetting	Test Materials
Wetting Collapse Settlement Test	HRWS	20.0(kN/m <sup>3</sup> )	(1) 200(kPa)	Hard Rock-Weahterd soil Mixture
	MRWS	20.0(kN/m <sup>3</sup> )	(2) 100(kPa)	
			(3) 200(kPa)	Medium Rock-Weathered soil Mixture
	SRWS	20.0(kN/m <sup>3</sup> )	(4) 100(kPa)	Soft Rock-Weathered Soil Mixture
			(5) 200(kPa)	
			(6) 400(kPa)	
	WS	19.5(kN/m <sup>3</sup> )	(7) 100(kPa)	Weathered Soil
			(8) 200(kPa)	

표 2. 일차원 Wetting Collapse 실험 결과

Test Materials	Stress at Wetting (kPa)	Vertical Settlement caused by Wetting (mm)	Vertical Strain caused by Wetting (%)
HRWS	200	2.58	0.57
MRWS	100	3.28	0.73
	200	2.71	0.60
SRWS	100	1.29	0.29
	200	1.14	0.25
	400	2.32	0.51
WS	100	1.65	0.37
	200	1.78	0.40

전 포화상태에 이르는 경우와 지하수위가 상승하여 완전 침수 포화되는 경우가 포함된다. 함수비 증가에 따른 암성토체 압축침하의 영향인자로는 실험 재료, 다짐 함수비, Wetting 조건, 응력 수준 등이 있을 것이며, Wetting Collapse에 대한 정량적인 예측을 위해서는 이러한 영향인자들에 대한 다양한 조합의 연구가 필요할 것이지만 본 실험에서는 이에 대한 발생정도를 파악하고 그 대책을 검토할 수 있는 기초연구자료로 활용하는 것을 목적으로 하였다. 즉 앞서 언급한 바와 같이 경암, 보통암, 연암으로 분류되는 암석이 주재료인 시료들(HRWS, MRWS, SRWS)과 화강풍화토(WS)를 대상으로 압중 및 입도분포에 따른 압축특성, Wetting이 이루어지는 응력수준에 따른 압축특성, 그리고 전체적으로 암석재료를 활용한 성토체에서 발생될 수 있는 함수비증가에 따른 압축침하 변형률의 범위를 파악해보았으며, 이에 대한 실험 결과는 그림 4 및 표 2와 같다.

실험 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 실험 대상 재료와 Wetting 응력 수준에 따라 Wetting Collapse에 의한 1차원 압축변형률은 약 0.2-0.8%의 범위에서 발생되는 것으로 나타났다. 이러한 변형률은 10m 성토 시, 약 20mm-80mm에 이르는 침하로써 허용 잔류침하량을 30mm까지 엄격하게 제한하는 콘크리트궤도의 고속철도에서는

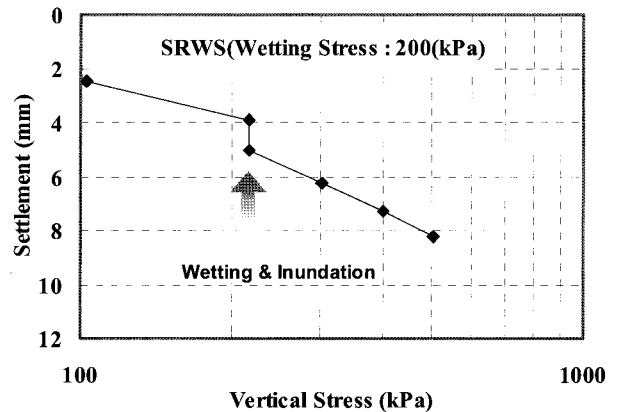


그림 4. 일차원 수직 압축응력-침하 곡선

상대적으로 매우 큰 침하를 유발시킬 수 있는 크기이다.

같은 재료의 성토재료일 경우에도 다짐 응력 및 입도, 함수비에 따른 밀도 등의 불균일성에 따라 위치별로 부등침하가 발생할 수 있다. 이러한 결과는 실내에 비해 다짐관리가 더욱 어려운 현장에서는 더 크게 발생될 수 있을 것으로 예상되며, 따라서 고속철도의 노반에서 토공구간의 다짐관리가 더욱 엄격히 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Wetting Collapse에 의한 부피감소와 침하발생은 크게 세립분의 포함 정도에 따른 조립재의 미끌림이나 재배열과 암석의 종류에 따른 접촉점에서의 입자변형에

의해 영향을 받는 것으로 예상할 수 있었다. 그러나 입도분포에서 큰 차이가 없는 3가지 암석/흙 혼합재료 (HRWS, MRWS, SRWS 재료)의 실험에서 상대적으로 암석의 종류 즉 암석 자체의 강도에 따라 Wetting에 의한 침하량의 일관된 경향은 확인할 수 없었다. 이에 대한 원인으로는 연암의 경우 다짐 과정이나 실험이 수행된 상재하중 하에서 이미 암석 접촉점의 파쇄가 발생하여 Wetting과정에서의 강도감소로 인한 파쇄율을 감소시켰을 것으로 판단된다.

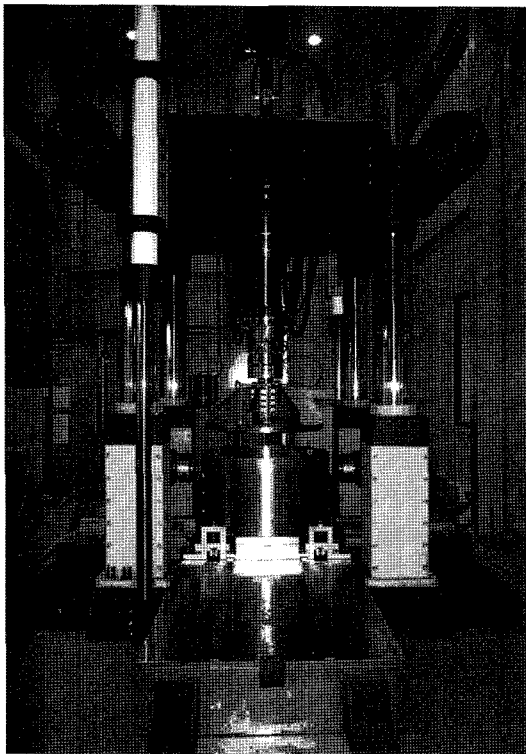


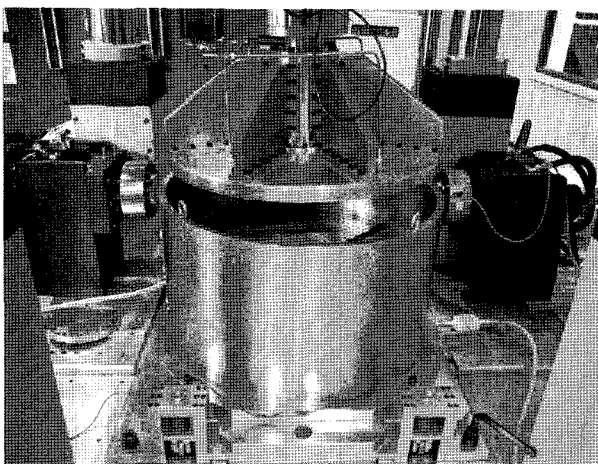
그림 5. 대형삼축압축시험 및 오이도미터 시험장비(한국철도기술연구원)

이 실험에서는 재료가 하중 단계별로 안정화된 다음 물을 공급하고 하부 배수라인에서 물이 배출되기 시작하면 배수라인을 막고 완전 수침상태로 Wetting에 의한 침하를 검토하였다. 즉 본 실험 결과는 완전 수침 상태의 최종 포화 시의 Wetting Collapse 양을 평가한 결과로 실제 현장에서는 하부노반의 지하수위 상승 등의 조건에서 발생할 수 있는 극한 상태의 결과일 수 있다. 따라서, 실제 현장에서 지하수위 상승과 강우 등의 요인으로 발생하는 노반의 포화상태 정도에 따라 침하량을 평가하기 위해서는 완전 침수 대비 부분 포화 정도에 따른 침하특성을 분석하여 압축침하특성을 예상하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단된다. 또한 부분 포화 정도에 따른 성토체의 투수특성 결과와 성토체 내부로의 침투 결과를 통해 성토체의 압축 침하정도를 예측하여 성토 과정 및 방치 기간 동안 강우에 노출되어 침하되는 양을 파악하여 잔류침하량 고려 시 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

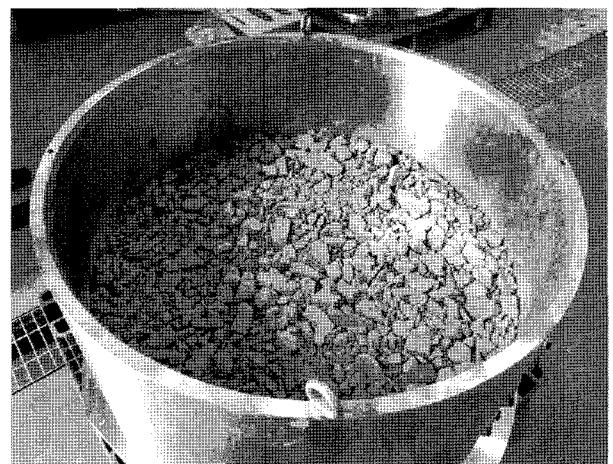
### 3.2 수직응력 및 다짐밀도에 따른 Wetting Collapse 평가

#### 3.2.1 실험 장비

본 실험에는 한국철도기술연구원에 구축된 대형오이도미터를 활용하였다. 오이도미터 셀은 직경 600mm, 1000mm 두 종류로서 각각 입자 최대직경 100mm와 150mm 내외의 암성토재료까지 실험이 가능한 장비이다. 하중은 2개의 Actuator에서 200kN( $\pm 10$ mm/10Hz)과 2000kN의 최대하중을 제어할 수 있다. 또한 오이도미터 셀은 상부 재하판을 통해 물을 주입하고, 하부 베이스를



(a)



(b)

그림 6. 대형오이도미터 셀 및 시험 시료

통해서 물이 배수될 수 있으며, 유입량 및 유출량은 유량계에 의해 측정할 수 있다.

### 3.2.2 실험 결과 및 평가

본 실험에서는 앞선 실험에서 사용하였던 SRWS 시료에 대해 다짐밀도를  $17.0(\text{kN/m}^3)$ 로 조성하여 각각 직경 600mm와 1000mm에서 실험을 수행하였다(SRWS-I, SRWS-II). SRWS-I, SRWS-II 실험의 경우 앞에서 소개된 SRWS 재료보다 작은 밀도로 조성된 것이 다르며 표 3과 같이 수직응력을 증가시키면서 단계별로 함수비 증가를 유도하는 Wetting이 반복적으로 가해지는 순서로 실험이 진행되었다(표 3). SRWS-I와 SRWS-II는 같은 재료에 같은 밀도를 가졌으며, 직경을 달리한 시료이다. 특히 SRWS-II의 경우에는 단계별로 성토 하중의 증가와 부분적인 Wetting이 반복되는 현상을 모사하는 실험을 수행하였다. 결과는 표 4, 그림 7, 그림 8과 같다.

SRWS-I의 경우 단위중량이  $17.0(\text{kN/m}^3)$ 로써, 앞선

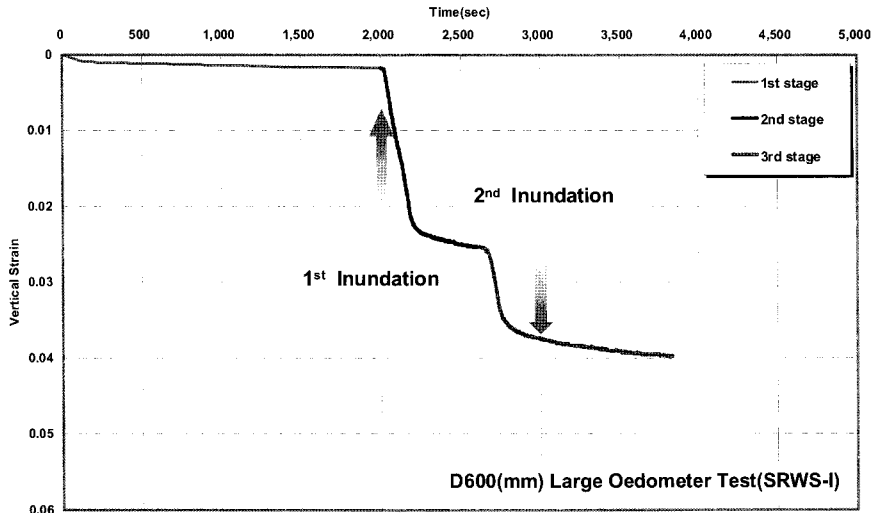
실험결과인  $20.0(\text{kN/m}^3)$ 의 SRWS와 비교했을 때 재료와 입도는 같으나 밀도가 작게 조성된 시료이다. 두 시료에서는 Wetting에 의한 침하에 미치는 밀도의 영향을 비교하기 위해 같은 수직응력인  $\sigma = 200(\text{kPa})$ 에서 물을 충분히 주입했을 때 즉 완전히 침수시켰을 때의 침하량을 비교하였다(그림 7). 결과는 표 2, 표 4에서 볼 수 있듯이  $17.0(\text{kN/m}^3)$ 의 시료인 SRWS-I가 2.33%의 수직변형률로써  $20.0(\text{kN/m}^3)$ 의 밀도로 조성되었던 SRWS의 0.25%의 수직변형률에 비해 약 10배의 변형률을 나타내고 있다. 여기에는 밀도가 작은 시료가 같은 응력 수준에서 안정화된 이후에도 입자간의 부서짐이 발생할 수 있는 접촉점이 상대적으로 많고 입자의 회전과 이동이 발생할 수 있는 절대적인 공극이 많았던 데에서 기인할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 밀도가 작은 시료는 시료 조성과정 즉 다짐 과정에서 다짐에너지가 작게 작용되어 입자 간 접촉점에서의 부서짐이 덜 발생되어 Wetting으로 인한 부서짐의 가능성이 더 컸을 것으로

표 3. 실험 재료 특성과 실험 순서 및 내용

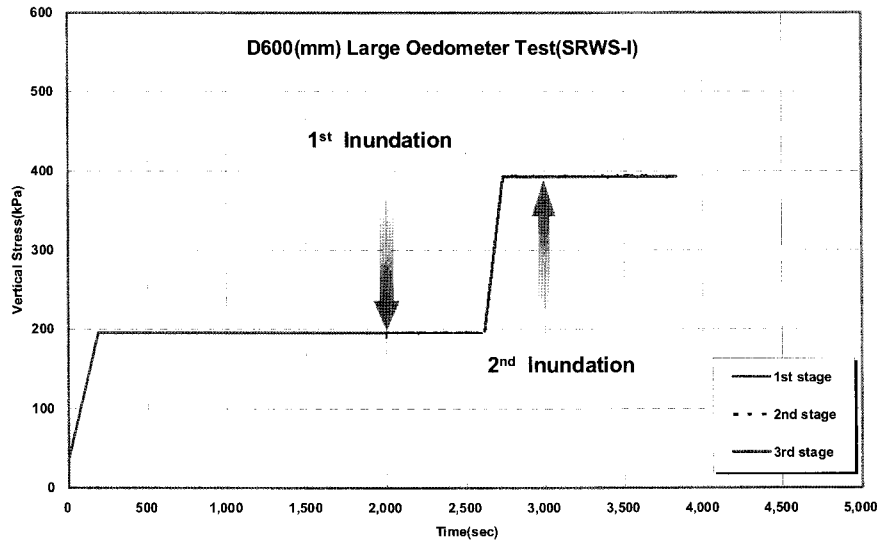
Test Sample	Unit Weight	Height	Diameter	실험 순서 및 내용	비고
SRWS-I	$17.0(\text{kN/m}^3)$	354(mm)	600(mm)	$\sigma = 200(\text{kPa})$ 까지 재하	
				$\sigma = 200(\text{kPa})$ 유지하면서 물주입	약 2분동안 수침
				$\sigma = 400(\text{kPa})$ 까지 재하	
				$\sigma = 400(\text{kPa})$ 유지하면서 물주입	약 2분동안 수침
SRWS-II	$17.0(\text{kN/m}^3)$	300(mm)	1000(mm)	$\sigma = 150(\text{kPa})$ 까지 재하	
				$\sigma = 150(\text{kPa}) \sim \sigma = 200(\text{kPa})$	5Hz, Cyclic Loading
				$\sigma = 200(\text{kPa})$ 유지하면서 물주입	5(liter) 주입
				$\sigma = 400(\text{kPa})$ 까지 재하	
				$\sigma = 400(\text{kPa})$ 유지하면서 물주입	5(liter) 주입
				$\sigma = 800(\text{kPa})$ 까지 재하	
				$\sigma = 800(\text{kPa})$ 유지하면서 물주입	약 2분동안 수침

표 4. SRWS-I/SRWS-II 시료의 대형오이도미터 실험 결과

Test Sample	Test Stage	Vertical Settlement (mm)	Accumulated Vertical Settlement (mm)	Vertical Strain (%)	Accumulated Vertical Strain (%)	Time (Sec)
SRWS-I	1st	0.61	0.609	0.17	0.17	0-2,000
	2nd	8.33	8.94	2.33	2.50	2,000-2617
	3rd	4.32	13.26	1.25	3.75	2,617-3,000
SRWS-II		0.79	14.05	0.16	3.91	3,000-3,507
	1st	0.96	0.96	0.32	0.32	0-4,201
	2nd	0.33	1.29	0.11	0.43	4,201-7,821
	3rd	2.42	3.71	0.81	1.24	7,821-11,436
	4th	3.58	7.29	1.19	2.43	11,436-15,040
	5th	2.44	9.73	0.81	3.24	15,040-18,646
	6th	5.77	15.50	1.93	5.17	18,646-22,251
7th	6.45	21.95	2.15	7.32	22,251-25,638	



(a) 단계별 변형률 곡선



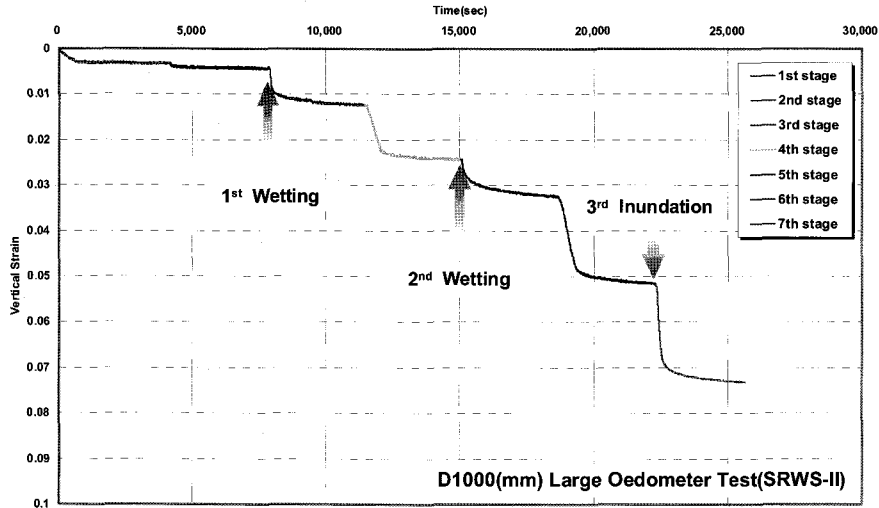
(b) 단계별 응력 곡선

그림 7. SRWS-I 실험 단계별 응력 및 변형률

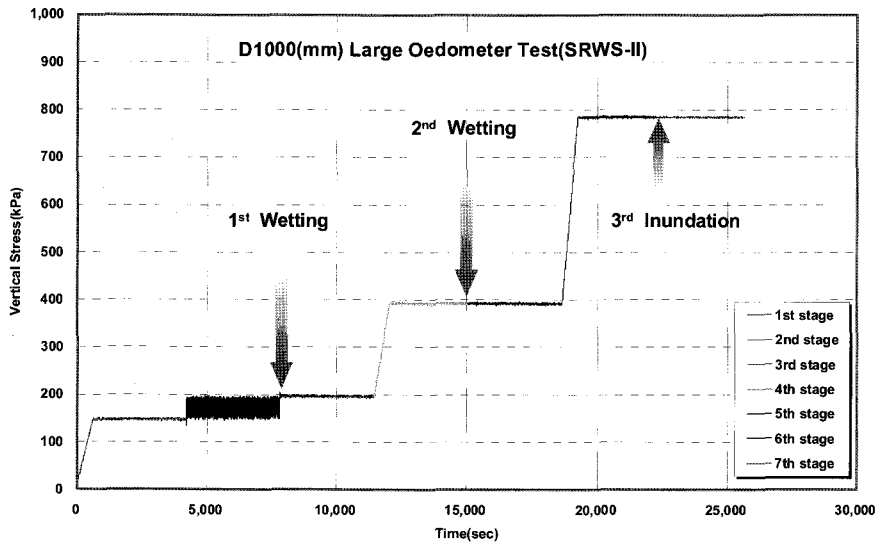
예상된다.

두 번째로 SRWS-II의 실험에서는 부분적인 Wetting과 응력증가의 반복이 수직변형에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 즉,  $\sigma = 200(kPa)$ 의 응력 하에서 부분적인 함수비 상승(1.25%)을 야기하는 1차 Wetting이 가해지고, 이후  $\sigma = 400(kPa)$ 의 응력 하에서 침하 완료 후, 2차 함수비 상승(1.25%)의 Wetting, 그리고 마지막으로  $\sigma = 800(kPa)$ 까지 하중이 증가된 이후 마지막으로 침수정도(inundation)의 물이 가해졌을 때의 수직변형률 거동을 볼 수 있었다(그림 8). 이는 건조된 상태로 다져진 암과 흙의 혼합재료가 성토고가 높아지면서 하중증가와 함께 부분적으로 강우나 지하수위에 의한 Wetting의 발생이 반복적으로 이루어질 때의 압축침하거동으로 예상할 수 있을 것

이다. 결과는 그림 8과 표 4에서와 같이 동일한 응력조건( $\sigma = 200(kPa)$ ) 하에서 부분적인 Wetting의 경우에는 완전 침수조건(SRWS-I)에 비해 발생하는 압축침하량은 작게 발생되었다. 즉 부분적인 Wetting으로 입자간 접촉점에서의 파쇄나 미끄러짐 등에 의한 체적변화가 상대적으로 적었던 것으로 예상된다. 하지만 SRWS-I 시료에서 완전침수로 인해 수직침하량이 크게 발생된 이후에는 추가적인 하중으로 인한  $\sigma = 400(kPa)$  하에서 다시 반복된 완전침수조건에서도 압축침하가 거의 발생되지 않았던 반면 SRWS-II 시료에서는 1차 부분적인 Wetting으로 인한 압축침하 이후에, 반복된 하중과 2차 Wetting 시에 비슷한 수준의 압축침하량이 발생하였다. 결과적으로 SRWS-I의 최종 수직변형률과 SRWS-II의



(a) 단계별 변형률 곡선



(b) 단계별 응력 곡선

그림 8. SRWS-II 실험단계별 응력 및 변형률

$\sigma = 400(kPa)$ 까지의 하중과 반복 Wetting 이후의 수직변형률은 각각 3.91(%), 3.24%로 유사한 수준으로 파악되었다. 즉, 임의의 하중 수준 하에서는 부분적인 Wetting이 반복되는 경우와 완전 침수조건 하에서 발생될 수 있는 압축침하량은 거의 비슷한 것으로 예상된다. 하지만 이에 대해서는 보다 많은 조건과 시료에 대한 실험이 추가되어야 보다 합리적인 추론이 가능할 것으로 사료된다.

### 3.3 장기 압축침하 특성 평가

대형오이도미터를 이용한 실험은 암석과 흙의 혼합 재료들에 대해 하중 증분에 대한 침하특성과 Wetting 시

의 일차원 압축침하특성을 검토하였으며, 이를 통해 함수비 증가로 발생할 수 있는 침하량이 고속철도의 콘크리트궤도 하부 성토재료에서는 상대적으로 큰 침하가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 조립재료로 이루어진 성토체의 장기적인 침하특성 및 경향을 보다 현실적인 조건을 반영한 실험으로 검토하고 이에 대한 장기적 잔류침하량 예측이 필요할 것으로 판단되었다.

따라서 대형오이도미터 실험에서 확인할 수 없었던 장기간 동안의 압축침하거동에서 다짐함수비 조건과 반복되는 수침과 건조 과정에서의 Wetting Collapse 발생량과 그 경향에 대한 검토를 위해 장기 침하실험 장비를 제작하여 실험을 수행하였다. 일정한 하중을 장기간 재하하기 위해서는 유압장비의 장시간 가동이 어렵기



때문에 그림 9와 같은 사하중을 이용한 재하방식을 채택하였다. 본 연구에서는 실험 재료에 일정 사하중(Dead Load)을 가하고 재하판 하부 급수라인을 통해 시료 상부로의 급수와 오이도미터 하부 배수라인을 만들어 배수와 비배수 상태를 제어할 수 있는 장비를 구성하였다. 또한 앞선 대형 오이도미터와 유사한 시료조건을 실험을 위해 내경 48cm, 높이 50cm로 제작하였다.

장기적인 재료 압축침하의 영향 인자 중 본 실험에서는 먼저 재료의 다짐함수비와 세립분의 함유율에 따른 장기압축침하거동을 중점적으로 평가하였다. 재료는 앞선 실험의 SRWS시료를 대상으로 하였으며, 시료의 조건은 표 5와 같다.

먼저 건조 다짐 시료(SRWS-D)와 습윤다짐시료(SRWS-W)를 비교했을 때, 전체 시험기간 동안의 장기압축침하량

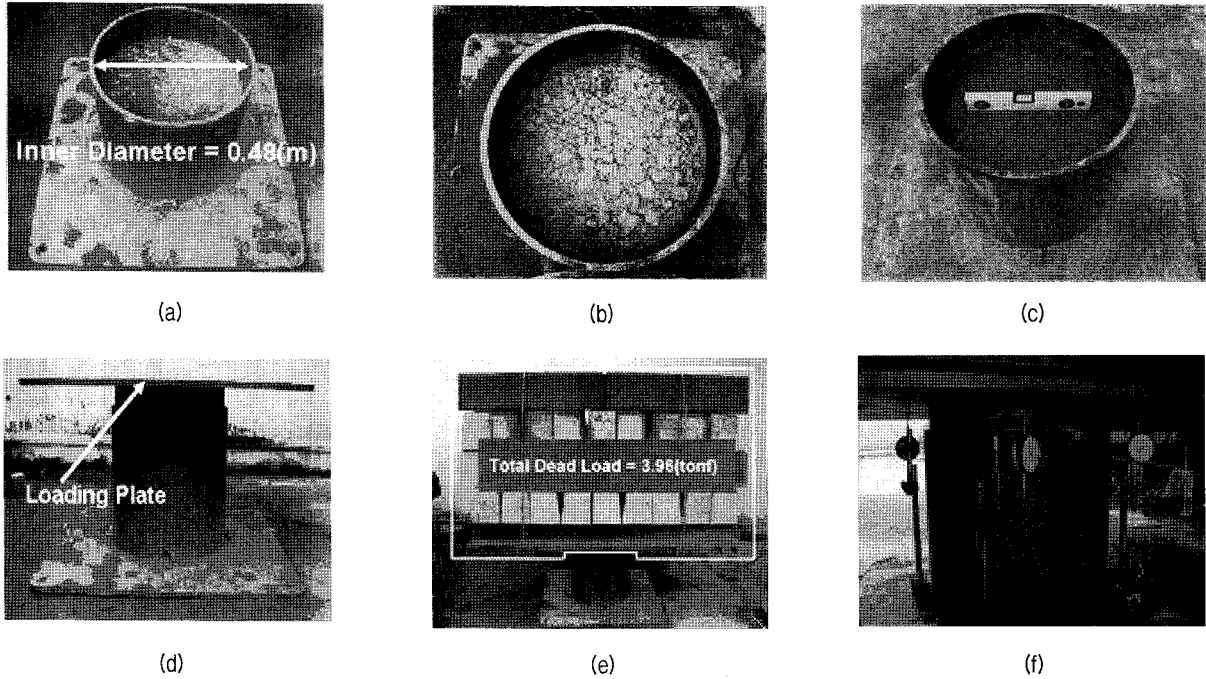
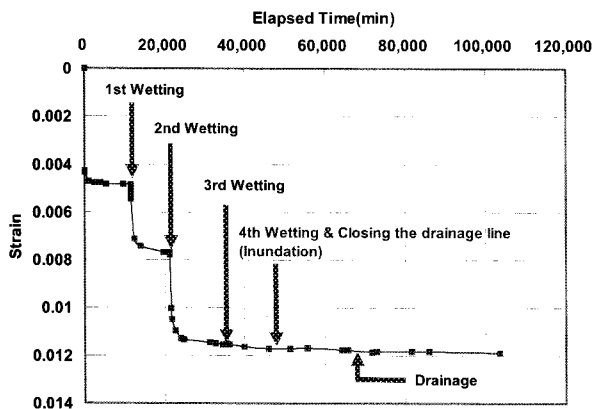


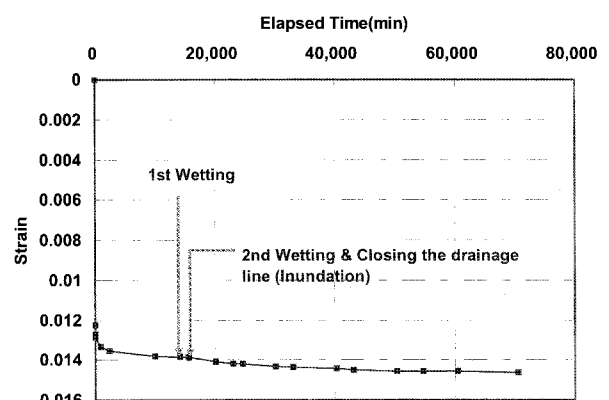
그림 9. 장기 침하특성 평가를 위한 대형오이도미터 시험

표 5. 장기 침하특성 평가를 위한 대형오이도미터 시험 조건

Test Specimen	Total Unit Weight	Vertical Stress	비고
SRWS-D	19.6(kN/m <sup>3</sup> )	220(kPa)	건조 다짐
SRWS-W	19.6(kN/m <sup>3</sup> )	220(kPa)	습윤 다짐
SR-D	17.1(kN/m <sup>3</sup> )	220(kPa)	건조다짐, 12.7mm 이하 입자 제거



(a) 건조 다짐 시료

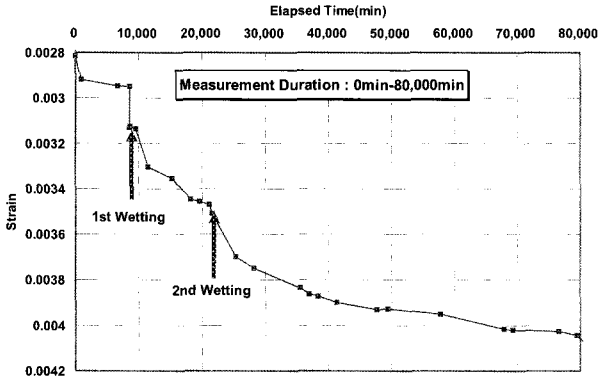


(b) 습윤 다짐 시료

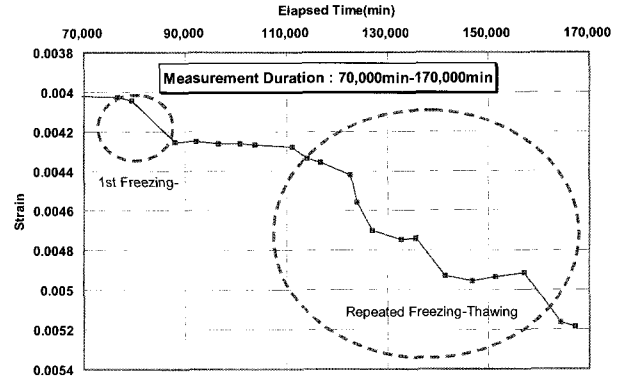
그림 10. 건조다짐시료와 습윤다짐시료 결과

은 유사하였다(그림 10). 그러나 SRWS-D시료의 초기 하중에 의한 직접침하량이 전체 침하량의 약 33%, SRWS-W 시료는 약 68%에 이르는 결과를 보였다. 실험 중에 강우 침투나 지하수위 상승을 모사하기 위해 실시한 Wetting 조건에서는 SRWS-D 시료의 경우 1st Wetting과 2nd

Wetting단계에서 급격한 침하를 발생시키는 결과를 보이며, 시간의 흐름에 따라 일정한 침하량에 수렴하였으나, SRWS-W시료의 경우 Wetting 조건에서 급격한 압축침하의 경향을 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한 본 실험은 침하가 수렴되는 것을 확인할 때까지 약 60-70



(a) 0-80,000(min)의 수직변형률



(b) 70,000-170,000(min)의 수직변형률

그림 11. SR-D시료(12.7mm 보다 작은 세립분을 제거한 시료) 시험 결과

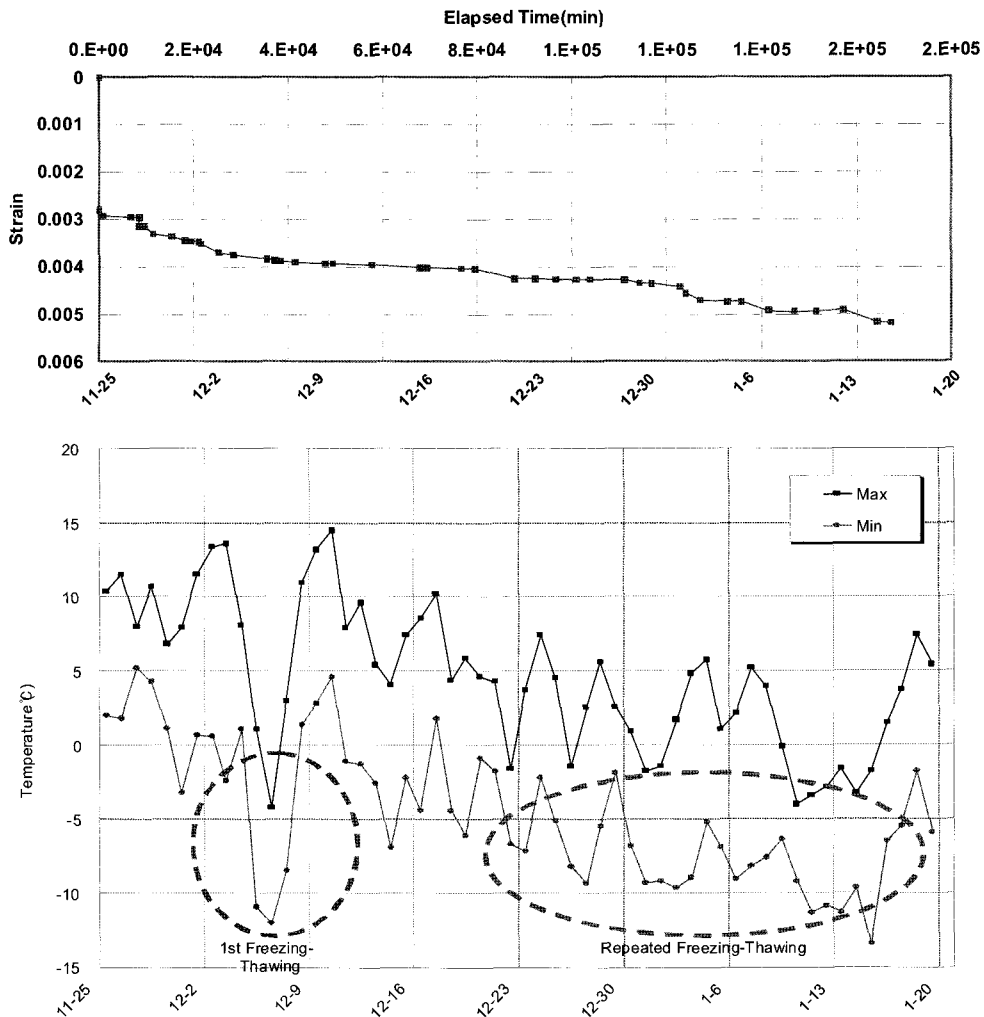


그림 12. SR-D 시료의 온도변화와 수직변형률 관계

일 동안 수행되었으며, 이 기간동안 발생된 전체 침하량에서 응력에 의한 침하량과 Wetting, 즉 함수비 상승 요인에 따른 침하량이 거의 95% 이상 차지하는 것으로 시간에 따른 Creep의 비중은 크지 않으며, 성토 완료 및 상부 구조물 설치에 따른 하중 재하 이후에 함수비에 급격한 변화가 없다면 큰 침하 발생 요인은 없을 것으로 예상된다. 따라서 장기적인 침하발생을 억제하기 위해서는 초기 다짐 조건에서 습윤조건을 유지하면서 성토 구조물을 조성하거나 장기간 방치하면서 강우에 노출시키는 것이 장기적인 압축침하량을 감소시키는 데 효과적인 것으로 판단된다.

두 번째로 SRWS-D시료와 같은 다짐함수비 조건 하에서 세립분함량을 제거한(12.7mm 이하 입자 제거) SR-D 시료의 경우에는 낮은 재료 밀도로 조성되었음에도 상대적으로 초기 변형량도 적었으며, Wetting 시나 장기적인 총 침하량에서도 작은 압축침하거동을 보였다(그림 11). 이는 본 실험에서 주어진 응력조건 하에서 입자들의 접촉점에서의 파쇄에 의한 압축량이 세립분이 포함된 구조에서의 입자 재배열에 의한 압축량에 비해 적게 발생하는 것으로 판단된다. 하지만 이는 응력수준이나 입자강도와 입도분포 등에 대한 다양한 조건의 연구결과를 검토하여 이에 대한 경향을 파악할 필요가 있을 것이다. 추가적으로 SR-D 시료의 경우 Wetting 후 실험 후반부가 동결기에 수행되면서 동결과 융해의 영향을 관측할 수 있었다. 그림 11과 12에서 볼 수 있는 바와 같이 하중과 Wetting에 의한 침하가 안정화 된 이후에 동결과 융해가 반복되면서 입자의 파쇄가 추가적으로 발생하여 지속적인 침하가 발생되고 있음을 확인할 수 있다. 그 크기는 약 0.12% 정도이며, 동결 융해의 영향을 받는 깊이가 깊지 않으므로, 성토체 전체적으로 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되나, 상대적으로 중요한 부분에서는 재료특성, 응력수준, 함수비 상태 등 다른 영향 인자에 따라 이로 인한 부등침하가 발생되지 않도록 예측하고 주의하는 것이 요구된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 암석과 흙이 혼합된 재료가 성토재료로 활용될 경우, 장기적인 압축침하거동을 평가하고 이를 예측할 수 있는 기초 연구를 수행하였다. 영향 인자로는 주로 Wetting에 의한 침하가 미치는 영향을 중점적으로 검토하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 고속철도 콘크리트궤도 하부 토공구간에서는 성토체 아래의 원지반과 성토체 자체압축침하량을 합한 허용잔류침하량이 30mm임을 고려했을 때 Wetting에 의해서 성토조건에 따라서는 허용잔류침하량을 넘는 압축침하가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 보다 정량적인 침하량 예측을 위해서는 재료별로 대상 하중조건을 고려한 실험이 추가적으로 수행되어 판단할 필요가 있을 것이다.
- (2) 같은 재료에서 동일한 입도로 밀도가 다른 시료의 실험에서는 밀도가 작은 경우에 Wetting에 의한 침하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 완전 침수와 같은 극한 조건인 경우(SRWS-I)를 제외하고는 일반적인 부분 Wetting의 조건과 하중증가가 반복되는 경우에는 반복적인 입자의 파쇄 및 재배열로 추가적인 압축침하가 발생되었다.
- (4) 같은 하중 조건 하에서는 반복적인 Wetting으로 인한 총 누적 침하량과 침수조건에서 한 번에 발생하는 침하량이 유사한 결과를 보였으며, 보다 합리적이고 효율적인 예측을 위해서는 다양한 재료와 조건 하에서의 실험 결과를 축적하여 판단해야 할 것으로 사료된다.
- (5) 같은 재료에서도 다짐 시 건조상태에서의 시료가 습윤상태에서 다져진 시료에 비해 Wetting에 의해 현저히 큰 침하경향을 보였다.
- (6) 반면 같은 다짐함수비 조건에서도 세립분이 없이 조성된 재료가 즉시 침하, Wetting에 의한 침하에서 모두 상대적으로 적은 침하경향을 보였다.
- (7) 동결 융해가 반복되는 경우 입자파쇄의 가속화로 압축침하가 지속적으로 발생되고 있는 것을 확인할 수 있었다.
- (8) 본 실험에서 관측된 장기적인 성토체 자체 압축침하거동에는 하중 증가 이외에 함수비증가, 온도변화 등이 영향을 미쳤으며, 성토구조물과 상부구조물의 하중 증가조건 외에는 일정응력 하에서 시간에 따른 크리프의 영향보다는 함수비 증가와 동결/융해의 반복에 따른 압축침하가 큰 부분을 차지하고 있으므로 이에 대한 설계/시공 단계에서의 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- (9) 특히 고속철도 콘크리트궤도와 같이 엄격한 허용잔류침하량이 요구되는 성토구조물의 경우 암성토 재료의 경우에도 가능하면 다짐 시 습윤조건을 유지하고, 최소 1년 이상 장기간 방치하면서 강우

에 의한 침투 및 동결 융해 등의 조건에서의 침하를 미리 유발시키는 것이 필요할 것으로 판단된다.

(10) 현재까지 수행된 실험 조건 이외에도 보다 다양한 Case의 실험 결과를 바탕으로 암석 등 조립재료 성토체의 장기침하에 대한 정량적 예측을 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이며, 실제 현장에 적용할 때는 현장 재료에 대한 직접적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 국토해양부 “철도기술 선진화 연구기반 조성”사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. 이성진, 이일화, 임은상, 신동훈, 조성은 (2008), 고속철도 콘크리트케도 흙쌓기재료의 Wetting Collapse에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, 제24권 4호, pp.79-88.
2. 한국철도시설공단 (2005), 고속철도설계기준(노반편), pp.83.
3. Burland, J.B. (1965), “Some aspects of the mechanical behavior of partly saturated soils”, *Moisture Equilibria and Moisture Changes in the Soils beneath Covered Areas*, Butterworth, Sydney, Australia, pp.270-278.
4. Casagrande, A. (1932), “The structure of clay and its importance

in foundation engineering”, *J. Boston Soc. of Civil Engrs.*, 19(4), pp. 168-209.

5. Feda, J. (2000), “Modelling grain crushing and debonding of soils”, *Geotechnical Measurements - Lab and Field*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 106, Proceedings of Sessions of GEO-DENVER 2000, pp.56-64.
6. Houston, W.N., Mahmoud. H.H., and Houston. S.L. (1993), “A Laboratory Procedure For Partial-Wetting Colapse Determination”, *Geotechnical Special Publication No.39*.
7. Kuhn, M.R. and Mitchell, J.K. (1993), “New perspectives on soil creep”, *J. of Geotech Engrg.* ASCE 119. No.3, pp.507-524.
8. Lade, P.V. and Liu, C.T. (1998), “Experimental Study of drained creep behaviour of sand”, *J. of Geotech Engrg.* ASCE 124. No.8, pp.912-920.
9. Leung, C.F., Lee, F.H. and Yet, N.S. (1996), “The role of particle breakage in pil creep in sand”, *Can. Geotech. J.* Vol.33, pp.888-898.
10. Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B. and Duncan. J.M. (1969), “Strength and deformation characteristics of rockfill materials”, Reports No. TE-69-5, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Calif. at Berkeley, Berkeley, California.
11. McDowell, G.R. (2003), *Micromechanics of creep of granula materials*, *Geotechnique*, Vol.53, No.10, pp.915-916.
12. Mitchell, J.K. (1993), “Fundamentals of Soil Behavior”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
13. Murayama, S., Michihiro, K. and Sakagami, T. (1984), “Creep characteristics of sands”, *Soils Found.* 24, No.2, pp.1-15.
14. Nohari, E.S. and Duncan, J.M. (1972), “Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams:” Report No. TE-72-1, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Calif. at Berkeley, Berkeley, California.

(접수일자 2009. 5. 26, 심사완료일 2009. 7. 29)