

콘크리트궤도노반에서의 강우량에 따른 장기 함수비 변화

Observed Long-term Water Content Change in Concrete Track Roadbed by Rainfall

최찬용^{1*}, 김현기², 양상범³, 엄기영⁴

Chanyong Choi^{1*}, Hunki Kim², Sangbeom Yang³, KiYoung Eum⁴

¹Member, Senior Researcher, High Speed Research Division, Korea Railroad Resarch Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-Ro, Uiwang-Si, Gyenggi-Do, 16105, Republic Korea

²Member, Senior Researcher, High Speed Research Division, Korea Railroad Resarch Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-Ro, Uiwang-Si, Gyenggi-Do, 16105, Republic Korea

³Non-Member, Researcher, High Speed Research Division, Korea Railroad Resarch Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-Ro, Uiwang-Si, Gyenggi-Do, 16105, Republic Korea

⁴Member, Chief Researcher, High Speed Research Division, Korea Railroad Resarch Institute, 176 Cheoldo bangmulgwan-Ro, Uiwang-Si, Gyenggi-Do, 16105, Republic Korea

ABSTRACT

In this study, it was performed in characteristics of settlement of roadbed materials with variation of water content using cylinder model device. The ratio of settlement (R_s) of subgrade soils in the initial water content were about 2.08, whereas it was increased about 4.06 which resulted in increase two times in the initial water content. Also, it was monitoring long-term to measure variation of the field water contents at concrete track using rainfall measuring sensors. The water content at directly underneath of concrete track rarely seems to affect the variation of water content, but it was increased by about 4% than intial water content with 20 mm/hr rainfall index at slope section. As for the result from the field date, it was determined that the water content of the inner subgrade layer was rarely affect caused by more than 20 mm/h rainfall index during if good drainage system at concrete track properly maintained.

요 지

원형모형실험을 통해 철도노반재료로 사용되는 흙을 대상으로 함수비 변화에 따른 침하관계를 평가하였다. 초기 함수비에서 침하량비(R_s)는 2.08이었으나, 초기함수비보다 2배 이상으로 함수비가 증가되었을 때 침하량비(R_s)는 4.06으로 4배 이상의 침하가 발생하였다. 또한 실제 공용중인 콘크리트궤도에서 계측된 강우데이터를 기반으로 약 1년여간 현장에 매설된 함수비 측정장비를 통해 장기 함수비 변화추이를 관찰하였다. 콘크리트궤도의 직하부에 위치한 함수비는 강우강도에 따라 변화가 거의 없는 수준이며, 사면부에서는 최대 강우강도 20mm/hr가 초과되는 경우 약 4% 정도의 함수비 변화가 생기는 것을 볼 수 있다. 이러한 변화정도를 볼 때 콘크리트 궤도의 경우 배수능력이 적절히 유지된다면 노반 내부의 함수비 변화는 강우에 대하여 영향이 매우 미비할 것으로 판단된다.

Keywords : Water content, Concrete track, Cylinder model box, Rainfall

1. 서 론

철도의 대표적인 궤도시스템인 콘크리트궤도는 유지보수주기의 연장과 생력화궤도의 장점으로 인해 국내에서도 건설되고 있다. 자갈궤도와 달리 콘크리트궤도는 시공이

Received 25 Sep. 2015, Revised 27 Oct. 2015, Accepted 28 Oct. 2015

*Corresponding author

Tel: +82-31-460-5317; Fax: +82-31-460-5289

E-mail address: cychoi@krii.re.kr (C.-Y. Choi)

후에 대규모의 보수작업이 어렵기 때문에 영업개통 후 부등침하, 예측하지 못한 침하량 등에 대비하여 보다 적극적인 설계를 하고 있다. 특히 콘크리트궤도를 지지하고 있는 흙노반은 강우에 의한 침투와 포화에 의해 노반의 강도를 저하시키기 때문에 원칙적으로 강우가 침투되는 것을 방지하고 표면배수로 설계 하고 있다.

기존의 연구에 따르면, 노반재료의 성능은 함수비 변화에 민감하다고 알려져 있다(Chandra et al., 1989; Drumm et al., 1997; Ping et al., 2000; Oh et al., 2010). 특히 공용기간 동안에 최적함수비 조건에서의 시공 상태가 집중호우나 적절하지 않는 배수상태가 되어 최적함수비에 비해 과도하게 높을 때에는 노반재료의 전단강도와 변형계수의 저하를 촉진하여 부등침하 또는 전단파괴 현상이 발생되어 궤도에 영향을 미치게 된다. Lee et al.(2015)은 대형오이도미터 시험을 통해 입경이 큰 암성토 재료에 대한 함수비에 따른 침하영향을 평가한 결과, 세립분 함유량에 따라 함수비 증가시점에서 매우 큰 침하가 발생하였으며, 세립분이 적게 포함된 경우 낮은 밀도로 조성되었음에도 함수비 증가시점에서 특별한 침하가 발생되지 않은 결과를 볼 때 함수비에 침하에 지배적인 영향을 주는 인자는 세립분 함유량이라고 하였다. Choi et al.(2009) 등은 점속부궤도 성토재료의 함수특성곡선을 산정하고 포화도 변화 추이를 검토하여 성토재료의 포화도 분포는 강우강도, 뒷채움재료의 경사, 성토 및 절토 여부, 그리고 함수특성곡선에 영향을 받는다고 하였다. Oh et al.(2012)은 입상재료의 회복탄성계수를 실내 및 현장 비파괴 실험을 통해 산정했을 때 두 값들 간의 보정계수를 제안하기 위하여 현장 함수비를 고려한 재료의 함수특성곡선과 회복탄성계수로 도로의 역학적 설계에 적용한바 있다. Kim(2004)는 현장 및 실내시험을 이용한 함수비 변화에 따른 노상토의 동적변형특성을 연구하여 최대전단탄성계수는 시료의 함수비가 감소함에 따라 뚜렷하게 증가한다고 하였다.

이 논문에서는 철도 노반재료를 대상으로 실내에서 원형모형실험을 통해 함수비를 조절하여 침하특성을 관찰하였다. 예비시험결과를 바탕으로 운영 중인 콘크리트궤도 노반에서 현장 강우량계를 설치하여 강우량에 따른 현장 함수비의 변화를 관찰하였다. 이를 통해 실제 콘크리트궤도노반에서 함수비 변화정도를 정량적으로 평가하여 노반의 상태를 확인하였다.

2. 노반재료의 상태변화와 파괴형태

철도노반의 침하는 원지반 침하와 성토체의 침하로 구별된다. 원지반 침하는 연약지반의 압밀침하로써 소성적 특성이 강하여 하중을 제거해도 변형이 회복하지 않는 특징을 가지고 있으며, 상당히 장기간에 걸쳐 계속되는 특징을 가지고 있다. 또한, 연약층의 압축침하는 쌓기 등에 의한 상재하중이 연약층을 압축하여 기초지반에 활동면을 발생시켜 급격히 파괴되는 것으로서 가장 위험한 침하이며, 침하의 진행도 돌발적이고 단시간에 발생하는 특징이 있다. 성토체 침하는 쌓기 재료의 부적합에 의한 수축 또는 압밀침하가 대부분으로 재료가 부적절한 경우이거나 쌓기의 다짐부족으로 생기는 것이다. 이 밖에도 쌓기 부분의 파괴와 활동에 의한 침하, 매립의 불완전에 의한 유실성 침하, 각기에 의해 노출된 원지반의 토질이 풍화되어 침하가 발생하는 경우가 있다.

노반재료의 침하는 함수비 변화에 의해 전단강도의 변화와 변형계수의 저하를 야기하여 공용중인 철도노반에 연약화를 촉진한다. 열차하중에 의한 노반내의 임의 지점에서의 상태 변화에 대한 메커니즘을 Fig. 1과 같이 응력경로로 표현할 수 있다. 그림에서와 같이 열차 하중에 의한 반복응력은 ①의 전응력(total stress path, TSP)경로에 있으며, 전응력 조건에서는 노반토의 포화도가 낮고 간극수(공극수)의 영향을 무시할 수 있는 경우이다. 그러나 우수나 지하수의 영향이 크고 흙의 포화도가 높은 개소에서는 흙의 간극수압을 고려한 ②유효 응력경로(effective stress path, ESP)에서 흙의 강도와 변형을 고려하여야 한다. 노반 흙이 강도를 잃게 되면 상태변화가 발생하게 되며 반복 전단에 의해 노반토의 과잉 간극수압이 축적되어

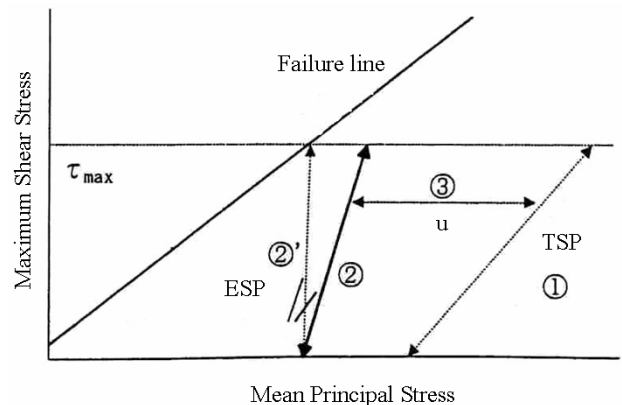
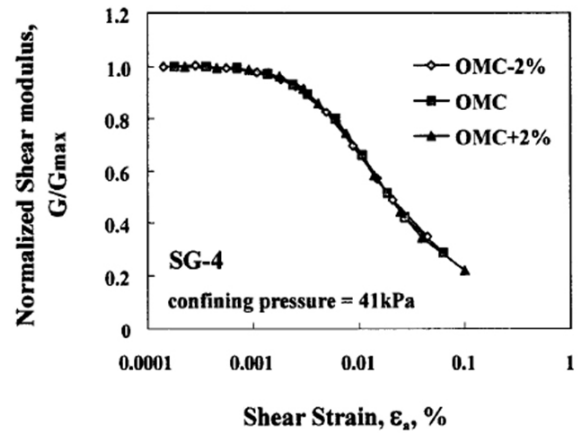
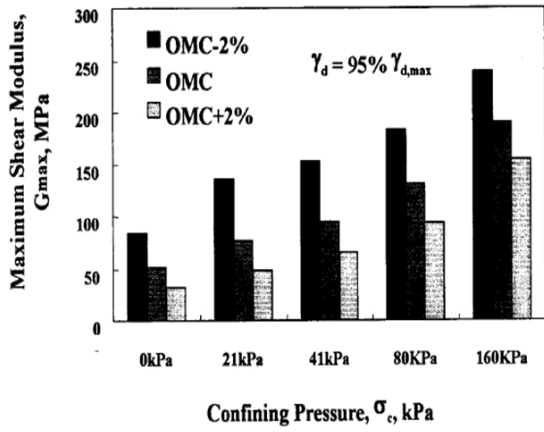


Fig. 1. Stress paths for railway roadbed (Muramoto et al., 2004)



(a) Water content - maximum shear modulus

(b) Water content - normalized shear modulus decrease curve

Fig. 2. Dynamic material properties of subgrade soils with variations of water content (Kweon, 1999)

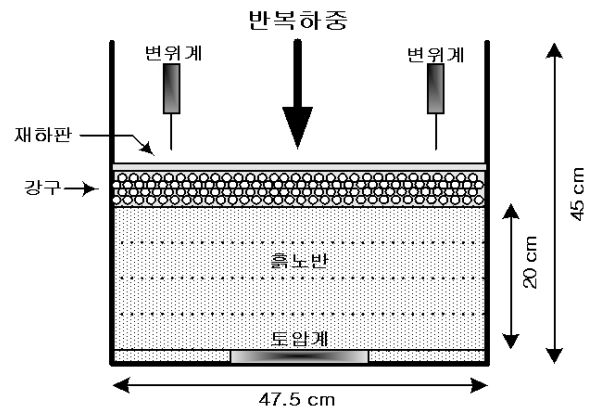
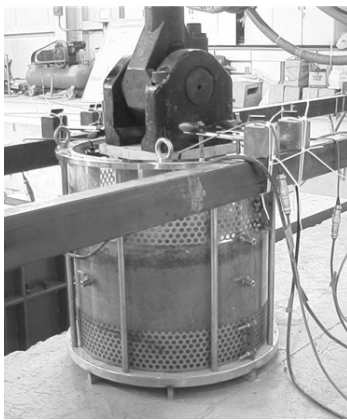


Fig. 3. The test set-up and schematic representation of model box

Table 1. Physical properties of roadbed materials

Natural water content (%)	G_s	Sieve analysis test				USCS	Compaction test		Direct shear test	
		Passes #200 (%)	Effective grain size (D_{10} , mm)	C_u	C_c		γ_{dmax} (kN/m^3)	w_{opt} (%)	c (kPa)	ψ ($^\circ$)
11.3	2.74	1.5	0.3	6.67	0.66	SP	21	10.2	25	38

유효응력경로는 ②→②'로 서서히 파괴가 진행된다.

함수비 변화에 따른 흙의 전단강도변화는 여러 연구자들에 의하여 연구가 이루어졌다. Kweon(1999)는 국내 노상 토 시료의 함수비에 따른 동적물성치를 연구하였다. Fig. 2와 같이 시료를 최적함수비와 최적함수비 $\pm 2\%$ 에서 성형하여 함수비가 감소함에 따라 최대 전단탄성계수는 증가하고 최적함수비에서 $\pm 2\%$ 범위내의 함수비에서는 정규화 전단탄성계수가 변하지 않는 경향을 보이고 있다고 하였다.

2.1 모형실험을 통한 함수비 변화에 따른 침하특성

노반재료의 침하특성을 파악하기 위하여 원형모형토조

시험을 실시하였다. 원형모형토조는 Fig. 3과 같이 직경 47.5cm, 높이 55cm로 하는 원통형으로 제작하였다. 재하하중은 철도윤중 68kN와 90kN으로 이론상 노반 상부의 응력은 약 157kPa 수준으로 실험에서 사용된 하중은 재하판 면적 $1,772cm^2$ 을 적용하여 약 28kN으로 산정하였다. 또한 반복하중에 의한 재하주파수는 10Hz로 200만회 재하하였다.

원형모형실험에서 사용된 시료는 철도현장에서 사용되는 재료로서 다소 연약한 지반특성을 가진 재료로서 실내 시험을 수행한 기본물성시험 결과는 Table 1과 같다.

3. 강우변화에 따른 장기 함수비 측정개요

콘크리트궤도에서의 강우변화에 따른 함수비 측정을 위한 현장은 Fig. 4(a)와 같이 호남고속철도 ○○교 교대(A2)의 접속부 노반이다. 원지반은 N치가 10 미만이고 두께가 2m인 전답토 및 퇴적층으로써 연약지반으로 판정되어 치환공법으로 시공되었다.

Fig. 4(b)는 계측기가 매설된 그림으로 함수량 센서는 상부노반 상단에 궤도 직하부 위치(WTC-1)와 성토체 사면부 상단부에 30cm심도에 설치하였다. 강우량계는 사면에 1개 설치되었으며 측정결과는 mm/hr로 적산 처리하였다.

3.1 현장계측기 및 특성

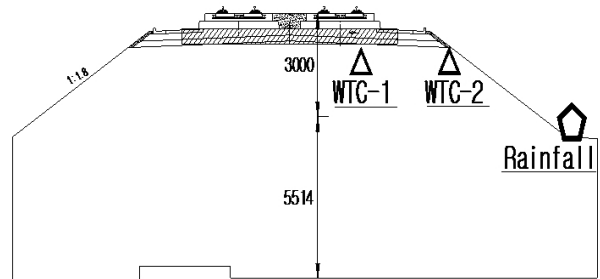
Fig. 5(a)는 현장에 설치된 함수비 센서이며 Fig. 5(b)는 강우량계이다. 강우량계는 기상청 검정을 통과한 0.5mm

의 분해능을 가진 전도식 우량계이며, 함수비 센서는 CampbellSCI에서 제작한 CS616이다. 데이터로거는 Campbell에서 제작한 CR1000으로써 정적 측정용이다. 측정기간은 2014년 1월부터 2015년 1월까지 약 13개월 동안 시간당 1회씩 측정하였다.

함수량계는 특성상 흙의 종류에 따라 센서 응답 특성이 다르기 때문에 현장 성토재료에 대하여 함수비 시험을 Fig. 6(a)과 같이 실험을 실시하였다. 산출된 함수비는 설계기준 및 시공사 품질관리기준으로 사용되는 중량함수비로 계산될 수 있도록 교정곡선을 실험으로 구하였으며, Fig. 6(b)은 센서의 출력값에 대하여 중량함수비의 관계를 나타낸 것이다. 그림과 같이 함수비 센서의 신호값은 period(msec)으로 함수비와 period의 관계는 2차 함수일 때 결정계수(R^2)가 0.9948로써 상관관계가 높은 것으로 분석되었다.



(a) experimental site



(b) Measurement layout

Fig. 4. View of the site and the measurement layout

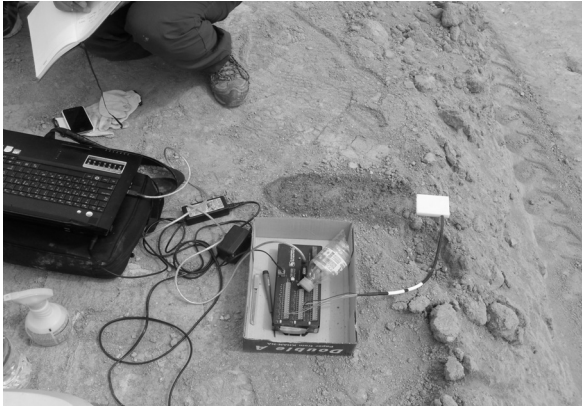


(a) Water content sensor

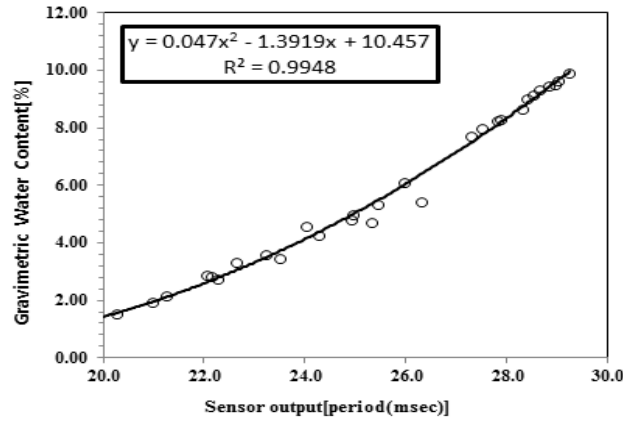


(b) Rainfall gauge

Fig. 5. View of installation of sensors



(a) Calibration for sensor



(b) Relation curve between sensor output (period) and gravimetric water content (%)

Fig. 6. Calibration curve for water content sensors

4. 실험결과 및 분석

4.1 모형실험을 통한 침하특성

일반적으로 열차하중의 반복하중에 의한 침하특성 곡선은 Eq. (1)과 같이 형태로 예측식이 사용된다(Lee., 2001; Chung et al., 2006). 식 1항은 도상자갈 초기의 즉시 침하 형태의 성분으로 도상입자간의 압축과 상부노반의 초기 압밀과정에 해당하고 제 2항의 초기 압밀과정이 후 직선적 침하거동은 도상자갈의 입자가 측방으로 유동에 기인한 침하로서 β 는 열차에 의한 궤도파괴에 직접적인 영향을 주며 도상압력과 도상가속도, 노반의 연약화 등에 비례하는 특성을 가진다.

$$Y = \gamma(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \quad (1)$$

여기서, Y : 침하량,

x : 반복횟수 또는 통과톤수,

α, β, γ : 계수로서 γ 는 초기침하의 크기, α 는 초기 침하의 반복횟수에 기인된 계수

원형모형실험에서의 노반재료의 초기함수비는 최적함수비인 10.2%이며, 3일 체수시에는 21%, 7일 체수시 약 25.1%로 점진적으로 함수비가 증가하였다. Fig. 7은 함수비 변화에 따른 침하특성이다. 그림에서와 같이 함수비가 커짐에 따라 최종침하량이 커지는 것을 볼 수 있으며, 함

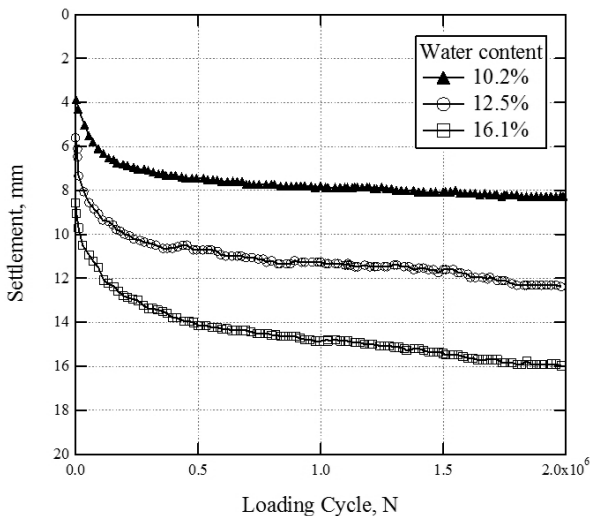


Fig. 7. Variation of settlement of water content with no. of cycle

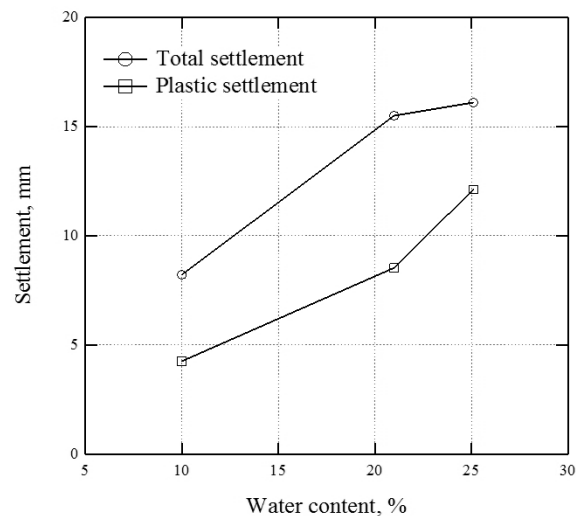


Fig. 8. Total and plastic settlement with water content

Table 2. Settlement and ratio of settlement with water variation of water content

Stagnant water days	Average water content(%)	Final settlement (mm)	Plastic settlement (mm)	Ratio of settlement (R_e)	Notes
0day	10,2	8,22	4,26	2,08	Elastic settlement, $S_e=3,96\text{mm}$ $S_e = q \frac{1+\nu}{E} b L_2$ (2) $\sigma_3=71,7\text{kPa}$, $E=13,8\text{MPa}$, $\nu=0,3$
3days	21,0	12,5	8,54	3,16	
7days	25,1	16,1	12,12	4,06	

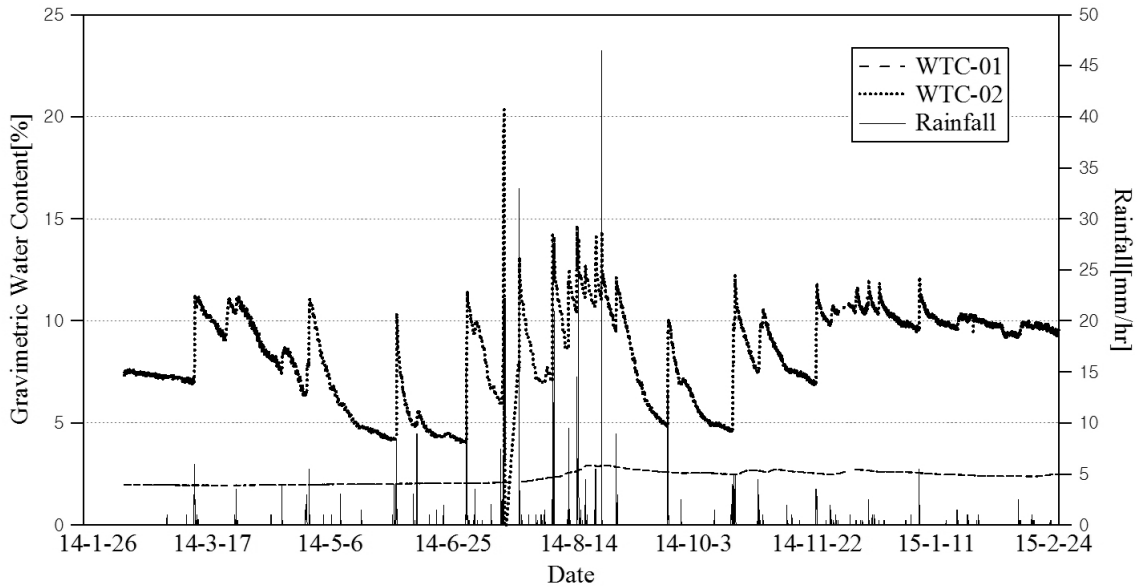


Fig. 9. The relationship curve between gravimetric soil water content and rainfall index

수비가 25.1%인 경우 최대 16.1mm로 최적함수비에서 실험된 침하량보다 약 2배 이상의 침하량이 더 발생되었다.

Fig. 8은 함수비 변화에 따른 전체침하량과 소성침하량을 나타낸 것이다. 모형실험으로 제한적인 실험결과이지만 초기함수비보다 함수비가 약 2배 이상으로 커질 때 소성침하량이 급격히 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 침하특성은 노반재료에 따라 달라질 수 있으나 최적함수비에서 약 2배 정도의 변화가 생겼을 때 침하량의 급격하게 증가되어 노반의 연약화를 촉진할 것으로 판단된다.

Table 2은 반복하중에 의한 침하특성을 정량적으로 평가하기 위하여 탄성침하량에 대한 총 침하량의 비를 침하량비(R_e)로 분석하였다. 함수비가 25.1%인 실험조건에서 침하량비(R_e)는 약 4.06배로 최종침하량은 16.1mm로서 초기함수비 실험조건보다 약 2배정도 침하가 더 발생하였다. 따라서, 동일한 재료를 대상으로 함수비에 따라 침하량이 급격하게 변화하는 것을 확인하였다.

4.2 현장측정에 따른 콘크리트궤도의 함수비 변화량

콘크리트궤도노반의 직하부와 사면부에서 측정된 장기 함수비 변화량을 관찰하였다. Fig. 9는 시간당 강우량(mm/hr)에 따른 함수비의 변화로서 궤도 직하부에 설치된 WTC-01의 함수비는 강우량에 따라 1.98~1.95% 범위로 '14년 우기시기(7~9월)에 0.03%로 미소하게 증가하였다. 사면부 WTC-02의 함수비는 강우량에 따라 약 6.7~11.3% 범위로 강우상승 시 즉각적인 함수비 변화가 발생하였다. 이러한 결과를 볼 때 사면부에서는 강우에 따라 변화가 있으나 콘크리트궤도노반의 직하부의 함수비는 거의 변화가 없는 것으로 측정되었다. 콘크리트궤도의 배수 설계와 배제 효과는 매우 유효하다고 볼 수 있다.

Table 3은 측정기간 동안 시간당 강우량이 20mm/hr가 초과되는 경우의 함수비를 정리한 표이다. 측정기간 동안 20mm 이상은 총 5회 측정되었으며 최대 강우량은 46.5 mm/hr이다. 2014년 8월 27일 강우조건에서 함수비의 변화량을 보면 사면부에서의 계측된 일일적인 증량함수비가

Table 3. Gravimetric water content and Rainfall index

Date	Hour	Rainfall (mm/hr)	WTC-1	WTC-2	Remark
2014-08-27	18:00	0.0	2,911	10,957	
	19:00	2.0	2,911	11,092	
	20:00	7.5	2,920	11,313	
	21:00	46.5	2,920	14,383	Max
	22:00	3.5	2,928	13,422	
	23:00	0.0	2,928	13,020	
	24:00	0.0	2,928	12,614	
2014-07-24	17:00	0.0	2,112	7,534	
	18:00	16.5	2,112	7,543	
	19:00	16.0	2,112	10,521	
	20:00	33.0	2,112	12,612	Max
	21:00	8.5	2,112	13,120	
	22:00	0.0	2,104	12,694	
	23:00	0.0	2,112	12,463	
2014-08-18	02:00	5.5	2,675	13,620	
	03:00	12.0	2,683	13,999	
	04:00	29.0	2,683	14,053	Max
	05:00	18.0	2,683	14,064	
	06:00	5.5	2,683	13,643	
	07:00	13.0	2,691	14,023	
	08:00	4.5	2,683	13,552	
2014-08-07	11:00	0.5	2,339	7,122	
	12:00	2.0	2,339	7,129	
	13:00	13.0	2,339	11,158	
	14:00	26.5	2,331	14,325	Max
	15:00	12.0	2,339	14,244	
	16:00	2.0	2,339	13,252	
	17:00	0.5	2,339	12,758	
2014-08-08	01:00	12.0	2,346	12,865	
	02:00	8.0	2,346	13,724	
	03:00	3.0	2,346	13,305	
	04:00	21.0	2,346	14,120	Max
	05:00	3.5	2,346	13,418	
	06:00	1.5	2,346	13,123	
	07:00	1.0	2,346	12,791	

10.96%에서 14.38%로 약 4%만의 함수비가 변화하고 있는 것을 볼 수 있다. 반면 콘크리트궤도 직하부에 위치한 WTC-1의 함수비의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 강우강도에 따른 위치별 함수비 변화량이다. WTC-1의 경우에는 강우강도에 대하여 기울기가 0.0005 (%/(mm/hr))로서 강우강도에 따라 함수비 변화가 거의 없으며, 사면분에서의 WTC-2의 경우에는 강우강도에 대하여 기울기는 0.057(%/(mm/hr))로 사면분에서는 강우강도

에 따라 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합적으로 볼 때 콘크리트궤도에서 적절한 배수배제 성능이 유지된다면 노반 내부의 함수비 변화는 강우에 대한 영향이 매우 미비할 것으로 판단되며, 사면분에서의 함수비의 변화는 발생하고 있으나, ±4% 정도의 수준인 것으로 발생되었다. 앞서 원형모형실험에서 노반재료의 함수비가 약 2배 이상 변화하였을 때 침하량이 급격하게 발생하는 특성이 있으나, 현장 함수비 측정결과를 볼 때 강우로 인

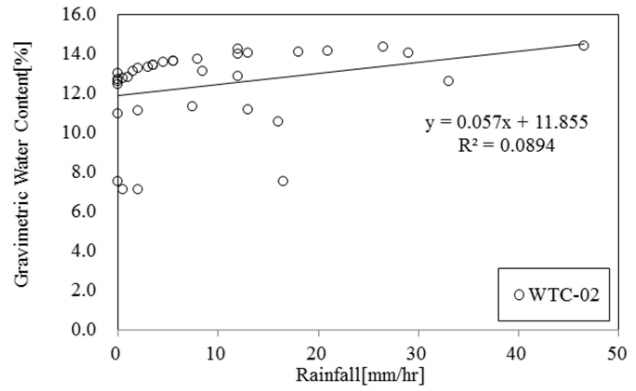
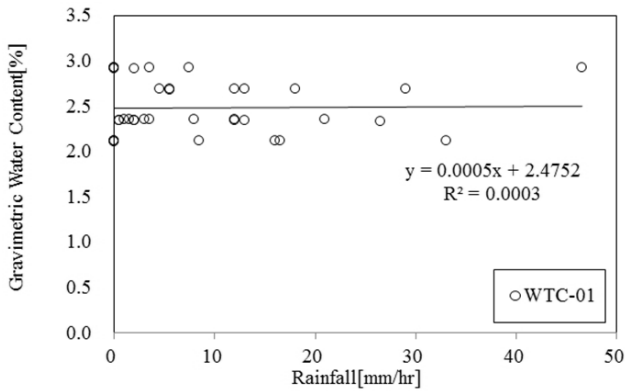


Fig. 10. The relationship with gravimetric soil water content rainfall index (up to 20 mm/hr)

한 침하량의 급격한 변화는 무시할 수준으로 판단된다. 따라서 콘크리트궤도에서는 노반의 연약화를 야기시키는 요인 중의 하나인 함수비의 변화에 의한 문제는 상대적으로 작을 것으로 판단된다. 즉, 성토체의 침하문제는 압축 침하량보다는 원지반의 압밀에 의한 잔류침하량에 의한 영향이 지배적으로 볼 때 이에 대한 노반침하에 대한 적절한 대책을 수립해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

원형모형실험을 통해 철도노반재료로 사용되는 흙을 대상으로 함수비에 변화에 따른 침하관계를 평가하였다. 또한 실제 공용중인 콘크리트궤도에서 계측된 강우데이터를 기반으로 약 1년여간 현장에 매설된 함수비 측정 장비를 통해 장기 함수비 변화추이를 관찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 노반재료로 사용하고 있는 흙은 함수비가 커짐에 따라 최종침하량이 커지고 초기함수량 보다 2배이상인 25.1%인 실험조건에서 최대 16.1mm로 초기함수비 실험조건보다 약 2배 이상의 침하가 발생하였으며, 이때 침하량비(R_c)는 약 4.06배이다.
- (2) 콘크리트궤도노반에서 현장함수비는 사면부에서는 약 $\pm 4\%$ 수준이며, 콘크리트궤도 직하부에서는 약 0.03% 수준으로 거의 영향을 받지 않는 것으로 측정되었다. 원형모형실험에서 노반재료의 함수비가 약 2배 이상 변화하였을 때 침하량이 급격하게 발생하는 특성이 있으나, 현장 함수비 측정결과를 볼 때 강우로 인한 침하량의 급격한 변화는 무시할 수준으로 판단된다.

따라서 콘크리트궤도에서는 노반의 연약화를 야기시키는 요인 중의 하나인 함수비의 변화에 의한 문제는 상대적으로 작을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant “Smart Rail Transport Operation Control for Mitigation of latent Meteorological Disaster” from R&D Program of the Korea Railroad Research Institute, Republic of Korea

References

1. Chandra, D., Chua, K. M. and Lytton, R. L. (1989), “Effects of temperature and moisture on the load response of granular base course material in thin pavements”, *transportation research record No.1252, National Research Council, Washington, D. C.*, pp.33-41.
2. Choi, C. Y., Lee, J. W. and Kim, H. K. (2009), “Characteristics of Settlement for Non-woven Geotextile through Cyclic Loading Model Test”, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.8, No.2, pp.47-54.
3. Chung, K. Y., Lee, I. W. and Choi, C. Y. (2006), “Simulation of Dynamic Behavior of the Track with Wide Sleepers in Transition Zone”, *2006 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, pp.15-22.
4. Drumm, E., Reeves, J., Madgett, M. and Trolinger, W. (1997). “The permeability of porous materials”, *Proc. Royal Soc.*, Vol.2010, No.A, pp.392-405.
5. Muramoto, K., Sekine, E. and Otsuka, M. (2004), *Dominant factors of Degradation of Cohesive-Soil Roadbed under Ballastless Tracks*, RTRI Report, Vol.18, No.3, pp.23-28.
6. Kim, J. T. (2004), *Dynamic Deformational Characteristics of*

- Subgrade Soils with Variation of Water Content using Field and Laboratory Tests*, Master's Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
7. Kweon, G. C. (1999), *Alternative MR Testing Methods for Subgrade and Subbase Materials Considering Deformational Characteristics of Soils*, Doctorate Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
 8. Lee, J. D. (2001), *Railway Track Mechanics*, Nohae Publishing company.
 9. Lee, S. J., Lee, I. W., Lee, S. H. and Eum, K. Y. (2015), "Laboratory Test for Permanent Settlement Behavior of Geomaterials used in Railway Considering Grain size distribution and Water content", *Journal of The Korean society for railway*, Vol.18, No.4, pp.354-362.
 10. Oh, J., Fernando, E. G. and Lee, W. D. (2010), "Consideration of moisture effect on load bearing capacity in texas flexible pavements", *KSCE J. of Civil Eng.*, Vol.14, No.4, pp.493-501.
 11. Oh, J., Fernando, E. G., Holzschuher, C. and Horhota, D. (2012). "Comparison of resilient modulus values for Florida flexible mechanistic-empirical pavement design", *Int. J. of pavement Eng.*, Vol.13, No.5, pp.472-48.
 12. Ping, W. V., Wang, Y. and Yang, Z. (2000), *Field and laboratory evaluation of resilient modulus measurements of florida pavements soils*, Research Report (No. FL/DOT/RMC/0636(F)-4538), FAMU-FSU College of Engineering, Tallahassee, Fl.