

크로스홀 형태의 동적 콘 관입기를 이용한 노반의 강성특성 평가

Stiffness Characterization of Subgrade using Crosshole-Type Dynamic Cone Penetrometer

홍 원 택 ¹	Hong, Won-Taek	최 찬 용 ²	Choi, Chan Yong
임 유 진 ³	Lim, Yujin	이 종 섭 ⁴	Lee, Jong-Sub

Abstract

In order to support the load of the train with enough stiffness, a study on an effective method for the characterization of the stiffness of the compacted subgrade is required. In this study, the crosshole-type dynamic cone penetrometer (CDCP) is used for the stiffness characterization of the subgrade along the depth. For the application of the CDCP test, three points of compacted subgrades are selected as the study sites. For the study sites, CDCP test, in-situ density test, and light falling weight deflectometer (LFD) test are conducted. As the results of CDCP tests, shear wave velocity profiles are obtained by using the travel times and the travel distances of the shear waves along the depth. In addition, maximum shear modulus (G_{max}) profiles are estimated by using the density of the subgrades and the shear wave velocity profiles. The averaged maximum shear moduli at each testing point are highly correlated with the dynamic deflection moduli (E_{vd}) determined by LFD tests. Therefore, a reliable stiffness characterization of the subgrade can be conducted by using CDCP tests. In addition, because CDCP characterizes the stiffness of the subgrade along the depth rather than a representative value, CDCP test may be effectively used for the stiffness characterization of the subgrade.

요 지

열차의 하중을 적절한 강성으로 지지하기 위하여 다짐시공된 노반의 효과적인 강성특성 평가 기법에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 상부노반에 대하여 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기(CDCP)를 적용함으로써 심도에 따른 강성특성을 평가하고자 하였다. CDCP의 적용을 위하여 세 단면의 다짐시공 완료된 상부노반이 대상 현장으로 선택되었으며, 각각의 개소에 대하여 CDCP 관입시험 및 들밀도시험, 동평판재하시험(LFD)이 수행되었다. CDCP 관입시험 결과, 심도에 따른 탄성과 발신시간 및 전단파 수신시간을 획득하였으며, 이를 이용하여 노반의 전단파속도 주상도를 획득하였다. 또한, 동일 개소에서 들밀도시험으로부터 획득한 노반의 밀도 및 전단파속도 주상도를 이용하여 심도에 따른 최대전단강성계수(G_{max})를 평가할 수 있었다. CDCP 관입시험 및 들밀도시험으로부터 평가된 최대전단강성계수와 LFD시험으로부터 획득한 동탄성계수(E_{vd})를 상호비교한 결과 매우 우수한 선형관계를 보이므로, CDCP 관입시험으로부터 유효한 강성특성을 평가할 수 있을 것이라 판단되었다. 또한, CDCP 관입시험으로부터 도출되는 결과는

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 한국철도기술연구원 선진인프라연구팀 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute)

3 정희원, 배재대학교 건설환경철도공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environmental and Railroad Engrg., Paichai Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-3290-5999, jongsub@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

일정 심도에 대한 대표 강성특성이 아닌 심도에 따른 연속적인 강성특성 이므로 노반의 강성특성 평가에 효과적으로 이용될 수 있을 것이라 기대된다.

Keywords : Crosshole-type dynamic cone penetrometer, Light falling weight deflectometer, Maximum shear modulus, Shear wave velocity, Subgrade

1. 서론

철도는 현존하는 교통수단 중 가장 안전하고 친환경적인 대중 교통수단으로 인식되며, 동시에 미래지향적 교통수단으로써 자리매김하고 있다. G20 국제회의에서는 저탄소 녹색성장을 위한 차기 산업 구성에서 철도가 가장 큰 부분을 차지함에 따라(Robins et al., 2009) 전세계적인 철도의 건설, 연계 및 연장이 활발히 수행되고 있다. 우리나라에서도 기존에 건설되어 운행중인 지선 철도에 대한 유지보수에 대한 연구(Byun et al., 2013; Hong et al., 2016)와 더불어 효과적인 교통망 및 물류관리를 위하여 간선철도의 건설이 수행되고 있다. 이와 같은 철도건설 수요에 의하여 열차의 승차감, 소음저감기술 및 사고방지를 위한 안전관리 등 철도기술과 관련된 다양한 방면에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(Chebli et al., 2008). 특히 철도궤도 하부구조물의 파괴 및 과도한 탄성침하하는 열차의 탈선 등 인명피해와 직접적으로 관련된 사고를 유발하므로(Selig and Waters, 1994; Clark et al., 2002) 궤도 하부구조물에 대한 강도 및 강성특성 평가와 관련한 연구는 가장 필수적으로 수행되어야 한다(Al Shaer et al., 2008).

국내에서 건설되는 궤도 하부구조물은 크게 자갈도상 궤도 하부구조물 및 콘크리트도상 궤도 하부구조물로 구분된다. 두 가지 도상은 궤도를 고정 및 지지하는 건설재료의 차이로 구분되며 도상 하부에 노반이 존재하는 경우, 해당 노반은 도상으로부터 전달된 열차의 하중을 적절히 지지할 수 있도록 철도설계기준에 명시된 시공 기준을 적용하여 건설된다. 시공이 완료된 궤도 하부구조물에 대하여 노반의 품질검사를 수행하고자 하는 경우 자갈도상 및 콘크리트도상의 제거가 필수적으로 선행되어야 하나 이는 기 시공된 궤도 하부구조물에 대하여 콘크리트도상의 균열, 도상자갈의 연화 등 추가적인 문제점을 야기하므로 흙구조물 시공 당시 노반의 다짐도 및 강성특성 평가를 통하여 품질관리를 수행한다. 우리나라 철도 설계기준에서는 현장들밀도시험으로

부터 다짐도를 평가하며, 반복평판재하시험으로부터 노반의 강성특성을 평가한다. 그러나 해당 반복평판재하시험 시 노반에 발생하는 변형률 수준은 하중-변형률 관계에서 비선형거동을 보이는 구간에 해당하므로 대상 노반의 강성특성을 객관적으로 평가하는데 한계가 있다(Lim et al., 2013). 또한, 반복평판재하시험으로부터 획득되는 강성특성은 평판의 약 2배의 심도에 해당하는 유효범위 내 대표값을 나타내기 때문에 재하위치 하부에 비균질 구간이 존재하는 경우 시험 결과로부터 획득되는 강성특성에 심각한 오류가 발생한다. 그러므로 대상 지반의 심도에 따라 연속적으로 강성특성을 평가할 수 있는 기법의 연구가 요구된다.

본 연구에서는 심도에 따른 강성특성을 평가하고자 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기를 다짐시공된 상부노반에 적용하여 전단파속도를 평가하였으며, 현장들밀도시험으로부터 평가된 밀도를 이용하여 심도에 따른 최대전단강성계수를 산정하였다. 또한, 동일 위치에서 수행된 동평판재하시험으로부터 동탄성계수를 평가하였으며, 최대전단강성계수와 상호비교하였다. 본 논문은 대상 지반의 탄성계수를 이용한 노반의 평가 기법 및 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기에 대하여 서술하며, 현장 적용실험 결과 및 분석내용을 다룬다.

2. 탄성계수 기반 노반평가 기법

우리나라의 철도설계기준(Korea Rail Network Authority, 2015)에서는 상부노반의 다짐도를 지반재료의 최대건조밀도(KS F 2312)의 95% 이상으로 규정한다. 또한, 과도한 탄성침하에 의한 열차의 탈선을 방지하기 위하여 반복평판재하시험(DIN 18 134)으로부터 획득되는 노반의 재하 2단계 변형계수(E_{v2})를 80MPa 이상, 재하 1단계 변형계수(E_{v1})와 E_{v2} 의 비율(E_{v2}/E_{v1})은 2.3 이하가 되도록 규정하고 있다. 상기 반복평판재하시험으로부터 평가되는 노반의 강성특성은 초기 탄성침하뿐만 아니라 반복하중에 의한 탄성침하 특성을 고려하므로 노반

의 탄성거동 평가에 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나 시험 및 분석결과는 시험자의 숙련도에 따라 큰 오류가 야기될 수 있으며 대상 노반에 정적하중을 가하기 위하여 매우 큰 반력하중의 반입 및 시험시간이 요구된다.

최근 노반의 강성특성을 효과적으로 평가하기 위하여 동평판재하시험(Light falling weight deflectometer: LFWD)의 적용 및 이와 관련한 연구가 수행되고 있다 (Choi et al., 2015). LFWD의 장비 구성 및 시험방법에 대한 모식도는 Fig. 1과 같다. LFWD는 질량 10kg의 해머를 70cm의 낙하고에서 자유낙하시키며 재하판에 대하여 100kPa의 평균충격압을 가한다. 이때, 재하판 상부에 설치된 가속도계로부터 가속도 신호를 획득하며, 해당 가속도 신호를 적분함으로써 재하판에 작용된 평균충격압에 대한 침하량을 산정한다. 재하판에 작용된 평균충격압 및 가속도계로부터 획득된 침하량으로부터 동탄성계수(E_{vd})가 계산되며, 해당 동탄성계수는 반복 평판재하시험으로부터 획득되는 2단계 변형계수(E_{v2})의 절반(1/2)에 해당하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 LFWD를 다짐시공된 노반에 적용 및 강성특성을 평가할 때 동탄성계수가 40MPa 이상으로 나타나는 경우, 이는 적절한 강성을 보유한 노반으로서 분류될 수 있다.

LFWD는 동적 재하방법을 이용하여 노반의 강성특성을 평가하므로 대형 장비의 반입 및 반력하중이 불필요하며, 해머타격 3회에 의하여 동탄성계수를 획득하므로(ASTM E2583) 짧은 시험시간 내에 노반의 여러 단면에 대하여 효과적으로 강성특성을 평가할 수 있다. 그러나 대상 노반에 대하여 재하판 직경의 두 배(2B)에 해당하는 심도만이 유효범위에 해당하므로(Elhakim et

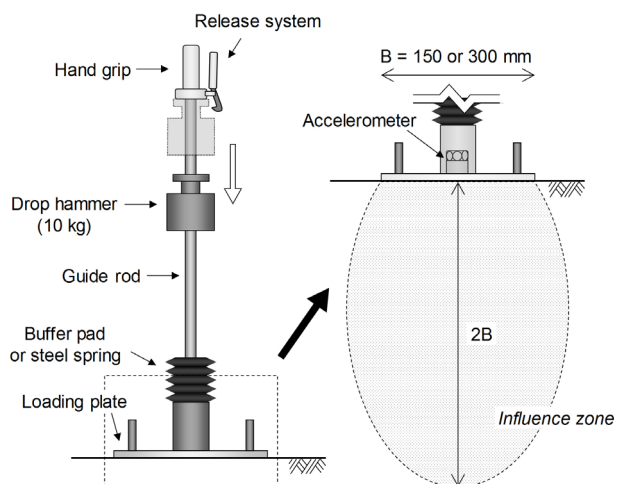


Fig. 1. Schematic drawing of light falling weight deflectometer (LFWD). B is the diameter of the loading plate

al., 2014; Fleming et al., 2007; Nazzal et al., 2004) 유효범위보다 깊은 심도의 노반에 대해서는 강성특성 평가가 불가능하며, 해당 유효범위 내에 비균질구간이 존재하는 경우 노반의 강성특성 평가 결과에 심각한 오류가 발생할 수 있다. 또한, LFWD로부터 측정되는 노반의 변형 범위는 하중-침하량 관계의 비선형 구간에 해당하므로 노반의 상태에 따라 객관적이지 않은 결과를 도출한다는 한계가 있다.

3. 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기

유효범위 및 비균질구간에 영향을 받지 않고 노반의 심도에 따른 상태평가를 수행하기 위하여 관입방법을 이용한 지반조사가 요구된다. Scala(1956)에 의하여 소개된 동적 콘 관입기(Dynamic cone penetrometer: DCP)는 소형화된 관입형 지반조사 장비로써 대상지반의 교란을 최소화 하며 심도에 따른 강도특성을 연속적으로 평가한다(Byun and Lee, 2013; Kodicherla and Nandyala, 2016; Mohammadi et al., 2008). 동적 콘 관입기를 이용한 지반조사는 Fig. 2와 같이 직경 20mm, 선단각 60°의 원추 및 관입로드를 해머로 동적 타격하여 대상지반으로 관입시킴으로써 수행된다. 타격에 사용되는 해머의 질량은 8kg, 낙하고는 575mm 이며, 타격당 관입되는 심도에

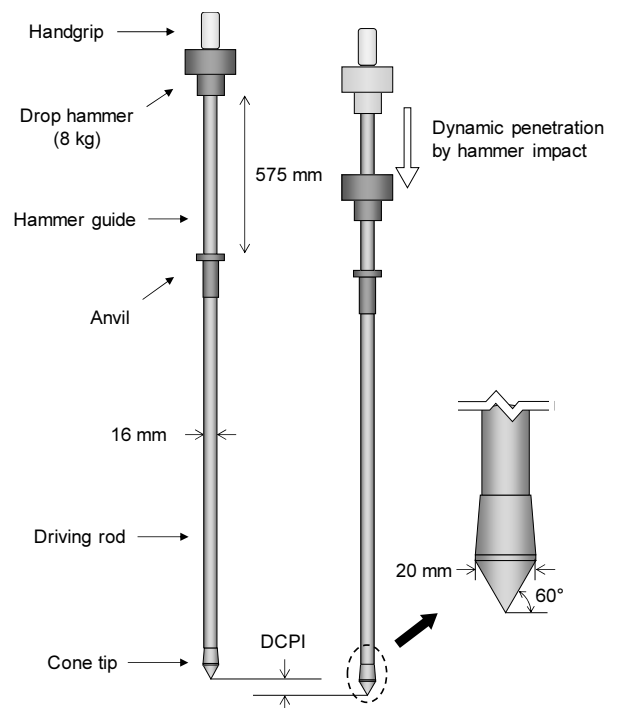


Fig. 2. Schematic drawing of dynamic cone penetrometer (DCP)

해당하는 동적 콘 관입지수(Dynamic cone penetration index: DCPI)를 시험 결과값으로써 획득한다(ASTM D6951). 심도에 따른 DCPI추상도는 대상 지반의 강도 및 다짐도와 크게 연관되므로 대상 다짐지반의 상태를 평가하기 위한 방법으로써 이용되고 있으나 대상지반의 강성특성 평가에는 한계가 있다.

본 연구에서는 노반의 강성특성을 심도에 따라 연속적으로 평가하기 위하여 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기(Crosshole-type dynamic cone penetrometer: CDCP)를 적용하였다. CDCP는 Fig. 3과 같이 직경 24mm의 선단부 및 관입로드, 동적 타격을 위한 해머 및 해머가이드로 구성되며 선단부에는 측정범위 10,000g의 일축 가속도계가 설치되어있다(Hong et al., 2017).

CDCP시험을 이용한 대상지반의 지반조사는 수신기 및 발신기에 해당하는 두 개의 CDCP를 동시에 관입하며 수행된다. 수신기 CDCP는 강성특성을 평가하고자 하는 목표심도에 선행하여 관입되며, 이후 일정 이격거리에서 발신기 CDCP를 동적 관입하며 대상 지반에 탄성파를 발생시킨다. CDCP에 설치된 가속도계는 지반의 상-하 방향 진동을 감지하는 일축 가속도계이므로 수신기는 발신기로부터 발생된 탄성파 중 진행방향에 수직한 입자 움직임을 갖는 전단파를 수집한다. 그러므로 두 개의 CDCP에 기록된 탄성파 발생시간 및 전단파 수신시간의 차(Δt)를 이용하여 식 (1)과 같이 대상 지반의 강성특성인 전단파속도를 획득할 수 있다.

$$V_s = \frac{S}{\Delta t} \quad (1)$$

여기서, V_s 는 전단파속도이며, S 는 전단파의 전파거리에 해당하는 수신기 및 발신기 CDCP의 이격거리, Δt 는 전단파의 전파시간에 해당한다. 수신기 및 발신기 CDCP를 일정심도 간격으로 반복하여 관입함으로써 심도에 따라 연속적으로 전단파속도를 획득할 수 있으며, 해당 전단파는 선형의 하중-변형을 관계를 보이는 미소변형 구간에서 전파하므로(Santamarina et al., 2001) 보다 객관적인 강성특성 평가에 이용될 수 있다.

4. 현장적용실험

CDCP를 이용한 노반 강성특성 평가의 현장 적용을 위하여 Fig. 4(a)에 표시된 Site-1 현장의 1개 단면(Point-1) 및 Site-2 현장의 2개 단면(Point-2, Point-3)에 대하여 CDCP 관입실험이 수행되었다. 두개 현장 모두 쌓기로 건설된 고속철도의 흙구조물으로써, 다짐시공 완료된 상부노반에 해당한다. 세 단면에 대한 CDCP 관입실험 시 수신기와 발신기의 일정한 이격거리 유지를 위하여 Fig. 4(b)와 같은 가이드(Guide for vertical alignment)가 이용되었다.

Site-1 및 Site-2 현장 상부노반에서 채취된 지반재료의 기본물성을 Table 1에 정리하였다. Site-1 및 Site-2에서 채취된 흙의 비중은 각각 2.663 및 2.637로 나타났으며, 해당 흙의 입도분포를 분석한 결과 통일분류법(Unified soil classification system: USCS)에 의하여 SW-SM(Well-graded sand and silty sand) 및 GW(Well-graded gravel)로 분류되었다. 이들 SW-SM 및 GW에 해당하는 지반재료는 철도설계기준에서 A군으로 분류하는 양질의 쌓기 재료로서(Korea Rail Network Authority, 2015), 노반 시공에 합리적인 것으로 판단된다. 또한, Site-1 및 Site-2에서 채취된 시료를 이용하여 수행된 다짐시험 결과 각각의 최대건조밀도는 2.09g/cm^3 및 2.12g/cm^3 로 나타났으며, Point-1, Point-2 및 Point-3 단면에서 수행된 현장들밀도 시험 결과 각의 단면의 밀도는 2.01g/cm^3 , 2.11g/cm^3 및 2.03g/cm^3 으로, 세 단면 모두 철도설계기준에서 규정하는 다짐도 95% 이상을 만족하는 것으로 판단되었다.

CDCP 적용실험의 대상 노반에 해당하는 세 단면 각각에 대하여 Fig. 5와 같은 실험이 수행되었다. CDCP 실험 결과와의 상호비교를 위하여 기 설정된 수신기 및

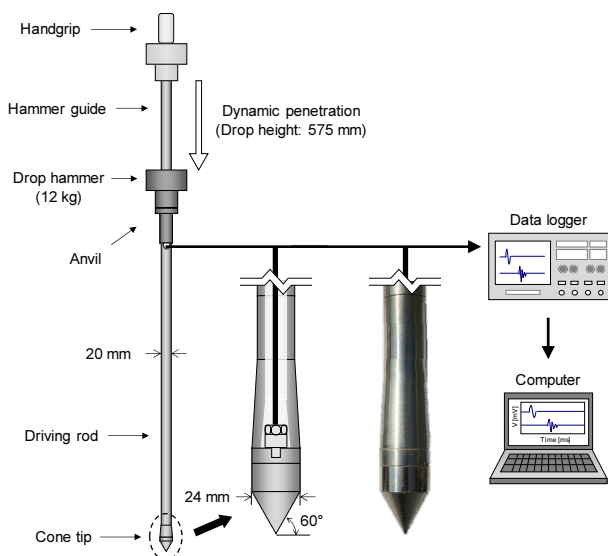
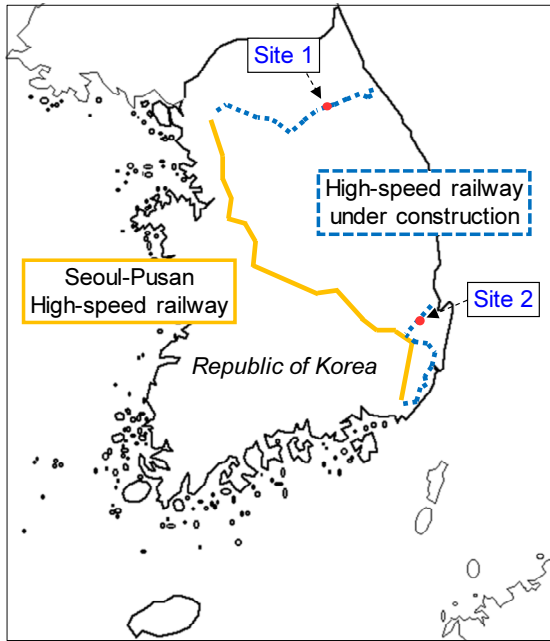
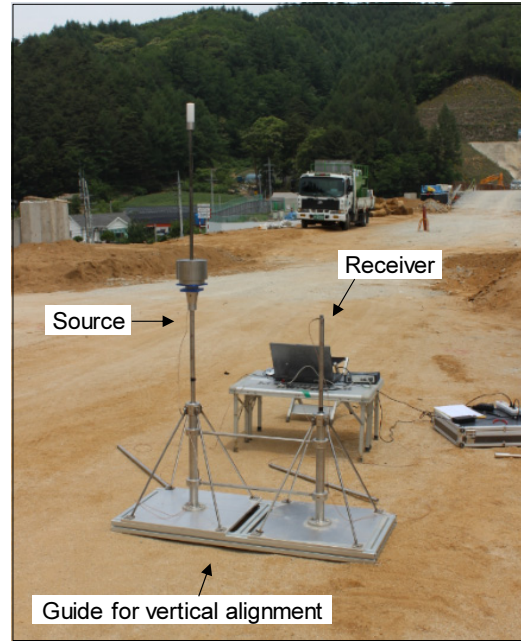


Fig. 3. Schematic drawing of crosshole-type dynamic cone penetrometer (CDCP) and measurement system



(a)



(b)

Fig. 4. Field study: (a) Site description; (b) Photographic image of field test

Table 1. Index properties of the subgrades at Site-1 and Site-2

Property	Site-1	Site-2	
	Point-1	Point-2	Point-3
Specific gravity, G_s ()	2.663	2.637	
Median diameter, D_{50} (mm)	0.595	9.828	
Coefficient of uniformity, C_u ()	8.5	16.0	
Coefficient of curvature, C_c ()	1.3	2.3	
Soil type by USCS	SW-SM	GW	
Maximum density, ρ_{max} (g/cm^3)	2.09	2.12	
In-situ density, ρ (g/cm^3)	2.01	2.11	2.03

발신기의 관입위치의 중간에서 LFWD시험을 선행하였으며, 해당 노반의 동탄성계수(E_{vd})를 평가하였다. 이후, 수신기를 심도 100mm만큼 선관입 후 발신기를 심도 150mm만큼 관입하며 두 개의 CDCP에 설치된 가속도계로부터 신호를 획득함으로써 노반의 심도 100mm부근의 가속도 신호 및 전단파 전파시간을 측정하였다. 수신기 및 발신기 주변의 이격거리는 576mm로 설정하였으며, 각각의 CDCP의 심도가 다른 경우에 측정된 전단파 전파시간은 수신기 및 발신기의 평균심도를 대표하는 것으로 판단하였다. 상기 과정을 반복함으로써 Fig. 5와 같이 100mm의 심도 간격(ΔD)으로 총 1,000mm까지의 가속도 신호를 획득하였다.

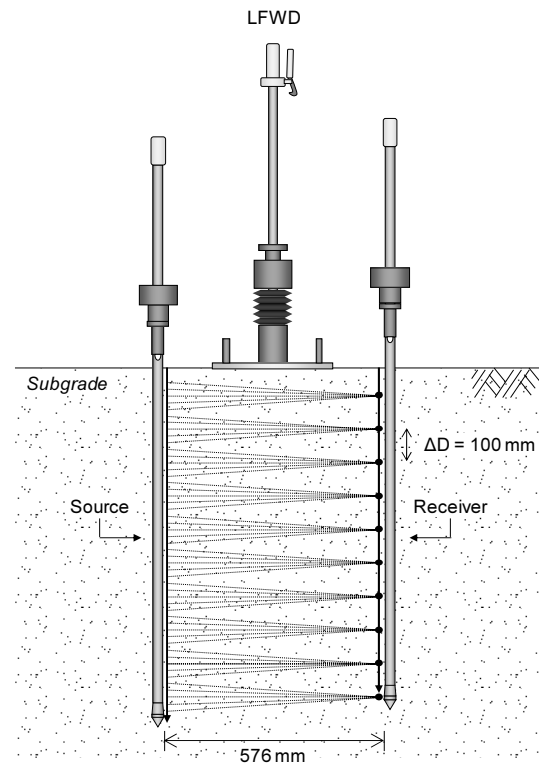


Fig. 5. Experimental setup

5. 결과 및 분석

5.1 가속도 신호

CDCP 현장 적용실험 단면 Point-1, Point-2 및 Point-3

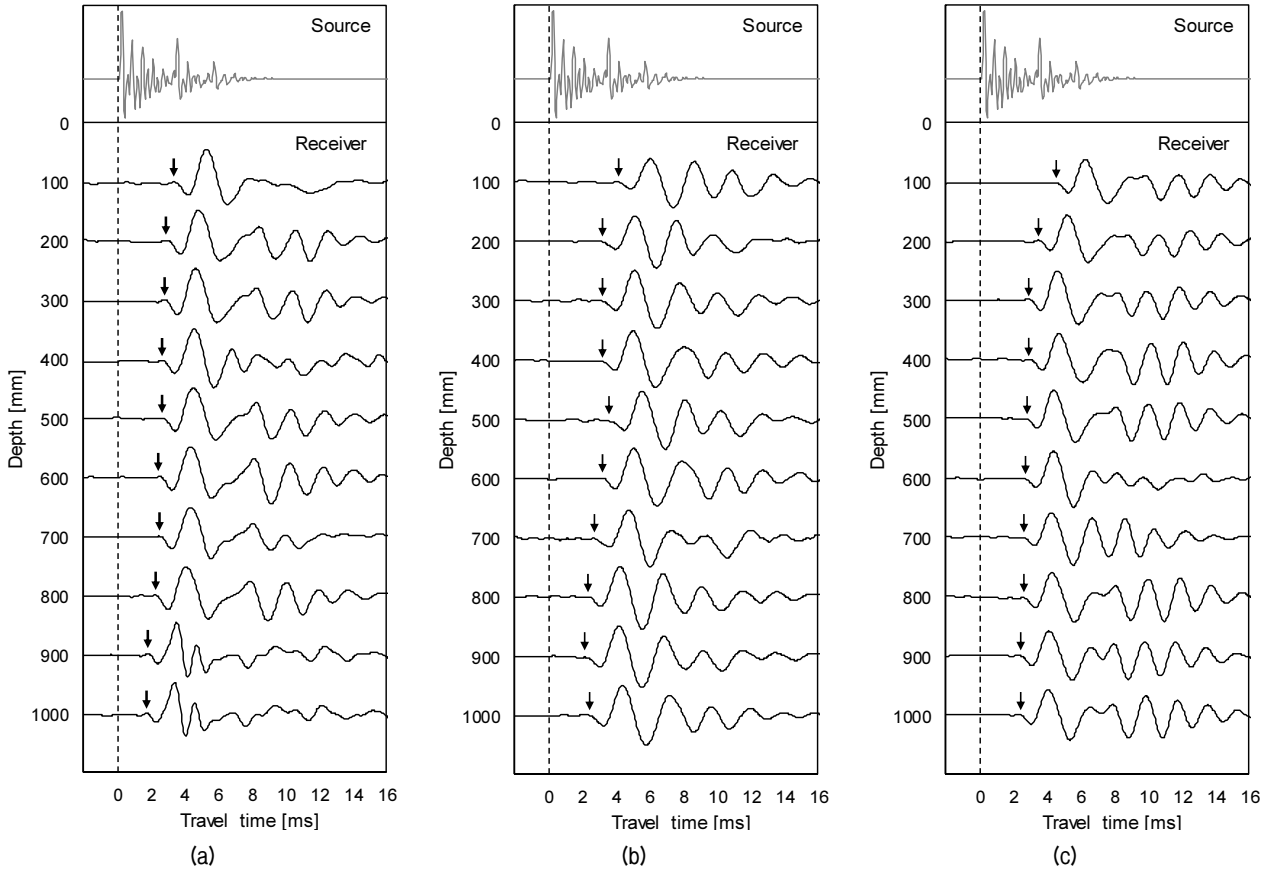


Fig. 6. Measured acceleration data: (a) Point-1; (b) Point-2; (c) Point-3. ↓ denotes the first arrival of shear wave

에서 수신기 및 발신기의 심도가 동일할 때 측정된 가속도 신호를 Fig. 6에 도시하였다. 각각의 실험 단면에서 발신기에 해머 타격이 감지된 시간을 전단파의 발신시간(0ms)으로 설정하였으며, 수신기로부터 감지된 전단파의 초동시간에 해당하는 전단파의 전파시간(Δt)을 Fig. 6에 화살표(↓)로 표시하였다.

Point-1에서 측정된 전단파의 경우 Fig. 6(a)와 같이 심도에 따른 유효응력의 증가로 인하여 심도 100~800mm 구간에서의 초동시간이 3.41ms에서 2.27ms로 서서히 감소하였으나, 심도 900mm 및 1,000mm에서는 초동시간이 각각 1.84ms 및 1.71ms 이하로 급격히 감소하였다. 초동시간의 급격한 감소 경향을 고려할 때, 심도 약 900mm 하부 구간에는 지표로부터 심도 800mm까지의 구간과 강성특성이 서로 상이한 비균질 구간이 존재할 것으로 판단된다. Point-2에서 측정된 전단파신호의 경우 Fig. 6(b)와 같이 100~1,000mm 구간에서 급격한 초동시간의 변화는 감지되지 않았으나, 심도 400mm 및 500mm에서 초동시간이 소폭 증가하는 경향을 보였으며, 이는 해당 심도의 노반이 비교적 낮은 강성특성을

나타낼 것으로 판단된다. Point-3에서 측정된 전단파의 경우 심도 100mm에서 초동시간이 약 4.52ms로 측정되었으나, 심도 300mm까지 급격히 감소하여 약 2.95ms로 측정되었으며, 이후 완만히 감소하는 경향을 보이며 심도 1,000mm에서는 약 2.36ms로 측정되어 비교적 균질한 강성특성을 나타내는 것으로 평가되었다.

5.2 전단파속도 및 최대전단강성계수

전단파의 전파거리에 해당하는 수신기와 발신기 사이의 이격거리(S) 및 전단파의 전파시간에 해당하는 초동시간(Δt)을 이용하여 전단파속도(V_s)를 계산할 수 있으며(식 (1)), 전단파속도 및 지반의 밀도(ρ)를 이용하여 식 (2)와 같이 최대전단강성계수를 계산할 수 있다.

$$G_{\max} = \rho \times V_s^2 \quad (2)$$

여기서, G_{\max} 는 미소변형에서 지반의 최대전단강성계수를 의미한다. Table 1에 정리된 바와 같이 Point-1,

Point-2 및 Point-3에서 수행된 들밀도시험 결과 각 단면의 밀도는 2.01g/cm^3 , 2.11g/cm^3 , 및 2.03g/cm^3 으로 나타났으며, 이들은 대상 노반의 최대전단강성계수 산정에 이용되었다(식 (2)).

식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 계산된 Point-1, Point-2, Point-3의 전단파속도 및 최대전단강성계수 주상도를 Fig. 7에 나타내었다. Point-1의 경우 심도 100mm부터 800mm까지의 평균 전단파속도는 168.47m/s에서 253.39m/s로 그리고 최대전단강성계수는 57.05MPa에서 129.06MPa로 증가하는 경향을 보였으나, 심도 900mm부터의 전단파속도는 310m/s 이상, 최대전단강성계수는 200MPa 이상으로 급격히 증가하여 상부 0~800mm구간보다 훨씬 큰 강성특성을 나타내는 비균질 구간이 존재할 것으로 추정되었다. Point-2의 심도 100~300mm 구간에서 전단파속도는 144.30m/s에서 204.13m/s로, 최대전단강성계수는 43.94MPa에서 87.92MPa로 크게 증가하였으나 이후 심도 500mm까지의 전단파속도는 186.91m/s, 최대전단강성계수는 73.72MPa로 소폭 감소하였으며, 이후 CDCP 관입 최종심도인 1,000mm까지 전단파속도는 약 281.54m/s, 최대전단강성계수는 267.25MPa로 증가하였다. Point-3의 경우 심도 100~300mm까지의 전단파속도는 125.20m/s에서 194.36m/s로 그리고 최대전단강성계수는 31.51MPa에서 75.93MPa로 급격히 증가하였으며, 이후 최종 CDCP 관입심도인 1,000mm까지 전단파속도 및 최대전단강성

수는 각각 244.08m/s 및 119.75MPa로 서서히 증가하여 비교적 균질한 강성특성을 나타내었다.

5.3 최대전단강수 및 동탄성계수

CDCP 관입실험으로부터 획득한 노반의 최대전단강성계수(G_{\max})를 동탄성계수(E_{vd})와 상호비교하기 위하여 Fig. 5와 같이 CDCP 수신기 및 발신기 관입위치 중간에서 LFWD시험을 선행하였다. LFWD의 유효심도는 재하판 직경의 두 배(2B)에 해당하며(Elhakim et al., 2014; Fleming et al., 2007; Nazzal et al., 2004), 본 연구에서 사용된 LFWD의 재하판의 직경은 300mm 이므로, LFWD 시험으로부터 획득한 동탄성계수의 유효심도는 600mm에 해당한다. 그러므로 Point-1, Point-2 및 Point-3의 CDCP 관입심도 100~600mm에서 획득된 최대전단강성계수를 LFWD 시험 결과와 상호비교 대상으로 설정하였으며, 각 심도에서의 최대전단강성계수 및 시험위치에 따른 평균 최대전단강성계수와 동일 위치에서 획득된 동탄성계수를 Table 2에 정리하였다.

Point-1, Point-2 및 Point-3의 심도 100~600mm에서 평균 최대전단강성계수는 각각 83.32MPa, 76.18MPa, 72.76MPa로 계산되었으며, 동탄성계수는 각각 47.1MPa, 42.4MPa, 40.4MPa로 평가되었다. 동일한 위치에서 획득된 평균 최대전단강성계수 및 동탄성계수의 관계를

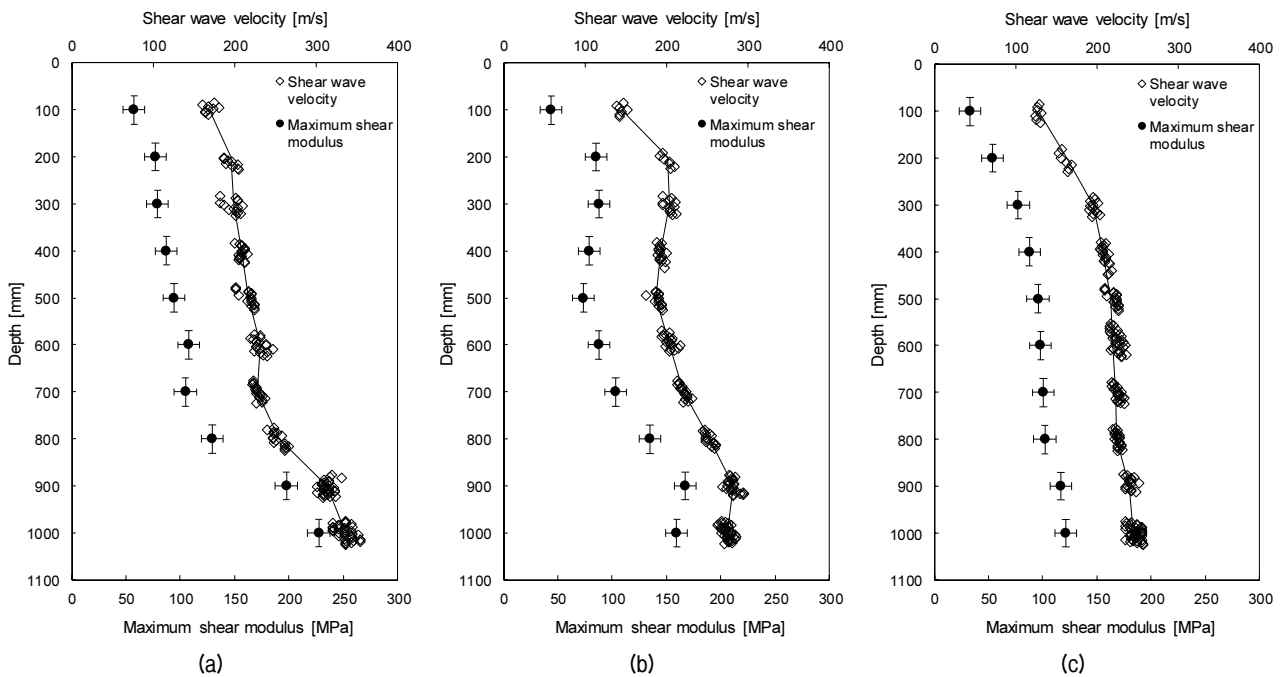


Fig. 7. Shear wave velocity and maximum shear modulus profiles: (a) Point-1; (b) Point-2; (c) Point-3

Table 2. Averaged maximum shear modulus and dynamic deflection modulus

Depth	Point-1		Point-2		Point-3	
	CDCP, G_{max} [MPa]	LFWD, E_{vd} [MPa]	CDCP, G_{max} [MPa]	LFWD, E_{vd} [MPa]	CDCP, G_{max} [MPa]	LFWD, E_{vd} [MPa]
100 mm	57.05	47.1	43.94	42.4	31.51	40.4
200 mm	76.45		85.26		52.40	
300 mm	78.68		87.92		75.93	
400 mm	86.86		78.69		86.02	
500 mm	93.78		73.72		94.09	
600 mm	107.09		87.58		96.64	
Average	83.32		47.1		76.18	

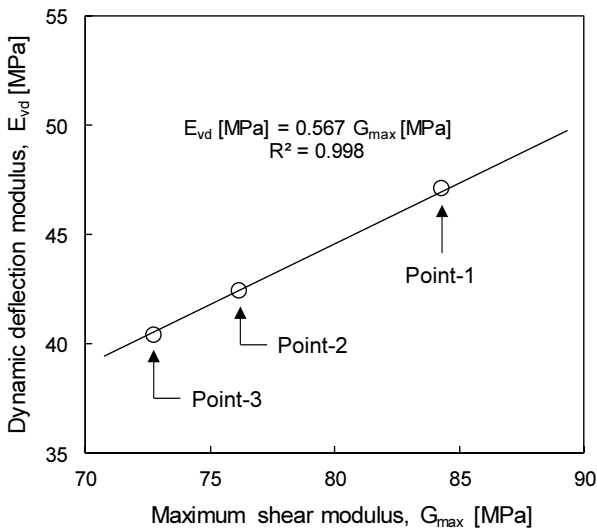


Fig. 8. Relationship between the maximum shear modulus (G_{max}) and dynamic deflection modulus (E_{vd})

Fig. 8에 나타내었으며, 해당 관계는 다음과 같은 1차 식으로 표현되었다.

$$E_{vd} [MPa] = 0.567 \times G_{max} [MPa] \quad (3)$$

여기서, E_{vd} 는 LFWD시험으로부터 평가된 동탄성계수이며 G_{max} 는 CDCP 관입시험으로부터 평가된 최대전단강성계수이다.

동일한 지반 및 구속상태에서 축방향 변형계수(E) 및 전단강성계수(G)는 식 (4)와 같은 관계로 표현된다.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (4)$$

여기서, ν 는 대상 지반의 포아송비(Poisson's ratio)를 의미하며 항상 양(+)의 값을 갖는다. 그러므로 동일한 조

전에서 축방향 변형계수는 언제나 전단강성계수보다 큰 값을 갖으나, 식 (3)의 G_{max} 는 미소변형에서의 최대 전단강성계수이며, E_{vd} 는 하중-변형률 관계에서 비선형 거동을 보이는 큰 변형구간에서의 값이므로 관계계수 (0.567)가 1보다 작은 값으로 나타났다. 그러나 Fig. 8에 표현된 것과 같이 결정계수(Determinant coefficient: R^2)는 0.998로 계산되어 매우 높은 상관관계를 보이므로 CDCP 관입시험을 이용하여 지반의 유효한 강성특성을 평가할 수 있으며, 다짐시공된 노반에 대한 CDCP 시험 결과로부터 동탄성계수(E_{vd})의 추정이 가능 할 것이라 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 기존 반복평판재하시험 및 동평판재하시험으로 강성특성을 수행하고 있는 노반에 대하여 심도에 따라 연속적으로 강성특성 평가를 수행하고자 크로스홀 형태의 동적 콘 관입기(Crosshole-type dynamic cone penetrometer: CDCP)가 이용되었다. CDCP의 현장 적용을 위하여 다짐시공 완료된 세 단면의 상부노반을 대상으로 관입시험이 수행되었으며, 비교시험으로써 동평판재하시험(Light falling weight deflectometer: LFWD)이 수행되었다.

CDCP 관입시험 결과, 발신기로부터 획득된 탄성과 발신기간 및 수신기로부터 획득한 전단파 초동시간을 이용하여 전단파의 전파시간을 획득하였으며, 전단파의 전파 거리에 해당하는 수신기와 발신기 주면의 이격거리를 이용하여 CDCP 관입 심도에 따라 연속적으로 전단파속도를 평가하였다. 또한, 동일 위치에서 현장밀도시험을 이용하여 획득한 노반의 밀도를 이용하여 심도에 따른 최대전단강성계수 추상도를 획득하였다. CDCP 관입시험은 전단파속도 및 최대전단강성계수는 심도에 따른 강성특

성 분포를 심도에 따라 연속적으로 평가하므로 노반 내 비균질 구간의 강성특성을 효과적으로 평가하였으며, CDCP 시험으로부터 획득하는 전단파는 선형의 하중-변형률 관계를 보이는 변형률 구간에서 전파하므로 객관적인 강성특성 평가에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

CDCP 관입실험을 수행한 세 단면 각각에서 심도 600 mm까지의 평균 최대전단강성계수와 LFWD시험으로부터 평가된 동탄성계수를 상호비교한 결과 매우 우수한 선형관계를 보이므로 두 시험법 모두 유효한 강성특성 도출 결과를 보였다고 판단된다. 그러나 LFWD시험을 이용하여 평가된 노반의 동탄성계수는 심도 600mm 내 유효범위의 대표적인 강성특성을 나타낸 반면, CDCP 관입실험으로부터 획득한 전단파속도 및 최대전단강성계수는 해당 범위내에서 심도에 따라 노반의 강성특성 분포를 보였다. 또한, CDCP 관입실험을 이용함으로써 LFWD의 유효범위보다 깊은 심도에서도 연속적으로 강성특성을 평가할 수 있으므로 노반의 강성특성 평가에 효과적으로 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- Al Shaer, A., Duhamel, D., Sab, K., Foret, G., and Schmitt, L. (2008), "Experimental Settlement and Dynamic behavior of a Portion of Ballasted Railway Track under High Speed Trains", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.316, No.1, pp.211-233.
- ASTM D6951 (2009), "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications", Annual Book of ASTM Standard 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E2583 (2015), "Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)", Annual Book of ASTM Standard 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Byun, Y. H., Kim, J. H., and Lee, J. S. (2013), "Cone Penetrometer with a Helical-Type Outer Screw Rod for Evaluation of the Subgrade Condition", *Journal of Transportation Engineering*, 139, pp.115-122.
- Byun, Y. H. and Lee, J. S. (2013), "Instrumented Dynamic Cone Penetrometer Corrected with Transferred Energy into a Cone Tip: A Laboratory Study", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.36, No.4, pp.533-542.
- Chebli, H., Clouteau, D., and Schmitt, L. (2008), "Dynamic Response of High-speed Ballasted Railway Tracks: 3D Periodic Model and in Situ Measurements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,

- 28, pp.118-131.
- Choi, C. Y., Lee J. W., Lim Y., and Cho, H. (2015), "Correction Factors for Modulus Calculation Equation used in Light Weight Deflectometer Considering Track Foundation", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.18, No.1, pp.53-62.
- Clark, M., McCann, D.M., and Forde, M.C. (2002), "Infrared Thermographic Investigation of Railway Track Ballast", *NDT & E International*, 35, pp.83-94.
- DIN 18 134 (1993), "Plattendruckversuch", Deutsches Institut für Normung e. V.
- Elhakim, A. F., Elbaz, K., and Amer, M. I. (2014), "The use of Light Weight Deflectometer for in Situ Evaluation of Sand Degree of Compaction", *HBRC Journal*, Vol.10, No.3, pp.298-307.
- Fleming, P., Frost, M., and Lambert, J. (2007), "Review of Light-weight Deflectometer for Routine in Situ Assessment of Pavement Material Stiffness", *Transportation research record: journal of the Transportation Research Board*, (2004), pp.80-87.
- Hong, W. T., Byun, Y. H., Kim, S. Y., and Lee, J. S. (2016), "Cone Penetrometer Incorporated with Dynamic Cone Penetration Method for Investigation of Track Substructures", *Smart Structures and Systems*, Vol.18, No.2, pp.197-216.
- Hong, W. T., Kim, S. Y., Lee, S. J., and Lee, J. S. (2017), "Strength and Stiffness Assessment of Railway Track Substructures using Crosshole-type Dynamic Cone Penetrometer", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, pp.88-97.
- Kodicherla, S. P. K. and Nandyala, D. K. (2016), "Use of CPT and DCP based Correlations in Characterization of Subgrade of a Highway in Southern Ethiopia Region", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.7, No.11, DOI 10.1186/s40703-016-0025-8.
- Korea Rail Network Authority (2015), "Design Specification for Railroad: Road Bed", Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, Republic of Korea, 1043.
- KS F 2312 (2004), "Test Method for Soil Compaction using a Rammer", Korean Standard Association, 12.
- Lim, Y., Kim, D. S., Cho, H. J., and Sagong, M. (2013), "Investigation of Stiffness Characteristics of Subgrade Soils under Tracks Based on Stress and Strain Levels", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.16, No.5, pp.386-393.
- Mohammadi, S. D., Nikoudel, M. R., Rahimi, H., and Khamehchiyan, M. (2008), "Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for Determination of the Engineering Parameters of Sandy Soils", *Engineering Geology*, Elsevier, Vol.101, No.3, pp.195-203.
- Nazzal, M., Abu-Farsakh, M., Alshibli, K., and Mohammad, L. (2004), "Evaluating the Potential use of a Portable LFWD for Characterizing Pavement Layers and Subgrades", *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, pp.915-924.
- Robins, N., Clover, R., and Singh, C. (2009), "A Climate for Recovery: the Colour of Stimulus Goes Green", *HSBC Global Research*, 25, pp.1-45.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), "Soils and Waves-Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring", Jhon Wiley and Sons, NY, p.448.
- Selig, E.T. and Waters, J.M. (1994), "Track Geotechnology and Substructures Management", Thomas Telford, London, p.141.

Received : December 27th, 2017

Revised : February 6th, 2018

Accepted : February 6th, 2018