철도보강노반 하부 연약지반 개량공법으로써의 DCM 적용성 평가

Evaluation of Applicability of Deep Cement Mixing Method as Soft-Ground Improvement for Reinforced Subgrade for Railways

김대상* · 김웅진**

Kim, Dae Sang*, and Kim, Ung Jin**

Abstract

The deep cement mixing method, as a means for soft-ground improvement, was applied to achieve a short construction period for reinforced subgrade for railways (RSR). The RSR was modeled using the finite-element method for the parametric study of three kinds of its height. The parameters for the numerical analysis were the improvement ratio, and the width and depth of the soft ground. On the basis of the analysis results, in the case of 10-m-high RSR, we assured residual and differential settlements. Furthermore, the horizontal displacements were under the control limits by satisfying both the condition of the total improvement of soft layers by the range of RSR wall foundation and the improvement ratio of 54%.

Key words : DCM, RSR, Numerical Analysis, Applicability Evaluation

요 지

연약지반 상에 철도용 보강노반(Reinforced subgrade for railways, RSR) 건설 시 공기단축을 위한 방법으로 Deep Cement Mixing (DCM) 개량공법을 적용하였다. RSR의 높이 3종류를 유한요소기법으로 모델링하고, 이를 지지하는 연약지반의 개량률과 개량 폭 및 깊이를 매개변수로 하여 수치해석을 실시하였다. 동 해석 결과 RSR 최대 높이 10 m 건설의 경우 개량률 54%로 매립층을 포함한 전체 연약지반층을 RSR 벽체 기초범위까지 개량할 경우 잔류 및 부등침하와 수평변위가 기준 범위 내에 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : DCM, 철도용 보강노반, 수치해석, 적용성 평가

1. 서 론

최근 사회간접자본 투자가 지속적으로 감소함에 따라 경제적인 철도노반 건설의 요구가 점차 증가하고 있다. 철도 건설 시 소요 용지 최소화가 가능한 기술은 이에 부합할 수 있는 좋은 기술로 평가되어 연구가 진행 중에 있다. 강성벽체와 짧은 보강재를 사용하는 RSR은 연직형 노반 구조물로 용지매입 비용을 최소화할 수 있으며, 기존선의 범면 공간을 활용하여 추가 용지 매입 없이 선로용량을 증가시킬 수

있는 등 용지 절감 측면에서 상당한 이점을 가지고 있는 기술이다(Kim, 2018). 또한, 토체를 선 시공하고 벽체를 후 시공하기 때문에 성토체 침하가 시공 중에 수렴하고, 보강재 적용 등으로 토체가 자립하는 구조로 토체로부터 벽체에 작용하는 수평토압이 작아서 연직 토류구조물을 위한 벽체두께 및 기초를 간소화 할 수 있는 장점이 있다(Tatsuoka et al., 1997). RSR의 안정성과 현장 적용성은 Kim (2014, 2015, 2016)의 연구로부터 이론적 고찰, 실험, 현장계측 등을 통하여 평가된 바 있다.

*교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원(Tel: +82-31-460-5305, Fax: +82-31-460-5749, E-mail: kds@krri.re.kr)

Corresponding Author, Member, Principal Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, KRRI

**한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 박사과정

Ph.D. Candidate, M.D. Track & Roadbed Research Team, KRRI

RSR 기술의 다양한 현장 적용성을 확보하기 위해서는 양호한 지반뿐만 아니라 N값 2 이하의 연약지반에서 공기단축이 가능한 기초 처리공법에 대한 평가가 필요하다. Kim (2017)은 심도 4 m 이하의 점토층을 현장타설 무근 콘크리트 말뚝으로 보강한 RSR의 시공 중 계측을 통하여 변형제어 성능을 평가하였으나 이 보다 심도가 깊은 연약지반에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 동 연구에서는 깊은 심도의 연약지반상에 철도용 보강노반 건설 시 공기단축을 위한 원지반 개량 공법으로 DCM공법의 적용성과 최적 개량 사양을 파악하기 위한 수치해석을 수행하였다. RSR 높이, 연약지반의 개량률과 개량폭을 변수로 한 매개변수 해석을 통하여 열차 설계하중 하에서 RSR 및 DCM의 거동을 분석하였다.

2. 수치해석 개요

DCM 공법으로 RSR 하부의 연약지반을 개량할 시 최적 개량 사양을 검토하기 위하여 개량률과 개량 폭 및 깊이를 변수로 한 매개변수 해석을 수행하였다. 수치해석은 2차원 유효요소해석 프로그램을 활용하였으며 DCM 설계에서 일반적으로 활용되고 있는 복합지반 해석법으로 수행하였다. Fig. 1은 기존 설계사례로부터 얻은 실제 연약지반 현장의 지반조건을 단순화하고 DCM과 RSR을 적용하여 구성한 해석 단면이다. 매립토 7 m, 퇴적 점토 10 m의 연약지반 상에 같이 하부 연약지반을 DCM으로 개량하는 것으로 가정하여, 높이 8 m의 RSR이 건설되는 해석 모델을 구성하였다. DCM 개량체는 직경 1.0 m의 4분을 동시에 시공하는 4축 1련 개량으로 가정하였다.

해석 순서는 ① 원지반 개량, ② RSR 시공, ③ 궤도하중 재하, ④ 열차하중 재하로 구성하였다. 궤도 및 열차하중은 철도설계기준(2017)에서 규정하는 15 kPa과 35 kPa을 정하중으로 재하하였다.

DCM의 적용 개량률은 성토체의 안정 확보나 증량구조물의 지지력 증가가 목적인 경우 개량률을 50% 이상으로 적용하는 것이 일반적이다. 동 수치해석에서는 Eq. (1) (DCM Research Society, 1996)을 이용하여 적용 개량률을 54%로 결정하였다. 이때 RSR 성토체의 단위중량은 19 kN/m^3 , 궤도와 열차하중 조건은 각각 15와 35 kPa을 적용하였다. 보다 높은 개량률로 보강한 경우와의 비교를 위하여 개량률 71%에 대해서도 추가로 검토하였다.

$$a_s = \frac{F_s \times Q}{q_{uck}} \quad (1)$$

여기서, a_s : 개량률

F_s : 안전율 = 1.2

Q : 작용하중

q_{uck} : DCM 개량체 설계 일축압축강도(= 530 kN/m^2)

Fig. 1. Analysis Section

개량폭은 Fig. 2와 같이 연약지반 상부까지 영향범위가 2:1로 분포하는 것으로 가정하여 산정하였다. 경제성을 고려하여 RSR 벽체 기초를 포함하는 범위까지만 보강하는 경우를 추가하여 횡방향 5분(10.2 m), 7분(14.5 m)의 개량폭으로 검토하였다. 개량률과 개량폭에 따른 평면상 DCM의 배치도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 2. Determination of Improvement Width

Fig. 3. Arrangements of DCM According to Improvement Ratios and Improvement Widths

개량 심도는 개량심도의 적정성 여부를 파악하기 위하여

하부 연약층만을 개량하는 경우와 상부 매립층까지 포함하여 전체를 개량하는 경우를 모두 검토하였다. 개량 폭과 심도를 반영한 해석 단면은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. Analyses Sections According to Improvement Depths & Widths

RSR 높이 변화에 따른 적용성을 파악하기 위하여 RSR 높이 5 m, 8 m, 10 m를 적용한 수치해석을 실시하였다. 개량률, 개량 폭 및 깊이, RSR 높이를 매개변수로 한 전체 해석 케이스를 정리하면 Table 1과 같다.

수치해석에 사용한 재료의 물성값은 기존 설계사례로부터 Table 2와 같이 적용하였다. 원지반의 퇴적층, 강화노반, DCM 개량구간, RSR 흙쌓기 등은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하고, 철근콘크리트 벽체는 Linear elastic 모델을 적용하였다. 연약점토층은 Soft soil model을 적용하였다.

DCM 개량지반의 점착력은 Eq. (2) (CDIT, 2008)로부터 개량체의 설계 일축압축강도 530 kPa의 1/2 값인 265 kPa를 적용하였다.

$$c = \frac{q_{uck}}{2} \quad (2)$$

여기서, c : 개량지반의 점착력

q_{uck} : DCM 개량체 설계 일축압축강도

개량지반의 탄성계수는 Eq. (3)을 이용하여 54% 개량률일 때 117 MPa, 71% 개량률일 때 152 MPa를 적용하였다.

$$E = E_0 \left(1 - \frac{A_S}{100}\right) + E_{50} \frac{A_S}{100} \quad (3)$$

E : 개량지반 변형계수

E_0 : 원지반 초기탄성계수

A_S : 개량률

E_{50} : 개량체 활선탄성계수 ($E_{50} = 500f'_c$)

$$f'_c = \alpha \cdot \beta \cdot q_{uck} \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

α : 단면유효계수 = 1

β : 중첩 폭 신뢰도 계수 = 0.8

q_{uck} : 일축압축강도 (kN/m²)

수치해석을 수행하기 이전에 동 연약지반 조건에 대한 개량의 필요성을 확인하고, 개량 후 개량률별 침하거동에 대한 비교자료로 활용하기 위하여 비 개량 시의 연약층 침하량을 검토하였다. 검토결과 매립층(Land fill)의 즉시침하량은 216.5 mm, 연약 점토층 압밀침하량은 362.3 mm로, 총 발생 침하량은 579.1 mm로 산정되었다(Table 3). 연약지반을 처리하지 않은 경우에 자갈레도의 잔류침하 기준을 만족하기 위해서는 13개월, 콘크리트슬래브레도의 경우는 27개월의 방치기간이 필요한 것으로 나타나, DCM 공법 적용의 필요성을 확인할 수 있었다.

Table 1. Analyses Cases of Improvement

Cases	Improvement ratio (%)	Improvement width (m)	Improvement depth (m)	RSR Height (m)
1	54	10.2	10.0	8
2	54	10.2	17.0	8
3	54	14.5	10.0	8
4	54	14.5	17.0	8
5	71	10.2	10.0	8
6	71	10.2	17.0	8
7	71	14.5	10.0	8
8	71	14.5	17.0	8
9	54	10.2	117.0	5
10	54	14.5	17.0	5
11	54	10.2	17.0	10
12	54	14.5	17.0	10

Table 2. Properties of Materials

Materials	Material models	Unit weights (kN/m ³)	Cohesions (kN/m ²)	Friction angles (°)	Elastic moduli (MPa)	Poisson's ratios	C _c	C _s	e _o
Reinforced roadbed	Mohr-Coulomb	19	10	30	120	0.35	N/A	N/A	N/A
Embankment	Mohr-Coulomb	19	10	30	80	0.35	N/A	N/A	N/A
DCM	Mohr-Coulomb	17	265	0	117 (54%) 152 (71%)	0.17	N/A	N/A	N/A
Reinforced Concrete	Linear elastic	24.5	1,000	45	25,000	0.17	N/A	N/A	N/A
Landfill	Mohr-Coulomb	18	5	28	15	0.35	N/A	N/A	N/A
Soft clay	Soft soil Model	17	15	25	N/A	N/A	0.408	0.083	1.099

Table 3. Prediction of Settlement Without Soft Ground Treatment

Layer	Total settlement (mm)	For Ballast Track (Allowable Residual Settlement: 100 mm)				For Slab Track (Allowable Residual Settlement: 30 mm)			
		Settlement (mm)	Residual settlement (mm)	Degree of consolidation (%)	Time (day)	Settlement (mm)	Residual settlement (mm)	Degree of consolidation (%)	Time (day)
Land Fill	216.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Soft clay	362.6	263.4	99.2	72.6	390	333.4	29.2	91.9	810

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 침하

각 해석 케이스에서 Fig. 5의 위치에서 침하량을 측정하였다. 각 측점은 RSR 중심으로부터 양쪽으로 1.0, 2.0, 3.0, 4.3, 5.3, 6.4 m 떨어진 곳에 설정하였다. 최적 개량 사양을 파악하기 위해 높이를 8 m로 고정하고 개량률, 개량 폭 및 심도를 달리한 케이스(1 ~ 8)에서 최대침하값을 보이는 측점에서의 침하를 Table 4 및 Fig. 6과 같이 정리하였다. 잔류침하량 기준은 보수적으로 궤도 및 열차하중 재하 시 발생하는 침하로 결정하였다. 콘크리트 궤도 잔류침하 기준(30 mm) (Korea Rail Network Authority, 2017)을 적용하였을 경우 케이스 3을 제외한 모든 케이스에서 허용값 미만의 잔류침하량을 보였다. 개량률과 개량 폭의 변화보다 개량 심도를 달리하였을 경우 발생 침하량이 더 큰 차이를 보였으므로 RSR 직하부인 매립층까지 개량하는 것이 침하저감 측면에서 가장 큰 효과가 있을 것으로 판단되었다. 매립층과 연약층을 모두 개량한 경우 개량 폭 증가에 의하여 17.5 ~ 31.5% 침하가 저감 되었으며, 개량률이 높을 때 개량폭 증가에 의한 침하저감 효과가 높은 것으로 나타났다.

Fig. 5. Location of Measurement Points**Table 4.** Settlements According to Improvement Specifications

Cases		Settlements (mm)		Measurement points
		Track construction	Train loading	
54%	Case 1	17.59	24.99	D
	Case 2	3.43	5.36	H
	Case 3	23.08	30.02	C
	Case 4	2.71	4.42	H
71%	Case 5	16.51	23.55	D
	Case 6	2.12	3.84	H
	Case 7	21.93	28.43	C
	Case 8	1.11	2.63	H

Fig. 6. Residual Settlements According to Improvement Specifications

Table 5는 각 축점의 침하로부터 부등침하량을 산정한 결과이다. 허용 각변위를 1/300으로 선정하여 각 케이스별 부등침하량을 계산한 결과, 매립층을 보강하지 않는 경우 허용값 이상의 부등침하량을 보였다. 부등침하량은 개랑률과 개랑 폭의 영향을 모두 받으며 개랑률이 크고 개랑폭이 넓은 케이스에서 적게 나타났다. 단, 매립층까지 개랑하고 개랑폭을 14.5 m로 적용할 경우 개랑률을 증가시켜도 부등침하를 저감하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 5. Differential Settlements According to Improvement Specifications

Cases		Differential settlements (mm)	Angular displacement	Allowable Angular displacement
54%	Case 1	30.0	1/133	1/300
	Case 2	3.0	1/1,333	
	Case 3	30.0	1/133	
	Case 4	2.0	1/2,000	
71%	Case 5	30.0	1/133	
	Case 6	2.5	1/1,600	
	Case 7	30.0	1/133	
	Case 8	2.0	1/2,000	

동 해석결과로부터 개랑 지반의 강성을 높이거나 개랑 범위를 넓히는 것으로 잔류침하 및 부등침하를 저감할 수 있는 것을 확인하였다. 개랑심도는 허용 부등침하 기준을 만족하기 위하여 상부 매립층까지 개랑해야 하는 것으로 나타났으며, 경제성을 고려하여 개랑률 54%를 적용하고 RSR 기초 하부 범위까지만 개랑하여도 침하에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

개랑률 54%를 적용하고 매립층과 연약층을 모두 개랑하였을 때 RSR 높이와 개랑폭에 따른 잔류침하량은 Table 6 및 Fig 7과 같다. 최대 잔류침하는 RSR 높이 10 m, 개랑폭 10.2 m를 적용하였을 때 8.46 mm이며, 최소 잔류침하량은 높이 5 m, 개랑폭 14.5 m에서 3.65 mm의 값을 보였다.

모두 허용 잔류침하량 기준 이내의 값으로, RSR의 높이가 높을수록 잔류침하는 크게 발생하는 것으로 나타났다. RSR 건설 높이 5 m, 8 m에서는 비교적 노반 하부 중앙부에서 최대 침하가 발생한 반면 RSR 건설 높이 10 m의 최대 침하발생 위치는 RSR 노반 벽체 근처 내측에서 발생한 것을 확인할 수 있다. Fig. 8의 연직변위 분포를 보면 RSR 높이 5 m에서는 열차하중의 영향이 원지반까지 영향을 미쳐 중앙부에서 변위가 큰 분포를 보이나, 높이 10 m에서는 원지반이 열차하중의 영향범위를 벗어나고 외측 벽체하중 증가의 영향이 더 크므로 중앙부에서 변위가 작은 분포를 보였다. 두 케이스 모두 뚜렷한 RSR 외측 지반의 상향 변위가 관찰되지 않았으므로 히빙에 대한 우려는 없는 것으로 판단되었다. 개랑 폭을 10.2 m에서 14.5 m로 증가시키는 경우 잔류침하 저감은 17.5 ~ 25.1%로 나타났고 높이 10 m에서 가장 크게 저감 되었다.

Table 6. Settlements According to RSR Heights

Cases		Settlements (mm)		Measurement points
		Track construction	Train loading	
5m	Case 9	2.68	4.71	F
	Case 10	1.84	3.65	F
8m	Case 2	3.43	5.36	H
	Case 4	2.71	4.42	H
10m	Case 11	6.40	8.46	D
	Case 12	4.57	6.34	D

Fig. 7. Residual Settlements According to RSR Heights

Fig. 8. Distribution of Vertical Displacement

Table 7은 부등침하량을 산정한 표이다. RSR의 높이가 증가함에 따라 부등침하량이 증가하였으며 개량 폭의 증가에 의한 부등침하 저감 효과는 RSR 높이에 따라 다르게 나타났다. 높이 5 m에서는 개량폭 증가에 의해 부등침하가 50% 저감 되었으나 높이 10 m에서는 저감효과를 보이지 않았다. 모든 케이스에서 허용값 이내의 침하를 보였으므로 개량률 54%를 적용하고 개량 폭을 벽체기초 하부까지 적용 하여도 침하 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 7. Differential Settlements According to RSR Heights

Cases		Differential settlements (mm)	Angular displacement	Allowable Angular displacement
5m	Case 9	1.0	1/4,000	1/300
	Case 10	0.5	1/8,000	
8m	Case 2	3.0	1/1,333	
	Case 4	2.0	1/2,000	
10m	Case 11	4.0	1/1,000	
	Case 12	4.0	1/1,000	

3.2 수평변위

RSR 높이를 8m로 고정하고 개량률, 개량폭, 개량심도를 달리한 케이스(1 ~ 8)에 대해 최대 수평변위를 Table 8 및 Fig. 9와 같이 정리하였다. 옹벽 수평변위 허용기준인 0.6% (MOLIT, 2005)를 준용하면, 허용 수평변위는 48 mm로 모든 케이스에서 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 침하와 마찬가지로 매립층 개량여부에 따라 가장 큰 차이를 보였다. 개량률이 높을수록, 개량폭이 넓을수록 수평변위는 감소하는데 매립층을 개량하지 않는 경우 2.3 ~ 11.1%, 매립층을 개량하는 경우 3.5 ~ 14.4%로 매립층을 개량할 경우 개량률과 개량폭 증가에 따른 수평변위 저감 효과가 증가하였다. 침하에 대한 안정성을 확보하기 위하여 매립층까지 개량하는 경우 개량률 증가로 인한 수평변위는 11.6 ~ 14.4% 저감되고 개량폭을 증가할 경우 3.5% ~ 6.6% 저감되는 것으로 나타났다. 따라서, 개량폭 증가보다는 개량률 증가가 수평변위 저감에는 보다 효율적일 것으로 판단되었다.

Table 8. Horizontal Displacement According to Improvement Specifications

Cases		Horizontal displacement (mm)	
		Track construction	Train loading
5m	Case 9	18.96	21.26
	Case 10	4.87	5.28
8m	Case 2	17.21	18.94
	Case 4	4.69	4.93
10m	Case 11	18.72	20.82
	Case 12	4.30	4.52

Fig. 9. Horizontal Displacement According to Improvement Specifications

RSR 높이에 따른 최대 수평변위는 Table 9 및 Fig. 10과 같다. RSR의 높이가 높을수록 자중 증가에 의해 수평변위가 크게 나타났다. 개량폭을 10.2 m에서 14.5 m로 증가시키는 경우 벽체 외측 지반의 강성이 증가하게 되므로 수평변위가 6 ~ 12% 저감되었다. RSR 높이가 높아질수록 개량폭 증가에 따른 수평변위 저감 효과가 감소하였다. 모든 케이스에서 옹벽 수평변위 허용 기준인 6% 이내의 값을 보여 개량률 54%를 적용하고 개량폭을 벽체기초 하부 범위까지만 적용 하여도 수평변위에 대한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 9. Horizontal Displacements According to RSR Heights

Cases		Horizontal displacement (mm)	
		Track construction	Train loading
5m	Case 9	2.86	3.40
	Case 10	2.74	2.99
8m	Case 2	4.87	5.28
	Case 4	4.69	4.93
10m	Case 11	6.41	6.85
	Case 12	6.08	6.43

Fig. 10. Horizontal Displacements According to RSR Heights

4. 결 론

본 논문에서는 공기단축을 위한 RSR 하부 연약지반의 개량공법으로서 DCM 공법의 적용성을 확인하고 경제적인 보강 조건을 파악하기 위하여 유한요소해석법을 활용하여 12케이스에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. 이를 통하여 DCM으로 보강된 연약지반상 RSR의 개량률, 개량폭 및 침하, RSR 높이에 따른 잔류침하 및 부등침하, 수평변위 발생량을 비교 검토하였으며 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 연약지반층 전체를 개량한 경우 개량률이 높을수록, 개량폭이 넓을수록 연약지반상 RSR의 침하 및 수평변위를 저감할 수 있으며, 54% 이상의 개량률로 개량폭을 벽체기초 하부 범위까지만 적용한 경우에도 검토한 RSR 최대 높이인 10 m까지 침하 및 수평변위에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 잔류침하 및 부등침하는 상부 매립층의 개량유무에 따라 큰 차이를 보였으며, 매립층을 포함한 전체 층을 개량하여야 잔류침하 및 부등침하에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 매립층을 개량하지 않는 경우 개량폭 증가에 의한 침하 감소 효과는 미미한 것으로 나타났다.
- (3) 수평변위도 침하와 마찬가지로 매립층의 개량여부에 따라 큰 차이를 보였으나, 매립층을 개량하지 않아도 수평변위에 대한 안정성은 확보할 수 있는 것으로 나타났다. RSR 높이가 높을수록 자중에 의해 수평변위가 크게 발생하며, 개량률과 개량폭의 증가로 이를 저감시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 수평변위 저감 측면에서는 개량폭보다는 개량률을 증가시키는 것이 보다 효율적으로 판단되며, 특히 RSR 높이가 높을수록 개량폭 증가에 따른 수평변위 저감효과는 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요연구사업의 연구비 지원 (“ZSR(Zero Settlement Railroad) 기술개발” 연구사업)에 의해 수행되었습니다.

References

- Costal Development Institute of Technology (CDIT). (2002). *Technical manual for deep cement mixing method in port and airport* (In Japanese).
- Deep Cement Mixing (DCM) Research Society (1996). *Design and construction manual of deep cement mixing method*.
- Kim, D.S. (2014). Stability evaluation of reinforced subgrade with short geogrid for railroad during construction, *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol. 13, No. 4, pp. 11-20.
- Kim, D.S. (2015). Performance evaluation of full scale reinforced subgrade for railroad with rigid wall under static load. *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol. 14, No. 3, pp. 31-42.
- Kim, D.S. (2016). Reinforcement of collapsed railway subgrade and line capacity increase using short reinforcement with rigid wall. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 11, pp. 604-609.
- Kim, D.S. (2017). Performance evaluation on deformation control of reinforced subgrade for railways under construction. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 17-22.
- Kim, D.S. (2018). Land use minimization technology in railway construction (May 8, 2018). *KuktoMaeil*. Retrieved from <http://www.pmnnews.co.kr/59379>
- Korea Rail Network Authority. (2017). *Railway design standard for roadbed*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2005). *Design standard for high-speed railways*.
- Tatsuoka, F., Tateyama, M., Uchimura, T., and Koseki, J. (1997). Geosynthetic-reinforced soil retaining walls as important permanent structures (1996-1997 Mercer Lecture). *Geosynthetics International*, Vol. 4, No. 2 pp. 81-136.

Received	August 2, 2019
Revised	August 6, 2019
Accepted	August 21, 2019