

## 표준트럭하중에 의해 옹벽에 작용하는 수평토압의 등가높이 산정

### Assessment of Equivalent Heights of Soil for the Lateral Earth Pressure Against Retaining Walls Due to Design Truck Load

김두환<sup>1</sup>, 진현식<sup>2</sup>, 서승환<sup>3</sup>, 박재현<sup>4</sup>, 김동욱<sup>5</sup>, 정문경<sup>6\*</sup>

Duhwan Kim<sup>1</sup>, Hyunsik Jin<sup>2</sup>, Seunghwan Seo<sup>3</sup>, Jaehyun Park<sup>4</sup>, Dongwook Kim<sup>5</sup>, Moonkyung Chung<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Member, Deputy General Manager, Plant Business Unit, Samsung C&T Corporation, Samsung GEC, 26 Sangil-ro 6-gil, Gangdong-gu, Seoul 05288, Republic of Korea

<sup>2</sup>Nonmember, President, HNG Consultants co., Ltd., 2F, 1025 Ori-ro, Gwangmyeong city, Gyeonggi-do 14284, Republic of Korea

<sup>3</sup>Nonmember, Research Specialist, Dept. of Infrastructure Safety Research (ISR), Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>4</sup>Nonmember, Research Fellow, Dept. of ISR., KICT, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

<sup>6</sup>Member, Senior Research Fellow, Dept. of ISR., KICT, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Limit state design has been implemented in Korea since 2015; however, there exists no specification of lateral load determination on retaining wall due to the Korean standard traffic load on retaining wall's backfill surface. The lateral load from traffic depends on lane number, standard truck's axle loads and locations, loading distance from the inner wall. The concept of equivalent height of soil accounting for traffic loadings is typically used for design of retaining walls to quantify the traffic loads transmitted to the inner wall faces. Due to the different characteristics of the standard design trucks between Korea and US (AASHTO), the direct use of the guidelines from AASHTO LRFD leads to incorrect estimation of traffic load effects on retaining walls. This paper presents the results of evaluation of equivalent height of soil to reflect the Korean standard truck, based on the findings from analytical solutions using Bounessq's theory and numerical assessment using 2D finite element method. Consequently, it was found that the equivalent heights of soil from the Korean standard truck load were lower for lower retaining wall height.

#### 요 지

교통하중으로 인해 교통시설 하부구조인 옹벽에 전달되는 수평토압은 도로의 차선 수, 차량하중 및 옹벽으로부터 이격거리 등에 영향을 받는다. 차량하중에 의해 유발되는 토압은 등가상재하중높이로 표현하며, 표준트럭의 축하중 크기와 위치에 따라 달라진다. 한계상태설계법은 2015년부터 국내 도로교 설계에 적용되어 왔으나, 우리나라 실정을 고려한 토압하중계수(등가상재하중높이)가 제시되어 있지 않아 설계에 적용하는데 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 국내 표준트럭의 축하중 크기 및 위치를 반영한 등가상재하중높이를 산정하였다. 탄성체 지반에 대하여 Boussinesq 이론을 적용시켜 계산한 등가상재하중높이와 2차원 수치해석 산정치를 비교하였다. 그리고 수치해석 상의 한계와 옹벽의 장기안정성을 고려하여 AASHTO 기준치와 차별화된 등가상재하중높이를 제안하였다. 우리나라 교통하중으로부터 도출된 등가상재하중높이는 AASHTO에서 제안하는 등가상재하중높이보다 옹벽의 높이가 낮을 경우 다소 낮게 평가되었으며 옹벽의 높이가 높을 경우 높게 평가되었다.

**Keywords** : Retaining wall, Traffic load, Land load, Lateral pressure, Numerical analysis

Received 16 Nov. 2018, Revised 30 Nov. 2018, Accepted 3 Dec. 2018

\*Corresponding author

Tel: +82-31-9100-219; Fax: +82-31-9100-561

E-mail address: mkchung@kict.re.kr (M. Chung)

# 1. 서론

미국 AASHTO(2012)에서는 옹벽 배면에 위치하는 표준트럭(HL-93)에 의해 옹벽에 전달되는 수평토압을 이론적으로 산정하여 '토압하중계수'로써 제시하고 있다. 여기서, 토압하중계수는 표준트럭 하중에 의해 유발되는 압력(토압)을 배면토사의 단위중량으로 나눈 값으로 정의되며, 이를 '등가상재하중높이( $h_{eq}$ )'로 정의한다. 미국 표준트럭의 축하중 크기와 위치가 우리나라의 경우와 상이하므로, AASHTO(2012)에서 제시한  $h_{eq}$ 를 국내 도로설계기준으로 준용하기가 곤란한 실정이다(MOCT, 2003a; MOCT, 2003b; MLTMA, 2012). AASHTO(2012)에서는 옹벽의 벽체를 Non-yielding wall으로 가정하고, 옹벽으로부터 배면쪽으로 옹벽 높이 이내의 거리에 위치하는 트럭하중을 벽체에 전달되는 추가 압력(토압) 산정에 고려한다. 그리고 트럭하중으로 유발된 토압을 Boussinesq 이론식으로 계산하여 등가상재하중 높이(토층 두께)로 제안하고 있다. 옹벽높이에 따라 등가상재하중높이는 0.6~1.5의 범위를 나타냈으며, 옹벽이 높이가 높아질수록  $h_{eq}$ 도 크게 산정되었다. 본 연구에서는 국내 표준트럭의 축하중 위치 및 크기, 트럭 배치 특성을 고려하여 옹벽의 높이와 교통하중과 옹벽의 이격거리에 따라 Boussinesq 이론과 범용 수치해석 프로그램인 Plaxis를 사용하여  $h_{eq}$ 를 산출하였다.

## 2. 등가상재하중높이 결정방법

### 2.1 옹벽배면 상재하중 조건

Fig. 1(a)는 이 연구에서 등가상재하중높이( $h_{eq}$ ) 산정을 위해 적용한 국내 표준트럭 1대의 차량하중 크기와 위치, 배치 평면도를 보여주고 있다(MOLIT, 2016a; MOLIT, 2016b). 각 차량이 차지하는 평면적은 3m(폭)×15.5m(길이)이며, 차량당 4개 차축(8개 차륜)을 통해 하중이 지표로 전달된다. 본 연구에서는 차량이 옹벽에 놓이는 위치와 방향에 따라 Fig. 1(b)~1(d)와 같이 3개의 상재하중(Case 1) 조건을 적용하였다. Fig. 1(b)는 3대의 트럭이 옹벽과 평행하게 인접하여 배치되는 경우를 나타내며, 이때 트럭간 전후 이격 거리는 11.5m이다. Fig. 1(c)는 Fig. 1(b)와 동일한 조건에서 트럭이 벽체로부터 0.3m 이격된 경우이다(Case 2). Fig. 1(d)는 3개의 트럭이 옹벽과 직교하게 바로 인접하여 배치되어 있는 경우를 보이며, 무한한 수의 트럭이 배열된

상태를 나타낸다(Case 3). 여기서, 각 트럭이 차지하는 평면적에 등분포하중(land load) 3.1kPa을 추가 반영하였다.

### 2.2 옹벽에 가해지는 토압의 합력 및 작용점 산정방법

각 상재하중 배치조건별로 옹벽높이( $H=1.5m, 3.0m, 6.0m$ )에 따른 영향을 파악하고 비교하기 위해서는 옹벽에 작용하는 토압의 합력과 그 작용점 계산이 필요하다. Boussinesq 이론을 적용하였으므로 옹벽의 뒷채움 토사를 이상적인 탄성체로 가정하고 등방성(isotropic) 매체로 가정한다(Lee, 2016). Fig. 2와 같은 좌표계에서 옹벽면이 y축과 z축이 이루는 면으로 가정하면, x-y축의 상부 한 점에 하중 P가 지표면에 연직으로 작용하는 경우 옹벽면에 작용하는 수평력  $\sigma_x$ 는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{3x^2}{R^5} - (1-2\nu) \left[ \frac{x^2-y^2}{Rr^2(R+z)} + \frac{y^2z}{R^3r^2} \right] \right\} \quad (1)$$

여기서,  $R = \sqrt{x^2+y^2+z^2} = \sqrt{r^2+z^2}$ ,  $r = \sqrt{x^2+y^2}$ ,  $\nu$ 는 포아송 비이다. Holl(1940)과 Poulos and Davis(1974)는 옹벽 배면 상단의 교통하중을 폭과 길이를 가진 띠하중으로 표현하고 이 하중에 옹벽과 평행하거나 직교할 때 옹벽 배면에 가해지는 압력 $\sigma_x$ 를 구하였다. 교통하중을 산정할 때 작용한 무한 등분포 차선하중(lane load)을 고려하기 위해서는 옹벽방향과 차량진행방향의 조건에 따라 식 (1)은 식 (2), (3)으로 나타낼 수 있다(Kim and Barker, 2002). 식 (2)는 Fig. 3과 같이 옹벽이 길이방향과 차량의 진행방향이 평행한 조건에서 차선하중이 벽체의 위치에 따라 작용하는 응력을 나타낸다.

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} [\alpha - \sin\alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (2)$$

식 (3)은 Fig. 3과 같이 옹벽의 길이방향과 차량의 진행방향이 직교하는 조건에서 차선하중이 벽체의 위치에 따라 작용하는 응력을 나타낸다.

$$\sigma_x = \frac{2\nu P\alpha}{\pi} \quad (3)$$

실제로 옹벽배면 상부에 차량 축하중의 조합이 작용하거나 차량 축하중들과 차선하중의 조합이 작용하므로 이

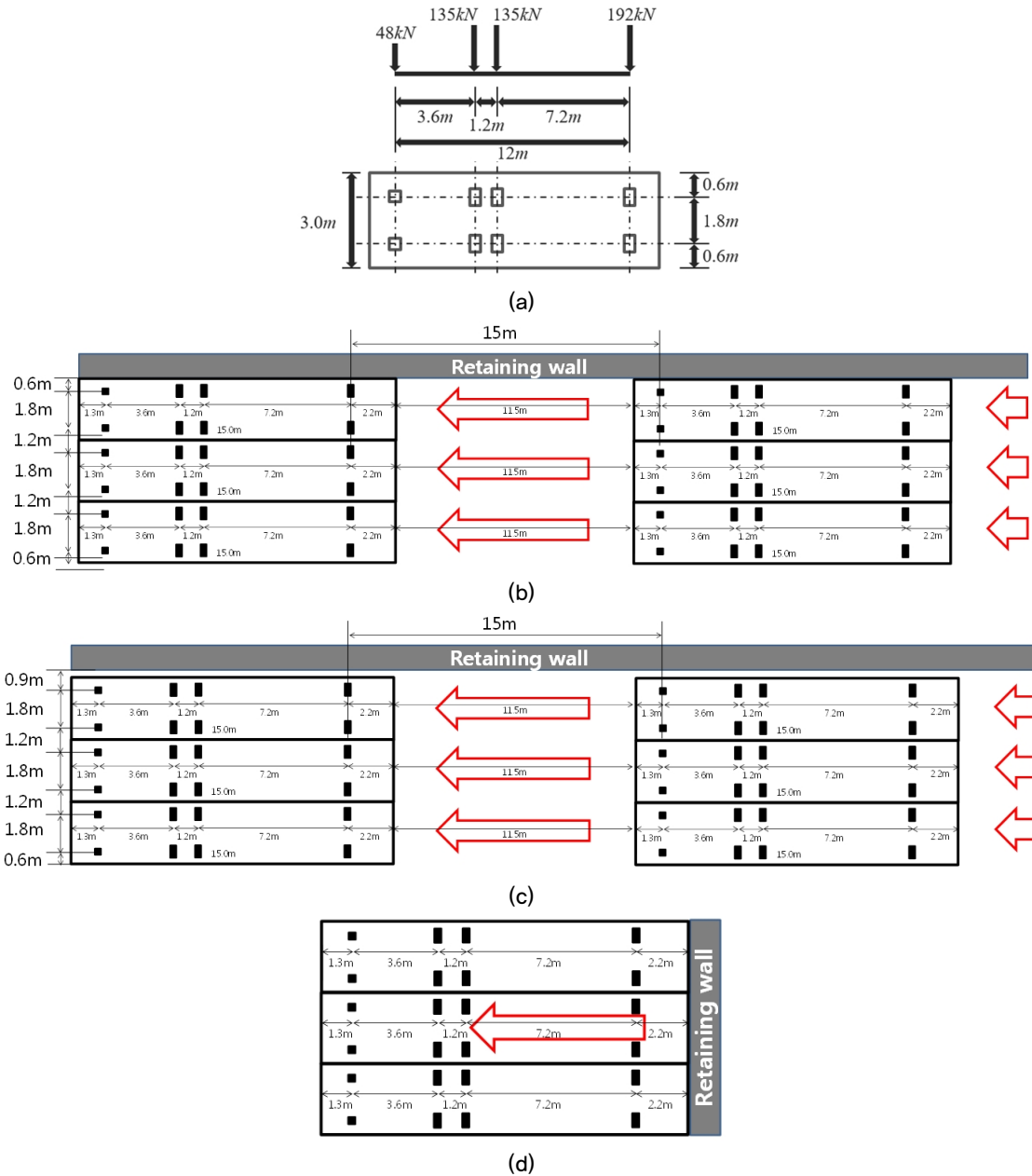


Fig. 1. Information of truck's axles loads and location and trucks' formations: (a) the standard Korean design truck loads (adopted from MOLIT, 2016), (b) Case 1 – trucks parallel and adjacent to the wall with a distance 0 m, (c) Case 2 – trucks parallel to the wall with a distance of 0.3 m, (d) Case 3 – trucks perpendicular to the wall (plan view)

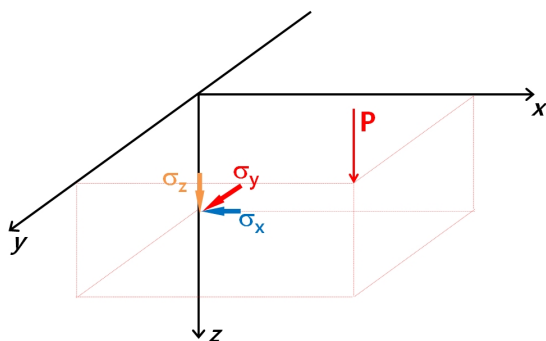


Fig. 2. Point load(P) on surface in cartesian coordinates

리한 하중 조합이 옹벽면에 작용하는 토압합력( $F_L$ )을 산정하기 위해 옹벽에 작용하는 수평토압의 면적을 적분하여 식 (4)로 나타낸다. 여기서,  $F_L$ 는 각각 전달되는 토압의 합력(total lateral pressure, 수평합력),  $H$ 는 옹벽 높이,  $\sigma_x$ 는 임의의 높이( $z$ )에서 옹벽에 전달되는 수평토압이다.

$$F_L = \int_{z=0}^z=H \int_{y=-\infty}^y=\infty \sigma_x dydz \quad (4)$$

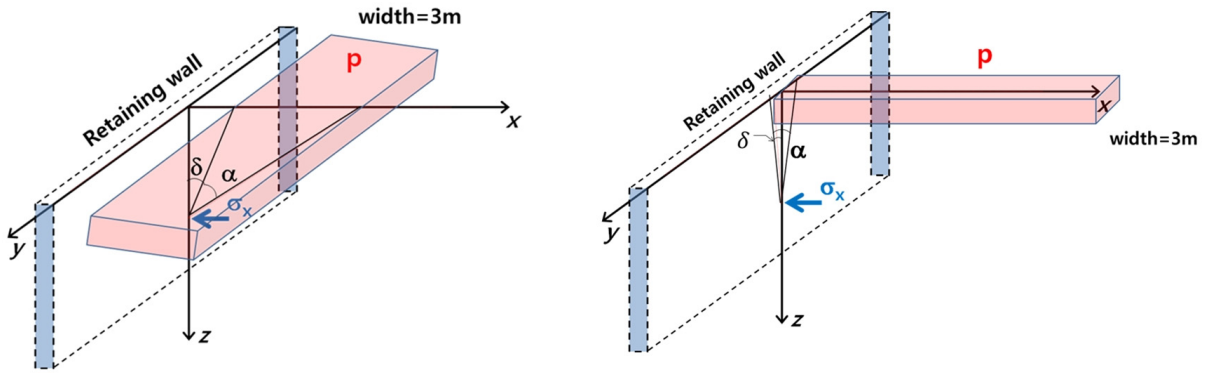


Fig. 3. Earth pressure induced by truck load and lane loads acting: (a) parallel to the wall and (b) perpendicular to the wall

수평합력의 작용점은 옹벽 하단면에 대해서 모멘트 평형 방정식을 이용하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 여기서,  $e_z$ 는 옹벽 바닥면 기준 수평합력 작용점(높이)이며  $z$ 는 옹벽의 임의 지점 높이를 각각 나타낸다.

$$e_z = H - \frac{\int_{z=0}^{z=H} \int_{y=-\infty}^{y=\infty} (\sigma_x z) dy dz}{F_L} \quad (5)$$

### 2.3 차량상재하중과 동일한 등가상재하중높이 $h_{eq}$ 산정방법

실제 상재 차량하중(actual truck loads) 및 등가등분포 하중(equivalent distributed loads) 재하시 전달되는 수평합력 크기 및 작용점 위치를 Fig. 4에 도시하였다.

실제 상재 차량하중에 의해 옹벽에 추가 전달되는 합력과 등가상재하중에 의한 합력은 같으므로,  $\Sigma F_L = K_0 \gamma h_{eq} H$ 로 나타낼 수 있다. 즉 등가수평력 방법에 의해 계산된 높이,  $h_{eq}$ 는 식 (6)과 같이 산정할 수 있다.

$$h_{eq} = \frac{\Sigma F_{L_i}}{K_0 \gamma H} \quad (6)$$

실제 차량하중에 의한 모멘트와 등가상재하중을 고려한 모멘트는  $F_L e_z = Q_L H/2$  이므로  $\Sigma F_L e_z = K_0 \gamma h_{eq} H^2/2$ 가 된다. 즉, 등가모멘트 방법에 의한  $h_{eq}$ 는 식 (7)로부터 산정할 수 있다.

$$h_{eq} = \frac{\Sigma F_L e_z}{0.5 K_0 \gamma H^2} \quad (7)$$

본 연구에서는 상재하중배치조건 및 옹벽높이별 Boussinesq 이론식을 이용하여 등가상재하중높이  $h_{eq(Bou)}$ 를 산정하였다. 상재하중 배치조건은 Fig. 1와 같이 총 3가지 cases로 적용하였으며, 옹벽높이는  $H=1.5m$ ,  $H=3.0m$ ,  $H=6.0m$ 를 적용하였다.

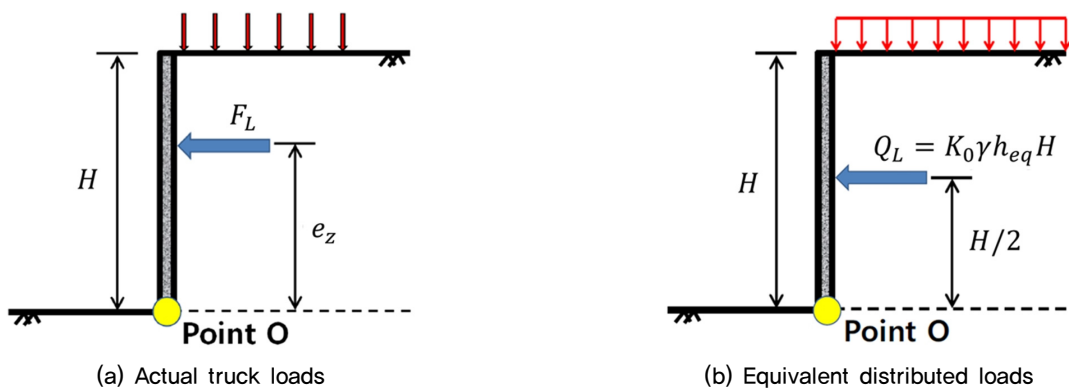


Fig. 4. Calculation of total lateral pressure against retaining wall and its elevation

### 3. 수치해석에 의한 등가상재하중높이( $h_{eq}$ ) 산정

#### 3.1 유한요소망 및 경계조건

수치해석은 범용 프로그램인 PLAXIS사에서 개발된 Plaxis2D(Plaxis VB, 2017)를 이용하였으며, 수치해석에 사용된 유한요소망(finite element mesh)내 기초지반, 뒷채움 토사, 중력식 옹벽 및 포장층 구역은 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 여기서, 구속조건(boundary condition)이 해석 결과에 영향을 주지 않도록 옹벽을 기준으로 충분한 수평 및 연직 거리를 적용하였다. 수치해석에 이용된 요소 수 및 절점 수는 검토영향요소(옹벽높이, 상재하중배치조건 등)에 따라 차등 적용되었으며, 요소 수는 880~1,595개, 절점 수는 7,330~13,152개로 모델링 되었다. 기초지반, 배면토사 및 중력식옹벽에는 15절점 삼각형요소와 Mohr Coulomb 모델을 적용하였다. 포장층은 5절점 plate 요소와 선형탄성(Linear-Elastic)모델이 사용되었다. 그리고,

옹벽-배면토 및 옹벽-기초지반 경계는 12절점 요소와 인터페이스(interface)로 모델링하였다.

#### 3.2 해석 입력 정수 및 조건

수치해석에 적용한 기초지반, 뒷채움 토사, 중력식 옹벽의 물성치를 Table 1에 나타내었다. 옹벽은 중력식 옹벽으로서 철근이 배근되지 않은 무근콘크리트로 가정하였으며, 식 (8)에 의해 재료의 탄성계수를 산정하였다(MOLIT, 2012). 이때, 적용한 콘크리트의 단위중량은  $2,350\text{kg/m}^3$ 이며, 극한 압축강도( $f_u$ )는 재령 28일에서의 콘크리트의 평균압축강도로  $f_{ck} + \Delta f$ 와 같다. 여기서,  $\Delta f$ 는  $f_{ck}$ 가 40MPa 이하일 경우 4MPa이며,  $f_{cu}$ 는 22MPa이다. 산정된 콘크리트의 탄성계수는 24,580MPa이며, 옹벽 벽체와 뒷채움 토사의 접촉면에서의 마찰계수(coefficient of interface friction)는 0.5를 적용하였다. 옹벽 뒷채움 토사는 점착력이 없는 사질토로 구성하였는데, 점착력을 무시함으로써 중력식

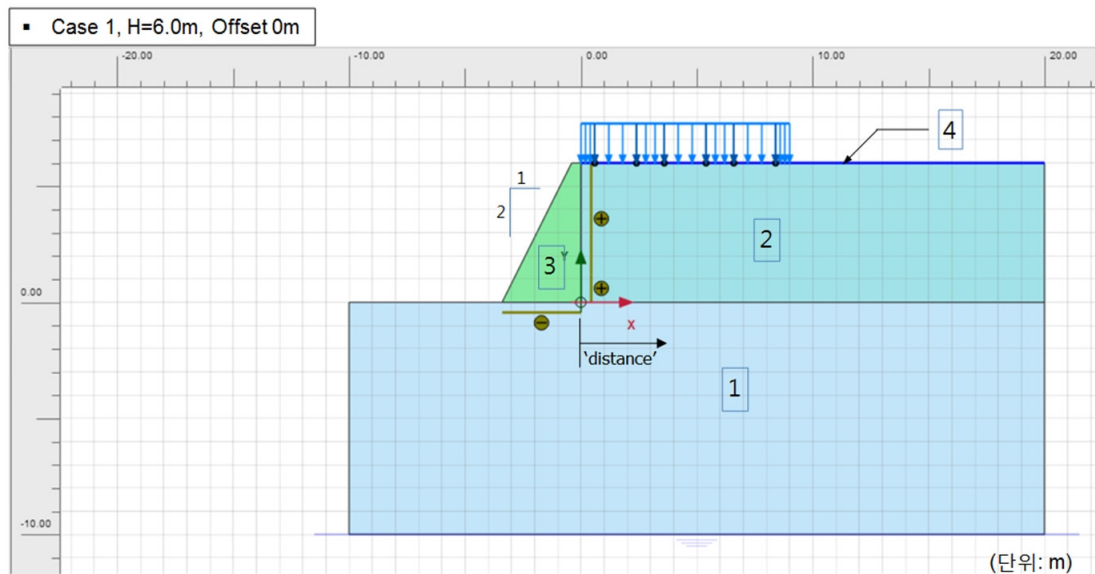


Fig. 5. Typical model section (Case 1; height of wall: 6.0 m)

Table 1. Properties of materials used in the modeling

Identification	Unit	Base soil	Backfill	Wall
Identification number		1	2	3
Unit weight ( $\gamma$ )	kN/m <sup>3</sup>	23	19	24
Young's modulus (E)	kN/m <sup>2</sup>	2,00E+06	5,00E+04	2,46E+07
Poisson's ratio ( $\nu$ )		0.3	0.3	0.2
Cohesion (c)	kN/m <sup>2</sup>	50	0	9,000
Internal friction angle ( $\phi$ )	°	40	30	0
Coefficient of interface friction		0.5	0.5	1

Table 2. Properties of pavement used in the modeling

Identification	Unit	*Pavement
Identification number		4
Material type		Elastic
Young's modulus (E)	kN/m <sup>2</sup>	2.1E+06
Thickness (d)	m	0.3
Unit weight (W)	kN/m <sup>3</sup>	6.9
Poisson's ratio, (ν)		0.45

옹벽 상부에서 발생할 수 있는 (-)토압을 억제하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt{f_{cu}} \quad (8)$$

Table 2는 포장층의 물성치를 나타낸다. 옹벽 상부에 포장층을 적용하는 것은 실제 설계조건과 부합하며, 수치해석상 차량하중에 의해 발생할 수 있는 지반의 국부과피로 의한 해석 오류를 방지하는 효과를 얻을 수 있었다. 여기서, 지하수위는 존재하지 않는 것으로 가정하였다.

#### 4. 수치해석 결과 분석

##### 4.1 상재하중배치 조건 및 옹벽높이별 옹벽에 작용하는 수평토압

옹벽 상부에 작용하는 차량하중으로 인해 옹벽에 작용하는 토압은 Fig. 6과 같다. Fig. 6은 Case 1에 대한 수치해석 결과이며, 상재하중 재하 전 초기토압과 상재하중 작용

시 토압을 나타낸다. 옹벽의 배면 뒷채움토 상부에 차량 축하중이 작용하는 부분은 원(circle)으로 표시하였다. Fig. 7은 수치해석을 통하여 산정된 수평토압으로서, 상재하중 배치조건 및 옹벽높이별 벽체에 작용하는 상재하중 재하 전 초기토압 ('Initial')과 전체 상재하중 작용시 토압 ('Final')을 보여준다. Case 1과 Case 2의 경우, 초기 토압에 비해 전체 상재하중에 따른 토압증가량이 거의 유사하게 나타났으나, 옹벽 높이가 낮을수록 토압증가량은 다소 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 옹벽높이가 낮을수록 배면하중 전달 정도가 민감하다는 것을 알 수 있다. Case 3의 경우, Case 1 및 Case 2 경우보다 토압이 큰 폭으로 증가하였으며, 옹벽 높이가 3.0m일 때 토압증가량이 가장 크게 나타났다. 즉, 트럭 하중이 옹벽에 직교한 경우에 수평토압 증가량이 더 크게 발생하였음을 알 수 있다.

Lane load와 차량하중에 의해 벽체에 추가 전달된 수평토압을 Fig. 8에 나타내었다. Cases 1, 2의 경우 대체로 비슷한 크기의 토압이 발생하였으나, Case 3의 경우 옹벽의 높이에 따라 큰 편차가 발생하였음을 알 수 있다.

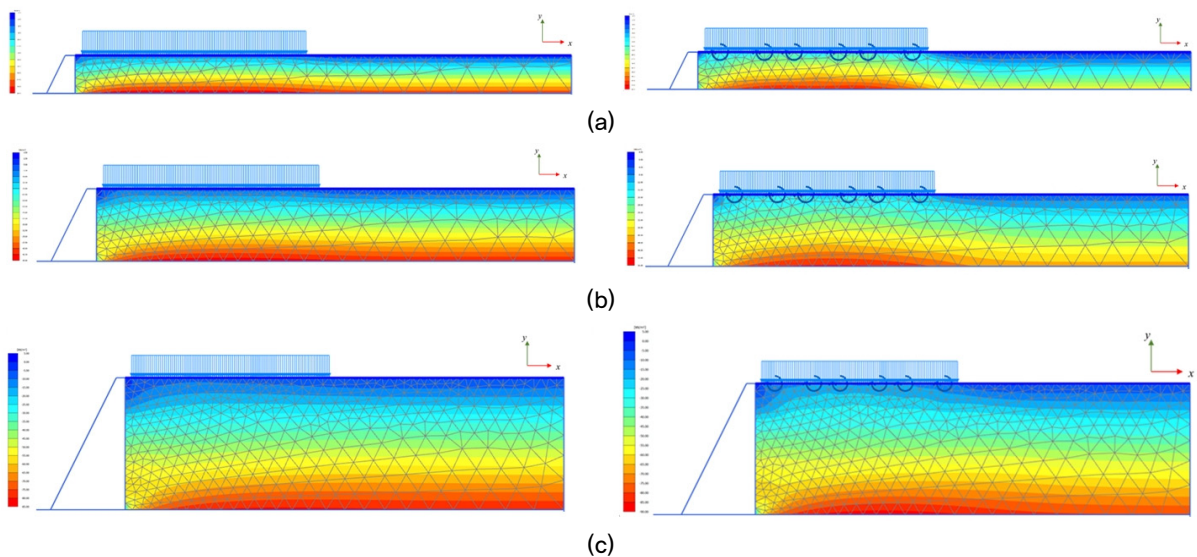


Fig. 6. Typical results of numerical analysis for unloading and loading traffic load (Case 2); (a) H=1.5 m, (b) H=3.0 m, (c) H=6.0 m



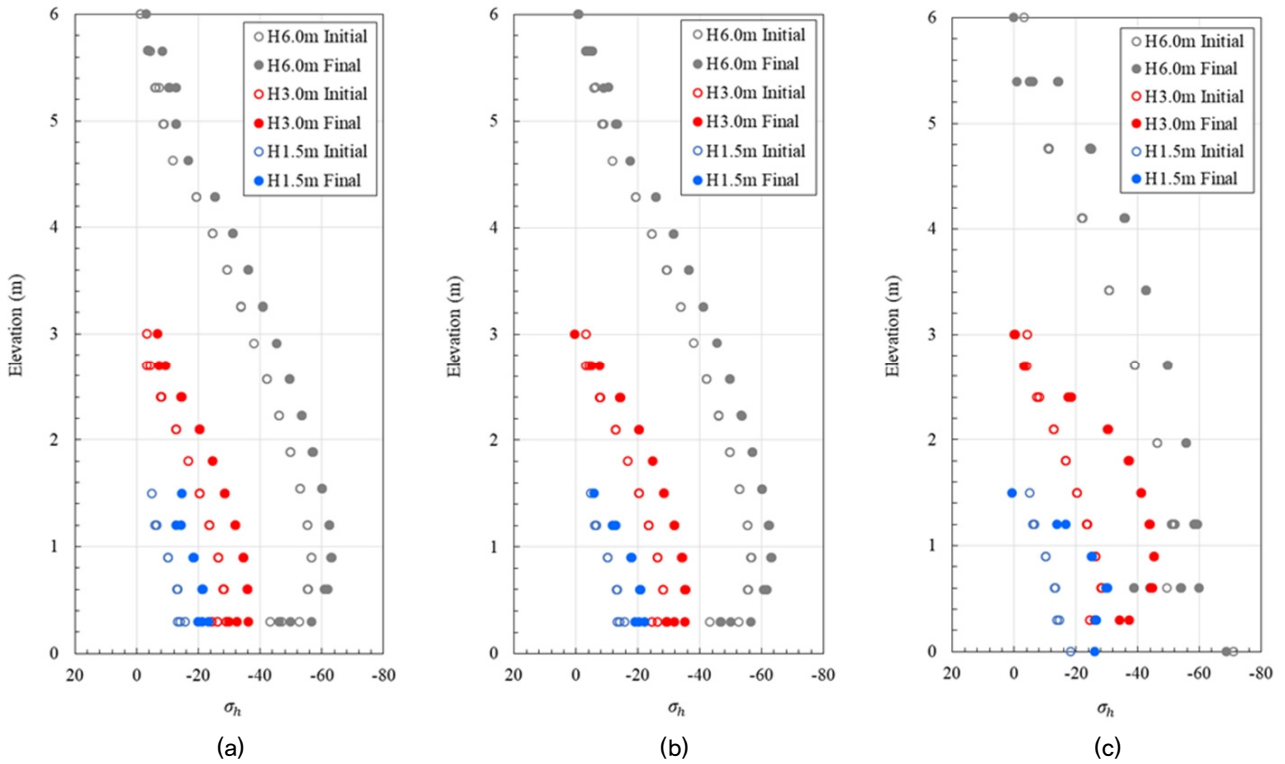


Fig. 7. Distribution of lateral earth pressure acting on the wall at initial and final loading stages with different wall heights; (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3

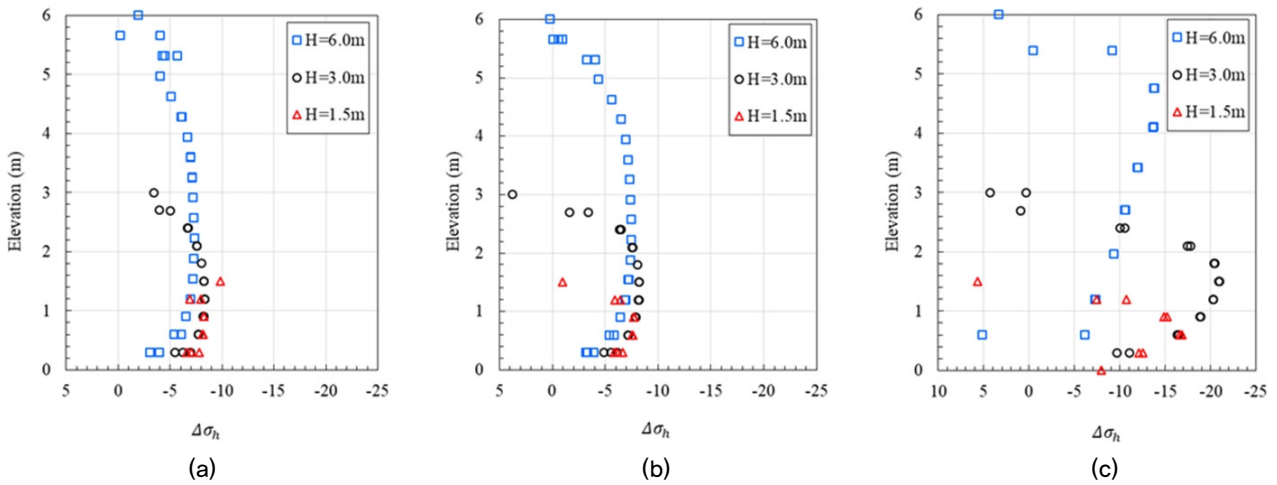


Fig. 8. Variation of lateral earth pressures with lane loads and truck loads between the initial and the final loading stages with different wall heights: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3

Fig. 9는 lane load와 트럭 하중 (LL + Pall) 에 의해 벽체에 추가로 전달된 수평토압의 합력을 나타낸 것이다. Cases 1~3 모두 벽체의 높이가 높을수록 전달되는 토압의 합력이 크다는 것을 알 수 있다. Case 2는 차량이 벽체로부터 0.3m 이격된 경우로서, Case 1 대비 이격에 의한 영향이 미미함을 알 수 있다. 차량이 벽체와 직교하는 Case 3의 경우 벽체에 전달되는 토압이 크게 증가(Case 1 대비 옹벽 높이  $H=1.5\text{m}$ ,  $3.0\text{m}$ ,  $6.0\text{m}$ 에 대해 각각 42%,

99%, 35% 증가)하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 수평토압 작용위치

상재 하중에 의해 옹벽 배면에 전달되는 전체 수평토압(합력)이 작용하는 높이(옹벽 바닥면 기준)의 계산치(수치해석 기준)를 Fig. 10에 나타내었다. 일반적 가정치인 옹벽 높이의  $1/2$ 보다 다소 낮은  $0.43H \sim 0.53H$ 의 범위로 분포하였다.

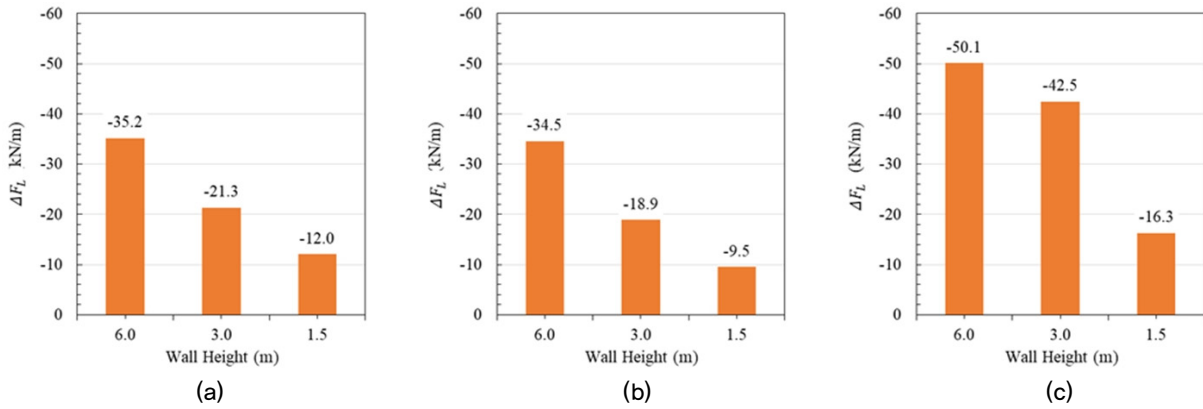


Fig. 9. Magnitudes of total earth pressures acting on the wall with lane and truck loads applied: (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3

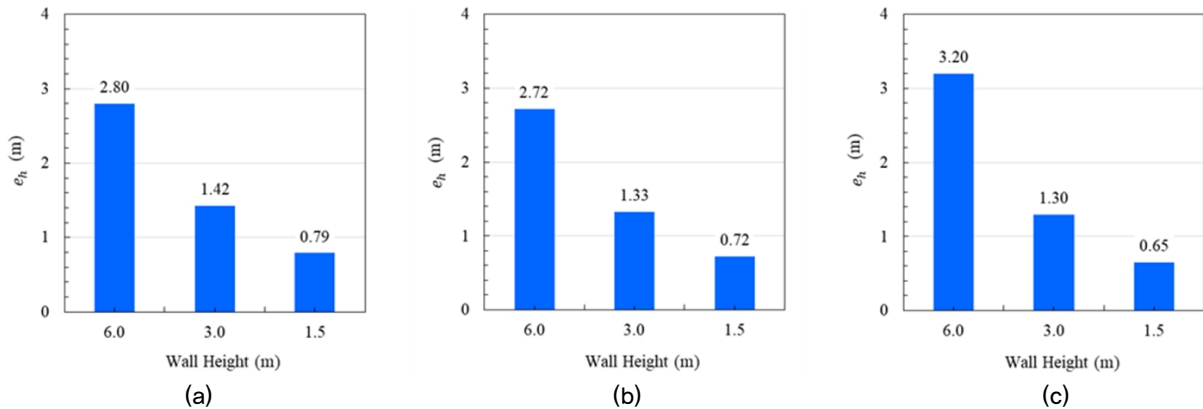


Fig. 10. Heights ( $e_h$ ) on which the total lateral earth pressures measured from the bottom of the wall: (a) Case 1, (b) Case 2, and (c) Case 3

Table 3. Summary of numerical analysis

Case	$H$	$\Delta P$	$K_i$	$K_f$	$K_{net}$	$e_h$
1	6.0	35.2	0.604	0.597	0.527	2.80
	3.0	21.3	0.616	0.634	0.666	1.42
	1.5	12.0	0.628	0.619	0.606	0.79
2	6.0	34.5	0.604	0.628	0.641	2.72
	3.0	18.9	0.616	0.691	0.882	1.31
	1.5	9.5	0.628	0.738	1.026	0.72
3	6.0	50.1	0.604	0.656	0.861	3.20
	3.0	42.5	0.616	0.782	1.930	1.30
	1.5	16.3	0.628	1.346	5.471	0.65

$H$  Height of wall (m)

$\Delta P$  Increase of lateral earth pressure against walls due lane loads and truck loads (kN/m-width)

$K_i$  Coefficient of earth pressure without surcharge (or initial loading stage)

$K_f$  Coefficient of earth pressure under land loads and truck loads (or final loading stage)

$K_{net}$   $\Delta\sigma_x/\Delta\sigma_z$

$e_h$  Elevation of increased lateral earth pressure from bottom of the wall (m)

### 4.3 토압계수의 변화

Table 3은 옹벽의 높이, 하중 조건에 따라 옹벽 벽면에 서 발생하는 토압계수의 변화를 보여준다. 여기서,  $K_i$ 는

벽체 배면토와 포장하중에 의한 초기 토압계수이며,  $K_f$ 는 상재하중 작용에 따른 최종 토압 계수이다.  $K_{net}$ 는 상재하중에 의해 옹벽에 전달된 수평/연직 토압 증감량의 비율 ( $\Delta\sigma_x/\Delta\sigma_z$ )을 나타낸다. 초기 토압계수( $K_i$ )는 옹벽 높이



Table 4. Equivalent height of soils ( $h_{eq}$ ) on retaining walls (unit: meter)

Case	Height of Wall, H (m)	Analytical solutions		Numerical solutions		$h_{eq}$ , Proposed	AASHTO (2012)
		Force-based	Moment-based	Force-based	Moment-based		
1	1.5	0.86	0.88	0.84	0.89	0.9	1.50
	3.0	0.76	0.82	0.75	0.71	0.8	1.05
	6.0	0.59	0.70	0.62	0.58	0.7	0.60
2	1.5	0.73	0.65	0.67	0.64	0.7	0.60
	3.0	0.70	0.70	0.66	0.59	0.7	0.60
	6.0	0.55	0.63	0.61	0.55	0.7	0.60
3	1.5	0.69	0.53	1.14	0.99	1.2	1.20
	3.0	0.85	0.76	1.49	1.29	1.5	0.90
	6.0	0.88	0.89	0.88	0.94	1.0	0.60

가 증가함에 따라 대체로 감소하는 경향을 보였으며, 상재 하중에 의한 영향도 이와 유사한 것으로 확인되었다.

#### 4.4 등가상재하중높이 산정

국내 표준트럭의 축하중 위치, 크기와 트럭배치 특성을 고려하여 Boussinesq 이론과 2차원 수치해석으로 산정한 등가상재하중높이를 Table 4에 나타내었다. 위 두 방법에 의한 결과는 거의 유사하게 나타났으며, Case 1, Case 3, Case 2의 순으로 크게 나타났다. 이는 Case별 등가상재하중높이를 Case 3, Case 1, Case 2의 순으로 크게 산정한 AASHTO(2012)와는 다른 경향이다.

Cases 1, 2의 경우 옹벽의 높이가 낮을수록 등가상재하중높이는 큰 값을 보였으며, case 별 산정치 크기가 비슷하였다. 반면에 Case 3의 경우 매우 큰 값 차이를 보이며 ( $H=3.0m$ ) > ( $H=1.5m$ ) > ( $H=6.0m$ )의 순으로 등가상재하중높이가 산정되었다. 즉, Case 1 및 Case 2는 AASHTO (2012)와 유사한 경향을 보였으나, Case 3은 AASHTO와 다른 경향을 보여주고 있다.

본 논문에서는 수치해석을 통한 결과를 근거로 하여 2가지 방법(등가수평력 기준, 등가모멘트 기준)으로 산정된 값보다 상향시킨 등가상재하중높이를 Table 4와 같이 제안하였다. 이는 이론 및 수치해석 상 동반되는 한계와 불확실성을 반영하고, 옹벽구조물의 장기안정성을 확보하기 위함이다.

### 5. 결론

국내 표준트럭의 축하중 위치 및 크기, 트럭배치를 반영하여 이론적인 Boussinesq 방법과 2차원 수치해석방법을 이용하여 등가상재하중높이를 산정하였으며, 그 결과를

아래와 같이 요약할 수 있다.

- (1) 트럭 하중에 의해 옹벽에 추가 전달되는 총 토압은 옹벽이 높을수록 크며, 트럭이 옹벽과 평행하게 배치되는 경우보다 직교하여 배치되는 경우에 더 크게 나타났다.
- (2) 토압의 합력이 작용하는 높이는 옹벽 바닥면 기준  $0.43H \sim 0.53H$ 로 나타났다.
- (3) 국내 표준트럭의 축하중 위치, 크기와 트럭배치 특성을 고려한 Case별 등가상재하중높이는 Case 3, Case 1, Case 2 순으로 크게 나타났으며, 특히 Case 3 경우 옹벽 높이가 3.0m일 때 가장 큰 등가상재하중높이가 산정되었는데 이는 AASHTO(2012)와는 상이한 결과이다.
- (4) 본 논문에서는 수치해석을 통해 산정된 등가수평력 및 등가모멘트를 기준으로 등가상재하중높이를 산정하였다. 해석 결과를 바탕으로 상향된 등가상재하중높이를 제안하였는데, 이는 해석상의 불확실성을 고려하고, 옹벽구조물의 장기안정성을 확보하기를 위함이다.
- (5) 향후 보다 신뢰성 높은 등가상재하중높이를 산정하기 위해서 옹벽 형태 및 높이, 뒷채움토, 지하수위 등을 고려한 3차원 수치해석이 필요할 것으로 판단된다.

### Acknowledgement

This work was supported by KAIA (Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement) through the research project “Development of life cycle engineering and construction method for global competitiveness upgrade of cable bridge (Project number : 18SCIP-B119960-03)”.

## References

1. AASHTO (2012), "LRFD Bridge Design Specifications", 6th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
2. Holl, D. L. (1940), "Stress transmission in earths" *Proc., Highway Research Board*, Washington, D.C., 20, pp.709-721.
3. Kim, J. S. and Barker, R. M. (2002), "Effect of live load surcharge on retaining walls and abutments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.10, pp.803-813.
4. Lee, S. D. (2016), "Earth pressure theory", CIR, pp.68-98. (in Korean)
5. MOCT (2003a), Standard Drawing of Road Wall, MOCT (Ministry of Construction and Transportation). (in Korean)
6. MOCT (2003b), Comprehensive Report on Standard Drawing of Road Wall, MOCT (Ministry of Construction and Transportation). (in Korean)
7. MLTMA (2012), Standard of Concrete and Structure, MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (in Korean)
8. MOLIT (2016a), Research on Maintenance of Retaining Wall for Reasonable Road, MOLIT (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (in Korean)
9. MOLIT (2016b), Standard of Tunnel Road, MOLIT (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (in Korean)
10. Plaxis VB (2017), Materials Model Manual, PLAXIS Corp., Netherlands.
11. Poulos, H. G. and Davis, E. G. (1974). "Elastic solutions for soil and rock mechanics", Wiley, New York.