

# 옹벽에 작용하는 수평토압 특성 분석 및 합리적인 등가상재하중 높이 산정

## Calculation of Reasonable Equivalent Uniform Pressure Height and Lateral Earth Pressure Characteristics of Retaining Structures

이기철<sup>1</sup>, 정문경<sup>2</sup>, 서승환<sup>3</sup>, 김동욱<sup>4\*</sup>

Kicheol Lee<sup>1</sup>, Moon-Kyung Chung<sup>2</sup>, Seunghwan Seo<sup>3</sup>, Dongwook Kim<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Graduate Student, Dept of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Associate Professor, Dept of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea, email:

### ABSTRACT

For retaining wall designs, horizontal earth pressure induced by traffic loads over the walls is calculated based on equivalent uniform pressure height. The AASHTO LRFD design standards propose equivalent uniform pressure height of traffic loads; however, the equivalent uniform pressure height is calibrated using the US standard trucks. As the domestic standard trucks are different from the US standard trucks, in this study, new domestic equivalent uniform pressure height is proposed using the Boussinesq theory varying vehicle directions, Poisson's ratios of pavement layers, and retaining wall height. The proposed equivalent uniform pressure heights are generally higher than those proposed by the AASHTO design standards because the axle loads and their densities of two domestic standard trucks are higher than those of the US standard trucks. The most highest equivalent uniform pressure height was found for traffic direction perpendicular to longitudinal direction of retaining wall.

### 요 지

옹벽 설계에서는 차량하중에 의해 유발되는 수평토압을 등가상재하중 높이를 토대로 계산한다. 미국 AASHTO의 LRFD 설계 기준은 미국 표준트럭을 대상으로 선정되었기 때문에 국내의 표준트럭과 부합하는 새로운 등가상재하중 높이를 산정 할 필요가 있다. 본 연구에서는 미국 표준트럭과 다른 국내 표준트럭의 특성을 반영하고 차량주행방향, 포장층의 포아송비, 옹벽높이를 고려하여 Boussinesq 이론에 근거한 국내 등가상재하중 높이를 제안하였다. 국내 표준트럭의 축하중과 하중 밀도가 미국 표준트럭보다 높기 때문에, 본 연구에서는 제안한 등가상재하중 높이는 미국 설계 기준에 제안된 등가상재하중 높이 보다 큰 것을 확인하였다. 가장 높은 등가상재하중 높이는 차량주행방향이 옹벽길이방향과 직교할 때로 확인되었다.

**Keywords** : Limit state design, Retaining wall, Equivalent uniform pressure height, Boussinesq theory, Domestic standard truck

## 1. 서 론

최근 경험적으로 결정된 안전율을 사용하는 기존 허용

응력설계법을 탈피하여 목표과괴확률에 근거한 계수를 사용하는 한계상태설계법의 설계가 증가하고 있다. LRFD (Load and Resistance Factor Design)는 구조 설계에서 정확한 특성을 가진 자원을 사용하여 안정적인 방식으로 설계 될 수 있지만 다양한 특성과 가변성을 가진 토양을 사용하여 지반 설계를 적용하는 것은 어렵다(Goble, 1999).

Received 21 Nov. 2019, Revised 28 Nov. 2019, Accepted 2 Dec. 2019

\*Corresponding author

Tel: +82-32-835-8461; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: [wookdong2@gmail.com](mailto:wookdong2@gmail.com) (D. Kim)

따라서, 지질 공학 설계에 LRFD의 적용은 다양한 연구자들에 의해 수행되었으며, 이중에서도 국제 표준화기구(ISO)는 국제 지반 구조표준(ISO 2394, 1998)을 한계 상태 설계 방법으로 채택하였다. 대표적인 지반구조물인 옹벽에서도 그 쓰임새는 증가되고 있는 추세이며, 교통하중에 의해 작용하는 수평토압은 현재 미국의 AASHTO 설계 기준에 준하여 사용되고 있다. 미국 AASHTO(2018)에서는 교통하중에 의해 유발된 토압을 옹벽 되메움토의 단위 중량의 배수인 등가상재하중 높이인  $h_{eq}$ 를 곱한 값으로 제시하고 있다. 등가상재하중 높이인  $h_{eq}$ 는 토압하중계수라고도 불리우며, 교통하중이 옹벽에 작용하는 하중 중에 가장 불확실성이 크기 때문에 옹벽의 한계상태설계법에서  $h_{eq}$ 값의 결정 및 이의 불확실성을 정량적으로 평가하는 것은 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

하지만, 국내 설계 기준에는  $h_{eq}$ 를 구하는 규정이 없고 미국 AASHTO(2012)에서 사용되는  $h_{eq}$ 를 사용하기에는 국내 표준트럭의 재원이 달라 어려움이 따른다. 따라서, 국내 실정에 맞도록 MOLIT(2016)에서 지정한 표준트럭 재원에 맞는  $h_{eq}$ 를 제안해야 한다.

Lee et al.(2017)은 옹벽 상단 교통하중 분포에 따른 옹벽의 수평 토압에 대한 연구를 수행하였다. 교통하중과 옹벽 내측벽 사이의 이격거리가 옹벽에 작용하는 수평 하중에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, AASHTO(2018)에서는 높이가 H인 옹벽에 대해서는 옹벽 내측벽에서 이격거리가 0.5H 이내에 존재하는 교통하중만을 고려하면 된다고 하였는데, Boussinesq 이론(Boussinesq, 1885)에 따르면 이격거리가 0.5H를 초과하는 곳의 교통하중도 무시하지 못할 정도의 수평하중을 유발하는 것을 확인하였다. Kim et al.(2018)은 국내 표준트럭하중에 따라 등가상재하중 높이를 산정하였다. 수치해석 프로그램인 Plaxis 2D를 사용하였으며 옹벽의 높이가 ( $H = 3.0\text{ m}$ ) > ( $H = 1.5\text{ m}$ ) > ( $H = 6.0\text{ m}$ )의 순의  $h_{eq}$ 를 확인하였다. 하지만 수행되었던 국내표준트럭하중을 이용한 도로 옹벽의 등가상재하중 높이 산정 연구는 수치해석적으로 진행되었을 뿐 아니라 이차원(2-dimensional)으로 설정하였고, 차량 배치에 따른 다양한 케이스를 적용하지 않아 직접적으로 등가상재하중 높이를 사용하기에는 어려움이 따른다.

따라서 본 연구에서는 이론적으로 가상의 3차원(3-dimensional)을 설정하고 등가상재하중 높이를 산정하였다. 사용된 이론은 Boussinesq 이론(Boussinesq, 1885)으로 집중하중 및 등분포 하중이 지표면에 적용되었을 때 지

반 내 임의의 점에서 유발되는 토압을 표현 할 수 있다. 해석 케이스는 차량 진행방향이 옹벽 길이방향과 평행할 경우와 직교할 경우로 크게 구분하며, 세부적으로 평행할 경우엔 옹벽과의 이격거리를 0m, 0.3m로 구분하였다. 직교 방향인 경우에는 국내표준트럭의 바퀴 축을 대상으로 3가지로 구분하였다.

## 2. 수평토압 및 등가상재하중 높이의 현행 설계 기준

### 2.1 도로 옹벽 설계 기준

도로 하부 구조로서 사용되는 옹벽은 크게 중력식 옹벽, 반중력식 옹벽, 보강토 옹벽, 캔틸레버 옹벽으로 구분된다. 옹벽의 전체 안정성은 한계평형방법을 사용하여 평가하며 지지력, 전도와 같은 거동에 대해 충분한 안정성을 갖도록 설계해야 한다. Fig. 1은 토질기초에 지지된 벽체의 지지력 기준을 나타내며, 가해진 힘들에 대해 평형을 이루어야 옹벽은 안전성을 확보하게 된다(MOLIT, 2016).

여기서,  $b$ 는 응력 전달 높이,  $B$ 는 옹벽 기초의 폭,  $H$ 는 옹벽의 높이,  $e$ 는 기초의 중심선으로부터의 하중의 편심,  $g$ 는 중력가속도,  $\beta$ 는 벽체 배면지반의 경사도,  $W_1$ 는 벽체 몸체 무게,  $W_2$ 는 벽체 바닥부의 무게,  $\nu$ 는 흙의 밀도,  $h$ 는 등가상재높이,  $F$ 는 주동 토압의 합력,  $V_1$ 는 흙 상재하중을 배제한 벽체 뒷굽에 의해 전달되는 흙 하중,  $V_2$ 는 벽체 뒷굽 직상부의 흙 상재하중,  $C$ 는 편심 위치이다.

Fig. 1에는 나타나 있지 않지만, 옹벽 배면이 도로로 사

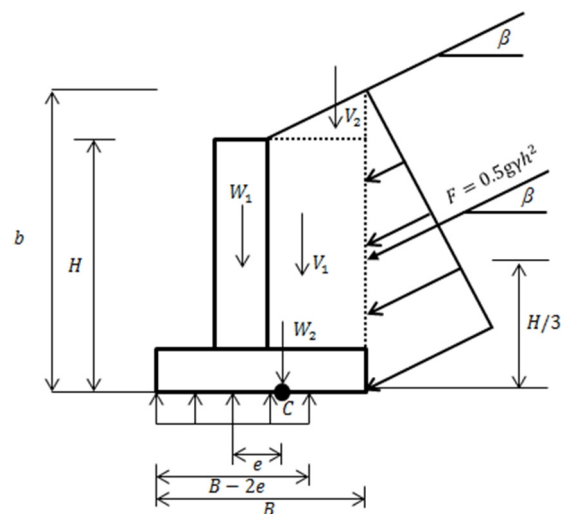


Fig. 1. Load on retaining wall modified after MOLIT (2016)

용되는 경우, 현재 국내에서 적용되는 옹벽 배면 뒤메움토를 통하여 전달되는 교통하중은 균등 상재하중으로 가정하는데 활하중 상재응력은 600mm 두께의 토체보다 크도록 해야 한다. 교통하중은 크기와 작용 위치에 따라 옹벽에 가해지는 토압이 다르기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다(Walls, 2014). 옹벽 내측 배면과 가까이 하중이 작용할수록 큰 수평토압과 모멘트가 전달되는데, Withiam (2003)은 옹벽 배면과 하중의 이격거리가 옹벽 벽체 높이의 1/2보다 이하일 경우 그 영향 정도가 크며, 그 이상의 이격거리에서는 옹벽에 영향을 미치지 못한다고 하였다.

## 2.2 AASHTO 교량 설계 기준에 따른 등가상재하중 높이

미국 AASHTO(2012)의 교량설계 기준에 의하면, 옹벽 설계 시 고려되는 교통하중을 등가상재하중으로 가정한다. 가정한 등가상재하중은 옹벽 배면 뒤메움토의 단위중량의 배수로 표시하고, 교통 활하중으로 인한 수평토압의 증가는 식 (1)과 같다.

$$\sigma_h = K_s \gamma_s' h_{eq} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_h$ 는 등가상재하중으로 가정된 교통하중에 의한 수평토압,  $K_s$ 는 토압계수(활성 토압조건인 경우,  $K_s$ 는  $K_a$ 로 고려되고, 정지 토압조건인 경우  $K_s$ 는  $K_0$ 로 고려한다),  $\gamma_s'$ 는 흙의 유효단위중량,  $h_{eq}$ 는 등가상재하중높이(교통 활하중 설계를 위한 옹벽 뒤메움토의 등가 높이)이다.

1994년까지는 미국 AASHTO에서  $h_{eq}$ 를 산정할 때, 옹벽이 움직이지 않는 상태(non yielding wall)로 간주하여 정지토압으로 가정을 하고 Boussinesq 반무한 탄성지반법 및 0.5의 포아송비( $\nu$ )를 사용하여 다소 보수적인 접근을 하였다. 이는 포아송비가 증가할수록 정지토압계수가 증가하기 때문이다. 옹벽과 같이 평면변형을 조건(plane strain condition)으로 가정할 수 있는 구조물의 정지토압 계수  $K_0$ 는 식 (2)를 이용하여 지반의 포아송비인  $\nu$ 로 구할 수 있다.

$$K_0 = \nu / (1 - \nu) \quad (2)$$

기존 AASHTO(1994)에서 제시한 보수적인 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 는 Table 1과 같다. 하지만 기존 설계법에서

Table 1. Equivalent uniform pressure height for traffic load (AASHTO, 1994)

Height of retaining wall (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)
< 1.5	1.70
3.0	1.20
6.0	0.76
> 9.0	0.61

Table 2. Modified equivalent uniform pressure height considering to distance between retaining wall and vehicle load (AASHTO, 2002)

Height of retaining wall (m)	Distance between retaining wall and vehicle load, d (m)	
	0	1
1.5	$h_{eq} = 1.52$	$h_{eq} = 0.61$
3.0	$h_{eq} = 1.07$	$h_{eq} = 0.61$
> 6.1	$h_{eq} = 0.61$	$h_{eq} = 0.61$

Table 3. Equivalent uniform pressure height of abutment (AASHTO, 2002)

Height of abutment (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)
1.5	1.22
3.0	0.91
6.1	0.61

등가상재하중 높이는 과도하게 측정되었기 때문에 2002년 이후의 AASHTO 교량설계 기준에서는 포아송비를 합리적으로 조정하여 다소 현실적인 값으로 수정하였다 (Tables 2와 3).

## 3. 차량 하중 배치에 따른 해석 케이스 설정

### 3.1 차량 하중

미국에서는 표준 트럭하중을 AASHTO(2018)에서 규정하여 사용한다. 미국 표준트럭(HL-93)은 3개의 축하중으로 구성되어 있으며 앞바퀴부터 35.6kN, 142.3kN, 142.3kN이며 각각의 축하중 거리는 4.2m 및 4.2~9.0m이다(Fig. 2(a)). 국내의 경우 도로교 설계 기준(MOLIT, 2016)에 따라 4개의 축하중으로 구성된 표준트럭(KL-510)을 사용하며 구성은 Fig. 2(b)와 같다. 이때 표준트럭하중은 재하차로 내에서 횡 방향으로 3m의 폭을 점유하는 것으로 가정하고, 이를 표준차로하중(lane load)라고 한다.

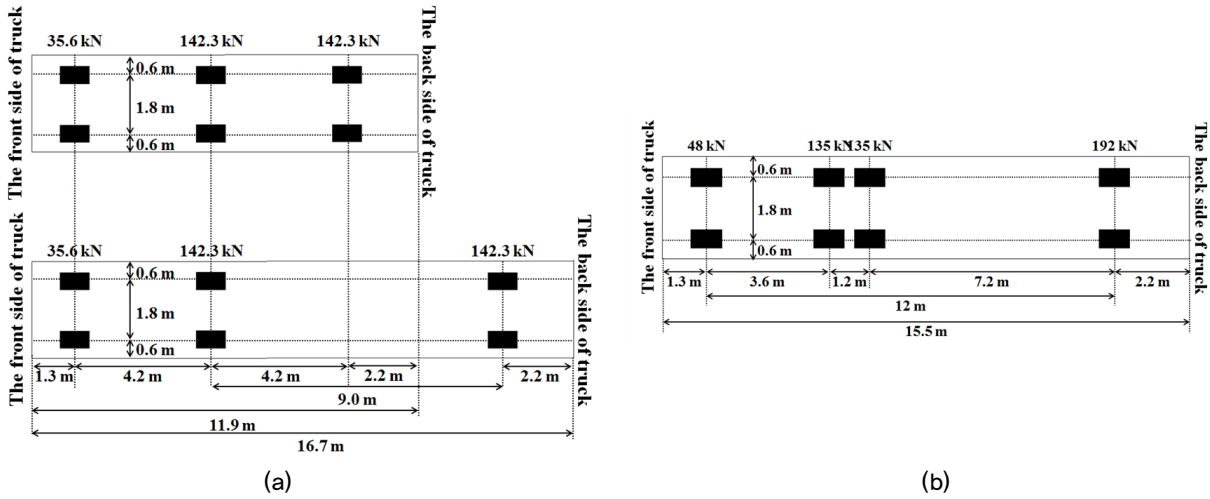


Fig. 2. Axle loads' locations of standard trucks of (a) AASHTO (2018) of the US and (b) MOLIT (2016) of Korea

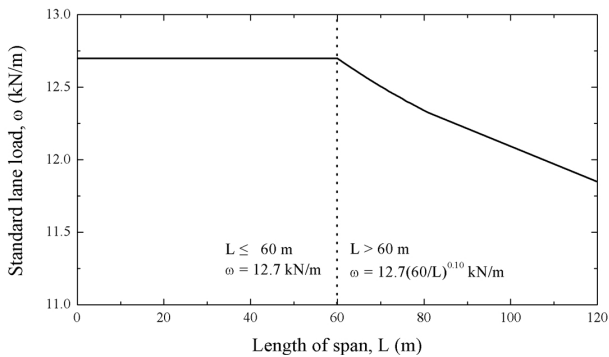


Fig. 3. Standard lane load with length of span (MOLIT, 2016)

도로 설계에 있어서 차량활하중의 기호는 LL이며, 교량이나 이에 부수하는 일반구조물의 노면에 작용하는 차량 활하중은 표준트럭축하중과 표준차로하중으로 구분된다. 표준차로하중은 종방향으로 균등하게 분포한 것으로 가정하며 Fig. 3과 같다. 여기서 L은 표준차로하중이 재하되는 부분의 지간(교량에서 교각 또는 교대 위의 상부 구조를 지탱하고 있는 받침점 사이의 다리 도리 방향의 거리)으로 60m를 기준으로 구분되어 계산된다. 60m 이상의 지간일 경우 표준차로하중은 점차 감소하는 경향을 보인다(MOLIT, 2016).

차량활하중의 적용은 앞서 언급한 바와 같이 표준트럭축하중과 표준차로하중이 있다. 도로교 설계 기준에 따라 최대 하중은 (1) “표준트럭축하중”, (2) “표준트럭축하중의 75% 및 표준차로하중의 합” 중 큰 값이 사용된다. 이때 최대 하중효과에 영향을 주지 않는 바퀴는 무시하며, 재하차로와 각 차로에 재하되는 3.0m 차량 폭은 최대 하중영향을 가지도록 배치되어야 한다. 이때 표준차로하중은 Kang and Kil(2015)에서 4.233kPa으로 제시하였으며,

“표준트럭축하중의 75% 및 표준차로하중의 합”에 대한 해석 시 표준차로하중 값으로 사용하였다.

### 3.2 차량 하중 배치

차량 진행방향과 옹벽 길이방향의 조합에 따라 차량배치가 달라지기 때문에 차량 진행방향이 옹벽 길이방향이 평행한 경우와 차량 진행방향이 옹벽 길이방향이 직교한 경우로 나누어 분석을 해야 한다. 옹벽 되메움도 상단에 아스팔트 포장층을 설치할 경우 차도부분에 표준트럭하중이 재하된다. 표준트럭하중은 옹벽에 수평하게 차량이 위치할 경우 표준트럭을 옹벽에 작용하는 수평토크압이 최대이도록 배치해야 한다. AASHTO(2018)에서는 앞 차량의 마지막 뒤 하중축과 바로 뒤 차량의 앞 하중축 사이의 이격거리를 15m로 규정하고 있다. 본 연구에서도 같은 기준으로 차량을 배치하였다(Fig. 4).

차량 진행방향이 옹벽 길이방향이 평행한 경우에 차량하중은 옹벽 내측으로부터 이격거리 0.3m인 지점에 작용한다. 도로교 설계 기준(MOLIT, 2016)에 의거하여 표준트럭의 최외측 위치는 옹벽 차도부분의 단부로부터 0.3m가 되어야 하며, 이는 옹벽 내측 이격거리 0.3m 이내에서는 옹벽 배면 상단 하중이 옹벽면에 작용하는 수평하중에 미치는 영향이 크고 민감하기 때문이다. 또한 이격거리가 없는 경우도 해석 케이스로 설정하여 실제 설계 기준과의 비교를 수행하였다(Fig. 4).

차량 진행방향과 옹벽 길이방향이 직교하는 경우에는 옹벽면을 향해 차량 전면부가 위치하는 경우와 차량 후면부가 위치하는 경우를 모두 고려해야 한다. 차량 중심부의

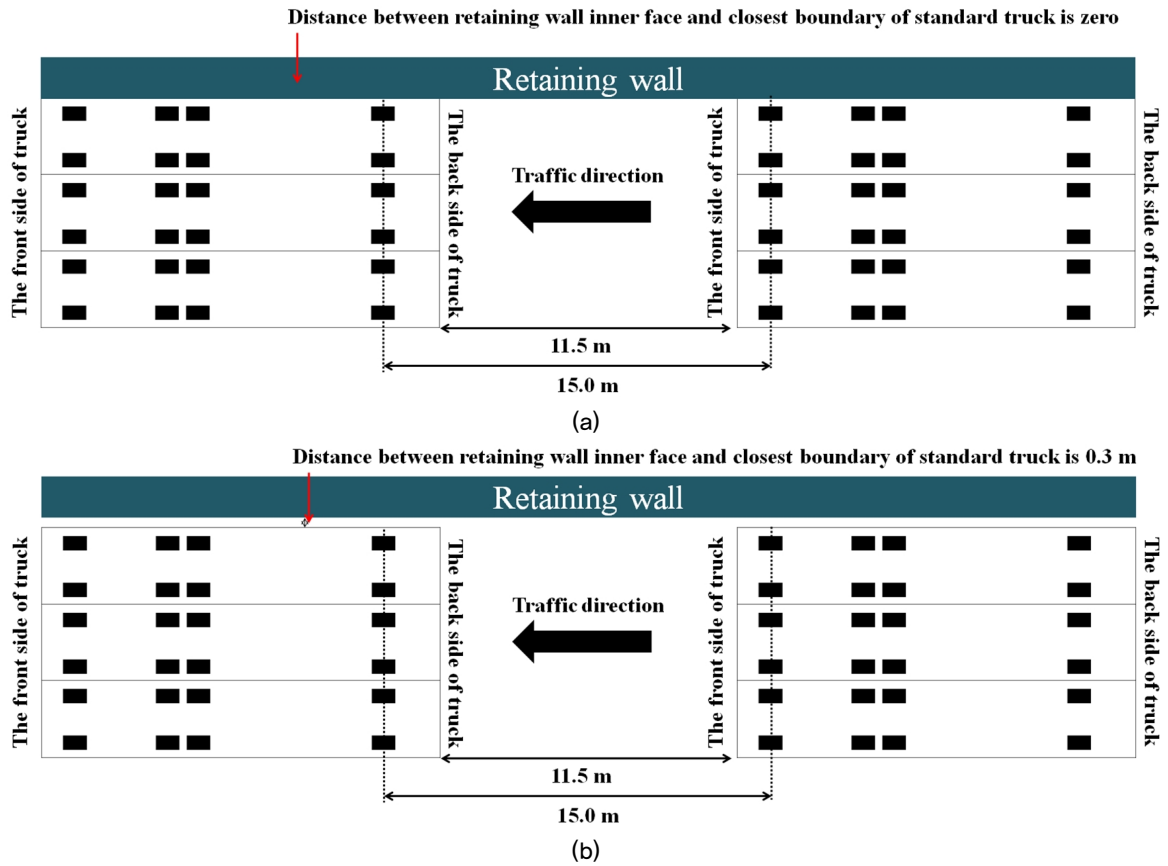


Fig. 4. Analysis cases when traffic direction is parallel to the retaining wall length direction with distance between retaining wall inner face and closest boundary of standard truck of (a) zero (Case 1) and (b) 0.3 m (Case 2)

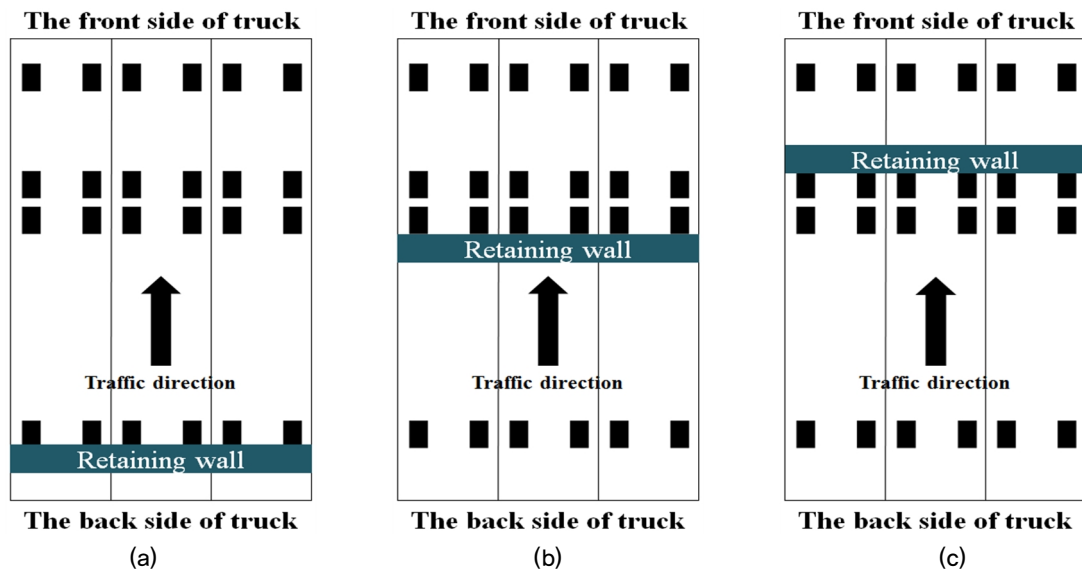


Fig. 5. Analysis cases when traffic direction is perpendicular to the retaining wall length direction; (a) Case 3-1, (b) Case 3-2, (c) Case 3-3

두 개의 135kN 축하중이 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되지만, 전면부의 축하중(48kN)은 차량 후면부의 축하중(192kN)의 영향도 고려해야 한다. 또한 차량 진행방향과 옹벽 길이방향이 직교하는 경우에는 차량하중축의 위

치를 변화시켜가며 옹벽의 불안전성을 가장 크게 유발하는 차량위치를 찾아야 한다. 이를 위하여 3가지 케이스를 설정하였으며 이에 대한 해석을 수행하였다(Fig. 5).

## 4. 합리적인 등가상재하중 높이의 산정 및 제한

### 4.1 등가상재하중 높이 산정 방법

합리적인  $h_{eq}$ 를 산정하기 위해 차량활하중(표준트럭하중 및 표준차로하중)이 작용할 경우 옹벽에 미치는 하중을 계산하고자 한다. 이를 위해 Boussinesq 이론(Boussinesq, 1885)을 적용하였으며, 해당 이론에 따라 지반 및 상부 포장층을 이상적인 탄성체 및 등방성 매체로(isotropic) 가정하였다.

표준트럭하중은 각 바퀴 축에 작용하는 집중하중으로 Fig. 6과 같이 상부에 한 점에 P라는 하중이 지표면에 연직으로 작용된다. 옹벽면은 y축과 z축이 이루는 면이라고 가정하였을 때 P점과 x방향으로 "x"만큼, y방향으로 "y"만큼 떨어진 곳에 깊이 "z" 점에 위치한 옹벽면에 작용하는 수평력은  $\sigma_x$ 와 같고, 그 크기는 식 (3)과 같다.

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

여기서,  $R = \sqrt{x^2+y^2+z^2} = \sqrt{r^2+z^2}$ ,  $r = \sqrt{x^2+y^2}$ , x, y, z는 지표면 위에 작용하는 P 하중의 위치로부터 Fig. 6에 나타난 축 방향에 대한 상대 이격거리이며,  $\nu$  = 포아송비이다.

표준차로하중(lane load)은 무한등분포 하중으로 고려하며, 옹벽 길이방향과 차량 진행방향의 조건에 따라 식 (4)와 식 (5)를 사용한다. 식 (4)는 Fig. 7(a)와 같이 옹벽 길이방향과 차량 진행방향이 평행한 조건에서의 차선하중이

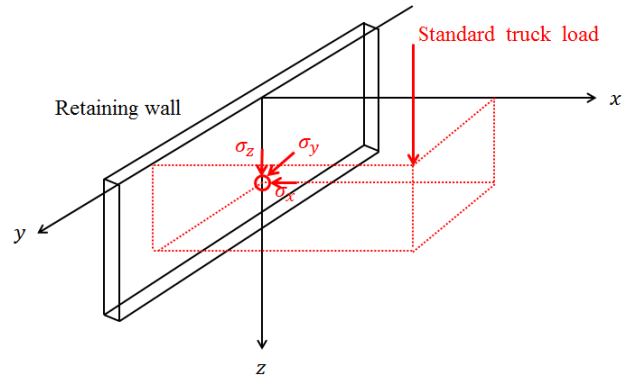


Fig. 6. Stresses in x, y, and z direction on retaining wall induced by standard truck axle load

벽체의 위치에 따라 작용시키는 응력을 산정에 사용되며, 식 (5)은 Fig. 7(b)와 같이 옹벽의 길이방향과 차량의 진행방향이 직교하는 조건에서의 차선하중이 벽체의 위치에 따라 작용시키는 응력을 산정 할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{p}{2\pi} [\alpha - \sin\alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (4)$$

$$\sigma_x = \frac{2vp\alpha}{\pi} \quad (5)$$

여기서, p는 단위길이당 하중, a는 단위길이당 하중 p와 옹벽 벽체가 이루는 각도,  $\delta$ 는 옹벽 벽체와 단위길이당 하중 p의 연직 각도이다.

위에서 구한 수평하중(식 (3)~(5))에 대해 전체적으로 옹벽에 작용하는 수평합력  $F_L$ 은 Boussinesq 이론에 따라 식 (6)과 같다.

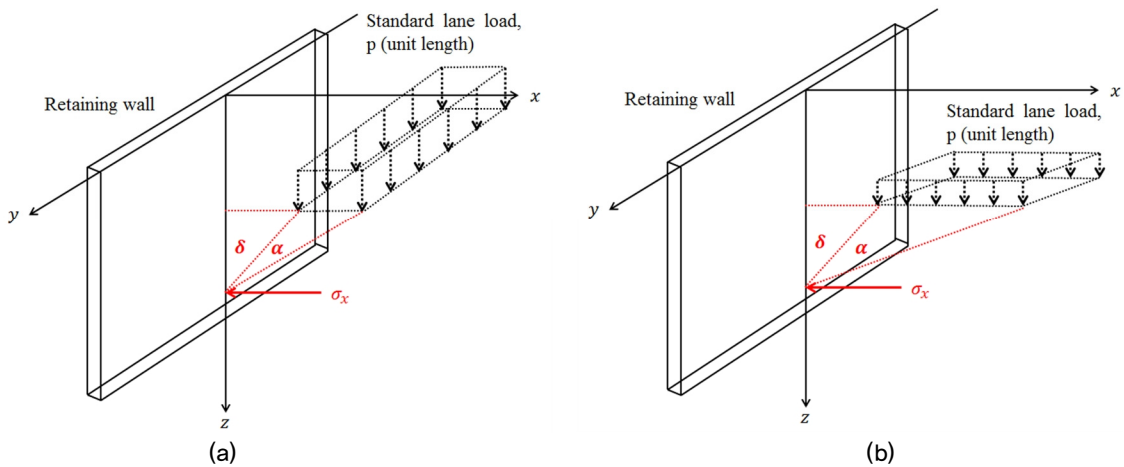


Fig. 7. The horizontal stress on retaining wall induced by standard lane load when traffic direction is (a) parallel to the retaining wall length direction and (b) perpendicular to the retaining wall length direction

$$F_L = \int_{z=0}^{z=H} \int_{y=-\infty}^{y=\infty} \sigma_x dy dz \quad (6)$$

등가상재하중은 옹벽의 수평활동과 전도에 영향을 미치며 각각의 조건에 대하여 등가상재하중 높이는 다르게 계산된다. 식 (7)은 옹벽의 수평활동(미끌림)에 대해 등가수평력이 작용하는 등가상재하중 높이이며, 식 (8)은 옹벽의 전도에 대해 등가모멘트가 작용하는 등가상재하중 높이를 의미한다. 두 가지 조건에 따라 산정된 등가상재하중 높이 중 최대값이 실제 설계에 사용될 수 있는 합리적인 등가상재하중 높이  $h_{eq}$  라고 할 수 있다. 이렇게 산정된 수평활동에 대한  $h_{eq}$ 와 전도에 대한  $h_{eq}$  중 높은 값을 최종 설계값인  $h_{eq}$ 로 결정하였다.

$$h_{eq} = \frac{F_L}{K_0 \gamma H} \quad (7)$$

$$h_{eq} = \frac{F_L e_z}{0.5 K_0 \gamma H^2} \quad (8)$$

여기서,  $F_L$ 은 수평합력,  $e_z$ 는 수평합력의 작용 위치,  $H$ 는 옹벽 높이에 해당하는 되메움토의 높이이다. 이때 옹벽 배면에 위치한 되메움토는 포장층과 되메움층으로 나뉘는 2 layer system으로 고려해야 하기 때문에 되메움토의 포아송비와 단위중량을 합리적인 범위 내에서 고려해야 한다.

#### 4.2 차량 진행방향이 옹벽 길이방향과 평행할 경우 등가상재하중 높이 산정(Cases 1과 2)

차량 진행방향이 옹벽 길이방향과 평행하고 이격거리가 0m인 Case 1의 해석 결과는 Table 4와 같다. 교통하중은 (1) “표준트럭하중 100 %”와 (2) “표준트럭하중 75%

+ 표준차로하중”으로 구분하였으며, 2 layer system에 따라 상부 포장층의 포아송비( $v_1$ )와 되메움토의 포아송비( $v_2$ )를 변화시켰다. 또한 옹벽의 높이도 1.0m~6.0m로 조절하여 모든 변수에 대한 등가상재하중 높이를 산출하였다.

교통하중은 (1) “표준트럭하중 100 %” 보다 (2) “표준트럭하중 75% + 표준차로하중”에서 등가상재하중 높이는 증가하는 경향을 보여 (2) “표준트럭하중 75% + 표준차로하중”을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 옹벽의 높이는 높을수록 등가상재하중 높이가 감소하였고 이는 전체적인 안정성이 옹벽의 높이가 높을수록 하단에 위치함을 의미한다. 포아송비의 영향으로 상부 아스팔트 포장층의 포아송비( $v_1$ )와 되메움토의 포아송비( $v_2$ )는 값이 증가할수록 등가상재하중 높이가 감소하였다. 또한 상부 아스팔트 포장층의 포아송비( $v_1$ )보다 되메움토의 포아송비( $v_2$ )의 변화에 따라 등가상재하중 높이의 증감폭은 크게 나타났으며 이에 따라 되메움토의 포아송비( $v_2$ )의 변화가 보다 큰 영향을 미침을 파악하였다.

차량 진행방향이 옹벽 길이방향과 평행하고 이격거리가 0.3m인 Case 2의 해석 결과는 Table 5와 같다. Case 1의 결과와 마찬가지로 등가상재하중 높이는 (2) 표준트럭하중 75% + 표준차로하중에서, 옹벽의 높이가 낮을수록 상부 아스팔트 포장층의 포아송비( $v_1$ )와 되메움토의 포아송비( $v_2$ )가 작을수록 큰 값을 보였다. Case 1과의 비교에서는 대체적으로 Case 2가 낮은 값을 보였으며 이를 토대로 옹벽 배면과 차량간의 이격거리를 설정할수록 더 안전한 등가상재하중 높이를 가지는 것으로 나타났다.

#### 4.3 차량 진행방향이 옹벽 길이방향과 직교할 경우 등가상재하중 높이 산정(Case 3)

차량 진행방향이 옹벽 길이방향과 직교하는 Case 3의 해석 결과는 Tables 6~8과 같다. 차량 진행방향이 옹벽

Table 4. Equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is parallel to the retaining wall length direction with zero distance between retaining wall inner face and closest boundary of standard truck (Case 1)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)									
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$		$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	
	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load
1.0	0.77	1.46	0.28	0.55	0.42	0.84	0.69	1.57	0.26	0.54
1.5	0.74	1.42	0.27	0.53	0.40	0.81	0.67	1.54	0.25	0.51
3.0	0.64	1.29	0.24	0.48	0.36	0.74	0.61	1.42	0.23	0.45
6.0	0.54	1.10	0.20	0.41	0.30	0.63	0.51	1.22	0.19	0.37

Table 5. Equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is parallel to the retaining wall length direction with 0.3 m distance between retaining wall inner face and closest boundary of standard truck (Case 2)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)									
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$		$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	
	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load
1.0	0.60	1.16	0.27	0.53	0.33	0.66	0.55	1.26	0.20	0.41
1.5	0.59	1.17	0.25	0.50	0.33	0.67	0.56	1.29	0.21	0.43
3.0	0.56	1.12	0.21	0.44	0.31	0.65	0.53	1.23	0.20	0.41
6.0	0.49	1.02	0.18	0.38	0.28	0.59	0.47	1.12	0.18	0.38

Table 6. Equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is perpendicular to the retaining wall length direction (Case 3-1)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)									
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$		$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	
	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load
1.0	5.29	4.39	1.76	1.51	2.06	1.96	2.38	3.28	0.67	0.91
1.5	4.04	3.45	1.28	1.21	1.58	1.61	2.02	2.80	0.52	0.80
3.0	2.53	2.35	0.75	0.89	1.01	1.20	1.49	2.14	0.36	0.69
6.0	1.66	1.71	0.49	0.72	0.71	0.97	1.13	1.71	0.29	0.62

Table 7. Equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is perpendicular to the retaining wall length direction (Case 3-2)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)									
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$		$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	
	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load
1.0	4.81	4.11	1.66	1.49	2.06	2.03	2.67	3.67	0.86	1.09
1.5	4.03	3.52	1.36	1.31	1.79	1.82	2.55	3.40	0.81	1.04
3.0	2.83	2.58	0.93	1.02	1.32	1.43	2.06	2.71	0.65	0.89
6.0	1.81	1.79	0.59	0.77	0.87	1.06	1.42	1.94	0.44	0.70

Table 8. Equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is perpendicular to the retaining wall length direction (Case 3-3)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)									
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$		$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.2$		$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	
	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load	100 % Axial load	75 % Axial load + Lane load
1.0	4.88	4.16	1.68	1.51	2.09	2.05	2.72	3.72	0.87	1.10
1.5	4.09	3.57	1.37	1.32	1.82	1.84	2.60	3.45	0.81	1.05
3.0	2.89	2.64	0.95	1.04	1.35	1.46	2.12	2.77	0.66	0.90
6.0	1.91	1.88	0.68	0.90	0.92	1.11	1.51	2.05	0.48	0.73



Table 9. The suggested values of equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is parallel to the retaining wall length direction with zero distance between retaining wall inner face and closest boundary of standard truck (Case 1)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)				
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$	$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$	$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	Maximum value	Final suggest value
1.5	0.53	0.81	0.51	0.81	0.85
3.0	0.48	0.74	0.45	0.74	0.75
6.0	0.41	0.63	0.37	0.63	0.70

Table 10. The suggested values of equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is parallel to the retaining wall length direction with 0.3m distance between retaining wall inner face and closest boundary of standard truck (Case 2)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)				
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$	$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$	$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	Maximum value	Final suggest value
1.5	0.50	0.67	0.43	0.67	0.70
3.0	0.44	0.65	0.41	0.65	0.65
6.0	0.38	0.59	0.38	0.59	0.60

Table 11. The suggested values of equivalent uniform pressure height  $h_{eq}$  when traffic direction is perpendicular to the retaining wall length direction (Case 3)

Height of retaining wall, H (m)	Equivalent uniform pressure height, $h_{eq}$ (m)				
	$v_1 = 0.2$ $v_2 = 0.4$	$v_1 = 0.3$ $v_2 = 0.3$	$v_1 = 0.4$ $v_2 = 0.4$	Maximum value	Final suggest value
1.5	1.37	1.84	1.05	1.84	1.85
3.0	1.04	1.46	0.9	1.46	1.50
6.0	0.9	1.11	0.73	1.11	1.15

길이방향과 평행한 Cases 1과 2의 비교하여 등가상재하중 높이는 비슷한 경향을 보였다. 하지만 상부 아스팔트 포장층의 포아송비( $v_1$ )가 작을 경우 (1) 표준트럭하중 100%가 (2) 표준트럭하중 75% + 표준차로하중 보다 높은 등가상재하중 높이를 가졌다. 즉, 직교 방향에서는 아스팔트 포장층의 압축성이 클 경우 표준차로하중에 큰 영향을 받는 것을 의미한다. Case 3의 3가지 유형에서는 옹벽의 위치가 차량 뒷축에 있을 경우 낮은 등가상재하중 높이를 가졌으며, 트럭 앞축으로 옹벽이 위치할 경우 큰 등가상재하중 높이를 가졌다.

#### 4.4 국내 표준트럭 하중 및 차량 진행방향에 따른 합리적인 등가상재하중 높이 제안

Cases 1, 2, 3에 대하여 포장층 포아송비  $v_1$ (0.2, 0.3, 0.4)과 뒤통층 포아송비  $v_2$ (0.2, 0.3, 0.4)를 변화시켜가며 최종 등가상재하중 높이를 결정하였다. (1) 차량축하중

100%, (2) 차량축하중 75%와 차선하중 4.233kPa를 조합하여 구한 등가상재하중 높이를 산정하였으며, 이러한 조건 (1)과 (2)에서 구한 등가상재하중 높이 중 가장 높은 값을 최종 등가상재하중 높이로 제안하였다. 추세를 분석하여 위하여 가정된 비현실적인 포장층 포아송비  $v_1$ 과 뒤통층 포아송비  $v_2$  조합인 “ $v_1 = 0.2, v_2 = 0.2$ ”과 “ $v_1 = 0.4, v_2 = 0.2$ ”는 제안값에서 제외하였다. 최종 제안 값은 최대값에 비해 약간 상향된 값으로 안전율 증가 및 단위의 현실성을 반영하기 위해 0.05 단위로 올림하여 제안하였다.

Tables 9~11에 따라 교통하중이 도로에 작용하였을 때 본 연구에서 제안하는 각 케이스별 최종 등가상재하중 높이는 Fig. 8과 같다. 옹벽의 높이와 상관없이 제안된 최종 등가상재하중 높이는 차량주행방향이 옹벽길이방향과 직교할 경우 큰 값을 가졌으며, 차량주행방향이 옹벽길이방향에 평행할 경우 이격거리가 있는 Case 2가 이격거리가 없는 Case 1보다 작은 값을 가졌다.

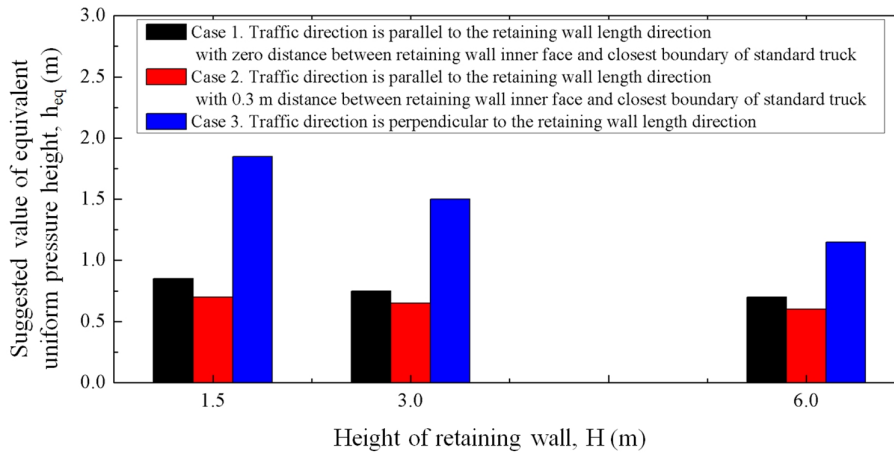


Fig. 8. Suggested value of equivalent uniform pressure height with height of retaining wall and each cases

## 5. 결론

미국 AASHTO의 경우에는 표준트럭이 우리나라 표준트럭보다 축하중이 작고 차량면접에 비하여 축하중 밀도가 적다. 따라서 우리나라 표준트럭이 더 큰 하중을 유발할 것이며, 이에 교통하중으로 인해 작용하는 옹벽에 수평 합력은 더 커진다. 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 는 옹벽의 높이와 지층의 포아송비에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 상부 포장층 30cm의 포아송비와 하부 되메움토의 포아송비의 조합을 다르게 하며 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 를 계산하였으며 하중 재하 케이스별 등가상재하중 높이를 제안하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 하부 되메움토는 양질의 토사 또는 유용토인 경우가 대부분이어서, 하부 되메움층의 포아송비를 0.3 미만일 가능성을 아주 적다. 따라서 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 를 제안할 때는 하부 되메움층의 포아송비를 0.3 미만인, 비현실적인 포장층 포아송비( $v_1$ )과 되메움층 포아송비( $v_2$ ) 조합(“ $v_1 = 0.2, v_2 = 0.2$ ”과 “ $v_1 = 0.4, v_2 = 0.2$ ”)의 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 는 제안값에서 제외하였다.
- (2) 우리나라 트럭하중의 경우, 미국 AASHTO 트럭하중에 비하여 큰 값을 가지고, 축의 개수가 많으며, 중간에 간격이 좁은 2개의 축하중이 있어 옹벽에 작용하는 수평력이 미국보다 큰 것으로 계산되었다.
- (3) 본 연구에서는 옹벽 높이 1.0m에 대한 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 도 계산하였지만, 이는 옹벽 높이에 따른 등가상재하중 높이  $h_{eq}$  변화 추이를 보기 위한 것이다. 등

가상재하중 높이  $h_{eq}$  변화 추이에서 볼 수 있듯이, 옹벽 높이가 작을수록 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 는 증가한다. 실제로 옹벽 높이가 1.5m 미만인 경우는 많지 않겠지만, 옹벽높이가 1.5m 미만일 경우에는 등가상재하중 높이  $h_{eq}$ 를 결정하는데 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

- (4) 가장 높은 등가상재하중 높이는 차량주행방향이 옹벽 길이방향과 직교할 때로 확인되었다. 높은 등가상재하중 높이는 옹벽의 불안정성을 의미하며, 차량주행방향이 옹벽길이방향과 수평 할 때보다 신중한 설계가 요구된다. 옹벽을 차량주행방향과 직교하게 설치할 경우 옹벽의 높이는 상대적으로 높아야 하며, 낮은 높이의 옹벽의 경우 전도 등의 불안정적인 요소를 내포 할 수 있다.
- (5) 포장층과 하부 되메움토의 포아송비를 이용하여 이론적 등가상재하중 높이를 산정하고 제안하였다. 하지만 하부 되메움토의 단위중량 등을 고려하지 않고, 반무한적인 길이를 가지는 탄성체로 가정했다는 점에서 실제 옹벽 배면에 작용하는 토압을 과소평가 할 가능성이 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 이를 고려하여 실험적 또는 수치해석적 연구가 수행되어야 할 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 bridges (Project number :19SCI-B119960-04)”.

## References

1. AASHTO (1994), AASHTO LRFD bridge design specifications : SI units, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
2. AASHTO (2002), Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Edition of American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
3. AASHTO (2012), AASHTO LRFD bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
4. AASHTO (2018), LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
5. Boussinesq, M. J. (1885), “Application des potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques, principalement au calcul des deformations et des pressions que produisent, dans ces solides, des efforts quelconques exerces sur une petite partie de leur surface ou de leur interieur: Memoire suivi de notes etendues sur divers points de physique mathematique et d'analyse”, GauthierVillars, Paris, pp.722.
6. Goble, G. (1999), *Geotechnical related development and implementation of load and resistance factor design (LRFD) methods*. Transportation Research Board, NCHRP synthesis 276.
7. ISO 2394 (1998), *General principles on reliability for structures*, ISO.
8. Kang, S. G and Kil, H. B. (2015), “Implementation of Equivalent Heights of Soil for Live Load Surcharge,” *Technical Conferences of Korean Institute of Bridge and Structural Engineers*, Vol.1, pp.31-32. (in Korean)
9. Kim, D., Jin, H., Seo, S., Park, J., Kim, D. and Chung, M. (2018), “Assessment of Equivalent Heights of Soil for the Lateral Earth Pressure Against Retaining Walls Due to Design Truck Load”, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.17, No.4, pp.119-128. (in Korean)
10. Lee, K., Kim, D. and Chung, M. K. (2017), “Analysis of Lateral Earth Pressures on Retaining Wall from Traffic Load Distribution”, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.4, pp.43-55. (in Korean)
11. MOLIT (2016), Research on Maintenance of Retaining Wall for Reasonable Road, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (in Korean)
12. Walls (2014), *Allan Block Retaining*. AB Engineering Manual, allenblock.co.nz.
13. Withiam, J. L. (2003), “Implementation of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications for Substructure Design,” *LSD2003: International Workshop on Limit State Design in Geotechnical Engineering Practice*, World Scientific Publishing Company.