열차하중 작용 시 연직토류벽에 발생하는 수평응력 고찰 A study on horizontal stress of retaining walls caused by train loading

김대상* 김형근** 김기환*** Daesang Kim, Hyunggeun Kim, Kihwan Kim

ABSTRACT

In the retaining wall design process, track and train loads are usually considered as uniform surcharge loads and strip loads. In this paper, the lateral(horizontal) earth pressure on retaining structures caused by track and train load are calculated using the Boussinesq solution. And also total horizontal force per unit length and the location of the resultant force were estimated with the changes of loading locations and widths of the loadings. The maximum horizontal earth pressure and the location of it for high-speed train load were 11.83kPa and 1.7m at the loading condition 2m away from retaining walls.

1. 서 론

옹벽 등 철도노반을 구성하는 토류구조물 설계 시 열차하중에 의하여 발생하는 수평력에 대한 충분 한 검토가 필요하다. 상재하중에 의하여 유발되는 수평응력은 벽체 형식과 변위 발생패턴에 따라 다르 다. 상재하중에 의하여 연직 토류구조물에 작용하는 수평응력 분포, 전 수평력과 그 작용위치는 토류구 조물의 거동에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 철도용 보강옹벽을 개발하기 위하여 설계 열차하중 작용 이격거리 및 하중 작용 폭을 변수로 연직토류벽에 발생하는 수평응력에 대한 이론적 검토를 수행 하였다.

2. 토류구조물 설계 열차하중

철도노반을 구성하는 옹벽 등 연직 토류구조물 설계 시 적용되는 궤도 및 열차 상재하중은 선로 등급에 따라 상 이하다. 궤도하중의 경우 기존선은 10kPa을, 고속선은 15kPa을 상재하중으로 고려한다. 열차하중은 하중재하 위치가 벽체 구조물 상단 끝으로부터 2m 이상 떨어진 경우, 기존선은 25kPa을, 고속선은 35kPa을 상재하중으로 적용하고 있다. 이격거리가 2m 이하인 경우 이격거리 감소에 따른 추가 상재하중을 표 1과 같이 고려하고 있다(<표 1>,<그림 1>,<그림 2>,<그림 3>). 열차하중의 재하 중심이 벽체 상단 끝 또는 경사 어깨로부터 5m이상 떨어진 경 우(<그림 2>)는 부분하중 재하를 허용하고 있다. 열차하중이 연직 토류구조물에 근접한 경우(B<2m), <그림 3>과 같이 하중 근접에 따른 수평토압 증가(q₃)를 별도로 고려해야 한다.

TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319 ** 비회원, 인하대학교 토목공학과 4학년

^{*} 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실 선임연구원 E-mail : kds@krri.re.kr

E-IIIaII · <u>Kus@kITI.Te.kI</u>

^{***} 비회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 연구원



표 1 . 상재하중 (kPa)

	기존선	고속선
Q1	10	15
Q_2	25	35
\mathbf{q}_{3}	70/B	80/B

그림 1. 상재하중 크기및 분포



그림 2. 궤도가 옹벽에서 벗어난 경우의 상재하중분포



그림 3. 궤도가 옹벽에 근접하고 있는 경우의 상재하중 크기 및 분포

3. 열차하중에 의한 수평응력 및 전 수평력 작용위치

상재하중에 의한 연직 토류구조물 배면토압을 평가하기 위하여 과거에 많은 선행 연구가 수행되었다. 현재 상재하중 재하 시 발생 수평응력 산정에는 Boussinesq(1876)가 유도한 식이 많이 사용되고 있다. 뒷채움 표면에 작용하는 점하중(<그림 4> 참조)에 의한 깊이 z지점에서 발생하는 수평응력(σ_x)에 대한 Boussinesq해는 식(1)과 같다.



그림 4. 벽체 작용 띠 하중

$$\sigma_{\boldsymbol{x}} = \frac{P}{2\pi} \left(\frac{3\boldsymbol{z}\boldsymbol{x}^2}{R^5} - (1-2\nu) \left(\frac{\boldsymbol{z}}{R^3} - \frac{1}{R(R+\boldsymbol{z})} + \frac{(2R+\boldsymbol{z})\boldsymbol{x}^2}{R^3(R+\boldsymbol{z})^2} \right) \right)$$
(1)

여기서, P는 점하중, $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$, y는 벽체와 평행한 방향 길이, z는 벽체 깊이, ν 는 포아송비이 다.

연직 토류구조물에 평행한 띠 하중(열차하중 표현)에 의하여 발생하는 수평응력은 식(1)에서 포아송비 를 0.5로 가정하고, 점 하중에 대한 수평응력을 이중 적분하여 구할 수 있다(식(2)).

$$\sigma_{h} = \int_{b}^{a+b} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_{x} \, dy \, dx = \frac{q}{\pi} (\beta - \sin\beta \cos 2\alpha) \tag{2}$$

식(2)에 사용된 각 용어에 대한 정의는 식(3)과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{2}(\theta_a + \theta_b), \ \beta = (\theta_a - \theta_b), \ \theta_a = \arctan\frac{a+b}{y} \ , \theta_b = \arctan\frac{b}{y}$$
(3)

식(3)을 도해적으로 표시하면 <그림 5>및 <그림 6>과 같다.

Spangler(1936)와 Gerber(1929)등의 수평응력에 대한 실험적 연구결과에 의하면, 수평응력의 분포는 Boussinesq식과 일치하나, 수평응력의 크기는 반무한체를 포아송비 0.5로 가정하고 Boussinesq식으로 계산한 값의 약 2배라는 결론을 도출하였다.



그림 5. 용어정의 II

그림 6. 용어정의 Ⅱ

상기와 같은 연구 결과를 토대로 Mindlin(1936)은 벽체 경계조건의 영향을 고려할 수 있는 이미지효과 (mirror image effect)를 이용한 중첩이론을 이용하여 식(4)와 같이 수평 응력식을 수정 제시하였다.

$$\sigma_{h} = \frac{2q}{\pi} (\beta - \sin\beta\cos2\alpha) \tag{4}$$

식(4)는 식(5)와 같이 표시할 수 있으며,

$$\sigma_{\mathbf{h}} = \frac{2\mathbf{q}}{\pi} [\left(\theta_{\mathbf{a}} - \theta_{\mathbf{b}}\right) - \left(\sin\theta_{\mathbf{a}}\cos\theta_{\mathbf{a}} - \sin\theta_{\mathbf{b}}\cos\theta_{\mathbf{b}}\right)]$$
(5)

식(5)를 삼각함수를 이용하여 변환하면 식(6)과 같다.

$$\sigma_{\boldsymbol{h}} = \frac{2\boldsymbol{q}}{\pi} \left[\left(\operatorname{arc} \boldsymbol{cot} \frac{\boldsymbol{y}}{\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}} - \operatorname{arc} \boldsymbol{cot} \frac{\boldsymbol{y}}{\boldsymbol{b}} \right) - \left(\frac{\boldsymbol{y}}{(\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) + \frac{\boldsymbol{y}^2}{(\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b})}} - \frac{\boldsymbol{y}}{\boldsymbol{b} + \frac{\boldsymbol{y}^2}{\boldsymbol{b}}} \right) \right]$$
(6)

식(6)을 벽체 높이에 대하여 적분하면 벽체에 작용하는 전 수평토압을 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$P = \int_{0}^{h} \sigma_{h} \, dz \tag{7}$$

$$P = \frac{2\boldsymbol{q}}{\pi} [\boldsymbol{h}(\boldsymbol{\theta}_2 - \boldsymbol{\theta}_1)] \tag{8}$$

 $\circ] \quad \mathfrak{W} \quad \theta_1 = \arctan \frac{b}{h}, \quad \theta_2 = \arctan \frac{a+b}{h}$

식(8)을 단위 변환하여 도(°)로 표시하면 식(9)와 같다.

$$P = \frac{q}{90} [h(\theta_2 - \theta_1)] \tag{9}$$

전 수평토압의 작용점, 즉 수평토압 합력의 지표면으로부터의 높이는 식(10)으로부터 구할 수 있다.

$$\overline{y} = \frac{h^2(\theta_2 - \theta_1) + (a + b)^2(90 - \theta_2) - b^2(90 - \theta_1) - 57.3ah}{2h(\theta_2 - \theta_1)}$$
(10)

4. 열차하중에 의한 수평응력 평가

뒷채움 흙에 의한 수평토압, 궤도하중 및 열차하중에 의하여 추가로 발생하는 수평응력을 개략적으로 평가하기 위하여 <그림 7>과 같은 기본모델을 설정하였다. 궤도하중(q₁)은 벽체로부터 충분히 넓게 펼 쳐진 등분포하중으로 가정하였고, 열차하중(q₂)는 기존철도와 고속철도 두 종류를 고려하였다. 해석대상 토류구조물의 기하학적 형상을 대표하는 높이(H)는 5~10m로 하였다. 해석에서는 열차하중 재하 폭(a), 열차하중 이격거리(b)를 변수로 하였으며, 배면토의 내부마찰각은 30°로 가정하였다. <그림 8>은 고속철 도에 대하여 H=5m, a=3m, b=2m인 경우에 대한 주동토압, 궤도하중 및 열차하중에 의하여 벽체에 발생 하는 수평응력을 평가한 결과이다. 열차하중에 의하여 발생하는 수평응력은 1.75m 심도에서 최대 12.6kPa이 발생하는 것으로 평가되었다. 동일 심도에서 주동토압(10.5kPa)과 설계 궤도하중에 의한 수평 토압(5kPa)을 고려한 전 수평토압은 28.1kPa이었다. 이는 열차하중에 의하여 유발된 수평응력이 전 수평 토압의 45%수준에 달하며, 이는 상당히 큰 값으로 판단된다.



그림 7. 열차하중에 의한 수평응력 평가를 위한 기본모델 그림

그림 8. 연직토류벽 작용 토압분포

50

4.1 열차하중에 의한 깊이 별 수평응력 분포

<그림 9>와 <그림 10>는 기존철도와 고속철도 설계하중작용 시 하중작용 이격거리 별 수평응력분포이다. 열차하 중 작용 폭은 기본모델의 경우 단선인 경우를 고려하여 2.7m로 산정하였다. 하중작용 이격거리가 0m일 때 벽체 최상 부에서 각각 열차하중과 동일한 25kPa과 35kPa의 수평응력이 발생하고, 깊이가 증가할수록 작용 수평응력은 감소하 는 형태를 보였다. 벽체로부터의 하중 작용 이격거리에 따른 영향을 보면 이격거리가 감소할수록 발생 수평응력이 크고, 이격거리가 증가할수록 발생 수평응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 하중 작용 이격거리 2m에 대한 최대수평응 력 및 작용위치는 기존철도의 경우 8.45kPa, 1.7m이었고, 고속철도의 경우 11.83kPa, 1.7m였다. 기존철도와 고속철도 의 경우 발생 수평응력의 절대량을 제외하면, 수평응력 발생 경향은 유사한 것으로 평가되었다.





그림 11. 열차하중 작용 폭 별 수평응력분포 (이격거리 2m)_기존철도



그림 12. 고속철도 열차하중 작용 폭 별 수평응력분포 (이격거리 2m)_고속철도

<그림 11>과 <그림 12>는 열차하중이 벽체로부터 떨어진 이격거리를 2m로 고정하고 열차하중 작용 폭을 변화시 켰을 때의 수평응력 분포이다. 열차하중 작용 폭 증가는 단선, 복선 및 복복선의 경우에 대한 하중조건을 고려하기 위함으로, 열차하중 작용 폭이 증가함에 따라 작용 수평응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 열차하중의 크기가 지반 파괴하중에 도달할 정도로 크지 않으므로, 열차하중 작용 시 토체 내 활동 파괴면의 영향은 고려하지 않았다.

4.2 열차하중에 의한 전 수평력 및 작용위치

<그림 13>은 열차하중 이격거리에 따른 전 수평력을, <그림 14>는 이격거리를 2m로 고정하고 열차하중 작용 폭을 증가시켰을 때의 전 수평력 변화이다. 이격거리에 따른 전 수평력 변화는 이격거리 3m에서 이격거리가 0m인 경우의 63% 수준이었다. 열차하중 작용 폭 변화에 따른 전 수평력은 작용 폭 이 증가할수록 증가율이 점차 감소하는 경향을 보였다.



<그림 15>는 열차하중 이격거리에 따른 전 수평력 작용위치 변화이다. 기존철도와 고속철도 모두 이격거리 3m까
지는 열차하중 작용 합력의 높이가 급격히 감소하고, 이후 합력의 작용 높이는 완만하게 감소하는 경향을 보였다.
이격거리 2m에서 전 수평력의 작용 위치는 전체높이(5m)의 50%인 2.5m지점에 작용하는 것으로 평가되었고, 이격거리 10m인 경우 작용높이는 1.79m 로 감소하였다. <그림 16>은 열차하중 작용 폭이 증가함에 따라 전 수평력 작용
높이는 약간 감소하였으나 감소량은 크지 않았다.



5. 벽체 높이에 따른 전 수평력(열차하중, 궤도하중 및 열차하중) 및 작용위치

벽체 높이에 따른 전 수평력(열차하중, 궤도하중 및 열차하중) 및 전 수평력 작용위치 변화를 평가하였다. <그림 17>은 벽체높이 증가에 따른 이격거리 별 전 수평력 평가 결과를 보여준다. 전 수평력은 벽체 높이가 증가(5m → 10m)함에 따라 높이의 2승에 비례하여 증가하고, 높이가 증가함에 따라 열차하중에 의한 영향은 점차 감소하는 경향 을 보여준다. 동일한 조건에서 이격거리(0m와 10m)에 따른 전 수평력 차이는 약 50kN/m 정도로, 열차하중 이격거리 에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있었다. <그림 18>은 열차하중 작용 폭 별 벽체높이와 전 수평력의 관계로 열차하중 작용 폭이 증가할수록 벽체높이 증가에 따라 전 수평력 증가율이 커지는 것을 확인할 수 있다.





<그림 19>와 <그림 20>은 벽체높이에 따른 전 수평력 작용위치 변화를 나타낸 것이다. 벽체높이 5~10m 범위에 서 전 수평력 작용위치는 이격거리에 따라 (0.36~0.5)H 범위에 있었다. 벽체높이 증가에 따라 전 수평력 작용 위치비는 감소하는 것을 알 수 있다. 이격거리 별 벽체 높이에 따른 전 수평력 작용 위치를 나타내는 <그림 19>로부터, 이격거리가 0~2m 범위로 작은 경우에서 전 수평력 작용위치 변화가 크나, 이격거리가 3m이상인 경우에는 전 수평력 작용 위치가 벽체높이의 (0.36~0.39)H 범위로 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 열차 하중 작용 폭 별 전 수평력 작용 위치 비를 나타낸 <그림 20>은 열차하중 작용 폭 증가에 따라 작용위치 비의 변화는 2%미만으로 이격거리 별 작용위치 변화 보다는 변화의 폭이 훨씬 작았다. 벽체높이가 높고 열차하중 작용 폭이 증가하면 작용점 위치가 벽체높이의 0.415H 위치로 점점 접근해 감을 알 수 있다. 이는 열차하중이 등분포 상재하중과 같게 되어 작용점이 한 곳으로 수렴하기 때문으로 판단된다.

6. 결론

열차하중과 같은 상재하중 작용 시 연직토류벽에 작용하는 수평응력은 벽체의 강성과 벽체 발생변위 모드에 크게 좌우된다. 실질적으로 벽체 발생변위는 정지상태와 주동토압 작용 시 발생하는 변위 범위 사이에 있을 것으로 판단되 나, 정확한 발생 변위량을 산정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 발생 벽체변위에 좌우되는 수평응력을 정확히 이론적으로 평가하는 것은 어려우나, 본 논문에서는 수평토압 및 열차하중에 의한 수평응력을 평가하기 위하여 Rankine 수평토압 과 Boussinesq 탄성해를 이용하여 벽체에 발생하는 수평응력을 평가해 보았다.

1) 열차하중에 의한 깊이 별 수평응력을 평가한 결과, 깊이가 깊어질수록 작용 수평응력은 감소하며 벽체로부터의 하중작용 이격거리가 감소할수록 벽체상면에의 발생 수평응력이 크고, 이격거리가 증가할수록 수평응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 하중 작용 이격거리 2m에 대한 최대수평응력 및 작용 깊이는 기존철도의 경우 8.45kPa, 1.7m 이었고, 고속철도의 경우 11.83kPa, 1.7m였다.

2) 이격거리에 따른 전 수평력 변화는 이격거리 3m에서 이격거리가 0m인 경우의 63% 수준이었다. 열차하중 작용 폭에 따른 전 수평력은 작용 폭 이 증가할수록 증가율이 감소하는 경향을 보였다. 3) 벽체높이에 따른 전 토압력(열차하중, 궤도하중 및 열차하중) 및 작용 위치 변화를 평가한 결과, 전 수평력은 벽체 높이 증가(5m -> 10m)에 따라 높이의 2승에 비례하여 증가하고, 높이 증가에 따라 열차하중에 의한 영향은 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 벽체 높이 5~10m 범위에서 전 수평력 작용위치는 이격거리에 따라 (0.36~0.5)H 범위에 있었다. 벽체높이 증가에 따라 전 수평력 작용 위치비(h/H)는 감소하며, 이격거리가 0~2m 범위로 작은 경우 는 전 수평력 작용위치 변화가 크나, 이격거리가 3m이상인 경우에는 전 수평력 작용 위치가 벽체높이의 (0.36~ 0.39)H 범위로 변화가 크지 않았다.

참고 문헌

- 1. 철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단 (2004)
- 2. 고속철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단 (2005)
- 3. 고속철도공사 전문시방서(노반편), 한국고속철도건설공단 (2003)
- 4. John S. Kim and Richard M. Barker(2002), Effect of Live Load Surcharge on Retaining Walls and Abutments, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.