

## 내부마찰각과 토압 산정방법에 따른 철도교대의 안정성 비교 연구

### Stability of Railway Bridge Abutment with Earth Pressure and Internal Friction Angle of Backfill

최찬용\* · 김현기 · 양상범 · 김병일

Chan Yong Choi · Hun Ki Kim · Sang Beom Yang · Byung Il Kim

**Abstract** In this study, a standard section of a railway bridge abutment wall was designed to satisfy the external stability condition in accordance with the design criteria; this design was used to compare and analyze the active earth pressure and to calculate various types of earth pressure acting on the virtual back (wall, plane) according to the frictional angle of the backfill materials. Also, the external stability, member force and construction cost were analyzed according to the frictional angle of the backfill materials using various theories of earth pressure such as Rankine, Coulomb, Trial Wedge, and Improved Trial Wedge. As for the results, it was found that lateral earth pressure at the virtual back plane was higher than at the virtual back wall, and that these values decreased with the increase of the frictional angle of the backfill materials. The increasing of the frictional angle of the backfill materials decreased the active earth pressure (according to Rankine, Coulomb, Trial Wedge, and Improved Trial Wedge results), and the member force as well as the construction cost were reduced.

**Keywords** : Railway bridge abutment, Earth pressure, Virtual back, Improved trial wedge, Frictional angle

**초 록** 본 연구에서는 철도 교대를 위한 표준단면을 선정하고, 선정된 단면에 대하여 토압산정방법과 내부마찰각에 따른 직배면과 가상배면에 작용하는 주동토압을 비교 분석하였다. 또한, 기존토압과 개량시행째기법의 토압을 이용하여 내부마찰각에 따른 교대의 외적 안정성, 부재력 및 경제성을 분석하였다. 본 연구로부터 가상배면에서의 주동토압은 직배면에서의 주동토압보다 크며, 내부마찰각이 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있었다. 기존토압(Rankine, Coulomb, 시행째기법) 및 개량토압(개량시행째기법) 모두 내부마찰각이 증가함에 따라 부재력은 크게 감소하였고, 경제성은 향상되는 것으로 평가되었다.

**주요어** : 철도교대, 토압, 가상배면, 개량시행째기, 내부마찰각

## 1. 서 론

옹벽, 교대, 토류구조물과 같이 토압을 받는 지반구조물에서 설계 작용력을 결정하는 핵심요소로는 교대 형상, 교대에 작용하는 수평력, 뒤채움재료와 구조물 벽면간의 벽마찰각, 뒤채움재의 지표경사각 및 내부마찰각 등이 있다. 특히 교대의 경우에는 지반과 상부조건에 따라 박스형, 역T형, 반중력식 교대 등 형태가 다양하기 때문에 작용하는 토압은 매우 상이하다고 할 수 있다.

일반적으로 벽체 배면에 작용하는 토압은 Coulomb의 토압이론과 뒤채움 내부의 가상배면에서 토압을 작용시키는 Rankine토압으로 구하고 있으며, Kim [2]는 벽체와 뒤채움간의 상대변위의 적용여부에 따라 적당한 토압으로 구하여야 정확한 토압을 산정할 수 있다고 하였다. 또한, 뒤채움 흙의 지표가 수평인 캔틸레버식 옹벽에서 극한평형상태가 되었을 때, 가상배면을 따라 흙이 상하로 상대적인 변위를 일으키는 것이 아니라 횡 방향으로 팽창되면서 극한소성평형상태로 발전하여 가상배면에서의 마찰력이 발생하지 않기 때문에 작용하는 토압은 Rankine 토압이론을 적용하는 것이 합리적이라고 하였다. Duncan 등 [7]은 중력식 옹벽을 대상으로 수치해석결과 뒤채움 흙은 옹벽보다 더 많은 침하가 발생되므로 옹벽의 뒷굽을 통하는 가상벽면을 따라 전단력이 발생하고, 그 크기는 옹벽의 경사각에 따라 큰 차이를 보일 수 있다고 하였다. Chae 등 [4]은 마찰력은 두 물체사이에 상대적인 변위가 없더라도 서로 힘이 작용하는 한 어느 정도는 발휘하고 있다고 보는 것이 더 타당하다고 제시한 바 있다.

\*Corresponding author. E-mail: cychoi@krri.re.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.6.765>

따라서 뒷굽을 가지는 구조물에 있어서 토압을 어느 한 이론으로 통일하여 설계한다거나 Coulomb 토압이 더 경제적이라고 하는 것은 잘못된 것이라고 하였다(Kim [2]). 뒷굽을 가지는 구조물의 주동토압을 구하는 방법은 여러 가지 방법들이 제안되어 왔으며, 이들 방법은 모두 Rankine토압과 Coulomb토압의 조합법에 의해 구할 수 있다고 하였다(Terzaghi [9]; Teng [8]; Barghouthi [6]). 국내의 경우 반중력식 옹벽, 교대 등 뒷굽이 있는 구조물에 대한 토압산정방법이 불명확하게 되어 있어 이에 대한 기준마련과 적용이론의 다변화를 통해 합리적인 토압산정이 필요하다고 할 수 있다. Kim 등 [1]은 육상 및 해상 구조물 설계시 적용되고 있는 다양한 토압이론을 정리하였으며, 뒷굽 길이에 따른 적용토압, 작용각, 벽면측으로의 활동각 등을 분석하여 뒷굽길이가 긴 경우 가상배면에서의 작용토압은 Rankine 토압과 작용각은 지표경사각을 적용하고 뒷굽이 짧은 경우는 Coulomb방법과 작용각은 벽마찰각을 고려하여 산정하는 것이 가장 합리적인 방법이라고 제시하였다. Baek [3]은 동일한 옹벽에서 지하수위 존재여부에 따라 Rankine과 Coulomb의 주동토압, 수평토압, 연직토압을 비교하여 토압의 크기를 비교하였으며, 옹벽 및 교대구조물의 단면 안정성은 전체 주동토압과 수평토압, 연직토압을 받으며, 실제구조물의 활동거동을 가장 근사적으로 고려한 토압이론을 적용하여야 한다고 하였다. Clayton 등 [10]은 교대, 옹벽 설계에서 개량썰기방법에 근거한 방법으로 옹벽을 설계에 적용한 사례가 다수 있다.

이와 같이 교대 단면 설계에서 단면의 크기를 결정하는 주동토압은 매우 중요한 설계과정이라고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 주동토압을 구하는 주요인자인 뒤채움재료의 내부마찰각을 35, 40, 45도 변화시켜가며, Rankine, Coulomb, Trial Wedge, Improved Trial Wedge 등 다양한 토압이론을 통해 주동토압의 산정하여 크기를 비교하였으며, 이를 바탕으로 교대 외 적안정성과 부재력을 비교분석하였다. 또한 내부마찰각에 따른 최소안전율을 만족하는 최적의 단면을 설계하여 공사비를 분석하여 내부마찰각에 따른 공사비 저감 정도를 평가하였다.

## 2. 토압 산정방법의 비교 연구

### 2.1 철도설계기준 및 철도설계지침의 비교

토압은 옹벽 설계에 있어 설계 작용력을 결정하는 핵심요소로서, 특히 주동토압은 주된 활동력으로 작용하므로 매우 중요하다. Korea Rail Network Authority [5]에 따르면 중력식 교대와 같이 뒷굽판의 내민 길이가 200~300mm 이하로 짧은 경우, 토압이 구체 콘크리트 배면에 직접 작용하는 것으로 설계하고 있다. 그러나 역T형 교대와 부벽식 교대와 같이 뒷굽이 긴 경우, 단면 계산에서의 토압 작용면은 구체 콘크리트의 배면, 안정계산에서는 뒷굽판 연단에서의 가상 연직면으로 간주하여 설계한다(Fig. 1). 적용하는 토압이론을 살펴보면, 중력식 옹벽의 경우 안정계산과 단면계산 모두 Coulomb토압을 적용하지만, 역T형옹벽은 안정계산에서는 Rankine토압, 단면계산에서는 Coulomb토압을 적용한다. 작용하중을 살펴보면, 안정계산시에는 하중계수를 고려하지 않고 단면계산에만 적용한다.

Table 1은 Korea Rail Network Authority [5]와 Korea Rail Network Authority [11]에 제시된 토압관련 기준을 비교한 것이다. 표에 제시된 바와 같이 토압 관련 기준은 유사하지만 Korea Rail Network Authority [5]이 보다 포괄적으로 되어 있다. 토압이론으로는 Coulomb와 Rankine 토압으로만 적용하게 되어 있으며, 현재 일본 등 설계기준에서 많이 적용하고 있는 썰기법 또는 개량썰기법은 철도에 적용되지 못하고 있는 실정이다.

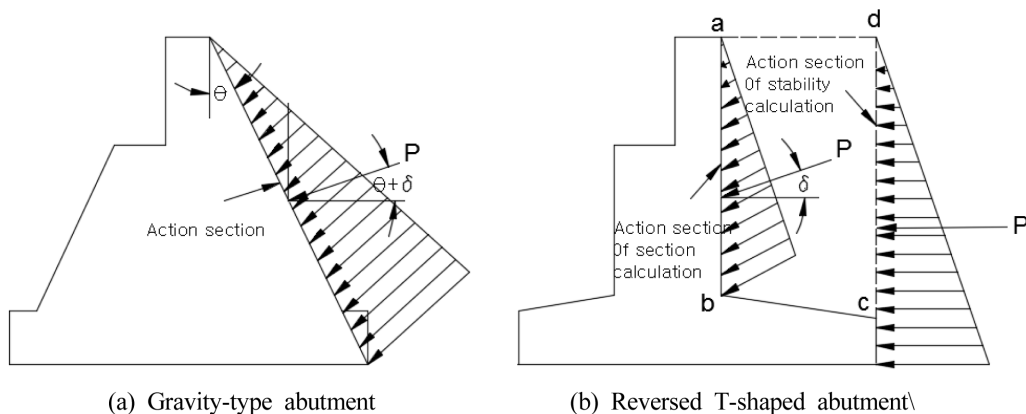


Fig. 1. Active area of earth pressure acting on abutment.

**Table 1.** Design value of earth pressure, actional angle and virtual surface of the abutment wall.

Category	Railroad design standard(2013)	KR C-08020(2014)
Earth pressure theory	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Can use formula of coulomb, rankine and terzaghi</li> <li>· Recommend: coulomb's earth pressure</li> <li>· Reversed T-shaped / counterfort retaining wall (Virtual surface of behind abutment)</li> <li>· Rankine earth pressure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Can use formula of coulomb, rankine and terzaghi</li> <li>· Recommend: coulomb's earth pressure</li> <li>· Reversed T-shaped / counterfort retaining wall (Virtual surface of behind abutment)</li> <li>· Rankine earth pressure</li> </ul>
Angle of action	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Stability calculation <math>\delta = \phi</math></li> <li>· Wall calculating <math>\delta = \frac{\phi}{3}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Inclined direction as the wall friction angle and the perpendicular direction to the wall(<math>\delta + \theta</math>)</li> <li>· Rankine's earth pressure : It is same with surface</li> </ul>
Virtual surface of behind abutment	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Method 1: the line connecting the back side of wall-peak and heel</li> <li>· Method 2: vertical wall erected from heel</li> <li>· Apply: apply method 1 in principle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Virtual surface erected from heel</li> </ul>

### 2.2 Rankine법과 Coulomb법의 비교

교대의 경우 벽마찰각의 고려여부는 전체 주동토압의 크기에는 큰 영향을 미치지 않지만, 주동토압의 작용방향이 달라지기 때문에 수평토압( $P_{ah}$ )과 연직토압( $P_{av}$ )에 영향을 미친다. Table 2에는 벽체가 연직이고, 지표면이 수평인 교대와 같은 옹벽에 대한 예를 제시한 것이다(Baek [3]). 표에 제시된 바와 같이 토압계수의 차이는 크지 않다. 그러나, Coulomb 토압은 Rankine 토압과 비교했을 때, 활동력이 작고, 저항력은 더 크게 발생한다고 볼 수 있다. 또한 Baek [3]은 Table 2과 같이 지하수 조건과 토압이론에 따라 토압의 차이가 발생할 수 있으므로, 전체 옹벽 및 교대 구조물의 단면 안정성은 전체 주동토압, 수평토압, 연직토압에 영향을 받고 실제 구조물의 활동거동을 잘 모사할 수 있는 토압이론을 적용하여야 한다고 하였다.

**Table 2.** Comparison of vertical and horizontal components of active earth pressure(Baek [3]).

Earth pressure theory applied at retaining wall	Result
<p>(a) Rankine (<math>\phi_w = 0</math>)      (b) Coulomb (<math>\phi_w &gt; 0</math>)</p>	<p>① Value of coefficient of active earth pressure : no significant differences (about 10%)</p> <p>② Vertical and horizontal component of active earth pressure Rankine: <math>P_a = 0.5\gamma z^2 K_a</math>, <math>P_{ah} = P_a</math>, <math>P_{av} = 0</math> Coulomb: <math>P_a = 0.5\gamma z^2 C_a</math>, <math>P_{ah} = P_a \cos\delta</math>, <math>P_{av} = P_a \sin\delta</math></p> <p>③ Analysis <math>P_{ah}(\text{Coulomb}) &lt; P_{ah}(\text{Rankine})</math>, <math>P_{av}(\text{Rankine}) = 0 &lt; P_{av}(\text{Coulomb})</math></p>

**Table 3.** Value of active earth pressure according to ground water level(Baek [3]).

Case 1 : No ground water level				Case 2 : Ground water level			
<p>(a) Rankine</p>		<p>(b) Coulomb</p>		<p>(a) Rankine</p>		<p>(b) Coulomb</p>	
	Rankine	Coulomb	Comparison		Rankine	Coulomb	Comparison
$P_A$	$\frac{1}{2}\gamma H^2(0.333)$	$\frac{1}{2}\gamma H^2(0.297)$	About 10% difference	$P_A$	$\frac{H^2}{2}(1.3)$	$\frac{H^2}{2}(1.241)$	About 5% difference
$P_{Ah}$	$\frac{1}{2}\gamma H^2(0.333)$	$\frac{1}{2}\gamma H^2(0.257)$	About 30% difference	$P_{Ah}$	$\frac{H^2}{2}(1.3)$	$\frac{H^2}{2}(1.234)$	About 5% difference
$P_{Av}$	0	$\frac{1}{2}\gamma H^2(0.15)$	Difference	$P_{Av}$	0	$\frac{H^2}{2}(0.135)$	Difference

### 2.3 시행썰기법과 개량시행썰기법의 비교

옹벽의 뒷굽이 긴 경우 배면에 있는 흙은 Fig. 2(a)와 같이 옹벽과 일체로 거동하기 때문에 연직의 가상배면이 생기고, 짧은 면 일체로 움직이지 않기 때문에 가상배면은 생기지 않는다고 생각할 수 있다. 하지만 실제 옹벽이 앞으로 이동하면 Fig. 2(b)와 같이 두 개의 활동면이 생기고, 뒷굽이 길고 짧은과 상관없이 옹벽과 일체로 이동하는 것은 활동면 S<sub>2</sub> 아래쪽의 흙 뿐이다. 뒷굽이 있는 옹벽의 안정검토에서는 뒷굽의 길고 짧음에 상관없이 가상배면에 토압을 작용시켜 계산한다. 이때 활동면 S<sub>2</sub> 아래의 흙은 뒷굽 상부에 있기 때문에 옹벽 중량으로서 뒷굽에 작용한다. 시행썰기법이나 개량시행썰기법은 기존 Rankine이나 Coulomb 토압보다 구조물 배면 지표의 경사가 불규칙하거나 지층이 혼재된 층의 토압을 산정할 때 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이상에 제시한 바와 같이 시행썰기법과 개량시행썰기법은 Table 4와 같은 특징을 가지고 있다.

개량시행썰기법을 이용한 토압 산정 방법은 Table 5와 같다(Barghouthi [6]; Ushiro T [20,21]; Grecoa [12]; Kim 등 [1]). 시

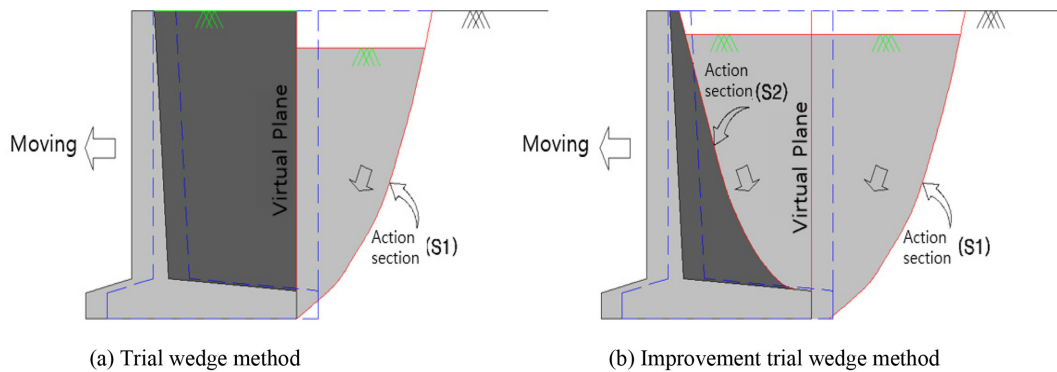


Fig. 2. Failure behavior according to movement of structure (Ushiro T [20,21]).

Table 4. Comparison between trial wedge method and improvement trial wedge method.

Category	Trial wedge method	Improvement trial wedge method
Working angle of earth pressure virtual surface of behind abutment	· Assume internal friction angle	· Calculate working angle theoretically from equilibrium of force
Effect of slip surface and heel	· Can't consider effect of length of heel because of not considering the second slip surface facing wall	· Consider the second slip surface facing wall · Can consider effect of length of heel

Table 5. Calculating earth pressure by improved trial wedge method.

Figure	Contents
	① Coefficient of active earth pressure : $K_a = \frac{2P_a}{\gamma H^2}$ ② Unit active earth pressure : $\sigma_a = \gamma z K_a$ ③ Total active earth pressure : $P_a = \frac{R_1 \sin(S_1 - \phi)}{\cos \delta}$ $R_1 = \frac{(W_1 + W_2) \sin(S_1 - \phi) + P_{ac}(S_2 - \phi + \delta + \psi)}{\sin(S_1 + S_2 - 2\phi)}$ $P_{ac}$ = Coulomb earth pressure $\delta$ = wall friction $\angle$ (Coulomb) ④ Horizontal active earth pressure, → $P_{ah} = P_a \cos \delta'$ (Virtual Surface of behind abutment ) → $P_{ah} = P_a \cos(\delta' + \psi)$ $\delta' = \tan^{-1} \frac{W_1 - R_1 \cos(S_1 - \phi)}{R_1 \sin(S_1 - \phi)}$

행째기법과의 차이는 뒷굽 길이에 따라 가상배면의 좌측에 있는 흙도 파괴시 켜기를 형성한다고 간주한다. 따라서, 뒷굽을 가지는 구조물에서 실제 거동을 가장 잘 설명할 수 있는 이론이다. 본 방법은 현재까지의 토압이론중 가장 발전된 형태의 토압산정 방법이라 알려져 있고, 일본의 경우 각종 시방기준에서 채택되어 적용되고 있다(Ushiro T [19]).

### 3. 철도 교대 안정성 비교 연구

#### 3.1 시멘트 안정처리골재의 역학적 특성

철도교대에 사용되는 재료는 지지강성의 차이를 최소화시키고 부등침하를 억제하기 위하여 교대로부터 중량대비 3%의 시멘트를 혼합하여 골재보다 강성이 큰 시멘트 안정처리된 골재와 일반골재로 시공하고 있다. 철도설계기준에 따르면 철도노반 쌓기재료의 내부마찰각은 GW과 GP계열은 40°, SW와 SP는 30~35°를 적용하도록 되어있다. 그러나 실무적으로 교대의 뒷채움재료는 골재 이상의 재료임에도 불구하고 내부마찰각을 30~35°로 적용하여 다소 보수적으로 설계하고 있다. 또한 Lim 등 [16]은 삼축압축시험기를 통해 강화노반골재의 내부마찰각( $\psi$ )의 범위를 45.4~47.7°수준이라고 하였다.

Table 6은 시멘트 안정처리된 골재와 일반골재의 대형전단시험한 결과이다. 내부마찰각의 크기는 약 35.7~40.38° 범위이였으며, 양생하지 않은 시멘트안정처리골재의 내부마찰각은 약 40.38° 수준이었다. 그러나 시멘트의 경우 양생이 되면서 강도가 증가하기 때문에 양생 후의 내부마찰각의 변화를 보기 위하여 3일, 7일 양생별 대형전단시험을 실시하고자 하였으나, 시멘트 안정처리된 골재가 경화됨에 따라 전단시험을 할 수 없어 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축강도시험은 시험방법(KS F 2405)을 적용하여 시험을 실시하였으며, 시편의 크기는 100(D)×200(H)이다. 시멘트안정처리된골재의 양생별 일축압축강도변화는 Fig. 3과 같다. 양생 3일차의 일축압축강도는 평균 2,070kPa이며 양생 7일차의 일축압축강도는 평균 3,150kPa이다. 양생 3일차의 일축압축강도를 기준으로 양생 7일차의 일축압축강도의 증가율은 약 1.5배의 증가하였다. 이는 철도설계기준에서 제시하고 있는 고로 슬래그의 2주이상의 일축압축강도 기준값 1,200kPa 보다 약 1.7~2.6배 큰 것으로 시멘트 안정처리된 골재의 강도는 품질기준 이상인 것으로 나타났다.

Table 6. Parameter C,  $\phi$  for each backfill materials.

Materials	Vertical stress (kPa)	Shear stress (kPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)
Soil	100	103	35.7	32.95
	200	160		
	300	233		
Aggregate	100	109	33.5	37.21
	200	187		
	300	261		
Cement treated aggregate	100	121	36.0	40.38
	200	206		
	300	291		

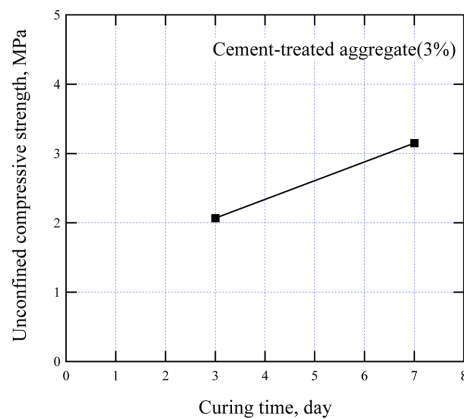


Fig. 3. Unconfined compressive strength of curing time.

**Table 7.** Correlations between N-value and unconfined compressive strength for different soil types(Sowers[17,18]).

Soil types	Strength in kPa*		
	Minimum	Average	Maximum
Highly	14.4N	24N	33.6N
Medium to low plastic clay	9.6N	14.4N	19.2N
Plastic silts, clays with failure planes	4.8N	6.7N	9.6N

\*Sowers (1953 & 1962) expressed the strength in 1000 psf which has been converted th kPa in this paper

본 논문에서는 시멘트안정처리골재의 내부마찰각에 따른 교대에 작용하는 토압과 안정성을 평가하는 것이 목적이기 때문에 기존 문헌을 바탕으로 일축압축강도를 통해 내부마찰각을 추정하였다. Terzaghi & Peck [15]에 의하면 일축압축강도와 N치의 상관관계를 흙의 강도에 따라 구분하였으며, 본 논문에서는  $q_u > 400\text{kPa}$  이상이기 때문에 딱딱한 지반상태로 추정하였으며, 이를 바탕으로 Table 7과 같은 상관관계를 통해  $q_u = 33.6\text{N}$ 을 적용하였다. 시멘트안정처리골재 3일 양생 후 일축압축강도가 2,070kPa로 볼 때 N값은 약 61.6으로 가정하였다. 이를 식(1)[14]을 이용하여 내부마찰각을 추정하면 약 45.4~50.1°이다. 따라서 본 논문에서 시멘트안정처리골재의 내부마찰각을 최대 45°로 가정하여 교대 설계를 수행하였다.

$$\begin{aligned} \phi &= 15 + \sqrt{15N} \quad \text{Specifications for highway bridge part} \\ \phi &= 15 + \sqrt{20N} \quad \text{Osaki} \\ \phi &= 0.3N + 27 \quad \text{Peck} \end{aligned} \tag{1}$$

### 3.2 설계 및 해석 조건

본 연구에서는 철도 교대에 대하여 일반화된 교대를 대상으로 하였다. 적용한 교대의 설계하중과 설계조건은 Table 8과 같다.

**Table 8.** Design condition of structure.

Category	Contents
Design situation	1) Upper form : PSC Beam-L=25m, 2) abutment form: Reversed T-shaped abutment, 3) footing form : Spread footing
The using material	1) Con`c: Fck = 27MPa , Ec = 8500 $3\sqrt{(fck+8)}$ =26,702MPa 2) Steel: fy = 400MPa, Es= 200,000MPa 3) Bridge support : Pot support :Support frictional coefficient = 0.15, Soil weight: $\gamma_1 = 20.0\text{kN/m}^3$ 3) Backfill: Unit weight = 20.0kN/m <sup>3</sup> , $\phi = 35, 40, 45^\circ$
Design load	1) Fixed load: a) Con`c : 2.45 kN/m <sup>3</sup> , Upper Fixed load : 6019.68kN(Double track) 2) Moving load: KRL-2012 (Standard) 3) Earth pressure a) Regular : Coulomb coefficient of active earth pressure b) Earthquake : Mononbe-Okabe coefficient of active earth pressure c) Foundation module ① N-value : 50, ② angle of shear resistance : 42°, ③ Friction coefficient of Foundation bottom( $\mu$ ) : 0.532, ④ attaching force : 0 4) Impact load: $I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L-2}} - 0.18$ 5) Start and Breake load a) KRL-2012(Standard train), b) Not rail expansion joint : $\pm 6L(\text{kN})(1 \text{ rail})$ 6) Earthquake load a) $k_f=0.11$ (Ground type I), b) Vertical load : upper fixed load=3,009.840kN c) Horizontal load : upper fixed load $\times$ friction coefficient of bridge bearing
Stability review	1) Structure(abutment) stability review a) Design standard of safety factor ① Minimum of overturning: 2.0, ② Minimum of sliding: 1.5 ③ Standard of bearing capacity : Allowable bearing capacity(600KN, 900KN) below



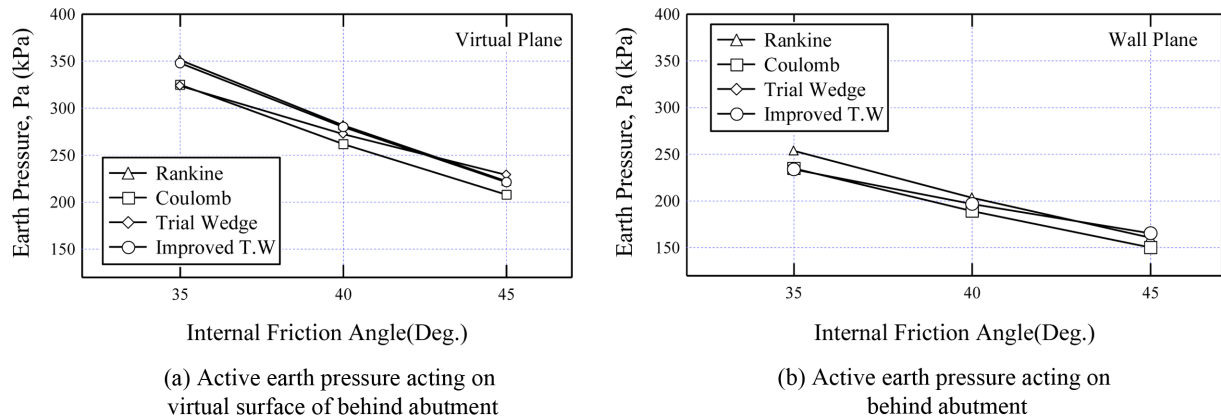


Fig. 5. Active earth pressure according to earth pressure theory.

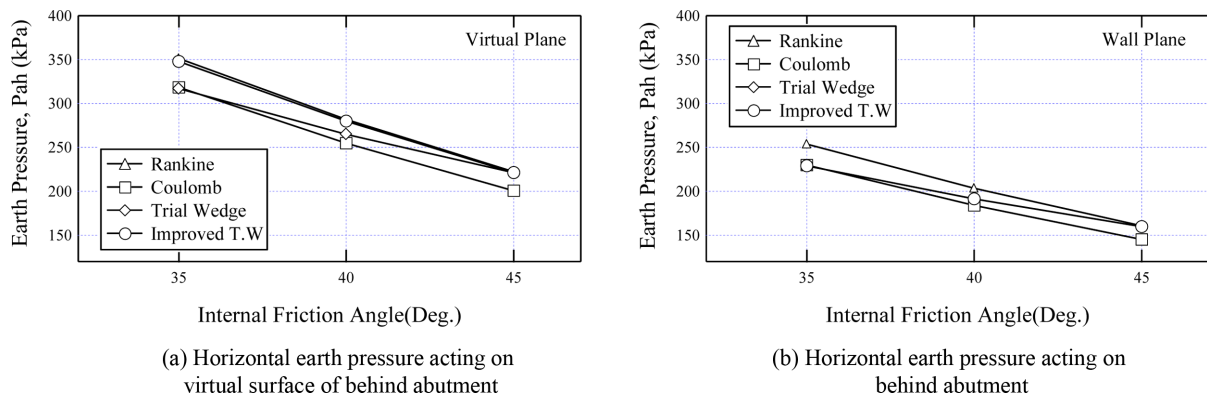


Fig. 6. Earth pressure according to earth pressure theory.

하 연직토압,  $P_{av}$ , 주동토압 수평성분(이하 수평토압,  $P_{ah}$ ), 작용각( $\alpha$ ), 토압계수( $K_a$ )를 제시하였다. 전체 주동토압의 경우 가상 배면과 직배면에서 Rankine 토압이 가장 크게 산정되는 경향을 보였고, Coulomb 토압이 가장 작게 산정되는 경향을 보였다. 주동토압의 경우 Fig. 5와 같이 가상배면보다 직배면에서 큰 것으로 나타났으며, 내부마찰각이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 6은 가상배면과 직배면에 작용하는 수평토압을 도시한 것이다. 수평토압은 내부마찰각이 35°에서 45°로 증가함에 따라 감소하였다. 토압이론별 가상배면의 주동토압은 Rankine과 개량시행쌓기법이 유사한 것으로 평가되었고, Coulomb과 시행쌓기법이 유사한 것으로 평가되었다. 직배면에 작용하는 전체 주동토압, 연직토압, 수평토압은 시행쌓기법과 개량시행쌓기법이 동일하였다.

### 3.3.2 내부마찰각 변화에 따른 외적 안정성

Table 10은 대상 단면에 대한 외적 안정성의 검토 결과를 나타낸 것으로, 내부마찰각을 35°에서 45°까지 5°씩 증가시키면서 평가한 결과이다. 본 연구에서 적용한 표준 단면은 최소 안전율을 기반으로 하여 안정검토시의 토압은 뒷굽에서부터 연직의 가상면에 작용하는 것으로 가정하여 Rankine 토압을 사용하였고, 벽체 설계시 Coulomb 토압을 사용하여 교대를 설계하였다(표에서 “Existing”으로 표현)

기존토압의 경우 최소 안전율을 고정하여 안정성 검토를 실시하였기에 설계기준을 만족하였다. 또한, 개량시행쌓기법(표에서 “Improvement”으로 표현)의 토압을 적용한 안전율은 전도 4.62~5.13, 활동 2.58~3.53, 지지력 1.41~1.36으로 기존 토압법과 같이 설계기준을 만족하였다. 기존토압을 적용한 안전율과 개량시행쌓기법을 적용한 안전율이 유사한 것은 지표면이 수평이고, 가상배면에서 Rankine 토압계수와 개량시행쌓기법의 토압계수가 유사하게 산정되었기 때문이다.

### 3.3.3 내부마찰각 변화에 따른 경제성

교대는 토압을 받는 구조체로 뒤채움의 재질 및 부설방법, 다짐정도, 배수시설등에 따라 교대에미치는 영향이 민감한 구조물



**Table 10.** External stability according to method of calculating earth pressure and internal friction angle.

Category		Overturning safety factor (2.0)		Active safety factor (1.5)		Bearing safety factor (600kN→F.S=1.0)	
$\phi$	Situation	Rankine	Improvement	Existing	Improvement	Existing	Improvement
35°	Regular	4.58	4.62	2.56	2.58	1.41	1.41
	Earthquake	2.66	2.66	1.79	1.79	1.68	1.68
40°	Regular	4.90	4.92	3.02	3.03	1.37	1.37
	Earthquake	2.70	2.70	1.99	1.99	1.63	1.63
45°	Regular	5.12	5.13	3.52	3.53	1.36	1.36
	Earthquake	2.73	2.73	2.20	2.20	1.59	1.59

**Table 11.** Economic efficiency according to change of internal friction angle.

Internal friction angle	Construction cost per 1m	Rate of construction cost	Fluctuation(%)
35	95,400,302	100.0%	
40	93,273,421	97.8%	-2.2%
45	90,152,939	94.5%	-5.5%

이다. 보통 철도 교대 설계시 실무에서는 경험치인 내부마찰각을 30~35°를 적용하고 있는 실정이지만, Ministry of Oceans and Fisheries [13]의 경우 뒤채움시 사석인 경우 40°의 내부마찰각을 적용한다. 따라서, 뒤채움재의 물성치값을 현실에 부합되는 보다 합리적인 값의 설정이 필요하다. 이에 본 연구에서는 뒤채움재의 마찰각을 35°, 40°, 45°로 향상 시킬 경우 교대단면 축소 등으로 인한 경제성 효과를 검토하였다.

Table 11은 대상 단면에 대한 내부마찰각에 따른 경제성을 비교한 것이다. 표에 제시된 바와 같이 내부마찰각을 35°에서 45°까지 5°씩 증가시키면, 공사비는 2.2%에서 5.5%까지 감소함을 알 수 있다. 이는 개량시행쇄기법을 적용한 경우도 유사한 결과가 도출될 것으로 판단된다.

### 3.3.4 토압 산정방법에 따른 부재력

부재의 균열 및 처짐 등의 사용성 검토시에는 사용하중(Service Load, Unfactored load)을 적용하여 검토하고 부재의 단면(두께 및 철근량 산정 등) 설계시에는 계수하중(Factored load)을 적용한다. Table 12는 대상 단면에 기존토압을 적용하여 검토한 부재력이다. Table 13은 내부마찰각 35° 결과를 기준으로한 내부마찰각 증가에 따른 부재력의 감소율을 제시한 것이다. 기존토압을 적용하여 부재력을 검토 결과 내부마찰각이 5°씩 증가함에 따라 부재력은 최소 7.36%에서 최대 46.49%까지 감소되는 것으로 분석된다. 사용하중을 적용한 경우 부재력은 모멘트 최대일 경우 7.97~18.9%, 축력 최대일 경우 7.36~19.55%까지 감소하는 것을 확인하였다. 계수하중을 적용한 경우 부재력은 모멘트 최대일 경우 27.63~46.49%, 축력 최대일 경우 27.70~45.92%까지 감소하는 것을 확인하였다. Table 14는 대상 단면에 대하여 개량시행쇄기법을 적용한 경우에 대한 부재력 검토 결과이다.

**Table 12.** Review of axial force of member according to internal friction angle : existing calculation of earth pressure method.

Category		Service load			Factored load		
$\phi$	Foundation	Normal force	Lateral force	Moment	Normal force	Lateral force	Moment
35°	Moment maximum	4903.3	1311.9	3064.5	1878.7	468.8	1174.2
	Axial force maximum	3270.2	873.2	2567.0	1858.9	469.8	1297.8
	Earthquake	1438.8	845.5	1438.8	1426.9	1426.9	1142.7
40°	Moment maximum	4475.5	1227.3	2797.2	1483.4	277.6	927.1
	Axial force maximum	3018.1	820.9	2352.2	1463.1	277.7	1025.9
	Earthquake	1335.3	844.4	1335.3	1140.4	1140.4	1049.0
45°	Moment maximum	3902.8	1103.4	2439.3	1226.4	140.5	766.5
	Axial force maximum	2606.4	723.6	2022.6	1221.0	142.4	859.7
	Earthquake	1166.5	809.1	1166.5	961.2	961.2	980.7

**Table 13.** Reduction ratio of axial force of member based on 35° internal friction angle : existing calculation of earth pressure method.

Category		Service load			Factored load		
$\phi$	Foundation	Normal force	Lateral force	Moment	Normal force	Lateral force	Moment
40°	Moment maximum	8.72	6.45	8.72	21.04	40.79	21.04
	Axial force maximum	7.71	5.99	8.37	21.29	40.88	20.95
	Earthquake	7.19	0.12	7.19	20.08	20.08	8.20
45°	Moment maximum	20.40	15.90	20.40	34.72	70.03	34.72
	Axial force maximum	20.30	17.13	21.21	34.32	69.69	33.76
	Earthquake	18.93	4.30	18.93	32.64	32.64	14.17

**Table 14.** Review of axial force of member according to internal friction angle : improved calculation of earth pressure method.

Category		Service load			Factored load		
$\phi$	Foundation	Normal force	Lateral force	Moment	Normal force	Lateral force	Moment
35°	Moment maximum	4927.2	1318.4	3079.5	1871.6	466.9	1169.7
	Axial force maximum	3294.2	879.7	2583.5	1851.7	467.8	1293.2
	Earthquake	1438.8	845.5	1438.8	1426.9	1426.9	1142.7
40°	Moment maximum	4485.3	1230.1	2803.3	1480.9	277.0	925.5
	Axial force maximum	3027.8	823.6	2358.9	1460.6	277.2	1024.3
	Earthquake	1335.3	844.4	1335.3	1140.4	1140.4	1049.0
45°	Moment maximum	3907.2	1104.7	2442.0	1225.3	140.4	765.8
	Axial force maximum	2610.8	724.9	2025.5	1219.9	142.2	859
	Earthquake	1166.5	809.1	1166.5	961.2	961.2	980.7

**Table 15.** Reduction ratio of axial force of member based on 35° internal friction angle : improved calculation of earth pressure.

Category		Service load			Factored load		
$\phi$	Foundation	Normal force	Lateral force	Moment	Normal force	Lateral force	Moment
40°	Moment maximum	8.97	6.70	8.97	20.87	40.66	20.87
	Axial force maximum	8.09	6.37	8.70	21.12	40.74	20.79
	Earthquake	7.19	0.12	7.19	20.08	20.08	8.20
45°	Moment maximum	20.70	16.21	20.70	34.53	69.93	34.53
	Axial force maximum	20.75	17.59	21.60	34.12	69.60	33.58
	Earthquake	18.93	4.30	18.93	32.64	32.64	14.17

개량토압을 적용하여 부재력을 검토한 결과 내부마찰각이 증가함에 따라 부재력은 최소 7.72%에서 최대 46.33%까지 감소되는 것으로 분석된다. Table 15은 부재력 검토 결과를 내부마찰각 35°을 기준으로 계산된 부재력의 감소율이다. 사용하중을 이용한 부재력 감소율은 모멘트 최대일 경우 8.21~19.20%, 축력 최대일 경우 7.72~19.98%로 평가되었다. 계수하중을 이용한 부재력 감소율은 모멘트 최대일 경우 27.47~46.33%, 축력 최대일 경우 27.55~45.77%로 평가되었다. 본 논문에서 선정된 표준 단면의 경우 부재력은 내부마찰각이 5°증가시 구조물에 외적 작용하는 토압은 반대로 감소함에 따라 이로 인해 구조물 부재력 또한 감소가 되는 것으로 분석되었다. 따라서, 내부마찰각이 5°증가함에 따라 기존 토압과 개량토압에서의 부재력 감소율은 유사한 비율로 감소하는것으로 분석되었으며 이는 부재력에 가장 큰 영향을 미치는 토압 중 기존 및 개량토압계수가 별 차이가 없어 이런 결과가 도출되었으리라 판단된다. 이러한 결과를 볼 때 현행 설계법과 큰 차이를 나타내지 않는다는 것이 검증된 바, 교대 단면의 형상이 복잡하거나 파괴형태가 복잡한 경우 등 뒷굽을 가지는 교대 구조물에서 실제 거동을 가장 잘 설명할 수 있는 개량시행법 적용하는 것이 지반공학적 측면에서 바람직할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 12m 높이의 교대를 대상으로 최소안전율을 기반으로 하여 표준단면을 선정하고 선정된 표준 단면에 대하여 다양한 토압이론을 적용하여 내부마찰각에 따른 직배면과 가상배면에 작용하는 주동토압을 비교 분석하였다. 또한, 기존토압과 개량시행쇄기법의 토압을 이용하여 내부마찰각에 따른 외적 안정성, 부재력 및 경제성을 분석하였다. 본 연구로부터 도출된 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 다양한 토압이론을 이용하여 내부마찰각 변화에 따라 교대 표준단면에 작용하는 주동토압을 산정한 결과, 가상배면에 작용하는 토압이 직배면에서의 토압보다 크며, 내부마찰각이 증가함에 따라 주동토압은 감소하는 것으로 나타났다. 토압이론별 가상배면에서의 주동토압은 Rankine과 개량시행쇄기법이 유사한 결과를 도출하였고, Coulomb과 시행쇄기법이 유사한 값을 평가하였다.

(2) 교대 표준단면에 대하여 내부마찰각 변화에 따른 외적 안정성을 평가한 결과 기존토압과 개량시행쇄기법의 토압 모두 설계기준을 만족하였다. 특히, 표준 교대단면에 대한 외적 안정성 검토시 토압계수의 경우 Rankine과 개량시행쇄기법이 유사하여 외적 안정성에 해당하는 안전율이 유사한 것으로 판단된다.

(3) 기존토압을 적용하여 내부마찰각 변화에 따른 표준 교대단면에 대한 경제성을 분석한 결과 내부마찰각 35°를 기준으로 5°씩 증가함에 따라 경제성은 2.2%에서 5.5%까지 향상되는 것으로 평가되었다.

(4) 기존토압을 적용한 경우 내부마찰각이 5°씩 증가함에 따라 부재력은 최소 7.36%에서 최대 46.49%까지 감소되는 것으로 분석되며, 개량시행쇄기법의 토압을 적용한 경우 내부마찰각이 5°씩 증가함에 따라 부재력은 최소 7.72%에서 최대 46.33%까지 감소되는 것으로 분석된다.

(5) 기존토압과 개량시행쇄기법을 적용하여 교대 표준단면에 대하여 주동토압, 외적 안정성, 경제성 등을 평가한 결과로부터 불규칙한 교대형상 및 지표형상을 고려할 수 있고, 작용각에 대한 가정을 하지 않고 이론적으로 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 철도 교대의 실제 거동에 가장 근접한 평가를 할 수 있는 개량시행쇄기법을 향후 관련 설계기준에 채용할 필요가 있는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 “철도노반 성능 및 건설비 최적화 기반기술 개발(16RTRP-B067919-04)”으로 수행되었습니다.

## References

- [1] B.I. Kim, Y.J. Jung, D.H. Kim, C.H. Lee, S.J. Han (2014) The Calculation and Design Method of Active Earth Pressure with Type of Gravity Structures, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 30(4), pp. 47-63.
- [2] S.K. Kim (1992) About application of earth pressure acting on abutment and retaining wall, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 40(1), pp. 46-54.
- [3] Y.S. Baek (2011) Soil mechanics described like lecture, Goomibook, Seoul, pp. 671-814.
- [4] Y.S. Chae, M.S. Park (1993) Study about earth pressure acting on Virtual Surface of behind cantilever wall, Conference of Korean Society of Civil Engineers, Korean Society of Civil Engineers, pp. 461-464.
- [5] Korea Rail Network Authority (2013) Guidelines of Track Maintenance.
- [6] Barghouthi, A.F. (1990) Active earth pressure on walls with base projection, *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(10), pp. 1570-1575.
- [7] Duncan, J.M., Clough, G.W., Ebeling, R.E., Design and Performance of Earth Retaining Structures, *ASCE Geot. Spec.*, 25, pp. 251-278.
- [8] Teng (1962) Foundation design, Prentice-Hall Inc., London, pp. 276-552.
- [9] Terzaghi, K. (1943) Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.100-117.
- [10] CRI Clayton, RI Woods, AJ Bond, J Milititsky, Earth pressure and earth-retaining structures Second Edition, Taylor & Francis, London and New York, pp. 412.
- [11] Korea Rail Network Authority (2014) Design Guideline and Handbook of Railway.
- [12] Greco, V.R. (2001) Active earth thrust on cantilever walls with short heel, *Canadian Geotechnical Journal*, 38(2), pp. 401-409.
- [13] Ministry of Oceans and Fisheries (2005) Guidelines of Port and Fishing port.

- [14] Kamimura, M., Truong, T.K. (2013) Relationships between N value and parameters of ground strength in the South of Vietnam, *Geotechnics for sustainable development*, Publisher of Construction, Hanoi, pp. 1-7.
- [15] Terzaghi, K., Peck, R.B. (1948, 1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, (First and Second Edition), John Wiley and Sons, New York, pp. 137-165.
- [16] Y.S. Lim, J.U. Lee, J.K. Hwang, M.Y. Park (2011) Characteristics of Resilient Modulus of Reinforced-Roadbed Materials Using Large Repetitive Triaxial Test, *Autumn Conference of Korean Society for Railway*, Jeju, pp. 1115-1122.
- [17] Sowers, G.F. (1953) Modern procedures for underground investigations, *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 80(5), pp. 1-11.
- [18] Sowers, G.F. (1962) *Earth and Rockfill Dam Engineering*, Asia Publishing House, Published under the auspices of the Water Resources Development Training Center, University of Roorkee, India, pp. 124-155.
- [19] Ushiro T., Nisimura H. (2009) Application of theory to the Coulomb cantilevered retaining wall, *Technical Research Conference*, Soil Mechanics Society at Sikoku.
- [20] Ushiro T, Tsutsui H., Kataoka H. (1991a) Study on earth pressure evaluation method of reverse T-shaped retaining wall, *Geotechnical Research Society 3rd workshop at Kochi Hyun*, pp. 44-47.
- [21] Ushiro T, Tsutsui H., Kataoka H., Okura M., Jushi N. (1991b) A proposal on the earth pressure evaluation method of reverse T-shaped retaining wall, *Technical Research Conference*, Soil Mechanics Society at Sikoku, pp.39-40.

(Received 17 October 2016; Revised 3 November 2016; Accepted 8 November 2016)

---

**Chan Yong Choi** : cychoi@krri.re.kr

High Speed Railway Infrastructure System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si 16105, Korea

**Hun Ki Kim** : hkkim@krri.re.kr

High Speed Railway Infrastructure System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si 16105, Korea

**Sang Beom Yang** : tkdqja246@krri.re.kr

High Speed Railway Infrastructure System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si 16105, Korea

**Byung Il Kim** : geokbi@ege.co.kr

Research Institute, Expert Group for Earth & Environment, Doosan Venture Digm #631, Heungandaero 415, Dongan-Gu, Anyang-Si, Korea