

# 지진 시 액상화된 지반 내 지중 구조물의 안정성 평가를 위한 한계평형해석 모델 제안

오주영<sup>1\*</sup> · 이재환<sup>2</sup> · 장석부<sup>3</sup>

<sup>1</sup>정회원, 삼성물산 건설부문 기반기술팀 공학박사

<sup>2</sup>정회원, 삼성물산 건설부문 기반기술팀 기술사

<sup>3</sup>정회원, 삼성물산 건설부문 기반기술팀 공학박사

## A proposed model of limit equilibrium analysis for stability assessment of underground structure in liquefied ground during earthquakes

Ju-Young Oh<sup>1\*</sup> · Jaehwan Lee<sup>2</sup> · Seokbue Chang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Construction Technology Team, Samsung C&T

<sup>2</sup>P.E., Construction Technology Team, Samsung C&T

<sup>3</sup>Ph.D., Construction Technology Team, Samsung C&T

\*Corresponding Author : Ju-Young Oh, [juyoung13.oh@samsung.com](mailto:juyoung13.oh@samsung.com)

### Abstract

Liquefaction of the ground caused by earthquakes results in significant damage to underground structures such as tunnels, pipelines, manholes, and underground tanks. The uplift of underground structures due to liquefaction has been identified as a major cause of this damage. However, current design practices have not adequately considered the upward displacement of underground structures. This paper proposes an analytical solution based on the limit equilibrium method for cut-and-cover tunnels. Using this solution, a sensitivity analysis was performed on soil cover height, liquefaction depth, ground improvement, and ledge. It was confirmed that the contribution of each factor to the safety factor can be reasonably derived through changes in the safety factor. Although there are still many assumptions and uncertainties that need to be reviewed for their appropriateness, a conservative approach appears to mitigate a significant portion of these uncertainties. This study is meaningful as a stability evaluation method considering the uplift behavior characteristics of underground structures.

**Keywords:** Earthquake, Liquefaction, Uplift, Underground structure, Limit equilibrium analysis

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
26(5)435-448(2024)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.5.435>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received July 16, 2024

Revised September 20, 2024

Accepted September 20, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

지진 시 발생하는 지반의 액상화는 터널, 관로, 맨홀, 지하 탱크 등 지중 구조물에 큰 피해를 초래한다. 이러한 액상화에 의한 피해는 지중 구조물의 부상(uplift)이 주요 원인인 것으로 나타났으며, 현재까지 설계 실무에서는 지중 구조물의 이러한 상향 변위를 충분히 고려하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 개착식 터널을 대상으로 하여 한계평형법 기반의 analytical solution을 제안하였다. 이를 활용하여 토피고, 액상화 심도, 지반개량, ledge 유무에 대한 민감도 분석을 시행하였다. 안전율 변화를 통해 안전율에 대한 각 요소들의 기여도를 합리적으로 도출할 수 있음을 확인하였다. 현재 모델 내 다수의 가정과 불명확성이 존재하며, 이에 대한 적합 여부에 대한 검토는 여전히 과제로 남아있다. 하지만, 보수적인 접근 방식을 통해 상당 부분의 불확실성이 완화된 것으로 판단되며, 지중 구조물의 uplift 거동 특성을 고려한 안정성 평가 방법이라는 점에서 의미가 있다고 사료된다.

**주요어:** 지진, 액상화, Uplift, 지중 구조물, 한계평형해석

## 1. 서론

지반의 액상화는 지진으로 인한 급속 진동 하중에 기인한 것으로 느슨한 사질토 또는 매립 지반이 순간적으로 비배수 상태가 되어 지반 내 과잉간극수압이 생성, 이로 인해 지반의 전단저항력이 저하되거나 상실하여 지반이 액체처럼 거동하는 현상이다. 이러한 지진 중 발생하는 지반의 액상화는 터널, 각종 관로, 맨홀, 지하 탱크 등의 같은 지중 구조물의 기능성에 문제를 야기시키고, 또한 재산적 피해를 유발한다(Yasuda and Kiku, 2006; Konishi et al., 2008; Arduino et al., 2010; Chian and Tokimatsu, 2012).

지반의 액상화 시 지중 구조물은 위치와 중량 등으로 인해 지상 구조물과는 상이한 거동 특성을 보인다. 지상 구조물의 경우, 액상화 발생 시 과잉간극수압으로 인한 원지반 내 유효응력의 감소로 인한 지반의 지지력 감소 또는 지진 이후 post-liquefaction 단계에서 과잉간극수압 소산에 따른 침하가 문제가 된다. 반면, 터널과 같은 지중 구조물은 주변 지반에 비교하여 상대적으로 겉보기 단위중량이 작아 액상화 발생 시 주변 지반과 압력차로 인한 상향 변위, 즉 지중 구조물의 부상(uplift)이 문제가 된다. 이러한 지중 구조물의 부상 현상은 해외 국가들에서 지하 오일 탱크의 부상으로 인한 기능 상실(Fig. 1(a)), 다수의 맨홀 구조물의 부상으로 인한 하수도 시설물의 기능 상실 및 도로의 파손(Fig. 1(b)) 등 막대한 재산적 피해를 입힌 것으로 보고되고 있다.

하지만, 액상화에 대한 지중 구조물의 거동 특성이 지상 구조물과 상이함에도 불구하고, 현재까지 지중 구조물의 거동 특성을 고려한 설계 방법은 극히 제한적이다. 도로 터널 설계 및 시공을 위한 AASHTO (2017)에 따르면 액상화가 터널에 미치는 영향으로 용기, 측방변위, post-liquefaction에 따른 침하를 언급하고 있으며, 액상화 가능성이 있는 경우에 액상화에 의한 영향도를 평가하여 구조물에 영향을 미치는 경우 적절한 대책을 수립해야 한다고 명기하고 있다. 이에 준하여 현재의 액상화에 대한 지중 구조물의 설계는 액상화 평가를 통한 액상화 위험 지층/심도를 도출하고, post-liquefaction에 의한 침하를 산정하여 침하량이 구조물에 부적절한 경우 액상화 심도

까지 지반을 개량하는 방식으로 진행되고 있다. 이는 액상화 발생 시 지중 구조물의 상향 변위가 지배적인데 반하여, 침하량 기반으로 안정성을 평가하게 되는 모순이 있다. 또한 지반 개량 등 액상화에 대비한 대책들의 효과·기여도에 대한 평가가 곤란한 단점을 포함하고 있다. Koseki et al. (1997), RTRI (1999) 등이 액상화 발생 시 지중 구조물의 부상에 따른 안정성 평가 방법을 제안하였으나, 입력값에 대한 불명확성이 존재하여 실무 적용에 있어 제한이 있다.

최근 국내외에서 고강도 지진 사례가 나타나고 있으며, 이에 따라 잠재적 액상화 가능 지역에서 지중 구조물에 대한 피해가 예상되고 있다. 이에 지중 구조물의 거동 특성을 고려한 설계 기법의 필요성을 인식하여 본 논문은 기초 연구로서 개착식 터널을 대상으로 하여 한계평형법 기반의 analytical solution을 제안하고, 제안식에 대한 민감도 분석을 수행하였다.



(a) Buried underground tank  
(Arduino et al., 2010)

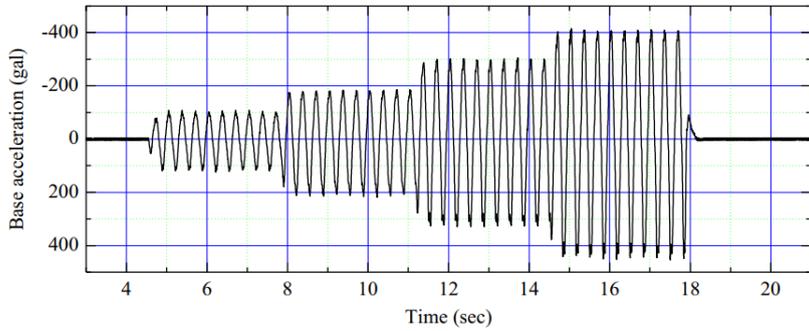


(b) Uplifted manhole and settled backfill  
(Konishi et al., 2008)

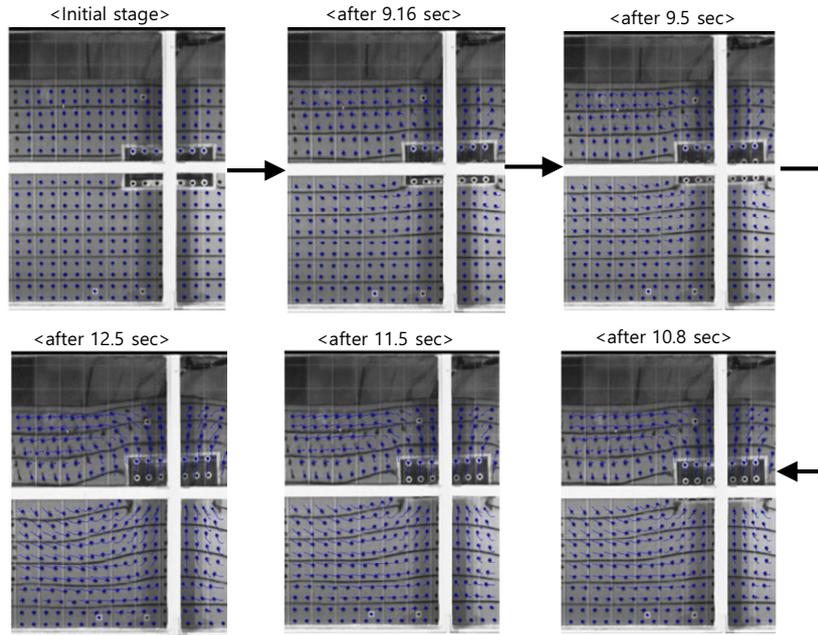
Fig. 1. Cases of damage induced by the uplift of underground structure during earthquake

## 2. 액상화 지반 내 지중 구조물의 거동 특성

터널과 같은 지중 구조물은 겉보기 단위 중량이 원지반에 비해 작기 때문에 지중 구조물 바닥 하부의 압력은 동일 심도의 인접 지반에 비하여 낮다. 즉, 지중 구조물은 지진 발생 이전부터 압력 불균형 상태에 있다. 이러한 압력 불균형은 지진 발생 이전 지반의 변형 저항력에 의해 평형이 유지된다. 지진으로 인한 지반의 액상화로 인해 이러한 변형 저항력이 감소하게 되어 인접 지반이 지중 구조물 바닥으로 변형이 발생하여 지중 구조물이 상향으로 움직이게 된다. Fig. 2는 이러한 지중 구조물의 상향 변위를 보여주는 Watanabe et al. (2016)의 원심 모형 시험 결과이다. 지중 구조물 외측 지반이 터널의 하부로 유동하면서 지중 구조물이 상향으로 이동하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 지중 구조물의 부상은 지진 가속도가 일정 수준을 초과한 후 시작되며, 지진 가속도가 증가할수록 동일 가속도에서는 시간이 경과할수록 상향 변위가 더욱 커지고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Time history of base acceleration



(b) Deformation of model ground during shaking test

Fig. 2. Displacement of tunnel and ground during shaking test (Watanabe et al., 2016)

Nokande et al. (2023)은 원형 터널을 대상으로 한 원심 모형 시험을 통해 액상화 발생 시 단계별 터널의 변위 거동 특성을 확인하였다(Fig. 3). 지진 발생 후 터널 상부 지반의 과잉간극수압이 증가하여 일정 수준에 도달 후 유지되는 경향을 보인다. 구조물의 상향 변위가 발생하면서 과잉간극수압이 감소하며, 지표면에 인장 균열이 발생한 시점부터 상향 변위 증가 추세가 증가함을 확인할 수 있다(Stage I&II). 이후 지진이 유지되는 동안 지중 구조물의 상향 변위가 지속적으로 증가하며, 이와 동시에 생성되었던 과잉간극수압이 점차 감소하면서 소산되며, 지진 이전 초기 간극수압보다도 작아져 부(-)의 간극수압이 나타나고 있다(Stage III). 지진 종료 후에는 감소되었던 간극수압이 증가하면서 지중 구조물의 상향 변위가 지속되고(Stage IV), 이후 미세한 크기의 침하가 나타났다(Stage V).

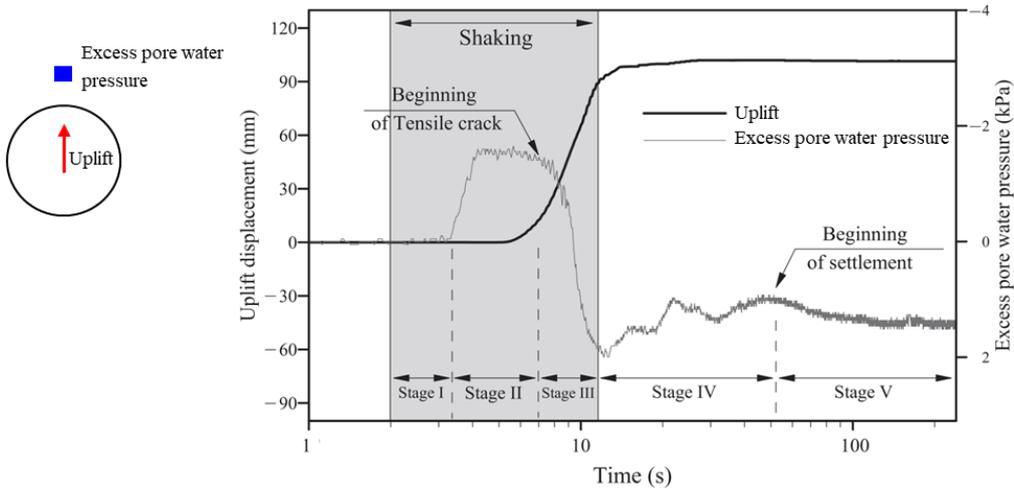


Fig. 3. Development of uplift displacement of tunnel and excess pore water pressure in the ground above a tunnel (Nokande et al., 2023)

이 외에도 원심 모형 시험을 이용한 액상화에 의한 박스형 개착식 터널의 거동 특성에 대한 Koseki et al. (1997), Kang and Iai (2012)의 연구와, 원심 모형 시험 및 수치해석을 이용한 액상화에 의한 원형 터널의 거동 특성에 대한 Chian and Tokimatsu (2012)의 연구 또한 동일하게 액상화에 의한 지중 구조물의 변위 거동은 부상에 의한 상향 변위가 지배적이며, post-liquefaction에 의한 침하는 경미함을 보여주고 있다.

### 3. 기존 액상화 지반 내 지중 구조물의 안정성 평가 방법

일부 연구 또는 기관에서 제시한 액상화 지반 내 지중 구조물 안정성 평가 방법이 존재하지만, 실무에 적용하기에는 한계가 있다. 아래의 식 (1)은 일본의 철도종합기술연구소(RTRI, 1999)에서 제시한 액상화 지반 내 지중 구조물의 안전율( $F_S$ ) 산정식으로, 액상화 발생 시 생성되는 과잉간극수압과 구조물 상향 변위에 따른 수직 저항력을 고려하고 있다(Fig. 4).

$$F_S = (W_B + W_S + 2Q_B + 2Q_S) / (U_S + U_D) \quad (1)$$

여기서,  $W_B$ 는 지중 구조물의 자중,  $W_S$ 는 구조물 상부 지반에 의한 수직력,  $Q_S$ 는 구조물 상부 지반에 작용하는 전단저항력,  $Q_B$ 는 지중 구조물 외벽에 작용하는 마찰력,  $U_S$ 는 구조물 바닥에 작용하는 수압,  $U_D$ 는 과잉간극수압에 의한 상향력을 의미한다. 기준 안전율은 1로, 이보다 큰 경우 액상화에 따른 부상에 대해 안정함을 의미한다.

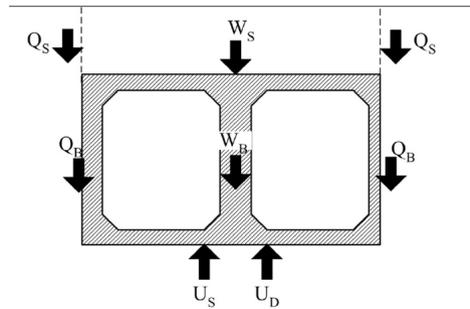


Fig. 4. External forces for calculating safety factor against uplift from ground liquefaction (RTRI, 1999)

이러한 안전을 산정 방식은 다음과 같은 단점이 있다. 첫 번째로 안전을 산정을 위한 입력값인 구조물 하부에 발생하는 과잉간극수압의 크기가 불분명하다. 지진으로 인해 발생하는 과잉간극수압은 지진강도 및 지진 지속시간, 터널 심도 등 다양한 요소들에 의해 영향을 받기 때문에 안전을 산정을 위한 과잉간극수압 크기를 결정하기 곤란하다. 또한, 구조물 부상을 야기하는 시점의 과잉간극수압 크기가 연구에 따라 상이하게 나타났다. 그 예로 Kang and Iai (2012)는 지진으로 과잉간극수압이 발생하여 그 크기가 지중 구조물 바닥의 유효응력보다 커지는 순간에 지중 구조물이 부상한다고 하였으나, Watanabe et al. (2016)의 시험 결과는 이보다 작은 수준의 과잉간극수압에서도 구조물이 부상할 수 있음을 보여주고 있다. 두 번째로 지중 구조물의 부상 원인으로 과잉간극수압과 부력만을 고려하고 있고, 압력차에 대한 지반 유동을 고려하고 있지 않기 때문에 지중 구조물과 인접 지반 간의 압력 불균형에 따른 지반 거동을 고려할 수가 없다. Koseki et al. (1997)의 경우, 이 지반유동을 과잉간극수압 차에 의한 지하수의 침투로 가정하여 안전을 산정하는 식을 제시하였으나, 과잉간극수압이 순간적인 비배수 상태에서 생성되기 때문에 지반 내 지하수의 흐름이 발생한다는 가정에 모순이 있고, 지진 발생 시 생성되는 과잉간극수압 크기를 결정하기 곤란한 단점도 존재한다.

## 4. 액상화 지반 내 개착식 터널의 안정성 평가

### 4.1 한계 평형 모델

본 논문에서는 액상화에 대한 터널의 안전을 기존의 안전을 산정방식과 동일하게 터널 바닥 하부에 수직으로 작용하는 상향력에 대한 저항력의 비로 정의하였다. Fig. 5는 안전을 산정을 위한 한계 평형 모델을 적용하기 위해 가정한 활동면, 활동 및 저항 영역을 보여준다. 그리고, 터널은 박스 형태의 개착식 터널을 대상으로 하였다. 구조물의 상향 변위의 원인이 되는 터널 바닥 하부에 작용하는 작용력으로 수압을 적용하는 대신 Fig. 5와 같은 활동면을 가정하여 터널 외측 지반의 압력을 작용력(활동력)으로 하였다.

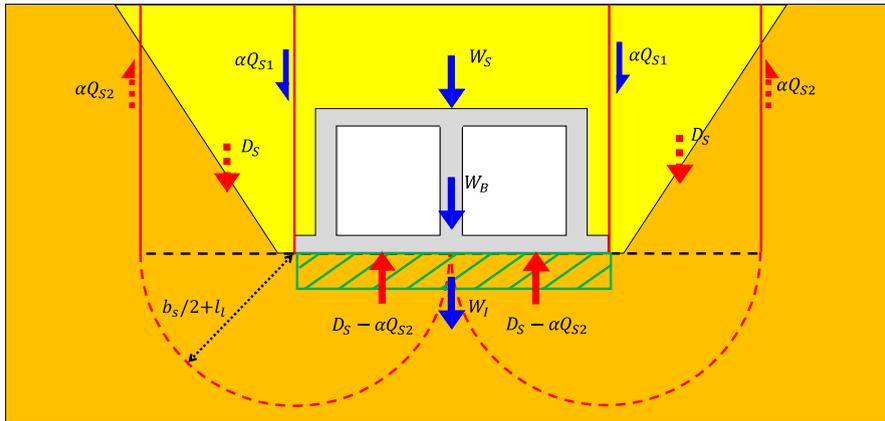


Fig. 5. Resultant forces on tunnel bottom from resisting and driving pressure during ground liquefaction

개착식 터널의 부상에 대한 저항력으로는 터널의 자중 ( $W_B$ ), 터널 상부 뒤채움 지반의 자중 ( $W_S$ ), 지반 개량체의 자중 ( $W_I$ ), 뒤채움 지반 내에서 활성화된 마찰력 ( $Q_{S1}$ )이다.

개착식 터널의 부상을 야기하는 활동력은 터널 외측에 위치한 지반의 자중 ( $D_S$ )이 주요 활동력이며, 활동 지반 블록 외측에 작용하게 되는 마찰력 ( $Q_{S2}$ )은 부(-)의 활동력으로 지반 자중에 의한 활동력을 경감시킨다. 이때 액상화된 지반은 내부 마찰각이 '0'이므로 액상화 지반 내 위치한 활동면에는 마찰력이 작용하지 않는다.

위에서 언급한 저항력과 활동력으로부터 액상화 지반 내 지중 구조물 부상에 대한 안전율은 아래의 식 (2)~(4)와 같이 산정된다. 여기서,  $\Sigma F_R$ ,  $\Sigma F_D$ 는 각각 저항력과 활동력의 합이고,  $\alpha$ 는 마찰력 저감계수이다. 해당 논문에서는 보수적인 접근을 위해 마찰력 저감 계수로 0.75를 사용하여 지반 물성에 의한 마찰력을 25% 경감시켜 적용하였다.

$$\Sigma F_R = W_B + W_S + W_I + 2\alpha Q_{S1} \quad (2)$$

$$\Sigma F_D = 2(D_S - \alpha Q_{S2}) \quad (3)$$

$$F_S = \Sigma F_R / \Sigma F_D \quad (4)$$

## 4.2 기본 단면 및 가정

기본 단면은 중심선을 기준으로 대칭인 박스 형태의 개착식 터널을 대상으로 하였다(Fig. 6). 해당 그림에서 볼 수 있듯이 액상화 위험이 있는 지층을 원지반으로 하고, 원지반 굴착 후 액상화가 되지 않는 재료로 뒤채움하는 방식의 단면이다.

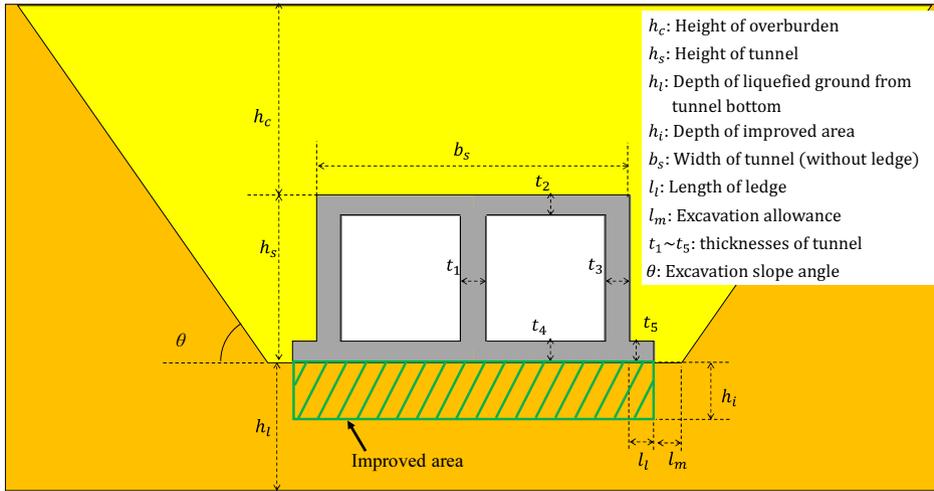


Fig. 6. Tunnel cross section for stability assessment

박스형 개착식 터널의 안정성 평가 방법은 다음과 같은 가정들을 기본으로 한다.

- ① 지하수위는 지표면과 동일하며, 지진 시 지표면부터 액상화 위험 지층 심도까지 액상화된다.
- ② 뒤채움 지반은 액상화에 대해서 안정적이며, 원지반 액상화에 따른 지중 구조물 부상 시 전단저항력이 활성화 된다.
- ③ 액상화 시 원지반 내 유효응력이 '0'이 되어 전단강도가 '0'이 된다.
- ④ 개착식 터널의 외벽(ledge가 있는 경우, ledge 선단)의 연장선을 경계로 내외측의 활동력(경계 외측 지반의 자중)과 저항력(경계 내측 지반과 구조물의 자중, 경계에서 작용하는 마찰력) 간 불균형에 의하여 터널이 상향으로 부상한다.
- ⑤ 액상화 발생 시 지반 내 유효응력과 전단강도가 '0' 이므로 측압계수가 1이며, 활동면도 원형이다. 따라서, 터널 외측의 활동력이 구조물 바닥 외측 꼭지점을 중심으로 한 원 형태로 손실없이 구조물 바닥으로 전달된다.
- ⑥ 자중에 의한 저항력과 활동력 산정 시 수중 단위중량을 적용한다. 액상화 발생 시 지반이 비배수 상태로 유동하는 조건으로, 자중에 의한 활동력과 저항력 산정 시 포화단위중량을 적용하는 것이 보다 합리적으로 보이나, 안전율이 대체로 작게 산정되어 토피고, 지반 개량 등 액상화에 대한 대책들이 과소평가되어 보수적인 설계가 이루어질 수 있는 위험이 있다. 이에 해당 논문에서는 수중 단위중량을 적용하였고, 향후 적합 여부를 확인할 필요가 있다.
- ⑦ 경계 외측 활동력을 유발하는 지반 영역은 터널 폭에 대한 터널 바닥으로부터 액상화 심도에 따라 상이하다. 즉, 액상화 지층 심도가 바닥으로부터 터널 폭의 1/2 이상인 경우, 터널의 외벽(ledge가 있는 경우, ledge 선단)으로부터 박스 구조물 폭의 1/2에 해당하는 영역, 액상화 지층 심도가 바닥으로 터널 폭의 1/2 미만인 경우, 터

널 외벽(ledge가 있는 경우, ledge 선단)으로부터 터널 바닥으로부터 액상화 심도까지의 깊이에 해당하는 영역으로 한다.

- ⑧ 일반적으로 터널 외벽에 방수포를 시공하므로 뒤채움 지반과 벽체 간 마찰력은 ‘0’으로 한다.
- ⑨ 안전율은 구조물 바닥 하부에 수직으로 작용하는 상향력에 대한 저항력의 비로 정의하며, 부력에 대한 기준 안전율 1.1을 적용한다.
- ⑩ 액상화 발생 방지를 위한 터널 하부의 지반 개량은 지반 개량 범위만큼 터널 하부로 저항 영역이 확대되어 전체 저항체 자중이 증가하는 것으로 한다. 실제 지반 개량으로 인해 전단강도 증가로 인한 활동에 대한 저항력이 추가될 수 있으나, 활동면이 불명확하여 이에 대한 고려는 제외하였다.

### 4.3 민감도 분석

본 절에는 제안한 안전율 산정 방식을 활용한 민감도 분석 결과를 기술하였다. 입력 물성과 단면의 기하학적 특성(Fig. 6 참조)은 액상화에 의한 지반 개량 범위 산정 이슈가 있었던 중동 지역의 프로젝트를 참고하였고, 각각 Table 1과 Table 2에 요약된 것과 같다.

**Table 1.** Material properties for ground and box structure

Items	Ground	Improved ground	Fill	Box structure
Saturated unit weight, $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.0	17.0	18.0	25.0
Internal friction angle, $\phi$ (degree)	36.0	40.0	34.0	-
Cohesion, $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.0	0.0	0.0	-

**Table 2.** Geometrical characteristics of corresponding section

Width of box structure, $b_s$ (m)	Height of boxes structure, $h_s$ (m)	Wall thickness of box structure (m)	Slab thickness of box structure (m)	Slope gradient, $\theta$ (°)
15	10	0.5	0.5	18.43

Fig. 7은 토피고( $h_c$ ) 변화에 따른 저항력, 활동력, 안전율의 변화를 보여주고 있다. 토피고가 증가함에 따라 그 증가량만큼 저항측 영역이 커질 뿐만 아니라, 활동측 영역도 커지기 때문에 Fig. 7(a)와 같이 저항력, 뿐만 아니라 활동력도 같이 증가하게 된다. 하지만, 토피고 증가에 따른 증가율에서 차이를 보이고 있는데, 저항력 증가율이 활동력 증가율보다 더 크게 나타나고 있다. 이는 토피고 증가에 따른 영역 확장이 자중을 증가시킬 뿐만 아니라 마찰력의 증가도 야기하기 때문이다. 이러한 증가율의 차이로 인해 토피고의 증가는 결과적으로 안전율을 증가시킨다. 해당 조건의 경우, 토피고가 터널 폭의 0.8배 이상인 경우에는 액상화 지반 내에서도 안정성이 확보되는 것으로 검토되었다.

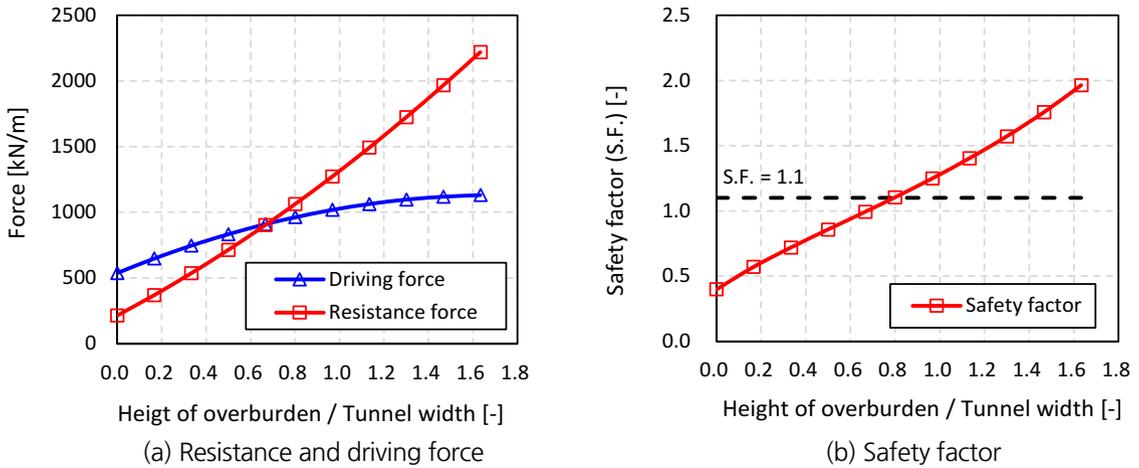


Fig. 7. Resistance force, driving force, safety factor in dependence of overburden

개착식 터널의 바닥 하부에서부터 액상화 지층의 침도( $h_l$ )가 낮은 경우, 터널 바닥 하부에 형성되는 활동면의 크기를 제한하기 때문에 안전율에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 8은 토피고 5.0 m, 10.0 m인 개착식 터널에 대하여 바닥 하부에서부터 액상화 지층의 침도에 따른 안전율의 변화를 보여준다. 액상화 지층의 침도가 터널 폭의 0.5배 이상인 경우, 가정 ⑦에 따라 안전율이 일정한 값을 보인다(토피고 5.0 m: 안전율 0.72, 토피고 10.0 m: 안전율 0.99). 액상화 지층 침도가 터널 폭의 0.5배 미만인 경우에는 침도가 작아질수록 터널 벽 외측 활동 영역의 폭이 작아져 활동력이 감소하게 되는 반면, 터널 벽 내측 저항 영역은 변화없이 일정하므로 안전율이 증가하게 된다. 안정성 평가 결과, 토피고가 5.0 m인 경우에는 침도가 터널 폭의 약 0.3배(5.5 m) 이하, 토피고가 10.0 m인 경우, 침도가 터널 폭의 약 0.47배(7.0 m) 이하일 때 액상화에 대한 안전율이 1.1 이상으로 안정성을 유지하는 것으로 나타났다.

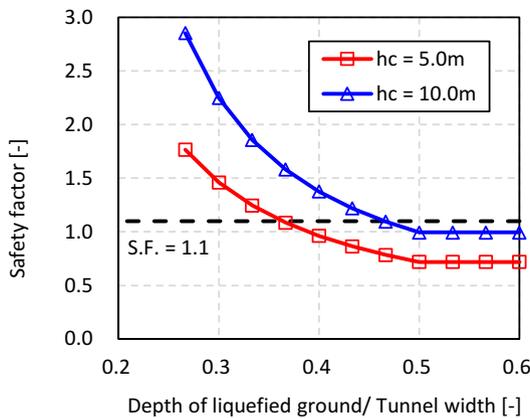


Fig. 8. Safety factor in dependence of depth of liquefied ground

본 논문의 가정 ⑩에서 언급된 바와 같이 터널 하부 지반의 지반 개량으로 지반 개량 영역의 자중만큼 저항력이 증가하게 되며, 반면 활동력은 지반 개량에 무관하게 일정하게 유지되게 된다. Fig. 9는 지반 개량에 의한 안전율의 증가를 보여주고 있는데, 개량 심도가 증가함에 따라 안전율이 증가하며, 토피고가 높은 경우에 비해 토피고가 낮은 경우에 지반 개량 영역 증가에 대한 안전율 증가율이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 토피고가 클수록 활동력이 커지고, 이로 인해 활동력 대비 지반 개량으로 증가한 저항력의 비가 작아지기 때문이다. 해당 조건에서는 토피고가 5.0 m일 때는 지반 개량 심도가 터널 폭의 약 0.37배(5.5 m) 이상, 토피고가 10.0 m일 때는 지반 개량 심도가 터널 폭의 약 0.13배(2.0 m) 이상일 때 안전율이 1.1 이상으로 터널이 안정한 것으로 나타났다.

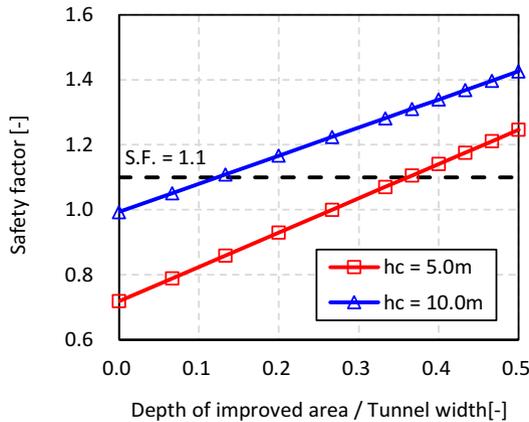


Fig. 9. Safety factor in dependence of soil improvement

Ledge는 터널 하부에 위치한 돌출부로, ledge 위로 뒤채움되기 때문에 해당 영역만큼 저항체의 영역이 증가하여 자중에 의한 저항력을 증가시킨다(Fig. 10(a)). 또한 ledge가 없는 경우(Fig. 10(b)) 터널 벽체와 뒤채움 지반이 직접 접촉하게 되어 방수포로 인해 마찰 저항력이 '0'인 반면에, ledge의 설치로 뒤채움 지반 간 전단이 발생하게 되므로 마찰 저항력이 증가하게 된다. 하지만, 이러한 ledge의 설치 가정 ⑤에 의해 활동측 영역도 증가시켜 활동력도 증가하게 된다. Fig. 11(a)에서 ledge 유무에 따른 저항력과 활동력의 차이를 확인할 수 있다. Ledge의 설치로 저항력과 활동력 모두 증가하지만, 이 중 저항력 증가 효과가 더 두드러지게 나타나고 있다. 이러한 저항력 증가 효과로 인해 ledge를 설치한 경우에 미설치한 경우에 비해 안전율이 크게 나타났다. 이는 ledge가 설치됨에 따라 최소 안전율 확보를 위한 소요 토피고가 감소하게 되며, 이는 ledge 설치를 통해 액상화에 대한 터널 안정성 확보를 위한 굴착 심도를 경감시킬 수 있음을 의미한다.

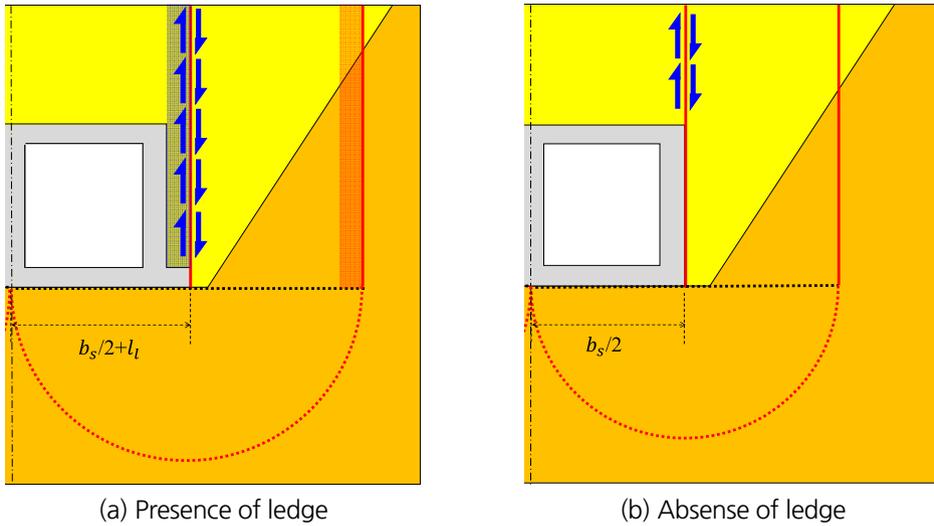


Fig. 10. Difference in section depending on the presence or absence of a ledge

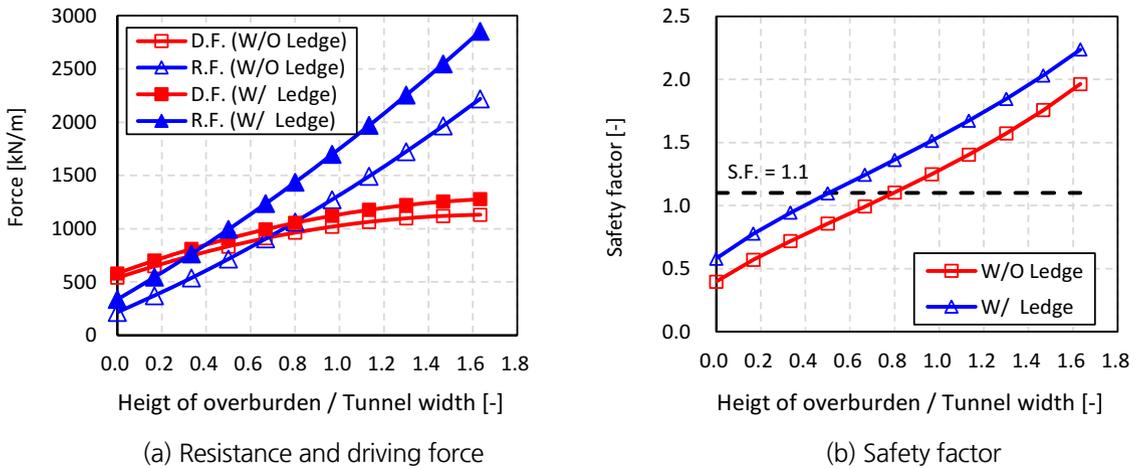


Fig. 11. Resistance force, driving force, safety factor in dependence of overburden

## 5. 결론

지진으로 인한 지반의 액상화는 지중 구조물의 손상 원인이 되어 재산적 피해를 야기한다. 실제 지진 피해 사례들과 액상화 지반 내 지중 구조물의 거동에 대한 다수의 연구로부터 액상화에 의한 지중 구조물의 변위는 주로 상향 변위, 즉 구조물 부상이 지배적이며, post-liquefaction 단계에서 지진 시 생성된 과잉간극수압 소산에 의한 침하하는 경미한 것으로 나타났다. 하지만 현재 시행되고 있는 설계는 post-liquefaction에 의한 침하에 대한 안정성 확보를 전제로 설계되고 있으며, 지중 구조물의 부상에 따른 안정성 검토는 극히 제한적으로만 이루어지고 있는

실정이다.

이에 해당 논문에서는 지중 구조물의 부상 현상을 고려한 액상화 지반 내 개착식 터널의 안정성 평가를 위한 analytical solution을 제안하였고, 이를 활용하여 민감도 분석을 시행하여 토피고, 액상화 심도, 지반개량의 영향을 아래와 같이 확인하였다.

1. 개착식 터널 상부로 토피고의 증가는 작용력과 저항력의 증가를 야기하며, 상대적으로 더 큰 저항력 증가율로 인해 결과적으로 안전율이 증가한다.
2. 터널 바닥 하부로부터 액상화 심도가 낮을수록 활동력이 감소하여 액상화에 대한 터널의 안전율이 증가한다.
3. 지반 개량을 통해 터널의 안정성을 증가시킬 수 있으며, 지반 개량에 대한 안전율 변화량을 확인하여 지반 개량의 효과를 정량적으로 확인할 수 있다.
4. Ledge 설치로 인해 저항 영역이 확장되고, 마찰력 작용 길이가 연장된다. 결과적으로 ledge 설치는 안전율을 증가시키는 효과가 있다.

본 논문에서 제안한 액상화 지반 내 지중 구조물의 안정성 평가 방법은 거동에 대한 불명확성으로 인해 여러 가정을 포함하고 있다. 따라서, 향후 수치 해석적 방법, 시험적 방법 등을 통해 이 가정들에 대한 적합 여부를 검토해야 할 필요가 있다. 하지만, 보수적인 접근법을 채택하여 상당 부분의 불명확성이 완화된 것으로 판단된다. 이와 더불어 액상화 지반 내 지중 구조물의 uplift 거동 특성을 반영한 접근법이라는 점에서 큰 의미가 있다고 사료된다.

## 저자 기여도

오주영은 장석부와 함께 안정성 평가 기법 개발을 하였고, 또한 민감도 분석 및 원고 작성을 하였다. 이재환은 분석 결과에 대한 검토와 분석 모델에 대한 보완 아이디어를 제공하였고, 장석부는 연구 개념 제공 및 기법 개발, 그리고 원고 검토를 하였다.

## References

1. AASHTO (2017), LRFD road tunnel design and construction guide specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. Arduino, P., Ashford, S.A., Assimaki, D., Bray, J.D., Eldridge, T., Frost, D., Hashash, Y.M.A., Hutchinson, T.C., Johnson, L.A., Kelson, K.I., Kayen, R.E., Ledezma, C., Moss, R.E.S., Mylonakis, G.E., Olson, S.M., Rollins, K.M., Sitar, N., Stewart, J.P., Urz, A., Verdugo, R., Witter, R.C., Zoa, N. (2010), Geoenvironment reconnaissance of the February 27, 2010 Maule, Chile Earthquake, Report of the National Science Foundation-Sponsored Geoenvironment Extreme Events Reconnaissance (GEER) Team, GEER

Association Report No. GEER-022.

3. Chian, S.C., Tokimatsu, K. (2012), "Floatation of underground structures during the  $M_w$ 9.0 Tōhoku earthquake of 11<sup>th</sup> March 2011", Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
4. Kang, G.C., Iai, S. (2012), "Liquefaction-induced uplift of geotechnical buried structures: centrifuge modeling and seismic performance-based design", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 10, pp. 5-16.
5. Konishi, Y., Tobita, T., Takahashi, K., Takeuchi, M. (2008), "Estimation of uplift displacement and evaluation of countermeasure against uplift of a sewage manhole", Journal of Japan Sewage Works Association, Vol. 45, No. 553, pp. 99-111.
6. Koseki, J., Matsuo, O., Ninomiya, Y., Yoshida, T. (1997), "Uplift of sewer manholes during the 1993 Kushiro-Oki Earthquake", Soils and Foundations, Vol. 37, No. 1, pp. 109-121.
7. Nokande, S., Jafarian, Y., Haddad, A. (2023), "Shaking table tests on the liquefaction-induced uplift displacement of circular tunnel structure", Underground Space, Vol. 10, pp. 182-198.
8. RTRI (Railway Technical Research Institute) (1999), Earthquake design standard for railway structure, Maruzen (In Japanese).
9. Watanabe, K., Sawada, R., Koseki, J. (2016), "Uplift mechanism of open-cut tunnel in liquefied ground and simplified method to evaluate the stability against uplifting", Soils and Foundations, Vol. 56, No. 3, pp. 412-426.
10. Yasuda, S., Kiku, H. (2006), "Uplift of sewage manholes and pipes during the 2004 Niigataken-Chuetsu earthquake", Soils and Foundations, Vol. 46, No. 6, pp. 885-894.