

## 성토지지말뚝공법의 침하안정성 분석

### Analysis of Settlement Stability on the Pile-Supported Embankment by Numerical Method

김승선<sup>\*†</sup>, 이일화<sup>\*\*</sup>, 이주공<sup>\*</sup>, 심성규<sup>\*</sup>

Kim Seung sun <sup>\*†</sup>, Lee Il-Wha <sup>\*\*</sup>, Lee Joo gong <sup>\*</sup>, Shim Shung kyu <sup>\*</sup>

**Abstract** The pile supported embankment system that transfers the train and embankment load to the bearing layer through the piles has constructed widely in Europe and China to control railway settlement of the soft ground. In this study, settlement analysis by numerical method was conducted to analyze the application of pile-embankment for concrete slab on the soft ground in Korea. Parametric studies by changing the height of embankment, thickness of soft soil were carried out. 2-D and 3-D piled supported embankment models has developed to compare the settlement and the effect of soil arching phenomenon.

**Keywords** : Pile supported embankment, Displacement, Geosynthetics

**초 록** 본 연구에서는 성토지지말뚝공법의 성토지지말뚝의 보강 및 아칭효과를 분석하고 국내 적용성을 검토하기 위해 수치해석을 통해 침하 안정성 검토하였다. 수치해석은 성토체 높이와 연약층 두께를 매개변수로 하여 성토체 및 철도열차하중에 의한 침하량을 분석하였다. 운영하중에 의한 침하량은 계획고와 연약층후에 비례하는 것으로 나타났으며, 침하량은 모두 국내 철도기준을 만족하는 것으로 나타났다. 하중전이층의 3차원 하중전이 거동 양상을 분석하기 위해 3차원 수치해석을 수행하여 평면변형을 조건의 해석과 비교 분석하였다. 3차원 수치해석결과는 2차원 수치해석결과에 비해 침하량은 감소하고 말뚝의 축력은 증가하는 경향이 나타난다.

**주요어** : 성토지지말뚝, 토목섬유, 침하 안정성

## 1. 서 론

최근 국내 철도분야에서는 콘크리트궤도가 전통적으로 부설되어온 자갈도상 궤도의 단점을 보완할 수 있는 대안적인 시스템으로 자리잡아가고 있다. 콘크리트궤도는 기존 자갈도상궤도와 달리 침하가 발생하였을 경우 궤도의 사용성 저하가 크고 대처방안이 매우 제한적이기 때문에 연약 지반상에서 궤도의 잔류침하를 엄격히 제한하고 있으며 경제성

† 교신저자: (주)본이앤씨(sunandjoy@naver.com)

\* (주)본이앤씨

\*\* 한국철도기술연구원

측면이나 정책적인 이유로 급속시공이 필요한 경우가 많아지고 있다. 이러한 여건에서 연약지반 상에 콘크리트궤도를 부설 할 경우 압밀축진공법과 같은 일반적인 지반개량 공법을 적용하는 데에는 한계가 있으며, 이차압축이 큰 특정연약지반에 대해서는 근본적으로 적용이 불가능한 경우도 있다. 이러한 문제점을 근본적으로 해결할 수 있는 새로운 공법이 요구되고 있으며, 이에 대한 대안으로 성토지지말뚝공법이 새롭게 부각되고 있다. 성토지지말뚝공법은 연약지반처리공법의 일종으로 성토 및 상부하중을 말뚝을 통하여 지지력이 양호한 지반에 전달하여 연약지반 자체의 압밀침하에 영향을 받지 않기 때문에 장기 침하를 근본적으로 억제하는 능동적인 공법이다. 본 연구에서는 성토지지말뚝공법의 성토지지말뚝의 보강 및 아칭효과를 분석하고 국내 적용성을 검토하기 위해 수치해석을 통해 침하 안정성 검토하였다. 수치해석은 성토체 높이와 연약층 두께를 매개변수로 하여 성토체 및 철도열차하중에 의한 침하량을 분석하였다. 또한 하중전이층의 3차원 하중전이 거동 양상을 분석하기 위해 3차원 수치해석을 수행하여 평면변형을 조건의 해석과 비교 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 검토조건

#### 2.1.1 침하안정성 분석 조건

본 논문에서는 상용 유한요소 해석프로그램인 PLAXIS(2014)를 적용하였다. 수치해석 모델은 고속철도 대표단면을 적용하여 Fig. 1과 같이 구성하였다. 계획고와 연약층 두께를 매개변수로하여 수치해석을 수행하였고 분석 조건은 다음 Table 1과 같다. 수치해석은 하중전이층의 3차원 하중전이 거동 양상을 분석하기 위해 2차원과 3차원 수치해석을 수행하였다.

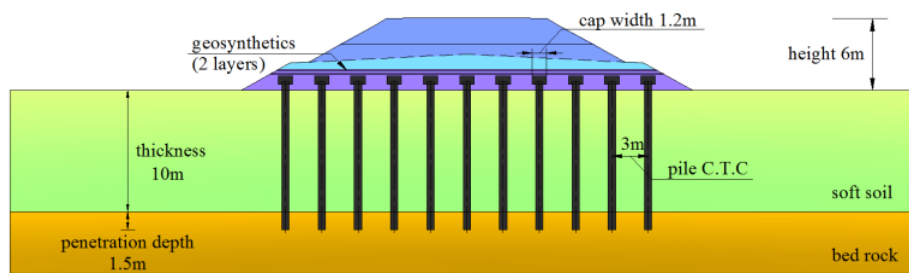


Fig. 1 Cross section profile for numerical piled embankment modeling

Table 1 The pile-supported embankment analysis cases

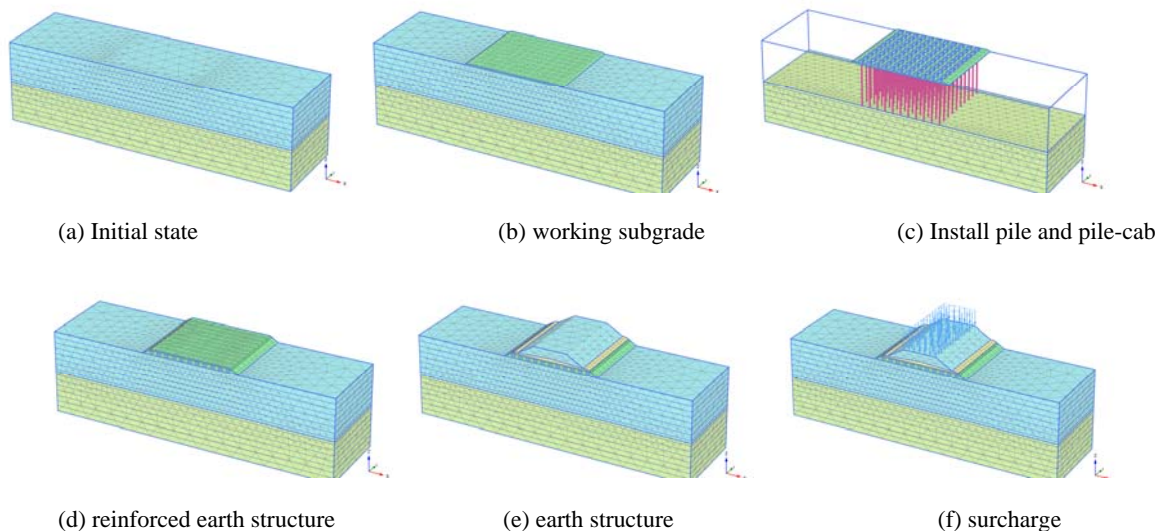
Load : High-speed rail road(50kPa)	Pile C.T.C : 3.0m(square, D600 PHC)
Height of embank (H) : 3.0, 6.0, 9.0, 12.0m	Pile-Cab width : 1.2m
Thickness of soft soil : 5.0, 10.0, 15.0, 20.0m	Geo-Synthetics : 200kN/m(2 layer)

수치해석에 사용한 물성은 Table 2와 같다. 원지반과 성토체는 Mohr-coulomb의 탄소성 모델을 적용하였으며, 토목섬유 보강재는 휨강성은 없고 인장강성만 가지는 요소인 GRID 요소를 적용하였다. 말뚝은 PILE요소를 적용하였으며, 말뚝과 지반의 마찰력은 무시하고 말뚝 축력에 대한 거동만 고려하였다.

**Table 2** Material properties used in the pile-supported embankment analysis.

Materials		Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Friction angle (degree)	Elastic modulus (MPa)	Poisson ratio (-)
Embank	Upper roadbed	19.0	15	30.0	80	0.33
	Lower roadbed	19.0	15	30.0	60	0.33
	Load transfer layer	20	-	37.0	80	0.33
Soft soil		17.5	23	-	15	0.40
Bed rock		23.0	400	32.0	500	0.27

수치해석은 운영하중에 의한 침하량을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 시공단계를 고려하여 수행하였다. 침하량 기준은 Korea Rail Network Authority(2012)(이하 KR Code)의 기준을 적용하였으며, 이에 따르면 「콘크리트궤도에서 쌓기의 총 허용 잔류 침하량은 30mm로 하며, 이는 노반 인수인계 후 원지반 침하량과 성토체 침하량 및 궤도구조에서의 침하량 총합 25mm, 그리고 열차하중에 의한 침하량(5mm로 가정)을 모두 포함한다.」고 명기되어 있다. 따라서 본 연구에서는 운영 중 추가 침하량 30mm를 적용하여 안정성 검토를 수행하였다.



**Fig. 2** Construction stage for modeling

침하에 대한 검토는 Fig. 3 과 같이 노반(Fig. 3 의 측정위치 ①)과 말뚝과 말뚝사이 원지반(Fig. 3 의 측정위치 ②)에 대해 검토하였다. 특히 노반의 경우 운영중 침하량 분석을 위하여 성토완료시의 침하량과 궤도하중 및 열차하중 작용시의 침하량 차이를 운영중 침하량으로 산정하였다. 말뚝축력과 토목섬유에 작용되는 인장력은 최대값을 분석하였다.

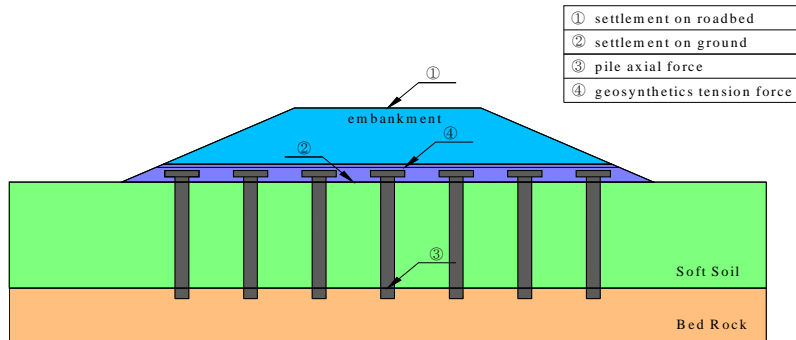


Fig. 3 Check point in cross section

## 2.2 수치해석 검토결과

차량 운행에 따른 운영중 침하량 분석을 위하여 성토완료시 침하량과 운영하중의 침하량을 도상 상단의 동일한 위치에서 측정하였으며 검토 결과는 다음 Fig. 4와 같다. 운영하중에 의한 침하량은 성토고(H)와 연약층 두께(t)에 비례하는 것으로 나타났다. 즉 계획고가 증가할수록 운영중 침하량은 증가하며, 연약층후가 두꺼울수록 운영중 침하량은 증가하는 경향을 보인다. 허용잔류침하량은 KR code에서 노반 인수인계 이후의 기준으로 선정하고 있으므로 성토시 침하량은 허용침하량에서 고려하지 않았으며, 운영하중에 의해 발생된 침하량은 모두 기준치 30mm 이내로 안정성이 확보되는 것으로 나타났다. 3차원 수치해석결과 평면변형을 조건인 2차원 침하량에 비해 약 62~82%감소하는 경향이 나타났다. 3차원 수치해석의 경우 하중전이층의 3차원 하중전이 거동효과로 인해 침하량이 감소되는 것으로 판단된다.

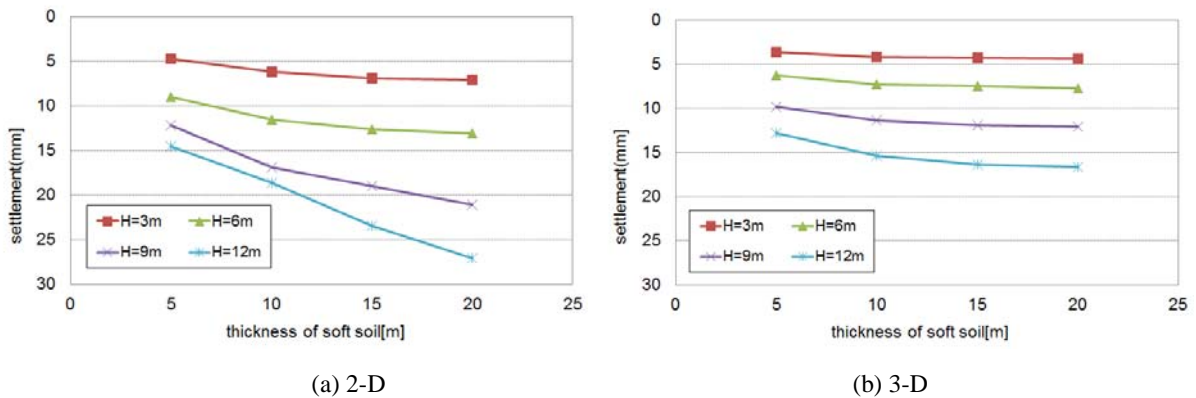


Fig. 4 Embankment settlement by design load

성토지지말뚝의 지반침하량은 지반아치(soil arch)를 통해 말뚝상부로 전달되지 못한 하중의 일부가 연약지반에 직접 전달되는 하중에 의한 침하량이다. 지반의 침하량은 말뚝과 말뚝사이 중앙지점에서의 원지반 침하량을 측정하였으며 Fig. 5 와 같이 나타났다. 원지반의 침하량은 연약층 두께에 따라 증가하는 경향이 나타났다.

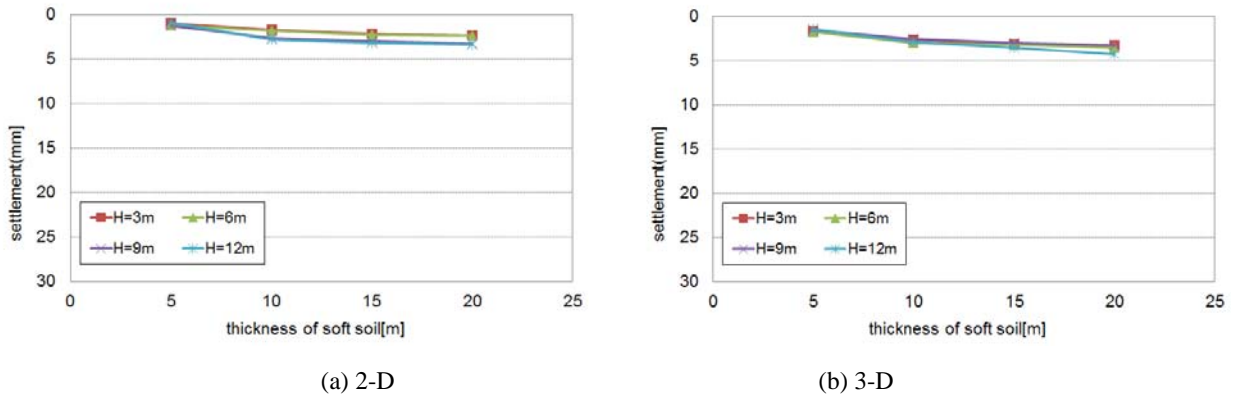


Fig. 5 Ground settlement by design load

말뚝에 작용되는 축력은 Fig. 6과 같이 성토고가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며 연약지반의 심도에 따라서도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 3차원과 2차원 수치해석을 비교한 결과 3차원 해석결과가 약 34~45% 증가하는 경향이 나타난다. 3차원 수치해석의 경우 하중 전이층의 3차원 하중전이 거동효과로 인해 말뚝에 전달되는 하중이 증가하는 것으로 판단된다. 토목섬유에 작용되는 인장력은 Fig. 7은 같이 성토하중 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 연약층 두께는 따라서는 일정심도 이상에서는 비례해서 증가하는 경향은 나타나지 않았다. 3차원 수치해석결과는 토목섬유에 작용되는 인장력은 2차원 대비 감소하는 경향이 나타났다.

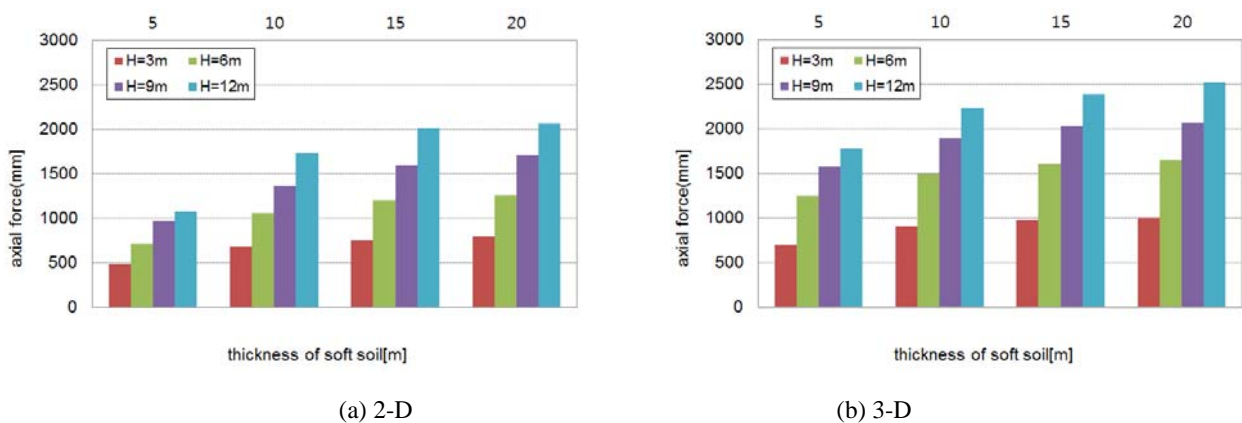


Fig.6 Axial force on piles

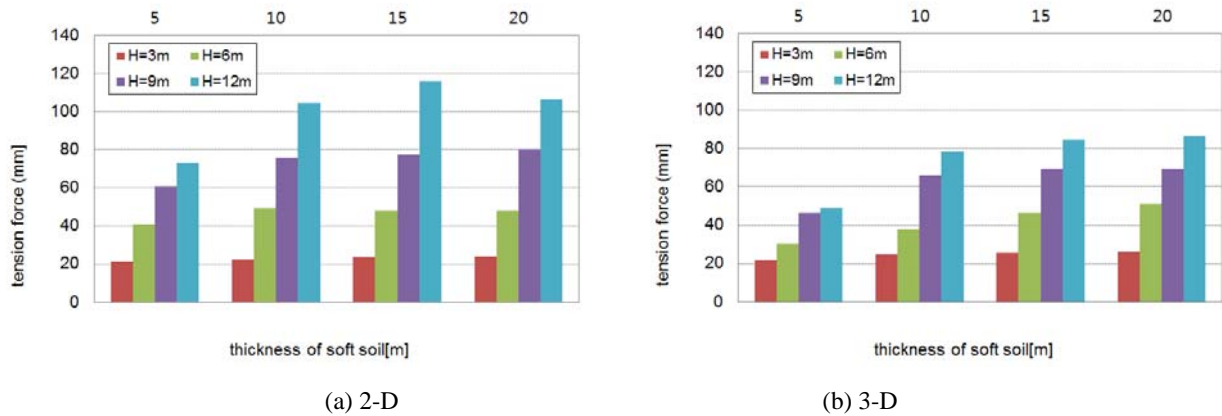


Fig.7 Geosynthetics tension force

### 3. 결론

성토지지말뚝의 수치해석을 통한 침하안정성 분석결과 모두 고속철도의 침하 기준을 만족하는 것으로 나타난다. 침하경향을 분석한 결과 공사중 침하량 및 운영중 추가 침하량은 계획고와 연약층후에 비례하는 것으로 나타났다. 이는 계획고가 증가하면 상부 하중이 증가되고, 연약층후가 증가함에 따라 침하 영향 범위가 증가하기 때문이다. 그리고 3차원 수치해석결과는 평면변형을 조건인 2차원 수치해석결과에 비해 침하량은 감소하고 말뚝의 축력은 증가하는 경향이 나타난다. 이는 3차원 하중전이 거동효과로 인해 말뚝으로 전이되는 하중이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(연약지반구간 교량대체를 위한 침하역제공법 개발, 15RTRP-B067919-03)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 이수형, 이일화, 이성진, 최정환(2008), “토목섬유 보강 성토지지말뚝의 최신 설계동향”, 한국지반공학회지, Vol.24, No.9
- [2] BS8006(1995), British Standard, Code of practice for: Strengthened/reinforced soils and other fills.
- [3] Korea Rail Network Authority(2012), “Design of embankment”, KR C-04020.
- [4] the German Geotechnical Society(2011), “Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures Using Geosynthetic Reinforcements-EBGEO”