

비개착공법 시공에 의한 철도교량 말뚝기초에 대한 연구 A Study on a Pile foundation of Railway Bridge by Non-open cut Method

이만희*, 김지환**, 조국환†

Man-Hee Lee*, Ji-Hwan Kim**, Kook-Hwan Cho†

Abstract Recently, cases of subsurface construction below existing structures are increased with the expansions of cities. When a subsurface structure is constructed under pile foundation, deformations in the ground are generated. This changes cause the additional axial force and moment in the pile foundation. This study investigates the influence around the pile foundation when the structure is constructed by non-open cut method under substructure of the railway bridge. Laboratory tests were performed by applying scale effect. The numerical analyses were also performed by considering construction sequence and distance between pile foundation and steel pipe. As the result, this study suggests the proper range of grouting for ground improvement around pile foundations.

Keywords : Non-open cut Method, Pile foundation, Model test, Grouting

초 록 최근 도심지 발전이 지속됨에 따라 기존 구조물 하부에 지하 구조물을 시공하는 사례가 증가하고 있다. 지하 구조물이 시공되는 경우 상부 구조물의 말뚝기초 및 주변 지반에 변형이 발생하게 되며, 이와 같은 외력 변화에 의한 말뚝기초의 추가적인 축력 및 모멘트 변화가 발생한다. 본 연구에서는 철도교량 하부에 비개착공법으로 구조물이 통과하는 경우, 이에 따른 말뚝기초와 주변 지반에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 상사율을 적용하여 과업구간을 모사한 모형실험과 기초와 강관의 이격거리 및 시공순서를 고려한 수치해석을 실시하였다. 그 결과, 시공순서를 고려한 기초와 강관의 이격거리에 따른 지반의 거동을 확인하여 지반보강 그라우팅 영역을 제안하였다.

주요어 : 비개착공법, 말뚝기초, 모형실험, 그라우팅

1. 서 론

최근 도심지 발전이 지속됨에 따라 기존 구조물 하부에 지하 구조물을 시공하는 사례가 증가하고 있다. 도심지의 경우 용지가 제한적이며, 시공 중 다양한 민원이 제기됨에 따라 신설되는 구조물은 지하화할 수 밖에 없게 되었다. 이에 신설 구조물이 기존 구조물과 근접하여 계획되는 경우가 자주 발생되고 있다. 지하 구조물이 시공되는 경우 상부 구조물의 말뚝기초 및 주변 지반의 변형이 발생하게 된다. 이와 같은 외력 변화에 의한 말뚝기초의 추가적인 축력 및 모멘트 변화가 발생한다. 즉, 지하 구조물 굴착시 시공된 상부 말뚝기초의 지지거동 안정성이 저하되며, 이에 대한 기존의 여러 연구가 진행되어 왔다.

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 대우건설

** 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

본 연구에서는 00억 철도교량 하부에 비개착공법으로 구조물이 통과하는 경우, 이에 따른 말뚝기초와 주변 지반에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 기존 연구 동향

2.1.1 교량하부를 통과하는 기존 연구 고찰

철도 및 도로교량 하부에 구조물을 시공하는 경우, 기존 연구 동향은 터널굴착에 따른 말뚝과 터널의 상관성을 중심으로 연구가 진행되어 왔으며, 이와 관련된 연구는 다음과 같다.

Choi et al.[1]은 터널 굴착에 따른 상부교량 말뚝기초의 거동 변화를 3차원 수치해석을 통하여 분석하였으며, 또한 터널의 심도변화에 따른 상부 말뚝기초 거동의 변화를 분석하기 위하여 직경 10m인 터널의 심도에 대한 매개변수 분석을 수행하였다.

Lee et al.[2]은 기존 모형말뚝에 인접하여 터널을 굴착하는 경우 모형실험과 수치해석을 수행하여 모형말뚝에 대한 거동을 규명하였다. 그 결과, 모형터널의 굴착 정도인 지반손실에 따라 수직하중을 받고 있던 모형 말뚝에 수직 및 수평변위가 동시에 발생하였으며, 이로 인해 모형말뚝이 기울어지는 현상이 발생하였다. 이러한 모형말뚝의 기울기 정도는 터널굴착으로 인한 지반손실, 터널중심으로부터 말뚝 선단부까지의 이격거리와 말뚝 선단부의 지지층 조건에 따라 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

Cho et al.[3]은 기존 말뚝기초와 인접(1D 이내)한 신설터널의 거동을 알아보기 위하여 실내 모형실험기에 균질한 사질토지반을 조성하여 말뚝기초와 터널의 이격거리에 따른 구조물의 거동을 확인하였다. 그 결과 말뚝기초와 터널 라이닝으로부터 수평·수직 방향으로 0.50D 이상 이격되면 라이닝과 말뚝의 상호영향이 확연히 작게 나타났으며, 그보다 가까워지면 영향성이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

2.1.2 비개착공법의 기존 연구 고찰

비개착공법은 다양한 입체 교차화 사업에 적용되고 있으며, 최근 도심지 공사에 교통 불편으로 인한 민원 해결과 지장물 이설비용을 최소화하기 위해서 그 적용이 늘어나고 있다. 비개착공법의 개념은 굴착 전 지반이완 등의 주변 변형을 억제할 수 있는 임시 지보를 설치한 후 안전하게 굴착하여 구조물을 시공하는데 있다. 이에 비개착공법은 개착공법의 적용 가능 여부, 현장의 지반조건과 인접건물의 여부 및 작업공간의 확보가능 여부 등을 고려하여 진행되어야 한다. 비개착공법은 위에서 언급했듯이 구조물 구축시 지반이완과 관련하여 지반거동을 중심으로 연구가 진행되고 있으며, 이와 관련된 연구는 다음과 같다.

Eum et al.[4]은 현장계측을 통해 프론트잭킹 공법과 파이프루트 공법을 적용한 철도지하 횡단공사에 따른 지반거동을 분석한 결과, 강관 관입과 굴착공정에서 80% 이상의 침하가 발생한다고 하였다.

Roh[5]도 RPS(Roof Panel Shield)공법에 의한 지하횡단구조물의 시공을 3차원 수치해석에 의해 모사한 결과, 최종적으로 발생한 지표 변위량의 1/3이 강관루프의 형성시에 발생한다고 하였다.

Choi et al.[6]은 비개착공법을 이용하여 입체교차 구조물을 시공할 경우 상부지반의 침하와 강관 주변의 변위를 3차원 수치해석으로 분석하였다. 수치해석결과, 사각형 강관 관입에 의한 주변지반의 거동은 수평방향보다 연직방향의 변위에 크게 좌우되며, 토피고가 낮을수록 침하량이 보다 커지는 것으로 파악되었다.

Choi et al.[7]은 비개착공법에서 상부 구조물의 하중을 지지하는데 유용한 사각형 강관의 관입이 지반에 미치는 영향을 파악하고자, 모형오거에 의한 굴착과 동시에 사각형 강관이 관입되는 모형 토조실험을 실시하였다. 실험 결과, 토피고가 낮을 경우에는 사각형 강관 주변의 모든 방향으로 대체로 균등하게 영향범위가 나타난 반면, 토피고가 높아질수록 사각형 강관 관입에 의한 영향범위는 주로 강관 상부에서 넓게 나타나고, 특히 상부 영역의 수평 변형률에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Eum et al.[8]은 모형 토조실험을 통해, 비개착공법에서 관의 형태에 따른 지반의 침하량과 용기량을 비교하였다. 그 결과, 동일한 토피고에서 사각형 강관이 원형 강관보다 용기와 침하가 크게 발생하긴 하지만, 관의 형태에 의한 변위량보다는 토피고에 따른 변위량의 차이가 보다 크게 나타나는 것으로 발표하였다.

2.2 소 결

최근 기존 구조물 하부에 지하 구조물을 시공하는 사례가 증가하면서 이와 관련된 연구가 활발히 진행 중에 있다. 주로 연구 방향은 기존 철도 및 도로교량의 구조물 하부에 터널로 시공하여 지하 구조물을 신설하는 경우, 이에 따른 말뚝과 터널의 상관성을 중심으로 진행되고 있다. 한편, 비개착공법은 주로 기존 철도 및 도로 성토 지반의 입체교차 사업에 적용되고 있으며, 비개착공법 적용시 지반의 거동과 관련하여 연구가 진행되고 있다. 이와 같이 기존 철도교량 하부에 비개착 구조물 시공과 관련하여 이에 대한 연구와 사례는 미미한 실정으로 본 연구를 아래와 같이 수행하였다.

3. 본 론

3.1 개요

본 연구는 기존 00역 철도교량 하부에 교량기초 파일과 근접하여 00선 사업이 계획됨에 따라 비개착공법인 NTR공법으로 구조물이 통과하는 경우, 이에 따른 말뚝기초와 주변 지반에 미치는 영향을 검토하였다.

상사율을 적용하여 과업구간을 모사한 모형실험과 기초와 강관의 이격거리 및 시공순서를 고려하여 수치해석을 실시하였다. 말뚝선단과 푸팅의 침하량을 기준치와 비교하였으며, 시공순서를 고려한 기초와 강관의 이격거리에 따른 지반의 거동을 확인하였다.

3.2 검토내용

과업구간은 기존 00교 00역의 정거장 구간으로 지층조건은 Fig. 3.1과 같이 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암, 경암, 극경암 순으로 분포하고 있다. 수치해석은 유한요소해석(FEM)프로그램인 MIDAS-GTS를 이용하였으며, 해석에 사용된 지반설계정수는 지반조사결과 및 관련 자료를 분석하여 토질역학에서 가장 널리 쓰이고 있는 Mohr-Coulomb모형을 사용하였다. 지반설계정수는 Table 3.1과 같으며, 수치해석시 검토기준은 기존 00교 말뚝기초의 설계지지력과 일반적인 허용기준을 참고하였으며, 본 과업구간이 정거장 구간임을 고려하여 Table 3.2와 같이 적용하였다.

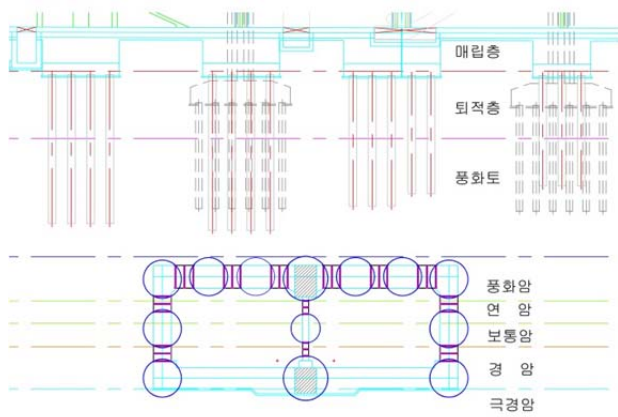


Fig. 3.1 Longitudinal Section

Table 3.1 Geotechnical Properties

구 분	단위중량 (kN)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포위송비	
매립층	17.7	10	27.0	10	0.35	
퇴적층	모래	18.0	10	29.0	13	0.34
	자갈	18.5	0	35.0	50	0.33
풍화토	N<30	19.0	15	30.0	30	0.33
	N≥30	19.5	20	30.5	40	0.33
풍화암	20.5	40	32.0	170	0.30	
연암	23.5	300	34.0	1,600	0.28	
보통암	25.0	1,200	37.0	5,600	0.25	
경암	26.0	1,800	42.0	13,000	0.22	
극경암	26.5	6,000	47.0	36,000	0.21	

Table 3.2 Stability Standards

구 분	말뚝허용변위 (mm)	레도허용변위 (mm)	구조물 침하 (mm)
허용기준	15.0	7.0	10.0
적용기준	7.0 이내		

3.3 실내 모형실험

3.3.1 실내 모형실험 개요

00역 철도교량 하부로 비개착공법인 NTR공법으로 구조물이 통과하는 경우, 말뚝기초와 주변 지반의 영향을 검토하기 위하여 상사율 1:50을 적용하여 과업구간을 모사한 실내 모형실험을 실시하였다.

모형실험 모델링은 Fig. 3.2와 같으며, 재료는 주문진 표준사를 사용하였다. 암층은 인력다짐을, 토사층은 강사법을 적용하여 모델링을 진행하였다. 그리고 구조물 주변 지반의 변형을 확인하기 위하여 2~3cm 간격으로 흙을 염색하였다. 말뚝선단에는 광파 타겟을, 푸팅에는 LVDT를 설치하였으며, 말뚝선단과 강관과의 이격거리에 따라 말뚝선단과 푸팅의 침하량을 확인하였다. 모형실험의 토조와 비개착 구조물 제원은 Table 3.3과 같다.

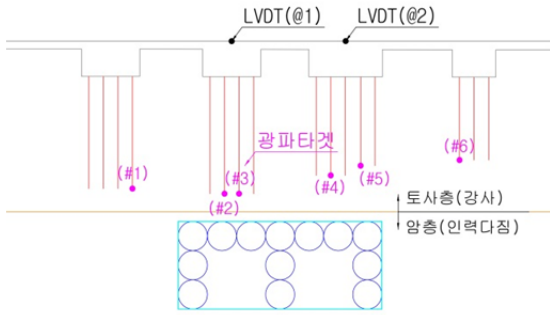


Fig. 3.2 Model test Modeling

Table 3.3 Specification

구 분	토 조	비개착 구조물	비 고
길이(L)	1.2m	0.45m	상사율 (1:50)
폭(B)	1.0m	1.0m	
높이(H)	0.6m	0.2m	

3.2.2 실내 모형실험 결과

Fig. 3.3의 (a)와 같이 기존 구조물을 조성한 후, (b)~(e)와 같이 비개착공법인 NTR공법의 시공 순서를 고려하여 비개착 구조물을 조성하였다. 조성한 후에 하중을 재하하여 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량 결과를 Table 3.4에 나타내었다. 침하량은 기준치보다 작은 값이 나타났으며, 강관 압입시에 비개착 구조물 상부 지반은 (f)와 같이 비개착 구조물 높이(0.5H)에 해당하는 지반의 거동이 발생하였다. 이에 비개착 구조물 상부 지반(0.5H)에 지반보강 그라우팅을 적용할 경우 침하량이 감소될 것으로 예상된다.



(a) Existing Structures Composition



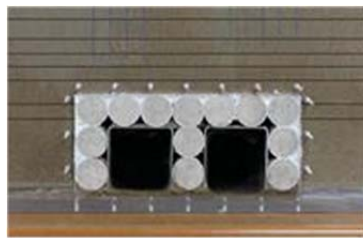
(b) Steel Pipe Injection



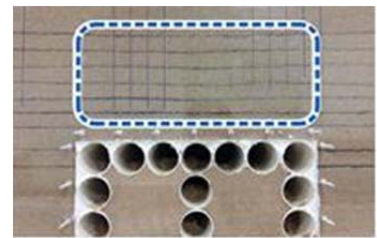
(c) Remove the Soil inside the Steel Pipe, Concreting



(d) Building Structures, Remove the Soil



(e) Completed Structures



(f) Geotechnical Behavior during the Steel Pipe Injection

Fig. 3.3 Non-open cut Structures Composition

Table 3.4 Settlements of footing and pile tip

구 분		푸 팅		말뚝 선단부					
		@1	@2	#1	#2	#3	#4	#5	#6
침하량	4cm	6.8mm	6.5mm	3.8mm	4.8mm	5.6mm	5.2mm	5.0mm	3.4mm
	8cm	4.0mm	4.8mm	1.7mm	2.6mm	3.0mm	2.8mm	2.5mm	1.2mm

3.4 수치해석

수치해석은 기초와 강관의 이격거리(2m, 4m) 및 NTR공법의 시공순서를 고려하였으며, 비개착 구조물 상부 지반에 그라우팅을 적용하였다. Fig. 3.4에 이격거리 2m의 그라우팅 미 적용시 시공순서에 따른 말뚝 선단과 푸팅의 침하량을 나타내었다. 강관내 토사 반출시의 침하량은 각각 말뚝 선단은 0.83mm, 푸팅은 0.85mm로 나타났으며, 강관내 콘크리트 타설시의 침하량은 각각 말뚝 선단은 0.10mm, 푸팅은 0.10mm로 나타났다. 그리고 Fig. 3.5에 비개착 구조물 완료시에 그라우팅 유무에 따른 해석결과를 나타내었다. 그라우팅을 미 적용할 경우에는 말뚝 선단은 4.35mm, 푸팅은 4.55mm의 침하량이 해석되었다. 한편, 그라우팅을 적용할 경우에는 말뚝 선단은 1.93mm, 푸팅은 2.10mm의 침하량이 해석되었다.

결과적으로 말뚝선단과 강관의 이격거리와 시공순서를 고려할 때, 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량은 기준치보다 작은 값으로 해석되었다. 또한 실내 모형실험 결과를 반영하여 비개착 구조물 높이(0.5H)에 해당하는 비개착 구조물 상부 구간에 그라우팅을 적용한 결과, 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량이 감소하였다.

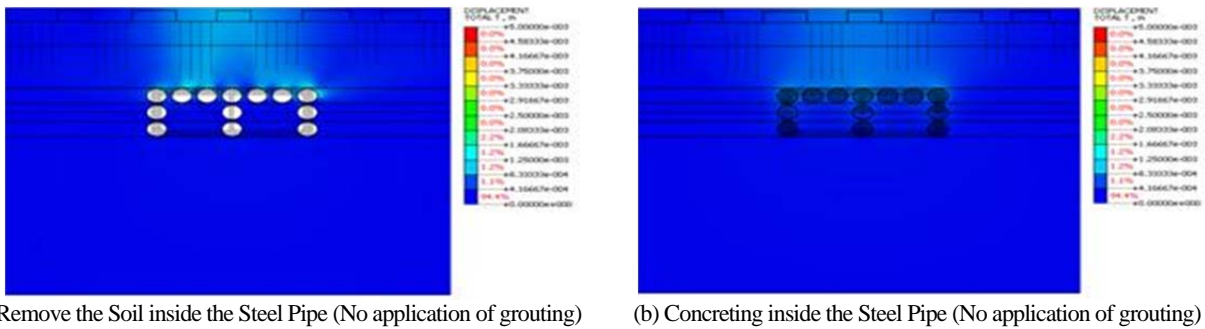


Fig. 3.4 Analysis of results according to construction sequence (Distance Adjacent: 2m)

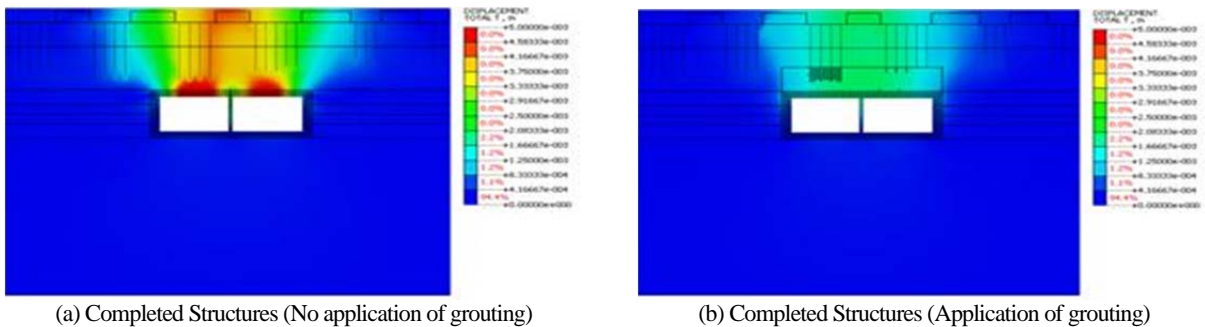


Fig. 3.5 Analysis of results according to (no) application of grouting (Distance Adjacent: 2m)

4. 결론

본 연구에서는 기존 철도교량 하부에 비개착공법으로 구조물이 통과하는 경우, 이에 따른 말뚝기초와 주변 지반에 미치는 영향에 대하여 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 상사율(1:50)을 적용하여 과업구간을 모사한 모형실험을 실시한 결과, 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량은 기준치보다 작은 값으로 계측되었다. 그리고 강관 압입시에 비개착 구조물의

상부 지반은 비개착 구조물의 높이(0.5H)에 해당하는 지반의 거동이 발생하였다. 이에 지반보강 그라우팅을 적용한다면 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량이 감소될 것으로 예상되었다.

둘째, 비개착공법의 시공순서와 기초와 강관의 이격거리를 고려하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석도 시공순서에 따라 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량을 검토한 결과 기준치보다 작은 값으로 해석되었다. 또한 실내 모형실험의 결과를 바탕으로 비개착 구조물 상부 지반의 0.5H에 그라우팅을 적용한 결과, 말뚝 선단부와 푸팅의 침하량이 감소하였다.

셋째, 본 과업구간이 일반 교량 구간이 아닌 교량 정거장 구간이므로 일반적인 허용기준보다는 좀 더 엄격한 기준이 적용되어야 하며, 이에 비개착 구조물 상부 지반의 0.5H 이상 그라우팅을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

기존 구조물 하부에 지하 구조물이 신설되는 사례가 증가하고 있는 만큼, 향후 기존 철도교량 하부에 비개착 구조물이 조성될 경우 이와 관련된 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Choi, G.N., Woo, S.J., Yoo, C.S. (2011), Effect of tunneling under a bridge on pile foundation behavior mechanism., Journal of the Korea Tunneling and Underground Space Association, Vol.13, No.1, pp.51-69
- [2] Lee, Y.J., Hwang, J.W. (2011), A study on degree of inclination of model pile due to tunneling, Journal of the Korea Tunneling and Underground Space Association, Vol.13, No.4, pp.305-317
- [3] Cho, I.H. (2012), Behavior of the Tunnel Constructed in the Vicinity of an Existing Deep Foundation., Master thesis, Dept, of Civil and Transportation Engineering, University of Ajou, South Korea.
- [4] Eun, K.Y., Shin, M.H., and Kim, J.H. (2001), The analysis of Ground Behavior on the Crossing Construction Under Railroad Using Field Measurement., Journal of the Korea Society for railway, Vol.5, No.2, pp. 83-89
- [5] Roh, J.M. (2006), Numerical Analysis of Crossing Tunnel Using Roof Panel Shield Method., Master thesis, Dept, of Civil and Environmental system Engineering, University of Incheon, South Korea.
- [6] Choi, S.W., Park, Y.T., Chang, S.H., Bae, G.J., Lee, K.T., Baek, Y.K. (2012), A numerical study on the three-dimensional ground movement by the trenchless construction method of concrete box by a square steel pipe supporting system., Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol.14, No.5, pp.469-484
- [7] Choi, S.W., Park, Y.T., Chang, SH., Bae, G.J., Lee, K.T., Baek, Y.K. (2012), An experimental study on the ground movement around a square pipe by its penetration for trenchless construction in sandy ground., Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol.14, No.5, pp.485-501
- [8] Eum, K.Y., Choi, C.Y., Cheon, JY. (2010), Analysis of Heaving and Settlement Test of Scale Model Depending on Shape of the Pipe during Pipe Roof Excavation., Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.9, No.4, pp.485-501