

비개착 공법에서의 강관 주변 공극이 지반 거동에 미치는 영향에 대한 연구

전영진*, 박병수**

*강원도립대학교 스마트건설토목과 연구원

**강원도립대학교 스마트건설토목과 교수(교신저자)

e-mail:claynsand@hanmail.net

A Study on the Effect of Annular Void around Steel Pipes on Ground Behavior in Trenchless Construction

Young-Jin Jeon*, Byung-Soo Park*

*Dept. of Civil Eng., Gangwon State Univ. Researcher

**Dept. of Civil Eng., Gangwon State Univ. Professor

요약

본 연구는 비개착 공법에서 강관 삽입 시 발생할 수 있는 강관 주변 공극이 지반 거동에 미치는 영향을 분석하고자 수행되었다. 강관 추진공법과 같은 비개착 시공에서는 강관 외주와 지반 사이에 공극이 형성될 수 있으며, 이는 지표 침하, 지반 변형 및 인접 구조물의 안정성에 중요한 영향을 줄 수 있다. 이를 정량적으로 평가하기 위해 다양한 공극 크기와 지반 조건을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과 강관 주변 공극이 클수록 지표면 침하량이 증가하는 경향을 보였다. 반면 공극이 일정 수준 이하로 적절히 제어된다면 지반의 변형은 허용 가능한 범위 내에서 발생하여 시공 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 비개착 시공 시 강관 주변 공극 크기에 따른 지반 침하 메커니즘을 분석하였다.

1. 서론

도심지 내 지하공간 활용이 확대됨에 따라 기존 구조물과 교통 흐름에 영향을 최소화할 수 있는 비개착 공법이 널리 적용되고 있다. 비개착 공법은 굴착 없이 지하 구조물을 설치할 수 있는 시공 방식으로 시공 중 발생할 수 있는 소음, 진동, 및 지반 침하 등을 최소화할 수 있다는 점에서 하수관, 통신관 및 전력구 등의 설치에 효과적으로 사용되고 있다(Choi et al., 2012). 그러나 강관 추진공법과 같은 비개착 시공에서는 강관과 지반 사이에 공극(annular void)이 발생할 수 있으며, 이로 인해 지반의 침하 및 구조물 안정성 저하가 유발될 수 있다(Lee et al., 2006). 강관 외주와 지반 사이의 공극은 주로 과굴착, 강관과 굴진면 사이의 직경 차이, 마찰 감소 등으로 인해 형성되며, 공극의 크기와 위치에 따라 지표 침하 및 주변 지반 변형 양상은 달라질 수 있다(Kim et al., 2015). Choi et al. (2012)은 비개착 공법에서 강관 삽입 시 지반 침하가 주로 강관 상부에서 발생하며, 토괴고가 낮을수록 침하가 증가하는 경향이 있음을 보고하였다. 또한 Kim et al. (2015)은 Gap Parameter 및 Volume Loss 개념을 적용하여 비개착 시공 시 지반 침하를 수치적으로 예측할 수 있음을 제시하였다. 이와 같이 공극의 형성과 그로 인한 지반 거동 변화는 시공 안정성 확보를 위한 중요한 설계 인자 중 하나로 간주된다. 따라서 본 연구에서는 비개착 공법 적용 시 강관 삽입으로 인해 형성되는 공극의 크기가 지반 거동, 특히 지표면 침하에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 다양한 공극 크기를 변수

로 한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 지반 침하 메커니즘과 안정성 확보 가능성을 정량적으로 평가하였다.

2. 본론

2.1 유한요소해석 개요 및 경계조건

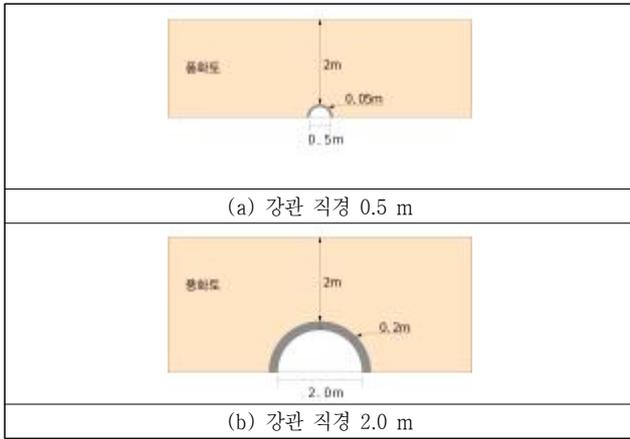
본 연구에서는 비개착 공법에서 강관 주변 공극 크기에 따른 지반의 침하 거동을 분석하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서는 강관의 직경(D) 및 강관과 지반 사이의 이완영역을 변수로 설정하였으며, 강관의 직경은 0.5 및 2.0 m, 이완영역은 0.05 및 0.2 m로 구분하여 분석하였다[그림 1].

[표 1] 수치해석에 적용된 물성치

구분	γ_t (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E' (kPa)	ν'
풍화토	19.0	15	30	50	0.34
이완영역	19.0	1	1	0.5	0.34

Note : γ_t (흙의 단위중량), ν' (포아송비), E' (탄성계수), c' (점착력), ϕ' (내부마찰각)

표 1은 수치해석에 적용된 물성치를 정리한 것이다. 강관-말뚝 사이 경계면에서 소성항복이 나타날 경우 미끄러짐(slip)의 발생을 허용하는 경계요소를 적용하였다. 해석에 적용된 풍화토의 단위중량은 19 kN/m^3 , 포아송비 0.34, 및 탄성계수 $50,000 \text{ kPa}$ 을 반영하였다.



[그림 1] 수치해석에 적용된 유한요소해석 대표 단면도

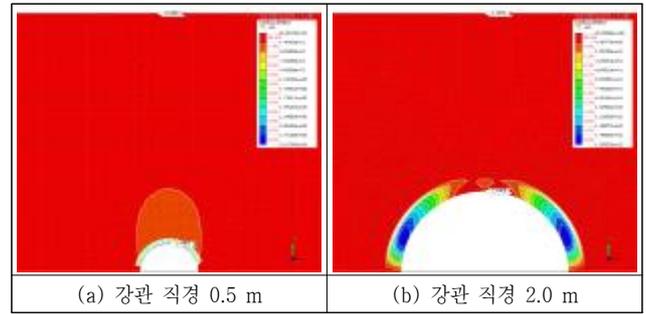
2.2 유한요소해석 결과

[표 2] 수치해석 결과

구분		강관 직경 0.5 m	강관 직경 2.0 m
연직변위	지표침하	(-)0.0959 mm	(-)1.9221 mm
	천단침하	(-)2.9907 mm	(-)2.8969 mm

[표 2]는 강관 직경 0.5 및 2.0 m의 강관 주변 공극 영향에 따라 발생하는 지표 및 천단침하를 정리한 표이다. 해석 결과 직경 0.5 m 강관의 경우 지표침하는 약 -0.09 mm, 천단침하는 -2.99 mm로 나타났으며, 직경 2.0 m 강관에서는 지표침하가 -1.92 mm, 천단침하가 -2.89 mm로 분석되었다. 두 조건 모두에서 지표침하는 강관 직경이 클수록 증가하는 경향을 보였으며, 이는 강관 외주부에서의 지반 이완 범위 증가와 지지력 저하에 기인한 것으로 해석된다. 반면, 천단침하의 경우에는 직경 0.5 m가 소폭 더 크게 나타났으나 두 조건 간 차이는 크지 않았다. 이는 직경이 작을 경우 국부적인 응력 집중에 의해 강관 상부에서의 침하가 상대적으로 크게 발생했음을 나타낸다.

[그림 2]는 강관 직경 0.5 및 2.0 m 조건에서 해석된 수직침하 등고선 분포를 나타낸 것이다. [그림 2(a)]의 경우 지반의 응력 집중이 상대적으로 국부적으로 발생하였으며, 특히 강관 상부 크라운 부근에서 변형률이 가장 높게 나타났다. 반면, [그림 2(b)]는 변형 영역이 넓게 확산되는 경향을 보였으며, 좌우 측면부까지 변형이 확장된 것이 확인된다. 이는 대구경 강관 삽입 시 강관 외주 전반에 걸쳐 지반의 응력 재분포가 발생하며, 국부 집중보다는 광범위한 지반 반응이 유도된 결과로 해석할 수 있다.



[그림 2] 강관 직경 1.5 m 에 대한 수직침하 등고선

3. 결론

본 연구에서는 비개착 공법에서 강관 직경 및 주변 공극이 지반 침하 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과 강관 직경이 클수록 지표침하가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 지반 이완 범위 확대에 기인한 것으로 해석된다. 반면, 천단침하는 직경 0.5 m 조건에서 소폭 더 크게 나타났으며, 국부적인 응력 집중에 따른 영향으로 판단된다. 또한 등고선 분석을 통해 소구경 강관은 침하가 국부적으로 집중된 반면, 대구경 강관은 보다 넓은 범위에 걸쳐 침하가 발생하였다. 따라서 강관 직경과 공극 특성은 지반 거동에 큰 영향을 미치며, 이를 고려한 설계와 시공 계획이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 강원도립대학교 신산업(스마트건설)사업단 산학공동기술개발과제의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- [1] Choi, S. W., Park, Y. T., Chang, S. H., Bae, G. J., Lee, K. T., & Baek, Y. K. (2012). Numerical analysis of ground behavior induced by trenchless construction using rectangular steel pipes. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 14(5), 469-484.
- [2] Kim, H. S., Lee, J. H., & Choi, J. Y. (2015). A study on surface settlement prediction methods for trenchless pipe jacking. *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, 16(2), 5-13.
- [3] Lee, J. H., Han, T. H., & Park, H. J. (2006). Effect of over-excavation on ground settlement in shield TBM tunneling. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 22(6), 85-94.