Hyperbolic 모델을 이용한 그라우팅된 터널 및 인근 지반의 장기 강도 예측



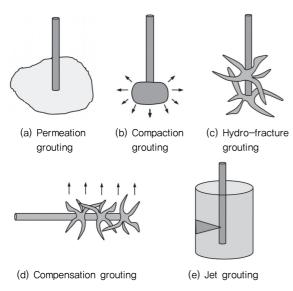
추현욱 경희대학교 교수

1. 개요

최근의 그라우팅 공법은 일반적으로 시멘트 또는 초미립자 시멘트를 사용한다. 시멘트는 수화과정에 의해 시간에 따라 강도가 증가하며, 외국의 경우 그라우팅 주입 후 90일 이상 장기간 경화된 지반에 대한 압축강도 값을 설계 및 시공에 사용한다. 하지만 장기간의 강도를 측정하기 위해서는 경제적인 이유를 포함한 많은 어려움이 따르며, 따라서 시간 의존적 강도 증가 특성을 반영한 해석을 바탕으로 그라우팅된 지반의 장기강도를 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 기사에서는 말뚝의 하중—변위 곡선 해석에 주로 사용되던 Chin의 hyperbolic 모델을 이용하여그라우팅된 지반의 장기강도 예측법을 소개하고자 한다.

2. 그라우팅 공법

터널, 수력 발전소, 지중저장소 등의 지하 구조물은 건설비용이 매우 높으며, 우리가 살고 있는 현대 사회에서 매우 중요한 가치를 지니고 있다. 따라서 다양한 지하 구조물이 지반공학적인 또는 구조적인 문제에 기인하여 성능 저하가 발생하였을 경우, 사회에 매우 큰 파장을 미치므로 이를 방지하기 위한 지속적인 유지 보수가 필요하다. 다양한 유지 보수 공법 중, 그라우팅 공법이란 주입재(그라우트재)를 지중에 충전하여 지반을 고결시키는 공법으로, 그림 1과 같이 크게 5개의 세부 공법으로 구분된다(Han, 2015): 1) Permeation 그라우팅은 지반의 공극이나 공동부를 그라우트재로 채우는 공법이며(원지반 상태보존); 2) Compaction 그라우팅은 높은 점성의 고강도그라우트재를 느슨한 모래 지반에 주입하여 공학적 특성을 개량하는 공법이며(원지반 fabric 변화); 3) Hydro-



〈그림 1〉 그라우팅 공법의 종류

fracture 그라우팅은 고압(최대 4MPa) 하에서 고강도 그라우트재를 주입하여 원지반을 파괴시키고, 파괴로 인해발생된 fracture 부분에 그라우트재를 주입하는 공법이며; 4) Compensation 그라우팅은 지반 굴착 및 터널 시공 등에 의해 손실된 지반부를 그라우트재를 이용하여 보상하는 공법이며; 5) Jet 그라우팅은 깊은 심도에서 흙의침식을 유발하고, 침식된 흙과 그라우트재를 혼합하여 경화체를 만드는 공법이다. 이러한 다양한 종류의 그라우팅 공법은 다음과 같은 주요 프로젝트에서 주로 사용된다:

- 터널 굴착 시 연약한 지반의 강도 증진
- 콘크리트 및 흙 댐에 대한 커튼 그라우팅
- 기존 구조물의 방수 처리
- 유해한 오염 물질의 확산 방지
- 기초 판 형성
- 오래된 댐과 터널의 재개발

위에서 볼 수 있듯이 그라우팅 공법은 중요한 지하 구조물의 유지 보수에 있어 핵심 기술 또는 공법으로 사용

될 수 있다.

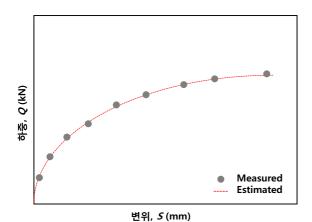
토목 공학의 역사에서, 최초의 그라우팅 공법은 프랑스 기술자 Charles Bérigny에 의해 개발되었다. Charles Bérigny는 1802년에 시멘트와 물의 현탁액을 이용하여 댐의 기초 부분 공동부를 채웠으며, 이후 그는 교량 기초 의 안정화를 위해 그라우팅 공법을 적용하였다. 시간에 지남에 따라 그라우팅 공법은 광업 분야나(독일 1864년) 댐 건설 분야(영국 1876년) 등 다양한 분야에 널리 쓰이게 되었으며, 이를 바탕으로 그라우팅 공법에 대한 이해도의 증가와 함께 다양한 그라우팅 장비 개발이 이루어졌다. 합성재료를 이용한 첫 번째 그라우팅 시험은 1926년 모래 지반의 개량을 위해 수행되었으며, 1930년대 초부터 대형 댐 건설을 위해 보편적으로 사용되었다. 1960년대 이후 기술개발에 힘입어 다양한 합성재료를 이용한 그라우팅 공법이 더 활발히 사용되었으나, 1980년대 이후 현재까지 환경과 지하수 보호에 대한 전 세계적인 요구가 증가하면 서. 시멘트 또는 초미립자시멘트를 이용한 그라우팅 공법 이 보편화되었다.

3. 시멘트의 수화 반응 및 강도의 시간 의존성

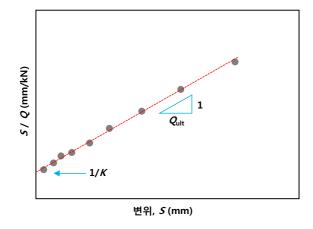
포틀랜드 시멘트의 수화반응이란 시멘트가 물과 결합하여 수화물을 생성하는 과정을 의미한다. 수화반응은 시멘트가 물과 혼합되면서 입자 표면이 겔화되며 가수분해반응이 일어나고, 물이 입자 내부로 침투하여 수화가 진행되고 내부에 또 다른 수화물층을 형성하는 과정이다. 따라서 시멘트 입자 내부의 수화는 장기간에 걸쳐 이뤄지며, 시멘트 입자의 완전한 수화를 위해서는 오랜 시일이 필요하다. 이로 인해 수화작용에 의한 시멘트의 강도 증가는시간 의존적인 경향을 나타내며, 일반적으로 시간에 따라비선형적인 강도 증진 거동을 보인다. 다시 말하면, 수화작용 초기에는 급속도의 강도 증진이 발생하나, 어느 한계 시간 이후에는 시간에 따른 강도 증진이 미미하다.

4. 비선형 모델(Hyperbolic model)

지반의 응력-변형률 간의 관계는 비선형이며, 말뚝의 하중-변위 간의 관계 역시 비선형을 나타낸다(그림 2). Chin (1970)은 하중(Q)과 변위(S) 간의 관계는 비선형이지만, 변위 / 하중과 변위 간의 관계는 선형(그림 3)으로 표현할 수 있다는 점에 착안하여, 말뚝의 극한강도(Qult)를 예측하기 위해 hyperbolic 모델을 제안하였다:



〈그림 2〉 말뚝의 하중-변이 간 관계



〈그림 3〉 Chin의 Hyperbolic 모델

$$S/Q = S/Q_{ult} + 1/K$$
 식 (1)

여기서, K = y절편(그림 3) = 초기 강성(기울기).

따라서 그림 3의 기울기를 이용하여 극한강도를 예측할 수 있으며, y절편을 이용하여 K 값을 예측할 수 있다. 식 (1) 및 그림 3의 과정을 통해 예측된 변위-하중 관계는 실제 말뚝의 하중-변위 거동 및 극한강도를 높은 정확도 로 예측할 수 있다(그림 2).

시간(t)에 따른 고결된 시료의 일축압축강도(UCS) 중 진 역시 시멘트 앞서 서술한 시멘트 수화과정에 의해 비선 형적인 거동을 보이기 때문에, Chin이 제안한 hyperbolic 모델을 활용하여 그라우팅된 지반의 장기강도 또는 극한 일축압축강도(UCS_{ult}) 예측이 다음 식과 같이 예측 가능 하다:

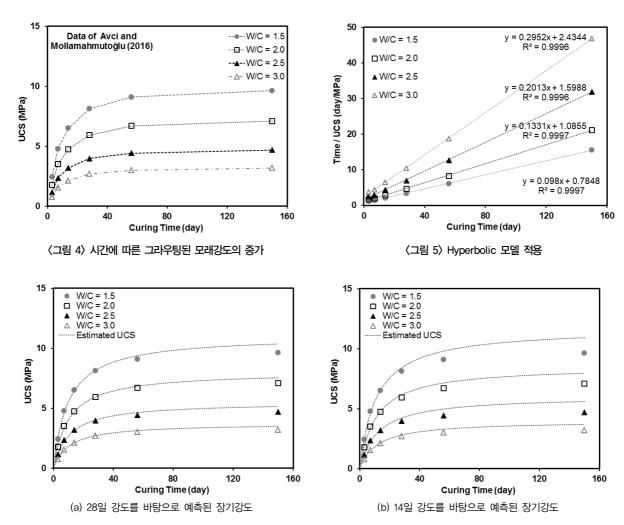
$$t/UCS = t/UCS_{ult} + 1/K$$
 식 (2)

5. 비선형 모델의 적용을 통한 장기강도 예측

그라우트재 주입 후, 시간에 따른 수화진행에 따라 일축압축강도(UCS)가 증가하며, 그 증가율은 시간에 따라 감소한다. 그림 4는 Avci and Mollamahmutoğlu (2016)의 모래시료에 대한 마이크로 시멘트 그라우팅 실험 결과이다. Avci and Mollamahmutoğlu (2016)는 물-시멘트비(W/C)를 바꿔가며 일축압축강도를 장기간 측정하였으며, 시간에 따른 강도 증가를 그림 4와 같이 확인할 수 있다. 또한, 그림 4를 통해 시험 시편의 UCS는 W/C가 감소함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 W/C가 감소함에 따라 모래 입자들 사이의 고결 접촉 결합의 강도가증가되기 때문이다. 앞서 그림 2와 유사하게, 시간에 따른 강도 증가 역시 비선형적인 거동을 보이기 때문에, 식(2)를 이용하여, 그림 4를 그림 5로 변경하여 도시하였다.

 R^2 값이 모든 실험 결과에 대해 0.99 이상으로 양호한 선형관계가 있음을 확인할 수 있으며, 따라서 Chin의 hyperbolic 모델이 그라우팅된 지반의 시간에 따른 강도 증가 및 장기강도 예측에 적용 가능함을 확인할 수 있다.

그림 6은 식 (2) 및 그림 5를 통해 계산된 극한일축압 축강도(UCS_{ult})와 K값을 이용하여 예측된 UCS 값을 실제 실험 결과와 함께 도시한 그림이다. 그림 6(a)는 UCS_{ult}와 K값을 28일까지 수행된 시험 결과를 바탕으로 도출한 결 과이며, 그림 6(b)는 UCSut와 K값을 14일까지 수행된 시험 결과를 바탕으로 도출한 결과이다. 28일 시험 결과를 사용하였을 시, 식(2)를 통해 최대 오차 7.3% 이내의 UCS 예측이 가능하였으며, 14일 시험 결과를 사용하였을 시, 최대 오차 13.2% 이내의 UCS 예측이 가능하였다. 다시 말하면, 식(2)를 활용할 경우, 14일까지의 실험 결과를 바탕으로 150일의 장기강도를 13.2%의 오차 범위 내에서 예측할 수 있다.



〈그림 6〉 Hyperbolic 모델을 이용한 장기강도 예측

6. 맺음말

말뚝의 극한강도를 예측하기 위해 제안된 Chin의 hyper-bolic 모델을 이용하여, 그라우팅된 지반의 장기강도 예측 방법을 알아보았다. 본 기술기사에 소개된 식을 활용할 경우, 14일까지 측정된 일축압축강도를 바탕으로 150일의 장기 강도를 13.2%의 오차 내에서 예측이 가능하였으며, 따라서 14일까지 측정된 UCS 값과 Hydperbolic 모델을 이용하여 그라우팅된 지반의 장기강도 예측이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

- Avci, E., and Mollamahmutoğlu, M. (2016). UCS Properties of Superfine Cement-Grouted Sand. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(12), 06016015.
- Chin, F. K. (1970). Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure. Proceedings of the Second Southeast Asian Conference on Soil Engineering, pp. 83-91.
- 3. Han, J. (2015). Principles and practice of ground improvement, John Wiley & Sons,

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]