

터널과 원심모형실험



이철주
강원대학교 토목공학과

1. 터널과의 인연

개인적인 이야기로 글을 시작하려고 한다. 필자와 터널과의 인연은 약 14년 정도 된 것 같다. 필자의 박사학위 논문의 주제는 원심모형실험과 유한요소해석을 통한 부마찰(negative skin friction)이 작용하는 말뚝의 거동이었다. 박사과정 당시 원심모형실험을 수행하던 몇 명의 친한 친구들이 실험 TBM 근접 시공과 관련된 compensation grouting 이나 터널 굴착에 의한 기존재하는 인접말뚝의 거동 등을 연구했으며, 터널의 대가인 R. J. Mair 교수님과도 인연에도 불구하고 학위논문에 쫓기느라 터널에는 별로 큰 관심을 기울이지 않았다. 또한 박사 후 연구과정시엔 현 국제지반공학회 회장인 C. W. W. Ng 교수님의 대학원 학생들이 기존재하는 터널과 인접한 신설터널을 굴착하는 상황을 원심모형실험으로 모사하는 것을 옆에서 좀 도와주고 그랬으나 역시 터널에는 큰 관심을 가지진 않았었다. 그러다가 한국으로 귀국 후 모 건설 회사를 다닐 때 운이 좋아서 NATM 시공현장에서 약 4개월 정도 근무하면서 터널과의 인연이 시작되었다. 회사에선 터널을 잘 모르는 필자가 현장실무를 통해 터널시공을 배운 후에 터널분야의 기술개발을 진행하게 하려는 의도였다. 하지만 회사에겐 참으로 미안하게도 그 경험이 회사의 기술개발엔 그다지 도움이 되진 못했지만, 필자에겐 터널시공 현장 실무 경험이란 엄청나게 소중한 자산이 되어 지금까지 이어져 오고 있다. 짧은 시간이었지만 참 다양한 체험을 했던 것 같다. 비슷한 시기에 박사학위의 주제가 아닌 새로운 연구테마를 생각해 보다가 현재 고국인 남아프리카공화국의 한 대학에서 근무하는 친구의 연구주제였던 터널굴착으로 인한 기존재하는 인접말뚝의 거동에 관심을 가지게 되었다. 주로 수치 해석을 통해 연구를 진행했지만, 필자가 근무하는 강원대의 원심모형실험기를 이용하여 간단한 원심모형실험을 실시해 보기도 했지만 안타깝게도 장비의 한계로 인해 논문으로 이어지지는 못했다. 본 글에서는 원심모형실험에서 널리 활용되지 못하고 있는 터널실험에 대한 필자의 생각을 간단히 정리해 보고자 한다.

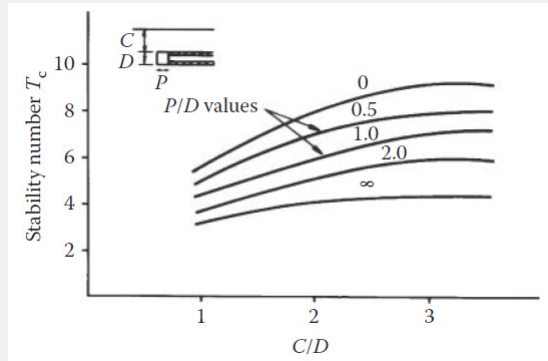
2. 원심모형실험

원심모형실험은 축소된 모형을 고속으로 회전시켜 현장조건과 유사한 응력조건하에서 지반공학 각 분야의 실험을 수행하는 실험기법이다. 그런데 대부분의 원심모형실험은 점토 혹은 모래로 조성된 지반에 대해 수행되며, 암반에 대해 수행된 실험은 매우 제한적이며 특히 매우 복잡한 터널시공 단계를 원심모형실험에서 적절히 구현하는 것은 더욱 어려운 도전이기 때문에 터널분야에 대해 수행된 원심모형실험은 찾아보기 매우 어렵다(물론 점토 및 모래지반에 대해 수행된 터널 원심모형실험은 일부 존재한다). 원심모형실험과 관련된 몇 권의 대표적인 도서에서 인용된 터널 분야의 실험들은 점토, 모래지반에서 수행된 경우로 국한되어 있다.

3. 터널에 대한 원심모형실험

실제 터널시공 과정을 원심모형실험에서 모사하는 것은 매우 어렵다. 이에 대한 근사적인 기법들을 소개하면 대략 다음과 같다. 즉 시료가 포함된 용기(container)가 고속으로 회전 중인 원심모형실험 도중에 터널굴착 즉 지반손실(volume loss)을 모사하려고 물이 들어있는 얇은 고무튜브로 터널라이닝을 감싼 후 이 물을 천천히 제거하는 방법, 공기가 채워진 주머니의 공기압을 적절히 감소시키는 방법, 열을 가하면 연약해지는 플라스틱 같은 것을 라이닝으로 이용하는 방법, 내부에 얇게 설치된 라이닝을 지지하던 두꺼운 외부라이닝을 밖으로 천천히 밀어서 흠의 자중이 모두 내부 라이닝으로 전해지게 하는 방법 등 다양한 간접적인 방법들이 있다. 일본 및 네덜란드에서 원심모형실험 도중 축소된 굴착기계가 실제로 지반을 굴착하는 경우가 있긴 하지만 굳이 이렇게 까지 할 필요가 있을까 하는 생각이 든다. 발파를 통한 터널굴착은 시도된 사례가 있거나 한지 모르겠다. 슛크리트 타설이나 록볼트 설치 역시 마찬가지이다. 따라서 실제 터널시공단계를 실험에서 모두 구현하는 것은 현실적으로 불가능에 가깝다고 할 수 있다. 최근에는 각종 센서들이 소형화 및 무선화되고 있는 추세이긴 하지만 여전히 많은 기술적 어려움이 존재하고 있는 것도 사실이다. 원심모형실험에서 변위 및 간극수압 측정은 상대적으로 어렵지 않지만 라이닝 같은 지중구조물에 작용하는 응력 및 토압을 측정하기 위해서는 보통 실험자가 직접 장비를 제작해야 하는 어려움이 존재한다. 즉 기성제품을 구입하는 것이 아니라 실험자가 각종계측기와 장비를 직접 제작해야 하는 엄청난 도전이 기다리는 것이다.

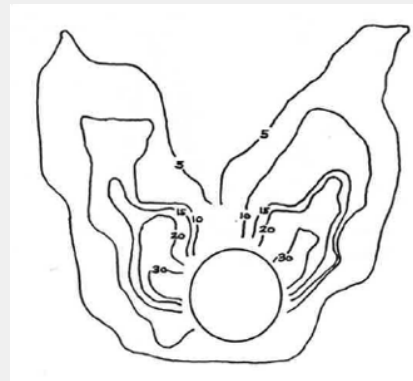
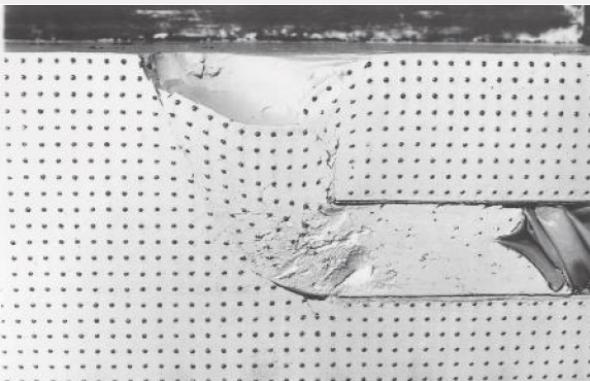
Mair(1979)는 점토지반에 시공된 터널굴착시 막장면의 붕괴를 방지하기 위해 필요한 막장압의 크기를 안정수(stability number)를 이용하여 간단한 설계도표로 제시한 바 있다(그림 1). 이 실험에서는 터널라이닝을 설치하고 터널굴착 이전에는 고무주머니를 이용하여 막장면에 공기압을 작용했으나 이를 천천히 0으로 감소시켜 막장의 붕괴를 유발시켰다(그림 2). 아래의 그림은 막장면이 붕괴된 전경을 보여주며, 작은 점들은 지반의 변위를 알아보기 위해 설치한 장난감 총알이다. 이를 통해 궁극적으로는 터널 붕괴시 지반의 전단변형율을 그림 3과 같이 산정하였다.



〈그림 1〉 점토지반에 시공되는 터널의 막장면의 붕괴를 방지하기 위해 필요한 막장압의 크기에 대한 설계도표(Mair, 1979)

$$T_c = \frac{q + \gamma[C + (D/2)D] - \sigma_{TC}}{S_u}$$

q =상재하중, γ =점토의 단위중량, σ_{TC} =막장압, C =지표면에서 터널크라운 까지의 거리, D =터널직경, P =라이닝으로 지지되지 않은 길이, S_u =점토의 비배수전단강도



〈그림 2〉 막장압을 0으로 감소시켜 발생한 막장의 붕괴(Mair, 1979) 〈그림 3〉 터널막장 붕괴시 지반의 전단변형률(Mair, 1979)

4. 터널분야 원심모형실험 계획

원심모형실험과 터널을 조금만 안다면 누구나 머릿속으로는 터널에 대한 실험계획을 구상해 볼 수 있겠으나, 이를 실제 실험으로 구현하는 것은 대단히 어려운 도전이다. 하지만 아래와 같은 실험을 한번 해보면 어떨까 하는 생각해 본다. 물론 실험이 성공적으로 수행되기 위해선 무엇보다 실험 중 지반 및 구조물의 각종 거동을 정확히 측정할 수 있는 각종 계측기를 구비하고, 터널시공 단계를 적절히 모사하는 것이 가장 중요하다고 하겠다.

a. 필요한(혹은 조속히 개발되어야 하는) 장비 및 기법

1. 3차원 위치정보를 알려주는 흠속에 매립된 센서
2. 지중 응력성분(수직, 수평) 및 수압을 측정하는 센서
3. 각종 구조물에(ex. 터널 라이닝) 작용하는 변위 및 응력성분 측정
4. 초소형 무선 센서(응력, 수압, 변위)
5. 막장압을 작용시킬 수 있는 고무주머니(공기 혹은 물) 혹은 소형 터널굴착 기계
6. 지반의 변위를 시각화하는 PIV(Particle image velocimetry)로 대표되는 visualisation(image analysis) 기법

b. 실험주제

1. 쉴드 TBM에서 막장압의 크기 변화에 따른 지반의 거동
2. 터널근접시공으로 인한 기존재하는 인접건물 혹은 말뚝의 거동
3. 기존 터널의 인근에 신설 터널, 깊은굴착 혹은 현장타설 말뚝시공시 터널의 거동
4. 암반시료를 이용한 터널실험
5. 터널 및 터파기 과정에서 발생한 지하수 유출로 의한 땅꺼짐(싱크홀)
6. 발파
7. 수직구 시공에 의한 주변지반 및 수직구 벽체의 거동

어쩌면 실현 가능성이 높지 못한 부질없는 이야기를 한 건 아닌지 모르겠으나 최소한 학술적으로는 매우 흥미 있는 주제가 아닐까 생각해 본다. 원심모형실험이 가지는 태생적 한계로 인해 이를 실제 터널시공 프로젝트에 제대로 활용하는 것은 요원해 보이지만, 이제는 다양한 터널시공과 관련된 문제를 원심모형실험을 통해 분석하는 것을 적극적으로 고려해 볼 때가 되었다고 생각한다.

참고문헌

1. Mair, R.J. (1979). Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay. Ph.D dissertation, University of Cambridge.