

되메움 조건을 고려한 지하차도 편토압구간 설계사례

황인철¹⁾, 오해진²⁾, 이현식³⁾

¹⁾ 동부건설 과장
²⁾ (주)제일엔지니어링 부사장
³⁾ (주)제일엔지니어링 부장

1. 서론

지하차도와 같이 개착식 지중구조물을 시공하고 되메움할 경우에는 연직, 수평토압에 추가하여 되메움 성토에 의한 부가적인 응력이 유발된다.

특히, 개착식 지중구조물 상부에 편측으로 성토사면이 형성되도록 되메움을 실시할 경우에는 편토압이 부가적인 응력으로 작용하게 되며, 이에 대한 영향을 고려하지 않는 경우 콘크리트 라이닝의 균열과 같은 개착식 지중구조물의 구조적인 결함을 발생시키게 된다.

선진국, 특히 유럽에서는 일찍부터 주로 도심지를 통과하는 일정심도의 지하차도나 지하철 등과 같은 개착식 지중구조물의 설계 및 시공사례가 많이 축적되어 있어 편토압의 해석 및 설계반영과 관련하여 상당한 기술력을 보유하고 있다.

그러나, 국내의 경우에는 최근 개착식 지중구조물의 건설실적은 크게 증가하고 있으나, 이에 비례하여 시공현장에서의 관련 구조물 손상사례 또한 증가하고 있으며, 이의 주요 원인은 지반공학적 특성을 고려한 설계기술 미흡, 개착식 지중구조물의 토압분포 및 크기 예측기술 미흡 등을 들 수 있다.

본 고에서는 편토압이 작용하는 개착식 지중구조물의 설계방법에 대해 살펴보고, 입자결합모델을 사용한 편토압구간 개착식 지중구조물(지하차도) 설계사례를 소개하고자 한다.

2. 개착식 지중구조물의 설계방법

지반굴착후 콘크리트 라이닝 타설 및 원지반 형태로 되메움을 실시하는 개착식 지중구조물에서 콘크리트 라이닝은 상재하중, 토압, 수압, 자중, 터널 내부의 구조물

하중, 온도변화 및 건조수축, 지진하중 등과 같은 다양한 현장조건 등을 고려하여 해석 및 설계가 이루어져야 한다.

개착식 지중구조물 라이닝의 설계방법은 설계상의 편의를 위해 현재까지도 수직 개착공법으로 시공되는 개착식 지중구조물의 라이닝에 대한 구조해석 기법인 Rigid Frame Analysis가 널리 사용되고 있으나, 최근에는 지반공학적인 수치해석 및 토조시험 등을 통한 개착식 지중구조물의 역학적 거동에 대한 연구가 이루어지고 있다. (이규필, 2007)

2.1 구조공학적 개념을 이용한 설계방법

수직 개착공법으로 시공되는 개착식 지중구조물의 설계방법은 Bickel(1996), 일본토목학회(1987) 등이 제안한 바 있으며, 현재 국내 개착식 지중구조물에 대한 설계방법은 이를 준용하고 있다.

이 설계방법의 수행 순서는, ① 터널 라이닝을 그림 1(a)와 같이 스프링으로 지지된 Frame으로 가정하고, ② 여기에 그림 1(b)와 같은 방법으로 수직 및 수평하중을 작용시켜, ③ Rigid Frame Analysis를 통하여 라이닝의 구조 요소에 대한 응력으로 전단력, 축력 및 휨모멘트를 산정함으로써, ④ 구조물로의 안정성을 검토한다.

이때 작용하중은 되메움 지반에 의해 구조물의 상부슬래브 및 측벽에 수직·수평으로 작용하는 것으로 가정한다. 수직하중은 토피하중에 대해 연직토압계수를 곱하여 산정하고 있으며, 연직토압 계수는 지중구조물의 규모, 토피고, 기초지지조건 등을 고려하여 일정한 상수로 제시되어 있다. 한편, 수평하중은 단기 안정성 검토 시에는 주동토압, 장기 안정성 검토 시에는 정지토압으로 가정하고 있다.

그러나, 개착식 지중구조물 주변에 단계적으로 시공되는 되메움 지반은 처음에는 라이닝에 하중으로 작용하

게 되지만, 되메움 시공이 완료된 이후에는 개착구조물 라이닝의 횡방향 변위를 구속하는 지반 반력으로 작용하게 되는데 Rigid Frame Analysis는 이러한 역학적 특성을 적절히 반영하지 못하고 있다.

이렇듯 Rigid Frame Analysis는 되메움 지반과 터널 라이닝 사이의 상호작용 메커니즘을 적절히 반영하지 못할 뿐만 아니라, 굴착 사면의 경사, 굴착 폭 및 지표면의 경사 등 지형적인 영향인자와 Soil arching effect 및 콘크리트 라이닝과 되메움 토체 접촉면의 경계요소(interface element)등과 같은 지반공학적인 측면의 영향인자를 고려하기에 많은 어려움이 있다. (배규진, 2001)

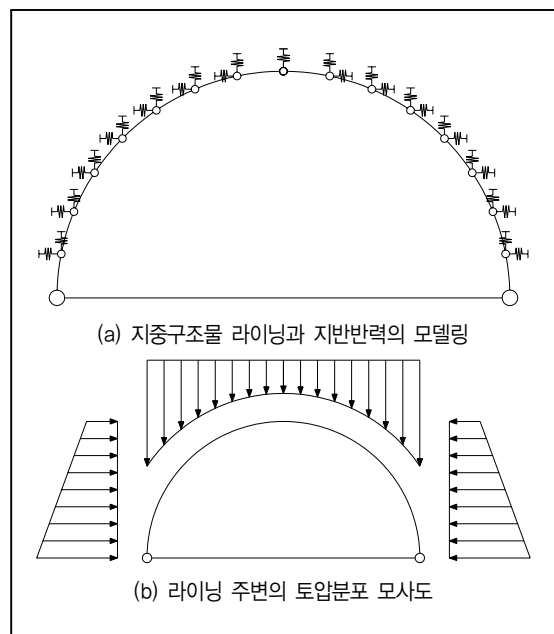


그림 1. 구조해석 예

2.2 지반공학적 개념을 이용한 설계방법

Kovari(1982)는 유한요소해석법(finite element analysis)을 이용하여 그림 2와 같이 되메움 지반과 지중구조물 라이닝 사이의 상호작용을 고려한 설계방법을 제안하였다.

기술기사

이 경우에 고려된 지반과 지중 구조물 사이의 상호작용은 다음과 같은 세 가지 개념에 근거를 두었다.

- 1) 원지반 ①을 고려함으로써 라이닝 하단부의 침하와 회전이 발생한다.
- 2) 이미 성토되어 다짐된 되메움 지반 ②를 고려하여 라이닝의 측방 변형에 대한 지반반력을 유발시켜 구조체의 일부로 작용한다.
- 3) 터널 라이닝에 작용하는 수평하중은 주동토압과 정지토압으로 고려하였으며, 매 단계별 되메움된 지층 ③과 같이 수평하중과 수직하중으로 작용시킨다.

그러나, 이와 같은 유한요소 해석법에서는 매 단계별 되메움 지반을 지반모델 자체로 고려하지 않고 상재하중과 수평하중으로 환산하여 작용시킴으로서 되메움 지층이 지중구조물 라이닝의 변형에 대한 지반반력을 생성하지 못하는 문제점이 발생한다.

더욱이 지중구조물의 라이닝과 되메움 지반 사이 및 굴착 사면과 되메움 지반 사이의 접촉면에서의 상호작용을 고려하지 않음으로 되메움 지반 내부에서 발생하는 아칭효과에 의한 토압의 변화를 제대로 반영하지 못하는 문제점을 갖고 있다.

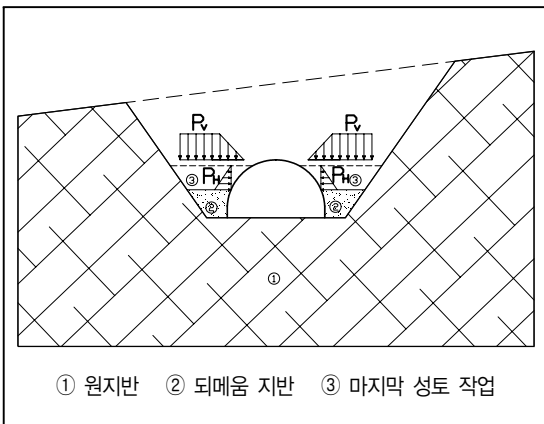


그림 2 되메움 지반과 터널 라이닝 사이의 상호작용(Kovari, 1982)

그밖에 이규필(2004) 등은 성토사면의 영향으로 인하여 개착식 터널 구조물에 작용하는 편토압 고려를 위하여 성토사면 선단부 시공위치, 성토사면 경사 및 굴착사면 구배 등과 같은 현장조건 변화를 고려한 토조실험, 수치해석 기법을 이용한 Design Chart를 제안하였으며, 현장계측을 통한 이의 검증을 수행하기도 하였다.

3. 입자결합모델을 사용한 편토압구간 개착식 지중구조물 설계사례

3.1 입자결합모델해석(PFC 2D) 개요

입자결합모델이란, 입자의 크기를 가지는 원형 입자들의 움직임과 상호작용을 기본으로 하여 지반의 거동을 모사하는 모델로서 이 모델에서 입자의 강성과 점착력을 가지는 입자들은 서로 독립적으로 존재하며 오직 접촉점(contact point)에서만 상호작용을 하도록 되어있다.

국내에서 많이 사용되는 입자결합모델 해석프로그램으로는 PFC 2D, 3D 등이 있으며, 본 절에서는 그중 PFC 2D에 대해 간략히 소개하고자 한다.

먼저, PFC 2D 해석프로그램의 기본가정은 다음과 같다.

- 1) 각 입자들은 변형할 수 없는 강체(rigid body)이며, 입자들 간의 접촉점은 매우 작은 면적(point)에서 발생한다.
- 2) 접촉점에서의 거동은 강체 입자들이 그 접촉점에서 서로 겹쳐짐(overlap)으로써 변형을 일으키도록 soft-contact approach를 사용한다.
- 3) 겹쳐짐의 정도는 힘-변위 공식을 통한 접촉력과 관련이 있으며, 모든 겹쳐짐 현상은 입자 크기에 비해 매우 작게 발생한다.
- 4) 결합은 입자들 간의 접촉에서만 존재하며, 모든 입자는 구형이다.

이러한 기본가정을 바탕으로 PFC 2D 해석프로그램은 시간에 따라 단계별로 입자들의 운동법칙, 각 접촉점에서의 힘-변위 공식, 벽 위치의 일정한 갱신과정 등의 반복을 통해 해석을 수행한다.

즉, 각각의 해석단계가 시작될 때마다 접촉점들은 이미 알고 있는 입자와 벽체(wall)로부터 그 정보가 수정되고 여기에 힘-변위 공식이 각각의 접촉력을 갱신시키기 위해 적용되며 다시 운동법칙으로부터 각각의 입자들의 속도와 위치가 재계산되는 것이다.

그림 3은 PFC 2D 해석프로그램의 해석수행 원리를 나타내고 있다.

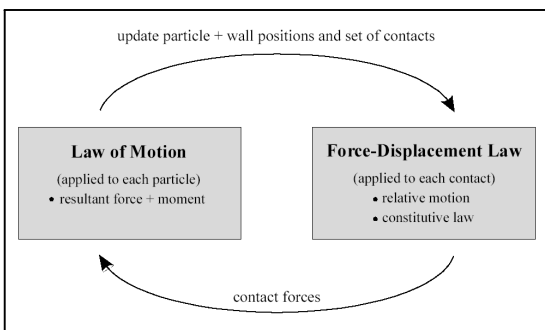


그림 3. PFC 2D 해석프로그램의 해석수행원리

3.2 설계단면 개요

본 고에서 소개하고자 하는 설계사례의 대상구간은 ○○지역 국도건설공사구간의 개착식 지하구조물(이하 ‘지하차도’라고 칭함)중 일부의 편측 되메움 성토 구간으로서 검토단면의 형상은 그림 4와 같다.

지하차도 상부에 되메움성토가 편측으로 이루어짐으로써 편토압이 작용하는 조건이며, 지하차도 상부 되메움 후 우측 성토단면은 높이 10m, 폭 24m 정도의 규모이고, 좌측에 편측으로 이루어지는 성토사면의 구배는 1:2.0, 개착 구조물 중앙으로부터의 이격거리는 10.4m이다.

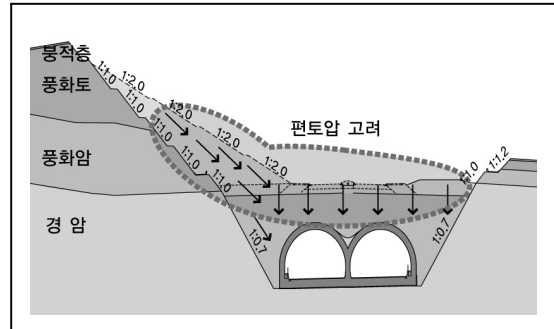


그림 4. 검토단면(STA 3+560)

이러한 조건에서 발생하는 편토압을 합리적으로 산정하기 위하여, 본 검토에서는 전술한 입자결합모델해석(PFC 2D해석)을 수행하였으며 그 결과를 지하차도 구조설계에 반영하였다.

다음의 그림 5는 PFC 2D를 이용한 검토단면의 모델링 과정을 나타내고 있으며, 해석대상 모델은 폭 110m, 높이 80m의 규모로서 해석대상의 규모가 크기 때문에 적절한 해석시간을 고려하여 입자의 최소반경은 0.18m로 하였고, 최대 1.66배의 입자반경을 가질 수 있도록 입자를 설정하였다.

해석대상 모델에 적용된 입자수는 원지방구성시 41,055개, 개착후 23,623개이다.

3.3 검토결과

지하차도 상부에 되메움성토가 편측으로 이루어짐으로써 편토압이 작용하는 경우에 대한 해석결과를 검증하기 위해 그림 6에서 음영으로 표시된 추가성토(되메움 성토)가 있는 경우를 ‘CASE-1’로, 없는 경우를 ‘CASE-2’로 구분하여 검토를 수행하였다.

두 가지 CASE에 대한 해석결과에서 변위분포도는 그림 7, 8과 같으며 편토압에 의한 변위발생 증가량 및 응력증가량은 각각 그림 9, 10과 같다.

기술기사

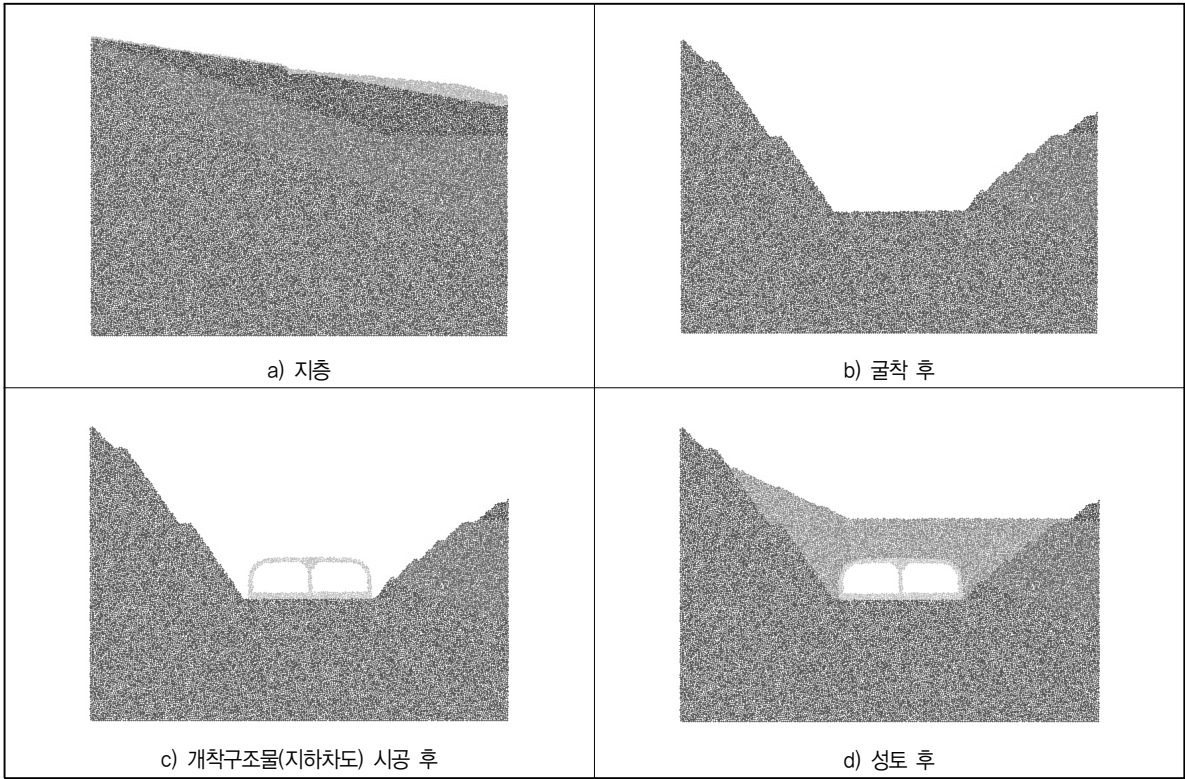


그림 5. 검토단면 모델링과정

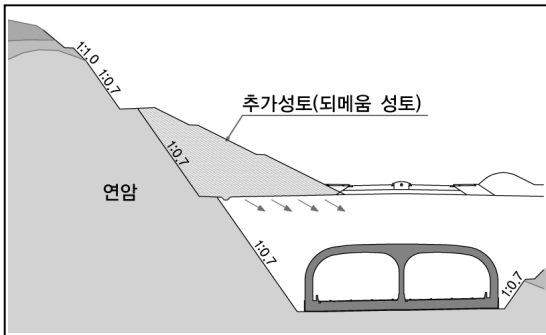


그림 6. 추가성토영역

그림 9에서 볼 수 있는 것과 같이 편토압 작용시 변위는 지하차도 중심으로부터 편성토측으로 약 25% 가량 증가되는 것으로 나타났으며, 응력은 약 17% 가량 증가 되는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 입자결합모델해석이 편측 되메움 성토에 의해 발생하는 편토압의 영향을 합리적으로 평가하고 있음을 나타내는 것이라고 판단되며, 기존의 연속체 해석 결과와 비교검토를 수행할 경우, 좀 더 합리적인 편토압 작용구간의 개착구조물 설계가 가능할 것으로 판단된다.

3.4 편토압 대책 공법

전술한 바와 같이 개착구조물에서 편토압이 작용할 경우에 경제적이고 안전한 설계를 위해서는 편토압 대책공법을 병행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- 편토압의 영향을 감소시킬 수 있는 대책공법으로는 ① EPS블록 성토, ② 지오그리드 또는 지오멤브레인 포설, ③ 토압 증가분을 고려한 지하차도 단면 철근보강 ④ 지

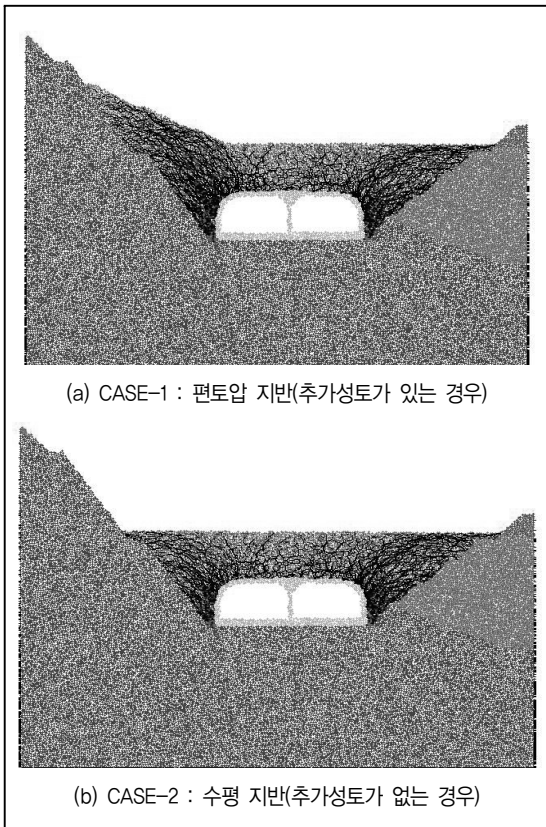


그림 7. 전단면 변위분포도(PFC 2D)

하차도 라이닝 인근에 지중연속벽체 설치 등을 고려할 수 있으며, 그중 설계 적용성이 가장 높을 것으로 판단되는 ‘EPS 블록 성토’ 및 ‘토압 증가분을 고려한 지하차도 단면 철근보강’의 개념도는 다음과 같다.

본 설계에서는 경제성을 고려하여 ‘토압증가분을 고려한 지하차도 단면의 철근보강(철근규격확대 : H 29 → H 32)’을 검토대상구간에 편토압 대책공법으로 적용하였다.

4. 맺음말

본 고에서는 개착식 지중구조물의 설계방법에 대하여

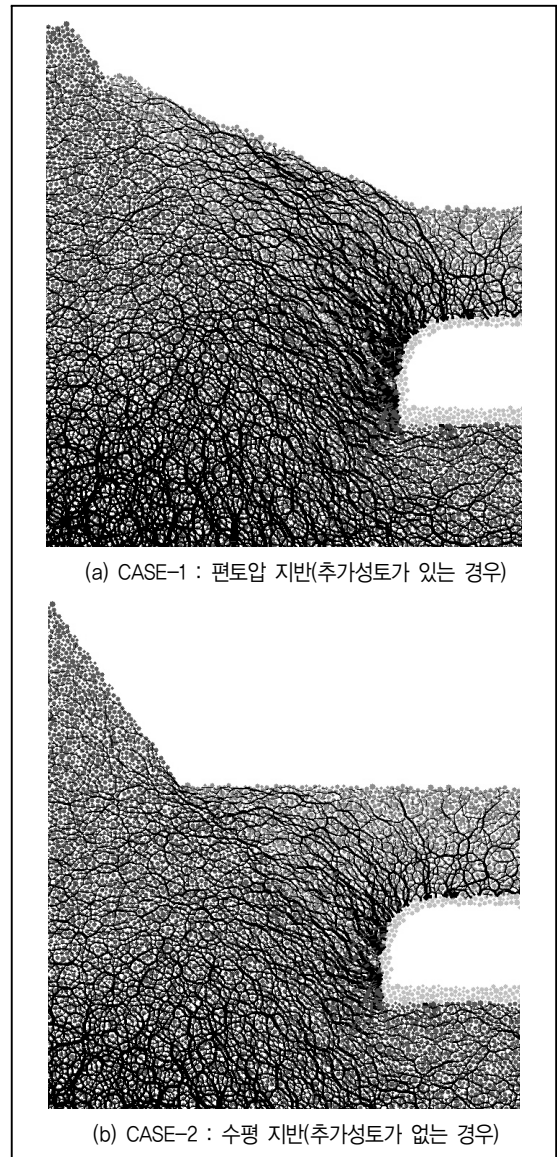


그림 8. 부분 확대단면 변위분포도(PFC 2D)

간략히 살펴보고, 편측 되메움 성토시 개착식 지중구조물에 작용하는 편토압의 영향을 파악하기 위하여 입자결합모델 해석 프로그램 중 하나인 PFC 2D를 설계에 적용한 사례를 소개하였다.

입자결합모델 해석을 기존의 연속체해석과 병행하여

기술기사

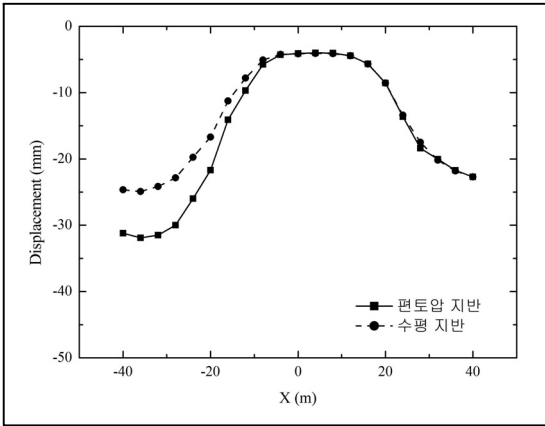


그림 9. 편토압에 의한 변위발생 증가량

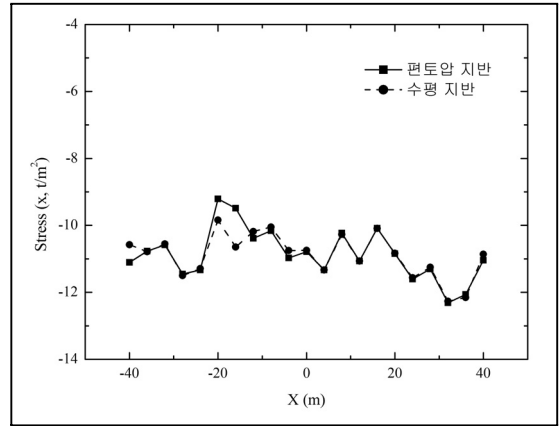


그림 10. 편토압에 의한 응력발생 증가량

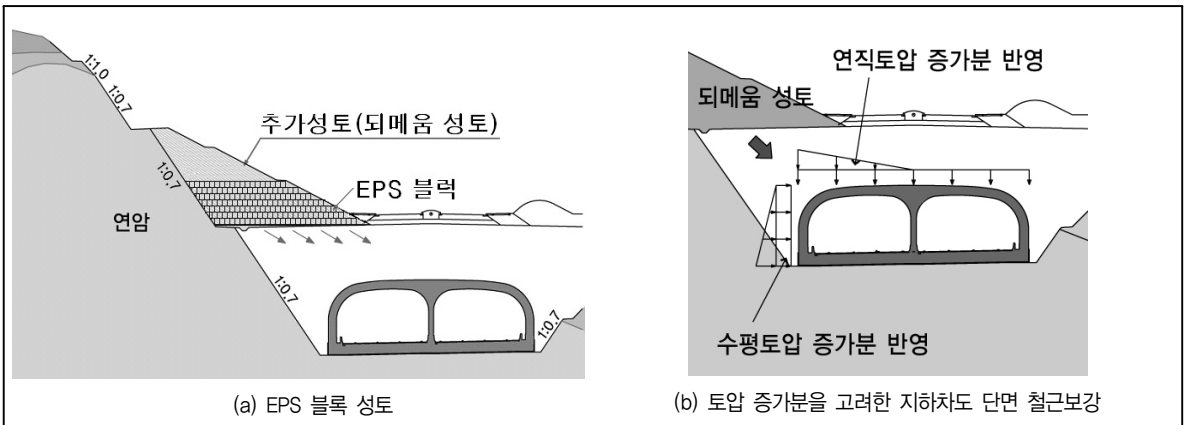


그림 11. 편토압 대책공법

사용할 경우 합리적인 편토압 산정이 가능할 것으로 판단되며 향후 이와 유사한 지반조건하의 개착식 지중구조

물 설계시 본 설계사례는 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

1. 한국건설기술연구원, (2002), “복개 터널구조물의 거동해석 및 설계요소개발(최종보고서)”
2. 대림산업, (2003), “복개 터널구조물의 성토하중 경감 및 라이닝 설계기술 개발”
3. 이규필, (2004), 한양대 박사학위논문, “아치형 개착식 터널구조물에 작용하는 토압평가”
4. 홍성완 외, (2007), “지반공학의 현기술과 개선방향”, 구미서관, pp 77~88
5. 동부건설, (2007), “행정중심복합도시 국도1호선 우회도로 건설공사(1공구) 토질조사보고서”