단층파쇄대 규모 및 조우 조건에 따른 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성 분석

조원섭¹ · 송기일^{2*} · 김경열³

¹비회원, 인하대학교 사회인프라공학, 석사과정

²정회원, 인하대학교 사회인프라공학, 조교수, 교신저자

³정회원, 한국전력 전력연구원, 책임연구원

The study on the effect of fracture zone and its orientation on the behavior of shield TBM cable tunnel

Won-Sub Cho¹, Ki-Il Song^{2*}, Kyoung-Yul Kim³

¹Department of Civil Engineering, Inha University, Graduate Student

²Department of Civil Engineering, Inha University, Assistant Professor

³Power System Laboratory, KEPCO Research Institute, Principal Researcher

ABSTRACT: Recently, the temperature rise in the summer due to climate change, power usage is increasing rapidly. As a result, power generation facilities have been newly completed and the need for ultra-high-voltage transmission line for power transmission of electricity to the urban area has increased. The mechanized tunnelling method using a shield TBM have an advantage that it can minimize vibrations transmitted to the ground and ground subsidence as compared with the conventional tunnelling method. Despite the popularity of shield TBM for cable tunnel construction, study on the mechanical behavior of cable tunnel driven by shield TBM is insufficient. Thus, in this study, the effect of fractured zone ahead of tunnel face on the mechanical behavior of the shield TBM cable tunnel is investigated. In addition, it is intended to compare the behavior characteristics of the fractured zone with continuous model and applying the interface elements. Tunnelling with shield TBM is simulated using 3D FEM. According to the change of the direction and magnitude of the fractured zone, Sectional forces such as axial force, shear force and bending moment are monitored and vertical displacement at the ground surface is measured. Based on the stability analysis with the results obtained from the numerical analysis, it is possible to predict fractured zone ahead of the shield TBM and ensure the stability of the tunnel structure.

Keywords: Shield TBM, Cable tunnel, Fractured zone, Three dimensional numerical analysis, FEM, Interface element

초 록: 최근, 기후변화에 따른 하절기 기온 상승으로 인하여 전력사용량이 급증하고 있다. 이에 따라 발전시설이 새로 준공되고 있으며, 생산된 전기를 도심지로 송전할 초고압 송전선로 시설의 필요성이 증가하고 있다. 쉴드 TBM을 이용한 기계화 터널 굴착 공법은 기존의 재래식 공법에 비해 지반 침하와 지반에 전달되는 진동을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 도심지에서의 전력구 터널 굴착을 위한 쉴드 TBM 공법이 증가함에도 불구하고, 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 분석에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 파쇄대를 포함하는 복합지반에서 파쇄대 너비, 각도에 따른 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성을 분석하고, 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대와 연속체로 모델링한 파쇄대의 거동 특성을 비교하고자 한다. 쉴드 TBM을 이용한 터널 굴착은 3D FEM을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 파쇄대의 방향과 크기의 변화에 따라 세그먼트 라이닝에 작용되는 축력, 전단력, 휨 모멘트를 검토하고 지표면에서의 연직변위를 분석하였다. FEM 해석으로 얻어진 결과와 안정성 분석에 기초하여, 전방의 파쇄대를 예측하여 터널 구조물의 안정성을 확보할 수 있다.

주요어: 쉴드 TBM, 전력구 터널, 파쇄대, 3차원 유한요소해석, 인터페이스 요소

*Corresponding author: Ki-Il Song

E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received July 9, 2014; Revised July 22, 2014;

Accepted July 25, 2014

1. 서 론

최근 대한민국에서는 전력 의존도 상승으로 인해 전력 사용량이 급증하고 있다. 이로 인해 대규모 정전 사태가 발생하기도 했으며, 도시의 변전소와 발전소를 연결 하는 초고압 송전선로 등의 기반시설의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 국내 전력 기반 시설인 초고압 송전선로는 주거 생활권 내 소음 유발과 건강상의 문제를 야기하고 농지 및 산림을 훼손한다(Cho et al., 2014). 이에 따라 환경 친화적 공법과 안전성 향상 측면에서 송전선로의 지하화가 필수적이다.

그러나 전력구 터널 건설을 위한 쉴드 TBM 공법이 증가함에도 불구하고, 다양한 너비의 파쇄대를 포함하는 복합지반에서 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동에 관한 연구는 미비한 실정이다. 국내에 건설되는 대부분의 지하 전력구 터널은 다양한 지반으로 이루어진 복합지반에 건설되며 복합지반에서 쉴드 TBM 전방의 파쇄대는 전력구 터널의 안정성에 부정적 영향을 끼친다(Kim et al., 2012). 파쇄대를 포함하는 복합지반에서 전력구 터널의 안정성을 확보하기 위하여 쉴드 TBM을 적용할 시, 전방의 파쇄대 예측이 적절하게 이루어지지 않는다면 커터헤드 및 스킨 플레이트, 세그먼트 라이닝에 과도한 단면력이 발생되어 구조물이 불안정 할 수 있다.

실제 파쇄대는 다양한 너비와 물성치를 가지며, 주변의 지반과 상이한 역학적 거동을 보인다. 이러한 거동을 시뮬레이션 하기 위해 유한요소해석 프로그램에서는 동일한 재료나 서로 다른 재료간의 접촉면 거동을 나타낼 수 있는 인터페이스 요소를 사용한다. 실제 접촉면에서의 거동은 주로 법선(Normal) 방향 거동과 접선(Shear) 방향 거동으로 구분되며, 인터페이스 요소는 두 접촉면 사이에 매우 큰 강성계수 값을 가지는 스프링을 삽입하여 접촉면 거동을 시뮬레이션 한다. 즉 인터페이스 요소는 법선 방향 거동과 접선 방향 거동의 형태로 양분되며, 해석 수행자는 법선 방향과 접선 방향의 강성계수를 입력해야만 한다. 강

성계수 값은 유한요소해석의 수렴성에 매우 민감하기 때문에 적절한 값을 찾는 것이 중요하지만, 강성계수 값의 결정에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 파쇄대를 통과하는 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성 분석을 수행하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 프로그램은 MIDAS-GTS NX를 이용하며, 1) 다양한 너비의 파쇄대를 통과하는 전력구 쉴드 TBM 터널의 합리적인 모델링 방법과 2) 파쇄대 각도의 변화에 따른 전력구 쉴드 TBM 터널과 지반, 파쇄대의 역학적 거동을 분석하고자 한다. 또한 3) 인터페이스 요소를 이용하여 파쇄대와 복합지반의 접촉면 거동을 시뮬레이션 한다. 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대에서 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동과 기존 연속체 모델에서의 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동을 분석함으로써 합리적인 모델링 방법을 도출한다.

2. 쉴드 TBM 유한요소해석 모델링 기법

2.1 복합지반을 통과하는 전력구 쉴드 TBM 터널의 3차원 모델링

복합지반의 구성과 전력구 쉴드 TBM 터널의 물성은 설계 완료된 ‘○○지역 전기공급시설 전력구공사(○○-○○, ○○-○○) 종합보고서’를 참조하였다. Fig. 1(a)는 복합지반을 통과하는 3차원 쉴드 TBM 모델을 나타낸다. 상부에서부터 5 m깊이는 매립토이고 아래로 12 m 깊이는 풍화토, 그 아래 전력구 쉴드 TBM 터널이 통과하는 9 m 깊이는 풍화암, 하부 14 m는 연암이 존재한다. Fig. 1(b)는 전력구 터널의 단면 제원을 나타낸다. 전력구 터널의 굴착 외경 직경은 3.55 m 이고 세그먼트 라이닝이 설치되는 내경의 직경은 3.4 m 이다. 터널의 천단 부분은 지표면으로부터 21.45 m 떨어져 있으며 지하수위는 고려하지 않았다. Fig. 1(c)는 지반, 세그먼트 라이닝, 뒷채움 그라우트,

스킨 플레이트의 모델에 적용된 요소를 나타낸다. 스킨 플레이트는 원통형의 두께를 가지는 철제 구조물로서, 쉴드 TBM의 커터헤드를 보호하고 굴진면의 불안정성으로부터 쉴드 TBM을 보호하는 역할을 한다. 스킨 플레이트의 길이는 세그먼트 라이닝의 단위 길이 1.2 m의 5배인 6 m를 적용하였다. 뒷채움 그라우트는 세그먼트 라이닝과 굴착면 사이에 필연적으로 발생하는 테일보이드에 주입되며, 단면을 폐합함으로써, 지표면의 침하를 억제하는데 효과적인 역할을 한다(Cho et al., 2014). 본 연구에서는 스킨 플레이트의 관입이 끝나고 세그먼트 라이닝과 뒷채움 그라우트가 동시에 설치되는 즉시주입 공법으로 모델링 하였으며, 뒷채움 그라우트는 지반의 이완하중을 세그먼트로 전달하는 탄성구조체로 가정하였다. 뒷채움 그라우트의 주입압에 따른 지반 응력 변화와 세그먼트

라이닝에 발생하는 압축력은 고려하지 않았으나, 추후 뒷채움 그라우트에 따른 효과를 규명하여 모델링에 반영 할 것이다.

지반의 모델 형식과 요소, 물성치는 Table 1에 나타냈으며, 스킨 플레이트와 세그먼트 라이닝은 각각 0.1 m와 0.2 m의 일정한 두께를 가지는 Shell 요소로 모델링 했다. Shell 요소는 두께가 얇은 구조물이 굽힘 변형을 받을 때 주로 이용하는 구조요소로서, 2차원 응력상태 및 굽힘, 전단 변형을 고려할 수 있다. 또한 Shell 요소는 결과 값으로 축력, 휨모멘트, 전단력을 얻을 수 있으므로 구조해석을 통해 세그먼트 라이닝의 빠른 안정성 판단이 가능하므로 본 연구에서는 Shell 요소를 스킨 플레이트와 세그먼트 라이닝에 적용하였다. 뒷채움 그라우트와 지반은 Solid 요소로 모델링하는 것이 효과적이라고 판단하였다. Solid 요

Fig. 1. Simulation of cable tunnel with 3D FEM

Table 1. Properties of the ground and shield TBM

Material	Model	Element	Elastic modulus (kN/m ²)	Poisson's ratio	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (degree)
Skin plate	Elastic	Shell	2.5e8	0.20	-	-
Segment lining	Elastic	Shell	2.1e7	0.25	-	-
Backfill grout	Elastic	Solid	1.0e7	0.30	-	-
Landfill soil	Drucker Prager	Solid	1.5e4	0.38	10	32
Weathered soil	Drucker Prager	Solid	5.0e4	0.35	20	30
Weathered rock	Drucker Prager	Solid	1.0e5	0.30	50	35
Soft rock	Drucker Prager	Solid	2.4e6	0.25	2.5e3	42.5

소는 연속체 요소로써 지하해석에서 토양, 두꺼운 벽 등과 같이 부피가 있는 구조물의 모델링에 주로 이용된다. 전력구 쉴드 TBM 터널 건설로 인해 발생하는 지표면의 변위 및 터널 주변의 응력 변화를 확인 할 수 있으므로 본 모델에서 뒷채움 그라우트와 지반은 Solid 요소로 모델링 하였다. 앞서 설명한대로 지반의 이완 하중을 전달하는 뒷채움 그라우트는 Elastic 모델로 구성되며 스킨 플레이트와 세그먼트 라이닝 또한 구조체이므로 Elastic 모델로 구성되었다. 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암은 Drucker Prager 재료모델을 사용하였다. Drucker-Prager 모델은 Drucker and Prager (1952)가 Mohr-coulomb 모델의 항복형상에서 모서리에 발생하는 수치적 문제점을 해결하기 위해 개발한 것으로, 내부 알고리즘은 Mohr-coulomb 과 동일하다(MIDAS IT, 2013). 또한 3차원 모델링인 경우는 파괴면이 전반적으로 더 완만한 Drucker-Prager 파괴기준을 적용하는 것이 훨씬 수월하다(Lee, 2013).

하중 경계조건으로는 자중과 굴진압을 적용해야 한다. 굴진압으로는 전토압 계산에 의한 관리토압 값을 사용하였고 초기지반의 정지토압계수를 0.5로 가정하여 관리토압 $P_0 = 77.12 \text{ kN/m}^2$ 를 획득하여 굴착면에 적용하였다. 하지만 이와 같은 관리토압의 계산은 절대적인 방법이 아니며 현장의 개략 검토결과를 바탕으로 관리토압을 설정한 후, 모니터링 결과를 참

고로 관리토압을 재설정해야 한다(Kim, 2013).

다음으로 요소특성변경을 통해 굴착 과정 중 비활성화된 지반 요소를 뒷채움 그라우트로 변경하여 다시 활성화해야 한다. 지반의 굴착 직경과 세그먼트 라이닝 사이의 테일보이드에는 뒷채움 그라우트가 설치된다. 하지만 굴착면에 굴진압을 적용하여 지반을 굴착하는 초기단계에는 굴착 직경의 지반과 세그먼트 라이닝 안쪽의 지반 모두 풍화암 성질을 가지고 있어야 한다. 그리고 스킨 플레이트가 모두 관입한 뒤 세그먼트 라이닝과 뒷채움 그라우트가 동시에 설치될 때, 굴착 직경과 세그먼트 라이닝 사이에 채워지는 요소는 뒷채움 그라우트 성질이어야만 한다. 즉, 테일보이드를 구성하는 실린더 모양의 풍화암 요소와 뒷채움 그라우트는 같은 요소망을 사용하지만 시공 순서에 따라 성질이 변해야 한다. 대표적인 시공순서를 세 단계로 나누어 Fig. 2에 나타냈다. Step 1은 굴진면에 굴진압의 적용과 동시에 지반의 굴착을 나타내며, Step 2는 굴착과 동시에 스킨 플레이트의 관입을 의미한다. Step 3는 Step 1에서 비활성화 된 지반 성질의 요소망을 뒷채움 그라우트 성질로 변경하여 다시 활성화 하는 과정을 의미한다. 또한 뒷채움 그라우트의 설치와 동시에 세그먼트 라이닝을 설치하는 즉시주입 공법으로 시공한다.

Fig. 2. 3 steps of TBM construction process

2.2 파쇄대를 통과하는 전력구 쉴드 TBM 터널의 모델링

본 절에서는 2.1 장에서 수행한 기본 모델을 바탕으로 다양한 너비와 방향을 가지는 파쇄대를 모델링했다. 생성된 모델을 바탕으로 하여 파쇄대의 너비에 따른 지표면의 침하 거동과 TBM 전력구 터널의 역학적 거동을 분석하여 터널에 가장 불안정성을 유발하는 파쇄대의 너비를 도출했다. 또한 터널과 파쇄대가 마주보는 역방향(Against Dip) 관계에서 터널을 기준으로 각각 30도, 60도의 기울기를 가질 때 지표침하와 터널의 거동에 가장 부정적 영향을 미치는 방향과

각도를 도출했다. 역방향 뿐만 아니라 터널의 굴착 방향과 나란한 순방향(With Dip)의 파쇄대와 연직 방향의 파쇄대에 대해서도 터널에 가장 부정적 영향을 미치는 방향과 각도를 획득하였다.

위 연구 수행에 있어, 파쇄대의 너비는 세그먼트 라이닝 길이의 1배, 3배, 5배를 적용하였으며 대표적으로 세그먼트 라이닝 길이의 5배를 적용한 파쇄대를 포함하는 모델을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)는 역방향 30도의 파쇄대와 파쇄대의 너비, 각도, 굴진 방향을 나타내며, Fig. 3(b)는 역방향 60도의 파쇄대, Fig. 3(c)는 연직방향의 파쇄대, Fig. 3(d)는 순방향

Fig. 3. Various fractured zone model in a composite ground

Table 2. Properties of the fractured zone

Material	Model	Element	Elastic modulus (kN/m ²)	Poisson's ratio	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (degree)
Fractured zone	Drucker Prager	Solid	1.0e4	0.28	10	23

30도의 파쇄대, Fig. 3(e)는 순방향 60도의 파쇄대를 나타낸다. 파쇄대의 물성치는 Table 2에 나타났다.

전력구 쉘드 TBM을 구성하는 요소망과 지반 요소망과의 접점에서 절점을 공유하는 것은 파쇄대를 통과하는 전력구 쉘드 TBM 모델링에서 중요한 부분이다. 파쇄대와 전력구 쉘드 TBM이 만나는 부분은 지반의 성질과 파쇄대의 성질을 가지는 요소망으로 각각 따로 생성되기 때문이다. FEM 프로그램은 공유된 절점에서 강성행렬을 구성하여 해석을 수행하기 때문에, 공유되지 않은 절점이 존재하면 자유면으로 인식하여 터널과 파쇄대의 상호거동을 분석할 수 없다. 또한 파쇄대와 터널이 만나는 접점에서의 굴착 단계에서 파쇄대 요소망과 지반 요소망을 동시에 굴착해야 한다. Fig. 4(a)는 30도 역방향 파쇄대의 요소망과 주변 요소망이 절점을 공유하고 있는 형상을 나타냈으며, Fig. 4(b)는 30도 역방향 파쇄대의 요소망과 지반 요소망의 접점에서 굴착 단계를 도시하였다.

파쇄대와 지반의 접점에서 각각의 성질을 갖는 요소망을 따로 구별하여 생성하였기 때문에, 굴착과정에서 전력구 쉘드 TBM과 파쇄대가 만나는 부분은 주의를 기울여야 한다. 외경과 내경의 요소망이 비활성화 되고 동시에 스킨플레이트 요소망이 활성화 될 때, 내경과 외경의 성질이 파쇄대와 지반으로 분리되어 있기 때문에 각각 따로 선택을 해야 한다.

2.3 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대 모델링

2.2절에서 생성된 파쇄대 모델은 파쇄대가 주변 지반과 절점을 공유하는 연속체 모델이다. 일반적으로 지반 요소는 터널과 완벽하게 부착되었다고 가정하며 구성모형에 따라 선형과 비선형해석으로 구분하여 해석한다(Yoo, 2012). 하지만 실제 파쇄대는 구조적 이방성 및 비균질성을 가지고 있으며 터널 굴착에 따라 균질한 지반에 비해 상이한 지반거동을 나타낸다. 즉 연속체 모델의 해석 결과는 파쇄대에 의한 지반 및 터널 천단 변위를 과소측정 할 수 있다.

파쇄대의 미끄러짐 거동을 모사하기 위하여 본 절에서는 인터페이스 요소를 사용하여 모델링 하였다. 본 연구에서 사용된 3D FEM 해석 프로그램은 Penalty method를 사용하여 인터페이스 방정식을 구성한다. Penalty method는 두 접촉면 사이에 강성이 큰 값의 스프링을 삽입하여 접촉면 거동을 모사하는 방식을 말한다(MIDAS IT, 2013). 두 절점사이에 생성된 스프링은 법선 방향과 접선 방향의 거동을 가지고, 비선형성 모델로 Mohr-coulomb 모델을 사용한다. 즉 합리적인 파쇄대의 미끄러짐 거동을 모사하기 위해서는 법선 방향 강성계수(K_n)와 접선 방향 강성계수(K_s)의 적절한 값을 찾는 것이 중요하다. 그러나 Belytschko et.al(1984)는 K_n 값의 범위를 K_s 의 2~100배로 제안

Fig. 4. Modelling of the excavation through the fractured zone

Table 3. Properties of interface elements

Direction	60degree against direction
Model	Mohr-coulomb
Kn (kN/m)	10e4
Ks (kN/m)	10e3
Cohesion (kN/m ²)	50
Friction angle (degree)	35

하였는데, 이는 인터페이스 요소의 적용은 경험적인 방법에 의존하는 것임을 의미한다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 제시된 Kn의 값을 적용하여 인터페이스 요소가 적용되지 않은 모델과 비교분석 하였다. 비교 분석 모델은 60도의 역방향 파쇄대를 기준으로 하였으며, 인터페이스 요소에 적용된 물성치는 Table 3에 나타냈다.

본 연구에서는 MIDAS (MIDAS IT, 2013) 매뉴얼에서 제안하고 있는 Kn과 Ks를 인터페이스 요소 물성치로 입력하였다. Kn값은 인터페이스 요소와 접촉하고 있는 주변 지반의 가장 약한 탄성계수를 기준으로 1~10배로 제안되었고, Ks값은 결정된 Kn 값의 0.1배가 권장되었다. 본 연구 모델은 복합지반으로써 터널

이 통과하는 풍화암과 파쇄대의 접촉면을 대상으로, 파쇄대 탄성계수의 10배를 적용하였다. Ks는 권장값인 Kn의 0.1배를 적용하였다. 매뉴얼에 따라 점착력과 내부마찰각은 인접한 두 요소의 값 중, 작은 값의 1~0.1배가 권장되어 파쇄대에 적용된 값을 사용하였으나, 파쇄대 점착력의 1~4배를 적용하는 경우 해석이 수렴 되지 않아 풍화암의 점착력과 마찰각(파쇄대 점착력의 5배)을 적용하였다.

제안된 인터페이스 요소의 물성치는 Fig. 5와 같이 적용된다. Fig. 5는 6 m 너비를 가지는 역방향 30도 파쇄대에 생성된 인터페이스 요소를 나타내며, 파쇄대의 요소망 앞뒤로 지반과 접촉하는 부분에 판으로 인터페이스 요소가 생성된 것을 확인 할 수 있다. 또한 전력구 쉴드 TBM 터널과 파쇄대의 접점에서 인터페이스 요소는 앞쪽의 인터페이스 요소와 뒤쪽의 요소를 이어주는 터널 형식으로 생성된다.

인터페이스 요소 적용면에는 자유면이 생기게 되는데, 자유면은 절점과 절점의 공유면을 단절 시키므로 유한요소해석 프로그램 특성상 해석이 불가능하다. 그렇기 때문에 가상의 두께를 가지는 링크를 생성하여 절점과 절점을 이어주어야 한다. 링크가 활성화 되어 있으면 인터페이스 요소는 연속체 모델과 동일한 거동을 하게 되며, 파쇄대를 굴착하는 동시 링크를 제거

Fig. 5. Implementation of interface elements over the fractured zone

하여 미끄러짐 거동을 모사할 수 있다. 즉, 인터페이스 요소는 링크와 동시에 생성되어 공유면의 절점을 연결해야 하며 미끄러짐 거동을 모사할 때 링크를 비활성화 시켜야 한다.

3. 터널 거동 분석

3.1 파쇄대 너비에 따른 지표면 연직 변위

파쇄대 너비는 세그먼트링 단위 길이인 1.2 m의 1배, 3배, 5배로 각각 모델링되었으며, 초기 지반의 토압계수가 0.5일 때 연속체 모델에서 지표면 연직 변위를 측정하였다. 지표면의 연직 변위 측점은 해석 수행 결과 최대 연직 침하가 발생된 지점에서 굴진 거리에 따라 측정하였다. Fig. 6(a)는 역방향 파쇄대의 너비가 1.2 m, Fig. 6(b)는 역방향 파쇄대의 너비가 3.6 m, Fig. 6(c)는 역방향 파쇄대의 너비가 6 m일 때를 나타낸다. 해석결과, 파쇄대의 방향과 각도에 상관없이 파쇄대의 너비가 넓어짐에 따라 연직 침하는 증가하는 것으로 나타났으며 파쇄대 내부 터널 천단에서의 침하 경향도 같았다. 본 연구에서는 최대 연직침하가 발생된 6 m 너비의 파쇄대를 기준으로 파쇄대의 연직 변위 및 세그먼트에 발생되는 단면력, 인터페이스 요소에 의한 영향 분석을 수행하였다.

3.2 파쇄대의 방향에 따른 지표면과 파쇄대의 연직 변위

파쇄대의 너비는 세그먼트 라이닝 길이의 5배인 6 m이며 파쇄대와 터널은 순방향, 역방향 모두 굴착 직후 35 m 부근에서 교호한다. 초기 지반의 토압계수는 0.5이다. 지표면의 연직 변위 측정 지점은 굴착 완료 후 발생하는 최대 연직 변위 지점이다. Fig. 7(a)는 역방향 60도 파쇄대 모델에서의 지표면 연직 변위의 유한요소해석 결과를 나타내며, Fig. 7(b)는 터널의 굴착 거리에 따른 지표면의 연직 침하 경향이다. 파쇄대가 있는 경우의 모든 방향에서 연직 변위는 파쇄대가 없는 경우보다 크게 나타났으며 모든 결과는 일정 값으로 수렴하였다. 순방향 30도의 경우 가장 큰 변위를 나타냈으며 파쇄대가 없는 모델보다 약 150% 증가된 변위를 나타냈다. 역방향 30도의 경우는 파쇄대가 있는 모델 중 가장 적은 변위를 나타냈으며 파쇄대가 없는 모델보다 약 130% 증가된 변위를 나타냈다. 최대 지표면의 연직 변위와 최소 연직 변위의 차는 0.15 mm이며 이는 파쇄대의 각도에 따른 지표면의 연직 변위 차이가 크지 않음을 의미한다.

파쇄대의 연직 변위는 터널과 파쇄대가 만나는 천단 부분에서 측정했으며, 측점은 굴착 완료 후 발생하는 최대 연직 변위 발생 지점이다. Fig. 8(a)는 역방향

Fig. 6. Vertical displacement of variation width of fractured zone

60도 파쇄대 모델에서 파쇄대 연직 침하의 유한요소 해석 결과를 나타내며, Fig. 8(b)는 터널의 굴착 거리에 따른 파쇄대의 연직 침하 경향을 나타낸다. 연직 침하 경향과는 반대로 역방향 30도의 경우 가장 큰 변위를 나타냈으며 지표면의 연직 침하에 비해 1,000% 가량 증가된 변위를 나타냈다. 순방향 60도의 경우 가장 작은 파쇄대 연직 변위를 나타냈으며 지표면의 연직 침하에 비해 800% 가량 증가된 변위를 나타냈다. 또한 최대 연직 변위와 최소 연직 변위의 차이는 약 3 mm 이며 지표면에서의 연직 변위 차이에 비해 큰 값을 나타냈다. 이는 파쇄대 각도에 따라 굴진면에서

의 영향이 지표면에서의 영향보다 큼을 나타낸다. 또한 역방향 파쇄대의 경우 순방향 파쇄대보다 굴착에 따른 터널 천단 침하가 먼저 발생하고 순방향 파쇄대보다 큰 값의 연직 침하량을 보였다. 이는 역방향의 파쇄대인 경우가 순방향 파쇄대 보다 터널 굴진면에서의 불안정성을 유발할 가능성이 높음을 의미한다.

3.3 세그먼트 라이닝에 발생하는 단면력 분석

파쇄대의 너비는 6 m이며, 측점은 굴착 완료 후 발생하는 최대 단면력 발생 지점이다. Fig. 9(a)는 세그

(a) Surface ground displacement

(b) Surface settlement along the advance length

Fig. 7. Surface settlement due to tunnel excavation: Effect of fractured zone

(a) Vertical displacement in the fractured zone

(b) Fractured zone settlement along the advance length

Fig. 8. Displacement at the fractured zone due to tunnel excavation

먼트 라이닝에 발생하는 최대 축력 측점을, Fig. 9(b)는 최대 휨 모멘트 측점을 나타내며 Fig. 9(c)는 최대 전단력 측점을 나타낸다.

시공 단계에 따라 단면력을 측정하였으며 Fig. 10(a)는 세그먼트 라이닝에 발생하는 축력의 경향을 나타내며 Fig. 10(b)는 휨모멘트의 경향을, Fig. 10(c)는 전단력의 경향을 나타낸다.

해석 결과, 파쇄대가 있는 경우의 모델이 파쇄대가 없는 경우보다 큰 최대 단면력 경향을 보였다. 축력의 경우 30도 순방향 파쇄대인 경우에 최대 축력을 보였으며 파쇄대가 없는 모델 대비 단면력의 크기가 150%~270% 증가된 경향을 보였다. 휨모멘트와 전단

력의 경우 30도 역방향 파쇄대에서 최대 단면력을 나타냈다. 휨모멘트의 경우 파쇄대가 없는 모델 대비 200%~500% 증가된 휨모멘트를 나타냈으며 전단력의 경우 파쇄대가 없는 모델 대비 200%~850% 증가된 전단력을 나타냈다.

파쇄대의 연직 침하 경향을 보면, 파쇄대가 없는 모델 대비 각각 30도 역방향, 30도 순방향, 60도 역방향에서 주로 증가된 값을 나타낸다. 파쇄대의 연직 침하 경향과 동일하게, 발생하는 단면력의 경향도 파쇄대가 없는 모델 대비 각각 30도 역방향, 30도 순방향, 60도 역방향에서 주로 증가된 값을 나타냈다. 이는 파쇄대의 연직 침하량과 발생하는 단면력이 비례관계

Fig. 9. Measured point of sectional force acting on the segment lining

Fig. 10. Variation of sectional force acting on the segment lining

에 있음을 나타낸다.

3.4 세그먼트 라이닝의 안정성 판단

기존의 세그먼트 라이닝 설계는 2차원 구조해석 프로그램을 이용하여 단면을 산출 한뒤 안정성을 검토하였다(Cho et al., 2014). 또한 지표면의 침하 경향은 세그먼트 라이닝 설계와 별개로 3차원 모델을 구성하여 예측하였다. 하지만 본 연구에서 제안된 3차원 모델은 지반의 거동과 동시에 세그먼트 라이닝에 발생하는 단면력도 획득 할 수 있다. 국내에서는 세그먼트 라이닝과 같은 콘크리트 구조물은 강도 설계법을 적용하여 철근량을 산정하는 것이 일반적이나, 본 연구에서는 무근콘크리트의 안정성 판단시 사용되는 허용응력 설계법으로 세그먼트 라이닝의 안정성을 개략적으로 평가했다. 본 연구에서 참조한 기설 전력구 터널의 세그먼트 라이닝 물성치는 Table 4에 도시하였으며 계산된 허용응력은 Table 5에 나타났다.

계산된 허용응력을 바탕으로 3.3장에서 획득한 단

면력을 각각의 응력으로 변환하기 위하여 다음 식을 적용한다. 식 (1)는 휨 압축응력을 나타내며 식 (2)은 휨 인장응력, 식 (3)는 전단응력을 나타낸다. 허용응력 계산 결과 모두 안전한 것으로 판정되었으며, 허용응력과 발생된 최대 단면력 결과값은 Table 6에 나타났다.

$$F'_c = \frac{P_{\max}}{A} + \frac{M_{\max}}{Z} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{P_{\max}}{A} - \frac{M_{\max}}{Z} \quad (2)$$

$$V = \frac{V_{\max}}{A} \quad (3)$$

여기서, $P_{\max}=827$ kN, $M_{\max}=25$ kN,

$V_{\max}=93$ kN, $A=2.011$ m²,

$Z=1.615$ m³ respectively.

Table 4. Properties of the segment lining

f_{ck} (MPa)	T (m)	A (m ²)	I (m ⁴)	y (m)
24	0.2	2.011	2.584	1.6

Note; f_{ck} is compressive strength, T is thickness, A is area, I is geometrical moment of inertia, y is distance from center of segment, respectively.

Table 5. Allowable stress of the segment lining

	Standard	Strength design criteria	Allowable stress
Allowable compressive stress	$0.40 f_{ck}$	$f_{ck}=24$ MPa	9.6 MPa
Allowable tensile stress	$0.42 \sqrt{f_{ck}}$		2.058 MPa
Allowable shear stress	$0.25 \sqrt{f_{ck}}$		1.225 MPa

Table 6. Stability of the segment lining

	Compressive stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Shear stress (MPa)
Maximum	0.427	0.396	0.046
Allowable	9.6	2.058	1.225
Stability check	Stable	Stable	Stable

4. 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대와 기존 모델의 비교 분석

4.1 지표면 및 파쇄대의 연직 변위 비교 분석

인터페이스가 적용된 모델은 기존 모델과 크기 및 물성치는 동일하며 지표면 변위 측정 과정 또한 3장의 측정 과정과 동일하다. 연직 변위 분석 결과는 60도의 역방향 파쇄대를 기준으로, 인터페이스 요소의 물성치는 2.3장에서 설명한 Mohr-coulomb 모델을 사용하였다.

분석 결과, 인터페이스를 적용한 모델의 지표면 연직 변위는 기존의 모델에 비해 최대 연직 변위가 600~1,000% 가량 증가한 결과를 나타냈다. 또한 파쇄대의 최대 연직 변위 경향은 기존의 모델에 비해 최대 연직 변위가 120~200% 가량 증가한 결과를 나타냈다. Fig. 11(a)는 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대의 지표면 연직 변위 경향을 나타내며 Fig. 11(b)는 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대의 연직 변위를 나타낸다. 연직 변위의 증가는 인터페이스 적용으로 인해 굴진면과 지표면에서의 불안정성이 증가함을 의미한다. 또한 기존 모델과 인터페이스 적용 모델의 변위 증가량을 비교해 보면 파쇄대의 연직 변위보다 지표면의 연직 변위가 크게 증가함을 알 수 있다.

이는 인터페이스의 적용으로 인해 지표면에서의 불안정성이 굴진면에서의 불안정성보다 크게 증가했음을 의미한다. Fig. 11(a)의 지표면 연직 침하 경향은 기존의 모델과는 다른 경향을 나타냈다. 기존의 모델에서의 변위는 터널 굴착이 완료되기까지 천천히 일정한 값으로 수렴하지만 인터페이스를 적용한 모델은 급격한 침하가 발생되어 빠르게 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 이는 갑작스런 변위의 발생으로 지상의 지장물과 굴진면의 쉴드 TBM 헤드 커터에 치명적 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 또한 침하 경향은 기존 모델과 동일하게 역방향 파쇄대의 경우 최대 연직 침하량이 순방향 파쇄대보다 먼저 발생했으나, 순간적인 연직 침하가 발생했음을 알 수 있다. 이는 기존의 모델보다 인터페이스 요소를 적용한 모델이 터널 안정성 측면에서 보다 위험한 상황을 예측하는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 파쇄대를 통과하는 전력구 쉴드 TBM 터널의 거동 특성을 분석하기 위하여 3차원 유한요소해석을 이용하여 연구를 수행하였다. 합리적인 전력구 쉴드 TBM 모델링 방법을 제시했으며 파쇄대의 적절한 모델링 방법을 제시하였다. 파쇄대를 통

(a) Ground settlement with interface

(b) Displacement at fractured zone with interface

Fig. 11. Evolution of vertical displacement due to tunnelling considering the interface element

과하는 전력구 쉴드 TBM 터널의 역학적 거동과 지표면에서의 거동을 파쇄대가 없는 모델과 비교하였으며 허용응력 설계법을 이용하여 세그먼트 라이닝의 안정성을 분석하였다. 또한 파쇄대의 미끄러짐 거동을 모사하기 위하여 인터페이스 요소를 적용하였으며 기존 모델의 지표면과 파쇄대의 연직 침하 거동을 비교하였다. 파쇄대가 있는 경우의 모델은 그렇지 않은 기존 모델보다 지표면의 연직 변위가 최대 1,000% 크게 나타났다. 또한 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대 모델의 경우는 인터페이스 요소가 적용되지 않은 모델보다 급속한 침하가 발생했으며 더 큰 값의 침하량을 나타냈다. 또한 기존의 파쇄대 모델과 인터페이스 요소를 적용한 모델 모두 역방향의 파쇄대가 순방향 파쇄대보다 굴착 과정에서 먼저 최대 침하량에 도달했으며 파쇄대의 연직 침하 경향과 동일하게 단면력 발생 경향을 나타냈다. 인터페이스 요소를 적용한 파쇄대의 해석 결과, 연속체 해석과는 달리 전력구 쉴드 TBM의 굴진면에서 파쇄대의 연직 침하로 인한 불안정성이 유발되었음을 확인했다. 파쇄대를 통과하는 전력구 쉴드 TBM을 설계함에 있어, 파쇄대에 인터페이스 요소 적용을 통한 불안정성을 검토하는 것이 필수적이다. 추후 뒷채움 그라우트 주입 압력에 따른 지반 응력 변화와 세그먼트 라이닝에 발생하는 압축력을 고려한 모델링 적용, 그리고 실제 세그먼트 연결부를 고려한 안정성 검토방안이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20131010501790).

References

1. Cho, W.S., Song, K.I., Ryu, H.H. (2014), "Analysis on the behavior of shield TBM cable tunnel: The effect of the distance of backfill grout injection from the end of skin plate", Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 2, pp. 213-224.
2. Drucker, D.C., Prager, W. (1952), "Soil mechanics and plastic analysis or limit design", Quarterly of Applied Mathematics 10, pp. 157-165.
3. Kim, H.W., Jeon, S.K., Park, E.S. (2012), "Evaluation of monitoring items for adverse ground conditions in subsea tunneling", TUNN UNDERGR SP TECH, Vol. 32, pp. 19-33.
4. Kim, J.Y. (2013), "EPB shield TBM tunnel construction -How to set the face pressure value and management for the stability of face-", Korean Geotechnical Society, Vol. 29, No. 2, pp. 21-27.
5. Lee, I.M. (2013), "Geotechnical engineering principles of the tunnel", CIR, Seoul, pp. 444.
6. MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2013), MIDAS GTS NX User's manual, Seongnam, pp. 443.
7. Ted Belytschko, Michael Pleasha, Dwiding, C.H. (1984), "A computer method for stability analysis of caverns in jointed rock", International journal for numerical method in Geomechanics. Vol. 8, pp. 473-492.
8. Yoo, J.K. (2012), "Dynamic Behavior of a Tunnel Considering Discontinuities of Rock Mass", Master Thesis, Hanyang University, pp. 55.