

점토지반에서 터널굴착에 따른 상부 블록구조물의 거동분석

손무락*

Son, Moorak*

Response Analysis of Block-Bearing Structure due to Tunnel Excavation in Clay Ground

ABSTRACT

This study investigates the response of structures to tunnelling-induced ground movements in clay ground, varying tunnel excavation condition (tunnel depth and diameter), tunnel construction condition (ground loss), and tunnel ground condition (soft clay and stiff clay). Four-story block-bearing structures have been used because the structures can easily be characterized of the extent of damages with crack size and distribution. Numerical parametric studies have been used to investigate of the response of structures to varying tunnelling conditions. Numerical analysis has been conducted using Discrete Element Method (DEM) to have real cracks when the shear and tensile stress exceed the maximum shear and tensile strength. The results of structure responses from various parametric studies have been integrated to consider tunnel excavation condition, tunnel construction condition, and tunnel ground condition and provide a relationship chart among them. Using the chart, the response of structures to tunnelling can easily be evaluated in practice in clay ground.

Key words : Clay ground, Tunnel excavation, Ground loss, Block-bearing structure, Damage estimation

초록

본 연구는 점토지반에서 터널의 굴착조건(터널깊이 및 터널직경)과 시공조건(지반손실량), 지반조건(연약점토, 단단한 점토)을 변화시키면서 터널상부에 위치한 구조물의 거동변화를 조사 및 분석한 것이다. 분석에 사용된 구조물은 4층 블록식구조물로서 변형 등에 의한 균열발생과 균열폭의 차이로 인해 구조물의 손상정도를 쉽게 파악할 수 있는 특징이 있다. 다양한 터널 굴착조건 및 시공조건, 지반조건에 대해서 발생할 수 있는 터널상부 블록구조물의 거동상태를 파악하기 위해 수치해석적 매개변수 해석을 수행하였으며, 수치해석은 구조물의 실제크랙 발생을 묘사할 수 있도록 개별요소법(DEM)에 근거하여 수행하였다. 다양한 매개변수 해석으로부터 얻어진 구조물의 거동상태에 대한 결과는 터널 굴착조건 및 시공조건, 점토 지반조건과 상호 연관하여 함께 반영될 수 있도록 도표화 하였으며, 이를 이용하여 향후 점토지반에서 다양한 터널굴착 및 시공조건, 지반조건으로 인해 유발되는 터널 상부구조물의 손상정도를 보다 용이하게 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 점토지반, 터널굴착, 지반손실량, 블록지지구조물, 손상평가

* 정회원 · 교신저자 · 대구대학교 토목공학과 교수, 공학박사/기술사 (Corresponding Author · Daegu University · mson@daegu.ac.kr)

Received September 11, 2013/ revised December 13, 2013/ accepted January 6, 2014

1. 서론

구조물이 밀집한 도심지역에서의 터널굴착은 구조물 자체의 안정성은 물론이고 주변의 다양한 시설물에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 각별한 주의가 필요하다. 터널굴착으로 인해 주변구조물이나 시설물들이 받는 영향은 터널의 굴착조건(터널직경 및 터널 깊이 등)이나 시공상태, 지반조건 등에 따라서 영향을 받으므로 이러한 조건들을 종합적으로 반영하여 분석하여야 한다. 그럼에도 불구하고 설계 등의 실무적 목적을 위하여 아직도 터널 굴착지반 주변의 구조물에 대한 영향을 평가함에 있어서 터널의 굴착조건 및 시공조건, 지반조건을 함께 구조물의 거동과 직접적으로 연계시켜 비교하고 평가를 위해 직접적으로 활용하기 위한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 Son (2013)은 모래지반에 대하여 터널의 굴착조건, 시공조건 및 지반조건을 달리 하여 구조물의 거동특성을 파악하는 연구를 수행하였고 그 결과를 실무에서 용이하게 활용할 수 있도록 도표로서 제시하였다. 그럼에도 불구하고 모래지반이 아닌 점토지반에서의 터널굴착 또한 자주 발생할 뿐만 아니라, 이와 같은 지반에서의 터널 굴착조건, 시공조건 및 지반조건을 종합적으로 반영하여 인접구조물을 용이하게 평가할 수 있는 방법 또한 필요할 것으로 판단되어 본 연구를 수행하게 되었다.

따라서, 본 연구는 모래지반에서 수행된 기존의 선행연구를 연장하여 점토지반에서 터널의 굴착조건, 시공조건 및 지반조건을 동시에 반영하면서 구조물의 손상정도 및 거동상태를 직접적으로 파악하고, 이들 결과를 도표화하여 실무에서 활용하기 위한 연구로서, 이로부터 얻어진 결과는 향후 점토지반에서 터널굴착으로 인해 유발되는 인접구조물의 손상정도를 평가하고 예상되는 손상을 제어하고 최소화하는데 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

2. 터널굴착 및 지반조건에 따른 지반변위

터널굴착 및 지반조건에 따른 지반변위는 기존의 많은 논문 (Son and Yun, 2009 등)에서 언급되고 있지만 본 논문에서 간략히 다시 언급하였다. 터널굴착은 이미 존재하고 있던 지반을 제거하는 것이므로 굴착에 따른 지반변위를 동반하게 된다. 터널굴착 유발 지반변위가 주변 구조물 및 시설물에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 먼저 구조물이 위치하고 있는 곳에서의 수직(침하) 및 수평 지반변위가 예측되어야 한다.

터널굴착에 따른 지반의 수직변위(침하)를 예측하기 위해서는 Peck (1969)이 제시한 경험적 방법인 에러함수가 자주 사용되고 있다. Peck은 다양한 지반조건에 대해서 터널깊이 및 직경을 고려하여 터널굴착에 따른 지반침하 예측을 위한 에러함수를 다음과

같이 제시하였다.

$$S = S_{max} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{2i^2} \right) \tag{1}$$

여기서 S는 침하곡선 중심에서 x 거리만큼 떨어진 점에서의 침하량, S_{max}는 침하곡선 중심에서의 최대침하량, x는 침하곡선 중심에서 임의의 거리, i는 침하곡선상 변곡점의 위치를 나타낸다 (Figs. 1 and 2).

터널깊이(Z) 및 직경(2R)과 지반의 조건으로부터 변곡점 i가 결정되면, 이로부터 침하폭 w가 결정된다. 터널중심선 상부에서의 최대침하량(S_{max})은 터널굴착 주변부에서의 지반손실량(V_L)을 고려한 지표면에서의 총 지표침하량(V_S)과 침하폭(w)으로부터 결정될 수 있다(S_{max}=V_S/w). 여기서 지반손실량(V_L)은 터널단위길이에 대한 실제 총 굴착부피량(V, m³/m)에서 이론적인 필요 굴착부피량(V₀, πR² × l m³/m, R=터널반경)을 뺀 값을 이론적인 필요 굴착부피량(V₀)으로 나눈 백분율로서 정의된다[V_L=(V-V₀)/V₀ × 100 (%)].

터널굴착에 따라 유발되는 수평변위와 관련하여 O'reilly and New (1982)는 지반의 수평변위를 예측하는 방법을 다음과 같이

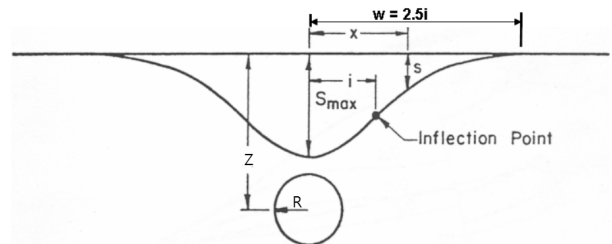


Fig. 1. Error Function for Estimating Settlement Profile (Peck, 1969)

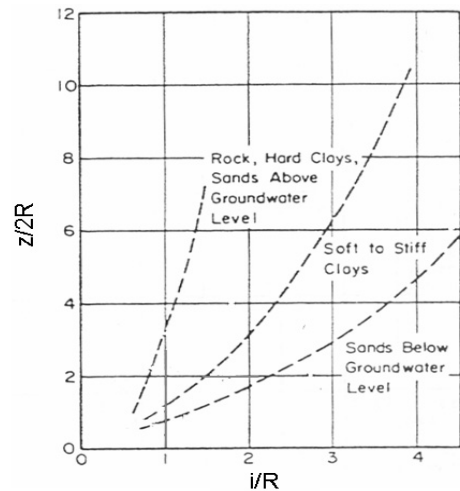


Fig. 2. Determination of Inflection Point, i (Peck, 1969)

제시하였다.

$$S_h = S_{hmax} \cdot 1.65x/i \cdot \exp(-(x^2/2i^2)) \quad (2)$$

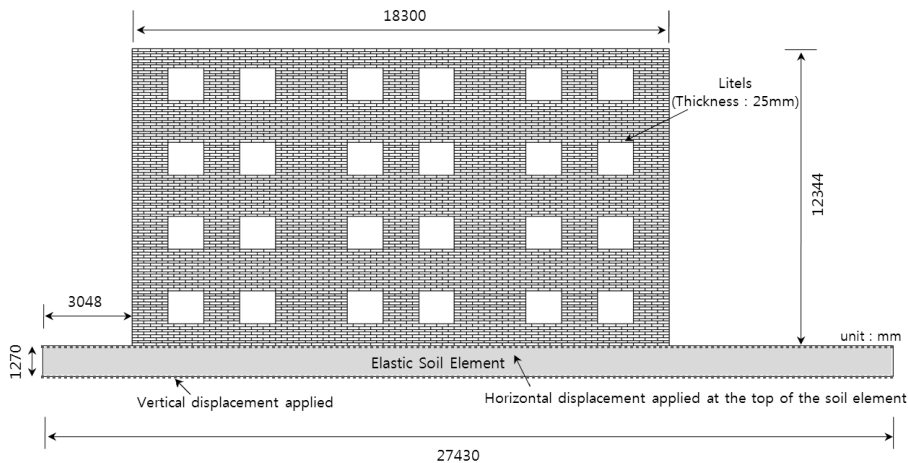
여기서 S_h 는 터널중심선상에서 임의의 거리 x 만큼 떨어진 지점에서의 수평변위량, S_{hmax} 는 변곡점 위치(i)에서의 최대수평변위량, x 는 터널중심선상에서 임의의 지점까지 거리, i 는 침하곡선상 변곡점의 위치를 나타낸다.

3. 수치해석적 접근방법

본 연구에서의 수치해석적 접근방법은 기존의 관련 유사연구 (Son and Yun, 2010)에 동일하게 적용된 바 있으며 그 결과 또한 확인된 바 있다. 여기서는 모델링방법에 대해서 기존 접근방법과 동일하지만 간략하게 다시 언급하였다. 본 연구에서는 두 종류의 점토지반(연약점토, 단단한 점토)에서 서로 다른 터널 굴착조건(터널직경 및 깊이)과 터널 사공조건(지반손실량)에 노출된 4층 블록식

구조물에 대한 터널굴착유발 지반변위의 영향을 파악하기 위하여 개별요소법에 근거한 수치해석적 방법을 이용하였다. 수치해석은 2차원 UDEC (UDEC3.1, 2000) 프로그램을 사용하였다. 이와 같은 접근방법은 구조물이 지반변위에 노출되었을 때 구조물에 발생하는 균열의 크기와 분포로부터 구조물 손상을 쉽게 파악할 수 있는 장점과 구조물에 손상이 발생한 후의 거동을 보다 실제적으로 묘사할 수 있다는 장점이 있다. 구조물의 각 블록은 탄성체로서 개별적으로 모델링 하였고, 블록들은 몰타르의 성질을 나타내는 조인트요소에 의해 서로 연결되었다. 조인트요소는 발생된 전단강도 또는 인장강도 이상의 응력조건에서 블록과 블록사이에 분리 및 미끄러짐이 일어날 수 있도록 모델링 하였다.

수치해석을 수행함에 있어서 터널굴착의 전 과정과 기초형식의 직접적인 모델링을 고려하는 대신에 터널굴착으로 인해 구조물 아래에 발생할 수 있는 지반변위를 구조물 아래 유한두께를 가지고서 모델링된 탄성지반요소에 직접적으로 적용함으로써 해석을 수행하였다(Fig. 3). 연약점토 및 단단한 점토의 서로 다른 지반조건은 해석모델의 지반요소 탄성계수를 달리하여 적용하였다. 자세한



Block-bearing Structure

Fig. 3. Numerical Modelling of Structure and Ground

Table 1. Properties of Structure, Ground, and Interface Used in Numerical Analysis

Case	Ground	Structure								Interface			
		Block			Block/Mortar Joint					c, σ_t (kPa)	ϕ (°)	K_n (MPa/mm)	K_s (MPa/mm)
Structure type	E_s (MPa) ($\nu_s=0.33$)	E (GPa)	ν	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	σ_t (kPa)	K_n (MPa/mm)	K_s (MPa/mm)				
Block-bearing Structure	17.2 (Soft) 68.9 (Stiff)	10.34	0.2	18.8	344 (0)	35 (35)	344 (0)	78	7.8	0	35	78	0.0584

Es=Elastic modulus of ground; E=Elastic modulus of block; ν_s =Poisson's ratio of ground; ν =Poisson's ratio of block; γ =Unit weight of block; c =Cohesive strength of joint or interface; ϕ =Friction angle of joint or interface; σ_t =Tensile strength of joint or interface; K_n =Normal stiffness of joint or interface; K_s =Shear stiffness of joint or interface; The values in parenthesis represents the properties after cracking

수치해석적 접근방법은 관련문헌(Son, 2003; Son and Yun, 2010)에 상세하게 설명되었으며 이를 참고하기 바란다. 구조물에는 상재하중의 영향을 고려하기 위하여 블록식구조물 자중의 총 1.0배에 달하는 하중이 구조물 각층에 고루 분포하도록 하였으며, 2차원해석을 수행함에 있어서 실제 지반변위에 노출된 3차원구조물의 거동특징을 고려하기 위하여 해석구조물에 직각으로 교차하는 벽체의 하중(해석구조물 자중의 1/6)이 구조물 아래 지반변위가 발생하는 시점에 해석구조물의 좌측 단부에 작용하도록 하였다. 지반과 구조물의 모델링을 위해서 사용한 물성치는 Table 1에 자세히 나타내었다. 표에서 사용한 조인트 및 인터페이스에 대한 물성치는 다양한 벽돌블록들에 대한 시험자료(Atkinson et al., 1989)와 여러 발표된 자료들 (Page, 1978)을 토대로 결정한 평균적인 값이다.

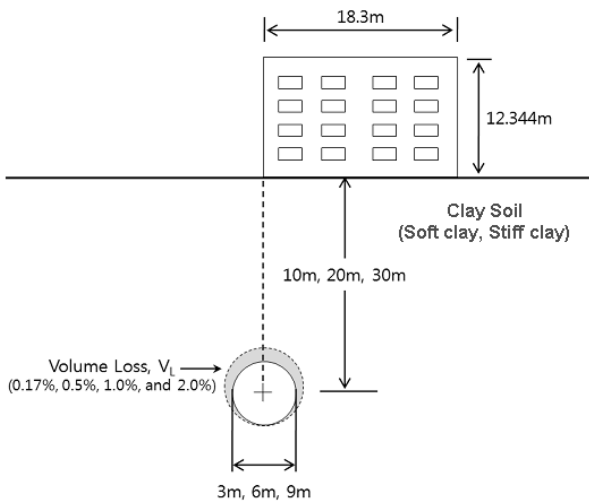


Fig. 4. Various Conditions of Numerical Parametric Studies

본 연구에서는 터널의 굴착직경과 깊이를 다양하게 변화시켜 적용하였으며, 또한 터널의 시공조건(지반손실)과 지반조건을 달리하여 해석을 수행하였다(Fig. 4 참조). 이와 같은 다양한 조건에서 발생하는 지표면에서의 수직침하 및 수평 지반변위는 앞서 2절에서 언급한 방법과 Fig. 2의 Soft to Stiff clays에 해당하는 곡선을 이용하여 결정하였다(Fig. 5 참조). 이 때, 터널주변에서 발생하는 지반손실량은 지표면에서 발생하는 총 침하부피량과 같다고 가정(비배수거동)하였으며 또한, 지표면에서 발생하는 최대 수평변위량은 기존의 연구결과(Cording, 1991; Son and Yun, 2009)를 토대로 최대 침하량의 35%로 적용하였다. 이렇게 결정된 침하곡선과 수평변위 곡선을 해석 모델의 지반요소에 변위로서 부여하였다. 구조물의 위치는 터널굴착으로 인해 가장 큰 지반변위에 노출될 수 있도록 구조물의 한 쪽 끝이 터널 중심선 상에 위치하는 것으로 가정하였다(Fig. 4 참조).

4. 구조물의 거동비교 및 분석

4.1 구조물의 거동비교

점토지반에서 다양한 터널 굴착조건 및 시공조건, 지반조건을 반영하여 4층 블록식구조물의 거동을 수치해석을 통해 파악하였다. 다양한 조건 중 해석에 고려된 굴착조건은 터널의 직경을 3m, 6m 및 9m, 깊이를 10m, 20m 및 30m로 변화시켜 적용하였으며, 지반조건은 연약점토와 단단한 점토의 두 경우로 가정하였고, 지반손실은 기존 점토질 지반에서의 여러 터널굴착 사례들(Attewell, 1978; O' Reilly and New, 1982; Mair et al., 1984 등)로부터 시공이 양호한 경우에서 불량한 경우까지의 범위에 해당되는 0.17%, 0.5%, 1% 및 2%에 대해서 해석을 수행하였으며 그로부터 발생된 구조물의 거동비교를 아래와 같이 정리하였다.

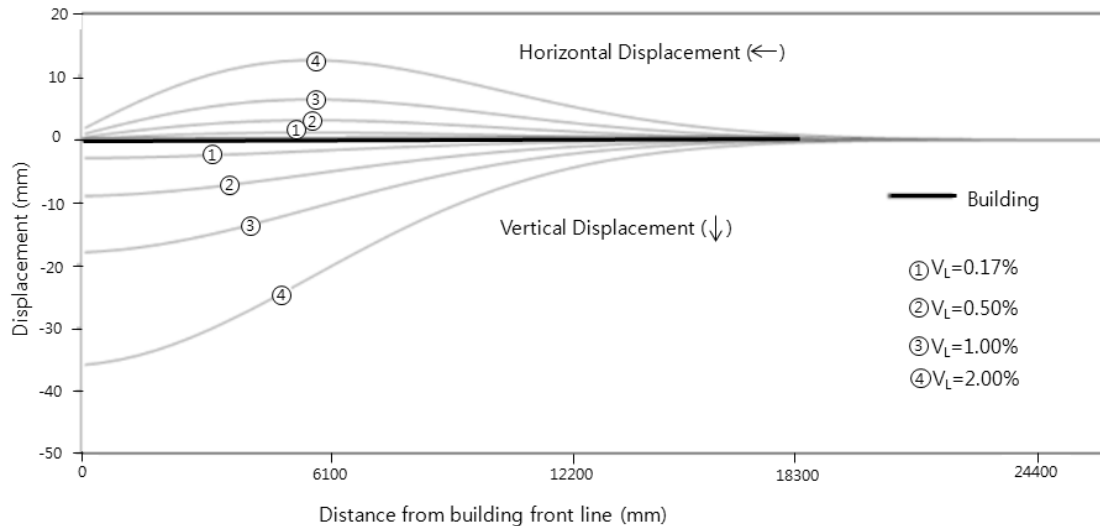


Fig. 5. An Example of Ground Displacement Profiles Applied for Numerical Analysis (Tunnel Depth, 20m, Tunnel Diameter, 6m)

Fig. 6은 연약점토 지반에서 시공조건(지반손실량, V_L)이 일정한 상태에서 터널깊이를 달리한 4층 블록식구조물에 대한 거동비교의 한 예를 보여주고 있다.

그림에서 보는바와 같이 같은 지반손실량에 대해서 터널깊이가 얕을수록 구조물은 보다 큰 변형을 겪는다는 것을 알 수 있다. 각 터널깊이에 대해서 Bay1에 발생한 각변위를 비교해보면, 각각 0.23×10^{-3} , 0.09×10^{-3} 및 0.05×10^{-3} 로 나타났으며, 구조물에 발생한 수평변형율을 비교해 보면, 각각 0.04×10^{-3} , 0.05×10^{-3} 및 0.04×10^{-3} 로 나타났다. 각 구조물에서 발생한 각변위와 수평변형율을 이용하여 구조물 손상도평가기준(Son and Cording, 2005)에 따라 손상도를 평가해 보면 터널깊이에 관계없이 모든 구조물에는

무시할 수 있는 정도의 손상이 발생하였다.

Fig. 7은 연약점토 지반에서 터널조건(터널깊이, 20m 및 터널직경, 6m)이 일정한 상태에서 지반손실량을 달리한 4층 블록식구조물에 대한 거동비교의 한 예를 보여주고 있다.

그림에서 보는바와 같이 주어진 터널조건에 대해서 지반손실량이 증가할수록 구조물은 보다 큰 변형을 겪는다는 것을 알 수 있다. 각 지반손실량 조건에 대해서 Bay1에 발생한 각변위를 비교해보면, 각각 0.06×10^{-3} , 0.09×10^{-3} 및 0.16×10^{-3} 로 나타났으며, 구조물에 발생한 수평변형율을 비교해 보면, 각각 0.04×10^{-3} , 0.05×10^{-3} 및 0.03×10^{-3} 로 나타났다. 각 구조물에서 발생한 각변위와 수평변형율을 이용하여 구조물 손상도평가기준에 따라 손상도를 평가해

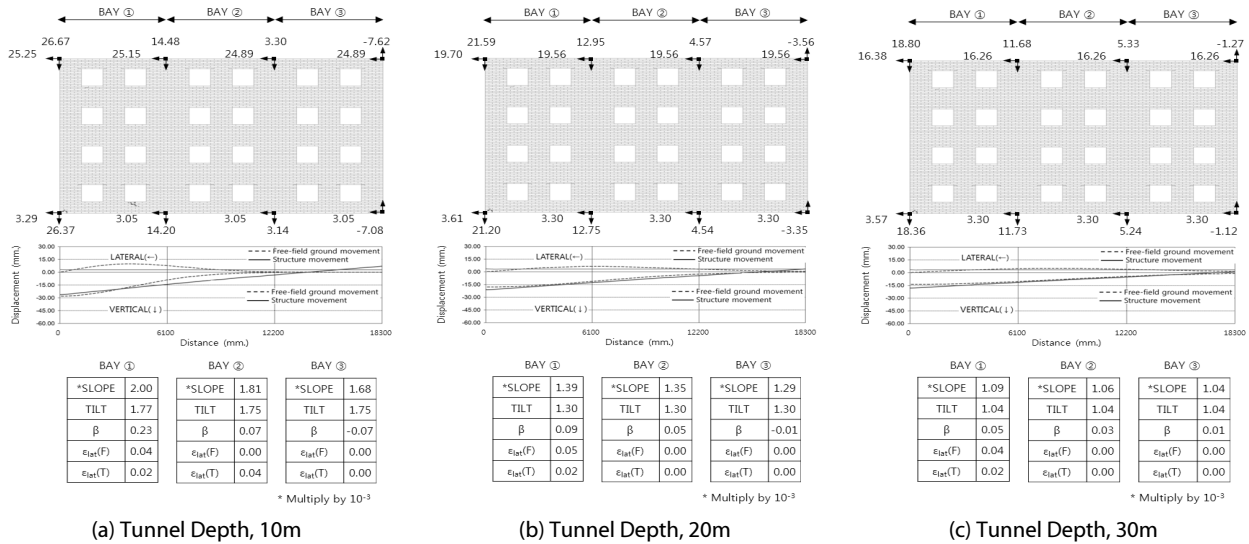


Fig. 6. Comparison of Structure Responses with Tunnel Depth (Ground Loss, 1%, Tunnel Diameter, 6m)

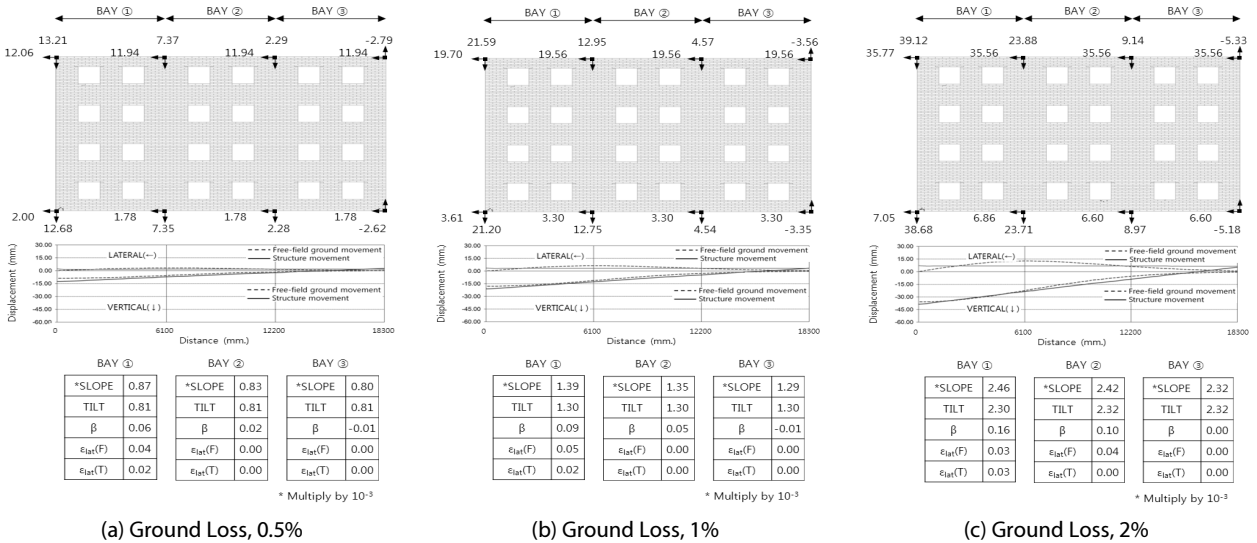


Fig. 7. Comparison of Structure Responses with Ground Loss (Tunnel Depth, 20m, Tunnel Diameter, 6m)

보면 지반손실에 관계없이 모든 구조물에는 무시할 수 있는 정도의 손상이 발생하였다.

Fig. 8은 단단한 점토지반에서 시공조건(지반손실량, V_L)이 일정한 상태에서 터널깊이를 달리한 4층 블록식구조물에 대한 거동비교의 한 예를 보여주고 있다.

그림에서 보는바와 같이 같은 지반손실량에 대해서 연약점토 지반에서의 경우와 마찬가지로 터널깊이가 얕을수록 구조물은 보다 큰 변형을 겪는다는 것을 알 수 있다. 각 터널깊이에 대해서 Bay1에 발생한 각변위를 비교해보면, 각각 2.03×10^{-3} , 0.10×10^{-3} 및 0.04×10^{-3} 로 나타났으며, 구조물에 발생한 수평변형율을 비교해보면, 각각 2.79×10^{-3} , 0.01×10^{-3} 및 0.02×10^{-3} 로 나타났다. 각

구조물에서 발생한 각변위와 수평변형율을 이용하여 구조물 손상도평가기준에 따라 손상도를 평가해 보면 터널깊이 10m에서는 보통 내지 심한정도의 손상이 발생한 반면, 터널깊이 20m 및 30m에서는 무시할 수 있는 정도의 손상이 구조물에 발생하였다. 같은 조건에서의 연약점토의 경우와 비교할 때, 터널깊이가 얇은 경우에는 훨씬 심각한 손상이 발생한 반면, 터널깊이가 20m 이상에서는 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 단단한 점토지반에서 터널조건(터널깊이, 20m 및 터널 직경, 6m)이 일정한 상태에서 지반손실량을 달리한 4층 블록식구조물에 대한 거동비교의 한 예를 보여주고 있다.

그림에서 보는바와 같이 주어진 터널조건에 대해서 지반손실량

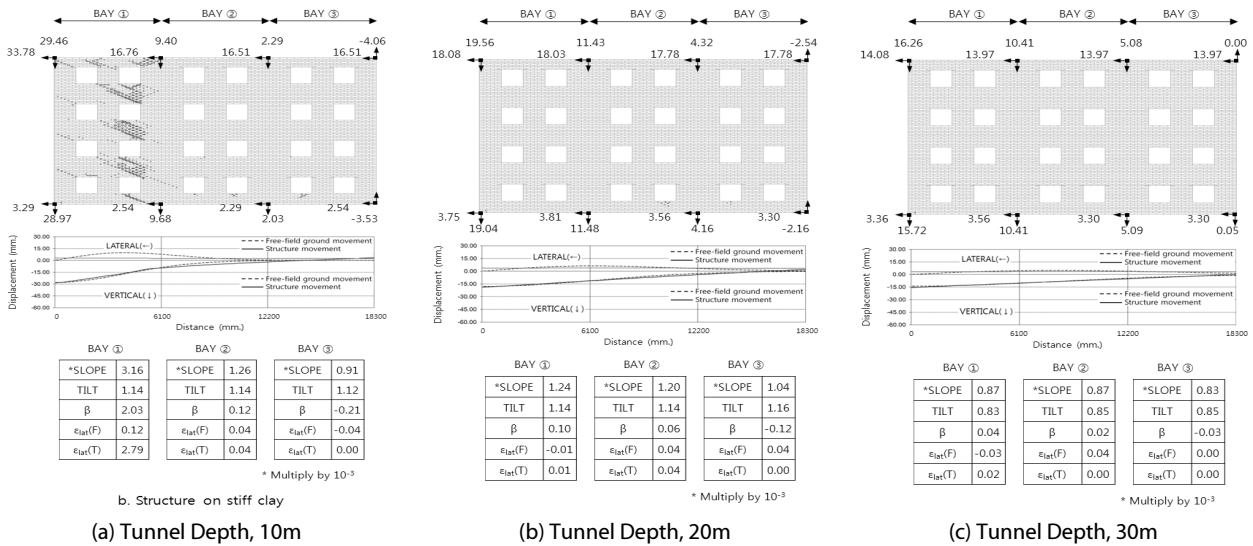


Fig. 8. Comparison of Structure Responses with Tunnel Depth (Ground Loss, 1%, Tunnel Diameter, 6m)

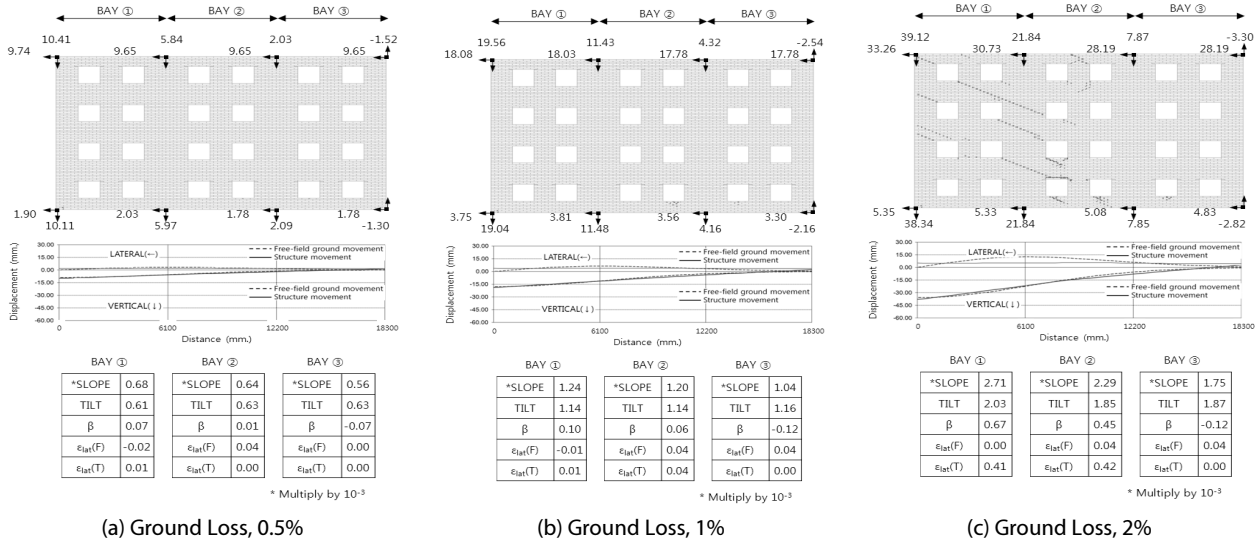


Fig. 9. Comparison of Structure Responses with Ground Loss (Tunnel Depth, 20m, Tunnel Diameter, 6m)

이 증가할수록 구조물에는 보다 큰 변형이 발생한다는 것을 알 수 있다. 각 지반손실량 조건에 대해서 Bay1에 발생한 각변위를 비교해보면, 각각 0.07×10^{-3} , 0.10×10^{-3} 및 0.67×10^{-3} 로 나타났으며, 구조물에 발생한 수평변형율을 비교해 보면, 각각 0.01×10^{-3} , 0.01×10^{-3} 및 0.41×10^{-3} 로 나타났다. 각 구조물에서 발생한 각변위와 수평변형율을 이용하여 구조물 손상도평가기준에 따라 손상도를 평가해 보면 지반손실 0.5% 및 1%에서는 구조물에 무시할 수 있는 정도의 손상이 발생한 반면, 지반손실 2%에서는 약간의 손상이 발생한 것을 알 수 있다. 마찬가지로 같은 조건에서의 연약점

토 지반의 경우와 비교할 때, 지반손실이 2% 이상일 때는 보다 큰 손상이 발생한 반면, 지반손실이 1% 이하에서는 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있었다.

4.2 구조물의 거동분석

4.2.1 연약점토 지반에서의 구조물 거동분석

Fig. 10은 연약점토 지반에서 해석된 모든 경우에 대하여 터널깊이/터널직경(Z/D) 비와 구조물에 발생한 최대 인장변형율을 비교 분석한 것이다. 그림에서 구조물의 손상상태를 구분하는 경계선은

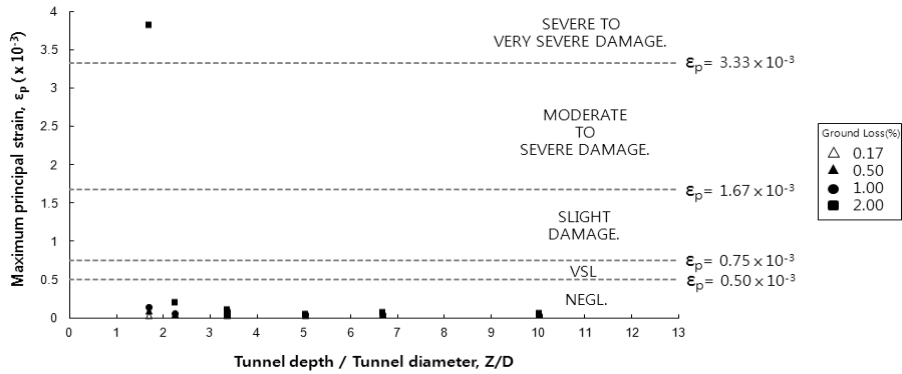


Fig. 10. Comparison of Structure Responses with Tunnel and Ground Loss Conditions in Soft Clay

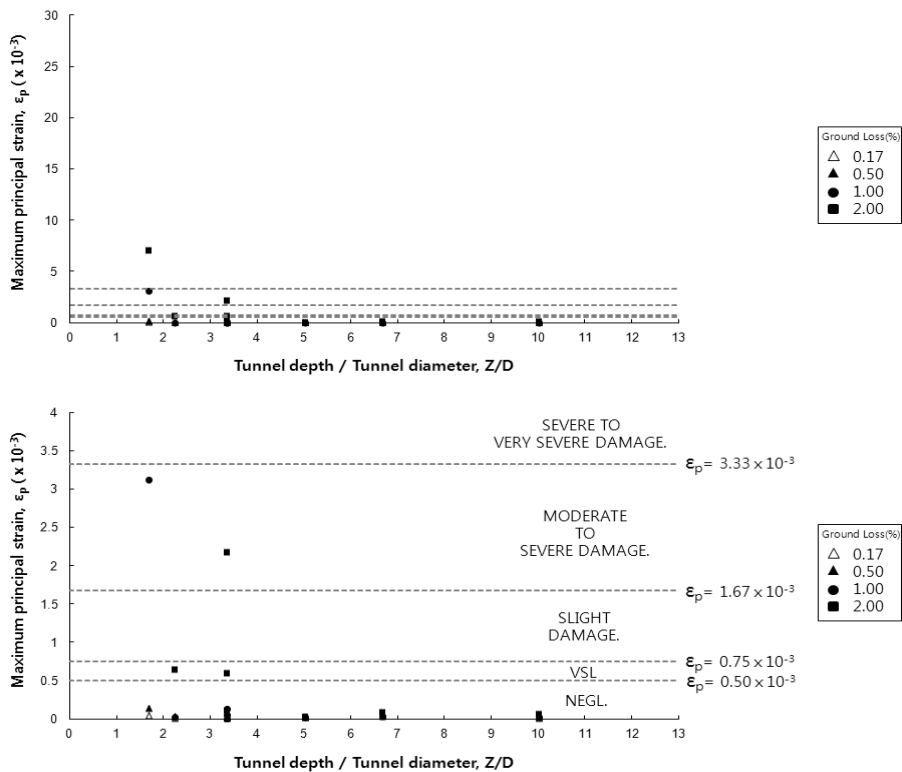


Fig. 11. Comparison of Structure Responses with Tunnel and Ground Loss Conditions in Stiff Clay

Son and Cording (2005)이 제시한 손상평가기준에서의 기준값들을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 Z/D 비가 작을수록 구조물에 발생하는 최대 인장변형률이 더 크다는 것을 알 수 있으나 그 비가 약 2.0보다 클 경우에는 큰 차이를 나타내지 않는다는 것을 알 수 있다. 연약점토에서는 터널굴착 유발 발생 지반변위가 구조물의 하중 및 강성에 의해서 완만하게 수정되는 경향이 있어 터널깊이/직경 비가 약 2.0보다 크고 지반손실이 2%이하가 되는 조건에서는 구조물에 발생하는 손상은 무시할 수 있는 정도인 것을 알 수 있었다. 하지만, 터널깊이/직경비가 약 2.0보다 작고 지반손실이 2%이상인 조건에서는 구조물이 아주 심각한 손상을 겪을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 단단한 점토지반에서의 구조물 거동분석

Fig. 11은 단단한 점토지반에서 해석된 모든 경우에 대하여 터널깊이/터널직경(Z/D) 비와 구조물에 발생한 최대 인장변형률을 비교 분석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 연약점토 지반의 경우와 비교하여 구조물에 발생하는 손상정도가 훨씬 증가한 것을 알 수 있다. 물론 이 때 서로 다른 점토 지반에 동일한 크기의 지반손실이 발생하는 경우를 가정한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 터널깊이/직경(Z/D) 비가 증가할수록 구조물에 발생하는 최대 인장변형률이 점점 감소한다는 것을 알 수 있으며 그 정도는 지반손실의 크기에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다. 지반손실이 2%인 경우에 터널깊이/직경 비가 약 3이 될 때 까지 구조물에 발생할 수 있는 손상은 매우 심각 내지 심각하다는 것을 알 수 있으며 지반손실이 1%인 경우에는 터널깊이/직경 비가 약 2.5가 될 때 까지 구조물은 보통 내지 심각한 손상을 입을 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만, 지반손실이 0.5%이하인 경우에는 구조물이 터널깊이/직경 비에 관계없이 손상을 거의 겪지 않는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 점토지반에서 터널의 굴착조건(터널깊이 및 터널직경)과 시공조건(지반손실량), 지반조건(연약점토, 단단한 점토)을 변화시키면서 터널상부에 위치한 구조물의 거동변화를 조사 및 분석한 것이다. 본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점토지반에서 터널굴착 유발 인접구조물의 거동은 터널의 굴착 조건 및 시공조건, 지반조건에 따라영향을 받는다는 것을 알 수 있으나, 기존의 모래지반에 대한 연구결과와 비교할 때 그 영향은 보다 작은 것을 알 수 있었다. 이는 점토지반에서 발생한 지반침하가 모래지반보다 더 넓은 범위에 걸쳐 분포되고

또한 더 완만하게 형성되어 구조물이 보다 작은 변형에 노출되었기 때문인 것으로 판단된다. 해석에 사용된 다양한 조건들의 구조물거동에 대한 영향검토 결과, 터널깊이가 얕을수록, 터널 직경이 클수록, 지반손실량이 클수록 구조물에 발생할 수 있는 손상은 더 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, 같은 조건하에서 단단한 점토일수록 구조물에 발생할 수 있는 손상은 더 크다는 것을 알 수 있었으며, 이는 연약점토와는 달리 발생된 지반변위가 구조물에 의해 보다 완만하게 뒤틀리는 경향이 더 작기 때문인 것으로 판단된다.

- (2) 본 연구에서 수행된 연약점토 지반(비배수탄성계수, E=17.2 MPa) 및 구조물 조건에서는 터널깊이/직경 비가 약 2.0보다 크고 지반손실이 2%이하가 되는 조건에서는 구조물에 발생하는 손상은 무시할 수 있는 정도이지만, 터널깊이/직경비가 약 2.0보다 작고 지반손실이 2%이상인 조건에서는 구조물이 아주 심각한 손상을 겪을 수 있다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구에서 수행된 단단한 점토지반(비배수탄성계수, E=68.9 MPa) 및 구조물조건에서는 지반손실이 2%인 경우에 터널깊이/직경 비가 약 3이 될 때 까지 구조물에 발생할 수 있는 손상은 매우 심각 내지 심각하다는 것을 알 수 있었으며 지반손실이 1%인 경우에는 터널깊이/직경 비가 약 2.5가 될 때 까지 구조물은 보통 내지 심각한 손상을 입을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 지반손실이 0.5%이하인 경우에는 구조물이 터널깊이/직경 비에 관계없이 손상을 거의 겪지 않는 것을 알 수 있었다.
- (4) 점토지반에서 터널굴착으로 인한 인접구조물의 손상정도를 용이하게 파악하기 위해서, 터널 굴착조건, 시공조건 및 지반조건이 모두 반영된 결과도표를 제시하였다. 향후 실무자는 상기 도표를 활용하여 본 연구에서 수행한 점토지층 및 구조물조건 의 범주 내에서 터널, 시공 및 지반조건이 주어지면 발생할 수 있는 구조물의 손상정도를 직접적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구는 단일지층의 점토지반에 한정하여 결과를 제시하였으며, 향후 보다 일반적인 다양한 복합지층에서의 터널굴착에 따른 관련연구가 필요할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 본 연구결과는 수행한 점토지층 및 구조물의 범주 내에 있을 수 있는 조건에서는 직접적으로 적용할 수 있다는 점과 향후 복합지층을 포함하여 확장된 관련연구에 대한 기초정보를 제공한다라는 점에서 그 의미가 있다.

References

Atkinson, R. H., Amadei, B. P., Saeb, S. and Sture, S. (1989).

- “Response of masonry bed joints in direct shear.” *J. Structural Engr*, ASCE, Vol. 115, No. 9, pp. 2276-2296.
- Attewell, P. B. (1978). Ground movements caused by tunnelling in soil, *Proc. Conf. Large Ground Movements and Structures*, Cardiff, Pentech Press, pp. 812-948.
- Cording, E. J. (1991). “Control of ground movements around tunnels in soil.” *Ninth Pan American Conference*, Vina del Mar, Chile. Sociedad Chilena de Geotechnica, Vol. 4, pp. 2195-2244.
- Cording, E. J. and Hansmire, W. H. (1975). *Displacements around soft ground tunnels*, General Report, Session 4, 5th Panamerican Cong. on Soil Mech. and Foun. Engr. Buenos Aires, November.
- Mair, R. J., Phillips, R., Schofield, A. N. and Taylor, R. N. (1984). “Application of centrifuge modelling to the design of tunnels and excavations in soft clay.” *Proc. of symposium on the application of centrifuge modelling to geotechnical design*, Manchester, April, Balkema, pp. 357-380.
- O’Reilly, M. P. and New, B. M. (1982). “Settlements above tunnels in the United Kingdom – Their magnitude and effects.” *Tunnelling ’82*, M. J. Jones, ed., London, England, pp. 173-181.
- Page, A. W. (1978). “Finite element model for masonry.” *J. Structural Engr*, ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1267-1285.
- Peck, R. B. (1969). “Deep excavations and tunneling in soft ground.” *Proc. 7th Int’l Conf. on Soil Mech. and Foun. Engr.*, Mexico City, State-of-the-Art, pp. 225-290.
- Son, M. and Cording, E. J. (2005). “Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements.” *J. of Geote. and Geoen, Engr*, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 162-177.
- Son, M. and Yun, J. (2009). “Numerical analysis of tunnelling-induced ground movements.” *Tunnel Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 229-243 (in Korea).
- Son, M. and Yun, J. (2010). “Response analysis of nearby structures with the considertaion of tunnel construction and ground conditions.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 6C, pp. 255-263.
- Son, M. (2003). *The response of buildings to excavation-induced ground movements*, Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Son, M. (2013). “Analysis of response change of structure due to tunnel excavation conditions in sand ground.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1541-1549.
- UDEC 3.1, Theory and Manual (2000). *Itasca consulting group*, Inc, MN.