

교량 직하부에 시공되는 터널에 의한 말뚝기초의 거동변화

최고니¹, 우승제², 유충식^{3*}

Effect of tunneling under a bridge on pile foundation behavior mechanism

Go-Ny Choi, Seung-Je Woo, Chung-Sik Yoo

ABSTRACT This paper presents the effect of tunneling on bridge pile foundation being operated using three-dimensional numerical modeling. Also the parametric study on the depth of tunnel of which the diameter was 10 m was carried out in order to evaluate the behaviors of pile foundation due to the tunnel excavation. This paper expresses the changes of vertical and horizontal displacement, movement of soil and stress of the pile. Based on the results obtained from the numerical analysis some insights into the changes of pile foundation behaviors due to variations of tunneling location were mentioned and discussed.

Keywords: Pile foundation, finite-element method, tunnelling, soil behavior

요약 본 논문은 터널 굴착에 따른 상부교량 말뚝기초의 거동 변화를 3차원 수치해석을 통하여 분석하였다. 또한 터널의 심도변화에 따른 상부 말뚝기초 거동의 변화를 분석하기 위하여 직경이 10 m인 터널의 심도에 대한 매개변수 분석을 수행하였다. 해석결과를 이용하여 지반 변위, 말뚝기초의 연직변위, 터널 굴착 직각방향 및 굴착방향 변위, 기초의 축력변화 등을 분석하였으며, 이 분석 결과를 토대로 터널의 굴착면의 위치에 따른 교량 기초의 지지거동 변화를 알아보았다.

주요어: 말뚝기초, 유한요소법, 터널굴착, 지반 변위

접수일(2011.1.4), 수정일(2011.1.13), 게재확정일(2011.1.27)

¹성균관대학교 초고층장대교량학과 석사과정

²성균관대학교 초고층장대교량학과 석사과정

³정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

*교신저자: 유충식 (E-mail: csyoo@skku.edu)

1. 서론

최근의 급격한 도시화와 인구밀집으로 인하여 기존 구조물 하부에 지하구조물을 시공하는 사례가 증가하고 있다. 지하 구조물 중 터널이 시공되는 경우 상부구조물의 말뚝기초 및 주변지반에 변형이 발생하고 이와 같은 외력 변화에 의한 말뚝기초의 추가적인 축력 및 모멘트 변화가 발생한다. 즉 터널 굴착시 시공된 상부 말뚝기초의 지지거동 안정성이 저하하며 이에 대한 기존의 여러 연구가 진행되어 왔다.

터널에 굴착에 의한 지표면의 거동 예측에 대한 연구는 터널공학 분야에 있어서 끊임없는 연구의 대상이었다. 특히 터널 굴착에 의한 지표 침하는 인접 지중물의 변위나 변형을 유발시켜 외력이나 모멘트를 유발하여 구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있어 터널굴착에 의한 지표면의 거동예측은 지중물의 거동에 대한 연구로 발전해 왔다(김상환, 2003; 이대혁 등, 2004; 유충식 등, 2006). 지중물중 말뚝기초에 지지거동 변화에 관련한 기존의 연구는 터널의 굴착과 터널 굴착과 단말뚝의 거동에 관련한 2차원 수치 해석 연구와 단말뚝 3차원 수치 해석 연구(Cheng 등, 2007; Huang 등, 2009; Lee 등, 2006; 이철주 등, 2005), 터널 굴착과 무리 말뚝의 거동에 관한 3차원 수치해석 연구(Li 등, 2010; 유충식 등, 2006)등이 수행되었으며 말뚝의 침하 발생으로 인하여 허용지지력의 크기가 감소하게 될 것이라는 연구 결과를 얻게 되었다.

기존 연구에 따르면 터널 굴착에 의한 말뚝의 거동이 터널위치에 대한 말뚝 선단의 상대위치에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(오세욱 등, 2006; 유충식, 1994). 특히 건축물의 경우 기초가 연속적으로 위치하지만 교량의 경우 교대의 위치에 따라 말뚝기초의 위치가 한정적이므로 터널 굴착의 위치에 따라 상부 말뚝기초의 거동이 두드러지게 변화하는 경향을 보인다. 또한 교량의 경우 터널 굴착면의 수평위치에 따른 교량 말뚝기초 직하부 또는 말뚝기초 사이(인접부) 시공조건과 터널 굴착 수평위치별 굴착 연직위치조건으로 터널 굴착면 CASE가 세분화 되므로 이러한 굴착면 위치에 따른 말뚝기초와 지반의 거동에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

즉 터널 굴착의 심도와 위치 따라 상부 말뚝 기초와 지반의 거동이 판이하게 달라지며 말뚝의 축력 변화 및 변위의 경향을 분석하여 굴착위치와 상관관계를 파악하여야 상부 말뚝기초에 영향을 크게 미치지 않는 이상적인 터널 시공 영역을 설정할 수 있으므로 터널 굴착면 위치에 따른 상부 말뚝기초의 하중지지 변화에 대한 연구수행이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus 6.7을 이용하여 터널 굴착에 따른 교량 무리말뚝의 거동변화 수치해석을 수행하였으며 터널 굴착면 수평위치 조건 중 교각 직하부에

터널 굴착이 이루어지는 CASE에 대하여 터널 굴착지점의 심도를 변화시키는 매개변수 연구를 수행하였다. 해석결과를 이용하여 터널의 굴착 과정에 따른 지반변위, 말뚝기초의 변위 변화 및 말뚝의 축력 변화를 평가하여 이를 통한 터널 굴착의 심도 변화와 주위 말뚝기초에 미치는 영향의 상관관계를 분석하였다.

2. 기존 연구 동향

터널 굴착에 따른 지반거동 및 구조물 말뚝기초 대한 영향 평가 연구는 다수의 연구자에 의하여 수행되었으며 단말뚝에 관련한 많은 수치해석연구는 Cheng 등(2007), Huang 등(2009), Lee 등(2006)에 의해 활발히 수행되어져 왔으며 최근에는 상부 구조물과 터널시공에 관한 수치해석 연구들이 진행되고 있다.

Cheng 등(2007)은 변위제어모델(displacement controlled method)을 적용한 3차원 유한요소해석을 통하여 점토지반에 위치한 단말뚝 및 2×2 의 무리말뚝에 대한 터널시공의 영향을 분석하였다. 현장측정 결과 및 하중제어모델 해석결과와 비교하여 터널시공에 의한 지반변형 예측 및 말뚝거동 예측 방법에 대한 변위제어모델의 적용성을 검증한 바 있다.

Huang 등(2009)의 연구 또한 해석모델링 검증에 관한 연구로 유한차분법을 이용한 단순 2단계해석법(a simple two-stage analysis)을 적용하여 터널 시공 시 단말뚝과 2×2 의 무리말뚝의 거동특성을 연구하였다. 단순 2단계해석법은 말뚝을 수동말뚝으로 간주하며 터널 굴착에 대한 해석결과로 말뚝이 존재함에 따라 발생하는 보호효과(shielding effect)의 영역을 정의내리고 경계요소 해석결과와 비교하였다. 해석결과 무리말뚝의 거동은 중첩의 원리에 의하여 결정되며 단순 2단계해석법은 말뚝과 지반의 마찰면을 일체거동으로 모사하기 때문에 터널 라이닝의 축력을 과소평가할 수 있다고 제안하였다.

Lee 등(2006)은 풍화도, 풍화암으로 구성된 지층구조에 대한 3차원 유한차분해석을 통하여 터널 굴착시 지반침하와 말뚝침하, 말뚝 축력변화 및 전단력분포 변화 등을 분석하여 터널 굴착 단계에 대한 단말뚝의 거동특성에 대하여 연구하였다.

이 외 터널시공에 의한 주변 말뚝 거동에 관한 연구는 Vermeer와 Bonnier(1991), Bezuijen과 Schrier(1994), Mroueh와 Shahrour(2002) 등 여러 연구가 수행되었으나 대부분 점토나 모래지반을 적용하고 단말뚝과 터널시공의 연관성에 대한 공학적 연구가 주를 이룬다.

무리말뚝과 터널 시공에 관련된 연구를 살펴보면 최근 유충식 등(2006)은 구조물 기초의 무리말뚝 하부에 터널 시공 시 3차원 응력-간극수압 연계 유한요소해석을 통하여 지하수위를 고려한 무리

말뚝과 터널시공의 상호작용을 연구를 수행하였다. 구조물의 무리말뚝은 터널의 그라우팅 상부지반과 일체화된 거동을 하며 이에 따라 말뚝의 침하 및 말뚝의 축하중이 변화하며 지하수위를 고려하지 않은 전응력 해석은 말뚝에 대한 터널시공의 영향을 과소평가 할 수 있다고 보고한 바 있다.

또한 Li 등(2010)은 연약지반에 시공되는 지하철 노선의 시공 단계에 있어서 기존의 무리말뚝의 간섭효과를 연구하기 위하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하였으며 기존의 무리말뚝은 터널 굴착 시 지반침하를 감소시키며 터널 굴착 시 지반의 수평변위와 특정위치의 말뚝에 작용하는 부주면 마찰력에 의하여 말뚝의 휨모멘트가 발생한다고 보고하였다.

이와 같이 기존의 연구는 단말뚝과 터널시공에 대한 공학적 거동분석을 위한 유한요소해석 연구가 주로 수행되었으며 최근의 상부 구조물과 터널시공에 대한 연구는 CASE study를 통한 전반적인 지반변형 및 말뚝 거동에 대한 연구가 주를 이룬다. 그러나 전술한 터널의 굴착지점의 심도에 대한 무리말뚝의 거동 메커니즘 분석 및 심도별 말뚝기초의 선단지지-주면마찰 거동에 대한 연구는 거의 전무한 바, 본 연구에서는 이에 대한 매개변수연구를 수행하여 터널 굴착이 주변 무리말뚝 기초의 거동 메커니즘의 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 터널 시공 조건

본 연구는 터널 굴착 단계별로 상부에 위치한 무리말뚝의 거동 변화 경향을 분석하기 위하여 3차원 반 단면 유한요소해석 모델을 구축하였고 터널의 심도(C)를 매개변수로 하는 연구를 수행하였다. 해석결과로 말뚝의 터널 굴착 단계별 지반변위, 선단침하 및 말뚝기초의 축력분포 등을 토대로 기존 무리말뚝 하부에 터널 굴착 시 무리말뚝의 하중지지 메커니즘의 변화 경향을 분석하였다.

3.1 터널시공 조건

본 연구는 그림 1과 같이 4×2 본의 무리말뚝을 대상으로 40단계에 걸쳐 총 80 m를 굴착하여 터널을 시공하는 단계를 모사하였으며 말뚝 직경 $B_p = 0.5$ m, 길이 $L_p = 15$ m, 파일캡 $6 \times 3 \times 0.5$ m으로 모델링하였다. 또한 말뚝은 풍화암에 1 m 근입되어 하중을 기반암에 전달하며 무리말뚝 내 단말뚝의 위치는 그림 1과 같다.

터널은 마제형 단면으로 최대 직경(D)은 10.0 m이며 터널 굴착이 무리말뚝의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 터널의 심도(C)를 0.15D, 0.30D, 0.60D로 변화시키며 무리 말뚝 거동에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 또한 말뚝의 주면 지반조건에 따라 말뚝의 주면마찰력의 발현에 차이가 발생하고 이는 말뚝 거동에 영향을 미칠 것으로 판단하여 Ladanyi와 Archambault(1970)가 제안

한 마찰계수(μ)를 $\mu = \tan(\phi' + \psi) = 0.5$ 로 고정시켜 해석결과를 분석하였다.

3.2 유한요소해석 모델링

본 연구의 유한 요소 해석은 유한요소 범용 프로그램 Abaqus 6.7을 사용하여 수행하였다. Abaqus 6.7은 지반의 탄소성 거동을 효율적으로 모사하며 3차원의 터널시공과정의 모사에 있어서 요소의 제거 및 추가기능이 탁월하여 지반굴착 및 지보재 설치 등의 터널모델링에 있어서 매우 효율적으로 평가되고 있다. 본 해석에 적용된 유한요소해석 모델은 그림 2와 같으며 보이는 바와 같이 해석 단면의 경우 단면의 좌우 대칭을 고려하여 3차원 반 단면 해석을 수행하였으며 터널 굴착은 전단면굴착으로 모델링 하였다(그림 2 참조). 먼저 그림 2(a)에서 보이는 바와 같이 좌우측 경계면은 약 5.0D의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 시·중점 경계의 영향을 최소화하면서 수평변위를 구속하고 터널 바닥으로부터 약 1.0D 하부에 하부경계를 위치시키고 롤러를 설치하여

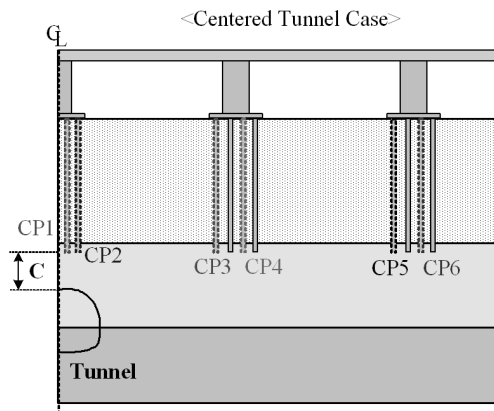
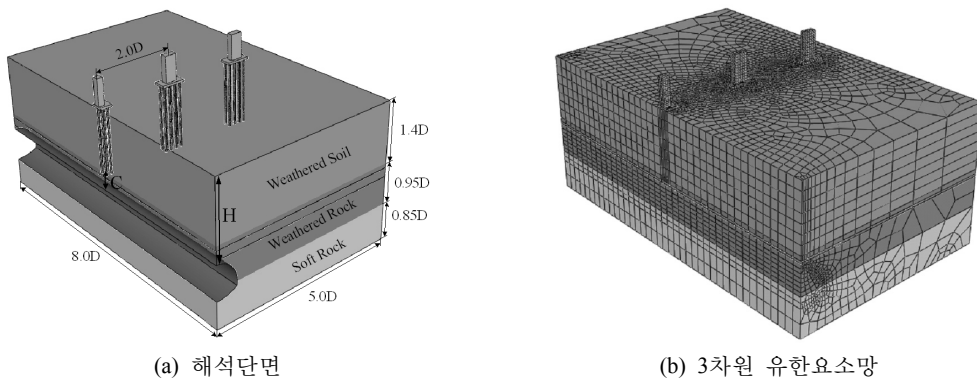


그림 1. 해석에 사용된 모델조건



(a) 해석단면

(b) 3차원 유한요소망

그림 2. 해석적용 단면의 유한요소망

연직방향 변위를 구속하였다.

말뚝의 주면부 하중전이 모델링은 그림 3(a)와 같이 접촉요소(contact pair)를 사용하여 말뚝과 주면지반의 미끄러짐 거동을 모사하였다. 접촉요소는 그림 3(b)와 같이 Coulomb friction 모델을 사용하여 접촉면의 전단응력(τ)이 임계전단응력 $\tau_{crit} = \mu \cdot p$ (μ : 마찰계수)을 초과하는 경우 미끄러짐이 발생하는 것으로 간주한다.

지반 및 지보재의 이산화에 있어 총 244,000개의 절점과 145000개의 요소가 사용되었으며 지반

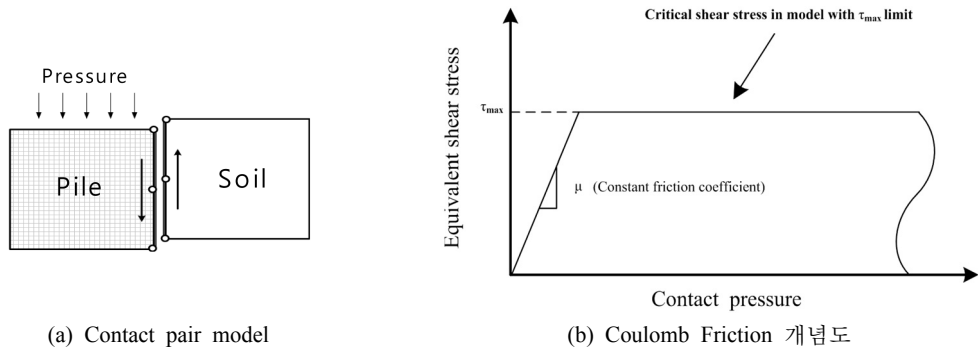


그림 3. 말뚝의 주면부 하중전이 모델링



그림 4. 시공과정 모델링

표 1. 해석에 적용된 지반 및 지보재의 역학적 특성

구 분	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kPa)	내부마찰각 ($^\circ$)	팽창각 ($^\circ$)	변형계수 (MPa)	프아송비
풍화토	18	20	30	0.5	60	0.30
풍화암	20	50	32	0.5	200	0.30
연암	23	500	35	5	1,000	0.25
말뚝	N/A	N/A	N/A	N/A	20,000	0.25
라이닝	N/A	N/A	N/A	N/A	20,000	0.25

및 말뚝기초는 8절점 가감 적분 고체요소(C3D8R)를 적용하고 숏크리트 라이닝은 4절점 가감 적분 쉘요소(S4R)를 적용하였다. 일반적으로 터널 설계시 숏크리트와 록볼트가 지보재로 사용되나 지반 조건이 좋은 풍화암대를 관통하여 터널이 굴착되므로 록볼트는 해석의 편의상 모델링에서 제외시켰다. 해석 대상지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준과 Davis(1968)가 제안한 비관련 흐름법칙을 따르는 탄소성 재료로 가정하였으며 숏크리트 라이닝은 탄성재료로 가정하였고 두께는 일반적인 현장 시공에서 사용되는 30 cm로 적용하였다. 해석에 사용된 지반 및 지보재의 물성치는 표 1과 같다.

시공과정의 모델링은 본 연구의 주목적은 터널 굴착에 의한 말뚝의 거동을 분석 함에 있으므로 말뚝의 거동을 상대적으로 과대평가 할 수 있도록 터널굴착 면을 단일면 굴착으로 그림 3과 같이 2단계 반복으로 진행된다. 굴진 장은 3차원 해석 소요시간을 감안하여 2 m로 결정하였다. 그림 4(b), (c)와 같이 굴진 장 2 m 굴착 후 추가 2 m 굴진 장이 굴진되는 단계에서 전 단계 굴진 장 무지보 구간에 숏크리트 라이닝이 시공되는 형태의 시공과정이 반복되어 무리말뚝 하부의 터널 굴착이 완료되도록 하였으며 굴착단계별 지반변위, 말뚝의 선단침하, 축력분포 등을 비교분석 하였다.

4. 결과 분석 및 고찰

교량기초의 거동에 대한 터널 굴착의 영향을 분석하기 위해 교각 기초 말뚝 전방 20 m단면(FD, Face Distance to section,=-2.0D), 교각 기초 말뚝 중심부(FD=0.0D)와 교각 기초 말뚝 후방 20 m(FD=2.0D) 단면을 주요 분석 단면으로 선정하여 침하량 결과를 분석하였다. 또한 그림 5에 보이는 바와 같이 교각 기초 말뚝과 터널 막장 사이의 거리를 통과 전·후, (-)와 (+)로 표기하여 터널 굴착 과정에 따라 말뚝 선단의 연직·수평 침하량, 굴착 단면에서의 굴착 전·후의 말뚝 축력 변화를 검토하여 터널 굴착 심도별 말뚝기초의 지지거동을 분석하였다.

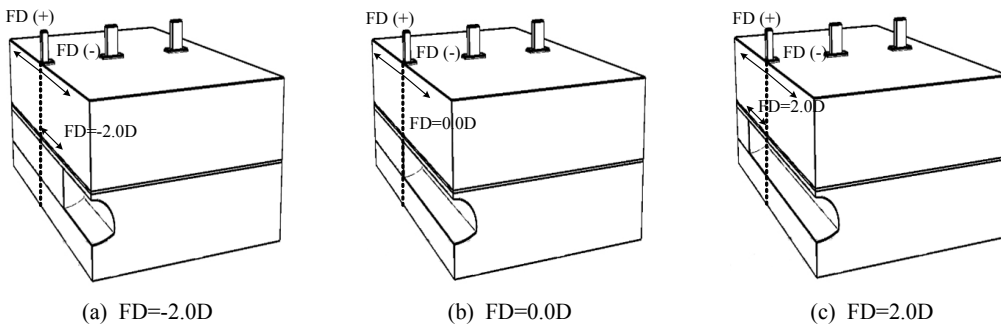


그림 5. 주요 분석 단면

4.1 기본 메카니즘

본 절에서는 터널 굴착에 의한 교량 말뚝기초의 거동 변화를 분석하는데 있어서 터널 굴착의 영향을 극대화시킨 조건인 $C = 0.15D$ 인 터널 굴착 CASE에 대한 결과분석을 수행하였다. 터널 굴착 과정에 따른 말뚝 침하, 선단하중, 축 하중 및 주변마찰력 변화를 분석하여 교량 말뚝기초의 하중지지 메카니즘의 변화를 평가하였다.

교량 말뚝기초 하부에 터널 굴착이 진행되는 경우 터널 직상부의 연직침하가 크게 발생하고 이에 따라 교량 말뚝기초의 거동의 안정성이 저하되는 결과를 보인다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 터널 굴착 완료 후 터널중심방향으로 지반변위가 발생하며 주 영향범위는 터널중심 $0.3D$ 영역으로 판단된다. 말뚝기초별 선단침하량을 살펴보면 그림 7과 같이 CP1과 CP2의 경우 $FD = -2D$ 지점에서 침하가 발생하여 구조물 터널의 굴착면이 교각의 직하부를 통과 할 때 침하의 정도가 터널직경 대비 $0.08 \sim 0.10\%$ 로 최대가 되고 $2D$ 지점에 이르러 그 값이 CP1에서 최대 11 mm , CP2에서 최대 9.5 mm 가 발생한다. 또한 CP3 ~ CP6의 경우 선단침하가 발생하나 그 크기가 약 터널직경 대비 0.002% 로 무시 할 수 있을 정도로 작으므로 굴착에 의한 영향은 CP 3~6에는 큰 영향을 미치지 않다고 판단 할 수 있다.

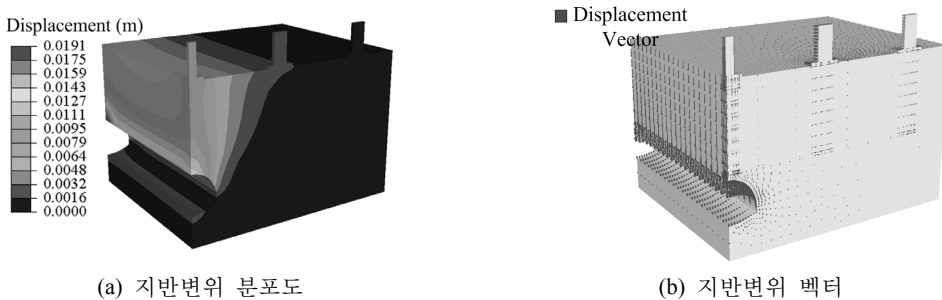


그림 6. 터널 굴착 완료 후 지반변위

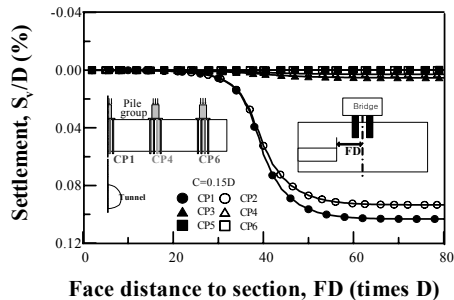


그림 7. 굴진에 따른 말뚝기초의 선단 침하량

교량 말뚝기초에 발생하는 굴착 직각방향 및 굴착방향 변위는 그림 8~9와 같으며 터널 굴착 과정에 따라 발생하는 말뚝의 변위는 말뚝 직경($B_p=0.5\text{m}$)으로 정규화하여 나타내고 있다. 굴착 직각방향(Y축) 변위의 경우 터널 굴착이 진행되면서 굴착면을 향해 변위가 발생하며 동일한 말뚝 무리에 있는 CP 1~2는 말뚝의 선단의 수평 변위가 크고 두부의 변위가 작은 동일한 경향을 보인다. 반면 CP 3~6는 CP 1~2와 반대로 선단의 변위가 작고 두부의 변위가 큰 경향을 동일하게 보인다. 굴착 직각방향 변위는 CP3~4에서 최대 1.42 mm가 발생하며 터널 중심 3.0D 이상의 영역에 미치는 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 8(a), (d)와 같이 CP1과 CP2는 터널 굴착에 의해 동일한 경향의 거동을 하지만 CP1의 수평 변위는 CP2의 약 30%이며, 이는 각각 동일한 말뚝 무리에 있는 CP 3~4 그리고 CP 5~6의 수평 변위가 거의 동일한 것과는 상반된 결과이다. 이는 CP1은 터널 굴착면의 직상부에 위치하기 때문에 CP2보다 수평 변위가 작은 것으로 판단되며, CP3~6은 동일한 말뚝 무리에 위치하는 말뚝간의

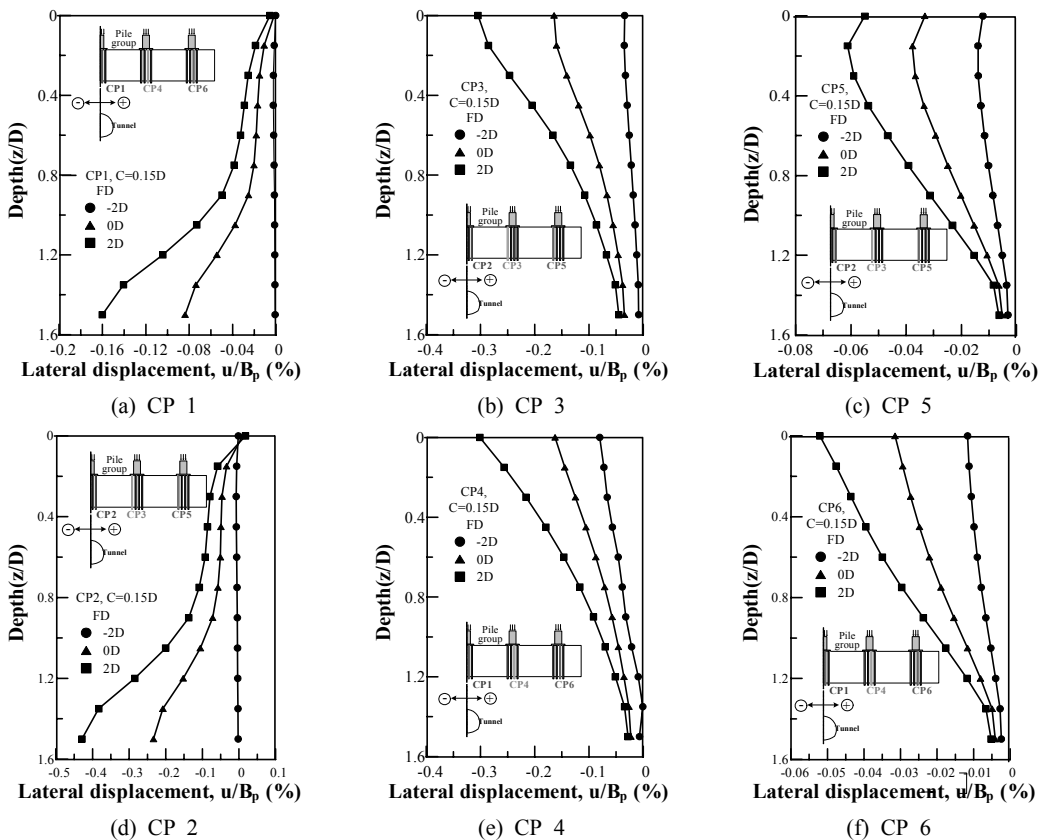


그림 8. 굴진에 따른 말뚝기초의 Y축 변위

변위는 거의 동일 하며 연직 변위와 마찬가지로 터널 굴착면에 근접해 있을수록 수평 변위는 증가하는 경향을 확인 할 수 있다.

터널 굴착 방향의 변위(X축)는 그림 9와 같으며 변위 발생의 경향은 터널 굴착 직각 방향 변위와 마찬가지로 같은 무리 말뚝인 CP1 ~ 2, CP3 ~ 4 그리고 CP5 ~ 6이 각각 유사한 거동을 하여 CP1, 4, 6의 해석결과를 검토하였다. CP1 ~ 2의 경우 터널 굴착 방향 변위는 터널 굴착이 진행되면서 터널이 굴착되어 들어가는 방향(-)으로 변위가 발생하며 터널이 기초를 통과하는 시점에서 (FD=0.0D) 교각의 전면에 시공된 라이닝에 의하여 라이닝이 시공이 되지 않은 기초의 후면방향(+ 방향)으로 변위가 발생한다. 즉 CP1 ~ 2의 경우 터널 굴착에 의한 변위의 방향이 터널의 굴착 면방향으로 발생하며 CP3 ~ 6의 경우 말뚝기초의 변위의 방향은 터널이 굴착되어 들어가는 방향으로 항상 일정한 경향을 보인다.

CP1 ~ 2의 경우 전체적으로 일정한 크기의 변위가 발생하고 CP2 ~ 6은 두부에서 변위가 상대적으로 크게 발생하는데 이는 말뚝의 선단이 암반에 구속 되어 있으며 터널 굴착이 말뚝을 구속하는 지반의 큰 침하를 유발하지 않아 상대적으로 말뚝 선단에 비해 두부의 변위가 크게 발생하는 것으로 판단된다. 최대 굴착방향 변위는 CP1 ~ 2의 경우 말뚝 선단부에서 최대 2 mm, CP3 ~ 4의 경우 말뚝 두부에서 최대 0.55 mm, CP5 ~ 6의 경우 말뚝 두부에서 최대 0.15 mm가 발생하는 것으로 나타났다.

터널 굴착에 의한 지반변위가 발생함에 따라 교량 말뚝기초의 지지력은 그림 10에서 보이는 바와 같이 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 그림 10의 q_x 는 곡선에 따라 선택되는 선단부근 말뚝의 축력 또는 주면마찰력, q_b 는 선단부근 말뚝의 축력, q_s 는 주면마찰력, q_u 는 말뚝으로 전달되는

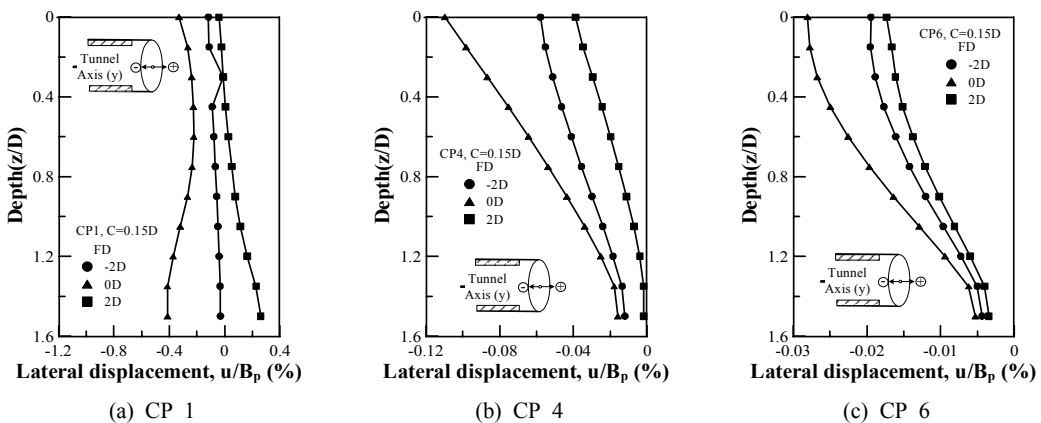


그림 9. 굴진에 따른 말뚝기초의 X축 변위

총 하중 크기이며, 그림 10(a)와 같이 말뚝기초 선단침하에 의하여 CP1의 선단부근 말뚝의 축력이 최종굴착 단계에서 약 300 kN이 감소하여 선단부 응력을 상실하는 반면 주면마찰력은 기존 주면마찰력의 약 1.7배로 크게 증가하는 경향을 보인다. 그림 10(b)에서 볼 수 있듯이 CP1의 경우 굴착전 선단지지와 주면마찰의 비율이 약 1:1로 하중을 지지하는 반면 터널 굴착이 진행되면서 $FD > -2.0D$ 인 조건에서 선단지지와 주면마찰력 비율이 변화하여 $FD > 0.0D$ 일 경우 선단지지의 비율이 급격히 감소하여 터널 굴착완료 후 선단지지가 소실되어 주면마찰만으로 하중이 지지됨을 확인할 수 있다. 이로 인하여 터널의 굴착이 진행되면서 지반이 침하함에 따라 말뚝에 작용하는 축력이 점차로 감소하고 있다. 즉 터널굴착에 의해 말뚝 선단의 축력이 감소하면서 주면마찰력이 증가하는 것임을 알 수 있는데, 이는 Jacobsz(2002)가 원심모형실험을 통해서 관찰한 결과와 유사하다고 볼 수 있다. 이와 같은 지지력비율 변화는 말뚝기초 주변부 지반변위에 비하여 7배 이상 크게 발생하는 선단침하가 원인이다. 이와 같은 거동특성은 터널 직상부에 위치하여 말뚝기초 주변에 큰 변위가 발생하는 CP1~2에 적용할 수 있으며 터널 굴착의 영향이 거의 무시되는 CP3~6의 지지력 변화는 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다.

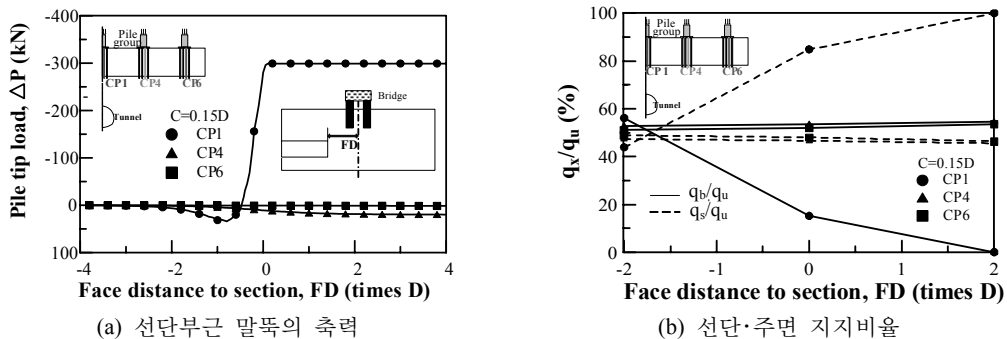


그림 10. 굴진에 따른 말뚝기초의 지지력 변화

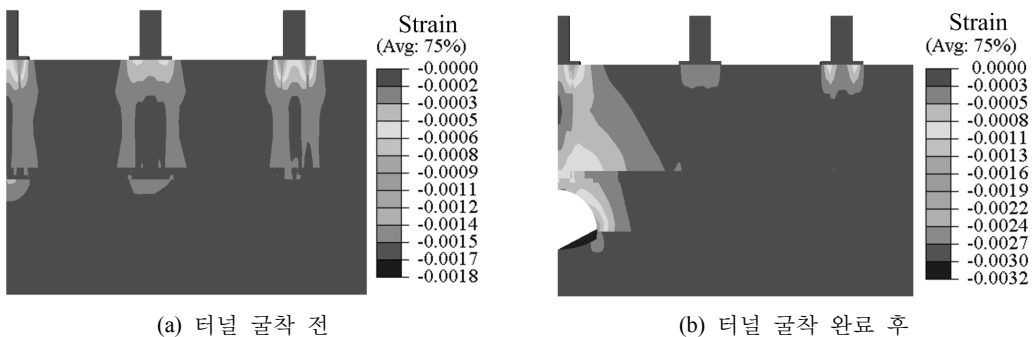


그림 11. 터널 굴착 전·후 변형률 분포도

그림 11은 교량 말뚝기초 주변의 연직변형률 분포를 보여주고 있다. 그림 11(a)에서 보이는 바와 같이 터널 굴착 전 변형률 분포는 기존의 세 무리말뚝군이 하중을 지반에 전달하는 형태를 띠고 있는 반면 터널 굴착이 완료된 그림 11(b)의 경우 풍화토와 풍화암의 경계면에서 변형률 분포차이가 발생하며 기존의 변형률 분포와는 다르게 지반변위가 크게 발생하는 터널 직상부의 CP1~2가 존재하는 영역에서 큰 변형률 분포를 보인다. 말뚝기초 주변의 최대 변형률은 터널 굴착 전 약 1.1%, 터널 굴착 완료후 약 2.2%가 발생하며 터널 굴착으로 인한 주변지반의 영향영역을 보여주고 있다.

4.2 말뚝 침하 및 수평변위 변화

터널 굴착의 심도변화가 상부 교량 말뚝기초의 변위 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 본 연구에서는 터널 심도, $C = 0.15D, 0.30D, 0.60D$ 로 변화시켜 터널 굴착 CASE에 대한 결과분석을 수행하였다. 터널 굴착 과정에 따른 말뚝 선단침하, 터널 굴착 직각방향 및 굴착방향 변위를 터널 심도별로 분석하여 교량 말뚝기초의 거동변화를 평가하였다.

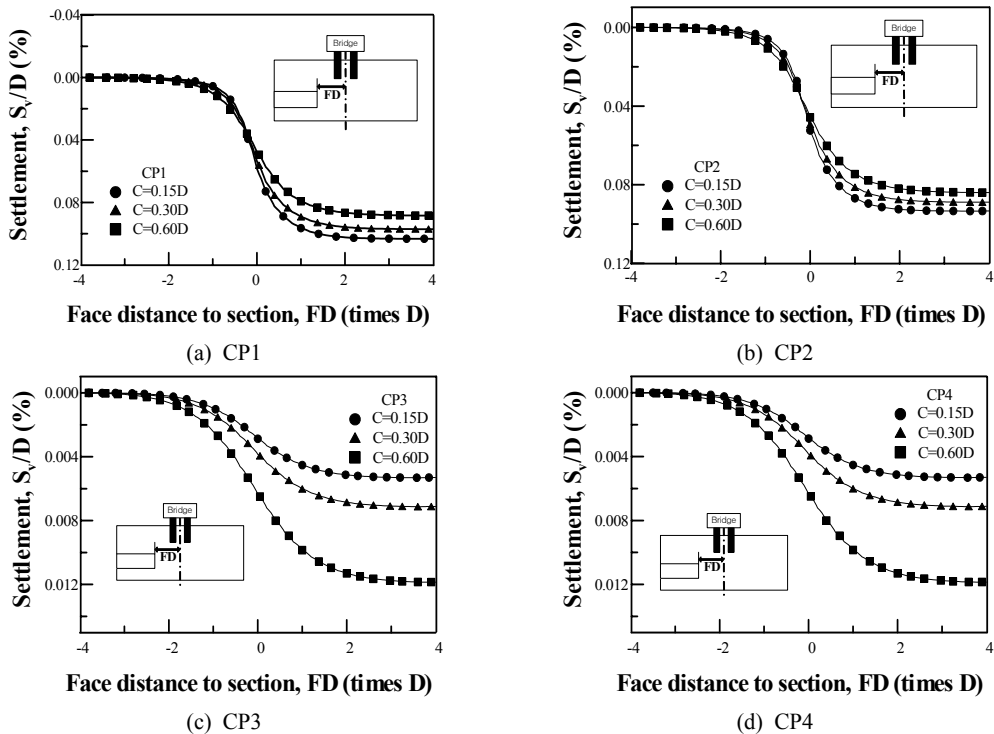


그림 12. 굴진에 따른 말뚝기초의 선단 침하량

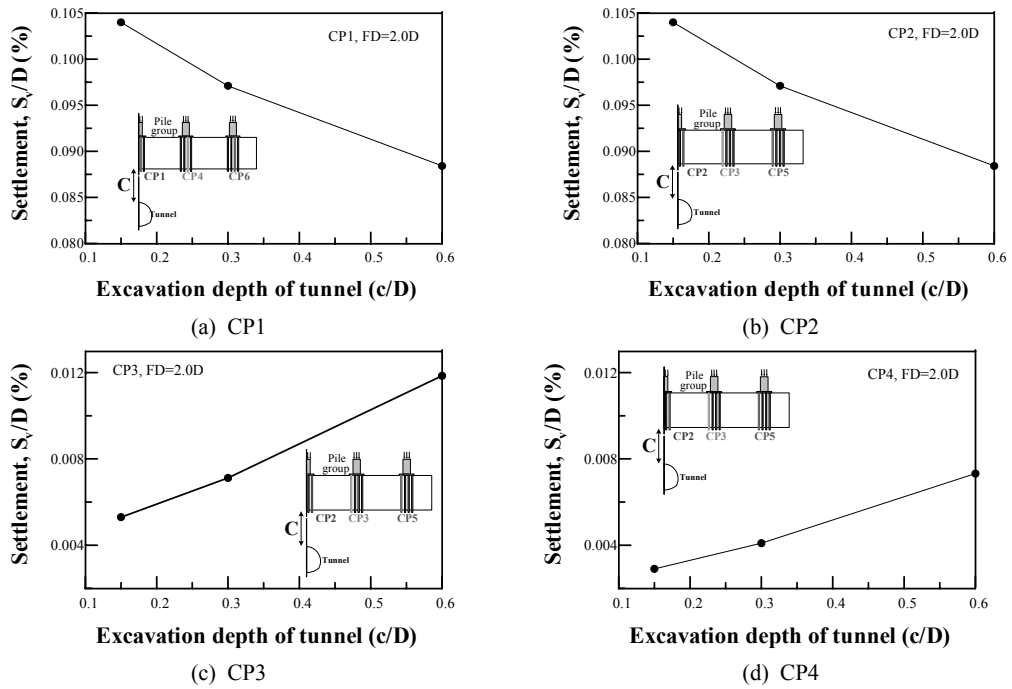


그림 13. 말뚝기초의 최대 선단 침하량 변화

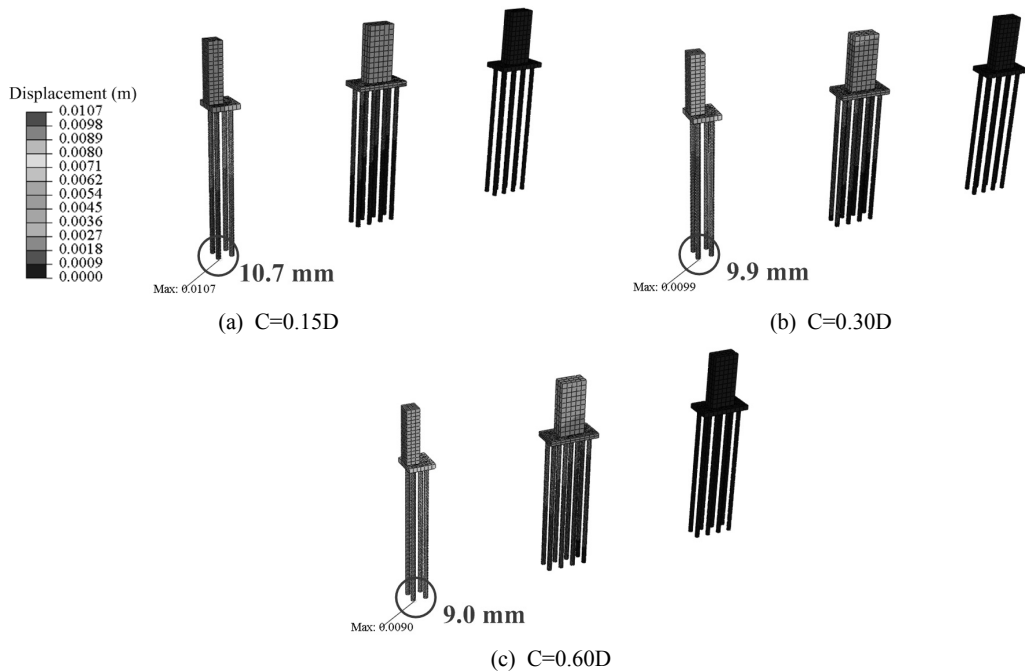


그림 14. 터널 심도별 말뚝기초의 변위 분포

그림 12~13은 심도가 $C = 0.15D, 0.30D, 0.60D$ 인 터널 굴착시 CP 1~4의 선단 침하량을 터널 직경($D=10$ m)로 정규화 하여 보여주고 있다. CP1 과 CP2는 터널 굴착의 심도가 2배 증가할 때마다 말뚝 기초의 선단 침하가 터널직경 대비 0.015%씩 감소하는 경향을 확인할 수 있는 반면 CP3 과 CP4는 터널 굴착의 심도가 2배 증가할수록 말뚝 기초의 선단 침하가 터널직경 대비 0.001~0.002%씩 증가하는 경향을 보인다.

CP1~2의 경우 터널의 굴착 심도가 깊은 경우 터널 상부에 작용하는 상재 토압이 크게 작용하기 때문에 굴착 초기에 침하가 크게 발생하는 경향을 보이며 터널의 굴착이 진행되어 라이닝이 시공된 후에는 터널의 영향 영역에서 멀리 떨어진 $C = 0.60D$ 의 경우 침하량이 작은 것으로 나타났다. CP3~4의 경우 터널 굴착 초기에도($-2.0D < FD < 0.0D$) $C=0.60D$ 인 CASE가 $C= 0.15D, 0.30D$ 인 CASE보다 침하가 최대 2배가량 크게 발생하며 터널 굴착 완료 후에도 동일한 경향을 보인다.

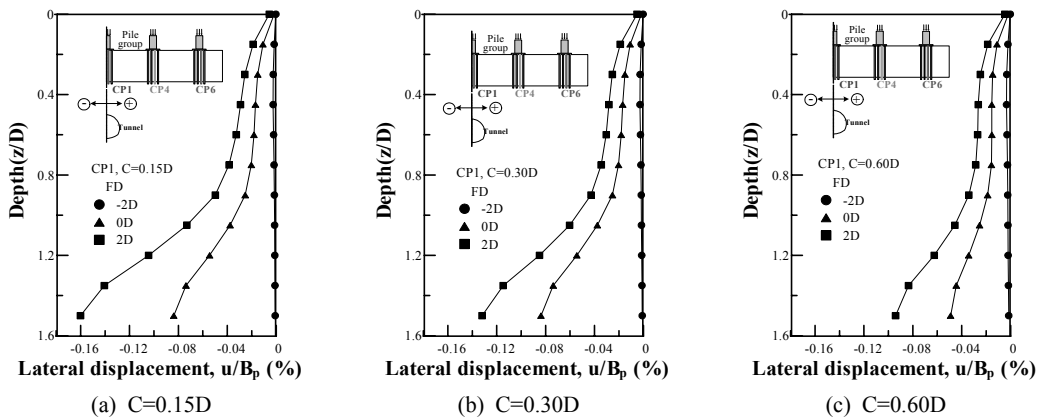


그림 15. 터널 심도변화에 따른 CP1의 Y축 변위

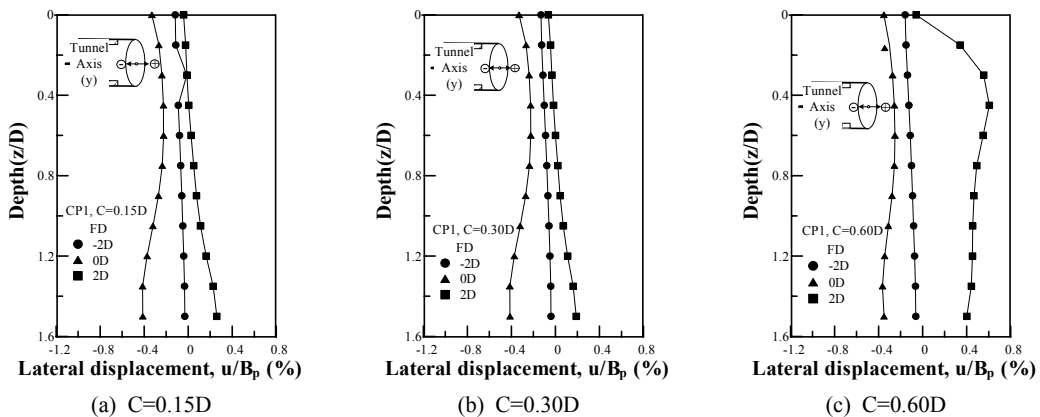


그림 16. 터널 심도변화에 따른 CP1의 X축 변위

즉, 터널 굴착면 직상부에 위치한 CP1과 CP2는 터널 굴착면의 아칭 효과가 발생하며 터널 굴착면 주변 지반의 토압이 아칭발현 영역의 주변부로 전달되어 말뚝의 선단부 지반의 토압이 감소하게 된다. 이에 따라 터널이 말뚝 기초의 직하부에 있는 경우 터널 굴착의 심도가 깊을수록 토압의 감소량이 증가하므로 말뚝 기초의 연직 침하량도 감소하는 경향을 보인다. 반면 CP3과 CP4는 터널 굴착에 의한 아칭효과의 발현이 되지 않으므로 터널 굴착의 심도가 깊을수록 주변 지반의 변위발생 영역이 넓어지고 이에 따라 말뚝 기초의 연직 침하량이 증가한다고 판단할 수 있다.

터널 굴착에 의한 교량 말뚝기초의 최대 변위는 그림 14에서 보이는 것과 같이 $C = 0.15D$, $0.30D$ 및 $0.60D$ 인 경우 각각 10.7 mm , 9.9 mm , 9.0 mm 가 발생하는 것으로 나타났다. 굴착에 의한 영향은 CP3~4까지 미치는 것으로 판단할 수 있으나 CP3~4에 발생하는 변위는 주로 파일캡 상부에 발생하며 말뚝기초부에 발생하는 변위는 2.5 mm 미만으로 본 해석결과 검토에서는 지반변위의 가장 큰 영향을 받는 CP1의 터널 굴착 직각방향과 굴착방향 변위를 분석하였다.

그림 15에서 보이는 바와 같이 터널 굴착 직각방향 변위는 심도가 2배 증가할수록 말뚝직경 대비 약 0.03% 씩 감소하며 그림 16에서 보이는 바와 같이 터널 굴착방향 변위는 심도변화에 상관없이 2.0 mm 의 동일한 크기로 발생한다. 즉 터널 굴착 면이 교량 말뚝의 직하부에 존재할 경우 터널 굴착 심도에 상관없이 굴착방향 변위는 거의 동일하다는 것을 알 수 있으며 연직방향 변위 및 터널 굴착방향 변위 대비 터널 굴착 직각방향의 변위는 그 크기가 1 mm 이하로 매우 미소하므로 말뚝기초의 안정성에 미치는 주요 인자는 터널 직상부 지반의 연직방향 변위인 것으로 판단된다.

4.3 말뚝 축하중 및 주면마찰력 변화

굴착으로 인한 교량 말뚝기초 CP1의 선단부근 말뚝의 축력 변화는 그림 17(a)에서 보이는 바와 같이 심도가 2배 증가할수록 선단부근 말뚝의 축력의 감소량이 $100 \sim 150 \text{ kN}$ 씩 증가하는 경향을 보인다. $C = 0.60D$ 인 CASE는 터널 굴착에 의한 선단 지지력의 감소가 150 kN 정도로 $C = 0.15D$ 인 CASE의 약 50% 정도로 줄어드는 경향을 보이는데 이는 $C < 3.0D$ 인 CASE에 비하여 터널 굴착의 영향이 다소 줄어드는 경향을 보여주나 $C > 0.30D$ 일 경우에도 터널 직상부에 위치한 말뚝의 선단부근 말뚝의 축력이 감소하므로 터널 시공 중 상부 교량기초 계층 및 안정성 검토가 항시 이루어져야 할 것이다. CP1의 경우 선단부근 말뚝의 축력 감소와 터널 굴착에 의한 아칭효과 발현에 의하여 그림 17(c)와 같이 $C > 0.30D$ 인 경우 터널굴착 완료 후 말뚝기초의 선단지지 및 주면마찰 비율이 8:2로 수렴함을 확인할 수 있다.

CP2의 경우 그림 18에서 보이는 바와 같이 터널 굴착 심도별 선단부근 말뚝의 축력 감소 변화는 발생하지 않으며 일정하게 약 150 kN 의 선단부근 말뚝의 축력이 감소한다. 이를 CP1~4의 선단

침하량과 비교해 볼 때 터널직경 대비 약 0.010%의 선단침하 이상이 발생할 경우 말뚝 선단부 안정성이 크게 저하되며 터널직경 대비 0.010%이내의 선단 침하가 발생할 경우 선단부근 말뚝의 축력의 감소 및 말뚝기초의 지지거동에 다소 영향을 미치나 그 크기는 일정수준 이하(CP2의 선단부근

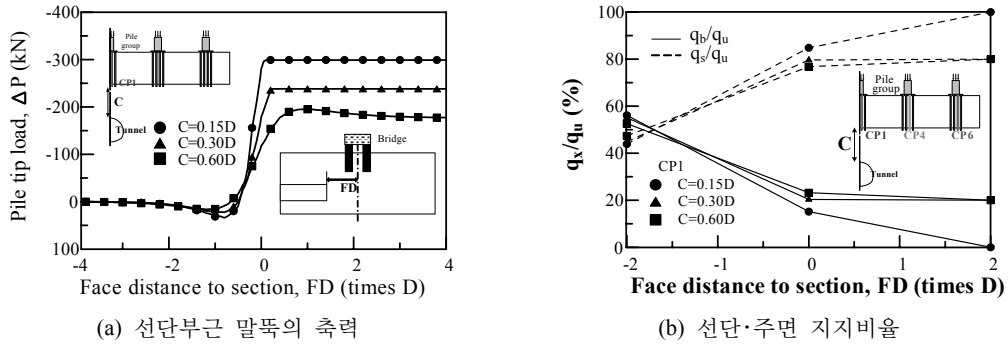


그림 17. 터널 굴진에 따른 CP1의 지지력 변화

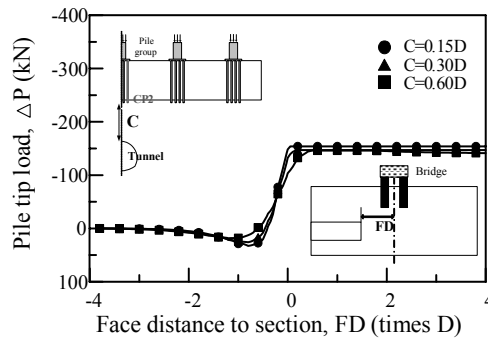


그림 18. 터널 굴진에 따른 CP2의 선단부근 말뚝의 축력 변화

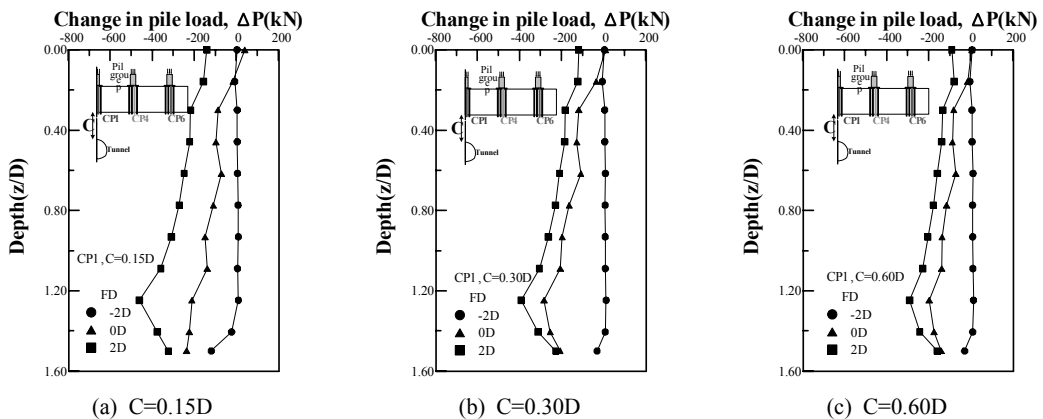


그림 19. 터널 심도변화에 따른 CP1의 축력변화 분포

말뚝의 축력 150 kN 감소)라 평가 할 수 있다.

그림 19는 CP1의 터널 굴착 단계별 축력변화 분포양상을 보여주고 있으며 터널 굴착 심도가 2배 증가할수록 말뚝기초의 축력변화량이 약 26.7%씩 감소하는 경향을 보인다. 교량의 말뚝기초는 $FD = -2D$ 에서는 말뚝 축력의 변화가 크게 발생하지 않다가 $0D < FD < 2D$ 에서 터널 굴착으로 인한 교량 말뚝기초의 선단 침하 및 주변부 변위가 발생하면서 말뚝기초의 축력변화가 발생한다. 터널 직상부에 위치한 말뚝은 말뚝침하가 주변부 침하보다 크게 발생하여 모든 말뚝의 축력이 감소하는 경향을 보이며 터널 굴착으로부터 2.0D이상의 반경에 위치한 CP3 ~ 6의 말뚝기초 축력 변화는 거의 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 교량의 말뚝기초 인근에 터널이 시공되는 경우 말뚝기초의 동에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였으며 그 결과 지반 및 말뚝 거동, 교량기초 말뚝에 대한 지반굴착의 영향 대한 결론은 다음과 같이 정리된다.

1. 교량의 직하부에 터널 시공 시 터널 굴착 심도에 상관없이 터널중심 2.0D 이내에 터널 굴착의 영향이 있으며 그 주요범위는 0.3D 이내로 판단된다. 터널 직상부에 위치한 말뚝기초는 말뚝 선단 침하가 8.0 ~ 12 mm 발생하며 아칭효과에 의하여 터널 굴착심도가 2배 증가할수록 선단 침하가 터널직경 대비 0.015%씩 감소하는 경향을 보인다. 이러한 선단 침하에 의하여 터널 직상부 말뚝기초의 선단부근 말뚝의 축력은 150 ~ 300 kN의 하중 감소가 발생하며 $C > 0.30D$ 인 경우 선단지지 및 주변마찰 비율이 일정하게 수렴하는 경향을 보인다.
2. 교량의 직하부에 터널 시공 시 터널중심 4.0D 외곽에 존재한 주변 말뚝기초(CP5 ~ 6)에 대한 터널시공의 영향은 무시할 수 있으며 거리가 2.0D 정도 떨어진 말뚝기초(CP3 ~ 4)의 경우 터널 굴착 직각방향의 수평변위가 최대 1.42 mm로 발생하여 터널 굴착의 영향은 미비한 것으로 판단된다. 터널 중심 외곽에 존재한 주변 말뚝기초(CP3 ~ 6)는 터널 굴착 심도가 증가할수록 말뚝의 선단 침하가 증가하는 양상을 보이므로 필요시 말뚝 안정성 확보를 위하여 면밀한 계측을 실시하고 추가 보수시공이 이루어져야 한다.
3. 터널시공이 교량의 말뚝기초의 직하부에 이루어질 경우 직상부에 위치한 말뚝기초(CP1 ~ 2)는 말뚝 선단부에서 굴착 직각방향 최대변위가 발생하며 터널 굴착면 방향으로 굴착방향 변위가 발생한다. 터널중심 2.0D 외곽에 존재한 말뚝기초(CP3 ~ 6)의 경우 말뚝 두부에서 굴착 직각방

향 최대변위가 발생하며 터널 굴착방향 변위는 터널이 굴착되어 들어가는 방향으로 일정하게 발생한다. 이러한 말뚝기초의 터널 굴착 직각방향·굴착방향 변위는 터널 굴착으로 인한 추가적인 휨모멘트를 말뚝에 발생시킬 수 있으나 직하부 시공조건에서는 이 크기가 최대 1.42 mm 미만으로 매우 작아 말뚝 안정성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김상환(2003), “교차터널의 상호거동에 대한 연구”, 한국터널공학회 정기학술발표회논문집, pp. 139~147.
2. 오세욱, 이봉직, 배우석(2006), “지하공동에 인접한 연속기초의 안정성”, 한국지반환경공학회 논문집, 제7권, 제3호, pp. 69~76.
3. 유충식(1994) “지하 공동 위에 위치한 얇은 기초의 극한 지지력”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 7755~758.
4. 유충식, 김선빈, 송아란(2006), “건물하부 통과 터널 구간의 3차원 해석 사례”, 한국지반공학회 가을학술 발표회 논문집, pp. 2051~2062.
5. 유충식, 송아란(2006), “근접 터널시공이 주변 기존터널에 미치는 영향”, 한국터널공학회 터널기계화 시공 기술 심포지엄 논문집, pp. 217~229.
6. 이대혁, 이철욱, 김문상, 유재원, 김호영(2004), “대전 LNG Pilot Cavern 건설공사 요약”, 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, pp. 307~319.
7. 이철주, 이재연, 김지성, 류남열(2005), “터널 굴착에 의한 주변 말뚝의 거동 분석”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 227~236.
8. 이철주, 박병수(2006), “부마찰력이 작용하는 기초판으로 연결된 군말뚝의 거동”, 한국지반공학회논문집, pp. 25~31.
9. Bezuijen, A., Schrier, J.V.D. (1994), “The influence of a bored tunnel on pile foundations”, Centrifuge 94, Lee and Tan ED., Balkema, Rotterdam, pp. 681~686.
10. Cheng, C.Y., Dasari, G.R., Chow, Y.K., Leung, C.F. (2007), “Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model”, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 22, Issue 4, pp. 450~466.
11. Davis, E.H. (1968), “Theories of plasticity and the failure of soil masses”, Soil mechanics: Selected topic, Butterworth's London, pp. 341~380.
12. Jacobsz, S.W. (2002), The effect of tunnelling on piled foundations, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
13. Ladanyi, B., Archambault, G. (1970), “Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass”, Proc. of 11th Symp. on Rock Mechanics: Theory and Practice, pp. 105~125.

14. Lee, C.J., Wu, B.R., Chen, H.T., Chiang, K.H. (2006), "Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, Issue 2, pp. 119~132.
15. Li, L., Jiang, X., Liang, R. (2010), "A numerical case study of soil-pile-shield tunneling interaction for Guangzhou Subway Project", *GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling, & Design*, Proc. of the GeoFlorida 2010 Conference, ASCE, pp. 1737~1746.
16. Maosong, H., Chenrong, Z., Zao, L. (2009), "A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, Issue 4, pp. 410~422.
17. Mroueh, H., Shahrou, I. (2002), "Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations", *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 26, pp. 217~230.
18. Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1991), "Pile settlements due to tunneling", *Proc. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, Balkema, Vol. 2, pp. 869~872.