

일체형 강관 파이프루프 시공에 따른 주변 지반의 토압 분포 특성 분석

심영종¹ · 진규남² · 송기일^{3*}

¹정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설환경연구실 수석연구원

²비회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 건설환경연구실 연구위원

³정회원, 인하대학교 사회기반시스템공학부 토목공학전공 교수

Analysis on the characteristics of the earth pressure distribution induced by the integrated steel pipe-roof construction

Youngjong Sim¹, Kyu-Nam Jin², Ki-Il Song^{3*}

¹Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Corporation, Research Fellow

²Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Corporation, Senior Research Fellow

³Inha University, Dept. of Civil Engineering, Assistant Professor

ABSTRACT: In recent, various types of steel pipe-roof methods, which is reinforced by mortar after propulsion of steel pipe into the ground, have been used for the construction of trenchless underpass. Integrated steel pipe-roof has flexural stiffness and can resist against overburden load and reduce the stress acting on the concrete underpass structures. Due to arching effect, vertical and horizontal stress distribution around the steel pipe-roof is changing. In this study, therefore, the characteristic of stress distribution around the underpass induced by the construction of integrated steel pipe-roof is investigated by using numerical method. To examine the soil-structure interaction, interface element is introduced. Results show that vertical stress acting on the concrete structure placing inside the steel pipe-roof is significantly reduced due to arching effect and flexural stiffness of integrated steel pipe-roof. Design load can be reduced and effective design of underpass will be available if the earth pressure reduction due to arching effect is considered in the design stage.

Keywords: Trenchless construction, Integrated steel pipe-roof, Flexural stiffness, Arching effect

초 록: 최근 비개착공법으로 지하차도 시공 시 강관을 지반에 삽입한 후 강관자체를 철근과 모르타르로 보강하는 다양한 일체형 파이프루프 공법이 적용되고 있다. 이러한 일체형 파이프루프 공법은 상재하중에 대해 지보강성 효과를 발휘하여 콘크리트 지하차도 구조물에 작용하는 응력을 한층 감소시킬 것으로 예상된다. 또한 아칭효과에 의해 주변지반의 연직방향 및 수평방향의 토압이 변화하게 된다. 본 연구에서는 일체형 파이프루프 시공에 따른 주변지반의 토압 분포 특성을 분석하고, 일체형 파이프루프 내측에 시공되는 콘크리트에 작용하는 토압을 분석하기 위하여 유한차분 수치해석을 통해 파이프루프의 체결 특성을 모델링하고 응력 및 변위거동을 분석하였다. 지반과 구조물의 경계에 인터페이스 요소를 도입하여 지반구조물의 상호작용을 분석하였다. 분석 결과, 본체 콘크리트 구조물에 작용하는 연직토압은 파이프루프의 강성과 아칭 작용에 의해 원상태의 연직토압보다 큰 폭으로 감소하여 작용하는 것을 확인하였다. 지하차도 구조물의 단면 설계 시 설계하중에 대해 이러한 아칭작용에 의한 연직토압의 감소를 고려한다면 경제성을 보다 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 비개착공법, 일체형 파이프루프, 휨강성, 아칭효과

1. 서론

*Corresponding author: Ki-Il Song

E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received June 5, 2013; Revised July 18, 2013;

Accepted July 30, 2013

최근 단지 및 택지개발 시 지하차도를 시공함에 있어 공용중인 철도 및 도로의 하부를 불가피하게

비개착으로 시행하는 공법의 사용빈도가 증가하고 있으며 대부분 파이프루프(pipe-roof)와 비슷한 공법으로 시행하고 있다. 이러한 비개착공법은 지반 굴착 이전에 강관을 적절한 형상으로 설치하여 지반 굴착 시 상재하중을 적절히 분산하여 토압을 저감시키는 것이 특징이다. 최근에는 직경이 큰 강관(직경 600 mm 이상)을 수평으로 압입한 후 횡방향으로 철판이나 철근으로 강관을 연결하고 내부를 모르타르로 보강하는 등 단면의 휨강성(flexural stiffness)이 증가하여 안전성이 한층 증대된 개량형 비개착공법이 많이 시공되고 있다. 이렇게 보강된 파이프루프는 일체형 라멘구조를 형성하게 되고 상재하중에 대한 저항성이 한층 증가 될 것으로 예상된다.

그러나 지하차도 구조물 주변에 이러한 높은 강성의 파이프루프가 형성되어 있음에도 불구하고 지하차도 설계 시 파이프루프의 강성으로 인한 응력감소효과, 즉, 설계하중(활하중 및 고정하중)에 대한 부담률을 고려하지 않고 오히려 상부의 강관과 강관내부의 모르타르까지 상재하중으로 고려하여 구조설계를 하게 됨으로써 지하차도 단면 부재력이 다소 과다하게 산출되고 있어 이에 대한 개선책이 필요한 실정이다. 이에 본 연구는 이러한 문제점을 개선하기 위한 일련의 사전연구로서 파이프루프 휨강성이 예상되는 공법을 중심으로 수치해석을 수행하여 개선책을 유도하고자 한다.

비개착공법 관련 연구는 개착공법에 비해 상대적으로 적은 실정이며 주로 지반거동 및 침하 등 안정성 측면에서 시공사례(Lee et al., 2003; Kimura et al., 2005), 실내실험(Histake and Ohno, 2008; Eum et al., 2010; Choi et al., 2012a and 2012b) 및 수치해석(Ahuja and Sterling, 2008) 등의 연구가 수행되었다. 그러나, 파이프루프의 강성증가로 안정성이 증대된 만큼 파이프루프 내의 본체 콘크리트 구조물의 설계 하중은 감소되어야 하나 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

최근 Cho et al. (2008)은 비개착공법의 일종인 STS

공법(Steel Tube Slab method) 연결부의 인장강도 평가 실험을 수행하였으며, Sim et al. (2013)은 비개착공법별 강관주위의 현장토압을 계측하여 비개착공법별 파이프루프의 지보강성 여부에 대한 연구를 수행하였다. Sim et al. (2013)이 수행한 연구에서 프론트잭킹(Front-Jacking)은 파이프루프의 지보강성이 확인되지 않은 반면 별도로 인접한 강관을 철근보강 하는 STS 공법과 UPRS 공법(Upgraded Pipe Roof Construction method)의 경우 파이프루프를 지보강성이 있으며 휨거동을 하는 구조체로 고려할 수 있는 것으로 확인되었다. 그러나, 제한적인 실험조건과 현장여건으로 추가적인 연구가 보다 필요한 실정이다. 본 연구에서는 파이프루프의 지보강성이 예상되는 STS 공법의 강관 체결 모델을 중심으로 유한차분 수치해석을 수행하여 파이프루프 주변 지반의 응력 분포 특성과 지반-구조물의 상호거동을 분석하였다.

2. STS 공법 및 수치해석적 접근 방법

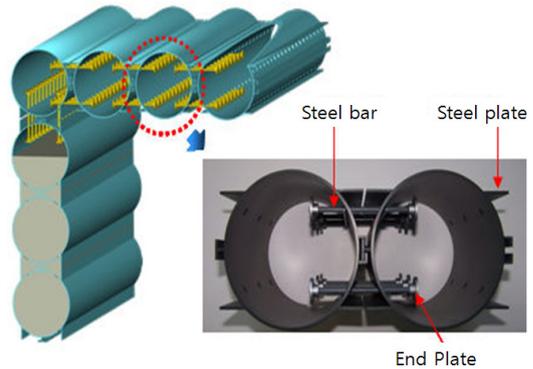
STS 공법은 직경 약 812 mm의 강관을 굴진방향으로 압입하고 강관의 내부를 시멘트 모르타르로 충전하여 파이프루프를 지반내부에 형성하는 공법이다(Fig. 1a). 인접한 강관은 강재 가이드를 따라 삽입되고, 1.2 cm 두께의 강판과 철근을 사용하여 인접한 강관을 서로 체결하여 보강한 후 횡방향 휨강성을 극대화시켜 침하에 대한 안정성을 보다 증대시킨 공법이다(Fig. 1b).

STS 공법과 같은 파이프루프 공법은 지보재 개념의 구조물이 이미 설치된 상태에서 굴착을 진행하게 되므로 내공변위는 거의 발생하지 않으며, 횡방향 또는 종방향으로 전이되어야 할 응력이 지보재에 의해 지지되면서 응력의 재분배가 발생하게 된다.

본 연구에서는 STS 공법에서 강관, 강재가이드, 연결강판 등으로 구성된 복잡한 파이프루프(Fig. 1b)를 합리적으로 단순화하여 수치해석 모델의 타당성을 우선 검토하였다. 또한 신뢰성 있는 해석 결과의 도출



(a) STS method



(b) Integrated steel pipe-roof (Cho et al., 2008)

Fig. 1. STS method and integrated steel pipe-roof

을 위해 유한차분 그리드의 크기를 작게하여 해석의 정밀도를 높였으며 파이프루프와 지반과의 상호거동을 해석하기 위하여 경계면요소를 도입하여 지반-구조물 상호거동에 따른 영향을 분석하였다. 또한 뒷채움 토층의 연직방향 응력과 변위, 파이프루프에 작용하는 토압과 변위, 콘크리트 구조물에 작용하는 토압을 역해석하여 실제 본체 콘크리트 구조물에 작용하는 토압을 도출하고자 하였다.

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델의 단순화

비개착구조물의 종방향 길이는 20~30 m에 이르므로 일반적인 터널과 같이 종방향 변형률이 제어된 평면변형률(plane-strain) 조건($\epsilon_z = 0$)으로 가정할 수 있다. 본 연구 대상인 STS 공법은 인접한 강관이

강재가이드를 따라 삽입된 후, 강관과 강관사이는 강관을 용접하고 철근이 인접한 강관을 연결하여 일체화 된다. 따라서, 3차원의 파이프루프는 철재 슬래브로 고려를 할 수 있고 또한 휨 거동을 할 것으로 기대된다. 이러한 휨 거동을 하는 파이프루프는 2차원 해석에서 일반적인 터널에서의 숏크리트를 범요소로 모델링하는 방법과 동일하게 범요소로 단순화할 수 있다.

비개착구조물의 시공을 위해 지반내에 형성되는 파이프루프는 모르타르, 강관, 강재가이드, 연결강관으로 구성된 복합체이다. Fig. 2는 강관, 강재가이드, 연결강관, 모르타르로 구성된 등가물성치 결정을 위한 본 연구의 대표 단면이다. 이러한 복합체의 탄성계수는 단순화의 방법에 따라 다양하게 결정할수 있다. 우선, 아래 Fig. 2에 도시된 강관, 강재가이드, 연결강관, 모르타르를 전부 합성하여 등가물성치로 산정하고, 강관의 두께를 갖는 범요소로 모델링하는 방법이 있을 수 있다. 그러나, 이렇게 파이프루프를 단일 범요

Table 1. Properties of materials for numerical analysis

Material	Specification	Unit weight (kN/m ³)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's Ratio
Steel pipe	Diameter: 812.8 mm, Thickness: 10 mm	75	210,000	0.25
Steel guide	L-50×50×6, CT-149×149×5.5×8	75	210,000	0.25
Connecting steel plate	Thickness: 12 mm	75	210,000	0.25
Mortar	-	22	24,518	0.25

소로 단순화하면 강관 내부 모르타르에 작용하는 응력을 확인할 수 없으므로 한계점을 안고 있다. 또한, 이러한 경우 굴착 단면 내부에 가시설을 설치한다고 하더라도 굴착면의 중앙선단부에 과도한 변위가 발생되며 불균형력이 수렴하지 않고 발산하여 파괴상태에 도달하게 된다. 따라서, 90 cm의 두께를 갖는 파이프 루프를 단일 범요소로 단순화하여 해석하는 것은 체적을 갖는 파이프루프의 지보효과를 과소평가하게 되고, 결국 가시설 설치 시 파괴상태가 되어 해석이 불가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 비개착 구조물을 Fig. 2와 같이 모르타르와 강재가이드 및 강관으로 구성된 복합체(section B)의 상부와 하부에 강관과 연결강판으로 구성된 1.2 cm 두께의 철재 슬라브가 둘러싸고 있는(section A와 section C) 보다 세밀한 모형을 고려할 수 있다. 연결강판과 강관 및 철근이 인접한 강관의 상부와 하부를 견고하게 연결하고 있으므로 모델의 단순화를 위해 상부와 하부(section A와 section C)를 각각 강재의 특성을 갖는 범요소로 모델링을 하여도 무방할 것으로 사료된다. 그리고, 강관, 모르타르, 강재가이드로 구성된 상부 및 하부 강재 사이의 구역(section B)은 복합체로써 휨거동을 하는 등가의 탄성계수를 구하여 적용하는 것이 타당하겠으나, 본 연구에서는 보수적인 해석을 위해 강재의 성능을 추가의 안전율로 취하고, 모르타르의 탄성

계수만을 적용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 강재와 모르타르의 물성치는 Table 1과 같다. 모델에서 강관과 연결강판이 일체화된 강재의 탄성계수로는 210 GPa을 공통적으로 적용하였다. FLAC2D에서 범요소는 평면응력(plane stress) 요소이므로 평면변형률(plane strain) 상태에서 해석에 적용하기 위해서는 탄성계수를 (1-포와송비²)로 나누어 주어야 한다.

더불어, 강구조와 지반과의 상호작용을 보다 면밀히 분석하기 위하여 지반과 강구조 사이에 경계면요소를 적용하여 빔거동을 하는 강구조 슬래브의 거동과 콘크리트 구조물에 작용하는 토압을 보다 정밀하게 분석하고자 하였다. Case I은 기본적으로 구조물과 지반과의 인터페이스를 고려한 경우이며, Case II는 Case I과 동일한 물성치를 사용하나 파이프루프와 지반과의 인터페이스를 고려하지 않은 경우이다.

3.2 해석 대상 모델 및 경계 조건

본 연구에서 대상으로 하는 STS 공법이 적용된 지하철도의 설계단면은 Fig. 3과 같다. 대상 단면의 토피고는 약 2.5 m이고, 지표면 아래 10 m 깊이의 매립층, 3.3 m 두께의 충전층과, 풍화암, 연암으로 구성되어 있다. 대상 지반의 물성치는 Table 2에 정리하였다. 종방향으로 27 m 압입되는 강관의 직경은

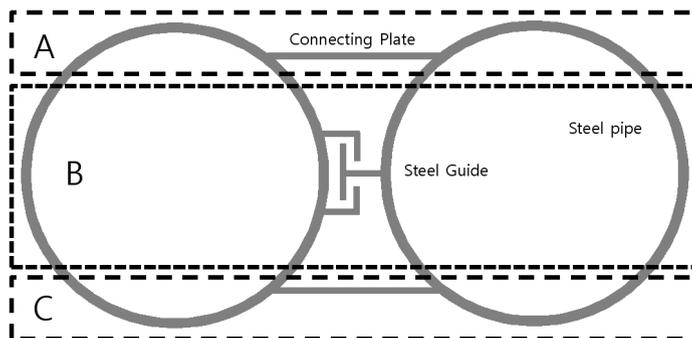


Fig. 2. Representative cross section for simulation of integrated steel pipe-roof

812 mm이고 굴착되는 단면은 높이 7.2 m, 폭 20 m의 직사각형 단면이다. 비개착구조물의 상부에는 0.85 m 두께의 포장체가 위치해 있으며 20 kPa의 교통하중이 작용하는 것으로 고려하였다. 포장체의 물성치는 Table 3에 정리하였다. 파이프루프 내부에 설치되는 콘크리트 구조물의 측벽과 상부 슬라브의 두께는 90 cm 이고 하부 슬라브의 두께는 1 m이다. 따라서, 최종 형성되는 내공면은 높이 5.3 m, 폭 18.2 m이다.

FLAC2D를 사용한 해석 단계는 Fig. 4에 도시하였다. 모델링은 초기 응력 해석(Fig. 4a), 강관의 추진을 통한 파이프루프 형성(Fig. 4b), 굴착 및 가시설 지보(Fig. 4b), 콘크리트 구조물 설치(Fig. 4c)의 실제 시공 과정과 동일한 절차에 따라 해석을 수행하였다. 가시설은 Table 4의 특성을 갖는 H빔이 종방향 2 m 간격으로 설치되며 수치해석에도 동일한 종방향 간격이 반영되었다. 지반재료는 Mohr-Coulomb 탄소성재료 모델을 적용하였고, 포장체와 본체 지하차도의 콘크리

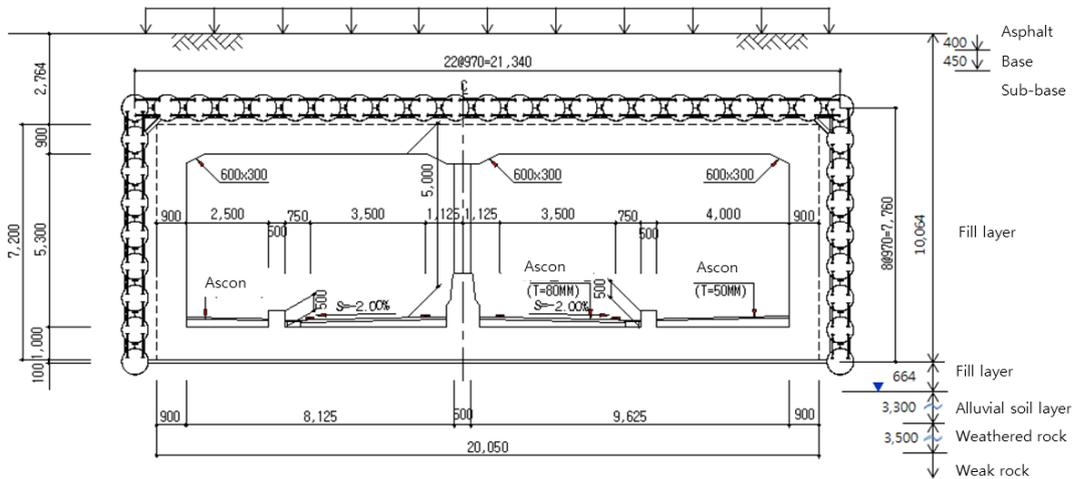


Fig. 3. Cross section of structure

Table 2. Properties of ground for the numerical analysis

Ground	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio
Fill layer	18	0	35	50	0.35
Alluvial soil layer	18	0	35	50	0.35
Weathered rock	21	30	33	200	0.30
Weak rock	22	130	35	300	0.2

Table 3. Properties of pavement structure

Layer	Unit weight (kN/m ³)	Thickness (m)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio
Asphalt	Surface	0.15	3,000	0.35
	Binder	0.30	2,000	0.35
Base	20	0.10	1,000	0.35
Sub-base	20	0.30	100	0.35

트 구조물은 탄성재료 모델을 적용하였다.

강관, 모르타르, 강제가이드를 한 개의 범요소로 단순화한다면, 굴착 단면 내부에 가시설을 설치한다고 하더라도 굴착면의 중앙선단부에 과도한 변위가 발생되며 Fig. 5a와 같이 불균형력이 수렴하지 않고 발산하여 파괴상태에 도달하게 된다. 따라서, 90 cm의 두께를 갖는 파이프루프를 단일 범요소로 단순화하여 해석하는 것은 체적을 갖는 파이프루프의 지보효과를 과소평가하게 되고, 결국 가시설 설치 시 파괴상태가 되어 해석이 불가능한 것으로 나타났다.

파이프루프를 강관과 연결강판으로 구성된 보가

강관, 모르타르, 강제가이드로 구성된 체적을 갖는 연속체의 상하부를 둘러싸고 있는 것으로 단순화를 한 경우 (Case I 및 Case II)에는 가시설 설치시에 Fig. 5b와 같이 불균형력이 수렴하여 안정상태를 유지하는 것으로 나타났다.

정적 해석시 이러한 절차를 통해 불균형력의 수렴성을 해석단계별로 확인함으로써, 단순화된 모델의 수치해석적 안정성을 확인할 수 있다. 이러한 과정을 통해 수치해석을 위한 단순화 과정 중 발생할 수 있는 모델링의 오류를 최소화 할 수 있다.

유한요소법의 경우는 요소의 크기와 종류에 따라,

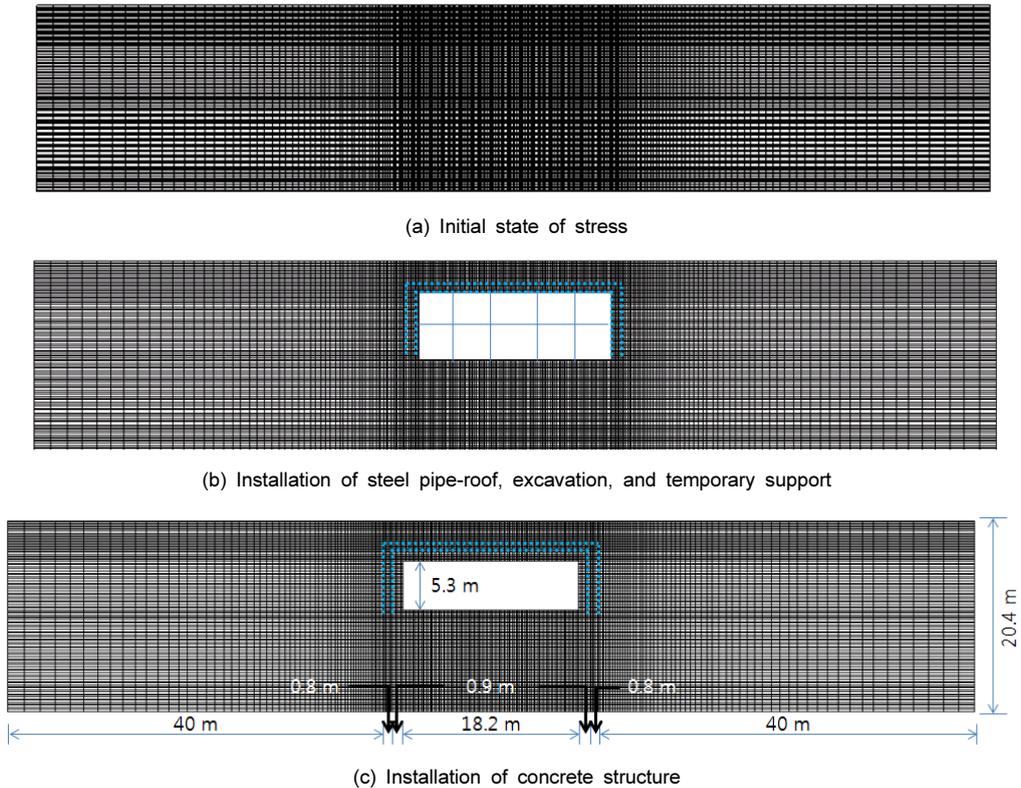


Fig. 4. Simulation and analysis considering construction stage

Table 4. Characteristics of H-beam (300 × 300 × 10 × 15)

Area (cm ²)	Shear area (cm ²)	Weight perm (kg/m)	Second moment of area (cm ⁴)		Radius of gyration (cm)		Section modulus (cm ³)	
119.8	30	94	20,400	6,750	13.100	7.510	1,360	450

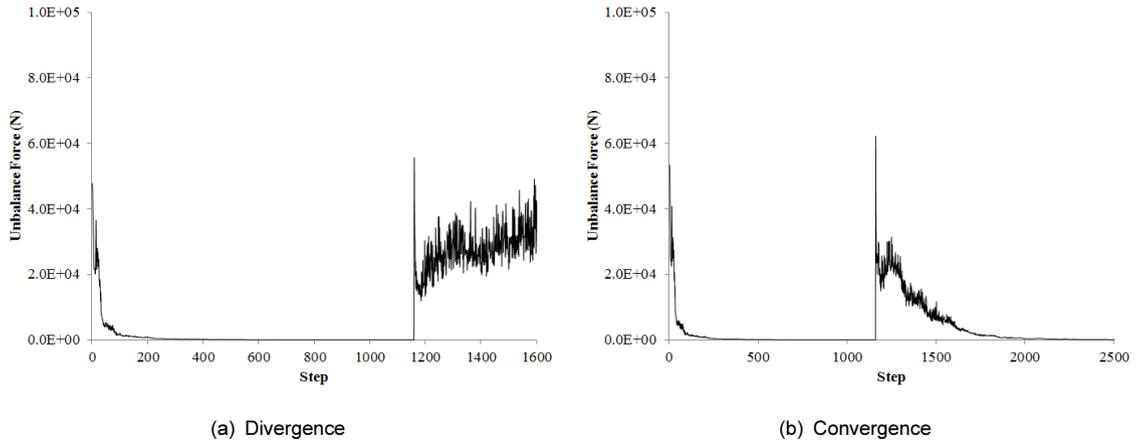


Fig. 5. History of unbalance force

유한차분법의 경우는 그리드의 밀도와 수렴조건에 따라 수치해석의 정밀도가 결정된다. 유한차분 그리드의 밀도에 따른 해석 결과, 그리드 사이즈가 작아지고 밀도가 증가할수록 발생하는 변위는 증가하며 수렴성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 그리드 밀도를 증가시키면 연산의 정확도도 증가함을 의미한다.

4. 수치해석 결과 분석

4.1 경계면요소를 고려한 지반구조물 상호작용

파이프루프와 지반과의 인터페이스를 고려한 경우 (Case I)와 고려하지 않은 경우 (Case II)로 나누어

경계면 조건에 따른 지반-구조물 상호 거동을 분석하였다. FLAC2D에서 제공하는 인터페이스 요소는 Glued 인터페이스, Coulomb 인터페이스, Tension bond로 구조물과 흙과의 다양한 경계조건을 표현할 수 있다. 본 연구에서는 미끄러짐과 열림 현상이 발생하지 않는 조건을 시뮬레이션하기 위하여 Glued 인터페이스 요소를 적용하였고, 연직강성과 전단강성은 10 GPa/m로 가정하였다.

경계면 요소가 빔요소로 모델링된 강구조에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 외측 빔요소와 내측 빔요소에 작용하는 축하중의 분포를 나타내고 있다. 비개착구조물의 중앙 상단부에 위치한 외측 빔요소에 작용하는 축하중은 경계면 요소를 적용한 경

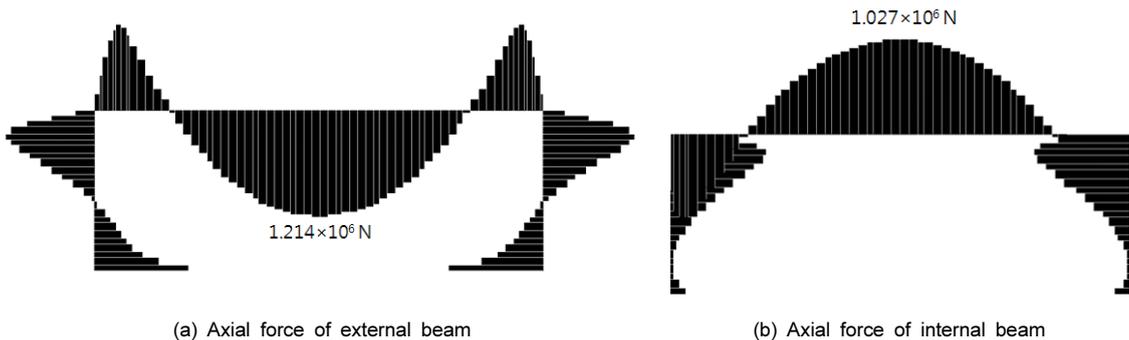


Fig. 6. Analysis with interface element (Case I): axial force distribution of external and internal beams

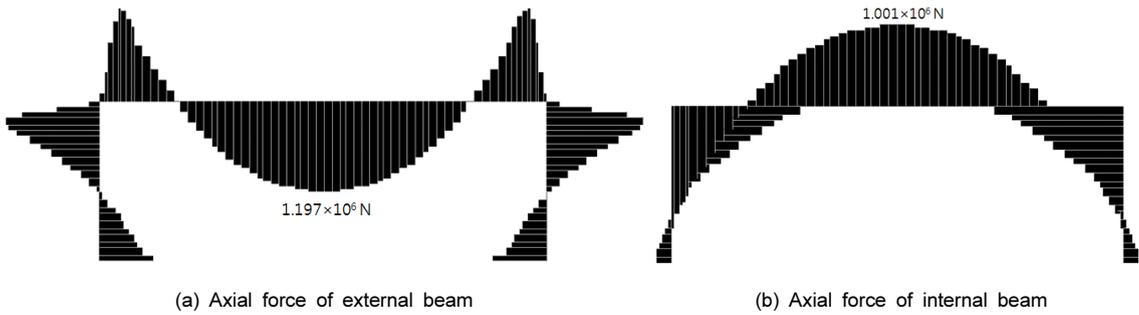


Fig. 7. Analysis without interface element (Case II): axial force distribution of external and internal beams

우 1.214×10^6 N, 경계면 요소를 적용하지 않은 경우 1.197×10^6 N이고, 내측 빔요소에 작용하는 축하중은 경계면 요소를 적용한 경우 1.027×10^6 N, 경계면 요소를 적용하지 않은 경우 1.001×10^6 N으로 두 경우 동일하게 외측 빔에 작용하는 축하중이 내측 빔에 작용하는 하중보다 크게 나타났다. 그리고, 경계면 요소를 적용한 경우의 축하중 값이 경계면 요소 미적용시의 결과보다 다소 크게 나타났다.

파이프루프의 외측을 형성하는 있는 강재는 토압을 직접적으로 받기 때문에 큰 하중이 걸리게 된다. 그러나, 외측의 파이프루프와 강재-모르타르의 복합 구조물의 저항으로 내측의 파이프루프는 외측보다는 작은 하중이 작용되는 것이 타당할 것이다. 이러한 거동은

변형률 분포로부터도 알 수 있는데, 경계면 요소 적용 시 본체 콘크리트 구조물이 설치된 이후 외측 빔의 중앙부에는 4.82×10^{-4} 의 변형률이 내측 빔의 중앙부에는 4.08×10^{-4} 의 변형률이 발생된다. 즉, 내측의 빔에 더 작은 변형이 발생되고 있는 것을 확인할 수 있다. 경계면 요소의 적용 유무에 따른 축변형률과 축하중은 Table 5에 정리하였다.

Fig. 8b에 도시된 바와 같이 경계면 요소를 적용하지 않은 경우, 내측 빔 구조물의 모서리 부분에서 과도한 변형률이 집중적으로 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 경계면 요소를 적용한 경우(Fig. 8a) 모서리 부분의 이상 변형률 집중현상은 나타나지 않는다. 이는 흙과 구조물의 경계면에서 인터페이스 요소를

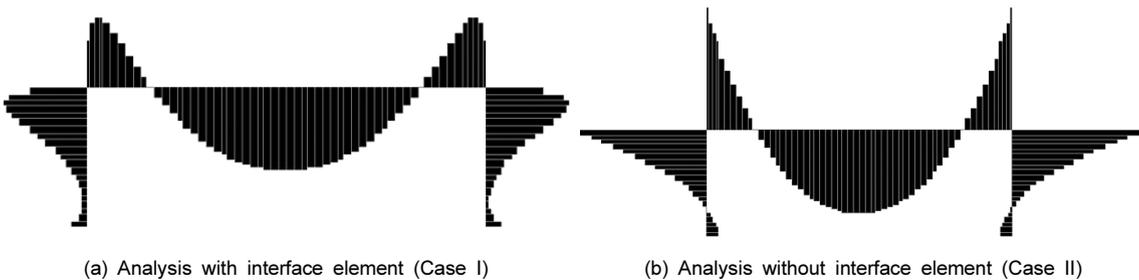


Fig. 8. Strain distribution of internal beam with and without interface element

Table 5. Axial strain and force with and without interface element

Interface	Axial strain (%)		Axial force (N)	
	Internal beam	External beam	Internal beam	External beam
With interface (Case I)	4.08×10^{-4}	4.82×10^{-4}	1.027×10^6	1.214×10^6
Without interface (Case II)	3.971×10^{-4}	4.75×10^{-4}	1.001×10^6	1.197×10^6

적용함에 따라 구조물의 거동이 지반에 구속되지 않기 때문이다. 반면, 인터페이스 요소가 적용되지 않은 경우는 전단잠김현상(shear locking effect) 때문에 구조물의 모서리 부분에서 비정상적으로 변형율이 증가되는 양상이 확인되므로 경계면 요소를 적용하여 이러한 문제점을 해소할 수 있다. 따라서, 경계면 요소를 적용하는 것이 파이프루프와 지반과의 상호거동을 보다 효과적으로 모델링할 수 있는 것으로 요약할 수 있다.

4.2 연직응력 분포 특성 분석

굴착 후 가시설 설치후 구조물 중앙 선단부에서 획득한 연직응력의 분포는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 선(A)는 비개착 구조물의 중앙 상부이고, B는 중앙에

서 우측으로 7 m 떨어진 지점에 위치하고 있다. 그리고 선(C)는 비개착 구조물의 시공에 따른 영향을 거의 받지 않는 곳으로 중앙에서 40 m 떨어진 지점에서의 연직변위 분포도이다. 연직응력은 깊이가 증가함에 따라 Fig. 9의 선(C)와 같이 선형적으로 증가하여야 하나 선단의 중앙부(A)에서는 평형상태의 토압보다 작은 토압이 형성된다. 하지만 중앙부에서 7 m 떨어진 지점에서 획득한 토압은 점선(B)으로 도시된 바와 같이 깊이에 따라 선형으로 증가하며 그 크기는 평형상태의 토압보다 오히려 증가되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9의 선(A)와 같이 구조물 중앙부에서의 토압 저하를 강성이 상대적으로 큰 상부의 포장체도 일부 지지하고 있는 것으로 나타난다. 이러한 구조물 중앙부에서의 토압 감소와 좌우측으로 토압이 증가되는 현상은 아칭효과로 설명될 수 있다. 일부 지반이

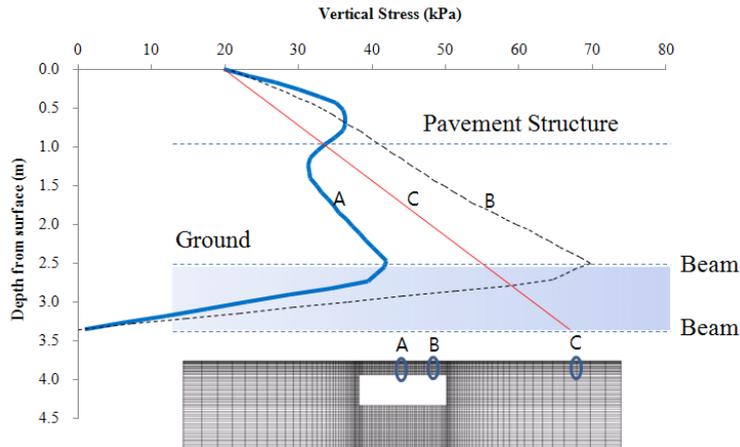


Fig. 9. Vertical stress distribution above the pipe-roof

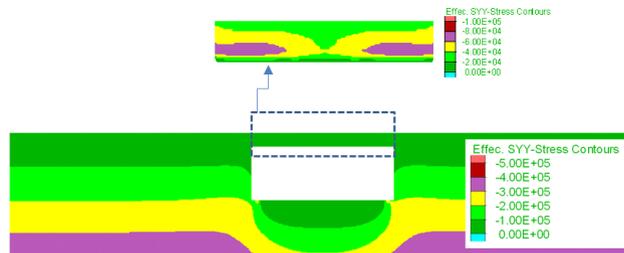


Fig. 10. Contour of vertical stress distribution

변형을 하게 되면 변형하려는 부분과 안정된 지반의 접촉면 사이에 전단 저항이 생기게 되는데 전단저항은 파괴하려는 부분의 변형을 억제하기 때문에 파괴하려는 부분의 토압은 감소하게 되고 이에 인접한 부분의 토압은 증가하게 된다. 이와 같은 파괴하려는 부분의 토압이 인접부의 흙으로 전달되는 전이현상을 아칭효과라 한다.

최종적으로 본체 콘크리트 구조물에 작용하는 연직 토압은 파이프루프의 강성에 의해 원상태의 연직토압보다 큰 폭으로 감소하여 작용하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 도시된 연직응력의 경우 국부적인 아칭현상이 잘 나타나 있는데 구조물의 중앙 상단부에서 발생하는 연직응력의 감소와 주변 지반의 응력 증가 현상을 잘 나타내고 있다.

4.3 연직변위 분포 특성 분석

Fig. 11 및 Fig. 12는 연직변위 분포를 나타내고 있다. Fig. 11의 점선(A)으로 표시된 바와 같이 구조물의 중앙 상단부에서는 약 3.9 cm 정도의 변위가 발생이 되고 중앙부에서 7 m 우측에서는 실선(B)으로 표시된 바와 같이 약 1.9 cm 정도의 연직 변위가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 12에서 나타난 바와 같이 중앙 선단부로부터 좌우측 방향으로 거리가 증가할수록 연직변위가 감소하는 경향을 나타낸다.

굴착 부분의 하단부에서는 제하효과에 의한 상향의 연직변위가 확인된다. 이것은 이전에 원지반의 토압을 경험하고 있던 지반이 굴착에 의해 제하상태로 전환되면서 상향의 변위 발생하게 되는 거동을 보여

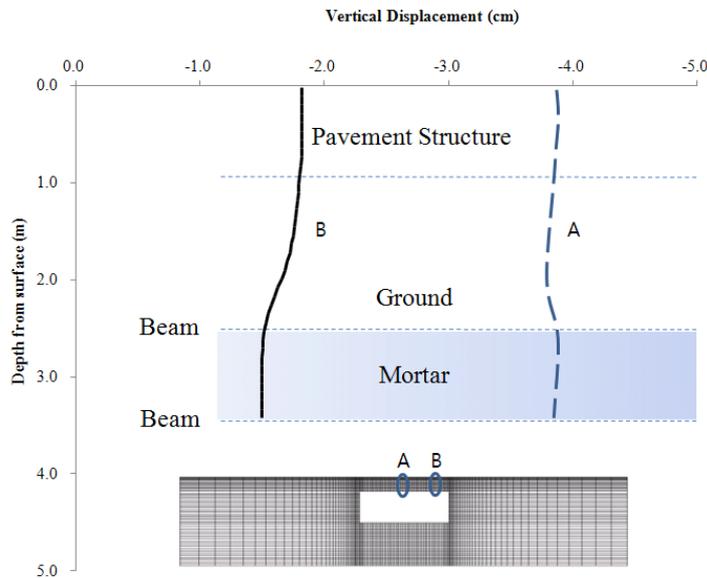


Fig. 11. Vertical displacement distribution above the pipe-roof

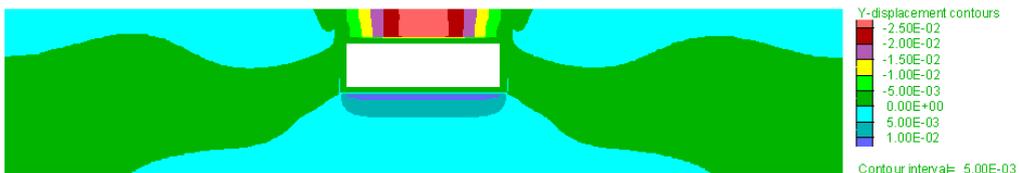


Fig. 12. Contour of vertical displacement

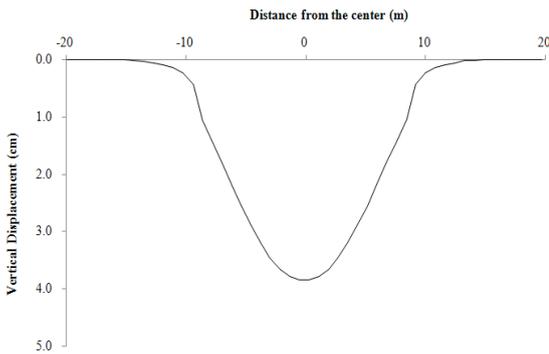


Fig. 13. Settlement at the ground surface

주고 있다. Fig. 13은 지표면에서의 침하곡선을 나타내고 있다. 굴착 및 가시설 설치 단계에서 구조물 중앙부 지표면의 침하가 3.9 cm 가량 발생되며 이후 본체 콘크리트 구조물 설치 시에도 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

4.4 수평토압 분포 특성 분석

Fig. 14는 콘크리트 지하차도 구조물 설치 이후 외측벽 위치에 작용하는 수평토압 분포도이다. 지표면으로부터 파이프루프의 설치 상부까지를 살펴보면 수평토압이 연직토압과 마찬가지로 아칭효과에 의해 강성이 강한 포장체에서 응력이 34 kPa정도까지 집중

했다 다시 감소되며, 다시 깊이가 깊어짐에 따라 수평토압이 증가되는 양상을 확인할 수 있다. 그러나 파이프루프가 설치된 부분을 지나면서 수평토압은 7.5kPa 정도로 급격히 감소하게 된다. 그리고 깊이가 증가함에 따라 수평토압은 증가하며 원지반의 토압보다는 큰 수평토압을 보이는데 이는 일체형 라멘구조의 파이프루프가 상재하중에 대해 외측으로 변형하여 지반에 추가응력으로 작용하기 때문인 것으로 분석된다.

4.5 콘크리트 구조물에 작용하는 토압의 역해석

파이프루프 상단에 작용하는 연직토압은 아칭효과에 의해 40 kPa~70 kPa정도로 분포한다. 가시설 제거 이후 본체 콘크리트 구조물을 시공할 때 본체 콘크리트 구조물의 상부에 작용하는 하중은 결국 가시설물의 해체 시 발생하는 상부 강구조물의 변위에 의해 발생된다. 수치해석적으로 콘크리트 구조물에 작용하는 하중을 직접적으로 획득할 수 있다. 비개착구조물의 시공을 위해 강관이 삽입되고 내부에 임시 지지강재가 설치되는 시공단계에서 지지강재에 작용하는 축방향의 하중은 결국 강관으로 이루어진 비개착구조물의 내부에 설치되는 콘크리트 구조물에 작용하는 하중과 동일하다. 앞서 구축한 모델에서 파이프루프를 지지하는 내부 임시 지지강재의 하중을 획득하였

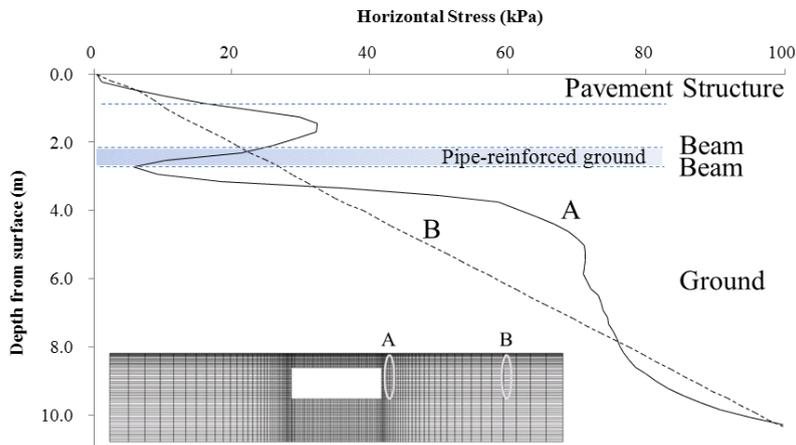


Fig. 14. Horizontal stress distribution

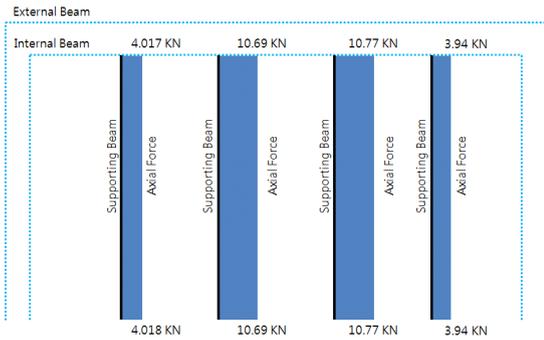


Fig. 15. Axial force of supporting beam

고 그 결과를 Fig. 15에 도시하였다. 측부에 위치한 지지강재에서는 3~4 kN 정도의 축력이 작용하는 것으로 나타났고, 중심에 위치한 지지강재에는 10~11 kN 정도의 축력이 발생하는 것으로 나타났다.

이 축력은 원래 상부의 토피고에 의해 발생하는 연직토압 65 kPa에 비해 20%도 채 되지 않는 값을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 정한 해석 조건하에서 파이프루프가 토피고에 의해 발생하는 토압을 대부분 지지하고 본체 구조물에는 원지반 토압의 20% 이내의 토압이 작용되는 것이다. 따라서 지하차도 구조물의

단면 설계 시 설계하중에 대해 이를 고려한다면 과다 설계요소의 감소로 인한 경제적 효과를 기할 수 있을 것으로 판단된다.

4.6 경제성 분석

4.5절에서 서술한 바와 같이 지하차도에 원지반 토압의 20% 이내의 토압이 작용하게 되면 지하차도의 단면을 상당부분 감소시킬 수 있다. 그러나 지하차도 단면의 시공성을 고려하게 되면 최소한의 단면두께는 유지되어야 한다. 이에 본 절에서는 Table 6 조건의 지하차도 단면 설계 시 설계하중이 원 설계하중의 80%와 60% 수준으로 작용할 경우에 대해 분석하였다. 지하차도의 설계기준은 콘크리트 구조설계기준 해설(KCI, 2007)과 도로교 설계기준(KRTA, 2010)을 적용하였으며 안전율은 1.2를 적용하였다. 포장층과 지층의 물성치는 각각 Table 7 및 Table 8에 정리하였다. 그 결과 Table 9와 같이 공사비 측면에서 경제적이고 효율적인 설계가 가능한 것으로 분석되었다. 예를 들어, 기존에 고려하던 설계하중의 80%정도의 수준

Table 6. Conditions of design for underpass

Conditions for underpass and design load		
Underpass	Width	Two lanes, Four lanes
	Length	40 m
Ground depth		3.0 m
Ground water level		GL-1 m
Live load		DB 24
Condition for design load		CASE ① : Application of design load of 100% (Present condition) CASE ② : Application of design load of 80% CASE ③ : Application of design load of 60%

Table 7. Properties of pavement structure

Layer	Unit weight (kN/m ³)	Thickness (m)
Asphalt	Surface	23
	Binder	23
Base	20	0.10
Sub-base	20	0.30

Table 8. Properties of the ground

Type	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	N Values
Fill Layer	20	0	30	30

Table 9. Decrease rate of construction cost and thickness according to the lower design load (except for the earthwork cost)

Design Load	Two lanes		Four Lanes	
	Construction cost (%)	Thickness (%)	Construction cost (%)	Thickness (%)
80%	(▼) 5	(▼) 10	(▼) 2	(▼) 7
60%	(▼) 10	(▼) 15	(▼) 9	(▼) 14

으로 지하차도 단면을 설계할 시에는 2차선인 경우 기존 설계의 경우보다 공사비는 5%, 단면두께는 10% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

지하차도 구조물의 직접공사비 부분은 총 공사비에 서 비개착공법에서 차지하는 비율이 11%~35%정도 이지만 구조물 단면을 감소시킴으로써 지하차도의 내부 가용공간에 여유가 생기거나 추진해야 할 강관의 수가 줄어드는 등 추가적으로 토공 및 가시설이나 추진공에 소요되는 직접공사비가 절감될 수 있기 때문에 직접공사비 절감폭은 Table 9에서 제시한 비율 보다 커질 것으로 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 일체형 강관 파이프루프 시공에 따른 주변 지반의 토압 분포 특성을 분석하기 위하여 수치해석 연구를 수행하였다. 강관, 강재가이드, 연결 강관 등으로 구성된 복잡한 파이프루프 구조물을 합리적으로 단순화하여 수치해석 모델의 타당성을 검토 하였다. 신뢰성 있는 해석 결과의 도출을 위해 유한차 분 그리드의 정밀도에 따른 해석 결과를 분석하였으며 파이프루프와 지반과의 상호거동을 해석하기 위하여 경계면요소를 도입하여 지반-구조물 상호거동에 따른 영향을 분석하였다. 또한 연직방향 응력, 연직방향 변위, 파이프루프에 작용하는 힘과 변위, 파이프루

프에 작용하는 토압 및 콘크리트 구조물에 작용하는 토압을 역해석하여 본체 지하차도 구조물에 작용하는 토압을 도출하였다.

해석 결과 경계면 요소를 적용하는 경우 보다 정확한 강관의 거동을 모사할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 지반과 구조물의 상호거동을 효과적으로 모사하기 위해서는 경계면요소를 적용하는 것이 바람직 할 것으로 판단되며, 비개착공법이 적용된 지하차도 단면에 대해 수치해석을 수행하여 파이프루프의 지보 효과에 따른 토압의 감소효과를 확인하였다. 본체 콘크리트 구조물 시공 전 설치되는 파이프루프에 상재 하중이 작용하지만 대부분 휨강성에 의해 지지가 되고, 최종적으로 본체 지하차도 구조물에 작용되는 연 직 토압은 원상태의 연직토압의 20%이내로 작게 작용 함을 확인하였다. 따라서, 본체 지하차도 구조물에 작용하는 설계하중을 상당 부분 감소시킬 수 있고 이는 본체 지하차도 구조물 공사비를 획기적으로 감소시킬 수 있는 중요 설계요소로 고려할 수 있다.

본 연구를 통해 비개착공법으로 시공되는 본체 지하차도 구조물의 설계인자를 규명하여 효율적인 설계 기준의 마련과 단면제원 축소 설계를 통한 공사비 감소도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 수치해석적 연구를 검증 보완할 수 있는 실험 연구와 현장 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단 된다.

감사의 글

본 연구는 한국토지주택공사 토지주택연구원의 “파이프루프의 지보강성을 고려한 비개착구조물의 최적설계”의 연구지원으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ahuja, V., Sterling, R.L. (2008), “Numerical modelling approach for microtunnelling assisted pipe-roof support system”, World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety, pp. 1678-1687.
2. Cho, S.K., Lee, J.M., Son, H.D., Kim, J.S., Park, D.H. (2008), “Evaluation of pullout strength at the connection of S.T.S method”, The 34th KSCE Annual Conference Civil Expo 2008, pp. 89-92.
3. Choi, S.W., Park, Y.T., Chang S.H., Bae, G.J., Lee, K.T., Baek, Y.K. (2012), “A numerical study on the three-dimensional ground movement by the trenchless construction method of concrete box by a square steel pipe supporting system”, J of Korean Tunn and Undergr Sp Assoc, Vol. 14, No. 5, pp. 469-484.
4. Choi, S.W., Park, Y.T., Chang S.H., Bae, G.J., Lee, K.T., Baek, Y.K. (2012), “An experimental study on the ground movement around a square pipe by its penetration for trenchless construction in sandy ground”, J of Korean Tunn and Undergr Sp Assoc, Vol. 14, No. 5, pp. 485-501.
5. Eum, K.Y., Choi, C.Y., Cheon, J.Y. (2010), “Analysis of heaving and settlement test of scale model depending on shape of the pipe during pipe roof excavation”, J. Korean Geotynthetics Society, Vol. 9, No. 4, pp. 9-15.
6. Hisatake, M., Ohno, S. (2008), “Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face”, Tunnel. Under. Space Tech, Vol. 23, pp. 120-127.
7. KCI (2007), “Manual for concrete structure design”, Korea Concrete Institute.
8. Kimura, H., Itoh, T., Iwata, M., Fujimoto, K. (2005), “Application of new urban tunneling method in Baikoh tunnel excavation”, Tunnel. Under. Space Tech. Vol. 20, pp. 151-158.
9. KRTA (2010), “Design criterion for the highway bridges”, Korea Road & Transportation Association.
10. Lee, Y.B., Kim, J.Y., Park, I.J., Kim, K.G., Lee, J.H. (2003), “A study on the applicability of under ground structure using steel tubular roof in Korean geotechnical condition”, J of Korean Tunn and Undergr Sp Assoc, Vol. 5, No. 4, pp. 401-409.
11. Sim, Y.J., Jin, K.N., Lee, K.H. (2013), “Measurement of Earth Pressure around Underpass by Non-open-cut Method”, KGS Spring National Conference 2013, March 21-22, 2013.