

지하차도 부력저감을 위한 유도배수공법의 적용성 검토: 수치해석적 연구

조선아¹ · 진규남² · 심영종³ · 조계춘^{4*}

¹비회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

²비회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 연구위원

³정회원, 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원

⁴정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과 교수

Applicability examinations of induced drainage system for reduction of uplift pressure in underpass structures: Numerical study

Seon-Ah Jo¹, Gyu-Nam Jin², Young-Jong Sim³, Gye-Chun Cho^{4*}

¹Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

²Senior Research Fellow, Land & Housing Institute

³Research Fellow, Land & Housing Institute

⁴Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

ABSTRACT: Urban underground structures at low ground elevations (i.e. shallow substructures) unlike typical tunnel structures are subjected to low overburden and high water pressures. This often causes the underground structures to become damaged. Various conventional methods for the urban underpass structures such as dead weight increasement, round anchors, and tension piles, are significantly conservative and provok concerns about the costly, time-consuming installation process. Recently, permanent drainage system becomes to widely use for supplementing the conventional method's shortcomings, but, it is applied without the considerations for ground conditions and water table. In this study, therefore, numerical analyses are performed with various parameters such as groundwater level, wall height, and ground conditions in order to establish design guidelines for induced drainage system which is a kind of the permanent drainage method constructed at the Y-area. According to the numerical results, the induced drainage system is very effective in reducing the uplift pressure that acts on the base of underpass structures.

Keywords: Underground structure, Uplift pressure, Induced drainage system, Numerical analysis

요 지: 도시지역에 주로 건설되는 지하차도는 기존의 터널과 달리 지표면에 근접한 지반에 시공되어 지하수의 양압력에 의한 구조물 부상 및 손상이 발생할 수 있다. 도심지 지하차도의 기존 설계방법(사하중 증가 또는 영구앵커 등의 부력 대처공법)은 지나치게 안전측인 보수적 설계를 수행하고 있어 시공기간 및 경제적 비용 증가를 초래한다. 최근 이를 보완하는 공법으로 영구배수공법 사용이 증가하고 있으나 대상 토질과 지하수 등을 고려한 적절한 분석과정 없이 선정되는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근 Y지역에 설치되는 영구배수공법의 일종인 유도배수공법을 대상으로 지반공학적 관점에서 합리적인 설계체계를 수립하기 위해 지하수 위 변화, 지하차도 옹벽 높이, 기초지반 조건 등 다양한 매개변수에 대한 수치해석을 수행하였다. 본 연구 결과로부터 유도배수공법은 지하수에 의해 발생하는 양압력을 효과적으로 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

주요어: 지하차도 구조물, 양압력, 유도배수공법, 수치해석

*Corresponding author: Gye-Chun Cho

E-mail: gyechun@kaist.ac.kr

Received March 5, 2013; Revised March 15, 2013;

Accepted March 20, 2013

Copyright ©2013, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

도시지역에 주로 건설되는 지하차도는 기존의 터널과 달리 지표면에 근접한 지반에 시공되는 경우가 많다. 따라서 토피고가 낮으며 지반 조건이 열악하여 시공상 어려움을 겪게 된다. 도시가 위치한 곳의 지형은 대부분 고도가 낮아 지하수위가 높으며, 지하구조물은 시공중 또는 운영중 지하수의 영향을 고려해야 한다(Wong, 2001). 특히, 지하차도 U-type 구간과 같이 상부가 개방된 형태의 구조물의 경우 자중이 충분하지 못하므로 지하수의 양압력에 의한 구조물 부상에 따른 손상이 발생할 수 있다. 따라서 지하차도 설계시 지형 및 지반조건 등 현장여건에 맞는 합리적인 설계방안과 이에 대한 대책 등 관련 기준이 필요한 실정이다.

그러나 현재까지 지하차도의 안정성 검토를 위한 관리지침 및 이에 대한 현장 적용성 평가, 유지관리방안 등 관련 기준이 미흡한 실정이다. 또한 국내 연구는 Shin et al.(2005), Bae et al. (2006), shin et al. (2008), Ko et al. (2009), Jung et al. (2011) 등이 터널 및 지하구조물 배수와 관련된 연구를 수행하였으나 지하차도 설계 및 부력대처공법에 관한 연구는 여전히 미흡하다. 관련 기준의 부재로 지하차도 설계는 기존의 공동구 설치 및 관리 지침(2006) 및 기존사례를 준용하고 있으며, 지하수에 대한 구조물의 안정성 평가는 지하수위를 지표면 하부 1.0 m로 일괄적으로 적용하여 설계에 반영하고 있다.

또한 부력에 대한 안정성을 확보하기 위한 일반적 방법으로 사하중 증가, 앵커, 인장파일(tension pile)등을 적용하고 있다(Wong, 2001; Hsu and Chang, 2007). 그러나 이 또한 기존 공법을 그대로 답습하고 있어 대부분 과다설계 되거나 친환경적이지 못하다는 지적을 받고 있다.

위와 같은 문제를 해결하기 위해 기존의 부력앵커를 대신하여 지나치게 안전측 설계에서 탈피한 경제적인 배수공법이 지하구조물(Chun et al., 2000; Chang

et al., 2000) 및 지하차도 시공현장에 적용중에 있다. 따라서 배수공법의 적용에 따른 지하수위 형성 및 양압력 저항에 대한 설계기술의 정립, 공사단계에서의 시공성, 향후 유지관리 방안을 구축하기 위한 기초 자료의 수집이 요구되고 있다.

본 연구에서는 지하차도 시공 현장에 적용된 유도배수공법에 대하여 지반공학적 관점에서 수치모델링 기법을 개발하고, 지하수위 변화, 지하차도 옹벽 높이, 기초지반 조건 등 다양한 매개변수에 대한 수치 해석을 수행하여 향후 현장 적용성에 대한 검증 및 설계표준 모델 제시 등을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 유도배수공법의 개요

일반적으로 지하구조물에 작용하는 하중은 상재하중, 토압 및 수압으로 나눌 수 있다. 지하수위가 높은 도시지역 지하구조물의 경우 상재하중과 자중이 충분하지 않을 경우 양압력에 의한 구조물 부상으로 구조물에 손상이 발생하기 쉽다. 특히 지하차도 U-type 구간은 양압력에 대한 안정성 확보가 어려워 별도의 대책 수립이 요구된다. 지하차도는 폭이 매우 넓고 지하수가 높아 부력에 대한 대책공법으로 앵커공법이나 고정하중(사하중)에 의한 방법을 적용할 경우 안정성은 확보되나 현 설계기준에서는 비경제적인 설계가 될 수 있다. 따라서 별도의 부력앵커 혹은 자중증대공법이 요구되지 않는 범위에서 지하차도의 자중만으로 부력에 대해 안정을 유지할 수 있는 만큼 지하수위를 허용하는 것을 원칙으로 하는 유도배수공법을 적용할 수 있다. 지하차도에 적용되는 유도배수공법은 Fig. 1의 개략도와 같이 저면부와 측면 하부에 배수재(쇄석, 배수 파이프)를 설치하고 지하차도 중간에 집수관을 통하여 유입 지하수를 집수정으로 모아 펌프에 의해 배수 처리하여 지하수위를 감소시키는 방법이다.

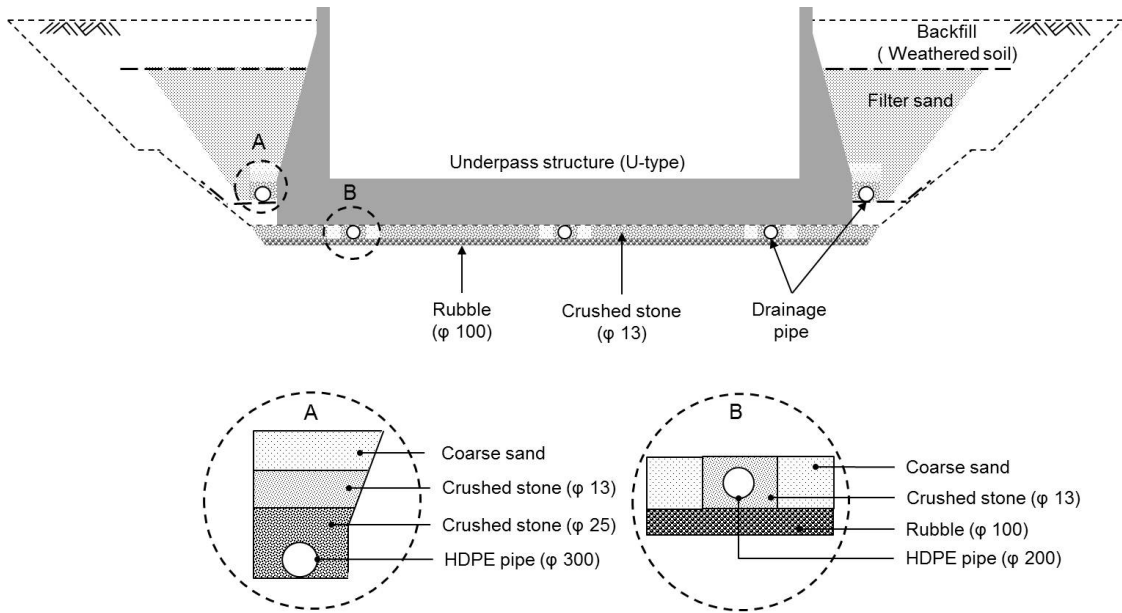


Fig. 1. Schematic diagram of underpass structure with induced drainage system

3. 유도배수공법에 대한 수치해석 모델링

본 논문에서는 인천광역시 Y지역에 설치되는 지하차도 구조물 및 주변 지반조건을 대상으로 유도배수공법에 대한 수치해석 모델링을 수행하였으며, 이를 위해 상용프로그램인 FLAC 2D (ITASCA 2002)를 이용하였다.

3.1 수치해석 모델의 구성 및 해석절차

본 연구에서는 지하수에 의해 발생된 부력 및 지하차도 구조물의 안정성을 평가하기 위하여 2차원 유한차분법을 이용하였으며 이때 적용된 해석모델의 개략도는 Fig. 2와 같다. 지하차도는 중심축을 기준으로 축대칭으로 이루어져 있으므로 해석시간을 단축시키

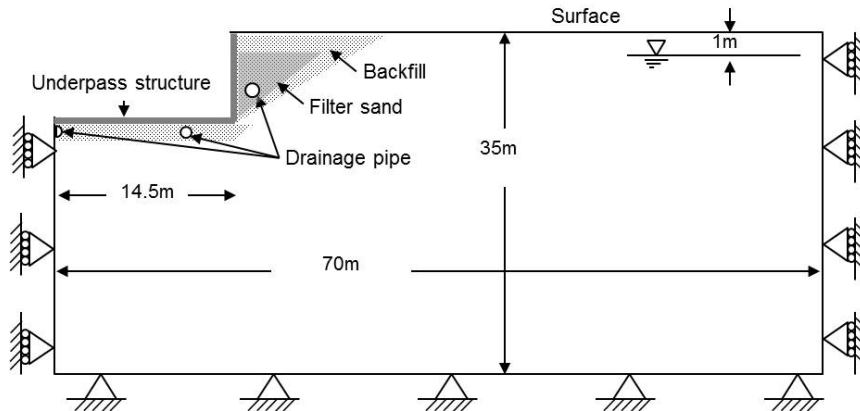


Fig. 2. Numerical model of underpass structure

Table 1. Geological material properties

Stratum		Poisson's ratio	Modulus of elasticity (E, MPa)	Adhesion (kPa)	Friction angle (°)	Permeability (cm/s)	Density (t/m ³)
In-situ soil	Clay	0.3	15.6	31.3	0	5×10^{-4}	1.75
	Silty sand	0.3	35.0	0	34	2×10^{-3}	1.80
	Weathered rock	0.3	294.3	29.4	38	1×10^{-6}	2.10
Backfill and filter materials	Backfill	0.3	35.0	0	34	5×10^{-4}	1.80
	filter sand	0.3	35.0	0	34	1×10^{-3}	1.80
	Coarse sand	0.3	35.0	0	34	3.6×10^{-1}	1.80
	Crushed stone	0.3	35.0	0	34	1.8	1.80
	Rubble	0.3	35.0	0	34	1.8	1.80

Table 2. Concrete structure properties

Material	Model	Modulus of elasticity (E, GPa)	Poisson's ratio	Allowable compressive strength (MPa)
Concrete	Elastic	30	0.2	27

기 위해 반단면으로 해석모형을 구성하였다. 해석영역은 경계조건에 의한 영향을 최소화하기 위해 모델의 높이와 폭을 지하차도 높이와 폭의 각각 4배이상으로 하였다. 모델 양측면은 횡방향으로 변위를 구속하였으며 하부경계는 수직방향 변위를 구속하였다. 해석에 사용된 95×49개의 요소망은 격자형으로 해석

에 영향을 미치는 지하차도 주변은 조밀하게 구성하고 상대적으로 영향이 적은 외부로 멀어질수록 요소 크기를 크게 구성하였다. 해석모델에 적용된 지반재료 및 지하차도 콘크리트의 주요 입력 물성치는 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

수치해석은 Fig. 3과 같은 절차로 수행하였다. 해석

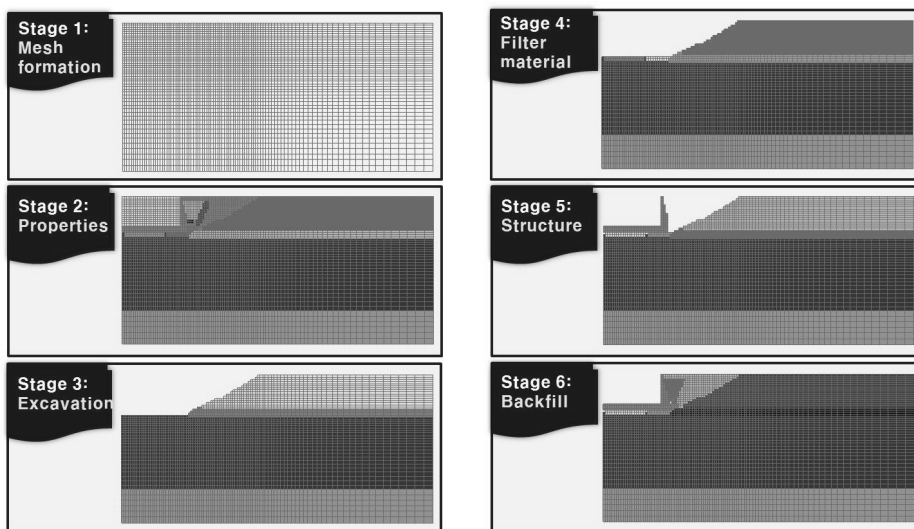


Fig. 3. Procedure for numerical analysis

에 적용된 지반은 대상 현장의 토질조건을 반영하여 상부 퇴적 점토층, 퇴적사질토층, 풍화암층의 세 층으로 구성하였다. 수치해석에서 사용한 지하차도 구조물은 해석상의 편의를 고려하여 실제 구조물을 단순화시켜 등가 단면적으로 적용하였다.

격자망을 생성한 후 기본 지반 물성치를 입력하고 초기 힘 평형상태(Equilibrium state)로 모델을 안정화시켰다. 이 때 지반은 Mohr-Coulomb 모델이 적용되었다. 평형상태인 모델을 실제 시공단계와 같이 먼저 절토하였으며, 이때 발생하는 지하수의 변화도 반영하였다. 절토 후 지하차도 하부에 배수재를 포설하고 지하차도 구조물을 설치하였다. 구조물 설치 후 뒷채움재를 채운 후 해석을 수행하였다.

3.2 수치해석 조건

수치해석은 총 3가지 목적을 위해 수행되었고 (CASE 1~3), 상세 해석조건은 Table 3에 나타내었다. CASE 1은 지하차도 U-type 구간에서 부력방지공법을 적용하지 않고 지하차도 바닥에 발생하는 양압력에 대해 순수 자중만으로 저항할 수 있는 최저 지하수 위선을 파악하기 위해 수행하였다. 지하차도 주변부 지반조건은 동일하게 적용하고, 지하차도 옹벽 높이 7 m에 대해서는 지하수위를 지표면으로부터 -1 m, -2 m, -3 m, -4 m, -5 m, -6 m로 이동시키면서, 지하차도 옹벽 높이 3 m에 대해서는 지하수위를 지표면으로부터

터 -1 m, -2 m, -3 m로 이동시키면서 해석을 수행하였다. 구조물은 비배수 상태로 구조물 내부로는 지하수가 통과하거나 흐르지 않는다고 가정하였다. 따라서 구조물이 모두 준공된 후에는 초기 지하수위를 회복하며 지하수 흐름이 없는 정수압 상태에서 지하차도 구조물의 부력에 대한 안정성을 평가하였다.

CASE 2는 실제 유도배수공법이 현장에 적용되었을 때 지하수위 및 지하차도 하부에 작용하는 수압의 변화를 관찰하고 부력에 대한 안정성 평가를 위해 수행하였다. 지하차도 측면 및 하부에 설치된 배수재(Filter materials)로 지하수가 유출되면서 지하차도 주변에 양압력의 감소가 예상되며, 그에 따라 구조물에 작용하는 효과를 수치적으로 규명하고자 하였다. 또한, 지하차도 U-type 구간은 종방향으로 경사와 함께 지하차도 진입부 및 진출부에 가까워질수록 지하차도 옹벽 높이가 낮아지는 특징을 갖고 있다. 지하차도 옹벽 높이의 변화는 부력에 저항하는 지하차도 자중의 변화 및 지하수에 의해 지하차도 하부에 발생하는 양압력의 크기가 변하므로 이를 확인하기 위해 지하차도 옹벽 높이 3 m, 5 m, 7 m에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 수치해석으로부터 획득한 수압 및 양압력을 이용하여 부력에 대한 안정성을 평가하였으며, 이때 안전율은 ‘공동구 설치 및 관리 지침’에 명시된 아래와 같은 식 (1)을 이용하였다.

$$F_s = \frac{W_s + W_b}{P_{wb}} \quad (1)$$

Table 3. Purpose and conditions of numerical analysis

Case	Objective of analysis	Groundwater level (G.L.)	Wall height	In-situ condition
CASE 1	Determination of minimum groundwater level without drainage system	-1 m, -2 m, -3 m, -4 m, -5 m, -6 m	7 m	· clay : 2m · Silty sand : 13m · Weathered rock : 20m
		-1 m, -2 m, -3 m	3 m	
CASE 2	Effect of wall height on uplift pressure stability with drainage system	-1 m	7 m	· Clay : 2 m · Silty sand : 13 m · Weathered rock : 20 m
			5 m	
			3 m	
CASE 3	Effect of ground conditions on drain performance	-1 m	7 m	· Clay : 12 m · Silty sand : 13 m · Weathered rock : 10 m

여기서, W_s : 상재하중 (kN/m)
 W_b : 본체하중 (kN/m)
 P_{wb} : 본체 아랫면에 작용하는 상향 수압 (kN/m)

CASE 3은 지하차도 주변 지반의 특성에 따라 배수 효율이 달라질 수 있으므로 지하차도 주변을 투수계수가 낮은 점성토 지반으로 구성하여 해석을 수행하였다. 본 해석결과는 지하차도 바닥이 퇴적 사질토 지반으로 구성되어 있는 CASE 2의 해석 결과와 비교 검토되었다.

4. 유도배수공법의 적용성 평가

4.1 CASE 1 : 부력방지공법 미적용에 따른 최저 지하수위선 파악

Fig 4는 초기 지하수위 -1 m 조건일 때, 유도배수공법을 적용하지 않고 절토한 후와 지하차도 구조물

축조 후 발생하는 깊이별 간극수압의 분포를 나타낸 것이다. 절토 단계에서 지하수위는 절토 하부 바닥면과 동일하다고 가정하였으며 따라서 지하수위가 그림과 같이 절토 하부에 가까워질수록 감소하면서 흐름이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 지하차도 구조물 설치 후 지하수위를 배출시킬 수 있는 배수시설이 없다고 가정하였을 때 지하수위는 어느 정도의 시간 경과 후 초기 지하수위 높이로 회복되며 그만큼의 수압이 구조물 하부 및 옹벽 측면에 작용하게 될 것으로 예상된다.

초기 지하수위가 지표면과 멀어질수록 지하차도 하부 및 측면에 작용하는 간극수압은 작아지며 지하차도 자중만으로 양압력에 저항할 수 있는 지하수위까지 낮추게 되면 추가적인 부력방지공법 적용 없이 양압력에 저항하게 된다. 지하차도 자중만으로 지하수에 의해 발생한 양압력에 저항할 수 있는 최저 지하수위선을 파악하기 위해 옹벽 높이 7 m의 지하차도 구조물에 대하여 지하수위를 지표면으로부터 -1 m, -2 m, -3 m, -4 m, -5 m, -6 m로 이동시키면서 해석을

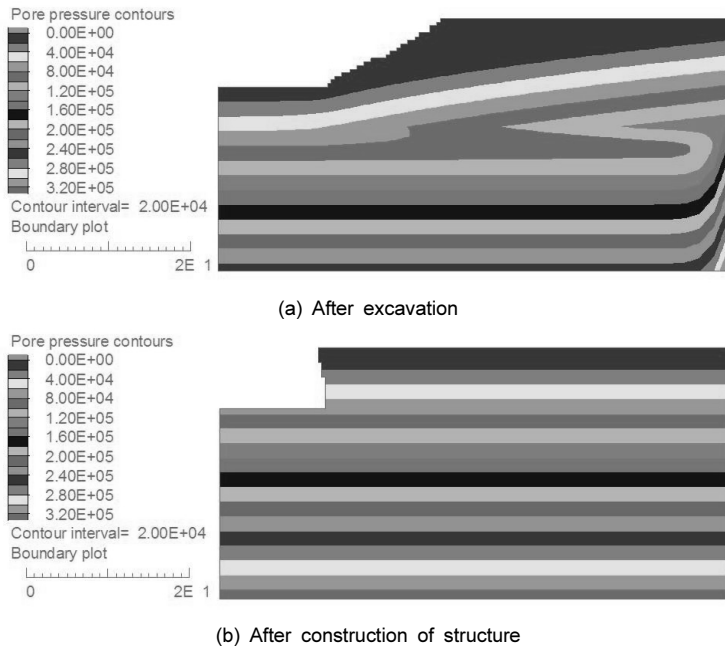


Fig. 4. Pore water pressure distribution after excavation and construction of structure (G.L. -1 m)

수행하였다. 그 결과, 지하수위 위치에 따라 유발된 간극수압에 대한 지하차도 자중의 안전율은 Fig. 5(a)와 같이 확인되었다. 부력방지공법이 적용되지 않을 경우, 지하차도 옹벽 높이 7 m에 대해 지하수위가 지표면으로부터 5 m 이상 낮춰져야만 기준에 준용하는 기준에 명시된 안전기준 조건인 안전율 1.2 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

지하차도는 진입부분과 진출부분에 가까워질수록 옹벽높이가 낮아지므로 이를 고려하여 낮은 지하차도 옹벽 높이 3 m에 대해서도 부력에 대한 안정성을 검토하였고, CASE 1과 동일한 지반 조건으로 동일한 해석 절차를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 지하수위는 지표면으로부터 -1 m, -2 m, -3 m로 이동시키면서 해석을 수행하였다. 절토단계에서 지하수위는 지하차도 근처에서는 절토 하부 바닥과 유사하게 감소하나 지하차도 구조물이 완성된 후 다시 초기 지하수위를 회복하는 결과를 보였다. 초기 지하수위 위치별 부력에 대한 지하차도 자중의 안전율을 나타내면 Fig. 5(b)과 같다. 이 결과로부터 지하차도 옹벽 높이 3m에서 지하수위가 1.2 m 이하로 형성될 경우 추가적인 부력방지공법을 적용하지 않아도 부력에 안정할 것으로 평가되었다. 앞의 지하차도 옹벽 높이 7 m에 대한 결과와 비교하였을 때, 동일한 지하수위 및 지하차도의 너비가 일정할 경우 지하차도 높이가 높아질수록 부력에 대해 취약할 것으로 판단된다.

결과적으로 2가지 해석조건 모두 기준에 준용하고 있는 지하수위에 대한 기준(지표면 하 1 m)을 적용할 경우 지하차도 자중만으로 안전율을 만족시키지 못하기 때문에 추가적인 부력방지공법의 적용이 불가피하다.

4.2 CASE 2 : 유도배수공법 적용에 따른 지하차도 구조물의 부력 안정성 평가

CASE 1의 해석결과로부터 지표면 하부 1 m 지하수위를 적용할 경우 부력방지공법의 적용이 불가피함을 확인하였다. 따라서 부력 앵커 및 사하중공법의 대안공법인 유도배수공법을 적용할 경우 지하차도 옹벽 높이 3 m, 5 m, 7 m 수치해석 모델에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 지하차도 높이 7 m 위치에서 절토 후와 지하차도 구조물 축조 후 간극수압의 분포를 보여준다. 절토 후 지하수위는 절토 하부 바닥과 동일한 수위로 저하된다. 유도배수공법을 적용한 지하차도 구조물 축조 후에는 뒷채움재 부분과 지하차도 하부에서 설치된 배수구를 중심으로 간극수압이 급격히 감소하였으며 외부로 멀어질수록 초기 지하수위와 동일해지는 것을 확인하였다. 투수계수가 작은 뒷채움 부분에서는 지하수위의 감소가 크지 않을 것으로 보이며 대부분 지하수위 감소는 필터모래와 왕사, 쇠석으로 이루어진 필터층에서 이루어 질 것으로 판단

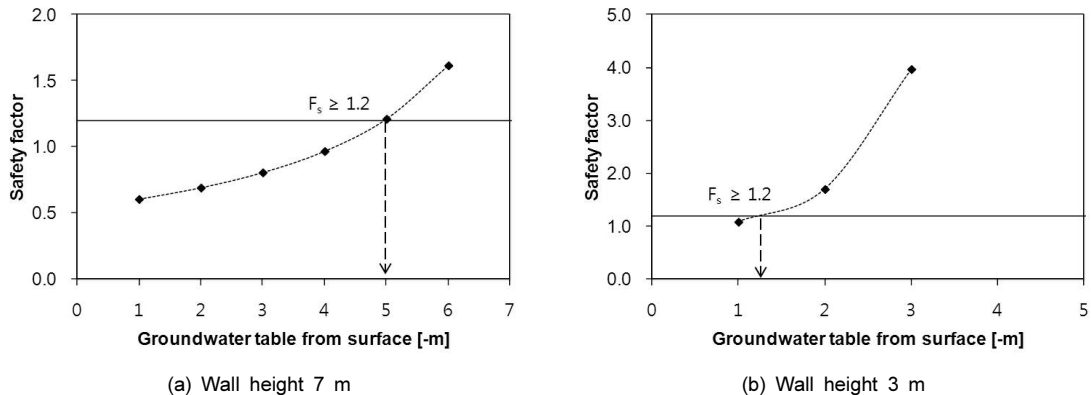


Fig. 5. Safety factor against uplift pressure by initial groundwater level: (a) Wall height 7 m, (b) Wall height 3 m

된다. 따라서 필터층 및 주변 지반의 특성(특히, 투수 계수)에 따라 지하수위선이 달라질 것으로 판단되며, 필터층 주변에 투수계수가 큰 지반(사질토층)이 존재할 경우 지하수위의 감소는 더욱 클 것으로 보여 필터층과 뒷채움재를 설치하기 전에 정확한 원지반에 대한 조사가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

지하수에 의해 발생된 부력에 가장 취약할 것으로 예상되는 지하차도 하부(지하차도 옹벽 높이 3 m, 5 m, 7 m에 대하여 각각 지표면 하부 5 m, 7 m,

10 m 위치)에 작용하는 횡방향 간극수압 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 지하차도 너비(즉, 횡방향으로 14.5 m)까지는 유공관으로 지하수가 배수되면서 간극수압이 매우 작은 값으로 지하차도 옹벽 높이와 관계없이 거의 유사하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 배수구에서 멀어질수록 그 영향이 급격하게 감소하면서 일정 거리 이상이 되면 초기 지하수위에 상응하는 간극수압으로 회복되는 것으로 나타난다.

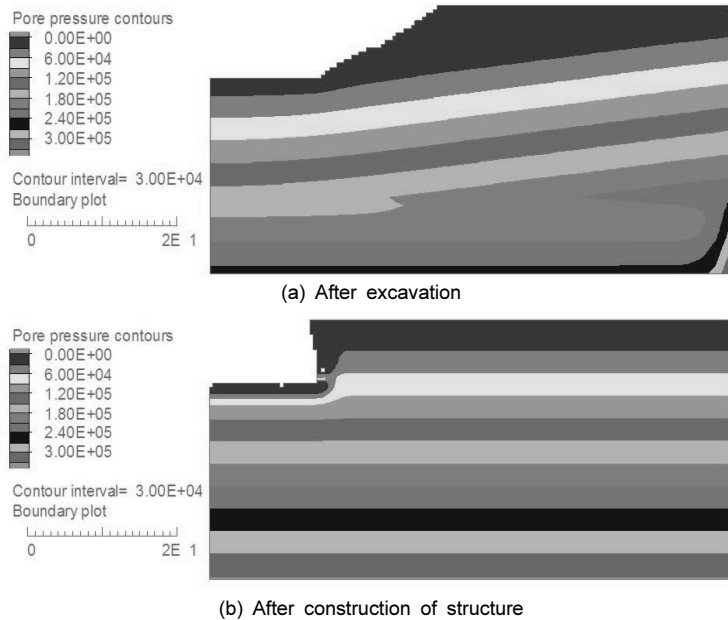


Fig. 6. Pore water pressure distribution with drainage system (G.L. -1 m): (a) After excavation, (b) After construction of structure

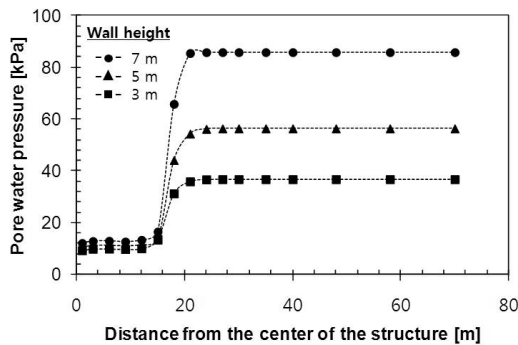


Fig. 7. Pore water pressure in horizontal direction with wall height of underpass structure

Table 4. Safety factors against uplift pressure with drainage system

Wall height	Depth	Horizontal distance from the center of structure	Uplift pressure on the bottom of the structure (kPa)	Weight of the structure (kPa)	Safety factor
7 m	GL. -10 m	0 m	12.2	47.5	3.9
		12 m	13.4		3.5
		15 m	16.6		2.9
5 m	GL. -7 m	0 m	11.0	32.5	3.0
		12 m	11.4		2.9
		15 m	13.4		2.4
3 m	GL. -5 m	0 m	9.3	29.2	3.1
		12 m	9.9		2.9
		15 m	13.6		2.1

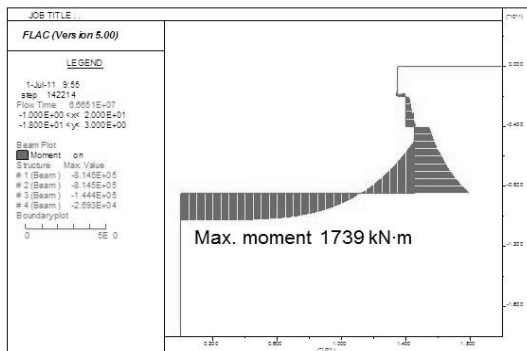
또한 지하차도 하부 바닥면에서 간극수압에 대한 안전율을 횡방향 위치에 따라 Table 4에 나타내었다. 지하차도 옹벽 높이 7 m인 경우 지하차도 구조물 바닥 부분에서 부력에 대한 안전율이 3.5이상으로 나타났으며, 지하차도 높이 3 m인 경우 약 3.0인 것으로 나타났다. 지하차도 종방향 위치에 따라 진입부(혹은 진출부) 옹벽높이 감소에 의해 부력에 대한 안전율이 소폭 감소하기는 하나 전체적으로 지하차도 구조물이 부력에 대해 안정한 것을 확인하였다. 따라서 안전율 측면에서도 지하차도 대부분의 구간에서 유도배수공법에 의한 간극수압 저감효과가 탁월한 것으로 나타났다.

지반의 변형과 간극수압에 의해 구조물에 작용하는

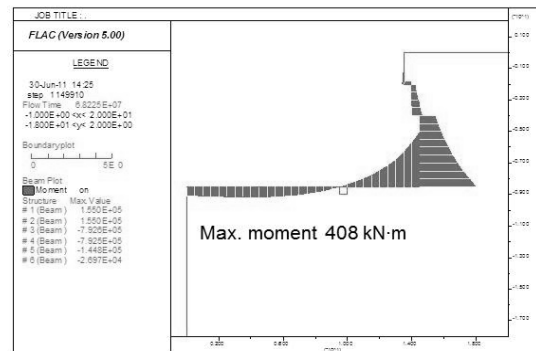
응력은 구조물의 안정성에 영향을 주며, 지하차도 옹벽 높이 7 m, 초기 지하수위 지표면 하부 1 m에 대한 CASE 1과 CASE 2의 해석결과를 비교하여 유도배수공법 적용 유무에 따른 구조물의 안정성을 평가하였다.

Fig. 8은 지하차도 구조물에 발생한 모멘트 분포를 나타낸다. 유도배수공법을 적용하지 않았을 경우 구조물에 발생한 모멘트는 하부에서 1,739 kN·m, 벽체 하단부에서 1,371 kN·m으로 나오며, 유도배수공법을 적용할 경우 하부에서 408 kN·m, 벽체하단부에서 1,303 kN·m을 나타내어 유도배수공법 적용에 의해 지하차도 하부에서 발생하는 모멘트가 크게 감소함을 확인하였다.

유도배수공법을 적용한 경우 측면에서 발생한 모멘



(a) Without drainage system



(b) With drainage system

Fig. 8. Moment diagram of underpass structure

트가 유도배수공법을 적용하지 않은 경우와 유사하게 나타난 이유는 간극수압에 의한 영향보다 뒷채움재의 다짐, 중량 등에 더 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 유도배수공법을 적용한 수치해석 결과로부터 얻어진 지하차도 측면에 작용하는 유효수평토압은 44.3 kPa로 설계시 산정되었던 유효수평토압 43.3 kPa와 거의 차이가 없었다.

구조물 자체의 변형은 유도배수공법 적용 유무에 따라 차이가 크진 않으나, 유도배수공법을 적용하였을 때 변형이 다소 작은 것으로 나타났다. 구조물의 변형률은 유도배수공법 미적용 시 약 0.01%, 유도배수공법 적용시 0.007% 이하로 두 경우 모두 매우 작게 나타났다. 그러나 지반의 변위는 유도배수공법을 적용하지 않을 경우 지하차도 바닥에서 13.5 mm로

매우 크게 나타나 구조물의 부상이 예상되는 반면 유도배수공법 적용 시에는 5 mm의 변위만이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 Fig 9과 같이 유도배수공법이 적용되지 않은 경우 지하차도 구조물 주변 지반의 소성변형에 의해 구조물의 부상이 예상되는 반면, 유도배수공법을 적용할 경우 주변지반에서는 구조물에 영향을 미칠만한 변형이 발생하는 않는 것으로 나타났다.

4.3 CASE 3 : 원지반조건에 따른 유도배수 공법에 의한 부력 저감효과 검토

지하차도 하부 및 주변 지반조건이 유도배수공법의 배수효율에 미치는 영향을 검토하기 위해 CASE 3의

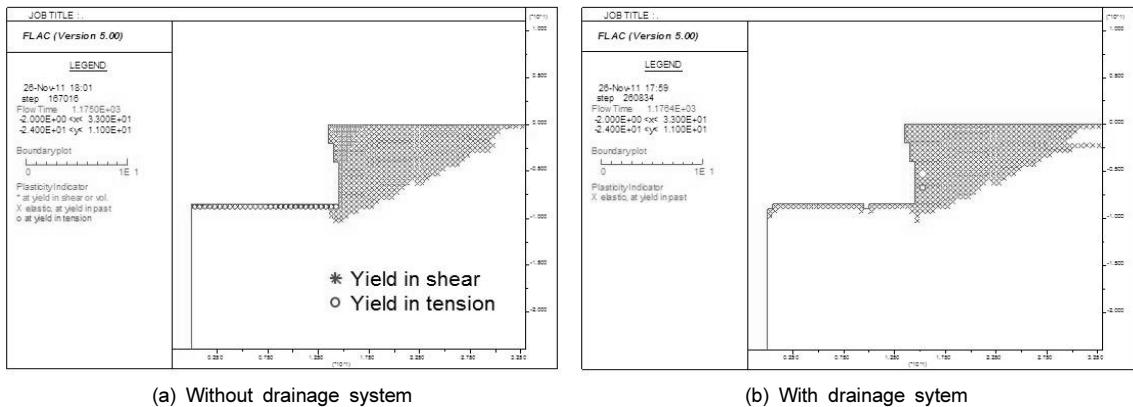


Fig. 9. Soil deformation near underpass structure

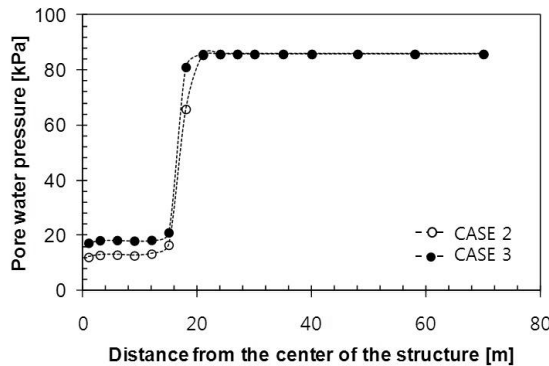


Fig. 10. Pore water pressure in horizontal direction for CASE 2 and CASE 3

해석결과를 CASE 2의 지하차도 옹벽 높이 7 m 해석결과와 비교하였다. CASE 2의 경우 지하차도 하부 지반이 투수계수가 비교적 큰 퇴적 사질토 지반으로 이루어진 반면 CASE 3의 경우 투수계수가 낮은 점성토 지반으로 구성되어 있다. Fig. 10은 CASE 2와 CASE 3의 지하차도 하부(지표면 하부 10 m)에서 발생한 횡방향 간극수압의 분포를 비교한 것이다. 지하차도 하부에서 간극수압은 CASE 2의 경우 상대적으로 작게 나타났다. 즉, 같은 시간동안 동일한 양의 침투수가 발생하더라도 투수계수가 큰 지반에서 더 빨리 배수가 이루어지는 것으로 평가된다. 지하차도 측면은 뒷채움재에 의해 치환되어 비교적 동일한 지반 특성을 갖기 때문에 두 경우에 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 11는 시간에 따른 간극수압의 소산 정도를 나타낸 결과이다. 지반의 투수계수가 큰 CASE 2의 경우 초기에 빠르게 간극수압이 소산되며 일정한 값으로 빨리 수렴한다. 그러나 CASE 3의 경우 간극수압의 소산이 CASE 2와 비교하여 느린 것으로 나타났다. 이 결과로부터 주변 지반의 투수계수가 유도배수공법의 배수효율에 영향을 미치는 것을 확인하였으며 따라서 유도배수설계에 원지반에 대한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다. 그러나 충분한 시간과 추가적인 지하수위 변화가 없을 경우 대부분의 지반에서 유도배수공법이 유효할 것으로 보인다.

5. 결론

도시지역에 주로 건설되는 지하차도의 경우 지표면에 근접하여 토피고가 낮게 시공되므로 지하수에 의한 양압력에 저항하기 위한 부력방지대책이 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 부력 앵커 및 사하중공법의 대안공법인 유도배수공법에 대한 지반공학적 관점에서 수치모델링 기법을 개발하였고, 지하수위 변화, 지하차도 옹벽 높이, 주변 지반조건에 대한 매개변수 연구를 수행하여 유도배수공법의 현장 적용성에 대한 타당성을 확인하였다.

1. 지하수에 의한 지하차도 구조물의 안정성을 평가하기 위하여 2차원 유한차분법인 FLAC 2D 프로그램을 이용하였으며, 지하차도가 축대칭 구조물임을 고려하여 반단면 해석모델을 구성하였다.
2. 인천광역시 Y지역에 설치되는 지하차도 구조물의 부력방지공법 미적용시 자중에 의해 안전율을 확보할 수 있는 최저 지하수위선을 분석하였으며, 그 결과 지하차도 옹벽 높이 7 m에 대해서는 초기 지하수위가 지표면으로부터 5 m 이상 낮춰졌을 때, 3 m 지하차도에 대해서는 1.2 m 이상 낮춰졌을 때 안전기준(안전율 1.2 이상)을 만족하는 것으로 평가되어 지하수위에 대한 기준인 지표면 하부 1 m 지하수위를 적용할 경우 부력방지공법의 적용

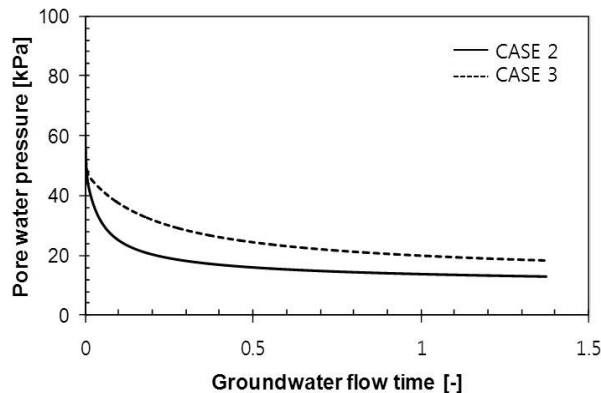


Fig. 11. Dissipation rates of excess pore water pressure for CASE 2 and CASE 3

이 불가피함을 확인하였다.

3. 유도배수공법의 적용에 따라 지하차도 하부에 작용하는 횡방향 간극수압 분포는 지하차도 옹벽 높이와 관계없이 매우 작은 값으로 감소하였다. 또한, 유도배수공법 적용 유무에 따라 간극수압에 의해 구조물에 작용하는 모멘트와 변형률을 평가하였다. 그 결과, 유도배수공법 적용에 의해 지하차도 하부 중앙부에서의 모멘트가 50% 이상 감소하였다. 주변 지반의 변형 역시 유도배수공법을 적용하였을 경우, 50% 이상 감소되었고, 구조물의 변형률은 거의 0에 가까운 값을 보여 구조적인 안전성을 확인하였다.
4. 지하차도 구조물이 사질토 지반에 시공될 경우 점토지반에 적용된 경우에 비해 간극수압의 소산이 더 빠른 것으로 나타났다. 즉, 주변지반의 투수계수가 유도배수설계의 배수효율에 영향을 미치므로 원지반에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
5. 유도배수공법은 앵커 및 고정하중 공법과 달리 미세 입자에 의한 필터재로 막힘 등이 발생하여 배수성능이 저하될 수 있으므로 장기적인 유지관리가 필요하다. 이러한 관점에서 수치해석을 통한 장기거동 모델을 수립하고 이로부터 유도배수공법의 장기적 배수성능평가를 수행하는 등 경제성 측면에서의 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 토지주택연구원과 환경부 차세대 에코이노베이션 기술개발 사업[과제번호: 413-111-004] 지원 아래 수행되었으며 본 연구의 원활한 진행을 위해 도움을 주신 관계자분들께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Bae, G.J., Lee, G.P., Lee, S.W., Shin, H.S. (2006), "Evaluation of drain capacity in tunnel

- drainage system using drainboard", Tunnelling Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 13-20.
2. Chang, D.T., Chang, J.C.I., Tung, R.S.T., Hou, H.C. (2000), "New method to stabilize the uplift pressure problem for raft foundations", Transportation Research Record, No. 1721, pp. 31-38.
3. Chun, B.S., Yeoh, Y.H., Choi, J.K. (2000), "A case study on the vertical drainage system construction for resisting uplift of sub-structure", 2000 Korean Society of Civil Engineers (KSCE) Annual Conference, No. 2, pp. 523-526.
4. Construction criteria for common utility tunnel (2006), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
5. Hsu, S.C., Chang, C.M. (2007), "Pullout performance of vertical anchors in gravel formation", Engineering Geology, Vol. 90, No. 1-2, pp. 17-29.
6. Itasca. (2002), Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC2D) v.4.0, Itasca Consulting Group.
7. Jung, K.Y., Kim, J.Y., Kim, J.H., Moon, H.K. (2011), "A study for application plan of rational residual water pressure on the tunnel linings", Tunnelling Technology, Vol. 13, No. 6, pp. 463-499.
8. Ko, O.Y., Kwon, O.C., Shim, J.K., Park, T.E. (2009), "A case study and analysis on the up-lift pressure treatment evaluation of underground installations for their efficient adoption", Journal of The Korea Institute of Building Construction, Vol. 9, No. 4, pp. 119-129.
9. Shin, J.H., Ahn, S.R., Shin, Y.S. (2005), "Pore water pressure development mechanism and sustainability of tunnel linings", 2005 Korean Society of Civil Engineers (KSCE) Annual Conference, Vol. 2005, No. 10, pp. 2958-2965.
10. Shin, J.H., Choi, M.G., Kang, S.R., Nam, T.S. (2008), "A study on the flow behavior around shallow tunnels and its numerical modelling", Tunnelling Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 37-47.
11. Wong, I.H. (2001), "Methods of resisting hydrostatic uplift in substructures", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 77-86.