

지하구조물 하부에 작용하는 양압력 평가

김진만¹, 한희수^{2*}

¹한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, ²국립금오공과대학교 토목공학과

Evaluation of Uplift Force Acting on Foundation of Underground Structure

Jin-Man Kim¹, Heui-Soo Han^{2*}

¹Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요약 양압력은 최하층 기초 바닥 슬라브에 직접 작용하여 건물을 상부로 부상시키는 현상을 유발하여 구조물의 안정성을 저해한다. 양압력에 따른 구조물의 안정성을 검토하기 위해, 중부지방의 4개 현장(파주, 안양, 오산 및 강릉)을 선정하여 지하구조물 기초바닥에 계측기를 설치하여 현장계측시험을 수행하였다. 강우량의 영향을 용이하게 파악할 수 있는 6월~9월을 중심으로 계측현장의 강우특성을 분석하였으며, 지하구조물에 영향을 주는 요소 중의 하나인 강수량 이외에도 인접한 하천수위의 변화도 고려하였다. 계측현장에서 측정된 연중 최대양압력은 강릉을 제외하면 기존설계(지하수위가 지표까지 있는 경우)로 평가된 수압의 72%를 초과하지 않았다. 다만, 오산에서 측정된 최대양압력은 약 67%로 나타났다. 타 현장과 비교할 때, 평균(46%)과의 차이가 커서 신뢰성이 다소 떨어졌다. 최소양압력은 안양(약 41%)을 제외하면 대개 10% 이내의 값을 보였다. 기초지반이 연암이고 계측 이전에 영구배수시설이 설치된 강릉 현장의 양압력의 최대값은 약 14%, 최소값은 약 3.5% 정도로 다른 현장에 비해서 양압력의 변화가 거의 없는 것으로 측정되었다. 계측결과를 토대로 볼 때, 지하수위가 지표면까지 있을 때 또는 지반조사에 의해 나타난 지하수위일 때의 조건으로 구한 정수압을 이용하여 설계할 때는 과다설계나 과소설계를 할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

Abstract The uplift force acts directly on the foundation and causes a building to float to the upper ground. To examine the stability of a structure according to the uplift force, four sites (Paju, Anyang, Osan, and Gangneung) were selected, and sensors were installed on the foundations for the field tests. The rainfall characteristics were analyzed around June~September, and the changes in the water level of the adjacent river were considered. The maximum uplift force except for Gangneung did not exceed 72% of the water pressure when the groundwater level was up to the surface. On the other hand, the maximum uplift force in Osan was approximately 67%, but the reliability was slightly inferior because the difference from the average (46%) was large. The minimum uplift force was within 10% except for Anyang (~ 41%). At the Gangneung site on soft rock where the permanent drainage facility was installed before the measurement, the maximum and minimum uplift force was approximately 14% and 3.5%, respectively. Based on the measurement results, the possibility of overdesigning or underdesigning comes from the design by the hydrostatic pressure when the groundwater level is up to the surface.

Keywords : Uplift Force, Water Level, Foundation, Rainfall, River

*Corresponding Author : Heui-Soo Han(Kumoh National Institute of Technology)

email: hanhs@kumoh.ac.kr

Received September 21, 2020

Accepted November 6, 2020

Revised October 21, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

지하수압의 처리문제는 도심지 지하굴착에 의한 구조물의 시공에 필연적으로 수반되며, 특히 아파트 주차장, 지하철 구조물, 암거 등과 같은 영구구조물인 경우 양압력에 대한 대응책이 필요하다. 지반의 투수계수, 토질특성, 지층구성, 지하 구조물의 종류, 지하수의 위치, 인접하천, 강우량 등에 따라 양압력은 좌우되므로 지반상황과 배수체계에 따른 적절한 분석이 필요하다[1].

일반적으로 지하수위가 지하구조물 위치보다 높은 지역에서 구조물을 건설할 경우에는 최하층 슬라브 저면에 위치하는 지하수와 그 지역의 지하수의 수두차에서 지하수위면 하부 구조물면에 연직방향으로 수압이 작용하게 되는데 이러한 수압 중에서 특히 구조물의 바닥면에서 발생하는 상방향의 압력을 양압력이라 정의한다. 이러한 양압력은 최하층 기초바닥 슬라브에 직접 작용하여 건물을 상부로 부상시키는 현상을 유발시키며, 양압력과 구조물 기초의 자중을 비교하여 양압력이 작으면 비교적 안정한 상태로 간주한다[2].

양압력의 합리적인 평가를 위해서는 세심한 지반조사를 통한 정확한 지반상태와 주변조건 확인이 요구된다. 그러나, 실제로 도심지 굴착현장에서는, 구조물 바닥면에서부터 지표면까지 포화된 상태라는 가정하에서 단순히 수두차에 의한 양압력 평가로 지하구조물 자중과의 차이에 따라서 보강여부를 판단하고 있는데, 이러한 평가방식은 과다설계를 유발하여 공사비의 증가를 발생시킨다.

또한, 지반조사결과를 활용하여 지하수위를 결정할 경우, 지반조사 당시의 강우량 및 계절별 영향에 따라 차이를 보여 과소설계의 우려가 있다. 그리고, 지하구조물에 하천이 인접한 경우, 하천수위의 지반침투에 따른 양압력의 변화를 설계에 반영해야 하나, 이에 대한 고려를 하지 않으면 구조물에 부정적인 영향을 초래할 수 있다[3].

따라서, 본 연구에서는 아파트 지하주차장에 현장계측 시험을 실시하여 다음과 같은 양압력의 특성을 분석하였다. 첫째, 계측시험이 수행된 지역의 계절별 강우특성을 파악하고 이에 따른 양압력을 정량적으로 분석하였다. 둘째, 인접하천이 있는 지역에서의 계측을 이용하여, 인접하천으로부터 지하수의 지반침투영향을 분석하였다. 마지막으로, 기존의 양압력 평가방식 결과와 계측된 양압력의 최대·최소값을 비교함으로써, 지하구조물에 작용하는 양압력을 합리적으로 평가하였다.

2. 이론적 검토

2.1 국내외 연구사례

1975년 Lumb은 지반의 포화도 및 투수계수에 따라 지반의 우수 침투깊이를 평가하는 경험식을 최초로 발표하였다[4]. 그러나, 이 경험식에서는 흙의 전단강도를 결정짓는데 가장 중요한 요소인 간극수압의 변화에 대한 언급이 누락되어있다. 1982년 Leach and Herbert 등은 2차원 유한차분법을 사용하여 가파른 경사면의 간극수압 해석에 적용할 수 있는 모델을 발표하여 실제 사면에 적용시켜 본 사례가 있다[5]. 또한 1984년 Anderson and Pope 등은 부(-)의 간극수압을 정의하고 물의 침투와 관련된 1차원 모델을 발표하였다[6]. 그러나 이 모델들은 토질공학적 측면보다는 수문학적 또는 지질학적 측면만 강조되어있는 단점이 있다.

국내의 연구사례로, 1988년 김상규 등은 큰 조수위차를 받는 방조제에 대해 불포화 영역의 전단강도 등을 고려하여 방조제의 안정성에 끼치는 영향을 연구한 바가 있으며, 강우가 시작된 후 시간의 경과에 따른 불포화 지반에서의 여러 가지 투수거동을 밝힘으로써 사면 불안정의 구체적인 메커니즘을 이해하려는 시도를 하였다[7]. 이인모(1992, 1994)등은 '산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구'에서 지하수의 유입량에 의한 비교·연구를 수행하였으며[8], 수치해석적 방법을 사용하여 실제 현장에서의 적용성 여부를 검토한 바 있다[9]. 이승현 등은 지하수에 의한 양압력에 따른 지하매서관의 거동을 해석하였으며[10], 박현정은 지하굴착에 따른 지하수와 지하구조물의 거동을 역해석방법으로 연구하였다[11].

2.2 지하수 흐름의 지배방정식

지하수 흐름의 지배방정식은 Eq. (1)과 같으며, 시간에 따라 임의의 한 점에서 요소체적의 유입-유출량의 차이는 체적함수비의 변화와 같다는 것을 의미한다[12]. 즉, 임의의 시간동안 내부로 공급되는 유량과 수평, 수직 방향 유량변화의 합은 체적함수비의 변화와 같다는 것을 나타낸다.

$$\frac{\delta}{\delta x} (k_x \frac{\delta H}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k_y \frac{\delta H}{\delta y}) + Q = \frac{\delta \theta}{\delta t} \quad (1)$$

여기서, H = 전수두

k_x = 수평투수계수

k_y = 수직투수계수
 Q = 경계흐름량
 Θ = 체적함수비

$$\delta\Theta = m_w \gamma_w \delta(H - y) \quad (5)$$

$\delta\Theta$ 를 지배방정식에 대입하면, Eq. (6)이 된다.

정상류 조건하에서, 요소체적에 유입 및 유출되는 유량은 모든 시간동안 동일하다. 따라서 식의 우변은 0이 되므로 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta}{\delta x} (k_x \frac{\delta H}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k_y \frac{\delta H}{\delta y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\delta(H - y)}{\delta t} \quad (6)$$

$$\delta \frac{\delta}{\delta x} (k_x \frac{\delta H}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k_y \frac{\delta H}{\delta y}) + Q = 0 \quad (2)$$

여기서, 높이 y 는 상수이기 때문에 시간의 흐름에 따라 사라지고 Eq. (7)의 지배방정식이 남게된다.

$$\frac{\delta}{\delta x} (k_x \frac{\delta H}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (k_y \frac{\delta H}{\delta y}) + Q = \frac{\delta H}{\delta t} \quad (7)$$

체적함수비의 변화는 흙의 물성 및 응력상태와 밀접한 관련이 있다. 또한, 포화 및 불포화조건에서의 응력상태는 두 가지 상태의 변수에 의해 표현될 수 있다. 이들 응력상태는 $(\sigma - u_a)$ 및 $(u_a - u_w)$ 이며, 여기서 σ 는 전 응력, u_a 는 간극기압(pore-air pressure), u_w 는 간극수압(pore-water pressure)이다.

체적함수비의 변화량($\delta\Theta$)은 간극수압의 함수이므로, 체적함수비의 변화량은 간극수압의 변화량(δu_w)에 관련된 Eq. (3)으로 표현할 수 있다.

$$\delta\Theta = m_w \delta u_w \quad (3)$$

여기서, m_w = 저류곡선기울기

또한,

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (4)$$

여기서, y = 수두 높이

상기의 식들은 Eq. (5)로 정리할 수 있다.

3. 현장계측에 의한 양압력의 평가

3.1 계측 시스템

그림 Fig. 1과 Fig. 2는 각각 양압력 센서 설치도 및 시스템 장비를 나타낸 것이다. 본 계측 시스템은 크게 센서 부분과 컨트롤러로 구성되어, 양압력 및 센서위치의 온도를 자동으로 관측하는 시스템이다.

3.2 계측현장 및 계측기 현황

충부지방의 4개 현장(파주, 안양, 오산 및 강릉)을 선정하여 지하구조물 기초바닥에 계측기를 설치하여 현장 계측시험을 수행하였다. 지하구조물 2개소(지하2층, 지하3층)를 선정한 안양 현장을 제외하고는 나머지 3개 현장에서는 각각 지하구조물(지하2층) 1개소에 계측기를 설치하였다.

Table 1. Comparison of conditions by measurement site

Division	Paju	Anyang		Osan	Gangneung
		#2	#4		
Basic ground	Gravel layer	Gravel sand layer	Weathered soil layer	Weathered soil layer	Soft rock layer
Adjacent rivers	O (66.0m)	O (102.6m)	O (178.5m)	X	X
Drainage facility	X	X	X	X	O
Height of Structure	8.65m (B2F)	8.5m (B2F)	11.8m (B3F)	8.7m (B2F)	9.2m (B2F)
Quantity of measurements	5	3	3	5	5

※ () is separation distance from the base of the adjacent river to the center of the structure.

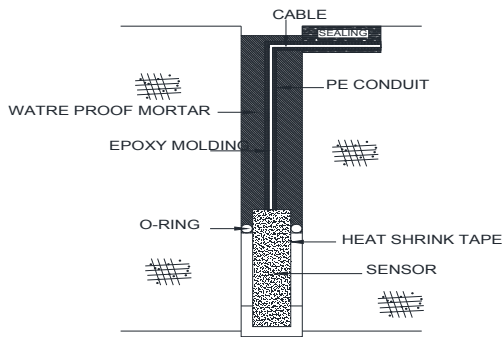


Fig. 1. Cross sectional diagram of measurement system for uplift seepage force

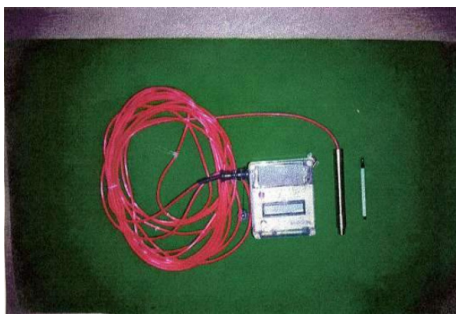


Fig. 2. Controller & probe for uplift seepage force

구조물바닥에 작용하는 양압력에 대한 위치별 영향을

파악하기 위해 계측기 배치시, 기초바닥 모서리부와 중앙부 등 여러 지점을 선정하였다. 또, 인접하천에 의한 침투 영향을 파악하기 위해서, 인접하천이 있는 현장(파주, 안양)에 하천으로부터 거리에 따라 계측기를 설치하였다.

Table 1은 계측현장 조건을 요약한 것이다. 파주현장의 지하구조물 기초지반은 자갈층, 안양 현장은 자갈모래층(#2), 풍화토층(#4)으로 되어있다. 또, 오산 및 강릉 현장의 기초지반은 각각 풍화토와 연암에 위치해있다. 강릉 현장에서는 계측기 설치 이전에 이미 기초바닥에 영구배수시스템이 설치된 상태이며, 각 구조물의 높이는 8.5~11.8m(지하2층~3층)의 범위에 있다.

계측기 설치당시 초기 지하수의 위치를 보면, 파주현장의 경우 기초바닥에서부터 2.55m(7월), 안양현장에서는 각각 3.6m(#2, 7월), 5.3m(#4, 7월)이고, 기타현장에서는 1.6m(오산, 4월), 3.2m(강릉, 4월)로 조사되었다.

4. 결과분석

4.1 강우량 특성

계측현장들이 위치해 있는 중부지방의 연평균강우량은 약 1,300mm 정도가 된다. 또, 우리나라 기후의 특징 중에 하나인 장마는 중부지방의 경우 평년을 기준으로 할 때 약 6월24일 경에서 7월24일 동안이며 이 기간

Table 2. Average precipitation at the measurement site in 1999

Site	Contents	June	July	August	September
Paju	1999's (a) (mm)	60.0	331.5	668.5	294.0
	Common year (b) (mm)	140.0	360.0	320.0	160.0
	(a)/(b) (%)	43	92	209	184
Anyang	1999's (a) (mm)	131.8	230.4	600.5	377.3
	Common year (b) (mm)	120.0	340.0	300.0	160.0
	(a)/(b) (%)	110	68	200	236
Osan	1999's (a) (mm)	103.5	348.0	344.5	548.5
	Common year (b) (mm)	120.0	320.0	280.0	140.0
	(a)/(b) (%)	86	109	123	392
Ganeneung	1999's (a) (mm)	100.1	110.7	462.0	477.7
	Common year (b) (mm)	120.0	220.0	280.0	220.0
	(a)/(b) (%)	83	50	165	217

의 총 강우량은 165~434mm 정도로 연 강우량의 13~33%를 차지하고 있다. 또, 최근 8월~9월에는 단기간에 집중호우가 자주 발생하는 경향을 보이고 있다. 나머지 기간의 강우량은 이에 비해서 그다지 많지 않은 것으로 나타나고 있다.

따라서, 강우량의 영향을 용이하게 파악할 수 있는 6월~9월을 중심으로 계측현장의 강우특성을 분석하고자 하였다. Fig. 3은 계측기간 중에 발생된 각 현장에서의 강우분포를 나타낸 것이고, Table 2에서는 6월~8월 기간의 평년과 계측기간의 강우특성을 서로 비교하고 있다.

이에 따르면, 대부분 현장에서는 해당 년도 6월과 7월의 강우량은 평년과 비교하여 작은 값이었으며, 그 반면에 8월, 9월의 경우는 평년보다 많이 발생하였다. 특히, 7월27일~8월3일 또는 9월18일~9월24일간은 각 계측현장에 최대강우량이 발생한 시기로 7~8일간의 지속적인 강우를 보였다. 8월1일~2일 동안에는 중부지방 연평균 강우량의 약 46%(591mm, 파주), 33%(425mm, 안양), 15%(188mm, 오산) 및 13%(172mm, 강릉)의 강우가 발생하였다. 9월말에는 2일 강우량이 약 11%(146mm, 파주), 17%(215mm, 안양), 22%(290mm, 오산) 및 18%(236mm, 강릉)이 발생하였다.

4.2 강우량에 따른 양압력 분석

Fig. 4는 각 현장에서 해당 년도 2월말~3월초에 계측기를 설치하여 약 1년 동안 지하주차장 기초바닥에 작용하는 양압력을 측정한 것이다. 계측시험 중에 계측기 고장으로 인해 일부 계측기를 얻을 수 없었지만 비교적 해당 현장의 전반적인 양압력 특성이 잘 나타나 있다.

각 현장에서 계측된 결과를 보면, 강릉을 제외한 나머지 현장들에서 계측된 양압력은 집중호우 등 높은 강우 강도를 보인 8월초 또는 9월말에 최대값이 계측되는 등 뚜렷하게 변화하는 것으로 나타났다. 반면에 강우량이 많지 않은 6월 이전의 양압력은 8~9월의 경우와 비교할 때 양압력의 변화가 별로 없었다.

특히, 기초지반이 자갈층 또는 자갈모래층(파주, 안양-#2) 및 풍화토층(안양-#4)일 때의 양압력은 8월초에 최대강우량 발생 시점에서 약 1~2일 후에 최대까지 상승하다가 이후 강우량이 거의 발생하지 않으면서 최대양압력 발생 이후 약 20일 이내에 이전 수준으로 감소되었다. 오산현장의 계측 값들은 같은 기초지반조건인 안양(#4)의 경우에 비해 상대적으로 완만한 경향이지만, 강우량에 따른 양압력의 변화는 유사하였다.

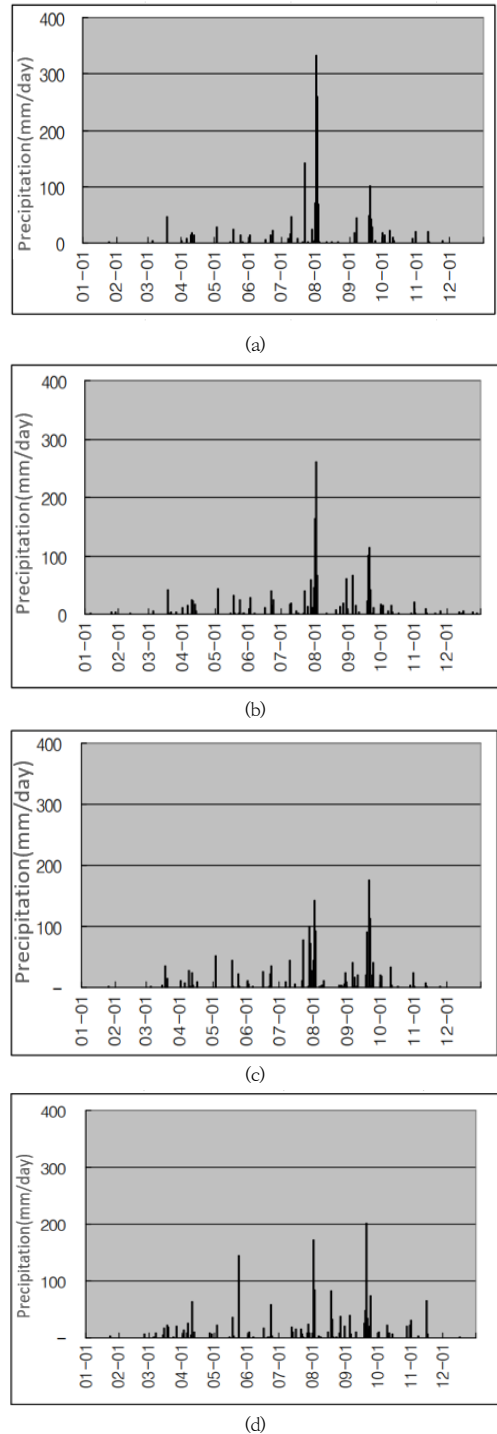


Fig. 3. Precipitation distribution, (a) Paju (b) Anyang (c) Osan (d) Gangneung

강우량에 따른 양압력의 정량적인 분석을 위해서, Fig. 5 (a)~(b)와 같이 최대 일 강우량을 보인 7월27일~8월3일 또는 9월18일~9월24일의 기간을 중심으로 구조물에 작용하는 양압력을 기존설계방법(지표까지 지하수위가 있는 것으로 가정)에 의해 평가되는 수압과 비교하였다.

우선, 7월27일~7월31일 사이의 강우량은 연평균강우량의 6~16%로 나왔으며, 이 때 예측된 양압력의 변화폭은 그다지 뚜렷하지 않았다. 이후에 연평균강우량의 13~46%의 강우량을 보인 8월1일~8월2일 동안의 1일 평균양압력은 기존설계방법으로 구한 수압과 비교하여 최대 약 61%(파주), 69~68%(안양), 31%(오산)로 예측되었다. 평균양압력의 증가량은 연중 최대 일 강우량 발생 이전인 7월31일의 경우와 비교할 때 최대 약 30%(파주), 8~19%(안양) 및 13%(오산) 정도였다.

연평균강우량의 11~22%의 강우량을 보인 9월18일~9월24일 동안 예측된 1일 평균양압력은 최대 약 50%(파주), 52~60%(안양) 및 43%(오산)정도가 측정되었고, 그 증가량은 7일 강우기간 중 초기시점인 9월18일과 비교할 때 최대 약 22%(파주), 6~10%(안양) 및 19%(오산) 정도로 나타났다. 강릉현장에서는 예측이전에 이미 지하구조물 바닥에 작용하는 양압력을 인위적으로 조절할 수 있는 영구배수시설을 설치된 상태였고 연암 상태의 기초지반조건으로 인해서 강우량과 관계없이 측정된 평균양압력은 거의 10% 이내로 나타났다.

4.3 하천이 인접한 지역에서의 양압력 분석

지하구조물에 영향을 주는 요소 중의 하나인 강우량이 외에도 하천이 인접할 때, 인접한 하천수위의 변화 및 지반으로의 침투에 따른 지하수위의 변화상태 등도 양압력에 대해 영향을 많이 미치므로 이들 변수들을 설계단계에서 고려하는 것은 매우 중요하다.

자연적인 지하수위에 의한 부력뿐 아니라 강우에 의한 지하수위 상승이나, 주변 하천 등과의 수위차로 인한 침투압을 양압력으로 고려해야 한다.

본 절에서는 이러한 인접하천에 의한 영향을 파악하는데 중요한 요소인 인접하천수위 자료가 없기 때문에 하천수위와 양압력의 직접적인 관계를 분석할 수 없었다. 그러나, 하천수위로부터의 침투여향에 의해 하천으로부터의 거리에 따라 양압력 증가량 차가 발생할 수 있으므로 이를 통하여 간접적으로 인접하천의 영향을 파악하고자 하였다.

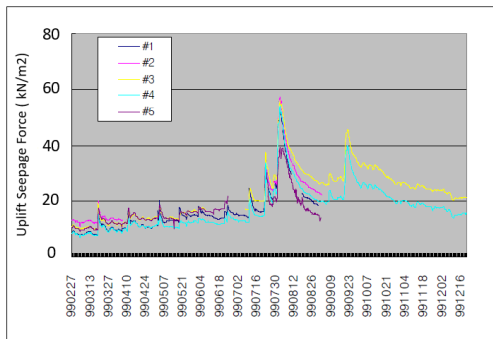
Table 3은 파주 및 안양 현장에 인접해 있는 하천특성을 나타낸 것이다. 파주 및 안양에서의 하천심도는 지표에서부터 각각 8.1m, 9.7m깊이이며, 100년 빈도의 계획 홍수위 기준시에는 하천심도가 각각 6.8m, 5.4m이다.

Fig. 6은 하천에서부터의 거리(L)에 따라 예측된 양압력과 예측초기압력의 차이를 비교한 것이다. Fig. 6 (a)를 보면 하천거리에 관계없이 각 지점간의 양압력 증분 차가 평균 $1.4kN/m^2$ 정도로 그다지 차이가 없었는데, 이는 측정지점이 하천과 가깝기 때문에 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.

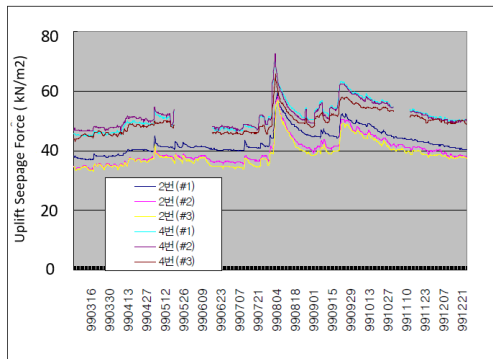
반면에, Fig. 6 (b)를 분석하면 7월 30일까지는 각 지점간의 차가 별로 없었으나 7월31일 이후부터 초기압력에 대한 양압력 증가량이 각 지점별로 달라지는 것을 볼 수 있는데, 하천으로부터의 거리가 41.2m지점에서 예측된 초기압력 대비 증가량이 기타 지점(L=9.19m 이상)들과 비교할 때 다소 차이를 보이고 있었다. 하천과 가장 가까운 지점(L=41.2m)과 가장 먼 지점(L=159.9m)간의 예측값 차이는 약 $11.0kN/m^2$ 정도로 나타났다. 따라서, 이 경향들이 크게 뚜렷하지 않지만 하천과 가까울수록 인접 하천의 침투에 대한 영향을 좀 더 받고 있음을 알 수 있었다.

Table 3. Properties of the river adjacent to the measurement site

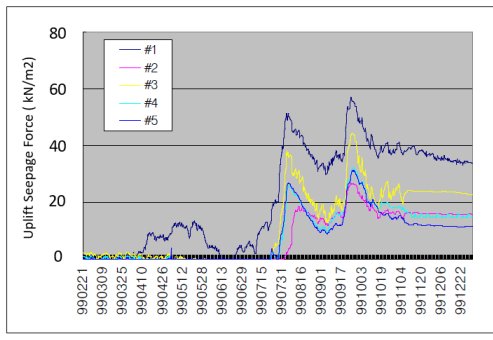
Site	Elevation of foundation floor	Ground level	Avg. river stage	Project water elevation (100-year frequency)	Underground water level	Adjacent rivers
Paju	EL+3.45	EL+12.1	(EL+4.0)+a	EL+10.8	EL+6.0	Gokryongcheon
Anyang	EL+1.9 (#2) EL+0.2 (#4)	EL+10.4 EL+12.0	(EL+2.3)+a	EL+7.7	EL+5.5	Anyangcheon



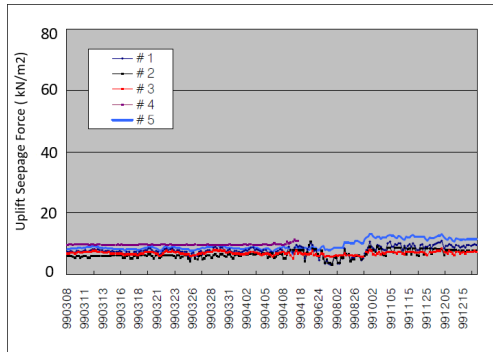
(a)



(b)

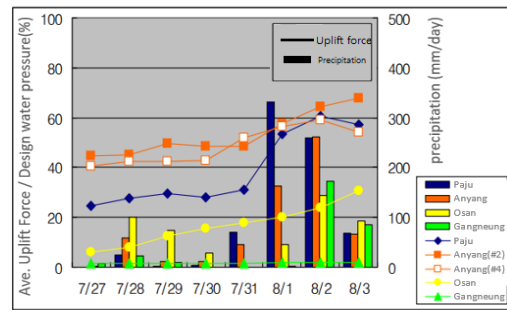


(c)

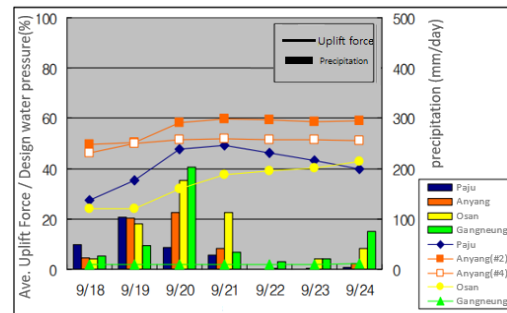


(d)

Fig. 4. Uplift seepage force change measured by site (a) Paju (b) Anyang (c) Osan (d) Gangneung

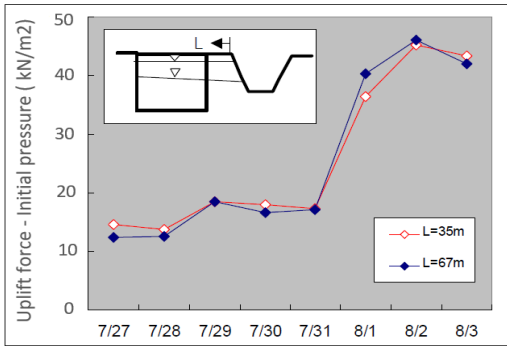


(a)

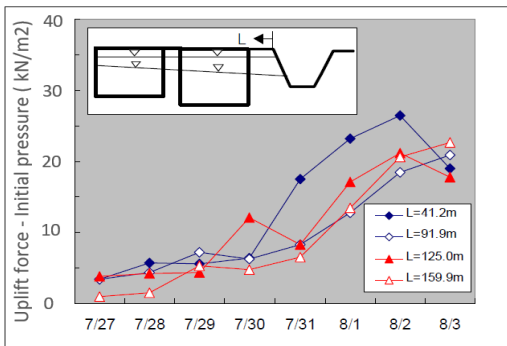


(b)

Fig. 5. Relationship between uplift force and rainfall



(a)



(b)

Fig. 6. Uplift force change according to adjacent river (a) Paju (b) Anyang

5. 양압력의 기존 설계방식 및 계측치 결과 비교

통상적인 설계에서의 양압력 평가는 지표면까지 지하수위가 있는 것으로 가정하고 이 지하수위를 설계수압으로 정하고 있다. 또는 지반조사 당시에 측정된 지하수위를 정수압으로 가정하여 설계에 반영하기도 한다.

따라서, 지하구조물에 작용하는 양압력을 계측한 결과와 기존 설계방식에 의해서 평가된 수압과 비교, 분석하고자 하였다. Table 4는 통상 설계에서 반영하는 수압, 즉 지하수위가 지표면까지 있는 것으로 가정하고 계산된 수압과 지반조사시의 지하수위로 인한 수압을 나타낸 것이다.

Table 5는 각 현장에서 계측된 최대 및 최소양압력으로 8월초 또는 9월말에 계측된 최대값은 28.7~74.6 kN/m^2 정도, 강우량이 작은 3월에 측정된 최소값은 안양현장(35.1~48.5 kN/m^2)을 제외한 나머지 현장에서는 10 kN/m^2 이내의 값을 나타냈다.

Fig. 7은 계측된 최대, 최소양압력을 지하수위가 지표까지 있을 때 평가된 수압(Table 4참조)으로 나눈 것이다. 이 결과에 의하면, 일반적으로 투수계수가 높은 기초

지반인 경우가 양압력이 크게 나왔지만, 기초지반이 풍화토인 경우(안양#4, 오산)라도 차이가 있는 것으로 나타났다.

계측현장에서 측정된 최대양압력은 기존설계수압 대비 약 72%를 넘지 않았다. 다만, 오산에서 측정된 최대양압력은 약 67%로 나타났지만, 타 현장의 결과와 비교할 때 5개 지점 평균(46%)과의 차이가 커서 신뢰성이 다소 떨어졌다. 또한, 최소양압력은 안양을 제외하면(41%) 대개 10%이내의 값을 보였다. 최대 및 최소의 차이는 약 58%(파주), 22~31%(안양), 오산(66%) 정도로 나타났다. 타 현장에 비해 최소값이 크게 나온 안양현장은 차이가 상대적으로 작게 나왔고, 최대값에 대한 신뢰성이 다소 떨어진 오산현장은 그 차이가 매우 큰 것으로 나타났다.

기초지반이 연암이고 계측이전에 영구배수시설이 설치된 강릉현장의 최대양압력은 약 14%, 최소값은 약 3.5% 정도로 다른 현장에 비해서 양압력의 변화가 거의 없는 것으로 계측되었다. 따라서, 지하구조물 시공시의 조건이 포장되지 않아서 채움재 쪽으로 유입되는 강우침투량이 구조물에 위험을 줄 정도가 아니면, 기초지반이 연암이고 영구배수시설이 설치되는 조건에서 구조물에 미치는 양압력의 영향이 미비한 것으로 판단되었다. 또한, 지반조사시점의 지하수위를 토대로 평가된 수압을 양압력 설계를 하는 경우, 양압력은 시기에 따라 범위가

Table 4. Water pressure assessed by conventional design at each site

Site	Water pressure (underground water level = surface) (kN/m^2)	Water pressure by underground water level (kN/m^2)	Investigation period
Paju	86.5	25.5	July
Anyang	#2	85.0	36.0
	#4	118.0	55.0
Osan	87.0	16.0	April
Gangneung	92.0	32.0	April

Table 5. Maximum and minimum uplift force measured at each site

Site	Point	Max. uplift force (kN/m^2)	Min. uplift force (kN/m^2)	Site	Point	Max. uplift force (kN/m^2)	Min. uplift force (kN/m^2)	
Paju	1	57.8	8.9	Anyang	#2	1	61.4	38.8
	2	59.4	12.9			2	60.3	35.8
	3	58.1	11.1			3	59.0	35.1
	4	56.1	8.8		#4	1	74.1	47.0
	5	41.1	10.9			2	74.6	48.5
Osan					3	67.8	45.2	
	1	59.2	2.0	Gangneung	1	13.0	3.2	
	2	28.7	2.0		2	12.6	3.4	
	3	46.3	2.0		3	10.5	5.1	
	4	34.2	2.0		4	-	9.5	
5	33.2	2.0	5		15.2	6.6		

달라지므로 지반조사 시점을 참고로 하여 설계에 반영해야 한다.

해당 연구현장은 강우, 지하수, 인접하천과의 거리 및 배수시설 등의 조건에 따라 양압력의 계측 결과가 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 현장의 계측 결과 역시 설계 시 고려한 최대 양압력보다 약 30% 낮은 값을 보였다. 그러므로, 구조물 설계 시 이러한 사항들을 고려한다면 경제적인 설계 및 시공이 될 것이다.

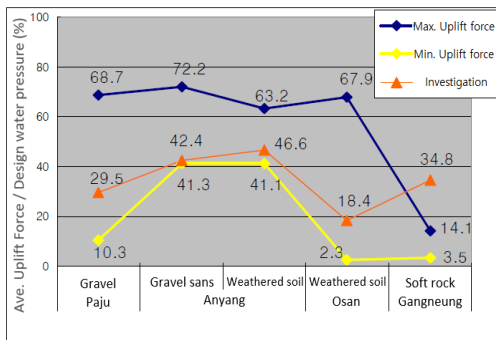


Fig. 7. Comparison of the maximum and minimum uplift force and the hydraulic pressure evaluated by the existing design method

6. 결론

(1) 각 계측현장의 지하구조물 기초지반은 자갈층(파주), 자갈 모래층(안양-#2), 풍화토층(안양-#4, 오산) 및 연암층(강릉) 등으로 분포되어 있다.

(2) 계측현장들이 위치해 있는 중부지방의 연평균강우량은 약 1,300mm 정도가 된다. 중부지방의 통상적인 장마기간과 최근의 기후특징상으로 보아 6월~9월은 연평균강우량과 비교할 때 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났다는데, 99년도에 발생한 최대강우량은 8월초(파주, 안양) 또는 9월말(오산, 강릉)에 발생되었다. 7월27일~8월3일 중에 내린 2일 강우량은 연평균강우량의 약 46%(591mm, 파주), 33%(425mm, 안양), 15%(188mm, 오산) 및 13%(172mm, 강릉)을 나타냈고, 9월18일~9월24일 중에 내린 2일 강우량은 약 11%(146mm, 파주), 17%(215mm, 안양), 22%(290mm, 오산) 및 18%(236mm, 강릉) 정도 발생하였다.

(3) 99년도 강우특성을 토대로 한 계측 결과를 분석하면, 대체적으로 강우량에 따라 양압력 변화가 뚜렷하였으나 거의 변화 없이 일정한 경우도 있었다. 7월27일~8월

3일에 계측된 평균 양압력은 기존설계방법(지하수위가 지표까지 있는 경우)으로 구한 수압 대비 최대 약 61%(파주), 59~68%(안양), 31%(오산)로 나타났다. 평균양압력의 증가량은 연중 최대 일 강우량 발생이전인 7월 31일의 경우와 비교할 때 약 30%(파주), 52~60%(안양) 및 43%(오산)정도로 나타났다. 평균양압력의 증가량은 7일 강우기간 중 초기시점인 9월18일과 비교할 때 각각 22%(파주), 6~10%(안양) 및 19%(오산) 정도로 나타났다.

(4) 안양현장의 경우, 하천으로부터의 거리(L)가 41.2m지점에서 계측된 초기치 대비 양압력 증가량은 다른지점(L=91.9m이상)들과 비교할 때 다소 차이를 보이고 있었다. 하천과 가장 가까운 지점(L=41.2m)과 가장 먼 지점(L=159.9m)간의 계측값 차이는 약 1.10t/m² 정도로 나타났다. 전체적인 경향으로 볼 때 구조물의 양지점과의 차이는 크게 뚜렷하지 않지만 하천과 가까울수록 인접하천의 침투에 대한 영향을 좀 더 받고 있음을 확인할 수 있었다. 파주현장은 안양에 비해서 계측지점간 거리가 가깝기 때문에 양단간 계측값의 차이는 별로 없었다.

(5) 계측현장에서 측정된 연중 최대양압력은 강릉을 제외하면 기존설계(지하수위가 지표까지 있는 경우)로 평가된 수압의 72%를 초과하지 않았다. 다만, 오산에서 측정된 최대양압력은 약 67%로 나타났지만, 타현장과 비교할 때, 평균(46%)과의 차이가 커서 신뢰성이 다소 떨어졌다. 최소양압력은 안양(약 41%)을 제외하면 대개 10% 이내의 값을 보였다. 기초지반이 연암이고 계측이전에 영구배수시설이 설치된 강릉현장의 양압력의 최대값은 약 14%, 최소값은 약 3.5% 정도로 다른 현장에 비해서 양압력의 변화가 거의 없는 것으로 계측되었다.

(6) 계측결과를 토대로 볼 때, 지하수위가 지표면까지 있을 때 또는 지반조사에 의해 나타난 지하수위일 때의 조건으로 구한 정수압을 이용하여 설계할 때는 과다설계나 과소설계를 할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 연구대상 현장의 경우, 강우, 지하수, 인접 하천 및 배수시설의 유무에 따라 양압력의 계측결과가 크게 영향을 받는 것을 확인하였으며, 최대 양압력은 설계값 보다 약 30% 낮은 계측 값을 보여주었다. 그러므로 시공 시 양압력에 영향을 미치는 다양한 사항들을 고려하면 경제적인 시공이 될 것이다.

References

- [1] E. J. Murray, J. D. Geddes, "Uplift of Anchor Plates in Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp.202-215, 1987.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:3\(202\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:3(202))
- [2] G.G. Meyerhof, J. I. Adams, "The Ultimate Uplift Capacity of Foundation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 4, pp.224-244, 1968.
DOI: <https://doi.org/10.1139/t68-024>
- [3] A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, "Uplift Behavior of Screw Anchors in Sand, I : Dry Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp.775-793, 1991a.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:5\(773\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:5(773))
- [4] P. Lumb, "Slope failures in Hong Kong", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 8, No. 1, pp.31-65, 1975.
DOI:<https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1975.008.01.02>
- [5] B. Leach, R. Herbert, "The genesis of a numerical model for the study of the hydrogeology of a steep hillside in Hong Kong", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol. 15, pp.243-259, 1982
DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1982.015.03.09>
- [6] M. G. Anderson, R. G. Pope, "The incorporation of soil water physics models into geotechnical studies of landslide behaviour", *In Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*, Vol. 4, pp.349-353, 1984, September.
- [7] S. K. Kim, "Penetration analysis considering unsaturated flow", *Korean Society of Civil Engineers*, pp.400-403, 1988.
- [8] M. I. Lee, "A Study on Prediction of Pore Water Pressure for Estimation of Landslide Risk(I) - groundwater inflow Comparative study", *Korean Geotechnical Society*, Vol. 8, No. 1, 1992.
- [9] M. I. Lee, "A Study on Prediction of Pore Water Pressure on Hillside Using Numerical Analysis", *Korean Geotechnical Society*, Vol. 10, No. 1, pp.47-61, 1994.
- [10] S. H. Lee, J. T. Han, "A Theoretical Study on the Ground Water Flow Adjacent to Buried Pipe", *The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 3, pp.1439-1443, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.3.1439>
- [11] H. J. Park, "A Field Case Research by Construction Management of Underground Excavation Construction Using Inverse Analysis Method", *The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 2, pp.1089-1095, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.2.1089>
- [12] A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, "Uplift Behavior of Screw Anchors in Sand, II : Hydrostatic and Flow Conditions", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp.794-808, 1991b.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:5\(794\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:5(794))

김진만(Jin-Man Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 경희대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)

• 1990년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원

〈관심분야〉

토질 및 기초, 하천제방, 보강토옹벽

한희수(Heui-Soo Han)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 12월 : South Dakota School of Mines Technology (공학박사)

• 2002년 3월 ~ 현재 : 국립금오공과대학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉

토질 및 기초, 사면안정, 보강토옹벽