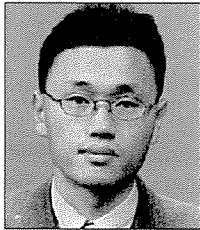




● ● ●

현장계측을 통한 지하구조물에 작용하는 양압력 평가



지반굴착위원회 간사
한라건설(주) 과장, 68회
박 신 영

1. 개요

일반적으로 지하수위가 지하구조물 위치보다 높은 지역에서 구조물을 건축할 경우에는 최하층 슬라브 저면에 위치하는 지하수와 그 지역의 지하수의 수두차에서 지하수위면 하부 구조물면에 연직 방향으로 수압이 작용하게 되는데 이러한 수압 중에서 특히 구조물의 바닥면에서 발생하는 상방향의 압력을 양압력(Uplift Seepage Force)이라고 한다. 이러한 양압력은 최하층 기초바닥 슬라브에 직접 작용하여 건물을 상부로 부상시키는 현상을 유발시키며, 양압력과 구조물 기초의 자중을 비교하여 양압력이 적으면 비교적 안정한 상태로 간주한다.

도심지 지하굴착에 의한 구조물의 시공에는 필연적으로 지하수압의 처리문제가 수반되며, 특히 이들 구조물이 건물, 아파트 주차장, 지하철 구조물, 암거 등과 같은 영구구조물인 경우 양압력에 대한 대응책이 더욱 중요시된다. 양압력은 대상지반의 투수계수 등의 토질특성 및 지층구성, 지하구조물의 종류, 지하수의 위치, 인접하천, 강우량 등에 따라 좌우되므로 주변상황과 배수체계에 따른 적절한 해석개념의 정립이 필요하다.

이러한 양압력을 예측하기 위한 노력은, 침투 및 배수 이론을 토대로, 여러 학지들에 의해 수행된 바 있으며, 대책방안의 선정과정에서 부력앵커 시스템의 개념을 도입할 수 있다. 그라운드 앵커는 이미 국내뿐만 아니라 외국에서도 오래 전에 실용화된 상태이며, 30년 이상 구조물 안정성 확보에 널리 사용되어 왔다. 최근 양압력으로 인한 지하구조물의 상승을 억제하기 위해 부력앵커의 사용이 증가하기 시작하였으나, 정확한 양압력의 평가, 구조물의 형태에 따른 부력앵커의 배치기준 등이 필요한 실정이다.

따라서, 지하구조물 하부 바닥면에 작용하는 양압력을 합리적으로 평가하기 위해서는, 앞에서 언급한 각종 조건

등에 대한 적절한 조사와 이를 해석하기 위한 시간과 노력이 병행되어야 함이 원칙이다. 일반적으로 실무적인 설계단계의 양압력 평가에 있어서, 상기의 여건들을 고려한 체계적인 해석이 어렵기 때문에 필요 이상의 과다설계가 이루어지거나 경우에 따라서는 과소설계에 의한 위험성 또한 배제할 수 없는 실정이다. 특히, 점유면적이 큰 아파트 지하주차장과 같은 지하구조물에서 양압력 대책공법을 적용할 때 공사비가 비용 문제를 감안할 때 합리적인 양압력의 평가는 더욱 필요하다고 할 수 있다.

현재, 지하구조물에 작용하는 양압력을 평가하기 위한 국내의 설계기술 현황은 매우 초보적인 수준이다. 즉, 대부분의 설계의 있어서 주변지반의 물성, 인접하천이 유무 및 하천수위의 변화, 구조물의 배수시스템 등의 조건들을 간과한 채, 지반조사결과에 의한 지하수위를 고려하거나 혹은 지표면까지 포화된 상태라는 가정하에서 단순히 수두차에 의하여 계산된 양압력을 토대로 지하구조물의 자중과 차이에 따라서 보강여부를 결정하고 있는 실정이다. 이러한 설계방식은 전자의 경우에는 계절별 혹은 년도별 지하수위의 변화를 감안할 때, 과소설계가 될 수 있고, 후자의 경우 연약지반 분포지역을 제외하고는 필요 이상의 과다설계가 되어 불필요한 공사비의 증가가 예상될 수 있다. 또한, 하천이 인접한 경우, 인접한 하천수위의 연도별 변화 및 지반으로의 침투에 따른 지하수위의 변화상태 등은 설계단계에서 파악되어야 할 매우 중요한 자료이나, 설계시 이러한 사항들을 반영하기가 현실적으로 어려우므로 기존의 설계에는 개략적인 설계방식이 적용되고 있다.

2. 국내외 연구 현황

2.1 국외의 연구

지하구조물에 작용하는 양압력을 합리적이고도 정확하게 평가하기 위해서는, 우선적으로 지반의 침투문제를 다

루어야 하며, 이러한 침투문제는 관련된 지배방정식 및 경계조건 등에 따라서 해석 및 계산 등이 매우 복잡하여 통상적으로 컴퓨터 수치해석 프로그램에 의존하는 경향이 강하다. 강우 및 지반침투와 관련된 연구는 이미 여러 학자들에 의해 부분적으로 수행된 바 있으며, 이를 개략적으로 정리하면 다음과 같다.

1978년 Lumb은 지반의 포화도 및 투수계수에 따라 지반의 우수 침투깊이를 평가하는 경험식을 최초로 발표하였다. 그러나, 이 경험식에서는 흙의 전단강도를 결정짓는데 가장 중요한 요소인 간극수압의 변화에 대한 언급이 누락되어있다. 최근에 이르러 강우강도, 강우특성시간 등을 모형화하여 지반침투에 관한 수치해석 모델들이 몇 가지 발표되었다. 1982년 Leach and Herbert 등은 2차원 유한차분법을 사용하여 가파른 경사면에 적용할 수 있는 해석모델을 발표하여 실제 사면에 적용시켜 본 사례가 있다. 또한 1984년 Anderson and Pope 등은 부(-)의 간극수압을 정의하고 물의 침투와 관련된 1차원 모델을 발표하였다. 그러나 이 모델들은 토질공학적 측면보다는 수문학적 또는 지질학적 측면만 강조되어 있는 단점이 있다.

이와 같이 양압력을 예측하기 위한 노력은 침투 및 배수이론을 토대로 여러 학자들에 의해 수행되었으며, 대책방안의 선정과정에서 부력앵커 시스템의 개념이 도입되었다. 이미 그라운드 앵커는 국내뿐만 아니라 외국에서도 오래 전에 실용화된 상태이며, 30년 이상 구조물 안정성 확보에 널리 사용되어 왔다. 최근 양압력으로 인한 지하구조물의 상승을 억제하기 위해 부력앵커의 사용이 증가하기 시작하였으나 정확한 양압력의 평가, 구조물의 형태에 따른 부력앵커의 배치기준 등이 명확하지 않아 과다설계 내지는 과소설계의 위험성을 안고 있다.

상기와 같이 많은 연구자들이 침투관련 문제를 해결하기 위하여 해석모델 및 프로그램 등을 개발해 오고 있으나, 기존에 제작된 프로그램 또한 세부기능과 적용대상

측면에서 약간의 차이만 보일 뿐, 바탕을 이루는 이론적 배경은 거의 유사하다. 즉, 일반적으로 침투해석 프로그램은 흙이나 암(rock)과 같이 물체에 분포하는 간극수압과 물의 흐름을 특정한 해석모델을 선정하여 모델링한 후, 이를 토대로 유한요소법(finite element method) 혹은 유한차분법(finite differential method) 등을 사용하여 특정구조물에 작용하는 양압력 또는 간극수압의 분포를 예측하고 있지만 해석모델 및 예측기법의 선정과정에서 존재하는 매개변수의 불확실성, 적용공법의 불확실성 등으로 인해 최적 전산시스템의 구축에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

2.2 국내의 연구

지하구조물에 작용하는 양압력을 평가하기 위한 국내의 연구개발 현황은 매우 초보적인 수준이다. 즉, 대부분의 설계의 있어서 주변지반의 물성, 인접하천이 유무 및 하천수위의 변화, 구조물의 배수시스템 등의 조건들을 간과한 채, 지반조사결과에 의한 지하수위를 고려하거나 혹은 지표면까지 포화된 상태라는 가정하에서 단순히 수두차에 의하여 계산된 양압력을 토대로 지하구조물의 자중과 차이에 따라서 보강여부를 결정하고 있는 실정이다. 이러한 설계방식은 전자의 경우에는 계절별 혹은 년도별 지하수위의 변화를 감안할 때, 과소설계가 될 가능성이 매우 크며, 후자의 경우 연약지반 분포지역을 제외하고는 필요 이상의 과다설계가 되어 불필요한 공사비의 증가를 유발시킨다. 또한, 하천이 인접한 경우, 인접한 하천수위의 연도별 변화 및 지반으로의 침투에 따른 지하수위의 변화상태 등은 설계단계에서 파악되어야 할 매우 중요한 자료이나, 설계시 이러한 사항들을 반영하기가 현실적으로 어려우므로 기존의 설계에는 개략적인 설계방식이 적용되고 있다.

국내의 구체적인 연구사례로써, 1988년 김상규 등은 큰 조수위차를 받는 방조제에 대해 불포화영역의 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. 이민도(1992, 1994) 등은 '산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구'에서 지하수의 유입량에 의한 비교·연구를 수행하였으며, 수치해석적 방법을 사용하여 실제 현장에서의 적용성 여부를 검토한 바 있다.

2.3 국내의 양압력 처리기술 현황

일반적으로 건축물의 지하구조물 저면에 작용하는 양압력을 처리하기 위한 방안으로는 구조물 자체의 고정하중(자중)을 증가시키는 방안과 영구앵커 또는 인장파일을 사용하는 방법이 있으며 최근에는 지하수위 증가에 따른 양압력을 원천적으로 배제시키자는 차원에서 영구배수처리공법(내부배수처리공법, 외부배수처리공법) 및 이들의 장점을 이용한 혼합공법을 적용하고 있다. 그러나, 배수처리공법을 사용할 경우, 주거밀집 지역 내에서 인접건물에 침하와 같은 문제점을 유발시킬 수 있으므로 아파트 주차장과 같은 도심지 지하구조물의 양압력 대처공법으로는 제한사항이 다소 존재한다.

(1) 구조물의 사하중 증가에 의한 처리 방법

건물의 고정하중 증가에 의한 지하수압에 저항하는 방법은 기초바닥 슬라브의 양압력 처리방법으로 가장 널리 사용되고 있는데, 구조물 자체의 고정하중(dead load)을 증가시켜 지하바닥에 작용하는 양압력과 서로 상쇄시키는 방식으로서, 전체적인 균형을 이루는 방식이다.

상기의 방법과 같이 양압력에 대응하는 인위적인 하중

을 증가시키는 것은 구조적으로 평형을 이룰 수는 있지만 경제적인 측면에서 다음과 같은 유의사항이 있다.

- 지하바닥 슬라브를 이중 슬라브화 함으로써 구조체의 단면이 증가할 수 있다.
- 이중슬라브 공법 수행시 거푸집작업과 방수작업 등의 난이성으로 인해 공기가 길어질 수 있고, 잡석 또는 자갈 채움 공정의 진행으로 방수층의 손상을 가져올 수 있다.
- 지하 단면깊이 증가로 인한 굴착깊이 증가로, 깊은 굴착면이 연암 또는 경암일 경우 시공에 따른 공기지연 및 공사비 증가를 초래한다.

(2) 영구부력앵커 및 인장파일의 사용공법

이 공법은 건축물의 사하중과 균형을 이루지 못하는 양압력에 대하여 기초바닥 저면의 암반층에 강제적으로 긴장된 스트렌드 다발 강선을 설치하거나 기초 파일의 고유 마찰력을 사용하여 저항하는 방법이다. 이것은 기초공사에 프리스트레스(prestress)를 도입한 것으로 구조물 축조 이전에 일정 기간동안의 인장력을 발휘하는 가설앵커와는 달리 구조물과의 일체성을 목적으로 한 영구앵커공법으로 인장재를 경암층에 고정시켜 인장력을 발휘하므로 보통 록앵커(rock-anchor) 또는 지하수에 의한 양압력에 저항한다고 하여 부력앵커라고도 정의한다.

양압력에 저항하는 영구앵커는 크게 마찰형과 지압형으로 나눌 수 있다. 초기에는 마찰형이 많이 사용되어 왔으나 점차로 지압형이 등장하고 있으며 이들의 장점을 복합화한 혼합형의 방식도 사용되고 있다.

① 마찰형 방식

마찰형 방식은 앵커체와 주변지반과의 마찰저항, 즉 시멘트 그라우팅 재료와 흙과의 허용부착강도 발현으로 양압력에 저항하는 방식이다.

② 지압형 방식

지압형 방식은, 마찰형 방식이 시멘트 그라우팅 재료의 마찰력 및 부착력에 의존하는 것과는 달리 앵커체의 주변과 지반과의 지압강도에 의해 양압력에 저항하는 방식이다.

③ 혼합방식

혼합방식은 시멘트 그라우팅 재료의 부착력에 의존하는 마찰형 방식과 앵커체의 주변과 지반과의 지압강도에 의해 인장력을 발휘하는 지압형 방식을 혼합한 방식이다.

(3) 영구배수 처리공법

영구배수 처리공법(permanent drainage system)이란 부재의 사하중을 증가시키거나 영구앵커를 사용하는 인위적인 방법과는 달리 지하수위에 의한 정수압을 초래하는 물의 성질을 이용한 자연배수공법의 일종으로 크게 내부배수 처리공법과 외부배수 처리공법이 있다.

내부배수 처리공법은 기초 슬라브 하부에 유기적으로 인위적인 배수층을 만들고 지하수위 차이에 의한 압력으로 기초 슬라브 하부로 유입되는 지하수를 집수정에 집수하여 일정 수위 이상이 넘으면 펌프를 사용하여 외부로 배출시켜 수압을 감소시키는 공법이다. 이 방법은 지하벽체 선단이 투수성이 적은 지반까지 시공되었을 때 이 지층을 통해 부지 내로 유입된 지하수의 처리에 효과적이다. 따라서, 지하수가 많고 터파기 하부 지층이 견고한 지층(풍화대)에서 수압을 완화시키는 방법으로 사용되고 있다.

이러한 영구배수 처리방식의 설계시는 지반의 투수계수 등 관련자료를 이용하여 지반 내로 유입되는 지하수량을 여러 가지 방법으로 계산·분석한 후, 효과적인 배수계획을 수립하여야 한다. 이 방법의 장점은 기초 슬라브의 경제적인 단면설계가 가능하고 이로 인한 토공량 절감

및 시공이 간편하여 공사비 절약에는 유리하나, 인위적으로 설치한 배수층이 시간의 경과와 함께 기능이 감소되어 정기적인 유지관리가 요구되고 있어 항구적인 대안으로는 비효율적이다.

외부배수처리공법은 건축물의 지하외벽 면의 소정의 심도를 갖는 배수층을 만든 후, 유공관을 통하여 집수정으로 지하수를 모은 후 펌프에 의해 배수처리를 하는 공법으로 건축물의 외부의 지하수위 조절로 최하층 슬라브에 작용하는 양압력을 감소시키는 기능을 한다.

이 방법은 지하 구조물 전체의 안정성에는 효과적이거나 배수관이나 집수정 부위의 연결부에 대한 시공관리에 주의를 기울여야 하고, 외부에 배수관 및 일정수위를 유지시키는 인공수위 조절, 차수막 및 집수정 등을 설치할 수 있는 최소공간이 필요하며 강제배수에 의한 수위저하는 인접구조물의 침하 등 유해여부를 고려하여 사용하여야 한다.

(4) 내·외부 혼합배수 처리공법

이 공법은 내부 및 외부배수 처리공법의 부분적인 장점을 취하여 현장조건에 적합하도록 지하수압을 조절하는 공법이다. 양호한 암반층이 조기에 출현하여 대심도 굴착에 따른 외벽의 최소화를 기대할 수 있는 조건일 경우, 지하외벽 쪽에 임의의 인공 지하수위를 선정하고 지하외벽 단면을 감소시켜 전체적인 공사비 절감을 기대할 수 있다. 아울러 내부에는 기초 바닥 영구 배수시스템이 설치된다. 또한 이 방법은 외부에 인공 지하수위를 유지하고 내부에는 최소의 영구 부력앵커를 설치하여 수압에 대처하는 방법으로 응용될 수 있다.

(5) 혼합공법

혼합공법은 현장의 지질과 지하수의 양, 투수계수 및 건물의 형상에 따라 구조계산을 실시한 후, 각 공법의 장점을 이용한 혼합방식이다. 즉, 영구앵커공법과 영구배수

공법, 구조물 자체의 사하중을 증가시키는 방법과 영구앵커공법 등이 많이 사용되고 있다. 이러한 혼합방식은 각 공법의 장점을 활용할 수 있다는 장점이 있기는 하지만, 구조계산이 적절치 못했을 경우 집중 양압력을 받는 취약 부위가 발생하여 건물의 균열 등을 유발할 수 있다는 단점을 아울러 지니고 있다.

3. 현장계측사례 분석

(1) 개요

본 장에서는 양압력을 측정하기 위해 4개소의 아파트 지하주차장 기초저면에 계측기를 설치함으로써 양압력에 대한 합리적인 평가를 하고자 하였다.

중부지방의 4개 현장을 선정하여 지하구조물 기초바닥에 계측기를 설치하여 현장계측시험을 수행하였다. 구조물바닥에 작용하는 양압력에 대한 위치별 영향을 파악하기 위해 계측기 배치시, 기초바닥 모서리부와 중앙부 등 여러 지점을 선정하였고, 인접하천부근의 현장을 선정하여 침투영향을 파악하고자 하였다.

(2) 지하구조물에 작용하는 양압력 분석

계측기간 동안의 발생된 최대강우강도는 259~332 mm/day(A현장), 163.5~261.6mm/day(B현장), 94~176.5mm/day(C현장) 및 171.8~202.8mm/day(D현장)로 측정되었다.

측정결과, 8월초 또는 9월말에 계측된 최대값은 2.87~7.46t/m² 정도, 강우량이 작은 3월에 측정된 최소값은 안양현장(3.51~4.85t/m²)을 제외한 나머지 현장에서는 1.0t/m² 이내의 값을 나타냈다.

대체로 각 현장에서 계측된 양압력은 강우량이 클수록 증가되는 양상을 보이고 있는데, 최대강우강도가 332mm/

표 1. 계측현장 조건 비교

구 분	A현장	B현장	C현장	D현장	비고
기초지반	자갈층	자갈모래층~풍화토층	풍화토층	연암층	
인접하천	○ (66.0m ^l)	○ (102.6m~178.5m)	×	×	
영구배수시설	×	×	×	○	
구조물 높이	8.65m(지하2층)	8.5m~11.8m(지하2층~3층)	8.7m(지하2층)	9.2m(지하2층)	
계측기 개수	5	3	5	5	
계측당시 지하수위	2.55m	3.6~5.3m	1.6m	3.2m	기초바닥에서부터 상향

1) () 은 인접하천 둔치부로부터 구조물 중심까지의 이격거리

day 정도 관측된 A지역에서는 갈수기(약 1.0t/m² 내외)에 비해 4배 이상(4.0~5.0t/m²)의 양압력이 증가한 것으로 관측되었다. 또한, 풍화토이상의 지반보다 자갈층, 자갈 모래 또는 풍화토층의 기초지반의 경우가 강우량이 발생한 후 1~2일시점에서 양압력이 증가되는 것으로 나타났다(그림 5). D현장에서는 강우량과 관계없이 양압력이 일정하게 나타났는데, 이는 사전에 양압력 대책방안으로 시공된 영구배수공법의 영향을 받은 것으로 분석되었다.

그림 6은 강우강도에 따른 양압력의 관계를 나타낸 것으로 50~100mm/day까지 선형으로 증가하다가 그 이상의 강우강도가 발생할 경우 증가량이 둔화되는 것으로 계측되었다.

지하구조물에 작용하는 양압력은 안전측으로 지하수위가 지표면까지 포화된 상태의 정수압(A)으로 적용하거나

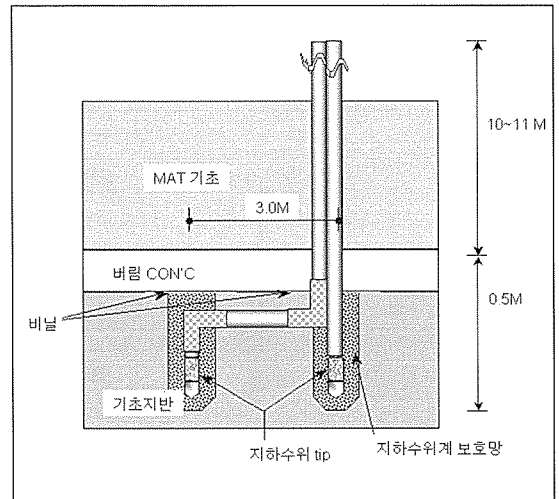
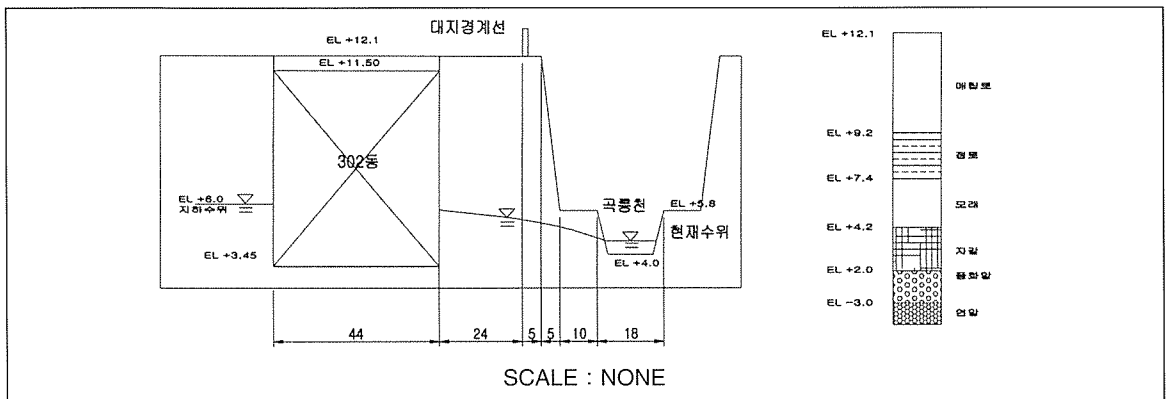


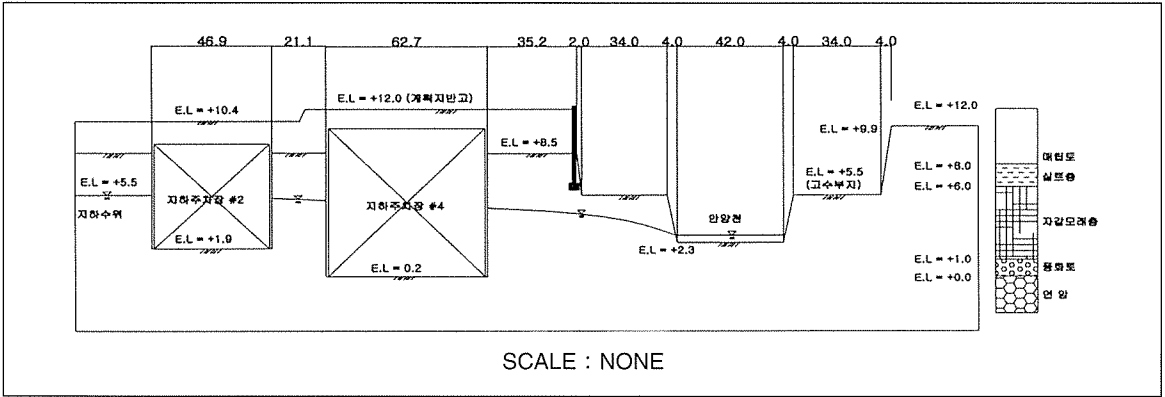
그림 2. 양압력 설치 단면도

지반조사시 측정된 지하수위로 계산된 정수압(B)로 적용하고 있으므로, 본문에서는 지하구조물에 작용하는 양압



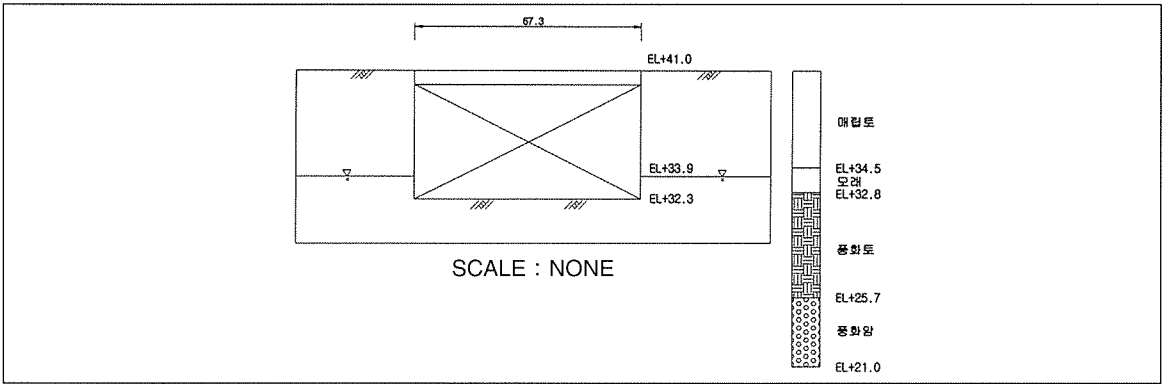
SCALE : NONE

(a) A현장 단면도



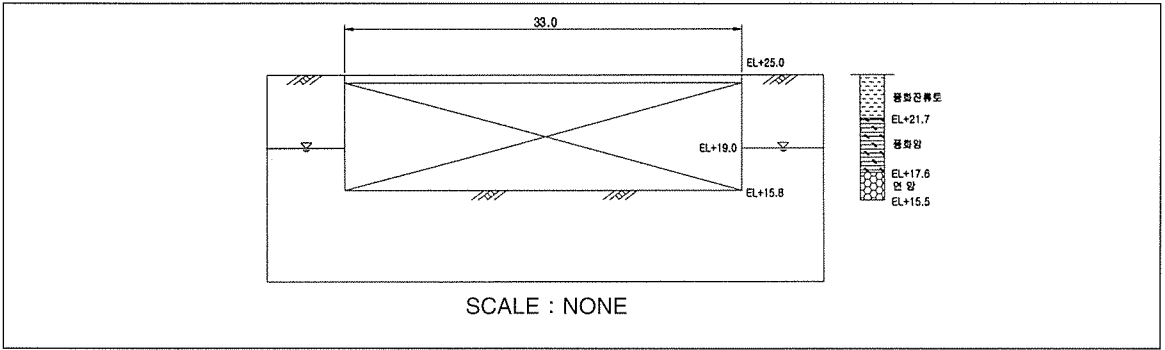
SCALE : NONE

(b) B현장 단면도



SCALE : NONE

(c) C현장 단면도



SCALE : NONE

(d) D현장 단면도

그림 3. 각 현장 지하구조물 단면도

력을 계측한 결과와 상기의 정수압과 비교 분석하였다.

통상 정수압(A)로 설계되는 성토지반 등의 투수성이 양호한 지반의 경우 본 현장에 계측된 양압력들은 정수

압(A)의 약 72% 정도를 초과되지 않았으며, 1년동안 구조물에 작용하는 양압력의 범위가 매우 큰 것으로 나타났다.

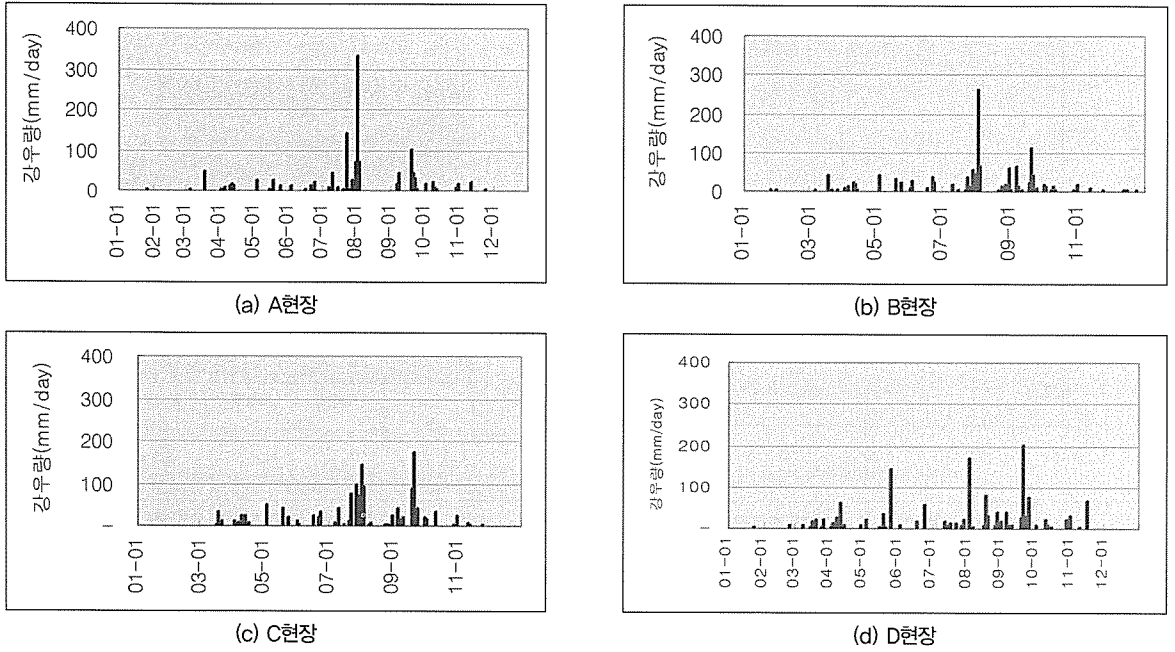


그림 4. 계측현장의 강우량 분포

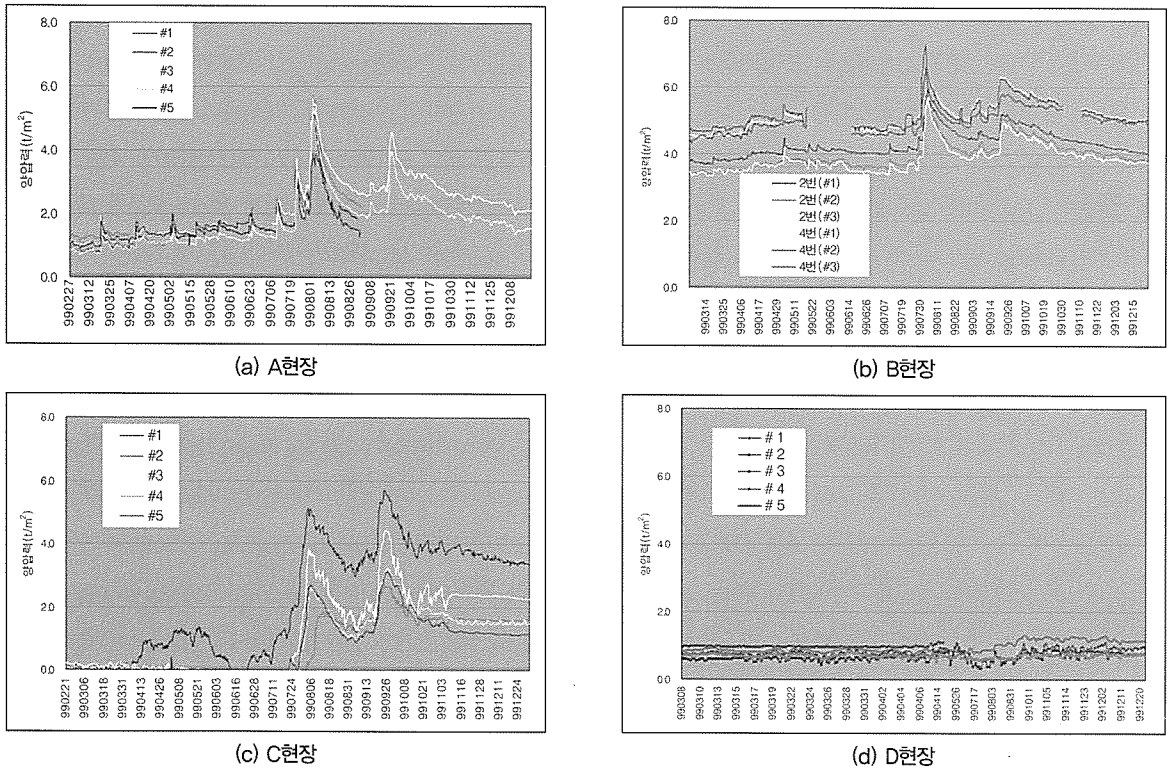


그림 5. 각 현장에서 계측된 양압력 변화

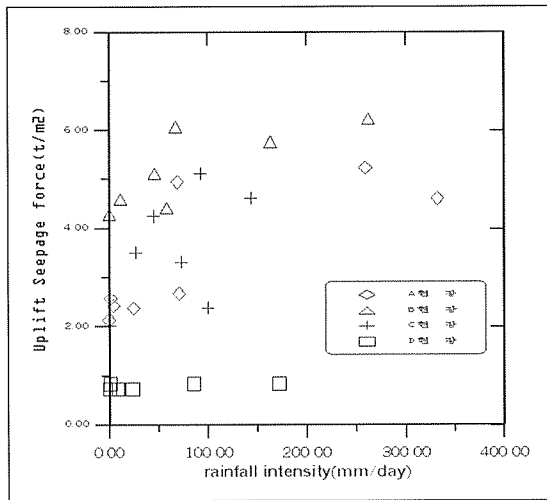


그림 6. 강우강도에 따른 양압력 계측값

따라서, 지하구조물 설계시 투수성이 양호한 기초지반에서 정수압(A)로 적용할 경우 과다설계를 할 가능성이 있고 정수압(B)로 할 경우 조사시기에 따라 양압력이 적용값보다 초과할 수 있으므로 설계에 유의해야 하나, 일정한 양압력이 구조물에 작용시키는 영구배수공법의 경우 설계에 반영해도 무방할 것으로 판단된다.

4. 결론

- (1) 대체로 각 현장에서 계측된 양압력은 강우량이 클수록 증가되는 것을 확인할 수 있었으며, 강우량에 따른 양압력에 영향을 주는 시간은 약 1~2일 정도로 관측되었다. 또한, 강우강도에 따른 양압력의 관계를 나타낸 것으로 50~100mm/day까지 선형으로 증가하다가 그 이상의 강우강도가 발생할 경우 증가량이 둔화되는 것으로 계측되었다.
- (2) 1년 동안의 계측결과로 볼 때, 정수압(A)로 설계되는 투수성이 양호한 성토지반의 경우 본 현장에 계측된 양압력들은 정수압(A)의 약 72% 정도를 초과되지 않았으며, 구조물에 작용하는 양압력의 범위는

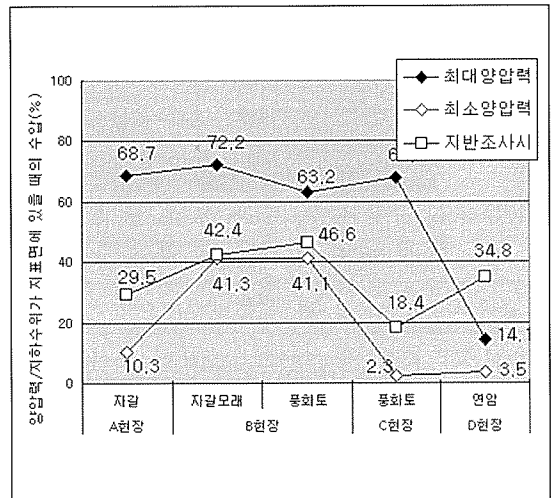


그림 7. 1년 동안 발생된 양압력

시기에 따라 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. 또한, 영구배수공법이 양압력 저감효과가 있으므로 지하구조물 설계시 이를 고려하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

- (3) 도심지 지하굴착에 의한 구조물의 설계시 필연적으로 수반되는 지하수압의 처리와 양압력에 대한 고려 문제는 지금까지 너무 단순한 방법에 의한 접근이 이루어져 과다설계로 인한 예산의 낭비문제와 과소설계로 인한 구조물의 위험성 등의 문제가 발생하고 있다. 따라서, 본문에서는 계측결과를 토대로 구조물에 작용하는 양압력에 대한 정량적인 평가를 시도하였으며, 향후 보다 다양한 계측자료 확보 후 파괴확률론 및 인공신경망 등을 이용한 평가와 더불어 지하수 침투해석이론에 대한 보완연구가 필요한 것으로 판단된다.