

연약지반 기술의 현황과 발전방향

이우진*, 이강일*, 유재명**

1. 서언

최근 항만과 공항용 부지, 택지, 산업기지 등의 수요가 증가함에 따라 해안 인근 연약지반 상의 건설이 늘어나고 있으며, 이러한 연약지반의 활용이 증가함에 따라 체계적이고 경제적인 개량을 위하여 연약지반에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 연약지반에 대한 조사와 실험적 특성 분석의 요구, 신뢰성 있는 데이터 분석을 통한 지반상수의 추정, 연약지

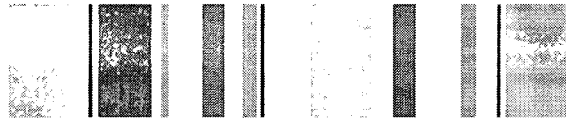
반의 특성을 정확히 표현하고자 합리적인 흙의 모델 적용, 연약지반의 장기적인 거동을 만족하는 합리적이고 경제적인 지반개량공법의 선정 등이 강조되고 있다.

본 고에서는 연약지반의 공학적 접근을 위한 연약지반의 거동 및 해석, 연약지반 대책공법으로써 지반개량공법의 선정 방법, 지반개량공법으로 국내에서 가장 많이 적용되고 있는 연직배수공법의 설계·시공 측면에서의 제반 문제점 및 개선사항에 대하여 고찰하였고, 연약지반 개량방법 및 연약지반 거동측정을 위한 계측분야로 구분하여 관련기술의 최근 현황 및 전망에 대하여 서술하였다.

* 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수
(woojin@korea.ac.kr)

*1 대전대학교 건설시스템공학과 부교수
(kilee@daejin.ac.kr)

** 도담 E&C 상무 (jmyu7@lycos.co.kr)



연약지반 기술의 현황과 발전방향

2. 연약지반의 거동 및 해석

일반적으로 연약지반이란 상부구조물을 지지할 수 없는, 즉 변위가 많이 유발되는 혹은 강도가 약한 지반으로 정의된다. 연약지반과 관련된 지반공학적 문제의 대부분은 지반의 변위와 강도의 문제로부터 발생한다. 지반에 전달되는 구조물 하중에 의해서 지반변형이 과대하게 유발되거나, 전단응력이 지반이 견딜 수 있는 전단저항보다 크게 유발될 경우 전단파괴 등과 같은 지반공학적 문제가 발생할 가능성이 있다. 따라서 연약지반 위에 구조물을 설계 및 시공하고자 할 때 연약지반의 변형 및 강도특성에 대한 정확한 이해를 바탕으로 발생가능한 문제점을 사전에 예측하여 방지할 수 있도록 해야 한다. 흙의 변형 및 강도특성과 관련된 이론 연구는 흙 자체의 거동특성을 모사하기 위한 구성 모델 개발 부분과 연약지반 및 지반개량공법이 적용된 지반에 대한 설계 및 해석을 위한 모델링 기법 및 수치해석 개발 부분으로 나눌 수 있다.

2.1 흙의 구성모델

1950년대 후반 흙의 거동을 수학적으로 표현하는 연구결과들이 발표되기 시작하였으며, Cambridge 대학 연구진이 한계상태 이론에 근거한 Cam-Clay 구성모델이 제안된 이래로 이를 수정 보완된 모델들이 개발되어 왔고, 이와 병행하여 경화현상, 이방성, 동적 거동특성, 시간 의존적 거동특성 등을 고려하기 위한 수많은 모델들이 개발되어 왔다. 흙의 구성모델의 개발과 동시에 수치해석 기법에 대한 연구 또한 컴퓨터의 발달로 인해 활발히 진행되었다.

정규압밀 혹은 약간 과압밀된 점토를 대상으로 개발된 Cam-Clay 모델은 비교적 단순한 하중변화 상

태에 대하여 적용성이 있으며 기본적으로 등방경화 현상을 나타내는 경우만을 묘사하고 있다. Cam-Clay 모델의 예측치와 실제 실험 결과가 일치하지 않는 결점을 보완하기 위해 Roscoe와 Burland (1965, 1968)는 수정 Cam-Clay 모델을 발표하고 이를 보완하였다. 또한 Dafalias(1987)은 등방응력에 대한 한계상태 이론 구성식을 이방응력에 대한 이론으로 발전시켰다. 최근에는 복잡한 하중조건 및 이방성, 이방경화 및 연화현상 등을 고려하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

제안된 구성 모델은 연구자의 관점에서 흙의 대표적인 특징을 수학적 표기를 한 것이며, 흙의 거동에 관한 모든 특성을 표현한 것은 아니기 때문에 사용되는 구성모델에 따라 다른 결과를 나타내므로, 정밀도가 높고, 통합적인 구성 모델의 확립이 필요하지만 복잡한 구성 모델일수록 요구되는 지반상수도 많아지기 때문에 그 결정법이 어려워지는 것이 현실이다. 특히 지반상수를 얻기 위해 많은 노력이 필요로 하는 특수한 시험법이 요구되거나 시행착오적으로 결정해야하는 구성 모델은 실무적으로 사용하기 어렵기 때문에, 흙의 복잡한 거동을 정밀하게 규명하는 노력과 동시에 현장의 실무자가 쉽게 적용할 수 있는 간단한 시험으로 지반상수를 도출하여 흙의 거동을 실용적으로 표현할 수 있는 구성 모델을 개발하는 것 또한 필요하다.

2.2 수치해석 기법

연약지반에 성토구조물 등의 외적하중이 작용할 때 지반의 변형상태와 구조물의 안정성 여부를 검토하기 위해 현장의 상황에 적합한 경계조건에 따른 응력-변형 해석을 수행하여야 한다. 복잡한 현장조건과 불균질한 지반을 단순한 흙의 구성모델로 모사

특집

할 때 발생하는 오차는 피할 수 없으므로, 흙의 변형 및 강도특성을 적절하게 모델화 하여 합리적인 수치 해석을 수행하는 것이 중요하다.

지반의 변형 문제를 다루는 경우 점토의 압밀현상은 연약지반을 대상으로 하는 설계·시공시에 반드시 마주치는 문제이다. 압밀침하 검토에는 Terzaghi의 1차원 압밀이론을 적용하는 것이 일반적이나 1차원 압밀이론에는 적용조건에 제약이 있고, 현장에서의 침하관측 결과를 충분히 설명하지 못하는 경우도 있다. Biot의 다차원 압밀이론은 3차원 압밀문제를 대상으로 하여 흙의 평형조건과 간극유체의 연속조건으로 3차원 압밀방정식을 유도하였다. 그 이론의 발표당시는 해석적인 수법으로만 해를 구할 수 있었고 구한 해는 단순한 조건의 문제에 한정되었으나 컴퓨터의 발달에 따라 종래 수계산으로 불가능하였던 복잡하고 방대한 계산도 신속하고 정확하게 할 수 있도록 되고, 컴퓨터를 사용하여 수치해석 기법을 적용하면 이론적으로는 어떠한 복잡한 조건에 있어서도 해를 구할 수 있게 되고, 따라서 수치해석 기법을 지반을 지배하는 각종 방정식의 해법에 적용하는 시도가 많아지게 되었다.

연약지반과 관련된 수치해석의 적용에 대한 연구는 오래 전부터 활발하게 진행되어온 연유로 최근에는 이들의 적용성 향상을 위한 간편법 등의 연구와 실제 적용시 현장 적용성을 높이는 방향의 연구가 진행되고 있다. 특히 다양한 연약지반 개량공법 적용시 가능한 해석방법에 대한 연구도 진행되고 있다.

수치해석 기법들의 현장 적용의 성공여부는 수치해석 방법에 내재되어있는 현장 시공단계 및 현장조건, 하중변화 특성 등과 같은 고려사항의 적합성과 연약지반 자체의 거동특성 모사를 위해 적용된 구성모델의 적정성 및 설계변수 도출의 간편성에 좌우된다. 또한 지반에 대한 해석의 모델링이 정확히 실시

되었다고 할지라도 실제 시공에 있어서는 환경이나 건설장비 자체의 제약 등으로 인하여 해석조건이나 설계대로 정확히 시공하기는 어렵기 때문에 시공 중 계측된 데이터를 토대로 이를 설계에 반영하여 재검토를 실시하여 검증을 하여야 한다.

2.3 전망

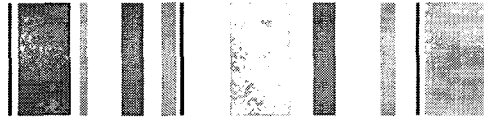
연약지반과 관련된 이론 연구는 점차 다양해지는 환경변화에 따른 연약지반의 거동특성을 모사하기 위한 흙의 모델 개발이 꾸준히 이루어지고 있고, 컴퓨터의 발전과 동시에 날로 발전되고 있는 수치해석 기법들을 적용하거나 기존의 수치해석 방법의 적용성을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 복잡한 이론적인 연구 성과에도 불구하고 수치해석에 대한 신뢰성이 저평가 되고 있는게 현실이다.

연약지반의 특성을 평가하기 위해 적용되는 현장 시험 결과 분석시 이론적인 연구 및 수치해석 기법들이 연계되어 이용되고 있다. 그리고 최근에는 여러 자료들을 활용하여 연약지반과 관련된 설계변수를 보다 신뢰성 있게 추정하고자하는 노력들이 진행되고 있다. 이러한 연구들이 지속적으로 진행된다면 재료적으로 점차 복잡해지는 연약지반 및 지반개량 재료와의 상호작용 효과 등을 적절히 고려한 해석방법들이 개발될 뿐 아니라 그 적용성도 점차 향상될 것으로 전망된다.

3. 지반개량공법의 선정

연약지반에서 구조물 시공 전후에 문제가 되는 것은 지반이 건설하는 구조물 등에 의한 하중에 비해





연약지반 기술의 현황과 발전방향

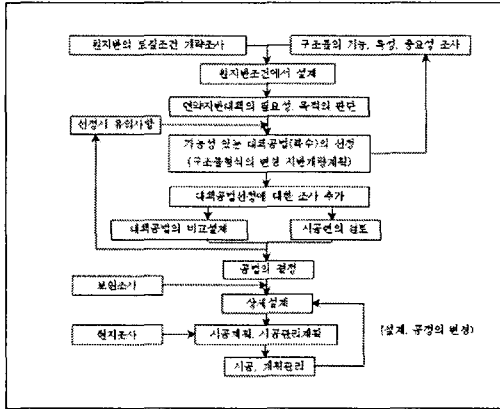


그림 1. 공법의 선정, 설계, 시공의 흐름도

전단강도가 작고 보통의 지반에 비하여 하중에 대한 체적 압축량이 크거나 지반진동 등에 의해 간극수압의 상승이 현저하여 이로 인해 지반의 내력이 급격하게 저하하기 때문이다. 이와 같은 경우에 연약지반의 공학적 성질을 개선하여 안정성을 증대시키는 것을 지반개량이라 한다. 연약지반에서 발생하는 여러 문제점의 허용여부는 구조물의 사용목적 및 중요성, 공사기간, 경제성, 환경조건 등과 관련되므로 일괄적으로 표현할 수 없으므로, 연약지반 개량공사 필요유무의 판단은 구조물의 기능, 기초형식, 공기 등을 고려하여 종합적인 판단을 거쳐 결정 하여야 한다.

3.1 지반개량공법의 선정절차

연약지반 위에 구조물을 건설하기 위해서는 대상 지반에 대한 지층상태 및 역학적 특성을 조사하고 구조물이 요구하는 기능성 및 안정성이 확보되지 않는 경우에는 연약지반대책을 계획한다. 대책의 목적, 대상토의 성질, 공사기간, 주변 환경에 미치는 영향 등을 고려하여 적용 가능한 공법을 선정하며 최종적으로 안정성, 시공성, 경제성 및 친환경성의 관점에서 최적공법을 선정한다.

3.2 공법 선정시 유의사항

연약지반 대책으로서 지반개량 공법을 적용하는 경우에는 아래와 같이 다양한 조건을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 연약지반 대책공법의 선정은 공학적 판단과 경험을 요구하는 작업으로 본 절에서는 선정에 관한 일반적인 예비지식과 공통사항을 기술한다.

(1) 구조물의 특성

파괴해도 지장 없는 구조물은 존재하지 않으나 부분적인 파괴가 인명, 경제, 환경 등에 곧바로 큰 영

표 1. 공법선정에 따른 유의사항

유의사항	내용
구조물의 특성	구조형식, 규모, 기능, 중요도
연약지반의 특성	연약토의 종류, 연약층의 범위, 심도, 지층상태, 지지층의 심도와 경사, 각 층의 공학적 특성
개량의 필요성	가설적 개량, 영구적 개량
개량목적	강도증가, 침하축진, 침하 및 액상화 방지, 지수(止水)
지반개량공법의 특성	설계의 신뢰성, 시공능력, 시공성, 시공기계나 재료 수급성, 효과판정의 난이도
공사기간과 환경적 측면의 제약	공사기간, 오염, 진동, 소음
종합적인 경제성	기타 공법과의 비교
기타	설계변경의 난이, 장래 계획과의 연계성

특집

향을 주는 구조물과 그렇지 않은 구조물이 있다. 예를 들면 매립지 호안은 다소 변형이 되어도 기능을 상실하지 않지만 같은 매립지에 설치된 크레인 기초 등은 변형에 민감하다. 이와 같은 구조물의 특성은 연약지반 대책의 기준이나 개량규모를 결정할 때 중요한 고려사항이 된다.

(2) 연약지반의 특성

연약지반의 특성은 구조물 조건과의 조합으로 대책공법 실시의 필요성 유무를 판단하기 위해서는 원지반 조건에서의 설계검토를 할 필요가 있다. 대책이 필요하다고 판단될 경우에는 개량 목적과 원리를 검토하여 최적공법을 선정한다.

예를 들면 압밀배수공법은 사질토지반에 대해서는 비효율적이며, 다짐공법은 포화점성토에 적용시 지반의 강도저하가 발생하고 사질토의 경우에도 세립분의 함유량에 따라 기대 효과가 현저히 변화한다. 혼합처리의 경우에는 흙의 유기물 함유량과 지하수의 pH가 개량효과에 크게 영향을 미치는 경우가 많다. 또한 지층조건도 공법의 선정에 무시할 수 없는 요인이다. 압밀계수가 다른 다층의 연약점토층이 존재하는 경우에는 이 지층 특성에 따라 압밀속도가 크게 변화하며 투수층이 혼재되어 있는 경우에는 특히 현저한 차이가 있다.

(3) 개량의 필요성

개량의 필요성과 아래에 기술하는 개량의 목적은 밀접한 관련이 있으며 원지반 조건(미개량 지반조건)에 대한 검토를 통해서 명확하게 알 수 있다. 시공 중에는 가설(일시)적인 안정, 지수 또는 배수 등의 대책이 필요하나 완성 후 구조물의 영구적인 기능 확보를 위해 선정될 공법은 다를 수 있다.

(4) 개량의 목적

원지반에 대한 개량목적은 침하대책과 안정대책 중 어느 쪽에 주목적이 있는지를 명확히 할 필요가 있다. 이에 따라 보다 효율적인 공법선정이 이루어질 수 있으며, 또한 개량의 목적과 개량의 기준도 매우 중요하다. 예를 들면 침하가 문제로 되어도 허용 잔류침하의 크기에 따라 선행 재하중의 크기와 재하 기간은 달라지고 부득이한 경우에는 지반개량의 한계를 넘는 기초구조물에 대처할 필요도 있다.

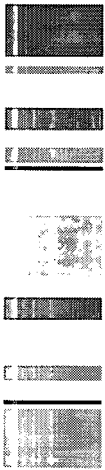
(5) 연약지반 개량공법의 특성

공법의 특성은 다양한 관점에서 공법선정에 영향을 미친다. 설계의 신뢰도, 설계에 소요되는 비용(요구되는 사전조사, 해석방법), 시공능력(가능한 심도, 시공규모), 재료 및 장비 수급의 용이성, 인력의 작업수행능력, 시공의 확실성, 시공중 문제가 발생할 경우에 설계변경(시공계획 변경)의 용이성 등이 문제가 된다.

(6) 공사기간과 환경적 측면의 제약

공사기간은 공법의 선정 폭을 좌우하는 요인이 된다. 공사기간이 충분하게 확보되는 경우에는 적은 공사비로 개량효과를 기대할 수 있는 선행재하공법 등을 적용할 수 있으며, 공사기간이 짧은 경우에는 연직배수공법보다는 고치환의 샌드컴팩션파일 공법 또는 심층혼합처리 공법 등이 일반적으로 적용되고 있다.

최근의 건설공사에서는 공법선정에 있어서 환경에 대한 배려가 큰 요인이 된다. 원지반을 강제적으로 배제하는 다짐공법과 생석회 말뚝공법에서는 타설 방향에 따라 기존 구조물에 변형을 일으킬 수 있으며, 압밀에 의한 개량공법은 잔류침하에 유의하여야 한다. 또한 각종의 약액을 이용하는 공법의 경우



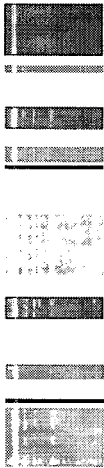
연약지반 기술의 현황과 발전방향

표 2. 개량 목적과 적용지반에 의한 대책공법

개량 원리	공법의 명칭	개량 목적	적용 지반	
다짐	샌드콤팩션파일	· 액상화방지	점토, 사질토, 유기질토	
	로드콤팩션	· 침하저감		
	바이브로플로테이션	· 지반 강도증가	사질토	
	중추낙하다짐	· 침하감소 · 액상화 방지	사질토	
	폭파, 전기충격			
동압밀				
고결 열처리	표층혼합처리	· 도로 노상 · 노반 안정처리	점토, 사질토, 유기질토	
	심층혼합처리	· 활동파괴 방지		
	약액주입	· 침하 감소		
	동결	· 전단변형 방지 · 허빙 방지		
보강	복토	· 도로 노상 · 노반 안정처리	점토, 유기질토	
	표층피복	· 국부파괴 · 국부침하 방지		
경량화	경량자재	· 지지력 향상	점토, 유기질토	
하중균형	압상토	· 전단변형 억제		
하중분산	침상	· 침하억제		
	쉬트, 네트	· 활동파괴 방지		
	샌드매트	· 트래커빌리티 확보		
	표층혼합처리			
치환공법	굴착치환	· 활동파괴 방지	점토, 사질토, 유기질토	
	강제치환	· 침하 감소		
	폭파치환	· 전단변형 억제		
압밀 배수	프리로딩		점토, 유기질토	
	연직배수 공법	샌드드레인		· 잔류침하 감소 · 지반 강도증가
		팩드레인		
		플라스틱드레인		
	지하수위 저하공법	웰포인트	사질토	
		딤웰		
		진공압밀	· 압밀촉진 · 잔류침하감소 · 지반 강도 증가	점토, 유기질토
	생석회 말뚝			
	전기침투			
	반투막			
	쇄석말뚝	· 액상화방지	사질토	
	표층배수	· 표층지반강도 증가	점토, 유기질토	

특집

는 약액이 지하수를 오염시켜 사회적으로 물의를 일으킨 사례도 있으므로 이에 대한 세심한 주의가 요구된다. 과도한 소음과 진동도 무시할 수 없는 요인으로 조건에 따라서는 주변 영향을 경감시킬 수 있는 대책을 실시하고 이에 따른 공법 선정이 이루어져야 한다. 표 2에는 개량목적과 적용지반에 따른 대책공법의 예를 나타내었다.



4. 연직배수공법의 문제점

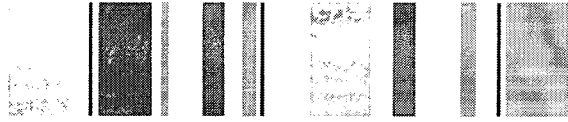
우리나라에서 주종을 이루는 지반개량 공법 중 대표적인 예가 샌드드레인(sand drain, SD), 플라스틱보드드레인(plastic board drain, PBD), 팩드레인(pack drain, PD), 모래다짐말뚝(sand compaction pile, SCP) 등이다. 이른바 연직배수(vertical drain)공법이라고 총칭되는 이 공법은 두꺼운 연약지반에 연직배수재를 일정간격으로 삽입하여 다단계의 재하공법 즉, 성토를 샌드매트(sand mat) 위에 시공하면서 배수재간의 수평방향의 과잉간극수압을 흡수하여 배수시킴으로서 침하를 촉진시켜 지반 전단강도의 향상을 도모하여 성토를 완성시키는 공법이다. 이 가운데 모래다짐말뚝은 지반의 압밀침하를 촉진하는 목적보다는 강성이 매우 큰 모래 기둥을 지중에 다수 설치함으로써 복합지반을 형성하려는 의도가 크다. 이경우를 제외하고는 이들 연직배수공법은 그 이론적 배경이 Terzaghi의 압밀이론에서 출발한 만큼 거의 Terzaghi의 압밀이론의 발표 시기(1925) 만큼 오래 되었다.

4.1. 연직배수공법에 대한 유효·무효론

1934년 미국의 Porter에 의해 최초로 Sand

Drain(이하 SD)공법이 시공된 이후 1969년까지 많은 실적이 있었는데 이에 관한 논문이 100편 이상이 발표되었다. 그러나 여기에는 대부분 성공 사례만이 논의되고 있다고 Casagrande(1969)는 전제하면서 1954년 Housel이 무효론을 제기한 후 가장 강력한 부정적 견해를 발표하였다. 그는 SD주변의 교란영향으로 투수계수가 저하됨으로서 SD의 유효성이 낮아지고 피트(peat)에 대해서는 전혀 효과가 없으며 매우 예민한 점토에 대해서는 오히려 해롭고 mud flow를 유발시킨 사례를 들었으며 반드시 무처리 상태의 동일 지반과 비교해야 한다고 주장하였다. 이에 대해 Broms등(1970)은 Casagrande가 인용한 Hansbo의 현장 비교 실험은 그 후 10년간의 관측 데이터가 있으며 분명히 침하속도에 큰 차이가 있어 유효하다고 주장하였다. 이와 같은 논쟁의 배경은 그동안 현장관측 자료가 축적되어 논란의 여지가 발생한 것과 유효론만 믿고 실제의 실패를 단순히 실험치나 계산의 잘못 또는 관측의 부적절 등으로만 생각하고 공표하지 않고 있다가 재검토하게 된 것으로 이해된다.

일본에서는 1952년의 첫 시공을 효시로 현재까지 세계에서 유례없는 시공실적을 보이고 있다. 그러나 초기에는 기초적 지식이 충분히 이해되지 않는 상태에서 시공되어 많은 문제점이 발생하였지만 이는 시공상의 결함으로 보고 이 공법의 유효성을 의심하지 않았으나 이 공법이 연약지반 처리공법의 주종으로서 정착되어 이용되면서 현장 비교시험을 통해 비로소 도로공단이나 국철의 기술자간에 무효론이 대두되고 큰 충격으로 받아들여졌다. 논의의 초점은 시험성토에서 SD시공 구간과 무처리 구간의 침하상태를 비교해 본 결과 거의 침하에 의의가 있는 차이가 없었고 SD를 시공하지 않아도 같은 속도의 침하가 발생했을 것이라고 주장하였다.



연약지반 기술의 현황과 발전방향

동시에 미국에서의 토론결과에 대한 영향을 받아 지금까지의 현장 관측자료의 재검토를 통해 Saito(1968), Mochinaga(1978)등에 의해 무효론이 강력히 제기되었다. 이들의 주장은 무처리 구간과 SD시공 구간의 시험성토 결과 성토의 침하속도에는 거의 차이가 없으며 이 공법은 침하축진에는 효과가 없지만 처리 후 강도의 증가에는 의의가 있다고 결론을 내리고 도로공단이나 국철에서는 이 지침이 통용되고 있다.

반면에 항만이나 간척, 해안매립 등 바다관련 공사관계자 측에서는 초기부터 각종의 설계시공, 실패 등의 경험을 통해 큰 자신감을 갖고 연직배수공법의 유효성을 확신하고 있으며 무효론자가 제시하고 있는 시험성토의 대부분이 SD의 효과가 없는 피트나 이탄층에 축조되고 있으면 매립과 같이 1차원적 압밀조건이 아니고 도로와 같은 부분 재하 조건이기 때문이며 특히, 무처리 시공의 경우는 침하가 빨리 발생하지만 강도의 증가가 큰 차가 없는 점과 무엇보다도 단시일에 그 광대한 유효 개량실적이 SD공법의 유효를 입증하고 있다는 것이다. 일본에서는 이와 같은 두 대립의 논쟁이 기본적인 관점에서는 변화는 없고 각각 대상토질이나 토성에서 차이가 있기 때문이라고 보는 것 같다.

연직배수공법은 과거 여러 차례에 걸쳐 이 공법의 유효성과 무효성에 대해 전술한 바와 같이 미국과 일본 등 여러 곳에서 논쟁이 있었고 아직도 그 결론을 내리지 못하고 있다. 우리나라에서도 수많은 시공예가 있으나 침하가 예정대로 잘 진행되지 않거나 거나 계산치와 차이가 있다거나 하는 이야기는 들은 바 있지만 연직배수공법 자체가 효과가 없다거나 무용론을 주장하는 이야기나 연구는 아직까지 없었다. 그 이유는 우리나라의 경우 어디에서나 이 공법은 유효한 공법이라고 일단 믿고 의심하지 않고 있기

때문이다. 그러나 1997년 연약지반 세미나 및 초청 강연회에서 박병기 교수께서 이 문제에 대해 국내 최초로 “연약지반 개량공법의 실제와 문제점”이라는 주제를 통해 미국과 일본에서 제기되고 있는 연직배수공법에 대한 유효·무효론에 대한 대표적인 사례 및 논쟁의 요점을 정리하여 발표하였으며 국내의 경우도 이 분야에 대한 집중적인 연구 및 논의의 필요성을 강력히 제기한 바 있다. 스웨덴의 왕립지질연구소 SGI(1981)에서 주관하고 있는 Vasby와 Sca-Edeby의 대규모 시험성토의 장기침하 관측 시험성토의 경우 1940년대 이후 현재까지 무처리 지반과 연직배수재 시공지반에 대해 장기 침하를 관측하고 있는 시험성토가 있으며 우리나라에서도 1970년대 이후 현재까지 수많은 연직배수공법의 실적을 보유하고 있다는 측면에서 이와 같은 장기시험의 의의를 이해하고 추진해줄 기관이 반드시 필요하다고 판단된다.

4.2 연직배수공법의 문제점 및 개선사항

(1) 침하문제

연직배수공법은 여러 개량공법들 가운데 유일하게 이론이 선도한 개발공법일 것이다. 인위적으로 연약지반에 타설한 배수재에 의해 배수거리를 단축하고 압밀을 촉진하는 공법이므로 침하축진이라는 관점에서 볼 때 반드시 무처리 지반의 압밀현상과 대비시켜야 그 효과를 판단할 수 있다. 우리나라에서 몇 개 안되는 시험성토에서 무처리 시험성토를 생략한 경우를 볼 수 있는데 무엇을 기준으로 그 효과를 판단 할 것 인가가 문제가 될 것이다. 무처리의 경우는 거의 1차원 압밀이론에 의해 예측하고 연직배수공법의 경우는 Barron이론에 의한 것이 상례이다. 이 결과 무처리의 경우는 예측값 보다 실제 침하

특집

가 더 빨리 진행되고 침하량은 대차가 없다는 것은 잘 알려진 사실이다.

한편 SD에서는 수평방향으로 배수가 진행되므로 Cv대신 Ch를 써야 한다는 것은 원칙이다. 퇴적조건으로 볼 때 Cv<Ch인 것은 분명하지만 SD타입에 의해 교란을 받아 Ch가 저하되므로 Cv=Ch로 보고 계산한다. 그러나 무처리 지반을 포함하여 1차원 압밀이 일어나는 성토 조건을 제외하고 도로와 같은 2차원 구조물이 재하되는 경우는 배수가 횡방향으로도 일어나므로 이때 Ch값에 의해 침하 속도가 결정된다. 침하 예측에 사용하는 이와 같은 Cv(또는Ch)는 압밀시험을 통해 결정하는데 내경 60×20mm의 압밀시료가 실제의 두꺼운 점토층의 거동을 표현하는 데는 1)시료채취, 공시체 제작까지의 교란, 2)벽면마찰이나 시험 방법의 문제, 3)점토층을 대표할만한 시료인가, 4)여기서 얻은 상수를 실제에 적용하는데 있어서 상사법칙이나 크기영향(scale effect)등과 같은 문제가 있음을 인식해야 한다.

결국 상기와 같은 침하문제는 무처리시의 Terzaghi 이론에 의한 계산값과 연직배수공법을 시공했을 경우의 Barron의 이론해에 의한 계산값 그리고 이들 실측값을 대비하여 연직배수공법의 효과를 판정해야지 이러한 대비가 없는 연직배수공법의 효과는 판정할 수 없음을 기억할 필요가 있다.

(2) 지반교란 문제

연직배수공법으로 지반개량시 배수재를 지반내에 타설하기 위하여 표층에서 전달되는 타설장비의 영향과 맨드렐 관입·인발로 인해 주변지반은 상당한 교란영역(smear zone)이 발생하게 된다. 맨드렐을 관입시 주위지반은 맨드렐 단면적만큼 방사형으로 위치 이동되면서 소성변형이 발생하게 되고, 인발시에는 맨드렐과 배수재 사이에 빈 공간이 생겨 흙이

다시 섞이는 과정에서 재차 교란이 발생하게 된다. 이러한 여러 가지 요인으로 인하여 맨드렐에 인접한 지반상태의 투수계수는 원지반상태의 투수계수 보다 현저히 저하되어 결과적으로 압밀속도에 큰 영향을 미치게 된다.

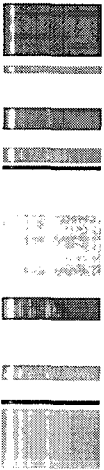
시험성토나 실내시험에 의해 교란영역을 규명하기 위하여 시도한 연구는 Bergado 등(1991)은 방콕점토(Bangkok clay)에 대하여 실내 및 현장시험을 실시하고 교란영역의 범위가 맨드렐 직경의 2배가 된다고 하였고, 시험성토에서 맨드렐이 큰 경우가 교란의 영향이 크게 된다고 보고함으로써 맨드렐의 크기에 대한 영향을 언급하고 있다. 이후에 박(1994)은 맨드렐 타입에 의한 교란영역의 범위를 실내시험을 통하여 재압밀의 경우 맨드렐 직경의 2.0~2.5배, 불교란시료의 경우 2.5~3.0배의 범위를 제시한바 있다.

연직배수재의 관입에 따른 교란영역내 투수계수 변화에 대하여 Hansbo(1987)는 교란영역내 투수계수를 비교란 조건의 연직방향 투수계수와 같은 값을 사용할 것을 제시하였으며, Bergado 등(1991)도 모형실험의 역해석 결과 교란영역의 투수계수가 비교란 조건의 연직방향 투수계수와 거의 같은 값을 갖는 결과를 얻었다고 하였다.

(3) 웰저항 문제

PBD의 타설심도 증가와 실트질 지반과 같이 투수성이 큰 연약지반을 개량하는 경우에 PBD재의 배수성능이 매우 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 또한, PBD재의 웰저항(well resistance)은 드레인 타설 간격, 샌드매트저항 및 교란효과 등과 함께 PBD를 이용하여 연약지반을 개량하는 경우 압밀지연이 발생하게 하는 주요인이다.

일반적으로 드레인의 압밀이론에서 드레인의 투





연약지반 기술의 현황과 발전방향

수계수는 주변지반에 비해 이상적으로 큰 것으로 가정한다. 그러나 세립자에 의한 필터의 막힘(clogging) 현상이 발생하거나, 성토하중에 의한 압밀침하로 배수재의 변형이 발생하여 통수능을 저하시켜 압밀시간을 지연시킨다. 웰저항은 보편적으로 축압, 동수구배, 물의 온도, 세립자등의 외적요인과 PBD의 길이, 통수단면적, 재질 등의 내적요인의 영향을 받는다.

(4) 미관통 문제

연직배수공법은 압밀대상 진층에 배수재를 관통시켜 개량하는 것이 기본이다. 그러나 시공 여건상 부득이하게 연약점토층 전체를 개량하는 것이 불가능한 경우도 있다. 일본 동경 하네다 국제공항 확장공사의 경우, 공항을 운영하면서 인접매립지에 공항을 확장하는 공사로 공역(空域)제한이 있어 배수재 시공장비의 높이가 제한되었다. 따라서 연약층 전체를 관통하지 못하고 하부에 미개량층이 존재하게 된 예가 있다.

또한 PBD나 SD공법의 경우는 연직배수재가 단 일본이므로 문제가 없지만 팩드레인의 경우는 4분을 동시에 설치하므로 미개량 토층이 발생되거나 맨드렐 길이의 조절이 용이하지 않아 평균토층 또는 이 값 이하 길이를 갖는 맨드렐을 사용하므로써 미개량토층이 발생될 수 있어 구조물 공용개시 후 하자가 발생될 수 있음에 주의할 필요가 있다. 또한 SCP의 경우는 미관통 SCP를 조성하는 형식은 무수히 존재하며, 그 예로서 모든 지반을 미관통 상태

로 두는 경우와 관통과 미관통을 교차하면서 타설하는 경우, 부분적으로 미관통 SCP를 채용하는 경우 등이 있다. 이와 같은 미관통 SCP 공법의 채용 이유로는 시공기계의 한계, 경제적 제약, 하부 모래자갈층으로 부터 SCP로 지하수의 유입방지, SCP로부터 지하수로의 오염물질 유입방지 등을 들 수 있다. 미관통과 관련된 공법의 개량효과는 아직 상세히 해명되어 있지 않고 기술자의 경험적인 예측에 의존하여 시공되고 있는 것이 현실이다.

5. 연약지반의 시공관리 기법

연약지반의 시공관리는 공사여건이 악조건이므로 특별한 관리가 요구되는 관점에서 특수한 조치들이 필요하며 일반적인 시공관리에 연약지반공사의 특수성이 반영된 관리전략의 마련이 요청된다.

보편적인 공사의 시공관리는 표에 나타난 내용을 포함하여 실시하게 되나 특히 연약지반 상에 구조물을 시공하는 경우에 과학적인 계측방법을 사용하여 공사 시공 중과 완공 후 구조물의 동태를 파악해야 하는 중요성이 첨가되어야 한다. 또한 시공 전 조사를 수행하고 시공 중 및 시공 후에 확인조사를 실시하여 지반개량의 효과를 파악하여 구조물의 품질관리에 참조한다.

공사부지가 연약지반인 경우 조사-설계-시공 각 단계마다 불확실성이 존재하고 따라서 이들 각 단계별로 발생하는 오차를 극소화시키는 노력이 요구된다.

표 3. 시공관리 내용

시공관리	공정 관리	계획과 실제공정의 비교분석
	품질 관리	설계와 시공품질의 비교평가
	가치 관리	설계와 시공과정에서 구조물의 가치극대화 유도
	안정 및 침하관리	성토 및 굴착 등에 따른 안정과 침하상태 파악

특집

시공 중에 설계상에 반영된 이론과 토질정수의 적합성을 판단하기 위하여 '현장계측'이 실시되어야 한다. 즉 설계와 시공의 차이를 파악하고 그 안정성과 경제성을 검증하면서 대안을 모색하기 위하여 공사중 또는 완공 후 계측과 조사가 실시되어야 한다. 일반적으로 계측 및 조사의 목적은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 연약지반상에 축조된 구조물의 안정성 평가 및 안정성을 유지하기 위한 시공절차의 수정여부를 판단
- ② 구조물 설계의 적합성 평가와 향후 설계변경 가능성 예측
- ③ 지반변위의 발생원인과 변위의 크기와 분포 등이 주변 구조물에 미치는 영향
- ④ 대책공법의 선정

5.1 연약지반 안정관리 및 침하관리

(1) 안정관리

하중에 의한 지반의 변형은 압밀에 의한 침하와 전단에 의한 측방유동이 복합된 것이고, 전체로서의 거동은 대단히 복잡하지만 개념적으로 말하면 압밀이 전단보다도 우월한 경우에는 지반이 안전하고, 반대로 전단이 압밀보다 우월한 경우에는 불안정해진다.

연약지반의 성토시 국내에서 안정관리에 주로 사용한 방법은 Matsuo-Kawamura방법, Tominaga-Hashimoto방법, Shibata-Sekiguchi방법, Kurihara-Ichimoto방법, Hukuda방법, 과잉간극수압에 의한 방법(NGI방법)등이 있으나 이와 같은 외국의 자료를 바탕으로 수행된 연구결과는 주로 계측관리를 통하여 축적된 자료를 이용하여 분석하였기 때문에 오차의 범위가 커서 국내의 실제현장 지반에 적합한지의 여부에 의문시되고 있다.

참고적으로 연약지반의 성토에 대한 안정성 분석 방법은 ① 극한평형법에 의한 방법, ② 수치해석에 의한 방법, ③ 계측관리에 의한 방법으로 크게 분류된다

(2) 침하관리

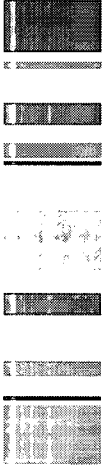
침하관리는 안정관리와 별개로 실시되는 경우보다는 통상 함께 수행되며 침하관리의 목적은 다음과 같다.

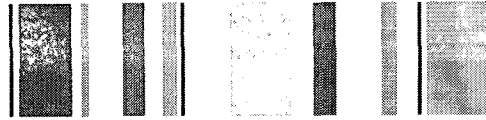
- ①장래 침하량을 예측하여 토랑, 성토단면 형상의 수정, 토공 계획고와 지중구조물의 장기침하량을 결정한다.
- ②선하중(Preloading)의 재하기간과 제거시기를 결정한다.
- ③장래침하량의 예측에 따라 잔류 침하량을 추정하여 교대와 성토의 연결부 단차와 그 외의 침하에 대한 대책을 검토한다.
- ④공사부지를 포함한 주변지반의 변형, 수로등 기존구조물의 변위 등을 측정하여 장애가 발생되지 않도록 관리한다.

따라서 침하관리를 위해서는 성토중의 침하량 측정치를 이용한 장래침하량의 예측이 중요하다. 쌍곡선법, 星野법(Hoshino법)은 경험에 준한 것이고 淺岡법(Asaoka법)과 門田법(Monden법)은 이론적으로 유도된 것으로 압밀계수(C_v)나 투수계수(k)와 같은 지반상수를 구할 수 있다. 일반적으로 쌍곡선법이 간단하여 가장 많이 사용되고 있다.

5.2 연약지반 거동 측정분야의 최근 경향

계측관리 분야도 사회적인 여건의 변화와 관련기술의 발전과 함께 계측기기와 관리 시스템이 많은





연약지반 기술의 현황과 발전방향

변화와 발전을 거듭하고 있다. 본 절에서는 연약지반 계측분야에서 최근 사용 빈도가 높아지는 계측기와 시스템을 살펴보고자 한다.

(1) 자동 계측기 사용의 증가

장기간 동안 인력을 이용한 계측값의 수집은 많은 비용이 소모되며 비효율적이라고 할 수 있다. 최근의 계측기 제조 기술 및 전자 통신 기술의 발전 또한 근래 들어 대두된 영구(유지관리) 계측의 필요성에 의하여 자동화된 계측기의 사용은 점차 보편적인 사양이 되고 있다.

(2) 계측 시스템의 자동화

기존의 수동 계측에 비하여 자동 계측 시스템의 구축은 대상 지반의 대형화, 계측 빈도가 증가할 경우 대단히 편리하고 경제적인 방법이라고 할 수 있다.

계측기로부터의 측정된 계측값을 무선(혹은 유선) 전송 방식에 의하여 원하는 장소(계측 사무실)에서 실시간으로 모니터링하고 이를 저장, 분석을 용이하게 함으로써 해서 적절한 시공관리 및 향후 설계 혹은 시공시에 반영하는 것이 가능하다.

(3) 무선 데이터 전송

토공사의 계측을 수행하는 경우, 특히 준설매립 공사 등은 대상지역이 광대하여 장거리의 케이블을 연결하여야만 하는데, 이는 주변의 전자기적인 간섭에 의하여 계측값의 오류가 생길 수 있고 거리가 길어짐에 따라 계측값의 손실을 초래할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 계측기와 데이터 저장 장치와의 연결을 무선으로 처리할 수 있도록 고안되어 케이블이 필요치 않으며 그에 따른 계측값의 오류를 상당부분 배제할 수 있는 시스템이

개발되어 있으며 편리함과 신뢰성이 우수하여 점차 사용이 증가할 것으로 예상된다.

(4) 맞춤형 계측기의 사용

연약지반 계측분야는 타 분야와 달리 설계시 예측의 정확도가 다소 낮은 편이다. 특히 깊은 심도의 연약지반, 특히 해수면 아래의 대심도 해성 점토층상의 방조제 축조공사의 경우 시공방법에 따라 대규모 침하와 종단면상의 매우 다른 침하량 및 속도차이를 나타내기도 한다. 따라서 이러한 거동을 파악하기 위하여 각 현장의 시공 상황에 적합한 계측기기를 고안하여 그 측정범위, 측정정도와 방법, 설치 및 보호방법 등도 맞춤형으로 설계, 제작, 설치하여 긍정적인 성과를 얻고 있다.

위에서 언급한 바와 같이 계측대상 연약지반이 대심도, 광역화함에 따라 연약지반 계측의 전반적인 추세는 자동 계측기를 이용한 자동계측 시스템의 사용과 준설·매립공사 또는 해수면상에서의 공사 특성상 케이블 관리의 어려움을 극복하고자 무선데이터 전송방식의 사용빈도가 점차 증가하고 있다.

6. 결론

연약지반은 공학적으로 많은 문제점을 가지고 있는 지반이다. 이에 대처하기 위해 그동안 연약지반에 대한 학문적, 실용적 측면의 연구 및 실무적용 분야에는 상당한 발전이 있었고 우리의 기술수준 또한 상당한 정도에 이르렀다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 아직 연약지반 기술에는 발전과 개선이 필요한 부분이 많이 남아 있으므로 지반공학도들이 많은 노력을 기울여야 할 분야이기도 하다.

본 고에서는 연약지반의 거동 및 해석에 관한 연

특집

구동향 및 전망, 지반개량공법 선정시 고려사항, 연직배수공법의 문제점 및 개선사항, 현장의 연약지반 거동을 계측하고 관리하는 분야에 대해 살펴보았다. 향후 이러한 분야에 대해 경제적이고 정교한 기법들이 개발되고 활용되어 실제 거동과의 오차를 최대한 줄일 수 있는 예측방법을 개발하기 위한 노력이 계속되어야 할 것이다. 이론에 의한 실험적 거동특성의 규명과 동시에 컴퓨터의 활용을 통해서 복잡한 이론의 활용도도 증가할 수 있을 것이고, 경제적이고 합리적인 지반개량공법의 선정, 정보화된 관리시스템을 이용한 연약지반의 체계적인 관리도 요구가 높아질 것으로 예상된다. 전술한 분야들에 대한 연구가 상호교류를 통하여 연약지반 거동분석 및 예측분야의 정밀도 향상을 위한 노력이 필요하다.



참고문헌

1. 김영남, 이강일(1996), "연직배수공법", 한국지반공학회 연약지반처리위원회 현지세미나, pp.1~19.
2. 박병기(1997), "연약지반 개량공법의 실제와 문제점", 한국지반공학회 연약지반기술위원회 가을학술세미나, pp.1~18.
3. 이문수, 김영남, 이강일(1997), 연직배수공법의 설계와 시공관리, 도서출판 새론
4. 아송, 김주현, 황규호, 양태선(2003), 연약지반의 설계와 시공, 도서출판 구미서관
5. 지반공학시리즈(2005), "연약지반(교육용)", 도서출판 구미서관, pp.5-68~5-79.
6. Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S., (1991), "Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay", J. Geotech. Eng., ASCE,

- Vol.117, No.10, pp.1509-1530.
7. Chang, Y. C. U (1981), "Long term consolidation beneath the test fills at Vasby", Rep. No.13, SGI
8. Casagrande, L. and Poulos, S.(1969), "On the effectiveness of sand drains" Canadian Geot. Journ. Vol.6, pp.287
9. Dafalias, Y. F. (1987), "An Anisotropic Critical State Clay Plasticity Model", Constitutive Laws for Engineering Materials Theory and Applications, Vol. 1, pp.513~522.
10. Drucker, D. C. (1957), "A More fundamental Approach to Stress-Strain Relations" Proc. 1st U.S. National Congress, Appl. Mech., ASME, pp.487-491.
11. Hansbo, S., (1987), "Design aspects of vertical drains and lime column installation" Proc. 9th Southeast Asian Geotechnical Conference, Vol. 2, No.8, pp.1-12.
12. Roscoe, K. H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. (1963), "Yielding of Clays in States Wetter than Critical", Geotechnique, Vol.13, pp.211-240.
13. Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968), "On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clay", Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp.535~609.
14. Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C. P. (1958), "On the Yielding of Soils", Geotechnique, Vol.8, pp.22~53.
15. Asaoka, A. (1978) "Observational procedure of settlement prediction", Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87-101.