

## 원통형 드레인보오드를 이용한 진공압밀공법에 관한 연구

### A Study on the Vacuum Consolidation Method by Cylindrical Drain

이규환<sup>1)</sup>, Lee, Kyu-Hwan, 전재성<sup>2)</sup>, Jeon, Jae-Sung 이송<sup>3)</sup>, Lee, Song

<sup>1)</sup> 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Student Dept of Civil Eng., Seoul City Unvi.

<sup>2)</sup> 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student Dept of Civil Eng., Seoul City Unvi.

<sup>3)</sup> 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept of Civil Eng., Seoul City Unvi.

**SYNOPSIS** : This paper describes the application of the vacuum consolidation method beneath a compressible clay soil to obtain stabilization and several advantages of the vacuum consolidation method. The concept of using atmospheric pressure to apply a precompression load for accelerating the consolidation of foundations for embankments constructed on soft clay.

In the case of the vacuum consolidation method has no problems of embankment stability to consider and it eliminates the need for backfill material which is usually expensive and often unavailable, The purpose of this study is to grasp mechanical characteristics of dredged soft clay and fundamental vacuum consolidation theory. The effectiveness of the vacuum method of stabilization of soil, its economies, and its potentials are discussed and conclusions set forth.

주요어(Key words) : Vacuum Consolidation, Negative pore pressure, Atmospheric pressure

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

드레인 보오드를 이용한 연약지반 처리공법의 적용시, 주로 프리로딩 공법과 조합하여 시공을 하는데, 시공시에 성토하중이 과다하게 되면 지반의 전단파괴 및 측방유동으로 인하여 지반이 파괴를 일으킬 수가 있다. 또한, 압밀시간이 길어, 공사 기간이 장기화되고, 지반개량후에는 필요 없는 성토 하중을 제거해야 하는 단점이 있다. 진공압밀 공법은 진공압 재하시 전단 파괴의 위험성이 없으며, 불필요한 성토 하중을 줄이거나, 신속한 배수를 통해서 공기를 단축하여 경제성 있는 시공을 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 진공 압밀공법의 장점에도 불구하고, 아직까지도 많이 사용되지 않는 이유는 진공압밀 공법을 연약지반 개량 공법으로 이용하는 데에는 아직도 해결해야 할 문제가 많이 남아 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 진공재하 공법의 실내 시험을 통해, 진공재하 공법 적용시의 거동을 분석하고, 진공재하 공법의 이론적인 검토와 문제점등을 분석하였다. 또한, 진공재하 공법을 이용하여 연약 지반의 개량 및 설계, 시공시에 고려해야 할 문제들에 대하여 분석하고, 드레인 종류 및 드레인경의 크기, 지반의 초기 간극비 변화에 따른 압밀 특성을 파악하였다.

## 1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구에서는 부산 가덕도에서 채취한 준설토를 가지고, 모형 시험장치를 통해 진공압밀 실내 시험을 하였다. 실내 시험은, 해안에서 채취한 고함수비의 해성점토를 이용하여 투명한 아크릴로 제작한 원형의 셀안에 드레인 보오드를 타입한 상태에서 진공 압밀 시험을 하였으며, 드레인 종류, 드레인 유·무, 드레인 간격 및 지반의 초기 간극비에 따른 진공압밀의 효과를 알아보기 위해 여러가지 경우에 대한 진공 압밀 시험을 하였다. 또한 시험도중에 각 시간별 침하량과 높이별 진공압의 크기를 측정하였으며, 원통형셀 내의 점성토의 거동을 관찰하였다.

시험이 종료된 후에는, 시험 장치를 해체하여, 드레인 중심에서 수평방향과 수직방향으로 간극비를 측정하였고, 강도측정을 통해서 개량효과를 확인하였다.

## 2. 진공압밀 공법의 원리

그림 1은 진공압밀공법의 기본적인 원리를 나타낸 것으로, 우리가 존재하고 있는 모든 공간들은 1013mb 혹은  $10.33 \text{ t/m}^2$ 의 크기에 해당하는 1기압의 대기압을 받고 있다.

진공 펌프가 가동되면 펌프와 연결된 liquid catch내부의 압력이 감소하면서 드레인과 상부 배트층의 기압을 떨어뜨리게 된다.

이 때, 대기압을 받고 있던 멤브레인 내부의 지반은 진공압에 의해 압력이 감소하는데 반해, 외부는 대기압을 그대로 받고 있으므로 결과적으로 초기의 평형상태에서 내부가 진공상태로 변함에 따라서 외부의 대기압이 외력으로 작용하게 된다.

만약, 100%의 진공도가 유지한다면, 이 때 가해지는 1 기압의 크기는 이론적으로  $10.33 \text{ t/m}^2$ 이 되고, 이를 모래에 의한 성토하중으로 환산한다면 약 6m의 성토하중의 효과를 얻을 수가 있다.

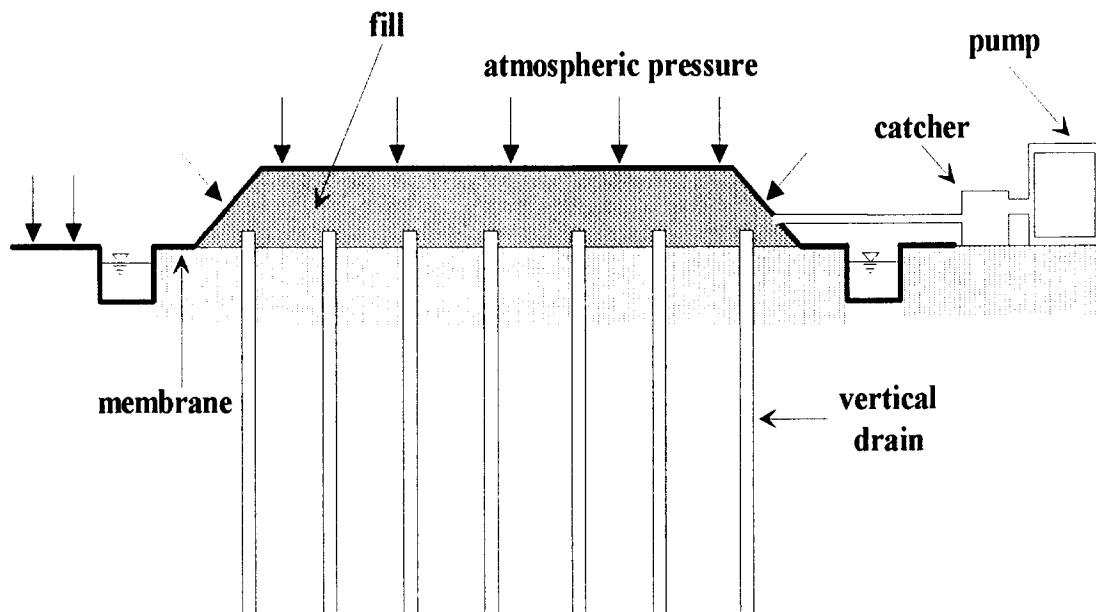


그림 1 진공압밀 공법

Preloading 공법과 진공압밀 공법의 시간 경과에 따른 지반 거동을 응력경로로 나타내면 다음 그림과 같다.

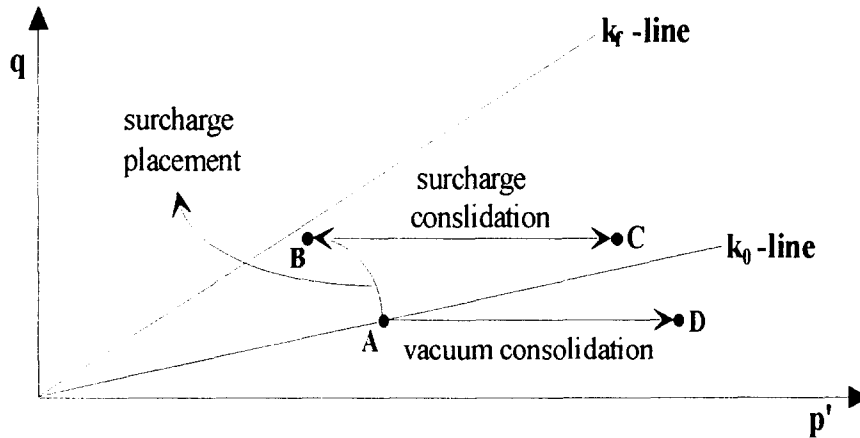


그림 2 응력경로

그림 2에서 보듯이 기존의 재하 공법은 재하 하중이 가해졌을 때, 외력의 의한 전응력의 증가로 A→B의 응력 경로를 따라 거동하다 과잉간극수압이 소산됨에 따라 B→C로 이동하게 된다. 이 때 과도한 상재하중은 지반의 파괴를 일으킬 수 있으므로 진단파괴를 방지할 수 있는 범위 안에서 단계성토가 이루어져야 한다. 진공압밀의 경우는 전응력의 증가가 없는 상태에서 부의 간극수압을 일으키므로 그림 2와 같이 A→D를 따라 이동하게 되어 파괴포락선에 접근함이 없이 유효응력의 증가를 기대할 수 있다. 100% 효율하에서의 이론적인 진공압은 10.33 t/m<sup>2</sup>로서 이는 모래의 재하 성토고 약 6m에 해당하는 크기이나, 실제 공법적용시에는 장시간의 가동에 의한 펌프의 효율감소, 지반을 덮고 있는 멤브레인의 품질문제, 멤브레인의 끝부분과 지반사이 연결부위의 씰링문제, 지반내에 투수층이 존재함으로 발생할 수 있는 외부로부터의 침투수 문제, 지하 수위, 기타 장치들간 연결부에서의 씰링문제들로 인하여 대기압이 모두 지반내에 작용하지 않고 대략 대기압의 65-75% 정도가 실질적인 진공 하중으로 작용하며, 이는 모래에 의한 재하 성토고 약 4.5m에 해당하는 크기이다.

### 3. 진공압밀 공법의 적용

재하중공법 및 탈수공법으로서 진공압밀공법은 압밀시 필요한 하중을 기존 재하중 공법의 성토하중 대신 지중을 진공으로 만들어 이 때, 작용하는 대기압 크기만큼의 진공하중으로부터 지중에 설치한 드레인을 통해 간극수를 강제 탈수시킴으로써 침하를 촉진시키는 공법이다. 진공압밀공법은 과거 일본이나 기타 지역에서 콘크리트의 조기 양생 및 강도강화 또는 연약지반의 표층재하공법으로 응용된 사례들도 있었다. 국내에서 현재 시험시공중인 진공압밀 공법은 프랑스의 메나드 진공압밀공법을 이용하여 하고 있으며 이 공법의 특징은 PVC 연성주름관에 부직포를 감싸 인장저항의 기능을 겸용한 드레인을 지중에 설치하고, 이들을 다시 수평 배수층에 그물 방식의 폐쇄회로 배관망을 구성한 후 펌프를 가동시켜 지중을 진공상태를 만들어 대기압의 하중을 지표 및 지중에 작용시키는 것이다.

재래식 공법에서 토사를 성토하여 재하하는 공정이 대기압 하중으로 교체되었으며, 기존의 재하공법에서 사용하던 배수목적의 샌드 드레인이나 밴드 드레인은 부직포를 씌운 PVC 연성주름관으로 대체되었다. 또한 타공법에서 수평배수를 위해 사용되는 샌드 매트층 속에는 수평드레인이 추가로 매설된다. 진공압밀공법은 연약지반상에 드레인을 설치한 후 필요 성토량을 재하하고 지중을 진공상태로 만들기 위하여 성토 후 표면을 진공 차단막(멤브레인)으로 덮는다.

이 때 진공펌프 가동시 지중의 경계부에서 외부와의 차수를 목적으로 차수용 지중벽을 설치해야 한다. 필요한 설치준비가 모두 완료되면 진공펌프를 가동시켜 지중의 간극수를 배출하게 되는데, 이 때 지중 입의 평면에서 간극수압과 유효응력의 합 즉, 전응력은 외부에서 작용한 대기압과 성토 재하하중의 합과 같게 될 것이다. 따라서 진공압밀 진행과정에서 전응력은 일정하게 되며 간극수가 배출되면서 유효응력은 증가되고 강도를 얻으면서 압밀이 진행된다.

이 공법의 기본원리는 압밀시킴 연약지반위에 불투수진공막을 덮어서 이 진공막 아래의 지반을 진공 상태로 만들어 대기압을 하중으로 이용하는 것이다. 진공압밀 공법을 이용하여 연약 지반을 개량공법으로 이용하는 것 이외에 다음과 같은 다양한 종류의 공사에 적용할 수가 있다.

1차 및 2차 압밀침하가 파괴의 원인이 되는 곳의 지반개량, 예를 들면 교량근처나, 제방과 말뚝으로 지지되는 건축물의 접속 부분, 하층토의 안정이 절박한 요소인 곳에서 매우 짧은 기간에 제방을 세워야 하는 경우, 바람직하지 못한 부등침하가 일어나는 곳의 도로 확장 등의 목적으로 사용되고 있다.

또한, 침전지, 침전물을 빠르게 탈수하기 위한 탈수목적, 탱크기초 설치를 위한 선행재하에도 사용되며 특히 토질 정화 방법으로 사용되는데 이 방법은 가장 비용이 적게 드는 토질 정화 방법중의 하나로 일명 현장 행구기 방법이라 하는데 다음과 같은 원리를 이용한다.

샌드매트와 하부 모래층에 모든 드레인이 연결되어 있는 수직 드레인 설비를 시공한 다음에 전체를 진공 설비에 연결한다. 깊은 지하수가 드레인을 따라서 표면으로 빨리 올라오면 오염된 흙속에 통로를 만들고 주위의 드레인을 거쳐서 계속 흐르게 되면 지하수는 이동성이 있는 정화기능을 발휘하여 정화 작용을 한다.

## 4. 진공압밀 실내시험

### 4.1 실험장치

실험 장치의 제원은 (직경 30cm×높이 50cm)의 투명한 아크릴 펠로 제작을 하여 실험중에 시료 내부에서 일어나는 지반 거동을 파악할 수 있도록 하였다. 본 장치에는 원통 외측에 10cm 간격으로 밸브를 설치하여 상부진공재하시 심도별로 미치는 진공압을 측정할 수 있도록 하였다.

본 실험 장치를 통해서도 드레인 재의 유,무, 드레인 종류 및 배치에 따른 진공압밀 효과와 진공재하시 드레인재의 영향 범위를 구하고, 진공재하시 드레인 주변에 발생하는 부분적인 강도증가문제, 적정한 드레인 배치 간격에 대한 문제, 진공압의 증감에 따른 지반 거동문제 등에 관해서 연구를 하였다. 진공 펌프는 국내에서 제작된 1 마력 용량의 진공 펌프를 사용하였으며 진공 탱크를 통하여 진공압이 걸리게 하였다. 진공 탱크에는 진공압을 측정할 수 있는 게이지를 부착하여 진공탱크에 걸리는 진공압을 측정하였다.

### 4.2 실험방법

#### 4.2.1 시료제조

본 시험을 수행하기 위한 시험 시료는 기본적으로 부산에서 채취된 준설햄 점토를 이용하였으며, 시료의 균질성을 확보하기 위하여 #40체로 체가름 하였다.

장기간 시료를 보관하는데서 오는 자중압밀현상을 제거하기 위하여 매 실험시 충분한 시료교반과 함께 이 물질의 혼합을 방지하였으며, 간단한 토성시험을 통해 시료의 기본 물성치를 구하였다.

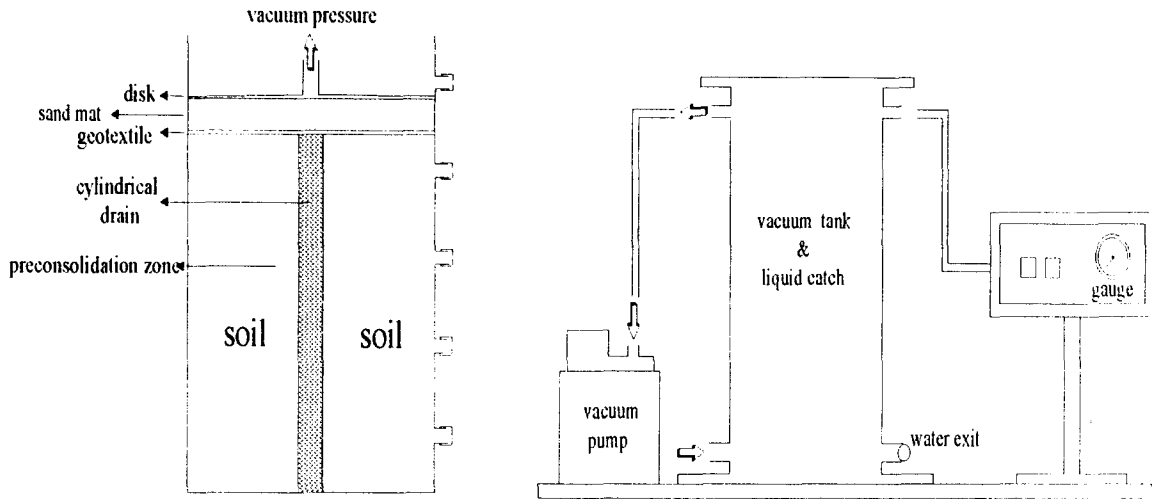


그림 3 진공압밀 실험장치

#### 4.2.2 토성실험

본 연구에서는 부산의 해안지역에서 채취한 준설토를 사용하여 시험을 하였다. 현장에서 채취한 준설토에는 조개껍질이나 기타 이 물질이 포함되어 있어서 모델 시험을 위한 시료의 균질성을 확보하기 위해서 #40번체를 통과한 시료를 사용하였고 완전 포화 상태를 만들기 위해서 준설토를 마닷물에 수침시켰다. 진공압밀 시험을 실시하기 전에 시료의 물성을 파악하기 위하여 입도분석시험, 액성한계시험, 소성한계시험, 함수량시험, 비중시험, 체분석시험등 기본적인 토성시험을 하였다. 3회에 걸쳐서 시험을 한 결과 그 평균치는 입도시험결과 통일분류상 CL이 나왔으며 액성한계는 35이고 소성지수는 14 로 나타났다.

표 1 Soil Properties of Sample

Sample No	Gs	LL	PL	PI	#200체 통과율(%)	USCS
1	2.70	35	19	16	90	CL
2	2.71	33	23	10	93	CL
3	2.72	37	22	14	92	CL

#### 4.2.3 실험방법

진공압밀 시험은 시험장치에서 설명한 원형의 아크릴 쉘에 시료를 투기하기전 공기가 혼입될수 있는 하부 틈새 및 밸브의 연결 부위에 진공그리스를 발라서 기밀시키고, 시료를 소정의 높이까지 투기하였다. 시료의 투기와 드레인 설치가 끝난후 시료표면위에 투수성이 큰 부직포를 깔고, 그 위에 표준사를 2-4cm정도 포설한후 이위에 여과지를 깔고 아크릴판을 올려놓은 후에 멤브레인을 씌워 이를 진공막으로 이용하였다. 전체적인 시험장치의 setting이 끝난 후, 진공펌프를 가동시키게 되는데 시험 초기에는 서서히 진공밸브를 열어 점차적으로 진공압의 크기를 증가시켜 가면서 시험을 하였다. 시험 도중 원통형셀의 측면에 부착된 개폐 장치를 통해 깊이별 진공압의 크기를 측정하였다. 초기 30분 동안은 5분에서 10분 간격으로, 그 후 3시간 동안은 30분 간격으로, 그 후 압밀종료시까지 1 시간 간격으로 침하량을 측정하였다.

침하량 측정은 최종압밀침하량의 변화가 없을 때까지 측정을 하였으며, 시료 측면의 3 곳에 부착된 눈금자를 붙여 이들의 평균값을 사용하였다.

진공재하에 의한 지반개량 효과를 분석하고 그 영향 범위를 알아보기 위하여 원통형 쉘의 3부분에 눈금자를 붙여 시간-침하량을 측정하였고, 시험 종료후에 쉘을 해체하여 드레인 중심에서 수평방향과 수직 방향별로 함수비, 간극비, 단위중량, 투수계수등을 측정하였다. 이 결과를 근거로 하여 여러 가지 조건에 따른 지반 개량효율 및 그 영향 범위를 함수식으로 표현할 수 있을 것이다. 강도증가 효과를 보기 위하여 소형 베인시험기와 소형 콘시험기를 이용하여 강도 측정을 하였다.

## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 침하분석

진공재하 공법에 의한 침하량 및 침하속도는 시료에 가해지는 진공압의 크기, 드레인 종류, 드레인 직경 및 배치 간격, 초기 함수비, 시료의 종류등에 따라서 영향을 받는 것으로 나타났다. 진공압밀 공법의 경우에도 침하량을 지배하는 가장 큰 요소는 지반의 투수계수이므로 간극수의 배수능력을 얼마나 크게 하는가에 따라서 침하량과 침하의 속도가 결정된다. 일반적으로 진공압밀 공법에 대한 아래의 두가지 경험치들이 받아들여지고 있다. 첫째, 진공재하 공법에 의한 침하량은 테르자기의 압밀 이론식 의해서 계산을 하지만, 실제로 등방압밀에 따른 수평압축 효과로 인하여 총 침하량의 25~50% 까지 감소한다고 밝히고 있다. 둘째, 침하시간은 기존의 배수압밀 공법에 비해 2~5배가 빠른 것으로 보고 있다.

#### 5.1.1 드레인 유·무에 따른 거동비교

시험시의 시료 높이를 345 mm로 하고, 워 드레인과 원통형 드레인 보오드 각각 드레인이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 시험을 하였고, 각각의 경우에 나타나는 최종 침하량을 확인하였다.

그 결과 워 드레인의 경우, 드레인이 없는 경우는 침하가 종결된 후의 시료 높이가 304 mm로 최종 침하량은 41 mm 였고, 드레인이 있는 경우는 침하가 종결된 후의 시료 높이가 272 mm로 최종 침하량은 73 mm 였다. 또한, 드레인이 있을 때가 없을 경우에 비해 약 9 %정도 많은 침하가 발생했다.

또한 유사한 침하량을 얻는데 필요한 시간을 비교해 보면, 드레인이 있는 경우가 없는 경우에 비해 약 2.5배의 시간이 더 필요한 것으로 나타났다.

원통형 드레인 보오드의 경우, 드레인이 없는 경우는 침하가 종결된 후의 시료 높이가 297 mm로 최종 침하량은 48 mm 였고, 드레인이 있는 경우는 침하가 종결된 후의 시료 높이가 265 mm로 최종 침하량은 80 mm 였다.

여기서 보면 드레인이 있을 때가 없을 경우에 비해 약 9 %정도 많은 침하가 발생했다. 또한 유사한 침하량을 얻는데 필요한 시간을 비교해 보면, 드레인이 있는 경우가 없는 경우에 비해 약 2.5배의 시간이 더 필요한 것으로 나타났다.

상기 결과를 종합해 볼 때, 워 드레인과 원통형 드레인 보오드에 따른 최종 침하량은 원통형 드레인 보오드의 경우가 워 드레인 경우보다 약 2% 정도 많이 침하되었다. 압밀소요시간에서는 원통형 드레인 보오드와 워 드레인 모두 드레인이 있을 때가 없을 때에 비해 약 2-2.5배 정도 빠른 것으로 나타났다.

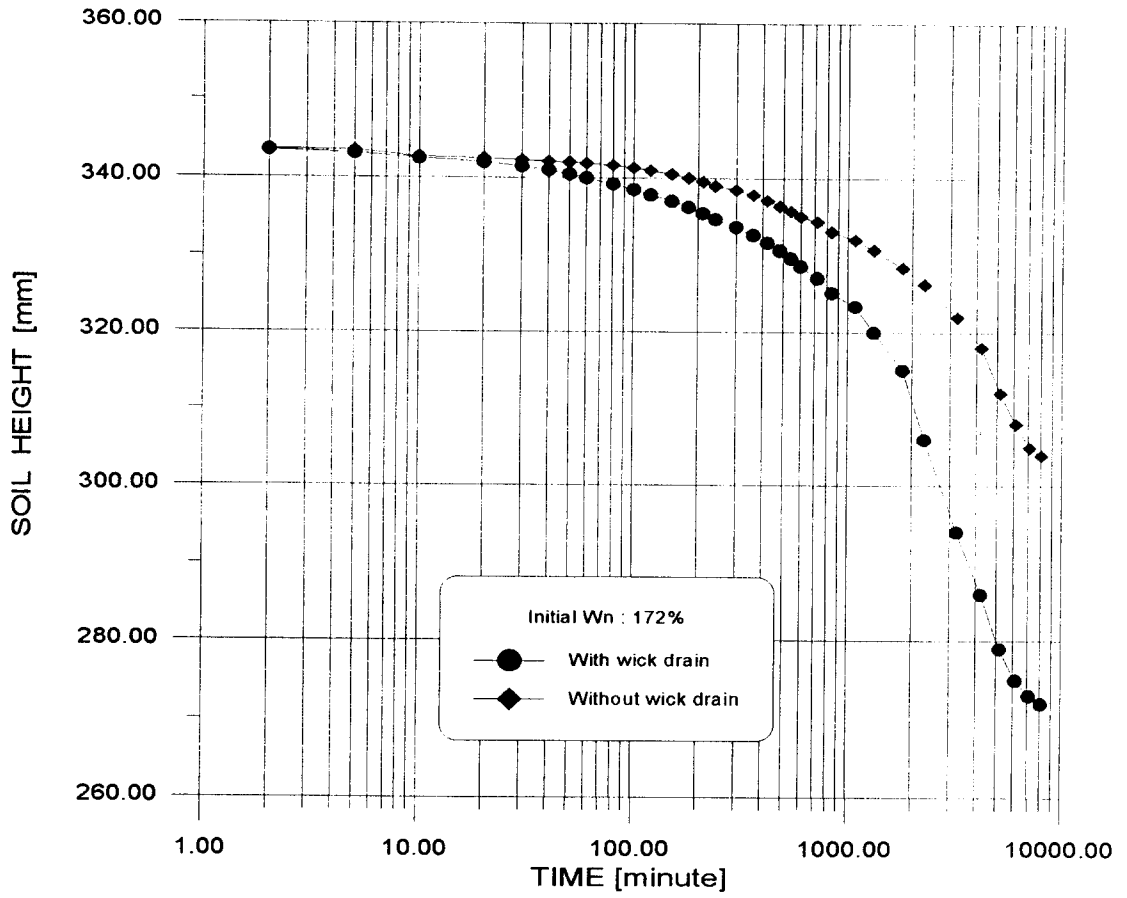


그림 4 워 드레인 의 경우

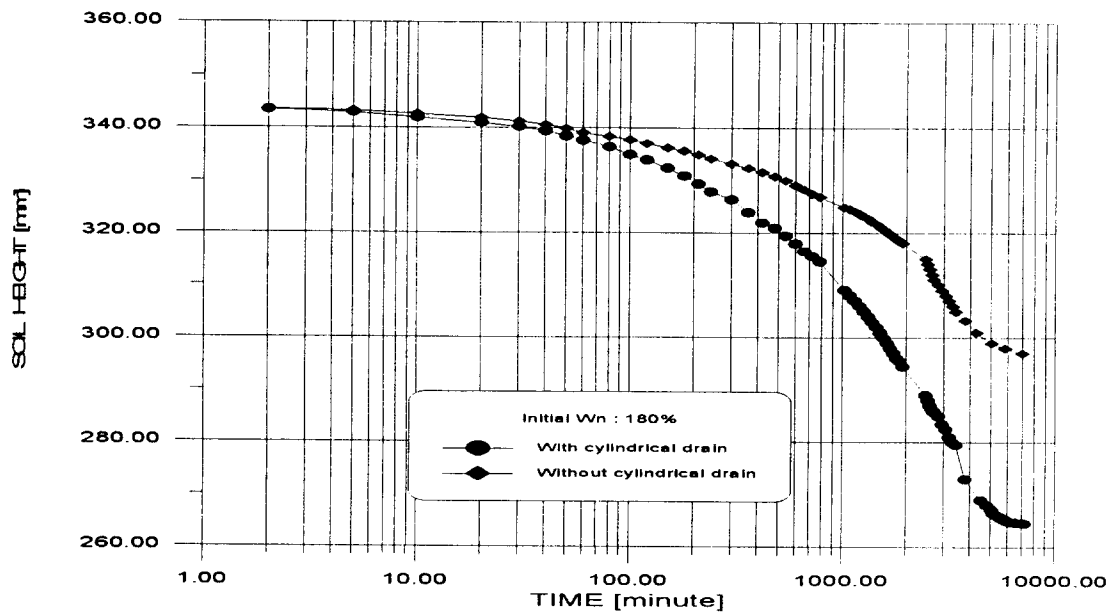


그림 5 Cylindrical Drain의 경우

### 5.1.2 드레인 종류에 따른 영향

지금까지의 시험결과 원통형 드레인 보오드와 워 드레인 두 종류에 관해서만 시험을 수행하였다.

시험결과 원통형 드레인 보오드에 의한 침하량과 침하속도가 워 드레인 경우에서보다는 양호하게 나타났으며, 이는 진공재하 배수시 드레인의 유효영향원과 드레인재의 투수능력이 다르기 때문이라고 사료된다.

또한 시험 종료 후 시료를 해체한 후에 드레인 보오드를 관찰한 결과 드레인 주변에 점토입자가 달라붙어서 배수능력을 감소시키고 있는 결과로 나타났다. 또한 워 드레인 유출량은 원형드레인의 유출량에 비해서 작다.

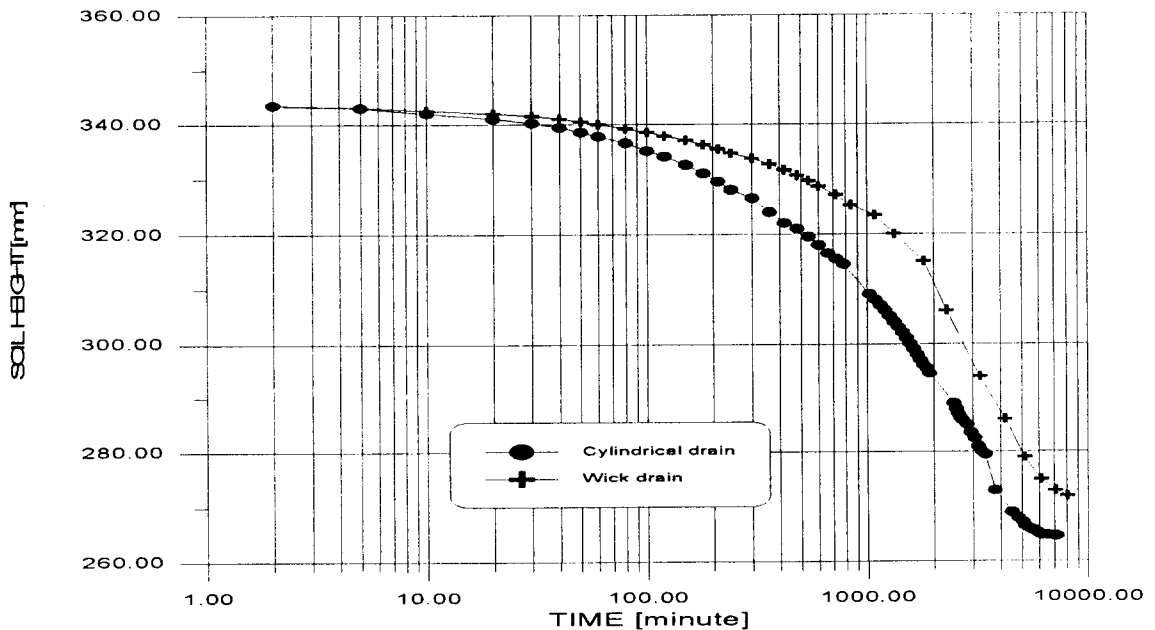


그림 6 드레인 종류에 따른 침하량의 분석

### 5.1.3 드레인 보오드 타입심도에 따른 영향

드레인 보오드와 프리로딩 공법을 병행하여 시공을 할 경우에 드레인 보오드를 조사된 연약지반의 전 심도에 걸쳐서 타입하는 것은 그다지 바람직스럽지 못하다.

기존의 연구에 의하면 연약지반의 심도가 40m인 지반에서 전체 침하량이 약 1m 발생한다고 하였을 때 전체 침하량의 약 80%가 20m이내에서 이루어진다.

이 이유는 상부에 재하된 성토하중으로 인한 지반에 대한 영향 범위가 지반의 심도가 깊어짐에 따라서 감소하기 때문이라고 볼 수가 있다.

따라서 연약지반 전 심도에 걸쳐서 드레인 보오드를 타입하는 것은 비 경제적이라고 할 수가 있다. 그러나 원통형 드레인 보오드를 사용하여 진공재하 공법을 이용하는 경우에는 공법의 특성상 원통형 드레인을 통하여 진공하중이 드레인의 하부까지 미치고 있으므로 진공재하 공법에 의한 시공시에는 드레인 보오드의 타입심도가 클수록 지반개량의 효과는 크게 나타난다.



### 5.1.4 지반의 조건에 따른 영향

실내시험에서는 현장에서 채취한 준설토를 가지고 시험을 하였으며 투수계수에 대한 비교를 위한 시험으로 모래를 이용한 진공재하 시험을 하였다. 모래를 이용한 경우 배수속도는 CL시료에 비해서 상당한 차이를 보였다. 이 결과로부터 진공압밀 공법은 투수성이 큰 실트성분이 많이 함유된 지반에서 효과적으로 적용할 수가 있으며 상대적으로 점착력이 크고 투수계수가 작은 점토지반에서는 현저하게 배수 기능이 떨어지는 것을 알 수가 있다.

### 5.2 개량 효과분석

시험종료후 지반개량 효과를 판단하기 위해서 소형 콘시험기와 소형 배인시험기를 가지고 드레인 중심으로 수평방향과, 수직방향으로 강도시험을 하고 함수비를 측정하였으며, 간극비 변화를 구하였다.

배인시험기에 의한 강도시험 결과는 드레인 주변부에서 거리가 멀수록 강도가 감소하였으며 심도가 증가함에 따라서 강도가 감소하였다. 특히 드레인 주변에서의 배인 시험치는 약  $1.25 \text{ kg/cm}^2$  정도로 상당히 크게 나타나고 있었다. 콘 관입시험의 결과 표층부의 경우는 약  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  정도이고 드레인 주변의 경우에는  $1.1 \text{ kg/cm}^2$  정도로 나타났으며 그 외 지역에서는 콘을 가지고 강도를 판별하기에는 미약했다. 특히 표층의 경우에, 드레인의 영향범위를 벗어나서는 강도가 거의 유사하게 나타났다. 시험종료후 시료를 채취하여 함수비 변화를 측정하여 심도별 거리별 함수비 변화를 관찰하여 함수비의 변화양상을 파악하였으며 그 결과는 그림 7에 나타내었다.

시험결과 시료 초기의 함수비는 180 % 정도의 슬러리 상태였으나 시험 종료후 각 부위별로 상이한 함수비 분포를 보였다. 우선 깊이 방향으로 표층에서 2cm, 3~5cm, 5~7cm, 7~9cm의 경우에 함수비 측정을 하였으며 그 결과는 46%, 49%, 53%, 60%로 나타났다.

표층부의 경우는 드레인 직경을 중심으로 수평 방향으로 0~4cm, 4~8cm, 8~12cm 떨어진 지점의 함수비를 측정하였으며, 그 결과는 38%, 40%, 41% 로 나타났다.

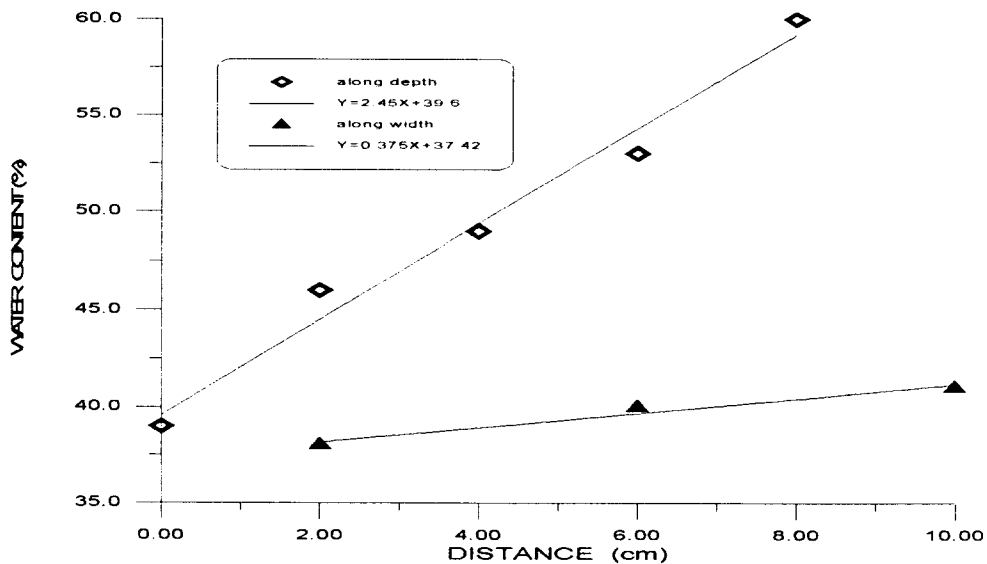


그림 7 함수비 변화분포

### 5.2.1 국부개량 효과분석

진공재하공법에서 고려해야 할 중요한 사항중 하나는 진공압 재하시 드레인 주변으로 국부적인 개량 효과가 나타난다는 것이다. 진공압밀 시험이 종료된 후에 시료를 해체하여 상부층과 드레인 주변 지반의 개량 범위를 조사한 결과 개량 효과가 그림 8에 나타난 것과 같이 드레인 주변을 따라서 국부적으로 나타났다. 시험결과 상부 표층으로부터 약 8~9 cm 정도의 개량효과가 나타났으며 드레인 주변부에서는 드레인의 직경이나 크기에 따라서 약간의 차이는 있으나 8~10 cm 정도의 영향범위를 갖는 것으로 나타났다.

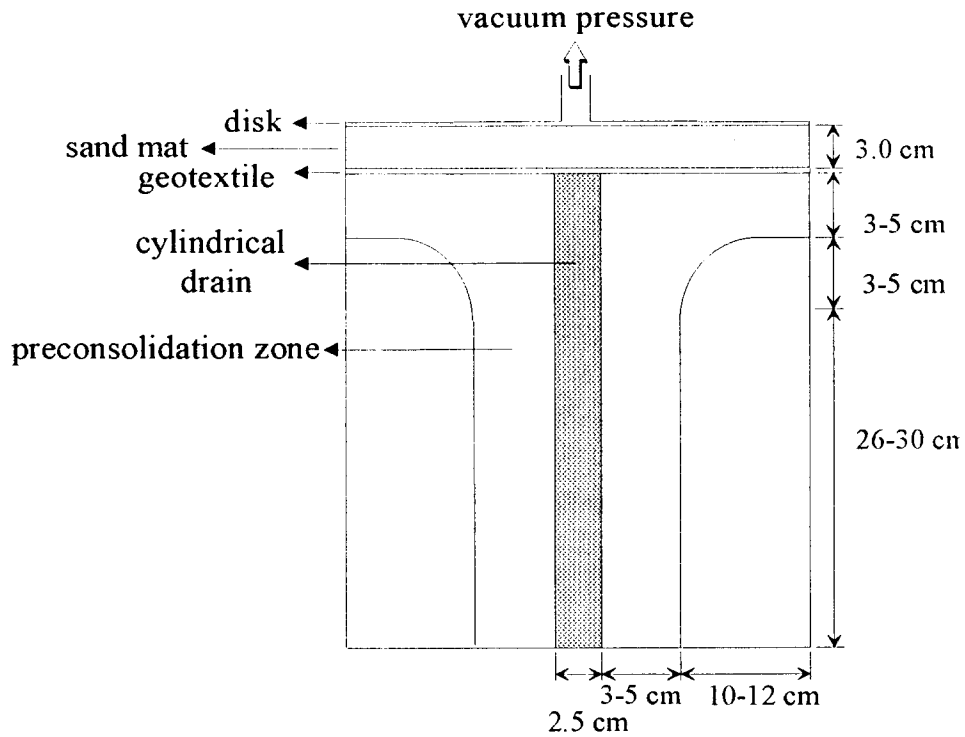


그림 8 진공재하 공법에 의한 국부 개량 효과

### 5.2.2 드레인 직경의 크기에 따른 압밀영향

시험결과 워 드레인의 경우 주로 폭 방향으로 약 5~8 cm 정도의 영향범위를 나타냈으며, 영향범위 또한 지반의 투수계수에 따라서 달라짐을 알 수 있었다. 원통형 드레인 보오드의 경우 드레인 중심으로 영향범위가 드레인 중심부로부터 6~10 cm 정도의 효과가 나타나고 있음을 보였으며 드레인경의 직경에 비례해서 영향범위가 증가하지는 않았다(표 2).

동일한 함수비와 초기 함수비하에서 드레인의 직경변화가 압밀거동에 미치는 영향을 알기 위해서 표 3에 나타난것과 같이 직경 2.3cm 와 4.5cm 인 경우의 원통형 드레인을 타설한후 진공압밀 시험을 하였다. 시험결과 그림 9에 나타난 것처럼 드레인의 직경이 변화함에 따라 최종침하량에는 큰 차이를 나타내지는 않지만 최종 압밀소요시간에는 상당한 시간의 단축 효과를 얻을 수가 있었으며 초기 간극비가 클수록 더욱 증가하였다.

표 2 드레인 보오드의 영향범위

드레인 종류	영향 범위 (cm)		비고
	폭 방향	두께 방향	
Wick Drain	6~8	2~3	
원통형 드레인	드레인 외벽에서의 거리		
드레인 직경 (5cm)	8~10		

표 3 함수비와 원통형 드레인 직경변화에 따른 침하량

초기 함수비	드레인 직경 (cm)	침하량 (cm)	시간 (hour)	유효원의 직경 (cm)
80±2%	2.3	5.2	155	4.0~4.5
	4.5	5.8	140	6.5~7.5
130±2%	2.3	8.8	170	3.5~4.5
	4.5	9.3	150	6.5~7.5
180±2%	2.3	8.9	190	4.0~5.0
	4.5	11.8	160	7.0~8.0

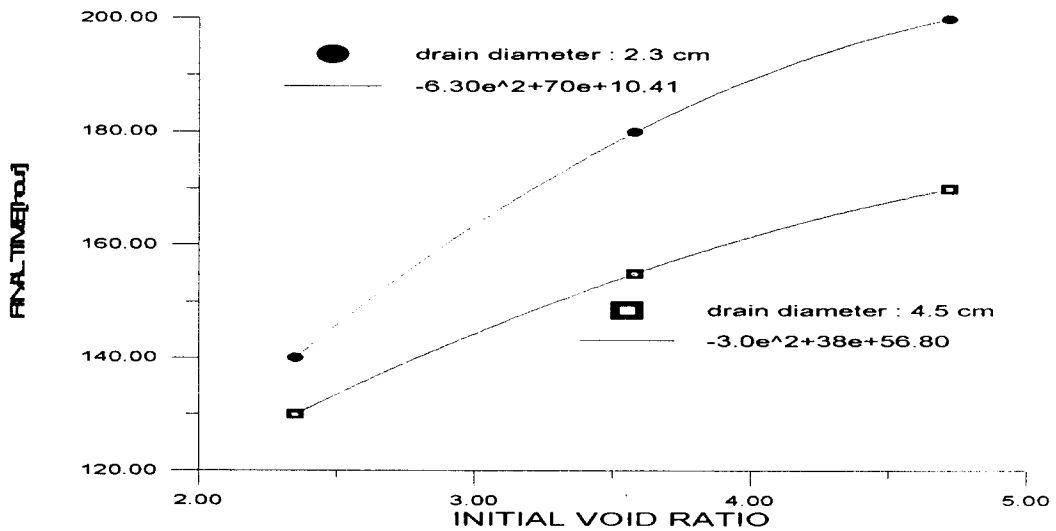


그림 9 드레인 직경 변화에 따른 압밀 영향

### 5.2.3 웰 저항 및 스미어 효과에 의한 영향

진공재하 공법에 의한 웰저항에 의한 압밀 지연효과는 거의 무시하여도 좋다고 본다. 왜냐하면 드레인 재의 배수능에 의한 영향은 진공재하의 경우 강제로 간극수를 배출시키기 때문에 드레인재의 투수능이 일반적인 시험이나 프리로딩 하중에 의한 배수효과 보다는 상당히 크다고 할 수가 있다.

실내시험의 결과에서 스미어 효과에 대한 뚜렷한 원인을 나타내지 않은 원인에 대해서는 시험 시료 자체가 교란시료를 가지고 있기 때문이며 드레인 보오드를 시험시료상에 타입시 기계를 이용한 타입이 아닌 손으로 시료의 교란을 최대한 억제하면서 타입하기 때문에 교란 효과의 영향이 거의 나타나지 않은 것으로 사료된다. 또한 진공재하에 의한 개량 원리가 진공압에 의해 강제로 간극수를 흡입하는 원리를 이용하는 것이므로 드레인 타입시 발생하는 교란 효과가 어느정도는 상쇄되리라고 본다.

## 5.2.4 진공재하의 영향

진공재하시험시 진공압을 일시적으로 중단하게 되었을 때 상부층이 약간 부풀어 오르는 Swelling현상과 더불어서 진공재하 하중의 영향범위에 들어있던 상층부의 시료와 하층부의 시료사이에 균열이 발생하여 구분히 확실하게 되었으며 시료에 부등침하 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 상당히 큰 등방압이 일시에 감소됨으로서 등방압 상태로 지반을 구속하고 있던 진공압이 제거 된것은 상부에 성토하중이 Unloading된 것과 같은 영향을 나타냄을 알 수가 있다.

즉, 상부지반의 하중에 의해서 전단파괴나 편칭파괴 현상이 일어날 수 있음을 예측할 수가 있다.

실내시험시에는 축방향이 구속되어 있기 때문에 전단파괴에 대한 영향은 검토하지 못하였으나 진공압 제거시에 상부의 토층에서 이완현상이 일어남을 관찰할 수가 있었다. 따라서 압밀도나 침하량이 최종치에 도달할 때까지 진공도를 지속적으로 유지하는 것이 중요하다.

## 6. 결론

본 연구에서는 준설, 매립에 형성된 초연약 해성점토지반의 개량공법인 진공압밀공법에 관한 연구를 하였으며, 실내 시험장치를 제작하여 드레인의 종류와 유·무, 드레인의 직경 및 초기 간극비를 변화시키 가며 실내 진공압밀 시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연약지반의 개량에 있어 드레인을 타입한 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 확실한 지반 개량효과와 더불어 시간단축 효과를 볼 수 있다. 특히 연약지반의 개량심도를 고려해 볼 때 개량심도가 깊어질 수록 지반개량효과와 개량시간에 있어 드레인의 사용효과는 증대된다.
- 2) 드레인재의 유무에 따른 압밀속도는 대략 2-3배 정도의 차이가 나타났으며, 드레인 종류에 따른 워 드레인과 원통형 드레인과의 침하량은 약 2배정도의 차이가 나타났다.
- 3) 드레인재의 영향범위는 드레인의 직경이 클수록 영향범위가 증가되었으나 직경에 비례하지는 않았고, 초기 간극비의 크기에 따라서 배수속도의 차이가 나타났다.
- 4) 원통형 드레인을 사용하였을 때, 드레인 주위에서는 깊이에 상관없이 거의 동일한 개량효과를 얻을 수 있었다. 즉, 일반적인 재하공법은 심도가 깊은 경우, 하부에서는 상부에 비해 미미한 개량효과가 기대되나 진공압밀 경우는 심도에 관계없이 거의 균등한 개량효과를 얻을 수 있다.
- 5) 원통형 드레인의 직경을 크게 하면, 드레인 중심에서 수평방향 뿐 아니라 수직방향으로도 균등한 개량 효과를 얻었다. 즉, 지반 개량이 직경한 직경의 드레인 산정을 통해 확실한 개량 효과 및 개량시간 단축을 도모할 수 있다.
- 6) 진공압밀공법의 효과는 초기 간극비가 클수록 더욱 증가했다. 즉, 초기 간극비가 매우 큰 초연약 지반에 진공압밀공법을 사용한다면 타 공법에 비해 더욱 확실한 개량 효과를 얻을 수 있다.

## 7. 감사의 글

이 연구는 삼성중공업의 지원과 협력아래 이루어진 것으로 관계자 여러분께 진심으로 감사를 드립니다.

## 8.참고문헌

1. Choa (1989), "Drains and Vacuum Preloading Pilot Test", Proceedings of Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol. 2.
2. Choa V., " Drains and vacuum preloading pilot test." Proc 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, 1989, pp.1347-1350
3. Jeanne A. Berg,(1992) "Vacuum consolidation of Sludge", M. S Thesis, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, South Dakota.
4. Kjellman (1952),"Consolidation of Clay by Means of Atmospheric Pressure"Proceedings of the Conference on Soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, June.
5. Kjellman W., "Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure" Proc. Conf. on Soil Stabilization, MIT, 1952, pp.258-263
6. Tang and Z. Gao (1989), "Experimental Study and Application of Vacuum Preloading for Consolidating Soft Soil", Proceedings of the Twelfth International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Vol- 2.