

깊은 掘鑿에 따른 問題點

프랑스와 보네*
 廉 溶 濟**
 마크 세클레***

〈표-1〉 토중구조물의 종류별 기능

| 구분 | 용도 | 擁壁 | 遮水壁 | 하중의 지지구조 | 다른구조물과의 일체가 된 구조 |
|----------------------------|----|----|-----|----------|------------------|
| Soldier Pile | | ○ | | | |
| 커피트 그라우팅 | | | ○ | | |
| 쉬트 파일 | | ○ | ○ | | |
| D. Wall | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 차수벽 | | | ○ | | |
| 벤토나이트, 시멘트 슬러리, 트렌치 스트립 파일 | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| D. Wall | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 스트립 파일 | | ○ | | ○ | ○ |

1. 地下連續壁의 機能

지중구조물의 설계에 있어서 수행하여야 할 기능이 정의되어야 하며, 주된 기능은 다음과 같다.

- 土壓 및 水壓을 지지하는 擁壁
- 地下水의 浸透를 억제하는 遮水壁
- 상부구조로부터의 하중전달을 지지하는 구조물
 더구나 주변지역 沈下와 變移에 의한 영향은 다음의 사항에 관련되어 있다.
- 기초의 시공방법
- 토공 및 버팀보의 작업순서
- 수평지지 방법 (타이백, 스트리트, 슬레브)
- 지하수위의 변화
- 사용재료의 성질 (Stiffness), 部材의 剛性

基礎壁은 단지 假設用으로만 사용되거나, 또한 永久的인 경우는 지중구조물과 일체가 되도록 사용된다.

1-1. 基礎構造物의 비교

기초의 형태는 제한된 작업공간, 지하수위(地下水位), 土質의 상태, 건축구조물 등 현장조건에 따라서 선택하게 된다.

다음의 표는 土中構造物의 기초로 사용되고

있는 각 종류별 기능을 나타낸 것이다.

D. Wall은 우리 나라에서는 부산 지하철과 기타 공사를 통하여 널리 알려져 있는데 구조적인 연결부위가 없는 연속적인 판벽로 지중을 굴착하여 계속된 철근 콘크리트벽을 만드는 공법이다.

遮水壁(CUT-OFF WALL)은 굴착을 D.Wall과 같은 과정으로 진행하면서 벤토나이트-시멘트용액 또는 콘크리트로 채우게 된다.

프리캐스트 D.Wall은 벤토나이트-시멘트 혼합용액으로 채워진 굴착부위에 프리캐스트 판벽을 삽입시킴으로써 기능상의 구분이 잘 되게 한 공법이다.

* 솔레땅쉬 범양 사 장
 ** 솔레땅쉬 범양 부 사 장
 *** 솔레땅쉬 범양 설계부장

즉, 프리캐스트 철근 콘크리트 판넬은 옹벽으로, 벤토나이트-시멘트 혼합용액은 止水壁의 역할을 하게 된다. 여기서 스트립파일은 연직하중(500톤-2,000톤), 수평하중과 휨 모멘트의 큰 하중에 견딜 수 있도록 한 단순한 D. Wall의 일부분이라고 할 수 있다.

2. D. Wall 설계

2-1 力學的 安定

D. Wall은 재료의 強度에 기초이론과 함께 계산된 수직 탄성보로 고려한다.

설계상 가장 중요한 점은 彈性보로 가정된 D. Wall에 載荷된 荷重條件을 정확히 파악하는 것이다. 계산방법은 주로 토질조사 자료에 따라 결정되며, 作用荷重은 土壓, 水壓 및 水平支持 反力이 있다. 가장 간단하고 고전적인 土壓分布의 가정은 D. Wall의 양면(흙의 지지층과 굴착층)에서 힘을 전달하는 主動壓기와 受動壓기가 각각 破壞限界에 달하는 極限水平變移가 일어날 때를 기준으로 하고, 主動 및 受動土壓의 분포 형태는 삼각형 분포로 가정한다.

D. Wall의 變移에 따라 土壓은 변하고, 토질의 應力과 變形에 관련된 彈塑性法則은 실제의 흙의 거동과 유사하게 표현된다.

따라서 土壓은 塑性狀態(主動 및 受動土壓)에 의한 彈性狀態 사이의 상태에 있게 된다. 적은 變移로 主動土壓에 이르며, 受動土壓에 이르러면 매우 큰 변이가 있어야 한다.

실제 계산은 掘鑿의 단계에 따라 해나가는데 이는 흙의 塑性變化가 한번 일어나면 다시 회복

할 수 없기 때문에 이렇게 순차적으로 하는 것이다.

예를 들면 흙의 支持側으로 D. Wall이 밀어주면 土壓이 증가할 것이며, 따라서 主動土壓狀態에서 彈性狀態로 변하는 것이다. 이 彈性狀態에서 壓力-變移圖表의 관계곡선의 기울기는 水平方向 地盤反力係數에 해당된다.

이 係數는 Pressuremeter 실험 결과에서 얻어질 수 있다. 이 係數는 확실히 土質의 특성에 따라 정해지며, 또 載荷面積과 變移정도에 따라 정해진다. D. Wall의 거동計測결과 위의 Pressuremeter 실험에서 얻어진 계수는 일반적으로 실제보다 낮은 값이었다.

(1) Toe(앞굽), Toe의 타입

極限土壓設計에서 최소한의 Toe는 掘鑿側에서 掘鑿深度 밑에 있는 D. Wall 앞의 흙을 말하는데 이곳의 受動土壓과 水平 버팀대의 힘이 D. Wall 뒷편의 主動土壓과 全體水壓과 평형을 이룬다.

이 방법은 자유단(Free Earth End) 방법이라 한다. 受動土壓이 전부 발휘된다고 가정되기 때문에 Toe 계산에 安全係數가 고려되어야 한다. 만약 이 최소 Toe 깊이가 점차적으로 증가한다면, 이에 따라서 D. Wall의 支持側에서 작용하는 逆土壓이 발휘된다는 것이 경험에 의해 알려졌다. 固定端方法은 축소된 축적의 모델실험에 의해 개발되었으며 제반 가정은 아래와 같다.

土壓이 零이 되는 깊이에서의 힘 모멘트는 零이다. 逆土壓이 작용하는 깊이는 受動土壓이 작용하는 부분의 깊이의 20%이다. 固定端 方法을 쓰면 Toe의 깊이가 깊어지나 버팀대의 作用力과 최대 휨 모멘트는 감소한다. 어떤 학자들은 다른 계산방법들을 제시하기도 한다.

(2) 內力·鐵筋콘크리트

D. Wall내부에 작용하는 內力(휨 모멘트, 전단력)은 각 굴착단계에 따라 각각 계산된다. 철근 콘크리트 계산은 이 內력의 그림(모멘트도, 전단력도)에 따르면 그 지역의 시방서 규정을 따른다. 슬러리속에 콘크리트를 타설하기 때문에 콘크리트강도에 감소계수를 고려해야 한다.

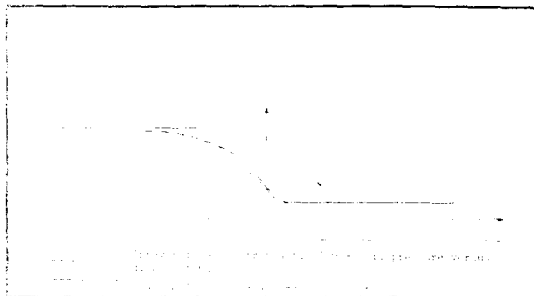


그림-1 地中壁의 土壓-變移關係

2-2. 水理的 安定

D. Wall의 設計는 擁壁으로서의 力學的 設計에 限定되지 않는다. Toe의 소요깊이 設計는 透水層의 噴射現象을 막기 위해 水理的 安定이 고려된 것이어야 한다.

이 水理的 安定計算은 D. Wall의 基礎部分에서 작용하는 흙의 무게, 浸透水力(지지층은 하향으로 또 굴착측은 상향으로 작용)을 고려하는 것이다. 地下水에 대한 세부적인 설명은 뒤에 하기로 한다.

2-3. 荷重支持의 基準

荷重을 지지하는 목적의 D. Wall은 깊이는 基礎로서 設計하고, 持耐力은 Toe부분이 壁面摩擦과 底部에서의 端持耐力으로 구성된다. 持耐力은 土質의 종류에 따라 그 지역에서 사용되는 시방서 규정을 따르거나, 전체적인 載荷實驗 결과와 Pressuremeter 實驗, 콘테스트, 標準貫入實驗 등과 같은 현장실험결과의 상관관계에서 얻어진 고전적 공식으로 구한다.

2-4. 一般的인 安定

공사의 형태에 따라 여러 가지 규명하여야 할 사항은 다음과 같다.

Tie Back에 의하여 지지되는 D. Wall에서는 Tie back 바깥쪽에서 일어나는 원형 파괴면을 갖는 전체적 안정문제, 즉 그림-2에서 빼기 ABCD의 안정, 점토층에 설치한 D. Wall의 Toe에서는 바닥면의 솟아오름(heaving)이 고려되어야 한다. 揚壓力에 대한 구조물의 안정 등이 고려되어야 한다.

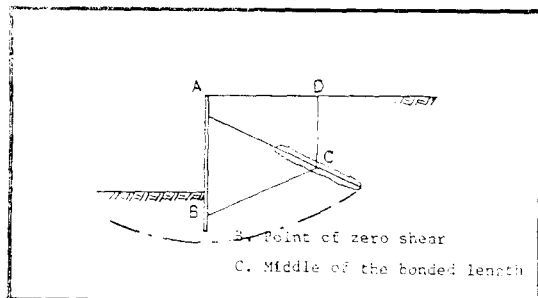


그림-2 지하연속벽의 安定計算

3. 깊은 굴착에 따른 제반 문제점

3-1. 변 위

3-1-1. 예 상

깊은 굴착에 따른 흙의 변위의 예측은 기술자가 당면하게 되는 가장 어려운 문제점 중의 하나인데, 변위는 무수한 계수, 즉 응력 구조물로서의 역학적 성질, 흙의 이력, 흙의 제계수 및 시간에 따른 이들 계수의 변화, 수문적인 경과, 시공순서, 현장에서의 시공과정 및 시간 등에 의하여 좌우된다.

관련기술자는 彈性理論과 재료역학지식을 가지고 또한 현장상태를 단순화시킨 모델 실험을 행함으로써 보의변위, 버팀대의 반력 등을 상당히 정확하게 예측할 수 있는 공식을 개발해 왔다. 수많은 역학적 계수 및 시간함수를 지닌 4차원의 문제로서 지중구조물을 해석하는 경우는 아니다.

塑性論의 컴퓨터 프로그램으로 얻어진 답은 신빙성 있는 정보를 주지 않는다. 彈塑性理論이 보다 정확한 답을 주나 입력되는 자료에 따라 정확도는 결정되는 것이다. 비록 자세하다고 하는 자료도 상당히 자세치 못하지만 三次元의 有限要素 모델은 비교적 정밀한 답을 주지만 가격이 비싸다는 단점이 있다. 흙의 모형화는 실제의 복잡한 양상을 모두 고려할 수 없다.

일반적으로 有限要素解析은 가격에 비해 정확도의 향상은 상당히 적어 비실용적인 경향이 있다. 따라서 變位の 예측은 전문가의 개인경험에 의해 행해진다. 그리고 이러한 경험을 얻는 가장 좋은 방법은 실험을 하고 현장에서 계측을 하는 것이다.

여러 이유에 의하여 토질역학의 이해 및 공사비 절감을 위한 變位測定이 현재까지는 잘 되어 오지 않았기에 설계기사는 따라서 참고할 기록이 많지 않은 형편이다.

그러나 전문화된 회사들은 현대적인 기술의 신빙도를 증명하여 그들의 know-how를 선전하는 때는 현장계측이 상당히 좋은 방법이라는 것을 인식하고 있다. 이러한 현장계측은 설계에서 공사비 절감을 가져온다.

3-1-2. 측정, 현장측측

현장 기술자는 다음의 여러 방법들을 사용하여 측정할 수 있다. 즉 간단한 수준측량, 삼각측량으로 mm 까지 변위를 측정한다. 더 정밀한 지형측지 장비로 1/10 mm 까지 정밀도를 높일 수 있는데, 지하철 공사 같은 변위가 잘 일어날 수 있는 곳에 지난 수년간 많이 행해졌다. 이러한 기술은 고도로 숙련된 인력과 측량기구가 소요된다.

D. Wall 에 스트레인 게이지를 설치하는 것은 다른 측정치와의 상관관계를 이해하는데 도움이 된다. 경사측정기의 정밀도는 지난 수년간 상당히 향상되었고, 이는 작은 프로그램의 사용과 고도로 숙련된 기술자에 의해 시간에 따른 주기적인 변위測定도 가능케 되었다.

Tie back 에 작용하는 실제 引張力을 조절키 위해 Soletanche 는 특유의 인장방법을 고안했다. 이 인장작업 중 변위가 정확하게 측정될 수 있다. Tassometer, Piezometer, Tie back Dynamometer 등은 충분한 자료를 가질 수 있는 수단들이다.

공사 및 공사장 주변 상황을 적절히 통제·조절할 수 있도록 계기를 설치하는 것은 바람직한 것이다. 이리하여 적절한 품질관리로 현장 작업 절차를 향상하고 향후의 설계에 반영하여 향상시킬 수 있는 것이다. 통상 계기 비용은 아주 세련된 장치들을 쓴다 해도 기초공사 예산의 상당히 적은 비용으로 만족하다.

3-1-3. 계측 결과

문제를 간단하게 하기 위해 지하수가 없는 경우를 고려해 보자. 굴착에 따른 응력의 발생은 포와송의 현상으로 다음 그림-3과 같은 변형을 야기한다.

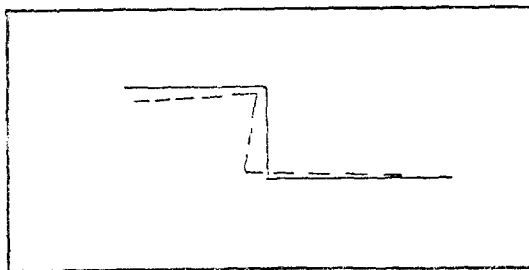


그림-3 掘鑿에 따른 변형

여기서 바닥의 heaving 현상은 좀체로 알기 어렵다. 이러한 heaving 은 점토의 그것과는 구별되어야 한다. 이 현상은 5~10년 정도 유지되며, 따라서 설계에 고려되어야 하는 것이다. 만약 토류구조물이 굴착 이전에 받았던 응력보다 더 큰 응력을 버팀대가 또는 Tie back 이 가한다면 변형은 그림-4와 같을 것이다.

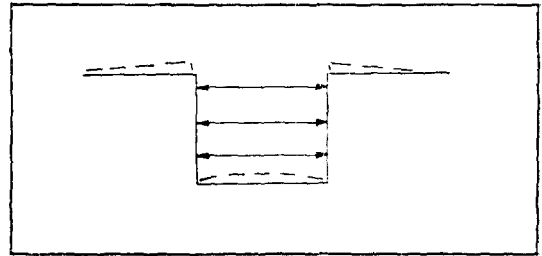


그림-4 Tieback 設置에 따른 변형

이것은 等分布 壓力하의 對稱沈下 현상과 같다. 다시 말하면 만약 이러한 側方向 變移를 원치 않으면 토류벽에 K_0 壓力을 가해 주어야 한다. 過壓密된 흙에서 이것은 현실적이지 아니다. PECK(1969)은 토류벽 주변의 沈下에 대한 차트를 그림-5와 같이 만든 바 있다.

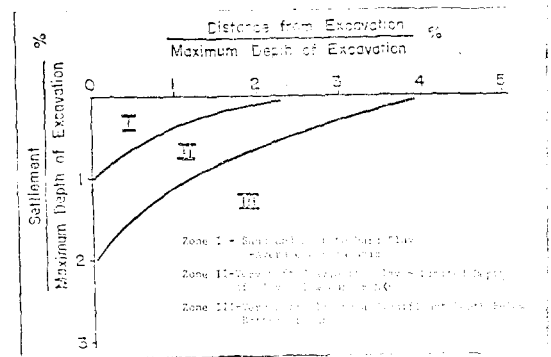


그림-5 거리—沈下關係

이 변위량은 오늘날 하중상태를 볼 때 적절치 못하다. Tie back 또는 하중을 가한 버팀대를 사용한 현장설치 D. Wall 공법은 오늘날의 심부 굴착에서 예상되는 변위를 방지할 수 있다. 다음의 예는 계측이 잘된 현장의 전형적 실례이다 (다음 장의 그림).

3-2. 바다의 부풀어오름(heaving)

이미 언급한 대로 굴착 중 바닥면의 부풀어오

름은 단지 바닥면의 수평을 유지 못한다는 문제를 야기한다.

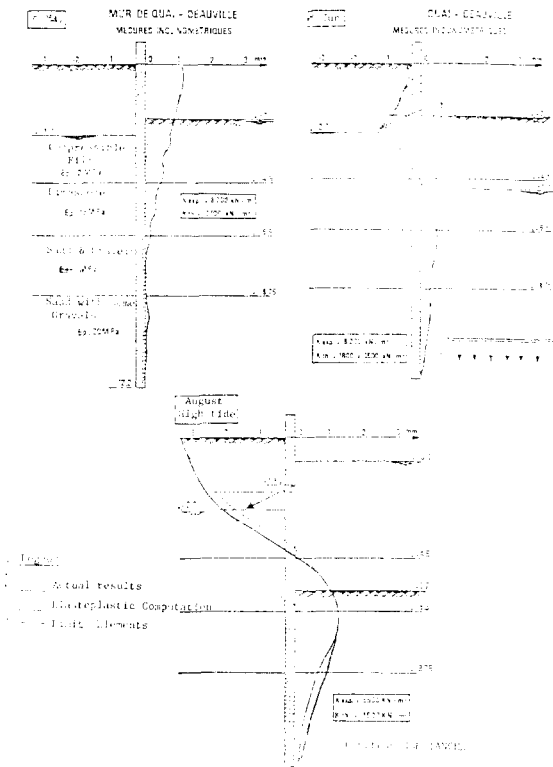


그림-6 掘整에 따른 D. Wall의 Moment 변화

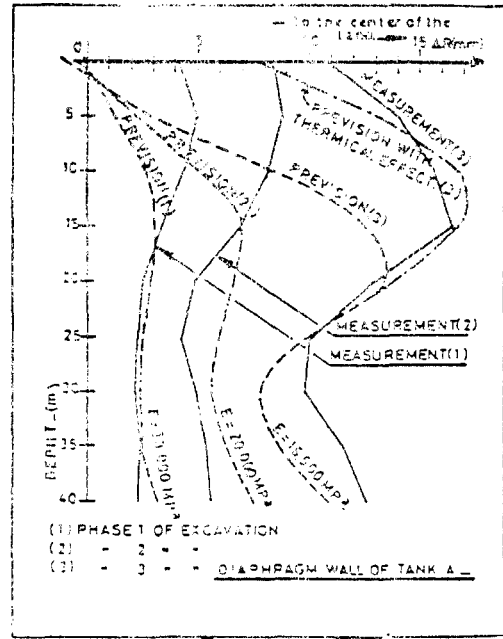


그림-8 變形量의 計算値와 實測値의 比率

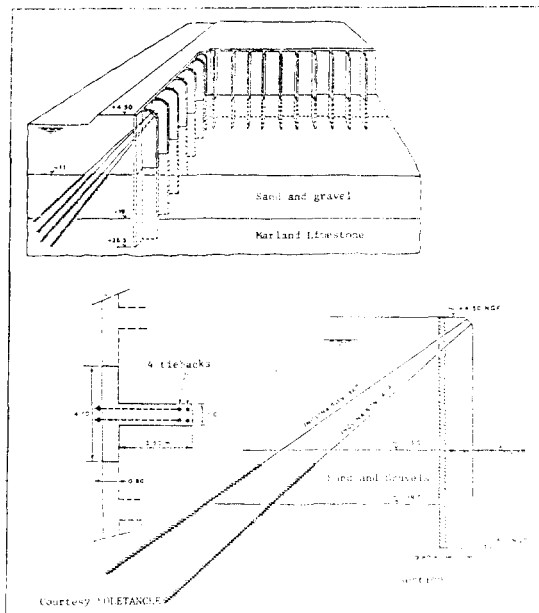


그림-7 Le Blayais 原子力發電所 掘整

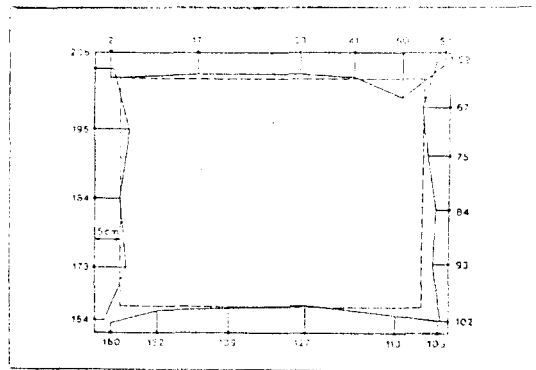


그림-9 D. Wall의 側方向變位

그러나 어떤 Swell potential이 높은 粘土에서는 수년간 계속적인 Swell이 있을 수도 있다. 이런 경우 다음 세 가지 방법이 유효하다. 즉, 지중구조물과 연결된 경고한 매트기초로 Swell을 막을 수 있는데, 건물의 하중을 매트기초에 전달토록 한다. 지하실 바닥과 굴착면 사이에 어떤 적정한 공간을 두어 부풀어 오름을 허용하는 방법(파리 National 건물, 유연한 포장(터널 등에서) 등이다.

3-3. 地下水

3-3-1. 댐효과

터널, 지하철, 지하 주차장 등은 지하수 흐름을 방해하기 때문에 설계자는 적절한 수위 및 수압을 선택하여 설계해야 한다. 토질조사에서 얻어지는 수위 뿐만 아니라 水位-時間, 깊이-水壓 및 기타 상황변화로 인한 水位變動도 고려해서 설계되어야 한다. 브뤼셀 지하철의 어떤 구간이 평평한 지층에 건설되었는데, 그 터널이 지하수의 흐름을 가로막아서 하류측의 피트층에 있는 지하수위를 낮추어 주위 고층건물에 심각한 피해를 주었다. 이러한 댐 효과를 막기 위해 터널을 가로지르는 파이프를 물이 빠지도록 해야 한다.

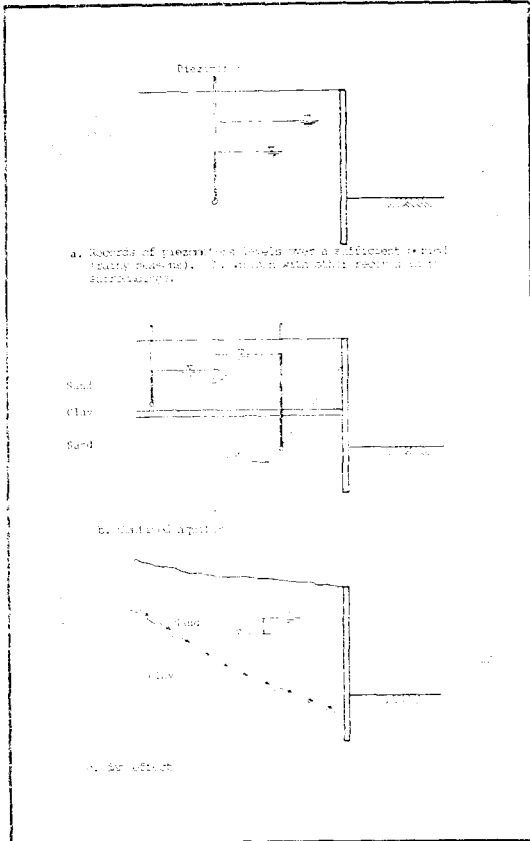


그림-10 地下水가 D.Wall에 미치는 영향

3-3-2. 洗掘 및 噴射

굴착된 바닥면의 안정을 위해서는 力學的인安定과 水理的인安定을 고려해야 한다. 浸透水力이 흙의 水中單位重量보다 강할 때 洗掘이 발생되고, 아울러 浸透水力은 토류벽의 Toe 부

분에 작용하는 受動土壓을 감소시킨다.

이러한 상황을 타개하기 위한 두 가지 방법은 流線의 길이를 증가시키기 위해서 Toe를 더욱 깊게 하거나, 流線을 取水井으로 유도하는 방법이다.

3-3-3. 流出量

굴착시의 長期, 短期 流出量은 잘 알려진 수학적 모델에 의한 이론들로 예측할 수 있다. 이론 전개를 위한 모델의 단순화는 이러한 이론들에 한계를 가져왔지만 가장 중요한 것은 透水係數이다. 가장 신빙성 있는 데이터는 대규모 펌핑 테스트에서 얻어진다.

3-3-4. 減勢孔

減勢孔을 설치하면 펌핑을 하지 않고 排水를 하므로 경제적이다.

3-3-5. 揚壓力

지하 구조물을 설계할 때 구조적인 측면 뿐만 아니라 揚壓力도 고려해야 한다. 종종 透水係數가 낮으면 浸透流量이 적고 따라서 水壓이 적다고 생각하기 쉬운데 이것은 잘못된 것이다. 揚壓力은 水壓分布로만 결정된다. 平衡狀態가 아닌 水壓은 揚壓力을 유발한다.

이 때에 예방책은 영구 펌핑으로 에너지 절약을 위해서 'Grouted raft'가 설계될 수도 있다. 이러한 조치는 단지 역학적 안정을 위한 것이지만 D. Wall에서 Toe 부분은 앵커의 역할을 하므로 항상 양압력에 대하여 유효하다.

4. 結 論

높고, 길고, 넓고, 무거운 건물은 엔지니어에게는 커다란 문제를 뜻한다. 좋은 기초 설계가 좋은 시공을 위한 첫번째 중요한 것이며 믿을만한 시공업자에게 맡기는 것은 그 다음이다.

환경의 손상은 즉 설계된 건물의 손상이며 항상 깊이 연구하여야 할 과제이다. 우리의 어떤 유명한 토질공학자는 항상 다음과 같이 말했다. "어머니인 자연은 건설인에게 좋은 숙녀로 매우 반기를 원하지 유린 당하기를 원치 않는다."

토질공학자로서 여러 단계에 걸쳐 좋은 실력을 함양함은 우리의 사명이다. 상세하고 적절한 토질조사(환경조건, 코어링, 실험실 실험, 현장 실험, 수리지질 시험, 지구물리탐사 등)은 환경 공해, 훼손, 최적설계 등의 면에서 그 비용에 비해 훨씬 많은 이익을 보장해 줄 것이다.