

KGS FALL '94 National Conference
28, 29 October, 1994/Seoul/Korea

KEY NOTE LECUTRE

도심지 지하굴착의 문제점과 개선방향

(SOME PROBLEMS AND REMEDIAL MEASURES OF BRACED EXCAVATION IN URBAN AREAS)

김 학문, HAK-MOON KIM

단국대학교 토목공학과 부교수, ASSOCIATE PROFESSOR, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, DAN KOOK UNIVERSITY.

SYNOPSIS : This report describes aspects of recent braced excavation constructed in built up areas where adjacent buildings or underground utilities are likely to be subjected to settlement and damages. Trends and choice of earth retaining structures for deep excavation are present, and some design and construction techniques are introduced in order to minimise possible adverse effects to the urban environment. Some problems in design and construction of braced excavation in urban area are closely examined and remedial measures are proposed.

1. 서론

부산 지하철 공사가 1985년을 고비로 한창 절정에 있을 무렵 고층건물이 밀집된 시내의 이른 아침 7층 높이의 콘크리트 건물이 인접 굴착중인 지하철 공사현장으로 콘두박질하는 현장을 목격 한지가 10년째로 접어들었다. 그 당시 연약점토층위에 토사와 전석으로 매립하여 형성된 지반에 지하수위는 바닷가인 관계로 변화가 심할뿐더러 지표면 부근에 위치해 있었다. 흙막이 벽이라고 불리는 모든 토류구조는 각 공구별로 나뉘어 시공 가능성을 점검받고 있는 그야말로 토류구조물 국제 전시장과 같았다. 각 공구별로 JSP, SCW, Sheet Pile, H-Pile 과 토류판 공법, L.W 등 공법을 상가지반에 적용시키느라 심혈을 기울여 투쟁하고 있었으나 벽체배면의 지하수유출과 인접지반 침하에 따른 구조물 손상등으로 문제점에 봉착하자 그 해결책으로 현장타설 철근콘크리트 벽체를 시공할 수 있는 지하연속벽공법이 지하철공사에 처음으로 도입되었다. 서울 지하철의 경우 정거장 구간만 주로 개착식으로 하고 역사간의 노선은 터널공사로 계획되어있어 정거장 구간의 경우 약 65%가 H-Pile 과 토류판 혹은 현장타설 콘크리트 판벽 벽체이고, 20%는 SCW, 14%는 지하연속벽, 1%만이 Sheet Pile 벽체가 채택되었으며, 평균굴착 심도는 20 ~ 25 m 정도이다. 1990년에 들어 도심지 재개발과 주차장 확보를 위한 고층건물의 양적팽창과 굴착심도의 증가와 더불어

대규모 굴착공사가 급증되었고, 인접구조물들의 영향평가를 조사하기 위하여 예측의 필요성이 부각되기 시작하였다. 본 논문에서는 도심지 굴착에서의 설계 및 시공에 관한 문제점들을 고찰하여 이들이 인접구조물에 미치는 영향을 검토하고 보다 경제적이고 안전한 건설공사가 이루어지도록 간략하나마 개선대책을 제시 하고자 한다. 특히 현재 대도시마다 지하철 공사가 한창이거나 계획되어 있으며, 도로확충, 고속철도공사 및 대규모 건축공사들을 목전에 둔 상황에서 기술의 국제화가 요구되는 이 시기에 아직도 가시설 토류벽 설계 및 시공의 개념을 떨쳐버리지 못하고 도심지에서 근접시공에 임하는 기술자가 없기를 희망하며 아직도 거름마 단계에 있는 이 분야의 경험을 모아보고자 한다.

2. 토류구조물의 계획과 선택

계획단계에서는 우선 시공중 토류구조물이 어떠한 상황에서 어떤기능을 하여야 되는지를 명확하게 정의할 해야 되겠으며 시공된 후 주변에 미치는 영향과 도심지 근접시공을 염두에 두고 다음과 같은 조건들을 상세히 검토해 나가게 될 것이다.

- 지형, 지질조건, 지반상태
- 인접지상, 지하구조물의 영향
- 지하수의 변화, 수질오염 영향

- 소음, 진동, 분진등 환경영향 평가
- 현장규모와 장비의 적합성
- 문제 발생시의 가능한 대책 가능성
- 경제성과 공사기간
- Mud Wave 또는 액상화 가능성

그러나 가장 문제의 발생소지가 높은 항목으로는 지반의 상태를 어떻게 설계의 입력자료로서 채택할 것인가 하는 것이다. 토압과 변형이 발생하는 위치에 Borehole 조사가 시행되어야 하며 가능한 모든 해석과 계측단면에서 조사된 시료는 실험실과 현장 조사를 거쳐 강도정수와 지반반력계수등이 결정되어야겠고 진행성 파괴(Progressive Failure), 대기노출로 인한 극종화 현상, Creep 영향, 응력이력사항, 최대강도가 아닌 잔류강도(Residual Strength) 적용 등의 적용성이 평가 되어야겠다.

토류구조물의 선택에 있어서는 일반적으로 강성벽체(Stiff Wall)와 연성벽체(Flexible Wall)로 나뉘고 다시 차수벽(Cut-off Wall)인가 개수식 벽체인가에 따라 주변 지하수위의 적용여부가 결정되겠다. 물론 강성벽체도 굴착심도가 깊을때는 Semi-Rigid 로 휨의 영향을 받지만 지하연속벽의 경우 굴착중에는 가시설 토류벽 역할을 하고 시공후는 영구적인 지하실 구조벽체로 사용되기 때문에 계획단계에서 안전성과 경제성등이 비교 검토된다. 벽체의 버팀구조로는 어스앵커의 시공조건이 가능한 지반이나 주변조건 일때는 문제가 없으나 그렇지 못할경우 버팀대(Struts) 사용이 불가피하여 길이가 30 ~ 40 m 이상일 경우 시공오차 및 응력집중에 의한 변형등으로 벽체의 수평변위를 유발할 우려가 있다. 최근 지반조건이 불량하고 굴착심도가 깊을 경우 주변구조물들의 보호차원에서 지하층 콘크리트 바닥 Slab 를 버팀으로 사용하는 Top-Down (역타) 공법이 자주 이용되고 있다.

주변지반의 지하구조물이 복잡하게 설치되어 있는 도심지에서는 어스앵커공법이 더욱 힘들뿐더러 정착장 부근의 지반조사나 토지이용 허가를 받기가 쉽지가 않아 토류벽 상부는 주로 Struts 버팀이나 Slab 버팀을 채택하고, 앵커 길이가 짧고 지반이 양호한 벽체 하부만을 어스앵커나 Rock 앵커를 설치하는 예가 늘고 있다. 최근 팔목할 만한 또 하나의 변화는 비교적 지반상태가 양호한 도심지 대심도 굴착에서 비교적 강성이 뛰어난 H-Pile 이나 철근으로 보강된 주열식 벽체(Contiguous pile wall) 의 일

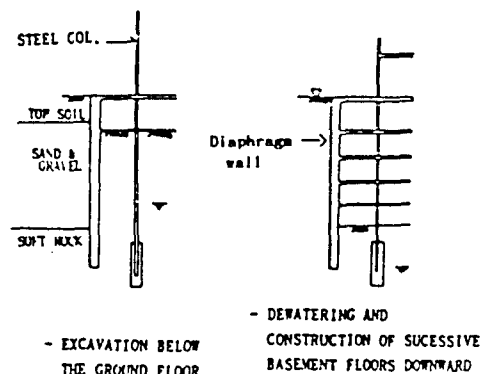


그림 1. An example of deep excavation for a underground car part in Yoido area (Top & Down Method)

부인 CIP (cast in place pile) 벽체가 많이 적용되고 있다. 굴착심도가 깊거나 자갈층이 두꺼울 경우 수직도 문제로 차수보강을 LW 와 JSP 등으로 연결시키기도 하지만 단단한 암반지층에서는 원형 Bit 의 회전과 타격작용을 이용하여 작은 진동으로 안전하게 경암층내에 H-Pile 등의 삽입이 가능한 장점이 있다. 물론 지하연속벽 보다는 경제적이면서 큰 시공장비 및 작업장이 필요치 않고 불규칙한 대지모양을 정확히 시공할 수 있는 점도 CIP 가 자주 채택되고 있는 이유일 것이다. SCW 의 경우 지층이 그다지 단단하지 않고 균질등방의 지반에 적용된 예가 많으며, 지하수위가 높은 경우는 제한된 강도 규정 때문에 대심도나 인접구조물 보호차원에서 주의깊은 검토가 필요하다. 그 외에도 토류구조의 선택에 있어 주변침하를 제한하기 위한 강성이 요구되거나 지하수의 저하를 방지하여 침하를 줄이는 차수벽 혹은 벽체 수압을 제거하기 위한 투수식 벽체등 각각의 요구되는 기능에 맞도록 벽체가 선택되기 위하여서는 폭넓은 비교분석이 이루어져야 한다.

3. 토압과 해석방법

불과 몇 년전만 하더라도 다단식 버팀의 토류구조 설계에서는 PECK(1969) 이나 Tschebotarioff(1973) 가 제안한 경험적 가시설 설계토압으로 만족하였으며 굴착심도 역시 불과 15 ~ 16 m 내외의 공사였다. 그러나 근래에는 굴착심도가 30 여 m 를 넘는 현장이 일반적이고 인접구조물이나 지하 매설물의 피해를 예측하는 근접시공 개념의 도입과 그 영향평가라는 안전설계 및 시공이 필연적이다. 설계방법에 있어서도 가정된 토압을 하중으로 놓고 Beam 해석하기 보다는 시공단계별 굴착해석을 요구

하며 벽체의 거동상태에 따라 토압이 변하는 탄소성 Soil-Structure Interaction 모델을 해석에 사용하기도 하며 FEM에 의한 주변지반 거동을 예측하여 보강대책을 논하기도 한다. 다단식 버팀을 이용한 굴착에 있어서의 흙막이 벽에 작용하는 토압분포는 고전적인 Coulomb(1776) 이나 Rankine(1857)의 소성평형(Plastic Equilibrium) 이론에 의한 형태가 아니라는 것은 Terzaghi 와 Peck(1948)에 의하여 밝혀졌다. 그후 Tschbotarioff(1951) 역시 토압의 분포가 깊이에 따라 증가되지 않고 사다리꼴 모양이라고 제안하였고 Terzaghi 와 Peck(1967)은 많은 현장계측과 관찰을 토대로 토압의 크기가 $0.65K_a\gamma H$ 이며 직사각형 분포라고 주장하였다.

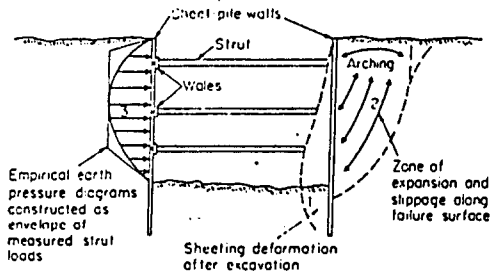


그림 2. Deformation of sheeting and soil and the resulting pressure distribution in braced cuts in sand [After Tschbotarioff (1973)]

이러한 반경험적(Semiempirical) 겉보기 토압(Apparent Pressure)은 연성벽체의 버팀굴착시 상부 버팀이 설치된후 계속되는 하부 굴착으로 벽체하부의 변형이 커지는 반면 상부버팀대는 움직임이 제한된 관계로 이 지점을 축으로 회전하게 되어 상부버팀대 부근 토압이 Arching등의 영향을 받아 고전적 주동토압보다 커지며 하부의 토압은 상대적으로 감소되어 사다리꼴이나 직사각형 토압분포를 나타내는 것이다. 그러나 이러한 경험 토압 분포들은 굴착후 지지구조 설치가 완료된후의 분포로서 굴착도중 다음단계 지지구조 설치하기 위하여 굴착하는 경우의 토압에 대하여는 알려진바가 없는 난점이 있다.

Prestressed tieback 벽체의 토압분포에 대하여 Clough(1976)는 대부분의 Prestressed벽체는 버팀대를 사용한 벽체하중의 높은 값보다도 큰 토압을 보이고 있다고 발표하였는데 그결과를 그림 3에 나타나 있다.

가장 보편적으로 사용되어지고 있는 겉보기 토압의 분포는 사실

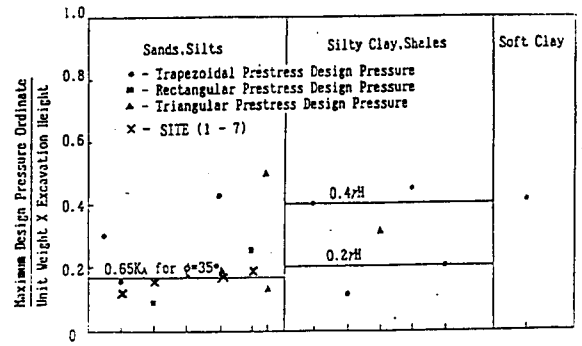


그림 3. Prestressing 작용시 토압계수

토에서 그림 4, 점토질에서 그림 5에 나타나 있으며, 이들 토압 사용시 제한 사항을 고려해 보면 다음과 같다.

- 최종굴착후 버팀대 하중을 토압으로 환산하였다.
- 굴착폭에 비하여 비교적 깊은 심도에서 균일한 토층을 대상으로 예측
- 버팀대의 변형이나 Prestressing이 고려 않됨
- 굴착단계와 지층변화의 영향이 적다고 가정
- 최대굴착심도가 20m이내인 현장 경험치만을 분석자료로 사용
- 가시설 흙막이벽을 대상으로 산정된 토압

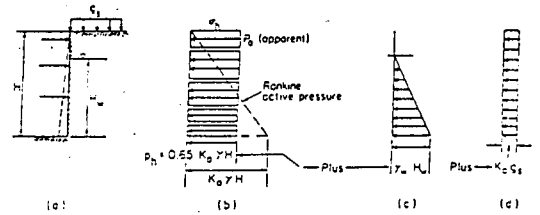


그림 4. Apparent earth pressures from sands for strut loads in braced excavations : (a)braced wall; (b)apparent pressure diagram for $P_h=0.65K_a\gamma H$ compared with Rankine active pressure; and (d)uniform surcharge pressure is added to apparent pressure [Part (b)from Terzaghi and Peck (1967)]

이들 반경험적 토압(Semi-empirical pressure)를 도심지 근접시 공에 적용하였을때 예상되는 아래와 같은 문제점으로 인하여 요즘은 주변지반 침하가 허용되는 가시설 토류벽 설계나 혹은 최종굴착단계에서 버팀하중의 총수평을 검토하는데 주로 이용되고 있다.

- 굴착단계별 토압이 최종굴착단계의 경험토압을 만족하는지 여부

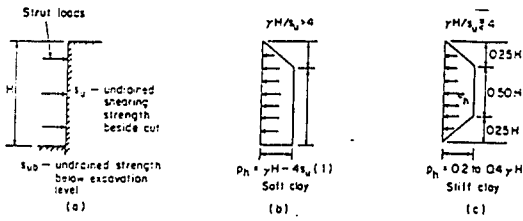


그림 5. Empirical rules for apparent pressure diagrams for calculating strut loads for braced cuts in clays: (a) braced wall; (b) diagram for $\gamma H/S_u > 4$ provided that $\gamma H/S_{ub} \approx 4$; and (c) diagram for $\gamma H/S_u \leq 4$. (NOTE: (1) If soft clay extends for considerable depth below bottom of sheeting, use $\gamma H - m4S_u$ where $m=0.4$ or $\gamma H - 1.6S_u$) [Diagrams from Peck et al. (1974)]

- 결보기 토압 사용시 주변지반의 침하 문제
- 수도권의 복잡한 지층상태에서 적용성 (특히 풍화암과 연암층이 두꺼울 경우 토압분포)
- 차수벽인 경우 지하수위의 관리와 흩막이벽체에 작용하는 횡하중관계 (인접 구조물의 부등침하 방지가 요구될 때)
- 벽체의 강성과 벽체의 최종굴착면 이하로 시공되는 근입 심도의 영향
- 영구벽체로 사용시 토압의 변화와 버팀대 철회시의 안전 점검 방법
- 시공단계별 흩막이벽의 거동에 따른 토압의 변화를 설계에 반영할 수 없을 경우 설계안전도에 미치는 영향

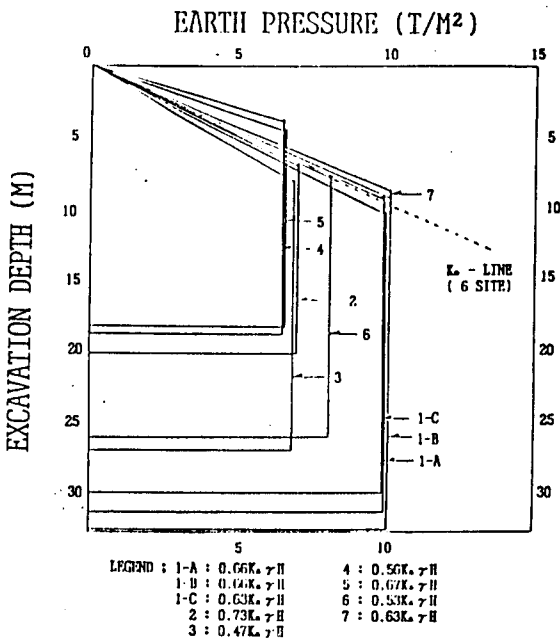


그림 6. 최대 예상 토압분포도

다층토 지반으로 형성된 국내의 굴착현장에서 계속된 현장자료를 토대로 굴착심도가 20 ~ 30 m 사이이며, 여러 종류의 토류벽을 어스앵커로 지지되고 지하수위는 비교적 높게 분포하고 있으며 LW 등으로 차수조치가 취해진 7개 현장의 자료 분석은 다음과 같다. 그림 6에 의하면 벽체 상단 1/3 지점까지는 Rankine의 정지토압이나 주동토압 사이의 크기로 삼각형 분포를 하고 있는 반면 하부는 $P = 0.65\gamma HK_a$ 로 전체적으로 사다리꼴 형태를 보이고 있다. 지하수위는 대부분 굴착심도와 함께 하강하고 있으나 지하연속벽으로 시공된 1개 현장만 굴착 Level과 주변지하수위의 중간에 위치하고 있어 주변지반 토류벽들이 현실적으로 차수되지 않고 있으며 지하수 저하시 정확한 침하계산 방법이 적용되어있지 않아 이로인한 인접구조물 영향평가에 많은 문제가 있다.

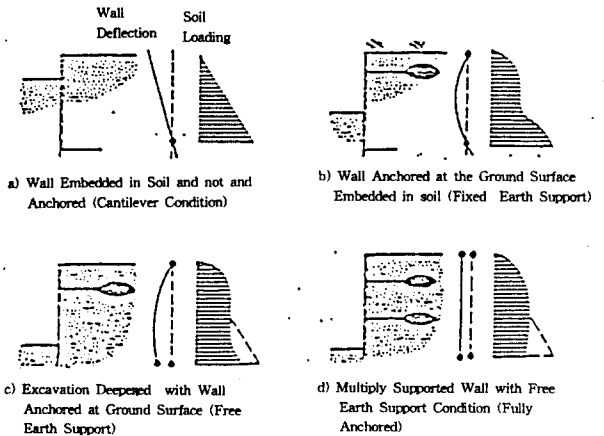


그림 7. 앵커로 지지된 흩막이벽의 시공단계별 벽체거동과 토압 분포

앵커로 지지된 모든 현장의 토압형태가 그림 7의 d)경우와 같이 벽체의 수평이동이 상당할 것으로 예측되어 앵커설계시 하중손실, Creep 변형 Wire relaxation 등 Loss 산정후 보완대책이 바람직하겠다. 그림 3에서 Prestressing을 작용시킨 현장의 토압을 Clough의 도표에 옮겨본 결과 역시 Clough 값의 하한치와 유사한 경향을 보인다. 풍화암과 연암(화강암질)층에서 측정된 횡토압을 점착력이 Zero 일때 토압계수와 내부마찰각으로 역해석한 결과 풍화암층이 $K_a=0.29$ 로 $\phi=33^\circ$ 로 연암층이 $K_a=0.2$, $\phi=42^\circ$ 로 예측되었다. (그림 8 참조)

서울 강남의 변성암 지역에서 계속된 토류벽의 거동 및 토압은 연암 및 경암의 파쇄대와 불연속면에 존재하는 점토질 실트 채

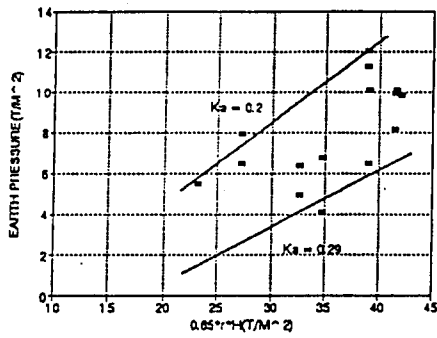


그림 8. 압반(풍화암 및 연암)의 계속토압계수 (K_a)

음계(Gauge)의 영향으로 굴착진행과 시간에 따른 증가 추세를 보이고 있다. (그림 9 와 10 참조)

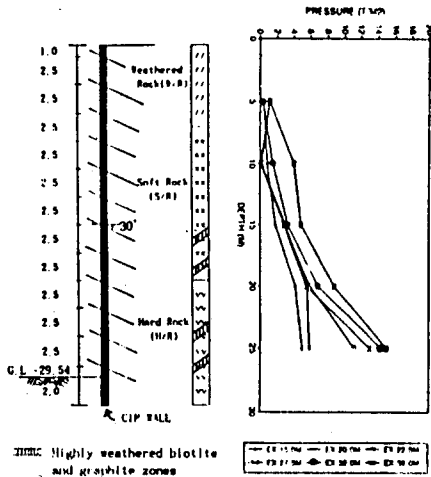


그림 9. Lateral pressure measured by pressurecells at various excavation stage

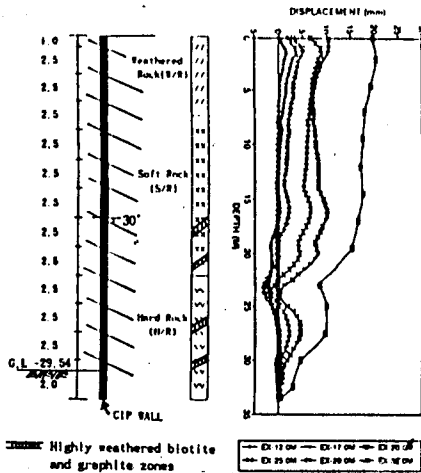


그림 10. Horizontal displacement of the CIP wall measured by Inclinerometers

결과적으로 토압의 크기는 벽체의 거동상태에 따라 결정되며 벽체의 변형이 주변지반 침하와 밀접한 관계가 있으므로 근접시공 설계에서는 인접구조물의 위치에 따라 토압계수(K)가 K_a , ($K_a + K_o$)/2 혹은 K_o 를 사용하는 Canada의 설계기준을 참작하여 별도의 안전율을 적용시켜서 인접구조물의 피해를 최대한 방지하는 대책이 시급하다.

해석방법중 도심지 깊은 굴착에 가장 폭 넓게 활용되고 있는 모델은 탄소성 Soil-structure Interaction 모델로 지반, 벽체와 지구구조의 종류 및 강성이 동시에 입력되어 굴착단계별 벽체의 변형에 따른 토압이 산정되고 토압을 하중조건으로 토류구조의 부재설계가 가능할 뿐더러 시공중 작용된 선행하중이나 벽체 변위의 억제기법도 적용이 용이하다. 국내에서는 SUNEX, EXCAD, WALLAP 컴퓨터 프로그램들이 여기에 속하며 시공단계별 누적된 벽체 변위로 부터 주변지반 예상 침하량과 인접구조물의 안정성 평가가 가능하다. 또한 어느 시공단계에서도 현장측정자료를 사용하여 역해석이 가능하지만 주변 지하수의 변화에 따른 정확한 해석이나 진동의 영향고려 등은 앞으로 보완 개발되어야 할 과제중의 하나이다. 연약점토지반이나 동시 굴착현장중 지반이상거동내의 응력·변형 상태가 복잡한 경우에는 FEM 해석방법이 널리 적용되고 있지만, 이러한 설계예측치나 단순화된 공식적용 결과는 항상 현장 계측결과에 의하여 재조정되고 재설계되어 예측한 지반거동을 실제로 평가할 수 있는 기회로서 삼아야 되겠다.

4. 시공방법과 지하수 영향

가정한 지반조건과 단순화 시킨 공식선택이 적중하였을 경우 현장에서 발생하는 크고 작은 문제점들이 시공조건이나 방법의 영향으로 귀결시킬 수 있으나 그렇지 않은 경우도 얼마든지 예상할 수가 있다. 국가적인 손실과 연결될 수 있는 큰 사고현장들을 조사해보면 설계·시공·감리 각 부서 부터 2 ~ 3 가지 문제의 요소들이 동시에 작용하였을 경우에 피해가 야기된다는 것을 느낄 수 있는데 이러한 2 ~ 3 가지 요소는 적용된 안전율과도 무관하지 않을 것이다. 설계시 가정한 하중조건이나 지반상태가 현장의 시공상태와 다름에도 불구하고 재설계를 기피한다거나 제시된 시공방법을 무시하고 공사를 진행시킴으로서 설계와는 거리가 먼 현장조건에서 시공하는 경우가 도심지 굴착과

근접시공에서는 배제되지 않는한 돌이킬 수 없는 재난은 항상 우리들과 함께할 가능성이 높다.

토류벽에 작용하는 수압은 토압의 2배가량 된다해도 과언이 아니다. 왜냐하면 횡토압계수 K 가 0.3 ~ 0.5 일때 물의 K=1.0 이며, $\gamma_w = 1.0 \text{ t/m}^3$ 일때 $\gamma_{\text{sub}} = 1.0 \text{ t/m}^3$ 이 되기 때문이다. 그러므로 지하수위의 2 ~ 3 m 증가로 인한 벽체의 하중변화는 실로 대단할 뿐더러, 지하수위의 감소로 인접구조물들의 침하를 예상할 수 있을것이다. 계절적인 지하수위 변동과 지하구조물 축조시 지하수의 흐름을 막고 있는 상류측 수압증가는 지하구조물 자체를 수평이동 시킬수 있을뿐더러 대부분의 도심지 굴착사고의 원인으로 연결되곤 한다. 불행하게도 국내의 도심지 굴착 현장에서 측정된 지하수위는 지하연속벽 현장을 제외하고는 대부분이 굴착 Level 과 함께 저하되고 있음이 제측을 통하여 보고되고 있다. 벽체의 Joint 나 근입부가 부실하여서 인지 정확한 원인은 알수 없으나 모든 벽체가 차수 Grouting 적용에 굴착 현장 주변에 구조물들이 존재하는 도심지 내의 현장이었다는 사실이다. 실트, 모래, 풍화토가 혼재된 지층에서 1m 의 지하수위 저하는 주변 구조물의 기초를 대략 1 ~ 2 mm 정도 침하시킬 수 있으며 지하수위 저하의 방지 대책으로는 Structural Cut-off, Grout Curtain 혹은 Recharge Well 방법등이 있으나 불투수층의 심도가 대단히 깊을 경우 경계성 면에서 Recharge Well 을 적용할 수도 있을것이다. 물론 정확한 현장 투수계수 측정과 수위계의 설치는 필수적이다. 또한 개수식 개념의 설계는 벽체 배면에 수압이 작용하지 않기 때문에 안전하지만 지하수 저하로 인한 주변구조물의 안정검토가 필연적으로 뒤따라야 되며, 완벽한 차수벽을 적용하여 지하수로 인한 침하문제가 해결되기 위하여는 벽체 변형을 억제할수 있는 강성의 벽체와 버팀 system이 요구된다.

5. 주변 구조물의 침하요인과 대책

굴착에 따른 주변 구조물의 침하는 관련된 요인들이 실로 다양하고 복잡할 뿐더러 이들이 복합적으로 작용할 수 있으므로 단순한 이론해석으로만은 쉽게 해결될것 같지가 않다. 제 1 회 도심지 굴착에 관한 한·일 세미나에서 정형식 교수님은 그의 논문을 통하여 토류구조물은 파괴에 대하여 안전해야 될뿐 아니라 주변지반이나 인근구조물에 대하여 최소의 영향을 미칠수 있

는 구조적 특성을 가져야 된다고 하였다. 최소의 영향이란 비교적 정확한 예측과 안전관리를 통하지 않고는 불가능하며 근접시공의 개념을 제시하고 있다. J.Burland 교수는 "Stress is a Philosophical Concept - Deformation is the Physical Reality" 용력은 하나의 철학적 개념으로 존재하지만 변형의 결과는 눈앞에 전개되는 지반의 거동, 건물의 침하와 균열등 현실로 나타나 일반적으로 잘 알려진 침하요인과 대책사항은 다음과 같다.

침 하 요 인	대 책 사 항
1) 벽체요인 - 지층상태의 조사미비, 지하수위의 상승, 지표면의 상재하중 증가, 배면과 전면의 토사강도 변화, 과잉굴착으로 인한 토압 증가	- 버팀간격축소 - 적합한 갯수의 토질조사 및 실험분석 - 설계시 지하수 변화에 대한 안전을 고려 - 극풍화상태에서 강도의 재조사와 잔류강도 적용 - 소단(BERM)의 활용 - 벽체강성증가
2) 버팀대의 강성부족 - 지형적 고저등으로 양측하중의 불균형이나 버팀길이 가 길어 좌굴변형발생	- 정확한 시공과 Bracing보강 및 용력의 집중현상을 최대한 방지 - 지반교란이 되지 않는 앵커 설치장비의 사용과 정착장부분의 토질조사
3) 지하수 저하 - 압밀 및 탄성침하 발생 - 벽체의 시공 Joint에서 토사유출	- 적절한 조사 갯수 - 별도의 현장 및 실내시험조사 - 잔류용력적용고려 - $(K_a + K_o)/2$ 나 K_o 사용
4) 시공방법 - 굴착주변의 상재하중 증가 - 과잉굴착 - 현장지반상태에 의해 보완하지않고 당초 설계도면을 사용 - 버팀설치 시간지연 - 벽체시공의 정확도 및 품질관리 - 시공장비와 공법채택 실패	- 시공중의 하중과 설계상태하중 비교 검토 - 소단(BERM)설치 - 시공중 변화되는 지반에 적합한 설계 변경채택 - 시간변형방지 - 품질관리 철저 - 지반조건에 적합한 공법 선정
5) 지반조사 및 강도정수 - 급작스런 단면 변화 - 지층상태와 강도정수 변화 - 시간에 따른 강도정수 감소 - K_o 사용	- 적절한 조사갯수 - 별도의 현장 및 실내시험 실시 - 잔류용력 적용고려 - $(K_a + K_o)/2$ 나 K_o 사용
6) 진동과 인접 상하수도관 파손 - 액상화 현상 - 부분침하로 인접 상하수도관 파열	- 보강공법 적용 - 초기 변형을 최대 억제 - 암반사면위 Sliding 방지

게 된다. 침하중에도 균등하게 침하(Uniform Settlement)되는 경우, 전도(Tilting)과 부등침하(Differential Settlement)로 나눌 수 있는데 이들중 부등침하는 건물전체에 뒤를림을 유발하여 지명적인 손상을 줄수 있다.

6. 침하예측과 현장계측

굴착주변지반의 침하량 예측은 앞서 언급한 침하요인들이 다양하고 복합적으로 작용할 수 있으므로 가장 중요한 몇가지 요인들에 대한 사례들을 참고로 조사하여 보았다.

미국 Boston 지하철 공사 굴착작업중 7층 건물 인접벽체를 90cm 두께 지하연속벽으로 시공하였고, 반대편 벽체는 Sheet Pile 공법으로 시공되었다. 이들 벽체에 대한 수평변위 계측을 시행한 결과 지하연속벽(Rigid Wall)의 경우 수평변위가 25mm 인데 반하여 Sheet Pile벽체(Flexible Wall)는 112-175mm로 5-6 배의 증가를 보이고 있었다. 이런상으로 벽체의 강성차이가 지표면의 침하에 미치는 영향이 상당함을 알 수 있다.

또한, London Clay에 시공된 지하연속벽체에 대하여 버팀대 형식과 벽체변형을 분석한 결과 Slab 지지 버팀이 Strut 나 어스 앵커지지에 비하여 수평변위를 3-4배 줄일수 있었다. 이때 벽체로 부터 10m거리에 있는 지표면의 침하가 Slab인 경우 20mm 인데 반하여 Strut지지에서는 52mm로 2배 이상의 차이를 보이고 있었다.

벽체의 강성, 앵커의 강성, 선행하중이 작용시 벽체의 수평변위에 대한 영향은 Clough와 Tsui(1974)에 의하여 발표되었고 그림 11에 나타나 있다.

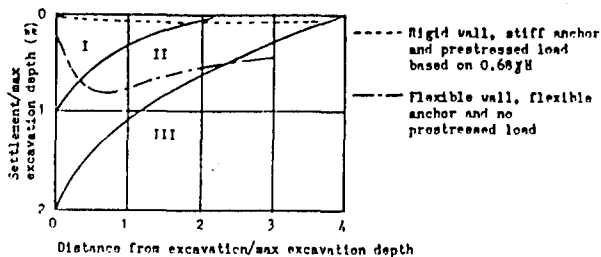


그림 11. 벽거동에 관한 매개변수의 복합효과

강성타입 벽체와 선행하중이 작용한 강성앵커인 경우 Peck의 단단한 지반인 경우의 침하량보다 적은 반면 연성벽체 앵커일때는 Peck의 연약지반 상태에서와 침하량이 유사하다.

침하예측방법에서 침하요인사이의 작용 Mechanism과 적용범위가 실로 광범위하여 이론해석에 의한 정확한 예측이란 아직 개발단계의 분야라고 사료된다.

경험자료 분석 결과를 도표에 표시하여 지반특성과 굴착심도에 따른 거리별 지표면 침하량을 손쉽게 예측할 수 있는 도표가 Peck(1969)에 의하여 제안되었다.

Caspe는 토류벽의 최대토류벽 변형면적을 이용하여 이에 상응하는 제적의 지표면 침하량이 발생된다는 가정하에 침하영향거리 예측곡선을 구하는 식을 제안하였다.

Fry et. al (1983)이 Kyrow의 FEM 해석을 근거로 지반이 완전 탄성포화체로 가정하여 소개한 탄성식이 있으며 Clough et. al(1989)는 배면지반을 사질토와 점성토 지반으로 구분하여 그림으로 침하위치와 침하량을 예측하였다. 그림 12은 상기의 모든 측정방법을 다층토지반에 적용한 결과를 나타낸 그림이다. Clough 방법은 극단적인 2가지 토질에만 적용함이 바람직한 것으로 보인다.

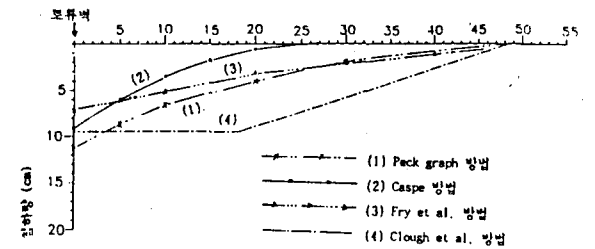


그림 12. 인접지반의 침하영상 비교표

현장계측을 통하여 건설재료인 흙의 공학적 특성을 파악하고 굴착지반 주변의 예측된 거동을 확인하여 안전하고 경제적인 공사가 이루어지도록 하므로써 이분야에 대한 확고한 경험과 기술발전이 기대될 수 있을것이다. 1968년 T.W. Lambe 과 R.V. Whitman 교수는 그의 저서 Soil Mechanic 에서 - "Experience does not mean merely Doing but the doing coupled with an EVALUATION of results of the act. Thus the Civil Engineer makes a design or solves a soil problems and then evaluate the outcome on the bases of measured field performance, he is gaining experience" - 도심지 굴착으로 인한 인접구조물의 경제성이나 안전은 설계나 시공사항이 아닌 현장계측결과 그 자체가 말하는 것이다. 설계단면과 가장 위험한 Control 단면을 설정하여 지속적인 계측, 분석, 평가, 조치등의 과정을 준엄하게

받아들일때에 진정한 경험이 터득될 것이며 다가올 국제화시대를 대비하는 바람직한 우리의 자세가 될 것이다.

결언

최근 10여년간 도심지 굴착에 적용된 토류구조물의 채택사례를 중심으로 설계 및 시공상의 문제점과 보완사항들을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 도심지 굴착에서 토류구조의 선택은 진동, 소음, 분진 등의 환경영향 외에도 인접구조물들의 피해를 최소화할 수 있는 공법이 선정되어야 하며 이들 구조물들에 대한 예상 거동상태를 해석하고 검증할 수 있는 계측 System 의 적용이 필수적이다.
2. 인접구조물의 침하영향을 최소화할 수 있는 공법으로는 강성이 큰 지하연속벽 타입에, 강성이 큰 앵커와 Prestressing 도입이 가능하든지, Slab 자체를 버팀으로 사용하는 역타공법 (Top-Down)이 가장 바람직한 방법으로 제시되고 있다.
3. 적합한 숫자의 토질조사를 시행하고 시공중 극중화나 이완된 토성치를 사용하여 변형후 최대값에서 잔류용력으로 감소된 영향을 고려하여 이를 근거로 한 재설계를 시도함으로써 보다 안전을 높은 도심지 공사가 되도록 한다.
4. 시공중의 지반상태와 계측자료를 토대로 시공단계별 토류구조체 및 인접구조물의 거동을 설계 예측치와 비교 분석하여 적절한 재설계등 보완조치를 취함으로써 보다 합리적이고 안전한 공사로 발전이 가능하겠다.
5. 근접시공 개념의 지하굴착 설계는 가시설 자체의 안정성과 더불어 평가분석 및 대책을 반드시 수행하여 시공중 현장계측결과에 대한 예측관리와 절대치 관리를 철저히 적용하며 공사의 안정성을 확인할 수 있는 여건조성이 시급하다.

참고문헌

1. Burland, J.B., Simpson, B. and St. John, H.D. Movement around Excavations in London Clay. proc. 7th European Conf. SMFE, 1979. VOL 1.
2. Canadian Geotechnical Society, Foundation Engineering Manual, 2nd ed, 1985.

3. Caspe, M.S., Surface Settlement Adjacent to Braced open cut, JSMFED, ASCE, VOL. 92, SM4, July. 1966. pp. 51 - 59.
4. Clough, G.Wayne. (1976). Deep Excavation and Retaining Structures pp417-456. IN Hsai-Yang Fung (Ed.) Analysis and Design of Building Foundation. ENVO. Publishing Co., Lehigh Valley, PA.
5. Clough and Tsui, Performance of tie-back walls in clay, ASCE J.Geotech. Div., 100(Dec.).
6. Craft, J.R., Diaphragm walls for the support of Deep Excavations, HKIE Seminar on June 6. 1983.
7. Philip C. Lambe and Lawrence A. Hansen, Design and Performance of Earth Retaining Structures, Cornell University Ithaca New York, June 18-21, 1990.
8. Preprint Volume for the International Symposium, Underground Construction in Soft Ground, January 3, 1994, New Delhi, India.
9. Proceedings of The First Korea-Japan Joint Geotechnical Seminar on Excavation & Tunneling in Urban Areas, October 18-20, 1990, Seoul, Korea.
10. Terzaghi, K., and R.B. Peck (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st ed. John Wiley and Sons, New York.
11. Terzaghi, K., and R.B. Peck (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
12. Tschebotarioff, G., (1951). Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, McGraw-Hill, New York.
13. 김학문, "도심지 지하굴착에 적용된 Top-Down 공법의 수치해석과 실측비교", 지반공학에서의 컴퓨터 활용, 91년도 추계 학술발표회 논문집, 한국지반공학회.
14. 김학문, 손준익, 주재건, "서울지하철 7-11공구 지하굴착 가설토류벽 배면차수 공법에 대한 안전성 검토 연구", 한국지반공학회 1992년 2월.
15. "서울지하철 7-11공구 지하굴착 가설토류벽 배면차수공법에 대한 안전성 검토 연구보고서", 한국지반공학회, 1992년 2월.
16. 이기준, "앵카지지 흩막이 구조물에 작용하는 측방토압", 1991.12., 중앙대학교 건설대학원.

17. 지반공학 시리즈 3, “굴착 및 흙막이공법”, 한국지반공학회, 1992년 2월.
18. 한국지반공학회 정보화시공위원회의 학술발표집 제1집, “지반계측”, 한국지반공학회, 1993.
19. 한국지반공학회 지반굴착위원회의 학술발표집 제1집, “흙막이 구조물의 설계 및 시공사례”, 한국지반공학회, 1992.
20. 한국지반공학회 지반굴착위원회의 학술발표집 제2집, “지반굴착”, 한국지반공학회, 1993.
21. '91년도 추계학술발표회 논문집, “지반공학에서의 컴퓨터 활용”, 한국지반공학회, 1991.
22. 전성곤, 이종규. 다층지반굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포. 한국지반공학회 논문집. 1993.3.
23. 홍원표, 주정석, 김학문. “지하철 건설에 따른 근접시공의 문제점 및 개선방향”, 지반굴착 위원회 학술발표집 제2집 “지반굴착” 한국지반공학회. 1993