

해성점토지반에서의 굴착거동

Excavation Behaviour of Soft Marine Clay Deposit

이승원¹⁾, Seung-Won Lee, 이영남²⁾, Young-Nam Lee

¹⁾ 현대건설(주) 기술연구소 토목기술부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Division, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾ 현대건설(주) 기술연구소 토목기술부 연구위원, Research Committee, Civil Engineering Division, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : In this paper, it is demonstrated that the shear strength of soil around jet grouting pile may be increased with the elapsed curing time of grouting cement. Because soil around pile initially experiences the disturbance due to the jet grouting work process, the soil gains the strength as grouting cement is cured and the soil is stabilized. In addition, excavation behaviour of marine clay at the strut excavation site is analyzed using measured data from inclinometers, load cells, and strain gauges. The time to install supporting system and the spatial distribution of excavation area are very important factors for understanding excavation behaviour of soft marine clay.

Key words : jet grouting pile, curing time, excavation behaviour, soft marine clay, sheet pile wall

1. 서론

본 논문에서는 남해안의 연약한 해성점토 지반에 59.3m×31.5m 면적의 건물을 건설하기 위하여 10.5m까지 굴착하는 동안의 해성점토 지반의 굴착거동을 관찰하고, 구조물의 하부기초로 채택된 제트그라우팅 말뚝에 의한 주변 지반의 개량 효과에 대하여 고찰하고자 한다. 굴착으로 인한 연약지반 저면의 융기를 방지하기 위하여 총 460개의 제트그라우팅 말뚝을 굴착전에 전굴착면적에 시공하였으며, 굴착을 위한 가시설토류구조물은 시트파일과 스트럿, 그리고 앵커를 이용하였다. 본 연구에서는 제트그라우팅 말뚝 시공으로 인한 해성점토지반의 강도 변화 특성을 파악하기 위하여 제트그라우팅 말뚝의 양생과정에 따라 현장 시험을 실시하였으며, 굴착과정에 따른 토류벽체의 변위 및 지보재에 걸리는 응력의 변화를 관찰하기 위하여 경사계, 하중계, 변형율계 등을 설치하여 계측을 실시하였다.

2. 원지반 조사

대상지반의 주상도와 깊이별 함수비 및 액소성한계, 그리고 전단강도는 그림 1과 같다. 여기에서 상부 3m는 해성점토지반을 압밀시키기 위한 매립토층이고, 3~17m는 해성점토지반으로 이루어져 있다. 해성점토지반의 자연함수비는 약 45%, 액성한계는 35~45%, 소성한계는 15~22%를 가지는 저소성 점

토(CL)로 분류되었으며, 원지반의 비배수전단강도는 1.5~3.5t/m²로 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다.

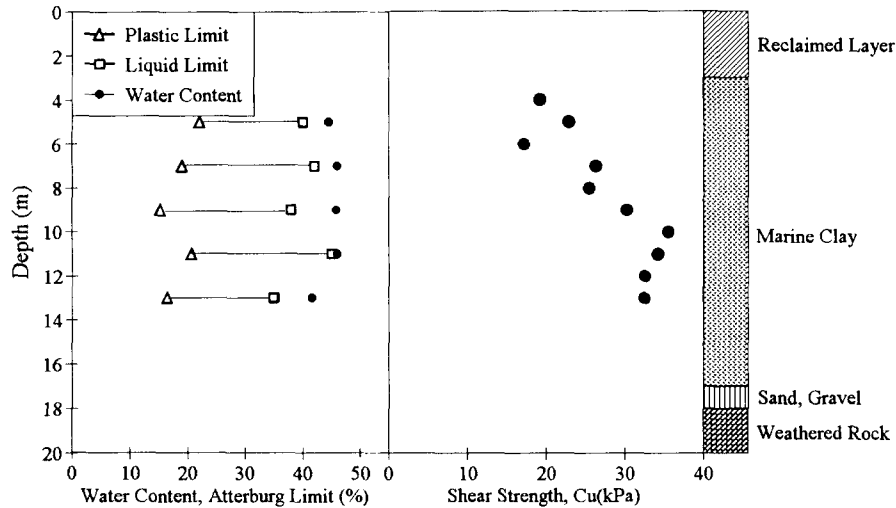


그림 1. 원지반의 자연함수비, 액소성한계, 초기 비배수전단강도

3. 제트그라우팅 말뚝에 의한 주변지반의 강도증가 효과

굴착으로 인한 굴착저면의 융기를 방지하고, 구조물의 하부기초로 활용하기 위하여 1m 직경의 제트그라우팅 말뚝이 평균 면적 4.0m²당 하나씩 시공되었다(치환율 약 20%). 제트그라우팅 말뚝은 이중관 고압분사(주입압 : 200kg/cm²) 방식을 이용하여 지반과 시멘트를 교반혼합하여 형성되었는데, Miura(1997)는 이러한 교반혼합말뚝의 시공으로 인하여 주변지반의 강도가 시간에 따라 변함을 밝힌 바 있다. 이때의 시간에 따른 주변 지반의 강도 변화 요인은 다음과 같이 네가지로 요약할 수 있다.

- 1) 말뚝시공직후에는 주변지반이 교란되어 강도가 감소하였다가 시간이 지남에 따라 강도회복현상(thixotropy)으로 원지반 강도로 회복된다.
- 2) 말뚝 시공중 고압분사에 의한 수압파쇄(hydraulic fracturing) 현상으로 주변지반에 균열이 발생하고, 그 균열로 간극수압 소산이 촉진된다.
- 3) 고압분사로 인해 발생한 균열로 시멘트 입자가 침투하여 주변지반의 강도를 증가시킨다.
- 4) 시멘트의 수화 및 포졸란 반응에 의해 주변 지반의 수분이 흡수되고 수화열이 발생하여 압밀을 촉진시킨다.

따라서 본 논문에서는 제트그라우팅에 사용된 시멘트의 양생일에 따른 주변지반의 강도변화를 관찰하기 위하여 제트그라우팅 말뚝 사이의 중앙부에서 시공전(P0)과 시공후 10일(P1), 20일(P2)이 경과한 시점에 피조콘 시험을 실시하였으며, 시공전(A0)과 시공후 10일(A1), 20일(A2), 50일(A3) 시점에 현장베인 시험을 실시하였다(그림 2). 피조콘 시험으로부터 얻은 주변지반의 콘 저항값(q_c)의 변화는 그림 3과 같고, 현장베인시험 결과를 이용한 주변지반의 강도 변화비(Shear Strength Ratio, SSR)는 그림 4와 같다. 여기에서 강도변화비는 시공전 원지반의 전단강도에 대한 시공후 주변지반의 전단강도의 비를 의미한다. 그림 3과 그림 4로부터 제트그라우팅 말뚝을 시공한 초기에는 주변지반의 교란으로 인하여 강도가 약간 감소하다가(P1, A1, A2), 시간이 경과함에 따라 주변지반의 강도회복현상과 수압파쇄로 인한 균열로 간극수압의 소산이 촉진되어 강도가 전체적으로 증가하는 경향을 보였다(P2, A3). 특히 P2의 콘 저항값은 깊이에 따라 산발적으로 큰 값을 보이는 경향을 보였는데, 이는 앞서 Miura가 지적한 고압분사로 인한 균열부로 시멘트 입자가 침투하여 주변 지반이 부분적으로 고화되었기 때문으로 판단된다. 마찬가지로 그림 4의 현장베인시험 결과에서도 주변지반에 침투된 시멘트 입자의 고화에 의한 부분적인 강도 증가 경향을 볼 수 있었다.

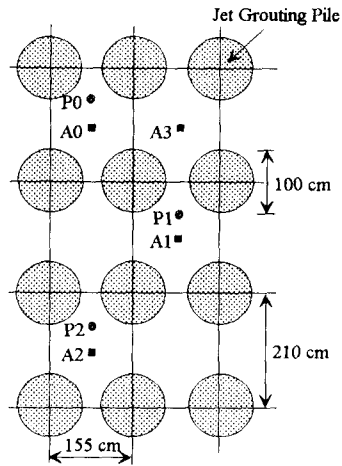


그림 2. 제트그라우팅 말뚝의 양생일에 따른 강도변화 측정 위치

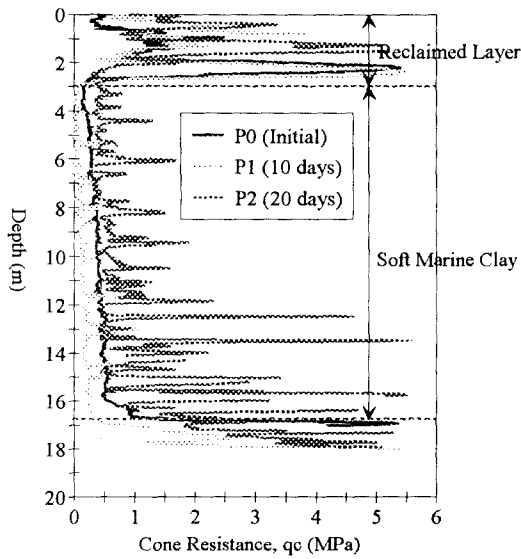


그림 3. 양생일에 따른 콘 저항값(q_c)

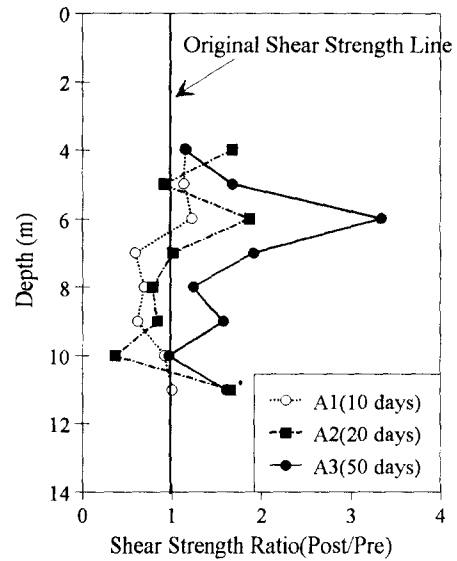


그림 4. 양생일에 따른 지반의 깊이별 강도변화비(SSR)

4. 굴착거동 분석

본 대상지반에 대한 굴착지지시스템과 굴착거동 분석을 위한 계측기의 설치위치는 그림 5와 같다. 본 연구를 위하여 토류벽체의 배면에 경사계를 3곳에 설치하였으며, 스트럿의 응력변화를 측정하기 위하여 3지점의 1, 2단 스트럿에 하중계와 변형율계를 설치하였다. 일반적으로 지반의 굴착거동은 굴착시기와 지보재의 설치시기, 그리고 굴착단면의 3차원적인 형상 등에 절대적인 영향을 받는데, 특히 연약한 점성토 지반에서는 발생하는 벽체변위가 크고, 굴착단면의 형상에 민감한 거동을 보이는 것으로 보고되고 있다(Finno, 1989; Mana et al., 1981). 따라서 본 연구에서는 현장에서의 굴착 및 지보재 설치상황 등을 고려하여 지반의 굴착거동을 분석하였다. 그림 6(a)는 굴착시점으로부터 12일 경과한 시점, 그림 6(b)는 27일 지난 시점에서의 전체적인 굴착상황을 표시한 것이고, 그림 7은 BH1지점의 횡단면(A-A' 단면)상의 굴착일정별 굴착단면을 종합하여 정리한 것이다. 그림 7 안의 숫자는 굴착시점으로부터의 경과시간을 표시한 것으로, 초기에는 양쪽의 벽체부위를 굴착하고 점차로 중앙부를 굴착해 간 것을 알 수 있으며, 굴착깊이는 중앙부에서 7.5m로 가장 깊고, 벽체쪽이 5.0m로 가장 얇았다.

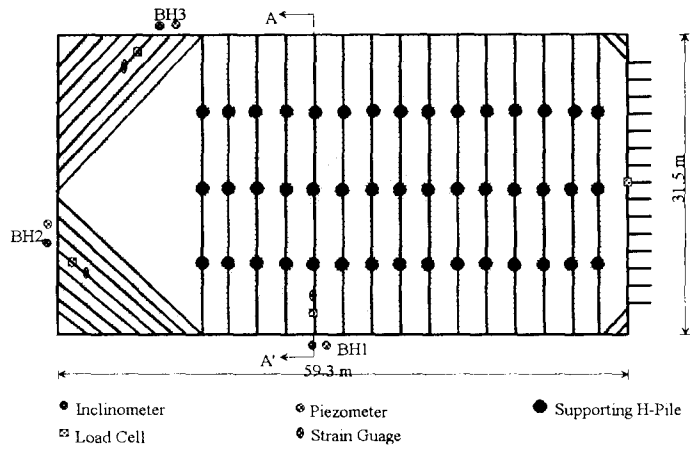


그림 5. 굴착지지시스템의 개요 및 계측기 설치 위치도

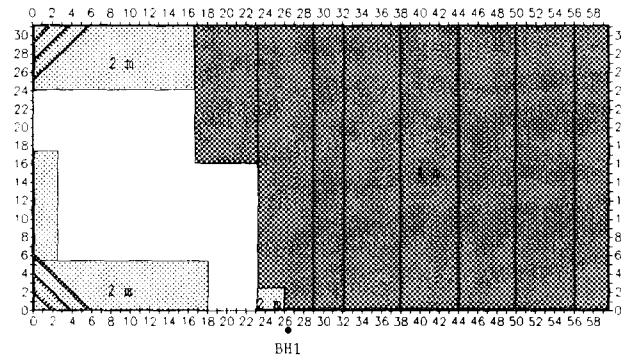


그림 6(a) 굴착시작후 12일째의 굴착 평면도

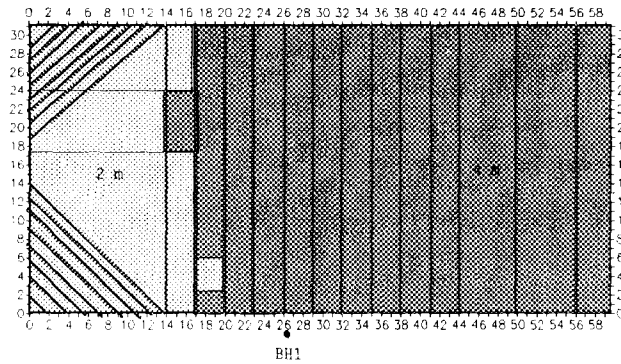


그림 6(b) 굴착시작후 27일째의 굴착 평면도

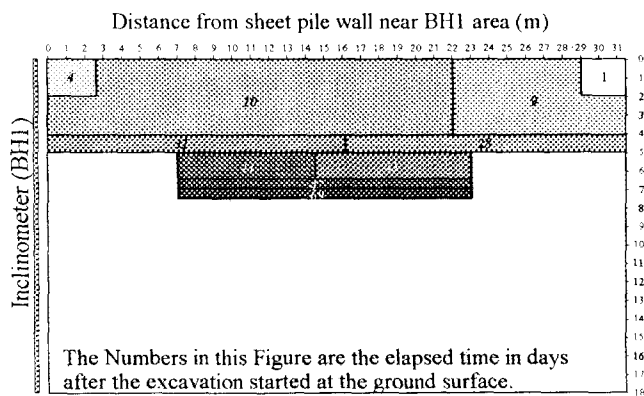


그림 7. BH1지점 횡단면(그림 5의 A-A' 단면)상에서의 굴착일정별 굴착단면

BH1에서의 굴착 진행 및 지보재 설치에 따른 벽체의 수평변위는 그림 8과 같은데, 여기서 얻을 수 있는 중요한 고찰은 다음과 같다.

1) 굴착 깊이가 깊어질수록 벽체의 최대 수평변위점의 위치는 아래로 이동하는 경향을 보여 굴착 완료후의 최대 수평변위는 깊이 6m 지점에서 7.6cm가 발생하였다. 이때의 벽체 전면의 최종 굴착깊이는 5m였지만, 중앙부에서의 굴착깊이가 7.5m여서 벽체의 최대 수평변위가 벽체의 최종굴착깊이 보다 깊은 곳에서 발생한 것이다.

2) 1단 스트럿 설치 지점(1.5m 깊이)에서는 변위가 구속되는 효과를 보였으나, 2단 스트럿 지점(4.0m 깊이)에서는 변위 구속효과가 거의 없었다. 이는 2단 스트럿을 설치하기 전에 이미 굴착저면에서 상당한 수평변위가 발생하여 굴착배면 지반이 부분적으로 소성상태에 도달하였기 때문이다. 따라서 스트럿의 변위 구속효과를 제대로 발휘하기 위해서는 적절한 시기에 스트럿을 설치하는 것이 중요하다.

3) 그림 7의 A-A' 단면에서의 12일째와 27일째의 굴착상황은 변화가 없음에도 불구하고, 이때의 수평 변위 형태는 근본적인 차이를 보이고 있는데, 이는 그림 6에서 보듯이 BH1 근처에서의 굴착단면과 지보재 설치 상황이 12일째와 27일째가 서로 다르기 때문이다. 즉, BH1 부근에서의 평면적인 굴착이 진행됨에 따라 BH1 지점에 대한 평면적인 구속효과가 감소하여 벽체의 수평변위가 증가하였으며, 1단 스트럿 설치로 인하여 상부에서의 수평변위가 구속되었기 때문이다. 계측지점에서의 변위는 3차원 공간에서의 굴착상황과 시공순서에 의해 영향을 받는다.

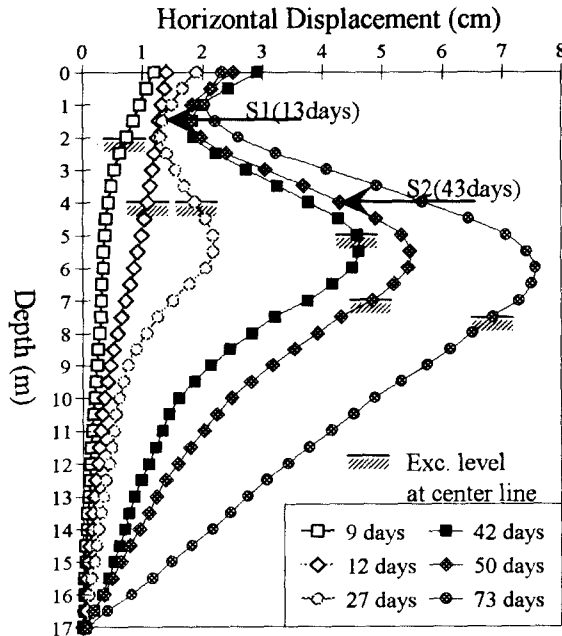
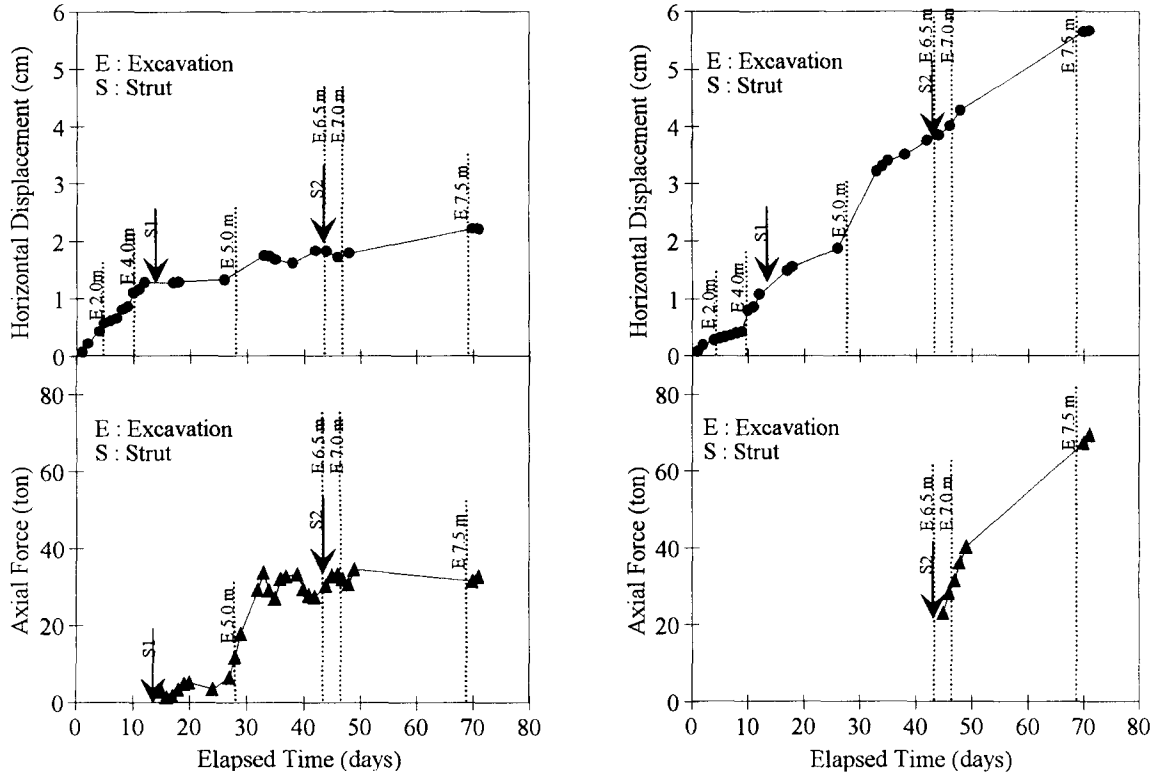


그림 8. BH1에서의 벽체의 수평변위

그림 9는 1단, 2단 스트럿의 깊이(1.5m, 4m)에서의 시간에 따른 벽체의 수평변위(BH1 지점)와 스트럿에 걸리는 축력을 도시한 것이다. 1.5m 깊이에서의 수평변위는 1단 스트럿 설치후에 구속되어 최종 굴착단계(73일)까지 거의 증가하지 않은 반면, 스트럿에 걸리는 축력은 A-A' 단면의 우측에 추가적인 굴착(28일)이 시작되면서 급격히 증가하는 경향을 보였다. 한편, 4m 깊이에서의 수평변위는 28일, 43일, 47일의 추가적인 굴착으로 인하여 급격히 증가하였는데, 특히 2단 스트럿 설치(43일) 후에도 스트럿에 의한 수평변위 구속효과가 거의 나타나지 않았다. 이는 앞서 언급한대로 2단 스트럿 설치전에 굴착배면 지반이 부분적으로 소성상태에 도달하였기 때문이다. 이로 인하여 2단 스트럿에 걸리는 축력은 계속 증가하였지만 벽체의 수평변위는 구속시키지 못하였다. 이러한 결과로 보아, 벽체의 수평변위 거동은 굴착 시공 상황, 지보재의 설치시기 등에 따라 상당한 차이를 보일 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 정확한 굴착 해석 및 계측자료의 분석을 위해서는 전체적인 굴착단면에 대한 3차원적인 고려가 필요하며, 벽체의 수평변위를 최대한 억제하기 위해서는 지보재를 최대한 신속히 설치하는 것이 중요하다.



(a) 1.5m 깊이에서의 수평변위 및 스트럿의 축력 (b) 4.0m 깊이에서의 수평변위 및 스트럿의 축력
 그림 9. 1.5m(1단 스트럿), 4.0m(2단 스트럿) 깊이에서의 시간에 따른 수평변위와 스트럿의 축력

5. 결론

- 1) 체트그라우팅말뚝 시공으로 인한 주변 지반의 강도 변화는 시공 초기에 지반의 교란으로 인하여 지반의 강도가 일시적으로 감소하다가 지반이 안정되고 시멘트의 양생이 진행되면서 주변 지반의 강도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 굴착으로 인한 벽체의 수평변위는 벽체 전면의 굴착깊이 뿐만 아니라 대상 벽체 주위의 굴착면적과 3차원적인 굴착형상에 크게 영향을 받는다. 따라서 계측 자료의 정확한 분석과 합리적인 굴착 거동 해석을 위해서는 3차원적인 굴착 형상에 대한 고려가 필요하다.
- 3) 지보재의 설치시기에 따라 벽체 변위구속 효과는 상당한 차이를 보이며, 지보재의 설치가 늦어져 지반이 파괴상태에 이른 후에는 스트럿의 변위 구속효과를 기대할 수 없다.

6. 참고문헌

- 1) Finno, J. et al.(1989), "Observed performance of a deep excavation in clay", *ASCE, J. Geotech Eng.*, Vol. 115, pp.1045~1064
- 2) Mana, A.I. and Clough, R.W.(1981), "Prediction of movements for braced cuts in clay", *ASCE, J. SMFE*, pp.759~777
- 3) Miura, N.(1997), "Strength changes of surrounding clay due to soil-cement column installation", *한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집*, pp.19~34
- 4) Terzaghi, K. and Peck, R.B.(1948), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New York