

도심지 깊은 굴착에 따른 지반 강성의 변화

Stiffness Degradation during Deep Excavation in Urban Area

최종호¹⁾ · 구본휘¹⁾ · 김태식[†]

Jongho Choi · Bonwhhee Koo · Taesik Kim

Received: October 23rd, 2014; Revised: October 28th, 2014; Accepted: December 9th, 2014

ABSTRACT : In urban area, many design projects related to geotechnical projects are controlled by serviceability rather than stability requirements. Accordingly, control of ground deformation has become more crucial and many researchers have studied soil stiffness. Recent experimental studies on the stress-strain response of Chicago glacial clays showed that the nonlinearity and anisotropy are the two key factors in evaluating the soil stiffness. In this study, experimental results are applied to analyze the deep excavation site locating in downtown Chicago. The stress paths observed from the observation points located behind and front of the supporting wall yield typical stress paths. Changes in soil stiffness nonlinearity and anisotropy were discussed by comparing experimental and computed stress paths. The stiffness anisotropy were significant even at the first few excavations. The stiffness degradation characteristics are significantly different according to relative location to the support wall even at the same elevation.

Keywords : Deep excavation, Numerical simulation, Stiffness, Nonlinearity, Anisotropy, Triaxial test

요 지 : 도심지 구간에 위치한 지반공학 관련 공사 현장에서는 충분한 안전을 확보와 더불어 사용성도 확보해야 한다. 이를 위해서는 공사 중 인접지반에 발생하는 변형을 제어해야 하므로 지반구조물과 관련된 기술 요구사항도 더욱 높아지고 있다. 사용성 확보를 위해서는 지반의 변형을 예측해야 하므로 지반의 강성을 분석해야 한다. 특히 강성의 비선형성과 이방성은 주요인자라 할 수 있다. 본 연구에서는 깊은 굴착 중 지반이 경험하는 응력경로에 따른 강성의 비선형성과 이방성에 대해 실내시험 결과와 전산 해석 결과를 비교하였다. 강성은 변형률이 작은 미소변형률 구간에서 비선형성이 두드러졌으며, 응력경로에도 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 실내시험 결과 압축은 작은 강성을 인장은 큰 강성을 나타내었으며, 깊은 굴착 시 지지벽체 뒤는 압축이 앞은 인장이 지배적인 응력경로를 나타내었다. 굴착 중 발생하는 지반의 변형을 정확히 예측하기 위해서는 지반이 경험하는 응력경로에 따라 변하는 강성의 변화 특성을 고려해야 한다.

주요어 : 깊은 굴착, 전산 해석, 강성, 비선형성, 이방성, 삼축 시험

1. 서 론

지반공학은 흙이라는 자연물질을 원위치에서 다루는 학문으로 지반 구조물의 충분한 안전율을 확보하여 파괴를 방지하는 데 초점을 맞춰 발달해왔다. 그러나 현대 사회로 접어들면서 도심지 구간과 같이 공사현장 인접 지역에 기존의 구조물들이 위치한 경우가 늘어나고 있다. 이 경우 시공 중 지반의 충분한 안전율 확보와 더불어 사용성(Serviceability) 까지도 확보해야 하는 경우들이 생겨나고 있다. 즉 사용성 확보를 위해서는 공사 중 인접지반에 발생하는 변형까지도 제어해야 하므로 지반구조물과 관련된 기술 요구사항도 더욱 높아지고 있다.

그동안 지반공학 관련 프로젝트 설계 시 안전율과 관련하여 지반의 강도를 주로 분석해왔으나 사용성과 관련하여

는 지반의 변형을 예측해야 한다. 따라서 지반의 강성을 분석해야 하며, 그 영향 인자인 강성의 비선형성과 이방성이 주요 분석 대상이라 할 수 있다.

본 연구에서는 깊은 굴착 중 지반이 경험하는 응력경로에 따른 강성의 비선형성과 이방성에 대해 실내시험 결과와 전산 해석 결과를 비교하였다. 시카고 점토의 미소변형률 구간에서의 비선형적 응력-변형률 관계파악을 위해 시험을 수행하고, 이 결과를 시카고 도시지역에서 수행된 Top-Down 굴착 프로젝트인 블록37(Block37)에 적용하였다. 깊은 굴착을 위해 설치된 지지벽체를 기준으로 그 상대적인 위치에 따라 지반이 경험하는 응력경로를 분석하였고, 그 응력경로에 따른 강성의 변화를 실내시험결과와 비교를 통해 분석하였다.

1) Department of Civil Engineering, Hongik University

† Department of Civil Engineering, Hongik University (Corresponding Author : taesik.kim@hongik.ac.kr)

2. 시험 및 전산 해석

2.1 삼축 시험

본 연구를 위해 CKC 삼축 압축 시험기(Chan, 1981)를 사용하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 시편의 변형률 측정을 위해 반지름 방향에 하나, 길이 방향에 두 개의 변형률계(LVDT)를 시편에 직접 설치하였고 하중측정계(Load cell)도 삼축 셀(Cell) 안에 설치하였다. 이 측정기기들을 이용하여 전단 변형률은 0.002%, 체적 변형률은 0.004%, 축 방향 응력은 0.3kPa 까지 정밀하게 측정이 가능하였다(Kim & Finno, 2012).

삼축 시험을 위한 시료는 시카고 도심에 위치한 블록37 재개발을 위한 Top-Down 굴착현장에서 채취한 불교란 블록 시료를 사용하였다. 시카고 기준 고도(Chicago City Datum, CCD) -5.5m와 -12m에서 각각 3개씩의 불교란 블록 시료를 채취하였다. 본 논문에서는 편의를 위해 -5.5m(CCD)에서 채취한 시료를 Shallow, -12m(CCD)에서 채취한 시료를 Deep 시료라 한다. 각각의 시료는 빙하퇴적 점토로 시카고 지역에서는 Blodgett, Deerfiled로 각각 통칭되며 연약점토층으로 분류된다. 통일분류기준(USCS)에 따라 CL로 분류되었다. 블록 시료의 기본물성은 Table 1과 같다.

삼축 시험을 위한 시편은 블록 시료를 지름 72mm, 높이 152mm로 잘라 사용하였다. 시편을 삼축 시험기에 위치하고 측정 기기들을 시편에 부착한 후, 잔류응력을 측정하고 이 잔류 응력이 유지되도록 배압을 가하여 시편을 포화시켰다. 각각의 Shallow와 Deep 시료의 현장 응력 상태로 K_0 압밀을 실시한 후 비배수 압축 시험(Triaxial Compression, TC)과 비배수 인장 시험(Reduced Triaxial Extension, RTE)을 실시하였

다. 시험결과와 분석은 등방압력(Mean normal stress) p , 축차응력(Deviatoric stress) q , 전단변형률(ϵ_{sh})을 이용하여 분석하였다. 시험 방법 및 시료에 관한 더 자세한 사항은 Kim(2011)에 설명되어 있으며, 시카고지역 빙하퇴적 점토에 관한 지질학적인 내용은 Chung & Finno(1992)에 자세히 설명되어 있다.

2.2 전산 해석

지반공학 관련 유한요소해석에 특화된 소프트웨어인 PLAXIS를 사용하여 Top-Down 건설에 대해 전산해석을 수행하였다. Fig. 2는 유한요소해석을 위한 메쉬(Mesh)와 시카고 지역의 전형적인 층상을 나타낸다. 1871년 시카고 대화재 이후 조성된 매립층(Fill) 밑으로 Blodgett, Deerfield, Park Ridge, Tinley, Valparaiso의 점토층이 있다. 시카고 점토의 낮은 투수계수를 고려하여 비배수 조건으로 전산해석을 수행하였다.

매립층과 경반층(Hardpan)인 Valparaiso에 대해서는 Mohr-Coulomb(MC) 모델을 적용하였고, 다른 점토층은 Hypoplastic Clay(HC) 모델을 사용하여 전산해석을 수행하였다. HC 모델은 Masin(2005)이 Kolymbas(1991)의 Hypoplastic law를 바탕으로 개발한 모델로 지반의 미소변형률 구간에서의 비선형적인 거동을 모사할 수 있다. 또한 지반의 이방성(Anisotropy) 및 응력이력(Recent stress history)을 고려할 수 있도록 구성하여, 응력상태가 복잡한 도심지 구간에 적합한 모델이라 할 수 있다. HC 모델의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\dot{T} = M : D$$

여기서 M 은 강성 매트릭스를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$M = [\rho^x m_T + (1 - \rho^x) m_R] f_s L + \rho^x (1 - m_T) f_s L : \hat{\delta} \otimes \hat{\delta} + \rho^x f_s f_d N \hat{\delta}$$

for $\hat{\delta} : D > 0$

$$M = [\rho^x m_T + (1 - \rho^x) m_R] f_s L + \rho^x (m_R - m_T) f_s L : \hat{\delta} \otimes \hat{\delta}$$

for $\hat{\delta} : D \leq 0$

Table 1. Summary of properties

Properties	Shallow	Deep
w_n (%)	26.0	24.4
Liquid limit (%)	34.3	34.9
PI (%)	15.8	16.7
Specific gravity	2.72	2.72
Vertical effective stress (kPa)	143	204
OCR	1.3	1.1
Cc	0.21	0.18
Cr	0.034	0.033

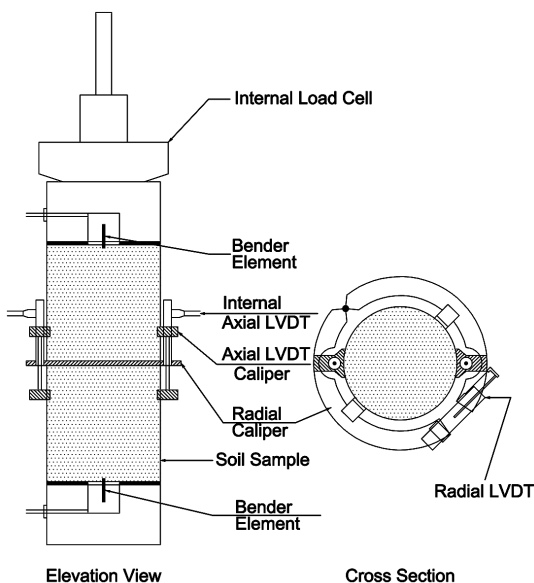


Fig. 1. Schematic diagram of small strain measurement device

δ 는 응력이력 모사를 위한 Intergranular strain의 방향 벡터를 나타내며, \mathbf{R} 은 탄성영역에 해당되는 변형률 구간을 의미하고 ρ 는 \mathbf{R} 로 정규화된 Intergranular strain을 뜻한다. m_R , m_I 는 응력경로의 변화에 따른 강성의 변화를 추적하기 위한 변수이며, β , χ 는 강성의 감쇠 모사를 위한 변수이다. \mathbf{L} 은 Hypoelastic tensor로 흙의 파괴 및 강소성에 관련된 변수인 ϕ_{cv} , λ , κ , r , N 을 이용하여 정의된다. ϕ_{cv} 는 마찰각, λ 와 κ 는 Modified Cam Clay 모델에서 사용하는 변수와 동일하다. r 은 체적탄성계수와 전단탄성계수의 비를 뜻하며, N 은 $p - \ln(1+e)$ 공간에서의 등방압밀 곡선의 y 절편을 뜻한다. 변수들에 관한 상세한 내용은 Masin(2005)에 상세히 설명되어있다.

각 지층에 적용된 입력정수는 Sarabia(2012)가 제안한 시카고지역 물성치 관계식을 바탕으로 산정하였으며 Table 2와 같다.

지중연속벽(Slurry wall)과 슬래브(Slab)는 보(Beam)로 해석을 수행하였으며, E (Young's modulus) 값은 $2 \times 10^4 \text{MPa}$ 을 사용하였다.

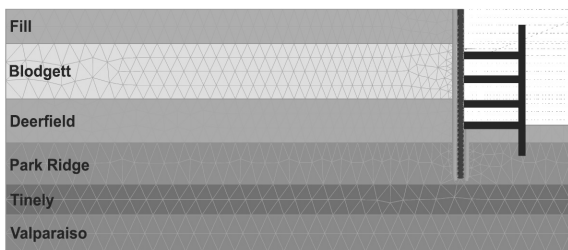


Fig. 2. Finite element mesh

Table 2. Model parameters

HC	Blodgett	Deerfield	Park ridge	Tinley
ϕ_{cv}	27°	30.6°	34.9°	36.9°
λ	0.072	0.06	0.046	0.039
κ	0.021	0.017	0.013	0.011
N	0.892	0.769	0.605	0.529
r	0.424	0.424	0.424	0.424
m_R	14	15	12.5	15
m_I	14	15	12.5	15
R	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}	5×10^{-5}
β	0.179	0.179	0.179	0.179
χ	1.277	1.277	1.277	1.277
MC		Fill	Valparaiso	
ϕ_{cv} (°)		30	45	
c (kPa)		10	47.88	
E (kPa)		1×10^4	7.33×10^5	
ν		0.33	0.1	
G (kPa)		3759	3.33×10^5	
E_{oed} (kPa)		14.8×10^3	7.49×10^5	

현장에서 진행된 Top-Down 시공 단계는 먼저 지지벽체를 시공하고, 지하 1층 깊이까지 굴착 후 슬래브(Slab1)를 시공하였고, 같은 방법을 굴착과 슬래브설치를 반복적으로 수행하여 지하 4층 슬래브(Slab4)까지 시공하였다. 현장 시공 단계와 동일하게 전산해석을 수행하였다.

3. 결과 분석

Shallow와 Deep 시료의 비배수 TC 및 RTE 시험을 실시한 결과, 응력-변형률 관계는 Fig. 3과 같이 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 Deep 시료는 Shallow 시료에 비해 깊은 심도에서 채취하였다. 따라서 Deep 시료가 Shallow 시료에 비해 큰 압밀 응력 상태에서 전단이 수행되었고, 이로 인해 전반적으로 큰 강성 및 강도 값을 나타냈다.

Fig. 4는 Shallow와 Deep 시료의 비배수 TC 및 RTE 시험의 응력경로를 나타낸다. TC의 경우 q 축의 양의 방향으로, RTE의 경우 q 축의 음의 방향으로 거의 수직으로 움직이는 응력경로가 지배적으로 형성됨을 알 수 있다.

각 시료 및 응력경로별 강성의 변화를 명확히 나타내기 위하여 전단탄성계수(G_{sec})를 분석하여 비교하였다. 전단탄

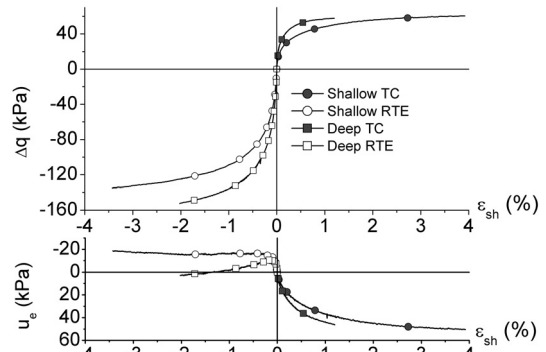


Fig. 3. Stress-strain responses

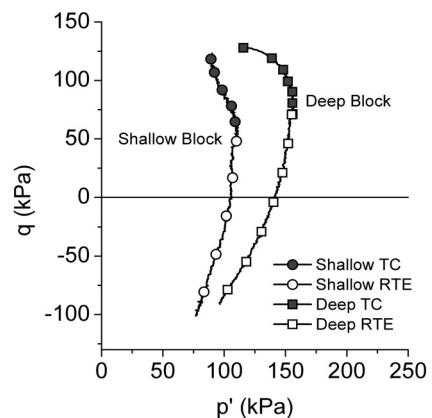


Fig. 4. Stress paths

성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$G_{sec} = \frac{\Delta q}{3\epsilon_{sh}}$$

Fig. 5에 나타난 바와 같이 시료의 종류에 관계없이 비배수 RTE 시험이 비배수 TC 시험에 비해 시료의 강성이 크게 평가되는 것으로 나타났다. 즉 p-q 응력공간에서 응력경로가 아래 방향으로 향할 때 강성이 크고, 위 방향으로 향할 때 강성이 작은 것으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 Deep 시료의 압밀응력이 더 크기 때문에 Shallow 시료에 비해 전반적으로 강성이 더 큰 것으로 나타났다.

Shallow 시료와 Deep 시료가 깊은 굴착 중 경험하게 되는 응력경로를 분석하기 위해 전산해석을 수행하고 각각의 시료 채취 깊이에 대해 관측점을 선정, 굴착에 따른 지반의 응력변화를 추적하였다. Fig. 6은 응력변화 관측점들의 위치를 나타낸다. Shallow 시료를 채취한 깊이의 경우, 지지벽체 앞쪽은 굴착으로 인해 사라지므로 지지벽체 뒤쪽에 대해서만 분석을 진행하였다.

Shallow 시료와 Deep 시료가 깊은 굴착 중 경험하는 배면 지반의 응력경로는 Fig. 7과 같이 나타났다. Shallow 시료의 경우 Slab1 깊이까지 굴착을 진행하였을 때, Deep 시

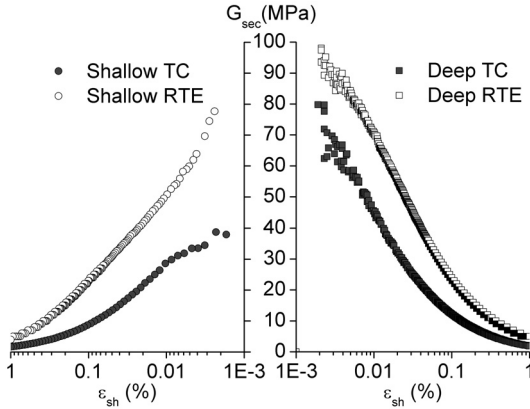


Fig. 5. G_{sec} degradation curves

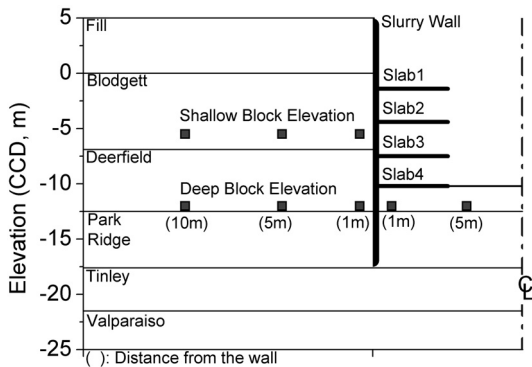


Fig. 6. Section view of the excavation sites with observation points

료의 경우 Slab2 깊이까지 굴착을 진행하였을 때 q의 증가가 크게 나타났다. 이때의 응력경로는 삼축 시험의 비배수 TC 시험과 유사한 것을 알 수 있었다. 또한 이때의 변형률은 1% 이내로 Fig. 5에 보인 바와 같이 강성의 비선형성이 두드러지는 구간임을 알 수 있었다. 따라서 설계단계에서 지반의 변형을 예측할 때, 변형률에 따라 비선형적인 강성의 거동을 모사할 수 있는 구성모델을 사용해야 시공 중 지반의 변형을 정확히 예측할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 지지벽체 앞쪽 지반이 경험하는 응력경로를 나타낸다. 벽체에서 1m 떨어진 벽체 인접 지역 지반의 경우, Slab1 단계까지는 상부지반 굴착으로 인한 제하(Unloading)의 영향으로 지반은 RTE 응력경로를 경험하게 된다. 그러나 이후 벽체의 이동으로 인해 증가한 횡 방향 토압으로 인해 q가 증가하는 응력경로를 따라가게 된다. 벽체에서 5m 떨어진 지반의 경우 벽체의 이동으로 인한 횡 방향 토압증가의 영향 없이 제하만의 영향으로 q가 감소하는 RTE 응력경로를 경험하게 된다.

앞서 Fig. 5에서 보인 바와 같이 RTE 응력경로를 따르는

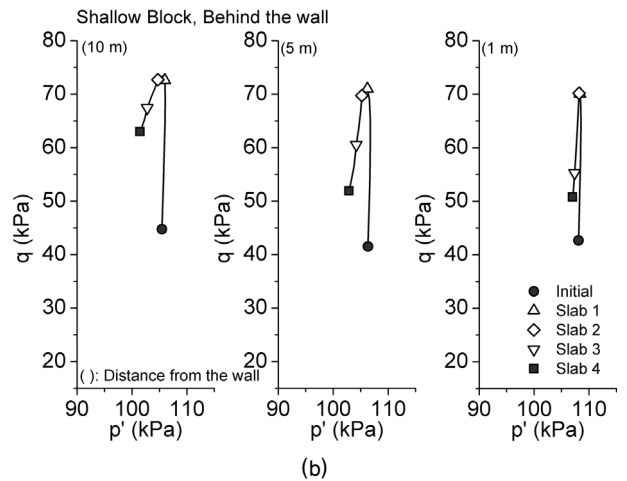
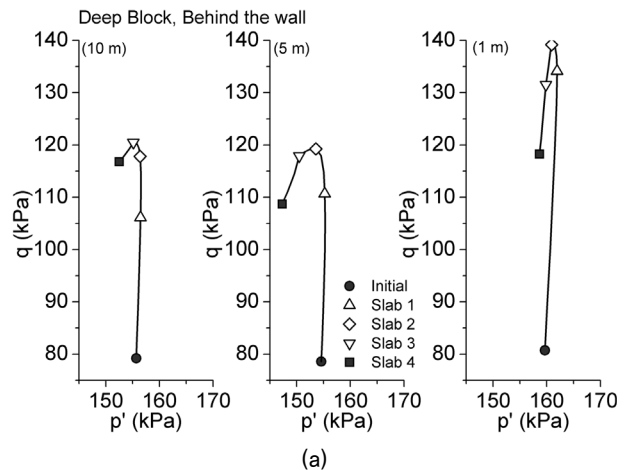


Fig. 7. Various stress paths for the various observation points locating behind the wall (Redrawn from Jung & Kim, 2014)

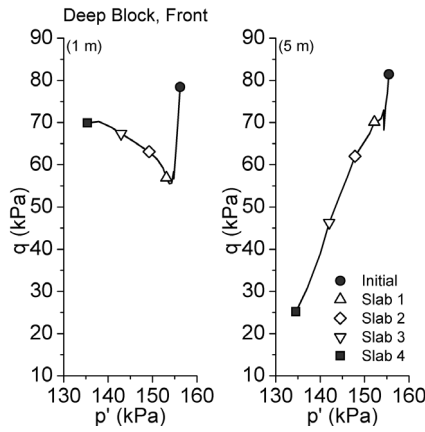


Fig. 8. Various stress paths for the various observation points locaing front of the wall (Redrawn from Jung & Kim, 2014)

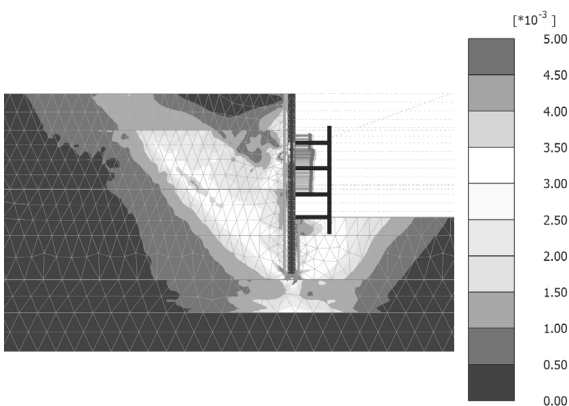


Fig. 9. Shear strain contour

지반의 전단강성이 TC 응력경로를 따르는 지반보다 전반적으로 크다. Deep 시료를 채취한 지반의 깊이에서 지지벽체를 기준으로 지반의 강성을 생각해봤을 때, 지지벽체 뒤는 작은 강성을 지지벽체 앞쪽은 큰 강성을 나타낸다. 즉 하나의 굴착단계에 대해서 상대적인 위치에 따라 지반은 다양한 응력경로를 경험하게 되고, 이에 따라 같은 지반이라 하더라도 강성이 다르게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 시공 종료 후 지반에 발생한 전단변형률을 나타낸다. 최대 전단변형률은 대략 0.5% 정도로 발생했음을 알 수 있다. 앞서 Fig. 5에 나타난 바와 같이 이 범위는 지반 강성의 비선형성이 두드러지는 구간으로 설계단계에서 지반의 변형을 정확하게 예측하기 위해서는 반드시 변형률에 따른 강성의 비선형성을 고려해야 할 것이다.

4. 결 론

도심지 깊은 굴착에 따른 지반 강성의 변화는 실내시험과 전산해석을 통해 평가하였다. 본 연구에서 수행한 분석

을 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

- (1) 삼축 시험기를 이용한 시험 결과 지반의 강성은 변형률에 따라 변하며, 변형률 값이 작은 미소변형률 구간에서 강성의 비선형성이 두드러지는 것으로 나타났다.
- (2) 지반의 강성은 변형률과 더불어 응력경로에 따라 이방적 특성을 나타내었다. 현장 상태로 압밀한 후 수행한 압축 시험의 경우 작은 강성을 나타내었고, 인장 시험의 경우 큰 강성을 나타내었다.
- (3) 지지벽체에 대한 상대적인 위치에 따라 지반이 경험하는 응력경로는 상이하었다. 벽체 뒤는 압축이 앞은 인장이 지배적인 응력경로를 나타내었다.
- (4) 굴착 중 발생하는 지반의 변형을 정확히 예측하기 위해서는 지반이 경험하는 응력경로에 따라 변하는 강성의 변화 특성을 고려해야 한다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

References

1. Chan, C. K. (1981), An electropneumatic cyclic loading system, Geotechnical Testing Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 183~187.
2. Chung, C. K. and Finno, R. J. (1992), Influence of depositional processes on the geotechnical parameters of Chicago glacial clays, Engineering Geology, Vol. 32, No. 4, pp. 225~242.
3. Jung, Y. H. and Kim, T. (2014), Stiffness reduction in soft Chicago clay during deep urban excavations, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Korean Geotechnical Society, Seoul, Korea, pp. 287~291.
4. Kim, T. (2011), Incrementally nonlinear responses of soft Chicago glacial clays, Ph.D. thesis, Northwestern Univ., Evanston, IL, pp. 58~84.
5. Kim, T. and Finno, R. J. (2012), Anisotropy evolution and irrecoverable deformation in triaxial stress probes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 138, No. 2, pp. 155~165.
6. Kolymbas, D. (1991), An outline of hypoplasticity. Archive of Applied Mechanics, Vol. 61, pp. 143~151.
7. Masin, D. (2005), A hypoplastic constitutive model for clays, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 29, No. 4, pp. 311~366.
8. Sarabia, F. (2012), Interpretation of the performance of earth retention structures using multi-objective optimization techniques and a hypo-plastic constitutive law. Ph.D thesis, Northwestern University, U.S. pp. 112~185.