

연약지반공학자의 위상제고를 위한 제언

김승렬, (주)에스코컨설턴트 대표이사
전 연약지반기술위원회 위원장

1. 머리말

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고 내륙에도 강들이 발달되어 있어서 서해안과 남해안을 따라 연약지반대가 형성되어 있으며 내륙에도 적지 않은 연약지반이 분포하고 있다. 그러나 우리나라의 경우는 방콕이나 상하이 등과 같이 대도시 지역에 연약지반이 형성되어 있지 않기 때문에 이러한 여건을 갖는 나라들에 비해 연약지반에 대한 공학적인 관심이 상대적으로 적었다.

최근 항만 시설과 매립지 조성 공사가 활발하게 추진되면서, 연약지반, 특히 광범위한 지역에 걸쳐 분포하는 대심도의 연약지반이 야기시키는 문제점들이 드러났다. 이와 함께 연약지반공학자들에게 요구하는 기술 수준도 높아졌으며 그동안 연약지반공학자들이 보여왔던 태도에 대한 변화도 촉구하고 있는 실정이다. 이에 맞추어 연약지반공학자의 위상제고의 필요성과 제고방향에 대한 소고를 나누고자 한다.

2. 연약지반의 정의

일반적으로 연약지반은 강도가 작고 압축성이 큰 퇴적 자연지반 또는 매립으로 조성된 인공지반 등으로 정의된다. 이 지반은 고유의 지반이라기 보다는 이용대상이 되었을 때 과도한 변위를 수반하거나 파괴되는 등의 중대한 문제를 야기시키는 토층 포함 여부에 의해 연약지반 여부가 판명되게 된다. 주로, 지반에 점성토, 실트 및 유기질토 또는 느슨한 사질토 등이 포함되어 있다면 이 지반을 연약지반으로 분류한다.

3. 연약지반의 공학적 특성

연약지반을 대표하는 지반은 점성토 지반이다. 지반공학 분야의 물질 중에서 점성토만큼 실험적 기초 자료로부터 고급이론에 이르기까지 잘 정돈된 공학적 연구 자료를 보유하고 있는 물질은 없다. 이것은 점성토가 갖는 특성을 이해한다는 것이 곧 토질의 전반적인 특성을 이해하는 지름길이 될 수 있는 증거 중의 하나이며 점성토로부터 야기되는 문제들을 극복하고자 끊임없이 노력한 결과의 산물이라 할 수 있다. 따라서, 본 장에서는 점성토를 대하고 있는 국내의 연약지반공학자들의 자세와 공학적 평가 수준을 가늠해 봄으로써 현시점에서 요구되는 연약지반공학자들의 발전적 위상 전환의 필요성을 공감하고자 한다.

3.1 점성토의 변형특성

3.1.1 압밀침하량

전통의 토질역학 교과서에서는 점성토의 변형특성을 '압밀특성'이라는 제목 하에서 다루고 있으며, 그 세부 내용은 1)압밀에 대한 이론적 배경 2)Terzaghi의 1차원 압밀현상(1차 및 2차 압밀 포함) 3)압밀시험 4)침하량 및 소요압밀시간 계산 등으로 구성되어 있다. 좀 더 심화된(advanced) 교육과정에서는 이러한 요소 중에서 침하계산 부분을 별도의 장(chapter)으로 분리하고 그 내용들을 더 세분화하여 상세하게 기술하고 있다.

이렇듯 변형특성을 소위 '침하'라고 하는 연직방향의 변위에만 국한하여 취급함으로써 더 진보된 교육과정(학부 이상의 과정)을 이수하지 못한 대부분 기술자들의 사고의 틀에는 점성토의 3차원적 변형(deformation) 특성에 대한 이해가 폭넓게 자리잡지 못하도록 하고 있다. 실제로 Terzaghi 압밀 이론에 의한 1차원 압밀에서의 침하량은 체적 변형률

(volumetric strain : $\frac{\Delta e}{1+e}$)로부터 얻어지게 된다.

다만, 횡방향의 변형이 없는 연직방향의 변형만이 발

생하기 때문에 이 체적 변형율이 바로 연직방향의 변형율이 되게되는 것이다.

실제로 체적 변형율은 체적변화를 발생시키는 직각방향의 응력(normal stress)과 직접적인 관계를 갖게 되며 연직 직각좌표계에서는 연직방향과 이 방향에 직각으로 만나는 평면상에서 직교하는 두 축 방향으로 발생하는 변형율의 합이 된다. 즉, 3축 방향에서 발생하는 변형율(strain)들의 합이다. 이러한 점성토의 체적 변화는 시간 의존 특성(time dependent characteristics)을 갖고 있으며 점성토에 함유된 점토 광물(clay mineral)의 영향이나 구조영향(structural effects)을 크게 받으며 강도와도 아주 밀접한 관계를 갖는다.

3.1.2 탄성변형과 소성변형

지중으로부터 점성토 시료를 채취하게 되면 시료는 기존의 응력으로부터의 해방을 경험하게 된다. 이 시료를 표준압밀 시험기에 넣고 다시 응력을 가하면 이미 지중에서 경험한 응력까지는 적은 간극비의 변화를 발생시킨다. 그러나 가해지는 응력이 이 응력 이상이 되면 간극비의 변화가 크게 발생한다. 이 때 응력 변화에 대한 미소 간극비 변화와 과대 간극비 변화의 분기점에 해당하는 응력을 선행압밀 하중(P_c)라고 부른다. 이 선행압밀 하중은 그동안 점성토가 경험한 최대의 응력이며 점성토가 받은 응력이 이를 판단하는 하나의 인자가 된다.

선행압밀하중에 해당하는 응력이하의 범주에서 응력 변화가 발생하면 체적변화는 탄성적이지만 이 응력 이상의 응력이 가해지면 발생하는 체적변화에는 회복될 수 없는 체적변화(소성 체적변화)를 수반하기 때문에 선행하중에 해당하는 응력은 일종의 항복응력(yield stress)이 되게 된다. 압밀곡선에서 선행압밀하중에 해당하는 응력을 초과하여 지속적으로 응력을 증가시키면 선행압밀하중, 즉, 항복응력을 확대시키는 것과 같게 된다. 따라서, 정규압밀상태(normally consolidated state)에서의 하중증가(처녀압밀곡선상의 응력변화)는 체적 항복의 연속이며

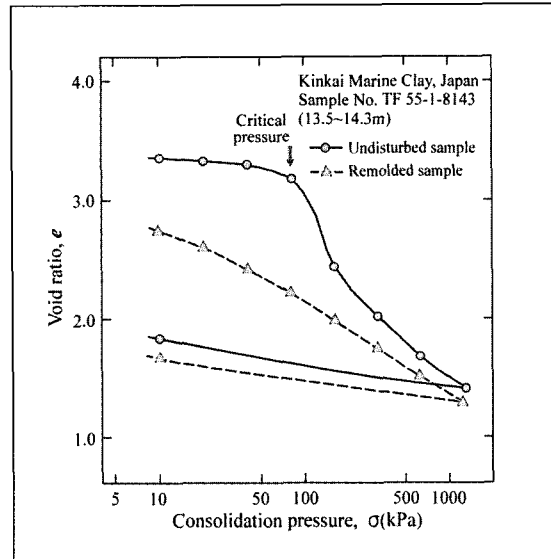


그림 1. Quality evaluation by void ratio-consolidation pressure curve(TC-24, ISSMFE, 1981)

이 때 수반하는 변형에는 탄성성분과 소성성분이 포함되어 있다.

압밀곡선($e - \log \bar{\sigma}_v$)에서 선행압밀하중보다 작은 하중영역과 큰 하중영역의 곡선을 직선화하고 그 기울기를 각각 C_r , C_c 로 정하여 사용하고 있지만 실제적으로는 직선이 아니다(그림 1 참조). 점성토의 구조적 영향(structural effect)이 크면 클수록 이러한 비선형적 현상은 두드러지게 나타나는 것으로 밝혀졌다. 또한 변형현상은 가해지는 하중 증분율과 재하되는 속도에 대해서도 영향을 받는다.

점성토의 실제적 변형특성은 비선형적(non-linear)이며 직접적으로 영향을 주는 인자인 비배수 탄성계수, 포아송비 등이 취급되는 응력의 크기(stress level)에 따라 달라진다.

3.1.3 점성토의 변형특성에 대한 영향 인자

(1) 점성토 시료의 교란여부와 대표성 여부

시료를 사용하여 점성토 지반의 변형특성을 규명하기 위해서는 사용되는 시료가 전체의 지반을 대표할 수 있어야 한다. 일반적으로 대상 층을 대표할 수

있는 위치에서 시료를 채취하며, 시료채취를 위해 사용되는 피스톤 샘플러의 직경은 54mm 이다. 그러나, 직경이 95mm인 피스톤 샘플러를 사용한 경우의 결과가 54mm를 사용한 경우의 결과치들보다 분산도가 적고 선행압밀과 유효응력의 비가 크게 나타나 대구경 샘플러의 시료가 교란을 적게 받는 것으로 보고되었다.(Berre, Schjetne & Sollie)

선행압밀하중, P_c 의 결정방법으로 Casagrande 도해법이 많이 사용되고 있지만 간극비의 감소패턴을 이용한 Schmertmann의 방법을 이용하여 P_c 를 구하는 것이 더 정확한 것으로 보고되고 있다. P_c 값은 침하특성을 규명하는 아주 중요한 인자이므로 이 값을 결정하는 방법도 확립된 한 가지 방법이 아닌 여러가지 방법을 통해 검토할 필요가 있음을 의미한다.

또한, 표준압밀 시험시에도 함수비의 변화영향 등을 최소화하기 위해서는 현장에서 시료가 받았던 유효응력을 가한 후에 물을 첨가하는 등의 배려가 필요하다. 이렇게 정성을 들여 시험결과를 도출한다 할지라도 실제의 지반에는 실트 또는 모래층이 존재하기 때문에 시험치가 현장치를 완벽하게 대표하는 경우는 극히 드물게 된다. 이러한 제반기술사항을 고려하여야 하고 이들에 대한 적합한 보정을 위해 계측관리를 통한 현장 엔지니어링(field engineering)의 활성화가 필요하다.

(2) 응력경로와 과잉 간극수압의 발생 양상

포화된 점성토를 이용하여 압밀시험을 실시할 경우 표준압밀시험기(Oedometer)는 횡방향의 변형을 구속(K_0 상태)하기 때문에 압밀시에 발생하는 과잉 간극수압은 가해지는 외부압력과 동일하게 된다. 즉, $\Delta u = \Delta \sigma$ 이다. 따라서, 간극수압계수 A 값의 영향은 나타나지 않는다. 그러나, K_0 상태가 아닌 경우에는 간극수압계수 A 에 의한 영향이 나타난다. ($\Delta u < \Delta \sigma$: Skempton & Bjerrum) 이것은 변형특성을 규명하여야 하는 지반에서 실제로 어느 정도의 과잉 간극수압이 발생하는지에 대한 고찰이 필요함을 의미한다. 따라서, 현장에서 발생하는 응력경로에 의한 영향을 반영하여 변형특성을 평가할 필요가 있다.

(3) 2차 압밀변형(secondary deformation)과 압축 특성

2차 압밀변형(침하)은 일정한 유효응력하에서 시간이 경과하며 발생하는 변형을 말한다. 2차 변형량은 점성토의 소성도에 따라 증가하며, 소성지수가 크면 클수록 2차 압밀변형에서 비롯되는 겉보기 선행압밀하중(apparent preconsolidation pressure)도 커지게 된다. 현재 점성토가 받고 있는 유효응력이 동일한 경우로서, 하중의 제거 등 유효응력 변화로 인해 형성되는 선행압밀하중과 2차 압밀에 의해 형성되는 겉보기 선행압밀하중의 크기가 같으면 과압밀비는 동일하다. 그러나, 이 두 점성토에 동일한 하중을 재하할 경우에는 2차 압밀변형을 받아 형성된 겉보기 과압밀 점성토가 유효응력 변화에 의해 생성된 과압밀 점성토보다 큰 변형특성을 보이는 것으로 보고되고 있다. 이것은 동일한 유효응력과 동일한 선행압밀 하중을 나타내는 점성토에서도 응력이력에 따라 변형특성이 달라질 수 있음을 의미하는 것으로 변형(침하)특성을 획일화하여 평가할 경우 오류를 범할 수 있음을 경고해 주고 있다.

또한, 실험실적 연구만으로는 2차압밀 변형특성을 정확히 예측하기 어려우므로 장기간에 걸친 지역적 침하특성 연구가 필요하다. 점성토의 2차 변형특성은 유효 주응력비, 하중증분율, 온도 및 시간 등의 영향도 크게 받기 때문에 종합적인 검토후에 결론을 내려야 한다.

(4) 점성토의 변형특성을 예측하는 기타의 방법

점성토의 변형특성 예측방법의 일종으로 침하를 예측하는 여러 방법들이 제시되었다. 이들 방법중에는 탄성계수(elastic modulus) 또는 변형계수(deformation modulus)를 이용하는 방법, 압축지수와 함수비와의 관계로부터 침하량을 예측하는 방법, 콘저항치와 점성토의 압축관계로부터 침하량을 예측하는 방법 등이 제안되었다. 특히, 원심모형 시험에 의한 침하량 예측도 시도되어 요소(element) 시험에서 비롯되는 여러 가지 제한성들을 극복하려는 노력도 있었음을 알 수 있다. 이렇게 제시된 방법들이 국

기술위원회 세미나 주요내용

내에서는 보편화 되어 널리 활용되고 있다고는 할 수 없다. 다만, 우리도 우리나라의 점성토에 대한 침하 특성을 쉽고 정확하게 예측하려는 다양한 노력을 기울여야 함을 일깨워 주고 있는 사례 등임은 틀림없다 하겠다.

3.2 점성토의 강도 특성

강도란 외력에 대응하여 저항할 수 있는 최대의 저항능력을 말하며 작용하는 외력에 따라, 압축강도, 인장강도, 전단강도로 구분된다. 등방 압축응력을 점성토에 가하면 점성토내에는 전단응력이 발생하지 않으며, 이러한 압축응력은 체적 변화만을 발생시킨다. 그러나, 이방응력을 가하게 되면 점성토 내부에는 전단응력이 발생하고 이때 발생하는 전단응력이 점성토의 전단강도를 초과하게 되면 전단파괴를 일으킨다. 본 절에서는 전단강도에 대한 몇 가지 사항들을 살펴보기로 한다.

3.2.1 점성토 전단강도의 이방성

점성토 입자는 퇴적 과정에서 포텐셜 에너지가 최소화되는 입자배열을 형성하며 이방성을 갖는 구조로 퇴적한다. 이방성 응력상태에 의해서도 이러한 이방성이 형성된다. 따라서, 점성토는 시험기기의 종류와 가해지는 응력경로에 따라 강도가 달라지는 강도의 이방성 특성을 나타낸다.

그림 2는 비배수 조건에서 삼축인장시험(triaxial extension test), 삼축압축시험(triaxial compression test), 그리고 직접전단시험(direct shear test) 시험을 각각 응리방향과 응리방향의 직각 방향에 대해 실시하고 측정된 결과를 나타낸 그림이다. 이 그림은 시료의 형성조건과 시험방법에 따라 강도가 다르게 평가됨을 보여주고 있다.

그림 2를 자세히 살펴보면 삼축인장시험, 삼축압축시험, 직접 전단시험 순으로 강도가 크게 측정되는 것으로 나타나 있지만, 직접전단시험 결과가 압축시험 결과보다 적게 측정된 결과도 발표(Bjerrum)되

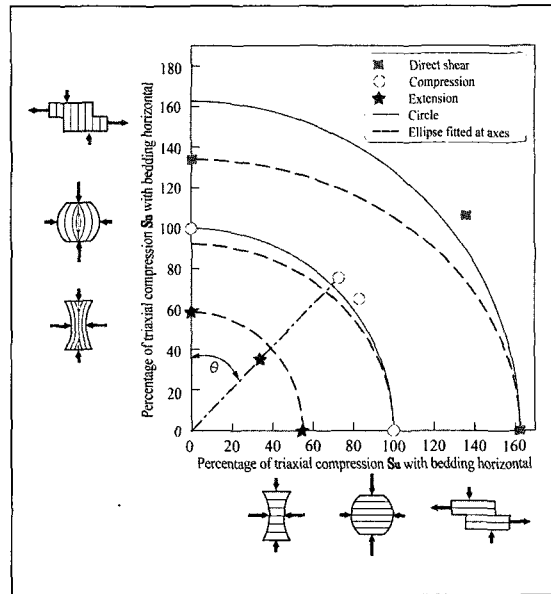


그림 2. Polar diagram showing the variation in undrained shear strength with test type and specimen orientation for a soft clay from Kings Lynn, Norfolk, after Madhloom(1974)

었기 때문에 이 경향을 절대적인 결과로 받아들이는 데에는 조심할 필요는 있다. 그러나 분명한 것은 전단강도는 측정하는 방법에 따라 각각 다른 강도를 나타내는 이방성을 가지고 있다는 것이다.

3.2.2 점성토의 강도와 체적 변화

Hvorslev(1937)는 일찍이 점성토의 강도는 파괴면에 작용하는 유효연직응력과 간극비의 함수가 됨을 다음의 식으로 발표하였다.

$$\tau_f = C_z \text{Exp}(-Be_f) + \bar{\sigma}_f \tan \bar{\phi}$$

여기서, C_z 와 B 는 상수이며, τ_f 는 파괴시의 전단강도, $\bar{\sigma}_f$ 는 파괴면에 작용하는 연직 유효응력, e_f 는 파괴면에서의 간극비를 말한다. 이 연구결과는 동일한 유효응력을 갖는 점성토가 서로 다른 강도를 보이는 이유를 공학적으로 설명할 수 있게 하였다. 또한, 점성토에서는 간극비와 강도가 아주 밀접한 관계를

기술위원회의 세미나 주요내용

보이기 때문에 체적 변화와 강도를 연계해서 생각하는 것이 더 합리적인 접근방법이 된다.

3.2.3 점성토의 강도평가에 미치는 영향 인자

(1) 전단속도가 미치는 영향

현장 배인시험이나 실내 전단시험으로부터 비배수 전단강도를 측정할 경우, 전단속도가 느릴수록 측정되는 강도는 작게 나타나는 것으로 알려져 있다. 그 이유로는 천천히 전단할수록 간극수압이 더 크게 발생하는 점성토의 고유한 크리프(creep) 특성 때문이다. 또한, 점성토의 소성지수가 크면 클수록 강도의 감소도 크게 나타난다. 따라서, 변형이 오랜시간에 걸쳐 점진적으로 발생하게 되는 경우에 대한 안정성 평가를 위해서는 이러한 강도 감소영향을 고려하여야 한다.

(2) 시료의 교란 영향

지반으로부터 시료를 채취하여 함수비 변화가 발생하지 않는 상태로 오랫동안 보관한 후에 강도를 측정하면 강도가 작게 측정된다. 견고한 시료일수록 이러한 현상이 두드러지게 나타난다. 또한, 시료가 교란될 경우에도 강도는 작게 평가된다. 따라서, 시료 채취기의 선정, 시료채취시의 교란, 시료의 보관, 시료의 제작과 시험, 시험의 종류 등이 측정되는 전단 강도에 영향을 미치기 때문에 최종결과를 도출함에 있어서는 이러한 영향이 반영된 공학자적 판단이 필요하다.

3.3 점성토의 공학적 특성 요약

점성토의 공학적 특성 규명에 대한 연구자료는 양이 방대하고 다양하여 여기에 모두 언급할 수는 없다. 그러나 본 장에서 살펴본 변형과 강도 측면의 특성 몇 가지는 국내의 연약지반공학자들이 실무에서 현재 시행하고 있는 내용들이 어느 위치를 점하고 있는가를 건주어 볼 수 있는 기회를 제공할 수 있을 것이다. 점성토는 응력이력과 경로, 구성광물의 종류와 구조적 특성, 생성환경, 시료의 획득과 취급 및 시

험, 시간영향 등에 의해 아주 민감한 반응을 보이는 특성을 가지고 있다. 따라서 특성평가를 위해서는 면밀하고 세심하게 접근하여야 한다. 즉, 현재 국내에서 시행하고 있는 것보다 훨씬 고급스런 데이터 창출이 요구된다 하겠다. 특히 변형(압밀)과 강도는 불가분의 관계를 가지고 있기 때문에 이들을 별개의 과제로 분리하여 취급하는 것 보다는 동일한 이해의 틀 안에서 검토하고 해석하여야 함도 알 수 있을 것이다. 무엇보다도 기억해야 할 것은 우리가 구사하고 있는 각종 평가기법에는 한계점들이 있기 때문에 다양한 기법들을 활용하여 평가하여야 하며 올바른 경험적 판단도 필요하다 하겠다.

4. 연약지반공학자의 국내 기술환경

4.1 기술사회환경 측면

지반공학이 지양하는 영역을 크게 둘로 나누면 안정성 도모와 과대변위 방지라고 할 수 있다. 물론, 이 두 가지 사안은 동전의 앞면과 뒷면과 같은 불가분의 관계를 갖는다. 궁극적으로 이 두 가지의 목적을 달성하기 위해 제반연구가 진행되어 왔고 앞으로 진행될 것이다. 학문이나 기술은 그것이 활용되고 발전시키는 사회에서 자양분을 공급받아 성장하기 때문에 한 나라의 기술도양은 곧 그 나라의 기술력이라 하여도 지나친 말은 아닐 것이다.

국내의 연약지반 기술발전은, 필자가 느끼기로는 최소한 수십년 동안, 담보적 상태를 유지해 왔다. 이러한 상태를 벗어나지 못하는 이유를 두 가지로 압축하여 생각해 보면, 1)연약지반으로 기인된 심각한 사회문제가 없었고, 2)연약지반의 특성이 불분명하여 어느 누구도 단정적이고 명쾌하게 규명할 수 없다는 고유한 특성을 보유하고 있다는 점이다. 특히, 2)와 같은 문제로 인해 지반특성치들(설계정수들)에는 항상 하한값과 상한값이 붙어다니게 되었고, 그 범위 안에서 적당한 값을 선정해서 적용해도 문제가 되지

기술위원회 세미나 주요내용

않았다는 매우 소극적이고 위험스러운 사고개념이 기술사회 전반에 걸쳐 형성되어 있다.

결국, 지반분야는 특별한 노력 없이도 누구나 할 수 있는 분야라는 인식이 서서히 자리매김되고 있을 때 이 분야에 종사하는 당사자들이 연약지반 분야가 기술적으로 매우 어려운 분야임을 입증하는데 소홀시 하였다.

이러한 단일한 대처로 인하여 우리 스스로의 기술 개발에 대한 관심보다는 다른 사람들이 연구해 놓은 결과를 더 선호하여 적용하는 기술 환경이 조성되었다. 요즘에도 당해 현장에서 얻어진 시험결과 보다는 기존의 적용사례와 외국의 사례와 연구결과가, 적용되게 된 배경의 면밀한 검토 없이도, 존중시 되는 사례가 종종 발생되고 있는 것을 보면, 우리자신마저 우리자신의 기술로 생산된 결과들을 신뢰하지 못하는 열악한 기술 환경에 처해있다고 할 수 있다. 이제는 시대에 걸맞게 우리 것은 우리의 기술로 해결하겠다는 환경조성이 절실하게 요구된다.

4.2 기술교육환경 측면

연약지반에 관련된 고급의 이론들은 모두 시험결과를 토대로 형성되었고, 지속적으로 개선과 발전을 거듭해 왔다. 이것은 실제적인 거동측정과 확인과정, 소위 'dirty-handed-research', 가 연약지반 관련 학문분야에서 핵심역할을 해오고 있음을 입증하는 예이다.

국내의 기술교육 과정을 좀 비판적으로 분석해 보면 미래의 연약지반공학자들이 경험하여야 할 필수적인 실험적 확인과정이 다양하지도 결코 깊지도 않다. 물론, 전부는 아니지만 대부분 그렇다. 특히, 실험 기자재가 낙후되어 있고 새로운 실험적 연구를 수행할만한 교육투자도 이루어지고 있지 않다. 다분히, 'clean-handed-research' 만을 선호하게 되기 때문에 경쟁력 있는 연약지반공학자를 육성하기가 어려운 교육구조를 가지고 있다. 이러한 시스템을 혁신하기 전에는 국내의 연약지반공학자가 외국의 기술 자

료의 포로 신세를 모면하기 어렵게 될 것이다. 이미 3장에서 언급한대로 선진국 뿐만 아니라 개발도상국에서 이미 보편적으로 적용하고 있는 시험적 평가방법을 국내의 연약지반의 변형특성과 강도특성에 널리 적용시킬 수 있는 교육환경 조성이 필요하다. 더 나아가 연약지반의 변형과 강도를 동시에 조명하여 이해할 수 있는 학문적 안목을 갖는 공학자들을 육성할 수 있도록 연약지반 교과과정을 강화하여야 한다. 특히, 개발된 연약지반의 특성에 대한 활발한 연구 활동이 이루어지고 그 성과들도 국외에 널리 알려 국제적인 위상이 확보될 수 있도록 노력하는 것이 필요하다.

4.3 기술실무환경 측면

현재 국내에서는 대규모 항만공사들이 진행되고 있다. 이러한 항만시설은 모두 도심도 연약지반상에 건설된다. 그 단위별 부지면적도 넓고 연약지반의 두께 또한 두꺼워, 가히 세계적으로 주목받을 수 있는 연약지반 개량공사들이다. 이들 중 규모가 최대인 모항만공사에서 설계를 위해 시행한 현장 및 실내시험 항목과 그 양을 요약하면 표 1과 같다.

표 1 (a)를 보면 시추작업을 위해 floating barge를 사용하였음을 알 수 있다. (b)에 나타난 시험항목에는 표준압밀시험과 일축압축 시험 등의 기초적인 시험만을 수행함으로써, 종합적이고 면밀한 점성토의 역학적 거동특성 파악을 위한 각종 시험 등은 수행되지 않았음을 알 수 있다. 즉, 앞서 3장에서 언급된 각종 특성들을 평가하고자 하는 노력이 몹시 부족한 조사내용임을 알 수 있다.

이 지역 점성토는 예민비가 5 내외인 예민한 점성토 지반이어서 시료의 교란영향이 매우 커서 아주 기초적인 선행압밀하중 마저도 정확하게 측정할 수 없는 수준의 시험결과들이 대부분이었다. 이처럼 사업비가 대규모인 대형사업을 위해, 그리고 장기간에 걸쳐 변형을 수반하게 될 두꺼운 연약지반에 새로운 항만시설을 건설하면서 정작 연약지반 평가에 대한 수준은 매우 미흡하였다. 정보화 시대에 살고 있는 연

기술위원회 세미나 주요내용

표 1. ○○항만 건설을 위한 지반조사 항목과 수량

구 분		내 용
현 장 조 사	시추조사	119개소 → Nx102개소
		대구경(120mm) 6개소
		연속시료채취 11개소
	피에조콘관입시험	74개소(간극수압 소산시험 병행)
	현장배인시험	40개소
	공내재하시험	18개소
조 사 장 비	시추장비	유압기 6대
	Floating Barge	시추작업용 6대 배인시험용 1대
	Jack-up Barge	피에조콘 관입 시험용 2대

(a) 현장조사항목 및 장비

구 분	내 용	구 분	내 용
자연함수비	751회	아터버그한계	610회
비중시험	751회	압밀시험	372회
체분석	751회	일축압축시험	357회
침강분석	604회	삼축압축시험	UU : 354회 CU : 70회 Rowe Cell : 30회

(b) 실내시험 항목 및 수량

약지반공학자들이 현재 연약지반의 대책을 세우기 위한 기초 자료의 생산과 평가방법이 이 정도의 수준에 지나지 않는다면 그 이유를 불문하고 연약지반공학자의 위상은 무너질 수밖에 없다.

4.4 연약지반공학자의 기술환경 요약

연약지반공학자가 처해있는 기술환경을 사회적 측면과 교육 및 실무측면에서 살펴보았다. 이것들을 아래의 그림 3과 같이 Burland(1987)가 제시한 토질역학 삼각형에 비추어 보면,

- 1) 국내의 연약지반공학자는 3분야에서 모두 각고의 자기 혁신이 필요하다.
- 2) 특히, '조사분야'와 '거동특성 분야'에 대한 진보된 기술습득과 응용이 절실히 요구된다.
- 3) 그리고, 토질특성의 이상화, 모델화 및 해석 등의 응용역학 분야에서도 국제수준과 견줄만한

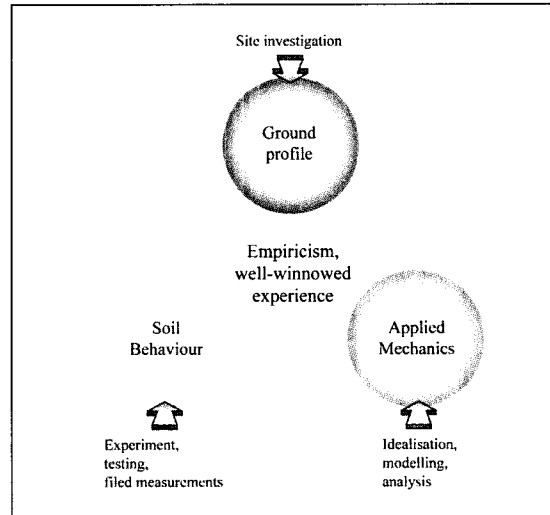


그림 3. The soil mechanics triangle(Burland, 1987)

기술수준으로 발전시켜야 하며

- 4) 무엇보다도 현장 경험을 통한 응용력과 판단력 습득에 노력을 기울여야 한다.

5. 연약지반공학자의 위상 제고 방향

이주 복잡하고 어렵고 다양한 연약지반의 공학적 문제들을 너무나도 안이하게 취급하는 국내의 기술환경을 타파하고 혁신하려는 노력을 기울이지 않는 연약지반공학자들의 미래는 매우 어둡다. 아울러, 유능한 후배 연약지반공학자도 이 분야를 찾지 않게 될 것이다. 연약지반공학자는 연약지반이 누구나 적당히 취급해도 된다는 안일한 인식을 갖지 않도록 스스로를 혁신하지 않으면 안 될 시점에 이르렀다. 즉, 위기를 맞이하고 있는 것이다. 이를 기회로 삼아 그 위상을 제고하기 위해서는

- 1) 적당주의를 배척하고 현장 엔지니어링(field engineering)을 중시하는 기술 환경을 조성하여야 한다.
- 2) 우리의 것은 우리의 기술로 해결하려는 자존심

기술위원회 세미나 주요내용

- 을 강화하여야 한다.
- 3) 고급의 공학적 자료를 스스로 생산하고 활용하여야 한다.
 - 4) 이를 위해서는 실험실의 현대화와 컴퓨터화된 데이터 창출시스템 조성이 필요하다.
 - 5) 소위 dirty-handed-research을 즐길 수 있어야 한다.
 - 6) 사회적으로 인정하는 성공한 연약지반 공학자를 배출하여야 한다.

점성토는 시간 의존적 변형과 강도특성을 보유하고 있기 때문에 이에 대한 매우 다양하고도 폭넓은 조사를 실시하되(그림 4~그림 6의 실험, 참조) 그 결과가 현업에 필요함을 적극적으로 알려 우리의 낙후된 기술 환경을 혁신하고 개선하여야 연약지반 공학자들의 위상도 제고될 수 있는 것이다.

6. 꼬리말

우리나라의 연약지반 기술수준은 동남아시아 지역의 국가들인 싱가포르, 대만, 태국, 심지어는 베트남에 비해 결코 우월한 위치에 있지 않다. 오히려 많이 낙후되었다고 할 수 있다. 우리나라의 경제규모와 국제적 위상과 발전속도에 비추어 보면 실로 부끄러운 일이 아닐 수 없다. 연약지반이 사회의 문제로 대두되는 일이 미미하여 이 분야에 쏠리는 관심이 상대적으로 적었기 때문이라고 자위할 수 있지만 연약지반이 국내의 현장에서 문제로 떠오르기 시작한지도 꽤 오랜 시간이 경과하였으니 이제 더 이상 우리의 기술수준을 이대로 방치할 수는 없는 시점에서 있는 것이다. 연약지반에 몸담고 있는 우리 스스로가 우리의 위상을 높이려는 노력을 기울여야 할 때이다.

따라서, 연약지반공학자들은 스스로 고급의 데이터를 생산하여야 할 뿐만 아니라 평가하고 예측하는 기법도 다양하고 활발하게 적용하고 발전시킴으로써 자신들의 위치를 지켜야 할 것이다. clean-handed-

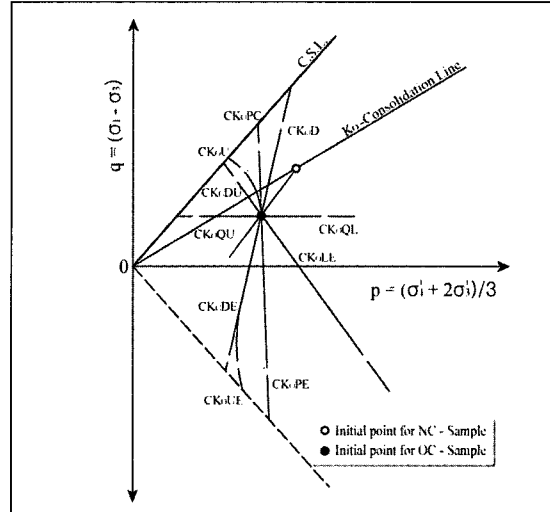


그림 4. K_0 상태와 응력 검토

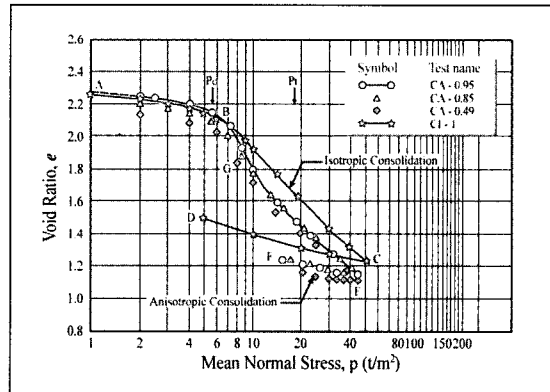


그림 5. 등방압밀과 K_0 압밀곡선

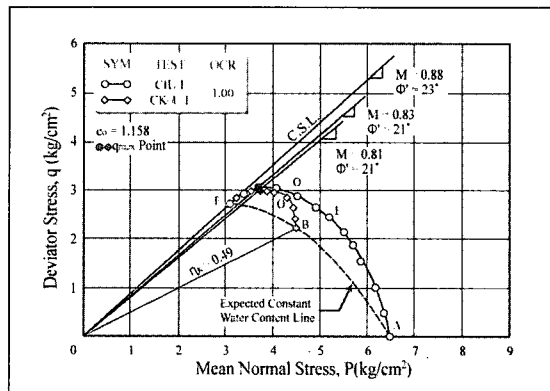


그림 6. 등방압밀과 K_0 압밀시험의 비배수 유효응력 검토

기술위원회 세미나 주요내용

research만을 고집하는 환경에서 벗어나 국외의 변모하는 모습을 빠르게 수용하고 국내의 연약지반 관련 자료를 국외에 널리 알릴 수 있는 위치로 발돋움할 때 연약지반 공학자의 위상도 제고될 수 있을 것이다.

알리는 말

본고는 한국지반공학회 연약지반기술위원회의 학술세미나(2003년 8월)에서 가졌던 필자의 강연내용을 일부 수정 보완한 것이다.

한국지반공학회의 연약지반위원회에서는 2003년 8월 20일 한양대학교 박물관 강당에서 학술세미나를 개최하였다. 학술세미나는 위원장의 인사말과 학회 회장을 대신하여 천병식 부회장께서 축사를 하여주셨으며 축사에서 천부회장께서는 현재 지반공학회에서 연약지반위원회의 중요성과 역할에 대하여 축사와 함께 말씀을 하여 주셨다.

그리고 이어서 연약지반공학자의 당면문제 및 해결방안에 관한 주제로 (주)에스코 컨설턴트의 김승렬 박사께서 초청강연을 하여 주셨다. 이후 본 세미나의 주제로 선정되었던 주제발표 I(연약지반 조사 및 설계변수 추정), 주제발표 II(연약지반 해석 및 설계) 및 주제발표 III(연약지반 처리기술 및 시공사례) 순서로 세미나와 좋은 의견들이 개진되었다.

본 세미나에서는 연약지반과 관련된 포괄적인 내용을 주제로 하였으며 당면한 연약지반 기술은 이들 각 주제별로 동떨어진 것이 아니라 각 주제에서 다루어지고 있는 내용들이 서로 연계되고 상호 보완적으로 발전될 때 보다 적절한 연약지반에 대한 대처가 가능하다는 관점에서 이러한 포괄적인 주제가 설정되었다. 각 주제별로는 약 3~4편의 논문들이 발표되었으며 발표 후 여러 의견들을 서로 나누고 토의하며 의견이 개진되었으나 이전과 마찬가지로 그다지 많은 의견이 토론되고 개진되지는 못한 아쉬움이 있었다.

주제발표 I은 연약지반 조사 및 이를 통한 설계변

수 추정과 관련하여 3편의 논문이 발표되었다. 첫 번째 논문은 '해양점토 지반의 압밀침하량 산정에 적합한 압축지수 예측식'이라는 제목으로 해양연구소의 윤길림 박사께서 발표하였다. 본 논문은 엘지건설(주)의 김병탁 박사와 함께 연구한 내용으로 우리나라 대상지역을 각 권역별로 나누어 각 지역특성에 적합한 압축지수값을 단일변수모델과 복합지반변수 모델을 적용하여 제안하였다. 이를 위해 국내 해성점토 지반에서 수행된 상당한 양의 지반상수와 압축지수에 대하여 통계분석을 수행하였고 각 지역별로 적합한 모델과 경험식을 제안하였다. 국내에서도 그동안 수많은 연약지반과 관련된 자료들이 실험을 통해 얻어졌음에도 국내 지반에 적합한 경험식들이 제안되지 못하고 있던 상황에서 국내 지반특성을 고려한 이와 같은 연구가 진행됨으로써 국내 독자적인 연구결과가 이루어 졌다는 관점에서 가치있는 연구결과라고 사료된다.

주제발표 I의 두 번째 논문은 '연약지반개량에 따른 지반의 물리역학적 특성변화'라는 제목으로 한국건설기술연구원의 정하익 박사께서 발표하여 주셨다. 본 논문에서는 전 세계적으로 많이 수행되고 있는 해안공사 과정에서 얻어진 결과를 바탕으로 연직배수제타설 및 상재하중 재하에 의한 연약지반 개량에 따른 지반의 물리역학적 특성 변화를 고찰하였다. 국내 및 국외 몇몇 지역에서 관측된 사례들을 정리하여 발표하였으며 개량으로 인한 지반의 기본적인 물성 변화 및 압밀과 관련된 설계변수들의 변화를 사례를 통하여 정리하였다. 정량적인 변화보다는 정성적인 경향 분석에 그쳤다는 것이 다소 아쉬운 점이었다.

주제발표 I의 세 번째 논문은 'DMT를 활용한 국내 연약지반의 구속압축계수와 비배수 전단강도의 평가'라는 제목으로 한국과학기술원의 이승래 교수께서 발표하였다. 본 논문에서는 날로 그 사용이 증대되고 있는 flat DMT에 의한 설계변수 추정 시 이용되는 여러 상관관계들의 국내지반 적용성 평가를 목적으로 수행되었다. 설계변수로는 비배수 전단강도와 구속압축계수에 국한하여 다소 국한된 지역에

기술위원회 세미나 주요내용

서 행해진 시험결과를 바탕으로 분석이 수행되었다. 연구결과 비배수 전단강도를 추정하기 위하여 많이 적용되고 있는 Marchetti에 의해 제안된 상관관계는 국내 지반의 경우 비배수 전단강도를 다소 보수적으로 추정하는 것으로 판단되었다. 그리고 그 추정된 설계변수 결과에는 연약지반에 포함된 실트성분이 비배수 전단강도 등의 설계변수 추정에 많은 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

주제발표 II는 연약지반 해석 및 설계라는 주제로 4편의 논문이 발표되었다. 본 주제의 첫 번째 논문은 '이종드레인을 이용한 다층지반의 지반재량 설계 사례'라는 제목으로 (주)도담E&C에서 발표하였다. 본 논문은 광양항 컨테이너 터미널 축조공사 중 퇴적 이력이 상이한 다층지반의 지반개량을 위해 동일한 압밀도를 획득하도록 이종드레인을 적용한 경우에 고려되었던 설계사례에 대하여 발표되었다. 상부 준설지반과 원지반이 상이한 경우 동일한 압밀개량 효과를 얻기 위해 드레인의 안정성 및 시공성 등을 고려하여 조합된 드레인공법을 선정하였고 이를 고려한 3차원 해석 등을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 등가설계법 등이 제안되었다.

주제발표 II의 두 번째 논문은 '광양항 3단계 2차 컨테이너 터미널 축조공사 설계사례'라는 제목으로 (주)현대건설의 이승원 박사께서 발표하였다. 본 논문에서는 컨테이너 안벽설계 및 연약지반과 관련된 설계 전반사항에 대하여 발표하였다. 이중 안벽설치를 위한 준설설계 및 기초설계과정과 배면 뒷채움 설계 시 고려하였던 사항들에 관해 요약하여 설명하였고 연약지반의 경우에는 표층처리공법설계 및 배수재 선정과정과 이와 관련된 통수능력 판단과정 및 교란효과 등에 대하여 설명하였다. 다소 민감한 결과를 초래할 수 있는 설계결과를 거리낌 없이 발표하여 주신 두 회사에게 감사사를 드린다.

주제발표 II의 세 번째 논문은 '지반개량 및 미개량 연약지반의 해석'이라는 제목으로 부경대학교의 김윤태 교수께서 발표하였다. 본 논문에서는 특히 개량 및 미개량 연약지반의 시간의존적인 거동특성에

대하여 발표하였다. 실제 현장에서 측정되는 거동특성과 시간효과를 고려하지 못했을 경우 예측되는 거동특성 간의 차이점을 설명하였고 변형률 속도를 고려한 점소성 압밀해석에 대하여 설명하였다. 그리고 이를 바탕으로 제안된 수치해석 프로그램을 적용한 결과 변형률 속도의 영향을 고려함으로써 보다 현장 지반의 거동특성을 잘 설명하는 결과를 도출하였다.

주제발표 II의 네 번째 논문은 '모래다짐말뚝(SCP)에 의한 복합지반의 응력분담 및 거동 연구'라는 제목으로 한국해양연구원의 유승경 박사후 연구원께서 발표하였다. 본 논문에서는 복합지반에 대한 실내모형실험 결과와 수치해석에서 얻어지는 결과를 비교 분석하였다. 분석 결과 개량지반 내부의 각 과정에서의 응력분담거동과 그 메커니즘을 규명하고자 하였다. 연구결과 압밀초기를 제외하고는 대부분의 압밀기간 중에 모래말뚝은 파괴상태에 도달되며 이때 개량지반의 역학거동은 모래말뚝의 다이러턴시 거동과 점토의 압축거동의 상호작용에 의해 지배되는 것으로 판단되었다.

주제발표 III은 연약지반 처리기술 및 시공사례라는 주제로 3편의 논문이 발표되었다. 본 주제의 첫 번째 논문은 '호안제체 강제치환시 계측관리사례'라는 제목으로 강제치환 효과를 확인하기 위해 여러 가지 계측기를 이용한 계측관리를 시행한 사례에 대하여 (주)이제이텍에서 발표하였다. 과도한 침하 측정이 가능하도록 수평액상 침하계를 연성 및 강성이 있는 코푸렉스보호관으로 보호하였고 여유장을 확보하기 위하여 보호관에 S자 주름을 주어 센서 좌우로 최대 6m의 여유장을 확보할 수 있도록 설치하였다. 본 시공결과 해상연약지반에서의 SCP 타설로 인하여 큰 융기현상이 일어날 수 있다는 것을 발견하였으며 사석간의 침하속도 차이로 센서하부로 사석이 밀려들어가는 현상이 나타남으로 인해 다소 침하를 과소 평가한 것으로 판단되었다.

주제발표 III의 두 번째 논문은 '봉적도 층에서의 JS-CGM 공법 및 CGP-앵커의 적용성'이라는 제목으로 한양대학교 양형철 박사과정에서 발표하였다.

기술위원회 세미나 주요내용

본 논문에서는 터널 갱구부 지역의 지반 특성 상 마찰형 어스앵커가 인장력을 발휘하지 못하는 결과가 초래되어 합성실리카 주입공법으로 차수벽을 형성시킨 후 시멘트밀크 및 몰탈을 주입하여 지반을 보강하고 인장하중을 받을 수 있게 CGP-앵커를 시행한 사례를 발표하였다.

마지막으로 주제발표 III의 세 번째 논문은 'CGS 공법 적용에 의한 지반개량특성'이라는 제목으로 발표되었다. 본 논문에서는 국내의 6개 지역에서의 CGS공법을 적용한 현장들에 대하여 개량효과를 선형회귀분석, 통계방법 등을 통하여 분석하였다. 주입으로 인한 지반개량효과를 파악하고자 주입 전후로 구분하여 시추작업과 표준관입시험 결과의 변화경향과 동적콘관입시험 및 피에조콘 관입시험결과를 분석하였다.

세미나 결과 처음 계획 단계부터 다소 급박한 일정으로 인해 미흡한 부분이 나타났던 것으로 판단된다. 우선 계획 당시부터 학회 회원 중 위원회에 소속된 회원들의 보다 적극적인 참여를 권장하지 못함으로 인해 이에 대해 깊은 사과를 드립니다. 또한 계획 당시에 수립된 발표 주제와 관련하여 다소 부적절한 구성이 이루어져 큰 실효를 거두지 못한 부분이 있었다고 생각한다. 이 모든 것이 지금 연약지반과 관련된 저희들의 현실인 것 같아 다소 착잡한 마음이 앞선다. 이제까지 연약지반위원회는 학회 위원회 중 가장 회원수가 많은 위원회이지만 그 숫자만큼 활발한 활동이 이루어지지 못하였던 것으로 판단된다. 이는 제일 우선적으로 위원장의 능력 부족과 함께 그만큼 연약지반에 대한 회원들의 인식이 다소 식어져 있지 않은가 하는 느낌이다.

세미나 결과를 돌아보며 이와 같이 후회도 많지만 나름대로 얻은 결실 또한 없지는 않았다고 판단된다. 우선 젊은 연약지반공학자들이 열심히 세미나에 참석하여 준데 대하여 감사를 아끼지 않는다. 그리고 멀리 지방에서부터 적극적으로 참여하여 주신 회원 여러분의 열의에 감사를 드립니다. 또한 세미나를 준비하는 과정에서 도와주신 한양대학교 관계자 여러분과 특별

히 본 세미나가 최소한의 경비로 이루어질 수 있도록 여러모로 도움을 아끼지 않으신 천병식 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 끝으로 연약지반 위원회는 현재 남순성 박사의 도움이 없이는 거의 운영이 되지 않을 정도로 많은 수고를 아끼지 않으십니다. 다시 한번 남박사님의 노고에도 깊은 감사를 드립니다.

기초기술위원회 워크샵 일자 변경안내

저희 기초기술위원회에 관심을 가져 주시는 회원들께 감사드립니다. 다름이 아니오라, 남부지방과 강원지방을 휩쓸고 지나간 태풍 매미의 영향으로 9월 26일로 예약된 워크샵 장소(부산광역시청 국제회의실) 사용이 불가능하게 되어 부득이 기초기술 워크샵의 일정을 변경하게 되었습니다. 날짜만 10월 14일(화요일)로 변경되었습니다. 이점 널리 양해해 주시기를 당부드립니다.