

Zemin mekaniğinin temelleri

Ergün TOĞROL*

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

İstanbul, Zemin Mekaniği'nin bilimsel bir disiplin olarak kurulduğu yerdir. Hikaye, Karl Terzaghi'nin İstanbul Teknik Üniversitesi'nde, o zamanki adı ile Yüksek Mühendis Mektebi'nde 1916 yılında görev alması ile başlamaktadır. Terzaghi'nin 1918'e kadar Yüksek Mühendis Mektebi'nde, daha sonra 1922'ye kadar Robert College'de çalıştığı yıllarda, yapmış olduğu deneyler, geliştirmiş olduğu kavramlar inşaat mühendisliğinde yeni ufuklar açmıştır. Ortaya attığı "efektif gerilme" kavramı, zemin davranışı ile ilgili o zamana kadar karanlıkta kalan bir çok konunun anlaşılmasını sağladığı gibi yeni araştırmaları teşvik etmiş, yeni bulgulara yol açmıştır. Türkiye'de zemin mekaniğinin inşaat mühendisliğinin bir dalı olarak yerleşmesi ve gelişmesi, daha sonraki yıllarda, Ahmet Hamdi Peynircioğlu'nun çalışmaları ve uzak görüşlülüğü sayesinde gerçekleşmiştir. A. H. Peynircioğlu, Türkiye'de ilk kez, "zemin mekaniği ve temel inşaatı" bilim dalını ve kürsüsünü kurdu, birçok öğrenci yetiştirdi. Şimdi kendi adını taşıyan İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nı kurdu. İnşaat mühendisi olarak çeşitli zemin koşullarında zarif, ders niteliğinde çözümler meydana getirdi. Yurdumuzda yapılan çalışmaların duyurulması ve uluslararası toplantılara sunulması amacıyla 1947 yılında "İTÜ Zemin Mekaniği Araştırma Kurumu"nu kurdu, gelişen üniversiteler ortamını da dikkate alarak, 1974'te "Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi"nin kurulmasını sağladı. Bugün, üniversitelerde ve araştırma kurumlarında görev alan, projelerde sorumluluk yüklenen birçok geoteknik mühendisi, Ahmet Hamdi Peynircioğlu'nun araştırmacı, öğretim üyesi ve insan olarak verdiği örneği hatırlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Zemin mekaniği, geoteknik mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Robert College.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ergün TOĞROL. toğrol@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 47.

Makale metni 18.03.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 11.08.2011 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 29.02.2012 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Toğrol, E., (2011) 'Zemin mekaniğinin temelleri', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 4, 15-22" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Foundations of soil mechanics

Extended abstract

Research on shear strength of soils always had, and perhaps still has, an important part in the development of soil mechanics. Some of the work carried out on the shear strength of cohesive soils is discussed here.

Karl Terzaghi came to Istanbul Technical University in 1916 and stayed in Istanbul till 1922. During his stay in Istanbul, he had the opportunity to re-evaluate and reconsider his engineering experiences of the past from the perspective of present. He later wrote, "I was sitting in a mood of depression at an old rustic coffee house overlooking Golden Horn. I suddenly visualised what was needed to obtain a rational approach to the problem involved in earthwork and foundation engineering." He carried out a series of experiments and made observations. He recognized that the addition of an increment of external pressure to a clay sample resulted in a temporary increment of water pressure of equal magnitude and soil's inter-grain contacts would feel no increment of force until the pore pressure began to dissipate. He defined "the pressure acting in the solid phase of the clay" which is now known as "the effective stress".

At the time Karl Terzaghi stated one of the fundamental principles of soil mechanics (Terzaghi, 1936) "... All measurable effects of a change of the shearing resistance are exclusively due to the changes in the effective stresses...." The principle of effective stress is extremely important concept in soil mechanics. A number of corollaries can be deduced from that principle. The engineering behaviour of soils with similar structure and mineralogy will be the same if they have the same effective stress. If the soil loaded or unloaded without change of volume and without any distortion there will be no change of effective stress. By raising or lowering pore water pressure it is possible to change the volume of the soil.

Coulomb studied the stability of earth masses by considering the frictional resistance of a sliding block and published his famous paper in 1776. After Coulomb and many attempts have been made to redefine c and ϕ to improve the equation in view of the new findings. Besides field observations and physical simulation by means of tests and monitoring our understanding of soil behaviour is improved.

The Mohr theory of strength has been very useful in predicting stress conditions at failure from triaxial

and other shear test results. The theory is based on the assumption that the shear stress on a failure plane is a unique function of the normal stress acting on that plane without particular reference to the associated strains.

M. Juul Hvorslev carried out a series of tests on remoulded consolidated clay samples in the soils laboratory of Terzaghi in Wien Technische Hochschule. Hvorslev was aware that a cohesive soil undergoes either decrease or increase in the void ratio depending on its state of consolidation and also this change in the void ratio is simultaneous with the increase or decrease of pore water pressure.

The classical work of Peñircioğlu (1939) on the shear strength of remoulded saturated cohesive soils is the earliest verification of Hvorslev's findings.

Roscoe, Schofield, Wroth (1958) in their prominent work define shear strength in three dimensional form by taking deviator stress (q), mean principal effective stress (p) and void ratio (v) as axes. They showed that failure points of clay samples which were initially isotropically consolidated and then loaded in drained and undrained triaxial compression tests fall on the same line in that space. They coined that line as the Critical State Line. The projection of the critical state line onto the $q - p$ plane may be described by $q = M p$ where M is its gradient.

Remoulded, reconsolidated samples, such as used by Hvorslev, Peñircioğlu, and stress in their tests may fall into the class of normally and lightly overconsolidated soils. The exact boundaries of the failure surface defined by them are continuously improved and discussed by the introduction of new experimental evidence. Yet the work carried out in the late thirties constituted a major progress still to be challenged.

We owe the development of Soil Mechanics and Foundation Engineering in Turkey to Professor A. Peñircioğlu (1908 – 1982). He worked in Istanbul Technical University where he was appointed as full professor in 1943. His lectures was always well prepared and inspiring. As an experienced engineer he was always consulted for constructions with difficult ground conditions. He established Soil Mechanics Research Institute of Istanbul Technical University, and Geotechnical Laboratory, lead and chaired the group constituted Turkish National Committee of Soil Mechanics and Foundation Engineering.

Keywords: Soil mechanics, geotechnical engineering, Istanbul Teknik Üniversitesi, Robert College.

Zemin Mekaniğinin temelleri Karl Terzaghi ve Zemin Mekaniği'nin kuruluşu

Zemin Mekaniği bilimsel bir disiplin olarak Karl Terzaghi'nin İstanbul'daki çalışmaları sonucunda kurulmuştur. Zemin Mekaniği, belki o olmadan da kurulacaktı, şu da bir gerçek ki Karl Terzaghi doğru zamanda, doğru bir birikimle ortaya çıktı ve inşaat mühendisliğine o unutulmaz katkısını yaptı.

Karl Terzaghi 1883 yılında, o zaman Avusturya'nın bir şehri olan Prag'da doğdu, 1963'de A.B.D. de Harvard'da öldü.

“Graz Teknik Üniversitesindeki öğrencilik yıllarında kendisini önemli oranda etkileyen, kişiliğinin şekillenmesinde ve hayatının yönlendirmesinde rol oynayan iki kişi olmuştur. Bunlar, okulun seçkin profesörlerinden dünyaca ünlü hidrolik profesörü Forchheimer ile tatbiki mekanik profesörü Wittenbauer'dir. Henüz 19 yaşındayken tanıdığı Wittenbauer'i tüm yaşamı boyunca kendisine örnek seçecektir.”(Özüdoğru, 2000). Terzaghi 1904 yılında Graz Teknik Üniversitesinden makine mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl askerlik görevine başladı. Jeoloji'ye ilgisi üniversitede başladı. Daha sonra çeşitli işlerde ve çeşitli ülkelerde çalıştı. 1912 yılında Rusya'da çalışırken endüstri tanklarının tasarımı için hazırladığı grafik yöntemleri sunarak Ocak 1912'de Graz Üniversitesinden doktora derecesini aldı.

Aralık 1914'de Terzaghi askere çağrıldı. Askerlik yapmakta iken, 1916 yılında, İstanbul'da Yüksek Mühendis Mektebi'nde görev almak üzere davet aldı. Onu tavsiye eden hocası Forchheimer'dir. “Forchheimer, Terzaghi'deki cevheri önceden farkedenlerden biridir” (Özüdoğru, 2000). Profesör Forcheimer, katılar içinde ısının yayılması ile gözenekli ortamda suyun hareketi arasında matematik analogiyi kurmuştu ve birçok konuda Terzaghi ile görüş alışverişinde bulunuyordu (Goodman, 1998). Profesör Forcheimer, daha önce de, 1891-1892 yıllarında, o zamanki adı ile, Hendese-i Mülkiye Mektebi'nde görev yapmıştı.

“Terzaghi'nin verdiği dersin adı usul-ü umumiye-i inşaat (genel inşaat yöntemleri)'tir. Bu dersler bugünkü adıyla temel inşaatı, yol ve demiryolu derslerinin konularını kapsar.” Orijinal adı “*Procédés Généraux de Construction*” olan ders notları, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi tarafından bastırılmıştır (Terzaghi, 1995). O sıralarda Avusturya Türkiye'nin müttefiki ve dostudur. Bu nedenle Terzaghi'nin itibarı ve sosyal statüsü bir eğitim elçisi olarak imrenilecek düzeydedir.”

1918'de savaşın bitmesi ve İstanbul'un işgal edilmesi ile Avusturya Hükümeti, Terzaghi'nin İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki işine son vermiştir. O sırada Robert Kolej Müdürü olan Dr. Caleb F. Gates, Terzaghi'ye görev verip, sınır dışı edilmesini önlemiştir. “Robert Kolej'de iş verildiği için Terzaghi'nin oturma izni 20 Şubat 1919'a kadar uzatılmış, 19 Şubat'a kadar ayrılması kesin görülen Terzaghi son anda İsveç Büyükelçisi'nin araya girmesiyle İstanbul'da kalabilmiştir”(Özüdoğru, 2000).

Terzaghi İstanbul'da bulunduğu sürede zeminlerin fiziksel özellikleri ve mukavemeti ile ilgili birçok gözlem ve deney yaptı. Deneylerde kullanılmak üzere Kilyos'dan, aldığı zemin örneklerini deney yapmak için zor koşullarda laboratuvara getirdi, zeminlerin fiziksel özelliklerini bilimsel temele dayanarak araştırdı. İlk deneylerini yaparken altı hafta boyunca günde 12 saat çalışıyordu. “Araştırmalarının en önemli sonucu, zeminde efektif gerilme boşluk suyu basıncı arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmasıdır.” 21 Ocak 1918'de İstanbul'daki Matematik Cemiyetinde, yeni teorisinin esaslarını açıklayan bir konuşma yaptı (Goodman, 1998). 1925 yılında Amerika'ya hareket etmeden önce, Terzaghi'nin “*Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*” (Zemin Fiziği Temelinde Zemin Mekaniği) isimli kitabı Viyana'da yayınlandı. *Engineering News Record* dergisinin editörü F.E.Schmitt'in daveti üzerine İstanbul'da gerçekleştirdiği araştırmalarının sonuçlarını, “*Principles of Soil Mechanics*” (Zemin Mekaniği'nin Prensipleri) başlıklı bir seri makale olarak yayınladı. Kasım 1925'te Boston Society of Civil Engineers'te verdiği “Modern Conceptions

Concerning Foundation Engineering” (Temel Mühendisliğini İlgilendiren Çağdaş Kavramlar) ve Ocak 1927’de American Society of Civil Engineers’de verdiği “The Science of Foundations” (Temellerin Bilimi) adlı konuşmalar zemin mekaniğinin uygulamadaki mühendisler tarafından da anlaşılmasını sağladı. Böylece, zemin mekaniği duyulmaya ve Terzaghi’nin çalışmaları izlenmeye başlamıştır.

“Terzaghi, zeminlerin sınıflandırılmasına büyük önem verdi, fiziksel özellikleri bakımından kumlarla killerin nasıl ayırt edilebileceğini gösterdi. Kumların kayma mukavemetini tamamen sürtünmeye bağlı olarak açıkladı. Boşluk suyu basıncının önemini fark etti, efektif kayma mukavemetinin belirlenmesi için drenajlı deney yapılması gerektiğini ifade etti. Killerin kayma mukavemetini, o tarihte “kohezyon” olarak tanımladı ve kohezyonun kapiler basınç ile efektif sürtünme açısının tanjantının toplamına eşit olduğunu iddia etti. Uygun bir şekilde ölçüldüğü zaman killerin kohezyonunun, serbest basınç mukavemetinin yarısına eşit olduğunu, bu bakımdan kumların sürtünmesine benzediğini söyledi. Killerde büyük boşluk suyu çekmesinin büyük kohezyonun nedeni olduğunu ifade etti ve “bugüne kadar böyle bir şeyden kimse şüphelenmemişti” dedi. Killerdeki büzülmeyi, kapilare yoluyla açıklaması killerdeki boşluk suyu çekmesine inanmayanları ikna etmekte yararlı oldu” (Peck, 2000). Terzaghi, zeminin boşluklarını dolduran su dışarı çıkmaya başlamadıkça katı danelerin oluşturduğu zemin iskeletinin dışardan tatbik edilen gerilmeleri taşımayacağını ortaya koydu. Dışardan etkiyen gerilme p , boşluk suyundaki basınç u ise danecikler arasındaki basınç $p-u$ olacaktır diyordu. İlk bu gerilmeyi “kilin katı fazına etkiyen gerilme” olarak tanımladı, daha sonra “efektif gerilme” adını verdi (Goodman, 1998).

Zeminleri bir mühendislik malzemesi olarak incelerken çeşitli yükler altında nasıl şekil değiştireceğinin bilinmesi gerekmektedir. Terzaghi, zeminlerin şekil değiştirmesini incelemek için tasarladığı deneylerine kumlarla başladı. İstinat yapılarından kaynaklanan gerilmelerin zemine nasıl aktarıldığını inceledi. İstinat yapı-

larına gelen kuvvetlerin hesaplanması için, daha önce, Rankine (1857) ve Coulomb (1776) önerdikleri ünlü varsayımlarda zeminin şekil değiştirmesini dikkate almamışlardı. Terzaghi, bunun “temel bir hata” olduğunu, “Coulomb’tan sonra gelenlerin, verilen hesap tarzlarının varsayım niteliğini göz ardı etmelerinin, gelişmeleri engellediğini” söylemiştir (Goodman, 1998).

Zemin Mekaniği bilimsel bir disiplin olarak genel bir ilgi gördü. Terzaghi, bir taraftan da teorik çalışmalar ve laboratuvar deneyleri ile sistematik araştırmalar yapıyordu. 1925-1929 yılları arasında A.B.D. de MIT’de, 1929-1938 yılları arasında Viyana’da çalışmalarını sürdürdü. Bu dönemde, Casagrande, Albert, Rendulic, Hvorslev gibi araştırmacıların çalışmalarını yönlendirdi. 1927’de *The Science of Foundation* makalesinde, “Temellerle ilgili problemler, tamamen teorik matematik işlemlerle çözülemez. Yapılması gereken ilk şey, benzer özellikleri taşıyan projelerde neler olduğunu, ikincisi uygulamanın yapıldığı yerdeki zeminin cinsini, ve son olarak uygulamaların ulaştığı sonuçları belirlemek olmalıdır. Bu gibi bilgilerin sistematik olarak toplanması, yeterli zemin incelemeleri ile tanımlanan amprik veriler ile temel mühendisliği yarı-amprik bir bilim olarak geliştirecektir.” diyordu.

Haziran 1960’da Boulder, Colorado’da yapılan “Kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemeti” konulu konferansa Terzaghi katılmadı. Fakat göndermiş olduğu mektupta gözlemlerini şöyle ifade ediyordu: “1936’da, Harvard’da, Birinci Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Konferansı düzenlenirken kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemeti konusunda bugünkü bilgilerimizin esasları ortaya konulmuş, zeminlerin arazi ve laboratuvar davranışları genel olarak belirlenmişti. Bununla birlikte, bu konferansa katılan bizler, eksiklerin giderilmesi için ne kadar zaman ve emek harcanması gerektiğinin farkında değildik. Bu işlerin tamamlanması için çeyrek yüzyıl geçti ve Atlantik’in iki tarafında yetenekli araştırmacılar emek harcadılar. Bu konferansa verilen tebliğler, bilgimizdeki eksikliklerin giderildiğine kani olana kadar çok sayıda araştırma yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.”

Zeminlerin kayma mukavemeti

Zeminlerin kayma mukavemetinin incelenmesi, zemin mekaniğinin gelişmesinde önemli bir yer tutmuştur.

Harvard Konferansı'nın açılış paragrafında (Cooling, 1936), "Stabilite ile ilgili problemlerin incelenmesinde en önemli konu zeminlerin kayma direncinin incelenmesidir. Diğer zemin özellikleri gibi kayma direnci de su muhtevassından etkilenmektedir. Genellikle yapılan kabul, kayma direncinin, kohezyon ve içsel sürtünme denilen iki temel özelliğe bağlı olduğu şeklindedir. Bunlardan kohezyon tatbik edilen gerilmeden bağımsızdır. Stabilite analizinde bu iki faktörün etkisini ayrı ayrı ele alıp toplam dirence etkilerini incelemek gerekmektedir." diyordu. Zamanının önde gelen mühendislerinden olan Cooling'in bu beyanı o dönemdeki bilgimizi özetliyordu.

Yine aynı tarihte Terzaghi (1936) " Zeminlerde gerilmeler, sıkışma, şekil değiştirme, kayma direncinin değişmesi gibi, ölçülebilen büyüklüklerdeki değişimlerin nedeni, efektif gerilmelerdeki değişiktir." diyordu.

Zeminlerin kayma mukavemeti konusunda bugün varılan sonuçları değerlendirirken, önce bu konudaki bilgimizin vardığı sınırları hatırlamakta yarar vardır.

İki rijit cisim birbiri üstünde çekildiği zaman sürtünme direnci, temas noktalarında meydana gelen plastik deformasyonlara bağlı olarak değişir. Mikroskopik ölçekte temas alanı, makroskopik temas alanından çok daha küçüktür. Temasa yol açan basınç arttıkça, temas eden daha fazla kesim plastik olarak şekil değiştirir, ve toplam sürtünme alanı normal kuvvet ile orantılı duruma gelir (Schofield, Toğrol, 1996).

Sürtünme kanunlarının tanımlanmasında ilk öneriler Leonardo da Vinci (1452-1519) tarafından yapılmıştır. Leonardo, ağırlığın iki katına çıkarılması durumunda sürtünmenin de iki kat artacağını göstermiştir. Sürtünme ile ilgili kanunlar 1699'da Fransız mühendis G. Amonton tarafından tekrar keşfedilmiştir. Bu sonuçların

zemin mekaniğine uygulanması için bir yüzyıl geçmesi gerekmiştir. Coulomb kayan zemin kamalarını inceleyerek 1776'da ünlü "Essai sur une application des régles de Maximis et Minimis a quelque Problèmes de Statique relatifs" isimli makalesini yayınladı (Coulomb, 1776). Coulomb zemini rijit homojen malzeme olarak kabul ediyor ve kayma, iki zemin kamasının önceden belirlenmiş bir yüzeyde birbirlerine göre hareketi olarak tanımlıyordu. Ünlü Coulomb ifadesi;

$$\sigma = c + \sigma \tan \phi$$

olarak verilir, bu ifadede c "kohezyon keseni", σ kayma yüzeyine etkiyen normal gerilme, ϕ "içsel sürtünme açısı" olarak ifade edilir. Coulomb'dan sonra, özellikle son kırk yılda " c " ve " ϕ " değişkenlerinin yeniden tanımlanması ve ifadenin geliştirilmesine çalışıldı. Her iki değişkenin de malzeme sabitleri olmadıkları, zeminin gerilme tarihçesine ve deney koşullarına bağlı olduğu gösterildi. Bu bakımdan, değişkenleri, Mohr gösteriliminde "kohezyon keseni", ve "kayma mukavemeti açısı" olarak tanımlamak daha doğru olmaktadır.

Mohr (1900) teorisi, malzemenin belli bir kayma yüzeyi boyunca kırılmasını kabul etmektedir. Bir başka deyişle, deney numunesinin gerilme tarihçesi veya deney koşulları dikkate alınmamaktadır. Mohr teorisi toplam gerilmelere veya efektif gerilmelere göre gerilme durumunun gösterilmesinde yararlı olmaktadır.

Kırılma durumunda zeminin gerilme durumunu tanımlamak için önemli araştırmalar yapılmıştır. Rendulic (1937), Henkel (1958, 1959, 1960), asal gerilmeleri dikkate alarak zeminin gerilme durumunu belirlemeye çalışmıştır. Henkel (1959) kırılmanın, maksimum deviatör gerilmeye $(\sigma_1 - \sigma_3)_{maks}$ ulaşıldığı zaman meydana geldiğini kabul etmiştir. Kırılmanın diğer bir tanımı, efektif asal gerilme oranının maksimum değeri olarak tanımlanmaktadır. Drenajlı deneylerde maksimum deviatör gerilme ile maksimum asal gerilme oranı aynı anda meydana gelmektedir. Drenajsız deneylerde ise maksimum deviatör gerilme daha önce meydana gelir.

Aralık 1933 ile Mayıs 1936 tarihleri arasında, M. Juul Hvorslev, Terzaghi'nin Viyana Technische Hochschule'deki laboratuvarında, yağrulmuş, konsolide edilmiş kil numuneleri üzerinde kesme kutusu deneyleri yaptı (Hvorslev, 1937).

Hvorslev hacim değişiminin kayma mukavemetine etkisini göstermek amacıyla deney numunelerini üç farklı şekilde konsolide etti. Deney numuneleri, normal konsolide, aşırı konsolide, tekrarlanan yükler altında aşırı konsolide olarak hazırladı. Numuneler, kesme kutusunda boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde çok yavaş olarak kesildi.

Hvorslev deney sonuçlarının değerlendirirken bir sadeleştirme yaptı ve eşdeğer basıncını, σ_e , tanımladı. Eşdeğer basınç, numunenin kırılma anındaki boşluk oranı e_f ye normal konsolidasyon eğrisinde karşı gelen gerilme olarak tanımlanıyordu.

Hvorslev deneylerinde, Coulomb ifadesine benzer bir ifade elde etti. Bu ifadeye iki önemli kavramı ekledi. (1) Kayma mukavemetinin, zeminin konsolidasyon durumu ne olursa olsun, zeminin kayma kesimindeki boşluk oranına bağlı olduğunu, (2) kohezyon keseninin değerinin boşluk oranı azaldıkça arttığını gösterdi.

Peynircioğlu 1939'da tamamladığı çalışma, yağrulmuş suya doygun killi zeminlerin kayma mukavemeti konusunda Hvorslev'in başlattığı çalışmanın ilk kanıtlanması olmuştur (Peynircioğlu, 1939, 1943). Peynircioğlu, konsolidasyon tarihesinin önemini dikkate alarak deneylerini normal konsolide, aşırı konsolide, konsolide edilip boşaltılıp tekrar sıkıştırılarak elde edilmiş numuneler üstünde yaptı.

Roscoe, Schofield ve Wroth (1958) zeminlerin kayma mukavemetini, deviyör gerilme, q ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$), ortalama efektif asal gerilme, p ($\frac{1}{3} [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]$) ve su muhtevası (w) uzayında tanımladılar. Bu uzayda, *kritik durum eğrisi*'ni tanımladılar. Bu gösterilimde $w = 0$ düzleminde kritik durum eğrisinin izdüşümü:

$$q = M p$$

olarak verilebilir. M katsayısı malzeme sabitidir. $q = 0$ düzleminde eğrinin izdüşümü:

$$w = w_1 - \lambda \ln p,$$

olarak verilebilir. Normal konsolidasyon eğrisinin kritik durum eğrisinin, $q = 0$ düzlemindeki izdüşüm eğrisine paralel olduğu görülmüştür. Normal konsolidasyon eğrisi;

$$w - w_0 = - \lambda \ln (p / p_0)$$

olarak verilebilir (Toğrol, 1965).

Ahmet Hamdi Peynircioğlu ve Türkiye'de Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği

Türkiye'de, Terzaghi'den yıllar sonra, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği*'nin inşaat mühendisliğinin bir dalı olarak yerleşmesi ve gelişmesi Ord.Prof.Dr.-Ing Ahmet Hamdi Peynircioğlu'nun çalışmaları ve uzak görüşlülüğü sayesinde olmuştur (Kumbasar, 1978).

Ahmet Hamdi Peynircioğlu, 1908 yılında doğdu. Kastamonu ve Edirne Liselerinde okudu. İstanbul Teknik Üniversitesi'nden 1931 yılında mezun oldu. Bir süre Bayındırlık Bakanlığı Köprüler Dairesinde çalıştıktan sonra, 1932 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesinde göreve başladı. Berlin Technische Hochschule'de 1938 yılında, Prof.Dr.-Ing A. Hertwig yönetiminde "*Über die Scherfestigkeit Bindiger Bodenarten*" (Kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemeti üzerine) konulu tezi ile Dr.Ing derecesini aldı (Peynircioğlu, 1939, 1943).

İstanbul Teknik Üniversitesi'nde 1943 yılında Zemin Mekaniği ve Temel İnşaatı Profesörü oldu.

1948'de İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü, 1950-1952 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Dekanlığı görevlerinde bulundu.

Öğretim üyesi olarak Profesör Peynircioğlu, derslerinde işlediği konuları, açık bir dille, konuya tamamen hâkim olarak ve dinleyenleri konu hakkında daha derin düşünmeye sevkedecek şekilde anlatırdı. Profesör Peynircioğlu, yalnız Zemin Mekaniği ve Temel İnşaatı bölümünü kurmakla kalmadı, aynı zamanda şimdi kendi adıyla anılan Zemin Mekaniği Laboratuvarını da kurdu. Zemin mekaniğinin gelişmesi için örnek çalışmalar yaptı.

Tecrübeli bir inşaat mühendisi olarak bir çok önemli yapının temelleri ile ilgili sorunların çözülmesine yardımcı oldu. Anıt Kabir temelleri ile ilgilendi. Karayollarının karşılaştığı heyelan problemlerini inceledi ve stabilitenin sağlanması için alınması gereken önlemleri önerdi. Haliç çevresindeki zor zemin koşullarında, yumuşak zeminler üstünde inşa edilecek yapıların temellerini ayrıntılı olarak inceledi. İstanbul Ticaret Sarayı, Hasköy Un Silosu gibi yapıların temel tasarımlarını yaptı. Derin temel kazılarını projelendirdi. Projelerinde ön yüklemeye, kum drenler, yüzen kazıklar, oturmalara karşı dengelenebilen temeller gibi çeşitli teknikleri kullandı. Silahtarğa Santralı, Süleymaniye Camii, Yeni Cami gibi tarihi yapıların stabilitesini ve oturmalarını inceledi.

Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği konularında yurt içindeki araştırmacılar arasında haberleşmenin sağlanması ve uluslararası düzeyde temsili için ilk olarak 1947 yılında İTÜ Zemin Mekaniği Araştırma Kurumu'nu kurdu. 1974'de Üniversiteler Kanunundaki yeniliklerden yararlanarak üniversitelerde veya üniversiteler dışında, zemin mekaniği ve temel mühendisliği konusunda çalışanları kapsayan Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi, onun önderliğinde kuruldu.

Zemin Mekaniği Laboratuvarı

İ.T.Ü. Zemin Mekaniği Laboratuvarı 1938 yılında, 28 m² büyüklüğünde bir odada kuruldu (Peynircioğlu, 1978). 1938-1946 yılları arasında Ankara Rasattepe'de yapılmakta olan Anıt Kabir ve Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Binaları sahalarında geoteknik incelemeler ve bunlarla ilgili deneyler yapıldı.

1946-1952 yılları arasında Laboratuvar Gümüşsuyu Binasında Fizik Laboratuvarı yanındaki 84 m² lik odaya taşındı. Aletlerin bir kısmı, Ankara Sanat Enstitüsünde imal edildi. O tarihte laboratuvarında dörtlü ödometre, İngiltere'den satın alınan serbest basınç aleti, özel cam ve porselen kaplar bulunuyordu. Karl Terzaghi'nin müşaviri olduğu Seyhan ve Sarıyar barajları için tasarladığı filtrasyon aleti imal ettirilip kullanılmaya başlandı.

1952-1953 ders yılında Laboratuvar Taşkılla Binasındaki 580 m² lik hacme taşındı. Aletler çeşitlendirildi, sayıları arttırıldı. Araştırma için ödometreler, kesme deney aletleri, üç eksenli deney aletleri, boşluk suyu ölçme tertibatı, halka kesme aleti, kompaksiyon aletleri, pH-metre, vibrasyonlu yüklemeye aleti, don koşullarında deney yapılması için -15°'ye kadar sıcaklığı düşürülebilen oda, renk ölçme aleti gibi zemin mekaniği laboratuvarlarında kullanılan çok sayıda alet laboratuvara kazandırıldı. Çok sayıda öğrenci laboratuvarından yararlanmaya başladı. 1981-1982 eğitim-öğretim yılında 400 kadar öğrenci, 26 yüksek lisans ve doktora öğrencisinin laboratuvarında çalışma olanağı hazırlanmıştı. 1983'de Taşkılla'daki Laboratuvar, Maçka'daki Laboratuvar ile birleştirilerek Ayazağa Yerleşkesinde İnşaat Fakültesi Laboratuvarlarının bulunduğu binaya taşındı. Zemin Mekaniği Laboratuvarı, bugün toplam 1500 m² genişlikte bir alanda hizmet vermektedir. Laboratuvar başlıca üç bölümden oluşmaktadır: Zemin Dinamiği Laboratuvarı, Araştırma Laboratuvarı, Rutin Deneyler Laboratuvarı.*

(*)Standart zemin mekaniği deney aletlerine ilave olarak aşağıdaki deney aletleri laboratuvarında kullanılmaktadır: dinamik burulmalı üç eksenli kesme deney sistemi, sabit hızlı konsolidasyon deney aleti, halka kesme deney aleti, dinamik basit kesme deney sistemi, tam otomatik üç eksenli basınç deneyi aleti, tam otomatik kesme kutusu, çeşitli elektronik ölçme ve kayıt sistemleri, PS logging sistemi ve benzeri gelişmiş deney düzenekleri. Daha ayrıntılı bilgi için www.ins.itu.edu.tr/geoteknik/lab adresine müracaat edilebilir.

Kaynaklar

Cooling, I.F., (1936). The shearing resistance of soils *Proceedings 1st ICSMFE*, Harvard, 37-41.

- Coulomb, C.A., (1776). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique à l'architecture. Mem.Div.Sav.Academi des Sciences, 7.
- Goodman, R.E., (1998). *The Engineer as Artist – Karl Terzaghi*, ASCE Press, 340.
- Henkel, D.J., (1958) Correlation between deformation, pore-water pressure, and strength characteristics of saturated clays. *Ph.D.Thesis*, Univ. London.
- Henkel, D.J., (1959). The relationship between the strength, pore-water pressure and volume change characteristics of saturated clays. *Géotechnique*, 9, 119-135.
- Henkel, D.J., (1960). Physical components of the shear strength of saturated clays. ASCE Research Conf. Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado.
- Hvorslev, J., (1937). Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. Kobenhavn: Danmarks Naturvidenskabelige Samfund.
- Kumbasar, V., (1978). Professor Hamdi Peynircioğlu, A Half Century in Geotechnics, E.Toğrol (Ed), Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi, 5-9.
- Mohr, O., (1900) Die Elastizitätsgrenze und Bruch eines Materials. *Zeit. Vereins Deutsche Ingenieure*. 44, 1524.
- Özudođru, K., (2000). *Yaşadıkça Öğrenmek – Karl Terzaghi'nin Hayatı*, İnşaat Mühendisler Odası İstanbul Şubesi, 156.
- Peck, R.B., (2000). Last Sixty Years, *Norwegian Geotechnical Institute, Publication*, 207, 36-47.
- Peynircioğlu, A.H., (1939). Über die Scherfestigkeit bindiger Bodenarten. Berlin: Julius Springer, 52.
- Peynircioğlu, A.H., (1943). Kohezyonlu zeminleri kayma mukavemeti, *İstanbul Yüksek Mühendis Okulu Dergisi*, 1, 4-5 197-209, 265-272.
- Peynircioğlu, A.H., (1978). İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği ve Temel İnşaatı Kürsüsü Zemin Mekaniği Laboratuvarı, kuruluş:1938; İTÜ Zemin Mekaniği Araştırma Kurumu'nun tarihçesi, kuruluş : 1947. İTÜ Zemin Mekaniği Araştırma Kurumu, 18.
- Rendulic, L., (1937). Ein Grundgesetz der Tonmechanik u. Sein Experimenteller Beweis. *Der Bauingenieur*, 18, 31-32.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N., Wroth, C.P., (1958) On yielding of soils, *Géotechnique*, 8, 22-53.
- Schofield, A.N., Toğrol, E., (1966). Casagrande's concept of critical density, Hvorslev's equation for shear strength and the Cambridge concept of critical density of soil, *İTÜ Bülteni*, 19, 39-56.
- Terzaghi, K., (1936). The shearing resistance of saturated soils and the angle between planes of shear. *Proceedings 1st.ICSMFE*, Harvard, Cilt.1, 54-56.
- Terzaghi, K., (1995). *Procedes Generaux de Construction 1916-1918*, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi, 188.
- Toğrol, E., (1965) The effect of overconsolidation on the development of pore pressure in saturated clays, *Proceedings 6th Int.Conf Soil Mech. Found.Engrg.* 1, 382-2384.
- Toğrol, E., (1976) *İTÜ İnşaat Fakültesi Cumhuriyetin Ellinci Yılı Kitabı* İTÜ İnşaat Fakültesi, 252.