1 الفصل الأول: الهندسة الجيوتكنيكية

1.1 الهندسة الجيوتكنيكية – مقدمة

لأغراض هندسية، عرفت التربة كحصويات لا اسمنتية من منرالات حبيبية (أجزاء صلبة) ومواد عضوية مع سائل وغاز ضمن الفراغات بين الجزيئات الصلبة. واستخدم الإنسان التربة كمادة بناء في العديد من مشاريع الهندسة المدنية، كما واستخدمها لتكون أساس لمختلف الأنظمة الإنشائية. من هنا، كان من واجبات المهندس المدني دراسة خصائص هذه التربة وهي: المنشأ، التدرج، حجم الحبيبات، إمكانية تصريف المياه، الانضغاطية، مقاومة القص، وقدرة تحمل التربة.

أما مفهوم ميكانيك التربة يتعلق بدراسة الخصائص الفيزيائية للتربة وسلوك كتل التربة المعرضة لحمولات مختلفة. في حين أن **هندسة الترب تعتبر** تطبيق لمبادئ ميكانيك التربة على حالات عملية. وعلم **الهندسة الجيوتكنيكية** يعتبر فرع من فروع الهندسة المدنية والذي يعنى بدراسة مواد طبيعية موجودة قرب سطح الأرض، مع تطبيق مبادئ ميكانيك التربة والصخور وتصميم الأساسات والمنشآت الساندة والمنشآت الترابية.

2.1 الهندسة الجيوتكنيكية قبل القرن الثامن عشر

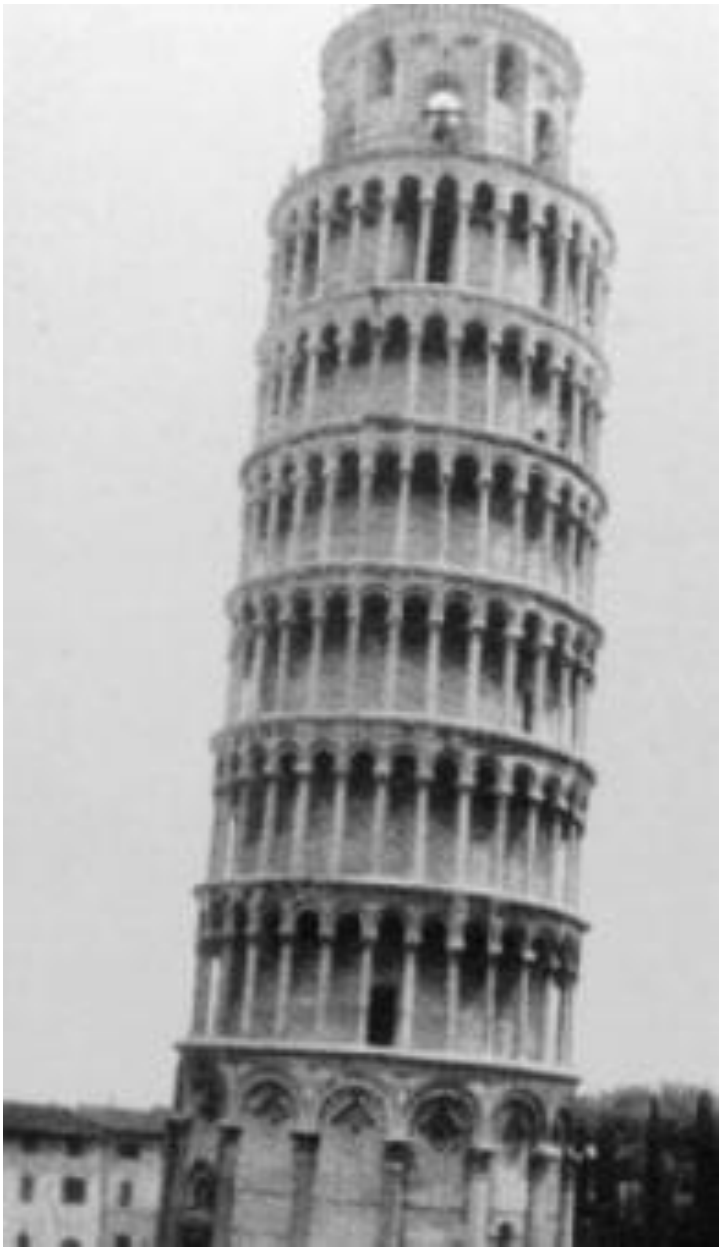
إن تاريخ أول شخص استخدم التربة كمادة بناء تعود لزمن بعيد، وفي الحقيقة وحسب مفاهيم الهندسة فإن فهم الهندسة الجيوتكنيكية كما تعرف الآن بدأ في القرن الثامن عشر (Skempton،1985). ولسنوات عدة، فإن فن الهندسة الجيوتكنيكية كان مبني على الخبرة من خلال العديد من التجارب الناجحة من دون أي صفة علمية حقيقية، وبناء على هذه التجارب، العديد من المنشآت تمَّ بناءها – وهناك الكثير منها تخرب بينما بقي بعضها الآخر كما هو حتى زمننا الحاضر.

السجلات التاريخية تخبرنا أن الحضارات القديمة ازدهرت على طول ضفاف الأنهار. وتم بناء الكثير من المنشآت الترابية لحماية القرى والمدن من جهة ومن جهة ثانية تم بناءها لأغراض زراعية. وليس هناك دليل أنه تم أخذ قياسات من أجل حساب استقرار الأساسات أو التأكد من التآكل الذي تسببه

الفياضانات (Kerisel،1985). إن حضارة اليونانيين القدماء استخدمت الأساسات المنفردة والشريطية والحصائر من أجل بناء المنشآت. هذا الأمر طرح عدة تحديات مرعبة من أجل بناء الأساسات التي تحقق الاستقرار للمنحدرات وللمعابد الكبيرة. إن العديد من هذه المنشآت تم بناءها على طبقات السلت والغضار الطري. وفي بعض الحالات تخطى الضغط المنقول من الأساسات للتربة قدرة تحملها ولذلك وجدنا أضرار كبير لحقت بهذه المنشآت.

واحدة من أشهر الأمثلة بما يتعلق بقدرة تحمل التربة ظهرت في القرن قبل الثامن عشر ألا وهو برج بيزا المائل في إيطاليا. (أنظر الشكل 1.1). بناء البرج بدأ في العام 1173 بعد الميلاد ووصلت قيمة الإجهادات النقولة من البرج إلى التربة حوالي 15.00 طن/م^2 . البرج يستند على أساس دائري بقطر 20 متر. في البداية مال البرج للشرق ثم للشمال ثم للغرب وأخيراً للجنوب. وآخر التحريات أظهرت أن طبقة غضار ضعيفة موجودة على عمق حوالي 11 متر أسفل سطح الأرض المضغوط، وهذا ما سبب بميلان البرج. بلغ ميلان البرج حوالي 5 متر لارتفاع 54 متر. لذلك تمّ إغلاق البرج عام 1990 خوفاً من إنهياره. مؤخراً تم تدعيمه عن طريق حفر التربة أسفل الجهة الشمالية من البرج. حالياً يميل البرج حوالي 5 درجات مما جعل البرج مستقر بشكل أكبر.

الشكل 2.1 يوضح برجين تمّ بنائهما في بولونيا في القرن الثاني عشر. البرج اليساري يعرف باسم برج Garisenda، ارتفاعه حوالي 48 متر ووزنه حوالي 4210 طن. هذا البرج مال بمقدار 4 درجات. أما البرج اليميني يعرف باسم برج Asinelli، ارتفاعه حوالي 97 متر ووزنه 7300 طن.



الشكل (1.1): برج بيزا المائل في إيطاليا

الشكل (1.2): أبراج توجد في بولونيا

ولكن وبعد مواجهة العديد من المشاكل المتعلقة بالأساسات خلال البناء على مر السنوات السابقة، بدأ المهندسون والعلماء في أوائل القرن الثامن عشر بدراسة معمقة للهندسة الجيوتكنيكية للفترة الممتدة من عام 1700 حتى عام 1927. ويمكن تقسيم مراحل نشأة الهندسة الجيوتكنيكية حسب الفترات إلى أربع مراحل رئيسية (Skempton،1985):

1. مرحلة ما قبل الكلاسيكية (1700 حتى 1776 بعد الميلاد).
2. مرحلة ميكانيك التربة الكلاسيكية – الفترة الأولى (1856 وحتى 1910 بعد الميلاد).
3. مرحلة ميكانيك التربة الكلاسيكية – الفترة الثانية (1856 وحتى 1910 بعد الميلاد).
4. مرحلة ميكانيك التربة الحديثة (1910 وحتى 1927 بعد الميلاد).

شرح ملخص لبعض التطورات المحلوظة خلال كل مرحلة من هذا المراحل الأربع سوف تتم مناقشته تباعاً.

1.2.1 مرحلة ما قبل الكلاسيكية لميكانيك التربة (1700–1776)

في هذه المرحلة تمّ التركيز على دراسات تتعلق زاوية الميل الطبيعية والوزن الحجمي للعديد من الترب، وأيضاً نظريات ضغط التربة شبه التجريبية. ففي عام 1717 قام مهندس فرنسي ملكي، Henri Gautier (1660–1737)، بدراسة الميول الطبيعية للترب من أجل تشكيل العمليات التصميمية للجدران الاستنادية وحدد متغير مهم هو زاوية الميل الطبيعي والتي عرفت بزاوية التوضع. ووفقاً لهذه الدراسة فإن الميل الطبيعي لتربة مكونة من رمل جاف وأرض طبيعية هو ما بين 31° و 45°، أما قيم الوزن الحجمي للرمل الجاف وأرض طبيعية ينصح من أجل تأمين الاستقرار بأن تكون ما بين $18.1 kN/m^3$ و $13.4 kN/m^3$.

وفي العام 1729 نشر الباحث Bernard Forest de Belidor (1671–1761) كتاب في الهندسة المدنية في فرنسا، هذا الكتاب قدم لنا نظرية لضغط التربة الجانبي على الجدران الاستنادية والتي كانت تتمة للدراسة الأصلية التي قام بها الباحث (Gautier,1717)، الذي عرف نظام لتصنيف التربة وأعطى قيم للوزن الحجمي وفقاً لتصنيفه كما هو موضح بالجدول التالي:

تصنيف التربة	الوزن الحجمي kN/m^3
الصخور	–
الرمل القاسي	16.7
الرمل المرصوص	18.4
تربة طبيعية بحالة جافة	13.4
تربة قاسية (سلتية)	16.0
الغضار	18.9

وفي العام (1746) قام المهندس الفرنسي Francois Gadroy (1705–1759) ببناء نموذج مصغر لجدار استنادي بارتفاع 76 مم في المخبر ووضع خلفه تربة رملية، خلال التجربة تبين له

وجود سطوح انزلاق في التربة عند الانهيار، وقام المهندس (J. J. Mayniel in 1808) بمتابعة هذه الدراسة ولنفس النموذج وقدم ملخص عنها.

2.2.1 مرحلة الكلاسيكية لميكانيك التربة – الفترة الأولى (1776–1856)

خلال هذه المرحلة، معظم التطورات التي حصلت في مجال الهندسة الجيوتكنيكية جاء من علماء ومهندسين في الجمهورية الفرنسية. في مرحلة ما قبل الكلاسيكية، كانت الافتراضات النظرية المستخدمة في حساب ضغط التربة الجانبي على الجدران الاستنادية مبنية على سطوح انهيار افتراضية في التربة. وفي ورقة البحث المشهورة التي قدمها المهندس شارل كولومب فيما يتعلق بسطوح الانزلاق (Charles Augustin Coulomb ,1736–1806) استخدم مبادئ الحساب الأعظمية والأصغرية لتحديد مواقعها خلف الجدار الاستنادي كما أنه استخدم قوانين الاحتكاك والتماسك للأجسام الصلبة.

في عام 1820 درس المهندس الفرنسي (Jacques Frederic Francais,(1775–1833 وأستاذ الميكانيك التطبيقي الفرنسي (Claude Louis Marie Henri Navier,1785–1836) حالات خاصة لأعمال الباحث كولومب والمتعلقة بميل الردم والحمولات المطبقة خلف الجدار الاستنادي.

أما في العام 1840 وسع المهندس الفرنسي وأستاذ المكيانيك (Jean Victor Poncelet ,1788– 1867)، نظرية كولومب لتشمل الجدران الاستنادية المائلة والشاقولية مع وضع فرضية أن السطوح عبارة عن مضلع مكسر. ويجب أن نذكر أن الباحث Poncelete هو أول من استخدم رمز ϕ من أجل زواية احتكاك التربة، وهو من قدم أول نظرية لحساب قدرة تحمل التربة الحدية من أجل الأساسات السطحية. في عام 1846 قدم المهندس (Alexandre Collin ,1808–1890) تفاصيل سطوح الانزلاق في المنحدرات الغضارية والسدود والحفريات. الباحث Collin برهن أنه في جميع حالات التحميل، تبدأ سطوح الانزلاق بالظهور عندما تتخطى قيمة التماسك المنقول من الجدار إلى التربة قيمة التماسك الموجود في التربة. واستنتج أيضاً أن سطح الانزلاق الفعلي يمكن تقريبه لقوس من دائرة . نهاية المرحلة الأولى لميكانيك التربة الكلاسيكية كانت عام 1857 عند أول بحث نشر من قبل (William John Macquorn Rankine,1820–1872)، وهو أستاذ في الهندسة المدنية في جامعة غلاسغو، هذا البحث أظهر نظرية مهمة للضغط الجاني وتوازن الكتل الترابية وتسمى حالياً بنظرية رانكين هي تبسيط لنظرية كولومب.

3.2.1 مرحلة الكلاسيكية لميكانيك التربة – الفترة الثانية (1856–1910)

في هذه المرحلة تمّ تنفيذ العديد من التجارب على الترب الرملية وتمّ تدوين الكثير من النتائج. وأهم هذه الدراسات هي التي قدمها المهندس الفرنسي (Philibert Gaspard Darcy ,1803–1858 Henri). ففي العام 1856 نشر هذا الباحث دراسة عن مفهوم نفاذية فلاتر الرمل وبناءً على هذه التجارب، قام دارسي بتعريف مفهوم الناقلية الهيدروليكية (معامل النفاذية) للتربة، وهو من أهم خواص التربة حتى يومنا هذا.

الأستاذ في علم الفلك (Sir George Howard Darwin ,1845–1912)، قام بالعديد من التجارب لتحديد عزم القلب لجدار استنادي مفصلي ضمن تربة رملية مخلخلة وكذلك ضمن تربة رملية متراصة (كثيف). وهناك مساهمة قيمة أخرى تم نشرها عام 1885 من قبل (Joseph Valentin Boussinesq 1842–1929)، والتي تتعلق بنظرية توزع الإجهادات ضمن الأوساط المتجانسة والمرنة المنتهية والمتماثلة نتيجة الحمولات المطبقة. ويجب أن نتذكر أنه في العام 1887 شرح Reynolds،(Osborne 1842–1912) ظاهرة التوسع في الرمل.

4.2.1 مرحلة ميكانيك التربة الحديثة – (1910–1927)

في هذه المرحلة، أجريت أبحاث عديدة على الترب الغضارية وتم نشر نتائجها، وبناءاً على هذه الأبحاث وضعت الخصائص الأساسية ومتغيرات الترب الغضارية. وأهم هذه المنشورات:

- في العام 1908 قام الكيمائي وعالم التربة السويدي (Alebrt Mauritz Atterberg 1846–1916)، بتعريف حجم حبيبات الغضار التي هي أصغر من 2 ميكرون. حيث أدرك أهمية حجم أجزاء الغضار في التربة وخاصية اللدونة. لذلك وفي العام 1911، شرح قوام الترب المتماسكة عن طريق تعريف حد السيولة وحد اللدونة وحد الانكماش (انظر Atterberg,1911).
- في أكتوبر عام 1909 انهار السد الترابي Charmes في فرنسا ذو الارتفاع 17 م والذي تم بناءه بين العامين 1902 و1906. ولمعرفة أسباب الانهيار، قام المهندس الفرنسي Jean Frontrard في الفترة (1884–1962) بمجموعة من التحريات المخبرية ومنها تجارب القص غير المصرف على عينات غضارية (مساحتها 0.77 م^2 وسماكتها 200 مم) وتحت

تأثير إجهاد شاقولي ثابت من أجل تحديد متغيرات مقاومة القص (انظر Frontard, 1914) وكان الزمن اللازم لانهيار هذه العينات هو بين 10 إلى 20 دقيقة.

- في هذه المرحلة، قام أيضاً المهندس الإنكليزي Arthur Langley Bell (1874–1956)، بتصميم وبناء الجدار البحري الخارجي في Rosyth Dockyard. وبناء على عمله، طور علاقات الضغط الجانبي ومقاومة الترب الغضارية وقدرة تحمل التربة للأساسات السطحية المستندة على الترب الغضارية (انظر Bell ,1915) . كما استخدم أيضاً تجارب علبة القص (Shear Box tests) لقياس مقاومة القص غير المصرفة لعينات غضارية غير مضطربة.
- قام المهندس السويدي Wolmar Fellenius (1876–1957)، بتطور طريقة تحليل الاستقرار لمنحدرات من الترب الغضارية المشبعة (بشرط $\phi=0$) مع افتراض أن سطح الانزلاق هو جزء قطع من دائرة (analysis Stability). وهذا ما شرحه بإسهاب في بحثه المنشوره عام 1918 و1926. أما بحثه المنشور في العام 1926 أعطى حلول عددية صحيحة لاستقرار عدد من سطوح الانزلاق المارة من أسفل المنحدر.
- قام المهندس Karl Terxaghi (1883–1963) من استراليا (انظر الشكل 1.3) بتطوير نظرية الانضغاطية للغضار والتي أصبحت كما نعرفها اليوم. استمرت دراسته لهذا الغرض حوالي 5 سنوات من 1919 وحتى 1924 وذلك على خمس أنواع من ترب غضارية. وتراوح حد السيولة لهذه الترب من 36 وحتى 67، وقرينة اللدونة بين 18 و38. نظرية الانضغاطية تم نشرها ضمن كتاب ترزاكي Edbaumechanik في عام 1925.

3.1 الهندسة الجيوتكنيكية بعد عام 1927

إن البحث الذي نشره Karl Terzaghi في عام 1925 شكل مرحلة جديدة في تطور ميكانيك التربة. إن ترزاكي يعرف بأنه أب ميكانيك الهندسة الحديثة. ولد ترزاكي في 2 اكتوبر عام 1883 ودرس الهندسة الميكانيكية وتخرج من جامعة Technische Hochschule in Graz، بعد التخرج عمل لمدة سنة واحدة في الجيش الاسترالي. وبعد الخدمة العسكرية، درس ترزاكي ولمدة عام علوم الهندسة الجيولوجية. في كانون الثاني 1912، نال درجة الدكتوراه في العلوم التقنية من alma mater in Graz. وفي عام 1916 بدأ بالتدريس في Imperial School of Engineering in istanbul

(1925 – 1918) وهناك درس سلوك الترب والهبوط في الترب الغضارية وانهيارها نتيجة التمديد في الرمل تحت السدود.

في عام 1925 ، قام ترزاكي بالتدريس في معهد Massachusetts Institute of Technolog. حيث عمل حتى عام 1929. وخلال هذه الفترة أصبح معروفا كرئيس لفرع جديد في الهندسة المدنية عرف باسم ميكانيك التربة. في اكتوبر عام 1929، عاد إلى أوروبا. وفي عام 1939، استقر في الولايات المتحدة ليصبح أستاذ في جامعة هارفارد.

ترأس ترزاكي المؤتمر الأول للجمعية العالمية لميكانيك التربة وهندسة الاساسات (ISSMEFE) الذي عقد في جامعة هارفارد في عام 1936، حيث بلغ عدد الحضور في هذا المؤتمر 200 شخص ممثلين 21 دولة، وفي هذا المؤتمر نشر ترزاكي بحثاً يعتبر أساساً ومرشداً للأبحاث في مستقبل ميكانيك التربة. أما المواضيع التي طرحها المؤتمر هي:

- الإجهادات الفعالة.
- مقاومة القص.
- التجارب باستخدام Dutch cone penetronmeter.
- الانضغاطية.
- تجارب الطرد المركزي.
- نظرية المرونة وتوزع الإجهادات.
- التحميل المسبق للتحكم بالهبوط.
- الغضار الانتفاخي.
- تأثير التجميد.
- الزلازل وتمييع الترب.
- الآلات الرجاجة.
- النظرية القوسية في ضغط التربة.

في عام 1939، قدم ترزاكي مجموعة من المحاضرات ضمن جامعة Institution of Civil Engineers, London ومنها محاضرة بعنوان "ميكانيك التربة – فصل جديد في علم الهندسة". وفيها أوضح أن معظم انهيارات الأساسات التي تظهر ليست "أفعال من الله".

أيضاً حدثان هامان حدثا بين 1948 و1960 هما:

(1) بحث علمي للمهندس A.W.Skempton درس من خلاله متغيرات ضغط الماء المسامي B،A والتي جعلت حسابات الإجهادات الفعالة أكثر عملية للعديد من الأعمال الهندسية.

(2) تمّ نشر كتاب حول قياس خواص التربة من خلال تجارب القص ثلاثي المحاور وهذا الكتاب بعنوان:

The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Text by A. W. Bishop and B. J. Henkel (Arnold، London) in 1957

في أوائل 1950، ومع تطور صناعة الحواسيب، تمّ استخدام طرق عددية وهي طريقة العناصر أو الفروق المحدودة لتطبيقها على العديد من مشاكل الهندسية الجيوتكنيكية.

منذ الأيام الأولى، قطع مهندسين وعلماء الهندسة الجيوتكنيكة شوطاً طويلاً لإدراك وفهم هذا المجال حتى أصبح الآن فرع من فروع الهندسة المدنية، والآلاف من المهندسين اختاروا الهندسة الجيوتكنيكية لتكون مجال اختصاصهم.

وأصبحت المؤتمرات أداة من أجل تبادل المعلومات والتطورات والنشاطات العلمية في الهندسة الجيوتكنيكية.

4.1 المراجع

1. ATTERBERG، A. M. (1911). "-ber die physikalische Bodenuntersuchung، und über die Plastizitet de Tone," International Mitteilungen für Bodenkunde, Verlag für Fachliteratur. G.m.b.H. Berlin, Vol. 1, 10–43.
2. BELIDOR, B. F. (1729). La Science des Ingenieurs dans la Conduite des Travaux de Fortification et D'Architecture Civil, Jombert, Paris.
3. BELL, A. L. (1915). "The Lateral Pressure and Resistance of Clay, and Supporting Power of Clay Foundations," Min. Proceeding of Institute of Civil Engineers, Vol. 199, 233–272.
4. BISHOP, A. W. and HENKEL, B. J. (1957). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Arnold, London.
5. BOUSSINESQ, J. V. (1885). Application des Potentiels â L'Etude de L'equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
6. COLLIN, A. (1846). Recherches Expérimentales sur les Glissements Spontanés des Terrains Argileux Accompagnées de Considérations sur Quelques Principes de la Mécanique Terrestre, Carilian-Goeury, Paris.
7. COULOMB, C. A. (1776). "Essai sur une Application des Règles de Maximis et Minimis à Quelques Problèmes de Statique Relatifs à L'Architecture," Mèmoires de la Mathèmatique et de Phisique, présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savans, et lûs dans sés Assemblées, De L'Imprimerie Royale, Paris, Vol. 7, Annee 1793, 343–382.
8. DARCY, H. P. G. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
9. DARWIN, G. H. (1883). "On the Horizontal Thrust of a Mass of Sand," Proceedings, Institute of Civil Engineers, London, Vol. 71, 350–378.
10. FELLENIUS, W. (1918). "Kaj-och Jordrasen I Goteborg," Teknisk Tidskrift. Vol. 48, 17–19.
11. FRANCAIS, J. F. (1820). "Recherches sur la Poussée de Terres sur la Forme et Dimensions des Revêtments et sur la Talus D'Excavation," Mémorial de L'Officier du Génie, Paris, Vol. IV, 157–206.
12. FRONTARD, J. (1914). "Notice sur L'Accident de la Digue de Charmes," Anns. Ponts et Chaussées 9th Ser., Vol. 23, 173–292.

13. GADROY, F. (1746). Mémoire sur la Poussée des Terres, summarized by Mayniel, 1808.
14. GAUTIER, H. (1717). Dissertation sur L'Epaisseur des Culées des Ponts sur L'Effort et al Pesanteur des Arches et sur les Profiles de Maconnerie qui Doivent Supporter des Chaussées, des Terrasses, et des Remparts. Cailleau, Paris.
15. ISHIHARA, K. (1999). Personal communication.
16. KERISEL, J. (1985). "The History of Geotechnical Engineering up until 1700," Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 3–93.
17. MAYNIEL, J. J. (1808). Traité Experimentale, Analytique et Pratique de la Poussé des Terres. Colas, Paris.
18. NAVIER, C. L. M. (1839). Leçons sur L'Application de la Mécanique à L'Establissement des Constructions et des Machines, 2nd ed., Paris.
19. PECK, R. B. (1985). "The Last Sixty Years," Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 123–133.
20. PONCELET, J. V. (1840). Mémoire sur la Stabilité des Revêtments et de seurs Fondations, Bachelier, Paris.
21. RANKINE, W. J. M. (1857). "On the Stability of Loose Earth," Philosophical Transactions, Royal Society, Vol. 147, London.
22. REYNOLDS, O. (1887). "Experiments Showing Dilatency, a Property of Granular Material Possibly Connected to Gravitation," Proceedings, Royal Society, London, Vol. 11, 354–363.
23. SKEMPTON, A. W. (1948). "The f _ 0 Analysis of Stability and Its Theoretical Basis," Proceedings, II International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 1, 72–78.
24. SKEMPTON, A. W. (1954). "The Pore Pressure Coefficients A and B," Geotechnique, Vol. 4, 143–147.
25. SKEMPTON, A. W. (1985). "A History of Soil Properties, 1717–1927," Proceedings, XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Golden Jubilee Volume, A. A. Balkema, 95–121.
26. TAYLOR, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley, New York.

27. TERZAGHI, K. (1925). Erdbaumechanik auf Bodenphysikalisher Grundlage, Deuticke,Vienna.
28. TERZAGHI, K. (1939). "Soil Mechanics—A New Chapter in Engineering Science," Institute of Civil Engineers Journal, London, Vol. 12, No. 7, 106–142.
29. TERZAGHI, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley, New York.
30. TERZAGHI, K., and PECK, R. B. (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, New York.