



1. YÜKSEK YAPILAR SEMPOZYUMU
04 – 05 MAYIS 2023 İSTANBUL

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI



YÜKSEK BİNA TEMELLERİ VE DEPREMDE YAPI-KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Prof. Dr. KUTAY ÖZAYDIN

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Geoteknik Anabilim Dalı Emekli Öğretim Üyesi



DEPREME DAYANIKLI BİNA TASARIMI VE TEMEL SİSTEMLERİ

- Bina temellerinin tasarımında ana amaçlar **güvenli taşıma gücünün** sağlanması ve **oturmaların izin verilebilir sınırlar altında kalması** olarak özetlenebilir. Statik yükler altında olduğu gibi deprem yüklemeleri altında da bu amaçlara ulaşabilmenin ilk koşulu doğru geoteknik tasarım parametrelerinin seçilmesi olmaktadır.
- Temel sistemi seçiminde, binadan zemine aktarılacak gerilmelerin güvenle taşınabilmesi doğrultusunda farklı temel sistemleri tasarlanabilmektedir. Yüzeye yakın zemin tabakalarına oturacak temel sistemlerinin yeterli olmaması durumunda **derin temeller** kullanılması veya **zemin iyileştirmesi** uygulanması söz konusu olabilmektedir.
- Yüzeysel temellerin tasarımında, yüzeye yakın zemin tabakalarının genel olarak daha zayıf özelliklere sahip olduğu ve deprem yükleri altında olumsuz davranış göstermesi olasılığının daha yüksek olduğu göz önüne alınmalıdır. Ayrıca özellikle kumlu zeminlerde **temel taşıma gücünün derinlikle arttığı** bilinmektedir.



1. YÜKSEK YAPILAR SEMPOZYUMU 04 – 05 MAYIS 2023 İSTANBUL

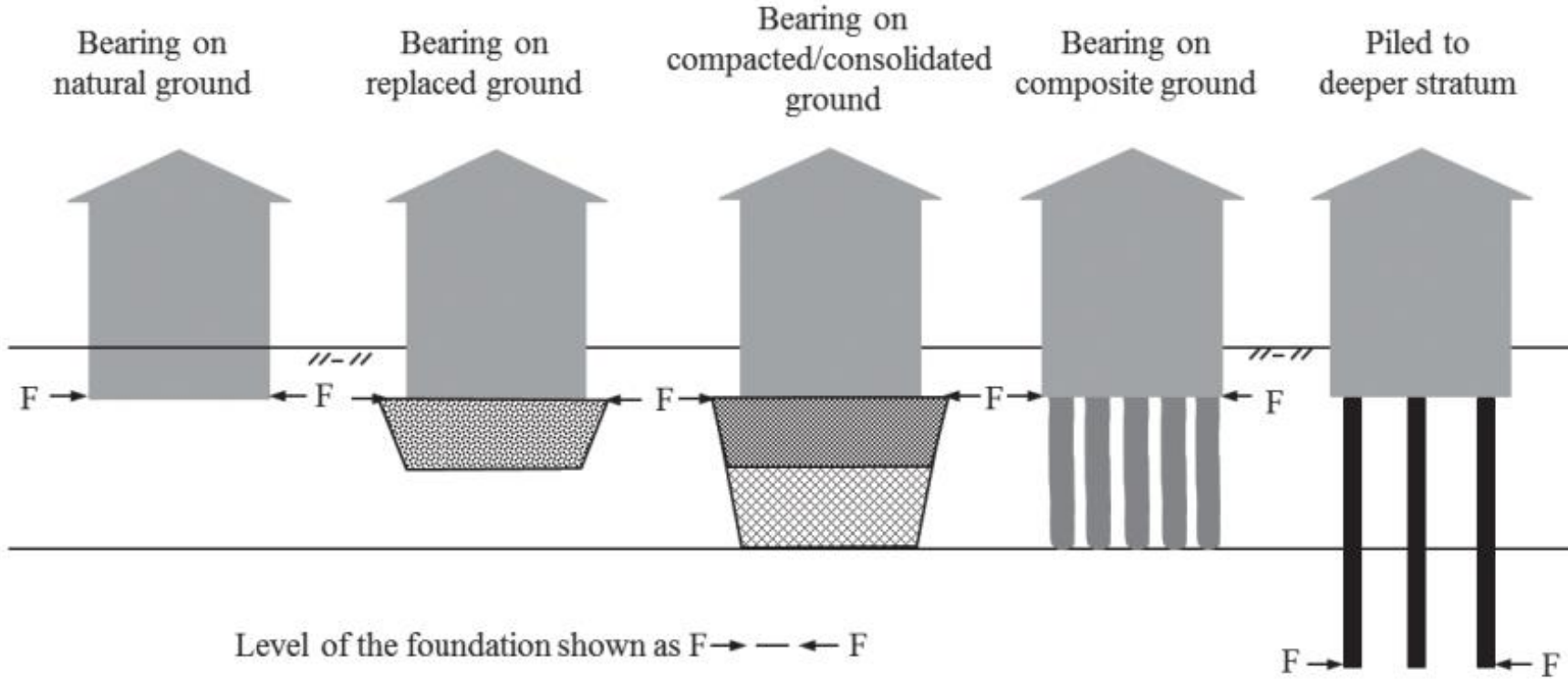
TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI



- Binalarda yerel zemin koşullarından kaynaklanan deprem hasarlarının çok önemli bir kısmının deprem yükleri etkisinde temel zemininde meydana gelen taşıma gücü kaybı ve/veya aşırı yer değiştirmelerden kaynaklandığı gözlenmektedir.
- Kumlu zeminlerde sıvılaşma, killi zeminlerde drenajsız kayma dayanımı ve rijitlik azalması, temel taşıma gücü kaybı ve/veya ani düşey-yatay yer değiştirmelere yol açabilmekte, sarsıntı geçtikten sonra da oturmalar ve yanal yer değiştirmeler devam edebilmektedir.
- Taşıma gücü kaybı ve zemin yer değiştirmeleri çok katlı yapıları daha çok etkilemektedir. Zemin büyütmesinin de daha yüksek periyotlarda daha belirgin olması ile birlikte, aynı yumuşak/zayıf zemin koşullarına sahip bir bölgede az katlı yapılar hasar görmediği halde çok katlı yapılarda ağır hasarlar meydana gelebilmektedir.
- Yüzeye yakın zeminlerin daha zayıf olması yanında, temel taşıma gücünün de derinlikle artması dikkate alındığında, bodrum kata sahip olmayan binalarda daha ağır hasarlar meydana gelmesi beklenilebilir.

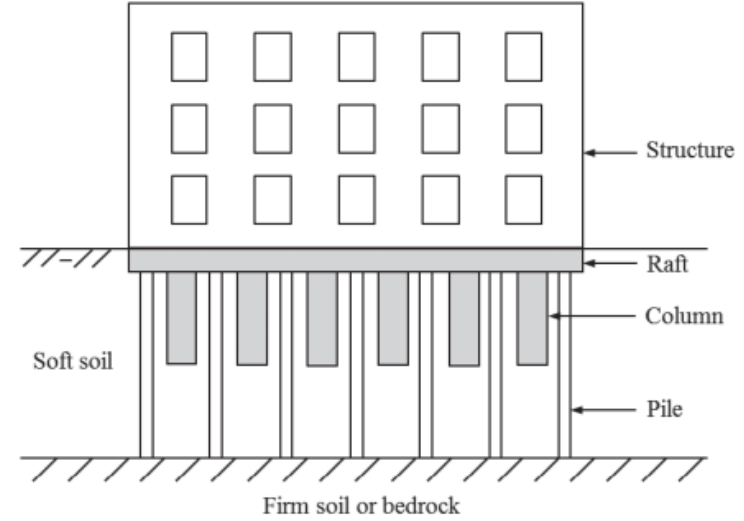
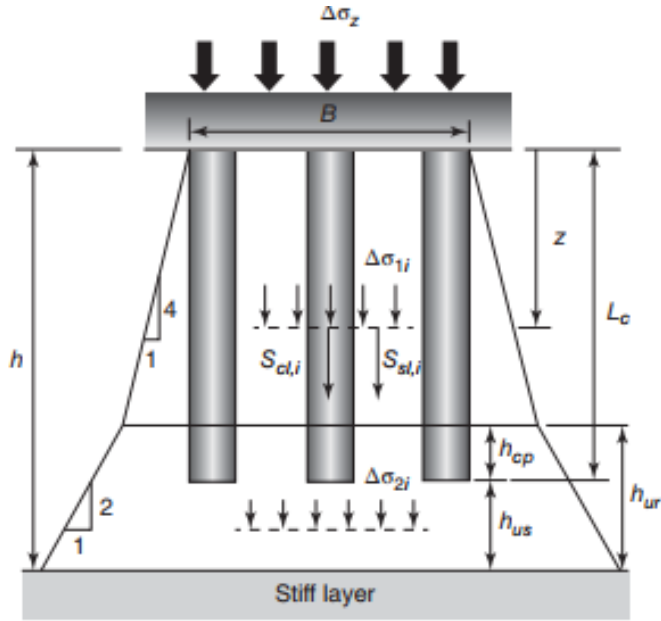


TEMEL SİSTEMİ SEÇENEKLERİ





ZEMİN İYİLEŞTİRME KOLONLARI





ZEMİNLERDE GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞI VE KAYMA MUKAVEMETİ

- Uygulanan yükler zemin içinde kayma gerilmelerinde ve normal gerilmelerde artışlara yol açmaktadır. Zemin kütlesinde meydana gelen normal gerilme artışları **hacimsel şekil değiştirmelere** (boşluk hacminin azalması-sıkışma) kayma gerilmesi artışları ise **kayma şekil değiştirmelerine** yol açmakta, her ikisi de non lineer davranış göstermektedir.
- Zeminde hacimsel ve kayma şekil değiştirmeleri meydana gelmesi zemin içindeki suyun dışarı çıkabilmesi ile ilişkili olup, drenaj koşulları zemin davranışını önemli ölçüde etkilemekte (**drenajsız ve drenajlı yüklenme koşulları**) bu bağlamda zeminin su geçirgenliği ve yüklenme hızının birlikte göz önüne alınması gerekmektedir.
- Zeminlerde göçme, olası bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu ortaya çıkmakta, **zeminin kayma mukavemeti** göçmeye meydan vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan Mohr-Coulomb hipotezine göre kayma mukavemeti iki parametre (c ve ϕ) ile tanımlanmakta, bu parametrelerin değerleri sadece zemin cinsine ve sıklık derecesine değil, yüklenme ve drenaj koşullarına da bağlı olarak geniş bir aralık içinde değişmektedir.

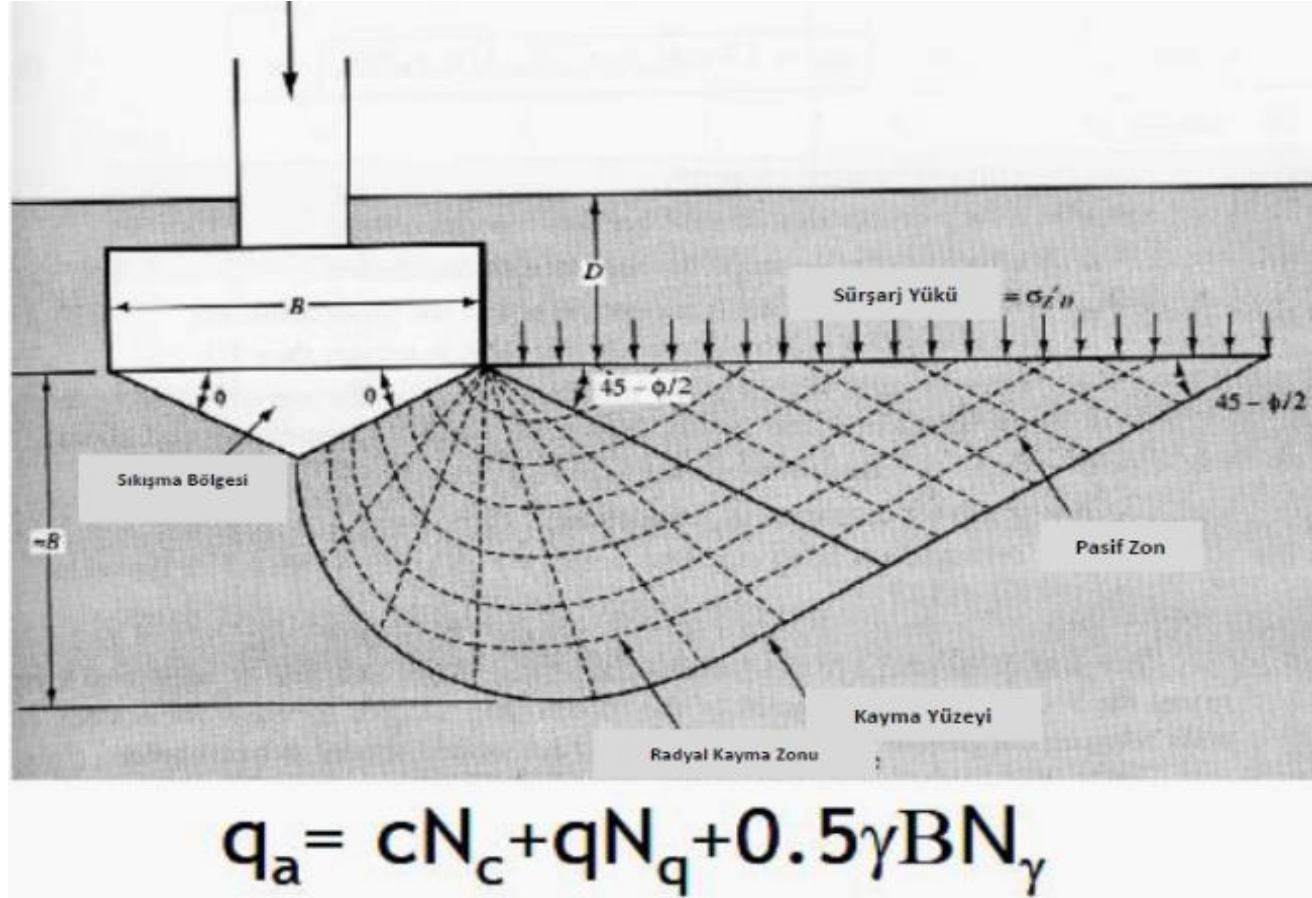


TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ VE OTURMALAR

- **Temellerin taşıma gücü**, temel boyutları, biçimi, derinliği ve kayma mukavemeti parametreleri bağlı olarak hesaplanmakta, dolayısıyla yüklenme hızı ve drenaj durumuna göre taşıma gücünde de büyük değişimler meydana gelebilmektedir.
- Statik yüklenme koşullarında killi zeminlere oturan temellerin taşıma gücü hesabında drenajsız koşulların, kumlu zeminlere oturan temeller için ise drenajlı koşulların geçerli olacağı kabul edilmektedir. Depremler sırasında kumlu zeminlerde de drenajsız koşullar geçerli olmaktadır.
- Temellerden zemine aktarılan gerilmeler, **zemin sıkışabilirliğine** ve zemininde derinlik boyunca meydana getirdiği düşey **gerilme artışlarına** bağlı olarak **oturmalar** yol açmaktadır. Gerilme artışları, yerinde(in-situ) jeolojik gerilmelere ve zeminin geçmişte maruz kaldığı maksimum gerilmelere(ön yüklenme basıncı) oranına bağlı olarak zeminin sıkışmasına yol açmakta, etki bölgesi içindeki tabakaların toplam sıkışması temellerin oturmasına neden olmaktadır.
- Oturmalar zamana bağlı olarak gelişmekte, **oturma hızı** zemin tabakasının kalınlığı ve geçirgenliği ile ilişkili olup, kalın killi zemin tabakalarına sahip arazilerde yıllarca sürebilmektedir.



YÜZEYSEL TEMELLERİN TAŞIMA GÜCÜ

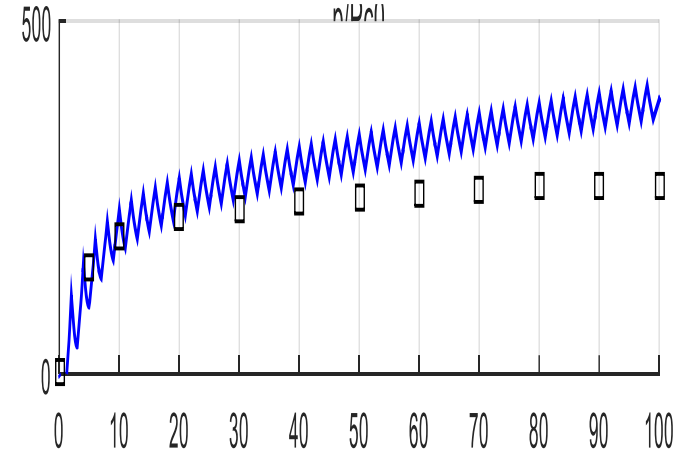
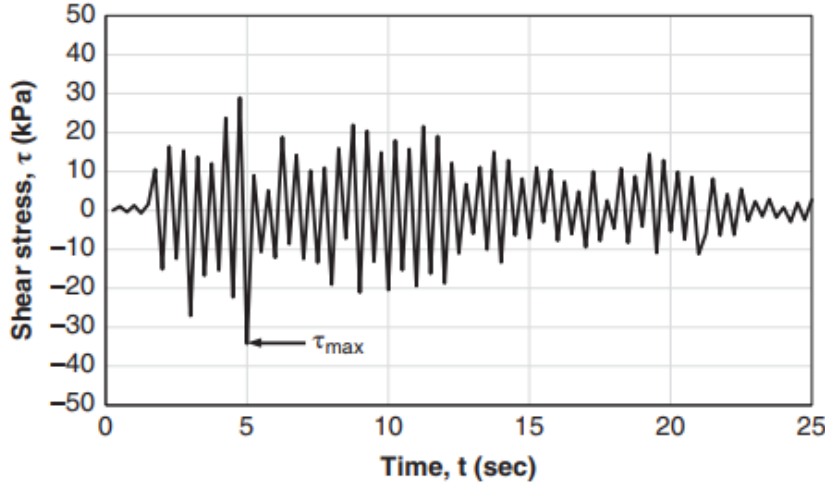




Deprem Yükleri Etkisinde Zemin Davranışı

Depremler sırasında zemin tabakaları tekrarlı ve yön değiştirmeli kayma gerilmelerinin etkisinde kalmaktadır. Ayrıca bu yüklemeler çok hızlı gerçekleştiği için drenajsız koşullar geçerlidir.

Titreşimli yükler etkisinde gevşek kum çökellerinde sıkışma eğilimi ortaya çıkar, boşlukların su ile dolu olması durumunda, boşluk suyu basıncında birikimli artışlar meydana gelir. Sarsıntı sona erdikten sonra boşluk suyu drene olmaya başlar, kumlu zeminlerde sıkışma ve killi zeminlerde konsolidasyon oturmaları meydana gelir.





B.A. YAPILARININ DEPREM PERFORMANSINDA ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

- Temellerin deformasyonu ve yer değiştirmesi, yapının deprem performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir.
- Doğrusal olmayan yapısal analiz tekniklerinde, yapı elemanlarının nonlineer yük-deplasman bağıntıları ile modellenmesi durumunda, yapı temellerinin etkilerinin de benzer şekilde dikkate alınması gerekir.
- Temel elemanlarının davranış parametreleri yapısal ve geoteknik elemanlarının özelliklerine bağlıdır.
- Geoteknik elemanlar için yük-deplasman ilişkilerinde zeminlerin non lineer mukavemet ve rijitlik özelliklerini dikkate almak gerekir, bu bağlamda bazı belirsizlikler ve yaklaşık değerlerin kullanılması söz konusu olabilir.

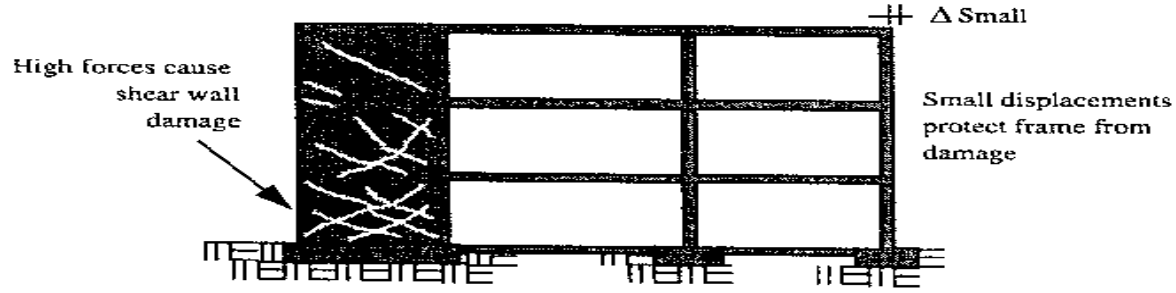


TEMEL DAVRANIŞININ ETKİSİ

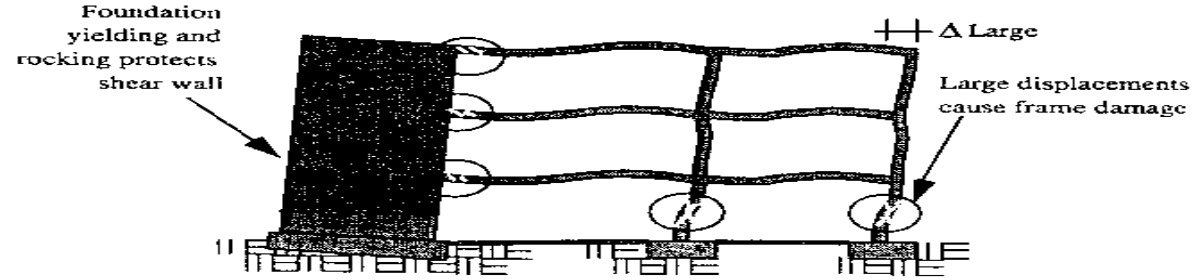
- **Yumuşak/zayıf zeminlerde aşırı yer değiştirmeler** ortaya çıkabilir, ancak sert zeminlere sahip sahalarda temel etkilerinin hiçbir zaman problem olmayacağı sonucu çıkarılmamalıdır, örneğin yüksek rijit yatay yük elemanları altında temelin bir ucunun yukarı kalkması ve sallanması (rocking etkisi) söz konusu olabilir.
- **Taşıdıkları sabit ve hareketli yük toplamı nihai taşıma gücüne yakın** temellerin, deprem yükleri etkisinde yapısal davranışı daha çok etkilemesi beklenilebilir. Mevcut yüklerin taşıma gücü kapasitesine yakın olması durumunda büyük sismik kuvvetler temelde önemli kalıcı deplasmanlara yol açabilir.
- **Temeller arasında toplam yük/ taşıma gücü oranı** arasında önemli farklılıklar olması durumunda, elastik ötesi bölgede yüklerin önemli ölçüde yeniden dağılımı söz konusu olabilir. Aşırı yüklenmiş bir temelin diğerlerinden önce akmaya ulaşması durumunda, yüklerin yeniden dağılımı sonucu yapıda burulma etkileri ortaya çıkabilir.



B.A. YAPILARDA ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ



Rijit / Kuvvetli Temel



Esnek/ Zayıf Temel

Rijit/kuvvetli her zaman daha elverişli olmayabilir
Esnek/Zayıf kabulü her zaman güvenli yönde olmayabilir



1. YÜKSEK YAPILAR SEMPOZYUMU 04 – 05 MAYIS 2023 İSTANBUL

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI



- Deprem yükleri etkisinde temeller altında aşırı gerilme ve yer değiştirmeler oluşmaması önemlidir. Deprem sırasında etkiyen tekrarlı yükler altında temel-zemin arası çekme durumu ortaya çıkmamalı, zeminde yumuşama sonucu aşırı yer değiştirmeler-çökmeler meydana gelmemelidir. Bina temelleri altında homojen lineer elastik yay katsayısı ile temel-zemin etkileşiminin modellenmesi sorgulanmaya muhtaç bir yaklaşımdır.
- Yüksek yapıların, zemine aktarılacak gerilme seviyesine göre, ileri derecede aşırı konsolide sert killi zeminler, çok sıkı kumlu zeminler veya kayaya oturan radye temeller ile taşıtılması, mümkün olmaktadır. Kalın bir radye temel altında, klasik yüzeysel temeller için önerilenlere göre daha büyük oturmalar izin verilebilir. Bu tür zeminlerde ve özellikle kaya oturan temeller altında meydana gelecek oturmaların elastik oturma şeklinde ve inşaat süresi içinde meydana gelmesi beklenilir.
- Temellerin üzerine oturtulacağı zemin tabakalarının üst seviyeleri deprem davranışını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Zayıf zemin koşullarında, en az bir bodrum kat tasarlanması, zayıf tabakaların yerinde iyileştirilmesi ve temel altında iyi sıkıştırılmış bir granüler dolgu tabakası teşkili deprem performansını olumlu etkileyebilmektedir.



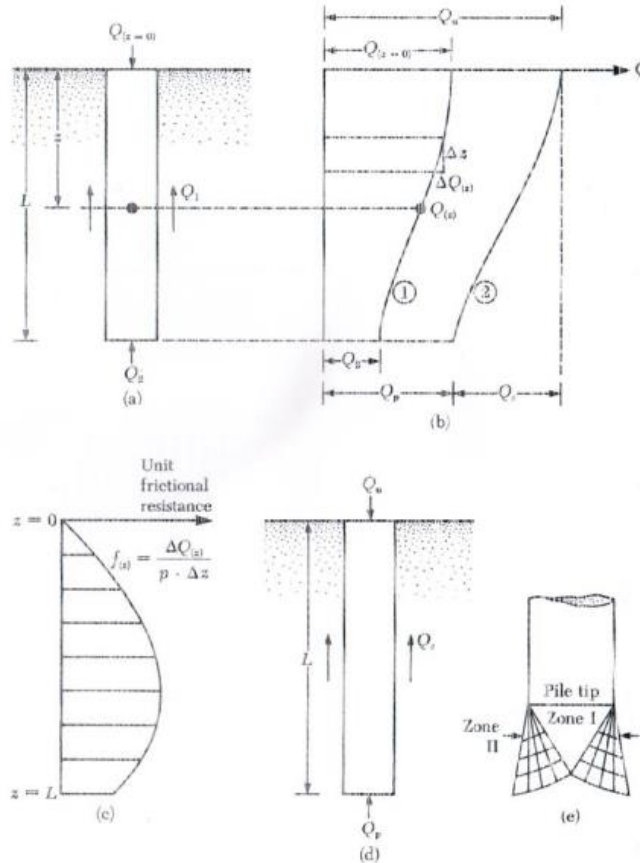
KAZIKLI TEMELLER

- Yüzeye yakın tabakaların özelliklerinin tasarlanan yapının yüzeysel temeller ile taşınması için taşıma gücü ve/veya oturmalar açısından yeterli olmaması durumunda, kazıklı temeller uygun bir seçenek oluşturabilmektedir. Kazıklı temellerin tasarımında da **taşıma gücü ve oturmaların** dikkate alınması gerekmektedir.
- Kazıklar zemin içinde oluşturulan düşey taşıyıcı elemanlar olup maruz kalacağı yükü **çeper sürtünmesi ve uç direnci** ile karşılamaktadır. Birim çevre sürtünmesi ve uç direnci değerleri zemin cinsi yanında, kazık malzemesi ve kazık yapım yöntemine bağlı olarak seçilmelidir. Birim çeper sürtünmesi ve birim uç direnci kazığın düşey yönde deplasmanına bağlı olarak mobilize olmakta, çeper sürtünmesi çok küçük deplasman seviyelerinde (5-10mm) nihai değerine ulaşırken, birim uç direnci nihai değerine çok daha büyük deplasman seviyelerinde (zemin cinsine göre kazık çapının $\geq \%10$) ulaşmaktadır.
- Sert zemin koşullarına sahip bir inşaat alanında, kazıkların yaptığı düşey deplasmana bağlı olarak, kazıklar arası radye de yük almaya başlamakta ve uygulanan yük kazıklar ile paylaşılmaktadır. Bu tür proje sahalarında, kazıklı radye tasarımı genellikle oturma kontrolü amaçlanarak yapılmaktadır. Bu bağlamda, kayaya oturan bir radye temelin kazıklar ile taşınması anlamlı olmamakta, belirli bir deplasman seviyesi sonrasında kazıklar çevresinde sürtünme mobilize olmamaya başlarken kazık ucuna yük aktarılması da söz konusu olmamaktadır.

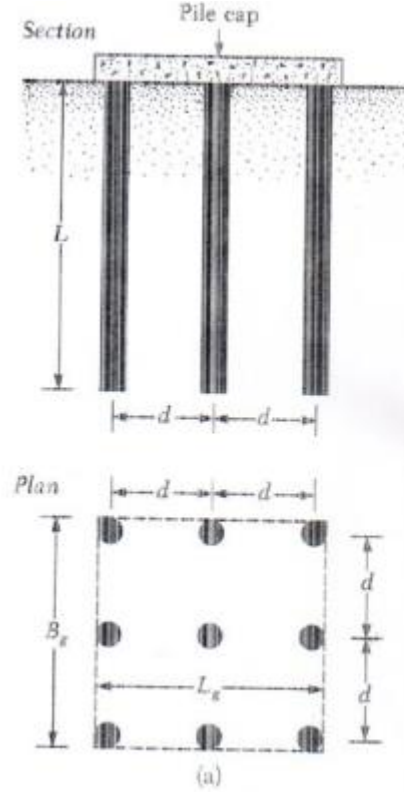


Kazıklı Temeller

Düşey Yük Altında Yük Transferi



Kazık Grubu Davranışı





Çeper Sürtünmesi Yük Transferi

a) Kohezyonlu Zeminler

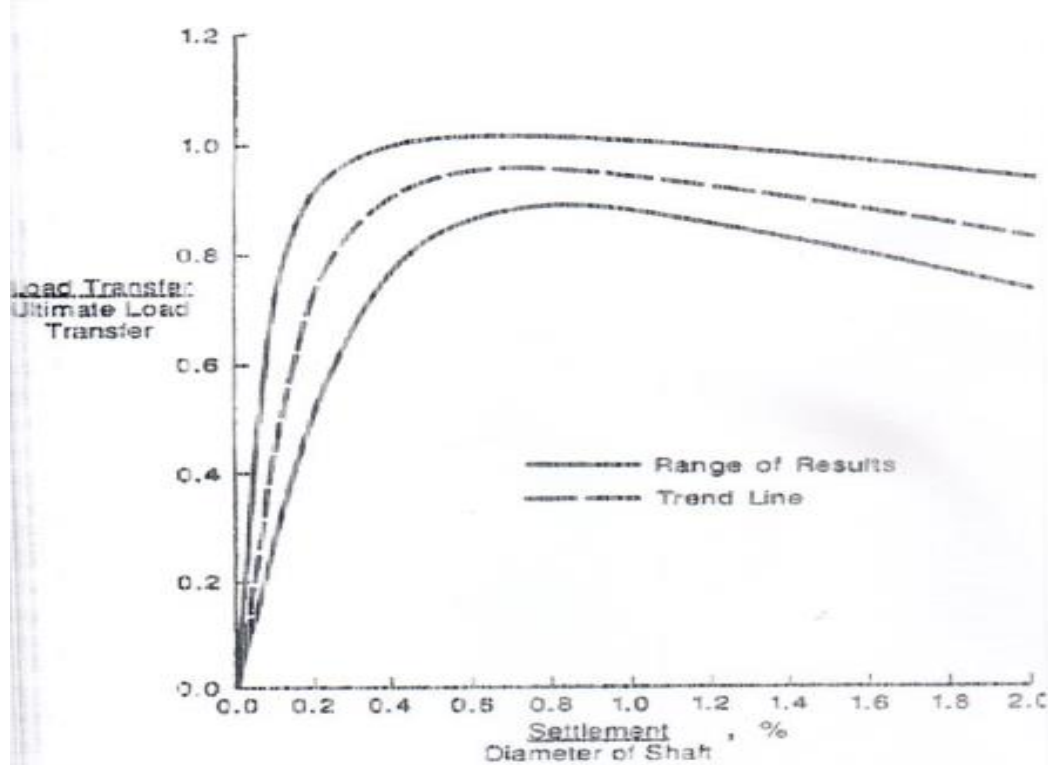
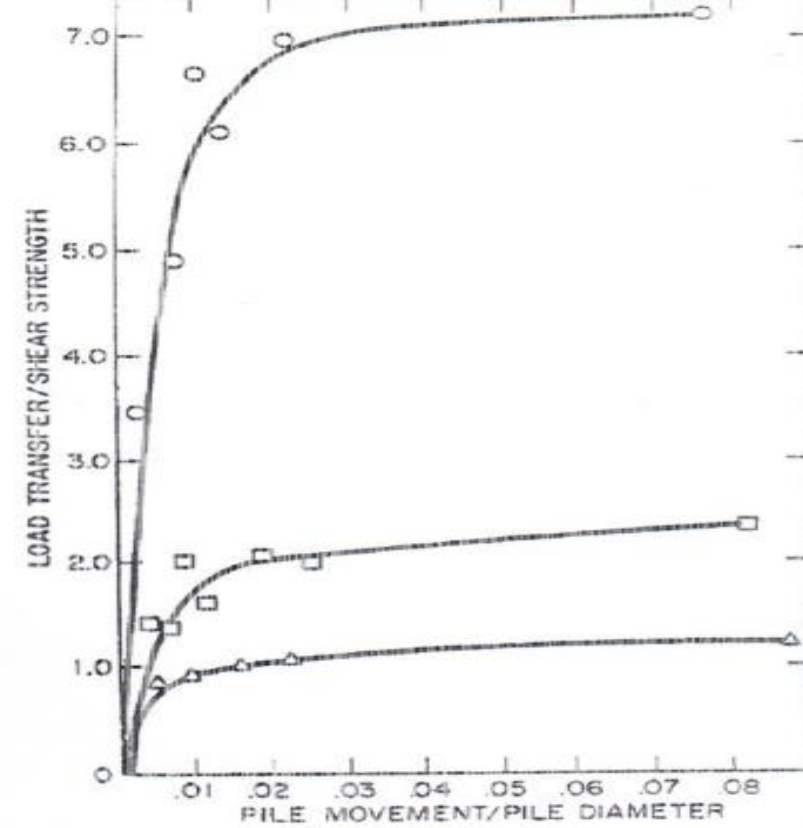


Figure 13.3 Normalized curves showing load transfer in side resistance versus settlement for drilled shafts in clay (after Reese and O'Neill, 1988).

b) Kohezyonsuz Zeminler



3.5 Experimental load-transfer curves in side resistance for sand (Girnan, 1967).



Uç Taşıma Gücü Yük Transferi

a) Kohezyonlu Zeminler

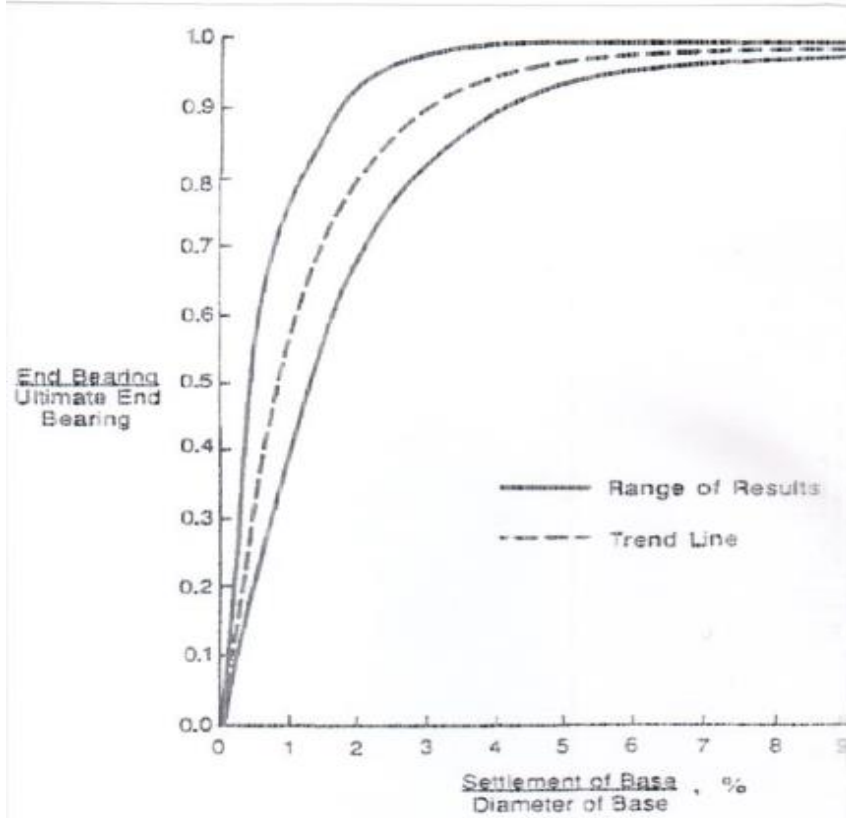


Figure 13.4 Normalized curves showing load transfer in end bearing versus settlement for drilled shafts in clay (after Reese and O'Neill, 1988).

b) Kohezyonsuz Zeminler

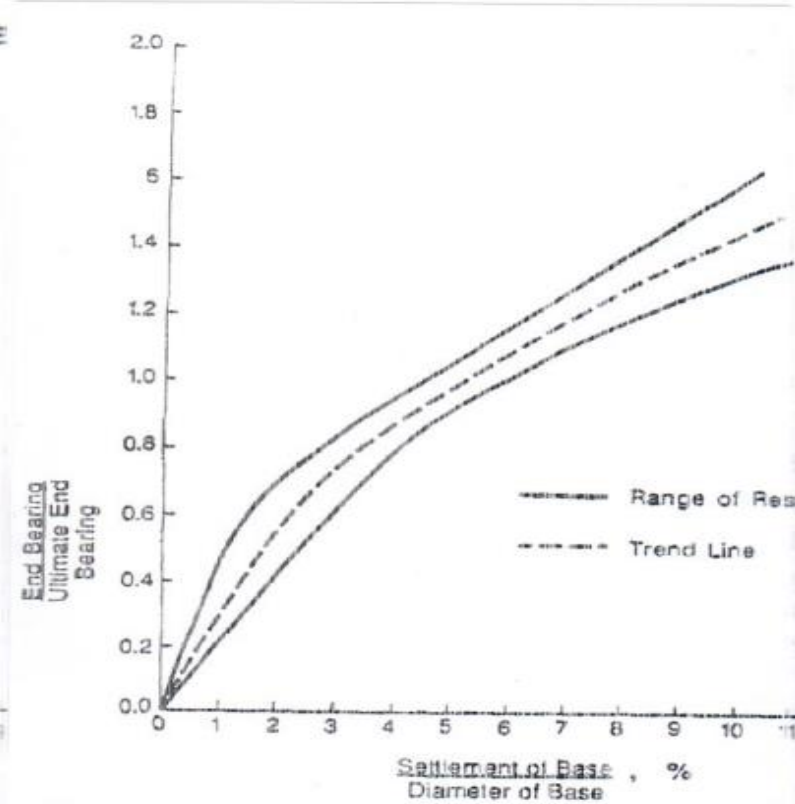
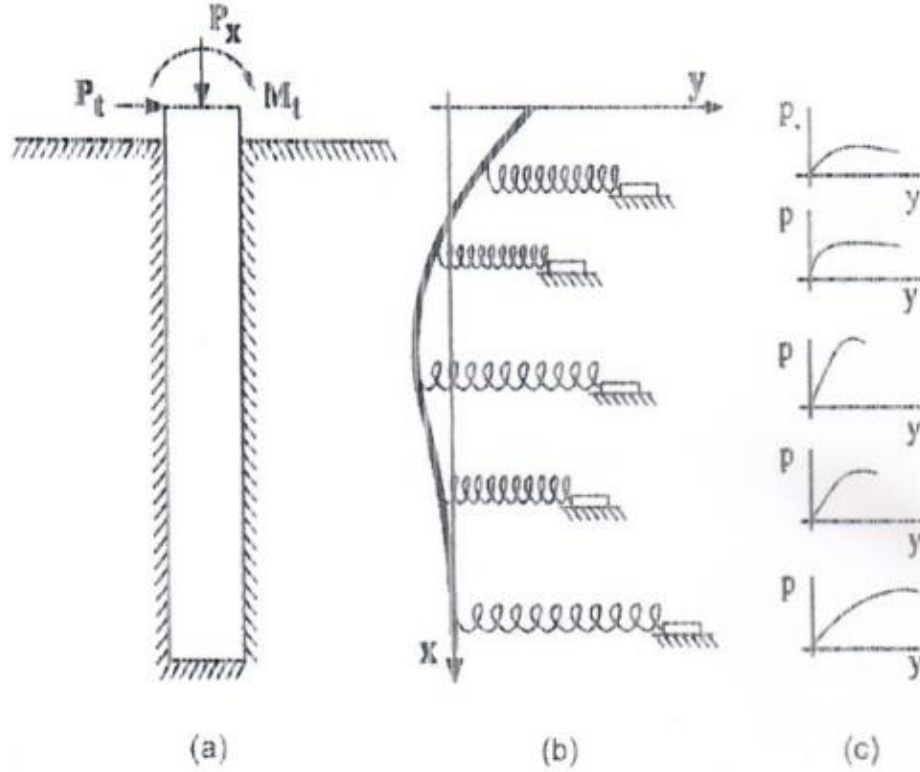


Figure 13.7 Normalized curves showing load transfer in end bearing versus settlement for drilled shafts in cohesionless soil (after Reese and O'Neill, 1988).



Yanal Yüklü Kazıklar: p-y eğrileri



12.9 Model of a pile subjected to lateral loading with a set of $p-y$ curves: (a) lateral loading. (b) soil spring model. (c) $p-y$ curves.

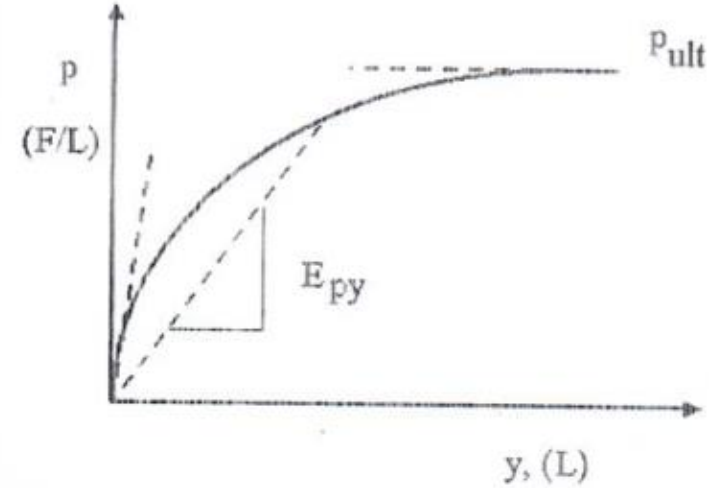
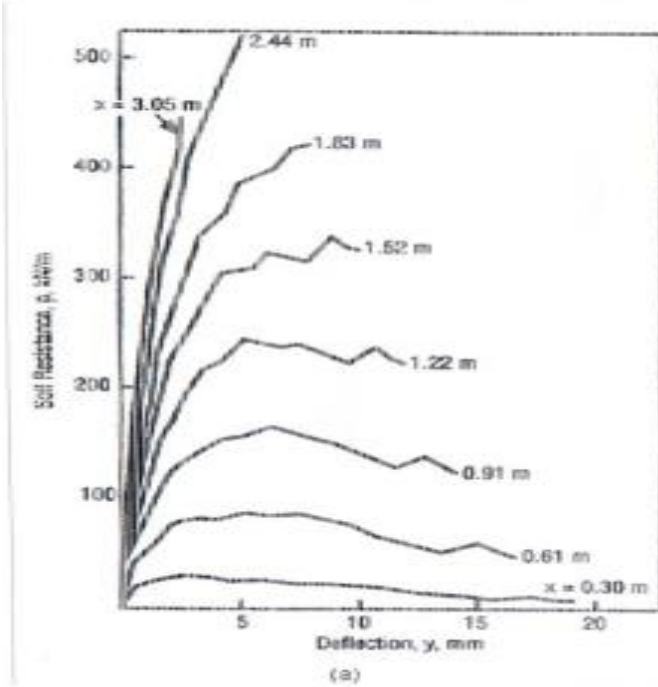


Figure 12.10. Conceptual shape of a $p-y$ curve.

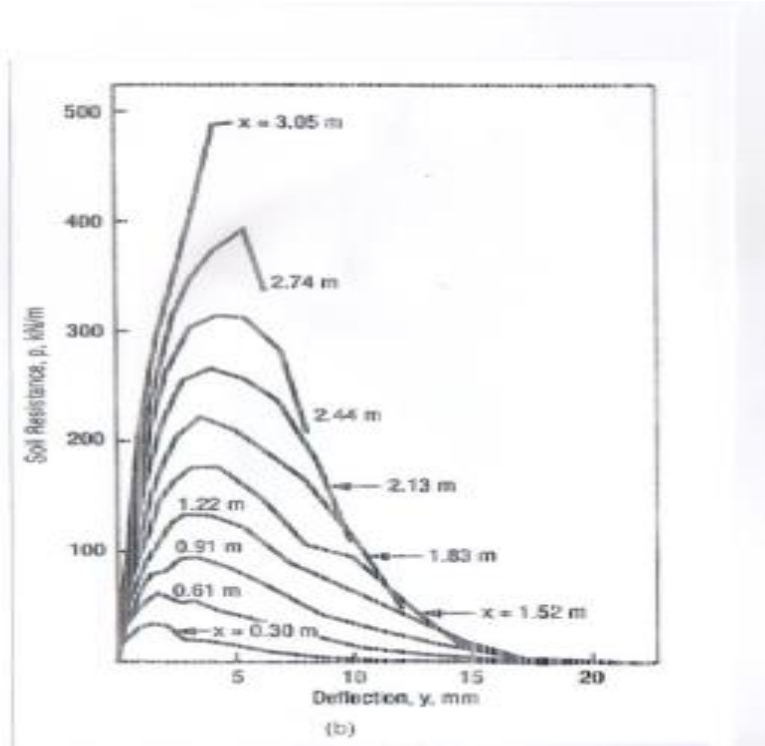


Deneyssel p-y eğrileri

a) Statik Yükleme Etkisinde



b) Çevrimli Yükleme Etkisinde





1. YÜKSEK YAPILAR SEMPOZYUMU 04 – 05 MAYIS 2023 İSTANBUL

TMMOB
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI



Millennium Tower San Francisco

- Kat Sayısı: 58
- İnşaat Başlangıcı 2007
- Temel Kalınlığı: ≈ 3.0 m
- Zemine Uygulanan Gerilme: ≈ 56 ton/m²
- Temel Sistemi: Sürtünme Kazıkları
- Kazık boyları: ≈ 30.0 m
- Taban Kayası Derinliği: 61.0m
- Kazıkların alt ucu ile taban kayası arasında 27.50m kalınlığında 'Old Bay Mud'
- Tasarımda öngörülen oturma: 20 yılda 5.50''(14 cm)
- 2016 yılında ulaşılan oturma 16'' (36 cm) + eğilme

