

ÇEKME YÜKÜNE MARUZ BETONARME KAZIKLARDA ÇATLAK GELİŞİMİ

CRACK FORMATION AT REINFORCED CONCRETE PILES UNDER TENSION

Orhan E. İNANIR¹, Mehmet M. BERİLGİN², Aykut ŞENOL³

ÖZET

Enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyleri ile kazık boyunca oluşan yük dağılımının belirlenmesi, Performansa Dayalı Kazık Tasarımına (PDK-T) imkan vermekte ve temel kazıklarının tasarımındaki belirsizlikleri asgari düzeye indirmektedir. Ancak, çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda (fore kazık, prekast çakma kazık, yerinde dökme çakma kazık Vibreks, vs.) oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Betonarme kazıklara kazık başından yukarı yönlü yük tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme gerilmesi kapasitesine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Bu çatlak gelişimi, kazığın çekme yükü altında deplasman davranışını etkilemektedir. Bu durum kazık çekme deneylerinde kazık davranışının değerlendirilmesini, t-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılmasını ve “Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modeli” oluşturulmasını zora sokmaktadır. Kazığın yapı bütünlüğünün bozulması sebebiyle etkilenen yük deplasman ilişkisi shaft sürtünmelerinin tamamının mobilize edilebilmesini ancak kabul edilebilir deplasman limitlerinin üzerinde gerçekleşebilmektedir. Bu durum daha çok uzun çekme kazıklarında aşırı güvenli tasarımlara yol açmaktadır. Bunun tezahürü olarak yönetmeliklerde ve tasarım tavsiyelerinde kazık kapasitesinin daha yüksek güvenlik faktörleri kullanılarak yük tahdidi öngörülmektedir. Bütün bu belirsizlikler sebebiyle izlenen konservatif tasarım yaklaşımları dahi maalesef servis yükü altında betonarme kazığın çatlamadığını garanti edememektedir.

Bu çalışma kapsamında enstrümante edilmiş bir eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) sonuçları çatlak gelişimi ve yayılımı açısından değerlendirilmiştir. Deneyde uygulanan eksenel çekme yükü altında betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişimi olduğu tespit edilmiştir. Kazık eksenel rijitlik hesapları da deneysel gözlemlerle paralellik arzettiği. Eldeki gözlemler ve hesaplar

¹ İnş.Y.Müh, GEOgrup İnşaat A.Ş., oinanir@geogrup.com.tr (Sorumlu yazar)

² Prof.Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, berilgen@yildiz.edu.tr

³ Prof.Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, senol@itu.edu.tr

değerlendirildiğinde “*Çatlamamış safha*” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “*nihai çatlak oluşmuş safha*” da ise donatı ile taşındığı anlaşılmaktadır. Kazık malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasite hesaplamalarını shaft sürtünmesinden kaynaklı olmamasına rağmen sun’î bir şekilde etkilemektedir. Yapılmış olan deneyde, bu hadisenin yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon mertebelerinde gözlenmiş olup literatürdeki benzer çalışmalar ile uyumludur.

Anahtar Kelimeler: *Betonarme çekme kazıkları, enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyi, aletsel gözlem, çatlak, performans dayalı kazık tasarımı, kazık süreklilik/bütünlük*

ABSTRACT

Instrumented pile loading tests can give a better understanding about the pile load-transfer mechanism. It gives also opportunity to assess the integrity and durability issues of the bored piles under tension. When a reinforced concrete pile subjected to high tension forces, it might reaches to tensile stress capacity of concrete and cracking occurs at a weakest section. The formation of cracks influences the load-displacement behaviour of piles under tension load and it causes difficulties during interpretation of pull-out tension test results. The full shaft resistance capacity can only be taken into account when it reaches the required relative displacement along the pile for fully mobilized shaft resistance and crack deformation. Especially for long piles this cannot be achieved in the acceptable pile displacement range. Thus there are different tendencies in various design manuals to limit the pile capacity under tension by applying higher safety factors or by lowering the resistance factors. However, these approaches might not always guarantee crack free design under service load.

In this study, the results of an instrumented axial static tensile pile loading test (S-KYD/Ç) were evaluated in terms of crack development and propagation. It has been determined that crack development occurs when the tensile deformation capacity of the concrete is reached under the axial tensile load applied in the experiment. Pile axial stiffness calculations also showed parallelism with experimental observations. When the observations and calculations are evaluated, it is understood that the load is carried by the pile composite section in the "uncracked phase" and it is carried by the reinforcement in the "final cracked phase", which is the region after the first crack development point. The change in the pile material property affects the pile capacity calculations artificially, although not due to shaft friction. In the experiment, this phenomenon was observed at approximately 70-120 microStrain unit deformation orders and is consistent with similar studies in the literature.

Keywords: *integrity, crosshole logging, tension, crack, pull-out, instrumented pile loading test*

1. GİRİŞ

Enstrümante edilmiş kazık yükleme deneyleri ile kazık boyunca oluşan yük dağılımının belirlenmesi, Performansa Dayalı Kazık Tasarımına (PDK-T) imkan vermekte ve temel kazıklarının tasarımındaki belirsizlikleri asgari düzeye indirmektedir. Ayrıca, çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda oluşan çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi konusunda kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Betonarme kazıklara kazık başından yukarı yönlü yük tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme gerilmesi kapasitesine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Çatlak gelişimi kazığın çekme yükü altında deplasman davranışını etkilemektedir. Bu durum kazık çekme deneylerinde kazık davranışının değerlendirilmesini ve t-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılmasını zora sokmaktadır. Esasen, “*Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modeli*” sağlıklı bir şekilde oluşturulamamaktadır. Bu durum daha çok araştırmacılar tarafından mobilize olan shaft sürtünmesinin istikamete bağlı olması ile açıklanmaya çalışılmıştır. Ancak, literatürde shaft sürtünmesinin kazığın hareketi istikameti ile değişip değişmediği hususunda farklı görüşler mevcuttur.

Fellenius (2021) ve England (2012) çalışmalarında deplasman istikametinin shaft sürtünmesi üzerinde bir etkisi olmadığını, diğer bir deyişle kazık shaftında mobilize olan kayma gerilmesinin kazığın basınç veya çekme yüküne maruz kalmasından bağımsız olduğunu raporlamışlardır. Bu görüşe karşılık Jardine ve Chow (1996) ve Liew v.d. (2011) çekme yüküne maruz kazıkların shaft dirençlerinin, basınç yüküne maruz kazıklardan daha düşük olduğunu raporlamaktadırlar.

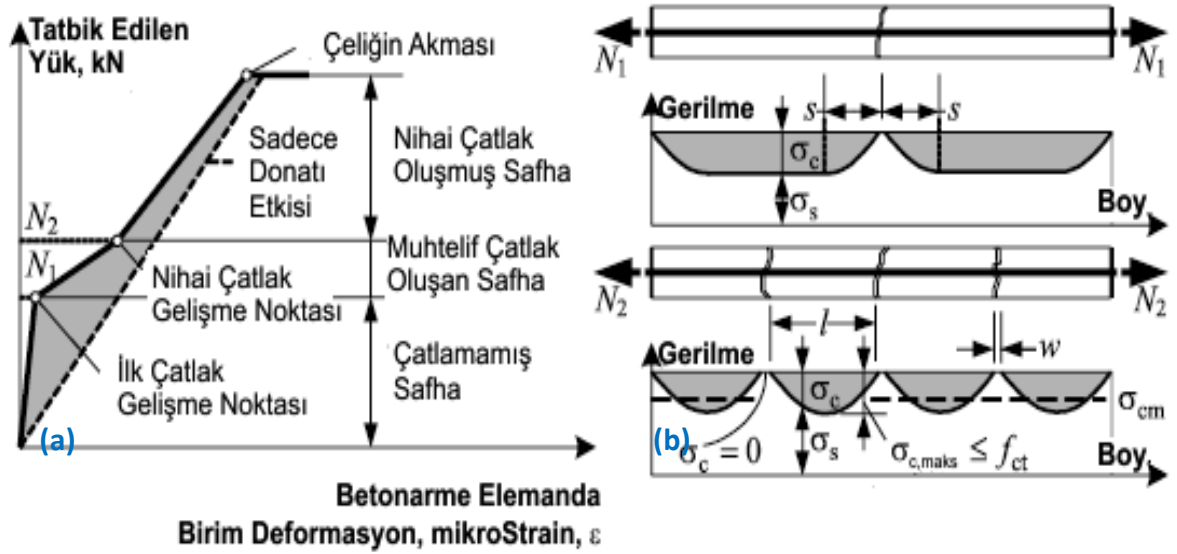
Jardine ve Chow (1996) çalışmasında çekme yüküne maruz kazıklarda shaft radyal efektif gerilmesinin ve pik lokal kayma gerilmesinin kum birimlerde basınç yüküne maruz kazıklara nisbeten daha düşük olduğu ancak kilde bir farklılık oluşmadığı belirtilmektedir. Liew v.d. (2011) çalışmasında ise çekme yüküne maruz kazıklarda shaft direncindeki azalmanın kazığın poisson etkisi sebebiyle büzülmesinin etkili olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, yaptıkları çapraz kuyu ultrason deneyinde statik çekme kazık yükleme deneyi esnasında oluşan çatlak gelişimine bağlı olarak ilk varış zamanında (FAT) gecikme ve sinyal enerjisinde (E) azalma tesbit ettiklerinden de bahsetmektedirler.

Bu çalışma kapsamında ise enstrümante edilmiş bir eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) sonuçları çatlak gelişimi ve yayılımı açısından değerlendirilmiştir. Çekme yüklemesi sonucunda betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişmektedir (Borosnyoi and Balazs, 2005, Bicocchi, 2011), Enstrümante edilmiş eksenel kazık çekme deneylerinde farklı beton malzemesi karakteristikleri ve donatı miktarları için İnanır, (2018) çalışmasında da çatlak gelişimi açısından 50-150 mikroStrain sınır değerleri gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bicocchi, (2011) çalışmasında da eğilme momentine maruz pasif kazıklarda birim deformasyon ölçer verileri ile çatlak gelişimi sınır değerleri için benzer sonuçlar rapor edilmiştir.

Beton aderansı ve donatı sıyrılma mekanizması Somayaji ve Shah, (1981) tarafından incelenmiş ve çekme yüküne maruz bir betonarme elemanın yük-birim deformasyon eğrisinde üç bölge tanımlanmıştır (Şekil 1a). Birinci bölge çatlamamış safhada ilk çatlak gelişme noktasına kadar elemanın elastik davranış sergilediği bölgedir. İkinci bölge ise ilk

çatlak gelişiminden nihai çatlak gelişimi noktasına kadar olan muhtelif çatlak oluşma safhasındaki deformasyon davranışı sergilediği bölgedir. Üçüncü bölge ise nihai çatlak gelişimi noktasından donatı akma noktasına kadar olan nihai çatlak oluşmuş safhasındaki deformasyon davranışı sergilediği bölgedir.

Fields ve Bischoff (2004) ise çekme yüküne maruz betonarme eleman için aksel gerilme ve birim deformasyon dağılımını Şekil 1.b.'deki gibi tanımlamaktadır. Çatlak gelişimi betondaki gerilmenin çekme mukavemetine ilk ulaştığı en zayıf kesitte oluşmaktadır. Çatlak gelişimi akabinde bu noktada betondaki gerilme sıfıra düşer. Betondaki gerilme çatlaktan uzaklaştıkça donatı beton aderansı sebebiyle transfer boyu (s) kadar mesafede çatlaktan etkilenmeyen gerilme değerine kadar artar. Çatlayan kesitte donatı ile beton aderansının yitirmeye başlaması, yüksek gerilmelere sebep olur ve çatlak genişler. Nisbeten küçük bir yük artımı bile mevcut çatlağın biraz ilerisinde başka bir çatlak oluşumuna sebebiyet verir. Yük artımı ile birlikte betonarme eleman boyunca belirli aralıklarla (nisbeten nizami aralıklarla, $s < l \leq (2 \cdot s)$) ilk çatlak patern gelişimi tamamlanmış olur (Şekil 1(b)). Bu çatlak paterninde betondaki çekme gerilmesi her çatlak noktasında sıfıra düşer, tekrar σ_{ct} değerine kadar artar, ancak tabii olarak hiçbir zaman betonun çekme mukavemetini aşamaz.



Şekil 1. Çekme yüküne maruz betonarme çekme elemanı: (a) çatlak gelişme safhaları (Somayaji and Shah 1981) (b) aksel gerilme ve birim deformasyon dağılımını (Fields and Bischoff 2004)

Burada izah edilen hadise aksel statik çekme kazık yükleme deneyinde (S-KYD/Ç) birim deformasyon ölçer (VWSG) verisinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu gözleme ilave olarak çatlak gelişimini doğrulama maksatlı kazık çekme deneyi öncesinde, deney azami yükünde ve deney yükü boşaltıldıktan sonra deney kazığında kazık bütünlük/süreklilik deneyleri, KBD (Sonic Integrity Test-SIT, Pulse Echo Test-PET, Pile Integrity Test-PIT) ve çapraz kuyu ultrason deneyleri, Ç-KUD (CrossHole Sonic Logging-CSL, CrossHole Ultrasonic Method-CHUM) yapılmıştır. Çatlak gelişimi gözlemi destekleyici bulgular elde edildiği değerlendirilmiştir.

Bu bildiride enstrümanite edilmiş bir eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) ele alınmış ve gözlem sonuçları yukarıda bahsolunan çatlak gelişimi ve yayılımı ile gerilme-birim deformasyon dağılımı dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

2. ENSTRÜMANTE EDİLMİŞ BİR EKSENEL STATİK ÇEKME KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/Ç) UYGULAMASI

Bir proje kapsamında ; OD1000mm çapında, $L_{toplam}=10.40m$ ve $L_{net}=10.10m$ (Kazık Başı Kotu -13.10, Temel Alt Kotu -13.40 ve Kazık Taban Kotu -23.50 olmak üzere) boyunda bir fore kazık üzerinde kapasitesinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için “Enstrümanite edilmiş eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç)” yapılmıştır. Bu bildiride deney özellikleri, deneyde ölçülen verilerin analizi, “Tekil Kazık-Zemin Etkileşim Modelinin” oluşturulmasını etkileyen menfi hususlar değerlendirilmiştir.

2.1. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Deney yapılan sahada yüzeyden (Kot +2.70) yaklaşık 4m kalınlığında kontrolsüz dolgu tabakası mevcuttur. Kontrolsüz dolgu tabakasını müteakip kumtaşı ve çamurtaşı ardalanması sondaj sonuna kadar (Kot -24.5) devam etmektedir. Yeraltı su seviyesi yüzeye yakın bulunmaktadır ($\sim +2.5$). Deney kazığı -13.10 kotunda teşkil edilen çalışma platformundan imal edilmiş ve yüzeye yakın bulunan yeraltı su seviyesi yaklaşık çalışma platformunun altında kalacak şekilde çalışmalar süresince pompaj yapılmıştır. Zemin tabakalanması ile ilgili özet bilgi Tablo 1. 'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney lokasyonunda zemin şartları

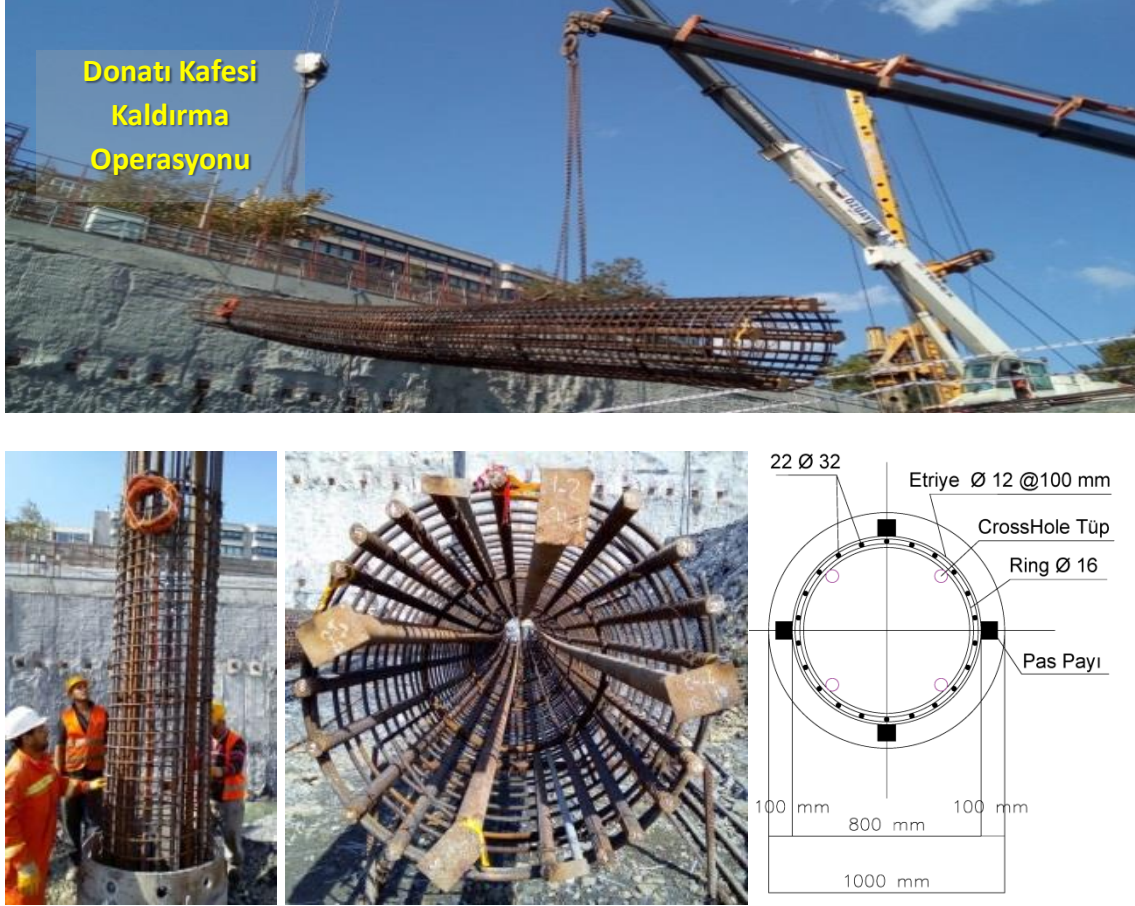
Kot [GRS 80]		Zemin Tanımlaması
+02.7	/ +00.0	Kontrolsüz Dolgu: İri çakıllı Kum ve Kil
+00.0	/ -00.7	Kontrolsüz Dolgu: Kumlu Kil kaya blok parçaları mevcut
-00.7	/ -01.2	Kontrolsüz Dolgu: Kaya blokları
-01.2	/ -09.6	Kumtaşı
-09.6	/ -12.4	Çamurtaşı
-12.4	/ -20.2	Kumtaşı
-20.2	/ -23.3	Çamurtaşı
-23.3	/ -23.8	Konglemera
-23.8	/ -24.5	Kumtaşı

2.2. DENEY KAZIĞI, ÖLÇÜM ALETLERİ VE ÇEKME DENEYİ

Deney Kazığı İmalatı

Deney kazığı, OD1000mm çapında ve $L_{toplam}=10.4m$ ve $L_{net}=10.1m$ boyunda (Çalışma Platformu Kotu -13.10, Temel Alt Kotu -13.40 ve Kazık Taban Kotu -24.50 olmak üzere) fore kazık tekniği ile kaya augeri kullanılarak ve kuyu stabilitesi için geçici muhafaza borusu ($L=6m$, OD1080mm ve boru üst kotu -11.45 olmak üzere) kullanılarak imal edilmiştir. Tij tipi ekstansometre ve seyyar ekstansometre yerleştirilmesine yönelik kılıf borular (çapraz kuyu ultrason deneyi maksadıyla da kullanılacak olan) ve donatı tipi birim

deformasyon ölçerler ile enstrümante edilerek hazırlanan donatı kafesi (22nos Φ 32mm boyuna donatı ve Φ 12/100mm etriye ile teşkil edilerek) tek parça olarak kuyuya indirilmiştir (Şekil 2). Akabinde C35/45 beton sınıfı ile betonlama tremi borusu kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2. Enstrümante edilmiş deney kazığı donatı kafesi kaldırma operasyonu ve donatı kafesi genel ve detay görünüşü.

Ölçüm Aletleri

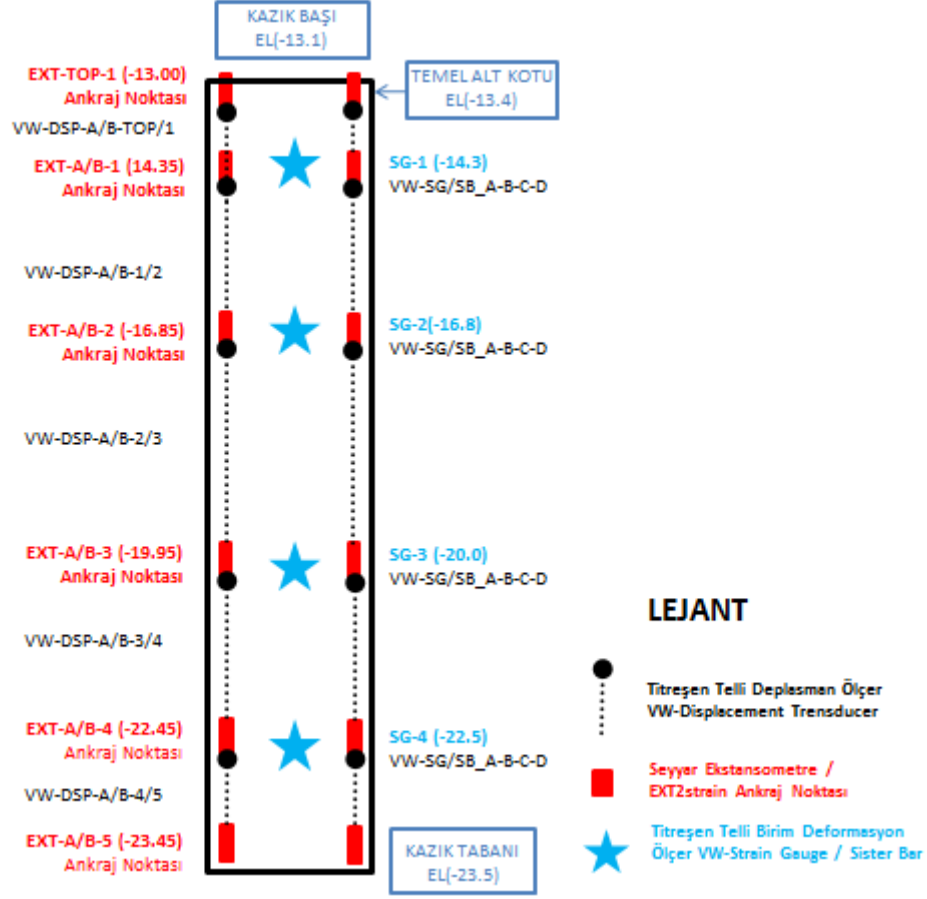
Deney kazığına dört (4) seviyede Titreşen Telli Donatı Tipi Birim Deformasyon Ölçer (VWSG/SB, Vibrating Wire Sister Bar Type Strain Gauge) her seviyede karşılıklı ikişer çiftten dört (4) adet olmak üzere toplam onaltı (16) adet yerleştirilmiştir. Karşılıklı kuvvet çiftlerinin 4 adet SG ile ölçülmesi ölçüm doğruluğu (accuracy) ve yedeklemesi (redundancy) açısından önem arz etmektedir. Birim deformasyon ölçer kotları SG-1/-14.3, SG-2/-16.8, SG-3/-20.0 ve SG-4/-22.5 Şekil 4’de şematik olarak verilmiştir. Kazık tabanındaki deplasmanların hesaplanabilmesi için tij tipi ekstansometre (Tell-Tale) karşılıklı iki (2) adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Deney esnasında çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD, CSL/CHUM) kapsamında kullanılan 2” çelik borulardan karşılıklı olan 2 adedine seyyar ekstansometre (EXT2strain) yerleştirilmiştir. Ankraj noktaları arasında kısalma/uzama ölçülerek ankraj noktaları arasındaki ortalama birim deformasyon hesaplanmıştır. Bu maksatla altı (6) ankraj noktası arasında beş (5) adet olmak üzere karşılıklı iki (2) boruda ölçüm alınmıştır.

Deney kapsamında kullanılan enstrümantasyon ölçüm sistemleri genel görünüşleri Şekil 3’de, yerleşim detayları ve listesi ise Şekil 4 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Deneyde kazık imalatı ve deney öncesi rezidüel gerilmeler ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek, deney öncesinde birim deformasyonlar sıfırlanmış ve “Rezidüel Gerilmeler” dikkate alınmamıştır.



Şekil 3. Yükleme deneyinde kullanılan ölçüm aletlerinden genel görünüş



Şekil 4. Donatı tipi birim deformasyon ölçer (VW-SG/SB) ve seyyar ekstansometre (EXT2strain) kazık boyunca yerleşimi şematik gösterimi

Kazık Çekme Deneyi

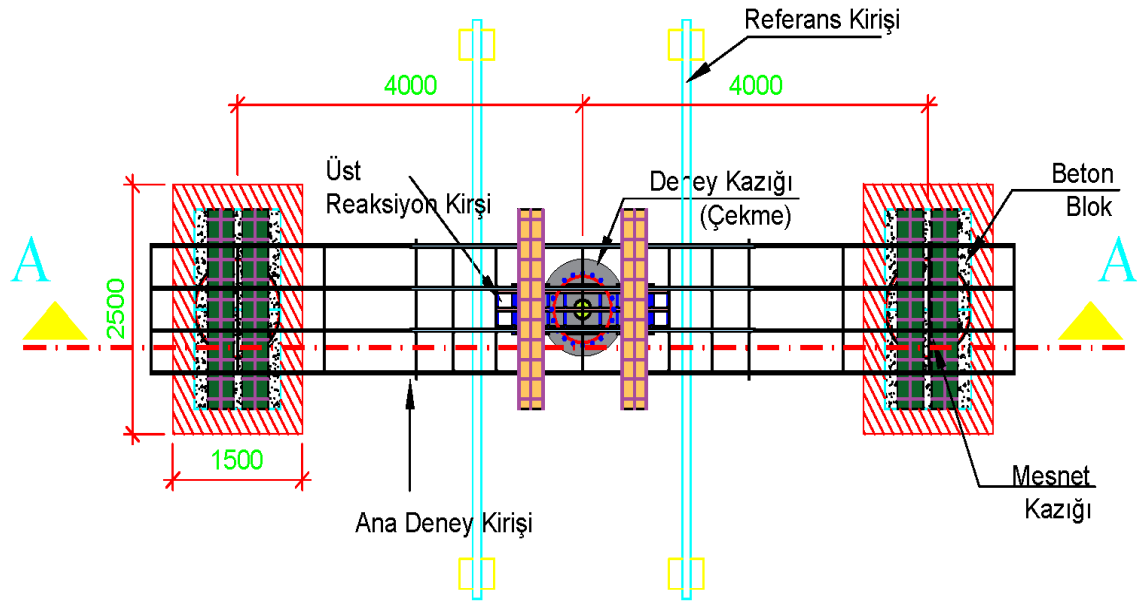
Yüklemeye deneyinde çekme kazığına yük, kazık ana donatılara kaynaklanan “yük aktarma borusu” ve iki (2) adet reaksiyon kazığına mesnetlenen deney kirişinden faydalınarak hidrolik krik o vasıtası ile tatbik edilmiştir. Hidrolik krikolara hava tahrikli hidrolik pompa ile basınç uygulanmış ve pompa hattındaki basıncı gözlemlemek için yüksek basınçlı bir manometre (Bourdon gauge) ile yüksek çözünürlüklü ve kalibrasyonlu bir basınç ölçer (pressure transducer) kullanılmıştır. Kazık başında mobilize olan yük ise elektrik direnç cinsi yük hücresi (Electric resistance type load cell, LC/ER) ile ölçülmüştür. Kazık başına transfer edilen yükün eksenelliğinin sağlanabilmesi ve deney boyunca reaksiyon kazıklarının farklı deplasman yapması sebebiyle oluşabilecek potansiyel eksantrite etkisinin bertaraf edilebilmesi maksadıyla yarım küresel mafsall kullanılmıştır. Ayrıca, referans kirişine, tij tipi (Tell-tale) ve seyyar ekstansometre (EXT2strain) muhafaza borularına sabitlenen deplasman ölçerler izafî hareketi ölçmek için kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve genel görünüş Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir. Referans kirişi üzerine yerleştirilen “Invar Mira Cetveli” ile referans kiriş hareketinin belirlenmesi için dış referansa sabitlenen DNA-03 Elektronik Nivo ile senkronize bir şekilde 0.01mm hassasiyette okuma alınmıştır. Deney boyunca deney kirişlerinin devrilmeye karşı güvenliği açısından boyuna ve enine istikamette dönme ölçümü yapılmıştır.

Deney kapsamında ASTM D3689-07, (2013) Prosedür-A “Hızlı Test” (Procedure A “Quick Test”) uyarınca yükleme programı uygulanmıştır (Şekil 7). Azami deney yüküne (%100 = 7 MN) %5 kademelerde 15dk bekleme ile 20 adımda tek çevrimde ulaşılması hedeflenmiştir. Ancak, azami yükte deney sistemi kapasitesinin imkan vereceğine kanaat getirilerek arttırılmış azami yüke (%110 = 7.7 MN) 2 kademe daha yükleme yapılarak (1L-22X adımı) 22 adımda çıkılmıştır. Arttırılmış zami yükte 60 dk bekleme sonrası 5 adımda yine 15dk bekleme kademeleri ile boşaltılarak ve son aşamada sıfır yükte yine 60dk bekleme ile deney tamamlanmıştır (1U-5X). Deney boyunca deplasman, yük, basınç, birim deformasyon ölçümü verileri ve diğer veriler 60sn aralıklarla otomatik rasat sistemi ile yedekli olarak kaydedilmiştir.

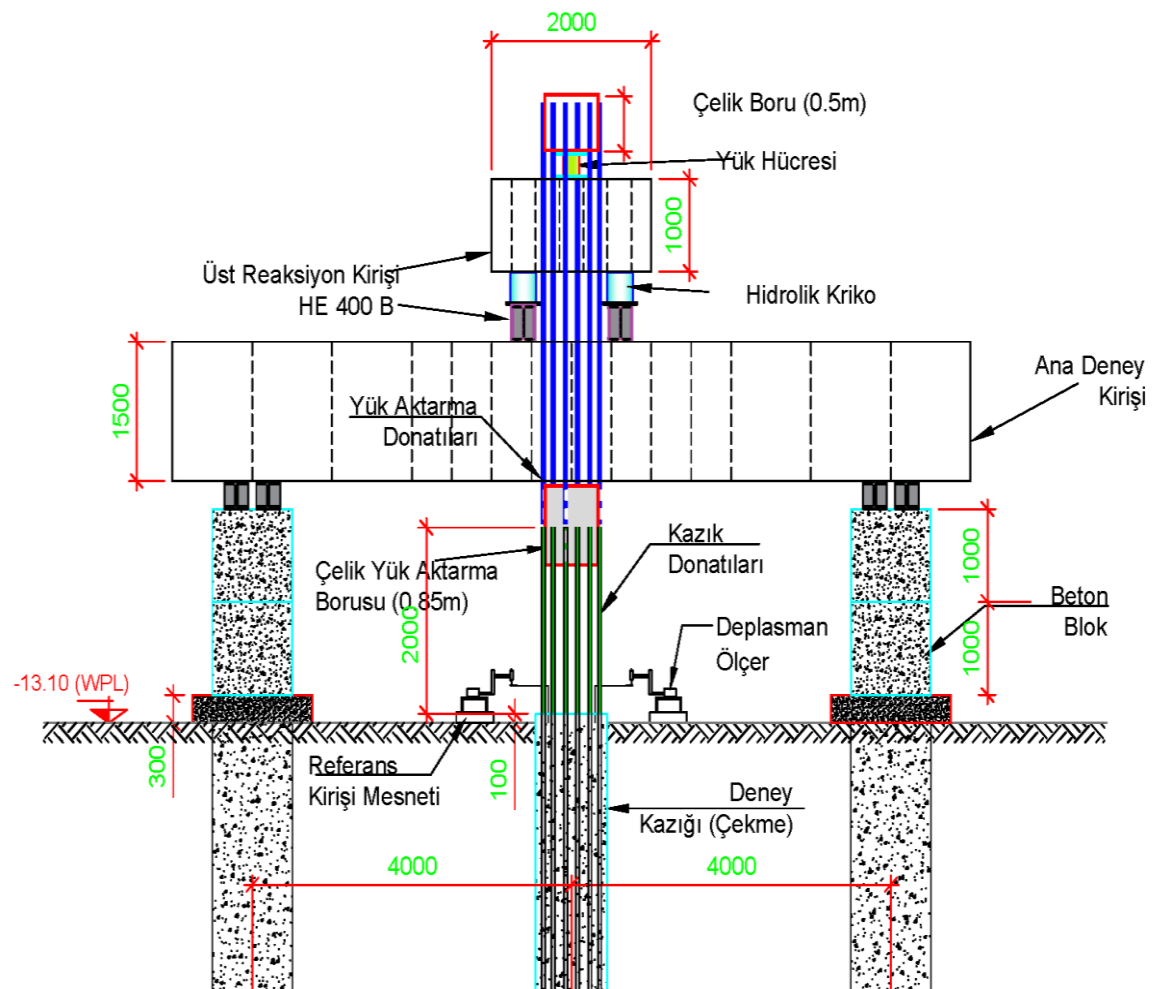
Tablo 2. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) özet bilgileri

Deney Kazığı	$D=1.000\text{mm}$, $L_{\text{toplam}}=10.4\text{m}$
Deney Düzeneği	Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) Reaksiyon kazıkları mesnet olarak kullanılarak
Maksimum Deney Yüğü	Planlanan %100 – 6.975 kN (S-KYD/Ç) Gerçekleşen ~%110 – 7,642 kN (S-KYD/Ç)
Hidrolik Teçhizat	15.000 kN kapasiteli Hidrolik Kriko
Yük Kontrolü	Oransal Servo Valf ile Hava tahrikli hidrolik pompa kontrolü
Yük Hücresi	Encardio-Rite ELC-150S-H High Capacity Resistive Type Solid Load Cell 1no x 12.5 MN
Deplasman Ölçer	Opkon SLPS100, 100mm stroklu, direnç tipi deplasman ölçer (4 adet deney kazığının başında, 4 yük aktarma borusunda, 2 adet Telltale başında \ 1 adet krikoda — Toplam 11 adet) Geokon titreşen telli deplasman ölçer (VW-DT) 25mm stroklu 2 adet / seviye x 5 seviye =10 adet VW-DT
Birim Deformasyon Ölçer	ENCARDIO-RITE EDS-12V titreşen telli donatı tipi birim deformasyon ölçer (Vibrating wire Sister Bar Type Strain Gauge) 4 adet/seviye x 4 seviye = 16 adet GEOKON A9 Model “Retrievable Extensometer – EXT2strain” 2 adet/seviye x 6seviye =12 adet ankraj noktalı
Basınç Ölçer	WIKI S-10 Model 1 adet basınç ölçer
Veri Kayıt Ekipmanı	RST Instruments Flexdaq Model Data Logger 1 adet Campbell Scientific CR6 Otomat’k Rasat Cihazı
Veri Kayıt Aralığı	60 Saniye

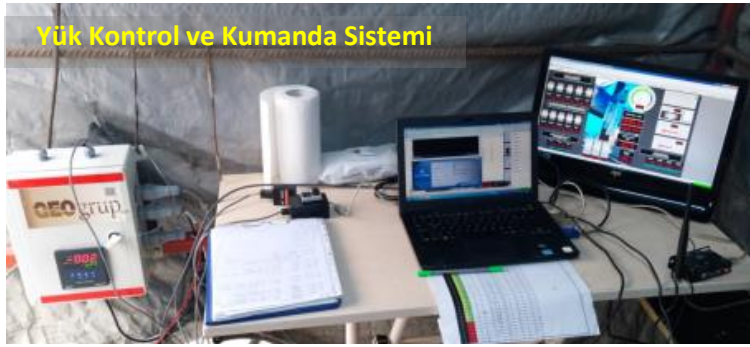
PLAN GÖRÜNÜŞÜ



KESİT "A-A"



Şekil 5. Deney düzeneği şematik gösterimi



Şekil 6. Deney düzeneği, yük kontrol ve kumanda sistemi ve hidrolik pompa genel görünüş

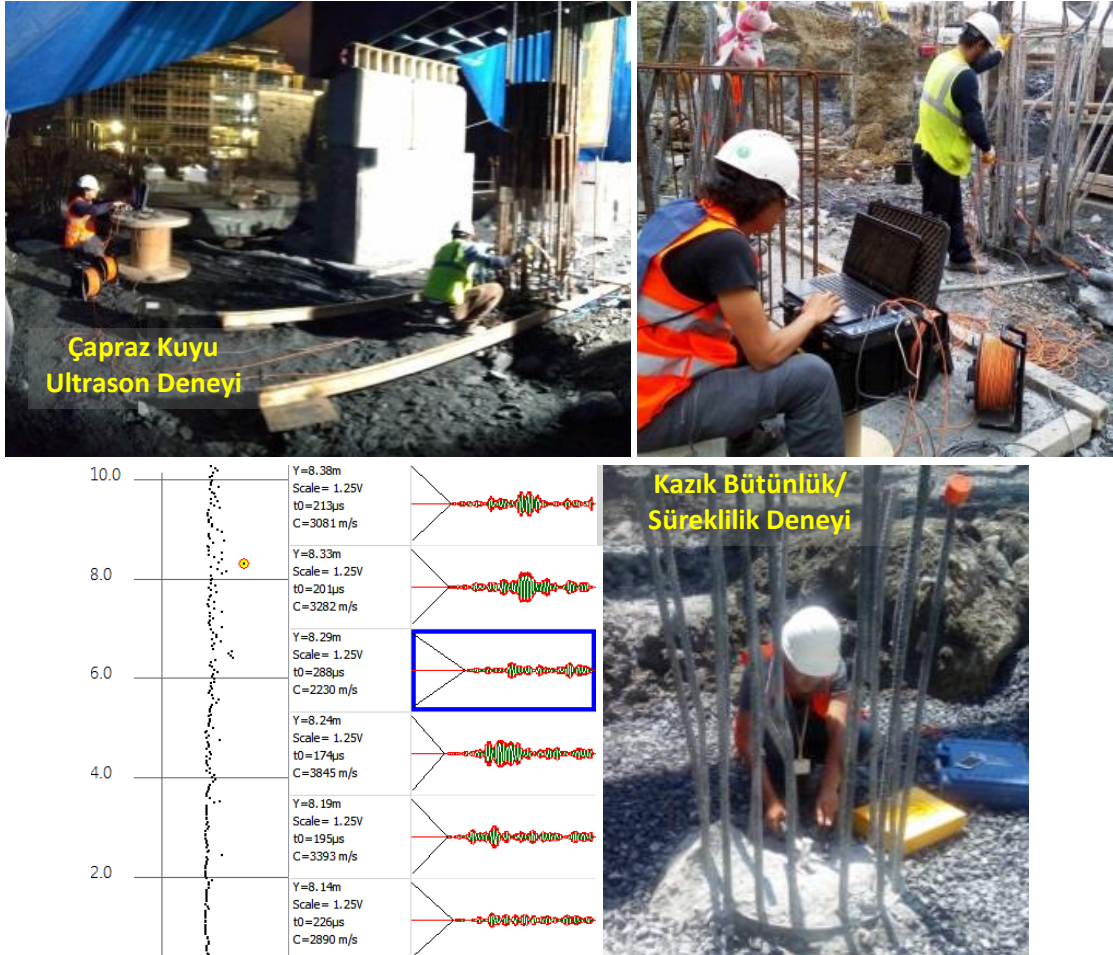
Çevrim	Basmaç (Bar)	Deney Yüğü (kN)	Azami Deney Yüğüne Nispeti (%)	Yük Tatbik Kriterleri	
				Azami Yük Tatbik Süresi (dk)	Deney Yük Tatbik Süresi Kriteri
1	L-	0	0	0	M/D
1	L-	1	34	349	
1	L-	2	69	698	
1	L-	3	104	1046	
1	L-	4	138	1395	
1	L-	5	173	1744	
1	L-	6	207	2093	
1	L-	7	242	2441	
1	L-	8	277	2790	
1	L-	9	311	3139	
1	L-	10	346	3488	
1	L-	11	381	3836	
1	L-	12	415	4185	
1	L-	13	450	4534	
1	L-	14	484	4883	
1	L-	15	519	5231	
1	L-	16	554	5580	
1	L-	17	588	5929	
1	L-	18	623	6278	
1	L-	19	658	6626	
1	L-	20	692	6975	
1	L-	21	727	7324	
1	L-	22	761	7673	
1	U-	1	692	6975	60
1	U-	2	554	5580	
1	U-	3	415	4185	
1	U-	4	277	2790	
1	U-	5	138	1395	
1	U-	6	0	0	

Şekil 7. Deney yükleme programı

Kazık Bütünlük/Süreklilik Deneyi (KBD) ve Çapraz Kuyu Ultrason Deneyi (Ç-KUD)

Deney kazığı başı kırımı yapılarak (Kot -13.10) temizlendikten sonra, kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD), zaman alanında analiz ile (sonic integrity test, SIT; pulse echo test, PET; pile integrity test, PIT) usûlü ile ASTM D5882.16 (2016) uyarınca Piletest marka PET-BT cihazı ile yapılmıştır. Çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD) ise, (Crosshole logging, CSL / Crosshole ultrasonic monitor, CHUM) ASTM D6760.16 (2016) uyarınca Piletest marka CHUM ekipmanı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 8).

Kazık bütünlük/süreklilik (KBD) ve çapraz kuyu ultrason deneyleri (Ç-KUD) çekme kazığı bütünlüğünün tesbiti maksatlı, kazık çekme deneyi öncesi, azami yükte iken ve yük boşaltıldıktan sonraki aşamalarda yapılmıştır. Kazık çekme deneyinde ultrason borularının karşılıklı 2 adedi seyyar ekstansometreler için kullanılması hasebiyle, azami yükte ve yük boşaltıldıktan sonra yapılan çapraz kuyu ultrason deneyleri sadece karşılıklı 2-4 nolu Ç-KUD borularında yapılmıştır.

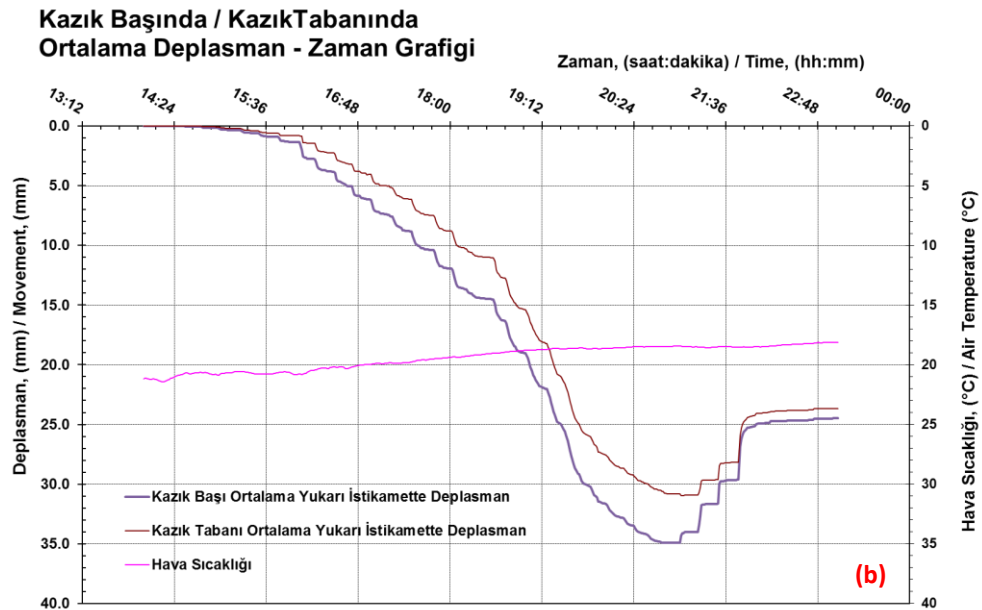
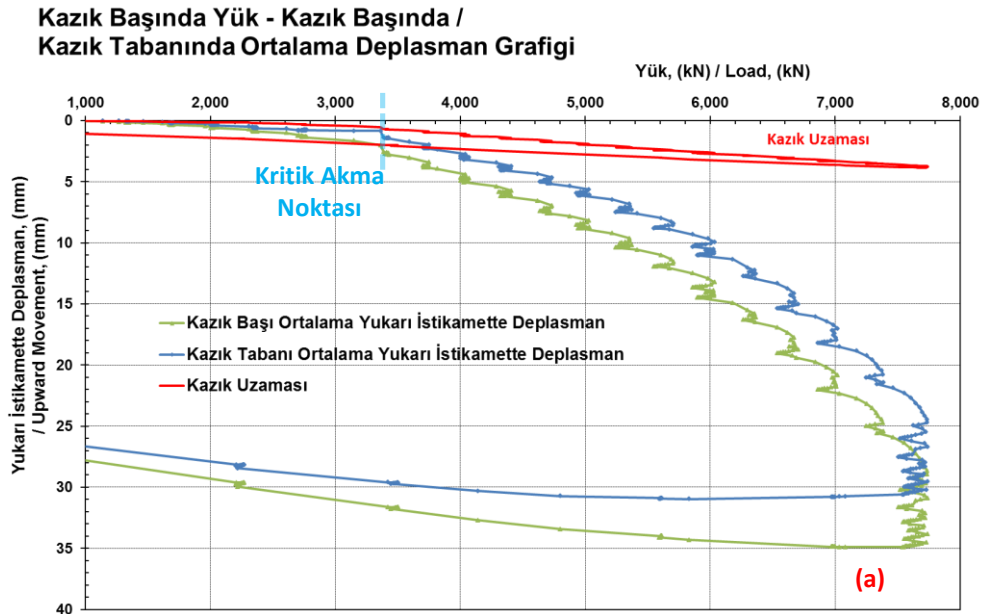


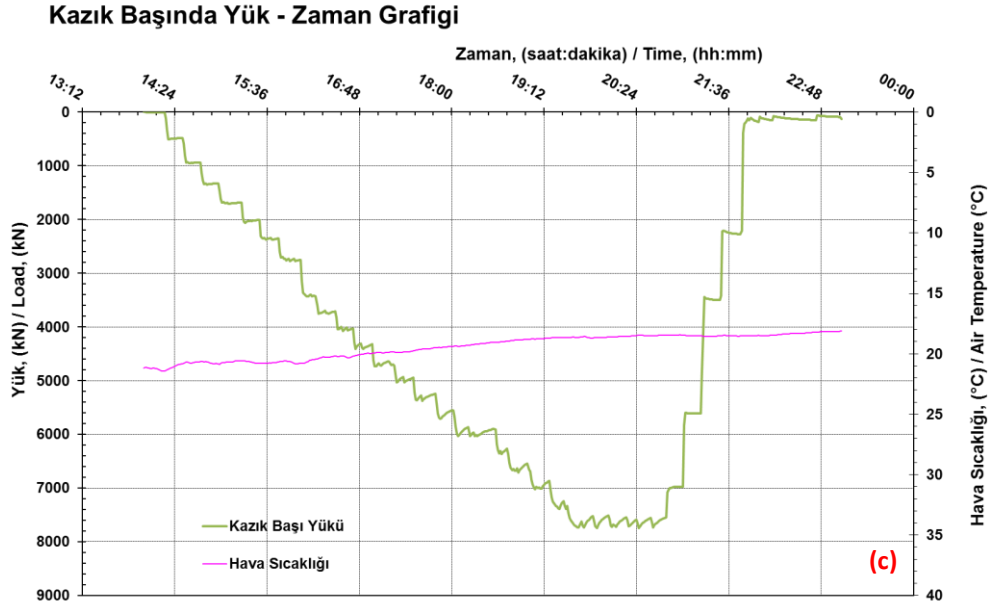
Şekil 8. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD) çalışmalarından genel görünüş

2.3. EKSENEL STATİK ÇEKME KAZIK YÜKLEME DENEYİ (S-KYD/Ç) SONUÇLARI

Deney kazığı yük-deplasman davranışı

Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) kazık imalatından 28 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Deney arttırılmış azami yükünde kazık başı yukarı istikamette ortalama deplasmanı 34.90mm ve kazık başı yukarı istikamette ortalama deplasmanı ise 30.61mm olarak ölçülmüştür (Şekil 9(a)). Kazık Başında Yük- Zaman ve Kazık Başında / Kazık Tabanında Yukarı İstikamette Ortalama Deplasman – Zaman Grafikleri Şekil 9(b)ve(c)’de verilmiştir. Kazık tabanında hesaplanan deplasman değerler, tij tipi ekstansometre ölçümleri kullanılarak elde edilmiştir. Çekme kazığının eksenel rijitliği, kazık başı yükü – yukarı istikamette ortalama deplasman grafiğinin eğimi incelendiğinde Şekil 9(a)’da gösterildiği gibi belirgin bir “*Kritik Akma Noktası*” itibari ile oldukça farklı karakter sergilemektedir.



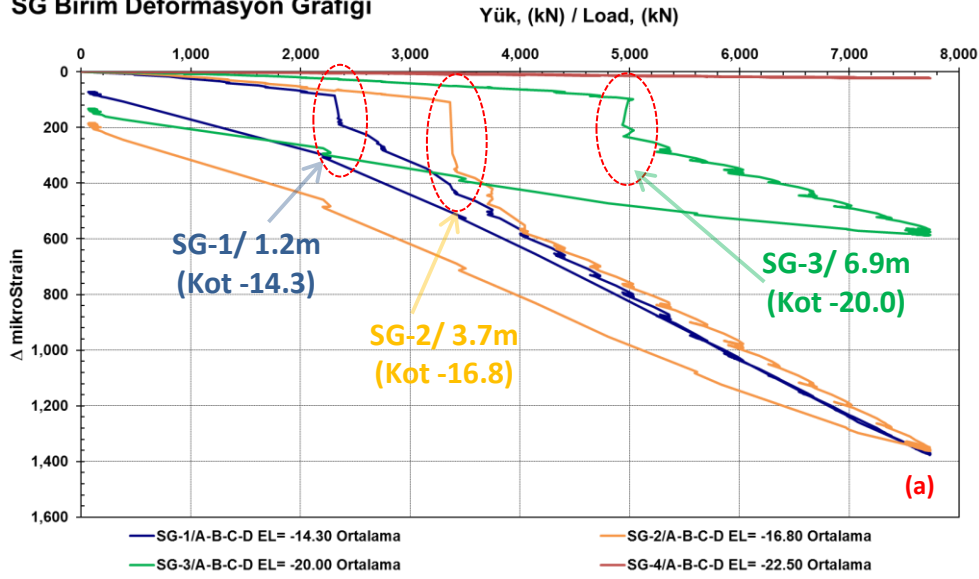


Şekil 9. (a) Kazık başında yük, kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman ve kazık uzaması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman – zaman grafiği (c) kazık başında yük – zaman grafiği.

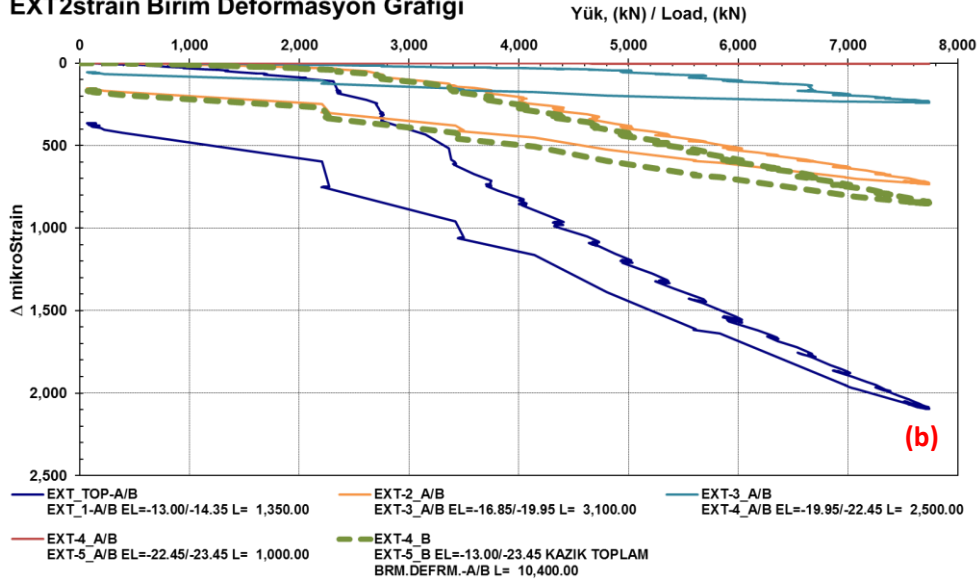
Kazık boyunca farklı seviyelerde ölçülen birim deformasyon verisi

Kazık başına tatbik edilen yukarı istikamette yük altında kazık boyunca farklı seviyelerde birim deformasyon ölçerlerden (VWSG/SB) elde edilen ve seyyar ekstansometre (EXT2strain) ankraj noktaları arasındaki mesafeler için ortalama birim deformasyon grafikleri Şekil 10'da verilmiştir. VWSG/SB birim uzama verisinde EXT2strain ortalama birim uzama verisine kıyasla ani birim uzama değişimi gayet belirgindir ve grafikteki ani sıçrama kazık kesitinde ilk çatlak gelişimi olarak değerlendirilmektedir. SG-1 seviyesinde (1.2m derinlik) ilk çatlak gelişimi kazık başında ~2.3 MN yükleme kademesine ve ~70 mikroStrain çekme birim deformasyon mertebesine tekabül etmektedir. Tahmin edilebileceği üzere en yüksek birim deformasyon SG-1 seviyesinde gözlenmekte ve daha derindeki birim deformasyon ölçer seviyelerinde ise azalarak gözlemlenmektedir. Çatlak gelişiminin SG-2 ve SG-3 seviyelerinde (3.7m ve 6.9m mesafede) yaklaşık sırasıyla ~3.4 MN ve ~5.0 MN kazık başı yükleme kademelerinde ve ~120 ve ~70 mikroStrain çekme birim uzama mertebelerinin gözlemlenmektedir. Bu durum çatlak gelişiminin derinlikle aşağı istikamette ilerlediğinin göstermektedir (Şekil 10(a)). Ancak, bu tesbit seyyar ekstansometre verisinde çok net olarak ayırt edilememektedir. Çatlayan ve geçiş zonuna yakın kesitte yerleştirilmiş bulunan bir birim deformasyon ölçer (SG) verisinde, seyyar ekstansometre (EXT2strain) ankraj noktaları arasındaki mesafede oluşan ortalama birim uzama değerlerine nazaran çok daha yüksek birim deformasyon değerlerinin ölçülmesi gayet tabiidir. Çatlak gelişimi maksatlı değerlendirilmelerde, birim deformasyon ölçer (SG) verisinin dikkate alınmasının daha sağlıklı olacağı aşikârdır.

**Kazık Başında Yük -
SG Birim Deformasyon Grafiği**



**Kazık Başında Yük -
EXT2strain Birim Deformasyon Grafiği**



Şekil 10. (a) Kazık başında yük - kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi grafiği (b) Kazık başında yük - kazık boyunca farklı aralıklarda ölçülen seyyar ekstansometre (EXT2strain) birim deformasyon değişimi grafiği.

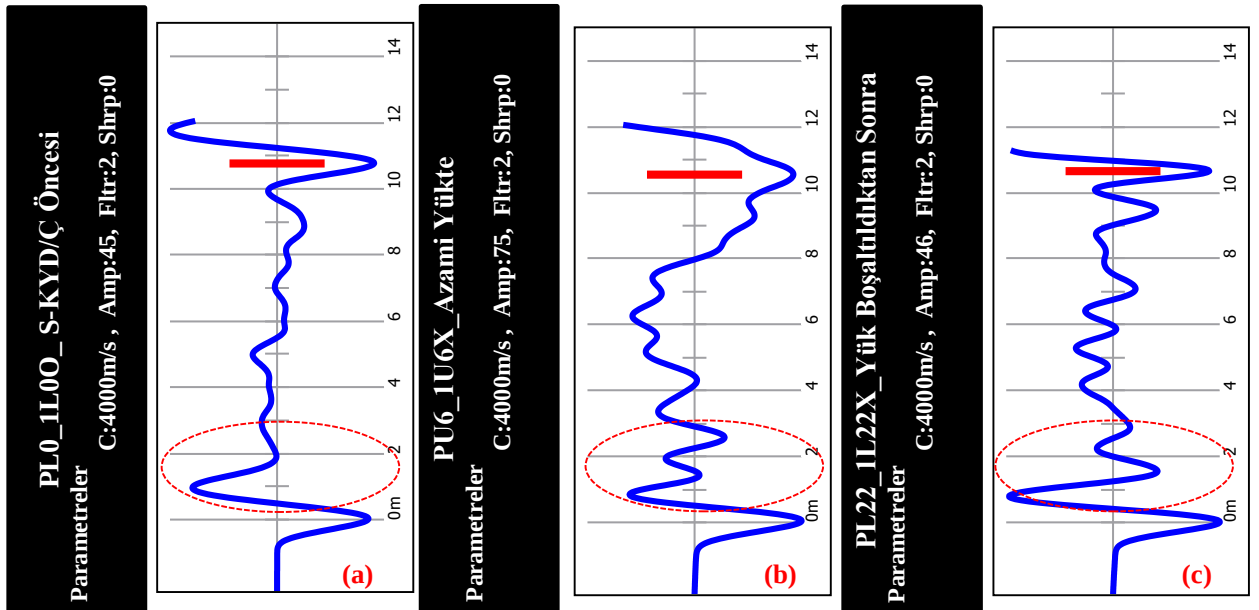
Kazık çekme deneyi öncesi, azami yükte ve deney sonrası yapılan kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD)

Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) öncesinde gerçekleştirilen kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) kapsamında reflektogram incelendiğinde çekiç darbesinin kazık başında mobilize olan süresinin nisbeten uzun (~2m) olduğu görülmektedir. Daha küçük bir çekiç kullanılarak daha kısa süreli darbe (0.5 – 1m) oluşturulabilmesi halinde kazık başına yakın olan çatlakların tesbitinin daha sağlıklı olabileceği Middendorp ve Schellingerhout (2006) çalışmasında da raporlanmıştır.

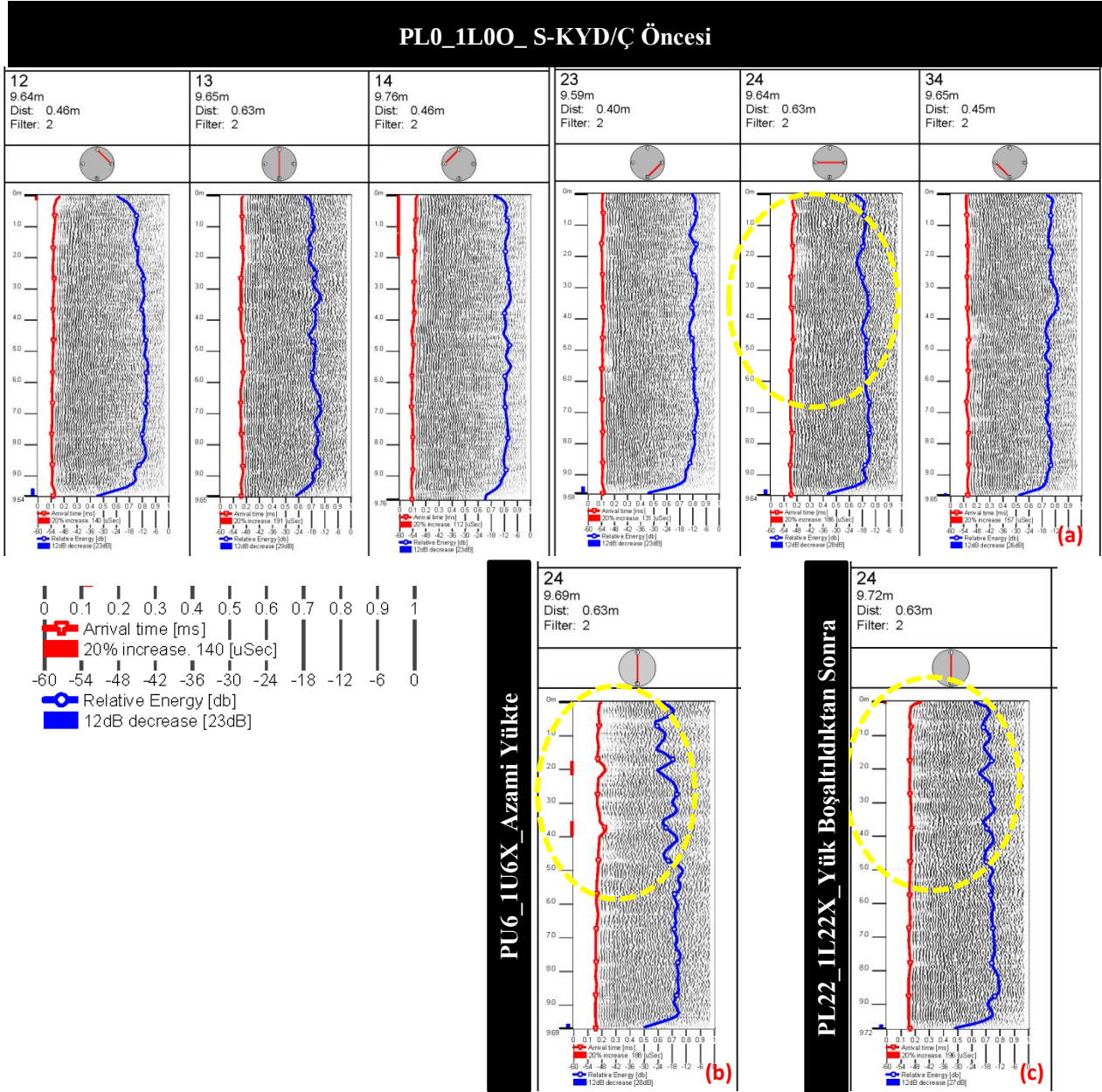
Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) kapsamında elde edilen reflektogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde 4.000m/sn dalga hızı için yaklaşık 10.5m derinliğinde belirgin bir uç sinyali elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, yaklaşık 5.5m mertebelerindeki bir derinlikte muhafaza borusunun bittiği bölgede anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) sinyali görülmektedir (Şekil 11(a)). Azami yükte yapılan KBD deneyinde ise mobilize olan yüksek şaft sürtünmesi ve mevcut olduğu düşünülen çatlak gelişimi birçok sinyal yansımasına sebebiyet vermekte ve reflektogramın sıhhatli bir şekilde değerlendirilebilmesine mani olmaktadır. Yükün boşaltılması akabinde yapılan KBD deneyinde ise kazık şaftında kitli kalan bir miktar rezidüel gerilmelerin mevcut olduğu aşîkârdır ancak azami yükteki şaft sürtünmesi ile kıyas-ı kabîl değildir. Reflektogram (>10 adet tekrar edilebilir darbe ortalaması) incelendiğinde kazık başından yaklaşık 1.5m de “Serbest Uç” yansıması görülmekte ve takip eden 3.0m, 4.5m vb tekrarlı sinyal tepe noktaları anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) sinyali olarak değerlendirilebileceği ve muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu düşünülmektedir.

Çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD) alıcı ve verici aynı seviyede olacak şekilde “*standart tarama usulü*” ile yapılmıştır. Eğer alıcı ve vericinin farklı seviyelerde konumlandırılarak “*offset tarama usulü*” ile veya 3B tomografi yapılması halinde kazıktaki çatlak gelişimi çok daha net görülebileceği düşünülmektedir. Buna rağmen çatlak gelişimi olan SG seviyelerinde dalga ilk varış zamanında >%20 gecikme (FAT, First Arrival Time, sinyal genliğine hassas olamayan özel FAT tesbit algoritması ile, Amir and Amir, 1998) ve ~7dB ($6\text{dB} < E_{\text{azalımı}} < 9\text{dB}$) Enerji azalımı tesbit edilmiştir (Şekil 12). Ölçülen bu değerler, Likins vd. (2007) tarafından tavsiye edilen şaft değerlendirme skalasına göre P/F (zayıf beton/sapma, Poor/Flaw) kategorisine tekabül etmektedir.

Bütün bu anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) tarafımızca SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilmesinde bir beis yoktur.



Şekil 11. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) reflektogramları (a) S-KYD/Ç öncesi (b) azamî yükte (c) yük boşaltıldıktan sonra.



Şekil 12. Çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD) grafikleri (a) S-KYD/Ç öncesi (b) azamî yükte (c) yük boşaltıldıktan sonra.

2.4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çatlak oluşma vetiresinin esasen iki ana aşaması bulunmaktadır: (1) ilk çatlak gelişimi ile başlayan “*muhtelif çatlak oluşma safhası*” ve (2) “*nihai çatlak oluşmuş safha*” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1). İlk safhada çatlak gelişimi rastgelelik arz ederek betondaki gerilmenin çekme mukavemetine ulaştığı en zayıf kesitte oluşmaktadır. Çatlamış kesitte beton-donatı aderansının yitirmeye başlaması, yüksek gerilmelere ve çatlak genişlemesine sebebiyet vermektedir. Çatlak gelişimi akabinde bu kesitte betondaki gerilme sıfıra düşmektedir (Borosnyoi ve Balazs, 2005). Betondaki gerilme çatlaktan uzaklaştıkça beton-donatı aderansı sebebiyle transfer boyu (s) kadar mesafede çatlaktan etkilenmeyen çekme gerilme değerine kadar artış göstermektedir.

“*Muhtelif çatlak oluşma safha*” sında, gelişen çatlaklarda birbirinden bağımsız olarak beton-donatı aderansı ilişkisi geçerli olmaktadır. Yük artışı ile çatlaklar gelişmekte ve ortalama çatlak mesafesi azalmaktadır. “*Nihai çatlak oluşmuş safhaya*” ulaşıldığında artık ilave yük altında çatlak ara mesafeleri asgari değere ulaştığı için yeni çatlak oluşumu gerçekleşmemekte ve bu safhada artık çatlak ara mesafesi sabit kalmakta ve de ilave yük artışı tamamen çatlak genişliğinin artmasına sebebiyet vermektedir (Borosnyoi ve Balazs, 2005). Bu duruma ilave olarak tatbik edilen bütün çekme gerilmelerinin tamamen donatılar tarafından taşındığı şeklinde de ifade edilebilmektedir.

Çalışma kapsamında birim deformasyon ölçer (SG) verisi çatlak gelişimi hususunda birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD) kapsamında tesbit edilen bütün anormallik/gariplik (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Kazık başı yük – birim deformasyon ilişkisinde Şekil 13’de görülebileceği üzere kazıkta ilk çatlak gelişimi yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon değerlerinde oluşmaktadır.

ACI 318-14 Manual (2014) uyarınca normal ağırlıkta bir beton için elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi;

$$E_{beton} = 4,700 * \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

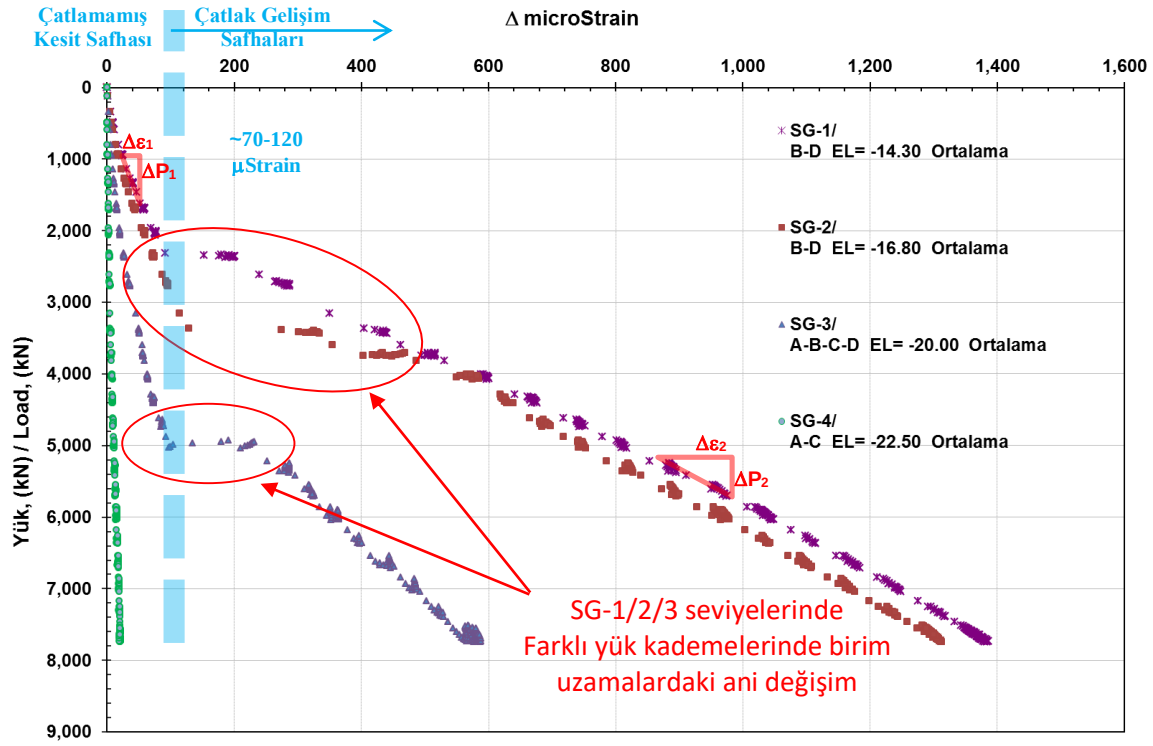
E_{beton} = Beton için elastisite modül

f'_c = Silindir beton numunesi için serbest basınç mukavemeti

formülüyle hesaplanmaktadır. Deney kazık betonu silindir numunesi için raporlanan ortalama serbest basınç mukavemeti (28 günlük) 29.9 MPa ‘dır. Buradan beton elastisite modülü 25.7 GPa olarak hesaplanmıştır. Kazık net beton kesiti dikkate alındığında E_{beton} (GN), beton için eksenel rijitlik 19.7 GN elde edilmiştir. Benzer yaklaşımla kazık boyuna donatı alanı dikkate alındığında ($E_{donatı}=210\text{GPa}$, $22\Phi 32\text{mm}$ için $A_{donatı}=17.693\text{mm}^2$ olmak üzere), donatı için eksenel rijitlik $E_{donatı}=3.7$ GN elde edilmektedir. Kompozit kazık kesiti için toplam kazık eksenel rijitliği (beton ve donatı için) $E_{kazık}=23.4$ GN olarak hesaplanmaktadır.

SG-1 seviyesinde (1.2m derinlikte) shaft sürtünmesi etkisi ihmal edilerek kazık başı yükünün değişmediği kabul edilmiştir. Kazık başı yükünün kademeli olarak artmasına karşılık benzer şekilde SG seviyelerinde shaft sürtünmesine bağlı olarak yük azalarak kazık boyunca transfer edilmektedir. Aktarılan yük kademesinde birim yük artışına bağlı gelişen birim deformasyon artışı kazık eksenel rijitliğine nisbetle artmaktadır. Bu da ilgili kesitteki yük ve birim deformasyon grafiğinin eğimine takabül etmektedir. Bu kapsamda Şekil 13’den takip edilebileceği üzere SG-1 seviyesinde birim kazık başı yükü değişimi – birim deformasyon değişimi grafiğinin çatlama safhadaki eğimi için 4.7 GN ve nihai çatlak oluşmuş safhadaki eğimi için ise 21.4 GN değerleri elde edilmektedir. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyinde (S-KYD/Ç) ölçülen SG verilerinden elde edilen bu değerler kompozit kesit için hesaplanan kazık eksenel rijitlik ve donatı için eksenel rijitlik değerleri ile

kıyaslanabilir mertebelerdedir. Buradan “*çatlamamış safha*” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “*nihai çatlak oluşmuş safha*” da ise donatı ile taşındığı söylenebileceği düşünülmektedir.



Şekil 13. Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi – kazık başı yükü grafiği

3. SONUÇ

Betonarme kazıklara kazık başından yukarı yönlü yük tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme gerilmesi kapasitesine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Çalışma kapsamında birim deformasyon ölçer (SG) verisi çatlak gelişimi hususunda birincil delil olarak dikkate alınmıştır. -Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve çapraz kuyu ultrason deneyi (Ç-KUD) kapsamında tespit edilen bütün anormallik/garıplık (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tespit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Doğrudan gözlemlenen delillere ilave olarak kazık eksenel rijitlik hesapları da paralellik arz etmektedir. Bu sonuç değerlendirildiğinde “*Çatlamamış safha*” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasındaki bölge olan “*nihai çatlak oluşmuş safha*” da ise donatı ile taşındığı şeklinde değerlendirilebileceği görülmektedir. Bu mekanizma çekme yüküne maruz betonarme kazıkların deneyde elde edilen yük-deplasman ilişkisinde bir akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir. Kazık malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasite hesaplamalarını shaft sürtünmesinden kaynaklı olmamasına rağmen sun’î bir şekilde etkilemektedir. Yapılmış olan deneyde, bu hadisenin yaklaşık 70-120 mikroStrain birim

deformasyon mertebelerinde gözlemlendiği, literatürdeki muhtelif çalışmalarda ise 50-150 mikroStrain mertebelerinde olduğu rapor edilmiştir, (Bicocchi, 2011, İnancı, 2018).

Elde edilen bu sonuçlara göre çekme yüküne maruz betonarme kazık tasarımında kazık boyunca oluşacak azami birim deformasyon değeri tahdidi, faydalı bir kazık tasarım sınır şartı olarak tavsiye edilebileceği düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, kazıkta mobilize olan azami birim deformasyonun 50-100 mikroStrain metebelerinde sınırlandırması ile çatlaktan arî bir kazık tasarımı yapılabilecektir (mevcut şartnamelerdeki çatlak kesit tasarımı çatlak gelişimine mani olmamaktadır). Ayrıca hesaplanan kazık kapasitesinin sunî olarak düşmemesine ve malzeme durabilitesi açısından da fayda sağlayacaktır. Ancak, bu kadar düşük birim deformasyon değerlerinin kazık tasarımında esas alınması beton çekme kapasitesi açısından gerekli iken, donatının çekme kapasitesinin çok sınırlı mertebelerde kalmasının ekonomik bir yaklaşım olmadığı unutulmamalıdır.

Çekme yüküne maruz betonarme kazıklarda, “kazık kapasite hesaplarına” ve “kazık çekme deney verilerine göre kazık kapasitesi tahmin yaklaşımlarına” çatlak gelişiminin ve çekme birim deformasyon etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi ve bu probleme çözüm üretilebilmesi için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee, American Concrete Institute, International Organization for Standardization (2014), “Building Code Requirements for Structural Concrete” (ACI 318-14) and Commentary. American Concrete Institute.
- Amir, E.I and Amir J.M. (1998), “Recent Advances in Ultrasonic Pile Testing”, Proc. 3rd Intl’ Geotechnical Seminar on Deep Foundation On Bored and Auger Piles, Ghent, pp. 181-185
- ASTM D3689/D3689M-07, (2013) e1., “Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- ASTM D5882-16, (2016), “Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- ASTM D6760-16, (2016), “Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- Bicocchi, N., (2011), “Structural and Geotechnical Interpretation of Strain Gauge Data from Laterally Loaded Reinforced Concrete Piles”, PhD Thesis, University of Southampton.
- Borosnyoi, G. and Balazs, G. (2005), “Models for flexural cracking in concrete: the state of the art”, Structural Concrete 6 No 2: 53-62.
- England, M.G. (2012), “On the Subject of Piles in Tension”. 680-693. 10.1061/9780784412084.0047.
- Fellenius, B.H. (1989), “Tangent Modulus of Piles Determined from Strain Data”. ASCE, Geotechnical Engineering Division, the 1989 Foundation Congress, F.H. Kulhawy, Editor, Vol. 1, pp. 500-510.

- Fields, K. and Bischoff, P. H. (2004), "Tension stiffening and cracking of high-strength reinforced concrete tension members", *ACI Structural Journal* 101(4): 447–456.
- İnanır, O.E. (2018), "Eksenel Yüklü Kazıklarda Yük Transfer İlişkisi ve Çekme Yüküne Maruz Fore Kazıklarda Süreklilik", *FC-TUGM Sempozyumu`Prof.Dr. Feyza Çinicioğlu Onuruna Teoriden Uygulamaya Geoteknik Mühendisliği Sempozyumu`, İstanbul Üniversitesi*, 10-05-2018, 92-106.
- Jardine, R.J. and Chow, F.C.(1996), "New design methods for offshore piles", *MTD Publication 96/103*, MTD, London.
- Liew, S.S., Khoo, C.M. and Tan, S.T. (2011), "Pile Performance in Weathered MetaSedimentary Formation and KL Limestone", *Corpus ID: 198924708*, Malaysia.
- Likins, G. E., Rausche, F., Webster, K. and Klesney, A. (2007), "Defect Analysis for CSL Testing". *Geo-Denver 2007 New Peaks in Geotechnics*.
- Middendorp, P., Schellingerhout, J., (2006), "Pile Integrity Testing in the Netherlands", *10th International Conference on Piling and Deep Foundations*, DFI , Amsterdam.
- Somayaji, S. and Shah, S. P. (1981), "Bond stress versus slip relationships and cracking response of tension members", *ACI Journal Proceedings* 78(3): 217–225.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$E_{donatı}$	: donatı için elastisite modül	E_{beton}	: Beton için elastisite modül
$A_{donatı}$	: toprak basıncı katsayısı	A_{beton}	: kompozit kazık malzemesinin tanjant modülü
L_{net}	: net kazık boyu	f'_c	: Silindir beton numunesi için serbest basınç mukavemeti
L_{toplam}	: toplam kazık boyu		

