

ÇEKME YÜKÜNE MARUZ BETONARME KAZIK DAVRANIŞININ ORJİNAL BİR YAKLAŞIM İLE İNCELENMESİ

AN INVESTIGATION OF THE BEHAVIOUR FOR CAST IN-SITU PILES WHICH ARE SUBJECT TO TENSION/UPLIFT LOAD WITH A NOVEL APPROACH

Orhan E. İNANIR¹, Mehmet M. BERİNGEN², Aykut ŞENOL³

ÖZET

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. Bu bildiride çatlak gelişiminin çekme yüküne maruz betonarme kazık davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ara mesafesi yaklaşık 6m olan komşu iki kazık üzerinde aksel statik çekme kazık yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Kazık çekme deneylerinden birincisinde deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilmiş ve ikincisinde de özel bir tertibat ile kazık tabanından çekilmiştir. Kazık başından çekilmesi durumu için deneyde uygulanan aksel çekme yükü altında yük deplasman ilişkisi ile aynı şartlardaki komşu kazık, tabandan yukarı istikamette çekilerek betonda basınç gerilmesi mobilize edilerek çekme yükü altında yük deplasman ilişkisi irdelenmiştir. Geliştirilen bu orijinal kazık yükleme deneyi ve kazık imalatı konvansiyonel olarak kazık başından çekilerek tatbik edilen çekme yükleme durumundaki problemleri bertaraf ettiği ve performans artışı sağladığı gözlemlenmiştir. Alttan yük uygulanan kazıkta daha yüksek kapasitesi ve aynı yükleme mertebelerinde daha düşük deplasman ölçülmüştür. Benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük – kazık başı deplasman ilişkisi için “Davisson Kazık Kapasitesi Tahmin Yöntemi” ile değerlendirilerek bir kıyaslaması yapıldığında alttan yük uygulanan kazıkta ~%146 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.

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

¹ Dr., 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



ABSTRACT

Crack development due to tensile stresses in reinforced concrete piles subjected to tensile load (bored pile, precast driven pile, cast-in-situ driven pile Vibrex, etc.) brings up integrity and long-term durability problems in piles. This paper investigates the effect of crack development on the behavior of reinforced concrete piles subjected to tensile load. In this context, an axial static tensile pile loading test was carried out on two adjacent piles with an interval of approximately 6 m. In the first pile pull test, the test pile was conventionally pulled from the pile head, and in the second one, it was pulled from the pile base with a unique device. For the case of pull from the pile head, the load-displacement relationship under the axial tensile load applied in the test and the adjacent pile under the same conditions were pulled upwards from the base. The compressive stress in the concrete was mobilized, and the load-displacement relationship under the tensile load was examined. It has been observed that this original pile loading test and pile manufacturing method eliminates the problems of conventionally applied tensile loading by pulling from the pile head and provides increased performance in the pile. Higher pile capacity and lower displacements at the same loading levels were measured in the pile loaded from below. When the capacity obtained by loading two adjacent identically bored piles in similar conditions in different ways was evaluated and compared with the "Davisson Pile Capacity Estimation Method" for the pile head load- pile head movement relationship, it was determined that a ~146% higher tensile capacity was achieved in the pile loaded from base.

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

1. GİRİŞ

Yerkabuğuna daha fazla yük aktaran yüksek ve endüstriyel yapılar ile kentleşme etkisiyle düşük mukevemet ve rijitliğe sahip alanlarda yapılaşma ihtiyacı kazıkların kullanımını artırmaktadır. Ancak kazıklar yüzeysel temellere göre daha zahmetli ve maliyetli olmalarının yanında statik ve dinamik yüklemeler altında karmaşık yük aktarma mekanizmalarına sahip yapısal elemanlardır. Kazık tasarımları proje kapsamında gerçekleştirilen zemin etütlerine göre uygulamadaki standart ve yönetmeliklere göre yapılırsa da imal edildikleri sahadaki zemin ve/veya kaya tabakalarındaki belirsizlikler söz konusudur. Bu belirsizliklerin ortaya çıkaracağı olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve kazıkların proje yükleri altında davranışını belirleyerek tasarımı teyit etmek veya düzeltmek için kazık yükleme deneyleri yapılmasına ihtiyaç vardır. Bu nedenle kazık yükleme deneylerinin yapılması yönetmeliklerle zorunlu hale getirilmiştir. Gelişen teknolojik imkanlar kazıkların enstrümante edilerek farklı yüklemeler altında kazık davranışının belirlenmesinin önünü açmıştır. Bu teknolojik imkanlar ile kazıklar enstrümante edilebilmekte ve uygulanan yükler altında kazık boyunca oluşan yük dağılımı belirlenebilmektedir. Performansa Dayalı Kazık Tasarımı (PDK-T) bu yük dağılımını dikkate almakta ve sahaya özgü, belirsizliklerin asgari düzeye indirildiği kazık tasarımları gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Kazıkların farklı yükleme durumları altındaki davranışı bu imkanlar çerçevesinde ayrıntılı olarak incelenebilmektedir.



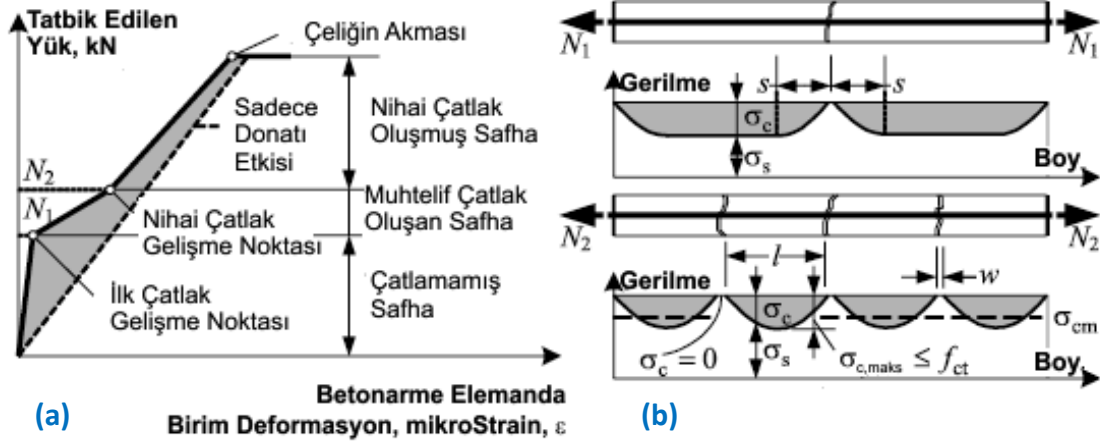
Betonarme kazıklarda çekme gerilmeleri sebebiyle oluşan çatlak gelişimi, kazıklarda bütünlük ve uzun vadede durabilite problemlerini gündeme getirmektedir. Betonarme kazıklara kazık başından yukarı istikamette yük tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme gerilmesi kapasitesine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Çatlak gelişimi kazığın yük-deplasman davranışını etkilemektedir. Bu durum kazık çekme deneylerinde kazık davranışının değerlendirilmesini ve t-z ilişkilerine bağlı simülasyonunun yapılmasını zora sokmaktadır. Esasen Başka bir deyişle, "Tekil Kazık- Zemin Etkileşim Modeli" sıhhatli bir şekilde elde olunamamaktadır. Bu durum daha çok araştırmacılar tarafından mobilize olan şaft direncinin istikamete bağlı olması ile açıklanmaya çalışılmıştır. Literatürde şaft direncinin kazığın hareket istikameti ile değişip değişmediği hususunda farklı görüşler ileri sürülse de Fellenius (2021) ve England (2012) çalışmalarında deplasman doğrultusunun şaft direnci üzerinde bir etkisi olmadığını, diğer bir deyişle kazık şaftında mobilize olan kayma gerilmesinin kazığın basınç veya çekme yüküne maruz kalmasından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Bu görüşe karşılık bazı araştırmacılar çekme yüküne maruz kazıkların şaft dirençlerinin, basınç yüküne maruz kazıklardan daha düşük olduğunu raporlamaktadırlar Jardine ve Chow (1996) ve Liew v.d. (2011).

Çekme yüklemesi sonucunda betonun çekme deformasyon kapasitesine ulaşıldığında çatlak gelişmektedir (Borosnyoi and Balazs, 2005, Biccocchi, 2011). Enstrümente edilmiş eksenel kazık çekme deneylerinde farklı beton malzemesi karakteristikleri ve donatı miktarları için İnanır, (2018 ve 2024) ve İnanır v.d. (2024) tarafından çatlak gelişimi açısından 50-150 mikroStrain sınır değerleri gözlemlendiği rapor edilmiştir. Biccocchi, (2011) çalışmasında ise 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 bölge, ikinci bölge ilk çatlak gelişiminden nihai çatlak gelişimi noktasına kadar olan muhtelif çatlak oluşma safhasındaki deformasyon davranışı sergilediği bölge ve üçüncü bölge ise nihai çatlak gelişimi noktasından donatı akma noktasına kadar olan deformasyon davranışı sergilediği bölgesidir. Fields ve Bischoff (2004) ise çekme yüküne maruz betonarme eleman için eksenel 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 sonrasında bu noktada betondaki gerilme sifıra düşmektedir.

Bu bildiri de çatlak gelişiminin çekme yüküne maruz betonarme kazık davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ara mesafesi yaklaşık 6m olan komşu iki kazık üzerinde eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Kazık çekme deneylerinde bir adet deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilerek yük tatbik edilmiş ve ayrıca özel bir tertibat ile kazık tabanından çekilecek şekilde imal edilerek yük tatbik edilmiştir. Kazık başından çekilmesi durumu için deneyde uygulanan eksenel çekme yükü altında yük deplasman ilişkisi ile aynı şartlardaki komşu kazık, tabandan yukarı istikamette çekilerek betonda basınç gerilmesi mobilize edilerek çekme yükü altında yük deplasman ilişkisi irdelenmiştir. Bu geliştirilen orijinal deney ve



imalat usulü konvansiyonel olarak kazık başından çekilerek tatbik edilen çekme yüklemeye durumundaki problemleri bertaraf ettiği ve kazığın yük deplasman performansında ve yük transfer ilişkisinde hatırı sayılır bir şekilde performans artışı sağladığı gözlemlenmiştir.



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

2. ZEMİN VE KAZIK ÖZELLİKLERİ

2.1. Zemin Durumu

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 (~+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.

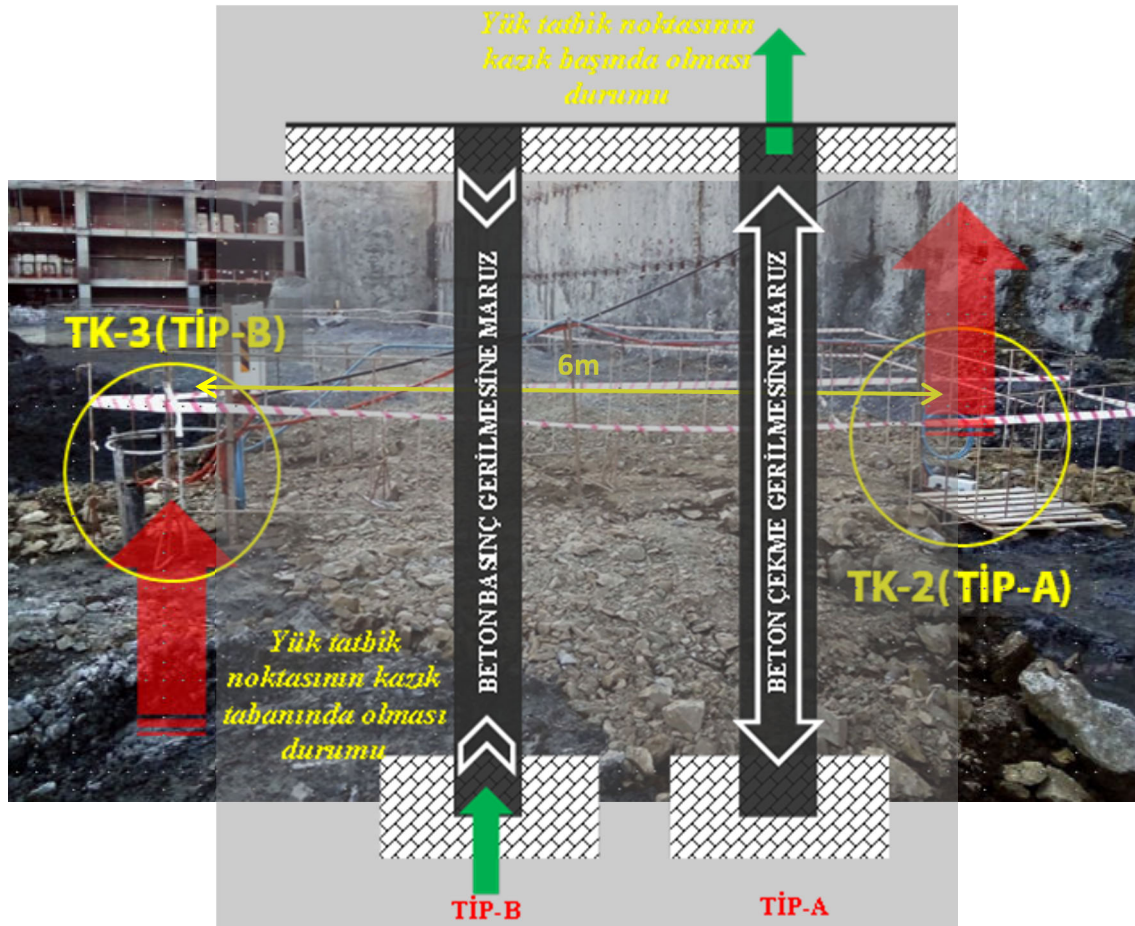
Tablo 1. Deney lokasyonunda zemin şartları

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. Kazık Özellikleri

Deneyler için imal edilen kazıklar TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) olarak adlandırılmıştır. TK-2 konvansiyel olarak üstten çekme uygulanan TİP-A kazıktır. TK-3 ise alttan yük uygulanan kazık olup TİP-B olarak sınıflandırılmaktadır. Deney kazıklarının ara mesafesi 6m olmak üzere kapasitelerinin ve kazık boyunca yük dağılımının belirlenebilmesi için “Enstrümante edilmiş aksel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç)” yapılmıştır (Şekil 2). Deney kazıkları 1000mm(OD) çapında ve 10.4m uzunlukta imal edilmiştir. Gömülü kazık boyu $L_{net}=10.1m$ 'dir. Buna göre Deney Platform Kotu -13.10, Temel Alt Kotu -13.40 ve Kazık Taban Kotu -23.50'dir. Kazıklar fore kazık tekniği ile kaya augeri kullanılarak ve kuyu stabilitesi için geçici muhafaza borusu kullanılarak imal edilmiştir. Tij tipi ekstansometre ve seyyar ekstansometre yerleştirilmesine yönelik kılıf borular (karşı 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 3 ve Şekil 4). Bunun ardından tremi borusu kullanılarak C35/45 sınıfı beton dökülmüş ve muhafaza borusu çekilerek imalat tamamlanmıştır.



Şekil 2. TK-2 Çekme deney kazığı için konvansiyonel olarak kazık başından yükleme durumu (TİP-A), TK-3 Çekme deney kazığı için kazık tabanından yükleme durumu (TİP-B) yerleşimi





Şekil 3. Enstrümente edilmiş TK-2 deney kazığı (TİP-A) donatı kafesi genel ve detay görünüşü.

2.1. Ölçüm Ekipmanları

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 olarak 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 şeklindedir (Şekil 5).

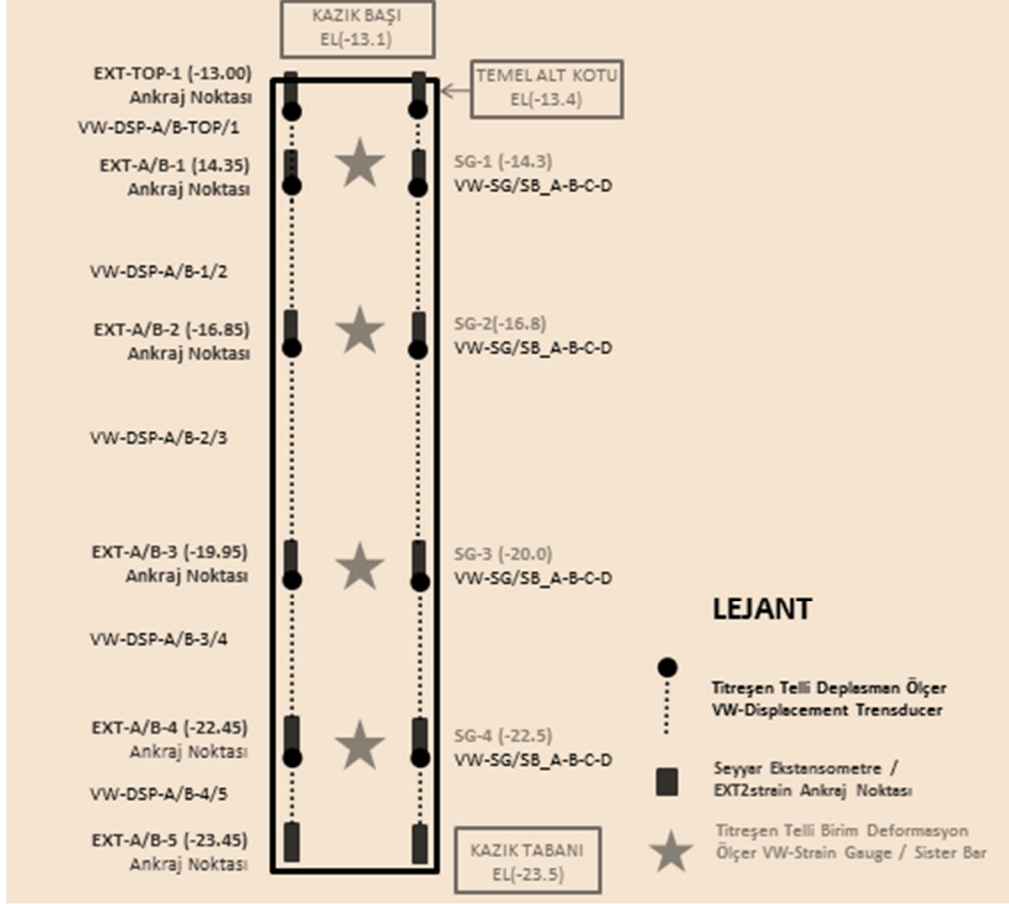




Şekil 4. Enstrümente edilmiş TK-3 deney kazığı (TIP-B) donatı kafesi genel ve detay görünüşü.

Kazık tabanındaki deplasmanların hesaplanabilmesi için tij tipi ekstansometre (T-EKST, Tell-Tale) karşılıklı iki (2) adet olmak üzere yerleştirilmiştir. Deney esnasında karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD, CSL/CHUM) maksadıyla kullanılan 2" çelik borulardan karşılıklı olan 2 adedine 6 ankraj noktalı seyyar ekstansometre (S-EKST, EXT2strain) yerleştirilmiştir. Bu sayede yaklaşık SG derinliklerinde oluşan deplasman doğrudan ölçülmüş ve ankraj noktaları arasında ölçülen kısalma/uzama değerleri kullanılarak ortalama birim deformasyon hesaplanmıştır. Deney kapsamında kullanılan enstrümantasyon ölçüm sistemleri genel görünüşleri Şekil 6'de ve listesi Tablo 2'de verilmiştir.

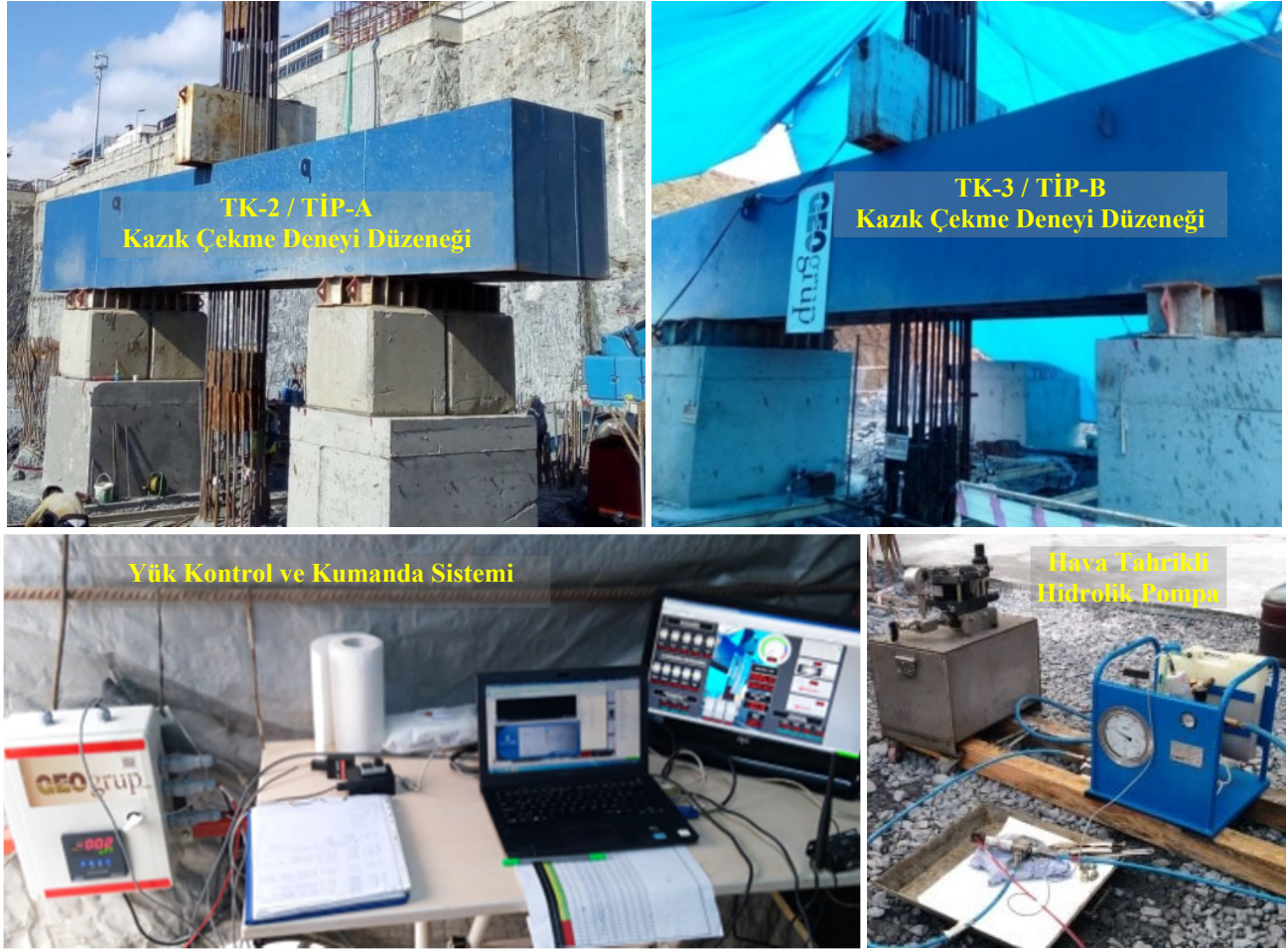
Deneyde kazık imalatı ve deney öncesi rezidüel gerilmeler ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilerek, deney öncesinde birim deformasyonlar sıfırlanmış ve "Rezidüel Gerilmeler" dikkate alınmamıştır.



Şekil 5. Donatı tipi birim deformasyon ölçer (VW-SG/SB) ve seyyar ekstansometre (EXT2strain) kazık boyunca yerleşimi şematik gösterimi



Şekil 6. TK-2 ve TK-3 Deney Kazıklarında (TİP-A ve TİP-B) yükleme deneyinde kullanılan ölçüm aletlerinden genel görünüş



Şekil 7 Deney düzeneği, yük kontrol ve kumanda sistemi ve hidrolik pompa genel görünüşü

2.2. Kazık Yükleme Deneyi

Yükleme deneyinde çekme kazığına yük, TK-2 (TİP-A) deney kazığında kazık ana donatılara kaynaklanan “yük aktarma borusu” ile / TK-3 (TİP-B) de ise yük aktarma borusuna özel tij somunları ile kilitlenen $D=63.5\text{mm}$ çaplı yüksek mukavemetli tijler (Dywidag GEWIPlus, akma yükü $F_{yk}=2.122\text{kN}$) vasıtası ile iki adet reaksiyon kazığına mesnetlenen deney kirisinden faydalınarak hidrolik krika ile tatbik edilmiştir. Deneylerde 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 yükler ise elektrik direnç cinsi yük hücresi (Electric resistance type load cell, LC/ER) ile ölçülmüştür. Ayrıca, TK-3 (TİP-B) deney kazığında kazık tabanına aktarılan yükler tabanda yük transfer plakasına kilitlenen yüksek mukavemetli tijlere yerleştirilen 4 adet 15 MN (%150 Yük Aşımı) kapasiteli Titreşen Telli Yük Hücresi VWLC kullanılarak ölçülmüştür. Kazık başına transfer edilen yükün eksenelliğinin sağlanabilmesi ve deney boyunca reaksiyon kazıklarının farklı deplasman yapması sebebiyle oluşabilecek potansiyel eksantrisite etkisinin bertaraf edilebilmesi amacıyla yarım küresel mafsal kullanılmıştır. Ayrıca, referans kirisine sabitlenen deplasman ölçerler, tij tipi (T-EKST / Tell-tale) ve seyyar ekstansometre (S-EKST / EXT2strain) tijlerinin izafi hareketlerini ölçmek için kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi ve genel görünüşü Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Referans kirişi üzerine



yerleştirilen “Barkodlu Invar Mira” ile referans kiriş hareketinin belirlenmesi için dış referansa sabitlenen DNA-03 Elektronik Nivo ile diğer sensörlerden alınan ölçümlerle senkronize bir şekilde 0.01mm hassasiyette otomatik olarak okuma alınmıştır. Ayrıca, deney boyunca deney kirişlerinin devrilmeye karşı güvenliği açısından boyuna ve enine istikamette kirişlerde dönme ölçümü yapılmıştır.

TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B), deneyleri kapsamında ASTM D3689-07, (2013) Prosedür-A “Hızlı Test” (Procedure A “Quick Test”) uyarınca yükleme programı uygulanmıştır (Tablo 3). Nihai deney yüküne (%100 = 7 MN) %5 kademelerde 15dk bekleme ile 20 adımda tek çevrimde ulaşılması hedeflenmiştir. Ancak, nihai yükte deney sistemi kapasitesinin imkan vereceğine kanaat getirilerek arttırılmış nihai yüke (%110 = 7.6 MN) 2 kademe daha yükleme yapılarak (1L-22X adımı) 22 adımda çıkılmıştır. Arttırılmış nihai 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 60s aralıklarla otomatik veri toplama sistemi ile yedekli olarak kaydedilmiştir.

Tablo 2. TK-2 ve TK-3 (TİP-A ve TİP-B) deney kazıklarında gerçekleştirilen eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (S-KYD/Ç) özet bilgileri.

<i>Açıklama</i>	<i>TK-2 (TİP-A) / TK-3 (TİP-B)</i>
Deney Kazığı	$D=1.000mm, L_{toplam}=10.4m$
Deney Düzenegi	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 – ~7.6 MN (S-KYD/ Ç)-----TK-2 (TİP-A) Gerçekleşen ~%110 – ~7.6 MN (S-KYD/ Ç)-----TK-3 (TİP-B)
Hidrolik Teçhizat	15.000 kN kapasiteli Hidrolik Kriko
Yük Kontrolü	Oransal Servo Valf ile Hava tahrikli hidrolik pompa kontrolü Encardio-Rite ELC-150S-H High Capacity Resistive Type Solid Load Cell 1adet x 12.5 MN
Yük Hücresi	Dong-A Geovan Co. GV-2409 Vibrating Wire Load Cell 4adet x 1.5 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	Wika S-10 Model 1 adet basınç ölçer
Veri Kayıt Ekipmanı	RST Instruments Flexdaq Model Data Logger 1 adet Campbell Scientific CR6 Otomatik Rasat Cihazı
Veri Kayıt Aralığı	60 Saniye



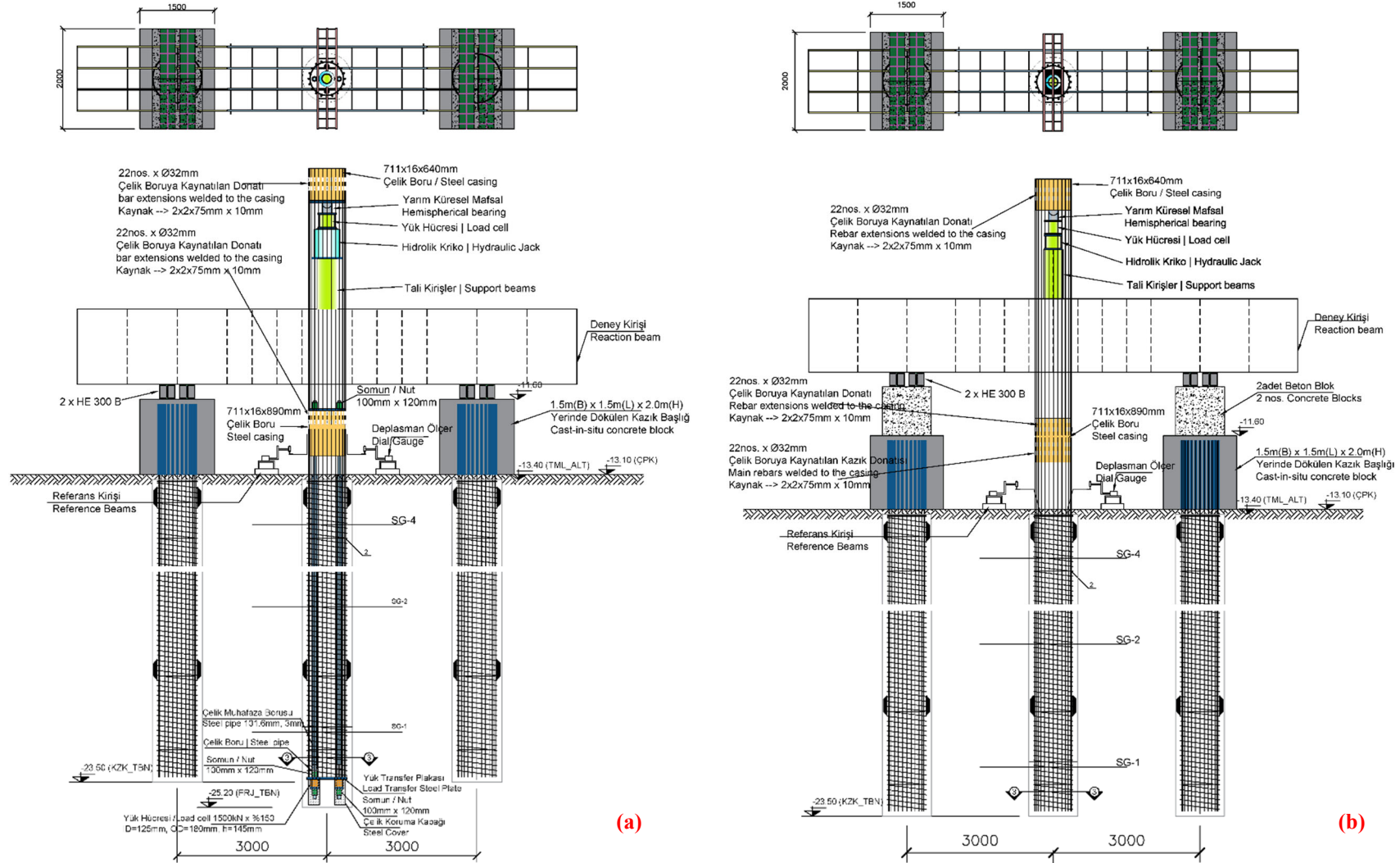
Tablo 3. TK-2 ve TK-3 (TİP-A ve TİP-B) KYD için yükleme programı

Çevrim	Pompa Basıncı (Bar)	Deney Yüğü (kN)	Kademe Yüğünün Azami Yüğe Oranı (%)	Yükleme Kademesi		
				Azami Yükleme Süresi (Dk)	Kriter	
1	L-	0	0	0	0	
1	L-	1	34	349	5	15
1	L-	2	69	698	10	15
1	L-	3	104	1046	15	15
1	L-	4	138	1395	20	15
1	L-	5	173	1744	25	15
1	L-	6	207	2093	30	15
1	L-	7	242	2441	35	15
1	L-	8	277	2790	40	15
1	L-	9	311	3139	45	15
1	L-	10	346	3488	50	15
1	L-	11	381	3836	55	15
1	L-	12	415	4185	60	15
1	L-	13	450	4534	65	15
1	L-	14	484	4883	70	15
1	L-	15	519	5231	75	15
1	L-	16	554	5580	80	15
1	L-	17	588	5929	85	15
1	L-	18	623	6278	90	15
1	L-	19	658	6626	95	15
1	L-	20	692	6975	100	15
1	L-	21	727	7324	105	15
1	L-	22	761	7673	110	60
1	U-	1	692	6975	100	15
1	U-	2	554	5580	80	15
1	U-	3	415	4185	60	15
1	U-	4	277	2790	40	15
1	U-	5	138	1395	20	15
1	U-	6	0	0	0	60

M/D



Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazık Davranışının
Orijinal Bir Yaklaşım ile İncelenmesi



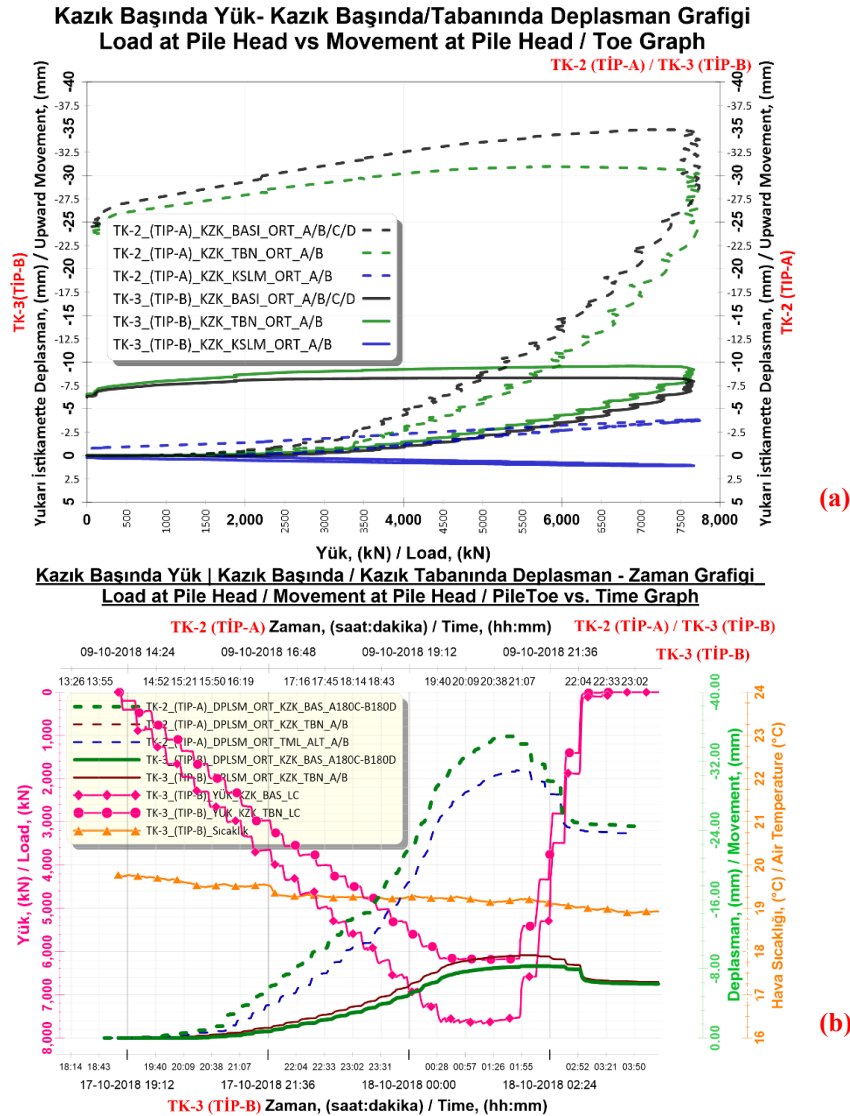
Şekil 8 (a) TK-3 Çekme deney kazığı için kazık tabanından yükleme durumu (TİP-B) ve (b) TK-2 Çekme deney kazığı için konvansiyonel olarak kazık başından yükleme durumu (TİP-A), deney düzeneği şematik gösterimi



2.3. Kazık Yükleme Deneyi Sonuçları

Deney Kazığı Yük-Deplasman Davranışı

TİP-A ve TİP-B, aksel statik çekme kazık yükleme deneyleri (S-KYD/Ç) kazık imalatından yaklaşık 28 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Arttırılmış nihai deney yükünde (1-L-22-X) kazık başı yukarı istikamette ortalama deplasmanı TİP-A için -34.73mm / TİP-B için ise -8.17mm ve kazık tabanı yukarı istikamette ortalama deplasmanı TİP-A için -30.42mm / TİP-B için -9.44mm olarak ölçülmüştür (Şekil 9.(a)). Kazık Başında Yük – Zaman ve Kazık Başında / Kazık Tabanında Yukarı İstikamette Ortalama Deplasman – Zaman Grafikleri ise (Şekil 9.(b)) verilmiştir. Kazık tabanında hesaplanan deplasman değerleri, tij tipi ekstansometre ölçümleri kullanılarak ve kazık taban yükü ise doğrudan tabandaki yük hücresi ölçümleri ile elde edilmiştir.



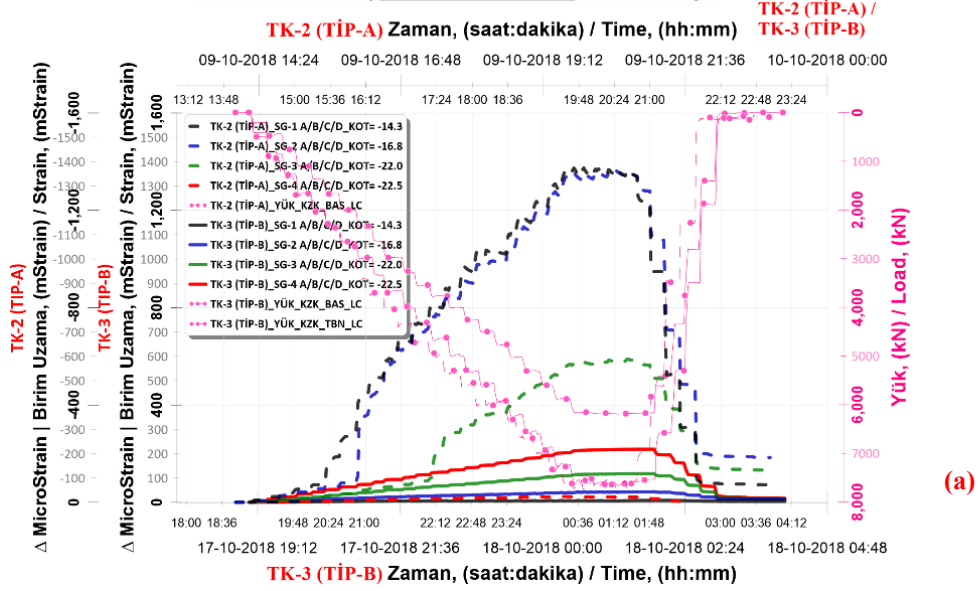
Şekil 9. TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Kazık başında yük - kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman ve kazık uzaması grafiği (b) Kazık başında / kazık tabanında yukarı istikamette ortalama deplasman / kazık başında yük – zaman grafiği.



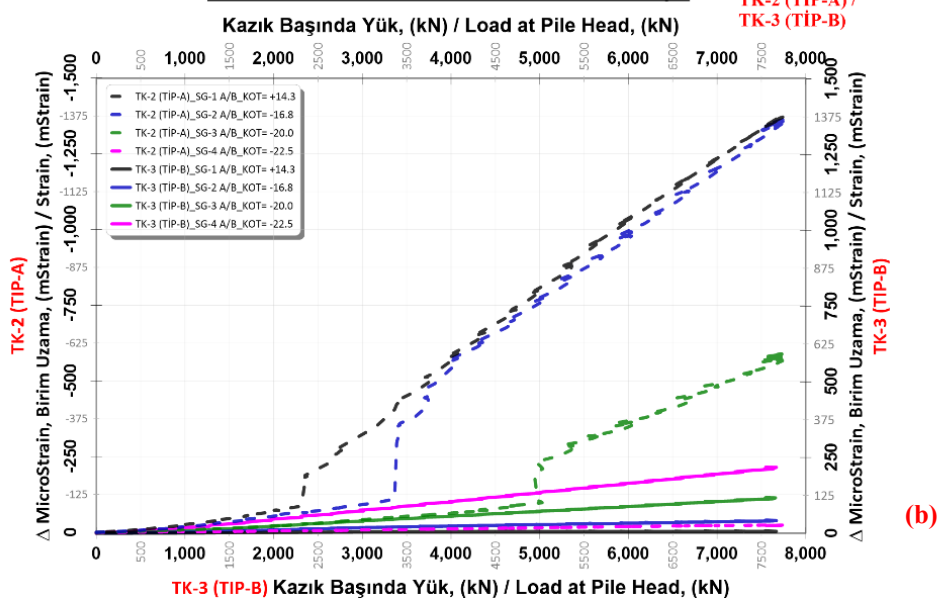
Kazık Boyunca Farklı Seviyelerde Ölçülen Birim Deformasyonlar

Kazık boyunca farklı seviyelerde ölçülen birim deformasyonlar Kazık başına tatbik edilen çekme yükü altında kazık boyunca farklı seviyelerde birim deformasyon ölçerlerden (VWSG/SB) elde edilen grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 10.(a)'da verilmiştir.

Kazık Başında Yük | Farklı Strain Gauge Seviyelerinde Birim Deformasyon - Zaman Grafiği
Load at Pile Head | Strain at SG Levels vs. Time Graph

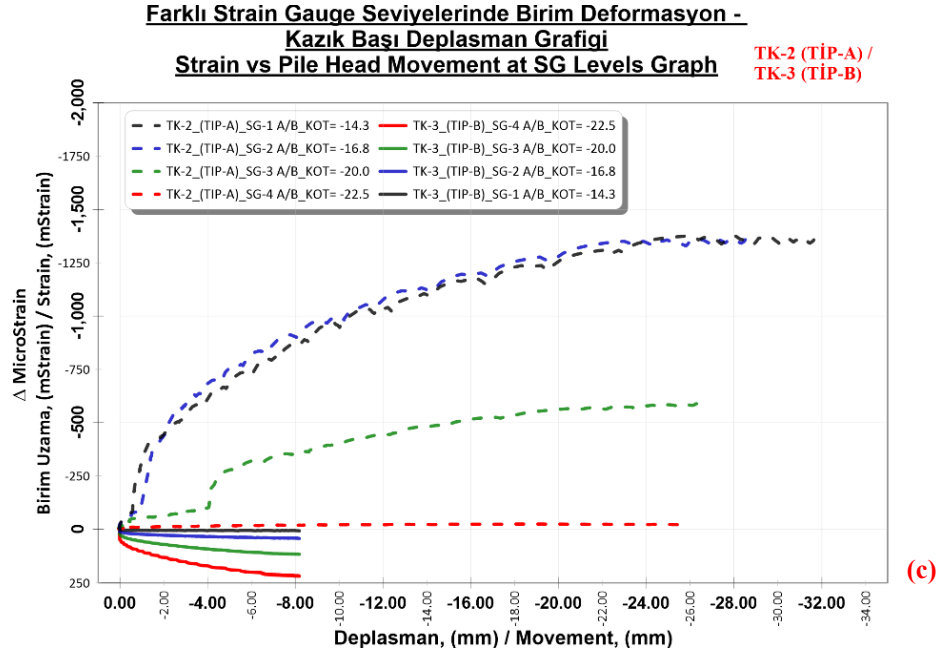


Kazık Başında Yük - Farklı Strain Gauge Seviyelerinde Birim Deformasyon Grafiği
Load at Pile Head vs. Strain at SG Levels Graph



Şekil 10. TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Kazık başında / tabanında yük / VWSG seviyelerindeki birim deformasyon – zaman grafiği, (b) Kazık başında yük – VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (c) VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) ve VWSG seviyelerindeki deplasman grafiği.





Şekil 9. (devam) TK-2 (TİP-A) ve TK-3 (TİP-B) için kıyaslamalı (a) Kazık başında / tabanında yük / VWSG seviyelerindeki birim deformasyon – zaman grafiği, (b) Kazık başında yük – VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) grafiği, (c) VWSG seviyelerindeki birim deformasyon (+basınç, -çekme) ve VWSG seviyelerindeki deplasman grafiği.

TİP-A ve TİP-B gerek seygar ekstansometre gerekse SG deney birim deformasyon verileri incelendiğinde farklı davranış göstermektedir. Nihai deney yükünde;

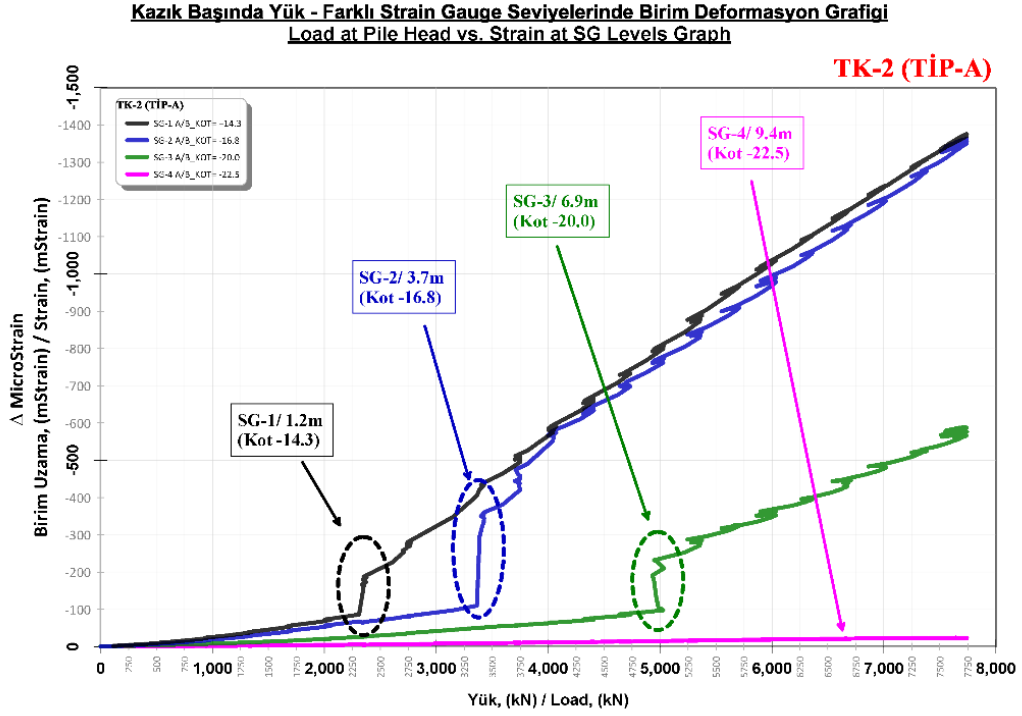
- *TK-2 (TİP-A) deneyinde VWSG birim deformasyon değerleri -1.356 mikroStrain (SG-1 A/B_KOT= -14.3), S-EKST ortalama birim deformasyon değerleri maksimum -2.083 mikroStrain (S-EKST_1_A/B_KZK-BAS_KOT=-14.35/-13.10) mertebelerinde*
- *TK-3 (TİP-B) deneyinde VWSG birim deformasyon maksimum değerleri +218 mikroStrain (SG-1 A/B_KOT= -14.3), S-EKST ortalama birim deformasyon maksimum değerleri +212 mikroStrain (S-EKST_1_A/B_KZK-BAS_KOT=-14.35/-13.10) mertebelerinde*

ölçülmüştür Şekil 10 (a)-(b)-(c). Benzer zemin durumlarında ve yük mertebelerinde ancak farklı yükleme durumunda betonarme kazık elemanının iç gerilmeleri açısından çok farklı davranış sergilediği net bir şekilde görülmektedir.

Ayrıca, TİP-A betonarme kazık elemanın çekmeye çalışıldığı yükleme durumunda VWSG/SB birim deformasyon (birim uzama) verisinde ani birim uzama değişimi gayet belirgindir ve grafikteki ani sıçrama kazık kesitinde betonun çekme mukavemetinin aşıldığı kesitteki ilk çatlak gelişimi olarak değerlendirilmektedir. Bu anomali TİP-B betonarme kazık elemanın basınca çalıştırıldığı yükleme durumunda VWSG/SB birim deformasyon (birim kısalma) verisinde ani değişim yaşanmadığı net bir şekilde görülmektedir (Şekil 10 (a)-(b)-(c)).



TİP-A yükleme durumunda 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 ilerlediğini göstermektedir (Şekil 11).



Şekil 11. Kazık başında yük – kazık boyunca farklı seviyelerde (VWSG/SB) birim deformasyon değişimi grafiği

2.4. Deney Kazıklarında Tahribatsız Kalite Kontrol Deneyleri

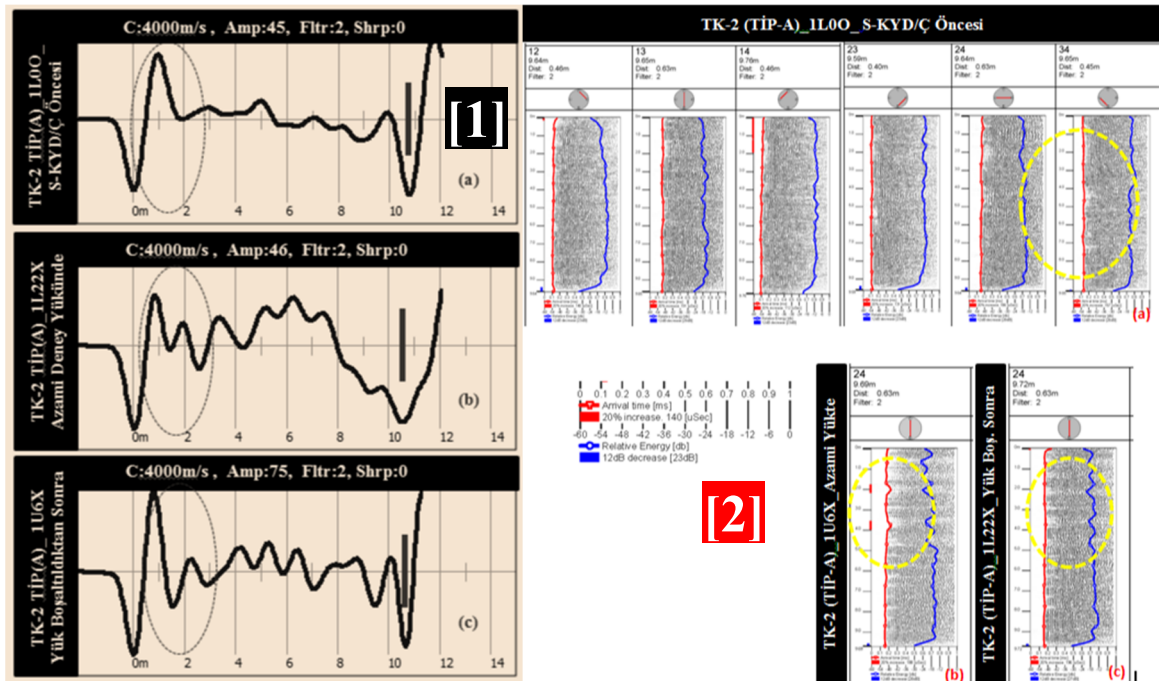
Betonarme deney kazıklarının süreklilik durumu çekme deneyi öncesi, nihai yükte ve deney sonrası Kazık Bütünlük/Süreklilik Deneyi (KBD) ASTM D5882.16 (2016) uyarınca ve Karşı Kuyu Ultrason Deneyi (K-KUD) deneyleri ise ASTM D6760.16 (2016) uyarınca yapılmıştır. Eksenel statik çekme kazık yükleme deneyi (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 12). Nihai yükte yapılan KBD deneyinde ise mobilize olan yüksek şaft direnci ve mevcut olduğu düşünülen çatlak gelişimi birçok sinyal yansımalarına sebebiyet vermekte ve reflektogramın sıhhatli bir şekilde değerlendirilebilmesine mani olmaktadır. Yükün boşaltılması akabinde yapılan KBD deneyinde ise kazık şaftında kilitli kalan bir miktar rezidüel gerilmelerin mevcut olduğu aşikârdır ancak nihai yükteki şaft direnci 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.

Karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) alıcı ve verici aynı seviyede olacak şekilde “standart tarama usulü” ile yapılmıştır. Eğer alıcı ve vericinin farklı seviyelerde konumlandırılarak “ofset tarama usulü” ile veya 3B tomografi yapılması halinde kazıktaki çatlak gelişimi daha net görülebileceği düşünülmektedir. Buna rağmen çatlak gelişimi olan SG seviyelerinde dalga ilk varış zamanında >%20 gecikme (FAT, First Arrival Time, sinyal genliğine hassas olmayan özel FAT tesbit algoritması ile (Amir ve Amir, 1998) ve ~7dB ($6\text{dB} < E_{\text{azalımı}} < 9\text{dB}$) Enerji azalımı tesbit edilmiştir. Bu değerler, Likins v.d. (2007) çalışmasında tavsiye edilen şaft değerlendirme skalasına göre P/F (zayıf beton/sapma, Poor/Flaw) kategorisine tekabül etmektedir. Bütün bu anormallik/gariplik (anomaly) ve sapma (flaw) SG ölçümleri ile tesbit edilen çatlak gelişimini destekleyici yöndedir.



Şekil 12. [1] TİP A Deney Kazığı bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) reflektogramları (1-a) S-KYD/Ç öncesi (1-b) azamî deney yükünde (1-c) yük boşaltıldıktan sonra, [2] Karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) grafikleri (2-a) S-KYD/Ç öncesi (2-b) azamî yükte (2-c) yük boşaltıldıktan sonra.



2.5. Kazık Yükleme Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Betonarme elemanlarda çatlak oluşumunun iki ana aşaması bulunmaktadır. Bu aşamalar (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.

TİP-A deney kazığı konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumu için birim deformasyon ölçer (SG) verisi çatlak gelişimi hususunda birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve karşı kuyu ultrason deneyi (K-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 uyarınca normal ağırlıkta bir beton için elastisite modülü ve serbest basınç mukavemeti ilişkisi;

$$E_{beton} = 4.700 \cdot \sqrt{f_c'} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

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 EA_{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 $EA_{donatı}=3.7$ GN elde edilmektedir. Kompozit kazık kesiti için toplam kazık eksenel rijitliği (beton ve donatı için) $EA_{kazık}=23.4$ GN olarak hesaplanmaktadır.

SG-1 seviyesinde (1.2m derinlikte) shaft direnci etkisi ihmal edilerek kazık başı yükünün değişmediği kabul edilmiştir. Kazık başı yükünün kademeli olarak artmasına karşılık benzer



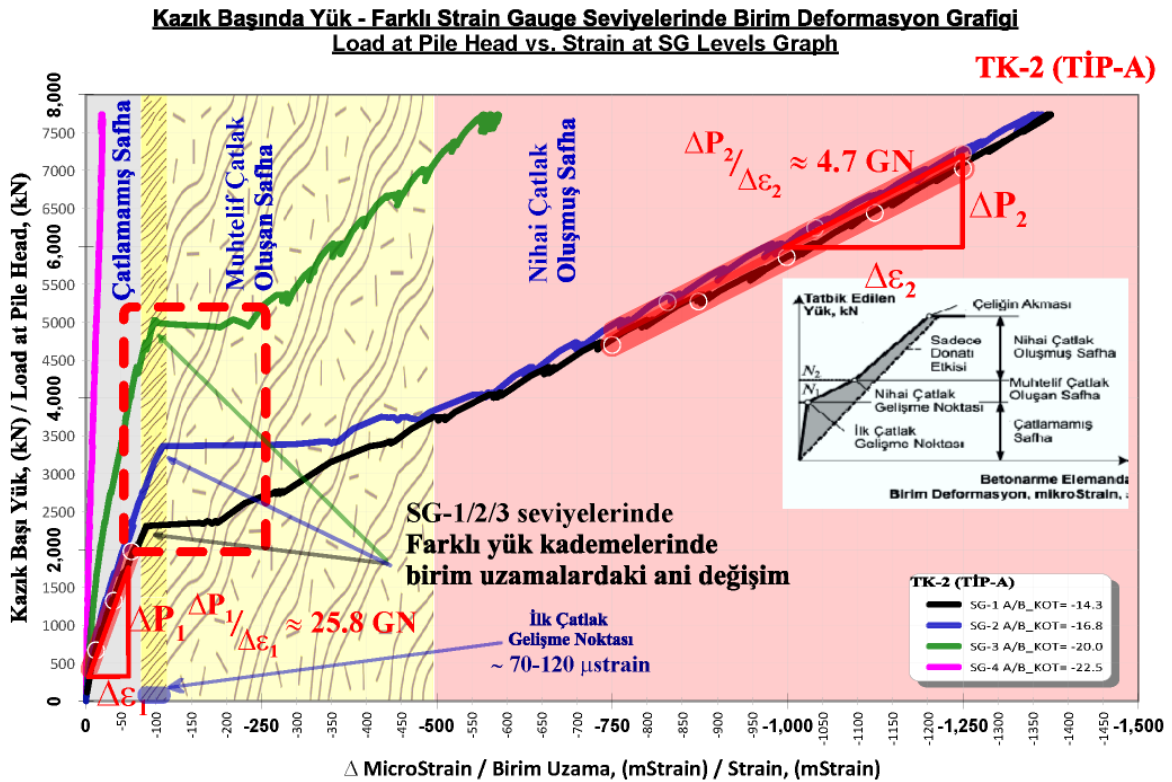
şekilde SG seviyelerinde şaft direncine bağlı olarak yük azalarak kazık boyunca transfer edilmektedir. Aktarılan yük kademesinde birim yük artışına bağlı gelişen birim deformasyon artışı kazık eksenel rijitliğine nisbetle artmaktadır. Bu da ilgili kesitteki yük ve birim deformasyon grafiğinin eğimine takabül etmektedir. Bu kapsamda Şekil 13'den takip edilebileceği üzere SG-1 seviyesinde birim kazık başı yükü değişimi – birim deformasyon değişimi grafiğinin çatlamamış safhadaki eğimi için

$$EA_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta \varepsilon_1} = 25.8 \text{ GN} \quad (EA_{\text{kazık}} \approx 23.4 \text{ GN})$$

ve nihai çatlak oluşmuş safhadaki eğimi için ise

$$EA_2 = \frac{\Delta P_2}{\Delta \varepsilon_2} = 4.7 \text{ GN} \quad (EA_{\text{donatı}} \approx 3.7 \text{ GN})$$

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 mertebelerde olduğu görülmektedir. Buradan “çatlamamış safha” da yükün kazık kompozit kesiti ile taşındığı ve ilk çatlak gelişme noktası sonrasında bölge olan “nihai çatlak oluşmuş safha” da ise donatı ile taşındığı söylenebileceği söylenebilir.



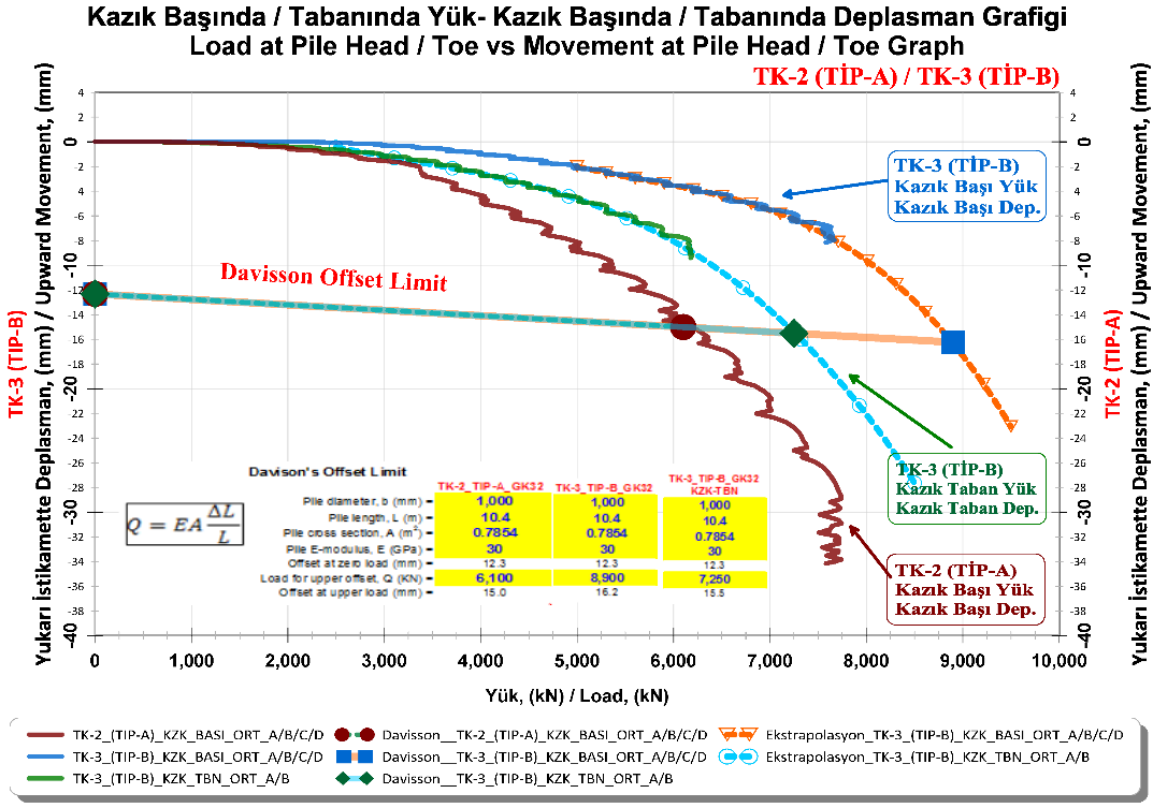
Şekil 13. Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi – kazık başı yükü grafiği

Bu mekanizma çekme yüküne maruz betonarme kazıkların deneyde elde edilen yük-deplasman ilişkisinde bir akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir Şekil 9.(a). TİP-A deney kazığında konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük – kazık başı deplasman ilişkisinde



yaklaşık 3.250 kN mertebelerinde bu etki görülmektedir. TİP-B deney kazığında kazık tabanından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük – kazık başı deplasman ve kazık tabanı yük – kazık tabanı deplasman ilişkisinde böyle bir akma etkisi gözlenmemiştir. Bu sebeble deplasman gelişimi sınırlı kalmıştır.

TİP-A deney kazığı malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasitesini etkilemektedir. TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktası farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber genel bir kıyaslama maksadıyla, kazık taşıma kapasitesi tahmin metodu Davisson Metodu (Fellenius, 2024) ile kazık başı yük ve kazık başı deplasman için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kazık tabanı yük ve kazık tabanı deplasman için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir (TİP-B deneyinde kazık deplasmanı sınırlı miktarda olduğundan kazık kapasite tahmini yapılabilmesi için yük-deplasman eğrileri ekstrapole edilmiştir). Bu da benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başı yük – kazık başı deplasmanı ilişkisine göre Davisson Metodu ile > ~%146 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaştığı anlamına gelmektedir.



Şekil 14. Farklı SG seviyelerindeki birim deformasyon değişimi – kazık başı yükü grafığı



3. SONUÇLAR

Betonarme kazıklarda konvansiyonel olarak kazık başından çekme yükü tatbik edilmesi ve bu yükün beton çekme mukavemetine ulaşması halinde en zayıf kesitte çatlak gelişimi söz konusu olmaktadır. Bu makalede birim deformasyon ölçer (SG) verisi çatlak gelişimi için birincil delil olarak dikkate alınmıştır. Kazık bütünlük/süreklilik deneyi (KBD) ve karşı kuyu ultrason deneyi (K-KUD) kapsamında tesbit edilen bütün anormallik/garıplik (anomaly) ve sapmaların (flaw) muhtemel sebebinin kazıkta çatlak gelişimi olduğu ve SG ölçümleri ile tespit edilen çatlak gelişimini destekleyici deliller olarak değerlendirilmiştir. Kazık eksenel rijitlik hesapları da bu ölçüm sonuçları ile uyusmaktadır. Bu durum 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 sonucuna ulaşılmaktadır.

Konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda TİP-A deney kazığında ölçülen kazık başı yük – kazık başı deplasman ilişkisinde akma etkisi (yük deplasman eğrisinde bir kırılma) oluşmasına sebebiyet vermektedir ve bu mekanizma yaklaşık 3.250 kN mertebelerinde görülmektedir. Kazık malzeme özelliğindeki değişim, kazık kapasitesini düşürmekte ve betonarme çatlamış kesit taşıma gücüne bağlı kılmaktadır. Yapılmış olan TİP-A deneyinde, bu hadisenin yaklaşık 70-120 mikroStrain birim deformasyon mertebelerinde gözlemlendiği, literatürdeki muhtelif çalışmalarda ise 50-150 mikroStrain mertebelerinde olduğu rapor edilmiştir (İnanır, 2018-2024; İnanır v.d., 2024; Bicocchi, 2011).

TİP-B deney kazığında kazık tabanından çekilmesi durumunda ölçülen kazık başı yük – kazık başı deplasman ve kazık tabanı yük – kazık tabanı deplasman ilişkisinde böyle bir akma etkisi gözlenmemiştir. Bu sebeple deplasman gelişimi sınırlı kalmıştır. TİP-A ve TİP-B yük tatbik noktasının farklı olması sebebiyle doğrudan karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla beraber, Davisson kazık taşıma kapasitesi tahmin yöntemi ile kazık başı yükü ve kazık başı deplasmanı için yapılan analizde kazık kapasitesi TİP-A için 6.1MN iken TİP-B için 8.9MN ve kazık tabanı yük – kazık tabanı deplasman için yapılan analizde ise TİP-B için 7.3MN olarak belirlenmiştir. Bu sonuç benzer şartlarda iki komşu eş fore kazığın farklı tarzda yüklenmesiyle elde edilen kapasitenin kazık başındaki yük – kazık başı deplasman ilişkisine göre tabandan yüklü kazıkta ~%146 mertebelerinde kazık tabanındaki yük – kazık tabanı deplasman ilişkisi kıyaslamasına göre ise ~%120 mertebelerinde daha yüksek çekme kapasitesine ulaşıldığını göstermektedir.

Konvansiyonel olarak kazık başından çekilmesi durumunda elde edilen bu sonuçlara göre çekme yüküne maruz betonarme kazık tasarımında kazık boyunca oluşacak nihai birim deformasyon değeri tahdidi, faydalı bir kazık tasarım sınır şartı olarak tavsiye edilebileceği düşünülmektedir. Diğer bir deyişle, kazıkta mobilize olan maksimum birim deformasyonun 50-100 mikroStrain metebelerinde sınırlandırması ile çatlaksız bir kazık tasarımı yapılabilecektir (mevcut şartnamelerdeki çatlamış kesit tasarımı çatlak gelişimine mani olmamaktadır). Ayrıca tasarımda öngörülen kazık kapasitesindeki sun’î olarak azalmanın önüne geçilecek ve malzeme durabilitesi artacaktır. 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 dikkate alınmalıdır.

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 vardır.

TİP-B’de olduğu gibi yükün kazık tabanından uygulamasında kullanılan özel düzenek ile kazık tabanından çekilmesi durumu uygulama pratiği ve betonarme çekme kazık tasarımı hususunda çekme kapasitesi ve uzun vadede durabiliteye etkisi açısından faydalı bir alternatif olabileceği 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.
- Akçay Aldanmaz, B. (2020). Karma Lifli Betonların Tek Eksenli Çekme Altında Çatlak Yapısının İncelenmesi. Teknik Dergi, 31(1), 9773-9787. <https://doi.org/10.18400/tekderg.419819>
- 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
- Biocchi, 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.
- Fellenius, B.H., (2024). “Basics of Foundation Design”, Electronic Edition, www.Fellenius.net.
- 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.
- İnanır, O.E., İnanır, M. (2022), “Integrity of Bored Piles Under Tension”, 11th International Stress Wave Conference, September 20-23 2022 Rotterdam The Netherlands,
- İnanır, O.E., Berilgen, M.M., Şenol, A. (2022), “Çekme Yüküne Maruz Betonarme Kazıklarda Çatlak Gelişimi”, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı, 29-30 Eylül 2022 Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- İnanır, O.E., (2024). Eksenel Statik Çekme Yüküne Maruz Betonarme Tekil Kazık Davranışı ve Orijinal Bir Kazık Deney ve İmalat Yaklaşımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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
$A_{donatı}$	Donatı kesit alanı	A_{beton}	Beton kesit alanı
L_{net}	Net kazık boyu	EA	Eksenel rijitlik
L_{toplam}	Toplam kazık boyu	P	Kazık başı yükü
f'_c	Silindir beton numunesi için serbest basınç mukavemeti	ϵ	Birim deformasyon
σ_{ct}	Beton çekme mukavemeti	F_{yk}	GEWIPlus için akma yükü

