

YUMUŞAK KAYALARDA YAPILAN İKSALİ KAZI DAVRANIŞININ SAHA DENEYLERİ İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF BEHAVIOR OF DEEP EXCAVATION IN SOFT ROCKS BY FIELD EXPERIMENTS

Arif ÇINAR¹, Havvanur KILIÇ², M. Mehmet BERİLGİN³

ÖZET

Bu bildiride, kırıklı-çatlaklı kumtaşı, kıltaşı birimlerde uygulanan çivili iksa sistemlerinde çivi ile çevresindeki jeolojik ortamın etkileşimi 1:1 ölçekli model deneylerle incelenmiştir. 8.4 m derinlikteki bu çivi destekli kazı modelinde düşeyde 5 ve yatayda 7 sıra çivi kademeli kazı yapılarak yerleştirilmiş ve nihai kazı derinliğine ulaşıldıktan sonra kesit üzerine sürşarj uygulanmıştır. Çivilerin gövdelerine şekil değiştirme ölçerler (strain gauge), başlıklarına yük hücreleri (load cell), kesit üzerine düşey inklinometreler ve shotcrete kaplama üzerine topoğrafik ölçüm için reflektörler yerleştirilmiştir. Kademeli kazı ve yükleme süresince tüm ekipmanlardan ölçümler alınmış, alınan ölçümler grafikler oluşturularak değerlendirilmiştir. Yapılan bu değerlendirmeler ışığında kazı ve sürşarj etkisinde kazı yüzeyinde meydana gelen yer değiştirmeler ile bunlara bağlı çivilerde oluşan aksel şekil değiştirmelerin ve aksel yüklerin çivi boyunca değişimi belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Derin Kazı, Yumuşak Kaya, Zemin Çivisi, Kaya Çivisi, Model Deney, Aletsel Gözlem

ABSTRACT

In this conference paper, nail and the surrounding geological environment interaction in supported shoring systems applied in fractured-cracked sandstone and claystone units was investigated with 1:1 scale model tests. In this nailed excavation model at a depth of 8.4 m, 5 vertical and 7 horizontal nails were placed by stepwise excavation, and a surcharge was applied on the section after the final excavation depth was reached. Strain gauges are placed on the bodies of the nails, load cells are placed on the heads, vertical

¹ İnşaat Y. Mühendisi, Geobos Zemin Güçlendirme Sist. Ltd. Şti., arifcinar@geobos.com

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat ABD, kilic@yildiz.edu.tr

³ Prof. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat ABD, berilgen@inm.yildiz.edu.tr

inclinometers on the section, and reflectors are placed on the shotcrete coating for topographic measurement. During the gradual excavation and loading, measurements were taken from all equipment, and the measurements were evaluated by creating graphics. In the light of these evaluations, the displacements that occurred on the excavation surface under the effect of excavation and surcharge, and the changes in the axial deformations and axial loads along the nail were determined.

Keywords: *Deep Excavation, Soft Rock, Soil Nail, Rock Nail, Model Test, Instrumental Observation*

1. GİRİŞ

Derin kazıların güvenli yapılması için desteklenmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Zemin olarak nitelendirilen jeolojik ortamlarda yapılan dik kazılarda destekleme mutlak bir zorunluluk iken kaya ortamlarda ayrışma ve süreksizlik durumuna göre desteklenme ihtiyacı doğmaktadır. Mühendisler için stabilite ve deformasyon bakımından sorun çıkaran zemin ortamlarındaki kazılar için geoteknik mühendisliğinin gelişim sürecinde 1930'lardan günümüze çok sayıda saha ve laboratuvar çalışması yapılmış ve günümüz tasarım ve uygulama yöntemleri şekillenmiştir. Kaya ortamlarda yapılan kazılarda mühendislik açısından daha az sorun görünmekle birlikte günümüz projelerinin derin kazı ihtiyacı kaya ortamlarda da kaya mekaniği prensiplerinin gözetilerek bir destekleme tasarımı ve uygulama yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak kayada yapılan derin kazılar için zemin ortamlarındaki kadar saha uygulaması ve araştırma bulgusu literatüre yansımadığından genel olarak kayada yapılan destekli kazılarda çoğunlukla ya aşırı güvenli tarafta kalınmakta ya da ciddi sorunlar yaşanmaktadır. Kayanın ayrışma ve eklem durumu dikkate alınarak stabilite sorununa yol açmadan kazının gerçekleştirilmesi ve ihtiyaç duyulan sürede açık kalması için tasarımcının uygun bir destekleme sistemi seçmesi gerekmektedir. Günümüzde bunun için genellikle çivi veya öngermeli ankraj uygulanması yoluna gidilmektedir. Öngerme ile donatı üzerinde yüksek tonajlı yüklerin oluşması ve korozyon sebebi ile öngermeli ankrajlar uzun süre açık kalacak kazılarda çok tercih edilmemekte ve çoğunlukla çivi yapılması yoluna gidilmektedir. İlk olarak Fransa'da zemin ortamında yapılan yarma kazılarında kullanılan zemin çivileri, sıradan çelik donatı kullanılması, ciddi bir bakıma ihtiyaç duymaması ve içinde yer aldığı jeolojik ortam ile esnek bir kompozit sistem oluşturarak deprem etkisinde diğer destekleme sistemlerinden daha iyi performans sergilemesi dolayısı ile kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda özellikle Almanya (Stocker vd., 1979) ve Fransa'da (Schlosser, 1983, Clouterre, 1993-2000) zemin çivileri üzerine çok sayıda araştırma yapılmış ve zemin çivilerinin çalışma mekanizması veya başka bir deyişle zeminle etkileşimi ve/veya davranışı aydınlatılmıştır. Kaya ortamların zemin ortamlarına göre daha az sorun çıkarması ve/veya kaya bulunuşu ve ankraj gibi destekleme sistemlerinin yaygın kullanışı sebebiyle çivilerin kaya ile etkileşimi ve davranışı üzerine daha az çalışmaya rastlanmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak bu bildiride yumuşak kaya ortamda çivilerle desteklenen bir derin kazının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sahada 1:1 ölçekli zemin çivili, kazı deneyi yapılmış ve aletsel ölçümler alınmıştır. Yapılan deneylerde kademeli kazı yapılarak çiviler imal edilmiş; her bir kazı ve çivi imalatı sonrası çivi başlıklarında kuvvet, çivi boyunca şekil değiştirme ve kazı yüzeyinde yer değiştirmeler ölçülmüştür.

2. DENEY SAHASI VE ZEMİN KOŞULLARI

Gerçek ölçekli model deneyler, Sakarya'nın Adapazarı İlçesinde yapımı devam eden bir iksa projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Proje alanının konumu ile derin kazı ve zemin çivisi imalatları Fotoğraf 1'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 1. İnceleme alanı uydu görüntüsü ve şantiye alanı görüntüsü

İnceleme alanında yapılan jeolojik ve geoteknik etüdlere göre bölgede Çakraz Formasyonu yer almaktadır. Bütünüyle karasal çökellerden oluşan Çakraz Formasyonu, kendine özgü kırmızı renge sahip olup başlıca karasal çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşlarından oluşan bir litolojiye sahiptir (Kıbaroğlu, G., Pekarun, O., 2019). Buna göre inceleme sahasında genel olarak üst seviyelerde 4,0 m derinliğe kadar W5, 12,0 m derinliğe kadar W2-W3 ayrışma derecesine sahip kumtaşı birimler görülmüştür. Sismik deneylerde ilk tabaka için $V_{s30}=287$ m/sn ve sonraki tabaka için $V_{s30}=570$ m/sn olarak ölçülmüştür. Model deney alanında yapılan sondajın karot sandığı Fotoğraf 2'de verilmiştir.



Fotoğraf 2. Model deney alanında yapılan SK-18 sondajının karot görüntüsü

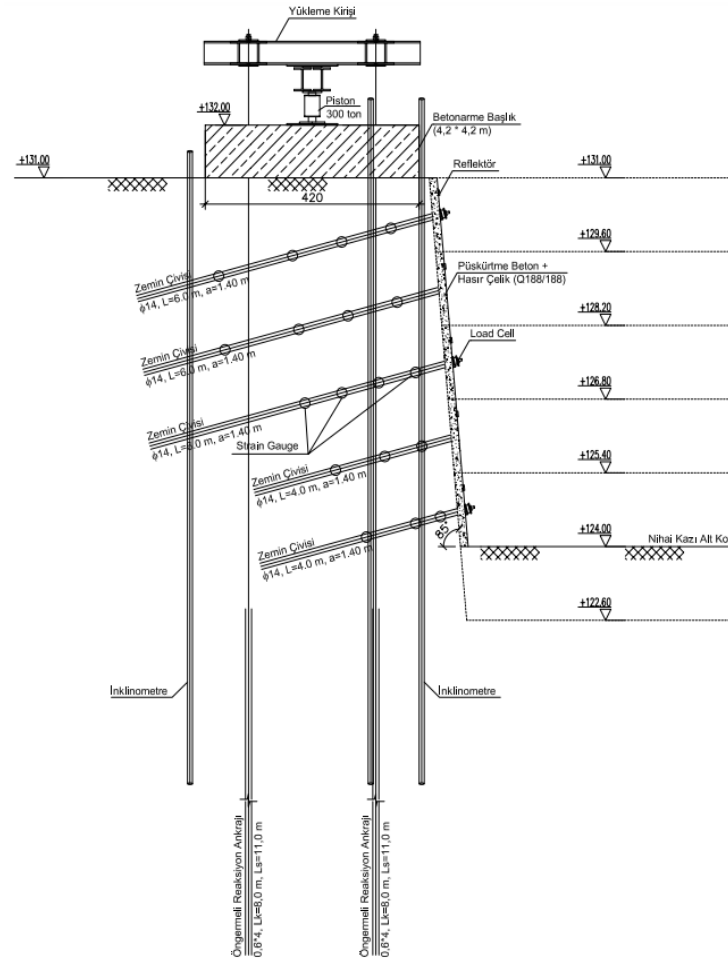
Model deneylerin yapıldığı bölgeye yakın sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile sismik deneylerden elde edilen kaya parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deney alanında yapılan zemin etüd çalışmaları özet tablosu

Sondaj No	Kot (m)	Derinlik (m)	RQD (%)	γ (kN/m ³)	$I_{s,50}$ (MPa)	q_u (MPa)	E_s (MPa)
SK-17	112.00	0.0-4.0	14	26.6	2.36		208.86
		4.0-8.0	33	27.0		13.79	222.85
SK-18	130.00	0.0-4.0	0				186.63
		4.0-8.0	0	25.6	1.02		222.85
SK-18	139.85	0.0-4.0	2				180.94
		4.0-8.0	12	24.7	1.54		
SK-19	116.00	0.0-4.0	2	21.5	0.94		178.95
		4.0-8.0	3	24.8	0.41		203.07

3. GERÇEK ÖLÇEKLİ DENEY MODELİ

Kayada çivi davranışını incelemek üzere yapılan gerçek ölçekli deney modelinin derinliği 8,4 m olup Sekil 1’de gösterildiği gibi yatay ve düşey aralıkları $s=1,4$ m olan 5 sıra çivi ile desteklenmiştir. $D=14$ mm çapında nervürlü inşaat çeliği olan çivilerin boyları üstteki üç sırada 6,0 m ve alttaki iki sırada 4,0 m uzunluktadır. Kazı yüzeyi hasır çelik ve shotcrete beton ile kapatılmıştır. Deney sahası 1,4 m düşey kademeler halinde kazılarak her kademede aletsel gözlemler yapılmıştır (Fotoğraf 3). 5 sıra çivi imalatını takip eden kazı kademeleri 1,5 ayda tamamlanmış ve sonrasında 1 ay bekledikten sonra son kademe kazılarak nihai kazı kotuna ulaşılmıştır. Nihai kazı kotunda kesit üzerine sürşarj uygulanmıştır. Sürşarj uygulaması zemin yüzeyinde tesis edilen bir yükleme düzeneği ile yapılmıştır. Bu düzeneğe 4,2 m x 4,2 m boyutlarında inşa edilen betonarme bir plak üzerine yerleştirilen 300 tonluk hidrolik krika ile 4 adet reaksiyon ankrajları ve yükleme kirişleri kullanılarak oluşturulmuştur. Deneyler sırasında kesit üzerinde yer alan 300 tonluk hidrolik krika ile başlık plağına kademeli olarak yük uygulanmıştır (Fotoğraf 3).



Şekil 1. Gerçek ölçekli saha deneyi kesiti

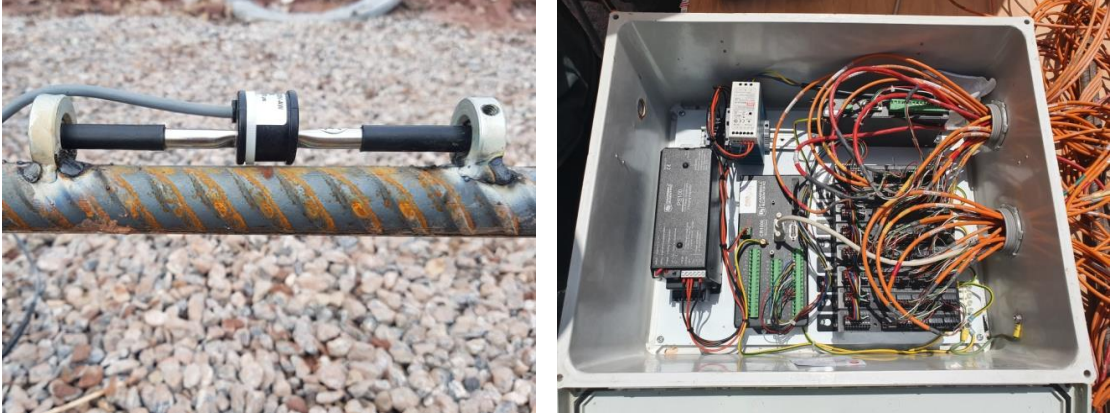


Fotoğraf 3. Gerçek ölçekli saha deneyi görüntüleri

3.1. Ölçüm Aletleri

Deneylerde çiviler ile kazı yapılan zemin ve püskürtme beton üzerine yerleştirilen ölçüm ekipmanları ile şekil değiştirme, yer değiştirme ve gerilmeler ölçülmüştür.

Zemin çivilerinin kazı ve sürşarj yüküne bağlı şekil değiştirme davranışını izlemek için üzerlerine Sekil 1’de gösterildiği gibi 3 veya 4 farklı noktada toplam 32 adet şekil değiştirme ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Şekil değiştirme ölçerlerin doğrulama testleri YTÜ Malzeme laboratuvarında yapılmıştır. Şekil değiştirme ölçerler çivilerin üzerine Fotoğraf 4’de gösterildiği şekilde yerleştirilmiş ve bir veri toplama sistemi yardımı ile şekil değiştirme ölçümleri bilgisayara aktarılmıştır.



Fotoğraf 4. Strain gauge ve çok kanallı data logger görüntüsü

Zemin çivilerinin kazı kademeleri sonunda maruz kaldığı eksenel yükü belirlemek için 2 çivinin başlığına Fotoğraf 5’te gösterildiği şekilde yük hücresi yerleştirilmiştir.



Fotoğraf 5. Yük hücresi görüntüleri

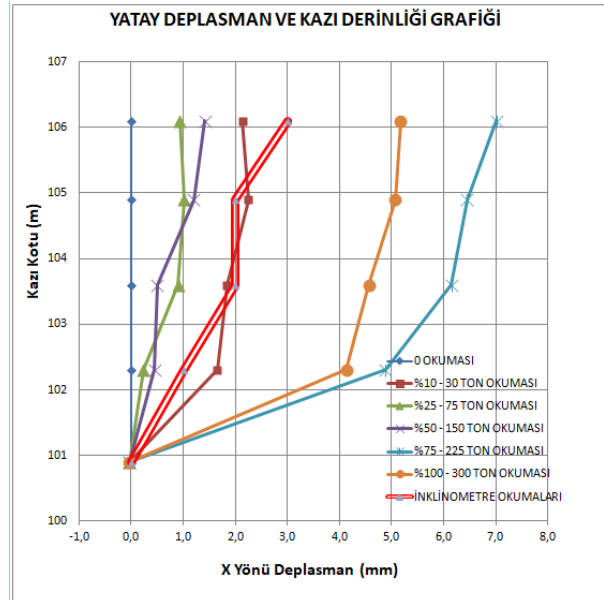
Kazı ve sürşarj yükü uygulaması dolayısıyla jeolojik ortamda meydana gelen yer değiştirmeleri ölçmek için 3 adet inklinometre ile püskürtme betonlu kazı yüzeyine 30 adet aynalı reflektör yerleştirilmiştir (Fotoğraf 6).



Fotograf 6. İnklinometre ve reflektör ölçüm görüntüleri

4. DENEY SONUÇLARI

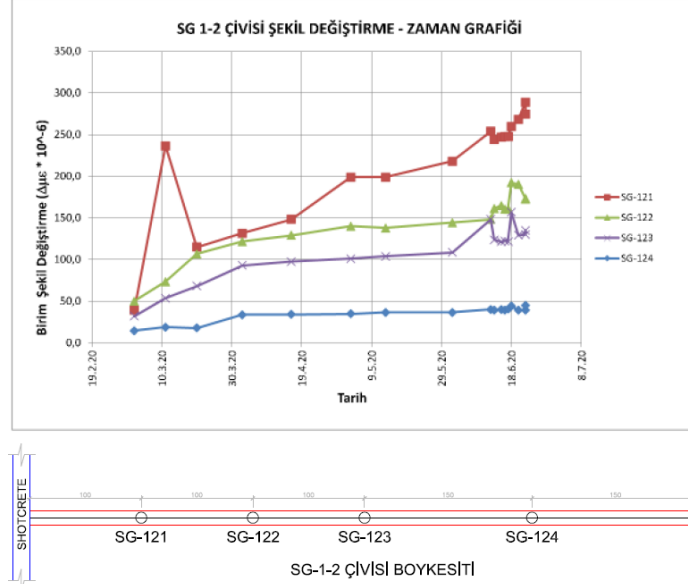
Kazı kademeleri boyunca kesit üzerinde yer alan 3 adet inklinometreden periyodik okumalar alınmıştır. Kademeli sürşarj yüklemesi sırasında ise her yük kademesinde inklinometrelerden ve shotcrete üzerinde yer alan reflektörlerden anlık okumalar alınmıştır. Kazı kademeleri sırasında ve sürşarj yüklemesi sırasında inklinometrelerde sadece 2-3 mm yatay deplasman gözlenmiştir. Sürşarj yüklemesi sırasında yük kademeleri arttıkça reflektörlerde artan şekilde deplasman gözlenmiştir. Kazı yüzeyinin üst kotlarında 6-7 mm yatay deplasman gözlenirken kazı tabanında deplasman gözlenmemiştir (Şekil 2).



Şekil 2. İnklinometre ve optik ölçümlere göre nihai kazı sonrası yer değiştirmeler

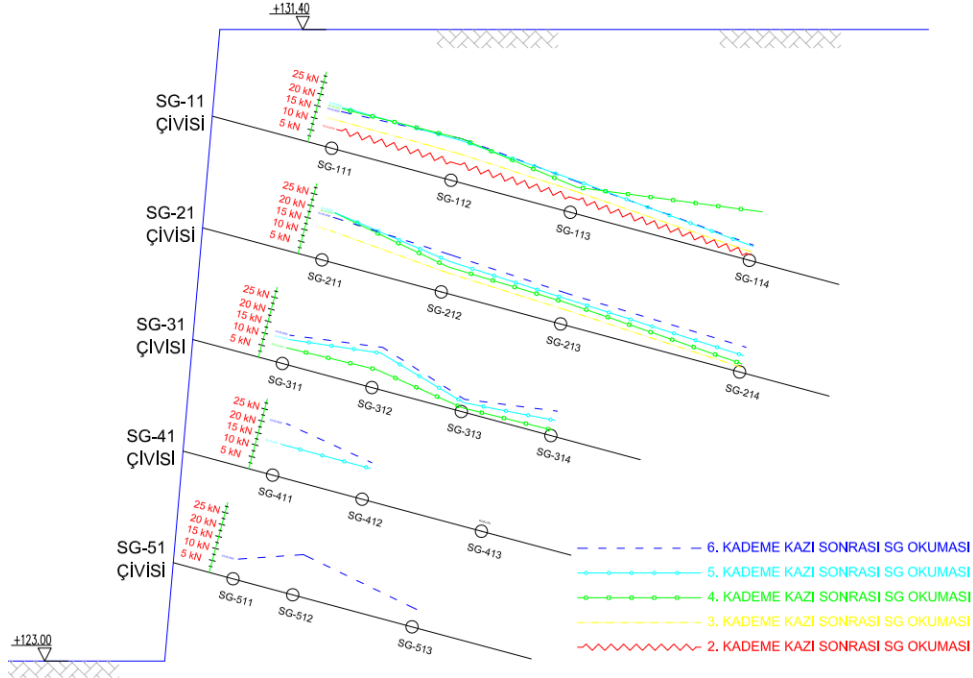
Kazı kademeleri yapıldıkça çivilerde yer alan toplam 32 adet strain gaugeden veriler alınmıştır. Strain gaugelerden ölçülen birim şekil değiştirmelerin çivi boyunca ve kazı kademelerine göre değişimleri en üstteki SG1-2 çivisi için Şekil 3'te verilmiştir. Bu şekilde gösterildiği gibi çivi boyunca kazı kademelerine göre alınan her bir şekil değiştirme ölçümü kullanılarak çivilerin üzerindeki

eksenel yükler hesaplanmıştır. Kazı kademelerine göre hesaplanan çivi normal kuvvetlerinin çivi boyunca değişimleri kazı enkesiti üzerinde Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 3 ve 4'den görüldüğü gibi kazı yapıldıkça çivilerin şekil değiştirmelerinin ve üzerine etkiyen eksenel kuvvetlerin arttığı gözlenmiştir.



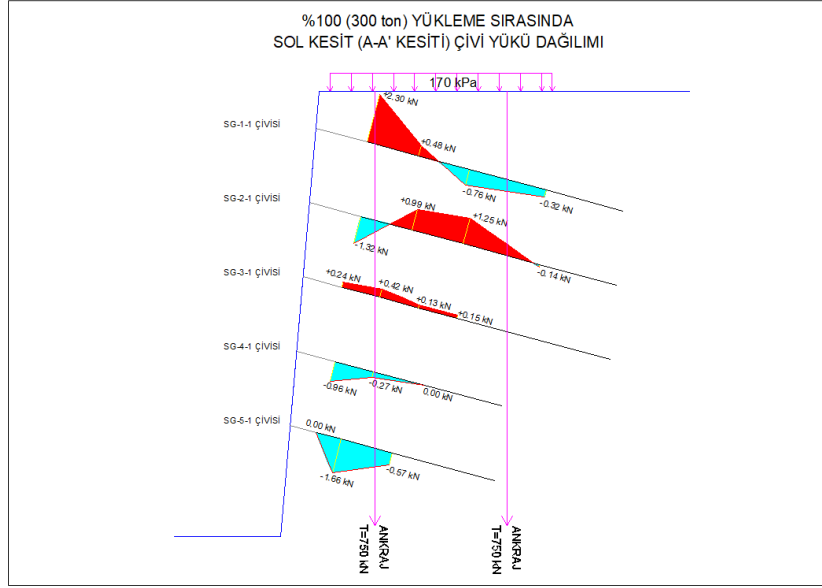
Şekil 3. En üstteki çivi boyunca ölçülen şekil değiştirmeler

Zemin çivilerinin shotcrete yüzeye bağlı kafa bölgelerinde daha çok şekil değiştirme ve eksenel kuvvete sahip olduğu, çivinin gömülü ucuna gidildikçe şekil değiştirme ve eksenel kuvvetlerin azaldığı görülmüştür (Şekil 3 ve 4).

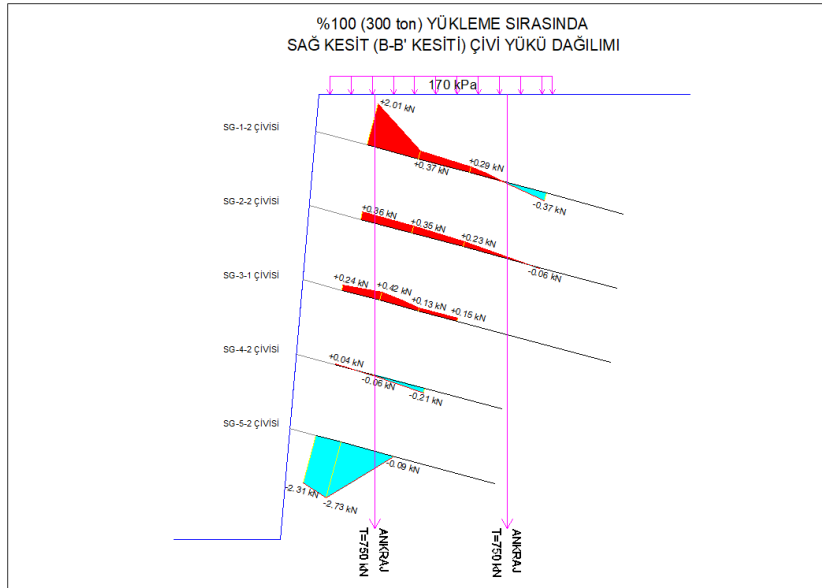


Şekil 4. Kazı kesitindeki çivilerde kazı seviyesine bağlı eksenel yük değişimi

Kazı kademeleri tamamlandıktan sonra kesit üzerine sürşarj yükü uygulanmıştır. Sürşarj yükü uygulandıktan sonra alınan şekil değiştirme okumalarının sürşarj yükü kademelerine göre değişimleri iki farklı kesit boyunca Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. A-A' Kesiti çivilerinin eksenel yükleme sırasındaki yük değişimi



Şekil 6. B-B' Kesiti çivilerinin eksenel yükleme sırasındaki yük değişimi

Kazı kademeleri sırasında zemin çivilerinde kademeli olarak 15-20 kN mertebelerinde eksenel çekme yükleri oluşurken eksenel yükleme sırasında bu değerler 2-3 kN mertebelerine düşmüştür. Bu durumun sürşarjin ankraj çubukları ile uygulanması dolayısı ile ortamda çevre basınçlarının artmasına bağlı çivilerde çevre sürtünmesinin artması yanında çivilerin eğilmeye zorlanmasından kaynaklandığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bildiride kırıklı-çatlaklı kumtaşı, kiltası birimlerde uygulanan çivili iksa sistemlerinde çivi/jeolojik ortam etkileşimi gerçek ölçekli model deneylerle incelenmiştir. 8.4 m derinlikte, 5 sıralı çivilerden oluşan bu destekleme sisteminde yüzey püskürtme betonla kaplanmış ve kademeli kazılar yapılarak çiviler imal edilmiştir. Kazı dolayısıyla çatlaklı

kırıklı kaya ortamın yer değiştirme davranışı ile buna bağlı çivilerde oluşan eksenel yük ve şekil değiştirmeler ölçüm ekipmanları tesis edilerek ölçülmüştür. Bu ölçüm ekipmanlarından alınan ölçümler yukarıda değerlendirilmiştir. Yapılan bu değerlendirmelerden şu sonuçlar çıkarılabilir;

1. Kırıklı çatlaklı kıltaşı-kumtaşı birimde yapılan çivi destekli kazıda dikkate değer şekil değiştirmeler meydana gelmemiş ve ölçülen yatay deplasman (2-3 mm) literatürde önerilen yatay deplasman-derinlik oranının ($\Delta y = \%0,1H$) oldukça altında ($\Delta y = \%0,02H$) gerçekleşmiştir (FHWA-IF-03-017, 2003).
2. Çivilerdeki şekil değiştirme ölçerlerde kazı seviyesine bağlı olarak en fazla $300 \cdot 10^{-6}$ birim eksenel şekil değiştirme ölçülmüş olup çivilerin bulunduğu seviyeye bağlı olarak 15-20 kN mertebelerinde eksenel yük aldığı tespit edilmiştir. Bu durum küçük şekil değiştirme seviyelerinde dahi çivilerin yük aldığını göstermektedir.
3. Çivilerdeki şekil değiştirmeler ve buna bağlı olarak hesaplanan eksenel kuvvetler çivi boyunca kafadan gömülü uca doğru gidildikçe azalmaktadır. Çivi boyunca oluşan eksenel şekil değiştirmeler kazı derinliğine bağlı olarak artmaktadır.
4. Çivilerin yer aldığı kumtaşı ile kumtaşı-çivi ara yüzeyinin mekanik özelliklerine bağlı olarak çivilerde sıyrılma meydana gelmemiş ve çivilerde oluşan en büyük eksenel kuvvet çivi kapasitesinin $\%30'$ una ulaşmıştır.
5. Model deneyden elde edilen bulgular çatlaklı-eklemli kayalarda yapılan derin kazılarda çivi kullanımının uygun bir mühendislik çözümü olduğunu göstermektedir.
6. Kazı destekleme sistemi tasarımında sürşarjın yanal deformasyon ve stabilite üzerindeki etkisinin belirlenmesinde çivi ve ankraj gibi kazı destekleme elemanları üzerinde oluşacak ilave etkiler gözönüne alınmalıdır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar saha çalışmalarında desteğini esirgemeyen Geobos Ailesine ve Jeoloji Mühendisi Öymen Akın'a teşekkürü borç bilir.

KAYNAKLAR

- Carlos A. Lazarte, Paul J. Sabatini, Victor Elias (2003), "Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls, FHWA-IF-03-0,17.
- Kıbaroğlu G., Pekarun, O. (2019), "Sakarya Katı Atık İşleme Tesisi Projesi Zemin ve Temel Etüdü Veri Raporu", Geobos zemin Güçlendirme Sistemleri Ltd. Şti., İstanbul.
- U.S. Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-14-007, (2015) Federal Highway Administration FHWA GEC 007.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
RQD (%)	Kayaç kalite değeri	$\bar{\sigma}$	Kaya birim hacim ağırlığı
$I_{s_{50}}$	Nokta yükleme indisi	q_u	Serbest basınç dayanımı
E_s	Elastisite modülü	V_{s30}	Kayma dalga hızı
q_s	Sürtünme direnci	Δy	Yatay deplasman oranı