

DERİN YUMUŞAK KİL ÜZERİNDE KÖPRÜ AYAĞI TEMELİ

Sedat SERT*, Akın ÖNALP** ve Aşkın ÖZOCAK*

*Sakarya Üniv., İnşaat Müh. Böl., Sakarya

**İstanbul Kültür Üniv., İnşaat Müh. Böl., İstanbul

ÖZET

İstanbul Beykoz Belediyesi Riva (Çayağzı) Beylik Mandıra mevkiinde yapımı öngörülen köprü için yapılan zemin değerlendirmelerinde köprü ve yaklaşım dolgularının inşaatı sırasında taşıma gücü ve oturma problemlerinin belireceği görülmüş ve uygun bir çözüm aranmıştır. Köprü ayağı altında oturmaların yaklaşık 50 m derinlikte karşılaşılan anakayaya indirilmiş çelik profil kazıklarla sınırlanabileceği, yaklaşım dolgusu altında meydana gelecek uzun süreli oturmaların da 65 cm çaplı, 15 m boyunda jet-grout kolonları ile kabul edilebilir seviyelere çekilebileceği yapılan sayısal analizle gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Normal yüklenmiş kil, Köprü ayağı, Sayısal analiz, Çelik kazık, Jet-grout

FOUNDATION DESIGN FOR A BRIDGE TO BE BUILT ON SOFT CLAY

A bridge to span across the River Riva to the North of Istanbul is likely to be placed on normally loaded clays. The depth of the clay was found to be around 50 m to the bedrock. This meant excessive settlements not only for the bridge piers but the approach embankments as well. The problem was solved by the use of steel piles under the bridge and jet grout columns beneath the embankment to secure acceptable differential settlements.

Keywords: Normally loaded clay, Bridge abutment, Numerical analysis, Steel pile, Jet-grout

1. GİRİŞ

Bu bildiride, İstanbul Kavacık-Riva Yolu Yanık Köprü bağlantısının oluşturulmasına yönelik yapılan çalışmalar irdelenmektedir.

2. ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Alanda zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle 4 adet dönel sondaj yapılmış ve sondaj logları değerlendirilmiştir [1]. Sondajlardan elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri İstanbul Kültür Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda TS1900-1 ve 2/2006'ya göre deneylere tabi tutulmuş ve TS1500/2000'e göre sınıflandırılmıştır.

Sondaj logları ve laboratuvar deney sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi sonrasında ortamda sondajların kesildiği 25 m'ye kadar gri ve siyah ağırlıklı renklerdeki killerin bulunduğu anlaşılmıştır. Sondaj loglarında yer altı su seviyesinin SK-1, SK-2 ve SK-3'de 1.3 m'de, SK-4'te ise 1.5 m'de belirttiği rapor edilmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda zeminlerin özellikleri Çizelge 1'de özetlenmektedir. Çizelgeden ortamda bir çok derinlikte doğal su muhtevasının likit limit değerlerinden yüksek olduğu ve sıvılık indisi değerlerinin 2'yi geçebildiği görülmekte, bu da ilk bakışta ortamın güncel durumuyla köprü ayağı gibi bir yapı için uygun özellikler taşımadığına işaret etmektedir.

Çizelge 1. Riva Deresi köprüsü zemin özellikleri

SK	z (m)	RENK	w _L	w _P	w _n	I _L	%İNCE	SINIF	ρ	S _r	c _u
4	6.00	RK	48	18	35	0.56	97	CI	17.94	100	18
1	6.00	K	25	16	38	2.46	61	CL			26
1	12.00	Z	36	16	40	1.19	73	CI			
3	12.00	kGZ	118	30	64	0.39	99	CH	15.11	98	26
3	13.50	Z	27	12	48	2.43	68	CL			
3	15.00	kGY	94	29	72	0.64	98	CH			
4	15.00	kGZ	90	28	68	0.65	98	CH	15.69	97	22
1	19.50	Z	52	23	71	1.71	87	CH			
3	21.00	kG	51	19	67	1.48	83	CH			

Z: siyah K: kahverengi Y: yeşil S: sarı G: gri X: karışık k: koyu R: kızıl P: cep penetrometre direnci I_L: sıvılık indisi

UD numunelerin aşırı yumuşak olması nedeniyle numunelerde örselenme yüksektir. Bu nedenle yapılan konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneylerine (UU) ek olarak zeminin direnci tüplerin ağzında cep penetrometresi ile ölçülmüş ve Çizelge 2'deki sonuçlara erişilmiştir. Buna göre 21 m'yi kapsayan derinlik boyunca yapılan 12 penetrometre ölçümünde sadece üç noktada 30 kPa'ı geçen kayma direnci değerleri elde edilmiştir. Diğer 9 noktada yapılan ölçümlerden gelen 0, 10, 15 kPa gibi drenajsız kayma direnci değerleri ortamın aşırı olumsuz durumunu teyit etmiştir.

Çizelge 2. Killerin kayma direnci (s_u değerleri) ve renk

DERİNLİK (m)	SK-3	SK-4
3.00	115 SK	50 SKR
6.00	67 RK	10 RK
9.00	23 kGZ	10 kGZ
12.00	12 kGZ	28 kGZ
15.00	25 kY	15 kGZ
18.00	00 kGZ	
21.00	00 kY	

Türkiye'de gerçek anlamda normal yüklenmiş kil bulunup bulunmadığı zaman zaman tartışılmakla beraber, bu sondajlardan gelen numuneler üzerinde yapılan

konsolidasyon deneyleri burada gerçek NL killerin varlığını göstermiştir. İki farklı derinlikten alınmış UD numuneler ödometrede konsolidasyon deneyine tabi tutulmuş ve Çizelge 3’deki sonuçlara ulaşılmıştır. Buradan killerin normal yüklenmiş karakteri bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Boşluk oranlarının 2’nin, sıkışma indislerinin 0.5’in üzerinde çıkması ortamda taşıma gücü probleminin varlığı yanında oturmaların da aşırı değerlerde gerçekleşeceğini göstermektedir.

Çizelge 3. Zeminlerin sıkışabilirliği

Sondaj No	SK-4	SK-3
Derinlik (m)	15.0	21.0
e_0	2.09	2.27
C_c	0.632	0.551
C_r	0.131	0.114
t_{50} (dak)	15.2	10.36
σ_c	NL	NL

Sondajlar sırasında ölçülen standart penetrasyon dirençleri Çizelge 4’te ve ortalama değerler Çizelge 5’te gösterilmektedir. 4 kuyuda ortalama SPT-N değerlerinin sırasıyla 7, 6, 4 ve 4 olması ve penetrometre dirençlerinin sıfır ölçüldüğü zeminlerin bulunması sondajların daha derinlere inmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Çizelge 4. SPT-N değerleri

Sondaj No Derinlik (m)	1	2	3	4	Sondaj No Derinlik (m)	1	2	3	4	Sondaj No Derinlik (m)	1	2	3	4
1.5	8	2	11	5	13.5	5	8	4	2	25.5	10	5	3	4
3.5	5	5	4	9	15.5	7	6	5	5	27.0	11	6	2	3
4.5	4	5	3	2	16.5	6	8	5	5	28.5	12	10	3	2
6.5	3	4	2	3	18.0	7	6	7	4	30.0	11		4	6
7.5	5	6	2	2	19.5	8	9	11	2	31.5	8		4	5
9.5	4	7	4	3	21.0	8	4	6	2	33.0	8		4	6
10.5	5	4	4	3	22.5	8	7	7	3	34.5	9		3	7
12.5	6	9	4	3	24.0	8	4	4	3	36.0	10		4	3
										37.5	9			

Çizelge 5. Sondaj kuyularında ortalama SPT-N değerleri

SK	1	2	3	4
SPT-N	7	6	4	4

Mevcut durumda yapılan tüm deneyler köprünün oturtulması istenen zeminin normal yüklenmiş kil, ve sağlam zeminin 25 m derinlik boyunca hiç yakalanmadığı bir profil olarak belirmiştir. Bu durumda $c=25$ kPa gibi bir drenajsız kayma direnci kullanarak alfa metodu ile $\Phi 100$ ’lük 25 m boylu bir betonarme kazığın servis yükü de 500 kN dolayında çıkmaktadır. Ancak, killerin yüksek sıkışabilirliği nedeniyle köprü ayaklarının 50 yıl boyunca aşırı oturması bu koşullarda kaçınılmaz görünmüştür.

3. ANAKAYA

Eldeki bilgiler ışığında köprünün bu eksene oturtulması kaçınılmaz ise sondajların kumlu bir tabaka kesilene değin uzatılması önerilmiş ve daha sonra yapılan SK-5 sondajında normal yüklenmiş killer altında 50.5 m derinlikte anakaya olduğu sanılan bazalta erişilmiş, kayanın eşdeğer basma dayanımı nokta yükleme deneyinde $\sigma_c=9000$ kPa olarak ölçülmüştür. Bu durumda uzun vadede oluşabilecek oturmaların sifira indirilmesi seçeneği ortaya çıkmış, bu amaçla köprü ayağı altında yaklaşık 51 m²'de ana kayaya oturan boru veya NP profil kazıkların ve yaklaşım dolgusu altında da jet-grout kolonlarının kullanılması düşünülmüştür.

4. SAYISAL ANALİZ

Öngörülen çözümün uygunluğunun kontrolü amacıyla Plaxis v8 2D sonlu eleman yazılımı ile köprü ayağı, altındaki boru profil kazıklar, yaklaşım dolgusu, altındaki jet-grout kolonları ve zemin profilini içeren farklı sonlu eleman modelleri kurulmuştur [5]. Model, tek bir köprü ayağını içerecek şekilde oluşturulmuştur. Buna göre köprü kirişlerinin etkisini yansıtabilmek için köprü ayakları yatay deplasman yapmayacak şekilde sınır şartları seçilmiştir. Zemin özellikleri Mohr-Coulomb zemin modeli ile temsil edilmiştir. Problem üç boyutlu olduğundan kazık ve jet-grout özellikleri s değerine bölünerek düzlem zorlanma için dönüşüm yapılmış, dönüşüm yapılırken köprü ayağı altında kazıkların 4x3=12 şeklinde yerleşimi kullanılmıştır [6]. Örnek model geometrisi ve sonlu eleman ağı Şekil 1'de, köprü ayağının yakın çevresi ise Şekil 2'de gösterilmiş, modelde kullanılan kazık, jet-grout kolonları ve zemin özellikleri Çizelge 6 ve 7'de verilmiştir.

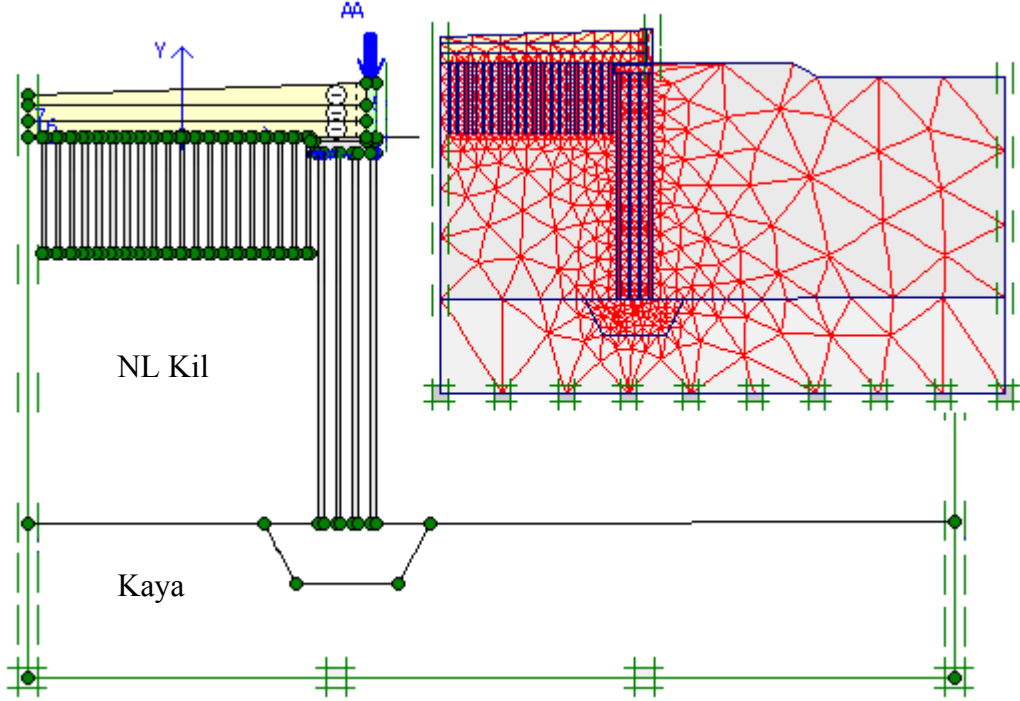
Sonlu eleman tekniğine uygun olarak gerilmelerin yoğun olduğu yerlerde elemanlar küçültülmüş, gerilme yığılmasının olmadığı model sınırlarında ise büyütülmüştür (Şekil 3) [7].

Çözümde ani yükleme sonucu yenilme oluşmaması için dolgu kademeli olarak yükseltilmiş, her dolgu sonrası ek boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi için konsolidasyon analizi yapılmıştır. Modelde çözüm aşamaları aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur:

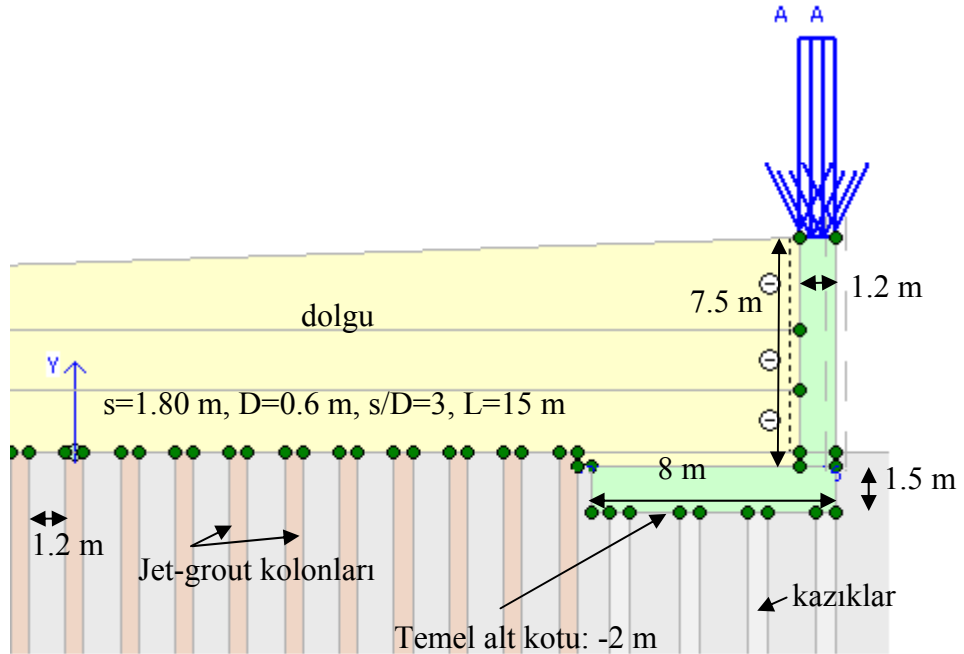
0. Doğal durum (YASS: -1.5 m)
1. Temelin, kazıkların (olan modellerde), yaklaşım dolgusu altında jet-grout kolonlarının (olan modellerde) ve yükün aktif hale getirilmesi
2. Konsolidasyon
3. 1. kademe dolgu
4. Konsolidasyon
5. 2. kademe dolgu
6. Konsolidasyon
7. 3. kademe dolgu
8. Konsolidasyon

Buna göre yapılan sayısal analizler sonrasında köprü ayağının tek başına inşa edildiği durumda yüklemenin yarısı gerçekleşmeden göçme meydana geldiği, köprü ayağı altındaki profil kazıkların ana kayaya kadar uzatıldığı, yaklaşım dolgusu altında 15 m boyunda, 0.65 m çapında, s=1.80 m aralıklı jet grout kolonları uygulandığı çözümde ise oturmaların kabul edilebilir değerlere düşeceği görülmüştür.

Şekil 3 ve 4'te yaklaşım dolgusu altında jet-grout kolonları yokken, Şekil 5 ve 6'da ise varken elde edilen oturma değerleri verilmiştir. Şekil 4 ve 6'dan anakayaya uzatılan çelik kazıklar sayesinde köprü ayağı altında deplasmanların sıfır civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Örnek model geometrisi ve sonlu eleman ağı



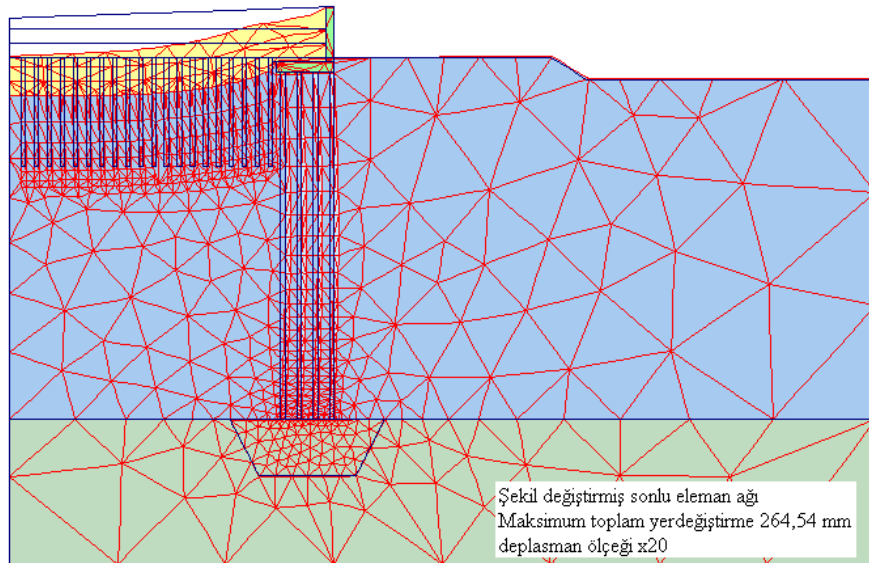
Şekil 2. Köprü ayağı ve yakın çevresinin modelde görünümü

Çizelge 6. Modelde kullanılan temel, kazık ve jet-grout kolonları özellikleri

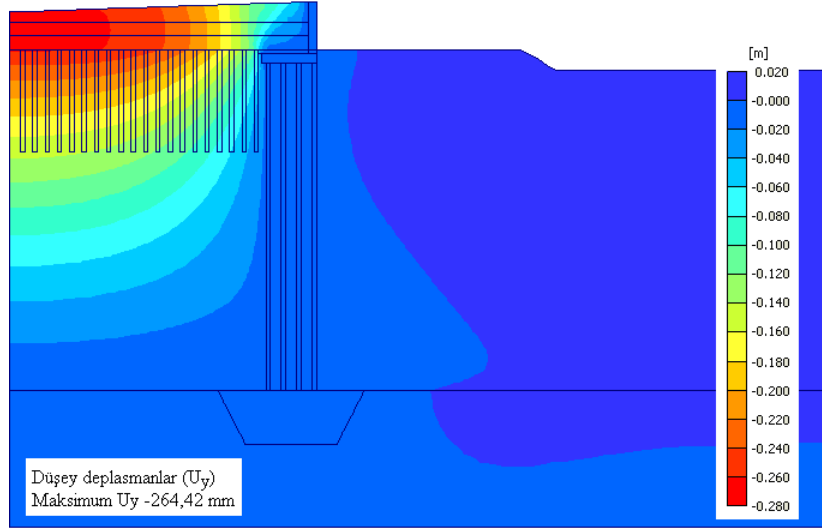
	Temel	Jet-Grout	Kazıklar
Malzeme	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik	Doğrusal Elastik
E (MPa)	30000	6000	55000
ν	0.2	0.25	0.25
Kalınlık / Çap (m)	1.5	0.65	0.65
Kazık/Jet-Grout Boyu (m)	-	15	48
Kazık/Jet-Grout Aralığı (m)	-	s=1.80	s=2.25
s/D	-	2.77	3.46

Çizelge 7. Modelde kullanılan zemin özellikleri

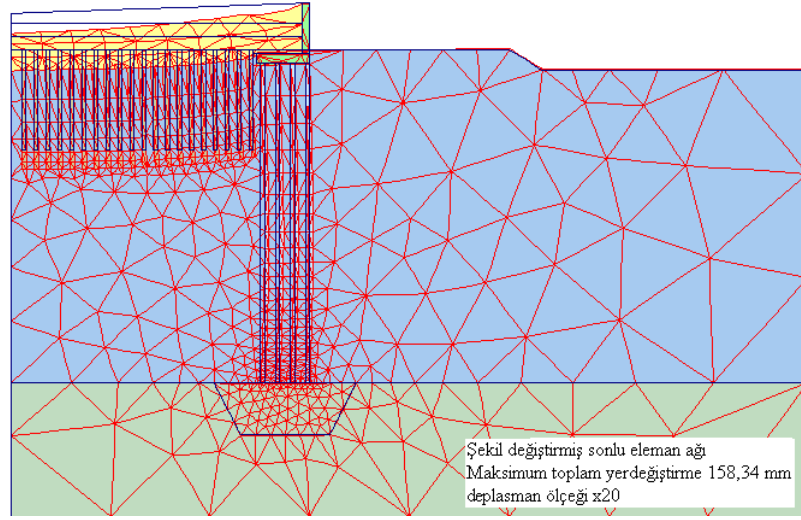
İsim	NL kil	Kaya	Dolgu
Malzeme Modeli	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Malzeme Tipi	Drenajsız	Drenajsız	Drenajlı
ρ_n (kN/m ³)	16	21	22
ρ_{doygun} (kN/m ³)	16	21	22
k (m/sn)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	1.0
e_0	2.0	0.4	0.5
E'_{50} (kPa)	7000	500000	60000
$E_{artış}$ (kPa)	500	10000	1000
ν	0.35	0.35	0.3
c' (kPa)	15	30	1
$c'_{artış}$ (kPa)	0,5	1	0
y_{ref} (m)	0	-50	10
ϕ' (°)	22	40	40
ψ (°)	0	10	10
R_{inter}	-	-	-



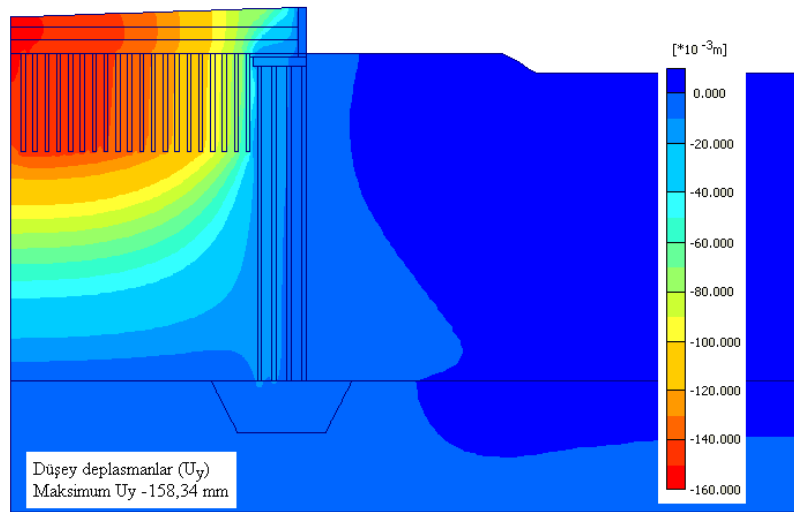
Şekil 3. Yaklaşım dolgusu altında jet-grout kolonları yokken oluşan deplasmanlar



Şekil 4. Dolgu altında jet-grout kolonları yokken oluşan düşey deplasmanlar

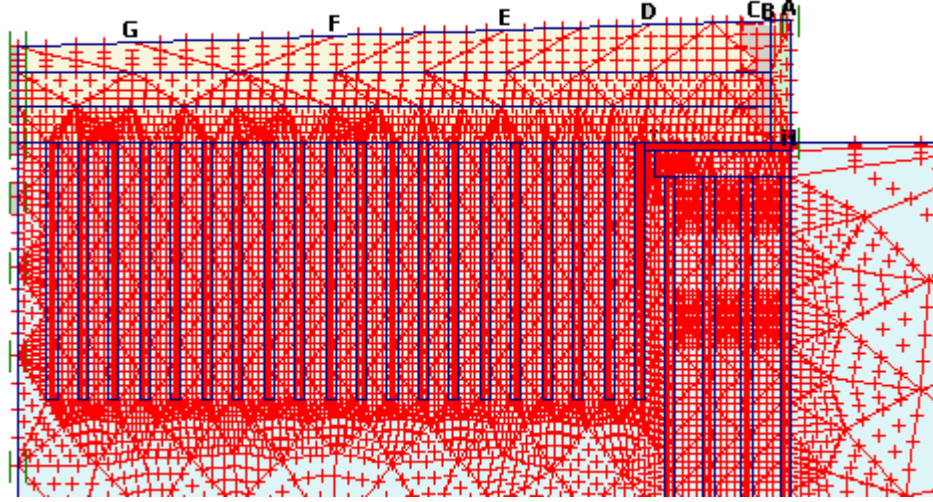


Şekil 5. Yaklaşım dolgusu altında jet-grout kolonları varken oluşan deplasmanlar

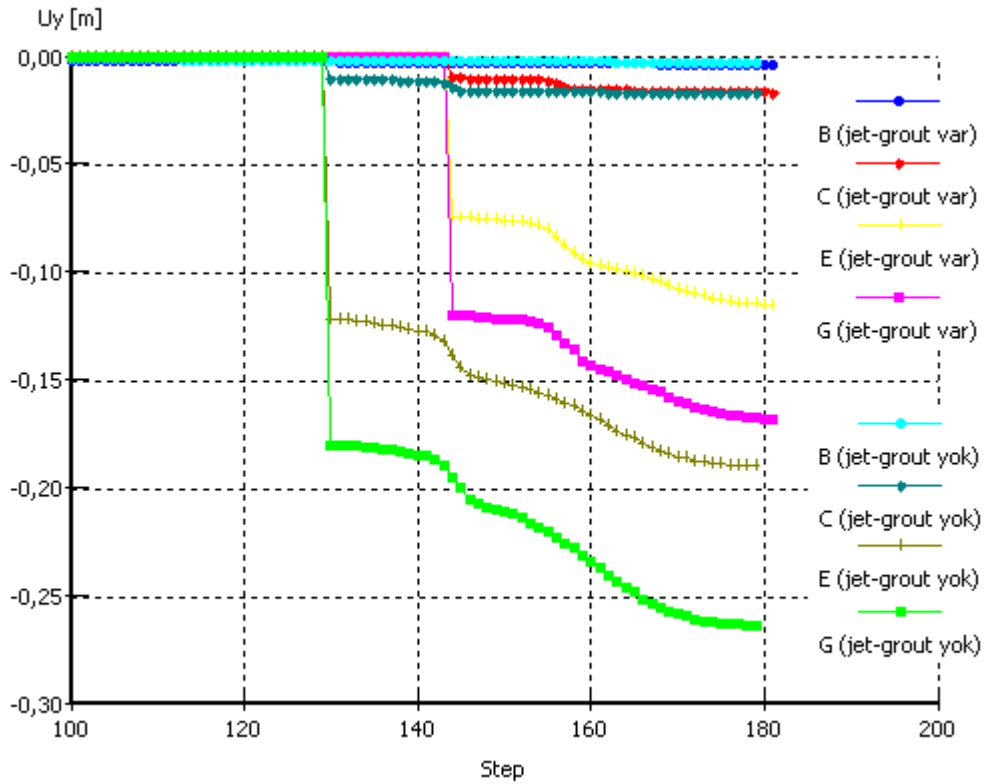


Şekil 6. Dolgu altında jet-grout kolonları varken oluşan düşey deplasmanlar

Şekil 7’de sonlu eleman ağında deplasmanların hesaplandığı noktalar görülmektedir. Şekil 8’de bu noktalardan seçilmiş olanlar için yükleme adımlarına karşılık düşey yer değiştirmeler verilmiştir. Köprü ayağı üzerinde bulunan B ve C noktalarında jet-grout kolonlarının olduğu ve olmadığı modellerde sıfır civarında ve aynı değerlerde düşey yer değiştirme meydana gelmiştir. Köprü ayağından uzaklaştıkça jet-grout kolonlarının olduğu ve olmadığı modellerde seçilen noktalar arasındaki farklılıklar giderek artmaktadır.



Şekil 7. Deplasman grafikleri için seçilen noktalar



Şekil 8. Seçilmiş noktalarda yükleme-düşey deplasmanlar grafiği

5. KÖPRÜ AYAKLARI

51 m boylu betonarme kazığın çamurda imalinde karşılaşılabilecek ciddi sorunlar gözönüne alındığında kazığın hazır çakma tip olması gerektiği tartışmasız kabul edilebilir. Hazır çakma kazık Türkiye’de 12 m boylu çelik profil veya prekast betonarme olarak sağlanabilmektedir. Çelik profilin sakıncası paslanma, hazır betonun sakıncası ek yerlerinin depremde hasar görme olasılığıdır [8, 9].

Tüm etkenler değerlendirildiğinde özellikle kazığın uygun boya kesilebilirlik kolaylığı da düşünülerek çelik profil kazığın tercih edilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Kullanılması önerilen F_c360 , $f_y= 235$ MPa profillerin özellikleri şöyle özetlenebilir

HD400x382	$P_c= 400$ kN
HD400x592	$P_c= 690$ kN

Bu profiller üç kez kaynaklı, ek plakalı ekleme işlemi görecekle ve kaynak yüzeylerinin pastan korunması için asfalt veya daha kaliteli kaplama gereci ile işlem göreceklelerdir. Köprü projesini yapacak mühendisin bunlardan herhangi birini seçmesi mümkün olacaktır.

6. YAKLAŞIM DOLGULARI

Köprü giriş ve çıkışları doğal zemin kotundan yaklaşık 8.5 m yükselme gerektirmektedir. Bu da yumuşak doğal zemin üzerine yapılacak iri daneli dolgunun 25 cm mertebesinde oturması sonucunu getirecektir.

Ayakların hiç oturmaması, yaklaşım dolgusunun 250 mm mertebesinde oturması ulaşımda ciddi sorunlar yaratacağından bu oturmaların yaklaşım dolgusu destek sistemi ile (BASP) kontrol altına alınması zorunlu olacaktır.

Kazıklı desteğin yüksek maliyeti nedeniyle bunun jet-grout kolonları ile sağlanması önerilmiştir. Buna göre kolonlar

Çap	$D=0.65$ m
Boy	$L_c=15$ m
Aralık	$s=1.8$ m

özellikle yerleştirildiğinde oturmalar 265 mm’den $\Delta_{max}=158$ mm gibi kabul edilebilir düzeylere inmektedir. SK-5’te çamurun yer yer kum mercer ve bantları içermesi nedeniyle, yükleme sırasında bu oturmanın önemli bir bölümünün oluşacağı, bir başka deyişle yol ve köprü arasında belirebilecek farklı oturmaların kabul edilebilir düzeyde kalacağı söylenebilmektedir.

7. SONUÇ

Bu bildiri de, olumsuz zemin koşulları nedeniyle Beykoz Riva Deresi üzerinde kurulacak köprüde meydana gelebilecek taşıma gücü ve oturma problemlerinin önlenmesine yönelik öngörülen tedbirler sayısal analizler ışığında değerlendirilmiştir. Buna göre anakayanın 50 m derinlikte olduğu ortamda, köprü

ayakları altında anakayaya indirilen çelik profil kazıkların oturmaları sıfırlayacağı, yaklaşım dolgusu altında da 15 m boylu, 65 cm çaplı jet-grout kolonlarının uzun süreli oturmaları kabul edilebilir seviyelere çekeceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] A.Önalp, 2007, “Geoteknik Rapor”, İstanbul Kültür Üniversitesi.
- [2] TSE, 2006, “TS1900-1, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini”, Ankara.
- [3] TSE, 2006, “TS1900-2, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini”, Ankara.
- [4] TSE, 2000, “TS1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara”.
- [5] R.B.J. Brinkgreve et al., 2002, “Plaxis 2D v8 Manual”, Delft University of Technology & Plaxis b.v., the Netherlands.
- [6] W.A. Prakoso and F.H. Kulhawy, 2001, “Contribution to Piled Raft Foundation Design”, ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 127, No. 1, pp. 17-24.
- [7] D.M. Potts and L. Zdravkovic, 2001, “Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory”, Vol:1, Thomas Telford, 440 pp., London.
- [8] N. Yoshida and M. Hamada, 1991, “Damage to Foundation Piles and Deformation Pattern of Ground due to Liquefaction-Induced Permanent Ground Deformations”, Proc. Third Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Report NCEER-91-0001, pp.141-161.
- [9] A. Önalp ve S. Sert, 2006, “Geoteknik Bilgisi III: Bina Temelleri”, Birsen Yayınevi, İstanbul