

DOLGU ŞEVİ ALTINDAKİ TAŞ KOLONLARLA GÜÇLENDİRİLEN YUMUŞAK ZEMİNLERİN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF SOFT SOILS REINFORCED WITH STONE COLUMNS LOCATED UNDER THE EMBANKMENT SLOPE UNDER THE INFLUENCE OF EARTHQUAKES

Cenk Cuma ÇADIR¹, Ferhat ŞAHİNKAYA²

ÖZET

Son dönemde nüfus artışına bağlı olarak problemli zemin alanlarının kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Özellikle inşa edilecek otoyol güzergahlarında problemli zeminlerle sık sık karşılaşmaktadır. Bu problemli zeminler güçlendirilmediği takdirde üzerine inşa edilecek dolgu şevi stabilitesini kaybederek can ve mal kayıplarına neden olabilir. Yol güzergahlarındaki problemli zeminler, dolgu şevi oluşturulmadan önce uygun bir yöntem ile güçlendirilmelidir. Bu yöntemlerden biride taş kolon tekniğidir. Geçmiş dönemdeki yapılan çalışmalar incelendiğinde dolgu şevi altındaki taş kolonlarla güçlendirilmiş zeminlerin deprem etkisi altındaki davranışı hakkında çok fazla çalışma olmadığı görülmektedir.

Bu çalışmada Plaxis 2D programı yardımıyla taş kolonlarla iyileştirilen dolgu şevi altındaki tabakalı zeminlerin deprem etkisindeki davranışı incelenmiştir. Yapılan dinamik analizlerde 1989 yılında San Francisco’da meydana gelen Loma depremi olarak bilinen depremin ivme zaman parametreleri kullanılmıştır. Analizlerde 60 m genişliğinde ve 25 m kalınlığında (10 m kil ve 15 m kum zemin) zemin modeli üzerine 20 m genişliğinde ve 3 m yüksekliğinde dolgu şevi oluşturulmuştur. Daha sonra dolgu şevi altındaki zemin modeline 100 cm çapında, 10 m uygulama derinliğinde ve farklı aralıklarda (s/D:2, 3) taş kolonlar eklenmiştir. Yapılan analizler sonucunda deprem etkisinde taş kolonlar ile güçlendirilen dolgu şevli zemin modellerinde, kalıcı deplasmanların azaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla deprem yüklerinde karşı taş kolonlarla güçlendirilen zeminlerin üzerinde yer alan dolgu şevleri daha güvenli hale geldiği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Dolgu şevi, Zemin iyileştirme, Taş kolonlar, Deprem etkisi

¹ Arş. Gör., Yozgat Bozok Üniversitesi, cenk.cadir@bozok.edu.tr

² Arş. Gör., Yozgat Bozok Üniversitesi, ferhat.sahinkaya@bozok.edu.tr (Cenk Cuma ÇADIR)

ABSTRACT

Recently, the use of problematic soils has become obligatory due to population growth. Especially along the highway routes to be built, problematic soils are frequently encountered. If these problem soils are not consolidated, the fill slope to be constructed may lose its stability, resulting in loss of life and property. Problem soils along roads should be consolidated using an appropriate method prior to the construction of the embankment slope. One such method is the stone column technique. When previous studies were examined, it was found that there were not many studies on the behavior of soils reinforced with stone columns under the embankment slope under the influence of earthquakes.

In this study, the behavior of layered soils under the embankment slope reinforced with stone columns under the influence of earthquakes was investigated using Plaxis 2D program. The acceleration time parameters of the earthquake known as the Loma earthquake, which occurred in San Francisco in 1989, were used for the dynamic analysis. In the analyzes, a 20 m wide and 3 m high fill was formed on the 60 m wide and 25 m thick (10 m clay and 15 m sand) soil model. Then, stone columns with 100 cm diameter, 10 m installation depth and different spacing ($s/D:2, 3$) were placed in the soil model under the backfill. As a result of the conducted analyzes, it was found that the permanent displacements in the soil models reinforced with stone columns decreased under the action of earthquakes. Therefore, it can be said that the embankment slopes on the soils reinforced with stone column become more safety under earthquake loading.

Keywords: Embankment slope, Soil improvement, Stone columns, Earthquake effect

1. GİRİŞ

Son dönemde hızlı nüfus artışı ve buna bağlı olarak dolgu şevlerin sayısı artmıştır. Özellikle dolgu altında yer alan zeminin türü bu dolgu şevleri daha da önemli hale getirmektedir. Dolgu şevi gerekli stabiliteye sahip olsada altında yer alan zemin nedeniyle stabilitesini kaybedebilir. Bu tür şevlerin altında yer alan zeminlerin muhakkak satabilitesinin sağlanması gerekmektedir. Aksi takdirde şev, stabilitesini kaybederek can ve mal kayıplarına neden olabilir. Son dönemde tüm bunlara bağlı olarak zemin içinde kolon oluşturmaya dayanan birçok yöntem (fore kazık, mini kazık, jet grout, taş kolon vb.) yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de taş kolon tekniğidir. Diğer yöntemlere göre daha ekonomik bir yöntem olan taş kolonlar problemleri zeminlerde aşırı ve farklı oturmalarda, zemin taşıma gücü problemlerinde, sıvılaşma ve şev stabilitesi gibi bir çok problemin çözümünde kullanılmaktadır. Yumuşak zeminlerin iyileştirilmesi ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır (Mokhtari ve Kalantari 2012; Doan and Fatahi 2021; Basack et al., 2018). Taş kolon yöntemi yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Son dönemde birçok araştırmacı taş kolonların şevlerin stabilizasyonu üzerine etkisini incelenmişlerdir (Connor ve Gorski 2000, White vd. 2002, Kirsch ve Sondermann 2003, Plomteux ve Porhaba 2004, Deb vd. 2008, Vekli 2012 vb). Özellikle statik yükler dışında deprem gibi dinamik bir yük etkisinde yıkıcı sonuçları daha da arttıracak göz önünde bulundurulmalıdır.

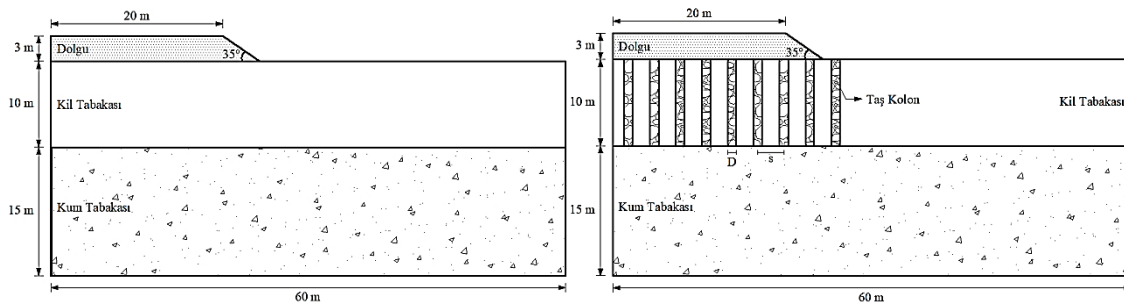
Yapılan çalışmalarda taş kolonun şevlerin stabilitesinin sağlanması noktasında olumlu bir etkisinin olduğu görülmüştür. Ancak taş kolonlarla iyileştirilmiş bir şevin tam zamanlı bir deprem etkisinde davranışını konusunda boşluk olduğu göze çarpmaktadır. Buradan

hareketle bu çalışmada, 1989 yılında San Francisco’da meydana gelen Loma depremi olarak bilinen depremin ivme zaman parametreleri kullanılmıştır. Analizlerde 60 m genişliğinde ve 25 m kalınlığında (10 m kil ve 15 m kum zemin) zemin modeli üzerine 20 m genişliğinde ve 3 m yüksekliğinde dolgu şevi oluşturulmuştur. Daha sonra dolgu şevi altındaki zemin modeline 100 cm çapında, 10 m uygulama derinliğinde ve farklı aralıklarda ($s/D:2, 3$) taş kolonlar eklenmiştir. Çalışmada Taş kolonun tam zamanlı bir deprem yükü etkisinde şevin stabilitesi üzerinde ne gibi bir katkısı olduğu değerlendirilmiştir.

1. MALZEME VE METOT

Bu çalışmada iyileştirme yöntemi olarak seçilen taş kolonların ilk uygulamalarına 1835 yılında Fransa’da ordunun mühendisleri tarafında büyük silah deposu altındaki zemini iyileştirmek amacıyla yapılmıştır. 1939 yılına kadar kullanılmayan taş kolon tekniği Almanya’da kendine yeni bir uygulama alanı bulmuştur. Bu tarihten sonrada taş kolon 1950 yılından beri Avrupa’da, 1972 yılından beri de Amerika’da yaygın olarak kullanım alanı bulmakta günümüzde de birçok alanda kullanım alanda artmıştır (Vekli ve diğ. 2012). Genel olarak taş kolonlar ile problemlili yumuşak ve gevşek zeminlerin taşıma gücünün artırılması, konsolidasyon ve oturma problemlerinde, dolgu ve yarma şevi stabilitesinin sağlanması (Connor ve Gorski 2000, White vd. 2002, Kirsch ve Sondermann 2003, Plomteux ve Porhaba 2004, Deb vd. 2008, Vekli 2012, Ghazavi 2013, Zhang 2014, Fathi 2016, Shaji Akhila 2016, Vekli 2016, Simon Reeves 2017), ve deprem gibi dinamik bir yük etkisinde meydana gelen sıvılaşma v.b. gibi problemlerde (Adalier ve Elgamel 2004, Al-Homoud ve Degen 2006, Javad Nazari Afshar 2010, Jin Man Kim vd. 2012, K.V.S.B. Raju 2013, Jeong-Ho Ryu ve Jin Man Kim 2013, Yongxiang Zhan 2014, Arsalan Salahi 2015, Tang 2015) gibi konularda birçok uygulama alanı bulmuştur.

Çalışmada taş kolonlu ve taş kolonsuz şevlerin modellenmesinde Plaxis 2D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Plaxis 2D programında taş kolonlu ve taş kolonsuz şev modelleri 15 düğümlü üçgen elemanlar ile düzlem deformasyon (plain strain) olarak modellenmiştir. Zemine zamana bağlı ivme uygulanarak deprem simülasyonu yapılacağı ve analiz sırasında zeminin sönümlenmesi gerekeceği vb. durumlar göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmada zemin modeli olarak şevi HSsmall malzeme modeli kullanılmıştır (Raikar, 2016). Çalışmada 1989 yılında San Francisco’da meydana gelen Loma depremi olarak bilinen depremin ivme zaman parametreleri kullanılmıştır. Analizlerde 60 m genişliğinde ve 25 m kalınlığında (10 m kil ve 15 m kum zemin) zemin modeli üzerine 20 m genişliğinde ve 3 m yüksekliğinde dolgu şevi oluşturulmuştur. Daha sonra dolgu şevi altındaki zemin modeline 100 cm çapında, 10 m uygulama derinliğinde ve farklı aralıklarda ($s/D:2, 3$) taş kolonlar eklenmiştir (Şekil 1.).



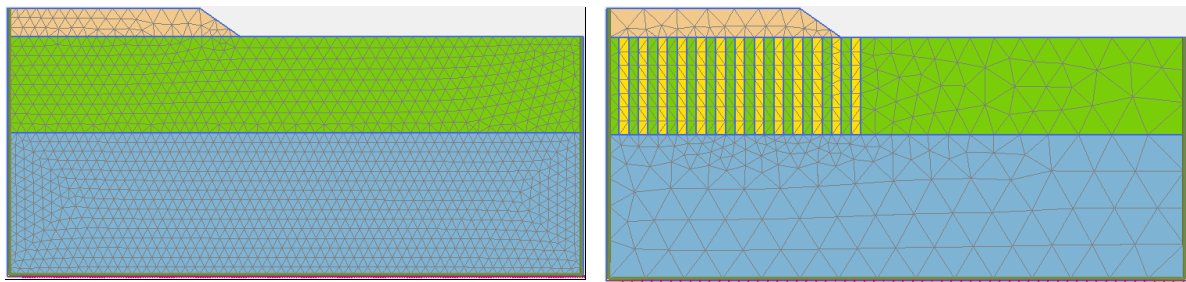
Şekil 1. Taş kolonlu ve taş kolonsuz şev modelleri

Modelde kullanılan kil, kum ve taş kolon oluşturulmasında kullanılan çakıl malzemesine ait parametreler Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Taş kolonsuz ve taş kolonlu şev modellerinde kullanılan malzeme özellikleri

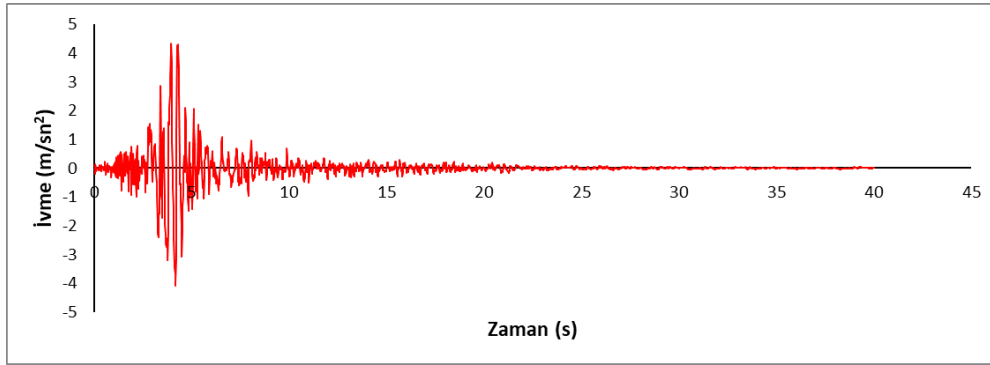
Parametre	Kil	Sıkı kum	Taş kolon	Dolgu
Drenaj Durumu	Drenajsız	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_k (kN/m ³)	16	20	21	16
Suya Doygun Birim Hacim Ağırlık, γ_d (kN/m ³)	20	20	21	20
Permabilite, k_x, k_y (m/gün)	1×10^{-8}	5	50	1
Drenajlı üç eksenli deneylerle elde edilen sekant rijitliği, E_{50}^{ref} (kN/m ²)	5000	30×10^3	30×10^3	9000
Drenajlı odömetre deneyleriyle elde edilen tanjant rijitliği, E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	7795	36×10^3	30×10^3	$10,6 \times 10^3$
Elastik yükleme/boşaltma rijitliği, E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	$22,84 \times 10^3$	$110,8 \times 10^3$	90×10^3	$18,05 \times 10^3$
Zeminin gerilme bağımlı sertliği, power (m)	1	0,5	0,5	0,5
Poisson Oranı, ν	0,2	0,2	0,2	0,2
Kohezyon, c , (kN/m ²)	10	5	1×10^{-8}	5
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	18	28	35/40/45	30
Toprak Basıncı Katsayısı, K_0^{nc}	0,65	0,53	0,43	0,44
Maksimum kayma modülü, G_{0ref}	9×10^4	1×10^5	$2,5 \times 10^5$	120×10^3
Kayma birim deformasyonu, γ_{07}	$0,12 \times 10^{-3}$	$0,15 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-5}$	$0,02 \times 10^{-3}$

Çalışmada yapılan analizlerde model tipi düzlem deformasyondur (plain strain). Oluşturulan model 15 düğümlü üçgen elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 2.).



Şekil 2. Taş kolonlu ve taş kolonsuz şev modellerinde zemin atanması ve ağın oluşturulması

Çalışmanın amacı doğrultusunda taş kolonlu ve taş kolonsuz şev modellerinin deprem etkisindeki davranışını belirlemek için 1989 yılında San Francisco’da meydana gelen Loma Prieta depreminin ivme zaman grafikleri kullanılmıştır (Şekil 3.). Depremin moment büyüklüğü $M_w=6.9$ olarak ölçülmüş olup deprem etkili zamanı 15 saniye olarak belirlenmiştir.

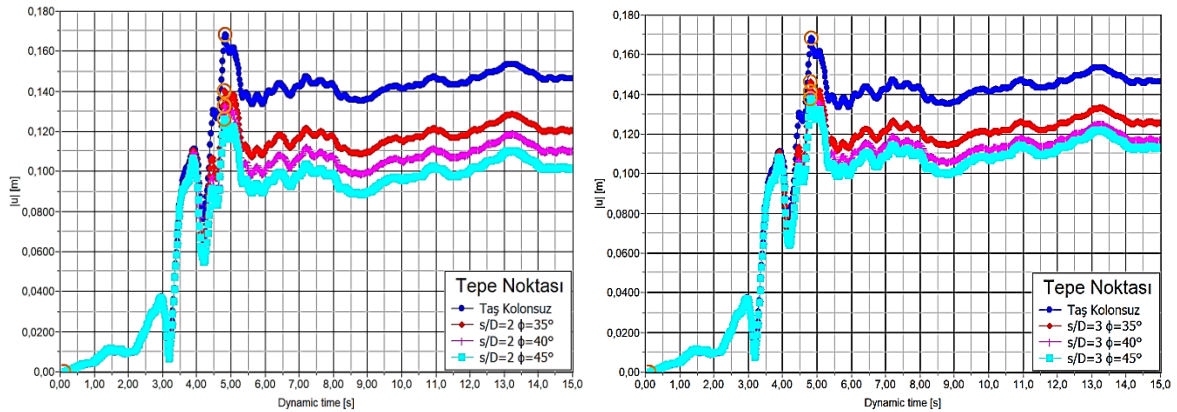


Şekil 3. 1989 Loma Prieta depreminin ivme-zaman grafiği

2. SONLU ELEMEN ANALİZLERİ VE BULGULARI

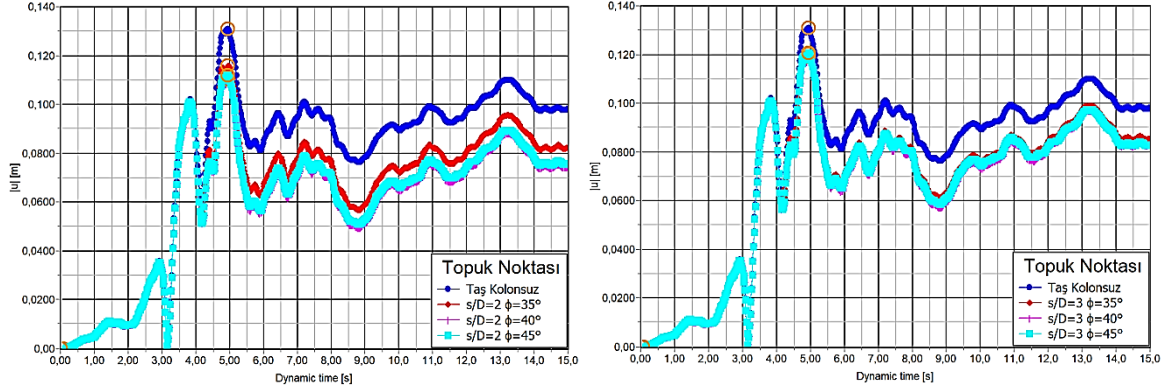
Genel olarak Bu çalışmanın amacı, dolgu şevi altında yer alan taş kolonlarla güçlendirilmiş yumuşak zeminin deprem gibi sismik yükler altındaki davranışını zaman tanım alanında incelemektir. Çalışmada İlk etapta 60 m genişliğinde ve 25 m kalınlığında (10 m kil ve 15 m kum zemin) zemin modeli üzerine 20 m genişliğinde ve 3 m yüksekliğinde dolgu şevi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu şev modeline herhangi bir iyileştirme yapılmadan özellikleri 1989 Loma Prieta depremi etki ettirilerek modelin davranışı incelenmiştir. Daha sonra dolgu şevi altındaki zemin modeline 100 cm çapında, 10 m uygulama derinliğinde ve farklı aralıklarda ($s/D:2, 3$) taş kolonlar eklenerek yine aynı deprem etkisinde Plaxis 2D programı yardımıyla dinamik analizleri yapılmıştır.

Yapılan analiz sonucunda dinamik zaman dikkate alınarak taş kolonsuz ve taş kolonlu dolgu şev tepe noktasına ait kalıcı deplasman ($[u]$) değerleri bulunmuştur (Şekil 4.).

Şekil 4. Taş kolonsuz ve Taş kolonlu dolgu şevlerin tepe noktasına ait deplasman ($[u]$) değerleri

Taş kolonsuz dolgu şev için ivmenin maksimum olduğu noktada şevin tepe noktası için 17,0 cm'lik bir kalıcı deplasman meydana gelmiştir. Dolgu şevi altındaki yumuşak zemin belirli aralıklarda taş kolonlar eklendikten sonra deplasman değeri 13,5 cm'ye ($s/D=2$; $\phi=45^\circ$ için) kadar düştüğü görülmüştür.

Dolgu şevi tepe noktası dışında taş kolonsuz ve taş kolonlu şevin topuk kısmından kalıcı deplasman değerleri belirlenmiştir (Şekil 5.).



Şekil 5. Taş kolonsuz ve Taş kolonlu dolgu şevlerin tepe noktasına ait deplasman ($[u]$) değerleri

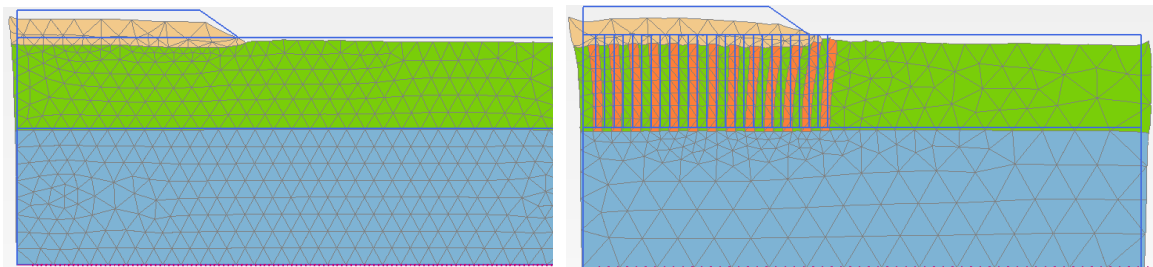
Dolgu şevin topuk kısmında meydana gelen maksimum kalıcı deplasman değeri 13,7 cm olarak belirlenmiştir. Dolgu şevi altındaki yumuşak zemin belirli aralıklarda taş kolonlar eklendikten sonra deplasman değeri 11,0 cm'ye ($s/D=2$; $\phi=45^\circ$ için) kadar düştüğü görülmüştür.

Deprem etkisinde yapılan analizler sonucunda elde edilen kalıcı deplasman değerleri Tablo 2.'de detaylı olarak verilmiştir.

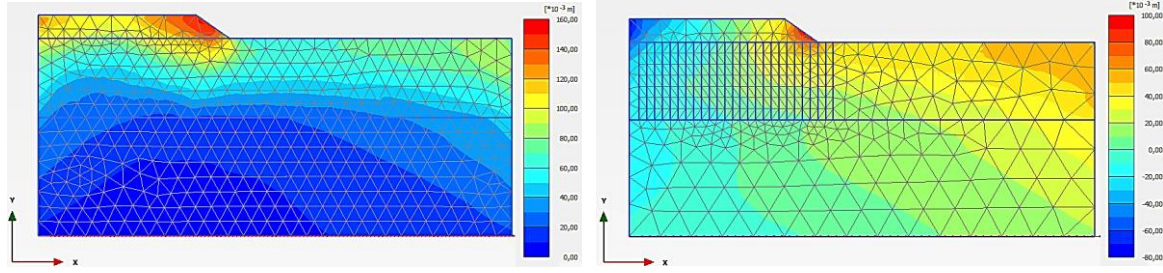
Tablo 2. Taş kolonsuz ve taş kolonlu dolgu şev tepe noktasında meydana gelen kalıcı deplasman değerleri

Kalıcı Deplasman Alındığı Noktalar	Taş Kolonsuz Dolgu Şevi Tepe Noktasında Oluşan Kalıcı Deplasman $[u]$ (cm)	Taş Kolon için İçsel Sürtünme Açısı (ϕ°)	Taş Kolonlu Dolgu Şevi Tepe Noktasında Oluşan Kalıcı Deplasman $[u]$ (cm)	
			Taş Kolon Uygulama Aralığı (s/D)	
			$s/D=2$	$s/D=3$
Şev Tepe Noktası	17,0	$\phi=30^\circ$ için	14,0	14,5
		$\phi=40^\circ$ için	13,0	14,0
		$\phi=45^\circ$ için	11,0	13,8
Şev Topuk Noktası	13,7	$\phi=30^\circ$ için	11,8	12,4
		$\phi=40^\circ$ için	11,5	12,3
		$\phi=45^\circ$ için	11,3	12,2

Taş kolonlu ve taş kolonsuz şevlerin analiz sonrasındaki deformasyon ve kalıcı deplasman görüntüleri ise Şekil 6. Ve Şekil 7.'de verilmiştir.



Şekil 6. Taş kolonlu ve taş kolonsuz şev modellerinin analiz sonrasındaki görünümü



Şekil 7. Taş kolonlu ve taş kolonsuz şev modellerinin analiz sonrasında kalıcı deplasman değerleri

3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan taş kolonsuz ve taş kolonlu analiz sonuçlarından; taş kolonsuz şevlerin tepe noktasının topuk noktasına göre % 19,42 daha fazla deplasman yaptığı, Taş kolonlu şevlerde ise bu oranın % 2,65'e kadar düştüğü görülmüştür. Taş kolonlu şevlerde tepe ile topuk arasındaki deplasman farkının az olması, dolgu şevi altına yerleştirilen taş kolonların yumuşak zemini daha iyi tutmasıyla açıklanabilir. Diğer taraftan şeve taş kolon yerleştirilmesi ile taş kolonsuz şevlere göre şev tepe noktasında meydana gelen deplasman % 35,29 oranında topuk noktasında ise % 17,52 oranında azaldığı görülmüştür. Yine bu durum yumuşak zemin içerisine yerleştirilen taş kolonun zemini deprem etkisinde yanal yönde daha rijit hale getirmesi nedeniyle üzerinde yer alan dolgu şevinin hareketini kısıtlamasıyla açıklanabilir. Taş kolonlu şevler kendi içinde kıyaslandığında en etkili kolon aralığının $s/D=2$ olduğu dolayısıyla kolon aralığı arttıkça meydana gelen deplasman değerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum yumuşak zeminin yanal yönde daha da sıkışması ve yumuşak zemine göre daha rijit olan taş kolon alanının artması (alan oranının artması) şeklinde açıklanabilir.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde tabakalı zeminden oluşan bir şevin deprem etkisinde stabilitesinin sağlanmasında taş kolon yönteminin etkili şekilde kullanılabileceği sonucu çıkarılabilir.

KAYNAKLAR

- Adalier, K. ve Elgamal, A. (2004), "Mitigation of Liquefaction and Associated Ground Deformations by Stone Columns". Journal of Engineering Geology, 72, 4, 275-291.
- Afshar, J.N., Ghazavi, M. and Hemmati, K., (2010), "Analytical Method for Seismic Bearing Capacity of Stone-Column Reinforced Shallow Foundations", 5. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Al-Homoud, A.S., ve Degen, W.S., (2006), "Marine Stone Columns to Prevent Earthquake Induced Soil Liquefaction", Geotechnical and Geological Engineering, 24, 775– 790.
- Basack, S., Siahaan, F., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C., (2018), "Stone column-stabilized soft-soil performance influenced by clogging and lateral deformation: laboratory and numerical evaluation", Int. J. Geomech., 18, p. 04018058
- Cadir, C.C., Vekli, M. and Şahinkaya, F., (2021), "Numerical analysis of a finite slope improved with stone columns under the effect of earthquake force", Natural Hazard, 106:173–211.

- Connor, S.S. and Gorski, A.G., (2000), "A Timely Solution for the Nojoqi Grade Landslide Repair", US 101 South of Buellton 51 st Annual Highway Geology Symposium, Seattle, 1-11.
- Deb, K., Basudhar, P.K. and Chandra, S., (2008), "Response of Multilayer Geosynthetic-Reinforced Bed Resting on Soft Soil with Stone Columns", Computers and Geotechnics 35, 323–330.
- Doan, S. and Fatahi, B., (2021), "Green's function analytical solution for free strain consolidation of soft soil improved by stone columns subjected to time-dependent loading" Computers and Geotechnics, Volume 136, 103941.
- Fathi, E. and Mohtasham, R., (2016), "Numerical Analysis of the Reinforced Stone Column by Geosynthetic on Stability of Embankment", Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16) Prague, Czech Republic.
- Ghazavi, M. and Afshar, J.N., (2013), "Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns", Geotextiles and Geomembranes 38:26-36.
- Jeong-H.R., and Jim M.K., (2013), "Seismic Performance of Stone-Column- Reinforced", Marine SoftSoil. EJGE, Vol 18 pp 497-508.
- Jin M.K., S.W., Son Mahood, K.M. and Jeong, H.R., (2012), "Site Response and Shear Behavior of Stone Column-Improved Ground under Seismic Loading", 15 WCEE, Lisboa.
- Kirsch, F. and Sondermann, W., (2003), "Field Measurements and Numerical Analysis of the Stress Distribution below Stone Column Supported Embankments and their Stability". Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soil Theory and Practice, Essen, p.595-600.
- Mehrannia, N., Kalantary, F. and Ganjian, Navid., (2018), "Experimental study on soil improvement with stone columns and granular blankets". J. Cent. South Univ. 25: 866–878.
- Mokhtari, M. and Kalantari, B., (2012), "Soft Soil Stabilization using Stone Columns-A Review". EJGE, Vol. 17 Bund. J.
- Plomteux, C., Porbaha, A. and Spaulding, C., (2004), "CMC Foundation System for Embankment Support, A Case History". Proc. of Geo Support Conference Orlando, Florida, USA, p.980–992.
- Raikaar, P., (2016), "Modelling Soil Damping for Suction Pile Foundations". Master Of Science Thesis, Delft University of Technology.
- Raju, K.V.S.B., Govinda R.L. and Chandrashekhar, A.S., (2013), "Cyclic Response of Stone Columns". International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 5.
- Reeves, S., (2017), "Slope Stabilisation using Stone Column Ground Improvement", Issue 93.
- Şahinkaya, F., Vekli, M. and Cadir, C.C., (2017), "Numerical analysis under seismic loads of soils improvement with floating stone columns". Natural Hazard, Volume 88, Issue 2, pp 891–917.
- Salahi, A., Niroumand, H. and Kassim, K.A., (2015), "Evaluation of Stone Columns versus Liquefaction Phenomenon". Ejge Vol. 20, pp739-759.

- Shaji, A., Anil A., Haripriya, M., Rajeswari, K.R. and Thomas G., (2016), “Stability Analysis Of Soft Clay Stabilized Using Stone Column”. International Conference on Structural Engineering & Construction Management (SECM), Special Issue, Vol. 3, No. 1.
- Tang, L., Cong, S., Ling, X., Lu, J. and Elgamal, A., (2015), “Numerical study on ground improvement for liquefaction mitigation using stone columns encased with geosynthetics”. *Geotextiles and Geomembranes* 43, 190-195.
- Vekli, M., Aytekin, M. İkizler, S.B. ve Çalık, Ü., (2012), “Taş kolonla iyileştirilmiş şevlerin stabilite analizi”. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2):88-96.
- Vekli, M., Aytekin, M. İkizler, S.B. and Çalık, Ü., (2012), “Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns”. *Natural Hazards*, Vol 64 (1), pp. 797-820.
- White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G. and Gaul, A.J., (2002), “Embankment Support :A Comprasion of Stone Column and Rammed Aggregaten Pier Soil Reinforcement”. Transportation Research Board, 81st Annual Meeting, Washington D.C.
- Zhan, Y., Jiang, G. and Yao, H., (2014), “Dynamic Characteristics of Saturated Silty Soil Ground Treated by Stone Column Composite Foundation”. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 745386, 7 pages.
- Zhang, Z., Han, J. and Ye, G., (2014), “Numerical investigation on factors for deep-seated slope stability of stone column-supported embankments over soft clay”. *Engineering Geology* 168:104–113.

