

DEPREM YÜKLERİ ALTINDA KURU KUMLARDA MEYDANA GELEN OTURMALARIN SONLU ELEMAN ANALİZLERİYLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF EARTHQUAKE-INDUCED SETTLEMENTS OF DRY SANDS USING BY FINITE ELEMENT ANALYSES

Ozan SUBASI*¹

Serdar KOLTUK²

Recep İYISAN³

ABSTRACT

One of the most important causes of damage resulting from strong ground motions is non-uniform settlements in sandy soil layers. While settlements in dry sands are completed in a short time, they may occur in saturated sands with the damping of the excess pore water pressure developed during an earthquake. In this study, the deformation behavior of a dry and loose sand layer under 5 different real acceleration-time records is investigated using the Finite Element Method and Hardening Small Strain model. The results of these analyses were compared with those obtained from the semi-empirical method in the literature.

Keywords: Earthquake-induced settlements, Dry sands, Finite-element method, Hardening small strain model, Semi-empirical methods

ÖZET

Kuvvetli yer hareketleri sonucunda oluşan hasarların en önemli nedenlerinden birisi, kum zemin tabakalarında meydana gelen, uniform olmayan oturmalar. Bu oturmalar, kuru kumlarda kısa süre içinde tamamlanırken, suya doygun kumlarda, deprem sırasında gelişen aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile meydana gelmektedir. Bu çalışma kapsamında, kuru ve gevşek bir kum tabakasının deformasyon davranışı, 5 farklı gerçek ivme-zaman kaydı kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi ve Hardening Small Strain modeli ile incelenmiştir. Elde edilen oturma değerleri, literatürde bulunan yarı ampirik yöntemden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deprem nedenli oturmalar, Kuru kumlar, Sonlu elemanlar yöntemi, Hardening small strain model, Yarı-ampirik yöntemler

1. GİRİŞ

*¹ M.Sc., Türk-Alman Üniversitesi, subasi@tau.edu.tr (Yazışma yapılacak yazar)

² Dr., TU Berlin, serdar.koltuk@campus.tu-berlin.de

³ Prof. Dr., TU İstanbul, iyisan@itu.edu.tr

Deprem sırasında meydana gelen kayma deformasyonları, kaba daneli zeminlerde sıkışmaya neden olabilmektedir. Kuru zeminlerde, zemin danelerinin yeniden düzenlenmesi nispeten hızlı bir şekilde gerçekleşirken, doymuş zeminlerde sıkışma ancak deprem sonucu ortaya çıkan aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile mümkün olmaktadır [1-2].

Geçmiş yıllarda meydana gelen sismik olaylar (San Fernando depremi 1971, Northridge depremi 1994, Colima depremi 2003 vb.) göstermiştir ki bu tür oturmalar; binalara, yollara, toprak yapılar ve yer altı yapılarına (Gömülü boru hatları, tüneller vb.) önemli ölçüde zarar verebilir.

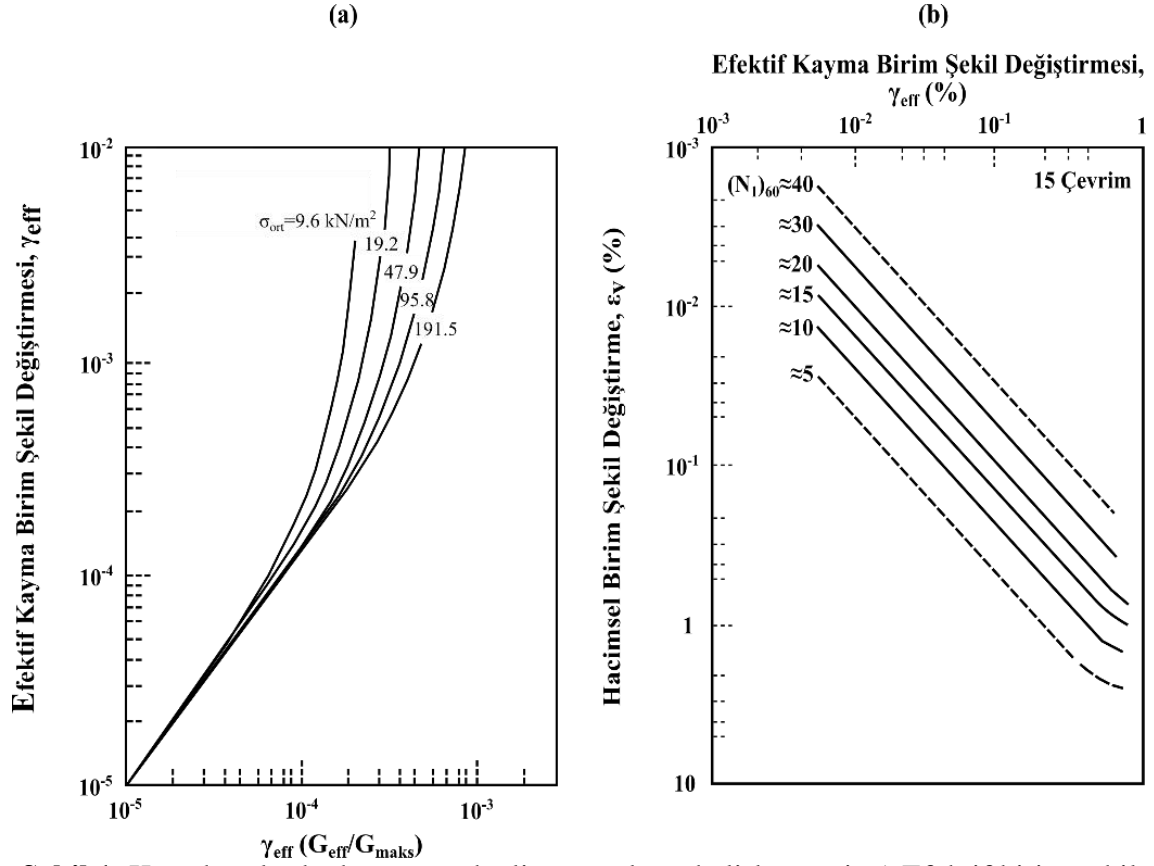
Literatürde, kuru kumlarda deprem nedeniyle meydana gelebilecek oturmaların belirlenmesi için çok sayıda yarı-ampirik yöntem bulunmaktadır [3-9]. Bu yöntemler, ağırlıklı olarak düz yüzeye sahip arazi koşulları için laboratuvar deneylerine dayalı sonuçlarla geliştirilmiş ve arazi çalışmaları ile kalibre edilmiştir.

Bu çalışmada, kuru kum zemin tabakasında meydana gelen deformasyonlar 5 farklı gerçek ivme-zaman kaydı için, sonlu elaman yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen oturma değerleri, Tokimatsu ve Seed (1987) [4] tarafından geliştirilmiş yarı-ampirik yöntemden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

2. KURU KUMLARDA KUVVETLİ YER HAREKETİ NEDENİYLE MEYDANA GELEN OTURMALARININ İNCELENMESİ

2.1. Yarı-Ampirik Yöntemler

Yüzde 5`ten daha az ince dane içeren kuru kumlarda, deprem nedeniyle gelişebilecek oturmaların belirlenmesi için geliştirilmiş yarı-ampirik yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan Tokimatsu ve Seed (1987) tarafından önerilen ve Şekil 1`de verilen yaklaşımdır [4].



Şekil 1. Kuru kumlarda deprem nedenli oturmaların belirlenmesi: a) Efektif birim şekil değiştirmenin belirlenmesi, b) Hacimsel birim şekil değiştirmenin belirlenmesi [4]

Bu yöntemde, ilk önce efektif birim şekil değiştirme (γ_{eff}) değeri, Şekil 1a yardımıyla belirlenmelidir. Bunun için, öncelikle incelenen derinlikteki ortalama asal gerilme değeri (σ_{ort}), Denklem 1 kullanılarak belirlenir.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_v' [1 + 2 \cdot (1 - \sin \phi) \cdot (OCR)^{\sin \phi}]}{3} \quad (1)$$

Denklem 1'de σ_v' , incelenen derinlikteki toplam düşey gerilme, ϕ kumun içsel sürtünme açısı, OCR, aşırı konsolidasyon oranı olup ilk kez yüklemeye maruz kalan kumlar için 1 kabul edilebilir. Önceden yüklemeye maruz kalmış kumlarda ise 1'den büyük değerler alabilmektedir.

Şekil 1a'da yatay ekseninde yer alan $\gamma_{eff} (G_{eff}/G_{maks})$ değeri ise aşağıda yer alan denklem 2 ile elde edilmektedir.

$$\gamma_{eff} \cdot \left(\frac{G_{eff}}{G_{maks}} \right) = CSR \cdot \left(\frac{\sigma_v'}{G_{maks}} \right) \quad (2)$$

Denklem 2'de; CSR, çevrimsel gerilme oranı, σ_v' incelenen derinlikteki efektif düşey gerilmedir. G_{maks} ise maksimum kayma modülü olup Denklem 3 ile belirlenmektedir.

$$G_{maks} = 4376 \cdot [(N_1)_{60}]^{0,333} \cdot \sqrt{\sigma_{ort}} \quad (3)$$

Denklem 3'te yer alan $(N_1)_{60}$ değeri düzeltilmiş SPT-N sayıdır.

7.5 moment büyüklüğü için hacimsel birim şekil değiştirme ($\epsilon_{v,7.5}$) değeri, efektif kayma birim deformasyonuna (γ_{eff}) ve düzeltilmiş SPT-N sayısına bağlı olarak Şekil 1b'den elde edilir. Bununla birlikte bu $\epsilon_{v,7.5}$ değeri, farklı moment büyüklükleri için belirli katsayılar ile çarpılarak düzeltilmelidir. Bu katsayılar, $M_w=8.5$ için 1.25; $M_w=6.75$ için 0.85; $M_w=6.0$ için

0.6 ve $M_w = 5.25$ için ise 0.4 olarak verilmiştir. Son olarak, moment büyüklüğüne göre düzeltilen $\varepsilon_{v,7.5}$ değeri, deprem yüklerinin yatay düzlemde çift yönlü etkisi dikkate alınarak 2 ile çarpılmalıdır [9].

Son olarak, deprem nedeniyle meydana gelen oturma değerleri (S) aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmektedir.

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_{v,i} \cdot H_i \quad (4)$$

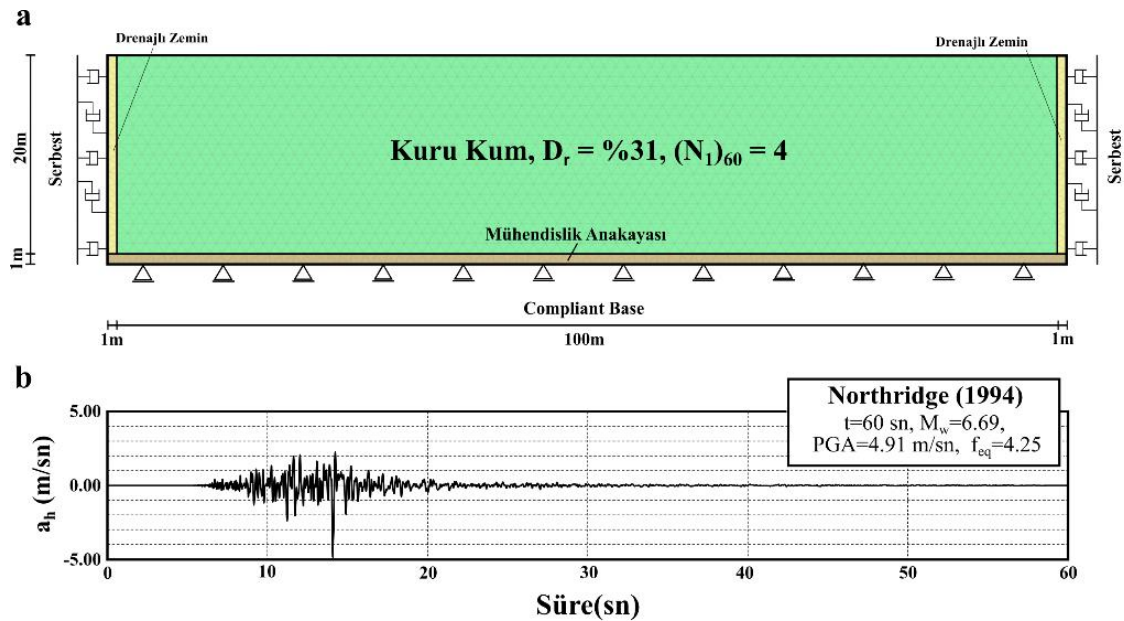
Bu eşitlikte yer alan n, tabaka sayısı, $\varepsilon_{v,i}$, i. tabakada gelişen hacimsel birim şekil değiştirme değeri ve son olarak H_i , i. tabaka kalınlığıdır.

2.2. Sayısal Yöntem

Bu çalışma için gerçekleştirilen sayısal analizler, sonlu elemanlar metoduna dayanan Plaxis-2D (2019) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [10]. Bu analizler için oluşturulan zemin modeli, kullanılan sismik yüklerin özellikleri ve deprem yükleri altında zemin davranışını modellemek amacıyla kullanılan bünye denklemleri aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1. İki boyutlu sayısal model

Analizlerde, rölatif sıklığı % 31 olan ve SPT-N sayısı yaklaşık 4 olan ve Şekil 2a'da gösterilen kuru bir kum zemin tabakası incelenmiştir. Kuru kum tabakasının kalınlığı 20 m olup, modelin en altında kuvvetli yer hareketi kaydını etkilemek için 1 m kalınlığında anakaya tanımlanmıştır. Modelin yatay uzunluğu ise analiz sonuçlarını etkilemeyecek şekilde, yapılan ön analizler sonucunda 100 m olarak seçilmiş ve sınır şartları ile uygunluk göstermesi için modelin her iki tarafına 1 m kalınlığında kum zemin tabakası ile benzer özelliğe sahip drenajlı zemin tabakaları tanımlanmıştır. Analizlerde, dinamik zemin davranışının doğru bir şekilde modellenebilmesi için alt sınır koşulu "compliant base", üst ve yatay sınır koşulları ise "serbest" seçilmiştir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar yöntemi: a) Sayısal model, b) Sismik yük

Ön incelemelere dayanarak, numerik analizlerde kullanılan hedef-sönüm oranı, %2 olarak programa girilmiştir. Aynı şekilde, yapılan ön analizler sonucunda, 15 düğüm noktalı, 3424

üçgen elemandan oluşan ve ortalama eleman boyutunun yaklaşık 1.20 metre olduğu bir sonlu eleman ağının numerik sonuçlarının sabit bir değere yakınsadığı görülmüştür [11].

Yapılan analizler toplamda 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, kuru kumun deprem yükünden önceki gerilme durumu, K0-prosedürü kullanılarak oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise FE modelinin tabanı boyunca sismik yükleme etkilmiştir ve Hardening Small Strain modeli kullanılarak dinamik bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu aşamanın süresi, depremin süresine karşılık gelmektedir (Şekil 2b). Bu aşamada, kuvvetli yer hareketi, tanımlı deplasman (prescribed displacement) olarak sadece yatay yönde 0.5 m olarak etkilmiştir.

2.2.2. Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları

Yapılan iki boyutlu numerik analizlerde, Tablo 1'de özellikleri verilen geçmiş yıllarda meydana gelen depremlerde, anakaya üzerinde alınmış 5 farklı ivme-zaman kaydı kullanılmıştır [12]. Bu kuvvetli yer hareketi kayıtlarına, baseline düzeltmesi yapılmış ve Butterworth yöntemine göre 0.5-15 Hz arasında bandpass filtreleme uygulanmıştır.

Tablo 1. Depremler ve özellikleri [12]

No	Deprem	Kırılma Mekanizması	M_w (-)	PGA (g)	f_{eq} (Hz)	I_a (m/s)	I_c (-)	CAV (m/s)
1	Chi Chi	Ters Oblik	7.62	0.51	1.32	1.17	1.68	13.13
2	Iwate	Ters	6.90	0.27	0.59	1.10	0.05	11.10
3	Kobe	Ters	6.90	0.24	0.73	0.79	0.05	6.45
4	L'aquila	Normal	6.30	0.31	0.59	1.05	0.05	8.58
5	Northridge	Ters	6.69	0.50	4.25	1.05	0.05	7.55

2.2.3. Bünye Denklemleri

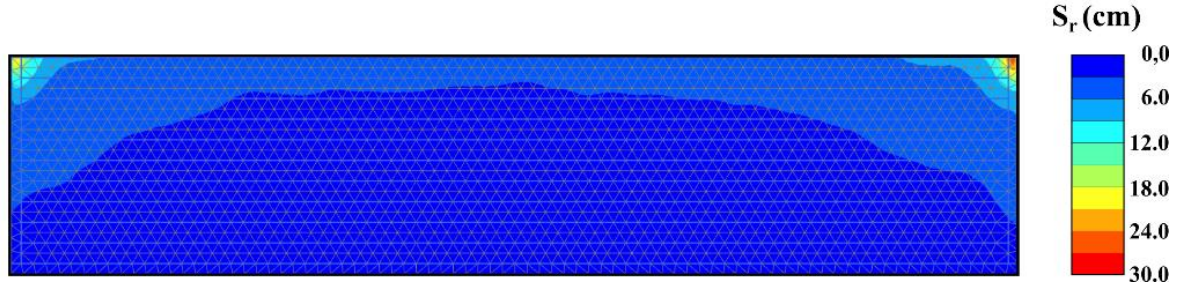
Numerik modelin tabanında yer alan 1 m kalınlığındaki ana kayanın gerilme deformasyon davranışı Hooke yasası kullanılarak modellenmiştir ($\nu = 0,25$, $E = 5600 \text{ MPa}$). 20 m kalınlığındaki % 31 rölafet sıklığına sahip kuru kum tabakasının dinamik yükler altındaki davranışını modellemek için ise Hardening Small Strain modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde kullanılan Hardening Small Strain parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hardening Small Strain modeline göre kuru kum zemin özellikleri [10]

Hardening Small Strain Model												
Sembol	$E_{50,ref}$ (MPa)	$E_{oed,ref}$ (MPa)	$E_{ur,ref}$ (MPa)	M	c' (MPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	$\gamma_{0.7}$	$G_{0,ref}$ (MPa)	ν (-)	P_{ref} (MPa)	R_f
Değer	20	16	60	0.65	0	34	0	0.0001	70	0.2	0.1	0.9

3. ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILASTIRMA

Plaxis 2D (2019) `den elde edilen oturma değerlerine örnek teşkil etmesi için Northridge depremi ile elde edilen oturma değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, en yüksek oturma değerleri modelin yüzeyinde yer alan köşe noktalarında oluşmaktadır. Bu durumun nedeni, deprem dalgalarının modelin bu bölgelerinde yoğunlaşmasıdır ki bu durum yanlıcıdır. Dolayısıyla, modelin üst yüzeyinin ortasında gelişen oturma değeri dikkate alınmalıdır ve bu oturma değeri Northridge depremi için 2.6 cm`dir.



Şekil 3. Sonlu elemanlar yöntemi ile Northridge depremi için elde edilen düzey deformasyonlar

Nümerik analizlerden elde edilen oturma değerlerini, Tokimatsu ve Seed (1987) [4] tarafından önerilen yöntemden elde edilen değerler ile karşılaştırabilmek için, zemin yüzeyinde gelişen maksimum yatay deprem ivmesi değerlerinin $a_{h,max}$ bilinmesi gerekmektedir. Bu ivme değerleri, Deepsoil 7.0 (2020) [13] programı ile yapılan bir boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizler sonucu elde edilmiştir. Tablo 3`de, sonlu elemanlar ve Tokimatsu ve Seed (1987) yöntemlerine göre, 5 farklı deprem kullanılarak elde edilen oturma değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Sonlu elemanlar ve yarı-ampirik yöntemlerden elde edilen oturmalar

Deprem	Chi Chi	Iwate	Kobe	L'aquila	Northridge
Plaxis 2D (cm)	3.2	1.1	2.2	2.0	2.6
Tokimatsu ve Seed (1987) (cm)	1.9	1.8	2.5	1.7	1.7

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada, % 31 rölatif sıklığa sahip kuru bir kum tabakasının oturması, 5 farklı ivme-zaman kaydı için, sonlu elemanlar yöntemi ve Hardening Small Strain modeli kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen oturma değerleri, Tokimatsu ve Seed (1987) tarafından geliştirilmiş yöntemden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Analizler sonucunda, her iki yöntemle de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak Hardening Small Strain zemin modelinin kullanımının, gerilme-deformasyon diyagramında pik değere ulaşıktan sonra önemli ölçüde düşüşün görüldüğü ve tekrarlı yüklere maruz zeminlerde dinamik davranışının modellenmesinde uygun olmadığı unutulmamalıdır. Ayrıca yine bu zemin modeliyle, elastik olmayan hacimsel birim şekil değiştirmelerin birikiminin dikkate alınamayacağı da belirtilmelidir. Buna karşın, yarı-ampirik yöntemlerde dikkate alınmayan, yapı-zemin etkileşimi ve topografik düzensizlikler sonlu elemanlar yöntemiyle dikkate alınarak, elde edilen oturma değerlerinin gerçeğe daha yakın olacağı aşikardır.

Son olarak belirtmelidir ki, her iki yöntem, daha fazla deprem yükü ve daha farklı özellikteki kuru kumlar için incelenmeli ve model deneylerle sonuçlar desteklenmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Youd, T.L., "Liquefaction Mechanisms and Induced Ground Failure", International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, 81, pp. 1159-1173, 2003.
- [2] National Research Council (1985), "Liquefaction of soils during earthquakes", National Academy Press, Washington, D.C.

- [3] Seed, H.B., Silver, M.L., “Settlement of dry sands during earthquakes”, J. Soil Mech. Found. Div.,98 (SM4), pp. 381-397, 1972.
- [4] Tokimatsu, K., Seed, H.B., “Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking”, Journal of Geotechnical Engineering,113 (8), pp. 861-878, 1987.
- [5] Pradel, D., “Procedure to evaluate earthquake-induced settlements in dry sandy soils”, J. Geotech. Geoenviron. Eng.,124 (4), pp. 364-368, 1998.
- [6] Duku, P.M., Stewart, J.P., Whang, D.H. and Yee, E., “Volumetric strains of clean sands subject to cyclic loads”, J. Geotech. Geoenviron. Eng.,134 (8), pp. 1073-1085, 2008.
- [7] Yi, F., “Procedure to evaluate seismic settlement in dry sand based on shear wave velocity”, Proc. 9th U.S. National 10th Canadian Conf. on Earthquake Engr. (9USN/10CCEE), July 2010, Toronto-Canada.
- [8] Lasley, S., Green, R., Chen, Q. and Rodriguez-Marek, A., “Approach for Estimating Seismic Compression Using Site Response Analyses”, J. Geotech. Geoenviron. Eng.,142 (6): 04016015, 2016.
- [9] Pyke, R., Seed, H.B., and Chan, C.K., “Settlement of sands under multidirectional shaking”, Journal of Geotech. Engr. Div.,101 (4), pp. 379-398, 1975.
- [10] Plaxis 2D (2019), “Material Models Manual”, Plaxisbv, Delft, The Netherlands
- [11] Subasi, O., Koltuk, S., Iyisan, R., “A numerical study on the estimation of liquefaction-induced free-field settlements by using PM4Sand model”, KSCE J. Civ. Eng. 26, pp. 673–684, 2022
- [12] Pacific Earthquake Engineering Research Center (2021), “Pacific Earthquake Engineering Research Center Ground Motion Database”, <https://ngawest2.berkeley.edu/site>
- [13] Deepsoil 7.0 (2020), “User Manual”, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana