

2011 TOHOKU, JAPONYA DEPREMİNDE ZEMİN SIVILAŞMASI GÖZLEMLERİ VE ETKİLERİ

SOİL LIQUEFACTION AND ITS EFFECTS DURING THE 2011 TOHOKU, JAPAN EARTHQUAKE

Selçuk TOPRAK¹, Motoharu JINGUUI², Yasemin MANAV³, Ramazan MANAV⁴,
Engin NACAROĞLU⁵

ÖZET

Mw=9.0 büyüklüğündeki 2011 Tohoku Depremi, 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın ana adasının kuzey doğu kıyısından yaklaşık 130 km uzaklıkta, Pasifik Okyanusu'nda meydana gelmiştir. Bu deprem, merkez üssü ve yaklaşık 300-400 km uzaklıkta Tokyo bölgesi arasında pek çok alanda sivilaşma etkilerine neden olmuştur. Sivilaşma kaynaklı kum konileri, zemin oturmaları, yanal yayılmalar gözlenmiş, neticesinde köprüler, demiryolları, limanlar, binalar ve altyapı sistemlerinde büyük hasar oluşmuştur. Deprem sonrasında Japan Geological Survey, National Institute of Advanced Science and Technology yoğun sivilaşma gözlenen Itako Şehri Hinode bölgesinde kapsamlı arazi çalışmaları yapmıştır. Birçok farklı test arasında özellikle 143 CPT sondajı gerçekleştirilmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır. Tone Nehri ve Kasumigaura Gölü birleşiminde bulunan Itako kentinin doğu kesiminde bulunan Hinode, 1970'lerde ıslah edilmiş bölgede kurulmuş ve yerleşim alanı olarak geri kazanılmıştır. Sivilaşma hasarı, ıslah alanında yoğunlaşmış ve zemin oturması ve kum kaynaması olayları gibi sivilaşma belirtileri geri kazanılan Hinode alanının dışında tespit edilmemiştir. Hinode bölgesindeki sivilaşma alanları içinde bina temellerinde oturmalar ve hasarlar, gömülü boru hatlarında ve yollarda hasarlar oluşmuştur. Depremden hemen sonra Hinode bölgesinde su temini ve kanalizasyon sistemleri durmuştur. Bu çalışmada 2011 Tohoku Depremi'nden sonra elde edilen verilerle sivilaşma analizleri yapılarak, sivilaşma şiddeti parametreleri ile hasar gözlemleri arasında ilişkiler değerlendirilmiştir. Bu amaçla LSN haritaları hazırlanmış ve bina hasar seviyeleri ile sivilaşma şiddet katsayısı (LSN) parametresi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bina hasarları, CPT, sivilaşma, Tohoku Depremi, LSN

¹ Prof Dr, Gebze Teknik Üniversitesi, stoprak@gtu.edu.tr

² Dr, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, m.jinguiji@aist.go.jp

³ Öğr. Gör. Dr., Pamukkale Üniversitesi, ymanav@pau.edu.tr

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, rmanav@isbu.gov.tr

⁵ Dr.Öğr.Üyesi, Pamukkale Üniversitesi, enacaroglu@pau.edu.tr

ABSTRACT

The 2011 Tohoku Earthquake with a magnitude of $M_w=9.0$ occurred on March 11, 2011 in the Pacific Ocean, about 130 km off the north east coast of the main island of Japan. This earthquake caused liquefaction effects in many areas between the epicenter and the Tokyo area, which is about 300-400 km away. Liquefaction-induced sand cones, ground settlements, lateral spreading have been observed, resulting in extensive damage to bridges, railways, ports, buildings and infrastructure systems. After the earthquake, Japan Geological Survey, National Institute of Advanced Science and Technology conducted extensive field studies in the Hinode area of Itako City, where intense liquefaction was observed. Among many different tests, 143 CPT drillings were carried out and used in this study. Located in the eastern part of the city of Itako at the confluence of the Tone River and Kasumigaura Lake, Hinode was established in the reclaimed area in the 1970s and was reclaimed as a residential area. Liquefaction damage was concentrated in the reclamation area and signs of liquefaction such as ground settlement and sand boiling events were not detected outside the reclaimed Hinode area. Within the liquefaction zones in the Hinode area, settlements and damage to building foundations, and damage to buried pipelines and roads have occurred. Immediately after the earthquake, the water supply and sewerage services in the Hinode area stopped. In this study, liquefaction analyzes were performed with the data obtained after the 2011 Tohoku Earthquake, and the relationships between liquefaction severity parameters and damage observations were evaluated. LSN maps were prepared and consequently the relationship between building damage levels and liquefaction severity coefficient (LSN) parameter were investigated.

Keywords: Building damages, CPT, liquefaction, Tohoku Earthquake, LSN

1. GİRİŞ

Deprem sonrasında sıvılaşma gözlemlenen yerlerde gömülü yapılar ve binalar üzerinde oldukça ciddi hasarların oluşması nedeniyle, sıvılaşmaya sebep olan etkenler geoteknik deprem mühendisliği alanında yoğun ilgi konusu olmuştur. Zemin sıvılaşmasının etkisinin görüldüğü bazı örnekler; 1964 Niigata, 1920 California Calvers, 1938 Montana Fort Peck, 1948 Fukui, 1964 Alaska Anchorage, 1971 California San Fernando, 1980 Mino-Owari, 2001 Japonya, 2011 Christchurch olarak sıralanabilir. Ülkemizde yakın tarihten büyük örnek 1999 Kocaeli (İzmit) ve Düzce depremi sıvılaşmalarıdır (Holzer vd., 2000). Araştırmacılar sıvılaşmaya neden olan faktörler ve sıvılaşma tahmin yöntemleri üzerine birçok çalışma yapmıştır (örn., Toprak ve Holzer, 2003; Toprak ve Jinguuji, 2006; Yasuda vd., 2012; Yamaguchi vd., 2012; Bray vd., 2014; Toprak vd., 2016; Manav, 2019). Sıvılaşma sonucu zemin oturması, zemin taşıma gücü yetersizliği ve yanal yayılma hasarları oluşabilir.

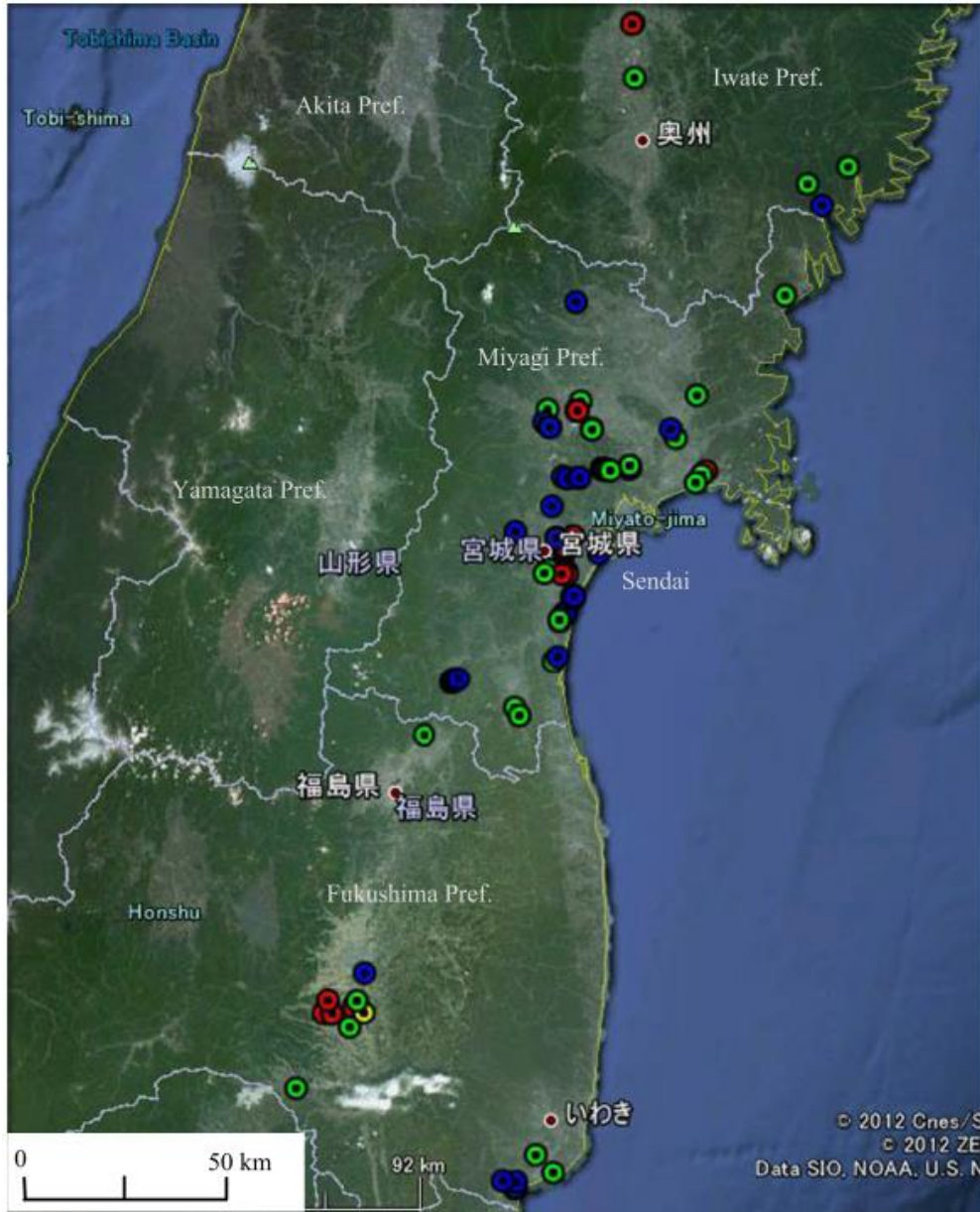
Bu çalışmanın konusu olan, 2011 Tohoku depremi 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın ana adasının kuzey doğu kıyısından yaklaşık 130 km uzaklıkta, Pasifik Okyanusu'nda meydana gelmiş ve $M_w=9.0$ büyüklüğündedir. Tohoku depremi sonrası benzerine az rastlanır bir tsunami meydana gelmiştir. Birçok kasabada on binlerce ev su altında kalmış, yıkılmış ve

çoğu kullanılamaz hale gelmiştir. Japonya'nın kuzeydoğusundaki kıyı şeridi boyunca, yaklaşık 20000 kişi ölmüş veya kaybolmuştur. Ayrıca, bu depremde zemin sivilaşmalarının etkisi ile yollar, köprüler, demiryolları, limanlar, binalar ve altyapı sistemlerinde büyük tahribatlar oluşmuştur. Tohoku depreminde meydana gelen hasarların dolgu olan bölgelerde sivilaşma kaynaklı olduğu belirtilmektedir (Jinguuji ve Toprak, 2017; Toprak vd., 2016; Tokimatsu vd., 2012; Ishihara vd., 2014; Nakai ve Sekiguchi, 2011; Manav, 2019). Şekil 1'de Iwate, Miyagi ve Fukushima'daki sivilaşma alanları görülmektedir. Bu bölgelerde kum kaynamaları ve boruların yükselmesi gibi sivilaşma kaynaklı net kanıtlar bulunmuştur fakat tusunaminin etkisi ile bazı bölgelerde sivilaşmaya dair izler kaybolmuştur. (Yamaguchi vd., 2012).

Şekil 1'deki bölgelerin dışında Tokyo'daki Odaiba'dan Chiba'daki Chiba limanının yakınlarına kadar sivilaşma gözlemlenmiş. Özellikle Urayasu bölgesi hasar görmüştür. Ayrıca Ichikawa ve Nrashino'da çok çeşitli sivilaşmalar gözlenmiş olup, hasar gören yapıların çoğunun, oturma ve eğilme meydana gelen ahşap evler olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan orta katlı yapılar daha iyi kazık temel yapılarına ve zemin iyileştirmesine sahip olduğundan, bina hasarı gözlemlenmemiştir. Birçok bölgede zemin hasarı ve çok fazla kum kaynaması gözlenmiş ve kum konisinin kalınlığı yaklaşık 30 cm olduğu saptanmıştır (Ishikawa ve Yasuda, 2012). Urayasu bölgesinde sivilaşma kaynaklı 9000 evin hasar gördüğü Tokimatsu ve Katsumata (2011) ve diğer çalışmalar ile belirlenmiştir. Bina hasarlarıyla ilgili özet sayılar Hori vd. (2012) çalışmasında sunulmuş, eyaletlerdeki bina hasarları ağır, orta, az hasarlı sel altında kalmış, yanmış ve bina olmayanlar olarak verilmektedir. Bunun yanı sıra Ibaraki'de bulunan şehirlere göre binalarla ilgili az, orta ağır hasar sayıları verilmiştir.

Ibaraki, Chiba ve Tokyo dahil olmak üzere Kanto bölgesi merkez üssünün 300-400 km güney batısındadır. Sivilaşmanın gözlemlendiği alan 70 km²'dir. Depremin merkez üssüne olan uzaklığı nedeniyle 2011 yılına kadar Kanto bölgesinde yaşanan sivilaşmanın benzeri görülmemiştir. Yaygın olarak bu bölgede kum kaynamaları, zemin oturmaları gözlenmiştir. (Ishihara vd., 2014). Shinkiba, Tokyo'da Urayasu, Ichikawa ve Narashino Şehirlerinden Chiba Şehrine kadar 1966'dan sonra zemin dolgusu ile inşa edilmiştir. Buralar dolgu zemin olmalarına rağmen aslında çok zayıf zeminler değildirler ve dolgu malzemesi genelde ince daneli ve siltli malzeme içermektedir (Yasuda vd., 2012). Bu bölgelerde tespit edilen sivilaşma ve ilgili hasarlarla alakalı bazı örnekler aşağıda sunulmuştur.

Mihama mahallesi Chiba şehrinin batı kesiminde Tokyo Körfezi kıyısı boyunca yer alır ve tamamen dolgu zemindir. Mihama mahallesinin hemen hemen tüm alanında zemin sivilaşması nedeniyle büyük miktarda kum kaynaması meydana gelmiştir. Ana yol üzerinde neredeyse kum kaynaması olayına rastlanmamış, asfalt kaplamasının kenarında veya ana yolun kaldırımında küçük kum kaynamalarına rastlamıştır. Diğer taraftan mahallenin dar sokakları 45 cm kum kaynamalarıyla kaplanmıştır. Bu bölgede bir hafta içinde 8500 m³ kum temizlendiği açıklanmıştır (Nakai ve Sekiguchi, 2011). Sendai şehrinde kazı dolgu şeklinde inşa edilen tepelik yerleşim alanlarındaki çok sayıdaki evde ağır hasar görülmüştür. İstinat duvarlarında basit çökme ve şev kaymaları gözlenmiştir. Sendai şehrinin Oroshimachi-Higasha bölgesinin batı kesiminde, zemin sivilaşmasına bağlı kum kaynaması, kazık temelle desteklenen temellerde zemin oturmaları, kaldırım ve yollarda bozulmalar görülmüştür. Kazık temellerde 10-20 cm zemin oturması görülmüştür (Tokimatsu vd., 2012).



Şekil 1. Sıvılaşma gerçekleşen bölgelerin konumu. Mavi, kırmızı, sarı ve yeşil daireler, sırasıyla, yapısal hasar olmadan kum kaynaması olan bölgeler, yeraltı yapılarındaki yükselmeler, yapılarda zarar olan bölgeler ve diğerleri (Yamaguchi vd., 2012)

Bu çalışmada özellikle Hinode bölgesinde (Şekil 2) meydana gelen sıvılaşma ve bina hasarları incelenmiştir. Tone Nehri ve Kasumigaura Gölü birleşiminde bulunan Itako kentinin doğu kesiminde bulunan Hinode, 2011'deki büyük depremde sıvılaşma nedeniyle ağır hasar gören bir yerleşim alanıdır. 1970'lerde bu bölge ıslah edilmiş ve yerleşim alanı oluşturulmuştur. Bu bölgelerde kum Kasumigaura Gölü'nden temin edilmiş ve kum sıkılaştırması gibi herhangi bir sıvılaşma önlemi uygulanmadan doğal halde doldurulmuştur. Sıvılaşma hasarı, ıslah alanında yoğunlaşmış ve arazi çökmesi veya kum kaynaması olayları gibi sıvılaşma belirtileri geri kazanılan Hinode alanının dışında tespit edilmemiştir. Bu nedenle, Kasumigaura Gölü'nden gelen geri kazanılmış kumun sıvılaşmaya neden olduğu bilinmektedir. Deprem sonrasında Japan Geological Survey, National Institute of Advanced Science and Technology yoğun sıvılaşma gözlenen Itako Şehri Hinode bölgesinde kapsamlı

arazi çalışmaları yapmıştır. Birçok farklı test arasında özellikle 143 CPT sondajı gerçekleştirilmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır. Analizlerde sivilaşma şiddet parametrelerinden sivilaşma şiddeti katsayısı (LSN) kullanılmış ve bölge için LSN haritaları hazırlanmıştır. Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanılarak, deprem hasarları az, orta ve ağır olarak sınıflandırılmış binalar ile sivilaşma şiddet parametrelerinin dağılımları arasında değerlendirmeler yapılmıştır.

2. SIVILAŞMA ŞİDDETİ KATSAYISI (LSN)

Literatürde farklı sivilaşma şiddet parametreleri mevcuttur. Bunlar arasında en yaygın olanı sivilaşma potansiyel endeksi (LPI) olarak bilinmektedir (Holzer vd., 2002; Toprak vd., 2019). 2011 Christchurch depremi sonrasında yeni bir parametre olarak sivilaşma şiddeti katsayısı (LSN) üretilmiş (Tonkin ve Taylor, 2013), bina ve boru hasarlarıyla da ilişkilendirilmiştir (Toprak, vd. 2019). Mevcut çalışmada sivilaşma şiddet parametreleri, sivilaşmanın büyüklüğünün ve özellikle sivilaşma oluşumunun tahmin edilmesinden ziyade bina hasarına (açısal bozulmayla tanımlanan) bağlı olarak değerlendirilmiştir. Diğer bir deyişle bu parametreler hasar tahmini amacıyla test edilmiştir.

Tonkin ve Taylor (2013) tarafından literatüre sunulan Sivilaşma şiddeti katsayısı (LSN) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (1)$$

Eşitlikte ε_v , değerlendirilen tabaka için hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirmeyi sembolize etmektedir. ε_v , Zhang vd. (2002) tarafından önerilen hesaplama metodu ile kullanılmıştır. “z” ise kesit boyunca derinliktir.

Van Ballegooy vd. (2014b) çalışmasında sivilaşmanın neden olduğu yerleşim yeri hasarlarını belirlerken, LPI ve LSN ile değerlendirme arasındaki farklılıklar şöyle ifade edilmiştir. LSN, hacimsel şekil değiştirme ampirik formüllerine dayandığından, FS’nin birden büyük değerleri için bile LSN değerleri sürekli olarak hesaplanabilmektedir. Böylece LSN değerleri, Zhang vd. (2002)’de önerilen hacimsel şekil değiştirme fonksiyonu olarak, FS<2 olduğu zaman aşırı boşluk suyu basıncı yükselişi gibi artmaya başlamaktadır ve FS<1 olduğunda sürekli yumuşak bir geçiş içermektedir. Zhang vd. (2002)’de LSN formülündeki hacimsel şekil değiştirme ilişkileri, sismik talebin fonksiyonu değildir, zemin göreceli yoğunluk fonksiyonu olarak sınırlayıcı bir hacimsel şekil değiştirmeye ulaşır. Aksine, LPI parametresindeki artış, PGA değerinin artmasıyla devam etmektedir. Çünkü LPI, FS’nin doğrudan bir fonksiyonudur, sismik talep arttıkça azalmaktadır.

Göreceli yoğunluğa sahip sivilaşabilen tabakalarda düşük göreceli yoğunluğa sahip tabakalar yer yüzeyinde daha fazla şekil değiştirme geliştirmeleri beklenmektedir. LSN ile hesaplanmış şekil değiştirme değeri hasar indeksi olarak kullanıldığında sadece oturmaya göre hesaplanmış indekse göre kuvvet kaybının ve zemin püskürme potansiyelinin etkilerini daha fazla içermektedir. LSN, hiperbolik derinlik ağırlıklı fonksiyonu kullanarak yer altı su tabakası yüzeye yakın olduğunda sivilaşmayan kabuk kalınlığına daha çok önem

vermektedir. LPI'deki sığ ve derin tabakaların katkısıyla karşılaştırıldığında LSN, sığ sıvılaşmanın yer ve yüzey yapılarına derin sıvılaşmaya göre çok daha büyük zarar verdiğini göstermektedir. Dolayısıyla LSN, sıvılaşmayan kabuğun ince olduğu ve ciddi püskürme sonucunu, kabuğun kalın ve çok daha az miktarda püskürme meydana geldiği zamanla ayırt etme özelliğine sahiptir.

3. 2011 JAPONYA DEPREMİ İÇİN ÇALIŞMA BÖLGESİNDEKİ VERİLERİN SIVILAŞMA ŞİDDETİ KATSAYISI (LSN) İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

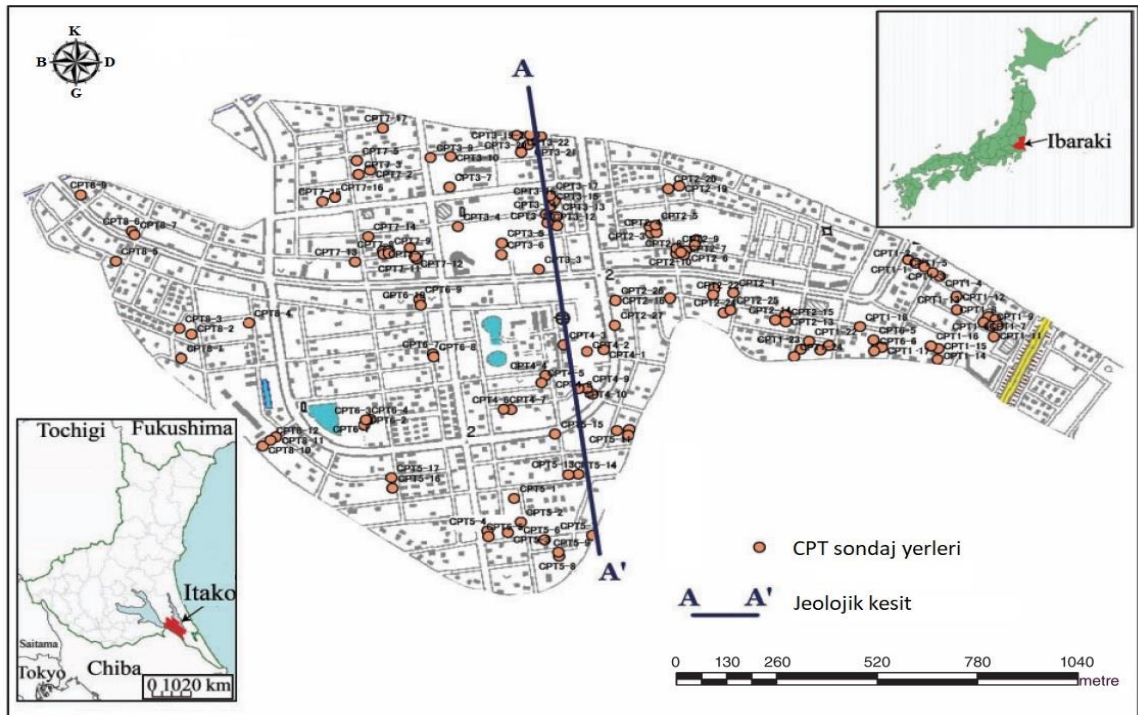
Sismik hareketlerden kaynaklanan zemin sıvılaşması, farklı altyapı türleri için önemli bir sorundur (örn.; Toprak ve Jinguuji, 2006; Yasuda vd., 2012; Yamaguchi vd., 2012; Toprak vd., 2015; Manav 2019; Toprak vd., 2018; Bray vd., 2013). Sıvılaşma sonucu zemin çökmesi, zemin taşıma gücü yetersizliği ve yanal yayılma hasarları oluşabilir (Bray vd., 2014; Toprak vd., 2014). Sıvılaşma ve sonucunda oluşan hasarın tahmini, ünlü 1964 Niigata ve Alaska depremlerinden bu yana mühendisler, şehir plancıları ve bilim adamları için büyük bir ilgi kaynağı olmuştur. Mevcut çalışmada 2011 Japonya Depremi'nden gelen verileri kullanarak bina hasar seviyeleri sıvılaşma şiddet katsayısı (LSN) parametresi ile ilişkilendirilmiştir.

2011 Büyük Doğu Japonya Depremi'nden sonra Ulusal İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST), 143 CPT sondajı ile Itako şehrinin Hinode bölgesinde sıvılaşma alanlarında birçok farklı test gerçekleştirmiştir (Toprak vd., 2016). Şekil 2'de çalışma alanı Itako şehri Hinode Bölgesini ve 143 CPT sondaj verisinin alındığı yerler görülmektedir.

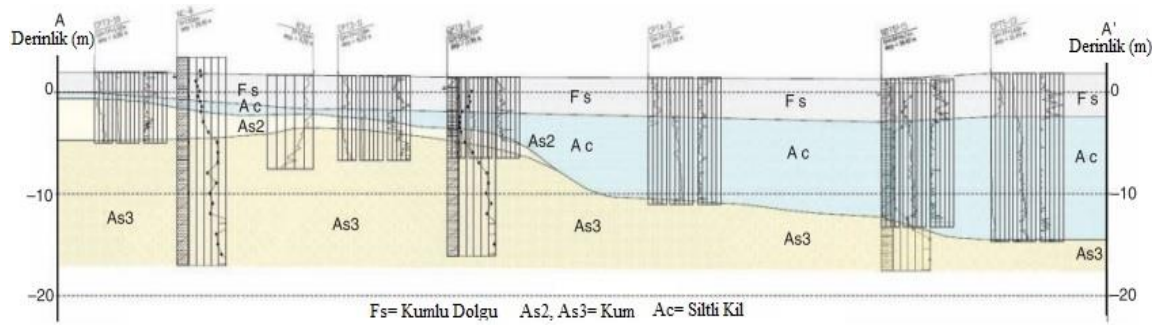
Şekil 3 bölgeden örnek zemin profillerini göstermektedir. Kum dolgusu (Fs) siltli kil (Ac) üzerinde yer almaktadır ve kum dolgunun kalınlığı 2 m ile 6 m arasında değişmektedir. Siltli kilin (Ac) kalınlığı ise 0 m ile 14 arasında değişmektedir. LSN hesabı için kullanılan yer ivmesi 200 Gal ve deprem büyüklüğü 9.0 alınmıştır (Şekil 4).

Hinode bölgesindeki sıvılaşma, bina temellerinde yayılmalar ve çökmelere, kazık temellerle destekli olan binalardaki oturmalar, gömülü boru hatlarının ve yolların yükselmesine neden olmuştur. Itako Şehrinde Hinode alanında sıvılaşma kaynaklı yapı hasarı örnekleri Şekil 5'de görülmektedir. Depremden hemen sonra Hinode bölgesinde su temini ve kanalizasyon sistemleri durmuştur. Sıvılaşma hasarı Kasumigaura Gölü'nden akan Ton Nehri'nin bir kolu olan Hitachi-Ton Nehri'nin bulunduğu alanın güney kesiminde daha büyük olmuştur.

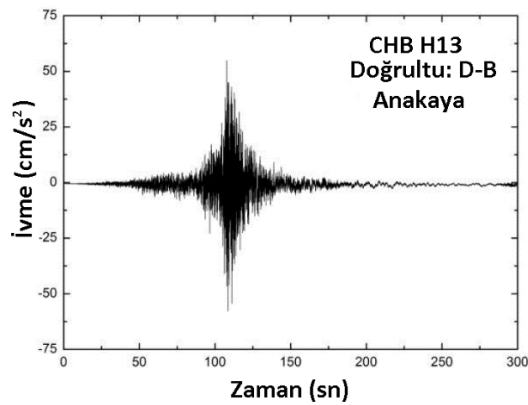
Zemin oturması güneyde Itako Kanalizasyon Arıtma Tesisi'nin yakınında 40-50 cm, kuzeyde 10 cm ve daha az olarak gözlemlenmiştir (Tokimatsu ve diğ. 2013). Jinguuji ve Toprak (2017) de sunulan kum kaynamalarının dağılımını (Itako City, 2014) ve binanın yapısal hasarının boyutunu (Japonya Jeoloji Derneği 2013) gösteren iki hasar haritası mevcuttur. Bu haritalardaki bina hasar yerleri coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak sayısallaştırılmış ve Şekil 6'te gösterildiği gibi çalışma alanının haritası üzerine bindirilmiştir.



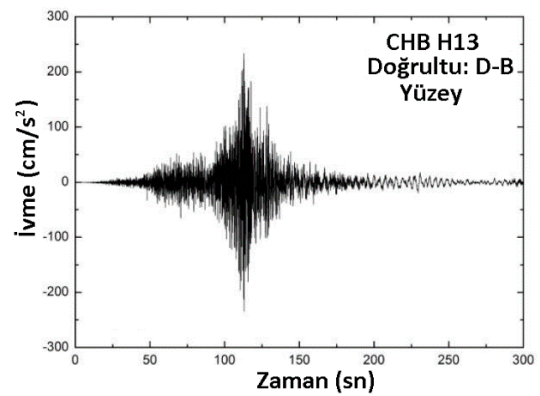
Şekil 2. Çalışma Alanı Itako Şehri ve CPT sondaj yerleri (Jinguuji ve Toprak, 2017)



Şekil 3. CPT verilerinden tahmin edilen Hinode bölgesindeki bir zemin profili (Jinguuji ve Toprak, 2017)

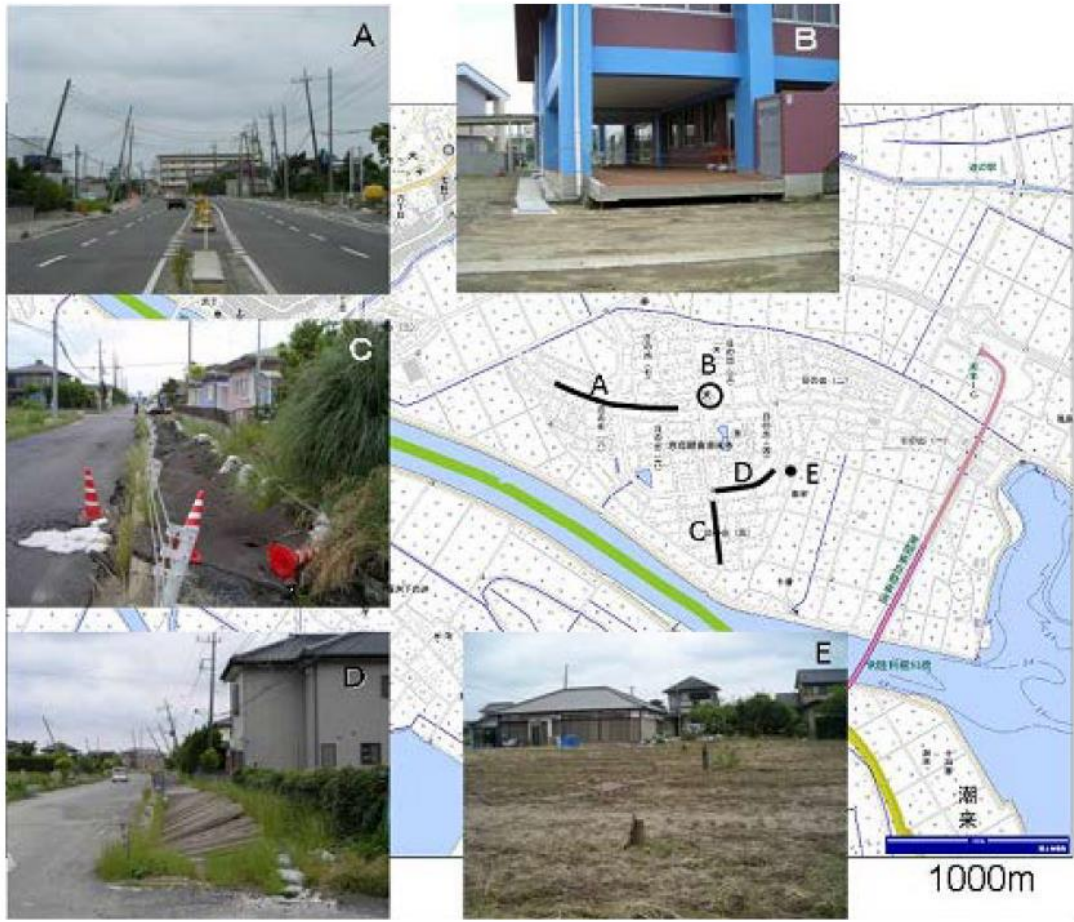


Doğu-Batı yönü ivme kaydı (Anakaya)



Doğu-Batı yönü ivme kaydı (Yüzey)

Şekil 4. a) Anakaya ve b) Yüzeyde, CHB013 konumundaki K-Net ivme-zaman kayıtları (Lenart vd., 2012)

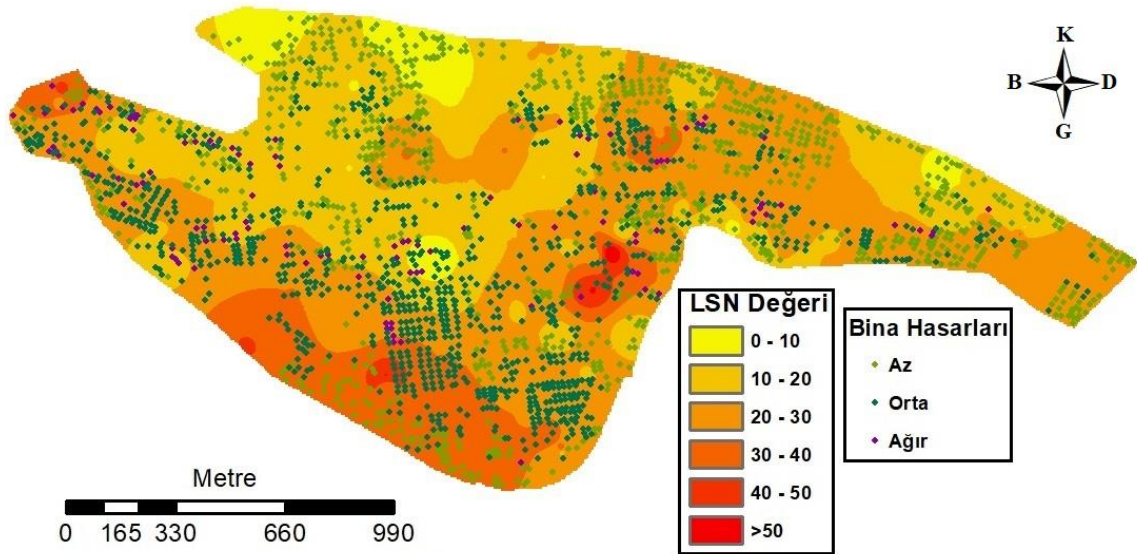


Şekil 5. İtako Şehrinde Hinode alanında sıvılaşma kaynaklı yapı hasarı örnekleri (Koarai ve Nakano, 2013)



Şekil 6. Hinode bölgesi bina hasarları

Çalışmada CPT verisi kullanılarak yapılan analizlerde Boulanger ve Idriss (2014) metodolojisi kullanılmıştır. Şekil 7.'de Hinode bölgesi bina hasarları ve LSN değerleri görülmektedir. LSN değerleri 0'dan 50'den büyüğe kadar altı sınıfta ve binalarda az, orta ve ağır hasarlı olarak gösterilmiştir. 0-10 LSN değerine sahip bölgelerde çok büyük oranda az hasarlı binalar bulunmakta, orta hasarlı binaları 20-30 LSN 'de yoğunlaştığı görülmekte, ağır hasarlı binalar LSN 20 değerinin üzerinde gözlenmektedir.



Şekil 7. Hinode bölgesi bina hasarları ve LSN değerleri

4. SONUÇLAR

Deprem oluşma tehlikesi olan alanlara yakın yerleşim yerlerinde, sivilaşma oluşumunun ve yapısal hasarların tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Zemin sivilaşmasının olduğu yerlerde ciddi alt ve üst yapı hasarlarının olduğu Tohoku depreminde de açıkça görülmüştür. Birçok araştırmacı zemin sivilaşması ve hasarları üzerine çalışmalar yapmaktadır. Yapılan çalışmalar sayesinde sonraki depremlerde olabilecek ekonomik kayıplar ve can kayıpları en aza indirgenebilecektir. Yeni yerleşim yerlerinin belirlenmesinde, var olan yerleşim yerlerinde önlem amaçlı olarak önceden sivilaşma tahmini çalışmaları önem arz etmektedir.

Bu çalışmada Japonya'da sivilaşma gerçekleşen bölgelerden vaka olarak Itako şehrinin Hinode bölgesi belirlenmiştir. Bu bölgede 2011 Tohoku Depremi sonrası Ulusal İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (AIST) tarafından yapılan 143 CPT sondaj gerçekleştirilmiştir. Bu sondaj verileri sismik ve jeolojik bilgilerle birleştirilerek her bir CPT verisi için Boulanger ve Idriss (2014) sivilaşma tetikleme yöntemiyle LSN değerleri hesaplanmıştır. CBS kullanılarak bu bölge için LSN haritası hazırlanmış ve bina hasarlarıyla karşılaştırılmıştır. LSN dağılımı ile oluşan bina hasarlarının uyum içerisinde olduğu değerlendirilmiştir. Devam eden çalışmalarda, hasarlı bina ve zemin sivilaşması bilgileri göz önünde bulundurularak farklı

şiddet parametreleri ve farklı sıvılaşma tetikleme yöntemlerinin etkileri parametrik ve istatistiksel analizlerle belirlenmektedir.

TEŞEKKÜR

Verilerin elde edildiği proje Japonya'nın Büyük Doğu Japonya deprem felaketinden kurtarmaya yönelik üçüncü ek bütçesine dahil edilmiştir. Bu kapsamda CPT testlerini gerçekleştirdikleri için DIA Consultants Company Limited çalışanlarına teşekkür ederiz. Bu yazıda bildirilen araştırmalar kısmen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114M258 No'lu Proje ve PAU BAP 2012FBE001 ve 2014HZL003 projeleri kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ballegooy S. ve Malan P. (2013), "Liquefaction Vulnerability Study, Report to Earthquake Commission", Tonkin ve Taylor, Ltd.
- Boulanger, R. W. ve Idriss I. M. (2014), "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures", Report No: UCD/CGM-14.
- Bray, J. D., O'Rourke, T. D., Cubrinovski, M., Zupan, J. D., Jeon, S. S., Taylor, M., Toprak, S., Hughes, M., van Ballegooy, S., ve Bouziou, D. (2013), Liquefaction Impact on Critical Infrastructure in Christchurch. USGS Technical Report, 22 March 2013.
- Bray, J., Cubrinovski, M., Zupan, J. ve Taylor, M. (2014), "Liquefaction Effects on Buildings in the Central Business District of Christchurch", Earthquake Spectra, Vol 30(1), 85-109.
- Holzer T. L., Barka A. A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J. H., Ellsworth W. L., Fumal T., Gross J. L., Langridge R., Lettis W. R., Meremonte M., Mueller C., Olsen R. S., Ozel O., Parsons T., Phan L. T., Rockwell T., Safak E., Stein R. S., Stenner H., Toda S. ve Toprak S. (2000), "Implications For Earthquake Risk Reduction in The United States From The Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999", United States Geological Survey (USGS) Circular 1193,1-64.
- Holzer, T. L., Toprak, S. ve Bennett, M. J. (2002), "Liquefaction Potential Index and Seismic Hazard Mapping in the San Francisco Bay Area, California", Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Theme: Urban Earthquake Hazard, Boston, MA, July 21-25.
- Hori, H., Nakamura, H., ve Kato, T. (2012), "The Damages of Land Liquefaction by the 3.11 Eastern Japan Great Earthquake Disaster and Public Financial Support in Ibaraki Prefecture, Japan", In Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, 1-10.
- Ishihara, K., Araki, K. ve Toshiyuki, K. (2014), "Liquefaction in Tokyo bay and Kanto regions in the 2011 great east Japan earthquake". In Earthquake Geotechnical Engineering Design, 93-140.
- Ishikawa, K. ve Yasuda, S. (2012), "Study of Sand Boiling Characteristics Along Tokyo Bay During the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake". Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol 68(4), 274-281.

- Itako City, 2014, A report on the project of liquefaction measures at Hinode area, Chapter 1, Outline. [Web document]. Available at http://www.city.itako.lg.jp/cms/data/doc/1385542213_doc_1_0.pdf (accessed 29 September 2015).
- Jinguuji, M. ve Toprak, S. (2017), "A Case Study of Liquefaction Risk Analysis Based on the Thickness and Depth of the Liquefaction Layer Using CPT and Electric Resistivity Data in the Hinode Area, Itako City", Ibaraki Prefecture, Japan. Exploration Geophysics, Vol 48(1), 28-36.
- Koarai, M. ve Nakano, T. (2013), "Liquefaction Damage in the Kanto Region Caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake in Japan, and the Land Condition of Damaged Areas Detected by Time-Series Geospatial Information", Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan Vol 61, 21-33.
- Lenart, S., Koseki, J. and Miyashita, Y., (2012), "Soil liquefaction in the Tone river basin during the 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku", Acta Geotech Slov., 9(2), 4-15.
- Manav, Y. (2019), "Sivilaşma Şiddet Parametreleri ile Bina Deprem Performansı İlişkilerinin Değerlendirilmesi ve Deneysel Zemin İyileştirme Uygulaması", Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nakai, S. ve Sekiguchi, T. (2011), "Damage due to Liquefaction During the 2011 Tohoku Earthquake", In Proc. of the International Symposium for CSMID, 1-8.
- Tokimatsu, K. ve Katsumata, K. (2011), "Liquefaction-Induced Damage to Buildings in Urayasu City During the 2011 Tohoku Pacific Earthquake", In Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, 665-674.
- Tokimatsu, K., Suzuki, H., Katsumata, K. ve Tamura, S. (2013), "Geotechnical Problems in the 2011 Tohoku Pacific Earthquakes", International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 2.
- Tokimatsu, K., Tamura, S., Suzuki, H. ve Katsumata, K. (2012), "Building Damage Associated with Geotechnical Problems in the 2011 Tohoku Pacific Earthquake", Soils and Foundations, Vol 52(5), 956-974.
- Tonkin Taylor Ltd. Liquefaction vulnerability study 2013. Report Number:52020.0200/v1.0.
- Toprak, S. ve Jinguuji, M. (2006), "A new test for Liquefaction Prediction: Electrical Resistivity Vibration Penetration Test", Eighth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, April 18-22.
- Toprak, S., Jinguuji, M., Manav, Y. ve Manav, R. (2016), "Soil Liquefaction At Hinode Area During 2011 Great East Japan Earthquakes." 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. June 2-4, 2016 Near East University, Nicosia, TRNC, 535-541.
- Toprak, S., Nacaroglu E., Koc A. C., O'Rourke T. D., Hamada M., Cubrinovski M. ve Ballegooy S. (2018), "Comparison of Horizontal Ground Displacements in Avonside Area, Christchurch from Air Photo, Lidar and Satellite Measurements Regarding Pipeline Damage Assessment", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 16(10), 4497-4514.
- Toprak, S., Nacaroglu, E. ve Koç, A. C. (2015), "Seismic Response of Underground Lifeline Systems", Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, Vol 2, 245-263.

- Toprak, S., Nacaroglu, E., O'Rourke, T. D., Koc, A. C., Hamada, M., Cubrinovski, M. ve Jeon, S. S. (2014), "Pipeline Damage Assesment Using Horizontal Displacements from Air Photo and LIDAR Measurements Avonside Area, Christchurch, NZ", The Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES).
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Van Ballegooy, S., Koc, A. C., Jacka, M., Manav, Y., Torvelainen, E. ve O'Rourke, T. D. (2019), "Segmented Pipeline Damage Predictions Using Liquefaction Vulnerability Parameters" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 125.
- Toprak, S., ve Holzer, T. L. (2003), "Liquefaction Potential Index: Field Assessment", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 129(4), 315-322.
- Van Ballegooy S., Lacrosse V., Simpson J. ve Malan P. (2015a), "Comparison of CPT-based Simplified Liquefaction Assessment Methodologies Based on the Canterbury Dataset", In: Proceedings of the 12th Australia and New Zealand Conference on Geomechanics.
- Van Ballegooy, S., Cox, S. C., Thurlow, C., Rutter, H. K., Reynolds, T., Harrington, G., Fraser, J. ve Smith, T. (2014b), "Median Water Table Elevation in Christchurch and Surrounding Areas After the 4 September 2010 Darfield Earthquake Version 2", GNS Science report 2014/18, Institute of Geological and Nuclear Sciences, Lower Hutt.
- Van Ballegooy, S., Wentz F. ve Boulanger, R. W. (2015b), "Evaluation of CPT-based Liquefaction Procedures at Regional Scale", Soil Dynamics an Earthquake Engineering, Vol 79, 315-334.
- Yamaguchi, A., Mori, T., Kazama, M. ve Yoshida, N. (2012), "Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake", Soils Found., Vol 52(5), 811-829.
- Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K. ve Kanemaru, Y. (2012), "Characteristics of Liquefaction in Tokyo Bay Area by the 2011 Great East Japan Earthquake", Soils Found., Vol 52(5), 793-810.
- Zhang G., Robertson P. K., Brachman R. W. I. (2002), "Estimating liquefaction induced ground settlements from CPT for level ground" Can Geotech J, 39:1168-80.

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
a_{max}	En büyük yatay yer ivmesi	z	Kesit boyunca derinlik
ϵ_v	Hacimsel yoğunlaştırılmış şekil değiştirme		