

BETON KOLON VE DARBELİ KIRMATAŞ KOLON (DKK) İMALATLARI SONRASI ZEMİNDEKİ SIKILAŞMANIN CPT VERİLERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

CPT- BASED ASSESSMENT OF DENSIFICATION AFTER GROUND IMPROVEMENT WITH RIGID INCLUSIONS AND RAMMED AGGREGATE PIERS® (RAP)

Kemal Önder ÇETİN¹

Ece KURT BAL²

Lale ÖNER³

Serhan ARDA⁴

ABSTRACT

Within the scope of this manuscript, the mitigation performance of a composite ground improvement solution, which is composed of 18 m long 40 cm diameter GeoConcrete® Column (GCC) and 50 cm diameter Impact® Rammed Aggregate Pier® (RAP) along with 40 m long 80 cm diameter piles is assessed by pre- and post- cone penetration testing (CPT). These elements are designed for controlling excessive total and differential settlements, and liquefaction triggering at a paper mill site. As a mitigation solution, 18 m and 40 m long elements are designed to be constructed in the soft to medium stiff silty clay with scattered silt and sand interlayers. Improvement goals from GCC and Impact® RAP elements are partially tested by pre- and post- CPT data, and are listed as: i) densification of cohesionless silt and sand layers, ii) shear stress transfer to rigid columns during cyclic (seismic) loading, reducing seismic demand from foundation soils iii) increased horizontal stresses, leading to increased soil (and column) stiffness and strength, iv) vertical drainage through aggregate columns to dissipate cyclically –induced excess pore water pressures. The results show that due to ramming and vibration induced-densification, cone tip resistances have increased by a factor of 1.3-1.6 in cohesionless layers.

Keywords: Impact® Rammed Aggregate Pier® (RAP), GeoConcrete® Column (GCC), cone penetration test (CPT), densification.

ÖZET

Bu çalışma kapsamında bir kağıt fabrikasında teşkili planlanan ağır ve oturmaya hassas yapı temelleri zemininde meydana gelebilecek toplam ve farklı oturmaların

¹ Prof. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, oetin@metu.edu.tr

² İnş. Yük. Müh. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat, ekurt@sentezinsaat.com.tr

³ İnş. Yük. Müh. & Jeof. Müh., Sentez İnşaat, loner@sentezinsaat.com.tr

⁴ İnş. Müh., Kipaş Holding, sarda@batikipas.com.tr

sınırlandırılması ve sismik zemin sıvılaşması sonrası taşıma gücü kayıplarının önlenmesi amacıyla darbeli kırmataş ve beton(arme) rijit kolon elemanları kullanılarak oluşturulan kompozit zemin iyileştirme örgüsü konu edilmiş olup, kolonlar arasındaki kohezyonsuz zeminde beklenen sıkılaşma ise kolon imalatları öncesinde ve sonrasında uygulanan konik penetrasyon test (CPT) sonuçları ile değerlendirilmiştir. Tasarlanan kompozit sistem, 50 cm çapında Impact® Sistemi ile Darbeli Kırmataş Kolon® (DKK) ve 40 cm çapında Forajsız Donatısız Beton Kolon (FDBK, GeoConcrete® Column (GCC)) elemanlarından oluşmaktadır. Bu sisteme ek olarak temel gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgelerde ise 80 cm çapında 40 m boyunda fore/vibreks kazıklar kullanılmıştır. Kazık elemanlarının yüksek taşıma kapasitesi ve rijitliğinden yararlanılırken, 18 m boylarındaki DKK ve FDBK elemanlarla yüzeye yakın kesimlerde bir kabuk teşkil edilmiş, ayrıca kırmataş malzemeden teşkil edilen DKK elemanlarının da serbest drenaj özelliğinden yararlanılmıştır. Uygulama sonrası beklenen kazanımlar: i) kolonlar arasındaki kohezyonsuz zeminde sıkılaşma, ii) deprem sebepli tekrarlı kayma gerilmelerinin büyük bir bölümünün rijit kolonlar tarafından taşınması, iii) yatay öteleme sebepli yanal gerilmelerde artış ve artırılmış rijit kolon kapasiteleri, iv) konsolidasyon veya sıvılaşma sebepli oluşabilecek aşırı boşluk suyu basınçlarının düşey yönde hızlı tahliyesi, v) rijit bir kabuk tabakası teşkili olarak özetlenebilir. Test sonuçları, kohezyonsuz birimlerde imalatlar sırasında uygulanan titreşim ve darbe nedeni ile koni uç direncinin 1,3-1,6 kat arttığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Impact® Darbeli Kırmataş Kolon® (DKK), Forajsız Donatısız Beton Kolon (FDBK), koni penetrasyon testi (CPT), sıkılaşma.

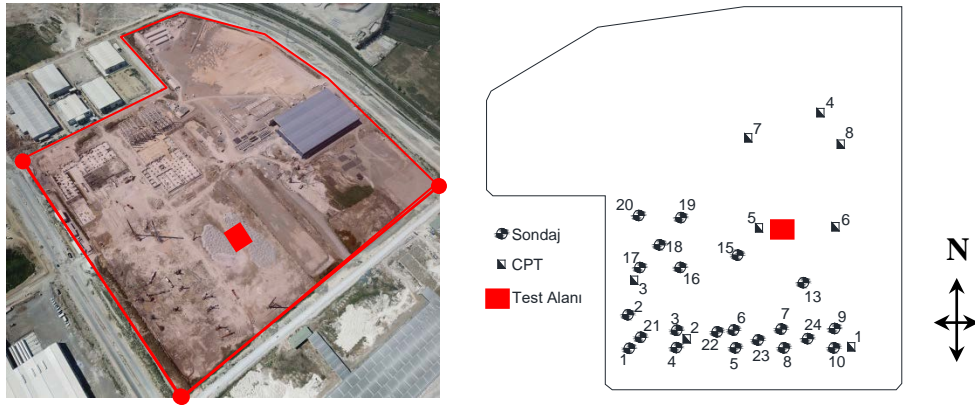
1. GİRİŞ

Beton kolon, derin zemin karıştırma, fore kazık, kum dren, taş kolon ya da Darbeli Kırmataş Kolon® elemanları sıvılaşmaya yönelik iyileştirme çözümü olarak sıkça kullanılmaktadır. Taş kolonlarla DKK elemanlarının benzer yönleri olsa da, DKK elemanlarının imalatları sırasında kırmataş 33 cm'lik tabakalar halinde düşey darbeleme işlemi ile çok yoğun sıkıştırıldığından Darbeli Kırmataş Kolon® elemanları taş kolonlardan daha rijit ve mukavim olarak teşkil edilebilmektedir. Darbeleme işlemi yüksek enerjili bir hidrolik çekiç ile yapılır, böylece kolon boyunca eşit sıkıştırma ve yanal gerilme oluşur (Handy ve Spangler, 2007). Bu kolonların en önemli özelliği, imalatları esnasında düşey darbeleme etkisi ile zemin içinde yanal gerilmelerin artışı sonrası yüksek dayanıma ve rijitliğe sahip olmalarıdır. Rijit kolonlar, yanal yayılma probleminin yaşanabileceği yumuşak zeminlerde darbeli kırmataş kolon ya da çimentolu kolonlar şeklinde zemin iyileştirme elemanı olarak uygulanabilir (Pockoski vd. 2018). Bu sistemler, zemin elemandaki sıkılaşma ve kayma gerilmelerindeki azalma etkisi ile heterojen zeminlerdeki sıvılaşma potansiyelinin azaltılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, bu rijit kolonların zemine etki eden çevrimsel kayma gerilmelerinin azaltılmasındaki etkinliği konusunda görüş farklılıkları vardır. Tasarımda sıklıkla rijit kolonların ve zeminin uyumlu birim deformasyon gösterdiği kabulü yapılmaktadır. Adalier vd. (2003) tarafından sunulan santrifüj test sonuçları bu kabulü desteklemekle birlikte, Rayamajhi vd. (2013) deney sonuçları ve değerlendirmeleri bu kabulü eleştirmektedir. Rayamajhi vd. (2015, 2016) da ise bu etkileşim yorumlanarak, soketli rijit elemanlarda gerilme aktarımının daha iyi belirlenmesine yönelik yeni bir bağıntı önerilmiştir.

Bu çalışmada, Aydın'da yer alan proje sahasında beklenen aşırı oturmalara kontrol altına almak ve sıvılaşma potansiyelini azaltmak amaçlarına yönelik olarak Forajsız Donatısız Beton Kolon ve Darbeli Kırmtaş Kolon® elemanlarından oluşan kompozit zemin iyileştirme sistemi konu edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, rijit kolonların imalatından sonra kohezyonsuz zeminde beklenen sıkılaşmanın imalatlar öncesi ve sonrası uygulanan CPT testleri ile değerlendirilmesidir.

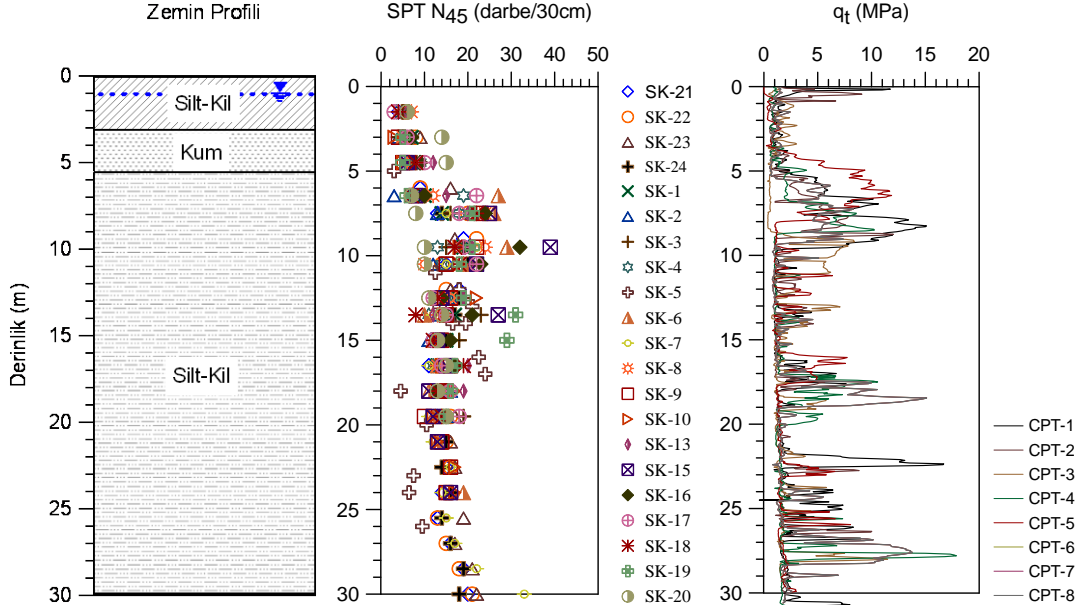
2. PROJE ALANI VE TEMSİLİ PROFİL

Proje kapsamında inşaa edilen kağıt fabrikası Aydın İli Söke İlçesinde yer almakta olup, tesisin görünümü Şekil 1'de sunulmuştur. Tesiste gross temel gerilmeleri 150 kPa ile 300 kPa arasında tasarlanmıştır. Tesis gereklilikleri nedeniyle izin verilen oturma değerleri 7 - 25 mm aralığına düşen alışılmadık derecede düşük mertebelere düşürülmüştür.

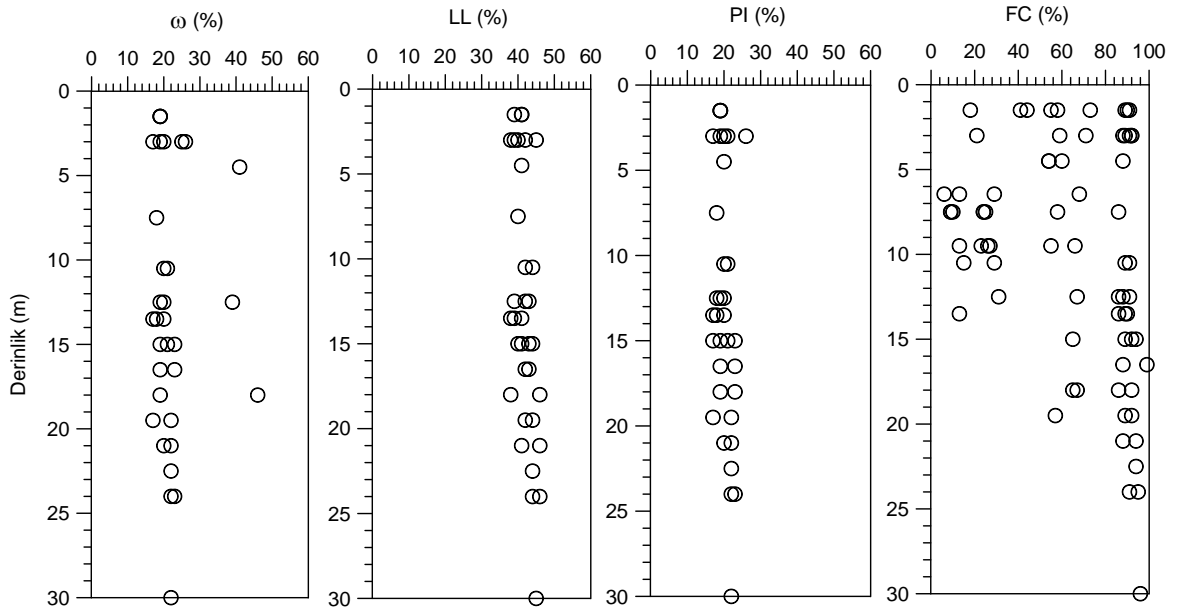


Şekil 1. Proje Sahasının Plan Görünüşü

Zemin araştırma çalışmaları kapsamında, 30 m derinliklere ulaşan sondaj ve koni penetrasyon deneyi (CPT) çalışmaları gerçekleştirilmiş, çeşitli derinliklerde standart penetrasyon deneyleri yapılmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Temsili zemin profili, standart penetrasyon deneyinden elde edilen N_{45} (darbe/30cm), koni penetrasyon deneyinden elde edilen düzeltilmiş uç direnci (q_t), doğal su muhtevası (ω), likit limit (LL), plastisite indisi (PI), ince dane oranı (FC) değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Temsili Zemin Profili, SPT N_{45} ve q_t – Derinlik İlişkisi



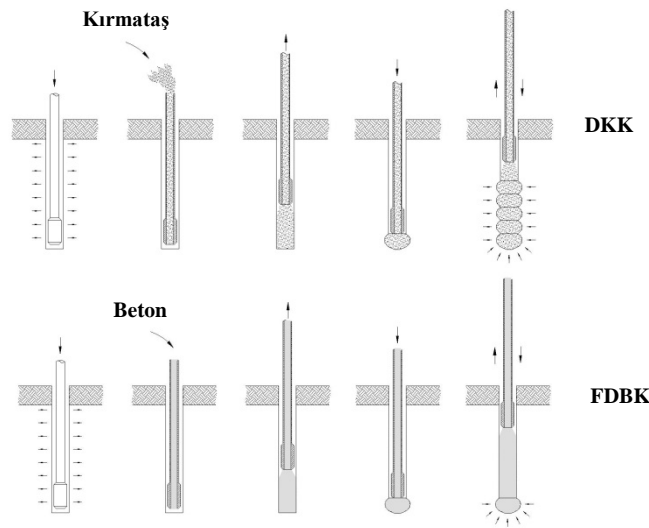
Şekil 3. w, LL, PI ve FC – Derinlik İlişkisi

Bu verilere göre zemin yüzeyinden itibaren 0.3m-0.5m kalınlığında bitkisel toprak tabakası geçildikten sonra, 5.0m derinliklere kadar yumuşak-orta katı siltli kil (CL) ve killi, kumlu silt (ML) tabakasını takiben, 1.5m-8.0m kalınlığında siltli kum (SM-SW) tabakası yer almaktadır. Bu birimin altında ise siltli kil tabakası devam etmektedir. Yeraltı su seviyesi 1.5-4.0 m derinlikleri arasında değişmektedir.

3. DKK VE FDBK KOMPOZİT SİSTEMİ İLE İYİLEŞTİRME

Geniş alanlara oturan yapılardan aktarılabilecek gerilmeler ile zemin profili birlikte değerlendirildiğinde, gevşek-orta sıkılıktaki kum birimlerinin, sahaya özel sismik tehlike analizlerine göre sahaya özel yer ivme değeri 0.47g için $M_w=6.5$ büyüklüğündeki deprem yüklemesi altında sıvılaşmaya maruz kalarak taşıma güçlerini önemli ölçüde kaybetmeleri riski bulunduğu ve yumuşak-orta katı siltli kil / gevşek-orta sıkı kum birimlerde 67-105 cm mertebelerine ulaşan toplam oturmaların meydana gelebileceği öngörülmüştür. Kritik proje yapıları altında gerek yapısal performansı olumsuz yönde etkileyecek aşırı oturmaların gerekse de sıvılaşma tetiklenmesinin önlenmesi amacıyla zemin iyileştirme tedbirlerinin alınması gerekli görülmüştür. İyileştirme sistemini optimize etmek adına Impact[®] yöntemi ile imal edilecek 50 cm çaplı 18 m boyunda Darbeli Kırmataş Kolon (DKK) elemanları, 40 cm çapında 18 m boyunda Forajsız Donatısız Beton Kolon (FDBK) elemanları ve forajla / vibrex olarak imal edilecek 40 m boyunda kazıkların (yapısal gerilmelerin durumuna göre kazık çapları 80 ve 100 cm olan) birlikte kullanıldığı kompozit bir iyileştirme sisteminin uygulanmasına karar verilmiştir. Forajla / vibrex olarak imal edilecek 40 m boyundaki kazıklar ana yük taşıyıcı elemanlar olarak tasarlanırken, bu kazıkların etrafındaki 18 m uzunluğundaki DKK ve FDBK elemanları kazıkları çevreleyen zeminde sıvılaşma/mukavemet ve rijitlik kaybına karşı direnci artırılmış homojen bir kabuk tabakasının oluşturulması için kullanılmıştır. Böylelikle zemin yüzeyinde oluşabilecek toplam ve fark oturmaların üst yapıya olan olumsuz etkisinin azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca 40 m uzunluğunda tasarlanan vibreks kazıklar ile de ilk 18 metrede teşkil edilen kabuk tabakasının derinlerdeki görece daha rijit tabakaya bağlanması sağlanarak sahanın yanal salınım deplasmanlarının kontrolü hedeflenmiştir.

Tasarımda kolon boyları ve karelajları; i) 7-25 mm aralığında değişen izin verilebilir oturma kriteri, ii) deprem durumundaki zemin sıvılaşmasına karşı minimum güvenlik katsayısının 1.20 olması kriterleri gözetilerek seçilmiştir. DKK ve FDBK elemanları, zemin içine özel olarak dizayn edilmiş bir mandrelin, dinamik düşey darbeleme enerjisiyle birlikte statik bir güçle çakılmasıyla sıvılaşabilir zeminlerin sıkılaşmasına olanak sağlayan Impact[®] Sistemi ile imal edilmiş olup, imalat adımlarının şematik gösterimi ve sahadaki imalatlardan bir görünüm sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’de gösterilmiştir. İmalat adımları şu şekilde özetlenmiştir:



Şekil 4. DKK ve FDBK yapım yöntemi



Şekil 5. Sahadaki imalattan görünüm

DKK İmalatı: Sahada Impact[®] Sistemi kullanılarak imal edilen Darbeli Kırmataş Kolon[®] elemanları için imalat adımları: (1) alt ucu kapalı olan 36 cm çaplı mandrel itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine kadar indirilir; (2) mandrel ve hazne kırmataş ile doldurulur; (3) 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi ile düşey vibrosyon uygulanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. 100 cm yukarı / 67cm aşağı itme yöntemi ile uygulanan sıkıştırma işlemi sonunda 36 cm olan çap, 50 cm'ye genişler. İmalat aşamaları yüksek yoğunluklu kırmataşla birlikte yanal gerilmelerde önemli bir artış yaratarak, Impact[®] DKK elemanlarında tek eksenli dayanımı ve rijitliği sağlar (Handy 2001, Wissmann vd. 2001).

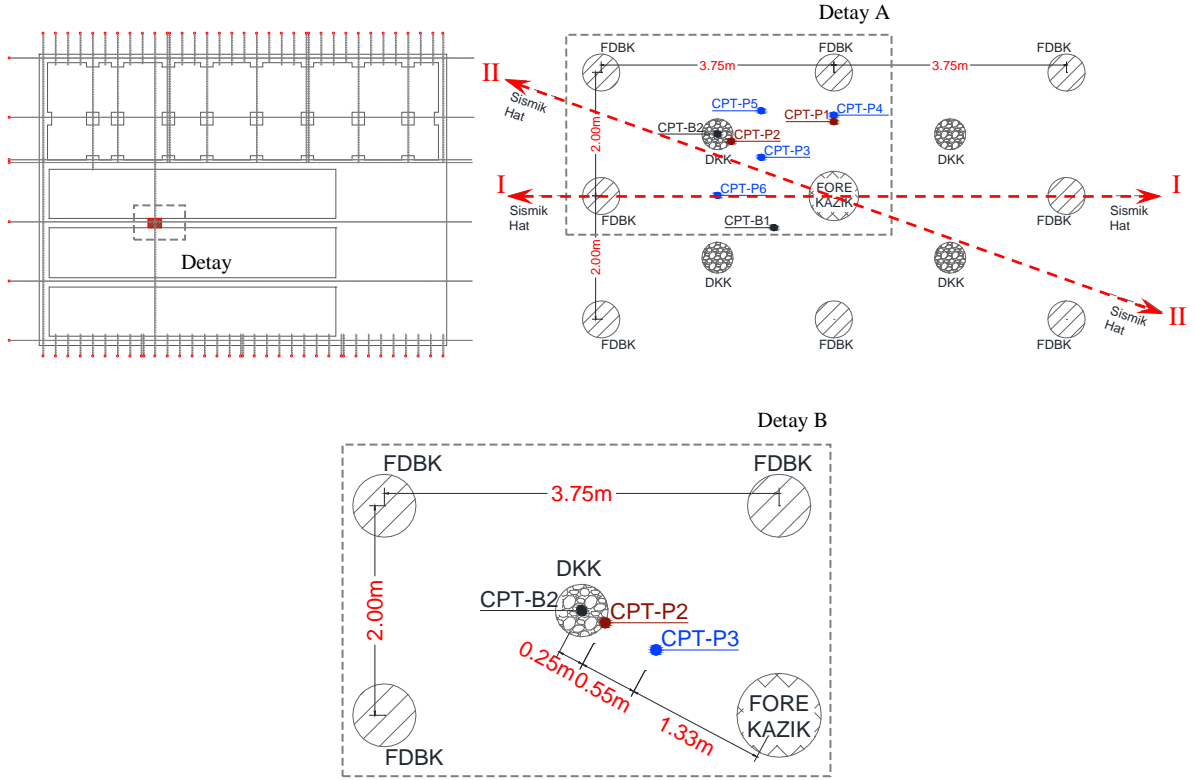
FDBK İmalatı: Sahada DKK imalatı gibi yerdeğiştirme sistemi kullanılarak imal edilen FDBK elemanları için imalat adımları: (1) alt ucu kapalı olan 40 cm çaplı mandrel itme kuvveti ve vibrasyonlu darbe ile tasarım derinliğine kadar indirilir; (2) mandrel beton ile doldurulur; (3) 100 cm yukarı / 67 cm aşağı itme yöntemi ile düşey vibrosyon uygulanarak dip soğanı (bottom bulb) oluşturulur (4) mandrelin geri çekilmesiyle FDBK imalatı tamamlanır.

4. ZEMİN İYİLEŞTİRME ETKİNLİĞİ DENEY PROGRAMI

Kolon imalatları sonrasında kolonlar arasındaki kohezyonsuz zeminde beklenen sıkılaştırmanın, imalatlar öncesinde ve sonrasında yapılan arazi testleri ile belirlenmesi için bir test programı oluşturulmuştur. Bu test programı kapsamında, üç test grubu oluşturulmuş, her grupta konik penetrasyon testleri (CPTu ve sismik CPTu) ve sismik deneyler yapılmıştır. Test yerleşim planı Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca, Şekil 6 Detay-B'de gösterildiği gibi, hücre merkezinde 80 cm çapında foraj yoluyla imal edilen kazık elemanından oluşan kompozit sistemin performansını ölçmek amacıyla hücre yükleme testi de yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında ise imalat öncesinde ve sonrasında yapılan CPT-B2, CPT-P2 ve CPT-P3 numaralı testlerden oluşan grup için test sonuçları sunulmuştur. Test hücresi, 18 m boylarındaki 2.0m x 2.0m yerleşimli 4 adet DKK ve 3.5m x 3.5m yerleşimli 8 adet FDBK elemanından oluşmaktadır.

Test aşamaları aşağıda özetlenmiştir:

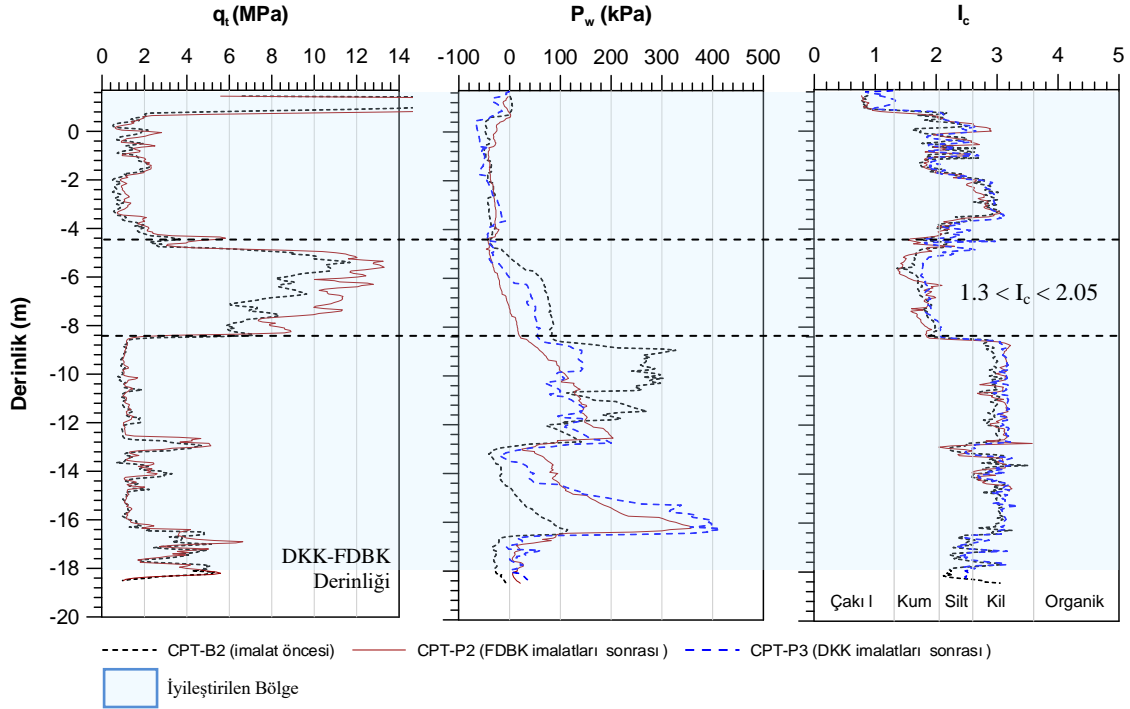
- Zemin iyileştirme hücre merkezinde 40 m boyunda fore kazık imalatı yapılmıştır.
- FDBK imalatı öncesi CPT testi yapılmıştır.
- FDBK imalatı yapılmıştır.
- FDBK elemanlarının imalatından 32 gün sonra, CPT testi yapılmıştır.
- DKK imalatı yapılmıştır.
- DKK elemanlarının imalatından 15 gün sonra, CPT testi yapılmıştır.



Şekil 6. Test Yerleşim Planı

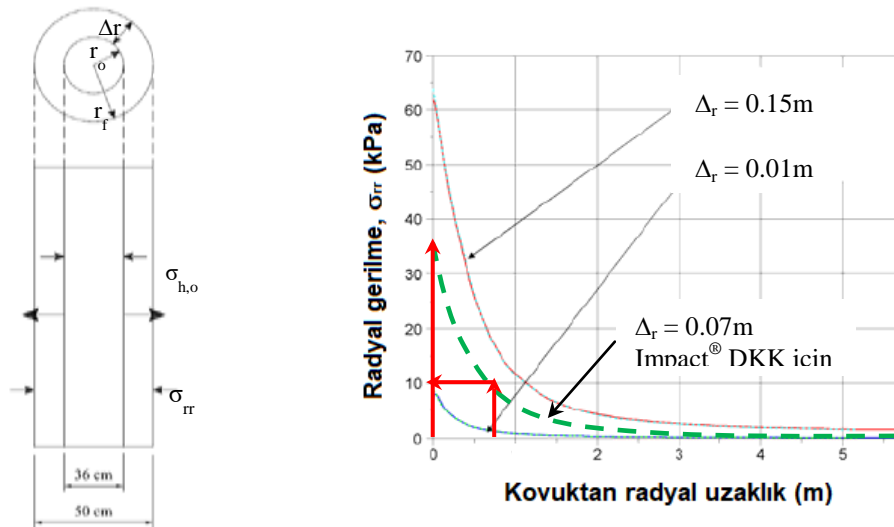
Şekil 7’de imalat öncesi ve sonrası CPT uç direncinin (q_t), boşluk suyu basıncının (p_w) ve zemin davranış tipi indeksinin (I_c) derinlik ile değişimi gösterilmiştir. FDBK imalatları sonrasında yapılan CPT test sonuçları, uç direnci (q_t) değerlerinin yaklaşık % 27 kat arttığını gösterirken, boşluk suyu basıncı değerlerinin (p_w), yaklaşık -5 m ile -8 m derinlikler arasında olan kum tabakalarında negatif değerlere doğru azaldığını dolayısı ile zeminin daha geniş bir davranış gösterme eğiliminde olacağını göstermiştir. DKK imalatları sonrasında yapılan CPT test sonuçları ise, uç direnci değerlerinin genel olarak FDBK imalatları sonrasında yapılan CPT uç direnci değerleri ile benzer olduğunu, ancak p_w değerlerinin arttığını göstermiştir. Yer değiştirme yöntemi ile yapılan imatlarda uzun vadede boşluk suyu basıncının sönümlenmesinin ardından, q_t değerlerinde artış olması beklenmektedir. CPT testleri DKK imalatından sadece 15 gün sonra yapıldığından, bu sürenin boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Saftner vd. (2017) tarafından yapılan araştırma bu düşüncüyü destekler mahiyette olup, yaptıkları çalışmada kolon imalatından 1 ay sonra yapılan CPT testi uç direnci değerlerinde kolon imalatından hemen 1 gün sonra yapılan CPT testi uç direnci değerlerine oranla % 33 mertebelerinde bir artış olduğu görülmüştür. Kohezyonlu zeminlerde, penetrasyon direncinde önemli bir değişim beklenmemekle birlikte, Şekil 7’de gösterildiği gibi, FDBK

ve DKK imatları sonrasında ölçülen CPT uç direnci, I_c değerlerinin 1.3 ile 2.05 (kaba daneli malzeme) aralığında arttığı anlaşılmıştır. Bu gözlemlerle uyumlu olarak Wissmann vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, zemin indeksinin, $I_c < 1,8$ olduğu (ince dane oranının az olduğu) zemin tabakalarında uç direncinde, q_c , 2-3 kat artış meydana geldiği, $I_c > 1,8$ olduğu zemin tabakalarında ise artışın minimum düzeyde olduğu belirtilmiştir.



Şekil 7. İmatlar öncesi ve sonrası CPT test sonuçları

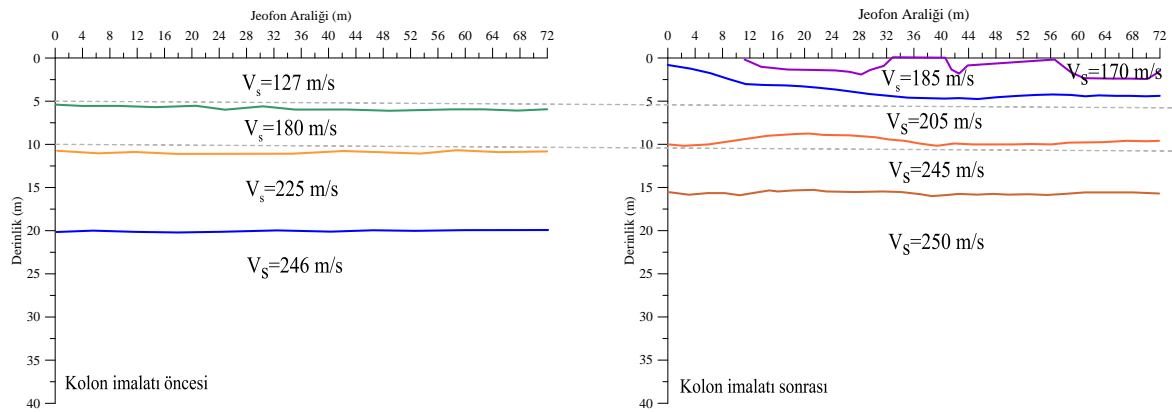
Uç direncindeki artış mekanizmasını açıklamak için taş kolon imalatının gerilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 8'de taş kolonlar ile zemin iyileştirme ve 0.01 m ve 0.15 m genişleme için radyal gerilme ile kovuktan radyal uzaklık ilişkisi (Kirsch, 2006) gösterilmiştir.



Şekil 8. 0.01 m ve 0.15 m genişleme için radyal gerilme – kovuktan radyal uzaklık ilişkisi (Kirsch, 2006).

DKK imalatları sonrasında yapılan CPT noktasındaki radyal gerilme artışı, Kirsch (2008) tarafından sunulan veriler kullanılarak Şekil 8’de yeşil kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Kolon imalatları sonucunda radyal gerilmelerdeki artış, kohezyonsuz tabakalardaki sıkılaşmanın etkisiyle birlikte artan uç direnc değerlerinin mekanizmasını da açıklamaktadır.

Şekil 6’da yer alan test yerleşim planındaki I-I no’lu sismik hat üzerinde kolon imalatı öncesi ve kolon imalatı sonrası için kayma dalgası hız ölçümleri yapılmış olup, ölçüm sonuçları Şekil 9’da gösterilmektedir. Sahada mevcut farklı boy ve rijitliklerdeki kolonların varlığı sebebi ile yüzey sismik ölçümlerinin yorumlanmasında ciddi zorluklar yaşanmış olmakla birlikte, iyileştirme ve güçlendirme sonrası sahanın temsili $V_{s,30}$ değerinin 230 m/sn mertebelerine ulaştığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte sahada oluşturulan kompozit zemin iyileştirmesi sonrası zemin rijitliğindeki artışın iyileştirme öncesi durumla kıyaslandığında %30 mertebelerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Yüzey sismik ölçümleri sonrası kayma dalgası hız dağılımı

5. SONUÇLAR

Bir kağıt fabrikası temel zemininde beklenen aşırı oturmaları kontrol altına almak ve sıvılaşma tetiklenme ve sonrasındaki sorunları bertaraf etmek amaçlarına yönelik olarak, 50 cm çapında Impact® Sistemi ile Darbeli Kırmataş Kolon® (DKK) ve 40 cm çapında Forajsız Donatısız Beton Kolon (FDBK, GeoConcrete® Column (GCC)) elemanlarına ek olarak temel gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgelerde 80 cm çapında 40 m boyunda fore/vibreks kazıklar kullanılarak kompozit bir zemin iyileştirme çözümü tasarlanmıştır. Bu rijit elemanların imalatından dolayı kohezyonsuz zeminlerdeki sıkılaşma ve kayma dalgası hız değişimi kolon imalatları öncesinde ve sonrasında yapılan CPT ve yüzey sismik testleri ile değerlendirilmiştir. Sismik testler sonrasında sahanın temsili $V_{s,30}$ değerinin 230 m/s ve zemin rijitliğindeki artışın %30 mertebelerine ulaştığı görülmüştür. Elde edilen CPT sonuçlarına göre konik uç direnci değerlerinde % 30-60 artış olduğunu göstermiştir. Bu artışa sebep olan mekanizmanın, FDBK ve DKK rijit elemanların imalatı nedeniyle radyal gerilmelerin artması ve kolon imalatları sırasındaki titreşime bağlı olarak kohezyonsuz tabakaların sıkılığının artması olarak ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- Handy, R. L. and Spangler, M. G. (2007), "Geotechnical Engineering: Soil and Foundation Principles and Practice" 5th ed. The McGraw-Hill Companies, New York.
- Pockoski, M., Metcalfe, B. and Wissmann, K. J. (2018), "Support of High Rise Building on Organic and Alluvial Deposits Using Rigid Inclusions. Practice on the Cutting Edge" Presented by ASCE Metropolitan Section – Geo-Institute Chapter. New York.
- Rayamajhi, D., et. al. (2013), "Numerical Study of Shear Stress Distribution for Discrete Columns in Liquefiable Soils" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE.
- Adalier, K., Elgamal, A., Meneses, J., and Baez, J. I. (2003), "Stone columns as liquefaction counter-measure in non-plastic silty soils" Soil. Dyn. Earthquake Eng. Bradford.
- Rayamajhi, D., et. al. (2015), "Dynamic Centrifuge Tests to Evaluate Reinforcing Mechanisms of Soil-Cement Columns in Liquefiable Sand" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE.
- Rayamajhi, D., et. al. (2016), "Dense Granular Columns in Liquefiable Ground. I: Shear Reinforcement and Cyclic Stress Ratio Reduction" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE.
- Handy, R. L. (2001), "Does Lateral Stress Really Influence Settlement?" ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 623-626.
- Wissmann, K.J., Moser, K. and Pando, M.A. (2001), "Reducing Settlement Risks in Residual Piedmont Soils Using Rammed Aggregate Pier Elements" Proceedings ASCE Specialty Conference, Blacksburg, Virginia.
- Saftner, D. A., Zheng, J., Green, R. A., Hryciw, R. and Wissmann, K.J. (2017), "Rammed Aggregate Pier Installation effect on Soil Properties" Proceedings of the Institution of Civil Engineers.
- Wissmann, K.J., Ballegooy, S., Metcalfe, B.C., Dismuke, J.N. and Anderson, C. K. (2015), "Rammed Aggregate Pier Ground Improvement as a Liquefaction Mitigation Method in Sandy and Silty Soils" In: 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Christchurch, New Zealand.
- Kirsch, F. (2006), "Vibro Stone Column Installation and its Effect on Ground" GuD Geotechnik und Dynamik GmbH, Berlin, Germany.
- Kirsch, F. (2008), "Evaluation of Ground Improvement by Groups of Vibro Stone Columns using Field Measurements and Numerical Analysis" GuD Geotechnik und Dynamik GmbH, Berlin, Germany.