

Makalenin Geliş Tarihi : 29.12.2008
Makalenin Kabul Tarihi : 12.02.2009

SIKIŞTIRILMIŞ ŞİŞEN KİLLERİN MİKROYAPISAL DEĞİŞİMİNDE ŞİŞME-BÜZÜLME ÇEVİRİMİN ETKİSİ

Murat TÜRKÖZ¹

ÖZET: Şişen zeminler üzerinde inşa edilen temellerin zeminin şişme-büzülme çevrimiyle ilişkili olarak yukarı ve aşağı hareketi, yapıda yorgunluğa ve çatlama sebeptir. Konu üzerinde yapılan çalışmalar, özellikle ıslanma ve kuruma çevrimlerinin şişen zeminlerin şişme yeteneğinde büyük oranda etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın ulaşılan sonuçlar arasında bir farklılık vardır. Bu olayı açıklamak için, bu çalışmada, sıkıştırılmış kil zeminlerin şişme davranışı üzerinde çevrimin etkisini ve buna bağlı mikro yapıdaki değişim incelenmiştir. Bu amaçla, Eskişehir bölgesinden elde edilen zemin numunesi kullanılmıştır. Örnek numuneler; kuru ağırlığının yüzdesi olarak sıra ile %0-5-10-15 katkı oranlarında eklenen bentonit katkı ilavesiyle hazırlanmıştır. Hazırlanan kil numunelerinin tekrarlı olarak şişmesi ve büzülme limiti su muhtevasına gelecek şekilde kurumaya maruz bırakılmaları durumunda mikro yapıdaki değişim gözlenerek, şişen killerin şişme davranışı üzerindeki etkisi çevrim açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler : Şişen kil, mikroyapı, büzülme.

EFFECT OF CYCLIC SWELL-SHRINK ON MICROSTRUCTURAL CHANGES OF COMPACTED SWELLING CLAYS

ABSTRACT: Cyclic swelling and shrinkage of clays and associated movements of foundations may result in cracking and fatigue to structures. Recent studies on this subject suggest that wetting and drying cycles have greatly influenced the swelling abilities of expansive soils. However, there is a discrepancy among the archived results. In order to explicit this phenomenon, the basic objective of this study was to investigate the microstructural changes on the basis of the effect of cyclic swelling on behavior of compacted swelling soils. For this purpose, soil sample obtained from Eskişehir city was used, and specimens were prepared by considering bentonite mixture at different percentage (0, 5, 10 and 15 percent of dry soil weight). The effect of cyclic swelling on clays was addressed on the basis of microstructural changes of clay specimens subjected to fully shrunk to their shrinkage limits.

Keywords : Swelling clay, microstructure, shrinkage.

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Şişen zeminler, inşaat mühendisliği yapıları için büyük hasara sebep olan dünya çapında bir problemdir. Özellikle, birbirini izleyen yağışlı ve kurak dönemler olarak tanımlanan iklimler ve büyük yüzeysel kil depozitlerine sahip bölgelerde görülür. Önemli hasara neden olan şişen zemin probleminin başlıca sebeplerinden biri de zeminin şişme-büzülme davranışdır. Bu tür zeminler üzerine inşa edilen sığ temellerde mevsimsel değişimler neticesinde yağmurlu mevsimlerde kabarma, kurak mevsimlerde oturma olabilir. Bu zeminler üzerinde inşa edilen temellerin zeminin ıslanma-kuruma çevrimiyle ilişkili olarak yukarı ve aşağı hareketi, yapıda yorgunluğa ve çatlamaya sebep olmaktadır. Çok sayıda ülkede şişen zemin problemine bağlı olarak ortaya çıkan hasarlarla ilgili çalışmalar yapılmış ve tasarım kriterleri önerilmiştir [1-7]. Zeminlerin şişme büzülme davranışı, özellikle şişen zeminlerde belirgin kuruma çatlaklarının oluşmasına yol açar. Büzülme neticesinde oluşan çatlaklar özellikle dolgu ve toprak baraj stabilitesi için önemlidir. Sayısız küçük çatlaklar zemin agregalarının oluşmasına veya ufalanmasına neden olur. Oldukça büyük miktarda gelişen büzülme çatlakları doygun killerin ilk kuruma aşamasında oluşur. Suyun varlığıyla oluşacak şişme miktarı, öncelikle zemin içinde bulunan kil mineral tipine bağlıdır.

Killerin şişme-büzülme davranışı üzerine çalışan birçok araştırmacı, davranışın neden olduğu sorunu farklı şekilde değerlendirmiştir. Bazı araştırmacılar, kil numunelerinin tekrarlı olarak şişmesi ve başlangıç su muhtevasına gelecek şekilde büzülmeye maruz bırakılmaları durumunda her bir çevrimden sonra numunenin yorgunluk işareti gösterdiğini ve bunun sonucunda da daha az şişmeye neden olduğu sonucuna varırken [8-11]; diğer araştırmacılar, şişme potansiyelinin ıslanma ve kuruma çevrimi sayısı ile arttığına işaret etmişlerdir [12, 13]. Konu üzerinde çalışmış olan araştırmacıların hem fikir olduğu durum ise, belirli bir şişme-büzülme çevriminden sonra şişmenin bir denge durumuna ulaştığıdır. Nihai olarak sıkıştırılmış kilin düşey şişmesi üzerinde kür zamanının etkisi, numunenin başlangıç sıkıştırma durumu ve ihtiva ettiği kil minerali ana faktörler olarak değerlendirilebilir. Allam and Sridharan [14] killerin kayma dayanımı üzerinde ıslanma ve kuruma çevrimin etkisini araştırdıkları çalışmalarında çevrime maruz numuneleri kuruma çevriminde 110 °C (230 °F) etüvde kurutulmuşlardır. Sıkıştırılmış kilin kayma dayanımındaki artışın, ıslanma ve kuruma çevrimi sırasında oluşan bağlar sayesinde olduğu

sonucuna varmışlardır. Collins [15] taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanarak, şişen zeminlerin mikro yapısını incelediği çalışmada; genleşen zeminlerin şişme davranışını değerlendirmede kilin mikro yapısının belirlenmesinin kilit bir rol oynadığını göstermiştir. Malzeme oluşumunun şişme potansiyeli üzerindeki etkisine benzer olarak, mikro yapı zeminin mühendislik davranışını etkileyen temel bir faktördür [16, 17].

Bu çalışmanın amacı, sıkıştırılmış kil zeminlerin şişme davranışı üzerinde çevrimin etkisini ve buna bağlı mikro yapıdaki değişimi incelemek olmuştur. Bu amaçla Eskişehir Meşelik bölgesinden elde edilen zemin numunesi kullanılmıştır. Zemin numunesi; kuru ağırlığının yüzdesi olarak sıra ile %0-5-10-15 katkı oranlarında eklenen bentonit katkı ilavesiyle hazırlanmıştır. Baskın kil mineral tipinin smektit olması ve kil numunelerinin tekrarlı olarak şişmesi ve büzülme limiti su muhtevasına gelecek şekilde kurumaya maruz bırakılmaları durumunda mikro yapıdaki değişim gözlenerek, şişen zeminlerin şişme davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

II. MALZEME

Bu çalışmada kullanılan zemin numunesi, Eskişehir Meşelik bölgesinden elde edilmiş, plastisite indisi 22 ve likit limiti 56 olarak belirlenmiş olup, Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemine (USCS) göre yüksek plastisiteli siltli kil (MH) olarak tanımlanmıştır. Fiziksel deney sonuçlarına dayalı sınıflamalara göre, temel zemini olarak yüksek şişme potansiyeline sahiptir. Dönüştürülmüş Casagrande plastisite kartında da yüksek şişme potansiyeli aralığında olduğu belirlenmiştir. Kuru ağırlığının yüzdesi olarak sıra ile %0-5-10-15 katkı oranlarında eklenen bentonit katkı ilavesiyle hazırlanan örneklerin kompaksiyon karakteristikleri Şekil 1’de ve baskın kil mineral tipinin belirlenmesi amacıyla yapılan X-ray difraktogram kayıtlarına ait grafiklerde Şekil 2-5’te sunulmaktadır. Bu amaçla her bir numuneden hazırlanan 100 g’lık örnekler X-Ray difraktometre cihazıyla deneye tabi tutulmuş ve nicel olarak kil minerali tipleri belirlenmiştir. İlgili deneyler Anadolu Üniversitesi Malzeme Mühendisliği laboratuvarında yapılmıştır. Katkı malzemesi olarak Ankara Karakaya bentonit kili kullanılmış olup çalışmada kullanılan malzemelerin geoteknik özellikleri Çizelge 1’de belirtilmektedir.

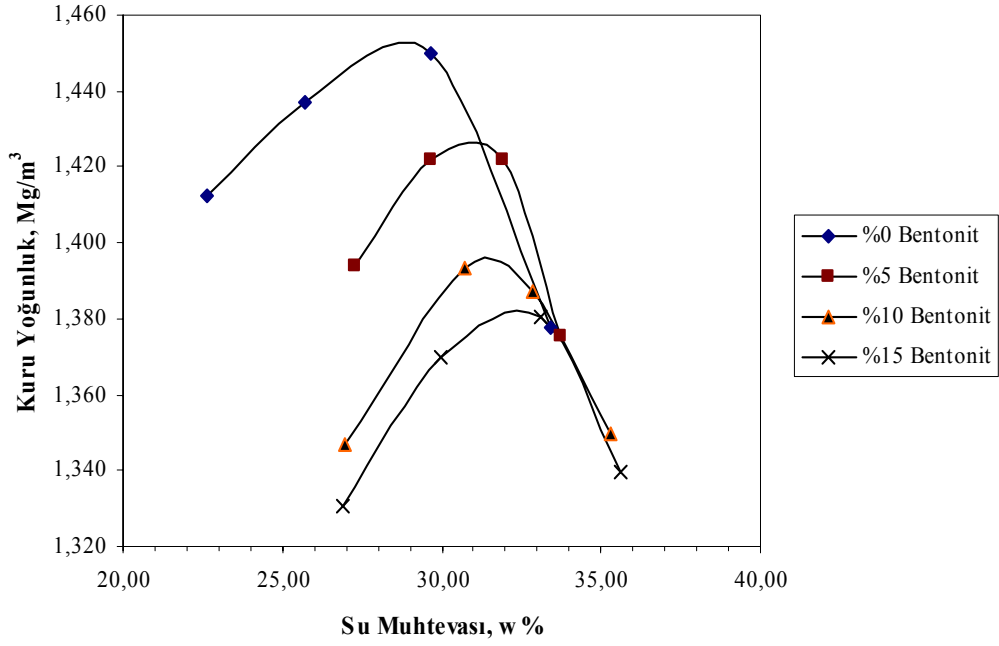
Çizelge 1. Kullanılan malzemelerin geoteknik özellikleri.

	Su Muhtevası (%)	Özgül Gravite (G _s)	Kıvam Limitleri (%)			Tane Dağılımı (%)		
			LL	PL	PI	Kum	Silt	Kil
Zemin	-	2,50	56	34	22	28	56	16
Bentonit	10,9	2,59	475	82	393	-	8	92

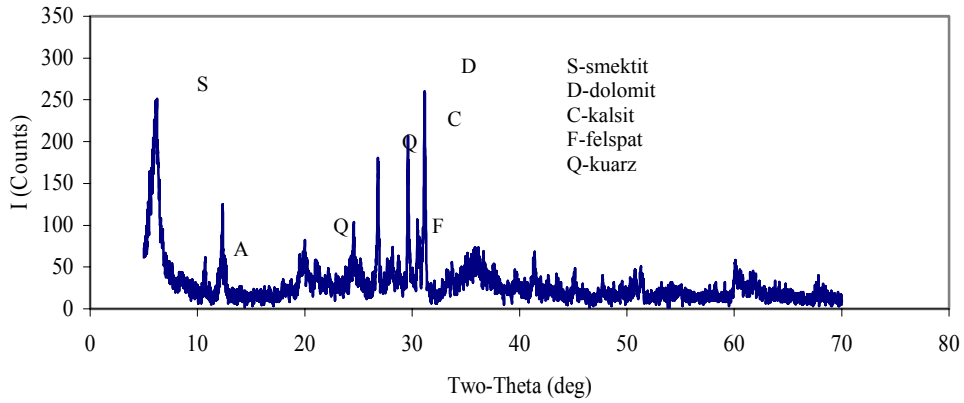
Kompaksiyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla Standart Proctor (SP) enerji seviyesinde deneyler yapılmıştır. Deney, 11,68 cm (4,6 in) yüksekliğe, 10 cm (4 in) iç çapa ve 944 cm³ (1/30 ft³) hacimli kalıp içine üç tabaka halinde serilen zemin numunesi üzerine her tabakaya 2,5 kg metal tokmak 30,5 cm yükseklikten düşürülerek elde edilen 593,7 kJ/m³ kompaksiyon enerjisinde gerçekleştirilmiştir [18]. Bu deneyler sonucunda, her bir seriye ait numunelerin hazırlanmasında kullanılacak en büyük kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri bulunmuştur. Çizelge 2’de farklı karışım serileri için maksimum kuru yoğunluk (MKY) ve optimum su muhtevası (OSM) değişimi verilmektedir. Dört ayrı katkı seviyesinde hazırlanan numunelerin kompaksiyon verilerine ait eğriler Şekil 1’de görülmektedir. %0, %5, %10 ve %15 bentonit karışımları için, maksimum kuru yoğunluk azalırken, su muhtevasının artması, artan katkı oranıyla birlikte artan ince malzeme miktarını doğrulamaktadır.

Çizelge 2. Bentonit katkılı ve katkısız seri için MKY ve OSM ilişkileri.

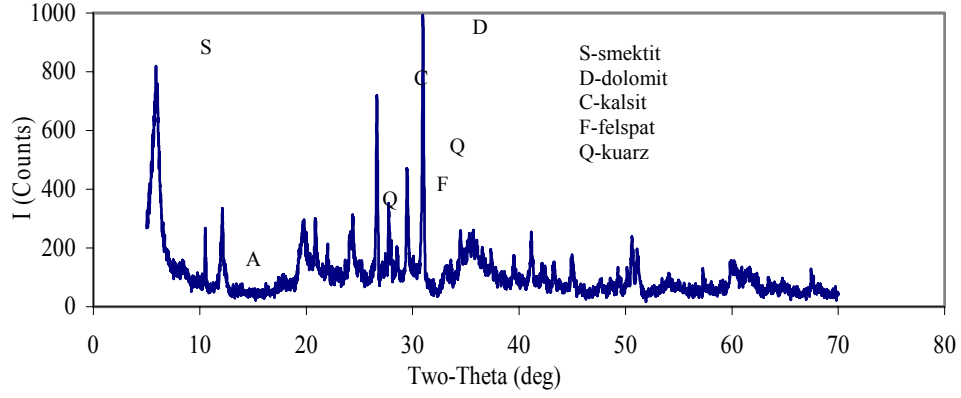
Zemin Numunesi	MKY (Mg/m ³)	OSM (%)
Zemin	1,450	28,80
Zemin+%5 Bentonit	1,430	31,00
Zemin+%10 Bentonit	1,396	31,50
Zemin+%15 Bentonit	1,382	32,40



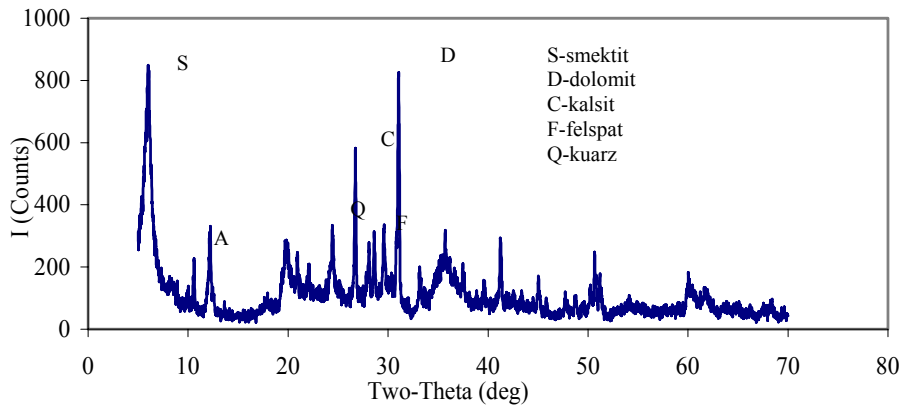
Şekil 1. Katkılı ve katkısız seriler için kompaksiyon eğrileri.



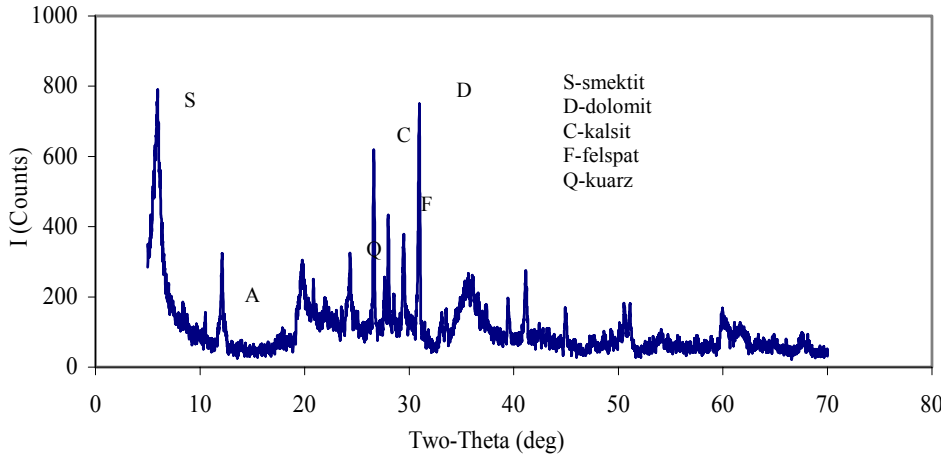
Şekil 2. Katkısız numunenin X-Işını Difraktogramı



Şekil 3. (% 5) Bentonit katkılı numunenin X-Işını Difraktogramı



Şekil 4. (% 10) Bentonit katkılı numunenin X-Işını Difraktogramı



Şekil 5. (% 15) Bentonit katkılı numunenin X-Işını Difraktogramı

III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TARTIŞMA

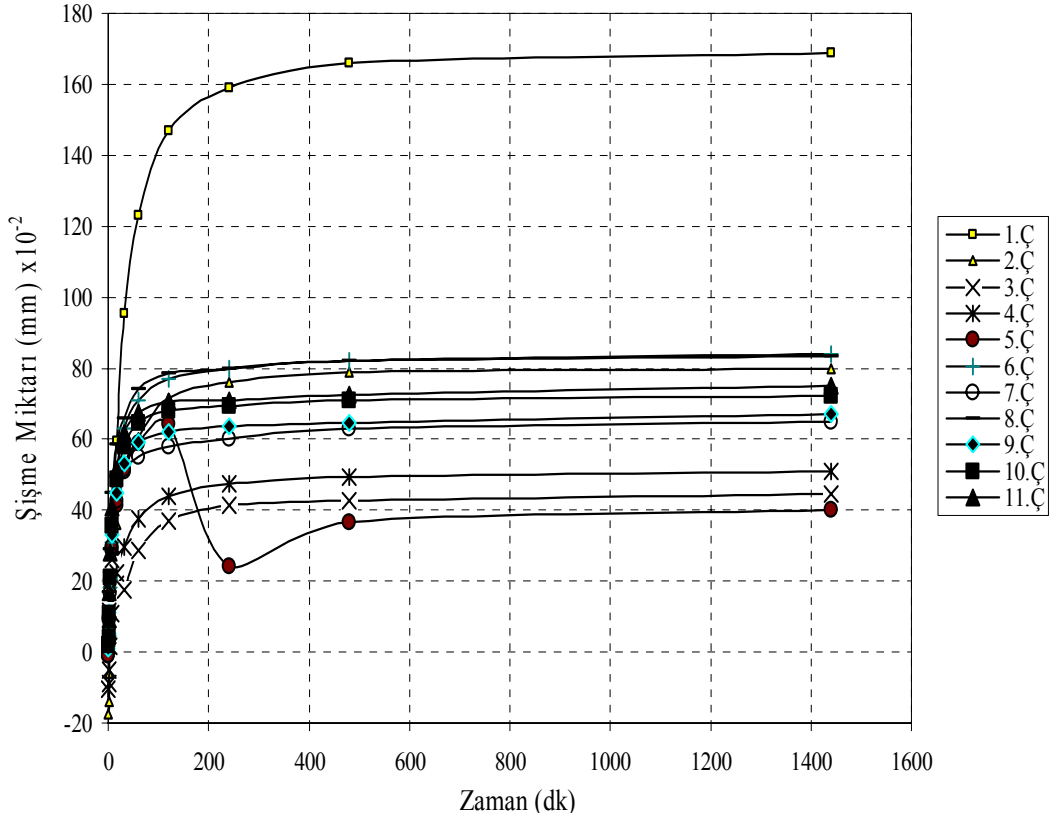
Laboratuarda optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan katkılı seriler üzerinde şişme-büzülme çevrimin öncesinde ve sonrasında şişme miktarı deneyi ile mikro yapıyı incelemek amacıyla; SEM analizi, elementel ve kimyasal analiz yapılmıştır. Numunelerin şişme miktarlarının tespitinin ardından numuneler daha sonraki şişme çevrimi için büzülme limiti su muhtevasına gelmesi için etüvde 105 °C’de kurutulmuştur.

Katkılı seriler, üniform tane dağılımını sağlamak amacıyla 4 no’lu elekten elenerek etüvde kurutulmuş zemin örneği içine, kuru ağırlığının yüzdesi olarak sırası ile % 5-10-15 oranlarında bentonit katkı ilavesi ile optimum su muhtevasında hazırlanmıştır. Zemin numunelerinde, bentonit katkısının ve optimum su muhtevasının homojen dağılımını sağlamak amacıyla, hazırlanan katkılı ve katkısız örnekler plastik poşet içine alınarak cam desikatörde iki hafta boyunca saklanmıştır. Şişme deneyleri klasik odometre deney ekipmanı ile yapılmıştır. Yoğrulmuş numuneler 75 mm çapında ve 20 mm yüksekliğindeki konsolidasyon ringi içine direkt olarak Standart Proktor değerlerinde ve enerjisinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Sıkıştırılmış zemin örneği ring içinde iki poroz taş arasına yerleştirilerek 6,9 kPa’lık düşey basınca maruz bırakılmıştır.

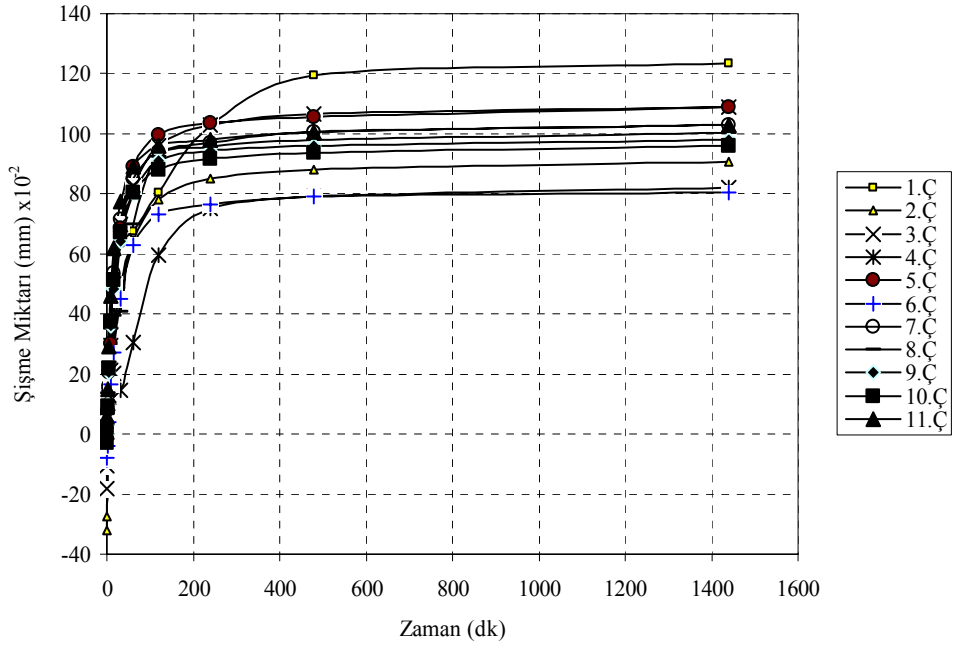
Şişme miktarlarını tespit etmek için numuneler saf suya boğularak, şişme miktarındaki değişimler 24 saat boyunca belirli aralıklarla (0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, 240, 420, 1440 dk.) kaydedilmiştir. Daha sonra numuneler sulu ortamdan uzaklaştırılarak konsolidasyon hücresi ringi içinde etüvde 105 °C’de bir gün süreyle kurutulmuştur. Kuruyan numunelerin büzülme limiti su muhtevasında kuruduğu, kuruyan numune yüzeylerinde oluşan derin çatlaklarla da gözlenmiştir. Bu şekilde ıslanma ve kuruma bir çevrim alınarak numuneler 11 çevirme maruz bırakılmıştır. Çevrim sayısının yüksek olması ve şişmenin % 91’inin ilk 24 saat de gerçekleşmesi dolayısı ile şişme aşaması 24 saat de tamamlanmıştır.

Kuruma aşamasında numune yüzeylerinde oluşan aşırı deformasyon ve yapraklanma şişme deneyi öncesi numune boyundaki değişimin tam olarak belirlenememesine neden olmuştur. Bu durum nedeniyledir ki, şişme deformasyonları yüzde olarak bulunamamıştır. Şişme miktarlarındaki değişimlerin gösterildiği grafiklerde görülen dalgalanmalar ve ani iniş çıkışlar, kuruma sırasında numune yüzeyinde oluşan düzensiz deformasyonlar nedeniyledir. Şişme

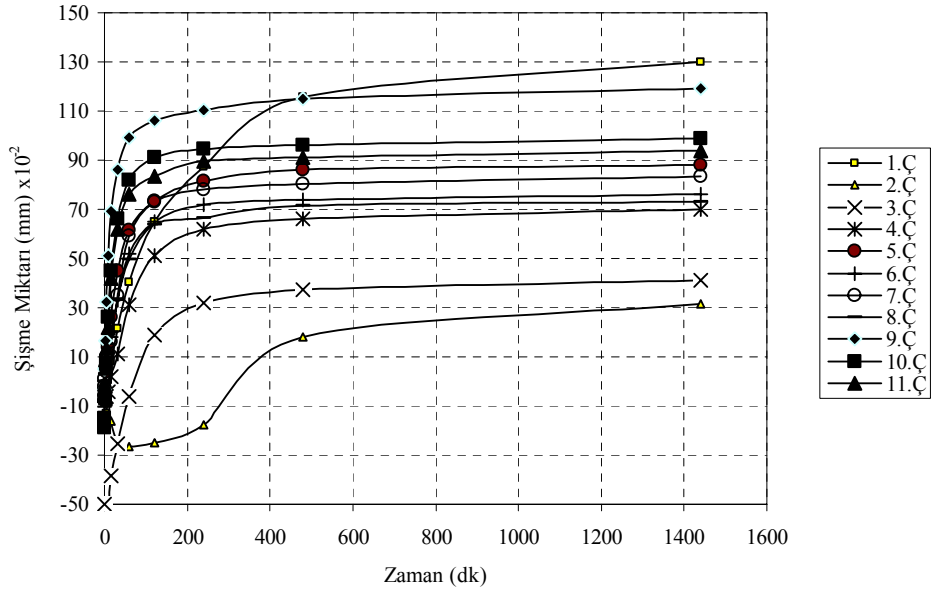
miktarı-zaman grafiklerinden de görülebileceği gibi (Şekil 6-9) numunelerin şişme miktarı, artan çevrim sayısına bağlı olarak nispi olarak daha kısa bir zaman diliminde ve daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir. Belirli bir çevrim sayısı ile orantılı olarak şişme miktarındaki değişimler bir aralık oluşturmuştur. Özellikle yüksek katkı yüzdelerinde bu düşüş çevrime bağlı olarak daha da belirgin bir hal almıştır.



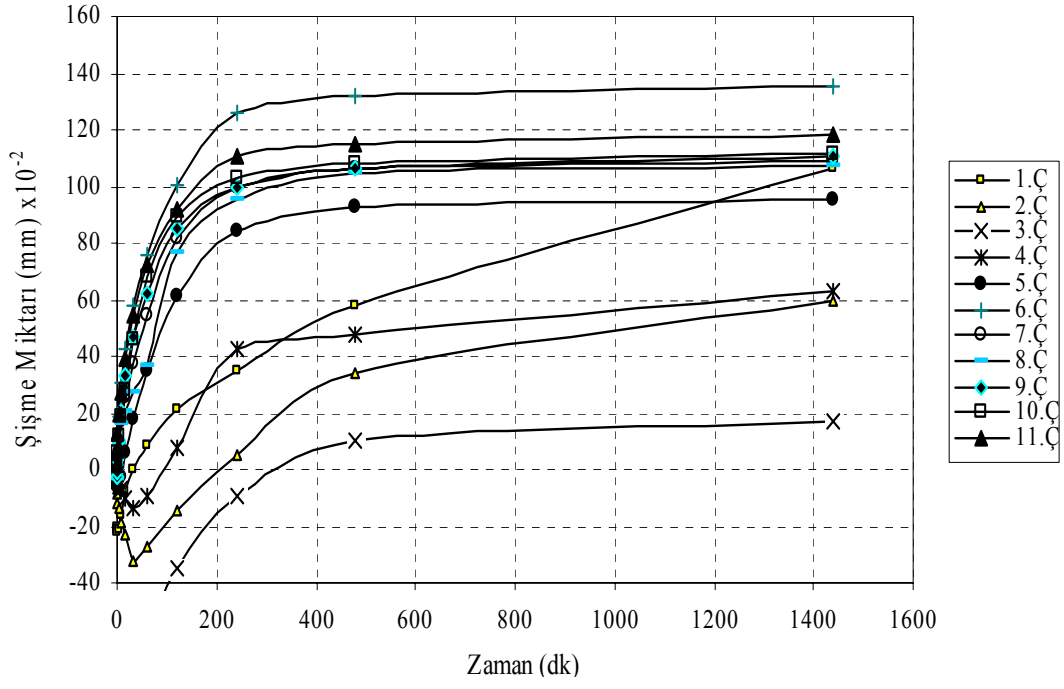
Şekil 6. Çevrim sayısına bağlı şişme miktarı zaman ilişkisi (Katkısız)



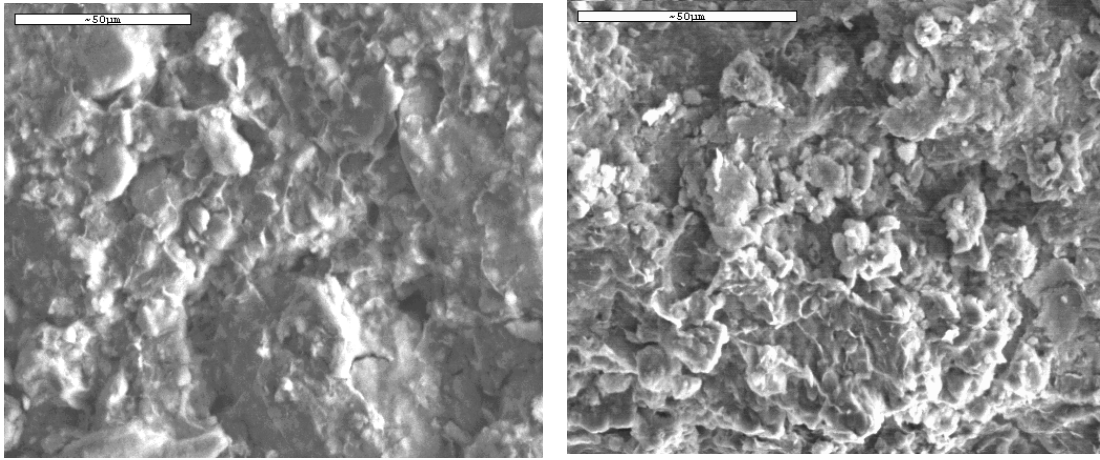
Şekil 7. Çevrim sayısına bağlı şişme miktarı zaman ilişkisi (% 5 Bentonit katkılı)



Şekil 8. Çevrim sayısına bağlı şişme miktarı zaman ilişkisi (% 10 Bentonit katkılı)



Şekil 9. Çevrim sayısına bağlı şişme miktarı zaman ilişkisi (% 15 Bentonit katkılı)

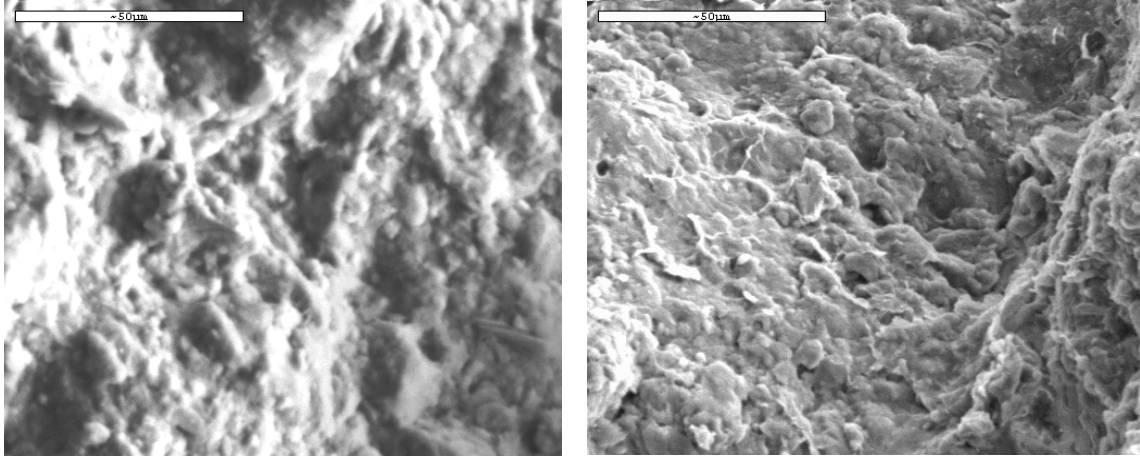


(a)

(b)

Şekil 10. Katkısız numuneye ait SEM Fotoğrafları

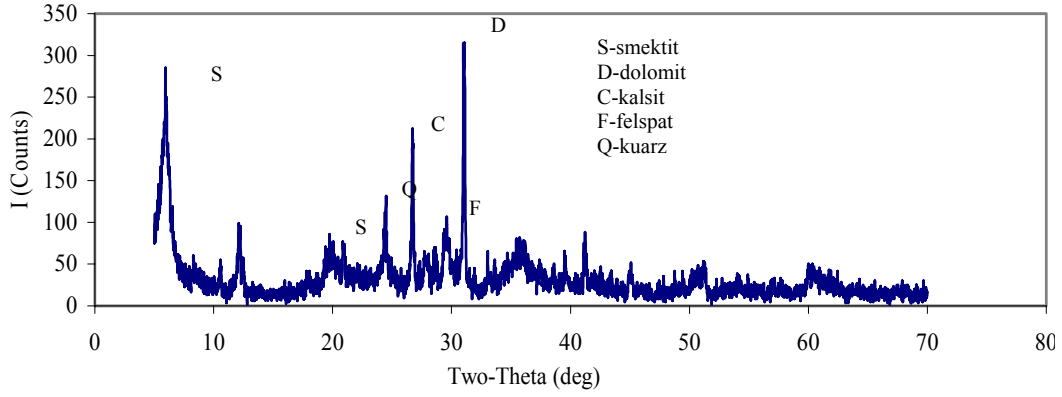
a) Çevrim Öncesi, b) Nihai çevrim sonrası



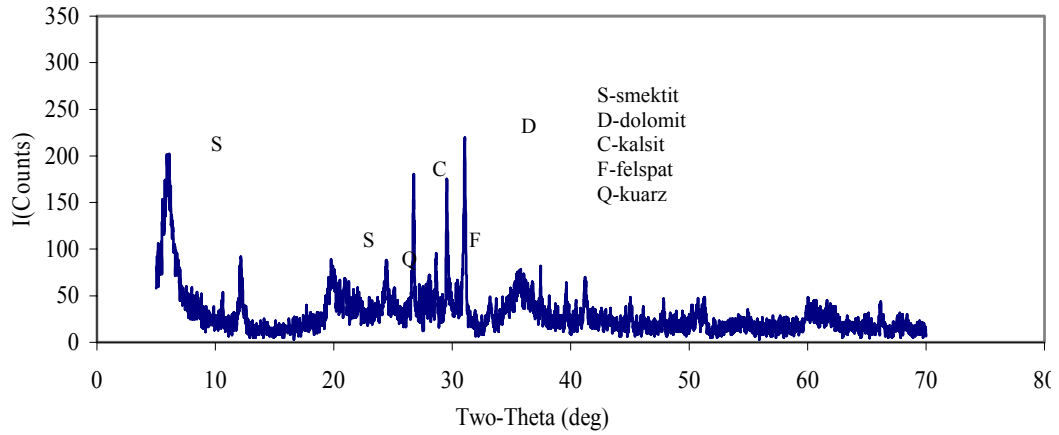
Şekil 11. (%15) Bentonit katkılı numune ait SEM Fotoğrafları

a) Çevrim Öncesi, b) Nihai çevrim sonrası

Çevrim öncesi ve sonrası örneklerde oluşan mikroyapısal değişimi görmek için özellikle karşılaştırmaya esas olması amacıyla, %0 ve %15 katkılı örneklerde X-Ray ve SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizi sonuçları %0 ve %15 katkılı örnekler açısından değerlendirildiğinde, her iki numunede de çevrim sonrasında daha kümeleşmiş ve yoğun bir yapı bütünlüğü gösterdiği görülmektedir. Nihai olarak muhtevasında %15 bentonit katkısı bulunduran numunenin SEM fotoğrafları çevrim sonrası için incelendiğinde (Şekil 11b); katkısız numuneye (Şekil 10b) oranla daha yoğun ve kümeleşmiş bir yapı ortaya koymaktadır. SEM analizleri sonuçları ve X-ray difraktogram kayıtlarından da (Şekil 12, 13)saptandığı gibi; ıslanma ve kuruma çevrimi sırasında tanelerin yeniden düzenlenerek nispeten yapı bütünlüğünü artırdığı ve bunun sonucunda oluşan aglomerasyon neticesinde su ile etkileşimde bulunacak mevcut yüzey alanlarının düşüşüne bağlı olarak, su ile temas edecek yüzey alanındaki azalmalar neticesinde çevrimle orantılı şişme potansiyelinde düşüş gözlenmiştir.



Şekil 12. Katkısız numunenin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası)



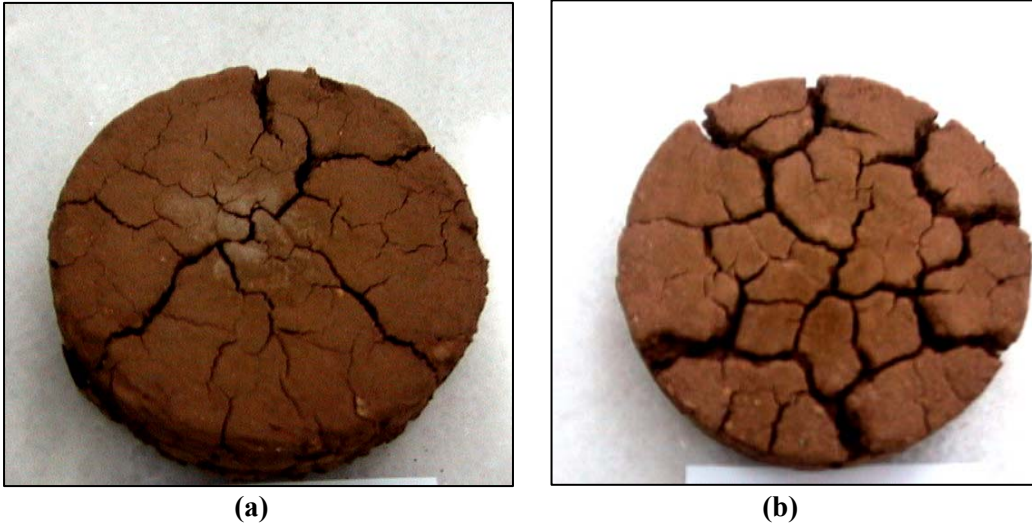
Şekil 13. (%15) Bentonit katkılı numunenin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası)

Çevrim sonrası örneklerle ait X-ray difraktogram kayıtları incelendiğinde ise, çevrim sonrası örneklerde kil muhtevasında genel bir azalmayla birlikte, SEM analizi sonuçlarından aglomerasyon neticesinde yapı bütünlüğünün arttığı görülmektedir.

Fiziksel değişimler açısından bakıldığında, numunelerin (%0 ve %15 katkılı) çevrime maruz bırakılmaları nihayetinde zemin yüzeyinde çevrim öncesine oranla çok daha derin ve büyük yarılmaların oluştuğu görülebilmektedir (Şekil 14). Büzülme çatlakları kurumaya maruz kil zeminlerin yüzeyinde gözlenir ve zemin yapısı içindeki tane yönelimindeki değişim; ıslanmadan sonra tekrar kuruyan çatlak yüzeyinde oluşur. Bu çatlaklar zemin başka şekilde örselenmedikçe

aynı yerde görülür. Birim alandaki çatlak miktarı ve tane oryantasyonu zemindeki mevcut kil mineraline bağlıdır. Büyük miktarda çatlaklar genel olarak folokule yapıya sahip kil zeminlerde oluşmaktadır. Bu esaslar dahilinde Şekil 14a ve 14b değerlendirildiğinde, görüldüğü gibi artan katkı seviyesine bağlı olarak çatlak miktarı ve derinliği artmıştır. Bu çatlak gelişimi, kil minerali muhtevasının etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Buna karşın çevrim neticesinde zemin yapı itibarıyla daha büyük tane yapısına ulaşmakta ve zeminin şişme potansiyelinde düşme oluşmaktadır.



Şekil 14. Nihai çevrim sonu, kuruma sonrası gözlenen çatlaklar:

a) Katkısız, **b)** (%15) Bentonit katkılı numune

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

DeneySEL çalışma sonuçları bir bütün içinde değerlendirildiğinde, çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak çevrimde kullanılan malzemenin tane boyutu ve buna bağlı olarak şişme potansiyelinde göreceli olarak bir düşüş gözlenmiştir. X-ray difraktogram kayıtları ve SEM analizi sonuçları mukayeseli değerlendirildiğinde, hem katkısız hem de katkılı seriler için zemin yapısı, çevrim öncesine oranla aglomerasyon neticesinde kümeleşmiş ve nihayetinde daha büyük tane yapısına

sahip olduğu görülmüştür. Şişme-büzülme çevriminin bu etkisi en büyük katkı seviyesi olan %15 bentonit katkı oranında daha da net kendini göstermiştir. Bu durum kuruma sırasındaki sıcaklıktan ziyade numunelerin ihtiva ettiği farklı yüzdelerdeki kil minerali muhtevasından kaynaklanmıştır.

Zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde çevrimin etkisi değerlendirildiğinde; çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak yüksek şişme potansiyeline sahip zeminin şişme yeteneği artan tane boyutuyla ilişkili olarak düşmüştür. Kilin düşey şişmesinin, numunenin başlangıç sıkıştırma durumuna ve ihtiva ettiği baskın kil mineral tipine bağlı olarak değiştiği sonucu çıkarılmaktadır. Killerin esas davranış mekanizmasını anlamak için nicel olarak killerin mikro yapısının değerlendirilmesi uygun olacaktır.

V. TEŞEKKÜR

Yazar, SEM ve X-Ray Difraktogram kayıtlarının değerlendirilmesinde sağladığı destek için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Selahattin KADİR Bey'e teşekkür eder.

VI. KAYNAKLAR

- [1] W.S. Abdullah, K.A. Alshibli, M.S. Al-Zou'bi, "Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays," *Applied Clay Science*, Vol. 15, pp.447-462, 1999.
- [2] A.A. Al-Rawas, R. Taha, J.D., Nelson, T.B. Al-Shap, and H. Al-Siyabi, "A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 25, No. 2, pp. 199-209, 2002.
- [3] A.A. Basma, A.S., Al-Hamoud, and A. Husein, "Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils", *Applied Clay Science*, Vol. 9, pp.355-365, 1995.
- [4] F.H. Chen, "*Foundation on Expansive Soils*", American Elsevier Science Publication, NewYork, 1988.
- [5] Y. Du, S. Li, and S. Hayashi, "Swell –shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China", *Engineering Geology*, Vol. 53, pp. 351-358, 1999.

- [6] C. Parker, D.F. Amos and D.L. Kaster, "An evaluation of several methods of estimating soil volume change", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 41, pp.1059-1064, 1977.
- [7] B. Shi, H. Jianh, Z. Liu, H.Y. Fang, "Engineering Geological Characteristics of expansive soils in China", *Engineering Geology*, Vol. 67, pp. 63 – 71, 2002.
- [8] F.H. Chen and G. S. Ma, " Swelling and shrinkage behavior of expansive clays." 6th Int. Conference on Expansive Soils, Vol.1, New Delhi, India, pp.127-129, 1987.
- [9] K. S., Subba Rao, and G. G., Satyadas, "Swelling potential with cycled of swelling and partial shrinkage." 6th Int. Conf. On Expansive Soils, Vol. 1, New Delhi, India, pp.137-142, 1987.
- [10] A.E. Dif, and W.F. Bluemel, "Expansive soils under cyclic drying and wetting." *Geotech. Testing J.*, Vol. 14, No. 1, pp.96-102, 1991.
- [11] A.S. Al-Homoud, A.A. Basma, A.I. Husein Malkawi, M.A. Al Bashabsheh, "Cyclic swelling behavior of clays." *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 121, No. 7, pp. 562-565, 1995.
- [12] M. Popesco, "Behavior of expansive soils with crumb structure." 4th Int. Conf. On Expansive Soils, Vol.1, ASCE, New York, N.Y., pp. 158-171, 1980.
- [13] R.W. Day, "Swell-shrink behavior of compacted clay." *J. Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 120, No. 3, pp.618-623, 1994.
- [14] M.M. Allam and S. Sridharan, "Effect of wetting and drying on shear strength" *J. Geotechnical Engineering Div., ASCE*, Vol. 107, No. 4, pp. 421-438, 1981.
- [15] K. Collins, "Characterization of expansive soil microfabric." In Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, South Australia, May 1984, pp. 37-41, 1984.
- [16] R. Push, "Unfrozen water as a function of clay microstructure", *Engineering Geology*, Vol. 13, pp. 157-162, 1979.
- [17] J.K. Mitchell, *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd edn. Wiley, New York, 1993.
- [18] BSI, 1990. British Standard Methods of Test for Engineering Purposes: Compaction Related Test, BS 1377: Part 4. British Standards Institution, London.