

Temel Mühendisliğinde Aletsel Ölçüm ve Gözleme

H.T. Durgunoğlu, C.G. Olgun

Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 80815 Bebek, İstanbul

H.F. Kulaç, T. Karadayılar, S. İkiz, C. Öge

Zetaş, Zemin Teknolojisi A.Ş., İstanbul

Özet

Aletsel gözlem, temel mühendisliği uygulamalarında, söz konusu yapının ve temel zemininin projelendirme, inşaat ve/veya servis safhalarında davranışını izlemek amacıyla kullanılmaktadır. Boşluk suyu basıncı, toplam zemin gerilmesi, yük deformasyon (oturma, deplasman, hacim değiştirme) türünde davranışların ölçülmesini ve izlenmesini kapsar. Bu yönde kullanılan aletlerin başlıcaları olarak piyezometre, basınç hücresi, ekstansometre, çatlak ölçer, oturma kolonu, inklinometre, yük hücresi, stresmetre sıralanabilir. Temel mühendisliği uygulamalarında son senelerde gerek diğer ülkelerde ve gerekse ülkemizde zemin ve yapı davranışının belirlenmesi, proje kriterlerinin tahkiki ve inşaatın yönlendirilmesinde aletsel ölçüm ve gözleme büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada temel mühendisliğinde gözlemede kullanılan ölçüm aletlerinin tanımı, tanıtımı ve çeşitli kullanım amaçları hakkında bilgi verilmiş, ayrıca aletsel gözlemin uygulanmasına bir örnek olarak, Anadolu Otoyolunda yumuşak killerin önyükleme dolgusu altında oturmasının gözlenmesinde oturma kolonlarının kullanılması bir vaka analizi olarak sunulmuştur.

Giriş

Temel mühendisliğinin modern uygulamalarında, özellikle otoyol yapımlarında ve tünel kazılarında sık sık aletsel gözlemden yararlanılmaktadır. Aletsel gözlemden projelendirme safhasında, yapım safhasında, ve inşa sonrası yararlanmak mümkündür. Aletsel gözlem projelendirme safhasında saha koşullarının tanımlanması ve belirsizliklerin azaltılmasında kullanılır. Yapım safhasında güvenliği sağlamak, inşaat maliyetini en aza indirmek, inşaat

planlaması yapmak, inşaat bittikten sonra da yapının davranışını izlemek amacıyla kullanılabilir.

Temel mühendisliğinde aletsel gözlemin önemi zemin davranışının projelendirme için öngörülen geoteknik modele uyup uymadığı, veya ne derecede uyduğu konusunda karar verilebilmesi için kuvvetli bir araç olmasından kaynaklanır. Temel mühendisliğinde gerek zemin gerek kaya olsun, eldeki malzemenin kontrol edilen bir üretim süreci olmadığı için davranış mekanizmasında belirsizliklerle karşılaşılır. Proje safhasında, temel zemininin doğal heterojen yapısından dolayı, mühendislik özelliklerinin kesin sayısal değerinin bulunması pek olası değildir. Seçilmiş numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri ve saha deneyleri yapılabilir, fakat bu testler sadece olası bir değerler aralığı sağlar. Temel mühendisliğinde projelendirme kesin bir analize dayalı olmayacağından, modern bir uygulamada proje yargıları inşaat ilerledikçe gözden geçirilip değerlendirilmeli ve gerektiğinde gözlenen geoteknik durum ve izlenen davranış doğrultusunda değiştirilmelidir.

Bir proje kapsamında bir aletsel gözlem programının uygulamaya konmasında en önemli safha, karşılaşılan duruma en uygun aletin seçimi ve maksada uygun olarak yerleştirilmesidir. Projedeki her alet belli bir soruya cevap verecek şekilde seçilmeli ve yerleştirilmelidir. Bu gaye ile zemin davranışını belirleyen temel mekanizmalar tanımlanmalı ve alet bu doğrultuda seçilmelidir.

Yeraltı Suyu ve Boşluk Suyu Basıncı

Yeraltı suyu akımı ve zemindeki boşluk suyu basıncının belirlenmesi temel zemininin mukavemeti ve stabilitesini saptamak açısından önemlidir. Boşluk suyu basıncının izlenmesinde piyezometreler kullanılır. Piyezometre zemin içinde bir noktada alttan ve üstten tıpalanmak yoluyla izole edilerek sadece bulunduğu derinlikte boşluk suyu basıncını ölçmek için kullanılır. Piyezometre yerine eşanlamlı olarak boşluk basıncı hücresi tanımı da kullanılabilir.

Bu tip aletsel gözlemlerde piyezometrelerin iki genel kullanım alanı vardır. Yeraltı suyu akımını gözlemek ve zemin veya kaya uzun vadeli mukavemetinin tayini için gerekli doneyi sağlamak. İlk kullanım alanı için, yerinde permeabiliteyi belirlemek için yapılan kuyu pompalama testlerinde yeraltı su akımının gözlenmesi, dolgu ve şevlerde uzun dönem sızma ağının çıkartılması ve beton barajların altında kaldırma kuvvetinin gözlenmesi örnekleri verilebilir. İkinci kategori için, boşluk suyu basıncının ölçülmesi ve bu yolla efektif gerilmenin belirlenmesiyle zemin mukavemetinin tespit edilmesi uygulaması gösterilebilir. Zemin veya kayada potansiyel kayma yüzeyini kesen kazılarda, kayma mukavemetinin tespitinde veya yumuşak kil temeller üzerine yapılan kademeli inşaatlarda ilave boşluk suyu basıncının sönümünün gözlenmesi bu tip uygulamanın örnekleridir.

Piyezometreler farklı uygulamalarda sondaj kuyularına ve dolguya yerleştirilebilir veya sürülmek yoluyla zemin içine yerleştirilerek yeraltı suyunun gözlenmesinde kullanılır.

Zemin içine sürülme durumunda oluşacak zemin basıncının ölçümleri etkilememesi için piyezometre gövdesi rijit bir koruyucu kılıfla kaplanmaktadır. Bu tip uygulamalarda karşılaşılan en önemli güçlük piyezometre filtresinin ince taneli malzemeyle tıkanmasıdır (Dunnicliff, 1988). Oluşan toprak basıncının piyezometre gövdesi üzerinde oluşturduğu basıncın hataya sebep olduğu örneklere de rastlanabilir (Olgun, 1995).

Deformasyon Ölçümü

Temel zemininde oluşan deformasyonların bazı inşaat mühendisliği uygulamalarında zemin mukavemeti ve üst yapının kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla sürekli gözlenmesi gerekebilir. Deformasyon ölçümleri zemin ve kayada oluşan oturma, deplasman ve hacim değiştirme olarak üç grupta toplanabilir. Her parametre çeşitli cihazlarla ölçülmektedir. Deformasyon ölçümlerinde kesinlik sağlamak için ölçüm noktası referans noktalarıyla topografik ölçümlerle eşleştirilmelidir. Deformasyon ölçümünde kullanılan başlıca aletler aşağıda sıralanmıştır.

Çatlak Ölçer

Deformasyon ölçümünde kullanılan aletlerin en basiti çatlak ölçerdir. Çatlak ölçer şevlerde, beton yapılarda, yolda, tünellerde, kırık ve faylarda oluşan çatlakları gözlemede kullanılır. Çatlaklardaki hareketleri gözlemek için farklı alanlarda kullanılan farklı hassasiyetlerde çeşitli aletler vardır. Çatlak her iki tarafından ankrajlanarak ve bu iki nokta arasına gergin bir tel veya uzatma çubuğu tutturarak bağlanır. Aradaki bağlantı sayesinde çatlağın iki tarafındaki noktaların birbirine göre hareketi ölçülebilir. Bu tipte çeşitli aletlerde çatlağın ilerlemesini izlemek için farklı hassasiyetlere göre aynı çalışma prensibinde çeşitli düzenekler vardır. Bu düzeneklerde temel ayırım, çatlağın iki noktası arası bağlantı elemanının tel veya çubuk olması ve oluşan hareketleri ölçmede kullanılan güç çeviricidir.

Oturma Kolonu

Oturma kolonu ortak eksen üzerindeki iki veya daha fazla noktanın arasındaki değişen uzaklığı ölçmeye yarar. Alet tek parça olan veya iç içe geçen plastik geçit borusu ve bunun üzerinden geçen bir dizi manyetik halkadan oluşur ve manyetik oturma kolonu olarak ta adlandırılır. Ön yükleme dolgusu altında düşey deplasmanın gözlenmesi ve açık derin kazılarda taban kabarmasının gözlenmesi oturma kolonunun tipik uygulamalarıdır.

Ekstansometre

Ekstansometre, sondaj kuyusu ekseninde bulunan iki veya daha fazla nokta arasında değişen mesafenin, hareket edebilir bir ölçüm sensörü olmaksızın gözlenmesi için zemin veya kayaya yerleştirilen bir tip alettir. Yeraltı kazılarında ve kazılmış şevler arkasında oluşan deformasyonların gözlenmesi tipik uygulamalarıdır. Ekstansometreler ayrıca konsolidasyon oturmasının ve açık derin kazılarda taban kabarmasının gözlenmesinde de kullanılır.

İnclinometre

İnclinometre bir borunun eksenine dik deformasyonları boru içinden geçirilen bir eğim sensörü aracılığıyla ölçmeye yarar. Sensörde dikeye göre eğimi ölçen yerçekimi duyarlı bir güç çevirici bulunur. Boru sondaj deliğine veya dolguya, çoğu uygulamada yüzey altı yatay deformasyonları belirlemek için dikey bir şekilde yerleştirilmektedir.

İnclinometrelerin tipik uygulamaları şunlardır.

1. Heyelanlarda kayma bölgesinin belirlenmesi
2. Baraj dolgusunda, zayıf zemin üzeri dolgularda, açık kazı ve tünellerde yanal deformasyonların miktarı ve hızının gözlenmesi
3. Sedde, kazık ve istinat duvarlarının düşeyden sapmasının gözlenmesi

Toplam Zemin Gerilmesi Ölçümü

Zemin içinde toplam gerilme ölçümü zemin kütlesi içinde ölçüm ve bir yapı elemanının yüzünde ölçüm olarak iki grupta toplanabilir. Aletler zemin basınç hücresi, zemin gerilme hücresi gibi isimlerle adlandırılır. İki ölçüm kategorisi için sırasıyla gömme zemin basınç hücresi ve yüzey zemin basınç hücresi terimlerini kullanmak uygun olacaktır.

Gömme zemin basınç hücreleri, toplam gerilmenin dağılımı, şiddeti ve yönünü belirlemek üzere baraj dolgusuna veya menfez üzeri dolgulara yerleştirilir. Yüzey zemin basıncı hücreleri istinat duvarları, menfezler, kazıklar vs. yapısal elemanlar üzerindeki toplam gerilmenin ölçülmesinde kullanılır.

Zemin basınç hücrelerinin başlıca kullanım amacı, proje tahmin ve kabullerini teyit etmek ve gelecek tasarımları geliştirecek bilgi sağlamaktır. Zemin basınç hücrelerinin çoğu statik veya yavaşça değişen gerilmeleri ölçmek üzere tasarlanmıştır. Sismik veya büyük ölçek dinamik yükleme çalışmalarında, hücreler yeterince hızlı tepki verecek şekilde tasarlanmalı ve geliştirilmelidir.

Zemin kütlesi içinde bir noktada toplam gerilmenin sağlıklı şekilde ölçülmesi için aşağıdaki şartların sağlanması gerekir.

1. Basınç hücresinin zemin kütlesi içindeki gerilme durumunu mevcudiyetinden dolayı değiştirmemesi
2. Lokal düzensizlikleri elimine edebilmek için yeterince büyük ölçüm alanı
3. Düzensiz tabakalaşmaya karşı minimum hücre duyarlılığı
4. Gerilme durumunu önemli derecede değiştirmeyecek bir yerleştirme yöntemi

Son şart genel olarak bu ölçümleri, dolgular ve diğer yapay zemin koşullarıyla sınırlandırır. Büyük çaplı delikler açıp, içine basınç hücresini yerleştirdikten sonra etrafını geri doldurarak zemin basıncı ölçme denemeleri zeminin gerilme durumunu bozduğundan hatalı ölçümlere sebep olur. Buna rağmen, yumuşak zeminlerde yanal gerilmeyi ölçmek için doğal zemin içine sürülerek yerleştirilen zemin basınç hücrelerinin başarılı örnekleri vardır (Massarsch 1975).

Zemin kütlesi içindeki toplam basıncı ölçerken başlıca hata, hücrenin varlığı ve yerleştirme metodunun zemin serbest-alan gerilmesinde önemli değişmelere yol açmasından kaynaklanır. Zemin basınç hücresinin elastisite modülünü yerleştirildiği zemininkine eşlemek zor ve pahalı bir iştir. Saha koşullarında hücreyi, etrafındaki malzeme, zemin veya kaya dolguyla aynı modül ve yoğunluğa sahip olacak ve hücrenin iki yüzünün de malzemeye sıkı temas halinde olacak şekilde yerleştirmek çok zordur. Bu sebeple toplam gerilmeyi büyük doğrulukla ölçmek neredeyse imkansızdır.

Önyükleme Dolgusu Altında Yumuşak Killerde Oturma Gözlenmesi Üzerine Bir Vaka Analizi

Proje tanımı

Anadolu Otoyolunun Gümüşova-Gerede bölümü Kısım II'de Km 9+640 ila Km 10+200 arasında karşılaşılan sıkışabilir kohezyonlu killi zemin koşullarında otoyol dolgusu altında meydana gelecek toplam ve farklı oturmaların menfez ve otoyol sanat yapıları için kabul edilebilir kriterin üzerinde olacağı öngörüldüğünden, bu km'ler arasında önyükleme dolgusu yapılmıştır (ZETAŞ, 1994). Söz konusu kesim İstanbul ve Ankara'yı bağlayan TEM otoyolunun önemli bir hattı olup, işveren Karayolları Genel Müdürlüğü ve müteahhit ASTALDI firmasıdır. Aletsel gözlem konusunda geoteknik müşavirlik hizmetleri ZETAŞ A.Ş. tarafından sunulmuştur.

Önyükleme dolguları altında oluşan oturmaların sağlıklı bir şekilde gözlenmesi amacıyla beş adet oturma kolonu yerleştirilmiştir. Oturma kolonu daha önce bahsedildiği gibi, tek parça olan veya iç içe geçen plastik geçit borusu ve bunun üzerinden geçen bir dizi manyetik halkadan oluşur ve ortak eksen üzerindeki iki ya da daha fazla noktanın arasındaki değişen uzaklığı, bu yolla da oluşan deformasyonları ölçmeye yarar.

Zemin koşulları

Söz konusu kesim yakın dönem nehir birikintisidir ve mevcut tabakalaşma bu oluşumu doğrulamaktadır. Sıkışabilir killi tabakanın üzerinde kalınlığı 1.5-3.0 m arası değişen çakıllı yüzeysel alüvyonel birikinti bulunmaktadır. Kil tabakasının kalınlığı 5.0 ve 12.0 m arasında değişmekte ve bu tabakanın altında da sıkı çakıldan oluşan taşıyıcı tabaka bulunmaktadır. Dolgunun yapılacağı yol kesiminin uzunluğu 600 m civarında olup dolgu yüksekliği 19.0 m'ye ulaşmaktadır.

Dolgu yapılan kesim boyunca kalınlığı değişmesine rağmen süreklilik gösteren kil tabakası içinde yer yer silt ve kum bantlarına rastlanmıştır. Aletler yerleştirilirken yapılan sondajlar esnasında gözlenen oluşum da bu bulguyla uyum içerisindedir. Kil tabakasından alınan numuneler için oturma indisi (C_c) ve yeniden yükleme oturma indisi (C_r) değerleri hesaplanmış olup ilk boşluk oranı (e_0) değerleri ile beraber sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 1. Konsolidasyon Parametreleri (ZETAŞ, 1995a)

Numune	Derinlik (m)	YASS derinliği (m)	Birim hacim ağırlık (t/m ³)	Basınç σ_{vo} (t/m ²)	Basınç, σ_p (t/m ²)	OCR	e_o	C_c	C_r
M302-UD2	6.0	4.75	2.085	11.26	20	1.78	0.516	0.170	0.040
M304-UD1*	3.0	0	1.912	2.74	24	8.77	0.901	0.270	0.080
M304-UD2*	4.7	0	1.741	3.48	26	7.47	1.245	0.540	0.150
M304-UD3	8.8	0	1.900	7.92	27	3.41	1.009	0.249	0.065
M304-UD4	10.5	0	1.926	9.72	32	3.29	0.880	0.310	0.090
M305-UD1	9.0	0.50	1.743	7.19	21	2.92	1.212	0.470	0.140
M306-UD2	11.0	3.00	1.900	12.90	30	2.33	1.155	0.323	0.095
Ortalama			1.887				0.988	0.304	0.086

YASS : Yeraltı Suyu Seviyesi

σ_p : Geçmişteki maksimum jeolojik basınç

σ_{vo} : Efektif jeolojik basınç

OCR : Aşırı konsolidasyon oranı

e_o : İlk boşluk oranı

C_c : Oturma indisi

C_r : Yeniden yükleme oturma indisi

* Bu numuneler silt zemin içerisinde yeraldıklarından C_c ve C_r değerleri için ortalamaya katılmamışlardır.

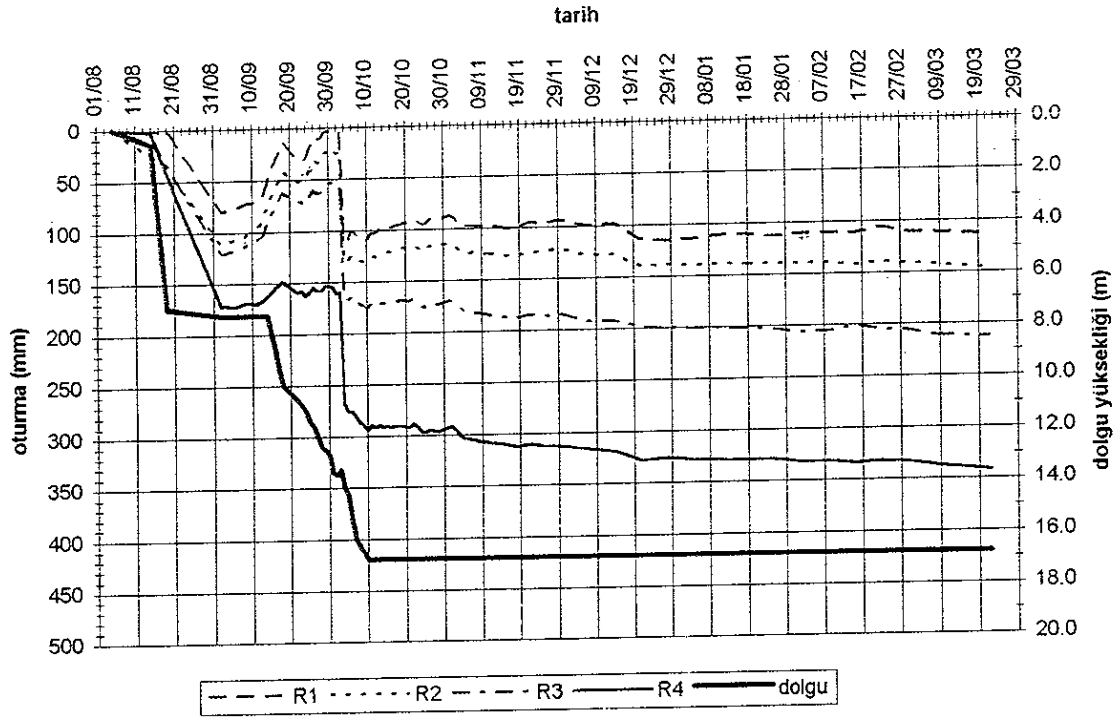
Aletlerin yerleştirilmesi

Oturma kolonları dolgu başlamadan önce gerekli derinlikte bir sondaj deliği açılmak yoluyla sıkışabilir kil tabakası içine üç ve doğal zemin yüzeyine bir adet olmak üzere toplam dört manyetik halkalı şekilde yerleştirilmiştir. Yüzeydeki dördüncü halka (R4) yoluyla kil tabakasında oluşan toplam oturma, kil tabakası içindeki halkalarla da oturmanın derinlikle değişimi tayin edilebilmektedir.

Dolguya başlanmasından sonra dolgu yükseldikçe kolon boyu boru eklenerek uzatılmıştır. Zemin içindeki halkaların konumunun boru içine sarkıtılan manyetik duyarlı bir okuma cihazıyla belirlenmesiyle zemin tabakasında önyükleme sonucu oluşan oturmalar gözlenmiştir.

Gözlem ve değerlendirme

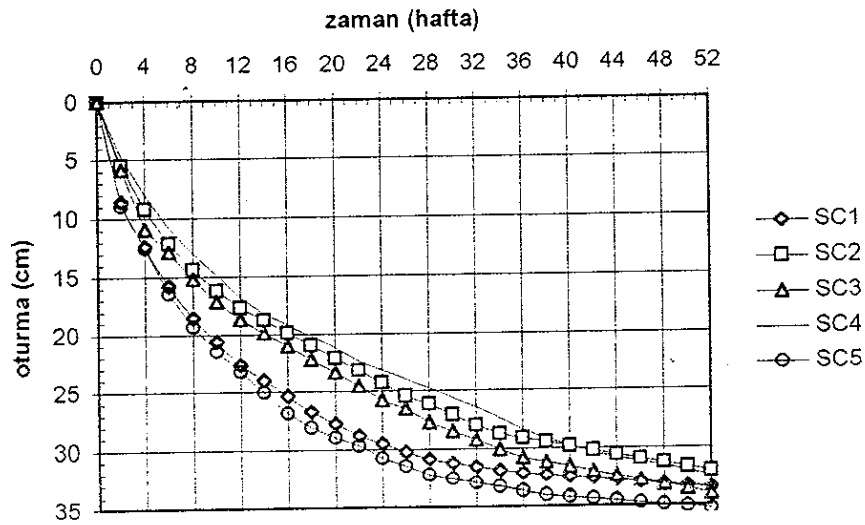
Aletlerin yerleştirilmesini takiben dolgunun inşasına başlanmış ve kademeli olarak son yüksekliğe ulaşılmış ve 34 haftalık bir süre zarfında gözlem devam etmiştir. Bir örnek teşkil etmek üzere 5 no'lu oturma kolonuyla (SC5) gözlenen oturma zaman profili aşağıda sunulmuştur. Söz konusu noktada şekilde görüldüğü gibi nihai önyükleme dolgu yüksekliği 16.8 m olup kil tabakasının kalınlığı 11.7 metredir. Bu şartlar altında 34 hafta sonunda toplam olarak 34.2 cm oturma gözlenmiştir.



Şekil 1. Aletsel gözlem sonuçları - Oturma kolonu 5 (SC5)

Halkaların hareketinden oturma hızı dolgu inşaatının tamamlanmasını takiben ani olarak azaldığı gözlenmiştir. Oturma-zaman grafiklerinden oturmaların trendi incelendiğinde 34. hafta itibariyle oturmaların tamamlanmış olduğu söylenebilir. Mevcut veriler ve değerlendirmeler, oturmaların büyük bir kısmının kısa bir zaman süreci içerisinde meydana geldiklerini göstermektedir.

Gerçekleşen oturmaları değerlendirebilmek için mevcut veriler ve analitik yöntemler (Terzaghi ve Peck, 1967) kullanılarak oturma kolonları konumlarında gerçekleşmesi beklenen maksimum konsolidasyon oturma değerleri hesaplanmıştır. Beş ayrı lokasyon için yapılan analizler oturma zaman grafiği olarak şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Teorik oturmanın zamana göre değişimi

Aletsel gözlem ile dolgu başlangıcından gözlem sonuna kadar geçen süre içerisinde ölçülen toplam oturma değerleri, hesaplanan oturmalar ile karşılaştırılmalı olarak Tablo 2 de sunulmuştur.

Tablo 2. Aletsel Gözlem ve Teorik Metodla Bulunan Değerlerin Karşılaştırması (ZETAŞ, 1995b)

Oturma Kolomu	Kil Tabakası Kalınlığı (m)	Dolgu Yüksekliği (m)	S_{max} (cm) (hesaplanan)	$S_{34hafta}$ (cm) (gözlenen)	$S_{gözlenen} / S_{hesaplanan}$ (%)
SC1	8.40	16.0	34.3	25.7	74.9
SC2	4.90	12.0	36.9	26.8	72.6
SC3	9.90	12.0	39.0	30.4	77.9
SC4	11.50	12.0	40.0	31.4	78.5
SC5	11.70	16.8	35.8	34.2	95.5
				ortalama	79.9

Buna göre teori ile bulunan değerler gerçek değerlerle karşılaştırıldığında hesaplanan oturma miktarının gerçekte gözlenenden %20 civarında daha yüksek olduğu ve zamanlama olarak da oturmaların hesaplar ile tahmin edilenden bir miktar daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

Bu durum büyük bir olasılıkla kil tabakası içinde bulunan silt ve kum bantlarından kaynaklanmaktadır. Siltli-kumlu lensler kil tabakasında drenaj vazifesi görerek oturma hızını arttırmış buna mukabil sıkışabilir tabaka kalınlığını düşürerek toplam oturmayı azaltmıştır. Genellikle idealize geoteknik profilin belirlenmesinde kullanılan numuneler, tüm tabaka derinliği boyunca üniform özelliklere sahip olmayan zeminin ince daneli kesimlerden elde edilmiş olduğundan bu durum hesaplarda tam olarak temsil edilememiştir.

Sonuç

Sunulan vaka analizi temel zemininin önyüklem dolgusu altında konsolidasyonu yoluyla ıslahında oturma kolonlarının uygulanmasına örnek olup, aletsel gözlemin inşaat programı ve zamanlaması konusunda kullanımını sergilemektedir. Projede aletsel gözlemin sağladığı ölçümler sayesinde kil tabakasında beklenen konsolidasyon oturmalarına teorik olarak hesaplanandan daha önce ulaşıldığı saptanmıştır.

Sonuç olarak teorik hesaplar ile ölçüm sonuçları arasındaki %20 mertebesindeki fark bu tür karmaşık zemin yapıları için hesap ile gözlem arasında oldukça iyi bir uyumun göstergesidir. Bu tür zeminlerde numunenin kil içeriği yüksek (oturma potansiyeli yüksek) seviyelerden alınması ve silt-kum lenslerinin temsil edilememesi nedeniyle hesapla belirlenen oturmanın, gerçekte oluşan oturmadan daha yüksek olması beklenen bir durumdur.

Kil tabakasının ıslahında gereken oturmaya hesaplanandan daha önce ulaşıldığının aletsel gözlemlerle saptanması sayesinde alt yapı menfez inşaatına daha önce başlama olasılığı doğmuş ve böylece söz konusu otoyol inşaatında çok değerli zaman kazanımı sağlanmıştır.

Referanslar

- Dunnicliff J., (1988), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, Wiley, New York.
- Massarsch, K. R. (1975), "New Method for Measurement of Lateral Earth Pressure in Cohesive Soils," *Can. Geotech. J.*, Vol. 12, No. 1, Feb., pp. 142-146.
- Olgun, C.G., (1995), 'Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Geotechnical Engineering', Yüksek lisans Tezi, B.Ü., İstanbul.
- Terzaghi, K., and R. B. Peck (1967), Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed., Wiley, New York.
- ZETAŞ (1994), Anadolu Otoyolu Gümüşova-Gerede Kısım 2 Km 9+600 - Km 10+200, Önyükeme Dolgusu ve Aletsel Gözlem Değerlendirme Raporu #1, İstanbul.
- ZETAŞ (1995a), Anadolu Otoyolu Gümüşova-Gerede Kısım 2 Km 9+600 - Km 10+200, Önyükeme Dolgusu ve Aletsel Gözlem Değerlendirme Raporu #4, İstanbul.
- ZETAŞ (1995b), Anadolu Otoyolu Gümüşova-Gerede Kısım 2 Km 9+600 - Km 10+200, Ön Yükleme Dolgusu Altında Hesaplanan Oturmalar ile Aletsel Gözlem Sonucu Belirlenen Oturmaların Karşılaştırılması Değerlendirme ve Öneriler, İstanbul.