PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
PAMUKKALE UNIVERSITY ENGINEERING FACULTY
MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES
YIL : 2009
CİLT : 15
SAYI : 1
SAYFA : 49-58

FARKLI ZEMİN ORTAMLARINA YERLEŞTİRİLEN ESNEK GÖMÜLÜ BORULARIN DÜŞEY YÜKLER ALTINDAKİ ŞEKİL DEĞİŞİMİMİN DENEYSEL VE AMPRİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

***Niyazi Uğur TERZİ, **Sönmez YILDIRIM**
*Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, E 90 Karayolu üzeri, Aksaray
**Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34210, Esenler, İstanbul

Geliş Tarihi : 03.09.2008
Kabul Tarihi : 10.03.2009

ÖZET

Esnek boruların şekil değişimi ve zamana bağlı davranış biçimleri çelik ve betondan malzemelerden üretilen rijit borular ile kıyaslandığında bir çok yönden farklılıklar gösterir. Düşey yükler altındaki deformasyon davranışları; geri dolgu mazlemesi ve yerleştirme koşulları ile doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada 100 mm yarıçapındaki bir HDPE esnek borunun düşey yükler altındaki davranışı labaratuvar ortamında incelenmiştir. Çalışmalarda, deney kutusu, şişebilen membran yastıklar, yağmurlama sistemi, pozisyon ve şekil değişimi ölçerler kullanılmıştır. İnceleme kapsamında farklı zemin ortamları dikkate alınmıştır. Matematiksel analizler için Geliştirilmiş Iowa yöntemini temel alan Masada Derivasyonu kullanılmış ve deney sonuçları ile matematiksel sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda geri dolgu malzemesinin boru davranışında önemli bir etken olduğu görülmüş, Masada Derivasyonunun boru dayanımının kestiriminde güvenilir çözümler ortaya koyduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler : *HDPE gömülü boru, Labaratuvar testi, Masada derivasyonu formülü.*

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FLEXIBLE BURIED PIPE DEFORMATION BEHAVIOR UNDER VARIOUS BACKFILL CONDITIONS

ABSTRACT

Deformation characteristics of polyethylene based flexible pipes are different than rigid pipes such as concrete and iron pipes. Deflection patterns and stress-strain behaviors of flexible pipes have strict relation between the engineering properties of backfill and its settlement method. In this study, deformation behavior of a 100 mm HDPE flexible pipe under vertical loads is investigated in laboratory conditions. Steel test box, pressurized membrane, raining system, linear position transducers and strain gauge rosettes are used in the laboratory tests. In order to analyze the buried pipe performance; Masada Derivation Formula which is mostly used by designers is employed. According to the test and mathematical studies, it is understood that relative density of backfill and its settlement method is a considerable effect on buried pipe performance and Masada Derivation method is very efficient for predicting the pipe performance.

Keywods : *HDPE buried flexible pipe, Laboratory test, Masada derivation formula.*

1. GİRİŞ

Gömülü esnek borular, petrol, doğal gaz gibi enerji hammaddelerinin taşınmasında, su toplama (kanalizasyon ve drenaj) ve su dağıtma (sulama kanalları, içme suyu hatları) sistemlerinde, elektrik ve telefon gibi kabloların yeraltından taşınmasında ve buna benzer bir çok amaçla ve bir çok alanda kullanılmaktadır. Yol ve maliyet kriterleri göz önünde tutulduğunda gömülü boru taşıma sistemlerinin deniz hava ve kara taşımacılığı içerisinde en ekonomik seçenek olduğu bilinmektedir. Özellikle yanıcı ve parlayıcı enerji kaynaklarının yeraltından güvenle taşınmasında gömülü boruların önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu bakımdan gömülü boruların dayanımlarının, servis kalitelerinin ve zamana bağlı davranışlarının bilinmesi gereklidir.

Gömülü esnek boruların davranışlarının saptanmasına yönelik birçok deneysel ve matematiksel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu konuda yürütülen araştırmalar 20. yüzyılın ilk çeyreğinde başlamış ve Marston (1930) tarafından rijit borular dikkate alınarak yapılmıştır. Marston'un ortaya koyduğu teoriler (Spangler, 1941) ve (Watkins, 1966) tarafından esnek boruların davranışları da incelemelere katılarak genişletilmiştir. Söz konusu teoremlerin yanında farklı kabullere dayanan elastik ve viskoelastik yaklaşımlar da bulunmaktadır.

Gömülü esnek boruların yük altındaki davranışı ve dayanımı en başta borunun mühendislik özelliklerine bağlıdır. Et kalınlığı, boru çapı, üretilen politilen hammaddenin süneklik, gevreklik gibi karakteristik değerleri boru davranışında egemen olan unsurlardır. Bununla beraber yükleme biçim ve büyüklüğü, borunun yerleştirildiği hendek boyutları, doğal zemin özellikleri, temel düzeyinde oluşturulan yataklama kalitesi ve kalınlığı da boru davranışında belirleyici etkenlerdir.

Gömülü esnek borular genellikle yük altında elipsoid bir biçimde şekil değişimi gösterirler. Düşey olarak etkiyen yük, boru tacı tarafından yan duvaralara (bel kısmı) taşınarak dağıtılır. Yük etkisinde yanal olarak şekil değiştiren yan duvarlar yükü geri dolgu malzemesine aktararak yük taşımaya devam ederler. Bu bakımdan rijit boruların aksine esnek borularda boru çevresine yerleştirilen geri dolgu malzemesinin mühendislik özelikleri boru davranışında belirleyicidir.

Bu çalışmada, laboratuar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla, esnek bir HDPE borunun düşey yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuarlarında hazırlanan bir deney düzeneği ile doğal hendek ortamı ve doğal yükleme biçimleri laboratuar şartlarında oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalarda, düşey yüklemeler altında yanal deformasyon göstermeyen (K_o koşullarının sağlayabilen) çelik konstrüksyon deney kutusu, 100 mm yarıçapında HDPE boru, yağmurlama sistemi, yerdeğişimlerini ölçen doğrusal pozisyon ölçerler, biçim değişimi ölçen rozetler, eşdeğer nitelikte yük uygulayabilen hava basınçlı şişebilir membran yastıklar ve yük okuma plakaları kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Iowa yönteminden türetilmiş olan Masada derivasyonu analizleri ile karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Gömülü esnek boruların davranışları üzerine yapılan ilk ve en önemli araştırma olarak Spangler'in 1941 yılında yayınladığı "Esnek Boruların Tasarımı" isimli çalışması kabul edilmektedir. Spangler, (Marston ve Anderson, 1913)'un rijit borular için geliştirdiği diferansiyel denklemlerini, ve arazi deneylerinden elde edilen tecrübelerini kullanarak basit bir amprik eşitlik ortaya koymuştur. "Iowa Eşitliği" olarak isimlendirilen bu yaklaşım halen bir çok tasarımcı tarafından kullanılmaktadır.

1960'lı yıllarda Spangler ve ekibinin gözlemlere dayalı olarak türettikleri yarı ampirik yaklaşımlara ek olarak bütünüyle sayısal temellere dayalı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bu türden çalışmalar içerisinde en çok bilineni, (Burns ve Richard, 1964) Elastik Çözüm Yöntemidir. Bu yöntemde sonsuz elastik bir ortamdaki elastik bir borunun düşey yüklemeler altındaki davranışını temel alınmıştır. Elastik Yöntemlerden bir başkası ise (Hoeg, 1968) tarafından geliştirilen Hoeg Elastik Çözüm Yöntemidir.

1970'li yıllardan başlayarak kullanımı hızla yaygınlaşan polietilen türü esnek boruların viskoelastik-termoplastik özelliklerinin de boru davranışına olan etkisinin göz önüne alınması gerektiği görülmüştür. Bu amaçla (Chua, 1986), (Ahn, 1998) ve benzeri araştırmacılar tarafından boruların viskoelastik ve termoplastik özelliklerini yansıtan yeni yöntemler geliştirilmiştir. Gömülü esnek boruların tasarımlarında, amprik, elastik ve viskoplastik yöntemlerin yanında mühendisliğin birçok dalında kullanılan sonlu elemanlar sayısal analiz yöntemleri de kullanılmaya başlanmıştır.

Bahsi geçen araştırmacılar değerlendirildiğin de 1950'lerden bu yana gömülü esnek borular üzerinde çalışıldığı görülmektedir. Ancak zemin-boru etkileşimin aydınlatılabilmesi için yeni çalışmalara ihtiyaç halen sürmektedir. Özellikle zemin yapısındaki düzensizlikler, yükleme koşullarındaki farklılıklar, uç noktalarda olabilen sıcaklık farklılıklarının boru dayanımına tesirleri ve esnek boru imalinde kullanılan yeni tür hammaddelerin (PVC, Polietilen vb.) kendilerine özgü özellikleri gibi değişkenlerin beklenmedik etkileri boru davranışının saptanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerle günümüzde boru-zemin ilişkisini aydınlatmak ve yeni tasarım yöntemleri geliştirebilmek amacıyla teorik ve deneysel çalışmalar yürütülmektedir.

Bu çalışmalar içerisinde arazi deneylerinin araştırmacılara çok anlamlı sonuçlar sağlayabildiği açıktır. Birebir modeller, gerçek yüklemeler ve sınır koşullarının bulunmadığı sonsuz zemin ortamlarında yapılan arazi deneyleri; araştırmacılara önemli sonuçlar verebilir. Ancak; arazi deneylerinin, pahalı yatırımlar gerektirmesi, hazırlık ve deney aşamalarının zaman alması, yükleme, zemin ve boru modellerinin kolaylıkla değiştirilememesi gibi mahsurları bulunmaktadır. Günümüzde yürütülen araştırma çalışmalarında, gelişmiş modelleme teknikleri, hassas ölçüm ve değerlendirme enstrümanları ve sınır problemlerini elimine edebilen çok amaçlı deney kutuları kullanılarak doğal zemin özellikleri, yapı boyutları ve gerçek yükleme koşulları labaratuvar ortamlarında yansıtılabilmektedir. Bununla beraber labaratuvar koşullarında; yapının şekil ve boyutları, zeminin özellikleri, yükleme adım ve büyüklükleri de kolaylıkla kontrol edilebilir. Bu tür üstünlükleri bakımından gömülü esnek borular üzerinde yapılan labaratuvar deneylerinin sayısı hızla artmaktadır.

Gömülü boruların davranışlarını inceleyen; sonsuz bir zemin ortamı modelleyebilen çok büyük deney tankları, hendek ortamını yansıtabilen hendek biçimli deney kutuları, boru çemberindeki radyal gerilmeleri saptayabilen basınç hücreleri ve çok amaçlı santrifüj deney sistemleri arazi koşullarını yansıtan deney tekniklerdir. Bu yöntemleri kullanan deneysel çalışmalar adına önde gelen isimler, (Rogers, 1988; Brachman, 1999; Kawabata, 2002; Smith, 2004; Cameron, 2005), araştırmacılar sayılabilir.

Bu araştırma kapsamında; hendek ortamına yerleştirilmiş gömülü HDPE esnek bir borunun farklı geri dolgu ortamlarındaki davranışı deneysel ve matematiksel olarak incelenmiştir. HDPE borunun düşey şekil değişimleri ve çembersel eğilme momentleri saptanmıştır. Eğilme momentleri Şekil (1)'de gösterildiği gibi boru kesitindeki sekiz ana noktaya (taç, taban, yan duvarlar, omuzlar ve kalçalar) yapıştırılmış biçim değişimi ölçerler ile saptanmıştır.

3. DENEY KOŞULLARI

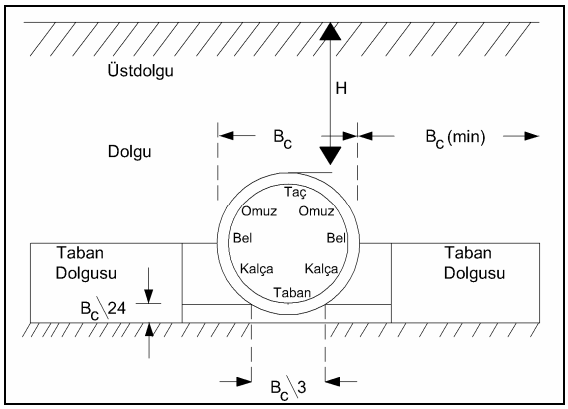
3. 1. Deney Kutusu

Kutu boyutlarının tasarım sürecinde, Tablo 1'de görülen ASTM D 2321 ve ASTHO Sec 30 standartları ve Şekil 1'de gösterilen hendek boyutlandırma prensipleri dikkate alınmıştır.

Tablo 1. Standartlara göre hendek genişlikleri.

Boru Dış Çapı (mm)	AASTHO Sec 30 (mm)	ASTM D 2321 (mm)
100	480	530
167	570	580
233	650	640

Şekil 1'de görüldüğü gibi, boru çemberi, boru tacı tabanı, beli, omuzları ve kalçalardan oluşan noktalarla tanımlanır. Temel tabakası, taban dolgusundan ve kalça kısmını kapayan yanal dolgularla desteklenir. Bu sayede borunun yan duvarlarla zemine aktararak yükün taşınabilmesi mümkün olur.



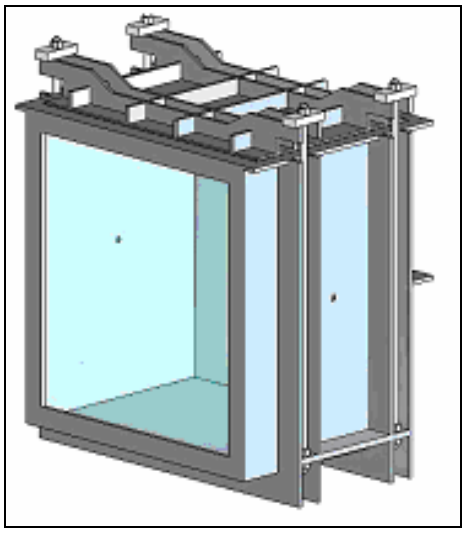
Şekil 1. Standart hendek ortamı (ASTM D 2321).

Standartların belirlediği kriterler çerçevesinde genişliği 700 mm, derinliği 500 mm ve boyu 700 mm boyutlarında olan ve Şekil 2'de görülen çelik konstrüksyon çerçeve kutu imal edilmiştir. Kutunun ön yüzünde 8 mm kalınlığında pleksiglas cam kullanılmıştır. Arka yüzünde ise 50 mm çapında bir boşluk bırakılarak ölçüm aygıtı kablolarının bu açıklıktan bilgisayar ortamına taşınması sağlanmıştır. Kutu üst ve yan yüzeylerinden membran yastıklara basınçlı hava basılabilmesi için

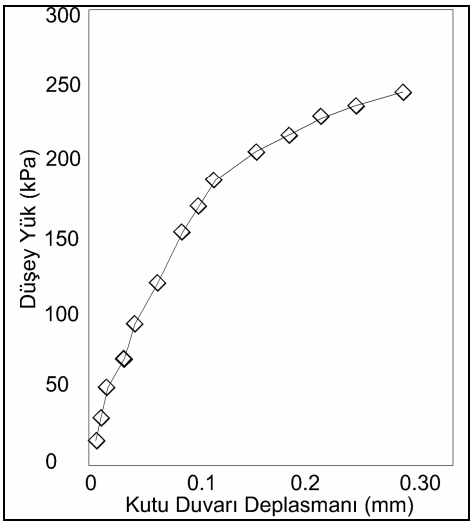
küçük delikler açılmıştır. 12 mm kalınlığında çelik levhalarla güçlendirilen deney kutusu, 8 bar (800 kPa) yüke kadar K_o koşullarını sağlayabilecek rijitlikte dayanım gösterebilmektedir.

Şişebilen basınçlı membranların kullanıldığı deney düzeneğinde eşdeğer düşey yüklemelerin uygulayabilmesi için kutu kapağı ve kilit sistemi ayrıca tasarlanmıştır.

Deney kutusuna uygulanacak düşey yükler altında kutu yan duvarlarının yerdeğişimi göstermemesi K_o koşullarının sağlanması bakımından çok önemlidir. Şekil 3'te görüldüğü gibi deney süresince yan duvarlardan alınan yanal şekil değişimleri değerlendirildiğinde, düşey yükler altında 1 mm'den küçük deplasmanlar ortaya çıktığı saptanmıştır.



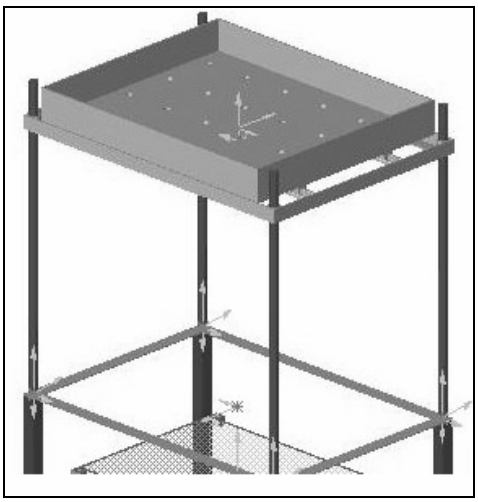
Şekil 2. Deney kutusu.



Şekil 3. Kutu yan duvarlarının yer değişimi.

3. 2. Yağmurlama Sistemi

Deneysel çalışmalarda geri dolgu malzemesinin hendek kutusuna eşdeğer nitelikte yerleştirmek amacıyla yağmurlama sisteminden yararlanılmıştır. Şekil 4'de gösterilen yağmurlama sistemi tabanda 1500 mm x 1500 mm x 1000 mm boyutlarındadır. Farklı elek açıklıklarında düzenlenebilen elek sistemi, hız denetimli bir motor ile helezonik çubuklar üzerinde hareket edebilmektedir. Frekansı ayarlanabilir olan bir titreşim mekanizması elek sistemine bağlanmıştır.



Şekil 4. Yağmurlama sistemi.

Dolgunun hedeflenen sıkılık seviyesinde yerleştirilmesi için, elek tablası, denetimli yükselme hızında ve istenilen titreşim frekansında çalıştırılmaktadır. Elek tablasının helezonik çubuklar üzerinde yağmurlama süresince yükselmesi ve belirlenen bir frekansta salınım yapması, kum danelerinin yerleştirme süresince her zaman eşit (h) potansiyel enerjisinde deney kutusuna düşmesine olanak sağlamıştır.

3. 3. Kullanılan Ölçüm Aygıtları

Deneysel çalışmada geri dolgu malzemesi özelliğinin boru davranışına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu bakımdan araştırmalar özellikle düşey yanal yerdeğişimleri, çembersel eğilme momentleri üzerinde odaklanmıştır.

Eğilme momentlerinin belirlenebilmesi için, boruların taç, taban, bel, omuz ve yan duvarlarının (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° açılarında) iç yüzeylerine biçim değişimi ölçer rozetler yapıştırılmıştır. 5 mm x 5 mm boylarındaki biçim değişimi ölçerler "Winston" köprüsü prensibinde 350 ohm ve 5 mA akımda çalışmaktadır. Üretici

firmadan alınan kullanım bilgileri ışığında, biçim değişimi ölçerlerin -20 ila 150 C^o sıcaklıklarda çalışabildiği ve her 10C^o ısı artışında ölçümlerin 0.5 µm hata verdiği göz önünde tutulmuştur. Laboratuar koşullarının yaklaşık olarak 10° ile 30° sıcaklık aralıklarında bulunduğu düşünüldüğünde sıcaklık değişiminin biçim değiştirme rozetleri üzerindeki etkisinin gözardı edilebileceği görülmüştür. Bunun yanında biçim değiştirme ölçer rozetler ile yapıştırıldığı HDPE boru yüzeyinin farklı Poisson oranlarında olması, ölçümlerin kalibre edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu amaçla iki farklı Poisson oranının yer aldığı bir malzemeyi tek malzemeye dönüştüren Daley ve Riley (1978) kalibrasyon eşitliğinden yararlanılmıştır.

$$CF = (1-\upsilon_0 K_t)/(1+K_t/-\upsilon) \qquad (1)$$

Eşitlikte yer alan;

CF; Kalibrasyon faktörü
υ_0; Biçimdeğiştirme rozetlerinin Poisson Oranı
υ ; Yapıştırılan yüzeyin Poisson Oranı
Kt ; Üretici firmanın önerdiği duyarlılık katsayısı

Biçim değiştirme ölçerlerin Poisson Oranı 0.285, HDPE malzemenin Poisson Oranı 0.40 ve hassaslık katsayısı 0.004 değerlerinde kabul edilmiştir.

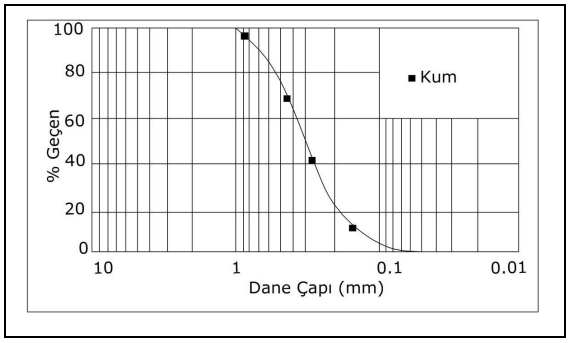
Rozetlerin boru iç çeperine özenle yapışması gerekmektedir. Yapıştırılacak yüzey saf alkol ile temizlenerek rozetler yüzeye 45° açılarda ve özel yapıştırıcılar kullanılarak bütünleşik bir yapıda konuşlandırılmıştır. Deney sırasında olası zedelenmelere karşı rozet yüzeyleri slikon kaplamalarla sırlanmış ve sistemi elektrik kaynağından doğan gürültülerden korumak için, topraklama düzeneği bilgisayar ve ara bağlantı kablolarında sağlanmıştır.

Boru kesitine düşey ve yanal deplasmanları ölçmek için elektrik akım değişimi prensibi ile çalışan Doğrusal Pozisyon Ölçerler'den yararlanılmıştır. 2 cm'e kadar ölçüm aralığında okumalar alabilen pozisyon ölçerler boru iç yüzeyine yerleştirilmiştir.

4. ZEMİN VE BORUNUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

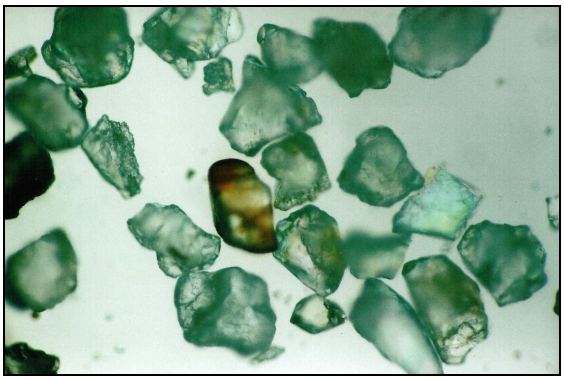
4. 1. Zemin Özellikleri

Özellikle yağmurlama sistemlerinin kullanıldığı labaratuvar deneylerinde, dolgu malzemesinin kolay elenebilmesi ve kayma mukavemeti özelliklerinin eşdeğer nitelikte olabilmesi için kötü derecelenmiş zeminler kullanılır. Bu çalışmada; İstanbul, Şile kum ocaklarından temin edilmiş olan Şile Quartz kumu kullanılmıştır. Dolgu kumunun özgül ağırlığını belirlemek için TS 1900 dikkate alınarak özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Üç adet özgül ağırlık deneyinden elde edilen ortalama değer; 2.657 olarak bulunmuştur. Şile kumunun en büyük ve en küçük boşluk oranları (Adalıer, 1992) yöntemi kullanılarak saptanmış ve sırasıyla, 0.87 ve 0.52 olarak tespit edilmiştir. Şile kumuna ait granülometri eğrisi Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Şile kumuna ilişkin granülometri eğrisi.

Zemin-yapı etkileşiminin incelenmesinde zemine ilişkin makro özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Ancak bu yeterli değildir, çünkü kayma mukavemetini oluşturan temel niceliklerden birisi zemin danelerinin makro özellikleri iken bir diğeri mikro özellikleridir. Bu bakımdan özelllikle detaylı labaratuvar çalışmalarında, zemine ilişkin mikro özelliklerinin de dikkate alınması gereklidir. Söz konusu çalışmada Şile kumunun mikro özellikleri incelenmiştir. Şekil (6)'da kum danelerinin mikroskop ile çekilmiş detaylı fotografları görülmektedir.



Şekil 6. Kum danelerinin şekli.

Mikroskobik çalışmalar yanında kimyasal özelliklerin saptanması ve bileşenlerinin tespiti çalışmaları da yürütülmüştür. Kuma ilişkin kimyasal

bileşenleri yapılan X-Ray deneyleri ile saptanmıştır. Tablo 2'de X-Ray deney sonuçları verilmektedir.

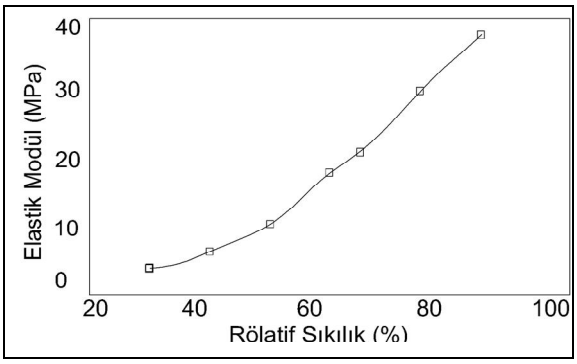
Tablo 2. Zeminin kimyasal bileşenleri.

Bileşenler	%
SiO_2	97
Fe_2O_3	14
Al_2O_3	-
$KAlSiO_3$	11
CaO	-
MgO	0,5

Zemine ilişkin Elastik Young Modülünün bulunması için plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının yorumlanabilmesi için; (ASTM D 1194) önerdiği eşitlikten yararlanılmıştır.

$$E_s = \frac{q \times r \times \pi(1-\upsilon^2)}{4\ \Delta L} \qquad (2)$$

Burada, E_s; Zeminin ikincil Young modülü (kPa), q; düşey gerilme (kPa), r plaka çapı (m), υ zeminin Poisson oranı, ΔL plaka oturması (m) dir. Zeminin Poisson oranı yaklaşık olarak 0.3 varsayılırsa $(1-\upsilon^2)$ değeri 1'e yakın bulunur. Yapılan plaka yükleme deneylerinden, çakıl malzemesine ait, göreceli sıkılık, Young modülü ilişkisi Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Plaka yükleme deneyi.

Masada derivasyonunda tanımlanan bir boyutlu sıkışma modulü olarak plaka yükleme deneyinden elde edilen Young modülü kullanılmıştır. Sıkılık derecesine göre Şekil 6'dan elde edilen değerler kullanılmıştır.

4. 2. Borunun Mühendislik Özellikleri

Son yıllarda birçok alanda HDPE türü borular kullanılmaktadır. HDPE türü boruların diğer rijit ve esnek boru türlerine göre en belirgin üstünlükleri; uzun süre korunabilen dayanım özellikleri, iç ve dış yüklere kırılma ve çatlama olmaksızın dayanım gösterebilmesi, yoğunluk ve ağırlığın oldukça düşük olması, pürüzsüz bir yüzeyi bulunması, kimyasal bozunuma uğramaması, su tutmayan ve geçirimsiz bir mikrodokuya sahip olması, sıcaklık veya mekanik bağlama yöntemleri ile eklemeler yapılabilmesi, istenilen renklerde üretilebilmesi, üretim sürecinde polietilen malzemenin kimyasal yapısı veya soğrulma süreci ile oynanabilmesi olarak özetlenebilir. Bu çalışmada 100 mm yarıçapındaki bir HDPE boru üzerinde deneyler yapılmıştır. Boruya ilişkin mühendislik özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. HDPE borunun mühendislik özellikleri.

Boru Y.Çapı	100 mm
E	900 MPa
EA	6372 kN/m
EI	0.126 kNm2/m
d	0.012 mm
υ	0.40-0.45

5. MASADA DERİVASYONU

Masada yaptığı sayısal dönüşümlerinde Watkins G.I eşitliğine herhangi yeni bir kabul veya ilave değişken atamamış, yalnızca denklem üzerinde derivasyonlar uygulamıştır. Yöntemin diğer eşitlikleden en önemli farkı borunun düşey deplasmanını hesaplayabilmesidir. Masada Eşitliği;

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{P}{M_s}\left[\frac{KM_s}{(EI/r^3)}\left(\frac{0.0595M_s}{(EI/r^3)+0.061M_s}-1\right)\right] \qquad (3)$$

Olarak verilmiştir. Eşitlikte;

Δy ; Düşey yer değiştirme (m)
P ; Düşey Yük (kPa)
K ; Yataklama Katsayısı
Ms ; Geri dolgu malzemesinin bir boyutlu sıkışma modülü (kPa) dır.

(Masada, 1996) K, yataklama katsayısısını, borunun yataklama açısı ile ilişkilendirmiştir. Buna göre K katsayısının yataklama açısı ile değişimi Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Yataklama katsayısı.

Yataklama Açısı	K Katsayısı
60	0.1020
90	0.0951
120	0.0890
180	0.0843

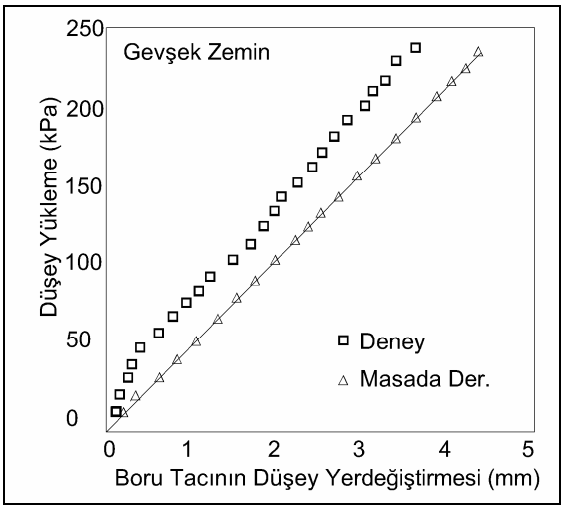
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda gömülü esnek bir borunun farklı sıkılıklarda ortaya koyacağı şekil değişimi ve şekil değişimi biçimi incelenmiştir. Bu amaçla deney kutusuna yağmurlama sistemi kullanılarak eşdeğer özellikte geridolgu malzemesi yerleştirilmiştir. Farklı sıkılıklarda tekrarlanan deneylerle boru davranışı kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar şu aşamalar izlenerek gerçekleştirilmiştir.

I. Gömülü boruya temel tabakası teşkil edecek 15 cm derinliğinde bir yatak seviyesi yağmurlama sistemi kullanılarak oluşturulmuştur. Yataklama seviyesi düzleştirilmiş ve eşdeğer nitelikte olduğu kontrol edilmiştir.
II. HDPE boru yatak seviyesi üzerine yerleştirilmiş ve kutu arasında bulunan arayüzeylere slikon sürülerek kum sızıntısı engellenmiştir.
III. Boru iç çeperine yapıştırılmış biçim değişimi ölçer kablolar bilgisayar donanımındaki veri toplayıcı karta bağlanmıştır.
IV. Yağmurlama sistemi kullanarak kutu kapağı seviyesine kadar kum elenmiştir. Kum elenirken kutu üst kesitinden daha geniş bir alana yağmurlama yapılarak, kumun kutuya yerleşimi esnasında yön değiştirmesi engellenmiştir.
V. Dolgu alanının bütün yüzeyini kaplayacak şekilde şişebilir membran yastık serilmiş ve yastık üzerine kutu kapağı kapatılarak kilitlenmiştir.
VI. Boru kesitinde dolgu yükünden doğan yerdeğişimleri ölçüm aygıtlarının kalibrasyonu yapılarak sıfırlanmış ve deney sistemi yüklemelere hazırlanmıştır.
VII. Membran yastığa kademeli 0.1 bar (10 kPa) aralıklarla yüklemeler uygulanmıştır. Her yükleme adımında 5'er dakika beklenerek, yüzeyden etkiyen gerilmelerin hendek kesiti boyunca sönümlenmesi beklenmiştir. Bu sayede boru ve geri dolgu malzemesinin yükü birbirlerine aktararak yük paylaşımının tamamlanması sağlanmıştır.
VIII. Sekizi biçim değişimi ölçerlerden, ikisi ise düşey yanal deplasman ölçerlerden olmak üzere toplamda 10 ölçüm aygıtından her yükleme adımından sonra 20'şer saniye süre ile okumalar alınmıştır.
IX. Amaçlanan yükleme seviyesine ulaşıldığında yine aynı yükleme adımlarında yük boşaltılarak okumalara devam edilmiştir.

6. 1. Gevşek Zemin Ortamı

Deney kutusu içerisinde en gevşek zemin ortamını sağlayabilemek için elek tabakalarından en büyük açıklığa sahip olan plaka (10 mm çap) kullanılmıştır. Sistem düşük frekansta salınıma tutulmuştur. Hacim ağırlık oranı hesaplandığında gevşek zemin deneyinin % 55 zemin sıkılığında gerçekleştirildiği saptanmıştır. Düşey yüklemeler altında Şekil 8'de boru tacının düşey yönde ortaya koyduğu yerdeğişim davranışı gösterilmektedir. 250 kPa yüke kadar uygulanan kademeli düşey yükler altında boru tacı 3.7 mm deplasman göstermiştir. Yük-deformasyon ilişkisi doğrusal bir eğimde ortaya çıkmıştır. Bu durum söz konusu deplasman seviyesi için esnek boru davranışı (elastik davranış) sergilemeye devam ettiğine işaret etmektedir. Deney koşulları, yükleme seviyeleri, zemin şartları ve yataklama özellikleri dikkate alınarak deneysel çalışma Masada Derivasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 8'den görüldüğü gibi boru davranışının kestiriminde Masada Derivasyonunun oldukça güvenilir sonuçlar ortaya koyduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Gevşek zemin ortamındaki HDPE borunun düşey deplasmanı.

Gevşek zemin ortamında yapılan deneyde boru tacının düşey yer değişiminin saptanması yanında, yükelemeler etkisi ile boru kesitinde meydana gelen eğilme momentlerinin dağılımı da belirlenmiştir.

Eğilme momentleri, biçim değişimleri kullanılarak saptanmıştır. Bu amaçla boru tacına (90), omuzlarına (45 ve 135) bellerine (0 ve 180),kalçalarına (215 ve 315) ve tabanına (270) yapıştırılan biçim değişimi ölçerlerden yararlanılmıştır.

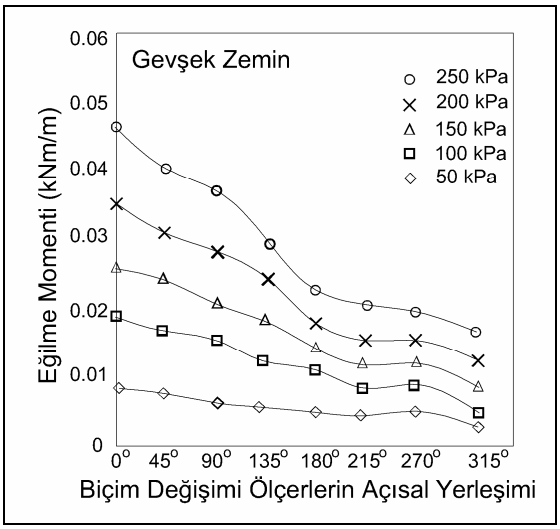
Eğilme momenti hesaplanmasında

$$M = \varepsilon \frac{EI}{r} \qquad (4)$$

Eşitliği kullanılmıştır. Burada; *M* eğilme momenti *E* HDPE borunun Elastisite modülü, *I*; borunun atalet momenti , ε şekil değişimi ve *r* borunun dış çapıdır.

Eşitlikten elde edilen eğilme momenti dağılımı Şekil 9'da görülmektedir.

Literatür kısmında değinildiği gibi, esnek boruların davranışında egemen olan unsurlar borunun taç ve tabanı değil, borunun yan duvarlarıdır. Yükün yan dolgulara aktarılması amacı ile yan duvarların elipsoid bir hareket göstererek esnemesi istenir. Eğilme momenti dağılımından bu davranışın sergilendiği görülmektedir. En büyük eğilme momenti boru sağ yan duvarında (O^o) ortaya çıkmıştır. Eğilme momentlerinin dağılımı iyi ve eşdeğer özellikte bir yataklama seviyesi oluşturulduğunu göstermektedir.

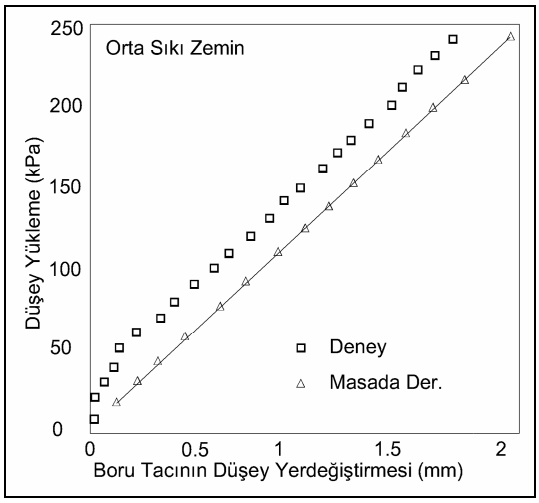


Şekil 9. Gevşek zemin ortamındaki HDPE boruda meydana gelen eğilme momenti dağılımı.

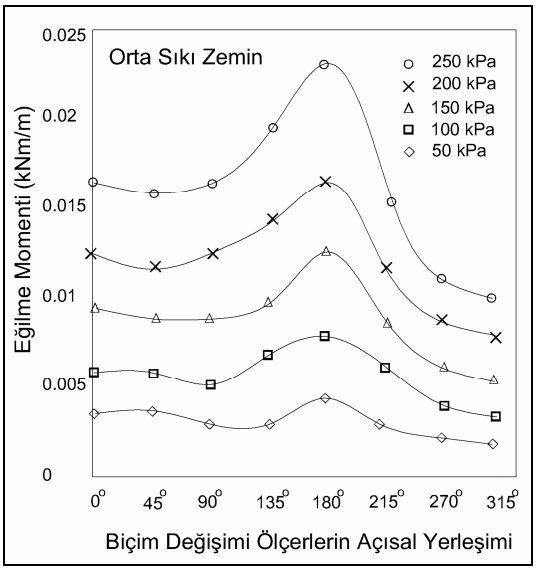
6. 2. Orta Sıkı Zemin Ortamı

Boru davranışının orta sıkı zemin ortamında gerçekleştirebilmek için yağmurlama düzeneğinde 6 mm açıklıklı elekler kullanılmıştır. Kullanılan elek açıklığı ile orta sıkı kum ortamı % 72 sıkılıkta elde edilmiştitr. Düşey yüklemeler gevşek zeminde olduğu gibi aynı aralıklarda 250 kPa'a kadar uygulanmıştır. Şekil 10'da boru tacının düşey yönde gösterdiği yerdeğişimi görülmektedir. Boru tacı 250 kPa yük altında 1.71 mm'lik bir göçme ortaya koymuştur. Boru tacı deplasmanı için Yükleme adımları, zemin özellikleri ve yataklamam koşulları dikkate alınarak Masada Derivasyonunda çözüminden ise 2.2 mm'lik deplasman hesaplanmıştır.

Orta sıkı zemin ortamında ve düşey yükler altında boru kesitinde meydana gelen eğilme momentleri Şekil 11'de görülmektedir. En büyük eğilme momenti borunun sol duvarında 0.022 kNm/m mertebesinde oluşmuştur. En küçük eğilme momentleri ise boru kesitinin kalça ve tabanında meydana gelmiştir. Bu durum eşdeğer özellikte ve iyi bir yataklama seviyesinin oluşturulduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Orta sıkı zemin ortamındaki HDPE borunun düşey deplasmanı.

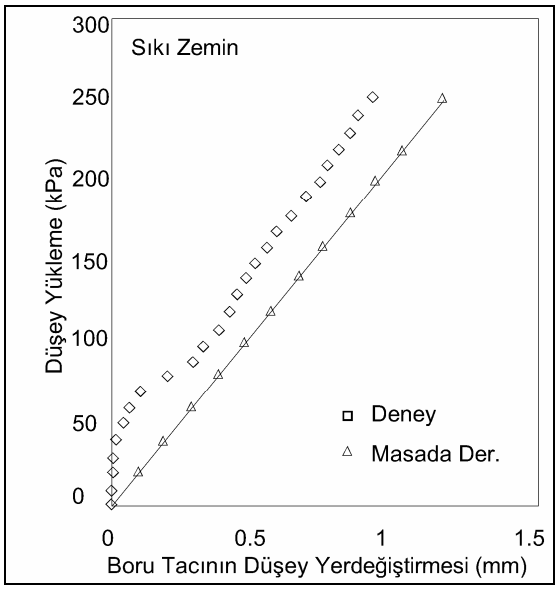


Şekil 11. Orta sıkı zemin ortamındaki hdpe boruda meydana gelen eğilme momenti dağılımı.

6. 3. Sıkı Zemin Ortamı

Deney kutusunda en sıkı zemin ortamını oluşturabilmek için 2.5 mm çaplı elekler kullanılmıştır. Yağmurlama sistemin salınım frekansı en yüksek seviyede tutulmuş ve plakanın kutu üzerinde yükselme hızı düşük hızda ayarlanmıştır. Yapılan düzenlemeler ile deney kutusuna % 90 sılıkta geri dolgu ortamını sağlamak mümkün olmuştur.

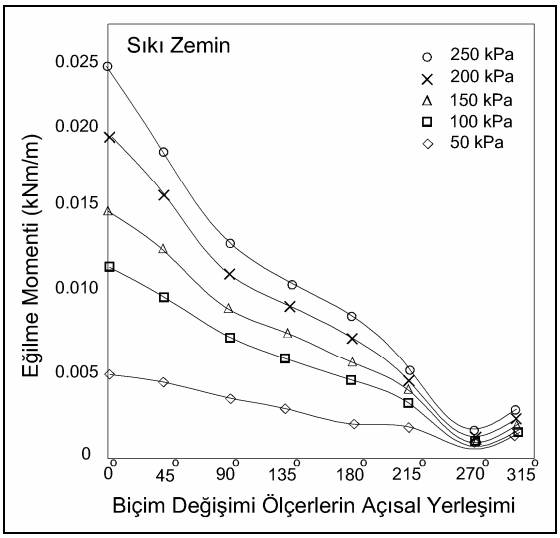
Şekil 12'de boru taç noktasının düşey yönde yer değiştirmesi görülmektedir.



Şekil 12. Sıkı Zemin ortamındaki HDPE borunun düşey deplamanı.

Boru tacı kademeli yüklemeler altında 0.97 mm deplasman göstermiştir. Şekilde görüldüğü gibi Masada Derivasyonu sonuçları ile deney sonuçları birbileri ile oldukça uyumludur. Amprik yaklaşım 250 kPa yük için 1.15 mm'lik deplasman öngörmüştür.

Şekil 13'de ise HDPE borunun gerilme-şekil değiştime davranışı görülmektedir. Sıkı zemin ortamında en büyük gerilme borunun sağ duvarında meydana gelmiştir.



Şekil 13. Sıkı zemin ortamındaki HDPE boruda meydana gelen eğilme momenti dağılımı.

7. SONUÇ

Bu çalışmada farklı zemin ortamlarına yerleştirilmiş esnek bir borunun davranışı labaratuvar ortamında incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler ışığında şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- ASTM ve ASTHO yöntemleri dikkate alınarak tasarlanan deney düzeneği doğal ortamı yansıtmada oldukça başarılı olmuştur. Deney koşulları, kutu boyutları ve yükleme koşulları zeminin doğal şartlardaki davranışını yansıtmada yeterli olduğunu göstermektedir.
- Ölçüm aygıtlarının kalibrasyonu için kullanılan yöntem, aygıtlarının doğru ve hassas okumalar alınmasını sağlamıştır. Bu bakımdan Daley-Riley yönteminin doğruluğu görülmüştür.
- Young modulu plaka yükleme deneyleri ile saptanmıştır. Matematiksel analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde plaka yükleme deneyinin doğru sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.
- Zemin sıkılığı arttıkça boru deformasyonun azaldığı görülmüştür. Özellikle yataklama ve kalça kısmındaki zemin özellikleri esnek boruların davranışında çok önemli olduğu anlaşılmaktadır.
- Boru kesitinde ortaya çıkan en büyük eğilme momentleri borunun yan duvarlarında meydana gelmiştir. Bu durum eşdeğer özellikte olan bir zemin ortamının ve yataklama seviyesi özelliklerinin boru davranışındaki etkisini göstermektedir.

Borular yerleştirildikleri ortam ve zemin durumlarına göre düşey yükler yanında yanal yüklere de maruz kalabilirler. Deneysel çalışmanın ilerleyen aşamalarında boru davranışı yanal yüklemeler altında da değerlendirilecektir.

8. TEŞEKKÜR

Çalışma, TUBİTAK tarafından I599/02 proje numarası olarak desteklenmiştir. Çalışmaya sağlanan maddi destekten dolayı TUBİTAK'a teşekkur ederiz.

9. KAYNAKLAR

Adalier, K. 1992. Post-Liquefaction behavior of soil systems. Master Thesis. Rensselaer Polytechnic Institute. Troy, N.Y.

AASTHO. 1996. Standart specification for highway bridges. 16th Edition American Association of State Highway and Transportation Officials,Washington;

Annual Book of ASTM. 2001. Standard, Plastics (III).

Ahn, W. S. 1998. An experimantal and analytical investigation of viscoelastic pipe-soil interaction. Phd Thesis Florida Atlantic Univesity Florida.

Brachman, R.W.I. 1999. Structural performance of leachete collection pipes. PhD Thesis, Department of Civil and Enviromental Eng. University of Western Ontario. Kanada.

Burns, J., Q. and Richard., R. M. 1964. Attenuation of stresses for buried cylinders. **Proc. of Soil Symposium on Soil-Structure Interaction**, Univ. of Arizona. pp 379-392.

Cameron, D. A. 2005. Analysis of buried flexible pipes in granular backfill subjected to construction traffic. Ms Thesis University of Sydney., Australia.

Chua, K. M. 1986. Time-dependent interaction of soil and flexible pipe" Phd Thesis Texas A&M University of Texas.

Daley, J. W. and Riley, W. F. 1978. Experimental strain analysis. McGraw-Hill; New York.

Hoeg, K. 1968. Stress against underground structural cylinders" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div. ASCE Vol 94 NSM4. pp. 833-858.

Kawabata, T. 2002. Earth pressure distribution for buried pipe bend subject to internal pressure beneath our feet., Challenges and Solutions Pipeline Division Specialty Conference.

Smith, M. E. 2004. Drainage pipe deflection for high heaps., Published in Mining Record 4th

Marston, A. and Anderson A.O. 1913. The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay. Drain Tile and Sewer Pipe Bulletin Number 47 Iowa State College.

Marston, A. 1930. Iowa Engineering Experiment Station. Bulliton No: 6 Ames, Iowa.

Masada, T. 1996. Structural performance of profile wall plastic pipes under relatively shallow soil cover and subjected to large surface laod" Phd Thesis., College of Eng. Technology Ohia University., Ohio

Rogers, C.D.F. 1988. Some observations on flexible pipe response load" Transportation Research Record 1191. pp. 1-11

Spangler, M. G. 1941. Structural design of flexible pipe culverts. Iowa Engineering Experiment Station, Bulletin No. 153.

Watkins R. K. 1966. Structural design of buried circular conduits, Highway Reseach Record. No 145, Paper Sponsored by Committee on Buried Structures and Presented at 45th Annual Meeting. USA.