

**DÜZENLİ ÜÇGEN VEYA DAİRESEL BOŞLUKLARA SAHİP
BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞ VE DAYANIMI**

MAHMUT CEM YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2008
ANKARA**

Mahmut Cem YILMAZ tarafından hazırlanan DÜZENLİ ÜÇGEN VEYA DAİRESEL BOŞLUKLARA SAHİP BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞ VE DAYANIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Sabahattin Aykaç
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hüsnü CAN
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Dr. Sabahattin AYKAÇ
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Tekin GÜLTOP
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Emin TUNA
Mimarlık, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Tarih: 29 / 04 / 2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mahmut Cem YILMAZ

**DÜZENLİ ÜÇGEN VEYA DAİRESEL BOŞLUKLARA SAHİP
BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞ VE DAYANIMI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Mahmut Cem YILMAZ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2008**

ÖZET

Bu çalışmada kapsamında düzenli gövde boşlukları bulunan betonarme kirişlerin tekdüze yükler altındaki davranışı araştırılmıştır. Bunun için gövdesinde dairesel veya üçgen geometrisinde düzenli büyük boşluklar bulunan altı adet kiriş ile bu kirişlere referans olarak boşluksuz üç adet kiriş test edilmiştir. Deney parametreleri, boşluk geometrisi ve çekme bölgesindeki donatı oranı olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmanın sonunda az ve olağan çekme donatısına sahip kirişlerin yeterli bir dayanım ve süneklik gösterdiği görülmüştür. Genel olarak dairesel boşluklu kirişler, üçgen boşluklu kirişlere göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Bilim Kodu : 911.1.144
Anahtar Kelimeler : Boşluklu kiriş, daire boşluklu kiriş, üçgen boşluklu kiriş
Sayfa Adedi : 72
Tez Yöneticisi : Dr. Sabahattin AYKAÇ

**BEHAVIOR AND STRENGTH OF R/C BEAMS WITH
REGULAR TRIANGULAR OR CIRCULAR WEB OPENINGS**

(M.Sc. Thesis)

Mahmut Cem YILMAZ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

April 2008

ABSTRACT

In the scope of this study the behaviour of RC beams with regular web openings subjected to monotonhic loading is investigated. Thus six beams with regular triangular or regular circular openings and three beams without openings as a reference to these beams are tested. The test parameters are chosen as the geometry of the opening and the reinforcement ratio of the tension area. According to the results of the tests, beams with low or normal reinforcement ratio in the tension area show sufficient ductile behaviour. Generally beams with circular openings yielded better results than the beams with triangular web openings.

Science code : 911.1.144
**Keywords : Beams with openings, beams with circular openings,
beams with triangular openings**
Number of pages : 72
Thesis supervisor : Dr. Sabahattin AYKAÇ

TEŞEKKÜR

Çalışmamda değerli katkılarından dolayı başta danışmanım sayın Dr. Sabahattin AYKAÇ olmak üzere Araş. Gör. Eray ÖZBEK ve Araş. Gör. Şule BAKIRCI ER ile laboratuvar çalışanlarına ve bu çalışmaya 06/2007-41 kodlu proje kapsamında destek veren Gazi Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	2
3. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR	3
3.1. Keun-Hyeok Yang, Hee-Chang Eun, Heon-Soo Chung'ın Çalışması.....	3
3.2. Kiang-Hwee Tan, M.A. Mansur ve Weng Wei'nin Çalışması	4
3.3. Ashraf F. Ashour ve G. Rishi'nin Çalışması	5
3.4. Kiang-Hwee Tan, Mohammad A. Mansur ve L. M. Huang'ın Çalışması	6
3.5. Mohammad A. Mansur, Y.F. Lee ve Diğerlerinin Yaptığı Çalışma.....	7
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	8
4.1. Deney Elemanı İlkeleri.....	8
4.2. Deney Elemanlarının Özellikleri	9
4.3. Deney Elemanlarının Adlandırılması.....	9
4.4. Deney Parametreleri	10
4.5. Donatı Düzenlemesi	11

Sayfa

4.6. Deney Elemanlarının Kalıbı	12
4.7. Malzeme Dayanımları	17
4.8. Deney Düzeni.....	18
4.8.1. Yükleme düzeni.....	18
4.8.2. Ölçüm düzeni	18
5. DENEYLER.....	26
5.1. Bs: Az Donatılı Referans Kirişi	26
5.2. Ts: Az Donatılı Uçgen Boşluklu Kiriş	29
5.3. Cs: Az Donatılı Daire Boşluklu Kiriş.....	31
5.4. B _N : Olağan Donatılı Referans Kirişi	33
5.5. C _N : Olağan Donatılı Daire Boşluklu Kiriş.....	35
5.6. T _N : Olağan Donatılı Uçgen Boşluklu Kiriş	38
5.7. B _B : Çok Donatılı Referans Kirişi	40
5.8. C _B : Çok Donatılı Daire Boşluklu Kiriş	42
5.9. T _B : Çok Donatılı Uçgen Boşluklu Kiriş	45
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	47
6.1. Ts Kirişi ile Bs Kirişinin Kıyaslanması.....	50
6.2. T _N Kirişi ile B _N Kirişinin Kıyaslanması	51
6.3. T _B Kirişi ile B _B Kirişinin Kıyaslanması	53
6.4. Cs Kirişi ile Bs Kirişinin Kıyaslanması.....	56
6.5. C _N Kirişi ile B _N Kirişinin Kıyaslanması.....	57
6.6. C _B Kirişi ile B _B Kirişinin Kıyaslanması	60
6.7. Cs Kirişi ile Ts Kirişinin Kıyaslanması.....	61

	Sayfa
6.8. C _N Kirişi ile T _N Kirişinin Kıyaslanması	63
6.9. C _B Kirişi ile T _B Kirişinin Kıyaslanması	65
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ	72

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Deney elamanlarının özellikleri	9
Çizelge 4.2. Beton dayanımları	17
Çizelge 6.1. Testlerden elde edilen verilere göre süneklik oranı değerleri.....	48
Çizelge 6.2. Süneklik oranları	49
Çizelge 6.3. Dayanımların karşılaştırılması	49
Çizelge 6.4. Eğilme rijitliklerinin karşılaştırılması.....	50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Boşluksuz kirişlerin donatı düzenlemesi	14
Şekil 4.2. Üçgen boşluğa sahip kirişlerin donatı düzenlemesi	15
Şekil 4.3. Dairesel boşluğa sahip kirişlerin donatı düzenlemesi	16
Şekil 4.4. Yükleme şekli 1	20
Şekil 4.5. Yükleme şekli 2	21
Şekil 4.6. Yükleme düzeneği detay çizimi	22
Şekil 4.7. Yalın kirişte ölçüm düzeni.....	23
Şekil 4.8. Daire boşluklu kirişte ölçüm düzeni.....	24
Şekil 4.9. Üçgen boşluklu kirişte ölçüm düzeni	25
Şekil 5.1. B _s kirişi yük-deplasman grafiği	27
Şekil 5.2. T _s kirişi yük-deplasman grafiği	29
Şekil 5.3. C _s kirişi yük-deplasman grafiği	31
Şekil 5.4. B _N kirişi yük-deplasman grafiği.....	33
Şekil 5.5. C _N kirişi yük-deplasman grafiği.....	36
Şekil 5.6. T _N kirişi yük-deplasman grafiği	38
Şekil 5.7. B _B kirişi yük-deplasman grafiği	40
Şekil 5.8. C _B kirişi yük-deplasman grafiği.....	43
Şekil 5.9. T _B kirişi yük-deplasman grafiği	45
Şekil 6.1. T _s kirişi ile B _s kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası	51
Şekil 6.2. T _s kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri	52
Şekil 6.3. T _N kirişi ile B _N kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası	53
Şekil 6.4. T _N kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri	54

Şekil	Sayfa
Şekil 6.5. T_B kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri	55
Şekil 6.6. T_B kirişi ile B_B kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası.....	56
Şekil 6.7. C_s kirişi ile B_s kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası.....	57
Şekil 6.8. C_s kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri	58
Şekil 6.9. C_N kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri.....	59
Şekil 6.10. C_N kirişi ile B_N kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası	60
Şekil 6.11. C_B kirişi ile B_B kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası	61
Şekil 6.12. C_B kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri	62
Şekil 6.13. C_s kirişi ile T_s kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası	63
Şekil 6.14. C_N kirişi ile T_N kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası	64
Şekil 6.15. C_B kirişi ile T_B kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası.....	65

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Bs kırıının deney öncesi görüntüsü.....	28
Resim 5.2. Bs kırıının deney sonrası görüntüsü.....	28
Resim 5.3. Ts kırıının deney öncesi görüntüsü.....	30
Resim 5.4. Ts kırıının deney sonrası görüntüsü.....	30
Resim 5.5. Cs kırıının deney öncesi görüntüsü.....	32
Resim 5.6. Cs kırıının deney sonrası görüntüsü.....	32
Resim 5.7. B _N kırıının deney öncesi görüntüsü	34
Resim 5.8. B _N kırıının deney sonrası görüntüsü	34
Resim 5.9. C _N kırıının deney öncesi görüntüsü	37
Resim 5.10. C _N kırıının deney sonrası görüntüsü	37
Resim 5.11. T _N kırıının deney öncesi görüntüsü.....	39
Resim 5.12. T _N kırıının deney sonrası görüntüsü	39
Resim 5.13. B _B kırıının deney öncesi görüntüsü	41
Resim 5.14. B _B kırıının deney sonrası görüntüsü	41
Resim 5.15. C _B kırıının deney öncesi görüntüsü	44
Resim 5.16. C _B kırıının deney sonrası görüntüsü	44
Resim 5.17. T _B kırıının deney öncesi görüntüsü.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A_s	Donatı alanı
b_w	Kiriş genişliği
f_{ck}	Beton basınç dayanımı (standart silindir)
f_{yk}	Donatı çeliği akma dayanımı
h	Kirişin yüksekliği
l	Kiriş boyu
δ_u	En büyük yükün %15 azaldığı noktadaki deplasman
δ_y	Akma anındaki deplasman değeri
$\emptyset$	Donatı çeliği çapı
ρ	Donatı oranı
ρ_n	Nominal donatı oranı
σ	Gerilme
σ_c	Beton basınç gerilmesi
d'	Basınç donatısının üst yüze mesafesi
d	Çekme donatısının üst yüze mesafesi
A_{s1}	Basınç donatısı alanı
A_{s2}	Çekme donatısı alanı
P_y	Akma yükü
P_u	Maksimum yük

1. GİRİŞ

Mühendisler bazen içerisinde gövde boşlukları bulunan kiriş tasarımı yapmak zorunda kalabilmektedirler. Bu boşluklardan genellikle pis su tesisatı , sıhhi tesisat, kalorifer tesisatı ve havalandırma kanalları gibi tesisat geçirilmektedir. Böylece iç hacimden olabildiğince fazla faydalanabilmektedir. Ayrıca bu tür boşluk kullanımı mimari açıdan da tercih edilebilmektedir.

Bu gibi durumlarda, kiriş gövdesinde genellikle daire veya dikdörtgen boşluklar oluşturulmaktadır. Kullanılan bu boşluklar araştırmacılar tarafından ‘büyük’ veya ‘küçük’ olarak nitelendirilirler. Bu nitelendirmeyi yaparken kullanılan boyut sınırları araştırmacılara göre değişebilmektedir. Bazı araştırmacılar, kullanılan boşluğun dolu gövdeli kirişe göre tasarım ve davranış bakımından önemli bir değişikliğe yol açmıyorsa bu boyuttaki boşluklara ‘küçük boşluk’, eğer davranışı farklı oluyor ve tasarımı bilinenden farklı yöntemle yapmak gerekiyorsa o zaman bu boyuttaki boşluklara da ‘büyük boşluk’ demişlerdir. Kimi araştırmacılar da boşluk yüksekliği ile kiriş yüksekliği arasındaki oran $\frac{1}{4}$ ’den az ise bu boşluklara küçük boşluk, fazla ise de büyük boşluk demişlerdir [1]. Kullanılan boşluğun ‘büyük’ veya ‘küçük’ olduğu konusunda belirli bir orana bağlı olmadan yapılan ilk tanım daha doğrudur. Ancak bir oran değeri kullanmazsak boşluk boyutları hangi sınır değer altında olduğunda kirişimizi dolu gövdeli kiriş gibi tasarlayacağız ve hangi sınır değerinden sonra hesap yöntemini değiştireceğiz soruları ile karşılaşmaktayız. Bu çalışmada hesap yönteminin seçiminde boşluk oranının tek başına belirleyici olmadığı görülmüştür. Boyuna ve enine donatı miktarlarının da kırılma mekanizması üzerinde etkili oldukları görülmüştür. Bu nedenle çalışmada boşluklu kirişlerin hepsinde boşluk yüksekliğinin kiriş yüksekliğine oranı $\frac{1}{2}$ seçilmiş, bu orandaki boşluklar büyük boşluk olarak ele alınmış ve ne zaman referans kirişi gibi hesap yapıp yapılamayacağı konusunda donatı oranına bağlı olarak önerilerde bulunulmuştur.

2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Daha önce yapılan çalışmalarda genellikle bir veya iki adet gövde boşluğuna sahip kirişler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu boşluklar da kesme kuvvetinin büyük olduğu bölgelere yerleştirilmiştir. Bu durumda boşlukların çevresinde büyük gerilme yığılmaları olduğu görülmüştür.

Esasen bu çalışmada bu gerilme yığılmalarının tek bir delik civarında oluşmasını engellemek ve gerilmeleri kiriş boyunca yaymak istenmiştir. Bundan dolayı bu tez kapsamında gövdesinde aynı boyutta düzenli birçok boşluk oluşturulan altı adet boşluklu kiriş ile bu kirişlere referans olması için üretilen üç adet boşluksuz kiriş test edilmiştir. Deney parametreleri, boşluk geometrisi ve çekme bölgesindeki donatı oranı olarak seçilmiştir. Boşluk geometrisi olarak daire ve üçgen delikler kullanılmıştır. Donatı oranı olarak az, olağan(normal) ve çok olmak üzere toplam üç farklı donatı oranı kullanılmıştır. Bu çalışmada kiriş boyunca oluşturulan düzenli boşlukların farklı donatı oranına sahip kirişlerin davranış ve dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda elde edilen deney elemanı davranışları kirişler arasında karşılaştırılmış ve sonuçlar araştırmacıların ve uygulamacıların kullanımına sunulmuştur.

3. GEÇMİŞTE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bünyesinde gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişlerin davranışları ile ilgili birbirine benzer veya farklı birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda farklı kesit tipleri, farklı boşluk geometrileri, farklı boşluk boyutları ve sayıları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Kimi araştırmalar da sadece analitik olarak yapılmıştır. Bazı çalışmalarda ise gövde boşluklarının çelik kirişler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

İçerisinde gövde boşluğu bulunan kirişlerle ilgili yapılan çalışmalardan birkaçı aşağıda kısaca anlatılmıştır.

3.1. Keun-Hyeok Yang, Hee-Chang Eun, Heon-Soo Chung'ın Çalışması

Keun-Hyeok Yang ve ark. (2006), içerisinde gövde boşlukları bulunan yüksek dayanımlı betonarme derin kirişlerde, gövde boşluklarının kirişe (kiriş davranışına) etkisi ile ilgili deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır [2]. İçerisinde boşluklar bulunan ve boşluk bulunmayan toplam 32 adet deney elemanı test edilmiştir. Deney parametresi olarak, beton dayanımı, kesme açıklığının derinliğe oranı, boşluğun genişliği ve boşluğun derinliği ele alınmıştır.

Deney elemanları içerisinde boyutları değişen dikdörtgen şeklindeki boşluklara sahip kirişler ile içerisinde boşluk bulunmayan (yalın) kirişlerden oluşturulmuştur. Çalışmada kesiti 160 x 600 mm ve boyu 2400 mm olan kirişler kullanılmıştır. Gövde boşlukları kirişlerde kesme açıklığı bölgesinin ortasına yerleştirilmiştir. Deney elemanları beton dayanımına bağlı olarak üç gruptan oluşturulmuştur. Beton dayanımının birinci grupta 24 MPa ikinci grupta 50 MPa üçüncü grupta ise 80 MPa olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu grupların içerisinde a/d oranı, boşluk genişliği ve boşluk derinliği değerleri de değiştirilmiştir. Kirişler basit mesnetli olarak, 2 nokta yükleme altında test edilmişlerdir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Boşluk genişliğinin ve derinliğinin deneylerde yüklemenin başlangıç aşamasında orta açıklıktaki deplasmanı etkilemediği fakat diagonal çatlak

oluştuktan sonra boşluğun orta açıklıktaki deplasmanı belirgin şekilde etkilediği görülmüş beton dayanımının boşluklu kirişlerin rijitliğini fazla etkilemediği belirtilmiştir.

- Boşluklu derin kirişlerde yalın derin kirişlere göre beton dayanımının nihai kesme dayanımına olan etkisinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür.
- Kesme açıklığının derinliğe oranı arttıkça kiriş rijitliği de kademeli olarak düşmüştür.
- Eğik çatlakların oluşmaları ile birlikte kiriş rijitlikleri de azalmıştır.

3.2. Kiang-Hwee Tan, M.A. Mansur ve Weng Wei'nin Çalışması

Kiang-Hwee Tan ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada, bünyesinde dairesel boşluk bulunduran kirişlerin kesmeye karşı tasarımı ile ilgili olan ACI Yönetmeliği yaklaşımının yeterliliğinin sorgulamışlardır [3]. Üzerine gelen fazla kesme kuvvetini azaltabilecek şekilde tasarlanmış, bünyesinde dairesel boşluk bulunduran yedi adet T kesitli kiriş test edilmiştir. Deney numuneleri, sürekli kirişin negatif moment bölgesinde meydana gelen duruma benzer bir durum elde etmek amacıyla ters çevrilerek teste tabi tutulmuşlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Dairesel boşluk bulunduran kirişlerin tasarımı ACI yönetmeliğine göre yapılabilir. Bu yöntem gövde boşluğuna bağlı olarak betonun kesme mukavemetine az olan katkısını artırmakta ve iki farklı tip göçme şeklini dikkate almaktadır.
- Çapraz donatılar çatlağın belirli bir seviyede kalması için önemli bir rol oynamaktadırlar. Konulan çapraz donatıların miktarı gelen kesmenin en az %50'sini taşıyabilecek yeterlilikte olmalıdır.

- Yeteri miktarda çapraz donatı konulduğunda gelen kesme kuvveti, kirişçikler arasında kesit alanları ile orantılı olarak dağıtılabilmektedir.
- Dolu gövdeli kirişler için maksimum kesme kuvvetini sınırlayan ACI yönetmeliği bünyesinde küçük boşluklar bulunan kirişler için de kullanılabilir.

3.3. Ashraf F. Ashour ve G. Rishi'nin Çalışması

Ashraf F. Ashour ve G. Rishi (2000) bünyesinde gövde boşluğu bulunan iki açıklıklı 16 adet sürekli derin betonarme kiriş test etmişlerdir [4]. Tüm test numuneleri aynı geometriye ve alt ve üst kısımlarında aynı boyuna donatı düzenine sahiptirler. Boşluk boyutu, boşluğun konumu ve boşluk çevresindeki donatı düzeni ana parametreler olarak alınmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Gövde boşluğu boyutunu, boşluk çevresindeki donatı miktarını ve tipini dikkate almadığımızda sadece boşluğun konumuna bağlı olarak göçme iki biçimde gerçekleşmektedir.
- Gövde boşluğunun içteki kesme açıklığı kısmında yer alması dıştaki kesme açıklığı kısmında yer almasına göre kiriş kapasitesini daha fazla azaltmaktadır.
- Gövde boşluğu çevresine yerleştirilen düşey donatılar, yatay donatılara göre kirişin kesme kapasitesini artırma bakımından daha fazla etkili olmaktadır.
- Mesnet reaksiyonları boşluğun boyutuna ve konumuna göre değişmektedir.
- Dıştaki kesme açıklığı bölgesinde küçük gövde boşluğu bulunan sürekli derin kirişler, referans kirişlerinininkine daha yakın davranış göstermektedirler.
- Sürekli derin kirişlerin göçme yüklerini önceden hesaplayabilmek için ileri sürülen denklemler oldukça makul sonuçlar vermiştir.

3.4. Kiang-Hwee Tan, Mohammad A. Mansur ve L. M. Huang'ın Çalışması

Kiang-Hwee Tan ve ark. (1996) bir kısmı negatif momente bir kısmı da pozitif momente maruz bırakılmış, her birinin içerisinde büyük gövde boşluğu veya boşlukları bulunan 15 adet ‘ T ’ kesitli sürekli kirişi test etmişlerdir [5]. Test sonuçlarına göre aşağıdaki yorumlar yapılmıştır:

- Genel olarak , sürekli kirişlerde gövde boşluklarının varlığı çatlama ve göçme dayanımı ile birlikte çatlama sonrası rijitliği de azaltmaktadır.
- Aynı boşluk açıklığı için birden fazla boşluğa sahip kirişler bir tek boşluğa sahip kirişlere göre dayanım ve kullanılabilirlik açısından daha iyi performans göstermektedir. Erken göçmeye neden olmamak için komşu iki boşluğun arasındaki kolonun (sütunun) kalınlığı kiriş derinliğinin bir buçuk katından daha az olmamalı ve kolonlar yeterli miktarda donatılmalıdır.
- Test sonuçları bünyesinde büyük dikdörtgen gövde boşluğu bulunduran T kesitli sürekli kirişin boşluk kısmında Vierendeel panel gibi davrandığını doğrulamaktadır. Hem eğilme hem de kesme etkisi altındaki kiriş elemanları, yaklaşık olarak kiriş açıklığının ortasında iki farklı eğim ile eğilirler.
- Toplam kesme kuvveti, sürekli kirişin içerisindeki alt ve üst kirişler (kirişcikler) arasında, bunların eğilme rijitliklerine bağlı olarak orantılı biçimde dağıtılabilir. Bu dağıtım hem servis hem nihai yükler altında boşluğun pozitif veya negatif moment kısmında olmasına bağlı olmaksızın uygulanabilir.
- Daha önce yapılmış olan “ sürekli kirişin nihayi dayanımını, göçme modunu, servis yükü altındaki deformasyonlarını” eşdeğer rijitliklerini kullanarak öngören analitik yöntem test sonuçlarıyla uyumaktadır.

3.5. Mohammad A. Mansur, Y.F. Lee ve Diğerlerinin Yaptığı Çalışma

M.A. Mansur ve ark. (1991), her biri gövdesinde büyük enine boşluk içeren 8 adet betonarme sürekli kirişi test ederek bir araştırma gerçekleştirmişlerdir [6]. Kirişler, dikdörtgen kesitlidirler ve hepsinin de içerdikleri boyuna donatı miktarları ve düzenleri aynıdır. “ Açıklık sayısı, boşluk boyutu ve boşluğun kiriş gövdesindeki konumu ” ana değişkenler olarak göz önüne alınmıştır. Deney sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Sürekli kirişin göçmesi mekanizma oluşumu ile olmaktadır. Boşlukların iki ucu plastik mafsalları oluşumu için en zayıf yerlerdir.
- Gövde boşluğunun boyundaki ve yüksekliğindeki artış erken çatlamaya öncülük etmekte ve daha büyük deformasyonlar ve belirgin Vierendeel hareketlere neden olmaktadır. Boşluk boyutları arttıkça göçme anındaki yük değeri düşmektedir. Bununla birlikte boşluk boyutundaki artışın göçme moduna bir etkisi olmamaktadır.
- Gövde boşluğunun açıklıktaki yerinin , çatlama yüküne etkisi çok az olmaktadır. Fakat boşluk, moment değerinin büyük olduğu bölgede bulunduğu anda kirişte daha büyük deplasmanlara ve daha küçük yük değerlerinde göçmeye neden olmaktadır.
- Vierendeel harekete bağlı olarak oluşan “göçme ve deformasyon (dönme) modu” genel olarak gövde boşluğunun konumundan etkilenmemektedir.

Yukarıda, bu teze konu olan çalışmaya en yakın literatürdeki çalışmaların bazılarından bahsedilmiştir. Bunların dışında yine boşluklu kirişlerle ilgili burulma etkisi altında veya hem burulma hem de eğilme etkisi altında betonarme veya kompozit kirişler için başka deneysel veya analitik çalışmalar da vardır [7-17].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Deney Elemanı İlkeleri

Deney elemanları laboratuvar koşullarından dolayı 1/2 geometrik ölçekte üretilmiştir. İç kuvvetlerin dağılımı sadece denge denklemleri kullanılarak hesaplanabildiği için ve daha büyük moment değerine ankastre mesnete göre daha küçük kuvvet ile ulaşabildiğimiz için kirişler basit mesnetli olarak teste tabi tutulmuşlardır. Normal şartlarda yapılardaki kirişler, düzgün yayılı yük etkisi altındadır. Ancak laboratuvar şartlarında kirişi düzgün yayılı yük etkisi altında test etme imkanımız bulunmamaktadır. Düzgün yayılı yük etkisi altında oluşan moment diyagramına olabildiğince yakın moment diyagramı elde etmek amacıyla kirişler 4 noktadan tekil yük uygulanarak test edilmişlerdir. Yayılı yük altında oluşan moment diyagramını kapsayacak şekilde tekil yüklerin yerleri deneme yanılma ile kaydırılarak belirlenmiştir.

Üretilen tüm deney elemanlarının (kirişler) kesitinin genişliği 150 mm, yüksekliği 400 mm olup boyu 4 m'dir. Bu çalışmada deney elemanları olarak toplam 9 adet kiriş üretilip deneye tabi tutulmuştur. Deney elemanlarının belirleyici özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Ayrıca üretilen bu kirişlerde kullanılan kalıp sistemi, donatı düzenlemesi, boşluk geometrisi ve malzeme türü aşağıda detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

4.2. Deney Elemanlarının Özellikleri

Çizelge 4.1. Deney elemanlarının özellikleri

Eleman No	Deney Adı	Boşluk Geometrisi	Çekme Donatısı	Basınç donatısı	Donatı oranı
1	B _s	Boşluksuz	2 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0043
2	B _N	Boşluksuz	4 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0069
3	B _B	Boşluksuz	7 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0108
4	T _s	Üçgen	2 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0043
5	T _N	Üçgen	4 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0069
6	T _B	Üçgen	7 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0108
7	C _s	Daire	2 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0043
8	C _N	Daire	4 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0069
9	C _B	Daire	7 ϕ 10 , 2 ϕ 8	4 ϕ 8	0.0108

4.3. Deney Elemanlarının Adlandırılması

Deney elemanının adının ilk harfi, deney elemanında bulunan boşluğun geometrik şeklinin ingilizcedeki karşılığının baş harfini; eğer elemanda boşluk yoksa yine bunun ingilizcedeki adının baş harfini göstermektedir.

B : Boşluğu olmayan kirişler büyük B harfi ile tanımlanmıştır. Burada B harfi “Bare” sözcüğünü simgelemektedir.

T : Üçgen geometrisine sahip boşluğa sahip kirişler büyük T harfi ile tanımlanmıştır. Burada T harfi ‘Triangle’ sözcüğünü simgelemektedir.

C : Dairesel boşluğa sahip kirişler C harfi ile tanımlanmıştır. Burada C harfi “Circular” sözcüğünü simgelemektedir.

Deney elemanının ikinci harfi ise, elemanda kullanılan çekme donatısının az, normal veya çok olduğunu işaret eden İngilizce kelimelerin baş harfini göstermektedir.

S : S harfi, az donatılı elemanlarda kullanılmıştır. Burada S harfi ‘Small’ sözcüğünü simgelemektedir.

N : N harfi, normal donatılı elemanlarda kullanılmıştır. Burada N harfi ‘Normal’ sözcüğünü simgelemektedir.

B : B harfi, çok donatılı elemanlarda kullanılmıştır. Burada B harfi ‘Big’ sözcüğünü simgelemektedir.

4.4. Deney Parametreleri

Bu çalışmada incelenmek üzere 2 parametre belirlenmiştir.

Boşluk geometrisi

Üçgensel ve dairesel boşluklara sahip olan kirişlerin yanı sıra bu boşluklu kirişlerle karşılaştırma yapıp sonuçları yorumlayabilmek için kiriş boyutları aynı olan 3 adet yalın (boşluksuz) kiriş de test edilmiştir.

Üçgensel boşluk (T türü)

Bu tür boşluğa sahip kirişlerin gövdelerine bir kenarı 231 mm olan birbirinin aynı 15 adet eşkenar üçgen boşluk yerleştirilmiştir. Üçgen boşlukların ağırlık merkezleri arasındaki mesafe 231 mm’dir.

Dairesel boşluklar (C türü)

Bu tür boşluğa sahip kirişlerin gövdelerine çapı 200 mm olan 12 adet dairesel boşluk yerleştirilmiştir. İlk dairesel boşluğun daire merkezi kiriş başından 350 mm ilerisindedir. Tüm dairelerin merkezleri arasındaki mesafe 300 mm'dir.

Boyuna donatı oranı

Çalışmada az donatılı, olağan donatılı ve çok donatılı olmak üzere üç farklı donatı oranı kullanılmıştır. Az donatılı kirişte donatı oranı TS500'de öngörülen minimum donatı oranına ($0,85f_{ctd}/f_{yd}$) yakın olacak şekilde belirlenmiştir. Çok donatılı kirişte donatı oranı TS500'de öngörülen maksimum donatı oranına ($0,85\rho_b$) yakın seçilmiştir. Olağan donatılı kirişlerde ise bu iki oranın yaklaşık ortalaması kullanılmıştır. Bu oranlar Çizelge 3.1'de her bir kiriş için gösterilmiştir.

4.5. Donatı Düzenlemesi

Boşluksuz kiriş (B)

Boşluksuz kirişlerde basınç donatısı olarak 2 ϕ 8, gövde donatısı olarak (kiriş eksenin altında ve üstünde olmak üzere) 2x2 ϕ 6 ve çekme donatısı olarak az donatılı kirişte 2 ϕ 10, normal donatılı kirişte 4 ϕ 10, çok donatılı kirişte ise 7 ϕ 10 kullanılmıştır.

Etriyeler ϕ 4'lük düz yüzeyli demirden üretilip mesnet bölgesinde (ilk 800 mm'lik bölüm) 40 mm ara ile orta bölgede ise 80 mm ara ile yerleştirilmiştir.

Bu kirişlerin donatı detaylarına Şekil 3.1'de yer verilmiştir.

Üçgen boşluklara sahip kirişler (T)

Bu kirişlerde basınç donatısı olarak üst başlıkta 2 sıra halinde 2 ϕ 8 konulmuştur.

Çekme donatısı olarak da alt başlıkta en alt sıraya az donatılı kirişte 2 ϕ 10, olağan (normal) donatılı kirişte 4 ϕ 10, çok donatılı kirişte ise 7 ϕ 10 kullanılmıştır. Ayrıca üçgen boşluklu kirişlerin hepsinde çekme donatısı olarak alt başlığın üst sırasında 2 ϕ 8 kullanılmıştır. Üçgen boşluklu kirişlere ait donatı detayı Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir.

Kiriş etriyeleri ϕ 4’lük düz yüzeyli demirden üretilip 40 mm ara ile Şekil 3.2’de detayda gösterildiği gibi kirişin alt ve üst kısmına yerleştirilmiştir. Kolon (boşluklar arasındaki beton kısım) etriyeleri ϕ 4’lük düz yüzeyli demirden hazırlanıp 40 mm ara ile boşluk yüksekliğince (6 adet) yerleştirilmiştir.

Ayrıca mesnet bölgelerinde (150 mm) 6 mm çapında düz yüzeyli demirden üretilmiş toplam 8 (2x4) tane düşey donatı 40 mm ara ile yerleştirilecektir. Aynı zamanda mesnetlere yakın olan kolonda 6 ϕ 12 diğer kolonlarda ise 4 ϕ 8 düşey donatı kullanılacaktır. Mesnet bölgelerinde detayda görüleceği üzere 40 mm ara ile her iki yüzde toplam 12 tane ϕ 6’dan oluşan yatay donatı kullanılmıştır.

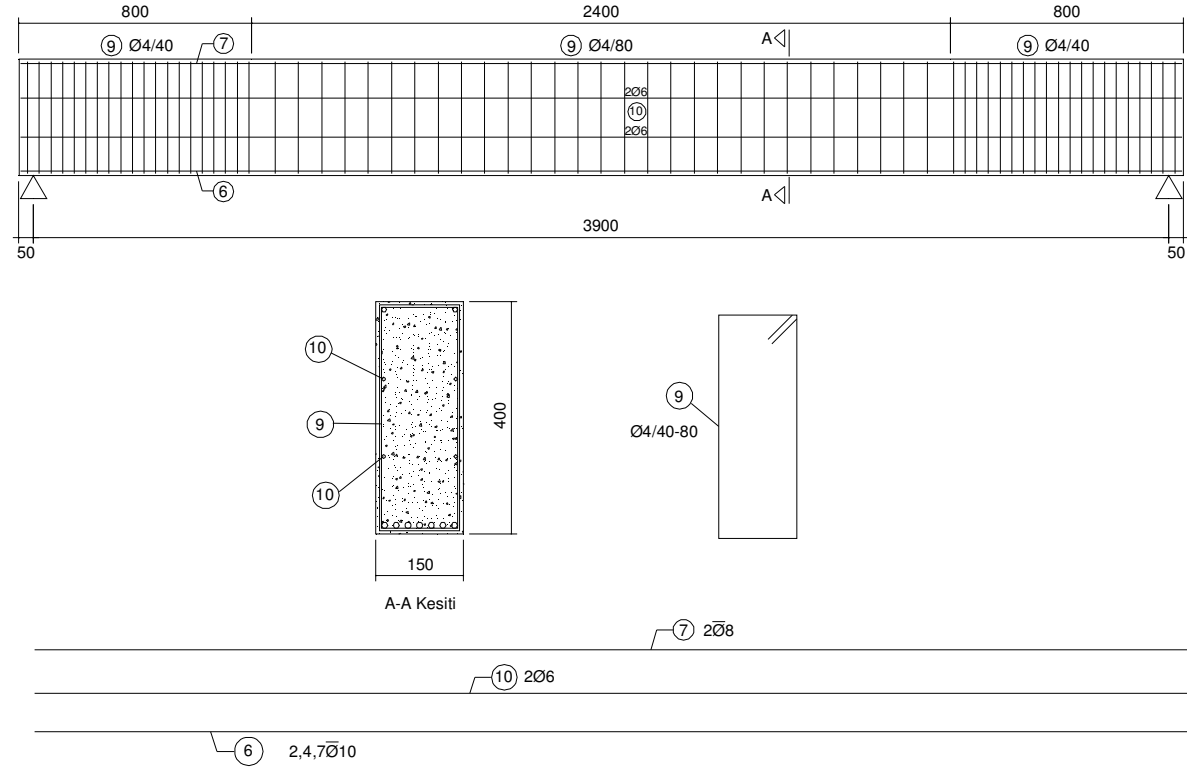
Dairesel boşluklara sahip kirişler (C)

Bu kirişler üçgen boşluğuna sahip kirişlerle aynı çekme basınç ve gövde donatı düzenlemesine sahiptirler. Etriye boyutları ve düzenlemeleri de aynıdır. Bu kirişlerin donatı detaylarına Şekil 3.3’te yer verilmiştir.

4.6. Deney Elemanlarının Kalıbı

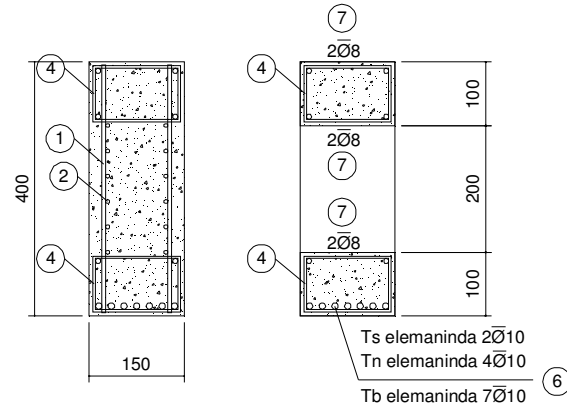
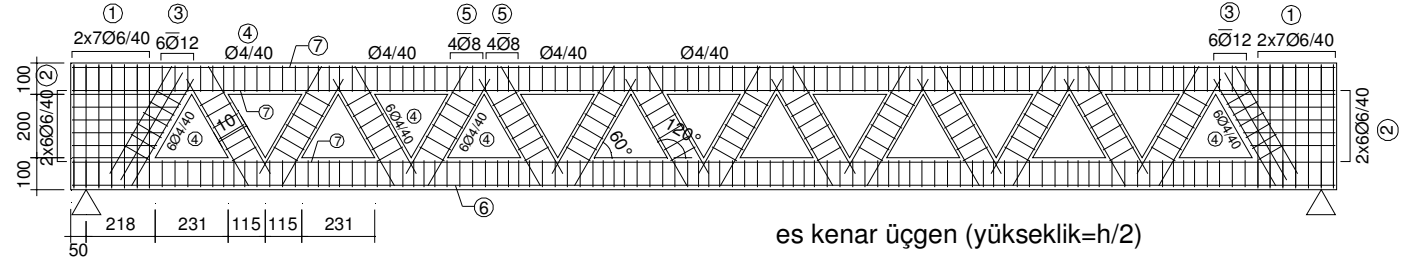
Deney elemanlarının üretilmesinde 3 adet çelik kalıp kullanılmıştır. Çelik kalıp 3 mm kalınlığındaki çelik levhadan imal edilmiştir. Çelik kalıp alt levha ve kirişin yan yüzlerini oluşturan 4 ayrı levhadan oluşmaktadır. Bu levhalar sökülüp takılabilir şekilde imal edilmiş olup priz sırasında deformasyonu engellemek amacıyla kalıp yan yüzleri çelik profillerle desteklenmiştir. Ayrıca boşluk içeren kalıplarda boşluğu sağlamak amacıyla kalıba boşluk geometrisine sahip çelik levha veya PVC boru

yerleştirilmiştir. Üçgen boşluğu sağlamak için daha önceden üçgen şeklinde bükülerek imal edilmiş çelik levha taban levhaya çelik profillerle içeriden desteklenerek vida yardımıyla sabitlenmiştir. Dairesel boşluğu sağlamak amacıyla dairese PVC boru, kalıp içerisine çelik profiller aracılığıyla sabitlenmiştir.



Şekil 4.1. Boşluksuz kirişlerin donatı düzenlemesi

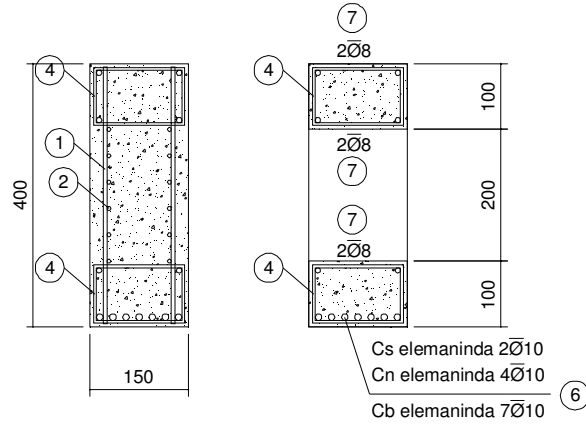
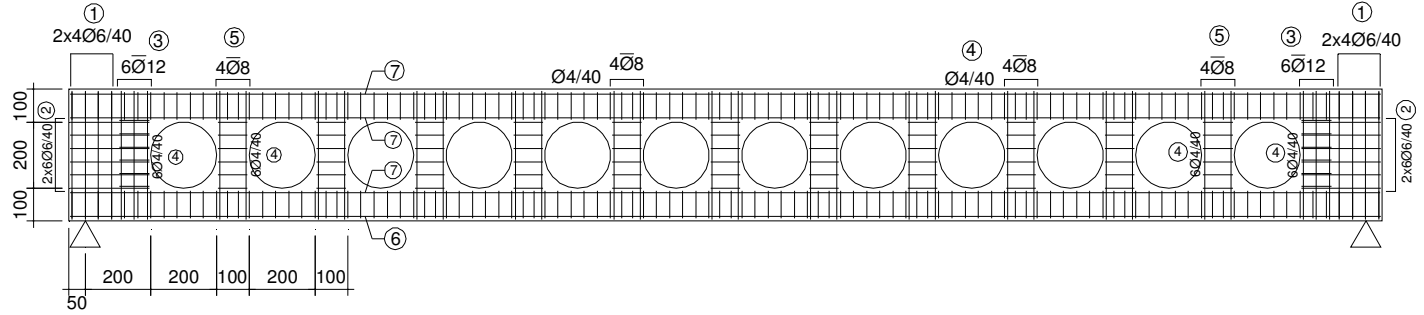
T



Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.2. Üçgen boşluğa sahip kirişlerin donatı düzenlemesi

C



Mesnet Kesiti

Bosluk Kesiti

Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.3. Dairesel boşluğa sahip kirişlerin donatı düzenlemesi

4.7. Malzeme Dayanımları

Düşey ve boyuna donatı olarak 6 mm'den daha büyük çaplarda S420; 6 mm çapındaki donatılarda ise düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. Etriyelerde ise 4 mm çapında düz yüzeyli donatı kullanılmıştır. S420 olan donatılar, donatı özellikleri olabildiğince aynı olabilmesi aynı şirketten tek seferde alınmıştır. Benzer şekilde Ø6'lık donatı ile Ø4'lük donatılarda aynı yerden ve tek seferde alınmıştır.

Beton dökümü her seferde 3 adet olmak üzere, toplam 3 seferde tamamlanmıştır. Her dökümde toplam 10 adet 300 mm yüksekliğinde ve 150 mm çapında standart silindir numune alınmıştır. Numunelerin hepsi deney elemanları ile aynı ortamda küre tabi tutulmuşlardır. Çizelge 4.2'de silindir numunelerinin kırılması ile öğrenilen ortalama beton dayanımları gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Beton dayanımları

	DAYANIM (MPa)
ÇEKME DONATISI AZ OLAN KİRİŞLER	22
ÇEKME DONATISI OLAĞAN OLAN KİRİŞLER	20
ÇEKME DONATISI ÇOK OLAN KİRİŞLER	21

4.8. Deney Düzeni

4.8.1. Yükleme düzeni

Deneyler Gazi.Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği Laboratuvarı'ndaki 400 kN kapasiteli çelik bir çerçevede gerçekleştirilmiştir. Kirişler dört noktalı yükleme ile teste tabi tutulmuşlardır Yayılı yükün moment grafiğine benzemesi amacıyla kirişler eşit aralıklı dört noktadan yüklenmiştir. Bunun için hidrolik bir kriko ile yük önce basit bir ana çelik (2U140) kirişe uygulanmış, daha sonra bu kirişin reaksiyonları yine iki basit çelik kiriş (2x2U120) ile dörde bölünerek betonarme kirişe aktarılmıştır, (söğüt sistemi). Deney düzeneğinde kirişe etki eden yük en üstteki çelik-profil-kiriş arasına yerleştirilmiş olan hidrolik kriko (yük hücresi) yardımıyla elde edilmiştir. Hidrolik krikodan elde edilen yükü, kiriş üzerinde belirlenen 4 noktaya iletebilmek için öncelikle kiriş üzerine U120 profillerden elde edilmiş olan 2 adet profil kutu yerleştirilmiş daha sonra da bunların üzerine U140 profilden elde edilmiş olan 1 adet kutu profil yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinin krokileri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Ayrıca Deney düzeneğinin detaylı çizimi de Şekil 3.6'da verilmiştir. Deney sırasında yükler hidrolik bir kriko ile uygulanmış, yükün büyüklüğü ise kriko ile sistem arasına yerleştirilmiş bir yük-hücresi ile ölçülmüştür.

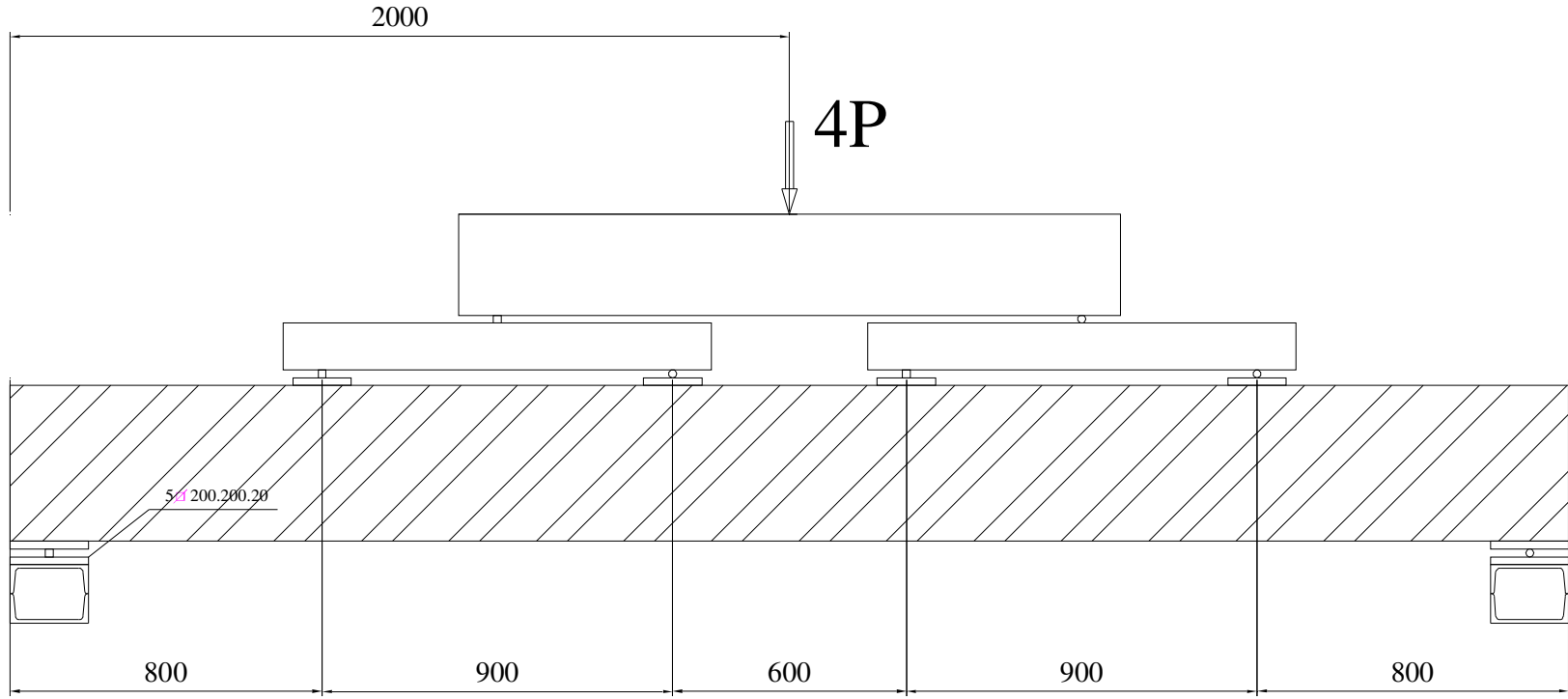
4.8.2. Ölçüm düzeni

Deney elemanlarının testleri sırasında, eleman üzerindeki çeşitli yön ve doğrultudaki deformasyonlar, LVDT olarak adlandırılan 0,01 mm'ye duyarlı elektronik aletler ile ölçülmüştür.

Deplasman ölçümünde, boşluk geometrisi daire olan C tipi kirişlerde ve gövde boşluğu bulunmayan (yalın) B tipi kirişlerde toplam 11 adet LDVT kullanılmıştır. Her LVDT'ye 1'den 11'e kadar olmak üzere numara verilmiştir. Mesnet çökmelerini ölçen 2 ve 3 nolu LVDT'ler mesnet altlarına, betonarme kiriş üzerindeki deformasyonu ölçen 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 nolu LVDT'ler ise kiriş üzerine

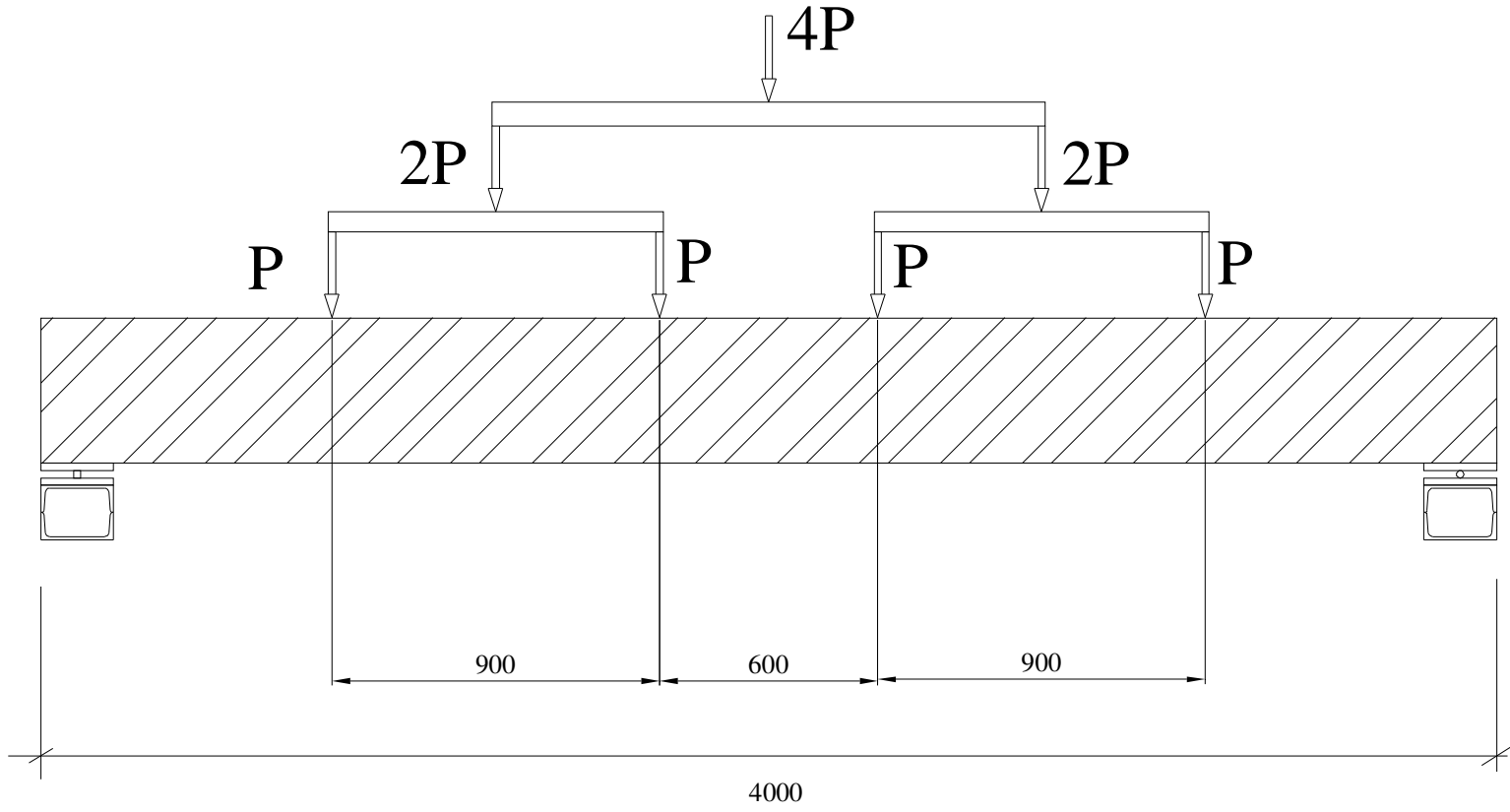
mesnetlenmiştir. Boşluksuz kiriş olan B tipi kirişe ait ölçüm düzeneğinin şeması Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Benze şekilde daire boşluklu kiriş olan C tipi kirişe ait olan ölçüm düzeneği de Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Kiriş gövdesi üzerinde bulunan 1 nolu LVDT kiriş ortasındaki düşey deplasmanı ölçmekte, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 nolu LVDT’ler de kayma deformasyonlarını ölçmektedir.

Boşluk geometrisi üçgen olan T tipi kirişlerde ise toplam 9 adet LVDT kullanılmıştır. LVDT’lere 1’den 9’a kadar numara verilmiştir. 1 nolu LVDT kiriş ortasındaki düşey deplasmanı, 2 ve 3 nolu LVDT’ler mesnet çökmelerini diğer LVDT’ler de kayma deformasyonlarını ölçmektedirler. T tipi kirişlerin ölçüm düzeneğinin şeması Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



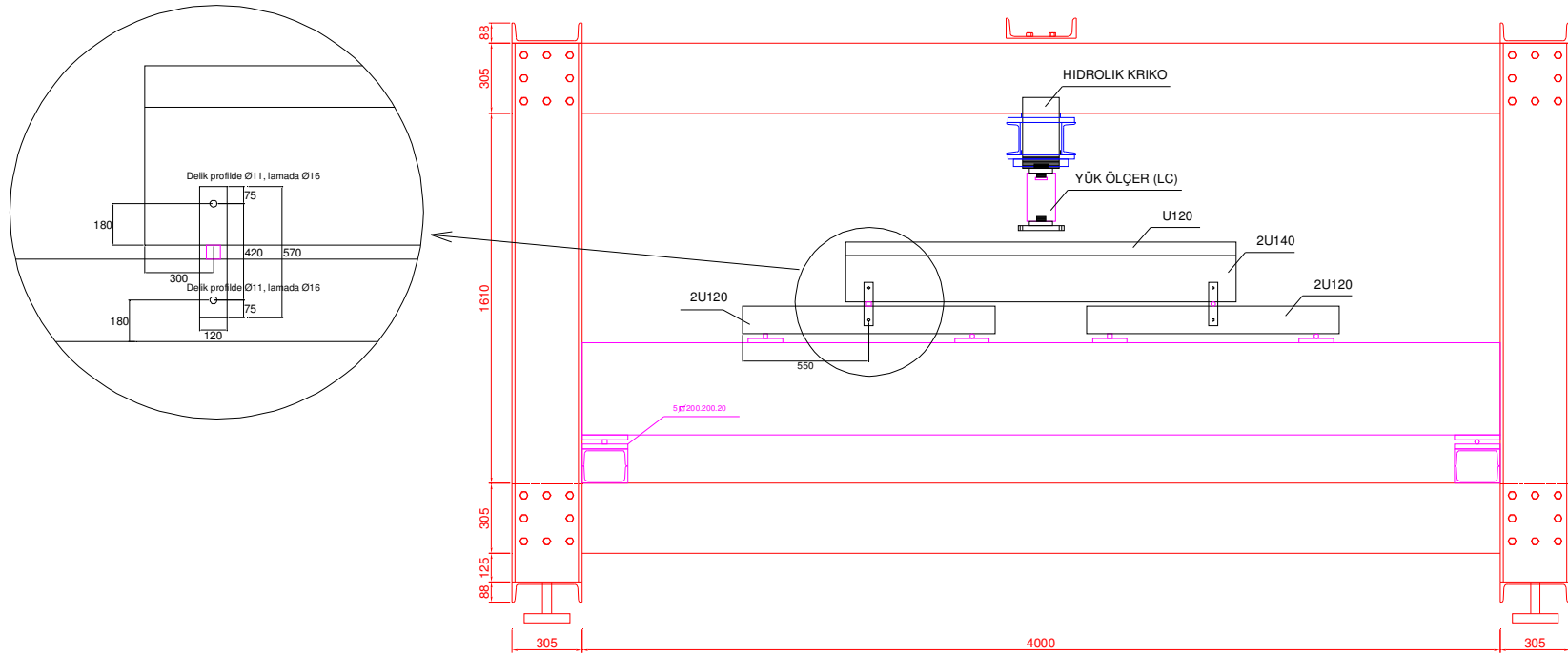
Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.4. Yükleme şekli 1

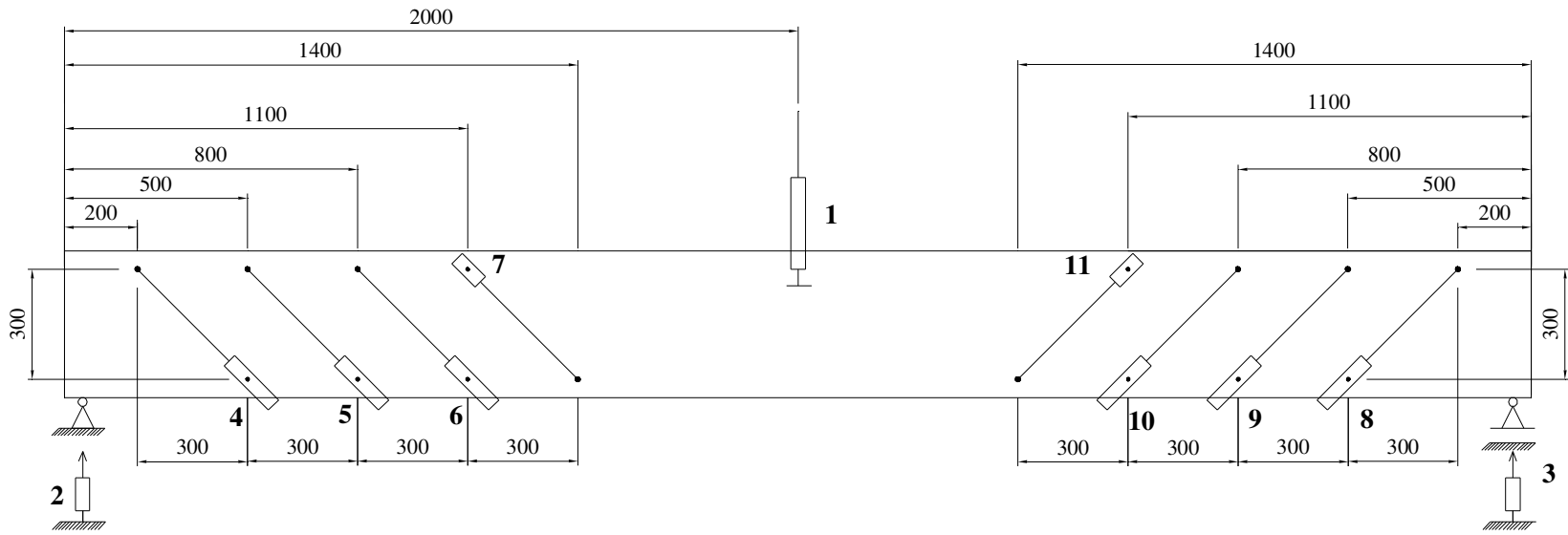


Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.5. Yükleme şekli 2

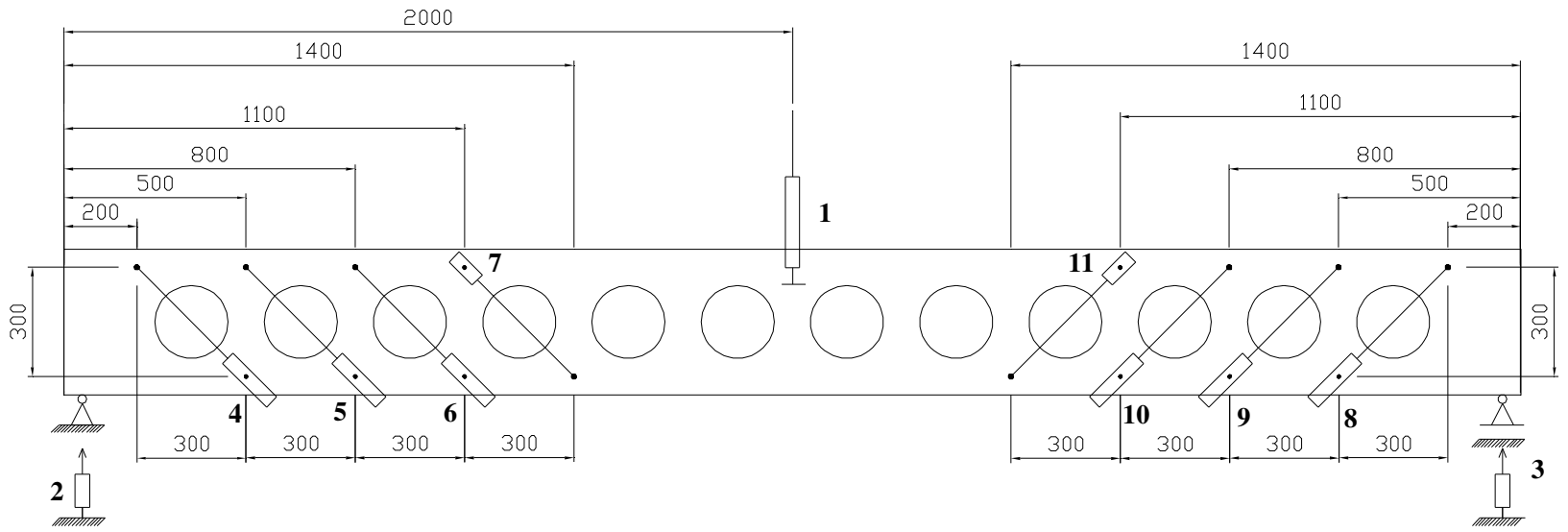


Şekil 4.6. Yükleme düzeneği detay çizimi



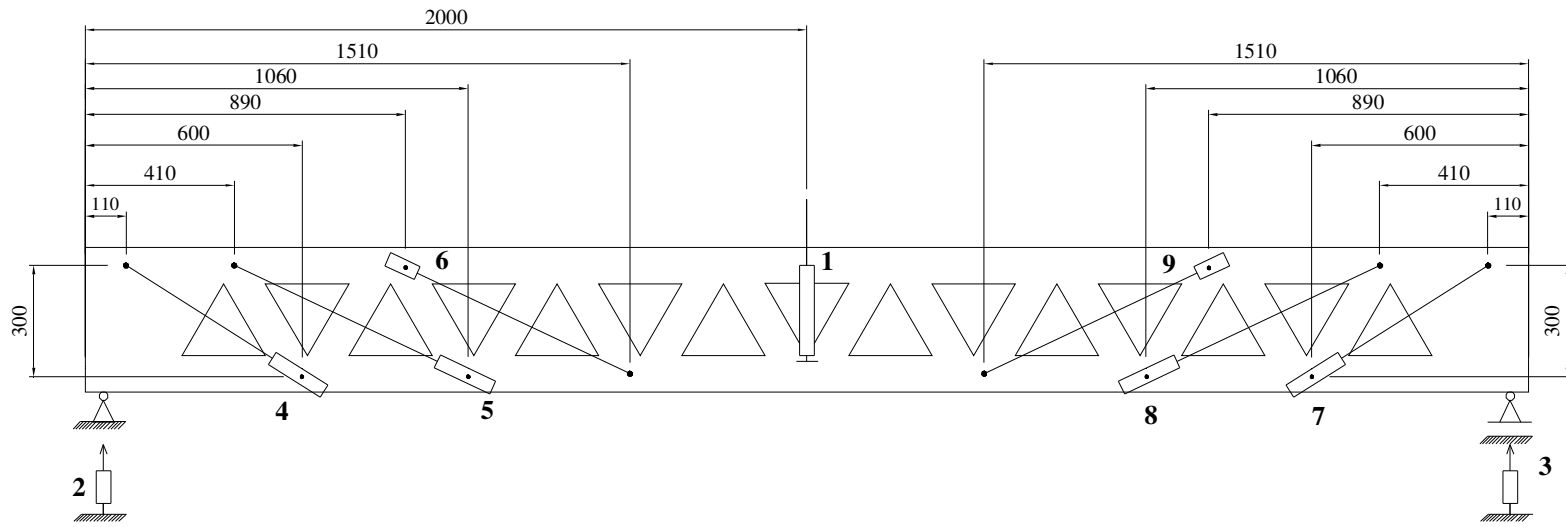
Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.7. Yalın kirişte ölçüm düzeni



Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

Şekil 4.8. Daire boşluklu kirişte ölçüm düzeni



Not: Tüm ölçüler milimetre cinsindendir.

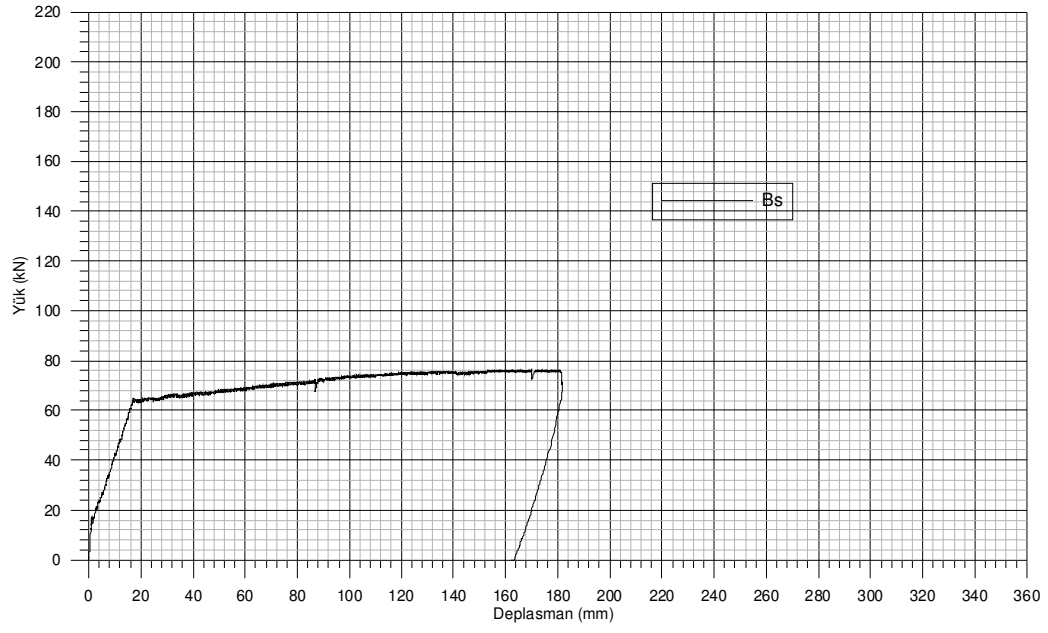
Şekil 4.9. Üçgen boşluklu kirişte ölçüm düzeni

5. DENEYLER

Bu bölümde deneyler anlatılmıştır. Sunumun olabildiğince yalın olması için kiriş oluşturan elemanlara bazı adlar verilmiştir. Anlatımda boşlukların üst kısmındaki sargılı yatay bölgeye ‘üst başlık’, alt kısmındaki sargılı yatay bölgeye ‘alt başlık’ denilmiştir. Ayrıca boşlukların arasındaki sargılı elemanlar ise ‘dikme’ olarak adlandırılmıştır. Her bir dikmeye sırasıyla bir numara verilmiştir. Gövdesinde üçgen boşluk bulunduran T tipi kirişlerde toplam 14 adet dikme bulunmaktadır ve bu dikme soldan sağa doğru sırasıyla 1’den 14’e kadar numara verilmiştir. Gövdesinde daire boşluk bulunan C tipi kirişlerde ise toplam 11 adet dikme bulunmakta ve bu dikmelere de soldan sağa doğru sırasıyla 1’den 11’e kadar numara verilmiştir. Deney elemanında meydana gelen bir olayın yeri tarif edilirken bu dikme numaralarından faydalanılacaktır. Örneğin 6-7 üçgeni denince 6 dikmesi ile 7 dikmesi arasındaki üçgen, 8-9 dairesi denilince de 8 ile 9 dikmeleri arasındaki daire anlaşılabacaktır.

5.1. Bs: Az Donatılı Referans Kirişi

Referans amaçlı test edilen bu kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.1’de gösterilmiştir. Yük değeri 16 kN olduğunda ilk eğilme çatlakları görülmüştür. Yük değeri arttıkça çatlak sayısı ve çatlak genişlikleri artmış, yük değeri 64 kN’a ulaşınca maksimum çatlak genişliği 3 mm olarak gözlenmiştir. Çatlaklar kiriş ortasındaki 1m’lik bölgede eğilme çatlakları olarak yoğunlaşmıştır. Yük değeri 68 kN iken betonda ezilme belirtisi gözlenmiştir. Yük 70 kN deplasman 70 mm’ye ulaştığında donatı pekleşmeye başlamıştır. Betondaki ezilmeler kiriş ortasındaki 600 mm’lik kısımda üniform olarak giderek belirginleşmiştir. Kiriş ortasındaki deplasmanı ölçen 1 nolu LVDT 88 mm değerini gösterdiğinde 1 nolu LVDT nin kapasitesi bittiği için, deneye ara verilip 1 nolu LVDT’nin ölçüm çubuğu yeniden düzenlendikten sonra deneye devam edilmiştir. Deneye 7,5 kN yük ve 182 mm deplasman değerinde son verilmiştir (Resim 5.2). Kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.1. Bs kirişi yük-deplasman grafiği



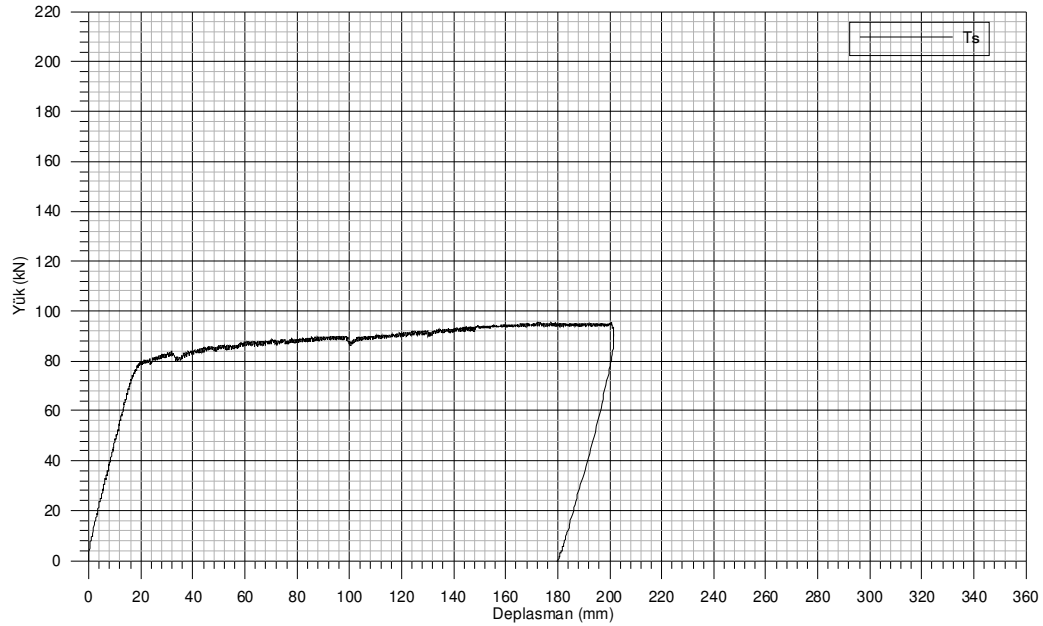
Resim 5.1. Bs kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.2. Bs kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.2. Ts: Az Donatılı Üçgen Boşluklu Kiriş

İlk çatlaklar, 25 kN yük değerine ulaşılmca kirişin orta kısmında eğilme çatlağı olarak görülmeye başlamıştır. 45 kN yük değerinde tabanı yere paralel olan tüm üçgenlerde çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. 70 kN yükdeğerinde 1 ve 14 nolu dikmelerde çatlaklar tespit edilmiştir. Yük değeri 8 kN olunca akma başlamıştır. Çatlaklar özellikle ortadaki 1 m'lik bölgede çekme bölgesinde eğilme çatlağı olarak yoğunlaştı. 88 kN yük değerinde 6-7 ve 8-9 üçgenlerinin tepe noktalarında ezilme belirtileri görüldü. Yük değeri 90 kN'a ulaştığında 1 nolu LVDT'nin gösterdiği deplasman değeri 130 mm'dir. Bu aşamada 6-7 ve 8-9 üçgenlerinin üst kısımlarındaki ezilmeler iyice belirginleşmiş ve oldukça simetrik olarak gelişmişlerdir. Deney sonucunda basınç bloğunun yüksekliğinin 2 mm olduğu ve mesnet bölgelerindeki çatlakların boyutlarının, oluştuklardaki andakiyle sınırlı kaldıkları gözlenmiştir. Kirişin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. Ts kirişinin deney öncesi ve deney sonrası görüntüsü Resim 5.3 ve Resim 5.4'de görülmektedir. Kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.2. Ts kirişi yük-deplasman grafiği



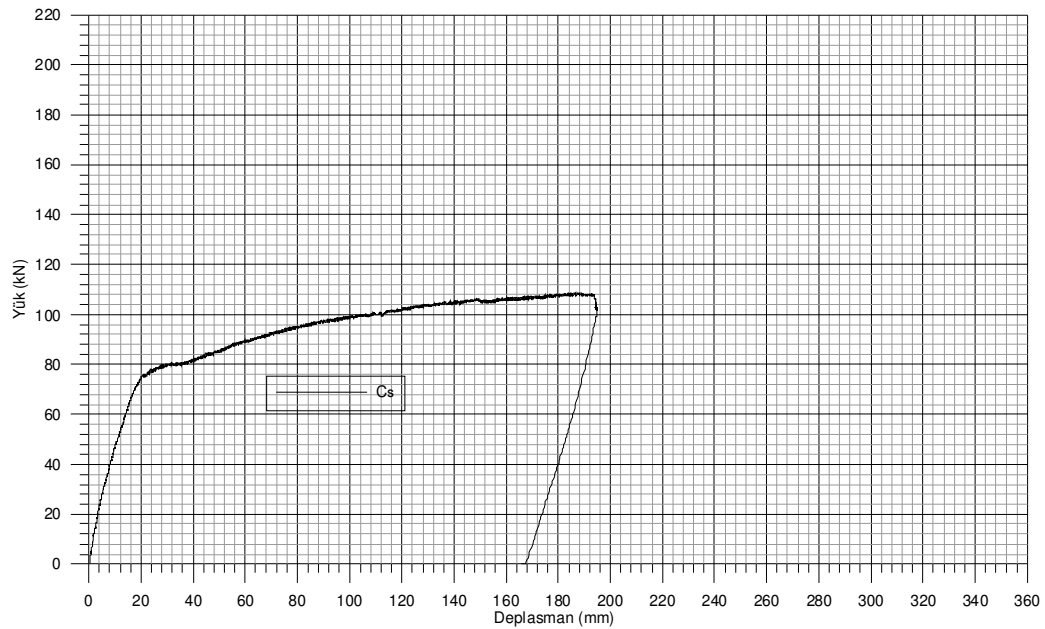
Resim 5.3. Ts kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.4. Ts kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.3. Cs: Az Donatılı Daire Boşluklu Kiriş

Cs kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.5’de görülmektedir. İlk çatlaklar yük değeri 30 kN iken tüm daire boşlukların alt kısımlarında kılcal boyutta görülmüştür. Yük değeri 40 kN’a ulaştığında 5 ve 6 nolu dikmelerde ve 4-5 ve 7-8 boşluklarının altlarında eğilme çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. 60 kN yük değerinde en soldaki iki boşluk ve en sağdaki iki boşluk çevresinde, doğrultuları boşlukların üzerlerinden geçecek şekilde 45^0 ’lik kesme çatlakları oluşmuştur. Yük değeri 95 kN iken 5 ve 7 nolu dikmeler arasında ezilme belirtileri görülmeye başlamış, yük değeri 105 kN olduğunda ezilmeler bu bölgede iyice yoğunlaşmıştır. Deneye, 108 kN yük değerinde ve 1 nolu LVDT 192 mm deplasmanı gösteriyorken son verilmiştir. Deney sonucunda Çatlakların büyük bir kısmının kiriş orta bölgesindeki 1,2 m’lik kısımda eğilme çatlağı karakterinde yoğunlaştığı görülmüştür. Mesnetlerdeki çatlaklarda yük artımı ile beraber ilerlemiş fakat kırılma karakterini kesmeye dönüştürememiştir (sol ve sağ mesnet civarlarındaki maksimum kesme çatlağı genişliği 1,5 mm ile sınırlı kalmıştır.). Kirişin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur (Resim 5.6). Kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.3’de görülmektedir.



Şekil 5.3. Cs kirişi yük-deplasman grafiği



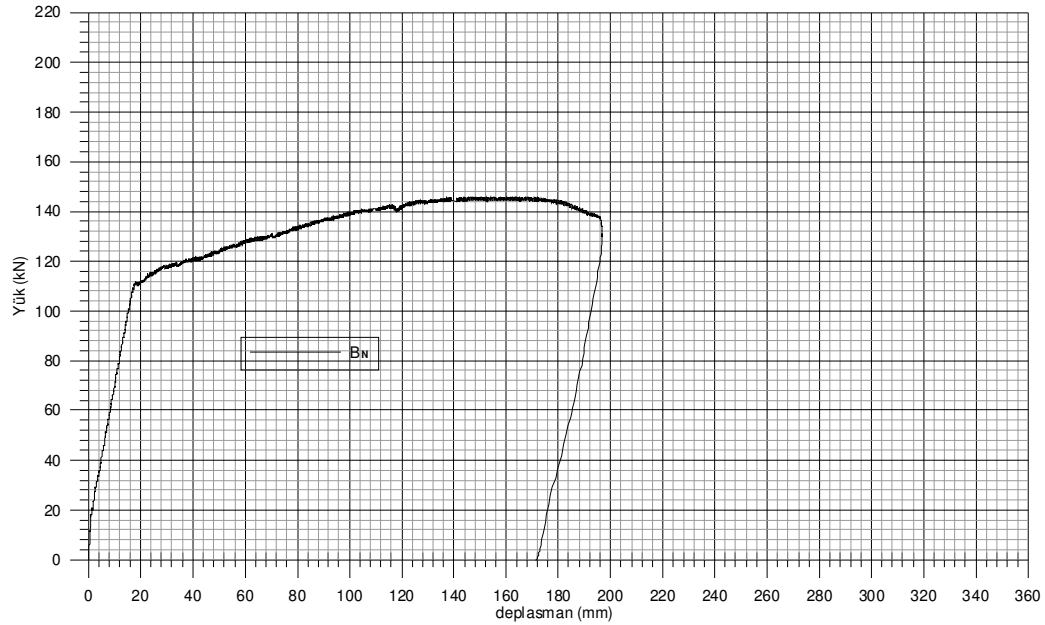
Resim 5.5. Cs kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.6. Cs kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.4. B_N: Olağan Donatılı Referans Kirişi

B_N kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.7’de görülmektedir. Yük değeri 30 kN olduğunda kiriş orta bölgesinde ilk kılcal eğilme çatlakları görülmüştür. 55 kN yük değerine ulaşıldığında sol ve sağ mesnet bölgelerinde kılcal çatlakların oluşmuştur. Akma olayı 110 kN yük değerinde gerçekleşmiştir. 115 kN yükte hem sağ hem de sol mesnet bölgelerinde yaklaşık 45° eğimli kesme çatlağı gelişimi gözlenmiştir. Çatlaklar kiriş orta bölgesindeki 1 m’lik bölgede esas olarak eğilme karakterinde oluşmuştur. Yük değeri 140 kN’a geldiğinde kiriş orta bölgesinde ezilme belirtisi gözlenmiş ve ezilme giderek belirginleşmiş ve 143 kN yük değerinde tamamen gerçekleşmiştir. Ezilmenin gerçekleştiği anda 1 nolu LVDT’nin gösterdiği değer 130 mm’dir. Kirişin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur (Resim 5.8). Kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.4’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.4. B_N kirişi yük-deplasman grafiği



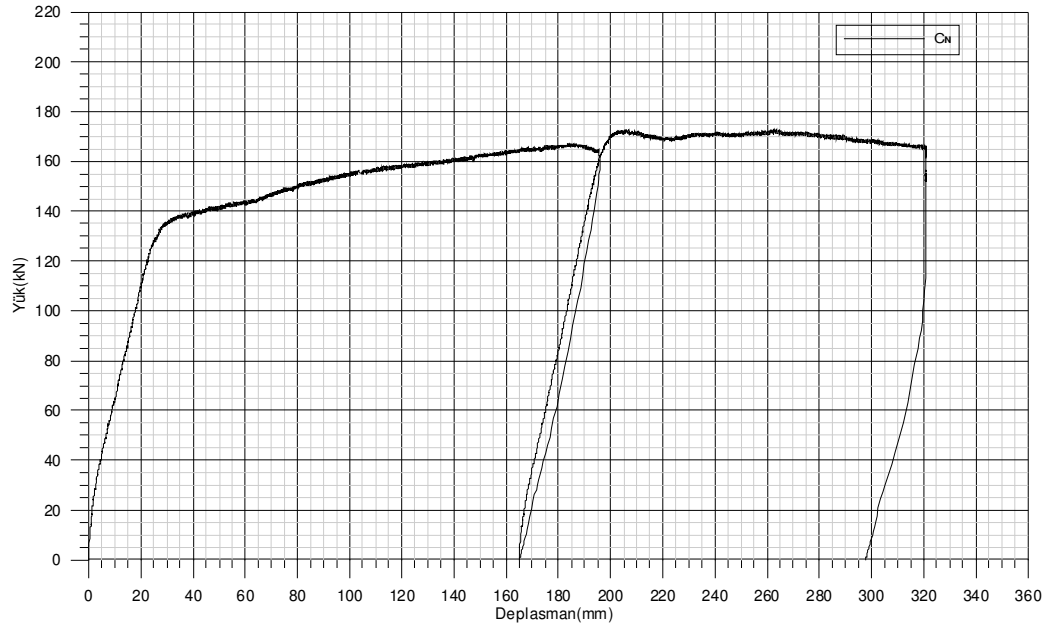
Resim 5.7. B_N kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.8. B_N kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.5. C_N: Olağan Donatılı Daire Boşluklu Kiriş

C_N kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.9’da görülmektedir. İlk çatlaklar kesme çatlağı olarak en soldaki iki daire ve en sağdaki iki dairenin çevresinde 80 kN yük değerinde görülmüştür. Yük değeri 110 kN olduğunda hala kiriş orta bölgesinde eğilme çatlağı gözlenmemiştir. 138 kN yük değerine ulaşıldığında ortadaki eğilme bölgesinde eğilme çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Akma 136 kN yük değerinde gerçekleşmiştir. Genel olarak en soldaki iki boşluk ile en sağdaki iki boşluk çevresinde kesme çatlaklarının, kiriş orta bölgesindeki dört boşluk çevresinde de eğilme çatlaklarının gelişmiş olduğu gözlenmiştir. 156 kN yük değerinde ve 1 nolu LVDT’nin gösterdiği deplasman değeri 104 mm iken beton basınç bölgesinde ezilme başlamıştır. Ezilme kiriş orta bölgesindeki 400 mm’lik parçada üniform olarak gelişmiştir. Bu arada mesnet bölgelerindeki kesme çatlaklarında da gelişme devam etmiştir. (Yük değeri 167 kN’a ulaştığında krikonun altı plakalarla doldurulmuş ve 1 nolu LVDT’nin de ölçüm aldığı noktaya bir boya kutusu konularak ölçüm kapasitesi artırılmıştır. Sonra deneye devam edilmiştir.) Deney çerçevesinin deplasman kapasitesinin sınırına gelindiği için deneye 152 kN yük ve 320 mm deplasman değerinde son verilmiştir. Deney sonunda basınç bölgesindeki donatıların burkulmuş olduğu görülmüştür. Kirişin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. Kirişin deney sonrası görüntüsü Resim 5.10’da Kirişe ait yük-deplasman grafiği ise Şekil 5.5’de görülmektedir.



Şekil 5.5. C_N kirişi yük-deplasman grafiği



Resim 5.9. C_N kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.10. C_N kirişinin deney sonrası görüntüsü



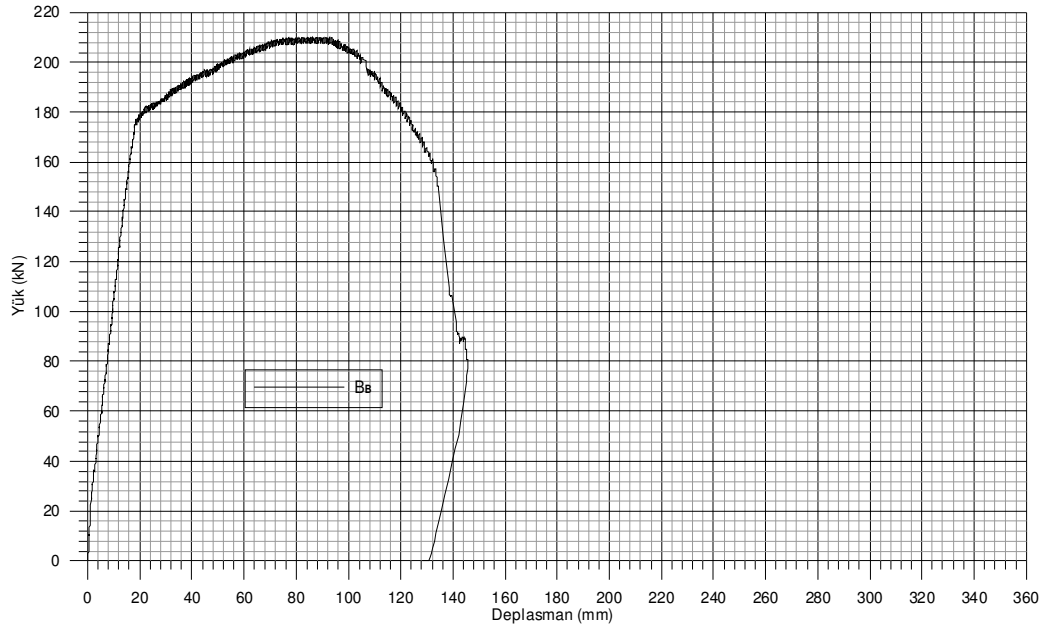
Resim 5.11. T_N kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.12. T_N kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.7. B_B: Çok Donatılı Referans Kirişi

B_N kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.13’de görülmektedir. İlk çatlaklar 55 kN yük değerinde mesnet orta bölgesinde eğilme çatlağı olarak görüldü. 130 kN yük değerinde sağ mesnette, 170 kN yük değerinde de sol mesnette kesme çatlakları görülmüştür. Ayrıca 183 kN yük değeri ve 27 mm deplasman değerinde akma meydana gelmiştir. Yük değeri 200 kN’a ulaştığında ve ortadaki 1 nolu LVDT 58 mm deplasman değerini gösterirken, kiriş orta bölgesindeki eğilme çatlakları yoğunlaşmış ve betonda ezilme görülmüştür. Bu arada mesnet bölgelerindeki kesme çatlaklarında oluştukları andakine göre kayda değer bir gelişme görülmemiştir. 205 kN yük değerinde ezilmenin olduğu yerdeki basınç donatılarında burkulma gözlemlenmiştir. Daha sonra yük değeri düşmeye başlamış ve 18 kN’a geldiğinde ani gevrek kırılma olmuştur. Kiriş göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur (Resim 5.14). Kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.7’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.7. B_B kirişi yük-deplasman grafiği



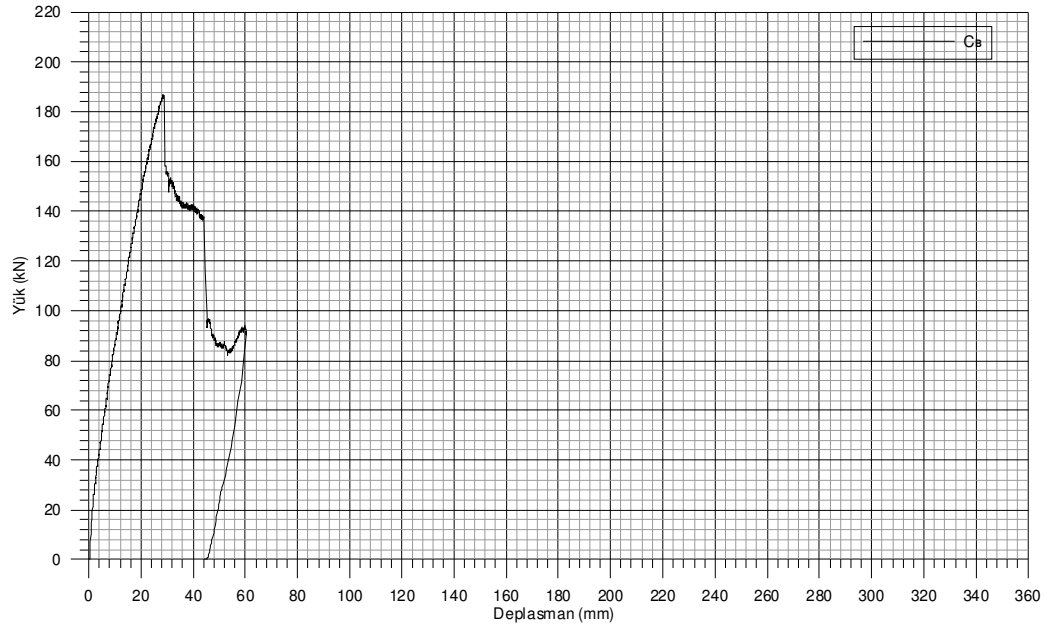
Resim 5.13. B_B kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.14. B_B kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.8. C_B: Çok Donatılı Daire Boşluklu Kiriş

C_B kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.15’de görülmektedir. Eleman üzerindeki ilk çatlaklar 50 kN yük değerinde sol mesnet ve sağ mesnet bölgelerindeki deliklerde 45⁰’lik açı ile meydana gelmiştir. Yük değeri 100 kN’a ulaştığında kiriş üzerindeki tüm delik çevrelerinde çatlakların oluşmuş olduğu görülmüştür. Bu çatlaklar mesnet bölgelerinde 45⁰’lik açı ile kesme çatlağı tipinde oluşmuş olup kiriş orta bölgesine gelindikçe eğilme çatlağı tipine dönüşmektedirler. 180 kN yük değerinde ve 1 nolu LVDT 27 mm deplasman değerini gösterirken en soldaki iki boşluk arasındaki 1 nolu kolonda oluşan 45⁰’lik çatlak gelişmiş ve eleman gevrek olarak kırılmıştır. Kırılma şeklini daha iyi görebilmek için deneye bir süre daha devam edilmiştir. Yük artımı ile beraber aynı mesnet bölgesinde ikinci bir gevrek kırılma daha oluşmuştur. En sol daire boşluğunun üst bölgesinde ve soldan ikinci daire boşluğunun alt bölgesinde büyük kayma deformasyonları ile plastik mafsallar meydana gelmiştir. Bununla birlikte deneye son verildiğinde kirişin orta kısmındaki eğilme bölgesinde çok hafif hasar oluştuğu görülmüştür. Sonuç olarak kiriş göçme şekli kesme karakterinde olmuştur (Resim 5.16). Kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.8’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.8. C_B kirişi yük-deplasman grafiği



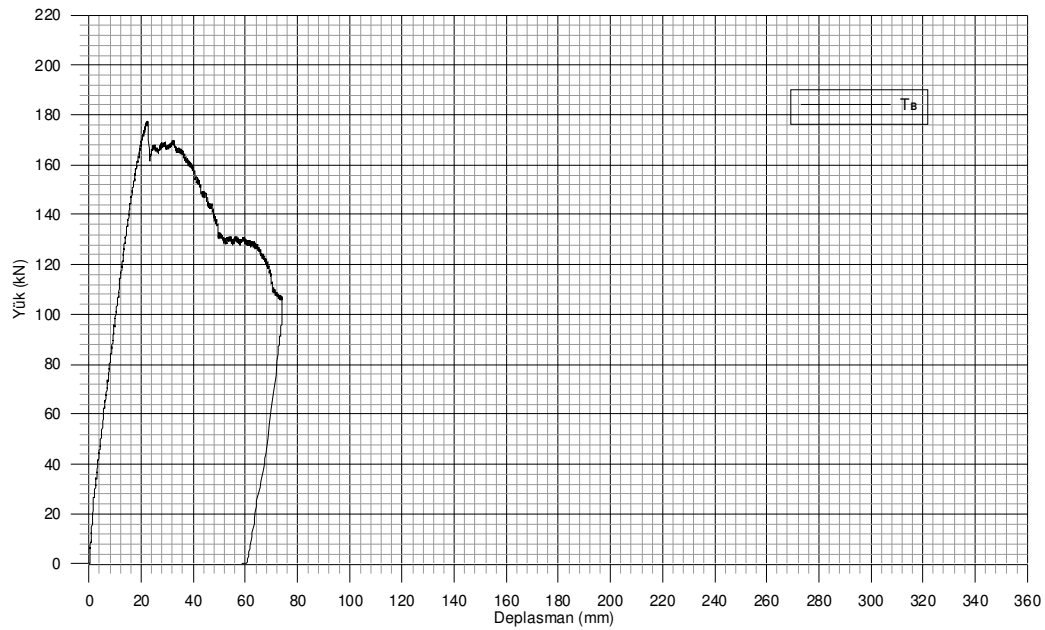
Resim 5.15. C_B kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.16. C_B kirişinin deney sonrası görüntüsü

5.9. T_B: Çok Donatılı Üçgen Boşluklu Kiriş

T_B kirişinin deney öncesi görüntüsü Resim 5.17’de görülmektedir. İlk çatlaklar 60 kN yük değerinde 1 nolu dikmenin iki ucunda dikme eksenine dik olarak meydana gelmiştir. Yük değeri 145 kN yük değerine ulaştığında 8 nolu dikmenin alt kısmında ve 6-7 üçgen boşluğun altında ilk eğilme çatlakları görülmüştür. 175 kN yük değerinde ve 1 nolu LVDT 22 mm deplasman değerini gösteriyorken 13-14 üçgen boşluğun tepe noktasında (altta kalan sivri uç) hızla bir çatlak gelişmiş ve bu çatlak kiriş eksenine dik devam etmiş sonra aniden yön değiştirerek mesnede doğru yatay aderans çatlağı şekline dönüşmüştür. Eş zamanlı olarak 13 nolu dikmenin üst ucunda çatlaklar oluşmuş ve ayrıca en sağdaki üçgen boşluğun sağ alt kısmında da çatlaklar oluşup mesnede doğru ilerlemiştir. Sonuç olarak kiriş gevrek bir davranış göstermiş ve kiriş göçme şekli kesme karakterinde olmuştur. T_B kirişinin deney sonrası görüntüsü Resim 5.18’de, kirişe ait yük-deplasman grafiği ise Şekil 5.9’da görülmektedir.



Şekil 5.9. T_B kirişi yük-deplasman grafiği



Resim 5.17. T_B kirişinin deney öncesi görüntüsü



Resim 5.18. T_B kirişinin deney sonrası görüntüsü

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Üçgen ve daire boşluklu kirişlerde referans kirişlerinden farklı olarak çekme bölgesinde, en alt sıra donatının üzerine bir sıra 2 ϕ 8 boyuna donatı konulmuş benzer şekilde basınç bölgesinde en üst sıra donatının altına da bir sıra 2 ϕ 8 boyuna donatı konulmuştur. Bu farklı donatı detayı nedeniyle boşluklu kirişler referans kirişlerine göre olması gerekenden daha büyük dayanım göstermişlerdir. Bu yüzden deneylerde elde edilen yük-deplasman grafiklerinin bu haliyle kullanılmasının yanıltıcı olabileceği düşünülmüştür. Bu sorunu olabildiğince gidermek için daire boşluklu ve üçgen boşluklu kirişlere ait yük-deplasman grafiklerinde yük (ordinat) değerleri, kirişlerin moment taşıma güçlerine bağlı olarak belirlenen (0,1) aralığındaki düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilmiş ve grafikler düzeltilmiş (normalize edilmiş) halde bu bölüme konulmuştur. Bu bölümdeki boşluklu kirişlere ait olan grafiklerin, 4. bölümdeki boşluklu kirişlere ait olan grafiklerin düzeltilmiş (normalize edilmiş) hali olduğu unutulmamalıdır. Test sonuçları düzeltilmiş (normalize edilmiş) yük-deplasman grafiklerine göre değerlendirilmiştir.

Değerlendirme yapılırken kirişlerin göçme karakterleri, süneklikleri, eğilme rijitlikleri, dayanımları vb. özellikleri dikkate alınmıştır. Süneklik, kirişin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde koruyarak deformasyon yapabilme yetisidir. Süneklik kıyaslaması yapılırken kirişin dayanımında önemli bir kayıp olmadan yapabildiği maksimum deformasyon ile süneklik oranı göz önünde bulundurulmuştur. Süneklik oranı, yük deplasman grafiğinde kirişin ulaştığı maksimum yük değerinden %15 değer kaybettiği andaki yük değerine karşılık gelen deplasman değerinin (δ_u) kirişin akma anındaki yapmış olduğu deplasman değerine (δ_y) oranı olarak alınmıştır. Bu oranın sünek bir kiriş için olması gereken minimum değeri 4~5'dir. Normalde eğilme rijitliği moment-eğrilik grafiğinin eğimidir. Ancak eğrilik ölçüleri betonarmede sağlıklı ölçülemediği için bunun moment-eğrilik grafiğinden ölçülmesi doğru sonuçlar vermemektedir. Ayrıca bu çalışmada eğrilik ölçümleri de alınmamıştır. Bunun yerine yük momentin bir fonksiyonu, deplasman da eğriliğin bir fonksiyonu olduğuna göre eğilme rijitliği yük-deplasman grafiğinin çıkış kolunun eğiminden hesaplanmıştır. Bu şekilde hesaplanmış olan eğilme rijitliği tabi ki gerçek

eğilme rijitlik değeri değildir. Fakat tüm kirişlerde eğilme rijitliği değeri aynı şekilde hesaplandığı ve bu kirişler de kendi aralarında kıyaslandığı için bunun bir sorun teşkil etmeyeceği düşünülmüştür. Çizelge 6.1’de kirişlere ait akma yükü, ulaşılan maksimum yük, δu ve δy deformasyon değerleri, süneklik oranı değerleri ve eğilme rijitliği değerleri düzeltilmiş yük-deplasman grafiklerindeki verilere göre bulunmuştur.

Çizelge 6.1. Testlerden elde edilen verilere göre süneklik oranı değerleri

Kiriş Adı	P_y (kN)	P_{max} (kN)	P_u ($P_u=0,85P_{max}$) (kN)	δu (mm)	δy (mm)	Süneklik Oranı ($\delta u / \delta y$)	Eğilme Rijitliği
Bs	64	76,3	64,9	$\geq 182,0$	17	10,71	3,06
Ts	54	64,2	54,6	$\geq 200,6$	20	10,03	2,77
Cs	50	73,3	62,3	$\geq 193,0$	19,5	9,90	2,64
BN	110	145,9	124,0	196,0	17,6	11,14	5,67
TN	113	136,5	116	114,0	22,5	5,07	4,98
CN	115	146	124	320,0	31,7	10,09	3,84
BB	170	210,1	178,6	122,0	17,5	6,97	9,16
TB	-	167,3	142,2	43,0	-	-	8,14
CB	-	176,3	150,0	29,4	-	-	6,54

Kirişleri süneklik, dayanım, eğilme rijitliği bakımından kıyaslarken daha kolay anlaşılabilmesi ve daha doğru yorum yapabilmek için kirişlerin her birine ait olan değerler birbirleri ile oranlanmış ve bu oran sonucunda ortaya çıkan değer dikkate alınmıştır. Elemanların sünekliklerinin kıyaslanmasında Çizelge 6.2’deki oranlar kullanılmıştır. δy değeri birçok parametreye bağlı olduğu için elemanlar arasında kıyaslanabilir bir bağ oluşturamamaktadır. Bu yüzden δy değerleri kullanılarak hesaplanan süneklik oranlarıyla yapılan karşılaştırmalar çok anlamlı olmayacağından Çizelge 6.2’deki süneklik oranı hesabında δu değerleri kullanılmıştır.

Sünekliktekine benzer karşılaştırmalar dayanım ve eğilme rijitlikleri için de yapılmış ve Çizelge 6.3 ile Çizelge 6.4’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Süneklik oranları

Karşılaştırılan elemanlar→	C/B	T/B	C/T
S (az donatılı)	-*	-*	-*
N (olağan donatılı)	1,63	0,58	2,81
B (çok donatılı)	-	-	-

Çizelge 6.3. Dayanımların karşılaştırılması

Karşılaştırılan elemanlar→	C/B	T/B	C/T
S (az donatılı)	0,96	0,84	1,14
N (olağan donatılı)	1,00	0,94	1,07
B (çok donatılı)	0,84	0,80	1,05

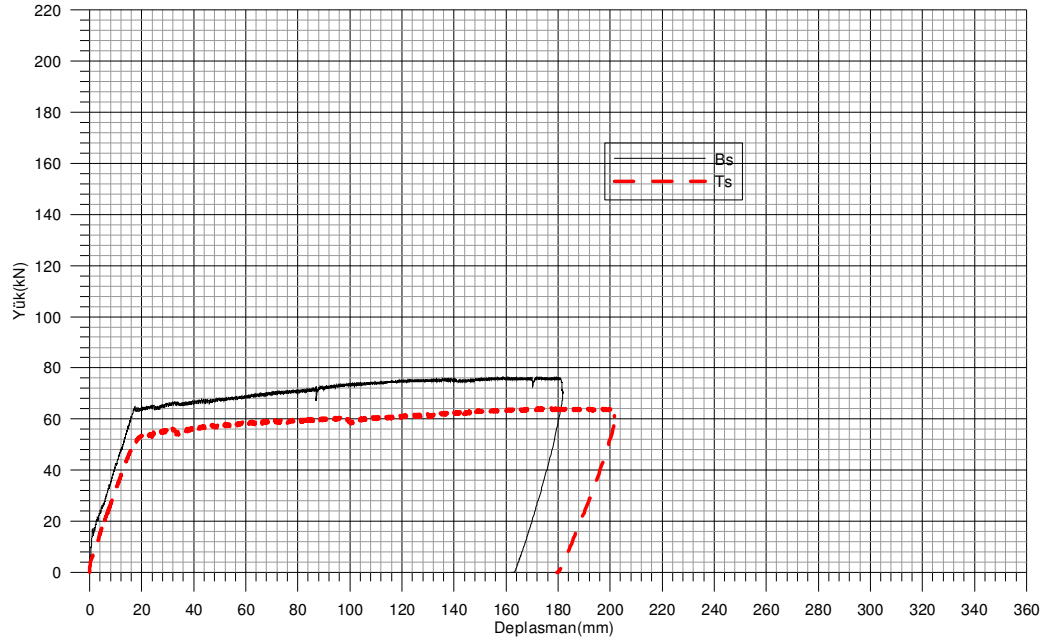
* Elemanlar yeterli sünekliktedir. Genlik kapasitesi bittiğinden deneye devam edilmemiştir. Bu yüzden oran hesaplanmamıştır.

Çizelge 6.4. Eğilme rijitliklerinin karşılaştırılması

Karşılaştırılan elemanlar→	C/B	T/B	C/T
S (az donatılı)	0,86	0,91	0,95
N (olağan donatılı)	0,68	0,88	0,77
B (çok donatılı)	0,71	0,89	0,80

6.1. Ts Kirişi ile Bs Kirişinin Kıyaslanması

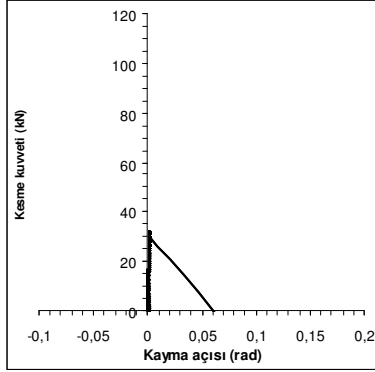
Ts kirişi ile Bs kirişinin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. Her iki kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 6.1’de aynı koordinat düzleminde gösterilmiştir. Her iki kiriş de yeterince sünek davranış göstermiştir. Her iki kiriş deneyinde de yük hücresinin genlik kapasitesi bittiği için ve yeterince sünek davranış elde edildiği için deneye devam edilmemiştir. Dolayısıyla deneylere devam edilmiş olması durumunda grafiklerdeki eğrilerin daha ne kadar yatay bir şekilde devam edeceği bilinmediğinden bu yük-deplasman grafiklerine göre bir kiriş diğerine göre daha sünektir şeklinde bir yorum yapılmamıştır. Ts kirişinin Bs kirişine olan dayanım oranı 0,84 (Çizelge 6.3), eğilme rijitliği oranı ise 0,91 (Çizelge 6.4) olarak bulunmuştur. Bu oranlardan da anlaşılabacağı üzere Ts kirişinin dayanım ve eğilme rijitliği Bs kirişinin dayanım ve eğilme rijitliğinden daha küçüktür. Bununla birlikte Ts kirişi referans kirişi olan Bs kirişine göre yakın sonuçlar vermiş ve benzer davranış göstermiştir. Ts kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri Şekil 6.2’deki gibidir. Kesme kuvveti-kayma açısı grafiklerinde görüldüğü gibi kesme bölgesindeki LVDT’ler çok küçük deplasman değerleri ölçerken kiriş orta bölgesindeki 6 ve 9 nolu LVDT’ler büyük deplasman değerleri ölçmüştür.



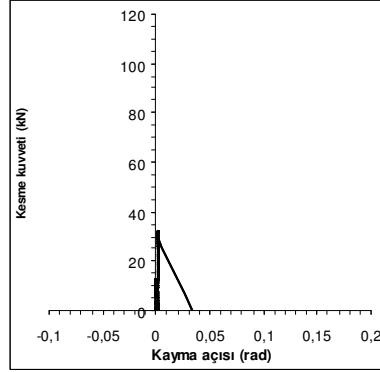
Şekil 6.1. Ts kirişi ile Bs kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.2. T_N Kirişi ile B_N Kirişinin Kıyaslanması

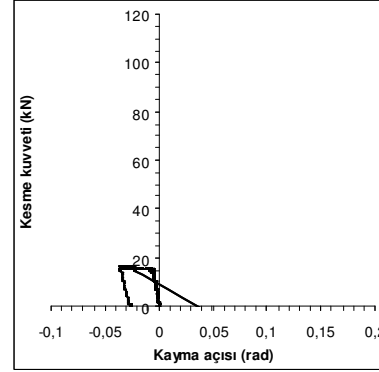
B_N kirişinin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. T_N kirişi hedeflenen taşıma gücüne ulaşmış, epey bir deformasyon yaptıktan sonra kesmeden göçmüştür. Her iki kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 6.3’de aynı eksen takımında gösterilmiştir. T_N kirişinin B_N kirişine olan süneklik oranı 0,58’dir (Çizelge 6.2). B_N kirişi oldukça sünek bir davranış gösterirken T_N kirişi minimum sınıra yakın düzeyde sünek bir davranış göstermiştir. T_N kirişinin B_N kirişine olan dayanım oranı 0,94 (Çizelge 6.3), eğilme rijitliği oranı ise 0,88’dir (Çizelge 6.4). T_N kirişinin ulaştığı maksimum yük değeri ve eğilme rijitliği değeri B_N kirişinin ulaştığı maksimum yük değeri ve eğilme rijitliği değerine göre daha küçük çıkmıştır. T_N kirişinin dayanım ve eğilme rijitliği değerinin B_N kirişine yakın değerler göstermesine karşın süneklik bakımından B_N kirişine göre kötü bir sonuç vermiştir. Bununla birlikte T_N kirişinin epey bir deformasyon yaparak taşıma gücüne ulaşmasına rağmen daha sonra mesnet kısmından kesme karakteri ile göçmesinin nedenlerinden birisi olarak, işçilik hatasından kaynaklanan aderans boyunun yeterli olmaması olarak düşünülmüştür.



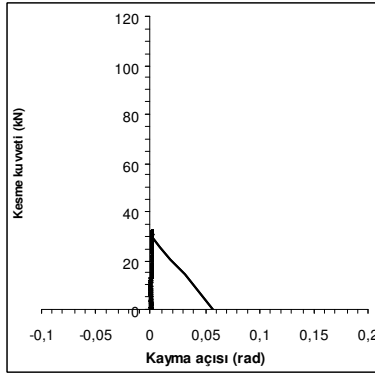
4 nolu LVDT



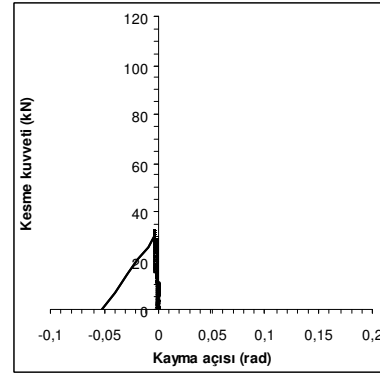
5 nolu LVDT



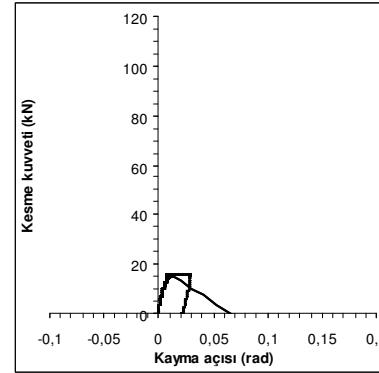
6 nolu LVDT



7 nolu LVDT



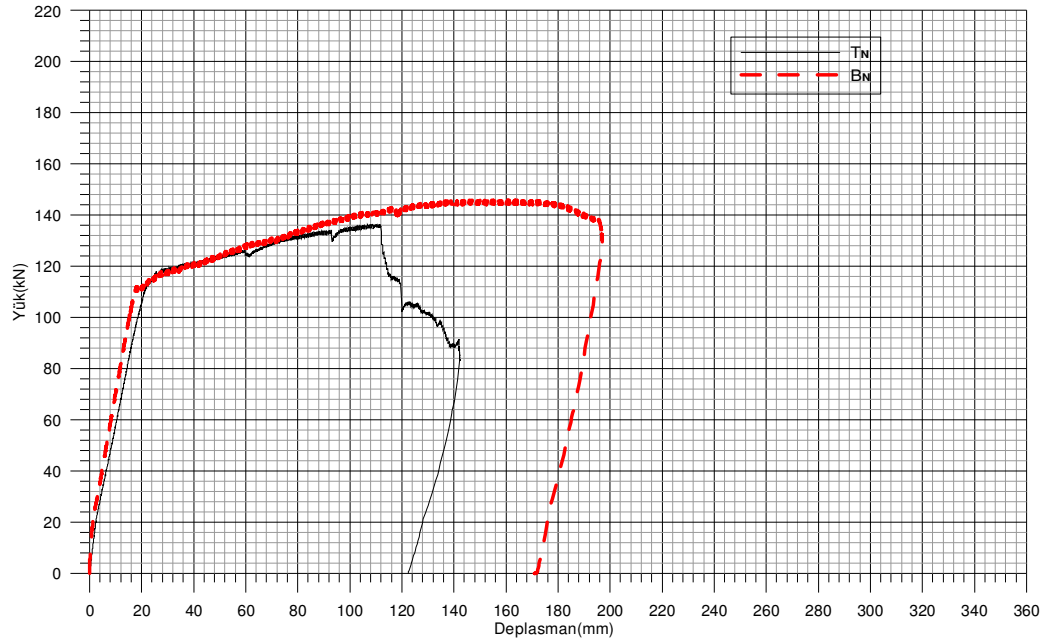
8 nolu LVDT



9 nolu LVDT

Şekil 6.2. Ts kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri

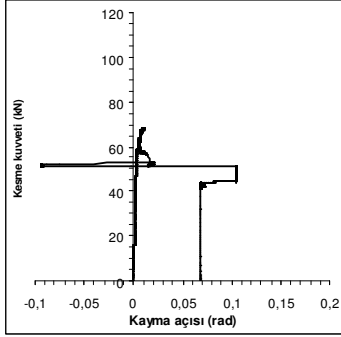
T_N kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Kayma- deformasyon grafikleri incelendiğinde göçmenin olduğu mesnet bölgesinde deplasman değerlerinin çok çıktığı görülmektedir.



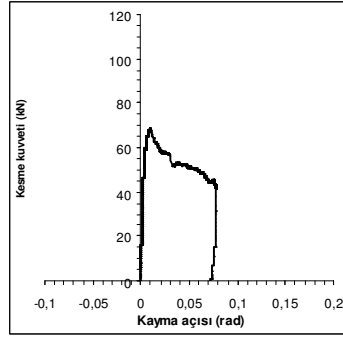
Şekil 6.3. T_N kirişi ile B_N kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.3. T_B Kirişi ile B_B Kirişinin Kıyaslanması

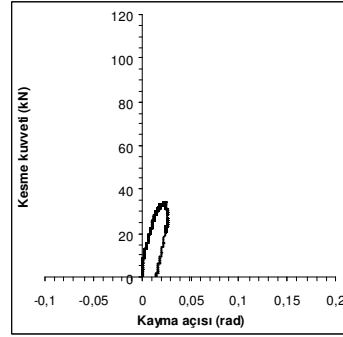
B_B kirişinin göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. T_B kirişi ise gevrek bir davranış göstermiş ve kesme karakteri ile göçmüştür. T_B kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri Şekil 6.5’de sunulmuştur. Göçmenin olduğu sağ mesnet bölgesinde büyük kayma deformasyonları olmuştur. Her iki kirişe ait yük-deplasman grafiği Şekil 6.6’da aynı koordinat düzleminde gösterilmiştir. T_B kirişinin B_B kirişine olan dayanım oranı 0,80 (Çizelge 6.3), eğilme rijitliği oranı ise 0,89 çıkmıştır (Çizelge 6.4). B_B kirişinde akmadan sonra donatıda pekleşmenin olması nedeniyle kiriş dayanımı artış göstermiştir.



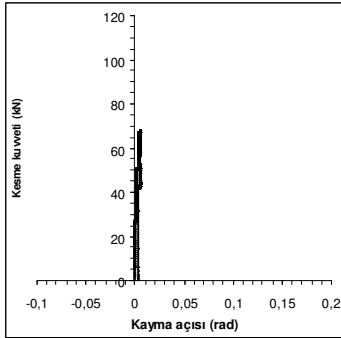
4 nolu LVDT



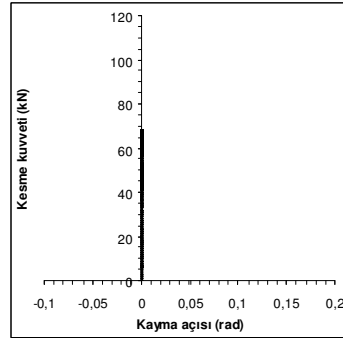
5 nolu LVDT



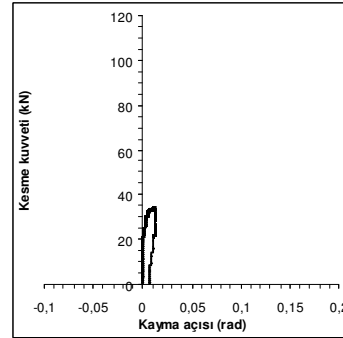
6 nolu LVDT



7 nolu LVDT

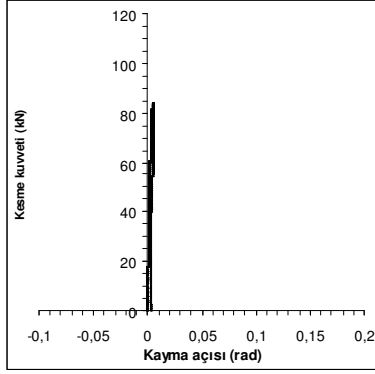


8 nolu LVDT

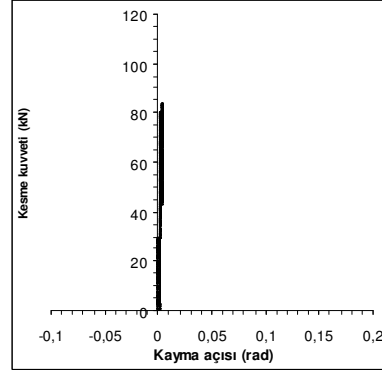


9 nolu LVDT

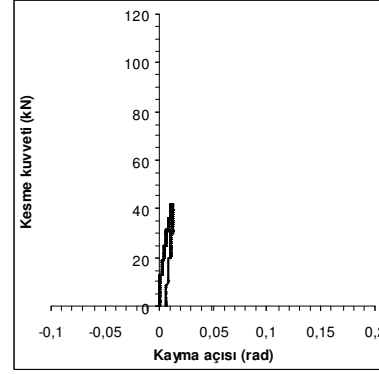
Şekil 6.4. T_N kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri



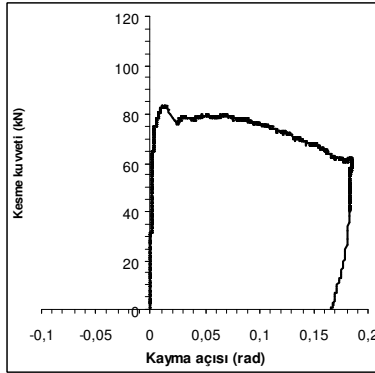
4 nolu LVDT



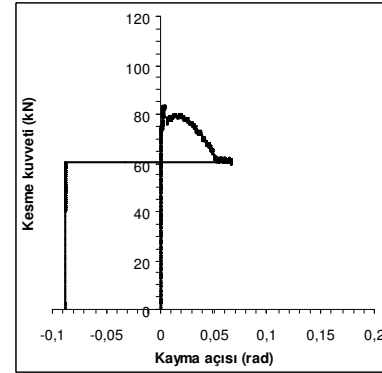
5 nolu LVDT



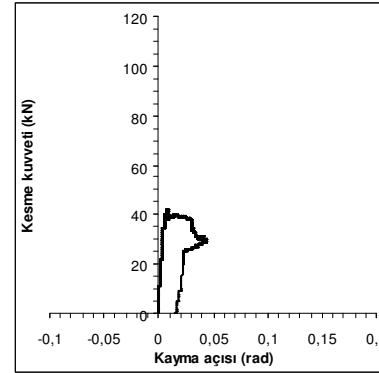
6 nolu LVDT



7 nolu LVDT



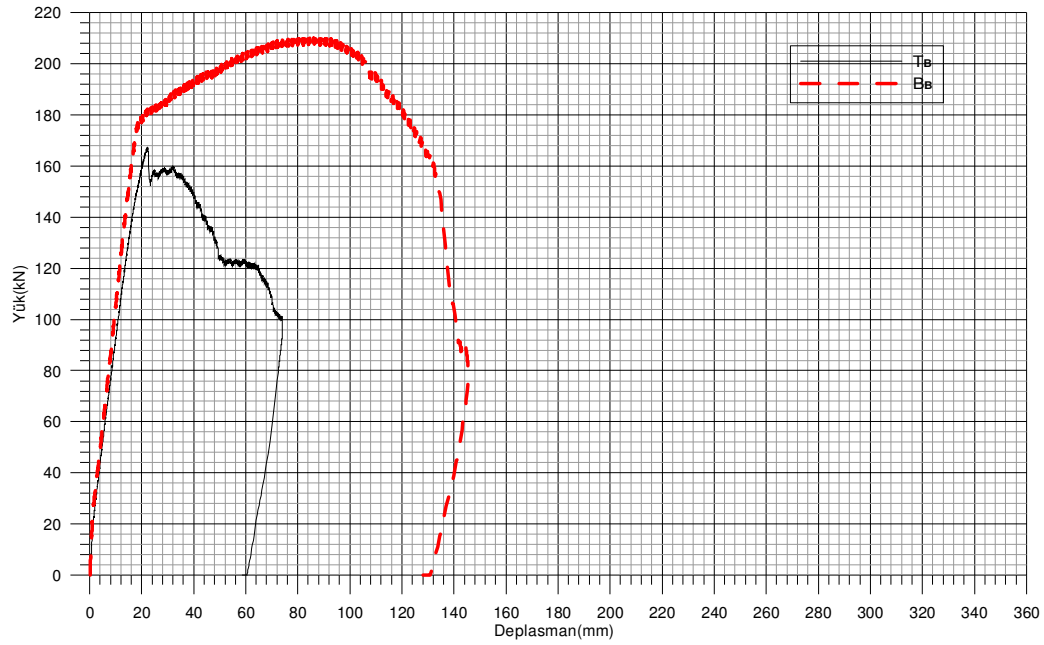
8 nolu LVDT



9 nolu LVDT

Şekil 6.5. T_B kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri

Sonuç olarak Her iki kirişin eğilme rijitlikleri birbirine yakın olmasına rağmen T_B kirişi B_B kirişinin ulaştığının ancak %80'i kadar bir taşıma gücüne ulaşabilmiş ve gevrek bir davranış göstererek kesme karakteri ile göçmüştür. Bu donatı düzeninde T_B kirişi başarılı olmamıştır. Ancak bu kirişin aşırı donatılı olduğu da unutulmamalıdır.

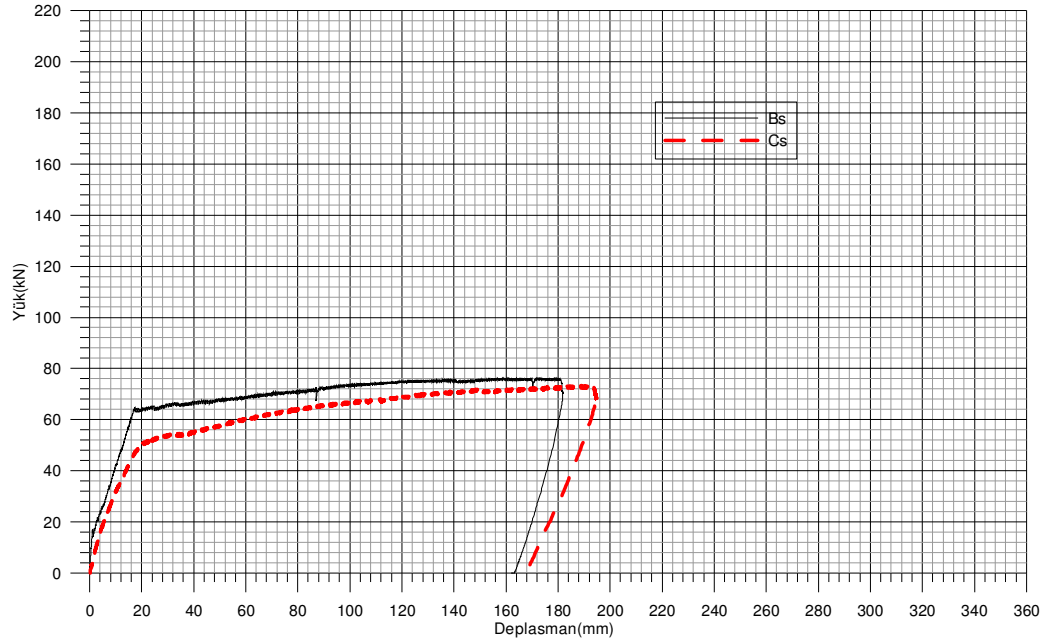


Şekil 6.6. T_B kirişi ile B_B kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.4. Cs Kirişi ile Bs Kirişinin Kıyaslanması

Bs kirişi ile Cs kirişinin her ikisinin de göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. Cs kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri Şekil 6.8'deki gibidir. Grafikler incelendiğinde kiriş eğilme bölgesinde (7 ve 11 nolu LVDT'lerin bulunduğu bölge) deformasyon değerleri büyük çıkmıştır. Kirişlere ait yük-deplasman grafiği Şekil 6.7'de aynı koordinat düzleminde gösterilmiştir. Her iki kiriş deneyinde de betonda ezilme meydana geldikten sonra yeterince sünek davranış elde edildiğine kanaat edilmiş ve yük hücresinin genlik kapasitesi bittiği için deneye devam edilmemiştir. Deneylere devam edilmiş olması durumunda yük-deplasman eğrilerinin bundan sonra nasıl bir şekil alacağı bilinemediğinden bu grafiklere göre hangi kirişin daha

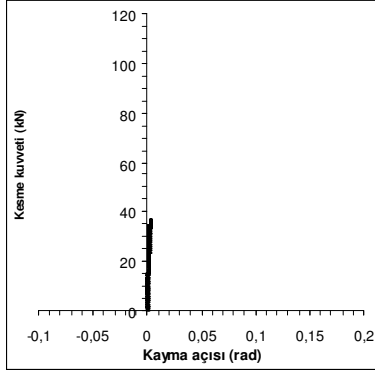
sünek olduğu hakkında bir yorum yapılmamıştır. Cs kirişinin Bs kirişine olan dayanım oranı 0,96 (Çizelge 6.3), eğilme rijitliği oranı ise 0,86 (Çizelge 6.4) olarak bulunmuştur. Dayanım ve eğilme rijitliği bakımından da Cs kirişi ile Bs kirişi arasında fazla bir fark oluşmamıştır. Sonuç olarak Cs kirişi Bs kirişine yakın sonuçlar vermiş ve benzer bir davranış göstermiştir.



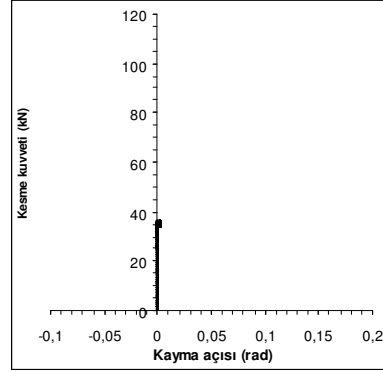
Şekil 6.7. Cs kirişi ile Bs kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.5. C_N Kirişi ile B_N Kirişinin Kıyaslanması

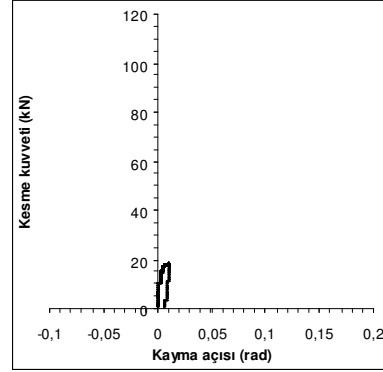
Her iki kirişin de göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. C_N kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri Şekil 6.9'da sunulmuştur. 7 nolu LVDT'de oluşan mekanik bir sorun nedeniyle bu LVDT'den ölçüm alınamamıştır. Kiriş eğilme bölgesinde (11 nolu LVDT'nin bulunduğu bölge) kayma deformasyonları diğer bölgelere göre daha büyük değer almıştır. Şekil 6.10'da B_N kirişi ile C_N kirişine ait yük-deplasman grafiği aynı koordinat düzleminde gösterilmiştir. Her iki kiriş de sünek davranış göstermiştir. C_N kirişinin B_N kirişine olan süneklik oranı 1,63 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 6.2).



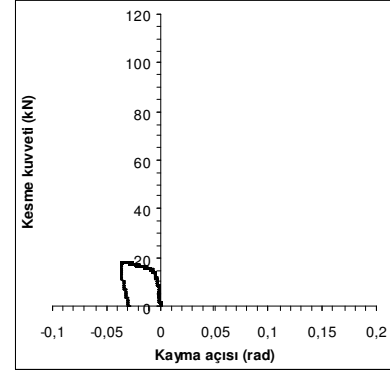
4 nolu LVDT



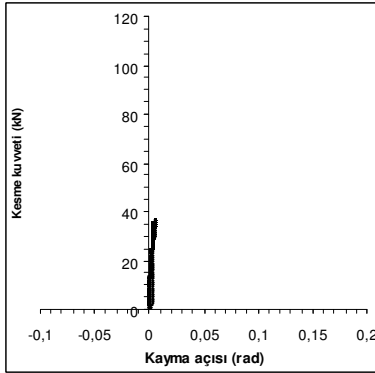
5 nolu LVDT



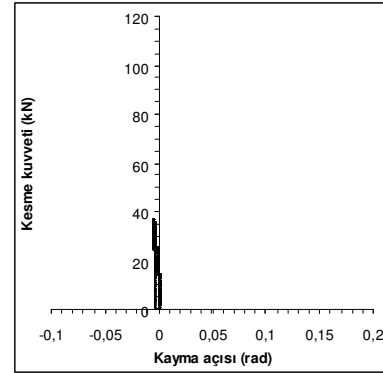
6 nolu LVDT



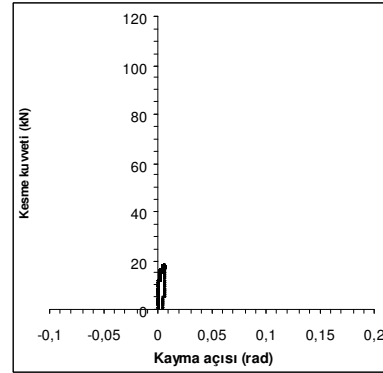
7 nolu LVDT



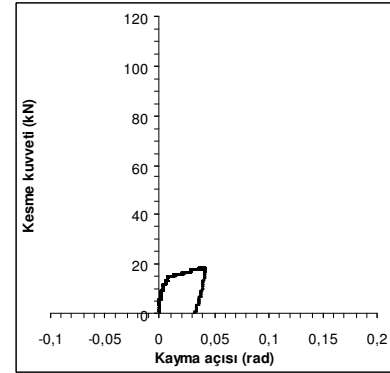
8 nolu LVDT



9 nolu LVDT

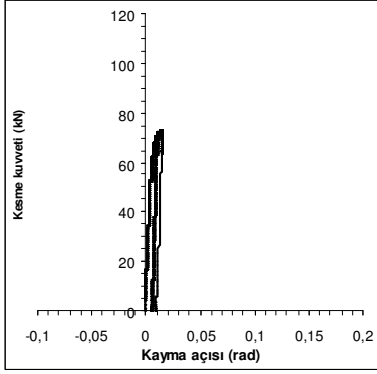


10 nolu LVDT

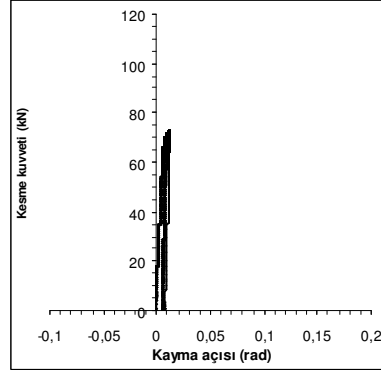


11 nolu LVDT

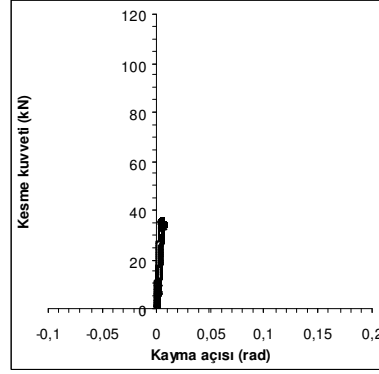
Şekil 6.8. Cs kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri



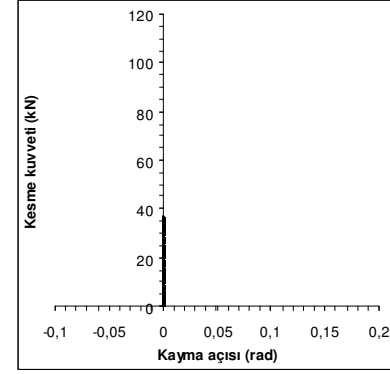
4 nolu LVDT



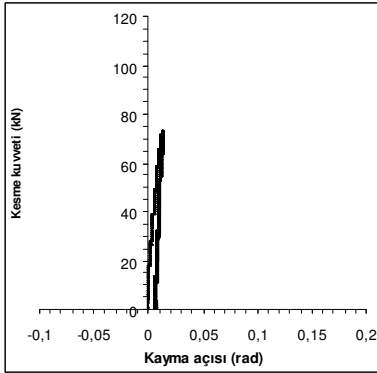
5 nolu LVDT



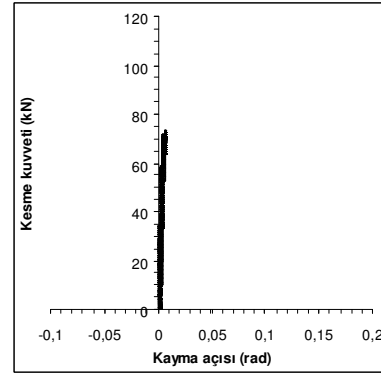
6 nolu LVDT



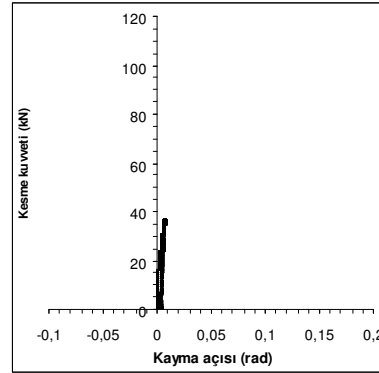
7 nolu LVDT



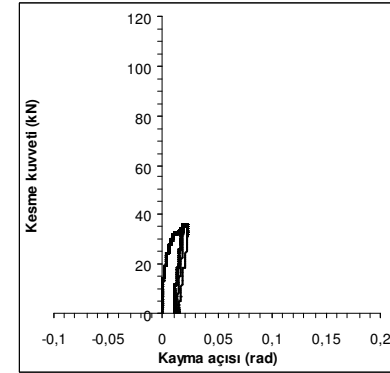
8 nolu LVDT



9 nolu LVDT



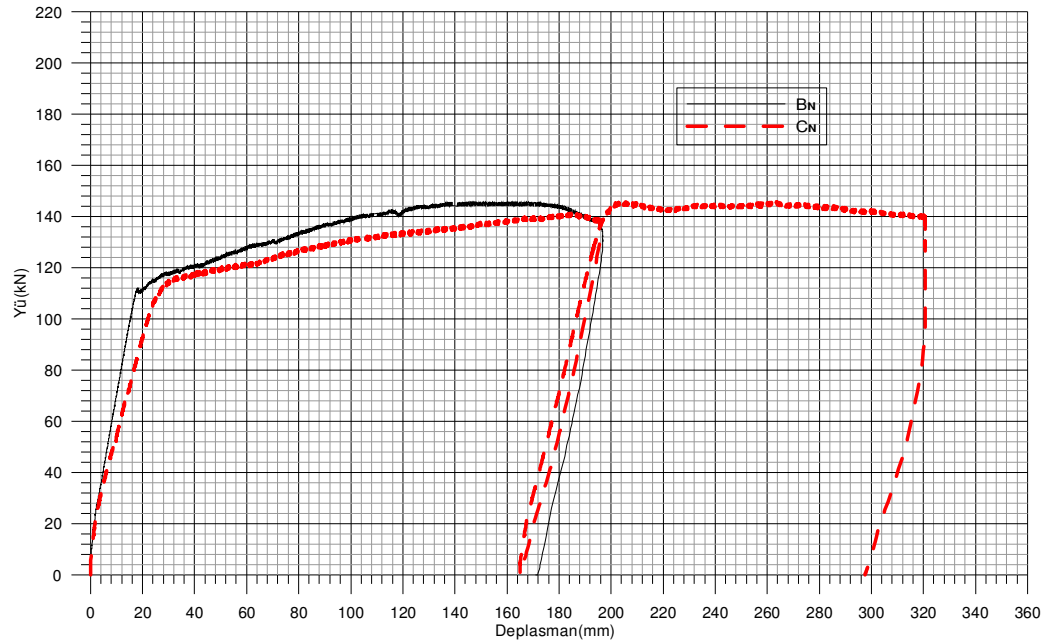
10 nolu LVDT



11 nolu LVDT

Şekil 6.9. C_N kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri

C_N kirişi B_N kirişine göre oldukça sünek bir davranış göstermiştir. C_N kirişinin B_N kirişine olan dayanım oranı 1,00 (Çizelge 6.3), eğilme rijitliği oranı ise 0,68 (Çizelge 6.4) olarak bulunmuştur. Her iki kirişin taşıma güçlerinin aynı olmasına karşın C_N kirişinin eğilme rijitliği değeri B_N kirişinin eğilme rijitliği değerinden daha küçük çıkmıştır. Eğilme rijitliği dışında C_N kirişi, oldukça iyi sonuçlar vermiş ve başarılı bulunmuştur.

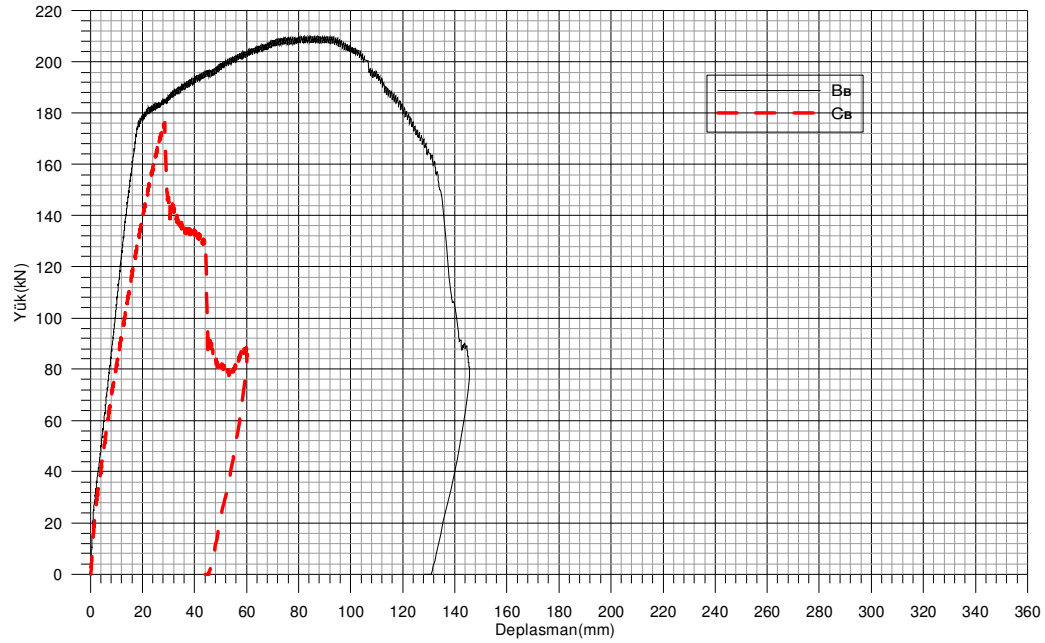


Şekil 6.10. C_N kirişi ile B_N kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.6. C_B Kirişi ile B_B Kirişinin Kıyaslanması

B_B kirişinin göçme şekli eğilme karakterinde olmuş ve sünek bir davranış göstermiştir. C_B kirişi ise gevrek bir davranış göstermiş ve göçme şekli kesme karakterinde olmuştur. C_B kirişinde eğilmeden dolayı kirişe fazla bir zarar gelmemiştir. C_B kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri Şekil 6.12'de gösterildiği gibidir. Grafikler incelendiğinde göçmenin olduğu mesnet bölgesinde (4 ve 5 nolu LVDT'nin bulunduğu bölge) büyük deformasyonlar oluşmuştur. 11 nolu LVDT'de meydana gelen mekanik arızadan dolayı bu LVDT'den kullanılabilir ölçüler alınamamıştır.

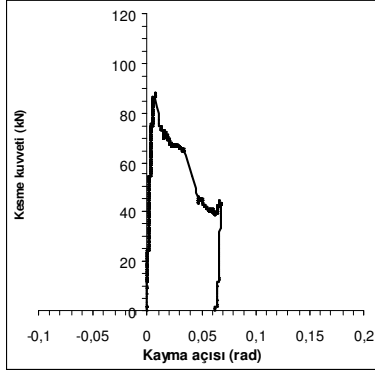
Şekil 6.11’de C_B kirişi ile B_B kirişine ait yük-deplasman grafiği aynı koordinat düzleminde gösterilmiştir. C_B kirişinin B_B kirişine olan dayanım oranı 0,84 (Çizelge 6.3) çıkmıştır. B_B kirişinde akmadan sonra donatıda pekleşmenin olması nedeniyle kiriş dayanımı artış göstermiş ve C_B kirişine göre daha büyük bir taşıma gücüne ulaşmıştır. C_B kirişinin B_B kirişine olan eğilme rijitliği oranı ise 0,71 değerini almıştır.



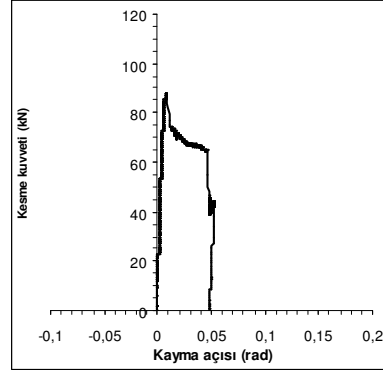
Şekil 6.11. C_B kirişi ile B_B kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.7. C_s Kirişi ile T_s Kirişinin Kıyaslanması

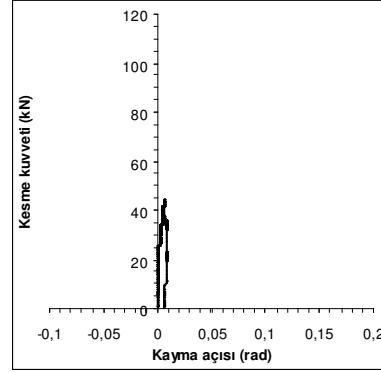
Yukarıda daha önce belirttiğimiz gibi T_s kirişi ile C_s kirişinin her ikisinin de göçme şekli eğilme karakterinde olmuştur. Şekil 6.13’de her iki kirişe ait yük-deplasman grafiği aynı koordinat düzleminde gösterilmiştir. Kirişler sünek davranış göstermiştir. Her iki kirişin deneyinde de yük hücresinin genlik kapasitesi bittiğinden ve yeterince sünek davranış elde edildiği düşünüldüğünden deneye devam edilmemiştir. Dolayısıyla deneylere devam edilmiş olması durumunda grafiklerdeki



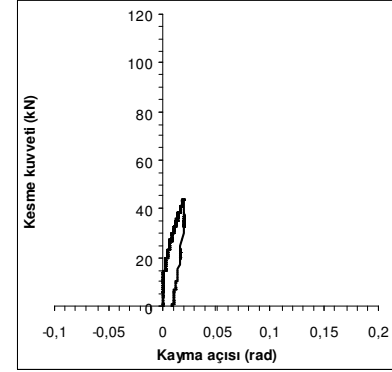
4 nolu LVDT



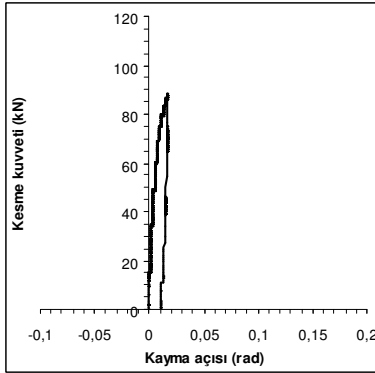
5 nolu LVDT



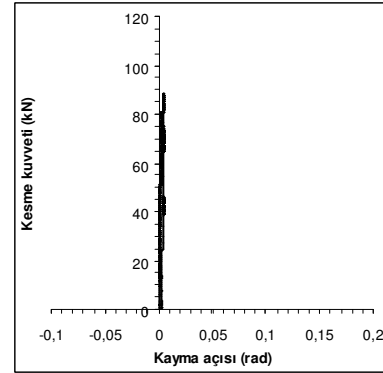
6 nolu LVDT



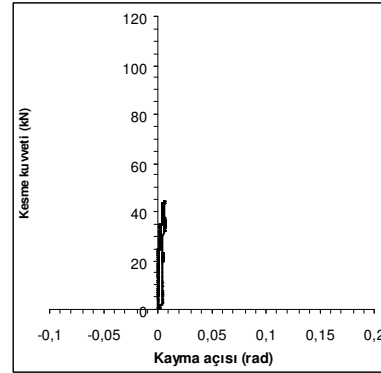
7 nolu LVDT



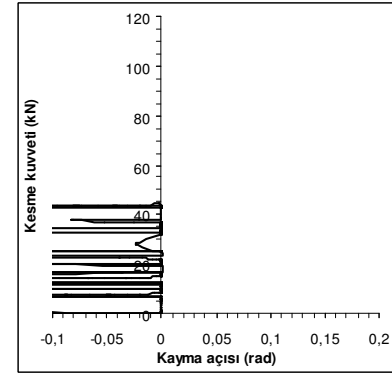
8 nolu LVDT



9 nolu LVDT



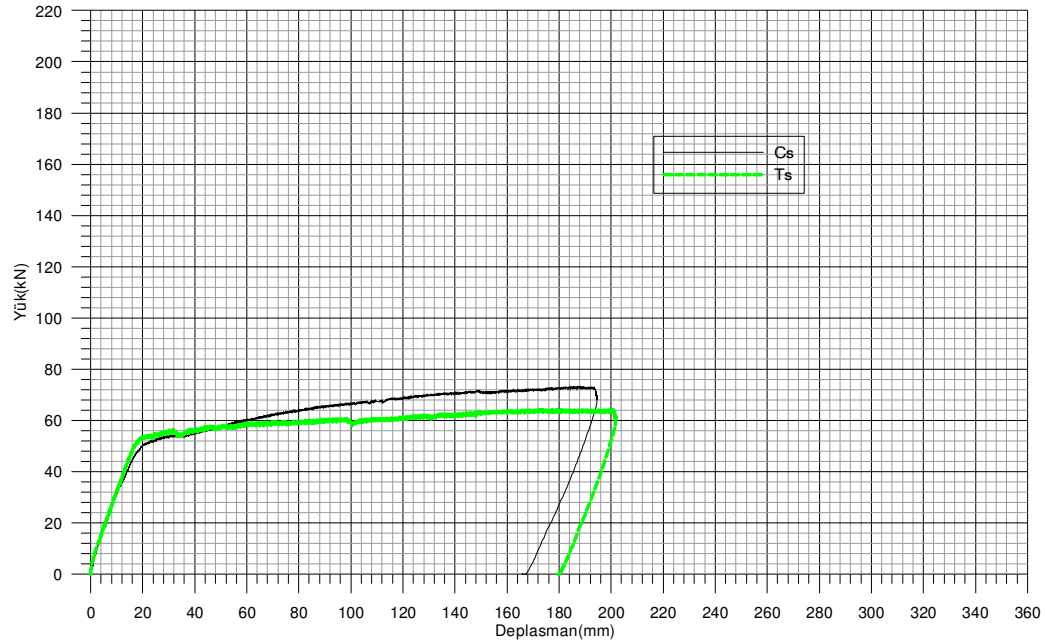
10 nolu LVDT



11 nolu LVDT

Şekil 6.12. C_B kirişine ait kesme kuvveti-kayma açısı grafikleri

eğrilerin daha ne kadar yatay bir şekilde devam edeceği bilinmediğinden bu yük-deplasman grafiklerine göre bir kiriş diğerine göre daha sünektir şeklinde bir yorum yapılmamıştır. Cs kirişinin Ts kirişine olan dayanım oranı 1,14 (Çizelge 6.3), eğilme rijitliği oranı ise 0,95 (Çizelge 6.4) olarak bulunmuştur. Cs kirişinde Ts kirişinden farklı olarak 35-40 mm deplasman değerini aştıktan sonra taşıdığı yük miktarında artış olmaya başlamıştır. Bunun sebebi tam olarak anlaşılamamakla birlikte donatıdaki pekleşme yüzünden olmuş olabileceği düşünülmüştür. Süneklikleri hemen hemen aynı ve eğilme rijitlikleri arasında da çok az bir fark olduğu için taşıma gücünü dikkate aldığımızda bu donatı düzeninde Cs kirişinin Ts kirişinden biraz daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

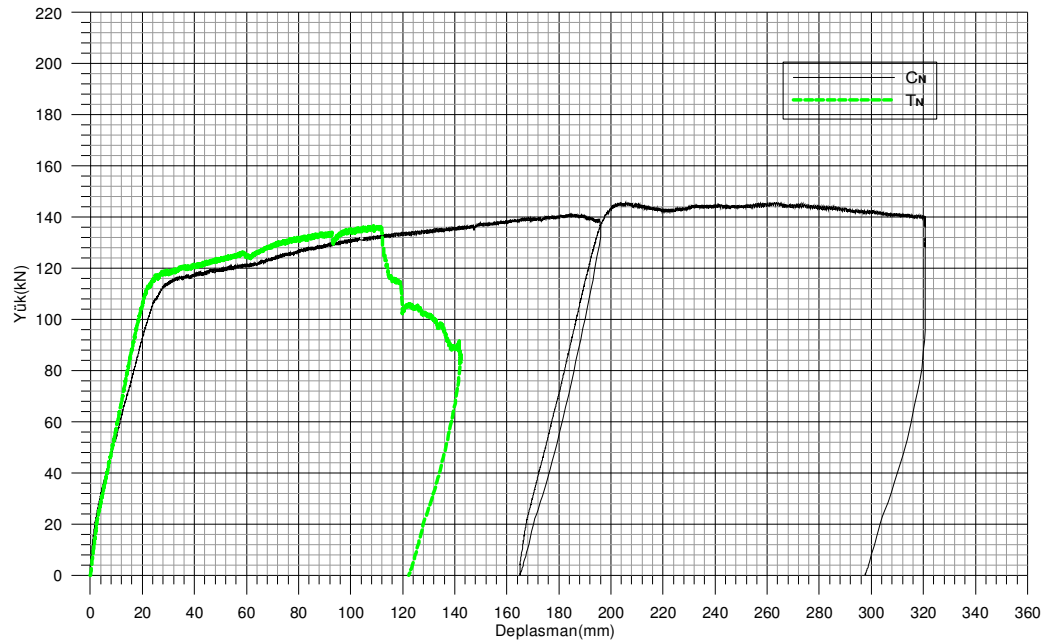


Şekil 6.13. Cs kirişi ile Ts kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.8. CN Kirişi ile TN Kirişinin Kıyaslanması

Şekil 6.14'de CN kirişi ile TN kirişine ait yük-deplasman grafiği aynı eksen takımında gösterilmiştir. CN kirişinin TN kirişine olan süneklik oranı 2,81 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 6.2). CN kirişi TN kirişine göre çok daha fazla sünek davranış göstermiştir. CN kirişi oldukça sünek bir davranış gösterirken, TN kirişi ise minimum sınır değere

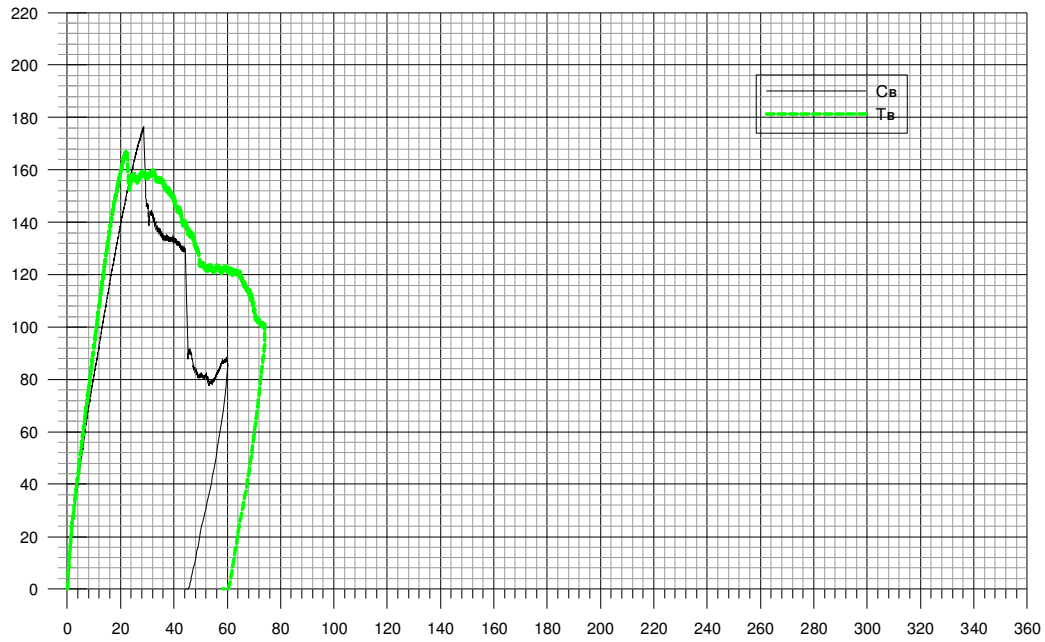
yakın süneklik göstermiştir. C_N kirişinin T_N kirişine olan dayanım oranı 1,07 çıkmıştır (Çizelge 6.3). Taşıma gücü olarak da C_N kirişi T_N kirişinden %7 gibi az bir farkla daha fazla bir değere ulaşmıştır. C_N kirişinin T_N kirişine olan eğilme rijitliği oranı ise 0,77 (Çizelge 6.4) olarak bulunmuştur. Eğilme rijitliği bakımından ise T_N kirişi C_N kirişinden daha iyi sonuç vermiştir. T_N kirişinin erken göçmesinin nedenleri arasında daha önce de belirttiğimiz gibi T_N kirişinin mesnet kısmında işçilik hatasından kaynaklanan aderans yetersizliği de gösterilebilir. Bunun dışında üçgen boşluklu kirişlerde gelen kesme kuvvetleri kiriş üst başlığından kiriş alt başlığına eğik dikmelerle (diyagonal elemanlarla) aktarılmaktadır. Bu aşamada bu elemanlar çekmeye maruz kaldıklarında aderansları daire boşluklu kirişe göre yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca üçgen boşluklu kirişler bir noktaya basınç kuvveti aktarırken daire boşluklu kirişlere göre daha dar bir alana etki etmektedirler. Bu yüzden üçgen boşluklu kirişlerde daire boşluklu kirişlere göre özellikle kesme bölgesinde zorlamaların daha fazla olduğu görülmüştür. Sonuç olarak üçgen kirişin işçiliğini daha zor ve yukarıda anlattığımız şekilde kesme bölgelerinde zorlamaların daire boşluklu kirişe göre daha fazla olması nedeniyle daire boşluklu kiriş üçgen boşluklu kirişe tercih edilmelidir.



Şekil 6.14. C_N kirişi ile T_N kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

6.9. C_B Kirişi ile T_B Kirişinin Kıyaslanması

Her iki kiriş de akma yüküne ulaşmadan gevrek bir şekilde kırılmış, kiriş göçme şekilleri kesme karakterinde olmuştur. İki kirişinde kırılma mekanizmaları benzer şekillerde olmuş, mesnet kısımlarındaki boşluk çevrelerinde mafsallar oluşmuş, mekanizma oluşması ile ani kırılmalarla göçme gerçekleşmiştir. Şekil 6.15’de T_B kirişi ile C_B kirişine ait yük-deplasman grafiği aynı eksen takımında gösterilmiştir. C_B kirişinin T_B kirişine olan dayanım oranı 1,05’dir (Çizelge 6.3). İkisinin de taşıma gücü hemen hemen aynı çıkmıştır. Eğilme rijitliği oranı ise 0,80 (Çizelge 6.4) olarak hesaplanmıştır. T_B kirişinin eğilme rijitliği C_B kirişinin eğilme rijitliğinden biraz fazla bir değer almıştır. Her iki kiriş de oldukça gevrek bir davranış göstermiş ve oldukça kötü sonuçlar vermişlerdir. Bu donatı düzeninde bu kirişler başarılı olmamışlardır.



Şekil 6.15. C_B kirişi ile T_B kirişinin yük-deplasman grafiğinde kıyası

Çizelge 6.1’e bakıldığında az donatılı, olağan donatılı ve çok donatılı kirişlerde üçgen boşluklu kirişlerin eğilme rijitliklerinin daire boşluklu kirişlere göre daha

büyük değer aldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak da üçgen boşluklu kirişlerin diyagonal dikme elemanları ile kafes sisteme daha yakın bir davranış göstermesidir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Üzerinde düzenli dairesel veya üçgensel boşluklar bulunan kirişler ve bunlara referans olarak tasarlanan yalın kirişler test edilmiştir. Kirişteki boşluk tipi sadece değişken olarak seçilmemiş aynı zamanda kirişlerin çekme bölgesindeki donatı oranları da az, normal (olağan) ve çok olarak düzenlenmek üzere, donatı oranı da değişken olarak düşünülmüştür.

Gerilme yığılmasının zayıf bir bölgede yoğunlaşmasını engellemek amacıyla oluşturulan çok sayıdaki boşluklar, amacına uygun yönde kiriş davranışına etkide bulunmuştur. Boşluklu kirişlerde göçmeler ya maksimum moment değerinin olduğu bölgede yada maksimum kesme kuvvetinin geldiği bölgede meydana gelmiştir.

Az donatılı Cs ve Ts kirişleri oldukça sünek davranış göstermişler ve iyi sonuçlar vermişlerdir. Her iki kiriş de bu donatı oranı ve düzeninde kullanılabilirler. Yalnız Ts kirişinin işçiliği daha zor olduğu için ve Cs dayanım bakımından biraz daha iyi performans gösterdiği için Cs kirişi tercih edilmektedir. Dayanım bakımından Cs kirişi referans kirişinden %5, Ts kirişi ise referans kirişinden %15 daha küçük değere sahiptir. Bu yüzden bu kirişler için taşıma gücü bulunurken betonarmede bilinen klasik yöntemle hesaplanan değer Cs kirişi için %5, Ts kirişi için ise %15 küçültülmesi önerilmektedir. Eğilme rijitliği yönünden ise Cs kirişi referans kirişinden %15, Ts kirişi ise referans kirişinden %10 daha az bir değere sahip olmuştur. Bu yüzden seğim hesaplarında, eğilme rijitliğinin Cs kirişi için %15, Ts kirişi için ise %10 daha düşük bir değer alınması önerilmektedir.

T tipi kirişlerde üçgen boşluğu oluşturmak için kullanılan kalıp parçaları maalesef projedeki üçgen geometrisinden biraz uzak olmaktadır. C tipi kirişlerde ise dairesel boşluklar gerçeğe daha yakın bir biçimde oluşturulabilmektedir. Bundan başka, Üçgen boşluklu kirişin işçiliği daire boşluklu kirişe göre daha zor olduğundan işçilik hatalarının olma olasılığı daire boşluklu kirişe göre daha fazladır. Bu yüzden daha çok itina gerektirmektedir dolayısıyla da üçgen kirişin yapımı daha uzun sürmekte ve

maliyeti de artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ve C_s kirişi T_s kirişine yakın olmakla beraber biraz daha iyi davranış gösterdiğinden ötürü C_s kirişinin kullanılması önerilmektedir.

Donatı oranı olağan olan T_N (üçgen boşluklu) kirişi asgari ölçüde sünek davranış göstermiştir. C_N kirişi ise oldukça sünek davranış göstermiş ve T_N kirişine göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla C_N kirişi tercih edilmelidir. C_N kirişinin dayanımı referans kirişinin dayanımı ile aynı değeri almıştır. Bu yüzden bu donatı oranında C_N kirişinin taşıma gücü betonarmede bilinen klasik yöntemlerle hesaplanabilir. Eğilme rijitliği bakımından ise C_N kirişi, referans kirişi olan B_N kirişinin eğilme rijitliğinden %30 kadar daha az bir eğilme rijitliği değerine sahiptir. Bu %30'luk fark sistem davranışını aşırı ölçüde etkileyen bir fark değildir. Ancak bu kirişi yaparken lineer yöntemlerle yapılan seğim hesaplarında, eğilme rijitliğinin %30 daha düşük bir değer alınması önerilmektedir. Ayrıca atalet momenti değerini hesaplarken de dolu gibi hesaplanan kesitin %70'inin alınması önerilmektedir.

Donatı oranı çok olan C_B ile T_B boşluklu kirişleri akma yüküne dahi ulaşmadan gevrek bir şekilde göçmüşlerdir. Her iki kiriş de dayanım ve süneklik açısından çok kötü sonuçlar vermiş ve başarısız olmuşlardır. Bu donatı oranında ve bu donatı detayında C_B ve T_B kirişi yapılması önerilmemektedir.

Üçgen ve Daire boşluklu kirişler için kullanılabilir nominal donatı oranı* (ρ_n) sınırı 0.0069'dur. Bu değere eşit veya daha küçük nominal donatı oranları için daire boşluklu kirişler bu donatı detayında kullanılabilir ve taşıma güçleri betonarmedeki bilinen klasik hesaplarla yapılabilir. Üçgen boşluklu kirişlerde ise bu oranda donatı kullanıldığında asgari ölçüde başarı sağlanabilmektedir. Bu yüzden üçgen boşluklu kirişlerin bu orandan daha düşük donatı oranıyla tasarlanması önerilmektedir.

* Nominal donatı oranı (ρ_n): Kiriş alt başlığındaki çekme donatısı alanının dolu gövdenin brüt kesit alanına (en x boy) oranı.

Boşluklu kiriş yapılırken kesme bölgesinde kolon uçlarındaki aderans yetersizliğinden kaynaklanan erken mafsallaşmaları önlemek için işçiliğe bu bölgelerde özellikle dikkat edilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Mansur, M.A., "Effect of openings on the behavior and strength of R/C beams in shear", *Cement and Concrete Composites*, 20(6): 477-486 (1998).
2. Yang, K.H., Eun, H.C., Chung, H.S., "The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams", *Engineering Structures*, 28(13): 1825-1834 (2006).
3. Tan, K.H., Mansur, M.A., Wei, W., "Design of reinforced concrete beams with circular openings", *Structural Journal*, 98(3): 407-415 (2001).
4. Ashour, A.F., Rishi, G., "Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings", *Structural Journal*, 97(3): 418-426 (2000).
5. Tan, K.H., Mansur, M.A., Huang, L.M., "Reinforced concrete T-beams with large Web openings in positive and negative moment regions", *Structural Journal*, 93(3): 277-289 (1996).
6. Mansur, M.A., Lee, Y.F., Tan, K.H., Lee, S.L., "Tests on R/C continuous beams with openings", *Journal of Structural Engineering*, 117(6): 1593-1606 (1991).
7. Mansur, M.A., Paramasivam, P., "Reinforced Concrete Beams with Small Opening in Bending and Torsion", *American Concrete Institute Journal*, 81(2): 180-185 (1984).
8. Mansur, M.A., "Combined Bending and Torsion in reinforced Concrete Beams With Rectangular Openings", *Concrete International*, 5(11): 51-58 (1983).
9. Mansur, M.A., Lee, Y.F., Tan, K.H., Wei, W., "Effects of Creating an Opening in Existing Beams", *ACI Structural Journal*, 96(6): 899-905 (1999).
10. Mansur, M.A., Tan, K.H., Lee, S.L., "Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Openings", *American Concrete Institute Journal*, 82(4): 517-524 (1985).
11. Mansur, M.A., Huang, L.M., Tan, K.H., Lee, S.L., "Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings", *ACI Structural Journal*, 89(4): 391-397 (1992).
12. Mansur, M.A., "Design of Reinforced Concrete Beams with Small Openings under Combined Loading", *ACI Structural Journal*, 96(5): 675-683 (1999).

13. Eun, H.C., Lee, Y.H., Chung, H.S., Yang, K.H., “On the shear strength of reinforced concrete deep beam with web opening”, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 15(4): 445-466 (2006).
14. Mansur, M.A., Tan, K.H., Lee, S.L., “Collapse Loads of R/C Beams with Large Openings”, *Journal of Structural Engineering*, 110(11): 2602-2618 (1984).
15. Mansur, M.A., Ting, S.K., Lee, S.L., “Torsion Tests of R/C Beams with Large Openings”, *Journal of Structural Engineering*, 109(8): 1780-1791 (1983).
16. Redwood, R.G., Poubouras, G., “Analysis of Composite Beams with Web Openings”, *Journal of Structural Engineering*, 110(9): 1949-1958 (1984).
17. Todd, D.M., Cooper, P.B., “Strength of Composite Beams with Web Openings”, *Journal of the Structural Division*, 106(2): 431-444 (1980).

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : YILMAZ, Mahmut Cem
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 27.03.1980 Adana
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 351 16 20
e-mail : mcemyilmaz@yahoo.com

Eğitim**Derece**

Lisans

Lise

Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi/
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Samanyolu Lisesi

Mezuniyet Tarihi

2004

1999

İş Deneyimi**Yıl**

2005-2008

Yer

Gazi Üniversitesi

Görev

Arş. Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Spor