Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 22(3), 160-170, 2016

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Burkulması engellenmiş çelik çaprazlar

Buckling restrained braces

Ramazan ÖZÇELİK[1]*

[1]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.
rozcelik@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.03.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 25.05.2015 doi: 10.5505/pajes.2015.92668
* Yazışılan yazar/Corresponding author Derleme Makalesi/Review Article

Öz

Burkulması engellenmiş çelik çaprazların (BEÇÇ'lerin) eksenel basınç ve çekme kapasiteleri eşit olmasının yanında BEÇÇ'ler yüksek enerji sönümleme özelliğine de sahiptirler. Bu bakımdan deprem bölgelerinde kullanılmaları giderek artmaktadır. BEÇÇ'lerin geliştirilmesine ait çalışmalar ilk olarak 1970'li yıllarda Japonya'da başlamıştır ve daha sonra özellikle deprem bölgesi üzerindeki ülkelerde devam etmiştir. BEÇÇ'lerin eleman ve çerçeve benzeri sistem bazındaki performanslarının oldukça kararlı olmasına karşın, çerçeve sistemi içerisindeki davranışlarında kiriş, kolon, bayrak levhası ve BEÇÇ arasında meydana gelen etkileşimden dolayı istenmeyen sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, BEÇÇ'lerin ilk olarak eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında ve daha sonra çerçeve içerisinde yapılan deneysel çalışmaları özetlemektedir.

Anahtar kelimeler: Burkulması engellenmiş çelik çapraz, Enerji sönümleyici, Çelik yapılar, Bağlantı detayı, Deneysel çalışma

Abstract

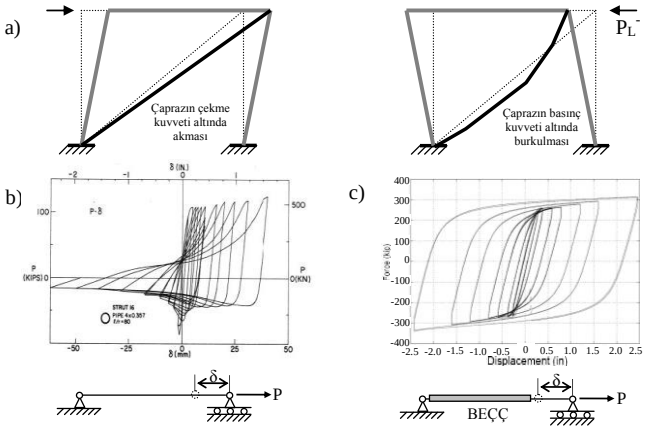
Buckling restrained braces (BRBs) have high energy dissipation capacity and equal tension and compression axial load capacity. Therefore, the application of BRBs has gained popularity in seismic regions. The first studies on BRBs started in Japan in 1970 and since then more studies have been undertaken in other earthquake prone countries. Although the BRBs perform well in component and subassembly tests, they do not perform as well in frame tests because of the interaction between beam-column-gusset plate and BRB. In this study, the component and subassembly test of the BRBs and then BRB frame tests available in the literature are summarized.

Keywords: Buckling restrained brace, Energy dissipater, Steel structures, Connection detail, Experimental study

1 Giriş

Çelik çaprazlar yapılara etkiyen rüzgar ve deprem kuvvetlerine karşı kullanılan yatay yük taşıyıcı elemanlardır. Bu çaprazların dizayn edilmesi esnasında karşılaşılan en büyük sıkıntılardan birisi, kullanılan çelik çaprazların yüksek deformasyon istemleri esnasında çekme ve basınç kapasitelerinin eşit olmamasıdır. Yapılarda kullanılan çelik çaprazlar genel olarak çekme deformasyonu etkisi altında plastikleşmekle (çeliğin akması) beraber, basınç deformasyonu esnasında burkulmaktadır. Çaprazların burkulmasından sonra eksenel yük taşıma kapasitelerinde büyük azalma meydana gelmektedir. Şekil 1a'da görüldüğü gibi çelik çaprazlı çerçeveye yatay kuvvet (PL) uygulandığı zaman, çelik çapraz, uygulanan yatay deplasmana bağlı olarak eksenel çekme ve basınç yüklerine maruz kalmaktadır. Bu çaprazın eksenel çekme deformasyonu etkisiyle plastikleştiği, eksenel basınç etkisi altında ise burkulduğu görülmektedir. Şekil 1b, tekil eleman bazında tekrarlanan eksenel deformasyonlar (δ) altında yapılan çelik çapraz deneyinden elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. Bu şekilde de açıkça görüldüğü gibi, çelik çapraz eksenel çekme deformasyonu altında plastikleşmekte; ancak eksenel basınç deformasyonu altında burkulmakta ve çaprazın eksenel basınç kapasitesi büyük oranda azalmaktadır. Çelik çaprazların burkulmasının önlenmesi ile birlikte eksenel basınç kapasitesinin değişeceği gerçeği araştırmacıları bu konu üzerine yönlendirmiştir. Çelik çaprazın burkulmasının önlenmesi ile birlikte tekrarlanan eksenel deformasyon etkisi altındaki davranışı Şekil 1c'de görülmektedir.

Bu şekilde de görüldüğü gibi Burkulması engellenmiş çelik çaprazların (BEÇÇ) eksenel çekme ve basınç deformasyonları altındaki davranışları hemen hemen eşit olmasının yanında enerji sönümleme kapasiteleri de diğer çelik çaprazlara göre oldukça stabil ve yüksektir.



Şekil 1: a): Çelik çaprazlı çerçeve, b): Çelik çaprazın histeretik davranışı ([1]'den adapte edilmiştir), c): BEÇÇ'nin histeretik davranışı ([2]'den adapte edilmiştir).

BEÇÇ'ler genel olarak Şekil 2'de görüldüğü gibi beş kısma ayrılmaktadır.

a) Burkulması engellenmiş plastik kısım: Bu kısım BEÇÇ'de eksenel yükün taşındığı çekirdek elamandır (ÇE). Eksenel basınç ve çekme deformasyonları esnasında plastikleşmesi beklenmektedir. Basınç durumunda yüksek burkulma modunda burkularak da eksenel yük taşıyabilmektedir. Bu kısım malzeme olarak sünek ve akma gerilmesi değeri fazla değişim göstermeyen çelikten olmalıdır.

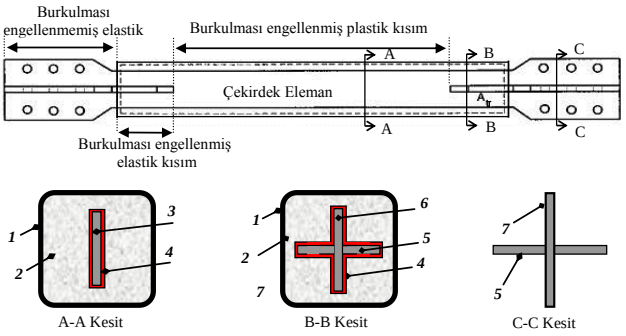
b) Burkulması engellenmemiş elastik kısım: Bu kısım çaprazın çerçeve elemanına (bayrak levhası) bağlantısını sağlayacak şekilde tasarlanır. ÇE'nin eksenel çekme ve basınç deformasyonları altında plastikleşmesi ve pekleşmesi sırasında elastik davranış göstermektedir. Bu kısım, çelik çaprazın bayrak levhasına bağlanma özelliğine göre bulonlu, mafsallı veya kaynaklı birleşimleri sağlayacak şekilde farklı tiplerde olabilir. Şantiye ortamında çaprazın çerçeveye montajını kolaylaştıracak şekilde tasarlanır. Bu kısmın enkesit alanı ve eğilme rijitliği, ÇE'nin bu bölgede enkesit alanının arttırılması veya ÇE'ye dik ek plaka eklenmesiyle daha büyüktür.

c) Burkulması engellenmiş elastik kısım: Bu kısım, çerçeveye bağlantı yapan "b"deki kısım ile plastikleşmenin olduğu ÇE arasında bir geciş bölgesidir. Genelde ÇE'nin enkesit alanın arttırılması veya ÇE'ye dik yönde ek plaka kaynatılarak elde edilir.

d) Burkulmayı engelleyen kısım (mekanizma): Bu kısım ÇE'nin burkulmasını engelleyen kısımdır. Burkulmayı engelleyen mekanizma (BEM) için birçok araştırmacı tarafından farklı teknikler kullanılmıştır. Şekil 2 gösterilen sürtünmesiz BEÇÇ'lere bir örnek olup, BEM: çelik kutu profil ve bu profilin içine beton veya beton harcı doldurularak oluşturulmuştur. BEM ÇE'nin eksenel deformasyonları esnasında, ÇE'ye yeterli stabilite sağlamalıdır. BEM ve ÇE arasında sürtünmenin engellenmesi gerekmektedir. Bu kısım için kullanılan farklı kesit özellikleri ve dizayn parametereleri ileriki kısımlarda verilecektir.

e) Genişlemeyi sağlayan boşluk ve izolasyon malzemesi: Bu kısım için ÇE'nin yüzeyi ince bir malzeme ile kaplanabilceği gibi BEÇÇ'lerin yapımı aşamasında BEM ile ÇE'nin arasında belli bir mesafede boşluk bırakılarak da oluşturulabilir. Bu kısım ile ilgili olarak ince lastik, polietilen, silikon gres, bant şerit vb. gibi farklı malzemeler denenmiştir. Hangi malzeme kullanılırsa kullanılsın, burada önemli olan BEM ile ÇE arasında sürtünmeden kaynaklanan kuvvet aktarımının engellenmesidir. Bu kuvvetin kısmen dahi olsa engellenmemesi durumunda BEÇÇ'lerin basınç kapasitesi çekme kapasitesinden büyük olacaktır. ÇE ve BEM arasında, ÇE'nin yüksek modda burkulmasına izin verilecek kadar mesafe bırakılabilir. Ancak bu boşluğun fazla olması durumunda ise lokal burkulmalar ve buna bağlı olarak ÇE'nin yorulma ömrü kısalması ve sürtünmeden kaynaklanan ek eksenel basınç kapasite artımı meydana gelebilir. Basınç deformasyonu altında poizon etkisi ile ÇE'de meydana gelecek hacimsel değişim dikkate alınmalıdır ve ÇE'nin elastik durumu için 0.3, plastikleşme durumu için 0.5 alınabilir [5].

BEÇÇ'lerin geliştirilmesi ve uygulama alanları günümüz mühendisleri tarafından geniş şekilde araştırılmaktadır. BEÇÇ'ler ile ilgili çalışmalar ilk olarak eleman bazında (sadece eksenel deformasyonlar uygulanarak) ve çerçeve benzeri sistem bazında (hem eksenel deformasyon hem de uç dönmeler uygulanarak) yapılan deneylerle başlamıştır. Bu çalışmaları BEÇÇ'lerin çerçeve sistemi içerisinde yapılan deneyler izlemiştir. Bu makale BEÇÇ'lerin geliştirilmesine yönelik eleman bazında, çerçeve benzeri sistem bazında ve çerçeve sistemi içerisinde yapılan bazı test sonuçlarını özetlemektedir.

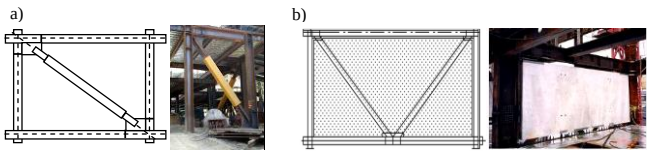


1=çelik kutu profil, 2=beton (1 ve 2 burkulmayı önleyen mekanizma), 3=çekirdek eleman (plastik), 4= genişlemeyi sağlayan malzeme veya izolasyon malzemesi, 5=ek plaka, 6 ve 7=en kesiti arttırılmış çekirdek eleman (elastik)

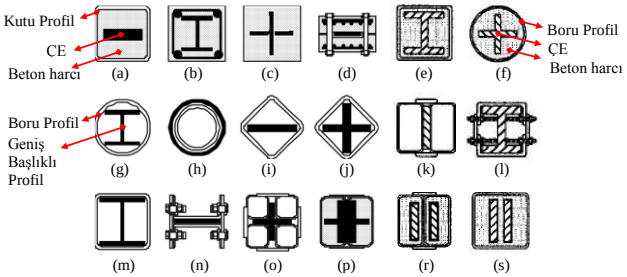
Şekil 2: BEÇÇ boyutları ve en kesitleri ([3] ve [4]'den adapte edilmiştir).

2 BEÇÇ'lerin geliştirilmesi ve çeşitleri

BEÇÇ'lerin geliştirilmesi ile ilgili ilk çalışmalar 1970'li yıllarda Japonya'da başlamıştır [5]-[7], diğer çalışmalar ise Tayvan [8] ve ABD'de yapılan kapsamlı araştırmalarla devam etmiştir. BEÇÇ'ler genel olarak iki kısma ayrılmaktadır (Şekil 3). İlk kısımdaki BEÇÇ'ler: genel olarak ÇE'nin BEM (Çelik kutu veya boru profil ve uygun şekilde hazırlanmış betonarme plakalar) ile arasında sürtünmeyi engelleyici malzeme ve hava boşluğu kullanılarak oluşturulmaktadır (Şekil 3a). Diğer BEÇÇ tipi ise: ÇE'nin prekast beton paneller arasına yerleştirilmesi ile elde edilmektedir (Şekil 3b). Bu çalışmada ilk kısımdaki BEÇÇ'ler incelenecektir.



Şekil 3: a): BEÇÇ [9], b): Prekast BEÇÇ [7] için çizim ve fotoğraf.



Şekil 4: BEÇÇ'lerin enkesit gösterimleri ([6]'dan ve [8]'den adapte edilmiştir).

Şekil 4 araştırmacılar tarafından incelenmiş bazı BEÇÇ'lerin enkesitlerini göstermektedir. Şekil 4a ve f'de görülen BEÇÇ tipinde: ilk olarak ÇE'nin yüzeyi sürtünmeyi engelleyici malzemeler ile kaplanır ve daha sonra kutu veya boru profil içerisine yerleştirilir ve beton harcı profilin içine dökülür. Burada ÇE Şekil 4a'da görüldüğü gibi dikdörtgen kesitli bir eleman olabileceği gibi bu kesit "+" şeklinde de olabilir. Şekil 4p'de gösterildiği gibi ÇE yatık "T" şeklinde iki ayrı BEÇÇ'nin birleştirilmesiyle oluşturulabilir ve bu tip BEÇÇ'ler bayrak levhasına bağlantılarının daha kolay olmasından dolayı da tercih edilmektedir. BEM tamamen çelik yapı elemanları

kullanılarak da elde edilebilir (Şekil 4k, l, n ve o). Bunların yanında, kutu veya boru profil içerisine (beton harcı koymadan) ÇE olarak, geniş başlıklı profil, kutu veya boru profil yerleştirilerek de BEÇÇ elde edilebilir (Şekil 4g, h, i, j, m). Bu enkesitlere ek olarak, tasarımcı mühendis tarafından da BEÇÇ tasarlanabilir. Burada önemli olan enkesit koşulları değil, elde edilen BEÇÇ'lerin belirli standartlarda göstermiş olduğu histeretik davranıştır. Bu konu hakkında gelecek bölümlerde ayrıntılı bilgi verilecektir.

2.1 BEÇÇ'lerin eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında davranışı

Kare ve dikdörtgen kutu profil içerisine beton doldurulmasıyla (Profil-beton) oluşan BEM'e sahip BEÇÇ'lerin global burkulmasını önlemek için Watanaba ve diğ. (1988) beş adet test yapmışlardır ve Denklem 1'i önermişlerdir [10].

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 \tag{1}$$

$$P_e = \frac{\pi^2 \times E \times I_{sc}}{(I_{sc})^2} \tag{2}$$

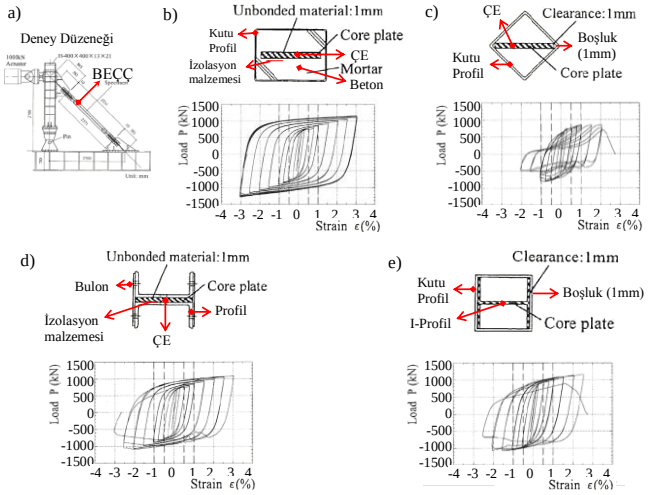
$$P_y = \sigma_y \times A_c \tag{3}$$

Burada P_e BEM'in (Kutu profil) Euler yük kapasitesi (Denklem 2), P_y ise ÇE'nin akma kapasitesidir (Denklem 3). Bu denklemlerde: E çeliğin elastisite modülü, I_{sc} BEM'nin atalet momenti, I_{sc} çapraz uzunluğu, σ_y ÇE'nin akma gerilmesi, A_c ÇE'nin plastik bölgedeki enkesit alanıdır. Bu test elemanlarının kesit özellikleri Şekil 4a'dakine benzemekle beraber farklı P_e/P_y oranlarına sahiptirler (Tablo 1). Tablo 1'de görüldüğü gibi bu oran test elemanları 4 ve 5 için birden küçüktür. Bunun sonucu olarak bu iki test elemanında deney esnasında global burkulma meydana gelmesine rağmen diğer ilk üç elemanda basınç ve çekme deformasyonları altında kararlı ve simetrik histeretik davranış elde edilmiştir. Watanaba ve diğ. (1988) deney çalışmalarına ek olarak yapmış oldukları analitik çalışmalarda P_e/P_y oranının birden büyük olmasına rağmen ÇE'deki geometrik kusur gibi etkilerden dolayı bu değerin yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Watanaba ve diğ. (1988) pratik olarak P_e/P_y oranının 1.5'ten büyük olmasını önermişlerdir [10].

Tablo 1: P_e/P_y oranları ([10]'dan alınmıştır).

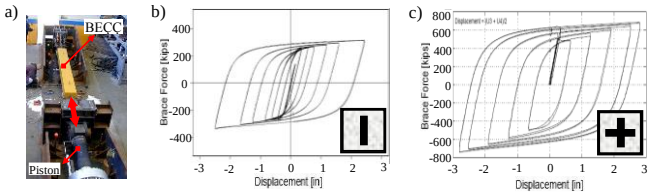
Örnek No	P_e/P_y
1	3.53
2	1.39
3	1.03
4	0.72
5	0.55

Iwata ve diğ. (2000) ticari olarak Japonya'da bulunan dört farklı tipteki BEÇÇ'leri Şekil 5a'daki deney düzeneğinde test etmişlerdir [11]. Burada test edilen BEÇÇ'lerin enkesitleri ve histeretik davranışları Şekil 5'te gösterilmektedir. Burada test edilen BEÇÇ'lerin ÇE kesit alanları eşittir ve akma gerilmesi 263 MPa'dır (SN400 çelik sınıfı). Şekil 5b'deki BEÇÇ'de, ÇE ile beton harcı arasında 1 mm kalınlığında yumuşak lastik şeritler bulunmaktadır. Şekil 5c ve e'de görülüğü gibi ÇE (dikdörtgen şeklinde plaka ve geniş başlıklı profil) ile BEM arasında sürtünmeyi önleyici madde yerine hava boşluğu bulunmaktadır. Şekil 5b'deki BEÇÇ daha önce [10] tarafından test edilen BEÇÇ ile aynı kesit özelliğine sahiptir. Şekil 5d'de test edilen BEÇÇ'de, ÇE iki "U" profil içerisine 1 mm'lik yumuşak plastik şeritler kullanılarak yerleştirilmiştir. U profiller iki plaka yardımıyla yüksek mukavemetli bulonlarla birleştirilerek ÇE'nin burkulması önlenmiştir. Şekil 5b'de görüldüğü gibi test elemanı kararlı histeretik davranışa sahiptir. Bu test elemanı ÇE'nin her iki uçunda lokal burkulmadan dolayı kapasitesine ulaşmıştır. Şekil 5c ve e'deki test elemanları lokal burkulmalardan dolayı diğerlerine göre performasyonları daha düşüktür. Şekil 5d'de verilen test elemanı yüksek mukavemetli bulonların kopması ile kapasiteye ulaşılmıştır [11].



Şekil 5: [11] tarafından test edilen BEÇÇ'lerin deney düzeneği, kesit görünüşleri ve histeretik (Eksenel yük-birim uzama) davranışları ([11]'den adapte edilmiştir).

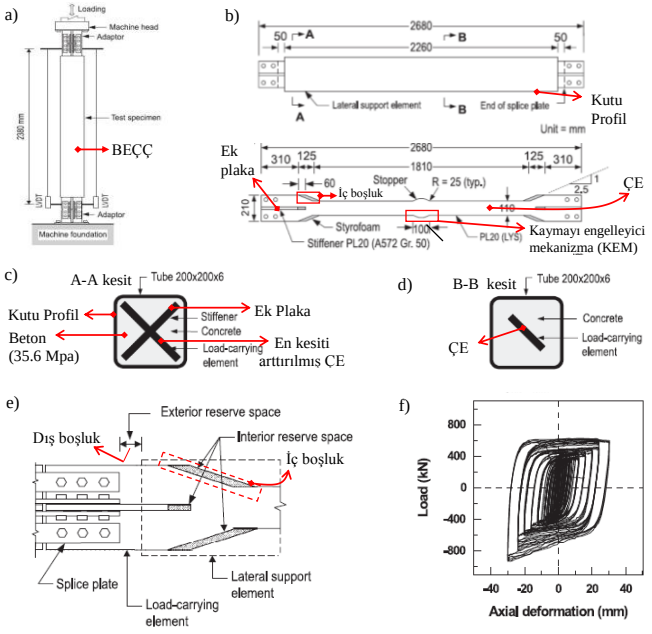
Amerika Birleşik Devletleri'nde BEÇÇ deneyleri ilk olarak 1999 yılında Kaliforniya Üniversitesinde (Berkeley) Clark ve diğ. (1999) tarafından yapılmıştır [12]. Bu çalışmada profil-beton birleşiminden oluşan BEM'e sahip üç adet BEÇÇ test edilmiştir. Bu BEÇÇ'ler dikdörtgen ve "+" şeklinde ÇE'lere sahiptirler. ÇE'lerin akma gerilmesi 419 MPa'dır. Bu çalışmanın devamı olarak "+" şeklinde 285 MPa akma gerilmesine sahip ÇE'den oluşan iki adet test Black ve diğ. (2002) tarafından yapılmıştır [2]. [2]'de yapılan çalışmada ayrıca BEÇÇ'lerin stabilite alanizleri geniş olarak ele alınmıştır. Kaliforniya Üniversitesinde yapılan deneyler Şekil 6a'daki deney düzeneğinde görüldüğü gibi zemine paralel olarak yapılmıştır ve iki test elemanın histeretik davranışı Şekil 6b ve c'de gösterilmiştir. Ayrıca bu şekil üzerinde BEÇÇ'lerin orta açıklıktaki kesit görünümleri de verilmiştir. BEÇÇ'lerin birim uzamaları yaklaşık olarak %2 civarındadır.



Şekil 6: a): Deney düzeneği, Eksenel yük-eksenel deformasyon grafiği, b): Deney elemanı T-1, c): Deney elemanı specimen 00-12. ([2] ve [12]'den abapte edilmiştir).

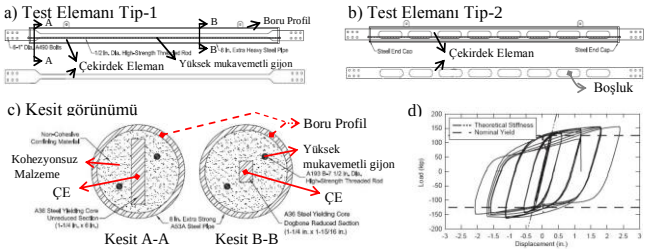
Chen ve diğ. (2001) ÇE'nin akma gerilmesinin (100 MPa) düşük ve sünek çelikden (%50 birim uzama kapasitesi) oluşan BEÇÇ'leri Şekil 7a'da görülen düşey eksendeki deney düzeneğinde test etmişlerdir [13]. Bu tip malzeme kullanılarak

elde edilen BEÇÇ'li çerçeveler düşük kat ötelemelerinde BEÇÇ'lerin plastikleşmeye başlaması ve ÇE'nin sünek olmasından dolayı yüksek enerji sönümleme özelliğinde olduğu belirtilmiştir [13]. BEÇÇ'lerdeki ÇE, çerçeve davranışına bağlı olarak maruz kaldığı eksenel basınç ve çekme deformasyonları ile kısalmakta ve uzamaktadır. Bunun yanında BEM'de herhangi bir yük istemi bulunmağı için eksenel deformasyon söz konusu değildir. Bu durumda, BEÇÇ'lerin iç kısmında, ÇE'nin kesitinin arttırıldığı burkulması engellenmiş elastik kısım (Şekil 7c, d ve e), BEM'e (Beton) temas etmesine izin vermemek için Şekil 7b ve e'deki iç boşluk ve çelik kutu profil ile bağlantı elemanlarının temasını engellemek için dış boşluk bırakılmıştır. İç boşluk, BEÇÇ'nin hazırlanışı esnasında beton dökümünden önce yumuşak bir malzeme (suni köpük) yerleştirilerek yapılmıştır. ÇE ile beton arasındaki sürtünmenin engellenmesi için ÇE'nin üzerine işçiliğinin kolay olmasından dolayı silikon gres sürülmüştür (bu durumda da beton ve ÇE arasındaki boşluk çok az olmaktadır). Bu işlem sonucunda ÇE sürtünmesiz olarak BEM içerisinde basınç ve çekme istemine göre hareket edebilmektedir. Bu esnada, ÇE'nin ve BEM'in orta açıklıklarındaki göreceli olarak hareketine izin verilmemelidir. Bu göreceli kayma hareketini engellemek için ÇE'nin orta açıklığında enkesit alanı arttırılarak kaymayı engelleyici mekanizma (KEM) oluşturulmuştur (Şekil 7b). Aksi halde, BEM'nin, BEÇÇ'nin çerçeveye bağlandığı durumda düşey eksende kayması söz konusu olmaktadır. Şekil 7f'de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin histeretik davranışı -20 mm'den sonra simetrik değildir. Bunun en önemli sebebi, beton ve ÇE arasındaki boşluğun (Silikon gres) çok az olmasından dolayı basınç deformasyonu altında poison etkisinden dolayı meydana gelen genişlemeden kaynaklanmaktadır [13]. Bu tip BEÇÇ'lerin V ve ters V çelik çaprazlı (chevron brace) çerçeveler yerine diyagonal merkezi çerçevelerde kullanılması daha uygundur [13].



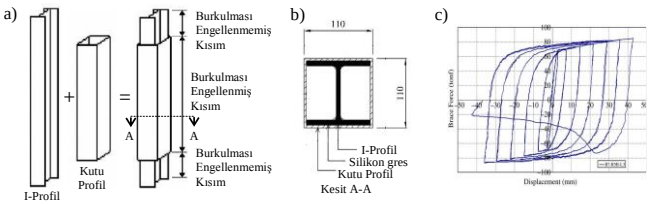
Şekil 7: a): Deney düzeneği, b): BEÇÇ'nin boyutları, ÇE ve ek plakalar, c): A-A enkesit gösterimi, d): B-B en kesit gösterimi, e): BEÇÇ'nin uç detayı, f): Deney elemanı BIB-L1'nin histeretik davranışı ([13]'den adapte edilmiştir).

Higgins ve Newell (2002) yukarıda bahsedilen profil-beton'dan oluşan BEM'den farklı olarak, ÇE'nin kohezyonsuz malzeme içerisine yerleştirerek elde ettikleri sargılı plastik çaprazları (SPÇ) geliştirip test etmişlerdir [14]. Higgins ve Newell ilk olarak ölçeklendirilmiş [14] ve daha sonra tam ölçekli [15] SPÇ'leri test etmişlerdir. Bu çalışmadaki SPÇ'lerin BEÇÇ'lerden farkı: Boru profil içerisine, beton harcı yerine, kohezyonsuz madde (kum ve çakıl karışımı) yerleştirilip sıkıştırılmasıdır (Şekil 8c). Kullanılan ÇE'nin malzeme sınıfı A36 olup akma ve en yüksek gerilme değeri sırasıyla 357 ve 497 MPa'dır. İki farklı ÇE geometrisine (Şekil 8a ve b) sahip toplam 14 adet SPÇ, Şekil 6a'dakine benzer bir deney düzeneğinde test edilmiştir [15]. Bu testlerde, kohezyonsuz malzeme ve sıkıştırma yöntemi, ÇE'nin geometrisi ve uygulanan yükleme protokolünün SPÇ'lerin performansları üzerindeki etkileri incelenmiştir [15]. Yapılan testlerde SPÇ'lerin performanslarının büyük oranda kullanılan kohezyonsuz malzemenin dane boyutuna ve şekline bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 8d gösterilen ve test elemanı 2'ye ait olan histeretik davranışın oldukça stabil olmasına karşın bazı deneylerde basınç ve çekme kapasitelerinde büyük farklar oluşmuştur [15].



Şekil 8: a): SPÇ test elemanı Tip 1, b): SPÇ test elemanı Tip 2, c): SPÇ kesit görünümü, d): Test elemanı Tip 2'nin histeretik davranışı ([15]'den adapte edilmiştir).

Geniş başlıklı I-profilin betonsuz kutu profilden oluşan BEM içine, sürtünmeyi engellemek için silikon gres kullanılarak oluşturulan ve bir örneği Şekil 9a ve b'de gösterilen BEÇÇ'ler Young ve diğ. (2009) tarafından test edilmiştir [16]. Şekil 7a'daki deney düzeneğine benzer bir sistemde test edilen BEÇÇ'lerin ÇE'leri 240 MPa nominal akma gerilmesine sahiptir. KEM I-profilin başlıklarına eklenen plakalar ile sağlanmıştır. Bu çalışmada, BEÇÇ'lerin uç kısımlarının (burkulması engellenmemiş kısım) güçlendirilmemesi, farklı boylarda güçlendirilmesi ve kutu profilin et kalınlığı gibi parametreler incelenmiştir. Şekil 9c'de görüldüğü gibi söz konusu elemanın histeretik davranışı oldukça kararlıdır. Bunun en önemli sebebi, bu eleman için kullanılan kutu profilin et kalınlığı diğerlerine göre daha büyüktür ve BEÇÇ uçları ek plakalarla güçlendirilmiştir. Kutu profilin et kalınlığı daha ince olan diğer elemanlarda lokal ve global burkulmalar görülmüştür ve bu BEÇÇ'lerin histeretik davranışları oldukça düşüktür.



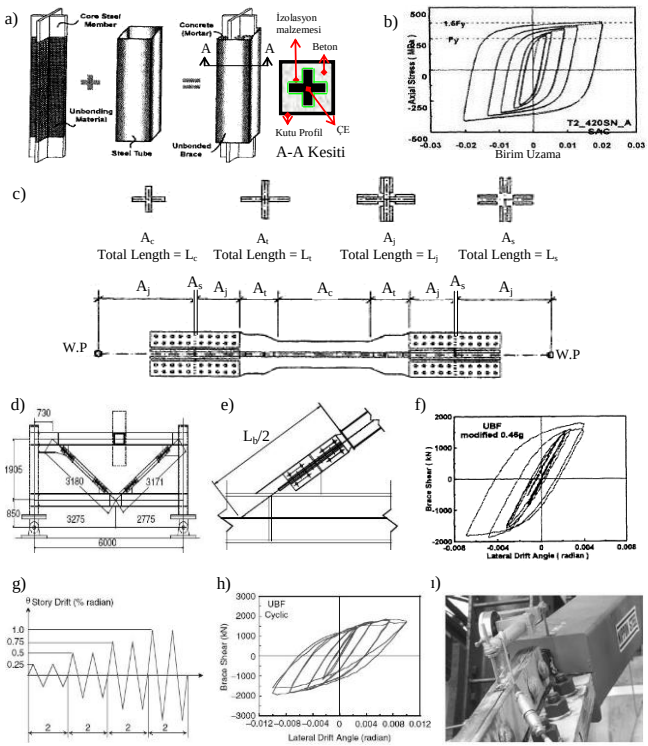
Şekil 9: a): BEÇÇ, b): BEÇÇ'nin enkesit gösterimi, c): Deney elemanı Specimen B7-R5B-L3'e ait histeretik davranış ([16]'dan adapte edilmiştir).

Tsai ve diğ. (2002) Taipei'de bulunan 33 katlı çelik binayı güçlendirmek için kullanılan 562 BEÇÇ'den rastgele seçilen 27 adet BEÇÇ'yi hem eleman bazında hem de ½ ölçekli sistem

bazında test etmişlerdir (Şekil 10) [17]. Eleman bazındaki çalışmanın amacı BEÇÇ'lerin kalite kontrolünü, elastik rijitliklerini ve elastik olmayan davranışlarını belirlemektir. ÇE'lerin malzeme sınıfı olarak LYP235 (222 MPa akma gerilmesi) ve SN400B (252 MPa akma gerilmesi) kullanılmıştır. Eleman bazında yapılan deneylerde kullanılan deney düzeneği Şekil 7a'dakine benzer özelliktedir. BEÇÇ'lerin elastik rijitliğini belirlemek için BEÇÇ'ler, ÇE'nin akma kapasitesinin %40 kadar eksenel olarak yüklenmiştir (deneyden sonra bu BEÇÇ'ler binaya monte edilmiştir) ve uygulanan kuvvetin çaprazda meydana gelen uzamaya oranı deneysel eksenel elastik rijitlik olarak kabul edilmiştir. Teorik olarak BEÇÇ'lerin eksenel rijitliği Şekil 10c'de gösterilen uzunluklar ve alanlar dikkate alınarak Denklem 4'ten hesaplanmıştır. Bu denklemde, Keff teorik rijitlik, Ac, At, Aj ve As sırasıyla BEÇÇ'nin plastik bölgesi, geçiş bölgesi, burkulması engellenmiş ve engellenmemiş elastik bölgesi, BEÇÇ'nin bayrak levhasına bağlandığı noktadaki geçiş bölgesi olmak üzere Şekil 10c'de gösterilen bölgelerdeki alanlar ve bu bölgelerdeki uzunluklarda L_c, L_t, L_j ve L_s'dir. Bu çalışmada deneysel ve teorik rijitlikler arasındaki hata %5'den daha azdır. Elastik deneylere ek olarak, Şekil 10b'de %85 civarında ölçeklendirilmiş BEÇÇ'nin histeretik davranışı, ÇE'nin eksenel gerilme eksenel birim uzama cinsinden grafiği görülmektedir. Bu grafikten de görüldüğü gibi BEÇÇ eleman bazında stabil ve simetrik histeretik davranışa sahiptir. Eleman bazındaki deneylere ek olarak Tsai ve diğ. (2002) ½ ölçekli sistem bazında BEÇÇ'leri test etmiştir (çalışmanın bu kısmı sistem bazındaki deneysel çalışmalara bir örnektir). Şekil 10d'de görüldüğü gibi kutu profilden oluşan çerçeve elemanlarına, BEÇÇ'lerden biri düğüm noktasına mimari sebeplerden dolayı 730 mm'lik dış merkezlik olacak şekilde bağlanmıştır. BEÇÇ'lerin çerçeve elemanlarına bağlantısını gösteren ayrıntı Şekil 10e'de görülmektedir. Bu çerçeve ilk önce iki farklı deprem kaydına göre yatay olarak yüklenmiştir (Şekil 10f). Bu yükleme sonunda çerçevede ve BEÇÇ'de herhangi bir hasar oluşmamasından dolayı, aynı çerçeve statik olarak test edilmiştir. Statik test esnasında uygulanan yatay deplasman (kat ötelemesi cinsinden) ve elde edilen histeretik davranış Şekil 10g ve h'de görülmektedir. Şekil 10h'de görüldüğü gibi BEÇÇ'li çerçeve %1 kat ötelemesinde ilk tersinir yüklemeye kadar stabil histeretik davranış göstermesine rağmen aynı kat ötelemesinin ikinci tersinir yüklemesinde BEÇÇ'de Şekil 10ı'da görüldüğü gibi burkulma meydana gelmiştir. Şekil 10ı'da meydana gelen burkulmanın olduğu ÇE ve ek plakaların geçiş bölgesinde, Şekil 10e'de gösterilen L_b uzunluğu dikkate alınarak hesaplanan Euler burkulma yükü (Denklem 5) ÇE'nin eksenel akma kapasitesinden 1.5 kat daha büyüktür. Bu oranın düşük olması bu bölgedeki burkulmaya sebep olmuş olabileceği [17] tarafından belirtilmiştir. Denklem 5'de: $P_{e-trans}$ Şekil 10e'de görülen geçiş bölgesinin Euler yük kapasitesi, $P_{c\,max}$ BEÇÇ'nin maksimum basınç kapasitesi, k etkili boy katsayısı, I_{trans} ve L_b Şekil 10e'de görülen geçiş bölgesinin atalet momenti ve uzunluğudur. Tek ÇE'li (Şekil 4a) BEÇÇ'lere ek olarak çift ÇE'li (Şekil 4ı) BEÇÇ'ler bayrak levhasına bağlantısının kolay olmasından dolayı özellikle Tayvan Üniversitesi ve Tayvan Deprem Araştırma Enstitüsünde kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu araştırmalar Tsai ve diğ. (2004) tarafından özetlenmiştir [8].

$$K_{eff} = \frac{1}{\frac{L_c}{EA_c} + \frac{L_t}{EA_t} + \frac{L_j}{EA_j} + \frac{L_s}{EA_s}} \tag{4}$$

$$P_{e-trans} = \frac{\pi^2 EI_{trans}}{(kL_b)^2} \geq P_{c\,max} \tag{5}$$

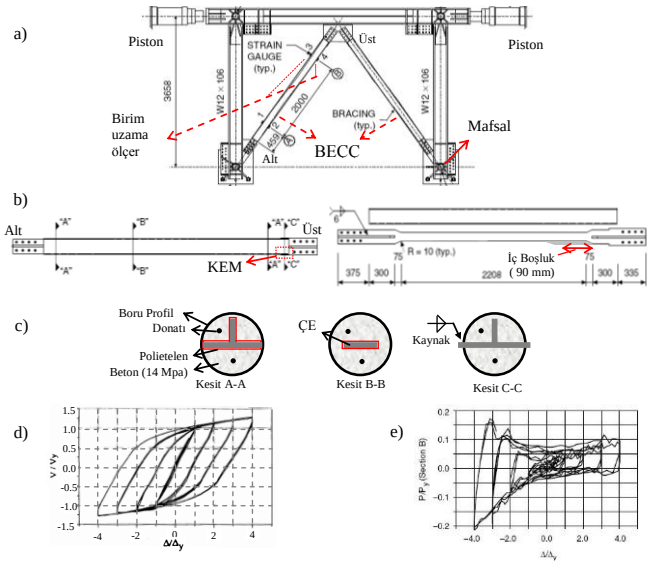


Şekil 10: a): BEÇÇ'nin kısımları, b): Deney elemanın (T2_420SN_A) histeretik davranışı, c): BEÇÇ'nin enkesitleri, d): Test çerçevesi, e): BEÇÇ'nin bağlantı detayı, f): Deprem kaydı aldında histeretik davranışı, g): Statik yük protokolü, h): Statik yük altında histeretik davranış, ı): BEÇÇ'de burkulma ([17]'den adapte edilmiştir).

Tremblay ve diğ. (1999) dört katlı çelik bir binayı güçlendirmek için tasarladıkları BEÇÇ'leri tek açıklıklı ve tek katlı, dört düğüm noktasında mafsallı olan çelik çerçeve benzeri sistem içerisinde test etmişlerdir (Şekil 11a) [18]. Şekil 11b ve c'de test edilen BEÇÇ'lerin boyutları ve kesitleri görülmektedir. Buradaki çalışmada beton harcı içerisine ek olarak donatı da eklenmiştir (Şekil 11c). Kullanılan ÇE'nin akma ve en büyük gerilme kapasiteleri sırasıyla 357 ve 517 MPa'dır. ÇE ve beton arasında sürtünmeyi engellemek için ÇE her biri 0.2 mm olan dört kat polyester malzemesi ile sarılmıştır. BEM'nin düşey eksende ÇE üzerinde hareketini engellemek için ÇE ve boru profil üst düğüm noktasında birbirine kaynaklanmıştır (Şekil 11b). Şekil 11d test edilen BEÇÇ'li çerçevenin normalize edilmiş yatay yük-deplasman grafiğini göstermektedir (bu grafikte V yatay yükü, Δ yatay deplasmanı ve alt y akma değerini göstermektedir). Bu şekilden de görüldüğü gibi çerçevenin histeretik davranışı oldukça stabil ve simetriktir. Burada kullanılan BEÇÇ'lerin, deney esnasında boru profil üzerine yapıştırılan birim uzma ölçerlerden (Şekil 11a) elde edilen bilgiler doğrultsunda, çelik boru profilde ÇE'nin akma kapasitesinin %20'si kadar eksenel yük taşıdığı görülmüştür (Şekil 11e).

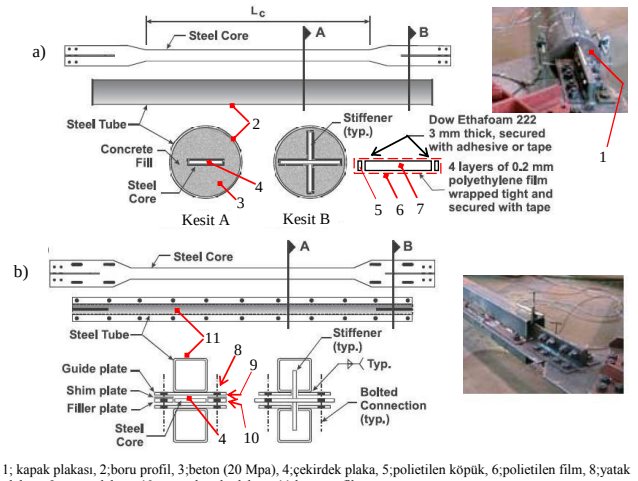
Tremplay ve diğ. (2006) tarafından yapılan başka bir deneysel çalışmada altı adet BEÇÇ Şekil 11a'da gösterilen çerçeve benzeri sistem içerisinde test edilmiştir [19]. Ancak bu çalışmada ters V çelik çapraz yerine diyagonal merkezi çapraz olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmanın genel amacı, BEÇÇ'lere

etkiyen eğilme momentleri ve bunların BEÇÇ'ler üzerinde etkileri, ÇE'nin plastik bölge uzunluğu ve bu uzunluğun eksenel rijitliğe ve yorulma kapasitesine etkisi ve değişik BEM'lerin incelenmesidir. [19] tarafından incelenen BEÇÇ'lerin ilk iki tanesinde beton-boru profilden (Şekil 12a, C1-1 ve C2-1) ve diğer dört BEÇÇ'de çelik plaka-kutu profil birleşimden oluşan (Şekil 12b, S1-1, S1-2, S2-1 ve S2-2) BEM kullanılmıştır.

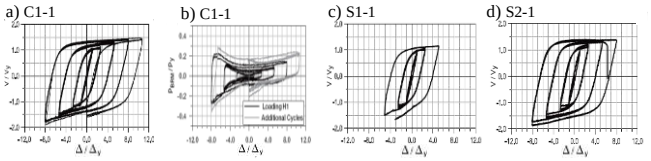


Şekil 11: a): Test çerçevesi, b): BEÇÇ ve c)BEÇÇ enkesit gösterimi, d): Normalize edilmiş yatay yük-yatay deplasman grafiği, e): Boru profil üzerinde ölçülen yük ve deplasman ([18]'den adapte edilmiştir).

Şekil 12a'da görüldüğü gibi [19]'da test edilen ilk iki BEÇÇ, [18]'de test edilen BEÇÇ'lere benzemektedir. [19]'da ve [18]'de kullanılan BEÇÇ'lerin arasındaki fark: [19]'da ÇE'nin poison etkisinden dolayı genişlemesi sırasında meydana gelecek hacimsel değişim beton içerisinde karşılanabilmesi için ÇE'nin altına ve üstüne 3 mm kalınğında polietilen köpük yerleştirilmiştir (Şekil 12a) ve buna ek olarak BEM'nin ÇE üzerinde kaymasını engellemek için [19]'da ilk olarak BEÇÇ'nin iki ucundan sadece bir ucunda boru profil, üzerinde slotlar açılan kapak plakaya kaynatılıp daha sonra ÇE bu kapak plakaya kaynatılmıştır (Şekil 12a). [19]'da test edilen ilk iki BEÇÇ'lerin arasındaki fark ise ÇE'nin plastik kısmının uzunluğudur (Şekil 12c, C1-1 ve 2). Bu BEÇÇ'lerde iç boşluk 100 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan ÇE'nin akma ve en yüksek gerilme kapasitesi 370 ve 492 MPa'dır. Diğer dört BEÇÇ'de kullanılan BEM'de Şekil 12b görüldüğü gibi ÇE, kutu profile kaynatılmış iki yatak plaka arasına hem altta hem de üstte boşluk (ayraç plakası sayesinde) ve her iki yan tarafta (yatay destek plakası ile ÇE arasında) boşluk kalacak şekilde yerleştirilip yatak plakaları bulonlarla sıkılmıştır. Dört deneyden S1-1 ve 2'de ÇE'nin plastik kısmının uzunluğu (Şekil 12c), bulonlar arasındaki mesafe, ayraç plakası ve ÇE üzerindeki bölge, S2-1 ve 2'da ayraç plakasının kalınlığı ve yükleme protokolü incelenmiştir (Şekil 12d). Şekil 13a, C1-1 için normalize edilmiş yatay kuvvet-yatay deplasman grafiğini göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi BEÇÇ stabil ve simetrik histeretik davranış göstermektedir. Şekil 13b'de BEM'in taşıdığı eksenel yükün ÇE'nin akma kapasitesine oranı ve normalize edilmiş yatay deplasman grafiğini gösterilmektedir. Bu grafikten anlaşıldığı gibi boru profilde, ÇE'nin akma kapasitesinin yaklaşık %30'u kadar eksenel yük ölçülmüştür. Buna ek olarak, boru profil üzerinde eğilme istemlerinin BEÇÇ'ler üzerinde çok fazla etkili olmayabileceği belirtilmiştir [19].



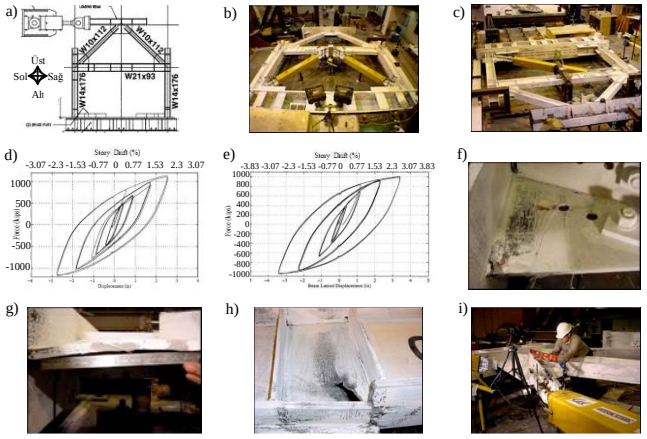
Şekil 12: a): Beton-boru profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'lar, b): Plaka-kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ, c): BEÇÇ'lerin ÇE boyutları ([19]'dan adapte edilmiştir.



Şekil 13: a): C1-1'in histeretik davranışları, b): C1-1 boru profildeki eksenel yük değişimi, c): S1-1 ve S2-1'nin histeretik davranışları ([19]'dan adapte edilmiştir).

Şekil 13c S1-1 deneyinden elde edilen normalize yatay yük-deplasman grafiği gösterilmektedir. S1-1'de, ÇE'nin her iki ucunda, ayraç plakasının kalınlığının ve bolunlar arasındaki mesafenin fazla olmasından dolayı lokal burkulmalar meydana gelmiştir ve bu sebepten deney protokolü tamamlanamamıştır. S1-2'de bulonlar arası mesafe azaltılmasına ve ek ayraç plakası (Şekil 13d) kullanılmasına rağmen BEÇÇ'nin basınç kapasitesi ÇE ve BEM arasındaki sürtünmeden dolayı beklenen değerini aşmıştır ve deney tamamlanamamıştır. Şekil 13d S2-1'den elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. S2-1'de ÇE'nin plastik kısmının kısa olmasından dolayı bu bölgede aşırı plastikleşme meydana gelmiş ve ÇE kopmuştur. S2-2 uygulanan dinamik yükleme altıda stabil davranmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan beton-kutu profilden oluşan BEM ve beton-ÇE arasındaki sürtünmeyi engellemek için kullanılan malzemelerin BEÇÇ'ler için kabul edilebilir oranda çalıştığı görülmüştür. Plaka ve kutu profilden oluşan BEM'li BEÇÇ'lerde ÇE'nin lokal burkulmasının ve dolayısı ile sürtünmenin engellenmesi ve plastikleşmenin ÇE'nin plastik kısmı boyunca yayılması gerektiği ortaya çıkmıştır [19].

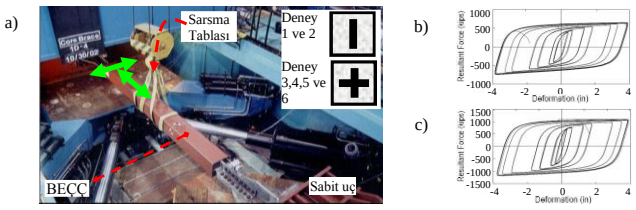
Kaliforniya Üniversitesinde, Şekil 14a'daki çerçeve sistemi kullanılarak, Şekil 14b ve c'de gösterilen bir adet ters V çelik çapraz (dikdörtgen şeklinde ÇE'ye sahip) ve iki adet diyagonal çelik çaprazlı (dikdörtgen ve "+"şeklinde ÇE'ye sahip) çerçeve deneyi yapılmıştır [20]-[22]. BEÇÇ'lerde beton-kutu profilden oluşan BEM kullanılmıştır. Her üç deney için sadece bir çelik çevçeve (Şekil 14a) imal edilmesinden dolayı kolon ve kiriş kesitleri olması gerekenden daha büyük seçilmiştir (daha rijit çerçeve sistemi oluşturulmuştur). Bu çalışmada, Test 1'de bayrak levhasında plastikleşme haricinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir ve %2 kat ötelemesine kadar çerçeve yatay deplasman yapabilmiştir (Şekil 14d). Şekil 14e'de histeretik davranışı gösterilen Test 2'de yaklaşık olarak %1.7 kat ötelemesinde, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde kaynak yırtılması ve %2.6 kat ötelemesinde bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 14f ve g). Bu test bayrak levhasının tasarımında kapasitesinin yeterli olmasına karşın çerçevenin sünek elastik olmayan davranış yapabilmesi için yeterli olmadığını göstermiştir. Test 3'te kiriş alt başlığında yırtılma ve bunu takiben üst-sol düğüm noktasında eksende olmayan dönme meydana gelmiştir (Şekil 14h ve i).



Şekil 14: a): Test çerçevesi, b): Test 1 fotoğraf, c): Test 2 ve 3 fotoğraf, d): Test 1 için histeretik davranış, e): Test 2 için histeretik davranış, f): Test 1, bayrak levhası ve sol kolon üst birleşiminde yırtılma, g): Test 2, Üst sol bayrak levhasında burkulma, h): Test 3, sol-üst düğüm noktasında kiriş alt başlığında yırtılma, i): Test 3, Üst-sol düğüm noktasında dönme [20]-[22].

Merit ve diğ. (2003) BEÇÇ'nin eksenel deformasyona ve uç dönmeye maruz kalacak şekilde hazırladıkları deney düzeneğinde iki adet dikdörtgen ve dört adet "+"şeklinde ÇE'ye ve beton-kutu profilden oluşan BEM'e sahip toplam altı adet test yapmışlardır [23]. Şekil 15a'da deney düzeneğine ait fotoğrafın üstünde BEÇÇ'lerin orta açıklıklarındaki enkesitleri gösterilmiştir. Bu şekilde yine görüldüğü gibi BEÇÇ'nin bir ucu sabit olarak reaksiyon duvarına bağlıyken diğer ucu sarsma tablasına bağlanmıştır. Bu sayede BEÇÇ'ye hem yanal hem de eksenel deformasyon uygulanabilmektedir. Bu deney sayesinde BEÇÇ'nin çelik çerçeve içerisinde maruz kalabileceği deformasyonlar elde edilerek BEÇÇ'lerin davranışı incelenmiştir. ÇE'de kullanılan çeliğin akma gerilmesi 297 MPa (A36), BEM'de kullanılan betonun basınç dayanımı 28 MPa'dır. Test edilen BEÇÇ'ler en yüksek 0.02 birim uzamaya kadar artan tersinir deformasyonlar altında stabil ve kararlı davranmışlardır (Şekil 15b ve c).

Çalışmanın bu kısmına kadar, BEÇÇ'lerin eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında deneylerinden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.



Şekil 15: a): Deney düzeneği ve BEÇÇ enkesitleri, b): Deney 1 ve c): Deney 3 için histeretik davranış ([23]'den adapte edilmiştir).

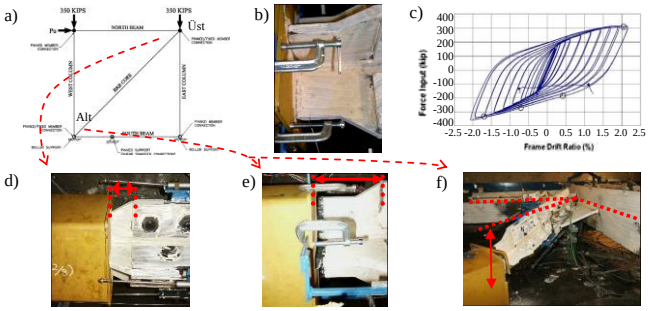
Şekil 4'te de görüldüğü gibi birçok BEÇÇ farklı kesit özelliklerinde olmak üzere araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Elde edilen herhangi bir BEÇÇ dizaynının BEÇÇ olarak kabul edilebilmesi için [24] tarafından belirlenen minimum performans kriterlerini sağlaması gerekmektedir. [24]'de hem eleman bazında hem de çerçeve benzeri sistem bazında yapılacak olan deneylerde izlenecek yükleme protokolü, deney elemanın boyutları, elde edilen histeretik davranışın hangi şartlarda kabul edilebilirliği gibi düzenlemeler bulunmaktadır. Buna göre BEÇÇ'lerin herhangi bir çelik çaprazlı yapı içerisine konulması durumunda BEÇÇ'lerin bayrak levhasına bağlantısı, eleman boyu, ÇE en kesit alanı, çaprazlı çelik yapının yapacağı maksimum yatay ötelenme anında çaprazda meydana gelecek eksenel uzama/kısalma, çapraz uç bağlantı bölgelerinde meydana gelen dönme istemlerinin tamamen görülebileceği çerçeve benzeri sistem içerisinde en az bir test yapılmalıdır. Çerçeve benzeri sistem içerisinde ve eleman bazında test edilecek olan deney elemanı ile gerçek yapıda kullanılacak BEÇÇ'lerin eksenel yük kapasiteleri, ÇE en kesit özellikleri (kare yada "+" şeklinde kesit), malzeme özellikleri ve tasarım parametreleri (kolon, kiriş ve bayrak levhası stabilite, lokal ve global burkulma hesap yöntemleri) eşit olmalıdır. Eleman bazında yapılacak olan deneyde ÇE plastik bölgesinde meydana gelecek olan uzama için yükleme protokolü şu şekilde olmalıdır; (δ_y), ($0.5\delta_t$), ($1.0\delta_t$), ($1.5\delta_t$), ($2.0\delta_t$). δ_y ÇE akma uzaması, δ_t gerçek yapı tasarımında kullanılan göreli kat ötelenmesindeki ÇE uzamasıdır. Bu deplasman değerlerinin her birinde iki kez ters çevrimli histeretik yükleme yapılmalıdır. Ayrıca toplam plastik uzama en az 200 akma uzaması kadar olmalıdır eğer bu durum yukarıdaki protokolde elde edilemezse $1.5\delta_t$ deplasman değerinde gerekli kadar ters çevrimli yükleme yapılmalıdır. BEÇÇ deneylerinin sonunda elde edilen eksenel kapasite-eksenel uzama/kısalma histeretik davranışın her bir deplasman değerinde stabilite ve pozitif rijitlik elde edilmelidir. Deney sonunda BEÇÇ ve bağlantılarında kopma ve stabilite sorunu gözlenmemelidir. δ_y yüklemesinden sonra yapılacak olan yüklemelerde elde edilen kapasite ÇE'nin nominal kapasiteden az olmamalıdır. δ_y yüklemesinden sonra her bir deplasman değerinde basma ve çekme kapasiteleri arasındaki oran 1.3'den daha büyük olmamalıdır. [24]'e göre, test edilen BEÇÇ'lerin yukarıda bahsedilen şartları sağlaması durumunda yeterli histeretik davranışa sahip olduğu kabul edilmektedir.

2.2 BEÇÇ'lerin çerçeve sistemi içerisindeki deneyleri

BEÇÇ'lerin eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında davranışlarının yukarıda da görüldüğü gibi genel olarak kararlı olmasına karşın, BEÇÇ'lerin çerçeve içinde davranışlarında aynı

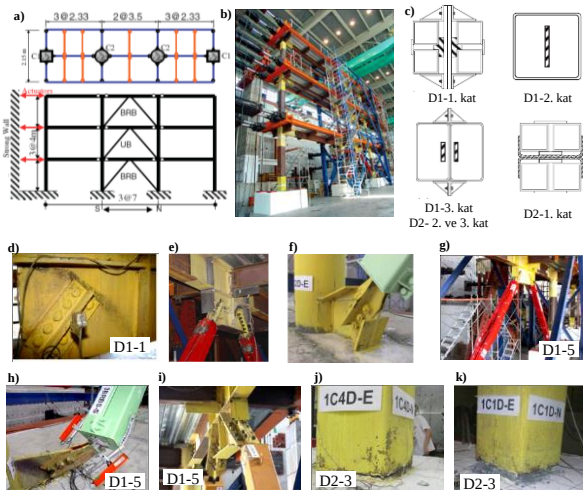
kararlı histeretik davranış tam olarak görülememiştir. Bu konu ile ilgili olarak yapılmış olan bazı deneysel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 16: a):Çerçevenin analitik gösterimi, b): BEÇÇ'nin testten önceki durumu, c) Reference BRB'nin histeretik davranışı, d): ve e): Test esnasında BEÇÇ'nin belirtilen uçlarda kayması, e): BEÇÇ'nin uç kısmında plastikleşme ve dönme ([25]'den adapte edilmiştir).

Christopulos (2005) beş adet diyagonal BEÇÇ'li çerçeveyi, zemine paralel olarak hazırladığı deney düzeneğinde test etmiştir (Şekil 16a ve f) [25]. Çerçeve sisteminin zemine paralel olmasına karşın beton-kutu profilden oluşan BEM, ÇE üzerinde yeterli KEM'nin olmamasından dolayı alt düğüm noktasından üst düğüm noktasına doğru hareket etmiştir. Şekil 16b deney başında, Şekil 16d ve e deney sonundaki BEM ve ÇE arasındaki mesafeleri göstermektedir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi BEÇÇ'nin alt ucundaki iç boşluk diğer uca göre artmıştır. Buna ek olarak [25]'te de belirtildiği gibi alt kirişin düğüm noktasına sağladığı stabilitenin de yetersiz olmasının da etkisiyle BEÇÇ'nin uç kısmında plastik mafsallaşma oluşmuş ve %1.5 kat ötelemesinden sonra düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir (Şekil 16f). Şekil 16c referans deneyinden elde edilen histeretik davranışı göstermektedir. Bütün deneylerde yaklaşık %2 kat ötelemesinden sonra BEÇÇ'nin aşırı dönmesinin sonucunda zemine temas etmesiyle yüklemeye son verilmiştir (Şekil 16f).

Tam ölçekli, üç açıklı üç katlı BEÇÇ'li çerçeve, dinamik benzerli yükleme yapılarak Tsai ve diğ. (2008) tarafından test edilmiştir (Şekil 17a ve b) [26],[27]. Bu çalışmadaki çelik çerçeve, beton döşeme, çelik kiriş ve kompozit kolonlardan oluşmaktadır. Dinamik benzerli yüklemelerde 1999 Chi-Chi (CC) ve 1989 Loma Prieta (LP) deprem kayıtları kullanılmıştır. Bu deprem kayıtları 50 yılda aşılma olasılığı %50-10-2 olmak üzere ölçeklendirilmiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi deprem kayıtların aşılma olasılıklarına göre yani yatay yük istemleri arttırılarak deneyler yapılmıştır. Çerçeve elemanı değiştirilmeden iki kısımda deneyler yapılmıştır ve bu kısımlarda kullanılan BEÇÇ'lerin enkesitleri Şekil 17c'de gösterilmektedir (D1-2. kat; 1. kısımdaki deneyde 2. kattaki BEÇÇ). 1. kısımdaki 1. deney CC deprem kaydının 50 yılda %50 aşılma olasılığı (bu ifadeye kısaca D1-1-CC-50/50 olarak adlandırılıp diğer deneylerde benzer şekilde kısaltılmıştır) olacak şekilde ölçeklendirilerek yapılmıştır. Bu deneyin hemen başında 1. katta BEÇÇ'nin kiriş ile birleştiği bayrak levhasında burkulma (Şekil 17d) ve ayrıca 1. kat sağ kolon dibinde BEÇÇ-bayrak levhasının birleşimde düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir. Bu testten sonra her katta kiriş orta noktasında bulunan bayrak levhalara ek plakalar kaynatılarak bayrak levhalarının burkulma kapasiteleri arttırılmıştır (Şekil 17e) ve BEÇÇ ısıl işlem ile onarılmıştır. Bu işlemlerden sonra bu test tekrarlanmıştır. Deney D1-2-LP-10/50: Bu deneyde kolon-BEÇÇ birleşim bölgesindeki döşemede çatlaklar meydana gelmiştir. Deney D1-3-CC-2/50: Bu deneyde yine 1. kat sol kolon-BEÇÇ'nin birleştiği noktada BEÇÇ'de eğilme gözlenmiştir ve deney durdurularak 1. kat kolon dibindeki bayrak levhaları ek plakalar ile güçlendirilmiştir (Şekil 17f). Daha sonra test devam etmiştir. Deney D1-4-LP-10/50: Bu deney esnasında 1. kat sol BEÇÇ'de hafif de olsa yüksek modda burkulma görülmüştür. Deney D1-5; Bu deney yukarıdaki deneyler tamamlandıktan sonra statik olarak tekrarlanan tersinir yatay yük uygulanarak yapılmıştır. Sırasıyla dörder kez %1, 1.25, 2.0, 2.52 ve son olarak da iki kez %3.75 kat ötelemesine kadar tekrarlanan tersinir deplasman uygulanmıştır. %2 kat ötelemesi kadar deplasman uygulandığında 1. kattaki BEÇÇ'de yüksek modda burkulma gözlenmiştir (Şekil 17g). Bunun yanında 3. katta BEÇÇ-kolon bileşiminde bayrak levhasında burkulma meydana gelmiştir (Şekil 17h). %2.5 kat ötelemesinde 2. kat kiriş ortasında, guse levhası-BEÇÇ birleşiminde BEÇÇ'nin uç kısmında Şekil 17i'de görülen düzlem dışı burkulma meydana gelmiştir. Bu beş deneylik ilk fazdan sonra sadece BEÇÇ'ler değiştirilip 2. ve 3. kat kolon diplerindeki bayrak levhalarına ek plakalar kaynatılarak burkulma kapasiteleri arttırılmıştır (Şekil 17f). İkinci kısımdaki deneyler aynı deprem kayıtlarının farklı ölçeklendirme metodu kullanılarak yapılmıştır. Deney D2-1-CC-10/50: Bu deney esnasında kiriş kolon birleşimde plastikleşme meydana gelmiştir. Deney D2-2-LP-2/50: Bu deney esnasında kiriş-kolon birleşim noktasında döşemede çatlaklar meydana gelmiştir. Deney D2-3: Bu deney yine yukarıdaki 2. kısımdaki iki deney tamamlandıktan sonra statik olarak tekrarlanan tersinir yatay yük uygulanarak yapılmıştır. Bu deneyin %2.5 kat ötelemesine geldiğinde, kolon-temel birleşimdeki profilde yırtılma meydana gelmiştir ve %3.75 kat ötelemesinde kolon tamamen kopmuştur (Şekil 17j-k). Sonuç olarak, oldukça düşük yatay yük istemlerine sahip deney D1-1-CC-50/50'nin hemen başında meydana gelen bayrak levhasındaki burkulma, kullanılan dizayn metotlarında soru işareti oluşturmuştur.



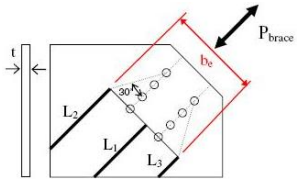
Şekil 17: a): Deney çerçevesinin plan görünümü, b): Deney çerçevesinin fotoğrafı, c): Deneyde kullanılan BEÇÇ'ler, d-k): Deney esnasında gözlenen deformasyonlar ve bayrak levhasına eklenen plakalar ([26]'dan ve [27]'den adapte edilmiştir).

Bayrak levhasının tasarımı yapılırken, BEÇÇ'nin çekme kuvveti altında Whitmore (1952) kesiti dikkate alınmıştır [28]. Bu kesit Şekil 18'de gösterildiği gibi b_e ve t ile sınırlanan kesittir. Denklem 6 sağlanarak, bayrak levhasının bu sınırlanan Whitmore kesiti boyunca plastikleşmesine izin verilmez. Bu denklemde: $P_{yGusset}$, F_y, $b_e$ve t sırasıyla bayrak levhasının

akma kapasitesi, malzeme akma gerilmesi, bayrak levhası üzerindeki Whitmore kesiti genişliği ve kalınlığıdır. $P_{T\,max}$ ve $P_{C\,max}$ BEÇÇ'nin maksimum çekme ve basınç kapasitesi, Ω, Ω_h ve P_y sırasıyla ÇE'nin malzeme büyütme, pekleşme katsayısı ve akma kapasitesidir. P_{cr}: bayrak levhasının burkulma kapasitesi, L_{gc}: Şekil 18'de gösterilen mesafelerden en uzunu, r: atalet yarıçapı ve β: BEÇÇ'nin eleman bazında yapılan deneyden elde edilen maksimum basınç ve çekme kapasitesi arasındaki oran (bu oran [24]'te 1.3 olarak verilmiştir). BEÇÇ'nin basınç kuvveti etkisi altında bayral levhasının hesaplarında Thornton (1984) tarafından önerilen ve Şekil 18'de bayrak levhası üzerinde gösterilen L1, L2 ve L3 uzunluklarından en büyük olanı kritik boy (L_{gc}) olarak alınır [29]. Bu kritik boy kullanılarak, Denklem 7 BEÇÇ'nin basınç durumu için sağlanmalıdır. Denklem 7'deki etkili boy katsayısı (k), [29] tarafından önerilen 0.65 olarak alınması durumunda hesaplanan değerler, deneyde kullanılan BEÇÇ'lerin eksenel basınç yüklerinden daha büyük olmasına rağmen [26] ve [27]'de bahsedilen burkulmalar meydana gelmiştir. Bu çalışma sonunda 0.65 olan etkili boy katsayısının bayrak levhasına ek plakalar eklenmesi ile kullanılabileceği, eğer ek plaka kullanılmazsa bu katsayının 2 olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [27].

$$P_{yGusset} = F_y \times b_e \times t \geq P_{T\,max}\left(= \Omega \times \Omega_h \times P_y\right) \quad (6)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times E}{\left(kL_{gc}/r\right)^2} \times b_e \times t \geq P_{C\,max}\left(= \beta \times \Omega \times \Omega_h \times P_y\right) \quad (7)$$



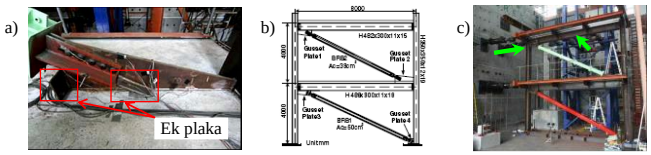
$P_{brace}=P_{T\,max}$ (BEÇÇ'nin çekme kuvvetine maruz kaldığı durumda)

$P_{brace}=P_{C\,max}$ (BEÇÇ'nin basınç kuvvetine maruz kaldığı durumda)

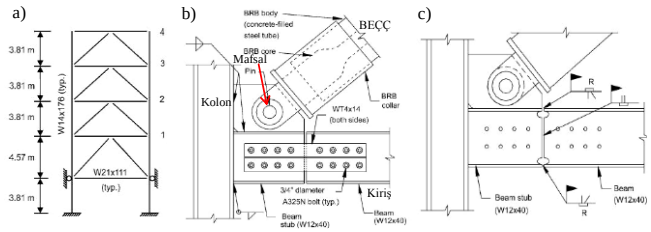
Şekil 18: Bayrak levhasındaki kuvvetler ([26]'dan adapte edilmiştir).

Tsai ve diğ. [26],[27] tarafından yapılan deneyde ilk yükleme esnasında bayrak levhasında meydana gelen burkulmadan sonra BEÇÇ'li çerçevelerde bağlantı detayını incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Lin ve diğ. (2005 ve 2006) tarafından analitik çalışmalar yapılmıştır [30],[31]. Bu analitik çalışmada bayrak levhasının ek plakalarla burkulmaya karşı güçlendirilebileceği belirtilmiştir. Ek plaka kullanılması durumunda (Şekil 19a), etkili boy katsayısı için 0.65 katsayısı önerilmiş olup, bu analitik çalışma dikkate alınarak Şekil 19b'de gösterilen çerçeve, hem çerçeve ekseninde hem de çerçeve eksenine dik yönde yatay istemlerin uygulandığı (Şekil 19c) dinamik benzeri yükleme altında Tsai ve diğ. (2006) tarafından test edilmiştir [32]. Bu deneylerde kolon-bayrak levhasındaki kaynakta çatlama meydana gelmesine rağmen, çerçeve yeterli performans göstermiştir.

Çerçeve benzeri sistem bazında ve çerçeve düzeyindeki deneysel çalışmalarda genel olarak bayrak levhası-BEÇÇ arasındaki bağlantı bulonlar yapılmaktadır ve benzer özellik taşımaktadır (Şekil 10ı, Şekil 11a, Şekil 12a, Şekil 14i, Şekil 15a, Şekil 16f, Şekil 17h, Şekil 19a). Fahnestock ve diğ. (2007), Şekil 20a görünen, 0.6 ölçekli dört katlı ve tek açıklıklı çerçeveyi test etmişlerdir [33]. Bu çalışmada yapılan deneylerin ilk kısmında (Hibrid dinamik benzeri yükleme) Şekil 20b'deki, diğer kısımda (statik yükleme) ise Şekil 20c'deki bağlantı detayı kullanılmıştır. Bu bağlantı detaylarında, diğer çalışmalardan farklı olarak, kiriş bayrak levhası kadar bir kısımda kolona bağlanmış ve daha sonra kirişin devamı bu ilk kısma, ilk deneyde moment aktarmayacak şekilde sadece profil gövdesinden bulonlarla (Şekil 20b), diğer deneyde moment aktaracak şekilde profil başlıklarından kaynatılarak bağlanmıştır (Şekil 20c). Bunun yanında bu çalışmada kullanılan BEÇÇ'ler bayrak levhasına diğer çalışmalardaki bulonlu birleşimden farklı olarak mafsallı şekilde bağlanmıştır. Bu deneylerin ilkinde ikinci katta %4.8 ve diğer deneyde aynı katta %5 kat ötelemesine kadar çerçeve stabil şekilde yük taşımaya devam etmiştir. Her iki deneyde de bayrak levhasında herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Bu davranış, BEÇÇ'nin mafsallı olarak bağlanması ve bu bağlantı boyunun kısa olmasının yanında Şekil 20'de verilen bağlantı detayının etkili olduğu belirtilmiştir [33].



Şekil 19: a): Bayrak levhası ve ek plakalar, b): Deney çerçevesi çizimi, c): Deney çerçevesi yükleme yönleri ([32]'den adapte edilmiştir).



Şekil 20: a): Deney çerçevesi çizimi, b): Bağlantı detayı 1, c): Bağlantı detayı 2 ([33]'den adapte edilmiştir).

3 Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalar esas alınarak BEÇÇ'lerin eleman bazında, çerçeve benzeri sistem bazında ve çerçeve içerisinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. BEÇÇ'lerin tasarımında genel olarak şu durumlara dikkat edilmelidir: a) ÇE'nin BEM içinde sürtünmeden kaynaklanan ek eksenel basınç kapasitesini engellemek için ÇE sürtünmeyi engelleyici uygun bir malzeme ile kaplanmalıdır, b) BEM ve ÇE arasında ÇE'nin poison etkisinden kaynaklanan hacimsel değişimi dikkate alınarak belirli bir boşluk bırakılmadır, c) ÇE'nin BEM'ye göre göreceli hareket etmesini engellemek için KEM'nin uygun şekilde tasarlanması gerekmektedir, d) BEÇÇ'li yapıya gelmesi muhtemel yatay ve düşey istemlerden kaynaklanan BEÇÇ eksenel yükleri altında BEÇÇ'lerin uç birleşim bölgeleri ve BEM'in yeterli stabiliteye sahip olması gerekmektedir. Elde edilen BEÇÇ'ler eleman bazında ve çerçeve benzeri sistem bazında [24]'de belirtilen yüklemeler sonucunda stabil davranmalıdır. Bu çalışmanın genelinden de anlaşıldığı gibi BEÇÇ'ler eleman ve çerçeve benzeri sistem bazında genel olarak stabil ve kararlı davranmalarına karşın, çerçeve deneylerinde kolon, kiriş, bayrak levhası ve BEÇÇ etkileşimden dolayı bayrak levhasında, birleşim kaynaklarında ve BEÇÇ'nin uç birleşim bölgelerinde istenmeyen sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısı ile BEÇÇ'li çelik çerçevelerde bağlantı detayları hala bir sorun olarak görülmektedir. BEÇÇ'lerin uç dönmelerinin daha stabil hale getirildiği, farklı BEM tasarımlarının kullanılabileceği daha pratik ve ekonomik BEÇÇ tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca BEÇÇ'lerin düşük akma

gerilmesine sahip ÇE'lerden üretilmesi durumunda BEÇÇ'ler, çelik veya betonarme yapıların yatay istemler altında kolon ve kirişlerinin elastik olduğu durumda bile plastikleşerek enerji sönümleyebilme özelliği gösterebilmektedir. Dolayısı ile söz konusu BEÇÇ'lerin hem yeni tasarım çelik ve betonarme yapılarda hem de ülkemizde mevcut kusurlu betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılabilir nitelikte olduğu düşünülmektedir. Bu konuda kapsamlı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu konuda yazar "Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Geliştirilmesi ve Betonarme Binaların Depreme Karşı Güçlendirilmesinde Kullanımının Araştırılması" başlıklı bir TÜBİTAK projesi yürütmektedir.

4 Teşekkür

Yazar 112M820 sayılı projeye destek veren TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

5 Kaynaklar

[1] Black GR, Wenger BA, Popov EP. "Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversals". University of California, Berkeley, California, USA. Technical Report, UCB/EERC-80/40, 1980.

[2] Black CJ, Makris N, Aike, ID. "Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling Restrained Braces". University of California, Berkeley, California, USA. Technical Report, PEER 2002/08, 2002.

[3] López WA. "Design of Unbonded Braced Frames". *70th Annual Convention, Structural Engineers Association of California*, Sacramento, California, USA, 2001.

[4] Wada A, Saeki E, Takeuchi T, Watanabe AC. "Development of Unbonded Brace, Nippon Steel's Unbonded Braces". Nippon Steel Corporation Building Construction and Urban Development Division, Tokyo, Japan, pp. 1-16, 1998.

[5] Uang CM, Nakashima M. *Steel Buckling-Restrained Braced Frames*. Editors: Bozorgnia Y, Bertero VV. Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2004.

[6] Qiang X. "State of the art of buckling-restrained braces in asia". *Journal of Constructional Steel Research*, 61(6), 727-748, 2005.

[7] Uang CM, Nakashima M, Tsai KC. "Research and application of buckling restrained brace frames". *Steel Structures*, 4, 301-313, 2004.

[8] Tsai KC, Lai JWYC, Lin SL, Weng, CH. "Research and application of double-core buckling restrained braces in Taiwan". *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, British Columbia, Canada, 1-6 August 2004.

[9] National Information Service for Earthquake Engineering. "The Earthquake Engineering Online Archive | Nisee e-library". http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Image/CR0310 (02.03.2015).

[10] Watanabe A, Hitomi Y, Yaeki E, Wada A, Fujimoto M. "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube". *9th World Conference on Earthquake Engineering*, Kyoto-Tokyo, Japan, 2-9 August 1988.

[11] Iwata M, Kato T, Wada A. Buckling-Restrained Braces as Hysteretic Dampers. Editors: Mazzolani FM, Tremblay R. STESSA 2000: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas: Proceedings of the Third International Conference *STESSA (21-24 August)*, Montreal, Canada, 33–38, 2000.

[12] Clark P, Aiken I, Kasai K, Ko E, Kimura I. "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices". 69th Annual Convention of Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, USA, 1999.

[13] Chen CC, Chen SY, Liaw JJ. "Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(5), 823-836, 2001.

[14] Higgins C, Newell J. "Development of two new hysteretic dampers". *7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering,* Oakland, California, USA, 21-25 July 2002.

[15] Higgins C, Newell J. "Confined steel brace for earthquake resistance design". *Engineering Journal*, 41(4), 187-202, 2004.

[16] Young KJ, Kim, MH, Kim J, Kim, SD. "Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length". *Engineering Structures*, 31(2), 507-516, 2009.

[17] Tsai KC, Hwang YC, Weng CS, Shirai T, Nakamura H. "Experimental tests of large scale buckling restrained braces and frames". *Passive Control Symposium*, Tokyo, Japan, December 2002.

[18] Tremblay R, Degrange G, Blouin J. "Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system". *8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 13-19 June 1999.

[19] Tremblay R, Bolduc P, Neville R, DeVall R. "Seismic testing and performance of buckling restrained bracing systems". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(2), 183-198, 2006.

[20] Uriz P. Towards Earthquake Resistance Design of Concentrically Braced Steel Structures. Thesis Doctor of Philosophy, University of California, Berkeley, California, USA, 2005.

[21] López WA, DS Lauck, TW, Saunders M. "Structural design and experimental verification of a buckling restrained braced frame system". *American Institute of Steel Construction Engineering Journal*, 4. Quarter, 177-186, 2004.

[22] Aiken ID, Mahin SA, Uriz P. "Large-Scale testing of buckling-restrained braced frames". *Japan Passive Control Symposium*, Tokyo, Japan, December, 2002.

[23] Meritt S, Uang CM, Benzoni G. "Subassemblage Testing of Star Seismic Buckling Restrained Braces". University of California, La Jolla, San Diego, California, USA. Report No TR-2003/04, 2003.

[24] American Institute of Steel Construction. "Seismic Provisions for Structural Steel Building". American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, USA, 2005.

[25] Christopulos AS. Improved Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frames. MSc Thesis, Civil Engineering University, Washington, USA, 2005.

[26] Tsai KC, Hsiao PC. "Pseudo-Dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame-part II: seismic performance of buckling-restrained braces and connections". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 1099-1115, 2008.

[27] Tsai KC, Hsiao PC, Wang KJ, Weng YT, Lin ML, Lin KC, Chen CH, Lai JW, Lin SL. "Pseudo-Dynamic tests of a full-scale CFT/BRB frame-part ı: specimen design experiment and analysis". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* 37, 1081-1098, 2008.

[28] Whitmore RE. "Experimental investigation of stresses in gusset plates". *Bulletin*, 16, 1-33, 1952.

[29] Thornton WA. "Bracing Connections for Heavy Construction". *Engineering Journal*, 21(3), 139-148, 1984.
[30] Lin ML, Tsai KC, Hsiao PC, Tsai CY. "Compressive Behavior of Buckling-Restrained Brace Gusset Connections". *The First Conference on Advanced in Experimental Structural Engineering*, Nagoya, Japan, 19-21 July 2005.
[31] Lin ML, Tsai KC, Tsai CY. "Bi-Directional Sub-Structural Pseudo-Dynamic Testing of a Full-Scale 2-Story BRBF, Part 2: Compressive Behavior of Gusset Plates". *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, CA, USA, 18-22 April 2006.
[32] Tsai KC, Weng YT, Wang KJ, Tsai CY, Lai JW. "Bi-Directional Sub-Structural Pseudo-Dynamic Testing of a Full Scale 2-Story BRBF, Part 1: Seismic Design, Analytical and Experimental Performance Assessments". *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, CA, USA, 18-22 April 2006.
[33] Fahnestock LA, Ricles JM, Sause R. "Experimental Evaluation of a Large-Scale Buckling-Restrained Braced Frame". *Journal of Structural Engineering*, 133(9), 1205-1214, 2007.