

# İçerisi Beton ile Doldurulmuş Çelik Kutu Kesitli Kolonların Gerilme-Şekil Değişirme-Zaman İlişkilerinin İncelenmesi

## Investigation of Stress-Strain-Time Relationships of Concrete Filled Steel Tube Columns

**Mutlu SEÇER\* ve Mehmet Emin KURAL**

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35160, İzmir

Geliş Tarihi/Received : 26.11.2008, Kabul Tarihi/Accepted : 18.09.2009

### ÖZET

Bu çalışmada, içerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların zamana bağlı sünme ve büzülme davranışlarının çeşitli yöntemler ile incelenmesi amaçlanmıştır. Zamana bağlı davranışın incelenmesinde etkin modül yöntemi, yaş faktörüne bağlı etkin modül yöntemi, sünme oranı yöntemi ve geliştirilmiş Dischinger yöntemleri kullanılmıştır. Sünme ve büzülme şekil değiştirmeleri ACI 209 yönetmeliği kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada, zamana bağlı davranışın nümerik olarak incelenebilmesi amacıyla yirmi katlı bir binada içerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli bir kolon seçilmiş ve betondaki gerilme azalması, çelik kutu kesitteki gerilme artışı ile şekil değiştirme bileşenlerindeki değişimler hesaplanmıştır. Gerilme-zaman, şekil değiştirme-zaman, şekil değiştirme bileşenleri-zaman grafikleri sunulmuş ve yöntemlerin zamana bağlı davranışı modellemedeki avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** *Zamana bağlı davranış, Sünme, Büzülme, ACI 209.*

### ABSTRACT

In this study, time dependent creep and shrinkage behaviors of concrete filled steel box section columns are investigated by using various methods. Time dependent behavior is examined by using effective modulus method, age-adjusted effective modulus method, creep rate method and Dischinger method. Shrinkage and creep strains are modeled using ACI 209 specification. In the study, in order to investigate time dependent behavior numerically, a concrete filled steel box section column is selected in a twenty story building and the time dependent stress decrease in concrete and stress increase in steel box section and the changes in strain components are calculated. Stress – time, strain – time and strain components – time graphics are shown and the advantages and the disadvantages of the numerical methods in modeling the time dependent behavior are revealed respectively.

**Keywords :** *Time dependent behavior, Creep, Shrinkage, ACI 209.*

### 1. GİRİŞ

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlar son yıllarda yüksek katlı binalarda yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmuştur (Uy, 1998a). Bu tip elemanların yapılarda kullanılmasının amacı; malzeme, işçilik bakımından ekonomi sağlanması ve yüksek yapı inşasında verimin artırılmasıdır. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli elemanlar ile betonarme elemanlar kıyaslandığında, yanıl deformasyonlarının içinde bulunduğu çelik kutu tarafından sınırlandırılması ile betonun dayanımının yüksek olması, betonun çelik kutu kesit içerisinde bulunması ile çelik kutu kesitin

yerel burkulmasının gecikeceği gibi malzemeler arası oluşmuş olan karşılıklı yapısal avantajlar dikkat çekmektedir (Susantha v.d., 2001). Ayrıca, dayanım/ağırlık oranının yüksek olmasının yanında çelik kutu kesit içerisindeki betonun fazla bakım gerektirmemesi de önemli bir avantajdır. Mimari açıdan incelendiğinde ise, içerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların kullanılması ile daha büyük kullanım alanları elde edilebilir. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların kullanılması inşaat maliyet ve süresini etkileyen önemli faktörlerden biri olan kalıp gereksinimini de oldukça azaltmaktadır. Bu tip

\* Yazılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : mutlu.secer@deu.edu.tr (M. Seçer)

kolonların kullanılması ile iskele kurma maliyeti ve süresi de azalacak ve bu esnada oluşabilecek imalat hataları da bu sayede azalacaktır. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlar genel olarak iki kat için üretilen çelik kolonların şantiyede yerine konması ile gerçekleşmektedir. Günümüzde, altı kat yüksekliğine kadar kolonlar üretilebilmekte ve çelik kutu kesit bir nevi kalıp gibi davranarak betonun pompalanmasına kolaylık sağlamaktadır (Uy ve Patil, 1996). Bu sayede, işçilik maliyeti azalırken inşaat hızı artmaktadır.

İçerisi beton doldurulmuş çelik kolonlar ile birçok yüksek katlı yapı inşa edilmiş ve yüksek dayanımlı beton kullanımı son yıllarda yaygınlaşması ile kolonlardaki büyük aksel yüklerin ekonomik olarak karşılanabilmesi için kullanılan yöntemler de çeşitlilik kazanmıştır (Hajjar, 2000). Avustralya Melbourne'daki 43 katlı ve 160 m. yükseklikteki Casselden Place, Perth'deki 28 katlı ve 110 m. yükseklikteki Forrest Center, Amerika Seattle'deki 56 katlı ve 220 m. yükseklikteki Two Union Square, Chicago'daki 62 katlı ve 270 m. yüksekliğinde AT&T Gateway Tower binaları önemli örnekler olarak sayılabilir (Uy, 1998b). Avrupa kıtasından örnek olarak ise; Almanya'daki Avrupa'nın en yüksek binalarından olan 56 katlı ve 259 m. yükseklikteki Frankfurt Commerzbank binasında kullanılan iç avluyu binanın uzunluğu boyunca taşımakta olan üç adet üçgen kesitli çelik kesitlerin içlerine beton doldurularak imal edilmiş kolonlar gösterilebilir (Wise v.d., 1996). Asya kıtasında ise; Tayvan'daki 101 katlı ve 509 m. yükseklikteki Taipei 101, Çin Shanghai'daki 88 katlı ve 415 m. yükseklikteki Jin Mao Kulesi, Shenzhen'deki 68 katlı ve 384 m. yükseklikteki Di Wang binası, Hong Kong'daki 88 katlı ve 415 m. yükseklikteki İnternasyonal Finans Merkezi gibi binalarda yüksek dayanımlı beton ile doldurulmuş çelik kolonlar kullanılmıştır (Ho, 2007). İçerisi beton ve betonarme ile doldurulmuş çelik kolonlar yalnızca yüksek yapılarda değil, köprü ve iskele ayaklarında, petrol çıkartma platformları gibi çeşitli mühendislik yapılarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Shanmugam ve Lakshmi, 2001).

Bu çalışma ile içerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların zamana bağlı gerilme ve şekil değiştirme davranışları çeşitli pratik nümerik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Bu tür yeni imalat teknikleri için sünme ve büzülme etkileri ile beton ve çelik elemanlarda oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerin değişimlerinin araştırılması önem taşımaktadır. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlarda gerilmelerin zamana bağlı değişiminin incelenmesi ile betondaki gerilmelerde zaman ile azalma ve çelik tüp kesitteki gerilmelerde ise zaman ile oluşan artma miktarları, şekil değiştirme bileşenlerindeki değişim miktarları hesaplanmıştır.

## 2.ZAMANABAĞLIDAVRANIŞIN İNCELENMESİ İÇİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME MODELLERİ

Beton kullanılan yapı sistemlerinde elastik deformasyonların yanında zamana bağlı deformasyonların da olduğu bilinmektedir. Beton döküldükten sonra ilk olarak çevre ve beton arasında nem etkisi ile büzülme gerçekleşir. Büzülme; yükten bağımsız olup betonun kalitesine ve dolayısı ile zamana bağlı bir davranış gösterir. Beton, yük etkisi altında da deformasyon yapar ve bu zamana bağlı davranış sünme olarak adlandırılır. Sünme; betonun özelliklerine, yük durumuna ve zamana bağlı bir davranıştır. Beton bir elemandaki toplam şekil değiştirme  $\epsilon_c(t, \tau)$  yüklemenin yapıldığı andan  $t=\tau$  sonraki herhangi bir  $t$  anı için denklem (1) gibi yazılabilir (Bazant, 1983).

$$\epsilon(t, \tau) = \epsilon_e(t) + \epsilon_c(t) + \epsilon_{sh}(t) \quad (1)$$

Burada;  $\epsilon_e(t)$  elastik şekil değiştirmeyi,  $\epsilon_c(t)$  yüklemenin başladığı zamana göre sünme şekil değiştirmesini, ise kuruma başladığı andaki büzülme şekil değiştirmesini  $\epsilon_{sh}(t)$  göstermektedir. Zamana bağlı etkileri modellemek için CEB (1990), ACI 209 (1997) gibi birçok yönetmelik kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sünme ve büzülme etkilerini incelemek amacıyla ACI 209 (1997) yönetmeliğinden yararlanmıştır.

### 2. 1. Sünme Modeli

Bu çalışmada, sünme şekil değiştirmelerinin modellenmesi için ACI 209 (1997) yönetmeliğinde verilen denklem (2) kullanılmıştır.

$$\phi(t, \tau) = \frac{(t - \tau)^{0.6}}{10 + (t - \tau)^{0.6}} \phi(\infty, \tau) \quad (2)$$

Burada;  $\tau$  betonun gün cinsinden ilk yüklendiği anı,  $(t - \tau)$  ise gün cinsinden yükün etkime süresini,  $\phi(\infty, \tau)$  nihai sünme katsayısını göstermektedir. ACI 209 (1997)'de  $\phi(t, \tau)/\phi(\infty, \tau)$  oranları pratik hesap için tablolar halinde de verilmiştir. Nihai sünme katsayısı ACI 209 (1997)'de denklem (3) gibi elde edilebilir.

$$\phi(\infty, \tau) = 2,35 \gamma_c \quad (3)$$

Burada;  $\gamma_c$  düzeltme katsayısını temsil etmekte olup yüklemenin yapıldığı ilk andaki betonun yaşı, bağıl nem miktarı, ortalama kalınlık veya hacim-yüzey alanı oranı, betonun çökme miktarı, ince agrega miktarı, hava içeriği gibi birçok faktöre bağlıdır (ACI 209, 1997).

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların zamana bağlı sünme davranışları çelik kutu kesitin betonunun içinde bulunan nemin dış atmosfer ortamına çıkışına engel olması nedeniyle betonarme kolonlara göre bir miktar düşük olmaktadır. Yapılan çeşitli deneysel çalışmalar sonucu 0,50-1,50 arasında değişen nihai sünme katsayıları elde etmiştir

(Nakai v.d., 1991; Terry v.d., 1994; Morino v.d., 1996). Bu çalışmada, nihai sünme katsayısı olarak deneysel çalışmalar sonucu Terry arkadaşları tarafından elde edilmiş olan 1,50 değeri kullanılmıştır (Terry v.d., 1994).

## 2.2. Büzülme Modeli

Kurumanın başladığı andan sonraki bir t anı için büzülme şekil değiştirmesi nemli ortamda kürlenmiş beton için denklem (4) gibi yazılabilir (ACI 209, 1997). Ayrıca, denklem (5) ile belirtilen  $\epsilon_{sh}(\infty)$  ifadesi nihai büzülme şekil değiştirmesidir.

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{t}{35+t} \epsilon_{sh}(\infty) \quad (4)$$

$$\epsilon_{sh}(\infty) = 780 \cdot 10^{-6} \gamma'_{sh} \quad (5)$$

Burada;  $\gamma'_{sh}$  düzeltme katsayısını temsil etmekte olup sünme için verilen düzeltme katsayısı gibi birçok faktörlere bağlıdır (ACI 209, 1997). İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların zamana bağlı büzülme davranışları da sünme davranışları gibi betonarme kolonlardan bir miktar düşük olmaktadır. Yapılan çeşitli deneysel çalışmalar sonucu 50  $\mu\epsilon$  – 200  $\mu\epsilon$  arasında değişen nihai büzülme şekil değiştirme değerleri elde etmiştir (Nakai v.d., 1991; Terry v.d., 1994; Morino v.d., 1996). Bu çalışmada, nihai büzülme şekil değiştirmesi olarak deneysel çalışmalar sonucu 45 MPa'lık beton kullanılarak Terry arkadaşları tarafından elde edilmiş olan 200  $\mu\epsilon$  değeri kullanılmıştır (Terry v.d., 1994).

## 3.ZAMANA BAĞLI DAVRANIŞIN İNCELENMESİ İÇİN YÖNTEMLER

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların zamana bağlı hesaplarında şekil değiştirme ve gerilmelerin yapı kullanım ömrü içerisinde bazı kritik zamanlarda bilinmesi gereklidir.

Birçok çalışmada belirtildiği üzere, betonun sünme ve büzülme davranışları değişken olduğundan önceden tam olarak bilinmesi mümkün değildir (Neville, 1997; Torres v.d., 2003). Bu çalışmada sunulan yöntemler çeşitli kabul ve yaklaşımlara dayanmakta olup yöntemlerin avantaj ve dezavantajları tartışılarak sunulmuştur. Buna göre, toplam şekil değiştirme, denklem (1) dikkate alınarak denklem (6) gibi yazılabilir.

$$\epsilon(t, \tau) = \frac{\sigma}{E_c(\tau)} + \frac{\sigma}{E_c(\tau)} \phi(t, \tau) + \epsilon_{sh}(t) \quad (6)$$

Burada;  $\phi(t, \tau)$  ve  $\epsilon_{sh}(t)$  yönetmeliklerde belirtilen yaklaşık modeller, deney sonuçları kullanılarak hesaplanabilir ve bu şekilde zamana bağlı yapı davranışı elde edilebilir (Neville v.d., 1983). Eğer betondaki gerilme zaman içerisinde değişken ise sünme şekil değiştirmesinin hesaplanması güçleşmektedir. Yapının zamana bağlı davranışının gerçekçi bir şekilde modellenmesi için gerilme geçmişi ve betonun yaşlanma etkileri

hesap aşamalarında dikkate alınmalıdır (Bazant ve Baweja, 1995a;b). Bu bölümde, yapıların zamana bağlı davranışlarının incelenmesi için geliştirilmiş olan çeşitli yöntemler sunulmuştur.

## 3.1. Etkin Modül Yöntemi

Etkin modül yöntemi oldukça pratik bir yöntem olup temel olarak denklem (7) ile tanımlanan etkin elastik modülü yaklaşımına dayanır. Ani ve sünme şekil değiştirmelerinden oluşan denklem (6) ifadesinde denklem (7) ile tanımlanan etkin elastik modülü yerine yazılırsa denklem (8) elde edilmiş olur (Bazant, 1988):

$$E_e(t, \tau) = \frac{E_c(\tau)}{1 + \phi(t, \tau)} \quad (7)$$

$$\epsilon(t, \tau) = \frac{\sigma}{E_e(t, \tau)} + \epsilon_{sh}(t) \quad (8)$$

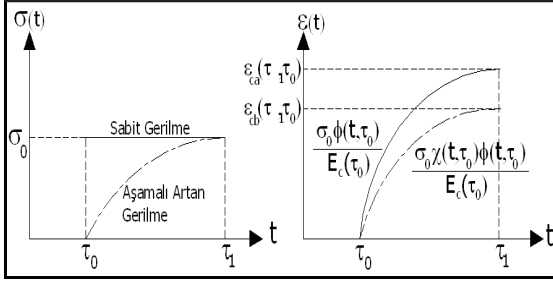
Bu yöntem ile sünme; elastik şekil değiştirmede gecikme şeklinde düşünülmüş ve betonun elastikite modülü azaltılarak hesaplara dahil edilmiştir. Zamana bağlı etkin modül yöntemi ile hesaplarda  $E_e(t, \tau)$  yerine  $E_e(t, \tau)$  kullanılır.

Etkin modül yöntemi ile t anındaki sünme şekil değiştirmesi sadece o andaki mevcut gerilmeye bağlı olup yapının gerilme geçmişinden bağımsız olarak dikkate alınmaktadır. Ayrıca, bu yöntemde betonun yaşlanması da ihmal edilmiştir. Etkin modül yöntemi ile artış halindeki bir gerilme geçmişine sahip sistem için sünme miktarı yüksek, azalan bir gerilme geçmişi için ise sünme miktarı düşük olarak bulunmasına neden olur (Bazant, 1988). Eğer gerilme aniden ortadan kalkarsa bu yöntemde göre sünme aniden kaybolmaktadır. Bundan dolayı, yöntem gerçek davranıştan oldukça uzak olan tamamen mükemmel bir sünme geri dönüşü olduğunu varsayar. Ancak, ilk yüklemeye yapıldığında betonun yaşı ileri ise yaşlanma etkisi düşük olmakta ve sonuçları büyük miktarlarda etkilememektedir. Ayrıca etkin modül yönteminin pratik bir yöntem olması, diğer zamana bağlı hesap yöntemlerine göre en önemli avantajıdır.

## 3.2. Yaş Faktörüne Bağlı Etkin Modül Yöntemi

Yaş faktörüne bağlı etkin modül yöntemi Bazant tarafından geliştirilmiştir (Bazant, 1988). Yöntemin incelenmesi amacıyla Şekil 1'de iki beton örnek için gerilme geçmişi ve buna karşılık elde edilen şekil değiştirme – zaman eğrileri verilmiştir. İlk şekilde gerilme geçmişi,  $\tau_0$  anında ani uygulanan  $\sigma_0$  sabit tutulmuştur. İkinci şekilde ise;  $\tau_0$  anında  $\sigma(t)$  aşamalı olarak uygulanmaya başlanmış ve  $\tau_1$  anında  $\sigma_0$  büyüklüğüne ulaşmıştır. Herhangi bir andaki  $\tau_0 < t$  artan gerilme ile oluşan sünme şekil değiştirmesi değeri gerilmenin ani uygulandığı durumda elde edilen değerden küçüktür. Bu durum kısaca yaş etkisi olarak ifade edilebilir. Beton ne kadar erken yüklenirse son şekil değiştirme o kadar

büyük olur. Bundan dolayı, eğer gerilme aşamalı olarak arttırılırsa azaltılmış bir sünme katsayısı sünme şekil değiştirmesini hesaplamak için kullanılabilir. Bu azaltılmış sünme katsayısını  $\chi(t, \tau_0)\phi(t, \tau_0)$  ile ifade etmek mümkündür. Burada,  $\chi(t, \tau_0)$  katsayısı yaşlanma katsayısı olarak adlandırılmış olup genel olarak 0,60–0,90 arasında değerler aldığı bilinmektedir (Bazant, 1988).



Şekil 1. Sabit ve değişken gerilme geçmişleri için sünme davranışı.

$t - \tau_0$  arasında aşamalı olarak arttırılan,  $t$  anındaki  $\sigma(t)$  gerilmesinden dolayı oluşan sünme şekil değiştirmesi denklem (9) gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\sigma(t)}{E_c(\tau_0)} \chi(t, \tau_0) \phi(t, \tau_0) \quad (9)$$

Herhangi bir  $t$  anındaki toplam şekil değiştirme;  $\sigma_0$  yüklemesinden oluşan şekil değiştirme ile aşamalı olarak artan gerilme artışı  $\Delta\sigma(t)$  ve büzülme şekil değiştirmesinin toplamı olarak denklem (10) ve denklem (11) ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon(t, \tau) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} [1 + \phi(t, \tau_0)] + \frac{\Delta\sigma(t)}{E_c(\tau_0)} [1 + \chi(t, \tau_0) \phi(t, \tau_0)] + \varepsilon_{sh}(t) \quad (10)$$

$$\varepsilon(t, \tau) = \frac{\sigma_0}{E_c(t, \tau_0)} + \frac{\Delta\sigma(t)}{E_c(t, \tau_0)} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (11)$$

Burada;  $E_c(t, \tau_0)$  etkin elastisite modülüdür.  $\bar{E}_c(t, \tau_0)$  ise yaşlanma etkisi dikkate alınmış etkin elastisite modülüdür.  $\bar{E}_c(t, \tau_0)$  denklem (12) gibi ifade edilebilir (ACI 209, 1997).

$$\bar{E}_c(t, \tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \chi(t, \tau_0) \phi(t, \tau_0)} \quad (12)$$

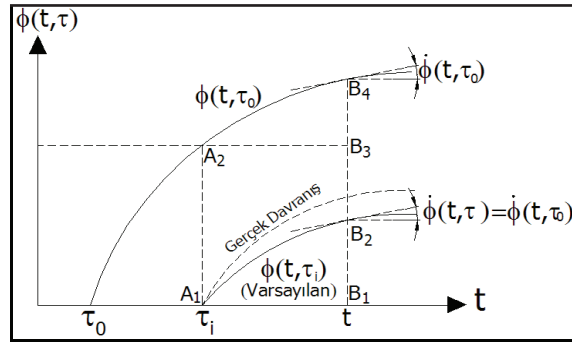
Sünme sabiti gibi,  $\chi(t, \tau_0)$  ilkyüklemenin yaşı, yüklemenin süresi, büyüklüğü ile elemanın geometrik şekli gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. İlk yükleme yaşı 5 günü geçtiği zaman son yaşlanma katsayısı  $\chi(\infty, \tau_0)$  yaklaşık 0,80 civarında ve nihai sünme katsayısı  $1,5 < \phi(t, \tau_0) < 3,5$  arasındadır (Bazant, 1988). Bu sınırların sünme katsayılarının belirlenmesindeki belirsizlikler ve diğer malzeme özellikleri düşünüldüğünde oldukça makul olduğu düşünülmektedir. Hesaplarda  $\chi(t, \tau_0) = 0,80$  kabulü ile yöntem pratikleştirmekte ve malzeme, yapı davranışının makul yaklaşıkla

hesaplanabilmesine imkan vermektedir (Bazant, 1988).

Yaşlanma katsayısı  $\chi(t, \tau_0)$  elde edildikten sonra yaş faktörüne bağlı etkin modül yöntemi ile hesap yapılırken etkin modül yöntemine benzer olarak yalnızca elastik hesap yapılması yeterli olmaktadır.

### 3. 3. Sünme Oranı Yöntemi

Sünme oranı yöntemi, sünme oranının zamana bağlı değişiminin  $d\phi(t, \tau)/dt$  yüklenme yaşından bağımsız olduğu kabulünü yaparak sünme davranışını incelemektedir. Yöntemde, farklı zamanlarda yüklenmiş sünme eğrilerinin Şekil 2'de görüldüğü gibi birbirlerine paralel olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım gerçek davranışı yansıtmamasına rağmen, sünme oranının yüklenme yaşından bağımsız olduğunun varsayılması ile herhangi bir yüklenme geçmişi için sadece tek bir sünme eğrisi ile sünme şekil değiştirmelerinin hesaplanması mümkün olmaktadır.



Şekil 2. Sünme oranı yöntemi için varsayılan paralel sünme eğrileri.

Herhangi bir  $\tau_i$  yaşında uygulanan gerilme etkisi ile oluşan sünme - zaman eğrisi tek bir eğri  $\phi(t, \tau_0)$  ile tanımlanmıştır. Burada,  $\tau_0$  ilk yüklenme anındaki betonun yaşını göstermektedir. Sünme oranı yöntemine göre  $|B_3B_4|$  ile  $|B_1B_2|$  birbirine eşit olduğu varsayılırsa  $|B_1B_2| = |B_1B_4| - |A_1A_2|$  olarak yazılabilir. Sabit  $\sigma_i$  gerilmesi  $\tau_i$  anında uygulandığı düşünülürse, herhangi bir  $t$  anındaki sünme şekil değiştirmesi denklem (13) ile gösterilebilir. Sünme oranı yöntemine göre; denklem (13)'de denklem (14) yazılırsa denklem (15) elde edilir.

$$\varepsilon_c(t, \tau_i) = \frac{\sigma_i}{E_c(\tau_0)} \phi(t, \tau_i) \quad (13)$$

$$\phi(t, \tau_i) = \phi(t, \tau_0) - \phi(\tau_i, \tau_0) \quad (14)$$

$$\varepsilon_c(t, \tau_i) = \frac{\sigma_i}{E_c(\tau_0)} [\phi(t, \tau_0) - \phi(\tau_i, \tau_0)] \quad (15)$$

Değişken gerilme geçmişi  $\delta t$  küçük zaman aralıklarına bölünür ve her küçük zaman aralığı için gerilmenin sabit olduğu düşünülürse, limit durumunda  $\delta t$



sıfıra yakınsar ve denklem (16) ile gösterilen sünme oranı değişimi o andaki gerilme ile sünme katsayısı değişimi oranına bağlı olur.

$$\dot{\varepsilon}_c(t, \tau) = \frac{\sigma(t)}{E_c(\tau_0)} \dot{\phi}(t, \tau_0) \quad (16)$$

Herhangi bir zaman için anlık şekil değiştirme oranı değişimi denklem (17) ile gösterildiği gibi gerilme oranındaki değişime bağlıdır.

$$\dot{\varepsilon}_c(t, \tau) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_c(\tau_0)} \quad (17)$$

Bu denklemde, sabit bir elastisite modülü dikkate alınmıştır. Büzülme davranışı için de sünme için yapılan kabule benzer bir yaklaşım yapılabilir. Buna göre, toplam beton şekil değiştirmesindeki değişim bu oranlarının toplamı olarak denklem (18) yazılabilir.

$$\dot{\varepsilon}_c(t, \tau) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_c(\tau_0)} + \dot{\phi}(t, \tau_0) \left[ \frac{\sigma(t)}{E_c(\tau_0)} + \frac{\varepsilon_{sh}(\infty)}{\phi(\infty, \tau_0)} \right] \quad (18)$$

Birinci mertebeden diferansiyel denklem yapı hesapları için bünye denklemi olarak kullanılabilir. Sünme oranı yöntemi matematiksel olarak cazip olsa da birtakım eksiklikler içermektedir. Sünme eğrilerinin paralel olarak kabul edilmesi yaşı ileri betonlar için sünme etkisinin düşük hesaplanmasına neden olur. Zaman ilerledikçe  $\phi(t, \tau_0)$  sıfıra yakınsar ve sünme oranı yöntemine göre  $\dot{\varepsilon}_c(t, \tau_0)$  de sıfır olur ki bu gerçek davranışı yansıtmamaktadır. Yaşı ileri betonlarda sünme erken yaştaki betonlara oranla oldukça düşük miktarlarda da olsa vardır. Ancak, özellikle erken yaşta beton kullanıldığı ve gerilmenin büyük değişimler göstermediği birçok pratik durum için sünme oranı yöntemi iyi sonuçlar vermektedir.

### 3. 4. Geliştirilmiş Dischinger Yöntemi

Geliştirilmiş Dischinger yöntemi ile nihai uzun-dönemli davranışın gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi amaçlanmış ve sünme şekil değiştirmesi bileşenleri  $\varepsilon_d$  geri dönen elastik şekil değiştirme ile  $\varepsilon_f$  geri dönüşü olmayan şekil değiştirme bileşenlerine ayrılmıştır. Bazı çalışmalarda,  $\varepsilon_d$  ifadesi ani elastik şekil değiştirme olarak kabul edilmiş ve  $\varepsilon_f$  ise sünme oranı yöntemindeki toplam sünme şekil değiştirmesine benzer olarak hesaplanması önerilmiş ve daha sonra matematiksel işlemleri kolaylaştırmak amacıyla gecikmiş elastik sünme katsayısını  $\phi_d = \varepsilon_d / \varepsilon_c$  yüklemeye anındaki betonun yaşından bağımsız olarak 0,333 olarak alınması önerilmiştir (Naguib ve Mirmiran, 2003). Bu ifade CEB (1990) yönetmeliğinde  $\phi_d = 0,40$  olarak dikkate alınmış ve sünme modeli olarak kullanılmıştır (CEB, 1990). Toplam beton şekil değiştirmesi denklem (19) ve benzer olarak denklem (20) veya denklem (21) gibi yazılabilir: geri dönüşü olmayan şekil değiştirme bileşenlerine ayrılmıştır. Bazı çalışmalarda, ifadesi ani elastik şekil

değiştirme olarak kabul edilmiş ve ise sünme oranı yöntemindeki toplam sünme şekil değiştirmesine benzer olarak hesaplanması önerilmiş ve daha sonra matematiksel işlemleri kolaylaştırmak amacıyla gecikmiş elastik sünme katsayısını yüklemeye anındaki betonun yaşından bağımsız olarak 0,333 olarak alınması önerilmiştir (Naguib ve Mirmiran, 2003). Bu ifade CEB (1990) yönetmeliğinde olarak dikkate alınmış ve sünme modeli olarak kullanılmıştır (CEB, 1990). Toplam beton şekil değiştirmesi denklem (19) ve benzer olarak denklem (20) veya denklem (21) gibi yazılabilir:

$$\varepsilon(t, \tau) = \varepsilon_c(t) + \varepsilon_c(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (19)$$

$$\varepsilon(t, \tau) = \varepsilon_c(t) + \varepsilon_d(t) + \varepsilon_f(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (20)$$

$$\varepsilon(t, \tau) = \varepsilon_c'(t) + \varepsilon_f(t, \tau) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (21)$$

Burada;  $\varepsilon_c'(t)$  fiktif ani şekil değiştirme olup, gerilmenin uygulandığı andaki gecikmiş elastik sünme şekil değiştirmesini içerir. Benzer şekilde, toplam şekil değiştirme denklem (22) ve denklem (23) şeklinde yazılabilir.

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} (1 + \phi_d) + \frac{\sigma_0}{E_c(\tau_0)} \phi_f(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (22)$$

$$\varepsilon(t, \tau_0) = \frac{\sigma_0}{E_c'(\tau_0)} + \frac{\sigma_0}{E_c'(\tau_0)} \phi'(t, \tau_0) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (23)$$

Burada;  $E_c'(\tau_0)$  fiktif elastisite modülü ve  $\phi'(t, \tau)$  azaltılmış sünme fonksiyonudur. Burada;  $\phi_d = 0,40$  olarak denklem (24) ve denklem (25) ifadelerinde yerine yazılabilir.

$$E_c'(\tau_0) = \frac{E_c(\tau_0)}{1 + \phi_d} \quad (24)$$

$$\phi'(t, \tau_0) = \frac{\phi_f(t, \tau_0)}{1 + \phi_d} = \frac{\phi(t, \tau_0) - \phi_d}{1 + \phi_d} \quad (25)$$

Geliştirilmiş Dischinger yöntemi, sünme oranı yöntemine oldukça benzerdir.  $E_c(\tau_0)$  ve  $\phi(t, \tau_0)$  ifadeleri yerine  $E_c'(\tau_0)$  ve  $\phi'(t, \tau_0)$  ifadeleri kullanılmış ve beton için bünye denklemi denklem (18) ve denklem (21)'e benzer olarak denklem (26) ve denklem (27) gibi yazılmıştır.

$$\dot{\varepsilon}(t, \tau) = \dot{\varepsilon}_c'(t) + \dot{\varepsilon}_f(t, \tau) + \dot{\varepsilon}_{sh}(t) \quad (26)$$

$$\dot{\varepsilon}_c(t, \tau) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_c'(\tau_0)} + \dot{\phi}'(t, \tau_0) \left[ \frac{\sigma(t)}{E_c'(\tau_0)} + \frac{\varepsilon_{sh}(\infty)}{\phi'(\infty, \tau_0)} \right] \quad (27)$$

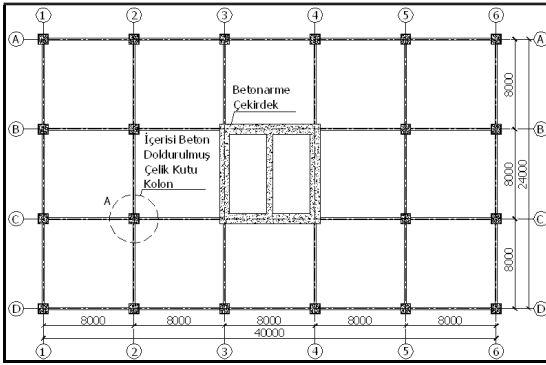
Geliştirilmiş Dischinger yöntemi, etkin modül ve sünme oranı yöntemlerinden her ikisinin de

bileşenlerini içerir. Azaltılmış elastisite modülü ve azaltılmış sünme katsayısı sünme geri dönüşünü modellemek için kullanılmıştır.

Artan ve azalan gerilme geçmişleri bulunan sistemlerin incelenmesini içeren birçok problemde geliştirilmiş Dischinger yöntemi kullanılabilir. Ancak, sünme akışı eğrilerinin paralel kabulü, sünme oranı yönteminde olduğu gibi, yaşı ileri betonların sünme değerlerini olduğundan küçük hesaplanmasına neden olur. Ayrıca, yükmeden hemen sonraki sünme değerlerini ise olduğundan büyük hesaplanmasına yol açar. Ancak uzun süreli davranışın elde edilmesi için ise yöntemin başarılı olduğu düşünülmektedir.

## 5. SAYISAL UYGULAMA

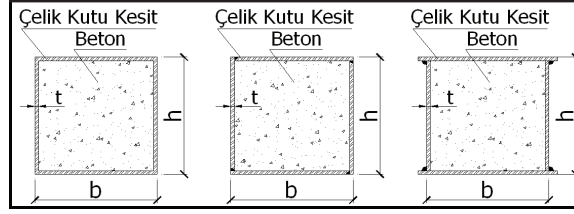
Çalışmada, sayısal örnek olarak Şekil 3 ile kat planı gösterilen merkezinde betonarme bir çekirdek bulunan yirmi katlı bir binanın zemin katından seçilen kolon elemanın zamana bağlı davranışı önceki bölümde tanıtılan yöntemler kullanılarak araştırılmıştır.



Şekil 3. Kat planı ve içerisi beton doldurulmuş çelik kutu kesiti.

Çelik tüp kesitin elastisite modülü 200GPa, beton malzemenin ise 28 günlük basınç dayanımı 45 MPa, elastisite modülü 36GPa olacak şekilde seçilmiş ve beton ile çelik arasında herhangi bir aderans problemi olmadığı kabul edilmiştir. Bina için hareketli yük ve öz ağırlık yükleri ile birlikte toplam hesap yükü 15 kN/m<sup>2</sup> olarak dikkate alınmıştır.

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesit Şekil 4 ile gösterilmiştir. Bazı durumlarda istenilen boyutlarda hazır üretim kutu kesitler bulunamayabilir. Bu tür durumlarda saç levhalar kullanılarak bulonlu veya daha sık tercih edilen kaynaklı şekilde kutu kesitler üretilebilir. Seç levhalarla yapılan imalatlarda birleşim elemanları da mutlaka ayrıca tahkik edilmelidir.



Şekil 4. İçerisi beton doldurulmuş çelik kutu kesitler.

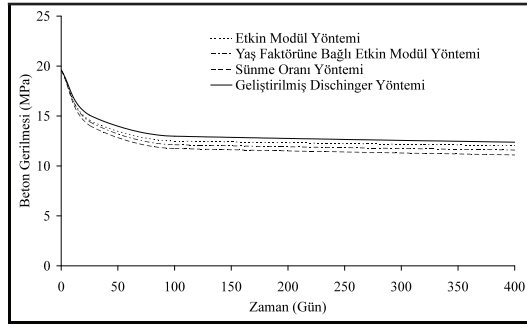
İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların en önemli avantajlarından biri yerel burkulma etkilerinin gecikmesi ile nispeten büyük deformasyon kabiliyeti kazanmış kolonların deprem performanslarının artmasıdır. Çelik kutu kesitlerde, yerel burkulmadan göçme genel olarak karşılıklı iki yüzün içe ve diğer iki yüzün dışa doğru burkulması ile gerçekleşir (Uy ve Bradford, 1996). Beton, çelik kutu kesitli kolonun içinde olması ile içe doğru olan burkulma engellenir ve bu sayede çeliğin daha büyük şekil değiştirmeler yapabilmesi, dolayısı ile daha iyi deformasyon kapasitesine sahip olması sağlanmış olur. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlarda yerel burkulmanın engellenmesi için Tablo 1'de çeşitli yönetmelikler ve çalışmalarda verilmiş sınır değerler ile bu çalışmada kullanılan kolon eleman kesit özellikleri sunulmuştur. Tablo 1'de çelik tüp kesitin elastisite modülü  $E_s$  200GPa ve akma gerilmesi  $F_y$  240 MPa olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 1. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların yerel burkulma sınırları.

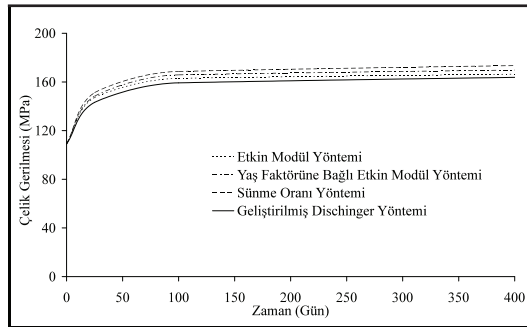
	Kesit genişliği / Et kalınlığı (b/t)	Kutu 800.800.18
AJ (1987)	$b/t \leq \sqrt{6.04E_s/F_y}$	$44 \leq 71$
Eurocode 4 (1996)	$b/t \leq \sqrt{3.17E_s/F_y}$	$44 \leq 51$
AISC (2001)	$b/t \leq \sqrt{3E_s/F_y}$	$44 \leq 50$
Uy ve Bradford (1994)	$b/t \leq 96\sqrt{250/F_y}$	$44 \leq 98$

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlardan oluşturulacak sistemin inşasının hızlı bir şekilde yapıldığı, bir başka deyişle binanın zamana bağlı davranışının incelendiği sürenin yanında ihmal edilebilecek kadar kısa sürede gerçekleştiği, kabul edilmiş ve imalat safhasının tamamlanmasından sonraki zamana bağlı davranış önceki bölümlerde tanıtılan yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlarda sünme ve büzülme nedeniyle incelenen tüm yöntemler için beton bileşen üzerindeki gerilmenin zamana bağlı olarak azaldığı, çelik kutu kesit bileşen üzerindeki gerilmenin ise zamana bağlı olarak artış gösterdiği görülmüş ve elde edilen değerler Şekil 5 ve Şekil 6 ile gösterilmiştir.

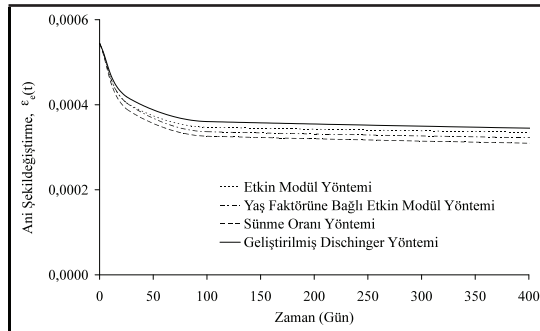


Şekil 5. Kolon eleman için beton gerilmesi – zaman ilişkisi.

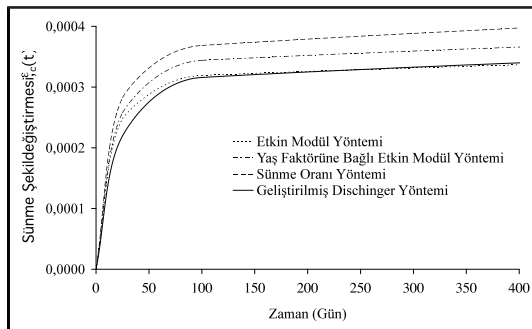


Şekil 6. Kolon eleman için çelik gerilmesi – zaman ilişkisi.

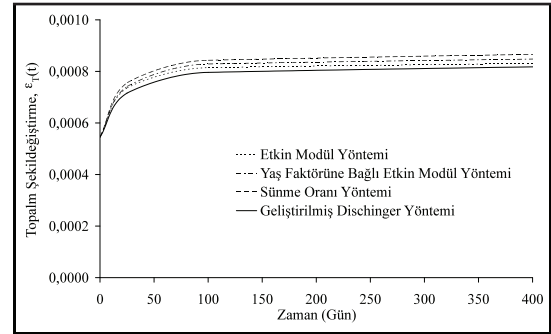
İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolon elemandaki şekil değiştirmelerin zamana bağlı değişimleri önceki bölümde tanıtılan yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Ani şekil değiştirme-zaman ilişkisi Şekil 7, sünme şekil değiştirmesi-zaman ilişkisi Şekil 8 ve toplam şekil değiştirme-zaman ilişkisi Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Kolon eleman için ani şekil değiştirme – zaman ilişkisi.



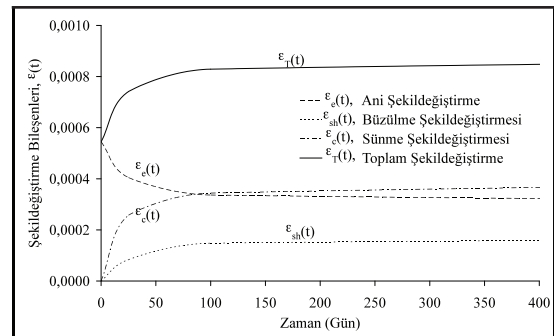
Şekil 8. Kolon eleman için sünme şekil değiştirmesi-zaman ilişkisi.



Şekil 9. Kolon eleman için toplam şekil değiştirme – zaman ilişkisi.

Ayrıca, yaş faktörlü etkin modül yöntemi ile yirmi katlı binanın incelenen kolonu için elde edilmiş olan şekil değiştirme bileşenlerinin zamana bağlı davranışlarını bir arada görmek amacı ile şekil değiştirme bileşenleri-zaman grafiği Şekil 10 ile sunulmuştur.

İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolon elemandaki zamana bağlı eksenel yük değişimi gibi diğer bazı hesap sonuçları da incelenebilir. Örneğin yirmi katlı binada incelenen kolon eleman için inşaatın tamamlandığı anda kesitteki beton ve çelik bileşenlerde bulunan gerilme değerleri kullanılarak eksenel yük dağılımı hesaplanır ise eksenel yükün %58'i beton ve % 42'lik kısmı çelik tarafından karşılanmakta olduğu sonucu elde edilir. Uzun bir süre sonra (t=10000 gün) elemandaki eksenel yük dağılımı yaş faktörüne bağlı etkin modül yöntemi ile kesit bileşenlerindeki gerilme dağılımı dikkate alınarak hesaplandığında, eksenel yük % 28 beton ve % 72 çelik tarafından karşılanır duruma gelmiştir.



Şekil 10. Yaş faktörüne bağlı etkin modül yöntemi ile incelenen kolon elemanın şekil değiştirme bileşenleri-zaman ilişkisi.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışma ile içerisi beton dolu çelik kutu kesitlerdeki sünme ve büzülme davranışlarının yapı üzerindeki etkileri seçilmiş bir kolon eleman üzerinde incelenmiş ve hesaplanan gerilme, şekil değiştirme dağılımlarının önemli ölçüde etkilediği sayısal olarak ortaya konulmuştur.

Çalışmada kullanılan etkin modül yöntemi ve yaş faktörlü etkin modül yöntemi uzun süre içerisinde binaya uygulanan yüklerde önemli bir değişim olmadığı varsayıldığından birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Sünme oranı yöntemi ise, ilk iki yöntemle göre betondaki gerilmeleri nispeten düşük, çelikteki gerilmeleri ise yüksek bulmuştur. Bunun nedeni, yöntem kısmında belirtildiği gibi yöntem geliştirilirken sünme geri dönüşünün dikkate alınmamasıdır. Diğer bir yöntem olan geliştirilmiş Dischinger yöntemi ise başlangıçta ilk iki yöntemden bir miktar farklı sonuçlar vermiş, ancak zaman ilerledikçe bu yöntemlerde elde edilen sonuçlara yaklaştığı görülmüştür. Zamana bağlı davranışı incelemek amacıyla kullanılan tüm yöntemler için içeriği beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonlarda zamana bağlı olarak betondaki gerilmenin zamanla azaldığı ve çelikteki gerilmelerin ise zamanla arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, sünme ve büzülme etkileri ile şekil değiştirme değerlerindeki

değişim de hesaplanmıştır. Özellikle yüksek binalarda kolonlardaki şekil değiştirmelerin, dolayısıyla kolon boy kısaltmalarının hesaplanması ile sistemde oluşabilecek ek moment ve kesme kuvvetlerinin elde edilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Sünme ve büzülme davranışları gerçeğe ne kadar yakın modeller ile temsil edilebilirler ise yapıların zamana bağlı davranışları da gerçek davranışa o oranda yakın olacaktır.

Betonun zamana bağlı davranışını mükemmel olarak yansıtabilen bir sayısal tahmin yapılabilmesi mümkün değildir. Ancak, çalışmada kullanılan yöntemler ile üst ve alt sınır değerler elde edilebilir ve zamana bağlı etkilerin gelecekteki herhangi bir durumda kritik olup olmayacağı önceden bilinebilir. Bu sayede, bazı gerekli durumlar için boyutlandırma esnasında birtakım önlemler alınarak uzun süreli davranış etkilerinin yapıya vereceği beklenmedik hasarların azaltılabileceği sağlanmış olur.

#### KAYNAKLAR

- ACI 209. 1997. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, American Concrete Institute Committee 209, Detroit, USA.
- AIJ. 1987. Structural calculations of steel reinforced concrete structures, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan.
- AISC. 2001. AISC, Manual of steel construction-load and resistance factor design (LRFD), 3<sup>rd</sup> Edition, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.
- Bazant, Z.P. 1988. Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete, John Wiley and Sons.
- Bazant, Z.P. 1983. Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature, Nuclear Engineering and Design. (76), 183–191.
- Bazant, Z.P. and Baweja, S. 1995a. "Justification and refinement of Model B3 for concrete creep and shrinkage, I Statistics and sensitivity", Materials and Structures (RILEM. Paris). (28), 415–430.
- Bazant, Z.P. and Baweja, S. 1995b. "Justification and refinement of Model B3 for concrete creep and shrinkage, II Updating and theoretical basis", Materials and Structures (RILEM. Paris). (28), 488–495.
- CEB. 1990. Model code for concrete structures, Comité Euro-Internationale du Béton (CEB)-Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), Thomas Telford, London, England.
- Eurocode 4. 1996. Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1. General – common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Hajjar, J.F. 2000. Concrete-filled steel tube columns under earthquake loads. Prog. Struct. Engng. Mater. (2), 72–81.
- Ho, P.H.K. 2007. "Economics planning of super tall buildings in Asia Pacific Cities", International Federation of Surveyors, The XXX FIG General Assembly and Working Week, 13–17.05.2007, Hong Kong.
- Morino, S., Kawaguchi, J. and Cao, Z.S. 1996. "Creep behavior of concrete – filled steel tubular members", Composite Construction in Steel and Concrete III: Proc. Engineering Foundation Conf., Irsee, Germany. 514–525.
- Nakai, H., Kurita, A. and Ichinose, H. 1991. "An experiment study on creep of concrete filled pipes", Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Steel – Concrete Composite Structures. 55–60.
- Neville, A.M. 1997. Properties of Concrete. 4<sup>th</sup> Ed., Wiley, New York, USA.
- Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J. 1983. Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, Longman Group Ltd., New York, USA.
- Shanmugam, N.E. and Lakshmi, B. 2001. State of the art report on steel-concrete composite columns, Journal of Constructional Steel Research. (57), 1041–1080.
- Susantha, K.A.S., Ge, H. and Usami, T. 2001. Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes, Engineering Structures. (23), 1331–1347.
- Terry, P.J., Bradford, M.A. and Gilbert, R.I. 1994. "Creep and shrinkage of concrete in concrete – filled circular steel tubes", Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symposium on Tubular Structures, Melbourne, Australia. 293–298.



Torres, L., Almansa F.L., Cahis, X. and Bozzo, L.M. 2003. A numerical model for sequential construction, repairing and strengthening of 2-d concrete frames, *Engineering Structures*. (25), 323–336.

Uy, B. 1998a. Ductility, strength and stability of concrete filled fabricated steel box columns for tall buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*. (7), 113–133.

Uy, B. 1998b. Concrete-filled fabricated steel box columns for multi storey buildings: behavior and design, *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1 (2), 150–158.

Uy, B. and Bradford, M.A. 1994. "Local buckling of composite steel – concrete rectangular columns", *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Steel Structures, The Steel Advantage, Jakarta, Indonesia*. 313–321.

Uy, B. and Bradford M.A. 1996. Elastic local buckling of steel plates in composite steel – concrete members, *Engineering Structures*, 18 (3), 193–200.

Uy, B. and Patil, S.B. 1996. Concrete filled high strength steel box columns for tall buildings: behaviour and design, *The Structural Design of Tall Buildings*. (5), 75–94.

Naguib, W. and Mirmiran, A. 2003. Creep modeling for concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. (59), 1327–1344.

Wise, C.M., Bridges, H.W., Walsh, S.R., Smith, C.J., Cross, P.T. and Bailey, P.A. 1996. The new Commerzbank headquarters, Frankfurt, Germany, *The Structural Engineer, J. Instn. Struct. Engrs, UK*, 74 (7), 111–122.