

ACE 2006

7th International Congress on

Advances in Civil Engineering



October 11-13, 2006

BOOK OF ABSTRACTS

EDITORS
ORGANIZING COMMITTEE

Yıldız Technical University
İSTANBUL - TURKEY

Advisory Committee

Metin AYDOĞAN (ITU), Huriye BİLSEL (EMU),
Erol GÜLER (BU), Tuğrul TANKUT (METU),
Yalçın YÜKSEL (YTU) (Congress Chair)

Local Organizing Committee

Şenay ATABAY, Cem AYDEMİR, Tuba BOSTAN, Ali COŞAR, Havvanur KILIÇ,
Ali KOÇAK (Congress Secretary), Orhun KÖKSAL, İsmail ŞAHİN, Nabi YÜZER

Scientific Committee

Abdulrezak N. MOHAMED (EMU), Abdurrahman GÜNER (Tekirdağ Ü.), Ahmet DURMUŞ (KTÜ), Akın ÖNALP (IKU), Alemdar BAYRAKTAR (KTÜ), Alessandro Di GRAZİANO (Catania Ü), Ali KOÇAK (YTÜ), Ali GÜNYAKTI (EMU), Alper İLKİ (İTÜ), Atakan AKSOY (KTÜ), Atilla AKKOYUNLU (BÜ), Aydın EREL (YTÜ), Ayfer ERKEN (İTÜ), Ayhan İNAL (ODTU), Ayşe EDİNÇLİLER (BÜ), B. Sadık BAKIR (ODTÜ), Bihrat ÖNÖZ (ITÜ), Bülent BARADAN (Dokuz Eylül Ü.), Bülent AKBAŞ (Gebze YTE), Cemal EYYUBOV (Erciyes Ü.), Cengiz KARAKOÇ (BÜ), Cengiz DÜNDAR (Çukurova Ü.), Cumhur AYDIN (Atılım Ü.), Darçın AKIN (Gebze YTE), E. Beyhan YEĞEN (İTÜ), Emin GÜÇBİLMEZ (EMU), Emine AĞAR (İTÜ), Ercan YÜKSEL (İTÜ), Erdinç SOYER (EMU), Erdoğan UZGİDER (İTÜ), Ergun GEDİZLİOĞLU (İTÜ), Esin ÖZKAN Çevik (YTÜ), Faruk YÜKSELER (YTÜ), Fevziye AKÖZ (YTÜ), Feyza ÇİNİCİOĞLU (İÜ), Fikret TÜRKER (Akdeniz Ü.), Filiz PİROĞLU (İTÜ), Gökhan BAYKAL (BÜ), Gökmen ERGÜN (BÜ), Gülay ALTAY (BÜ), Güliz BAYRAMOĞLU (İTÜ), Gülten GÜLAY (İTÜ), Güney ÖZCEBE (ODTÜ), Halil ÖNDER (ODTÜ), Halim CEYLAN (Pamukkale Ü.), Halit ÖZEN (YTÜ), Haluk GERÇEK (İTÜ), Hasan YILDIRIM (İTÜ), Hasan KAPLAN (Pamukkale Ü.), Hasan BİRİCİK (İKÜ), Hasan BODUROĞLU (İTÜ), Havvanur KILIÇ (YTÜ), Hayrullah AĞAÇCIOĞLU (YTÜ), Hesham RAKHA (Virgina Tech, ABD), Hikmet Hüseyin ÇATAL (Dokuz Eylül Ü.), Hikmet BAYIRTEPE (Gazi Ü.), Hilmi LUŞ (BÜ), Hulusi ÖZKUL (BÜ), Huriye BİLSEL (EMU), Hüsnü CAN (Gazi Ü.), Işıkhan GÜLER (Yüksel Proje A.Ş.), İ. Kutay OZAYDIN (YTÜ), İ. Özgür YAMAN (ODTÜ), İbrahim EKİZ (YTÜ), İlhan AVCI (İTÜ), İlker ÖZDEMİR (Eskişehir Osmangazi Ünv), İlknur BOZBEY (İÜ), İrfan COŞKUN (YTÜ), İsmail AYDIN (ODTÜ), İsmail ŞAHİN (YTÜ), İsmail DURANYILDIZ (İTÜ), Joern PACHL (IfVE), K.P. GEORGE (The University of Mississippi, ABD), Kadir GÜLER (İTÜ), Kambiz RAMYAR (Ege U.), Kejin WANG (Iowa State University, ABD), Kemal Selçuk ÖĞÜT (İTÜ), Lei YU (Texas Southern University, ABD), M. Emin BİRPINAR (YTÜ), M. Emin ÖCAL (İTÜ), M. Ruhi AYDIN (Eskişehir Osmangazi Ü.), M. Tuğrul ÖZKAN (İTÜ), M. Uğur MÜNGEN (İTÜ), Mehmet Emin KARAHAN (İTÜ), Mehmet Hakkı OMURTAG (İTÜ), Mehmet Ufuk ERGÜN (ODTÜ), Mehmet UYAN (İTÜ), Mehmet BERİLGEN (YTÜ), Melih YANMAZ (ODTÜ), Melike ALTAN (İTÜ), Metin AYDOĞAN (İTÜ), Metin GER (ODTÜ), Metin HÜSEM (KTÜ), Murat KURUOĞLU (İTÜ), Mustafa YILDIRIM (YTÜ), Mustafa ZORBOZAN (YTÜ), Mustafa GÖĞÜŞ (ODTÜ), Mustafa ÖNAL (Gazi Ü.), Mustafa GÜRSOY (YTÜ), Nabi YÜZER (YTÜ), Nadir YAYLA (İTÜ), Nagui ROUPHAİL (North Carolina State University, ABD), Necati AĞIRALİOĞLU (İTÜ), Nesrin YARDIMCI (İTÜ), Nilgün HARMANCIOĞLU (Dokuz Eylül Ü.), Orhan YÜKSEL (Ege Ü.), Orhun KÖKSAL (YTÜ), Perviz AHMEDZADE (Fırat Ü.), Recep İYİSAN (İTÜ), Saadet BERİLGEN (YTÜ), Sedat KAPDAŞLI (İTÜ), Serap KAHRAMAN (Dokuz Eylül Ü.), Serhan TANYEL (Dokuz Eylül Ü.), Sinan HINISLIOĞLU (Atatürk Ü.), Sinan ALTIN (Gazi Ü.), Sönmez YILDIRIM (YTÜ), Sunanda DİSSANAYAKE (Kansas State University, ABD), Süreyya TAYFUR (İSFALT A.Ş.), Syed Tanvir WASTİ (ODTÜ), Talat BİRGÖNÜL (ODTÜ), Tuba BOSTAN (YTÜ), Tuğrul TANKUT (ODTÜ), Turan ÖZTURAN (BÜ), Turgut ÖZTÜRK (İTÜ), Tülay AKSU (İTÜ), Yalçın YÜKSEL (YTÜ), Yaşar UĞUR (Erciyes Ü.), Yeşim ÇELİKOĞLU (YTÜ), Yılmaz AKKAYA (İTÜ), Zalihe NALBANTOĞLU (EMU), Zekai CELEP (İTÜ), Zekai ANGIN (KTÜ), Zekeriya POLAT (YTÜ), Zeki HASGÜR (İTÜ), Zübeyde ÖZTÜRK (İTÜ)

KEYNOTE PAPERS

1 APPLICATIONS OF A NEURAL NETWORK TO PREDICT WAVE OVERTOPPING AT COASTAL STRUCTURES.....1
Jentsje W. van der MEER, Marcel R.A. van GENT, Beatriz POZUETA, Hadewych VERHAEGHE, Gosse-Jan STEENDAM, Josep R. MEDINA

2 WAVE TRANSMISSION AT LOW-CRESTED STRUCTURES, INCLUDING OBLIQUE WAVE ATTACK.....12
Jentsje w. Van der MEER, Rıccardo BRIGANTI, Baoxıng WANG, Barbara ZANUTTIGH

3 BETTER MATERIALS FOR SAFER STRUCTURES FIRE RESISTANCE OF ULTRA HIGH-PERFORMANCE CONCRETES 23
Pietro G. GAMBAROVA

4 UNDERSTANDING AND ASSESSMENT OF DEBONDING FAILURES IN FRP-CONCRETE SYSTEMS 39
Oral BÜYÜKÖZTÜRK, Tzu-Yang YU

5 NEW PUBLIC TRANSIT OPERATIONS PLANNING CONCEPTS.....60
Avishai (Avi) CEDER

6 GREEN HIGHWAYS: STRATEGY FOR RECYCLING MATERIALS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION PRACTICES 91
Tuncer B. EDİL

PAPERS BY SPONSORS

1 EL MEK NIMIR KÖPRÜSÜ PROJESI - KHARTOUM, SUDAN.....113
Yapı Merkezi Ağır İnşaatlar Grubu

2 THE NEED OF NONLINEAR ANALYSIS FOR STRUCTURAL DESIGN AND ASSESSMENT 123
Max A.N. HENDRIKS

3 URBAN TRASNFORMATION IN *KÜÇÜKÇEKMECE*, ISTANBUL.....134
Aziz YENİAY

4	ace06-302	GENETİK ALGORİTMALARDA BAZI PARAMETRELERİN ETKİSİ.....494 *Tayfun DEDE, Serkan BEKİROĞLU, Yusuf AYVAZ*	
5	ace06-303	BETONARME YAPILARIN LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞININ MODELLENMESİ.495 *Tayfun DEDE, Hakan ÇELİK, Serkan BEKİROĞLU*	
6	ace06-305	OUT OF PLANE PERFORMANCE OF CONFINED MASONRY WALLS WITH DIFFERENT TIE-COLUMN CONFIGURATIONS.....496 *Ali URAL, Adem DOĞANGÜN*	
7	ace06-519	REMEDIATION AND SAFETY MONITORING OF A BRIDGE ABUTMENT SLOPE.....497 *Robert LIANG, Shuyu LIU*	
8	ace06-554	TARİHİ SAPANCA RAHİME SULTAN CAMİİ DİNAMİK DAVRANIŞININ BELİRLENMESİ.....498 *Zeki ÖZCAN, Pelin YILMAZ*	
9	ace06-557	1999 DEPREMLERİ IŞIĞINDA FAYA YAKIN KÖPRÜLERİN SİSMİK ANALİZİ.....499 *Fevzi SARITAŞ, Zeki HASGÜR*	

Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim 2006
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Betonarme Yapıların Lineer Olmayan Davranışının Modellenmesi

Tayfun Dede, Hakan Çelik, Serkan Bekiroğlu
Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Öz

Betonarme, yapı malzemesi olarak, oldukça karmaşıktır. Betonarme yapıların davranışını doğru tahmin edebilmek için yada nihai yük taşıma kapasitelerini belirleyebilmek için kesin belirli bir malzeme modeli bulunmamaktadır. Bu nedenden ötürü, beton malzeme modelleri araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Günümüze kadar, araştırmacılar betonarmenin davranışını doğru tanımlayabilmek için deneysel yada analitik çalışmalar sonucunda bir çok malzeme modelleri geliştirmişlerdir. Genel olarak, betonarme yapıların davranışı malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ile açıklanmaya çalışılmış olup bu ilişkiler de gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ile temsil edilmektedir. Çoğu mühendislik probleminde, kullanım yüklerine maruz kalan betonarme yapıların davranışı linear elastik malzeme tanımıyla modellenmektedir. Fakat deneysel sonuçlardan da görüleceği gibi betonarmenin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri lineer değildir. Düşük yükleme düzeleri hariç, hem beton hem de donatı lineer olmayan bir davranış sergiler. Özellikle çatlama olayı betonarme yapıların lineer olmayan davranış sergilemesinin asıl sebebidir. Bu çalışmada betonarmeyi oluşturan beton ve donatının malzeme bakımından lineer olmayan modelleri incelenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, betonun basınç ve çekme gerilmeleri altında davranışı ile donatının basınç ve çekme davranışlarını temsil eden literatürdeki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ele alınmıştır. Betonarme yapıların lineer olmayan davranışı hesap edilirken çözümlerinin de lineer olmayan yöntemlerle yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ayrıca beton için göçme modelleri ve sonlu elemanlar yardımıyla lineer olmayan çözüm tekniklerinden bahsedilmektedir.

Anahtar sözcükler: Betonarme yapılar, lineer olmayan davranış, malzeme bakımından lineer olmama, sonlu elemanlar

Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi,11-13 Ekim 2006
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Betonarme Yapıların Lineer Olmayan Davranışının Modellenmesi

Tayfun Dede, Hakan Çelik, Serkan Bekiroğlu
Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Öz

Betonarme, yapı malzemesi olarak, oldukça karmaşıktır. Betonarme yapıların davranışını doğru tahmin edebilmek için yada nihai yük taşıma kapasitelerini belirleyebilmek için kesin belirli bir malzeme modeli bulunmamaktadır. Bu nedenden ötürü, beton malzeme modelleri araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Günümüze kadar, araştırmacılar betonarmenin davranışını doğru tanımlayabilmek için deneysel yada analitik çalışmalar sonucunda bir çok malzeme modelleri geliştirmişlerdir. Genel olarak, betonarme yapıların davranışı malzemenin gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri ile açıklanmaya çalışılmış olup bu ilişkiler de gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ile temsil edilmektedir. Çoğu mühendislik probleminde, kullanım yüklerine maruz kalan betonarme yapıların davranışı linear elastik malzeme tanımıyla modellenmektedir. Fakat deneysel sonuçlardan da görüleceği gibi betonarmenin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri lineer değildir. Düşük yükleme düzeleri hariç, hem beton hem de donatı lineer olmayan bir davranış sergiler. Özellikle çatlama olayı betonarme yapıların lineer olmayan davranış sergilemesinin asıl sebebidir. Bu çalışmada betonarmeyi oluşturan beton ve donatının malzeme bakımından lineer olmayan modelleri incelenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, betonun basınç ve çekme gerilmeleri altında davranışı ile donatının basınç ve çekme davranışlarını temsil eden literatürdeki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ele alınmıştır. Betonarme yapıların lineer olmayan davranışı hesap edilirken çözümlerinin de lineer olmayan yöntemlerle yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada ayrıca beton için göçme modelleri ve sonlu elemanlar yardımıyla lineer olmayan çözüm tekniklerinden bahsedilmektedir.

Anahtar sözcükler: Betonarme yapılar, lineer olmayan davranış, malzeme bakımından lineer olmama, sonlu elemanlar

Giriş

Betonun davranışı betonun bileşimine, yaşına, yükleme şekline ve zamana bağlıdır. Betonun davranışı için yapılan birçok deney, betonun ileri derecede doğrusal olmayan bir davranış gösterdiğini ortaya koymuştur (Bratina ve diğ, 2004; Phuvoravan, 2003). Pek çok parametreye bağlı olduğu için, betonun davranışını gösteren ve yaygın olarak kabul edilen bir bünye denklemi mevcut olmayıp araştırmacılar tarafından ortaya konulan değişik ifadeler vardır.

Deneysel ya da analitik çalışmalar sonucunda geliştirilen beton malzeme modelleri, betonun çekme ve basınç gerilmeleri altında davranışı için ayrı ayrı geliştirilmiştir. Betonun davranışını tanımlamak için gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları, moment-eğrilik bağıntıları ve yük-yerdeğiştirme bağıntıları kullanılmakta olup genelde gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarını kullanmak tercih edilmektedir. Çekme ve basınç gerilmesi için geliştirilen bu modellerin matematiksel ifadeleri, gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin tepe noktası öncesinde ve sonrasında farklılaşabilmektedir.

Betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi gerilme-şekildeğiştirme eğrileri ile verilmektedir. Birçok mühendislik probleminde beton malzemesi lineer elastik olarak alınmasına rağmen yapılan deneyler göstermektedir ki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi lineer değildir. Bu durumda betonarmenin gerçek davranışını sergilemek için doğrusal davranış ötesini dikkate almak gerekir. Bir başka deyişle doğrusal olmayan davranış kullanılması gerekmektedir.

Beton Malzeme Modelleri

Basınç Etkisinde Beton Malzeme Modelleri

Basınç etkisi altında betonun malzeme bakımından gerçek davranışını modelleyebilmek için Popovics, Hognestad, Hoshikuma, Popovics-Mander, Popovics-Saenz, Kent-Park, Saenz, Desayi-Krishnan, Değiştirilmiş Popovics , Desayi-Krishan-Saenz , Park-Paulay , Değiştirlmiş Park-Kent, CEB-FIP modelleri araştırmacılar tarafından önerilen lineer olmayan malzeme modelleridir. Bu modellerden Popovics, Hognestad, Hoshikuma ve Saenz modellerinin detayları aşağıda açıklanmaktadır. Bu bağıntılarda f_c, beton basınç dayanımını, f'_c, beton silindir dayanımını, f_p, maksimum basınç dayanımını, ε_c, betonun şekildeğiştirmesini, ε_p ise maksimum basınç dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme oranını göstermektedir.

Popovics Modeli

Popovics'in önerdiği gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin artan ve azalan kısımları lineer davranışa yakın bir davranış göstermektedir. Gerilme-şekildeğiştirme eğrisindeki "n" parametresi yüksek dayanımlı betonlarda başlangıç tanjant modulü "E_c" ve sekant "E_{sec}" modulünün farkının az olması durumunda oldukça lineer davranış sergilenmesini sağlar. Şekil 1-(a)'da Popovics tarafından önerilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi verilmektedir (Kwan, 2000).

$$f_{ci} = -\left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right) f_p \frac{n}{n-1+\left(\varepsilon_{ci}/\varepsilon_p\right)^n} \qquad \varepsilon_{ci} < 0 \tag{1}$$

$$n = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}, \quad E_{sec} = \frac{f_p}{|\varepsilon_p|}. \tag{2}$$

Hognestad Modeli

Hognestad parabolü olarak da anılan bu model (Denklem 3) normal basınç dayanımlı betonlar için Hognestad tarafından önerilmiştir (Ersoy, 1985). Bu model en büyük basınç gerilmesi değerine kadar olan önceki kısım için ve bu değerden sonrası olan eğri kısmı için de kullanılmakta olup başlangıç tanjant rijitliği "E_c" aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmaktadır. Şekil 1-(b)'de Hognestad tarafından önerilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi verilmektedir.

$$f_{ci} = -f_p \left\{ 2\left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right) - \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right)^2 \right\} < 0 \qquad \varepsilon_{ci} < 0 \tag{3}$$

$$E_c = 2\frac{f_p}{|\varepsilon_p|} \tag{4}$$

Hoshikuma Modeli

Hoshikuma ve çalışma arkadaşları betonarme köprü ayaklarıyla ilgili yaptıkları çalışmada beton için basınç etkisi altında bir gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı önermişlerdir (Denklem 5). Bu model en büyük basınç gerilmesine kadar olan davranışı dikkate almaktadır. Bu modelin genel formu Şekil 1-(c)'de verilmektedir (Wong, 2002).

$$f_{ci} = E_c.\varepsilon_{ci}.\left(1 - \frac{1}{n}\left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right)^{n-1}\right) \qquad \varepsilon_p < \varepsilon_{ci} < 0 \tag{5}$$

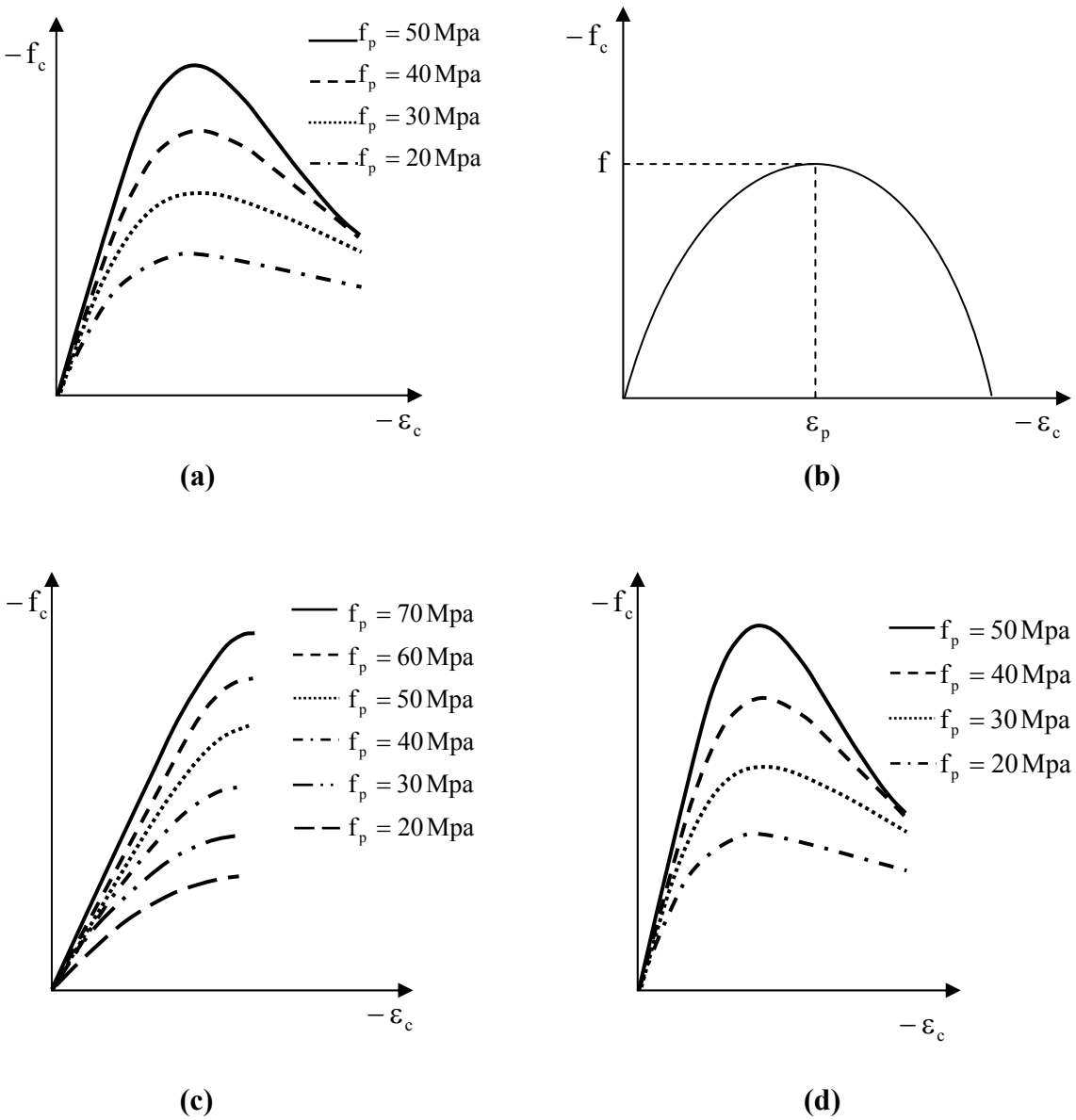
$$n = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}, \quad E_{sec} = \frac{f_p}{|\varepsilon_p|}. \tag{6}$$

Popovics / Mander Modeli

Mander ve diğ., enine donatılarla sarılı betonun basınç gerilmesi altında davranışı için bir gerilme-şekildeğiştirme eğrisi önermişlerdir (Denklem 7). Bu modelin genel formu Popovics modeli ile aynı olup sadece başlangıç tanjant modulü farklıdır (Wong, 2002). Önerilen bu model Şekil 1 (d)'de verilmektedir.

$$f_{ci}^{b} = \left(\frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p}\right) f_p \frac{n}{n-1+\left(\varepsilon_{ci}/\varepsilon_p\right)^n} < 0.2 f_p \quad \varepsilon_{ci} < \varepsilon_p < 0 \tag{7}$$

$$n = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}, \quad E_{sec} = \frac{f_p}{\varepsilon_p}, \quad E_c = 5000\sqrt{f_c'}\,. \tag{8}$$



Şekil 1 Basınç etkisindeki betonun malzeme modelleri: (a) Popovics modeli, (b) Hognestad modeli, (c) Hoshikuma modeli ve (d) Popovics-Mander modeli.

Çekme Etkisinde Beton Malzeme Modelleri

Literatürde yaygın olarak verilen çekme etkisi altında betonun gerilme-şekildeğiştirme modellerinden Vecchio 1982 modeli, Collins-Mitchell 1987 modeli, Bentz 1999 Modeli, Izumo-Maekawa modeli aşağıda verilmektedir.

Vecchio 1982 modeli

Deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olan bu modelin genel bağıntısı aşağıda verilmektedir (Denklem 9). Ortalama beton çekme gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 2 (a)'da verilmektedir. Bu bağıntıda $\varepsilon_{cr}, \varepsilon_{cl}$ sırasıyla çatlama şekildeğiştirmesini ve asal eksen doğrultusunda betonun ortalama eksenel şekildeğiştirmesini göstermektedir.

$$f_{ci}^{a} = \frac{f_{cr}}{1+\sqrt{200\varepsilon_{cl}}} \qquad 0 < \varepsilon_{cr} < \varepsilon_{cl}. \tag{9}$$

Collins-Mitchell 1987 Modeli

Bu model (Denklem 10) Vecchio 1982 modelinin değiştirilmiş hali olup kabuk elemanlar için yapılan deneylerle elde edilmiştir. Bir önceki modelden tek farkı kök içindeki ifadenin 200 yerine 500 olmasıdır. Bu durumda eğrinin sağ tarafı aynı paralellikte yalnız biraz daha alt taraftan geçmektedir (Wong, 2002).

$$f_{ci}^{a} = \frac{f_{cr}}{1+\sqrt{500\varepsilon_{cl}}} \qquad 0 < \varepsilon_{cr} < \varepsilon_{cl}. \tag{10}$$

Bentz 1999 Modeli

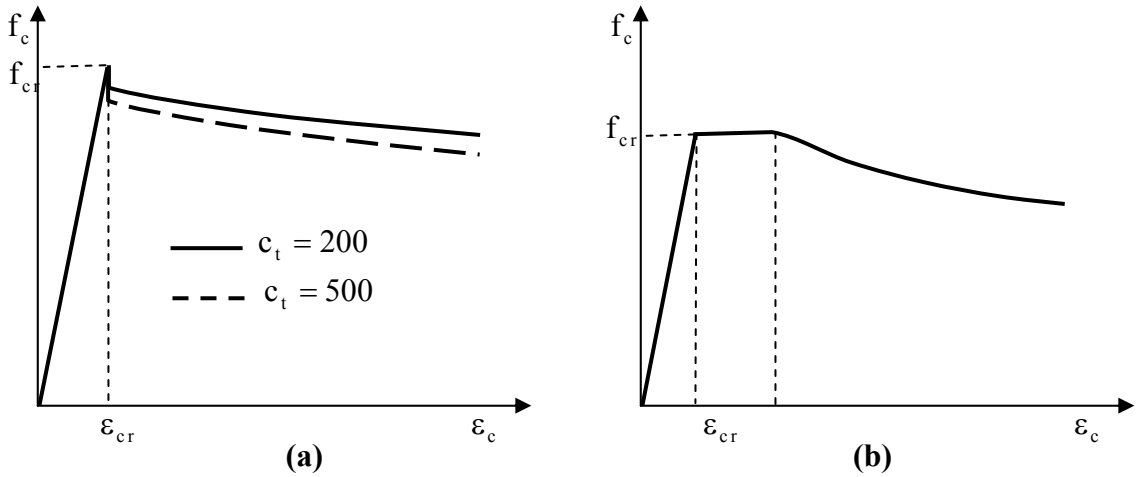
Bentz, aderans özelliklerini dikkate almak için bir model önermiştir (Denklem 11). Bu denklemde "m" aderansla ilgili bir katsayıdır. Bu katsayı beton alanının donatının oluşturduğu aderans alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu modelin grafiği bir önceki modellerle aynı olup kök içindeki sabit sayı "m" in alacağı değerle değişmektedir (Bentz, 2000). Aşağıdaki eşitlikte modelin bağıntısı verilmektedir.

$$f_{ci}^{a} = \frac{f_{cr}}{1+\sqrt{3.6m\,\varepsilon_{cl}}} \qquad 0 < \varepsilon_{cr} < \varepsilon_{cl}. \tag{11}$$

Izumo-Maekawa Modeli

Izumo ve diğ. (1992), ortalama çatlak yaklaşımını kullanarak, düzlem gerilmeye maruz betonarme paneller için analitik model önermiştir. Deney sonuçlarıyla uyumlu ilişki gösteren bu modelin ortalama beton çekme gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 2 (b)'de verilmektedir. c, aderansı dikkate alan bir katsayı olmak üzere aşağıdaki bağıntı Izumo-Maekawa modelini göstermektedir.

$$f_{ci}^{a} = \begin{cases} f_{cr} & 0 < \varepsilon_{cr} < \varepsilon_{cl} < 2\varepsilon_{cr} \\ f_{cr}\left(\dfrac{2\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{cl}}\right)^{c} & 0 < 2\varepsilon_{cr} < \varepsilon_{cl} \end{cases} . \tag{12}$$



Şekil 2 Çekme etkisindeki betonun malzeme modelleri: (a) Vecchio 1982 modeli ve (b) Izumo-Maekawa modeli.

Donatı Modelleri

Betonun özellikle çekme gerilmelerine maruz kalması durumunda uygulanan yüke karşı koyabilmesi için ayrı bir malzemeden yapılmış güçlendiricilere ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü betonun çekme dayanımı çok düşüktür. Bu nedenle de çekmeye çalışmadığı kabulü yapılmaktadır. Güçlendirici amaçlı en yaygın olarak çelik çubuklar yani donatılar kullanılır. Çelik malzemesi beton malzemesi kadar karmaşık bir yapıya sahip olmayıp oldukça homojen bir yapı malzemesidir. Bundan dolayı hesaplarda donatının davranışını modellemek için kullanılan model sayısı betondaki gibi çok fazla değildir. Aşağıdaki bağıntılarda f_s, donatı gerilmesini, f_y, donatının akma gerilmesin, ε_s, donatının şekildeğiştirmesini, E_s, donatının elastisite modulünü, ε_{sh}, donatının pekleşme şekildeğiştirmesini, ε_u , donatının nihai şekildeğiştirmesini göstermektedir.

Sünek (yumuşak) Donatı

Çekme ve basınç için gerilme-şekildeğiştirme eğrisi çelik için 3 lineer kısımdan oluşmaktadır. 1.si lineer-elastik, 2.si akma olayının gerçekleştiği düz kısım ve 3.sü sonunda kopma olayının meydana geleceği lineer kısımdır (Denklem 13). Şekil 3 (a)'da bu kısımlar verilmektedir (Wong, 2002).

$$f_s = \begin{cases} E_s\varepsilon_s & |\varepsilon_s| \le \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < |\varepsilon_s| \le \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) & \varepsilon_{sh} < |\varepsilon_s| \le \varepsilon_u \\ 0 & \varepsilon_u < |\varepsilon_s| \end{cases} \tag{13}$$

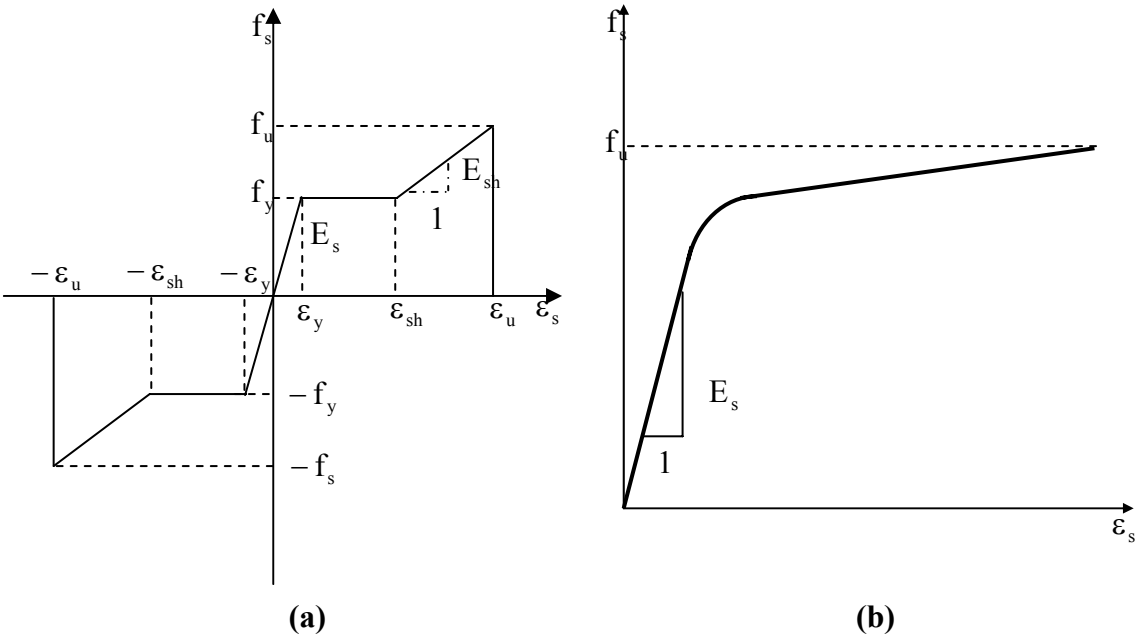
$$\varepsilon_u = \varepsilon_{sh} + \frac{(f_u - f_y)}{E_{sh}}. \tag{14}$$

Öngerilmeli Donatı

Bu model soğukta işlem görmüş donatılar için uygundur. Bu malzemede akma safhası belirgin olarak görülmez. Ancak ilk kısmı lineer olup, II. lineer kısma bir geçiş eğrisiyle bağlanır. Şekil 3 (b)'de grafiği verilen bu modelin çekme ve basınçtaki formülasyonu Ramserg-Ospood tarafından şöyle verilmektedir (Wong, 2002).

$$f_s = E_s \varepsilon_s \left\{ A + \frac{1-A}{\left[1+(B\varepsilon_s)^C\right]^{1/C}} \right\} \le f_u \tag{15}$$

$$A = \frac{E_{sh}}{E_s},\ B = \frac{E_s(1-A)}{f_s^o},\ C = \text{ geçiş katsayısı.} \tag{16}$$



Şekil 3 Donatının malzeme modelleri: (a) sünek donatı modeli, (b) öngerilmeli donatı.

Sonlu Elemanlarla Lineer Olmayan Çözüm Yöntemleri

Betonarme yapıları sonlu eleman yöntemiyle analiz etmenin önemli bir özelliği, doğrusal davranış sergilemeyen betonun malzeme davranışını modelleyebilmektir. Malzeme modelleri sayesinde, elemandaki gerilme ifadesine bağlı olarak beton elemanların farklı rijitlik ve dayanıma sahip olmaları dikkate alınabilmektedir. Malzeme davranışı bakımından lineer olmayan yani gerilme-şekildeğiştirme bağıntısının doğrusal olmaması nedeniyle rijitlik matrisi şekildeğiştirme ve yüklemelere bağlı olarak değişir. $[K]$ riijitlik matrisi, $\{\Delta\}$ yerdeğiştirme vektörü ve $\{F\}$ yük vektörü olmak üzere sonlu elemanlarda genel denklem aşağıdaki gibidir.

$$[K]\{\Delta\} = \{F\} \tag{17}$$

Lineer analizlerde $[K]$, $\{F\}$sabittir, yani malzeme ve eleman özellikleri yerdeğiştirme yada gerilmelerin bir fonksiyonu değildir. Ancak lineer olmayan analizde $[K]$ ve $\{F\}$, $\{\Delta\}$'nin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla lineer olmayan eşitliklerin çözümü iterasyon sürecini gerektirir. Genel olarak lineer olmayan eşitliklerin çözümünde 3 temel yöntem vardır (Rahmanian, 2003). Bunlar Artımsal yöntem, Newton-Raphson veya İterasyon yöntemi ve Artımsal-İterasyon yöntemi olup bunlardan artımsal yöntem aşağıda açıklanmaktadır.

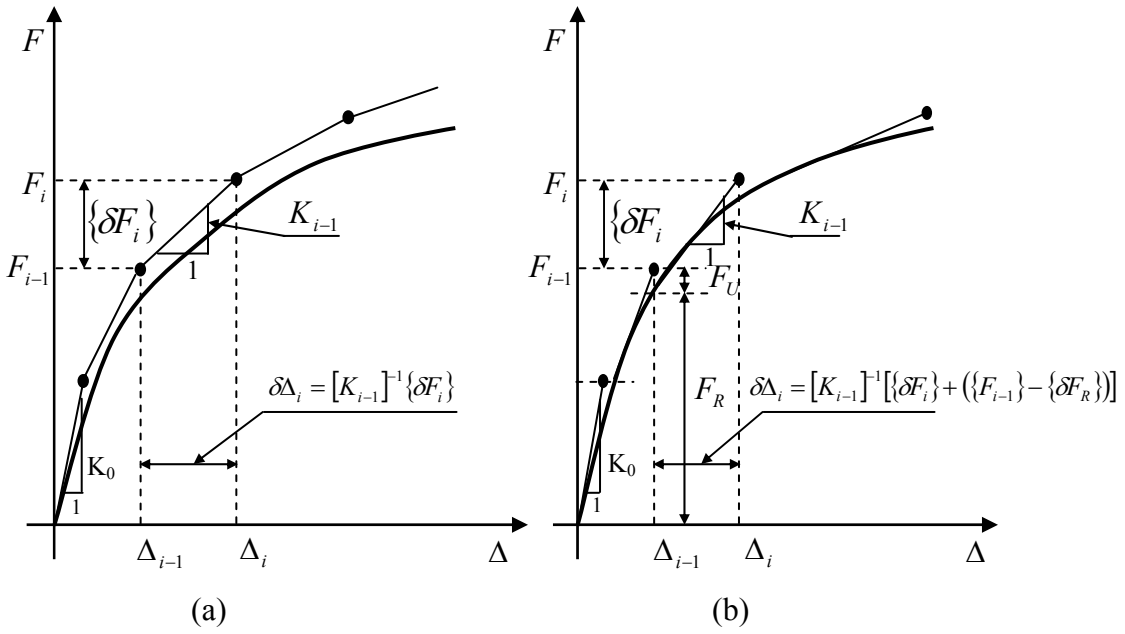
Artımsal Yöntem

Bu yöntemde toplam yük "F" belli sayıda yük artımına (δF_i) bölünür.

$$\{F\} = \sum_{j=1}^{k} \{\delta F_i\} \tag{18}$$

Burada "k" artım sayısıdır. Şekil 4'den görüldüğü gibi yükün ilk artımında, başlangıç rijitlik matrisi $[K_0]$ kullanılır. Başlangıç rijitlik matrisi, yükün sıfır olduğu durumda başlangıç bağıntılarından bulunur. "i". artım için, rijitlik matrisi "i-1". yük artımı sonundaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinden hesaplanır.

$$[K_{i-1}]\{\delta\Delta_i\} = \{\delta F_i\} \tag{19}$$



Şekil 4 (a) artımsal yöntem, (b) değiştirilmiş artımsal yöntem.

Burada $[K_{i-1}]$, $\{\Delta_{i-1}\}$'in bir fonksiyonudur. "i". artımda toplam yerdeğiştirme vektörü aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır.

$$\{\Delta_i\} = \sum_{j=1}^{i} \{\delta \Delta_j\} \tag{20}$$

Bu yöntemin dezavantajı her bir artımda çözümün gerçek çözümden sapmasıdır. Bunun üstesinden gelmek için yük terimine düzeltme yapılır. Bu düzeltme her bir artımda dengelenmemiş yükün hesabından yapılır. Dengelenmemiş kuvvet, $\{F_U\}$, uygulanan yük, $\{F_i\}$, ile rijitlik matrisinin mevcut yerdeğiştirme vektörüyle çarpımından meydana gelen $\{F_R\}$'nin farkı olarak tanımlanır. Aşağıdaki bağıntıda, düzeltilmiş artımsal yöntem ile yerdeğştirmenin hesap edilmesi verilmektedir.

$$\{\Delta_{i+1}\} = \{\Delta_i\} + [K_i]^{-1}\left[\{\delta F_{i+1}\} + (\{F_i\} - \{F_R\})\right] \tag{21}$$

Dengelenmemiş yük düzeltmesi yapılarak, her yük adımı düzeltilir ve gerçek çözümden olan sapmalar önemli derecede azaltılır.

Sonuçlar ve Öneriler

Beton malzemesi için yapılan deneysel yada analitik çalışmalar göstermektedir ki betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini yansıtan gerilme-şekildeğiştirme eğrileri lineer değildir. Dolayısıyla daha gerçekçi hesaplama yapabilmek, betonun davranışını daha doğru tahmin edebilmek için gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının lineer değil aksine lineer olmayan modellerle dikkate alınması gerekmektedir. Ancak lineer olmayan aşamada modelleme yapmak lineer aşamadakinden daha karmaşık ve zordur. Lineer olmayan modelleme yapılırken sisteme ait eşitliklerin çözümünde de lineer değil lineer olmayan tekniklerin kullanılması oldukça zaman alıcıdır. Bu durumda yakınsama kriterleri kullanılıdır. Yakınsama için yerdeğiştirme yada dengelenmemiş kuvvet kontrolü yapılabilir. Yerdeğiştirme yada kuvvet kontrolü için belirli bir tolerans verilir. Ardışık hesaplardaki fark kabul edilen tolerans değerinden küçük olursa program sonlandırılır.

Beton için modellemede kesin olarak doğru modellerin varlığından henüz söz edilemediği için malzeme bakımından önerilen pek çok modelin bilgisayarlara kodlanmasında fayda bulunmaktadır. Böylece betonun ve sonrasında betonarmenin davranışı daha doğru modellenebilecektir.

Teşekkürler Çalışmalarımıza verdikleri destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Bentz, E. C (2000) Sectional analysis of reinforced concrete members, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Bratina, S., M. Saje and I. Planinc (2004) On materially and geometrically non-linear analysis of reinforced concrete planar frames, International Journal of Solids And Structures, Vol. 41, pp.7181-7207.

Ersoy, U. (1985) Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı. Cilt I, Bizim Büro Basımevi, Ankara, Türkiye.

Izumo, J., H. Shin, K. Maeakawa and H. Okamura, (1992) An analytical model for RC panels subjected to in-plane stresses Concrete Shear in Earthquake, Elseiver Applied Science, pp. 206-215

Kwon, M. H. (2000) Three dimensional finite element analysis of reinforced concrete members Ph.D. Thesis, University of Colorado, Colorado.

Phuvoravan, K. (2003). A finite element for the nonlinear analysis of reinforced concrete slabs Ph.D. Thesis, Purdue University.

Rahmanian, N. (2003) Nonlinear analysis of reinforced concrete space frames under combined actions. Master of Applied Science, University of Ottawa, Ontario.

Wong, P. S. L. (2002) User facilities for 2D nonlinear finite element analysis of reinforced concrete. Master of Applied Science, University of Toronto, Toronto.