DÜMF Mühendislik Dergisi
web: http://dergipark.gov.tr/dumf

Betonarme yapıların doğrusal olmayan analizinde yayılı plastisite modellerinin hassaslık analizi

Sarper SEVİNÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Müh. ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul

İhsan Engin BAL*
Hanze Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Groningen, Hollanda
iebal@pl.hanze.nl ORCID: 0000-0003-0919-9573 , Tel: +31 (0)50-5952101

Geliş: 20.04.2017, Kabul Tarihi: 01.06.2018

Öz

Yapıların ileri derece deprem analizlerinde, günümüze gelinceye kadar çok çeşitli lineer olmayan eleman modelleri sunulmuştur. Bu modelleri iki kategoride toplamak mümkündür: i)elemanın doğrusal olmayan deformasyonlarının bir bölgede toplanması, ve ii) bu özelliklerin eleman boyunca yayılı olması. Elastik olmayan özelliklerin belirli bir noktada toplanmış olduğu modellerde, lineer olmayan davranış, genellikle eleman uç noktalarına yakın yerlerde tanımlanmış plastik mafsallarda toplanırlar. Hızlı bilgisayarların hesaplarda kullanılmaya başlanması ile betonarme yapılarda plastik mafsallardaki kesit davranışlarını modellemek için kullanılan tek eksenli malzeme modellerinde fiber elemanlar kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle son 20 yılda bilgisayarların işlemci kapasitelerindeki artış, elastik olmayan özelliklerin eleman boyunca yayılı olduğu durumların fiber tabanlı olarak modellenmesini kolaylaştırmıştır.

90'lı yılların sonuna kadar, lineer olmayan çerçeve elemanların modellenmesinde deplasman tabanlı formülasyon çok yaygın olarak kullanılmaktaydı. Bu yöntem, elemanların enine ve eksenel deplasmanları için uygun enterpolasyon fonksiyonlarının kullanılmasına dayanmaktadır. Kuvvet tabanlı eleman formülleri, iç kuvvetlerin enterpolasyon fonksiyonlarına dayanır. Elemanlarda sabit eksenel kuvvet ve lineer olarak değişen eğilme momenti bulunduğunda, eleman denge durumunu karşılayan polinomları seçmek daha basittir

Yapılan analizlerin doğru sonuca ulaşması için bir elemanı modellemekte kullanılacak alt eleman sayıları ve her eleman için uygulanacak entegrasyon nokta sayısının giderek artması analiz sürelerini oldukça arttırmaktadır. Bu bağlamda, analizlerin hangi elaman ve entegrasyon nokta sayısı kullanarak yeteri kadar doğru sonuca yaklaşılmasının sağlandığı ve analizlerin süresini kısaltarak makul bir hale getirilmesi önem kazanmıştır. Bu çalışmada, analiz süresinin kısaltılması için kabul edilebilir sonuçları veren sistem tasarımını seçmek için bir dizi hassaslık analizi yapılmıştır. Bu analizlerin neticesinde takip edecek diğer çalışmalarda kullanılmak üzere en uygun sistem tasarımında eleman bölüm sayısı, entegrasyon nokta sayısı ve deplasman mı yoksa kuvvet tabanlı formülasyon mu kullanılacağının seçilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: *OpenSees, SeismoStruct, itme analizi, deplasman tabanlı, kuvvet tabanlı;*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

Günümüze gelinceye kadar çok çeşitli lineer olmayan eleman modelleri sunulmuştur. Bu modelleri iki kategoride toplamak mümkündür: elastik olmayan özelliklerin bir bölgede toplanması ve bu özelliklerin eleman boyunca yayılı olması. Elastik olmayan özelliklerin belirli bir noktada toplanmış olduğu modellerde, lineer olmayan davranış, genellikle eleman uç noktalarına yakın yerlerde tanımlanmış plastik mafsallarda toplanırlar. Bu noktalara, bileşen kuvvetler için klasik plastisite teorisi göz önünde bulundurularak histerik davranış atamak gerekir. Tüm plastik deformasyonların eleman uçlarından toplandığı bu ilk jenerasyon modellerde moment-normal kuvvet etkileşimi ihmal edilmektedir ve dahası, mafsallardaki histerik davranış parametrelerinin hassas bir şekilde seçilmesi de zor bir işlemdir.

Hızlı bilgisayarın hesaplarda kullanılmaya başlanması ile plastik mafsallardaki kesit davranışlarını modellemek için kullanılan tek eksenli malzeme modellerinde fiber elemanlar kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle son 20 yılda bilgisayarların işlemci kapasitelerindeki artış, elastik olmayan özelliklerin eleman boyunca yayılı olduğu durumların fiber tabanlı olarak modellenmesini kolaylaştırmıştır. Böylece eleman davranışları, Gauss-Legendre, Gauss-Lobatto gibi geleneksel numerik entegrasyon yöntemleri ile hesaplanmaya başlanılmıştır.

Deplasman tabanlı ve kuvvet tabanlı hesap yöntemleri, elemanların formüle edilmesinde çok iyi bilinen iki tiptir. Örneğin SeismoStruct [SeismoSoft, 2018], eleman uç noktalarına belli bir mesafede bulunan 2 Gauss noktası ile deplasman tabanlı eleman formülasyonu kullanır. SeismoStruct (v4.0.3 build30) programının kullandığı deplasman tabanlı yaklaşım Izzuddin'in [1991] yaptığı çalışmaları kullanmaktadır ve buna ek olarak geometrik lineer olmayan etkileri de dikkate almaktadır. Günümüzde, SeismoStruct programında deplasman ve kuvvet tabanlı iki yöntemi kullanmak mümkündür. OpenSees programında da Neuenhofer ve Flippou [1997,1998], Tauccer ve ark. [1991] ve Spacone ve ark.'nın [1992] yaptığı çalışmalara dayanan deplasman ve kuvvet tabanlı modelleme teknikleri kullanılmaktadır.

Yapılan analizlerin doğru sonuca ulaşması için kullanılacak eleman sayıları ve her eleman için uygulanacak entegrasyon nokta sayısının giderek artması analiz sürelerini oldukça arttırmaktadır. Bu bağlamda, analizlerin hangi elaman ve entegrasyon nokta sayısı kullanarak yeteri kadar doğru sonuca yaklaşılmasının sağlandığı ve analizlerin süresini kısaltarak makul bir hale getirilmesi önem kazanmıştır. Bu çalışmada analiz süresinin kısaltılması için kabul edilebilir sonuçları veren sistem tasarımını seçmek için bir iki farklı örnek betonarme çerçevede, SeismoStruct ve OpenSees programlarını kullanarak itme analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin neticesinde tez çalışmasında kullanılmak üzere en uygun sistem tasarımında eleman alt bölme sayısı, entegrasyon nokta sayısı ve deplasman ve kuvvet tabanlı olmak üzere iki farklı formülasyon kullanımının seçilmesi ve tüm bu seçeneklerin sonuçları ne derecede etkilediğinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

Bu makalede gerçekleştirilen hassaslık analizleri, çok miktarda doğrusal olmayan analiz yapara bu analizlerin sonuçlarından belirli çıkarımlara varmadan önce yürütülmesi gereken bir çalışmadır. Bu makalede anlatılan hassaslık analizleri için, yapı modellerinin oluşturulduğu iki farklı yazılım kullanılmıştır. Kullanılan modeller ve yazılımlar aşağıdaki detaylı biçimde açıklanmıştır.

SeismoStruct ve OpenSees Modelleri

Örnek yapı sistemlerinin, yerdeğiştirme kapasiteleri, şekil değiştirmiş halleri ve mevcut özelliklerinin limit durum periyotları Antonio ve Pinho [2004] ve Pinho [2005] tarafından önerilen yerdeğiştirme tabanlı adaptif itme analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem SeismoStruct'ta programın bir parçası iken, OpenSees'da aynı itme yönteminin uygulanabilmesi için ilave bir programlama gerekmiştir. Adaptif itme yöntemi, geleneksel ters üçgen veya 1nci mod ağırlıklı yatay yük

profillerinin kullanıldığı itme analizlerine göre, ilgili referanslarda belirtilen bir çok avantajı barındırmaktadır. Analizlerde, programın mümkün olduğu kadar en standart malzeme ve eleman özellikleri kullanılmıştır. Buradaki amaç, yazılımı kullanacak farklı kullanıcıların aynı çerçeveyi modellemesi muhtemel parametrelerin kullanılması ve olası kullanıcı tabanlı farklı sonuç aralığının tespitidir.

SeismoStruct ve OpenSees modellerinin birbirleri ile karşılaştırılabilir olması için, beton ve donatı çeliği malzeme modellerinin de karşılaştırılabilir olması gereklidir. Bunun için seçilen malzeme modelleri ve bunların başlangıç rijitliği, çevrimsel davranış gibi özelliklerine ait özet bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Modellemeye Ait Detaylar

Olası depremlerde meydana gelebilecek hasarları belirlemekve mevcut betonarme yapıların davranışını incelemek için iki adet basit modelleme seçeneği bulunmaktadır. Bu seçeneklerden birincisi elastik olmayan özelliklerin belli bölgelerde toplanmış olduğu kabulünü, ikincisi ise hesapları karmaşık ve zorlu olan fiber tabanlı elemanlar kullanmayı gerektirir. Elastik olmayan özelliklerin belli bölgelerde toplanmış olduğu yöntemin dezavantajı, elastik olmayan deformasyonların elemanların daha önceden tanımlanmış bölgelerinde meydana gelmesidir. Bu olgu doğrultusunda, alt katlar için makul bir kabul olmasına rağmen, üst katlardaki elemanlar boyunca plastik mafsalların oluşumları bir soru işareti doğurur. Mevcut yapıların deprem analizindeki diğer önemli bir kısıtlama ise, elastik olmayan özellikleri belirli bölgelerde toplanan elemanların histerik parametrelerinin, ideal yükleme koşulları altında gerçek ya da ideal bir çerçeve elemanının davranışına göre kalibre edilmesini gerektirmesidir. Bu, mevcut yapıların değerlendirmesinde pratik olarak uygulanabilir değildir ve önemli miktarda deneyim gerektirir.

Elastik olmayan özelliklerin belirli bölgelerde toplandığı modellerin yukarıda açıklanan kısıtlamaları nedeniyle, bu çalışmada betonarme yapıları modellemek için fiber tabanlı sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış, bu yöntemin de kendi içerisindeki farklı seçeneklerin analiz sonuçlarına etkisi irdelenmiştir. Bu makalede fiber tabanlı modellerin seçilmesinde iki neden vardır. Bunlardan birincisi hassaslık ve ikincisi ise kesit birim şekil değiştirme değerlerine doğrudan ulaşabilmektir. Hasar tanımlarının, birim şekil değiştirme değerlerinin daha önceden belirlenmiş limit durumlarını aşıp aşmamasına göre belirlenmesinden dolayı, birim şekil değiştirme değerleri mekanik hasar belirleme çalışmalarında büyük bir öneme sahiptir. Fiber tabanlı modeller kullanıcıların, analiz sonrası ekstra işlem yapmadan direk olarak birim şekil değiştirme değerlerine ulaşmasını sağlarlar. SeismoStruct'da [SeismoSoft, 2018] belirli bir birim şekil değiştirme limit durumunun aşılmasının tanımlanması, Opensees [2013] programına göre çok daha kolaydır, ancak bu her iki programda da mümkündür.

Bu makalede hassaslık analizlerinde 3 farklı konu irdelenmiştir: kullanılan eleman tipinin (kuvvet veya deplasman tabanlı) etkisi, entegrasyon nokta sayısı (İN) ve/veya bununla ilişkili olarak elemanların parçalara bölünmesinin etkisi, ve son olarak da farklı yazılımların etkisi. Mevcut yöntemler genelde düzenli ve 2B çerçeveler için yerleşmiş ve tutarlıdır. Ayrıca bu tip analizleri 2B çerçevelerde gerçekleştirmek, düzensizlikler ve diğer 3B parametrelerin, modelden modele sonuçlar arasındaki farkları gölgelemesine engel olur.

Oluşturulan modellerde kesit kapasitesini hesaplarken kullanılan parametrelerden biri de kesitin malzeme modelidir. Tek eksenli malzeme modelleri, birçok deprem mühendisliği uygulaması için yeterlidir. Bu çalışma kapsamında SeismoStruct ve OpenSees programlarında kullanılan tek eksenli malzeme modelleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Malzeme modellerinin uygulanmasında ve etkilerindeki farklılıklar, tekrarlı ve rasgele yükler altında daha belirgin görülürler. Bunun nedeni ise kabul edilen modellerin yükleme boşaltma

eğrilerindeki değişimlerden oluşan yığılmalardır. Bugün mühendislerin fiber tabanlı programlarda kullandığı çeşitli malzeme modelleri mevcuttur. Her malzeme modeli değişik yaklaşımlar ile farklı amaçlar için oluşturulduğundan ve bu nedenle direk olarak birbirleriyle karşılaştırılamayacağından, bu tür malzeme modellerinin kullanılmasından kaynaklanan değişimler bu bölümde incelenmemiştir.

Yapısal kapasite tahmininde eleman formülasyonu, entegrasyon nokta sayısı ve elemanların bölünmesi

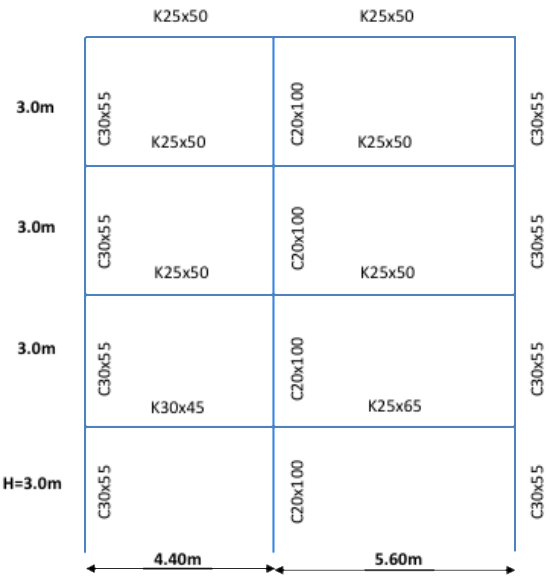
Opensees ve SeismoStruct programlarında deplasman tabanlı ve kuvvet tabanlı eleman fomülasyonunu kullanmaktadırlar ve ikisi de düzlem kesitlerin eleman boyunca uzanan aksa normal olacak şekilde düzlem kaldığı kabulünü kullanırlar. Doğrusal olmayan histerik davranış, her bir kesiti oluşturan kuşatılmış beton, kabuk betonu ve çelik donatı fiberlerinin temel ilişkilerinden türemiştir. Düzlem kesitler düzlem kalırlar varsayımı narin kolon kesitleri için geçerliyken, T veya U şeklindeki gibi dikdörtgen olmayan duvar elemanlar için uygulanması oldukça zordur [Beyer ve ark., 2008].

90 yılların sonuna kadar deplasman tabanlı formülasyon veya rijitlik metodu, doğrusal olmayan çerçeve elemanların formülasyonunda kullanılan bir yaklaşımdır. Deplasman tabanlı formülasyon, elemanların eksenel ve enine deplasmanları için uygun enterpolasyon fonksiyonlarının kabul edildiği uygunluk koşullarına dayanmaktadır. Geleneksel çerçeve elemanlar, yüklerin düğüm noktalarına uygulandığı doğrusal elastik prizmatik kirişler için kesin sonuçları gösteren enine deplasman alanları ve eksenel deplasman için doğrusal Lagrangian şekil fonksiyonları için kübik Hermitian polinomlarına dayanmaktadır. Bu formülasyon elastik bölgede makul bir sonuç sergilerken, eğer elemanlar doğru bölümlere ayrılmamışsa, elastik olmayan bölümde hatalar oluşabilir.

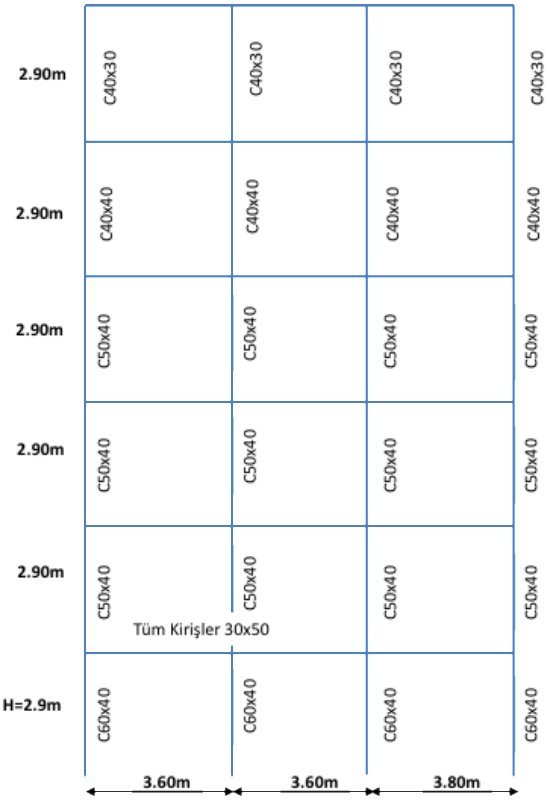
Yapısal çerçeve elemanların hassas modellenmesinde, her elemanın 3 veya 4 alt elemana bölünmesi gerekmektedir. Adapte edilmiş kübik formülasyonda, sabit genelleştirilmiş eksenel şekil değiştirme fonksiyonu kabul edilmiştir ve kısa elemanların doğrusal olmayan davranışının modellenmesinde tam anlamıyla geçerlidir [Izzuddin, 1991].

Kuvvet tabanlı elemanların formülasyonu, iç kuvvetlerin enterpolasyon fonksiyonlarına dayanmaktadır. Eleman yükleri olmadığı durumlarda, sabit eksenel kuvvet ve doğrusal olarak değişen eğilme momenti gibi elemanın denge durumunu sağlayan polinomları seçmek oldukça basittir [Neuenhofer ve Flippou, 1997; Zeris ve Mahin, 1988 ve 1991]. Kiriş elemanın geometrisinden ve temel kurallardan bağımsız olarak, enterpolasyon fonksiyonları gerçek çözümleri temsil ederler ve bu nedenle, özellikle deprem mühendisliği analizleri için uygundurlar. Kesit davranışında yumuşamanın, birim şekil değiştirmenin belli bölgelerde toplanmasına neden olması haricinde [Coleman ve Spacone, 2001], deplasman tabanlı eleman formüllerinde görülen bölümleme hatası oluşmaz [Neuenhofer ve Flippou, 1997]. Deplasman tabanlı direk metotlar kullanan analiz programlarında, bu tip elemanların kullanılmasında zorluklar vardır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen hassaslık analizlerinde, değişik modelleme yaklaşımlarını test etmek için 2 açıklıklı, biri 4 diğer 6 katlı iki çerçeve modeli seçilmiştir. Her iki çerçeve de, 1980'lerin sonu, nispeten iyi mühendislik hizmeti almış binaları temsil eder [Bal, 2008] (Şekil 1 ve Şekil 2).



Şekil 1. 4 katlı model boyutları



Şekil 2. 6 katlı model boyutları

4 katlı örnek yapının beton basınç dayanımı 16 MPa, sarılmış beton katsayısı K 1.10, çelik çekme dayanımı 400MPa ve beton pas payı 3 cm olarak alınmıştır. Binanın toplam kütlesi ise 177 tondur. Bu çerçevede 30x55cm boyutlarında 10Φ16 donatısı olan 8 adet kolon (dış akslarda) ile 20x100 cm boyutunda 8 Φ20 başlık, 16 Φ16 gövde donatısı olan 4 adet kolon bulunmaktadır (orta aks). Kirişler ise 30x45 cm dikdörtgen kesit, 25x65 ve 25x50 boyutlarında tablalı kesit olarak teşkil olunmuştur. 4 katlı çerçevenin çerçevesinin detayları Şekil 1'de, 6 katlı çerçeve ise Şekil 2'de verilmiştir. Kat yükseklikleri bütün katlarda aynı ve 3,00m'dir. Açıklıklardan biri 4,40 m diğeri ise 5,60 m genişliğindedir. Yapı OpenSees programında değişik modelleme alternatifleri kullanılarak oluşturulmuş, ayrıca aynı çerçeve SeismoStruct programında da modellenmiştir. İki farklı programda kullanılan modelleme kabulleri ile ilgili parametreler Tablo 1'te listelenmiştir. İki programda da kullanılan parametrelerin olabildiğince birbirine yakın olabilmesi için özel bir çaba sarf edilmiştir.

4 katlı analiz çerçevesi üzerinde 7 adet değişik analiz türü uygulanarak, elemanların formüle edilmesi, bir elemanın bölünme sayısı ve her elemanın üzerinde bulunan entegrasyon nokta sayısının etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Adaptif itme analizinde ilk olarak 1nci mod şekline benzer ters üçgen yayılımındaki yatay kuvvetler altında analizler başlamış, yapıdaki plastikleşmelere göre yük profili yazılım tarafından adapte edilmiştir. Uygulanan analiz alternatifleri aşağıda sıralanmıştır.

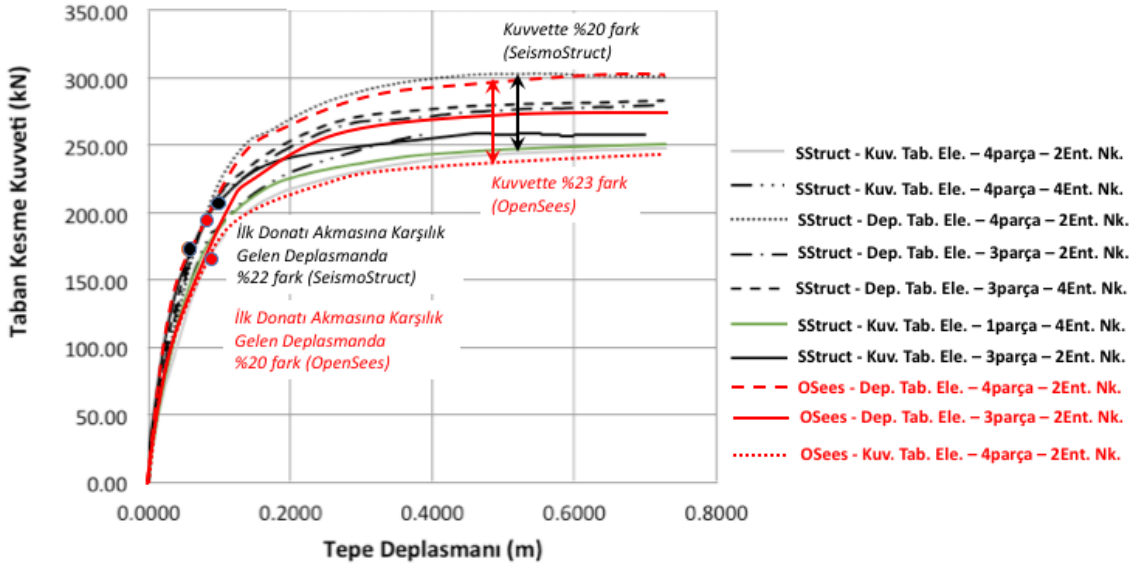
- Her eleman dört eşit parçaya bölünerek ve her elemanda 2 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan yer değiştirme tabanlı elemanlar (SeismoStruct)
- Kolon ve kiriş uç bölgelerini kesit yüksekliği uzunluğunda elemanlara bölerek ve her elemanda 2 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan yer değiştirme tabanlı elemanlar (SeismoStruct)
- Kolon ve kiriş uç bölgelerini kesit yüksekliği uzunluğunda elemanlara bölerek ve her elemanda 4 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan yer değiştirme tabanlı elemanlar (SeismoStruct)
- Her eleman dört eşit parçaya bölünerek ve her elemanda 2 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan kuvvet tabanlı elemanlar (SeismoStruct)

- Her eleman dört eşit parçaya bölünerek ve her elemanda 4 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan kuvvet tabanlı elemanlar (SeismoStruct)
- Her eleman tek parça olarak modellenerek ve her elemanda 4 adet entegrasyon noktası kullanılarak oluşturulan kuvvet tabanlı elemanlar (SeismoStruct)
- Her eleman üç parça olarak modellenerek ve her elemanda 2 adet entegrasyon noktası kullanılarak oluşturulan kuvvet tabanlı elemanlar (SeismoStruct)
- Her eleman dört eşit parçaya bölünerek ve her elemanda 2 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan kuvvet tabanlı elemanlar (OpenSees)
- Her eleman 3 parçaya bölünerek ve her elemanda 2 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan yer değiştirme tabanlı elemanlar (OpenSees)
- Her eleman 4 parçaya bölünerek ve her elemanda 2 integrasyon noktası kullanılarak oluşturulan yer değiştirme tabanlı elemanlar (OpenSees)

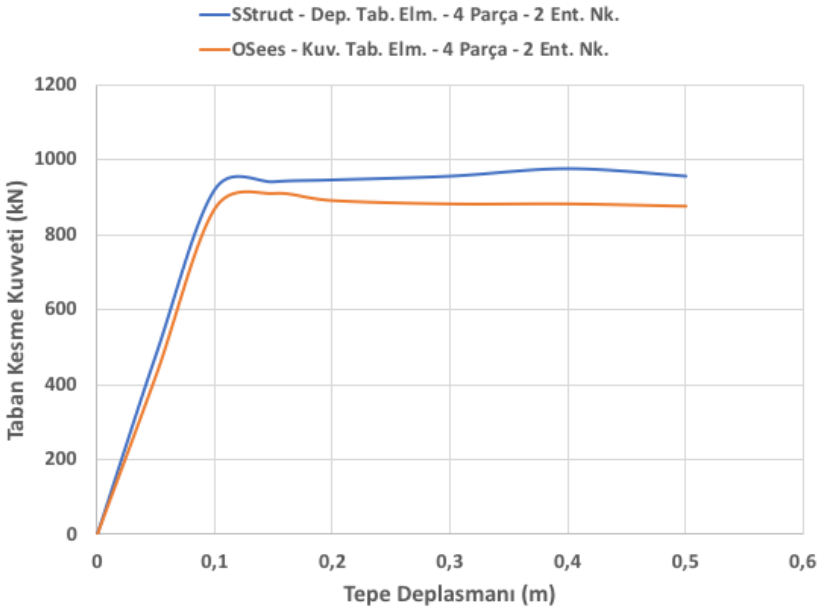
Tablo 1. Modelleme kabulleri ile ilgili parametrelerin sınıflandırılması

Parametre	SeismoStruct	OpenSees
Beton basınç dayanımı *(MPa)*	*16.80 (ortak değer)*	
Tek eksenli beton modeli	Mander ve ark. [1988]	Eğrinin yükselen kısmı için Hognestad parabolü, doğrusal olarak azalan dalı için ise Scott ve ark. [1982] tarafından geliştirilen Kent-Park modeli
Betonun tekrarlı yükler altındaki davranışı	M.-Rueda &Elnashai [1997]	Yassin [1994]
Beton çekme dayanımı *(MPa)*	1.68 *(ortak değer)*	
Kuşatılmış beton katsayısı, K	1.10 *(ortak değer)*	
Kuşatılmış betonda maks. gerilme Için şekildeğiştirme değeri	$\varepsilon_{c0} = 0.002[1 + 5(K - 1)]$	
Çelik çekme dayanımı *(MPa)*	400 *(ortak değer)*	
Çelik elastisite modülü *(MPa)*	200.000 *(ortak değer)*	
Çelik malzeme modeli	Menegottove Pinto [1973]*	Giuffrè ve Pinto [1970]*
Pekleşme parametresi	0.002 *(ortak değer)*	
Çelik için geçiş eğrisi başlangıç şekli parametresi	20 *(ortak değer)*	
Ortalama fiber parça boyutları	1.5x1.5cm *(ortak değer)*	

(*) Opensees programının kullandığı Giuffrève Pinto [1970] modeli, burkulmanın hesaba katılmadığı durumlarda Menegotto ve Pinto [1973] modeliyle benzerdir.



Şekil 3. Hassaslık analizi sonuçlarının 4 katlı model için karşılaştırmalı grafiği



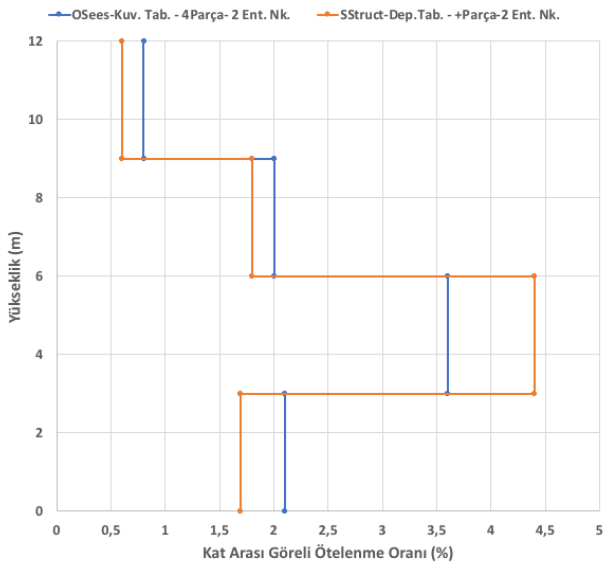
Şekil 4. Hassaslık analizi sonuçlarının, en az ve en çok dayanım değerini veren model seçenekler ve 6 katlı model için karşılaştırılması

Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilen kapasite eğrilerinde lejand kısmında sırasıyla analizde kullanılan eleman tipinin deplasman tabanlı veya kuvvet tabanlı olduğu, elemanın kaç parçaya bölündüğünü ve son olarak da entegrasyon nokta sayısı belirtilmektedir. Şekil 3'teki ilk eğrilerde ayrıca siyah ve kırmızı noktalar ile, kesitlerdeki ilk donatı akmasının meydana geldiği deplasman değerleri de işaretlenmiş, bunlar arasında analizden analize oluşan farklar da rapor edilmiştir.

Şekil 3'te verilen, 4 katlı çerçeveye ait SeismoStruct ile gerçekleştirilen hassaslık analizlerinde, öncelikle farklı modeller arasındaki en yüksek dayanım farkı, % 20 mertebesindedir. Yani, yapılan modellerde hepsi mantıklı modelleme seçeneklerini içeren tüm alternatiflerden en az dayanım değerini (250kN) veren model ile en yüksek dayanım değerini (300kN) veren model arasında %20 mertebesinde bir fark oluşmaktadır. Bu fark, yapının deplasmanları açısından incelendiğinde

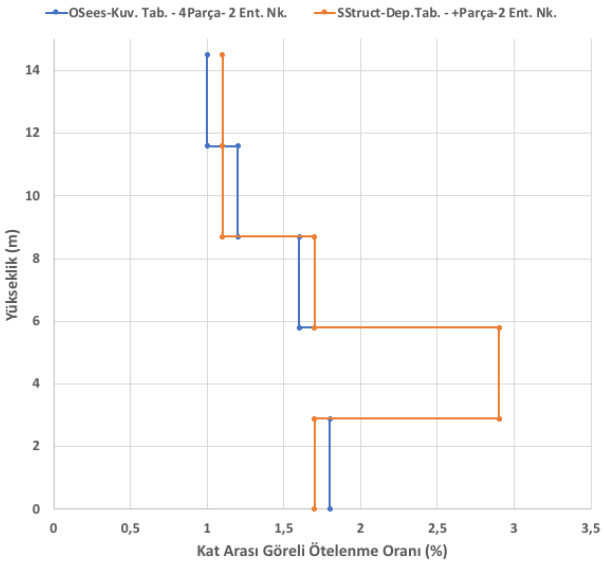
ise, yapının kolonlarında ilk donatı akmasının meydana geldiği tepe deplasmanı değeri, en küçük ve en büyük değerin meydana geldiği iki analiz arasında, %22 mertebesinde değişmektedir. OpenSees modelinde ise en büyük ve en küçük dayanımlar arasındaki oran 290/235, yani % 23 farklıdır.

Bu analizlerde kat arası göreli ötelenme oranları karşılaştırıldığında (bkz. Şekil 5), aynı toplam deplasman değeri olan 25cm'de, en düşük dayanım değeri veren OpenSees modelinin (Kuvvet Tabanlı Elemanlar, 4 parça, 2 entegrasyon noktası), en yüksek dayanım değerini veren SeismoStruct modeline nazaran (Deplasman Tabanlı Elemanlar, 4 parça, 2 entegrasyon noktası), en yüksek ötelenme oranlarının görüldüğü 1nci normal katta daha düşük ötelenme oranları sergilemektedir. Yani bir başka deyişle, deplasman tabanlı elemanların kullanıldığı modelde, plastikleşmelerin yüksek olduğu 1nci normal katta bir deformasyon lokalizasyonu gerçekleşmektedir, ki bu bulgu literatür ile de uyumludur [Calabrese ve ark., 2010].



Şekil 5. 4 katlı model çerçevesinde en yüksek ve en düşük dayanım değerlerini veren analizlerin göreli kat ötelenmesi oranı karşılaştırması

Burada elde edilen bulguların karşılaştırılması için, ayrıca 6 katlı bir başa çerçevede de deplasman ve kuvvet tabanlı iki farklı analiz sonucu karşılaştırılmıştır. Özellikle dayanım, kesitlerde oluşan ilk donatı akması ve kat arası göreli ötelenme oranı gibi değerler, birbirinden en farklı sonuçlar veren iki farklı model için karşılaştırılmıştır. Bunun için SeismoStruct yazılımında, Şekil 3'te verilen 6 katlı yapı modellenmiştir. Bu yapının özellikleri, Bal [2006] yayınında da detaylı anlatılmıştır. Bu yapıda beton kalitesi C14, donatı akma dayanımı 370MPa, kolon donatı oranları ise %1.05 civarındadır. 6 katlı modele ait kapasite eğrilerinde (bkz. Şekil 4), dayanımda %9, ilk rijitlikte %4, ilk donatı akması gerçekleşen yatay deplasman değerinde ise %3.5 değerinde farklılıklar bulunmuştur.



Şekil 6. 6 katlı model çerçevesinde en yüksek ve en düşük dayanım değerlerini veren analizlerin göreli kat ötelenmesi oranı karşılaştırması

Sonuçlar ve Tartışma

Yapıların doğrusal olmayan analizinde izlenen yöntemler ve uygulanan modeller, zamanla bilgisayarların da gelişmesi ile, değişiklik göstermiştir. İlerleyen bilgisayar teknolojisine paralel olarak ortaya daha karmaşık, analizi ve modellemesi daha uzun süren ve daha fazla bilgi birikimi gerektiren modeller çıkmıştır. Model çeşitliliğinin de artması ile birlikte, betonarme yapılarda doğrusal olmayana analiz yapmak isteyen mühendislerin önünde geniş bir seçenek

yelpazesi oluşmuştur. Bu seçenekler içerisinden hangilerinin, hangi parametrelere dayanarak ve nasıl seçileceği, açık ve net olmayıp, mühendislik bilgisinden çok akademik bilgiyi gerektirmektedir. Bu yüzden de çoğu zaman, aynı yapı için bile yapılan doğrusal olmayan analizlerde büyük farklar gözlenebilmektedir.
Bu çalışmada, 4 ve 6 katlı, nispeten basit iki betonarme çerçeve, iki farklı yazılımda ve hepsi mantıklı modelleme seçeneklerinden oluşan farklı modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen farklar, gerek yapı dayanımı ve gerekse, doğrusal olmayan deformasyonların başlamasına işaret eden bulgulardan biri olan kolonlarda ilk donatı akmasına denk gelen tepe deplasmanı anlamında karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre ve sonuçlar sadece bu makalede analiz edilen iki yapıyı temsil etmek üzere:

- tüm modelleme seçenekleri arasında %20 mertebesinde dayanım farkı,
- %22 mertebesinde de kolon donatılarında ilk akmaya tekabül eden tepe deplasmanı farkı
- Kuvvet tabanlı elemanlar ile deplasman tabanlı elemanlar arasındaki en temel fark olarak, plastikleşmelerin en yoğun olduğu katta deplasman tabanlı elemanlarda lokalizasyon

saptanmıştır. Birçok modelleme seçeneği arasında "en doğrusu" gibi çok net bir seçenek yapmanın mümkün olmadığı bu durum, mühendislerin yaptıkları doğrusal olmayan modellerin güvenilirlik derecesi ve önemli yapılarda bu tip modeller yapılmadan evvel hassaslık analizinin önemini bir kez daha vurgulamaktadır.

Ayrıca 4 katlı ve 6 katlı modeller arasında yapılan karşılaştırmada, eleman adedi ve yapı boyutları arttıkça, farklı modelleme seçenekleri arasındaki farkların da azaldığı görülmüştür. Daha karmaşık 3 boyutlu modellerde bu farkların daha da azalması beklenebilir, ancak düzensizlik durumlarında da bu tezin geçerli olup olmayacağı kestirilememektedir. Bununla ilgili 3 boyutlu, düzenli ve düzensiz yapılarda da analizleri tekrar etmek gerekir.

Kaynaklar

Antoniou S. and Pinho R. [2004] "Development and Verification of a Displacement-based Adaptive Pushover Procedure," Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.

Bal, I. E. [2008] "Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock", PhD Dissertation, University of Pavia, Italy.

Calabrese A., Almeida J. and Pinho R. [2010] "Numerical Issues in Distributed Inelasticity Modeling of RC Frame Elements for Seismic Analysis", Journal of Earthquake Engineering, 14(S1), 38-68.

Izzuddin B.A. [1991] ."Nonlinear Dynamic Analysis of Framed Structures,." PhD Thesis, Imperial College, University of London, London, UK.

Neuenhofer, A., and Filippou, F. C. [1997] ."Evaluation of nonlinear frame finite-element models.", ASCE Journal of Structural Engineering, 123(7), pp. 958-966.

Neuenhofer, A., and Filippou, F. C. [1998] ."Geometrically nonlinear flexibility-based frame finite element,." ASCE Journal of Structural Engineering, 124(6), pp. 704-711.

OpenSees [2010] ."Open System for Earthquake Engineering Simulation.", Pasific Earthquake Engineering Research Center, US(opensees.berkeley.edu).

Paulay, T. and Priestley, M. J. N. [1992] ."Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings,." John Wiley& Sons, Inc..

Pinho, R., Antoniou, S. [2005] ."A displacement-basedadaptivepushoveralgorithmforassessmentof verticallyirregularframes,." Proc. Of the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of the Irregular and Complex Structures, Thessaloniki, Greece

Priestley, M. J. N. [1997] ."Displacement-based seismic assessment of reinforced concrete buildings,." Journal of Earthquake Engineering, (1)1, pp.157-192.

Priestley, M.J.N.,Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. [2007] ."Displacement-based seismic design of structures,." IUSS Press, Pavia, Italy.

SeismoSoft [2018] ."SeismoStruct: A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures,." Available from URL: http://www.seismosoft.com.

Turkish Earthquake Code [2007] .“Specifications for the buildings to be constructed in earthquake areas,.” Ministry of Public Works and Settlement, Ankara, Turkey.

TS500 [2001] .“Requirements for design and construction of reinforced concrete structures,.”Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey

UBC 97, [1997] .“Uniform Building Code.”, Farmington Hills, USA.

Taucer, F., Spacone, E., and Filippou, F. C. [1991] .“A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures,.” Report No. UCB/EERC-91/17, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley. December 1991.

Mander J.B., Priestley M.J.N. and Park R. [1988] "Theoretical stress-strain model for confined concrete," Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.

Menegotto M. and Pinto P.E. [1973] "Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending," Symposium on theResistanceand Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, International Associationfor Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, pp. 15-22.

Giuffrè, A. and Pinto, P.E. [1970] .“Il comportamento del cementoarmato per sollecitazioni ciclichédi forte intensità.”, Giornale del Génio Civile (in Italian).

Sensitivity analysis of available distributed plasticity models for nonlinear analysis of RC structures

Extended abstract

Several different nonlinear beam models have been proposed up until today. These models can be grouped into two different categories: lumped inelasticity and distributed inelasticity models. In the case of lumped inelasticity models, nonlinear behaviour is concentrated at points where typically hinges are expected, generally at the member ends.

With the introduction of the fast computers, the use of fibres with uniaxial material behaviour to model the sectional response emerged as a viable alternative to the classical plastic hinge hysteretic models. The former featured the great advantages of relegating the definition of the hysteretic behaviour to the uniaxial stress-strain law and the ability of directly modelling the variability and biaxial character of the forces with normal stress components, as well as the reduction of post-peak resistance due to material softening.

The displacement-based formulation or stiffness method was the most common approach in the formulation of nonlinear frame elements until the end of the 90.'s. The displacement-based formulation is based on compatibility conditions where appropriate interpolation functions for the transverse and axial displacements of the member are assumed. The formulation of flexibility-based (or force-based) elements is based on interpolation functions of internal forces. It is rather straight forward to select polynomials that satisfy the element equilibrium in a strict sense, such as constant axial force and linearly varying bending moments in absence of element loads.

In order to have more accurate results, the number of the element subdivision and the integration points in one member have to be increased accordingly. Unfortunately, increased numbers of the elements and the integration points cause longer analysis times. It is really important to have reasonable results with the minimum numbers of the subdivision and the integration points to shorten the analysis times. The aim of this study is to carry out nonlinear pushover analysis on a RC frame model to find out the optimum conditions of the number of the integration points, subdivision number and use forced based or displacement based formulation to achieve the reasonable results with the shortest analysis time.

Initially, nine different analyses have been run on the 4-story case study frame to examine the effect of element formulation, as well as the number of subdivisions and integration points. A simple load-controlled conventional pushover analysis has been run with an inversed triangular loading pattern. The analysis options that have been considered are as follows:

- *Open Sees analysis with 4 displacement-based element per member with 2 Gauss points*
- *OpenSees analysis with 3 displacement-based element per member with 2 Gauss points (end elements' lengths are equal to the height of the section)*
- *OpenSees analysis with 3 displacement-based element per member with 4 Gauss points (end elements' lengths are equal to the height of the section)*
- *OpenSees analysis with 4 force-based elements per member, each with 2 Gauss-Lobatto points (elements have equal length)*
- *OpenSees analysis with 4 force-based elements per member, each with 4 Gauss-Lobatto points (elements have equal length)*
- *OpenSees analysis with 1 force-based element per member, with 4 Gauss-Lobatto points*
- *SeismoStruct analysis with 1 displacement-based element per member, with 2 Gauss points*

The analyses showed that, even if an analyst engineer uses available and "logic" modelling options, the results may differ significantly from one modelling strategy to another. In brief:

- *within all the models, the maximum difference of strength has reached to 20%,*
- *while the top displacement corresponding to the displacement at which the first reinforcement yield is attained in columns differs as much as 22%*
- *the main difference between the models prepared with displacement-based elements and force-based elements is the localisation of the plastic deormations in the floor with the highest inter-storey drift ratio*

These results are obviously bounded by the limited number of examples analysed here, however they still are indicative. The results show that the results of following different modelling options may lead to significant changes in the overall results, while the difference in sectional levels (i.e. curvatures and strains) are expected to be higher.

Keywords: *SeismoStruct, OpenSees, pushover, displacement based, force based;*