

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARIN
TASARIMI

M. İlkey URGU

Ağustos, 2006

İZMİR

SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARIN TASARIMI

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı**

M. İlkay URGU

**Ağustos, 2006
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

M. İlkey URGU, tarafından **Dr. Aydın SAATÇİ** yönetiminde hazırlanan “**SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARIN TASARIMI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Danışman

.....

Jüri Üyesi

.....

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasında bana yol gösteren ve çalıőmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Dr. Aydın SAATÇI'ye teőekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans eğitimim süresince manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

M. İlkey URGU

SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARIN TASARIMI

ÖZ

Bu çalışmada yapıların periyotlarını uzatmak suretiyle deprem etkilerini azaltmak amacıyla kullanılan sismik izolasyon sistemleriyle inşa edilen yapıların tasarım esasları incelenmiştir.

Öncelikle sismik izolasyon sistemlerinin sınıflandırılması, mekanik karakteristikleri ve teorik esasları detaylı olarak verilmiş ve sismik izolasyonlu yapılarla ilgili yönetmelik şartları açıklanmıştır. Uygulamalar bölümünde ise 4 katlı betonarme bir yapının ankastre mesnetli ve üç farklı tipteki sismik izolasyonlu modelleri oluşturulmuştur. Yapının izolasyonlu modellerinde HDR, LRB ve FPS tipi mesnetler kullanılmıştır. Sismik izolasyonlu yapı modelinin tasarımında UBC 97 yönetmelik şartları dikkate alınmıştır. Yapı modellerinin zaman tanım alanı analizleri SAP2000N bilgisayar programı ile 1999 Düzce Depremi'nin Bolu kaydı K-G ivme bileşeni kullanılarak yapılmıştır.

Son olarak, yapı modellerinin analizler sonucunda elde edilen görece kat ötelemeleri, maksimum kat ivmeleri, taban kesme kuvvetleri ve periyotları karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve sismik izolasyon sistemlerinin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Sismik izolasyon, UBC 97, deprem.

DESIGN OF SEISMIC ISOLATED STRUCTURES

ABSTRACT

Design bases of the structures, that are built with seismic isolation systems for reducing the earthquake effects by lengthening the structures' periods, are investigated in this study.

Initially, the classification, mechanical characteristics and theoretical essentials of the seismic isolation systems are given in detail and the code provisions for seismic isolated structures are explained. In the applications chapter a fixed-base and three different types of isolated models of a 4 storey reinforced concrete structure have been formed. The HDR, LRB and FPS types of bearings have been used in seismic isolated structure models. The UBC 97 code provisions have been considered in designing the seismic isolated structure models. The time history analyses have been carried out for structure models on SAP2000N structural analysis programme by utilising the Düzce earthquake's (1999) Bolu N-S acceleration records.

Finally, storey drifts, accelerations, base shears and periods of the structure models obtained from the analyses are presented and the advantages and disadvantages of the seismic isolation systems are discussed.

Keywords: Seismic isolation, UBC 97, earthquake.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|-------------------------------------------|-----|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU..... | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZ | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| İÇİNDEKİLER..... | vi |

BÖLÜM BİR – GİRİŞ.....1

| | |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 Sismik İzolasyon Kavramı..... | 1 |
| 1.2 Sismik İzolasyon Sistemlerinin Özellikleri..... | 3 |
| 1.3 Dünya’da Sismik İzolasyon Kavramının Gelişimi..... | 4 |
| 1.3.1 Tarihçe..... | 4 |
| 1.3.2 Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar..... | 6 |
| 1.3.3 Sismik İzolasyon Sistemleriyle İnşa Edilmiş Yapılar..... | 10 |

BÖLÜM İKİ – SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN

SINIFLANDIRILMASI.....18

| | |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Kauçuk Esaslı (Elastomerik) Sismik İzolasyon Sistemleri..... | 18 |
| 2.1.1 Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk İzolatörler (LDRB)..... | 19 |
| 2.1.2 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB)..... | 20 |
| 2.1.3 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDR)..... | 23 |
| 2.2 Kayma Esaslı Sismik İzolasyon Sistemleri..... | 26 |
| 2.2.1 Sürtünmeli Sarkaç (Pandül) Sistemler (FPS)..... | 28 |
| 2.2.2 Elastik Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi (R-FBI)..... | 31 |
| 2.2.3 Electricité-de-France Sistemi (EDF)..... | 32 |
| 2.2.4 EERC Birleşik Sistemi..... | 33 |
| 2.2.5 TASS Sistemi..... | 33 |
| 2.3 Yay Tipi Sistemler..... | 34 |

| | |
|---------------------------------------------|----|
| 2.4 Kılıflı Kazık İzolasyon Sistemleri..... | 34 |
| 2.5 Rocking Sistemi..... | 35 |

BÖLÜM ÜÇ – SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN MEKANİK

KARAKTERİSTİKLERİ.....36

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Giriş..... | 36 |
| 3.2 İzolatörlerin Bilineer Modelleme ile Tasarımı..... | 36 |
| 3.3 Kauçuk İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri..... | 38 |
| 3.3.1 Yatay Rijitlik (K_H)..... | 38 |
| 3.3.2 Düşey Rijitlik (K_V)..... | 39 |
| 3.3.3 Kauçuk İzolatörlerin Burkulma Yüğü Kapasitesi..... | 41 |
| 3.3.4 Kauçuk İzolatörlerin Yüksek Yatay Deplasmanlar Altındaki Stabilitesi..... | 41 |
| 3.3.5 Kauçuğun Mesnetten Dönerek Çıkma (ROLL-OUT) Stabilitesi..... | 42 |
| 3.4 Kurşun Çekirdekli İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri..... | 43 |
| 3.5 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerin Mekanik Karakteristikleri..... | 44 |

BÖLÜM DÖRT - SİSMİK İZOLASYONUN TEORİK ESASLARI.....49

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Tek Katlı Taban İzolasyonlu Yapının Hareketinin Lineer Teori ile İncelenmesi..... | 49 |
| 4.2 Lineer Teorinin Çok Katlı Yapılara Uygulanması..... | 63 |
| 4.2.1 Çok Serbestlik Dereceli Taban İzolasyonlu Sistemlerin Hareket Denklemleri..... | 63 |
| 4.2.2 Çok Serbestlik Dereceli Sistemin Modal Analizi..... | 65 |

BÖLÜM BEŞ – SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARLA İLGİLİ

YÖNETMELİK ŞARTLARI68

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 Giriş..... | 68 |
| 5.2 Sismik İzolasyonlu Yapıların Tasarımıyla İlgili UBC 97 Yönetmeliği Şartları..... | 69 |
| 5.2.1 Tanımlamalar..... | 70 |
| 5.2.1.1 Sismik Risk Düzeyi..... | 70 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.1.2 Sismik Bölge Faktörü (Z)..... | 70 |
| 5.2.1.3 Zemin Profili Tipi..... | 71 |
| 5.2.1.4 Bina Önem Katsayısı (I)..... | 71 |
| 5.2.1.5 Sismik Kaynak Tipleri..... | 71 |
| 5.2.1.6 Kaynak Yakınlık Faktörleri (N_a , N_v)..... | 72 |
| 5.2.1.7 Sismik Katsayılar (C_{AD} , C_{VD})..... | 73 |
| 5.2.1.8 Olabilecek Maksimum Deprem Tepki Katsayısı (M_M)..... | 74 |
| 5.2.1.9 Sarsıntı Şiddetine Bağlı Sismik Katsayılar (C_{AM} , C_{VM})..... | 75 |
| 5.2.1.10 Sönüm Katsayıları (B_D , B_M)..... | 76 |
| 5.2.1.11 Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R_I)..... | 76 |
| 5.2.2 Analiz Yöntemleri..... | 77 |
| 5.2.2.1 Statik Analiz..... | 77 |
| 5.2.2.1.1 Statik Analiz Kriterleri..... | 77 |
| 5.2.2.1.2 Statik Analiz Prosedürü..... | 78 |
| 5.2.2.2 Dinamik Analiz..... | 81 |
| 5.2.2.2.1 Dinamik Analiz Kriterleri..... | 82 |
| 5.2.2.2.2 Dinamik Analiz Prosedürü..... | 82 |
| 5.2.2.2.3 Tepki Spektrumu Analizi..... | 83 |
| 5.2.2.2.4 Zaman Tanım Alanı Analizi..... | 84 |
| 5.2.2.2.5 Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi..... | 84 |
| BÖLÜM ALTI – UYGULAMALAR..... | 85 |
| 6.1 Giriş..... | 85 |
| 6.2 İzolasyonlu Yapıların UBC 97'ye Göre Statik Analizi..... | 86 |
| 6.3 İzolasyonlu Yapıların Mesnetlerinin Tasarlanması..... | 88 |
| 6.4 Bilgisayar Programı ile Sismik İzolasyonlu ve Ankastre Mesnetli Yapı Modellerinin Zaman Tanım Alanında Analizi..... | 91 |
| 6.5 Analiz Sonuçları..... | 96 |
| 6.6 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... | 96 |
| 6.7 Sismik İzolasyonlu Yapıların Yaşanmış Depremlerdeki Performansları..... | 97 |

BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....99

KAYNAKLAR.....100

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Sismik İzolasyon Kavramı

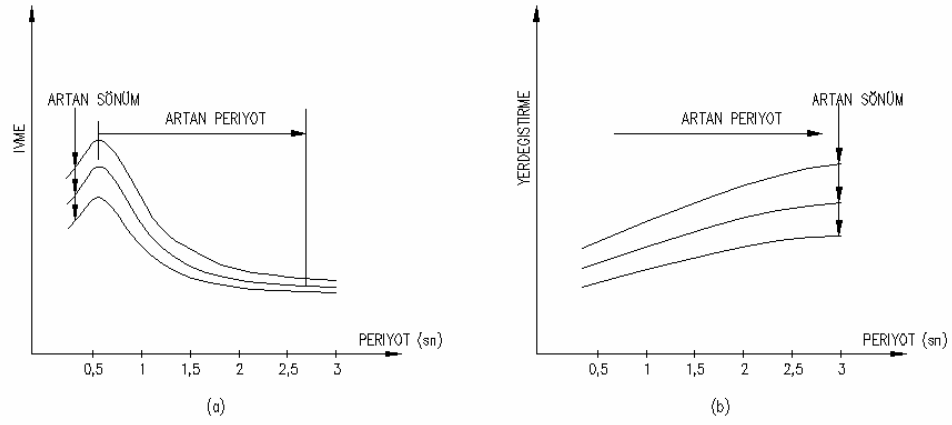
Taban izolasyonu genel olarak üst yapı ve temelin çeşitli sistemlerle birbirinden ayrılmasıdır. Günümüzde, izolasyon yapının temeli dışında daha farklı seviyelerinde de (çatılarda ve köprülerde olduğu gibi) uygulanabildiğinden, taban izolasyonu yerine daha genel bir ifade olarak “sismik izolasyon” kavramı kullanılmaktadır. Sismik izolasyon yapının depremlere karşı dayanım kapasitesinin artırılması ya da yapıya zeminden aktarılan sismik kuvvetlerin azaltılması prensibine dayanan, depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı yaklaşımıdır.

Ankastre mesnetli yapıların tasarımında inşaat mühendisi aşağıdaki ikilemele karşı karşıyadır:

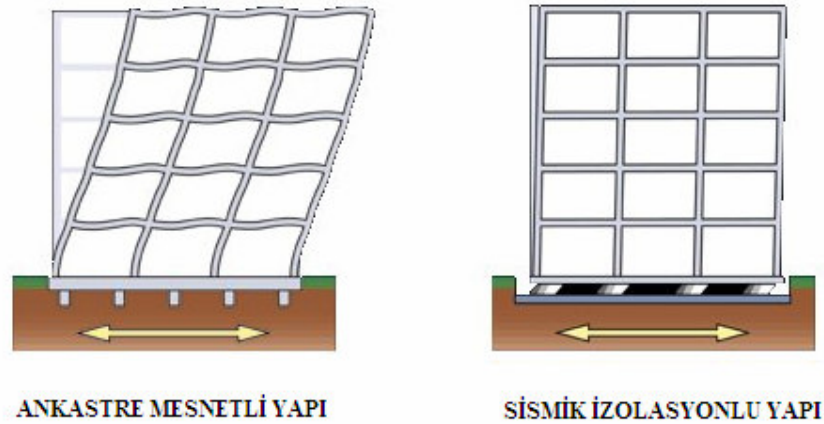
1. Yapının rijitliği artırılırsa, görelî kat ötelemeleri azalır, yapı maliyeti ve kat ivmeleri artar. Bu durumda binanın taşıyıcı elemanlarında hasar oluşmasa da bina içindeki cihaz ve tesisatın zarar görmesi engellenemez.
2. Yapının sünekliği artırılırsa, yapı maliyeti ve kat ivmeleri azalır, görelî kat ötelemeleri artar. Kat ivmeleri azaldığından bina içindeki cihaz ve tesisatlar zarar görmez fakat görelî kat ötelemeleri arttığından binanın taşıyıcı elemanlarında hasarlar oluşur.

Buradan anlaşılacağı gibi, ankastre mesnetli yapılarda şiddetli deprem yükleri altında aynı anda hem binayı hem de bina içindeki cihaz ve teçhizatları korumak mümkün olmamaktadır. Bu düşünceyle geliştirilen sismik izolasyon sistemlerinin çalışma prensibi kısaca şöyledir: Üst yapı ile temel arasına yerleştirilen sismik izolasyon sistemlerinin yatay rijitlikleri çok düşüktür. Bu sayede taban izolasyonlu yapının periyodu ankastre mesnetli yapıya göre daha uzun olmaktadır. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi yapı periyodunun (yaklaşık olarak $T=3$ sn’ye kadar) uzamasıyla

yapıya etkiyen deprem ivmesi azalmakta buna karşın yapı tabanındaki yer değiştirmeler artmaktadır (izolasyon sistemlerinde izin verilen sınırlar içinde). Bu yer değiştirmeler sönüm oranı yüksek sismik izolasyon sistemleri kullanılarak veya yapıya ek sönüm cihazları ilave ederek azaltılabilmektedir. Şekil 1.2’de gösterildiği gibi üst yapı rijit bir davranış sergilemekte ve görel kat ötelemeleri azalmaktadır. Bu sayede yapıda hiçbir can ve mal kaybı yaşanmamakta, depremden sonra da yapı işlevini yerine getirebilmektedir.



Şekil 1.1 Sağlam zeminler üzerinden alınmış (a) tipik ivme tepki spektrumu (b) tipik yerdeğiştirme tepki spektrumu



Şekil 1.2 Mesnet tiplerine göre yapı davranışları (DIS, b.t.)

1.2 Sismik İzolasyon Sistemlerinin Özellikleri

Sismik izolasyon sistemlerinin özellikleri maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1. Öncelikle sismik izolasyonlu binada deprem esnasında can güvenliği artar.
2. Binada deprem esnasında olabilecek yapısal hasarlar önlenir.
3. Bina içindeki cihazlar ve donanımlarda oluşabilecek hasarlar önlenmektedir. (Özellikle deprem sonrası kullanılması gereken sarsıntılara karşı hassas hastane cihazlarının, müzelerde saklanan ve yeniden yapılması mümkün olmayan tarihi eserlerin, deprem sonrası oluşacak en ufak bir hasarda büyük felaketlere yol açabilecek nükleer reaktörlerin, araştırma ve geliştirme merkezlerindeki hassas cihazların korunması için yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde bu sistemler tercih edilmektedirler.)
4. Depremden sonra oluşabilecek üretim kayıpları önlenmektedir. Unutulmamalıdır ki 17 Ağustos depreminin ülkemizin en önemli sanayi tesislerinin bulunduğu Marmara Bölgesinde meydana gelmesi ve depremin ardından üretim tesislerinin kısmen veya tamamen yıkılması veya bu tesisler içindeki cihazların hasar görmesi sonucu oluşan üretim kayıplarının maliyeti ülkemiz açısından oldukça yüksektir.
5. Sismik izolasyon sistemleri yeni yapılacak bir binada kullanılabilmesi gibi mevcut binaların güçlendirilmesinde de rahatlıkla kullanılabilir. Sismik izolasyon sistemleriyle güçlendirmede yapının üst katlarında herhangi bir inşaat faaliyetine gerek yoktur. Böylelikle üst yapının, mimarisi bozulmadan ve üst katlar boşaltılmadan güçlendirme işlemi tamamlanabilir. Özellikle tarihi binaların güçlendirmesinde bu sistemler büyük avantaj sağlar.
6. Bu cihazlar sökülüp, yeniden monte edilebildiğinden yapının kullanım ömrünü kısaltmazlar.
7. Sismik izolasyonlu çözüm, ankastre mesnetli çözüme nazaran %5 daha pahalıdır. Bu başlangıçta bir dezavantaj gibi görünse de yapının kullanım ömrü boyunca oluşacak her bir depremi hasarsız olarak atlatacağı düşünülürse, bu maliyet artışı dezavantaj olmaktan çıkar.

8. Yumuşak dolgu zeminlerin zemin hâkim periyotları uzun olduğundan, üst yapının periyodunu uzatmanın bir avantajı yoktur. Binanın periyodu zemin hâkim periyoduna yaklaşacağından yapının depreme karşı tepkisi artacaktır. Bu da taban izolasyonlu sistemin ankastre mesnetli yapıya göre avantajını ortadan kaldıracaktır.
9. Bu cihazlar yangın riskine karşı korunmalıdırlar.
10. Çok yüksek katlı binalarda veya kolonları eksenel çekmeye maruz binalarda tek başlarına kullanılamazlar (Naeim, 1989).

1.3 Dünya’da Sismik İzolasyon Kavramının Gelişimi

1.3.1 Tarihçe

Sismik izolasyon cihazlarını binaların altına yerleştirme fikri ilk kez Tokyo Üniversitesi profesörlerinden sismolog Dr. John Milne tarafından ortaya atılmıştır. Dr. Milne 1876-1895 yılları arasında konuyla ilgili çeşitli çalışmalar yapmıştır. Dr. Milne öncelikle izolatör olarak 25 cm çapında dökme demir bilyeler kullanmıştır. Bu modellemeyle yapılmış bina hafif deprem yükleri altında iyi bir performans gösterse de rüzgar yükleri karşısında başarısız olmuştur. Dr. Milne daha sonraki çalışmalarında bilyelerin çapını 2,5 cm’ye düşürmek suretiyle hem rüzgar hem de deprem yükleri karşısında stabilitesini koruyabilen bir bina tasarlamayı başarmıştır (Tezcan ve Cimilli, 2002).

Sismik izolasyon düşüncesinin depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı stratejisi olarak ilk kez 1908 yılında Messimo-Reggio depreminin ardından İtalyan Hükümeti tarafından tartışmaya açılmıştır (Naeim ve Kelly, 1999).

Konuyla aslen bir tıp doktoru olan Johannes Avetican Calantarients de ilgilenmiştir. 1909 yılında Calantarients talktan oluşan bir tabakayla yapıyı temelden ayırmayı önermiştir (Kelly, 1981).

1921 yılında Frank Lloyd Wright Tokyo'daki Imperial Hotel binasını sismik izolasyon kavramıyla dizayn etmiştir. Wright binanın oturacağı zemin profilinin 2,5 m kalınlığında sağlam bir zemin tabakası ile onun altındaki yaklaşık 20 m kalınlıkta yumuşak çamur tabakasından oluştuğunu gözlemlemiştir. Wright binayı sismik etkilerden korumak amacıyla sağlam zemin tabakasına yakın aralıklarla kazıklar çakarak bina ile sağlam zemin tabakasını birleştirmiş ve böylelikle çamur tabakasının üzerinde yüzen bir sistem oluşturmaya çalışmıştır. Imperial Hotel binası 1923 yılında meydana gelen yıkıcı Tokyo depremini hasarsız atlarmayı başarmıştır (Kelly, 1981).

Kauçuk izolatörler ilk kez, inşası 1969 yılında tamamlanan Yugoslavya'nın Üsküp kentinde bir ilkokul binasında (Pestalozzi Okulu) depremden korunma amaçlı olarak kullanılmıştır (Naeim ve Kelly, 1999).

1970'li yıllarda kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler geliştirilmiştir (Kelly, 2001). Kurşun çekirdekli izolatörlerin kullanıldığı ilk bina 1981 yılında Yeni Zelanda'nın Wellington şehrinde inşası tamamlanan "William Clayton Building" adlı yapıdır (Robinson, 2000).

1976 yılında Earthquake Engineering Research Center (EERC) kurumunda doğal kauçuk mesnetlerin geliştirilmesine yönelik araştırmalar başlamıştır (Kelly, 1998).

1982 yılında bir İngiliz kurumu olan "Malaysian Rubber Producers' Research Association (MRPRA)" tarafından yüksek sönümlü kauçuk izolatörler geliştirilmiştir (Naeim ve Kelly, 1999).

1985 yılında ABD'deki ilk sismik izolasyonlu bina olan "Foothill Communities Law and Justice Center"ın inşası tamamlanmıştır (Kelly, 1998).

1987 yılında Zayas V.A., Low S.S. ve Mahin S.A. sürtünmeli sarkaç sistemlerle ilgili ilk deneysel çalışmayı yapmışlardır.

1.3.2 Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Kelly (1982) tarafından taban izolasyonunun deprem yükleri etkisindeki yapının içindeki ikincil ekipmanların sismik tepkisi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir seri deney yapılmıştır. Bu deneyler sarsma tablası üzerine monte edilmiş büyük ölçekli 5 katlı yapı modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde California'da meydana gelmiş dört depreme ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Bunlar El Centro 1940 NS, Pacoima Dam 1971 S16E, Taft 1950 S69E ve Parkfield 1966 N65E ivme kayıtlarıdır. Kelly yapı modelini beş ayrı mesnet durumuna göre deprem yükleri altında incelemiştir: 1) Ankastre mesnetli durum, 2) Taban izolasyonu için kauçuk mesnetlerin kullanıldığı durum, 3) Tabanda küçük mesnetlerin yanında sistemin 1cm düşey deplasmanı sonucu aktif hale geçen sürtünmeli sönümleyicilerin kullanıldığı durum. 4) Kauçuk mesnetlerin yanında sürtünmeli sönümleyicilerin kullanıldığı durum. 5) Kauçuk mesnetlerle beraber enerji sönümleyici cihazın kullanıldığı durum. Deneylerde yapı içindeki ikincil ekipmanları modellemek amacıyla sarkaçlar kullanılmıştır. Sonuç olarak taban izolasyon sistemlerinin yapı içindeki ikincil ekipmanların sismik tepkisini önemli ölçüde azalttığı ispatlanmıştır. En büyük azalmanın 2 no'lu mesnet durumunda olduğu gözlemlenmiştir. Bu aynı zamanda yapının yerdeğiştirmesinin en fazla olduğu durumdur. Bu yerdeğiştirmeler kabul edilebilir değerlerin üzerinde olduğundan bu tür sistemlerin yanında bir takım kontrol sistemlerinin kullanılmasının zorunlu olduğu ortaya konulmuştur. 3 ve 4 no'lu mesnet durumlarının bir mühendis için dizaynının kolay olmasına rağmen ikincil ekipmanların sismik tepkisini azaltmakta yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. 5 no'lu mesnet durumunun yapı içindeki ivmeleri azaltırken yapının yerdeğiştirmelerini de kontrol etmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu tür bir sistemin gerçek bir yapıya uygulanmasının güçlükleri vurgulanmıştır. Uygulanabilirlik açısından iki tip mesnet modeli önerilmiştir: Teflon ve paslanmaz çelikten oluşan düşük sürtünmeli mesnet modelinin kauçuk sistemlerle birlikte kullanıldığı bir sistem ve kurşun çekirdekli kauçuk mesnet modeli.

Mostaghel ve Kelly (1987) elastik sürtünmeli taban izolasyon sistemlerinin (R-FBI) dizayn prosedürlerini vermiştir.

Zayas, Low ve Mahin (1987) tarafından yapılan çalışmada sürtünmeli sarkaç sistemlerinin özellikleri deneysel olarak ortaya konulmuştur. Bu çalışmada 2 katlı yapı modeli kullanılmış ve bu modelden kütle kolon rijitliklerini değiştirmek suretiyle periyotları farklı dört ayrı tip yapı modeli türetilmiştir. Bu yapı modelleri aynı özelliklere sahip sürtünmeli sarkaç mesnetlerin üzerine monte edilip sarsma tablası deneylerine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak deney neticelerinin deprem yükleri altındaki sürtünmeli sarkaç sistemli yapıların performanlarıyla ilgili teorik hesaplamaları destekler nitelikte olduğu ispatlanmıştır. Deneylerde sürtünmeli sarkaç sistemli yapı modelinin 8 büyüklüğündeki bir depreme dahi dayanabildiği gözlemlenmiştir. Sürtünmeli sarkaç sistemlerinin yapının periyodunu yükseltmekte ve yapıya etkiyen deprem kuvvetlerini azaltmakta etkili olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Ayrıca sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin deprem enerjisini absorbe ettiği, izolasyon seviyesindeki yerdeğiştirmeyi ve üst yapının görelî kat ötelemelerini azaltmakta etkili olduğu ispatlanmıştır.

Griffith, Kelly ve Aiken (1988) tarafından elastomerik izolasyon mesnetlerinin içine monte edilebilen bir deplasman kontrol cihazı tasarlanmıştır. Bu cihaz mesnetlerin deplasmanlarını sınırlayacak ve mesnetlerde oluşan kaldırma (uplift) kuvvetlerini karşılayacak şekilde dizayn edilmiştir. Cihaz 1/4 ölçekli 9 katlı bir yapı modelinin altına monte edilerek sarsma tablası testine tabi tutulmuştur. Deplasman kontrol cihazı 8 adet elastomerik mesnet üzerine oturtulan yapı modelinin köşelerindeki 4 adet mesnedin içerisine yerleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda deplasman kontrol cihazının orta yükseklikteki yapı modelinde kolonların havaya kalkmasını engellediği, yatay deplasmanları sınırlamakta etkili olduğu ve cihazın izolasyon sistemi için göçme güvenlik mekanizması olarak kullanılabilceği anlaşılmıştır.

Mokha, Constantinou, Reinhorn ve Zayas (1991) tarafından yapılan çalışmada dört sürtünmeli sarkaç mesnet üzerine monte edilmiş 1/4 ölçekli 6 katlı, 23 ton ağırlığında, 5,49 m yüksekliğinde bir yapı modeli sarsma tablası testlerine tabi tutulmuştur. Mesnetler 2,44 m arayla yerleştirilmiştir. Bu deneylerde sürtünme katsayıları 0,075 ve 0,095 olan iki farklı tipte mesnet malzemesi kullanılmıştır. Bu

malzemelerden sürtünme katsayısı yüksek olan Techmet-B, diğeri ise işlenmiş teflon malzemedan imal edilmiştir. İzolasyonlu sistemin doğal periyodu 1 sn olacak şekilde izolatörler tasarlanmıştır. Ankastre mesnetli sistemin doğal periyodu is 0,43 sn olarak hesap edilmiştir. Sarsma tablası testlerinde El Centro S00E (0,34g), Taft N21E (0,16g), Pacoima S74W (1,08g), Pacoima S16E (1,17g), Miyagi-Ken-Oki (0,16g), Hachinobe (0,23g) ve Mexico City (0,17g) yer ivme kayıtları kullanılmıştır (parantez içinde verilen değerler en büyük ivme değerleridir). Deneyler sonucunda, sürtünmeli sarkaç izolasyon sisteminin yapıyı yüksek sismik etkilere karşı korumakta etkili olduğu gözlemlenmiştir. Sarsma tablasındaki ivme değerleri 1g'ye kadar yükseldiği halde yapı modeli elastik sınırlar içinde kalmıştır. Mesnetlerin en büyük kalıcı yerdeğiştirmelerinin mesnet tasarım yerdeğiştirme değerinin % 6'sı kadar olduğu ölçülmüştür (deneylerde kullanılan mesnetlerin dizayn yerdeğiştirme değeri 5 cm olarak verilmiştir). Deneyler sırasında hiçbir mesnet yuvasından çıkmamıştır. Yapı modelinin El Centro yüklemesi altında ankastre mesnetli yapının dayandığı yer ivmesinden altı kat daha büyük yer ivme değerine elastik sınırlar içinde kalarak karşı koyduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeli sarkaç sisteminin ihtiyaca göre değiştirilenebilir özelliklere sahip olması ve analiz yöntemlerine uygunluğu sayesinde yapının tepkisinin önceden güvenilir bir şekilde hesap edilebileceği ortaya konulmuştur.

Aiken, Kelly, Clark, Tamura, Kikuchi ve Hoh (1992) üç tip sismik izolasyon sisteminin mekanik karakteristiklerini belirlemek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında üzerinde çalışılan sistemler yüksek kayma modülüne sahip yüksek sönümlü kauçuk mesnet, düşük kayma modülüne sahip yüksek sönümlü kauçuk mesnet ve kurşun çekirdekli kauçuk mesnettir. Mesnetler çeşitli düşey yük ve yükleme frekanslarında yatay histeretik deplasman testlerine tabi tutulmuş ve bu testlerde mesnetlerin kayma rijitliği ve sönüm oranı özelliklerinin kayma şekil değiştirmesiyle ilişkileri incelenmiştir. Son olarak yapılan kapasite testlerinde ise mesnetlerin çeşitli düşey yükler altındaki kesme dayanımı, bulonlu birleşimlerdeki çekme dayanımı ve dübellenmiş mesnetlerdeki dönerek yuvadan çıkma (roll-out) durumları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda düşey yük ve yükleme frekanslarındaki değişimlerin mesnetlerin kayma rijitliği ve sönüm oranı

özelliklerini çok fazla etkilemediği gözlemlenmiştir. Yapılan kesme dayanımı testlerinde mesnetlerin %500'e varan kayma şekil değiştirmelerine kadar dayandığı tespit edilmiştir. Çekme dayanımı testleri bulonlanmış yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerin yüksek seviyede gerilmelere dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Kikuchi ve Aiken (1997) taban izolasyonlu yapıların sismik tepkisini en az hata ile hesaplamak amacıyla elastomerik izolasyon mesnetleri için analitik histeretik bir model tasarlamışlardır. Bu çalışma kapsamında iki tip yüksek sönümlü kauçuk, bir tip kurşun çekirdekli kauçuk ve bir tip silikon kauçuk olmak üzere toplam dört tip elastomerik mesnet kullanılmıştır. Bu mesnetlerin mekanik karakteristikleri mesnet yükleme deneyleriyle tespit edilmiştir. Daha sonra bu mesnetler üzerine monte edilmiş 1/2,5 ölçekli üç katlı yapı modeli üzerinde sarsma tablası testleri yapılmış ve bu testlerden elde edilen sonuçların, mesnetlerin mekanik karakteristikleri kullanılarak analitik olarak hesaplanan değerlere çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Clark, Aiken ve Kelly (1997) tarafından Foothill Communities Law and Justice Center binası için üretilen sismik izolatörlerin uzun süreli performanslarını ölçmek amacıyla yapılan deney programının sonuçları verilmiştir. Bu binaya ait iki çift yüksek sönümlü kauçuk mesnet test edilmiştir. Bunlardan ilk çifti binanın inşasından 10 yıl sonra binadan sökülmüş, diğer çifti ise bina inşasından önce imal edilmiş orijinal özelliklere sahip prototip izolatörlerdir. Yapılan testler sonucunda binadan sökülen izolatörlerin düşey rijitliklerinde bir değişiklik olmadığı, yatay rijitliklerinin ise %15 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan büyük şekildeğiştirme testleri sonucunda mevcut mesnetlerin halen daha maksimum yerdeğiştirmeler için istenilen dayanıma sahip oldukları tespit edilmiştir.

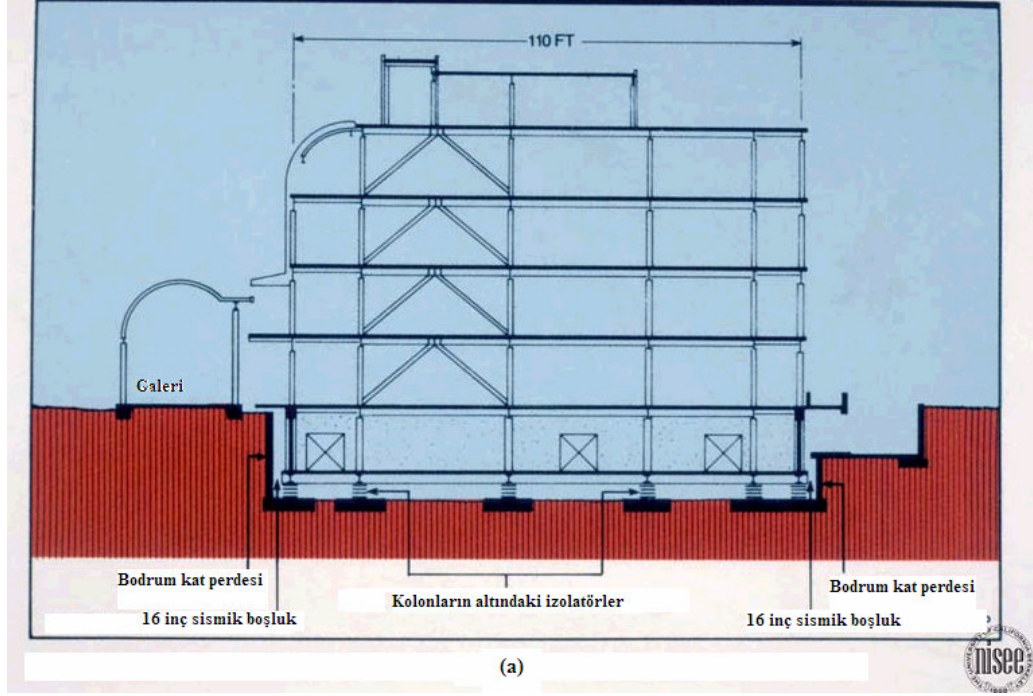
Kelly (1999) tarafından izolasyon sistemlerinin deplasmanlarını azaltmak amacıyla sisteme eklenen sönümleyicilerden oluşan doğrusal bir modelin teorik esasları verilmiştir.

Tsai ve Kelly (2005) elastomer mesnetlerde kullanılan ara çelik levhaların fleksibilitesinin izolatörün burkulma yüküne etkisini içeren bağıntılar vermiştir. Çelik levhanın genişlik / kalınlık oranının artmasıyla mesnetlerin kritik burkulma yükünün azaldığı teorik olarak gösterilmiştir.

1.3.3 Sismik İzolasyon Sistemleriyle İnşa Edilmiş Yapılar

ABD'nin ilk taban izolasyonlu binası olan "Foothill Communities Law and Justice Center (FCLJC)" in inşası 1985 yılında tamamlanmıştır (Şekil 1.3). FCLJC yüksek sönümlü kauçuk mesnet kullanılarak inşa edilen ilk binadır. Binanın sismik izolasyonu için toplam 98 adet yüksek sönümlü kauçuk mesnet kullanılmıştır. Bu bina Los Angeles'ın 60 km doğusunda bulunan Rancho Cucamonga şehrinde ve San Andreas fayına sadece 21 km uzaklıkta inşa edilmiştir. Toplam 15794 m² alan ve dört kattan oluşan bina 8,3 büyüklüğündeki depremlere dayanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Binanın izolasyon seviyesindeki maksimum yatay deplasman kapasitesi 380 mm'dir. Bina toplam 38 milyon dolara mal olmuştur.

1990 yılında Los Angeles'ta inşası tamamlanan "Fire Command and Control Facility (FCCF)" binası da yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerin üzerine inşa edilmiştir (Şekil 1.4). Bu bina konvansiyonel olarak tasarlanan alternatif modeline göre %6 daha ucuza mal edilmiştir.



Şekil 1.3 Foothill Communities Law and Justice Center binası (a) kesit (b) cepheden bir görünüş (University of California Berkeley, b.t.)



Şekil 1.4 Fire Command and Control Facility binası (University of California Berkeley, b.t.)

İnşası 1991 yılında tamamlanan sekiz katlı, çapraz perdeli olarak tasarlanan ABD'nin Los Angeles şehrinin doğusundaki "The University of Southern California Teaching Hospital" binası 68 adet kurşun çekirdekli kauçuk ve 81 adet kauçuk izolatör üzerine mesnetlenmiştir (Şekil 1.5). Temel sistemi radye general olarak seçilen bina kayalık zemin üzerine inşa edilmiştir. Mimari gereksinimlerden dolayı, yapıda planda ve düşey doğrultuda düzensizlikler bulunmaktadır (Clark ve diğer., 1996).

Yeni inşa edilen yapıların yanında sismik izolasyon sistemleri birçok eski yapının sismik güçlendirilmesinde de kullanılmıştır. Bu yapılara örnek olarak, Şekil 1.6'daki California'daki "Oakland City Hall" ve Şekil 1.7'deki "San Francisco City Hall" binaları gösterilebilir. Bu iki bina 1989 Loma Prieta Depremi'nde hasar görmüş ve sismik izolasyon sistemleriyle güçlendirilmesine karar verilmiştir (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 1.5 The University of Southern California Teaching Hospital binası (University of California Berkeley, b.t.)



Şekil 1.6 Oakland City Hall binası (DIS, b.t.)

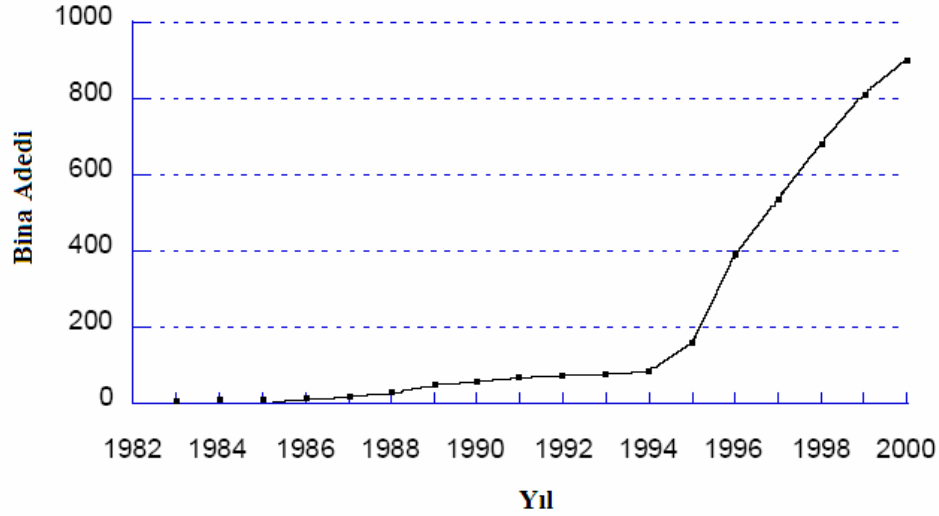


Şekil 1.7 San Fransisco City Hall Binası (DIS, b.t.)

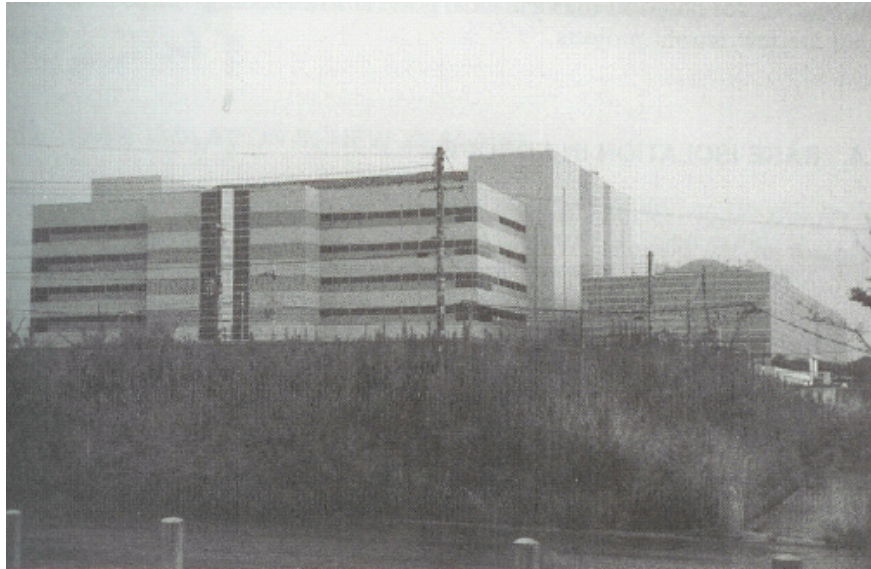
1997 yılında EERC bünyesindeki Protective Systems Research Group, ABD’de sismik izolasyon sistemleri ile inşa edilmiş veya güçlendirilmiş bina adedini 38 olarak açıklamıştır.

Sismik izolasyonlu yapı uygulamaları Japonya’da 1980’lerin başlarında başlamıştır. İlk bina 1983 yılında tamamlanmış ve 1985 yılına kadar sadece üç adet deneme projesi tamamlanmıştır. 1985-1994 yılları arasında taban izolasyonlu yapıların sayısı artmış ve senede inşa edilmiş bina sayısı 10’a yükselmiştir. Bu yapıların 1995 Kobe depremini hasarsız atlattıkları sonucunda Japonya’da sismik izolasyonlu yapıların sayısı hızla artmış ve 1995-2001 yılları arasında, senede inşa edilen sismik izolasyonlu yapı sayısı 150’e yükselmiştir. Yıllara göre Japonya’da inşa edilen sismik izolasyonlu yapı adedi Şekil 1.8’de verilmiştir (Nakashima ve diğer, 2004). Japonya’da inşa edilmiş en büyük sismik izolasyonlu yapı toplam 47000 m² alana sahip, 6 katlı betonarme olarak inşa edilmiş “West Postal Computer Center” binasıdır (Şekil 1.9). Bu bina Kobe’nin kuzeyindeki Sanda şehri yakınlarında inşa edilmiştir. Bu binada 54 adet kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve 66 adet doğal kauçuk izolatöre ek olarak 44 adet çelik sönmüleyici kullanılmıştır. Üst yapının ankastre mesnetli periyodu 0,68 sn, izolasyonlu sistemin periyodu ise 24 cm deplasman için 3,3 sn olarak tasarlanmıştır. Bu bina 1995 Kobe Depremi’nde hiç bir

hasar görmemiştir. Japonya'dan örnek olarak verilebilecek diğer bir bina ise yine Sanda şehri yakınlarında 1994 yılında inşası tamamlanan “Technical Research Institute of the Matsumura-Gumi Construction Company” binasıdır (Şekil 1.10). 12.8 m yüksekliğindeki bina 8 adet yüksek sönümlü kauçuk izolatör üzerine inşa edilmiştir. Üst yapının ankastre mesnetli periyodu 0,24 sn, izolasyon sistemli yapının hedef periyodu 20,3 cm deplasman için 2,3 sn olarak tasarlanmıştır (Clark, 1997).



Şekil 1.8 Yıllara göre Japonya'da inşa edilmiş sismik izolasyonlu yapı adedi (Nakashima ve diğer., 2004)



Şekil 1.9 West Postal Computer Center binası (Naeim ve Kelly, 1999)



Şekil 1.10 Technical Research Institute of the Matsumura-Gumi Construction Company binası (Naeim ve Kelly, 1999)

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin kullanıldığı ilk yapı Yeni Zelanda'nın Wellington şehrinde 1981 yılında inşası tamamlanan "William Clayton Building" dir. Bina 80 adet kurşun çekirdekli kauçuk izolatör üzerine inşa edilmiştir. Bu binanın doğal periyodu 2,5 sn olarak tasarlanmıştır. Yeni Zelanda'da inşa edilmiş Union House ve Wellington Police Station binalarında kılıflı kazık izolasyon sistemleri kullanılmıştır. Wellington'daki "The National Museum of New Zealand" Binasının sismik izolasyonunda 142 adet kurşun çekirdekli kauçuk ve perdelerin altında 36 adet teflon yastık kullanılmıştır. Yine Yeni Zelanda'daki "The South Rangitikei River Bridge" Köprüsünün inşasında rocking sistemi kullanılmıştır. Ayrıca "Parliament Building (1918)" ve "Assembly Library (1898)" binalarının güçlendirilmesinde kurşun çekirdekli izolatörler kullanılmıştır (Naeim ve Kelly, 1999; Robinson, 2000)

2001 yılı rakamlarına göre Çin'de çoğu konut olmak üzere 450'nin üzerinde binanın inşasında sismik izolasyon sistemleri kullanılmıştır. Çin'de sismik izolasyon sistemleri genellikle 7-8 katlı betonarme çerçeve tipi yapılarda kullanılmıştır. Bunlardan en ilgi çekici olanı 13 katlı, 28000 m² alana sahip güney Çin'de inşa

edilmiş müze binasıdır. Bu binada kauçuk izolatörler 1. kat seviyesine monte edilmiştir. Müzenin maliyeti, ankastre mesnetli tasarımına göre %2 fazla olsa da 4 kat daha güvenli olmuştur (Zhou, 2001).

Türkiye’de ise yıkıcı depremlerden sonra sismik izolasyon kavramı önem kazanmıştır. Atatürk Havaalanı Dış Hatlar Terminali’nin çatısında ve Kocaeli Üniversitesi Hastanesi Binasında sürtünmeli sarkaç izolatörler kullanılmıştır. Ayrıca Bolu Dağı Viyadüğü’nde ve Güney Otoyolunda (Gaziantep-Tarsus) kayıcı mesnetler kullanılmıştır.

BÖLÜM İKİ

SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Sismik izolasyon sistemlerini kauçuk esaslı sismik izolasyon sistemleri, kayma esaslı sismik izolasyon sistemleri, yay tipi sistemler, kılıflı kazık izolasyon sistemi ve rocking izolasyon sistemi olmak üzere beş ana başlık altında incelemek mümkündür. Bu sistemlerden günümüzde en çok kullanılan kauçuk ve kayma esaslı sismik izolasyon sistemleri olduğundan bu bölümde bu tip sistemlere geniş yer verilmiş, adı geçen diğer sistemler kısaca tanıtılmıştır.

2.1 Kauçuk Esaslı (Elastomerik) Sismik İzolasyon Sistemleri

Kauçuk izolatörler ilk kez 1969 yılında Yugoslavya'da Üsküp kentinde bir ilkokul binasında (Pestalozzi Okulu) depremden korunma amaçlı olarak kullanılmıştır. Bu binadaki kauçuk izolatörlerde ara çelik plakalar kullanılmamıştır. Bunun sonucu olarak da kauçuk izolatörler, bina ağırlığı altında ezilerek yanlara doğru bel vererek deforme olmuştur. Kullanılan kauçuğun yatay ve düşey rijitlikleri hemen hemen aynı olduğu için, deprem anında bina öne ve arkaya yatacaktır (Naeim ve Kelly, 1999). Kauçuk izolatörlerde ara çelik plakaların kullanımına başlanmasıyla bu sorunlar giderilmiştir.

Bayülke (2002) kauçuk izolatör yerine lastik takoz terimini kullanmış ve takozların üretim aşamalarını aşağıdaki sırada vermiştir:

- Lastik takozlar doğal kauçuktan yapılmaktadır.
- Lastiğe ozon dayanımı, mekanik dayanım, çekme dayanımı, rijitlik ve sönüm artırıcı katkı maddeleri konulur. Rijitlik ve sönüm artışı için doğal kauçuğa karbon siyahı konulur ve karıştırılır.
- Kauçuk rulo yapılır.
- Birkaç milimetre kalınlığında daire biçiminde kesilir.
- Kauçuklar kat kat yerleştirilir.

- Aralarına yine birkaç milimetre kalınlığında çelik levhalar konulur. Levhaların lastiğe iyi yapışması için yüzeyleri parlatılır.
- Yüzeyle yapıştırıcı maddeler konulur.
- Bir kat lastik, bir kat çelik, ağır çelik kalıba konulur. Alt ve üst katmanlar ile kalıp arasına lastik konulur. 135 °C’de 14 saat bekletilir.
- Lastik “vulkanize” edilir. Bu işlem sırasında lastik kalıptan dışarı taşabilir. Çevreye konulan lastik, çeliği paslanma ve yangından korur.

Doğal lastiğin yapısındaki değişkenler, katkı maddesindeki değişimler, karıştırma ve kür sırasındaki koşullarının aynı olmaması nedeniyle lastik takozların özelliklerinde, kalite ve dayanımlarında (mekanik özelliklerinde) önemli farklılıklar olabilir. Lastik takozların ortasına sönüm ve yatay stabilite açısından kurşun bir çekirdek de konulabilir.

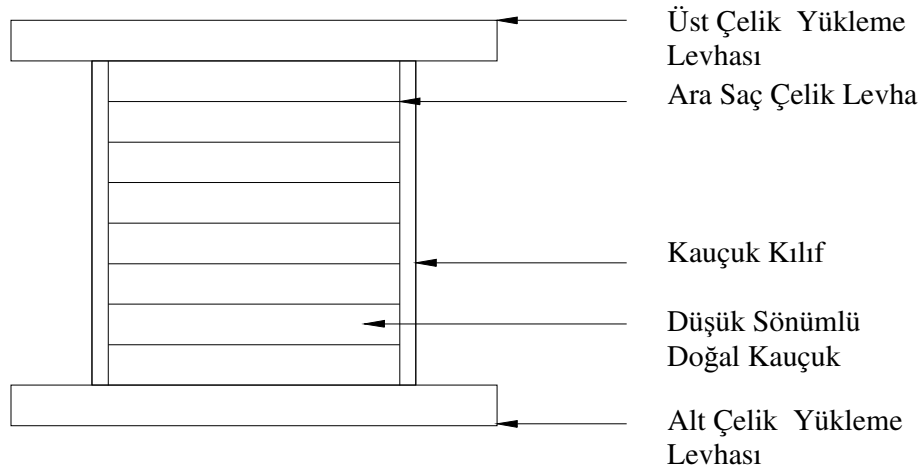
2.1.1 Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk İzolatörler (LDRB)

Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk izolatörler, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi altta ve üstte olmak üzere iki adet çelik montaj (yükleme) levhası ve bu levhaların arasında bulunan çok sayıda ara saç levhaları ve kauçuk malzemeden meydana gelir. Kauçuk vulkanize işlemine tabi tutularak bir kalıp içinde uygulanan sıcaklık ve basınç altında tek bir işlem dâhilinde, çelik malzeme ile bağlanır. Çelik montaj plakaları düşey kuvvetlerin homojen olarak izolatörlere aktarılmasını sağlar. Çelik ara saç plakalar ise kauçuk malzemenin iki yana şişmesini yani yanal deformasyon yapmasını engellemek için kullanılırlar. Bu saç plakalar izolatörün yatay rijitliği üzerinde katkıları olmadığından sistemin yatay yükler altındaki davranışını etkilemezler. Genellikle istenilen rijitlik, tabaka kalınlığı sabit tutularak kauçuk tabaka sayısının değiştirilmesiyle sağlanır.

Kayma durumunda malzeme %100’ün üzerindeki şekil değiştirmelerine kadar doğrusala çok yakın bir davranış gösterir (bu durum kritik sönümün % 2-3 aralığı için geçerlidir). Malzeme sünme yapmaz ve uzun ömürlüdür.

Düşük sönümlü kauçuk izolatörlerin avantajları üretim için basit bir yapıya sahip olmaları, kolayca modellenebilmeleri, mekanik özelliklerinin hız, sıcaklık ve zamanla eskime gibi faktörlerden etkilenmemesi olarak sıralanabilir. Bu tür sistemlerin tek dezavantajı ise ek bir sönüm sistemine ihtiyaç duymalarıdır. Bu ek sistemler çok karmaşık bağlantı detayları gerektirmekte olup metalik sönümleyiciler kullanılması durumunda kısa sürede yıpranmaktadırlar.

Japonya’da bu tip kauçuk izolatörler geniş ölçüde ilave sönüm cihazları ile birlikte kullanılmıştır. Japon projelerinde doğal kauçuk kullanılmasına karşın Fransa’dakilerde neopren tercih edilmiştir. 1970’lerde Yeni Zelanda’da kurşun çekirdekli izolatörlerin geliştirilmesiyle düşük sönümlü kauçuk izolatörler önemini yitirmeye başlamıştır (Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 2.1 Düşük sönümlü doğal kauçuk izolatör detayı

2.1.2 Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler (LRB)

Bu izolatör tipi 1975’te Yeni Zelanda’da icat edilmiş ve bu tarihten itibaren Yeni Zelanda, Japonya ve ABD’de çok sayıda yapıda kullanılmıştır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi kurşun çekirdekli izolatörlerde düşük sönümlü kauçuk izolatörlerde olduğu gibi kauçuk ve çelik tabakalar mevcuttur. Bunlara ilave olarak sistemin

ortasında bir veya birden çok kurşun çekirdek ilavesi yapılmıştır. Burada içteki kauçuk şekil değiştirebilmeyi sağlarken dıştaki kauçuk kılıf ise çelik levhaları korur.

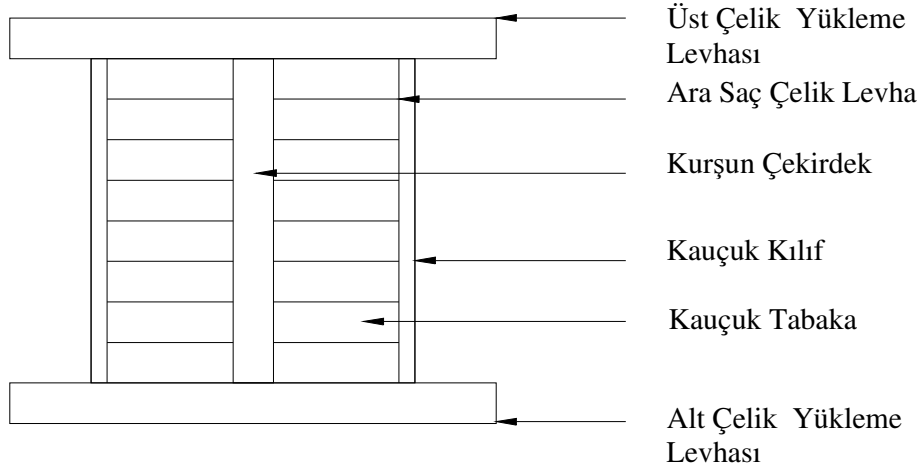
İzolatörün içindeki çelik levhalar, kurşun çekirdeği kayma sırasında şekil değiştirmeye zorlamaktadır. İzolatörün içindeki kurşun 10 Mpa civarındaki bir akış gerilmesinde fiziksel olarak şekil değiştirmektedir. Böylelikle izolatörün bilineer davranış göstermesi sağlanmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999). Şekil 2.3'te kurşun çekirdekli izolatör uygulamasına bir örnek gösterilmiştir.

Sisteme düşük seviyede yatay yükler etkidiğinde (hafif deprem sarsıntıları, rüzgar veya trafik yükleri vb.) kurşun çekirdekli izolatör düşeyde ve yatayda rijit bir davranış gösterir.

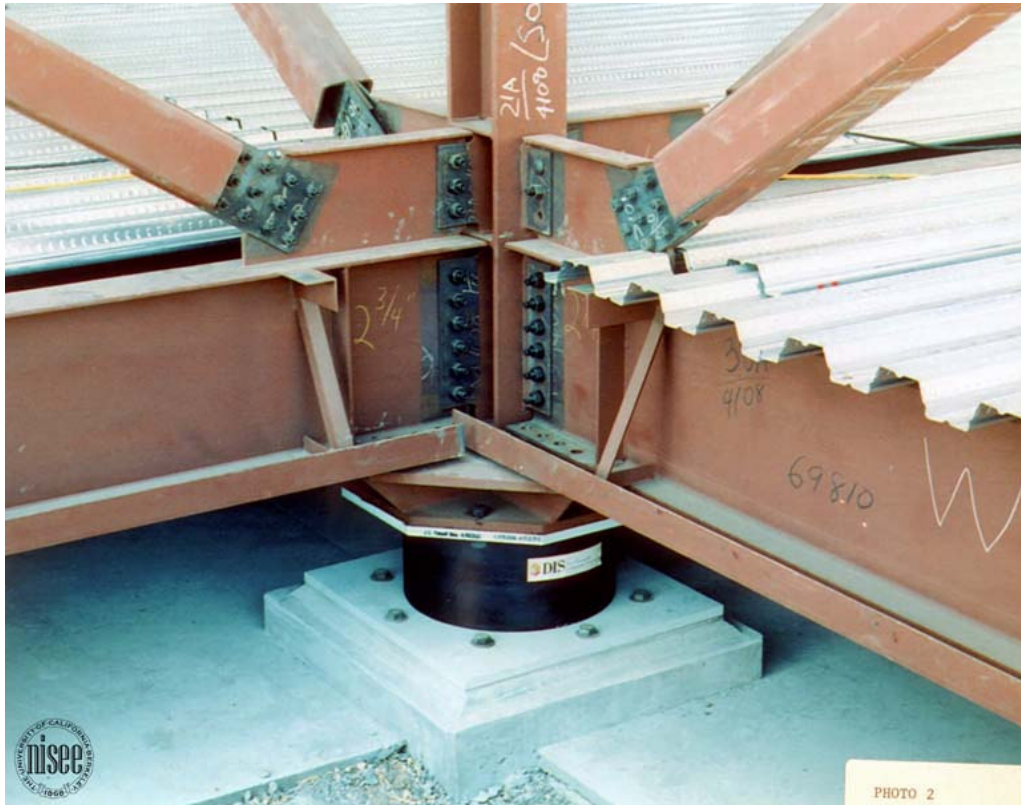
Sistem yüksek yatay yükler etkimeğe başladığında kurşun akar ve yatay rijitlik önemli derecede azalır. Bu olay izolatöre periyot düşürme özelliği kazandırır. İzolatör şiddetli deprem sarsıntıları altındaki döngüsünde yüksek deplasmanlara ulaşmaya başladığında kurşun çekirdeğin yapmış olduğu plastik deformasyonlar enerjiyi histeretik sönüm gibi absorbe eder. Bu histeresinin oluşturduğu yerdeğiştirmeye bağlı fonksiyonun eşdeğer viskoz sönümü %15-35 arasında değişir (Kelly, 2001). Şekil 2.4'te kurşun çekirdekli izolatörlere ait tipik histeresis eğrilerine bir örnek gösterilmiştir.

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin avantajları düşey yükler altında rijit davranış, yatay yüklerde esnek davranış göstermeleri ve sönüm için ek bir sisteme ihtiyaç duymamaları olarak sıralanabilir. Tek dezavantajları ise deprem sonrası kurşun çekirdekte oluşan hasarın gözlemlenememesidir.

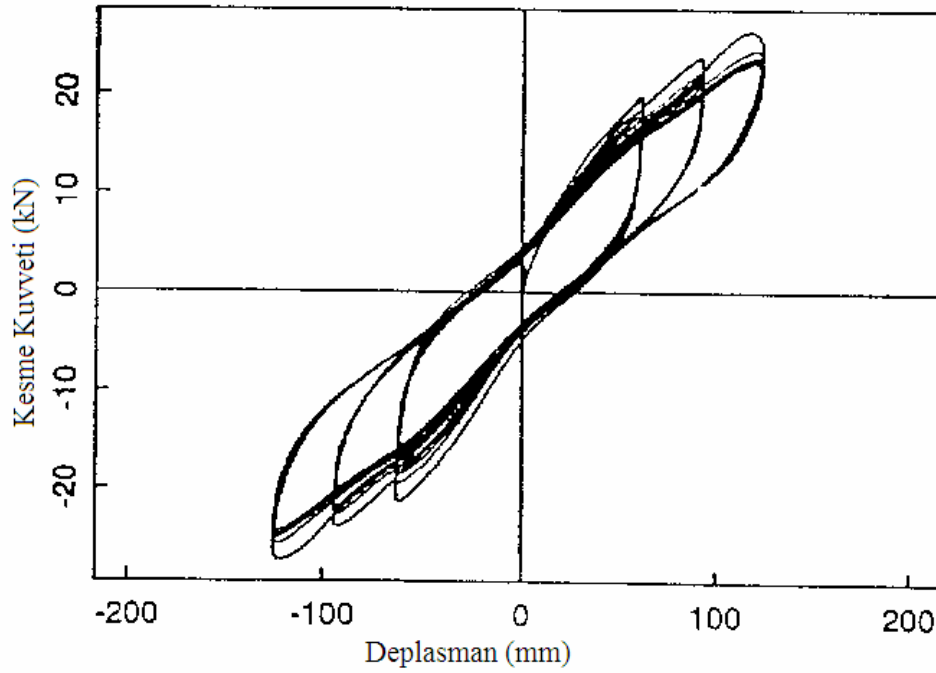
Bu tip izolatörlerle inşa edilmiş binalar 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi performans göstermişlerdir (bkz. Bölüm 6).



Şekil 2.2 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör detayı



Şekil 2.3 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör uygulaması (University of California Berkeley, b.t.)



Şekil 2.4 Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin tipik histeresis eğrilerine bir örnek
(Aiken ve diğer., 1992)

2.1.3 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDR)

1982 yılında bir İngiliz kurumu olan “Malaysian Rubber Producers’ Research Association (MRPRA)” tarafından ek sönüm elemanlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmak amacıyla yeterli sönüme sahip doğal kauçuk bir bileşim geliştirilmiştir. Doğal kauçuğa, ekstra saf karbon bloklar, yağ veya reçineler ve diğer özel dolgu malzemeleri ilave edilerek sönüm artırılmıştır. %100 oranındaki kayma deformasyonlarında sönüm %10-20 arasındaki mertebelere çıkarılmıştır. Düşük sönüm seviyelerine, düşük sertlik (50-55 durametre) ve düşük kayma modülüne (0,34 Mpa) sahip malzemelerde; yüksek sönüm seviyelerine ise yüksek sertlik (70-75 durametre) ve yüksek kayma modülüne sahip malzemelerle ulaşılmaktadır. Bu tip izolatörlerin vulkanizasyon, yapıştırma işlemleri ve imalat teknikleri LDRB tipi izolatörlerinkilerle aynıdır. Tipik bir yüksek sönümlü kauçuk izolatörün görünümü Şekil 2.5’te, detayı ise Şekil 2.6’da verilmiştir.

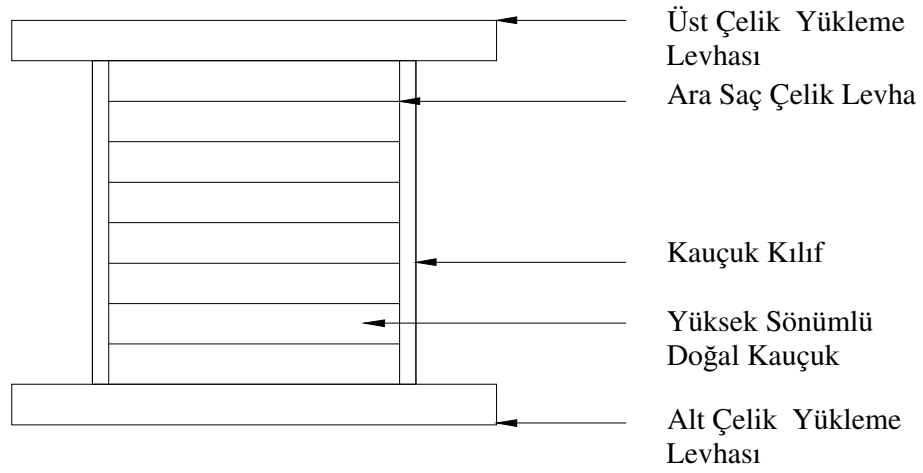
Şekil 2.8’de görüldüğü gibi malzeme %20’ye kadar olan kayma şekil değiştirmelerinde doğrusal olmayan bir davranış gösterir ve rüzgar yükleri ve hafif şiddetli deprem hareketlerinin etkilerini en aza indirecek şekilde yüksek rijitlik ve sönüme sahiptir. %120’den büyük kayma deformasyonları için kayma modülü değeri düşük ve sabit değerler almaktadır. Büyük deformasyonlarda ise, enerji yutma kapasitesi artarken, kauçuktaki şekil değişimi kristalleşmesi nedeniyle kayma modülü değeri de büyür. Büyük şekil değişimlerinde rijitlik ve sönümde görülen bu artış sayesinde, düşük düzeydeki depremlerde rijit, tasarım düzeyindeki depremlerde doğrusal ve esnek ve tasarım düzeyinin üzerinde gelebilecek beklenmedik etkilerde ise deplasmanları sınırlandırılabilir sistemler tasarlanabilir.

İzolatörlerdeki sönüm viskoz ya da histeretik olmayıp ikisinin arasındadır. Tam lineer viskoz bir elemandaki enerji yutumu yer değiştirmeye ikinci dereceden bağlı iken histeretik bir sistemde bu ilişki doğrusaldır. “Earthquake Engineering Research Center (EERC)” da yapılan çok sayıdaki deneyde, birim döngüde yutulan enerjinin, deplasmanın yaklaşık 1,5 kuvveti ile orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Bu tip izolatörlerin tipik histeresis eğrilerine bir örnek Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

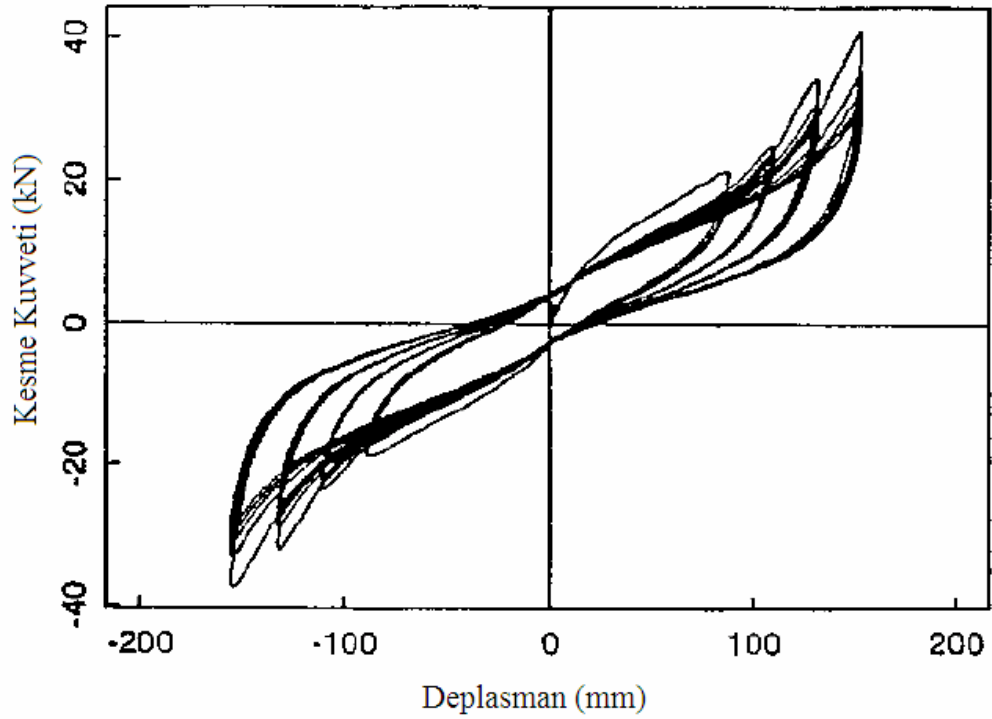
Yüksek sönümlü kauçuk sistemlerin bir diğer avantajı da çevreden gelen titreşimi azaltma özelliğidir. Bu tür izolatörler yakındaki trafik ve metro hatlarının sebep olacağı yüksek frekanslı düşey titreşimleri filtreler (Naeim ve Kelly, 1999).



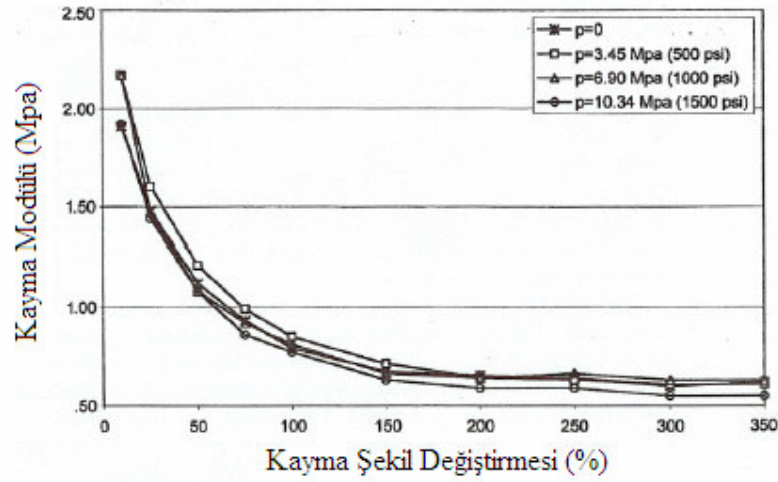
Şekil 2.5 Yüksek sönümlü doğal kauçuk (HITEC, 1999)



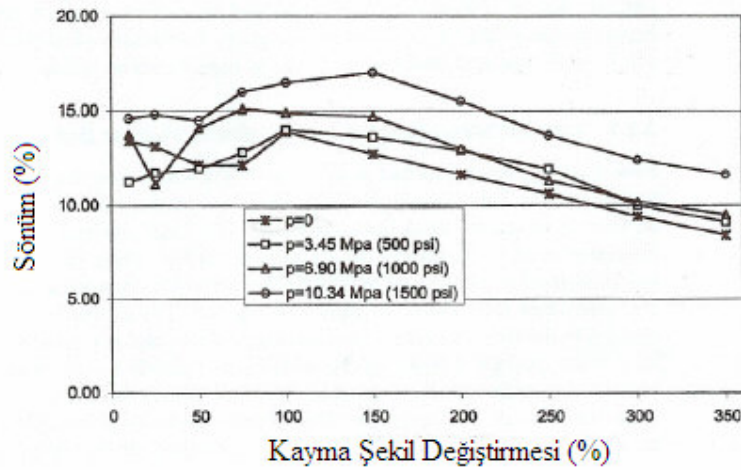
Şekil 2.6 Yüksek sönümlü doğal kauçuk izolator detayı



Şekil 2.7 Yüksek sönümlü kauçuk izolatorlerin tipik histeresis eğrilerine bir örnek (Aiken ve diğer., 1992)



(a)



(b)

Şekil 2.8 Yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin, (a) kayma modülü-kayma şekil değişimi, (b) sönüm-kayma şekil değişimi ilişkisi (Naeim ve Kelly,1999)

2.2 Kayma Esaslı Sismik İzolasyon Sistemleri

Önerilen en eski ve basit sismik izolasyon sistemi tamamen kayma esasına dayalı bir sistemdir. Bu türden bir sistem 1909 yılında İngiltere’de Johannes Avetican Calantarients adında bir tıp doktoru tarafından önerilmiştir. Calantarients talktan (hidratlı doğal magnezyum) oluşan bir tabakayla yapıyı temelden ayırmayı önermiştir. Calantarients bina ile temeli arasında oluşabilecek büyük yerdeğiştirmeler

pahasına da olsa, izolasyon sisteminin binadaki ivmeleri azalttığını açık bir şekilde anlamıştır (Kelly, 1981).

Sismik izolasyon düşüncesi depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı stratejisi olarak ilk kez 1908 yılında Messimo-Reggio depreminde 160000 kişinin yığma binaların altında ölmesinin ardından İtalyan Hükümeti tarafından tartışmaya açılmış ve deprem bölgesinde yeniden yapılacak binaların güvenli ve ekonomik olabilmesi için tavsiyelerde bulunacak bir komisyon kurulmuştur. Bu komisyon depreme karşı dayanıklı yapı tasarımında iki tip yaklaşım üzerinde durmuştur. Bunlardan birincisi binaları bina temel seviyesinde bir kum tabakasıyla zeminden ayırarak veya kolonların altına silindirler monte ederek binanın yatay yöndeki hareketini serbest bırakma düşüncesidir. Diğer bir yaklaşım ise binaları temelde ankastre tasarlayarak ve yüksekliği sınırlayarak yatay yük tasarımı yapma düşüncesidir. Bunlardan ikinci görüş kabul görmüş kayıcı izolasyon sistemleri kullanılmamıştır (Naeim ve Kelly, 1999).

Daha sonraları Hindistan'da meydana gelen Dhubai (1930), Bihar (1934) ve Çin'de meydana gelen Tangshan (1976) depremlerinde, deprem esnasında duvarların alt kısmından kırılıp temelleri üzerinde kayan küçük yığma binaların göçmedikleri buna karşın aynı boyutta fakat temelde ankastre olan binaların yıkıldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemler küçük yığma binaları kayıcı bir sistemle temelden ayırmanın doğru bir yaklaşım olduğunu desteklemiştir. Bu düşünceyle yapılan binaların en büyüğü Pekin'de "Earthquake Strong Motion Observatory" için inşa edilen 4 katlı yurt binasıdır. Bu binanın zemin katında duvarlar ile temel arasında terrazzo plakalarının arasına yerleştirilmiş özel bir kum tabakasıyla kayma yüzeyi oluşturulmuştur (Naeim ve Kelly, 1999).

Kayıcı mesnetler için en çok kullanılan malzemeler, paslanmaz çelik üzerine kaplanan doldurulmamış ya da doldurulmuş "politetrafloraetilen"dir (PTFE veya Teflon). Bu sistemin sürtünme karakteristikleri sıcaklığa, arayüzey hareketinin hızına, aşınma derecesine ve yüzeyin temizliğine bağlıdır.

2.2.1 Sürtünmeli Sarkaç (Pandül) Sistemler (FPS)

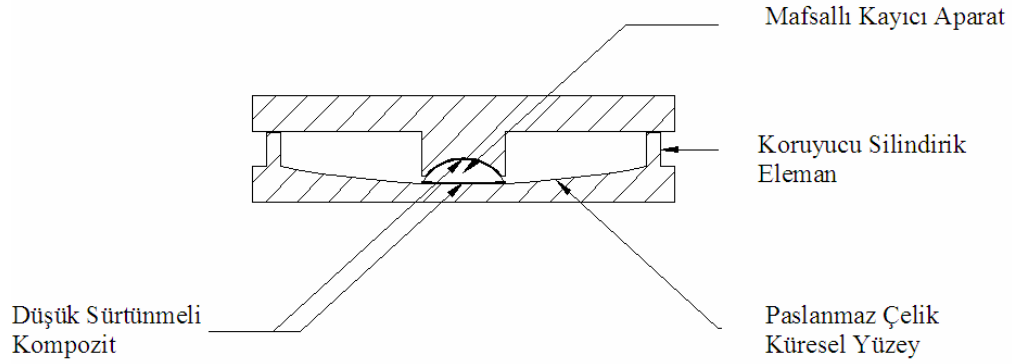
Sürtünmeli sarkaç sistemi yapıların sismik dayanımını arttırmak amacıyla Zayas ve diğer. (1987) tarafından geliştirilmiştir. FPS bir kayma hareketini ve geri dönüş kuvvetini, geometrisi sayesinde birleştiren sürtünmeli bir izolasyon sistemidir. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da gösterilen FPS izolatörü, paslanmaz çelikten yapılmış küresel yüzey üzerinde hareket eden, mafsallı kayıcı bir aparata sahiptir. Mafsallı kayıcının küresel yüzeyle temas eden bölümü düşük sürtünmeli kompozit bir malzemeyle kaplanmıştır. Kayıcı mafsallın diğer yüzü de küresel olup paslanmaz çelik ile kaplıdır ve yine düşük sürtünmeli kompozit bir malzemeyle kaplanmış küresel bir oyuk içine oturmaktadır. Kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe, taşınan kütlelerin yükselmesine yol açmakta ve sistem için geri dönüş kuvveti sağlamaktadır. Mafsallı kayıcı ve küresel yüzey arasındaki sürtünme izolatörlerde sönüm oluşturur.

FPS'lerin davranışı basit bir sarkaç hareketinin temel prensiplerine dayanır. Sistemin periyodu iç bükey yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlıdır, kütlede bağımsızdır.

Mesnedin iç bükey yüzeyi üstte ya da altta olabilir. Sistem her iki durum için de aynı davranışı gösterir. Mesnetlerin çatılarda veya köprülerde olduğu gibi kolonların üstünde kullanıldığı durumlarda küresel yüzeyin üstte olması tercih edilir. Bu tür kullanımın amacı dışmerkezlikten dolayı kolonlarda $P-\Delta$ momentlerinin oluşumunu engellemektir (Zayas, Low, Bozzo ve Mahin, 1989).

FPS'lerin tipik histeresis eğrilerine bir örnek Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu tip izolatörlerle mesnetlenmiş binalar sürtünme kuvvetinin altındaki deprem yüklerinde ankastre mesnetli yapı gibi davranırlar. Deprem kuvvetleri bu eşik değeri geçtiği anda kayma hareketi başlar ve sistemin periyodu yükselir. Böylelikle binada sismik izolasyon sağlanmış olur. FPS'lerin diğer bir özelliği de yatay rijitliklerinin taşınan ağırlıkla orantılı oluşudur. Bundan dolayı yapının kütle merkeziyle mesnetlerin rijitlik merkezi kendiliğinden çakışır ve asimetrik yapılarda burulma momentleri oldukça düşük olur (Zayas ve diğer., 1987).

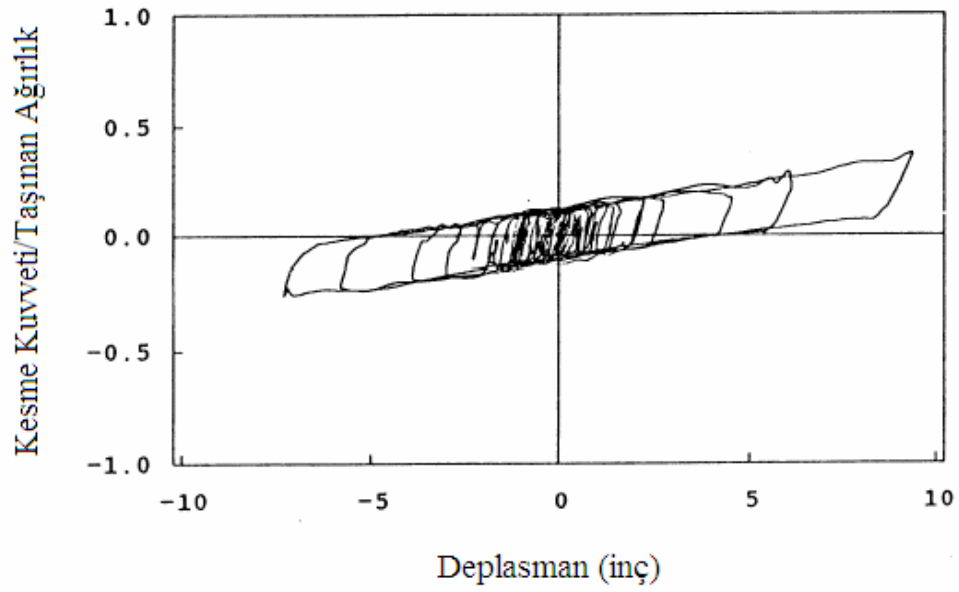
Türkiye’de inşa edilen İstanbul Atatürk Hava Limanı Terminali ve Kocaeli Üniversitesi Uygulama Hastanesi’nde sürtünmeli sarkaç izolatörler kullanılmıştır. İstanbul Atatürk Hava Limanı Terminali çatısında kullanılan FPS’lere ait bir görünüm Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.9 Sürtünlü sarkaç sistemi detayı



Şekil 2.10 Sürtünlü sarkaç sisteme bir örnek
(Earthquake Protection Systems Inc., b.t.)



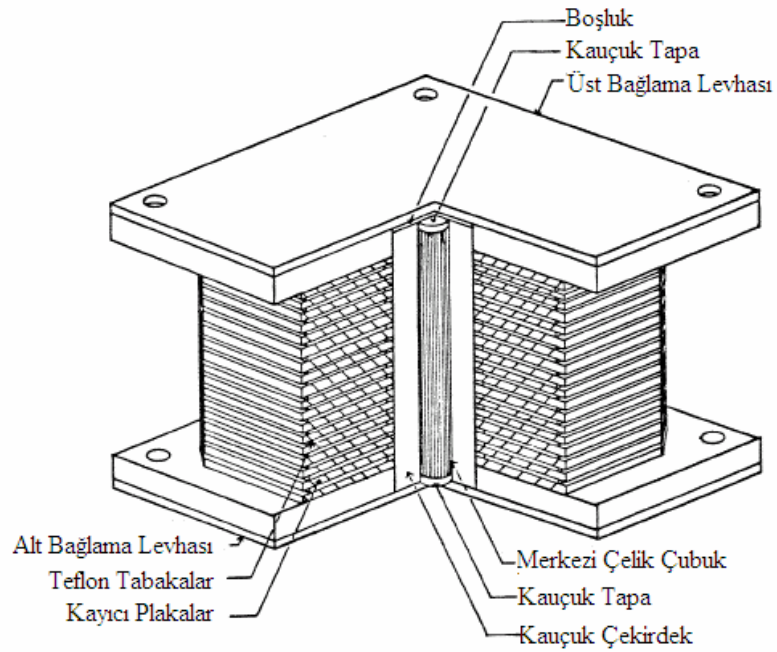
Şekil 2.11 Sürtülmeli sarkaç sistemlerin tipik histeresis eğrilerine bir örnek (Zayas ve diğer., 1989)



Şekil 2.12 Atatürk Hava Limanı Terminalinin çatısında kullanılan sürtülmeli sarkaç mesnet detayı (Earthquake Protection Systems Inc., b.t.)

2.2.2 Elastik Sürtülmeli Taban İzolasyon Sistemi (R-FBI)

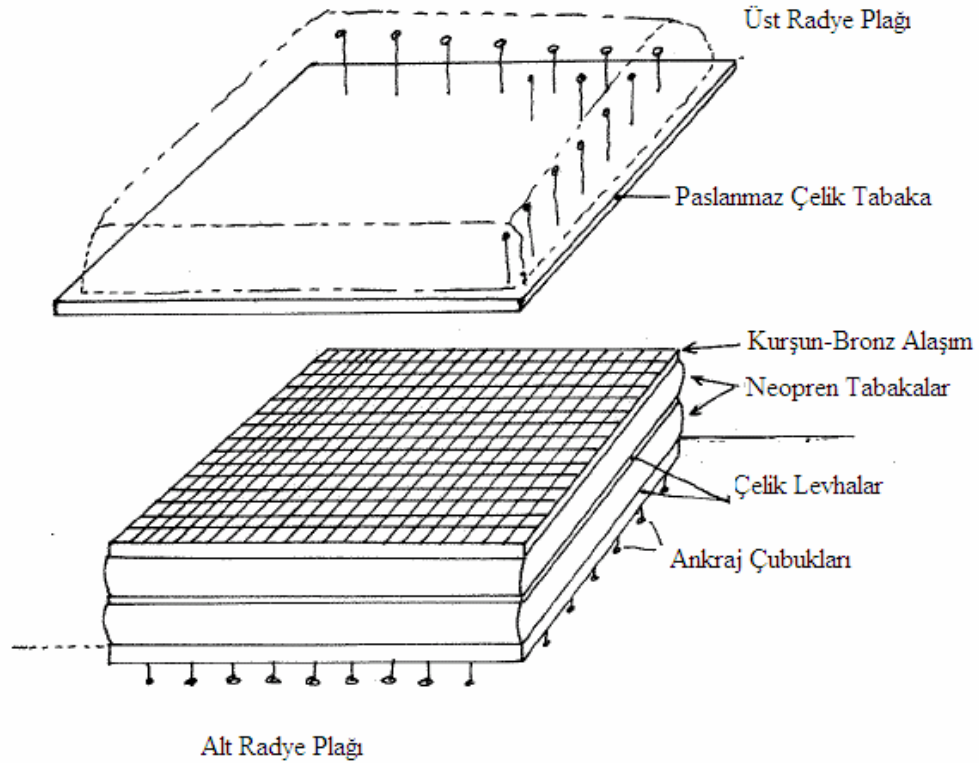
Naser Mostaghel tarafından geliştirilen elastik sürtülmeli taban izolasyon sistemi Şekil 2.13’de görülmektedir. R-FBI’nın ortasında kauçuk bir çekirdek mevcuttur. Bu kauçuk çekirdek teflon ve kayıcı halka tabakalarıyla çevrelenmiştir. Ayrıca kauçuk çekirdeğin merkezinde çelik bir çubuk bulunur. Sistemin çok sayıda tabakadan oluşturulmasının nedeni her bir yüzdeki hız değerini düşürmek suretiyle düşük sürtünme katsayısı elde edilmesinin amaçlanmasıdır. Sistemin geri dönüş kuvvetini kauçuk çekirdek sağlar. Yer değiştirmenin tek bir düzlemde toplanmasını önlemek amacıyla kauçuk çekirdeğin içine çelik bir çubuk yerleştirilmiştir (Clark ve Kelly, 1990).



Şekil 2.13 Elastik sürtülmeli taban izolasyon mesnedi detayı (Mostaghel ve Kelly, 1987)

2.2.3 Electricité-de-France Sistemi (EDF)

Şekil 2.13'de detayı verilen EDF sistemi nükleer enerji santrali tesislerinde uygulanmak için 1970'li yılların başlarında geliştirilmiştir. Bu sistemde enerji santrali, arasında izolasyon mesnetlerinin bulunduğu iki adet radye plağının üzerine inşa edilir. İzolasyon mesnetleri çelikle güçlendirilmiş neopren tabakalar ile paslanmaz çelikle temas halinde olan kurşun-bronz alaşımdan oluşur. Kurşun-bronz alaşım vulkanizasyon işlemiyle neopren tabakasının üst kısmıyla birleştirilir. Paslanmaz çelik tabakalar ise ankraj çubuklarıyla üstteki radye plağına sabitlenir. Böylelikle kurşun-bronz alaşımı ile paslanmaz çelik tabakalar arasında bir kayma oluşturulur. Kayma yüzeyinin sürtünme katsayısı 0,2 olarak tasarlanmıştır. Neopren tabakanın yer değiştirme kapasitesi çok düşüktür (± 5 cm). Bu değer aşıldığında kayıcı elemanlar gerekli hareketi sağlar. Bu sistem mesnedi merkeze geri döndüren bir mekanizmaya sahip değildir. Bu sebepten dolayı kalıcı yer değiştirmeler oluşabilir. Bu sistem sadece Güney Afrika'daki bir enerji santralinde kullanılmıştır (Kelly, 1981; Naeim ve Kelly, 1999).



Şekil 2.14 Electricité-de-France sistemi detayı (Kelly, 1981)

2.2.4. EERC Birleşik Sistemi

EERC birleşik sistemi, kauçuk ve kayma esaslı sismik izolasyon sistemlerinin kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Bu sistemde yapının iç kolonları, teflon malzeme ile kaplı paslanmaz çelikten yapılmış kayıcı elemanlara, dış kolonları ise düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörlere taşınır. Kauçuk izolatörler yapının yeniden merkezlenmesini sağlarken burulma davranışını da kontrol ederler. Buna karşın kayma esaslı izolatörler sönümü sağlamaktadır (Naeim ve Kelly, 1999).

2.2.5. TASS Sistemi

TASS sistemi, Japonya'nın TASEI şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu tip sistemlerde düşey yükün tamamı teflon-paslanmaz çelikten meydana gelen elemanlar tarafından taşınmaktadır. Hiç yük taşımayan tabakalı suni kauçuk (neopren) elemanlar ise yapıyı yeniden merkezlendirecek kuvvetleri oluşturmak için kullanılmaktadırlar.

2.3 Yay Tipi Sistemler

Hem düşey hem de yatay yönde izolasyon sağlamak amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir. Sistem viskoz sönümleyici bir sıvı ile hem yatay hem de düşey yönde esnek davranabilen yaylardan oluşur. Bu sistemler yapının ağırlık merkezi ile izolasyon sisteminin rijitlik merkezinin aynı seviyede olduğu durumlarda pratik uygulama alanı bulabilmektedir. Örnek olarak nükleer enerji santrallerinin reaktör teknelerindeki uygulamalar gösterilebilir. Şekil 2.14’de Gerb firmasının ürettiği yay tipi sistemlere örnek bir uygulama görülmektedir.



Şekil 2.15 Yay tipi sistemlere örnek uygulama-Gerb sistemi (University of California Berkeley, b.t.)

2.4 Kılıflı Kazık İzolasyon Sistemleri

Derin kazıkların kullanılmasının zorunlu olduğu çok yumuşak zeminlerdeki yapılarda, bu tip kazıklar kullanılması izolasyon sistemi için gereken yatay esneklik için avantaj oluşturur. Kazıklar, kendilerini saran tüplerde bırakılan uygun boşlukla esneklik kazanırlar.

Bu sistemin kullanıldığı ilk yapı 1983 senesinde Yeni Zelanda'nın Auckland şehrinde inşa edilen "Union House" binasıdır. Benzer bir yaklaşım ile 1991 senesinde "Wellington Police Station" binası inşa edilmiştir (Naeim ve Kelly, 1999).

2.5 Rocking Sistemi

Üzerlerinde ağır konstrüksiyon yükleri taşıyan uzun ve narin yapılar, temel seviyesinde çekme kuvveti oluşturan devrilme momentlerinin etkisi altındadırlar. Derin su altı (keson) temellerinde ankrajla çekme kapasitesi sağlamak pahalı bir çözümdür. Buna alternatif olarak, kolonları ya da köprü ayaklarını temel seviyesinden ayıran bir sistem önerilebilir. Bu kısmi izolasyon uygulaması yapıya etkiyen deprem yüklerini ve özellikle kolonlarda veya köprü ayaklarında oluşacak çekme kuvvetlerini azaltır.

Bu sistem Yeni Zelanda'da "The South Rangitikei River Bridge" demiryolu köprüsünde uygulanmıştır. 69 m yüksekliğindeki köprü ayakları, deprem yüklerinde temelden bağımsız hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Her bir köprü ayağında, düşük karbonlu çelik çubukların elastoplastik burulması esasına dayanan iki büyük enerji yutucu alet vardır. Ayakların yukarı veya aşağı hareketlerinde, bu mekanizma sayesinde gerekli kontrol gücüne ulaşılır (Naeim ve Kelly, 1999).

BÖLÜM ÜÇ

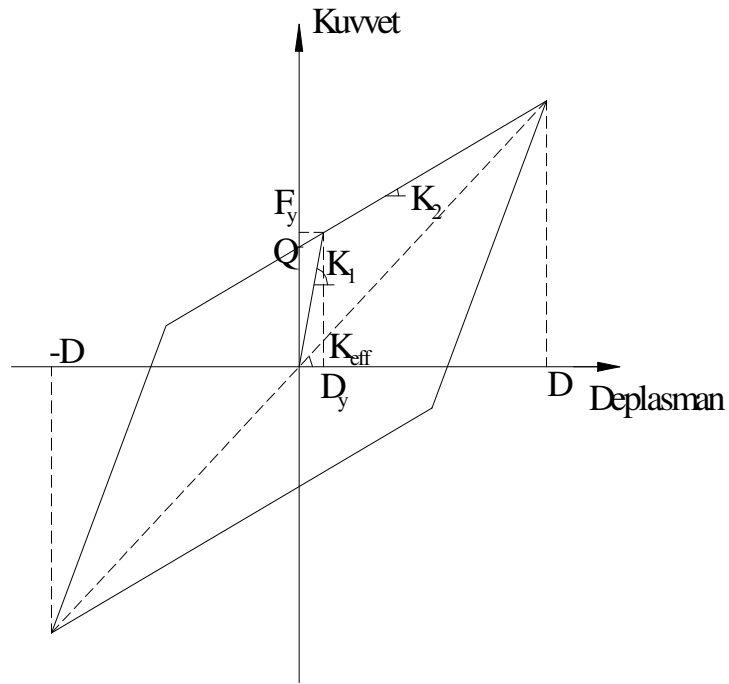
SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN MEKANİK KARAKTERİSTİKLERİ

3.1 Giriş

Bir izolasyon sisteminin projelendirilmesindeki ilk aşama ön tasarımdır. Bu aşamada önceki projelerden veya üretici firmalardan elde edilen izolatörlerin tasarım parametreleri yardımıyla sistemin maksimum yerdeğiştirme, çeşitli kontrol büyüklüklerinin maksimum değerleri (kayma şekil değiştirmesi vb.), yapının taban kesme kuvveti, izolatörlerin stabilitesi ve izolatörlerde oluşabilecek çekme kuvvetlerinin tahkikleri yapılır. Ön tasarım aşamasından sonra ebatları belirlenen izolatörlerin prototipleri imal edilir ve bu prototipler yönetmeliğe uygun bir test programından geçirilir. Test sonuçlarına bağlı olarak ön tasarımın değiştirilip, değiştirilmeyeceğine karar verilir. Bu bölümde izolasyon sistemlerinin ön tasarımı için gerekli olan mekanik özellikleri açıklanacaktır.

3.2 İzolatörlerin Bilineer Modelleme ile Tasarımı

Pratikte tüm izolatörler Şekil 3.1’de görüldüğü gibi üç parametreye dayanan bilineer modelleme ile modellenir. Bu parametreler, elastik rijitlik (K_1), akma sonrası rijitlik (K_2) ve karakteristik dayanım (Q) olarak adlandırılır. Elastik rijitlik deneysel olarak elde edilen histeresis eğrilerinden veya yaklaşık olarak K_2 ’nin ampirik olarak belirlenen bir katsayı ile çarpılması sonucunda hesaplanır. Bu katsayının çeşitli izolatör tipleri için yaklaşık değerleri Tablo 3.1’de sunulmuştur. Karakteristik dayanım, Q kauçuk izolatörler için deneysel olarak elde edilen histeresis eğrilerinden, kurşun çekirdekli izolatörler için kurşunun akma dayanımı ile kurşun çekirdeğin alanına bağlı olarak, sürtünmeli sarkaç sistemler için ise kayma yüzeyinin sürtünme katsayısı ile mesnet üzerinde taşınan ağırlığa bağlı olarak elde edilir.



Şekil 3.1 Bilineer modellemede kullanılan parametreler

Efektif rijitlik (K_{eff}) histeresis eğrisinin en alt noktası ile en üst noktasını birleştiren doğru parçasının eğimidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad D \geq D_y \quad (3.1)$$

F_y akma kuvveti, D_y akma deplasmanı olup Şekil 3.1'den aşağıdaki gibi elde edilirler. D_y yüksek sönümlü kauçuk mesnetler için yaklaşık kauçuğun toplam kalınlığının 0,05 ile 0,1 katı, sürtümlü sarkaç sistemler için ise 2 mm olarak alınabilir (FEMA-356).

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (3.2)$$

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad (3.3)$$

Histeresis eğrisinin alanı, W_D

$$W_D = 4Q(D - D_y) \quad (3.4)$$

formülü yardımıyla hesaplanır. Efektif sönüm, ξ_{eff} histeresis eğrisinin alanına bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\xi_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi K_{eff} D^2} \quad (3.5)$$

Tablo 3.1 Çeşitli izolatör tipleri için K_1/K_2 oranları

| İzolatör Tipi | K_1/K_2 |
|----------------------------------------|-----------|
| Sürtünmeli Sarkaç Sistem | 51 |
| Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör | 10-21 |
| Yüksek sönümlü Kauçuk İzolatör (Tip 1) | 6 |
| Yüksek sönümlü Kauçuk İzolatör (Tip 2) | 3 |

3.3 Kauçuk İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri

3.3.1 Yatay Rijitlik (K_H)

Kauçuk izolatörlerin en önemli mekanik özelliği izolatörün yatay rijitliğidir. Yatay rijitlik " K_H " ile gösterilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir :

$$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad (3.6)$$

Burada, G, kauçuğun herhangi bir kayma şekil değiştirmesi altındaki kayma modülü, A, kauçuğun plandaki enkesit alanı, t_r , kauçuğun toplam kalınlığıdır.

Kauçuğun kayma modülü kauçuğun kayma şekil değıştirmesi γ değerine bağlı olarak 0,4 ile 1 Mpa arasında değışir. Genellikle yatay rijitlik hesaplarında $\gamma=100-150$ değerine karşılık gelen kayma modülü değeri kullanılır. Kauçuğun kayma şekil değıştirmesi maksimum yatay değıştirme D ve kauçuğun toplam kalınlığı t_r değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (3.7)$$

3.3.2 Düşey Rijitlik (K_V)

Kauçuk bir izolatörün düşey rijitliği K_V aşağıdaki bağıntıyla verilir:

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \quad (3.8)$$

Burada, E_c kauçuk ve çelikten oluşan kompozit elemanın basınç modülüdür ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_c = \frac{E_c' K}{E_c' + K} \quad (3.9)$$

Denklem (3.9)'daki E_c' sıkıştırılmayan durumdaki basınç modülünü ifade eder. E_c' değerleri, izolatörün geometrisine, G kauçuk izolatörün düşük kayma şekil değıştirmelerindeki kayma modülüne (genellikle düşey rijitlik hesaplarında $\gamma=20$ değerine karşılık gelen kayma modülü değerleri kullanılır) ve S şekil faktörüne bağlı olarak Tablo 3.2'de verilmiştir. Buradaki S değerleri ise yine izolatörün geometrisine bağlı olarak Tablo 3.3'de verilmiştir. Denklem (3.9)'daki K malzemenin hacim modülüdür ve bu değer hesaplarda yaklaşık 2000 Mpa olarak alınır (Naeim ve Kelly, 1999).

Tablo 3.2 Sıkıştırılmayan durumdaki basınç modülü (E_c')

| İzolator Geometrisi | Daire | Kare | Merkezi Boşluklu Daire |
|---------------------|---------|------------|------------------------|
| E_c' | $6GS^2$ | $6,73GS^2$ | $6\lambda GS^2$ |

$$\lambda = \left\{ b^2 + a^2 - [(b^2 - a^2) / (\ln b/a)] \right\} / (b-a)^2 \quad \text{a: dairenin iç çapı, b: dairenin dış çapı}$$

Tablo 3.3 Şekil faktörü (S)

| İzolator Geometrisi | Daire | Kare |
|---------------------|--------|--------|
| S | $d/4t$ | $a/4t$ |

d: dairenin çapı, a: karenin kenar uzunluğu, t: bir adet kauçuk tabakanın kalınlığıdır [Yaklaşık olarak $d/80$ ile $d/40$ arasında bir değer olarak seçilir (Tezcan ve Cimilli, 2002)].

Basınç etkisi altında birbirine bağlı çelik levhalar nedeniyle kauçukta oluşan kayma şekil değişimi γ_c , $\varepsilon_c = \Delta/t_r$ olmak üzere ε_c nominal (birim) basınç şekil değişimi ve S şekil faktörü cinsinden,

$$\gamma_c = 6S\varepsilon_c \quad (3.10)$$

ile tanımlanır. Burada Δ , düşey yerdeğiştirmeyi göstermektedir. W düşey yük olmak üzere $W=K_v\Delta$ bağıntısı bilindiğine göre Denklem (3.4)'den,

$$\gamma_c = 6S \frac{W}{E_c A} \quad (3.11)$$

yazılabilir. γ_c değerinin $\varepsilon_b/3$ değerinden küçük olması istenir. ε_b kauçuğun yırtılma anındaki birim uzamasını gösterir (Chen, 2003).

3.3.3 Kauçuk İzolatörlerin Burkulma Yüğü Kapasitesi

Kritik burkulma yüğü P_{crit} kesiti dairesel ve kare olan kauçuk izolatörler için Naeim ve Kelly (1999) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\text{Dairesel kesitli izolatörlerde} \quad P_{crit} = \left(\frac{\pi G S d}{2\sqrt{2}t_r} \right) A \quad (3.12.a)$$

$$\text{Kare kesitli izolatörlerde} \quad P_{crit} = \left(\frac{\pi G S a}{\sqrt{6}t_r} \right) A \quad (3.12.b)$$

Burada G kauçuğun düşük kayma şekil değıştirmesi altındaki kayma modülüdür. Düşey yükler altındaki izolatörün güvenlik faktörü olarak adlandırılan n aşağıdaki gibi ifade edilir ve uygulamalarda bu değeri genellikle 3 olarak alınır.

$$n = \frac{W}{P_{cr}} \quad (3.13)$$

3.3.4 Kauçuk İzolatörlerin Yüksek Yatay Deplasmanlar Altındaki Stabilitesi

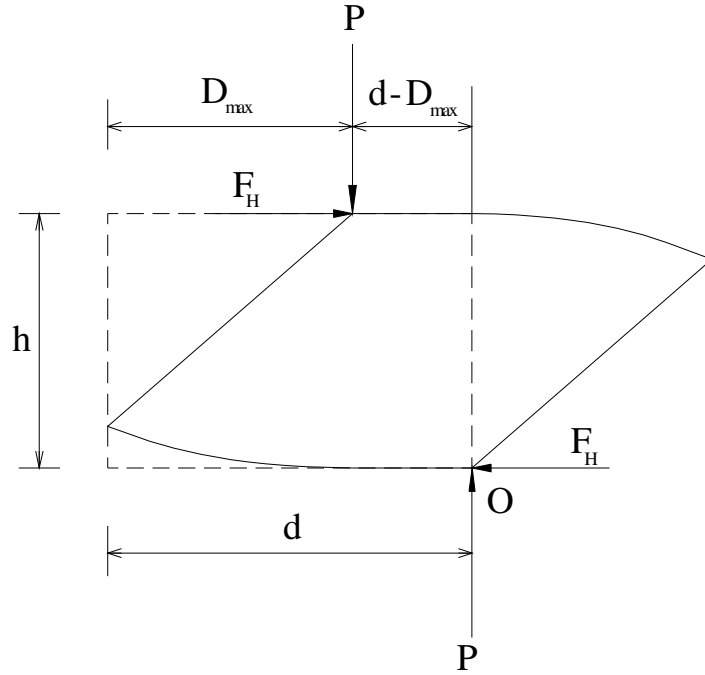
Kritik yatay deplasman değeri D_{crit} dairesel ve kare kesitli kauçuk izolatörler için aşağıda verilmiştir. Burada P deprem etkisindeki izolatör üzerindeki düşey yük, P_{crit} ise deprem etkisi altındaki izolatörün kritik burkulma yüküdür.

$$\text{Dairesel kesitli izolatörlerde} \quad D_{crit} = \frac{d\pi}{4} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right] \quad (3.14.a)$$

$$\text{Kare kesitli izolatörlerde} \quad D_{crit} = a \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right] \quad (3.14.b)$$

3.3.5 Kauçuğun Mesnetten Dönerek Çıkma (ROLL-OUT) Stabilitesi

Eğer kauçuk mesnet dübelli birleşimle dizayn edilmişse, yüksek yatay yerdeğiştirmeler esnasında kauçuk dönerek mesnetten çıkabilir. Bu duruma yol açabilecek yatay yerdeğiştirme miktarı Şekil 3.2’den faydalanılarak hesaplanabilir.



Şekil 3.2 Dübelli mesnetlerin yüksek yatay yerdeğiştirmeler altındaki davranışı

Şekil 3.2’de P deprem etkisi altındaki izolatör üzerindeki düşey yük, F_H izolatöre etkiyen yatay kuvvet, D_{max} izolatörün yatayda yapacağı maksimum deplasman, h izolatör yüksekliği ve d izolatörün çapıdır. Burada gösterilen sistemin O noktasına göre moment denge denklemi

$$P(d - D_{max}) = hF_H \quad (3.15)$$

olup, $F_H = D_{max} K_H$ eşitliği Denklem (3.15)’de yerine konulur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa maksimum deplasman ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$D_{\max} = \frac{d}{1 + \frac{hK_H}{P}} \quad (3.16)$$

3.4 Kurşun Çekirdekli İzolatörlerin Mekanik Karakteristikleri

Kurşun çekirdekli izolatörler daima karakteristikleri K_1 , K_2 ve Q parametrelerine bağlı bilineer elemanlar olarak modellenir. K_1 değeri Tablo 3.1’de verildiği gibi K_2 değerinin bir katsayı ile çarpılması sonucunda hesaplanır. K_2 akma sonrası rijitlik ise kauçuğun kayma modülü ile boyutlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K_2 = \frac{G A}{t_r} \quad (3.17)$$

Karakteristik dayanım olarak adlandırılan Q , kurşunun akma gerilmesi f_y (10,3 Mpa) ile kurşun çekirdeğin kesit alanı A_L ’ye bağlı olarak aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$Q = f_y A_L \quad (3.18)$$

Böylece kurşun çekirdekli izolatörün efektif rijitliği,

$$K_{eff} = K_2 + \frac{f_y A_L}{D} \quad (3.21)$$

olarak yazılabilir. Periyot, T ise aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

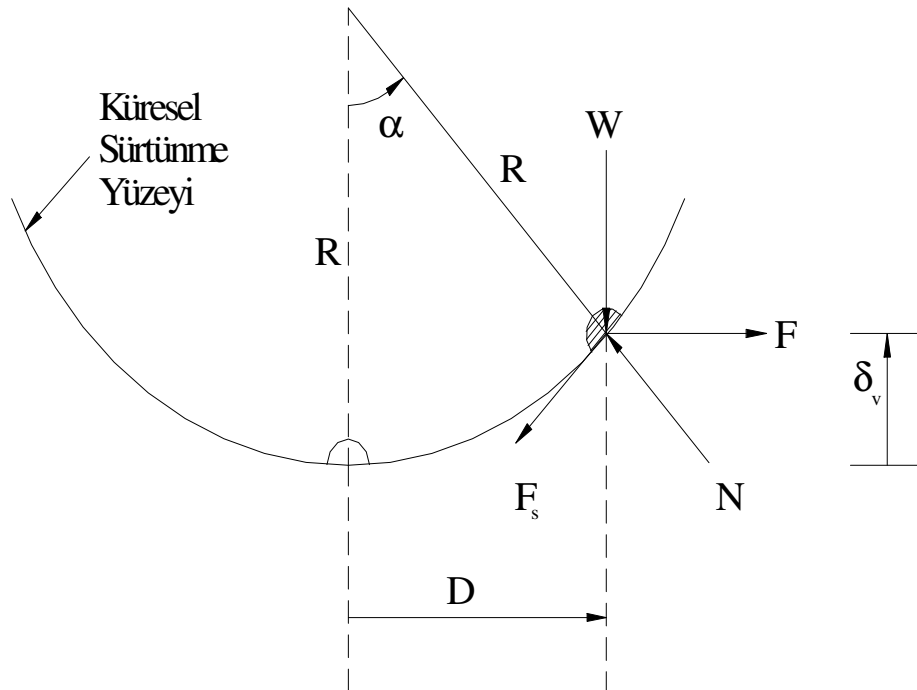
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W/g}{K_{eff}}} \quad (3.22)$$

Denklem (3.1) Denklem (3.5)'de yerine konular ve $K_1 \cong 10K_2$ kabulüyle denklem düzenlenirse kurşun çekirdekli izolatörler için efektif sönüm oranı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\xi_{eff} = \frac{4Q[D - Q/(9K_2)]}{2\pi(K_2D + Q)D} \quad (3.23)$$

3.5 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerin Mekanik Karakteristikleri

Küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı R , sürtünmeli sarkaç sistem üzerindeki düşey yük W , yatay deplasman D , sürtünme katsayısı μ , sürtünme kuvveti F_s , sürtünme yüzeyinde oluşan normal tepki kuvveti N ve sisteme etkiyen yatay kuvvet F ile gösterilirse Şekil 3.3'de serbest cisim diyagramı verilen sürtünmeli sarkaç sistemin düşey ve yatay denge denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:



Şekil 3.3 Sürtünmeli sarkaç sistemin serbest cisim diyagramı

$$W + F_s \sin \alpha - N \cos \alpha = 0 \quad (3.24.a)$$

$$F - F_s \cos \alpha - N \sin \alpha = 0 \quad (3.24.b)$$

$F_s = \mu N$ için (3.24) nolu denklem takımının çözümünden

$$F = (W \sin \alpha + \mu W \cos \alpha) \left(\frac{1}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) \quad (3.25)$$

elde edilir. $\sin \alpha = D/R$, $\cos \alpha \cong 1$, $\mu \sin \alpha \cong 0$ ile Denklem (3.25) düzenlenirse ifade aşağıdaki hali alır.

$$F = \frac{W}{R} D + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{D}) \quad (3.26)$$

Buradaki $\operatorname{sgn}(\dot{D})$ terimi işaret fonksiyonu olarak adlandırılır ve kayma hızına bağlılığı ifade eder. Denklem (3.26)'daki ilk terim kütlenin yükselmesinden kaynaklanan geri dönüş kuvveti olup,

$$K_H = \frac{W}{R} \quad (3.27)$$

izolatörün yatay rijitliğini tanımlar. Buna göre izole edilmiş yapının periyodu T aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W/g}{K_H}}$$

veya

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (3.28)$$

Denklem (3.28)'de görüldüğü gibi sürtünmeli sarkaç sistemlerin periyodu taşınan ağırlıktan bağımsızdır. Sistemin periyodu küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı ile kontrol edilir.

Denklem (3.26)'daki ikinci terim mafsallı kayıcı ile içbükey yüzey arasında oluşan sürtünme kuvvetidir. Buradaki sürtünme katsayısı μ mesnetteki p basıncına ve \dot{D} kayma hızına bağlı olarak değişir (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). FEMA 356'da paslanmaz çelik yüzeye temas eden PTFE veya PTFE bazlı kompozit elemanlar için sürtünme katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min})e^{-a(\dot{D})} \quad (3.29)$$

Burada, f_{\max} , yüksek kayma hızlarındaki sürtünme katsayısı, f_{\min} , düşük kayma hızlarındaki sürtünme katsayısı, a , sürtünme katsayısının kayma hızıyla değişimini kontrol eden deneysel olarak bulunan oran parametresidir.

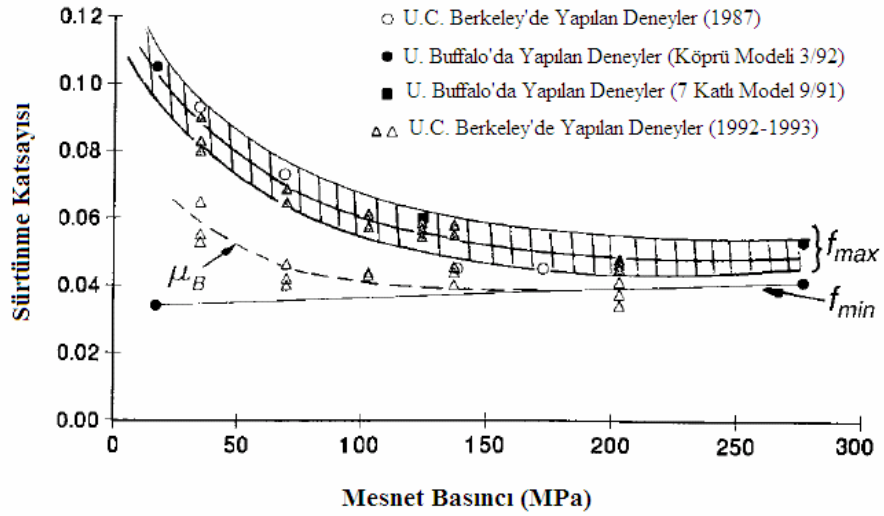
Sürtünme katsayısı artan basınçta düşer, artan hızla artar. 14 Mpa'dan yüksek basınçlarda 51mm/sn'nin üzerindeki hızlarda hızdan bağımsız hale gelir (Naeim ve Kelly, 1999).

Sürtünmeli sarkaç sistemlerin eşdeğer efektif rijitliği aşağıdaki gibi ifade edilir

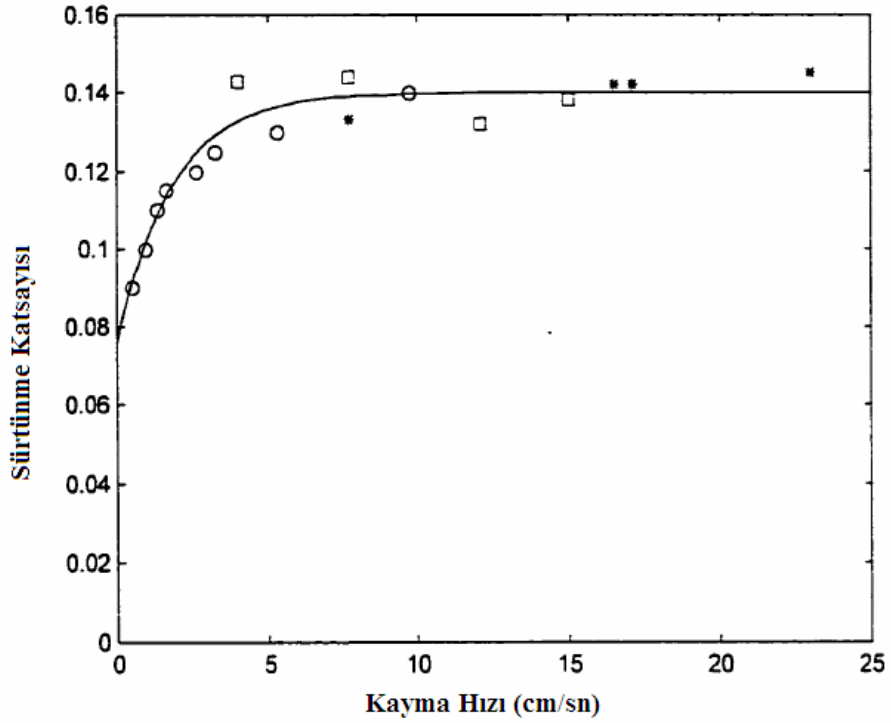
$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (3.30)$$

Kayıcı yüzeylerdeki sürtünmenin oluşturduğu sürtünmeli sarkaç sistemin efektif sönümü, D_y terimi ihmal edilerek Denklem (3.5)'den aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu}{D/R + \mu} \quad (3.31)$$



Şekil 3.4 Sürtünme katsayısının basınçla değişimi (FEMA 356)



Şekil 3.5 Deneysel bir çalışmadan alınmış sürtünme katsayısının kayma hızıyla değişimini gösteren grafik. Bu çalışmada a parametresi 54,5 sn/m alınmıştır. (Wongprasert, 2001)

Sürtünmeli sarkaç sistemin düşey yerdeğiştirmesi ise Şekil 3.3'den aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\delta_v = R(1 - \cos \alpha)$$

$$\delta_v = 2R \sin^2(\alpha/2) \quad \sin(\alpha/2) \cong \alpha/2 = D/2R \text{ kabulüyle,}$$

(3.32)

Sistemin merkezi konuma geri dönebilmesi için gerekli olan geri dönüş kuvveti sürtünme kuvvetinden büyük olmalıdır. Bu ifadeye istinaden denklem (3.26)'nın birinci terimi ikinci teriminden büyük olmalıdır. Bu eşitsizlik yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığı takdirde sistemin merkeze geri dönüş şartı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$D/R > \mu$$

(3.33)

BÖLÜM DÖRT

SİSMİK İZOLASYONUN TEORİK ESASLARI

4.1 Tek Katlı Taban İzolasyonlu Yapının Hareketinin Lineer Teori ile İncelenmesi

Bu kısımda tek katlı sismik izolasyonlu bir yapının deprem yükleri etkisi altındaki davranışının “Lineer Teori”ye göre modellenmesi anlatılacaktır. Daha sonraki kısımda ise teorinin çok katlı sismik izolasyonlu yapılara uygulanması incelenecektir.

Tek katlı sismik izolasyonlu bir yapı Şekil 4.1’de gösterildiği gibi iki serbestlik dereceli bir sistem gibi modellenir. İfadelerin çıkarılmasında görelî kat ötelemeleri kolaylık olması açısından tercih edilmiştir.

Üst yapı kütlesi m_s , izolasyon sisteminin üzerindeki zemin katının kütlesi m_b olan, hesap modeli Şekil 4.2’de verilen sismik izolasyonlu sistemin hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_b + F_s - F_b - m_b \ddot{u}_b = 0 \quad (4.1a)$$

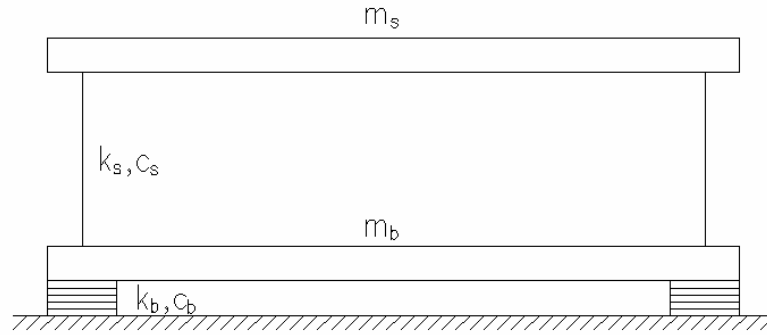
$$P_s - F_s - m_s (\ddot{v}_b + \ddot{v}_s) = 0 \quad (4.1b)$$

Burada $\ddot{v}_b = \ddot{u}_b$ olup sırasıyla izolasyon sisteminin mutlak ve görelî yerdeğiştirmelerinin zamana göre ikinci türevleri, \ddot{v}_s üst yapının görelî kat ötelemesinin zamana göre ikinci türevidir. P_b izolasyon sistemine etkiyen dış kuvvet, P_s üst yapıya etkiyen dış kuvvet, F_b izolasyon sisteminde oluşan elastik yay kuvveti ile sönüm kuvvetinin toplamı, F_s üst yapıda oluşan elastik yay kuvveti ile sönüm kuvvetinin toplamıdır. Bu kuvvetlerin karşılıkları Denklem (4.1a) ve (4.1b)’de yerlerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

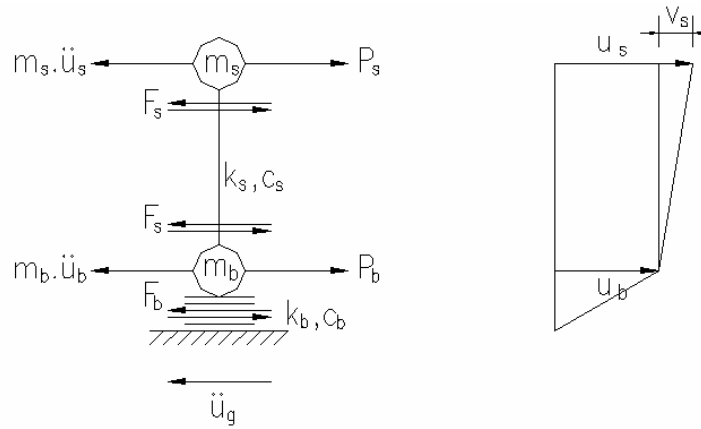
$$(m_b + m_s)\ddot{v}_b + m_s\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m_b + m_s)\ddot{u}_g \quad (4.2a)$$

$$m_s\ddot{v}_b + m_s\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m_s\ddot{u}_g \quad (4.2b)$$

Burada k_b ve c_b izolasyon sisteminin rijitliği ve sönümü, k_s ve c_s üst yapının rijitliği ve sönümü, v_b ve \dot{v}_b izolasyon sisteminin görelü kat ötelemesi ve görelü kat ötelemesinin zamana göre birinci türevi, v_s ve \dot{v}_s üst yapının görelü kat ötelemesi ve görelü kat ötelemesinin zamana göre birinci türevi, \ddot{u}_g güçlü yer ivmesini göstermektedir.



Şekil 4.1 Sismik izolasyonlu sistem



Şekil 4.2 Sismik izolasyonlu sistemin hesap modeli

Üst yapı ve izolasyon sisteminin nominal frekansları

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad \text{ve} \quad \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{m_s + m_b}} \quad (4.3)$$

sönüm oranları

$$\xi_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s} \quad \text{ve} \quad \xi_b = \frac{c_b}{2(m_s + m_b)\omega_b} \quad (4.4)$$

ve boyutsuz bir kütle oranını tanımlayan

$$\gamma = \frac{m_s}{m_s + m_b} \quad (4.5)$$

olmak üzere 4.2a ve 4.2b hareket denklemleri daha yalın bir formda ifade edilebilir:

$$\gamma\ddot{v}_s + \dot{v}_b + 2\omega_b\xi_b\dot{v}_b + \omega_b^2v_b = -\ddot{u}_g \quad (4.6a)$$

$$\ddot{v}_s + \dot{v}_b + 2\omega_s\xi_s\dot{v}_s + \omega_s^2v_s = -\ddot{u}_g \quad (4.6b)$$

$\Sigma m = m_b + m_s$ olmak üzere 4.6 hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \Sigma m & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_b \\ v_s \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Sigma m & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (4.7a)$$

veya

$$[M]\{\ddot{v}\} + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (4.7b)$$

(4.7b) hareket denkleminin modların süperpozisyonu yöntemi ile çözümü için, öncelikle sönümsüz sistemin özdeğerlerinin bulunması gerekir. Sönümsüz sistemin serbest titreşim hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{v}\} + [K]\{v\} = \{0\} \quad (4.8)$$

olup iki serbestlik dereceli bu sistemin i. katının hareketi sinüzoidal bir fonksiyon olarak tanımlanır ise, bu kata ait deplasman, hız ve ivme fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_i = \phi_i \sin(\omega t + \theta) \quad (4.9a)$$

$$\dot{v}_i = \omega \phi_i \cos(\omega t + \theta) \quad (4.9b)$$

$$\ddot{v}_i = -\omega^2 \phi_i \sin(\omega t + \theta) \quad (4.9c)$$

Burada ϕ_i i. katın genliği, θ faz açısı, ω doğal açısal frekanstır.

(4.8)'de (4.9) bağıntıları yerlerine konular ve gerekli düzenlemeler yapılırsa sistemin genlik değerine bağlı hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$-\omega^2 [M]\{\phi\} + [K]\{\phi\} = \{0\}$$

veya

$$[[D] - \lambda[I]]\{\phi\} = \{0\} \quad (4.10)$$

$[D] = [K]^{-1}[M]$ dinamik matris ve $\lambda = 1/\omega^2$ olup sönümsüz serbest titreşimin hareket denklemini bir özdeğer problemine indirgenmiş olur. Sistemin sıfırdan farklı (nontrivial) çözümü için katsayılar matrisinin determinantının sıfır olması gerekir:

$$|[D] - \lambda[I]| = 0 \quad (4.11)$$

(4.11)'in çözümünden [D] matrisinin özdeğer ve özvektörleri yani sistemin açısıl frekans ve mod vektörleri elde edilir. Buradaki $[K]^{-1}$ ve [D] değerleri aşağıda verildiği gibi bulunur.

$$[K]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/k_b & 0 \\ 0 & 1/k_s \end{bmatrix} \quad (4.12a)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 1/\omega_b^2 & \gamma/\omega_b^2 \\ 1/\omega_s^2 & 1/\omega_s^2 \end{bmatrix} \quad (4.12b)$$

Bir başka ifade ile [D] matrisinin özdeğeri λ ise $[D]^{-1}$ matrisinin öz değeri $1/\lambda$ olur:

$$[D]\{\phi\} = \lambda\{\phi\} \quad \text{ise} \quad [D]^{-1}\{\phi\} = \frac{1}{\lambda}\{\phi\}$$

$[D]^{-1}$ matrisinin özdeğer ve özvektörleri aşağıdaki gibi kolaylıkla bulunabilir:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} d'_{11} & d'_{12} \\ d'_{21} & d'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_b^2}{1-\gamma} & -\frac{\gamma\omega_s^2}{1-\gamma} \\ -\frac{\omega_b^2}{1-\gamma} & \frac{\omega_s^2}{1-\gamma} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$[D]^{-1}$ matrisinin karakteristik denklemi sıfıra eşit olmalıdır

$$\begin{vmatrix} d'_{11} - \omega^2 & d'_{12} \\ d'_{21} & d'_{22} - \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.14)$$

buradan gerekli düzenlemeler ile

$$(1-\gamma)\omega^4 - (\omega_b^2 + \omega_s^2)\omega^2 + \omega_b^2\omega_s^2 = 0 \quad (4.15)$$

ve

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{(\omega_b^2 + \omega_s^2) \mp \sqrt{(\omega_b^2 + \omega_s^2)^2 - 4(1-\gamma)(\omega_b^2 \omega_s^2)}}{2(1-\gamma)} \quad (4.16)$$

elde edilir. Denklem (4.16) $\omega_b^2 = \varepsilon \omega_s^2$ kabulü ile aşağıdaki forma dönüşür:

$$\omega_{1,2}^2 = \omega_s^2 \left[\frac{(\varepsilon + 1) \mp \sqrt{\varepsilon^2 + (4\gamma - 2)\varepsilon + 1}}{2(1-\gamma)} \right] \quad (4.17)$$

(4.17)'deki karekök içerisindeki terim Taylor Serisine açılarak ifade sadeleştirilebilir. Bir $f(x)$ fonksiyonunun $(x-a)$ 'nın kuvvetlerine göre Taylor serisine açılımı aşağıdaki gibidir:

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n \quad (4.18)$$

İlgili ifadenin ilk üç terimi için seriye açılması yeterlidir. Buna göre:

$$\begin{aligned} f(x) &= f(\varepsilon) = [\varepsilon^2 + (4\gamma - 2)\varepsilon + 1]^{1/2} \\ f'(x) &= f'(\varepsilon) = \frac{1}{2}[2\varepsilon + (4\gamma - 2)][\varepsilon^2 + (4\gamma - 2)\varepsilon + 1]^{-1/2} \\ f''(x) &= f''(\varepsilon) = \frac{1}{2} \left\{ 2[\varepsilon^2 + (4\gamma - 2)\varepsilon + 1]^{-1/2} - \frac{1}{2}[2\varepsilon + (4\gamma - 2)]^2[\varepsilon^2 + (4\gamma - 2)\varepsilon + 1]^{-3/2} \right\} \end{aligned} \quad (4.19)$$

ve $a = 0$ için

$$\begin{aligned} f(0) &= 1 \\ f'(0) &= (2\gamma - 1) \\ f''(0) &= 4\gamma(1 - \gamma) \end{aligned} \quad (4.20)$$

yazılabilir. (4.19) ve (4.20) ifadeleri (4.18)'de yerine konulursa

$$f(\varepsilon) = 1 + (2\gamma - 1)\varepsilon + 2\gamma(1 - \gamma)\varepsilon^2$$

ve (4.17)'den

$$\omega_{1,2}^2 = \omega_s^2 \left\{ \frac{(\varepsilon + 1) \mp [1 + (2\gamma - 1)\varepsilon + 2\gamma(1 - \gamma)\varepsilon^2]}{2(1 - \gamma)} \right\} \quad (4.21)$$

bulunur. Denklem (4.21)'de $\varepsilon^2 \cong 0$ kabulüyle gerekli düzenlemeler yapılırsa sistemin frekansları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\omega_1 = \omega_b \sqrt{(1 - \gamma\varepsilon)} \quad (4.22a)$$

ve

$$\omega_2 = \omega_s \sqrt{\frac{(1 + \gamma\varepsilon)}{(1 - \gamma)}} \quad (4.22b)$$

Sistemin özvektörleri ise bulunan özdeğerler kullanılarak hesaplanabilir:

$$\begin{bmatrix} d'_{11} - \omega_k^2 & d'_{12} \\ d'_{21} & d'_{22} - \omega_k^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_{bk} \\ \phi_{sk} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad k=1,2 \quad (4.23)$$

(4.23) denklem takımının $\phi_{bk} = 1$, $k=1,2$ için çözülmesiyle ϕ_{sk} değerleri bulunur ve birinci ve ikinci moda ait özvektörler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\{\phi\}_1^T = (1, \varepsilon) \quad (4.24a)$$

ve

$$\{\phi\}_2^T = \left\{ 1, -\frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\varepsilon] \right\} \quad (4.24b)$$

(4.7) denklem takımının çözümü sönümsüz sistemin mod şekilleri kullanılarak modların süperpozisyonu yöntemi ile yapılabilir:

$$\{v\} = [\phi]\{q\} = \begin{bmatrix} \phi_{b1} & \phi_{b2} \\ \phi_{s1} & \phi_{s2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{b1} \\ \phi_{s1} \end{Bmatrix} q_1 + \begin{Bmatrix} \phi_{b2} \\ \phi_{s2} \end{Bmatrix} q_2 = \{\phi\}_1 q_1 + \{\phi\}_2 q_2 \quad (4.25a)$$

$$\{\dot{v}\} = [\phi]\{\dot{q}\} = \begin{bmatrix} \phi_{b1} & \phi_{b2} \\ \phi_{s1} & \phi_{s2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{b1} \\ \phi_{s1} \end{Bmatrix} \dot{q}_1 + \begin{Bmatrix} \phi_{b2} \\ \phi_{s2} \end{Bmatrix} \dot{q}_2 = \{\phi\}_1 \dot{q}_1 + \{\phi\}_2 \dot{q}_2 \quad (4.25b)$$

$$\{\ddot{v}\} = [\phi]\{\ddot{q}\} = \begin{bmatrix} \phi_{b1} & \phi_{b2} \\ \phi_{s1} & \phi_{s2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{b1} \\ \phi_{s1} \end{Bmatrix} \ddot{q}_1 + \begin{Bmatrix} \phi_{b2} \\ \phi_{s2} \end{Bmatrix} \ddot{q}_2 = \{\phi\}_1 \ddot{q}_1 + \{\phi\}_2 \ddot{q}_2 \quad (4.25c)$$

Burada q_k zamana bağlı modal katsayılar olarak adlandırılır.

(4.25a), (4.25b) ve (4.25c)'deki ifadeler denklem (4.7b)'de yerlerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$[M]\{\{\phi\}_1 \ddot{q}_1 + \{\phi\}_2 \ddot{q}_2\} + [C]\{\{\phi\}_1 \dot{q}_1 + \{\phi\}_2 \dot{q}_2\} + [K]\{\{\phi\}_1 q_1 + \{\phi\}_2 q_2\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (4.26)$$

(4.26) sırasıyla mod vektörlerinin transpozeleri olan $\{\phi\}_1^T$ ve $\{\phi\}_2^T$ vektörleri ile çarpılırsa aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$\begin{aligned} & \{\phi\}_1^T [M]\{\{\phi\}_1 \ddot{q}_1 + \{\phi\}_2 \ddot{q}_2\} + \{\phi\}_1^T [C]\{\{\phi\}_1 \dot{q}_1 + \{\phi\}_2 \dot{q}_2\} \\ & = +\{\phi\}_1^T [K]\{\{\phi\}_1 q_1 + \{\phi\}_2 q_2\} \{r\}\ddot{u}_g - \{\phi\}_1^T [M]\{r\}\ddot{u}_g \end{aligned} \quad (4.27a)$$

ve

$$= +\{\phi\}_2^T [K]\{\{\phi\}_1 q_1 + \{\phi\}_2 q_2\} \{r\}\ddot{u}_g - \{\phi\}_2^T [M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (4.27b)$$

Mod vektörlerinin ortogonal olması özelliği dikkate alındığında $i \neq j$ ($k = i, j$) şartını sağlayan değerler için sönümün yeteri kadar küçük olduğu kabulüyle aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 0 \quad (4.28a)$$

$$\{\phi\}_i^T [C] \{\phi\}_j = 0 \quad (4.28b)$$

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_j = 0 \quad (4.28c)$$

(4.28) ifadeleri (4.27a) ve (4.27b) denklemlerinde yerlerine yazılırsa

$$\{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_1 \ddot{q}_1 + \{\phi\}_1^T [C] \{\phi\}_1 \dot{q}_1 + \{\phi\}_1^T [K] \{\phi\}_1 q_1 = -\{\phi\}_1^T [M] \{r\} \ddot{u}_g \quad (4.29a)$$

$$\{\phi\}_2^T [M] \{\phi\}_2 \ddot{q}_2 + \{\phi\}_2^T [C] \{\phi\}_2 \dot{q}_2 + \{\phi\}_2^T [K] \{\phi\}_2 q_2 = -\{\phi\}_2^T [M] \{r\} \ddot{u}_g \quad (4.29b)$$

elde edilir. k . titreşim modu için modal kütle (\underline{M}_k), modal sönüm (\underline{C}_k) ve modal rijitlik (\underline{K}_k) tanımlarıyla

$$\underline{M}_k = \{\phi\}_k^T [M] \{\phi\}_k \quad (4.30a)$$

$$\underline{C}_k = \{\phi\}_k^T [C] \{\phi\}_k = 2\underline{M}_k \omega_k \xi_k \quad (4.30b)$$

$$\underline{K}_k = \{\phi\}_k^T [K] \{\phi\}_k = \underline{M}_k \omega_k^2 \quad (4.30c)$$

(4.29) aşağıdaki formu alır:

$$\ddot{q}_k + 2\omega_k \xi_k \dot{q}_k + \omega_k^2 q_k = -\frac{\{\phi\}_k^T [M] \{r\} \ddot{u}_g}{\underline{M}_k} = -\Gamma_k \ddot{u}_g \quad (4.31)$$

buradaki Γ_k katılım faktörü olarak adlandırılır.

Modal Kütle (\underline{M}_k) Değerlerinin Hesabı

Birinci mod için:

$$\underline{M}_1 = \{\phi\}_1^T [M] \{\phi\}_1 = [1 \quad \varepsilon] \begin{bmatrix} \Sigma m & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \Sigma m [1 \quad \varepsilon] \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

$$\underline{M}_1 = \Sigma m (1 + 2\varepsilon\gamma + \varepsilon^2\gamma)$$

$\varepsilon^2 \cong 0$ kabulüyle;

$$\underline{M}_1 = \Sigma m (1 + 2\varepsilon\gamma) \quad (4.32)$$

benzer şekilde ikinci mod için:

$$\underline{M}_2 = \{\phi\}_2^T [M] \{\phi\}_2 = \Sigma m [\phi_{b2} \quad \phi_{s2}] \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{12} \\ \phi_{22} \end{bmatrix}$$

$\varepsilon^2 \cong 0$ kabulü ve gerekli düzenlemelerle

$$\underline{M}_2 = \Sigma m \frac{(1 - \gamma)(1 - 2\varepsilon + 2\varepsilon\gamma)}{\gamma} \quad (4.33)$$

olarak bulunur.

Modal Sönüm (\underline{C}_k) Değerlerinin Hesabı

Birinci mod için:

$$\underline{C}_1 = \{\phi\}_1^T [C] \{\phi\}_1 = [1 \quad \varepsilon] \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix} = [1 \quad \varepsilon] \begin{bmatrix} 2\xi_b \omega_b \Sigma m & 0 \\ 0 & 2\xi_s \omega_s m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

$$\underline{C}_1 = \Sigma m \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon \\ \varepsilon & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2\xi_b \omega_b & 0 \\ 0 & 2\xi_s \omega_s \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \Sigma m (2\xi_b \omega_b + 2\varepsilon^2 \xi_s \omega_s \gamma)$$

$$\underline{C}_1 = 2\Sigma m \xi_b \omega_b \quad (4.34)$$

(4.22a), (4.30b) ve (4.34)'den, $\varepsilon^2 \cong 0$ kabulüyle

$$\xi_1 = \xi_b \sqrt{1 - 3\gamma\varepsilon} \quad (4.35)$$

elde edilir. Bu ifadenin karekök içindeki terimleri $\varepsilon=0$ için 2. terime kadar Taylor serisine açılır ise:

$$f(x) = f(\varepsilon) = (1 - 3\gamma\varepsilon)^{1/2}; \quad f(0) = 1$$

$$f'(x) = f'(\varepsilon) = -\frac{1}{2} 3\gamma(1 - 3\gamma\varepsilon)^{-1/2}; \quad f'(0) = -\frac{3}{2} \gamma$$

ve

$$f(\varepsilon) = 1 - \frac{3}{2} \gamma\varepsilon \quad (4.36)$$

elde edilir. Buna göre (4.35)

$$\xi_1 = \xi_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma\varepsilon\right) \quad (4.37)$$

olarak sadeleştirilebilir. Benzer şekilde 2. mod için Modal Sönüm değeri hesaplanabilir:

$$\underline{C}_2 = \{\phi\}_2^T [C] \{\phi\}_2 = \Sigma m \begin{bmatrix} \phi_{b2} & \phi_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2\xi_b \omega_b & 0 \\ 0 & 2\xi_s \omega_s \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{b2} \\ \phi_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\underline{C}_2 = 2\Sigma m (\xi_b \omega_b \phi_{b2}^2 + \xi_s \omega_s \gamma \phi_{s2}^2)$$

$$\begin{aligned}\underline{C}_2 &= 2\Sigma m \left\{ \xi_b \omega_b + \frac{1}{\gamma} \xi_s \omega_s [1 - 2(1-\gamma)\varepsilon + (1-\gamma)^2 \varepsilon^2] \right\} \\ \underline{C}_2 &= 2\Sigma m \left[\xi_b \omega_b + \frac{1}{\gamma} \xi_s \omega_s (1 - 2\varepsilon + 2\gamma\varepsilon) \right]\end{aligned}\quad (4.38)$$

(4.22), (4.30) ve (4.38)'den $\varepsilon^2 \cong 0$ ve (4.36) kabulleri ile

$$\xi_2 = \frac{(\xi_s + \gamma \xi_b \sqrt{\varepsilon})}{\sqrt{1-\gamma}} \left(1 - \frac{\gamma\varepsilon}{2}\right) \quad (4.39)$$

elde edilir.

Katılım faktörlerinin hesabı

Birinci mod için:

$$\begin{aligned}\Gamma_1 &= \frac{1}{\underline{M}_1} \{\phi\}_1^T [M] \{r\} \\ \Gamma_1 &= \frac{\Sigma m}{\Sigma m(1+2\varepsilon\gamma)} \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{(1+\varepsilon\gamma)}{(1+2\varepsilon\gamma)} = \frac{1+\varepsilon\gamma-2\varepsilon\gamma-4\varepsilon^2\gamma^2}{1-4\varepsilon^2\gamma^2}\end{aligned}$$

$\varepsilon^2 \cong 0$ olduğuna göre

$$\Gamma_1 = 1 - \varepsilon\gamma \quad (4.40)$$

elde edilir. Benzer şekilde ikinci mod için

$$\begin{aligned}\Gamma_2 &= \frac{1}{\underline{M}_2} \{\phi\}_2^T [M] \{r\} \\ \Gamma_2 &= \frac{\gamma}{\Sigma m(1-\gamma)(1-2\varepsilon+2\varepsilon\gamma)} \begin{bmatrix} \phi_{b2} & \phi_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma \\ \gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{\varepsilon\gamma}{(1-2\varepsilon-2\varepsilon\gamma)} = \frac{\varepsilon\gamma+2\varepsilon^2\gamma(1+\gamma)}{1-4\varepsilon^2(1+\gamma)^2}\end{aligned}$$

$\varepsilon^2 \cong 0$ kabulü ile

$$\Gamma_2 = \varepsilon\gamma \quad (4.41)$$

olarak bulunur. Böylelikle sistemin ayrık titreşim denklemleri aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\ddot{q}_1 + 2\omega_1\xi_1\dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\Gamma_1\ddot{u}_g \quad (4.42a)$$

$$\ddot{q}_2 + 2\omega_2\xi_2\dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -\Gamma_2\ddot{u}_g \quad (4.42b)$$

Bu denklemlerin çözümü Duhamel İntegrali ile aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$q_1 = \frac{\Gamma_1}{\omega_1} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi_1\omega_1(t-\tau)} \sin \omega_1(t-\tau) d\tau \quad (4.43a)$$

$$q_2 = \frac{\Gamma_2}{\omega_2} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi_2\omega_2(t-\tau)} \sin \omega_2(t-\tau) d\tau \quad (4.43b)$$

q_1 ve q_2 'nin maksimum değerleri ise deplasman spektrumları ile hesaplanabilir:

$$|q_1|_{\max} = \Gamma_1 S_d(\omega_1, \xi_1) = (1 - \varepsilon\gamma) S_d(\omega_1, \xi_1) \quad (4.44a)$$

$$|q_2|_{\max} = \Gamma_2 S_d(\omega_2, \xi_2) = \varepsilon\gamma S_d(\omega_2, \xi_2) \quad (4.44b)$$

Burada $S_d(\omega, \xi)$, $\ddot{u}_g(t)$ yer hareketi için ω frekans ve ξ sönüm oranındaki deplasman tepki spektrumudur. Taban izolatörlü sistemin birinci ve ikinci dinamik serbestlik derecesi doğrultularındaki maksimum görelî yer değiştirmeleri, kareler toplamının karekökü yöntemi ile aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$|v_b|_{\max} = \sqrt{(\phi_{b1}|q_1|_{\max})^2 + (\phi_{b2}|q_2|_{\max})^2} \quad (4.45a)$$

$$|v_s|_{\max} = \sqrt{(\phi_{s1}|q_1|_{\max})^2 + (\phi_{s2}|q_2|_{\max})^2} \quad (4.45b)$$

Burada v_b birinci serbestlik derecesi doğrultusundaki izolasyon sisteminin yere göre, v_s ise ikinci serbestlik derecesi doğrultusundaki üst yapının izolasyon sistemine göre deplasmanıdır. (4.24), (4.44) ve (4.45)'den $\varepsilon^2 \cong 0$ kabulü ile

$$|v_b|_{\max} \cong (1 - \varepsilon\gamma)S_d(\omega_1, \xi_1) \quad (4.46)$$

ve

$$|v_s|_{\max} \cong \varepsilon \sqrt{[S_d(\omega_1, \xi_1)]^2 + \{S_d(\omega_2, \xi_2)\}^2} \quad (4.47)$$

elde edilir. Tasarım taban kesme kuvveti katsayısı C_s aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} C_s &= \frac{k_s v_s}{\Sigma m} \Big|_{\max} = \omega_s^2 |v_s|_{\max} \\ C_s &= \omega_s^2 \varepsilon \left\{ [S_d(\omega_1, \xi_1)]^2 + [S_d(\omega_2, \xi_2)]^2 \right\}^{1/2} \\ C_s &= \left\{ \omega_b^4 [S_d(\omega_1, \xi_1)]^2 + \varepsilon^2 \omega_s^4 [S_d(\omega_2, \xi_2)]^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (4.48)$$

(4.46) ve (4.47) ifadelerinin sadece birinci terimleri dikkate alınır,

$$|v_s|_{\max} = \frac{\varepsilon S_v}{\omega_b} = \varepsilon S_d(\omega_b, \xi_b) \quad (4.49)$$

$$|v_b|_{\max} = \frac{S_v}{\omega_b} = S_d(\omega_b, \xi_b) \quad (4.50)$$

ve buradan tasarım taban kesme kuvveti katsayısı,

$$\begin{aligned}
C_s &= \frac{k_s v_s}{m} = \omega_s^2 v_s \\
C_s &= \omega_b S_v \left[1 + \varepsilon^2 \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right]^{1/2} = S_a(\omega_b, \xi_b) \left(1 + \frac{\varepsilon}{1-\gamma} \right)^{1/2} \cong S_a(\omega_b, \xi_b) \\
C_s &\cong S_a(\omega_b, \xi_b)
\end{aligned} \tag{4.51}$$

yazılabilir.

Elde edilen ifadelerle göre, küçük ε değeri ve tipik bir tasarım spektrumu için, izolasyon sisteminin tasarımı, en azından ilk adım olarak, görelî taban yer değıştirmesi, $S_a(\omega_b, \xi_b)$, üst yapı tasarımı ise taban kesme kuvveti katsayısı, $S_a(\omega_b, \xi_b)$ kullanılarak yapılabilir. $C_s = S_a(\omega_b, \xi_b)$ olduğuna göre taban izolasyonlu yapının ankastre mesnetli yapıya nazaran taban kesme kuvvetindeki azalma, $S_a(\omega_b, \xi_b) / S_a(\omega_s, \xi_s)$ olarak ifade edilir. Sabit hız spektrumu için bu oran ω_b / ω_s veya $\varepsilon^{1/2}$ ile verilir. Genellikle $\xi_b > \xi_s$ olduğundan taban kesme kuvvetinde meydana gelen azalma yukarıda hesaplanan değerin altında kalır. Böylece emniyetli tarafta kalınmış olunur (Naeim ve Kelly, 1999).

4.2 Lineer Teorinin Çok Katlı Yapılara Uygulanması

4.2.1 Çok Serbestlik Dereceli Taban İzolasyonlu Sistemlerin Hareket Denklemi

Önceki kısımda tek katlı sismik izolasyonlu yapı için geliştirilen basit lineer modelin iki serbestlik dereceli analizi, çok katlı binalar için de uygulanabilir. Kütle matrisi $[M]$, sönüm matrisi $[C]$ ve rijitlik matrisi $[K]$ olan bir yapı sistemi ele alalım. Deprem hareketi etkisi altındaki yapı sistemi için her bir serbestlik derecesinin yere göre bağıl yer değıştirmesi “ u ” olarak verilirse, bu sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılır:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \tag{4.52}$$

Burada $\{r\}$, her bir serbestlik derecesini yer hareketiyle etkinleştiren bir vektördür. Bu yapısal model, taban kütlesi m_b , rijitliği k_b , ve sönümü c_b olan taban izolasyon sisteminin üstüne oturtulduğunda denklem (4.52) şu formu alır:

$$[M]\{\ddot{v}\} + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = -[M]\{r\}(\ddot{u}_g + \ddot{v}_b) \quad (4.53)$$

Burada v taban döşemesine göre bağıl yer değiştirme, v_b taban döşemesinin yere göre bağıl yer değiştirmesidir. Bina ve taban izolasyon sisteminin oluşturduğu birleşik sistemin hareket denklemi ise

$$\{r\}^T [M] [\{\ddot{v}\} + \{r\}\ddot{v}_b + \{r\}\ddot{u}_g] + m_b(\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = 0 \quad (4.54)$$

veya

$$\{r\}^T [M]\{\ddot{v}\} + (m + m_b)\ddot{v}_b + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (4.55)$$

olarak yazılabilir. Burada $\{r\}^T [M]\{r\}$ üst yapının toplam kütesini (m) verirken $m+m_b$ izolasyon sisteminin taşıdığı toplam kütle olmaktadır. Denklem (4.55)

$$[M]^* = \begin{bmatrix} m + m_b & \{r\}^T [M] \\ [M]\{r\} & [M] \end{bmatrix}, [C]^* = \begin{bmatrix} c_b & \{0\}^T \\ \{0\} & [C] \end{bmatrix}, [K]^* = \begin{bmatrix} k_b & \{0\}^T \\ \{0\} & [K] \end{bmatrix},$$

$$\{r\}^* = \begin{Bmatrix} 1 \\ \{0\} \end{Bmatrix}, \{v\}^* = \begin{Bmatrix} v_b \\ \{v\} \end{Bmatrix}$$

olmak üzere aşağıdaki gibi matris formunda ifade edilebilir:

$$[M]^* \{\ddot{v}\}^* + [C]^* \{\dot{v}\}^* + [K]^* \{v\}^* = -[M]^* \{r\}^* \ddot{u}_g \quad (4.56)$$

4.2.2 Çok serbestlik Dereceli Sistemin Modal Analizi

Ankastre mesnetli yapıların doğal mod şekilleri, ϕ_k biliniyorsa, yapının her bir serbestlik derecesindeki yer değiştirmeleri bu mod şekilleri cinsinden aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$v = \sum_{k=1}^N q_k \phi_k \quad (4.57)$$

Doğal frekanslar $\{\phi\}_i [C] \{\phi\}_j = 0$ [$k = i, j$ ve $i \neq j$] varsayımı yapılarak

$$[M] \{\phi\}_k \omega_k^2 = [K] \{\phi\}_k \quad (4.58)$$

denklemleri ile verilir. (4.55) hareket denklemleri N+1 adet denkleme indirgenerek şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_{k=1}^N \{r\}^T [M] \{\phi\}_k \ddot{q}_k + (m + m_b) \ddot{v}_b + c_b \dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b) \ddot{u}_g \quad (4.59a)$$

ve

$$\ddot{q}_k + 2\omega_k \xi_k \dot{q}_k + \omega_k^2 q_k = -\Gamma_k (\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4.59b)$$

Burada Γ_k , ankastre mesnet durumunda modların katılma faktörü olup aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Gamma_k = \frac{\{\phi\}_k^T [M] \{r\}}{\{\phi\}_k^T [M] \{\phi\}_k} \quad (4.60)$$

Ankastre mesnet durumunda modal kütleler

$$\underline{M}_k = \{\phi\}_k^T [M] \{\phi\}_k \quad (4.61)$$

olarak verilir. Buna göre (4.59a) ve (4.59b) aşağıdaki formda yazılabilir

$$\sum_{k=1}^N \frac{\Gamma_k M_k}{m + m_b} \ddot{q}_k + \ddot{v}_b + 2\omega_b \xi_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g \quad (4.62a)$$

ve

$$\Gamma_k \ddot{v}_b + \ddot{q}_k + 2\omega_k \xi_k \dot{q}_k + \omega_k^2 q_k = -\Gamma_k \ddot{u}_g \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4.62b)$$

Çoğu zaman taban izolasyonlu yapılarda birinci moddan yüksek modlar, üstyapı ve izolasyon sisteminin tasarımında hiçbir rol oynamazlar. Bu nedenle analizlerde sadece 1. modun katkıları dikkate alınır. Böylelikle yukarıda verilen (4.62a) ve (4.62b) nolu çok katlı sistemin hareket denklemleri tek katlı sismik izolasyonlu yapının hareket denklemlerine kolayca dönüştürülebilir. Denklem (4.6a) ve (4.6b)'deki v_b yerine $\Gamma_1 v_b$, \ddot{u}_g yerine $\Gamma_1 \ddot{u}_g$ ve

$$\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{\Sigma m} \text{ yerine}$$

$$\gamma_1 = \frac{\Gamma_1^2 M_1}{m + m_b}$$

kullanılırsa

$$\frac{\Gamma_1 M_1}{m + m_b} \ddot{q}_1 + (\Gamma_1 \ddot{v}_b) + 2\omega_b \xi_b (\Gamma_1 \dot{v}_b) + \omega_b^2 (\Gamma_1 v_b) = -\Gamma_1 \ddot{u}_g$$

ve

$$(\Gamma_1 \dot{v}_b) + \ddot{q}_1 + 2\omega_1 \xi_1 \dot{q}_1 = -\Gamma_1 \ddot{u}_g$$

elde edilir. Bu denklemlerin çözümündeki q_1 tek katlı sismik izolasyonlu yapının çözümündeki v_s 'ye karşılık gelmektedir.

Tek katlı sismik izolasyonlu sistem için elde edilmiş olan yer değiştirme ve taban kesme kuvveti katsayısı büyüklükleri:

$$|v_b|_{\max} = \frac{1}{\omega_b^2} S_a(\omega_b, \xi_b)$$

ve

$$C_s = \left\{ [S_a(\omega_b, \xi_b)]^2 + \varepsilon^2 (1 - \gamma)^2 [S_a(\omega_s, \xi_s)]^2 \right\}^{1/2}$$

olup çok katlı taban izolasyonlu yapılar için bu büyüklükler aşağıdaki şekilde verilir:

$$|\Gamma_1 v_b|_{\max} = \frac{1}{\omega_b^2} \Gamma_1 S_a(\omega_b, \xi_b) \quad (4.63)$$

ve

$$\varepsilon_1 = \frac{\omega_b^2}{\omega_1^2} \text{ olmak üzere}$$

$$C_s = \frac{\Gamma_1^2 M_1}{m} \left\{ [S_a(\omega_b, \xi_b)]^2 + \varepsilon_1^2 (1 - \gamma_1)^2 [S_a(\omega_1, \xi_1)]^2 \right\}^{1/2} \quad (4.64)$$

Denklem (4.63)'deki Γ_1 terimi denklemin her iki tarafında da yer aldığı için sonuç tek katlı yapımınki ile aynıdır.

BÖLÜM BEŞ

SİSMİK İZOLASYONLU YAPILARLA İLGİLİ YÖNETMELİK ŞARTLARI

5.1 Giriş

Türkiye’de deprem bölgelerinde yapılacak yapıların bağlı olacağı teknik şartlar “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” de belirtilmiştir. Bu Yönetmeliğin 5.2 No’lu Kapsam başlığı altındaki şartlar şöyledir:

5.2.1 - Bu Yönetmelik hükümleri, yeni yapılacak binalar için olduğu kadar; aynı zamanda değiştirilecek, büyültülecek, deprem öncesi veya sonrasında onarılacak ya da güçlendirilecek binalar için de geçerlidir.

5.2.2 - Bu Yönetmelik hükümleri, betonarme (yerinde dökülmüş ve öngerilmeli veya öngerilmesiz prefabrike) binalar, çelik binalar ve bina türü yapılar ile ahşap, yığma kagir ve kerpiç binalar için geçerlidir.

5.2.3 - Binalar ve bina türü yapılar dışında, tasarımının bu Yönetmelik hükümlerine göre yapılmasına izin verilen bina türü olmayan diğer yapılar, Bölüm 6’da, 6.12 ile tanımlanan yapılarla sınırlıdır. Bu bağlamda; köprüler, barajlar, liman yapıları, tüneller, boru hatları, enerji nakil hatları, nükleer santraller, doğal gaz depolama tesisleri gibi yapılar, tamamı yer altında bulunan yapılar ve binalardan farklı hesap ve güvenlik esaslarına göre projelendirilen diğer yapılar bu Yönetmeliğin kapsamı dışındadır.

5.2.4 - Yapı taşıyıcı sistemini deprem hareketinden yalıtım amacı ile, temelleri ile zemin arasında özel sistem ve gereçlerle donatılan veya diğer aktif ve pasif kontrol sistemleri bulunan binalar için bu Yönetmelik hükümleri uygulanamaz.

5.2.5 - Her türlü kapsam dışı yapılara uygulanacak esaslar, kendi özel yönetmelikleri yapılıncaya dek, yapımları denetleyen Bakanlıklar tarafından

çağdaş uluslararası standartlar gözönünde tutularak özel olarak saptanacak ve projeleri bu esaslara göre düzenlenecektir.

Ortaya konulan 5.2.4 ve 5.2.5 No'lu maddeler doğrultusunda ülkemizde taban izolasyonlu yapı sistemlerinin uygulanma şekilleri ve kullanılacak yapıların özellikleri yabancı ülke yönetmeliklerinin şartları göz önüne alınarak tasarlanır.

Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletleri'nde yayınlanmış olan "1997 UNIFORM BUILDING CODE Volume 2" tarafından verilen şartlar incelenmiştir.

5.2 Sismik İzolasyonlu Yapıların Tasarımıyla İlgili UBC 97 Yönetmeliği Şartları

Bu bölümde halen Amerika Birleşik Devletleri'nde geçerli olan ve "International Conference of Building Officials" tarafından yayınlanan Uniform Building Code'un 1997 yılı baskısı incelenecektir (UBC 97). UBC 97 yeni yapılacak sismik izolasyonlu binaların tasarım kurallarını içerir. Mevcut binaların bu tip sistemlerle iyileştirilmesine yönelik şartları içermez. Ancak iyileştirme yapılacak binaların projelendirilmesinde tasarım mühendisi için önemli bir yardımcı kaynaktır. Ayrıca yönetmelik düşey izolasyon konusuna da hitap etmemektedir.

UBC 97'deki temel felsefe, yönetmelikteki şartlara uygun olarak tasarlanan sismik izolasyonlu bir yapının, orta ve yüksek şiddetli depremlerde ankastre mesnetli bir yapıya göre daha yüksek bir performans sergilemesini sağlamaktır. Yönetmelik sismik izolasyonlu yapıların tasarımında yapı maliyetini düşürmeyi hedeflemez. Amaç yapı ve onun içindekilere gelecek hasarın önlenmesidir.

Aşağıda UBC 97 'de geçen bazı terimler ve sismik izolasyonlu yapıların tasarımı için yönetmelikçe öngörülen analiz yöntemleri verilmiştir.

5.2.1 Tanımlamalar

5.2.1.1 Sismik Risk Düzeyi

UBC 97 yönetmeliğinde iki farklı sismik risk düzeyi tanımlanmıştır:

i. Tasarım Esaslı Deprem “Design Basis Earthquake (DBE)”

50 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 (tekrar periyodu 475 yıl) olan yer hareketini tanımlar.

ii. Olabilecek Maksimum Deprem “Maximum Capable Earthquake (MCE)”

100 yıllık bir süre içinde aşılma olasılığı %10 (tekrar periyodu 1000 yıl) olan yer hareketini tanımlar.

5.2.1.2 Sismik Bölge Faktörü (Z)

UBC 97 bölgelerin sismik aktivitesine göre ABD ve ABD dışındaki yerleri 5 tip sismik bölgeye ayırmıştır. UBC 97’de İzmir ve İstanbul’un sismik bölgesi 4, Adana ve Ankara’nın ise 2A olarak verilmiştir. Z, sismik bölge faktörünün değeri bölgenin sismik aktivitesi yükseldikçe artan bir katsayıdır ve sismik bölgelere göre Z değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Sismik bölge faktörü

| Bölge | 1 | 2A | 2B | 3 | 4 |
|-------|-------|------|------|------|------|
| Z | 0,075 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | 0,40 |

5.2.1.3 Zemin Profili Tipi

Zemin profili tipi, zemin yüzeyinden 30,5 m içinde bulunan zemin tabakasının ortalama zemin özelliklerine bağlı olarak Tablo 5.2'den belirlenir.

Tablo 5.2. Zemin profili tipi

| Zemin Profili Tipi | Zemin Profili Tanımı | Zemin yüzeyinden 30,5 m içindeki tabakanın ortalama zemin özellikleri | | |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| | | Kayma Dalgası Hızı, \bar{v}_s (m/s) | Standart Penetrasyon Test, N (Darbe/30cm) | Drenajsız Kesme Direnci, \bar{s}_u (kPa) |
| S _A | Sert Kaya | >1500 | - | - |
| S _B | Kaya | 760–1500 | - | - |
| S _C | Sıkı Toprak ve Yumuşak Kaya | 360–760 | >50 | >100 |
| S _D | Sert Toprak | 180–360 | 15–50 | 50–100 |
| S _E | Yumuşak Toprak | <180 | <15 | <50 |
| S _F | Yerel zemin sınıfına bağlı değerlendirme gerektirir. Sıvılaşma tehlikesi bulunan zayıf zeminleri temsil eder. | | | |

5.2.1.4 Bina Önem Katsayısı (I)

UBC 97'nin 1657.3 No'lu maddesine göre yapı tipi ne olursa olsun sismik izolasyonlu yapılarda bina önem katsayısı değeri 1 alınabilir.

5.2.1.5 Sismik Kaynak Tipleri

UBC 97'de sismik kaynak tipi, fay hatlarının taşıdıkları sismik riske göre A, B ve C olarak sınıflandırılmıştır. Sismik kaynak tipi Tablo 5.3'e göre belirlenir.

Tablo 5.3. Sismik kaynak tipleri

| Sismik Kaynak Tipi | Sismik Kaynak Özellikleri | Sismik Kaynak Tanımı | |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| | | Maksimum Moment Büyüklüğü (M) | Kayma Hızı, SR (mm/yıl) |
| A | Büyük depremler oluşturabilecek yüksek oranda sismik aktiviteye sahip fay hatları | $M \geq 7,0$ | $SR \geq 5$ |
| B | Tip A ve C'nin ışındaki tüm fay hatları | $M \geq 7,0$ $M < 7,0$ $M \geq 6,5$ | $SR < 5$ $SR > 2$ $SR < 2$ |
| C | Büyük depremler oluşturamayacak ve düşük oranda sismik aktiviteye sahip fay hatları | $M < 6,5$ | $SR \leq 2$ |

5.2.1.6 Kaynak Yakınlık Faktörleri (N_a , N_v)

Kaynak yakınlığını modellemek için iki faktör kullanılır. N_a , kısa periyot aralığında tepki spektrumunun ivmeye duyarlı bölümü için, sismik izolasyon uygulamalarında öncelikli olarak kullanılan N_v ise, orta periyot aralığında veya tepki spektrumunun hıza duyarlı bölümü için uygulanır.

UBC97 kaynak yakınlık faktörlerini, Tablo 5.4 ve 5.5'de görüldüğü gibi sismik kaynağa en yakın mesafe ve sismik kaynak tipine bağlı olarak vermiştir. Burada sismik kaynağa en yakın mesafe; yapının yapılacağı zemin ile fay kırığının yüzeydeki izdüşümü arasındaki en yakın uzaklık olarak alınır.

Tablo 5.4 Kaynak yakınlık faktörü, N_a

| Sismik Kaynak Tipi | Sismik kaynağa en yakın mesafe | | |
|--------------------|--------------------------------|------|-----------|
| | ≤ 2 km | 5 km | > 10 km |
| A | 1,5 | 1,2 | 1,0 |
| B | 1,3 | 1,0 | 1,0 |
| C | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Tablo 5.5 Kaynak yakınlık faktörü, N_v

| Sismik Kaynak Tipi | Sismik kaynağa en yakın mesafe | | | |
|--------------------|--------------------------------|------|-------|--------------|
| | ≤ 2 km | 5 km | 10 km | ≥ 15 km |
| A | 2,0 | 1,6 | 1,2 | 1,0 |
| B | 1,6 | 1,2 | 1,0 | 1,0 |
| C | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

5.2.1.7 Sismik Katsayılar (C_{AD} , C_{VD})

Sismik izolasyonlu yapılar için C_{AD} , C_{VD} katsayıları konvansiyonel yapılar için tanımlanan C_a ve C_v katsayıları ile aynıdır ve değerleri Tablo 5.6 ve 5.7'den alınabilir. Bu katsayılar DBE spektrumunun minimum spektral ordinatlarının sabit hızlı ve sabit ivmeli kısımlarının tanımlanmasında kullanılır.

Tablo 5.6 Sismik katsayı, C_a

| Zemin Profili Tipi | Sismik Bölge Faktörü | | | | |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-----------|
| | Z=0,075 | Z=0,15 | Z=0,2 | Z=0,3 | Z=0,4 |
| S_A | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,24 | $0,32N_a$ |
| S_B | 0,08 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | $0,40N_a$ |
| S_C | 0,09 | 0,18 | 0,24 | 0,33 | $0,40N_a$ |
| S_D | 0,12 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | $0,44N_a$ |
| S_E | 0,19 | 0,30 | 0,34 | 0,36 | $0,36N_a$ |
| S_F | S_F zemin profiline sahip bölgelerde C_a sismik katsayısı bölgenin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizinin yapılması sonucu elde edilir. | | | | |

Tablo 5.7 Sismik katsayı, C_v

| Zemin Profili Tipi | Sismik Bölge Faktörü | | | | |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|--------------------|
| | Z=0,075 | Z=0,15 | Z=0,2 | Z=0,3 | Z=0,4 |
| S _A | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,24 | 0,32N _v |
| S _B | 0,08 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | 0,40N _v |
| S _C | 0,13 | 0,25 | 0,32 | 0,45 | 0,56N _v |
| S _D | 0,18 | 0,32 | 0,40 | 0,54 | 0,64N _v |
| S _E | 0,26 | 0,50 | 0,64 | 0,84 | 0,96N _v |
| S _F | S _F zemin profiline sahip bölgelerde C _v sismik katsayısı bölgenin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizinin yapılması sonucu elde edilir | | | | |

5.2.1.8 Olabilecek Maksimum Deprem Tepki Katsayısı (M_M)

Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı olarak adlandırılan M_M , Z ile N_v'nin çarpımı olan tasarım deprem sarsıntı şiddetine bağlı olarak Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Olabilecek maksimum deprem tepki katsayısı, M_M

| Tasarım Deprem Sarsıntı Şiddeti Z N _v | M_M |
|-----------------------------------------------------|-------|
| 0,075 | 2,67 |
| 0,15 | 2,0 |
| 0,20 | 1,75 |
| 0,30 | 1,50 |
| 0,40 | 1,25 |
| ≥0,50 | 1,20 |

5.2.1.9 Sarsıntı Şiddetine Bağlı Sismik Katsayılar (C_{AM} , C_{VM})

MCE spektrumunun minimum spektral ordinatlarının sabit ivmeli ve hızlı kısımlarının tanımlanmasında kullanılan, sarsıntı şiddetine bağlı C_{AM} ve C_{VM} sismik katsayıları M_M , Z ve N_a (sabit hızlı kısım için N_v)'nin çarpımı olan olabilecek maksimum deprem sarsıntı şiddeti ve zemin profil tipine bağlı olarak sırasıyla Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.9 Sarsıntı şiddetine bağlı sismik katsayı, C_{AM}

| Zemin Profil Tipi | Olabilecek Maksimum Deprem Sarsıntı Şiddeti $M_M Z N_a$ | | | | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|----------------|
| | 0,075 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | $\geq 0,4$ |
| S_A | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,24 | $0,8M_M Z N_a$ |
| S_B | 0,08 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | $1,0M_M Z N_a$ |
| S_C | 0,09 | 0,18 | 0,24 | 0,33 | $1,0M_M Z N_a$ |
| S_D | 0,12 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | $1,1M_M Z N_a$ |
| S_E | 0,19 | 0,30 | 0,34 | 0,36 | $0,9M_M Z N_a$ |
| S_F | S_F zemin profiline sahip bölgelerde C_{AM} katsayısı bölgenin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizinin yapılması sonucu elde edilir | | | | |

Tablo 5.10 Sarsıntı şiddetine bağlı sismik katsayı, C_{VM}

| Zemin Profil Tipi | Olabilecek Maksimum Deprem Sarsıntı Şiddeti $M_M Z N_v$ | | | | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|----------------|
| | 0,075 | 0,15 | 0,2 | 0,3 | $\geq 0,4$ |
| S_A | 0,06 | 0,12 | 0,16 | 0,24 | $0,8M_M Z N_v$ |
| S_B | 0,08 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | $1,0M_M Z N_v$ |
| S_C | 0,13 | 0,25 | 0,32 | 0,45 | $1,4M_M Z N_v$ |
| S_D | 0,18 | 0,32 | 0,40 | 0,54 | $1,6M_M Z N_v$ |
| S_E | 0,26 | 0,50 | 0,64 | 0,84 | $2,4M_M Z N_v$ |
| S_F | S_F zemin profiline sahip bölgelerde C_{VM} katsayısı bölgenin geoteknik incelenmesi ve dinamik tepki analizinin yapılması sonucu elde edilir | | | | |

5.2.1.10 Sönüm Katsayıları (B_D , B_M)

Sırasıyla DBE ve MCE seviyelerindeki B_D ve B_M sönüm katsayıları β_D , β_M efektif sönüm oranlarına bağlı olarak Tablo 5.11'den alınabilir. Efektif sönüm oranları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(\text{Kuvvet - yer deg istirme grafiğinin alanı})}{k_{D \max} D_D^2} \right] \quad (5.1.a)$$

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(\text{Kuvvet - yer deg istirme grafiğinin alanı})}{k_{M \max} D_M^2} \right] \quad (5.1.b)$$

Burada, K_{eff} efektif rijitlik olmak üzere, $k_{D \max}$ deney sonucu hesaplanan D_D yer değiştirmesindeki K_{eff} değerinin maksimumu, $k_{M \max}$ ise deney sonucu hesaplanan D_M yer değiştirmesindeki K_{eff} değerinin maksimumunu ifade eder.

Tablo 5.11 Sönüm katsayıları, B_D , B_M

| Efektif Sönüm Oranı (β_D , β_M) | Sönüm Katsayıları (B_D , B_M) |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| ≤ 2 | 0,8 |
| 5 | 1,0 |
| 10 | 1,2 |
| 20 | 1,5 |
| 30 | 1,7 |
| 40 | 1,9 |
| ≥ 50 | 2,0 |

5.2.1.11 Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R_I)

Sistemin sismik izolasyonlu olması halinde R_I , ankastre mesnetli olması halinde R taşıyıcı sistem davranış katsayıları Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12 Taşıyıcı sistem davranış katsayıları, R_I, R

| Taşıyıcı Sistem | R_I | R |
|----------------------------|-------|-----|
| Moment Aktaran Çerçeve | 2 | 8,5 |
| Perde Duvar | 2 | 5,5 |
| Merkezi Çaprazlı Çerçeve | 1,6 | 5,6 |
| Dışmerkez Çaprazlı Çerçeve | 2 | 7 |

5.2.2 Analiz Yöntemleri

UBC 97 Yönetmeliğinde sismik izolasyonlu yapı tasarımında iki tip analiz yöntemi tanımlanmıştır:

- i. Statik Analiz
- ii. Dinamik Analiz

Yönetmelik sismik izolasyonlu yapı tasarımı için bir statik analiz ortaya konulmasını zorunlu tutar. Statik analiz aynı zamanda dinamik analiz için başlangıç ve minimum koşulları belirler.

5.2.2.1 Statik Analiz

5.2.2.1.1 *Statik Analiz Kriterleri.* Sismik izolasyonlu yapıda aşağıdaki şartlar sağlandığı takdirde sadece statik analiz yeterli olabilmektedir:

1. Yapı aktif fay hattından en az 10 km uzaklıkta olmalı.
2. Yapının zemin profil tipi S_A, S_B, S_C, S_D olmalı.
3. İzolasyon katının üzerindeki yapı 4 kattan veya 19,8 m'den yüksek olmamalı.
4. İzolasyonlu yapının T_M değeri 3 saniyeden büyük olmamalı.
5. İzolasyonlu yapının T_D değeri ankastre mesnetli yapı periyodunun üç katından büyük olmalı.
6. İzolasyon sisteminin üzerindeki yapı düzenli olmalı.

- 7.1. Tasarım deplasmanındaki efektif rijitlik, tasarım deplasmanının %20'sine tekabül eden efektif rijitliğin üçte birinden fazla olmalı.
- 7.2. Toplam tasarım deplasmanındaki geri dönüş kuvveti toplam tasarım deplasmanının %50'sine tekabül eden geri dönüş kuvvetinden 0,025W kadar fazla olmalı.
- 7.3. İzolasyon sisteminin kuvvet - sehim özellikleri yükleme oranından bağımsız olmalı.
- 7.4. İzolasyon sisteminin kuvvet - sehim özellikleri düşey ve bilateral kuvvetlerden bağımsız olmalı.
- 7.5. İzolasyon sisteminin toplam tasarım deplasmanı ile C_{VM}/C_{VD} oranının çarpımı olabilecek maksimum deprem deplasmanını geçmemeli.

5.2.2.1.2 *Statik Analiz Prosedürü.* UBC 97'ye göre statik analizle yapılan çözümlerde hesaplanan ifadeler aşağıda verilmiştir.

Efektif Titreşim Periyotları (T_D , T_M)

Tasarım deplasmanındaki efektif periyot, T_D , maksimum deplasmandaki efektif periyot T_M aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$T_D = 2\pi\sqrt{W / k_{D\min} g} \quad (5.2.a)$$

$$T_M = 2\pi\sqrt{W / k_{M\min} g} \quad (5.2.b)$$

Burada, W binanın ağırlığı, g yerçekimi ivmesi, $k_{D\min}$ deney sonucu hesaplanan D_D yer değiştirmesindeki K_{eff} değerinin minimumu, $k_{M\min}$ ise deney sonucu hesaplanan D_M yer değiştirmesindeki K_{eff} değerinin minimumunu ifade eder.

Deplasman Hesapları (D_D , D_M , D_{TD} , D_{TM})

Tasarım deplasmanı D_D ve maksimum deplasman D_M , sarsıntı şiddetine bağlı sismik katsayı, efektif periyot ve sönüm oranına bağlı olarak Denklem (5.3.a) ve (5.3.b)'deki gibi hesaplanır.

$$D_D = \frac{(g/4\pi^2)C_{VD}T_D}{B_D} \quad (5.3.a)$$

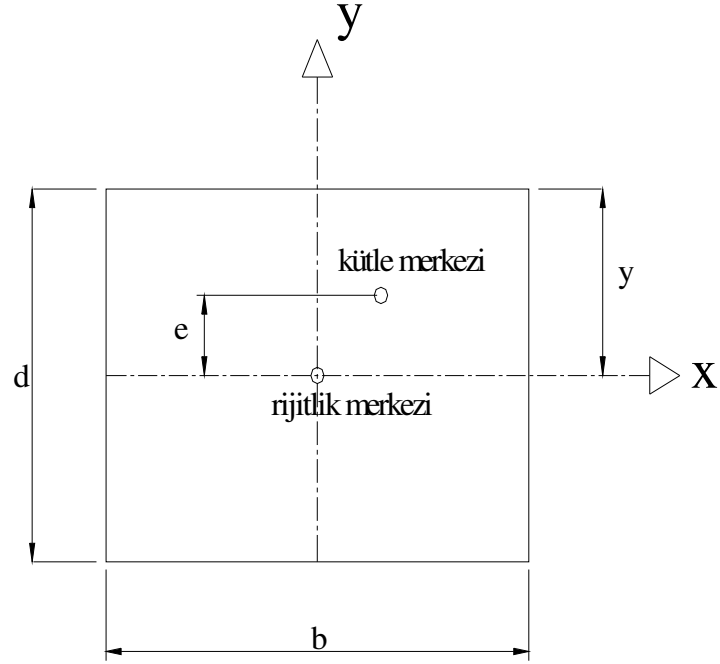
$$D_M = \frac{(g/4\pi^2)C_{VM}T_M}{B_M} \quad (5.3.b)$$

Burulma etkilerini de içeren toplam tasarım deplasmanı D_{TD} ve toplam maksimum deplasman D_{TM} aşağıda verilmiştir.

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad D_{TD} \geq 1,1D_D \quad (5.4.a)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad D_{TM} \geq 1,1D_M \quad (5.4.b)$$

Şekil 5.1'de de gösterildiği gibi e dış merkezlik, y deprem yüklemesinin doğrultusuna dik kenara olan uzaklık, d binanın deprem yönüne dik olan boyutu b ise binanın deprem yönündeki boyutudur. UBC97, izolasyon sisteminin gerçek burulma rijitliği hesap edilerek toplam deplasmanların Denklem (5.4.a) ve (5.4.b) ile bulunan değerlerinde azaltma yapılmasına izin verir. Ancak bu değerler sırasıyla D_D ve D_M 'in en az 1.1 katı olmak zorundadır.



Şekil 5.1. Toplam deplasman hesabı için plan boyutları

Minimum Yatay Kuvvet Hesapları

İzolasyon sisteminin altında kalan elemanlar ,

$$V_b = k_{D_{\max}} D_D \quad (5.5.a)$$

izolasyon sisteminin üstünde bulunan elemanlar ise

$$V_s = k_{D_{\max}} D_D / R_I \quad (5.5.b)$$

olarak tanımlanan tasarım kuvvetlerine göre boyutlandırılırlar. UBC 97 V_s değerini sınırlandırmıştır. Buna göre hesaplanan V_s değeri aşağıda belirtilen değerlerden az alınamaz:

- i. İzolasyonlu sistemli yapı ile aynı ağırlığa sahip ve periyodu da T_D 'ye eşit ankastre mesnetli yapının taban kesme kuvvetinden

- ii. Tasarım rüzgar yükünden dolayı oluşan taban kesme kuvvetinden
- iii. Sistemi harekete geçirecek sismik yanal kuvvetin 1,5 katından (Bu değer kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler için akma yükü, kayıcı mesnet sistemleri için kayma sınırındır).

Yatay Deprem Yükünün Katlara Dağılımı

Deprem kuvveti izolasyon sisteminin üzerindeki katlara aşağıdaki formülasyonla dağıtılacaktır:

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (5.6)$$

Burada, x yatay deprem yükü hesaplanacak kat numarası, w_x ve w_i x. ve i. katın ağırlığı, h_x ve h_i ise izolasyon seviyesinden itibaren ölçülen x. ve i. kat yükseklikleridir.

Yerdeğiştirme Sınırları

Taban izolasyonlu yapıların görelî kat ötelemeleri oranı $0,01/R_1$ değerinden fazla olmamalıdır. Yönetmelikte bu değer ankastre mesnetli yapılarda, doğal periyotları 0,7 saniyenin altında olan binalar için $0,025/0,7R$, doğal periyotları 0,7 saniyenin üzerinde olan binalar için $0,02/0,7R$ olarak verilmiştir. $R_1=2$ olan sismik izolasyonlu bir yapı için bu değer 0,005 olarak hesaplanır ki bu değer aynı elastik dayanıma sahip ankastre mesnetli yapılar için verilen değerlerden oldukça düşüktür.

5.2.2.2 Dinamik Analiz

Yönetmelik dinamik analiz yöntemlerini üç gruba ayırmıştır:

- i. Tepki Spektrumu Analizi
- ii. Zaman Tanım Alanı Analizi
- iii. Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi

5.2.2.2.1 *Dinamik Analiz Kriterleri.* Bu analiz yöntemlerinin hangi koşullar altında geçerli kılınabileceği Tablo 5.13’de verilmiştir.

Tablo 5.13 Dinamik analiz kriterleri

| Tepki Spektrumu Analizi | Zaman Tanım Alanı Analizi | Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.Yapı zemin profil tipi S_A S_B, S_C, S_D olmalı. 2. Statik analiz kriterleri başlığı altındaki 7. maddede tanımlanan koşullar sağlanmalı. | Tepki spektrumu analizi için geçerli olan tüm kriterler burada da geçerlidir. | 1. Yapı zemin profil tipi S_E S_F ise, 2. Yapı aktif fay hattından 10km’den daha az mesafede inşa edilecekse, 3. T_M değeri 3 saniyeden büyük ise, bu analiz yönteminin seçilmesi zorunludur. |

5.2.2.2.2 *Dinamik Analiz Prosedürü.* Dinamik analiz sonucu çıkan değerler Tablo 5.14’de verildiği şekilde sınırlandırılmıştır. Burada, T izolasyonlu sistem üzerindeki yapının ankastre mesnetli çözümü halindeki doğal periyodudur. “ st ” indisiyle gösterilen ifadeler ise statik çözümden elde edilen değerleri simgeler.

UBC 97 Tablo 5.14’de verilen D_{TD}' , D_{TM}' hesabında dinamik analiz sonucu bulunan D_D ve D_M değerleri yerine D_D' ve D_M' değerlerini kullanarak ilave bir azaltmaya izin vermektedir.

$$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad (5.7.a)$$

$$D_M' = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (5.7.b)$$

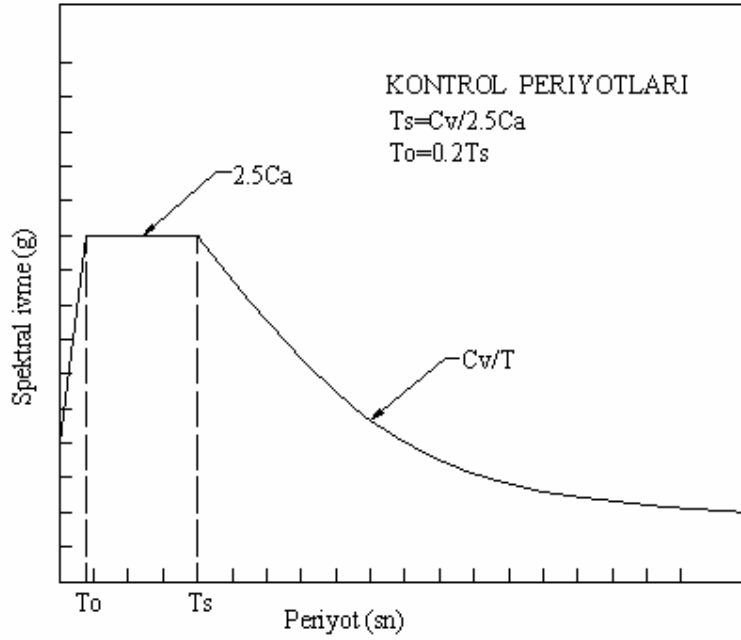
Tablo 5.14 Dinamik analiz sonuçlarının UBC 97 minimum değerleri

| Parametre | Tepki Spektrumu Analizi | Zaman Tanım Alanı Analizi | Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi |
|----------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| D_{TD} | $0,9 D_{TD}^{st}$ | $0,9 D_{TD}^{st}$ | $0,9 D_{TD}^{st}$ |
| D_{TM} | $0,9 D_{TM}^{st}$ | $0,9 D_{TM}^{st}$ | $0,9 D_{TM}^{st}$ |
| V_b | $>0,9 V_b^{st}$ | $>0,9 V_b^{st}$ | $>0,9 V_b^{st}$ |
| V_s (Düzensiz Yapılarda) | $>0,8 V_s^{st}$ | $>0,6 V_s^{st}$ | $>0,8 V_s^{st}$ |
| V_s (Düzenli Yapılarda) | $>1,0 V_s^{st}$ | $>0,8 V_s^{st}$ | $>1,0 V_s^{st}$ |
| Görelî Kat Ötelemeleri | $0,015/R_I$ | $0,020/R_I$ | $0,015/R_I$ |

5.2.2.2.3 *Tepki Spektrumu Analizi.* UBC 97 yönetmeliği tepki spektrumu analizi için Şekil 5.2’de verilen tasarım spektrumunu tanımlamıştır.

Şekil 5.2’deki grafikte C_a , C_v değerleri sismik izolasyonlu yapıların tasarım esaslı deprem tahkikinde C_{AD} , C_{VD} ; olabilecek maksimum deprem tahkikinde ise C_{AM} , C_{VM} olarak alınır.

UBC 97’ye göre tepki spektrumu analizi, temel mod için modal sönüm oranı izolasyon sisteminin efektif sönüm oranından veya %30’dan küçük bir değer alacak şekilde tasarlanacaktır.



Şekil 5.2. UBC 97 tasarım tepki spektrumu

5.2.2.2.4 *Zaman Tanım Alanı Analizi.* Zaman tanım alanında yapılacak bir analiz için en az üç adet kaydedilmiş yatay ivme kaydı bileşen çiftleri gerekmektedir. Analizde göz önüne alınan bu kayıtların büyüklükleri, fay hattına mesafeleri ve kaynak karakteristikleri tutarlı olmalıdır. Yapıya etkitilen bu üç çift ivme kaydından elde edilen büyüklüklerin en elverişsiz olanı tasarıma esas alınacaktır.

5.2.2.2.5 *Bölgeye Özel Tepki Spektrumu Analizi.* Tasarım esaslı deprem veya olabilecek maksimum deprem tahkiklerinde kullanılacak tasarım spektrumu Şekil 5.2.'de verilen tasarım spektrumunun %80'nden daha az alınamaz. Burada da C_a ve C_v katsayıları yerine Kısım 5.2.2.2.3.'te verilen katsayılar kullanılacaktır.

BÖLÜM ALTI

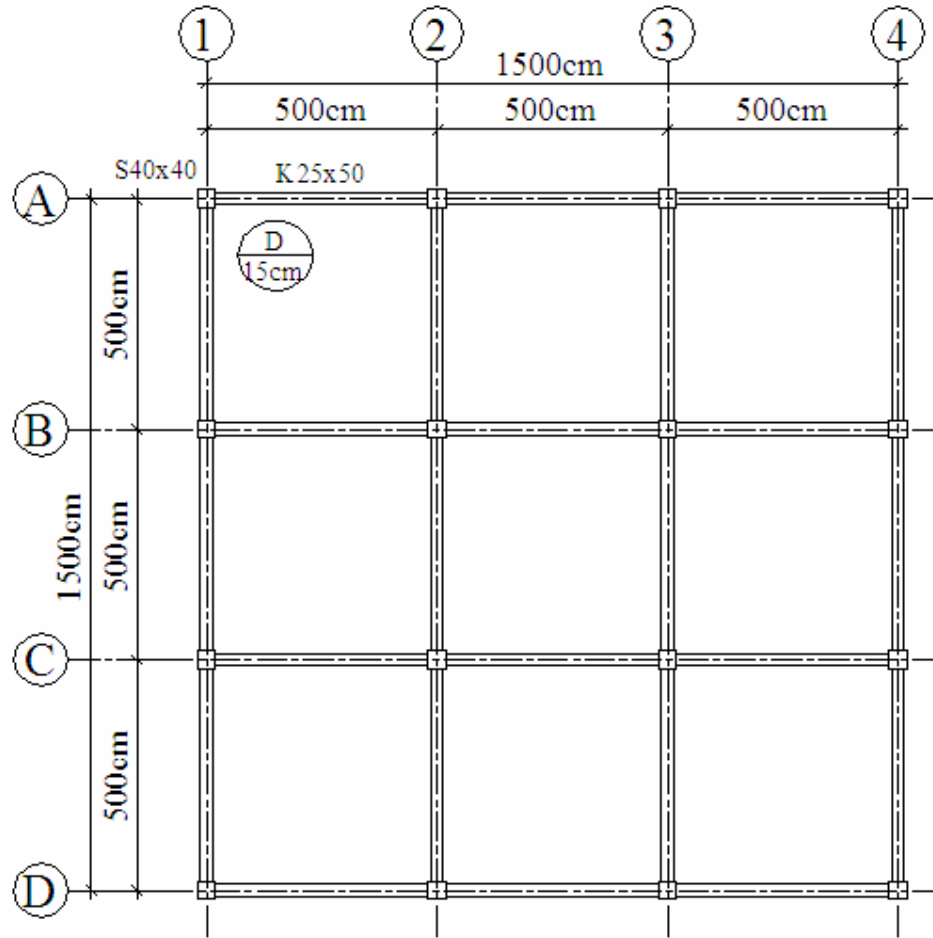
UYGULAMALAR

6.1 Giriş

Bu bölümde rijit kolon ve kirişlerden meydana gelen, özellikleri Tablo 6.1’de, normal kat kalıp planı ise Şekil 6.1’de verilen 4 katlı 3 boyutlu betonarme bir bina modeline üç ayrı tipte sismik izolasyon uygulanmıştır. Uygulanan bu sismik izolasyonlarda sırasıyla yüksek sönümlü kauçuk (HDR), kurşun çekirdekli kauçuk (LRB) ve sürtünmeli sarkaç sistem (FPS) tipindeki mesnetler kullanılmıştır.

Tablo 6.1 Dört katlı betonarme yapının özellikleri

| Özellik | Sembol | Birim | |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| Deprem Bölgesi | - | - | 4 |
| Zemin Profili Tipi | - | - | S _B |
| Bina Önem Katsayısı | I | - | 1 |
| Sismik Kaynak Tipi | - | - | A |
| Sismik Kaynağa En Yakın Mesafe | - | km | 10 |
| Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (Sismik İzolasyonlu Yapının) | R _I | - | 2 |
| Beton Sınıfı | - | - | C25 |
| Beton Elastisite Modülü | E _{beton} | t/m ² | 3000000 |
| Beton Birim Hacim Ağırlığı | - | t/m ³ | 2,45 |
| Kolon Boyutları (Tüm Katlarda) | - | cm | 40x40 |
| Kiriş Boyutları (Tüm Katlarda) | - | cm | 25x50 |
| Döşeme Kalınlığı | - | cm | 15 |
| Kat Yüksekliği | - | m | 3 |
| Duvar Yüğü (Tüm Kirişlerde) | - | t/m | 1,2 |
| Hareketli Yüğü (Tüm Döşemelerde) | Q | t/m ² | 0,35 |
| Hareketli Yüğü Katılım Katsayısı | n | - | 0,3 |
| Kat Kütleleri (Kolonlar Hariç) | m | tsn ² /m | 29,3 |
| Bina Toplam Ağırlığı (ÖLÜ+0,3HRK) | W | t | 1510 |



Şekil 6.1 Dört katlı betonarme yapının kalıp planı

6.2 İzolasyonlu Yapıların UBC 97'ye Göre Statik Analizi

$T_D=2,5$ sn ve $T_M=2,8$ sn olarak hedeflemiş ve izolasyonlu sistemlerin efektif sönüm oranları HDR için %10, LRB için %21 ve FPS için %17 alınarak Bölüm 5'te bahsedilen UBC 97 minimum şartları belirlenmiş ve bu değerler Tablo 6.2, Tablo 6.3, Tablo 6.4 ve Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.2 UBC 97'den hesaplanan statik analiz için gerekli katsayılar

| Katsayı | Sembol | |
|--------------------------------------------|-----------------|------|
| Sismik Bölge Faktörü | Z | 0,40 |
| Kaynak Yakınlık Faktörü | Na | 1,00 |
| Kaynak Yakınlık Faktörü | Nv | 1,20 |
| Sismik Katsayı | C _{AD} | 0,40 |
| Sismik Katsayı | C _{VD} | 0,48 |
| Olabilecek Maksimum Deprem Tepki Katsayısı | M _M | 1,21 |
| Sarsınsıntı Şiddetine Bağlı Sismik Katsayı | C _{AM} | 0,48 |
| Sarsınsıntı Şiddetine Bağlı Sismik Katsayı | C _{VM} | 0,58 |
| Sönüm Katsayıları | HDR | 1,20 |
| | LRB | 1,52 |
| | FPS | 1,41 |

Tablo 6.3 Statik analiz sonucu elde edilen rijitlik değerleri

| | Sembol | Birim | |
|------------------------------------------------------|-------------------|-------|------|
| Tasarım Deplasmanındaki Efektif Rijitliğin Minumumu | k _{Dmin} | t/m | 972 |
| Maksimum Deplasmanındaki Efektif Rijitliğin Minumumu | k _{Mmin} | t/m | 775 |
| Tasarım Deplasmanındaki Efektif Rijitliğin Maksimumu | k _{Dmax} | t/m | 1188 |
| Maksimum Deplasmanındaki Efektif Rijitliğin Minumumu | k _{Mmin} | t/m | 947 |

k_{Dmax} ve k_{Mmin} değerleri tasarım ve maksimum deplasmanlardaki efektif rijitliklerde $\mp\%10$ sapma olabileceği düşünülerek hesaplanmıştır

Tablo 6.4 Statik analiz sonucu elde edilen deplasman değerleri

| | | Sembol | Birim | |
|----------------------------------------------|-----|----------|-------|------|
| Tasarım Deplasmanı | HDR | D_D | m | 0,25 |
| | LRB | | | 0,20 |
| | FPS | | | 0,21 |
| Maksimum Deplasman | HDR | D_M | m | 0,34 |
| | LRB | | | 0,27 |
| | FPS | | | 0,29 |
| Burulma Etkilerini İçeren Tasarım Deplasmanı | HDR | D_{TD} | m | 0,29 |
| | LRB | | | 0,23 |
| | FPS | | | 0,24 |
| Burulma Etkilerini İçeren Maksimum Deplasman | HDR | D_{TM} | m | 0,39 |
| | LRB | | | 0,31 |
| | FPS | | | 0,33 |

Tablo 6.5 Statik analiz sonucu elde edilen yatay kuvvet değerleri

| | | Sembol | Birim | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------|-------|-----|
| İzolasyon Sisteminin Altında veya İzolasyon Sistemi Seviyesinde Kalan Elemanların Boyutlandırılmasında Kullanılacak Minimum Yatay Kuvvet | HDR | V_b | t | 295 |
| | LRB | | | 233 |
| | FPS | | | 251 |
| İzolasyon Sisteminin Üstünde Bulunan Elemanların Boyutlandırılmasında Kullanılacak Minimum Yatay Kuvvet | HDR | V_s | t | 148 |
| | LRB | | | 117 |
| | FPS | | | 126 |

6.3 İzolasyonlu Yapıların Mesnetlerinin Tasarlanması

Kısım 6.2’de belirlenen şartlar doğrultusunda Bölüm 3’te detaylı olarak anlatılan kriterlere uygun olarak her bir izolasyon sistemi için köşe, kenar ve orta kolonların altına monte edilecek mesnetler tasarlanmıştır. Tasarlanan mesnetlerin özellikleri Tablo 6.6, Tablo 6.7 ve Tablo 6.8’de verildiği gibidir.

Tablo 6.6 Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerin özellikleri

| Özellik | Sembol | Birim | | | |
|------------------------------------------------------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|
| Mesnet Yeri | | | Köşe | Kenar | Orta |
| Mesnet Adedi | n_{mesnet} | | 4 | 8 | 4 |
| Düşey Yük (ÖLÜ+HRK) | | t | 64 | 106 | 169 |
| Düşey Yük (ÖLÜ+0,3*HRK) | | t | 57 | 90 | 139 |
| Tasarım Şekil Değişimi | γ | - | 1 | 1 | 1 |
| Kauçuğun Düşük Şekil Değişimindeki Kayma Modülü | $G_{düş}$ | t/m ² | 100 | 100 | 100 |
| Kauçuğun Yüksek Şekil Değişimindeki Kayma Modülü | $G_{yük}$ | t/m ² | 60 | 60 | 60 |
| Kauçuk Tabaka Çapı | d | m | 0,53 | 0,55 | 0,58 |
| Kauçuğun Plandaki Kesit Alanı | A | m ² | 0,221 | 0,238 | 0,264 |
| Toplam Kauçuk Tabaka Kalınlığı | t_r | m | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Bir Adet Kauçuk Tabaka Kalınlığı | t | m | 0,013 | 0,014 | 0,015 |
| Şekil Faktörü | S | - | 10 | 10 | 10 |
| Sıkıştırılmayan Durumdaki Basınç Modülü | E_c' | t/m ² | 60000 | 60000 | 60000 |
| Malzemenin Hacim Modülü | K | t/m ² | 200000 | 200000 | 200000 |
| Kompozit Elemanın Basınç Modülü | E_c | t/m ² | 46154 | 46154 | 46154 |
| Düşey Rijitlik | K_v | t/m | 40730 | 43861 | 48777 |
| Basınç Etkisi Altında Kauçukta Oluşan Kayma Şekil Değişimi | γ_c | - | 0,38 | 0,58 | 0,83 |
| Düşük Şekil Değişimlerdeki Kritik Burkulma Yüğü | $P_{critdüş}$ | t | 519 | 581 | 681 |
| Yüksek Şekil Değişimlerdeki Kritik Burkulma Yüğü | $P_{crityük}$ | t | 312 | 348 | 408 |
| Yüksek Yatay Deplasmanlar Altındaki Stabilitesi | D_{crit} | m | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Tasarım Deplasmanı | D_D | m | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Akma Sonrası Rijitlik | K_2 | t/m | 52,95 | 57,02 | 63,41 |
| Akma Sonrası Rijitlik/Elastik Rijitlik | K_2/K_1 | - | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| Karakteristik Dayanım | Q | t | 2,69 | 2,89 | 3,22 |
| Akma Deplasmanı ($D_y=0,1t$, kabul edildi) | D_y | m | 0,0250 | 0,0250 | 0,0250 |
| Elastik Rijitlik | K_1 | t/m | 160 | 173 | 192 |
| Akma Kuvveti | F_y | t | 4,01 | 4,32 | 4,80 |
| Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 64 | 69 | 76 |
| Toplam Efektif Rijitlik | ΣK_{eff} | t/m | 255 | 549 | 305 |
| Efektif Sönüm Oranı | ξ_{eff} | - | 0,10 | 0,10 | 0,10 |

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------|-----|------|
| Sistemin Toplam Efektif Rijitliği | ΣK_{effsis} | t/m | 1109 |
| Sistemin Efektif Sönümü | ξ_{effsis} | - | 0,10 |

Tablo 6.7 Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin özellikleri

| Özellik | Sembol | Birim | | | |
|------------------------------------------------------------|------------------|---------|--------|--------|--------|
| Mesnet Yeri | | | Köşe | Kenar | Orta |
| Mesnet Adedi | n_{mesnet} | | 4 | 8 | 4 |
| Düşey Yük (ÖLÜ+HRK) | | t | 64 | 106 | 169 |
| Düşey Yük (ÖLÜ+0,3*HRK) | | t | 57 | 90 | 139 |
| Tasarım Şekil Değişimi | γ | - | 1 | 1 | 1 |
| Kauçuğun Düşük Şekil Değişimindeki Kayma Modülü | $G_{düş}$ | t/m^2 | 70 | 70 | 70 |
| Kauçuğun Yüksek Şekil Değişimindeki Kayma Modülü | $G_{yük}$ | t/m^2 | 40 | 40 | 40 |
| Kurşun Akma Dayanımı | f_y | t/m^2 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Kurşun Çekirdek Çapı | d_L | m | 0,080 | 0,082 | 0,090 |
| Kurşun Çekirdeğin Plandaki Alanı | A_L | m^2 | 0,005 | 0,005 | 0,006 |
| Kauçuk Tabaka Çapı | d | m | 0,52 | 0,55 | 0,60 |
| Kauçuğun Plandaki Kesit Alanı | A | m^2 | 0,212 | 0,238 | 0,283 |
| Toplam Kauçuk Tabaka Kalınlığı | t_r | m | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| Bir Adet Kauçuk Tabaka Kalınlığı | t | m | 0,013 | 0,014 | 0,015 |
| Şekil Faktörü | S | - | 10 | 10 | 10 |
| Sıkıştırılmayan Durumdaki Basınç Modülü | E_c' | t/m^2 | 42000 | 42000 | 42000 |
| Malzemenin Hacim Modülü | K | t/m^2 | 200000 | 200000 | 200000 |
| Kompozit Elemanın Basınç Modülü | E_c | t/m^2 | 34711 | 34711 | 34711 |
| Düşey Rijitlik | K_v | t/m | 32050 | 35855 | 42671 |
| Basınç Etkisi Altında Kauçukta Oluşan Kayma Şekil Değişimi | γ_c | - | 0,52 | 0,77 | 1,04 |
| Düşük Şekil Değişimlerdeki Kritik Burkulma Yüğü | $P_{critdüş}$ | t | 373 | 442 | 573 |
| Yüksek Şekil Değişimlerdeki Kritik Burkulma Yüğü | $P_{crityük}$ | t | 213 | 252 | 328 |
| Yüksek Yatay Deplasmanlar Altındaki Stabilitesi | D_{crit} | m | 0,38 | 0,38 | 0,39 |
| Tasarım Deplasmanı | D_D | m | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| Akma Sonrası Rijitlik | K_2 | t/m | 37 | 41 | 49 |
| Akma Sonrası Rijitlik/Elastik Rijitlik | K_2/K_1 | - | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Karakteristik Dayanım | Q | t | 4,96 | 5,22 | 6,36 |
| Akma Deplasmanı | D_v | m | 0,0149 | 0,0140 | 0,0144 |
| Elastik Rijitlik | K_1 | t/m | 369 | 413 | 492 |
| Akma Kuvveti | F_y | t | 5,52 | 5,80 | 7,07 |
| Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 59 | 64 | 77 |
| Toplam Efektif Rijitlik | ΣK_{eff} | t/m | 234 | 512 | 307 |
| Efektif Sönüm Oranı | ξ_{eff} | - | 0,22 | 0,21 | 0,21 |

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------|-----|------|
| Sistemin Toplam Efektif Rijitliği | ΣK_{effsis} | t/m | 1053 |
| Sistemin Efektif Sönümü | ξ_{effsis} | - | 0,21 |

Tablo 6.8 Sürtümlü sarkaç sistem mesnetlerin özellikleri

| Özellik | Sembol | Birim | | | |
|----------------------------------------------|------------------|-------|---------|---------|---------|
| | | | Köşe | Kenar | Orta |
| Mesnet Yeri | | | | | |
| Mesnet Adedi | n_{mesnet} | | 4 | 8 | 4 |
| Düşey Yük (ÖLÜ+HRK) | | t | 64 | 106 | 169 |
| Düşey Yük (ÖLÜ+0,3*HRK) | | t | 57 | 90 | 139 |
| Sürtünme Katsayısı | μ | - | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Yüksek Kayma Hızlarındaki Sürtünme Katsayısı | f_{max} | - | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Düşük Kayma Hızlarındaki Sürtünme Katsayısı | f_{min} | - | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Oran Parametresi | a | sn/m | 50 | 50 | 50 |
| Tasarım Deplasmanı | D_D | m | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| Küresel Yüzeyin Eğrilik Yarıçapı | R | m | 1,55 | 1,55 | 1,55 |
| D_D/R (μ Kts.'dan Büyük Olmalı) | - | - | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| Disk Çapı | d | m | 0,91 | 0,91 | 0,91 |
| Maksimum Düşey Deplasman | δ_v | m | 0,035 | 0,035 | 0,035 |
| Küresel Yüzeyin Yüksekliği | δ | m | 0,068 | 0,068 | 0,068 |
| Düşey Rijitlik | K_v | t/m | 2000000 | 2000000 | 2000000 |
| Akma Sonrası Rijitlik | K_2 | t/m | 37 | 58 | 90 |
| Karakteristik Dayanım | Q | t | 2,87 | 4,52 | 6,97 |
| Akma Deplasmanı (2mm kabul edildi) | D_y | m | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| Elastik Rijitlik ($K_1=Q/D_y+K_2$) | K_1 | t/m | 1471 | 2317 | 3574 |
| Akma Dayanımı | F_y | t | 2,94 | 4,63 | 7,15 |
| Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 50 | 80 | 123 |
| Toplam Efektif Rijitlik | ΣK_{eff} | t/m | 202 | 636 | 491 |
| Efektif Sönüm Oranı | ξ_{eff} | - | 0,17 | 0,17 | 0,17 |

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------|-----|------|
| Sistemin Toplam Efektif Rijitliği | ΣK_{effsis} | t/m | 1329 |
| Sistemin Efektif Sönümü | ξ_{effsis} | - | 0,17 |

6.4 Bilgisayar Programı ile Sismik İzolasyonlu ve Ankastre Mesnetli Yapı Modellerinin Zaman Tanım Alanında Analizi

Bu kısımda SAP2000N bilgisayar programı kullanılarak üç farklı tipteki izolasyonlu yapı modelleri ile ankastre mesnetli yapı modeli zaman tanım alanında analiz edilmiştir. Analizlerde 12 Kasım 1999 Düzce Depremi'nin Bolu kaydı kuzey-güney ivme bileşeni kullanılmış ve her bir mod için binanın sönüm oranı %5 olarak alınmıştır. Kullanılan deprem kaydının özellikleri Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9 Analizlerde kullanılan deprem kaydının özellikleri

| | Birim | |
|------------------|-----------|-------------------------------------|
| Yeri | - | Bolu Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü |
| Deprem büyüklüğü | M_w | 7,2 |
| Maksimum İvme | cm/sn^2 | 739,512 |
| Koordinatlar | - | 40,474N – 31,610E |
| Tarih | | 12/11/1999 16:57:22 (GMT) |
| Yön | | +L Kuzey |
| Veri Adedi | | 5590 |
| Zaman Aralığı | sn | 0,01 |

SAP2000N bilgisayar programı ile yapılan analizlerde, döşemelerin yatay düzlemde rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilmiştir. Serbestlik dereceleri her katta iki yatay yerdeğiştirme ile düşey eksen etrafındaki dönme serbestlik derecesi olmak üzere üç tanedir. Ek dışmerkezlik kat kütle merkezlerinin deprem doğrultusuna dik doğrultudaki kat boyutunun %5'i kadar kaydırılması sonucu elde edilmiştir. Sismik izolasyonlu bina modellerinde kullanılan mesnetler bilgisayar programına nonlineer NLLINK elemanlar olarak Tablo 6.9, 6.10 ve 6.11'de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

Tablo 6.10 HDR tipi sismik izolasyon mesnetlerinin SAP2000 bilgisayar programına tanımlanırken kullanılan temel parametreler ve değerleri

| YÜKSEK SÖNÜMLÜ KAUÇUK | | | | Sembol | Birim | | | |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------------------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| Özellik Adı | | | | | | HDRKOSE | HDRKNR | HDRORTA |
| Tipi | | | | | | Isolator1 | Isolator1 | Isolator1 |
| Toplam Ağırlığı (İzolatörün) | | | | | t | ihmal | ihmal | ihmal |
| Doğrultu | U1 (Düşey) | Lineer | Efektif Rijitlik | K_v | t/m | 40730 | 43861 | 48777 |
| | | Nonlineer | - | - | - | - | - | - |
| | U2 (Yatay) | Lineer | Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 64 | 69 | 76 |
| | | Nonlineer | Rijitlik | K_1 | t/m | 160 | 173 | 192 |
| | | | Akma Dayanımı | F_y | t | 4,01 | 4,32 | 4,80 |
| | | | Akma Sonrası Rijitlik Oranı | K_2/K_1 | - | 0,33 | 0,33 | 0,33 |
| | U2 (Yatay) | Lineer | Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 64 | 69 | 76 |
| | | Nonlineer | Rijitlik | K_1 | t/m | 160 | 173 | 192 |
| | | | Akma Dayanımı | F_y | t | 4,01 | 4,32 | 4,80 |
| | | | Akma Sonrası Rijitlik Oranı | K_2/K_1 | - | 0,33 | 0,33 | 0,33 |

Tablo 6.11 LRB tipi sismik izolasyon mesnetlerinin SAP2000 bilgisayar programına tanımlanırken kullanılan temel parametreler ve değerleri

| KURŞUN ÇEKİRDEKLİ KAUÇUK | | | | Sembol | Birim | | | |
|-------------------------------------|------------|-----------|-----------------------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| Özellik Adı | | | | | | LRBKOSE | LRBKNR | LRBORTA |
| Tipi | | | | | | Isolator1 | Isolator1 | Isolator1 |
| Toplam Ağırlığı (İzolatörün) | | | | | t | ihmal | ihmal | ihmal |
| Doğrultu | U1 (Düşey) | Lineer | Efektif Rijitlik | K_v | t/m | 32050 | 35855 | 42671 |
| | | Nonlineer | - | - | - | - | - | - |
| | U2 (Yatay) | Lineer | Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 59 | 64 | 77 |
| | | Nonlineer | Rijitlik | K_1 | t/m | 369 | 413 | 492 |
| | | | Akma Dayanımı | F_y | t | 5,52 | 5,80 | 7,07 |
| | | | Akma Sonrası Rijitlik Oranı | K_2/K_1 | - | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| | U2 (Yatay) | Lineer | Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 59 | 64 | 77 |
| | | Nonlineer | Rijitlik | K_1 | t/m | 369 | 413 | 492 |
| | | | Akma Dayanımı | F_y | t | 5,52 | 5,80 | 7,07 |
| | | | Akma Sonrası Rijitlik Oranı | K_2/K_1 | - | 0,10 | 0,10 | 0,10 |

Tablo 6.12 FPS tipi sismik izolasyon mesnetlerinin SAP2000 bilgisayar programına tanımlanırken kullanılan temel parametreler ve değerleri

| SÜRTÜNME Lİ SARKAÇ SİSTEM | | | Sembol | Birim | | | | |
|------------------------------|--------------------------|-----------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| Özellik Adı | | | | | FPSKOSE | FPSKNR | FPSORTA | |
| Tipi | | | | | Isolator2 | Isolator2 | Isolator2 | |
| Toplam Ağırlığı (İzolatörün) | | | | t | ihmal | ihmal | ihmal | |
| Doğrultu | U1 (Dişey) | Linear | Efektif Rijitlik | K_v | t/m | 2000000 | 2000000 | 2000000 |
| | | Nonlinear | Rijitlik | K_v | t/m | 2000000 | 2000000 | 2000000 |
| | U2 (Yatay) | Linear | Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 50 | 80 | 123 |
| | | Nonlinear | Rijitlik | K_1 | t/m | 1471 | 2317 | 3574 |
| | | | DHS Kts. | f_{min} | - | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| | | | YHS Kts. | f_{max} | - | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| | | | Oran Parametresi | a | sn/m | 50 | 50 | 50 |
| | Kayma Yüzeyinin Yarıçapı | R | m | 1,55 | 1,55 | 1,55 | | |
| | U2 (Yatay) | Linear | Efektif Rijitlik | K_{eff} | t/m | 50 | 80 | 123 |
| | | Nonlinear | Rijitlik | K_1 | t/m | 1471 | 2317 | 3574 |
| | | | DHS Kts. | f_{min} | - | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| | | | YHS Kts. | f_{max} | - | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| | | | Oran Parametresi | a | sn/m | 50 | 50 | 50 |
| | Kayma Yüzeyinin Yarıçapı | R | m | 1,55 | 1,55 | 1,55 | | |

6.5 Analiz Sonuçları

Her bir sistem için elde edilen analiz sonuçları Tablo 6.13’de verilmiştir.

Tablo 6.13 Karşılaştırmalı analiz sonuçları

| | Birim | Kat | Ankastre Mesnetli Analiz | Sismik İzolasyonlu Analiz | | |
|-----------------------------------------------------|-------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|--------|--------|
| | | | | HDR | LRB | FPS |
| Kat Ağırlık Merkezi Maksimum Yerdeğiştirme | m | 4 | 0,1629 | 0,2346 | 0,1518 | 0,1566 |
| | | 3 | 0,1352 | 0,2322 | 0,1491 | 0,1528 |
| | | 2 | 0,0894 | 0,2276 | 0,1445 | 0,1504 |
| | | 1 | 0,0365 | 0,2202 | 0,1379 | 0,1479 |
| | | taban | - | 0,2113 | 0,1315 | 0,1424 |
| Maksimum Kat İvmeleri | m/sn ² | 4 | 16,97 | 6,82 | 8,77 | 10,75 |
| | | 3 | 14,34 | 7,39 | 8,18 | 8,72 |
| | | 2 | 8,64 | 7,82 | 7,70 | 7,16 |
| | | 1 | 5,98 | 7,53 | 7,15 | 7,20 |
| | | taban | - | 7,07 | 8,17 | 7,48 |
| Taban Kesme Kuvveti | t | | 879 | 241 | 176 | 213 |
| 1. Mod Periyodu | sn | | 0,74 | 2,44 | 2,49 | 2,24 |

6.6 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan bilgisayar analizi sonucunda ankastre mesnetli yapının 1. doğal titreşim periyodu 0,74 sn olarak hesaplanırken, izolasyonlu yapıların periyotları HDR’li sistem için 2,44 sn, LRB’li sistem için 2,49 sn, FPS’li sistem için ise 2,24 sn değerlerine yükselmiştir.

Sismik izolasyonlu yapı modelleri taban seviyesinde 13-21 cm arasında yerdeğiştirmiş, buna karşın görelî kat ötelemelerinin ankastre mesnetli yapı modeline göre çok düşük değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

Ankastre mesnetli yapıda, yer hareketinden dolayı yapıya aktarılan ivmeler, yapı temelinden üst katlara doğru belirgin ölçüde artmaktadır. Sismik izolasyonlu yapı modellerinde bu ivmeler üst katlara doğru önemli bir artış göstermemektedir. Bina içerisinde oluşan maksimum ivme değeri ankastre mesnetli yapı modeline göre %37 - %54 oranlarında azalmıştır.

Taban kesme kuvveti değeri sismik izolasyonlu yapılarda ankastre mesnetli yapı modeline göre %73 - %80 oranlarında azalmıştır.

6.7 Sismik İzolasyonlu Yapıların Yaşanmış Depremlerdeki Performansları

Özellikleri birinci bölümde verilen birkaç sismik izolasyonlu binanın ABD'nin Los Angeles şehri yakınlarında meydana gelen 6,8 büyüklüğündeki 17 Ocak 1994 Northridge ve Japonya'nın Kobe şehri yakınlarında meydana gelen 7,2 büyüklüğündeki 17 Ocak 1995 Kobe (Hyogo-ken Nanbu) depremleri esnasındaki davranışları detaylı olarak incelenebilmiştir.

Northridge Depremi'nin merkez üssüne 36 km uzaklıkta bulunan University of Southern California Teaching Hospital (USC) binasının çevresindeki bölgede pik yer ivmesi 0,493g olarak ölçülmüştür. Bina temelinin altında ölçülen pik yer ivmesi değeri 0,366g'dir. Buna karşın bina içerisindeki pik ivmeler, izolasyon seviyesinin hemen üzerinde 0,13g, çatı katında ise 0,21g olarak ölçülmüştür. Bu deprem esnasında, çevredeki binalarda hasarlar meydana gelirken izolasyon sistemi işlevini etkin bir biçimde yerine getirdiğinden USC binasında hiçbir hasar oluşmamıştır. Northridge depreminden etkilenen diğeri bir sismik izolasyonlu bina ise depremin merkez üssünden 39 km uzaklıktaki Fire Command and Control Facility binasıdır. Deprem esnasında binanın temelinin altında pik yer ivmesi 0,22g , izolasyon seviyesi üzerinde bina içerisindeki ivme değeri ise 0,35g olarak ölçülmüştür. Depremden

sonra binada yapılan incelemeler sonucunda izolasyon sisteminin dışında kalan binanın giriş kısmının betonarme bir döşemeyle sonradan binaya bağlandığı tespit edilmiştir. Bu bağlantının binanın doğu-batı yönündeki hareketini engellemesiyle binanın içerisinde ölçülen ivme değerlerinin beklenenden yüksek değerlerde olmasına yol açtığı tespit edilmiştir (Clark, 1996; Kelly,1998 ; Kelly, 2001).

Kobe depreminin merkez üssüne 35 km uzaklıktaki sismik izolasyonlu West Japan Postal Center (WJPC) binası deprem esnasında çok iyi bir performans göstermiştir. Bina temelinin altında pik yer ivmesi değerleri 0,306g (X yönü), 0,268g (Y yönü) olarak ölçülmüştür. İzolasyon seviyesinin hemen üzerindeki ivme değerleri 0,108g (X yönü), 0,059g (Y yönü), çatı katında ise 0,105g (X yönü), 0,076g (Y yönü) olarak ölçülmüştür. Deprem esnasında izolatörlerin pik deplasmanı 10 cm olarak rapor edilmiştir. Binada depremden sonra yapılan incelemelerde hiçbir hasar oluşmadığı tespit edilmiştir. Deprem merkez üssüne WJPC binasıyla aynı mesafede olan Matsumura Gumi Laboratory binası Kobe Depremi'nde kendisinden beklenen performansı sergileyememiştir. Bina temelinin altındaki pik yer ivme değerleri 0,266g (doğu-batı), 0,279g (kuzey-güney) olarak ölçülmüştür. İzolasyon seviyesinin üzerindeki ivme değerleri 0,256g (doğu-batı), 0,148g (kuzey-güney), çatı katında ise 0,274g (doğu-batı), 0,200g (kuzey-güney) olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerden anlaşılacağı gibi bina tam bir sismik izolasyonlu yapı davranışı göstermediyse de, ankastre mesnetli bir yapı gibi deprem ivmelerinin artışına da sebep olmamıştır. Bu durumun deprem esnasında hava sıcaklığının çok düşük (0 °C) olması nedeniyle kauçuk mesnetlerin rijitliğinin artmasından meydana geldiği düşünülmektedir (Clark, 1996; Clark ve diğer.,1999; Kelly, 2001).

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sunulan çalışmada depreme karşı yapı tasarımında ülkemiz için yeni bir yöntem olan *Sismik İzolasyon Kavramı* incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sismik izolasyonlu yapıların doğal titreşim periyotları 2-3 sn mertebelerinde olmaktadır. Bundan dolayıdır ki periyodu yüksek (yüksek katlı binalar, su kuleleri vb.) yapılarda kullanılması yapı için avantaj sağlamamaktadır. Ayrıca zemin hakim periyodu yüksek, yumuşak zeminler üzerine inşa edilecek binalarda bu sistemlerin kullanılması uygun değildir.
- Sismik izolasyonlu yapılar deprem esnasında izolasyon seviyesinde yüksek yerdeğiştirmeler yapmaktadırlar. Bu tip yapıların mimari tasarımında izolasyon seviyesinde oluşacak yerdeğiştirmeleri engelleyecek detaylar oluşturulmamalıdır.
- Sismik izolasyonlu yapıların içinde yer hareketinden dolayı oluşan ivme değerleri azalmaktadır. Bu özellik sayesinde yapı içindeki cihazlar ve donanımlarda oluşabilecek hasarlar önlenebilmektedir.
- Sismik izolasyonlu yapılarda oluşan taban kesme kuvvetleri azalmaktadır. Bu durum yapıda meydana gelecek kesit tesirlerini taşıyıcı elemanların boyutlarının küçüleceği anlamına gelmektedir. UBC 97 yönetmeliği kesitleri küçültmek yerine sismik izolasyonlu yapılarda taşıyıcı sistem davranış katsayısının ankastre mesnetli yapılara göre daha düşük alınmasını zorunlu kılarak (Örnek: Taşıyıcı sistemi moment aktaran çerçeve olan sismik izolasyonlu bir bina için bu katsayı 2 olarak alınırken, aynı binanın ankastre mesnetli olarak tasarlanması durumunda bu değer 8,5 olarak alınmaktadır) sismik izolasyonlu yapıların elastik olarak dayanması istenen yatay kuvvet değerini arttırmıştır.
- İncelenen deneysel çalışma sonuçlarına, sismik izolasyonlu yapıların yaşanmış depremlerdeki performanslarına ve analitik olarak çözülen örneklerden elde edilen sonuçlara bakılarak doğru tasarlanmış sismik izolasyonlu yapıların depreme karşı etkin bir performans gösterdiği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

A.B.Y.Y.H.Y. (1998). *Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik*. Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi (b.t), <http://www.angora.deprem.gov.tr>

Aiken, I.D., Kelly, J.M., Clark, P.W., Tamura, K., Kikuchi, M. ve Itah, T. (1992). Experimental studies of the mechanical characteristics of three types of seismic isolation bearings. *Proceedings, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid*.

Alhan, C. ve Gavin, H.P. (2005). Reliability of base isolation for the protection of critical equipment from earthquake hazards. *Engineering Structures*, 27, 1435-1449.

Bayülke, N. (2002). *Yapıların deprem titreşimlerinden yalıtımı*. İstanbul: Analiz Basım Yayım.

Chen, W.F. (1997). Passive energy dissipation and control. In *The handbook of structural engineering*. (27.1-27.25). New York: CRS Press.

Chen, W.F. (2003). Base isolation. In *The earthquake engineering handbook* (17.1-17.31). New York: CRS Press.

Chopra, A.K. (1995). *Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering*. New Jersey: Prentice Hall.

Clark, P.W. ve Kelly J.M. (1990). *Experimental testing of the resilient-friction base isolation system, Report No UCB/EERC-90/10*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California.

- Clark, P.W., Higashino, M. ve Kelly, J.M. (1996). *Performance of seismically isolated structures in the January 17, 1994 Northridge Earthquake*. 24 Ocak 2006, <http://nisee.berkeley.edu/library/clark/peterclark.pdf>.
- Clark, P. (1997). *Response of base isolated buildings*. 14 Kasım 2005, <http://www.berkeley.edu/kobe/clark.html>.
- Clark, P.W. , Aiken, I.D. ve Kelly, J.M. (1997). Ongoing studies of the Foothill Communities Law and Justice Center. *Proceedings, Structures Congress XV., Portland*.
- Clark, P.W. ,Aiken, I.D., Nakashima, M., Miyazaki, M. ve Midarikawa, M. (1999). *New design technologies the 1995 Kobe (Hyogo-ken Nanbu) Earthquake as a trigger for implementing new seismic design technologies in Japan*. 15 Kasım 2005, <http://www.siecorp.com/lfe/EERI-LFE.pdf>.
- Clough, R.W. (1993). *Dynamics of structures (2nd ed.)*. Singapore: McGraw-Hill.
- Connor, J.J. (2003). *Introduction to structural motion control*. New Jersey: Pearson Education.
- Constantinou, M.C. (2004). *Friction pendulum double concave bearing technical report*. 20 Mayıs 2005, <http://nees.buffalo.edu/docc/dec304/FP-DC%20Report-DEMO.pdf>.
- DIS (b.t.), <http://www.dis-inc.com>
- Earthquake Protection Systems Inc. (b.t), <http://www.earthquakeprotection.com>
- FEMA-273 (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington: Federal Emergency Management Agency.

- FEMA-274 (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA-356 (2000). *Prestandart and commentary for seismic rehabilitation of buildings*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- Griffith, M.C., Kelly, J.M. ve Aiken, I.D. (1988). A displacement control and uplift restraint device for base isolated structures. *Proceedings, Ninth World Conference On Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto*.
- HITEC (1999). *Summary of evaluation findings for the testing of seismic isolation and energy dissipation devices*. 07 Mayıs 2005, <http://www.cerf.org/hitec/news.html>.
- Jangid, R.S. ve Kelly, J.M. (2001). Base isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 691-707.
- Jangid, R.S. (2004). Optimum friction pendulum system for near-fault motions. *Engineering Structures*, 27, 349-359.
- Kasımzade, A.A. (2004). *Yapı dinamiği (2. Baskı)*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Kelly, J.M. (1981). *Control of response of piping systems and other structures by base isolation, Report No UCB/EERC-81/01*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California.
- Kelly, J.M. (1982). *The influence of base isolation on the seismic response of light secondary equipment, Report No UCB/EERC-81/17*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California.
- Kelly, J.M. (1998). *Base isolation: Origins and development*. 14 Kasım 2005, <http://www.berkeley.edu/lessons/kelly.html>.

- Kelly J.M. (1999). The role of damping in seismic isolation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 3-20.
- Kelly, T.E. (2001). *Base isolation of structures: Design guidelines*. 20 Ocak 2005, <http://www.holmesgroup.com/designguide.html>.
- Kikuchi, M. ve Aiken I.D. (1997). An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.26, no.2.
- Kitagawa, Y. ve Midarikawa, M. (1997). Seismic isolation and passive response-control buildings in Japan. *Smart Mater. Struct.*, 7, 581-587.
- Lee, G.C., Kitane, Y ve Buckle I.G. Literature Review of the observed performance of seismically isolated bridges. 26 Ocak 2006, <http://buffalo.edu/publications/resaccam/01.SP01/rpa.pdf/06lee-bridges.pdf>.
- Mokha, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M. ve Zayas, V.A. (1991). Experimental study of friction-pendulum isolation system. *Journal of Structural Engineering*, vol.117, no.4, pp1201-1217.
- Mokha, A., Constantinou, M.C. ve Reinhorn, A.M. (1993). Verification of friction model of teflon bearings under triaxial load. *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, no.1, pp. 240-261.
- Mostaghel, N. ve Kelly, J.M. (1987). *Design procedure for R-FBI bearings*, , Report No UCB/EERC-87/18. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California.
- Naeim, F. (1989). Design of structures with seismic isolation. In *The seismic design handbook* (413-438). New York: Chapman & Hall.

- Naeim, F. ve Kelly, J.M. (1999). *Design of seismic isolated structures fom theory to practice*. NY: John Wiley & Sons.
- Nakashima, M., Pan, P. Zamfirescu, D. ve Weitzmann, R. (2004). Post-Kobe approach for design and construction of base-isolated buildings. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 4, 259-264.
- Othman, A.B. (2000). Property profile of laminated rubber bearing. *Polymer Testing*, 20, 1435-1449.
- Paz, M. (1997). *Structural dynamics theory and computation (4th ed)*. NY: Chapman & Hall.
- Robinson, W.H. (2000). Seismic isolation of civil buildings in New Zealand. *Prog. Struct. Engng. Mater*, 2, 328-334.
- Tezcan, S.S. ve Cimilli S. (2002). *Seismic base isolation*. İstanbul: Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları.
- Tezcan, S.S. ve Erkal A. (2002). *Seismic base isolation and energy absorbing devices*. İstanbul: Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı Yayınları.
- Tsai, H.C. ve Hsueh, S.J. (1999). Mechanical properties of isolation bearings identified by a viscoelastic model. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 53-74.
- Tsai, H.C. ve Kelly, J.M. (2005). Buckling load of seismic isolators affected by flexibility of reinforcement. *International Journal of Solids and Structures*, 42, 255-269.
- UBC 97. *1997 Uniform Building Code Volume 2*. Whittier: International Conference of Building Officials.

University of California Berkeley (b.t.), <http://www.nisee.berkeley.edu>

Williams, A. (2000). Seismically isolated buildings. In *The seismic design of buildings and bridges* (147-148). Austin: Engineering Press.

Wongprasert, N. (2001). *Development of adaptive base isolation systems for seismic response control of structures*. Washington State University, Washington.

Zayas, V.A., Low, S.S. ve Mahin, S.A. (1987). *The FPS earthquake resisting system: Experimental report, Report No UCB/EERC-87/01*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California.

Zayas, V.A., Low, S., Bozzo, L. ve Mahin, S.A. (1989). Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system, Report No UCB/EERC-89/09, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California.

Zhou, F.L. (2001). Seismic isolation of civil buildings in the People's Republic of China. *Prog. Struct. Engng. Mater.*, 3, 268-276.