

# 論文 RC 建造物の耐震補強としての履歴エネルギー消費設備に関する解析的研究

Oscar Lopez-Batiz\*<sup>1</sup>

要旨：RC 建造物が古い基準で設計された場合、現代的な基準で設計された場合と RC 建造物に耐震補強として履歴エネルギー消費設備が利用された場合の三つのケースを 1 算点系にモデル化し、弾塑性応答解析を行う。パラメトリック解析により建造物の被害度を基づいて、履歴エネルギー消費設備が RC 建造物に及ぼす影響について検討した。その結果をもとに、建造物の許容塑性率及び最大変位による、履歴エネルギー消費設備の影響及び利用可能性について述べる。その結果、いずれの地震波に対しても固有周期が 1.5 秒以上の建造物には履歴エネルギー消費設備の有効性が少ない。

キーワード：履歴エネルギー消費設備、1 質点系、弾塑性地震応答、耐震補強

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 建造物が古い基準で設計された場合、現代的な基準で設計された場合と RC 建造物に耐震補強として履歴エネルギー消費設備 (以下で EDD と呼ぶ) が利用された場合の三つのケースを 1 算点系にモデル化し、弾塑性応答解析を行う。パラメトリック解析により建造物の被害度を予想した、EDD が RC 建造物に及ぼす影響について検討する。その結果をもとに、建造物の許容塑性率及び最大変位による、EDD の影響及び利用可能性について述べる。

本研究では、RC 建造物に耐震補強法として EDD が建造物の被害度をおさえるために有効な方法かどうかを検討することが目的である。

## 2. 解析方法

RC 構造が基本モードで振動して全体破壊機構を形成すると考えれば、その主な応答を 1 質点系に縮約して表わすことができる<sup>1)</sup>。そこで、建造物に許容できる塑性率を設定した時に必要な耐力を求めて、各 1 算点系の水平耐力を決定し、1 自由度系非線形地震応答解析を行った。

### 2.1 復元力及び履歴特性

本研究の非線形形応答解析では以下の履歴モデル

及び復元力特性を使用する。復元力特性は、RC 建造物の静的漸増荷重解析を参考に、ひび割れ点及び降伏点で剛性が変化する Trilinear 形とした。履歴モデルは耐力劣化を考慮する武田スリップモデル<sup>2, 3)</sup>を用いた (Fig. 1)。

解析で考慮した建造物は三つのケースである。ケース 1 は古い基準で設計された等価粘性減衰係数の少ない ( $heq=0.10$ ) RC 建造物、ケース 2 は現代的な基準で設計された  $heq$  の大きい ( $heq=0.18$ ) RC 建造物、そしてケース 3 は耐震補強として EDD が利用された  $heq$  が増加された ( $heq=0.30$ ) RC 建造物である。

ケース 1 と 2 の復元力特性は第 1 折れ点と第 2 折れ点の耐力比 ( $F_c/F_y$ ) を 1/3、初期弾性剛性と降伏点の割線剛性 ( $F_cD_y/D_cF_y$ ) を 1/3、降伏後剛性 ( $K_u$ ) を降伏点剛性の 1/10 とした。ケース 3 の場合ではブレースと EDD の影響で復元力特性が Tetralinear 型になる (Fig. 2)。今研究の一つの仮定はケース 3 の復元力特性も Trilinear 型として使用し、 $F_c/F_y=1/2$ 、 $F_cD_y/D_cF_y=1/2$ 、 $K_u$  はケース 1 と 2 と等しくした。系の初期剛性周期を 0.1 秒から 5.0 秒まで、0.15 秒刻みで変化させた。

\*1 CENAPRED、メキシコ国立防災センター、研究員 工博 (正会員)

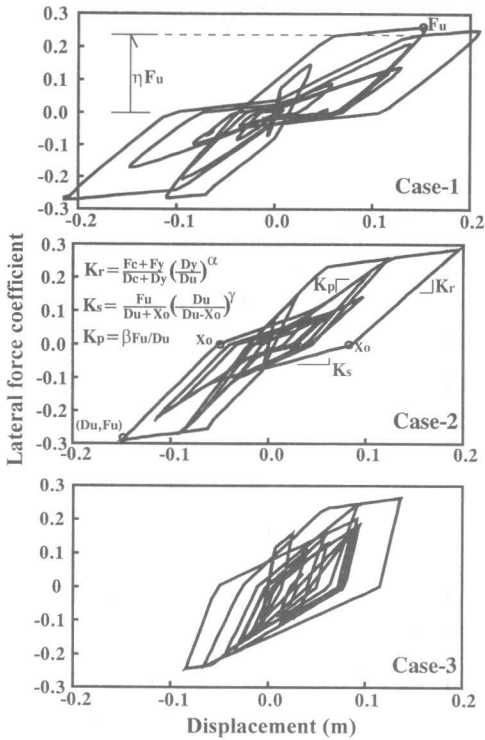


Fig.1 Hysteresis models

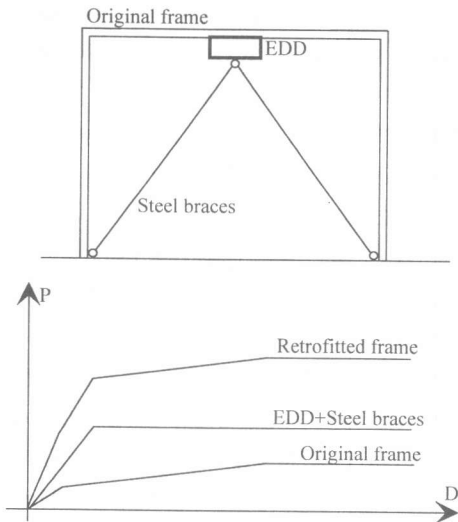


Fig.2 Skeleton curve and the structural system considered

耐力劣化を考慮する武田スリップモデルの履歴特性を定義するパラメータとして、各ケースの応答塑性率が2程度の場合、上記に述べた heqの値になるように、Table-1 に示す値を使った。ケー

Table-1 Parameters of each structural model

Parameter	Case-1	Case-2	Case-3
$\alpha$	0.50	0.50	-1.00
$\beta$	1.00	1.00	1.00
$\gamma$	2.00	1.00	0.00
$\eta$	0.95	1.00	1.00
heq	0.10	0.18	0.30

ス1の場合では剪断及び付着割裂の影響で塑性領域で5%の耐力劣化を考慮し、顕著なスリップ型になる。ケース2の場合では現代的なRC構造物を表わすために耐力劣化がなく、曲げ及び剪断ひび割れの影響で若干スリップ型になる。ケース3の場合ではEDDとRC部材の補強の影響で耐力劣化及びスリップがなく、普通の武田モデルになる<sup>2, 4, 5, 6)</sup>。ケース3ではブレースとEDDの補強のために構造物の初期剛性及び水平耐力が増加する。本研究では、両パラメータの増加量は25%とした。

## 2.2 入力地震波

地震波は、広い周波数領域で大きな応答を示す El Centro 1940 (NS)と、長周期で著しい卓越周期を有する Mexico City-SCT 1985 (EW)、及びこの二つ地震波の中間的性質を示す Taft 1952 (S6 9E)、Hachinohe 1968 (EW)と Miyagi-Tohoku 1978 (NS)、などの記録地震波を用いた。地震波の一般的な特性を Table-2 に示す。

Table-2 Characteristics of the ground motion records

Record	Tpmax (s)	t <sub>d</sub> (s)	a <sub>max</sub> (gal)
El Centro	0.46	0 - 20	342
Taft	0.44	0 - 20	176
Hachinohe	0.35	0 - 20	183
Tohoku	0.98	0 - 20	258
SCT	2.00	35 - 70	168

Tpmax: period where the maximum spectral acceleration is reached

t<sub>d</sub>: length of the record considered for analysis

a<sub>max</sub>: maximum acceleration of the record

## 2.3 地震応答解析法

応答解析の数値積分は、Newmark-β法<sup>7)</sup>(β=1/6)を用い、各時刻で力の釣合いと復元力特性を満たす反復計算を行い、数値積分の時間刻みは弾性周期の1/20あるいは地震波記録の時間刻みの

小さい方とした。減衰は、弾性時の減衰定数を 0.05 とし、瞬間剛性比例型とした。

### 3. 解析結果と構造物特性の影響

構造物の設計では最大応答、変位及び塑性率のみに関心が寄せられるが、大きな振幅で振動する回数も重要な検討項目であろう。そのうえ、現代の耐震構造設計の考え方では、地震時に生じる構造的損傷を抑えることが重要である。そこで、地震応答時損傷度を Park 他<sup>9)</sup> の損傷定数 (DMI<sub>PA</sub> 以下の式(1)) に基づいて、塑性率と累積消費エネルギーよりも最大変位、累積変位を考慮して、以下の式(2)のように損傷定数 (DMI<sub>PAM</sub>) として定義する：

$$DMI_{PA} = [\mu_{dmax} / \mu_{du}] + \beta [NE_{HU} / \mu_{du}] \quad (1)$$

$$DMI_{PAM} = [\delta_m / \delta_u] + \beta [\delta_a / \delta_u] \quad (2)$$

ここに、 $\mu_{dmax}$ ：地震応答の最大塑性率、 $\mu_{du}$ ：許容塑性率、 $\beta$ ：実験を基に定める定数、 $NE_{HU}$ ：降伏点（耐力と変位）で基準化する塑性領域で生じさせた累積エネルギー、 $\delta_m$ ：最大変位、 $\delta_u$ ：許容変位、 $\delta_a$ ：累積変位。

本研究で比較的な検討するパラメータは地震応答の最大応答塑性率、最大変位と累積変位の三つのパラメータについて述べる。

#### 3.1 最大応答塑性率スペクトルに関する考察

ケース3において構造物の剛性と強度が増すということは、最大応答塑性率 ( $\mu_{dmax}$ ) の変化は非常に重要であるといえる。例えば、Fig. 3 に示すように、ケース1のような繰り返し荷重による耐力劣化モデルにおいては、短周期の領域で最大応答塑性率は一般に大きくなる。一方、ケース3のモデルにおいては、最大応答塑性率は非常に小さくなる。ケース2のモデルは良好な挙動を示す RC 構造物なので、最大応答塑性率は設計用スペクトルに用いられた塑性率（本研究においては  $\mu_{du} = 2$ ）に近い値となっている。

#### 3.2 最大変位スペクトルに関する考察

部材レベルと構造物全体の損傷度が変位量に直接左右されることを考えると、EDDのような補強部材を使用しても変形にほとんど変化がない場合

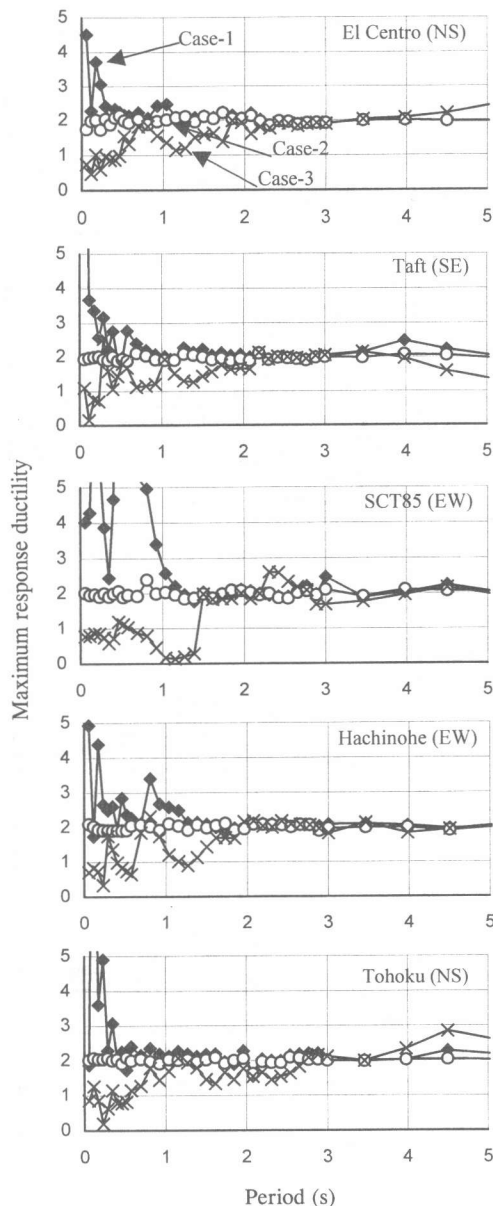


Fig.3 Maximum ductility responses for each model considering the five records

は、このような補強部材は有功ではないといえる。つまり、補強部材を除いた本来の構造部材は同等の変位量によって同等の損傷を受けるということである。

Fig. 4には弾性変位スペクトルと最大塑性変位 ( $\delta_m$ ) スペクトルを示す。弾性変位スペクトルでは、粘性減衰が大きいほど変位が小さくなるこ

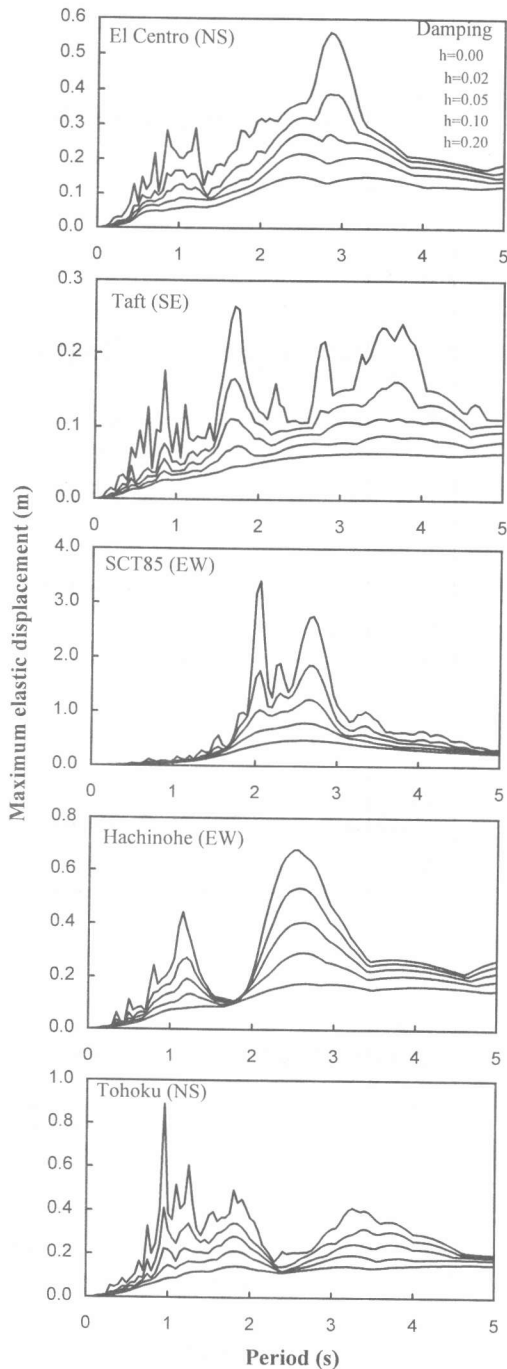


Fig.4(a) Elastic displacement response spectrum

とが明かである。それは、すべての地震波において0.8秒以上の長周期領域で顕著であるが、一方で地震波に関わらず弾性変位応答にあまり変化がない周期領域があることもわかる。

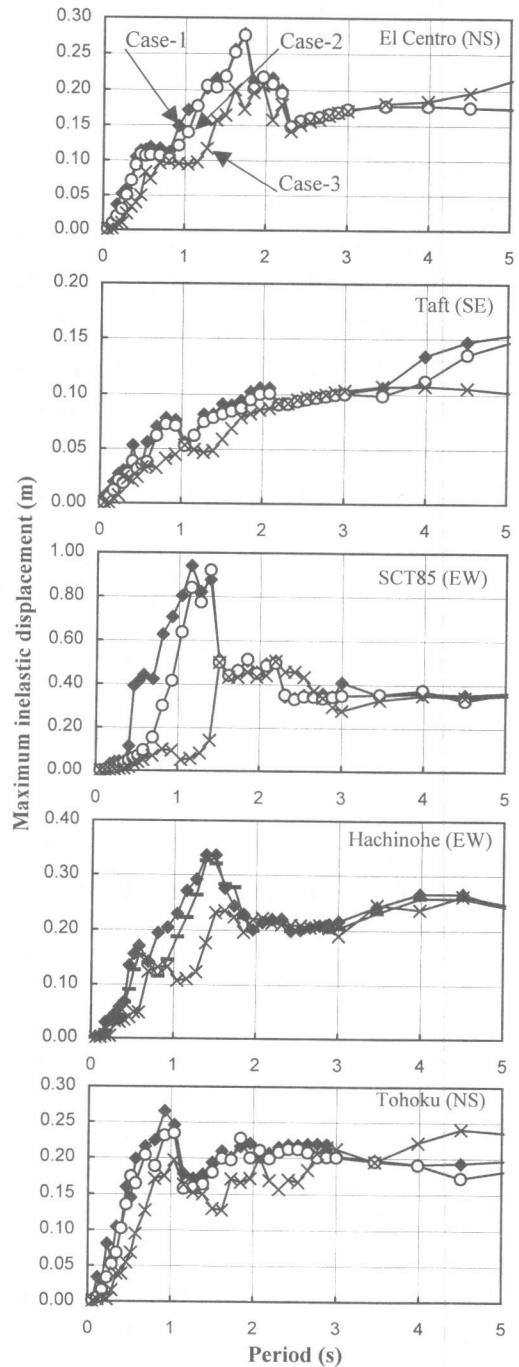


Fig.4(b) Inelastic displacement response spectrum

最大塑性変位スペクトルにおいて三つの構造モデルを比べてみると、弾性変位スペクトルで得られた結果とは逆の挙動が見られる。Tohokuの地震波を除いて、その他の地震波に対するスペクトル

では、2.0秒以上の長周期領域において最大変位応答は平均して10%以下の変化を示している。2.0秒以下の周期領域では、最大塑性変位の差ももっと顕著になるが、EDD補強されたRC構造物(ケース3)においてはEDDのないRCモデル(ケース1、2)に比べて一般に小さくなっている。粘性減衰のみを変化させて得られた弾性応答結果とは逆に、RC構造物におけるEDD補強の有無は、最大塑性変位量に1.5秒以上の周期領域において25%以下の、1.5秒以下の周期領域において50%以下の変化をもたらしている。これは長周期領域において100%に近い顕著な変動が見られた弾性変位スペクトルの場合とはまったく違った結果である。

また、検討されたケースの最大塑性応答結果はランダムに変化しており、入力波との相関関係は、弾性応答スペクトルの場合と違って、単純には求められないことがわかった。しかしながら、EDDを導入した場合の最大塑性変位の変化率は、弾性加速度スペクトルの卓越周期(Table-2における $T_{pmax}$ の値)より少し短い周期においてきわだっている傾向があるといえる。Tohoku波を考慮した場合、これとは異なる結果となっている。

RC構造物における補強部材としてのEDDの有効性は設計用入力波の性質に大きく依存することが明かである。さらに本研究においては、最大入力加速度と地震エネルギーをそれぞれの地震波の周期別に基準化してはいない。この二つのパラメータの影響は今後の研究課題となる。

### 3.3 累積変位スペクトルに関する考察

先に述べたように、構造物の変位はその損傷レベルを知るための重要なパラメータとなりうる。しかしながら、最大変位のみを考慮することは、構造物が最大変位に達するような繰り返し荷重を受けた可能性を考えないことであり、単純荷重で最大変位に達した構造物よりも繰り返し荷重によって最大変位に達した構造物の方が大きな損傷を受けることを無視することになる。以上の理由により、累積変位( $\delta_a$ )の大きい構造物は、累積変位の小さいそれに対して大きな被害を受けるこ

とを仮定して、Fig. 5に示す累積変位スペクトルをも検討した。

累積変位スペクトルは最大塑性変位スペクトルと同様な挙動を示すことが明らかになった。また、特にEl CentroとHachinoheの場合、長周期領域においてはほとんど応答結果に差がないのに比べ、

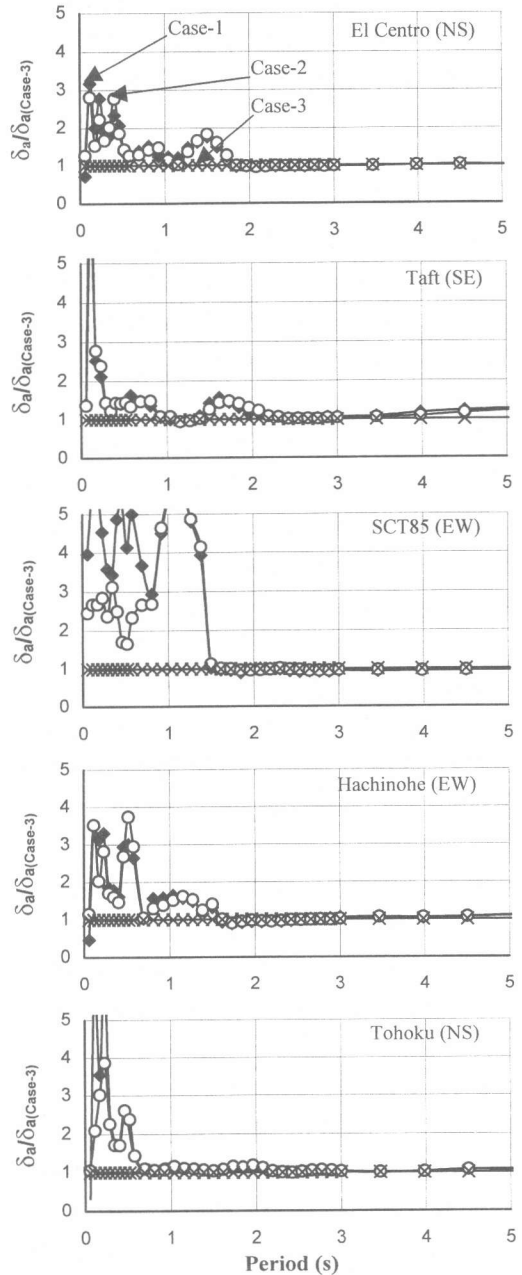


Fig.5 Accumulated displacement ( $\delta_a$ ) normalized with respect to the  $\delta_a$  for Case-3

短周期領域においてはそれが大きくなることがわかった。さらに、Tohokuでは0.8秒以下の周期において、ケース1、2とケース3の結果の違いが大きくなる。これは、周期2.0秒まで大きな差の見た最大塑性変位スペクトルでの結果とは非常に異なっている。

もし累積変形が"low fatigue"と比例するのであれば、低周期構造物におけるEDDの使用は累積変形を大きく減少させ、損傷を抑えることが可能である。

#### 4. 結論

本研究では許容変位塑性率を2とした場合の一質点弾塑性モデルを用いて、繰り返し加重に対して良好な挙動を示すRC構造物、良好でない挙動を示すRC構造物、そしてEDD補強されたRC構造物の比較を行った。

得られた結果により、塑性率が2であるRC構造物における補強部材としてのEDDの使用は、主に固有周期が1.5秒以下の構造物に薦められることがわかった。それ以上の周期領域においては、最大変位と累積変位はEDDの有無に関わらず変化が見られなかった。つまり、EDDを使用しても構造部材の損傷量は変わらないということである。さらに、補強用費用を大きく増加させることなく最大変位量を抑えるために必要な剛性と強度を知るためには弾塑性解析を行うことが推奨される。

謝辞：この研究は、著者はJapan Science and Technology CorporationのSTAフェローシップ制度で1998年の7月～10月までに建設省建築研究所の第3研究部で研究させて頂いた成果である。

#### 参考文献：

- 1)塩原等・小谷俊介・青山博之、縮約モデルによる構造物の弾塑性応答解析、第28回構造工学シンポジウム、pp.225-236、1985.3
- 2)Takeda, T., Sozen, M. and Nielsen, N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes. Journal, Structural Divisio

- n, ASCE, Vol.96, No. ST12, 1970
- 3)Lopez, O.・小谷俊介・青山博之、骨組の非線形応答に及ぼす部材履歴形状の影響、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.12, No.2, pp.113-118, 1990.6
- 4)滝口泰・田才晃・益夫潔・太田寛、粘弾性ダンパーを用いた既存鉄筋コンクリート造骨組の耐震補強に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.20, No.3, pp.147-1152, 1998.6
- 5)勝俣英雄・関松太郎・隈沢文俊・岡田恒男、既存鉄筋コンクリート造架構の靱性抵抗型鉄骨ブレースによる耐震補強、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.11, No.2, pp.263-268, 1989.6
- 6)Aguilar Raul, Study on the behavior of shear panel type energy disipation devices, Master Thesis submitted at Graduate Division of the Faculty of Engineering, UNAM, Mexico. June, 1998. (in spanish)
- 7)Newmark, N.: A method for computation for structural dynamics. Journal, Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.85, No. EM3, 1959
- 8)Park, Y. J., Ang, A. H. and Wen, Y. K., Damage-limiting aseismic design of buildings, Earthquake Spectra, Vol.3, No.1, pp.1-26. May, 1987