



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Détermination du point de performance des portiques en B.A par la méthode statique non linéaire pushover

Determination of the performance point of reinforced concrete frames using the nonlinear static method pushover

El Ghoulbzouri Abdelouafi ^{*a}, *El Alami Zakaria* ^a, *El Hannoudi Sabrina* ^a

^aGC/GE, ENSAH, Université Mohammed Premier, Al Hoceima, Maroc

ARTICLE INFO

Article history:

Received : 24 June 2014

Received : 12 October 2014

Accepted : 08 November 2014

Mots clés :

Analyse statique non linéaire

Point de performance

Rotule

Site

Keywords:

Nonlinear static analysis

Performance point

Hinge

Site

RESUME

Le but du présent travail consiste à déterminer le point de performance des portiques en mettant l'accent sur l'influence du site sur les dégâts observés, l'emplacement de ce point sur la courbe capacité permettra de prédire le comportement réel du bâtiment en cas de séismes. Cette méthode consiste dans une première étape à appliquer des charges statiques équivalentes d'allure triangulaire sur le portique étudié, le comportement non linéaire de la structure sera défini, la non linéarité de la structure est introduite au moyen de rotules plastiques de flexion et de cisaillement., La seconde étape consiste à trouver la courbe de capacité en transformant respectivement l'effort tranchant à la base et le déplacement du sommet de l'analyse push over à l'accélération et le déplacement correspondant à un système à un seul degré de liberté, finalement les résultats seront discutés.

ABSTRACT

The purpose of this work is determination of the performance point of a frame for different soil type, the location of this point on the curve capacity will predict the behavior of the frame in case of earthquakes, this method consists in a first step to apply static loads on the frame, the non linear behavior of the structure is defined, the nonlinearity of the structure is introduced with the use of plastic hinges, the second step is to find the capacity curve by transforming respectively shear at the base and displacement in the top to acceleration and displacement corresponding to a system of a single degree of freedom, finally results of performance point will be discussed.

* Corresponding author. Tel.: +212 671341858.

E-mail address: e.abdelouafi@hotmail.fr

1 Introduction

L'étude de la vulnérabilité sismique des structures à travers l'analyse statique non linéaire Push over fournit une idée sur leur comportement vis-à-vis des sollicitations sismiques, la présente étude a pour but principal de mettre en évidence l'influence du site sur lequel la structure est construite sur ses performances, l'étude sera effectuée sur un portique de rive d'un bâtiment R+3 supposé existant avant l'adoption du règlement parasismique marocain RPS 2000, les résultats de l'analyse statique non linéaire seront présentés en premier lieu pour un portique construit sur sol rocheux (site S_1), ensuite, les résultats relatifs au même portique construit sur un sol meuble (site S_4) seront présentés. [1, 2]

L'accent sera mis lors de l'étude sur l'évolution des séquences de formation de rotules plastiques et le mécanisme de leur formation, la localisation du point de performance et l'allure des courbes Pushover obtenues permettront de tirer des données nécessaires pour la détermination des degrés de dégâts subis par la structure. [3]

Cet article permettra de trouver une justification des dégâts observés lors du séisme d'Al Hoceima 2004, il constitue un moyen justifiant la nécessité d'adoption des exigences de la conception parasismique, il permet aussi de mettre en évidence l'exactitude des résultats fournis par l'échelle macrosismique européen 98 (EMS98). [4]

2 Caractéristiques du portique étudié et paramètres de l'analyse pushover

2.1 Caractéristiques géométriques et ferrailage du portique

Le portique étudié est un portique de rive d'une structure à 4 étages, la hauteur de tous les étages est fixée à 3 mètres, le nombre de travées du portique est 4, leurs longueurs varient entre 3,55m et 3,85m. Il appartient à une structure supposée construite dans la région d'Al Hoceima avant l'adoption du règlement parasismique, elle est alors sous-dimensionnée.

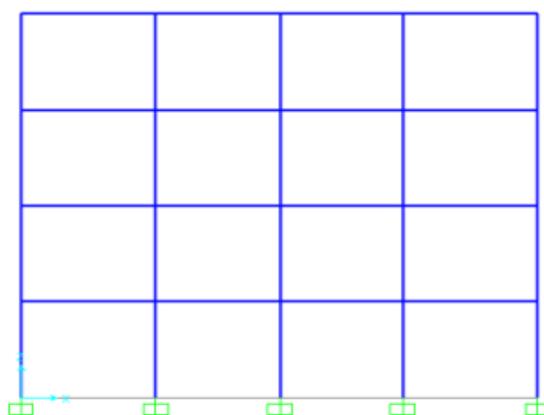


Fig.1 Croquis du portique étudié

Les tableaux 1 et 2 ci-dessous donnent quelques résultats de ferrailage obtenus, ce ferrailage correspond à un dimensionnement statique.

Tableau.1 Ferrailage de la nappe inférieure des poutres du portique de rive

Niveau /position de la poutre	Section	Ferrailage de la nappe inférieure
Etages courants/rive	25×35	2HA14+2HA12= 5,35 cm ²
Etages courants /intermédiaire	25×35	3HA14+3HA12 = 8,01 cm ²
Terrasse/rive	25×35	2HA14=3,08 cm ²
Terrasse/ intermédiaire	25×35	2HA14+2HA12= 5,35 cm ²

Tableau.2 Ferrailage des poteaux du portique de rive

Niveau	Section (cmxcm)	section théorique (cm^2)	Ferrailage réel (section retenue)
RDC	25x25	4	6HA10=4,71 cm^2
Etage1	25x25	4	6HA10=4,71 cm^2
Etage2	20x20	3,2	6HA10=4,71 cm^2
Terrasse	20x20	3,2	6HA10=4,71 cm^2

2.2 Forces statiques équivalentes en site S1

Dans une première hypothèse de l'étude, on propose que la structure est construite sur un sol rocheux, le coefficient du site selon le règlement parasismique marocain est alors $S = 1$. Le calcul des forces statiques équivalentes se fait en calculant le poids de la structure à l'aide de la combinaison de calcul $G+0,2Q$ et en prenant pour vitesse du sol la valeur $v=0,17$ correspondante à la région.

Tableau 3. Forces statiques équivalentes en site S₁

Etage	Force latérale équivalente
RDC	F1=12,86 KN
Niveau 1	F2=25,71KN
Niveau 2	F3=38,57KN
Terrasse	F4=53,4 KN

2.3 Forces statiques équivalentes en site S4

Comme deuxième hypothèse de travail on va supposé que le portique soit construit sur un sol meuble, il s'agit alors d'un site S₄, le calcul conformément à la réglementation marocaine donne les résultats suivants :

Tableau.4 Forces statiques équivalentes en site S₄

Etage	Force latérale équivalente
RDC	F1=23,14 KN
Niveau 1	F ₂ =46,28KN
Niveau 2	F ₃ =69,43KN
Terrasse	F ₄ =96,12KN

2.4 Spectre de réponse sismique correspondant au site S1 et à la région d'Al Hoceima

Le spectre de réponse sismique dépend du type de site ainsi que l'accélération du sol, l'interpolation linéaire des valeurs de C_a et C_v donné par les normes permet d'aboutir aux coefficients sismiques représentant la région et la nature du site. L'interpolation linéaire donne comme résultat:

$$C_a = C_v = 0,18$$

2.5 Spectre de réponse sismique correspondant au site S_4 et à la région d'Al Hoceima

La modification du type de sol cause une grande variation des coefficients sismiques C_a et C_v , ces derniers influencent sur le spectre de réponse élastique et par conséquent sur le point de performance qui traduit le comportement réel de la structure. L'interpolation linéaire dans ce cas donne pour résultats :

$$C_a=0,324 \text{ et } C_v=0,584$$

Ces résultats sont obtenus en combinant entre les codes ATC40 et RPS2000.

3 Résultats de l'analyse Pushover

3.1 Séquences de rotulations plastiques

Les rotules plastiques traduisent le comportement non linéaire de la structure, les niveaux de performance affichés par les rotules lors de l'analyse Push over et l'évolution de la formation des rotules avec l'avancement des étapes de l'analyse permettent de juger le degré de dommages auxquels la structure est soumise ainsi que les parties fragiles qui peuvent connaître plus de dégâts.

L'analyse Pushover effectué à l'aide du logiciel SAP2000 en variant le type de site conduit aux séquences de rotulations résumés dans le tableau suivant : [5, 6]

Tableau 5. Comparaison des séquences de rotulations obtenus pour le portique en site S_1 et en site S_4

Etape de l'analyse	Elément	Types de rotules (site S_1)	Types de rotules (site S_4)
1	Poteau	/	/
	Poutre	1 B	1 B
2	Poteau	6B	6 B
	Poutre	2 B	2 B
3	Poteau	11 B	12 B
	Poutre	2 B	2 B
4	Poteau	12 B	13 B
	Poutre	3 B	3 B
5	Poteau	4 B/10 LS	4 B/11 LS
	Poutre	4 B	4 B
6	Poteau	5 B/5 LS/5 C	5 B/ 2 LS/8 C
	Poutre	4 B	4 B
7	Poteau	5 B/2 LS/8 C	5 B/2 LS/8 C
	Poutre	4 B	5 B
8	Poteau	5 B/1 LS/9 C	5 B/10 C
	Poutre	4 B	5 B
9	Poteau	5 B/ 9 C	5 B/ 10 C
	Poutre	4 B	5 B

Pour mieux comparer les résultats, la figure 2 de la page suivante présente l'emplacement ainsi que le niveau de performance de rotules formées à l'étape 6 de l'analyse.

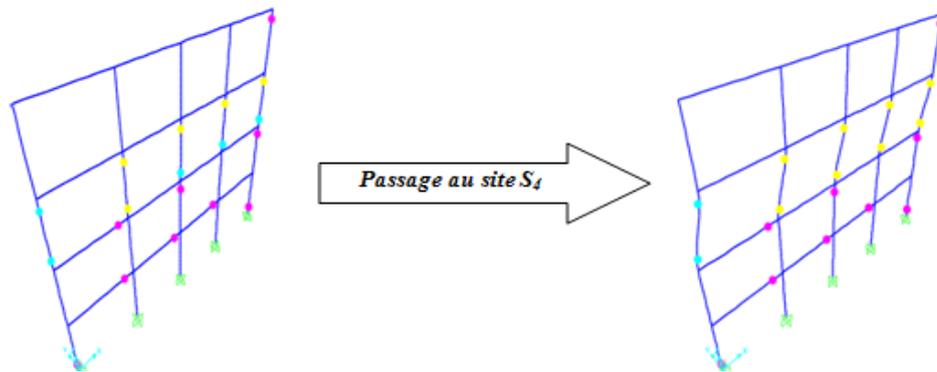


Fig .2. Influence du site sur la formation des rotules plastiques (étape 6 d'analyse)

Lors d'affichage des résultats de l'analyse, on remarque dans les deux cas que dès le début il y'a formation de rotules de type B dans quelques poutres de rives de RDC et du 1^{er} niveau, au même temps on aperçoit la formation de rotules plastiques en pied et en tête des poteaux du 2^{ème} niveau.

Au fur à mesure de l'augmentation de l'effort appliqué et de la rotation de rotules on arrive à des rotules du niveau LS qui donnent naissance dès l'étape 6 à des rotules de type C (collapse) qui annonce que les poteaux du 2^{ème} niveau ont connu un grand endommagement.

Durant les 5 première étapes de l'analyse le comportement de la structure en site S_4 est globalement similaire à celui observé dans le site S_1 malgré l'apparition d'une rotules plastique supplémentaire de type B sur l'un des poteaux du niveau 2, à partir du 6^{ème} étape le degrés de dégâts observé dans les rotules en site S_4 augmente nettement, donc, les dommages structuraux observé dans ce cas seront plus importante lors des sollicitations sismiques.

L'apparition et l'évolution des rotules plastiques sont observées en premier lieu et principalement au niveau des poteaux, il s'agit alors du mécanisme 1 de formation de rotules plastique, c'est le mécanisme le plus défavorable car il engendre une rupture précoce de la structure.

On déduit alors que dans le cas d'un puissant séisme la structure peut connaître des dommages principalement au 2^{ème} niveau, les dommages seront plus importantes dans le cas ou le portique est situé sur un sol meuble.

3.2 Point de performance

Le point de performance correspond à l'intersection entre la courbe de capacité et le spectre de réponse sismique réglementaire, l'obtention de ce point se fait par itération successif en variant le coefficient d'amortissement visqueux, il traduit le comportement réel de la structure vis à vis un spectre réglementaire moyen représentatif de la région étudié.[7]

La localisation du point de performance sur la courbe de capacité permet de savoir si la structure a un comportement élastique, plastique ou elle est proche de la rupture, en fonction du comportement observé à l'aide de l'analyse statique non linéaire on peut juger si le portique sera stable ou non face aux spectres de réponses sismiques caractérisant la région d'Al Hoceima.

La comparaison portera sur plusieurs critères à savoir le déplacement enregistré dans la terrasse, l'effort tranchant enregistré, la raideur du portique au point de performance ainsi que sa ductilité.ces caractéristiques donnent une idée assez complète sur le comportement du portique lors du séisme. [8]

La figure 3 présentée dans la page suivante donne la localisation du point de performance sur la courbe de capacité pour les sites S_1 et S_4 .

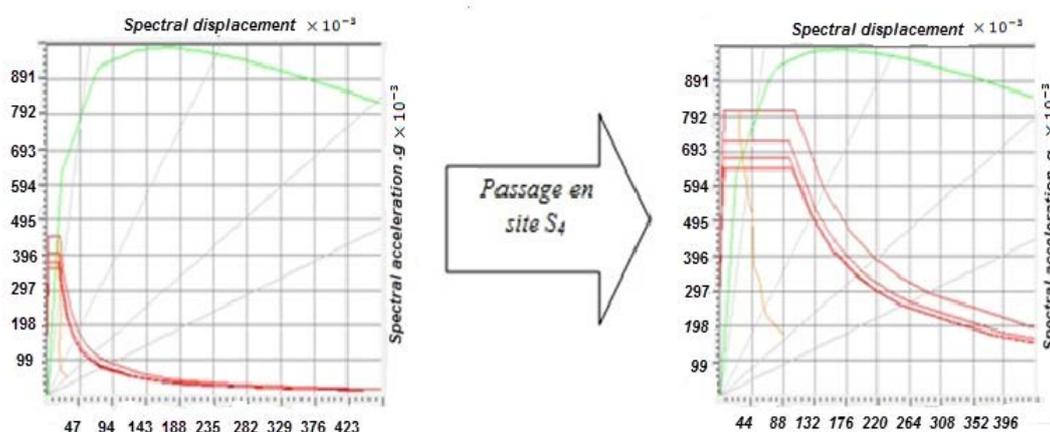


Fig.3 Influence du site sur le point de performance

Le tableau 6 ci-dessous résume les caractéristiques du point de performance dans le cas où le portique est construit sur un sol classé site S_1 et celui d’un sol classé site S_4 :

Tableau 6. Influence du site sur le point de performance.

Caractéristique du point de performance en site S_1		Caractéristique du point de performance en site S_4	
Effort tranchant à la base (KN)	68,165	Effort tranchant à la base (KN)	95,126
Déplacement de la terrasse (cm)	1,9	Déplacement de la terrasse (cm)	3,5
Raideur au point de performance (KN/cm)	35,876	Raideur au point de performance (KN/cm)	27,178
Accélération spectrale	0,448	Accélération spectrale	0,667
Déplacement spectral (cm)	1,4	Déplacement spectral (cm)	2,7
Ductilité	1,077	Ductilité	1,581

Pour le cas du sol représentant le site S_1 , la figure qui localise le point de performance permet de dire que le portique étudié à globalement un comportement élastique, la ductilité qui traduit la capacité de la structure à dissiper l’énergie en rentrant dans des déformations plastique montre avec sa valeur $1,077 > 1$ que le portique commence à rentrer dans le domaine plastique et les rotules vont commencer à se former principalement dans les poutres de RDC et dans les poteaux du 2^{ème} niveau.

Les valeurs de l’effort tranchant à la base et le déplacement de la terrasse au point de performance indiquent en se basant sur les tableaux données par le logiciel SAP2000 lors d’affichage des résultats de l’analyse que le comportement de la structure est donné par la 2^{ème} étape de l’analyse, on peut alors commencer à avoir des fissures dans les poteaux du 2^{ème} niveau ainsi que sur quelques poutres, la classification du EMS98 permet de dire que le portique a subit des dégâts de degré 2.

Etant donné que la structure est sans conception parasismique elle est de classe de vulnérabilité ‘C’ et sachant que les spécialistes ont attribué au séisme d’Al Hoceima2004 une intensité VIII, on peut dire que la classification des dommages de structures en terme de vulnérabilité donné par l’EMS98 qui attribut généralement pour ce type de structures des dégâts de degré 2 correspond aux résultats trouvés par l’analyse statique non linéaire.

Pour le cas du sol représentant le site S_4 La position du point de performance sur la figure permet de dire que le portique étudié à globalement un comportement plastique, la ductilité montre avec sa valeur $1,581 > 1$ que la plastification

des rotules dans la structure est avancée, les valeurs de l'effort tranchant 95,126 KN et du déplacement du toit 3,5 cm dépassent largement les valeurs enregistré pour le même portique en site S_1 , cette différence se traduit par le passage d'une raideur de 27,178KN/m en site S_4 à une raideur de 35,876 KN/m en site S_1 ce qui correspond à *une augmentation de 32% dans la résistance* du portique en passant du site S_4 au site S_1 .

Les valeurs de l'effort tranchant à la base et le déplacement de la terrasse au point de performance du site S_4 indiquent que le comportement de la structure est donné par la 6^{ème} étape de l'analyse (*Fig1.*), on va observer des fissures dans les éléments structuraux de tous les niveaux, les poteaux du 2^{ème} niveau peuvent connaître même un basculement, le degré de dégâts est alors 3.

Le degré de dégâts 3 est fournit rarement par l'EMS98 pour les structures de classe de vulnérabilité C subissant des séismes d'intensité VIII, le cas d'un portique de classe de vulnérabilité C en site défavorable en particulier donne ce résultat.

Le séisme d'AL Hoceima 2004 a causé la mort de 629 personnes suite à l'effondrement de leurs bâtiments, la majorité de structures qui ont connu la ruine sont de type maçonnerie (à Ait Kamra), les constructions en béton armé existantes étaient tous sans conception parasismique, cependant il y'a des constructions qui ont connu d'importantes dégâts voir la ruine et d'autres qui ont connu des dégâts légers ceci peut s'expliquer par :[9]

L'influence du site : on a vu que les bâtiments en béton armé construits sur des sols meubles sont plus vulnérables aux séismes que ceux construits sur des sols rocheux ou ferme, ces derniers vont connaître généralement de faible dégâts réparable et qui n'influence pas sur la stabilité structurelle en assurant le sauvegarde de vie.

La qualité d'exécution : les dégâts excessifs remarqués sur certaines structures au même temps que des structures voisines n'ont pas été très touchées sont généralement lié à des problèmes de suivi et de non respect du plan de béton armé.

3.3 Vérification de la fonctionnalité du portique

Le tableau ci-dessous résume les résultats de déplacements et déplacements inter étage obtenus de lors de l'analyse statique non linéaire, ces résultats correspondent aux déplacements maximum des nœuds du portique près du point de performance

On désigne par :

D : Le déplacement de l'étage

ΔD : Le déplacement inter-étages

Tableau 7. Déplacement inter étages du portique de rive pour les sites S_1 et S_4

Portique de rive site S_1			Portique de rive site S_4		
Niveau	D (cm)	ΔD (mm)	Niveau	D(cm)	ΔD (mm)
RDC	0,42	4,2	RDC	0,57	5,7
Niveau 1	0,88	4,6	Niveau 1	1,22	6,5
Niveau2	1,58	7	Niveau2	3,05	18,3
Niveau3	1,95	3,7	Niveau3	3,55	5

Le déplacement limite inter-étage qui ne doit pas être dépassé pour assurer la fonctionnalité de la structure en terme de déplacement est selon RPS2000 :

$$\Delta D_{lim} = 0,01h/K \quad (1)$$

h : représente la hauteur de l'étage ; dans notre cas h = 3m.

K : Le facteur de comportement : dans notre cas K=2

Alors :

$$a \Delta D_{lim} = 0,005h = 0,015m = 15mm \quad (2)$$

h : représente la hauteur de l'étage ; dans notre cas h = 3m

K : facteur de comportement : dans notre cas K=2

Pour le portique en site S_1 la fonctionnalité est assurée car le déplacement maximal inter-étage enregistré au niveau 2 est inférieur au déplacement limite imposé par la réglementation :

$$7mm < 15mm$$

Pour le portique de rive en site S_4 la fonctionnalité n'est pas assurée car le déplacement maximal inter-étage enregistré au niveau 2 est supérieur au déplacement limite imposé par la réglementation :

$$18,3mm > 15mm$$

Le changement de site peut influencer d'une manière très importante sur la fonctionnalité de la structure, la nature de sol influence sur le comportement inter-étage.

Pour mieux comparer les résultats de déplacements inter-étages on regroupe les déplacements inter-étage dans un même graphe comme le montre la figure ci-dessous :

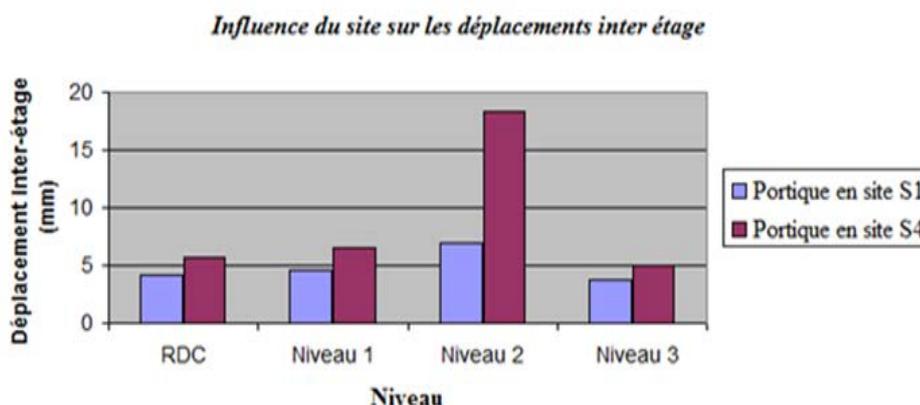


Fig. 4. Influence du site sur le déplacement inter-étages.

On remarque que à part le niveau 2 le déplacement inter-étage en site S_4 est légèrement plus important que celui en site S_1 , cependant au niveau 2 l'augmentation du déplacement inter-étage au site S_4 par rapport au site S_1 a atteint 226% ce qui a compromis la fonctionnalité du portique.

Le portique étudié appartient à une structure dimensionnée sans conception parasismique, le niveau 2 avait pour section de poteaux 20 x 20 ; bien que cette section est suffisante pour reprendre les efforts de compression, elle ne supporte pas les charges sismiques qui engendrent une flexion composée. L'exigence du RPS2000 d'une section minimale de 25x25 se trouve ainsi justifiée car on a vu que les grands dommages en matière de rotules et en déplacement inter-étages sont enregistrés au niveau 2.

4 Conclusion

L'analyse statique non linéaire a permis de montrer l'influence du site sur les dégâts observés lors de séismes, les structures sans conception parasismiques nécessitent généralement des renforcements pour pouvoir résister aux sollicitations sismiques que la région d'Al Hoceima peut connaître, ces renforcement vont assurer plus de rigidité et de ductilité à la structure

REFERENCES

- [1]- ATC, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Vol. 1, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, USA, 1996.
- [2]- Règlement de construction parasismique RPS 2000, Ministère de l'ATUHE, Secrétariat d'État de l'Habitat, Royaume du Maroc, 2011.
- [3]- P. Fajfar, Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake Eng. Struct.* 28(9)(1999) 979-993.
- [4]- L'échelle Macrosismique Européenne, Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Ed. Conseil de l'Europe, Vol. 19, 1998
- [5]- SAP2000, Integrated Finite Element Analysis, SAP2000 Web tutorial 1: Detailed tutorial including pushover analysis. Computer and structures Inc, Berkeley, California, 1998.
- [6]- SAP2000, Integrated Finite Element Analysis, SAP2000 Web tutorial 2: Quick pushover analysis tutorial. Computer and structures Inc, Berkeley, California, 1998.
- [7]- Federal Emergency Management Agency, NEHRP recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures: FEMA273, 2003.
- [8]- R. Bento, S. Falcao, F. Rodrigues, Nonlinear Static Procedures in Performance Based Seismic Design. In: Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, Canada,
- [9]- M. Saiidi, MA. Sozen, Simple Nonlinear response of R/C Structures. *J. Struct. Div-ASCE.* 107(5)(1981) 937-953.