



ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СЕИЗМИЧНИЯ КАПАЦИТЕТ НА СТОМАНОБЕТОННА КОНСТРУКЦИЯ ПОСРЕДСТВОМ НЕЛИНЕЙНИ СТАТИЧНИ АНАЛИЗИ

Александър Илиев, Димитър Стефанов

eng.alexander.iliev@gmail.com, dstefanov@geophys.bas.bg

Българска Академия на Науките (БАН)

Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География (НИГГГ)

гр.София, ул. "Акад. Г. Бончев", бл. 3

БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *сеизмично реагиране, нелинейни статични методи*

Резюме: *Земетресенията са едни от най-големите източници на природен риск, водещи до тежки човешки и икономически загуби в световен мащаб. В инженерната практика в наши дни, сеизмичният капацитет на строителните конструкции се изчислява с числени анализи. Съществуват различни варианти за представяне както на конструктивния модел, така и на сеизмичното движение/натоварване. Методът на Капацитивния Спектър (Capacity Spectrum Method) е съвременен метод за определяне на сеизмичното поведение на дадена конструкция, вследствие земетресения с различна интензивност. Използването му все повече навлиза сред практикуващите инженери поради редица предимства, които притежава. В България този метод все още рядко намира приложение, което е предпоставка за по-задълбоченото му изследване.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

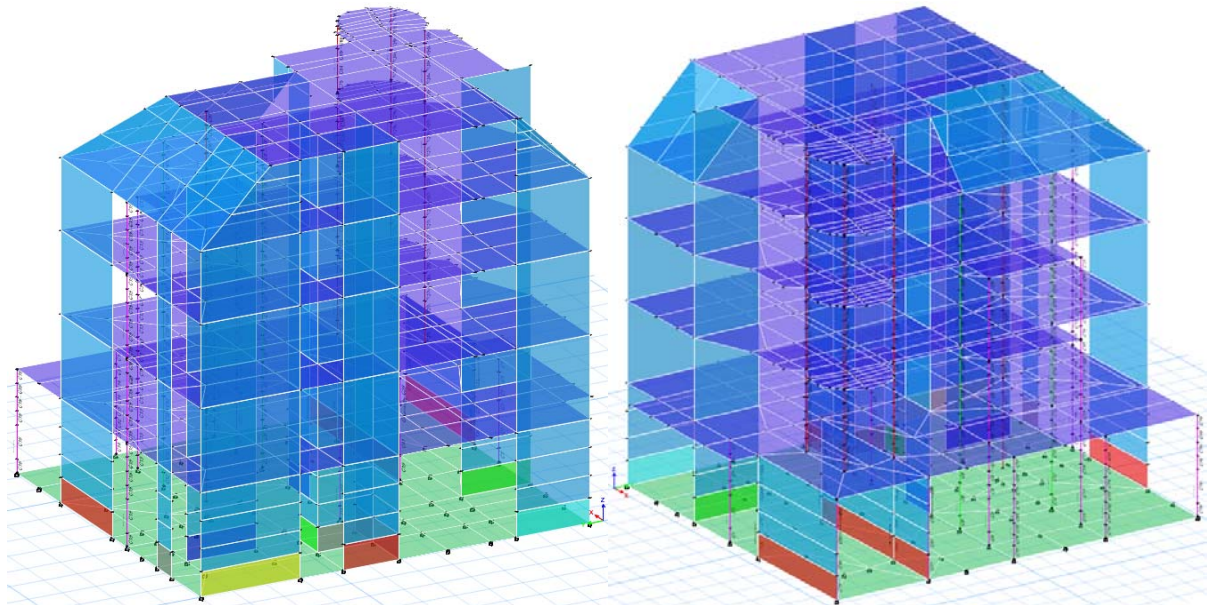
Изучаването на земетресенията съпътства човека от дълго време, но въпреки това, всяка година те са причина за много човешки и икономически загуби в световен мащаб. Това се дължи на факта, че в много от населените места сградите и съоръженията нямат необходимите съвременни конструктивни качества. Въздействието на тези загуби за икономиката на България може да бъде наистина тежко, особено в по-слабо развитите райони на страната.

В зависимост от целта и детайлността на съответното изследване, наличността на входни данни и нивото на несигурности, може да се използват различни подходи за анализиране на конструкцията. Методът на Капацитивния Спектър (Capacity Spectrum Method) е съвременен метод за определяне на сеизмичното поведение на дадена конструкция за земетресения с различна интензивност. Използването му все повече навлиза сред практикуващите инженери поради редицата предимства, които притежава. Методът е въведен за първи път в документът АТС-40[1], а в последствие е доосъвременен с малки промени във FEMA-440 [2]. Чрез съответните процедури по лесен начин може да се представи реагирането на конструкция по време на сеизмично въздействие.

2. ИЗСЛЕДВАНА КОНСТРУКЦИЯ

За изследване е избрана стоманобетонна конструкция на жилищна сграда, изчислена и оразмерена по съвременни сеизмични норми. Този избор е продиктуван от богатата документация, съпровождаща проекта и възможността за точно представяне и моделиране на конструкцията. За изчислението ѝ е използвана съвременна изчислителна програма ETABS, широко разпространена сред инженерите проектанти. Моделът от крайни елементи – фиг.1 се състои от гредови и плочови елементи, чието съчетание е изключително подходящо за представянето на динамичното поведение на конструкцията, а от друга страна има не-толкова високи изчислително-времени изисквания.

Поради богатите възможности, които предоставят съвременните изчислителни програми, съществуват различни възможности за моделирането на нелинейното поведение на стоманобетонните противоземетръсни стени (шайби). В това изследване са разгледани няколко подхода при моделирането на шайбите. Основно е използвана опцията за концентрирана нелинейност посредством нелинейна пластична става, а в едно от решенията е използван подходът за разпределена, материална нелинейност.



фиг.1. Изчислителен модел на изследваната конструкция

3. НЕЛИНЕЙНИ СТАТИЧНИ АНАЛИЗИ

Стоманобетонната конструкция е изследвана посредством три различни подхода при дефинирането на нелинейната работа на противоземетръсните шайби. При два от тях, нелинейните зависимости са зададени чрез нелинейна пластична става, а в третия нелинейността на елемента е в директна връзка с нелинейността в стоманобетонния материал.

- Модел М1 - Нелинейна става, при която армировката е дефинирана като разпределен процент на армиране използвайки фибров модел за представяне.

Това е най-опростения метод за моделиране на нелинейност чрез равнинен елемент (shell). В това изследване той е използван за първоначална, приблизителна оценка на сеизмичния капацитет на конструкцията. За автоматичното определяне на характеристиките за пластична става в програмата се използва фибров модел от тип „Fiber P-M3“.

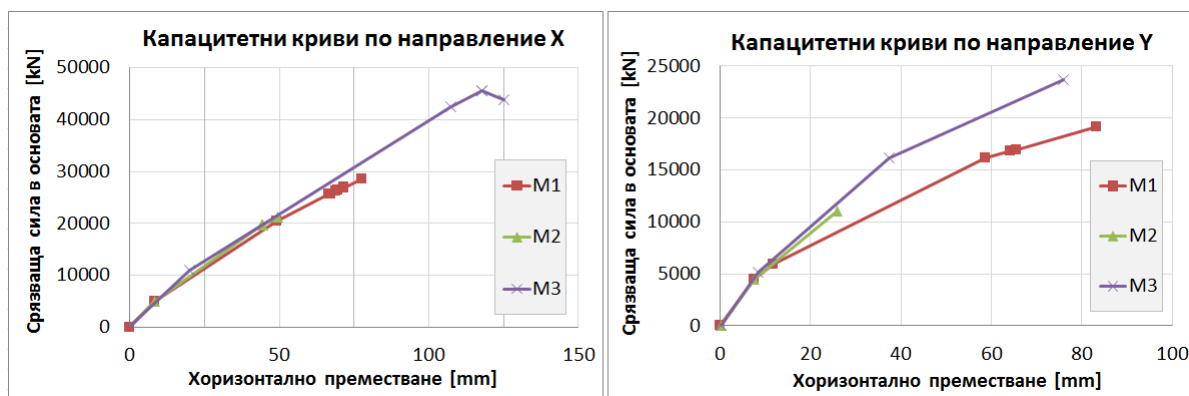
- Модел М2- Нелинейна става, при която армировката е дефинирана чрез опция за детайлно въвеждане на разположението ѝ (specified rebar layout).

При този вариант за моделиране на стоманобетонните стени прави впечатление, че програмата успява да намери решение само на няколко стъпки, което води до незадоволителни резултати в смисъл на крайни/гранични премествания, фиг.2.

- Модел М3 - Чрез директно отчитане на материалната нелинейност.

При този вариант се използва дефинирането на слоето (layered) напречно сечение за стоманобетонната стена. Нелинейното поведение на бетона и на стоманата се въвежда с помощта на криви за взаимовръзката между напрежения и деформации. Тук не се въвежда точното местоположение на нелинейността във вид на пластична става, а програмата сама, в хода на решението, намира местата, в които се развиват нелинейни деформации.

На фиг.2 е направено сравнение между сеизмичното реагиране от различните аналитични методи.

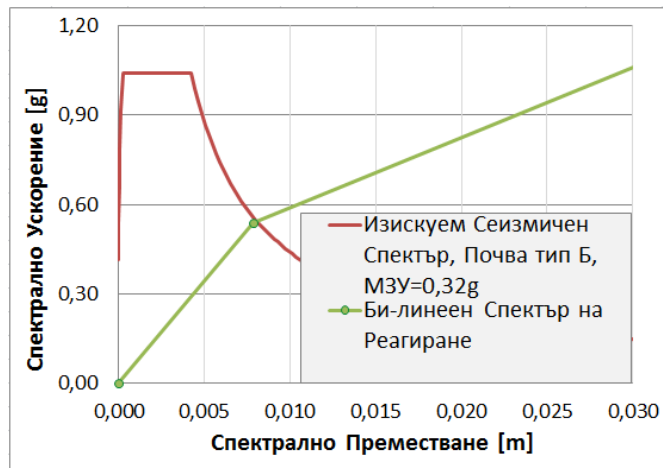


фиг.2. Капацитивна криви от различни аналитични методи (М1-М3) по ос X и Y

От сравнението на реагирането на конструкцията по двете взаимно перпендикулярни оси x и y ясно се вижда, че конструкцията има значително по-голям капацитет по ос x, поради по-големият брой сеизмични шайби в тази посока. Тъй като за определяне на граничния капацитет на конструкцията е меродавно реагирането по посока Y, определянето на т.н. точка на поведение (performance point) ще бъде изчислено само за капацитивните криви по ос Y.

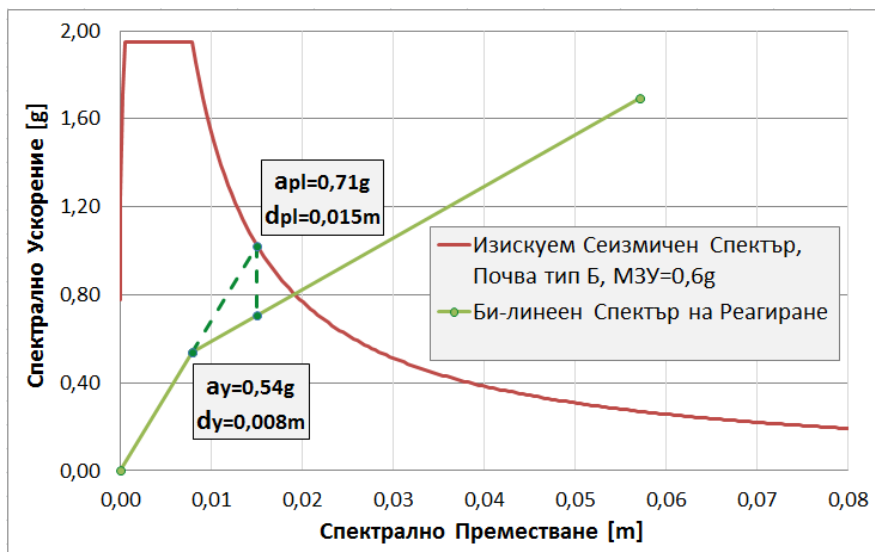
4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СЕИЗМИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ

За изчислението на ефективното затихване β_{eff} и подходящи редуционни коефициенти е необходимо капацитивната крива да бъде представена чрез своя билинейна апроксимация. На фиг.3 са представени сеизмичният спектър за Максимално Земно Ускорение (МЗУ) 0,32g (проектно ускорение за гр. София с период на повторяемост 1000 г.) и капацитивния спектър за конструкцията, получен чрез нелинейните статични анализи в т.3. Пресечната точка на двата спектъра се получава на границата между еластично и пластично поведение на изследваната конструкция. От това следва, че конструкцията ще реагира почти изцяло еластично, с минимални конструктивни повреди и коефициент на дуктилност, $\mu' = d_{max}/d_y = 1$. Така, еластичният сеизмичен спектър не следва да се редуцира, а точката на поведение характеризираща поведението на конструкцията за даденото сеизмично ниво, се определя като пресечната точка на двата спектъра - фиг.3.



фиг.3. Определяне на точката на поведение при въздействие с МЗУ=0,32g

С цел да се изследва по-подробно нелинейното поведение на конструкцията, както и за дефинирането на приемливи, гранични нива на поведение е извършено допълнително изследване на реагирането на конструкцията за сеизмично въздействие с МЗУ=0.6g, което съответства на приблизителен период на повторяемост $T=8500$ г. На фиг.4 са представени сеизмичния спектър за Максимално Земно Ускорение (МЗУ) 0,6g и капацитивния спектър за конструкцията, получен чрез нелинейните статични анализи в т.3.

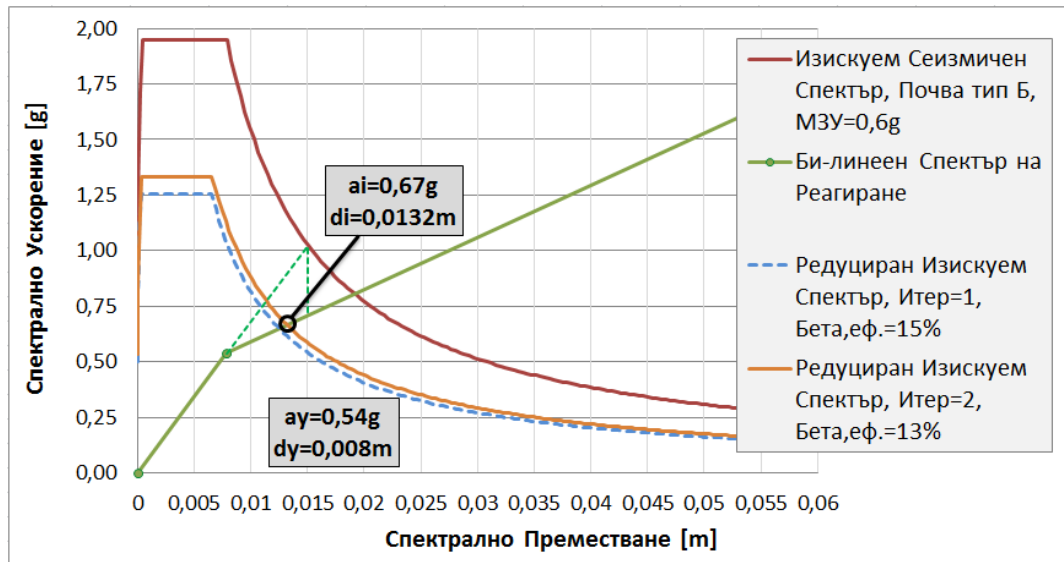


фиг.4.Определяне на точката на поведение при въздействие с МЗУ=0,6g и първоначалната точка на поведение a_{p1}/d_{p1}

За избраната точка и съответните стойности за a_y , d_y , a_{p1} d_{p1} (фиг.4) е изчислена стойност β_{eff} от 15%. Това отговаря на редукиционни коефициенти $SR_a=0.64$ и $SR_v=0.73$, с които се редуцира първоначалния еластичен спектър на сеизмичното въздействие. Пресечната му точка с би-линейната капацитивна крива дава временната точка на поведение a_{int}/d_{int} - фиг.5. Първоначалната точка a_{p1}/d_{p1} се приема за подходяща, ако изпълнява критерия $0.95d_{pi} < d_{int} < 1.05d_{pi}$. В случая това изискване не е изпълнено, поради което следва да се изпълни нова итерация за сходимост на решението. Много често това може да бъде точката, получена в първата итерация a_{int}/d_{int} , но по експертна оценка може да бъде избрана и друга точка.

В случая на настоящето изследване за втората итерация, точката a_{p2}/d_{p2} е избрана като получената точка на поведение за първата итерация: $a_i=0,653g/d_i=0,0125$ m. Изчислено е ефективно затихване $\beta_{eff}=13\%$ и съответните редукиционни коефициенти

$SRa=0,68$ и $SRv=0,76$. На фиг.5 е показан новополучения редуциран спектър, както и новата точка на поведение $a_i=0,67g/d_i=0,0132\text{ m}$. Този път критерият за сходимост $0,95.d_{pi}<d_{int}<1,05d_{pi}$ е изпълнен, с което точката $a_i=0,67g/d_i=0,0132\text{m}$ се приема за представляваща сеизмичното реагиране на конструкцията за избраното сеизмично въздействие с $MZY=0,6g$.



фиг.5. Определяне на пресечната точка на поведение a_{int}/d_{int}

За да се верифицира метода за определяне на сеизмично реагиране е направено и допълнително изчисление по методологията, описана във FEMA-440 [2]. За изчислената предварителна точка на реагиране, се определя коефициент на дуктилност $\mu=d_{max}/d_y=0,0132/0,008=1,65$.

$$\beta_{eff}=4.9(1,65-1)^2-1.1(1,65-1)^3+5=3,8-0,8+5=8(\%)$$

$$B=4/(5.6-\ln(\beta_{eff}))=4/(5.6-2.1)=1.14$$

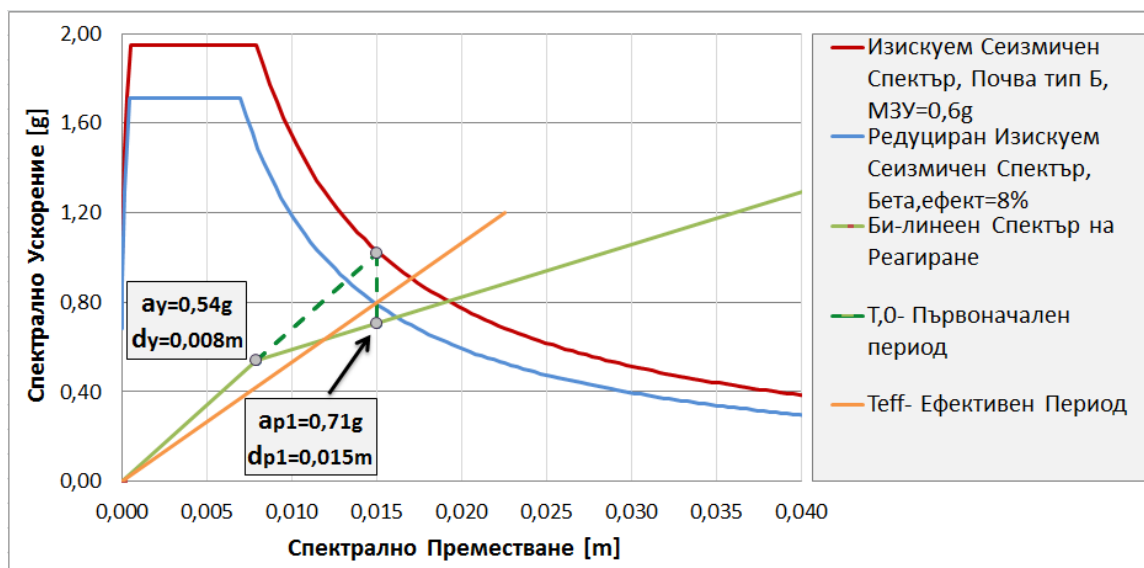
След изчислението на ефективното затихване, еластичния сеизмичен спектър, се редуцира като се разделя на коефициента „B“. След това се изчислява ефективният период на трептене на конструкцията T_{eff} .

$$T_0=2.\pi.(S_d/S_a)^{1/2}=2.3,14.(0.008/0.54)^{1/2}=0.76s$$

$$T_{eff}=(0.2(1,65-1)^2-0.038(1,65-1)^3+1)T_0=(0.155-0.026+1)0.76s=0.86s$$

При пресичането на редуцирания спектър на реагиране с ефективния период се получава точката на поведение „ d_i “. В случаят за изследваната конструкция се отчита $d_i=0.015\text{m}$, - фиг.6.

Изчислената точка на поведение „ d_i “ съвпада с първоначално приетата точка „ d_{p1} “ и следва да се приеме за представителна за сеизмичното реагиране на конструкцията за избраното ниво на въздействие.



фиг.6. Определяне на пресечната точка на поведение a_{int}/d_{int}

Последна точка от методиката е сравнението на полученото спектрално преместване и отнасянето на конструктивното състояние към дадено ниво на поведение (performance objective). Към момента няма единен подход при определянето на критериите за настъпване на дадено ниво. В АТС-40[1] е приложена таблица с гранични стойности за междуетажни премествания на конструкцията. За изследваната конструкция и съответно получените стойности на междуетажно преместване (между 0.7-0.9%), конструкцията попада в ниво на поведение „Незабавно използване“ (Immediate Occupancy).

„Незабавно използване“ се дефинира като следземетръсно състояние, при което конструкцията е безопасна за обитаване. По същество са запазени пред земетръсните якостни и коравинни характеристики на сградата и тя може да изпълнява функциите, за които е предвидена. Това състояние се характеризира с малко на брой и големина конструктивни повреди. Рискът от животозастрашаващи наранявания, вследствие на конструктивна повреда, е много малък и въпреки, че малки конструктивни поправки са необходими, те няма да изискват спиране на функционирането на сградата.

Друг основен документ, в който са дадени критерии за ограничение на повредите е Еврокод 8[3]. Граничното междуетажно преместване е дефинирано като:

$$dr.v < 0.005h$$

където dr е изчисленото максимално междуетажно преместване, а v' е редуциращ коефициент, който отчита периода на повторемост на сеизмичното въздействие. Препоръчителната стойност за v' при сгради с класове на значимост I и II е 0,5. В случая на настоящото изследване уравнението за изчисление на допустимите повреди има следния вид:

$$2,8 \cdot 0,5 < 0,005 \cdot 350 \Rightarrow 1,4 < 1,75$$

От това следва, че сградата покрива необходимите изисквания за допустимост на междуетажните премествания (с оглед на ограничаване на повредите) и има достатъчен сеизмичен капацитет дори при много високо ниво на сеизмично въздействие.

5. ИЗВОДИ

В настоящата статия е изследвано нелинейното сеизмично реагиране на съвременна стоманобетонна конструкция. За определяне на сеизмичния капацитет са извършени по четири нелинейни статични анализи във всяка посока. Резултатите от

сравнението на отделните подходи, при определянето на капацитета, показват сходни резултати, като при някои от тях, поради изчислителни затруднения програмата няма възможност да достигне до граничния капацитет на конструкцията. Интерпретирането на сеизмичното реагиране е извършено посредством Метода на Капацитивния Спектър. Методът доказва предимството си за бързо и лесно определяне на сеизмичното реагиране посредством графичните методи, описани в АТС-40[1] и FEMA440 [2]. Изследваната конструкция показва високи противоземетръсни качества и висока степен на осигуреност.

БЛАГОДАРНОСТ

Настоящото изследване е част от научен проект, финансиран от Програмата за подпомагане на младите учени в БАН - договор ДФНП-6/20.04.2016г. Авторите Александър Илиев и Димитър Стефанов изразяват тяхната благодарност за осигурената подкрепа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] АТС-40 (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, Redwood City, California, U.S.A.
- [2] FEMA-440 (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Applied Technology Council, Redwood City, California, U.S.A.
- [3] БДС EN 1998-1, Еврокод 8: Проектиране на аконструкциите за сеизмични въздействия, Част 1: Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради. БИС.

ASSESSMENT OF SEISMIC CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BASED ON NONLINEAR STATIC PROCEDURES

Alexander Iliev, Dimitar Stefanov

eng.alexander.iliev@gmail.com, dstefanov@geophys.bas.bg

*Bulgarian Academy of Sciences
National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography
Sofia, Acad. G. Bonchev str., bl. 3
BULGARIA*

Key words: seismic response, nonlinear static procedures

Abstract: Earthquakes are one of the largest sources of natural hazards, leading to severe human and economic losses worldwide. In engineering practice nowadays, the seismic capacity of structures is calculated by numerical analysis. There are different ways of presenting both the structural model and the seismic source. Capacity Spectrum Method is modern method for determining the seismic behavior of structures due to earthquakes of varying intensity. It is more and more gaining popularity among the practicing engineers because of the numerous advantages it holds. In Bulgaria this method is yet rarely used, which is a prerequisite for deeper research.