

CONFINED COCRETE MODELS ACCORDING TO EC 2 AND EC 8 AND THEIR INFLUENCE ON THE RC FRAME SEISMIC RESPONSE

МОДЕЛИ УТЕГНУТОГ БЕТОНА ПРЕМА ЕВРОКОДУ 2 И ЕВРОКОДУ 8 И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА СЕИЗМИЧКИ ОДГОВОР АБ ОКВИРА

Aleksandra Radujković¹
Anka Starčev-Ćurčin²
Đorđe Lađinović³

UDK: 624.012.4.042.7
DOI: 10.14415/zbornikGFS31.001
CC-BY-SA 4.0 license

Summary: Seismic design according to European norms implies the design of ductile rc structures. By confining the concrete, the ratio of stress-strain is changing and increases ductility. In Eurocode 2, a model of confined concrete was proposed, and in the Eurocode 8 an improved model was shown. The paper also analyzes the compared values of obtained strengths and ultimate strains for both models of confined concrete, as well as their impact on the global and local seismic response in the case of a six-storey rc frame.

Keywords: European norms, ductility, confinement

Резиме: Сеизмички прорачун према Европским нормама подразумева пројектовање дуктилних АБ конструкција. Утезањем бетона мења се однос напон - дилатација и повећава дуктилност. У Еврокоду 2 предложен је један модел утезања бетона, а у Еврокоду 8 је приказан побољшани модел. У раду су анализирани и упоређене вредности добијених чврстоћа и граничних дилатација за оба модела утегнутог бетона, као и њихов утицај на глобални и локални сеизмички одговор на примеру шестоспратног АБ оквира.

Кључне речи: Европске норме, дуктилност, утезање

1. INTRODUCTION

The concept of rc structures for earthquake resistance design, according to modern seismic regulations, is based on the reduced elastic inertial seismic actions by reduced factor with providing adequate ductility in the all critical region. The structure is designed so that for design seismic action nonlinear performance is exposed. According to Eurocode 8, buildings can be designed

1. УВОД

Концепт прорачуна сеизмички отпорних АБ конструкција, према савременим сеизмичким прописима, заснива се на смањењу еластичних инерцијалних сеизмичких сила фактором редуције уз обезбеђење адекватне дуктилности у свим критичним регионима. Конструкција се пројектује тако да за пројектно сеизмичко дејство испољи нелине-

¹Aleksandra Radujković, PhD, Assistant professor, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e – mail: lekxa@uns.ac.rs

²Anka Starčev-Ćurčin, MSc, Teaching assistant, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e – mail: astarcev@uns.ac.rs

³Đorđe Lađinović, PhD, Full professor, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, e – mail: ladjin@uns.ac.rs

for different levels of energy dissipation through two classes of ductility: medium (DCM) and high (DCH). The structures of the middle and high ductility classes differ, apart from the value of the behavior factor, in the local ductility requirements. Local ductility, i.e. the cross-sectional ductility is achieved, inter alia, by cross-section confinement with lateral reinforcement.

Confined concrete is defined as concrete restrained with lateral reinforcement (steel stirrups or spirals). The main consequence of confinement is to increase the strength and ductility of reinforced concrete.

In order to satisfy the seismic performance of the elements and the structure as a whole in the design of seismic resistant structures, the behavior of constituent materials of rc elements, concrete and reinforcement, affects on the shape and dimensions of concrete elements, as well as on the shape, quantity and layout of the reinforcement, under cyclic loading [1]. There are a large number of concrete models that describe the relationship of stress-strain, for both unconfined and confined concrete in the case of monotonic or cyclic load: Hognestad (1951), Kent and Park (1971), Popovics (1973), Scott (1982), Park et al. (1982), Sheikh and Uzumeri (1982), Tsai (1988), Mander et al. (1988), Yong et al. (1989), Li et al. (2000), etc.

Seismic requirements at global and local level are assessed with nonlinear analysis methods.

This paper analyzes the seismic response of rc frame that is designed in accordance with the provisions of EN 1992-1:2004 and EN 1998-1:2004. The response was estimated using nonlinear dynamic analysis for two models of confined concrete, according to Eurocodes 2 and 8. The responses at the global and local level were compared through ductility of the roof displacement and cross section curvature ductility. Nonlinear dynamic analysis has been conducted for three

арно понашање. Према EC8 конструкције се могу пројектовати за различите нивое дисипације енергије кроз две класе дуктилности: средња (DCM) и висока (DCH). Конструкције средње и високе класе дуктилности разликују се, осим у вредности фактора понашања, у захтевима за локалну дуктилност. Локална дуктилност, тј. дуктилност пресека се, између осталог, постиже утезањем попречног пресека попречном арматуром.

Утегнути бетон се дефинише као бетон који је ојачан бочно постављеном арматуром (узеније или спирална арматура). Главна последица утезања је повећање чврстоће и дуктилности армираног бетона.

Ради задовољења сеизмичког понашања елемената и конструкције као целине при пројектовању сеизмички отпорних конструкција, на облик и димензије бетонских елемената, као и облик, количину и распоред арматуре, утиче понашање конститутивних материјала АБ елемената, бетона и арматуре, услед цикличног оптерећења [1]. Постоји велики број модела бетона који описује однос напон-дилатација за неутегнути и утегнути бетон, за случај монотоног или цикличног дејства: Hognestad (1951), Kent i Park (1971), Popovics (1973), Scott (1982), Park i dr. (1982), Sheikh i Uzumeri (1982), Tsai (1988), Mander i dr. (1988), Yong i dr. (1989), Li i dr. (2000).

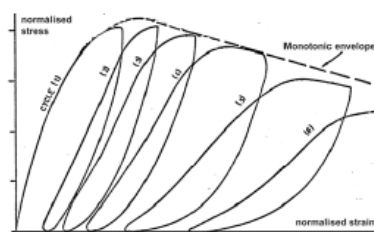
Нелинеарним методама анализе процењују се сеизмички захтеви на глобалном и локалном нивоу.

У раду је анализиран сеизмички одговор АБ оквира пројектованог у складу са одредбама EN 1992-1:2004 и EN 1998-1:2004. Одговор је процењен применом нелинеарне динамичке анализа за два модела утегнутог бетона, према EC2 и EC8. Упоређени су одговори на глобалном и локалном нивоу преко дуктилности померања врха оквира и дуктилности кривине попречног пресека. Нели-

earthquake records that complied the requirements given in EN 1998-1.

2. MODELS OF CONFINED CONCRETE ACCORDING TO EUROPEAN NORMS

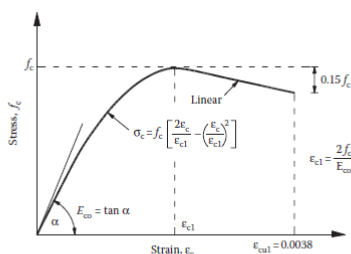
It is known that concrete has a fairly high compressive strength and very limited tensile strength, so that in the design of rc structures, the tensile strength of concrete is neglected. The stress-strain curvature for concrete, due to the monotonic load at uniaxial pressure, has the form of a parabola, and the envelope of the σ - ϵ concrete diagram due to the cyclic load does not deviate significantly from the curvature of the monotonic load. For cyclic loads corresponding to an earthquake, the strength of the concrete on the pressure does not exceed the value of the strength due to the monotonic load, Figure 1a, [1]. In analytical models that describe the behavior of concrete in uniaxial pressure, the ascending branch of the diagram σ - ϵ is mostly shown by the parabolic function, while the descending branch is shown as a linear function, Figure 1b, [2].



неарна динамичка анализа је спроведена за три записа земљотреса, која задовољавају правила прописана у EN 1998-1.

2. МОДЕЛИ УТЕГНУТОГ БЕТОНА ПРЕМА ЕВРОКОДУ

Познато је да бетон поседује поприлично велику чврстоћу на притисак и врло ограничену чврстоћу на затезање, те се у прорачуну АБ конструкција чврстоћа бетона на затезање занемарује. Крива напон-дилатација за бетон, услед монотоног оптерећења при једноаксијалном притиску, има облик параболе, и од ове криве не одступа значајно анvelopeа σ - ϵ дијаграма бетона услед цикличног оптерећења. За циклична оптерећења која одговарају дејству земљотреса, чврстоћа бетона на притисак не прелази вредност чврстоће услед монотоног оптерећења, слика 1а, [1]. У аналитичким моделима који описују понашање бетона при једно-аксијалном притиску најчешће се узлазна грана дијаграма σ - ϵ описује параболичном функцијом, док се силазна грана приказује као линеарна функција, слика 1б, [2].



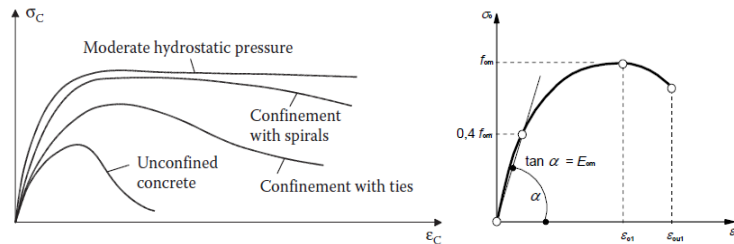
Слика 1 - Дијаграм σ - ϵ бетона: а) циклични притисак [1], б) идеализована крива [2]
Figure 1 - Diagram σ - ϵ of concrete: a) cyclic compression [1], b) idealised curve [2]

In the case of the structures resistant to earthquakes, as a primary interest is the case where the concrete is located under the conditions of triaxial pressure, so that the stress in one direction (the uniaxial stress σ_1) is considerably larger

Код конструкција отпорних на земљотрес од примарног интереса је случај када се бетон налази у условима троосног притиска, тако да је напон у једном правцу (аксијални напон σ_1) знатно већи од друга два

than the other two that are with the same value order (the lateral stresses $\sigma_2 \approx \sigma_3$). Such stress conditions occur in the compressed concrete zone when approaching its maximum strength, provided that the lateral expansion is limited. This limitation may be from lateral reinforcement: steel stirrups or spirals, which limits the lateral strain within the "reinforcement cage" that is formed by the lateral and longitudinal reinforcement. The limitation of the lateral strain is called the confinement, and the volume of such concrete is considered as confined [1]. The value of the maximum strength increases, as well as the strain corresponding to this stress, Figure 2a. As the lateral pressure (σ_2, σ_3) is higher, the uniaxial stress increasing is greater and the corresponding strains. Beside that, the descending branch of the σ - ε diagram becomes less steep.

који су истог реда величине (бочни напони $\sigma_2 \approx \sigma_3$). Такви напонски услови се јављају у притиснутој зони бетона када се приближава својој највећој вредности чврстоће, уз услов да је бочно ширење ограничено. Ово ограничење може да потиче од попречне арматуре: узенгија или спиралне арматуре, које ограничавају бочну дилатацију унутар „арматурног коша“ који формирају попречна и подужна арматура. Ограничење бочне дилатације се назива утезање, а запремина таквог бетона се сматра утегнутом [1]. Вредност максималне чврстоће се повећава, као и дилатација која одговара овом напону, слика 2а. Што је већи бочни притисак (σ_2, σ_3), веће је и повећање аксијалног напона и одговарајуће дилатације. Поред тога силазна грана дијаграма σ - ε постаје равнија.



Слика 2 - Дијаграм σ - ε бетона а) за различите типове утезања [2], б) за нелинеарну анализу конструкција [3]
 Figure 2 - Diagram σ - ε of concrete a) for various types of confinement [2], b) for nonlinear analysis of the structures [3]

Reference methods for assessing the seismic performance of structure, i.e. obtaining a seismic response, are nonlinear analysis methods. Modeling for the nonlinear method demands should include post-elastic behavior of the elements. Nonlinear models are based on the mean values of material properties. For nonlinear structural analysis, it is used σ_c - ε_c diagram of compressed stress and corresponding strain of unconfined concrete for short-term uniaxial load, which is shown in the

Референтне методе при процени сеизмичког понашања конструкције, односно добијања сеизмичког одговора су нелинеарне методе анализа. Моделирање за потребе нелинеарних метода треба да обухвати постеластично понашање елемената. Нелинарни модели су засновани на осредњим вредностима особина материјала. За нелинеарне анализе конструкција користи се дијаграм напон притиска и одговарајућа дилатација неутегнутог бетона σ_c - ε_c за краткотрајно

Figure 2b and is described by equation [3]:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \quad (1)$$

where:

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1},$$

ε_{c1} - strain at the highest stress,

$k = 1.05E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$, where E_{cm} is modulus of elasticity, f_{cm} is mean value of compressed concrete strength,

ε_{cu1} - ultimate strain (3.5%).

With concrete confinement the stress-strain ratio in concrete is changed and increase the values of maximum strength from f_c to $f_{c,c}$, strain that correspond to the maximum strength from ε_{co} to $\varepsilon_{co,c}$ and ultimate strains from ε_{cu} to $\varepsilon_{cu,c}$. The ascending branch is modeled as a parabolic curvature based on equation (1) as:

$$\frac{\sigma}{f_{c,c}} = \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co,c}} \left(k - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co,c}} \right)}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co,c}}} \quad (2)$$

where $k = 1.05E_c \cdot |\varepsilon_{co,c}| / f_{c,c}$, E_c is

secant modulus of elasticity from the origin to a stress $\sigma_1 = 0.4 f_c$, determined as $E_c = 11000 \cdot f_c^{0.3}$, for E_c and f_c in MPa [1].

According to the analogy with the uniaxial compressure diagram adopted in EN 1992-1, the application of equation (2) on the decreasing branch, e.i. after reaching the value $f_{c,c}$ and $\varepsilon_{co,c}$, can be considered. A simplified alternative to the descending branch of the σ - ε diagram is the approximation with the right line [4]. Ultimate strain is defined as strain on the decreasing branch of σ - ε diagram for the stress value

једноаксијално оптерећење, који је приказан на слици 2б и описан једначином [3]:

где је:

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1},$$

ε_{c1} - дилатација при највећем напону

$k = 1.05E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$, где је E_{cm} модул еластичности, f_{cm} је средња вредност чврстоће бетона при притиску,

ε_{cu1} - гранична дилатација (3.5%).

Утезањем бетона се мења однос напон - дилатација у бетону и повећавају вредности максималне чврстоће од f_c до $f_{c,c}$, њој одговарајуће дилатације од ε_{co} до $\varepsilon_{co,c}$ и граничне дилатације од ε_{cu} до $\varepsilon_{cu,c}$. Узлазна грана је моделирана као параболична крива на основу једначине (1) као:

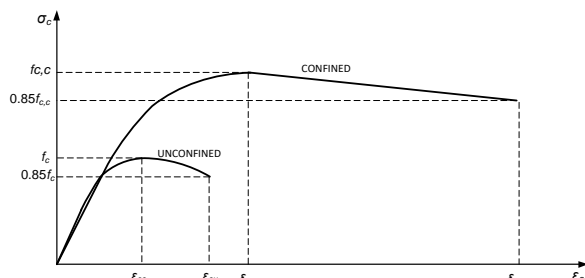
где је $k = 1.05E_c \cdot |\varepsilon_{co,c}| / f_{c,c}$, а E_c

секантни модул од координатног почетка σ - ε дијаграма до напона $\sigma_1 = 0.4 f_c$, који се одређује као $E_c = 11000 \cdot f_c^{0.3}$, за E_c и f_c у МПа [1].

По аналогји са дијаграмом за једноаксијални притисак усвојеним у EN 1992-1, могла би се размотрити примена једначине (2) и на опадајућем делу, односно после достизања вредности $f_{c,c}$ и $\varepsilon_{co,c}$. Поједностављена алтернатива опадајуће гране σ - ε дијаграма је апроксимација правом линијом [4]. Гранична дилатација је дефинисана као дилатација на опадајућем делу σ - ε дијаграма за вредност напона који

corresponding to $0,85 f_c$, e.i. $0,85 f_{c,c}$ for confined concrete, Figure 3.

одговара $0,85 f_c$, односно $0,85 f_{c,c}$ за утегнути бетон, слика 3.



Слика 3 - Шематски приказ модела σ - ϵ за утегнути и неутегнути бетон
Figure 3 - Schematic representation of model σ - ϵ for confined and unconfined concrete

The increased values of the confined concrete strength, its corresponding strain and ultimate strain, adopted in EN 1992-1, are given by expression:

Повећане вредности чврстоће утегнутог бетона, одговарајуће дилатације и граничне дилатације, усвојене у EN 1992-1 су дате изразима:

$$f_{c,c} = f_c \left(1 + 5 \frac{\sigma_2}{f_c} \right) \quad \text{за } \sigma_2 \leq 0.005 f_c \quad (3)$$

$$f_{c,c} = f_c \left(1.125 + 2.5 \frac{\sigma_2}{f_c} \right) \quad \text{за } \sigma_2 > 0.005 f_c$$

$$\epsilon_{co,c} = \epsilon_{co} \cdot \left(\frac{f_{c,c}}{f_c} \right)^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_{cu,c} = \epsilon_{cu} + 0.2 \frac{\sigma_2}{f_c} \quad (5)$$

σ_2 is effective lateral pressure ($\sigma_2 = \sigma_3$) due to confinement and is determined according to equation [5]:

σ_2 је ефективни бочни притисак ($\sigma_2 = \sigma_3$) услед утезања и одређује се на основу израза [5]:

$$\sigma_2 = \alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw} \quad (6)$$

where:

α - confinement effectiveness factor:

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o} \right),$$

s_h is stirrup spacing, b_o and h_o are dimensions of confined core to the stirrup axis, and b_i is the axial distance between the longitudinal bars, which are laterally held by stirrups or cross ties along the cross-sectional perimeter,

где су:

α -фактор ефикасности утезања:

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o} \right),$$

s_h је размак узенгија, b_o и h_o димензије утегнутог језгра до оса узенгија, а b_i осно растојање између подужних шипки које су бочно придржане узенгијама или попречним везама дуж обима попречног пресека,

ρ_{sx} - coefficient of reinforcement with lateral reinforcement which is parallel with the load direction x , $\rho_{sx} = A_{sx}/b_w s_h$, A_{sx} is the cross-sectional area of stirrups, and b_w is thickness of the web of a beam, f_{yw} - yield strength of stirrup reinforcement.

The model of confined concrete shown in EC2 provides less improvement of the main properties of concrete with confinement relative to the confined concrete model shown in EN 1998-3. In EN 1998-3 the values of confined concrete strength, its corresponded strain and ultimate strain, are determined according to equations:

$$f_{c,c} = f_c \left[1 + 3.7 \left(\frac{\alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw}}{f_c} \right)^{0.86} \right] \quad (7)$$

$$\varepsilon_{co,c} = \varepsilon_{co} \cdot \left[1 + 5 \left(\frac{f_{c,c}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

$$\varepsilon_{cu,c} = 4 \cdot 10^{-3} + 0.5 \frac{\alpha \cdot \rho_{sx} \cdot f_{yw}}{f_{c,c}} \quad (9)$$

3. SEISMIC PERFORMANCE ESTIMATION

To estimate the seismic performance of a structure, ductility is often used, which indicates the amount of seismic energy that can be dissipated through plastic deformation. The ductility demand is determined as the ratio of the achieved deformation and deformation at yield, and is compared with the available ductility, which correspond to the ratio of the deformation at the failure (deformation capacity) and deformation at yield. At the local level, structural performance is assessed based on the curvature ductility. For rc cross sections, the curvature capacity represents sectional curvature at the moment when the strain of the compressed concrete reached the highest value (ultimate strain), while the curvature at yield is determined as the value of the curvature

ρ_{sx} - коефицијент армирања попречном арматуром која је паралелна са правцем оптерећења x , $\rho_{sx} = A_{sx}/b_w s_h$, A_{sx} је површина попречног пресека узенгија, а b_w дебљина ребра, f_{yw} - граница развлачења арматуре узенгија.

Модел утегнутог бетона приказан у EC2 даје мање побољшање главних особина бетона са утезањем у односу на модел утегнутог бетона приказаног у EN 1998-3. Према EN 1998-3 вредности чврстоће утегнутог бетона, њему одговарајуће као и граничне дилатације одређују се на основу израза:

3. ПРОЦЕНА СЕИЗМИЧКОГ ОДГОВОРА

За оцену сеизмичког понашања конструкције често се користи дуктилност, која указује на количину сеизмичке енергије која се може расипати кроз пластичну деформацију. Захтевана дуктилност се одређује као однос остварене деформације и деформације на граници течења, и пореди се са расположивом дуктилности, која представља однос деформације на граници лома (капацитет деформације) и деформације на граници течења. На локалном нивоу понашање конструкције се оцењује на основу дуктилности кривине. За АБ пресеке капацитет кривине представља кривину пресека у тренутку када је дилатација бетона при притиску достигла највећу вредност (граничну

when the strain of the tensile reinforcement has reached yielding. Nonlinear dynamic method gives the most accurate insight into the nonlinear behavior of the structure and while it is applied, minimum of three earthquake records is necessary to take into account. These records must be adequate for the given structure site, and their values should be scaled to the appropriate values for the seismic zone [6]. The structure is analyzed for the horizontal component of the record, because the vertical component is relatively damped fast, although in the near-source earthquake it should not be ignored [7], [8].

4. NUMERICAL EXAMPLE

In this paper rc frame with 6 stories is analyzed, designed for the high ductility class and seismic action of 0,3 g intensity. The frame is 3 x 5m span, the height of the first storey is 3.5m and for the other stories is 3m. All beams have the same cross-section, 30x45cm, and in numerical analyzes they are modeled as T-section beam with an effective flange width of 170cm and with thickness of 15cm. The columns are square, with dimensions of 50x50cm. Concrete class C30/37 and steel S500, class C, were adopted. The frame is calculated due to permanent and imposed load and seismic action.

The seismic action is represented by the horizontal elastic response of type 1, for the ground type C according to EN 1998-1. For high ductility class, the behavior factor is 5.85. The frame is dimensioned according to the provisions of EN1992-1 and EN 1998-1.

The same reinforcement was adopted for all columns, while for beams a different reinforcement was adopted in the field and in the joint zone, Figure 4. The characteristic values of confined concrete for beams and columns according to EN 1992-1 are obtained on the basis of the expressions (3), (4), (5)

дилатацију), док се кривина на граници течења одређује као вредност кривине када је дилатација затегнуте арматуре до-стигла границу течења.

Нелинеарна динамичка метода даје најтачнији увид у нелинеарно понашање конструкције и при њеној примени неопходно је узети у обзир минимум три записа земљотреса. Ови записи морају бити адекватни за дату локацију конструкције, и њихове вредности треба да буду скалиране на одговарајуће вредности за ту сеизмичку зону [6]. Конструкција се анализира за хоризонталну компоненту записа, јер се вертикална компонента релативно брзо пригушује, мада се у случају земљотреса у близини епицентра она не би смела занемарити [7], [8].

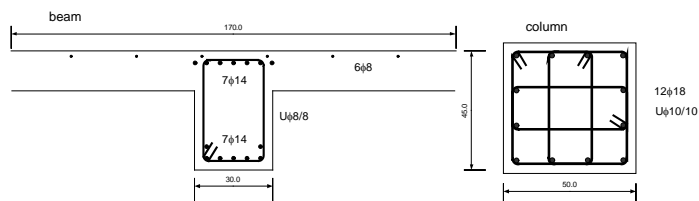
4. НУМЕРИЧКИ ПРИМЕР

У овом раду анализиран је АБ оквир са 6 спратова, пројектован за високу класу дуктилности и сеизмичко дејство интензитета 0,3 g. Оквир је распона 3 x 5m, висина првог спрата је 3,5m а осталих спратова 3m. Све греде имају исти попречни пресек, 30 x 45cm, а у нумеричким анализама су моделиране као греде Т-пресека са ефективном ширином фланше 170 cm и дебљином 15cm.

Стубови су квадратни, димензија 50 x 50cm. Усвојен је бетон класе C30/37 и челик S500 класе C. Оквир је прорачунат услед сталног и повремениг оптерећења и сеизмичког дејства. Сеизмичко дејство је представљено хоризонталним еластичним спектром одговора типа 1, за тло категорије C према EN 1998-1. За високу класу дуктилности фактор понашања износи 5,85. Оквир је димензионисан према одредбама EN 1992-1 и EN 1998-1. За све стубове је усвојена иста арматура, док је код греда усвојена различита армаура у пољу и у зони ослонца, слика 4.

and (6), e.i. (7), (8) and (9) for the confined model given in EN 1998-3. Table 1 shows these values, as well as the values for unconfined concrete.

Карактеристичне вредности утегнутог бетона греда и стубова према EN 1992-1 израчунате су на основу израза (3), (4), (5) и (6), односно (7), (8) и (9) за модел утезања дат у EN 1998-3. У табели 1 приказане су ове вредности, као и вредности за неутегнути бетон.



Слика 4 Усвојена арматура греда у зони ослонца и стубова
Figure 4 - Reinforcements for beams in joint zone and columns

Табела 1. Карактеристичне вредности за неутегнути и утегнути бетон стуба и греде
Table 1. Characteristic values for unconfined and confined concrete of column and beam

| | unconfined | $f_{c,c}$ [MPa] | Column | | Beam | |
|-----------------|------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | EN2 | EN8 | EN2 | EN8 |
| f_c [MPa] | 38 | | 48.50 | 50.60 | 41.48 | 42.51 |
| ϵ_{co} | 0.0022 | $\epsilon_{co,c}$ | 0.0036 | 0.0058 | 0.0026 | 0.0035 |
| ϵ_{cu} | 0.0035 | $\epsilon_{cu,c}$ | 0.0156 | 0.0267 | 0.0072 | 0.0122 |

Except the strength of concrete and the quantity of lateral and longitudinal reinforcement, an important parameter for determining the curvature ductility is the level of axial load in the columns, and in the beam the ratio of the compressed and tensile reinforcement. Available curvature ductility of the column cross-section (for the largest axial force corresponding to the seismic design situation) for the confined model according to EC2 is 19.26, and for the confined model according to EC8 is 31.35. The available curvature ductility of the beam is determined in the case of a negative moment (tension of the upper side), the curvature ductility due to the positive moment is greater because of the adopted T cross-section. For the confined model according to EC2, the available curvature ductility is 23.5 and is 32.9 for the confined model according to EC8. When the cross sections were not reinforced with lateral reinforcement,

Осим чврстоће бетона и количине попречне и подужне арматуре, битан параметар за одређивање дуктилности кривине је и ниво аксијалног оптерећења код стубова, а код греда однос притиснуте и затегнуте арматуре. Расположива дуктилности кривине попречног пресека стуба (при највећој аксијалној сили притиска која одговара сеизмичкој прорачунској ситуацији) за модел утезања према EC2 износи 19,26, а за модел утезања према EC8 31,35. Расположива дуктилност кривине греде је одређена за случај негативног момента (затезања горње стране), јер због усвојеног Т пресека расположива дуктилност кривине услед позитивног момента је већа. За модел утезања према EC2 расположива дуктилност кривине износи 23,5, односно 32,9 за модел утезања према EC8. Када попречни пресеци не би били ојачани попречном арматуром,

the available ductility of the curvature would be 5.67, for the column, e.i. 15.11 for the beam.

For the assessment of seismic performance, three earthquake records from the PEER database were selected [9]. Nonlinear dynamic analysis was carried out using the OpenSees program, which enables the including of material and geometric nonlinearities. Cross sections are presented as fiber models, with three types of different characteristics: cover is modeled as an unconfined concrete, a core as a confined concrete and reinforcement is separately modeled.

Seismic responses for three earthquake records and two confined models are presented below. The frame model for which the values of confined concrete are determined according to the confined model given in EN 1992-1 is marked as an EN2 model, while the frame model with characteristic values for confined concrete determined according to the confined model shown in EN 1998- 3 is marked as EN8 model. In Table 2, the values of displacement ductility are given. Although the values of the roof displacement are greatest due to the earthquake action Eq1 (20.4 cm for model EN2 and 20.9 cm for model EN8), displacement ductility for both models is greatest due to the earthquake action Eq3. The differences between the roof displacement ductility values are less than 5%.

расположиве дуктилности кривине би износиле 5,67 за стуб, односно 15.11 за греду.

За процену сеизмичког понашања одабрана су три записа земљотреса из PEER базе података [9]. Нелинеарна динамичка анализа је спроведена употребом програма OpenSees, који омогућује обухватање материјалне и геометријске нелинеарности. Попречни пресеци су представљени као влакнасти модели, са три врсте различитих карактеристика: омотач је моделиран као неутегнути бетон, језгро као утегнути бетон и посебно је моделирана арматура.

Сеизмички одговори за три записа земљотреса и два модела утезања приказани су у наставку. Модел оквира за који су карактеристичне вредности утегнутог бетона одређене према моделу утезања датом у EN 1992-1 обележен је као модел EN2, док је модел оквира код којег су карактеристичне вредности за утегнути бетон одређене према моделу утезања приказаном у EN 1998-3 је обележен као модел EN8.

У табели 2 су дате вредности дуктилности померања. Иако су вредности померања врха оквира највеће услед дејства земљотреса Eq1 (20,4 cm за модел EN2 и 20,9 cm за модел EN8), дуктилности помеања за оба модела су највећа услед дејства земљотреса Eq3. Разлике између вредности дуктилности померања врха оквира су мање од 5%.

Табела 2 Вредности дуктилности померања врха АБ оквира
Table 2 Roof displacement ductility values of rc frame

| | Eq1 | Eq2 | Eq3 |
|-----|------|------|------|
| EN2 | 2.24 | 2.00 | 2.46 |
| EN8 | 2.32 | 2.10 | 2.52 |

Beside the response at the global level, the values of the curvature of the cross-sections in the characteristic sections of columns and beams are determined. The values of the curvature ductility demand μ_{ϕ} are estimated for all three

Поред одговора на глобалном нивоу, одређене су и вредности кривине попречних пресека у карактеристичним пресецима стубова и греда. Процењене су вредности захтеване дуктилности кривина μ_{ϕ} за

seismic actions and are compared with the supplied ductility $\mu_{\phi, supp}$ of columns and beams. The highest values are given in Table 3.

сва три сеизмичка дејства и упо-
ређене са расположивом дуктилно-
сти $\mu_{\phi, supp}$ стубова и греда. Највеће
вредности су дате у табели 3.

Табела 3 Сеизмички одговор на локалном нивоу
Table 3 Seismic response at the local level

| | | Eq1 | | Eq2 | | Eq3 | |
|--------|-----|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|---------------------------------|
| | | μ_{ϕ} | $\mu_{\phi} / \mu_{\phi, supp}$ | μ_{ϕ} | $\mu_{\phi} / \mu_{\phi, supp}$ | μ_{ϕ} | $\mu_{\phi} / \mu_{\phi, supp}$ |
| column | EN2 | 3.72 | 19.32 | 2.02 | 10.48 | 6.06 | 31.44 |
| | EN8 | 3.62 | 11.53 | 2.13 | 6.81 | 6.10 | 19.47 |
| beam | EN2 | 6.81 | 28.98 | 4.36 | 18.54 | 7.75 | 32.98 |
| | EN8 | 7.00 | 21.30 | 4.61 | 14.02 | 7.96 | 24.18 |

The values of the curvature ductility demand for two models do not differ significantly, but the relationship of the demanded and supplied curvature ductility is essentially different.

Вредности самих захтеваних дукти-
лности кривина за два модела се не
разликују битно, али се битно разли-
кује однос захтеване и расположиве
дуктилности кривине.

5. CONCLUSION

Seismic codes prescribe provisions for achieving the corresponding values of deformation ductility. The deformation ductility is achieved, inter alia, by confinement of cross-section with lateral reinforcement. In Eurocode 2, a confined model is given, which gives less increase key characteristics of concrete with confinement, compared to the confined model given in EN 1998-3. There is a significant difference between the key values of the confined concrete determined according to two presented confined models. These differences are certainly reflected in the assessment of the seismic response at the local level. At the global level, there is not big difference in the seismic response between two models because the seismic response is estimated for the intensity of the earthquake at the design level. By confining the cross-section of the concrete, a considerable increase of strain is obtained, especially of the ultimate. By increasing the ultimate strain, the deformation capacity at the local level increases, that is, the available ductility increases. The values of the estimated curvature ductility for

5. ЗАКЉУЧАК

Сеизмичким кодовима прописане су одредбе за постизање одговарајућих вредности дуктилности деформација. Дуктилност деформација се, између осталог, постиже утезањем попречног пресека попречном арматуром. У Еврокоду 2 приказан је један модел утезања, који даје мање повећање кључних карактеристика бетона са утезањем, у односу на модел утезања дат у EN 1998-3. Постоји значајна разлика између кључних вредности утегнутог бетона одређених према два приказана модела утезања. Ове разлике се свакако огледају и у оцени сеизмичког одговора на локалном нивоу. На глобалном нивоу, нема велике разлике у сеизмичком одговору између два модела из разлога што је сеизмички одговор процењен за интензитет земљотреса на пројектном нивоу. Утезањем попречног пресека бетона добија се знатно повећање дилатације, нарочито граничне. Повећањем граничне дилатације повећава се и капацитет деформације на локалном нивоу, односно повећава се расположива дукти-

two confined models do not differ significantly, but the relationship of the demanded and available ductility is different. The higher value of this relationship is obtained for the EN2 confined model, in which case it could be concluded that the structure has less ability to resist seismic action. This confined model, considering less characteristic values of confined concrete compared to the confined model according to EN 1998-3, is on the safety side for dimensioning. The confined model according to EC8 has been adopted because it shows more realistic characteristics of confined concrete and better insight into the real seismic performance.

лност. Вредности процењених дуктилности кривине за два модела утезања се не разликују битно, али се разликује однос остварене и расположиве дуктилности. Већа вредност овог односа се добија за модел утезања EN2 и у том случају би се могло закључити да конструкција поседује мању способност да се одупре сеизмичком дејству. Овај модел утезања, с обзиром на мање карактеристичне вредности утегнутог бетона у односу на модел утезања према EN 1998-3, је на страни сигурности за димензионисање. Модел утезања по EC8 је усвојен због тога што реалније показује карактеристике утегнутог бетона, па са њиме добијамо и бољи увид у стварно сеизмичко понашање.

ACKNOWLEDGEMENTS

The results presented in this paper are the result of work of this project: TR36043, funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

ЗАХВАЛНИЦА

Резултати представљени у овом раду су произашли из дела истраживања у оквиру пројекта TR36043 финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

REFERENCES

- [1] Fardis, M. N.: Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings, Geotechnical, geological and earthquake engineering, volume 8, Springer, **2009**.
- [2] Penelis G. G., Penelis G. G., Concrete building in seismic regions, CRC Press, **2014**.
- [3] EN 1992-1-1: 2004, Proračun betonskih konstrukcija, deo 1-1: opšta pravila i pravila za zgrade, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, februar **2006**.
- [4] CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, Thomas Telford, London **1993**.
- [5] EN 1998-3: 2005: Proračun seizmički otpornih konstrukcija, deo 3: Procena stanja i ojačanje zgrada, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, novembar **2009**.
- [6] EN 1998-1: 2004: Proračun seizmički otpornih konstrukcija, deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, novembar **2009**.
- [7] Živković S., Kukaras D., Prokić A., Lađinović Đ.: Osetljivost amirano-betonskog rama na vertikalne seizmičke sile, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, 5. međunarodno naučno-stručno savetovanje, Sremski Karlovci, 29-30. jun **2016**., str. 363-370.
- [8] Kukaras D., Chouw N.: RC frame response to the strong Northridge near-source ground excitations, iNDIS2003, 9th national and 3rd International scientific meeting, Novi Sad, 26-28. November **2003**. pp. 219-226.
- [9] Radujković, A., Lađinović Đ., Starčev-Čurčin A., Džolev I., Rašeta A.: Estimation of ductility demands of RC frames using time history analysis, International conference "Contemporary achievements in civil engineering 2015, Subotica, 24. april **2015**, pp. 233-238.