

ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКО РЕШЕЊЕ

M85 – Ново техничко решење у фази реализације, тестирано у овлашћеној институцији

АРМИРАНОБЕТОНСКИ КОНСТРУКЦИЈСКИ ЕЛЕМЕНТИ ОД ЗЕЛЕНИХ БЕТОНА НА БАЗИ АГРЕГАТА ОД РЕЦИКЛИРАНОГ БЕТОНСКОГ ОТПАДА: ТЕХНОЛОГИЈА ПРОИЗВОДЊЕ БЕТОНА И УСАГЛАШАВАЊЕ СА СТАНДАРДИМА ЗА КОНСТРУКЦИЈЕ

АУТОРИ:

В.проф.др Иван Игњатовић, дипл.грађ.инж. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Проф.др Снежана Маринковић, дипл.грађ.инж. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Доц.др Никола Тошић, мастер инж.грађ. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Доц.др Јелена Драгаш, мастер инж.грађ. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Београд, април 2020.

1. АУТОРИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

В.проф.др Иван Игњатовић, дипл.грађ.инж. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Проф.др Снежана Маринковић, дипл.грађ.инж. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Доц.др Никола Тошић, мастер инж.грађ. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

Доц.др Јелена Драгаш, мастер инж.грађ. Универзитет у Београду-Грађевински факултет

2. НАЗИВ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Армиранобетонски конструкцијски елементи од зелених бетона на бази агрегата од рециклираног бетонског отпада: технологија производње бетона и усаглашавање са стандардима за конструкције

3. КЉУЧНЕ РЕЧИ

Конструкцијски бетон; рециклирани агрегат; технологија бетона; носивост; употребљивост; прорачунски модели, стандарди

4. КОРИСНИК ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

"ШУША" д.о.о, 21203 Ветерник, Нови Сад, улица Додолска 4, ПИБ 103567021

5. ГОДИНА КАДА ЈЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ КОМПЛЕТИРАНО

2020 год.

6. ГОДИНА КАДА ЈЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ПОЧЕЛО ДА СЕ ПРИМЕЊУЈЕ И КОД КОГА

Планирана примена - 2020. година, "ШУША" д.о.о,
(техничко решење у реализацији)

7. ОБЛАСТ И НАУЧНА ДИСЦИПЛИНА НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Грађевинарство, ужа област бетонске конструкције

8. ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ ТЕХНИЧКИМ РЕШЕЊЕМ РЕШАВА

Грађевинска индустрија користи огромне количине природних ресурса и истовремено производи значајне количине грађевинског отпада, што значи и да има велики утицај на животну средину и да представља изазов одрживом развоју. Са годишњом производњом од око 20 млрд тона на глобалном нивоу (WBCSD, 2009), бетон је најзаступљенији грађевински материјал. Утицај бетона на животну околину је сложени механизам и постоји током читавог животног циклуса бетонске конструкције, слика 1.

Бетон је композитни материјал код кога око 70% запремине чини агрегат, па огромна производња бетона уједно значи и потребу за обезбеђивањем енормних количина агрегата, процењене на око 15 млрд тона годишње (Langer et al., 2004). То неумитно доводи до исцрпљивања природних извора речног и дробљеног агрегата и великог утицаја на животну средину. Неконтролисана експлоатација агрегата из река доводи до промена водених екосистема и станишта. С друге стране, оријентација на производњу дробљеног природног агрегата носи са собом повећану емисију гасова, у првом реду CO₂, одговорних за ефекат стаклене баште. Они се јављају као резултат минирања и процесуирања стена, као и приликом транспорта од каменолома до обично удаљених градских средина где се производи бетон.

Количина грађевинског отпада од рушења објеката, али и отпада насталог током грађења, износи 2 до 3 млрд т годишње на глобалном нивоу према подацима из 2001. године (Lauritzen, 2006) – 200-300 мил. т у САД-у (Meuer, 2002) и исто толико у Европи (Lauritzen, 2004), 83 мил. т у Јапану итд. Само у Европи, количина грађевинског отпада је повећана четири пута у поређењу са подацима са почетка 1990-их (Hansen, 1992). Зависно од разматраног подручја (земље) варира и структура грађевинског отпада, али истраживања показују да значајан део чини бетонски отпад (Јапан 42%, Европа 50% (Lauritzen, 2004), који се одлаже на за то предвиђене или “дивље“ депоније. Са становишта утицаја на околину бетонски отпад није проблем, али његова количина достиже неодржив ниво. Нарочито велики проблеми са одлагањем бетонског отпада постоје у високо урбаним зонама, нпр. Њујорк (Meuer, 2002) и уопште у земљама у развоју, где су велике површине “скупог” земљишта под депонијама грађевинског отпада.



Слика 1. Животни циклус бетонске конструкције

Једно од решења за проблеме одлагања грађевинског отпада и исцрпљивање природних налазишта агрегата је поступак рециклирања депонованих грађевинских материјала, у првом реду бетона. Тим поступком може се произвести агрегат који је могуће искористити на више начина, од подлоге коловозних конструкција до производње конструкцијских бетона. Примена бетона на бази агрегата од рециклираног бетона условљена је адекватном класификацијом агрегата по питању кључних својства (упијања воде и запреминске масе), као и дефинисањем процедура које се тичу технологије производње бетона (пројектовање састава, припрема, мешање, транспорт, уградња).

Такође, проблем за ширу примену таквих “зелених” бетона, нарочито за армиранобетонске конструкције где је и највећи утросак глобалних количина агрегата и бетона, представља и недостатак одговарајуће техничке регулативе – прописа, стандарда и правилника која препознаје и третира елементе од “зелених” бетона. При томе, заправо треба допунити постојећу регулативу за класичне бетоне специфичностима за овако пројектоване и грађене елементе конструкције, а односе се на стандардне техничке услове по питању носивости и употребљивости. Основ за одговарајуће допуне техничке регулативе представља експериментално испитивање, анализа и верификација добијених резултата. Ово је, уз препоруке које се односе на технологију бетона, циљ и садржај овог техничког решења које обезбеђује услове за примену бетона од рециклираног агрегата као одрживо решење за стални раст индустрије бетона и бетонских производа уз истовремено решавање проблема грађевинског отпада и редукцију утицаја на животну средину.

9. СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ТОГ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

За процес рециклирања грађевинског, претежно бетонског отпада, највише интересовања показале су земље које имају проблема са налазиштима природног агрегата (нпр. Холандија, Белгија, Данска) и земље попут Јапана где су капацитети депонија процењени на још свега неколико година (Meuer, 2009). Подаци указују да се у њима процес рециклирања грађевинског отпада одвија на високом нивоу - Јапан 98% (Sakai 2005), Холандија 90% (Symonds et al, 1999). У оквиру ЕУ-27 земаља, 2006. године рециклирало се 55% укупне количине грађевинског отпада, са циљем да до 2020. то буде 70%. (Final Report, 2010)

И поред високог степена рециклирања бетона у појединим земљама, агрегат од рециклираног бетона (енг. recycled concrete aggregate, RCA) доминантно се користи за израду тампон слојева и подлога коловозних конструкција, испуну иза потпорних зидова и израду неконструктивних бетонских елемената (ивичњака, стаза, ограда), а у малом проценту (око 1%) се користи као конститутивни елемент конструкцијских бетона (Тошић et al, 2015). Проблеми технологије бетона на бази рециклираног агрегата (engl. recycled aggregate concrete), на које је указано, доминантно потичу од специфичности рециклираног агрегата који се састоји од зрна природног агрегата које је потпуно или делимично обавијено заосталим цементним малтером оригиналног бетона.



Слика 2. Изглед зрна рециклираног и природног агрегата по фракцијама (лево) и детаљ зрна рециклираног агрегата (десно)

Ту се пре свега мисли на веће упијање воде и нижу запреминску масу у поређењу за природним агрегатом, као и већи ниво разних примеса као нус производа у процесу рециклаже мешовитог грађевинског отпада. Зато су испитивања у вези ових својстава врло честа тема истраживања на светском нивоу (Yang et al, 2008; Chakradhara Rao et al, 2011; Tam&Tam 2008; Angulo et al, 2010). За разлику од упијања природног агрегата које ретко превазилази 1%, упијање RCA може бити 3–10% у случају крупног RCA (величина зрна >

4 мм) (Rahal, 2007; Xiao et al, 2005) па чак и више у случају ситне фракције RCA, због чега се она не препоручује за употребу у бетонима. Осим упијања, на својства бетона такође могу да утичу облик и текстура зрна рециклираног агрегата, квалитет старе и нове контактне зоне, порозност агрегата и стање влажности агрегата при справљању бетонске мешавине (Poon et al, 2007). У последње три деценије обављена су опсежна истраживања својстава бетона на бази рециклираног агрегата (нпр. Hansen 1992; Ajdukiewicz&Klisczewicz 2002; Rahal 2007; Xiao&Falkner 2007; Domingo et al, 2010; Silva, 2015), из којих је закључено да су чврстоћа при притиску, затезању и модул еластичности RAC у просеку нижи од упоредног бетона на бази природног агрегата (NAC). Упоредни RAC и NAC бетони најчешће имају исти “ефективни” водоцементни фактор, $(w/c)_{\text{eff}}$, базиран на количини воде која је доступна цементу у процесу хидратације. Апострофиране разлике у својствима повећавају се са повећањем учешћа RCA у бетону и са повећањем упијања воде RCA. С друге стране, много мање испитивања обављено је на тему реолошких карактеристика RAC- скупљања и течења. С обзиром на композицију зрна рециклираног агрегата, укупна количина цементног малтера већа је у RAC него код NAC. Последице, скупљање и течење RAC најчешће су значајно већи у односу на упоредни NAC. Код RAC са 100% крупног RCA, мерена су скупљања и течења која су 20–50% и 20–60% респективно, већа у односу на упоредне NAC (C. Lye et al, 2016; C. Q. Lye et al, 2016; Silva, 2015). Реолошка својства нарочито су важна због прорачуна деформација (угиба) елемената конструкција, те су модели за њихову предикцију неопходни као део техничких услова за примену RAC елемената у пракси. Постоје само две студије које се баве овом темом (C. Lye et al, 2016; C. Q. Lye et al, 2016), а аутори су произвели дијаграме за читавање дилатације скупљања и коефицијента течења RAC, прилагођених за примену у оквиру Еврокода 2. Међутим, предложени коефицијенти нису дати у аналитичкој форми па самим тим није могућа ни аутоматизација прорачуна.

Из досадашњих малобројних истраживања на нивоу елемената конструкција (Sato i ost. 2007; Ajdukiewicz&Klisczewicz 2007; Fathifazl 2008) може се закључити да су граничне носивости гредних носача од бетона на бази рециклираног агрегата, код којих је до лома дошло услед савијања, сличне носивостима упоредних греда од бетона са природним агрегатом. При томе, под упоредним гредним носачима углавном су подразумевани носачи армирани истом количином подужне и попречне арматуре, направљени од бетона са природним и бетона са рециклираним агрегатом који имају исти водоцементни фактор. То међутим не значи нужно и да имају исте чврстоће при притиску или било које друго механичко својство, што може да представља одређену препреку у извођењу валидних закључака. Разлика је забележена у понашању армиранобетонских гредних елемената под експлоатационим кратким и дуготрајним оптерећењем, при чему елементи од бетона са рециклираним агрегатом имају веће ширине прелина и веће угибе од упоредних елемената од бетона са природним агрегатом. Осим тога, пратећи модели за димензионисање гредних армиранобетонских елемената од бетона са рециклираним агрегатом према моментима савијања нису развијени, а питање је могу ли се применити модели који важе у случају греда од класичних бетона. Још већу непознаницу представља механизам преноса сила смицања. Иако неколико досадашњих истраживања (Etxeberria et al, 2007; González-Fonteboa&Martínez-Abella 2007; Fathifazl 2008) указују да су граничне носивости гредних армиранобетонских елемената од бетона на бази рециклираног агрегата код којих је до лома дошло услед смицања, сличне носивостима упоредних елемената од бетона са природним агрегатом, удео појединих механизма при прихватању смичућих сила не мора бити исти. Није утврђено да ли се до извесног процента замене природног агрегата рециклираним може сматрати да не постоји, или је занемарљиво мала разлика у понашању између гредних елемената од ове две врсте бетона, односно када се гредни носачи од бетона са рециклираним агрегатом могу димензионисати на основу постојећих модела за бетоне са природним агрегатом. Коначно, не постоји упоредни преглед и анализа нумеричких података (резултата) досадашњих експерименталних истраживања на онову

кога би могли да се извуку општи закључци о понашању греда од бетона на бази рециклираног агрегата.

Осим на гредним елементима, појединачна испитивања граничне носивости су обављена и на армиранобетонским рамовима у виду push-over тестова или тестова сеизмичке отпорности (Pacheco et al, 2015; Xiao et al, 2012).

Поред анализе граничне носивости RAC елемената конструкције, од есенцијалне важности је утврдити њихово гранично стање употребљивости. Са тим циљем, спроведено је релативно мало истраживања (Sato et al, 2007; Maruyama et al, 2005; Choi and Yun, 2013; Lapko et al, 2005; Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2011; Knaack&Kurama, 2015; Seara-Paz et al, 2018), у највећем броју као радови са конференција који не обезбеђују довољно података за детаљну анализу. У овим истраживањима примењени су врло различити рециклирани агрегати (упијање 1.9-6.0%), геометрија греда (2000–3700-мм распони, 200–300-мм висине попречног пресека, 0.5–1.6% арматуре) и трајање оптерећења (118–1000 дана). Уопштено говорећи, уочене су веће деформације и шире пррлине у RAC елементима у односу на упоредне NAC са истим ефективним водоцементним фактором $(w/c)_{eff}$. Иако су неки истраживачи тестирали примену постојећих модела за прорачун деформација (ACI 318 i Eurocode 2), ово је рађено само на сопственим експерименталним резултатима, што је премала база резултата за доношење дефинитивних закључака.

10. ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предложено техничко решење састоји се из два дела:

- Технологија конструкцијских бетона на бази рециклираног агрегата,
- Усаглашавање са захтевима стандарда за пројектовање конструкција од бетона на бази рециклираног агрегата

10.1. Технологије конструкцијских бетона са агрегатом од рециклираног бетона

10.1.1. Циљеви, проблеми и концепт решења

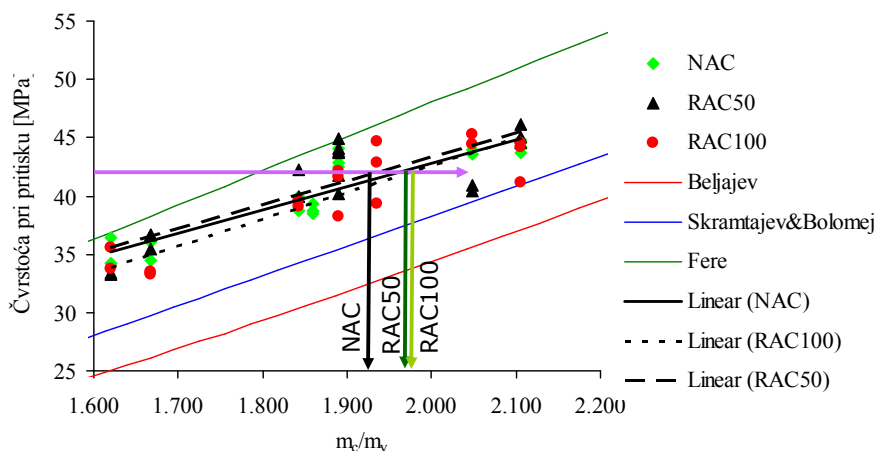
Основни циљ дефинисања технолошког поступка јесте дефинисати специфичности пројектовања рецептуре бетона са рециклираним агрегатом у контексту реализације, тј. производње у фабрици бетона. При томе, бетон код кога је садржај крупног природног агрегата замењен делимично или потпуно рециклираним агрегатом, треба да постигне физичке и механичке карактеристике у свежем и очврслем стању које ће омогућити поуздану примену ове врсте бетона у конструкцијама. Пројектовање зелених бетона са рециклираним агрегатом захтева прецизно утврђивање упијања рециклираног агрегата, дефинисање адекватног начина дозирања додатне количине воде приликом справљања бетона и одређивање ефективног водовезивног фактора потребног да се добије бетон одређене конзистенције и циљане чврстоће. Ефективни водовезивни фактор дефинисан је односом количине воде која учествује у процесу хидратације, тзв. слободне воде, и количине цемента, $(w/c)_{eff}$ или $(m_v/m_c)_{eff}$. Количина тзв. слободне воде (m_v), тј. воде која треба да буде доступна за процес хидратације усваја се на основу емпиријских израза и/или претходног искуства, тј. проба, у скаду са циљаном конзистенцијом.

Када се приликом справљања бетона изврши просто додавање додатне количине воде пропорционално упијању агрегата, долази до проблема по питању обрадивости и уградивости свежег бетона. Наиме, релативно велика количина воде остаје слободна што узрокује разливање бетона приликом испитивања конзистенције, као и одавање воде на површини узорака, тј. избетонираних елемената конструкције. Последишно, резултат по питању основних механичких карактеристика, пре свега чврстоће при притиску, потпуно је неизвестан, а сасвим сигурно није могуће достићи на уобичајени начин пројектовану чврстоћу због повећања водовезивног фактора. Ако се, пак, не обезбеди додатна количина воде, рециклирани агрегат упија део воде намењен процесу хидратације цемента, долази

до поремећаја водоцементног фактора и тешко предвидљиве, али сигурно круће конзистенције, тј. изузетно малог слегања.

Упијање агрегата по стандарду се одређује на основу измерене масе воде коју је агрегат апсорбовао у току 24 сата, што је време довољно да дође до потпуног засићења. С друге стране, мешање агрегата, воде, цемента и осталих компонената при производњи бетона траје значајно краће, око 5 минута. Ако се узме у обзир и време неопходно за транспорт бетона од фабрике до градилишта, где се испитује конзистенција пре саме уградње, долази се до времена које је „на располагању“ агрегату да упија воду. Управо то време треба да буде параметар на основу кога се одређује мера, тј. степен упијања рециклираног агрегата, односно количина додатне воде (Δm_v) коју треба додати приликом справљања бетона са рециклираним агрегатом.

Да би се бетони са рециклираним агрегатом пројектовали према циљаној чврстоћи при притиску, што је један од основних захтева за квалитет бетона, неопходно је на бази претходних испитивања успоставити везу између чврстоће при притиску и ефективног водоцементног фактора. С обзиром да су везе ових величина код класичних бетона представљене хиперболичним функцијама, искоришћен је једноставнији облик, тј. линеарна функција чврстоће при притиску и реципрочне вредности водоцементног фактора. Након успостављања предметне зависности, за циљану чврстоћу при притиску одређује се реципрочна вредност водоцементног фактора. На основу њега и усвојене количине слободне воде срачунава се потребна количина цемента. Концепт овог решења за бетоне са 50% и 100% крупног RCA приказан је на слици 3, а на истом дијаграму представљено је и неколико добро познатих аналитичких зависности ових величина код класичних бетона.



Слика 3. Одређивање реципрочне вредности ефективног водоцементног фактора на основу циљане чврстоће при притиску и резултата претходних проба

Описани поступак који укључује пробне мешавине нарочито је важан имајући у виду специфичности производних погона, тј. фабрика бетона. За разлику од лабораторијских услова где се сав агрегат потпуно суши, хлади, а затим дозира у мешалицу/миксер уз срачунату количину воде, у савременим производним погонима врши се аутоматска даљинска детекција влажности ускладиштеног агрегата и према томе корекција количине воде која се уноси у мешавину. Пробне мешавине су значајне и због постојања ефекта мешалице, тј. различитих конзистенција које се за исту рецептуру добијају приликом справљања у различитим типовима мешалица, па и о овоме треба водити рачуна приликом састављања рецептуре.

10.1.2. Експериментално испитивање

Са циљем потврђивања претходно описаног концепта за утврђивање рецептуре, тј. пројектовање састава и технологије справљања бетона са 50% и 100% замене крупног

природног агрегата рециклираним (RAC50 и RAC100), потребних физичко-механичких карактеристика, спроведено је експериментално испитивање.

10.1.2.1. Компонентни материјали

Испитивања компоненталних материјала спроведена су у Лабораторији за материјале Грађевинског факултета у Београду. Ова испитивања су била неопходна за састављање рецептура бетонских мешавина. У оквиру испитивања компоненталних материјала, спроведена су испитивања агрегата (природног и рециклираног), док је као везиво коришћен стандардни, комерцијални цемент ознаке СЕМ II 42.5R са 20% мешаног додатка (силикатна прашина и кречњак). Вода која је коришћена је из београдског градског водовода, и нису испитивана њена физичка и хемијска својства.

Физичко-механичка својства агрегата

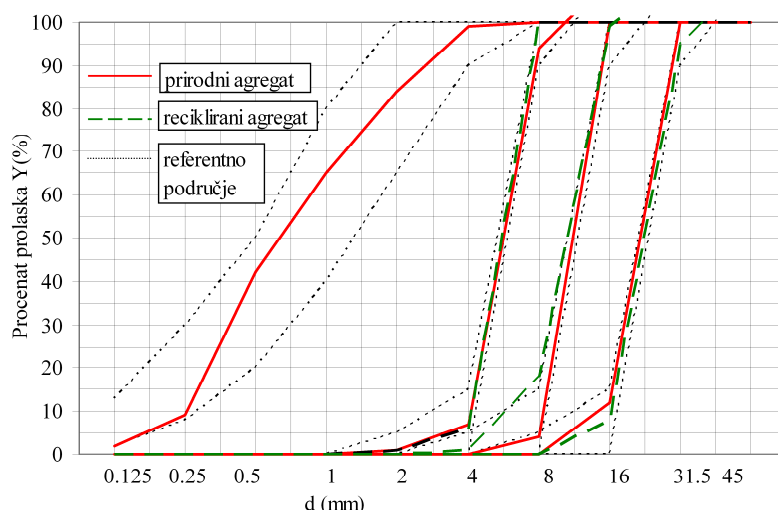
Две врсте крупног агрегата су коришћене за производњу бетона- природни агрегат (Моравац) и агрегат од рециклираног бетона. Рециклирани агрегат је добијен из два различита извора- рециклирањем бетонског отпада од срушене армиранобетонске конструкције старе 40 година и рециклирањем испитаних лабораторијских узорака. Својства оригиналног бетона нису била позната. Мешање рециклираних агрегата различитог порекла имало је за циљ симулацију ситуације из праксе где се у рециклажни погон допрема бетонски отпад различитог квалитета, порекла и својства. Предметни агрегати нису садржали нечистоће (опеку, гипс, малтер, земљу, стакло итд.), чиме је омогућена обрада у мобилном рециклажном постројењу- дробилици са магнетним сепаратором за уклањање арматуре. Имајући у виду закључке претходних истраживања који су указивали на низ негативних ефеката примене рециклираног ситног агрегата, као прва фракција (0/4 мм) коришћен је природни сигни агрегат у свим мешавинама. Резултати испитивања физичких и механичких својстава крупног природног и рециклираног агрегата приказани су у табели 1.

Својство	Технички захтев	Тип агрегата	Величина зрна		
			4/8 mm	8/16 mm	16/31.5 mm
Запремински коефицијент [%]	-	RCA	29.0	20.7	28.6
Дробљивост (у цилиндру) [%]	≥18	NA	27.4	27.1	29.7
Садржај ситних честица < 0.063 [%]	-	RCA	23.0	26.1	32.7
SSD ¹ запреминска маса [kg/m ³]	< 30	NA	21.0	24.0	28.9
Запреминска маса у збијеном стању [kg/m ³]	-	RCA	0.38	0.38	0.00
Запреминска маса у насутом стању [kg/m ³]-	< 1	NA	0.23	0.08	0.12
10 min	-	RCA	2405	2456	2482
30 min	-	NA	2593	2595	2601
Упијање воде [%]	2000-3000	RCA	1275	1398	1694
10 min	-	NA	1532	1587	1941
30 min	-	RCA	1132	1260	1521
24h	-	NA	1406	1463	1814
10 min	-	RCA	4.1	3.5	3.4
30 min	-	RCA	4.1	4.0	3.7
24h	-	RCA	4.6	3.7	3.8
10 min	-	NA	0.8	0.6	0.4
30 min	-	NA	0.8	0.6	0.5
24h	≤1.5	NA	0.9	0.8	0.5

Табела 1. Карактеристике природног и рециклираног агрегата

Гранулометријски састав агрегата и мешавине

Одређивање гранулометријског састава извршено је методом сувог сејања, а линије просејавања природног агрегата као и мешавине рециклираног агрегата по фракцијама (0/4, 4/8, 8/16 и 16/31,5 мм), приказане су на слици 4.



Слика 4. Гранулометријски састави природног и рециклираног агрегата

10.1.2.2. Пројектовање бетонских мешавина

Пројектоване су две групе мешавина са циљаним чврстоћама при притиску од: 42 МПа (Група 1) и 36 МПа (Група 2). Свака група мешавина састојала се од 3 врсте бетона: NAC - бетон са комплетно природним агрегатом, RAC50 - бетон са 50% замене крупног природног агрегата рециклираним и RAC100 - бетон са 100% замене крупног природног агрегата рециклираним. Код свих бетона циљана је пластична конзистенција, која изражена мером слегања треба да износи 8 ± 2 цм након изабраног временског периода од 30 минута, што би требало да симулира време транспорта бетона до градилишта. Свака од рецептура је одређена на основу резултата испитивања пробних мешавина, тј. претходно описаног концепта пројектовања мешавина (слика 3). Једначине тренд линија са којима је успостављена веза између реципрочне вредности ефективног водоцементног фактора ($1/w$) и чврстоће при притиску (f_c) приказане су у табели 2.

	Група 1 ($f_c=42$ МПа)	Група 2 ($f_c=36$ МПа)
NAC	$f_c = 25.549 \cdot \frac{1}{w} - 6.7759$	$f_c = 27.648 \cdot \frac{1}{w} - 10.393$
RAC50	$f_c = 31.979 \cdot \frac{1}{w} - 17.669$	$f_c = 33.845 \cdot \frac{1}{w} - 20.81$
RAC100	$f_c = 25.865 \cdot \frac{1}{w} - 8.5713$	$f_c = 27.927 \cdot \frac{1}{w} - 12.046$

Табела 2. Једначине везе циљане чврстоће при притиску и водоцементног фактора

На основу једначина из табеле и циљаних чврстоћа при притиску (42 МПа и 36 МПа), срачунате су вредности ефективних водоцементних фактора за бетоне са 0%, 50% и 100% RCA. С обзиром да је једна од хипотеза експерименталног истраживања, да се бетони са 50% крупног RCA и елементи конструкција направљени од тог бетона могу користити као еквивалент бетонима и елементима са потпуно природним агрегатом, усвојен је исти водоцементни фактор за бетоне са 0% и 50% RCA. Поштујући кораке у процедури пројектовања састава бетона објашњене у претходном поглављу, одређене су рецептуре за три по врсте бетона са циљаном чврстоћом при притиску од 42 МПа, табела 3, односно, са циљаном чврстоћом при притиску од 36 МПа, табела 4.

Ознака бетона	Цемент, m_c	Вода		Природни агрегат				Рециклирани агрегат		
		m_v	Δm_v	Песак Крупан агрегат				Крупан агрегат		
				[0-4]	[4-8]	[8-16]	[16-31.5]	[4-8]	[8-16]	[16-31.5]
NAC-42	354	185	-	600	300	300	564	-	-	-
RAC50-42	354	185	20	598	128	171	256	128	171	256
RAC100-42	365	186	38	576	-	-	-	198	379	494

* sve vrednosti su u $[kg/m^3]$

Табела 3. Састав бетонских мешавина за жељену чврстоћу при притиску од 42 МПа

Ознака бетона	Цемент, m_c	Вода		Природни агрегат				Рециклирани агрегат		
		m_v	Δm_v	Песак Крупан агрегат				Крупан агрегат		
				[0-4]	[4-8]	[8-16]	[16-31.5]	[4-8]	[8-16]	[16-31.5]
NAC-36	302	180	-	619	310	310	583	-	-	-
RAC50-36	302	180	21	618	132	177	265	132	177	265
RAC100-36	312	181	40	597	-	-	-	204	391	511

Табела 4. Састав бетонских мешавина за циљану чврстоћу при притиску од 36 МПа

10.1.2.3. Физичко механичка својства свежег и очврслог бетона

У табели 5 су приказани резултати испитивања својстава бетонских мешавина Групе 1, у свежем стању- запреминске масе бетона и слегања које је мерено у два тренутка времена, као и карактеристика бетона у очврслом стању- запреминске масе, чврстоће при притиску (f_c), модула еластичности (E_c) и чврстоће при затезању цепањем (f_t).

Ознака мешавине	Карактеристике свежег бетона			Карактеристике очврслог бетона			
	Запреминска маса $[kg/m^3]$	Слегање $[cm]$		Запреминска маса $[kg/m^3]$	f_c $[MPa]$	E_c $[GPa]$	f_t $[MPa]$
		Одмах	Након 30 min.				
NAC-42	2402	13.2	8.0	2400	43.7	26.6	3.1
RAC50-42	2343	12.0	9.7	2342	44.2	26.2	2.7
RAC100-42	2316	13.5	9.7	2310	42.5	25.4	3.2

¹ 34, 37 и 34 дана старости узорака за бетоне NAC, RAC50 и RAC100, респективно

Табела 5. Физичко-механичке карактеристике бетона са пројектованом чврстоћом од 42 МПа

У табели 6 су приказани резултати испитивања својстава бетонских мешавина Групе 2, у свежем стању- запреминске масе бетона и слегања које је мерено у два тренутка времена, као и карактеристика бетона у очврслом стању- запреминске масе, чврстоће при притиску (f_c), статичког и динамичког модула еластичности (E) и чврстоћа при затезању цепањем (f_{sp}) и савијањем ($f_{ct,fl}$).

Ознака мешавине	Слегање $[cm]$		Запреминска маса $[kN/m^3]$		f_c	E_c	E_d	$f_{ct,sp}$	$f_{ct,fl}$
	$t=0$	$t=30$	Свеже стање	Очврсло стање					
	min	min			$[MPa]$	$[GPa]$	$[GPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$
NAC-36	11.8	6.3	2401	2384	38.5	28.0	39.7	3.0	7.0
RAC50-36	11.0	6.5	2356	2345	41.8	24.5	37.2	3.2	7.3
RAC100-36	12.7	6.3	2331	2320	43.1	25.1	34.9	3.1	6.6

Табела 6. Физичко-механичке карактеристике бетона са пројектованом чврстоћом од 36 МПа

Јединствен закључак за сва три бетона из обе групе је да су задовољила задати услов слегања Абрамсовог конуса од 8 ± 2 цм (пластична конзистенција) након 30 минута, што треба да обезбеди адекватну уградљивост у елементе конструкције на градилишту након транспорта из фабрике бетона.

Добијене вредности чврстоћа при притиску на 28 дана, код свих бетона задовољавају циљаних 42 МПа (Група 1), односно 36 МПа (Група 2), што и јесте био основни циљ пројектовања бетонских мешавина са рециклираним агрегатом по описаној методологији.

10.2. Усаглашавање са захтевима стандарда за пројектовање конструкција од бетона на бази рециклираног агрегата

Након што су донети одговарајући закључци у вези технологије производње зелених бетона на бази агрегата од рециклираног бетона, следећи циљ овог техничког решења је дефинисање прорачуна носивости и употребљивости армираних елемената направљених од таквог бетона, односно усаглашавање са стандардима за конструкције. Разматрани су основни типови напрезања типични за гредне и плочасте елементе – савијање и смицање. Спроведен је следећи програм:

1. Сопствена експериментална испитивања на гредним елементима у пуној размери,
2. Поређење резултата испитивања са рачунски добијеним вредностима на основу постојећих модела за бетоне са природним агрегатом, као и корекција модела
3. Упоредна анализа сопствених и других експерименталних резултата.

На основу оваквог програма донети су општи закључци у смислу потврђивања важења постојећих модела за бетоне са природним агрегатом, који су део стандарда за конструкције, или корекција тих модела како би важили и за бетоне са рециклираним агрегатом.

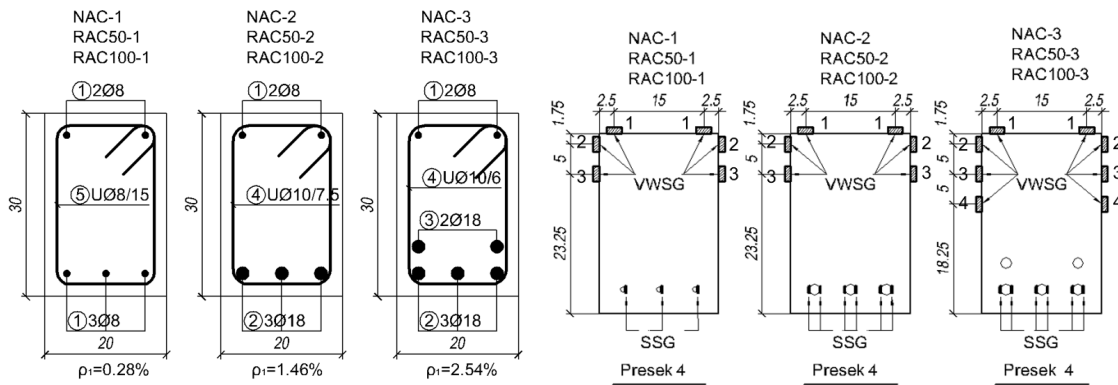
10.2.1. Експериментална испитивања

10.2.1.1. Понашање носача изложених доминантно савијању

Због карактеристика RCA и специфичности технологије RAC бетона у односу на упоредне NAC бетоне направљени са истим водовезивним фактором, ово не гарантује нужно и исту чврстоћу ових бетона при притиску. Како би се обезбедила усклађеност са тренутном праксом у бетонској индустрији где се пројектом дефинишу и са фабрика бетона поручују бетони одређене класе чврстоће (марке), а не бетони одређеног водовезивног фактора, неопходно је утврдити однос носивости греда изложених савијању, а које су направљене од бетона са различитом количином рециклираног агрегата. Даље, потребно је показати да такав однос важи за различите проценте армирања.

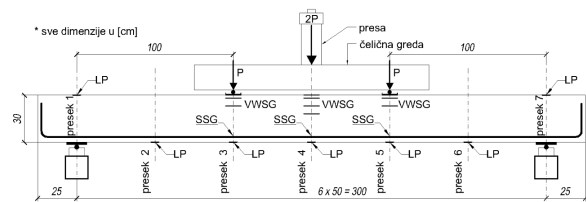
Диспозиција експеримента и мерна опрема

У оквиру испитивања понашања на савијање направљене су по три греде од три врсте бетона дефинисаних у 10.1.2.2 (NAC-42, RAC50-42 и RAC100-42), са практично истом чврстоћом при притиску (табела 5), али са различитим процентом подужне затегнуте арматуре: 0.28% ('минимум') – греде NAC-1, RAC50-1 и RAC100-1, 1.46% ('средње') - греде NAC-2, RAC50-2 и RAC100-2, и 2.54% ('максимум') - греде NAC-3, RAC50-3 и RAC100-3. Детаљи армирања свих греда на нивоу попречних пресека приказани су на слици 5, а диспозиција испитивања и мерне опреме, на слици 6.



Слика 5. Армирање греда испитиваних савијање – попречни пресеци

на



Слика 6. Диспозиција испитивања и распоред мерне опреме

Кључни резултати испитивања

Мерене вредности параметара при испитивања греда са различитим процентом армирања подужном затегнутом арматуром (ρ_1) приказани су у табели 7: гранична сила лома ($2P_u$), сила при којој гредa прелази праг течења ($2P_y$) и одговарајући угиби (δ_y , δ_u), сила при којој долази до појаве прве прслине ($2P_{cr}$) као и угиби при експлоатационом оптерећу (δ_s). Такође, у истој табели приказане су максималне ширине прслина под експлоатационим оптерећењем (w_{max}), као и дилатације на притиснутој ивици бетона (ϵ_c) у фази оптерећења непосредно пред лом. Гредe су испитиване у старости од 28 до 37 дана, табела 7.

Ознака греде	ρ_1 [%]	Старост [дани]	$2P_{cr}^1$ [kN]	$2P_y^2$ [kN]	$2P_u$ [kN]	δ_s [mm]	δ_y [mm]	δ_u [mm]	$\Delta 2P_u^3$ [%]	δ_u/δ_y	w_{max} [mm]	l_{cr} [cm]	ϵ_c^4 [%]
NAC-1	0.28	29	25	48.7	56.7	2.2	12.5	75.4	-	6.0	-	-	0.92
RAC50-1	0.28	33	20	44.9	54.0	4.2	12.8	97.9	-4.8	7.7	0.05	27.0	1.48
RAC100-1	0.28	28	20	46.7	53.6	3.5	14.4	92.6	-5.3	6.4	0.05	28.0	1.04
NAC-2	1.46	30	40	202.5	217.1	7.5	22.2	45.8	-	2.1	0.05	14.8	2.75
RAC50-2	1.46	35	40	210.0	221.1	7.4	25.0	46.2	1.8	1.8	0.05	12.8	2.5
RAC100-2	1.46	30	40	202.0	210.8	7.2	22.9	38.9	-2.9	1.7	0.08	11.3	2.86
NAC-3	2.54	34	60	-	275.2	8.9	-	28.5	-	-	0.1	9.3	4.13
RAC50-3	2.54	37	60	-	320.7	8.0	-	34.5	16.6	-	0.05	10.0	3.24
RAC100-3	2.54	34	60	-	285.2	9.0	-	30.4	3.7	-	0.05	11.6	3.56

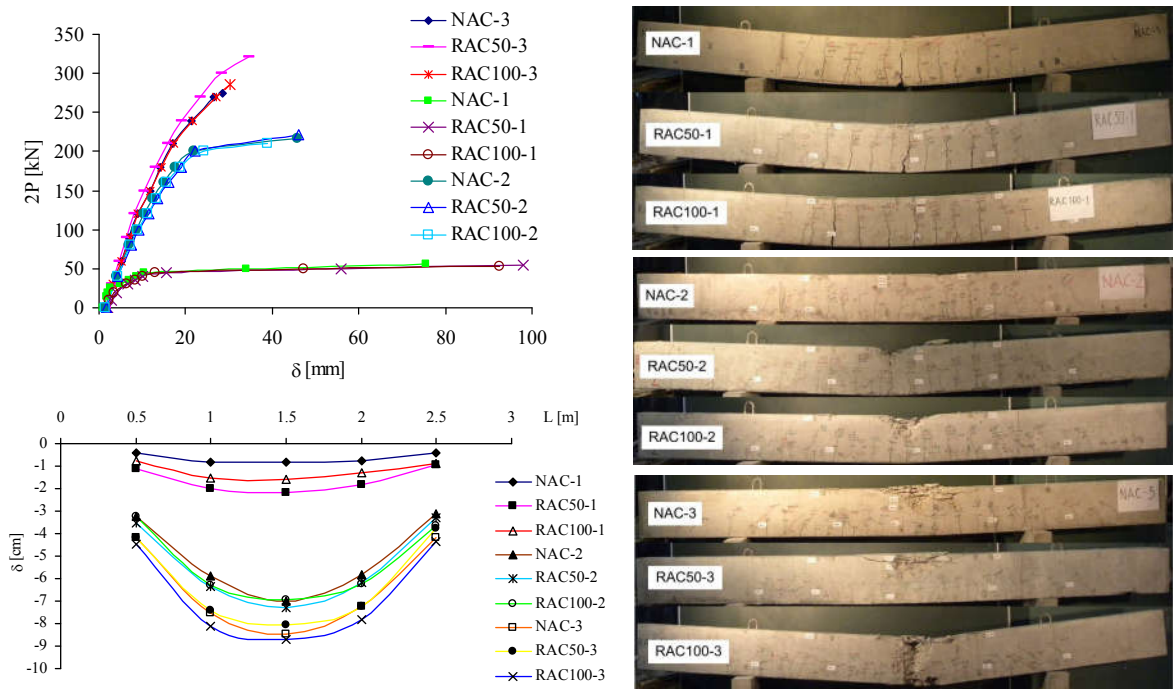
¹ примећено голим оком на крају фазе оптерећења

² течење греде, процењено на основу облика дијаграма сила-померање

³ у односу на NAC греду са истим процентом армирања затегнутом арматуром

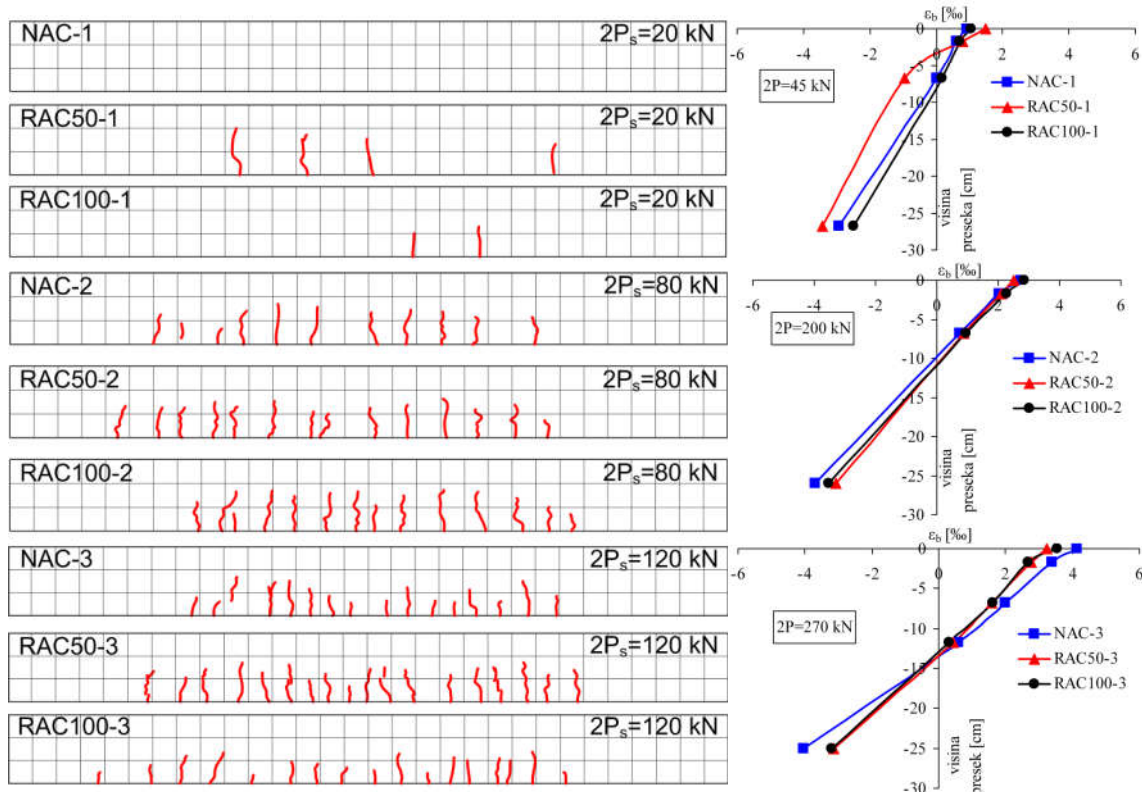
⁴ дилатације у бетону, крајње притиснуто влакно, пресек у средини распона, при сили од 45 kN, 200 kN и 270 kN за гредe са 0.28%, 1.46% и 2.54% арматуре, респективно

Табела 7. Резултати испитивања греда на савијање

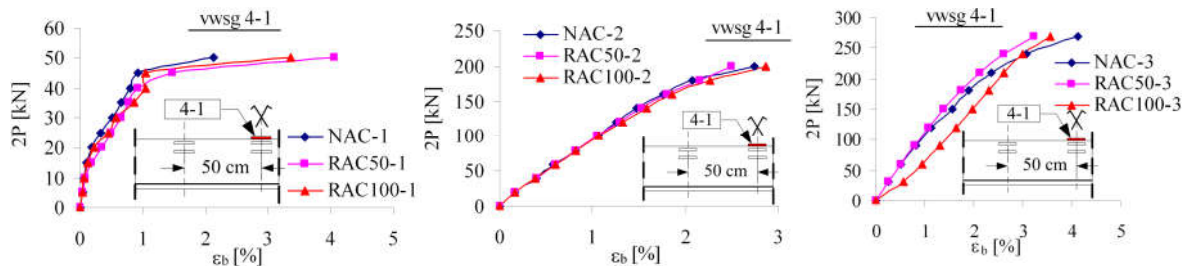


Слика 7. Дијаграми сила ($2P$) - угиб (δ) (горе лево), дијаграми угиба дуж распона (доле лево), изглед испитаних греда до лома савијањем

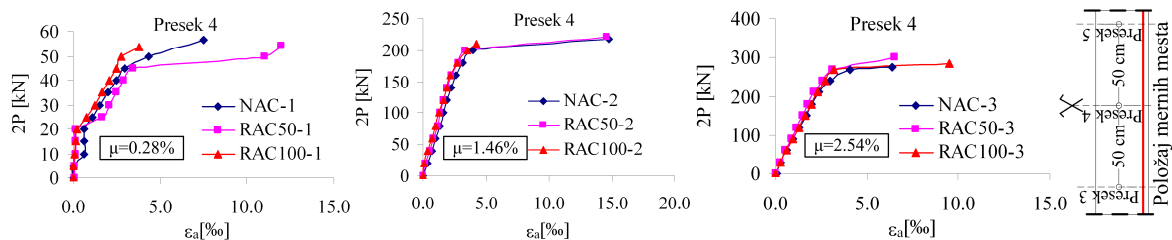
Зависност сила-померање за оптерећење до лома код испитаних греда не зависи значајно од типа примењеног бетона, тј. од количине рециклираног агрегата. Разлике у облику дијаграма сила-померање између NAC, RAC50 и RAC100 греда које су армиране истом количином арматуре, могу се сматрати занемарљивим. Дуктилност, дефинисана као однос угиба у средини распона при лому (δ_u) и при течењу греде (δ_y), опада са порастом процента армирања, табела 7. Ипак, разлике у дуктилности међу гредама са истим процентом армирања, независно од процента примењеног рециклираног агрегата у бетону, могу се сматрати занемарљивим. Такође, разлике у вредностима сила лома, тј. граничним носивостима између NAC, RAC50 и RAC100 греда које су армиране истом количином арматуре, могу се сматрати занемарљивим. Величина површи лома као и ниво деструкције бетона при лому греда при савијању значајно је условљен количином рециклираног агрегата. Са повећањем количине рециклираног агрегата расте величина површи лома, а већи је и ниво деструкције бетона, слика 7 (десно). Нису уочене значајне разлике у угибима NAC и RAC греда са истим процентом армирања за експлоатациони ниво оптерећења, слика 7 (лево). Извесне разлике уочене су у гредама са минималним процентом армирања, због нешто ранијег отварања прслина, односно мањег садејства затегнутог бетона и арматуре између прслина код RAC греда. У оквиру група греда са истом подужном арматуром, средње растојање и ширина прслина за ниво експлоатационг оптерећења могу се такође сматрати сличним, имајући у виду релативно грубу процену ширине прслина, слика 8 (лево) и табела 7. Линеарна расподела дилатација по висини пресека у фази пред фазу лома (слика 8 десно) доказује да важи Бернулијева хипотеза равних пресека, без обзира на количину рециклираног агрегата у бетону, што је изузетно важна претпоставка за прорачун армиранобетонских пресека. Нема значајних разлика у дилатацијама у бетону и арматури између NAC и RAC греда са истим процентом армирања, за све нивое оптерећења, слика 9 и слика 10.



Слика 8. Шематски приказ слика прлина при експлоатационом оптерећењу (лево) и распоред дилатација по висини preseka у фази блиској граничној носивости (десно)



Слика 9. Дилатације у бетону- preseк у средини распона



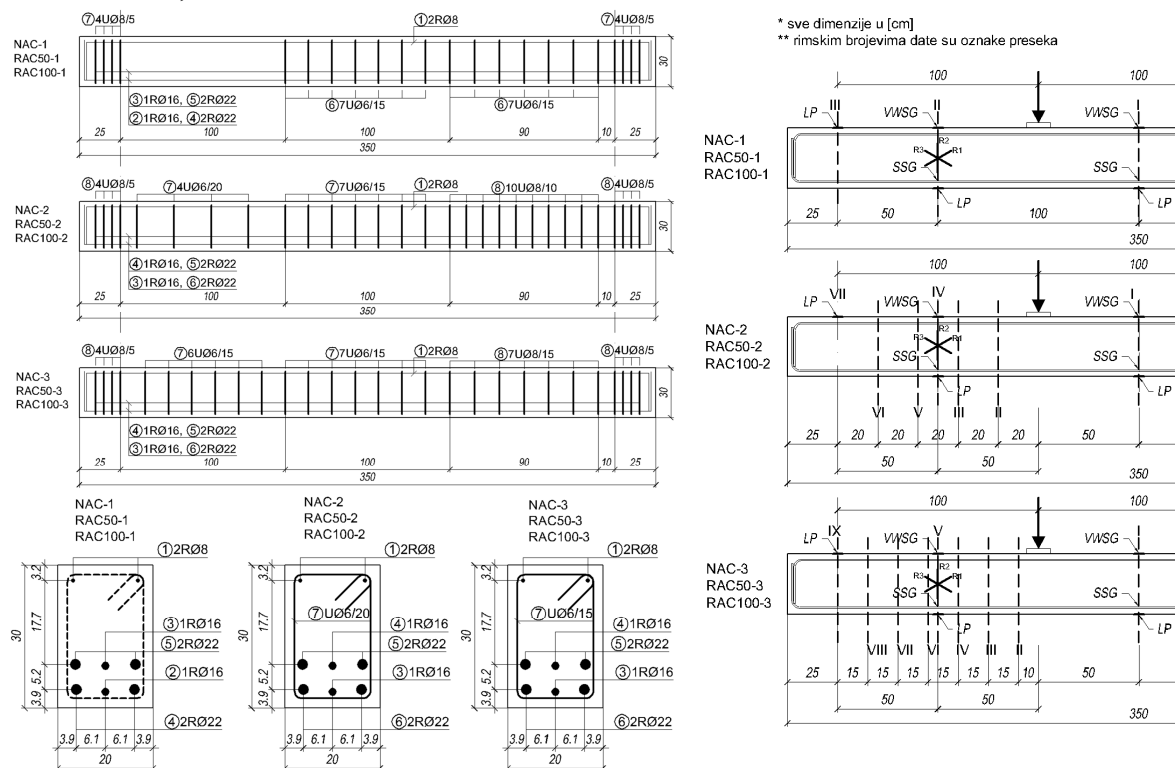
Слика 10. Дилатације у арматури- preseк у средини распона греда

10.2.1.2. Понашање носача изложених доминантно смицању

Диспозиција експеримента и мерна опрема

Направљене су по три греде од три врсте бетона (NAC-36, RAC50-36 и RAC100-36) чија су физичко-механичка својства приказана у табели 6 (део 10.1.2.3.), са различитим процентом попречне арматуре: 0%– греде NAC-1, RAC50-1 и RAC100 0.14% (минимална

попречна арматура) - греде NAC-2, RAC50-2 i RAC100-2, и 0.19% - греде NAC-3, RAC50-3 i RAC100-3, слика 11.



Слика 11. Детаљи армирања и поставка мерне опреме код греда испитиваних до лома смицањем

Кључни резултати испитивања

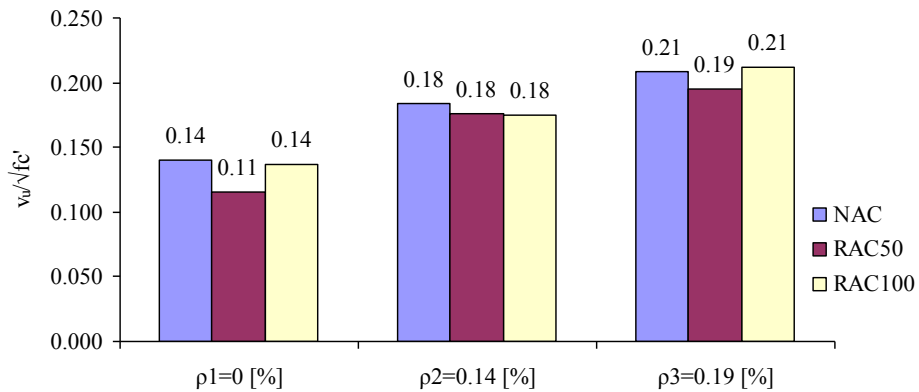
Резултати мерења при испитивања греда са различитим процентом армирања попречном арматуром (ρ_l) сумарно су приказани су у табели 8 и на основу њих спроведене су одговарајуће анализе и прорачуни. У табели 8 дате су вредности следећих величина: сила при формирању вертикалних прелина услед савијања ($2P_{cr,fl}$) сила при формирању косих прелина услед главних напона затезања ($2P_{cr,s}$), гранична сила лома ($2P_u$), однос силе лома и силе при формирању косе прелине као индикатора дуктилности греда, нормализована смичућа носивост $(v_c/\sqrt{f_c})^1$, као и угиби (δ_s) при експлоатационом оптерећењу ($2P=0.4 \cdot 2P_u$) и угиби при лому (δ_u).

Oznaka grede	ρ_l [%]	Starost [dani]	$2P_{cr,fl}^1$ [kN]	$2P_{cr,s}^2$ [kN]	$2P_u$ [kN]	$2P_u/2P_{cr,s}$	$v_c/\sqrt{f_c}^1$	δ_s [mm]	δ_u [mm]
NAC-1	0	24	37	160	212.5	1.33	0.140	5.10	17.4
RAC50-1	0	24	40	160	183.5	1.15	0.115	4.5	13
RAC100-1	0	25	50	180	209.5	1.16	0.137	4.7	19.2
NAC-2	0.142	26	35	160	281.3	1.76	0.184	6.92	25.6
RAC50-2	0.142	26	40	160	283.9	1.77	0.176	7.66	22.7
RAC100-2	0.142	26	30	180	269.9	1.50	0.175	6.68	24.7
NAC-3	0.189	28	30	180	319.8	1.78	0.209	7.68	28.5
RAC50-3	0.189	30	30	180	313.7	1.74	0.195	7.42	28.8
RAC100-3	0.189	28	30	180	326.8	1.82	0.212	8.09	30.8

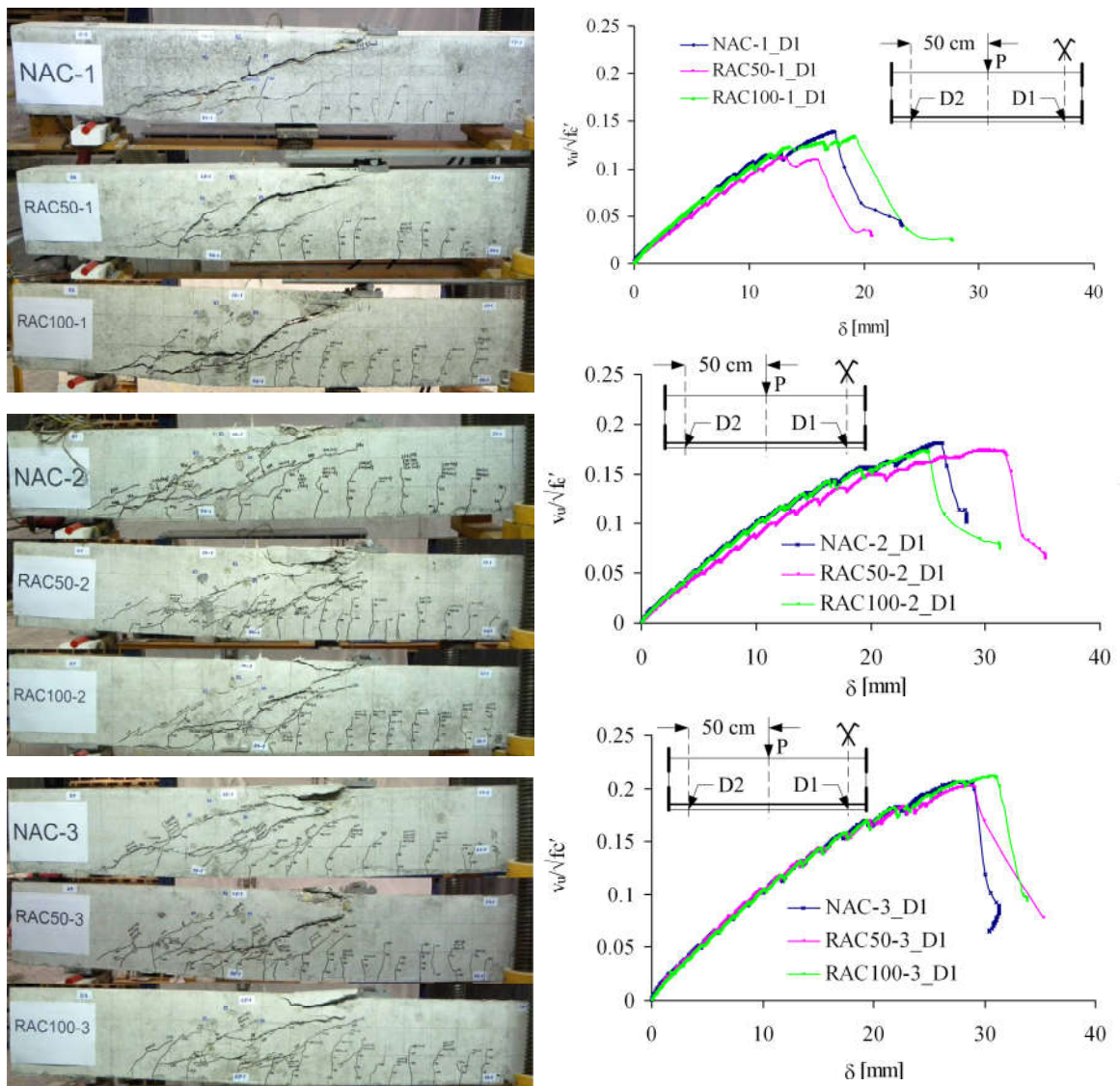
Табела 8. Резултати испитивања греда на смицање

Нормализоване граничне силе лома код греда од бетона са 0%, 50% и 100% рециклираног агрегата и истим процентом армирања попречном арматуром, разлике су до 5%, слика 12. Код греда RAC100 и NAC без смичуће арматуре, смичућа носивости је

практично иста, док је код греде RAC50 била 15% мања у односу на упоредну NAC греду. Смичућа носивост је изражена преко напона смицања, нормализованог помоћу квадратног корена вредности чврстоће при притиску примењеног бетона. Ово је било неопходно како би се елиминисао ефекат различитих чврстоћа бетона при притиску (табела 6).



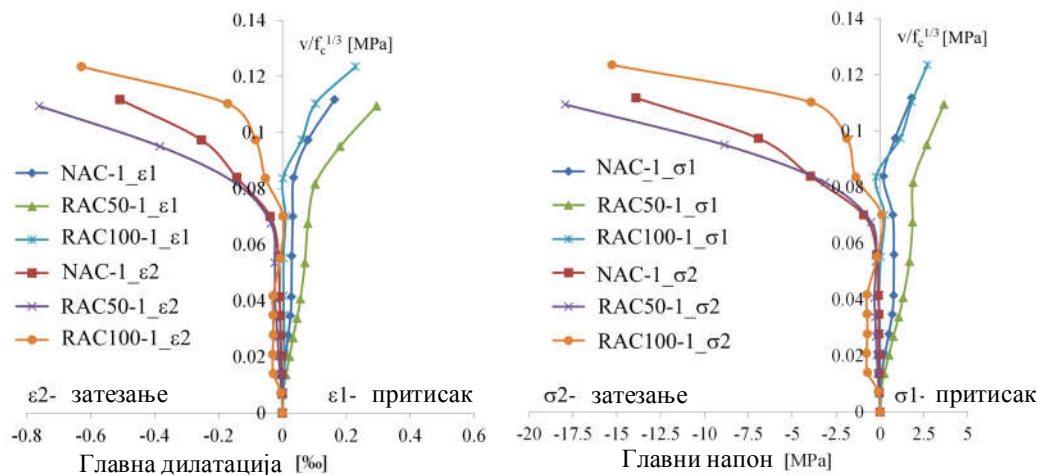
Слика 12. Однос нормализованих смичућих носивости испитаних греда



Слика 13. Лом греда смицањем (лево); зависност нормализованог смичућег напона и угиба (десно)

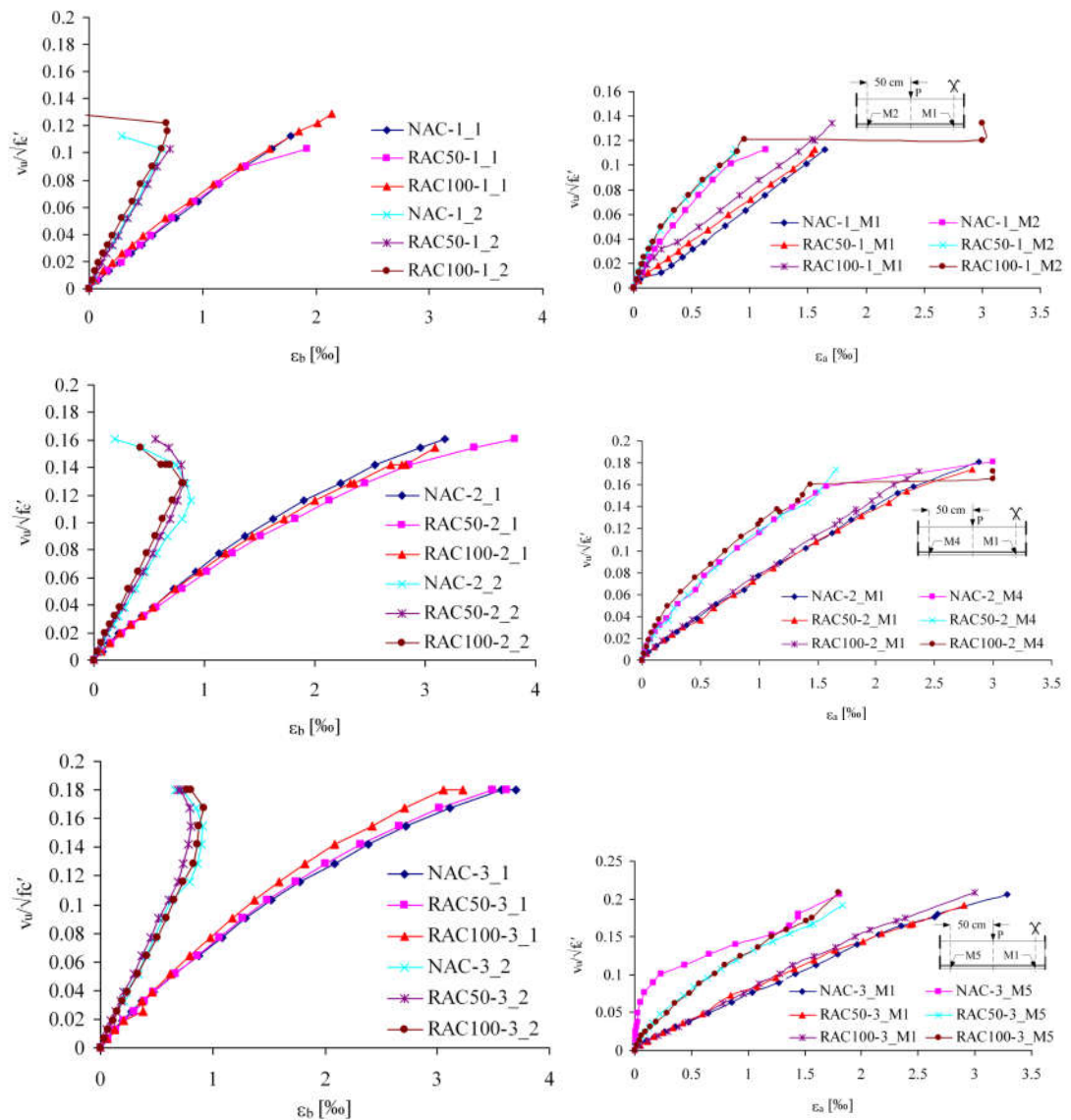
Посматрајући дијаграме зависности деформације и нормализоване смичуће чврстоће могу се уочити неколико карактеристичних области, слика 13 десно. Почетни, линеарни део дијаграма се може поделити на два линеарна сегмента, један до и други након формирања првих прслина од савијања, иако то није видљиво на дијаграму. Први значајан пад силе се дешава при појави косих смичућих прслина и њиховом ширењу, што значајно редукује крутост све три греде. Прве смичуће прслине у NAC и RAC гредама без смичуће арматуре формирале су се при сличном нивоу напона. У све три греде, прслине су заправо биле формиране пре него што су уочене голим оком, што је закључено на основу срачунатих главних дилатација и главних напона, слика 14. С обзиром на релативно велики однос a/d , у смичућој отпорности доминира гредно дејство на које у великој мери утиче формирање косих прслина, тако да је овај пад очекиван. Трећи сегмент дијаграма и пораст отпорности при повећању деформација резултат је “interlock” ефекта између зрна агрегата. За разлику од греда NAC-1 и RAC100-1, тај ефекат је очигледно изостао код RAC50-1 греде, где је одмах након појаве доминантне косе прслине дошло до рапидног повећања угиба и лома носача, слика 13 десно. Облици лома код RAC греда без смичуће арматуре не разликују се од модела лома NAC греде, али извесне разлике у углу и облику смичуће прслине је могуће уочити, слика 13 лево. Код греда са попречном арматуром, након формирања косих прслина дошло је до активирања узенгија које секу косу прслину чиме је обезбеђен бољи “interlock” ефекат и спречен значајан пад крутости све до течења узенгија.

Греде од бетона са рециклираним агрегатом, без обзира на количину RCA, без попречне арматуре, имају мању дуктилност у односу на греде са природним агрегатом, док дуктилност греда које имају попречну арматуру не зависи од количине RCA у бетону. Разлике у угибима греда од бетона са 0%, 50% и 100% RCA са истом количином попречне и подужне арматуре, при експлоатационом оптерећењу у оквиру су границе од 10%, слика 13 десно.



Слика 14. Главне дилатације (лево) и главни напони (десно)

Ширина прслина, као и механизам лома греда услед смицања са истом количином попречне арматуре не зависи од количине, тј. процентуалног садржаја рециклираног агрегата у бетонским гредама (слика 13 лево); распоред прслина такође је сличан, али је код RAC греда између доминантних косих прслина приметно формирање серија мањих (тањих и краћих) прслина. Дилатације у бетону и подужној арматури код греда од бетона са 0%, 50% и 100% RCA са истом количином попречне арматуре, могу се сматрати истим, слика 15. Дилатације у узенгијама код RAC50 и RAC100 греда мање су у поређењу са дилатацијама узенгија код NAC греда. Ово указује на мањи допринос узенгија, а већи допринос “agregat interlock” механизма у преношењу смицања код греда са рециклираним агрегатом.



Слика 15. Дилатације у бетону (лево) и дилатације у подужној арматури (десно)

10.2.2. Упоредна анализа експерименталних и аналитички срачунатих параметара носивости и употребљивости

10.2.2.1. Момент савијања у тренутку формирања прслина

Момент савијања у тренутку формирања прслина значајан је параметар при одређивању ширине прслина и угиба савијаних елемената. Извршено је поређење између вредности које су забележене у тренутку визуелног уочавања првих прслина и рачунских вредности. Рачунске вредности момента савијања при појави прслина ($M_{cr,rač}$) према Еврокоду 2 (CEN, 2004), добијају се из израза који зависе од чврстоће бетона при затезању савијањем, а која се, пак, може добити прерачунавањем са мерених вредности чврстоће при притиску ($f_{ctm,n}^1$) или чврстоће при затезању цепањем ($f_{ctm,n}^2$). На овај начин остварена су два циља: утврђивање односа стварног, експерименталног ($M_{cr,exp}$) и очекиваног, рачунског момента савијања при формирању прслина ($M_{cr,rač}$) код бетона са и без RC агрегата и тестирање примене веза између основних механичких својстава које важе код обичних бетона на бетонима са рециклираним агрегатом. Срачунате и у експерименту забележене вредности момента савијања при појави прслина ($M_{cr,rač}$ и $M_{cr,exp}$), као и њихов однос, приказани су у табели 9.

EC2	$f_{ctm,fl}^1$	$f_{ctm,fl}^2$	$M_{cr,rač}^1$	$M_{cr,rač}^2$	$M_{cr,exp}$	$M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$	$M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$
Ozn. Bet.	[MPa]	[MPa]	[kNm]	[kNm]	[kNm]		
NAC-1	4.36	3.63	13.1	10.9	12.5	0.96	1.15
NAC-2	4.36	3.63	13.1	10.9	12.5	0.96	1.15
NAC-3	4.36	3.63	13.1	10.9	13.5	1.03	1.24
RAC50-1	4.30	3.16	12.9	9.5	9	0.70	0.95
RAC50-2	4.30	3.16	12.9	9.5	12.5	0.97	1.32
RAC50-3	4.30	3.16	12.9	9.5	10	0.78	1.06
RAC100-1	4.14	3.74	12.4	11.2	12	0.97	1.07
RAC100-2	4.14	3.74	12.4	11.2	9	0.72	0.80
RAC100-3	4.14	3.74	12.4	11.2	11	0.89	0.98
Srednja vrednost					NAC	0.98	1.18
					RAC	0.84	1.03

Табела 9. Рачунске и експерименталне вредности момента при појави прелина према EC2

Просечне вредности односа $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$ за NAC и RAC узорке (без обзира на количину RC агрегата), износе 0.98 и 0.84 респективно, док за однос $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$ просечне вредности износе 1.18 и 1.03, респективно. Очигледно је да EC2 даје сасвим коректну предикцију тренутка формирања прелина од савијања код NAC греда, уколико се прорачун базира на чврстоћи при притиску. С друге стране, просечан однос $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^1$ за RAC греде износи 0.84, што значи да EC2 прецењује чврстоћу при затезању RAC бетона, тј. појава прелина код RAC греда реално се дешава при нижем оптерећењу од очекиваног (рачунског). Уколико је прорачун момента појаве прелина код RAC греда базиран на чврстоћи при затезању цепањем, добијају се боље предикције (у смислу да су на страни сигурности) са просечном вредношћу односа $M_{cr,exp}/M_{cr,rač}^2$ од 1.03.

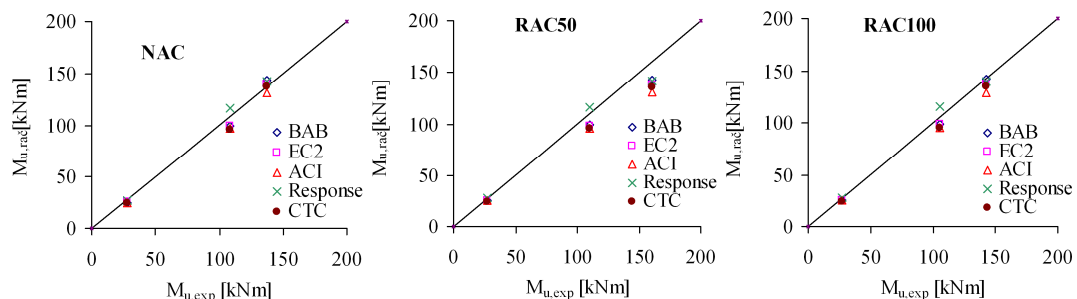
10.2.2.2. Гранична носивост на савијање

Гранични момент савијања или момент носивости елемената доминантно изложених савијању зависи од величине пресека, процента армирања и врсте примењене арматуре, као и од чврстоће бетона при притиску, односно дијаграма напон-дилатација за примењени бетон. Ако се пореде греде истог попречног пресека, са истом количином и врстом арматуре, а постигнута је иста чврстоћа при притиску, јасно је да ће реална носивост доминантно зависити од напонско-деформацијске везе бетона, а у рачунском смислу, од усвојеног модела за бетон чиме ће се дефинисати сила у притиснутом бетону и крак унутрашњих сила. У том смислу, извршено је поређење рачунских и експерименталних вредности граничних момената савијања код свих греда. Рачунске вредности добијене су применом различитих прописа – БАБ'87 (Бетон и армирани бетон према БАБ '87- Приручник, 1995), Evrokod 2 (CEN, 2004) и ACI (ACI Committee 318, 2008), као и на основу програма RESPONSE 2000 (Bentz, 2000) са дефинисаним понашањем бетона и челика, који користи методу нумеричке интеграције. Осим ових прописа за класичне, NAC греде, тестиран је и израз за гранични момент савијања дат у Кинеским прописима за елементе конструкције од рециклираног бетона (СТС) (Xiao et al, 2013). За гранични експериментални момент савијања усвојен је момент савијања срачунат на основу максималне забележене силе на преси при испитивању. Допринос сопствене тежине греде том приликом је занемарен. За прорачун према БАБ87 и EC2 (CEN, 2004) усвојени су дијаграми напон-дилатација у бетону у облику парабола-права, са експериментално утврђеним чврстоћама при притиску и карактеристичним вредностима дилатација дефинисаним у овим прописима. За прорачун према АЦИ усвојен је блок-дијаграм напона притиска у бетону (ACI Committee 318, 2008). За дефинисање криве напон-дилатација у програму RESPONSE 2000 коришћен је модел који су предложили Popovics, Thorenfeldt и Collins (Collins&Mitchell, 1991). Сумарни резултати испитивања односа граничних момената савијања одређених аналитички, нумеричком интеграцијом и експериментално, приказани су у табели 57.

Ozn. Bet.	BAB	EC2	ACI	R*	CTC	EXP	$M_{u,exp}/M_{u,rač}$				
	M_u	M_u	M_u	M_u	M_u	M_u	BAB	EC2	ACI	R*	CTC
	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]					
NAC-1	25.0	25.7	25.1	27.5	24.0	28.4	1.14	1.10	1.13	1.03	1.18
NAC-2	99.9	98.9	96.4	117.0	95.8	108.6	1.09	1.10	1.13	0.93	1.13
NAC-3	144.0	139.3	131.6	142.6	136.8	137.6	0.96	0.99	1.05	0.96	1.01
RAC50-1	24.9	25.7	25.1	27.5	24.0	27.0	1.08	1.05	1.08	0.98	1.12
RAC50-2	99.7	98.7	96.1	116.6	95.6	110.6	1.11	1.12	1.15	0.95	1.16
RAC50-3	143.5	138.7	130.7	142.1	136.3	160.4	1.12	1.16	1.23	1.13	1.18
RAC100-1	24.9	25.6	25.0	27.4	24.0	26.8	1.08	1.05	1.07	0.98	1.12
RAC100-2	99.3	98.9	95.3	115.9	95.1	105.4	1.06	1.07	1.11	0.91	1.11
RAC100-3	142.1	137.1	128.4	139.2	134.9	142.6	1.00	1.04	1.11	1.02	1.06
Srednja vrednost						NAC	1.06	1.06	1.10	0.97	1.11
						RAC	1.08	1.08	1.12	1.00	1.12
Standardna dev.						NAC	0.09	0.06	0.05	0.05	0.09
						RAC	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04

Табела 10. Рачунске и експерименталне вредности граничног момента савијања

Ако се упореде средње вредности односа $M_{u,rač}/M_{u,exp}$ μ за различите прописе, јасно је да сва три прописа дају конзервативне вредности граничне носивости на савијање, а да су најконзервативнији прописи АСИ и СТС. Дакле, према пропису који важи за RAC конструктивне елементе, гранични моменти савијања су просечно за 12% мањи од стварних. Штавише, мање су конзервативни када се примене на NAC греде, разлика је 11%. Ипак, врло важна чињеница је да је управо код прописа СТС стандардна девијација најмања, што говори о поузданости ове предикције. Анализа из Респонс-а показала је најбољу корелацију рачунских и експерименталних вредности граничних момената савијања, али за већину греда независно од врсте бетона, са неконзервативне стране, табела 57. Закључак ове анализе је да се приликом прорачуна граничног момента савијања RAC греда могу применити постојећи прописи за NAC елементе конструкција. У прилог томе иде чињеница да је грешка која се том приликом чини до 10% и да је у рангу грешке коју прави једини пропис за прорачун RAC елемената конструкција (СТС). Графичка презентација резултата из табеле 10 приказана је на слици 16.



Слика 16. Однос рачунских и експерименталних вредности граничних момената савијања за NAC, RAC50 и RAC100 греде

10.2.2.3. Деформације под краткотрајним оптерећењем

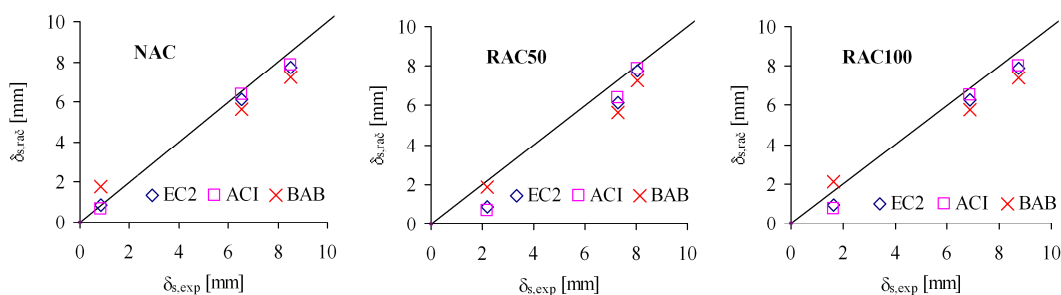
Једну групу чине греде са минималним процентом армирања, а другу групу чине греде са „средњим“ и „максималним“ процентом армирања. У оквиру прве групе, дакле минимално армираних греда, однос $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$ варира у врло широком опсегу од 0.34 до 1.99, у зависности од врсте бетона и прописа, табела 11. То је последица специфичности

случаја у коме је вредност експлоатационог оптерећења за које се рачунају угиби ($2P_s=20$ kN) врло блиска измереној сили при формирању прслина ($2P_{cr}=20$ kN и $2P_{cr}=25$ kN, табела 7) и врло блиска рачунским вредностима момената савијања при формирању прслина, табела 9.

Oznaka grede	BAB	EC2	ACI	EXP	$\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$		
	δ_s [mm]	δ_s [mm]	δ_s [mm]	δ_s [mm]	BAB	EC2	ACI
NAC-1	2.48	0.88	0.86	0.84	0.34	0.96	0.98
NAC-2	5.75	6.25	6.42	6.55	1.14	1.05	1.02
NAC-3	7.34	7.77	7.87	8.49	1.16	1.09	1.08
RAC50-1	3.01	1.46	1.24	2.20	0.73	1.50	1.78
RAC50-2	5.88	6.35	6.49	7.27	1.24	1.14	1.12
RAC50-3	7.45	7.84	7.92	8.04	1.08	1.02	1.01
RAC100-1	2.40	0.92	0.83	1.65	0.69	1.79	1.99
RAC100-2	5.80	6.32	6.50	6.89	1.19	1.09	1.06
RAC100-3	7.44	7.89	8.00	8.73	1.17	1.11	1.09
Srednja vrednost				NAC	0.88	1.03	1.03
				RAC	1.02	1.28	1.34

Табела 11. Рачунске и експерименталне вредности угиба при експлоатационом оптерећењу

У оквиру друге групе греда, средње и максимално армираних, момент савијања при појави прслине је значајно мањи од момента при експлоатационом оптерећењу. Самим тим, утицај разлика у прорачунским моментима савијања при појави прслине према разним прописима (које су у оквиру 5 kNm), је мали. Разлике у односима $\delta_{s,exp}/\delta_{s,rač}$ код NAC и RAC греда из ове групе биле су релативно мале, од 6% до 10% када се упореде RAC50 и NAC греде, односно од 1% до 4% при поређењу RAC100 и NAC греда, без обзира на примењени пропис. Дакле, прописи слично “греше“, тј. имају сличну тачност у предикцији угиба и NAC и RAC греда са “средњом” и “максималном” количином арматуре. Графичка презентација резултата из табеле 11 дата је на слици 17.



Слика 1. Однос рачунских и експерименталних вредности угиба за NAC, RAC50 и RAC100 греде

10.2.2.4. Гранична носивост на смицање

Иако је практична примена елемената конструкције који нису армирани попречном арматуром релативно ограничена, обим експерименталног истраживања подразумевао је израду 3 такве греде како би се анализирао утицај различитих врста бетона (NAC, RAC50, RAC100) на смичућу носивост греда. Прописи генерално “признају” допринос бетона у пријему смичућих сила, иако је то на разне начине спроведено у различитим прописима. У

табели 12 су приказане експерименталне и прорачунске вредности граничних сила лома гредних носача (и њихови односи), који су оптерећени комбинацијом момента савијања и трансверзалних сила, при чему је пројектована носивост на савијање свих греда била бар 1.5 пута већа од носивости на смицање.

Oznaka grede	BAB	EC2	ACI	MC	R*	CTC	EXP	$V_{u,exp}/V_{u,rač}$						
	V_u [kN]	V_u [kN]	V_u [kN]	V_u [kN]	V_u [kN]	V_u [kN]	V_u [kN]	BAB	EC2	ACI	MC	R*	CTC	
NAC-1	57.9	83.5	45.1	36.5	80.8	42.7	106.3	1.84	1.27	2.36	2.91	1.31	2.49	
NAC-2	88.1	45.3	65.2	81.4	95.8	62.7	140.7	1.60	3.10	2.16	1.73	1.47	2.24	
NAC-3	98.2	60.4	71.9	96.4	111.2	69.3	159.9	1.63	2.65	2.22	1.66	1.44	2.31	
RAC50-1	62.0	86.4	47.4	38.4	85.7	45.6	91.8	1.48	1.06	1.93	2.39	1.07	2.01	
RAC50-2	92.2	45.3	67.5	83.3	97.5	65.5	142.0	1.54	3.13	2.10	1.70	1.46	2.17	
RAC50-3	102.2	60.4	74.2	98.3	111.4	72.2	156.9	1.53	2.60	2.11	1.60	1.41	2.17	
RAC100-1	58.5	83.9	45.4	36.8	82.7	44.1	104.8	1.79	1.25	2.31	2.85	1.27	2.37	
RAC100-2	88.6	45.3	65.5	81.7	95.0	64.1	135.0	1.52	2.98	2.06	1.65	1.42	2.11	
RAC100-3	98.7	60.4	72.2	96.7	111.5	70.7	163.4	1.66	2.71	2.26	1.69	1.47	2.31	
Srednja vrednost								NAC	1.69	2.34	2.25	2.10	1.41	2.35
								RAC	1.59	2.29	2.13	1.98	1.35	2.19
Standardna devijacija								NAC	0.13	0.95	0.10	0.70	0.08	0.13
								RAC	0.12	0.90	0.14	0.52	0.15	0.13

* Response 2000

Табела 12. Рачунске и експерименталне вредности граничних сила смицања

Рачунске вредности добијене су применом одредби из прописа (BAB, EC2, ACI), кинеског прописа за RAC елементе конструкције (CTC), модела прописа (MC), или програмом Response 2000 који је базиран на модификованој теорији поља притиска (MCFT). Прорачун према Моделу прописа, MC2010 (Model Code, 2010) спроведен је према изложеном првом нивоу прорачуна, који осим доприноса узенгија подразумева и допринос бетона смичућој носивости. Ако се анализирају само греде без попречне арматуре, најбоље предикције, тј. прорачунске вредности граничне носивости најближе експерименталним, дали су EC2 и Response 2000. Ово важи и за NAC и за RAC греде, независно од количине RCA. Према њима, прорачунске вредности су од 6% до 31% веће од експерименталних. Сви други прорачуни дају значајно конзервативније предикције, са прорачунским вредностима које су 2 до 3 пута веће од реалних.

Код свих греда са узенгијама, вредности које су најближе експериментално утврђеним добијају се на основу програма Response, правилника BAB и модела прописа MC. Док је за Response, који је базиран на “реалном” понашању испрског бетона у зони дејства попречних сила и “реалном” напонско-деформацијском дијаграму арматурног челика, очекивано да даје добру предикцију, мало изненађење представља добра корелација мерених и рачунских вредности добијена према алгоритму правилника BAB. Овај релативно једноставан модел дао је боље резултате код свих греда од новијих правилника попут EC2. Еврокод 2 је код армираних дао изузетно конзервативне предикције које су биле од 2.5 до 3 пута мање од реалних. Ово је последица занемаривања носивости бетона у ситуацијама када постоји попречна арматура већа од минималне. При томе, минимална арматура је дефинисана у функцији чврстоће бетона при притиску и границе развлачења челика узенгија, уместо да мора бити бар једнака носивости бетона на смицање. Тако се дошло у парадоксалну ситуацију да код разматраних греда већу прорачунску носивост имају оне које немају узенгије, табела 60. С тим у вези, нови Модел прописа, MC2010 (Model Code, 2010), који је претеча Еврокода 2 и који предствља основу за будући Еврокод 2, извршио је извесне корекције и узима у обзир допринос бетона у смичућој отпорности носача, што је резултовало значајно бољим предикцијама, табела 12. Независно од процента армирања узенгијама, ACI даје прилично конзервативне предикције граничних

сила смицања, које су од 2 до 2.3 пута веће од мерених, независно да ли се ради о RAC или NAC гредима. У истом рангу тачности предикција је и СТС, кинески правилник за RAC елементе конструкција. Ипак, у оба случаја ради се о релативно поузданим предикцијама имајући у виду малу вредност стандардне девијације.

Приметне су, дакле, релативно велике разлике у предикцијама носивости греда на смицање, како RAC тако и NAC, рачунате на основу различитих прописа. То је у складу са разликама у моделима на којима се ти прописи базирају и даље отвореним питањем механизма преноса смичућих сила у бетонским елементима, као и великим расипањем резултата експерименталних испитивања. Просечне вредности односа $V_{u,exp}/V_{u,рач}$, без обзира на начин прорачуна, мање су код RAC него код NAC греда за свега око 5%. Имајући у виду и прилично велику сигурносну резерву, то не угрожава могућност да се за прорачун носивости на смицање RAC греда примени методологија из постојећих прописа и правилника. Примена кинеског прописа за RAC елементе конструкција (СТС) нема неку посебну предност, имајући у виду његову конзервативност.

10.2.2.5. Деформације под дуготрајним оптерећењем

На основу резултата претходних анализа закључено је да су кључне разлике у понашању савијаних елемената у деформацијама, тј. угибима. Уочене су разлике у угибима под краткотрајним оптерећењем, а познавајући структуру RAC бетона, уз искуста из спроведених експеримената на гредним елементима, може се очекивати да те разлике постају још израженије када се ради о дуготрајном оптерећењу, које је карактеристично за армиранобетонске конструкције. Зато је извршена детаљна анализа података прикупљених кроз експериментална истраживања реолошких својстава материјала, као и анализа постојећих модела предикције ових својстава од којих зависе модели за срачунавање дугограјних угиба савијаних елемената.

Скупљање бетона на бази рециклираног агрегата

Да би се спровела ова анализа формирана је база података о скупљању RAC бетона (Тошић et al, 2018a). Идентификовано је 19 студија и из њих формирано 125 кривих скупљања (39 NAC и 86 RAC) са 424 податка приказаних у логаритамској размери. Подаци који су узети у обзир базирани су на јасним и транспарентним критеријумима, а параметри који су прикупљени су:

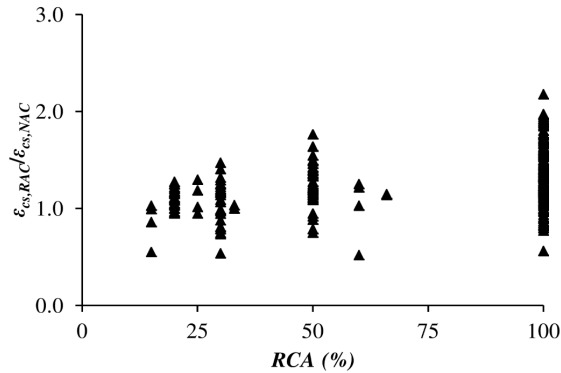
- дилатације скупљања RAC и упоредног NAC са истим водоцементним фактором,
- чврстоћа при притиску на 28 дана, f_{cm} ,
- упијање воде рециклираног агрегата, $w.a.$,
- трајање неге, t_s ,
- димензија узорка, h_0 ,
- температура и релативна влажност (RH).

У оквиру базе података налазе се бетони чија је чврстоћа при притиску у границама 20–60 МПа, а упијање воде рециклираног агрегата од 2% до 7%. Први корак у анализи је поређење дилатација скупљања у RAC и упоредном NAC. Након елиминисања података који битно одступају од тренда (“outliers”) применом технике “box-and-whiskers”, статистички параметри за однос дилатација скупљања RAC и упоредног NAC, $\varepsilon_{cs,RAC}/\varepsilon_{cs,NAC}$, приказани су у табели 13 кроз средњу вредност (μ) и стандардну девијацију (CoV), за различите проценте рециклираног агрегата у бетону.

Видљиво је повећање односа $\varepsilon_{cs,RAC}/\varepsilon_{cs,NAC}$ у функцији повећања количине RCA, осим за бетон са 51-75% удела RCA у бетонској мешавини. Ипак, евидентан је мањак резултата за ову количину RCA у поређењу са другачијим процентима замене природног агрегата рециклираним, слика 18. Корелациони коефицијент односа $\varepsilon_{cs,RAC}/\varepsilon_{cs,NAC}$ и количине RCA је 0.411.

RCA (%)	Mean (μ)	CoV (%)
1–25	1.08	12.1
26–50	1.17	19.2
51–75	1.06	23.5
76–100	1.35	21.9

Табела 13. Статистички параметри односа $\varepsilon_{cs,RAC}/\varepsilon_{cs,NAC}$



Слика 18. Однос $\varepsilon_{cs,RAC}/\varepsilon_{cs,NAC}$ у функцији количине RCA у RAC

Разлике у скупљању RAC и NAC бетона могу се генерално поделити у две групе: 1) разлике у интензитету, (вертикално скалирање) и 2) разлике у развоју скупљања током времена (хоризонтално скалирање). Анализирајући формирану базу закључено је да нема потребе за хоризонталним скалирањем, већ да би само вертикално скалирање требало да буде разматрано.

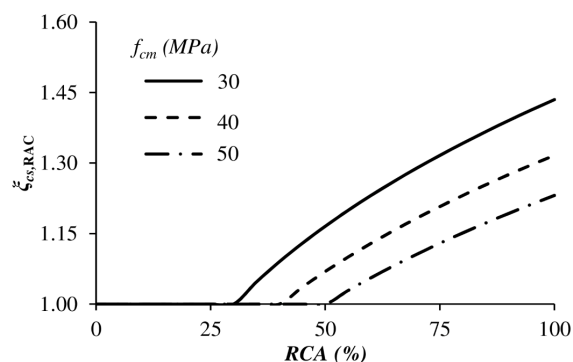
У следећем кораку, на формираној бази NAC и RAC резултата тестиран је MC2020 модел за скупљање. За све бетоне из базе срачунат је однос рачунске и експериментално мерене дилатације скупљања, $\varepsilon_{cs,calc}/\varepsilon_{cs,exp}$. Закључено је да за NAC и RAC бетоне са садржајем рециклираног агрегата до 75% модел предвиђа чак до 54% веће дилатације скупљања, али да није конзервативан, тј. није адекватан у случају бетона са 76% до 100% RCA. Имајући то у виду, извршена је корекција MC2020 модела увођењем корекционог коефицијента који узима у обзир чврстоћу при притиску (f_{cm}), садржај RCA (RCA%):

$$\xi_{cs,RAC} = \left(\frac{RCA\%}{f_{cm}} \right)^{0.3} > 1.0 \quad (1)$$

и који директно множи дилатацију скупљања упоредног NAC бетона:

$$\varepsilon_{cs,RAC}(t, t_e) = \xi_{cs,RAC} \cdot \varepsilon_{cs}(t, t_e) \quad (2)$$

На слици 19 је графички представљен корекциони коефицијент, који за уобичајене чврстоће бетона од 30–40 МПа и за бетоне са 100% RCA износи 1.32–1.44.



Слика 19. Корекциони коефицијент $\xi_{cs,RAC}$ за дилатацију скупљања RAC бетона

Течење бетона на бази рециклираног агрегата

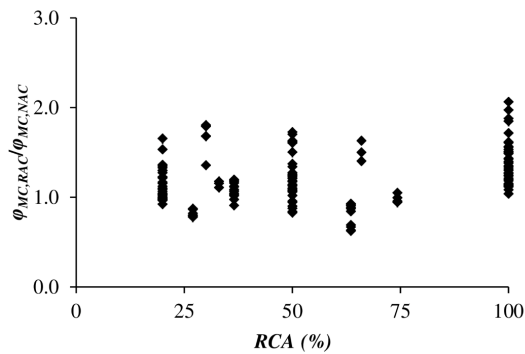
Слично као у случају скупљања RAC, база података је формирана на основу објављених резултата течења RAC бетона (Тошић et al., 2019). Параметри који су селектовани и подаци за њих прикупљени су:

- дилатације течења RAC и упоредног NAC са истим водоцементним фактором,
- чврстоћа при притиску на 28 дана, f_{cm} ,
- упијање воде рециклираног агрегата, *w.a.*,
- старост у тренутку оптерећења, t_0 ,
- однос напона и чврстоће у тренутку оптерећења, $\sigma_c(t_0)/f_{cm}(t_0)$, мањи од 0.4 (како би се обезбедило линеарно течење),
- димензија узорка, h_0 ,
- температура и релативна влажност (RH).

Укупно је обухваћено 10 студија (9 експерименталних испитивања) са 46 кривих течења (14 NAC и 32 RAC) и укупно 233 податка на логаритамској временској скали. Поређење резултата течења RAC и NAC бетона је комплексно, с обзиром да су представљени на различите начине: као експериментални коефицијент течења, $\varphi_{exp}(t,t_0)$, дилатација течења, $\varepsilon_{cc}(t,t_0)$, или специфично течење $\varepsilon_{cc}(t,t_0)/\sigma_c(t_0)$ (дилатација течења подељена са напоном). Због тога су сви резултати представљени као MC2010 коефицијент течења $\varphi_{MC}(t,t_0)$ који је дефинисан кроз функцију течења $J(t,t_0)$. Однос RAC и NAC MC2020 коефицијента течења $\varphi_{MC,RAC}/\varphi_{MC,NAC}$, представљен је на слици 27, а статистички дескриптори дати су у табели 14. Са слике 20 евидентно је повећање односа $\varphi_{MC,RAC}/\varphi_{MC,NAC}$ са повећањем садржаја рециклираног агрегата (RCA) осим када је садржај RCA између 51% и 75%. Слично као код скупљања, за ове проценте замене природног агрегата са RCA има значајно мање резултата испитивања. Коефицијент корелације између коефицијената течења $\varphi_{MC,RAC}/\varphi_{MC,NAC}$ и садржаја RCA, износи 0.411.

RCA (%)	Средња вредност (μ)	Коефицијент варијације CoV (%)
1–25	1.16	15.9
26–50	1.18	22.3
51–75	0.97	29.3
76–100	1.39	17.6

Табела 14. Статистички параметри односа $\varphi_{MC,RAC}/\varphi_{MC,NAC}$

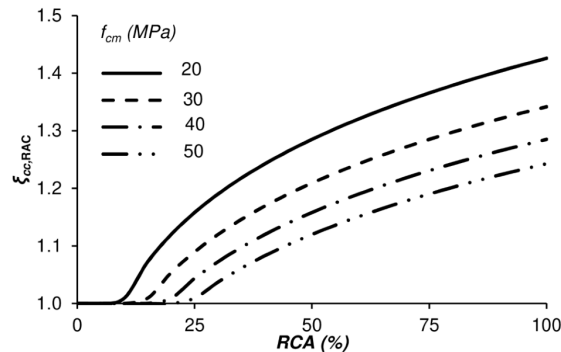


Слика 20. Однос коефицијената течења $\varphi_{MC,RAC}/\varphi_{MC,NAC}$ у функцији количине RCA

Поново је разматрано само вертикално скалирање, тј. разлике у интензитету течења код RAC и NAC , а не промене течења током времена. Сличним поступком калибрације модела $MC2020$ који је спроведен код анализе скупљања, добијен је коефицијент којим се коригује, тј. множи срачунати коефицијент течења према $MC2020$:

$$\varphi_{MC,RAC}(t, t_0) = \xi_{cc,RAC} \cdot \varphi_{MC}(t, t_0) \quad (3)$$

$$\xi_{cc,RAC} = 1.12 \cdot \left(\frac{RCA\%}{f_{cm}} \right)^{0.15} \geq 1.0 \quad (4)$$



Слика 21. Корекциони коефицијент $\xi_{cc,RAC}$ за RAC коефицијент течења

Графичка интерпретација коефицијента приказана је на слици 21, и за уобичајене чврстоће бетона од 30–40 МПа и за бетоне са 100% RCA узима вредности у опсегу између 1.21–1.43.

Прорачун дуготрајних деформација елемената од бетона на бази рециклираног агрегата

Анализа дуготрајних деформација савијаних RAC елемената започета је формирањем базе експерименталних података из ове области. Релативно мали број тестова је спроведен и објављен на начин да се подаци могу користити у ове сврхе, а то су три студије укључујући и сопствено испитивање: Кнаack and Kurama, 2015; Тоšić et al, 2018b; Seara-Raz et al, 2018, у којима је испитано укупно 30 греда, од тога 20 RAC греда. Неки од параметара у овим експериментима били су: тренутак настанка прслине (одмах након оптерећења или касније), присуство притиснуте арматуре, учешће RCA , старост у тренутку оптерећења, w/c однос у рецептурама бетона. Све испитани елементи били су носачи статичког система проста греда, оптерећени са две концентрисане силе у трећинама распона (енг. four-point bending test). Након додатне селекције и искључивањем одређеног броја узорака по различитим критеријумима (обезбеђење само линеарног течења, подаци о тренутним и дуготрајним деформацијама, количина RCA већа од 30%),

RAC база података садржала је 15 греда и 30 података – 15 за иницијалне и 15 за измерене дуготрајне, коначне угибе. Геометрија елемената, као и количина арматуре била је иста код RAC и упоредних NAC греда, док је чврстоћа при притиску RAC била очекивано нешто нижа у односу на упоредни NAC направљен са истим ефективним водовезивним фактором, $(w/c)_{\text{eff}}$. Вредности статистичких параметара, тј. однос рачунског и мереног угиба приказани су у табели 15. Очигледно је да модел даје релативно добра предвиђања почетних угиба (односи 1.14 и 1.08 за RAC50 и RAC100 греде респективно), али потцењује коначне угибе (0.78 и 0.76).

База података	Угиби	n	μ	σ	CoV (%)
Упоредне греде-NAC	Просечни	20	1.17	0.26	22.4
	Почетни	10	1.33	0.25	18.9
	Коначни	10	1.01	0.15	15.2
RAC	Просечни	30	0.94	0.28	29.4
	Почетни	15	1.11	0.24	21.8
	Коначни	15	0.77	0.2	25.9

Табела 15. Статистички параметри односа угиба $a_{\text{calc}}/a_{\text{exp}}$ за RAC и упоредне NAC греде

Потцењени угиби RAC греда у апсолутном смислу и у поређењу са упоредним NAC гредама имају два разлога. Први су неадекватни изрази MC2010 за механичке и временске карактеристике RAC (модул еластичности, чврстоћа при затезању, дилатација скупљања, коефицијент течења). Други разлог је неадекватна метода прорачуна за RAC греде коју нуди MC2010. С обзиром да је већ показано да се чврстоћа при затезању RAC може добро предвидети применом једначина из Еврокода 2 (идентичне онима из MC2010), израз за f_{ctm} неће се мењати. За угибе, нарочито почетне, модул еластичности је од изузетног значаја, па се израз

$$E_{\text{ctm}} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{\text{ctm}}}{10} \right)^{1/3} \quad (5)$$

модификује коефицијентом α_E који треба да има облик:

$$\alpha_E = 1.0 - 0.3 \cdot \frac{RCA\%}{100} \quad (6)$$

где је RCA% проценат крупног RCA у RAC.

Са коригованим вредностима параметара за прорачун- дилатација скупљања и коефицијента течења (изрази 1-4), прорачун угиба RAC греда и даље даје ниже вредности у односу на мерење па се зато уводи корекциони коефицијент самог модела, β_{RAC} :

$$\beta_{\text{RAC}}=0.75, \text{ за краткотрајно оптерећење} \quad (7)$$

$$\beta_{\text{RAC}}=0.25, \text{ дуготрајно или оптерећење које се понавља}$$

Другим речима, коефицијент β се смањује са 1.0 на 0.75 за рачунање почетних деформација, односно са 0.5 на 0.25 за прорачун дуготрајних угиба RAC греда. Заправо, β_{RAC} редукује момент појаве прслине за приближно 15% у случају краткотрајног оптерећења и за 50% за случај дуготрајног оптерећења, због већег скупљања RAC. Применом овако дефинисаних корекционих коефицијената, добијају се односи $a_{\text{calc}}/a_{\text{exp}}$ у редовима 5 до 7 у табели 16, чиме је постигнуто да статистички параметри за RAC греде буду практично исти као за упоредне NAC греде. Такође, вредности коефицијената

варијације су готово идентичне за RAC и NAC греде, осим у случају трајних угиба RAC греда где су нешто већи. Другим речима, предложеним корекцијама параметара и модела прорачуна угиба омогућава се прорачун деформација RAC греда са истим степеном поузданости као код NAC греда.

База података	Корекције	Угиби	n	μ	σ	CoV (%)
RAC	$E_{cm}, \varepsilon_{cs}, \varphi$	Просечни	30	1.06	0.29	26.9
		Почетни	15	1.27	0.24	19.4
		Коначни	15	0.9	0.24	26.1
	$E_{cm}, \varepsilon_{cs}, \varphi, \beta$	Просечни	30	1.17	0.29	25.0
		Почетни	15	1.32	0.23	17.2
		Коначни	15	1.02	0.21	20.6

Табела 16. Статистички параметри коригованих односа a_{calc}/a_{exp} за RAC елементе из базе

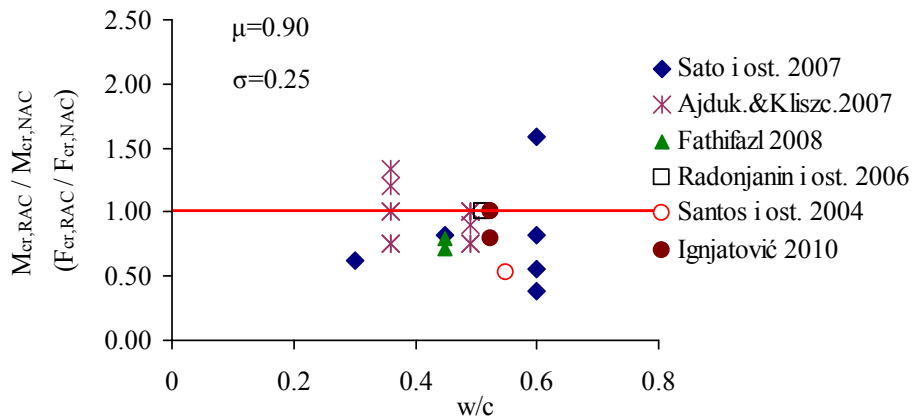
10.2.3. Анализа сопствених и других експерименталних резултата

Овај део истраживања спроведен је како би се проширила база експерименталних резултата и осим сопствених у анализу укључили и резултати других истраживача, добијени под другим условима и са другачијим типовима агрегата. Спроведеним анализама потврђена је неопходност да се извесни параметри у прорачуну употребљивости елемената конструкција од RAC бетона коригују, док је за параметре носивости показано да постојећи модели који се примењују код NAC бетона дају сасвим задовољавајуће вредности и у случају RAC.

10.2.3.1. Савијање греда под краткотрајним оптерећењем

У овом поглављу анализирани су сопствени и експериментални подаци других аутора (Sato et al, 2007; Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2007, Fathifazl et al, 2009), који се односе на понашање греда RAC при савијању. У наведеним истраживањима, експерименти су спроведени на RAC гредама са различитим садржајем рециклираног агрегата (од 50% до 100%) и на контролним, упоредним NAC гредама. Природни песак коришћен је као ситна фракција (0/4 мм) у свим гредама. Бетон за упоредне NAC греде справљен је са истим ефективним водоцементним фактором (Sato et al, 2007, Ajdukiewicz&Kliszczewicz, 2007), или са истом чврстоћом при притиску (сопствено истраживање) или са истом укупном запремином цементног малтера, као и RAC бетон (Fathifazl, 2008). Да би подаци из различитих истраживања могли да се пореде, извршена је анализа пројектованих састава бетона и за упоредну анализу одвојени само они резултати који се односе на NAC и RAC бетоне справљене са истим ефективним водоцементним фактором. Таквом селекцијом прикупљен је највећи број података. Све испитане греде биле су статичког система проста греда, изложене оптерећењу са две концентрисане силе приближно у трећинама распона. Анализа се односи само на извесне параметре који се могу поредити, с обзиром да се греде из различитих истраживања разликују у величини, проценту армирања, распону итд.

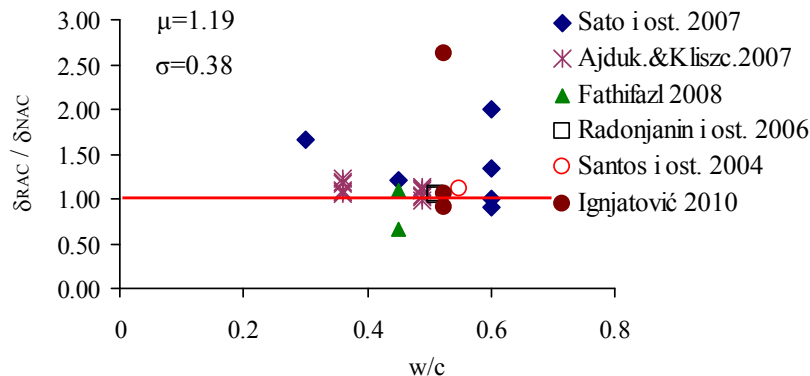
Однос момената савијања ($M_{cr,RAC}$) или силе ($F_{cr,RAC}$) при формирању прелина RAC греда и момената савијања ($M_{cr,NAC}$) или силе ($F_{cr,NAC}$) упоредних NAC греда са истим процентом армирања, за различите водоцементне факторе (w/c) примењених бетона, приказан је на слици 22.



Слика 22. Однос момента савијања (силе) при појави прслина код RAC и NAC греда

Просечна вредност овог односа (μ) је 0.90, што значи да је сила при појави прслина код RAC греда за 10% мања од силе при појави прслина код упоредне NAC греде. Расипање резултата оцењено је путем стандардне девијације (σ) која износи 0.25. Момент (сила) при појави прслина код греда доминантно оптерећених на савијање зависи углавном од чврстоће бетона на затезање, а у мањој мери и од количине подужне затегнуте арматуре. У анализираним истраживањима, просечна вредност односа чврстоћа при затезању RAC и NAC бетона износи 0.90, што значи да приближно 10% мањи момент савијања (сила) при појави прслине RAC греда (у поређењу са NAC гредом), кореспондира са 10% нижом чврстоћом при затезању бетона са RCA (у поређењу са бетоном од природног агрегата).

Однос угиба од краткотрајног експлоатационог оптерећења у средини распона RAC греде (δ_{RAC}) и угиба у средини распона упоредне NAC греде (δ_{NAC}) износи 1.19, слика 23.

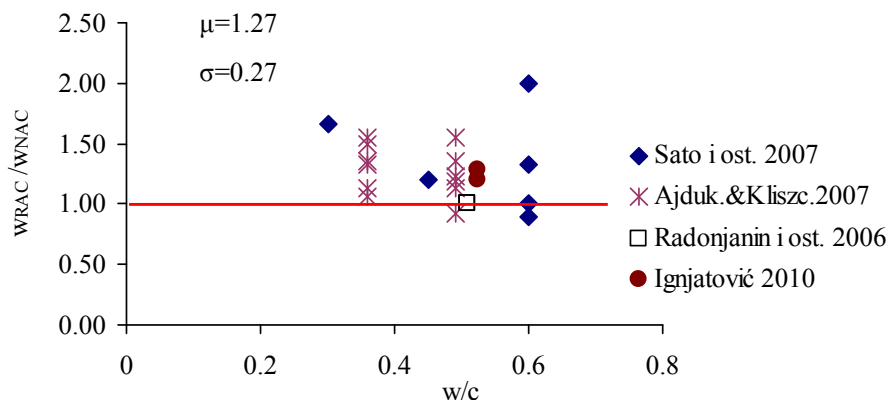


Слика 19. Однос угиба при експлоатационом оптерећењу код RAC и NAC греда

Дакле, угиби RAC греда већи су у просеку за 19% од угиба упоредних NAC греда. Анализа модула еластичности примењених бетона показала је да су модули RAC бетона мањи од модула NAC бетона у просеку за 11%. С обзиром да је угиб обрнуто пропорционалан модулу, следи да 11% мањи модул изазива 9% мање угибе, што се не поклапа са утврђеном просечном разликом угиба RAC и NAC греда од 19%. Ипак, не треба заборавити да угиби армиранобетонских греда осим од модула еластичности зависе и од слике прслина. Имајући у виду реологију RAC, током времена се може очекивати даље повећање разлике у угибима RAC и NAC греда, па је неопходно извршити прорачунски доказ угиба RAC греда на основу предложених модификација у поглављу 10.2.2.5.

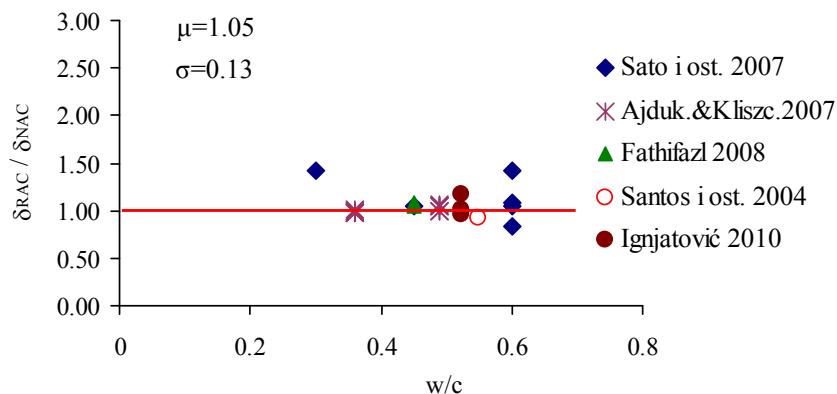
На слици 24 приказани су резултати поређења односа ширине прслина код NAC и RAC греда и то просечних мерених ширина прслина (Sato et al, 2007; Radonjanin et al, 2006) или суме ширина прслина са обе стране греда (Ajdukiewicz&Klisczewicz 2007 и сопствено истраживање). Јасно је да су просечне ширине прслина код RAC греда веће или их има

више него код NAC греда, што утиче на крутост носача па тако и на већи угиб RAC греда. Поред тога, момент при појави прслина RAC греда нижи је од момента појаве прслина упоредних NAC греда у просеку за 10%, а тај податак, без обзира на методологију прорачуна, битно утиче на величину угиба. Дакле, не сме се успоставити релација између параметра који дефинише понашање конструкцијског елемента (угиба) и карактеристике бетона (модул еластичности), с обзиром да параметри попут слике прслина и тренутка њиховог формирања нису исти код NAC и RAC греда, а битно утичу на угиб носача.



Слика 24. Однос ширина прслина при експлоатационом оптерећењу код RAC и NAC греда

На основу анализираних података, гранична носивост на савијање (M_u или F_u) RAC греда је за 5% већа од граничне носивост упоредних NAC греда, слика 25. При томе, расипање резултата је релативно мало ($\sigma=0.13$). Просечан однос чврстоћа при притиску RAC и упоредних NAC бетона који су коришћени у овим испитивањима износи 0.95.



Слика 25. Однос граничних носивости на савијање RAC и NAC греда

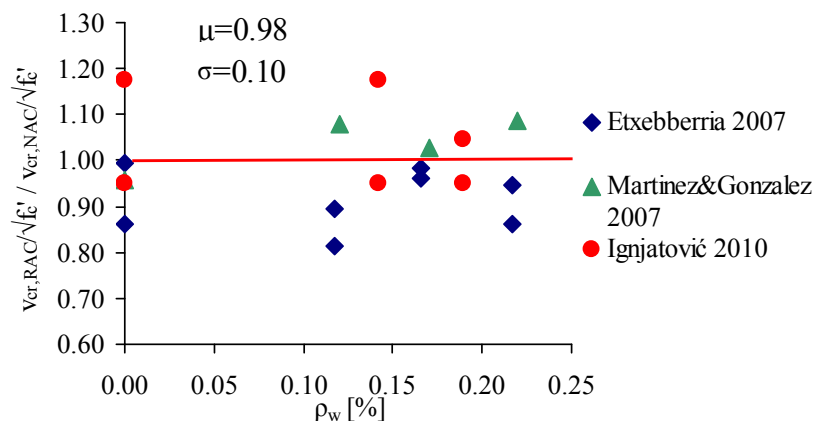
Дакле, постигнута је 5% већа гранична носивост на савијање RAC у односу на упоредне NAC греде, при чему је чврстоћа при притиску RAC бетона за 5% мања од чврстоће NAC. Ово се може објаснити извесним разликама у напонско-деформацијским дијаграмима RAC и NAC бетона и положају неутралне линије при лому код RAC и NAC греда, тј. извесним разликама у дилатацијама у бетону и арматури за фазу лома код анализираних NAC и RAC греда.

10.2.3.2. Смицање греда под краткотрајним оптерећењем

У овом поглављу анализирани су сопствени и експериментални подаци других аутора (Etcheberria, 2007; Gonzalez&Martinez 2006), који се односе на понашање RAC греда при смицању. У наведеним истраживањима, експерименти су спроведени на RAC гредама са различитим садржајем рециклираног агрегата (од 50% до 100%) и на контролним, упоредним NAC гредама. Природни песак коришћен је као ситна фракција (0/4 мм) у свим гредама. Све испитане греде биле су статичког система проста греда, изложене

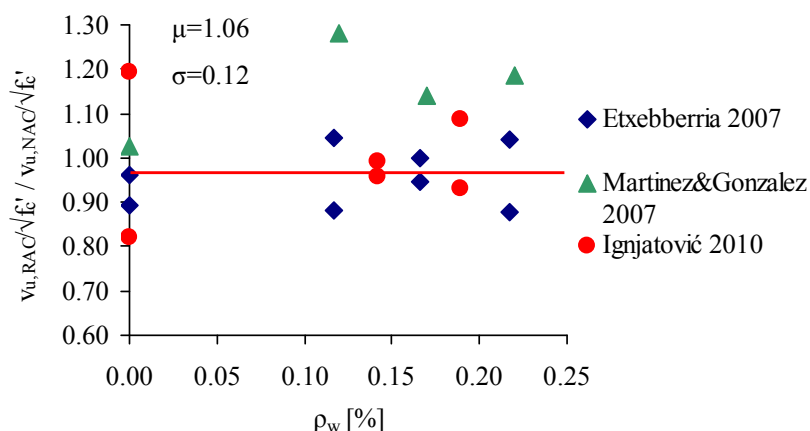
оптерећењу са две концентрисане силе приближно у трећинама распона. Анализом су обухваћена испитивања код којих је однос смичућег распона и статичке висине пресека већи од 3.0, јер је таквом селекцијом прикупљен највећи број података, а истовремено је обезбеђено да код свих греда буде доминантно гредно дејство при смицању. Упоредне NAC греде армиране су истим процентом армирања подужном и попречном арматуром, али су биле од бетона чија чврстоћа при притиску и водоцементни фактор нису нужно били исти као код посматране RAC греде. Због тога су резултати испитивања приказани у облику напона и нормирани са квадратним кореном чврстоће при притиску за сваки бетон. Тиме је чврстоћа при притиску елиминисана као параметар. Додатна селекција података извршена је узимањем у обзир само резултата који се односе на смичући лом, углавном услед комбинације напона притисака и смицања у притиснутој зони пресека у близини концентрисане силе. Подаци из анализираних истраживања приказани су у табели 62. Анализа се односи на нормализовани напон при појави прве косе прслине и при лому носача.

Односи нормализованих смичућих напона при појави косе прслине код RAC и упоредних NAC греда у функцији процента армирања попречном арматуром (ρ_w), приказани су на слици 26.



Слика 26. Однос нормализованих напона при појави косе прслине код RAC и NAC греда

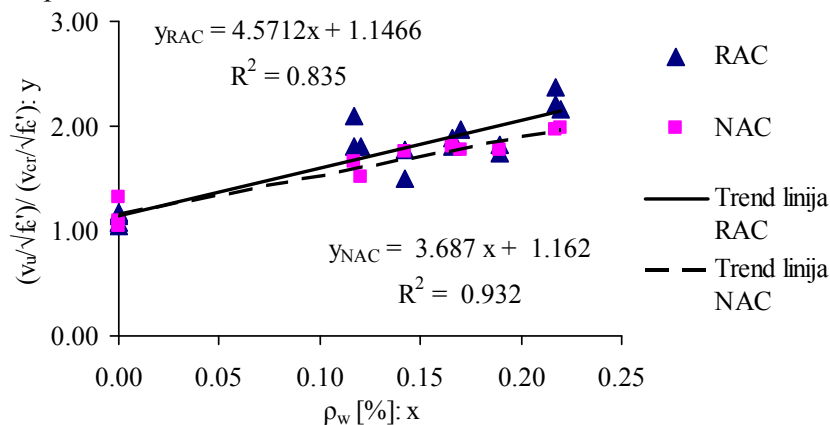
Просечна вредност овог односа (μ) износи 0.98, тј. нормализовани напон при појави косе прслине код RAC греда за 2% је мањи него код упоредних NAC греда. При томе, расипање резултата није велико с обзиром да стандардна девијација (σ) износи 0.10. Срачуната просечна вредност од $\mu=0.98$ добра је апроксимација односа смичућих напона при појави прслине и код греда без узенгија ($\mu=0.99$, $\rho_w=0$) и код греда које имају попречну арматуру ($\mu=0.98$, $\rho_w>0$).



Слика 27. Однос нормализованих напона при лому код RAC и NAC греда

Односи нормализованих смичућих напона при лому RAC и упоредних NAC греда у функцији процента армирања попречног арматуром (ρ_w), приказани су на слици 27. На основу података са слике 27, срачунато је да је нормализовани смичући напон при лому RAC греде просечно за 6% већи од нормализованог смичућег напона упоредне NAC греде. То практично значи да је гранична носивост на смицање RAC греда за 6% већа од граничне носивости исто армиране NAC греде.

На слици 28 је приказан однос нормализованих напона при лому и при формирању прве косе прслине за RAC и NAC греде у функцији процента армирања узенгијама. Овај однос користи се као мера дуктилности код греда доминантно изложених смицању. За греде без попречне арматуре, тај однос је близак јединици, јер практично одмах након формирања дијагоналне прслине долази до кртог лома. То се види на слици 28, а може се показати да је однос $v_u/\sqrt{f_c'}$ практично исти код NAC и RAC греда без узенгија и износи 1.16 и 1.12 респективно. Овај однос је пре свега функција процента армирања попречног арматуром и може се рећи да линеарно расте са порастом количине попречне арматуре код RAC и NAC греда, слика 28. Боља апроксимација, тј. мање расипање резултата од успостављене тренд зависности важи за NAC греде, што је изражено већим коефицијентом детерминације (R). Са порастом процента армирања узенгијама расту и разлике између тренд линија за NAC и RAC греде, при чему се веће вредности односа $v_u/\sqrt{f_c'}$ за исти проценат армирања односе на RAC греде. Дакле, с обзиром да је раније показано да се формирање прве косе прслине код NAC и RAC греда дешава практично при истом нормализованом напону, може се закључити да RAC греде са попречног арматуром имају већу дуктилност у односу на упоредне NAC греде.



Слика 28. Однос нормализованих напона при лому код RAC и NAC греда

10.3. Закључци

На основу анализе литературе, постојећих решења у пракси која се односе на бетоне са природним агрегатом, као и на основу спроведеног сопственог експерименталног истраживања у вези технологије конструкцијског бетона на бази рециклираног агрегата изведени су следећи закључци и техничке препоруке:

- Пројектовање састава бетона са рециклираним агрегатом могуће је базирати на методологији познатој код NAC бетона, где се масе компоненти материјала срачунавају из запреминске једначине,
- Својства RCA која су неопходна при пројектовању састава су упијање воде и запреминска маса у површински сувом, водом засићеном стању,
- Додавање извесне количине воде срачунате из капацитета упијања RCA за унапред дефинисан временски период, на количину потребну за хидратацију цемента, тј. остваривање ефективног водоцементног фактора, ефикасан је начин за контролу уградљивости и обрадивости мешавина које садрже RCA; описана методологија

обезбеђује захтевану конзистенцију у условима уобичајеног времена протеклог од производње до уградње бетона,

- Захтевана уградљивост RAC бетона изражена мером слегања остварена је након 30 минута од справљања, уз спречено одавање воде и повремено мешање у мешалици; с обзиром на утврђену брзину упијања воде рециклираног агрегата, процена је да се циљана конзистенција може постићи већ након 10 минута од справљања бетона.

Специфични закључци изведени на бази експерименталног испитивања који се могу сматрати репрезентативним у случају примене рециклираног бетонског агрегата средњег квалитета, израженог мером упијања до 5%:

- Запреминске масе у свежем и очврслном стању бетона са 50% и 100% крупног рециклираног агрегата су за 2% и 4% респективно мање од запреминске масе упоредног бетона са природним агрегатом,
- Бетони са 50% RCA имају исту или чак већу чврстоћу при притиску у односу на бетоне са природним агрегатом справљених са истом количином цемента и са истим ефективним водоцементним фактором; ово се тумачи као последица ефикасног међусобног паковања угластих зрна рециклираног и заобљених зрна природног агрегата,
- За справљање бетона са 100% крупног RCA потребно је око 3% цемента више, при чему има до 3% мању чврстоћу при притиску у односу на упоредни NAC,
- Чврстоћа бетона са 50% до 100% RCA на затезање цепањем креће се у границама од $\pm 7,5\%$ у односу на упоредне NAC бетоне од природног агрегата; није могуће утврдити зависност количине RCA и одступања од чврстоће упоредног NAC,
- Модул еластичности бетона са 50% RCA је исти или већи у односу на модул еластичности упоредног NAC,
- Модул еластичности бетона са 100% RCA је 5% до 7% мањи од модула еластичности упоредног NAC.

На основу истраживања, теоријских и експерименталних, са циљем усаглашавања са захтевима стандарда за пројектовање конструкција од бетона на бази рециклираног агрегата (носивост и употребљивост), изведени су бројни, у овом решењу представљени закључци, а овде се издвајају најзначајнији:

- Разлике у граничним носивостима при савијању и смицању, као и облику дијаграма сила-померање између NAC, RAC50 и RAC100 греда које су армиране истом количином подужне и попречне арматуре, могу се сматрати занемарљивим,
- У оквиру група греда од бетона са различитом количином рециклираног агрегата, армираних истом количином подужне и попречне арматуре, средње растојање и ширина прелина за ниво експлоатационг оптерећења могу се сматрати сличним, имајући у виду релативно грубу процену ширине прелина,
- Величина површи лома као и ниво деструкције бетона при лому греда изложених доминантно савијању расте са повећањем количине рециклираног агрегата, али не утиче на граничну носивост,
- Доказано је да важи Бернулијева хипотеза равних пресека без обзира на количину рециклираног агрегата у бетону, чиме је потврђен прорачунски модел за савијање,
- Показано је да се прорачун граничног момента савијања, као и граничне силе смицања RAC греда, може спровести на основу постојеће техничке регулативе за NAC елементе конструкција, уз задовољење истог степена поузданости, без обзира на количину крупног агрегата од рециклираног бетона,

- Прорачун угиба RAC елемената конструкције треба базирати на моделу датом у Моделу прописа (Model Code, 2010), уз примену корекционих коефицијената за предикцију дилатација скупљања и течења бетона RAC, као и корекционог коефицијента за сам модел (поглавље 10.2.2.5) како би се обезбедило слично понашање при граничном стању употребљивости као код упоредних NAC елемената. Ово се односи и на тачан и на поједностављен поступак прорачуна угиба.

Дефинисане специфичности технологије производње бетона на бази агрегата од рециклираног бетонског отпада, као и специфичности пројектовања према граничним стањима носивости и употребљивости, омогућавају примену предметних бетона у елементима армиранобетонских конструкција који су изложени комбинацијама савијања и смицања или доминантно притиску (греде, плоче, стубови, зидови). Пројектовање и грађење конструкција од бетона на бази агрегата од рециклираног бетонског отпада су операције које су технички изводљиве, компаративне и компетитивне примени бетона од природног агрегата.

Литература

- ACI Committee 318 (2008): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, ACI 318M-08. Farmington Hills, M.I., U.S.A.
- Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A. (2002): Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites* 24: 269-279.
- Ajdukiewicz, A. & Kliszczewicz, A. (2011): Long-term behaviour of reinforced-concrete beams and columns made of recycled aggregate. in *fib Symposium: Concrete engineering for excellence and efficiency*, June 8-10 479-482 .
- Angulo S.C., Carrijo P.M., Figueiredo A.D., Chaves A.P., John V.M. (2010): On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Mater. and Struct.* 43: 519-528.
- Bentz E.C. (2000): Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 310.
- Beton i armirani beton prema BAB '87- Priručnik (1995): Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu. Beograd, str. 115-160 i str. 240-265.
- Chakradhara Rao M., Bhattacharyya S.K., Barai S.V. (2011): Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Mater. and Struct.* 44: 205-220.
- Choi, W.-C. & Yun, H.-D. (2013): Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate. *Mater. Des.* 51, 742-750.
- Collins M.P., Mitchell D. (1991): *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall, New Jersey.
- Domingo A., Lazaro C., Gayarre F.L., Serrano M.A., Lopez-Colina C. (2010): Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. *Mater. and Struct.* 43: 1147-1160.
- EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. (CEN, 2004).
- Etxeberria M., Mari A., Vasquez E. (2007): Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures* 40: 529-541.
- Fathifazl G. (2008): Structural performance of steel reinforced recycled concrete members. Doctoral thesis, University of Ottawa, Ontario, Canada.

- Final Report (2010): FINAL REPORT – SUPPORTING THE THEMATIC STRATEGY ON WASTE PREVENTION AND RECYCLING,
<https://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/Final%20Report%20final%2025%20Oct.pdf>
 Accessed: 05.04.2020.
- Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F. (2007): Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials* 21: 887-893.
- Hansen T. C. (1992): Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report 1945-1989 of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete), str. 157.
- Ignjatović, I. (2013): Ultimate strength of reinforced recycled concrete beams. University of Belgrade.
- Knaack, A. M. & Kurama, Y. C. (2015): Sustained Service Load Behavior of Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates. *ACI Struct. J.* 112, 565–578.
- Langer, W.H., Drew, L.J., Sachs, J.J. (2004): *Aggregate and the Environment*. Alexandria, VA.
- Łapko, A., Sadowska-Buraczewska, B. & Tomaszewicz, A. (2005): Experimental and numerical analysis of flexural composite beams with partial use of high strength/high performance concrete. *J. Civ. Eng. Manag.* 11, 115–120.
- Lauritzen E. (2004): Recycling Concrete – An overview of development and challenges. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. Barcelona, Spain.
- Lauritzen E. (2006): Research needs on regeneration of construction and demolition waste. Workshop “Research in waste area - Towards the FP7, Brussels, Belgium.
- Lye, C., Ghataora, G.S., Dhir, R.K., (2016): Shrinkage of recycled aggregate concrete, in: *Structures and Buildings, Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. ICE, pp. 1–25. doi:10.1680/jstbu.15.00138
- Lye, C.Q., Dhir, R.K., Ghataora, G.S., Li, H. (2016): Creep strain of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 102, 244–259. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.181
- Maruyama, I., Oka, Y. & Sato, R. (2005): Time-dependent Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams. in *CONCREEP 7* 1–6.
- Meyer C. (2009): The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites* 31: 601-605.
- Model Code (2010): First complete draft, Volume 2. Fédération de l'Industrie du Béton (fib), Lausanne, Switzerland.
- Pacheco, J., Brito, J. De & Soares, D. (2015): Destructive Horizontal Load Tests of Full-scale Recycled Aggregate Concrete Structures. *ACI Struct. J.* 112, 815–826.
- Poon C. S., Kou S.C., Lam C. S. (2007): Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures* 40: 981-988.
- Radonjanin V., Malešev M., Dimča M. (2006): Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete – Part II, Proceedings of the 4th International Scientific Conference INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry, Novi Sad, Serbia: 505-516.
- Rahal K. (2007): Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build. and Environ.* 42: 407-415.
- Sakai K. (2005): Environmental design for concrete structures. *J. of Advanc. Concr. Technol.* 3(1):17-28.
- Sato R., Maruyama I., Sogabe T., Sogo M. (2007): Flexural Behaviour of Reinforced Recycled Concrete Beams. *Japan Concrete Institute, Journal of Advanced Concrete Technology* 5 (1): 43-61.

- Seara-Paz, S., González-Fontebo, B., Martínez-Abella, F. & Carro-Lopez, D. (2018): Long-term flexural performance of reinforced concrete beams with recycled coarse aggregates. *Constr. Build. Mater.* 176, 593–607.
- Silva, R.V., (2015): Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production of structural concrete. Universidade de Lisboa.
- Symonds, Argus, Cowi and PRC Bouwcentrum (1999): Construction and Demolition Waste Management Practices and their Economic Impact. Report of the Project Group to the European Commission. http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.pdf. Accessed on 05.04.2020.
- Tam W.Y.V., Tam C.M. (2008): Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. *Constr. and Build. Mater.* 22: 2067-2077.
- Tošić, N., de la Fuente, A. & Marinković, S. (2019): Creep of recycled aggregate concrete: Experimental database and creep prediction model according to the fib Model Code 2010. *Constr. Build. Mater.* 195, 590–599.
- Tošić, N., de la Fuente, A., Marinković, S. (2018a): Shrinkage of recycled aggregate concrete: experimental database and application of fib Model Code 2010. *Mater. Struct. Constr.* doi:10.1617/s11527-018-1258-0
- Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., Stanić, M. (2015): Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *J. Clean. Prod.* 87, 766–776.
- Tošić, N., Marinković, S., Pecić, N., Ignjatović, I. & Dragaš, J. (2018b): Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete. *Constr. Build. Mater.* 176, 344–358.
- WBCSD (2009): The Cement Sustainability Initiative [WWW Document]. World Bus. Counc. Sustain. Dev. URL <http://www.wbcscement.org/pdf/CSIRecyclingConcrete-FullReport.pdf> (accessed 7.7.16).
- Xiao J., Falkner H. (2007): Bond behavior between recycled aggregate concrete and steel rebars. *Construction and building materials* 21: 395-401.
- Xiao J., Li J., Zhang Ch. (2005): Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research* 35: 1187-1194.
- Xiao J., T. L. Pham, P. J. Wang, G. Gao (2013): Behaviors of semi-precast beam made of recycled aggregate concrete, *Struct. Design Tall Spec. Build.* Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com/journal/tal). DOI: 10.1002/tal.1071
- Xiao, J., Wang, C. Q., Li, J. & Tawana, M. (2012): Shake-table model tests on recycled aggregate concrete frame structure. *ACI Struct. J.* 109, 777–786.
- Yang K.H., Chung H.S., Ashour A. (2008): Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Mater. J.* 105(3): 289-296.

Rezultati istraživanja iz problematike kojom se bavi prikazano tehničko rešenje objavljeni su u sledećim publikacijama:

- Vedran Carević, Ivan Ignjatović, Jelena Dragaš (2019) Model for Practical Carbonation Depth Prediction for High Volume Fly Ash Concrete and Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials.* 213 (), pp.194-208. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.267 [M21a]
- Tošić N., Marinković S., Pecić N., Ignjatović I., Dragaš J. (2018) Long-term behaviour of reinforced beams made with natural or recycled aggregate concrete and high-volume fly ash concrete. *Construction and Building Materials.* 176 (), pp.344-358. [M21a]
- Ignjatović Ivan., Marinković Snežana., Tošić Nikola (2017) Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement. *Engineering Structures.* (141), pp.386-401. [M21]

Tošić Nikola., Marinković Snežana., Ignjatović I. van (2016) A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions. Construction and Building Materials. (127), pp.932-944. [M21]

Ignjatović I., Marinković S., Mišković Z., Savić A. (2013) Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading. Materials and Structures. 46 (6), pp.1045-1059. [M21]

Marinković S., Radonjanin V., Malesev M., Ignjatovic I. (2010) Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. Waste Management. 30 (11), pp.2255-2264. [M21]

11. ТЕХНИЧКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

- Скениран Уговор о пословно-техничкој сарадњи

- Листа техничких решења свих аутора

Аутори немају друга техничка решења

Аутори решења:



в.проф. др Иван Игњатовић, дипл.грађ.инж.



проф.др Снежана Маринковић, дипл.грађ.инж.



доц.др Никола Тошић, мастер инж.грађ.



доц.др Јелена Драгаш, мастер инж.грађ.

На основу обострано изражене жеље, а у циљу преношења научних достигнућа и повезивања са радом у пракси, као и ради остваривања оптималних резултата пословања кроз заједнички рад:

Универзитет у Београду - Грађевински факултет, ПИБ 100251144, ул. Булевар краља Александра бр. 73 Београд, кога заступа декан проф. др Владан Кузмановић (у даљем тексту: ГФБ).

и

"ШУША" д.о.о, 21203 Ветерник, Нови Сад, улица Додолска 4, ПИБ 103567021, кога заступа директор Девис Шуша (у даљем тексту: Партнер)

Закључују

УГОВОР О ПОСЛОВНО-ТЕХНИЧКОЈ САРАДЊИ

Предмет Уговора

Члан 1.

Предмет овог Уговора је сарадња Уговорних страна у различитим стручним и научним областима грађевинарства од заједничког интереса, у циљу унапређења технологија производње бетонских композита, знања, вештина, компетенција и угледа уговорних страна.

Принципи и стандарди сарадње

Члан 2.

Уговорне стране су сагласне да ће се међусобна сарадња одвијати уз уважавање обостраних пословних интереса на принципу равноправности, савесности и поштења, као и уз обавезу поступања по стандарду доброг привредника, уз нужне толеранције које због промењених околности или тешкоћа у пословању могу бити изазване током трајања овог Уговора.

У реализацији овог Уговора, уговорне стране се обавезују да примењују позитивне домаће прописе, прописане техничко-технолошке стандарде, домаћа и инострана научна достигнућа, као и да међусобно уважавају сопствена општа акта и пословне одлуке органа управљања.

Уговорне стране се обавезују да максимално штите пословне, економске и моралне интересе партнера из овог Уговора и да обострано чувају и уздижу пословни углед који су стекли пре закључења овог Уговора.

Члан 3.

Сваки од потписника овог уговора може да одреди координатора задуженог за дефинисање заједничких активности, њиховог обима и динамике спровођења.

Заједничке активности

Члан 4.

Уговорне стране ће дефинисати заједничке активности у духу добрих односа и сарадње, и оне могу укључивати:

- истраживање савремених бетонских композита са малим количинама цемента и високим садржајем филера
- истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала (рециклирани бетон, опека и сл.) у бетонским композитима и армиранобетонским конструкцијама
- развој, тестирање и верификација технологије производње бетона са високим садржајем летећег пепела
- развој, тестирање и верификација технологије производње слојевитих конвенционалних и зелених бетона
- оцену утицаја на животну средину горе поменутих врста бетонских композита

Обим и динамика појединих активности ће бити периодично договаран и усклађиван између Уговорних страна, преко координатора (члан 3), а све у циљу обезбеђења ефикасне и обострано корисне сарадње.

Поверљивост информација

Члан 7.

У складу са интерним актима Партнера и његовим посебним захтевима и добрим пословним обичајима, ГФБ је дужан да као пословну тајну чува сваки документ или информацију коју добије од Партнера, а које као такве одреди Партнер.


ГФБ је одговоран за свако неовлашћено давање информације и података у смислу претходног става, изузев и само оним лицима која су непосредно ангажована на реализацији активности по овом Уговору.

Партнер је одговоран за свако неовлашћено давање информација коју добије од ГФБ, до којих дође приликом реализације активности по овом Уговору, и одговоран је за евентуалне трошкове и/или штету коју услед тога претрпи ГФБ.

Трајање Уговора

Члан 3.

Уговор о пословно - техничкој сарадњи се закључује на неодређено време и сваки од потписника га може отказати.



2

Започети послови завршиће се у роковима предвиђеним планом активности које утврде координатори, односно прихваћеним писменим налозима, без обзира што би евентуално дошло до отказивања овог уговора.

Решавање спорова и раскид уговора

Члан 8.

Све евентуалне спорове који настану из овог Уговора уговорне стране ће покушати да реше Уговорно.

Уколико спорови између уговорних страна не буду решени, уговорне стране су сагласне да ће сваки такав спор бити решаван пред стварно надлежним судом у Београду.

Завршне одредбе

Члан 9.

Овај Уговор се може изменити само писаним анексом, потписаним од стране овлашћених заступника уговорних страна.

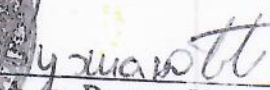
Члан 10.

Уговор се сматра закљученим и ступа на снагу када га потпишу оба овлашћена лица уговорних страна, а што ће се документовати датумом на заводном печату.


Овај Уговор је сачињен у 4 (четири) истоветна примерака, од којих по 2 (два) за сваку уговорну страну.

Уговорне стране сагласно изјављују да су овај Уговор прочитале, разумеле и да уговорне одредбе у свему представљају израз њихове стварне воље.

Универзитет у Београду
Грађевински факултет


Проф. др Владан Кузмановић, декан

„ШУША“ Д.О.О.


Девис Шуша, директор