



Получена: 03.01.2023 г.

Приета: 10.03.2023 г.

ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДУАЛНИ СТОМАНЕНИ РАМКОВИ КОНСТРУКЦИИ С *BRB*-ДИАГОНАЛИ

Б. Куков¹

Ключови думи: стоманени конструкции, дуални (смесени) системи, *BRB*-диагонали, сеизмично проектиране

РЕЗЮМЕ

Представени са числени изследвания, проведени върху четириетажна петотворна рамкова конструкция от административна сграда. За целите на изследването от първоначалната рамка с корави възли са разработени пет производни рамки (три от които дуални) с добавяне на *BRB*-диагонали. Сеизмичното реагиране на дуалните системи е оценено чрез спектрален анализ и статичен нелинеен *push-over* анализ (*Capacity Spectrum Method*). Резултатите от числените изследвания показват, че дуалните системи от този тип имат редица предимства пред традиционните рамки с корави възли и рамки с вертикални връзки.

1. Въведение

Диагоналите, осигурени срещу изкълчване (*BRB*-диагонали), са широко използвани като високодуктилни сеизмични устройства. Първата сграда, в която са използвани *BRB*-диагонали, е построена в Токио още през 1989 г. и от тогава до сега са реализирани още много сгради в Япония, САЩ, Тайван, Китай, Нова Зеландия и други страни. Основната функция на *BRB*-диагоналите е да увеличат дисипативния капацитет и коравината на конструкцията за хоризонтални въздействия и като следствие да намалят нееластичните деформации и повреди в основната рамкова конструкция.

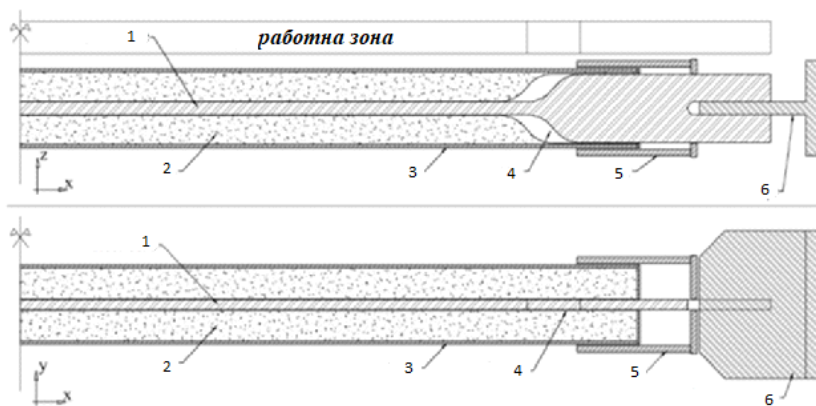
¹ Борислав Куков, докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: borislavkukov@abv.bg

При сеизмични въздействия *BRB*-диагоналите осигуряват стабилно дисипиране на енергия чрез своето хистерезисно поведение, докато рамките с корави възли се очаква да реагират в еластичен стадий и да осигурят центриране на конструкцията на сградата след края на земетресението.

Анализирани са пет производни една на друга 4-етажни 5-отворни рамки, като целта е да се проследи приносът на подсистемата „рамка с корави възли“ за поемане на сеизмичните сили, с увеличаване на нейната коравина.

Сеизмичното реагиране на конструкциите е оценено чрез спектрален анализ и паралелно със статичен нелинеен *push-over* анализ (*Capacity Spectrum Method*) [1], проведени със софтуера *SAP 2000 v14.1.0* [2].

2. *BRB*-диагонали – предимства и приложение в сеизмичното проектиране



Фиг. 1. Надлъжни разреза на типичен *BRB*-диагонал, произведен от *Star Seismic* [3]

1. Стоманено ядро; 2. Бетон; 3. Стоманен кух профил (сечение); 4. Въздушен джоб (кухина, фуга); 5. „Яка“; 6. Фрагмент от стоманената конструкция, към който се захваща *BRB*-диагоналът

BRB-диагоналите са сеизмични устройства, състоящи се от стоманено ядро, което поема само осови усилия и стабилизираща обвивка, която възпрепятства изключването на ядрото при работа на натиск. Както е показано на фиг. 1, типичната обвивка се състои от стоманен затворен профил, запълнен с разтвор, който обвива дуктилното ядро. В краищата на ядрото има зони без запълване (кух участък), което е съществена особеност на съвременните *BRB*-диагонали. В резултат на тези мерки дисипативните характеристики на *BRB*-диагоналите са отлични и са сравними с други демпферни устройства.

За постигане на стабилни и надеждни характеристики на системите с *BRB*-диагонали при проектиране трябва да се вземат предвид следните критерии [3]:

- Изисквания за стабилно хистерезисно поведение

BRB-диагоналите трябва да се проектират за носимоспособност и устойчивост предвид локалното и глобалното поведение на дуктилното ядро, съединенията им и всички останали части.

- Локални несъвършенства в стабилизиращата обвивка

Нарушаването на сцеплението или празнина между стоманеното ядро и кожата могат да доведат до компрометиране на ядрото, когато *BRB* работи на натиск.

- Глобална загуба на устойчивост, заедно със съединенията
- Нарастващ деформационен капацитет до разрушаване

Нарастващият деформационен капацитет на *BRB*-диагоналите, подложени на осови деформации с постоянна амплитуда, може приблизително да бъде моделиран по правилата на *Manson-Coffin*.

3. Предимства и недостатъци на дуалните системи с *BRB*-диагонали пред „чистите“ връзкови системи с *BRB*-диагонали

3.1. Предимства

- Въпреки доброто сеизмично поведение на „чистите“ системи (вертикални връзки) с *BRB*-диагонали, някои изследвания показват, че тези системи, приложени в многоетажни сгради, са склонни към формиране на „меки“ етажи (локални пластични механизми на разрушение). Това явление се нарича още „концентрация на междуетажните премествания“ и се усилва от проявата на *P-Δ* ефекти.

- Непрекъснатостта на колоните по височина и ориентацията на техните напречни сечения така, че да работят на огъване спрямо силната им ос, подобряват коравината на системата след провлачване на *BRB*-диагоналите, но най-добро поведение е наблюдавано при добавяне на рамки с корави възли (*MRF*), т.е. превръщане на системата в дуална (смесена).

- Особено ценен е приносът на *MRF*-подсистемата за намаляване на необходимата дуктиленост (*ductility demand*) на *BRB*-диагоналите при силно земетресение, така че дуалната система да запази някакъв минимум от коравина и дуктиленост, които да я предпазят от разрушение при последващи афтершокове.

- Чрез подходящо съчетаване на носимоспособностите, коравините и дуктиленостите на двете подсистеми може да се постигне рационално удовлетворяване на основните критерии на Еврокод 8 [4], свързани с трите нива на интензивност на сеизмичните въздействия: *DL* – Ограничаване на повредите ($Tr = 95$ г.), *SD* – Значителни повреди ($Tr = 475$ г.) и *NC* – Близко до разрушаване ($Tr = 2475$ г.).

- При съвместното поемане на хоризонталните сеизмични въздействия от двете подсистеми – вертикални връзки с *BRB*-диагонали и рамки с корави възли (*MRF*) – се получава благоприятна трилинейна диаграма „сила-преместване“ (срязваща сила в основата във функция на хоризонталното преместване на покрива).

3.2. Недостатъци

- Въпреки че *BRB*-диагоналите са изследвани задълбочено и тяхната висока дуктиленост е потвърдена от много изследвания, [4] не предоставя никакви правила за проектиране на стоманени рамки с *BRB*-диагонали, а по-скоро ги третира като изделия, предлагани от производител.

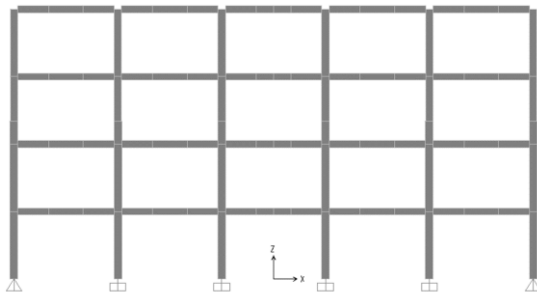
- Трудности при тяхното проектиране – свързани с това, че линейният еластичен динамичен анализ (определяне на сеизмичните сили и премествания по спектралния метод) не дава достатъчна информация за поведението на дуалната система и за

взаимодействието между нейните две подсистеми (*BRB* и *MRF*) при различни нива на сеизмичното въздействие [5, 6].

4. Описание на изследваните конструкции, приложени подходи и методология

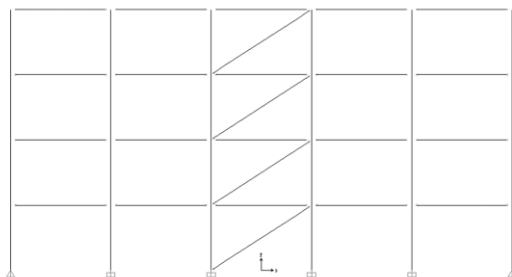
Изследванията са проведени върху 4-етажна 5-отворна рамка с корави възли от административна сграда, изследвана в примера от Глава 12 на [7]. Височината на всяко етажно ниво е 3,90 m, а разстоянието между колоните е 6,0 m (съответно за цялата рамка е $5 \times 6,0 \text{ m} = 30,0 \text{ m}$). За целите на настоящото изследване са разработени пет производни рамки, като към рамката с корави възли (*MRF*) са „вложени“ *BRB*-диагонали. Натоварванията в изчислителните модели са аналогични на тези от примера и са съгласно конструктивните Еврокодове. Производните рамки не са проектирани наново, а сеченията на техните елементи са приети както в изходната рамка. За определяне на напречните сечения на *BRB*-диагоналите е извършена проверка за носимоспособност на опън на диагоналите на всички етажни нива. Приетите напречни сечения на колоните са *HEB450* в долните два етажа и *HEA450* в горните два и са от стомана клас *S275*. Ригелите на всички етажни нива са със сечение *IPE400* от стомана клас *S235*. Допълнително вложените *BRB*-диагонали са въведени в изчислителния модел, като са моделирани от няколко части съгласно [8]: Работна зона с дължина 70 % от общата дължина на елемента, в случая 5,0 m; Крайни зони от *BRB*-диагонала, които работят само в еластичен стадий с еднаква дължина съответно по 15 % от дължината на елемента във всеки от двата края. Приетите сечения на работната зона на диагоналите са *CHS 88,9*×6,3 mm (с площ 16,3 cm²) и крайни зони с напречно сечение с площ 50 cm² за *BRB*-диагоналите в долните три нива и съответно *CHS 76,1*×5 (с площ 11,2 cm²) и крайни зони с напречно сечение с площ 20 cm² за последното ниво. Всички *BRB*-диагонали са от стомана *S235* и са ставно свързани към рамките. *BRB*-диагоналите са ориентирани спрямо въведеното натоварване така, че в тях да има само опънни усилия.

Сеизмичното реагиране на конструкциите е оценено чрез спектрален анализ и статичен нелинеен *push-over* анализ (*Capacity Spectrum Method*), [1]. В краищата на рамковите ригели и колони, както и в *BRB*-диагоналите, са дефинирани пластични стави, като са използвани вградените в *SAP2000 v14.1.0* модели на пластични стави съгласно предписанията на [9]. Пластичните стави в моделите са дефинирани чрез диаграмите момент-ротация и осова сила-осова деформация. Предвид особеностите на *BRB*-диагоналите и това, че имат изравнена носимоспособност на опън и натиск, при моделирането на пластичните стави в тях е взета предвид тази тяхна особеност.



Фиг. 2. Геометрия на изходна рамка 1 (*MRF*)

Изследваната рамка е изцяло с корави възли, връзката на колоните с фундаментите е корава, единствено крайните колони са ставно свързани към фундаментите. Тази рамка сама по себе си не е дуална система и е използвана като изходна за сравнение с останалите рамки.



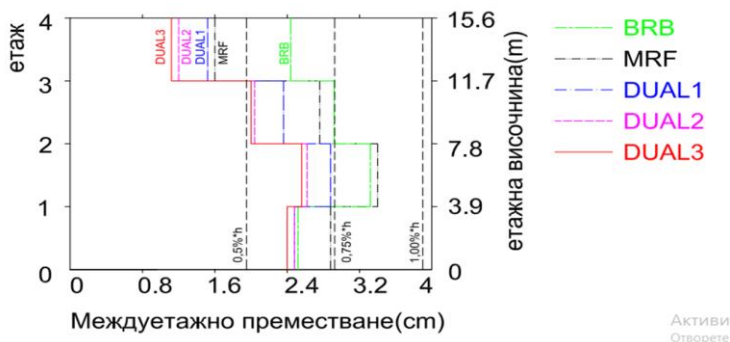
Фиг. 3. Геометрия на изследваните производни рамки (*BRB*, *DUAL1*, *DUAL2*, *DUAL3*)

Изследвани са още четири производни рамки като са добавени *BRB*-диагонали в средното междуосие, добавените диагонали са ставно свързани с рамката. Първата производна изследвана рамка представлява „чиста“ връзкова система с *BRB*-диагонали. Всички възли колона-ригел, както и връзките на диагоналите към рамката, са ставни.

Останалите три рамки са дуални системи, като при тях, освен добавените връзки с *BRB*-диагонали има и корави възли колона-ригел. За първата дуална система в крайните междуосия възлите колона-ригел са корави, а във вътрешните междуосия са ставни. При втората дуална система за крайните и вътрешните междуосия връзката колона-ригел е корава, единствено в средното междуосие е ставна. За последната дуална система всички възли колона-ригел са корави.

5. Резултати, получени от числените изследвания

На фиг. 4 са показани очакваните междуетажни премествания за изследваните рамки, съответстващи на слаби земетресения. Ограниченията на междуетажните премествания съгласно [4] са обозначени с пунктирани линии ($0,005h$; $0,0075h$ и $0,010h$), където $h = 3,9$ m е етажната височина.



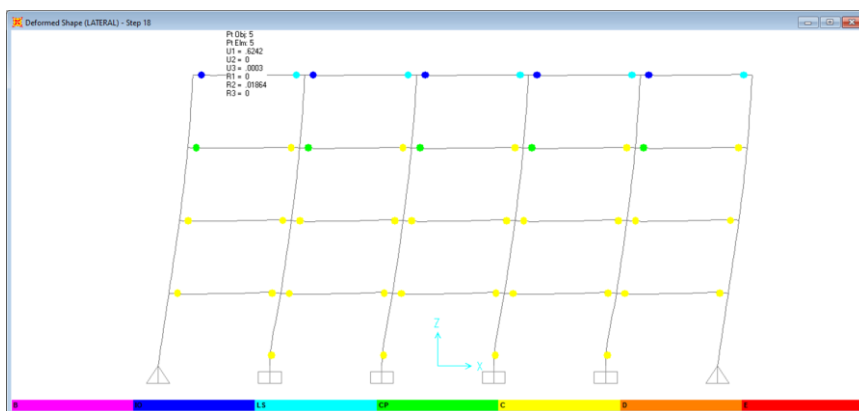
Фиг. 4. Междуетажни премествания за различните рамки, получени от спектралния анализ коефициент на поведение $q = 4$

Таблица 1. Обобщени резултати от спектралния анализ и от статичния нелинеен *pushover*-анализ

Обобщени резултати от спектралния анализ (q=4)							
Модел	T1(s)	Δ_{roof} (cm)	V base(kN)	V _{b,BRB}		V _{b,MRF}	
				kN	%	kN	%
MRF	0,84728	10,64	403,2	0	0	403,1	100
BRB	0,84269	11,2	431,2	226,8	52,6	204,3	47,4
DUAL 1	0,72295	9,24	463,8	223,3	48,1	240,5	51,9
DUAL 2	0,64541	8,32	536,7	224,6	41,8	312,2	58,2
DUAL 3	0,62746	8,08	553,2	220,3	39,8	332,9	60,2

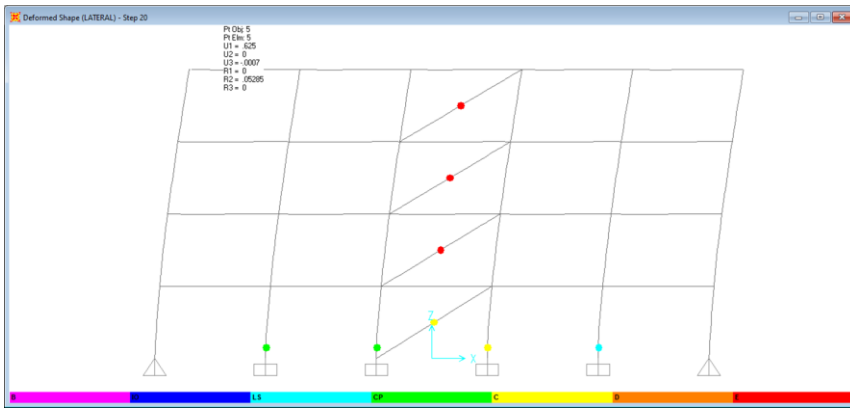
Обобщени резултати от Pushover-анализа за точката на реагиране							
Модел	Teff(s)	Δ_{roof} (cm)	V base(kN)	V _{b,BRB}		V _{b,MRF}	
				kN	%	kN	%
MRF	0,935	10,3	1168,9	0	0	1168,9	100
BRB	1,249	10,8	582,7	332,4	57,1	250,3	42,9
DUAL 1	0,916	8,7	973,3	326,5	33,6	646,7	66,4
DUAL 2	0,784	7,8	1266,8	330,8	26,1	936	73,9
DUAL 3	0,744	7,6	1385,4	331,8	23,9	1053,6	76,1

Разпределението на сеизмичните сили между двете подсистеми (в %) е различно според резултатите от двата метода за изследване на сеизмичното реагиране. Съотношението на срязващите сили в основата, поемани от *MRF* и *BRB*, „предсказано“ от спектралния метод, съответства на началното съотношение на коравините на двете подсистеми в еластичен стадий.



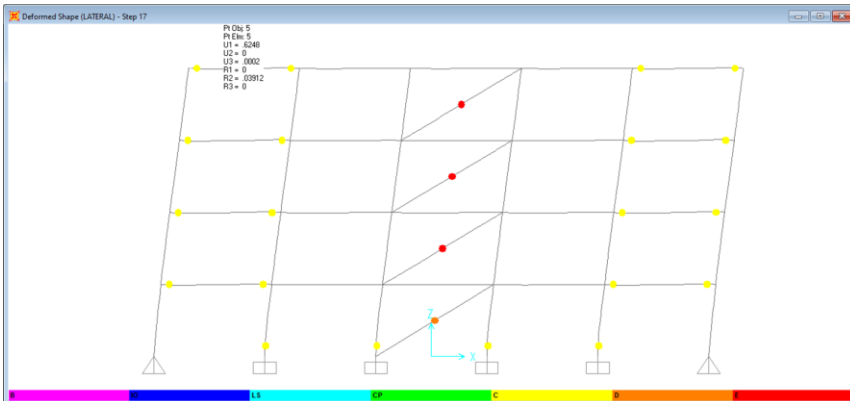
Фиг. 5. Резултати от нелинейния статичен *pushover*-анализ за рамка с корави възли *MRF*

Първите пластични стави в рамката с корави възли се появяват в краищата на ригелите на първия етаж при вътрешните колони, при междуетажно преместване, равно на 0,38 % от етажната височина, постепенно следвано от провлачване в краищата на гредите до предпоследния етаж. След това се формират пластични стави в основата на вътрешните колони на първия етаж, с което се достига до развитието на пластични стави в краищата на всички ригели.

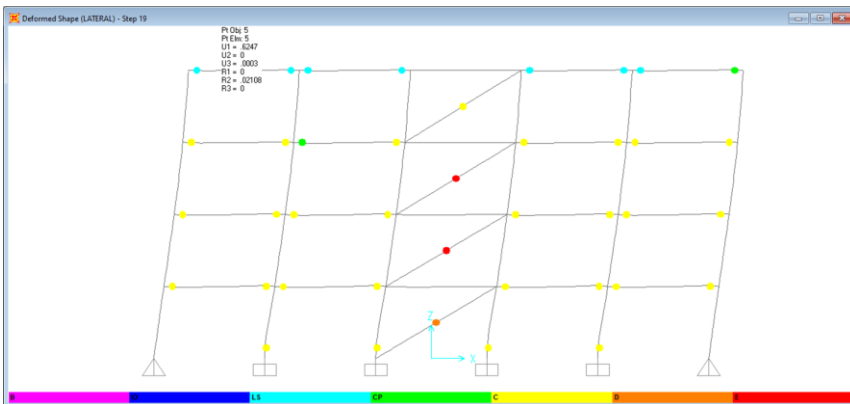


Фиг. 6. Резултати от нелинейния статичен *pushover*-анализ за „чиста“ връзкова система *BRB*

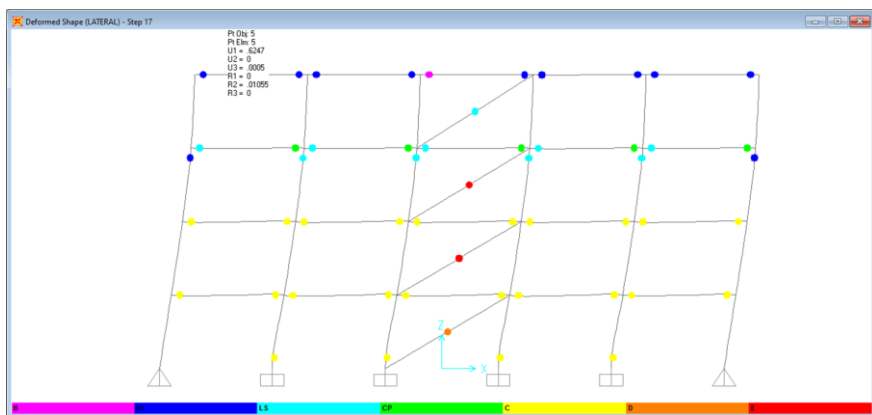
Първите пластични стави във връзковата система се появяват във връзките на второто ниво, следвано от провлачване на връзките на всички нива и поява на пластични стави в основата на вътрешните колони на първото ниво.



Фиг. 7. Резултати от нелинейния статичен *pushover*-анализ за дуална система 1

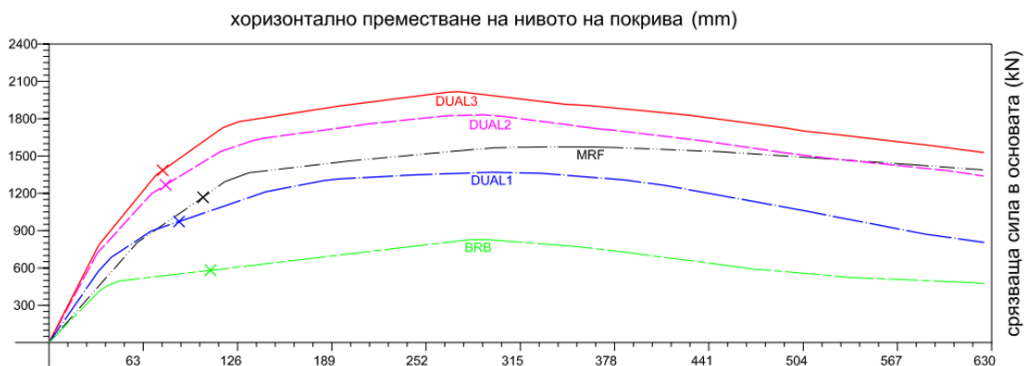


Фиг. 8. Резултати от нелинейния статичен *pushover*-анализ за дуална система 2



Фиг. 9. Резултати от нелинейния статичен *pushover*-анализ за дуална система 3

На фиг. 7, 8 и 9 са показани резултатите от статичния нелинеен анализ за трите изследвани дуални рамки. От тях се вижда, че първите пластични стави в дуалните системи се появяват във връзките на второто ниво, следвано от провлачване на връзките на всички нива и пластифициране в краищата на кораво свързаните ригели. След пластифицирането на ригелите започва и появата на пластични стави в основата на вътрешните колони на първото ниво.



Фиг. 10. Капацитивни криви „срязваща сила в основата – хоризонтално преместване“ за изследваните рамки

На фиг. 10 са показани капацитивните криви за изследваните рамки, като с *X* са означени точките на реагиране (*Performance Point*), определени чрез *capacity spectrum method*. Тези точки съответстват на така наречените целеви премествания (*target displacements*) в [4]. За определяне на точките на реагиране първоначално задаваме еластичния спектър на ускоренията от [4] във формат *S_a – T* (спектрално ускорение-период) и дефинираме въздействието във формат *ADRS* (*Acceleration-Displacement Response Spectrum*).

За първата изследвана рамка *MRF* хоризонталното преместване на нивото на покрива Δ_{roof} за точката на реагиране е 10,3 cm, което съответства на стъпка 2 от *pushover* анализа. За рамката *BRB* Δ_{roof} за точката на реагиране е 10,8 cm, съответстващо на стъпка 4 от *pushover* анализа. За *DUAL1,2,3* Δ_{roof} са съответно 8,7 cm, 7,8 cm и 7,6 cm,

съответстващи на 3-а стъпка от *pushover* анализа за рамката *DUAL1* и на 2-а стъпка за рамките *DUAL2,3*.

6. Изводи и заключителни бележки

Изводите от проведените числени изследвания могат да се обобщят в няколко точки.

Спектралният метод (линеен еластичен динамичен анализ) сравнително добре предсказва максималните премествания на системата, като те не зависят от приетата стойност на „ q “.

Разпределението на сеизмичните сили между двете подсистеми, получено по метода на капацитивния спектър, е по-реалистично и достоверно, защото то съответства на точката на реагиране и отразява изменението и съотношението на коравините в еласто-пластичен стадий.

Основният извод, който се налага, е, че с увеличаване на коравината на *MRF*-подсистемата нейният принос в поемане на сеизмичните сили нараства значително (до 76 % от общата сръзваща сила в основата), докато спектралният метод „предсказва“ само 60 %. Като цяло „приносът“ на *MRF*-подсистемата е много висок, но това е само за разглежданата рамка, тъй като дуалните системи не са проектирани наново, а техните сечения са приети, както са в изходната рамка.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Freeman, S.* Review of the development of capacity spectrum method, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 438, Vol. 41, No. 1, March 2004, pp. 1-13.
2. SAP 2000 v14.1.0, Computers and Structures, Inc. 2015.
3. *László Gergely, Vigh, Ádám Zsarnóczy, Tamás Balogh.* Eurocode conforming design of BRBF – Part I: Proposal for codification.
4. CEN. EN 1998-1: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for building, European Committee for standardization, Bruxelles, 2005.
5. *Zaruma, S., Fahnestock, L.* Assessment of design parameters influencing seismic collapse performance of buckling-restrained braced frames.
6. *Zaruma, S., Fahnestock, L.* Seismic Stability of Buckling-Restrained Braced Frames.
7. *Venkov, L., Belev, B., Penelov, Ch.* Rukovodstvo za proektirane na stomaneni konstrukcii na sgradi po Evrokod 8, KIIP, 2009.
8. *Sabelli, R., López, W. A.* Buckling-Restrained Braced Frames, 2008.
9. ASCE/SEI 41-17 Seismic evaluation and retrofit of existing buildings.

NUMERICAL STUDY OF DUAL STEEL FRAMES WITH INCORPORATED BRBS

B. Kukov¹

Keywords: steel structures, dual systems, BRB-frames, seismic design

ABSTRACT

Numerical studies on a four-story five-span frame structure from an administrative building are presented in this survey (in Bulgarian). For the purpose of the study, five derivative frames (three of them are dual) with incorporated *BRB*-diagonals are developed from the original MRF. The seismic response of the dual systems is compared by spectral analysis and static nonlinear push-over analysis (Capacity Spectrum Method). The results of the numerical studies show that the dual systems of this type have a number of advantages over traditional MRF and CBF frames.

¹ Borislav Kukov, Eng. PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: borislavkukov@abv.bg