XIV Международна научна конференция
„Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 10-12 септември 2026 г, Варна
XIV International Scientific Conference
„Civil Engineering Design and Construction“, Sept. 10 - 12, 2026, Varna, Bulgaria
ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD)

ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ГРАВИТАЦИОННИ КОЛОНИ ЗА СЕИЗМИЧНИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ

Никола Ангелов[1]

DESIGN OF GRAVITY COLUMNS FOR SEISMIC ACTIONS

Nikola Angelov

Abstract:
A practical case of gravity column in a building with wall structure and flat slabs is considered. The column is secondary seismic element and does not participate in absorbing seismic forces. However, it is subjected to the same horizontal displacements as reinforced concrete walls. A practical sequence for its dimensioning and for a seismic situation is presented. It is proven through analyses and numerical examples that this situation can also be relevant, especially for large horizontal displacements of the entire structure.

Keywords:
Gravity Column, Secondary Seismic Element, Seismic Situation

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В съвременните кодове за проектиране [2-6] и в практиката елементите на конструкциите се разделят на главни и второстепенни, що се отнася до поемането на сеизмичните въздействия.

В настоящата статия са разгледани колони при стенна противоземетръсна система, които са опори на безгредови плочи. Тези, т.н. „гравитационни колони“, са второстепенни сеизмични елементи и не участват в поеманането на сеизмичните сили, а само в преноса на вертикални товари към основите.

Тяхното оразмеряване за КГС според Еврокод 2 [1] от дълготрайна и краткотрайна ситуация (основна ситуация) се изпълнява лесно с познатите процедури в източници, като [7, 9, 10]. Дори като част от укрепена система проектирането им може да се проведе много по-бързо и лесно и по „φ-метода” [7].

Често обаче оразмеряването им за сеизмична комбинация се пренебрегват, с оглед на по-малките осови сили в тях при тази ситуация.

Те обаче са част от конструкцията и като такива са подложени на същите хоризонтални премествания, както и главните сеизмични елементи. Именно тези

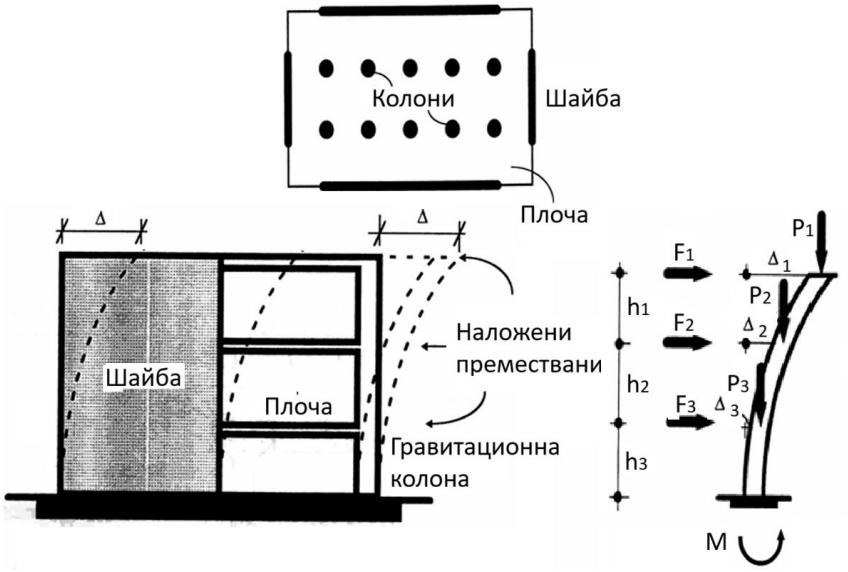
[1] Никола Ангелов, гл. ас. д-р инж., катедра „Масивни конструкции”, Строителен факултет, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски” №1, 1164 София, nikangelov_fce@uacg.bg
Nikola Angelov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Department of Reinforced Concrete Structures, Faculty of Structural Engineering, UACEG, Sofia 1164, 1 Hristo Smirnenski Blvd., nikangelov_fce@uacg.bg

преместванията са причината за възникване на огъващи моменти и срязващи сили по височина на колоните.

Не винаги малките междуетажни премествания са критерии за слабо огъване на колоните. Много по-важен е профила на изменението на хоризонталните премествания по височина. Той ще бъде същия, както на стените и ще бъде наложен на колоните от коравите подови диафрагми.

Обикновенно големите огъващи моменти в гравитационните колони, заради хоризонталното им деформиране, се получават в мястото на запъването им. Има случаи обаче, когато такива се появяват и по височина, например при смяна на коравината на конструкцията (намаляване на дължината на стените, отпадане на стени), при трансферни плочи и др. [17].

Особено голям проблем за гравитационните колони може да са хоризонтални премествания едновременно в двете посоки, както е при усукващо-деформируемите конструкции и колони, разположени по периферията на сградите.



Фигура 1. Наложени премествания на гравитационни колони и генериран огъващ момент, Agarval, 1996 – цитирана в [6]

Според [6] огъващите моменти в основата на гравитационна колона може да се определят по:

$$M = \sum P_i.\Delta_i + \sum F_i \left(\sum_{j=i}^{n} h_j \right). \quad (1)$$

2. ПРОЕКТИРАНЕ НА ВТОРОСТЕПЕННИ ЕЛЕМЕНТИ СПОРЕД ЕВРОКОД 8 [2]

Според Еврокод 8 [2] максималните деформации от изчислителна сеизмична ситуация трябва да са определени с отчитането на $P-\Delta$ ефектите, като коравината на второстепенните елементи е напълно пренебрегната, а главните са с редуцирана коравина, за да се отчете ефекта на напукването им от огъване и срязване.

При проектиране на сгради междуетажните премествания трябва да са в определени граници [2], за да се гарантират „изискванията за ограничаване на повредите“. Тези междуетажни премествания обаче се проверяват за сеизмични въздействия с по-голяма вероятност за повтаряемост (веднъж на 95г.), отколкото изчислителното сеизмично въздействие. За проверки на гравитационните колони обаче трябва да се използват

пълните хоризонтални деформациите от изчислителното сеизмично въздействие с вероятност за повтаряемост веднъж на 475г. Пълните деформации лесно могат да се определят от еластичните, получени от спектрален анализ, като се умножат с използвания коеф. на поведение q.

Според Еврокод 8 [2] второстепенните елементи са с достатъчна носимоспособност за поемане на гравитационните товари при сеизмична ситуация, ако изчислените за тях огъващи моменти и срязващи сили на база на определените хоризонтални деформации, с намалената им коравина вследствие на напукване, са по-малки от носимоспособностите им на огъване M_{Rd} и срязване V_{Rd}. В настоящата статия е изследвана само носимоспособността им на огъване с натискова сила.

Второстепенните елементи не трябва да отговарят на правилата за оразмеряване и конструиране на Еврокод 8 [2], както е изтъкнал M.Fardis в [11].

3. ПРАКТИЧЕН ПОДХОД ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ГРАВИТАЦИОННИ КОЛОНИ

3.1. Определяне на усилия в гравитационна колона при сеизмично въздеиствие

Основната идея в сатията е да се предложи опростен и консервативен метод за практическо определяне на разрезните усилия M_{Ed} и V_{Ed} в гравитационните колони и да се проверят традиционни елементи от конструкции дали са в състояние да ги поемат.

Първоначално трябва да се определи еластичния профил на преметсванията на гравитационна колона, съвпадащ с този на цялата конструкция. От него да се определят пълните етажни премествания.

Разрезните усилия в колоните могат да определят от два самостоятелни модела.

В първия модел колоните трябва да се „натоварят” с наложените пълни етажни премествания и да се определят генерираните от тази деформация огъващи моменти M_{Ed}. Тук е особено важно да се приеме подходяща ефективна коравина $E.I_{eff}$ на колоната, за да се получат реалистични огъващи моменти.

Във втория модел трябва да бъдат въведени всички вертикални етажни реакции действащи в деформирана схема и отново да се изчисли огъващ момент M_{Ed}. Допълнителни хоризонтални премествания при тази ситуация не бива да се очакват, защото плочите, освен че налагат премествания върху колоните, и ги укрепват хоризонтално (плочите не позволяват на колоните да се деформират допълнително).

Оразмеряването на колоните трябва да бъде извършено със сумата от двата огъващи момента и вертикалния товар по време на сеизмичното въздействие. Срязващите сили V_{Ed} лесно могат да бъдат получени от изчислените огъващи моменти.

Тази процедура прилича на предложената в [6], но вместо хоризонтални сили, както е в (1), са използвани наложените пълни хоризонтални премествания. Подобна идея е изказана и от авторите на [8], като те предлагат моментите във второстепенните колони да се определят с вземане под внимание само на първото събираемо от (1).

3.2. Уточняващи подробности

При оразмеряването на елементи за сеизмична ситуация инперфекции не се отчитат, т.е. $e_i = 0$.

Глобалните $P-\Delta$ ефекти ще се отчитат според описаните възможности в EC8 [2]:

- При $\theta \le 0{,}1$ – няма да се отчитат (обикновенно при стенни конструкции попадаме в този диапазон);
- При $0{,}1 \le \theta \le 0{,}2$ – ще се отчитат чрез завишаване на деформациите от сеизмичното въздействие с $1/(1-\theta)$.

Локалните $P-\delta$ ефекти трябва да се отчитат според Еврокод 2 [1]. В настоящата статия те са пренебрегнати за опростяване на представените резултати.

При безгредови плочи (огъваеми извън равнината си) взаимодействието плоча-колона е слабо и не води до формиране на сериозна рамкова връзка [18]. Затова и предложения подход и интерпретацията на деформираната схема изглеждат разумни.

Гравитационните колони трябва да останат еластични (да не дисипират енергия) при проектното сеизмично въздействие [11]. Затова и при изследването те са отклонени от вертикалното си положение с пълните премествания.

Вертикалните товари в гравитационните колони при сеизмична ситуация наистина са по-малки (обикновенно $0,5 \div 0,8$ пъти) в сравнение с изчислителните в КГС.

3.3. Ефективна коравина

Особено важно за част от изследването е определяне на ефективната коравина $E.I_{eff}$ на второстепенните колони.

В кодове [2] и автори [11, 12] тя е с фиксирана стойност 0,5 за сеизмична стуация.

В други изследвания и кодове [13-16] зависи от относителния натиск в колоните. Установената тенденция е колкото по-голям е относителният натиск толкова по-голяма да е ефективната коравина $E.I_{eff}$, защото напречното сечение по-трудно се напуква от огъване. Това от своя страна води до генериране на по-големи огъващи моменти при деформиране на колоните.

Ефективната коравина на гравитационните колони по време на сеизмично въздействие може да се представи като част от еластичната. Някои от предложените стойности от [11-16] са показани в Табл.1.

Таблица 1. Ефективна коравина на колона според кодове и автори – по подобие на [15]

Източник	$K_{eff} = E.I_{eff} / E.I_g$
ACI 318 [3]	$\begin{cases} 0,35 & при \quad \nu < 0,1 \\ 0,7 & при \quad \nu \geq 0,1 \end{cases}$
EC-8 [2]	$\frac{M_y L}{3EI_g \theta_y}, \qquad \theta_y = \frac{k_y L}{3} + 0,013\left(1+1,5\frac{h}{L}\right) + 0,13k_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c'}}$
CSA A23.3-14 [4]	$0,5.\nu + 0,6 \leq 1,0$
Elwood and Eberhard [14]	$0,2 \leq 5.\nu/3 - 4/30 \leq 0,7$
Biskinis and Fardis [13]	$a\left(0,8+\ln\left(\max\left(\frac{L}{h},0.6\right)\right)\right)\left(1+0,048\min\left(50MPa,\frac{P}{A_g}\right)\right)$ $a = 0,081 \quad за \quad колони$

За K_{eff} в настоящата статия е избрано да се работи с ф-лата, предложена в [14]:

$$K_{eff} = 0,2 \leq \frac{5}{3}\nu - \frac{4}{30} \leq 0,7 . \qquad (2)$$

където $\nu = N/(f_{cd}.A_c)$ е нормализираната сила.

3.4. Сеизмично въздействие

Прието е ефектите от въздействията вследствие комбинирането на хоризонталните компоненти на сеизмичното въздействие да се изчисляват, като се използва правилото 100:30, както е позволено в Еврокод 8 [2]:

$$\begin{matrix} E_{Ed,x} \text{"+"} 0,3.E_{Ed,y} \\ 0,3.E_{Ed,x} \text{"+"} E_{Ed,y} \end{matrix}. \quad (3)$$

където $E_{Ed,x}$ и $E_{Ed,y}$ са ефектите от сеизмичното въздействие съответно по направление x и y, а "+" означава „комбинира се”.

3.5. Оразмеряване на колоната

Оразмеряването на натискова сила от основна к-ция не е проблем и както беше споменато може лесно да се извърши според [1, 7, 9, 10].

За оразмеряването на колоната за сеизмична комбинация трябва да се използват получените огъващите моменти според т.3.1 и по-малките вертикални сили, действащи по време на сеизмичното въздействие. Отново се ползват постановките и процедурите от [1, 7, 9, 10].

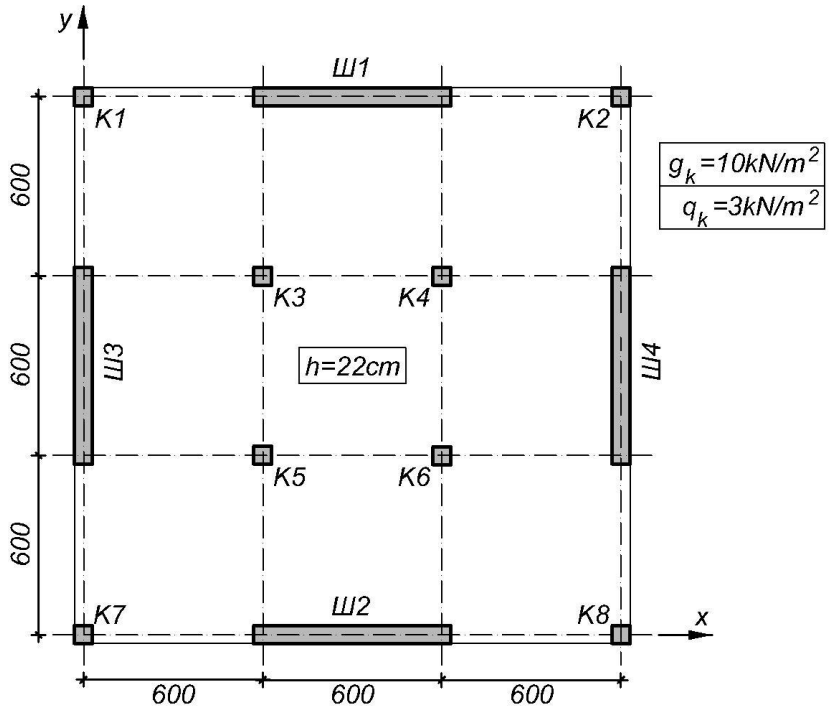
Като меродавно за армирането се приема разбира се по-голямата определена армировка от двете ситуации.

В настоящата статия оразмеряванията са проведени само за критичните сечения до запъването.

4. ЧИСЛЕН ПРИМЕР – МОДЕЛИ, РЕЗУЛТАТИ, АНАЛИЗИ И ОРАЗМЕРЯВАНЕ

4.1. Геометрия, натоварвания, параметри и модели

За числено изследване е избрана 8 етажна сграда (фиг.2). Всичките й елементи са проектирани с бетон клас $C25/30$. Плочите са с дебелина $22cm$. Етажната височина е $H_{et} = 3,3m$. Определените постоянни товари върху плочите са със стойност $g_k = 10,0kN/m^2$, а експлоатационен – със стойност $q_k = 3,0kN/m^2$.



Фигура 2. План на изследваната сграда

При дефиниране на сеизмичните сили е използван сеизмичен коефициент $a_{gR} = 0,23.g$, коефициент на поведение $q = 3,0$ и група почви C.

Шайбите са с дебелина $40cm$ в критичната зона и $25cm$ извън нея, като коравините им са дефинирани според Еврокод 8 [2]. За опростяване на модела е прието всички плочи да са еднакви и той да е запънат на горен ръб сутерен.

Проверките на провисване и продънване на плочата могат да бъдат удовлетворени с така избраните геометрични размери на конструктивните елементи.

Дори и без специално изследване е очевидно, че показаната конструкция може да се класифицира като стенна.

Направени са 3 различни модела:

- Стандартен 3D-модел със ставно свързани към плочите колони – за получаване на хоризонталните премествания;
- Самостоятелни модели на колони К1 и К3 с наложени премествания и корегирани коравини;
- Самостоятелни модели на хоризонтално отклонени колони К1 и К3 с вертикални етажни товари по време на сеизмично въздействие.

Разгледано е сеизмично въздействие само в едно направление.

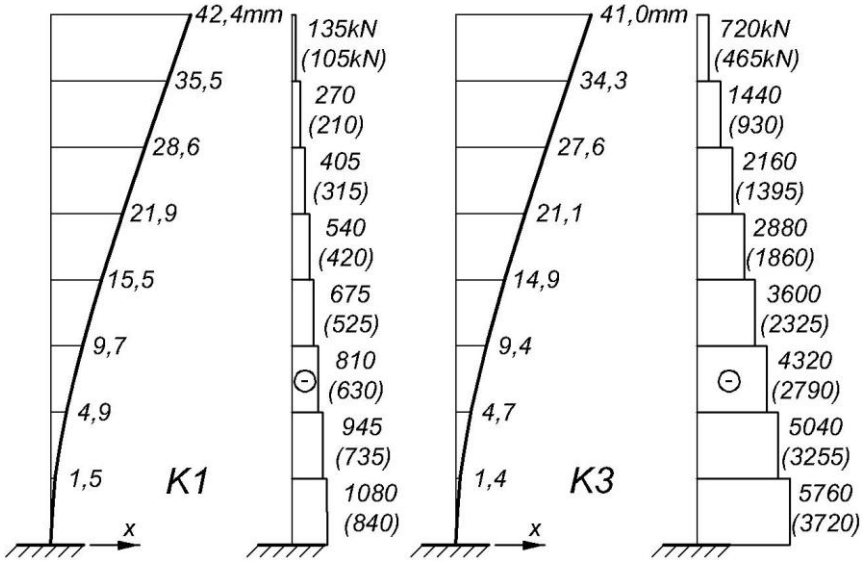
Заради пълната симетрия на сградата изпълняването на ф-ла (3) става лесно, защото получените резултати са валидни и за двете главни посоки.

В това изследване деформирането на земната основите е пренебрегнато.

4.2. Хоризонтални премествания

За избраната конструкция междуетажните премествания са далеч от граничните (около 2/3 само са изразходени):

$$d_{e,i}.q.\nu = 0,0069.3.0,5 = 0,01035m < \left(d_{r,i}\right)_{\lim} = 0,005.H_{et} = 0,005.3,3 = 0,0165m\,. \qquad (4)$$



Фигура 3. Натискови сили в колони К1 и К3 от основна и особена (.....) комбинации и еластични премествания по x в mm

4.3. Осови сили и пълни премествания

На фиг.3 и в Табл.2 са показани по-важните резултати за изследваните колони – осови сили и премествания на колони К1 и К3 на всяко етажно ниво.

Таблица 2. Резултати за колони К1 и К3 – осови сили N_{Ed} и пълни премествания $d_{s,i}$ по х

Етаж, i	Колона К1			Колона К3		
	N_{Ed}, kN Осн. к-ция	N_{Ed}, kN Особ. к-ция	Прем. над i -ти етаж $d_{s,i}$, mm	N_{Ed}, kN Осн. к-ция	N_{Ed}, kN Особ. к-ция	Прем. над i -ти етаж $d_{s,i}$, mm
8	135	105	127	720	465	123
7	270	210	107	1440	930	103
6	405	315	86	2160	1395	83
5	540	420	66	2880	1860	63
4	675	525	47	3600	2325	45
3	810	630	29	4320	2790	28
2	945	735	15	5040	3255	14
1	1080	840	5	5760	3720	4

4.4. Оразмеряване за основна комбинация

Оразмеряването на колони К1 и К3 на натиск за основна комбинация е проведено според [7] и резултатите са представени в Табл.3.

Таблица 3. Оразмеряване от основна комбинация за колони К1 и К3

	Колона К1			Колона К3 – 50/50	
Етаж, i	N_{Ed}, kN	Напр. сечение, избрана армировка и проц. на арм.		N_{Ed}, kN	Избрана армировка и проц. на арм.
8	135	40/40 с 4ф12 (0,28%)	25/40 с 4ф12 (0,45%)	720	8ф12 (0,36%)
7	270			1440	
6	405			2160	
5	540			2880	
4	675			3600	8ф14 (0,5%)
3	810			4320	16ф16 (1,29%)
2	945			5040	16ф20 (2,01%)
1	1080			5760	16ф25 (3,13%)

4.5. Огъващи моменти от особена комбинаци

Таблица 4. Ефективна коравина за колони К1 и К3 при особена комбинация

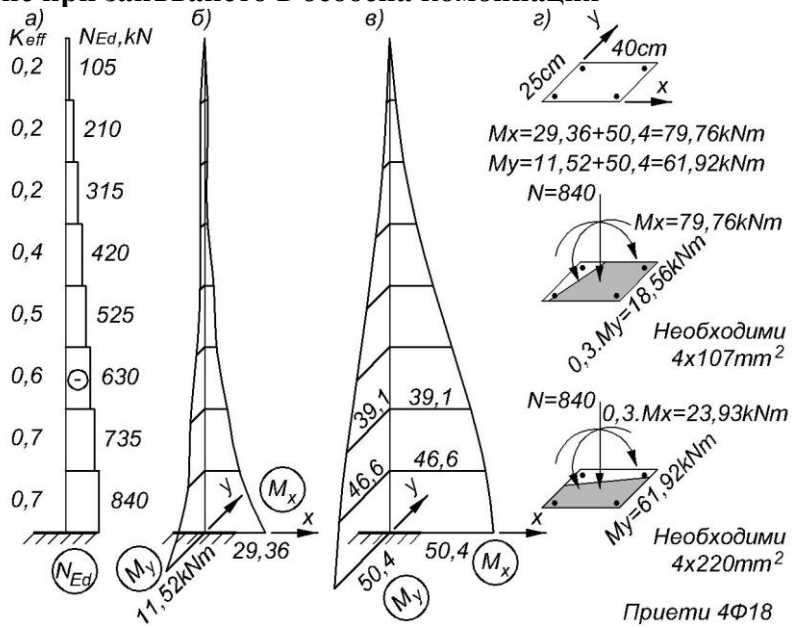
Етаж, i	Колона К1							Колона К3 – Напр. сеч. 50/50			
	N_{Ed}, kN	Напр. сеч. 40/25			Напр. сеч. 40/40			N_{Ed}, kN	ν	K_{eff} (2)	Прието K_{eff}
		ν	K_{eff} (2)	Приет K_{eff}	ν	K_{eff} (2)	Приет K_{eff}				
8	105	0,073	0,2	0,2	0,046	0,2	0,2	465	0,131	0,2	0,2
7	210	0,147	0,2	0,2	0,092	0,2	0,2	930	0,260	0,3	0,3
6	315	0,219	0,23	0,2	0,137	0,2	0,2	1395	0,387	0,51	0,5
5	420	0,289	0,35	0,4	0,181	0,2	0,2	1860	0,511	0,7	0,7
4	525	0,358	0,46	0,5	0,224	0,24	0,2	2325	0,634	0,7	0,7
3	630	0,424	0,57	0,6	0,265	0,31	0,3	2790	0,754	0,7	0,7
2	735	0,488	0,68	0,7	0,305	0,38	0,4	3255	0,872	0,7	0,7
1	840	0,548	0,7	0,7	0,343	0,44	0,4	3720	0,99	0,7	0,7

На база резултатите от Табл.2 и Табл.4 за всяка от колоните К1 (във вариант 40/25 и 40/40 за напречно сечение) и К3 (50/50) са направени по два самостоятелни модела. В първия върху колоните са наложени пълните етажни премествания и са отчетени получените огъващи моменти. Вторите модели отчитат факта, че вертикалните етажни сили действат в деформирана схема и също създават огъващи моменти. Резултатите от това изследване може да бъдат видяни на фиг.4, фиг.5 и фиг.6.

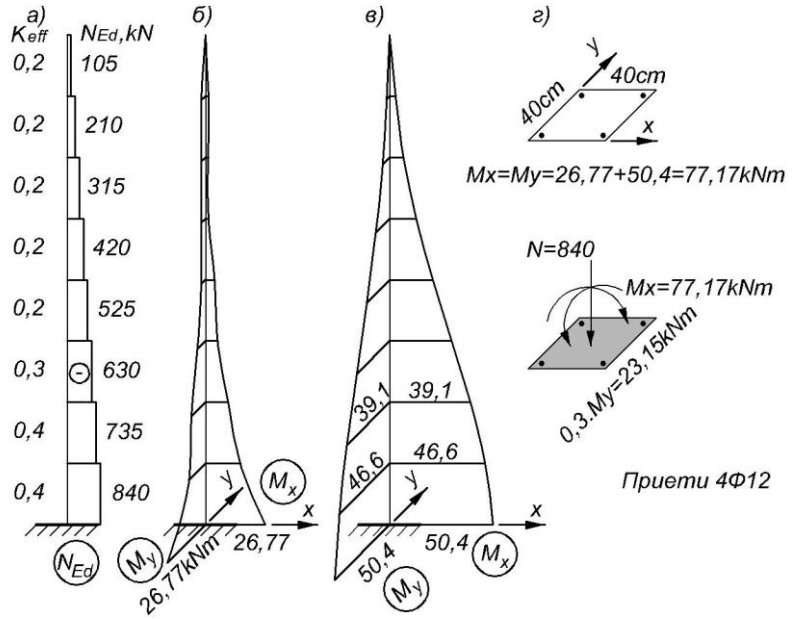
За комбиниране на ефектите от хоризонталните компоненти на сеизмичното въздействие и използвано правилото, дадено чрез ф-ла (3).

Финалните оразмерителни разрезни усилия за най-долните сечения на колоните също са показани на фиг.4, фиг.5 и фиг.6.

4.6. Оразмеряване при запъването в особена комбинация



Фигура 4. К1-25/40: Осови сили и ефект. коравина (а), огъващи моменти от наложени премествния (б) и от действие на верт. товари в деформирана схема (в) и оразмеряване (г)

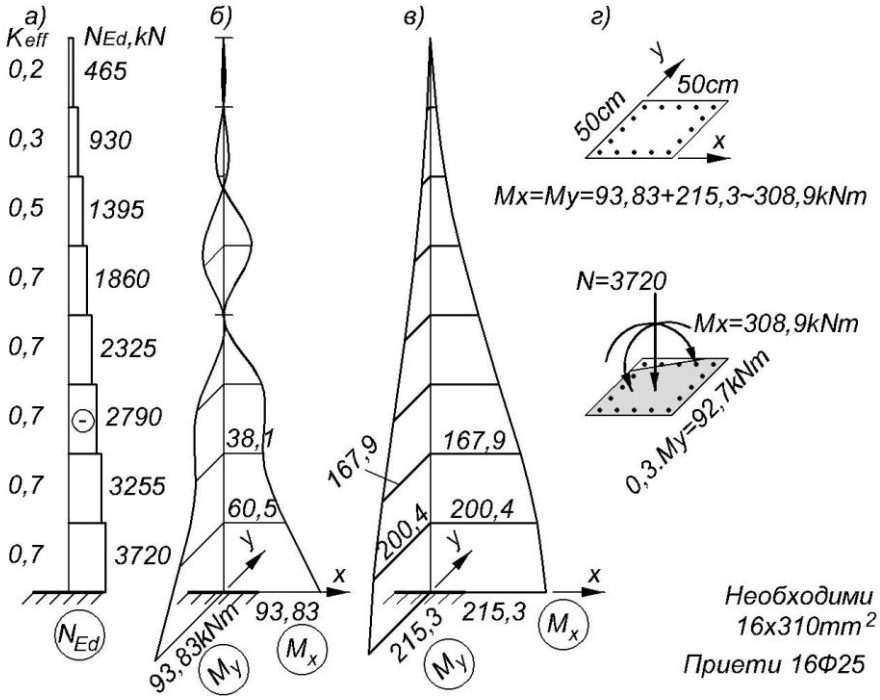


Фигура 5. К1-40/40: Осови сили и ефект. коравина (а), огъващи моменти от наложени премествния (б) и от действие на верт. товари в деформирана схема (в) и оразмеряване (г)

Видно от фиг.4 е, че преди всичко поради малкото напречно сечение на колона К1 – 40/25 за особена комбинация са необходими доста по-големи площи на вертикалната армировка при запъването – $4\phi 18$ вместо $4\phi 12$.

Това положение се подобрява кардинално с увеличаване на размерите й на 40/40 (фиг.5). Тогава особената комбинация не е вече меродавна.

Колона К3 (фиг.6) въпреки подобните хоризонтални премествания и големите натискови сили (големи ефективни коравини) няма проблеми при оразмеряването за особена комбинация най-вече заради дисперсното вертикално армиране по всички страни.



Фигура 6. К3-50/50: Осови сили и ефект. коравина (а), огъващи моменти от наложени премествния (б) и от действие на верт. товари в деформирана схема (в) и оразмеряване (г)

5. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Огъващите моменти в гравитационните колони се формират от хоризонталното отместване, наложено им от отклонениетто на сградата, както и от вертикалните товари, действащи в отклонена схема.

Важността на гравитационните колони като второстепенен елемент е безспорна. Те поемат голяма част от вертикалния товар и го пренасят до основите по време на сеизмично въздействие. В [3, 6] изтъкват аварии, случили се заради подценяване на гравитационните колони.

Изследваната в числения пример конструкция дори не е с най-големите междуетажни премествания и съответно с най-големите хоризонтални отклонения и въпреки това има колони, за които особената комбинация е меродавната.

За това могат да се направят следните препоръки към проектирането:

- Колоните с малки напречни сечения трябва да се избягват;
- За предпочитане са компактни напречни сечения на колоните с дисперсно армиране по периферията;
- Да се избягват гравитационни колони по периферията на сградите, както препоръчва и M. Fardis [11];
- Срязването на колоните също трябва да се гарантира.

- Тази статия е още едно доказателство за това, че трябва да се избягват усукващо-деформируеми конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 1992-1-1:2004/A1:2015 – Еврокод 2: Проектиране на стоманобетонни конструкции, Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.
[2] БДС EN 1998-1:2004 – Еврокод 8: Проектиране на конструкции за сеизмични въздействия, Част 1: Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради.
[3] ACI 318M-08, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary, June 2008, ISBN 978-0-87031-283-0.
[4] CSA A23.3-14, Design of concrete structures, 2014, ISBN 978-1-77139-390-4.
[5] IS 1983 (Part 1): 2016, Criteria for Earthquake Resistant Design of Structure, Part 1 General Provision and Building, December 2016.
[6] Jain, S. K., Murty, C. V. R., Proposed Draft Provisions and Commentary on Indian Seismic Code IS 1893 (Part 1), Indian Institute of Technology Kanpur, Doc No.: IITK-GSDMA-EQ05-V4.0, IITK-GSDMA-EQ15-V3.0.
[7] Велинов, К., Ангелов, Н., Георгиев, Ат., БДС EN 1992-1-1: Указания, София, 2021г.: https://kiip.bg/documents/messages/82341d4-3c94-c51c-d8e6-033188cea2ee.pdf
[8] Й. Милев, Й., Милев, Н., Георгиев, Г., Проблеми при прилагането на Еврокод 8 в България при сгради със стоманобетонни конструкции, Годишник на УАСГ, София, Том 48, 2015, ISSN 1310-814X, Свитък 12 – I, Част I.
[9] Русев, К и колектив, Ръководство по стоманобетон Еврокод 2, КИИП, София, 2013
[10] Русев, К., Янчев Вл., ЕС2. Оразмеряване на стоманобетонни конструкции по нормални сечения, АВС Техника, 2011г.
[11] Fardis, M., Seismic design, assessment and retrofitting of concrete building based on EN-Eurocode 8, ISBN 978-1-4020-9841-3, 2009.
[12] Fardis, M., Carvalho E., Fajfar p., Pecker, A., Seismic design of concrete buildings to Eurocode 8, ISBN 978-1-4822-8253-5, 2015.
[13] Biskins, D., N. Fardis, M., Deformation of concrete members at yielding and ultimate under monotonic or cycling loading (including repaired and retrofitted members), ISBN 978-960-89691-6-2, Report No. SEE 2009-01, Department of Civil Engineering, University of Patras, January, 2009.
[14] Elwood, K., Eberhard, M., Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns, ACI Structural Journal, Title no. 106-S45, July-August, 2009.
[15] Ozcan, O., Stiffness modeling of RC columns reinforced with plain rebars, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete Island, Greece, 25–27 May 2015.
[16] Avsar, B. Bayhan, A. Yakut, Effective flexural rigidities for ordinary reinforced concrete columns and beams, Struct. Design Tall Spec. Build. 23, 463–482 (2014) Published online 5 November 2012 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com/journal/tal). DOI: 10.1002/tal.1056.
[17] P. Adebar, G. Albanez, Design of Gravity-Load Frames in Shear Wall Buildings for Seismic Deformation Demands: The Canadian Code Approach, Canadian Conference - Pacific Conference on Earthquake Engineering 2023 Vancouver, British Columbia June 25th – June 30th, 2023.
[18] Bazargani, P., Seismic Demands on Gravity-Load Columns of Reinforced Concrete Shear Wall Buildings, Vancouver, 2014.