

МОДЕЛИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИАФРАГМЕНТО ПОВЕДЕНИЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ

Йонко Димитров¹, Дария Михалева²

MODELS FOR THE ANALYSIS OF THE DIAPHRAGM BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE PLATES

Yonko Dimitrov, Dariya Mihaleva

Abstract:

The horizontal wind and seismic actions develop shear and normal stresses in floor diaphragms as well as in-plane bending between vertical systems. The diaphragms also bear transfer forces between different vertical seismic resistant systems. In some cases, the internal forces induce a nonlinear behavior of the reinforced concrete plates. In this article, a review of the models, used for the analysis of the diaphragm behavior of reinforced concrete plates, subjected to horizontal actions, is presented.

Keywords:

diaphragm, reinforced concrete plates, nonlinear behaviour, seismic actions

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Диафрагмите изпълняват множество роли при поемането на гравитационни и странични натоварвания [1]. Някои от тях са илюстрирани на фиг.1 за сгради със сутеренни нива. Основните функции включват:

а) **Диафрагмени усилия.** Хоризонталните натоварвания от вятър и земетръс създават сръзващи и осови напрежения, както и огъване в собствената им равнина между вертикалните носещи системи. При сеизмични въздействия в диафрагмите възникват инерционни сили от теглата на плочите и вертикалните елементи. Тези сили се пренасят впоследствие през диафрагмата към вертикалните системи.

б) **Диафрагмени трансферни усилия.** Вертикалните елементи на конструкциите, поемащи странични натоварвания, могат да имат различни свойства по височина на сградата, както и равнините на съпротива могат да се променят от едно ниво на друго. Едно такова ниво е при връзката на основната сграда със сутеренното ниво, където

¹ Йонко Димитров, инж., докторант, катедра „Строителство на сгради и съоръжения“ към Архитектурен факултет, ВСУ „Черноризец Храбър“, Варна, ionko.dimitrov@abv.bg

Yonko Dimitrov, PhD student, Construction of Buildings and Facilities Department of Faculty of Architecture, VFU “Chernorizets Hrabar”, Varna, Bulgaria, ionko.dimitrov@abv.bg.

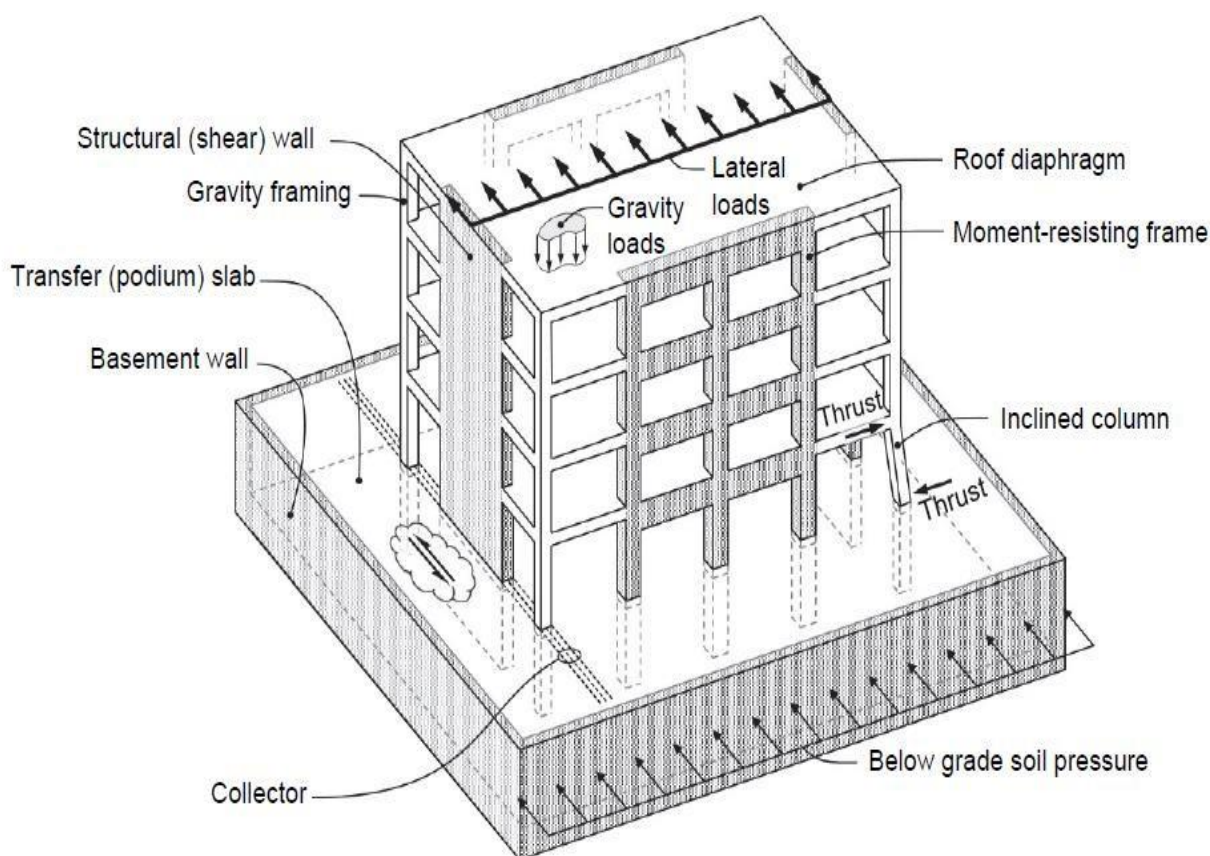
² Дария Михалева, доц. д-р инж., катедра „Строителство на сгради и съоръжения“ към Архитектурен факултет, ВСУ „Черноризец Храбър“, Варна, dariya.mihaleva@vfu.bg

Dariya Mihaleva, assoc. prof. PhD, Construction of Buildings and Facilities Department of Faculty of Architecture, VFU “Chernorizets Hrabar”, Varna, Bulgaria, dariya.mihaleva@vfu.bg.

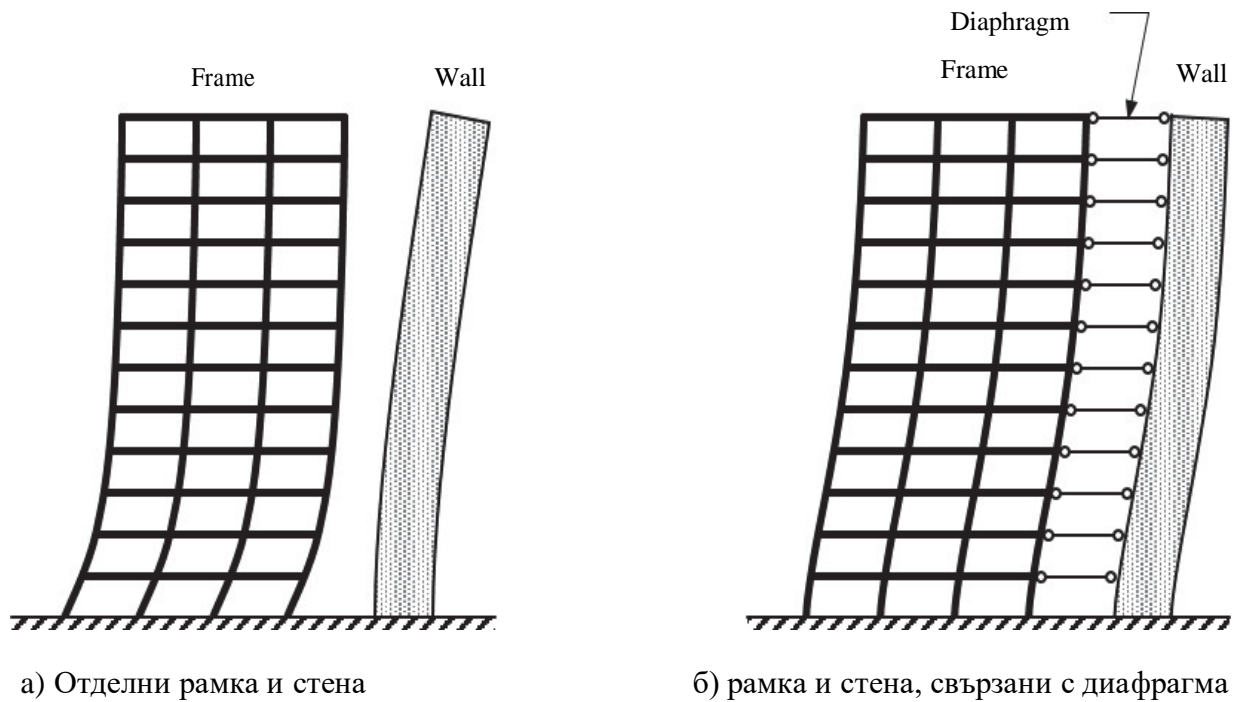
усиления трябва да се пренесат от по-тясната конструкция на сградата към сутеренните стени чрез основната диафрагма (фиг. 1). Диафрагмите също така поемат трансферни усилия от различни вертикални системи, поемащи сеизмични въздействия. Пример за това е съчетание от рамкови и стенни конструкции с различен стремеж към деформация, който предизвиква вътрешни за диафрагмата усилия (фиг. 2). В някои случаи най-големите диафрагмени усилия се получават при отстъпи или прекъсвания на вертикалните елементи на носещите противоземетръсни системи (фиг. 3);

в) **Усилия на свързване между колоните.** Диафрагмите свързват вертикалните елементи на конструкцията на всяко етажно ниво и създават странично подпирание срещу изкълчване, както и срещу ефекти от втори ред. Архитектурните решения понякога изискват наклонени колони, които създават големи хоризонтални сили в равнината на диафрагмата от гравитационни въздействия, както и от преобръщателни моменти (фиг. 1). Тези хоризонтални сили могат да имат различни посоки в зависимост от ориентацията на колоната и дали тя е натоварена на натиск или опън. Там, където тези сили не са локално уравновесени от други елементи, те трябва да се пренесат през диафрагмата до други вертикални носещи системи.

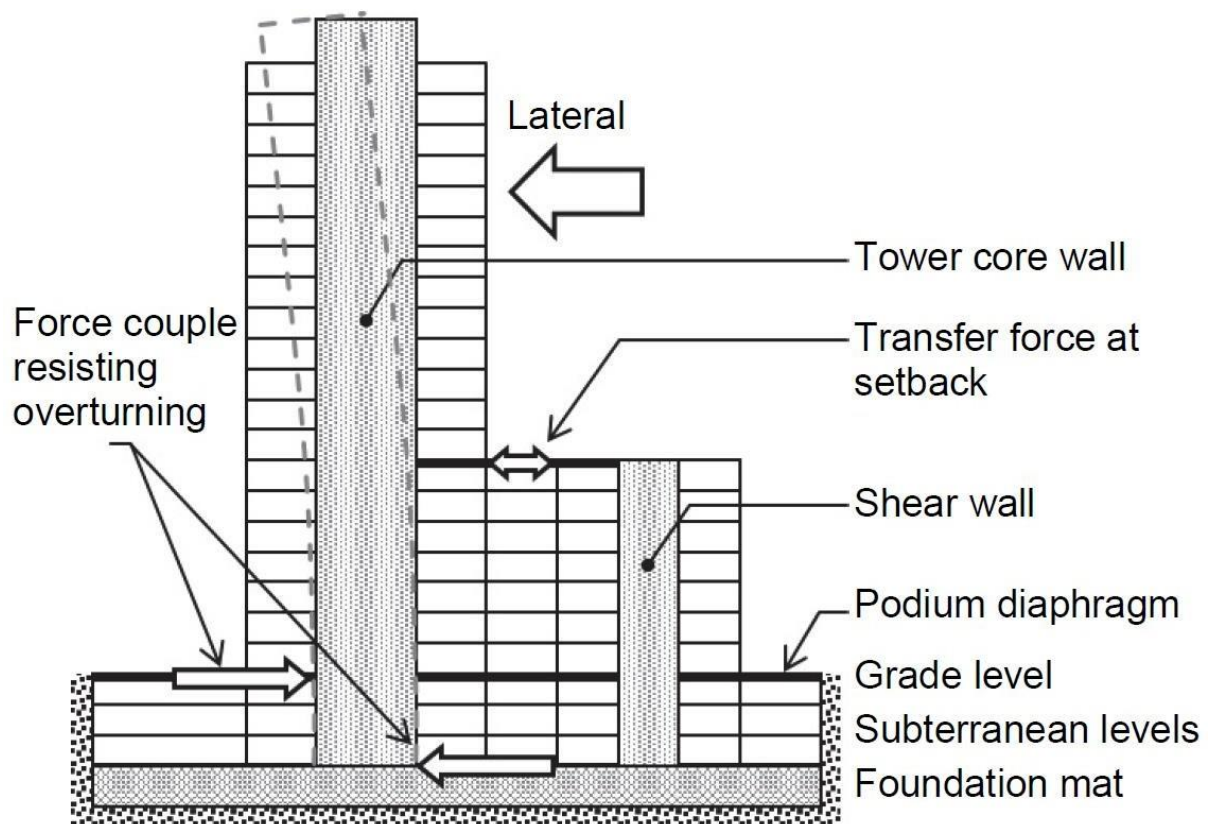
г) **Диафрагмени усилия извън нейната равнина.** Повечето диафрагми са подови или покривни плочи и следва да поемат гравитационни товари от постоянни и полезни натоварвания, както и усилия от вертикален земетръс.



Фигура 1. Функция на диафрагмите [3]



Фигура 2. Поведение при деформация на рамки и стени [3]



Фигура 3. Диафрагмени трансферни усилия при вертикални нерегулярности [3]

Един от принципите на антисейзмитното проектиране е да се запази относителната коравина на диафрагмите без повреди, така че те да могат ефективно да изпълняват ролята на свързващ елемент между вертикалните носещи системи. Във връзка с това диафрагмите се проектират за линейно поведение при сейзмично въздействие, като се допуска минимално нееластично поведение. За постигане на тази цел антисейзмитното проектиране включва идентифициране на пътя на усилията към вертикалните елементи и осигуряване на достатъчна коравина на диафрагмата по направленията на усилията.

Вътрешните усилия в диафрагмите се изчисляват с различни подходи, вариращи от прости идеализации до сложни компютърни анализи. Анализът следва да бъде дотолкова пълен, така че да представя достатъчно точно как напречните сили преминават през конструкцията на сградата, включително и диафрагмите. За регулярни конструкции, при които съпротивата срещу хоризонтални сили се осигурява от сходни вертикални елементи, опростените модели често са достатъчно точни за определяне на диафрагмените усилия. За сгради със нерегулярности или с различни вертикални системи се налага по-сложен анализ за определяне на диафрагменото действие. Независимо от степента на идеализация, анализът следва да отговаря на условията на равновесие, а проектирането изисква да се осигури достатъчна якост на всички елементи по пътя на усилията.

2. МОДЕЛИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИАФРАГМЕНТО ПОВЕДЕНИЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ

Традиционно приблизителните подходи се използват масово при проектирането на стоманобетонните диафрагми. Те са особено подходящи за диафрагми в сгради в зони с ниска или средна сейзмичност, тъй като усилията се получават относително малки в сравнение с коравината на конструкцията и по-точни изчисления са излишни и неоправдани. В зони с висока сейзмичност компютърното моделиране за определяне на усилията в диафрагмите се използва все по-масово.

При анализа на стоманобетонните подови диафрагми обикновено се използват следните видове модели:

- **гредови модел.** Диафрагмата може да се моделира като греда с дълбочина, равна на пълната ширина на диафрагмата.

- **модел с подкоси и връзки (strut-and-tie).** Цялата диафрагма или част от нея може да се моделира като система от свързани прътови елементи.

- **модел с крайни елементи.** Диафрагмите се моделират с използване на метода на крайни елементи.

- **алтернативни модели.** Позволява се диафрагмите да се моделират чрез използването на каквито и да е алтернативни методи, които отговарят на изискванията за равновесие и за коравина на елементите по пътя на усилията.

2.1. Гредови модели

При гредовите модели диафрагмата се представя като греда върху корави или поддаваеми опори. Анализът включва определянето на огъващите моменти, срязващите сили и опорните реакции, както и определяне на резултатните вътрешни усилия.

Три версии на гредови модели са масово използвани:

- прост гредови модел;

- еквивалентен модел на греда върху еластични опори;

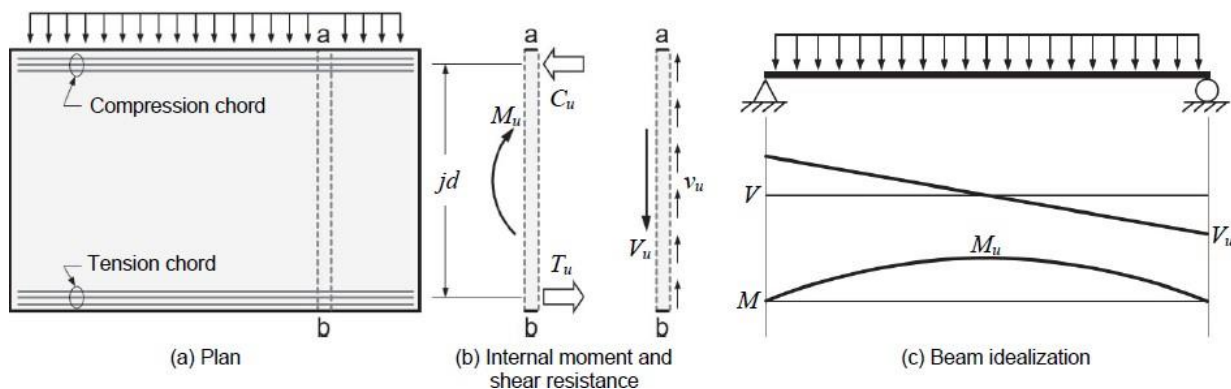
- коригиран гредови модел.

Моделите са подходящи за нивата на сградата, които не са главни трансферни нива.

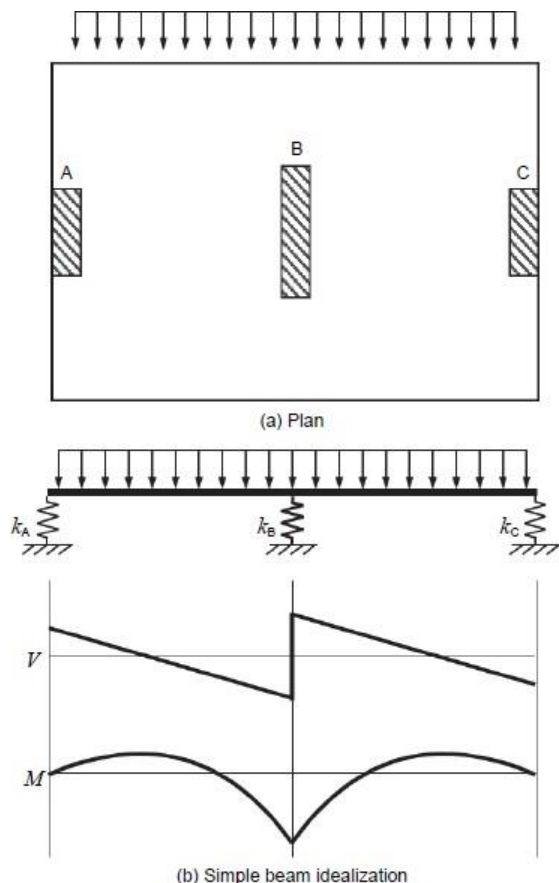
При главно трансферно ниво, каквото е основното ниво (при връзката между основната и

сутеренната конструкции), където усилията се прехвърлят през диафрагмата от един към друг набор от вертикални системи, гредовите модели се налага да се коригират, така че да отразяват това поведение.

Простият гредови модел третира диафрагмата като хоризонтална греда между идеализирани неподдаваеми опори (фиг. 4). Корава опори представят вертикалните елементи като шайби. За показания модел гредата е просто подпряна, тъй като стените са разположени в двата края на диафрагмата. Този подход може да се използва и когато стените са разположени във вътрешността на диафрагмата, като в този случай зоните извън стените се третират като конзоли. Диаграмите на усилията се получават както за обикновена греда (фиг. 4).

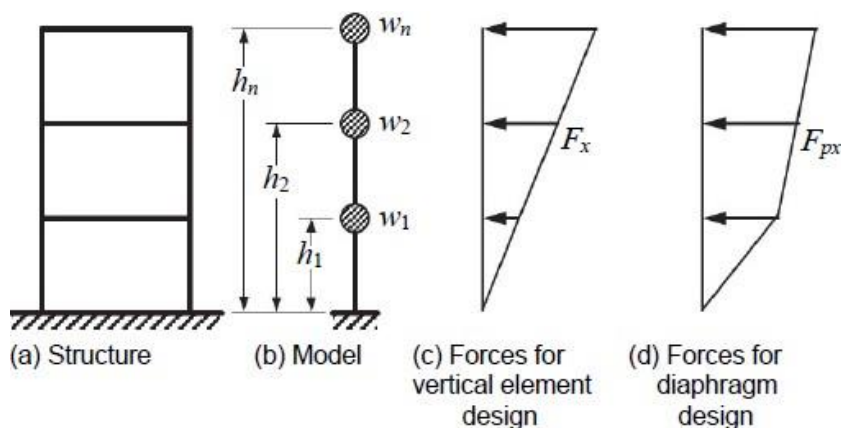


Фиг. 4. Прост гредови модел [3]



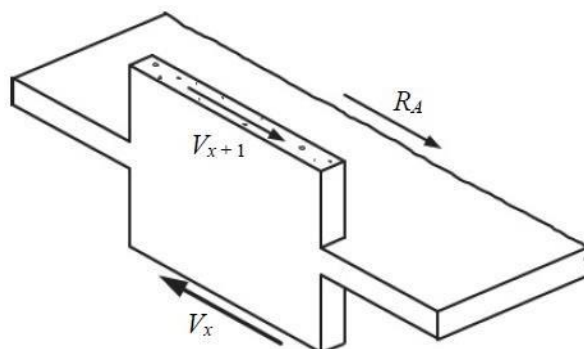
Фиг. 5. Еквивалентен модел на греда на еластични опори [3]

Еквивалентният модел на греда върху еластични опори (фиг. 5) е подходящ при едноетажни сгради, където коравината на опорите е точно определена. При многоетажните сгради, където възникват трансферни усилия в диафрагмите и коравините на опорите са неопределими, този подход може да използва като проектните етажни сили се прилагат върху компютърен модел на цялата конструкция. Един такъв подход е да се приложат диафрагмени сили върху отделните нива, докато етажните сили се прилагат отделно върху вертикалните елементи по всички етажи (фиг. 6). Диафрагмата може да се третира като корава греда, като греда с огъвателна коравина, или като плочест елемент с определена коравина в равнината си.



Фиг. 6. Проектни сили за вертикални елементи и диафрагми [3]

Коригираният гредови модел може да бъде полезен за приблизително определяне на диафрагмените усилия при наличието на значително взаимодействие между вертикалните носещи системи. Такова въздействие възниква при вертикални системи с различна коравина или където възникват значителни усуквания или вертикални нерегулярности. Основния подход е да се определят усилията на взаимодействие между диафрагмата и вертикалните елементи, след което се дефинира страничното натоварване върху диафрагмата така, че страничното натоварване да е в равновесие с тези усилия, и след това да се анализира диафрагмата за това странично натоварване. Когато коравината на диафрагмата е моделирана за компютърен анализ, усилията на взаимодействие между диафрагма и вертикалните конструкции могат да се определят чрез разрези през диафрагмата около вертикалния елемент. Когато диафрагмата се моделира като абсолютно корава, тези усилия могат да се определят като разлика между усилията във вертикалния елемент под и над диафрагмата (фиг. 7).

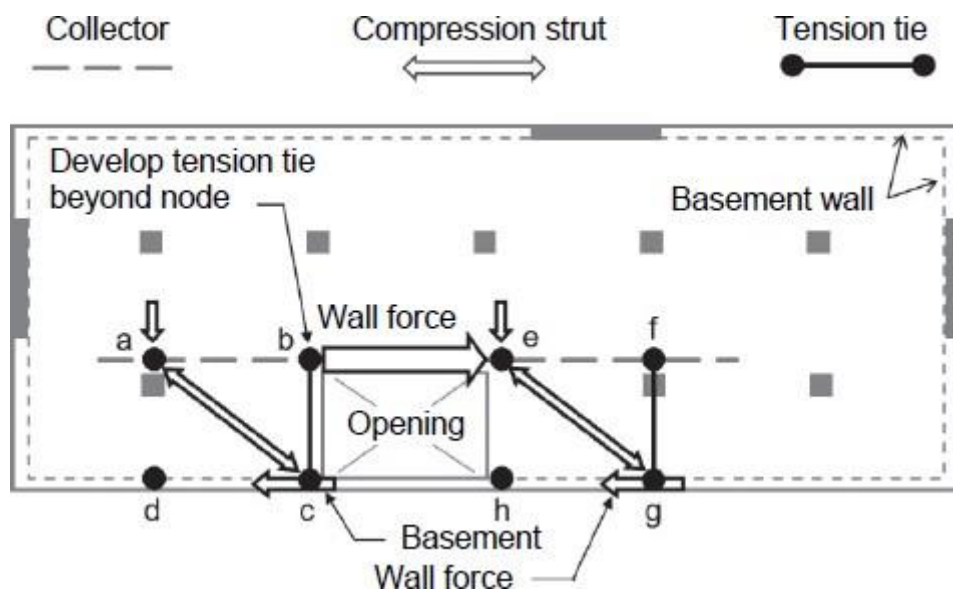


Фиг. 7. Резултантни сили на взаимодействие между вертикални елементи и диафрагма [3]

2.2. Модели с подкоси и връзки (strut-and-tie)

Моделите с подкоси и връзки са фермови модели, които могат да се използват за идеализиране потока на усилията през една диафрагма, като начин за удовлетворяване на изискванията за статическо равновесие. Такива модели не се използват масово, макар че в определени случаи са много подходящи. Много често тези модели се използват за идентифициране на потока на усилията и посоките на армировката около прекъсвания в плочата. На фиг. 8 е илюстрирано как посочения метод може да се използва за установяване на необходимата армировка.

В този пример усилието от шайба се пренася около отвор чрез колектор в диафрагмата, а след това в сутеренна стена. Ако се разгледа зоната $abcd$ като отделна, условието за равновесие на моментите около точка d изисква опънна връзка между точка b и точка c , която се приема за съседния сегмент. Равновесието на моментите около точка c не може да се изпълни от опънна връзка между точка a и точка d , тъй като опънната сила трябва да се закотви в сутеренната стена, което по принцип не се конструира. Вместо това, равновесието се осигурява чрез натискава сила между точка a и точка c .

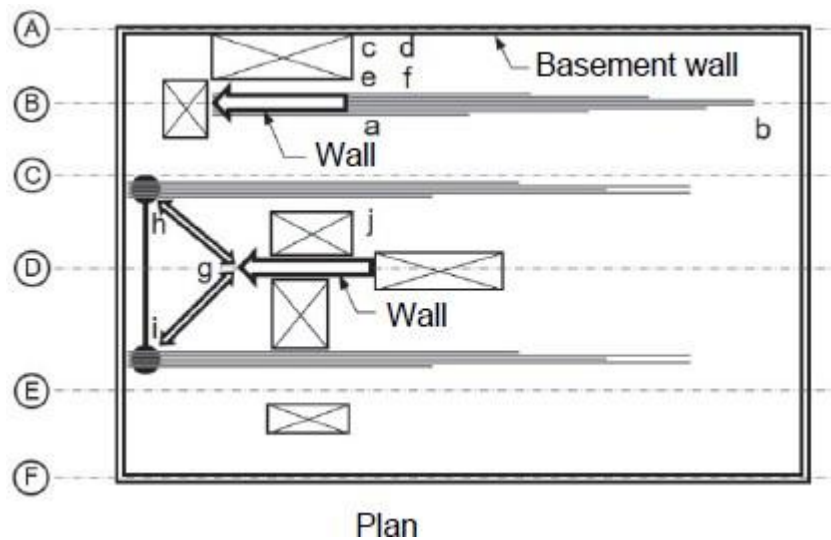


Фиг. 8. Модел с подкоси и връзки за пренасяне на усилията към сутеренна стена [3]

Наличието на значително количество отвори в диафрагмите може да създаде трудности при проектирането. В примера, показан на фиг. 9, ако шайбата по ос В трябва да предаде голямо усилие към сутеренна стена, единствения възможен път е чрез дълъг колектор между точка a и точка b . Ако армировките на колектора са прекъснати, силата в колектора намалява по дължина, а удължението на колектора би било приблизително якостта на опън на армировката, умножена по дължината между точка a и точка b . Ако колекторът е с непрекъсната армировка, фиксирана в точка b , тогава точка a следва да се премести, колкото е големината на удължението на колектора. Това може да доведе до развитие на значителни ъглови деформации в областта $cdfe$ на плочата. Възможно е, ако диафрагмата се деформира значително поради наличието на дълъг колектор, срязващата

сила в стената е по-вероятно да намери друг алтернативен път за предаване през шайбата надолу под плочата.

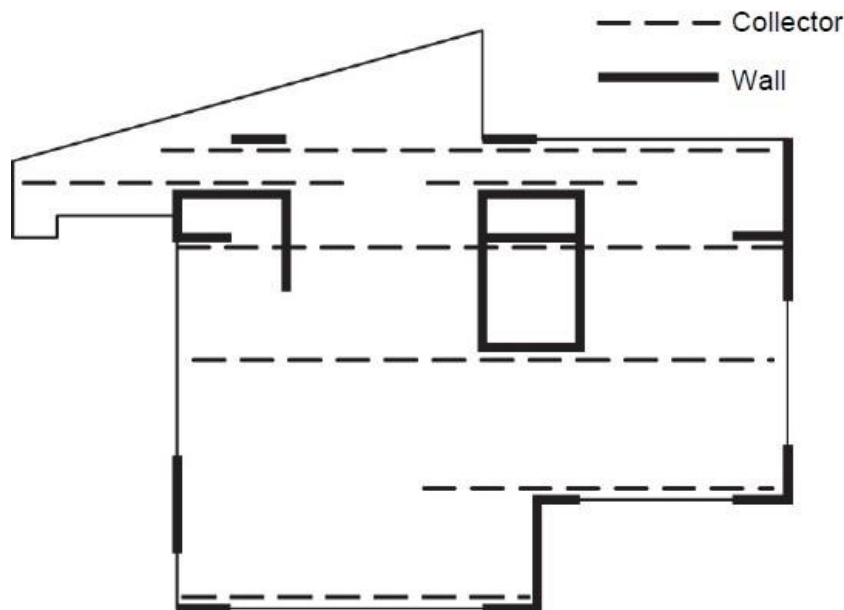
Друг пример се получава при стената по ос D. При показания модел с подкоси и връзки условията на статиката са удовлетворени, но дългия път за пренасяне на силите водят до преместване на стената, несъвместимо с преместването на връзката в точка *j*. За избягването на такива сложни взаимодействия в диафрагмата се предпочита да се намалят броя на отворите и това да се предвиди още в началните етапи на проектиране.



Фиг. 9. Пренасяне на усилията към сутеренна стена в случай на много отвори [3]

2.3. Модели с крайни елементи

Моделирането на диафрагми с използване на метода на крайни елементи (МКЕ) може да бъде полезен при определянето на пътищата за пренасяне на силите в диафрагми с големи отвори или други нерегулярности, моделирането на коравината на рампи, както и при оценка на трансферните усилия между отделните вертикални носещи системи. На фиг. 10 е показан пример, при който е удачно използването на МКЕ.



Фиг. 10. Нерегулярна в план диафрагма [2]

За правилното моделиране на гъвкавостта на диафрагмите, мрежата на крайни елементи би трябвало да бъде от $1/5$ до $1/8$ от разстоянието между осите или дължините на вертикалните носещи елементи, независимо, че по-фина мрежа дава по-точни резултати. Ако се правят разрези през диафрагмения модел за определяне на разпределението на срязващите сили в диафрагмата, по-фина мрежа около тези разрези е за предпочитане.

В сутеренните нива диафрагмените усилия могат да преминават диафрагмата в сутеренните стени, например сутеренните стени могат да работят като пояси на диафрагмата за моменти в нейната равнина. В тези случаи е необходимо да се правят разрези през сутеренните стени, за да не се пропуснат тези усилия.

3. ИЗВОДИ

От направения преглед на моделите за изследване на диафрагменото поведение могат да се направят следните изводи:

- Всички норми по принцип приемат, че в повечето случаи подовите диафрагми могат да се моделират като идеално корави без деформативност в равнината си.

- Традиционно приблизителните подходи са подходящи за диафрагми в сгради в зони с ниска или средна сеизмичност, тъй като усилията се получават относително малки в сравнение с коравината на конструкцията и по-точни изчисления са излишни и неоправдани.

- В зони с висока сеизмичност компютърното моделиране за определяне на усилията в диафрагмите е препоръчително при определянето на пътищата за пренасяне на силите в диафрагми с големи отвори или други нерегулярности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Игнатиев Н., Сотиров П., Михалева Д., Павлов Ив., Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-1 – Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия (нови сгради), КИИП, София, 2012.
- [2] Васева Е., Игнатиев Н., Сотиров П., Михалева Д., Павлов Ив. Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-3 – Проектиране на

- конструкциите за сеизмични въздействия, Трета част (Оценка и усиляване на сгради), КИИП, София, 2012.
- [3] NIST (2016). Seismic design of cast-in-place concrete diaphragms chords, and collectors: A guide for practicing engineers, Second Edition, GCR 16-917-42, NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 3, produced by the Applied Technology Council for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- [4] Federal Emergency Management Agency (1998), National Earthquake Hazard Reduction Program Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-274, Washington, D.C.
- [5] SEAOC Seismology Committee (2007) “Development of System Factors”, January, 2007, The SEAOC BlueBook: Seismic Design Recommendations, Structural Engineers Association of California, Sacramento, CA