

ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА ОПОРА НА ФАСАДНА КОНСТРУКЦИЯ

Владислав Милков¹, Георги Пеков²

NUMERICAL MODELLING OF THE SUPPORT OF A FAÇADE STRUCTURE

Vladislav Milkov, Georgi Pekov

Abstract:

This report deals with the numerical modelling of supports of façade structures (fixings to the concrete structure).

A type of support has been selected and experimentally investigated in the laboratory.

The same was modelled analytically using a manufacturer's software, and then a solution was made using more sophisticated software with volumetric finite elements.

The results of these studies on the behaviour of the façade supports are described and compared.

Keywords:

facade supports, experimentally, volumetric finite elements, analytically

1. ВЪВЕДЕНИЕ

С бурното развитие на фасадното строителство последните десетилетия се увеличиха възможностите и детайлите за техните закрепвания към носещата конструкция от стоманобетон.

Поради сложността и нелинейността на елементите на една опора (закрепване), те са обект на изследвани, особено от фирмите производители на анкерни устройства. Например с познатите софтуери базирани на нормите БДС EN 1992-4 [1], ETAG 001[2], БДС EN 1993[3] все още не може да се моделират някои видове опори, както и да се определи тяхното поведение.

¹ Владислав Милков, докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: vlado_milkov@yahoo.com

Vladislav Milkov, Eng., PhD Student, Dept. “Steel and Timber Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vlado_milkov@yahoo.com

² Георги Пеков, д-р., инж., кат. „Строителна Механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: vasiliev_fce@uacg.bg

Georgi Pekov, Eng., PhD, Dept. „Structural Mechanics“, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: vasiliev_fce@uacg.bg

В случая ще разгледаме фасадна опора състояща се от анкерна плоча, конзолен профил и 4 Анкера. Отворите в анкерната плоча са овални, което позволява известно преместване на опората. Това играе роля в случай на непредвидено голямо напречно натоварване на опората. Също така би улеснило монтажа.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИЗЛЕДВАНЕТО

Целта на изследването е максимално точно да се моделира една фасадна опора и да се определи нейното поведение, като се състави диаграма външно натоварване – преместване на опората.

Изследването ще премине през 3 етапа:

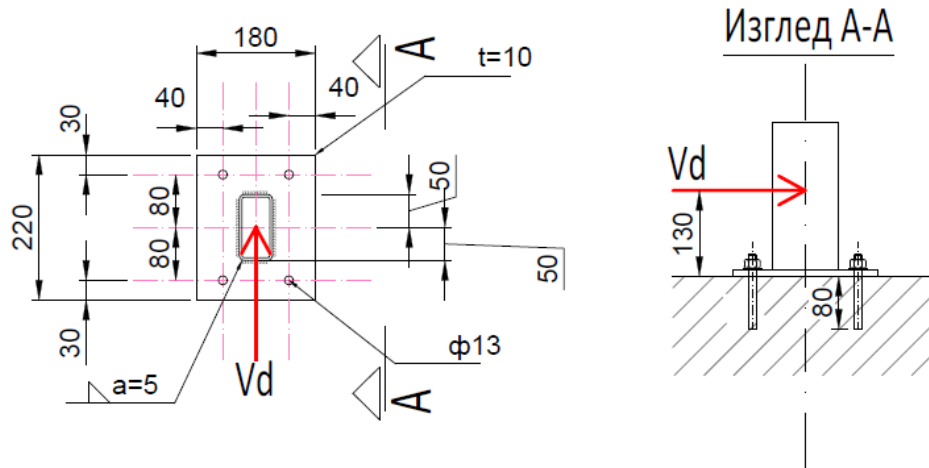
- Аналитично решение със софтуер на фирма производител на крепежни и фасадни елементи(базиран на оразмеряване по Еврокод)
- Експериментално изследване в учебната и научноизследователска лаборатория (УНИЛ) на катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции” към СФ на УАСГ
- Числено моделиране със софтуер за обемни крайни елементи

Съответно те ще бъдат описани по-подробно в следващите няколко точки и резултатите ще бъдат сравнени.

3. АНАЛИТИЧНО РЕШЕНИЕ СЪС СОФТУЕР НА ФИРМА ПРОИЗВОДИТЕЛ

С помощта на приложен софтуер на фирма Хилти: Hilti Profis Engineering е направен аналитичен модел на фасадно закрепване. Това е спомагателно решение за оразмеряване на елементите на опората, в което ще бъдат дефинирани размери и дебелина на анкерната плоча, конзолен профил и анкери. То е базирано на методиката по БДС EN 1992-4 [1] и БДС EN 1993[3].

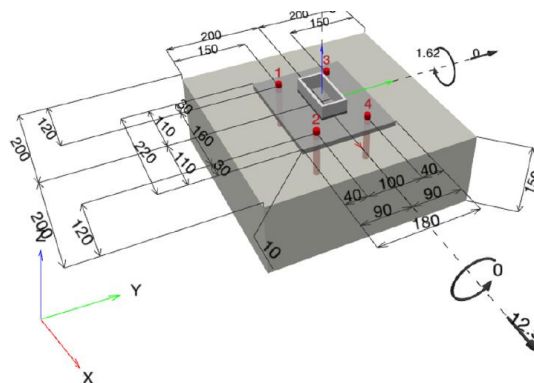
Проектирана е фасадна опора от стомана S235, която е разгледана също така в друг доклад от единия автор [4]. Тя представлява конзола (кутиеобразен профил 100x50x5 mm), свързана посредством ъглов заваръчен шев към анкерна плоча 10x180x220 mm. Опората е свързана с 2x2 механични анкера към слабоармиран бетонен елемент с размери 400x400x150 mm (фиг. 1). Бетонът е клас C25/30 и е приет за ненапукан. Тъй като аналитичното решение е комбинация от различни видове проверки (за металните елементи, бетоновото сечение около анкерите, комбинирани проверки), по итеративен път е избрано външно натоварване ($V_{Ed} = 12,5 \text{ kN}$), при което е достигнато гранично състояние (конструктивните елементи не са достигнали пластични деформации и са запазили своята носимоспособност)



Фиг. 1. Схема на анкерното закрепване и на натоварването

Огъващия момент в опорното сечение $M_{Ed} = 12,5,0,13 \approx 1,6 \text{ kNm}$. В случая V_{Ed} и M_{Ed} са изчислителни стойности на опорните реакции в опората от въздействия за крайно гранично състояние.

Избрани са механични сегментни анкери HST3 M12, с ефективна дълбочина на заkotвяне в бетона $h_{eff} = 80 \text{ mm}$.



Фиг. 2. Изчислителен модел на фасадното закрепване

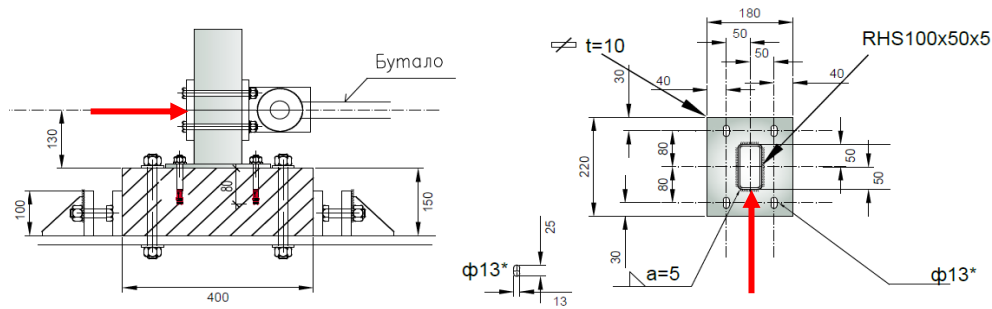
Резултатите от оразмерителни проверки на анкерите (проверки за изтръгване, опън и срязване на стоманата), разрушение на бетона (конусовидно, близо до ръб) по БДС EN 1992-4 и БДС EN 1993 са представени в [4]. Проверките за опън ($55\% < 100\%$) и напречна сила ($71\% < 100\%$) на анкерите са удовлетворени, а при проверката за комбинираното действие на силите (опън и напречна сила) е достигнат коефициент на използваемост 1,0 (т.е. 100%).

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ В ЛАБОРАТОРИЯ

Изследвано е експериментално поведението на фасадната опора дефинирана в т. 3. За целта е проектирана експериментална постановка в „Учебната и научноизследователска лаборатория“ (УНИЛ) на катедра „Метални, дървени и пластмасови конструкции“ към СФ на УАСГ

Тя се състои от стенд, натоварваща система, експериментален образец и система от датчици за регистриране и записване на данните от експериментите [4].

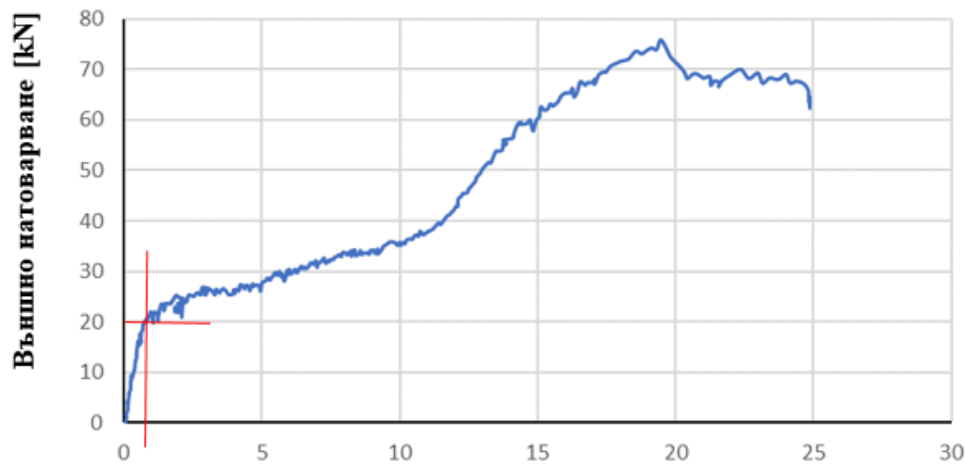
Използвани съответно са анкери 2x2 Hilti HST3 - M12; $h_{eff} = 80$ mm. В случая анкерната плоча е проектирана и произведена с овални отвори (фиг. 3). Приложен е въртящ момент на натягане (затягане с динамометричен ключ) на анкерите по каталог от производителя: $T_{inst} = 60$ Nm.



Фиг.3. Експериментален образец с овални отвори в анкерната плоча

Експериментите са проведени веднага след натягане на анкерите, като не е отчетено известно намаляване на опънните сили в тях. Около час след след натягането нормалните усилия в анкерите на база следващи експерименти са между 6 kN и 7 kN.

Приложено е монотонно увеличаване на силата (чрез плавно увеличаване на налягането в хидравличния цилиндър). Регистрирани са стойностите на хоризонталното преместване на върха на буталото и анкерната плоча, както и вертикалното преместване в анкерите и стойността на приложената сила. Получените зависимости (сила – преместване) от експеримента са показани на фигури 4 и 5.



Фиг. 4. Хоризонтално преместване на елемент (в точката на натоварване) в зависимост от приложената сила

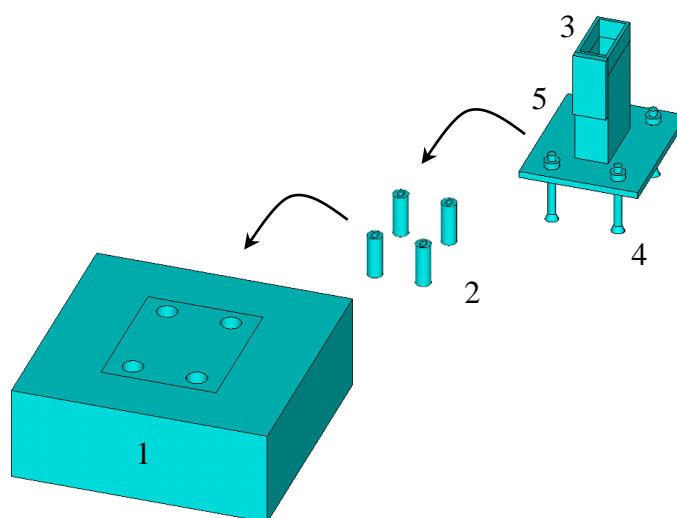


Фиг. 5. Хоризонтално преместване на анкерна плоча в зависимост от приложена сила

Дефинирано е гранично преместване от 1 mm в точката на прилагане на силата, в съответствие с експлоатационни гранични състояния [4]. То се достига при външна сила $V \cong 20$ kN (фиг. 4), а в същия момент анкерната плоча има преместване $U_x = 0,23$ mm. До достигане на тази стойност на силата, анкерната плоча може да се приеме за неподвижна (силата на триене уравновесява външното въздействие). В следващия етап на натоварване в диапазона от 20 kN до 39 kN анкерната плоча се премества по линеен закон (фиг. 5), до изчерпване на луфта в продълговатите отвори: $U_{x,max,1} \cong 9$ mm. В третия етап на натоварване от 39 kN до 75 kN анкерната плоча се премества по нелинеен закон, наблюдава се изтръгване на опънните анкери и напукване на бетона.

5. ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ СЪС СОФТУЕР ЗА ОБЕМНИ КРАЙНИ ЕЛЕМЕНТИ

Моделът е съставен чрез изчислителната програма ANSYS [5], като е разделен на характерни зони, представени на фиг. 6.



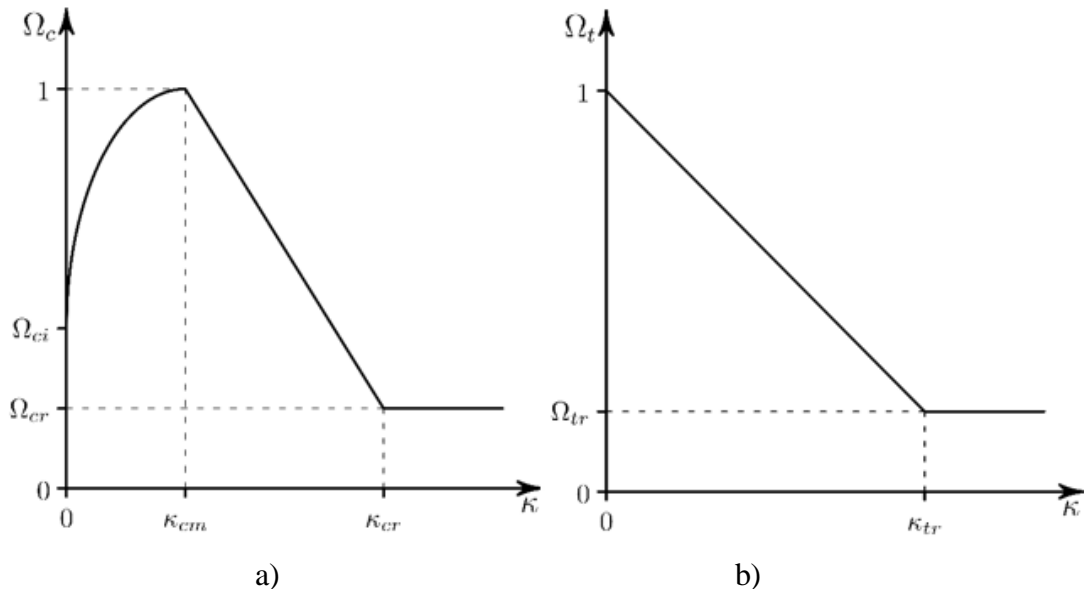
Фиг. 6. Характерни зони на изчислителния модел: 1) еластична зона от фундамента*; 2) пластична зона от фундамента; 3) стоманен профил; 4) анкери; 5) анкерна плоча

* В случая с „фундамент“ е означен слабоармиран бетонен елемент от горните точки (напр. стена, греда)

За всяка една от зоните са приети изотропни материалните свойства, както следва:

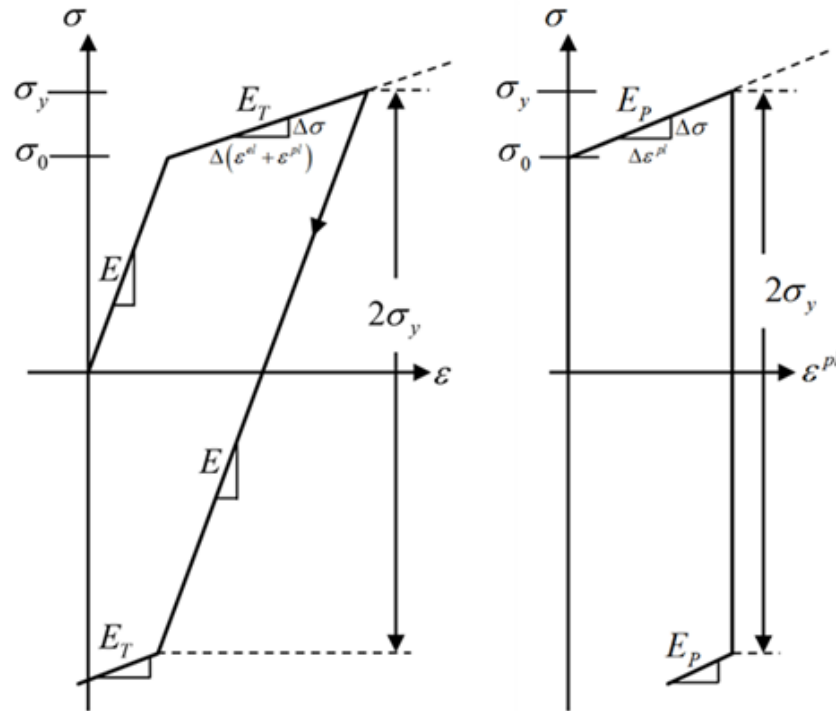
- Стоманобетон с линейно-еластични свойства за еластичната зона от фундамента, т.е. зоната далеч от контакта фундамент-анкери-анкерна плоча. Материалът е зададен чрез модул на еластичност $E = 2,875E7$ kPa и коефициент на Поасон $\nu = 0,2$.

- Стоманобетон с нелинейно-пластични свойства за пластичната зона фундамент-анкерна плоча. Материала е зададен по модела Drucker-Prager със следните параметри: якост на едноосов натиск $R_c = 3,6E4$ kPa; якост на едноосов опън $R_t = 3,6E3$ kPa; якост на двуосов натиск $R_b = 4E4$ kPa; дилатация при опън $\delta_t = 0,25$; дилатация при натиск $\delta_c = 1$. Нелинейния характер на работната диаграма е зададен, чрез следните коефициенти: деформация при достигане якостта на едноосов натис $\kappa_{cm} = 1,25E-3$; остатъчни деформации на натиск $\kappa_{cr} = 2,5E-3$; множител на натисковите напрежения при нулеви деформации $\Omega_{ci} = 0,33$; множител на остатъчните натискови напрежения $\Omega_{cr} = 0,1$; остатъчни деформации на опън $\kappa_{tr} = 5E-4$; множител на остатъчните опънни напрежения $\Omega_{tr} = 0,2$. Работната диаграма е представена на фиг. 7.



Фиг. 7. Работна диаграма на модела Drucker-Prager[5]: а) натискова зона б) опънна зона

- Стоманен профил с линейно-еластични свойства, дефинирани чрез модул на еластичност $E = 3,1E8$ kPa и коефициент на Поасон $\nu = 0,3$.
- Стоманени анкери и анкерна плоча с билинейно-пластичен материал със следните параметри: модул на еластичност $E = 3,1E8$ kPa, коефициент на Поасон $\nu = 0,3$, тангенциален модул на еласто-пластичност $E_T = 1,45E6$ kPa и напрежение на пластификация $\sigma_0 = 2,5E5$ kPa. Модулът на пластичност се изчислява съгласно формулата $E_P = EE_T/(E-E_T)$. Работната диаграма е представена на фиг. 8.



Фиг. 8. Работна диаграма на билинеен-пластичен модел на стоманата[5]

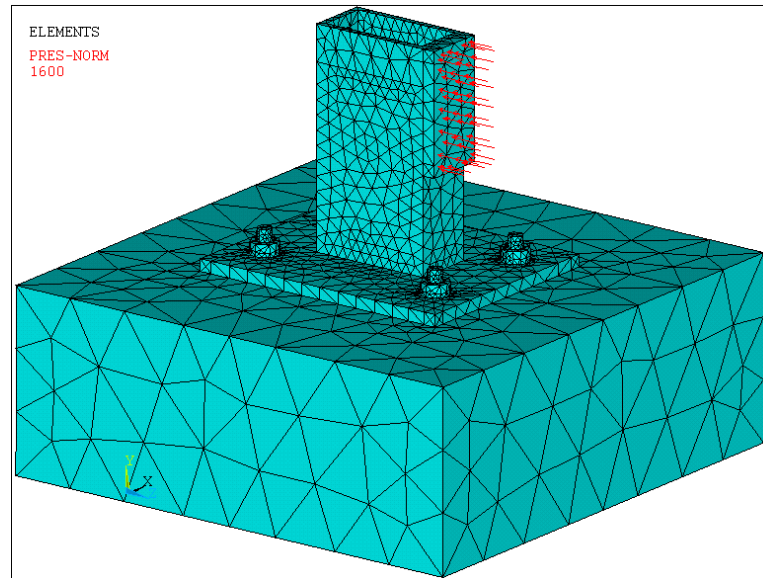
- Контактна зона фундамент-анкерна плоча с коефициент на триене $\mu = 0,45$ [6]
- Контактна зона фундамент-анкери с коефициент на триене $\mu = 0,45$

Използвани са следните крайни елементи:

- Обемни елементи SOLID187 за моделиране на фундамента, стоманения профил, анкерите и анкерната плоча;
- Контактни елементи CONTA174 и TARGE170 за моделиране на контактната зона между фундамента, анкерите и стоманената плоча;

Натоварването е зададено като равномерно разпределен товар върху площ с размери 50/100 мм. по натоварената страна на стоманения профил. Освен това, в анкерните болтове е заложена напрегаща сила от 6 kN на болт. Като гранично условие е приложено запъване в долната плоскост на фундамента. Проведен е нелинеен статичен анализ при стъпково натоварване, където равнодействащата на товара нараства от 0 до 45 kN. При сила 42 kN изчислителният метод губи сходимост и поради това анализът е прекратен.

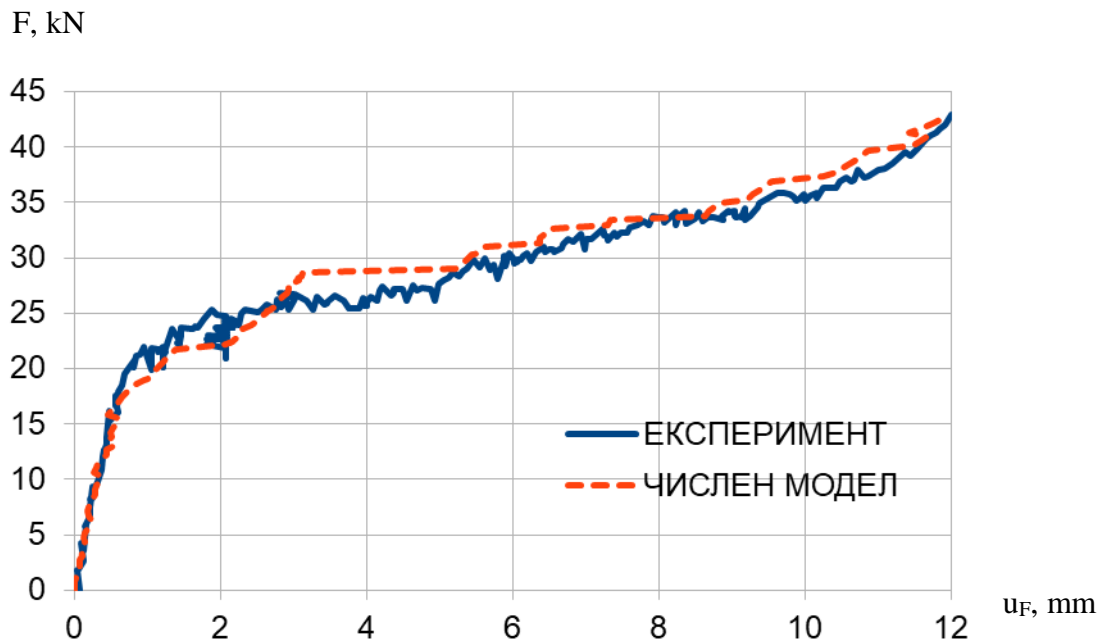
Дискретизацията и натоварването на модела са представени на фиг. 9.



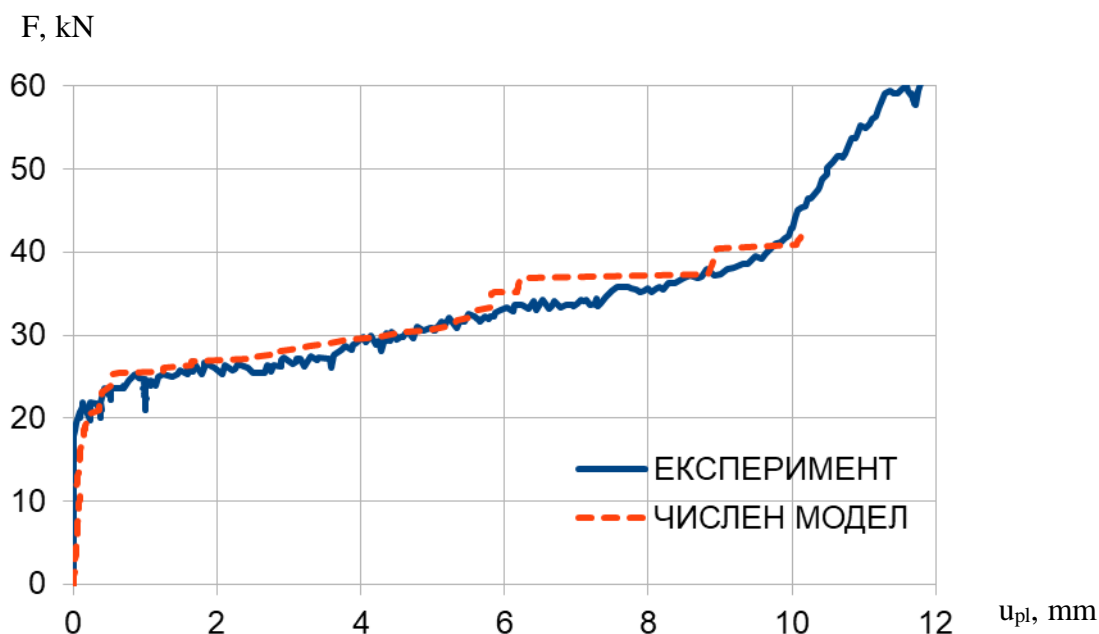
Фиг. 9. Дискретизация и натоварване на изчислителния модел.

6. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ЧИСЛЕНОТО РЕШЕНИЕ

Като резултати от численото моделиране са представени графики сила-преместване за: 1) хоризонталното преместване в точката на натоварването и 2) взаимното хоризонтално преместване в контакта фундамент-анкерна плоча (приплъзване на анкерната плочата). Тези резултати са сравнени с графиките от проведения в лабораторни условия експеримент (фиг. 4 и фиг. 5) и са представени на фиг. 10. и фиг. 11.



Фиг. 10. Графика сила-преместване в точката на натоварването



Фиг. 11. Графика сила-приплъзване на анкерната плоча

От двете графики се вижда, че изчислителният модел сравнително добре се съвпада с експерименталното изследване до сила на натоварване 40 kN.

Дадената методика на изследването би помогнала при анализа на поведението на други подобни фасадни опори, без да се налага експериментално изследване, изискващо много време и ресурси.

Също така би съдействала за по-детайлно разбиране на нелинейния характер на анкерните закрепвания към бетон.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторите изказват благодарност към фирми Тал Инженеринг и Хилти България заради консултантска дейност, производство на образци и доставка на материали, както и Центъра за Научни Изследвания и Проектиране (ЦНИП) при УАСГ за финансиране на изследванията.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 1992-4:2018, Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 4: Проектиране на закрепващи устройства за използване в бетон
- [2] ETAG 001 Annex C: 1997, Metal Anchors for Use in Concrete - Design Methods for Anchorage
- [3] БДС EN 1993, Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции
- [4] Милков, В., Георгиев, Ц., „Експериментално изследване на опори на окачени фасади работещи чрез триене при въздействие от напречна сила, Годишник на УАСГ, Том 56, 2023
- [5] “ANSYS Mechanical APDL Element Reference”, ANSYS, Inc., 2011, https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/vem/ansys_14_element_reference.pdf
- [6] Райков, С., Изследване на поведението на открити бази на стоманени колони при поемането на срязващи сили чрез анкерните болтове, УАСГ, Автореферат на дисертация, 2015