

СРАВНЕНИЕ НА МОДЕЛИТЕ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ЧАШКОВИДЕН ФУНДАМЕНТ С ГЛАДКА И С ПРОФИЛИРАНА ПОВЪРХНОСТ ПОД НЕЦЕНТРИЧНО НАТИСНАТА КОЛОНА

Никола Ангелов¹

STRUT-AND-TIE MODELS FOR DESIGN OF SINGLE COLUMN-BASE POCKET FOUNDATION WITH SMOOTH AND WITH KEYED INTERNAL WALLS LOADED TO BENDING WITH AXIAL COMPRESSION

Nikola Angelov

Abstract:

This paper presents different cases of precast column-based pocket connection, where column is loaded to bending with axial compression. The main difference in the transmission of forces from the column to the foundation is due to the design of the contact surface between them - smooth, rough or with dowels.

Strut-and-tie models for design of column-based pocket connection are shown for different surfaces. Analysis of these models is made base to Eurocode 2.

Suitable construction details are shown for the different described cases.

Keywords:

Precast Column-Base Pocket Connection, Keyed and Smooth Surface Interface, Strut-and-Tie Models

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Вътрешните повърхности на чашките на фундаментите и учащите от колоните, които попадат в обема на чашките могат да се оформят или плоски или профилирани, като плоските могат да бъдат много гладки, гладки или грапави.

Именно вида на контактната повърхност колона – фундамент е определящия фактор за формиране на различните механизми за предаване на силите от колоната към фундамента, и разбира се за формиране на различните изчислителни модели.

Акцента на настоящата статия е практичния анализ на възможните прътови модели за различните повърхности. Дискутирани и обяснени са базовите постановки и е направен

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

опит за решаване на проблемите, възникващи при прилагането им. Натоварването на колоните и на фундаменти като цяло е нецентричен натиск.

1.1. Нормативни изисквания

В настоящата статия са използвани принципите и правилата на системата Еврокод, както и утвърдени добри практики.

При проектирането на фундамента трябва да се спазват всички нормативни документи от тази система, които касаят оразмеряването на основна плоскост и тяло на фундамента [1, 2, 3, 4], както и популярните ръководства като [5, 6, 7].

Прието е, че проверките и изисквания на [3, 4] относно размери на основната плоскост (L_f и B_f – фиг.5), дълбочина на фундиране (D_f – фиг.5), слягания и други са изпълнени и е обърнато внимание на оразмеряването на тялото на фундамента и неговата чашка според Еврокод 2 [1].

1.2. Изисквания за дълбочината на чашката

В настоящата статия са споменати по-специфичните изисквания за оформяне на размерите на чашката. Правила за това има систематизирани в редица източници [8-14].

Самата чашка може да бъде с по-големи размери в план в горната си част, което да улеснява монтажа и замонолитването. Разстоянието между чашката и колоната долу и под колоната обикновено е около $\sim 5\text{cm}$. Замонолитката между колоната и фундамента е от съществено значение за носимоспособността на връзката и трябва да е добре уплътнена и с характеристики поне на по-слабия бетон от тези на двата елемента.

В Еврокод 2 [1] няма нормирана дебелина на стените на чашката t_1 – вж. фиг.1 и фиг.2. Необходимо е да бъдат изпълнени проверките за натискови напрежения в тях и да се осигури конструирането на получените армировки. Като минимална дебелина може да се приеме 25cm .

Дълбочината на чашката H_p (и по-скоро навлизането l на колоната в чашката) е може би най-важния ѝ размер. Чрез него се осигурява монолитност на връзката колона – фундамент.

Според Еврокод 2 [1] при гладки повърхности е приет модела от фиг.1 с изискването $l/h \geq 1,2$. Триенето между стените на колоната и чашката $\mu.F_i$ се отчита, като коефициентът на триене трябва да се приеме не по-голям от $\mu = 0,3$.

Според работната редакция [2] минималното навлизане на колоната в чашката при гладки и грапави повърхности трябва да бъде по-голямо:

$$\begin{aligned} l &\geq 1,2.h \quad \text{при} \quad M_{Ed} / N_{Ed} \leq 0,15.h \\ l &\geq 2.h \quad \text{при} \quad 0,15.h \leq M_{Ed} / N_{Ed} \leq 2.h \end{aligned} \quad (1)$$

като за междинни стойности се интерполира, а параметъра h е по-големия размер на колоната (фиг.1).

При твърде високи чашки е необходимо изследване на устойчивостта извън равнината им.

При профилирани повърхности (фиг.2) навлизането на колоната в чашката трябва да бъде съобразено с необходимата дължина на снаждане на вертикалните пръти, като се отчете и отдалечеността им [1, 14]:

$$\begin{aligned} l &\geq l_0 + s \\ l_0 &\geq (\alpha_2 \cdot \alpha_5) \alpha_6 \cdot l_{b,req} \sim 0,7 \cdot 1,5 \cdot l_{b,req} \sim 1,05 \cdot l_{b,req} \end{aligned} \quad (2)$$

2. МОДЕЛИ ЗА ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ТЯЛОТО НА ФУНДАМЕНТА

Описаните по-долу прътови модели са представени след подробно проучване на голяма част нормативни документи и автори [1, 2, 6, 8-14].

2.1. Прътов модел при чашковиден фундамент с гладки и грапави стени

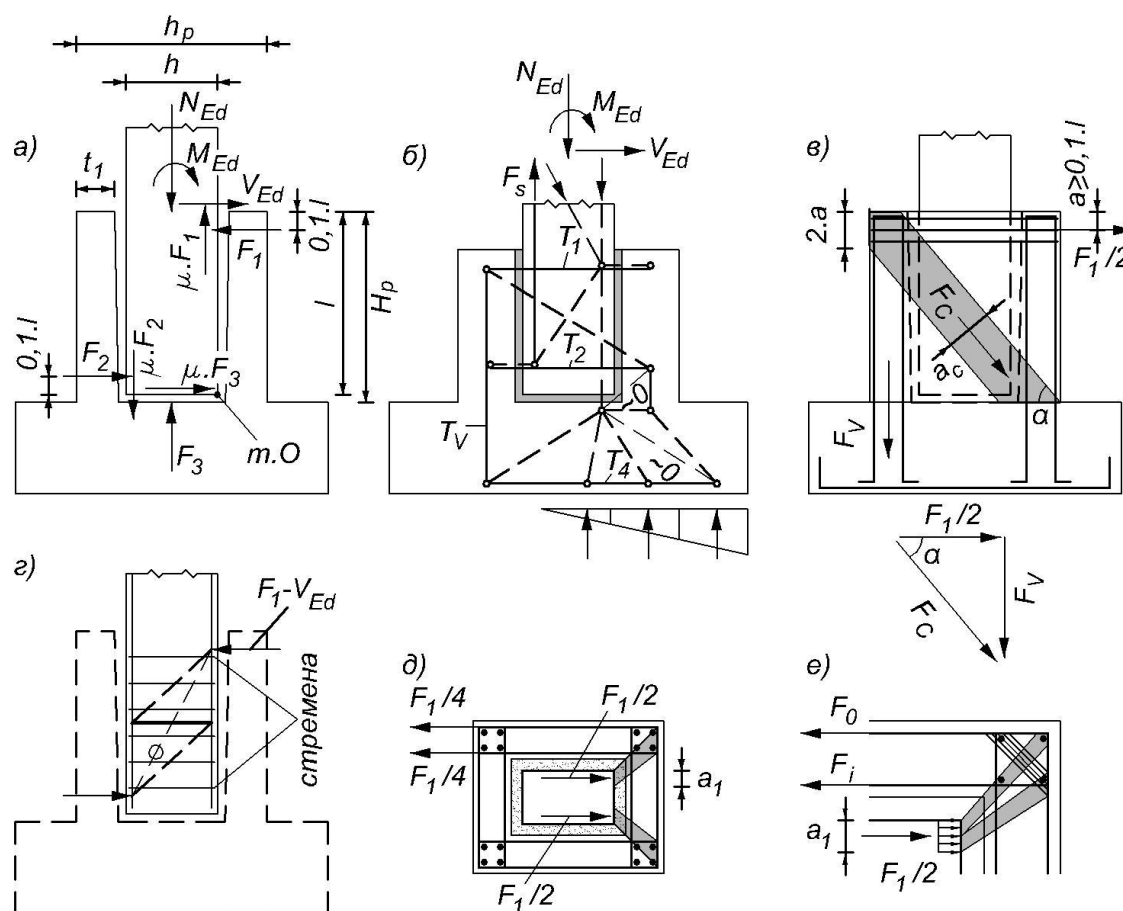
Според Еврокод 2 [1] е забранено използването на гладки повърхности при нецентрично опънати колони [14].

Преносът на силата F_1 към основата на фундамента за ULS може да бъде осъществен посредством прътовия модел от фиг.1.б. Позицията на силата F_1 трябва да бъде избрана на $\geq 0,1l$ от горния край на чашката. Показан е точен рафиниран модел (фиг.1.е) за напрегнатото състояние на хоризонталната армировка в горния край на чашката, но се позволява използването и на опростения модел от фиг.1.д.

Необходимо е подходящо детайлиране за предаването на хоризонталната сила F_1 в горния край на чашката към вертикалните пръти, както и закотвянето им.

За надлъжните стени на чашката е важно доказването на напреженията в натисковия диагонал (фиг.1.в).

Частта от колоната в чашката трябва да бъде проверена на срязване (фиг.1.г).



Фигура 1. Вътрешни сили в тялото на фундамента [1, 2] (а), общ прътов модел според [9] (б), прътов модел за надлъжна стена [1, 2] (в), срязване на колона в чашка (г), груб (д) и рафиниран (е) модел на контакт колона-горен край чашка

2.1.1. Определяне на вътрешните сили F_i за модела от Еврокод 2 [1]

Както е описано в [12, 13] стойностите на силите, действащи по повърхността на чашката (фиг.1), могат да се определят чрез системата равновесни условия:

$$\begin{aligned}\Sigma V = 0: & \quad \mu.F_1 - \mu.F_2 + F_3 = N_{Ed} \\ \Sigma H = 0: & \quad F_1 - F_2 - \mu.F_3 = V_{Ed} \\ \Sigma M_{T,0} = 0: & \quad 0,9.l.F_1 - F_2.(0,1.l - \mu.h) - F_3.\frac{h}{2} = M_{Ed} + V_{Ed}.l - N_{Ed}.\frac{h}{2}\end{aligned}\quad (3)$$

След съвместното решение на горните уравнения (3) за основните сили по повърхността на чашката се извежда:

$$\begin{aligned}F_3 &= \frac{N_{Ed} - \mu.V_{Ed}}{1 + \mu^2} \\ F_2 &= \frac{M_{Ed} + 0,1.l.V_{Ed} - N_{Ed}.h/2 - F_3.(0,9.\mu.l - h/2)}{0,8.l + \mu.h} \\ F_1 &= V_{Ed} + F_2 + \mu.F_3\end{aligned}\quad (4)$$

Вътрешни сили, показани на фиг.1.в и действащи само в една от надлъжните стени на чашката, могат да бъдат определени лесно:

$$\begin{aligned}F_v &= \frac{F_1}{2}.\operatorname{tg}\alpha \\ F_c &= \frac{F_1}{2.\cos\alpha}\end{aligned}\quad (5)$$

В [14] могат да бъдат видяни и по-съкратени формули за определяне на пълните вътрешни сили, но за целия прътов модел (т.е. общо за двете надлъжни стени), основаващи се също на Еврокод 2 [1], които според приетите тук означения са:

$$\begin{aligned}T_v &= \frac{M_{Ed} + V_{Ed}.H_p}{h_p - t_1} \\ T_1 &= V_{Ed} + 1,25.\frac{M_{Ed}}{H_p} \\ T_2 &= 1,25.\frac{M_{Ed}}{H_p}\end{aligned}\quad (6)$$

От направените авторски изследвания за конкретни числени примери е установено, че резултатите по (4) и (5) при $\mu = 0,3$, и по (6) са подобни за силите $T_v \sim 2.F_v$ и $T_1 \sim F_1$. По-съществени различия има за силите F_2 и T_2 , като резултатите по (6) са по-консервативни.

2.1.2. Проверки на елементите на прътовия модел

Всички опънни армировки могат да се определят лесно за поемане на съответните опънни сили в модела от фиг.1:

$$A_{s,req} = \frac{F_i}{f_{yd}}.\quad (7)$$

Изчислената хоризонтална армировка за сила $F_1/2$ трябва да се разположи в зона с височина $2.a$ (фиг.1.в).

Вертикална армировка в ъглите на чашката е необходима за поемане на силата F_v (фиг.1). Тя може да бъде оформена като високи столчета (фиг.1.в).

Заради параметрите на колоната в обема на чашката (фиг.1.г), този ѝ участък може да се причисли към „късите греди“. Въпреки това стремената в колоната в обема на чашката ще се определят без директно пренасяне на силата (без нулевия диагонал на фиг.1.г), защото опънния вертикал не е достатъчно закотвен в долния край след концентрираната хоризонтална силата. Тогава според [7] хоризонталната армировка се определя:

$$F_1 - V_{Ed} \leq 0,75 \Sigma A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot \quad (8)$$

Описаното оразмеряване е консервативно, защото не отчита всички пръти в стените на чашките и това, че самите чашки работят пространствено, а не равнинно. За това и в литературата може да се видят твърдения, че реални разрушения на фундаменти рядко се срещат в практиката.

За съществуването на прътовите модели е изключително важно надеждното закотвяне на опънните армировки. Препоръчва се избор на повече бройки с по-малки диаметри.

Консервативно за всички проверки на натисковите пръти се препоръчва да се работи с гранични напрежения като в условия на страничен опън:

$$\sigma_{Rd, \max} = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \cdot f_{cd} \cdot \quad (9)$$

Натисковите напрежения под силата F_1 в чашката (фиг.1.д, е) и диагоналните натискови напрежения, причинени от силата F_c (фиг.1.г), трябва да са по-малки от $\sigma_{Rd, \max}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{F_1} &= \frac{F_1/2}{a_1 \cdot 0,2 \cdot l} \leq \sigma_{Rd, \max} \\ \sigma &= \frac{F_c}{a_c \cdot t_1} \leq \sigma_{Rd, \max} \end{aligned} \quad (10)$$

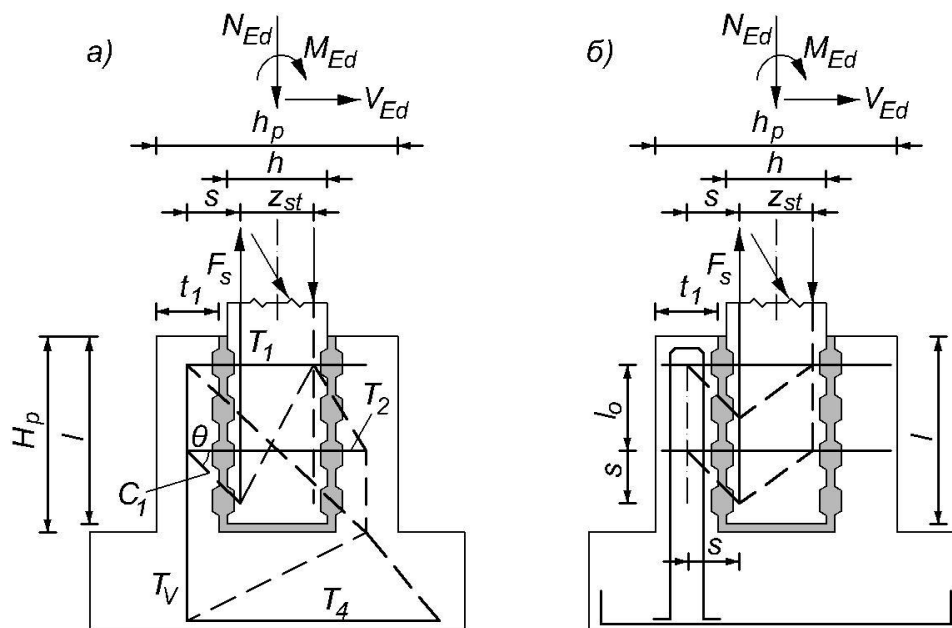
Широчината на натисковия диагонал a_c в надлъжните стени на чашката се определя от геометрията на възела в горния край на чашката (фиг.1.в).

Силата T_4 от фиг.1.б и кореспондиращата ѝ армировка може лесно да се намерят при оразмеряване на основата на фундамента.

2.2. Прътов модел при чашковиден фундамент с профилирани стени

В Еврокод 2 [1] се казва, че тази връзка може да се разглежда като работеща монолитно, като се обръща внимание на необходимостта от по-голяма дължина на снаждане на вертикалните пръти (когато са опънни - F_s и T_v) заради по-голямата им отдалеченост (фиг.2), както и на необходимостта от хоризонтална армировка в снадката. Ако е осигурено предаването на срязващите усилия от колоната към фундамента продънването в КГС трябва да се изчисли като за монолитен фундамент.

За съществуването на прътовия модел от фиг.2 е задължително срязващите напрежение в профилираната повърхност да бъдат под граничните.



Фигура 2. Прътов модел при дюбелирана повърхност (а) и снаждане на вертикалните армировка (б)

Според [14] за намиране на вътрешните сили в прътовия модел от фиг.2 (отново за целия модел) могат да се използват формулите:

$$\begin{aligned} \text{om } V_{Ed} \left\{ \begin{aligned} T_1 &= V_{Ed} \\ T'_V &= \frac{T_1 \cdot l}{h_p - t_1} \end{aligned} \right. \\ \text{om } M_{Ed} + N_{Ed} \left\{ \begin{aligned} T''_V &= \frac{F_s \cdot z_{st}}{z_{st} + s} \\ T_2 &= C_{1x} = T'_V \cdot \cot g\theta \end{aligned} \right. \quad (11) \\ T_V &= T'_V + T''_V \\ T_1 + T_2 &= V_{Ed} + T'_V \cdot \cot g\theta \end{aligned}$$

Силата T_1 може да се обясни с равновесието и директното въздействие на срязващата сила V_{Ed} . Локални прътови модели, като тези от фиг.1.д и фиг.1.е са приемливи и сгъстяването на хор. армировка в горния край на чашката изглежда логично.

Силата T_2 е с известен произход и поддържа хоризонталното равновесие в локалния прътов модел за пренос на вертикални сили от F_s към T'_V . Обичайните ъгли в този модел са в порядъка $\theta = 40^\circ \div 45^\circ (55^\circ)$.

Изчислението и конфигурацията на армировките е подобно на тези от предишния модел (вж. т.2.1), но със значителна редукция на количеството им.

Важно е да се отбележи, че армировката за силата T_V този път е по-добре да не се концентрира цялата в ъглите на чашката, а да се аранжира по дължина ѝ. Това се обяснява

лесно с факта, че взаимодействието на силите F_S към T_V'' и възникналите срязващи напрежения са по цялата широчина на чашката.

Тук отново силата T_4 и съответната ѝ армировка може да се определи от решаването на основата на фундамента.

2.2.1. Определяне на срязващите напрежения в профилирана повърхност

Срязващите напрежения в профилираната повърхност могат да бъдат определени на база действащата срязваща сила:

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed,i}}{A_i} = \frac{F_s}{b.l} \leq v_{Rd,c}, \quad (12)$$

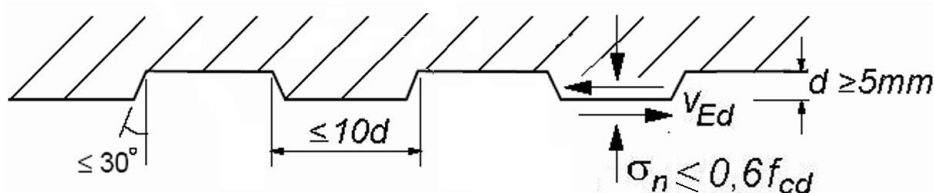
където $V_{Ed,i} = F_s$ [14], а b е другия размер на колоната.

Силата F_s може да се изчисли като максималната за вложената армировка или приблизително по:

$$F_s \sim \frac{M_{Ed}}{z_{st}} - \frac{N_{Ed}}{2}. \quad (13)$$

2.2.2. Носимоспособност на профилираната повърхност на срязване

За използване на следващите формули за носимоспособност на срязване на профилираната (дюбелирана) повърхност трябва да бъдат спазени минималните конструктивни изисквания (фиг.3) за размери на дюбелите [1, 7, 15]. Дълбочината на дюбелите d (фиг.3) трябва да е съобразена и с големината на едрия добавъчен материал.



Фигура 3. Конструирание на фуга с дюбели – адаптирана от [1, 7, 15]

Тогава определянето на носимоспособност на срязване на профилираната повърхност може да стане по формулите, представени в [1, 7, 15]:

$$v_{Rd,c} = c.f_{ctd} + \mu.\sigma_n \leq 0,3.f_{cd}, \quad (14)$$

$$v_{Rd,c} = \min(c.f_{ctd} + \mu.\sigma_n; 0,3.f_{cd}), \quad (15)$$

където $f_{ctd} = f_{ck;0,05} / 1,5$ е изчислителното съпротивление на опън в елемента с по-нисък клас.

Стойности на коефициента на триене μ и на „кохезия“ c са показани в Табл.1.

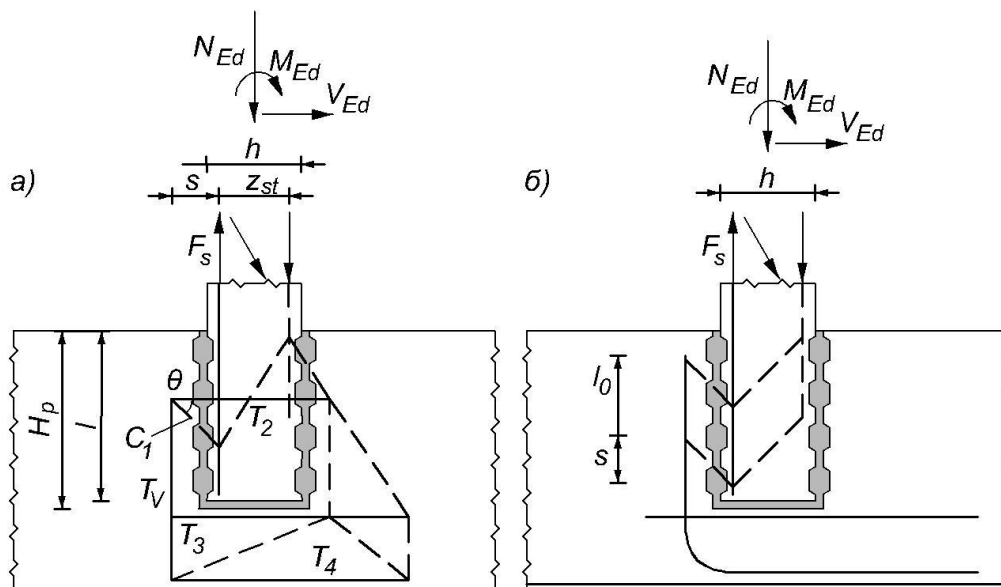
Таблица 1. Коефициенти на триене μ и на „кохезия“ c според вида повърхност според [1]

Повърхност	μ	c
много гладка	0,5	0,25
гладка	0,6	0,35
грапава	0,7	0,45
Назъбена (дюбелирана, профилирана)	0,9	0,5

Страничният натиск, гарантиран от хоризонталната армировка в стените на чашката, който подобрява носимоспособността на срязване, може да се отчете чрез приноса на нормалните напрежения σ_n [14]:

$$\sigma_n = \frac{C_1 \cdot \cos \theta}{b \cdot l} = \frac{V_{Ed} + T_2}{b \cdot l} \leq 0,6 \cdot f_{cd} . \quad (16)$$

2.3. Прътов модел в случаи на чашки в обема на фундамента и профилирани стени



Фигура 4. Прътов модел при фундаментна плоча и дюбелирана повърхност [1, 2, 14]

Като частен случай на предишния модел може да се разглежда връзката на колона с чашка, потопена изцяло в обема на фундамента с дюбелирани повърхности (фиг.4).

Тук отново ако е осигурено предаването на срязващите усилия от колоната към фундамента връзката може да се приеме за монолитна и корава. Продънването също се изчисли като за монолитен фундамент.

Усилието в прът T_V може да се определи от [14]:

$$T_V = \frac{F_s \cdot z_{st}}{z_{st} + s} , \quad (17)$$

като силата F_s може да се определи по (13).

Усилието T_2 е с ясна големина и причина и гарантира снаждането на вертикалните пръти. Според модела в Еврокод 2 [1] и според [14] то може да се определи по:

$$T_2 = T_V \cdot \cot \theta . \quad (18)$$

В случая според автора усилието T_2 може да се поеме от „неактивния“ заобикалящ бетон, който създава ефект на ограничаване на напречните деформации.

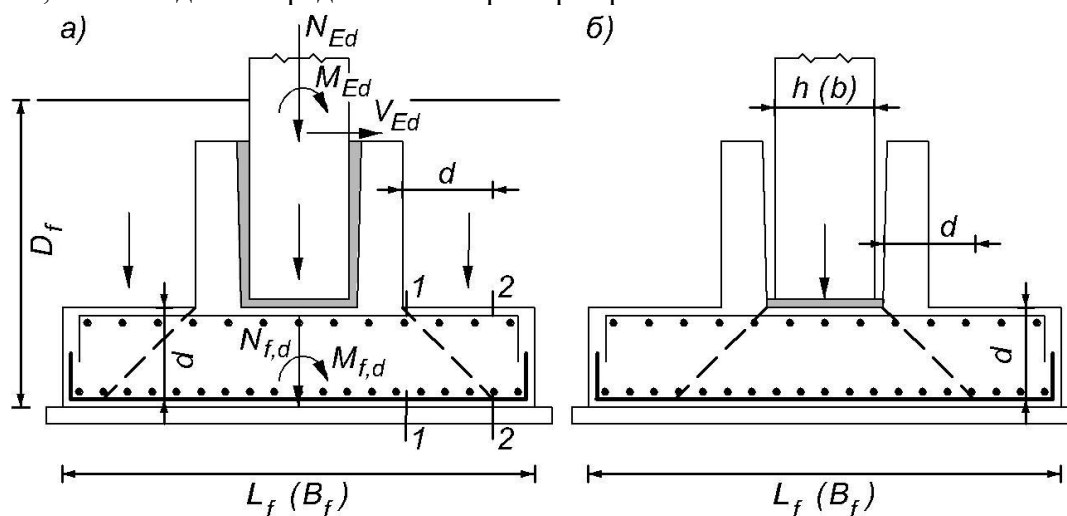
3. ОБИЧАЙНИ ПРОВЕРКИ НА ОСНОВАТА НА ФУНДАМЕНТА

При оразмеряване на основата на фундамента в [7] се препоръчва да се работи с характеристични стойности на теглото на фундамента и почвата.

Традиционни проверки на огъване за сеч.1-1 по външния ръб на чашката (фиг.5.а) и на срязване в сеч.2-2 (фиг.5.а) са необходими. С първата се определя долната армировка на фундамента, а с втората – необходимостта от напречно армиране. Препоръчва се фундаментите да се проектират с достатъчна дебелина, за да не е необходимо напречно армиране. Гарантирането на дължината на закотвяне на армировката за силата T_v до голяма степен способства тази препоръка да бъде изпълнена.

Продънването в монтажно състояние обикновено не е меродавно (фиг.5.б). Продънване в експлоатационно състояние е необходимо да бъде проверено при ръбовете на чашката (фиг.5.а), заради монолитната връзка колона-фундамент.

За състояния на натоварване, при които може да възникне отлепяне на основната плоскост, е необходимо определяне на горна армировка.



Фигура 5. Фундамента в (а) Крайно гранично състояние и в (б) Монтажно състояние

4. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Представените прътови модели за проектиране на сглобяеми фундаменти с повишена чашка показват нагледно „пътищата“, по които изтичат силите от колоните през самите фундаменти до земната основа.

Изчислените хоризонтални и вертикални армировки в чашката, за случая на плоски повърхности (фиг.1), се съсредоточават в горната ѝ част и в ъглите ѝ. Подобни пръти, без да бъдат взети предвид в оразмеряването, се разполагат и в останалата част на чашката.

Това е едната причина показаният модел да бъде консервативен в сравнение с експериментите. Другата причина е, че моделът е равнинен и не отчитат пространственото взаимодействие на стените с чашката.

При доказване на срязващите напрежения в дюбелирана повърхност чашка-колона се получават далеч по-икономични решения (фиг.2).

Конструирането на армировката трябва да следва прътовите модели, което е причината за по-различното конструиране на вертикалната армировка в чашката, когато тя е дюбелирана.

Осигуряването на надеждно закотвяне на армировките след възлите е гаранция за съществуване на всички показани прътови модели.

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] Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures, *pr*EN 1992-1-1: 2017-10.
- [3] БДС EN 1998-1: 2005, Еврокод 8: Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия, Част 1: Общи правила и правила за сгради.
- [4] БДС EN 1997. Еврокод 7: Геотехническо проектиране.
- [5] Илов, Г. и колектив. Ръководство по геотехника, КИИП, 2012
- [6] Сотиров, П., Игнатиев, Н., и др., Практическо ръководство с решение примери по прилагане на Еврокод 8-1 – Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия (Нови сгради), КИИП, София, 2012.
- [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] Leonhardt F, Vorlesungen uber Massivbau, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1977.
- [9] Schlaich J., Schäfer K., Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models, *The Structural Engineer*, Vol. 69, No.6/19, 1991.
- [10] FIB Bulletin 43, Structural connections for precast concrete building, February, 2008
- [11] Chana, R. M. F., Campos, G. M., El Debs, M. K., Design modeland recommendation of column-foundation connection through socket with rough interfaces, Volume 5, Number 2 (April, 2012) p.182-218, ISSN 1983-4195
- [12] Grzegorz Ludwik Golewski, The Specificity of Shaping and Execution of Monolithic Pocket Foundations (PF) in Hall Buildings., *Buildings*, 2022, 12, 192, <https://doi.org/10.3390/buildings12020192>
- [13] Ангелов Н., Сглобяем единичен чашковиден фундамент с повишена чашка с гладки повърхности под нецентрично натисната колона, Сборник с доклади, XIII Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, 12-13 септември 2024г., Варна, ISSN 2683-071X (online) ISSN 2738-7879 (CD), стр.122-131.
- [14] Constantinescu, H.; Toader, T.-N. Structural Design and Technology of Pocket Foundations for Long Precast Concrete Columns in Seismic Areas. *Buildings* 2024, 14, 3466. <https://doi.org/10.3390/buildings14113466>.
- [15] Neshev, Hr., Horizontal shear transfer at interface in composite concrete flexural members, *Annual of the University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia*, Volume 56, Issue 3, pages.1183-1190, 2023.