

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 13.11.2017 г.

ГРАНИЧНО РАВНОВЕСИЕ НА СТОМАНОБЕТОННИ ПЛОЧИ. А СЛЕД ТОВА?

Г. Соколова¹, Ат. Георгиев²

Ключови думи: стоманобетонни плочи, крайно гранично състояние, пластични линии, мембранно състояние

РЕЗЮМЕ

Пластичният анализ е популярен метод за изследване на плочите, а моделът с пластични линии е широко разпространен. Той е подходящ за установяване на крайното гранично състояние при дълготрайни изчислителни ситуации. При извънредни ситуации (експлозии, удари) се допускат по-големи повреди, но без колапс на конструкциите. При плочите такъв преход може да е въвеждането на мембранното действие на армировката при големи премествания.

В доклада се разглеждат и анализират изисквания за осигуряване на прехода огъване-мембранен опън за някои характерни случаи на полета от плочи.

1. Въведение

Към известните компоненти на надеждността на строителните конструкции (носи-мощност, експлоатационна годност и дълготрайност), в случаите на извънредни изчислителни ситуации съвременните стандарти за проектиране поставят и изискване за *здравина*: способност на конструкцията да устоява на събития като пожар, експлозия (взрив), удар или последици от човешка грешка, без да бъде повредена до степен, която е непропорционална на първопричината (БДС EN1990:2002). Тук трябва да се отбележи,

¹ Галина Соколова, инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: galq.sokolova@gmail.com

² Атанас Георгиев, проф. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: atanasg@vip.bg

че променливите въздействия от сняг и вятър могат бъдат и особени, ако е налична информация за статистическите им разпределения.

Поради значителната големина на особените въздействия, които обаче са с малка вероятност за възникване, подходът с традиционно осигуряване на конструкциите не е ефективна стратегия – препоръчително е да се търсят и предвидят алтернативни пътища за предаване на товарите (БДС EN 1991-1-7:2006).

В стандарта [1] алтернативно предаване на натоварването (макар и в неявен вид) е използвано за конструирането на долната армировка на безгредовите плочи при колони (т. 9.4.1) срещу *постепенно разрушаване (progressive collapse)* след продънване.

В доклада е изследвано поведението на квадратно поле от гредова стоманобетонна плоча и преходът му към опънна мембрана при извънредно големи натоварвания и провисвания до пълното му разрушение с предизвестие.

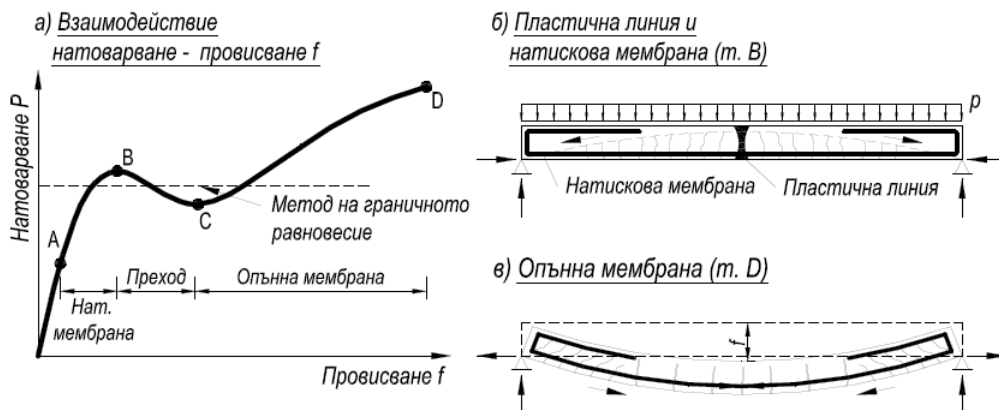
2. Поведение на ивица от тънка плоча

Обикновено стоманобетонните плочи изпълняват приемливо общите геометрични предпоставки за тънки, ако стройността им е $l/d \geq 10$ и провисванията са до $0,5d$.

По-долу е разгледано принципното поведение до разрушение на еднопосочна ивица от плоча [2, 3, 4], която е ставно подпряна, с ограничени хоризонтални премествания при опорите и с пълноценно закотвена армировка зад тях (фиг. 1).

(1) В началото връзката натоварване-преместване е линейна (до т. А на фиг. 1а). След образуването на пукнатини и формирането на пластична линия в средата, в действие влиза и натисквата (сводова) зона, наречена *натисква мембрана* (фиг. 1б). Затова т. В е по-високо в сравнение с граничния товар, определен по метода на граничното равновесие.

(2) Поради големите провисвания на плочата, натисквата мембрана редуцира действието си, а поради разрушения в натисквата зона с намалена носимоспособност може да се окаже и пластичната линия (т. С).



Фиг. 1. Гранично равновесие и мембранните действия

(3) С увеличаване на провисванията (удължаване на армировката) натоварването започва да се поема от *опънна мембрана*, формирана от силно удължената армировка.

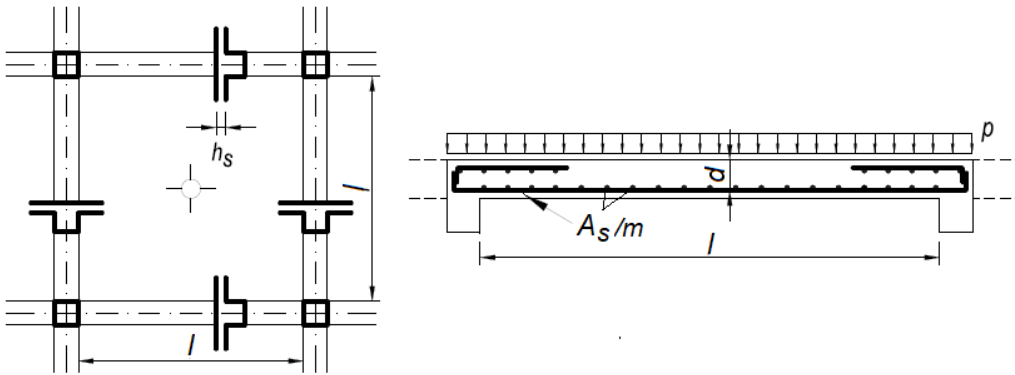
Разрушението (т. D) е при достигане на граничните деформации в армивката ϵ_{uk} и обикновено то е при по-големи стойности на натоварването в сравнение с първия пик (т. В). При експериментът, представен в [2], за ивица с отвор 8,0 m е достигнато провисване $f = l/12$.

3. Изследвания върху квадратно поле

3.1. Геометрична схема, материали, конструиране

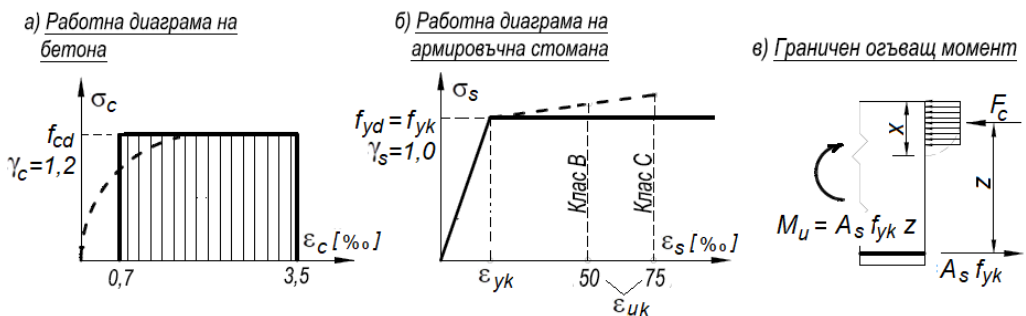
(1) Прието е вътрешно свободно подпряно поле от гредова стоманобетонна плоча.

(2) Носещата (долната) армивка е изотропна (с еднаква интензивност в двете направления), стига без прекъсване до опорите и е закотвена в тях (фиг. 2).



Фиг. 2. Схема и конструиране на армивката

(3) Приети са обичайните [1] характеристики и работни диаграми на бетона и армивката (фиг. 3). В изследванията са отчетени занижените стойности на коефициентите за материалите, характерни за извънредните изчислителни комбинации на въздействията (фиг. 3).



Фиг. 3. Работни диаграми и носимоспособност при огъване

3.2. Стадий „гранично равновесие“

(1) Методът на пластичните линии е популярен и се използва в практиката за бързо концептуално установяване на носимоспособността на плочи в крайното гранично състояние.

(2) Съвременният стандарт [1] в т. 5.6 също регламентира този подход, като поставя изискване за дуктилност, което гарантира ротационен капацитет и възможност за предсказване на механизма на разрушение. За обикновени бетони то е (фиг. 3в)

$$x/d \leq 0,25, \quad (1)$$

което означава процент на армиране с единична армировка $\rho_l \leq 0,008$ (за бетон клас C20/25) и $z/d \geq 0,9$.

(3) Този пластичен анализ се основава на метода на горната граница (кинематичната теорема) и обикновено се използва за директно изчисляване на гранични разпределени натоварвания.

3.2.1. Традиционно и рафинирано решение

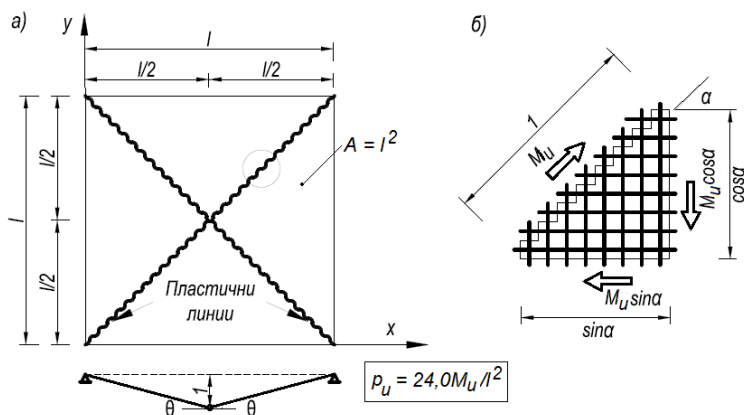
(1) В съответствие с всички правила за оптимално разпределение на пластичните линии и на другите оси на въртене на коравите дискове (напр. при свободното подпиране), на фиг. 4а е показан елементарният механизъм на разрушение на разглежданото квадратно поле. На фиг. 4б е доказана инвариантността на граничните моменти M_u при изотропно армиране, което също е известен факт.

(2) Елементарно се доказва и стойността на граничното разпределено натоварване върху плочата в зависимост от носимоспособността ѝ на огъване в произволно направление:

$$p_u = 24,0M_u / l^2, \quad (2)$$

където

$$M_u = A_s f_{yk} z. \quad (3)$$

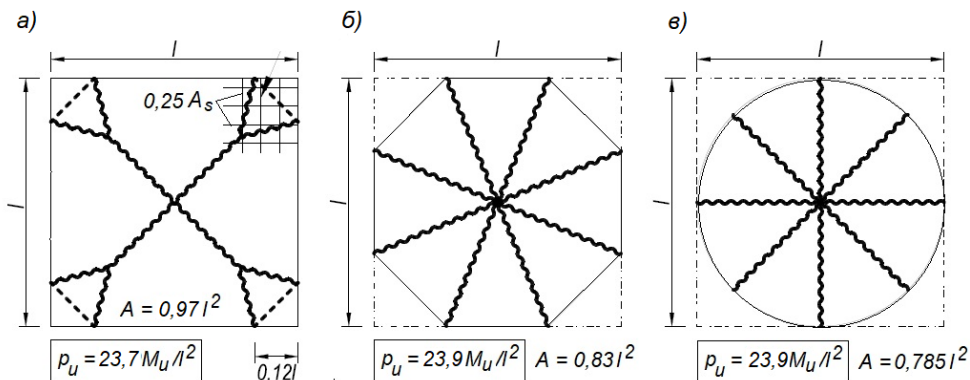


Фиг. 4. Пластични линии и особеност на изотропното армиране

(3) Когато повдигането на плочата в ъглите е ограничено, което е обичайно за монолитните гредови подове, задължително е предвиждането на горна армировка в ъглите (фиг. 5а). В този случай подобреният механизъм на разрушение включва и пластичните линии (запъването) в ъглите. Граничното натоварване при този модел е приблизително със стойността от традиционния механизъм, ако от площта на плочата се изключат ъглите ($A = 0,97l^2$).

3.2.2. Заместващи геометрични схеми

За представените на фиг. 5б и фиг. 5в, вписани ставно подпрени осмоъгълно и кръгло поле граничното натоварване е същото (както за квадратното), ако и интензивността на армировката е същата.



Фиг. 5. Ограничение срещу повдигане в ъглите (а) и заместващи осмоъгълна (б), и кръгла (в) схема на плочата

3.2.3. Изводи

(1) Изследванията върху граничното равновесие на елементарни случаи показва, че при дадено натоварване, полета с вписана в квадрат форма се нуждаят от еднакво ортогонално изотропно армиране. Това доказва отново, че по-икономично е конструирането по главните направления (напр. кръгли плочи с радиална и пръстеновидна армировка), което обаче е свързано със сериозни технологични проблеми.

(2) Анализите по-горе са по-скоро с цел изследване на формите, които са най-близки до следващия стадий – преход към опънна мембрана върху квадратна основа. Резултатите до тук показват, че приемането на първото приближение със сферична мембрана е напълно резонно.

3.3. Стадий „опънна мембрана“

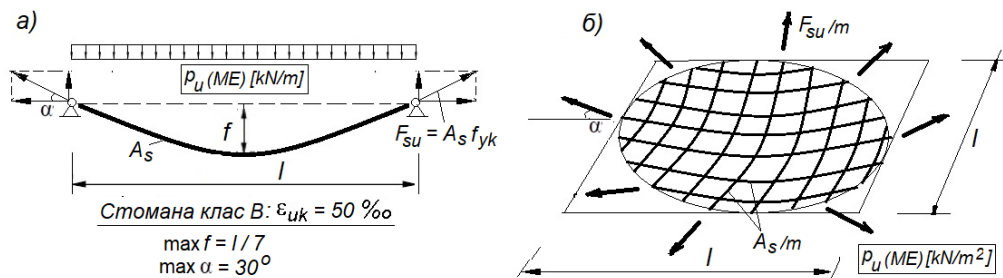
3.3.1. Армировката като разтежима нишка

(1) Разглежда се праволинейна самостоятелна армировка (каквото е очертанието ѝ, когато е вложена в стоманобетонната плоча), чийто провес се дължи единствено на удължение. За армировка с клас по дуктилност В то трябва да се приеме с гранична стойност $\epsilon_{uk} = 0,05$ (фиг. 3б). При това граничната деформирана форма (квадратна па-

рабола или близката до нея и по-удобна дъга от окръжност) е с параметрите, показани на фиг. 6а.

(2) За граничното разпределено натоварване $p_u(ME)$ върху такава нишка (ME е съкращение от *мембрана*) при $\alpha = 30^\circ$ от равновесието се определя

$$p_u(ME) = A_s f_{yk} / l, \text{ kN/m.} \quad (4)$$



Фиг. 6. Армировката – нишка и мембрана

3.3.2. Сферична мембрана

(1) Тя представлява преход от кръгла плоча при големи деформации. Също е с изотропно поведение, т.е. с еднакви по стойност и разпределени по контура наклонени реакции F_{su} (фиг. 6б).

(2) Стойността на граничното разпределено натоварване $p_u(ME)$ върху квадратната плоча, което може да се поеме от мембранното действие, е

$$p_u(ME) = \pi A_s f_{yk} \sin \alpha / l, \text{ kN/m}^2. \quad (5)$$

3.3.3. Ортогонални цилиндрични мембрани

(1) Въз основа на резултатите от т. 3.3.2, за квадратна плоча може да се приеме заместваща комбинация от ортогонални цилиндрични мембрани, които са с редуцирана активна ширина – до $0,75l$ (фиг. 7а).

(2) Подобно на форм. 5, всъщност за граничното разпределено натоварване се предлага изразът

$$p_u(ME) = (3,0 A_s f_{yk} \sin \alpha) / l, \text{ kN/m}^2. \quad (6)$$

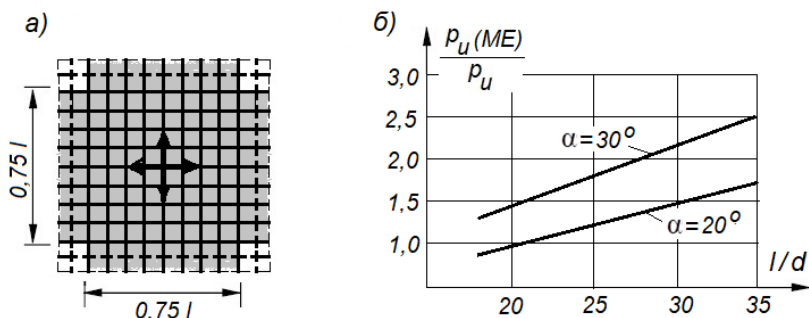
4. Сравнения

(1) Една от задачите на изследването е за разглежданата схема на стоманобетонна плоча да се сравни изчислителната носимоспособност при пластичен анализ с тази след прехода към мембрана при големи премествания.

(2) Сравнението на граничните товари по форм. 6 и форм. 2 (при отчитане на форм. 3 и приемането $z/d = 0,9$) води до отношението

$$p_u(ME)/p_u = 0,14 \sin \alpha(l/d). \quad (7)$$

(3) За обичайните стойности l/d на кръстосано армираните плочи в границите от 20 до 35, на фиг. 7б е показано отношението (7) при $\alpha = 20 \div 30^\circ$.



Фиг. 7. Заместващи ортогонални цилиндрични мембрани (а) и сравнения (б)

5. Заключение

5.1. Анализите и числените сравнения показват, че в случай на случайни въздействия, с промяната на схемата и отчитането на мембранно действие може да се увеличи фактичката носимоспособност на плочите средно до два пъти. Ако се предвиди двойна армировка, това увеличение може да е и по-голямо.

5.2. Освен необходимото пълно закотвяне на армировките, които формират мембраните, опорите (гредите) трябва да са с достатъчна коравина в равнината на плочата, ако са крайни. Особено критично е тяхното поведение при усукване.

5.3. Трябва да се отбележи също, че граничната деформация в армировката (фиг. 6а) трябва да присъства като ограничаващ критерий, но тя не може да се реализира като средна стойност във вътрешността на мембраната, където взаимодействието с бетона я редуцира. Това практически означава и редуция на стрелката на параболите и на ъглите α . Вертикалните приплъзвания в крайните (при опорите) области, които са с начални наклонени пукнатини обаче, го възстановяват до теоретично определените.

5.4. Според [3], ортогоналното взаимодействие при алтернативните схеми на поведение на двупосочните плочи е актуален проблем, за решаването на който са необходими сериозни изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1992-1-1:2005, Еврокод 2: Проектиране на стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.
2. Gouverneur, D. Experimental and Numerical Analysis of Tensile Membrane Action in Reinforced Concrete Slabs in the Framework of Structural Robustness. Ghent University, Belgium, 2014.
3. Krauthammer, T. Modern protective structures. Georgia Institute of Technology, 2007.
4. Wittek, U. u.a. Beitrag zu nichtlinearen Dimensionierungskonzepten von Flächentragwerken aus Stahlbeton, Universität Kaiserslautern, 2000.

YIELD LINES LIMIT STATE OF CONCRETE SLABS. AND THEN?

G. Sokolova¹, At. Georgiev²

Keywords: RC slabs, ultimate limit state, yield line, membrane effect

ABSTRACT

The plastic analysis is a popular method for slab survey, and the yield lines model is widespread. The latter is suitable for determining the ultimate limit state of slabs in persistent design situations. In accidental design situations (explosions, impacts) larger damages are allowed, but with no collapse of the structures. Such a transition, regarding the slabs, could be the introduction of membrane action of the reinforcement when the deflections are large.

The paper examines and analyses requirements for providing the bending – membrane tension transition for some specific cases of panels.

¹ Galina Sokolova, Eng. PhD student, Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: galq.sokolova@gmail.com

² Atanas Georgiev, Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: atanasg@vip.bg