
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АРМИРАНА ТЕХНОЛОГИЧНА ФУГА В СТОМАНОБЕТОНЕН ЕЛЕМЕНТ, ПОДЛОЖЕНА НА СРЯЗВАЩО УСИЛИЕ

Хр. Христовулов¹, М. Андреев²

Ключови думи: срязване чрез триене, армирани технологични фуги, връзка стар–нов бетон, метални и полипропиленови фибри, епоксиден състав

Научна област: стоманобетон и стоманобетонни конструкции

РЕЗЮМЕ

Изучено е експериментално поведението и механизмът на разрушение на стоманобетонен елемент с армирана технологична (работна) повърхнина, подложена на срязване. Изготвени и изпитани са шестнадесет експериментални стоманобетонни образца. Описани са отделните етапи по време на натоварването на експерименталните тела. Дадена е типова крива напрежение/деформации. Разглеждано е влиянието на фибри в единия пласт бетон, както и наличието на епоксиден състав по работната равнина.

1. Въведение

При стоманобетонните конструкции много често се разглеждат ситуации, където възниква армирана технологична фуга (връзка между стар и нов бетон), подложена на срязващо усилие. Механизмът на предаване на срязване чрез триене между двете повърхности е познат в световната литература като shear friction, concrete-to-concrete load transfer или interface shear transfer. Тази ситуация се среща при сглобяемото и монолитно-сглобяемото строителство, при повърхности между стоманобетонни елементи, изпълнени на различни етапи, при усилване на конструкции чрез стоманобетонен „кожух“, както и при много други случаи.

¹ Христо Христовулов, инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: hristo_hristodulov@abv.bg

² Методи Андреев, д-р инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: ekonproekt@dir.bg

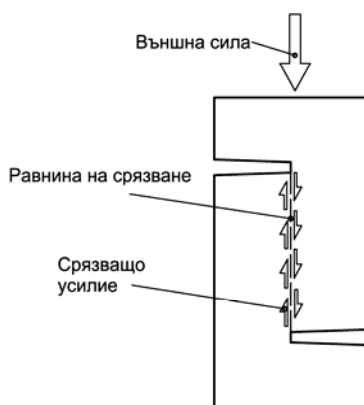
Предаването на срязващото усилие чрез триене е сложен процес, включващ много взаимосвързани фактори. Във всички световни конструктивни норми са дадени методики за оразмеряване на елементи, подложени на триене чрез срязване. Носимоспособността на срязване на тези елементи зависи от множество параметри, като основните от тях са:

- видът и характеристиките на равнината, подложена на срязване;
- характеристиките (якост, вид, количество, положение, оребреност и др.) на армировката, която пресича равнината;
- якостта на бетона, неговата структура и пълнителите му;
- допълнителни усилия (опънни или натискови), действащи напречно на равнината, подложена на срязване.

В настоящия експеримент всички горепосочени основни параметри ще бъдат константни, а в отделните експериментални тела ще варират количеството на фибри (метални и полипропиленови) в единия пласт бетон. Също при някои серии образци ще бъде обработена работната фуга със свързващ епоксиден състав. По време на изпитването ще бъдат следени хоризонталните и вертикалните премествания в равнината, подложена на срязване.

2. Описание на експерименталната програма

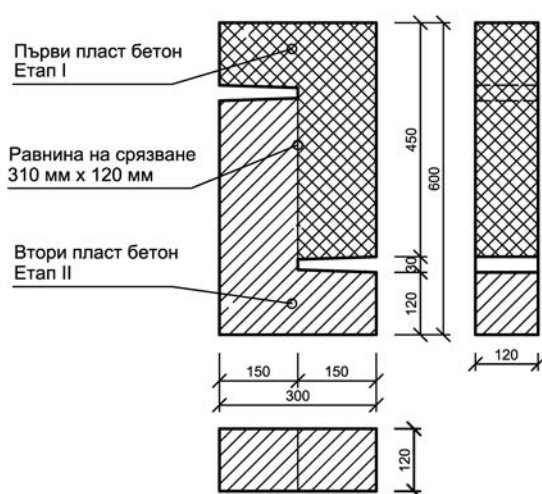
Параметрите на експерименталните тела са избрани така, че в работната равнина (фуга) да се получи чисто срязващо усилие. Образците са излети на два етапа – до работната фуга, и след набиране на якост на първия пласт бетон (процесите по втвърдяване са приключили) е долят втория пласт бетон. Телата са армирани и равнината на срязване също е армирана чрез свързване на двата пласта бетон с армировъчни пръти (стремена). Класът на бетон, класът на армировката, процентът на армиране, грапавостта на равнината на срязване и размерите на телата са константни при всички експериментални образци. Параметрите, които варират, са количеството метални и полипропиленови фибри във втория пласт бетон и наличието на лепилен епоксиден състав по работната равнина. От всяка серия (образци с еднакви параметри) са изготвени по две еднакви тела. Общо са изработени шестнадесет експериментални тела.



Фиг. 1. Схема на експерименталните образци

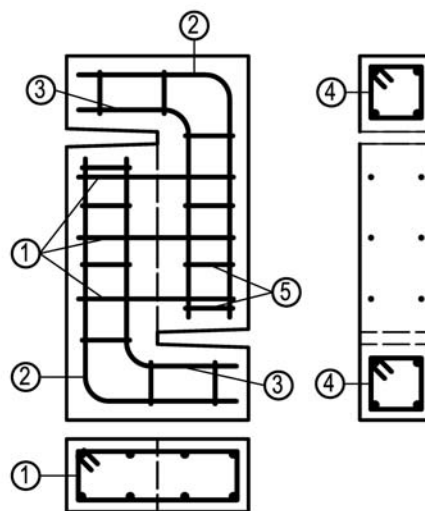
2.1. Параметри на експерименталните образци

Размерите на образците са приети на базата на възможностите на изпитвателната апаратура и на базата на опита от подобни експерименти, описани в световната литература. Прието е, че мащабният фактор е минимизиран и размерите на телата не оказват значително влияние върху разпределението на напреженията. Изработени са четири кофражни форми от водоустойчив шперплат. По периферията платната са усилены от метални профили. Кофражните форми са разглобяеми с цел лесно декофриране на образците. Армировката на експерименталните образци е във вид на два Г-образни скелета, които са свързани чрез три (двусрезни стремена). Тези стремена са ф6,5 стомана В235 и са армировката, която пресича работната равнина и свързва първия и втория пласт бетон.



Фиг. 2. Кофражен план на експериментален образец

Спецификация на армировката - за един образец	
1	3Ø6,5x760 Стомана клас В235 (Ст А-I)  260 80
2	4N10x650 Стомана клас В420 (Ст А-III)  250 400
3	4N10x510 Стомана клас В420 (Ст А-III)  170 340
4	4Ø6,5x400 Стомана клас В235 (Ст А-I)  80 80
5	8Ø6,5x420 Стомана клас В235 (Ст А-I)  90 80



Фиг. 3. Армировъчен план на експериментален образец

Таблица 1. Параметри на отделните серии експериментални тела

Сигнатура	Описание
1ВНС-А	Двата пласта бетон са без добавки.
2ВНС-В	Двата пласта бетон са без добавки.
3ВІМs-А	Вторият пласт бетон е с минимално количество метални фибри Dramix 5D (15 кг/м ³)
4ВІМs-В	Вторият пласт бетон е с минимално количество метални фибри Dramix 5D (15 кг/м ³)
5СJМm-А	Вторият пласт бетон е с нормално количество метални фибри Dramix 5D (30 кг/м ³)
6СJМm-В	Вторият пласт бетон е с нормално количество метални фибри Dramix 5D (30 кг/м ³)
7СКМl-А	Вторият пласт бетон е с максимално количество метални фибри Dramix 5D (45 кг/м ³)
8СКМl-В	Вторият пласт бетон е с максимално количество метални фибри Dramix 5D (45 кг/м ³)
9DLРs-А	Вторият пласт бетон е с минимално количество полипропиленови фибри SikaFiber M48 (3 кг/м ³)
10DLРs-В	Вторият пласт бетон е с минимално количество полипропиленови фибри SikaFiber M48 (3 кг/м ³)
11DMPm-А	Вторият пласт бетон е с нормално количество полипропиленови фибри SikaFiber M48 (6 кг/м ³)
12DMPm-В	Вторият пласт бетон е с нормално количество полипропиленови фибри SikaFiber M48 (6 кг/м ³)
13ENPl-А	Вторият пласт е с максимално количество полипропиленови фибри SikaFiber M48 (9 кг/м ³)
14ENPl-В	Вторият пласт бетон е с максимално количество полипропиленови фибри SikaFiber M48 (9 кг/м ³)
15ЕОЕ-А	Двата пласта бетон са без добавки, но има епоксиден лепилен състав SikaDur-31 по равнината на срязване
16ЕОЕ-В	Двата пласта бетон са без добавки, но има епоксиден лепилен състав SikaDur-31 по равнината на срязване

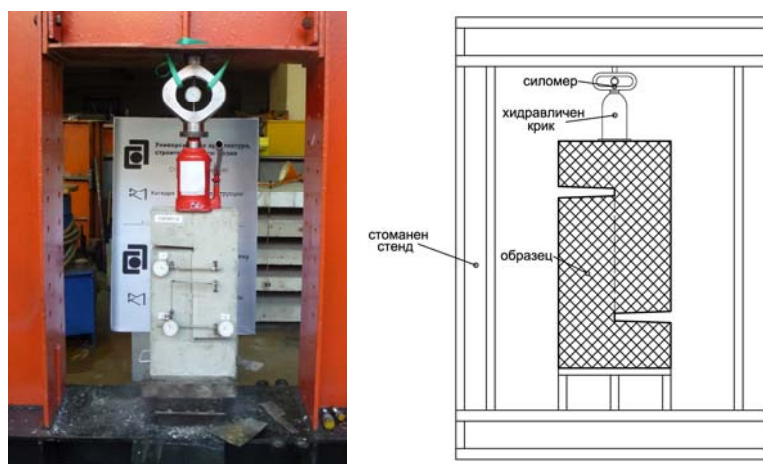
2.2. Изготвяне и изпитване на експерименталните тела

Изготвянето на образците е на два етапа. В първия етап се монтира армировката в кофражните форми и се налива хомогенизираната бетонна смес до равнината на срязване. След набиране на якост на първия пласт бетон работната равнина се нагрява еднакво за всички образци. Във втория етап се налива вторият слой бетон. От всяко бъркало бетонна смес се изливат по три призми 100 mm x 100 mm x 400 mm за определяне на характеристиките на набрاليا якост бетон.



Фиг. 4. Изготвяне на експерименталните образци

Експерименталните тела са изпитвани чрез прилагане на концентрирана сила в оста на образеца, предадена в горната повърхност на образеца. Чрез така приложената сила работната равнина (повърхността между двата пласта бетон) е натоварена на срязващо усилие, стремящо се взаимно да премести едната повърхност спрямо другата. Концентрираната сила се прилага чрез хидравличен крик, който е свързан към силомер с цел отчитане на стойността на приложеното натоварване. Натоварването е статично, на стъпки, като между отделните стъпки се изчаква до притихване на деформациите в образеца. Експерименталното тяло, хидравличният крик и силомерът са свързани към безкрайно корав стоманен стенд, чиито деформации се пренебрежимо малки и не се отчитат.



Фиг. 5. Опитна постановка

Поведението на образеца при предаване на срязващо усилие чрез триене през равнината на срязване се следи чрез измерване на взаимните вертикални премествания и взаимните хоризонтални премествания на двете повърхности на работната равнина. От всяка страна на експерименталното тяло са монтирани по три механични деформометри – два от тях измерват хоризонталното преместване в горната и долната част на работната равнина и един отчита вертикалното преместване в средата на работната равнина. В началото и в края на всяка стъпка от статичното натоварване се отчитат стойностите от деформометрите.

3. Поведение на елемент, подложен на срязване чрез триене и анализ на получените резултати от проведените експерименти

3.1. Дефиниране на основните компоненти на носимоспособността на елемент, подложен на срязване чрез триене

Носимоспособността на срязване зависи от няколко взаимосвързани механизма на поведение на стоманобетонния елемент. Могат да бъдат обособени три основни компонента на носимоспособността:

- *кохезия* – към този обобщен компонент спадат адхезионните сили, вследствие на химическото и физическото сцепване на двете повърхности, както и

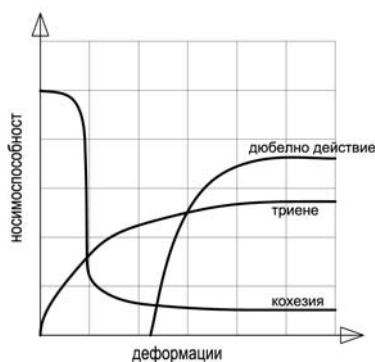
външните нормални напрежения, действащи перпендикулярно на разглежданата работна равнина;

- *триене* – към обобщеното понятие „триене“ се включват механичното зацепване на двете неравни повърхности вследствие на деформациите и триенето, породено от притискането на двете повърхности една към друга, вследствие на опънното усилие в армировката;
- *дюбелно действие на армировката* – носимоспособността на огъване на армировката.

Общата носимоспособност може да бъде условно представена чрез сума от горепосочените три механизма на поведение на изследваната работна равнина:

$$\tau = \tau_{\text{кохезия}} + \tau_{\text{триене}} + \tau_{\text{дюбелно действие}} \quad (1)$$

Въпреки че разделянето на отделните компоненти един от друг е некоректно поради тяхната взаимносвързаност, много важно е да се отбележи, че те не действат „едновременно“, т.е. през един и същ период от време (при едни и същи деформации). Всеки обобщен компонент на носимоспособността достига своята максимална стойност при различни деформации на двете повърхности на равнината на срязване (взаимното вертикално преместване на повърхнините и тяхното раздалечаване). Преди да се напука стоманобетонният елемент, компонентът на кохезията достига своята максимална стойност. С развитието на деформациите и раздалечаването на двете повърхности (раздалечаване, което поражда опън в армировката), триенето става основният механизъм на предаване на срязващото усилие през работната равнина. При много големи взаимни вертикални премествания на двете повърхнини (близки до граничните стойности) дюбелното действие в армировката развива своята максимална носимоспособност.



Фиг. 6. Обобщени компоненти на носимоспособността

В повечето световни конструктивни норми изразът за максимална носимоспособност при предаване на срязващо усилие чрез триене на отделните компоненти е без да се взема под внимание деформацията в работната повърхност. По тази методика се дава неикономично решение и се получава стойност за носимоспособността на срязване, която се развива при гранично преместване между двете повърхности. Също така в различните световни конструктивни норми не се вземат под внимание всички компоненти на носимоспособността. За основен обобщен компонент на носимоспособността се приема триенето, което най-пълно отразява механизма на предаване на срязващо усилие чрез триене.

- ACI 318-08:

$$T_{(\max)} = V_n = \underbrace{A_{yf} f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)}_{T_{\text{триене}}}; \quad (2)$$

- БДС EN 1992-1-1:

$$\tau_{(\max)} = v_{Rdi} = \underbrace{c f_{ctd} + \mu \sigma_n}_{\tau_{\text{кохезия}}} + \underbrace{\rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)}_{\tau_{\text{триене}}}; \quad (3)$$

- СЕВ-FIB ModelCode 2010:

$$\tau_{(\max)} = \tau_u = \underbrace{\tau_c + \mu \sigma_n}_{\tau_{\text{кохезия}}} + \underbrace{k \rho f_y (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)}_{\tau_{\text{триене}}} + \underbrace{\alpha \rho \sqrt{f_y f_{ck}}}_{\tau_{\text{дюбелно действие}}}. \quad (4)$$

В уравнения (2), (3) и (4) няма възможност за изчисление на носимоспособността на срязване в работната фуга при зададено отваряне на работната фуга (хоризонтално раздалечаване на двете повърхности).

3.2. Поведение на експерименталните тела по време на изпитването им и механизъм на разрушение

Всички шестнадесет експериментални образеца показват сходно поведение по време на натоварването. Само експерименталните тела, обработени с епоксиден лепилен състав по работната фуга, имат малко по-специфична работа вследствие на натоварването. Могат да бъдат описани следните етапи в поведението на образците:

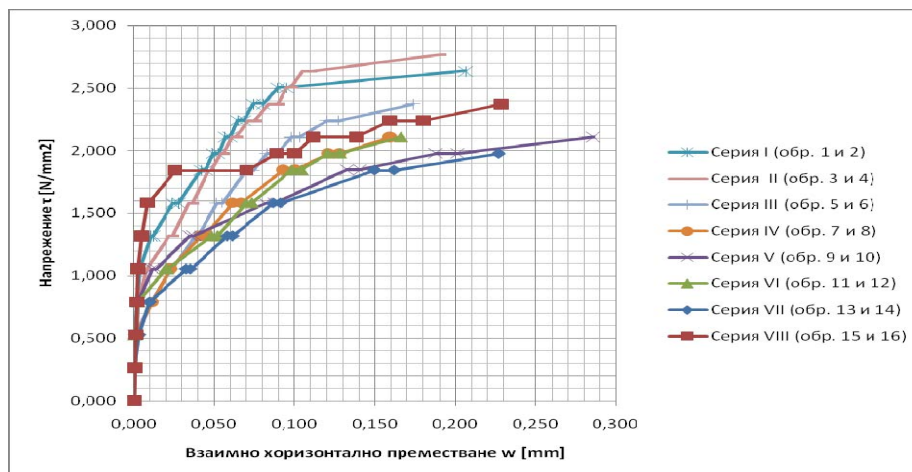
- **Етап 1.** Ниски стойности на натоварване, които изцяло се поемат от адхезионните сили в бетона. Не възникват деформации в експерименталното тяло. Натоварването се поема само от кохезионния компонент на носимоспособността, който се доминира пряко от якостта на бетона.
- **Етап 2.** При увеличаване на натоварването се наблюдава взаимно вертикално преместване на двете повърхности на работната фуга. Не се наблюдава видима пукнатина по дължина на работна фуга. Раздалечаването на двете повърхности е почти нулево. Срязващото усилие се поема от кохезионния компонент на носимоспособността и механичното зацепване на двете неравни повърхности (компонент триене). Поради нулевото раздалечаване на двете повърхности, липсва опънно усилие в армировката и съответно притискаща сила на едната повърхност към другата.
- **Етап 3.** Взаимно хоризонтално преместване на двете повърхности на работната равнина. Видима пукнатина по дължина на работната фуга и увеличение на взаимните вертикални премествания. Раздалечаването на двете повърхности води до опънно усилие в армировката и предаването на срязващото усилие е почти изцяло чрез компонента триене, т.нар. механизъм на срязване чрез триене (shear-friction). Този етап се характеризира с най-голяма „дължина“ на натоварването и почти линейна зависимост в работната диаграма на образеца „напрежение–деформации“.
- **Етап 4.** Големи стойности на хоризонталните и вертикалните деформации, пластично поведение на експерименталните тела. При някои образци се

наблюдават наклонени пукнатини спрямо работната равнина. Увеличение на взаимното раздалечаване на двете повърхности поради провлачване на армировката. Носимоспособността на срязване се поема от компонента на триене и дюбелното действие на армировката. В края на Етап 4 имаме разрушение на експерименталното тяло. При срязващо усилие е типично крехкото разрушение, но поради големите деформации в Етап 4, провлачването и дюбелното действие на армировката при предаване на срязващо усилие чрез триене може да се опише механизъм на разрушение с частична дуктилност.

При експерименталните тела с лепилен епоксиден състав по работната фуга се наблюдават специфични различия в поведението. Много по-високи адхезионни сили между двете повърхности на работната равнина и близо двойно по-голямо натоварване на тези образци в Етап 1 и Етап 2. След развитие на видима пукнатина в Етап 3 се наблюдават значително по-големи хоризонтални и вертикални деформации спрямо останалите серии образци. Могат да бъдат изведени следните заключения за образци с епоксиден лепилен състав по работната фуга:

- При напрежения, по-големи от опънната якост на бетона, фугата показва по-голяма адхезионна носимоспособност, без развитие на деформации.
- След образуване на пукнатина между двете повърхности, наличието на епоксиден състав намалява триенето между двете повърхности на разглежданата равнина, вследствие на което се развиват по-големи деформации.

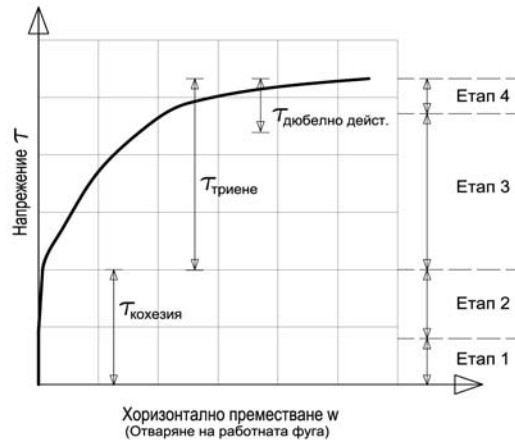
Всичките шестнадесет експериментални тела са групирани в осем серии с по два идентични образца. Диаграмата *напрежение в работната фуга/отваряне на пукнатина* при всички изпитвани образци има подобен вид. На фиг. 7 е дадена тази зависимост за всички серии:



Фиг. 7. Диаграма напрежение/взаимно хоризонтално преместване

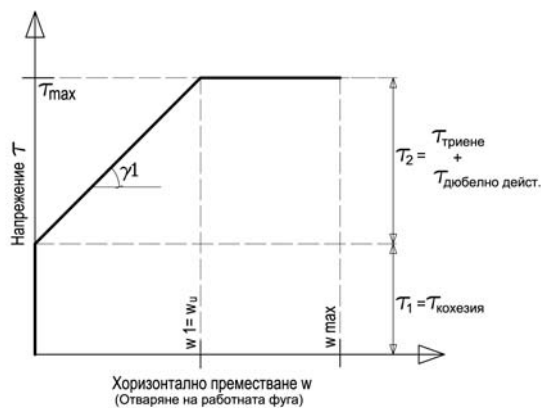
Ясно се забелязва, че телата с епоксиден състав по работната повърхнина (Серия VIII) имат много по-висок кохезионен компонент на носимоспособност и почти хоризонтална част на кривата след достигане на опънната якост на епоксидния състав. Също така може да се забележи, че промяна в количеството на фибрите в повърхностния пласт бетон не се отразява на поведението на армираната фуга. Серии V, VI и VII също развиват по-големи деформации за дадено напрежение, следователно поли-

пропиленовите фибри в зоната на срязване намаляват триенето между двете повърхнини. Наклон на кривата „напрежение в работната фуга/отваряне на пукнатина”, близък до хоризонтален, показва по-малка носимоспособност на срязване и по-голямо „приплъзване между двете повърхнини”. На базата на резултатите от проведените експерименти на фиг. 8 е дадена типова крива „напрежение/хоризонтални деформации” на поведението на армирана фуга при предаване на срязващо усилие чрез триене. Условно са отбелязани и границите на разгледаните по-горе етапи.



Фиг. 7. Типова крива напрежения/хоризонтални деформации

Както се вижда от фигурата, носимоспособността на срязване е представена от своите обобщени компоненти в зависимост от възникналите деформации. Поради тяхната взаимносвързаност и зависимост от всички параметри на работната равнина, точното им разграничаване е невъзможно. Също така при дадена деформация действат комплексно няколко компонента. Познаването на работната диаграма на елементи, подложени на срязване чрез триене, ще ни позволи по-точно да оразмеряваме и конструираме различните стоманобетонни елементи.



Фиг. 8. Опростена типова крива напрежения/хоризонтални деформации

Изчислението на носимоспособност на срязване при дадено хоризонтално преместване, по-малко от граничното, ще позволи оразмеряване на стоманобетонни еле-

менти за срязващо усилие и тяхното предпазване от поява на нежелано широки пукнатини. Типова крива от фиг. 7 може да бъде апроксимирана с по-проста линейна крива от фиг. 8.

4. Заключение

Създаден е теоретичен модел от четири етапа, описващ поведението на стоманобетонен елемент, подложен на предаване на срязващо усилие чрез триене. Отделните етапи са подобни за всички експериментални образци, като във всеки етап действа различен, обобщен компонент на носимоспособност със своята максимална стойност. Дадена е типова крива напрежение/деформации, представяща теоретичния модел.

Наличието на метални фибри в повърхностния пласт бетон не се отразява на триенето между двете повърхности и тяхната грапавост, както и върху крайната носимоспособност на срязване на работната фуга. Наличието на полипропиленови фибри намалява триенето между двете повърхности и телата с такъв тип фибри развиват по-големи деформации при дадено напрежение от останалите образци. Промяна в количеството вложени фибри не променя цялостния модел на поведение на образеца, подложен на срязване чрез триене.

Наличието на епоксиден лепилен състав по работната фуга води до по-различно поведение на стоманобетонния елемент, вследствие на натоварването. В началото на натоварването фугата показва значително по-голяма адхезионна носимоспособност, без развитие на деформации. След образуване на пукнатина между двете повърхности наличието на епоксиден състав намалява триенето между двете повърхности на разглежданата равнина, вследствие на което се развиват по-големи деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1992-1-1 “Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции – Част 1-1: Общи правила и правила за сгради”, 2007.
2. *Birkeland, P. and H. Birkeland.* Connections in Precast Concrete Construction. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 63, No. 3, March 1966, pp. 345-368.
3. Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08).
4. CEB-FIB Model Code 2010, First complete draft, Volume 1.
5. *Hofbeck, J., I. Ibrahim and A. Mattock.* Shear Transfer in Reinforced Concrete. ACI Journal, Proceedings, Vol. 66, No. 2, February 1969, pp. 119–128.
6. *Julio, E. N. B. S., F. A. B. Branco and V. D. Silva.* Concrete-to-concrete bond strength: influence of an epoxy-based bonding agent on a roughened substrate surface. University of Coimbra, Portugal; Technical University of Lisbon, Portugal Magazine of Concrete Research, 2005, 57, No. 8, October, 463–468.
7. *Mattock, A. and N. Hawkins.* Shear Transfer in Reinforced Concrete – Recent Research. Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 17, No. 2, March–April 1972, pp. 55–75.
8. *Walraven, J. C.* Experiments on shear transfer in cracks in concrete. Part II: Analysis of results. Report No. 5-79-10, November 1979, Stevin Laboratory, Delft University of Technology.

9. *Walraven, J. C.* Fundamental Analysis of Aggregate Interlock. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 107, No. ST11, November 1981, pp. 2245–2271.

10. *Walraven, J. C., E. Vos and H. W. Reinhardt.* Experiments on shear transfer in cracks in concrete. Part I: Description of results. Report No. 5-79-3, January 1979, Stevin Laboratory, Delft University of Technology.

Постъпила: април 2015 г.

EXPERIMENTS ON SHEAR TRANSFER IN CONSTRUCTION JOINTS IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

H. Hristodulov¹, M. Andreev²

Keywords: *shear-friction, concrete-to-concrete shear transfer, construction joints, steel and polypropylene fibers, epoxy resin,*

Research area: *reinforced concrete, reinforced concrete structures*

ABSTRACT

This paper describes the experimental behaviour of shear transfer in construction joints in reinforced concrete. Sixteen push-off specimens are tested. The different stages during loading of the experimental samples are considered. Type stress-strain curve is presented. The influence of fibers in one of the concrete layers as well as the presence of epoxy resin in construction joints is reported.

¹ Hristo Hristodulov, Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: hristo_hristodulov@abv.bg

² Metodi Andreev, Chief Assist. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ekonproekt@dir.bg

