



Получена: 18.03.2018 г.

Приета: 22.10.2018 г.

ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ МОДЕЛИРАНЕ И ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ВЕРТИКАЛЕН ЕЛЕМЕНТ, ИЗПЪЛНЕН ОТ БЕТОН ПО ТЕХНОЛОГИЯТА НА 3D ПЕЧАТА

Р. Захариева¹, С. Първанова², В. Кърджиев³, Ж. Добелаере⁴

Ключови думи: 3D принтиране, бетон, моделиране, МКЕ, оразмеряване

РЕЗЮМЕ

Въпреки бурното навлизане на технологията на 3D печата в строителството през последните години, включително с принтирането на сгради, все още няма достатъчна информация и експериментални данни относно поведението на отделните конструктивни елементи, нито на носещата конструкция като цяло. Настоящата статия разглежда основните предизвикателства и възможни решения за определяне на носещата способност и необходимата коравина чрез статически изчисления и оразмерителни проверки на стена със сложна форма (спираловидна в план) като самостоятелен обект с декоративни функции, чието изпълнение по конвенционален метод би било твърде трудоемко. Установено е, че технологията на 3D печата води до създаване на конструктивни елементи със сложна структура от слоест материал (бетон) с анизотропни свойства, което изисква адаптиране на статическия модел чрез метода на крайните елементи, както и прилагането на специфичен подход при оразмеряването и детайлирането.

¹ Румяна Захариева, доц. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

² Соня Първанова, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: slp_y@abv.bg

³ Васил Кърджиев, проф. д-р инж., кат. „Масивни конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kardjiev@abv.bg

⁴ Жил Добелаере, инженер проекти, BESIX Group, 100 Avenue des Communautés, 1200 Woluwe-Saint-Lambert, Belgium, e-mail: giles_dobbelaere@hotmail.com

1. Въведение

3D печатът е (сравнително) нова технология за изграждане на тримерни обекти чрез наслагване на материал в последователно разположени във височина пластове, като дейностите се контролират от компютър. Понастоящем 3D печатът намира приложение в най-различни области и е една от най-интензивно развиващите се технологии – както по отношение на формата и големината на обектите, така и по отношение на материалите.

По отношение на строителството обаче, 3D печатът доскоро „изоставаше“, но след 2004 г. са налице първите пробни реализации чрез истински голямоформатни 3D принтери, а през 2013 г. е пусната в експлоатация първата работеща версия на 3D принтер за сградни елементи. През последните години нараства броят на строежите в експлоатация, които са били изпълнени с 3D печат.

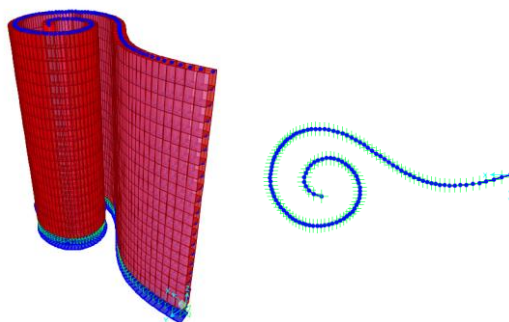
Оценката на технологията на 3D печата в контекста на устойчивото строителство не е еднозначна – технологията е атрактивна с предимствата си (роботизирано изпълнение, бързина на строителство, прецизност и възможност за изпълнение на сложни архитектурни форми) и предлага решения за специфични приложения. В същото време, има редица ограничения, които понижават ефективността на 3D печата – приложима е за директен печат *in-situ* само за вертикални и сводови елементи, но не и за хоризонтални конструктивни елементи. Необходимо е да се изпълняват допълнително конструктивни мерки (например полагане и замонолитване на армировка), довършителни работи и др. Високата себестойност на технологията при индивидуални изпълнения също ограничава приложението ѝ. От друга страна, обаче, технологията има сериозен потенциал за положително въздействие върху условията на труд в строителството, развитието на други сектори на икономиката, оползотворяването на отпадъци и бързото осигуряване на подслон след природни и антропогенни бедствия и катастрофи [1].

За да може обаче да бъде прилагана тази технология у нас, е необходимо разработване на национално know-how, включващо създаване на специални състави (най-често – финозърнести бетонови смеси) за печат, на машини (тип екструдери) за полагането им, адаптиране/създаване на специализиран софтуер и на индустриални роботи и др. Не на последно място, необходимо е да се изследват особеностите при моделиране и оразмеряване на 3D печатани сгради и елементи и да се предложи методика, приложима към конструктивните елементи за осигуряване на тяхната носеща/самоносеща способност както по време на печата, така и при експлоатацията на сградите и съоръженията.

2. Постановка на задачата

След проведения SWOT анализ за приложението на технологията на 3D печата в контекста на устойчивото развитие, с отчитане на екологичния, социалния и икономическите аспекти бе установено, че в български условия като най-перспективно се очертава изпълнението на индивидуални елементи и на сложни архитектурни форми в не-големи размери, както и монолитното изпълнение на малки индивидуални жилища в райони, пострадали от бедствия (пожар, земетресение, обгазяване), където традиционните технологии крият рискове за здравето на работниците и/или се нуждаят от по-дълго време за елиминиране на последствията от бедствията [1].

Настоящата статия разглежда основните предизвикателства и възможни решения за определяне на носещата способност и необходимата коравина чрез статически изчисления и оразмерителни проверки на спираловидна стена като самостоятелен обект с декоративни и/или преграждащи функции, изпълнена в градска среда – фиг. 1.



Фиг. 1. 3D изглед и напречен разрез на самостоятелна спирална стена

3. Състав и свойства на материала за 3D печат

3D печатът в строителството може да бъде реализиран с различни материали – от естествени материали (глина, гипс), през дребнозърнести бетони до полимери, но досега най-голямо разпространение са получили материалите на основата на силикатни свързващи вещества (портландцимент и смесени свързващи вещества). Изискванията към смесите и към свойствата на втвърдения бетон, с оглед на приложението му за 3D печат, са дискутирани в предишна публикация [2]. В нея е представен и разработеният в рамките на проекта състав (финозърнеста смес на база смесено свързващо вещество от портландцимент, микросилициев прах и летяща пепел, кварцов пясък и полипропиленови влакна), като е приета технология на печата от тип „Изграждане на контури“ (“Contour crating – CC”) – принтират се външен и вътрешен контур, като пространството между тях се запълва със зигзагообразна част [3, 4] – фиг. 2, или се залива с бетонна смес. Тъй като съставът на материала влияе изключително много върху възможностите (и ограниченията) на 3D печата, технологичните параметри са моделирани теоретично и в лабораторни условия, така че да се оптимизират подходящите рецептури [5].



Фиг. 2. Изграждане на контури в University of Southern California [4]

За настоящите изследвания съставът на матрицата е модифициран посредством частична замяна на кварцовия пясък с рециклиран пясък от санитарна керамика (фракция 1,2 – 1,6 mm, в количество 605 kg/m^3), което наложи повишаване на водосвързващото отношение от 0,26 на 0,36 за постигане на нужната обработваемост. В резултат на

тези промени бяха постигнати следните характеристики на материала (на 28-дневна възраст):

- Обемно тегло: $1,980 \cdot 10^{-8} \text{ kN/mm}^3$, като обемната плътност е определена по БДС EN 12390-7:2009;
- Якост на натиск: $f_c = 50,9 \text{ MPa}$, определена по БДС EN 12390-3:2009;
- Якост на опън при разцепване: $f_t = 3,32 \text{ MPa}$, определена по БДС EN 12390-6:2009;
- Якост на опън при огъване: $f_f = 8,56 \text{ MPa}$, определена по БДС EN 12390-5:2009;
- Модул на еластичност: $E = 24 \text{ GPa}$, определен по БДС EN 12390-13:2013;
- Коефициент на Поасон: $\mu = 0,22$, определен по ASTM C469 / C469M – 14;
- Модул на срязване: $G = 9,9 \text{ GPa}$;
- Коефициент на температурно разширение: $\alpha = 1,000 \cdot 10^{-5} \text{ mm/}^\circ\text{C}$, определен по методика CRD-C39-81 [6];
- Съсъхване (във възд. суха среда): $0,57 \text{ mm/m}$, определено по ASTM C157 / C157M – 17.

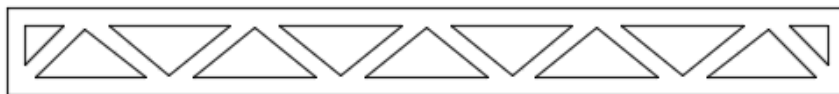
Елементите, изпълнени с СС технологията се отличават с анизотропност във вертикално направление, поради полагането на материала на слоеве – в случая с дебелина 8 – 9 mm. Сцеплението между различните слоеве на 3D принтирания елемент е важна мярка за способността на бетона да предава натоварванията между отделните слоеве. За определянето му е адаптирана методика от БДС EN 1015-12:2016. Сцеплението е измерено при вариране на времето на полагане на следващия слой, респективно 10 мин. и 20 мин. При пробните тела, печатани през интервал 10 мин., на възраст 28 дни, разрушението е между металната плоча и първия слой при напрежение 2 MPa, което показва, че адхезията е по-голяма от 2 MPa. При интервал 20 мин., разрушението е между двата бетонни слоя при напрежение 2,4 MPa. В заключение е приета стойност на сцеплението от 2 MPa, тъй като при спираловидната стена интервалите между слоевете биха били много по-малки от 20 мин.

4. Въздействия върху стената и моделиране

Моделирането на спираловидната стена е направено с програмния продукт SAP 2000. То отчита характеристиките на материала, вида на напречното сечение, геометрията на стената, опорните условия и основните степени на свобода, различните видове натоварвания и техните комбинации и др. Изчисленията и основните проверки са направени за опростени варианти на спираловидната стена, тъй като не е известен точният механизъм на въздействие на натоварванията от вятър върху модела. Характерът на това въздействие върху стената и съответните участъци със завишени стойности е нужно да бъдат установени експериментално. Опростеният модел разглежда единица дължина от стената, както и цялата дължина на стената, но с праволинейна геометрия, а не спираловидна.

Поради слоестата си структура бетонът в елементи, произведени с 3D принтиране, е с нелинейно поведение и анизотропен. Въпреки това, при моделирането на стената е възприета линейна зависимост в работата на бетон и армировка, което може да се обоснове с факта, че за този вид конструкции разликите между линейно и нелинейно поведение не са от първостепенна важност и могат да бъдат пренебрегнати. По отношение на анизотропията, модулът на еластичност E е изпитван само в посока перпендикулярна на слоевете, т.е. взета е най-неблагоприятната (най-ниската) стойност. За опростяване е прието, че материалът е изотропен и е използван установеният минимален секантен модул на еластичност.

Поради трудностите в определяне на възможните товарни въздействия и поради недостатъчната информация относно поведението на такъв тип елементи се изследва един линеен метър от правоъгълна свободно стояща стена с височина 2,0 m, както и стена с дължина 2,10 m. Напречното сечение е правоъгълно или плътно, моделирано като черупков (shell) елемент с дебелина 10 cm. Това е най-простото възможно напречно сечение за 3D принтери и може да се оформи от 3 слоя (1 вътрешен и 2 външни). Възможно е също да се оформи профил във вид на решетка или блокове, но това затруднява моделирането им в SAP2000. В настоящото изследване този проблем е решен, като е моделирано еквивалентно плътно правоъгълно сечение за решетъчния профил. Прието е двете сечения да имат еднаква коравина и би следвало да се получат сходни резултати. Дебелината на слоевете (вътрешен и външен) е 2,0 cm, а ъгълът между тях е 45° – фиг. 3.



Фиг. 3. Напречно сечение на 3D принтираната стена

След направено сравнение на резултатите за разрезните усилия в основата на стената с двете различни сечения (плътно и решетъчно) за пет различни комбинации от натоварвания е установено, че максималната разлика е под 5%, т.е. резултатите за практически цели може да се приемат еднакви.

Направени са също проверки на преместванията в горната част на стената за различни комбинации от натоварвания. Резултатите показват, че разликите в техните стойности са под 10%. Следователно моделираното еквивалентно правоъгълно напречно сечение може да се използва в по-нататъшните изчисления вместо варианта с решетъчно напречно сечение.

За представяне на еквивалентното напречно сечение са избрани черупкови равнинни елементи (shell), които могат да работят като тънки еластични или дебели черупки. С първите се пренебрегва деформацията от напречно срязване, а вторите отчитат тази деформация. В настоящото изследване са използвани тънки черупкови елементи с дебелина 100 mm. Прието е свойствата на бетона, които иначе биха се изменили в течение на времето, да са непроменливи и са заложили стойностите, отговарящи на 28-дневна възраст.

При 3D принтирането структурата на елемента се формира слой по слой, което я прави нехомогенна и тази особеност е отчетена в модела. Якостта в контактната зона между всеки 2 слоя е разпределена между слоевете пропорционално на размерите на елементите. Прието е, че връзката между слоевете е еластична (реализирана чрез еластични пружини).

Възможните товарни въздействия върху стената са приети съгласно изискванията на системата конструктивни Еврокодове, като бяха отчетени следните видове:

- постоянни товари – от собствено тегло;
- ветрово натоварване – съгласно приетия модел в EN 1991-4, като се взима под внимание само статичната компонента поради малката височина на стената;
- случайни товари – от възможен удар на превозно средство.

Съответните товарни комбинации за крайни и експлоатационни гранични състояния са определени съгласно изискванията на БДС EN 1990.

5. Резултати и дискусия

5.1. Анализ на модела

Направени са проверки за експлоатационно и крайно гранично състояние на стената с единична дължина. Направени са анализи и с нелинеен модел, но още при първите стъпки от изчисленията с него са получени погрешни резултати. Грешките могат да бъдат обяснени с неточното моделиране на работата на пружините при натоварване извън равнината на модела. Ситуацията е аналогична и за стената с по-голяма дължина.

Ключов момент при моделирането на 3D принтирани елементи е да се познава характерът на взаимодействие между отделните слоеве. Пружинната връзка не работи за натоварвания извън равнината, а те са преобладаващи в този модел. Не е възможно да се изчислят необходимите характеристики на пружините поради липса на достатъчно данни. Например в модела липсва ротационна степен на свобода, а би трябвало да е включена, защото shell-елементите и натоварванията извън равнината предполагат огъващи моменти. Изследвана е и коравината на стената във и извън равнината и е установено, че коравината в равнината (както се очаква) е значително по-голяма от тази извън равнината.

След направени промени в натоварването на стената (премахване на натоварванията от вятър и удар) е проведено нелинейно изследване. Направени са модификации и в свойствата на пружинните елементи – освободени са преместванията в двете направления в равнината x и y и в двете посоки е зададена еднаква коравина. Проследени са резултатите за зависимостите напрежения и деформации. До натоварвания около 250 kN поведението на стената е линейно, след което преминава в нелинейно до максималното натоварване от 332 kN. Това е якостта, която съответства на носещата способност в равнината на стената. Установено е, че включването на пружинните елементи (нелинеен модел) намалява носещата способност на стената значително (повече от 10 пъти). Това доказва, че изследването на връзката между слоевете е от изключително значение за анализа и изчисляването на този тип елементи.

5.2. Работа на еластичните пружини

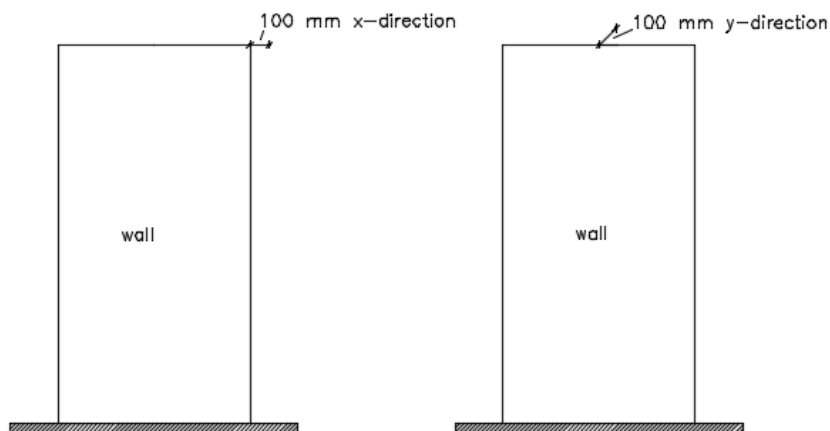
Връзките на възлите са най-важният компонент на стената и те са моделирани с еластични пружини. Те се включват, за да опишат връзката между съседни слоеве на стената, но по този начин се появява и проблемът с нелинейния анализ. Пружините не работят за натоварвания извън равнината на модела, а те доминират. В модела не е включена ротационна степен на свобода, а тя би трябвало да присъства, защото черупко-

вите елементи и натоварванията извън равнината на модела предполагат наличието на огъващи моменти и ротационна степен на свобода.

Когато стената е подложена на натоварвания, нормални към равнината, тя по-скоро работи като плочов елемент, но това не отразява принципите, според които е моделиран 3D принтираният елемент.

5.3. Сравнение на коравините в различните направления

Коравината в двете направления може да се провери, когато не са включени еластични връзки и тогава се прави линеен анализ. Методът, по който се получават резултатите, е чрез натоварване на стената със съответните премествания – 100 mm по направление x и 100 mm по направление y – вж. фиг. 4.



Фиг. 4. Местоположение на приложените премествания [7]

Получени са резултати за преместванията и при двете положения (табл. 1). Видно е, че възлите в мястото на приложените премествания всъщност имат преместването от съответния случай. Другият възел също се премества, но в по-малка степен. Освен получените премествания е възможно да има и премествания във вертикално направление.

Таблица 1. Деформации във възлите вследствие на приложените премествания [7]

Възел	Посока на натоварване	U_x [mm]	U_y [mm]	U_z [mm]
Среден	Преместване по x	81,141	0,000	0,461
Страничен	Преместване по x	100,000	0,000	-35,250
Среден	Преместване по y	0,000	100,000	-0,002
Страничен	Преместване по y	0,000	98,802	-0,002

Като резултат от анализа могат да се определят и реакциите, на база на които могат да се изведат стойности за коравината в двете направления. Табл. 2 представя получените резултати.

Таблица 2. Реакции във възлите вследствие на приложените премествания [7]

Възел	Посока на натоварване	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]
Среден	Преместване по x	0,000	0,000	0,000
Страничен	Преместване по x	5253,854	0,000	0,000
Среден	Преместване по y	0,000	76,384	0,000
Страничен	Преместване по y	0,000	0,000	0,000

Реакциите в страничната част и в средата съответно по x и по y потвърждават факта, че стената е със значително по-голяма коравина в равнината на модела, отколкото извън равнината.

5.4. Адаптирана комбинация на натоварване

Ако върху стената се приложат натоварвания извън равнината на модела, плочата би трябвало да работи като плочов елемент, т.е. да има една трансляционна и две ротационни степени на свобода. Както беше споменато по-горе, не е известно как се развива ротационното поведение на стената. Не са провеждани експерименти, с които да се симулира ротационният капацитет на материала, така че не е известна кривата „огъващ момент-завъртане“. Би било добре това да се проучи в бъдещи изследвания. В резултат от липсата на достатъчно информация пружините са моделирани само с 1 трансляционна степен на свобода (глобално по посока y) и без ротационна степен на свобода, което съответно води до грешки в модела.

За да се проучи поведението на пружините, а оттам връзката между два съседни слоя, е необходимо да се приложат натоварвания в равнината на модела. Получава се равнинно напрегнато състояние, което е такова, че ненулевите компоненти на напреженията действат само в една равнина. Това означава, че едно от главните напрежения, тук по направление y , е 0. Ето защо в модела са позволени само две трансляционни степени на свобода и нито една ротационна. Ако това напрегнато състояние е моделирано правилно, би трябвало пружините да работят правилно.

Схемата на натоварването в равнината на модела на стената не е развита според препоръките на Еврокод 1. Не са търсени отново специфични стойности за вятър, сняг и случайни натоварвания, така че като препоръка това би могло да се направи при по-нататъшни изследвания. Приложеното натоварване в равнината на модела на стената е също приложено преместване – 100 mm е необходимата стойност, за да се осигури значителна деформация на стенния елемент и пружините да работят правилно. От разрезните усилия в конкретния възел е възможно да се изведат и други схеми на натоварване (точков товар, разпределен линеен товар, триъгълно разпределен линеен товар, и др.); те биха имали същото влияние върху стената.

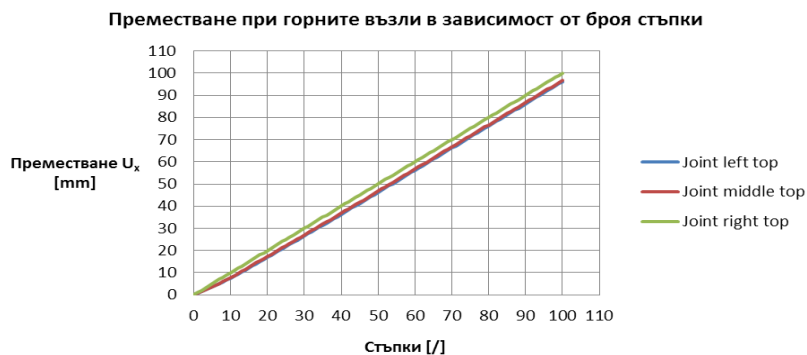
Някои от параметрите на натоварване претърпяват промяна – премахнати са натоварванията от вятър и удар, а е приложено само преместване 100 mm по направление x в горния десен ъгъл на стената. Дефиниран е нов случай на натоварване, който е нелинеен, така че на стъпки са изследвани множество напрегнати състояния за диапазон на приложените премествания от 100 mm до 200 mm. Останалите параметри на натоварването са оставени по подразбиране.

В конкретната точка е зададено ограничение на трансляцията на възела по направление x , без което не е възможно да се приложи преместването от 100 mm по положителната посока на оста x .

Свойствата на еластичните пружини също трябва да се променят. Натоварването действа по посока на оста x и трансляцията по x не може да бъде фиксирана. По направление x са зададени стойности на коравината, еднакви с тези на коравината по y , тъй като изпитването на якост на опън при разцепване е проведено за материала по принцип. Към свойствата на 1 слой еластични пружини е зададена коравина на пружините 1000 kN/mm и якост на опън при разцепване f_{ts} of 3,316 N/mm².

5.5. Резултати от статичния модел

След провеждане на изчисленията са получени кривите на взаимовръзката между приложена сила и преместване. Деформациите при левия, средния и десния възел са визуализирани като функция от изчисленията при всяка стъпка (фиг. 5).



Фиг. 5. Хоризонтални премествания на горните възли [7]

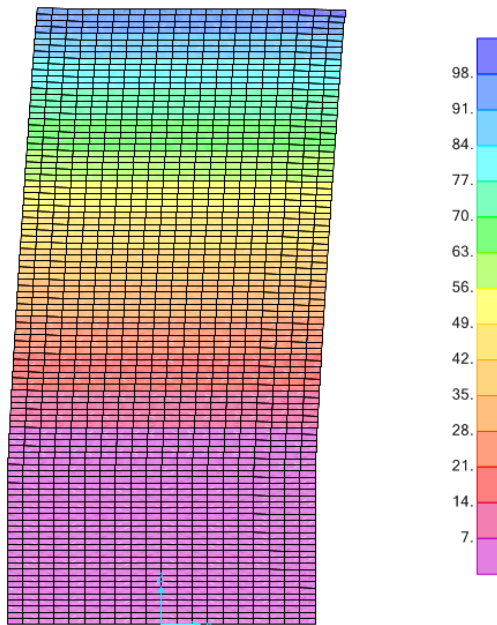
Преместването е приложено на 100 стъпки, като при всяка стъпка то се завишава с 1 mm и в резултат е получена линейна крива. Левият горен и средният горен възел имат малко по-малко преместване вследствие на коравината на стената и отговарящите им графики (синя и червена линии) практически съвпадат. Следователно, след началото на прилагане на преместването се получава по-малко увеличаване на преместването, но след приблизително 20 стъпки кривите са успоредни.

Възможно е също да се сравнят преместванията при 50 cm (височина на стената, при която няма еластични пружини и до която е прието, че спират армировъчните пръти) с преместванията на горните възли. Таблицата по-долу представя получените максимални стойности.

Таблица 3. Максимални премествания U_x [7]

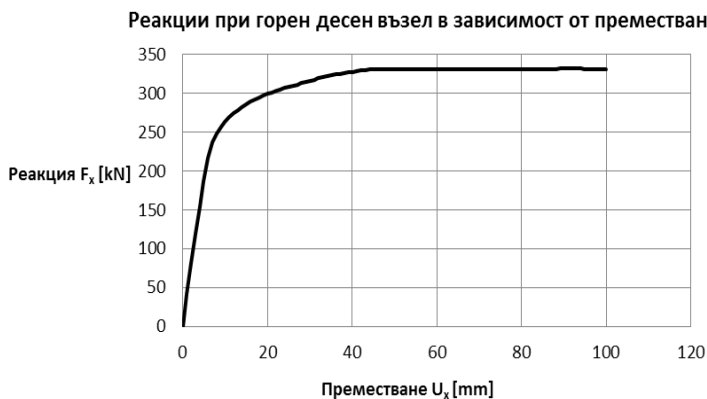
Възел	Преместване [mm]
Ляв горен	96,175
Ляв 50 cm	0,961
Среден горен	96,735
Среден 50 cm	0,743
Десен горен	100
Десен 50 cm	0,993

Ясно е, че стената има много малки премествания при върха на армировката. Това има смисъл, тъй като под тази височина не са задавани пружини, т.е. в тази част от стената е налице линейно поведение. След 50 cm височина до горния край на стената максималните премествания се увеличават до 100 mm при дясната част (фиг. 6).



Фиг. 6. Визуализация на преместванията по $x - U_x$ [7]

Фиг. 7 по-долу представя кривата „сила-премествания“ на горния десен възел, върху който е приложено преместването. Кривата показва линейно поведение до реакция около 250 kN. След това нелинейното поведение е преобладаващо, а максималната получена реакция е 332 kN. Това е усилието, което съответства на носещата способност в равнината на модела на 3D принтираната бетонна стена. Както беше споменато, носещата способност извън равнината на модела е много по-малка, но не може да бъде изчислена с наличните към момента на изследването данни.



Фиг. 7. Крива „реакция-преместване“ за възел с приложено преместване [7]

Когато се сравнят линейният и нелинейният вариант на стената, се вижда, че включването на пружините, които моделират връзките между съседните слоеве при принтиране, води до значително намаляване на носещата способност. Носещата способност при линейния модел е 5254 kN, което е 10 пъти повече от носещата способност при нелинейния модел. От тези резултати става ясно, че връзките между съседните слоеве играят значителна роля при анализа. Препоръчително е да се продължат изследванията за параметрите на връзките, за да се изяснят специфичните механизми на разрушение.

5.6. Проверка на носещата способност на свободно стояща стоманобетонна стена

Първоначалните апроксимации на модела на 3D стената не предоставят надеждни резултати и по-конкретно, не са ефективни при натоварвания извън равнината на стената. Ето защо, в допълнение към тях са направени допълнителни проверки за осигуряване на устойчивостта на стената.

Първоначално са проведени проверки за необходимата дебелина на стената за поемане на преобръщащите моменти при условие, че се разчита само на собственото ѝ тегло.

Проверка за преобръщане е направена в долната и средната част на стената за лицевата ѝ част. За стената с дължина единица е установено, че минималната необходима дебелина в долната част е 321 mm, а в средната – 228 mm. Тези дебелини обаче са твърде големи за 3D принтирани елементи поради изцяло естетически съображения. За цялата стена са получени съизмерими резултати. Проверките за сечението с решетъчно напречно сечение и за еквивалентното сечение водят дори до още по-големи дебелини.

Съгласно Еврокод 2, основното изискване за усилията на срязване в контактната зона между слоеве, полагани по различно време, е да са по-малки от якостта на срязване на контактната зона. За изчислените необходими минимални дебелини на двата вида стени е установено, че проверката е удовлетворена без проблем, а освен това има и достатъчен резерв от якост на срязване, което означава, че сечението може да бъде редуцирано.

Извършена е и проверка за напреженията в напречното сечение от огъващи моменти и осови сили. Проведена е за различни части от стената при използване на вече изчислените дебелини на стената в долната и средната ѝ част. Изчисленията показват, че якостта на връзката между слоевете, якостта на огъване и якостта на натиск са достатъчни за поемане на разглежданите натоварвания.

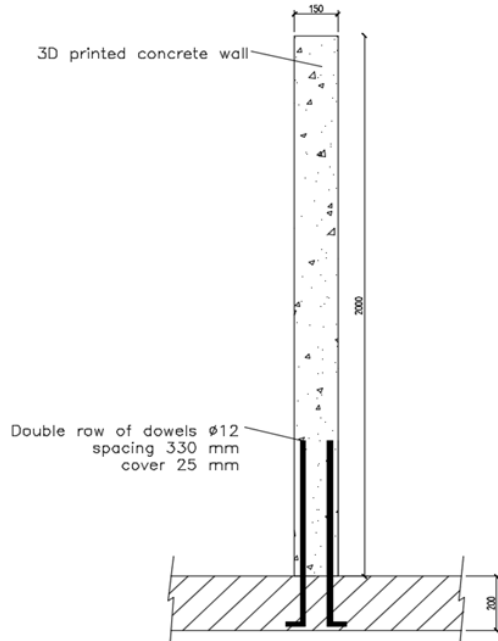
Следователно, за намаляване на дебелината в основата на стената е предвидена вертикална надлъжна армировка за връзка с фундаментната конструкция и за поемане на преобръщащите моменти. Необходимата площ на напречно сечение на тази армировка е определено от съответните проверки на срязване в работната фуга в основата на стената и от проверките в крайно гранично състояние на огъване, комбинирано с надлъжна натискава осова сила. Разположението на тази армировка е възможно в двата външни слоя на решетката на 3D принтираната стена, като тази армировка може да се третира и като армировъчни дюбели, заложи в основата – фиг. 8.

Изследването показва, че необходимата площ на напречното сечение на тази армировка е минимално и се избира по конструктивни съображения, но по този начин е възможно ограничаване на необходимата дебелина на стената.

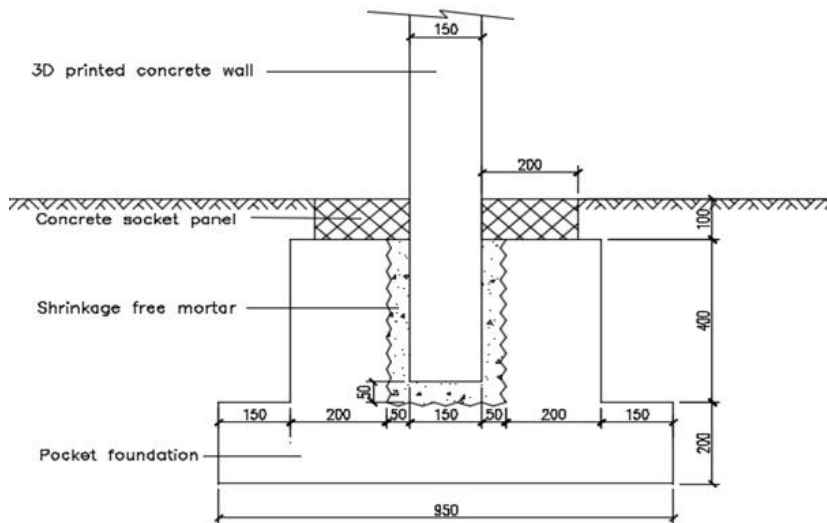
Предложено е и алтернативно решение с използването на чашковидни сглобяеми фундаменти или монолитно изпълнен стоманобетонен фундамент със заложи преди бетониране сглобяема чашка – фиг. 9. Проведени са необходимите изчисления за доказ-

ване на размерите на основната плоскост на фундамента и необходимата дълбочина на замонолитване на 3D принтираната стоманобетонна стена.

В този случай на особената комбинация с включване на въздействията от удар на превозно средство е допуснато отлепване в основната плоскост, като е ограничена дължината на отлепената зона след изключването му и съответно е проверено полученото максимално напрежение спрямо приета осреднена стойност на изчислителното почвено натоварване.



Фиг. 8. Армировъчни дюбели за връзка с основата и за поемане на преобръщащите моменти [7]



Фиг. 9. Препоръчителни размери на чашковидния фундамент [7]

6. Изводи и насоки за бъдещи изследвания

Въпреки бурното развитие в последните години на принтирането на строителни конструкции и елементи с 3D принтери все още няма достатъчна информация и събрани експериментални данни относно проверките за носеща способност и коравина на отделните конструктивни елементи, както и на цялата носеща конструкция. Следователно, необходимо е създаването на изчислителен пространствен статически модел чрез метода на крайните елементи, идентифициране на особеностите при статико-динамично моделиране и предлагане на възможни решения за определяне на носещата способност и необходимата коравина чрез статически изчисления и оразмерителни проверки на самостоятелен вертикален елемент – свободно стояща стоманобетонна стена със специфична форма.

Задачата се усложнява и от липсата на достатъчно експериментални данни относно коравината и носещата способност на принтирания елемент при различни варианти на конфигурация на основната решетка и последователността в нейното принтиране.

Ключов момент при моделирането на 3D принтирани елементи е да се познава характерът на взаимодействие между отделните слоеве – пружинната връзка не работи за натоварвания извън равнината, а те са преобладаващи в този модел. Не е възможно да се изчислят необходимите характеристики на пружините поради липса на данни. Необходимо е изследванията на връзките да продължат, за да се изяснят специфичните механизми на разрушение.

В резултат от възникналите проблеми при изчисленията в модела, може да се направи препоръка за промяна на постановката за натоварванията. Би било по-подходящо 3D принтираната стена да се разглежда не самостоятелно, както е в настоящото изследване, а като част от сграда (къща). В този случай натоварванията не биха били нормални към shell елементите, а в равнината на модела. Този подход би бил интересен да се проследи в по-нататъшни изследвания.

В бъдещите изследвания е необходимо да се провери и връзката между отделните принтирани по височина на елемента слоеве при отчитане на действащите хоризонтални въздействия, особено в случая, при който тези елементи са от носеща конструкция на сграда, която е необходимо да бъде осигурена и за сеизмични въздействия. В тези случаи на практика се разчита на силите на триене, които се получават в контактната повърхност, но е възможно да се наложи и поставянето и на вертикална надлъжна армировка и съответно ограничаване на напречните деформации в крайните участъци на тези стени за предотвратяване на възможността от крехко разрушаване на тези зони при сеизмични въздействия.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-192/2016 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Захариева, Р., Кънчева, Я.* SWOT-анализ на технологията на 3D печата в контекста на устойчивото строителство. Сборник доклади от VIII Межд. научна конф. по архитектура и строителство AgCivE 2017, 01 – 03 юни 2017, Варна.

2. *Zaharieva, P., Boшнаков, Д.* Предиизвикателства пред създаването на материал за приложение на технологията на 3D печата в строителството. Сборник доклади от Межд. научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, Варна, 15-17 септ. 2016 г.

3. *Khoshnevis, B. & Bekey, G.* (2002). Automated construction using contour crafting – applications on earth and beyond. Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, National Institute of Standards & Technology Special Publication, 989, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg, MD, pp. 489–494.

4. USC Craft, www.contourcrafting.org, посетен на 14.04.2017 г.

5. *Иванова, Ст., Zaharieva, P.* Особенности при моделирането на елементи, изпълнени от бетон по технологията на 3D печата. // Годишник на УАСГ, 2017 г., том 50.

6. CRD-C39-81 Test method for coefficient of linear thermal expansion of concrete, U.S. Army Corps of Engineers, <https://www.wbdg.org/ffc/army-coe/standards/crd-c39>, посетен на 10.01.2018.

7. *Dobbelaere, G.* Dimensioning and static model of 3D concrete printed vertical element. Dissertation for obtaining the Master's Degree in Civil engineering, UACEG, Sofia, June 2017.

CHALLENGES IN DIMENSIONING AND STATIC MODEL OF 3D CONCRETE PRINTED VERTICAL ELEMENT

R. Zaharieva¹, S. Parwanova², V. Kardjiev³, G. Dobbelaere⁴

Keywords: 3D printing, concrete, static modelling, finite elements method, dimensioning

ABSTRACT

Despite the storming of 3D print technology in construction in recent years, including printing of multistore buildings, there is still insufficient information and experimental data on the behaviour of the individual structural members or of the supporting structure as a whole. This paper discusses the main challenges and possible solutions for determining the bearing capacity and stiffness required by static calculations and dimensioning checks of a complex shape (helical in plan) 3D printed concrete wall as a standalone object with decorative function whose conventional construction would be too labour-intensive. It has been found that 3D printing technology leads to the creation of structural elements with a complex structure made of layered material with anisotropic properties, which peculiarities require adaptation of the finite element based static model as well as application of a specific approach to dimensioning and detailing.

¹ Roumiana Zaharieva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

² Sonia Parwanova, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: slp_y@abv.bg

³ Vasil Kardjiev, Prof. Dr. Eng., Dept. “Reinforced Concrete Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kardjiev@abv.bg

⁴ Giles Dobbelaere, Project Engineer, BESIX Group, 100 Avenue des Communautés, 1200 Woluwe-Saint-Lambert, Belgium, e-mail: giles_dobbelaere@hotmail.com