

4. Guseinov R.V., Agakhanov E.K., Rustamova M.R. Instrumental support of technology of processing of threads in heat-resistant and titanium alloys // Bulletin of Dagestan state technical University. Technical science. 2013. № 1 (28). S. 57-62.
5. Guseinov R.V., Rustamova M.R. Improvement of processing of small diameter holes // Bulletin of mechanical engineering. 2012. No. 9. P. 50-52.
6. Guseinov R.V., Rustamova M.R. Improving the machining of small holes // Russian Engineering Research. 2013. Vol. 33. No. 1. P. 29-31.

УДК 531/534:[57+61], 539.3

<https://doi.org/10.26160/2618-6810-2019-2-170-173>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛА С УЧЕТОМ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИЕЙ

Герасимов О.В., Мухин Д.А., Семенова Е.В., Яикова В.В., Харин Н.В.
Казанский (Приволжский) федеральный университет, г.Казань

Ключевые слова: математическое моделирование, негомогенные среды, компьютерная томография, метод конечных элементов, цифровой прототип.

Аннотация. В работе рассматривается один из возможных численных подходов к описанию процессов деформирования гетерогенных сред под действием внешних нагрузок, основанный на моделировании структуры расчетной области с учетом данных ее компьютерной томографии. Предлагаемый подход позволяет моделировать поведение пористой среды с учётом ее структурных свойств на основе методов неразрушающего контроля. На первом этапе исследования методом компьютерной томографии проводится сканирование расчетного образца, далее полученные данные оцифровываются, после чего цифровой прототип структуры образца с соответствующими весами вносится в конечно-элементный алгоритм расчета на этапе формирования локальных матриц жесткости расчетной области, интегрирование которых проводится методом центральных прямоугольников. В работе проведена оценка влияния данных томографического исследования на сходимость предложенной численной методики, решены тестовые задачи. Приведены результаты решения модельной задачи для участка диафиза бедренной кости. Полученные численные результаты отображают влияние точности аппроксимации геометрии образца, а также иллюстрируют зависимость поля перемещений от структуры материала.

В настоящее время наиболее перспективным направлением в моделировании поведения гетерогенных сред является применение данных компьютерной томографии. Такой подход позволяет исследовать структуру сложных анизотропных материалов, характеризующихся неоднородностью. Задача такого рода особенно актуальна в ортопедической практике: дефекты костной ткани [4], связанные с всевозможными патологиями, могут оказать большое влияние на качество проводимого лечения.

Существует несколько подходов к построению моделей элементов пористой структуры в условиях действия внешних нагрузок. В первую очередь к ним можно отнести метод средней длины перехвата [1, 2], согласно которому формулируются соотношения, связывающие компоненты тензора упругих констант и тензора структуры [1, 2, 5, 7], характеризующего осредненное направление пор. Вторым подходом выступает сведение анизотропии материала к ортотропии путем определения констант из численных экспериментов [3, 6, 8].

В данной работе рассматривается подход, предполагающий учет особенностей структуры пористого материала при построении численной модели, выявленных по данным компьютерной томографии.

Проведение компьютерной томографии элемента пористой среды предполагает создание цифрового прототипа, представляющего собой трехмерный целочисленный массив определенной структуры, элементами которого являются числа из некоторого диапазона значений. Элементы такого массива отражают рентгеновскую плотность согласно шкале Хаунсфилда и при расчетах бинаризируются по некоторому порогу, определяемому, например, методом Отсу. Таким образом, цифровой прототип представляет структуру пористого объекта в виде совокупности элементарных микрообъемов, каждый из которых несет информации о свойствах вещества. По этим данным на основе какого-либо приближенного метода можно построить дискретную механическую модель элемента пористой среды.

Наиболее удобным с алгоритмической точки зрения в этом случае методом дискретизации будет метод конечных элементов. Наивысшая точность расчета достигается в случае моделирования каждого микрообъема трехмерным конечным элементом сплошной среды. Однако в этом случае затраты ресурсов ЭВМ на создание дискретной модели, процессорные вычисления и постпроцессорную обработку результатов превысят разумные пределы. С этой целью следует увеличить размеры конечных элементов, а каждый определенный в цифровом прототипе микрообъем считать окрестностью точки интегрирования при численном вычислении матрицы жесткости конечного элемента.

В самом простом случае при интегрировании локальной матрицы жесткости применяется метод средних прямоугольников, таким образом, остается неясным вопрос определения числа квадратур в каждом из направлений: если число точек интегрирования по каждой координате мало, то точность решения задач на основе такого элемента может быть невысокой. Однако использование конечных элементов с большим числом квадратур, несмотря на повышение точности интегрирования в пределах элемента, может увеличить жесткость расчетной области из-за малого количества элементов.

Целью работы выступает реализация методики статического расчета трехмерных пористых объектов с использованием изопараметрического линейного конечного элемента сплошной среды, построенного на основе цифрового прототипа, выявленного по данным компьютерной томографии исследуемой области.

Для оценки влияния данных компьютерной томографии на сходимость предложенной численной методики были решены тестовые задачи, результаты которых применялись для определения подходящих параметров (числа вокселей в конечном элементе) модельной задачи. В рамках модельной задачи были исследованы три типа конечно-элементных сеток различной густоты. Полученные численные результаты отображают влияние точности аппроксимации геометрии образца, а также иллюстрируют зависимость поля перемещений и напряженно-деформированного состояния от структуры материала.

Исследования могут быть расширены с использованием другого вида обработки данных компьютерной томографии, усовершенствования формулы численного интегрирования локальной матрицы жесткости, а также с применением иных типов конечных элементов. В дальнейшем предполагается исследовать возможные критерии оценки прочности материала при квазихрупком разрушении в условиях статического нагружения на основе локально усреднённого по объёму напряжённо-деформированного состояния по данным компьютерной томографии.

Публикация осуществлена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160025.

Список литературы

1. Киченко А.А., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Заборских А.А. Экспериментальное определение тензора структуры трабекулярной костной ткани // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 4 (54). – С. 78–93.
2. Киченко А.А., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Симановская Е.Ю., Еловицова А.Н. Становление и развитие классической теории описания структуры костной ткани // Российский журнал биомеханики. – 2008. – Т. 12, № 1. – С. 69–89.
3. Саченков О.А., Герасимов О.В., Королева Е.В., Мухин Д.А., Яикова В.В., Ахтямов И.Ф., Шакирова Ф.В., Коробейникова Д.А., Хань Х.Ч. Построение негомогенной конечно-элементной модели по данным компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 332–344.
4. Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Андреев П.С., Коноплев Ю.Г. Численное исследование НДС тазобедренного сустава при ротационной остеотомии проксимального участка бедренной кости // Российский журнал биомеханики. – 2016. – Т. 20, №3. – С. 257–271.
5. Тверье В.М., Няшин Ю.И., Никитин В.Н., Оборин Л.Ф. Механическое давление как основа биомеханического моделирования зубочелюстной системы человека // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 1. – С. 24–35.
6. Харин Н.В., Воробьев О.В., Бережной Д.В., Саченков О.А. Методика построения репрезентативной модели по данным компьютерной томографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 95–102.
7. Чикова Т.Н., Киченко А.А., Тверье В.М., Няшин Ю.И. Биомеханическое моделирование трабекулярной костной ткани в состоянии равновесия // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22, № 3. – С. 282–291.
8. Carniel T.A., Klahr B., Fancello E.A. A multiscale numerical approach for the finite strains analysis of materials reinforced with helical fibers // Mechanics of Materials. – 2018. – Vol. 126. – P. 75-85.

Сведения об авторах:

Герасимов Олег Владимирович – магистрант КФУ, г.Кезань;

Мухин Дмитрий Александрович – студент КФУ, г.Кезань;

Семенова Елена Вячеславовна – студентка КФУ, г.Кезань;
Яикова Виктория Владимировна – студентка КФУ, г.Кезань;
Харин Никита Вячеславович – магистрант КФУ, г.Кезань.

CONSTRUCTION OF A MECHANICAL MODEL OF ELEMENTS OF A HETEROGENEOUS MATERIAL BASED ON NUMERICAL-DIGITAL ALGORITHM OF COMPUTER TOMOGRAPHY DATA PROCESSING

Gerasimov O.V., Mukhin D.A., Semenova E.V., Yaikova V.V., Kharin N.V.

Keywords: mathematical modeling, inhomogeneous material, computed tomography, finite element method, digital prototype.

Abstract. The paper considers one of the possible numerical approaches to the description of the processes of heterogeneous material deformation under external loads, based on modeling the computational region structure, using computed tomography data. The proposed approach allows us to model the behavior of a porous material using its structural properties based on non-destructive testing methods. At the first stage of the research using computed tomography, the computed sample is scanned, then the data obtained are digitized, after which the digital prototype of the sample structure with the corresponding weights is entered into the finite element calculation algorithm at the stage of forming the local stiffness matrices of the computational region, which are integrated using the central rectangles method. The paper assesses the effect of tomographic research data on the convergence of the proposed numerical method, solves test problems. The results of solving a model problem for the diaphysis of the femur are given. The obtained numerical results reflect the influence of the accuracy of the sample geometry approximation, and also illustrate the dependence of the displacement field on the material structure.

References

1. Kichenko A.A., Tver'e V.M., Nyashin Yu.I., Zaborsky A.A. Experimental determination of the fabric tensor for cancellous bone tissue // Russian Journal of Biomechanics. – 2011. – V. 15, № 4 (54). – P. 78–93.
2. Kichenko A.A., Tver'ye V.M., Nyashin Yu.I., Simanovskaya Ye.Yu., Yelovikova A.N. Formation and elaboration of the classical theory of bone tissue structure description // Russian Journal of Biomechanics. – 2008. – V. 12, № 1. – P. 69–89.
3. Sachenkov O.A., Gerasimov O.V., Koroleva Ye.V., Mukhin D.A., Yaikova V.V., Akhtyamov I.F., Shakirova F.V., Korobeynikova D.A., Khan' KH.CH. Building the inhomogeneous finite element model by the data of computed tomography // Russian Journal of Biomechanics. – 2018. – V. 22, № 3. – P. 332–344.
4. Sachenkov O.A., Khasanov R.F., Andreyev P.S., Konoplev Yu.G. Numerical research NDS of a coxofemoral joint at a rotational osteotomy of the proximal site of a femur // Russian Journal of Biomechanics. – 2016. – V. 20, №3. – P. 257–271.
5. Tver'ye V.M., Nyashin Yu.I., Nikitin V.N., Oborin L.F. Mechanical pressure as a basis for biomechanical modelling of the human dentofacial system // Russian Journal of Biomechanics. – 2014. – V. 18, № 1. – P. 24–35.
6. Kharin N.V., Vorob'yev O.V., Berezhnoy D.V., Sachenkov O.A. Construction of a representative model based on computed tomography // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2018. – № 3. – P. 95–102.
7. Chikova T.N., Kichenko A.A., Tver'ye V.M., Nyashin YU.I. Biomechanical modeling of a trabeculyarny bone tissue in equilibrium state // Russian Journal of Biomechanics. – 2018. – V. 22, № 3. – P. 282–291.
8. Carniel T.A., Klahr B., Fancello E.A. A multiscale numerical approach for the finite strains analysis of materials reinforced with helical fibers // Mechanics of Materials. – 2018. – Vol. 126. – P. 75–85.