

Применение цифровых двойников для анализа прочности костей на основе данных компьютерной томографии

О.В. Герасимов
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия
valeriy.karasikov@gmail.com

К.Р. Шарафутдинова
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия
KaRSharafutdinova@stud.kpfu.ru

Р.Р. Рахматулин
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия
RRRakhmatulin@stud.kpfu.ru

Т.В. Балтина
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия
tvbaltina@kpfu.ru

М.Э. Балтин
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия
baban.bog@mail.ru

А.О. Федянин
Казанский (Приволжский) федеральный университет
Казань, Россия
artishock23@gmail.com

Аннотация—В данной работе рассматривается способ обработки данных компьютерной томографии (КТ) и метод последующего расчёта и анализа результатов на основе построения конечно-элементного (КЭ) ансамбля. Цель исследования заключается в описании общего алгоритма построения численной модели для статического расчёта пористых объектов на основе данных КТ. Количественная оценка значений основывалась на нормированной ошибке энергии. В качестве модельной задачи рассматривался трёхточечный изгиб бедренной кости свиньи. Результаты численного эксперимента сравнивались с данными натурального испытания.

Ключевые слова— цифровой прототип, численное моделирование, костные органы, конечно-элементный анализ, негомогенные среды.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение данных КТ при построении численных моделей выступает основным подходом к созданию цифрового прототипа элементов негомогенных сред [1]. Подобные задачи особенно актуальны в клинической практике [2]. Существует несколько подходов, основанных на применении данных с изображений. В основе первого лежит построение МП-распределения [3]. Другой предполагает сведение анизотропии к ортотропии путём вычисления констант из численных экспериментов [4]. В данной работе предлагается к рассмотрению метод прямого учёта свойств материала с помощью взвешенного интегрирования локальной матрицы жёсткости (ЛМЖ). Цель исследования заключается в реализации методики статического расчёта негомогенных пористых элементов на основе трёхмерного изопараметрического КЭ сплошной среды с линейной аппроксимацией, построенного по данным КТ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе подхода лежало интегрирование ЛМЖ с весовой функцией, соответствующей данным КТ [5]. Бинаризируя исходный массив, производилась гетерогенизация материала. В качестве метода интегрирования был выбран метод средних прямоугольников [6]. Напряжённо-деформированное состояние (НДС) локально усреднялось по объёму [7]. Полученная из расчётов величина ошибки энергии по

напряжениям нормировалась по энергии деформации [8]. Построение расчётной области осуществлялось путём удаления элементов с низким содержанием кости из исходной регулярной сетки. Эксперименты проводились на плечевой кости Вьетнамской свиньи. Протокол эксперимента был одобрен Комитетом по уходу за животными Казанского государственного медицинского университета (протокол №5 от 20 мая 2020 года) [9]. Механические параметры соответствовали костной ткани. Перемещения прикладывались к диафизу, закрепление дистальных участков соответствовало жёсткому закреплению. Натурный эксперимент проводился в условиях действия поперечной нагрузки. Сравнение результатов осуществлялось на основе вычисления эквивалентной силы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёт производился на двух КЭ-сетках различной плотности. Особое внимание уделялось областям максимальных напряжений по Мизесу. Результаты показали, что максимальные значения ошибки энергии возникают на границах с наименьшим относительным содержанием костной ткани. Значения в интересующих областях составили менее 25%, кроме зон, подверженных кинематическим граничным условиям (~ 50%). Минимальная ошибка энергии (20%) и максимальные напряжения по Мизесу соответствовали области приложения нагрузки. В регионе максимальных напряжений по Мизесу первая главная компонента достигает максимума, а третья – минимума, что объясняет возникновение трещины при проведении натурального эксперимента, так как значения превышают предел прочности. Относительная ошибка в сравнении с данными натурального испытания составила от 3 до 15%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализован метод обработки данных КТ на основе распределения плотности материала в объёме исследуемого образца. Осуществлён КЭ-анализ НДС бедренной кости свиньи. Проведена оценка полученных результатов на основе значений ошибки энергии. Поставлен натурный эксперимент в условиях действия трёхточечного изгиба.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам (№ стипендии СП-4182.2022.4).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Marwa, F. Improved USCT of Paired Bones Using Wavelet-based Image Processing / F. Marwa, E.Y. Wajih, L. Philippe, M. Mohsen // IJGSP. – 2018. – Vol. 10(9). – P. 1-9. DOI: 10.5815/ijgsp.2018.09.01.
- [2] Kichenko, A.A. Experimental determination of the fabric tensor for cancellous bone tissue / A.A. Kichenko, V.M. Tverier, Y.I. Nyashin, A.A. Zaborskikh // Russ. J. Biomech. – 2011. – Vol. 15(4). – P. 66-81.
- [3] Sachenkov, O. Determination of muscle effort at the proximal femur rotation osteotomy / O. Sachenkov, R. Hasanov, P. Andreev, Y. Konoplev // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2016. – Vol. 158(1). – P. 012079.
- [4] Ridwan-Pramana, A. Finite element analysis of 6 large PMMA skull reconstructions: A multi-criteria evaluation approach / A. Ridwan-Pramana, P. Marcian, L. Borak, N. Narra, T. Forouzanfar, J. Wolff // PLoS ONE. – 2017. – Vol. 12. – P. e0179325. DOI: 10.1371/journal.pone.0179325.
- [5] Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone / J.Y. Rho, M.C. Hobatho, R.B. Ashman // Medical Engineering & Physics. – 1995. – Vol. 17(5). – P. 347-355.
- [6] Воробьёв, О.В. Конечно-элементная оценка деформированного состояния по данным компьютерной томографии / О.В. Воробьёв, Е.В. Семёнова, Д.А. Мухин, Е.О. Стаценко, Т.В. Балтина, О.В. Герасимов // Вестник ПНИПУ. Мех. – 2021. – № 2. – С. 44-54. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.05.
- [7] Giovannelli, L. Direct medical image-based Finite Element modelling for patient-specific simulation of future implants / L. Giovannelli, J.J. Rodenas, J.M. Navarro-Jimenez, M. Tur // Finite Elem. Anal. Des. – 2017. – Vol. 136. – P. 37-47. DOI: 10.1016/j.finel.2017.07.010.
- [8] Gerasimov, O.V. Bone Stress-Strain State Evaluation Using CT Based FEM / O.V. Gerasimov, N.V. Kharin, A.O. Fedyanin, P.V. Bolshakov, M.E. Baltin, E.O. Statsenko, F.O. Fadeev, R.R. Islamov, T.V. Baltina, O.A. Sachenkov // Front. Mech. Eng. – 2021. – Vol. 7. – P. 688474. DOI: 10.3389/fmech.2021.688474.
- [9] Fadeev, F. Combined Supra- and Sub-Lesional Epidural Electrical Stimulation for Restoration of the Motor Functions after Spinal Cord Injury in Mini Pigs / F. Fadeev, A. Ereemeev, F. Bashirov, R. Shevchenko, A. Izmailov, V. Markosyan, M. Sokolov, J. Kalistratova, A. Khalitova, R. Garifulin, R. Islamov, I. Lavrov // Brain Sciences. – 2020. – Vol. 10. – P. 744. DOI: 10.3390/brainsci10100744.