

# 三维有限元法应用于乳牙牙体修复的研究进展

张宇璐<sup>1\*</sup>, 刘佳<sup>1,2#</sup>

<sup>1</sup>新疆医科大学第一附属医院(附属口腔医院), 儿童口腔科, 新疆 乌鲁木齐

<sup>2</sup>新疆维吾尔自治区口腔医学研究所, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年2月27日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月29日

## 摘要

有限元法是一种分析方法, 其运作基于现代的计算机技术并应用于理论力学方面, 且能够建立研究所需的省时、直观、具有明确结论的模型。迄今已广泛应用于工程技术领域, 而对于口腔医学专业的载荷应力研究方面也具有很强的优势。三维有限元法应用在儿童口腔医学领域的相关力学研究已逐渐成为热点。

## 关键词

有限元法, 乳牙, 牙体修复, 应力分析

# Research Progress of Three-Dimensional Finite Element Method Applied to Primary Teeth Restoration

Yulu Zhang<sup>1\*</sup>, Jia Liu<sup>1,2#</sup>

<sup>1</sup>Children's Stomatology Department, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University (Affiliated Stomatology Hospital), Urumqi Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Stomatology, Urumqi Xinjiang

Received: Feb. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 21<sup>st</sup>, 2024; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The finite element method is an analysis method. Its operation is based on modern computer technology and applied to theoretical mechanics, and it can establish a time-saving, intuitive and clear conclusion model for research. So far, it has been widely used in the field of engineering

\*第一作者。

#通讯作者。

technology, and has strong advantages in the research of load stress in stomatology. The relevant mechanical research on the application of the three-dimensional finite element method in the field of children's oral medicine has gradually become a hot topic, so I will make a review and elaborate on it.

## Keywords

Finite Element Method, Primary Teeth, Teeth Restoration, Stress Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

龋病为儿童口腔疾病中的常见病, 因儿童的乳牙牙齿组织与结构的特点较恒牙更易患龋, 最终可能造成牙髓病、根尖周病等严重后果。在我国各地区的流行病学调查结果显示学龄儿童的龋病患病率达19.7%~50.0%, 证明患龋风险属于较高水平[1]。因牙齿的再生能力并非无限, 需修复材料替换因患龋等病因而丧失的牙齿组织[2]。

三维有限元法(3D-Finite Element Method, 简称 3D-FEM)是一种数值方法, 进行分析与评估研究对象的结构框架, 测试其性能和强度, 原理是通过计算机来制作模型、采纳外应力的材料所设置特定的指标来构建的, 最终计算、分析应力的大小与分布、应变的区域与趋势和形变的程度等研究结果[3]。3D-FEM具有优越性, 其可行性、适用性较佳, 其分析过程是方便、快捷且简明, 无需研究人员消耗过多的实验时间[4] [5] [6]。

3D-FEM 属于口腔研究领域的一种实验手段, 可以将指定的实验材料应用在口腔或颌骨等组织, 并最终得出应变、应力值及其影响[7], 应力分布很大程度上取决于功能荷载, 例如对于粘接层而言, 冠的材料及其厚度影响应力分布, 即研究结果中表明 2 mm 内冠层比 4 mm 内冠层具备更强的应力集中[8]。近年来, 3D-FEM 在口腔领域的研究逐渐深入, 学者们越发关注其在分析、评估乳牙牙体的修复疗效。现就 3D-FEM 应用于分析乳牙的修复治疗的优点及其效果做一综述。

## 2. 3D-FEM 概述

### 2.1. 3D-FEM 的基本操作概念及其特质

该技术的基本操作概念是将研究对象的实际组织结构可视化, 从而成为包含有限数量元素的集合, 将指定的研究区域划分为一组较小的元素, 这些元素可用于获得原始研究问题的总体近似解[9]。即该软件可针对所研究的虚拟模型进行一定的简化处理, 最终不会影响其计算的结果。简化模型材料, 并设立前提条件如假设均质、各向同性或线、弹性等结构性能, 这些通常不会影响研究结果, 但由于改变研究材料的结构性能会对结构中的应力分布产生影响。因此, 颌骨或颅骨、附着体、种植体和假体冠等的实体模型均可制作成 3D 模型的格式导入 3D-FEM 软件。

3D-FEM 作为一种数值技术, 其核心是根据计算机的工作原理对实验对象的结构性能和强度进行计算和分析。3D-FEM 还可以用于计算和分析在外部添加的载荷应力或位移下弯曲引起的变形或应变[10]。虚拟的几何模型是建立有限元模型的基础。而临床应用方面的数字成像技术, 例如 CAD 软件、探针扫描、

激光和 CT 等, 均能提供研究人员理想的几何(实体)模型。

## 2.2. 3D-FEM 研究儿童口腔治疗方面的发展及其影响

成年人在人体结构检查的 3D 头影测量成像机的应用中, 如计算机断层扫描(CT)或锥束计算机断层成像(CBCT), 它被广泛用于创建颌骨和颞下颌关节的 3D 有限元模型, 并评估机械性能失衡的程度。但其应用在儿童会不利于自身的生长发育, 源于使用 CT 或 CBCT 扫描时会形成高剂量的辐射[11] [12]。通过运用 3D-FEM 并统计、分析所要研究的变形模型, 极大程度地实现了有限元模型生成的自动化。在其他研究领域的应用中, 若要使用并统计、分析所要研究的变形模型, 这其中须运用自动化技术进行医学图像分割[13]、形状识别[14]和疾病诊断[15]。因此, 有限元法适用于不限次数的研究模拟, 且无须进行动物或人的试验。在口腔医学领域的应用中, 有限元法为评估研究对象的解剖组织结构以及分析具有力学性能和可接受载荷应力循环测试的任一修复材料提供了一个极好的技术工具[16]。

## 3. 3D-FEM 在乳牙治疗中的运用

### 3.1. 3D-FEM 运用于嵌体材料的相关研究

Zuhail Kirzioglu 等人[17]通过比较使用间接复合材料与嵌体进行乳磨牙牙体修复并在咬合时观察应力大小及其分布所产生的影响, 结果表明使用嵌体材料可保护修复材料与牙齿结构之间的结合、减少可能的牙齿折裂与分配高咬合应力。蔡长宇[18]等研究者用嵌体修复下颌第二乳磨牙来分析并探讨髓室的垫底材料及其厚度的变化对牙体应力分布的影响, 结论得出牙体组织的应力主要集中于下颌第二乳磨牙的牙颈部, 而嵌体修复后牙体的应力主要集中于牙合面和近中邻面。

### 3.2. 3D-FEM 运用于非金属材料的相关研究

咀嚼产生的咬合力在乳牙修复后可转移至牙体组织及其牙周组织甚至骨组织, 最终这种咬合刺激可导致该区域的组织结构发生异常改变。其中, 国内有研究[19]运用 3D-FEM 探究关于非金属冠修复乳磨牙并分析对牙体及牙周组织的应力分布情况, 结果显示无角肩台、非解剖式氧化锆冠及其粘接层的应力峰值最小和安全性强, 而全瓷冠组在牙冠颊面边缘处存在应力集中。迄今研究者可通过运用 3D-FEM 进行应力分析, 这将有助于反馈系统的物理变化[20]。国内存在相关研究[19]分析使用非金属冠修复根管治疗后的乳磨牙牙体、牙周组织的受力与载荷分布情况。此外, Sumer M. Alak 等学者[21]通过预成树脂冠和氧化锆冠修复患儿的上颌乳中切牙和乳侧切牙后, 研究结论为氧化锆冠的牙齿具有更好的牙龈健康状态、较少的牙龈出血、菌斑积累与修复材料丢失。Chin-Yun Pan 等人[22]用全瓷冠修复根管治疗后的乳磨牙并对其根面的四种颈面终点线进行应力分析, 研究结论得出应力的峰值较为集中于乳牙的主牙根面以及骨皮质的近端。

### 3.3. 3D-FEM 运用于金属材料的相关研究

研究表明, 当使用全冠修复后, 它能更大程度地承担咬合应力[2]。预成型金属冠(PMC), 即不锈钢冠, 简称为 SSC, 是用于修复已有大面积缺损的乳牙冠的极佳选择, 且不锈钢冠(SSC)是作为修复严重龋坏、存在发育性缺损以及经过根管治疗后的牙齿的金标准[23]。已有文献综述[5] [6] [24] [25] [26]比较 SSC 与其他的乳牙修复材料进行对比, 均认可 SSC 在修复治疗方面优于牙体汞合金充填治疗。国外已研究[27]将 SSC 对牙体结构已被严重破坏的乳牙进行修复并观察其远期疗效, 该实验表明当水平施加载荷时, 在单层牙冠内表面上的载荷点周围和双层牙冠的颈部区域周围存在最大应力值, 并发现咬合接触点的强度对全瓷后牙冠的完整性很重要, 从水平方向施加的咬合力是一个关键因素。K. Sundeep Hegde 等学者[28]研究 SSC 修复根管治疗后的乳磨牙是否有应力产生, 发现乳磨牙在未被 SSC 覆盖的情况下牙齿与修复材

料均易折裂。

#### 4. 结论与展望

综上所述, 运用 3D-FEM 进行牙体力学方面的研究已成为热点, 为了让临床情况的模拟程度更具有准确性, 需施加易进行人为调整的应力的方向及其大小等条件。但 3D-FEM 尚存在局限性, 易导致牙体的部分信息出现偏差, 即会出现所构建的模型存在几何、力学相似性等方面的差异。通过历年研究发现尚缺乏 3D-FEM 在儿童乳牙牙体修复方面是否会对儿童头面部发育产生影响的研究。深入探讨 3D-FEM 在乳牙牙体修复中的治疗效果, 将为拓展适用于儿童乳牙牙体的修复材料提供新的靶点和思路。

#### 参考文献

- [1] 何尚群. 儿童第一恒磨牙窝沟封闭防龋效果分析[J]. 现代预防医学, 2012, 39(24): 69-70.
- [2] Shubhashini, N., Meena, N., Shetty, A., et al. (2008) Finite Element Analysis of Stress Concentration in Class V Restorations of Four Groups of Restorative Materials in Mandibular Premolar. *Journal of Conservative Dentistry*, **11**, 121-126. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.45251>
- [3] Geramy, A. and Sharafoddin, F. (2003) Abfraction: 3D Analysis by Means of the Finite Element Method. *Quintessence International*, **34**, 526-533.
- [4] Santamaria, R.M., Innes, N.P., Machiulskiene, V., et al. (2014) Caries Management Strategies for Primary Molars. *Journal of Dental Research*, **93**, 1062-1069. <https://doi.org/10.1177/0022034514550717>
- [5] Braff, M.H. (1975) A Comparison between Stainless Steel Crowns and Multisurface Amalgams in Primary Molars. *ASDC Journal of Dentistry for Children*, **42**, 474-478.
- [6] Dawson, L.R., Simon, J.F. and Taylor, P.P. (1981) Use of Amalgam and Stainless Steel Restorations for Primary Molars. *ASDC Journal of Dentistry for Children*, **48**, 420-422.
- [7] Prabhakar, A., Chakraborty, A., Nadig, B., et al. (2017) Finite Element Stress Analysis of Restored Primary Teeth: A Comparative Evaluation between Stainless Steel Crowns and Preformed Zirconia Crowns. *International Journal of Oral Health Sciences*, **7**, 10-15. [https://doi.org/10.4103/ijohs.ijohs\\_18\\_17](https://doi.org/10.4103/ijohs.ijohs_18_17)
- [8] Lin, J., Lin, Z. AND Zheng, Z. (2020) Effect of Different Restorative Crown Design and Materials on Stress Distribution in Endodontically Treated Molars: A Finite Element Analysis Study. *BMC Oral Health*, **20**, Article No. 226. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01214-3>
- [9] Narayanaswamy, S., Meena, N., Shetty, A., et al. (2008) Finite Element Analysis of Stress Concentration in Class V Restorations of Four Groups of Restorative Materials in Mandibular Premolar. *Journal of Conservative Dentistry*, **11**, 121-126. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.45251>
- [10] Vasudeva, G. (2009) Finite Element Analysis: A Boon to Dental Research. *The Internet Journal of Dental Science*, **6**, 1-6. <https://doi.org/10.5580/2626>
- [11] Planas, P. (2013) Neuro-Occlusal Rehabilitation: NOR. 2nd Edition, Amolca, Barcelona.
- [12] Thiesen, G., Gribel, B.F. and Freitas, M. (2015) Facial Asymmetry: A Current Review. *Dental Press Journal of Orthodontics*, **20**, 110-125. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.20.6.110-125.sar>
- [13] Shan, Z.Y., Parra, C., Ji, Q., et al. (2006) A Know-Ledge-Guided Active Model Method of Cortical Structure Segmentation on Pediatric MR Images. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **24**, 779-789. <https://doi.org/10.1002/jmri.20688>
- [14] Dornaika, F. and Ahlberg, J. (2006) Fitting 3D Face Models for Tracking and Active Appearance Model Training. *Image and Vision Computing*, **24**, 1010-1024. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2006.02.025>
- [15] Bredbenner, T.L., Eliason, T.D., Potter, R.S., et al. (2010) Statistical Shape Modeling Describes Variation in Tibia and Femur Surface Geometry between Control and Incidence Groups from the Osteoarthritis Initiative Database. *Journal of Biomechanics*, **43**, 1780-1786. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.02.015>
- [16] Cervino, G., Fiorillo, L., Arzukanyan, A.V., et al. (2020) Application of Bioengineering Devices for Stress Evaluation in Dentistry: The Last 10 Years FEM Para-Metric Analysis of Outcomes and Current Trends. *Minerva Dental and Oral Science*, **69**, 55-62. <https://doi.org/10.23736/S0026-4970.19.04263-8>
- [17] Zuhail, K., Derya, C., Fatih, S., et al. (2019) Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Composite and Comonomer Onlays in Primary Molars. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, **22**, 936-941. <https://doi.org/10.1080/10255842.2019.1604951>

- 
- [18] 蔡长宇, 冯娜, 杨玉娥. 垫底材料及厚度对下颌第二乳磨牙嵌体修复应力分布影响的三维有限元分析[J]. 口腔医学研究, 2022, 38(7): 654-658.
- [19] 唐忠旺, 石伟华, 夏斌, 等. 儿童乳磨牙非金属冠设计及关键参数的三维有限元分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2022, 57(3): 242-250.
- [20] Proos, K.A., Swain, M.V., Ironside, J., *et al.* (2002) Finite Element Analysis Studies of an All-Ceramic Crown on a First Premolar. *The International Journal of Prosthodontics*, **15**, 404-412.
- [21] Alaki Sumer, M., Abdulhadi Bashaer, S., AbdElBaki, M.A. and Alamoudi, N.M. (2020) Comparing Zirconia to Anterior Strip Crowns in Primary Anterior Teeth in Children: A Randomized Clinical Trial. *BMC Oral Health*, **20**, Article No. 313. <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01305-1>
- [22] Pan, C.Y., Lan, T.H., Liu, P.H. and Fu, W.R. (2020) Comparison of Different Cervical Finish Lines of All-Ceramic Crowns on Primary Molars in Finite Element Analysis. *Materials*, **13**, Article 1094. <https://doi.org/10.3390/ma13051094>
- [23] Ludwig, K.H., Fontana, M., Vinson, L.A., *et al.* (2014) The Success of Stainless Steel Crowns Placed with the Hall Technique: A Retrospective Study. *The Journal of the American Dental Association*, **145**, 1248-1253. <https://doi.org/10.14219/jada.2014.89>
- [24] Levering, N.J. and Messer, L.B. (1988) the Durability of Primary Molar Restorations: I. Observations and Predictions of Success of Amalgams. *Pediatric Dentistry Journal*, **10**, 74-80.
- [25] Roberts, J.F. and Sherriff, M. (1990) The Fate and Survival of Amalgam and Prefomed Crown Molar Restorations Placed in a Specialist Paediatric Dental Practice. *British Dental Journal*, **169**, 237-244. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4807333>
- [26] Einwag, J. and Dünninger, P. (1996) Stainless Steel Crown versus Multisurface Amalgam Restorations: An 8-Year Longitudinal Clinical Study. *Quintessence International*, **27**, 321-323.
- [27] Imanishi, A., Nakamura, T., Ohyama, T., *et al.* (2003) 3-D Finite Element Analysis of All-Ceramic Posterior Crowns. *Journal of Oral Rehabilitation*, **30**, 818-822. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2842.2003.01123.x>
- [28] Hegde, K., Suvarna, R. and Bhat, S. (2019) Stress Analysis in Endodontically Treated Primary Molar with and without Stainless Steel Crown: A Comparative Finite Element Model Study. *Journal of Natural Science*, **10**, 202-208. [https://doi.org/10.4103/jnsbm.JNSBM\\_7\\_19](https://doi.org/10.4103/jnsbm.JNSBM_7_19)