

土-结构相互作用体系动力响应的敏感性分析*

古泉, 曾志弘, 邱志坚, 郑翥鹏

(厦门大学 建筑与土木工程学院 福建 厦门 361005)

摘要: 本文概述了基于直接微分法的非线性有限元动力响应用于模型材料参数、几何参数和地震不确定性参数的敏感性分析方法, 介绍了基于力法、位移法和三场混合法等方法的有限单元直接微分法敏感性分析最新进展, 并着重讲述了将直接微分法拓展到非线性结构和岩土等材料模型中, 用于分析土-结相互作用体系的敏感性分析方法。本文将此敏感性方法应用到一个有实际工程背景的受双向地震荷载作用下的三维土-结相互作用体系中, 通过有限差分法证明敏感性分析计算结果的高效性和正确性, 验证了此方法应用到实际工程中的有效性和实用性。直接微分法由于计算得到的是半解析解, 具有精确、高效、不受数值噪音干扰等优点, 具有潜在重要的工程价值。

关键词: 有限元敏感性分析; 力法; 直接微分法; 钢筋混凝土框架结构; 土和结构相互作用

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)增 1-0080-07

Seismic Response Sensitivity Analysis of Soil-Structure Interaction Systems

Gu Quan, Zeng Zhihong, Qiu Zhijian, Zheng Zhupeng

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, P. R. China)

Abstract: Sensitivities of the FE response with respect to both model (material or geometry) and loading parameters represent an essential ingredient in studying the structures. This paper presents recent developments in FE response sensitivity analysis based on the Direct Differentiation Method (DDM) for displacement-based, force-based, and three-field mixed finite elements, with a focus on the extensions of the DDM to nonlinear material constitutive models of structural or geotechnical systems. DDM based response sensitivity analysis methods are used to analyze a real three dimensional nonlinear soil-structure interaction system under bi-directional seismic load to verify its accuracy, efficiency and applicability to engineering problems. The DDM has semi-analytical solution and is accurate, effective and not disturbed by numerical noise, it has latent engineering value.

Key words: finite element response sensitivity; force-based; the Direct Differentiation Method; steel concrete composite frame structures; soil-structure interaction systems

1 引言

结构在地震或风荷载等外力作用下的响应受多种不确定性因素的影响, 包括结构自身不确定性 (比如材料不确定性和几何尺寸不确定性) 和环境、荷载不确定性等。对于结构设计人员来说, 如

何分析和量化结构响应不确定性非常重要^[1,2]。目前学术界已经基本形成共识, 即仅仅通过确定性研究来分析复杂结构或者土与结构相互作用体系的动力响应是不够全面的, 基于概率、可靠度的不确定性分析是非常必要的补充^[3]。一个体系的不确定性从概念上可分为认知不确定性 (可通过提

* 收稿日期: 2014-05-30 (修改稿)

作者简介: 古泉 (1974-) 男, 福建厦门人, 教授, 博士, 主要从事高层建筑结构与土结体系的非线性地震动力分析研究。E-mail: quangu@xmu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (51261120376, 51281220267); 冻土工程国家重点实验室资助 (SKLFSE201405)

高认知能力减小甚至消除)和偶然不确定性(客观存在的无法消除)。深入研究这些不确定性的来源、量化其大小、以及分析其传播过程(从震源不确定性、材料不确定性和几何不确定性等最终体现为结构地震响应的不确定性的过程)是非常重要的。这也是风险评估、可靠度分析、概率响应分析等不确定性分析的基础^[4]。有限元敏感性分析为不确定分析提供了一个重要分析工具,是至关重要的一个计算环节。如何高效和精确地计算结构响应的敏感性也是基于梯度的优化分析、系统识别、模型更新和参数重要性研究等问题的基础。在这个背景下,本文介绍了有限元敏感性分析的几种基本方法,重点讲述基于直接微分法的敏感性分析方法,以及其在复杂的非线性结构或者土-结构相互作用体系中的应用。结构响应的敏感性或者梯度通常定义为 $\frac{\partial r}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \theta_0}$ 。其中 r 代表结构响应,包括全局响应(位移、速度、加速度等)和局部响应(梁柱截面上的弯矩、剪力、曲率;高斯点上的应力、应变等); θ 为敏感性参数,包括几何、材料或荷载等。这里响应敏感性从数学上定义为响应 r 对 θ 的偏导数,即在其他参数固定情况下由于特定参数 θ 改变引起的响应改变,也可以理解为响应的梯度。由于响应 r 对 θ 的敏感性是参数 θ 的函数,定义中取 $\theta = \theta_0$,其中 θ_0 为敏感性参数 θ 的特定值^[5-13]。

有限元响应敏感性分析有多种不同的方法,比如有限差分法(FDM),包括向前、向后和中心有限差分法^[2, 14, 15],伴随法(AM)^[2],摄动法(PM)^[16]和直接微分法(DDM)^[5-15]等方法。其中,有限差分法是敏感性分析中最简单、常用的一种方法,但此方法计算量大,对有限元响应的计算精度要求很高,且容易受数值噪声的影响^[6, 17],因此在复杂非线性体系中不够适用;伴随法对于线性和非线性弹性结构系统的计算非常有效,但该方法应用到非线性滞回材料时,却不如其他方法高效;摄动法虽然计算效率很高,但结果不够准确。相对这些方法,直接微分法计算高效、准确,可应用于复杂的非线性体系中,是本文重点讲述的方法。

直接微分法的具体计算过程是在每一时步计算收敛后,对离散后的结构动力平衡方程直接求导(静力问题可以视为动力问题的特例),可以得到公式:

$$\left[\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M + \frac{\alpha}{\beta(\Delta t)} C + (K_T^{stat})_{n+1} \right] \frac{\partial u_{n+1}}{\partial \theta} =$$

$$- \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \frac{\partial M}{\partial \theta} + \frac{\alpha}{\beta(\Delta t)} \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) u_{n+1} - \frac{\partial r(u_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \Big|_{u_{n+1}} + \frac{\partial \bar{F}_{n+1}}{\partial \theta}$$

式中: $\Delta t = (t_{n+1} - t_n)$ 为时间步长, α 和 β 是NewMark积分常数,当 $\alpha = \frac{1}{2}$ 和 $\beta = \frac{1}{4}$ 时,为无条件稳定。 M 、 C 和 K_T^{stat} 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; u_{n+1} 表示当前步($n+1$)步节点的位移, $\frac{\partial u_{n+1}}{\partial \theta}$ 为位移敏感性,即需要求解的量; \bar{F}_{n+1} 为等效外荷载; $r(u_{n+1}(\theta), \theta)$ 表示结构的内力,为节点位移 u_{n+1} 函数,而 u_{n+1} 为是敏感性参数 θ 的函数,同时 r 也是 θ 的函数。 $\frac{\partial(\cdot)}{\partial \theta} \Big|_{u_{n+1}}$ 表示在 u_{n+1} 固定条件下的偏导数。

上述公式中的 $\frac{\partial r(u_{n+1}(\theta), \theta)}{\partial \theta} \Big|_{u_{n+1}}$ 是结构内力

梯度,相对最难计算,需要按照结构内力求解方法,分别计算有限元响应计算的各个级别的梯度,包括结构内力梯度(结构级),单元内力梯度(单元级),截面内力梯度(截面级)和材料应力梯度(材料级),并由下向上逐级积分最终得到结构内力梯度。直接微分法具体公式推导参见文献^[2, 5, 14]。直接微分法的计算结果可以用有限差分法验证。即将敏感性参数 θ 加上一定量的扰动 $\Delta\theta$,将扰动后的敏感性参数值 $\theta + \Delta\theta$ 代入到响应公式中进行计算,可以得到其对应的响应为 $\Delta r + \Delta r$ 。通过有限差分法 $\Delta r / \Delta\theta$ 和直接微分法得到的 $\frac{\partial r}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \theta_0}$ 进行对比,来验证直接微分法得到的敏感性分析正确性。在一定的范围内,随着扰动值 $\Delta\theta$ 的减小,阶段误差减小,计算得到的 $\Delta r / \Delta\theta$ 一致趋近于由直接微分法计算得到的 $\frac{\partial r}{\partial \theta}$,由此可验证敏感性分析结果的正确性。但是,过小的扰动值 $\Delta\theta$ 可能会导致有限差分计算结果发散,这是由于计算的舍入误差造成的。因此通常有一个可接受的扰动值区间和一个最优的扰动值,但是在未做有限差分收敛性研究前很难预先确定这个可接受区间和最优扰动值的大小^[18]。

2 基于直接微分法的有限元响应敏感性分析

2.1 基于位移法的框架单元敏感性分析

基于位移法的有限元是目前有限元中最常

用的单元,通过位移插值函数假定单元位移场分布,继而获得应变,根据材料的本构关系计算得到应力,随后通过积分得到单元内力。对上述计算每步直接求微分,可以得到单元位移梯度、高斯点应变梯度、应力梯度和单元内力梯度的关系,将其代入敏感性分析基本方程,最终求解得到响应的敏感性。由于基于位移法单元技术成熟、计算稳定,被广泛用于有限元计算中,因此基于位移法单元的框架单元敏感性分析被用于各种问题中。但基于位移法单元的缺点是需要单元数量较多,而力法单元可以较好地克服这一缺点,即用较少的单元来实现较高的计算精度,从而提高计算效率^[19]。

2.2 基于力法(Force-based)的框架单元敏感性分析

相比基于位移法单元,基于力法插值单元(即对内力基于形函数直接插值)在达到相同有限元响应计算精度时,所需的单元数量和整体计算量都有明显减少。例如,参考文献^[11]中对超静定二维单层钢结构框架分析表明,基于力法的有限元分析方法收敛到精确解的速度明显较位移法速度快。当计算分析的结构越复杂,这种优势也就越明显。将直接微分法拓展到基于力法框架单元中,可以利用这些计算上的优势。从理论上说,基于力法单元比基于位移单元的有限元响应敏感性方法更加复杂,因为力法单元在截面变形和单元节点位移之间没有简单的直接对应关系。求解该问题需要在单元级、每一个计算时步上求解一个线性方程组,但该线性方程组中存在截面变形梯度和单元节点力梯度待求解未知量,较位移法的单元内力梯度更加复杂,具体求解方法可参见文献^[20]。

2.3 基于三场混合框架单元(Three-field mixed formulation elements)的敏感性分析

在过去的 30 年间很多研究者针对混合有限元的研究开展了大量的工作,基于变分原理发展出了几种不同的有限单元^[21-22],并建立了这些单元之间的关系。同时,对这些单元的计算性能和准确性,也进行了全面的分析和改进^[22]。经过多年的研究,混合单元的理论发展已经比较成熟,并且在许多结构分析中得到了广泛应用。因此,把基于直接微分法拓展到混合单元当中也具有较大的计算优势。最近,基于 Hu-Washizu^[21]的三场混合单元的直接微分法敏感性分析公式已经被推导出来^[23]。这些公式的推导是基于有限元基本方程(包括平衡方程、相容性方程及材料的本构方程),适

用于材料非线性和几何非线性问题的静力和动力分析。

2.4 直接微分法应用到三维混凝土和岩土材料中

直接微分法能够被拓展和应用用于多种三维塑性本构模型中,从而非常高效、精确地计算混凝土和岩土材料的响应敏感性。最近,直接微分法被应用于三维混凝土 Cap 塑性本构模型^[24,25],此模型由 Hofstetter G 和 Simo JC 提出,被广泛用于模拟混凝土非线性力学行为。另外,直接微分法还被推广和应用到砂土边界面塑性模型^[26,27]和多屈服面模型^[28-30]中。这两个模型是目前学术界模拟粘土和可液化砂土非线性动力行为和液化行为最重要的模型之一,也在工程界广泛使用。由于有限元计算岩土材料时响应精度往往无法达到很高(即计算得到响应的有效数字位数不够,如果提高收敛精度计算量将极大提高,甚至不收敛),有限差分方法经常无法计算得到满足精度的梯度,而直接微分法可以解决这一重要问题,得到和响应精度相当的梯度^[27],为岩土工程的基于梯度的优化计算方法提供重要工具,包括计算可靠度、模型更新、系统识别等计算方法,因此具有重要突破。

2.5 直接微分法应用到水利工程中

最近,基于直接微分法的敏感性分析也被应用与考虑流固耦合的混凝土重力坝和拱坝中。通过把直接微分法拓展到用于模拟三维混凝土和地基的截断 Drucker-Prager 模型、仅考虑压力的流体单元、流固耦合边界单元、以及考虑透射吸能地基边界的单元中,能够计算复杂的流固耦合混凝土坝的敏感性。由于直接微分法的高效性和精确性,使得上述基于梯度的优化算法能够成功应用于诸多水利工程问题中。

2.6 直接微分法应用到多点约束问题

基于直接微分法的有限元响应敏感性分析已经被拓展到多点约束的线性和非线性有限元模型中。从理论上可以处理三个不同约束,1) 变换方程法 2) 拉格朗日乘数法 3) 罚函数法。文献^[13]中论述了直接微分法用于多点约束的理论推导,并列举了应用多点约束的非线性框架结构、土-结构相互作用体系的敏感性分析算例。这为有限元中一大类多点约束问题的直接微分法求解计算提供了理论依据和计算工具。

2.7 有限元响应敏感性分析的其他计算问题

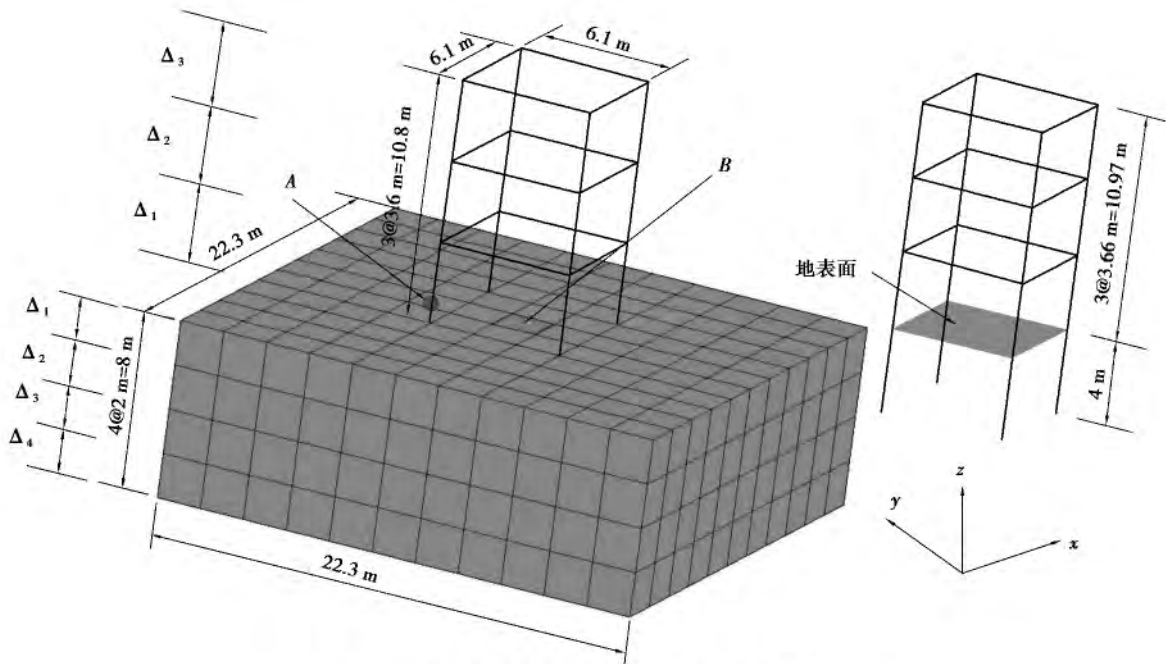
有限元响应敏感性的公式可能有两种不同的推导方法。第一种方法是先计算相应,再推导其敏

感性(梯度);第二种方法定义相应敏感性为基本未知量,直接求解得到响应敏感性。可以证明,这两种敏感性计算最终结果是相同的^[14]。另外,在敏感性分析过程中,需要用到一致切线模量而不是连续切线模量^[31]。虽然在一维材料本构中,一致切线模量和连续切线模量是相同的,但对于多维材料本构却并不如此。目前已推导出三维 Cap 模型^[24]和多屈服面模型^[33]等一致切线模量并将其在有限元框架中实现。最后,有限元敏感性的是否连续或光滑同样是一个需要仔细研究的问题。尤其是当有限元敏感性应用到基于梯度的优化算法中时,梯度的不连续将会影响优化算法的收敛速率和能否得到全局最优解,甚至影响到优化算法能否收敛^[33]。而非光滑的材料本构模型在从弹性到塑性的受力状态转变期间会发生响应敏感性的不连续现象,因此有必要采用光滑的非线性本构模型避免这一问题^[34]。

3 基于直接微分法的非线性土与结构相互作用体系的响应敏感性分析算例

本节应用直接微分法计算三维土和结构非线性相互动力作用体系的响应敏感性,数值模型如图(1)所示。结构是用基于位移法插值的非线性梁柱框架单元、纤维截面、一维非线性 J₂ 钢筋模型(钢筋的屈服强度 $\sigma_y = 248.2 \text{ MPa}$,弹性模量 $E =$

210 GPa)和一维非线性 Kent-Scott-Park 模型模拟(混凝土的抗压强度 $f_c = 34.5 \text{ MPa}$);土采用三维(八节点)单元,与压力无关的多屈服面弹塑性模型^[32,35]模拟(其中四层土的性质见表 1)。结构与土的连接是通过在基础上位置相同的两个结点水平和竖向位移协调条件实现的;土的下部固定,侧向边界上等高程处节点通过的水平位移和竖向位移相等模拟简单剪切条件,具体描述见文献^[19]。该土与结构相互系统受双向(x 和 y 方向)地震荷载作用,地震波的时间历程如图 1 所示。图 2 为上层框架结构中 A 点的弯矩和曲率关系,图 3 为土体接近表面的高斯点 B 点的剪应力和剪应变关系。从图 2、图 3 中可以看出, A 点和 B 点在地震荷载作用下表现出强非线性。图 4 为第二层结构节点位移 u_2 对顶层土的剪切模量 G_1 的敏感性及其有限差分验证图。从图中可知,随着 $\Delta\theta/\theta$ 的减小,有限差分 $\Delta r/\Delta\theta$ 逐渐趋近于由直接微分法算出响应敏感性值 $\frac{\partial r}{\partial \theta}$ 。从而可以验证直接微分法在土与结构相互作用体系中计算的正确性。图 5(a)为土层间 x 方向相对位移的时间历程,图 5(b)为第一层结构 x 方向层间位移 Δ_{1x} 对每层剪切刚度相对敏感性。由这些图可知,影响层间 Δ_{1x} 最主要的参数是两个深处土层的剪切刚度 τ_3 和 τ_4 。



(a) 土和结构相互作用体系的几何尺寸及模型

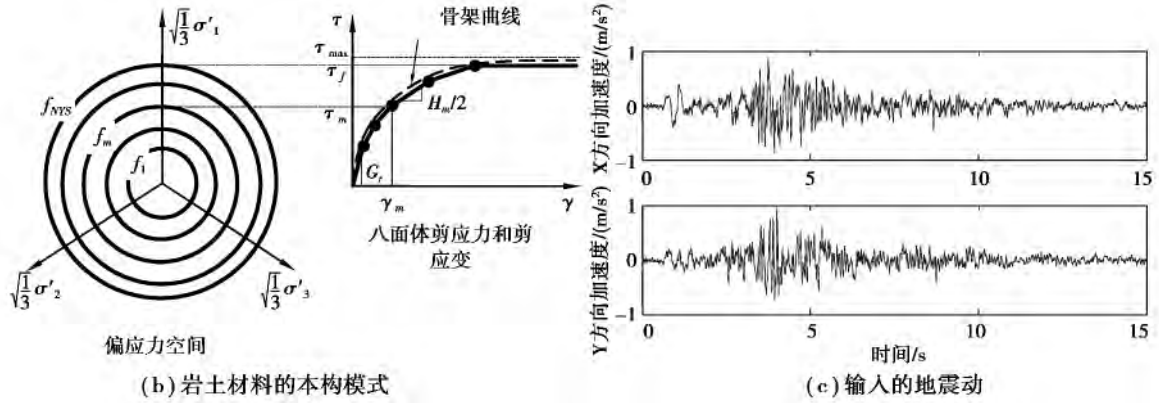


图 1 土和结构相互作用体系的几何尺寸、岩土材料的本构模型和输入的地震动

Fig. 1 Geometry, soil material constitutive model and input earthquake ground motion for the benchmark SFSI system

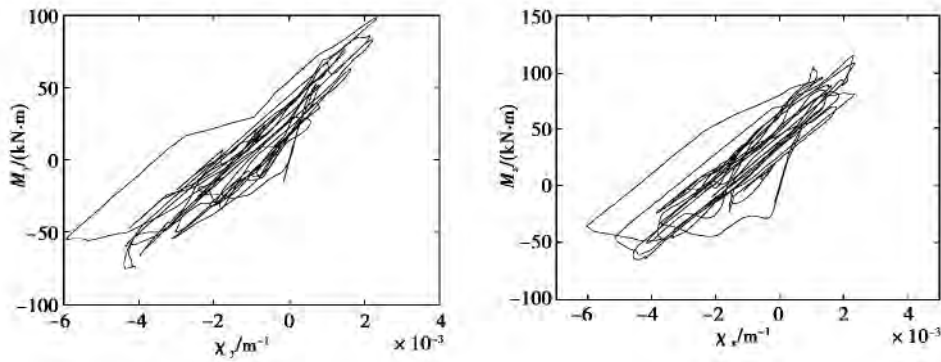


图 2 框架结构中 A 点的弯矩和曲率关系

Fig. 2 Local moment-curvature response in the frame at point A

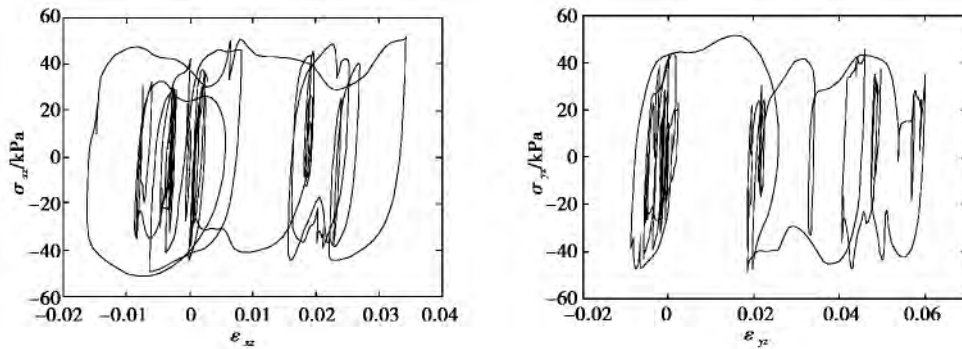


图 3 土中 B 点附近高斯点上剪应力和剪应变关系

Fig. 3 Local shear stress-strain response in the soil at point B

表 1 土的性质(土层的顺序为从上往下)

Table 1 Material properties of various layers of soil column (from top to bottom)

土层 #	G/kPa	tau_max/kPa	泊松比
1	54 450	33	0.35
2	33 800	26	0.35
3	96 800	44	0.35
4	61 250	35	0.35

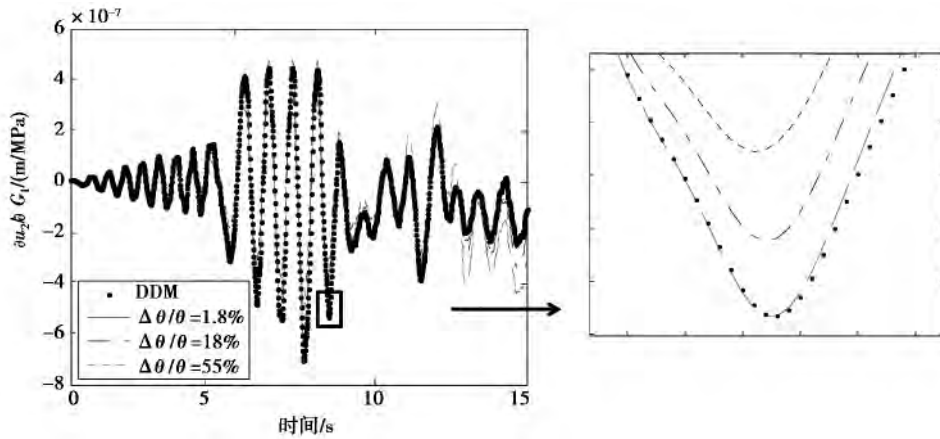


图 4 第二层节点位移 u_2 对第一层(顶层)土的剪切模量 G_1 的敏感性

Fig. 4 Sensitivity of nodal displacement u_2 to low strain shear modulus G_1 of the first (top) soil layer

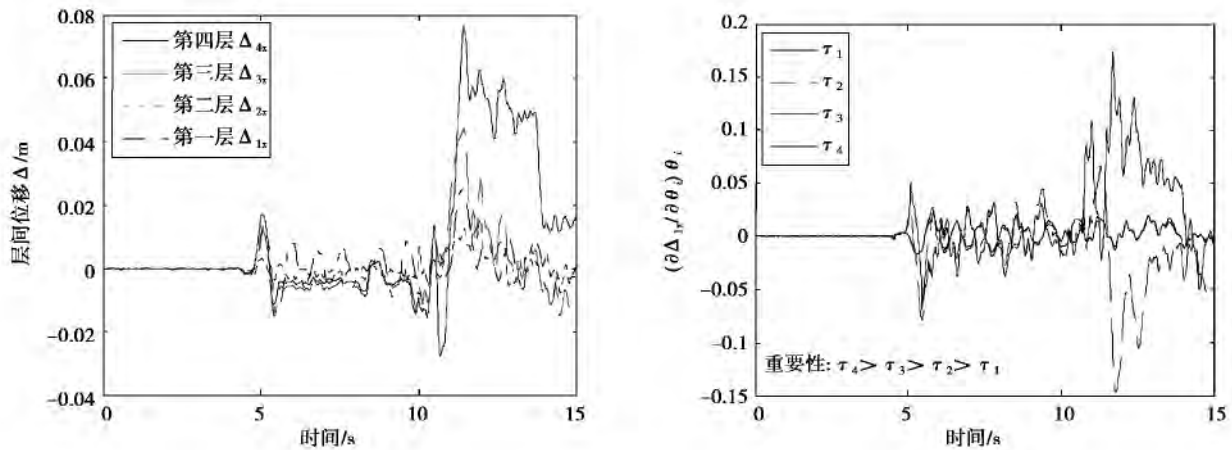


图 5 标准土和结构相互作用体系

Fig. 5 Benchmark SFSI system

3 结 语

阐述了有限元响应敏感性分析方法的最新进展,并重点论述了基于直接微分法的敏感性分析方法。讲述了直接微分法拓展和应用基于位移插值单元、力法插值单元、三场耦合单元、混凝土和岩土材料、涉及多点约束问题、土与结构相互作用问题、流固耦合问题等诸多学术和工程问题中的现状。通过一个在双向地震荷载作用下强非线性土与结构相互作用体系的算例,计算得到体系的响应以及响应敏感性,利用有限差分法证明敏感性分析计算结果的正确性,并通过对计算结果分析,来验证了直接微分法在实际工程中的有效性和实用性。直接微分法由于计算得到的是半解析解,具有精确、高效、不受数值噪音干扰等优点,具有潜在重要的工程价值。

参考文献(References)

- [1] Ditlevsen O, Madsen H O. Structural reliability methods [M]. Wiley, 1996.
- [2] Kileiber M, Antunez H, Hien T D, et al. Parameter sensitivity in nonlinear mechanics: theory and finite element computation [M]. Wiley, 1997.
- [3] Haukaas, T, Der Kiureghian A. Parameter sensitivity and importance measures in nonlinear finite element reliability analysis [J]. J Eng Mech, 2005, 131 (10): 1013-1026.
- [4] Der Kiureghian A, Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter [J]. Structural Safety, 2009, 31:105-112.
- [5] Conte J P. Finite element response sensitivity analysis in earthquake engineering [M]. Earthquake Engineering Frontiers in the New Millennium, Spencer & Hu (eds), Swets & Zeitlinger, 2001, 395-401.

- [6] Gu Q, Conte J P. Convergence studies in non-linear finite element response sensitivity analysis [J]. Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Proceedings of ICASP9, San Francisco, CA, USA, July 6-9, 2003.
- [7] Barbato M, Conte J P. Finite element response sensitivity analysis: a comparison between force-based and displacement-based frame element models [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194(12-16): 1479-1512.
- [8] Barbato M, Conte J P. Finite element structural response sensitivity and reliability analyses using smooth versus non-smooth material constitutive models [J]. International Journal of Reliability and Safety, 2006, 1(1-2): 3-39.
- [9] Barbato M, Gu Q, Conte J P. Response sensitivity and probabilistic response analyses of reinforced concrete frame structures [C]. Proceedings of the 8th NCEE, April 18-22, San Francisco, CA, USA, 2006
- [10] Barbato M, Zona A, Conte J P. Finite element response sensitivity analysis using three-field mixed formulation: general theory and application to frame structures [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(1): 114-161.
- [11] Zona, A, Barbato, M, Conte, J P. Finite element response sensitivity analysis of steel-concrete composite beams with deformable shear connection [J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 2005, 131(11): 1126-1139.
- [12] Zona A, Barbato M, Conte J P. Finite element response sensitivity analysis of continuous steel-concrete composite girders, Steel and Composite Structures [J]. an International Journal, 2006, 6(3): 183-202.
- [13] Gu Q, Barbato M, Conte J P. "Handling of Constraints in Finite-Element Response Sensitivity Analysis [J]." J. Eng. Mech., 2009, 135(12): 1427-1438.
- [14] Conte J P, Vijalapura P K, Meghella M. Consistent finite-element response sensitivity analysis [J]. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 2003, 129: 1380-1393.
- [15] Conte J P, Barbato M, Spacone E. Finite element response sensitivity analysis using force-based frame models [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 59: 1781-1820.
- [16] Kleiber M, And Hien T D. The Stochastic Finite Element Method. Basic perturbation technique and computer implementation [M]. Wiley, 1992.
- [17] Haftka R T, Gurdal Z. Elements of structural optimization [J]. Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [18] Gu Q, Conte J P. Convergence Studies in Nonlinear Finite Element Response Sensitivity Analysis. Proc. Ninth International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9), San Francisco, CA, USA, 2003, 297-304.
- [19] Gu Q. Finite element response sensitivity and reliability analysis of Soil-Foundation-Structure-Interaction (SFSI) systems [D]. dissertation, University of California, San Diego, USA, 2008.
- [20] Scott M H, Franchin P, Fenves, G L, et al. Response sensitivity for nonlinear beam-column elements [J]. Journal of Structural Engineering (ASCE), 2004, 130(9): 1281-1288.
- [21] Washizu K. Variational methods in elasticity and plasticity [M]. Pergamon Press, 1975.
- [22] Belytschko T, Liu W K, Moran B. Nonlinear finite elements for continua and structures. Wiley, 2000.
- [23] Barbato M, Zona, K Conte J P. Finite element response sensitivity analysis using three-field mixed formulation: general theory and application to frame structures [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(1): 114-161.
- [24] Gu Q, Qiu Z J, Conte J P. Consistent finite element response sensitivity analysis: application to a multi-surface cap plasticity model [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014 (Under Review)
- [25] Hofstetter G, Simo J C, Taylor T L. A modified cap model: closest point solution algorithms [J]. Comp. & Structures, 1993, 46(2): 203-214.
- [26] Dafalias, Y F. Bounding surface plasticity. I: mathematical foundation and hypoplasticity [J]. J. Eng. Mechanics, ASCE, 1986, 112: 966-987.
- [27] Gu Q, Wang G. Direct differentiation method for response sensitivity analysis of a bounding surface plasticity soil model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 135-145.
- [28] Prevost J H. Plasticity theory for soil stress-strain behavior [J]. J Eng Mech Div (ASCE), 1978, 104(EM5): 1177-1194.
- [29] Elgamal A, Yang Z, Parra E, et al. Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils [J]. Int J Plasticity, 2003, 19: 883-905.

(下转第 123 页)

从南岳地区花岗岩残积土、全风化花岗岩、两者过渡层土体矿物组成成分对比分析可得: 花岗岩残积土的风化程度最高, 衍生矿物种类最多, 原生矿物种类最少; 全风化花岗岩的风化程度弱于花岗岩残积土, 衍生矿物种类最少, 原生矿物种类最多; 两者过渡层土体的风化程度介于花岗岩残积土与全风化花岗岩之间。

5 结 论

运用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪对南岳地区花岗岩残积土从微观结构和矿物成分两方面进行微观特性分析研究, 得出以下结论:

(1) 在 SEM 照片中可以发现土体中分布着大量尺寸不一的孔隙与裂隙, 微观结构中存在团粒状结构、片块状结构、片状结构、块状结构、细粒状结构。

(2) 通过对三组样品的 XRD 衍射谱图分析可知, 南岳地区花岗岩残积土主要矿物成分为高岭石、珍珠陶土、斜长石、水钠锰矿、埃洛石、石英、地开石、蛇纹石及硫酸镁。

(3) 通过对花岗岩残积土、全风化花岗岩、两者过渡层土体的微观结构和矿物成分对比分析可知, 花岗岩风化程度越高, 微观结构越复杂多样, 土体中存在的原生矿物越少, 衍生矿物越多。

(4) 由于花岗岩残积土中存在着易溶于水矿物和遇水膨胀的高岭石矿物, 且颗粒间孔隙、裂隙连通性好使土体在水作用下体现出其宏观的软化崩解特性。

参考文献(References)

- [1] 吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [2] 张抒. 广州地区花岗岩残积土崩解特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- [3] 钱自卫, 姜振泉, 孙强, 等. 深部煤系软岩遇水崩解的宏观特征及微观机理研究[J]. 高校地质学报, 2011, 17(4): 605-610.
- [4] 刘晓明, 熊力, 罗卫华. 通平高速公路红砂岩崩解的微观特性[J]. 公路交通科技, 2011, 28(10): 7-11.
- [5] SHI B, LI S. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils[J]. Science in China, Series B, 1995, 36(8): 741-748.
- [6] Yamaguchi H, Yoshida K, Kuroshima I, et al. Slaking and shear properties of mudstone[J]. Rock Mechanics and Power Plants, 1988: 133-144.
- [7] PRIKRYL R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, (38): 671-682.
- [8] Konert M, Vandenberghe J E F. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: A solution for the underestimation of the clay fraction[J]. Sedimentology, 1997, 44(3): 523-535.
- [9] Irfan T. Y. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1996, 29: 5-35.
- [10] 赵柳. 南岳地区全风化花岗岩微观特性及崩解特性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.

(上接第 86 页)

- [30] Gu Q, Conte J P, Elgamel A, et al. Finite element response sensitivity analysis of multi-yield-surface J2 plasticity model by direct differentiation method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198: 2272-2285.
- [31] Simo J C, Taylor R L. Consistent tangent operators for rate independent elastoplasticity [J]. Comput. Methods Appl Mech Eng, 1985, 48: 101-118.
- [32] Gu Q, Conte J P, Yang Z, et al. Consistent tangent moduli for multi-yield-surface J2 plasticity model[J]. Computational Mechanics, 2011, 48(1): 97-120.
- [33] Barbato M, Conte J P. Finite element structural

- response sensitivity and reliability analyses using smooth versus non-smooth material constitutive models [J]. Int J of Reliability and Safety, 2006, 1: 3-39.
- [34] Haukaas T, Der Kiureghian A. Finite element reliability and sensitivity methods for performance-based engineering [R]. Report PEER 2003/14, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, USA, 2004.
- [35] Prevost J H. Mathematical modelling of monotonic and cyclic undrained clay behaviour. International [J]. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1977, 1(2): 195-216.