

大坝结构静动力分析的精细化模型^{*}

林 皋^{1,2}, 庞 林^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学
工程抗震研究所建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 阐述近期大连理工大学抗震研究所在大坝抗震分析方面所取得的研究成果, 为了提高大坝结构静动力分析的计算精度与效率, 提出多边形单元的计算技术与奇异应力场计算方法, 该方法使应力计算成果较有限元法有很大的改进, 且计算工作量比较节省。

关键词: 静动力分析; 多边形单元; 奇异应力场

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0001-09

0 前言

大坝结构的安全对城市抗震防灾有重要影响。2008年5月12日发生的汶川8.0级特大地震对位于成都市西北60 km岷江上游的紫坪铺大坝造成了一定的地震损伤, 威胁到成都市的安全。吉林市的安全与丰满大坝的安全息息相关, 密云水库、官厅水库的安全也对北京市的安全产生一定影响。研究城市防灾需要关注周边大坝的安全设防。

新中国成立以来, 特别是改革开放以来, 我国水利水电建设迅速发展。进入21世纪, 世界大坝建设中心已经转向中国。一大批世界级的高坝已经或正在中国大地上兴建, 坝高屡破世界纪录, 其成就举世瞩目。我国地处世界两大活跃地震带——环太平洋地震带和欧亚地震带的交汇地段, 地震活动频繁。为适应地震危险区大坝建设的需要, 我国的大坝抗震技术也蓬勃发展, 并进入世界先进行列。

自20世纪50年代以来, 大连理工大学工程抗震研究所一直根据我国大坝抗震的需要, 致力于研究如何提高大坝抗震分析的水平。大坝抗震的特点在于大坝所处环境复杂(图1), 参照世界坝工专家Chopra(1992, 2008)的意见, 大坝抗震的关键技术包括坝与库水的动力相互作用分析, 坝与无限地基的动力相互作用分析, 筑坝材料的动态特性及大坝地震损伤发展与风险分析。在

2013年中国工程院举办的“中国工程科技论坛——水安全与水利水电可持续发展”会议上, 林皋(2014)提出了大坝抗震模型的改进意见。关于坝与库水的动力相互作用分析需要考虑水的可压缩性以及动水压力波在水库边界的吸收作用, Chopra(2008)采用有限元法(FEM)进行求解, 动水压力按坝的振动模态展开, 计算复杂、难以实际应用。Lin等(2007a, 2012a)采用比例边界有限元法(SBFEM)进行求解, 按库水的模态进行展开, 计算简便、精度高、便于实际应用。关于坝与无限地基的动力相互作用, 由于计算模型比较复杂, 文献中一般都将无限地基简化为均质地基进行考虑, 难以反映实际情况。我们将无限地基分为层状分布、分块不均质和近场杂乱不规则等几种类型, 分别提出了不同的计算模型(Lin *et al.*, 2015, 2007b; Yin *et al.*, 2013), 计算结果都具有较好的精度与效率。为了提高坝—库水—地基系统时域分析的计算精度与效率, Lin等(2012b)提出以等几何分析方法(isogeometric analysis, 简称IGA)代替FEM来进行坝的应力分析, 并将IGA与SBFEM相结合来进行坝与库水和坝与无限地基的动力相互作用分析。关于坝材料的动力特性方面, 混凝土是速率敏感性材料。自从第一颗原子弹1945年在日本广岛爆炸以后, 为了防卫核爆炸造成的灾难, 许多国家都加强了混凝土材料抗击核冲击的研究。但这种研究偏重单调瞬时冲击, 而且抗压性能居多, 抗拉性能偏少。地震荷载

^{*} 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(51138001)、国家自然科学基金委托创新研究群体项目(51421064)和中央高校基本科研业务费专项基金(DUT15TD17)联合资助。

的特点是不规则的循环往复,而且加载速率也偏低。为此,我们开展了 2000 多试件混凝土在地震作用下的动态特性的研究,取得了一批有价值的成果 (Yan, Lin, 2006; Lin *et al*, 2007c)。

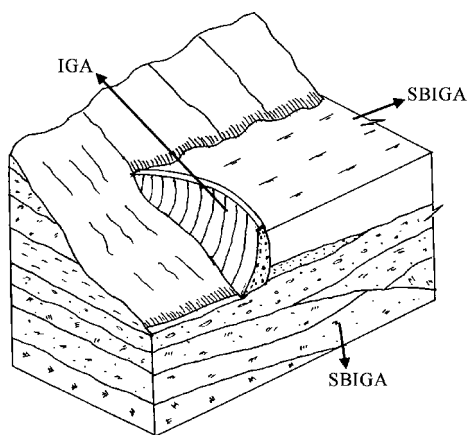


图 1 坝—库水—地基系统

Fig. 1 Dam - reservoir - foundation system

笔者认为除了计算模型以外,数值计算方法也对大坝抗震分析的计算精度与效率产生影响。大坝地震响应分析中,有限元方法的应用比较普遍。有限元法可以适应各种不规则的几何边界条件和分布不规则的单元材料特性,可以应用于各种类型物理问题的求解,计算能力强,不受问题求解自由度的限制。但有限元法也有其不足之处,其主要采用低阶插值函数,连续性差,应力计算精度低。但在工程设计中应力是对大坝安全性评价的重要依据,所以,有必要寻求更为有效的其它数值计算方法。根据我们研究,提出以下计算模型和方法供参考,欢迎批评指正。

1 多边形单元技术

多边形单元 (PE - Polygon Element) 不是一个新概念,但经过澳大利亚新南威尔士大学 (UNSW) 宋崇民教授团队的发展,建立在 SBFEM 基础上的多边形单元已经成为与 FEM 一样具有广泛适应性的网格离散技术,对数值计算具有强大的功能。PE 可称为广义的 FE。

大连理工大学发展了 PE 技术在结构静动力分析中的应用,主要工作为: (1) 单元细化与连续性升阶可以只在 PE 的边界上进行,不改变网格的拓扑结构,使应力计算精度显著提高,但计算工作量则很节约; (2) 将 PE 与曲线边界相结合,既可构

造纯直线边的 PE,也可构造曲线边的 PE,或直线边与曲线边相结合的 PE; (3) 将 PE 应用于结构的奇异应力场分析,可以达到很高的计算精度。

多边形单元按 SBFEM 进行建模 (图 2)。单元域内选择一点 O 作为比例相似中心,其要求是从 O 点可以看见边界上各点,或 O 点可与边界上任意点用直线连接,没有障碍。单元各边上可以任意划分子单元和结点,数目不限。如图 2 所示,PE 为六边形,每边可以只划分一个子单元,每个子单元含 3 个结点,则具有 2 阶精度。AB 边也可以划分 2 个子单元,每个子单元各 3 个结点共 5 个结点,这就相当于网格加密。各子单元用 SBFEM 进行建模,由于 SBFEM 为半解析方法,从 O 点至边界 AM 上任意点相连的射线上,变量具有解析解,这就使 PE 计算域具有很高的连续性,使应力计算达到很高的计算精度。

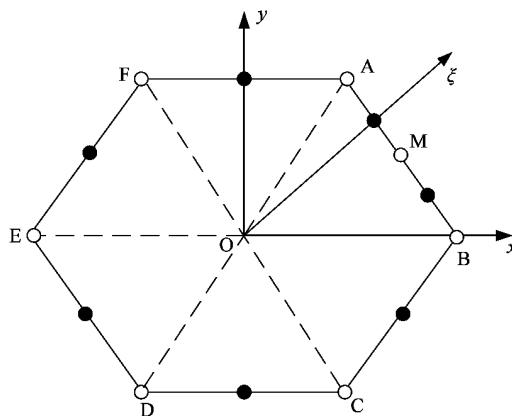


图 2 多边形单元

Fig. 2 Polygon element

含有曲线边的多边形单元如图 3 所示。这时,含曲线边 AF 的子单元 1° 按等几何分析 (IGA) 建模,采用非均匀有理 B 样条 (NURBS) 作为插值基函数,即使在很粗网格的条件下也可以准确地描述几何外形。IGA 充分利用了 NURBS 的优点,可以在保持几何外形不变的条件下方便地进行网格细分,提升插值的阶次,提高计算的精度,所以很适于曲线形结构的建模。NURBS 基函数由控制点进行描述,不具有插值性。图 3 中 BE、CD、DE 各边相应的子单元由 SBFEM 进行建模,AB、EF 边相对应的两个子单元 2° 和 6° 按 SBFEM 建模,但是由于和 1# 相连需作一定调整。亦即 A 点的位移需用控制点 1、2、3 的位移加以表示, F 点的位移需用控制点 2、3、4 的位移加以表示,这样就保持了 PE 单元位移场的连续性。

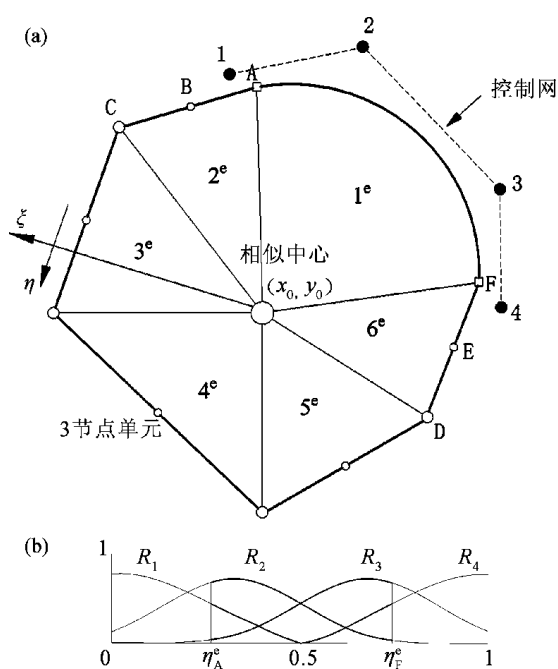


图3 含曲线边的多边形单元

(a) 典型的 PE 单元; (b) 曲边 AF 的插值基函数

Fig. 3 Polygon element with curved boundary

(a) typical PE element; (b) interpolation basis

function of AF with curved boundary

PE 由域内三角形单元形心点连线加周边三角形单元中点连线构成 (图4), 所以建模非常方便。单元便于细分和拼合, 如图5所示。

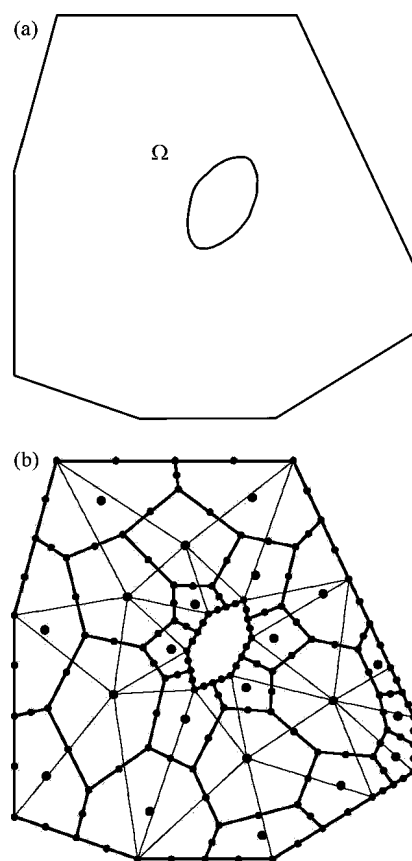


图4 多边形单元建模

(a) 任意物理域; (b) 多边形网格

Fig. 4 Modeling of polygon elements

(a) arbitrary physical domain; (b) polygon grid

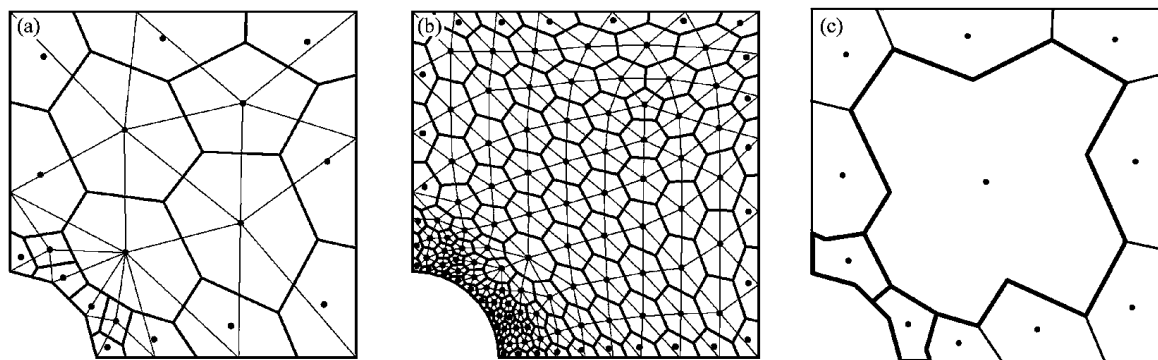


图5 多边形单元细化和拼合

(a) 初始多边形网格; (b) 细分的多边形网格; (c) 多边形网格合并

Fig. 5 Refinement and combination of polygon element

(a) initial polygon grid; (b) refinement of polygon mesh; (c) merging of polygon grid

多边形单元具有以下特点: (1) 适于各种几何形体的建模, 具有高度灵活性; (2) 单元具备单位分解性与线性完备性, 通过分片检验; (3) 可以将网格加密进行单元细化, 也可在不改变网

格拓扑结构的条件下, 在单元各边上增加结点实现单元细化和连续性升阶; (4) 可以方便地进行粗细网格过渡, 只需在不同网格交界面上增加结点即可 (图6); (5) 可以和 FE 和 NURBS 兼容。

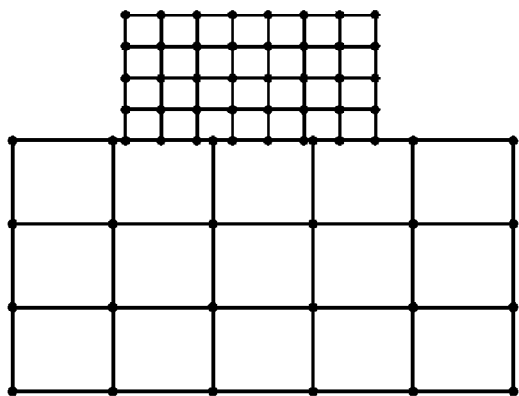


图6 粗细网格直接过渡, 不增加任何复杂性

Fig. 6 Seamless transformation from coarse to refined mesh without introducing any additional complexity

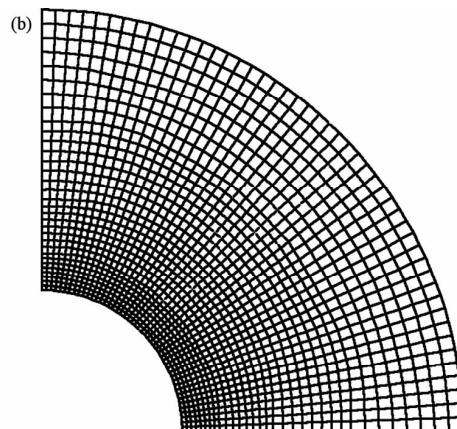
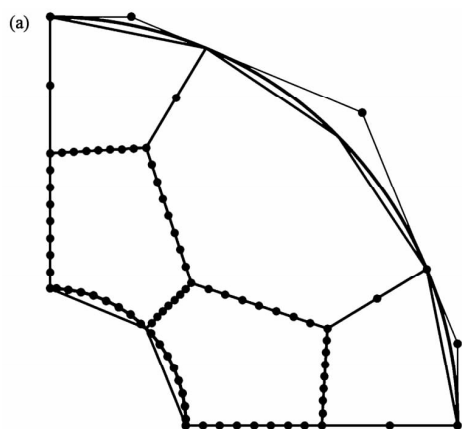


图7 厚壁圆筒的 PE (a) 与 FE (b) 网格划分

Fig. 7 Mesh generation of PE (a) and FE (b) for thick cylinder

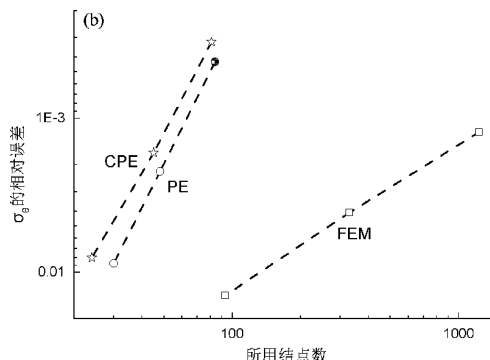
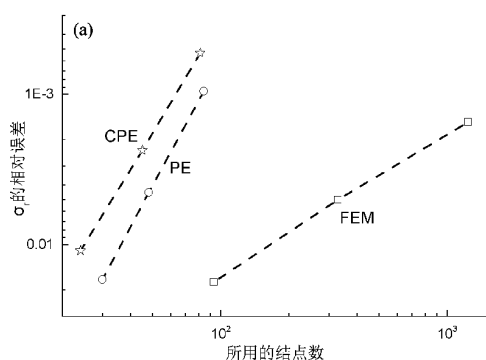


图8 PE 和 FE 计算精度与网格结点数关系的对比

Fig. 8 Comparison of the relationship of the calculation accuracy of PE and FE and node number of grid

2.2 曲线形溢流坝受静水压力作用

某工程溢流坝, 高 $H = 66$ m, 受静水压力作用。坝材料参数假设为: 弹性模量 $E = 36.5$ GPa; 泊松比 $\gamma = 0.167$ 。采用 PE 与 FE 两种方法对该工程溢流坝进行计算对比。坝体两种方法网格划分如图 9 所

2 数值算例

为了检验 PE 的效果, 通过以下算例加以说明。

2.1 厚壁圆筒承受均匀内压作用

本例有解析解。利用对称性, 只取厚壁圆筒的 $1/4$ 进行离散。假设内压力 $p = 1$, 径向与环向应力只和内径和外径的比值有关, 假设 $r/R = 1/3$ 。将 PE 与 FE (二阶单元) 的计算结果进行对比, 两种方法的网格划分如图 7 所示。两种方法计算精度与解析解相比的误差随网格结点数的变化的对比如图 8 所示, 图中 PE 代表直线边界网格, CPE 代表内外曲线边界网格, 由图可见 PE 的计算优越性是明显的。

示, 廊道部位网格划分如图 10 所示。图 10 图题中 p 表示单元离散所用的插值阶数。廊道上部曲线边界的应力分量对比如图 11 所示, 廊道周边第一主应力分布如图 12 所示。由图可见, 有限元网格即使在廊道角点 O 附近细分, 应力奇异性仍无法反映。

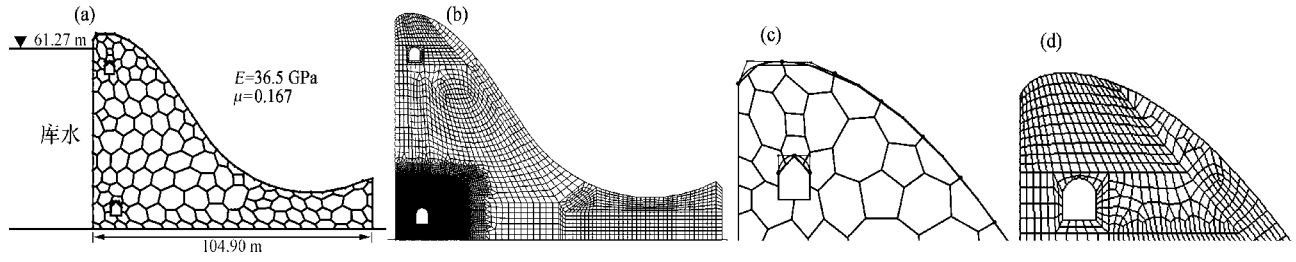


图 9 溢流坝网格划分

(a) PE 模型; (b) 有限元模型 (mesh4); (c) 坝顶局部图 (SBP); (d) 坝顶局部图 (FEM)

Fig. 9 Mesh generation for overflow dam

(a) PE model; (b) finite element model (mesh4); (c) the local map of dam crest; (d) the local map of dam crest

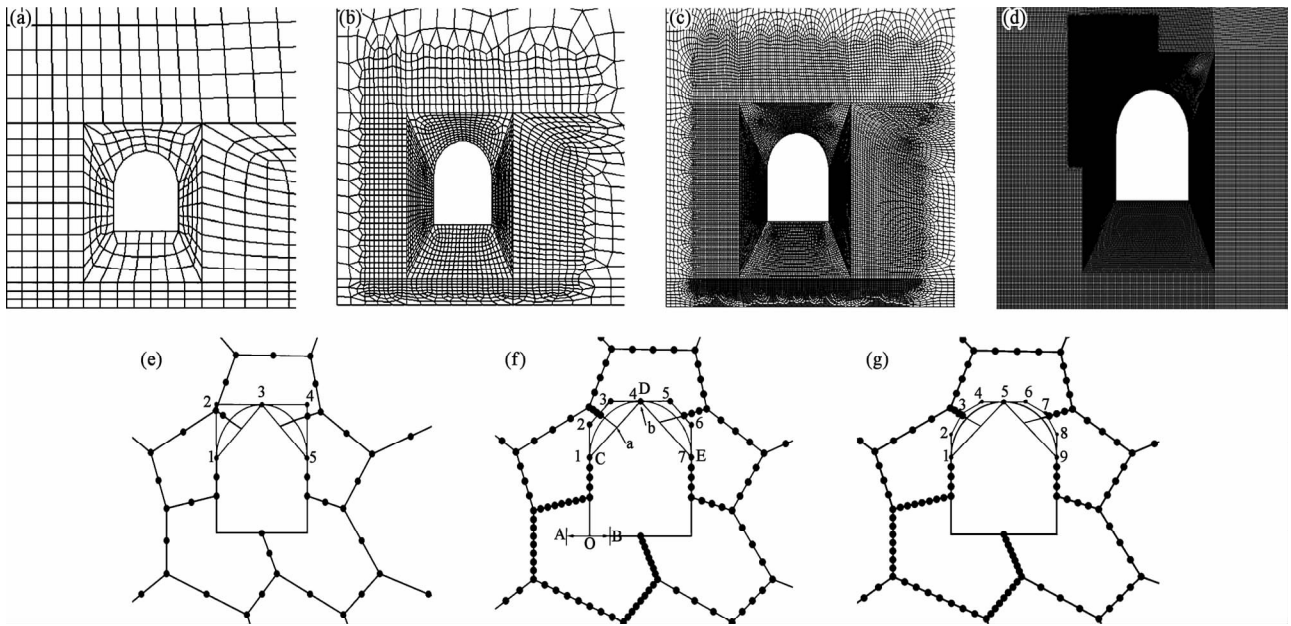


图 10 廊道周边网格划分

(a) FEM mesh 1; (b) FEM mesh 2; (c) FEM mesh 3; (d) FEM mesh 4;

(e) PE mesh1 ($p=2$); (f) PE mesh2 ($p=3$); (g) PE mesh3 ($p=4$)

Fig. 10 Mesh generation around the gallery

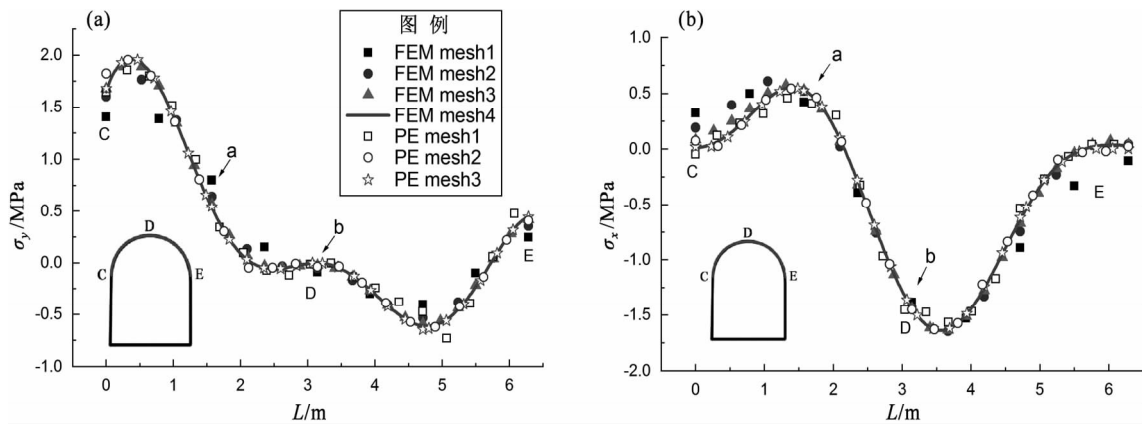


图 11 廊道上部曲线边界应力值对比

Fig. 11 Comparison of stress on the curved boundary of the top of the gallery

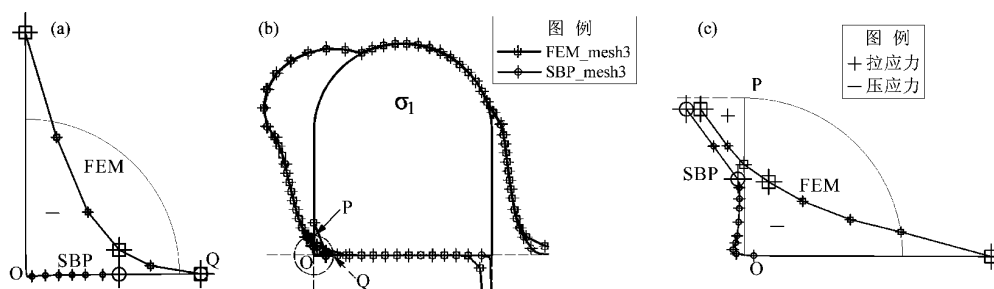


图 12 廊道角点的奇异应力场分布

(a) 整体分布; (b) 沿竖直自由面分布; (c) 沿水平自由面分布

Fig. 12 Singular stress distribution around the corner of the gallery

(a) the whole distribution; (b) distribution along the vertical free surface; (c) distribution along the horizontal free surface

3 异应力场分析

有限元方法无法处理应力奇异性问题。SBFEM 由于径向具有解析解, 所以特别有利于处理应力奇异性问题。关键是须将应力奇异点设置

于相似中心处。但是 SBFEM 中, 通过相似中心的边界不能进行离散, 只能将此边界上作用的外力或变形转化为相应的边界条件, 在计算方程中加以体现。我们通过算例来加以说明。

研究坝踵点在水压力作用下的奇异应力分布。图 13 表示 PE 和 FE 两种网格划分。

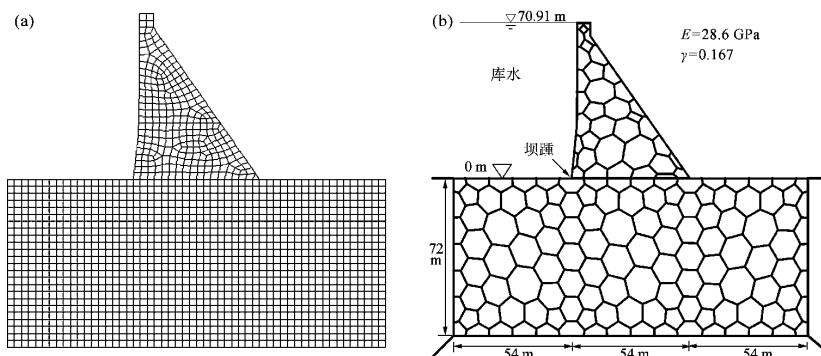


图 13 PE (a) 与 FEM (b) 网格划分

Fig. 13 Mesh generation of PE (a) and FEM (b)

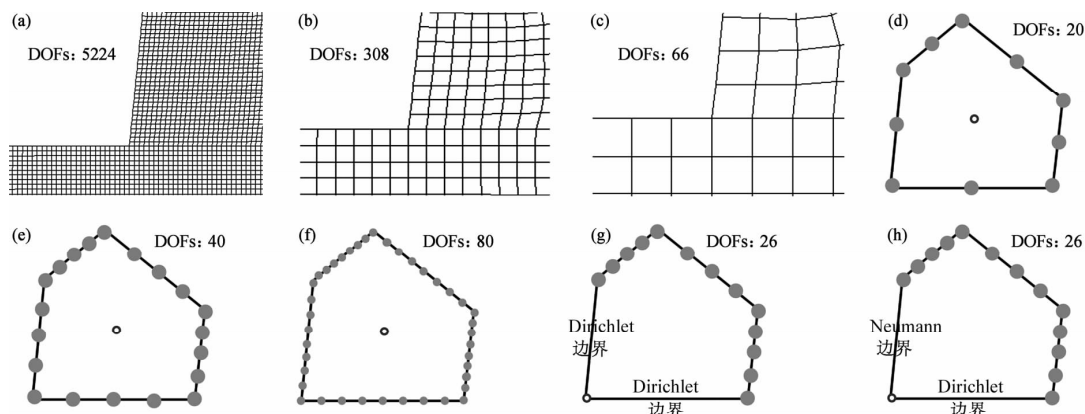


图 14 坝踵点奇异应力场计算的各种网格划分

(a) SBFEM mesh1; (b) SBFEM mesh2; (c) SBFEM mesh3; (d) PE1; (e) PE2; (f) FEM mesh1; (g) FEM mesh2; (h) FEM mesh3

Fig. 14 Various mesh generation for evaluating singular stress field around dam heel

图 14 表示 PE 与 FE 在坝踵点附近的网格形状和节点分布。图 15 表示各种方法的计算结果。图中 SBFEM 相似中心位于域内，但采用不同的结点数进行离散。PE 为相似中心位于坝踵 A 点，但采用不同的边界条件。由图可见，FEM 即使进行网格细分都无法表示奇异应力场的分布，采用 SBFEM 时，如不将相似中心置于应力奇异点处也难以描述坝踵点附近的奇异应力分布。采用 PE 方法同时将相似中心置于坝踵点有可能获得接近奇异应力场分布的结果。这时需通过其它方法求得 AB 和 AC 两边界面上的位移，以建立相应的 AB 和

AC 边的 Dirichlet 边界条件。但处理方式不同所取得的效果也有差别。笔者采用了两种方式处理。PE1 中 AB 和 AC 两边界均按其它方法计算出的位移建立 Dirichlet 边界条件进行计算，而 PE2 中边界 AC 采用已知水压力建立 Neumann 边界条件，AB 边界仍采用其它方法计算的位移建立 Dirichlet 边界条件。可以看出 PE2 的效果比较好，这是因为 AC 边的边界条件比较准确，同时 AC 边上的水压力也对奇异应力场影响比较大的缘故。因此，为了取得良好的奇异应力场的效果，建立边界面的准确边界条件仍然很重要。

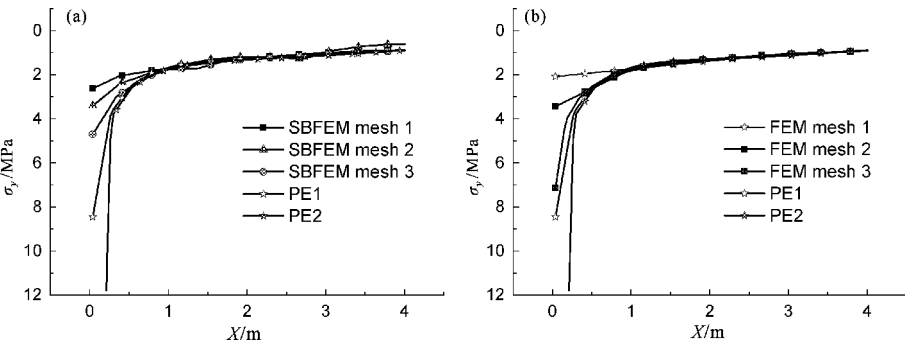


图 15 PE 与 SBFEM (a)、PE 与 FEM (b) 奇异应力场的计算结果比较
Fig. 15 Comparison of calculation result of the singular stress field between PE and SBFEM (a), between PE and FEM (a)

动力问题奇异应力场的分析也可采用相同的方法进行处理。图 16 ~ 20 为地震波作用下坝踵点奇异应力场的分析结果。采用的材料参数列入表 1，为了表示 PE 的优越性，将 PE 结果与比较准确的 IGA 的计算结果进行比较。IGA 的各级网格均可自动加密，网格采用 2 阶单元。图 18 表示奇异应力场分析结果的比较。由图可见，在距坝踵点水平距离 $x = 1.0\text{ m}$ 以外，各种网格的计算结果都收敛而且相符性比较好。但距离坝踵点 $x = 0.5\text{ m}$ 范围以内，IGA1 – IGA3 偏差较大，IGA4 结果与本文

方法吻合良好，达到收敛要求。图 19 为坝踵点的位移与加速度响应时程比较。由于位移不存奇性，与应力结果不同，各网格计算结果相差不大。

表 1 模型采用的计算参数			
Tab. 1 Calculation parameters for the models			
项目	E/GPa	泊松比 γ	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
坝体	28.6	0.167	2 400
地基	11.7	0.25	2 400
水	—	—	1 000

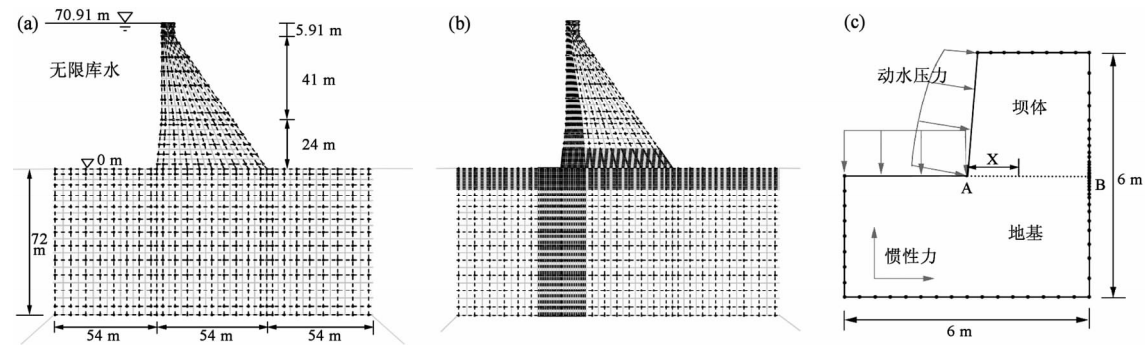


图 16 力计算网格划分
Fig. 16 Mesh generation for dynamic calculation

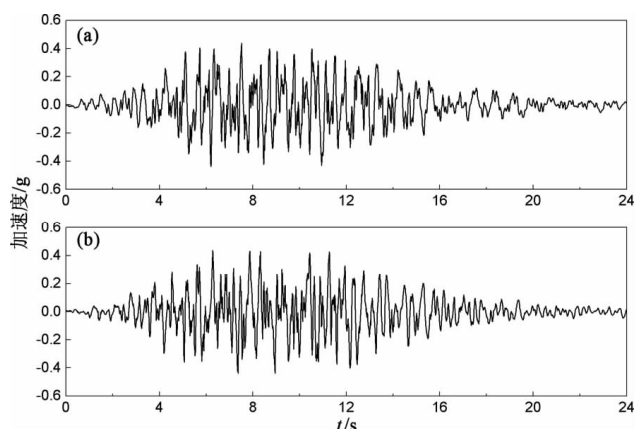


图 17 坝基输入地震波水平 (a) 与竖直 (b) 分量
Fig. 17 Horizontal (a) and vertical (b) component for the inputting seismic wave at dam foundation

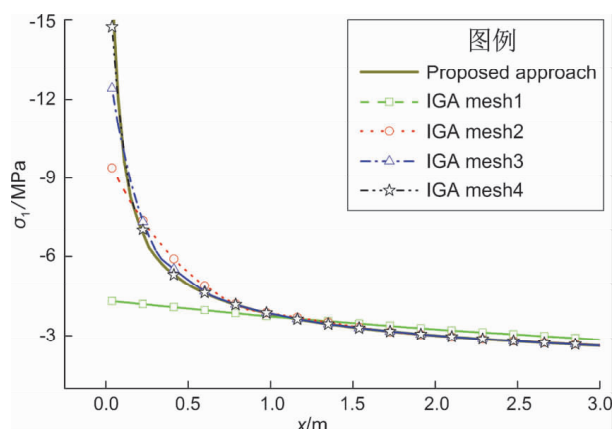


图 18 异应力场计算结果及比较
Fig. 18 Results and comparison of the singular stress field

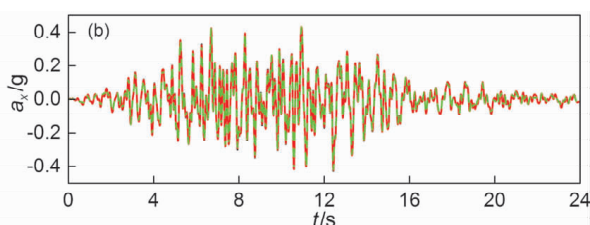
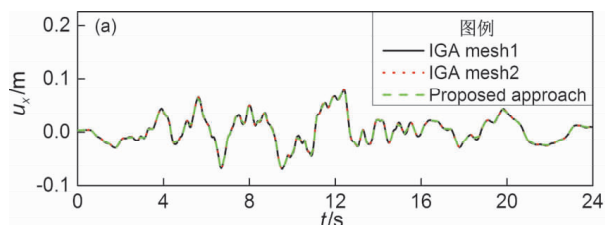


图 19 坝踵点位移 (a) 与加速度响应 (b) 历时曲线
Fig. 19 Response of displacement (a) and acceleration time-history (b) at dam heel

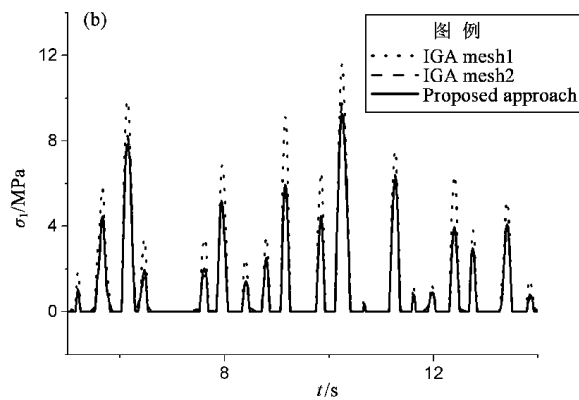
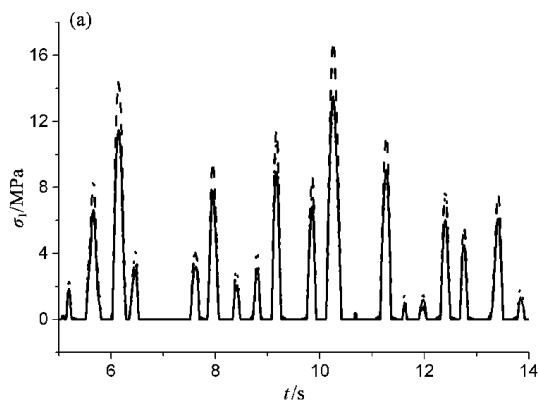


图 20 $x=0.5$ m (a) 和 $x=1.0$ m (b) 结点第一主应力的响应历时曲线
Fig. 20 Response curves of the first principle stress time-history at representative point of $x=0.5$ m (a) and $x=1.0$ m (b)

4 结语

按比例边界有限元法 (SBFEM) 原理建立的多边形单元 (PE) 是一种提高应力计算精度的高效数值方法。多边形单元可以进一步发展为多面

体单元, 即将二维问题发展到三维问题, 具有广阔的发展前景。

参考文献:

- 林皋. 2014. 混凝土高坝抗震分析的新技术[C]//中国工程科技论坛: 水安全与水利水电可持续发展. 北京: 高等教育出版社, 49-79.

- Chopra A K. 1992. Earthquake analysis, design, and safety evaluation of concrete arch dams [Z]//Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake. Rotterdam: Balkema A A. publisher, 6763.
- Chopra A k. 2008. Earthquake analysis of arch dams: factors to be considered [C]//The 14WCEE. Beijing, China.
- Lin G, Du J G, Hu Z Q. 2007a. Dynamic dam-reservoir interaction analysis including effect of reservoir boundary absorption [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 50(1): 1 – 10.
- Lin G, Du J, Hu Z. 2007b. Earthquake analysis of arch and gravity dams including the effects of foundation inhomogeneity [J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 1(1): 41 – 50.
- Lin G, Han Z, Li J. 2015. General formulation and solution procedure for harmonic response of rigid foundation on isotropic as well as anisotropic multilayered half-space [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 70: 48 – 59.
- Lin G, Wang Y, Hu Z. 2012a. An efficient approach for frequency-domain and time-domain hydrodynamic analysis of dam-reservoir systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 41(13): 1725 – 1749.
- Lin G, Yan D, Yuan Y. 2007c. Response of concrete to dynamic elevated-amplitude cyclic tension [J]. ACI Material Journal, 104(6): 561 – 566.
- Lin G, Zhang Y, Wang Y, et al. 2012b. A time-domain coupled scaled boundary isogeometric approach for earthquake response analysis of dam – reservoir-foundation system [C]//15th World Conference on Earthquake Engineering Lisbon, Portugal.
- Yan D, Lin G. 2006. Dynamic properties of concrete in direct tension [J]. Cement and Concrete Research, 36(7): 1371 – 1378.
- Yin X, Li J, Wu C, et al. 2013. NSYS implementation of damping solvent stepwise extraction method for nonlinear seismic analysis of large 3-D structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 44: 139 – 152.

Model Refinement for Static and Dynamic Analysis for Dam Structures

LIN Gao^{1,2}, PANG Lin^{1,2}

(1. State key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Lianning, China)

(2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract

The recent progress of the research which is conducted by the Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology is briefly introduced. To enhance the accuracy and efficiency of the static and dynamic stress analysis for dam structures, the calculation technique for exploiting salient functions of polygon elements and the method for evaluating singular stress field has been developed. Compared with the finite element analysis, these achievements results of stress analysis have been greatly improved. Meanwhile, the computational effort is reduced to a great extent.

Key words: static and dynamic analysis; polygon element; singular stress field