

基于 BIM 技术的混凝土截面时效非线性分析

叶英华¹, 刘文鹏², 刁波¹

(1. 北京航空航天大学 土木工程系, 100191 北京; 2. 中国建筑科学研究院, 100013 北京)

摘要: 分析了现有混凝土截面时效非线性分析的数据需求、算法和数据处理方式的特点, 应用面向对象的参数化建模方法建立了描述与表达混凝土截面时效非线性分析信息需求的建筑信息模型 (BIM), 将考虑环境、荷载和内部因素影响的混凝土耐久性劣化理论应用于时效本构关系拟合和截面时效非线性分析, 得到截面的内力-变形全过程时效信息模型; 开发了基于 BIM 技术的混凝土截面时效非线性分析软件系统 (Non-Linear Analysis System, NLAS), NLAS 的实例应用结果表明, 采用 NLAS 系统进行混凝土截面时效非线性分析能够提高分析过程中信息提取、交流和共享效率、减小数据流失和错误, 本研究探索的 BIM 技术在混凝土截面时效非线性分析中的应用方法同样适用于其他建设工程领域。

关键词: 建筑信息模型; 工业基础分类; 混凝土截面非线性分析; 混凝土结构耐久性

中图分类号: TU311.41

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0106-07

BIM-based time-dependent non-linear analysis of concrete section

YE Ying-hua¹, LIU Wen-peng², DIAO Bo¹

(1. Dept. of Civil Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China; 2. China Academy of Building Research, 100013 Beijing, China)

Abstract: The theory model of current RC section non-linear analysis is studied to clarify the data demand, algorithm characteristics and data processing pattern. Parametric object-oriented modeling method is adopted to express the data demand of RC section non-linear analysis and the corresponding building information model (BIM) is developed. The BIM is used to fit the constitutive relationship of concrete according to environmental condition, loads and internal factors. Furthermore, Non-Linear Analysis System is developed based on the BIM to automate the analyzing process of deterioration laws of RC section under conditions of environment, loads and internal acts. A case study is elaborated to demonstrate how the system is capable of conducting the RC section non-linear analysis and the results fit well with the data from detection on spot.

Key words: building information model (BIM); industry foundation class (IFC); non-linear analysis of concrete section; durability of concrete structure

BIM (Building Information Model) 将取代传统 2D CAD 技术成为未来计算机辅助建设项目生命周期信息集成与管理的主流技术^[1]。芬兰、挪威、德国等欧洲国家基于 BIM 技术的应用软件普及率已达 60% ~ 70%^[2]。随着 IAI (International Alliance for Interoperability) 发布 IFC (Industry Foun-

dation Class) 标准信息模型^[3-7], BIM 技术的研究和应用在国外引起了广泛关注, Vanlande 等^[8]建立了设计阶段与使用维护阶段的信息模型 AEC (Architecture, Engineering and Construction); Wan 等^[9]研究了用于表达预应力荷载和荷载组合的信息模型; Yu 等^[10]建立了用于设备管理的 FMC (Facilities Management Classes) 信息模型; Schein^[11]建立了针对建筑自动化系统 (Building Automation System) 的信息模型。然而 BIM 技术在我国的研究尚处于起步阶段, 清华大学张建平、胡振中等^[12]建立了 4D 施工冲突和安全分析与管理

收稿日期: 2011-06-29.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2007BAF23B02-06);
国家自然科学基金资助项目 (51078015).

作者简介: 叶英华 (1959—), 男, 教授, 博士生导师;
刁波 (1958—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘文鹏, dolphinelwp@163.com.

信息模型,开发了基于 IFC 标准的建筑工程 4D 施工管理系统 4D - GCPSU;上海交通大学邓雪原、张之勇等^[13]研究了 IFC 模型自动生成结构分析模型的方法,实现了从 IFC 文件自动提取结构分析信息;十一五期间,清华大学、中国建筑科学研究院、北京航空航天大学共同承接的国家十一五科技支撑计划“基于 BIM 技术的下一代建筑工程应用软件研究”项目目标是将 BIM 技术和 IFC 标准应用于建筑设计、成本预测、建筑节能、施工优化、安全分析、耐久性评估、信息资源利用 7 个方面,本研究为其中基于 BIM 技术的建筑工程耐久性评估软件系统子课题的核心功能模块。

由于混凝土材料的本构关系具有非线性,并且在环境、荷载和内部因素下随时间产生不可逆的变化,基于本构关系进行的截面非线性分析也具有时效性,其过程涉及大量信息处理.目前截面非线性分析主要用于实验中,截面的荷载、环境和内部信息来自实验条件,而且实验构件数目不多,分析的结果主要用于理论研究.而实际工程中需要从海量的工程数据中提取相关信息工作量巨大,而且分析过程采用人工管理任务也非常繁重,应用 BIM 技术来解决截面时效非线性分析中的信息提取、整合、转化和交换能够很好地解决上述问题,而目前在国内外 BIM 相关研究中尚未见相关报导.本研究应用 BIM 技术建立描述与表达混凝土截面非线性分析相关信息的完整、一致的参数化信息模型,并建立了与 IFC 标准信息模型的数据映射机制,能够全面支持截面时效非线性分析过程中的信息提取、信息转换、信息集成、信息存储、信息计算以及信息的交流与共享.应用这些模型,将考虑环境、荷载和内部因素影响的材料耐久性劣化理论应用于混凝土时效本构关系模型的拟合和截面时效非线性分析,得到截面的时效全过程模型,用于研究构件截面在环境、荷载和内部因素作用下力学性能随时间的劣化规律以及评估构件的耐久性水平.

1 基于 BIM 的混凝土时效本构关系拟合

将 BIM 技术应用于具体工程阶段,主要包括信息模型的建立、理论成果的集成和信息模型应用模式的开发 3 个主要问题^[10].建立信息模型需要相关原始工程数据的种类、关系、层次以及这些数据在 IFC 模型中的表达方式,确定表达这些信息的模型名称和数据类型、建立数据关系并建立与 IFC 模型的映射规则,形成满足特定工序数

据需求的信息模型基本结构^[14];理论模型的集成是将领域内相关的理论研究成果进行规范化修正,用建模语言集成于信息模型的行为函数中,信息模型可以通过这些行为函数提取数据实现具体工序和功能^[15];模型应用模式是应用上述建立的信息模型和行为函数实现信息提取、整合、转化、存储、结成和共享等操作的具体规则^[16].

目前国内外采用的本构关系模型形式各异,但其本质都是应用参数化的分段函数表达本构关系曲线.在 BIM 的应用模式中,采用信息模型对象的方式管理与应用本构关系模型,因此根据本构关系模型的“参数化分段函数”的特点,本研究开发了本构关系信息模型 CConstitutive.这里以清华大学过镇海^[17]建议的典型的参数化分段函数本构关系为例说明 CConstitutive 模型工作原理.

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, x \leq 1;$$
$$y = x/[b(x - 1)^2 + x], x > 1;$$
$$y = \sigma^N/\sigma_c^N, x = \varepsilon^N/\varepsilon_c^N.$$

式中: σ_c^N 为 N 次冻融循环的混凝土峰值压应力; ε_c^N 为 N 次冻融循环的混凝土峰值压应力对应的应变; a 为本构关系曲线上段形状的参数; b 为本构关系曲线下段形状的参数.

CConstitutive 模型通过参数 a 、 b 、 σ_c^N 和 ε_c^N 满足本构关系的信息需求,成员函数 Constitutive (float e) 用于在本模型上查找应变 ε 对应的应力.在运算中,每个 CConstitutive 对象都描述一个本构关系曲线,能够根据需求获得曲线的所有特征和信息.

实现材料时效本构关系拟合的另一个重要功能模型是时间模型,图 1 为时间信息模型结构,时间模型分为时间点模型 (CTimePoint) 和时间段模型 (CTimeLength),二者派生自抽象模型 CTime.

时间点模型表达绝对时间轴上的时间点,以公历年、月、日为单位,FormerPoint 和 LaterPoint 属性分别指向与当前对象相邻的前、后时间点对象;成员函数包括用于计算两个时间点模型之间的时间段模型长度的 GetLengthYear() 和 GetLengthDay() 函数、用于设定时间值的 SetTimePoint() 函数、用于返回时间点的 GetTimePoint() 函数以及用于访问当前时间节点的工程属性的 AccessObject() 函数,其中 GetLengthYear() 和 GetLengthDay() 返回值的符号反映目标时间点和当前时间点先后关系.

时间段模型反映时间段的长度,可以在天、月和年 3 种单位间转换,StartPoint 属性引用一个外部时间点对象作为起始点,Connected 属性引用一

个时间段对象,表达当前对象以被引用对象的结束点为起点;成员函数 ConvertUnit() 用于转化与设定模型度量单位,GetEndPoint() 根据 StartPoint 属性和时间段长度计算并返回时间段终点时间点对象。

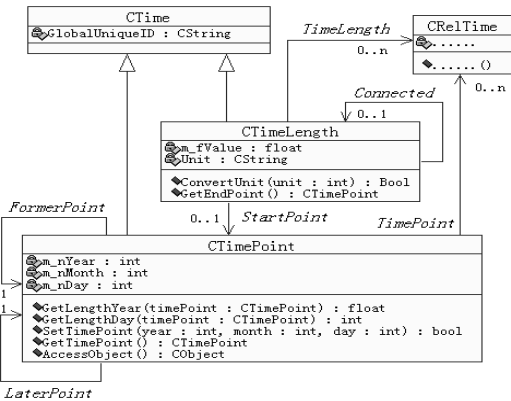


图 1 时间模型结构

进行基于 BIM 技术的混凝土本构关系时效分析过程的实质是建立信息模型 CConstitutive 的对象,相关的信息模型结构见图 2。CConstitutive 模型存储了分析方法、理论模型、材料模型和分析结果,所建立的 CConstitutive 对象可以被后续分析过程共享与应用。建立 CConstitutive 对象的过程封装于在材料信息模型 CMaterial 的成员函数 CreateConstitutive(tPoint: CTimePoint), 该函数根据环境、荷载和材料信息,应用材料耐久性劣化理论模型拟合实参 cTimePoint 提供的时间点处的本构关系模型,工作原理如下:

- 1) 访问 CMaterial 的属性 m_pParameters 所引用的 CMaterialParameterSet 对象,提取该对象的属性 m_pParameters -> m_fWCRatio 和 m_pParameters -> m_fFreezeThawFrequency, 分别存放到本地变量 k_1 、 k_2 中。
- 2) 访问属性 m_pBirthday 所引用的 CTimePoint 对象,将本函数的实参对象 tPoint 与 m_pBirthday 所指向的对象进行对象的差运算(运算规则在 CTimePoint 类中定义),获得对象的服役时间,存放于本地参数 k_3 。

表 1 混凝土配合比

组号	水灰比	设计强度	水泥/g	砂/g	石/g	水/g	外加剂/g	掺和料/g	28 d 抗压强度/MPa
A	0.50	C30	339	760	1 063	170	10.61	48	26.59
B	0.55	C30	343	775	1 077	189	11.72	52	26.48

共制备 A、B 两类试件,其水灰比分别为 0.50、0.55。每一类试件包括 5 组共计 10 个立方体试件,尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm。试验采用质量分数为 3% 的氯化钠溶液和 5% 的硫酸

3) $k_2 * k_3$ 得到实际冻融循环次数 N , 根据 k_1, k_2, k_3 拟合本构关系中参数 a 与 b 。马彬等^[18]通过不同尺寸、配比和环境下的大量冻融循环实验数据偶合而提出了 N 次冻融循环后过镇海本构关系模型中的参数 a, b 的取值方法,其研究的条件与本研究解决的问题一致,因此将其研究成果集成应用于信息模型中。

$$a = - \left(0.037 \frac{w}{c} - 0.014 \right) N - 2 \frac{w}{c} + 3.8,$$

$$b = - \left(0.068 \frac{w}{c} - 0.024 \right) N + 8.4 \frac{w}{c} - 3.3.$$

式中: a 为本构关系曲线上段形状的参数; b 为本构关系曲线下段形状的参数; w/c 为混凝土水灰比; N 为冻融循环次数。

4) 创建 CConstitutiveParameterSet 对象,取名为 Constitutive_1, 分配 GlobalID 值。将 a, b 、当前 CMaterial 的地址、实参 CTimePoint 地址值分别交给 Constitutive_1. m_fa、Constitutive_1. m_fb、Constitutive_1. m_pMaterial 和 Constitutive_1. m_pAge。

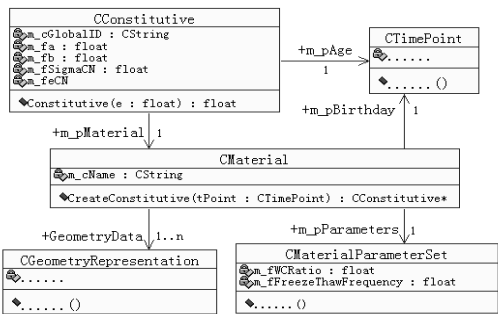


图 2 混凝土时效本构关系拟合模型结构

CConstitutive 模型的时间属性表明了该本构关系的时间节点,材料属性表明了该本构关系所属于的混凝土材料。一个混凝土对象可以有許多时效本构关系模型对象,每个本构关系模型对象只反映一个时间点。为了验证该方法是否能够合理拟合混凝土材料的本构关系,进行了混凝土在侵蚀作用下的材性实验来比较应用 BIM 技术拟合的时效本构关系与实验测得的本构关系的符合程度,混凝土材性实验见表 1。

钠溶液组成的混合溶液作为侵蚀介质。冻融试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》^[19]中的快冻法。试件养护龄期为 28 d,其中带模养护 1 d,拆模后在标准条件下养护 23 d,之后

将试件在 $20 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的混合侵蚀性溶液中浸泡 4 d 后开始冻融试验. 对各组试件分别进行 0、50、100、150、200 次冻融循环. 冻融循环结束后, 按照

《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[20] 中之规定进行混凝土试块的力学性能试验. 实验结果和通过 BIM 拟合的本构关系模型见图 3.

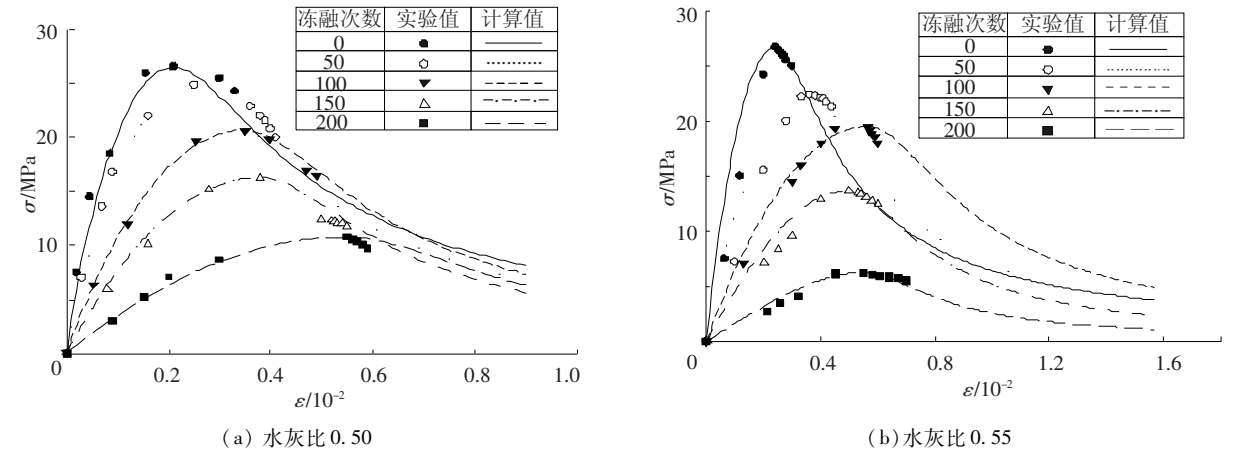


图 3 混凝土本构关系模型分析与试验结果对比

图 3 表明通过 BIM 技术拟合的混凝土在侵蚀环境和冻融作用综合作用下的本构关系与实验测得的本构关系基本一致, 分析结果可以用于后续的截面时效非线性分析. 在应用 BIM 的过程中还可以发现与传统的手动拟合方法相比, BIM 技术通过信息的自动提取、转化和运算应用, 显著提高了分析拟合的效率和准确性, 适用于实际工程中大量构件分析的应用.

2 基于 BIM 技术的截面时效非线性分析

截面时效非线性分析相关模型的建立、理论模型的集成和信息模型应用模式的开发过程与时效本构关系拟合相似, 只是内容有所不同, 因此不再赘述开发过程. 建立了 C++ 信息模型 37 个, 包括 200 多个数据成员和 29 个核心功能函数, 图 4 所示为截面时效非线性分析信息模型主体结构的框架, 其中各个对象和数据成员的语义在表 2 进行了说明. 下面说明信息模型如何实现截面时效非线性分析的功能.

在进行非线性分析时, 需要指定分析的时间节点, 时间节点以实参的方式交给信息模型的行为函数, 模型提取材料在指定时间点处的本构关系用于非线性分析. 图 4 中构件模型 CComponent 的属性 m_pCrossSections 为 1 至 n 个 CCrossSection 对象, 每个 CCrossSection 对象描述一个特征截面, 图 5 (a) 所示的一个名称为 Beam_1 的 CComponent 对象包含的 3 个特征截面, 分别用名称为 CrossSection_1、CrossSection_2、CrossSection_3 的 3 个 CCrossSection 对象描述.

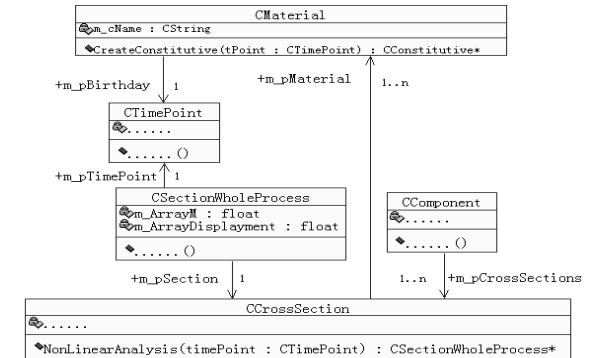
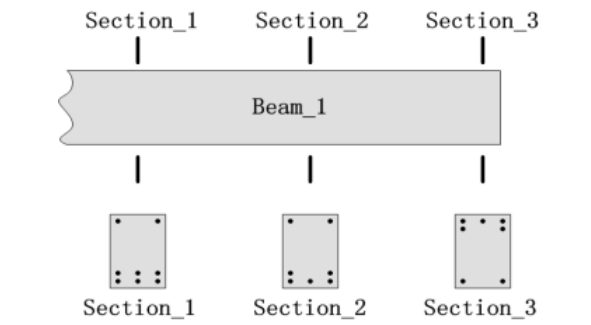
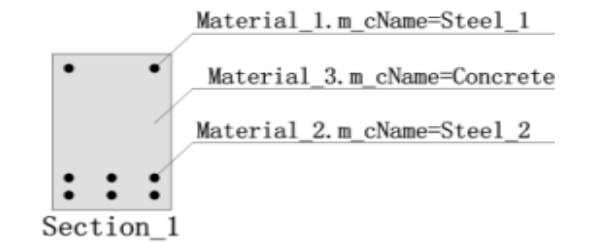


图 4 截面时效非线性分析信息模型结构



(a) 梁模型与截面模型



(b) 截面模型与材料模型

图 5 信息模型与实体对象的对应关系

表 2 截面时效非线性分析信息模型语义

信息模型	模型描述对象	模型参数	参数类型	参数意义
CMaterial	组成截面材料	m_cName	CString	材料名称
		m_pBirthday	CTimePoint	材料寿命起点
CSectionWholeProcess	内力 - 变形 全过程曲线	m_pTimePoint	CTimePoint	非线性分析时间节点
		m_pSection	CCrossSection	非线性分析目标截面
		m_ArrayM	float	全过程内力的数组
		m_ArrayDisplayment	float	全过程变形的数组
CCrossSection	混凝土构件	m_pMaterial	CMaterial	截面组成材料数组
	截面	m_pComponent	Ccomponent	截面母体构件

截面模型 CCrossSection 除了表达截面的几何信息外,通过属性 m_pMaterial 引用 1 至 n 个 CMaterial 对象,每个对象表达该截面包括的一种材料,图 5(b)所示 Section_1 截面由 3 种材料组成,包括一种混凝土和两种钢筋.

CSectionWholeProcess 模型用于表达截面在特定时间节点处的内力 - 变形全过程曲线,该模型引用 CTimePoint 模型作为 m_pTimePoint 属性,表达非线性分析进行的时间节点;引用 CCrossSection 模型作为 m_pSection 属性,表达非线性分析的目标截面.应用 BIM 技术对截面进行分线性分析的过程的实质是建立 CSectionWholeProcess 模型的对象,该对象存储了分方法、目标截面以及分析结果.

截面非线性分析的过程封装于截面模型 CCrossSection 的成员函数 NonLinearAnalysis () 中,该函数的全部声明为 CSectionWholeProcess * NonLinearAnalysis (CTimePoint timePoint),其功能实现的过程为:

1) 访问属性 m_pMaterial 中描述本截面所用混凝土材料的 CMaterial 对象,获得混凝土材料的本构关系库.根据输入参数 timePoint 的值获取本构关系库中 timePoint 时间节点对应的 CConstitutive 对象,constitutive_t,该对象存储的是混凝土材料在龄期为 timePoint 处的本构关系分析结果,是根据工作条件和劣化规律分析获得的,采用这个本构关系进行分析,可以得到在该时间节点处的全过程曲线.

2) 同理获得时间节点为 timePoint 处的钢筋本构关系.

3) 应用叶英华等^[21]建立的混凝土截面非线性分析方法的 FORTRAN 程序,并将 FORTRAN 与 C + + 模型行为函数混编,将模型数据输入分析函数,经过分析生成输出文件.

4) 打开并解析输出文件,将其中的内力 - 变形的数据提取.创建 CSectionWholeProcess 对象,

将 timePoint 的值交给其 m_pTimePoint 属性,将 CCrossSection 对象指针交给 m_pSection 属性.将内力 - 变形的数据交给属性 m_ArrayM 和 m_ArrayDisplayment.

至此实现了截面在时间点 timePoint 处的非线性分析,可以选取不同的 timtPoint 的值来指定分析的时间节点.分析结果为 CSectionWholeProcess 对象,这些对象和其他对象一样被软件系统存储、交换和管理,能够灵活地被其他下游应用程序和模型访问和应用,适用于批量构件的截面分析.

3 实例应用

应用本研究开发的信息模型和模型应用方法建立了软件系统功能模式,混凝土截面时效非线性分析相关信息模型位于 4D 耐久信息模型库内,模型映射接口从存储工程全生命周期完整数据的 IFC 文件自动提取进行截面时效非线性分析的原始数据,转化为截面时效非线性分析模型存放到信息模型数据库;耐久性分析功能模块调用这些模型实现分析过程并将结果输出到用户界面,图 6 所示为应用混凝土截面时效非线性分析信息模型开发的非线性分析软件系统 NLAS (Non - Linear Analysis System),左侧为构件信息管理区,现实从 IFC 文件中提取进行截面时效分线性分析的原始数据,用户可以查看并根据需要进行数据的更新,通过反向映射 IFC 文件也被随时更新;界面左下窗口输出混凝土本构关系时效拟合结果;截面右下窗口输出截面时效非线性分析得到的截面内力 - 变形全过程曲线.

为了验证 NLAS 系统分析结果的准确性,进行了腐蚀环境下钢筋混凝土梁正截面抗弯承载力实验,腐蚀环境下混凝土梁在 100、150、200 次冻融循环的极限承载力实验结果与应用 NLAS 系统分析的结果见表 3,数据表明误差均在 20% 以内,能够完成预期的分析目标,NLAS 系统还能够给

出在各个时间节点上的位移 - 荷载截面全过程曲线, 见图 7。

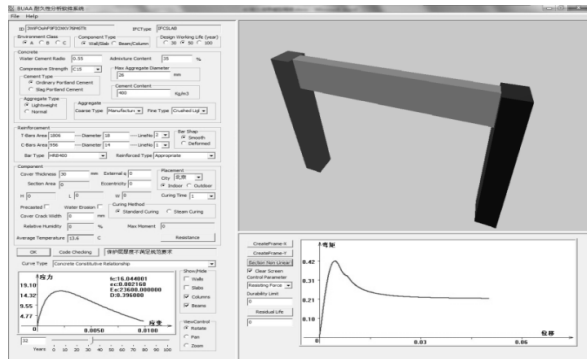


图 6 NLAS 系统用户界面

表 3 腐蚀梁抗弯承载力计算结果与实验结果比较				
梁号	试验值 F_{uexp}	$F_{uexp}/F_{ucal-cn}$	计算值 F_{umod}	F_{uexp}/F_{umod}
B0a	60.80	1.18	53.33	1.14
B1a	53.30	1.06	50.46	1.05
B1.5a	49.60	1.03	49.02	1.01
B2a	43.72	0.93	46.56	0.94
B0b	58.80	1.20	51.69	1.14
B1b	52.20	1.07	48.97	1.07
B1.5b	48.40	1.03	48.19	1.00
B2b	45.00	0.91	49.77	0.90

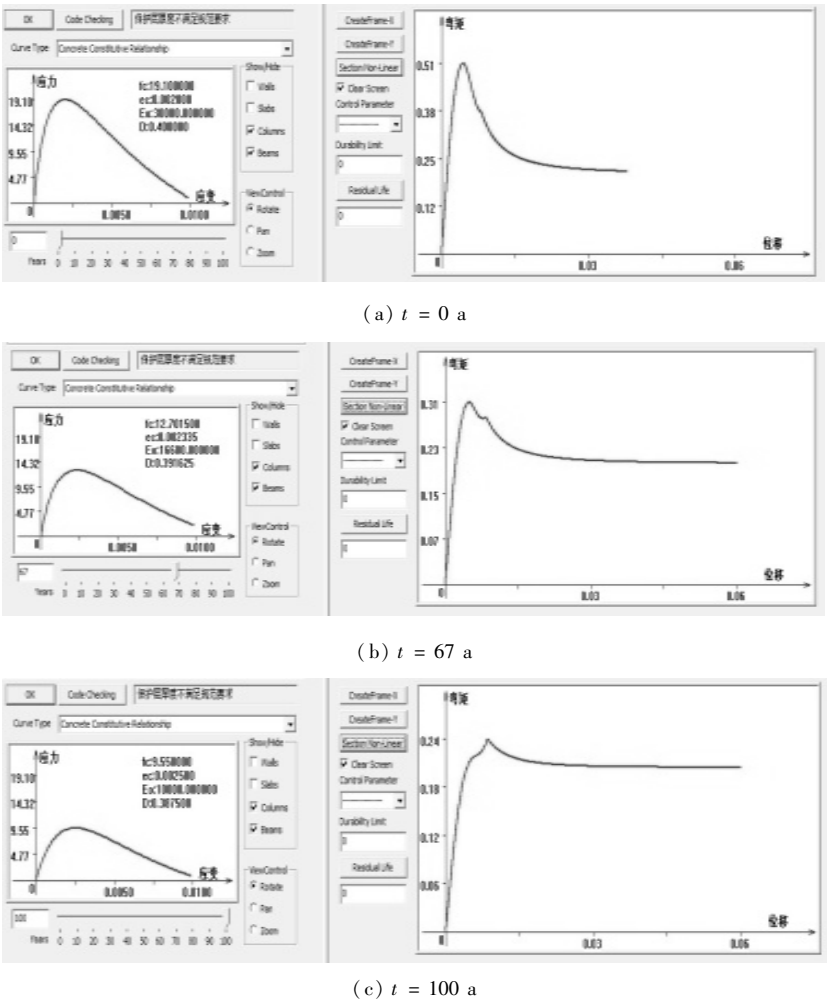


图 7 考虑内部、外部因素共同作用下面面时效非线性分析

4 结 论

- 1) 在应用层面, 建立了相关模型和工作机制, 并开发了软件系统 NLAS, 通过对比分析实验数据和 NLAS 系统的分析结果验证了研究成果能够有效地支持混凝土截面时效非线性分析过程中大量信息的频繁提取、转换、集成、存储和处理等操作, 并能提高其效率和准确度。
- 2) 在理论层面, 应用 BIM 技术将考虑环境、

荷载和内部因素影响的材料耐久性劣化理论模型应用到本构关系拟合与非线性分析中, 实现了多元化理论模型的协同工作, 不但可以促进理论研究的发展, 还能促进理论研究成果的应用和推广。

3) 从 BIM 推广层面, 所提出的 BIM 技术在混凝土结构时效非线性分析领域推广应用的探索过程和开发方法同样也适用于在建设工程的其他领域中 BIM 技术的推广, 加快了实现全生命期信息管理的进程。

后续工作重点将放在把考虑更多影响因素的耐久性理论模型通过 BIM 技术整合至截面时效非线性分析信息模型,使分析结果更符合实际情况;并进一步探索将混凝土截面时效非线性分析结果应用在基于 BIM 技术的建筑工程耐久性评估方法中。

参考文献:

- [1] 刘晴, 王建平. 基于 BIM 技术的建设工程生命周期管理研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2010, 2 (3): 40 - 45.
- [2] HOWARD R, BJORK B. Building information modeling-Experts' views on standardization and industry deployment [J]. Advanced Engineering Informatics, 2008, 22: 271 - 280.
- [3] International Alliance for Interoperability. End user guide to industry foundation classes, enabling interoperability in the AEC/FM industry [EB/OL]. [2011 - 06 - 18]. <http://www.iai-international.org/End User Guide to Industry Foundation Classes>.
- [4] International Alliance for Interoperability. BuildingSMART [EB/OL]. [2011 - 06 - 18]. <http://www.buildingsmart.com/>.
- [5] International Alliance for Interoperability. IFC 2x edition 3 model implementation guide [EB/OL]. [2011 - 06 - 18]. <http://www.iai-international.org/IFC 2x Edition 3 Model Implementation Guide>.
- [6] International Alliance for Interoperability. Data modelling using EXPRESS-G for IFC development [EB/OL]. [2011 - 06 - 18]. <http://www.iai-international.org/Data Modelling Using EXPRESS-G for IFC Development>.
- [7] International Alliance for Interoperability. IFC 2x model integration guide [EB/OL]. [2011 - 06 - 18]. <http://www.iai-international.org/IFC 2x Model Integration Guide>.
- [8] VANLANDE R, NICOLLE C, CRUZ C. IFC and building lifecycle management [J]. Automation in Construction, 2008, 18: 70 - 78.
- [9] WAN C, CHEN P, TING S K. Assessment of IFCS for structural analysis domain [J]. Information Technology in Construction, 2004, 9: 75 - 95.
- [10] YU K, FROESE T, GROBLER F. A development framework for data models for computer-integrated facilities management [J]. Automation in Construction, 2000, 9: 145 - 167.
- [11] SCHEIN J. An information model for building automation systems [J]. Automation in Construction, 2007, 16: 125 - 139.
- [12] ZHANG J P, ZHANG Y, HU Z Z. Construction management utilizing 4D CAD and operations simulation methodologies [J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(1): 241 - 247.
- [13] 邓雪原, 张之勇, 刘西拉. 基于 IFC 标准的建筑结构模型的自动生成 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 6 - 12.
- [14] GEYER P. Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design [J]. Advanced Engineering Informatics, 2009, 23: 12 - 31.
- [15] AOUD G, WU S, LEE A. nDimensional modeling technology past, present, and future [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006, (MAY/JUNE): 151 - 153.
- [16] CHEN P, CUI L, WAN C, *et al.* Implementation of IFC-based web server for collaborative building design between architects and structural engineers [J]. Automation in Construction, 2005, 15: 115 - 128.
- [17] 过镇海. 混凝土的强度和变形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [18] 叶英华, 马彬, 孙洋. 基于盐冻损伤的钢筋混凝土纯弯构件截面非线性分析 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 16 - 21.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GBJ82—85 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法 [S]. 北京: 中国建工出版社, 1985.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建工出版社, 1985.
- [21] YE Y H, BO D. Nonlinear analysis of concrete structures [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996.

(编辑 赵丽莹)