

考虑材料劣化的 RC 剪力墙结构数值建模方法研究

李强强, 郑山锁, 秦 卿, 左河山

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

摘要:采用结构分析软件 SAP2000 中的分层壳单元模型对 3 个剪力墙构件试验进行数值模拟, 在考虑不同龄期的影响下进行了 Pushover 分析, 将最终所得 Pushover 曲线与试验数据进行对比, 发现拟合度较高, 进而采用同样方法对某 12 层剪力墙结构建立数值模型并进行非线性动力时程分析, 对其层间位移角等相关性能指标进行分析, 发现在不同龄期下, 其性能退化表现与实际结构的宏观性能退化表现相符。结果表明:利用分层壳单元在基于劣化的情况下对 RC 剪力墙结构进行数值模拟的方法是可行的。

关键词:分层壳; SAP2000; Pushover; 剪力墙; 数值模拟

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0056-08

Research on numerical modeling method of RC shear wall structure based on material degradation

LI Qiangqiang, Zheng Shansuo, Qin Qin, Zuo Heshan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The software ,SAP2000, is used for the pushover analysis of three shear wall components which is form three finished experiments using layered shell element model based on effect of different age, and after comparing the the skeleton curves of the hysteresis curves obtained from the finished experiments with the PUSHOVER curves, We found that these two curves are similar. Then we analyzed the nonlinear dynamic time history of a 12 story shear wall structure with sap2000 in the same way above and analyzed different indicators of the structure model, figured out that the behavior of the structure model is matched with the real structure. The final conclusion is that The numerical simulation of the RC shear wall structure is feasible by using the layered shell element method based on material degradation and this method can also provide certain guidance to the practical engineering.

Key words: layered shell; SAP2000; PUSHOVER; shear wall; numerical simulation

地震是自然界危害最严重的灾害之一, 给人类的生命财产安全带来极大的威胁。对建筑物进行抗震分析是很有必要的。随着中国经济不断发展, 人们对于建筑物的功能要求越来越高, 使得建筑物的高度不断增加, 尤其是在一些大中城市高层结构的比例越来越大, 而在高层结构中应用较多的则是剪

力墙结构。

但剪力墙结构具有脆性大和自身变形性能较差的缺点, 尤其是因为自身刚度过大而使得其地震反应亦过大。此外, 在结构的长期建造使用和服役的工程中, 混凝土剪力墙耐久性和劣化方面的问题更是引起了国内外专家学者的注意。

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金(50978218, 51108376); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003); 陕西省科研项目(2012K12-03-01, 2011KTCQ03-05, 2013JC16)

作者简介: 李强强(1992-), 男, 硕士生, 主要从事剪力墙结构研究, (E-mail) utopia_007@foxmail.com。

研究主要从材料的劣化角度来研究在不同龄期下整个结构的抗震性能变化。建立一栋剪力墙结构模型,通过修改不同劣化程度下混凝土的强度、钢筋强度和钢筋直径等来模拟其劣化,同时考虑不同龄期的影响,并进行时程分析,以比较不同劣化程度下结构的抗震性能。以此来研究这种考虑劣化的数值模拟方法的可行性。

1 RC 剪力墙构件数值建模分析

为保证最终 RC 剪力墙结构时程计算结果的可靠性,对 SAP2000 中的分层壳单元模型进行验证,将各种形式的剪力墙构件单推计算结果同已有的实验结果进行对比,为下文分析剪力墙高层结构的可行性奠定基础。对剪力墙构件进行数值分析采用 Pushover 方法,计算得出的荷载-位移曲线将与试验所得的荷载-位移曲线对进行比。

1.1 剪力墙构件基本信息

在高层建筑中,剪力墙的形式往往是多样的,为验证分层壳模型的通用性,分别对矩形截面^[1]、工字形截面^[2]以及 T 形截面^[2]剪力墙进行了模拟,构件采用实际试验中设计的剪力墙构件,其截面尺寸及配筋信息如图 1、2 和 3 所示,其余参数详见表 1、2 和 3。

1)矩形截面 RC 剪力墙

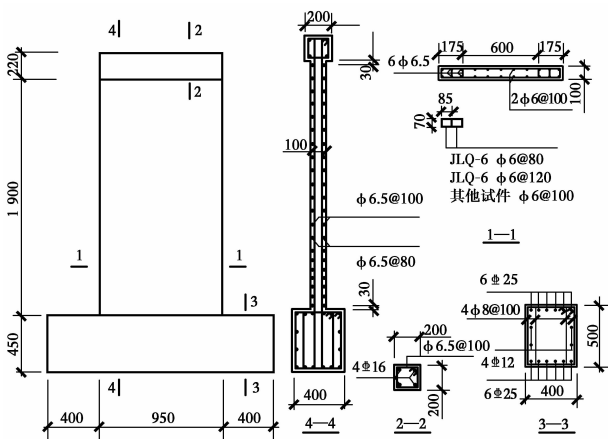


图 1 矩形试件截面尺寸及配筋

表 1 构件其它设计参数

| 试件编号 | 混凝土强度 | 剪跨比 | 高厚比 | 轴压比 | 加载方式 |
|-------|-------|------|-----|-----|------|
| JLQ-1 | C40 | 2.01 | 9.5 | 0.4 | 单推 |

注:单片短肢墙 JLQ-1 钢筋均 HPB235 级钢筋,屈服强度 f_y 为 386.3 MPa,极限强度 f_u 为 422.5 MPa,C40 混凝土轴心抗压强度 f_c 为 43.2 MPa。

2)工字形截面 RC 剪力墙

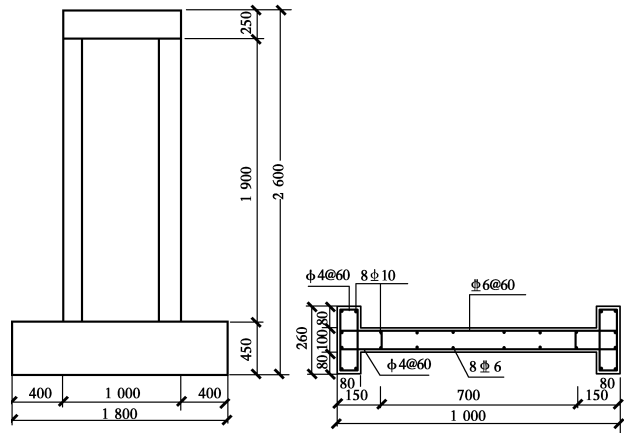


图 2 工字形试件截面尺寸及配筋

表 2 构件其它设计参数

| 试件编号 | 混凝土强度 | 剪跨比 | 高厚比 | 轴压比 | 加载方式 |
|-------|-------|-----|-----|-----|------|
| JLQ-2 | C30 | 1.9 | 10 | 0.5 | 低周往复 |

注:工字形截面 JLQ-2 纵筋采用 HRB335 级钢筋,分布筋及箍筋均为 HPB235 级钢筋,采用 SAP2000 中的默认值,C30 轴心抗压强度 f_c 为 34.4 MPa。

3)T 形截面 RC 剪力墙

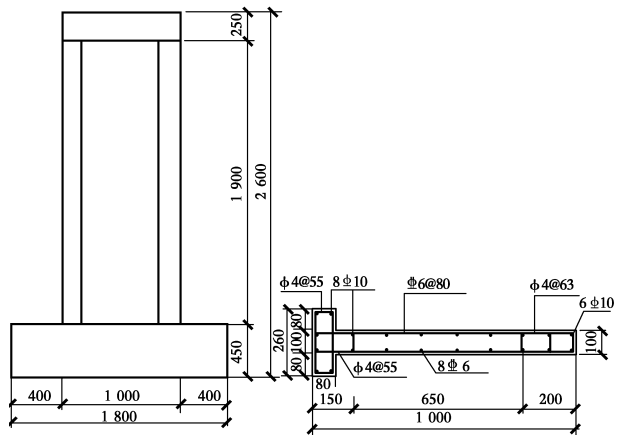


图 3 T 形试件截面尺寸及配筋

表 3 构件其它设计参数

| 试件编号 | 混凝土强度 | 剪跨比 | 高厚比 | 轴压比 | 加载方式 |
|-------|-------|-----|-----|-----|------|
| JLQ-3 | C30 | 1.9 | 10 | 0.5 | 低周往复 |

注:T 形截面 JLQ-3 纵筋采用 HRB335 级钢筋,分布筋及箍筋均为 HPB235 级钢筋,采用 SAP2000 中的默认值,C30 轴心抗压强度 f_c 为 34.4 MPa。

1.2 劣化 RC 剪力墙构件的数值模拟及分析

通过材料劣化来考虑一般大气环境作用下 RC 剪力墙构件的退化规律,下文重点将对在一般大气环境作用下 0 年、30 年龄期 RC 剪力墙构件进行数值模拟分析,以说明龄期对 RC 剪力墙构件的影响。由于一般大气环境较为复杂,本文中考虑材料劣化的计算都基于特定的环境假定。

通过总结文献[3]—[7]中关于环境对材料的性能的影响模型,可知只要确定了钢筋的锈蚀深度,便可以跟据上述文献中所提供的计算方法计算以下: 11 纵筋横截面积的折减和由于箍筋横截面积减少造成的核心混凝土约束压力的减小 22 钢筋极限变形的折减 33 受压区混凝土强度的退化。

根据上述文献所提供公式进行计算,预测结果如下表 4。

表 4 不同龄期下钢筋剪力墙构件材料性能退化计算

| 类别 | 0 年 | 30 年 | |
|---------------------------|-------|--------------|-------|
| JLQ-1(C40) | f_c | 43.2 | 40.11 |
| | f_t | 1.71 | 1.59 |
| JLQ-2(C30) | f_c | 34.1 | 31 |
| | f_t | 1.43 | 1.30 |
| JLQ-3(C30) | f_c | 34.4 | 32 |
| | f_t | 1.43 | 1.33 |
| 钢筋直径类别 | 6 | 4.988(16.8%) | |
| HRB335(f_y) | 386.3 | 260.75 | |
| HRB335(ϵ_{su}) | 0.01 | 0.006 75 | |
| HRB400(f_y) | 400 | 270 | |
| HRB400(ϵ_{su}) | 0.046 | 0.003 10 | |
| HPB300(f_y) | 300 | 202.5 | |
| HPB300(ϵ_{su}) | 0.01 | 0.067 5 | |

注:括号内为相应的质量损失,钢筋直径单位,mm;混凝土及钢筋强度单位,MPa。

1.3 分层壳单元定义

JLQ-1 试件暗柱和腹板部分分别采用两种分层壳来模拟,采用约束的 Mander^[8]混凝土本构模型考虑暗柱箍筋的约束作用,其中暗柱约束混凝土强度计算按照 Mander 本构关系计算;JLQ-2 试件翼缘和腹板部分分别采用 2 种分层壳来模拟,采用约束的 Mander 混凝土本构模型考虑暗柱箍筋的约束作用,其中翼缘约束混凝土强度计算按照 Mander 本构关系计算;JLQ-3 试件主要包括翼缘、腹板及腹板暗柱部分,分别采用 3 种分层壳来模拟,采用采用约

束的 Mander 混凝土本构模型考虑翼缘箍筋和暗柱箍筋的约束作用,其中翼缘及暗柱约束混凝土强度计算按照 Mander 本构关系计算。钢筋本构采用简 SAP2000 中自带的钢筋本构。模型 3D 图如下图 4 所示

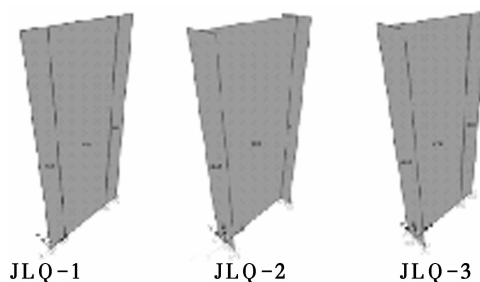


图 4 3D 数值模型图

当通过分层壳单元在考虑材料劣化的情况下模拟剪力墙时,应对其分层壳单元各项参数(如钢筋和混凝土本构)进行修正,以考虑不同混凝土层的强度退化以及钢筋的强度折减,此外,各试件考虑混凝土约束的方式以及分布区域同上,故不在此赘述。

此外,为便于数值建模分析,本文只对龄期为 30 年的钢筋直径按照上述计算结果进行了修正,混凝土的强度按照上表进行折减。对于钢筋(HRB335,HRB400),因为锈蚀率均在 10%以下,对于截面削弱较多的箍筋,其屈服强度和极限应变虽有一定的程度的减小,但因数值建模中仅能(分层壳单元无法考虑箍筋的影响,只能通过对约束混凝土进行修正间接考虑)考虑箍筋的约束性能,因此可以仅仅考虑箍筋截面减小,造成的核心区混凝土约束能力的降低,约束系数按照 Mander 公式计算。

1.4 边界条件及加载方式

在有限元模型中根据实际试验条件将 RC 剪力墙基础底部设为固定端,其余方向为自由。有限元模型加载方式采用位移控制的加载方式,并根据试验中试件的实际情况施加竖向荷载。

经过分析荷载形式对 RC 剪力墙抗震性能影响时表明单调加载下 RC 剪力墙的构件骨架曲线与低周往复荷载作用下的构件骨架曲线形状相似,且两种加载方式下的各项指标的变化规律相同,仅数值上有所差别但都在误差允许范围内,由于国内试验鲜有对剪力墙试件进行单推试验,故 JLQ-2 和 JLQ-3 试件计算结果只能与相应试验所得到的骨架曲线对比也具有一定的参考价值。

1.5 数值模拟计算结果分析

荷载-位移曲线可以反映构件受力与变形之间的关系,由荷载-位移曲线可以对比计算结果与试验结果在弹性段刚度、承载力及变形能力等方面的差异,它是构件抗震性能的综合体现。图 5 为结构在 0 年龄期下的有限元分析得到的荷载-位移曲线与试验所得荷载位移曲线的对比图,可以看出,由有限元软件 SAP2000 计算得到的荷载-位移曲线与试验所得荷载-位移曲线吻合得较好,二者形状和变化规律相似,最大水平荷载差值都在 15% 以内,大部分试件的弹性段刚度与试验结果吻合较好,只有部分试件弹性段刚度比试验结果稍大,这是因为:1)有限元模型中的材料定义是完全各向同性材料,而实际试验中的材料并不是严格意义上的各向同性,混凝土材料本身有一定复杂性和离散性;2)所使用的材料本构与实际材料性能有一定的差别,有限元模拟未考虑加载过程中材料的损伤累积;3)在混凝土的有限元引入许多参数考虑非线性因素,参数之间可能相互影响,部分参数对构件性能的影响机理还不明朗,造成有限元分析结果与试验结果存在一定误差。总体来说,有限元模拟结果与试验结果吻合较好,这充分说明了 SAP2000 中分层壳单元可以较为准确地模拟 RC 剪力墙构件的实际受力情况,验证了有限元模型和参数的可靠性。图 6 为 30 年龄期考虑钢筋混凝土材料退化以后的各种形式的 RC 剪力墙的 PUSHOVER 曲线,可以明显看出,剪力墙由于材料劣化而引起的性能降低很明显。因此,可以得出结论,利用 SAP2000 对剪力墙进行模拟可以考虑材料劣化对其的影响,这将对后面关于劣化的 RC 剪力墙结构的时程分析提供理论基础。此外,对构件受力时的应力分布进行了分析。其不同形式的剪力墙试件破坏形态如图 7 所示,三片剪力墙表现出同样的应力分布现象,右下角因为其受压而产生破坏,左下角因为受弯而产生受拉破坏,与试验现象较为符合。图中红色部分即为应力较大,而试验中剪力墙底部混凝土一般被压碎,能充分体现剪力墙构件的受力性能,由此可见,本文选用的分层壳单元适合于各种形式的剪力墙数值分析,试件的破坏方式跟其应力的分布较为吻合。

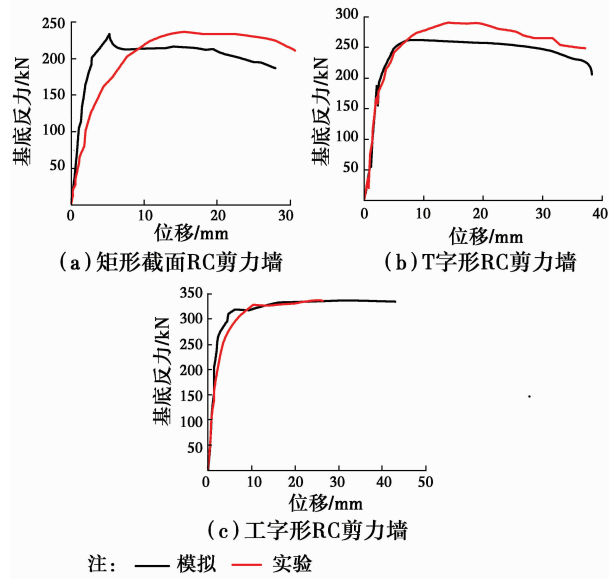


图 5 结构 0 年时的 Pushover 曲线与试验荷载-位移曲线对比图

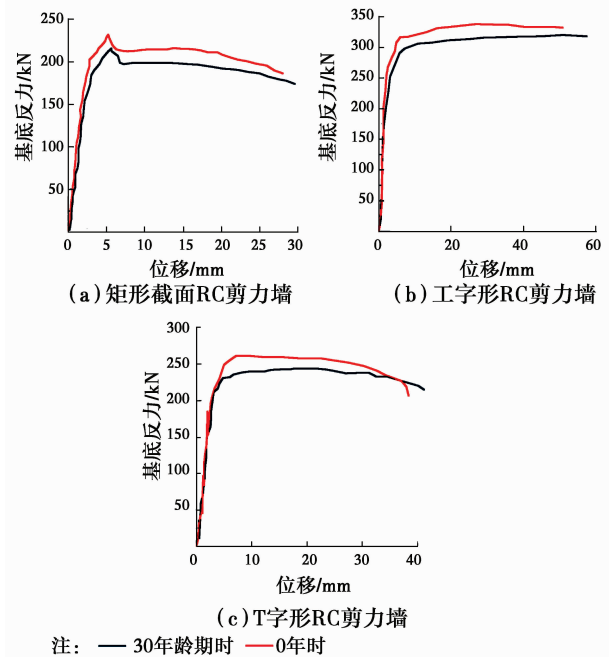


图 6 结构 30 年时的 Pushover 曲线与试验荷载-位移曲线对比图

通过在荷载-位移曲线和破坏形态 2 个方面对有限元模拟结果和试验结果之间的对比表明,合理地选取材料本构及有限元参数的情况下,采用分层壳单元对剪力墙构件进行数值模拟的结果与试验结果吻合得较好,有限元结果具有一定的准确性和可靠性,因此,可以采用分层壳单元模型对 RC 剪力墙结构进行模拟,且对其性能反应较为准确良好。

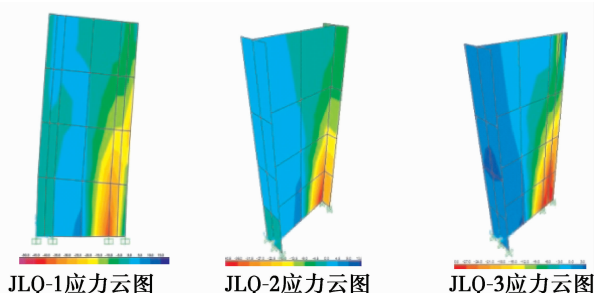


图 7 剪力墙试件应力云图

较来进行模拟,塑性铰的相对位置默认为 0.1 值和 0.9。其余的混凝土强度,钢筋等材料特性同 PKPM 中设置值。结构中楼板采用刚性楼板。

为简便起见,建模时仅考虑结构的地上部分,模型底部设置为固支端,同时删去阳台等对结构整体特性影响不大的附属构件。钢筋弹性模量设为 200GPa,各构件在建模过程中不考虑刚度折减。混凝土密度为 2 500 kg/m³,钢筋密度为 7 800 kg/m³,其余荷载根据规范要求以及实际受荷情况设置。建筑结构三维模型见图 8 和图 9 所示。

2 基于材料劣化的 RC 剪力墙结构地震时程反应分析

2.1 RC 剪力墙结构的设计概况

本结构为中国西安某地区 12 层高层剪力墙住宅楼,总高 30.3 m,标准层高 2.9 m。本结构抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.15 g,地震分组为第一组,场地类别为 II 类,混凝土框架抗震等级为三级,剪力墙抗震等级为三级。修正后风压为 0.5 KN·m²,地面粗糙类别为 B 类,体形系数一类。结构相关详细参数见下表 5。

表 5 主要结构构件尺寸

| 主要结构构件尺寸 | |
|----------|--|
| 层高 | 首层及第二层层高 3.6 m 第三层到第十二层层高 2.9 m |
| 保护层厚度 | 梁保护层厚度 25 mm 板保护层厚度 25 mm 剪力墙保护层厚度 25 mm |
| 楼层 | 地上 12 层 |
| 剪力墙厚 | 各层均为 200 mm |
| 楼板厚度 | 各层均为 100 mm |
| 剪力墙混凝土强度 | C30 $f_c=30$ MPa |
| 梁混凝土强度 | C30 $f_c=30$ MPa |
| 柱混凝土强度 | C30 $f_c=30$ MPa |
| 钢筋强度 | 梁采用 HRB400 钢筋 $f_y=400$ MPa 柱采用 HRB400 钢筋 $f_y=400$ MPa 剪力墙采用 HPB235 $f_y=235$ MPa |

2.2 模型的建立与参数设置

采用设计软件 PKPM 对结构进行设计,采用 SAP2000 来进行结构的动力弹塑性分析,其中剪力墙采用分层壳单元进行模拟,各项参数设置同上述剪力墙构件的设置方法,结构中的少量梁采用塑性

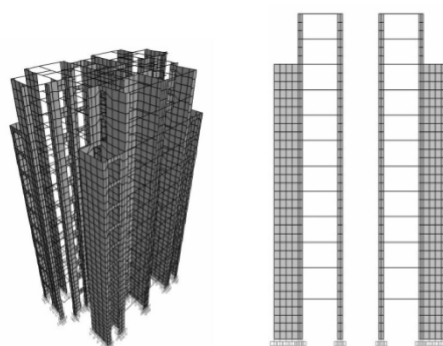


图 8 三维建筑模型图 图 9 结构立面图

因为 PKPM 和 SAP20 是 2 个不同的 00 软件,为了验证前后模型一致性,对其前三周期进行了对比。下 6 表为分别用 PKPM 和 SAP2000 进行设计的结构前三阶振型。

表 6 RC 剪力墙结构的固有周期

| 周期 | PKPM | SAP200 |
|--------|---------|----------|
| 第一周期/s | 0.901 2 | 0.924 1 |
| 第二周期/s | 0.754 2 | 0.7752 1 |
| 第三周期/s | 0.619 2 | 0.5987 8 |

由表 6 可以看出,SAP2000 模型的结构固有周期在不同振型下的变化与 PKPM 模型的固有周期在不同振型下的变化趋势相同,且两者周期差在 5%以内,吻合度较高。所以利用 SAP2000 进行模型分析是具有相当程度上的可靠性。

2.3 地震波的选取

在进行结构非线性动力时程反应分析时,选择合适的地震动记录,是得到比较合理分析结果的前提和基础。中国规范规定:采用时程分析法时,应在建筑场地类别和设计地震分组选用不少于二组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线。而

本章对结构进行弹塑性分析时,选择的是3条自然波,即 lanzhou1, tangshanEW, EL-CENTRO3 条波,本结构抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.15g,按照抗震规范(见表4.3)将此3条波调幅为55 cm/s²,150 cm/s²,310 cm/s²以分别对应多遇地震(小震),设防地震(中震),罕遇地震(大震)的设防烈度,详情见表7所示。利用上述三条波对结构进行了时程分析,发现在小震、中震、大震下结构的各项表现均满足规范规定的性能水平要求。

表7 地震波的选择

| 地震波 | 方向 | 原始峰值 | 调幅后峰值 | 说明 |
|--------------------|----|-------------------------------------|------------------------------------|------|
| | | 加速度 PGA/ (cm · s ⁻²) | 加速 PGA/ (cm · s ⁻²) | |
| lanzhou1(小震) | X | 105.72 | 55 | 二类场地 |
| tangshanEW (中震) | X | -65.94 | 150 | 二类场地 |
| El-centro(大震) | X | 341.7 | 310 | 二类场地 |

2.4 不同龄期下 RC 剪力墙结构的时程分析

在考虑劣化的基础上对0年、30年、50年、70年龄期下的RC剪力墙结构进行地震时程分析。各项劣化参数的计算选取以及程序中剪力墙分层壳单元的设置方法同1.2模拟劣化剪力墙构件时采用的方法。经计算,钢筋表面开始锈蚀临界时间为2.825年,其他各项劣化参数值如下表8。

表8 不同龄期下钢筋剪力墙构件材料性能退化计算

| 类别 | 0年 | 30年 | 50年 | 70年 |
|---------------------------|--------|---------|---------|----------|
| C30 剪力墙 (f _c) | 30 | 28.64 | 26.36 | 25.32 |
| 钢筋直径类别 | 10 | 8.896 | 8.503 | 8.076 |
| | 14 | 12.99 | 12.5 | 12.07 |
| HPB235 (f _y) | 235 | 183.3 | 164.5 | 149 |
| HPB235 (ε _{su}) | 0.01 | 0.007 8 | 0.007 | 0.006 34 |
| HRB400 (f _y) | 413.68 | 352.7 | 326.35 | 301.6 |
| HRB400 (ε _{su}) | 0.01 | 0.005 4 | 0.001 6 | 0.001 4 |

注:钢筋直径单位,mm;混凝土及钢筋强度单位,MPa。

基于上述表8的材料各项参数,对结构进行不同龄期下的地震时程分析。为简便起见,本研究中主要考虑模拟剪力墙构件,因此对于本RC剪力墙结构,在模拟中为计算简略起见假定梁柱性能未发生变化,且将只选择大震下对结构进行地震时程分析。

2.4.1 不同龄期下 RC 剪力墙结构顶层加速度

在不同龄期下,RC剪力墙结构的顶层加速度时程曲线图如图10,由图10可以看出,结构在地震作用下,0年,30年,50年,70年年龄期的顶层加速度在逐渐变小(X、Y方向都是如此。X方向依次为2 893.61 mm/s²,1 992.5 mm/s²,1 188 mm/s²,839.1 mm/s²;Y方向依次为2 158.42 mm/s²,1 707 mm/s²,1 533 mm/s²,1 331 mm/s²),这是因为当结构随着龄期的增大,在外界环境下,结构的材料因为各种侵害而发生劣化,材料性能退化导致结构承载力降低,在同一条地震波作用下其极限承载力随着龄期增大而减小,在质量不变的情况下,加速度势必会减小。

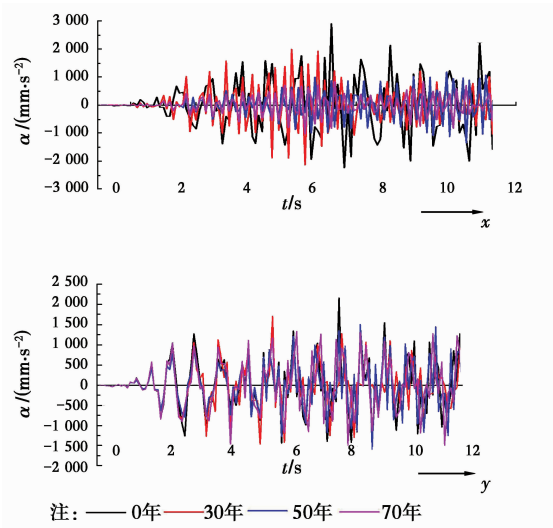


图10 龄期对结构顶层加速度影响

2.4.2 不同龄期下 RC 剪力墙结构的各层水平位移

图11为结构各层X向和Y向水平位移时程曲线。

由图11可以看出,结构在地震作用下,X和Y方向上0年,30年,50年,70年年龄期下的结构顶层位移在逐渐变大(X方向依次为29.773 47 mm,47.061 027 mm,76.917 456 mm,138.766 898 mm;Y方向依次为15.376 212mm,24.274 997mm,33.424 704mm,38.267 073mm)。这是因为在结构服役的过程中,随着龄期增长,在外界环境下结构的材料因为各种侵害而发生劣化,材料性能降低使得结构刚度降低柔性变强,变形能力增强,主要体现在结构的位移的增大。由图12可以看出,沿层高结构的水平位移依次增加,且顶层位移为各层最大,且随着龄期的增加,结构相同层的位移明显增加,这也正与结构

顶层位移时程所显示的结果一样,即随着时间的增长,劣化使得结构的性能慢慢下降,承载力随之变小,结构更易发生破坏。

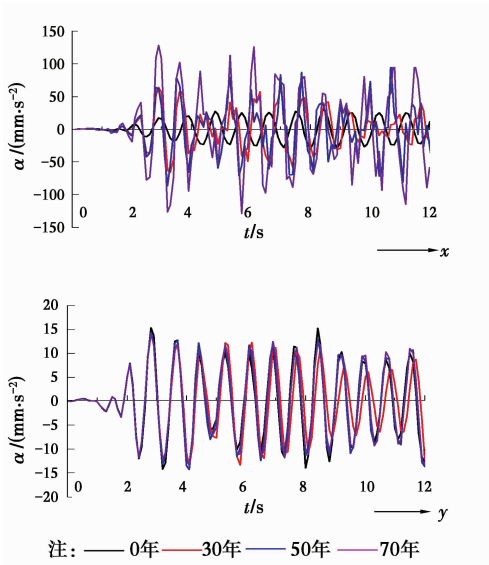


图 11 不同龄期对结构顶层位移的影响

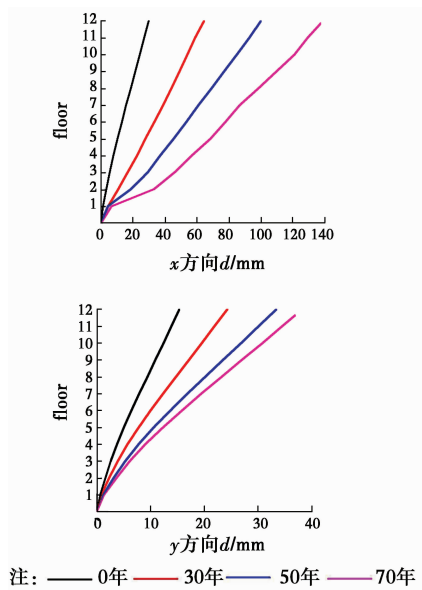


图 12 不同龄期下水平位移沿建筑高度的变化曲线

2.4.3 不同龄期下 RC 剪力墙结构的层间位移角

在不同龄期下,RC 剪力墙结构的层间位移角沿层高方向如图 13。由图 13 可以看出,在不同龄期下结构的层间位移角随着龄期的增加而变大,在 70 年时达到最大为 1/109,大于规范规定的弹塑性分析时层间位移角限值 1/120,可说明此结构在 70 年时无法安全度过大震。同时由图可以看出在 2 层左右结构的层间位移角发生突变,这是因为在此处结构的层高发生变化使得结构此处刚度突变,成为

结构的薄弱处,故结构对此处进行适当加强。结构层间位移角随着时间的增长变大反映出结构的延性增强,变形增大,但同时结构的承载力亦会同时降低。这印证了之前一系列证据说明的结构整体性能随着材料的劣化而降低的现象。

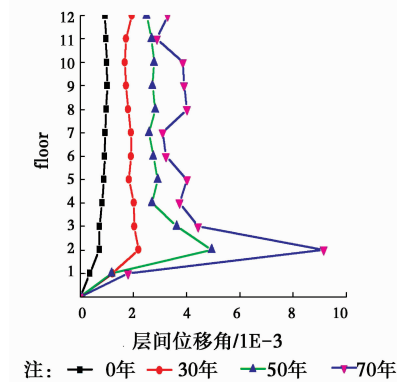


图 13 不同龄期下结构层间位移角沿高度变化

3 结 论

利用有限元软件采用数值模型能够比较精确地模拟已劣化结构整个时程的地震响应,可以反映出结构在未来遭遇地震作用下的地震需求能力和抗倒塌能力,较好地反映出结构在强震作用下强度、刚度以及变形能力的变化过程。同时,还可迅速而准确地评估地震灾害的损失,对于政府部门实施紧急救援和进行灾区的恢复重建具有重要意义。

1)对缺少实际劣化资料的 RC 剪力墙结构,基于材料劣化的 RC 剪力墙结构的数值模拟方法是研究 RC 剪力墙结构抗震性能的一种可行性方法。并且可运用到其它高层结构的抗震性能分析中。同时也为评估 RC 剪力墙结构的地震灾害损失提供了基础数据。

2)严格按照中国现行规范设计的 RC 剪力墙结构,都能达到“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设防目标。说明中国目前现行的各项设计规范符合中国的实际建设情形。

3)随着龄期的增长,材料劣化对于结构的整体性能的损坏非常大,甚至于会使得结构提前于服役期满而发生破坏。应当对此产生足够的重视。特别是对于一些建立在严酷环境下的建筑物应当采用一下提前的预防措施,随着中国建筑数量的增多,越来越多的建筑物会出现各种各样的损害,应当对此进行更多深层次的研究。

参考文献:

- [1] 郑山锁, 侯丕吉, 李磊, 等. RC剪力墙地震损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2012(2):51-59.
- [2] 陈勤, 钱稼茹, 李耕勤. 剪力墙受力性能的宏模型静力弹塑性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3).
- [3] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(5): 586-592.
- [4] 郑山锁, 杨威, 秦卿, 等. 基于氯盐最不利侵蚀下锈蚀RC框架结构时变地震易损性研究[J]. 振动与冲击, 2015(7):38-45.
- [5] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete swedish [D] Stockholm: Cement and Concrete Research Institute; 1982.
- [6] DuraCrete. Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions[M]. The European Union Brite EuRam 3 contract BRPR-CT95-0132 Project BE95-1347 Report no BE95-1347/R7, 2000.
- [7] Choe D E, Gardoni P, Rosowsky D, et al. Probabilistic; capacity models and seismic fragility estimates for RCcolumns subject to corrosion [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 93: 383-393.
- [8] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal Structural Engineering ASCE 1988, 114(8): 1804-1826.

(编辑 侯湘)