

RC 核心筒地震损伤模型研究及损伤评价

侯丕吉¹, 郑山锁², 苏三庆²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: RC 核心筒是高层混合结构中应用广泛的结构单元体系, 为体现构件损伤向结构损伤迁移转化的多尺度效应, 基于数值模拟方法, 在分析构件耗能权重的基础上, 建立了结构单层地震损伤模型; 通过对结构单层损伤与整体结构破坏之间的关系进行分析, 采用位置权重系数与结构单层损伤指数权重系数二者组合的形式作为结构层损伤权重系数, 建立了能够反映构件损伤、楼层损伤以及整体结构损伤三者之间迁移演化规律的 RC 核心筒地震损伤模型, 并给出了 RC 核心筒的损伤状态及相应的损伤指数范围。计算结果与试验结果的对比表明, 建立的地震损伤模型能够较好地描述核心筒结构的地震损伤演化过程与损伤程度, 并反映构件损伤、局部结构损伤以及整体结构损伤三者之间迁移演化规律, 研究结果可为混合结构抗震性能评估提供参考。

关键词: RC 核心筒; 损伤模型; 损伤分析; 数值模拟; 损伤状态

中图分类号: TU398.201; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)04-0518-05

钢筋混凝土筒体结构常被作为高层建筑结构中主要竖向交通联系楼梯、电梯间以及服务性用房等位置来使用, 其地震中的性能表现对高层建筑有着至关重要的影响。但有关此类结构的地震损伤性能的研究资料较少^[1-5]。国内外针对整体结构损伤的研究方法主要有整体法和加权系数法两种, 整体法没有考虑局部损伤与整体结构损伤的关系, 而加权系数法则通过将局部损伤按一定权重系数组合的途径来确定整体结构损伤程度, 较好地体现了局部对整体的影响程度。目前在研究结构损伤模型方面, 采用加权系数法的大多数情况只是研究了结构层损伤对整体结构损伤的影响, 并未细化分析同一楼层中不同构件发生损伤后对所在楼层的影响, 那么按照这个过程中所得到的整体结构损伤程度不能更精细地体现局部构件损伤对整体结构损伤的贡献。鉴于此, 本文基于对剪力墙构件损伤性能的研究^[6], 通过分析结构中构件破坏与楼层破坏及楼层破坏与整体结构破坏之间的关系, 在结合国内外相关研究成果的基础上(含数值方法及试验方法得到的结论及数据), 建立适用于 RC 核心筒结构的整体损伤模型。

1 RC 核心筒单层损伤模型研究

筒体结构楼层的损伤应该同时考虑剪力墙损伤和连梁损伤两个方面, 文献[7]中对 RC 筒体结构的抗震性能进行了较系统分析。可以看出, 在低周反复荷载作用下, 除试件4以外, 其余模型中的连梁均在四角部位形成塑性铰并发生严重破坏, 属于弯曲破坏。墙体斜向剪切裂缝主要分布在模型下部的1~3层, 第1层裂缝较为集中。试件4连梁发生的是剪切破坏, 主要表现为腹部交叉斜向裂缝, 模型1~2层剪切裂缝集中但分布均匀。试件5的连梁, 裂缝主要沿试件加载方向两端墙肢呈现弯曲破坏, 而中部墙肢主要呈现为剪切破坏形态。

1.1 RC 核心筒单层损伤模型分析

引言中提到的整体损伤分析方法是整体结构的位移、变形等参数作为损伤控制目标, 从宏观上把握结构的整体性能, 并未将结构破坏过程作为分析重点。因此本文采用加权系数法, 以核心筒结构墙体、连梁的损伤数学模型为基础, 从能量的角度赋予不同构件相应的权重系数, 而后叠加来确定整体结构的损伤模型。整个分析过程能够较为精确地把握整体结构中各个层次损伤的迁移规律过程, 建立的整体损伤模型能够实现损伤由局部构件到楼层

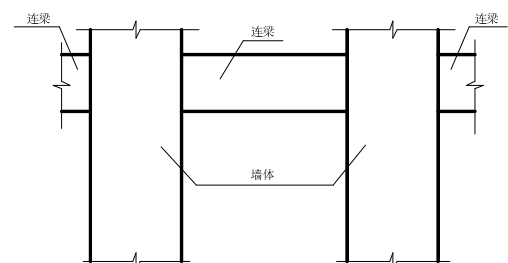


图1 单层计算简图

Fig. 1 Calculation scheme of single layer

收稿日期: 2013-10-15

修改稿日期: 2014-07-24

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金项目(50978218, 51108376); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20106120110003); 陕西省科研项目(2012K12-03-01, 2011KTCQ03-05); 西安科技大学科研培育基金(201235); 西安科技大学博士科研启动金项目(2013QDJ001)

作者简介: 侯丕吉(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事工程结构抗震性能方向研究。E-mail: houpiji@163.com

再到整体结构的迁移演化。

首先核心筒单层计算简图如图1所示。建立层损伤模型,首先应在考虑墙与连梁两类构件对层损伤的贡献大小基础上,赋予相应的权重系数。综合分析,本文将RC核心筒的单层损伤模型表达式定义为:

$$D_j = \sum_{i=1}^n \eta_{ij,w} D_{ij} + \sum_{k=1}^m \eta_{kj,b} D_{kj} \quad (1)$$

式中: D_j 为第 j 结构层损伤值; $\eta_{ij,w}$ 为第 j 结构层第 i 片墙所对应的权重系数; n 为筒体结构中第 j 结构层墙体总数; D_{ij} 为第 j 结构层第 i 片墙的损伤值; $\eta_{kj,b}$ 为第 j 结构层第 k 根连梁所对应的权重系数; D_{kj} 为第 j 结构层第 k 根连梁的损伤值。

1.2 损伤模型参数的计算

(1) 构件损伤值的确定方法

作者前期已经对剪力墙构件的损伤性能进行了研究,建立了由较大非弹性变形引起的变形累积损伤分量和由低周疲劳引起的能量累积损伤分量联合表征的低周反复荷载作用下剪力墙的非线性双参数损伤模型^[8],该模型考虑了变形累积损伤与能量累积损伤之间的相互影响。连梁损伤指数的确定方法可按照文献^[9]提供的方法进行计算。

(2) 构件损伤的权重系数的确定方法

式(1)中权重系数 $\eta_{ij,w}$ 和 $\eta_{kj,b}$ 表示本结构层内各个构件对楼层总体损伤的贡献大小,本文将采用构件滞回耗能作为构件权重系数的确定依据,则同一结构层内各个构件损伤权重系数的计算式为:

$$\eta_{ij,w} = E_{ij,w} / \sum E_j, \quad \eta_{kj,b} = E_{kj,b} / \sum E_j \quad (2)$$

其中:

$$\sum E_j = \sum E_{ij,w} + \sum E_{kj,b} \quad (3)$$

式中: $\sum E_j$ 为第 j 结构层在往复荷载作用下的总滞回耗能; $\sum E_{ij,w}$ 、 $\sum E_{kj,b}$ 分别为往复荷载作用下第 j 结构层中剪力墙构件滞回耗能之和和连梁构件的总滞回耗能之和。

2 RC 核心筒单层损伤分析

为了提取相关的分析数据,本文借助文献^[7]中所提供的试件设计方案,利用ETABS分析软件建立了相应的筒体数值模型,并利用接口导入Perform-3D程序中对该模型进行低周往复加载分析(如图2所示)。模型共五层,层高均为3.9 m,总高度19.5 m。模型完全依照ETABS模型的单元、截面、节点、边界条件,确保ETABS模型的构建组成、质量分布、动力特征等与Perform-3D模型基本一致。1~5层剪力墙混凝土强度为C40,楼板混凝土强度均为C35,纵筋为HRB335级。

利用数值模拟的核心筒计算结果,分别计算出各结构层墙、连梁的损伤值,利用式(2)赋予相应的权重系数,同时令连梁的权重系数为零得到剪力墙的总损伤贡献值,令剪力墙的权重系数为零得到连梁的总损伤贡献值,而后采用式(1)得到结构单层的损伤值。为便于直观比较构件损伤与楼层损伤之间的关系,笔者以往复荷载循环次数为横坐标,纵坐标分别采用单个楼层损伤值、墙损伤值以及连梁损伤值,绘制出结构各层损伤值、墙和连梁的损伤贡献值与往复荷载循环次数之间的变化关系如图3所示。

从图3中可以发现:

(1)较连梁损伤对楼层损伤贡献而言,剪力墙对整个结构层的损伤贡献更大。加载初期,墙体损伤贡献大约占到55%,连梁占到45%,但随着循环次数的增加,墙体与连梁损伤同时增大,当连梁达到破坏并退出工作后,墙体才逐渐由屈服达到破坏,整个过程损伤值不断增大,因此占楼层损伤的比重也逐渐加大,最终破坏时,墙体对结构层的损伤贡献达到60%左右。

(2)图中还可以发现相同位移幅值下的循环加载中,楼层的损伤值有所上升,表明本文提出的层损伤模型,即式(1),能够较好地滞回耗能累积效应对结构层损伤的影响作用体现出来。

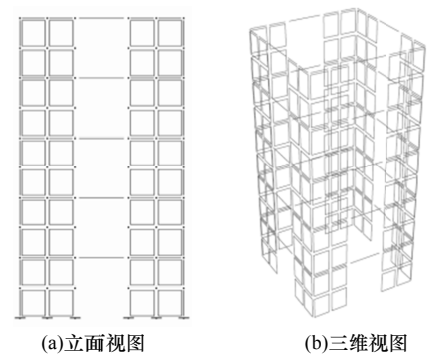


图2 RC 核心筒数值模型
Fig.2 Numerical model of RC core walls

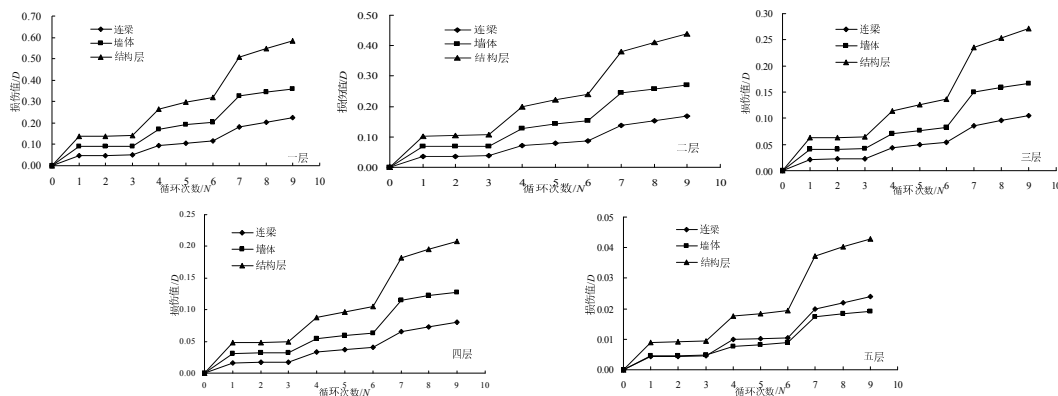


图3 墙体损伤、连梁损伤以及楼层损伤与循环次数的关系
Fig. 3 Relationship of single layer damage, member damage and cycle numbers

3 RC 核心筒整体损伤模型的建立

3.1 损伤过程分析

基于筒体结构试验结果, 将其在低周反复荷载作用下的损伤破坏过程分为以下几个阶段:

(1) 无损伤阶段

加载初始, 结构顶部位移小, 各个构件主要处于弹性工作阶段, 结构损伤主要表现为模型腹板墙体中部连梁的四角出现细微竖向弯曲裂缝. 此阶段结构的总体损伤基本可以忽略, 属于无损阶段.

(2) 损伤初始阶段

当连梁中开始出现竖向裂缝时, 随着加载幅值的增大, 新裂缝不断产生, 并向墙肢延伸, 连梁开始进入塑性工作阶段, 大部分能量主要依靠梁端塑性铰来耗散, 此阶段墙体变形仍然较小, 属于损伤初始阶段.

(3) 损伤稳定发展阶段

随着连梁中斜裂缝的不断发展并延伸至墙体, 墙体翼缘部位开始出现水平弯曲裂缝, 同时在腹板墙体中下部出现大量的剪切斜裂缝, 新旧裂缝不断发展, 并逐渐贯通. 在外部荷载作用下, 构件损伤程度虽在增大, 但较稳定, 属于损伤稳定发展阶段.

(4) 损伤急剧发展阶段

连梁破坏, 墙体屈服, 结构顶部位移急剧增大, 最终失去承载能力而破坏. 这个阶段损伤发展迅速, 属于损伤急剧发展阶段.

3.2 核心筒结构加权法损伤模型

目前国内外有关整体结构损伤模型的研究方法中, 较其他方法而言, 加权系数法能够体现结构楼层损伤对整体结构损伤影响的大小, 表达上更为合理. 其基本形式如下所示:

$$D = \sum_{j=1}^N \lambda_j D_j \quad (4)$$

式中: λ_j 为第 j 结构层损伤权重系数; D_j 为第 j 结构层损伤指数; N 为结构总层数.

本文拟采用公式(4)的表示形式来建立的 RC 核心筒结构地震损伤模型.

3.3 核心筒单层损伤权重系数分析

文献[1]以及文献[10~14]中提到了多种典型的权重系数, 此外也有学者从结构单层自重以及楼层屈服强度系数等角度出发来定义结构层损伤权重系数, 均在一定意义上考虑了结构层的损伤程度.

研究资料表明, 除有外界的偶然因素影响外, 结构自身的组成对结构损伤也有着决定性的影响. 结构层损伤权重系数 λ_j 的确定, 关键在于其必须能够精确反映结构各层损伤对整体结构损伤的贡献. 现有的研究成果一般只考虑单个因素的作用来确定 λ_j , 这样的考虑方式虽简化了计算难度, 但不能将各因素造成的影响同时考虑. 因此本文认为, 在整体结构中, 一个合理的结构层权重系数应综合考虑结构层所处位置以及不同结构层在地震作用下损伤程度大小两个方面的因素. 基于上述分析, 本文采用位置权重系数 γ_j 与结构单层损伤权重系数 μ_{D_j} 组合的形式来确定结构层的损伤权重系数.

(1) γ_j 的计算

文献[15]在针对框架结构采用线性变化的位置权重系数研究后发现, 结构底层的分析结果与实际情况较吻合, 但是在结构的中上部, 权重系数却表现出退化较缓的特点, 这说明该方法放大了上部各结构层的重要程度. 而文献[10]的分析结果恰好相反, 所采用的位置权重系数能够较合理地对结构上部各层的重要程度进行表征, 却过度夸大了结构底层的重要性. 上述两种方法都不甚合理.

综合上述分析, 取长补短, 文献[15]提出一种介于二者之间的位置权重系数, 表达式如下:

$$\gamma_j = 1/N^{1/2}$$

(5)

该位置权重系数退化速率保留了文献[15]和文献[10]中两种系数退化规律的优势, 避免出现过度放大底层重要程度的可能性, 同时又可以与底部结构各层有可能成为薄弱层的事实相符, 并且仍能较准确反映中上部各结构层对整体结构损伤的贡献.

(2) μ_{D_j} 的计算

结构单层损伤权重系数 μ_{D_j} 反映了局部损伤与整体损伤的关系, 通过式(6)计算可以得到单层损伤程度占整体结构损伤程度的比重大小.

$$\mu_{D_j} = D_j / \sum_{j=1}^N D_j$$

(6)

本文采用公式(4)的数学形式来建立的 RC 核心筒损伤模型, 并将位置权重系数与结构单层损伤权重系数通过平方和开根号的组合方式, 来最终确定结构层损伤权重系数, 其具体的表达式为:

$$\lambda_j = \sqrt{\gamma_j^2 + \mu_{D_j}^2}$$

(7)

式中: γ_j 为第 j 结构层位置权重系数; μ_{D_j} 为第 j 结构层损伤权重系数.

基于上述分析方法, 以加载循环次数为横坐标, 分别以式(7)计算所得结果和根据文献[7]试验结果所确定的整体结构损伤指数为纵坐标, 将两种变化关系进行对比, 如图 4 所示.

由图可知, 根据式(7)计算得到的损伤值与试验损伤值吻合较好, 表明该模型能够较合理并精确地反映 RC 核心筒结构的损伤发展过程, 因此, 本文最终建立的 RC 筒体结构地震损伤模型的数学表达式为:

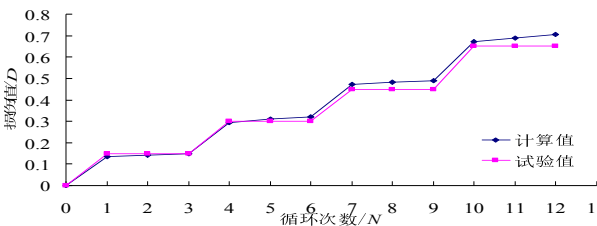


图 4 损伤计算值与试验值的对比
Fig. 4 Comparison of calculation and test results

$$D = \sum_{j=1}^N \sqrt{\gamma_j^2 + \mu_{D_j}^2} \cdot D_j$$

(8)

式中: γ_j 为第 j 结构层位置权重系数; μ_{D_j} 为第 j 结构层损伤权重系数; D_j 为第 j 结构层损伤指数.

3.4 RC 核心筒结构损伤水平的确定

合理评估建筑结构损伤程度应首先对结构的性能水准进行合理划分并给予对应的量化指标. 文献[1]将结构损伤程度分为: 无损、轻微损伤、中度损伤、重度损伤以及倒塌五个等级; 文献[17]则将结构损伤程度分为: 无损、轻微损伤、可修复、不可修复和倒塌. 本文参考以上思路, 并基于收集试验资料以及本次数值模拟结果确定了 RC 筒体结构的损伤水平. 表 1 给出了 RC 核心筒的性能水平及宏观描述, 表 2 给出了 RC 核心筒的破坏程度及相应的损伤指数范围.

表 1 RC 核心筒结构性能水平及宏观描述
Tab.1 Performance level of RC core walls structure

性能水平	结构宏观描述	破坏程度	易修复程度
正常使用	试件基本完好, 连梁刚开始出现轻微竖向裂缝, 及斜向小裂缝, 试件保持原有强度和刚度, 仍处于弹性阶段	基本完好	不需修复
暂时使用	试件轻微至中等破坏, 连梁及墙肢裂缝发展较为充分, 接近屈服阶段	轻微破坏	较易修复
生命安全	试件破坏较为严重, 裂缝发展、延伸, 宽度加大, 进入屈服阶段, 表现出明显的塑性变形	严重破坏	可以修复
接近倒塌	试件连梁纵筋出现屈服, 混凝土剥落严重, 底部墙肢破坏较为严重, 接近或以严重破坏	接近倒塌	不可修复

表2 RC筒体结构的损伤程度及相应损伤指数

Tab.2 Damage states and corresponding damage indexes of RC core walls structure

结构损伤程度	基本完好	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	倒塌
损伤指数范围	$0 \leq D_c < 0.3$	$0.3 \leq D_c < 0.45$	$0.45 \leq D_c < 0.65$	$0.65 \leq D_c < 0.8$	$D_c \geq 0.8$

4 结论

经过本文的分析工作,笔者得到以下结论:

(1)本文所提出的适用于RC核心筒损伤模型充分考虑了损伤的层次性,以及损伤的迁移转化规律,对损伤的发展过程有着较为准确地描述与把握。

(2)所给出的该类结构性能水准划分及相应量化指标,可为地震作用下该类结构的损伤评估提供依据以及基于损伤的抗震设计方法的建立提供参考。

参考文献 References

- [1] PARK Y J, REINHORN A M, KUNNATH S K. Inelastic damage analysis of frame shear wall structures [R]. Technical Report, NCEER, 87-0008.
- [2] GHOBARAH A, ABOU-ELFATH A. Response-based damage assessment of structure [J]. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 1999, 28: 79-104.
- [3] 李国强, 郝坤超, 陆桦. 框架结构损伤识别的两步法[J]. 同济大学学报, 1998, 26 (5): 1-9.
LI Guoqiang, HAO Kunchao, LU Ye. Two-step approach for damage identification of frame structures[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26 (5): 1-9
- [4] GU Xianglin, SHEN Zuyuan. Damage analysis on reinforced concrete structures under earthquake series [J]. Proceedings of ICCBE-VII, Seoul, Korea, 1997.
- [5] WHITMAN R V, HONG J T, REED J W. Damage statistics for high rise building in the vicinity of the San Fernando earthquake [R]. Dept. Civ. Engrg., Research Report, 1973.
- [6] 郑山锁, 侯丕吉, 李磊. RC 剪力墙地震损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 51-59.
ZHENG Shansuo, HOU Piji, LI Lei. Experimental study of the damage of RC shear walls under low cycle reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 51-59
- [7] 侯炜. 钢筋混凝土核心筒抗震性能及其设计理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
HOU Wei. Study on Seismic Behavior and Design method of Reinforced Concrete Core Walls[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [8] 侯丕吉. RC 剪力墙构件及 RC 核心筒地震损伤性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
HOU Piji. Research on Seismic Damage Performance of Reinforced Concrete Shear Wall Members and Reinforced Concrete Core Walls [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012
- [9] 于飞. 型钢高强高性能混凝土框架梁损伤试验及损伤分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
YU Fei. Research on Seismic Damage of Steel Reinforced High Strength and High Performance Concrete Frame Beams[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2010.
- [10] CHUNG Y S, MEYER C, SHINOZAWA M. Modeling of concrete damage [J]. Struct. ACI, 1989, 86(3): 259-270.
- [11] 欧进萍, 何政, 吴斌, 等. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 21-29.
OU Jinping, HE Zheng, WU Bin, et al. Seismic damage performance-based design of reinforced concrete structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(1): 21-29
- [12] 杨栋, 丁大钧, 宰金钊. 钢筋混凝土框架结构的地震损伤分析[J]. 南京建筑工程学院学报, 1995, 4: 8-13.
Yang Dong, Din Dajun, Zai Jinmin. Seismic injury assessment of reinforced concrete frame structures[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1995, 4: 8-13.
- [13] 李洪泉, 欧进萍. 剪切型钢钢筋混凝土结构的地震损伤识别方法[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(2): 8-12.
LI Hongquan, OU Jinping. An identification method of shear-type RC frame for earthquake damage[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996, 29(2): 8-12.
- [14] MOHAMMAD R., BAKHSHI Ali. Vulnerability and damage analyses of existing buildings [C]//13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, 2004: 1-13.
- [15] 杜修力, 欧进萍. 建筑结构地震破坏评估模型[J]. 世界地震工程, 1991, 7(3): 52-58.
DU Xiuli, OU Jinping. Earthquake damage assessment model of structure[J]. World Earthquake Engineering, 1991, 7(3): 52-58.
- [16] 郑山锁, 侯丕吉, 张宏仁, 等. SRHSPC 框架结构的地震损伤试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(07): 84-92.
ZHENG Shansuo, HOU Piji, ZHANG Hongren, et al. Experimental study on seismic damage of SRHSPC frame structure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 29(07): 84-92.
- [17] BRACCI J M, KUNNATH S K, REINHORN A M. Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(1): 3-10.

(下转第535页)

Coupling numerical simulation of the in-situ stress and hydraulic-pressure fields in Danjiangkou area using the modeling with the zone of chasm and fault

XIE Xiangdong¹, LIU Sumei²

(1. School of Mechanics and Automobile Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The 3-D finite element model considering the zone of chasm and fault is established according to seismogeological characteristics of Danjiangkou area by the software of ABAQUS. The stress and strain fields of the model are calculated reversely in the condition of interaction of the in-situ stress and the second impoundment water pressure fields, the stability of reservoir area is analyzed, the possibility and risk area of induced seismic is forecasted. The results show that after the second impoundment a series of microseisms would be tempted by stretch in such tensile stress areas as the south of Gonglu chasm, the east of Danjiang chasm, the north of Junyun chasm and the west of Danjiang chasm, be tempted by shear-slide in such areas as Guanghua, Gucheng, Shihuaie, the southeast of Danjiang chasm, in the line of Gonglu chasm; A series of small earthquakes were tempted by reservoir-water infiltration and shear-slide in such area as the periphery of Songwan, the periphery of Linmaoshan, the periphery of Danku, be tempted by shear-slide in the line of Baokang and Yuan'an, the line of Xiangyang and Zhongxiang, the line of Yunxian and Xijiadian.

Key words: hydraulic-pressure stress field; in-situ stress field; reservoir induced earthquake; Danjiangkou Reservoir

(本文编辑 桂智刚)

(上接第522页)

Research on the seismic damage model and damage evaluation of RC core walls

HOU Piji¹, ZHENG Shansuo², SU Sanqing²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China,;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. and Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: RC core walls is a widely used structural unit in high-rise hybrid structure. In order to study the multi-scale effect of migration and transformation from member damage to structure damage, based on numerical method, the storey damage model was established by introducing energy weighting coefficient of members. Through analysis the relation between storey damage and structure damage, the global damage model, which could reflect migration and evolution law from member damage to local damage and global damage, was established by using the storey weighting coefficient is a combination of location weighting coefficient and storey damage weighting coefficient. The damage states and corresponding damage index range of RC core walls were defined by combining the damage indexes. Comparison of the calculated results with test results indicates that the proposed seismic damage model can appropriately describe the damage evolution of RC core walls, and the relationship between the local component damage and global structure damage is revealed. The results may well serve as a reference on seismic performance evaluation for hybrid structure.

Key words: RC core walls; damage model; damage analysis; numerical simulation; damage states

(本文编辑 吴海西)