

高层再生混凝土框-剪结构动力弹塑性分析

肖建庄, 胡 博, 王春晖

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 在对再生混凝土材料性能深入分析的基础上, 根据再生和普通混凝土材料非线性性能的差异, 探讨了再生混凝土弹塑性分析时软件选取、材料本构模型确定、结构构件模型选取等关键问题. 在此基础上完成了一再生混凝土框架-剪力墙结构高层试点工程的动力弹塑性分析, 并与相应的普通混凝土结构模型的分析结果进行了对比. 结果表明, 当再生粗骨料取代率不大于 30% 时, 再生混凝土结构模型在大震作用下其弹塑性层间位移角虽然较普通混凝土模型有所增大, 但仍可满足抗震设防第三水准“大震不倒”的要求. 再生混凝土结构由于结构弹塑性变形及刚度滞回退化所耗散的能量占总能量的 32.8%, 耗能能力较相应的普通混凝土结构下降 9.6%. 根据构件的性能状态可见, 高层再生混凝土框-剪结构符合“强柱弱梁”、“强墙肢弱连梁”等抗震设计基本要求.

关键词: 再生混凝土; 框-剪结构; 动力弹塑性分析; 抗震性能; 高层试点工程

中图分类号: TU375

文献标志码: A

is lower than 30%, although the relative elastic-plastic drift angle of RAC structures is larger than that of normal concrete structures, it can still meet the requirements of “no-collapsing with rarely-met intensity earthquake”. The energy dissipation due to structural elastic-plastic deformation and hysteretic stiffness degradation of the RAC structure accounts for 32.8% of the total dissipated energy, which decreases by 9.6% compared to the corresponding normal concrete structure. According to the performance of the components, it can be concluded that the high-rise RAC frame-shear wall structure conforms the concepts for the seismic design such as “strong column-weak beam” and “strong wall-weak coupling beam”.

Key words: recycled aggregate concrete; frame-shear wall structure; dynamic elastic-plastic analysis; seismic performance; high-rise demonstration project

Dynamic Elastic-plastic Analysis on High-rise Recycled Aggregate Concrete Frame-shear Wall Structures

XIAO Jianzhuang, HU Bo, WANG Chunhui

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on intensive analysis of material properties of recycled aggregate concrete (RAC) and the differences between the nonlinear behaviors of RAC and those of normal concrete, key points about elastic-plastic analysis on RAC structures, including selecting the proper analysis software, constitutive relation model and structure modeling were discussed. Then the elastic-plastic analysis on one RAC frame-shear wall high-rise demonstration project was undertaken, while the analysis results were compared with those of normal concrete structures. The analysis result demonstrates that when the recycled coarse aggregate (RCA) replacement ratio

目前国内再生混凝土正处于由试验阶段向实际工程应用、推广的发展阶段. 再生混凝土应用于实际工程结构中, 其安全性能、特别是抗震性能是人们首要关注的问题, 为此有关研究人员对再生混凝土结构及构件的抗震性能进行了一系列基础研究^[1-4]. 在试验研究的基础上和相关标准规范的指导下, 再生混凝土作为建筑结构材料在国内已应用于一些低层试点工程^[1-2]. 通过合理的配合比设计, 再生混凝土可以达到与普通混凝土相同设计强度的要求^[5-6], 以保证结构构件承载能力可靠度. 然而, 再生粗骨料的存在必然对再生混凝土构件及结构的非线性性能产生重要影响. 因此, 在高层建筑中应用再生混凝土, 有必要对其进行弹塑性分析以了解其非线性性能及其与普通混凝土结构的差异, 为抗震设计提供依据. 本文着重解决再生混凝土结构弹塑性分析中的关键问题, 并结合一再生混凝土框-剪结构高层试点工程进行动力弹塑性分析, 验证所提出的分析方法和步

收稿日期: 2016-06-26

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325802); 上海市科委创新行动计划(14231201300)

第一作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土材料与结构. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

骤,并和相应的普通混凝土结构进行对比分析。

1 结构设计概况

1.1 工程简介

该工程位于上海市杨浦区,为商业-办公建筑,结构采用再生混凝土框-剪结构,结构屋面标高为

49.2 m,地上 12 层,地下 2 层.抗震设防烈度为 7 度,场地类别为 IV 类,特征周期为 0.9 s.标准层层高为 3.9 m,建筑平面东西方向长度为 46.2 m,南北方向宽度为 29.4 m,标准层构件布置如图 1^[7]所示。

计算分析时以地下室顶板作为嵌固端,地下室顶板厚度为 180 mm,其余各层楼板厚度分别为 120~150 mm.典型框架柱截面为正方形,边长为

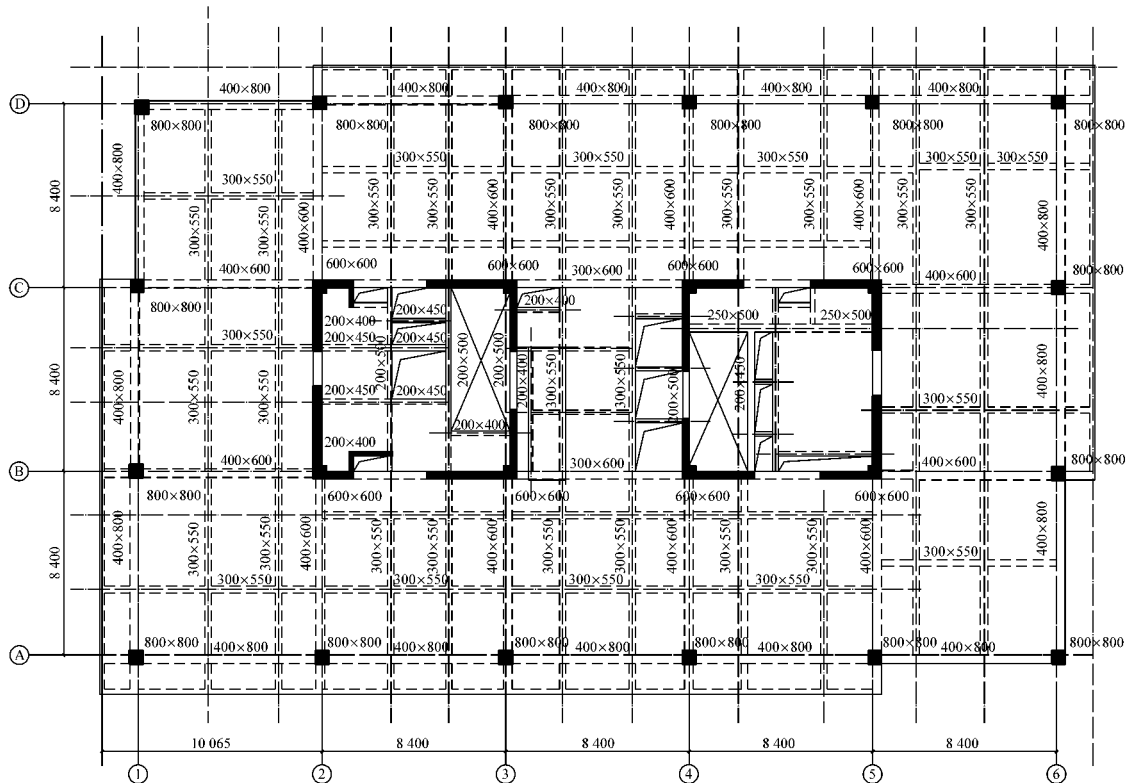


图 1 结构标准层构件布置^[7](单位:mm)

Fig.1 Arrangement of components on standard floors^[7](unit:mm)

800 mm;典型剪力墙厚度为 200~400 mm;框架梁截面宽度为 400 mm,高度为 600 mm,由于结构抗扭刚度较弱,将外圈环向框架梁截面高度增加至 800 mm^[7].

1.2 设计概况

再生混凝土材料性能的控制是再生混凝土结构质量的保证,是其结构安全设计的前提.再生混凝土材料的生产采用“定点定场定配比”的原则,即再生粗骨料来源单一,再生混凝土生产场地固定及再生混凝土配合比试配优选.试点工程再生混凝土由商品混凝土搅拌站提供,该搅拌站在再生混凝土生产及质量控制方面已有较为成熟的技术和经验。

通过合理的配合比设计,再生混凝土抗压强度标准值可满足规范要求^[8].考虑第一二层为底部加强区,对结构构件抗震性能要求较高,采用再生粗骨

料取代率为零的普通混凝土.2 层及以上混凝土中用再生粗骨料按一定质量比例取代天然粗骨料(表 1).

表 1 高层试点工程再生混凝土材料分布

Tab.1 Distribution of recycled aggregate concrete in the demonstration project

层号	梁、楼板		柱、剪力墙	
	强度等级	再生粗骨料取代率/%	强度等级	再生粗骨料取代率/%
7~12F	RC30	30	RC40	30
3~6F	RC30	30	RC50	10
2F	RC30	30	C50	0
1F	C35	0	C50	0
B1F	C30	0	C50	0
B2F	C30	0	C50	0

采用盈建科(YJK)结构计算分析软件进行设计,并用 MIDAS Building 软件对 YJK 软件计算的结构整体指标进行对比校核,保证计算结果可靠。

2 再生混凝土结构弹塑性分析关键问题

2.1 分析软件选取

以往对于再生混凝土结构构件非线性分析,软件一般采用 Ansys, Abaqus 和 OpenSees 等^[9-11],选用的模型多为实体单元,这是因为研究对象大多为构件层次或简单的结构层次.当再生混凝土应用于实际结构工程中时,由于结构构件单元数目较多,采用上述软件操作复杂,计算速度较慢,不便于工程设计人员应用,从而在一定程度上限制了再生混凝土在实际结构工程中的推广.

相对于 Abaqus, Ansys 等通用有限元软件而言,Perform-3D 拥有更丰富的结构构件单元库,且非线性模型建立操作相对通用有限元软件及 OpenSees 简便;另一方面,考虑到再生混凝土材料非线性性能的特殊性,相对于 SAP2000, ETABS, PKPM 等结构设计类软件而言,Perform-3D 软件在非线形参数设置方面拥有更开放式的空间,且分析功能更为强大.

综合上述分析,选用 Perform-3D 软件对再生混凝土结构开展动力弹塑性分析.

2.2 再生混凝土弹性模量取值

在再生混凝土结构线弹性设计时,考虑到再生混凝土弹性模量相对普通混凝土小,参考相关规程^[12],并通过现场材性试验验证,本次弹性模量设计值取相应强度等级普通混凝土的 90%.值得注意的是,在计算结构地震工况引起的内力时,折减弹性模量将增大结构自振周期计算值.如果结构的第 1 阶周期处于地震反应谱的下降段,将降低其地震作用下的内力,对于结构安全储备不利.因此,在这种情况下,如无可靠的再生混凝土弹性模量实测数据,在计算内力时,建议再生混凝土弹性模量应保持和普通混凝土规范同样的取值;在计算结构变形(层间位移角、扭转位移比等)时,仍按折减弹性模量取值.计算内力与计算变形 2 个阶段弹性模量分别取值,有利于提高高层再生混凝土结构的安全性.

2.3 再生混凝土本构模型

再生混凝土结构和普通混凝土结构非线性性能差异的本质在于材料本构关系的差异,如何选取合理的再生混凝土材料本构模型是保证再生混凝土结构非线性分析结果准确性的关键.再生混凝土的本构关系,国内外学者^[13-15]已经做了一定的研究,结合研究成果可以看出再生混凝土和普通混凝土本构关

系具有类似的数学表达形式,两者性能相似.

考虑到箍筋的约束作用对混凝土材料的应力-应变关系产生的影响,将其三维约束效应处理为等效单轴应力-应变问题会使得问题的求解更加高效实用.约束及非约束混凝土的本构模型常采用 Kent-Scott-Park^[16]模型(图 2),其中: E_c 为混凝土的初始弹性模量, σ_c 为混凝土压应力; ϵ_c 为混凝土压应变; ϵ_{c0} 为混凝土峰值压应力所对应的应变; ϵ_{c20} 为压应力下

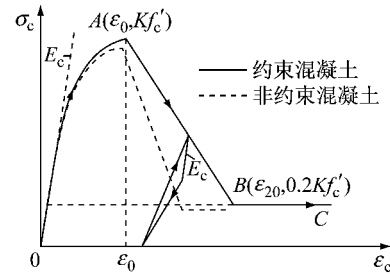


图 2 Kent-Scott-Park 混凝土本构模型

Fig. 2 Kent-Scott-Park concrete constitutive model

降至峰值压应力的 20%时所对应的应变; K 为考虑约束所引起的混凝土增强系数; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度,可通过棱柱体抗压强度换算得到.对于 OA 段,有

$$\sigma_c = Kf'_c \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (\epsilon_c \leq \epsilon_{c0}) \quad (1)$$

对于 AB 段,有

$$\sigma_c = Kf'_c [1 - Z(\epsilon_c - \epsilon_{c0})] \quad (\epsilon_{c0} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c20}) \quad (2)$$

式中: Z 为应变软化段斜率.对于 BC 段,有

$$\sigma_c = 0.2Kf'_c \quad (\epsilon_c > \epsilon_{c20}) \quad (3)$$

其中 $\epsilon_{c0}, \epsilon_{c20}, K, Z$ 的计算公式如下:

$$\epsilon_{c0} = 0.002K \quad (4)$$

$$\epsilon_{c20} = \frac{0.8}{Z} + \epsilon_{c0} \quad (5)$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002k} \quad (6)$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \quad (7)$$

对于极限压应变 ϵ_{cu} , Scott 等^[16]建议按偏于保守的下式确定:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + 0.9\rho_s \left(\frac{f_{yh}}{300} \right) \quad (8)$$

式中: ρ_s 为箍筋与箍筋内混凝土核心的体积之比; f_{yh} 为箍筋的屈服强度; h' 为从箍筋外边缘至核心区截面中心的距离; s_h 为箍筋间距.

值得注意的是,根据肖建庄^[17]的研究成果,当再

生粗骨料取代率为 30% 时,再生混凝土峰值压应变可取为普通混凝土的 1.05 倍;再生混凝土极限压应变可取为普通混凝土的 85%。

修正的 Kent-Scott-Park 约束混凝土模型是在简化与精确之间的一种较好的平衡,该混凝土模型涉及的特征参数,如峰值应力点 A 和残余应力点 B,仅给出模型的确定方式,现有模型的特征点参数可通过再生混凝土的材性试验获取.虽然修正的 Kent-Scott-Park 约束混凝土模型是在对普通混凝土材料性能研究的基础上提出的,但国内外关于再生混凝土材料性能的试验研究和理论分析表明,再生混凝土应力-应变关系曲线的形状与普通混凝土类似^[1].故在对再生混凝土结构的非线性分析中,采用 Kent-Scott-Park 混凝土模型来考虑箍筋的约束作用是可行的^[4].

根据 Perform-3D 软件中混凝土材料本构模型的定义,采用 YULRX 骨架曲线模拟混凝土受压非线性行为,如图 3 所示.为便于软件实施,需对理论上的混凝土本构模型进行适当简化以符合 YULRX 骨架曲线特征.

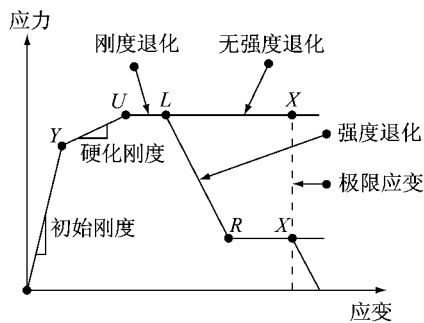


图 3 YULRX 骨架模型

Fig.3 YULRX skeleton model

以应力-应变曲线所包围的面积不变为基本原则,按下述方法对 Kent-Scott-Park 混凝土模型进行

简化得到 YULRX 骨架曲线:①按计算要求确定 X 点,即失效点.对于无约束混凝土可取为 0.005,约束混凝土取为 0.020;②取 R 点应变为 ϵ_{20} 和由式(8)计算的 ϵ_u 的较小值,并取其对应的应力值为 0.20 倍的应力峰值;③取 0.95 倍的应力峰值为 U 及 L 点纵坐标,在 Kent-Scott-Park 混凝土模型上找到该两点;④确定初始弹性模量,以 YU 段的斜率为变量,保持应力-应变包围面积和原 Kent-Scott-Park 本构曲线相同,利用 MATLAB 程序进行迭代试算可确定 Y 点;⑤连接各点,从而得到最终的 YULRX 骨架曲线,如图 4 所示.

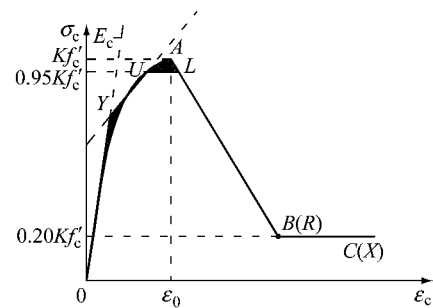


图 4 Kent-Scott-Park 混凝土模型简化为 YULRX 骨架曲线

Fig.4 YULRX skeleton curves simplified from Kent-Scott-Park concrete constitutive model

材料性能点参数宜根据实测确定.当无实测数据时,为方便推广至工程应用,便于和普通混凝土模型进行变参数对比分析,可按如下方式取用:当普通混凝土的强度及弹性模量按规范选用时,由于再生混凝土按等设计强度值配比时其均值将不低于普通混凝土,再生棱柱体抗压强度均值取为和普通混凝土相同,而再生混凝土的弹性模量取普通混凝土对应值的 90%.依据 Kent-Scott-Park 混凝土模型参数计算方法得各强度等级混凝土的参数见表 2.

表 2 材料性能参数

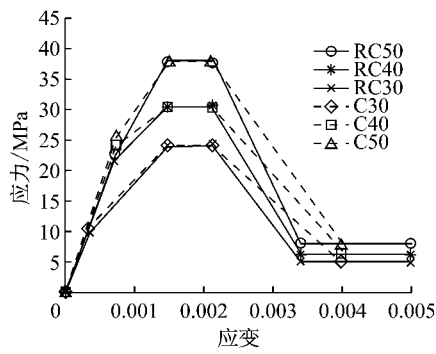
Tab.2 Material property and parameter of concrete

材料	强度等级	f'_c/MPa	K	E_c/MPa	$\epsilon_0/10^{-3}$		$\epsilon_{20}/10^{-3}$	
					无约束混凝土	约束混凝土	无约束混凝土	约束混凝土
普通混凝土	C30	25.56	1.17	30 000	2.00	2.35	4.00	17.50
	C40	32.25	1.14	32 500	2.00	2.35	4.00	17.50
	C50	40.04	1.11	34 500	2.00	2.35	4.00	17.50
再生混凝土	RC30	25.56	1.17	27 000	2.10	2.47	3.40	16.90
	RC40	32.25	1.14	29 300	2.10	2.47	3.40	16.90
	RC50	40.04	1.11	31 100	2.10	2.47	3.40	16.90

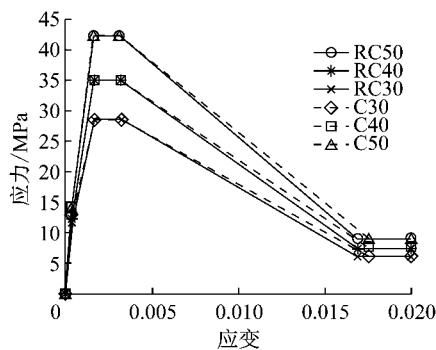
根据上述建议的材料参数可以确定 RC30, RC40, RC50 再生混凝土的 Kent-Scott-Park 模型,并按前述的简化方法确定其 YULRX 曲线,见图 5.约束混凝土选用的典型配箍率为 1%,在分析时应结

合具体模型构件的实际配箍率进行相应调整.

在 Perform-3D 软件中的混凝土滞回本构中,卸载刚度总是等于初始弹性刚度,结构耗能能力的变化可通过控制重新加载的刚度控制.按照软件中的



a 无约束再生混凝土



b 约束再生混凝土

图 5 混凝土 YULRX 骨架曲线

Fig.5 YULRX skeleton curves of concrete

定义,能量耗散因子定义为退化后滞回环的面积除以无退化的滞回环面积,可在软件中人为指定,其大小取决于最大变形.如果能量耗散因子等于 1.0,则重新加载的刚度如图 6a 所示,此时耗能量最大;如果能量耗散因子小于 1.0,重新加载过程如图 6b 所示.本文中混凝土能量耗散因子如图 7 所示,图中 D

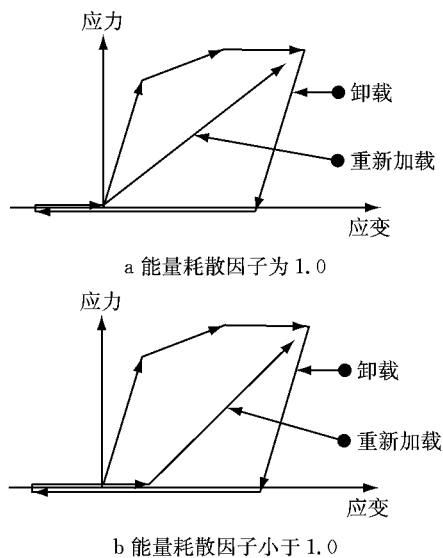


图 6 Perform-3D 软件中能量耗散因子与重新加载刚度之间的关系

Fig.6 The relationship between energy dissipation factor and reloading stiffness in Perform-3D

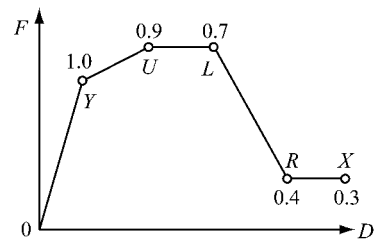


图 7 混凝土能量耗散因子

Fig.7 Energy dissipation factor of concrete

为滞回环最大位移, F 为能量耗散因子.

2.4 钢筋本构模型

试点工程钢筋主要为 HRB400,钢筋视为理想弹塑性材料.根据《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[8]表 4.2.4 的规定,用于钢筋模型的极限应变取为 0.075.在 Perform-3D 软件中选用 Inelastic Steel Material, Non-Bulking 模型,在各阶段的能量耗散因子均定义为 1.

2.5 结构构件模型

在应用 Perform-3D 软件对结构进行非线性分析时,采用纤维模型可以直接考虑由于再生混凝土本构模型和普通混凝土本构模型的差异所导致的再生混凝土结构非线性性能的不同.因此,梁、柱、剪力墙均采用纤维模型.对梁柱采用端部塑性区模型,在杆件端部箍筋加密区设置非线性纤维段模拟塑性铰;梁柱端部箍筋加密区范围内的混凝土及剪力墙边缘构件采用约束再生混凝土模型,剪力墙非边缘构件及保护层混凝土纤维采用无约束再生混凝土模型.

2.6 计算模型检验

采用前文所述的建模方法,模拟参考文献[18]中的再生混凝土框架-剪力墙结构模拟地震台试验,试件编号为 FSW1,输入地震波加速度峰值为 0.710g.模拟时程曲线与试验结果对比如图 8.

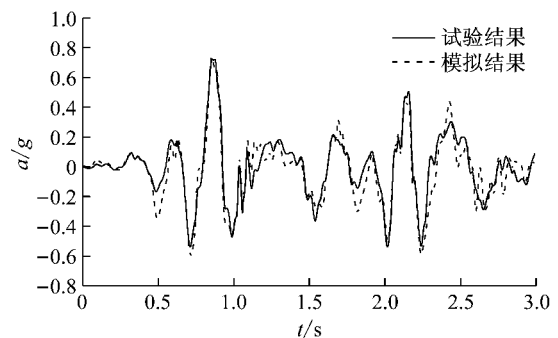


图 8 加速度反应时程

Fig.8 Comparison between the acceleration response curves in time domain

由图 8 可知,本文使用的建模方法可较准确反映再生混凝土框架-剪力墙结构的加速度时程,所使用的有限元软件、非线性单元、截面类型、混凝土材料模型和钢筋材料模型等较为合理。

3 动力弹塑性分析及对比

采用前文所述建模方法建立本工程有限元模型,进行模态分析和动力弹塑性分析。Perform-3D 和其他设计软件计算的主要振型周期^[7]对比如表 3 所

示,Perform-3D 和设计软件分析的结果基本一致。

动力弹塑性分析采用的地震波按《上海市建筑抗震设计规程》(DGJ08-9-2013)^[19],选用 7 组地震波。其中 2 组为人工波:AWX0.9-2,AWY0.9-1;5 组为天然波:NRX0.9-4,NRX0.9-6,NRX0.9-7,NRY0.9-6,NRY0.9-7。各组地震波的特征周期均接近 0.9 s。时程持续时间设置为 25 s,分析步长为 0.02 s,峰值加速度设置为 $220 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$,按 X,Y 2 个方向分 7 组地震波,分别对应 GMX1~GMX7 和 GMY1~GMY7 共 14 个工况进行时程分析。

表 3 各阶振型周期

Tab.3 Comparison of frequencies of first three order modes

计算软件	T_1/s		T_2/s		T_3/s	
	再生混凝土结构	普通混凝土结构	再生混凝土结构	普通混凝土结构	再生混凝土结构	普通混凝土结构
YJK	1.47	1.42	1.33	1.29	1.31	1.27
MIDAS Building	1.50	1.44	1.33	1.29	1.32	1.28
Perform-3D	1.41	1.36	1.30	1.26	1.25	1.22

3.1 结构整体性能

对各工况地震作用进行计算分析后,可以得到结构顶点位移时程曲线。其中 GMY1 工况下结构顶点位移时程曲线和相应弹性分析对比的情况如图 9 所示。在地震作用前 5.5 s,弹塑性分析的顶点位移时程形状与弹性分析基本接近,表明结构处于弹性状态;地震作用 5.5 s 后,弹塑性分析的顶点位移曲线与弹性分析的位移曲线开始分离,表明结构进入非线性阶段。另一方面,从曲线形状分析可知,随着时间的增加,波峰间距逐渐变大,表明结构塑性损伤增加,刚度下降引起结构周期变长。

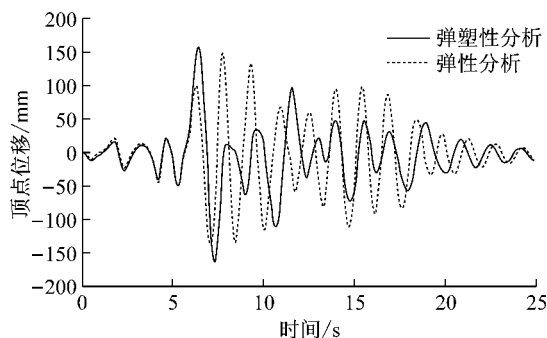


图 9 GMY1 工况下结构顶点位移时程曲线

Fig.9 Time-history curve of the top point under GMY1 case

弹塑性层间位移角是衡量结构整体性能的重要指标,现行结构设计规范对于混凝土框架剪力墙结构第三水准下的抗震性能要求主要通过校核弹塑性层间位移角来考察。理论上,再生混凝土层间位移角控制指标应较普通混凝土结构严格。然而根据相关

试验结果^[20],当再生混凝土框-剪结构的层间位移角达到 1/100 时,结构尚未严重破坏,完全能满足大震不倒的性能水准;再生混凝土框架剪力墙结构达到极限荷载时,其弹塑性层间位移角约为 1/74,大于现行抗震规范对混凝土框架剪力墙结构弹塑性层间位移角 1/100 的限值要求。综合上述分析,再生混凝土框剪结构弹塑性层间位移角限值可按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[8]取用。

各工况下结构各层的最大弹塑性层间位移角 $\Delta u_{ep,max}$ 计算结果如图 10 及图 11 所示。在 X 方向上,各工况下 $\Delta u_{ep,max}$ 均出现在第 5 层,这和结构在第 5 层竖向构件几何尺寸开始收进、层刚度有所下降有关。各工况中 GMX7 工况下再生混凝土结构 $\Delta u_{ep,max}$ 达到 1/203,而相应普通混凝土结构 $\Delta u_{ep,max}$ 为 1/215,相对增大了 5.9%;在 Y 方向上,除 GMY7 外其余各工况下结构 $\Delta u_{ep,max}$ 均出现在第 7 层,这可能和结构竖向构件所用混凝土强度等级从该层起变为 RC40 有关。GMY3 工况下再生混凝土结构 $\Delta u_{ep,max}$ 达到 1/223,而相应普通混凝土结构 $\Delta u_{ep,max}$ 为 1/245,相对增大了 9.9%。另外可以看到,由于结构顶层没有剪力墙,刚度较弱,在 Y 方向地震波作用下有一定的鞭梢效应,但其变形仍处于可控范围。

提取各工况下结构主要指标的响应峰值,将其均值列于表 4。可以看到再生混凝土模型的最大层间位移角相对普通混凝土增大 10% 左右,但均远小于 1/100 的限值要求。

综上所述,再生混凝土结构模型在大震作用下其弹塑性层间位移角虽然稍高于相应的普通混凝土

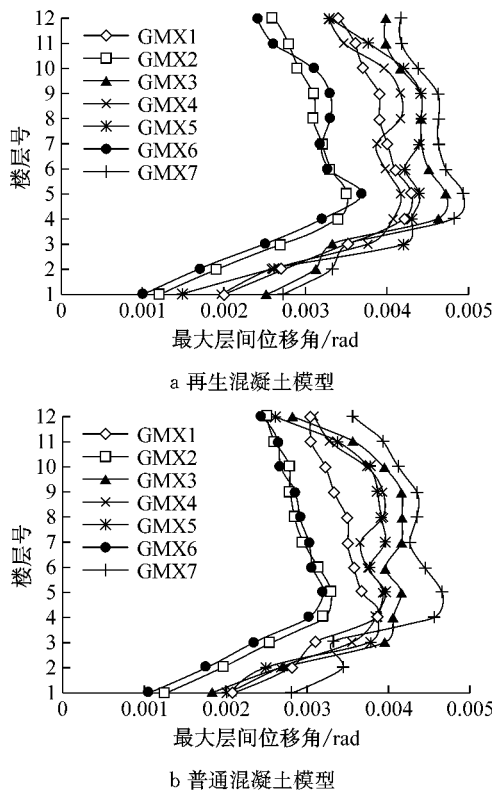


图 10 各地震波作用下结构 X 向 $\Delta u_{ep,max}$

Fig. 10 The maximum elastic-plastic drift angle in X direction excited by earthquake waves

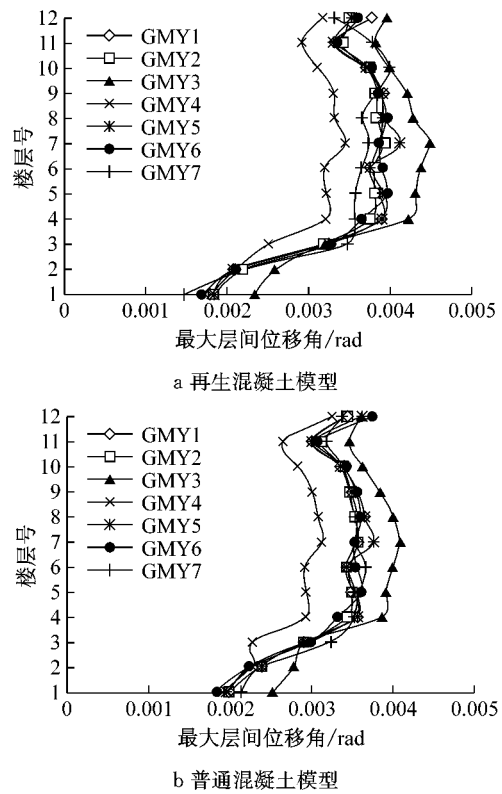


图 11 各地震波作用下结构 Y 向 $\Delta u_{ep,max}$

Fig. 11 The maximum elastic-plastic drift angle in Y direction excited by earthquake waves

表 4 地震作用下结构主要响应指标峰值

Tab. 4 The maximum response during earthquake

模型	方向	最大层间位移角/rad	顶点位移/mm	顶层层间位移角/rad	底层			第 3 层	
					层间剪力/ (10^4 kN)	层间位移角/rad	倾覆力矩/ $(10^4 \text{ kN} \cdot \text{m})$	层间剪力/kN	层间位移角/rad
普通混凝土	X 向	1/261	153	1/349	2.65	1/512	7.32	2.17	1/309
	Y 向	1/281	145	1/284	2.76	1/503	7.48	2.35	1/344
再生混凝土	X 向	1/236	159	1/303	2.49	1/543	6.97	2.03	1/298
	Y 向	1/255	153	1/291	2.64	1/544	7.30	2.23	1/313

模型,但仍符合现行规范的规定,满足抗震设防第三水准的“大震不倒”的要求。

以 X 方向为例,观察各变量的峰值,可见普通混凝土模型和再生混凝土模型的底层层间位移角分别为 1/512 和 1/543,普通混凝土模型的底层层间位移角反而要大。可见再生混凝土模型中底层层间剪力、底层倾覆力矩较普通混凝土模型小,而层间位移却较大。这由于再生混凝土模型结构刚度较弱,地震作用较小,其底层剪力较小,而 2 种模型中底层及第 2 层的竖向构件均为普通混凝土材料,刚度相同,因此再生混凝土模型底层层间位移角反而较小。

因再生混凝土竖向构件从第 3 层开始使用,因此对该 2 层的剪力及层间位移角随时程变化的情况也进行专门对比。普通混凝土模型和再生混凝土模型的第 3 层层间位移角分别为 1/309 和 1/298,可

见,虽再生混凝土模型的地震作用力有所下降,但其层刚度较弱,其层间位移角仍大于普通混凝土结构。

由上述分析可知,当上部结构为再生混凝土结构时,由于结构体系刚度下降其地震作用力有所减小(一般小于按普通混凝土模型设计时的计算值),对结构底部加强区结构层的地震剪力及层间变形的控制可以起到有利作用。但是,对于开始应用再生混凝土材料的结构层,由于地震作用力和层刚度同时减小,其变形仍然需要重点校核。

3.2 结构构件响应

利用 gage 单元对构件的变形进行测量,图 12 显示了 GM3 工况下峰值位移时构件变形性能(以 B 轴及 2 轴剖面为例)。观察构件变形可发现:在 X 方向上,下部 8 层连梁已经破坏,其余各层连梁处于屈服状态,框架梁绝大部分处于屈服状态;剪力墙和框

架柱大部分处于非线性状态,3层剪力墙出现塑性铰,但尚未破坏.在Y方向上,大部分连梁均已破坏,框架梁绝大部分处于屈服状态,个别框架梁已破坏;剪力墙框架柱大部分处于非线性状态,3层框架、剪力墙出现塑性铰,但尚未破坏.

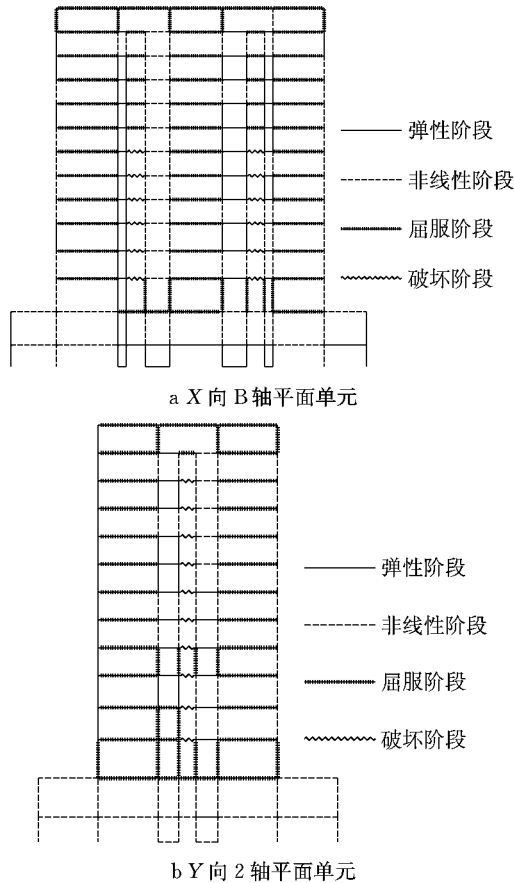


图 12 结构平面单元各构件性能状态

Fig.12 States of components in a structural elevation

在 2 轴框架-剪力墙单元的第 3 层选取典型的框架梁、框架柱、剪力墙和连梁 4 种构件,如图 13,在 Perform-3D 软件中提取其对应的端部时程响应结果,并和其根据实际配筋计算的极限抗弯承载力进行比较,见图 14,图中虚线为构件承载力的理论值.

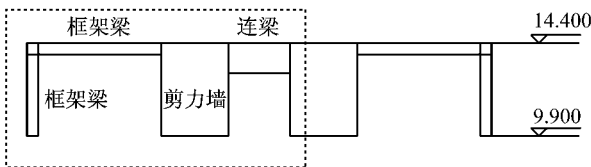


图 13 轴框架-剪力墙单元第 3 层典型构件(单位:m)

Fig.13 Typical components on the 3rd floor (unit: m)

可见:在水平构件方面,框架梁已经达到了其极限承载力的 91%,连梁已经超过了其极限抗弯承载力;在竖向构件方面,框架柱的峰值弯矩值达到了其极限承载力的 75%,剪力墙的最大弯矩值达到了其

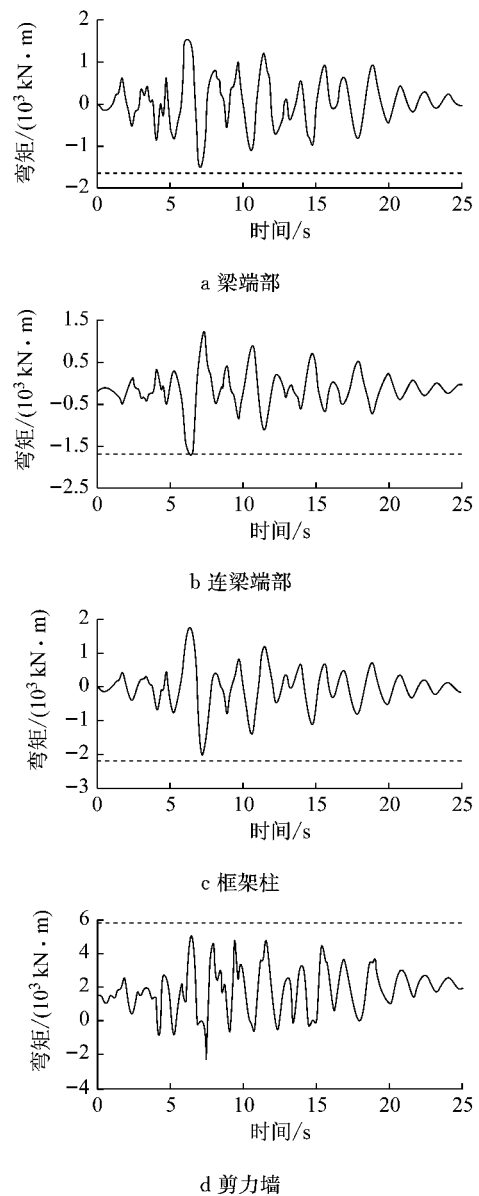


图 14 构件弯矩时程

Fig.14 Time history curves of inner moments of components

承载力的 70%. 综合上述分析,可以看到该试点工程再生混凝土结构构件符合“强柱弱梁”、“强墙肢弱连梁”的抗震设计要求.剪力墙及连梁的破坏程度较框架柱及框架梁严重,剪力墙及框架分别为结构的第 1 道抗震防线和第 2 道抗震防线.

3.3 抗震性能评估及抗震构造措施探讨

由表 4 可知,该结构 X 向地震工况及 Y 向地震工况的最大弹塑性层间位移角均处于 1/400 到 1/200 之间,依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[21],对于钢筋混凝土框架剪力墙结构,该结构属于中等破坏水准.

图 15 为 GMY1 工况下结构能量耗散时程图.对比再生混凝土和普通混凝土 2 种模型的能量耗散

时程曲线可以看出,其形状基本一致,各成分耗能机制一致.从弹塑性能量曲线也可见,结构从 5 s 左右后开始产生弹塑性变形耗能.

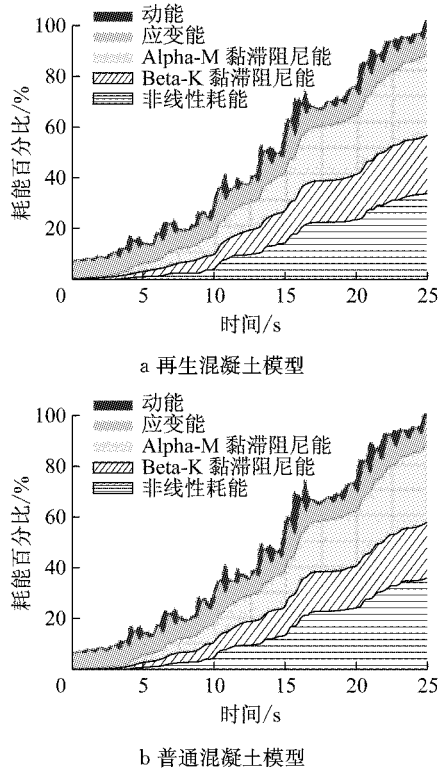


图 15 GMY1 工况下结构能量耗散时程
Fig.15 Time history curves of energy dissipation under GMY1

普通混凝土由于结构弹塑性变形及刚度滞回退化所耗散的能量占总能量的比例为 36.3%,而相应的再生混凝土模型其比例达到了 32.8%,耗能能力下降了 9.6%.再生混凝土由于刚度较小且非线性变形性能稍差,其结构弹塑性耗能能力较低.

为对结构的抗震性能进行评估,选取 X 向 GMX7 地震波工况,对结构嵌固端以上的构件状态进行统计,见表 5.可见,再生混凝土各类构件在非线性发展程度方面较普通混凝土稍高,但差别不大.

表 5 地震作用下结构构件性能状态统计

Tab.5 Statistics on components performance under earthquake

性能状态	线弹性		非线性		屈服		破坏	
	普通	再生	普通	再生	普通	再生	普通	再生
框架梁受弯	17	16	80	70	268	279	3	3
框架柱压弯	43	37	55	59	94	96	0	0
连梁受弯	0	0	2	3	13	10	73	75
连梁受剪	0	0	21	21	32	33	35	34
剪力墙压弯	39	31	72	74	65	71	0	0

结合弹塑性分析的结果,可以对再生混凝土结构抗震设计中相关问题进行探讨.根据结构层间位

移角及层间剪力计算结果可以看到,除了基本的抗震概念设计外,再生混凝土结构设计时尤其要注重再生混凝土材料布置方案,底部加强区不宜选用再生混凝土;另外在开始使用再生混凝土的楼层处,不宜同时对竖向构件尺寸收进,即材料转换层和刚度开始变化的楼层不宜同时出现.

可以看到再生混凝土柱和剪力墙相较普通混凝土模型其屈服状态比例较大,竖向构件的屈服破坏由轴力-弯矩包络图控制,为符合“强柱弱梁”、“强剪弱弯”的抗震概念,可以从轴压比以及柱端加密区箍筋体积配箍率两方面同时入手,保证再生混凝土竖向构件具备足够的延性.另一方面,虽然可以看到再生混凝土框架梁较普通混凝土框架梁出现更多的屈服情况,但是由于截面轴向压力较小,截面屈服由受弯控制,不易破坏,且由于在实际结构中框架梁通常可以受到现浇楼板的约束及保护作用,因此其抗震构造措施可以不予加强.

4 结论

(1) 根据再生混凝土和普通混凝土材料非线性性能的差异,可采用 Kent-Scott-Park 模型对其本构关系进行定义并合理简化;基于 Perform-3D 软件,采用纤维模型对再生混凝土框-剪结构进行非线性分析,经过试验验证其合理性.

(2) 由于再生混凝土模型结构刚度较弱,减小了地震作用,再生混凝土结构内力分析结果较小,而变形仍然较相应普通混凝土模型稍大.该再生混凝土高层试点工程结构模型在大震状态下,最大层间位移角在 X 向及 Y 向上分别为 1/236 及 1/255,相对普通混凝土增大约 10%,但均小于抗震规范规定的限值要求.

(3) 该再生混凝土高层试点工程结构构件的性能符合“强柱弱梁”、“强墙肢弱连梁”等抗震概念设计思想,在再生粗骨料取代率不超过 30%的情况下,竖向构件在大震状态下未破坏;再生混凝土模型构件的非线性发展程度稍高于普通混凝土,但差别较小.

(4) 再生混凝土弹塑性变形及刚度滞回退化所耗散的能量占总能量的比例为 32.8%,而相应的普通混凝土模型其比例达到了 36.3%;再生混凝土由于刚度较小且变形性能稍差,其结构弹塑性耗能能力较低.

(5) 高层再生混凝土结构设计时尤其要注重再

生混凝土材料布置方案,对于开始使用再生混凝土的楼层,不宜同时对竖向构件尺寸收进,并应重点校核其变形.为进一步保证再生混凝土结构符合“强柱弱梁”、“强剪弱弯”的抗震要求,可以在轴压比及柱端加密区箍筋体积配箍率上对其竖向构件提高抗震构造措施.

(6) 本文在分析中,混凝土的弹性模量等参数依据规范取值,与材料实测结果有所不同,将导致结构的实际动力特性参数和动力反应与计算结果有所不同,值得今后进一步研究.

致谢:感谢上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司郑振鹏教授级高工、卢家森高工以及上海城建物资有限公司徐亚玲教授级高工的支持和帮助.

参考文献:

- [1] XIAO Jianzhuang, LI Wengui, FAN Yuhui, *et al.* An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011) [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 364.
- [2] 曹万林, 张勇波, 董宏英, 等. 再生混凝土结构抗震性能研究进展与评述[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(6): 63.
CAO Wanlin, ZHANG Yongbo, DONG Hongying, *et al.* A review of mechanical properties and structural behavior of recycled concrete[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 33(6): 63.
- [3] XIAO Jianzhuang, WANG Changqing, LI Jie, *et al.* Shake-table model tests on recycled aggregate concrete frame structure [J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(6): 777.
- [4] XIAO Jianzhuang, WANG Changqing, PHAM Thi Loan, *et al.* Nonlinear analysis and test validation on seismic performance of a recycled aggregate concrete space frame [J]. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2014, 23(18): 1381.
- [5] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
XIAO Jianzhuang. *Recycled concrete* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [6] ETXEBERRIA M, VÁZQUEZ E, MARÍ A, *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): 735.
- [7] 卢家森, 郑振鹏, 肖建庄. 上海某高层再生混凝土结构设计与分析[J]. *建筑结构*, 2016(12): 11.
LU Jiasen, ZHENG Zhenpeng, XIAO Jianzhuang. Structural design and analysis of a high-rise recycled concrete structure in Shanghai [J]. *Building Structure*, 2016(12): 11.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [9] 胡波. 再生混凝土结构抗震性能研究及混凝土结构损伤评估[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2013.
HU Bo. Study on seismic performances of recycled aggregate concrete and concrete structure damage assessment [D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2013.
- [10] 张鹏, 周德源, 孙跃东. 再生混凝土框架结构受力性能非线性分析[J]. *建筑结构*, 2007, 36(12): 36.
ZHANG Peng, ZHOU Deyuan, SUN Yuedong. Nonlinear analysis on mechanical behavior of recycled concrete frame [J]. *Building Structures*, 2007, 36(12): 36.
- [11] 丁猛. 再生混凝土框架结构抗震性能研究及地震易损性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
DING Meng. Seismic behavior research and seismic fragility analysis of rac frame structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology.
- [12] 同济大学. 再生混凝土应用技术规程: DG/TJ 08-2018—2007 [S]. 上海: [s. n.], 2007.
Tongji University. Technical code on the application of recycled concrete: DG/TJ 08-2018—2007 [S]. Shanghai: [s. n.], 2007.
- [13] TOPÇU I B. Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(12): 1817.
- [14] XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, ZHANG Chuangzeng. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1187.
- [15] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1): 24.
CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, *et al.* Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1): 24.
- [16] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. *Journal Proceedings*, 1982, 79(1): 13.
- [17] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11): 1445.
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(11): 1445.
- [18] ZHANG Jianwei, CAO Wanlin, MENG Shaobin, *et al.* Shaking table experimental study of recycled concrete frame-shear wall structures [J]. *Earthquake Engineering & Engineering Vibration*, 2014, 13(2): 257.
- [19] 同济大学. 上海市建筑抗震设计规程: DGJ08-9—2013[S]. 上海: 中国建筑工业出版社, 2013.
Tongji University. Code for seismic design of buildings: DGJ08-9—2013 [S]. Shanghai: China Building Industry Press, 2013.
- [20] 曹万林, 张建伟, 尹海鹏, 等. 再生混凝土框架-剪力墙结构抗震研究与应用[J]. *工程力学*, 2010(S2): 135.
CAO Wanlin, ZHANG Jianwei, YIN Haipeng, *et al.* Experimental study on the seismic behavior of recycled concrete frame-shear-wall structure [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(S2): 135.
- [21] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.