

装配式钢筋再生混凝土框架结构超强能力研究

王召猛¹, 魏永才¹, 刘文锋¹

(1. 基准方中建筑设计股份有限公司济南分公司, 山东 济南 250014;

2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 装配式钢筋再生混凝土结构是再生混凝土应用于装配式建筑中的一种新型建筑结构体系, 对结构进行抗震性能评估是结构安全分析的核心内容。为进一步评估装配式钢筋再生混凝土结构的抗震性能, 文章采用 Pushover 分析方法, 建立了基于结构整体超强系数概念的结构抗震性能评估方法, 深度研究分析装配式钢筋再生混凝土结构安全储备能力。算例表明: 结构在四级设防水准下全过程的抗震行为表现良好, 满足装配式钢筋再生混凝土框架结构“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的抗震设防目标要求。

关键词: 装配式钢筋再生混凝土框架结构; Pushover 分析; 结构整体超强系数

中图分类号: TU375

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)08-0026-07

doi:10.13402/j.gcjs.2024.08.101

Study on super-strength capacity of fabricated reinforced recycled concrete frame structure

WANG Zhaomeng¹, WEI Yongcai¹, LIU Wenfeng²

(1. JZfZ Architectural Design Shares Limited Jinan Branch, Jinan 250014, Shandong, China; 2. School

of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: Fabricated reinforced recycled concrete structure is a new type of building structure system in which recycled concrete is applied to prefabricated buildings. It is the core content of structural safety analysis to evaluate the seismic performance of the structure. In order to further evaluate the seismic performance of fabricated reinforced recycled concrete structures, this paper uses Pushover to establish a structural seismic performance evaluation depth study based on the concept of overall super-strength coefficient of the structure. Safety reserve capacity of fabricated reinforced recycled concrete structures The example shows that the whole seismic behavior of the structure is good under the four-level fortification level. The seismic fortification target requirement of prefabricated reinforced recycled concrete frame structure is “not bad in small earthquakes, repairable in medium earthquakes and not collapsed in large earthquakes”.

Key words: fabricated reinforced recycled concrete frame structure; pushover analysis; overall super strength coefficient of structure

装配式钢筋再生混凝土结构是装配式建筑和绿色建筑有机结合的产物, 对推动建筑工业化发展, 以及助力建筑产业结构调整具有重要意义; 在结构可行性层面, 对其进行抗震性能的研究尤为重要。基于结构超强能力的抗震性能分析, 对防止结构倒塌、减轻震害、提高结构抗震性能水准均起到了至关重要的作用; 在结构设计中, 适

当地考虑结构超强能力可以降低结构的设计地震作用, 使结构更经济、合理。

国外学者 NEWMARK^[1]、JAIN^[2]相继提出结构超强能力理论概念, 并对结构整体超强系数 R_s 的大量研究, 其中很多研究成果被应用到世界各国的抗震设计规范中, 取得显著成效。国内学者翟长海^[3]采用动力时程分析法和 Pushover 方法对几个典

收稿日期: 2023-12-19

作者简介: 王召猛(1991—), 男, 工程师, 从事土木工程方向的研究。

型的现浇混凝土框架结构进行超强研究, 并建立结构超强能力曲线, 保守地认为严格按我国抗震规范设计的钢筋混凝土框架结构的超强系数最小值为 2。崔双双^[4]表明虽然我国抗震规范摒弃了结构影响系数的概念, 采用小震弹性设计反应谱理论, 但是对于包括结构超强能力系数在内的抗震性能系数的研究也具有重要价值; 并对 17 个非线性有限元现浇框架结构模型进行多方法、多角度的研究分析。

然而, 在我国对装配式钢筋再生混凝土结构的超强能力的研究少之又少。本文基于目标模型建立、结构超强能力计算、结构超强能力评价等三个方面, 创新性地建立了基于 Pushover 分析方法的装配式钢筋再生混凝土结构超强能力的分析评价体系。利用 Sap2000 有限元分析软件, 选取 15 栋目标结构模型, 基于 Pushover 分析方法^[5]在结构超强能力、结构能力需求比等方面, 对目标结构的超强能力进行追踪分析, 研究成果为装配式再生混凝土结构的实践应用提供重要的理论依据。

1 结构超强能力分析方法

目标模型建立、结构整体超强能力计算、结构整体超强能力评价是装配式钢筋再生混凝土结构的超强能力分析的 3 个重要方面。

1.1 目标模型建立

建立准确、可靠的结构分析模型, 是进行结构抗震性能、结构超强能力分析的重要前提。再生混凝土本构关系确定、装配式结构梁柱节点处理是建立装配式钢筋再生混凝土结构模型的核心要素。

1.1.1 再生混凝土本构关系确定

本构关系是描述材料力学性能的数学模型, 也是研究分析构件、结构受力性能的基础。再生混凝土中掺入不同量的再生骨料, 在本质上亦改变了再生混凝土的本构关系; 确定再生混凝土本构关系是对结构进行受力分析的重要内容。

国内学者肖建庄^[6]、陈宗平^[7]、刘数华等^[8]基于过镇海混凝土本构关系模型, 通过多次试验研究确定了再生混凝土本构关系。公式(1)为普通混凝土应力-应变标准曲线基本方程, 其中系数 a 控制应力应变曲线的上升段, 系数 b 控制应力应变曲线的下降段, 并采用有理分式和多项式进行

拟合确定待定系数 a 、 b 值, 于是得到不同再生骨料取代率的再生混凝土本构关系表达式。

$$\begin{cases} y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, 0 \leq x < 1 \\ y = \frac{x}{b(x - 1) + x}, x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别为控制曲线上段, 下降段系数。

由于选材、试验条件等差异因素影响, 肖建庄、陈宗平、刘数华试验研究计算的系数 a 、 b 取值不同, 即同一取代率下的再生混凝土应力-应变全曲线存在差异。于是选择规范混凝土本构关系模型作为基准, 并分析肖建庄、陈宗平、刘数华模型和规范模型的应力-应变曲线上段, 的差异性, 可确定较为合理、精准的再生混凝土本构关系模型。

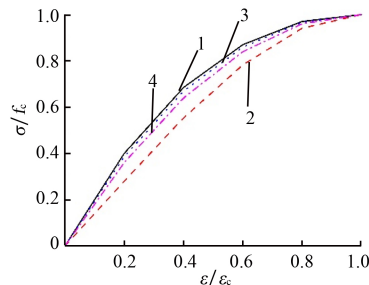
$$\sigma_c = f_c [1 - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2], \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (2)$$

表 1 肖建庄、陈宗平、刘数华取代率为 0% 的

混凝土本构模型系数 a 值

本构模型	肖建庄模型	陈宗平模型	刘数华模型
系数 a 值	2.200	1.400	2.314

依据公式(1)上升段表达式以及表 1 中 3 种本构关系模型系数 a 值, 可拟合出肖建庄、陈宗平、刘数华取代率为 0% 的混凝土本构模型的应力-应变曲线上段; 再依据公式(2)拟合出规范混凝土本构关系上升段, 具体拟合结果如图 1 所示。对比分析, 肖建庄本构关系曲线变化趋势与规范本构关系曲线最为接近, 进而表明肖建庄本构关系模型研究的试验条件、试验选材等方面控制较好, 数据结果更为准确、合理。最终选定肖建庄本构关系模型作为研究装配式钢筋再生混凝土结构超强能力的力学基础^[9]。表 2 提供了肖建庄本构关系模型待定系数 a 、 b 值。



1—刘数华模型; 2—陈宗平模型;
3—肖建庄模型; 4—规范模型。

图 1 肖建庄、陈宗平、刘数华本构关系与规范本构关系模型上升段的对比

表 2 肖建庄本构关系模型待定系数 a 、 b 值

取代率/%	a	b
0	2.20	0.80
30	1.32	3.30
50	1.26	3.96
70	1.15	4.31
100	1.04	7.50

1.1.2 装配式结构梁柱节点处理

美国颁布的《国家地震灾害减轻计划》(2000 年版)提出,装配式钢筋混凝土框架结构节点采用预应力拼接式、后浇整体式等连接方式,其整体抗震性能可达到或超过现浇结构。我国《装配式混凝土结构技术规程》也提出装配式钢筋混凝土结构可采用与现浇结构一致的分析方法。考虑到现阶段施工技术不成熟、施工条件不确定等因素,可弱化装配式结构的“等同现浇”概念。作者通过查阅大量文献资料,总结出 4 种基于 Sap2000 分析软件的装配式钢筋混凝土框架结构梁柱节点处理方法,具体表述如下。

(1) 减弱预制楼板对梁柱的约束作用。即将预制板对结构的刚度贡献率乘以折减系数。

(2) 节点区特殊指定。对于节点连接, Sap2000 将产生两个分离的节点来模拟节点区,所有梁构件与这两个节点中的一个相连,而所有的柱构件与另一个节点相连。这两个节点通过与具有节点区指定属性的一个零长度弹簧相连。

(3) 定义梁柱塑性铰长度。梁柱塑性铰的位置一般设置在弹性阶段内力最大处,该位置会最先达到屈服状态。对于混凝土框架结构梁柱单元,一般为两端弯矩最大,该位置对装配式框架与现浇框架结构而言自然不同。文献[10~11]给出装配式混凝土框架结构的塑性铰距节点的长度范围为 $0.01L \sim 0.05L$ (L 为构件长度),且梁两端设 M 铰,柱两端设 PMM 铰,可采用程序默认塑性铰。

(4) 削弱节点区面积。文献[12]通过试验研究,对梁柱节点的面积缩小原节点面积的 $0.75 \sim 0.8$ 倍来模拟装配式框架结构节点。

上述 4 种处理方法均是不同程度对现浇结构的弱化,或是折减结构整体刚度,或是削弱节点强度等;前者直接减弱预制板对梁柱的约束作用,单一

地考虑了预制板约束作用偏弱的影响,并未实际模拟梁柱节点的区别。方法(4)是直接削弱节点区域面积,间接减小了节点区强度,但折减系数取值尚没有可靠依据,此方法受多因素影响,有待进一步验证。方法(2)节点区的特殊指定虽然能较好的模拟出梁柱节点,但建模和计算效率偏低,不适宜广泛使用。方法(3)定义梁柱塑性铰长度是根据现浇结构与装配式结构的破坏特点不同,其构件破坏的塑性铰位置也不相同,进而可确定结构构件破坏的塑性铰长度,该方法具有良好的鲁棒性、通用性。

1.2 结构整体超强能力计算

结构在地面运动作用下,实际的结构承载力一般较结构设计地震力大,超出部分强度称为结构的安全储备能力,一般用结构整体超强系数 R_s 来表示。定义结构整体屈服超强系数 R_{s1} 为实际的屈服承载力与设计地震力之比,结构整体极限超强系数 R_{s2} 为结构实际的极限承载力与设计地震力之比,如公式(3)所示。

$$R_s = \frac{V_{y,m}}{V_d} \quad (3)$$

式中: $V_{y,m}$ 为结构屈服或极限承载力, kN; V_d 为结构设计地震力, kN。

基于 Pushover 分析方法计算结构整体超强能力系数,其重点首先是 Pushover 曲线双折线化确定结构初始刚度、结构屈服点,然后确定结构极限状态,最后是计算结构整体超强系数。具体计算过程如下:

(1) 采用第一振型分布加载模式对目标结构进行静力推覆,得到结构基底剪力与顶点位移的 Pushover 能力曲线。

(2) 利用等能量法进行 Pushover 曲线的双折线化,确定结构的初始刚度、屈服强度、极限强度等。

(3) 采用小震下的弹性设计反应谱计算目标结构的水平地震作用标准值 $V_d^{[13]}$, 最终根据公式(3)计算结构整体超强系数能力值。

1.3 结构整体超强能力评价

结构整体超强系数值的大小能直接反应结构的承载力储备能力,但对结构超强系数数值的合理性却不能直观的评价。具体表现: 1) 结构超强

系数数值过小, 会导致结构安全系数降低; 2) 结构超强系数数值过大, 会导致结构建造成本增加; 由此可见结构整体超强系数的合理取值显得尤为重要。于是, 引入结构整体超强系数能力需求比概念^[3], 即结构整体超强系数能力值与需求值之比, 用 λ 表示, 如公式(4)(5)所示。

$$\lambda_1 = \frac{R_{sl}}{R_{SDi}} \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \frac{R_{s2}}{R_{SDj}} \quad (5)$$

式中: R_{SDi} 为结构在多遇地震、设防地震时超强系数需求值; R_{SDj} 为结构在罕遇地震、极罕遇地震时超强系数需求值。

为了更加精确、详尽地评价结构整体超强能力, 建立了基于四级设防水准的结构超强能力评价体系, 包括结构在多遇地震、设防地震下弹性承载力的超强能力和在罕遇地震、极罕遇地震下的弹塑性承载力超强能力等评价内容。具体评价过程如下:

(1) 计算结构在多遇、设防地震下的结构弹性承载力能力需求值, 计算如公式(6)。

(2) 计算结构在罕遇、极罕遇地震下的结构弹塑性承载力超强能力需求值; 计算如公式(6)。

(3) 计算结构整体屈服超强系数能力需求比 λ_1 以及结构整体极限超强系数能力需求比 λ_2 , 计算如公式(4)(5)。

(4) 计算所得能力需求比 λ_1 、 λ_2 数值若大于等于 1, 表明结构在多遇地震、设防地震下的整体屈服超强能力, 在罕遇地震、极罕遇地震下的整体极限超强能力表现良好, 且数值越大, 结构的安全储备空间越大, 反之亦然。

$$R_{SD} = \frac{V_i}{V_d} \quad (6)$$

式中: V_i 为结构在四级设防水准下性能点处的基底剪力, kN; V_d 为结构设计地震力, kN。

2 算例

2.1 建立模型

采用 Sap2000 软件建立了 4、8、12 层 3 种不同高度的框架结构模型, 均为三榀四跨, 横向各跨跨度分别为 6、2.4、6 m, 纵向各跨跨度均为 5.1 m, 层高均为 3.6 m, 板厚均为 100 mm, 荷载按现行《建筑结构荷载规范》取值。结构抗震设防烈度均为 8 度($0.2g$), 设计地震分组为第二组, II 类场地, 特征周期 0.40 s, 钢筋强度等级采用 HRB400, 基准混凝土强度等级采用 C30, 结构模型如图 2 所示。

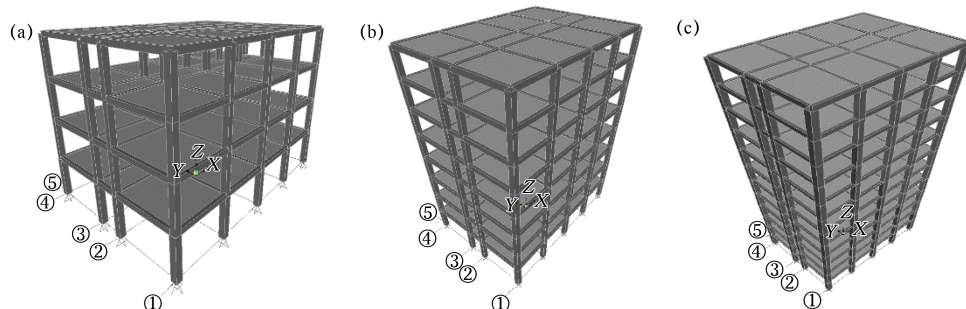
2.1.1 再生混凝土本构模型输入

确定了肖建庄本构关系模型, 具体如图 3 所示, 并将取代率分别为 0、30%、50%、70%、100% 的再生混凝土本构关系数据分别输入至 4、8、12 层结构模型中, 最终形成了 15 栋 Sap2000 有限元分析结构模型。

2.1.2 结构模型梁柱节点处理

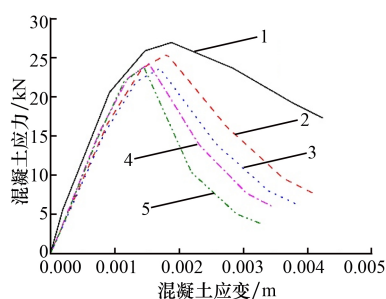
总结多种基于 Sap2000 软件的装配式框架结构梁柱节点处理方法, 为进一步选取合理的方法, 现以 4 层结构模型为例, 采用节点区特殊指定、定义梁柱塑性铰不同长度、减弱预制板的约束作用等方法对结构装配化梁柱节点进行模拟。对各结构模型进行静力推覆并得到 Pushover 能力曲线, 如图 4 所示。

由图 4 数据可知, 5 条 Pushover 曲线变化幅度较小, 基底剪力的变化差值控制在 6% 以内, 对应的顶点位移差值在 10% 以内; 其中折减板约束方



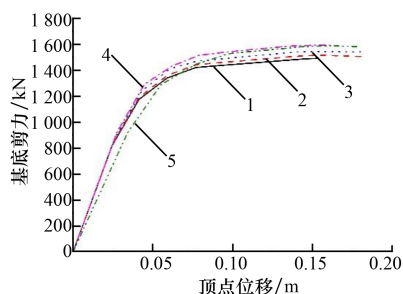
层数/层: (a) 4; (b) 8; (c) 12

图 2 结构模型示意



肖建庄模型取代率/%: 1—0; 2—30;
3—50; 4—70; 5—100。

图 3 不同取代率的肖建庄本构关系曲线



1—节点区设置; 2—塑性铰 $0.01L$; 3—塑性铰 $0.03L$;
4—塑性铰 $0.05L$; 5—折减板约束。

图 4 不同梁柱节点处理方式 Pushover 曲线对比

法曲线在结构弹性阶段的斜率偏小, 表明结构的初期刚度偏小, 而曲线的峰值点较大, 表明结构承载力偏大。综合分析, 此 3 种模拟方法所得数据的离散程度在允许范围内, 所以其均可对装配式框架结构梁柱节点进行模拟。基于统计学中均值指标, 优选采用定义梁柱塑性铰长度为 $0.03L$ 作为本文梁柱节点处理方法。

2.2 基于 Pushover 的结构整体超强能力计算

基于 Sap2000 有限元分析软件建立了由 4、8、12 层对应不同再生骨料取代率为 0、30%、50%、70%、100% 的 15 栋装配式再生混凝土框架结构模型, 采用第一振型分布加载方式对 15 栋

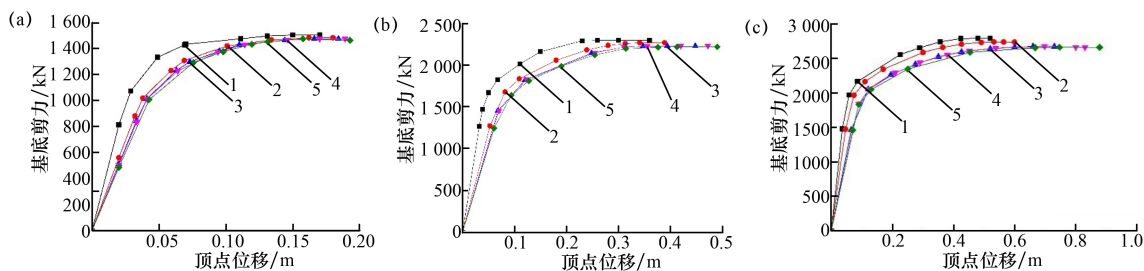
结构模型的 Y 方向进行静力推覆分析, 并获取 Pushover 曲线图, 如图 5 所示。

采用小震下的弹性设计反应谱计算 15 栋结构模型的水平地震作用标准值, 即设计地震力; 根据公式(4)、(5)计算 15 栋结构模型的结构整体屈服超强系数能力值和结构整体极限超强系数能力值, 具体数据如表 3 所示。

表 3 结构整体超强系数能力值

模型	设计地震力/kN	R_{s1}	R_{s2}
4 - F0	558.15	2.371	2.694
4 - F30%	480.48	2.667	3.087
4 - F50%	467.91	2.717	3.150
4 - F70%	464.86	2.713	3.175
4 - F100%	458.91	2.744	3.213
8 - F0	924.16	2.024	2.612
8 - F30%	734.94	2.323	3.053
8 - F50%	716.55	2.372	3.106
8 - F70%	710.64	2.381	3.134
8 - F100%	697.37	2.415	3.188
12 - F0	1312.56	1.775	2.234
12 - F30%	1168.65	1.825	2.341
12 - F50%	1006.19	2.106	2.654
12 - F70%	997.38	2.114	2.680
12 - F100%	979.78	2.139	2.719

由表 3 数据可知: 同一再生骨料取代率下, 随着结构高度增加, 结构整体超强系数能力值随之减小, 表明在同一地震工况下, 结构高度增加会导致结构承载力的安全储备能力减小; 同一结构高度下, 随着取代率的增加结构整体超强系数能力值整体呈增大趋势, 表明再生骨料的掺入量增加会导致结构承载能力下降, 但其承载力的超强能力有所增强。15 栋结构模型的屈服超强系数



1—F0; 2—F30%; 3—F50%; 4—F70%; 5—F100%。

不同层数结构: (a) 4; (b) 8; (c) 12

图 5 不同取代率下的 Pushover 曲线对比

能力值在 1.70 ~ 2.75 范围内, 极限超强系数能力值在 2.20 ~ 3.25 范围内, 均有较好的承载力安全储备能力, 此外再生混凝土结构较基准结构承载力超强能力有所提高, 但提高幅度较小。

2.3 基于能力需求比的结构超强能力评价

结构整体超强系数需求值是表征结构在四级设防水准性能点处下的需求性能, 即各性能点处的承载力与结构设计地震力之比, 如公式(6)。通过计算获取结构在 8 度设防下多遇地震、设防地震、罕遇地震、极罕遇地震的结构整体超强系数需求谱, 如图 6 所示。通过公式(4)(5)计算出结构的结构整体超强系数能力需求比, 具体数据如图 7 所示。

由图 6 数据可知, 结构整体超强系数需求值随着地面运动强度的增大而增大, 随结构高度的

增加有降低的趋势, 而随着取代率的增加有不同程度的增加。在多遇地震下, 结构的超强系数需求值均小于 1, 表明结构此时尚未达到设计地震力水平, 处于完全弹性状态; 而对于其它水准状态下的需求值范围在 1.5 ~ 3.0 之间, 结构处于弹塑性不断发展的阶段。

由图 7 数据可知, 结构在多遇地震下的整体屈服超强系数能力需求比范围为 1.9 ~ 3.2, 表明结构均有较好的弹性承载力的超强能力, 并呈现随着结构高度增加而减小, 随着取代率的增加而增加的趋势。结构在设防地震下的整体屈服超强系数能力需求比范围为 1.04 ~ 1.19, 表明结构此时处于弹性阶段末期, 并且结构屈服超强能力受取代率变化影响不大。结构在罕遇地震下的整体

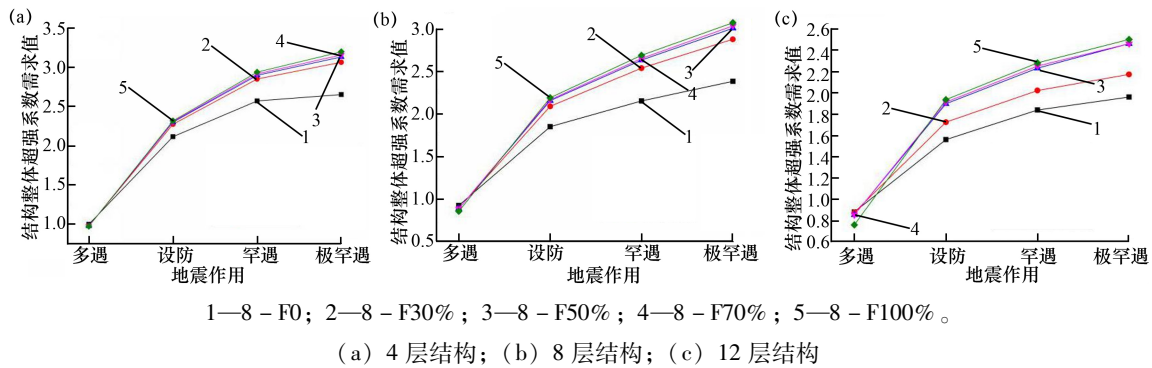
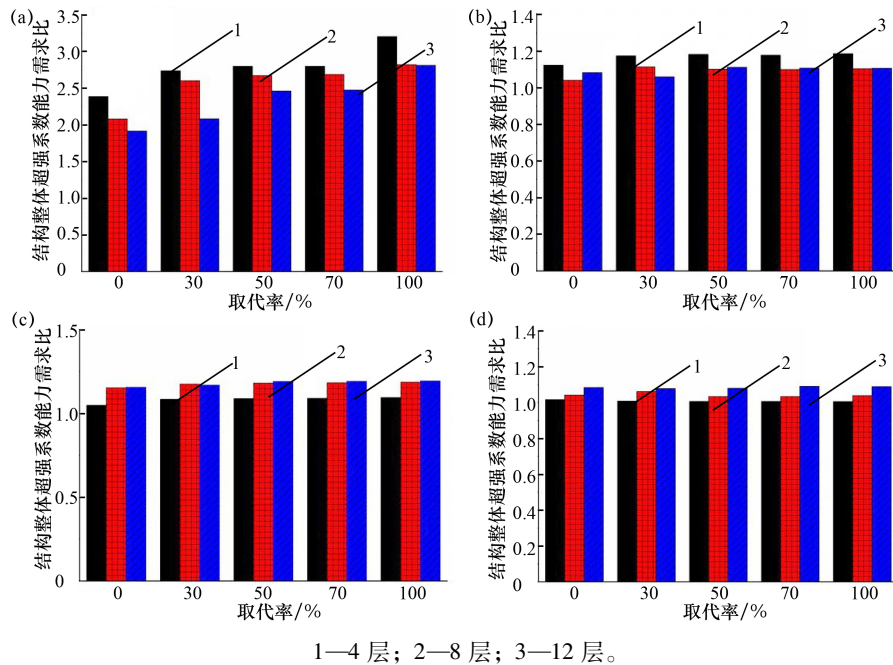


图6 结构整体超强系数需求谱



(a) 多遇地震; (b) 设防地震; (c) 罕遇地震; (d) 极罕遇地震

图7 四级设防水准下结构整体超强系数能力需求比

极限超强系数能力需求比范围为 1.04 ~ 1.20, 表明结构在罕遇地震下有较好的弹塑性承载力超强能力, 并随着结构高度的增加而增大, 而随着取代率的变化并不明显。结构在极罕遇地震下的整体极限超强系数能力需求比范围为 1.005 ~ 1.090, 表明结构此时几乎达到弹塑性承载力的极限状态, 即将进入塑性变形阶段直至倒塌。

3 结 论

(1) 对比分析了多种再生混凝土本构关系模型, 肖建庄模型最具可行性、合理性, 可用于结构抗震性能分析; 总结了多种基于 Sap2000 分析软件的装配式框架结构梁柱节点的处理方法, 优选定义塑性铰长度为 0.03 L 为节点处理方法; 论述了结构整体超强能力的计算方法, 并提出基于能力需求比的结构超强评价体系, 最终建立了基于结构整体超强系数概念的结构抗震性能评估方法。

(2) 建立 15 栋目标结构模型, 计算了结构整体超强能力系数能力值、需求值, 并基于能力需求比追踪了结构在四级设防水准下全过程的抗震行为。算例表明: 1) 结构高度增加会导致结构整体超强系数能力减小; 再生骨料取代率增加会导致结构承载力降低, 但会不同程度提高结构超强能力; 15 栋算例的结构整体屈服、极限超强系数能力值范围分别为 1.75 ~ 2.75、2.20 ~ 3.25, 表明装配式钢筋再生混凝土框架结构具备较好的承载力超强能力; 2) 目标结构的超强能力需求比值在四级设防水准下均大于 1, 满足装配式钢筋再生混凝土框架结构“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的抗震设防目标。

(3) 本文研究内容均基于 pushover 静力分析方法计算得到的, 尚未考虑结构动力响应因素, 需进一步采用动力时程分析法^[14]进行补充研究, 并与本文研究内容进行差异性分析。

参考文献:

[1] NEWMARK N M, Hall W J. Earthquake spectra and

design [A]. Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1982.

- [2] JAIN S. Seismic overstrength in reinforced concrete frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121 (3): 580 - 585.
- [3] 翟长海, 谢礼立. 钢筋混凝土框架结构超强研究[J]. 建筑结构学报, 2007(1): 101 - 106.
- [4] 崔双双. RC 框架结构整体抗震性能系数与综合反应修正系数研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [5] 王召猛, 刘文锋, 张怀超, 等. 高层框筒结构在不同加载模式下的 Pushover 分析与研究[J]. 工程建设, 2018, 50 (7): 18 - 22; 41.
- [6] 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(11): 1445 - 1449.
- [7] 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 - 32.
- [8] 刘数华, 阎培渝. 再生骨料混凝土的力学性能[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(1): 85 - 88; 101.
- [9] 张华, 刘文锋, 王召猛. 基于 Pushover 的装配式再生混凝土框架结构抗震性能评估[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(2): 28 - 36.
- [10] 王树臣. 装配整体式 RC 框架结构超强能力研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [11] 宋满荣, 黄慎江, 昂正文. 3 层预压装配式预应力混凝土框架的静力弹塑性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(4): 508 - 512.
- [12] 丁陶, 曹明, 王少华. 基于 SAP2000 预制再生混凝土框架非线性地震反应分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(13): 29 - 33.
- [13] 王召猛. 装配式钢筋再生混凝土框架结构抗震性能评估[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [14] 潘超, 安康. 基于时程分析法的抗爆结构动力响应分析[J]. 工程建设, 2020, 52 (8): 34 - 38.