

基于 BRB 的高烈度幼儿园的结构设计

段春辉¹ 岳增书²

1 中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京 210019

2 中国技术进出口集团有限公司, 北京 100055

[摘要]高烈度区幼儿园一般层数较少, 大多采用框架结构, 但由于其抗震设防类别为乙类, 在设计中一直存在位移角较大, 柱截面钢筋难配的情况。本工程为了提高结构的抗震性能, 增强结构抗侧刚度, 在高烈度区幼儿园结构中采用防屈曲支撑(BRB)的设计, 运用 PKPM 软件进行结构建模, 完成小震作用下计算, 采用 PKPM-SAUSAGE 软件接力小震模型进行大震作用下计算。通过分析发现: 小震作用下, 在框架结构中布设防屈曲支撑能够提高结构的整体刚度, 减小地震作用下的位移角, 减小混凝土柱配筋; 在大震作用下, 布设的防屈曲支撑能够提供额外的附加阻尼, 发挥防屈曲支撑特有的耗能作用, 从而实现结构“大震不倒”的抗震设防目标。

[关键词]BRB; 高烈度; 框架结构

DOI: 10.33142/ec.v5i4.5864

中图分类号: TU391

文献标识码: A

Structural Design of High Intensity Kindergarten Based on BRB

DUAN Chunhui¹, YUE Zengshu²

1 MCC Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, Nanjing, Jiangsu, 210019, China

2 China National Technical Import and Export Group Co., Ltd., Beijing, 100055, China

Abstract: Kindergartens in high intensity areas generally have few floors, and most of them adopt frame structure. However, due to its seismic fortification category of class B, there has always been a situation of large displacement angle and difficult reinforcement of column section in the design. In order to improve the seismic performance of the structure and enhance the lateral stiffness of the structure, the anti buckling support (BRB) design is adopted in the kindergarten structure in the high intensity area, the structural modeling is carried out by using PKPM software, the calculation under small earthquake is completed, and the calculation under large earthquake is carried out by using PKPM-SAUSAGE software. It is found that under the action of small earthquake, the arrangement of anti buckling brace in frame structure can improve the overall stiffness of the structure, reduce the displacement angle under earthquake and reduce the reinforcement of concrete column; Under the action of large earthquake, the anti buckling brace can provide additional damping and give full play to the unique energy dissipation effect of anti buckling brace, so as to achieve the seismic fortification goal of "no collapse in large earthquake".

Keyword: BRB; high intensity; frame structure

引言

在我国, 钢筋混凝土框架结构是建筑结构设计一种主要的结构形式, 因其具有结构规则, 布置灵活等特点, 广泛应用于低层民用建筑中。与剪力墙结构相比, 框架结构的侧向刚度小, 强烈地震作用下结构的变形较大, 位移角较大, 容易发生倒塌, 这严重限制其在高烈度地区的广泛应用。而幼儿园一般层数较低, 空间布置要求灵活, 最适合的结构形式即为框架结构。根据《建筑工程抗震设防分类标准》的相关规定, “对于幼儿园、小学中学教学楼, 设防类别应予以提高, 不应低于重点设防类”, 幼儿园在结构设计中应判定为乙类建筑。本项目为幼儿园教学楼, 在抗震烈度为 8 度时, 其框架结构的抗震等级为一级, 在柱截面有限的情况下, 结构设计及其不容易。因此如何提高框架结构在高烈度地区的适用性, 在设计中已经成为了一个非常重要的问题。

鉴于此问题, 2018 年 2 月 1 日国家住房城乡建设部发布了《建筑工程抗震管理条例(征求意见稿)》, 在意见稿中第 18 条提出“位于高烈度设防地区的新建学校、医院、应急指挥中心等应当采用减震隔震技术。”此意见为各地特别是高烈度区域提供了强力的参考依据, 山西省, 云南省等高烈度地区相继出台强制采用隔震减震的技术要求。

目前, 隔震减震的元件种类较大, 作用机理也不尽相同, 最广泛应用的即为阻尼器及屈曲约束支撑(BRB)。本项目经初步计算时, 位移角在柱截面一定的情况下很难满足要求, 因此采用屈曲约束支撑进行设计。屈曲约束支撑不仅能为结构提供刚度, 而且在大震作用下具有良好的耗能能力, 能够更好的保护主体结构。

本项目选取山西地区某幼儿园教学楼, 结构形式为框架结构。在设计初期进行了布设 BRB、不布设 BRB 及增加

柱截面的三个模型进行比较，而后进行了弹性时程分析，比较反应谱和时程分析两种方法作用下结构基底剪力，最后进行了罕遇地震作用下的弹塑性分析计算。通过本项目的研究，发现在高烈度地区布置 BRB，可以作为一种有效的解决柱截面过大、配筋过大及位移角不满足要求的方法。

1 工程概况

本工程为幼儿园教学楼，抗震设防烈度为 8 度，设计基本地震加速度为 0.2g，属于钢筋混凝土框架结构，层数为三层，层高均为 3.6m，总高度 10.8m，建筑面积为 3015.2m²。结构设计使用年限为 50 年，建筑结构安全等级为一级，建筑抗震设防类别为乙类，场地类别为 III 类，设计地震分组为第一组，场地特征周期为 0.45s，基本风压为 0.45kN/m²，基本雪压为 0.3kN/m²。

根据《建筑抗震设计规范》的规定，本工程框架结构抗震等级为一级，模型计算过程中为满足结构的位移角要求，需要采用很大的梁柱截面，同时因为截面的增加，刚度相应变大，地震影响变化的更快，结构的配筋会大幅度的增加，甚至出现结构柱超筋配不下来的情况，从而很难实现结构的既定目标。鉴于上述原因，本工程采用防屈曲支撑（BRB）提高结构的侧向刚度。防屈曲支撑具有如下特点：1. 在小震作用下，防屈曲支撑能够提供侧向刚度，调节结构的平衡，满足位移角要求；2. 在大震作用下，防屈曲支撑变形能力强，滞回性能好，能够起到很好的耗能效果；3. 防屈曲支撑因其自身特性，不需要考虑受压的稳定性的问题，其截面较钢支撑可以做到更经济，可降低结构的整体造价。

2 防屈曲支撑的方案设计

2.1 防屈曲支撑的设计原理

防屈曲支撑（BRB）的主要材料有四部分，分别为中心芯材，外侧钢套筒、两者之间的无粘结材料及填充砂浆（如图 1）。其主要作用原理是在轴向力作用下，中心芯材率先受力并发生侧向变形，为了防止其屈服破坏，在外侧设置钢套筒约束其侧向变形，同时为了保证内外之间统一工作，在芯材外层设置一层无粘结材料（多为硅胶板、橡胶板），中间灌注高强度、密实的填充砂浆，形成一个统一的整体。

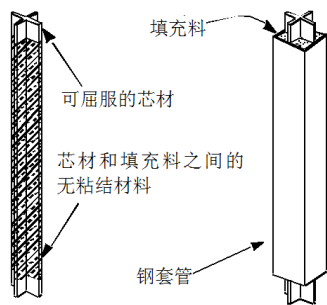


图 1 防屈曲约束支撑的基本构成图

防屈曲支撑的主要材料为钢材，但其又不同与一般钢支撑，其更好利用了钢材抗拉抗压强度相同的特性，避免了受压失稳引起的先于受拉破坏的情况，从而使钢材的性能发挥更大。同时防屈曲支撑在为结构提供刚度的情况下，还能提供额外的附加阻尼，耗能效果更强。在施工方面，两者均具有施工快速，质量可靠的特点。

2.2 防屈曲约束支撑的布置方案

本工程综合考虑建筑及结构方案的布置，在 1-3 层沿 X 向及 Y 向分别布置 BRB，其参数表 1，平面布置图见图 2，防屈曲支撑三维布置图、X 向立面布置图及 Y 向立面布置图分别见图 3、4、5。

表 1 防屈曲支撑参数表

支撑类型	支撑长度 (mm)	屈服承载力 (KN)	楼层	数量
BRB1	4600	400	1 层	6
BRB2	4000	400	2、3 层	12
BRB3	6600	600	1 层	3
BRB4	6100	600	2、3 层	6
合计:				27

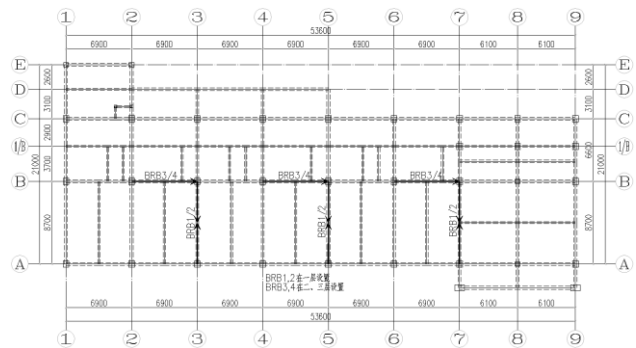


图 2 防屈曲支撑平面布置图

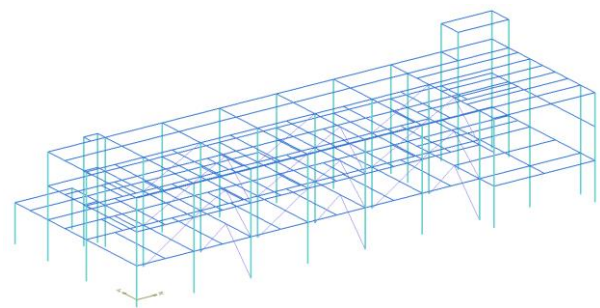


图 3 防屈曲支撑三维图

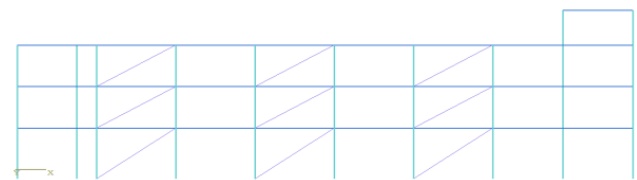


图 4 X 向防屈曲支撑布置图

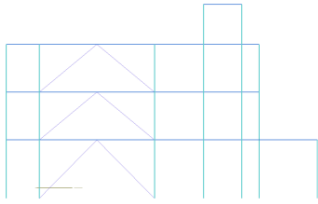


图5 Y向防屈曲支撑布置图

3 多遇地震下的结构分析

本工程进行了三个模型的比较，分别为柱子 600x650+不布设 BRB（模型 1）、柱子 600x850+不布设 BRB（模型 2）、柱子 600x650+布设 BRB（模型 3），BRB 采用 100X100 的斜杆进行模拟，基本条件除阻尼比外均相同（模型 1、模型 2 阻尼比采用 5%，模型 3 阻尼比采用 6%），对模型中的层间剪力、位移角及典型的柱配筋进行比较

表 2 3 种模型的计算指标对比

指标	模型 1 (mm)	模型 2	模型 3
第一周期	0.5649	0.5427	0.5175
第二周期	0.5555	0.4822	0.5065
第三周期	0.4698	0.4111	0.4472
总质量 (t)	3498.3	3599.6	3501.0
X 向基底剪力	4858.2	4972.1	4712
Y 向基底剪力	4308.5	4423	4113
X 向位移角	1/583	1/626	1/700
Y 向位移角	1/446	1/578	1/571
X 向位移比	1.03	1.04	1.05
Y 向位移比	1.37	1.44	1.32

从上表中可知，3 个模型的质量相差不多，主要是模型 2 的质量略微大点，经分析主要差别在结构柱的重量上；在结构的周期方面，模型 1>模型 2>模型 3；在位移角方面，布设 BRB 可以大幅的减小结构的位移角，原结构 600X650 的柱子，在不布设 BRB 时候位移角不满足规范要求，而在把柱子增加到 600X850 时结构才刚刚满足规范要求，而在建筑墙体内布设 BRB 后位移角显著降低，从中可知，在建筑空间有限的情况下，采用 BRB 能够更好的调节结构刚度满足结构对位移角的要求。

从三个模型中配筋图中可知，柱配筋模型 1>模型 3>模型 2，可知布设 BRB 可以减小柱配筋，但没有增加截面减小的多；但基本可以解决柱钢筋密布排不下钢筋的问题。

综上所述，布设 BRB 可以作为一种有效的调整结构位移，调整柱配筋的方法，特别是在高烈度框架抗震等级较高的情况下具有很高的操作性。

4 罕遇地震作用下的结构分析

本工程进行罕遇地震作用下的结构分析时，首先采用采用 PKPM 结构设计软件进行弹性时程分析，确定其选波

的合理性；然后采用 PKPM-SAUSAGE 软件进行动力弹塑性时程的分析。

4.1 弹性时程分析

根据《建筑抗震设计规范》的相关规定，本工程可选用 3 条地震波进行计算分析，其中 2 条天然波（简称 TH01 波、TH02 波），1 条人工波（RH01 波），地震波选自 PKPM 软件中的地震波库，经计算其时程分析与振型分解反应谱作用下基底的剪力见下表

表 3 时程分析法与反应谱法基底剪力

	反应谱	TH01	TH02	RH01
X 向	4264KN	4134KN	4565KN	3946KN
Y 向	2934KN	2854KN	3104KN	2752KN

从上表中可知，时程分析法每条波底部剪力值均介于 PKPM 软件振型分解反应谱法的 65%~135%之间，时程分析法三条波平均底部剪力值介于 PKPM 软件振型分解反应谱法的 80%~120%之间，以上均符合抗规对选波的要求，地震波选取合理，采用 PKPM 软件振型分解反应谱法的计算结果作为设计依据是安全可靠的。

4.2 动力弹塑性时程分析

4.2.1 抗震性能目标

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》中对结构抗震性能设计的规定，结构的抗震性能分为五个水准，其损坏程度由轻到重具体可为 1.完好、无损坏，2.基本完好、轻微损坏，3.轻度损坏，4.中度损坏，5.比较严重损坏”。

钢筋混凝土构件主要由两种材料组成，分别为混凝土和钢筋。其中混凝土主要承受压应力，在软件中采用受压损失截面面积作为判别混凝土损伤程度的依据；钢筋主要承受拉应力，在软件中采用受拉塑性应变作为判别钢筋损伤程度的依据。在受力工程中，截面边缘的受力最大，塑性变形最先出现于此，构件的钢筋也布置于此。软件中假定截面边缘一旦屈服，整根钢筋就全截面屈服。

在 SAUSAGE 软件中构件的损坏的评定标准主要有(1)混凝土的受压损伤因子，(2)钢材(钢筋)的塑性应变程度，其与《高层建筑混凝土结构技术规程》中构件的损坏程度对应关系如下表所示：

性能水平分级数	6							
序号	性能水平	颜色	梁柱 ϵ_p/ϵ_y	梁柱 d_c	梁柱 d_t	墙板 ϵ_p/ϵ_y	墙板 d_c	墙板 d_t
1	无损坏	蓝色	0	0	0	0	0	0
2	轻微损坏	绿色	0.001	0.001	0.2	0.001	0.001	0.2
3	轻度损坏	黄色	1	0.001	1	1	0.001	1
4	中度损坏	橙色	3	0.2	1	3	0.2	1
5	重度损坏	红色	6	0.6	1	6	0.6	1
6	严重损坏	深红色	12	0.8	1	12	0.8	1

图 8 构件的损坏程度表

图表中均采用单元各性能水平指标最大值，按不利情况选取。

$\varepsilon_p/\varepsilon_y$ 为钢筋（钢材）塑性应变与屈服应变的比值。

dc 为混凝土受压损伤系数。

梁柱构件性能等级取单元性能等级最大值。

本工程指定的抗震性能目标具体见下表

表 4 抗震性能目标表

地震烈度	多遇地震	罕遇地震
规范规定的抗震概念	小震不坏	大震不倒
最低抗震性能要求	第 1 水准	第 4 水准
允许层间位移角	1/550	1/50
总体性能	无损坏	多数损坏
框架柱	无损坏	部分损坏
耗能构件（BRB 及框架梁）	无损坏	多数损坏

4.2.2 滞回曲线和能量图

本结构中的 BRB 作为耗能构件，在小震作用下无损坏，不屈服，仅提供侧向刚度，但在大震的作用下会发生屈服，为结构提供附加阻尼，经软件计算，典型大震能量曲线见图 9、10。

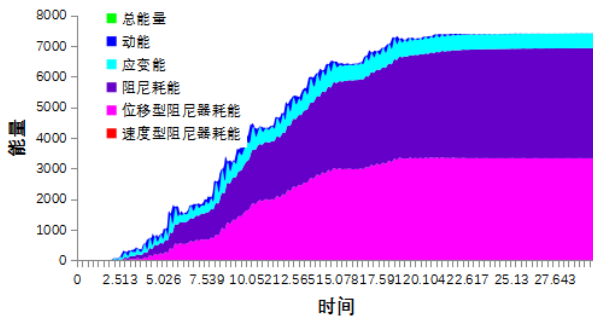


图 9 典型大震能量曲线

下表列出了各时程曲线下的阻尼情况

表 5 各时程曲线下阻尼值

工况	初始阻尼比	弹塑性	位移型阻尼	总等效阻尼
TH01 (X 向)	5%	0.5%	4.9%	10.4%
TH01 (Y 向)	5%	0.7%	4.6%	10.3%
TH02 (X 向)	5%	2.8%	6.3%	14.1%
TH02 (Y 向)	5%	3.3%	6.2%	14.6%
RH01 (X 向)	5%	0.5%	2.5%	8.0%
RH01 (Y 向)	5%	0.7%	2.5%	8.2%
包络值 (X 向)				8.0%
包络值 (Y 向)				8.2%

从上表可以看出大震作用下布设有 BRB 的结构阻尼比不布设 BRB 的结构阻尼比较大，能够更好的耗能，

在罕遇地震作用下能够更好的保护主体结构免受破坏。

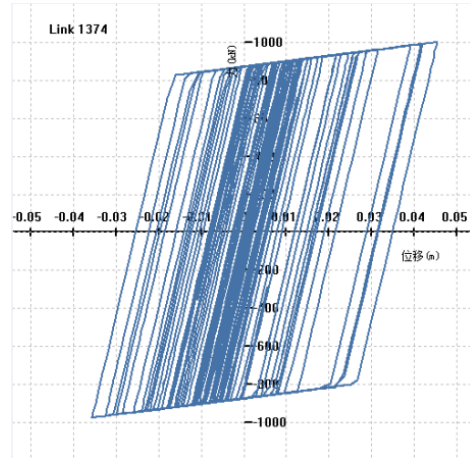


图 10 典型滞回曲线

从上图可看出 BRB 的滞回曲线饱满，BRB 在罕遇地震作用下吸收了很大的地震作用，能够有效的减小结构的地震响应。

4.2.3 弹塑性分析位移结果

将弹塑性时程分析后的地震动作用下的位移归纳如下表：

表 6 弹塑性时程分析后的地震动作用下的位移

工况	最大顶点位移	最大层间位移角	对应层号
TH01 (X 向)	0.088	1/127	2
TH01 (Y 向)	0.098	1/96	2
TH02 (X 向)	0.164	1/62	2
TH02 (Y 向)	0.159	1/61	2
RH01 (X 向)	0.081	1/94	2
RH01 (Y 向)	0.093	1/98	2

由上表可知，结构最大层间位移角均不大于《高层建筑混凝土结构技术规程》中层间弹塑性位移角限值，符合规范中“大震不倒”的性能要求。

4.2.3 结构构件的损伤情况及抗震性能评价

(1) 框架梁的混凝土损伤

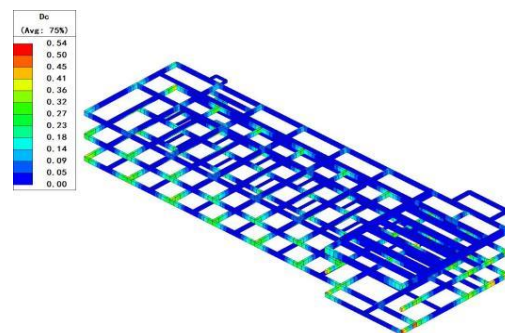


图 11 大震 框架梁混凝土损伤

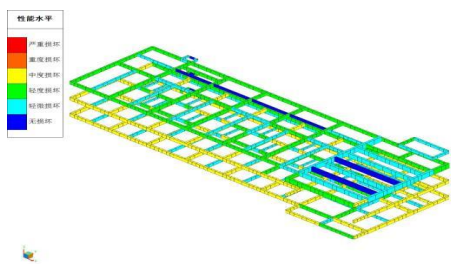


图 12 大震 框架梁性能指标

从上图中可知,在地震作用下,首层梁损坏最严重,达到了中等破坏的等级,满足抗震性能要求。

(2) 框架柱的混凝土损伤

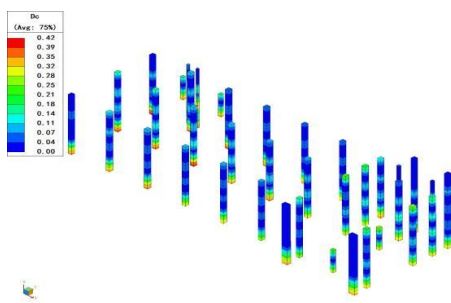


图 13 大震 框架柱混凝土损伤

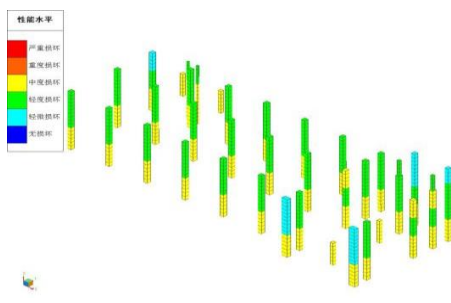


图 14 大震 框架柱性能指标

从上图中可知,在地震作用下,首层柱吸收能量最大,柱脚损坏最为严重,达到了中等破坏的等级,满足抗震性能要求。根据柱结构的损伤情况,可以看出加强柱脚钢筋的重要性。

(3) 框架柱的钢筋损伤

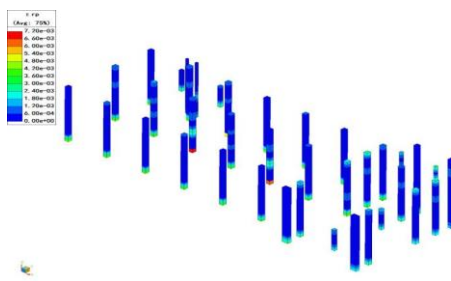


图 15 大震 框架柱钢筋损伤

从上图中可知,在地震作用下,柱子钢筋塑性变形主要集中在柱脚处,个别柱子柱角钢筋塑性应变已经屈服,需要增设钢筋的配置。

5 结论

本工程将防屈曲支撑应用于烈度较高的幼儿园结构中,通过对其进行分析研究,主要得到以下结论:

(1) 在小震作用下,在框架结构中布设防屈曲支撑能够提高结构的整体刚度,减小地震作用下的位移角,减小混凝土柱配筋;通过模型计算分析可知结构小震下最大层间位移角为 Y 向 1/571;满足规范为位移角的要求,可实现结构“小震不坏”的抗震性能目标。

(2) 主体结构首层梁柱损坏最严重,达到了中等破坏的等级,满足构件对抗震性能设计的要求;混凝土底层柱柱脚处损伤最为严重,有些已经超过屈服,需要额外增设纵向钢筋,这从另一侧面反应了加强柱角钢筋的必要性。

(3) 在大震作用下,防屈曲支撑能够提供额外的附加阻尼,可作为消能器减小地震能量,充当第一道防线,从而实现结构“大震不倒”的抗震设防目标。

[参考文献]

[1] 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 2.
[2] 中华人民共和国国家标准. 建筑工程抗震设防分类标准 GB 50223-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1. 4.
[3] 中华人民共和国国家标准. 建筑消能减震技术规程: JGJ 297-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 4-8.
[4] 韩振林, 李潇. 临沂某幼儿园消能减震设计[J]. 建筑结构, 2020, 50(2): 299-304.
[5] 钱闪光, 李云等. 某钢筋混凝土框架结构减震设计[J]. 中国水运, 2018, 12(1): 237-241.
[6] 杨圣辉, 朱国品. 基于 BRB 屈曲约束支撑的 5 层框架结构减震设计[J]. 智能城市, 2021, 23(7): 143-144.
[7] 岂凡, 邢宁波, 陈君军, 付孟秋. 消能减震技术在高烈度区框架结构中的应用[J]. 建筑结构, 2020(50): 396-399.
[8] 周敏, 薛彦涛. BRB 钢筋混凝土框架结构罕遇、极罕遇地震弹塑性分析[J]. 建筑科学, 2017, 5(33): 25-30.
作者简介: 段春辉(1987-)男, 北京工业大学, 土木工程, 中冶华天南京工程技术有限公司, 结构设计, 工程师; 岳增书(1983-)男, 北京工业大学, 土木工程, 中国技术进出口集团有限公司, 工程师。