

《建筑抗震设计规范》和《高层建筑混凝土结构设计规程》抗震性能化设计规定的分析对比

陈 嵘*

(北京建筑大学北京高等学校工程研究中心, 北京 100044)

摘要 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010, 2016版)和《高层建筑混凝土结构设计规程》(JGJ 3—2010)均有抗震性能化设计的规定且略有不同,工程师在执行中可不可避免地产生困惑。本文分析两本规范抗震性能化设计的规定,从荷载-位移曲线的角度阐述性能目标、性能水准的含义,并对比两本规范的设计参数。列举29个采用性能化设计方法的工程实例,分析位移指标的取值依据。根据上述两方面分析,总结两本规范性能化设计规定的不同点,并给出设计建议。

关键词 抗震性能化设计, 性能目标, 性能水准, 变形

Comparative Analysis of Seismic Performance-Based Design Provisions in Code for Seismic Design of Buildings and Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building

CHEN Rong*

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Civil Engineering Structure and Renewable Material, Beijing 100044, China)

Abstract The code for Seismic Design of Buildings (GB 50011—2010, 2016 edition) and the Technical Specification for Concrete Structures of Tall Buildings (JGJ 3—2010) both have provisions for performance-based seismic design, albeit with slight differences. Engineers, in their execution, may inevitably encounter confusion due to these variations. This paper analyzes the provisions of both codes regarding seismic performance design, and explains the meanings of seismic performance objectives and seismic performance levels from the perspective of load-displacement curves. It also compares the design parameters of the two codes. By listing 29 engineering cases adopting performance-based design methods, this study analyzed the basis for determining displacement indicators. Based on the analyses of these two aspects, the differences in the specifications regarding performance-based design are summarized, and design recommendations are provided.

Keywords performance-based seismic design, seismic performance objective, seismic performance level, displacement

0 引言

抗震性能化设计由美国加利福尼亚结构工程师协会(SEAOC, 1960)提出建议,并由波特兰水

泥协会(PCA, 1961)发布了一份出版物。1964年 Alaska 地震、1971年 San Fernando 地震、1989年 Loma Prieta 地震和1994年 Northridge 地震的震害导致规范不断修订,震害表明美国抗震设计规范相对有效地保护了使用者的生命安全,但经济损

收稿日期: 2023-06-14

* 联系作者: 陈 嵘,男,讲师,主要从事抗震设计研究。E-mail: 49264334@qq.com

失巨大,因此需要确定性能目标说明经济风险一破坏程度。1995年SEAOC编写了《基于性能的建筑抗震工程》,1996年应用技术委员会(ATC)发布了《混凝土建筑抗震改造方法》(ATC 40),1997年联邦紧急事务管理局(FEMA)制定的文件(FEMA 273)引入了性能化设计。之后,国际规范理事会(ICC)颁布了适用于建筑和设施的性能化规范(ICC 2003a)——一种完全基于性能的建筑规范。^[1-2]

当研究不同性能化设计方法后可以发现,相同点远多于不同点,它们的设计框架基本相同而具体参数有一些变化。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010,2016版)^[3](简称《抗规》)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[4](简称《高规》)均有抗震性能化设计的规定,具体规定略有不同。本文结合性能化设计理论分析两本规范规定,从荷载-位移曲线的角度梳理逻辑关系、分

析对比,再依据工程实例给出设计建议。

1 《抗规》抗震性能化设计分析

《抗规》3.10.3条指出抗震性能化设计的主要工作是确定性能目标、地震动水准和性能水准,选定建筑在不同地震动水准下的性能水准就是确定性能目标,它是对建筑经历不同地震动水准后的破坏状态或使用功能的预测。

1.1 性能目标和地震动水准

性能目标就是多遇地震、设防地震、罕遇地震(地震动水准)与不同性能水准(破坏状态或使用功能的预期)的组合。《抗规》将性能目标划分为4个级别,根据相关规定可把性能目标、地震动水准和性能水准三者关系总结为表1。

表1 性能目标的分级及要求

Table 1 Classification and requirements of performance objectives

性能目标	多遇地震	设防地震	罕遇地震
性能1	①完好	①完好,正常使用	②基本完好,检修后继续使用
性能2	①完好	②基本完好,检修后继续使用	④轻~中等破坏,修复后继续使用
性能3	①完好	③轻微损坏,简单修理后继续使用	⑤中等破坏,其破坏需加固后继续使用
性能4	①完好	④轻~中等破坏,变形 $<3[\Delta u_e]$	⑥不严重破坏(接近严重破坏),大修后继续使用

注:1. $[\Delta u_e]$ —满足《抗规》多遇地震下的位移角限值;2. 表中编号①~⑥表示《抗规》规定的六级性能水准。

《抗规》3.10.3条1款规定了50年设计使用年限结构的“小震、中震、大震”计算参数,并对其他情况给出建议。

1.2 性能水准及指标

性能化设计是一种灵活的设计方式,可以由业主和工程师协商完成,为了让两者方便交流,又能明确结构在特定地震作用下的破坏状态,需要两类标准并能够相互转换。

(1) 对于非专业人员(业主)用定性的表达方法:完好、轻微、中等和严重破坏、倒塌等。

(2) 对于专业人员用定量的表述方法:承载力、位移、延性、耗能等。

《抗规》3.10.3条及附录M给出①完好、②基本完好、③轻微损坏、④轻~中等破坏、⑤中等破坏、⑥接近严重破坏(不严重破坏)的定义,并以承载力、变形能力(位移)、延性构造三项指标给出各级性能水准的具体参数,这样实现了不同表达方式之间的等效关系,这种关系可总结为表2。

表2中由上至下延性构造和变形能力逐步提

高,而承载力逐步降低,各级性能水准的承载力和延性构造关系是:高承载力、低延性构造,低承载力、高延性构造。

1.3 性能水准、性能目标与荷载-位移曲线的关系

六级性能水准实质上是对结构或构件在地震作用下破坏状态的划分,也是对荷载-位移曲线的划分,因此可用图1表示。性能水准①~⑥表示结构或构件整个受力过程的某一阶段,性能目标1~4表示结构或构件受力过程曲线的终点位置。需要说明,各性能目标曲线的竖向坐标即屈服荷载是变化的,图中曲线代表一系列不同性能目标曲线。

1.4 弹塑性分析方法

《抗规》按照结构整体进入弹塑性程度的不同,给出不同的分析方法(图2):结构总体上处于开裂阶段或刚刚进入屈服阶段,可取等效刚度和等效阻尼按等效线性方法估算,AB段;结构总体上处于承载力屈服至极限阶段宜采用静力或动力弹塑性分析方法估算,BC段;结构总体上处于承

表2 六级性能水准指标
Table 2 Indicators of six levels of performance levels

序号	性能水准	承载力	位移	延性构造
①	完好	小震完好,常规设计中震完好,承载力按抗震等级调整地震效应的设计值复核(M.1.2-1)	小震完好,变形远小于弹性位移限值($\Delta u < [\Delta u_e]$) 中震完好,变形小于弹性位移限值($\Delta u < [\Delta u_e]$)	—
②	基本完好	按不计抗震等级调整地震效应的设计值复核(M.1.2-2)	变形略大于弹性位移限值($\Delta u \approx [\Delta u_e]$)	基本抗震构造。可按常规设计的有关规定降低二度采用,但不得低于6度,且不发生脆性破坏
③	轻微损坏	承载力按标准值复核(M.1.2-3)	变形小于2倍弹性位移限值($\Delta u < 2[\Delta u_e]$)	《抗规》未明确,可按序号④处理
④	轻~中等破坏	承载力按极限值复核(M.1.2-4)	变形小于3倍弹性位移限值($\Delta u < 3[\Delta u_e]$)	低延性构造。可按常规设计的有关规定降低一度采用,当构件的承载力高于多遇地震提高二度的要求时,可降低二度采用;均不得低于6度,且不发生脆性破坏
⑤	中等破坏	承载力达到极限值后能维持稳定,降低少于5%	有明显塑性变形,变形约4倍弹性位移限值($\Delta u < 4[\Delta u_e]$)	中等延性构造。当构件的承载力高于多遇地震提高一度的要求时,可按常规设计的有关规定降低一度且不低于6度采用,否则仍按常规设计的规定采用
⑥	不严重破坏	承载力达到极限值后基本维持稳定,降低少于10%	变形不大于0.9倍塑性变形限值	高延性构造。仍按常规设计的有关规定采用

注:表中公式(M.1.2-1)、(M.1.2-2)、(M.1.2-3)、(M.1.2-4)见《抗规》附录M。

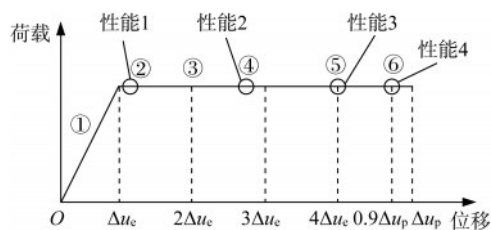


图1 荷载-位移曲线中性能水准、性能目标示意

Fig.1 Illustration of performance levels and performance objectives in load-displacement curve

承载力下降阶段应采用计入下降段参数的动力弹塑性分析方法估算,CD段。

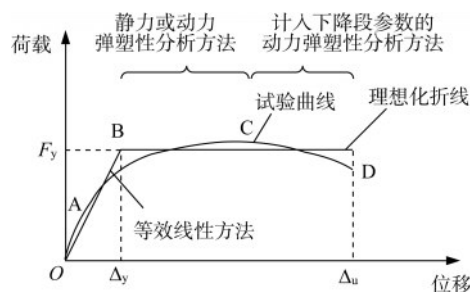


图2 不同阶段的弹塑性分析方法示意

Fig.2 Illustration of elastic-plastic analysis methods at different stages

工程判断。地震动水准划分服从《抗规》规定。

2 《高规》抗震性能化设计分析

《高规》3.11.1条指出,结构抗震设计主要工作是:分析结构方案;选用抗震性能目标;计算分析和

2.1 性能目标

《高规》3.11.1条将性能目标分为A、B、C、D四级,性能目标的划分及要求见表3,表中编号1~5表示五级性能水准。

表3 性能目标的划分及要求
Table 3 Classification and requirements of performance objectives

性能目标	多遇地震	设防地震	罕遇地震
A	1.完好	1.完好、无损坏,不需修理即可使用	2.基本完好、轻微损坏,稍加修理即可继续使用
B	1.完好	2.基本完好、轻微损坏,稍加修理即可继续使用	3.轻度损坏,一般修理后可继续使用
C	1.完好	3.轻度损坏,一般修理后可继续使用	4.中度损坏,修复或加固后可继续使用
D	1.完好	4.中度损坏,修复或加固后可继续使用	5.比较严重损坏,需排险大修

2.2 性能水准及指标

性能水准分为五级: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。考虑到高层建筑各个构件作用不同,例如转换梁比剪力墙连梁更重要,将构件分类并

限定其破坏程度。构件分三类:关键构件——失效可能引起结构的连续破坏或危及生命的严重破坏;普通竖向构件——关键构件之外的竖向构件;耗能构件——框架梁、剪力墙连梁及耗能支撑等。

与《抗规》类似,每级性能水准规定了承载力和位移要求。表 4 总结了《高规》性能水准的规定,表中小注所列公式编号见《高规》。

表 4 各级性能水准的承载力和位移要求

Table 4 Requirements of load capacity and displacement for each level of performance

性能水准	关键构件		普通竖向构件		耗能构件		水平长悬臂和大跨度结构的关键构件		层间位移角限值
	正截面	受剪	正截面	受剪	正截面	受剪	正截面	受剪	
1	弹性	弹性	弹性	弹性	弹性	弹性	弹性	弹性	弹性*
2	弹性	弹性	弹性	弹性	不屈服	弹性	弹性	弹性	—
3	不屈服	弹性	不屈服	弹性	部分屈服	不屈服	不屈服*	弹性	弹塑性
4	不屈服	不屈服	部分屈服	截面限制	大部分屈服	截面限制	不屈服*	不屈服*	弹塑性
5	宜不屈服	宜不屈服	较多屈服	截面限制	部分严重破坏	截面限制	宜不屈服*	宜不屈服*	弹塑性

注:弹性—小震时常规设计,中震时符合式(3.11.3-1);弹性*—满足弹性层间侧移角限值要求,3.7.3条;弹塑性—结构薄弱部位满足弹塑性层间位移角限值要求,3.7.5条。不屈服—应符合式(3.11.3-2);不屈服*—除满足(3.11.3-2)外,还应满足(3.11.3-3);截面限制—混凝土构件应符合式(3.11.3-4),这是防止构件发生脆性受剪破坏的最低要求;宜不屈服—宜符合式(3.11.3-2);较多屈服—同一楼层的普通竖向构件不宜全部屈服;性能水准 4—整体结构的承载力不发生下降;性能水准 5—整体结构的承载力下降幅度不超过 10%。

《高规》3.11.3 条条说明指出,结构的抗震等级不宜低于本规程的有关规定,需要特别加强的构件可适当提高抗震等级,已为特一级的不再提高。这表明《高规》不按高承载力-低延性构造,低承载力-高延性构造的方法调整构造要求,而是提高了高层结构的安全储备以应对地震的不确定性,也提高了造价。

性能水准略有不同:《高规》性能水准分五级,表 4 表明位移限值仅分两级:弹性限值(3.7.3 条)和弹塑性限值(3.7.5 条),抗震等级不宜降低,特别构件可适当提高;《抗规》性能水准分六级,表 2 表明位移限值分六级,延性构造随承载力的提高而降低。

2.3 性能水准、性能目标与荷载-位移曲线的关系

《高规》各级性能水准、性能目标也可以荷载-位移曲线表示,如图 3 所示。

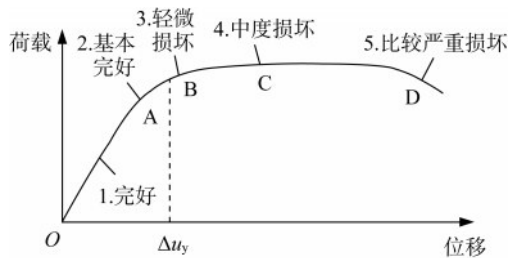


图 3 荷载-位移曲线中性能水准、性能目标示意

Fig.3 Illustration of performance levels and performance objectives in load-displacement curve

3 《高规》与《抗规》抗震性能化设计对比

图 4 表明,《高规》《抗规》抗震性能化设计的框架基本相同,四级性能目标、三级地震动水准。

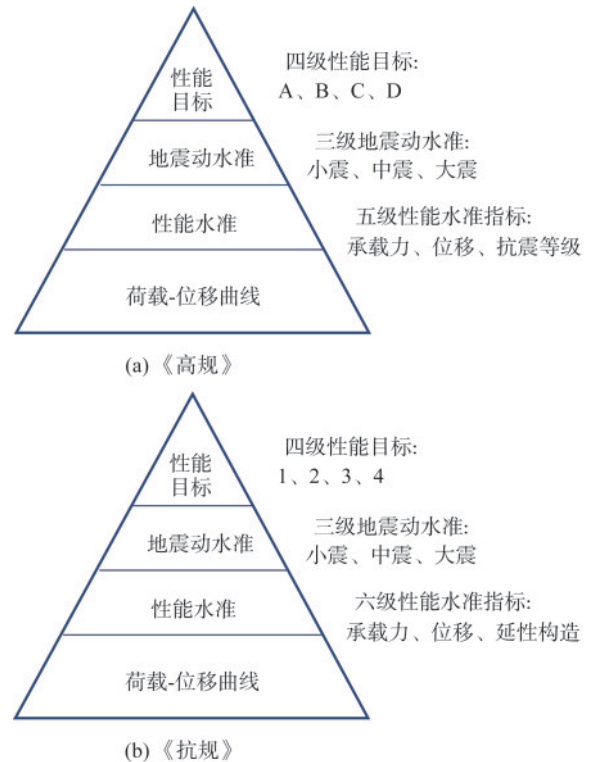


图 4 设计框架对比

Fig.4 Comparison between design frameworks

对比发现,《高规》要求抗震等级不宜降低,那么对应的构造要求也不降低,这点比《抗规》严格。《高规》位移限值仅分两级,实际上仅对小震和大震进行控制,没有中震的位移限值,这点没有《抗规》严格。

4 工程实例分析

表5统计了近期29个实际工程,性能化设计步骤基本按照图4完成:根据结构的不规则性、复

杂性确定性能目标→明确各地震动水准下构件的性能水准→验算指标。

上述工程性能目标均为C或D级,部分工程未明确性能目标以“—”表示,实际设计参数处于C~D级之间。从位移指标来看,25项工程仅采用《高规》规定的小震、大震位移限值,4项工程规定了小震、中震、大震位移限值,中震限值引用《抗规》指标。弹塑性分析方法以Push-Over法为主,例如第1、8项工程采用Push-Over法给出倾覆曲线。

表5 工程实例统计

Table 5 Statistical analysis of engineering case studies

序号	工程名称	设防烈度	高度/m	结构形式	性能目标	层间位移角限值			层间位移角计算值		
						小震	中震	大震	小震	中震	大震
1	杭州拱墅区万达广场XX楼 ^[5]	6度	79.25	框架-核心筒	C级	1/800	1/400	1/100	1/1 941	1/647	1/200
2	海航豪庭1#SOHO办公和酒店结构	8度(0.30g)	134.65	框架-核心筒	C级	1/800	—	1/100	1/918	—	1/122
3	昆明某超限高层建筑	8度(0.20g)	232.3	框架-核心筒结构	C级	1/590	—	1/110	1/614	—	1/120
4	洛阳市新区国际酒店	7度(0.10g)	166	框架-剪力墙	C级	1/740	—	1/100	1/772	—	1/161
5	合肥市某超限高层住宅	7度(0.10g)	200.5	剪力墙结构	C级	1/666	—	1/120	1/866	—	1/120
6	南京万豪酒店	7度(0.10g)	98.7	框架-剪力墙	D级	1/800	—	1/100	1/979	—	1/164
7	南京苏宁滨江公寓	7度(0.10g)	141.8	剪力墙	D级	1/1 000	—	1/120	1/1 109	—	1/152
8	苏州兆润财富中心 ^[9]	6度	东塔:139 西塔:199	框架-核心筒	—	1/800 1/615	—	1/100	1/939 1/863	—	1/342
9	西安1668新时代广场A区A1塔楼	8度(0.20g)	132.05	框架-核心筒	D级	1/800	—	1/100	1/810	—	1/165
10	郑州金水万达中心	7度(0.15g)	198.6	框架-核心筒	C级	1/620	—	1/100	1/808	—	1/168
11	深圳某综合楼	7度(0.10g)	31.05	框架	D级	1/550	—	1/50	1/627	—	1/67
12	苏州第二图书馆	7度	34.3	钢框架、钢筋混凝土框架-剪力墙	C级	1/800	—	1/100	1/1 367	1/586	1/210
13	福州长乐区三馆三中心	7度	37.33	框架-剪力墙	D级	1/800	—	1/100	1/997	—	小于1/100
14	南京明发国际中心办公楼	7度(0.10g)	176.6	框架-核心筒	—	1/690	—	1/100	1/1278	—	1/185
15	九江国际金融广场A1#楼	6度	299.3	框架-核心筒	C级	1/500	—	1/100	1/997	—	1/253
16	广州珠海区某超限高层	7度(0.10g)	77.9	框架-核心筒	C级	1/800	—	1/100	满足	1/469	1/197
17	河北邯郸东方国际商务中心	7度(0.15g)	95.8	框架-剪力墙结构,双塔连体	C级	1/800	—	1/100	1/820	—	1/129
18	济南西部会展中心配套高层	7度(0.10g)	188.95	框架-核心筒	C级	1/645	—	1/100	1/1097	—	1/130
19	沈阳金廊超高层写字楼	7度	300	框架-核心筒	—	1/500	—	1/100	1/775	—	1/142

续表

序号	工程名称	设防烈度	高度/m	结构形式	性能目标	层间位移角限值			层间位移角计算值		
						小震	中震	大震	小震	中震	大震
20	广州某Y形平面超高层塔楼	7度(0.10g)	282.9	框架-核心筒	C级	1/500	—	1/100	1/560	—	1/139
21	南京建邺区某综合楼	7度(0.10g)	27.6	框架结构	—	1/500	—	1/50	1/598	—	1/133
22	湖北黄石东方琉璃宝塔结构 ^[6]	6度	86	钢框架-中心支撑	C级	1/250	1/125	1/50	1/1662	1/274	1/188
23	长沙某超限高层建筑 ^[7]	6度	288	框架-核心筒	C级	1/500	1/250	1/100	1/787	—	1/131
24	西安环球贸易中心1#楼	8度(0.20g)	299.75	框架-核心筒	C级	1/500	—	1/100	1/542	—	1/102
25	南京金融城三期A01办公楼	7度(0.10g)	199.85	框架-核心筒	C~D级	1/667	—	1/100	1/825	—	1/172
26	某商务办公楼	7度(0.10g)	150	剪力墙	C级	1/1 000	—	1/120	1/1 048	—	1/135
27	郑州国际文化交流中心酒店 ^[8]	7度(0.15g)	39.2	框架-剪力墙	C级	1/800	1/300	1/100	1/833	满足	1/161
28	珠海某超高层办公楼	7度(0.10g)	220.8	框架-核心筒	C级	1/562	—	1/100	1/679	1/422	1/132
29	山东省某综合营业楼 ^[10]	7度(0.10g)	99.95	框架核心筒	—	1/800	—	1/100	满足	—	1/349

根据文献[1-2]总结的性能化设计思想,当结构设计已基本保障生命安全后还应明确经济风险。表5中25项工程未明确中震时的位移限值,应补充中震位移限值完善设计指标,且大震位移限值仅有一个指标《高规》3.7.5条,不够灵活,没有体现性能化设计是一种更高的要求。

5 结论和建议

根据《抗规》、《高规》抗震性能化设计规定的分析对比和工程实例统计,给出如下结论和建议:

(1)《抗规》性能水准的延性构造要求可随着承载力的提高而降低,《高规》要求抗震等级不宜降低,特别构件可适当提高,《高规》要求更高。

(2)《高规》没有给出中震时的位移限值,无法明确中震后的破坏状态,若设计时引用《抗规》中震位移限值作为设计指标,能更全面地控制结构在各地震动水准下的状态。

(3)《高规》大震位移指标只有一个,3.7.5条弹塑性位移角限值,若设计时引用《抗规》不同性能水准的位移限值能更好地控制大震破坏状态。

参 考 文 献

[1] FREEMAN S A. Performance-based seismic engineering: past, current, and future [C]. Advanced Technology in Structural Engineering, Structures

Congress 2000, Philadelphia, Pennsylvania, 2000: 1-8.

[2] THOMPSON B, BANK L. The perception of risk in performance-based design of buildings [C]. Building Integration Solutions, Architectural Engineering Conference (AEI), 2006: 1-15.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(2016版): GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016. (in Chinese)

[4] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015. (in Chinese)

[5] 陈丽, 张鑫. 超限高层建筑抗震性能化分析研究——以杭州拱墅区万达广场XX楼为例[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2020, 40(4): 20-28.

CHEN Li, ZHANG Xin. Seismic performance analysis of high-rise buildings beyond the limit—Taking XX Building of Wanda Plaza in Gongshu District of Hangzhou as an Example [J]. Journal of ShaoXing University (Natural Science), 2020, 40(4): 20-28. (in Chinese)

- [6] 舒绍云,余晗,冷育欣,等.东方琉璃宝塔结构设计[J].建筑结构,2022,52(12):9-16.
SHU Shaoyun, YU Han, LENG Yuxin, et al. Structural design of Dongfang Glazed Pagoda [J]. Building Structure, 2022, 52(12):9-16.(in Chinese)
- [7] 万海洋,舒绍云,陈军,等.某超限高层建筑结构方案必选与分析[J].建筑结构,2022,52(S1):30-35.
WANG Haiyang, SHU Shaoyun, CHEN Jun, et al. Comparison and analysis of structural schemes of an exceeding limit high-rise building [J]. Building Structure, 52(S1):30-35.(in Chinese)
- [8] 钱洋,孙逊,胥建华,等.郑州国际文化交流中心酒店结构设计[J].建筑结构,2023,53(2):8-14.
QIAN Yang, SUN Xun, XU Jianhua, et al. Structural design of Hotel in Zhengzhou International Exchange Center [J]. Building Structure, 53 (2) : 8-14. (in Chinese)
- [9] 陈建兴.苏州兆润财富中心结构设计[J].结构工程师,2018,34(3):32-38.
CHEN Jianxing. Structural design of Suzhou Trirun Fortune Center[J].Structural Engineers, 2018, 34(3): 32-38.(in Chinese)
- [10] 董兴平.山东省某综合营业楼超限高层结构设计[J].结构工程师,2021,37(3):220-228.
DONG Xinping. Design of an exceed-code high-rise structure of comprehensive business building in Shandong Province [J].Structural Engineers, 2021, 37 (6):220-228.(in Chinese)