

跨座式单轨独柱大悬挑钢-混组合框架高架车站 抗震设计探讨

陈志强, 靳鹏, 廖宇飏

(中铁工程设计咨询集团有限公司建筑工程设计研究院, 北京 100055)

摘要:针对跨座式单轨独柱大悬挑钢-混组合框架高架车站结构抗震冗余度低,在高烈度地区应用较少,为更好地分析高架车站抗震受力全过程,以某跨座式单轨独柱大悬挑钢-混组合框架高架车站工程实例为背景,根据建筑规范和城市轨道交通规范要求设定合理的抗震性能目标,并研究构件抗震受力历时过程中的受力情况。采用大型有限元 Midas 作为主要计算软件,选取合理的地震波,进行多遇地震和设防地震有限元计算时采用弹性时程分析方法,且对振型分解反应谱法地震作用进行相应的放大,结果分析构件满足抗震性能目标要求。进行罕遇地震计算时,为更好地模拟工程实际情况,计算模型考虑桩土共同作用,采用结构-承台-桩基整体计算建模方法,进行弹塑性时程分析,关键构件采用截面纤维模型进行计算,能够反映关键构件在大震作用下进入破损阶段之后的行为,可以查看关键构件截面混凝土的开裂和压碎历史,钢材或钢筋的屈服和硬化过程。研究结果表明结构构件均满足抗震性能目标:(1)关键构件的钢材纤维受拉受压均未超过屈服强度,保持弹性工作状态,混凝土纤维受拉开裂,受压未达到屈服强度,同时延性系数 $D/D1$ 小于 1,均说明关键构件满足抗震性能为压弯、抗剪不屈服的目标;(2)桩基的钢筋纤维受拉、受压均未超过屈服强度,混凝土纤维受拉开裂,受压未达到屈服强度,满足抗震性能为压弯、抗剪不屈服的目标;(3)地震作用下,带有桩模型与无桩模型的基底剪力有一定差距,表现为带有桩基模型的地震剪力较大,设计时应考虑桩土共同作用。

关键词:跨座式单轨;高架车站;独柱大悬臂;钢-混组合框架;抗震性能;纤维截面;关键构件;延性系数

中图分类号:U232; U291 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202305160001

Discussion on Seismic Design of Straddle Monorail Elevated Station with Single Column Large Cantilever Steel-concrete Composite Frame

CHEN Zhiqiang, JIN Peng, LIAO Yubiao

(Architectural Engineering Design and Research Institute, China Railway Engineering
Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: Targeting the low seismic redundancy of the single-column large cantilever steel-concrete composite frame in straddle-type monorail elevated station structures, which is rarely applied in high-intensity seismic regions, an engineering case of a straddle-type monorail single-column large cantilever steel-concrete composite frame elevated station is used as the background. to better analyze the entire process of seismic resistance at elevated stations. Rational seismic performance goals are set up according to building codes and urban rail transit standards, and the stress situation during the seismic resistance of components is studied. The finite element analysis software Midas is used for calculation and suitable seismic waves are selected. The elastic time-history analysis method is adopted for frequent earthquakes and medium earthquakes, and the response spectrum analysis of structures for the earthquake effect is

amplified. The results show the components meet the seismic performance goals. For rare earthquake calculations, to better simulate actual engineering situations, the calculation model takes into account of the pile-soil interaction by using

收稿日期:2023-05-16;修回日期:2023-06-13;网络首发日期:
2023-09-08

基金项目:中铁工程设计咨询集团有限公司科研课题(研2017-33)

作者简介:陈志强(1970—),男,高级工程师,1992年毕业于华东交通大学工业与民用建筑工程专业,工学学士,主要从事建筑结构
设计研究工作,E-mail:380840622@qq.com。

an integrated superstructure-bearing platform-pile foundation calculation modeling method and performing an elastic-plastic time-history analysis. Key components are calculated with a fiber cross-section model, reflecting the behaviors of key components after entering the damage stage under rare earthquake effect. The cracking and crushing history of the concrete sections, and the yielding and hardening process of steel or rebars can be reviewed. The results show all structural components meet the seismic performance goals: (1) Steel fibers in key components, whether under tension or compression, do not exceed the yield strength, maintaining an elastic state. Concrete fibers crack under tension but do not reach yield strength under compression. Meanwhile, the ductility coefficient $D/D1$ is less than 1, indicating that key components meet the seismic performance goal of not yielding under compression bending and shear; (2) Rebar fibers in the pile foundation, whether under tension or compression, do not exceed yield strength, and concrete fibers crack under tension but do not reach yield strength under compression, meeting the seismic performance goal of not yielding under compression bending and shear; (3) Under earthquake effect, there is a noticeable difference in base shear between models with piles and models without piles, and models with pile foundations exhibit larger earthquake shear forces. Pile-soil interaction should be considered in the design.

Key words: straddle monorail; elevated station; single-column large cantilever; steel-concrete composite frame; seismic performance; fiber cross section; key components; ductility coefficient

引言

随着我国经济的快速发展,城市化进程不断加速,高架敷设方式以其占地面积小、建造周期较短、建设费用较节省等优点,在城市轨道交通中广泛运用^[1-3]。高架轨道中的高架车站是人流密集区域,是高架轨道中的重要组成部分^[4-5]。其中,高架车站的“桥-建”合一独柱大悬挑钢-混组合框架结构体系因其空间利用率高、占用中间绿化带小、对道路交通影响小、施工方便在国内抗震低烈度地区的轨道交通项目中应用越来越广泛^[6-7]。

独柱大悬挑组合结构车站悬挑长度大、上部荷载重且横轨向体系为静定的大悬臂独柱结构,整体结构冗余度较小^[8-10]。目前,在国内抗震设防烈度 6 度和 7 度地区已有该体系车站的实际应用,但是在 8 度地区,独柱三层大悬挑钢-混组合框架结构车站应用较少。本文通过某跨座式单轨高架车站典型工程实例,分析高烈度地区组合结构抗震计算过程^[11-13],并给出相应的结论。

1 工程概况

某跨座式单轨高架车站由于道路两侧用地条件和路中绿化带宽度均受限制,采用路中高架独柱三层钢-混组合框架结构,钻孔灌注桩基础。

车站为三层结构,纵向柱距采用 13.5 m 和 16 m,车站长度为 75 m,从地面算起,为架空层、站厅层、下夹层、站台层,下文在计算位移及剪力指标时分别简称“一层”“二层”“三层”及“四层”。对于钢-混组合结

构,横向采用单柱对称悬挑结构。墩柱采用矩形钢管-混凝土组合柱,横向主梁采用局部内灌混凝土的箱形组合梁,纵向采用组合梁,楼板采用压型钢板-混凝土组合楼板,站台雨棚采用轻型钢结构。结构设计主要参数见表 1,车站平面及横剖面分别见图 1~图 4,主要构件尺寸见表 2。

表 1 结构设计主要参数
Tab. 1 Main parameters for structural design

设计参数	数值	设计参数	数值
主体结构工作年限	100 年	抗震设防烈度	8 度
结构安全等级	一级	地震基本加速度	0.20g
抗震设防类别	乙类	设计地震分组	第二组
抗震等级	一级	建筑场地土类别	Ⅱ类

表 2 主要构件尺寸
Tab. 2 Main scantling

构件编号	构件名称	截面类型	截面尺寸/mm	材质
Z-1	钢管混凝土柱	矩形	B2500×3000×62×62	Q355C+C40
Z-2	钢管混凝土柱	矩形	B1600×1600×48×48	Q355C+C40
Z-3	钢管混凝土柱	矩形	B800×800×36×36	Q355C+C40
Z-4	钢柱	矩形	B400×400×22×22	Q355C
Z-5	钢柱	焊接 H 型钢	H600×400×16×25	Q355C
ZL-1	钢梁	箱钢管梁	B1000×500×20×30	Q355C
ZL-2	钢梁	箱钢管梁	B950×450×20×30	Q355C
ZL-3	钢梁	箱钢管梁	B800×400×20×30	Q355C
ZL-4	钢梁	热轧 H 型钢	HM488×300	Q355C
ZL-5	钢梁	箱钢管梁	H600×300×16×20	Q355C
CL-1	钢梁	热轧 H 型钢	HM488×300	Q355C
CL-2	钢梁	热轧 H 型钢	HN400×200	Q355C
CL-3	钢梁	焊接 H 型钢	H600×300×16×20	Q355C
GKL1	横向主梁	箱形组合梁	(1 200~2 500)×1 600×36×50	Q355C+C40
GKL1	横向主梁	箱形组合梁	1 200×1 600×28×35	Q355C+C40

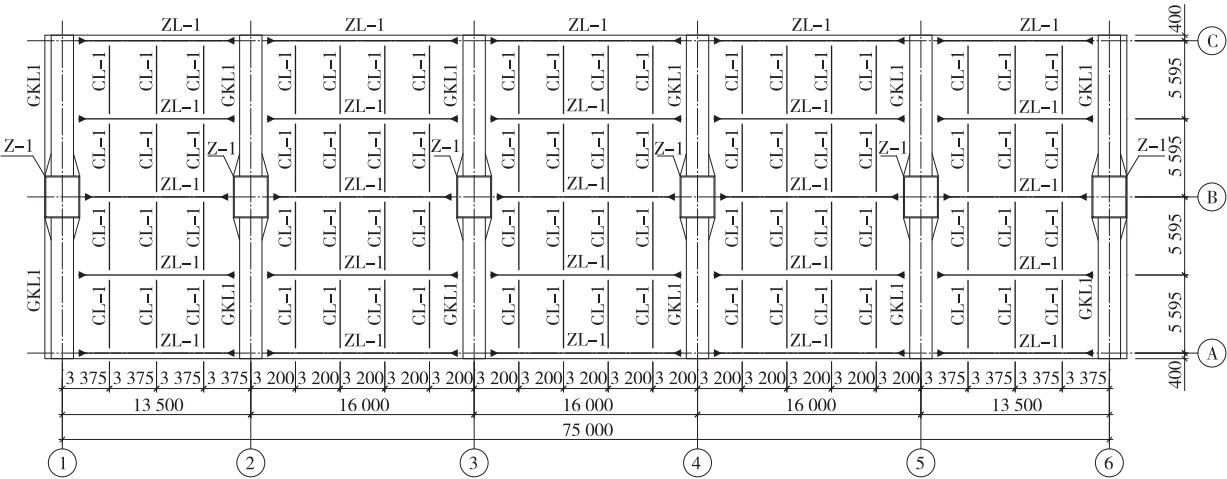


图 1 高架车站站厅层平面 (单位:mm)
Fig. 1 Elevation station hall floor plane (unit: mm)

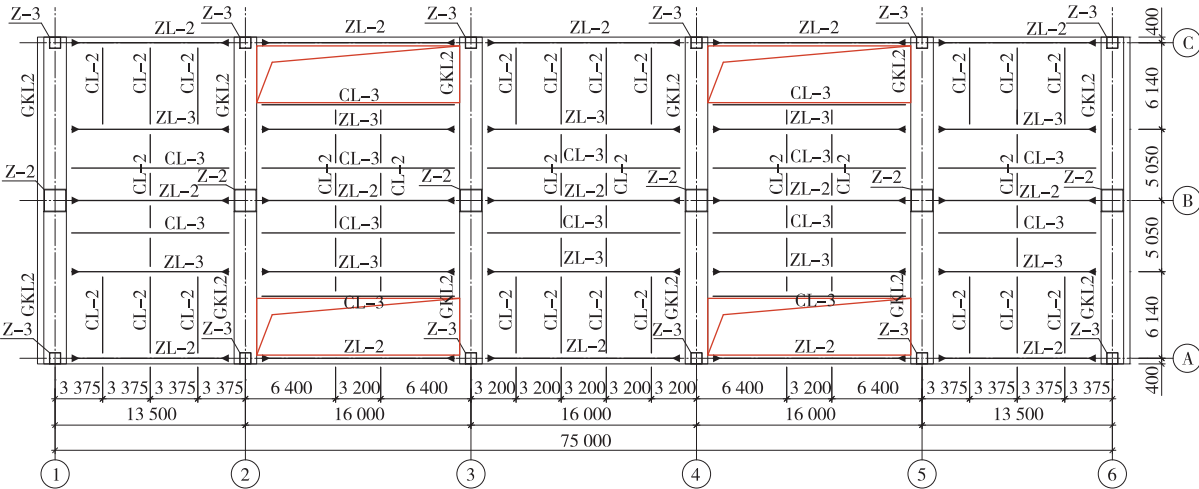


图 2 高架车站下夹层平面 (单位:mm)
Fig. 2 Elevation station mezzanine plane (unit: mm)

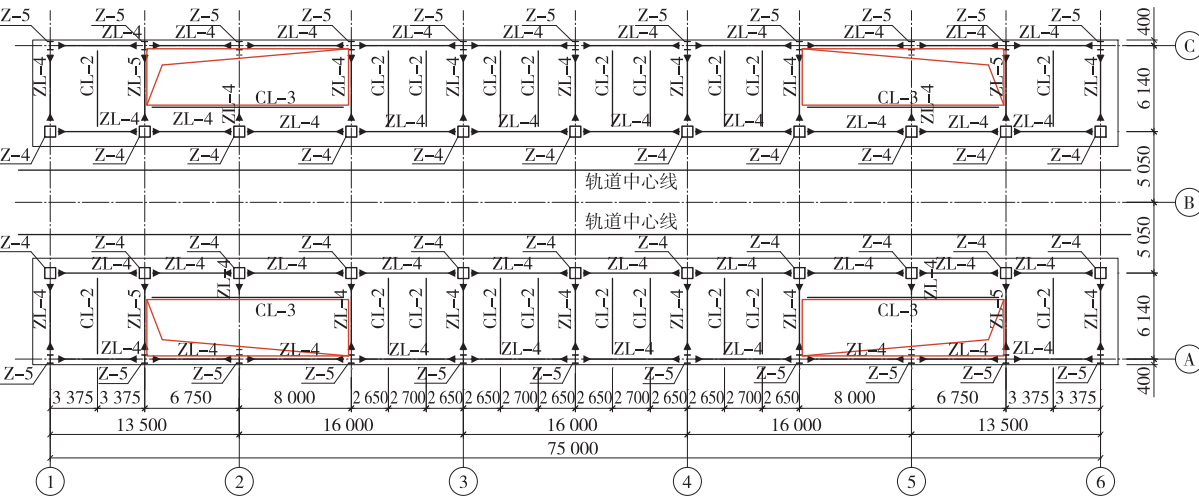


图 3 高架车站站台层平面 (单位:mm)
Fig. 3 Elevation station platform level plane (unit: mm)

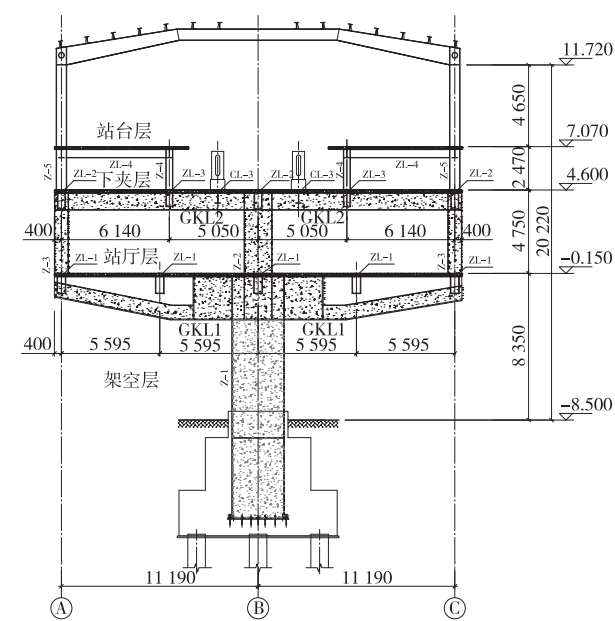


图 4 高架车站横剖面(单位:高程为 m,其余 mm)

Fig. 4 Cross section of elevated station (unit: elevation in m, others in mm)

2 抗震设防目标设定

根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》及相关规范,城市轨道交通结构的抗震性能要求分成下列 3 个等级^[14]。

性能要求 I:地震后不破坏或轻微破坏,应能保持其正常使用功能;结构处于弹性工作阶段;不应因结构

的变形导致轨道的过大变形而影响行车安全。

性能要求 II:地震后可能破坏,经修补,短期内应能恢复其正常使用功能;结构局部进入弹塑性工作阶段。

性能要求 III:地震后可能产生较大破坏,但不应出现局部或整体倒毁,结构处于弹塑性工作阶段。

由于独柱三层钢-混组合框架结构横轨向为独柱悬挑结构,竖向荷载由横向大悬挑传递给墩柱,最终传给基础。当关键构件(墩柱、大悬挑梁)进入弹塑性工作阶段之后很可能引起结构的整体倒塌,在设计时应尽量避免此类构件进入弹塑性工作阶段。因此,根据城市轨道交通结构抗震设计规范,不同地震作用下抗震性能指标如表 3 所示。

表 3 不同等级地震作用下结构构件性能设计指标

Tab. 3 Performance design indexes of structural members under seismic action of different grades

抗震烈度	多遇地震	设防地震	罕遇地震
底层墩柱、底层悬挑横梁、桩基	性能要求 I	性能要求 I	性能要求 II
站厅边柱、盖梁	性能要求 I	性能要求 I	性能要求 II
普通框架柱	性能要求 I	性能要求 I	性能要求 II
普通框架梁	性能要求 I	性能要求 II	性能要求 III

依据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》(2016 年版)附录 M“结构抗震性能设计”的要求进行本工程结构抗震性能设计^[15],抗震性能目标在各地震水准条件下的抗震性能水准要求按照性能 2,如表 4 所示。

表 4 结构构件实现抗震性能要求的参考指标

Tab. 4 Reference indicators for achieving seismic performance requirements of structural components

性能要求	结构抗震性能水准		
	多遇地震	设防地震	罕遇地震
性能 1	完好,变形远小于弹性位移限值	完好,变形小于弹性位移限值	基本完好,变形略大于弹性位移限值
性能 2	完好,变形远小于弹性位移限值	基本完好,变形略大于弹性位移限值	有轻微塑性变形,变形小于 2 倍弹性位移限值
性能 3	完好,变形明显小于弹性位移限值	轻微损坏,变形小于 2 倍弹性位移限值	有明显塑性变形,变形约 4 倍弹性位移限值
性能 4	完好,变形小于弹性位移限值	轻~中等破坏,变形小于 3 倍弹性位移限值	不严重破坏,变形不大于 0.9 倍塑性变形限值

综上所述,依据《城市轨道交通结构抗震设计规范》和《建筑抗震设计规范》的要求,结构各构件在同等级地震作用下的性能设计目标如表 5 所示。

表 5 不同等级地震作用下结构构件性能设计目标

Tab. 5 Performance design objectives of structural components under different levels of earthquake action

地震水准	多遇地震	设防地震	罕遇地震
车站构件	底层组合柱、底层悬挑横梁、桩基	弹性	压弯、抗剪,不屈服
	站厅层中边柱、盖梁	弹性	压弯、抗剪,不屈服
	普通框架柱	弹性	压弯、抗剪,不屈服
	普通框架梁	压弯、抗剪,不屈服	允许进入屈服阶段,但不允许发生破坏
层间最大位移	一层	1/1 000	1/250
	二层	1/550	1/120
	三层	1/300	1/100
性能水平定性描述	完好、无损伤	基本完好、轻微损伤	轻度损伤
结构工作特性	弹性	关键构件弹性,允许部分次要构件屈服	关键构件不屈服,允许部分次要构件进入塑性,控制楼层位移

3 多遇地震分析

3.1 地震波选取

根据规范选取地震动记录,输入 2 组实际地震记录的天然波和 1 组场地合成的人工波(包含三向分量),采用主、次和竖向方向输入法(即 X 、 Y 、 Z 方向依次为主、次、竖向)作为本结构的动力弹塑性分析的输入,其中三向输入峰值比依次为 1 : 0.85 : 0.65(主方向 : 次方向 : 竖向),主方向地震波时程曲线的最大峰值加速度 PGA 为 98 cm/s^2 (设计工作年限为 100 年时,地震作用按照放大 1.4 倍考虑^[16]),次方向地震波时程曲线的最大峰值加速度 PGA 为 83.3 cm/s^2 ,竖方向地震波时程曲线的最大峰值加速度 PGA 为 63.7 cm/s^2 。规范反应谱地震计算采用 PKPM 软件,时程分析地震计算采用 Midas 软件。选取人工波如图 5 所示。

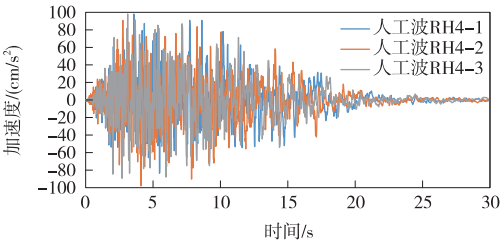


图 5 人工波三方向加速度时程曲线(多遇地震)

Fig. 5 Three-direction acceleration time history curve of artificial waves (frequent earthquake)

依据 GB50011—2010《建筑抗震设计规范》规定,时程分析法时,多组时程曲线的平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法所用的地震影响系数曲线相比,在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于 20%;每条时程曲线计算所得结构基底剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 65%,且平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%,本工程地震波与规范反应谱对比分别如表 6、表 7 所示。

表 6 多遇地震波平均谱与规范反应谱对比

Tab. 6 Comparison between frequent seismic wave average spectrum and code response spectrum

项目	人工波	天然波 1	天然波 2
波名称	RH4	TH025	TH060
持时/s	20.5	28.0	32.3
是否满足	是	是	是
基本周期	第一周期	第二周期	第三周期
时间/s	0.543 4	0.450 5	0.366 3
反应谱影响系数	0.171	0.202	0.224
平均谱影响系数	0.177	0.188	0.223
差值/%	3.5	6.9	0.6

表 7 多遇地震弹性时程与规范反应谱分析的基底剪力

Tab. 7 Base shear force analysis for elastic time history and response spectrum analysis of code response spectrum

项目	X 向 /kN	X 向各波 /反应谱	是否满足 选波要求	Y 向 /kN	Y 向各波 /反应谱	是否满足 选波要求
反应谱	17 083	—	—	11 239	—	—
人工波	18 286	107.4%	满足	12 159	108.2%	满足
天然波 1	18 121	106.1%	满足	12 949	115.1%	满足
天然波 2	18 447	107.9%	满足	13 449	119.7%	满足
平均值	18 285	107.3%	满足	12 852	114.4%	满足

从表 6 和表 7 可知, X 主向最小值为规范反应谱法计算结果的 106.1%, Y 主向最小值为规范反应谱法计算结果的 108.2%;3 组波结构基底剪力平均值 X 主向为反应谱结果的 107.3%, Y 主向为规范反应谱结果的 114.4%,结果满足平均剪力不小于振型分解反应谱法结果的 80%,每条地震波底部剪力不小于规范反应谱法结果的 65%的条件,并且每条地震波输入计算不大于 135%,平均不大于 120%;地震波的持续时间都大于结构基本周期的 10 倍,且所选的天然波和人工波平均反应谱与规范反应谱在主要周期点的地震影响系数相比不超过 20%,因此所选用的地震波满足规范要求。

3.2 层间位移角

多遇地震各组地震激励下结构的层间位移角如表 8 所示。

表 8 多遇地震弹性时程与规范反应谱分析的层间位移角

Tab. 8 Interlayer displacement angle for elastic time history and response spectrum analysis of code response spectrum

项目	X 向层间位移角			Y 向层间位移角		
	一层	二层	三层	一层	二层	三层
反应谱	1/2 790	1/1 577	1/1 028	1/2 721	1/1 175	1/568
RH4	1/2 566	1/1 374	1/909	1/3 083	1/1 330	1/569
TH025	1/2 529	1/1 313	1/786	1/3 348	1/1 432	1/562
TH060	1/2 545	1/1 363	1/829	1/2 450	1/989	1/455
包络	1/2 529	1/1 313	1/786	1/2 450	1/989	1/455
包络/反应谱	110.3%	120.1%	130.8%	111.1%	118.8%	124.8%

由表 8 可知,结构在规范反应谱分析中 X 向最大层间位移角为 1/1 028(第三层), Y 向最大层间位移角为 1/568(第三层);在弹性时程分析中,3 条波的包络值 X 向最大层间位移角为 1/786(第三层), Y 向最大层间位移角为 1/455(第三层),这说明弹性时程分析法和规范反应谱法计算的地震作用下楼层最大层间位移角均小于性能设计目标的要求。

3.3 层间剪力

多遇地震各组地震激励下结构的层间剪力如表

9 所示。

表 9 多遇地震弹性时程与规范反应谱分析的层间剪力
Tab. 9 Interlayer shear force in elastic time history and response spectrum analysis of code response spectrum

项目	X 向层间剪力/kN			Y 向层间剪力/kN		
	一层	二层	三层	一层	二层	三层
反应谱	17 089	12 349	5 774	11 239	8 071	3 818
RH4	18 304	13 097	6 312	12 160	8 218	2 935
TH025	18 105	14 044	6 984	12 894	8 396	3 675
TH060	18 462	13 210	6 230	13 450	9 688	4 300
包络	18 462	14 044	6 984	13 450	9 688	4 300
包络/反应谱	108.0%	113.7%	121.0%	119.7%	120.0%	112.6%
层剪力放大系数	1.08	1.14	1.21	1.20	1.20	1.13

由表 9 可知,弹性时程分析中 3 条波的包络值,X 和 Y 向的楼层剪力均大于振型分解反应谱计算的结果。X 向一层、二层、三层楼层剪力分别为振型分解反应谱的 1.08、1.14、1.21 倍。Y 向一层、二层、三层楼层剪力分别为振型分解反应谱的 1.20、1.20、1.13 倍。根据规范要求,计算结果取时程法的包络值和振型分解反应谱法的较大值,故振型分解反应谱法计算时采用放大系数法,X 向地震作用下一层、二层、三层放大系数分别取 1.08、1.14、1.21,Y 向地震作用下一层、二层、三层的楼层剪力放大系数分别取 1.20、1.20、1.13。以 YJK 计算软件为例,在后处理地震信息中输入放大系数,对应每层的层号根据上表 X、Y 各方向放大系数输入放大信息。

4 设防地震分析

采用振型分解反应谱法进行结构的中震弹性设计。根据多遇地震分析,X 向地震作用一层、二层、三层放大系数分别取 1.08、1.14、1.21,Y 向地震作用一层、二层、三层的楼层剪力放大系数分别取 1.20、1.20、1.13,按振型分解反应谱法进行设计,得到结构层间位移角如表 10 所示。

表 10 中震弹性分析的层间位移角
Tab. 10 Interlayer displacement angle in elastic analysis of moderate earthquakes

项目	X 向层间位移角			Y 向层间位移角		
	一层	二层	三层	一层	二层	三层
反应谱	1/1 203	1/659	1/502	1/1 513	1/677	1/343

由表 10 可知,结构在中震作用下 X 向最大层间位移角为 1/502 (第三层),Y 向最大层间位移角为 1/343 (第三层),均小于预设的抗震性能目标的要求,同时构件的承载力验算均满足规范要求。

5 罕遇地震分析

5.1 模型建立

根据城市轨道交通及桥梁抗震规范要求,对采用桩基的车站结构,计算模型需要考虑桩土共同作用,采用结构-承台-桩基整体计算建模^[17-19]的方法。利用 Midas Gen 建立带有桩基的整体模型。承台及桩约束按弹性支承考虑,其水平抗力系数随深度线性增加(“m”法^[20]),与水平抗力系数的比例系数 m 值成正比,模型如图 6 所示。

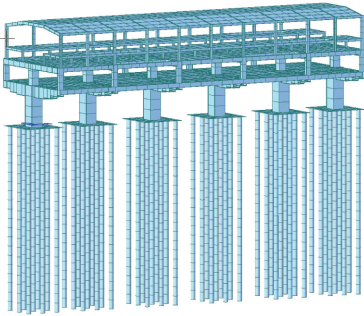


图 6 高架车站 Midas 三维模型(含桩基)
Fig. 6 3D model of elevated station Midas (including pile foundation)

5.2 地震波选取

选取地震波的原则可参考多遇地震分析,输入 2 组实际地震记录的天然波和 1 组场地合成的人工波(包含三向分量),采用主、次和竖向方向输入法(即 X、Y、Z 方向依次为主、次、竖向)作为本结构的动力弹塑性分析的输入,其中三向输入峰值比依次为 1 : 0.85 : 0.65 (主方向 : 次方向 : 竖向),主方向地震波时程曲线的最大峰值加速度 PGA 为 400 cm/s²,次方向地震波时程曲线的最大峰值加速度 PGA 为 340 cm/s²,竖方向地震波时程曲线的最大峰值加速度 PGA 为 260 cm/s²。时程分析地震计算采用 Midas 软件。选取人工波如图 7 所示。

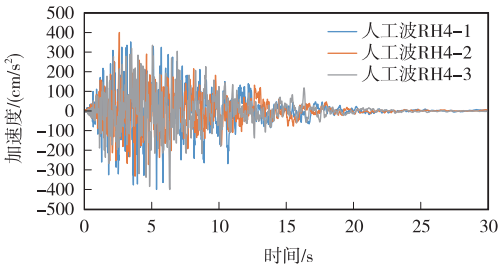


图 7 人工波三方向加速度时程曲线(罕遇地震)
Fig. 7 Three-direction acceleration time history curve of artificial waves (rare earthquake)

罕遇地震时程分析时,地震波选取见 3.1 节。本

工程罕遇地震波与规范反应谱参数对比分别如表 11、表 12 所示。

表 11 罕遇地震波平均谱与规范反应谱对比
Tab. 11 Comparison between rare seismic wave average spectrum and code response spectrum

项目	人工波	天然波 1	天然波 2
波名称	RH4	TH047	TH092
持时/s	17.4	29.8	53.8
是否满足	是	是	是
基本周期	第一周期	第二周期	第三周期
时间/s	0.543 4	0.450 5	0.366 3
反应谱影响系数	0.764	0.891	0.900
平均谱影响系数	0.743	0.835	0.840
差值/%	2.7	6.3	6.6

表 12 罕遇地震弹性时程与规范反应谱分析的基底剪力
Tab. 12 Base shear force analysis for elastic time history and response spectrum of code response spectrum

项目	X 向 /kN	X 向各波 /反应谱	是否满足 选波要求	Y 向 /kN	Y 向各波 /反应谱	是否满足 选波要求
反应谱	65 046	—	—	41 022	—	—
人工波	71 455	109.9%	满足	48 198	117.4%	满足
天然波 1	62 575	96.2%	满足	43 840	106.9%	满足
天然波 2	71 084	109.3%	满足	46 016	112.2%	满足
平均值	68 371	105.1%	满足	46 018	112.2%	满足

从表 11 和表 12 可知,X 主向最小值为反应谱法计算结果的 96.2%,Y 主向最小为反应谱法计算结果的 106.9%;3 组波结构基底剪力平均值 X 主向为规范反应谱结果的 105.1%,Y 主向为反应谱结果的 112.2%,结果满足 3.1 节选波的原则要求,因此所选用的地震波满足规范要求。

5.3 材料的本构关系

动力时程分析中地震波的选取原则参考多遇地震分析。动力时程分析由于输入为地震波整个过程,可以真实反映各个时刻地震作用引起的结构响应,包括变形、应力、损伤形态(开裂和破坏)等,也可以反映出铰顺序,故应构建更加精细的材料本构模型来满足分析需要。本车站结构采用的材料本构模型参数如图 8、图 9 所示^[21-22]。

构件采用截面纤维模型^[23-25],可以反映截面材料屈服(开裂)以及强化(压碎)之后对截面刚度的影响,能很好地反映结构构件在大震作用下进入破损阶段之后的行为,满足结构在多向地震作用下构件截面多个内力相互作用的情况,能够直观地观测到截面上各种材料的工作状态,查看混凝土的开裂和压碎历史,钢材或钢筋的屈服和硬化过程。典型构件的纤维截面模型划分如图 10 所示。

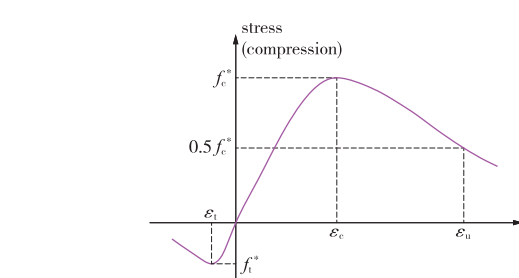


图 8 混凝土骨架曲线
Fig. 8 Concrete skeleton curve

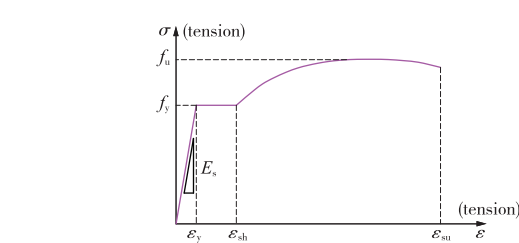


图 9 钢材的 Park 模型
Fig. 9 Park model of steel

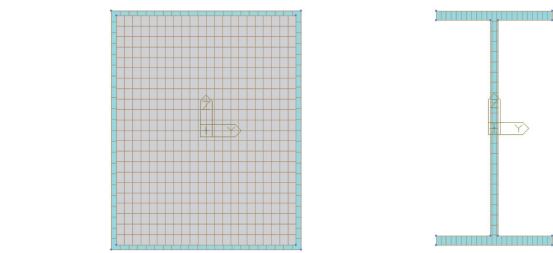


图 10 矩形钢管混凝土柱和工字梁的纤维截面模型
Fig. 10 Fiber section model of concrete-filled rectangular steel tubular column and I-beam

5.4 层间剪力

根据带有桩基 Midas Gen 模型在各地震波作用下的最大剪力,统计了各层最大剪力,并对比弹性时程分析的数据,见表 13。由表 13 可知,弹塑性分析的楼层剪力与弹性的结果基本相近,带有桩基的模型其基底剪力比值为 91.7%~113.7%,无桩基的模型其基底剪力比值为 87.9%~100.7%,表明在大震作用下,车站结构在有桩基和无桩基的模型下主要抗侧力体系的塑性发展很小,具有良好的抗震性能,但是结构的基底剪力随着桩基建入反而增大,这是因为整个结构在横桥向的受力类似于悬臂结构,桩基的建入加大上部结构的鞭梢效应,地震力增大。

5.5 结构关键及普通竖向构件出铰结果与屈服(开裂)状态

本工程中底层墩柱、底层悬挑横梁、桩基、站厅层中边柱及盖梁为关键构件,其余构件为普通构件。结构构件某个截面从屈服开始到达最大承载能力或达到

以后而承载力没有显著下降期间的变形能力,即为延性。在抗震设计中,延性是一个重要的指标,通常用延性系数 $D/D1$ 来表示。在 Midas 分析中, $D1$ 代表构件边缘屈服时的弯矩变形值。

表 13 大震弹性时程与弹塑性分析的楼层剪力
Tab. 13 Elastic time history of large earthquakes and floor shear force of elastic-plastic analysis

项目		弹性时程分析			弹塑性时程分析			弹塑性/弹性		
地震波	方向	一层	二层	三层	一层	二层	三层	一层	二层	三层
EX-RH	X 向	80 456	57 055	22 970	73 759	56 896	22 923	91.7%	99.7%	99.8%
EY-RH	Y 向	51 602	28 068	9 900	58 657	32 918	10 057	113.7%	117.3%	101.6%
EX-TH1	X 向	75 645	50 342	18 872	71 006	49 763	18 673	93.9%	98.8%	98.9%
EY-TH1	Y 向	51 006	25 346	9 404	46 833	27 392	9 230	91.8%	108.1%	98.1%
EX-TH2	X 向	74 370	47 647	17 934	72 671	47 077	17 509	97.7%	98.8%	97.6%
EY-TH2	Y 向	43 371	24 906	8 494	44 403	27 228	9 606	102.4%	109.3%	113.1%
包络值(带桩)	X 向	80 456	57 055	22 970	73 759	56 896	22 923	91.7%	99.7%	99.8%
	Y 向	51 602	28 068	9 900	58 657	32 918	10 057	113.7%	117.3%	101.6%
包络值(无桩)	X 向	71 444	48 884	22 872	68 399	49 249	21 997	95.7%	100.7%	96.2%
	Y 向	48 399	33 742	13 834	45 714	29 667	13 012	94.5%	87.9%	94.1%

图 11 以人工波为例给出了关键构架及普通竖向构件的延性系数,其余地震工况与人工波类似。由图 11 可知,在 3 条地震波下,结构主要出铰的结构构件基本相同,在极限情况下,关键构件总是底层柱底端先进入屈服阶段,其次是柱顶端,然后是站厅层中间柱和边柱。关键构件及普通竖向构件的 $D/D1$ 延性系数均小于 1.0,结构关键及普通竖向构件都处于弹性工作状态,满足大震不屈服的性能目标,保证了结构的安全性。

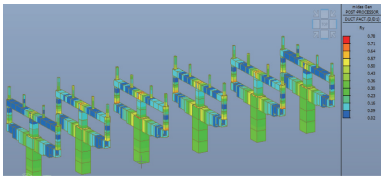


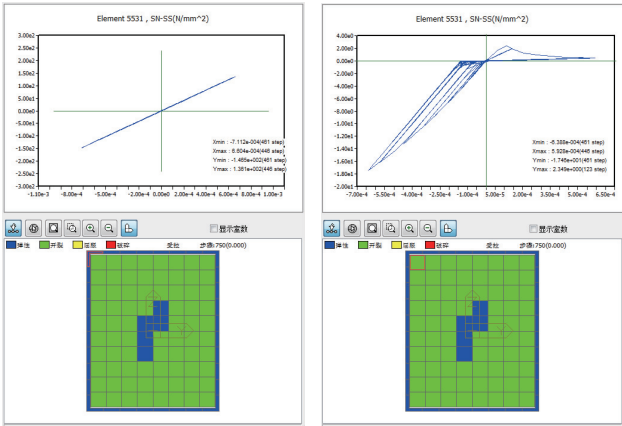
图 11 人工波 EX-RH 工况下延性系数

Fig. 11 Ductility coefficient under artificial wave EX-RH working condition

5.6 底层组合柱、悬挑梁及桩基纤维截面结果

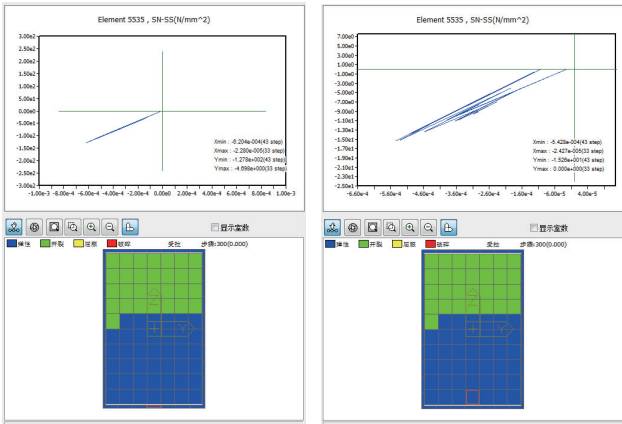
为更详细评估底层组合柱、悬挑梁及桩基关键构件在大震作用下的抗震性能应力应变情况,选取受力最大的部位,给出在人工波工况下,时间历程中纤维截面应力-应变曲线变化,分别如图 12~图 14 所示。

在人工波 EX-RH 工况下,从图 12、图 13 得到如下结果。(1)底层组合柱钢材纤维最大拉应力 $\sigma = 136.1 \text{ MPa}$,最大压应力 $\sigma = 146.5 \text{ MPa}$,均小于 $f_y = 345 \text{ MPa}$,钢材处于弹性阶段;底层柱混凝土已经开裂,混凝土受拉退出工作,最大压应力 $f = 17.5 \text{ MPa}$,小于 $f_{ck} = 26.9 \text{ MPa}$,柱内混凝土受压状态下处于弹性阶段。(2)底层悬挑梁钢材纤维最大拉应力 $\sigma = 125.1 \text{ MPa}$,最大压应力 $\sigma = 127.8 \text{ MPa}$,均小于 $f_y = 345 \text{ MPa}$,钢材处于弹性阶段;悬臂梁混凝土上部部分



(a) 钢材应力-应变 (b) 混凝土应力-应变

图 12 底层组合柱 EX-RH 工况材料纤维应力-应变曲线
Fig. 12 Material fiber stress-strain curve of bottom composite column under EX-RH working condition

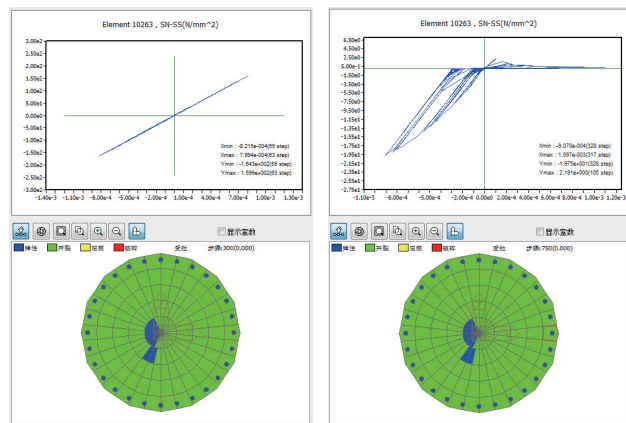


(a) 钢材应力-应变 (b) 混凝土应力-应变

图 13 底层悬挑梁 EX-RH 材料纤维工况应力-应变曲线
Fig. 13 Material fiber stress-strain curve of bottom cantilever beam under EX-RH working condition

开裂,此部分混凝土受拉退出工作,下部混凝土纤维最

大压应力 $f = 15.3 \text{ MPa}$, 小于 $f_{ck} = 26.9 \text{ MPa}$, 此部分混凝土受压状态下处于弹性阶段。在整个时间历程中, 底层组合柱和悬挑梁在 EX-RH 工况下, 混凝土截面开裂, 钢材和混凝土受压未屈服, 保持弹性工作状态, 满足大震不屈服的性能目标。



(a) 钢材应力-应变

(b) 混凝土应力-应变

图 14 桩基 EX-RH 材料纤维工况应力-应变曲线

Fig. 16 Material fiber stress-strain curve of pile foundation under EX-RH working condition

由图 14 可知, 在人工波 EX-RH 工况下, 受力最大的桩基钢筋纤维最大拉应力 $\sigma = 159.9 \text{ MPa}$, 最大压应力 $\sigma = 164.3 \text{ MPa}$, 均小于 $f_y = 400 \text{ MPa}$, 钢材处于弹性阶段; 桩基混凝土已经开裂, 混凝土受拉退出工作, 最大压应力 $f = 19.7 \text{ MPa}$, 小于 $f_{ck} = 26.9 \text{ MPa}$, 柱内混凝土受压状态下处于弹性阶段。在整个时间历程中, 桩基在 EX-RH 工况下, 混凝土截面开裂, 钢筋和混凝土受压未屈服, 保持弹性工作状态。

6 结论

跨座式单轨高架车站创新性对关键构件采用纤维模型进行罕遇地震分析, 得出构件整个时间历程的应力、应变曲线, 主要研究结论如下。

(1) 底层组合柱、底层悬挑横梁的预期性能目标为压弯、抗剪不屈服, 根据延性系数列表及纤维截面图示结果, 钢材纤维受拉受压均未达到屈服强度, 保持弹性工作状态; 混凝土纤维受拉开裂, 受压未达到屈服强度, 保持弹性工作状态, 总体为构件保持弹性工作状态。

(2) 站厅层中边柱、盖梁的预期性能目标为压弯、抗剪不屈服, 根据关键构件及普通竖向构件延性系数结果, 中边柱和盖梁的 D/D_1 均小于 1.0, 此部分构件还处于弹性工作状态。

(3) 桩基的预期性能目标为压弯、抗剪不屈服, 根据纤维截面模型的结果, 钢筋纤维受拉受压均未达到

屈服强度, 保持弹性工作状态; 混凝土纤维受拉开裂, 受压未达到屈服强度, 保持弹性工作状态, 总体为构件保持弹性工作状态。

(4) 地震作用下, 带有桩模型与无桩模型的基底剪力有一定差距, 表现为带有桩基模型的地震剪力较大, 基于独柱长悬臂结构体系的重要性, 从结构的安全性出发, 设计时应考虑桩土共同作用, 土弹簧刚度按较小值进行计算, 并进行抗震性能化设计。

参考文献:

- [1] 张婷, 曹永刚, 赵岩, 等. 芜湖市轨道交通工程路中高架车站设计 & 创新[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(5): 109-116.
ZHANG Ting, CAO Yonggang, ZHAO Yan, et al. The Design and Innovation of Elevated Stations of Wuhu Rail Transit Project Located in the Middle of Road[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(5): 109-116.
- [2] 雷慧锋. 芜湖跨座式单轨交通技术发展及节点工程方案研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 5-11, 36.
LEI Huifeng. Research on the Technology Development and Node Engineering Schemes of Wuhu Straddle Monorail Transit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(5): 5-11, 36.
- [3] 周江天, 胡江民. 芜湖城市轨道交通 2 号线总体技术研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 12-19, 24.
ZHOU Jiangtian, HU Jiangmin. Research on Overall Technology of Wuhu Urban Rail Transit Line 2[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(5): 12-19, 24.
- [4] 尧云涛, 陈骥, 杨奇. 成都轨道交通 10 号线高架车站主体结构设计[J]. 浙江建筑, 2018, 35(1): 8-11.
YAO Yuntao, CHEN Ji, YANG Qi. Design of Major Structure for the Elevated Station of the 10th Rail Transit Line in Chengdu[J]. Zhejiang Construction, 2018, 35(1): 8-11.
- [5] 赵丹, 庄旺, 安永林, 等. 钢混组合结构地铁高架车站墩柱间距影响研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5): 103-108.
ZHAO Dan, ZHUANG Wang, AN Yonglin, et al. Research on the Influence of the Distance between Columns in the Elevated Metro Station with the Steel-concrete Composite Structure Form[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(5): 103-108.
- [6] 史振云, 黄秀, 李雪源. 独柱式长悬臂高架车站结构设计[J]. 建筑科学, 2018, 34(1): 130-134.
SHI Zhenyun, HUANG Xiu, LI Xueyuan. Structure design of single-column and Long Cantilever Elevated Station[J]. Building Science, 2018, 34(1): 130-134.
- [7] 赵丹, 聂小沅, 陈立, 等. 长悬臂岛式地铁高架车站抗震性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1501-1507.
ZHAO Dan, NIE Xiaoyuan, CHEN Li, et al. Research on the Seismic Performance of Island Elevated Subway Station with Long Cantilever[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1501-1507.
- [8] 高修建, 刘强. 独柱高架车站抗震性能化设计及节点研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(2): 96-102.
GAO Xiujian, LIU Qiang. Research on the Performance-based Seismic Design and Joint of Single Column Elevated Station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(2): 96-102.

- [9] 高杰. 青岛轨道交通独柱高架车站抗震设计关键技术研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 154-159.
GAO Jie. Research on Key Technology of Seismic Design for Single Column Elevated Station in Qingdao Rail Transit[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7): 154-159.
- [10] 李宗凯. 建-桥合建高架车站性能化设计方法及算例[J]. 建筑结构, 2020, 50(11): 46-51.
LI Zongkai. Performance-based Seismic Design Method and Example for Integrated Building-bridge Elevated Station[J]. Building Structure, 2020, 50(11): 46-51.
- [11] 马福东. 基于不同基础模拟方式的钢-混凝土组合高架独柱车站抗震分析探讨[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(1): 122-127.
MA Fudong. Seismic Analysis of Elevated Steel-concrete Composite Single Pillar Station Based on Models with Different Foundation Simulation[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(1): 122-127.
- [12] 中国城市轨道交通协会. 轻型跨座式单轨交通设计导则: T/CA-MET 04001—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [13] 廖宇飏. “桥建合一”独柱大悬臂高架车站设计要点研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(5): 120-124.
LIAO Yubiao. The Design of Elevated Station with Single Pillar and Long Cantilever which Serving as a Combination Structure of Station and Bridge[J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(5): 120-124.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010(2016版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [16] 中国工程建设标准化协会. 建筑工程抗震性态设计通则(试用): CECS 160—2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [17] MAHESHWARI B K, SARKAR R. Seismic Behavior of Soil-Pile-Structure Interaction in Liquefiable Soils: Parametric Study[J]. International journal of geomechanics, 2011, 11(4): 335-347.
- [18] 张永亮, 徐瑾, 刘聪聪, 等. 承台-桩-土作用下铁路桥梁桩基础地震反应[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 30-35.
ZHANG Yongliang, XU Jin, LIU Congcong, et al. Seismic Response of Pile Foundation of Railway Bridge Considering Cap-pile-soil Interaction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(5): 30-35.
- [19] 符成, 朱俊, 方波. 桩-土-承台相互作用的有限元简化模型[J]. 水运工程, 2018(11): 193-198.
FU Cheng, ZHU Jun, FANG Bo. Simplified Finite Element Model of Pile-soil-base Slab Interaction[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(11): 193-198.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [21] 许立言, 聂建国, 丁然, 等. 独柱高架站台组合结构体系设计及分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S1): 34-41.
XU Liyan, NIE Jianguo, DING Ran, et al. Design and Analysis on Composite Structural System of Single-column Elevated Station[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S1): 34-41.
- [22] 梁辉, 彭刚, 邹三兵, 等. 循环荷载下混凝土应力-应变全曲线研究[J]. 土木工程与管理学报, 2014(4): 55-59.
LIANG Hui, PENG Gang, ZOU Sanbing, et al. Research on the Stress-strain Curve of the Concrete under Cyclic Loading and Unloading[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2014, 31(4): 55-59.
- [23] 陶慕轩, 丁然, 潘文豪, 等. 传统纤维模型的一些新发展[J]. 工程力学, 2018, 35(3): 1-21.
TAO Muxuan, DING Ran, PAN Wenhao, et al. Some Advances in Conventional Fiber beam-column Model[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 1-21.
- [24] 欧智菁, 林建茂, 谢铭勤, 等. 罕遇地震下钢管混凝土格构式高墩连续梁桥抗震简化分析方法研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(1): 132-139.
OU Zhijing, LIN Jianmao, XIE Mingqin, et al. Research on Simplified Methods for Seismic Analysis of Continuous Girder Bridge with High Piers of Concrete Filled Steel Tubular Laced Column under Rare Earthquakes[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(1): 132-139.
- [25] KOSTIC S M, FILIPPOU F C. Filippou. Section Discretization of Fiber Beam-Column Elements for Cyclic Inelastic Response[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(5): 592-601.

(编辑: 王婷)