

框架结构中折板楼梯的抗震性能分析

陈 希¹, 王淮峰², 楼梦麟², 翟永梅³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 结构工程与防
灾研究所, 上海 200092; 3. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 通过 ANSYS 数值模拟, 对比了纯框架结构、带直板楼梯或带折板楼梯框架结构的振动特性. 建议框架的楼梯设计尽量采用折板楼梯, 并且使平台板与框架柱不连接或弱连接. 这样可以削弱楼梯在水平地震作用下的“斜撑”效应, 减弱楼梯参与整体结构受力的性能, 减轻地震作用在框架间分配不均的现象, 进而减小楼梯构件内力及其设计难度, 并且使楼梯间的框架柱不再会形成短柱, 同时降低位移限值的保守度, 减少浪费. 通过大量数据寻找出应力的变化规律, 给出折板楼梯设计时需要的一些尺寸的建议值.

关键词: 折板楼梯; ANSYS; 平台梁; 框架

中图分类号: TU 375.4

文献标识码: A

Analysis on Seismic Performance of Folded-slab Stair

CHEN Xi¹, WANG Huai Feng², LOU Menglin², ZHAI Yongmei³

(1. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A comparative study was made of the vibration performances of frame structures without stair tread, with straight stair tread or with folded stair tread by ANSYS numerical simulation. The stair with folded slab was proposed to adopt while designing stair in frame structure. Landing board and frame column were proposed to be separated as well. With the method, the *K*-effect of stairs during earthquake would be weakened and the stairs' capability to take part in the whole structure decreases, too. The mal-distribution of seismic force among frames would be lightened. As a result, the internal force of the stair components and the difficulty of design would diminish.

However, frame columns would not be changed into short columns. Meanwhile, the conservative degree of allowable value of drift angle would be reduced. Based on a lot of data, the variation law of stress was investigated, and proposals on dimensions of folded stair were put forward.

Key words: folded-slab stair; ANSYS; landing beam; frame

2008 年以前, 工程设计者大多只考虑楼梯部位楼面开洞及竖向荷载的传递, 几乎不考虑楼梯对整体结构抗侧刚度的影响. 一般认为楼梯间部位的楼面开洞削弱了层刚度, 但梯板(梁)又增大了层刚度, 两者大体上相互抵消.

汶川大地震中, 学校和医院建筑成了重灾区, 而学校建筑中, 教学楼是重灾区; 教学楼中楼梯间是重灾区^[1]. 楼梯部位的刚度较大, 分配的地震作用大. 根据水平地震作用的分配原则: 抵抗水平地震作用构件的刚度越大, 其分配的水平地震作用也就越大. 而在设计时设计师又没有充分考虑到楼梯的斜撑效应, 导致楼梯部位构件的承载力不足. 楼梯间作为地震疏散通道在地震中的性能表现, 是土木工作者必须认真对待和考虑的问题. 中华人民共和国住房和城乡建设部公告第 71 号(2008 年 8 月 1 日)对国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)进行了局部修订, 其中第 3.6.6, 3.7.3, 7.1.7, 7.3.1, 7.3.8 条规定均与楼梯有关, 第 3.6.6 条中提到: “计算中应考虑楼梯构件的影响”. 对应的修订说明为: “本次修订, 考虑到楼梯的梯板等具有斜撑的受力状态, 对结构的整体刚度有较明显的影响, 建议在结构计算中予以适当考虑.”

梯板作为斜撑构件, 地震作用下破坏比较严重,

收稿日期: 2010-01-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2008BAJ08B14); 上海市建设科技发展基金(2007-014)

第一作者: 陈 希(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为结构时变分析与优化. E-mail: kukuwindy@163.com

通讯作者: 王淮峰(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为防灾减灾工程. E-mail: forgotten.wang@yahoo.com.cn

一般为拉断破坏,如图 1^[2-3].

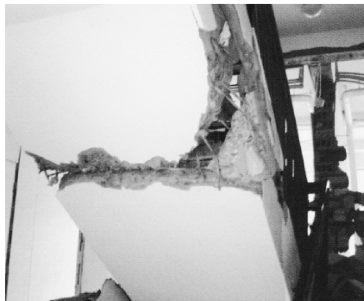


图 1 楼梯板的破坏

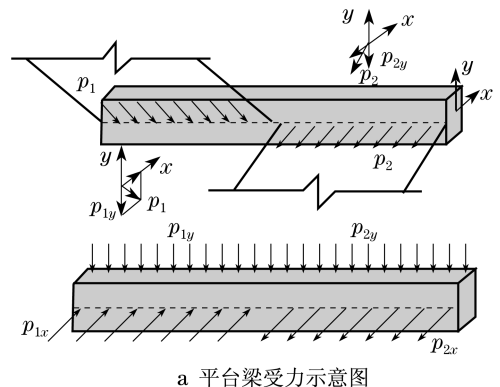
Fig.1 Damage of stair slab

梯板就好像是个“紧箍咒”,将上下平台板构件之间“拴住”了;其内力对上下连接的平台板之间的位移差非常敏感.上下平台板的水平向位移差和竖直向位移差都可以导致梯板出现巨大的轴向力.例如:假定楼梯板与水平方向夹角 $\alpha = 37^\circ$,梯板长 3 000 mm,宽 1 200 mm,厚 100 mm,上下平台板间有一个水平位移差 $\Delta h = 1$ mm,假定混凝土处于弹性状态下,则产生的正应力 $\sigma = 8$ MPa,这已经远远超过了混凝土的抗拉强度;如果这个轴力完全由钢筋来承受,按热轧一级圆钢(屈服强度 235 MPa)考虑,则需要 59 根 10 mm 的钢筋.一般跨中底筋约为楼面板底筋的 2 倍,其两端面筋也大于楼面板,因此设计中梯板比其他楼板配筋更多^[4].

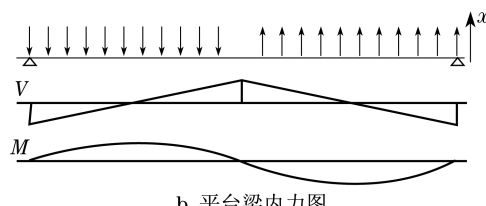
如图 2 所示, M 为弯矩, V 为剪力, p_1 , p_2 分别为上下梯段对平台梁的应力.由图可知,梯板的轴力使平台梁平面外受弯、受剪,而平台梁宽度一般很小,大多在 200~250 mm,平面外抗弯及抗剪能力极低.所以在汶川地震的重灾区,包括中等烈度区都有大量的楼梯在平台处发生破坏,如图 3^[5].

鉴于楼梯构件受力复杂和内力数值较大,楼梯板为拉弯、压弯构件(轴力很大),楼梯梁为弯剪扭构件(剪力很大),楼梯柱为双向剪切、受弯构件.如果按常规设计方法进行截面设计和配筋,势必导致楼梯构件截面尺寸和配筋量极大增加,甚至出现楼梯梁板的截面尺寸和配筋达到工业厂房的水平,这在建筑上可行性值得商榷.此外,楼梯构件截面增大后,楼梯间抗侧刚度增大,将“吸引”更多的地震作用,反而使楼梯构件的受力更为不利,加大了潜在危险性.

楼梯的存在,就像框架抗震墙结构中的抗震墙一样,起到了第一道防线的作用,这是有利的一面;但是,楼梯的设计若不合理,又常常导致楼梯破坏严重,并使得框架结构受损伤,这是不利的一面,应通过改进设计来克服它.



a 平台梁受力示意图



b 平台梁内力图

图 2 平台梁受力图

Fig.2 Force diagram of landing beam

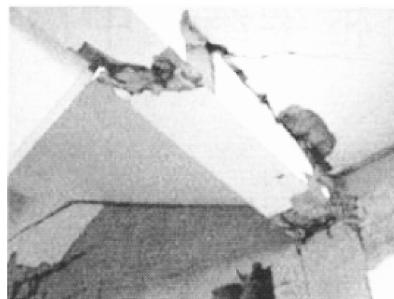


图 3 平台梁的破坏

Fig.3 Damage of landing beam

在地震作用下,楼梯构件的受力状态越简单,对于保护楼梯构件越有利.通过以下的研究,本文建议,设计楼梯时不要采用直板楼梯,而尽量采用折板楼梯,并且使平台板与框架柱不连接或弱连接,这样可以削弱楼梯在水平地震作用下的“斜撑”效应,减弱楼梯参与整体结构受力的性能,进而减小楼梯构件内力及其设计难度,并且使楼梯间的框架柱不再会形成短柱.(框架结构的抗侧刚度较小,因此楼梯对其整体结构受力产生的影响最大.而将楼梯作为一个梯筒形式的框架抗震墙和抗震墙结构,楼梯的影响则相应较小,对筒体结构的影响就更小^[3,6].因此,本文仅对框架结构进行分析.)

1 研究对象

图 4、图 5 分别为上海某中学教学楼标准层平面和结构布置图,整个建筑为 6 层,层高均为 3.6 m,混

凝土强度等级 C30,弹性模量 3×10^4 MPa,主要构件截面尺寸:框架柱 500 mm \times 500 mm,横向框架梁 250 mm \times 600 mm,纵向框架梁 250 mm \times 400 mm,平台梁 250 mm \times 400 mm,梯柱 250 mm \times 250 mm,走廊边梁 250 mm \times 400 mm. 其楼梯为直板楼梯.

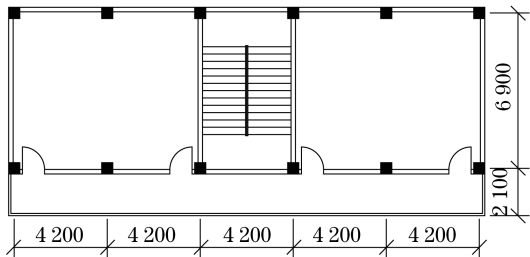


图 4 教学楼平面图(单位:mm)

Fig.4 Plane of class buildings (unit:mm)

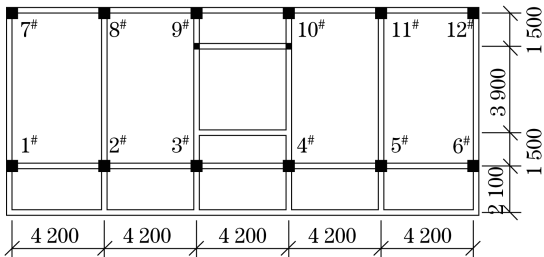


图 5 教学楼结构图(单位:mm)

Fig.5 Structure of class buildings (unit:mm)

2 建立模型

利用大型通用软件 ANSYS 建模分析,梁柱采用 BEAM188 单元模拟,楼板和梯板采用 SHELL63 单元模拟. Beam188 单元是一个 2 节点的 3 维线性梁,每个节点有 6 或 7 个自由度,它基于 Timoshenko 梁理论,能考虑剪切变形的影响. SHELL63 单元是一个 4 节点的 3 维弹性壳单元,每个节点具有 6 个自由度,既具有弯曲能力又具有膜力,可以承受平面内荷载和法向荷载.

利用 ANSYS 分别建模,楼梯分别采用直板楼梯(stair1)和折板楼梯(stair2),其他部分相同. 同时建立一相同但没有楼梯的框架模型(stair0). 对以上 3 个模型进行多遇地震下的弹性时程分析. 地震波采用由拟合反应谱而来的上海人工波,时间间隔 0.01 s,共 3 686 点,最大加速度峰值 35.0 cm \cdot s⁻²,重力荷载代表值取 1.0 恒荷载 + 0.5 活荷载,其中恒荷载取 4.8 kN,活荷载取 2.5 kN.

图 6 为作者建议的折板楼梯的剖面图. 注意,平台板不与框架柱相连,并且有一定宽度的缝隙,防止

在地震作用下碰撞产生破坏. 缝隙的最小宽度建议取 $[\theta_p] \cdot H/2$,其中 $[\theta_p]$ 为钢筋混凝土框架结构弹性层间位移角限值.

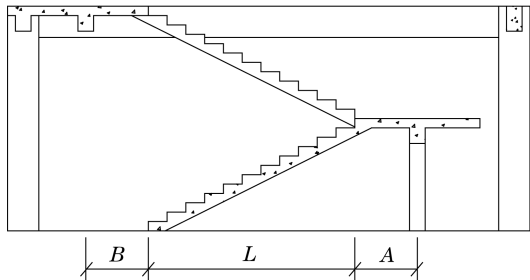


图 6 折板楼梯剖面图

Fig.6 Cross-section of folded-slab stair

3 计算结果及分析

结果数据见表 1,2 及图 7—11.

表 1 平台梁及梯段板中点第一主应力
Tab.1 Stress of landing beam and slabs

第一主应力	楼层	主应力/Pa		相对值 ¹⁾ /%
		stair1	stair2	
平台梁 中点	6	194 840	64 631	33.2
	5	350 839	117 035	33.4
	4	443 853	167 726	37.8
	3	482 800	205 663	42.6
	2	599 881	222 065	37.0
	1	531 434	159 700	30.1
梯段板 中点	6.0	1 209 480	799 154	66.1
	5.5	994 291	846 447	85.1
	5.0	2 068 670	1 282 340	62.0
	4.5	1 685 250	1 295 330	76.9
	4.0	2 707 680	1 715 550	63.4
	3.5	2 076 990	1 783 070	85.8
	3.0	3 021 630	1 964 070	65.0
	2.5	2 269 280	2 062 720	90.9
	2.0	3 456 620	2 103 790	60.9
	1.5	2 669 500	2 374 560	89.0
	1.0	3 176 070	1 490 350	46.9
	0.5	2 543 420	1 513 040	59.5

1)相对值为 stair2 与 stair1 主应力的比值.

由表 1 可知,同样的框架,折板楼梯的平台梁中点第一主应力约为直板楼梯的 40%左右;折板楼梯的梯段板中点第一主应力约为直板楼梯的 47%~91%. 因此,框架结构采用折板楼梯可以有效地减小平台梁和梯段板中的应力,减小构件尺寸和配筋量,减小设计难度.

虽然楼板开洞的影响导致相关的框架柱抗侧刚度减小,但梯板的斜撑作用 and 平台板及平台梁的加强作用使框架柱的抗侧刚度增大. 由图 7—9 可知,

楼梯的存在极大提高了楼梯间的刚度,导致地震作用在各榀框架之间分配不均匀,楼梯间部位的框架柱和平台梁、梯板内力严重增大,设计困难.而折板楼梯由于刚度小于直板楼梯,因此引起的地震作用分配不均的现象较轻.

表 2 自振频率

Tab.2 Natural frequency

Hz

阶数	stair0	stair1	stair2
1	0.915 92	1.037 2	0.994 05
2	0.931 71	1.187 9	1.095 60
3	1.072 60	1.388 8	1.126 70
4	2.914 70	3.244 6	3.120 00
5	2.957 60	3.720 0	3.400 80
6	3.401 80	4.221 5	3.540 50
7	5.347 70	5.819 2	5.614 30
8	5.403 90	6.680 2	6.043 70
9	6.212 20	6.957 1	6.387 30

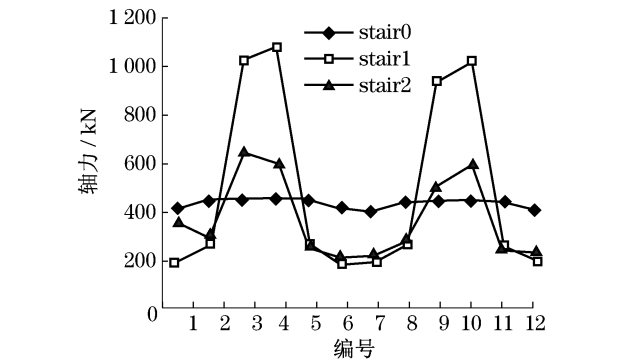


图 7 柱底轴力
Fig.7 Axial force of columns

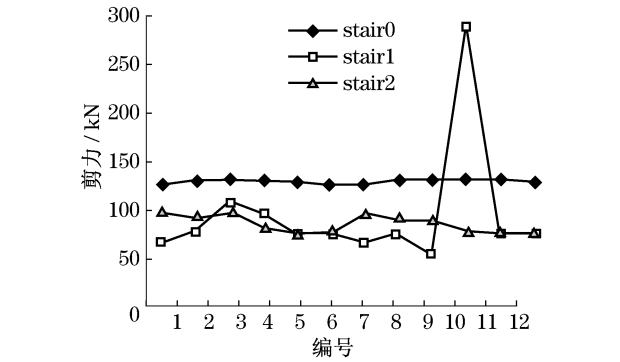


图 8 柱底剪力
Fig.8 Shearing force of columns

由表 2、图 10、图 11 可知,直板楼梯提高了结构的抗侧刚度,减小了结构的位移,其水平位移为无楼梯结构的 42%~53%,这与曹万林等提出的楼梯可以提高框架模型层刚度约 100%的结论相符^[7-8];而折板楼梯对结构抗侧刚度的提高量较小,其水平位移为无楼梯结构的 51%~56%.日本及欧美的规范

规定钢筋混凝土框架结构的弹性层间位移角限值为 1/300~1/200,而我国规范规定的限值为 1/550,是比较保守的.进行设计结构时设计师又不考虑楼梯的影响,放大了结构的实际位移,导致了严重的浪费.因此,采用折板楼梯可以降低保守度,减少浪费.

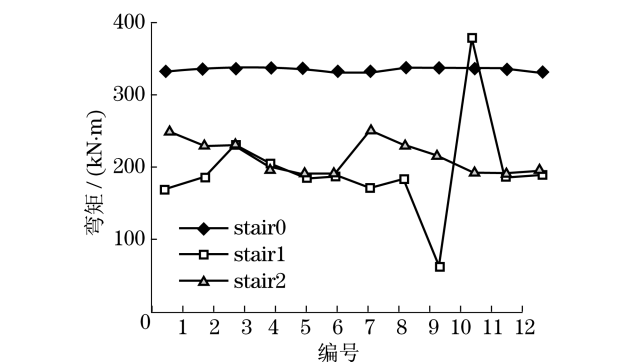


图 9 柱底弯矩
Fig.9 Bending moment of columns

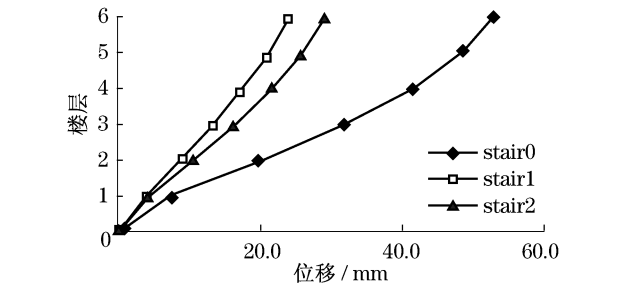


图 10 10#点横向水平位移
Fig.10 Lateral horizontal displacement of point 10

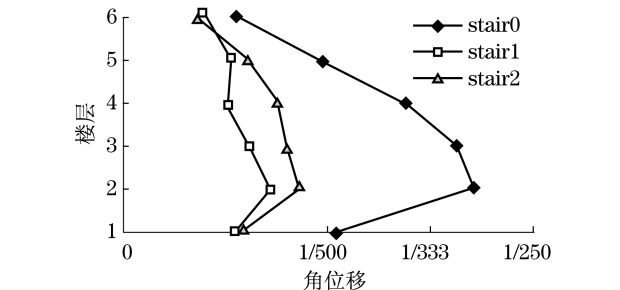


图 11 层间位移角
Fig.11 Angle of displacements

从图 12 可以很直观地看出,当梯板为直板时,形成的桁架腹杆相当于直杆;当梯板为折板时,形成的桁架腹杆相当于弯杆.直杆只受拉力和压力作用,而弯杆主要是靠杆件的抗弯能力来传递其两端的拉压力.梯板跨高比较大,其抗弯能力较弱,传递梯板两端的拉压力的能力相对较弱.因此折板楼梯形成桁架来提高楼梯间抗侧刚度的能力比直板楼梯要弱,楼梯间构件受到的水平地震作用也就小,对结构的安全性有可靠的保证.

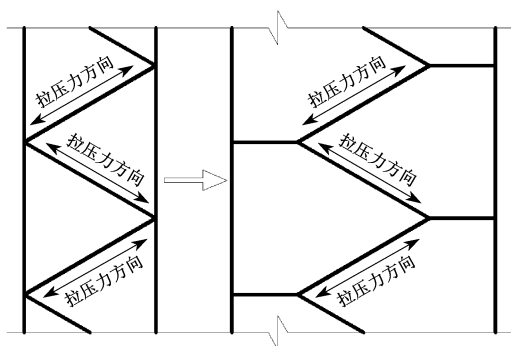


图12 直板楼梯与折板楼梯简化模型对比

Fig.12 Comparison of simplified models of straight stair and folded-slab stair

作者的想法在汶川地震中得到了验证:汶川地震强度大、范围广,河北保定也有明显震感.震后河北保定某公司办公楼楼梯间内的部分平台梁中间出现明显的上下贯通的竖向裂缝,裂缝位置是在梁底与梁侧面,而有裂缝的梯梁所连接的梯板均为直板,而无裂缝的梯梁所连接的梯板均为折板(图13).

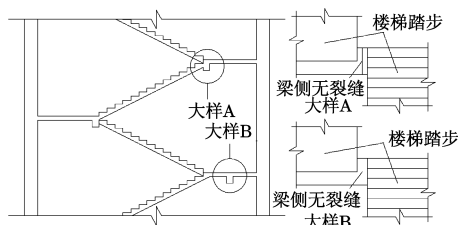


图13 楼梯梁裂缝对比

Fig.13 Flaw comparison of landing beams

在设计折板楼梯时,应注意:①在折角处附加几个复合箍筋,受力钢筋的构造注意阴角问题,防止折角处混凝土保护层崩溃;②梯板厚应在保证竖向承重的基础上尽量减小,满足挠度和裂缝计算即可.

图6的楼梯休息平台板与框架柱脱离开,这样楼梯与框架结构整体的性能有所削弱.因此,在实际工程中可利用低强度高韧性的钢板、型钢等将图6中的楼梯休息平台板与框架弱连接,使得在小震或中震时,相当于目前通常用的直板楼梯,并利用楼梯的局部损伤(弱连接处)吸收相当的地震能量;在大震时,首先在弱连接部位破坏,在其破坏之前消耗地震能量,之后退化成图6的功能,这样避免了短柱的发生,又使楼梯不严重破坏而继续保持逃生功能.

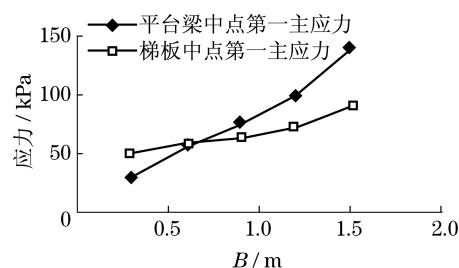
4 折板楼梯各尺寸的选择

一般建筑的梯板跨度、宽度和楼层高度均由实

际需要决定.为了确定折板楼梯平台梁到平台板边的距离 A , B 的尺寸(图6),取一系列的 A , B 值及楼层高度 H 建立楼梯模型(两榀框架及之间的楼梯构件)进行分析^[9-10].

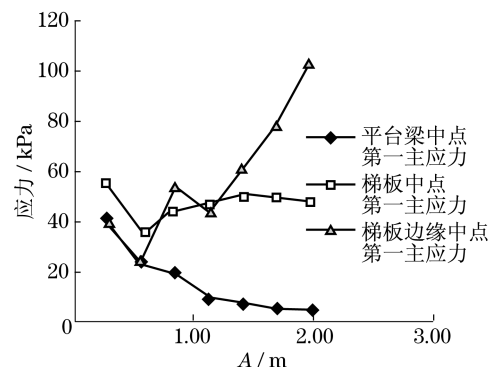
4.1 尺寸 B 的选择

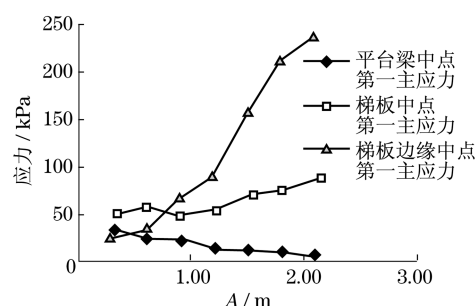
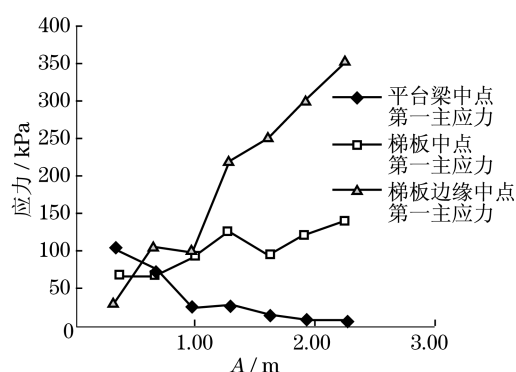
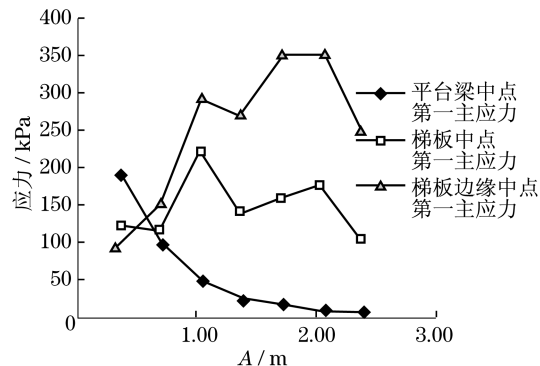
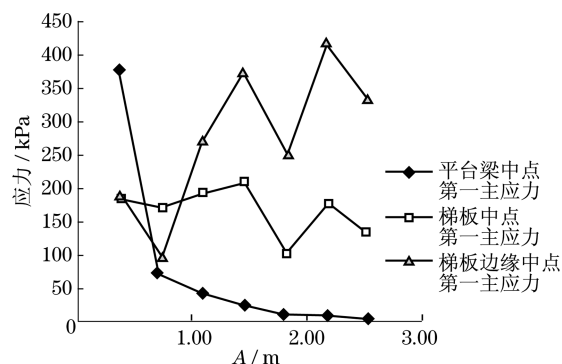
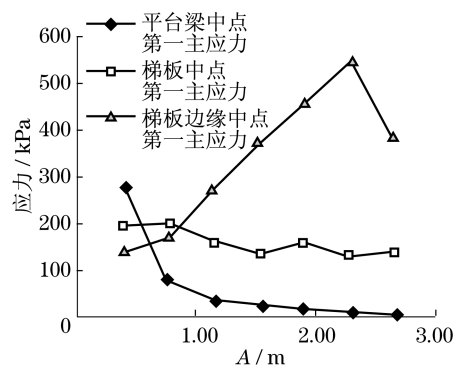
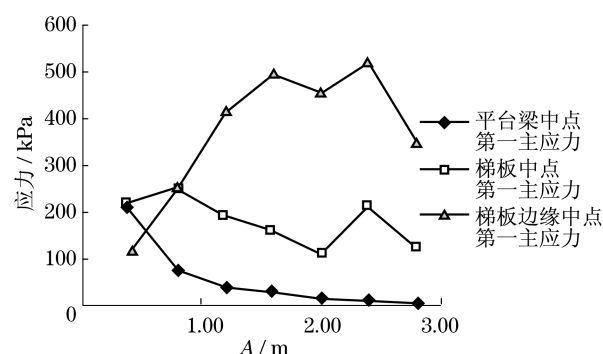
取楼层高 $H=3\text{ m}$,梯板宽 $W=2.1\text{ m}$, $A=0.3\text{ m}$, $B=0.3\sim 1.5\text{ m}$,踏步高宽比 $1:2$ (即梯板跨度 $L=H$).由计算结果图14可知,平台梁中点和楼梯板中点的第一主应力均随着 B 的增加而增加,因此建议 B 取 0 m .

图14 B 值的影响Fig.14 Influences of B on stress

4.2 尺寸 A 的选择

取楼层高 $H=2.8\sim 4.0\text{ m}$,梯板宽 $W=2.1\text{ m}$,踏步高宽比 $1:2$ (即梯板跨度 $L=H$), $B=0\text{ m}$, $A=10\%L\sim 70\%L$.由计算结果图15—21可知,平台梁中点第一主应力随着 A 的增加不断减小,并且减小的速率变小;楼梯板中点第一主应力受 A 的影响较小,随着 A 的变化呈上下波动趋势;楼梯板边缘中点第一主应力(折角处)随着 A 的增加急剧波动上升,但主要是由于直杆变弯杆,弯矩增加引起的,只要应力不是太大,不会造成配筋困难.由计算所得数据,作者建议,结合建筑设计,尺寸 A 取 $20\%L\sim 40\%L$,即 1 m 左右.

图15 A 值对应力的影响($L=2.8\text{ m}$)Fig.15 Influences of A on stress ($L=2.8\text{ m}$)

图 16 A 值对应力的影响 ($L=3.0$ m)Fig.16 Influences of A on stress ($L=3.0$ m)图 17 A 值对应力的影响 ($L=3.2$ m)Fig.17 Influences of A on stress ($L=3.2$ m)图 18 A 值对应力的影响 ($L=3.4$ m)Fig.18 Influences of A on stress ($L=3.4$ m)图 19 A 值对应力的影响 ($L=3.6$ m)Fig.19 Influences of A on stress ($L=3.6$ m)图 20 A 值对应力的影响 ($L=3.8$ m)Fig.20 Influences of A on stress ($L=3.8$ m)图 21 A 值对应力的影响 ($L=4.0$ m)Fig.21 Influences of A on stress ($L=4.0$ m)

5 结语

经过合理设计的折板楼梯可以削弱楼梯在水平地震作用下的“斜撑”效应,减弱楼梯参与整体结构受力的性能,减轻地震作用在框架间分配不均的现象,进而减小楼梯构件内力及其设计难度,并且使楼梯间的框架柱不再会形成短柱,降低位移限值的保守度,减少浪费。

以下是作者对楼梯设计的几点建议:①在结构分析和设计时不宜“以硬抗硬”,宜多考虑构造措施和概念设计,削弱楼梯的“斜撑”效应;②对于既有建筑,宜考虑对其楼梯进行改造加固;③抗震规范宜将楼梯的抗震等级较主体结构提高一级考虑,在理论上保证楼梯在大震水平下不会进入屈服,或者稍微进入屈服而不发生过大变形,以体现楼梯作为大震时人员疏散通道的功能的重要性;④随着减隔振技术的不断成熟,甚至还可以考虑将耗能减震装置应用到楼梯构件上;⑤震害表明,楼梯的破坏位置与施工缝密切相关,与冷拔钢筋脆性密切相关,因此,应改进施工并选择延性好的钢筋。

参考文献:

[1] 《汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告》编委会. 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Editorial Committee of Analytical Reports About Disaster Investigation and Reconstruction of Architecture Subjected to Wenchuan Earthquake. Analytical reports about disaster investigation and reconstruction of architecture subjected to wenchuan earthquake [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[2] 李英民, 刘立平. 汶川地震建筑震害与思考[M]. 重庆: 重庆出版社, 2008.
LI Yingmin, LIU Liping. Thoughts on disaster of architecture subjected to wenchuan earthquake[M]. Chongqing: Chongqing Press, 2008.

[3] 郭书普, 王彩艳. 楼梯的抗震设计 [J]. 建筑结构, 2009 (4): 604.
GUO Shupu, WANG Caiyan. Seismic design of stairs [J]. Building Structure, 2009(4): 604.

[4] 焦柯, 吴文勇, 黄真康, 等. 楼梯参与结构整体工作的计算分析 [J]. 广东土木与建筑, 2009(3): 3.
JIAO Ke, WU Wenyong, HUANG Zhenkang, et al. Structural analysis of staircase participated in the working of building structure[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009 (3): 3.

[5] 吴勇, 王周胜, 张玲. 框架结构中板式楼梯震害分析及对策探讨[J]. 建筑技术, 2009, 40(6): 561.
WU Yong, WANG Zhousheng, ZHANG Ling. Analysis on earthquake disaster of cranked slab stairs in frame structures in erathquane and discussion on countermeasures[J]. Architecture Technology, 2009, 40(6): 561.

[6] 王奇, 马宝民. 钢筋混凝土现浇楼梯对整体结构的影响[J]. 建筑结构, 2002(4): 27.
WANG Qi, MA Baomin. Influence of whole structure induced by cast - in - place stairs[J]. Building Structure, 2002(4): 561.

[7] 曹万林, 庞国新, 李云霄. 带楼梯框架弹性层刚度的试验研究 [J]. 世界地震工程, 1996(2): 29.
CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao. The test research on elastic floor rigidity of frame with staircase[J]. World Earth Quake Engineering, 1996(2): 29.

[8] 曹万林, 庞国新, 李云霄. 带楼梯框架弹塑性工作性能研究 [J]. 世界地震工程, 1996(3): 52.
CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao. On elastoplastic performance of frames with staircase[J]. World Earth Quake Engineering, 1996(3): 52.

[9] Ahmed I, Muqtadir A, Ahmad S. Design basis for stair slabs supported at landing level [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(7): 1051.

[10] Ahmed I, Muqtadir A, Ahmad S. Design provisions for stair slabs in the bangladesh building code [J]. Journal of Structural Engineering, 1996; 122(3): 262.

• 下期文章摘要预报 •

路基不均匀沉降对有砟轨道沉降影响的模型试验

邹春华, 周顺华, 王炳龙, 韦 凯

为研究路基不均匀沉降对有砟轨道沉降变形的影响, 设计了 1 : 1 有砟轨道模型试验系统. 通过人为设定的空隙模拟路基不均匀沉降, 采用激振器模拟列车振动荷载作用, 研究了在有砟轨道变形稳定后, 轨枕空吊前后路基不均匀沉降对有砟轨道沉降变形的影响. 试验结果表明, 余弦型路基不均匀沉降引起的轨道沉降变形曲线可用余弦型函数描述; 当路基的纵向不均匀沉降槽面积较小且未引起轨枕空吊时, 轨面与路基纵向不均匀沉降槽的面积比为 1, 并据此明确了轨枕不发生空吊情况下路基不均匀沉降与有砟轨道轨面沉降变形之间的计算关系及其主要影响因素; 随着路基不均匀沉降继续增加, 当轨面与路基纵向不均匀沉降槽的面积比小于 1 时, 有砟轨道将出现轨枕空吊现象, 并且面积比将随路基不均匀沉降的增加而减小.