

# 带高端和低端平板滑动支座楼梯抗震性能研究

彭凌云,李姣姣,曹达忠,李永梅

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室,北京 100124)

**摘要** 目的 研究地震作用下同时带高端和低端平板滑动支座的现浇混凝土板式楼梯的抗震性能、滑动支座的可靠性以及建筑面层对梯板滑动性能的影响.方法 依据《国家建筑标准设计图集》(16G101-2)设计制作了缩尺比例为1:2的钢筋混凝土框架楼梯,并对其进行拟静力试验.结果 试验结果表明:带高端和低端平板滑动支座楼梯的抗震性能较好,平台板和梯板均未发生破坏;带高、低端平板滑动支座楼梯的梯板滑动性能良好,建筑面层强度低,对楼梯滑动性能的影响可以忽略;楼梯间试件的破坏主要集中于梯梁和梯柱;加载过程中梯板下端存在竖向翘起现象,但处于较低水平.结论 滑动支座楼梯将梯板和框架脱离,有效避免了梯板构件的斜向支撑作用,表现出较好的抗震性能.

**关键词** 现浇混凝土板式楼梯;高端和低端平板;滑动支座;抗震性能

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Study on Seismic Performance of Stairs with Sliding Bearings of Upper-end and Low-end Plates

PENG Lingyun, LI Jiaojiao, CAO Dazhong, LI Yongmei

(Beijing University of Technology, Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing, China, 100124)

**Abstract:** In order to study the seismic performance of cast-in-situ concrete slab stairs with upper and low-end slab sliding bearings under earthquake, the reliability of sliding bearings and the influence of building surface on the sliding performance of staircase slabs, a 1:2 scale reinforced concrete frame staircase was designed and manufactured according to the national building standard atlas (16G101-2), and its quasi-static test were carried out. The results of test show that the staircase with upper and low-end flat sliding support has better seismic performance, and the platform and staircase plates have not been damaged; the staircase with upper and low-end flat sliding support has good sliding performance, and the strength of building surface is low, which can neglect the influence on the sliding performance of staircase; the failure of staircase specimens mainly concentrates on the loading process of staircase beams and staircases; There is a vertical heave phenomenon at the bottom of the middle ladder plate, but it is at a small level. The sliding bearing

收稿日期:2019-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51478023)

作者简介:彭凌云(1976—),男,副研究员,博士,主要从事结构抗震和减隔震方面研究.

staircase separates the ladder plate from the frame, effectively avoids the oblique bracing effect of the ladder plate components, and shows better seismic performance.

**Key words:** cast-in-situ concrete slab stairs; upper-end and low-end plates; sliding bearings; seismic performance

传统的现浇混凝土楼梯在遭遇地震作用时,楼梯作为主体框架的斜撑构件提供抵抗侧力<sup>[1]</sup>,这种框架与楼梯的协同受力形式与结构设计中不考虑楼梯对结构抗侧力贡献的假定严重不符<sup>[2]</sup>. 相关的地震灾害研究表明传统楼梯在遭遇强烈地震作用时容易先于主体框架发生破坏而延误逃生和救援的时间<sup>[3-10]</sup>. 赵均等<sup>[11-15]</sup>对 ATa 滑动支座楼梯(梯板全部由踏步段构成,梯板低端带滑动支座支撑在梯梁上)与普通楼梯(梯板全部由踏步段构成,梯板低端固定在梯梁上)分别进行了振动台和拟静力试验,结果表明普通楼梯由于不对称斜撑参与试件受力,梯梁梯柱节点、梯梁和梯板破坏较为严重,而带滑动支座的楼梯削弱了楼梯间的抗侧刚度,具有良好的抗震性能. 曹达忠<sup>[16]</sup>等对 CTb 型楼梯(梯板由踏步段和高端平板构成,梯板低端带滑动支座支撑在梯梁挑板上)进行了拟静力试验,结果表明带滑动支座的楼梯有较好的抗震性能.《国家建筑标准设计图集》(16G101-2)<sup>[17]</sup>对 DTb 型楼梯(梯板由低端平板、踏步段和高端平板构成,梯板下端带滑动支座支撑在挑板上)的构造形式做了相关规定,但 DTb 型楼梯的相关性能仍需通过试验进行检验.

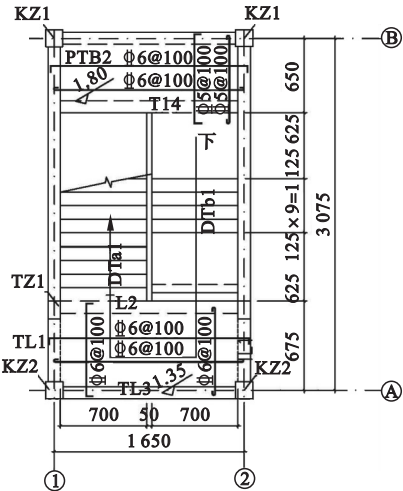
为研究 DTb 型楼梯的抗震性能,笔者设计制作了 1:2 缩尺的楼梯试件(为满足首层双跑式楼梯的尺寸要求,楼梯上梯板采用 DTb 楼梯,下梯板采用 ATa 楼梯),并对其进行低周往复试验,重点研究 DTb 型楼梯的抗震性能、滑动性能和工作机制. 研究表明:当遭受水平作用时,滑动支座开始工作,消除了梯板的侧向支撑作用,改变了梯板及相连构件受力状态,通过破坏情况和应变曲线可以

看出 DTb 型楼梯的滑动支座滑动性能较好,梯板及相连构件破坏较轻.

1 试验概况

1.1 试件设计

试件选取某钢筋混凝土框架结构的首层楼梯间作为试件原型,缩尺比为 1:2,其层高为 1 800 mm,轴网尺寸为 3 075 mm × 1 650 mm. 试件由底座、构成该层楼梯间的框架柱、框架梁和楼梯的梯板、梯梁、梯柱及平台板等组成. 按照《国家建筑标准设计图集》<sup>[17]</sup>的做法,梯板下端设置 5 mm 厚聚四氟乙烯板,与梯板下端相连的平台板面层采用 25 mm 厚的水泥砂浆模拟建筑面层的摩擦阻力,两者之间的缝隙填充 50 mm 厚度的聚苯板,试件几何尺寸、构件截面配筋及滑动支座构造如图 1 所示. 试件分 3 次浇筑完成,试件底座采用 C40 商品混凝土,其他部位采用 C30 商品混凝土,梯板与其底部支承部位分开浇筑,并通过塑料薄膜隔开形成滑动支座.



(a) 楼梯平面图

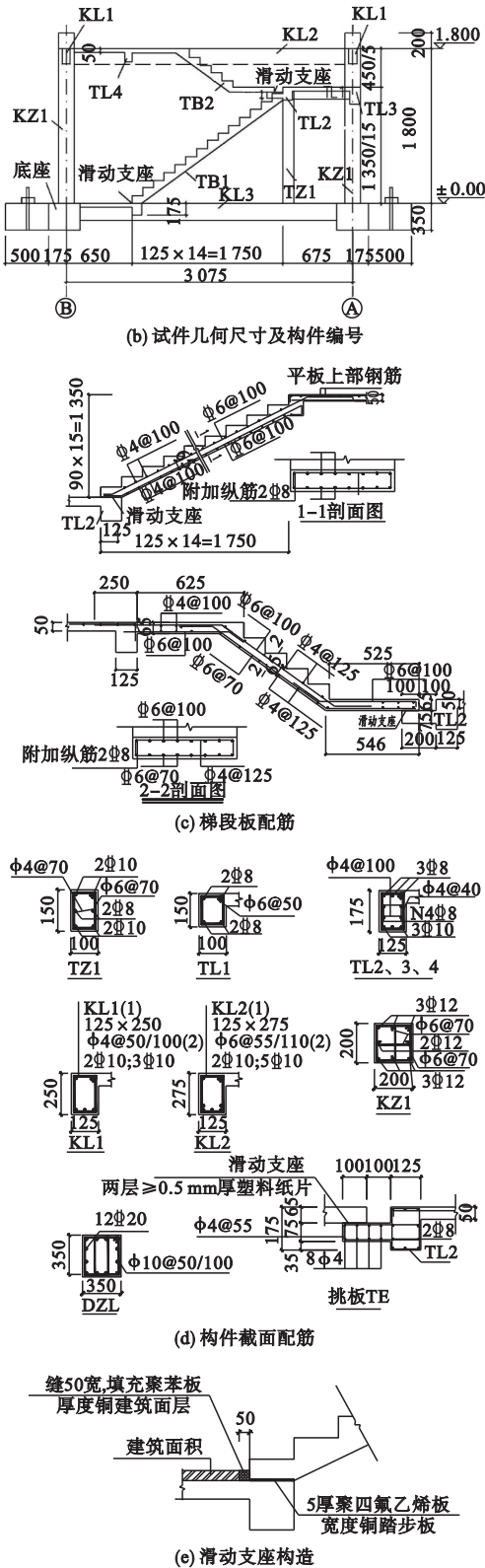


图1 构件的截面尺寸和配筋

Fig. 1 Section size and reinforcement of components

1.2 材性试验

试验的混凝土和钢筋材料强度试验按相关材性试验规范<sup>[18-20]</sup>进行,其中,试块和楼梯试件同时浇筑,在规范规定的条件下进行养护,并在试件做拟静力试验当天测量混凝土立方体的抗压强度. C40 混凝土水胶比为 0.33,坍落度(180±20)mm, C30 混凝土水胶比为 0.4,坍落度(160±20)mm. 实测的 C40 混凝土立方体试块抗压强度平均值为 46.6 MPa, C30 强度混凝土立方体试块抗压强度平均值为 35.26 MPa. 钢筋的抗拉强度试验实测结果见表 1.

表1 钢筋抗拉强度测量结果

Table 1 Measurements of tensile strength of reinforcement bars			
直径/mm	$f_y$ /MPa	$f_u$ /MPa	$\delta$ /%
4	382	473	13.9
6	385	551	15.4
8	420	653	17.1
10	405	620	17.5
12	450	602	24.1

注: $f_y$ 为屈服强度; $f_u$ 为抗拉强度; $\delta$ 为屈强比.

1.3 加载方案

试验参考《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)的要求进行加载,试件加载方案如图 2 所示. 在试验过程中,框架柱的轴压比控制在 0.4,每个框架柱承受轴力250 kN,由出力为 500 kN 的竖向千斤顶配合水平分配梁实现.

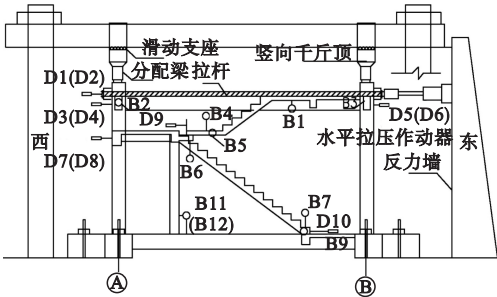


图2 加载装置

Fig. 2 Loading devices

通过布置在框架梁柱节点位置的两个水

平千斤顶对楼梯试件施加低周往复荷载,全程按水平位移控制、正反向对称加载的机制进行加载,加载方向以千斤顶自东向西(推)为正向,反向(拉)为负向,加载控制值如表 2 所示. 根据规范要求,试件开裂前每级加载位移循环 1 次,试件开裂后每级加载位移循环 3 次. 当水平荷载下降至峰值荷载的 85% 以下或因试件变形太大而不适于继续加载时,停止加载.

表 2 水平加载位移控制值

Table 2 Horizontal load deflection controlling value

级别	位移/mm	级别	位移/mm	级别	位移/mm
1	1	6	8	11	30
2	2	7	10	12	40
3	3	8	15	13	50
4	4	9	20	14	60
5	6	10	25	—	—

2 试验现象

2.1 开裂阶段

试件开裂前的荷载-位移曲线基本呈线性关系,试件处于弹性状态. 加载至第三级(位移为 3 mm)时,梯柱 TZ 和梯梁 TL1 节点部位出现一道斜裂缝;反向加载后,框架柱 KZ 与梯梁 TL1 节点处出现一道裂缝.

2.2 屈服阶段

试件初始裂缝出现后继续加载,试件开始进入屈服状态. 位移加载至 8 mm 时,TB2 底端与聚苯板分离,反向加载时,TB1 挤压底部平台板面层受剪,面层边缘区域出现裂缝,聚苯板被挤压. 位移加载至 10 mm 时,框架

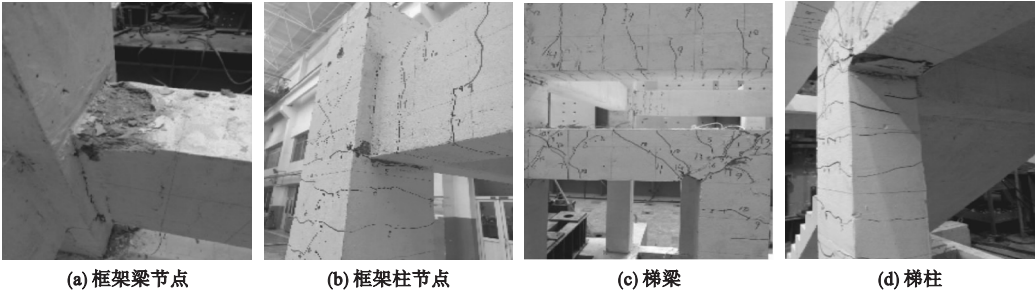
柱出现水平裂缝,梯柱底部开裂,梯梁和梯柱的结点斜裂缝贯通.

2.3 峰值荷载阶段

当负向加载至荷载 344.5 kN,平均位移(2 个水平加载点处的水平位移平均值)为 48.79 mm,试件达到峰值荷载. 梯柱与梯梁的节点部位的斜裂缝不断延伸,多道斜裂缝遍布 TL1 的梁身成放射状,正反向加载的斜裂缝交汇成“X”形. 在梯梁 TL1 与框架柱连接的部位,竖向裂缝贯通梁高. 梯柱的破坏比较明显,除了柱顶的斜裂缝区域以外,梯柱的柱身遍布受弯裂缝,柱底的裂缝较宽. 框架柱柱顶的水平裂缝区域从节点开始向下发展,加载结束后框架柱开裂的区域约占柱身的 2/3. 框架梁的开裂先出现在梁端节点区域,在试件破坏阶段框架梁两端开裂区域各占 1/4 梁长度.

2.4 试件破坏阶段

位移加载到 50 mm 后,TB1 底层水泥砂浆面层部分被掀开,与梯板底端接触的面层边缘的水泥砂浆碎裂,面层对梯板的滑动性能影响极小. TB2 在加载过程中同样没有提供抵抗侧力,随着加载位移进行滑动. 试验过程中下梯板 TB1 没有先于框架结构发生损坏,当位移加载到 40 mm 后,下梯板 TB1 的根部出现一道横向裂缝,此后随着加载位移增加,裂缝有所发展. 试验加载完成后,带高、低端双平台板的滑动支座楼梯 TB2 基本保持完好,没出现明显开裂现象. 其底部支座的梯梁挑板 TE 构件未出现明显开裂现象. 破坏阶段各框架构件的破坏状态如图 3 所示.



(a) 框架梁节点

(b) 框架柱节点

(c) 梯梁

(d) 梯柱



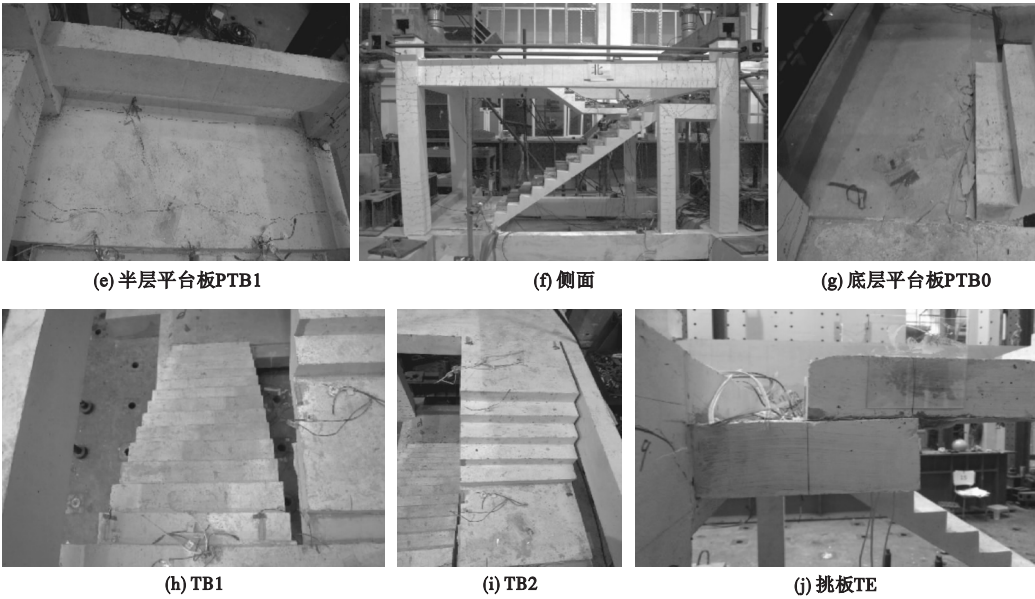


图3 楼梯构件最终形态

Fig. 3 Final failure form of specimen

3 试验结果及分析

3.1 滞回性能及骨架曲线

由试件的水平荷载 - 水平位移绘制的滞

回曲线和相应的骨架曲线如图 4 所示. 其中水平荷载为两个水平千斤顶的合力, 位移为两个水平加载点处水平位移的平均值. 根据

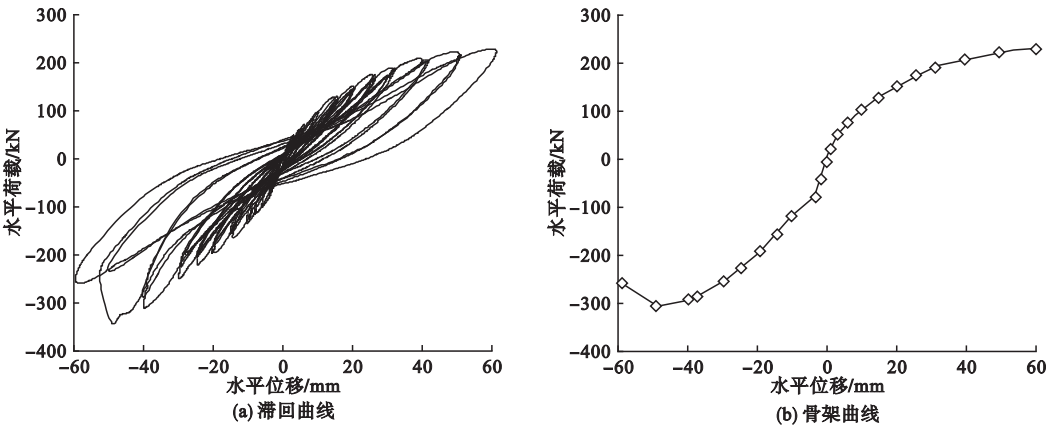


图4 滞回曲线和骨架曲线

Fig. 4 Hysteretic curves and skeleton curves

曲线可知,水平位移加载到3 mm时,水平荷载与位移基本呈线性增长. 随着水平位移的不断增加,试件出现裂缝并不断发展,试件开始进入弹塑性状态,割线斜率逐渐减小,每一级卸载后的残余变形不断增大. 当加载到第十四级(加载位移为60 mm),试件承载力下降至不足极限荷载的 85%,此时层间位移角

达到1/31,加载终止.

3.2 承载力

试件在初始开裂、屈服、峰值和极限等特定状态的水平荷载、位移及对应的层间位移角如表 3 所示. 根据 $\mu = \Delta_{\mu} / \Delta_y$  计算得到该试件的位移延性系数为 2.72,其中 $\Delta_{\mu}$  为荷载下降至峰值荷载 85%时对应的位移, $\Delta_y$  为名

义屈服位移.由表 3 可知,试件在开裂状态的平均层间位移角为 1/598,屈服状态的平均层间位移角为 1/80,峰值荷载状态的平均层间位移角为 1/34.达到峰值荷载后试件的承载力迅速下降,当平均层间位移角为 1/31 时,荷载已小于峰值荷载的 85%.

表 3 各状态下荷载与位移实测值汇总

Table 3 Test values of lateral loads and drift

状态	加载方向	加载荷载/kN	加载位移/mm	层间位移角
开裂荷载	正向	48.9	3.01	1/630
	负向	63.9	3.34	1/568
屈服荷载	正向	166.9	23.64	1/76
	负向	206.2	21.52	1/83
峰值荷载	正向	228.3	59.97	1/31
	负向	344.5	48.79	1/39
极限荷载	正向	—	—	—
	负向	259.8	58.57	1/31

3.3 刚度退化

试件的割线刚度和水平加载位移的关系曲线如图 5 所示,其中,刚度为每级加载第一次循环时峰值荷载和相应位移的比值.由图可知:随着水平加载位移的增大,试件的刚度不断退化,开始退化较快,后来有所缓慢,而且正、反向加载时,刚度退化不对称.

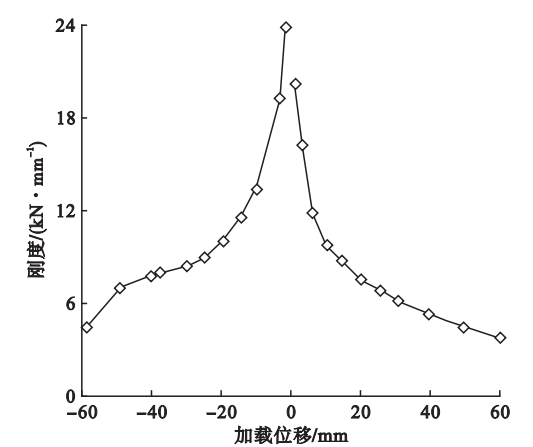


图 5 刚度退化曲线

3.4 试件滞回耗能

试件的等效黏滞阻尼系数随水平加载位移的变化曲线如图 6 所示.由图可知,随着位移的增加,试件的黏滞阻尼系数整体呈现上升趋势,滞回耗能不断增加.结合破坏阶段的

试验现象可知,梁柱节点的剪切破坏和梯柱弯曲破坏占滞回耗能总量的很大一部分.

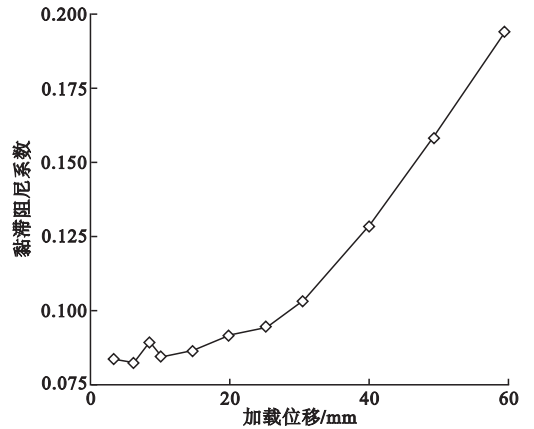


图 6 等效黏滞阻尼系数曲线

Fig. 6 Equivalent viscous damping coefficients curve

3.5 梯段板水平滑动和竖向翘起位移

TB1 和 TB2 的水平滑动位移如表 4 所示.由表可知:正向加载时,弹性阶段梯段板 TB1 底部的水平滑动位移与加载位移较为接近,屈服后 TB1 底部的滑动位移约为加载位移的 85% 左右;反向加载时,梯段板 TB1 滑动位移与加载位移相差较大,约为加载位移的 75% ~ 80%. TB2 的水平滑动位移约为 TB1 滑动位移的 1/3,与上、下两梯段板高度的比例一致.

表 4 各阶段梯段板水平向滑动位移测量值

Table 4 Measurements of horizontal sliding displacement of stage plates in each stage

状态	加载方向	加载位移/mm	水平滑动位移/mm	
			TB1	TB2
弹性	正向	3.01	2.94	0.65
	负向	3.34	2.7	0.73
屈服	正向	23.64	20.50	5.67
	负向	21.52	16.97	5.23
峰值	正向	59.97	50.60	12.10
	负向	48.79	36.50	15.20
极限	正向	—	—	—
	负向	58.57	-42.00	-16.60

楼梯段板竖向翘起位移的采集由布置在梯段板支座所在的平台板上的位移计完成,以梯段板向上翘起时的方向为正向,向下为反向,楼梯板竖向翘起位移曲线如图 7 所示.

由图 7 可知,下梯段板 TB1 翘起位移不超过 3 mm,上梯段板 TB2 最大竖向翘起位移不超过 1.8 mm,试件中的 DTb 型楼梯梯段板翘起不明显.

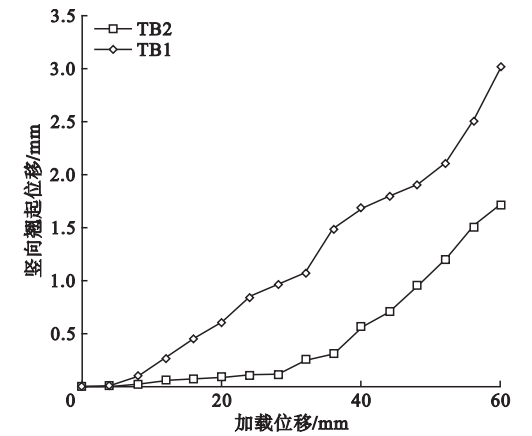


图 7 楼梯板竖向翘起位移曲线

Fig. 7 Tilting displacement curve of gangboard

3.6 梯柱转角

通过在距离梯柱底部 20 cm 高的位置布置位移计来量测梯柱在该高度的水平位移,并计算得到两个梯柱的平均转角随加载位移的变化曲线如图 8 所示.当水平加载位移为 60 mm 时,梯柱正、负向转角平均值为 0.035 rad $\approx$ 1/30,此时对应的层间位移角为 1/27,梯柱转角与加载点的层间位移角较为接近.梯柱的转动角较大,故最终梯柱的破坏较为明显,与试验现象吻合.

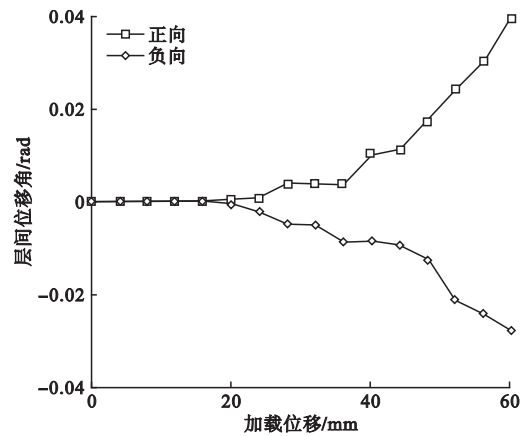


图 8 梯柱转角曲线

Fig. 8 Rotation angle history curve of ladder column

3.7 钢筋应变发展

钢筋应变片主要用于对梯板、支承挑板和梯柱等关键部位进行实时的监测,判断相关构件钢筋屈服情况.根据钢筋应力-应变实测曲线,梯板钢筋屈服应变取 0.2%. 每级加载过程 TB1 与梯梁的连接部位(TB1)、TB2 高端平板(TB2-H)和低端平板(TB2-L)三个测点的纵向钢筋应变的峰值曲线如图 9 所示.从数据可知梯板上的钢筋应变实测值远小于钢筋屈服应变值,加载过程中试件的梯板未发生破坏,与试验现象吻合.

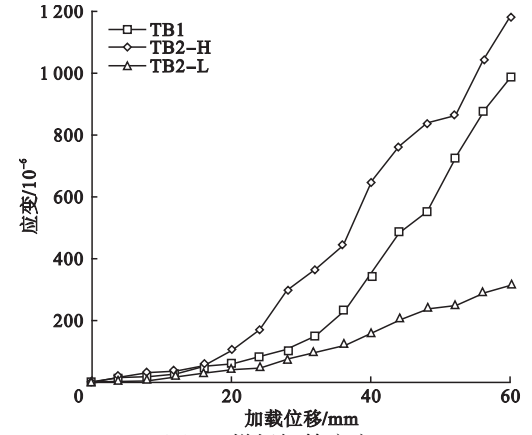


图 9 梯板钢筋应变

Fig. 9 Strain history curve of gangboard steel

每级加载位移下的挑板钢筋峰值应变如图 10 所示.挑板 TE 钢筋应变测点位于挑板根部,TE 钢筋拉应变实测值均未超过  $3.0 \times 10^{-4}$ ,远小于钢筋的屈服应变,与试验过程中挑板未出现破坏的现象相符.

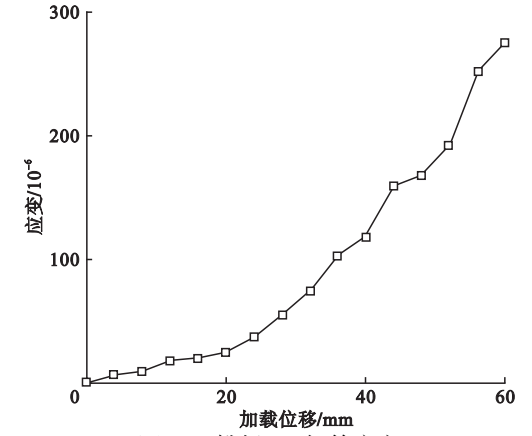


图 10 挑板 TE 钢筋应变

Fig. 10 Strain history curve of TE steel

为了使梯板充分滑动,试件梯柱截面未做加强处理,试验过程中梯柱转角较大,柱底破坏明显.梯柱钢筋应变的应变片布置在梯柱纵筋底部,图11为南北侧两个梯柱纵筋应变片所测得钢筋应变曲线.

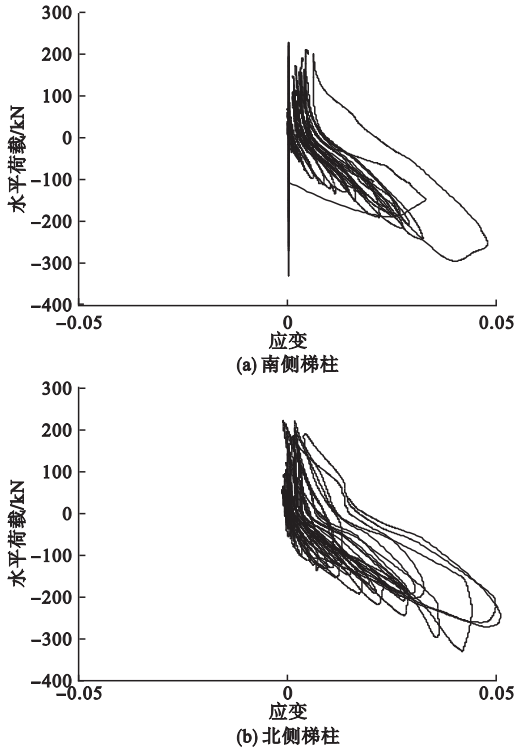


图11 梯柱钢筋应变

Fig. 11 Strain hysteresis curve of TZ reinforcement

由图11可知,梯柱钢筋压应变测量值远远大于钢筋屈服应变(0.2%),与破坏状态时梯柱的纵筋屈服明显的试验现象相符.南北侧两个梯柱的变形较为对称,不存在固定支座楼梯由于楼板参与抵抗刚度引起的梯柱受力复杂的问题.

## 4 结 论

(1)同时带高、低端平板的滑动支座楼梯的高、低端平板在水平极限变形时保持完好,底部支座处的挑板未出现开裂.

(2)同时带高、低端平板的滑动支座楼梯的滑动性能良好,不参与抗侧刚度的贡献.水平滑动位移与加载位移的比值和上下梯板高度与总高的比例相同,工程中可按照钢筋

混凝土框架结构相应地震影响下的层间位移角限值乘以踏步板高度估算梯板底部的搭接长度,防止楼梯板的脱落.

(3)梯柱和梯梁的节点转角位移较大,梯柱和梯梁节点处的混凝土破坏严重,梯柱柱底部位混凝土的破坏严重.梯梁、梯柱等构件在抗震设计过程中应进行加强.

(4)梯板加载过程中存在竖向翘起现象,梯板翘起高度随层间位移角增大而增大,但破坏阶段梯板翘起高度仍处于较低水平.

## 参考文献

- [1] 冯远,吴小宾,李从春,等.现浇楼梯对框架机构的抗震影响分析与设计建议[J].土木工程学报,2010,43(10):53-62.  
(FENG Yuan, WU Xiaobin, LI Congchun, et al. A study of the earthquake-resistance performance of frames with staircases[J]. China civil engineering journal, 2010, 43(10): 53-62.)
- [2] 罗开海,王亚勇,左琼.地震作用下钢筋混凝土框架结构中楼梯构件的影响效果分析[J].建筑结构,2011,41(11):88-93.  
(LUO Kaihai, WANG Yayong, ZUO Qiong. Analysis on action effects of stairs in RC frame structures under earthquake[J]. Building structure, 2011, 41(11): 88-93.)
- [3] 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):561-564.  
(WU Yong, WANG Zhouzheng, ZHANG Ling. Analysis on earthquake disaster of cranked slab stairs in frame structures in earthquake and discussion on countermeasures[J]. Architecture technology, 2009, 40(6): 561-564.)
- [4] 清华大学,西南交通大学,重庆大学,等.汶川地震建筑震害分析及设计对策[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:111-190.  
(Tsinghua University, Southwest Jiaotong University, Chongqing University, et al. The seismic damage analysis and design countermeasures for Wenchuan earthquake[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 111-190.)
- [5] 全学友,米伟,张智强,等.汶川地震中楼梯结构的破坏现象及对策[J].建筑结构,2009,39(11):75-77.  
(QUAN Xueyou, MI Wei, ZHANG Zhiqiang, et al. Special failure modes of stair structures by Wenchuan earthquake and its countermeasures[J]. Building structures, 2009, 39(11): 75-77.)
- [6] 王威,薛建阳,罗大明,等.建筑楼梯在2008年汶川大地震中的震害分析[J].地震工程与工程振动,2011,31(5):157-165.  
(WANG Wei, XUE Jianyang, LUO Daming,



- et al. Analysis of the damage to building stairs in 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31(5): 157–165. )
- [7] 张令心, 刘琛, 刘洁平. 芦山地震楼梯间震害调查及思考 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 21–25.  
(ZHANG Lingxin, LIU Chen, LIU Jieping. Investigation and consideration of the staircase damaged in Lushan earthquake [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2013, 33(4): 21–25. )
- [8] 肖疆. 框架结构楼梯震害原因分析及加固和改进措施研究 [D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2013.  
(XIAO Jiang. Research on the seismic damage analysis and strengthening method & improvement measure of staircase in RC frame structure [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2013. )
- [9] 沈靓, 柳炳康, 张瑜中, 等. 汶川地震中框架楼梯典型震害分析与有限元计算 [J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 114–119.  
(SHEN Liang, LIU Bingkang, ZHANG Yuzhong, et al. Typical seismic damage analysis and finite element calculation of stair in frame in Wenchuan earthquake [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2010, 32(4): 114–119. )
- [10] RICCI P, LUCA F D, VERDERAME G M. 6th April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance [J]. Bulletin of earthquake engineering, 2011, 9(1): 285–305.
- [11] 赵均, 侯鹏程, 刘敏, 等. 混凝土框架楼梯设置滑动支座的结构模型振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 53–59.  
(ZHAO Jun, HOU Pengcheng, LIU Min, et al. Shaking table test on the structural model of concrete frame-staircase with sliding supports [J]. Journal of building structure, 2014, 35(3): 53–59. )
- [12] 赵均, 侯鹏程, 刘敏, 等. 混凝土框架楼梯结构抗震性能拟静力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(12): 44–50.  
(ZHAO Jun, HOU Pengcheng, LIU Min, et al. Experimental study on seismic performance of concrete frame with staircase under quasi-static loading [J]. Journal of building structure, 2014, 35(12): 44–50. )
- [13] 朱玉玉. 钢筋混凝土框架楼梯间抗震性能拟静力试验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.  
(ZHU Yuyu. Pseudo-static experimental study on seismic performance of staircase in reinforced concrete frame structure [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. )
- [14] 涂军. 钢筋混凝土框架楼梯间振动台试验研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.  
(TU Jun. A research of shaking table test of the concrete frame unit with staircase [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. )
- [15] 涂军, 赵均, 朱玉玉, 等. 斜梯板双层配筋的混凝土框架楼梯间单元地震响应分析 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊1): 197–201.  
(TU Jun, ZHAO Jun, ZHU Yuyu, et al. Analysis of seismic response of the concrete frame unit with doubly reinforced staircase [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(S1): 197–201. )
- [16] 曹达忠, 彭凌云, 高志强, 等. 钢筋混凝土框架结构带高端平台板滑动支座楼梯抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 46–54.  
(CAO Dazhong, PENG Lingyun, GAO Zhiqiang, et al. Experimental study on seismic performance of sliding bearing staircase with upper-end slab in RC frame structure [J]. Journal of building structures, 2018, 39(7): 46–54. )
- [17] 中国建筑标准设计研究院. 国家建筑标准设计图集: 16G101–2 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.  
(China Institute of Building Standard Design & Research. National building standard collective drawings: 16G101–2 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016. )
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. )
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. )
- [20] 高怡斐, 梁新帮, 邓星临. 金属材料拉伸试验: 第一部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
(GAO Yifei, LIANG Xinbang, DENG Xinglin. Metallic materials: tensile testing: part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011. )
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)