

文章编号:1673-2049(2011)01-0001-05

不同面板钉木剪力墙抗侧承载力试验

何敏娟,李 征

(同济大学 建筑工程系,上海 200092)

摘要:为了研究中国钉应用在木剪力墙建造中的可行性,进行了面板钉连接节点试验和剪力墙有限元分析;对采用中国钉的面板钉连接节点进行加载方向垂直于木纹和加载方向平行于木纹的试验,将得到的试验结果以节点荷载-位移曲线的形式输入到有限元分析软件中,计算木剪力墙的抗侧承载力,并与进口钉剪力墙模型的计算结果进行对比。研究表明:采用中国钉和进口钉的木剪力墙有着相近的抗侧承载力和刚度;有限元计算所得的木剪力墙抗侧承载力相对于《木结构设计规范》(GB 50005—2003)中的公式有足够的可靠度,因此,在木剪力墙的建造中,中国钉和进口钉可以相互替代使用。

关键词:木剪力墙;面板钉;节点试验;抗侧承载力;有限元分析

中图分类号:TU366.2

文献标志码:A

Experiment on Lateral Bearing Capacity of Wood Shear Walls with Different Sheathing Nails

HE Min-juan, LI Zheng

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To research the feasibility of applying domestic nails in the construction of wood shear walls, authors first introduced the sheathing nail connection experiment and finite element analysis of shear wall. Then, the sheathing nail connection experiment with load direction which was perpendicular and paralalled to grain was carried out respectively for applying domestic nails, and the load-displacement curves of nail connections were used in finite element analysis software to calculate lateral bearing capacity of wood shear walls, and compared with the calculated results of shear wall models for imported nails. The study results show that the lateral bearing capacity and rigidity of wood shear walls with domestic or imported nails are similar, and its lateral bearing capacity which is calculated by finite element has enough reliability compared with Chinese Code for Design of Timber Structures (GB 50005—2003), so in the construction of wood shear walls, domestic and imported nails can be used interchangeably.

Key words: wood shear wall; sheathing nail; connection experiment; lateral bearing capacity; finite element analysis

0 引言

轻型木结构是常见的结构形式之一,具有美观、

节能、环保、施工工期短等特点,并能充分按照个性化要求进行设计和施工^[1]。木剪力墙是轻型木结构房屋中最重要的抵抗地震与风等侧向荷载的抗侧承

收稿日期:2010-11-25

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ04A02);国际科技合作计划项目(2008DFA71990)

作者简介:何敏娟(1963-),女,江苏海门人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:hemj@tongji.edu.cn。

载力构件,通常由墙骨柱、顶梁板和底梁板、门窗洞口上的过梁以及覆面板用钉连接而成,构件的尺寸和间距根据其承担的荷载决定。为避免剪力墙在水平荷载作用下发生倾覆,还要求用抗倾覆锚固件将木剪力墙的端墙骨柱同下部结构连接起来。

中国建造的轻型木结构房屋大量采用进口的结构材料,随着轻型木结构房屋在中国应用范围的扩大,结构材料国产化是必然的发展趋势。本文中笔者通过试验和有限元分析来研究不同钉子对木剪力墙抗侧承载力和刚度的影响,并讨论中国钉与进口钉在木剪力墙建造中相互替代使用的可能性。

1 面板钉连接节点试验

钉连接具有连接紧密、韧性好、制作简单以及安全可靠等优点,是轻型木结构中应用最为广泛的连接形式之一^[2]。木剪力墙和楼屋面的有限元分析模型都是建立在钉连接模型的基础上,而钉连接的模型参数多数是从试验数据拟合得到的,因此,钉连接性能对于剪力墙和房屋整体分析具有重要意义,也是有限元分析中需要的重要数据。尽管国外已经进行了很多钉连接的试验研究,但是随着轻型木结构在中国应用范围的扩大,越来越多的中国钉被应用于轻型木结构房屋的建造中,鉴于中国钉的生产过程和力学性能与进口钉有所差异,因此有必要对轻型木结构中的中国钉连接进行试验研究。

1.1 试验设计

1.1.1 试件设计

木剪力墙中覆面板的铺设总与墙骨柱垂直,面板钉连接分别受到垂直于墙骨柱方向和平行于墙骨柱方向的剪力作用,因此分别进行加载方向垂直于墙骨柱木纹方向和加载方向平行于墙骨柱木纹方向的试验,面板钉连接试件如图 1 所示。面板钉连接节点试验共有 30 个试件,分 6 组,第 1~3 组采用垂直于木纹的加载方向,第 4~6 组采用平行于木纹的加载方向,各组试件的具体参数见表 1。

1.1.2 试验材料

试验所用的墙骨柱为进口Ⅲ级以上的 SPF 规格材,截面尺寸为 38 mm×89 mm,实测平均含水率为 18%,平均密度 0.44 g·cm⁻³。覆面板采用进口 9.5 mm 厚 OSB 板材,实测平均含水率为 18%,平均密度 0.41 g·cm⁻³。钉子采用中国市场上可以买到的普通镀锌铁钉,名义屈服强度为 883.9 MPa,试验中仅变换覆面板与墙骨柱连接所用钉的长度和直径。试验材料见图 2。

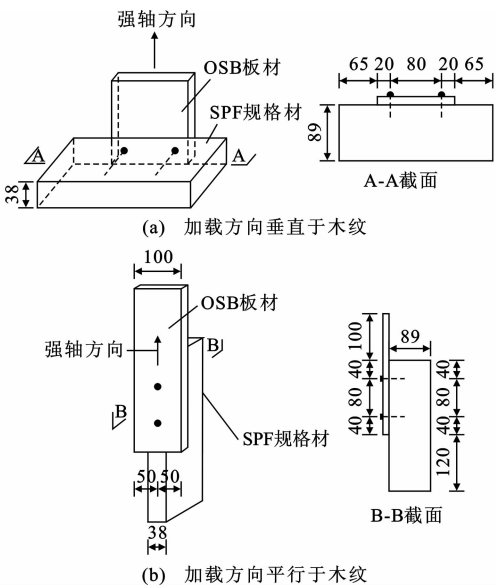


图 1 面板钉连接试件(单位:mm)

Fig. 1 Connection Specimens of Sheathing Nails (Unit:mm)

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件组编号	试件编号	钉子直径/mm	钉子长度/mm	试件个数	加载方向
1	J-1~J-5	2.8	50	5	垂直于木纹
2	J-6~J-10	3.0	63	5	垂直于木纹
3	J-11~J-15	3.0	73	5	垂直于木纹
4	J-16~J-20	2.8	50	5	平行于木纹
5	J-21~J-25	3.0	63	5	平行于木纹
6	J-26~J-30	3.0	73	5	平行于木纹

1.1.3 试验方法

试验采用 WAW-200 kN 计算机控制电液伺服万能试验机,其两端夹具的最大夹持厚度为 25 mm,夹持长度为 50 mm,而试验所用 SPF 规格材的截面尺寸为 38 mm×89 mm,其厚度大于 25 mm,为使夹具夹住木材,在试验机下端安装夹具,而另一端的 OSB 板材厚度为 9.5 mm,小于 25 mm,可用试验机夹头直接夹紧,如图 3 所示。

加载过程采用位移控制,加载速度为 8~10 mm·min⁻¹,试件被拉伸,直至荷载超过最大值后下降到小于 80%最大荷载的加载点,停止加载。

1.2 试验结果分析

1.2.1 加载方向垂直于木纹的试件

第 1~3 组试件的主要破坏形式为钉头从覆面板中拔出,覆面板碎裂,且长度较大钉子的试件具有钉子从墙骨柱中拔出的趋势。随着钉子长度的增大,试件破坏形式由覆面板撕裂向钉子拔出的趋势发展,整个节点的延性随钉子长度增大而增大。3

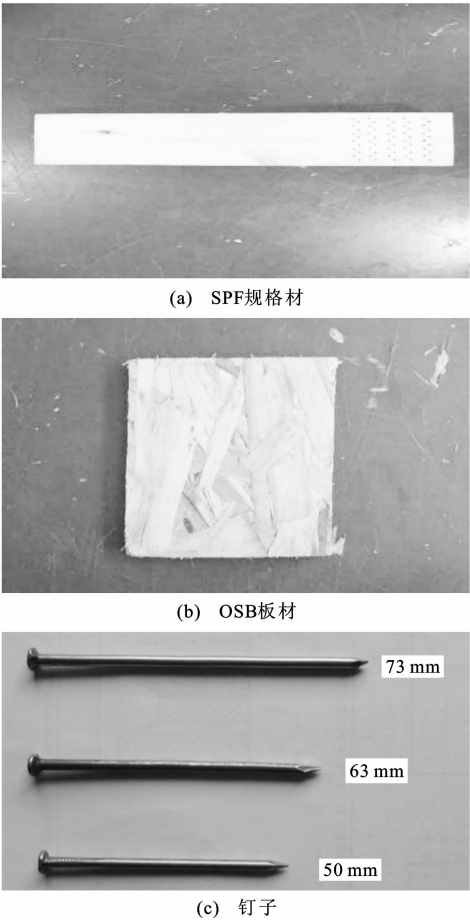


图 2 试验材料
Fig.2 Test Materials

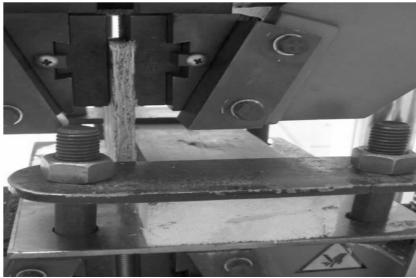


图 3 试件加载试验
Fig.3 Loading Test of Specimens

组试件的荷载-位移曲线见图 4。

第 1~3 组试件的平均荷载-位移曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,加载方向垂直于木纹方向试件的极限承载力随着钉子长度和直径增大而增大,这是因为钉子的长度和直径越大,与木材的相互作用越强。

1. 2. 2 加载方向平行于木纹的试件

第 4~6 组试件的主要破坏形式为钉子被拔出墙骨柱或钉头从覆面板中拔出,覆面板只在钉头处破碎,墙骨柱 SPF 规格材基本没有破坏。3 组试件

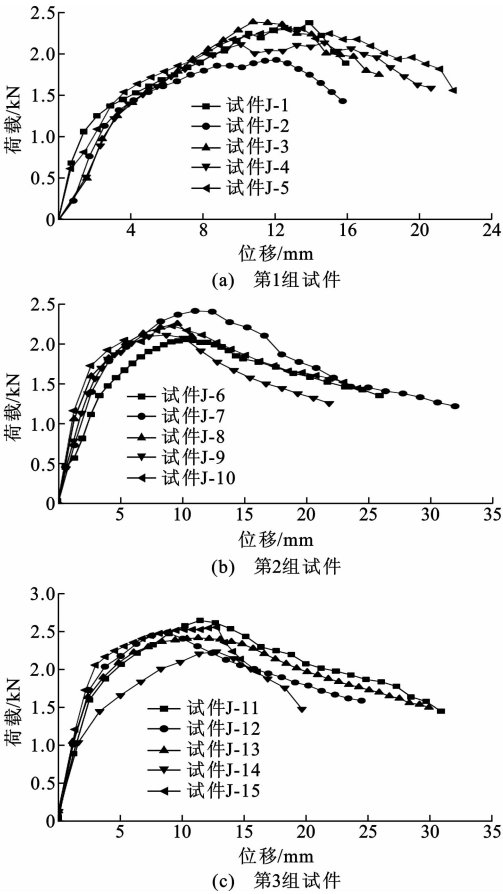


图 4 加载方向垂直于木纹试件的荷载-位移曲线
Fig.4 Load-displacement Curves of Specimens with Load Direction Which is Perpendicular to Grain

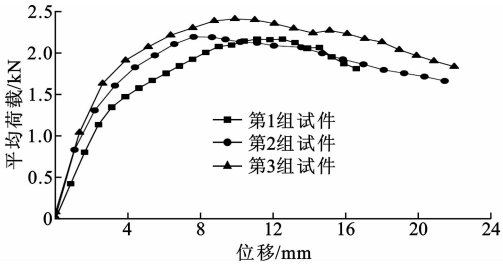


图 5 第 1~3 组试件的平均荷载-位移曲线
Fig.5 Average Load-displacement Curves of Specimen Group 1 to Group 3

的荷载-位移曲线见图 6。

第 4~6 组试件的平均荷载-位移曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,加载方向平行于木纹方向试件的极限承载力随钉子长度和直径的变化没有加载方向垂直于木纹方向试件的明显,但其承载力普遍大于加载方向垂直于木纹的试件。

1. 2. 3 钉节点试验结论

钉节点试验的结果显示:加载方向平行于木纹方向试件的极限承载力略大于加载方向垂直于木纹

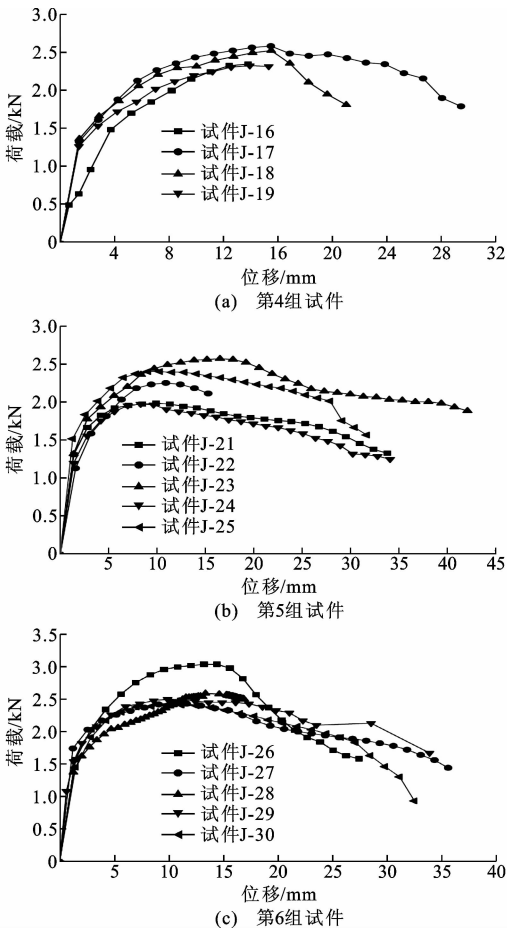


图 6 加载方向平行于木纹试件的荷载-位移曲线
Fig. 6 Load-displacement Curves of Specimens with Load Direction Which is Parallel to Grain

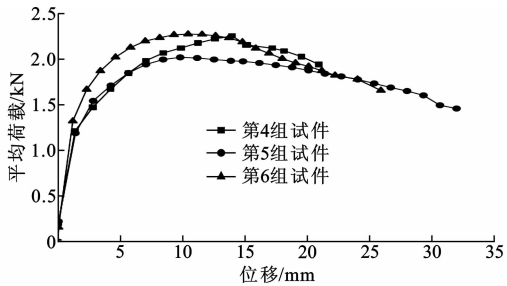


图 7 第 4~6 组试件的平均荷载-位移曲线
Fig. 7 Average Load-displacement Curves of Specimen Group 4 to Group 6

方向试件的极限承载力。对于加载方向垂直于木纹的试件,节点的极限承载力随着钉子直径和长度的增大而增大;对于加载方向平行于木纹的试件,节点的极限承载力随着钉子直径和长度的变化并不明显。

2 不同面板钉对抗侧承载力的影响

对剪力墙进行有限元分析,分别在有限元模型中输入中国钉节点的荷载-位移曲线和进口钉节点

的荷载-位移曲线,考查不同面板钉对剪力墙抗侧承载力的影响。

2.1 木剪力墙的有限元模型

采用有限元分析软件 SAP2000 建立木剪力墙模型并对其进行平面受力分析,计算模型主要由 3 种单元组成:梁单元用来模拟木框架和加载分配梁;壳单元用来模拟覆面板;连接单元用来模拟框架之间的连接、框架和覆面板之间的连接以及墙体和基础之间的连接。按照通常的做法,框架之间的连接可处理为铰接,框架和覆面板之间的连接采用多段线弹性连接单元模拟,可将钉节点试验所得的荷载-位移曲线输入此单元来体现节点的非线性性质^[3-5]。具体各单元参数如表 2 所示。

表 2 木剪力墙各构件特性和有限元模拟参数

Tab. 2 Component Characteristics and Finite Element Simulation Parameters of Wood Shear Walls

墙体构件	材料特性	有限元模拟
墙立柱、顶梁板、底梁板	SPF 规格材,弹性模量 $E = 9\,650\text{ MPa}$,密度 $\rho = 455\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	采用矩形截面的梁单元模拟
覆面板	OSB 板材,单块截面尺寸 $1.2\text{ m} \times 2.4\text{ m}$,纵向弹性模量 $E_y = 5\,445\text{ MPa}$,横向弹性模量 $E_x = 1\,840\text{ MPa}$,密度 $\rho = 650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	材料定为各向异性,采用壳单元模拟
钉子	钉节点试验得到的相关数据	采用两点连接多段线弹性连接单元模拟
抗倾覆锚固件	$U_1 = 60\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, $U_2 = 60\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, $R_3 = 60\text{ (kN}\cdot\text{m)}\cdot\text{rad}^{-1}$	采用一点线性连接单元模拟
加载分配梁	刚度较大	采用箱形截面钢梁单元模拟

注: U_1 、 U_2 分别为线性连接单元局部坐标系中沿轴 1、2 的弹簧刚度; R_3 为线性连接单元局部坐标系中绕轴 3 的弹簧刚度。

2.2 参数定义

图 8 为木剪力墙的荷载-位移曲线,曲线最高点处的荷载值定为剪力墙的最大抗侧承载力 F_{\max} ,剪力墙的刚度 K 取原点 O 到曲线上升段 $H/250$ 墙高点的割线刚度,其中 H 为剪力墙的高度。

2.3 可行性分析

本文中试验的钉均采用了中国市场上可以买到的钉子,进口钉试验数据采用文献[6]中的钉节点试验曲线,文献[6]中所采用的进口钉由加拿大国家林业工业技术研究院提供。按照美国 ASTM 钉力学性能试验标准^[7]分别对中国钉和进口钉进行力学性能测试,得到二者的名义屈服强度分别为 883.9、938.1 MPa。建立 4 个截面尺寸为 $2.44\text{ m} \times 2.44\text{ m}$

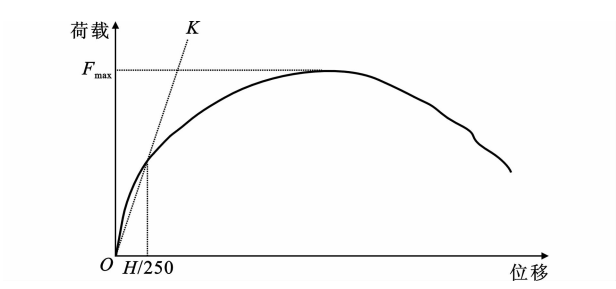


图 8 木剪力墙荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement Curve of Wood Shear Wall
的剪力墙有限元模型,分 A、B 两组,每组 2 个模型,分别采用覆面板厚度为 9.5 mm 的中国钉和进口钉的荷载-位移曲线建模,计算结果如表 3 所示。

表 3 中国钉与进口钉木剪力墙抗侧性能对比
Tab. 3 Comparisons of Lateral Performances of Wood Shear Walls with Domestic and Imported Nails

对比组 编号	钉子直 径/mm	最大抗侧 承载力 F_{max}/kN	承载力 相差百 分比/%	刚度 $K/$ ($kN \cdot mm^{-1}$)	刚度相 差百分 比/%
A	中国钉	2.8	20.15	0.7	10.7
	进口钉	2.8	20.29		
B	中国钉	3.0	24.37	3.8	7.6
	进口钉	3.0	25.34		

从计算结果可以看出,采用进口钉荷载-位移曲线的剪力墙模型的极限承载力和刚度都有一定的提高,但是提高值相比于剪力墙总的承载力和刚度而言很小,故可以认为,中国钉和进口钉有着基本相同的承载性能。另外,按照通常做法^[8-10],取剪力墙极限承载力的 40% 作为其抗侧承载力设计值时,有限元计算所得模型的抗侧承载力设计值见表 4,同时《木结构设计规范》(GB 50005—2003,以下简称规范)^[11]中剪力墙抗侧承载力设计值 V 计算公式为

$$V=f_d l$$

(1)

式中: f_d 为剪力墙的抗剪强度设计值; l 为平行于荷载方向的剪力墙墙肢长度。

由式(1)计算长度为 2.44 m 木剪力墙的抗侧承载力设计值,所得结果见表 4。

从表 4 可见,有限元计算所得的木剪力墙抗侧承载力设计值均大于按规范公式计算的结果,这说明有限元计算模型相对于规范中的公式有充分的可靠度,并且将中国钉应用于木剪力墙的建造中是偏于安全的。

综上所述,采用中国钉和进口钉的木剪力墙有着基本相同的抗侧性能且其抗侧承载力设计值大于按规范公式计算的结果,故在木剪力墙的建造中,中

表 4 木剪力墙抗侧承载力设计值对比
Tab. 4 Comparisons of Lateral Bearing Capacity Design Values of Wood Shear Walls kN

模型编号	有限元计算结果	规范公式计算结果
1	8.06	6.25
2	8.17	
3	9.75	6.84
4	10.14	

国钉和进口钉可以相互替代使用。

3 结 语

进行了木剪力墙覆面板和墙骨柱连接节点试验,并将试验所得的荷载-位移曲线输入有限元分析软件中,研究不同面板钉对剪力墙抗侧性能的影响以及中国钉应用在木剪力墙建造中的可行性。研究结果表明,采用中国钉和进口钉的木剪力墙有基本相同的极限承载力和刚度,且相对于规范中木剪力墙抗侧承载力设计值的计算结果是偏于安全的,因此,在木剪力墙的建造中,中国钉和进口钉可以相互替代使用。

参考文献:

References:

[1] 何敏娟, LAM F. 北美“轻型木结构”住宅建筑的特点[J]. 结构工程师, 2004(1): 1-5, 10.
HE Min-juan, LAM F. Properties of North American Wood Frame Residential Constructions[J]. Structural Engineers, 2004(1): 1-5, 10.

[2] 何敏娟, LAM F, 杨 军, 等. 木结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
HE Min-juan, LAM F, YANG Jun, et al. Design of Timber Structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[3] MI H. Behavior of Unblocked Wood Shear Walls[D]. New Brunswick: University of New Brunswick, 2004.

[4] 张盛东, 胡国玺, 屈文俊. 木剪力墙静力有限元分析[J]. 结构工程师, 2007, 23(6): 28-32.
ZHANG Sheng-dong, HU Guo-xi, QU Wen-jun. Static Finite Element Analysis on Wood Shear Walls[J]. Structural Engineers, 2007, 23(6): 28-32.

[5] DOLAN J D, FOSCHI R O. Structural Analysis Model for Static Loads on Timber Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(3): 851-861.

[6] 周丽娜. 高木剪力墙抗侧性能有限元分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.

参考文献:

References:

- [1] JGJ 106—2003, 建筑基桩检测技术规范[S].
JGJ 106—2003, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S].
- [2] NOVAK M, NOGAMI T, ABOUL-ELLA F. Dynamic Soil Reactions for Plane Strain Case[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1978, 104(4): 953-959.
- [3] VELETOS A S, DOTSON K W. Impedance of Soil Layer with Disturbed Boundary Zone[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 363-368.
- [4] YANG D Y, WANG K H, ZHANG Z Q, et al. Vertical Dynamic Response of Pile in a Radially Heterogeneous Soil Layer[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(8): 1039-1054.
- [5] HAN Y C, SABIN G C W. Impedances for Radially Inhomogeneous Viscoelastic Soil Media[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(9): 939-947.
- [6] 周铁桥, 王奎华, 谢康和, 等. 轴对称径向非均质土中桩的纵向振动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 720-725.
ZHOU Tie-qiao, WANG Kui-hua, XIE Kang-he, et al. Vertical Vibration Analysis of Piles in Radial Heterogeneous Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 720-725.
- [7] NOGAMI T, REN F, CHEN J W, et al. Vertical Vibration of Pile in Vibration-induced Excess Pore Pressure Field[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(5): 422-429.
- [8] ZENG X, RAJAPAKSE R K N D. Dynamic Axial Load Transfer from Elastic Bar to Poroelastic Medium[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(9): 1048-1055.
- [9] 李强, 王奎华, 谢康和. 饱和土中端承桩纵向振动特性研究[J]. 力学学报, 2004, 36(4): 435-442.
LI Qiang, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Vertical Vibration of an End Bearing Pile Embedded in Saturated Soil[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 36(4): 435-442.
- [10] 李强. 饱和土中端承桩非完全黏结下的竖向振动特性[J]. 水利学报, 2007, 38(3): 349-354.
LI Qiang. Vertical Vibration of Piles Embedded in Saturated Soil Considering the Imperfect Contact[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 349-354.
- [11] 白冰, 徐建平, 周健. 饱和软粘土地基沉桩过程中桩土挤压应力及超孔压计算[J]. 重庆交通学院学报, 2000, 19(3): 1-3, 7.
BAI Bing, XU Jian-ping, ZHOU Jian. Study on Squeezing Effect Against Soil and Pore Pressure by Pile Pushing in Saturated Soft Clay Foundation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2000, 19(3): 1-3, 7.
- [12] MARTIN P P, SEED H B. Simplified Procedure for Effective Stress Analysis of Ground Response[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(6): 739-758.
- [13] BIOT M A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-saturated Porous Solid I: Low-frequency Range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.
- (上接第 5 页)
- ZHOU Li-na. Finite Element Analysis on Racking Performance of Tall Wood Shear Walls[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] ASTM, Standard Test Method for Determining Bending Yield Moment of Nails. Designation F 1575[S].
- [8] 马志林, 史庆轩, 王伟. 钢筋混凝土联肢剪力墙弹塑性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 60-64.
MA Zhi-lin, SHI Qing-xuan, WANG Wei. Elastoplastic Analysis of Reinforced Concrete Coupled Shear Walls[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 60-64.
- [9] 陈以一, 王拓. 半组合结构压弯构件滞回试验的有限元模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 109-114.
- CHEN Yi-yi, WANG Tuo. Finite Element Simulation on Hysteretic Experiment of Partially Encased Composite Structures Subjected to Combined Compression and Bending Members[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 109-114.
- [10] 蒋路, 陈以一, 王伟栋. 带缝钢板剪力墙弹性抗侧刚度及简化模型研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(3): 115-120.
JIANG Lu, CHEN Yi-yi, WANG Wei-dong. Research on Elastic Lateral Stiffness and Simplified Model of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 115-120.
- [11] GB 50005—2003, 木结构设计规范[S].
GB 50005—2003, Code for Design of Timber Structures[S].