

文章编号:1673-2049(2008)01-0018-05

预制混凝土板对组合剪力墙抗剪 静力性能的影响

张素梅, 吴志坚, 马欣伯

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:采用 ANSYS 软件分析了预制混凝土板厚度和混凝土强度对钢板混凝土组合剪力墙承载力及初始剪切刚度的影响,通过与钢板剪力墙对比,探讨了钢板混凝土组合剪力墙的受力机理和破坏模式。研究表明:与钢板剪力墙相比,预制混凝土板能够有效地抑制钢板屈曲,明显地提高钢板混凝土组合剪力墙抗剪承载力及初始剪切刚度,钢板的受力形式也发生了明显的变化。

关键词:预制混凝土板;静力性能;有限元分析;组合剪力墙;屈曲

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

Influence of Precast Concrete-plate on Static Behavior of Steel-concrete Composite Shear Wall

ZHANG Su-mei, WU Zhi-jian, MA Xin-bo

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: The commercial software ANSYS was employed to investigate the mechanical behavior of steel-concrete composite shear wall (SCSW) under mono-static load. The influences of concrete-plate thickness and concrete strength on SCSW ultimate bearing capacity and SCSW initial shear stiffness were discussed in detail after comparison of the mechanical behavior of the two types of shear walls. The research results show that concrete-plate thickness is a key parameter to predict the behavior of SCSW, and variation of concrete grade has little effect on static behavior of SCSW.

Key words: precast concrete-plate; static behavior; finite element analysis; composite shear wall; buckling

0 引言

钢板剪力墙是将钢板通过焊缝或螺栓连接内嵌于钢框架或者钢筋混凝土框架内的一种剪力墙形式,为防止钢板在受力时过早发生屈曲,可在钢板两侧通过连接件贴附预制钢筋混凝土板,这就形成了钢板混凝土组合剪力墙^[1]。钢板混凝土组合剪力墙在克服了钢筋混凝土剪力墙自重大、角部混凝土易

开裂、易碎等缺点的同时,还具有延性好、施工速度快等一系列优点^[2]。钢板-预制混凝土板组合剪力墙(以下简称组合剪力墙)的预制混凝土板与周边框架梁、柱间预留适当的缝隙,在较小的层间侧移下,预制混凝土板并不直接承担水平荷载,而仅仅作作为钢板的侧向约束,防止钢板发生屈曲;在发生较大的层间侧移时,预制混凝土板先在角部与框架梁、柱接触,随着接触面不断增大,预制混凝土板开始承担一

收稿日期:2007-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50478029)

作者简介:张素梅(1963-),女,辽宁兴城人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:smzhang@hit.edu.cn。

部分水平荷载,直至其最终开裂破坏^[3-7]。

1 ANSYS 计算模型的建立

1.1 力学模型

钢板-预制混凝土板组合剪力墙如图 1 所示。本文中从剪力墙结构体系中选取一片进行分析,计算模型如图 2 所示。考虑到工程实际,模型钢板高度 H 取 3 000 mm,钢板长度 L 取 4 500 mm;钢板的厚度 t 分别取 6、20 mm;框架柱选用焊接箱形截面 $450\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ (抗弯刚度 $EI=2.64\times 10^2\text{ MN}\cdot\text{m}^2$,抗压刚度 $EA=8.75\text{ GN}$);框架梁抗弯刚度 EI 无穷大,抗压刚度 $EA=1.68\text{ GN}$ (窄翼缘 H 型钢 $\text{HN}400\times 200$ 的抗压刚度);预制混凝土板与钢板边长相同,通过连接件贴附在钢板上,连接件沿 x 方向、 y 方向均匀布置,间距 300 mm,连接件处预制混凝土板与钢板在 z 方向上的位移相同;在进行非线性分析时,选取该板的 1 阶屈曲模态作为钢板几何初始缺陷的波形,根据文献[8]中的建议和文献[9]、[10]中的要求,取初始缺陷最大幅值为钢板长边边长的 1/1 000。模型的边界条件为(图 2):框架梁和框架柱铰接;框架梁、柱沿 z 方向的位移以及绕 x 轴、 y 轴的转角均为 0,在 x - y 平面内,限制 C 点和 D 点 x 方向、 y 方向的位移。

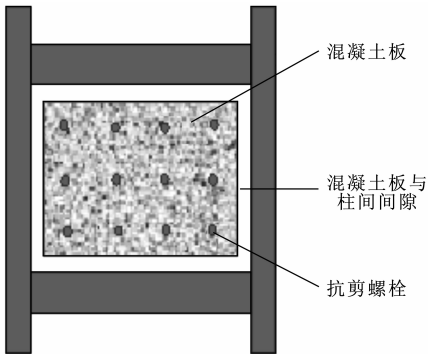


图 1 钢板-预制混凝土板组合剪力墙
Fig. 1 Precast Concrete-plate of Steel-concrete Composite Shear Wall

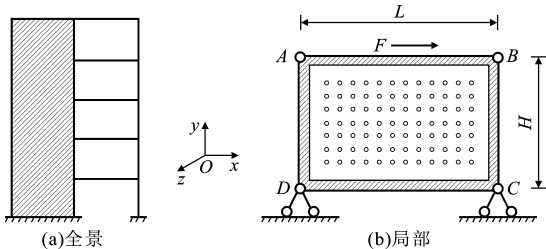


图 2 力学模型
Fig. 2 Mechanical Model

1.2 单元选取

本文中在采用 ANSYS 有限元软件进行分析

时,选用 Shell181 单元模拟钢板和预制混凝土板, Beam189 单元模拟框架梁、柱。Shell181 单元是一种 4 节点中等厚度的平板壳单元,每个节点有 6 个自由度(x 方向、 y 方向、 z 方向上的线位移和绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的转角),单元可以考虑塑性、应力强化、大变形和大应变特性。Beam189 单元是三维二次梁单元,每个节点有 6 个自由度,可以考虑弹性、蠕变及塑性特性,这个单元可用于线性、大角度转动和非线性大应变问题的分析,有限元模型见图 3。

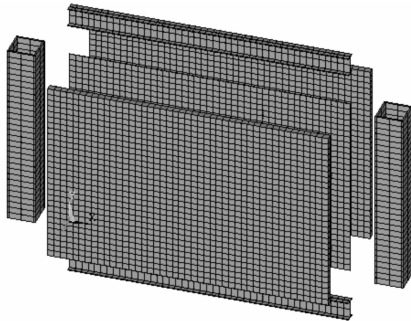


图 3 有限元模型
Fig. 3 Finite Element Model

1.3 材料本构关系

本文中选用的钢材应力-应变关系曲线如图 4 所示,该曲线由钢材弹性模量 E 、单轴屈服强度 f_y 来确定,钢材进入屈服阶段后服从 Von Mises 屈服准则,钢材泊松比 $\nu=0.3$,屈服强度 $f_y=235\text{ MPa}$,弹性模量 $E=2.06\times 10^5\text{ MPa}$,强化段的斜率取为 $2\%E$ 。预制混凝土板截面的弯矩-转角(M - α)关系曲线如图 5 所示。预制混凝土板配置适量钢筋,其截面开裂弯矩 M_{cr} 与极限弯矩 M_u 相同,假设预制混凝土板截面在达到极限弯矩 M_u 后随转角的增大保持不变,且不考虑预制混凝土板受压区混凝土压溃,则 M_{cr} 的计算公式为

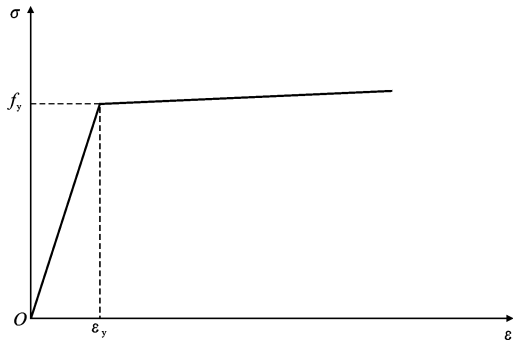


图 4 钢材应力-应变关系
Fig. 4 Relation of Stress and Strain of Steel

$$M_{cr}=f_t^k b l_c^2 / 6 \quad (1)$$

式中: f_t^k 为混凝土的抗拉强度标准值; b 为计算板带

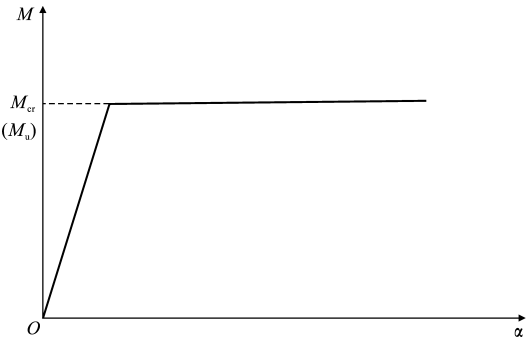


图 5 预制混凝土板截面的弯矩-转角关系
Fig. 5 Relation of Moment and Corner of
Precast Concrete-plate

宽度； t_c 为预制混凝土板厚度。

2 对组合剪力墙抗剪静力性能的影响

在本文分析过程中取预制混凝土板厚度 t_c 为 40~120 mm，混凝土强度等级为 C20~C40。

图 6、7 分别为不同预制混凝土板厚度 t_c 和不同混凝土强度下组合剪力墙的平均剪应力-层间侧移角曲线。图 6、7 中横轴为图 2 所示模型的层间侧移角 θ ，纵轴为所施加的平均剪应力 τ ， $\tau=F/(Lt)$ ， F 为模型上施加的荷载。

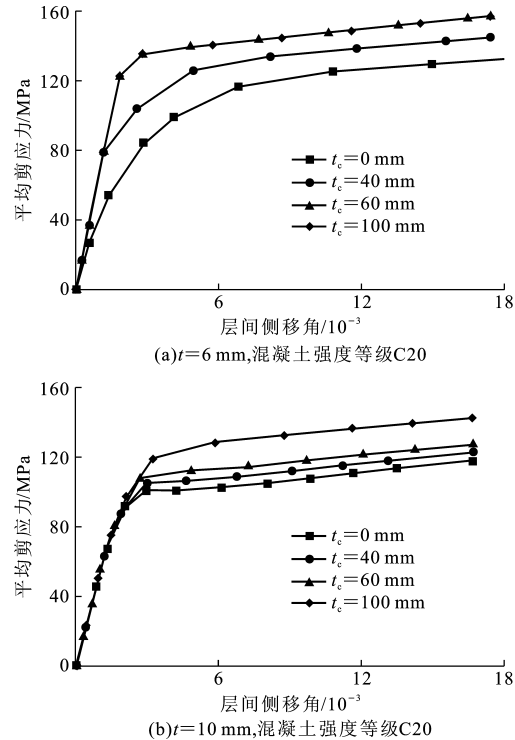


图 6 不同预制混凝土板厚度下组合剪力墙的平均剪应力-层间侧移角关系

Fig. 6 Relations of Average Shears and Displacements
Under Different Thicknesses of Precast Concrete-plate

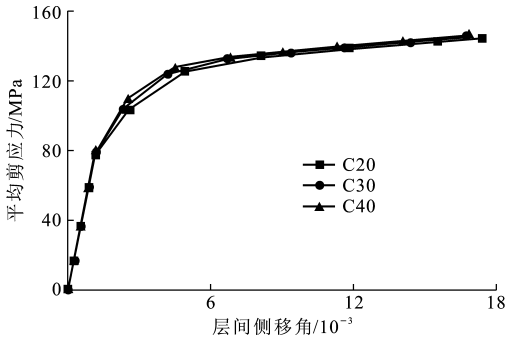


图 7 不同混凝土强度下组合剪力墙的平均剪应力-层间侧移角关系 ($t=6\text{ mm}$, $t_c=40\text{ mm}$)
Fig. 7 Relations of Average Shears and Displacements
Under Different Concrete Grades of Precast of
Concrete-plate ($t=6\text{ mm}$, $t_c=40\text{ mm}$)

由图 6 和图 7 可以看出：

(1) 在不同预制混凝土板厚度和混凝土强度下，不考虑预制混凝土板混凝土压碎退出工作，组合剪力墙(包括 $t_c=0\text{ mm}$ 时的钢板剪力墙)在单向荷载作用下的荷载-位移曲线均没有明显的峰值点和下降段，如考虑预制混凝土板混凝土压碎退出工作，贴附较薄预制混凝土板的组合剪力墙平均剪应力-层间侧移角曲线可能因为混凝土的压碎退出工作，从而出现下降段，但其不会低于相同情况下钢板剪力墙的平均剪应力-层间侧移角曲线。

(2) 在工程常用的范围内，混凝土强度等级对组合剪力墙抗剪静力性能的影响不大，预制混凝土板厚度 t_c 对组合剪力墙抗剪静力性能的影响较大。由式(1)可知，预制混凝土板的承载能力与混凝土抗拉强度标准值 f_t^k 呈线性关系而与预制混凝土板厚度 t_c 呈二次方关系，而且混凝土抗拉强度标准值 f_t^k 的变化范围要小于预制混凝土板厚度 t_c 的变化范围，因此混凝土板厚度 t_c 的影响显然比 f_t^k 要大。

(3) 对于不同厚度的内置钢板，完全限制其出平面位移所需要最小预制混凝土板厚度也不相同。在常用的钢板厚度取值范围内，抑制钢板屈曲所需预制混凝土板的厚度随钢板厚度的增大而增大。在一般情况下，100 mm 厚度的预制混凝土板已能够满足完全限制钢板屈曲的要求。

中国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)和《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—98)规定多、高层建筑钢结构第 1、2 阶段抗震设计结构层间侧移角分别不得超过层高的 1/300 和 1/70。本文中定义：层间侧移角 θ 为 1/300 时对应的剪力墙承载力为 $\tau_{1/300}$ ；层间侧移角 θ 为 1/70 时对应的剪力

墙承载力为 $\tau_{1/70}$, 剪力墙荷载-位移曲线在原点处的切线斜率为初始剪切刚度 K_c 。图 8、9 分别为预制

混凝土板厚度 t_c 对组合剪力墙承载力 $\tau_{1/300}$ 、 $\tau_{1/70}$ 及初始剪切刚度 K_c 的影响。

由图 8 和图 9 可以看出：

(1)组合剪力墙 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 随预制混凝土板厚度 t_c 的增大而增大,但当预制混凝土板的厚度大于一定值时,预制混凝土板的厚度对 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 几乎没有影响。这是因为预制混凝土板的存在抑制了钢板的屈曲,当预制混凝土板达到一定厚度时,钢板面外已经可以忽略,钢板此时主要以截面受剪承受外荷载,再增大预制混凝土板厚度对于 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 已基本没有影响。

(2)预制混凝土板厚度 t_c 对厚钢板组合剪力墙初始剪切刚度几乎没有影响,可以忽略不计。这是因为在厚钢板组合剪力墙受力初期,钢板并不屈曲,预制混凝土板未发挥作用,组合剪力墙初始剪切刚度与预制混凝土板厚度没有关系;而对于薄钢板组合剪力墙,组合剪力墙钢板更容易发生屈曲,预制混凝土板的存在提高了剪力墙的初始剪切刚度。

(3)在周边框架不变的情况下,随着钢板厚度的增大,钢板(或组合)剪力墙的承载力和初始剪切刚度均减小。这是因为本文中分析时选取的能够使薄钢板充分发挥性能的周边框架对厚钢板而言相对较弱,因此为了充分发挥厚钢板性能,在实际设计中应当考虑钢板与周边框架的匹配。

图 10 为 $t_c=6\text{ mm}$ 、 $\theta=1/300$ 时不同预制混凝土

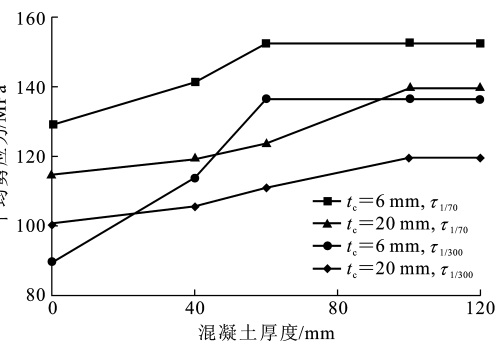


图 8 预制混凝土板厚度对平均剪应力的影响
Fig. 8 Influences of Thicknesses of Precast Concrete-plate on Average Shears

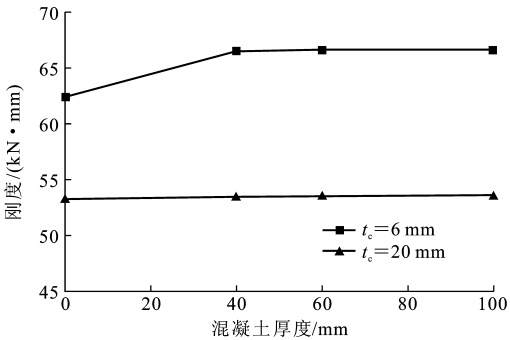


图 9 C20 预制混凝土板厚度对剪力墙刚度的影响
Fig. 9 Influences of Thicknesses of Precast Concrete-plate on Stiffnesses

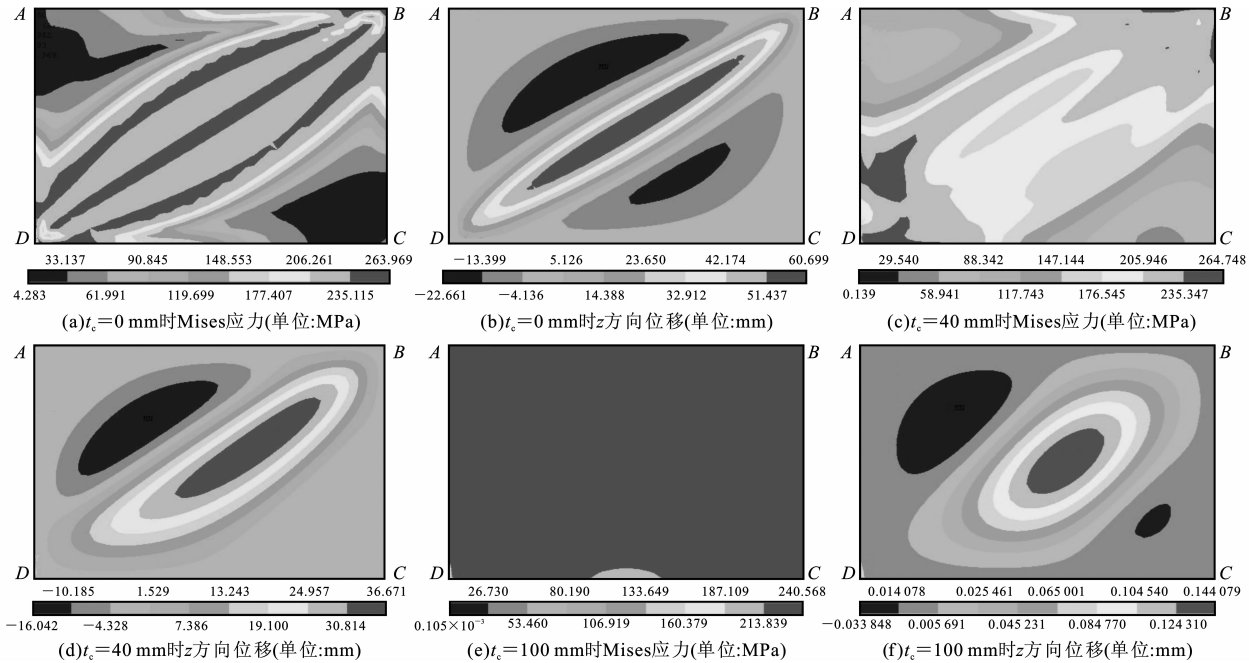


图 10 不同预制混凝土板厚度下剪力墙钢板的应力和位移分布

Fig. 10 Stresse and Displacement Distributions of Shear Wall Steel Plate Under Different Thicknesses of Precast Concrete-plate

土板厚度下剪力墙钢板的应力及位移分布。

由图 10 中可以看出:

(1) 预制混凝土板较薄的组合剪力墙受力方式主要是以沿 BD 对角线方向形成的拉力带承受剪力[图 10(a)], 拉力带区域钢板第一主应力(沿对角线 BD 方向)与第二主应力(沿对角线 AC 方向)均为正值且数值相近, 此区域内的钢板处于双向受拉平面应力状态; 随着预制混凝土板厚度 t_c 的增大, 组合剪力墙的受力方式由以对角线拉力带承受剪力向拉力带和截面受剪共同承受剪力过渡[图 10(b)]; 直至当混凝土板厚度达到完全限制钢板屈曲时, 组合剪力墙的受力方式则转变为钢板全截面受剪[图 10(c)]。

(2) 预制混凝土板的存在有效抑制了钢板的屈曲, 随着预制混凝土板厚度增大, 钢板出平面位移逐渐减小。

3 结 语

预制混凝土板厚度是影响组合剪力墙抗剪静力性能、受力机理和破坏形式的重要因素, 在常用的混凝土强度等级下, 改变预制混凝土板混凝土强度等级对组合剪力墙抗剪静力性能和破坏形式几乎没有影响。当预制混凝土板厚度 t_c 较小时, 组合剪力墙的受力方式是以对角线拉力带承受剪力, 随着预制混凝土板厚度 t_c 的增大, 组合剪力墙的受力方式逐渐向拉力带和截面共同承受剪力过渡, 沿对角线的拉力带区域开始变小; 当预制混凝土板厚度 t_c 增大至足够完全限制钢板出平面屈曲时, 组合剪力墙的受力方式转变为钢板全截面受剪。

参考文献:

References:

- [1] ZHAO Qiu-hong, ASTANEH-ASL A. Cyclic Behavior of Traditional and Innovative Composite Shear Walls[J]. Journal of Structure Engineering, 2004, 130(2): 271-284.
- [2] 郭彦林, 董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构, 2005, 20(1): 1-6.
GUO Yan-lin, DONG Quan-li. Research and Application of Steel Plate Shear Wall in High-rise Buildings [J]. Steel Construction, 2005, 20(1): 1-6.
- [3] 楼梦麟, 李守继. 低矮小开口剪力墙自由振动问题的

半解析解[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(3): 50-53.

LOU Meng-lin, LI Shou-ji. Semi-analytical Solution for Free Vibration of Short Shear Wall with Small Openings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 50-53.

- [4] 刘伯权, 潘元. 框架-抗震墙结构抗震墙抗弯刚度的优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 55-57.

LIU Bo-quan, PAN Yuan. Study on Optimum Bending Rigidity of Seismic Wall in Frame-shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 55-57.

- [5] 丁大钧. 再论墙体改革与可持续发展[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 1-15.

DING Da-jun. Re-discussion of Walls Innovation and Sustainable Development[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 1-15.

- [6] 蒋波, 应宏伟, 谢康和, 等. 平动模式下挡土墙非极限状态主动土压力计算[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 24-27.

JIANG Bo, YING Hong-wei, XIE Kang-he, et al. Computation of Active Earth Pressure Under Non-limit State for Retaining Wall with Mode of Translation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 24-27.

- [7] 李杰, 李奎明. 钢筋混凝土短肢剪力墙结构试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 12-20.

LI Jie, LI Kui-ming. Experiment on RC Short-leg Shear Wall Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 12-20.

- [8] 董莉. 开缝与不开缝钢板混凝土组合剪力墙抗剪性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005: 27-30.

DONG Li. Shear Resistance Behavior of Steel-concrete Composite Shear Wall with and Without Slits [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005: 27-30.

- [9] GB 50204—92, 混凝土结构工程施工及验收规范[S].

GB 50204—92, Code for Acceptance of Construction Quality of Concrete Structures[S].

- [10] GB J205—83, 钢结构工程施工及验收规范[S].

GB J205—83, Code for Acceptance and Construction Quality of Steel Structures[S].