装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述*

赵作周[1]， 周 剑[1]， 侯建群[2]， 任宝双[2]
（1 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室，北京 100084；
2 清华大学建筑设计研究院有限公司，北京 100084）

[摘要] 归纳了现有装配式混凝土剪力墙水平缝的连接方式和混凝土界面构造，综述了对界面抗剪机理的认识和国内外规范中的水平缝受剪承载力计算方法。通过对一座剪力墙结构中典型墙体水平缝受剪设计算例和对已有界面抗剪试验结果的计算分析，比较了既有典型计算公式间的差异。发现现行规范中的计算公式均基于剪切摩擦理论，大多来源于新旧混凝土叠合面抗剪试验研究成果，所有计算公式均保守估计了水平缝叠合面的受剪承载力，但其中一些公式对拼缝齿槽面的设计结果偏不安全。基于上述分析，建议对水平缝叠合面可采用《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ 1—2014）中的公式进行计算，对于拼缝齿槽面可参照《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ 1—2014）或《预制装配整体式房屋混凝土剪力墙结构技术规范》（DB23/T1400—2010）进行计算；建议对现有装配式混凝土剪力墙水平缝应根据界面类型做进一步系统的专门研究，考虑复合受力、材料性能、加载方式、轴向压力及总受剪承载力限值等因素的影响，提出能准确预测、简单方便的受剪承载力计算公式。

[关键词] 装配式；剪力墙；水平缝；剪切摩擦；受剪承载力
中图分类号：TU973.16，TU973.2 文献标识码：A 文章编号：1002-848X（2015）12-0040-08

Review of studies on shear resisting mechanisms and calculating formulas of shear resisting capacity of horizontal joints in fabricated reinforced concrete shear wall structures

Zhao Zuozhou[1], Zhou Jian[1], Hou Jianqun[2], Ren Baoshuang[2]
(1 Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Architectural Design and Research Institute of Tsinghua University Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Different detailing methods and concrete interfaces of horizontal joints in fabricated reinforced concrete shear wall structures have been summarized, and researches on shear resisting mechanisms and the available calculating formulas of shear resisting capacity have been reviewed. Typical formulas have been compared by a design example and analysis of shear resisting test results of concrete surface. The comparisons have revealed that the available formulas are mainly based on shear-friction theory and derived from the experiment results of the shear joint interface between the existing and the new concrete. The shear resisting capacities of the composite interface predicted based on the formulas are conservative. However, the shear resisting capacity of the horizontal joints with shear keys might be overestimated in some cases. The shear resisting capacity of the composite interface can be predicted by the formula in *Technical specification for precast concrete structures* (JGJ 1—2014), the shear resisting capacity of joints with shear keys can be calculated by *Technical specification for precast concrete structures* (JGJ 1—2014) or *Technical specification for concrete shear wall structure assembled with precast components* (DB23/T1400—2010). It has been proposed that a systematic study on shear behavior of horizontal joints of the existing fabricated reinforced concrete shear wall structures, and considering combined force condition, material property, limit of axial compression force and total shear resisting capacity should be carried out to get a reliable and friendly usable formula.

Keywords: fabricated; shear wall; horizontal joint; shear friction; shear resisting capacity

0 引言

工业化剪力墙住宅结构近年来有了飞速发展，出现了预制钢筋混凝土剪力墙结构[1]、叠合板式剪力墙结构[2]、预制圆孔板剪力墙结构[3,4]、装配整体式双向孔空心模板剪力墙结构[5]等体系。对于装配式混凝土剪力墙结构而言，预制构件之间的连接问题是其研究与推广应用中的关键技术问题之一，尤其是上下层预制剪力墙之间连接（即水平缝连接）的可靠性对装配式剪力墙结构整体抗震性能至关重要。Becker J M 等[6]研究发现，水平缝开裂及墙体摇摆会导致结构刚度退化，结构自振周期延长，

* 国家高技术研究发展计划（863计划）课题（编号2013AA041307），清华大学自主科研基金项目（2012THZ02-1）。
作者简介：赵作周，博士，副教授，Email：zzzhao@tsinghua.edu.cn。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

进而影响结构地震作用的大小与分布。剪力墙间水平缝连接和剪力墙间竖缝连接不同，水平缝连接较弱对于预制剪力墙结构的抗震不利，但竖缝连接较弱有时却可以改善结构的抗震性能。通过一栋高层住宅结构中一片剪力墙沿高度水平缝的受剪设计算例和对已有界面抗剪试验结果的计算分析，比较了国内外相关规范中水平缝受剪承载力的计算公式，发现不同计算公式的计算结果之间差异较大，部分计算结果可能高估了实际的受剪承载力。

本文在归纳汇总既有水平缝连接的构造方法和抗剪机理研究成果的基础上，对需要继续研究的问题提出了意见和建议。

1　水平缝构造

1.1　上下层间的连接构造

图 1 所示为几种典型水平缝的连接构造方式。Magaña R A 等[7] 发现套筒灌浆连接牢固可靠，若构造合理，变形能力也较好，对后张拉连接而言，若耗能能力不起关键作用，锚具及连接器不提前破坏，也可用于预制剪力墙结构。

Soudki K A 等[8,9] 通过对不同形式的软钢（有明显屈服平台钢筋）连接和后张预应力连接研究发现，角钢焊接连接、套筒连接、钢管螺栓连接均具有较好的延性，采用套筒连接时将套筒以上部分连接钢筋进行无粘结处理能在不损失强度的前提下提高连接的变形能力，抗剪键能够有效限制水平滑移，无粘结预应力钢筋连接变形能力增强，但会略微降低强度和刚度，在给定变形水平下，无粘结连接的累计耗能大于有粘结连接。Kurama Y C[10] 发现软钢和后张预应力混合连接中以后张拉预应力钢筋连接为主，软钢连接可根据受拉和受压屈服设计，在地震中起耗能作用，两种连接可以共同抵抗侧向荷载产生的弯矩，充分发挥各种材料的作用。Smith B J 等[11] 发现混合连接剪力墙既有较强的耗能能力，又可充分发挥后张拉连接的自复位功能，而单纯的软钢连接尽管耗能能力强，但由于水平滑移较大导致较严重的强度和刚度退化，墙体极限位移角较小。

《装配式大板居住建筑设计和施工规程》（JGJ 1—91）[12]（简称大板规范）中要求大板墙水平缝采用钢筋焊接与设置现浇销键的连接方式。近年来，对预制剪力墙结构中上下层预制墙体竖向钢筋采用的套筒灌浆和留洞浆锚搭接连接方法进行了深入研究[13-16]，部分成果已纳入《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ 1—2014）[17]（简称装配式规程）。有研究人员还研究了混凝土现浇带的连接方式[18,19]。安徽省地方标准《叠合板式混凝土剪力墙结构技术规程》（DB34/T 810—2008）[20] 对叠合板式混凝土剪力墙连接方式作了详细规定。

1.2　水平缝混凝土界面构造

水平缝抗剪除与上下层钢筋的连接方式有关外，还与水平缝处混凝土的界面构造有关。对于预制剪力墙，预制墙体底部设置齿槽或处理为粗糙面，下层楼板或圈梁对应位置一般经凿毛处理为粗糙面，吊装时二者之间留有一定空隙，待调整到位后进行灌浆或塞缝，此种界面处理方式称为拼缝（图 2(a)～(c)）。对于叠合板式剪力墙及其他需要现场浇筑一部分混凝土的剪力墙结构，水平缝处界面

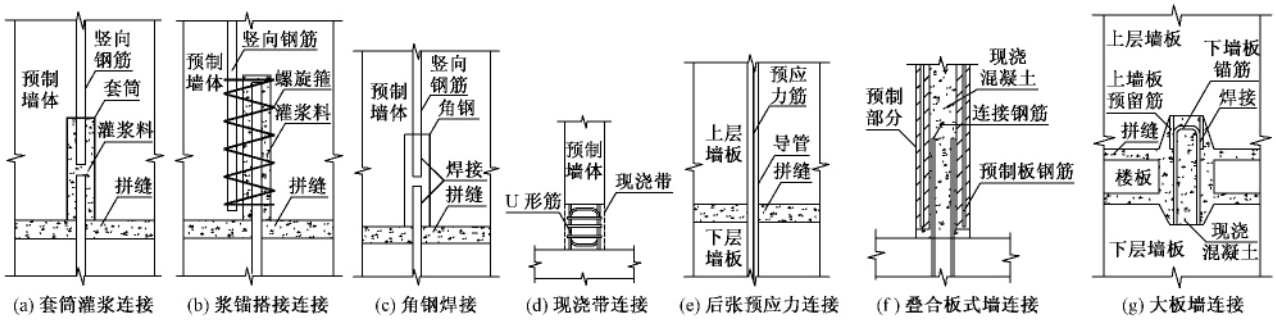

图 1　装配式混凝土剪力墙水平缝连接方式

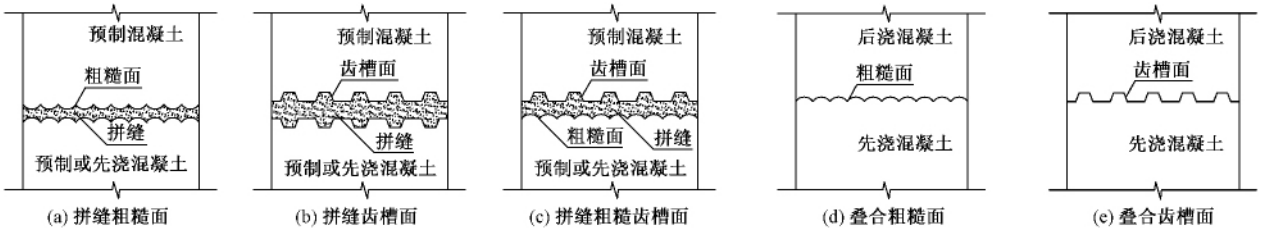

图 2　装配式混凝土剪力墙水平缝混凝土界面类型

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

即为新旧混凝土叠合面(图 2(d),(e)),类似于现浇混凝土结构中的施工缝。

2 水平缝抗剪计算研究

2.1 混凝土界面剪力传递问题及其计算理论

混凝土界面剪力传递问题主要指因不同时间浇筑混凝土形成的连接界面(诸如预制梁与现浇板的界面或其他一些预制混凝土连接界面)的剪力传递及抗剪问题[21],这种剪力传递机制不同于一般现浇钢筋混凝土梁的抗剪问题。其他如混凝土构件因材料收缩、温度变化等原因产生裂缝,由于材料、截面尺寸不一致等形成分界面,沿这些裂缝及分界面的剪力作用亦视为剪力传递问题。界面剪力传递问题主要包括现浇构件未裂及预裂界面抗剪,混凝土叠合构件的叠合面抗剪,装配式混凝土结构中的竖缝及水平缝抗剪,混凝土结构加固中新旧混凝土界面抗剪等。本文论述对象为装配式剪力墙结构的水平缝抗剪问题。

目前,针对预制混凝土与现浇混凝土界面受剪承载力的计算方法大多数基于剪切摩擦理论[22,23]。剪切摩擦理论是指当剪力作用于混凝土裂缝界面时,界面会发生相对滑移,如果界面粗糙且不规则,则界面在相对滑移的同时会发生相对分离,从而在穿过界面的钢筋中产生拉力,反过来给混凝土界面施加压力,作用于界面上的剪力将被主要由压力所产生的混凝土界面摩擦力抵抗(图 3)。

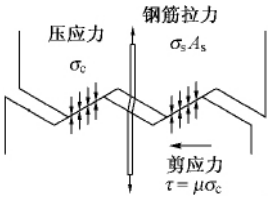

图 3 剪切摩擦模型

与剪切摩擦理论有所不同,Mattock A H[24] 认为界面的抗剪作用由钢筋的剪切摩擦力、界面的细小粗糙物的抗剪作用及钢筋的销栓作用组成。Laible J P 等[25] 把界面的粗糙分为总体粗糙和局部粗糙(图 4),当界面分离较小时主要依靠局部粗糙引起的骨料和砂浆的挤压来抗剪,而钢筋的剪切摩擦力主要由整体粗糙引起。Walraven J C[26] 认为界面完全在骨料和水泥浆之间形成,在剪应力和正应力的作用下,界面上水泥浆基质局部变形,接触面上同时传递剪应力和正应力。秦文钺等[27] 在以上理论的基础上结合试验研究认为预裂剪切面主要以突出物咬合机构、钢筋拉力在平行于剪切面方向的分量及其销栓作用抵抗剪力。

对于齿槽界面,有些研究基于剪切摩擦理论,认为界面受剪承载力由抗剪键的抗剪作用和钢筋的剪切摩擦作用组成,而对于抗剪键的抗剪计算包括抗剪强度[28] 和斜压杆理论[29](图 5)两种。此外,也

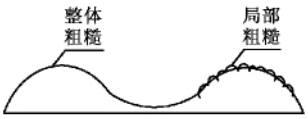

图 4 整体粗糙和局部粗糙

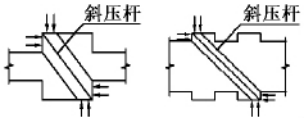

图 5 拼缝齿槽斜压杆模型

有基于摩尔库伦破坏准则[30] 推导的计算公式。

2.2 水平缝抗剪的影响因素

2.2.1 受剪承载力来源

水平缝受剪承载力的来源有界面混凝土直接抗剪(粘结、细小粗糙物、骨料咬合)、钢筋剪切摩擦、钢筋销栓作用、轴向压力作用、抗剪键抗剪等。在界面发生剪切滑移时,这些抗剪作用的贡献大小及变化比较复杂。准确计算受剪承载力的关键就是研究清楚界面剪切破坏的过程及极限状态时的抗剪受力机理。Tsoukantas S G 等[31] 认为预制构件间接缝的抗剪作用由摩擦力(包括轴向压力引起的和剪切摩擦作用引起的两部分)和钢筋销栓作用构成,基于此推导了关于剪切滑移量的计算公式,发现摩擦抗剪占总受剪承载力的 80% ~90%。Rizkalla S H 等[32] 发现,无抗剪钢筋的直线型拼缝连接的受剪承载力由法向压力产生的摩擦力提供,对于无筋拼缝齿槽连接,由抗剪键的抗剪作用和轴向压力的摩擦作用提供。Soudki K A 等[33] 认为有抗剪钢筋直线型拼缝连接的总受剪承载力由轴向压力产生的摩擦力、钢筋的剪切摩擦及拉力水平分量构成,但计算时一般忽略钢筋拉力的水平分量。Crisafulli F J 等[34] 在计算受剪承载力时,同时考虑了摩擦作用和钢筋销栓作用(钢筋扭折时拉力的水平分量)。万墨林等[28] 认为大板结构的水平缝受剪承载力由抗剪键抗剪作用、轴力和钢筋的剪切摩擦作用组成。同济大学的研究报告[35] 认为对于新旧钢筋混凝土界面,在荷载较小时主要由混凝土直接抗剪,随着荷载增加,销栓作用和摩擦抗力逐渐增强,极限荷载主要由骨料的咬合力及摩擦力来承担,剩余抗力主要由销栓力构成。可见,对不同界面而言,受剪承载力的构成不同,对同类型界面抗剪机制的研究也并不统一。

2.2.2 界面构造

已有研究中,针对叠合粗糙面和拼缝齿槽面的抗剪研究较多,但对叠合齿槽面和其他拼缝界面的研究较少。与叠合界面不同,拼缝界面的抗剪机制与拼缝材料的强度、拼缝尺寸等有关,如直线型拼缝界面的破坏会以拼缝的开裂及破坏为标志[33],拼缝齿槽界面存在斜压杆的抗剪机制,破坏时抗剪键斜向开裂,斜压杆角度、爆裂后受剪承载力、拼缝的延性均与拼缝厚度有关,但极限承载力与拼缝厚度关

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系不大[29,36,37]。可见，能否将叠合界面的研究结果应用到拼缝界面有待深入研究，反之亦然。

2.2.3 复合受力状态

对于装配式剪力墙而言，一般均受剪力、弯矩、轴力的共同作用，但现有研究中缺少复合受力状态的界面抗剪试验研究。Mattock A H 等[38]认为只要弯矩不大于界面的受弯承载力则不会减小界面的受剪承载力，对于同时受弯剪作用的界面，抗剪钢筋应布置在受拉区，界面承受拉力时，应在抗剪钢筋的基础上附加抗拉钢筋。秦文钺等[27]认为弯矩对粗糙剪切面的剪力传递强度具有显著的不利影响。可见，对于复合受力状态下的界面抗剪并无定论，需要进一步研究。

2.2.4 材料性能

叠合界面的新旧混凝土、拼缝界面的预制混凝土及拼缝材料、穿过界面的钢筋等材料的性能均会影响界面的受剪承载力。Mattock A H[39]发现一些受剪承载力计算公式对于高强混凝土过于保守，不能发挥高强混凝土的优势。Mattock A H 等[40]通过对轻质混凝土界面的抗剪问题研究发现，其受剪承载力小于普通混凝土界面，并建议了计算公式。对于预制拼缝界面，受剪承载力与拼缝材料如高强灌浆料、砂浆的性能有关，由于其不同于普通混凝土，有必要进行深入研究。

2.2.5 加载形式

已有研究大多是单调加载，对于往复荷载下的界面受剪承载力研究较少。Walraven J C 等[41]发现以受剪承载力的 65% 进行预先循环加载后不会影响界面的受剪承载力。许谋奎[36]发现对于拼缝齿槽面，在反复荷载下由于材料磨损、钢筋屈服后的永久变形及交叉裂缝对斜压杆抗剪能力的影响等，使得界面受剪承载力降低。同济大学的研究报告[35]发现循环往复荷载下界面受剪承载力显著降低，具体表现为两个加载方向极限荷载相差较大，位移控制阶段每个峰值位移点处承载力退化较大。由于往复和单调加载下受剪承载力存在较大差异，则相应的非抗震设计和抗震设计时的受剪承载力计算公式应明显不同，且应使抗震设计时承载力低于非抗震设计。

2.3 针对预制墙体水平缝的抗剪试验研究

关于界面抗剪的研究大多是针对新旧混凝土叠合界面的，而专门针对预制墙体水平拼缝界面的研究较少。Rizkalla S H 等[32]研究了预制墙板的多抗剪键连接。Soudki K A 等[33]研究了干燥混合料直线型拼缝连接，认为其受剪承载力主要由墙体与连接缝间的摩擦力和连接钢筋的夹持作用产生的摩擦力组成。Crisafulli F J 等[34]对一种与基础间采用浆锚搭接的少筋预制混凝土墙板的抗震设计方法进行了研究。Foerster H R 等[42]研究认为干燥混合料直线型拼缝连接的受剪承载力由界面骨料的摩擦力及钢筋的销栓作用组成。表 1 为上述文献所建议的水平缝受剪承载力计算公式。

文献中的建议水平缝受剪承载力公式汇总　　表 1

公式来源	公式
文献[32]	$V_u = 2.4\sqrt{f_g'}A_{ck} + 0.5\sigma_n A_c$ 式中：A_{ck}为界面中被抗剪键覆盖的面积；A_c为界面面积；σ_n为界面的轴压应力；f_g'为拼缝干燥混合料的抗压强度
文献[33]	$V_u = \mu(\sigma_n A_c + A_s f_s)$ 式中：μ为摩擦系数，取 0.6～0.8；σ_n为竖向荷载产生的压应力；A_c为界面面积；A_s为穿过水平缝连接钢筋的总截面面积；f_s为连接钢筋的拉应力增量（小于屈服强度）
文献[34]	$V_n = \mu_f[(1+\xi)\omega_0 T_y + N] + (1+\xi)\omega_0 T_y \sin\kappa$ 式中：μ_f为摩擦系数；ξ为受压区钢筋合力与受拉区钢筋合力之比；ω_0为超强系数；T_y为竖向钢筋屈服承载力的 1/2；N为轴向力；κ为钢筋的轴向力与竖向轴线间的夹角
文献[42]	$V_u = \mu\sigma_n A_c + A_b f_y/\sqrt{3}$ 式中：μ为摩擦系数，取 0.7；σ_n为界面的轴压应力；A_c为界面面积；A_b为钢筋截面面积；f_y为钢筋屈服强度

国内针对大板墙体水平缝的抗剪研究较多[28,43,44]，而针对近年来出现的预制混凝土剪力墙采用套筒灌浆或浆锚搭接时的水平拼缝抗剪问题研究很少。陈云钢等[45]通过研究装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接的抗震性能，分析了水平缝连接对抗震性能的影响，但缺乏对水平缝具体的抗剪机制及受剪承载力计算方面的研究。

3　水平缝受剪承载力计算方法

对现行相关规范中可用于计算水平缝受剪承载力 V_u的方法进行归纳比较，可以看出不同方法之间的差异。

3.1 国内规范

表 2 为我国大板规范《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2010）[46]（简称混规）、《装配式混凝土结构技术规程》（征求意见稿）[47]（简称装配式征求意见稿）、装配式规程、北京市地方标准《装配式剪力墙结构设计规程》（DB11/1003—2013）[48]（简称北京规程）、黑龙江省地方标准《预制装配整体式房屋混凝土剪力墙结构技术规范》（DB23/T1400—2010）[49]（简称黑龙江规范）中的剪力墙水平缝受剪承载力计算公式汇总。

由表 2 可知，大板规范的公式基于混凝土抗剪键的抗剪作用、钢筋及轴力的剪切摩擦作用三项的

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

国内规范水平缝受剪承载力计算公式汇总 表 2

公式来源	公式
大板规范	非抗震设计:当 N 为压力时 $V_u = 0.24\xi(n_k A_k + n_j A_j) f_{jv} + 0.56\sum A_s f_y + 0.4N$ 抗震设计:当 N 为压力时 $V_u = [0.24\xi(n_k A_k + n_j A_j) f_{jv} + 0.56\sum A_s f_y + 0.3N]/\gamma_{RE}$ 式中:ξ 为群键共同工作系数;n_k,n_j 分别为销键、节点个数;A_k,A_j 分别为单个销键、单个节点的受剪截面面积;f_{jv} 为销键混凝土的抗剪强度设计值;A_s 为垂直穿过界面的钢筋截面面积;f_y 为钢筋抗拉强度设计值;N 为垂直于界面的轴向力;γ_{RE} 为承载力抗震调整系数。
混规	$V_u = (0.6 f_y A_s + 0.8N)/\gamma_{RE}$ 式中:N 为压力时符号为正、拉力时符号为负。
装配式征求意见稿	$V_u = \beta[K_1 A_c + 0.7(f_y A_s + N)] \leqslant K_2 f_c A_c$ 及 $K_3 A_c$ 式中:A_c 为界面面积;f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值;其余符号含义同前;f_y 不大于 400MPa;A_s 不小于 $0.0025A_c$;β,K_1,K_2,K_3 为系数,取值见装配式征求意见稿
装配式规程	$V_u = 0.6 f_y A_s + 0.8N$
北京规程	$V_u = 0.6(f_y A_s + f_v A_n) + 0.8N$ 式中:f_v 为型钢或钢板连接件的钢材抗剪强度设计值;A_n 为型钢或钢板连接件的钢材抗剪净截面面积;当 N 大于 $0.6 f_c b h_0$ 时,取 $N = 0.6 f_c b h_0$,b 为截面宽度,h_0 为截面有效高度
黑龙江规范	非抗震设计:N 为压力时 $V_u = 0.25\xi_c n_c A_c f_t + 0.5\sum A_s f_y + 0.4N$ 抗震设计:N 为压力时 $V_u = [0.25\xi_c n_c A_c f_t + 0.5\sum A_s f_y + 0.3N]/\gamma_{RE}$ 式中:ξ_c 为齿槽共同工作系数;n_c 为齿槽个数;A_c 为单个齿槽抗剪面积;f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值

叠加,适用于大板的水平拼缝齿槽界面;混规的公式基于剪切摩擦理论,考虑了轴力的作用,通过承载力抗震调整系数考虑抗震设计,适用于剪力墙施工缝抗剪验算;装配式征求意见稿的公式理论基础与文献[39]相同,适用于粗糙和齿槽界面;装配式规程、北京规程的公式均与混规的相同,未考虑承载力抗震调整系数,其中北京规程规定了 N 的上限;黑龙江规范的公式以大板规范的公式为基础,对个别系数做了调整。

3.2 国外规范

表 3 为部分国外规范中的混凝土界面受剪承载力计算公式汇总,均可用于计算装配式剪力墙水平缝受剪承载力。*Building code requirements for structural concrete and commentary*(ACI 318-11)[50](简称美国规范)公式适用于存在裂缝、不同材料、不同时浇筑混凝土界面的剪力传递问题,基于剪切摩擦理论,未考虑轴向力的抗剪贡献。*Eurocode 2: design of concrete structures-part* 1-1(BS EN 1992-1-1:2004)[51](简称欧洲规范)公式适用于不同时浇筑界面的剪力传递问题,考虑了界面混凝土抗剪,规定了轴力和受剪承载力的上限。*Design of concrete structures*(CSA A23.3-04)[52](简称加拿大规范)公式为通用的裂缝界面剪力传递计算公式,考虑了混凝土抗剪并规定了上限。*Concrete structures standard part* 1: *the design of concrete structures*(NZS 3101:2006)[53](简称新西兰规范)公式在美国规范基础上考虑了轴力贡献。

国外规范水平缝受剪承载力计算公式汇总 表 3

公式来源	公式
美国规范	$V_u = \varphi V_n = \varphi A_{vf} f_y \mu$ 式中:φ 取 0.75;V_n 上限取 $0.2 f_c' A_c$,$(3.3 + 0.8 f_c')A_c$,$1.03A_c$ 三者中的较小值;A_{vf} 为抗剪钢筋的截面面积;f_c' 为混凝土抗压强度规定值;f_y 为钢筋屈服强度规定值(不大于 414MPa);μ 整浇时取 1.4,新旧粗糙面取 1.0,不做粗糙处理取 0.6
欧洲规范	$V_u = c f_{ctd} A_c + \mu N + \mu A_s f_{yd} \leqslant 0.5\nu f_{cd} A_c$ 式中:新旧混凝土表面粗糙化处理时 $c = 0.45$,$\mu = 0.7$,齿槽界面时 $c = 0.5$,$\mu = 0.9$,表面未处理时 $c = 0.35$,$\mu = 0.6$;f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值;f_{ctd} 为混凝土抗拉强度设计值;f_{yd} 为钢筋抗拉强度设计值;$N \leqslant 0.6 f_{cd} A_c$;$\nu$ 取 $0.6(1 - f_{ck}/250)$;受拉时无第一项
加拿大规范	$V_u = \lambda\varphi_c(c + \mu\sigma)A_c \leqslant 0.25\varphi_c f_c' A_c$ 式中:$\sigma = (f_y A_s + N)/A_c$,$f_y$ 为钢筋屈服强度规定值;f_c' 为混凝土抗压强度规定值;界面为自然状态时 $c = 0.25$MPa,$\mu = 0.6$,粗糙面时 $c = 0.5$MPa,$\mu = 1.0$;$\varphi_c = 0.65$;对普通混凝土,$\lambda = 1.0$
新西兰规范	$V_u = \varphi V_n = \varphi(A_{vf} f_y + N)\mu$ 式中:$V_n \leqslant 0.2 f_c' A_c$ 及 $8A_c$;$f_y \leqslant 500$MPa;各参数意义及取值同美国规范

注:公式仅为钢筋垂直于界面的情况,未注明符号意义同表 2。

4 不同方法计算结果比较

4.1 剪力墙结构水平缝抗剪验算比较

以某 26 层的剪力墙住宅项目为例,选取其中一典型墙肢沿高度的内力分布与各水平缝受剪承载力计算公式计算结果进行对比。结构层高 3m,总高 78m。计算墙肢长 3 200mm,厚 200mm,计算时以粗糙面为例,各公式计算结果如图 6 所示。计算时采用材料强度设计值,最小配筋贡献指按《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)[54]要求的最小配筋计算得到的由剪切摩擦作用产生的对水平缝受剪承载力的贡献(摩擦系数取 0.6)。

由计算结果对比可知:美国规范、大板规范和黑龙江规范的计算结果相近(较小组),混规、装配式征求意见稿、装配式规程、欧洲规范、加拿大规

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

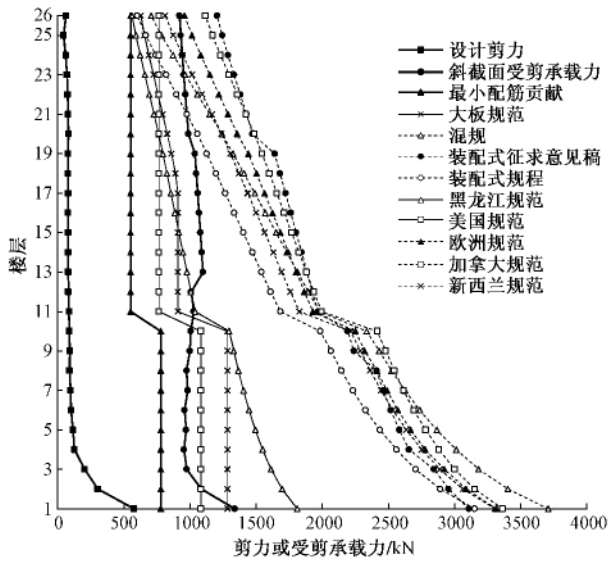

图 6　剪力墙结构水平缝验算比较

范和新西兰规范的计算结果相近（较大组），但两组之间存在较大差异。具体来看，美国规范因仅考虑钢筋的剪切摩擦作用，除顶部 6 层外计算值最小；大板规范和黑龙江规范同时考虑钢筋和轴力的作用，但大板规范规定了轴力贡献的上限，因而对于轴力较大的底部，其计算值小于黑龙江规范，对于轴力较小的顶部，二者计算值均小于美国规范。较大组中混规、装配式规程、新西兰规范均同时考虑钢筋和轴力作用，其中装配式规程计算值最小，装配式征求意见稿、欧洲规范、加拿大规范同时考虑界面混凝土抗剪及钢筋、轴力作用，其中对于底部 11 层，装配式征求意见稿计算值最小，对于上部，欧洲规范计算值最小。

对于此算例，最小配筋的剪切摩擦作用已经远大于设计剪力，但为保证剪切滑移破坏不先于斜截面剪切破坏发生，一般要求水平缝受剪承载力大于剪力墙斜截面受剪承载力，如此则选用不同的计算公式必然得到不同的水平缝抗剪钢筋数量，如若选择过于保守的公式，计算值小于斜截面受剪承载力而需增加抗剪钢筋，则会造成浪费；若选择计算值偏大的公式，则可能导致不安全。另外对于剪力墙结构，也有可能出现墙肢轴力较小或受拉的情况，此时水平缝受剪承载力的计算更为关键。

从以上分析可知，有必要对各计算公式进行详细对比，对现有装配式剪力墙所采用的水平缝的抗剪机理进行系统研究，以得到准确预测、简单方便的计算方法。

4.2 计算与试验对比

收集整理了文献[30,35,36,43,44,55,56]中关于粗糙和齿槽界面的抗剪试验数据，包括 29 组叠合粗糙面、6 组叠合齿槽面、93 组拼缝齿槽面，拼缝粗糙面因数据极少不参与统计，共计 128 组，其中仅 7 组考虑了轴力作用，加载方式包括单向和循环往复两种。不同规范所规定的混凝土强度、钢筋强度之间的换算关系参照文献[57]，计算时均采用材料强度实测值。界面受剪承载力计算值与试验值之比的平均值及变异系数见表 4，大板规范、装配式征求意见稿和装配式规程公式的计算值 $V_{u,calc}$ 与试验值 $V_{u,test}$ 对比如图 7 所示。

界面抗剪试验数据统计　　表 4

界面类型	试件组数	大板规范		装配式征求意见稿		装配式规程		黑龙江规范		美国规范		欧洲规范		加拿大规范		新西兰规范	
		平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数	平均值	变异系数
叠合粗糙	29	0.33	0.22	0.93	0.24	0.35	0.22	0.29	0.22	0.57	0.19	0.77	0.23	0.78	0.22	0.67	0.20
叠合齿槽	6	0.37	0.16	0.92	0.11	0.31	0.19	0.30	0.17	0.51	0.19	0.87	0.12	0.71	0.15	0.51	0.19
拼缝齿槽	93	0.63	0.44	1.76	0.31	0.54	0.52	0.54	0.43	0.83	0.57	1.58	0.29	1.23	0.45	0.89	0.51

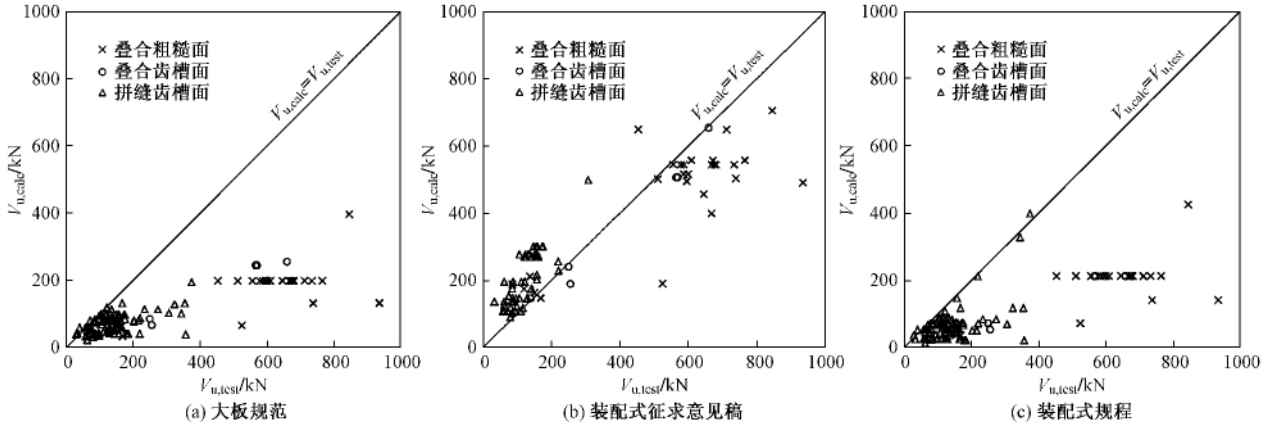

图 7　受剪承载力计算值与试验值对比

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由表 4 及图 7 可知，对于叠合粗糙面和叠合齿槽面，所有公式计算值与试验值之比的平均值均小于 1，说明均偏保守，其中装配式征求意见稿的平均值分别为 0.93 和 0.92，说明按其对叠合粗糙面和叠合齿槽面进行受剪承载力计算时最准确，且设计时具有一定的安全度。对于拼缝齿槽面，大板规范、装配式规程、黑龙江规范、美国规范、新西兰规范总体偏保守，但数据较离散，而装配式征求意见稿、欧洲规范、加拿大规范总体偏不安全，其中装配式征求意见稿平均值高达 1.76，说明按这几个规范对拼缝齿槽面进行设计时可能安全度不足，存在安全隐患。

从各公式的具体形式来看，大板规范、装配式规程、黑龙江规范、新西兰规范均未考虑界面混凝土的抗剪，而美国规范仅考虑了钢筋的剪切摩擦作用，因而均明显偏保守。装配式征求意见稿、欧洲规范和加拿大规范考虑了界面混凝土直接抗剪，对于叠合粗糙面和叠合齿槽面，计算值更接近试验值，但对于拼缝齿槽面，由于抗剪机理与叠合面有所不同，计算结果偏于不安全，这说明不能简单地将叠合面计算公式运用于拼缝面。由于收集到的试验数据中考虑轴力的很少，无法判断各公式对轴压力或总受剪承载力的上限规定值是否合理。

针对国内规范，总体而言，对于叠合粗糙面和叠合齿槽面，采用装配式征求意见稿公式计算时最准确，采用装配式规程公式计算偏保守；对于拼缝齿槽面，大板规范、装配式规程及黑龙江规范计算保守，其中大板规范、黑龙江规范能够反映齿槽尺寸的影响。

5 结论与建议

5.1 结论

(1)装配式剪力墙结构水平缝上下层连接方法主要有套筒灌浆、浆锚搭接、现浇带连接等，水平缝界面类型可概括为叠合粗糙面、叠合齿槽面、拼缝粗糙面、拼缝齿槽面、拼缝粗糙齿槽面等。

(2)混凝土界面剪力传递机制复杂，影响因素多，目前国内外的相关受剪承载力计算方法之间差异较大。国内针对大板结构进行过系统研究，但对当前装配式剪力墙结构的水平缝抗剪问题缺乏研究。

(3)已有界面抗剪试验研究中，考虑轴压力和受弯、受拉情况的很少。现有的一些公式对轴压力或总承载力规定了上限，但上限大小并不统一，且均未考虑压(拉)弯剪复合受力状态的影响。

(4)现有相关规范中界面受剪承载力计算公式均基于剪切摩擦理论，大多来源于新旧混凝土叠合面抗剪试验研究。通过对比发现，对叠合面和拼缝齿槽面，大板规范、装配式规程和黑龙江规范计算均偏保守，对于叠合面，采用装配式征求意见稿公式计算最准确，对于拼缝齿槽面，采用装配式征求意见稿计算偏不安全。

5.2 建议

(1)对现有装配式剪力墙水平缝应根据界面类型做进一步系统的专门研究，考虑复合受力(拉、压、弯、剪)、材料性能(混凝土、灌浆料、填缝砂浆、钢筋等材料强度)、加载方式(单调加载和循环往复加载)、轴压力及总受剪承载力限值等因素，提出能够准确预测、简单方便的受剪承载力计算公式。

(2)对于水平缝叠合面，采用装配式规程的公式计算时结果偏保守；对于拼缝齿槽面，可参照装配式规程或黑龙江规范的公式进行计算。但对上述公式在界面为复合受力状态时的适用性仍需研究，对拼缝粗糙面等其他类型界面的抗剪计算有待深入研究。

参 考 文 献

[1] 彭媛媛. 预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 北京:清华大学，2010.

[2] 连星. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析及理论研究[D]. 合肥: 合肥工业大学，2010.

[3] 张微敬，孟涛，钱稼茹，等. 单片预制圆孔板剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构，2010，30(6)：76-80.

[4] 钱稼茹，张微敬，赵丰东，等. 双片预制圆孔板剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构，2010，30 (6)：71-75.

[5] 初明进，刘继良，崔会趁，等. 装配整体式双向孔空心模板剪力墙受剪性能试验研究[J]. 工程力学，2013，30(7)：219-229.

[6] BECKER J M，LLORENTE C，MUELLER P. Seismic response of precast concrete walls [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics，1980，8(6)：545-564.

[7] MAGANA R A，SCHULTZ A E. Design and behavior of connections in precast concrete shear walls [C] // Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco，Mexico，1996.

[8] SOUDKI K A，RIZKALLA S H，LEBLANC B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections [J]. PCI Journal，1995，40(4)：78-96.

[9] SOUDKI K A，RIZKALLA S H，DAIKIW R W. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 2: prestressed connections [J]. PCI Journal，1995，40(5)：82-96.

[10] KURAMA Y C. Seismic design of partially post-tensioned precast concrete walls [J]. PCI Journal，2005，50(4)：100-125.

[11] SMITH B J，KURAMA Y C，MCGINNIS M J. Comparison of hybrid and emulative precast concrete shear walls for seismic regions [C] // Proceedings of the ASCE Structures Congress. Las Vegas，NV，USA，2011.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[12] JGJ 1—91 装配式大板居住建筑设计和施工规程 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，1991.
[13] 赵培. 约束浆锚钢筋搭接连接试验研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
[14] 钱稼茹，彭媛媛，张景明，等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验 [J]. 建筑结构，2011，41(2)：1-6.
[15] 钱稼茹，彭媛媛，秦珩，等. 竖向钢筋留洞浆锚间接搭接的预制剪力墙抗震性能试验 [J]. 建筑结构，2011，41(2)：7-11.
[16] 张微敬，钱稼茹，陈康，等. 竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验 [J]. 建筑结构，2011，41(2)：12-16.
[17] JGJ 1—2014 装配式混凝土结构技术规程 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2014.
[18] 钱稼茹，杨新科，秦珩，等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验 [J]. 建筑结构学报，2011，32(6)：51-59.
[19] 王墩，吕西林，卢文胜. 带接缝连接梁的预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报，2013，34(10)：1-11.
[20] DB34/T 810—2008 叠合板混凝土剪力墙结构技术规程 [S]. 合肥：安徽省质量技术监督局，2008.
[21] HOFBECK J A，IBRAHIM I O，MATTOCK A H. Shear transfer in reinforced concrete [J]. ACI Journal，1969，66(2)：119-128.
[22] BIRKELAND P W，BIRKELAND H W. Connections in precast concrete construction [J]. ACI Journal，1966，63(3)：345-368.
[23] MAST R F. Auxiliary reinforcement in concrete connections [J]. Journal of the Structural Division，1968，94(6)：1485-1504.
[24] MATTOCK A H. Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane [C]//ACI SP-42：Shear in Reinforced Concrete. Detroit：American Concrete Institute，1974：17-42.
[25] LAIBLE J P，WHITE R N，GERGELY P. Experimental investigation of seismic shear transfer across cracks in concrete nuclear containment vessels [C]//ACI SP-53：Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones. Detroit：American Concrete Institute，1977：203-226.
[26] WALRAVEN J C. Fundamental analysis of aggregate interlock [J]. Journal of the Structural Division，1981，107(11)：2245-2270.
[27] 秦文钺，郭平. 弯矩对剪力传递强度的影响 [J]. 重庆建筑工程学院学报，1985，8(3)：27-37.
[28] 万墨林，曾兵. 大板结构接缝的强度和刚度 [J]. 建筑结构学报，1986，7(4)：54-69.
[29] 柳炳康，宋国华. 装配式大板结构竖缝抗剪机理研究 [J]. 郑州大学学报：工学版，2002，23(2)：74-78.
[30] ABDUL-WAHAB H M S，SARSAM S Y H. Prediction of ultimate shear strength of vertical joints in large panel structures [J]. ACI Structural Journal，1991，88(2)：204-213.
[31] TSOUKANTAS S G，TASSIOS T P. Shear resistance of connections between reinforced concrete linear precast elements [J]. ACI Structural Journal，1989，86(3)：242-249.
[32] RIZKALLA S H，SERRETTE R L，HEUVEL J S，et al. Multiple shear key connections for precast shear wall panels [J]. PCI Journal，1989，34(2)：104-120.
[33] SOUDKI K A，WEST J S，RIZKALLA S H，et al. Horizontal connections for precast concrete shear wall panels under cyclic shear loading [J]. PCI Journal，1996，41(3)：64-80.
[34] CRISAFULLI F J，RESTREPO J I，PARK R. Seismic design of lightly reinforced precast concrete rectangular wall panels [J]. PCI Journal，2002，47(4)：104-121.
[35] 钢筋混凝土界面摩擦受剪性能试验研究报告 [R]. 上海：同济大学，2011.
[36] 许谋奎. 反复荷载作用下装配式大板结构结合部延性特征及接合筋应力分析 [D]. 合肥：合肥工业大学，2003.
[37] 宋国华，柳炳康. 装配式大板结构竖缝受剪承载力与接缝宽度的关系 [J]. 河南科学，2002，20(2)：165-168.
[38] MATTOCK A H，JOHAL L，CHOW H C. Shear transfer in reinforced concrete with moment or tension acting across the shear plane [J]. PCI Journal，1975，20(4)：76-93.
[39] MATTOCK A H. Shear friction and high-strength concrete [J]. ACI Structural Journal，2001，98(1)：50-59.
[40] MATTOCK A H，LI W K，WANG T C. Shear transfer in lightweight reinforced concrete [J]. PCI Journal，1976，21(1)：20-39.
[41] WALRAVEN J C，FRENAY J，PRUIJSSERS A. Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members [J]. PCI Journal，1987，32(1)：66-84.
[42] FOERSTER H R，RIZKALLA S H，HEUVEL J S. Behavior and design of shear connections for loadbearing wall panels [J]. PCI Journal，1989，34(1)：102-119.
[43] 黄清桂. 大板水平节点、接缝抗剪试验研究 [J]. 四川建筑科学研究，1983，9(2)：43-45.
[44] 朱幼麟，文国栋. 高层大板建筑水平接缝的抗剪试验研究 [J]. 建筑结构学报，1982，3(3)：66-72.
[45] 陈云钢，刘家彬，郭正兴，等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报：自然科学版，2013，45(6)：83-89.
[46] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
[47] 装配式混凝土结构技术规程(征求意见稿) [S]. 2010.
[48] DB11/1003—2013 装配式剪力墙结构设计规程 [S]. 北京：北京市规划委员会，北京市质量技术监督局，2013.
[49] DB23/T1400—2010 预制装配式房屋混凝土剪力墙结构技术规程 [S]. 哈尔滨：黑龙江住房和城乡建设厅，黑龙江省质量技术监督局，2010.

(下转第 39 页)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

MIDAS 有限元分析的结果与试验测试结果比较接近，其中位移的最大相对误差值约为 10%，应变的最大误差值约为 7.5%，表明在弹性分析下，软件分析时所采用的设计参数具有较高的可信度。

4　结论及建议

通过对橘子洲毛泽东青年艺术雕塑头像模型进行试验研究和有限元分析，并经分析比较后，可得出以下结论：

(1) MIDAS 有限元分析结果与试验模型试验测试结果吻合良好，相对误差较小，其计算结果具有设计应用价值。

(2) 根据试验模型的相似比关系，试验中所施加的荷载与雕塑结构的荷载相似比例为 1∶16。由试验可知，试验模型中的开裂荷载为 65kN，根据相似比的关系可知，雕塑头部实际结构能承担的开裂荷载大小为 1 040kN，远大于工程实际中此部位所承担荷载设计值(680kN)。因此，雕塑头部结构是安全的。

由于本雕塑为永久性建筑，根据试验模型试验测试结果和 MIDAS 有限元分析结果，为了确保雕塑结构的耐久性，对雕塑头部结构设计提出以下建议：

(1) 增加水平板的配筋，设置双向双层钢筋网，且水平板宜增加沿短肢剪力墙方向的扇形钢筋配置，以限制其裂缝开展。

(2) 加厚雕塑头部短肢剪力墙的厚度，建议其厚度不小于 250mm，并增大外挑短肢剪力墙上部水平钢筋的配筋率。

(3) 中间核心筒顶部 3 层水平结构部位设置环向暗梁，加强核心筒顶部水平结构的刚度，同时将中间十字形交叉梁沿核心筒高度错位布置，提高短肢剪力墙与核心筒的整体刚度。

参　考　文　献

[1] 沈世钊. 大跨空间结构的发展——回顾与展望 [J]. 土木工程学报，1998，31(6)：5-14.

[2] 沈祖炎，赵宪忠，陈以一，等. 大型空间结构整体模型静力试验的若干关键技术 [J]. 土木工程学报，2001，34(4)：102-106.

[3] WONG H T，TENG J G. Experimental on a model steel base shell of the Comshell roof system [C]//The Third International Conference on Advances in Steel Structures. Hongkong，2002：745-754.

[4] HYUK CHUN N. Ultimate strength of large scale reinforced concrete thin shell structures [J]. Thin-Walled Structures，2005，43(9)：1418-1443.

[5] 陈星烨，马晓燕，宋建中. 大型结构试验模型相似理论分析与推导 [J]. 长沙交通学院学报，2004，20(1)：11-14.

[6] 姚振纲，刘祖华. 建筑结构试验 [M]. 上海：同济大学出版社，1996.

[7] 梁兴文，叶艳霞. 混凝土结构非线性分析 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007.

(上接第 47 页)

[50] ACI 318-11 Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. Farmington Hills：American Concrete Institute，2011.

[51] BS EN 1992-1-1：2004 Eurocode 2：design of concrete structures-part 1-1 [S]. Brussels：European Committee for Standardization，2004.

[52] CSA A23.3-04 Design of concrete structures [S]. Mississauga：Canadian Standards Association，2004.

[53] NZS3101：2006 Concrete structures standard part 1：the design of concrete structures [S]. Wellington：Standards New Zealand，2006.

[54] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[55] BASS R A，CARRASQUILLO R L，JIRSA J O. Shear transfer across new and existing concrete interfaces [J]. ACI Structural Journal，1989，86(4)：383-393.

[56] CHAKRABARTI S C，NAYAK G C，PAUL D K. Shear characteristics of cast-in-place vertical joints in story-high precast wall assembly [J]. ACI Structural Journal，1988，85(1)：30-45.

[57] 贡金鑫，魏巍巍，胡家顺. 中美欧混凝土结构设计 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007.

(上接第 80 页)

[2] GB 50003—2001 砌体结构设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

[3] GB 50574—2010 墙体材料应用统一技术规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[4] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.

[5] 施楚贤. 砌体结构理论与设计 [M]. 3 版. 北京：中国建筑工业出版社，2014.

[6] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[7] 施楚贤. 砌体结构类型的分析与抗震设计建议 [J]. 建筑结构，2010，40(1)：74-76.

[8] GB 50702—2011 砌体结构加固设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.

[9] JGJ 116—2009 建筑抗震加固技术规程 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.

[10] 程绍革. 水泥砂浆面层加固砖墙抗震受剪承载力计算的探讨 [J]. 建筑结构，2014，44(11)：34-37.

[11] TMS 402-13/ACI 530-13/ASCE 5-13 Building code requirements for masonry structures [S]. The Masonry Standards Joint Committee(MSJC)，2013.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net