

基于能量原理的混合联肢剪力墙塑性性能控制方法与 Push-over 分析

秦朗¹ 伍云天^{1,3†} 侯超¹ 朱康¹ 周庆²

(1.重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)(2.四川省建筑设计研究院,成都 610000)

(3.重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要 目前,联肢剪力墙结构普遍存在于我国高层建筑中,而混合联肢剪力墙结构作为其中的一种,能够充分利用混凝土和钢材的优势,其延性耗能能力以及抗剪能力更强.但由于墙肢较大的延性导致其设计方法和抗震性能的复杂化,混合联肢剪力墙结构并未广泛应用于工程实践中.因此,对混合联肢剪力墙结构进行设计方法和抗震性能的研究具有重要意义.本文采用了与传统方法不同的能量平衡塑性设计方法,该方法综合考虑了结构的力、变形以及耗能等因素,并且可以预先控制结构的变形大小和屈服机制.本文基于该设计方法设计了 12 个混合联肢剪力墙结构算例,并在有限元软件中对其进行了推覆分析,得到了 12 个算例的相应推覆曲线.结果表明,12 个算例能够实现理想屈服机制,保证在结构破坏时连梁最先达到屈服、墙肢后屈服,从结构承载力的角度看,结构也能满足较高的抗震要求.

关键词 混合联肢剪力墙, 抗震, 能量平衡塑性设计, 推覆分析

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-071

引言

联肢剪力墙结构作为常规钢筋混凝土剪力墙的一种,目前广泛应用于我国高层建筑中,但结构中的连梁不具有较大的延性能力,不能满足巨大的抗剪需求,故工程中的学者针对此类缺陷开始研究混合联肢剪力墙结构^[1-3],将易满足延性和抗剪需求的钢连梁代替常规钢筋混凝土连梁.然而,混合联肢剪力墙结构有着复杂的设计方法与抗震性能^[4-6],这是由于具有高延性的钢连梁与结构墙肢之间的延性需求差异过大.故本文采用了与传统方法不同的能量平衡塑性设计方法,该方法综合考虑了结构的力、变形以及耗能,并且可以预先控制结构的变形大小和屈服机制^[7,8].目前,对采用此方法设计的混合联肢剪力墙结构研究较少,因此开展研究此方法设计的混合联肢剪力墙结构将具有重要意义.

本文从混合联肢剪力墙结构的连梁与墙肢力学性能出发,采用基于能量平衡的塑性设计方法,设计了 12 个算例,对其进行 Push-over 分析.对比分析结果,验证了设计方法的合理性,并进行了结构相应的推覆曲线、整体屈服机制、结构超强系数、

屈服位移及延性、墙肢内力变化等参数研究.

1 基于能量平衡的塑性设计方法

现行《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[9]实现“小震不坏,中震可修,大震不倒”的设防目标,采用小震作用下的弹性计算和大震作用下的弹塑性变形验算的二阶段设计方法.该规范主要通过折减连梁刚度以及对结构承载力进行调幅来设计联肢剪力墙结构,并实现“双重抗震防线机制”.在混合联肢剪力墙结构中,钢连梁在屈服前基本保持弹性,但墙肢在混凝土受拉开裂期间就表现出非弹性性质,钢连梁与墙肢的刚度变化不同步以及构件间延性需求的较大差异使得规范里的传统设计方法并不能控制好混合联肢剪力墙结构在中震和大震作用下的失效模式,不能体现其结构良好的抗震性能.

Leelataviwat 和 Goel^[10]提出的基于能量平衡的塑性设计方法能够在设计之初,预先设定结构屈服机制,并根据目标侧移以及能量平衡控制好结构在塑形阶段时的失效模式.该方法能有效克服现行规范里传统设计方法的难点,故本文将根据该方法对混合联肢剪力墙结构进行抗震性能分析.

2019-08-25 收到第 1 稿,2019-11-18 收到修改稿.

† 通讯作者 E-mail: yuntianw@cqu.edu.cn

基于能量平衡的塑性设计方法,其根本也是从地震作用下的动力方程出发,在方程两边同时乘以位移微分,然后在地震持时内对整个方程进行积分得到能量平衡方程,利用能量的耗散与输入进行分析与设计。

多自由度结构体系在地震作用下的振动微分方程为

$$[m] \{\ddot{x}\} + [c] \{\dot{x}\} + \{F(x, \dot{x})\} = -[m] \{1\} \ddot{x}_g \quad (1)$$

式(1)中:

$[m]$ ——体系的质量矩阵;

$[c]$ ——体系的阻尼矩阵;

$\{F(x, \dot{x})\}$ ——体系的恢复力向量;

\ddot{x}_g ——地震动加速度;

$\{\ddot{x}\}, \{\dot{x}\}, \{x\}$ ——体系的相对加速度向量、相对速度向量、相对位移向量;

$\{1\}$ ——单位列向量。

方程(1)是控制体系地震响应的基本关系式,对方程(1)两边同时左乘 $d\{x\}^T = \{\dot{x}\}^T dt$,并在地震持续时间 t_0 内积分,最终简化即可得到

$$E_e + E_\xi + E_p = E \quad (2)$$

式(2)中:

E_e ——弹性振动能;

E_ξ ——体系的阻尼耗能;

E_p ——塑性应变能;

E ——体系的地震总输入能。

式(2)的推导过程是基于时程分析的能量平衡,是结构在“动力”意义上的能量平衡,它体现了结构在地震作用下任意时刻的能量平衡概念和耗能机制。

混合联肢剪力墙结构基于能量平衡的塑性设计流程如图1所示.通过结构塑性设计方法得到各个构件内力后,对其进行截面设计.参照现行建筑抗震设计规范对钢连梁和墙肢底部截面抗弯承载力、墙肢底部加强区截面抗剪承载力和其余截面进行承载力计算,在对墙肢底部加强区进行设计时,借鉴文献[11]并考虑耦连比CR的影响,预先对结构左右墙肢底部倾覆力矩进行比例分配,具体情况见表1,由于本文重点在于对设计结构进行Push-over分析,以验证该方法的合理性,且限于篇幅所限只列出算例C-10-30结构设计参数、钢连梁截面及配筋信息,见表2至表4及图2,其余算例不再具体列出。

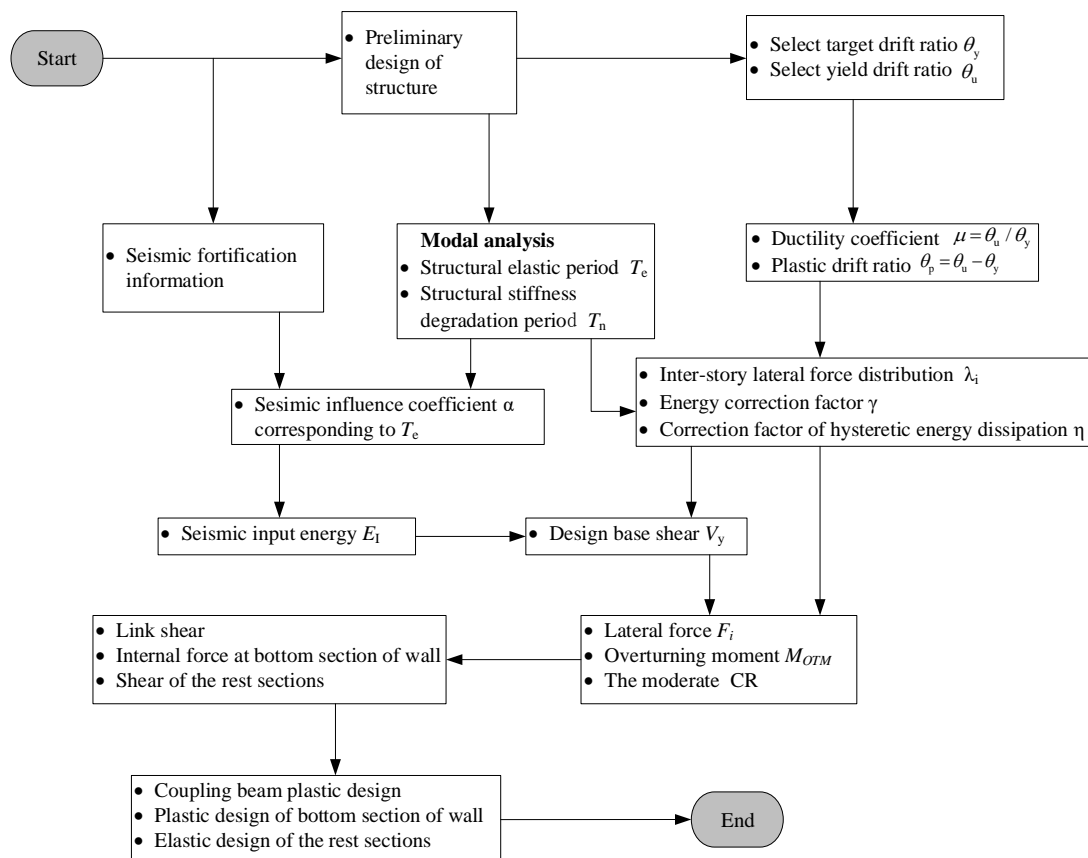


图1 基于能量平衡的塑性设计流程图

Fig. 1 Flowchart of energy balance-based plastic design

表1 墙肢弯矩分配比例

Table 1 Proportions of wall moment demands

Wall pier	CR			
	30%	40%	50%	60%
Tensile wall	0.45	0.40	0.35	0.30
Compressed wall	0.55	0.60	0.65	0.70

表2 结构设计参数

Table 2 Structural design parameters

Design parameters	Parameters information
Importance category	C class
Structure categories	RC frame-shear wall structure
Story height	3.5m
Fortification intensity zone	8 degree 0.2g
Design seismic grouping	Second Group
Site classification(soil type)	Class II(B)
Classes of seismic measure	First level
Gravity load representative value (10 story HCW systems)	1500kN
Wall thickness (10 story HCW systems)	250mm
Reinforcement	HRB400
Concrete	C40

2 有限元模型的建立

2.1 模型概况

基于以上设计方法设计CR为30%,40%,50%,60%的10层,15层和20层混合联肢剪力墙结构,共12个算例.在非线性有限元软件Perform3D中建立模型,钢筋混凝土墙肢采用纤维模型,剪力墙边缘构件核心区混凝土采用修正Kent-Park混凝土应力-应变模型^[11,12],该模型考虑了矩形箍筋约束;而剪力墙腹板混凝土具有受约束较弱的特点,故采用现行混凝土结构设计规范中的非约束混凝土模型,结构中混凝土均不考虑受拉需求,钢筋采用弹性强化模型.

此外,在PERFORM-3D中,模拟连梁可用梁单元与墙单元两种单元类型.相比墙单元,梁单元更容易模拟连梁的性能,同时若使用墙单元,每层的剪力墙至少需要两个墙单元来模拟.因此,本文采用梁单元模型来模拟连梁.而针对钢连梁和墙肢连接处理上,PERFORM-3D中剪力墙单元的节点不存在平面内的转动刚度,钢连梁和墙肢在节点处的连接相当于铰接.因此,当钢连梁与墙肢连接时,需要在墙单元处设置抗弯刚度较大的水平内嵌梁传递弯矩,一般可取钢连梁线刚度的20倍,内嵌梁的轴向刚度和扭转刚度则设置为一个较小值.

表3 结构C-10-30配筋

Table 3 Structure C-10-30 reinforcement

Story	Longitudinal bar of edge component(mm ²)	Reinforcement ratio of edge components	Vertical distribution bar of web(mm ²)	Web reinforcement ratio
5-10	923	0.92%	2000	0.25%
4	1231	1.23%	2000	0.25%
3	2513	2.51%	2000	0.25%
2	2036	2.04%	2000	0.25%
1	3041	3.04%	2000	0.25%

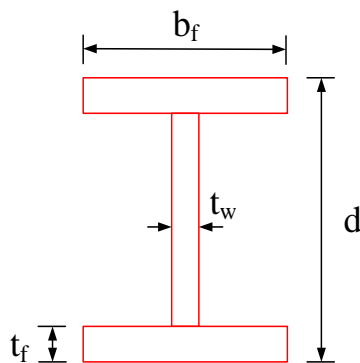


图2 钢连梁截面

Fig.2 Section of steel coupling beam

由于PERFORM-3D中骨架曲线为“YURLX”的折线形式不含有上述所采用约束混凝土和非约束混凝土应力-应变关系中的曲线段,故本文根据文献[13]中的方法进行等面积拟合.由于本文12个算例中箍筋对混凝土的约束存在差异,故设定1.56%的体积配箍率对其简化分析,拟合对比如图3所示.

2.2 分析对比验证

2009年,詹永旗^[14]设计了一个10层1/5缩尺比例的混合联肢剪力墙,并在中南大学土木工程安全

表4 C-10-30钢连梁截面信息(mm)

Table 4 Cross section information of C-10-30 steel coupling beam (mm)

Structure number	Story	b_f	d	t_f	t_w
C-10-30	9-10	130	190	30	6
	7-8	140	260	30	6
	5-6	160	265	30	7
	3-4	185	260	30	8
	1-2	185	270	30	8

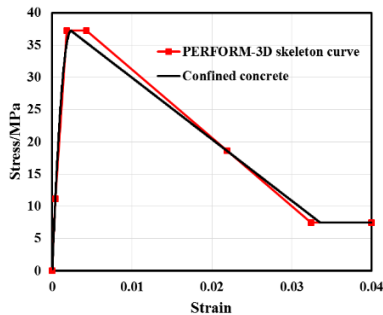
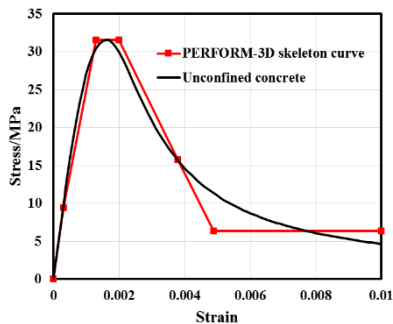
(a)修正 Kent-Park 模型
(a) Modified Kent-Park model(b)规范本构模型
(b) Normative constitutive model

图3 混凝土本构曲线拟合

Fig.3 Matching of concrete constitutive curves

科学实验室进行低周往复荷载试验,研究其抗震性能.本文利用PERFORM-3D建模分析,通过与该试

验的结果对比,以验证基于能量平衡的塑形设计方法的正确性.

2.2.1 试验概况

在该试验中,詹永旗不考虑竖向轴力的影响,仅仅在试件顶部施加水平低周往复荷载.试件端柱为120mm×120mm,墙肢厚60mm,具体尺寸如图4.墙肢水平钢筋与箍筋采用冷拔钢丝,纵向钢筋采用HRB335钢筋,试件具体配筋见表5.

试验采用荷载-位移控制加载制度进行,首次施加荷载为5kN,往后每级荷载以5kN为增量直至加载到25kN;之后变为位移控制,每级位移循环三次,每级加载位移为荷载达25kN时所对应的顶点位移的倍数,待剪力墙的承载力下降到峰值承载力的85%后即停止加载.

2.2.2 有限元模拟结果与对比

对于本文混合联肢剪力墙结构模型的材料采用试验实测平均值,具体参数如表6所示.

水平地震是在正负方向之间相互转换对结构产生作用,低周往复试验能够在一定程度上模拟结构所受到的真实地震作用,其试验结果中的滞回曲线和骨架曲线能够准确评价结构抗震性能.因此,本文将有限元模拟结果中的滞回曲线、骨架曲线与试验结果进行对比,如图5和图6所示.

从图5和图6中可以看出,模型的分析结果与试验数据从弹性刚度、承载力特征等方面均拟合良好.通过对比可以发现:结构的初始刚度与试验结果很接近,并且其最大荷载值与试验结果基本吻合;但分析结果中结构屈服荷载值均比试验结果大,这是因为本文在建模时,所有钢筋的屈服强度均采用的是HRB335纵向钢筋的实测值.同时,由于利用PERFORM-3D进行模拟时对联肢剪力墙结构进行了诸多简化^[15],模拟环境更加理想,分析结果中的滞回曲线呈现出更加饱满的趋势.

表5 墙肢配筋

Table 5 Reinforcement of the specimen

Part	Type of reinforcement	1~10 stories	
		Reinforcement	Reinforcement ratio
End post	Longitudinal reinforcement	14Φ6	0.022
	Stirrup	Φ ^b 4@50	0.017
Embedded column	Longitudinal reinforcement	4Φ6	0.024
	Stirrup	Φ ^b 4@50	0.015
Wall	Longitudinal reinforcement	Φ ^b 6@100	0.010
	Horizontal reinforcement	Φ ^b 6@100	0.010

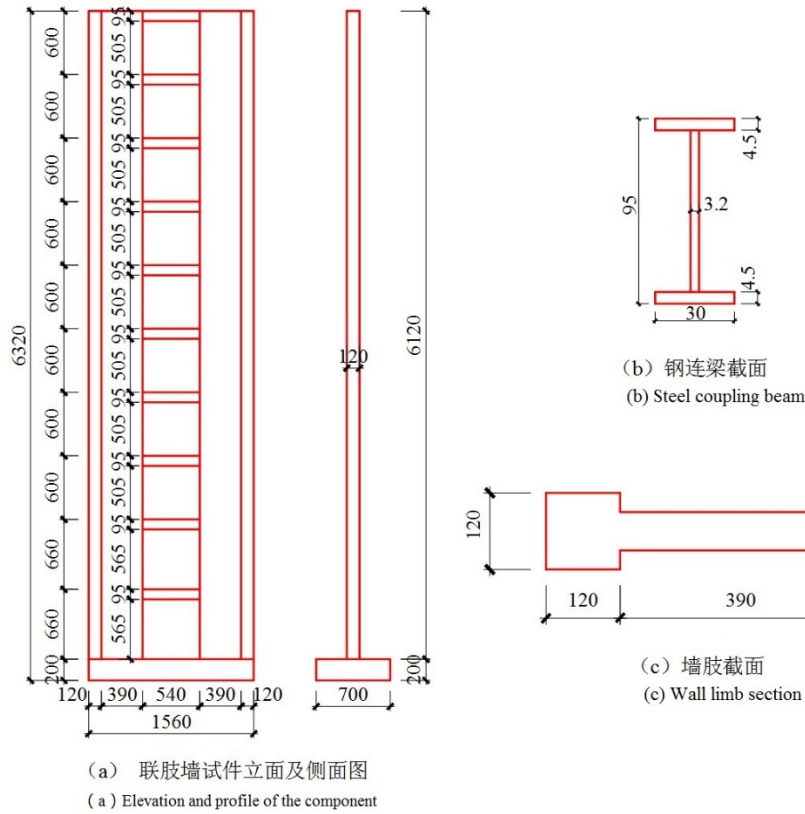


图4 联肢墙构件截面尺寸(mm)

Fig. 4 Geometric dimension of the specimen(mm)

表6 材料力学性能实测值

Table 6 Measured mechanical properties of the material

Material	Concrete	Reinforced	Steel beam
Elasticity modulus E(MPa)	2.16E+04	2.00E+05	2.10E+05
Poisson ratio μ	0.2	0.3	0.3
Tensile strength(MPa)	-	283	215
Compressive strength(MPa)	22.7	283	215

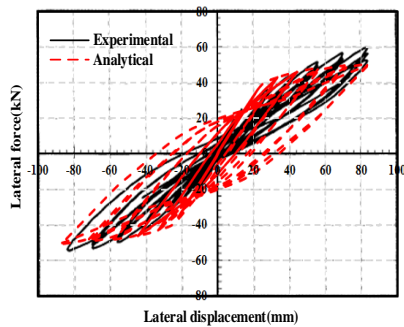


图5 滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison of experimental and analytical hysteresis curves

综合考虑整体结构,以上分析所产生的误差均在可接受范围内,并认为所采用的建模分析方法正确.

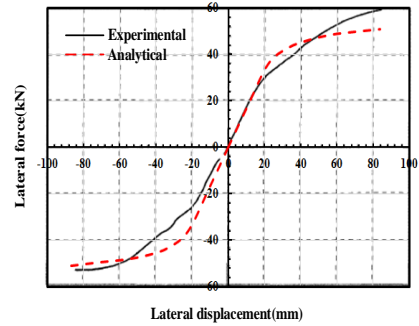


图6 骨架曲线对比

Fig. 6 Comparison of experimental and analytical skeleton curves

3 Push-over 分析

Freeman^[16]于1975年提出了静力弹塑性分析(Push-over analysis),通过在结构分析模型上施加某种方式模拟地震水平惯性力的侧向力,借助推覆曲线近似反映结构在地震作用下的性能状态^[17].

Push-over分析的关键在于如何选择侧向力加载模式,不同的侧向力加载模式将产生不同的推覆曲线.如果这一曲线过高或过低地估计了结构的抗震能力,那么基于此加载模式估计的结构弹塑性位

移反应是不合理的.因此,选择合理的侧向力加载模式尤为重要.由于本文主要研究混合联肢剪力墙结构在塑形阶段时的结构抗震性能,因此选择考虑了一定塑性发展的侧向力加载模式.同时,推覆曲线分析中采用位移控制,PERFORM-3D通过结构在各个荷载步中发生的变形反推出所需要的推覆荷载.

3.1 推覆曲线分析

3.1.1 推覆曲线基本特征

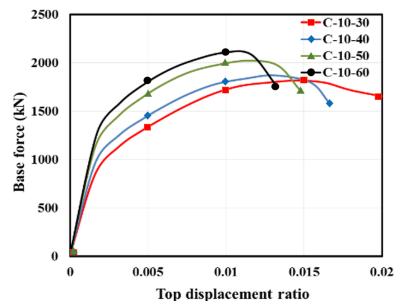
连梁总剪力所形成的拉压力偶(T_L)占总体倾覆力矩的比例被定义为耦合比(Coupling ratio, CR).CR对联肢剪力墙结构的抗震性能影响显著,是研究与设计其结构的重要参数.其中,塑性耦合比是墙肢和钢连梁都屈服、结构形成机构时的耦合比,能够清晰地反映墙肢和钢连梁在塑性阶段承载力中的比例关系.塑性耦合比值较为稳定,同时与本文所采用的塑性设计方法相契合,故本文采用“塑性耦合比”作为结构的主要设计和研究参数.如无特别说明,文中所提到的耦合比CR均指“塑性耦合比”.

10层、15层、20层的混合联肢剪力墙结构的推覆曲线对比如图7所示.随着CR的变化,我们可以发现:

(1)在弹性阶段初期,随着CR从30%提升到50%,各层数的结构初始弹性刚度提高不明显;而CR提升到60%时,结构弹性刚度几乎没有变化,其结果符合初始弹性刚度主要由结构墙肢控制的事实.

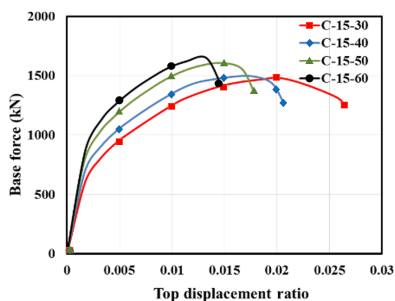
(2)当CR较小时,推覆曲线呈现出明显的两个屈服点,前后屈服点分别是连梁屈服点以及墙肢屈服点,在连梁屈服点前,结构基本保持弹性;而在相同层数结构内的连梁屈服时,顶点位移角随着CR的增大变化幅度小,但结构基底剪力增大较为明显,这表明CR的变化对结构屈服点的位置有着重要影响,即CR越大,结构保持弹性的范围越广.同时,CR的增大使得两个屈服点的出现不再明显,其所对应的的顶点位移角逐渐接近,当CR提升到60%时,连梁和墙肢的屈服点近似重合,结构推覆曲线只剩一个屈服点.

(3)在达到峰值承载力后期,随着CR越大,相同层数结构的承载力下降越快,即较大的CR使结构的受压墙肢承受的轴压力过大,导致延性变差.



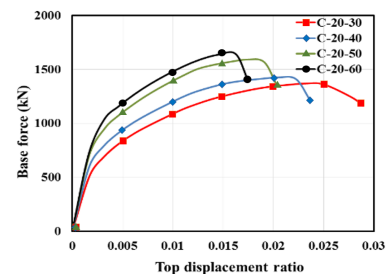
(a) 10层混合联肢剪力墙

(a) 10 story HCW systems



(b) 15层混合联肢剪力墙

(b) 15 story HCW systems



(c) 20层混合联肢剪力墙

(c) 20 story HCW systems

图7 结构静力推覆曲线

Fig. 7 Static pushover curves of structures

3.1.2 整体屈服机制

为研究本文所设计的12个混合联肢剪力墙结构整体屈服机制,列举了在推覆曲线分析中连梁屈服时和墙肢底部屈服时所对应的顶点位移角,如图8所示.其中,连梁屈服应达到整体的50%以上,保证在结构中大部分连梁屈服,才能选取对应的顶点位移角.

从图8可以看出,CR的不同与层数的不同对连梁屈服时对应的顶点位移角影响较小,其值均在0.16至0.18范围内,小于我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)给出的中震层间位移角限值0.005.这表明在中震作用下,大部分连梁能够进入塑性阶段,满足性能要求.而在不同层数、不同CR

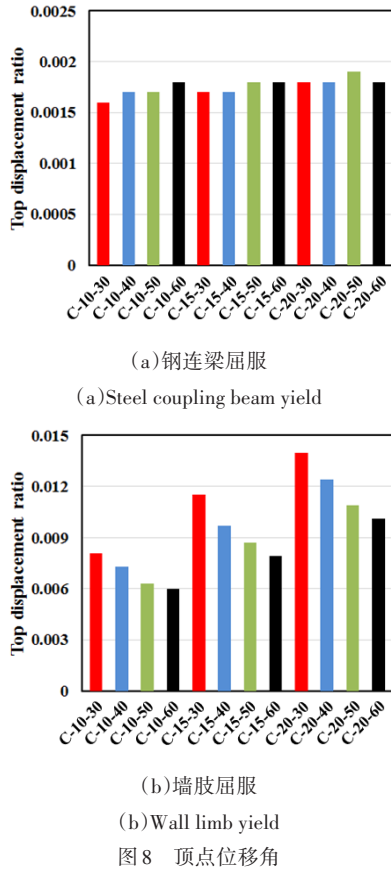


Fig.8 Top displacement ratio

的结构墙肢屈服时,对应的顶点位移角差距较大,当CR相同时,层数越多,位移角越大;同时,位移角均大于中震层间位移角限值0.005.这表明在中震作用下,结构墙肢不屈服,大震作用下才可能屈服,

满足性能要求.需要注意的是,CR越大,会使得墙肢屈服的时间越早,所以在超过中震作用下,为控制墙肢屈服状态,避免结构发生倒塌,合理选择CR尤为重要.

3.1.3 结构超强系数

结构的超强能力可以分为三个方面:设计超强、材料超强以及结构体系超强.设计超强主要指结构拥有超大的截面、富裕的钢筋,使得结构承载力存在富裕,结构超强;材料超强取决于材料设计值和实际材料强度之间的差异;结构体系超强主要包括某一设计的建筑形式要求、规范中的基本假定以及荷载效应组合等.结构超强系数是结构系数的重要组成部分,经实际地震破坏情况以及研究表明,超强系数的大小直接影响着结构抗震性能,是结构抗震性能里的一个重要因素,因此利用结构超强系数量化结构在抗震设计中结构的超强能力具有重要意义.

根据上述推覆曲线结果,几乎没有影响.表7给出了本文所设计的12个混合联肢剪力墙的峰值承载力和超强系数.从表中可以看出,12个不同层数不同CR结构的结构超强系数均在1.35附近浮动,即结构承载力存在富裕,可以作为一定的安全储备.从表7还可以看出,作为简化设计,CR为30%和40%以及50%和60%的结构均具有相同的设计基底剪力,其结构CR的不同对于峰值承载力的变化非常小,几乎没有影响.

表 7 结构超强系数

Table 7 Overstrength ratio of structures

Structure number	Design bearing capacity (kN)	Peak bearing capacity (kN)	Overstrength ratio
C-10-30	1358.56	1817.11	1.34
C-10-40	1358.56	1870.06	1.38
C-10-50	1500.38	2021.82	1.35
C-10-60	1500.38	2088.54	1.39
C-15-30	1131.67	1481.17	1.31
C-15-40	1131.67	1495.96	1.32
C-15-50	1195.79	1606.48	1.34
C-15-60	1195.79	1648.79	1.38
C-20-30	1079.86	1368.37	1.27
C-20-40	1079.86	1425.12	1.32
C-20-50	1208.21	1590.50	1.32
C-20-60	1208.21	1634.91	1.35

3.1.4 屈服位移及延性

混合联肢剪力墙的推覆曲线在连梁屈服时具有明显的折点,尤为注意的是,CR在30%~60%范

围内,结构中钢连梁总体设计偏弱,主要利用其连梁屈服后良好的塑性变形能力耗散地震能量,在地震作用下容易达到屈服状态,故连梁屈服点不易作

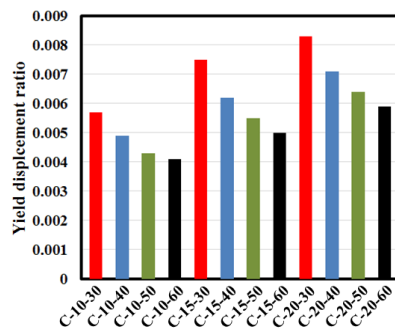
为结构体系的屈服点.而在墙肢屈服前,事实上混合联肢剪力墙已有了较为明显的塑性变形,因此,墙肢屈服点也不宜作为体系屈服点,结构屈服点的定义目前仍缺乏统一性.文献[14]提出采用通用屈服弯矩法确定混合联肢剪力墙屈服点,本文亦参照并采用该方法确定屈服点.结构的极限位移点取为结构的承载力下降至峰值承载力的85%对应的位移点.

图9给出了上述12个混合联肢剪力墙结构的屈服位移角、极限位移角以及延性系数的对比关系.从图中可以看出,无论是结构的屈服位移角、极限位移角或位移延性系数,CR的增大均使得其值略有减小,呈现出相似的变化规律.这表明增大CR使得结构的延性能力降低.需要说明的是,上述规律仅仅只因本文对12个结构中确定屈服位移角和极限位移角采用的方法相同.若采用不同方法,可能得到不同结果.

3.1.5 墙肢内力变化规律

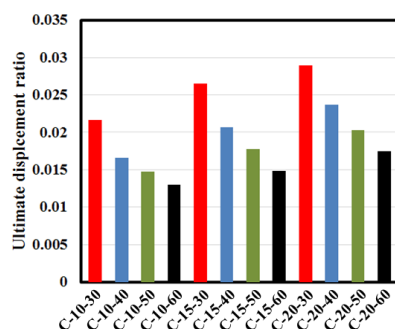
本文给出了上述10层混合联肢剪力墙结构的拉压墙肢底部截面弯矩随着侧移增大的变化曲线图,如图10所示.从图中我们可以发现:在顶点位移角为0.0016之前,10层混合联肢剪力墙结构的拉压墙肢承担的倾覆力矩基本相同;但随着CR的不断增大,结构受压墙肢承担的倾覆力矩比例也逐渐变大,说明CR的大小对结构左右墙肢承担的倾覆力矩比例影响显著.这是由于连梁对墙肢的轴力增大,导致左右墙肢的轴力差增加,受压墙肢逐渐承担更多的倾覆力矩.同时,由于其余层数的混合联肢剪力墙结构在推覆分析中拉压墙肢的弯矩同10层混合联肢剪力墙结构变化规律相似,故这里不再进行详细阐述.

本文根据不同的CR,预先按比例分配倾覆力矩,提取出了12个结构被推覆至目标位移角为0.005时倾覆力矩在受拉墙肢与受压墙肢中的分配比例,如图11所示.从图11中可以看出,随着CR的变化,不同层数的结构倾覆力矩变化趋势相同,且相同CR的分配比例非常接近,说明层数对倾覆力矩分配比例影响较小.当CR为30%时,结构受压墙肢设计分配比例略低于分析结果,而当CR为40%到60%之间时,结构受压墙肢体设计分配比例略高于分析结果.根据上述分析可以得知,预先选择的倾覆力矩分配比例与分析结果吻合较好.



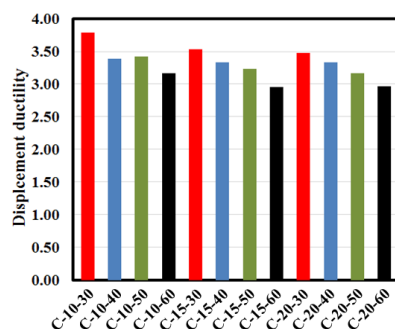
(a) 屈服位移角

(a) Yield drift ratio



(b) 极限位移角

(b) Drift ratio at ultimate



(c) 位移延性系数

(c) Displacement ductility coefficient

图9 结构顶点位移对比

Fig.9 Comparison of top displacement

3.1.6 CR随顶点位移的变化规律

当结构进入到塑性阶段后,力会按照新的刚度进行分配,CR的值也随之发生变化,对于能够形成预定屈服机制的混合联肢剪力墙结构,在一次单向推覆分析中,CR随着顶点位移角的变化规律可以用图12表示.

图中A、B、C、D四点分别表示出了四类联肢剪力墙结构的CR.“A”点所示的 $CR_{elastic}$ 为“完全弹性耦连比”,由结构构件的完全弹性刚度并采用连续介质法计算求得;“B”点所示的CR为“弹性极限耦

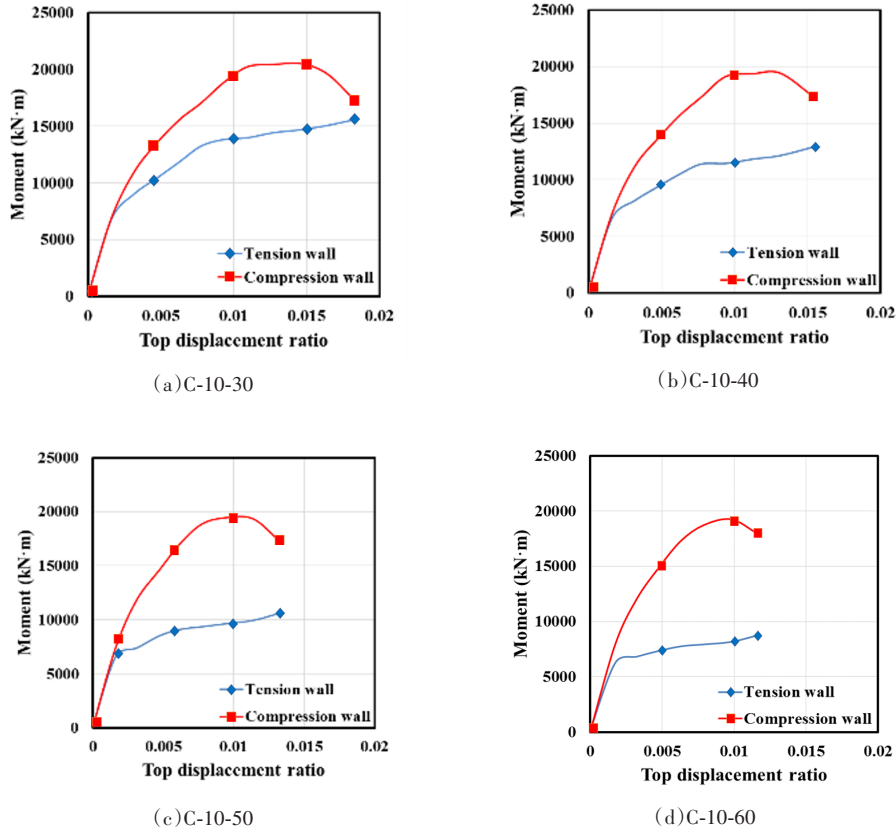


图 10 墙肢底部截面弯矩变化规律

Fig.10 The relationship between the moment and the top displacement ratio

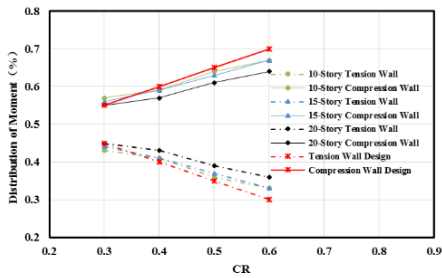


图 11 墙肢底部截面倾覆力矩分配比例

Fig.11 Distribution of moments at the bases of the walls

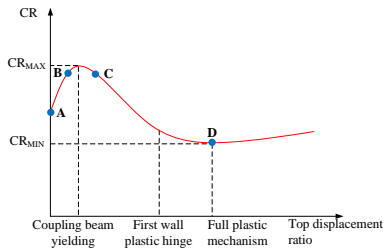


图 12 CR 随顶点位移角变化规律

Fig.12 The relationship between the CR and the top displacement ratio

连比”,在时程分析过程中,根据首个连梁屈服时刻提取结构构件的受力并计算求得;“C”点所示的CR为“不完全弹性耦连比”,根据结构构件混凝土开裂

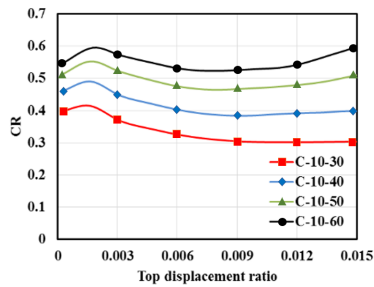
后的有效刚度,并采用连续介质法计算求得;“D”点所示的 CR_{MIN} 为“塑性耦连比”,在大部分连梁屈服,结构形成机构时,根据左右墙肢倾覆力矩分配比例计算求得.

图 13 给出了 12 个混合联肢剪力墙结构基于推覆分析得到的实时 CR 变化规律曲线,从图 13 和表 8 可以看出, C-10-50、C-10-60、C-15-60 三个结构的 CR_{MIN} 与设计之初选择的塑形 CR 存在偏差,这是由于其连梁承担的倾覆比例较大,而总体倾覆力矩偏小,导致一定程度上增大了墙肢底部截面的设计弯矩.而其余 9 个结构的 CR_{MIN} 均与设计之初选择的塑性 CR 基本相等.

总结图 13 和表 8 中实时 CR 的变化规律,可以得出结论:

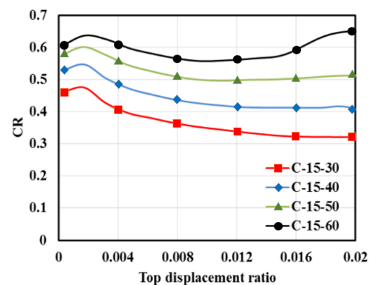
(1)结构的“塑性耦连比”均小于“完全弹性耦连比” $CR_{elastic}$,表明连梁在结构处于弹性阶段时其承担的倾覆力矩比例更大,而在结构进入塑性阶段后,大部分连梁逐渐屈服后其承担的倾覆力矩增长变慢,从而在结构形成结构式连梁承担的倾覆力矩比例会减小.

(2)相同设计的“塑性耦连比”结构会随着层数



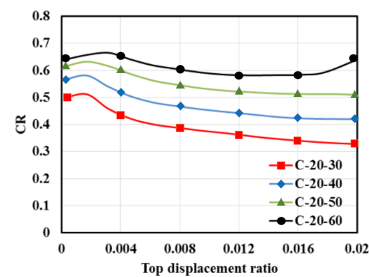
(a) 10层混合联肢剪力墙

(a) 10 story HCW systems



(b) 15层混合联肢剪力墙

(b) 15 story HCW systems



(c) 20层混合联肢剪力墙

(c) 20 story HCW systems

图13 CR与顶点位移角的关系

Fig.13 The relationship between the CR and the top displacement ratio

的增大其“完全弹性耦合比” $CR_{elastic}$ 和 CR_{MAX} 均逐渐增大。

(3)在结构层数相同时,其 CR_{MAX} 和 CR_{MIN} 的差值将随着设计“塑性耦合比”的增大而逐渐减小,表明连梁和墙肢屈服时的顶点位移角度越来越接近。可以预测,当设计“塑性耦合比”继续增大时,墙肢可能先于大部分连梁屈服,形成不合理的屈服机制。

4 结论

本文采用基于能量平衡的塑性设计方法,设计出12个混合联肢剪力墙结构,并对其12个结构进行Push-over分析,得出的结论主要有:

(1)基于能量平衡的塑性设计方法设计的12

表8 结构的CR特征点

Table 8 CR feature points of structural

Structure number	$CR_{elastic}$	$CR_{MAX}(\%)$	$CR_{MIN}(\%)$	$CR_{MAX}-CR_{MIN}(\%)$
C-10-30	39.8	41.4	30.1	11.3
C-10-40	45.8	49.0	38.3	10.7
C-10-50	50.9	55.2	46.4	8.8
C-10-60	54.2	59.5	52.3	7.2
C-15-30	46.1	47.5	31.9	15.6
C-15-40	52.7	54.7	41.2	13.5
C-15-50	57.5	60.1	49.6	10.5
C-15-60	60.3	63.7	55.7	8.0
C-20-30	50.2	51.1	31.1	20.0
C-20-40	56.7	58.1	41.9	16.2
C-20-50	61.5	63.2	50.4	12.8
C-20-60	63.9	65.7	58.2	7.5

个混合联支剪力墙结构均能够实现理想的屈服机制,保证在结构破坏时连梁最先达到屈服、墙肢后屈服,使连梁充当抗震体系的第一道防线,消耗部分地震能量输入。在承载力上能够性能设计的目标,采用此方法设计的混合联肢剪力墙结构仍然具有一定的超强。

(2)当结构的层数相同时,随着CR增大其屈服位移角、极限位移角均减小,同样降低的还有位移延性系数。在巨大的轴力差下,拉压墙肢所承担的倾覆力矩也有所不同,而CR的大小对倾覆力矩在拉压墙肢间的分配比例也有影响。

(3)随着其顶点位移的增大,结构的实时CR先增大后减小,最后趋于稳定,在结构的设计CR相同时,随着结构高度的增大,其 $CR_{elastic}$ 和 CR_{MAX} 会相应增大。

参 考 文 献

- 刘坚,李东伦,潘澎.钢-混凝土混合结构中剪力墙与钢梁连接节点弯矩-转角关系研究.钢结构,2015,30(10):1~8(Liu J, Li D L, Pan P. Research on the moment-rotation relationship of the connection between shear walls and steel beams. *Steel Construction*, 2015, 30(10): 1~8(in Chinese))
- 王丽,苏明周,徐明.钢连梁剪切屈服型混合连肢墙体节点滞回性能有限元分析.水利与建筑工程学报,2011,9(2):11~19(Wang L, Su M Z, Xu M. FEM analysis on hysteretic behavior of shear-critical steel coupling beam-column connection in hybrid coupled shear wall system. *Journal of Water Resources and Architectural Engi-*

- neering, 2011, 9(2): 11 ~ 19 (in Chinese))
- 3 石韵, 苏明周, 梅许江, 等. 高耦连比新型混合连肢墙结构滞回性能拟静力试验研究. 土木工程学报, 2013, 46(1): 52 ~ 60 (Shi Y, Su M Z, Mei X J, et al. Experimental study on hysteretic behavior of innovative hybrid coupled wall system with high coupling ratio. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(1): 52 ~ 60 (in Chinese))
 - 4 田建勃, 史庆轩, 刘云贺, 等. PRC连梁-混合联肢剪力墙抗震性能分析. 工程力学, 2018, 35(11): 53 ~ 67 (Tian J B, Shi Q X, Liu Y H, et al. Research on seismic performance of PRC coupling beam-hybrid coupled shear wall system. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(11): 53 ~ 67 (in Chinese))
 - 5 纪晓东, 马琦峰, 王彦栋, 等. 钢连梁可更换消能梁段抗震性能试验研究. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 1 ~ 11 (Ji X D, Ma Q F, Wang Y D, et al. Cyclic tests of replaceable shear links in steel coupling beams. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6): 1 ~ 11 (in Chinese))
 - 6 El-Tawil S, Kuenzli C M. Push-over of hybrid coupled walls. II: Analysis and Behavior. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(10): 1282 ~ 1289
 - 7 白久林, 欧进萍. 基于能量平衡的钢筋混凝土框架结构抗震塑性设计方法. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 22 ~ 31 (Bai J L, Ou J P. Seismic plastic design of RC frame structure based on energy balance. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(10): 22 ~ 31 (in Chinese))
 - 8 陈向荣, 宗智芳, 冉红东. 基于能量平衡的延性交错桁架塑性设计方法. 地震工程与工程振动, 2015, 35(4): 236 ~ 243 (Chen X R, Zong Z F, Ran H D. Plastic design of special staggered truss based on energy balance. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2015, 35(4): 236 ~ 243 (in Chinese))
 - 9 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010 (National Standard of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings (GB 50011-2010). Beijing: China Building Industry Press, 2010 (in Chinese))
 - 10 Leelataviwat S, Goel S C. Toward performance-based seismic design of structures. *Earthquake Spectra*, 1999, 15(3): 435 ~ 461
 - 11 Paulay T, Priestley M N J. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 1992
 - 12 Park R, Priestley M J N, Gill W D. Ductility of square-confined concrete columns. *Journal of the Structural Division*, 1982, 108(4): 929 ~ 950
 - 13 秦宝林. 在 PERFORM-3D 软件支持下对超高层结构实例抗震性能的初步评价 [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012 (Qin B L. Preliminary evaluation of seismic performance of super high-rise structures with the support of PERFORM-3D software [Master Thesis]. Chongqing: Chongqing University, 2012 (in Chinese))
 - 14 詹永旗. 带钢连梁混合双肢剪力墙结构抗震性能实验与设计研究 [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009 (Zhan Y Q. Experimental and design study on seismic behavior of double-limb shear wall structure with steel beam and beam [Master Thesis]. Changsha: Central South University, 2009 (in Chinese))
 - 15 樊萱. 基于 Perform-3D 的粘钢加固钢筋混凝土框架静力弹塑性分析 [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016. (Fan X. Static elastoplastic analysis of reinforced concrete frame strengthened with bonded steel based on Perform-3D [Master Thesis]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese))
 - 16 Freeman S A, Nicoletti J P, Tyrell J V. Evaluation of existing buildings for seismic risk—a case study of puget Sound naval shipyard, Bremerton, Washington. In: Proceedings of US National Conference on Earthquake Engineering, Berkley, USA, 1975: 113~122
 - 17 谭丽芳, 蒋丽忠, 董立冬. 基于 Push-over 分析的钢混凝土组合框架抗震性能研究. 动力学与控制学报, 2008, 6(2): 169~172 (Tan L F, Jiang L Z, Dong L D. Push-over analysis on the steel concrete composite frame structure with three stories. *Journal of Dynamics and Control*, 2008, 6(2): 169 ~ 172 (in Chinese))

PLASTIC PERFORMANCE CONTROL METHOD AND PUSH-OVER ANALYSIS OF HYBRID COUPLED SHEAR WALL BASED ON ENERGY PRINCIPLE

Qin Lang¹ Wu Yuntian^{1,3†} Hou Chao¹ Zhu Kang¹ Zhou Qing²

(1.School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

(2.Sichuan Architectural Design and Research Institute, Chengdu 610000, China)

(3.Key Laboratory of Mountain Construction and New Technology Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract At present, the joint shear wall structure is common in high-rise buildings in China, and the hybrid limb shear wall structure is one of them. It can make full use of the respective advantages of concrete and steel, and has great ductility and can meet larger shear demand. However, due to the large ductility of the wall limbs, the design method and seismic performance are complicated. The hybrid limb shear wall structure is not widely used in engineering practice. Therefore, it is of great significance to study the design method and seismic performance of the hybrid limb shear wall structure. In this paper, an energy balance plastic design method different from the traditional method is adopted. The method comprehensively considers the force, deformation and energy consumption of the structure, and can pre-control the yield mechanism and deformation size of the structure. This paper based on energy balance plastic design method. 12 hybrid coupled shear wall examples are designed and static Push-over analysis is carried out in finite element software. The static pushover curves of 12 examples are obtained. The results show that 12 examples can realize the ideal yielding mechanism, and ensure that the joint beam first yields and the wall is yielded after the structural failure. From the perspective of structural bearing capacity, the structure can also meet the higher seismic requirements.

Key words hybrid coupled shear wall, seismic resistance, energy balance plastic design, static push-over analysis

Received 25 August 2019, revised 18 November 2019.

† Corresponding author E-mail: yuntianw@cqu.edu.cn