

混凝土剪力墙受剪承载力可靠度分析

童小龙^{1,2}, 方志^{1†}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南理工学院 土木建筑工程学院, 湖南 岳阳 414006)

摘要:针对我国规范未对剪力墙受剪承载力可靠指标进行校准,本文研究钢筋混凝土剪力墙受剪承载力的可靠度水平.根据剪力墙抗剪公式所依据的试验及试件情况,收集并筛选截面型式、混凝土类型、配筋型式、破坏形态等方面与其一致的74片剪力墙试验数据,对试件承载力的试验值与规范公式计算值进行分析,得出剪力墙受剪承载力计算模式不定性统计参数,进而得出抗力统计参数和概率分布类型;采用考虑基本变量概率分布类型的验算点法进行可靠指标计算.结果表明:现行规范剪力墙受剪承载力可靠指标低于目标可靠指标3.7的要求,其中荷载效应比、剪跨比、轴向压力、配筋率、混凝土强度等级对可靠指标影响较小,风荷载与永久荷载效应比对可靠指标影响较大,分布钢筋采用HPB300时的可靠指标在同等条件下较小.为保证剪力墙受剪承载力可靠指标满足目标可靠指标要求,引入承载力调整系数0.95对现行计算公式进行修正,修正后计算公式的可靠指标均值为3.738.

关键词:钢筋混凝土剪力墙;受剪承载力;计算模式不定性;可靠度

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Reliability Analysis of Shear Capacity of Concrete Shear Walls

TONG Xiaolong^{1,2}, FANG Zhi^{1†}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. School of Civil and Architectural Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

Abstract: Current Chinese design codes have not calibrated the reliable index of shear capacity of shear wall. In order to study the reliability level of shear bearing capacity of reinforced concrete shear wall, this paper collected and selected 74 shear wall specimens that are consistent with the ones based on the shear formulas of shear wall in terms of section type, concrete type, reinforcement type and failure mode. By analyzing the test and calculated values of shear capacity for the specimens, the statistical parameters of calculation model uncertainty were obtained, and then the statistical parameters and probability distribution types of resistance were obtained. The checking point method considering the probability distribution of basic variables was used to calculate the reliability index. The results show that the reliability index of shear capacity of shear wall in current code is lower than the target reliability index 3.7. Load effect ratio, shear span ratio, axial pressure, reinforcement ratio and concrete strength grade have little influence on the reliability index. The wind-to-dead load ratio has great influence on the reliability index. The reliability index

* 收稿日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708209,51608189), National Natural Science Foundation of China(51708209, 51608189); 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50209), Natural Science Foundation of Hunan Province(2019JJ50209)

作者简介:童小龙(1983—),男,湖南岳阳人,湖南大学访问学者,湖南理工学院副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail:fangzhi@hnu.edu.cn

of distributed rebar with HPB300 is small under the same conditions. In order to ensure that the reliability index of shear capacity of shear wall meets the requirements of target reliability index, a bearing capacity adjustment coefficient of 0.95 is introduced to modify the current calculation formula. The average value of reliable index in the revised formula is 3.738.

Key words: reinforced concrete shear wall; shear capacity; calculation model uncertainty; reliability

GBJ 68-84《建筑结构设计统一标准》^[1]、GB 50068-2001《建筑结构设计统一标准》^[2]对钢筋混凝土结构、钢结构、砌体及木结构等不同类型构件的承载能力可靠指标进行了较系统的计算,计算结果满足目标可靠指标要求.但规范中钢筋混凝土构件受剪可靠指标均以钢筋混凝土梁为对象进行校准,未对钢筋混凝土剪力墙受剪可靠指标进行分析.很明显,钢筋混凝土剪力墙和梁属于不同的构件类型,其受荷形式、破坏形态、受剪承载力计算公式等方面均不同,剪力墙受剪可靠指标明显不能套用梁的结果.我国现行规范 JGJ 3-2010《高层混凝土结构技术规程》、GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》中剪力墙受剪承载力基于4个假定,取中国建筑科学研究院12片剪力墙试验和美国波兰特水泥协会的3片剪力墙以及日本所做的1片剪力墙试验的偏下限作为计算公式,16个试件均为矩形截面,截面两端设有暗柱,均发生剪压破坏^[3].基于此,本文按照剪力墙抗剪公式所依据的试验试件情况,收集并筛选截面型式、混凝土类型、配筋型式、破坏形态等方面与其一致的剪力墙试验数据,对剪力墙受剪承载力计算模式不定性进行统计分析,确定抗力不定性统计参数和概率分布类型,按相应的荷载效应组合,采用考虑基本变量概率分布类型的JC法计算我国规范公式的剪力墙受剪承载力可靠指标,并对其影响因素和计算结果进行分析,提出相应的设计建议.

1 剪力墙受剪承载力计算公式

GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》^[4]和 JGJ 3-2010《高层混凝土结构技术规程》^[5]规定剪力墙偏心受压受剪承载力 V 计算公式如下:

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.5f_t b h_0 + 0.13N) + f_{yv} \frac{A_{sh}}{s_v} h_0 \quad (1)$$

式中: λ 为剪跨比,当 λ 小于1.5时,取1.5,当 λ 大于2.2时,取2.2; f_t 为混凝土轴向抗拉强度设计值; b

为剪力墙截面宽度; h_0 为剪力墙截面有效高度; N 为轴向压力,当大于 $0.2f_c b h$ 时,取 $0.2f_c b h$; f_{yv} 为水平分布钢筋的抗拉强度设计值; A_{sh} 为配置在同一截面内的水平分布钢筋截面面积; s_v 为水平分布钢筋的竖向间距.

2 试验数据统计

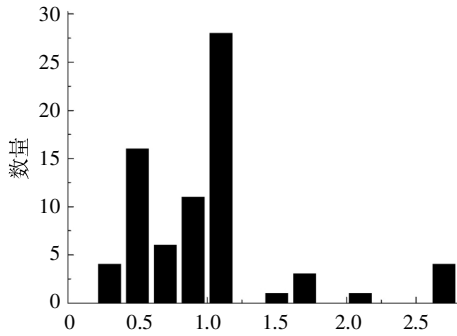
以规范中剪力墙受剪承载力计算公式所依据的试验试件为参照,筛选和引用的试验数据满足以下准则:1)矩形截面普通混凝土带暗柱剪力墙,不包括轻骨料混凝土、再生混凝土、纤维混凝土墙;2)配有水平分布钢筋;3)发生剪压破坏;4)不包括改进型剪力墙,如配置型钢墙、带暗支撑钢筋墙、钢板组合剪力墙、带竖缝墙等;5)试验参数完整且试验成功,能满足分析需要.数据来源见表1.其中单调加载试件11

表1 试验数据统计

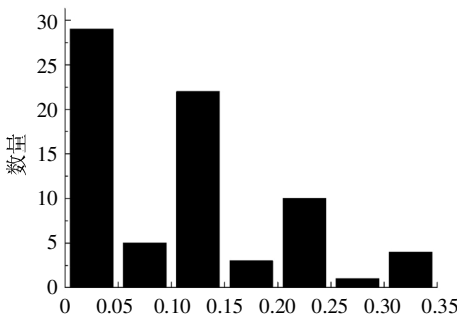
Tab.1 Statistics of test data

数据来源	试件总数	引用数量	筛选依据
文献[3]	16	16	—
文献[6]	9	3	3)
文献[7]	12	2	4)、5)
文献[8]	15	1	3)
文献[9]	11	1	4)
文献[10]	6	1	3)、4)
文献[11]	7	2	1)、3)
文献[12]	4	1	4)
文献[13]	3	3	—
文献[14]	2	1	4)
文献[15]	5	4	5)
文献[16]	8	8	—
文献[17]	24	1	3)、4)
文献[18]	7	1	4)
文献[19]	8	1	1)
文献[20]	26	17	2)
文献[21]	4	4	—
文献[22]	13	7	3)

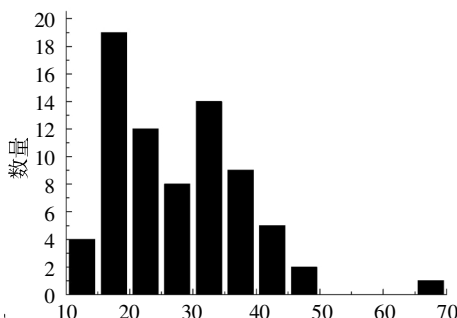
片,其余为低周反复加载.图1给出了74片试件的参数分布情况,其中剪跨比 λ 为0.35~2.73,轴压比 n 为0~0.3,混凝土抗压强度 f_c 为14.3~66.7 MPa,水平钢筋抗拉强度 f_{yh} 为235~600 MPa,水平钢筋配筋率 ρ_h 为0.1%~1.1%.上述参数的取值基本覆盖了实际工程中对应参数的取值范围,具有较好的代表性.



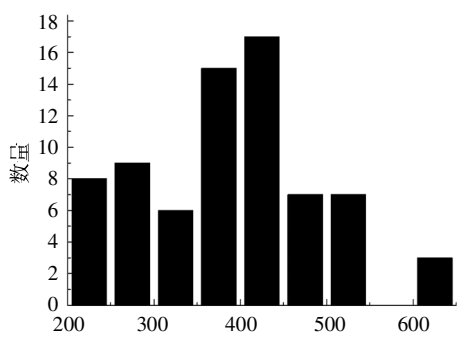
(a)剪跨比



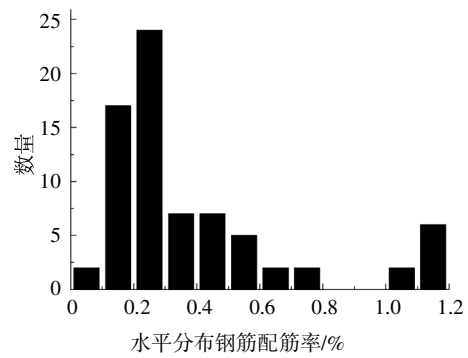
(b)轴压比



(c)混凝土抗压强度



(d)水平分布钢筋抗拉强度



(e)水平分布钢筋配筋率

图1 试件数量随参数取值的分布

Fig.1 Distribution of database with different parameters

3 可靠度分析

3.1 几何参数的不定性

钢筋混凝土剪力墙的几何参数,其不定性随机变量的统计参数均值 k_x 和变异系数 δ_x 见表2^[1,23].

表2 几何尺寸统计参数

Tab.2 The statistical parameters of geometric dimensions

变量	k_x	δ_x
截面高度、宽度	1	0.02
截面有效高度、钢筋截面面积	1	0.03
箍筋平均间距	0.99	0.07

3.2 材料性能的不定性

影响钢筋混凝土剪力墙抗剪承载力的材料参数包括混凝土抗拉强度和钢筋抗拉强度,两者均服从正态分布^[1].

3.2.1 混凝土

混凝土轴心抗拉强度变异系数 δ_f 按GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》附录采用,混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 与立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 关系为^[4]:

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_{c2} \quad (2)$$

式中: α_{c2} 为混凝土脆性折减系数,对C40混凝土取1,对C80混凝土取0.87,中间线性内插.考虑 α_{c2} 和试件混凝土强度修正系数0.88,可得混凝土抗拉强度随机变量 f_t 的统计参数均值 k_f ,见表3.

3.2.2 钢筋

HPB300钢筋的屈服强度统计参数还未见文献报道,按HPB235的统计参数采用.根据文献[24-25],钢筋的统计参数均值 k_s 及变异系数 δ_s 见表4.

表 3 混凝土轴心抗拉强度统计参数

Tab.3 Statistical parameters of axial tensile strength of concrete

强度等级	k_i	δ_i
C30	1.585	0.172
C35	1.556	0.164
C40	1.529	0.156
C45	1.554	0.156
C50	1.505	0.149
C60	1.480	0.141

表 4 钢筋强度统计参数

Tab.4 Statistical parameters of reinforcement strength

钢筋种类	k_s	δ_s
HPB300	1.020	0.080
HRB335	1.140	0.070
HRB400	1.114	0.072

3.3 计算模式的不定性

剪力墙抗剪承载力计算模型不确定性可用随机变量 K_p 表示^[1]:

$$K_p = V_0/V \tag{3}$$

式中: V_0 为结构实际抗力,取试验实测值; V 为按理论计算公式所得的计算抗力值.计算时几何尺寸和材料参数取实测值,得到剪力墙抗剪承载力计算模式不确定性参数 K_p 的统计参数见表 5,可见规范公式与试验值吻合较好,但剪力墙抗剪承载力计算结果有一定的离散性.

表 5 K_p 的统计参数

Tab.5 Statistical parameters of K_p

均值 μ_{K_p}	标准差	变异系数 δ_{K_p}
1.230	0.260	0.211

3.4 抗力统计参数计算及概率分布类型

受剪承载力可采用式(4)计算^[1]:

$$V = K_p R_p (f_{ci} \cdot a_i); i = 1, \dots, n \tag{4}$$

式中: f_{ci} 、 a_i 均为随机变量,分别为第 i 种材料的材料性能和几何参数.剪力墙受剪承载力统计参数的均值 k_V 和变异系数 δ_V 分别见式(5)(6):

$$k_V = \frac{\mu_V}{V_d} = \frac{\mu_{K_p} \mu_{R_p}}{V_d} = \frac{\mu_{K_p} R_p (\mu_{f_{ci}}, \mu_{a_i})}{V_d} \tag{5}$$

$$\delta_V = \sqrt{\delta_{K_p}^2 + \delta_{R_p}^2} \tag{6}$$

式中: V_d 为按规范公式(1)确定的受剪承载力设计值.变异系数 δ_{R_p} 由式(7)计算,其中 σ_{R_p} 由式(8)计算.

$$\delta_{R_p} = \frac{\sigma_{R_p}}{\mu_{R_p}} \tag{7}$$

$$\delta_{R_p}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R_p}{\partial X_i} \Big|_{\mu} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 \tag{8}$$

抗力由多个随机变量的乘积和形成,可靠度分析时可近似认为服从对数正态分布.

3.5 荷载统计参数及分布类型

文献[1,26]给出了永久荷载、楼面活荷载、风荷载的统计参数和分布类型,见表 6,其中楼面活荷载考虑住宅楼和办公楼 2 类.

表 6 荷载统计参数及分布类型

Tab.6 Statistical parameters and distribution types of loads

荷载类别	平均值/标准值	变异系数	分布类型
永久荷载	1.060	0.070	正态
住宅楼面活荷载	0.644	0.233	极值 I 型
办公楼面活荷载	0.524	0.288	极值 I 型
风荷载	0.908	0.193	极值 I 型

3.6 可靠指标计算

3.6.1 剪力墙受剪承载力极限状态方程

规范[1-2]确定构件可靠指标时,采用永久荷载+办公楼面活荷载、永久荷载+住宅楼面活荷载、永久荷载+风荷载 3 种简单组合,没有考虑风荷载和活荷载同时作用的情况.对于高层结构,风荷载作为主要活荷载,与楼面活荷载同时出现的概率较大,因此本文的分析不再按规范[1-2]中的简单组合,而是按《建筑结构荷载规范》^[27]和《高层建筑混凝土结构技术规程》^[5]中的荷载效应基本组合,荷载组合的效应设计值 S 为(假定结构安全等级为二级):

$$S = \gamma_G S_{Gk} + \psi_Q \gamma_Q S_{Qk} + \psi_W \gamma_W S_{Wk} \tag{9}$$

式中: γ_G 、 γ_Q 、 γ_W 分别为永久荷载、活荷载、风荷载的分项系数; ψ_Q 、 ψ_W 分别为活荷载和风荷载的组合值系数; S_{Gk} 、 S_{Qk} 、 S_{Wk} 分别为永久荷载、活荷载、风荷载的荷载效应标准值.

确定荷载和抗力的统计参数后,建立剪力墙抗剪承载力的极限状态方程式:

$$R - S_G - S_Q - S_W = 0 \tag{10}$$

式中: R 为剪力墙受剪承载力; S_G 、 S_Q 、 S_W 分别为永久荷载、活荷载及风荷载的荷载效应,分别等于相应的荷载分项系数与效应标准值之积.定义荷载效应比 ρ 为活荷载与永久荷载标准值效应之比, χ 为风荷载与永久荷载标准值效应之比,则对于不同效应

比,荷载组合设计值 S 取式(9)中不同组合的较大值^[5,27].

3.6.2 计算步骤

将剪跨比 λ 、轴向压力 N 视为确定性变量,其他参数为随机变量.楼面活荷载分为住宅楼和办公楼2类.从工程实际出发,并满足规范^[9]构造规定,混凝土强度等级取 C30~C60,水平分布钢筋取 HPB300~HRB400,配筋率 ρ_{sh} 取 0.2%~0.35%, λ 取 1.5~2.2, N 取 $0.1f_c b h_0 \sim 0.2f_c b h_0$.可靠度计算中, ρ 取 0.1~2, χ 取 0~40.下述计算如无特殊说明,混凝土强度等级为 C35,钢筋种类为 HRB400, $\rho_{sh} = 0.25\%$, $\lambda = 2$, $N = 0.15f_c b h_0$, $\rho = 0.5$, $\chi = 10$.计算步骤为:

1)假定活荷载标准值 S_{Qk} 为某一定值,根据 ρ 计算永久荷载标准值 S_{Gk} ,根据 χ 计算风荷载标准值 S_{Qk} ,依公式(10)计算抗力 R .

2)按式(5)(6)计算 R 的统计参数,根据步骤 1)所求的 S_{Gk} 、 S_{Qk} 、 S_{Wk} 、 R 及相应的统计参数求各变量相应的均值和标准差.

3)采用 JC 法计算可靠指标^[28].

3.6.3 计算结果

按上文的步骤和方法计算不同剪跨比、轴向压力、钢筋种类、水平钢筋配筋率和混凝土强度下剪力墙受剪可靠指标,并分析各因素对可靠指标的影响规律.

1)荷载效应比影响

分别计算住宅、办公楼楼面活荷载下不同荷载效应比时的可靠指标 β ,见表 7.从表 7 中可以看出,可靠指标均低于目标可靠指标 3.7.住宅楼面活荷载下剪力墙受剪可靠指标均略小于办公楼.可靠指标随着荷载效应比的增大呈增大趋势,荷载效应比从 0.1 增大至 2,2 类楼面活载下的可靠指标仅增幅 4.0% 和 4.1%.

表 7 荷载效应比对可靠指标的影响

Tab.7 Influence of load effect ratio on reliability index

ρ	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$
0.1	3.380	3.382
0.25	3.392	3.397
0.5	3.411	3.422
1	3.447	3.470
1.5	3.483	3.516
2	3.516	3.520
可靠指标均值	3.438	3.459
	3.448	

2)风荷载与永久荷载效应比影响

表 8 为风荷载与永久荷载效应比对可靠指标的影响,除 χ 为 0 时的住宅楼面活荷载、 χ 为 0~1 时的办公楼楼面活荷载下的可靠指标大于目标可靠指标外,其余均小于目标可靠指标,可靠指标均值 3.527 也小于目标可靠指标 3.7.随着 χ 的增大,可靠指标总体减小且减小幅度逐渐变缓并几乎不变, χ 从 0 增大至 40,可靠指标减小了 12.3% (住宅)和 15.8% (办公楼).

表 8 风荷载与永久荷载效应比对可靠指标的影响

Tab.8 Influence of χ on reliability index

χ	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$
0	3.818	3.983
0.25	3.665	3.812
0.5	3.625	3.752
1	3.674	3.764
5	3.478	3.500
10	3.411	3.422
15	3.385	3.397
20	3.371	3.377
25	3.363	3.368
30	3.357	3.361
40	3.350	3.353
可靠指标均值	3.500	3.554
	3.527	

3)剪跨比和轴向压力影响

不同剪跨比和轴向压力时的可靠指标见表 9.住宅楼面活荷载下的可靠指标略小于办公楼楼面活荷载下的可靠指标,可靠指标计算结果均小于 3.7.随着剪跨比增大,2 类楼面活荷载下各自的可靠指标均近似呈线性减小,但减小幅度均在 4.5% 以内.其他条件相同时,轴向压力对可靠指标的影响规律与剪跨比类似,可靠指标随轴向压力的增大而略有减小.

4)钢筋种类和配筋率影响

水平分布钢筋采用 HPB300、HRB335、HRB400 及不同配筋率时的受剪承载力可靠指标计算结果见表 10.结果显示,3 种类型钢筋的可靠指标均不能达到目标可靠指标要求.HPB300 钢筋所计算的可靠指标最小,这是由于 HPB300 钢筋抗拉强度统计参数中的均值最小,且变异系数最大所致.3 种类型钢筋的配筋率大小对可靠指标的影响规律类似,配筋率从 0.2% 增大至 0.35%,住宅楼楼面活荷载下

HPB300、HRB335 和 HRB400 的可靠指标分别减小了 4.68%、3.19% 和 3.95%；办公楼楼面活荷载下 HPB300、HRB335 和 HRB400 的可靠指标分别减小了 5.17%、3.49% 和 4.23%。这是由于随着配筋率增大，抗力统计参数中的均值和变异系数均略有减小，但变异系数减小对可靠指标的影响没有均值减小对可靠指标的影响大。总体而言，配筋率对可靠指标的影响幅度不大，同等条件下，剪力墙采用 HPB300 分布钢筋，不仅材料强度低且可靠指标相对最小；而采用 HRB400 分布钢筋不仅强度高，可靠指标也较大。因此，剪力墙分布钢筋类型应优先采用 HRB400 钢筋。

表 9 剪跨比、轴向压力对可靠指标的影响

Tab.9 Influence of shear span ratio and axial pressure on reliable indexes

λ	$N=0.1f_c b h_0$		$N=0.15f_c b h_0$		$N=0.2f_c b h_0$		可靠指标平均值	
	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$
1.5	3.560	3.571	3.510	3.521	3.464	3.475	3.511	3.522
1.8	3.490	3.501	3.447	3.458	3.408	3.419	3.448	3.459
2	3.449	3.460	3.411	3.422	3.374	3.386	3.411	3.423
2.2	3.412	3.423	3.377	3.389	3.345	3.356	3.378	3.389
可靠指标均值	3.478	3.489	3.436	3.448	3.398	3.409	3.437	3.448

表 10 水平钢筋配筋率对可靠指标影响

Tab.10 Influence of horizontal reinforcement ratio on reliability index

钢筋种类	$\rho = 0.2\%$		$\rho = 0.25\%$		$\rho = 0.3\%$		$\rho = 0.35\%$		可靠指标平均值	
	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$
HPB300	3.440	3.458	3.375	3.386	3.318	3.330	3.268	3.279	3.350	3.363
HRB335	3.537	3.548	3.488	3.499	3.445	3.456	3.406	3.424	3.469	3.482
HRB400	3.468	3.478	3.411	3.422	3.362	3.373	3.320	3.331	3.390	3.401
可靠指标均值	3.482	3.495	3.425	3.436	3.375	3.386	3.331	3.345	3.403	3.415

5)混凝土强度影响

混凝土强度等级取 C30~C60，可靠指标计算结果见表 11。由表 11 可知，混凝土强度等级的变化对可靠指标的影响极小，但所计算的可靠指标均低于目标可靠指标要求。

表 11 混凝土强度对可靠指标影响

Tab.11 Influence of concrete strength on reliability index

混凝土强度等级	$\beta_{住宅}$	$\beta_{办公}$
C30	3.407	3.419
C35	3.411	3.422
C40	3.412	3.424
C45	3.442	3.453
C50	3.411	3.422
C60	3.399	3.410
可靠指标平均值	3.414	3.425

4 基于可靠指标的剪力墙受剪承载力计算公式修正

为保证钢筋混凝土剪力墙受剪承载力可靠指标

满足目标可靠指标要求，参照钢筋混凝土轴心受压构件的承载力计算公式，通过引入承载力调整系数的方式来满足可靠指标的基本要求^[4,29]。即修正后的承载力 V_s 计算公式如式(11)，其中 φ 为可靠指标调整系数。

$$V_s = \varphi V \tag{11}$$

通过上文分析，风荷载与永久荷载效应比以及荷载效应对剪力墙受剪可靠指标影响较大，鉴于实际工程中剪力墙分布钢筋已普遍采用 HRB400，本文以下的分析全采用 HRB400 分布钢筋，剪跨比、轴向压力、配筋率和混凝土强度的变化对可靠指标的变化幅度不超过 5%，影响较小。因此，对修正的剪力墙受剪承载力计算公式进行可靠度分析时，主要考虑风荷载与永久荷载效应比以及荷载效应比的影响，荷载效应比 ρ 取 0.1~2，风荷载与永久荷载比值 χ 取 0~40，其他参数按 3.6.2 节取值。给定可靠指标目标值，通过 JC 法进行反算可得出修正计算公式的计算模式不定性变量 K_p 的统计参数均值 μ_{Kp} ，公式修正前、后的 μ_{Kp} 之比即为 φ 值。

以平均可靠指标 3.7 为目标，通过 JC 法反算得到计算模式不定性变量的统计参数均值的平均值为

1.282, 据此得到可靠指标调整系数 φ 的平均值为 0.96. 取可靠指标调整系数 φ 为 0.95, 得到修正的剪力墙受剪承载力计算公式:

$$V_s = \frac{1}{\lambda - 0.5} (0.48f_t b h_0 + 0.12N) + 0.95f_{yv} \frac{A_{sh}}{s_v} h_0 \quad (12)$$

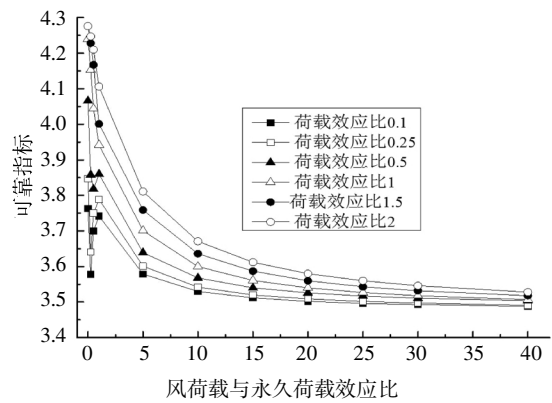
对式(12)的可靠度水平进行校准, 计算结果见表 12 和图 2. 可见, 采用修正计算公式所得的可靠指标明显提高, 相同楼面活荷载和 χ 下, 可靠指标随着荷载效应比的增大而增大. 相同楼面活荷载下, 荷

表 12 可靠指标计算结果

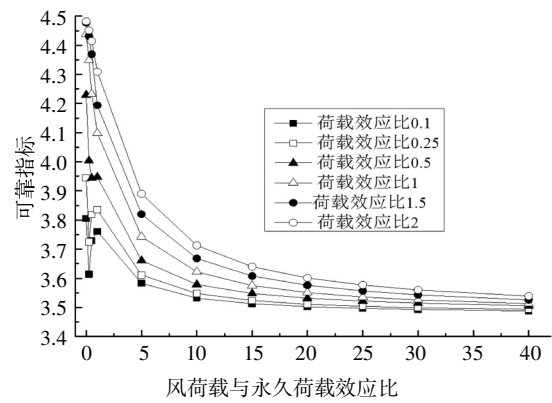
Tab.12 Calculation results of reliability index

风荷载与永久荷载 效应比	荷载效应比						
	0.1	0.25	0.5	1	1.5	2	
0	住宅活荷载	3.763	3.847	4.066	4.240	4.276	4.276
	办公活荷载	3.805	3.945	4.230	4.438	4.477	4.482
0.25	住宅活荷载	3.578	3.641	3.858	4.153	4.228	4.247
	办公活荷载	3.614	3.725	4.004	4.349	4.431	4.451
0.5	住宅活荷载	3.700	3.750	3.818	4.044	4.167	4.210
	办公活荷载	3.729	3.819	3.944	4.232	4.369	4.414
1	住宅活荷载	3.742	3.789	3.860	3.942	4.001	4.106
	办公活荷载	3.761	3.835	3.948	4.098	4.194	4.309
5	住宅活荷载	3.579	3.601	3.639	3.701	3.759	3.811
	办公活荷载	3.583	3.611	3.661	3.743	3.820	3.890
10	住宅活荷载	3.530	3.542	3.568	3.600	3.636	3.671
	办公活荷载	3.532	3.548	3.579	3.622	3.668	3.713
15	住宅活荷载	3.512	3.520	3.540	3.561	3.587	3.612
	办公活荷载	3.513	3.524	3.548	3.575	3.608	3.640
20	住宅活荷载	3.502	3.509	3.526	3.540	3.560	3.580
	办公活荷载	3.503	3.511	3.532	3.551	3.576	3.601
25	住宅活荷载	3.496	3.502	3.517	3.527	3.543	3.560
	办公活荷载	3.497	3.504	3.522	3.536	3.557	3.577
30	住宅活荷载	3.493	3.502	3.511	3.518	3.532	3.546
	办公活荷载	3.493	3.499	3.515	3.526	3.543	3.560
40	住宅活荷载	3.488	3.491	3.504	3.507	3.518	3.528
	办公活荷载	3.488	3.494	3.506	3.513	3.526	3.539
平均值	3.586	3.623	3.700	3.796	3.844	3.878	
3.738							

载效应比为 1、1.5、2 时, 可靠指标随着 χ 增大而减小, 减小幅度逐渐变缓至几乎不变; 荷载效应比为 0.1、0.25 时, χ 取 0.25 时的可靠指标较 χ 为 0 时有所减小, 在 χ 为 0.5 和 1 时, 可靠指标较 χ 为 0.25 时有所增大, 之后再一直减小至几乎不变; 荷载效应比为 0.5 时, 可靠指标随着 χ 增大先减小, 在 χ 为 1 时增大, 之后再一直减小至几乎不变. 这主要是由于荷载效应组合发生变化使得可靠指标呈现了不规则的拐点. 从表 12 可以看出, 按修正的剪力墙受剪承载力计算公式设计的剪力墙抗剪承载力可靠指标平均值为 3.738, 满足目标可靠指标要求.



(a)住宅楼面活荷载



(b)办公楼面活荷载

图 2 可靠指标与荷载效应比的关系

Fig.2 Relationship between reliability index and load effect ratio

5 结论

通过搜集并筛选国内外 74 片矩形截面普通混凝土剪力墙斜截面剪压破坏试验数据, 对受剪承载力试验数据进行统计分析, 对荷载效应进行组合, 对现行规范剪力墙受剪承载力的可靠度水平进行了检验, 可得出以下结论:

1) 74 片斜截面破坏的剪力墙受剪承载力试验结

果与规范公式计算结果比值的平均值为 1.230、变异系数为 0.211,总体上说明我国规范剪力墙受剪承载力计算公式与试验值吻合较好。

2)可靠度分析表明,现行规范中剪力墙受剪承载力可靠指标低于目标可靠指标 3.7 的要求。其中荷载效应比、剪跨比、轴向压力、混凝土强度等级对可靠指标影响极小;风荷载与永久荷载效应比 χ 对可靠指标影响较大,当 χ 从 0 增大至 40,住宅楼面活荷载和办公楼活荷载下的可靠指标分别减小了 12.3%和 15.8%;钢筋种类对可靠指标有一定影响,采用 HPB300 钢筋所得的可靠指标最小,钢筋配筋率变化对可靠指标的影响幅度在 5%以内,HRB400 钢筋不仅强度高而且同等条件下可靠指标较 HPB300 略有增大,本文建议剪力墙的水平分布钢筋类型应优先采用 HRB400 钢筋。

3)参照钢筋混凝土轴心受压构件正截面承载力计算公式,通过对规范现行剪力墙受剪承载力计算公式乘以 0.95 的承载力调整系数得到新的修正公式。对修正公式进行可靠度校准,结果表明:可靠指标均值为 3.738,满足目标可靠指标 3.7 的要求。本文的剪力墙受剪承载力修正公式满足可靠度标准要求,可为规范修订提供参考。

4)本文的剪力墙受剪承载力可靠度分析没有考虑地震作用效应组合,剪力墙受剪承载力的抗震可靠度有待下一步研究。

参考文献

- [1] GBJ 68-84 建筑结构设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,1984:57-70.
GBJ 68-84 Unified standard for design of building structures[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,1984:57-70. (In Chinese)
- [2] GB 50068-2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2001:19-21.
GB 50068-2001 Code for design of concrete structures[S].Beijing: China Architecture & Building Press,2001:19-21. (In Chinese)
- [3] 郝锐坤.剪力墙结构的性能与截面设计[R].北京:中国建筑科学研究院,1985:11-21.
HAO R K. Shear wall structure performance and section design [R]. Beijing:China Academy of Building Research,1985:11-21. (In Chinese)
- [4] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011:63-64.
GB 50010-2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011:63-64. (In Chinese)
- [5] JGJ 3-2010 高层混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:51-85.
JGJ 3-2010 Technical specification for concrete structures of tall building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 51-85. (In Chinese)
- [6] 李宏男,李兵.钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型及试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(5):35-42.
LI H N,LI B. Model and experimental study on seismic restoring force of reinforced concrete shear walls [J]. Journal of Building Structures,2004,25(5):35-42. (In Chinese)
- [7] 蒋欢军,吕西林.沿竖向耗能剪力墙的低周反复荷载试验研究[J].工程力学,1997,14(增刊):649-654.
JIANG H J,LÜ X L. Experimental study on low-cycle cyclic loading along vertical energy dissipation shear walls [J]. Engineering Mechanics,1997,14(S):649-654. (In Chinese)
- [8] 章红梅.剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007:74-102.
ZHANG H M. Behavior based seismic design method for shear wall structures [D]. Shanghai:College of Civil Engineering,Tongji University,2007:74-102. (In Chinese)
- [9] 曹万林,张建伟,田宝发,等.带暗支撑低矮剪力墙抗震性能试验及承载力计算[J].土木工程学报,2004,37(3):45-51.
CAO W L,ZHANG J W,TIAN B F,et al. Seismic performance test and bearing capacity calculation of low-rise shear walls with concealed braces [J]. Journal of Civil Engineering,2004,37(3):45-51. (In Chinese)
- [10] 曹万林,杨兴民,黄选民,等.钢筋混凝土带暗支撑一字形截面短肢剪力墙抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2004,20(4):30-35.
CAO W L,YANG X M,HUANG X M,et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete short-leg shear walls with concealed braces with a zigzag cross-section [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2004,20(4):30-35. (In Chinese)
- [11] 方小丹,李照林,韦宏,等.高配筋率边缘约束构件高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(12):145-153.
FANG X D,LI Z L,WEI H,et al. Experimental study on seismic behavior of high strength concrete shear walls with high reinforcement ratio edge restrained members [J]. Journal of Architectural Structures,2011,32(12):145-153. (In Chinese)
- [12] 左晓宝,戴自强,李砚波.改善高强混凝土剪力墙抗震性能的试验研究[J].工业建筑,2001,31(6):37-39.
ZUO X B,DAI Z Q,LI Y B. Experimental study on improving seismic behavior of high strength concrete shear wall [J]. Industrial Building,2001,31(6):37-39. (In Chinese)
- [13] 郑万仁.不同轴压比下混凝土剪力墙结构性能研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2004:7-12.
ZHENG W R. Performance of concrete shear walls under different axial compression ratios [D]. Shanghai:College of Civil Engineering,Tongji University,2004:7-12. (In Chinese)
- [14] 刘藏.带暗支撑高强混凝土低矮剪力墙抗震性能试验研究[D].重庆:重庆大学土木工程学院,2010:13-68.

- LIU Z. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete low-rise shear walls with concealed braces [D]. Chongqing: College of Civil Engineering, Chongqing University, 2010: 13—68. (In Chinese)
- [15] 罗元军. 近场地震下剪力墙抗震性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2011: 11—50.
- LUO Y J. Experimental study on seismic behavior of shear walls under near field earthquakes [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2011: 11—50. (In Chinese)
- [16] 孔慧. 配筋率对混凝土剪力墙结构性能影响的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010: 61—62.
- KONG H. Experimental study on the effect of reinforcement ratio on the structural performance of concrete shear wall [D]. Beijing: China Academy of Architectural Sciences, 2010: 61—62. (In Chinese)
- [17] 王立长, 李凡璘, 朱维平, 等. 设置暗支撑钢筋混凝土剪力墙的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(增刊): 51—58.
- WANG L C, LI F L, ZHU W P. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete shear walls with concealed braces[J]. Journal of Architectural Structures, 2005, 26(S): 51—58. (In Chinese)
- [18] 杜兴亮. 钢筋钢纤维混凝土剪力墙受剪及抗震性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2007: 8—38.
- DU X L. Experimental study on shear and seismic behavior of reinforced steel fiber reinforced concrete shear walls [D]. Zhengzhou: College of Civil Engineering, Zhengzhou University, 2007: 8—38. (In Chinese)
- [19] 史新亚, 于庆荣, 陶鹤进. 钢筋轻骨料混凝土剪力墙的试验研究[J]. 河北工学院学报, 1994, 23(3): 33—47.
- SHI X Y, YU Q R, TAO H J. Experimental study on reinforced lightweight aggregate concrete shear wall[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 1994, 23(3): 33—47. (In Chinese)
- [20] HIDALGO P A, LEDEMA C A, JORDAN R M. Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls [J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(2): 287—308.
- [21] LOPS M S. Experimental shear-dominated response of RC walls. Part II: Discussion of results and design implication[J]. Engineering Structures, 2001, 23(5): 564—574.
- [22] LEFAS I D, KOTSOVOS M D, AMBRASEYS N N. Behavior of reinforced concrete structural walls: strength deformation characteristics and failure mechanism [J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(1): 23—31.
- [23] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 164—165.
- GONG J X, WEI W W. Theory of engineering structures reliability design [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 164—165. (In Chinese)
- [24] 沈在康. 混凝土结构设计新规范应用讲评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 25—26.
- SHEN Z K. Application of new specifications for concrete structure design [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993: 25—26. (In Chinese)
- [25] 王紫轩, 杨秀云, 邸小坛. 热轧钢筋强度取值和分项系数的校准[J]. 工程质量, 2013, 31(7): 20—24.
- WANG Z X, YANG X Y, DI X T. Calibration of eigen value and partial coefficient of the hot-rolled steel [J]. Construction Quality, 2013, 31(7): 20—24. (In Chinese)
- [26] 史志华, 胡德妍, 陈基发. 钢筋混凝土结构安全度水准修订[J]. 建筑科学, 2002, 18(增刊2): 50—57.
- SHI Z H, HU D W, CHEN J F. Revision of safety level of reinforced concrete structures[J]. Architectural Science, 2002, 18(S2): 50—57. (In Chinese)
- [27] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 9—10.
- GB 50009—2012 Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 9—10. (In Chinese)
- [28] 张望喜, 刘有, 程超男. 考虑施工误差影响的 RC 框架结构可靠度分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(7): 69—77.
- ZHANG W X, LIU Y, CHENG C N. Reliability analysis of reinforced concrete frame structure considering the influence of construction error[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(7): 69—77. (In Chinese)
- [29] 唐昌辉, 易伟建, 沈蒲生. 混凝土轴心受压柱的可靠性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2003, 30(1): 97—100.
- TANG C H, YI W J, SHEN P S. Reliability study of reinforced concrete columns with axial loads[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2003, 30(1): 97—100. (In Chinese)