石卫华,陈礼科,陈堤. 栓钉连接件抗剪承载力可靠度分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):28-35. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.005

Shi W H, Chen L K, Chen D. Reliability Analysis of Shear Capacity of Stud Shear Connectors [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(1):28-35.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.005

栓钉连接件抗剪承载力可靠度分析

石卫华*,陈礼科,陈堤

(湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘 要:基于《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283-1999)(以下简称《公路统一标准》),以试验数据为基础, 采用一次二阶矩法(JC法),对《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中栓钉连接件抗剪承载力计算公式进行了可靠度分析. 结果表明,规范公式能满足《公路统一标准》的可靠指标要求,但明显偏于保守.继而对栓钉连接件抗剪承载力计算公式进 行可靠度校准,得到了混凝土破坏和栓钉破坏2种破坏形态的抗力分项系数,提出了栓钉连接件抗剪承载力的修正公式.可 靠度分析表明:修正公式的可靠指标得到了有效减小,并能满足《公路统一标准》的可靠指标要求;相比较规范公式,混凝土 破坏和栓钉破坏时承载力分别提高了4.7%和10.0%.

关键词:栓钉连接件;抗剪承载力;可靠度;抗力分项系数

中图分类号:TU398 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2019)01-0028-08

Reliability Analysis of Shear Capacity of **Stud Shear Connectors**

Shi Weihua, Chen Like, Chen Di

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: According to the Unified Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures (GB/T 50283-1999), The reliability analysis of design formula (GB 50017-2003) for shear capacity of stud connectors was carried out with first-order second-moment method (JC method) based on test results. The analytical results indicate that the current design formula can meet the requirement of reliability index specified in GB/T 50283, but it's obviously too conservative. The reliability calibration analysis of design formula for shear capacity of stud connectors is then performed, the partial safety factors for resistance for two failure modes are obtained and a modified formula is put forward. The reliability analysis shows that the reliability index of the modified formula is effectively reduced and satisfy the standard requirements given in GB/T 50283. The shear strength of stud connectors corresponding to concrete failure and stud failure increase 4.7% and 10.0% respectively in comparison with the results calculated by formula in design code.

Keywords: stud connectors; shear capacity; reliability; resistance partial coefficients

栓钉作为剪力连接件属于柔性连接,能够有效传递钢梁和混凝土板间的纵向剪力,抵抗混凝土板和钢

收稿日期:2018-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678234);湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2069);湖南省高校创新平台开放基金资 助项目(14K036)

^{*}通信作者,E-mail: weihshi2002@163.com

梁之间的相对滑移和掀起作用,具有受力性能好,施工方便,可靠性高等优点,已在钢-混凝土组合结构中普遍应用.

栓钉连接件的抗剪承载力是体现其抗剪性能的主要指标,合理安全地确定其抗剪承载力对于组合结构的设计至关重要.国内外研究者,如 Ollgaard^[1],Oehlers 和 Johnson^[2],Gattesco^[3],Saari^[4],聂建国^[5],薛伟辰^[6]等,对栓钉连接件的极限抗剪承载力进行了大量试验研究,建立了相应的抗剪承载力计算公式.其中,1971年 Ollgaard 提出的适用于普通混凝土和轻骨料混凝土的栓钉连接件承载力模型^[1],已被各国规范广泛采用.《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)^[7]给出的栓钉承载力计算公式是通过对 Ollgaard 公式进行折减得到,并未进行可靠性分析,是否满足《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283-1999)^[8](以下简称《公路统一标准》)的可靠性要求,还有待研究.胡夏闽^[9]通过对栓钉连接件承载力公式进行的可靠性研究,得到了栓钉连接件承载力的概率极限状态设计表达式,并且发现栓钉剪切破坏时,现行规范公式偏于保守.该研究针对建筑结构进行,其研究成果是否适用于钢-混凝土组合桥梁尚有待商榷.

本文在作者收集的国内外栓钉连接件推出试验的数据基础上,依据《公路统一标准》,对现行规范公式进行了可靠度分析;通过对抗剪承载力公式进行可靠度校准分析,获得了混凝土破坏和栓钉破坏2种破坏形态的抗力分项系数,提出了栓钉连接件抗剪承载力的修正公式,并与现行规范公式进行比较.

1 统计数据

作者在文献[10]中收集了国内外普通混凝土实心板推出试件 172 个,其中混凝土压碎破坏试件 54 个,栓钉剪断破坏试件 118 个;连接件破坏形态及栓钉分类见表 1 所示.其中,混凝土立方体抗压强度 f_{cu} = 11.10~109.33 MPa,不含轻骨料混凝土;栓钉直径 d = 13~27 mm,其中 d = 12.5 mm 归类到 d = 13 mm,d = 16.2 mm 归类到 d = 16 mm,d = 18.3,20 mm 归类到 d = 19 mm;栓钉长度与直径之比 h/d \geqslant 4.由于国外资料多采用圆柱体抗压强度,统计分析时,先将混凝土圆柱体抗压强度转化为标准立方体抗压强度,然后根据混凝土设计规范规定,转化为轴心抗压强度;针对部分文献并未说明连接件破坏形式,或同时出现了 2 种破坏形式,根据文献[9],对抗剪承载力 \geqslant 0.85 A_sf_u 的试件均按栓钉剪断破坏处理.

	衣1 件个数据破坏形念及程针分类。										
	[径/mm	13	16	19	22	25	27	16~27	13~27		
\-\P\#\ \A \\\	混凝土破坏	0	15	31	3	5	0	54	/		
试件个数	±∆ <i>E</i> ⊤71±±7	0	41	21	7	11	6	/	110		

表 1 样本数据破坏形态及栓钉分类[10]

2 栓钉连接件抗力统计分析

结构构件抗力是结构构件抵抗作用效应的能力.影响抗力的主要因素包括材料性能不定性、几何参数不定性和计算模式不定性.这些因素一般都是相互独立的随机变量,因此结构构件抗力一般是由若干随机变量组成的随机函数.通过对影响抗力的主要因素进行统计分析,获得其统计参数,然后根据误差传递原理,通过抗力与影响因素的函数关系进行推导,最终获得抗力的统计参数.

2.1 材料性能不定性

材料性能不定性,主要指由于材料品质以及制作工艺、受荷状况、外形尺寸、环境条件等因素引起的结构构件中材料性能的变异性.材料性能不定性通常采用随机变量 K_{M} 表示[11]:

$$K_{\rm M} = \frac{f_{\rm st}}{f_{\rm K}} = \frac{f_{\rm st}}{f_{\rm sp}} \frac{f_{\rm sp}}{f_{\rm K}} = \Omega_0 \Omega_1. \tag{1}$$

式中: f_{st} 为结构构件中实际的材料性能值; f_{sp} 为试件实际的材料性能值; f_{K} 为规范规定的试件材料性能标准值; Ω_{0} 为结构构件中材料性能与试件材料性能的差异随机变量; Ω_{0} 为试件材料性能不定性随机变量.

考虑到现行《公路统一标准》中混凝土材料性能不定性 K_{M} 的统计参数依据我国 85 桥规计算得到,而现行桥规改变了混凝土强度的取值原则,强度值发生了改变^[12],因此有必要依据现行桥规对 K_{M} 统计参数进行重新计算.修正后的混凝土材料性能统计参数见表 2.

栓钉材料的强度指标,目前尚缺乏可靠的统计资料.本文分析时,按文献[9]的建议,近似取栓钉抗拉强度 f_u 的变异系数为 δ_{f_u} = 0.1,按照材料强度的标准值应具有 95%的保证率的要求 [8],可得到栓钉抗拉强度 f_u 的统计参数,见表 2.

材料	性能参数		平均值/标准值	变异系数	分布类型
轴心抗	加入培	C30	1.314 6	0.177 3	
3F1 Ne7 1	压强度	C40	1.281 0	281 0 0.157 8	
混凝土		C50	1.190 8	0.137 4	正态
	$f_{ m c}$	C60	1.197 1	0.116 0	
	弹性模	量 E _c	1.100 0	0.170 0	正态
栓钉	抗拉强	員度 f_{u}	1.197 0	0.100 0	正态
	截面面	${\mathsf f}$ 积 $A_{\mathrm s}$	1.000 0	0.035 0	正态

表 2 材料性能和几何参数的统计参数

2.2 几何参数不定性

几何参数不定性,主要是指制作尺寸偏差和安装误差等引起的结构构件几何参数的不定性.影响栓钉连接件抗剪承载力的几何参数是栓钉截面面积,由于目前缺少可靠的统计资料,其统计参数近似按钢筋截面面积的统计参数选取[11],见表 2.

2.3 计算模型不定性

计算模式不定性,主要是指抗力计算中采用的基本假设的近似性和计算公式的不精确性等因素引起的不确定性.计算模式不定性可用随机变量 K_p 表示:

$$K_{\rm P} = \frac{R_{\rm t}}{R}.\tag{2}$$

式中: $R_{\rm r}$ 为结构构件的实际抗力值,一般取试验值; $R_{\rm e}$ 为抗力公式计算的抗力值,为排除材料及几何参数的变异性对 $K_{\rm P}$ 的影响,计算时采用材料性能和几何参数的实测值.

对上述统计数据采用 3σ 原则剔除异常值(样本数据落在[μ - 3σ , μ + 3σ]内为正常值)后混凝土破坏试件 54 个,栓钉破坏试件 105 个. K_P 的统计参数如表 3 所示.

破坏形态	栓钉直径/mm	13	16	19	22	25	27	16~27	13~27
NET MEZ I	试件个数	0	15	31	3	5	0	54	/
混凝土	均值 $\mu_{K_{\mathbf{P}}}$	/	1.242 2	1.082 5	1.078 2	1.122 2	/	1.130 3	/
破坏	变异系数 $\delta_{K_{\mathrm{p}}}$	/	0.082 1	0.103 0	0.004 2	0.010 1	/	0.108 3	/
+∧ <i>⊱</i> -r	试件个数	9	41	31	7	11	6	/	105
栓钉	均值 $\mu_{K_{\mathrm{P}}}$	1.711 5	1.508 6	1.318 2	1.440 2	1.295 3	1.158 1	/	1.422 8
破坏	变异系数 $\delta_{K_{ m P}}$	0.111 0	0.164 3	0.147 6	0.057 8	0.138 6	0.102 2	/	0.174 8

表 3 计算模式不定性统计参数

图 1 给出了 2 种破坏形态时计算模式不定性 K_P 的频数分布直方图.按置信度 $\alpha = 5\%$ 进行 \mathcal{X}^2 检验,结果表明,2 种破坏形态的 K_P 均服从正态分布.

2.4 综合的结构抗力变量的统计参数

栓钉连接件抗力表达式为

$$R = K_{\rm p}R_{\rm p}. \tag{3}$$

式中: R_p 为规范给定的抗力函数式,包含材料不定性和几何参数不定性.根据现行钢结构设计规范,栓钉连接件抗剪承载力计算公式如下:

$$R_{\rm P} = 0.43 A_{\rm s} \sqrt{E_{\rm e} f_{\rm e}} \leqslant 0.7 A_{\rm s} \gamma f. \tag{4}$$

式中: A_s 为栓钉钉杆截面面积; E_c 为混凝土弹性模量; f_c 为混凝土轴心抗压强度; γ 为栓钉材料抗拉强度最小值与屈服强度之比;f 为栓钉抗拉强度设计值; γf 相当于栓钉极限强度的设计值,即 $\gamma f = f_u$.栓钉连接件发生混凝土破坏时取左式计算抗力,发生栓钉破坏时取右式计算抗力.

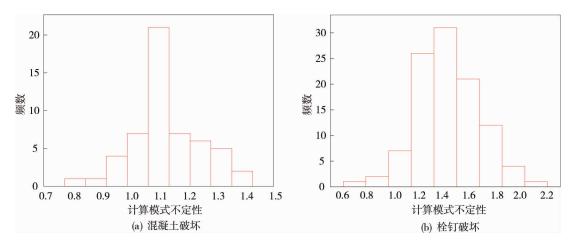


图 1 Kp 频数分布直方图

根据误差传递原理,可得到抗力 R 的平均值和变异系数为

$$\mu_{\mathbf{R}} = \mu_{K_{\mathbf{P}}} \mu_{R_{\mathbf{P}}}; \tag{5}$$

$$\delta_{\rm R} = \sqrt{\delta_{K_{\rm P}}^2 + \delta_{R_{\rm P}}^2}.$$
 (6)

式中: μ_{K_P} , δ_{K_P} 分别为 K_P 的均值和变异系数; μ_{R_P} , δ_{R_P} 分别为抗力函数的平均值和变异系数.

令 κ_R 为抗力 R 的平均值与设计值之比; R_a 为抗力 R 的设计值,将式(4)中的随机变量取设计值得到. 根据式(5)和式(6)可得到栓钉连接件抗力 R 的统计参数的均值和变异系数 $\kappa_{\rm R}$, $\delta_{\rm R}$ 的具体表达式:

混凝土破坏时,

$$\kappa_{\rm R} = \frac{\mu_{\rm R}}{R_{\rm d}} = \frac{\mu_{K_{\rm P}} \mu_{R_{\rm P}}}{R_{\rm d}} = \mu_{K_{\rm P}} \mu_{K_{A_{\rm s}}} \sqrt{\mu_{K_{E_{\rm c}}} \mu_{K_{f_{\rm c}}} \gamma_{\rm e}}; \tag{7}$$

$$\delta_{R} = \sqrt{\delta_{K_{P}}^{2} + \delta_{R_{P}}^{2}} = \sqrt{\delta_{K_{P}}^{2} + \delta_{K_{A_{s}}}^{2} + \frac{1}{4}\delta_{K_{f_{c}}}^{2} + \frac{1}{4}\delta_{K_{E_{c}}}^{2}}.$$
(8)

栓钉破坏时,

$$\kappa_{R} = \frac{\mu_{R}}{R_{A}} = \frac{\mu_{K_{P}} \mu_{R_{P}}}{R_{A}} = \mu_{K_{P}} \mu_{K_{A_{s}}} \mu_{K_{f_{u}}} \gamma_{s}; \tag{9}$$

$$\delta_{R} = \sqrt{\delta_{K_{P}}^{2} + \delta_{R_{P}}^{2}} = \sqrt{\delta_{K_{P}}^{2} + \delta_{K_{A_{-}}}^{2} + \delta_{K_{f_{-}}}^{2}}.$$
 (10)

式(7)~式(10)中: $\mu_{K_{A_s}}$, $\mu_{K_{E_o}}$, $\mu_{K_{f_o}}$ 和 $\mu_{K_{f_u}}$ 分别为栓钉截面面积、混凝土弹性模量、混凝土抗压强度和栓 钉极限强度的统计参数的平均值; δ_A 、 δ_E 、 δ_L 和 δ_L 分别为栓钉截面面积、混凝土弹性模量、混凝土抗压强度 和栓钉极限强度的统计参数的变异系数; γ_e 为混凝土的材料分项系数,取 γ_e =1.45; γ_e 为栓钉的材料分项 系数,对于材料性能等级为 4.6 级的栓钉,可取 $\gamma_s = 1.111^{[14]}.2$ 种破坏形态的抗力统计参数分别如表 4 和 表 5 所示.抗力 R 的统计参数可假定为对数正态分布[9].

表 4 混凝土破坏时不同直径栓钉抗力统计参数

混凝土弘	虽度等级	16 mm	19 mm	22 mm	
C30	κ_{R}	1.799	1.568	1.561	

混凝土 9	I 皮等级	16 mm	19 mm	22 mm	25 mm	16~25 mm
C30	$\kappa_{ m R}$	1.799	1.568	1.561	1.625	1.637
C30	$\delta_{ m R}$	0.152	0.164	0.128	0.128	0.163
C40	$\kappa_{ m R}$	1.776	1.547	1.541	1.604	1.616
C40	$\delta_{ m R}$	0.146	0.159	0.121	0.163	0.163
C50	$\kappa_{ m R}$	1.712	1.492	1.486	1.547	1.558
C30	$\delta_{ m R}$	0.141	0.154	0.115	0.115	0.158
C60	$\kappa_{ m R}$	1.717	1.496	1.490	1.551	1.562
C00	$\delta_{ m R}$	0.136	0.150	0.109	0.109	0.153

0.086 2

表 5	栓钉破坏时抗力统	计多	え数

d/mm	13	16	19	22	25	27	13~27
$\kappa_{ m R}$	2.276	2.006	1.753	1.915	1.723	1.540	1.892
$\delta_{ m R}$	0.153	0.196	0.182	0.121	0.175	0.147	0.204

3 荷载效应统计参数

按照《公路统一标准》的规定,在分析公路桥梁结构可靠度时,考虑汽车运行状态,取荷载效应主要组 合(恒载效应与汽车荷载效应)和附加组合(恒载效应与挂车或履带车的荷载效应)进行计算.恒载效应服 从正态分布.汽车运行状态考虑设计基准期内一般运行状态和密集运行状态,其荷载效应服从极值 I 型分 布.荷载效应的统计参数如表 6 所示.

荷载效应	运行状态	分布类型	平均值/标准值	变异系数
恒载 S_{G}	/	正态	1.014 8	0.043 1
	→般	极值Ⅰ型	0.686 1	0.156 9

极值I型

极值I型

表 6 荷载效应的概率分布及统计参数[8]

4 可靠度分析

在确定了栓钉连接件的抗力和荷载效应的不定性统计参数的基础上,即可按照《公路统一标准》的要 求,根据给定的目标可靠指标,对栓钉连接件抗剪承载力设计公式进行可靠度校准分析.

0.799 5

4.1 破坏形态及目标可靠指标

汽车荷载 S_0

一般

密集

栓钉连接件的破坏形态包括栓钉周围混凝土开裂或压碎破坏、栓钉剪断破坏及栓钉焊缝破坏. 当混凝 土强度较低时,栓钉周围混凝土发生开裂或局部压碎破坏,其极限承载力随混凝土强度的提高而增大,构 件破坏呈现较好的延性,为延性破坏;当混凝土强度较高时,栓钉在拉力和剪力共同作用下发生剪断破坏, 其极限承载力随栓钉直径和抗拉强度的增大而增加,破坏较突然,可认为是脆性破坏;栓钉焊缝破坏亦属 于脆性破坏.

《公路统一标准》对不同破坏类型的结构构件提出了明确的可靠指标要求:对于安全等级为二级的结 构构件,考虑荷载效应主要组合时延性破坏构件和脆性破坏构件的目标可靠指标分别为 4.2 和 4.7,附加 组合时延性破坏构件和脆性破坏构件的目标可靠指标分别为 3.7 和 4.2.

4.2 分析步骤

考虑恒载效应与汽车荷载效应的组合,栓钉连接件承载能力极限状态功能函数为

$$Z = g(R, S_G, S_O) = R - S_G - S_O.$$
(11)

式中:假定抗力R服从对数正态分布,统计参数见表4和表5;活载效应 S_0 ,恒载效应 S_c 的统计参数见表 6.3 个随机变量的平均值和标准差可表示为

$$\mu_{\rm R} = \kappa_{\rm R} R_{\rm d}, \sigma_{\rm R} = \mu_{\rm R} \delta_{\rm R}; \tag{12}$$

$$\mu_{S_{G}} = \mu_{K_{S_{G}}} S_{G_{K}}, \sigma_{S_{G}} = \mu_{S_{G}} \delta_{S_{G}};$$
(13)

$$\mu_{S_0} = \mu_{K_{S_0}} S_{C_0}, \sigma_{S_0} = \mu_{S_0} \delta_{S_0}. \tag{14}$$

式中: $\mu_{\rm R}$ 和 $\delta_{\rm R}$ 分别抗力的平均值和变异系数; $\mu_{\kappa_{s_{\rm C}}}$ 和 $\delta_{s_{\rm C}}$ 分别表示恒载效应统计参数的平均值和变异系 数; $\mu_{K_{S_o}}$ 和 δ_{S_0} 分别表示活载效应统计参数的平均值和变异系数.

《公路统一标准》中规定设计表达式如式(15):

$$\gamma_0(\gamma_c S_{c_K} + \gamma_0 S_{\varrho_K}) \leqslant R_d. \tag{15}$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,二级结构为 1.0; γ_0 为恒载分项系数,取 γ_0 = 1.2; γ_0 为汽车荷载分项系数,主 要组合取 γ_0 = 1.4, 附加组合取 γ_0 = 1.1; S_{c_k} 和 S_{o_k} 分别为按规范规定计算的恒载效应和活载效应的标准 值; $R_{\rm d}$ 表示抗力 R 的设计值.

当设计满足式(15)的最小值时, $R_{\rm d}$ 可用恒载效应和活载效应的标准值表示为

$$R_{\rm d} = \gamma_0 (\gamma_{\rm G} S_{G_{\rm K}} + \gamma_{\rm Q} S_{Q_{\rm K}}) . \tag{16}$$

定义荷载效应比 ρ 为活载效应标准值与恒载效应标准值之比,即 $\rho = S_{Q_K}/S_{C_K}$.由于荷载效应的具体取值并不影响可靠指标的计算结果^[8],计算中统一取 $S_{C_K} = 1$, $S_{Q_K} = \rho S_{C_K}$.考虑到钢-混凝土组合结构自重要小于混凝土结构自重,其荷载效应比 ρ 取为 0.10,0.25,0.50, 1.00, 1.50,2.00 和 3.00 这 7 个数值.

4.3 结果及分析

根据功能函数和各随机变量的统计参数,采用《公路统一标准》规定的一次二阶矩法(JC法),计算得到栓钉连接件抗剪承载力计算公式的可靠度指标.

表 7 给出了混凝土破坏时栓钉连接件可靠度指标随荷载效应组合、混凝土强度、汽车运行状态和荷载效应比的变化情况,表中数据均为不同栓钉直径时可靠度指标的平均值.可以看出:主要组合时一般运行状态下可靠指标均值为 5.10,密集运行状态下可靠指标均值为 5.29,均大于目标可靠指标 β_{T} = 4.2;附加组合时一般运行状态下可靠指标均值为 4.65,密集运行状态下可靠指标均值为 4.63,均大于目标可靠指标 β_{T} = 3.7.

表 8 给出了栓钉破坏时栓钉连接件可靠度指标随荷载效应组合、汽车运行状态和荷载效应比的变化情况.可以看出:主要组合时一般运行状态下可靠指标均值为 5.30,密集运行状态下可靠指标均值为 5.44,均大于目标可靠指标 $\beta_{\rm T}$ = 4.7;附加组合时一般运行状态下可靠指标均值为 4.80,密集运行状态下可靠指标均值为 4.85,均大于目标可靠指标 $\beta_{\rm T}$ = 4.2.

荷载效	混凝土	汽车运			;	荷载效应比,)			亚丛生
应组合	等级	行状态	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	- 平均值
	C30	一般	4.60	4.96	5.24	5.25	5.18	5.13	5.06	5.06
	C30	密集	4.54	4.84	5.17	5.44	5.50	5.51	5.50	5.22
	C40	一般	4.70	5.07	5.32	5.30	5.22	5.15	5.08	5.12
全面如人	C40	密集	4.63	4.94	5.29	5.54	5.58	5.58	5.56	5.30
主要组合	C50	一般	4.62	5.00	5.25	5.21	5.13	5.07	4.99	5.04
	C30	密集	4.55	4.87	5.22	5.47	5.50	5.50	5.48	5.23
	C60	一般	4.83	5.21	5.42	5.33	5.23	5.16	5.07	5.18
	COU	密集	4.76	5.09	5.45	5.65	5.66	5.64	5.60	5.41
	C30	一般	4.45	4.63	4.74	4.63	4.50	4.41	4.30	4.52
	C30	密集	4.39	4.51	4.63	4.69	4.66	4.63	4.56	4.58
	C40	一般	4.54	4.73	4.81	4.66	4.52	4.43	4.31	4.57
1744-hn 60 A	C40	密集	4.48	4.60	4.72	4.77	4.72	4.68	4.60	4.65
附加组合	C50	一般	4.46	4.64	4.72	4.56	4.42	4.33	4.21	4.48
	0.50	密集	4.39	4.52	4.64	4.68	4.63	4.58	4.50	4.56
	C60	一般	4.66	4.85	4.89	4.68	4.52	4.41	4.28	4.61
	C00	密集	4.59	4.72	4.85	4.85	4.78	4.71	4.62	4.73

表7 混凝土破坏时可靠指标

表8 栓钉破坏时可靠度指标

荷载效	汽车运		荷载效应比ρ							
应组合	行状态	0.10	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	- 平均值	
主要	一般	4.89	5.21	5.44	5.47	5.42	5.37	5.30	5.30	
组合	密集	4.84	5.11	5.40	5.62	5.69	5.71	5.71	5.44	
附加	一般	4.76	4.92	4.99	4.88	4.77	4.69	4.58	4.80	
组合	密集	4.70	4.81	4.91	4.94	4.91	4.88	4.82	4.85	

从表 7 和表 8 可以看出,无论是荷载效应主要组合还是附加组合,密集运行状态下可靠指标平均值均 大于一般运行状态下的可靠指标平均值,但两者差值均不大.因此在可靠度分析时,可不区分汽车运行状 态对可靠指标的影响.

混凝土破坏时混凝土强度等级对可靠指标的影响如图 2 所示.可以看出,混凝土破坏时可靠指标随荷载效应比 ρ 的变化呈现两边低、中间高的趋势,在 ρ =0.5 时达到峰值;在其他参数均相同的情况下,可靠指标随混凝土强度等级提高呈现增加的趋势.

栓钉破坏时栓钉直径对可靠指标的影响如图 3 所示.直径为 13,22 和 27 mm 的试验数据较少,不具有代表意义,图中并未给出.可以看出,栓钉破坏时可靠指标随荷载效应比 ρ 的变化呈现先增长后趋于不变的趋势,在 ρ =1.0 时达到峰值;在其他参数均相同的情况下,可靠指标随栓钉直径增加呈现降低的趋势.

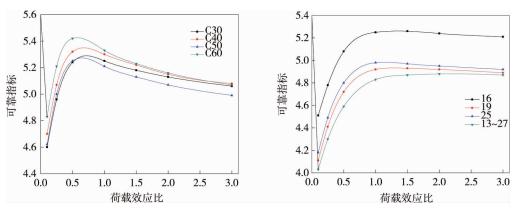


图 2 混凝土强度等级对可靠指标的影响

图 3 栓钉直径对可靠指标的影响

5 修正公式

从上述分析结果可以看出,式(4)的可靠度指标均能满足《公路统一标准》的可靠度要求.混凝土破坏时,主要组合可靠指标高于目标可靠指标 1.0,附加组合可靠指标高于目标可靠指标 0.9;栓钉破坏时,主要组合可靠指标高于目标可靠指标 0.67,附加组合可靠指标高于目标可靠指标 0.63;2 种破坏状态的可靠指标均超过目标可靠指标 0.5 以上,表明式(4)可靠度设置水平较高,计算值偏于保守.因此本文建议对式(4)进行修正,修正后栓钉连接件抗剪承载力的计算公式为

$$N_{\rm V}^{\rm C} = \frac{0.5A_{\rm s}\sqrt{E_{\rm c_k}f_{\rm c_k}}}{\gamma_{\rm R_{\rm C}}} \leqslant \frac{A_{\rm s}f_{\rm u_k}}{\gamma_{\rm R_{\rm S}}}.$$
(17)

式中: γ_{R_c} 为混凝土破坏时的抗力分项系数; γ_{R_s} 为栓钉剪断破坏时的抗力分项系数.最优抗力分项系数可根据抗力最小二乘法确定^[8,15].2 种破坏状态下栓钉连接件抗剪承载力按 2 种荷载效应组合计算的抗力分项系数如表 9 和表 10 所示.

作用效	应组合	16 mm	19 mm	22 mm	25 mm	16~25 mm						
	C30	1.06	1.27	1.12	1.08	1.23						
主要	C40	1.05	1.26	1.11	1.07	1.22						
组合	C50	1.07	1.29	1.13	1.09	1.25						
	C60	1.05	1.26	1.11	1.07	1.22						
	C30	1.11	1.32	1.18	1.14	1.28						
附加	C40	1.10	1.32	1.18	1.13	1.28						
组合	C50	1.13	1.35	1.20	1.15	1.30						
	C60	1.11	1.32	1.18	1.13	1.28						

表 9 混凝土破坏时栓钉连接件抗力分项系数

表 10 栓钉破坏时栓钉连接件抗力分项系数

作用效应组合	13 mm	16 mm	19 mm	22 mm	25 mm	27 mm	13~27 mm
主要组合	0.95	1.26	1.37	1.01	1.36	1.38	1.38
附加组合	1.00	1.30	1.42	1.07	1.41	1.44	1.42

根据上述计算结果,取混凝土破坏时抗力分项系数 $\gamma_{R_{\rm C}}=1.35$,栓钉破坏时抗力分项系数 $\gamma_{R_{\rm S}}=1.44$.根

据现行桥规 $^{[12]}$,对混凝土轴心抗压强度和弹性模量,分别有 f_{c_k} = 1.45 f_c , E_{c_k} = E_c . 因此,当 13 mm \leq d \leq 27 mm, $\frac{h}{d} \geq$ 4 时,栓钉抗剪连接件抗剪承载力的设计公式为

$$N_{\rm V}^c = 0.45 A_{\rm s} \sqrt{E_{\rm e} f_{\rm c}} \le 0.77 A_{\rm s} f_{\rm u}.$$
 (18)

采用前文方法对式(18)进行可靠度分析,可靠指标分析结果如表 11 所示.对于主要组合,延性破坏构件的可靠指标均值为 4.98,脆性破坏构件的可靠指标均值为 4.37;对于附加组合,延性破坏构件的可靠指标均值为 4.86,脆性破坏构件的可靠指标均值为 4.31.和式(4)相比,可靠指标均明显减小,且满足《公路统一标准》规定的目标可靠指标要求;混凝土破坏和栓钉破坏时,抗剪承载力分别提高了 4.7%和 10.0%,按照式(18)进行组合梁栓钉连接件设计会更加经济.

荷载效应组合	延性破坏		脆性破坏	
	式(4)	式(18)	式(4)	式(18)
主要组合	5.19	4.98	5.37	4.86
附加组合	4.59	4.37	4.83	4.31

表 11 可靠指标比较

6 结论

- 1)《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)中关于栓钉连接件抗剪承载力的设计公式,能满足《公路统一标准》的目标可靠指标要求,但明显偏于保守,因此有必要进行修正.
- 2)通过对栓钉连接件抗剪承载力计算公式的可靠度校准,可以得到混凝土破坏和栓钉剪断破坏的抗力分项系数,分别为 1.35 和 1.44.
- 3)本文提出的栓钉连接件抗剪承载力修正公式,和规范公式相比,可靠指标明显减小,均满足《公路统一标准》的要求;混凝土破坏和栓钉破坏时,抗剪承载力分别提高了4.7%和10.0%;按照修正公式进行组合梁栓钉连接件设计会更加经济.

参考文献:

- [1] Ollgaard J G, Slutter R G, Fisher J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete [J]. AISC Engineering Journal, 1971,8(2):55-64.
- [2] Oehlers D J, Johnson R P. The strength equations of stud shear connections in composite beams [J]. The Structural Engineer, 1987,65(2):44-48.
- [3] Gattesco N, Giuriani E, Gubana A. Low-cycle fatigue test on stud shear connectors [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(2):145-150.
- [4] Saari W K, Hajjar J F, Schultz A E. Behavior of shear studs in steel frames with reinforced concrete infill walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(10): 1453-1480.
- [5] 聂建国.钢-混凝土组合梁结构:试验、理论与应用[M].北京:科学出版社,2005:369-374.
- [6] Xue W C, Ding M, Wang H, et al. Static behavior and theoretical model of stud shear connectors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008,15(3): 346-348.
- [7] GB 50017-2003,钢结构设计规范[S].2003.
- [8] GB/T 50283-1999,公路工程结构可靠度设计统一标准[S].1999.
- [9] 胡夏闽,刘子彤,赵国藩.钢与混凝土组合梁栓钉连接件的设计承载力[J].南京建筑工程学院学报,2000,55(4):1-10.
- [10] 石卫华. 考虑耐久性的钢-混凝土组合梁结构力学性能研究及可靠性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2013:134-138.
- [11] 龚金鑫,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.
- [12] JGT D62-2004, 公路钢筋混凝土结构及预应力混凝土桥涵设计规范[S].2004.
- [13] 王建超,赵君黎,龚金鑫,等.钢-混凝土组合桥梁承载力可靠度分析[J].中国公路学报,2009,22(3):76-82.
- [14] 朱聘如.钢-混凝土组合梁设计原理(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:152-153.
- [15] 闫磊,张雪林,贺栓海.抗力分项系数双重迭代求解算法[J].交通运输工程学报,2011,11(3):1-5.