

荷载分项系数调整对管道支架结构可靠度设计影响分析

程凯凯¹,王兴¹,李科委¹,王春增²,姜磊³,盛维睿³,易朝阳³

(1. 西安石油大学 土木工程学院,陕西 西安 710065;

2. 青岛市房地产事业发展中心 房屋拆除处,山东 青岛 266033;

3. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590)

摘要:为了进一步明确现行 GB 50068—2018《建筑结构可靠性设计统一标准》中荷载分项系数调整对管道支架结构可靠度设计的影响,基于可靠度理论和 GB 50709—2011《钢铁企业管道支架设计规范》中管道支架的极限状态设计方法要求,对钢筋混凝土和钢结构两种管道支架结构进行了可靠指标计算,同时分析了材料用量的增加情况。考虑永久荷载与风荷载、永久荷载与雪荷载两种荷载组合以及荷载效应比和多种破坏模式等情况,分别计算了钢筋混凝土与钢结构管道支架在荷载分项系数调整后的可靠指标变动情况,并深入分析了材料用量的相应变化。研究结果表明:荷载分项系数调整后,钢筋混凝土管道支架结构的可靠指标较原来标准(GB 50068—2001)提高 8.6%~19.9%,钢结构管道支架结构的可靠指标增幅为 9.9%~16.6%;材料用量分别增加 0.7%~6.4%和 1.6%~6.0%。荷载分项系数调整之后满足可靠度要求,该研究可为管道支架结构设计提供更加详细的科学依据。

关键词:管道支架结构;荷载分项系数;荷载效应比;可靠性分析;材料用量

中图分类号:U323

文献标志码:A

Impact of load partial factor adjustment on reliability design of pipeline support structures

CHENG Kaikai¹, WANG Xing¹, LI Kewei¹, WANG Chunzeng², JIANG Lei³,

SHENG Weirui³, YI Chaoyang³

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Housing Demolition Department, Qingdao Real Estate Development Center, Qingdao 266033, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To further clarify the impact of load partial factor adjustment on the reliability design of pipeline support structures in the current *Unified Standard for Reliability Design of Building Structures* (GB 50068—2018), this study calculated the reliability indexes of reinforced concrete pipeline support structures and steel pipeline support structures and analyzed the increase of material usage based on the reliability theory and the requirements of the limit state design method for pipeline supports in *Design Code for Pipeline Supports in Iron and Steel Enterprises* (GB 50709—2011). Considering the two load combinations of permanent load with wind load and the combination of permanent load with snow load, as well as the load effect ratios and multiple failure

收稿日期:2024-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52174061);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2025JC-YBMS-561,2024JC-YBMS-277,2025JC-YBMS-453);陕西省城市公共交通空间综合规划与开发工程研究中心项目(CK20241101);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-194);西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(YCS23214321);陕西省技术创新引导专项(基金)(2024ZC-YYDP-21)

作者简介:程凯凯(1990—),女,甘肃天水人,副教授,博士,主要从事工程结构可靠性设计与评定等方面的研究。

王春增(1972—),男,山东青岛人,高级工程师,主要从事结构设计理论及土木工程管理等方面的研究,本文通信作者。E-mail:wcz7219@126.com

modes, the changes in the reliability indexes of reinforced concrete and steel pipeline supports after the adjustment of load partial factors were respectively calculated and the corresponding changes in material usage were analyzed in depth. The results show that after the adjustment of load partial factors, the reliability indexes of reinforced concrete pipeline support structures and steel pipeline support structures increased by 8.6% ~ 19.9% and 9.9% ~ 16.6% respectively while the material usage increased by 0.7% ~ 6.4% and 1.6% ~ 6.0% respectively compared with the previous standard (GB 50068—2001), meeting the reliability requirements. This study can provide a more detailed scientific basis for the design of pipeline support structures.

Key words: pipeline support structure; load partial coefficient; load effect ratio; reliability analysis; material consumption

管道支架作为架空输送管线的关键支承结构,数量庞大且形式多样,承担着水、油、气、化工介质及电伴热管线等的自重与环境荷载,其可靠性直接影响生产安全与公共安全^[1]。支架结构一旦失效,易引发断供、泄漏、爆炸等次生灾害,造成重大经济损失。我国 GB 50709—2011《钢铁企业管道支架设计规范》^[2]明确指出:管道支架设计必须采用基于概率的极限状态设计法,按可靠指标度量结构构件可靠度,以保证结构安全,并依据 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》和 GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》取永久荷载分项系数 1.2(或 1.35)、可变荷载分项系数 1.4 进行荷载效应组合。

GB 50068—2001 和 GB 50153—2008 两项标准奠定了我国概率极限状态设计的基础。2019 年实施的新版 GB 50068—2018《建筑结构可靠度设计统一标准》^[3]将永久荷载分项系数与可变荷载分项系数分别调整为 1.3 和 1.5,并简化了荷载组合表达式,将基本组合由原来的“双公式并列”简化为“单一公式”: $1.3S_{G_k} + 1.5S_{Q_k}$ (S_{G_k} 和 S_{Q_k} 分别是永久荷载作用效应标准值和可变荷载作用效应标准值)。该调整虽然提升了结构目标可靠指标,但将导致材料用量相应增加。为了量化其影响,国内学者已针对混凝土梁^[4]、轻钢门架^[5-6]、砌体构件^[7]等开展了系列研究,但针对管道支架这类高柔、长悬臂、多荷载耦合特殊结构体系的可靠度校准与经济性分析仍显不足^[8-11]。

本研究考虑永久荷载-风荷载、永久荷载-雪荷载两类主控组合,取荷载效应比 0.1~2.0(覆盖工程常见范围^[1]),对受弯、受剪、轴心受拉、轴心受压、大偏心受压和小偏心受压 6 种破坏模式,建立钢筋混凝土与钢支架的可靠指标增量 $\Delta\beta$ 与材料用量增量 Δm (以抗力标准值表征)的量化模型,揭示不同荷载效应比下的安全-经济关联规律。研究成果可为 GB 50709—2011 的修订提供数据支持,并为设计人员应用 GB 50068—2018 提供参考。

1 荷载分项系数及相关统计参数取值

1.1 荷载分项系数的调整

GB 50068—2018《建筑结构可靠度设计统一标准》调整了荷载分项系数取值,取消永久荷载控制组合,将永久荷载分项系数和可变荷载分项系数分别由 1.2、1.4 提高至 1.3、1.5,通过这种方式提升建筑结构的安全度水平。表 1 列出了本次调整的具体数值,并对比了美国、英国、欧洲等国家和国际规范^[12-14]的荷载分项系数取值。结果可见,调整后我国分项系数已接近国际主流水平,国际可比性明显改善。

1.2 荷载统计参数取值

可靠度分析时,对于永久荷载,采用正态分布概率模型;对于可变荷载,本研究在管道支架结构设计时考虑风荷载或雪荷载,采用极值 I 型分布概率模型。荷载变量的统计信息用分布类型、荷载均值系数和变异系数来描述^[15],各种荷载统计参数取值见表 2。

表 1 国内外规范荷载分项系数对比

Table 1 Partial factors comparison of loads in domestic and overseas codes

国名	永久荷载分项系数	可变荷载分项系数
中国(调整前)	1.2(1.35)	1.4
中国(调整后)	1.3	1.5
美国	1.2(1.4)	1.6
英国	1.4	1.6
欧洲	1.35	1.5
国际规范	1.4	1.6

1.3 抗力不确定性分析

构件抗力是指结构构件承受外加作用的能力,是可靠度分析的重要内容,其不确定性包括几何参数不确定性、材料性能不确定性和计算模式不确定性三个方面。本研究针对钢筋混凝土和钢结构两类管道支架结构开展可靠度分析。

基于设计值法,可靠度表述为:

$$F_R(R_d) = \Phi(-\alpha\beta) \quad (1)$$

式中: R_d 为设计时的抗力值; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; β 为目标可靠指标; α 为抗力的灵敏度系数,当抗力为主控变量时,取值 0.8^[16]。基于设计值法和目前设计表达式,一般认为抗力服从对数正态分布,其分项系数 γ_R 可表达为:

$$\gamma_R = \frac{\mu_R}{\chi_R F_R^{-1}[\Phi(-\alpha\beta)]} = \frac{\sqrt{1+\delta_R^2}}{\chi_R} \exp[-\alpha\beta \sqrt{\ln(1+\delta_R^2)}] \quad (2)$$

式中: μ_R 为抗力的均值, χ_R 为抗力均值系数, δ_R 为抗力变异系数。

不同支架结构类型及受力状态的抗力统计参数存在差异^[17]。各类构件的抗力分项系数、均值系数和变异系数见表 3。由表 3 可知,混凝土管道支架的抗力均值系数为 1.10~1.47、变异系数为 0.10~0.19;钢结构支架的抗力均值系数为 1.13~1.21、变异系数为 0.16~0.23。

表 3 不同管道支架结构在各受力状态下的抗力分布类型和统计参数取值

Table 3 Distribution type and statistical parameters of different pipe supports under various stress states

管道支架结构类型	受力状态	抗力均值系数 χ_R	抗力变异系数 δ_R	分项系数 γ_R	荷载效应比 ρ
钢筋混凝土管道支架	轴心受拉	1.10	0.10	1.18	0.10, 0.25, 0.50, 1.00, 2.00
	轴心受压	1.47	0.17	1.17	
	大偏心受压	1.16	0.13	1.21	
	小偏心受压	1.30	0.15	1.23	
	受弯	1.24	0.10	1.15	
	受剪	1.36	0.19	1.33	
钢结构管道支架	轴心受拉	1.13	0.12	1.23	0.25, 0.50, 1.00, 2.00
	轴心受压	1.11	0.12	1.22	
	偏心受压	1.21	0.15	1.16	

2 管道支架结构可靠性与材料用量分析

2.1 管道支架结构可靠指标变化

在承载能力极限状态评估中^[3],其功能函数为:

$$Z = R_K / \gamma_R - \gamma_G S_{Gk} - \gamma_Q S_{Qk} \quad (3)$$

式中: R_K 为构件抗力标准值; S_{Gk} 、 S_{Qk} 分别为永久荷载效应和可变荷载效应的标准值; γ_R 为抗力分项系数,取值见表 3; γ_G 、 γ_Q 分别为永久荷载和可变荷载的分项系数,取值见表 1。

可靠度分析考虑“恒荷载+风荷载”(组合 1)、“恒荷载+雪荷载”(组合 2)两种荷载组合情况。对于混凝土管道支架结构,荷载效应比 ρ 的取值范围是 0.10~2.00,则取:0.10、0.25、0.50、1.00、2.00。对于钢结构管道支架结构,荷载效应比 ρ 的取值范围是 0.25~2.00,则取:0.25、0.50、1.00、2.00。基于表 2 和表 3 的统计参数,结合规范给定的荷载效应组合及荷载效应比 ρ ,计算构件抗力的平均值,通过当量正态化处理并采用一次二阶矩法,计算管道支架结构的可靠指标 β ,具体过程及相关计算式如下。

1) 针对不同结构构件的荷载组合,假定活载作用效应 S_Q 为某一定值,由给定的荷载效应比 ρ ,计算恒载作用效应:

$$S_G = S_Q / \rho. \quad (4)$$

2) 分别按照式(5)~(8)计算恒载作用效应的均值 μ_{SG} 、恒载作用效应的标准差 σ_{SG} 、活载作用效应的均值 μ_{SQ} 、活载作用效应的标准差 σ_{SQ} 。

$$\mu_{SG} = S_G \chi_s, \quad (5)$$

$$\sigma_{SG} = \mu_{SG} \delta_s, \quad (6)$$

$$\mu_{SQ} = S_Q \chi_s, \quad (7)$$

$$\sigma_{SQ} = \mu_{SQ} \delta_s. \quad (8)$$

3) 计算构件抗力标准值 R_K :

$$R_K = \gamma_R (S_G + S_Q). \quad (9)$$

4) 计算抗力均值 μ_R 、抗力标准差 σ_R :

$$\mu_R = R_K \chi_R, \quad (10)$$

$$\sigma_R = \mu_R \delta_R. \quad (11)$$

5) 基于一次二阶矩法,采用迭代法计算构件可靠指标:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_{SG} - \mu_{SQ}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{SG}^2 + \sigma_{SQ}^2}}. \quad (12)$$

荷载分项系数调整前后,钢筋混凝土与钢结构管道支架在两种荷载组合下的可靠指标计算结果分别见表4~7。

表4 不同荷载分项系数下钢筋混凝土管道支架的可靠指标(组合1)

Table 4 Reliability indexes of reinforced concrete pipe supports with different partial factors (combination 1)

ρ	轴心受拉		轴心受压		大偏心受压		小偏心受压		受弯		受剪	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
0.10	3.411	4.091	3.187	3.626	3.307	3.860	3.627	4.117	3.437	4.117	3.148	3.546
0.25	3.558	4.184	3.315	3.742	3.453	3.982	3.758	4.231	3.583	4.209	3.267	3.656
0.50	3.417	3.905	3.364	3.753	3.429	3.875	3.743	4.153	3.437	3.924	3.331	3.692
1.00	3.120	3.506	3.266	3.592	3.221	3.581	3.540	3.876	3.136	3.522	3.273	3.583
2.00	2.876	3.201	3.113	3.395	3.011	3.317	3.322	3.612	2.890	3.214	3.148	3.418
平均值	3.276	3.777	3.249	3.622	3.284	3.723	3.598	3.998	3.297	3.797	3.233	3.579

表5 不同荷载分项系数下钢筋混凝土管道支架的可靠指标(组合2)

Table 5 Reliability indexes of reinforced concrete pipe supports with different partial factors (combination 2)

ρ	轴心受拉		轴心受压		大偏心受压		小偏心受压		受弯		受剪	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
0.10	3.396	4.073	3.181	3.619	3.298	3.849	3.618	4.108	3.422	4.100	3.143	3.540
0.25	3.464	4.059	3.283	3.705	3.396	3.911	3.710	4.173	3.488	4.082	3.241	3.626
0.50	3.219	3.674	3.266	3.638	3.278	3.697	3.603	3.990	3.238	3.692	3.252	3.600
1.00	2.886	3.246	3.100	3.409	3.014	3.352	3.337	3.654	2.901	3.261	3.127	3.421
2.00	2.634	2.938	2.917	3.183	2.785	3.073	3.097	3.370	2.647	2.951	2.967	3.223
平均值	3.120	3.598	3.149	3.511	3.154	3.576	3.473	3.859	3.139	3.617	3.146	3.482

表 6 不同荷载分项系数下钢结构管道
支架的可靠指标(组合 1)

Table 6 Reliability indexes of steel pipe supports with
different partial factors (combination 1)

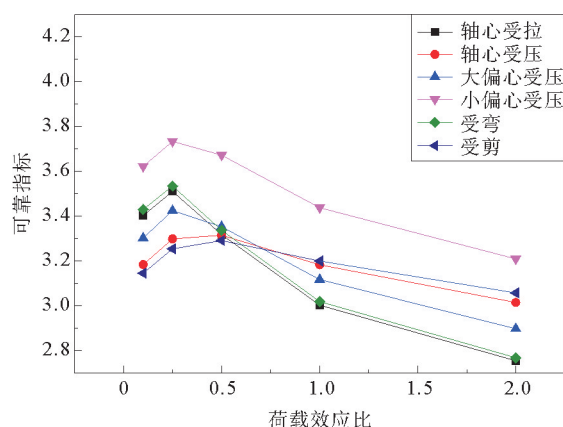
ρ	轴心受拉		轴心受压		偏心受压	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
0.25	3.489	4.048	3.359	3.920	3.320	3.794
0.50	3.433	3.893	3.322	3.786	3.347	3.766
1.00	3.194	3.563	3.104	3.475	3.206	3.550
2.00	2.971	3.284	2.893	3.207	3.030	3.325
平均值	3.272	3.697	3.170	3.597	3.226	3.609

表 7 不同荷载分项系数下钢结构管道
支架的可靠指标(组合 2)

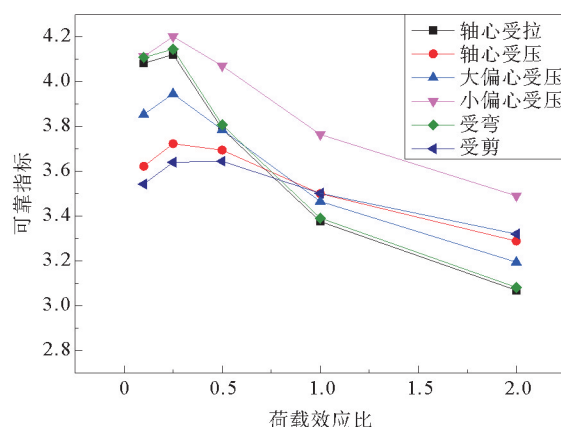
Table 7 Reliability indexes of steel pipe supports with
different partial factors (combination 2)

ρ	轴心受拉		轴心受压		偏心受压	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
0.25	3.422	3.964	3.297	3.840	3.279	3.744
0.50	3.266	3.697	3.163	3.597	3.228	3.624
1.00	2.978	3.323	2.893	3.241	3.023	3.347
2.00	2.740	3.033	2.667	2.961	2.821	3.099
平均值	3.102	3.504	3.005	3.410	3.088	3.454

荷载分项系数调整前后钢筋混凝土管道支架与钢结构管道支架的可靠指标变化分别如图 1 和图 2 所示。由图 1 可见,对于钢筋混凝土管道支架,可靠指标随荷载效应比 ρ 的变化规律为: ρ 在 0~0.25 区间递增,在 0.25~2.0 区间递减,可靠指标峰值对应 $\rho=0.25$ 。由图 2 可见,对于钢结构管道支架,可靠指标随荷载效应比 ρ 增大呈单调递减趋势,两者呈负相关关系。



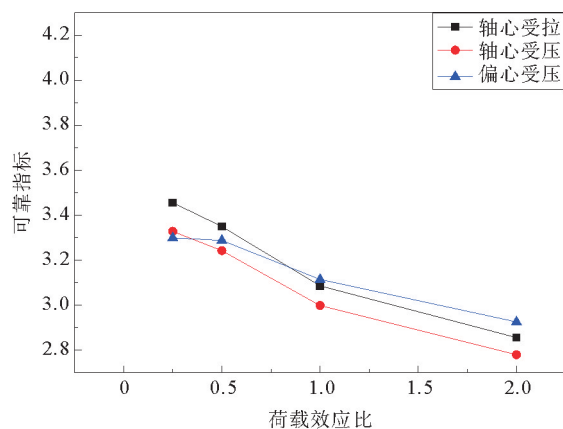
(a) 荷载分项系数调整前



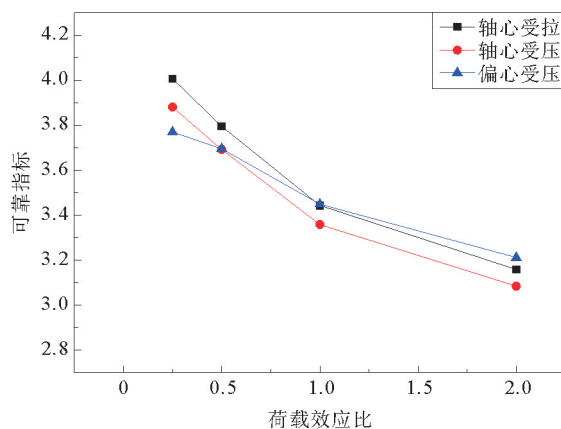
(b) 荷载分项系数调整后

图 1 荷载分项系数调整前后钢筋混凝土管道支架可靠指标对比

Fig. 1 Comparison of reliability indexes of reinforced concrete pipeline supports before and after load partial factor adjustment



(a) 荷载分项系数调整前



(b) 荷载分项系数调整后

图 2 荷载分项系数调整前后钢结构管道支架可靠指标对比

Fig. 2 Comparison of reliability indexes of steel pipeline supports before and after load partial factor adjustment

图3和图4显示,分项系数调整之后,两类管道支架结构可靠指标均有提高,但增幅均随荷载效应比 ρ 增大而递减。调整后,钢筋混凝土支架可靠指标提高8.6%~19.9%,钢结构支架提高9.9%~16.6%,两者增幅相近。

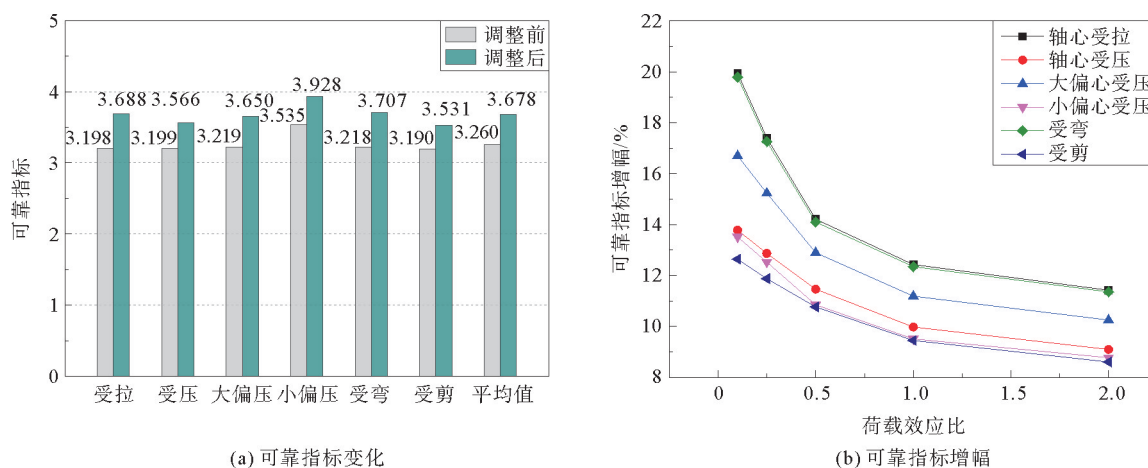


图3 荷载分项系数调整前后钢筋混凝土管道支架可靠指标变化及增幅对比

Fig. 3 Comparison of reliability indexes and their increases of reinforced concrete pipeline supports before and after load partial factor adjustment

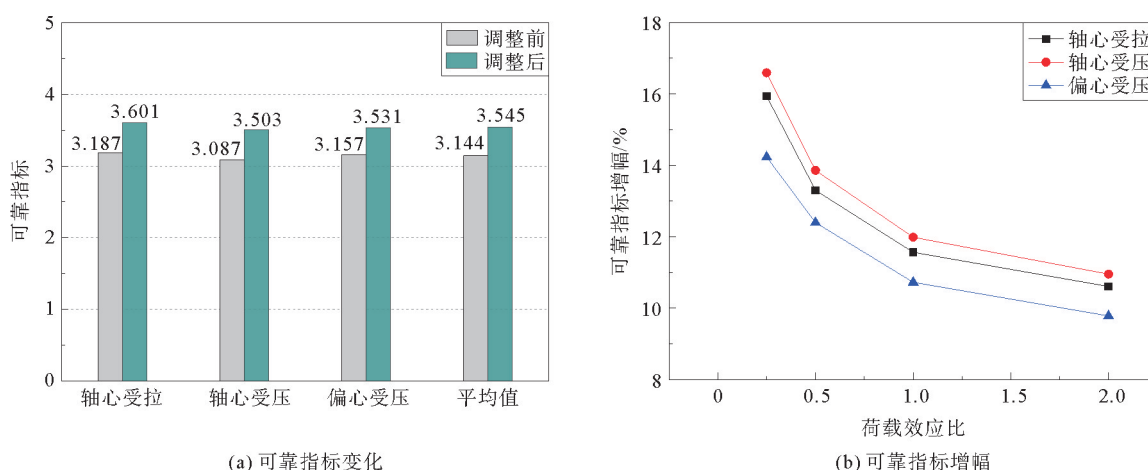


图4 荷载分项系数调整前后钢结构管道支架可靠指标变化及增幅对比

Fig. 4 Comparison of reliability indexes and their increases of steel pipeline supports before and after load partial factor adjustment

同时,对比图3和图4可以看出,对于两种类型的管道支架结构,其可靠指标增率及增长趋势是一致的,说明荷载分项系数的调整对于不同支架种类和不同受力状态的支架结构的影响效果是相同的。另外,随着荷载效应比的增加,可靠指标增幅依次减小,这说明荷载分项系数的调整更突显了永久荷载对管道支架结构可靠指标的影响逐渐增大,而可变荷载对管道支架结构可靠指标的影响则有所降低。

2.2 管道支架结构材料用量变化

在管道支架结构设计中,材料用量随结构可靠度的变化而变化,两者之间构成一种经济性与安全性的矛盾关系。可靠度提升导致材料用量增加,建造成本上升,结构设计需要在这两者之间寻找最佳平衡点。基于前述可靠指标计算结果,量化了荷载分项系数调整前后的材料用量变化,见表8、表9。

材料用量随可靠度提升而增加。为量化荷载分项系数调整对管道支架结构材料用量的影响,针对两种荷载组合下管道支架结构不同受力状态时的材料用量进行了分析计算。由于材料用量取决于结构设计时的

抗力值,为了方便分析,以结构设计时的抗力值 R_K 表征材料用量,计算结果如表 8~9 和图 5~6 所示。

表 8 钢筋混凝土管道支架在荷载分项系数调整前后的材料用量变化

Table 8 Changes of material consumption of reinforced concrete pipe supports with different load partial factors %

ρ	轴心受拉		轴心受压		大偏心受压		小偏心受压		受弯		受剪	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
0.10	2.588	2.639	2.486	2.508	2.534	2.569	2.529	2.556	2.590	2.641	1.235	1.244
0.25	3.029	3.144	2.846	2.881	2.928	2.993	2.918	2.969	3.033	3.149	1.409	1.423
0.50	3.980	4.210	3.625	3.735	3.820	3.998	3.829	3.986	3.989	4.220	1.777	1.819
1.00	5.762	6.122	5.393	5.635	5.640	5.950	5.751	6.042	5.777	6.137	2.634	2.739
2.00	9.156	9.739	8.849	9.286	9.101	9.626	9.403	9.907	9.180	9.764	4.346	4.544
平均值	4.903	5.171	4.640	4.809	4.805	5.027	4.886	5.092	4.914	5.182	2.280	2.354

由表 8~9 可见,钢筋混凝土管道支架和钢结构管道支架的材料用量在荷载分项系数调整之后都是增加的,并且随着荷载效应比的增大而单调递增。

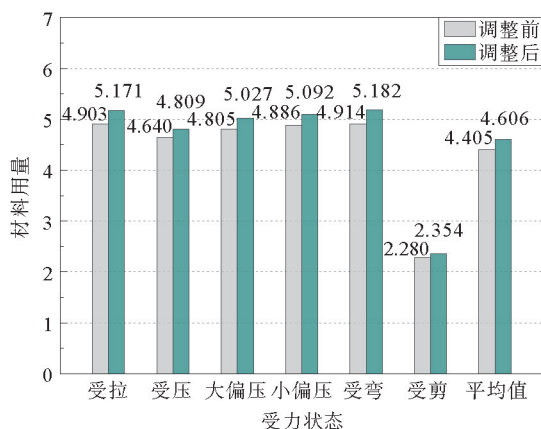
对比表 8 和表 9 可见,钢筋混凝土管道支架和钢结构管道支架的材料用量增量的变化规律基本一致,并且均随着荷载效应比的增大而单调递增。

由图 5 可见,钢筋混凝土管道支架材料用量增幅随荷载效应比 ρ 增大而递增,但增速递减,增幅为 0.7%~6.4%。不同受力状态下增幅差异显著:受弯与轴心受拉构件增幅最大,偏心受压构件次之,轴心受压与受剪构件最小。

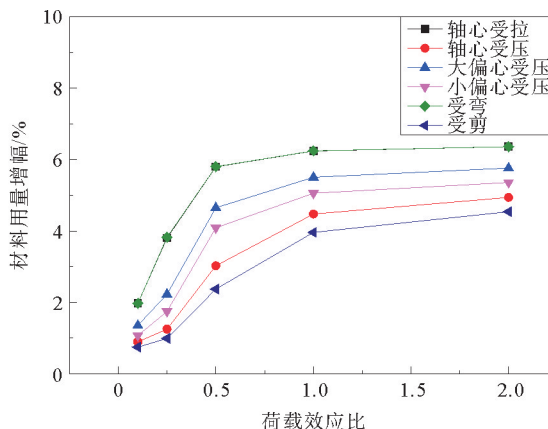
表 9 钢结构管道支架在荷载分项系数调整前后的材料用量变化

Table 9 Changes of material consumption of steel pipe supports with different load partial factors %

ρ	轴心受拉		轴心受压		偏心受压	
	调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
0.25	2.957	3.035	2.941	3.016	2.876	2.922
0.50	3.875	4.070	3.832	4.023	3.699	3.838
1.00	5.689	6.017	5.613	5.936	5.487	5.760
2.00	9.135	9.680	9.005	9.542	8.930	9.407
平均值	5.414	5.701	5.348	5.629	5.248	5.482



(a) 材料用量



(b) 材料用量增幅

图 5 钢筋混凝土管道支架材料用量及其增幅对比

Fig. 5 Comparison of material consumption and its increase of reinforced concrete pipeline supports

由图 6 可见,与混凝土管道支架相比,钢结构管道支架材料用量增幅呈现相同变化趋势,材料用量增幅随荷载效应比 ρ 增大而递增,但增速递减,增幅为 1.6%~6.0%。不同受力状态下增幅差异显著:轴心受拉/受压构件增幅最大,偏心受力构件次之,与钢筋混凝土支架材料用量变化规律存在差异。

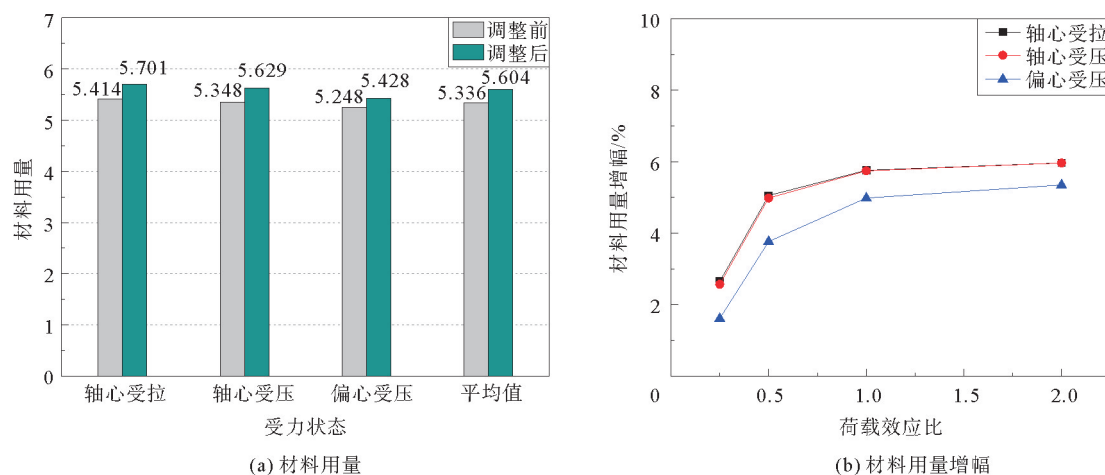


图6 钢结构管道支架材料用量变化及其增幅对比

Fig. 6 Comparison of material consumption and its increase of steel pipeline supports

3 结论

针对 GB 50068—2018《建筑结构可靠性设计统一标准》中荷载分项系数的调整,基于可靠度理论和 GB 50709—2011《钢铁企业管道支架设计规范》的极限状态设计方法,考虑风荷载、雪荷载两类主控组合,对钢筋混凝土与钢结构管道支架的可靠度及材料用量变化进行了分析,得到如下结论:

1) 荷载分项系数调整后,管道支架可靠指标显著提升。钢筋混凝土支架可靠指标提高 8.6%~19.9%,钢支架可靠指标提高 9.9%~16.6%,各破坏模式的增幅规律基本一致。

2) 可靠指标增幅随荷载效应比 ρ 增大而递减。 ρ 在 0.1~0.5 区间时增幅最大, $\rho>1.0$ 后增幅趋于稳定;调整后永久荷载对可靠度的贡献权重增大。

3) 材料用量增幅显著低于可靠指标增幅。钢筋混凝土支架材料用量增加 0.7%~6.4%(平均 3.4%),可靠指标提高 8.6%~19.9%(平均 14.3%);钢支架材料用量增加 1.6%~6.0%(平均 3.8%),可靠指标提高 9.9%~16.6%(平均 13.3%)。材料用量增幅约为可靠指标增幅的 1/4,表明规范调整实现了材料用量小幅增长下的可靠度大幅提升。

4) 材料用量增量随 ρ 增大先增后稳。当 $\rho=2.0$ 时,增量基本趋于稳定,增幅曲线渐趋平缓。

本研究聚焦于常规管道支架的静力荷载组合,尚未涵盖地震作用、温度效应及疲劳损伤等复杂工况;材料用量基于抗力标准值表征,未细化至混凝土体积和钢材重量等直接经济指标。后续工作可考虑由钢铁行业拓展至化工、能源等行业支架体系,考虑多灾耦合作用,开展足尺试验验证,并建立基于可靠度的管道支架结构优化设计方法,以实现安全储备与全寿命周期成本的最佳平衡。

参考文献:

- [1] 曲昭嘉,王瑾,曲圣伟. 简明管道支架计算及构造手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢铁企业管道支架设计规范:GB 50709—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [4] 左志坚,王新槐,樊伶俐,等. 荷载分项系数调整对钢筋混凝土梁可靠性的影响分析[J]. 建筑科学,2023,39(9):40-45.
ZUO Zhijian, WANG Xinhui, GONG Lingfei, et al. Influence analysis of load partial factors adjustment on reliability of reinforced concrete structural members[J]. Building Science, 2023, 39(9): 40-45.
- [5] 程凯凯,程正杰,姚继涛,等. 荷载分项系数调整对结构构件承载力评定分级标准的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2023,21(4):59-63.
CHENG Kaikai, CHENG Zhengjie, YAO Jitao, et al. Influence of bearing capacity grading standard of structural members after adjustment of load partial coefficient[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21

- (4):59-63.
- [6] 程凯凯,程正杰,姚继涛,等. 荷载分项系数调整对轻钢结构构件可靠性和材料用量的影响分析[J]. 应用力学学报, 2020,37(5):2303-2308.
CHENG Kaikai, CHENG Zhengjie, YAO Jitao, et al. Reliability analysis of light steel structure after adjustment of load partial coefficient[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020,37(5):2303-2308.
- [7] 吴柯娴,金伟良,夏晋. 荷载分项系数调整对砌体结构设计的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018,52(10):1901-1910.
WU Kexian, JIN Weiliang, XIA Jin. Influence of load partial factors adjustment on design of masonry structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018,52(10):1901-1910.
- [8] 漆天奇,王辉,罗进红,等. 国内外混凝土结构设计规范安全度设置水平的比较研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(1):138-147.
QI Tianqi, WANG Hui, LUO Jinhong, et al. Comparative research on the setting-level of safety for concrete structural design codes at home and abroad[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024,57(1):138-147.
- [9] 许岳峰,王桂玲,梁斌,等. 高温下超高性能混凝土的抗爆裂性能和抗压强度[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024,43(5):79-89.
XU Yuefeng, WANG Guiling, LIANG Bin, et al. Spalling resistance and compressive strength of ultra-high performance concrete under high temperature[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 43(5):79-89.
- [10] 莫时旭,房洋洋,郑艳,等. 配筋率对钢箱-UHPC 组合梁裂缝特征的影响[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(3):85-93.
MO Shixu, FANG Yangyang, ZHENG Yan, et al. Effect of reinforcement ratio on crack characteristics of steel box-UHPC composite beam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2024,43(3): 85-93.
- [11] 刘立渠,彭立新,赵振红,等. 既有建筑结构安全性鉴定中分项系数的调整研究[J]. 建筑结构学报, 2024,45(4):247-253.
LIU Liqu, PENG Lixin, ZHAO Zhenhong, et al. Research on adjusting partial factors in safety appraisal of existing building structure[J]. Journal of Building Structures, 2024,45(4):247-253.
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode: Basis of structural design: EN1990—2002[S]. London: BSI, 2002.
- [13] International Organization for Standardization. General principles on reliability for structures: ISO2394:2015[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
- [14] Joint Committee on Structural Safety. JCSS probabilistic model code: Part 3: Resistance models[S]. Copenhagen: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [15] 张于. 管道支架结构可靠度分析及应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009:35-42.
ZHANG Yu. Study on analysis and application of the reliability of pipe support structures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009:35-42.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [17] 李继华,林忠民,李明顺. 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990:351-410.

(责任编辑:吕海亮)