

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.047

基于破坏试验的混凝土梁承载能力极限状态 容许变形研究

杨玉龙^{1,2}, 袁阳光^{1,2}, 龙关旭³, 王俊峰^{1,2}, 辛公锋³, 黄平明⁴

(1.西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.陕西省城市基础设施数字化工程技术研究中心, 陕西 西安 710055;
3.山东高速集团有限公司创新研究院, 山东 济南 250101; 4.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为明确混凝土梁在承载能力极限状态下的容许变形, 进而支撑基于变形的结构安全冗余解析及服役状态监测、预警、评估等工作, 首先开展了 1 片足尺旧空心板的破坏试验; 其次, 通过广泛调研混凝土梁破坏试验成果, 形成了包含 630 片梁的破坏试验成果数据库, 据此分析了承载能力极限状态的平均变形水平, 表征了容许变形的概率分布特征, 提出了具有 95% 保证率的容许变形建议值。研究发现: 混凝土梁在承载能力极限状态下的特征变形包括屈服变形、强化变形和破坏变形, 钢筋混凝土(RC)梁三大特征变形平均水平分别为 $L/261.3$ 、 $L/209.5$ 和 $L/88.8$, 预应力混凝土(PC)梁三大特征变形平均水平分别为 $L/173.7$ 、 $L/141.3$ 和 $L/92.7$; 混凝土梁承载能力极限状态容许变形不拒绝正态分布, RC 梁和 PC 梁在承载能力极限状态下具有 95% 保证率的容许变形水平可分别取为 $L/345$ 、 $L/284$ 。

关键词: 桥梁工程; 混凝土梁; 承载能力极限状态容许变形; 破坏试验

中图分类号: U44

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0221-06

0 引言

桥梁结构安全性是桥梁运营阶段的核心问题。根据承载能力极限状态的内涵, 桥梁结构安全性问题有强度失效和抵抗变形失效 2 种。在桥梁运营阶段状态监测工作中, 变形监测精度相对较高, 且近年来的变形监测技术和设备研发进展迅速^[1]。通过变形监测来解析桥梁实时安全储备是对健康监测价值信息挖掘方法的有益补充, 实现该思路的关键在于承载能力极限状态容许变形水平的合理确定^[2]。与此同时, 该变形水平的确定可推动桥梁性能评估方法的发展完善。混凝土桥梁在我国已有桥梁中占比超过 90%, 混凝土梁是该类桥型上部结构的主要受力构件, 确定其承载能力极限状态容许变形水平的理论意义和工程应用价值明显。

对于桥梁结构设计与运营维护, 极限状态容许变形水平都是关键的力学指标。例如 Rad 等^[3]通过控制残余变形水平, 建立了 RC 梁的极限状态设计

方法。Wang 等^[4]为获取 RC 构件在承载能力极限状态下的屈服变形, 建立了统一的估算方法并进行了验证。相比于理论分析, 获取承载能力极限状态变形最直接有效的方法为破坏试验。截至目前, 国内外学者已开展了大量的 RC 梁和 PC 梁破坏试验, 试验梁包括足尺和缩尺 2 类, 并考虑了不同的截面类型、不同的尺寸、不同的锈蚀状态和不同的加固处理方法等^[5-10]。但在进行该类破坏试验研究时, 变形测试结果多用于从刚度层面阐释梁体在破坏试验全过程中的力学行为变化特征, 并未将承载能力极限状态容许变形水平作为研究重点。

部分学者在破坏试验研究过程中以变形性能作为重点, 如高祥等^[11]研究了部分无黏结复合钢筋混凝土梁的变形能力, 分析了开裂形态与无黏结长度的关系; 李福海等^[12]研究了聚丙烯纤维增强混凝土梁的变形性能, 重点关注了它的损伤变形能力和变形恢复能力; 张锡治等^[13]研究了钢混预制混合梁在集中荷载下的变形性能, 重点探讨了剪切变形对变形性能的影响。尽管上述研究明确了不同类型混凝土梁的极限变形行为, 但仍无法给出适用性较强的承载能力极限状态容许变形水平。该问题的解决需要立足既有研究成果调研, 并对大量破坏试验的极限变形进行分析。

收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-321)

作者简介: 杨玉龙(2000—), 男, 硕士在读, 从事路桥设计和理论研究工作。

为此,本文首先开展了1片混凝土足尺旧梁的破坏试验,根据试验结果,分析承载能力极限状态的变形水平;其次,为获得普适性更好的承载能力极限状态容许变形水平,通过文献调研形成混凝土梁破坏试验数据库,基于该数据库分析典型荷载-位移曲线和承载能力极限状态特征变形水平;最后,根据容许变形样本,分析不同特征变形指标概率特性,实现对承载能力极限状态容许变形随机变量的概率表征,并提出具有95%保证率的容许变形建议值。在承载能力极限状态下,混凝土梁容许变形水平的确定可支撑两大工程应用场景:(1)基于变形监测的混凝土梁安全冗余实时解析;(2)基于变形指标的混凝土梁安全性评估。

1 混凝土足尺旧梁破坏试验

1.1 试验梁概况

试验梁为山东省某高速改扩建工程中更换的旧钢筋混凝土空心板梁,服役时间为24 a,梁长7.96 m,破坏试验的计算跨径为7.70 m,梁高0.57 m,铺装层为厚17 cm混凝土+厚7 cm沥青面层。采用四点弯曲加载开展破坏试验,如图1所示。试验开始前凿除纯弯段铰缝混凝土,以排除其对抗弯性能的影响。采用变形控制加载,试验过程中采集跨中挠度和边缘2根纵筋的应变。

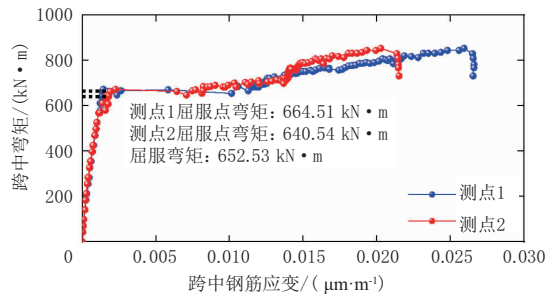


图1 足尺旧空心板破坏试验

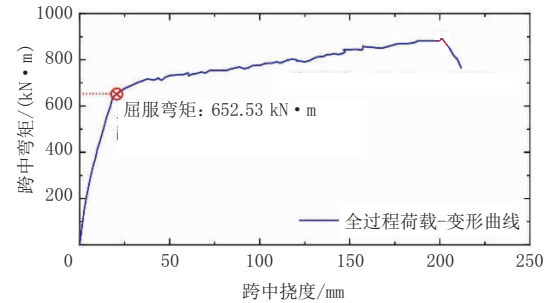
1.2 基于测试结果的容许变形分析

通过破坏试验得到的主筋荷载-应变曲线和荷载-变形曲线见图2。由图2可知,2根边缘主筋的屈服弯矩分别为664.51、640.54 kN·m,均值为652.53 kN·m;根据平均屈服弯矩和荷载-挠度曲线,确定梁体的屈服变形为20.68 mm,为计算跨径的1/372.34;进一步根据荷载-挠度曲线的峰值水平,确定梁体的峰值变形为201.44 mm,为计算跨径的1/38.22。

该破坏试验分析结果对混凝土梁承载能力极限状态容许变形的确定具有参考价值,但考虑到梁体



(a) 主筋荷载-应变曲线



(b) 荷载-变形曲线

图2 破坏试验测试结果

尺寸、截面形式、材料特性等的随机性,混凝土梁承载能力极限状态容许变形本质上为随机变量。为获取具有特定保证率的容许变形水平,必须开展充分的破坏试验成果调研,基于承载能力极限状态容许变形的大样本分析,获取对应随机变量的特征值和概率特性。

2 混凝土梁破坏试验研究概况

2.1 混凝土梁破坏试验数据库

对国内外学者已开展的混凝土梁破坏试验研究开展充分调研,共获取到630片混凝土梁的破坏试验结果及相应的荷载-变形曲线。通过该调研工作形成混凝土梁破坏试验成果数据库,数据库内容包括了630片梁的截面类型、几何尺寸、预应力信息、缩尺比信息、加固处置信息以及荷载-挠度曲线等^[5-10,14-33]。

2.2 破坏试验加载方式

混凝土梁破坏试验开展过程中所采用的加载方式主要包括四点弯曲加载、三点弯曲加载和实桥加载等,荷载的施加方式主要借助液压千斤顶加载、反力架加载和堆载等。对于加载过程的控制,主要采用内力控制加载、变形控制加载2种形式,相比之下,通过变形控制加载可获取更加完整的全过程荷载-变形曲线。

2.3 试件概况

对630片混凝土梁的基本信息进行统计分析,发现所开展的混凝土梁破坏试验中,足尺梁合计48片,

占比 7.5%;缩尺梁 582 片,占比 92.5%。由于足尺梁破坏试验开展成本较高,现有破坏试验主要以缩尺模型梁为主。根据统计结果,缩尺梁的跨径分布范围为 0.70~6.00 m,均值为 2.08 m;足尺梁的计算跨径范围为 6.35~51.50 m,均值为 18.68 m。

试验梁的截面类型及其数量、占比信息见图 3。由图 3 可见,在混凝土梁破坏试验中,试件截面类型以矩形梁为主,占据了总量的 83.0%;其次为 T 形截面梁,占据了总量的 12.1%。在材料方面,主要为 RC 梁和 PC 梁,它们分别占比 83.0%、17.0%。在材料劣化方面,已有破坏试验考虑了锈蚀和非锈蚀 2 种情形,其中非锈蚀梁占比 61.7%,锈蚀梁占比 38.3%。此外,调研得到的破坏试验成果中,包含了不同加固处置方法对试验梁抗弯性能的影响,所采用的加固方法包括碳纤维布加固、碳纤维板加固、粘贴钢板加固和比例纤维加固等。

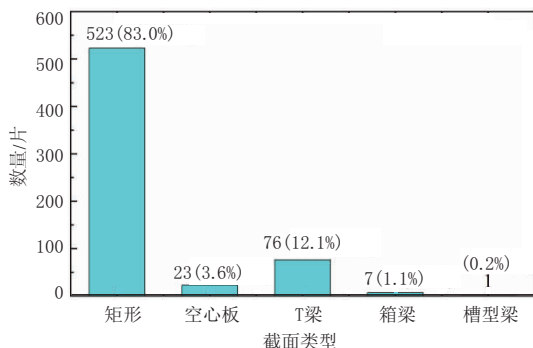


图 3 试验梁的截面类型

2.4 典型荷载 - 变形曲线

通过对数据库中荷载 - 变形曲线中特征阶段的分析,可得到混凝土梁典型荷载 - 变形曲线(见图 4)。图中 OA 段对应于第 1 根钢筋屈服之前,包括了线弹性段以及因开裂导致的斜率渐变段;BC 段对应于钢筋强化行为,该阶段的荷载 - 变形曲线斜率较小,但仍大于零,B 点即为钢筋强化起始点;AB 段为上述 2 个阶段的过渡阶段,通过调研发现,不同梁体的 AB 段长度并不相同,该阶段可能由梁体主筋依次屈服所导致;CD 段为梁体破坏阶段,该阶段测试数据的捕捉主要取决于对加载进程的控制效果。

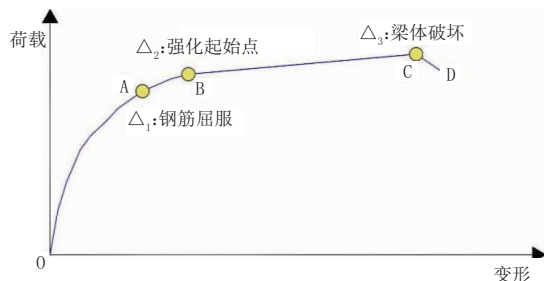


图 4 典型荷载 - 变形曲线图

根据图 4 所示的典型荷载 - 变形曲线,以及承载能力极限状态的内涵,抽取出 3 个特征变形,即:屈服变形 Δ_1 ,对应于钢筋屈服点 A;强化变形 Δ_2 ,对应于强化段 BC 的起点;破坏变形 Δ_3 ,对应于峰值荷载点 C。根据调研得到的荷载 - 变形曲线,以及 3 个特征变形指标处荷载 - 变形曲线切线斜率的突变特征,提取出每片梁的 Δ_1 、 Δ_2 和 Δ_3 。需要指出,并非所有的荷载 - 变形曲线均能提取出 3 个特征变形,部分曲线仅能提取出 1 个或 2 个特征变形。特征变形样本量见表 1。

表 1 3 个特征变形的样本量

样本名称	样本类型	Δ_1	Δ_2	Δ_3
RC 梁	总体	214	124	491
	足尺	3	14	12
	缩尺	211	110	479
	加固	144	30	225
	非加固	70	94	266
	锈蚀	65	61	218
PC 梁	非锈蚀	149	63	273
	总体	35	61	72
	足尺	4	26	14
	缩尺	31	35	58
	加固	24	27	35
	非加固	11	34	37
	锈蚀	7	16	16
	非锈蚀	28	45	56

3 平均变形水平

为与现行规范正常使用极限状态容许变形表达式一致,记 $\Delta_1=L/x_1$ 、 $\Delta_2=L/x_2$ 、 $\Delta_3=L/x_3$,其中 L 为计算跨径,后续分析直接针对 x_1 、 x_2 、 x_3 。样本 $[x_1]$ 、 $[x_2]$ 和 $[x_3]$ 根据相应的特征变形样本和试验梁计算跨径确定。

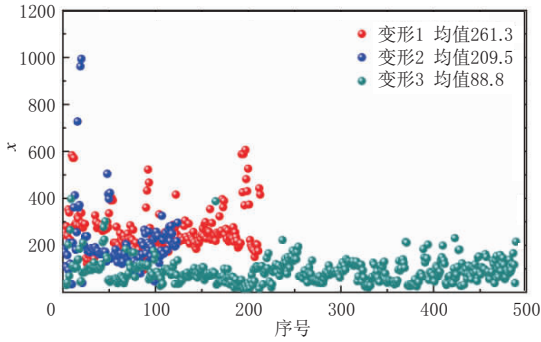
3.1 RC 梁

RC 梁 x 值均值水平见图 5。

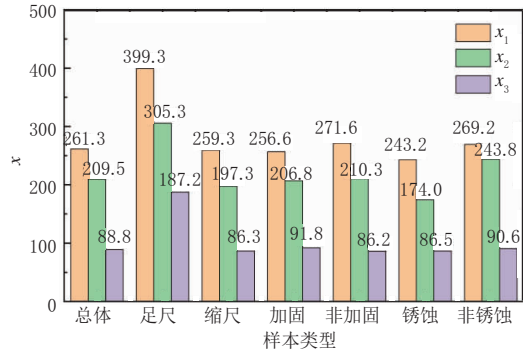
由图 5(a)可见,RC 梁的 x_1 、 x_2 、 x_3 总体样本统计均值分别为 261.3、209.5 和 88.8。由图 5(b)可见:足尺梁对应的均值水平高于其他子样本,说明实际 RC 梁的承载能力极限状态变形水平明显小于缩尺梁;除足尺子样本外,其余子样本的 x_1 、 x_3 统计均值波动变化不明显,说明加固与否对 RC 梁的 Δ_1 、 Δ_3 影响不大;而钢筋锈蚀之后,将增大 RC 梁的 Δ_2 。

3.2 PC 梁

PC 梁 x 值均值水平见图 6。

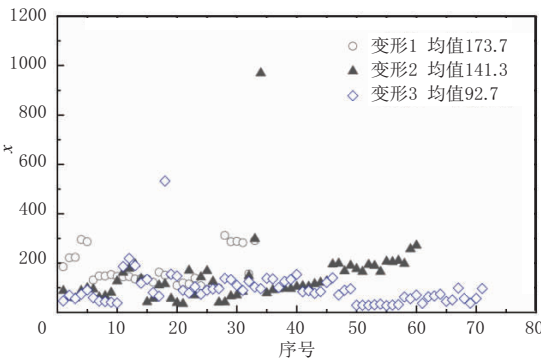


(a) 总体样本

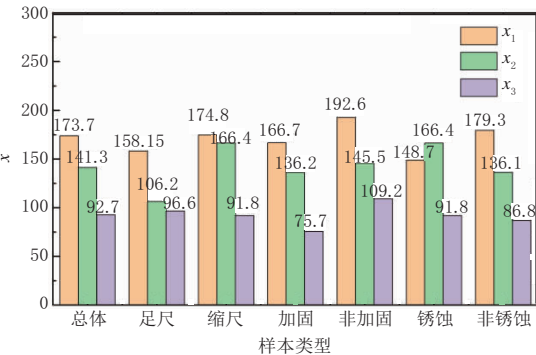


(b) 子样本统计均值

图5 RC梁x值均值水平



(a) 总体样本



(b) 子样本统计均值

图6 PC梁x值均值水平

由图6(a)可见,PC梁的 x_1 、 x_2 、 x_3 总体样本的统计均值分别为173.7、141.3和92.7。将图6(b)与图5(b)相比可知,PC梁的 Δ_1 、 Δ_2 明显更高,缩尺比对PC梁的影响相对较小。

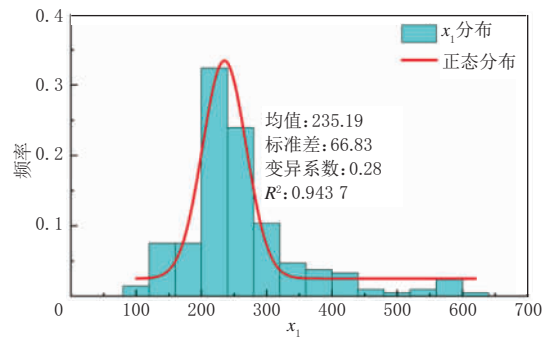
4 容许变形概率分布

混凝土梁承载能力极限状态容许变形为随机变

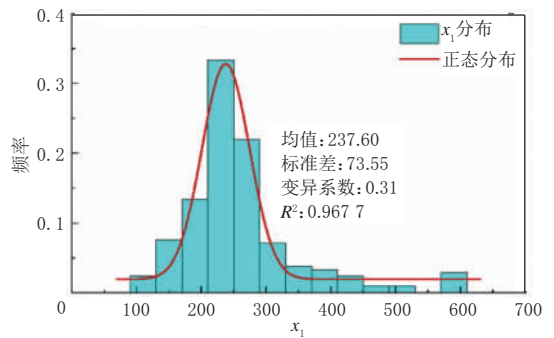
量,仅根据特征变形统计均值难以提供具有特定保证率的容许变形水平。对各子样本的 x 值进行概率拟合分析,在明确概率分布特征的基础上,确定具有特定保证率的容许变形水平。

4.1 RC梁容许变形概率分布

以RC-总体、RC-缩尺这2个样本为例,其 x_1 的概率分布拟合结果如图7所示。表2进一步给出了所有样本 x_1 、 x_2 、 x_3 的概率拟合分析结果。由表2可知, x_1 、 x_2 、 x_3 均不拒绝正态分布;RC梁破坏变形 Δ_3 的变异性最强,其次为强化变形 Δ_2 ,屈服变形 Δ_1 的变异性最小。



(a) RC-总体



(b) RC-缩尺

图7 x_1 概率分布拟合

4.2 PC梁容许变形概率分布

PC梁所有样本 x_1 、 x_2 、 x_3 的概率拟合分析结果见表3。由于PC梁样本量较少,分析过程中若得到的拟合优度系数超过0.7,则采用拟合分析结果;否则,直接将变量处理为正态分布,并认为样本统计均值和标准差分别为正态分布均值和标准差的无偏估计。由表3可知, x_1 、 x_2 、 x_3 的分布类型仍以正态分布为主, Δ_2 、 Δ_3 的变异性明显高于 Δ_1 。

4.3 混凝土梁容许变形建议值分析

根据表2、表3,在3个特征变形中以混凝土梁的屈服变形变异性最小,且考虑到其数值水平最小,从结构安全储备分析需求出发,建议由 x_1 的概率分布来确定具有特定保证率的承载能力极限状态容许变形。对于运营阶段的变形预警、性能评估等工作,

表 2 RC 梁 x 值的概率分布特性

样本类型	x_1			x_2			x_3					
	分布类型	均值	标准差	变异系数	分布类型	均值	标准差	变异系数	分布类型	均值	标准差	变异系数
总体	正态	235.19	66.83	0.28	正态	179.91	72.44	0.40	正态	78.11	79.77	1.02
足尺	正态	399.30	43.51	0.11	正态	305.28	102.61	0.34	正态	187.16	72.67	0.39
缩尺	正态	237.60	73.55	0.31	正态	177.24	70.08	0.39	正态	77.84	79.66	1.02
加固	正态	235.52	72.48	0.31	正态	175.47	107.35	0.61	正态	84.85	87.78	1.03
非加固	正态	237.60	53.38	0.22	正态	178.93	62.18	0.35	正态	74.83	75.11	1.003
锈蚀	正态	248.90	69.48	0.28	正态	164.00	20.54	0.12	正态	85.89	65.06	0.76
非锈蚀	正态	232.43	59.16	0.25	正态	189.32	115.83	0.61	正态	71.66	91.20	1.27

表 3 PC 梁 x 值的概率分布特性

样本类型	x_1			x_2			x_3					
	分布类型	均值	标准差	变异系数	分布类型	均值	标准差	变异系数	分布类型	均值	标准差	变异系数
总体	正态	173.75	67.30	0.39	正态	117.59	141.39	1.20	正态	76.88	87.67	1.14
足尺	正态	158.15	26.85	0.17	正态	106.24	43.20	0.41	正态	96.61	61.41	0.63
缩尺	正态	174.76	68.98	0.39	对数正态	149.75	0.61	0.004	正态	74.34	101.90	1.37
加固	正态	166.68	66.88	0.40	正态	136.23	64.53	0.47	正态	75.67	39.06	0.52
非加固	正态	192.62	64.73	0.34	正态	102.37	109.09	1.06	正态	84.30	69.98	0.83
锈蚀	正态	148.73	8.65	0.06	正态	156.92	42.09	0.27	正态	114.83	22.88	0.20
非锈蚀	正态	179.31	73.13	0.41	正态	92.12	103.43	1.12	正态	63.27	60.47	0.95

由于容许变形在多种场景下作为广义抗力随机变量存在,采用其概率分布的 0.05 分位值作为特征值。与之对应,需确定 x_1 的 0.95 分位值,分析结果见图 8。

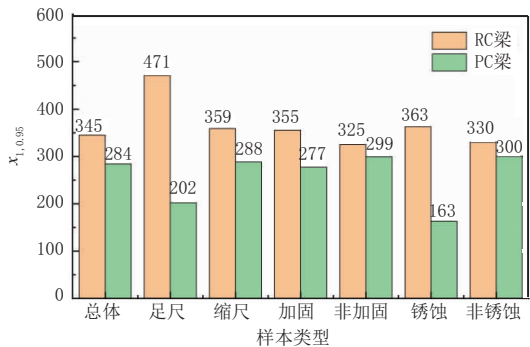


图 8 x_1 的 0.95 分位值

尽管足尺试件测试结果更接近真实情况,但考虑到对应样本量偏小,故根据总体样本分析结果给出容许变形建议值。根据图 8,建议 RC 梁、PC 梁承载能力极限状态的容许变形分别为 $\Delta_{RC}=L/345$ 、 $\Delta_{PC}=L/284$ 。由图 8 可知,梁体加固与否、钢筋锈蚀与否将对容许变形产生一定影响,且由总体样本分析得到的容许变形可能高估或低估实际梁体的变形能力,故在 Δ_{RC} 、 Δ_{PC} 分析结果的基础上,进一步给出特殊情形下的容许变形调整系数,见表 4。

5 结 语

(1)形成了包含 630 片混凝土梁破坏试验成果的

表 4 不同情形的容许变形调整系数

样本名称	足尺调整系数	加固影响系数	锈蚀影响系数
RC 梁	0.73~1.00	0.97~1.00	0.95~1.00
PC 梁	1.00~1.41	1.00~1.03	1.00~1.75

数据库,获取了混凝土梁破坏试验的加载方式和试件概况。通过典型荷载-变形曲线,明确了承载能力极限状态的 3 个特征变形,依次为屈服变形、强化变形和破坏变形。

(2)由破坏试验得到的 RC 梁三大特征变形平均水平分别为 $L/261.3$ 、 $L/209.5$ 和 $L/88.8$;PC 梁三大特征变形平均水平分别为 $L/173.7$ 、 $L/141.3$ 和 $L/92.7$ 。

(3)RC 梁和 PC 梁容许变形概率分布以正态分布为主,且破坏变形和强化变形的变异性明显强于屈服变形,建议以屈服变形来表征混凝土梁承载能力极限状态容许变形。

(4)RC 梁和 PC 梁承载能力极限状态下具有 95% 保证率的容许变形水平可分别取为 $L/345$ 、 $L/284$;根据实际工程场景和分析需求,可在上述数值基础上进一步引入足尺调整系数、加固影响系数和锈蚀影响系数。

参考文献:

[1] XU Y, BROWNJOHN J M W, HUSEYNOV F. Accurate deformation monitoring on bridge structures using a cost-effective sensing system

- combined with a camera and accelerometers: Case study[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(1): 05018014.
- [2] DEVORE C, JOHNSON E A. Improving substructure identification using structural control with limited sensor measurements[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 29(4): B4014007.
- [3] RAD M M, IBRAHIM S K, LóGó J. Limit design of reinforced concrete haunched beams by the control of the residual plastic deformation[J]. *Structures*, 2022(39): 987–996.
- [4] WANG Z, KUSUNOKI K, TESHIGAWARA M, *et al.* Estimation and verification of the yield deformation of reinforced concrete members [J]. *Engineering Structures*, 2021, 249: 113252.
- [5] 肖新波, 黎波, 袁振圣. 环境温度对黏钢加固 RC 梁承载能力影响的试验研究[J]. *混凝土*, 2021, 383(9): 22–24, 32.
- [6] 唐军, 张建仁, 王磊. 既有 RC 旧梁与新梁承载能力对比试验研究[J]. *广东公路交通*, 2010, 113(4): 29–33.
- [7] 任伟, 刘贺, 李平, 等. 预应力 TRM 加固 RC 梁正截面承载能力试验 [J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(1): 113–120.
- [8] 王振海, 邓军, 王道耀. 超载损伤混凝土 T 梁的抗弯承载力试验研究[J]. *混凝土*, 2014, 296(6): 31–33, 40.
- [9] ZHU W, FRANÇOIS R. Structural performance of RC beams in relation with the corroded period in chloride environment [J]. *Materials and Structures*, 2015(48): 1757–1769.
- [10] DONG J, ZHAO Y, WANG K, *et al.* Crack Propagation and flexural behavior of RC Beams under Simultaneous Sustained Loading and Steel Corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2017(151): 208–219.
- [11] 高祥, 孙泽阳, 孙运楼, 等. 部分无黏结复合钢筋混凝土梁变形能力研究[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(增刊1): 20–26.
- [12] 李福海, 何肖云峰, 吴昊南, 等. 聚丙烯纤维增强混凝土梁变形性能的试验研究[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(4): 853–863.
- [13] 张锡治, 李青正, 章少华, 等. 钢-混凝土预制混合梁变形性能研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(6): 193–201.
- [14] 刘红义, 张劲泉, 周建庭, 等. PC 空心板梁裂缝变化抗弯足尺试验研究[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(6): 92–98.
- [15] 王佳伟. 季冻区在役 PC 板梁破坏试验与加固技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [16] 张瀚誉. 在役预应力混凝土小箱梁承载能力提升研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [17] 张志伟. 预应力小箱梁极限承载能力试验研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017.
- [18] 赵新. 锈蚀钢筋混凝土梁工作性能的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [19] 张蓓, 徐天昭, 王复明, 等. 预应力混凝土空心板梁桥承载能力实桥试验研究[J]. *公路*, 2008(6): 1–5.
- [20] 袁计红. 钢筋混凝土 T 梁桥加固前后安全评估试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [21] 肖新波, 黎波, 袁振圣. 氯盐侵蚀对 CFRP 加固 RC 梁抗弯性能影响[J]. *混凝土*, 2022, 398(12): 44–46, 51.
- [22] LI H, LI B, JIN R, *et al.* Effects of sustained loading and corrosion on the performance of reinforced concrete beams[J]. *Constr Build Mater*, 2018(169): 179–87.
- [23] XIA J, JIN W, LI L. Effect of chloride-induced reinforcing steel corrosion on the flexural strength of reinforced concrete beams[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2012, 64(6): 417–485.
- [24] YU L, FRANÇOIS R, DANG V, *et al.* Structural performance of RC beams damaged by natural corrosion under sustained loading in a chloride environment[J]. *Engineering Structures*, 2015(96): 30–40.
- [25] KHAN I, FRANÇOIS R, CASTEL A. Structural performance of a 26-year-old corroded reinforced concrete beam[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2012(16): 440–449.
- [26] DU Y, CULLEN M, LI C. Structural performance of RC beams under simultaneous loading and reinforcement corrosion[J]. *Constr Build Mater*, 2013(38): 472–481.
- [27] DCAB C, GSA D, DH E, *et al.* Study on the bearing capacity and chloride ion resistance of RC structures under multi-factor corrosive environment and continuous load[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021(44): 102990.
- [28] CHEN Z, SHI K, ZHANG T, *et al.* Study on flexural performance of concrete beams reinforced by steel fiber and nano-sio₂ materials [J]. *Crystals*, 2021(11): 927.
- [29] LIU X, LI Y. Static bearing capacity of partially corrosion-damaged reinforced concrete structures strengthened with PET FRP composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(211): 33–43.
- [30] RINALDI Z, IMPERATORE S, VALENTE C. Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(11): 2267–2278.
- [31] YU T, SUN Q, LI C, *et al.* Experimental research on the flexural performance of RC rectangular beams strengthened by reverse-arch method[J]. *Symmetry*, 2021, 13(9): 1666.
- [32] YANG J, WANG L. Experimental research on flexural behaviors of damaged PRC beams strengthened with NSM CFRP strips[J]. *Construction and Building Materials*, 2018(190): 265–275.
- [33] PITEK B, SIWOWSKI T. Experimental study on flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with passive and active CFRP strips using a novel anchorage system[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 22(1): 1–17.