

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.048

预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁受力性能分析

高占波

(辽宁大通公路工程有限公司, 辽宁 沈阳 110111)

摘要:以 C35 混凝土为主要原料,设计制作腐蚀混凝土连续梁试件,分析预应力钢绞线网加固方式、施加预应力值、钢绞线间距等因素对加固腐蚀混凝土连续梁的裂缝宽度和承载力等受力性能的影响;采用 LTH400-10000LB 型号的压力试验机,对试件进行腐蚀混凝土连续梁受力性能分析试验。试验结果表明:应用 X 形预应力钢绞线网加固方式加固后,腐蚀混凝土连续梁的裂缝宽度有所下降;增加钢绞线间距,会导致腐蚀混凝土连续梁的应变增大,即增加腐蚀混凝土连续梁的变形程度;适当增加钢绞线网的预应力,能够提升腐蚀混凝土连续梁的承载力,预应力由 1 100 kN 增至 1 400 kN 时,试件的最大承载力可由 190 kN 增至 240 kN;加固后混凝土连续梁的腐蚀程度越严重,其跨中挠度值越大,在施加荷载后的变形程度越大。

关键词:预应力;钢绞线网;腐蚀混凝土;连续梁;受力性能分析;钢绞线间距

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0227-05

0 引言

预应力钢绞线网加固技术具有施工方便、耐久性强、适用范围广等优点^[1],被广泛应用于混凝土结构的加固工程中。然而,对于预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁的受力性能,目前的研究还相对较少。腐蚀是混凝土结构的主要破坏因素之一,对于建筑结构具有极大的威胁^[2-4]。通过研究加固后腐蚀混凝土连续梁的受力性能,可以为提高结构的耐久性提供理论依据和实践指导^[5],还可以为腐蚀环境中结构的评估和安全使用提供支持和参考。例如,李可等^[6-7]分析了高强钢绞线网配筋率和纵向钢绞线公称直径对加固混凝土连续梁受力性能的影响,试验证明:利用高强钢绞线网加固混凝土连续梁后,其承载力、刚度和韧性均有所提升,且钢绞线配筋率越大,混凝土连续梁的受力性能越优;梁的开裂荷载得到显著提升,裂缝宽度相应减小,但纵向钢绞线公称直径过大会导致梁的延性下降。由此可知,钢绞线网对加固混凝土连续梁非常有效,可显著提升梁的受力性能。

为了进一步分析预应力钢绞线网对混凝土连续梁受力性能的影响,为腐蚀环境中的混凝土结构加固提供新的解决方案,推动结构加固技术的整体进步,本文以 C35 混凝土为主要原料,设计制作了腐

蚀混凝土连续梁试件,分析预应力钢绞线网加固方式、施加预应力值、钢绞线间距等因素对加固腐蚀混凝土连续梁的裂缝宽度和承载力等受力性能的影响。

1 加固方式和试件设计

1.1 腐蚀混凝土连续梁的预应力钢绞线网加固方式

利用预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁的具体步骤如下。

步骤 1:在楔形钢板套箍内放入垫板,钢板套箍厚度为 6 mm,垫板厚度为 4 mm,两者宽度相同,都是 65 mm。

步骤 2:以焊接方式在钢板套箍上固定钢丝绳加载板,同时按照要求设置螺栓孔,加载板厚度 9 mm。钻孔目的为安装钢绞线网。

步骤 3:按照钢绞线网安装角度放置加载板,确保钢绞线网处于紧绷状态,同时保证螺栓与加载板间无缝隙。

步骤 4:选用 2 个高强螺栓,拧紧上下钢板箍的接缝位置。

步骤 5:将垫板放置在钢板套箍 1/3 位置处,拧紧螺栓,并敲打垫板,令钢板套箍紧紧加固腐蚀混凝土连续梁,以确保张拉钢绞线网过程中,钢板套箍不会移动。以拧紧螺母的方式,实现不同预应力,预应力取值区间为 1 100~1 400 MPa。

采用 X 形双向加固方式对钢绞线网进行加固(见

收稿日期: 2023-12-19

作者简介:高占波(1980—),男,本科,高级工程师,从事道路与桥梁施工研究工作。

图1),钢绞线间距为25~45 mm。

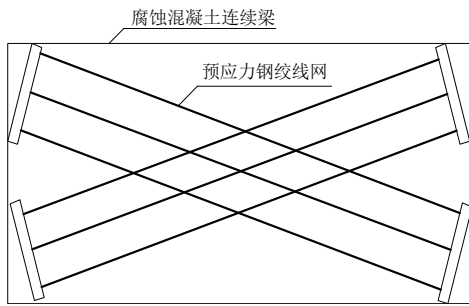


图1 X形双向加固方式

1.2 试件设计

试验共设计9个等跨腐蚀混凝土连续梁试件。每个试件的跨度均为1 200 mm,全长为3 600 mm;矩形截面,尺寸为200 mm×300 mm。

等跨腐蚀混凝土连续梁使用的混凝土等级为C35。为模拟混凝土连续梁的不同腐蚀情况,在混凝土内加入不同含量的工业盐^[8-10]。浇筑结束后,混凝土连续梁以干湿循环的方式在室外养护4周,以加快腐蚀速度^[11]。养护过程中,每天均向混凝土连续梁浇水2次,确保混凝土连续梁内具备腐蚀反应条件^[12]。全部试件均需加速腐蚀10个月,确保混凝土连续梁出现不同程度的腐蚀状态。以裂缝宽度为衡量指标的腐蚀状态包含3种类型,分别是轻微腐蚀(0.26~1.00 mm)、中度腐蚀(1.01~2.00 mm)、重度腐蚀(2.01~4.00 mm)。

腐蚀混凝土连续梁试件参数见表1。

表1 腐蚀混凝土连续梁试件参数

试件编号	加固形式	施加预应力/MPa	腐蚀程度	钢绞线间距/mm
A0	无	0	轻微腐蚀	0
A1		1 100	轻微腐蚀	25
A2		1 200	轻微腐蚀	25
A3		1 300	轻微腐蚀	25
A4	双向加固	1 400	轻微腐蚀	25
A5		1 400	中度腐蚀	25
A6		1 400	重度腐蚀	25
A7		1 400	轻微腐蚀	35
A8		1 400	轻微腐蚀	45

2 试验内容和方案

在预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁受力性能试验过程中,需要分析的试验内容是腐蚀混凝土连续梁应变、裂缝宽度、挠度、承载力和延性共5种。

通过测量腐蚀混凝土连续梁的应变分布,可以

判断连续梁结构的健康状况。如果应变分布异常,则代表腐蚀混凝土连续梁的受力性能较差。

腐蚀混凝土连续梁应变测量步骤如下:

步骤1:采用WSM800-100型东成角磨机,打磨腐蚀混凝土连续梁表面,确保连续梁表面光滑;

步骤2:采用乙醇清洗打磨后的腐蚀混凝土连续梁^[13],确保连续梁表面无杂质;

步骤3:确定腐蚀混凝土连续梁的应变片粘贴位置;

步骤4:选用AB胶将应变片粘在确定的测量位置上;

步骤5:采用UT61E型万用表检测应变片的电阻,确保粘贴的应变片无损坏问题^[14],若存在有问题的应变片,需及时替换。

步骤6:利用粘贴的应变片测量腐蚀混凝土连续梁的应变。

腐蚀混凝土连续梁的挠度是指在荷载作用下,梁在一定时间内产生的变形。该指标用于评估结构强度和刚度,挠度越小,说明腐蚀混凝土连续梁在受力下的变形程度越小,其刚度和稳定性也越好^[15]。试验过程中,腐蚀混凝土连续梁挠度 f 的计算公式为:

$$f = S \frac{Nl^2}{H} \quad (1)$$

式中: S 为挠度系数; N 为弯矩; l 为腐蚀混凝土连续梁长度; H 为短期刚度。

H 的表达式为:

$$H = \frac{0.86EI}{\frac{N_c}{N} + \left(1 - \frac{N_c}{N}\right)w} \quad (2)$$

式中: E 为试件弹性模量; I 为惯性矩; w 为弯矩应力; N_c 为开裂弯矩, $N_c = (\sigma + rg)N_0$,其中 σ 为预压应力, g 为试件无受拉翼缘, r 为试件抵抗矩塑性影响系数, N_0 为初始挠度。

采用ZW-S800型裂缝测宽仪,测量腐蚀混凝土连续梁的裂缝宽度。裂缝宽度是一个重要的指标,它反映了腐蚀混凝土连续梁在受力下的损伤程度,裂缝宽度越小,说明腐蚀混凝土连续梁的损伤程度越小,其受力性能和安全性也越好。

通过测量腐蚀混凝土连续梁承载力,可以评估其结构安全性。如果承载力下降,说明腐蚀混凝土连续梁的受力性能受到影响。腐蚀混凝土连续梁的承载能力越大,代表它能够承受更大的荷载,从而具有更好的受力性能。腐蚀混凝土连续梁承载力 C 的计算公式为:

$$C = g_y A_s (u_0 - a_s) + g_p A_p (u_p - a_s) - (g_y A_s + g_p A_p - g'_y A'_s) \left(\frac{x}{2} - a_s \right) \quad (3)$$

式中: g_y 、 g'_y 分别为试件垂向受拉、压屈服强度; A_s 、 A'_s 分别为试件垂向受拉、压的截面总面积; A_p 为预应力钢绞线网总面积; g_p 为预应力钢绞线网的极限强度; x 为试件受压区截面高度; u_p 为试件受压边缘长度; $u_0 = u - \frac{A_p a_p + g_y A_s a_s}{A_p + g_y A_s}$,其中 u 为试件截面高度, a_p 为受力点到试件下端的距离, a_s 为受拉合力点到试件下端的距离。

采用LTH400-10000LB型压力试验机(相关参数见表2),对腐蚀混凝土连续梁展开轴心受压试验。

表2 压力试验机的相关参数

参数名称	参数值
最大试验力/kN	10 000
试验力分辨率/%	± 0.5
活塞直径/mm	350
活塞行程/mm	25
试验空间/mm	450
压板尺寸/mm	φ350
弯曲支辊间距/mm	240
最大弯曲角/(°)	± 15
上下压板平行度/mm	<0.2
活塞最大上升速度/(mm·min ⁻¹)	75
供电电源	AC, 380 ± 10% V, 50 Hz
电机功率/kW	7.5
外形尺寸(长×宽×高)/mm	1 490 × 750 × 2 380
机器重量/kg	约 4 500

试验过程中,以分级单调加载方式进行加载,加载前需对中修正腐蚀混凝土连续梁,每级加载荷载为10 kN;加载结束后,观察腐蚀混凝土连续梁的裂缝变化情况,并测量受力性能相关参数,继续下一级加载。在腐蚀混凝土连续梁失效前,降低加载速度,便于观察连续梁的最终破坏过程。

3 试验分析

3.1 试验形态

以试件A0、A4为例,分析X形双向加固方式加固前后对腐蚀混凝土连续梁受力性能的影响;分析施加荷载后,试件在失效前的破坏形态。试件A0、A4的破坏形态见图2。

由图2(a)可知,试件A0的裂缝直接从加载端



(a)试件A0 (b)试件A4

图2 试件的破坏形态

至支座端,存在1条主斜裂缝,且裂缝宽度较宽;1条较窄的裂缝,且裂缝长度较短。由图2(b)可知,试件A4的裂缝也是直接从加载端至支座端,存在1条主斜裂缝,以及多条既短又窄的裂缝,但该条主裂缝的宽度明显小于试件A0的主裂缝宽度,且在中部存在很多转折。虽然试件A4的裂缝数量比试件A0多,但裂缝宽度明显较小,说明应用预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁后,有效提升了腐蚀混凝土连续梁中部的受力性能,并提升了试件的受剪破坏延性,增强了试件发生突然脆断的安全防范作用。综合分析可知,应用预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁,可缩短裂缝宽度,提升腐蚀混凝土连续梁的受力性能。

不同荷载下,试件A0、A4的最大裂缝宽度见表3。

表3 不同荷载下的最大裂缝宽度

荷载/kN	最大裂缝宽度/mm	
	试件A0	试件A4
10	0	0
20	0	0
30	0	0
40	0.02	0
50	0.05	0.03
60	0.15	0.09
70	0.17	0.12
80	0.24	0.13
90	0.36	0.17
100	已失效	0.19
110	已失效	0.25
120	已失效	0.32

由表3可知,当施加荷载不大于30 kN时,2个试件均未出现破坏形态,即无裂缝;当施加荷载达到40 kN时,试件A0首先出现裂缝,此时试件A4并无裂缝。当施加荷载达到50 kN时,试件A4也出现了裂缝;随着施加荷载的提升,2个试件的最大裂缝宽

度均呈上升趋势。当施加荷载达到 100 kN 时,试件 A0 已失效,而试件 A4 并未失效。当 2 个试件均出现裂缝时,在不同荷载下,试件 A0 的最大裂缝宽度均明显高于试件 A4。综上所述可知,应用 X 形预应力钢绞线网加固形式,可缩小腐蚀混凝土梁的最大裂缝宽度,且效果较为显著。

3.2 应变分析

以试件 A4、A7、A8 为例,分析不同钢绞线间距对腐蚀混凝土连续梁应变的影响,结果见图 3。

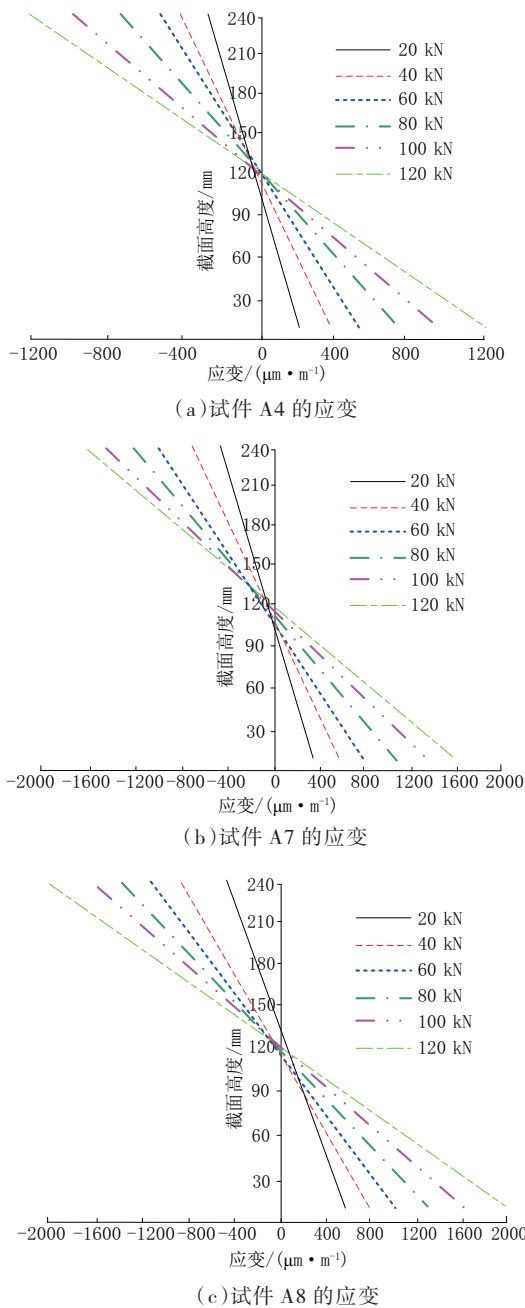


图 3 不同钢绞线间距下腐蚀混凝土连续梁的应变

由图 3 可知,随着施加荷载的增大,试件的应变也相应增大。这表明在较大的荷载作用下,腐蚀混凝土连续梁的变形程度会更加明显。此外,试件 A4、

A7、A8 的应变变化趋势是一致的,这表明钢绞线间距的增加对腐蚀混凝土连续梁的应变变化趋势没有明显影响。而试件 A8 的最大应变比试件 A4 和 A7 都要大,原因是试件 A8 的钢绞线间距较大,使其在相同的荷载作用下产生了更大的变形。综上所述可知,钢绞线间距的提升会导致腐蚀混凝土连续梁的应变增大,即腐蚀混凝土连续梁的变形程度会随着钢绞线间距的提升而加大。因此,在设计和施工过程中,应该根据实际情况选择合适的钢绞线间距,以避免腐蚀混凝土连续梁产生过大的变形和破坏。

3.3 承载力分析

以试件 A1~A4 为例,分析施加不同预应力时,预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁承载力的变化情况,结果见图 4。

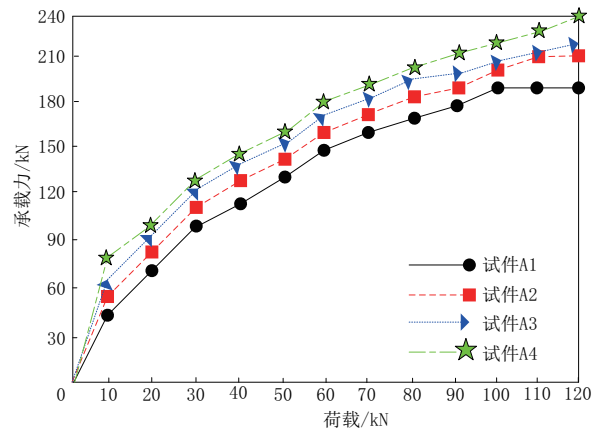


图 4 不同预应力下腐蚀混凝土连续梁承载力变化情况

由图 4 可知,随着施加荷载的增加,4 个试件的承载力均呈上升趋势。这说明预应力钢绞线网加固的腐蚀混凝土连续梁在受力过程中,能够逐渐发挥出更大的承载能力。当施加荷载达到 100 kN 时,试件 A1 的承载力趋于稳定,不再发生任何改变,说明此时试件 A1 已失效。根据图 4 数据可知,A1 试件的极限承载力在 190 kN 左右。这表明,在预应力钢绞线网加固的腐蚀混凝土连续梁中,当荷载超过一定范围后,预应力较小的钢绞线网加固效果可能无法满足要求,需要采取其他加固措施。当施加荷载达到 110 kN 时,试件 A2 的承载力不再发生改变,其极限承载力在 210 kN 左右。这表明,在预应力钢绞线网加固的腐蚀混凝土连续梁中,增加钢绞线网的预应力能够提升其极限承载力。当施加荷载达到 110 kN 时,试件 A3、A4 的承载力均始终呈上升趋势,说明这 2 个试件均未失效。其中,试件 A4 的承载力在不同荷载下均高于试件 A3。原因是试件 A4 具有更高的钢绞线网预应力。根据图 4 数据,试件 A3 的最大

承载力在 220 kN 左右,试件 A4 的最大承载力在 240 kN 左右。同时,从图 4 还可看出,随着预应力的提升,腐蚀混凝土连续梁的承载力均呈上升趋势。这表明适当增加钢绞线网的预应力能够提升其加固效果,从而提升腐蚀混凝土连续梁的承载性能。

综上所述可知,在预应力钢绞线网加固的腐蚀混凝土连续梁中,适当增加钢绞线网的预应力能够提升其极限承载力和加固效果。

3.4 跨中挠度分析

以试件 A4~A6 为例,分析不同混凝土连续梁腐蚀程度对预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁跨中挠度的影响,结果见图 5。

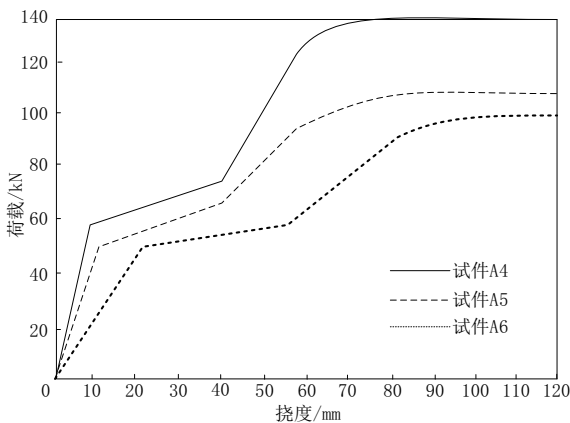


图 5 不同腐蚀程度下混凝土连续梁跨中挠度变化情况

由图 5 可知,随着施加荷载的增加,3 个试件的挠度均呈上升趋势,其受力过程均包含弹性工作阶段、存在裂缝阶段和破坏阶段这 3 个阶段。

第 1 个阶段,3 个试件跨中挠度的增长速度均较快,其中试件 A6 的跨中挠度值最高,其次是试件 A5,跨中挠度值最小的试件是 A4。

第 2 个阶段,3 个试件均存在不同程度的裂缝,前期 3 个试件的裂缝宽度均较小,跨中挠度增长速度较为缓慢;当 3 个试件的裂缝宽度较大时,试件跨中挠度的增长速度突然提升,并逐渐进入缓慢增长阶段。此时,还是试件 A6 的跨中挠度值最大,试件 A4 的跨中挠度值最小,说明试件 A6 的变形程度较为严重。

第 3 个阶段,3 个试件均开始逐渐失效。随着裂缝宽度的不断增加,3 个试件的跨中挠度值均逐渐趋于平稳,当跨中挠度值不再出现变化时,说明试件已失效。其中试件 A6 进入破坏阶段需要的荷载较小,该试件最先失效,其最大跨中挠度值在 100 mm 左右;试件 A5 失效时的最大跨中挠度值在 80 mm 左右,相比试件 A6 有所减小;试件 A4 失效时的最大

跨中挠度值在 70 mm 左右,明显小于另外 2 个试件。

综合分析可知,腐蚀越严重的混凝土连续梁,其跨中挠度值越大,施加荷载后的变形程度越大。

4 结 语

(1)在相同条件下,预应力钢绞线网加固腐蚀混凝土连续梁的极限承载力高于未加固的腐蚀混凝土梁,未加固连续梁的最大裂缝宽度是 0.36 mm,X 形加固方式的连续梁最大裂缝宽度是 0.32 mm。应用 X 形预应力钢绞线网加固方式,可缩小腐蚀混凝土梁的最大裂缝宽度,且效果较为显著。

(2)在设计和施工过程中,应该根据实际情况选择合适的钢绞线间距,以避免腐蚀混凝土连续梁产生过大的变形和破坏。腐蚀越严重的混凝土连续梁跨中挠度值越大,施加荷载后的变形程度也越大,适当增加钢绞线网的预应力能够提升其极限承载力和加固效果。

(3)本文的研究结果对于拓展预应力钢绞线网加固技术的应用范围、提高混凝土结构的耐久性、促进结构加固技术的进步以及为腐蚀环境中的结构安全评估提供支持均具有重要意义。

参考文献:

- [1] 褚文涛,关进轩,杨帆,等.轨道交通大跨度预应力混凝土连续梁桥加固设计[J].世界桥梁,2023,51(增刊1):159-166.
- [2] 王新玲,赵要康,王利超,等.高强钢绞线网/ECC 加固 RC 柱小偏心受压性能研究[J].建筑材料学报,2023,26(1):29-36,44.
- [3] 周雁玲,曹大富,王琨,等.预应力混凝土连续梁桥施工过程中徐变效应分析[J].工业建筑,2022,52(9):101-107.
- [4] 司建辉,陈杰斌,郭杨博.预应力钢绞线-角钢复合加固预损混凝土柱轴压性能试验研究[J].建筑科学,2021,37(9):105-113.
- [5] 袁佳,赵艳,龙秋颖.基于预应力的混凝土内衬结构受力仿真[J].计算机仿真,2021,38(4):457-461.
- [6] 李可,陈翔,范家俊,等.高强钢绞线网/ECC 加固 RC 梁二次受力试验[J].复合材料学报,2023,40(8):4670-4681.
- [7] 李可,王宇,李志强,等.高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁受弯承载力研究[J].建筑结构学报,2022,43(12):82-90.
- [8] 李聪.钢-混组合连续梁负弯矩区受力性能研究及实用新型装置[J].公路工程,2021,46(1):18-22,80.
- [9] 袁方,邵显稼.高强钢绞线网-水泥基复合材料抗弯加固 RC 梁试验研究[J].铁道建筑,2021,61(4):33-38.
- [10] 李可,任魁,李志强,等.高强钢绞线网增强 ECC 加固无损 RC 梁截面刚度计算[J].铁道科学与工程学报,2022,19(10):3046-3054.
- [11] 魏路,刘翔,叶海登.珠海航展中心主展馆工程预应力混凝土柱抗拉弯性能分析[J].建筑结构,2021,51(4):65-70.
- [12] 周家伟,张旭伟,龚顺风,等.先张法预应力钢绞线高强混凝土大直径管桩受弯性能研究[J].建筑结构学报,2022,43(8):282-292.

(下转第 237 页)

