

白维刚,王军文,马玉龙,等.锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震能力评估[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):58-66.
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.009

Bai W G, Wang J W, Ma Y L. Seismic Capacity Evaluation of Corroded Reinforced Concrete Piers[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4):58-66.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.009

锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震能力评估

白维刚¹,王军文^{1,2*},马玉龙¹,张伟¹,李勇^{1,2}

(1.石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;

2.石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,河北 石家庄 050043)

摘要:为了探究钢筋锈蚀对混凝土桥墩抗震能力的影响,在考虑锈蚀对桥墩纵筋、核心混凝土以及保护层混凝土影响的基础上,提出了锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震能力的数值模拟方法,并通过已有试验验证了该模拟方法的可靠性.基于OpenSees平台建立了锈蚀钢筋混凝土桥墩有限元模型,针对仅纵筋锈蚀、仅箍筋锈蚀以及纵筋、箍筋均锈蚀这3种工况,采用Pushover方法计算了钢筋混凝土桥墩的抗震能力,研究了钢筋锈蚀对混凝土桥墩抗震能力的影响,并对纵筋、箍筋均锈蚀工况下的混凝土桥墩抗震能力进行了评估.结果表明:纵筋锈蚀主要影响钢筋混凝土桥墩的极限承载力,箍筋锈蚀则主要影响钢筋混凝土桥墩的延性能力,纵筋、箍筋均锈蚀对钢筋混凝土桥墩的抗震能力影响最大;钢筋锈蚀率越高、地震烈度越大,则混凝土桥墩损伤越严重.

关键词: 锈蚀钢筋;混凝土桥墩;抗震能力;抗震评估;数值模拟

中图分类号:U443

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)04-0058-09

Seismic Capacity Evaluation of Corroded Reinforced Concrete Piers

Bai Weigang¹, Wang Junwen^{1,2}, Ma Yulong¹, Zhang Wei¹, Li Yong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to investigate the effect of steel corrosion on the seismic capacity of concrete bridge piers, a numerical simulation method for the seismic capacity of corroded reinforced concrete (RC) piers was presented on the basis of the effect of corrosion on the longitudinal reinforcement, core concrete and cover concrete. The reliability of the method was verified by the existing corroded RC piers' experiment. The OpenSees finite element software was used to establish the calculation model of corroded RC piers and the Pushover method was used to calculate the seismic capacity of corroded RC piers, and that method was used to calculate the seismic capacity of corroded RC piers in three cases of only longitudinal reinforcement corrosion, only rusting of stirrups, both longitudinal reinforcement and stirrups corrosion. The influence of steel corrosion on the seismic capacity of concrete piers was studied, and the seismic capacity of RC piers with corroded longitudinal reinforcement and stirrups was evaluated. The results show that the corrosion of the longitudinal reinforcement mainly affect the

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508347;51508350);河北省自然科学基金资助项目(E2011210028;E2015210038;E2019210215);河北省高等学校科学技术研究项目资助(ZD2019124);国家土建结构预制装配化工程技术研究中心开放课题项目资助(2018CPCCE-K03)

*通信作者,E-mail:wangjunwen@stdu.edu.cn

ultimate bearing capacity of RC piers and the corrosion of the stirrups mainly impact the ductility of RC piers. The corrosion of the longitudinal reinforcement and stirrups have the greatest influence on the seismic capacity of RC piers; the higher the corrosion rate of steel and the greater the earthquake intensity, the more serious damage of RC piers.

Keywords: corroded steel bar; concrete piers; seismic capacity; seismic evaluation; numerical simulation

桥墩是桥梁结构的重要组成部分,多以钢筋混凝土为建筑材料.由于混凝土本身多缝隙、抗裂性能差,钢筋混凝土桥墩在使用期间往往容易遭到腐蚀.同时,我国处于世界两大活跃地震带之间,震区大量钢筋混凝土桥墩经受钢筋锈蚀与地震的双重考验.这样看来,对锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震能力展开研究,不管是对在役桥梁的抗震性能的科学评估,还是对新建桥梁基于性能的抗震设计,均具有十分重要的现实意义.

贡金鑫等^[1]、Lee C 等^[2]在考虑钢筋锈蚀的基础上,对混凝土构件的恢复力模型展开了研究;邓宗才等^[3]、BELARBI A 等^[4]进行过锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究,但由于试验条件的限制,试验结果的代表性难以界定.还有一些学者通过有限元数值模拟对锈蚀钢筋混凝土墩柱的抗震性能进行了研究^[5-8],但多数研究仅在钢筋截面损失及其力学性能退化两方面分析了纵筋锈蚀对钢筋混凝土桥墩抗震能力的影响,而箍筋锈蚀对其性能影响的研究依然很少.实际上,钢筋混凝土桥墩中箍筋的锈蚀程度往往比纵筋更严重^[9].一些学者对锈蚀钢筋混凝土柱的抗震能力评估和评价也做过理论上的研究^[10-11],但部分缺少试验资料佐证,数值计算准确性有待进一步验证.因此,为了与混凝土桥墩中钢筋锈蚀的实际情况相契合,有必要采用数值模拟手段就纵筋锈蚀、箍筋锈蚀对钢筋混凝土桥墩抗震能力的影响进行深入研究.

本文在考虑钢筋锈蚀影响的基础上,提出锈蚀钢筋混凝土桥墩的数值模拟方法,基于 OpenSees 有限元数值模拟,利用 Pushover 方法,针对纵筋锈蚀、箍筋锈蚀和纵筋、箍筋均锈蚀 3 种工况,研究锈蚀对钢筋混凝土桥墩抗震能力的影响规律;基于能力谱法和结构损伤指数,以 Pushover 分析结果作为评估依据,对纵筋、箍筋均锈蚀工况下钢筋混凝土桥墩抗震能力进行评估.

1 锈蚀钢筋混凝土桥墩的数值模拟方法

锈蚀钢筋混凝土桥墩的数值模拟方法主要从纵筋、核心混凝土及保护层混凝土 3 方面来考虑.

1.1 锈蚀纵筋的数值模拟

钢筋发生锈蚀和钢筋锈蚀导致钢筋本构关系改变对锈蚀纵筋的影响较大,对于钢筋锈蚀情况,模拟时可假定钢筋锈蚀沿截面四周均匀一致,将钢筋锈蚀率代入式(1)计算钢筋锈蚀后的有效截面积.基于 OpenSees 有限元模拟平台,钢筋本构模型采用 Reinforcing Steel Model,通过对屈服强度、极限强度分别按照式(2)和式(3)进行修改^[12],来实现锈蚀钢筋本构的模拟.

$$A_{sc} = (1 - \eta_s) A_s; \quad (1)$$

$$f_{yc} = \frac{1 - 1.196\eta_s}{1 - \eta_s} f_{y0}; \quad (2)$$

$$f_{uc} = \frac{1 - 1.201\eta_s}{1 - \eta_s} f_{u0}. \quad (3)$$

式中: A_{sc} 为锈蚀钢筋有效截面积; η_s 为钢筋截面锈蚀率; A_s 为未锈蚀钢筋截面积; f_{yc} 、 f_{uc} 分别为锈蚀钢筋屈服强度、极限强度; f_{y0} 、 f_{u0} 分别为未锈蚀钢筋屈服强度、极限强度.

1.2 钢筋锈蚀情况下核心混凝土的数值模拟

钢筋锈蚀对核心混凝土产生的影响,主要考虑箍筋锈蚀引起核心混凝土受约束作用发生变化,从而导致其本构关系改变^[13].基于 OpenSees 平台,混凝土本构采用 Mander 模型,如图 1 所示,选取 Concrete04 材料进行模拟,圆形截面混凝土主要力学指标计算公式如式(4)~式(8)所示.

$$f'_{cc} = f'_c \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_1}{f'_c} - 2\frac{f'_1}{f'_c}} \right); \quad (4)$$

$$f'_1 = \frac{1}{2} K_e \rho_s f_{yh}; \quad (5)$$

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{d_s s}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right]; \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}}. \quad (8)$$

式中: f'_{cc} , f'_c , f'_1 , f_{yh} 分别为核心混凝土峰值应力、混凝土 28 d 圆柱体抗压强度、有效约束压力、箍筋屈服强度; K_e , ρ_s , A_{sp} , d_s , s 分别为截面有效约束系数、箍筋体积配箍率、箍筋截面积、箍筋中心的横向距离、箍筋竖向间距; ε_{cc} , ε_{c0} , ε_{cu} , ε_{su} 分别为约束混凝土峰值应力对应的压应变、无约束混凝土峰值应力对应的压应变、约束混凝土极限压应变、箍筋的极限拉应变(一般取 0.09)。

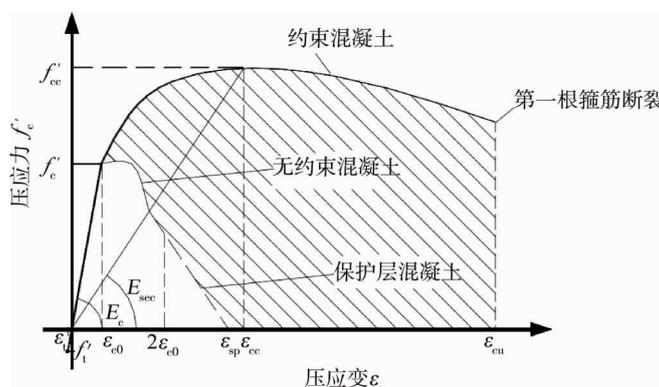


图 1 Mander 混凝土应力-应变模型

首先按照式(1)和式(2)分别计算锈蚀箍筋的有效截面积、屈服强度,然后将计算结果依次代入式(4)~式(8)中,计算出箍筋锈蚀工况下核心混凝土的峰值应力 f'_{cc} , 峰值应变 ε_{cc} 及极限应变 ε_{cu} 。

1.3 钢筋锈蚀情况下保护层混凝土的数值模拟

为使保护层混凝土引入钢筋锈蚀的影响,考虑到钢筋锈胀会引起保护层混凝土发生开裂甚至脱落,从而导致钢筋混凝土墩柱的有效截面积减小。在桥墩截面中保护层混凝土占比较小,并且现实中裂缝的形成与扩展是个极其复杂的过程,难以准确模拟,因此,在建立数值模型过程中,可通过减小保护层混凝土的厚度,进而改变钢筋混凝土桥墩的有效截面积来模拟钢筋锈蚀对于保护层混凝土影响的情况,按照式(9)~式(11)计算考虑保护层锈胀开裂的钢筋混凝土桥墩有效截面积^[14]。

$$A_c = b_c h_c; \quad (9)$$

$$h_c = h - (c_1 + c_2) \alpha; \quad (10)$$

$$b_c = b - (c_3 + c_4) \alpha. \quad (11)$$

式中: A_c , b_c , h_c 分别为考虑锈胀损伤后有效截面积、计算宽度、计算高度; h , b , α 分别为原截面高度、原截面宽度、几何损伤系数; c_1 , c_2 , c_3 , c_4 分别为构件截面高度方向两侧保护层厚度、构件截面宽度方向两侧保护层厚度,根据文献[14]取值。

2 模拟方法的可靠性验证

为验证第 1 节锈蚀钢筋混凝土桥墩模拟方法的可靠性,利用 OpenSees 软件中基于位移的梁柱单元 (Displacement-based Beam-column Element) 模拟钢筋混凝土桥墩,采用该方法对文献[15]中 3 根锈蚀钢筋混凝土圆柱往复荷载试验进行数值模拟,具体锈蚀情况如表 1 所示。在建模时,假设同一试件中每根钢筋受到的锈蚀损伤相同,且锈蚀沿柱周边和柱高均匀分布,将荷载-位移滞回曲线的模拟结果与试验结果进行比较,如图 2~图 4 所示。

表 1 试件锈蚀情况统计

试件编号	纵筋锈蚀率/%	箍筋锈蚀率/%
C0	0.00	0.00
C5	3.83	0.00
CG10	7.16	18.27

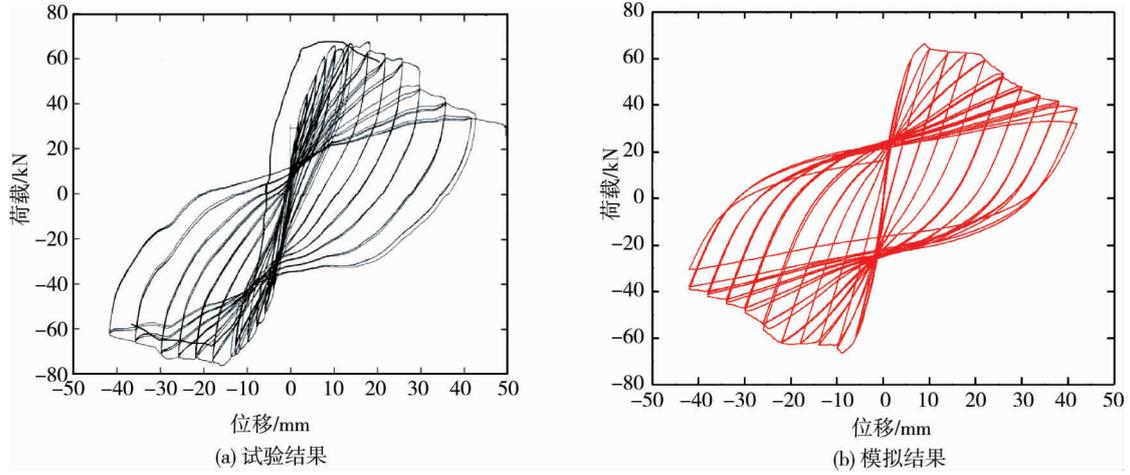


图 2 C0 试件试验、模拟滞回曲线对比

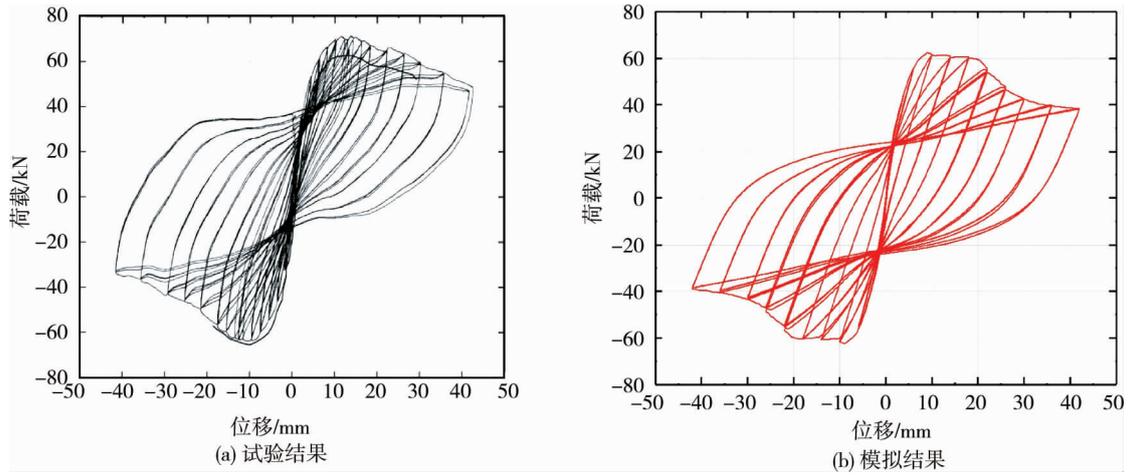


图 3 C5 试件试验、模拟滞回曲线对比

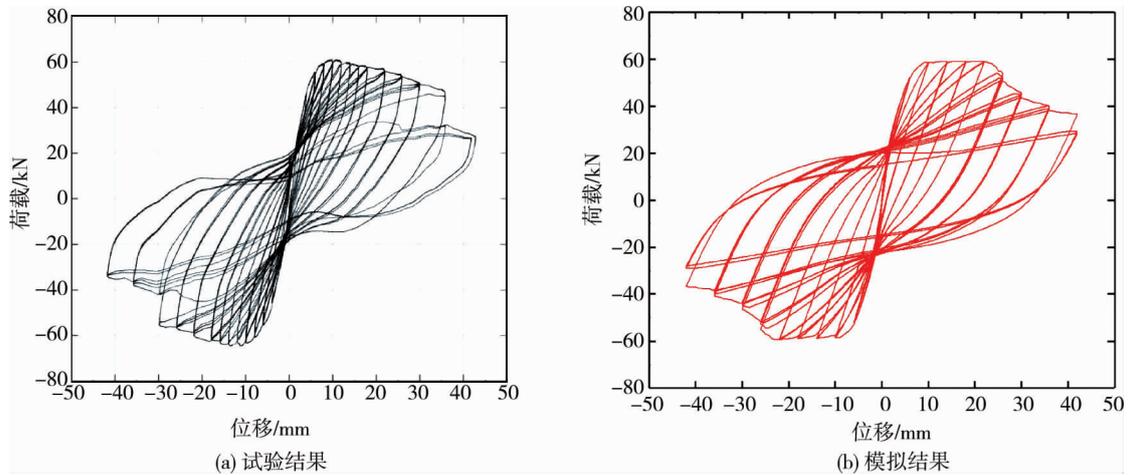


图 4 CG10 试件试验、模拟滞回曲线对比

由图2~图4可以看出:锈蚀钢筋混凝土圆柱试件C0、C5及CG10的模拟滞回曲线与试验滞回曲线在基本形状、发展趋势和饱满程度等方面都具有较好的相似一致性.为了进一步验证锈蚀钢筋混凝土墩柱模拟方法的可靠性,将模拟结果和试验结果的主要性能特征指标进行比较,如表2~表4所示.

表2 试件屈服荷载、屈服位移的试验与模拟结果对比

试件编号	屈服荷载/kN			屈服位移/mm		
	试验	模拟	模拟误差/%	试验	模拟	模拟误差/%
C0	56.86	58.93	3.64	6.82	6.62	2.93
C5	56.40	55.78	1.10	5.47	5.38	1.65
CG10	54.11	53.74	0.68	5.56	5.45	2.00

表3 试件极限荷载、极限位移的试验与模拟结果对比

试件编号	极限荷载/kN			极限位移/mm		
	试验	模拟	模拟误差/%	试验	模拟	模拟误差/%
C0	70.27	66.71	5.00	28.18	25.99	7.77
C5	67.39	62.39	7.42	24.08	23.00	4.49
CG10	62.17	59.14	4.87	29.02	28.70	1.10

表4 试件延性、耗能的试验与模拟结果对比

试件编号	位移延性系数			耗能/(kN·m)		
	试验	模拟	模拟误差/%	试验	模拟	模拟误差/%
C0	4.13	3.93	4.84	31.58	31.68	0.32
C5	4.40	4.28	2.73	29.96	29.62	1.13
CG10	5.22	5.27	0.96	26.31	28.16	7.03

由表2~表4可知:锈蚀钢筋混凝土试件模拟结果和试验结果的主要性能特征指标的误差较小,大部分低于5%,只有极个别大于5%但也小于10%.总体而言,模拟结果与试验结果的符合程度较好,说明第1节中锈蚀钢筋混凝土墩柱的数值模拟方法具有较高的可靠性.

3 钢筋锈蚀对钢筋混凝土桥墩抗震能力的影响

3.1 计算模型

以文献[16]中按我国桥梁规范设计的单柱式圆墩(图5)为计算模型,该墩高为6.0 m,直径为1.0 m,保护层厚度为50 mm,混凝土强度等级为C30,纵筋布置形式:24根直径为36 mm的HRB335钢筋,箍筋布置形式:直径为12 mm的HRB300钢筋,间距100 mm,圆墩约束形式:墩顶自由,墩底固结,上部结构质量为315 t作为集中荷载施加在模型顶部节点.引入钢筋锈蚀的影响,按照仅纵筋锈蚀、仅箍筋锈蚀和纵筋、箍筋均锈蚀3种工况,钢筋锈蚀率 η 分别取0%,10%,15%,20%,25%,30%,按照第1节所述方法建立有限元数值模型,其中纵筋、箍筋均锈蚀情况中假定纵筋、箍筋锈蚀率相同.

3.2 Pushover 分析

为了得到桥墩的推覆曲线,反映出桥墩的抗震能力,故进行Pushover推覆分析,选用倒三角加载模式,得到桥墩的能力曲线,如图6所示.

由图6可知:钢筋锈蚀对桥墩能力曲线的形状、发展趋势产生了较大的影响,总体表现为桥墩能力曲

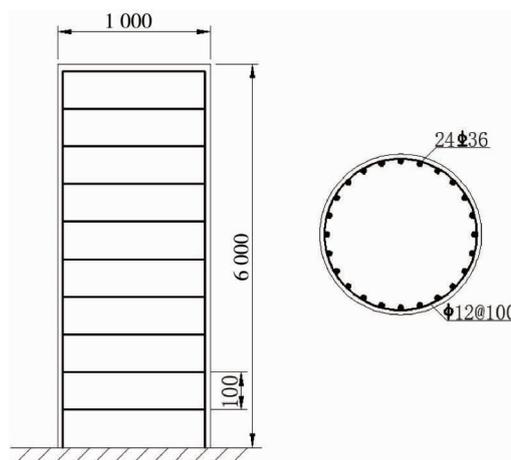


图5 桥墩模型(单位:mm)

线上升速度和所能达到的最大值均随纵筋锈蚀率的增加而下降,桥墩能力曲线达到极值后的下降速度和幅度均随箍筋锈蚀率的增大而增大.由此可见,纵筋锈蚀和箍筋锈蚀在不同方面对混凝土桥墩抗震能力产生了影响,具体表现:在桥墩纵筋锈蚀工况下,桥墩极限承载力随纵筋锈蚀率 η 的增加而显著减小,屈服位移随纵筋锈蚀率 η 的增加而小幅减小,极限位移随纵筋锈蚀率 η 的增加而增大;在桥墩箍筋锈蚀工况下,桥墩屈服位移随箍筋锈蚀率 η 增加无明显变化,而桥墩极限位移随箍筋锈蚀率 η 的增加而显著减小;在纵筋、箍筋均锈蚀工况下,桥墩屈服和极限状态的位移、承载力均随钢筋锈蚀率 η 的增加而减小.

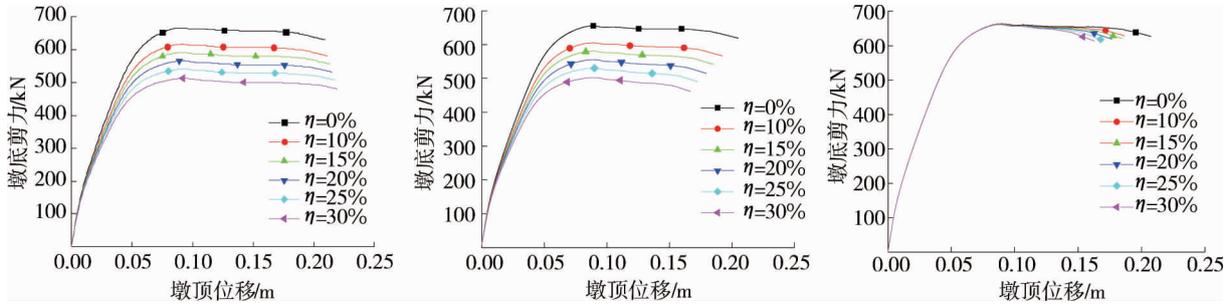


图 6 钢筋锈蚀桥墩能力曲线

桥墩的极限承载力和位移延性系数是 2 个反映桥墩抗震能力的重要指标,将 3 种锈蚀工况下桥墩抗震能力指标进行比较,如图 7 所示.

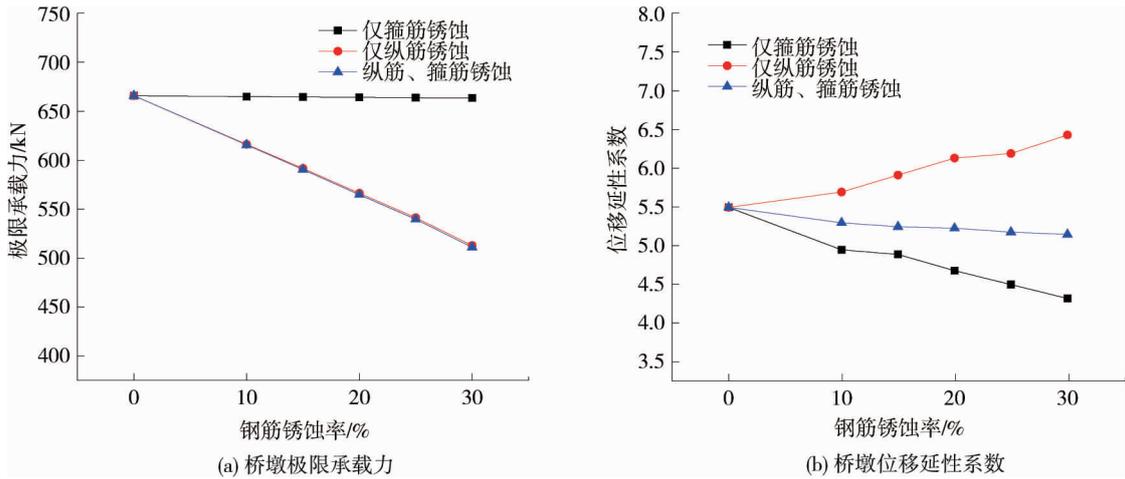


图 7 桥墩抗震能力指标随钢筋锈蚀率变化

由图 7a 可知:在仅纵筋锈蚀和纵筋、箍筋均锈蚀 2 种工况下,桥墩的极限承载力随钢筋锈蚀率 η 的增大而明显减小,且 2 种锈蚀工况下桥墩的承载力相差很小,而仅箍筋锈蚀工况下桥墩的极限承载力随钢筋锈蚀率 η 的增加下降不太明显.究其原因主要是箍筋锈蚀造成其约束效应降低,引起核心混凝土本构关系发生变化,进而影响桥墩整体承载力大小,但在一定锈蚀率下箍筋与混凝土间的粘结作用反而加强,从而在整体上 2 种作用会相互抵消,由此可见箍筋锈蚀对钢筋混凝土桥墩的极限承载力影响不大,而纵筋锈蚀对钢筋混凝土桥墩的极限承载力起决定性作用,其中桥墩承载力下降幅度最大的为纵筋、箍筋均锈蚀工况,当该工况下锈蚀率为 30%时,钢筋混凝土桥墩极限承载力的下降幅度达 23.91%.由图 7b 可知:仅纵筋锈蚀工况下,桥墩的延性能力随钢筋锈蚀率的增加有所提升,主要是纵筋锈蚀使桥墩的屈服位移稍有减小,而极限位移小幅增加(图 6a)造成的;仅箍筋锈蚀和纵筋、箍筋均锈蚀工况下,桥墩的延性能力均随钢筋锈蚀率的增加而下降,其中仅箍筋锈蚀桥墩下降幅度最大,纵筋、箍筋均锈蚀桥墩降幅相对较小.总体来看,纵筋、箍筋均锈蚀对钢筋混凝土桥墩的极限承载力影响极大,而对位移延性能力影响相对较小.但纵筋、箍筋均锈蚀工况下,钢筋混凝土桥墩极限承载力及其位移延性系数这 2 个表征桥墩抗震能力的重要指标的变化规律有相同的趋势,即钢筋锈蚀率 η 越大,两者指标越小.由此可见,该 2 种钢筋均锈蚀的工况

下,桥墩抗震能力所受影响最大,这也与人们的认知基本一致.

4 锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震能力评估

考虑到实际桥墩中钢筋锈蚀大多属于纵筋、箍筋均锈蚀情况,文献[17]将纵筋、箍筋均锈蚀工况下钢筋混凝土桥墩的 Pushover 分析结果作为评估依据,基于能力谱法,再进一步采用结构损伤指数的方法对锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震能力进行评估.

4.1 能力谱法

能力谱法是一种以 Pushover 分析为基础并与反应谱相结合的分析方法,其实施过程包括能力谱曲线的建立、需求谱曲线的建立以及性能点的确定,能力谱法的具体操作细节及相关计算公式可参考文献[17].

4.2 评估方法

Sozen 刚度退化损伤模型为单参数损伤模型,以能力谱法为基础,具有计算简单、应用广泛及实用性强等优点,故采用该模型对发生钢筋锈蚀损伤的钢筋混凝土桥墩的抗震能力进行评估,该模型依据刚度的退化来计算结构的地震损伤,其表达式如式(12)所示^[18].

$$D = 1 - \frac{K_r}{K_0} \quad (12)$$

式中: D 为结构的损伤指数; K_0, K_r 分别为结构的初始刚度值、构件的最大变形点所对应的割线刚度值.

对于结构的初始刚度 K_0 及性能点所对应的割线刚度 K_r 可利用 Pushover 法和能力谱法来确定,如式(13)和式(14)所示.

$$K_0 = \frac{A_y}{D_y}; \quad (13)$$

$$K_r = \frac{A_m}{D_m}. \quad (14)$$

式中: A_y, A_m 分别为屈服点在能力谱上的谱加速度、性能点的谱加速度; D_y, D_m 分别为屈服点在能力谱上的谱位移、性能点的谱位移.

根据文献[19]提出的钢筋混凝土桥梁结构不同损伤程度的损伤指数范围(表5),可以定量判定锈蚀钢筋混凝土桥墩的震害损伤.

表5 损伤程度及对应损伤指数范围

序号	损伤程度	损伤指数 D
1	轻微破坏	0.00~0.15
2	中等破坏(可修)	0.15~0.30
3	严重破坏(不可修)	0.30~0.80
4	倒塌	>0.80

4.3 评估实例

基于上述评估方法,以纵筋、箍筋均锈蚀工况下钢筋混凝土桥墩的 Pushover 分析结果作为评估依据,对钢筋锈蚀率 η 分别取 0%, 10%, 20% 及 30% 的钢筋混凝土桥墩抗震能力进行评估.其中,地震需求谱参照文献[20],将水平设计加速度反应谱(阻尼比 ζ 为 0.05)进行转化、折减来获得.

在求取性能点时,首先设定:场地类型为 II 类,设防烈度为 VII 度、VIII 度及 IX 度, E1, E2 地震作用.然后同一坐标图中绘制能力谱曲线和需求谱曲线,求得 2 曲线的交叉点,即为结构性能点,结果见图 8.

由图 8 可知:在同一地震烈度下,钢筋锈蚀率 η 越大,锈蚀钢筋混凝土桥墩的性能点就越接近能力谱极限点;同一钢筋锈蚀率下钢筋混凝土桥墩的性能点也随着地震烈度的增加呈现出向能力谱极限点靠近的趋势.

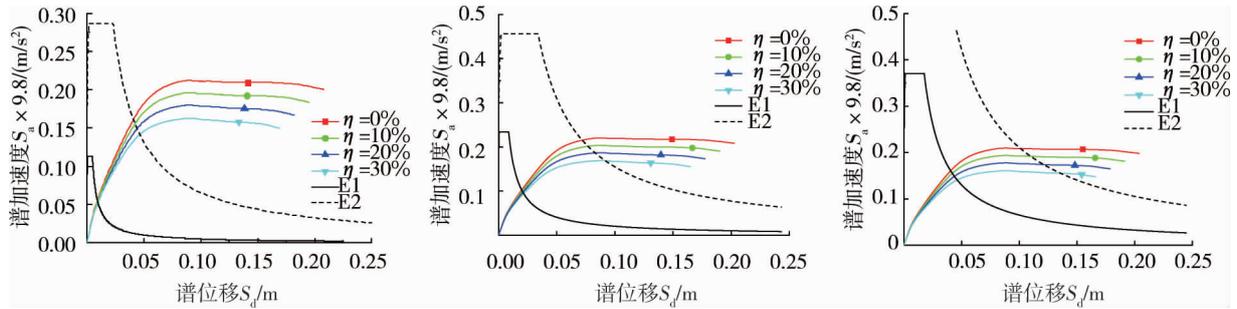


图 8 不同烈度地震作用下钢筋锈蚀桥墩性能点

不同钢筋锈蚀率桥墩在不同烈度 E2 地震作用下性能点的具体数值及损伤评估情况如表 6 所示。

由表 6 可知:桥墩在 E2 地震作用下,其损伤状态均随钢筋锈蚀率 η 的增加发生了明显的恶化.在地震烈度为 VIII 度时,钢筋未锈蚀(锈蚀率 η 为 0%)时,只发生中等破坏,而锈蚀率 η 为 20% 时,损伤指数已经增大到 0.435,损伤程度也恶化为严重破坏;而同一锈蚀率条件下,针对不同烈度地震作用,桥墩的损伤程度相差也较大,表现为地震烈度越大,损伤程度越严重;30% 锈蚀率桥墩在 VII 度、VIII 度和 IX 度下的损伤程度分别为轻微破坏、严重破坏和严重破坏.可见,钢筋锈蚀率越高、地震烈度越大,则桥墩损伤越严重.

表 6 E2 地震作用下钢筋锈蚀率桥墩损伤评估

锈蚀率 η / %	地震烈度	谱位移 S_d / m	谱加速度 S_a / (m/s ²)	损伤指数 D	损伤程度
0	VII	0.040 1	1.577 8	0.000	轻微破坏
	VIII	0.073 9	2.030 6	0.300	中等破坏
	IX	0.103 2	2.067 8	0.495	严重破坏
20	VII	0.043 9	1.462 2	0.086	轻微破坏
	VIII	0.085 3	1.758 1	0.435	严重破坏
	IX	0.123 7	1.724 8	0.618	严重破坏
30	VII	0.046 3	1.386 7	0.112	轻微破坏
	VIII	0.094 2	1.592 5	0.511	严重破坏
	IX	0.138 4	1.541 5	0.678	严重破坏

5 结论

1) 纵筋锈蚀主要影响钢筋混凝土桥墩的极限承载力,箍筋锈蚀主要影响钢筋混凝土桥墩的延性能力.纵筋、箍筋均锈蚀工况下表征钢筋混凝土桥墩抗震能力的 2 个重要指标,即极限承载力和位移延性系数有一致的变化趋势,即钢筋锈蚀率 η 越大,两者指标越小;当该工况下锈蚀率 η 为 30% 时,钢筋混凝土桥墩极限承载力下降幅度最大,高达 23.91%.

2) 钢筋混凝土桥墩的地震损伤状态随钢筋锈蚀率的增加发生了明显的恶化,而同一锈蚀率钢筋混凝土桥墩在不同烈度地震作用下的损伤程度差别较大,表现为随地震烈度的增加而加大.

3) 本文在建立锈蚀钢筋混凝土桥墩模型过程中,假定锈蚀沿钢筋周围均匀发生且每根钢筋锈蚀率相同,这与实际桥墩中钢筋锈蚀情况有所出入,下一步还需将锈蚀钢筋混凝土桥墩模型进行优化,以更好地模拟实际桥墩中钢筋的锈蚀情况.

参考文献:

[1] 贡金鑫,李金波,赵国藩.受腐蚀钢筋混凝土构件的恢复力模型[J].土木工程学报,2005,38(11):38-44.
 [2] Lee C, Bonacci J F, Thomas M D A, et al. Accelerated corrosion and repair of reinforced concrete columns using carbon fibre reinforced polymer sheets [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 941-948.

- [3] 邓宗才,李建辉.混杂 FRP 加固腐蚀混凝土柱恢复力模型研究[J].工程力学,2011,28(8):151-159.
- [4] Belarbi A, Bae S W. An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets [J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(5/6): 674-684.
- [5] 马澍玮,王达磊,胡腾.锈蚀钢筋混凝土桥墩抗震性能数值模拟[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,23(s1): 756-759.
- [6] 陈昉健,易伟建.锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的非线性分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(3):77-83.
- [7] 赵建锋,李洪一,刘苏文.基于钢筋锈蚀的钢筋混凝土桥墩抗震性能[J].山东大学学报(工学版),2017,47(3):112-118.
- [8] 张雯.锈蚀箍筋约束混凝土力学性能退化数值模拟分析[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [9] 贡金鑫,仲伟秋,赵国藩.受腐蚀钢筋混凝土偏心受压构件低周反复性能的试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(5): 92-97.
- [10] 赵桂峰,何双,马玉宏,等.基于钢筋坑蚀效应的近海隔震桥梁易损性分析[J].中国公路学报,2016,29(8):67-76.
- [11] 李磊,郑山锁,周宁.锈蚀钢筋混凝土柱性能化抗震能力的评价模型[J].土木工程学报,2013,46(s2):50-56.
- [12] 张伟平,商登峰,顾祥林.锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(5):586-592.
- [13] 梁岩,李杰,罗小勇,等.锈蚀钢筋混凝土构件抗震动力性能研究[J].振动工程学报,2016,29(1):140-147.
- [14] 惠云玲,李荣,林志伸,等.混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J].工业建筑,1997,27(6):15-19.
- [15] Yuan Z J, Fang C Q, Parsaeimaram M, et al. Cyclic Behavior of Corroded Reinforced Concrete Bridge Piers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 04017020.
- [16] 司炳君,李宏男,王东升,等.基于位移设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2008,28(1):123-129.
- [17] 张伟.钢筋锈蚀对混凝土桥墩抗震能力影响的研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [18] Gulkan P, Sozen M A. Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motion [J]. Journal of the American Concrete Inst, 1974, 71(12): 604-610.
- [19] 潘龙,孙利民,范立础.基于推倒分析的桥梁地震损伤评估模型与方法[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(1): 10-14.
- [20] 中华人民共和国交通运输部.JTG/TB02-1-2008 公路桥梁抗震设计细则[S].2008.