

材料性能劣化对RC墩抗震性能的影响

张 辉

(上海城市交通设计院有限公司, 上海市 200092)

摘 要: 为了探讨混凝土和钢筋材料长期性能劣化后,桥墩的变形能力、延性水平等变化规律,以不同直径、不同轴压比、不同纵筋率以及不同服役年限条件下的圆形RC墩截面为代表,采用Ucfyber记录不同条件下RC墩截面的初始、等效、极限弯矩、曲率;研究了随着服役年限的增加,桥墩的最大容许转角和最大容许位移的变化规律,并探讨了墩柱直径、轴压比、纵筋率对桥墩抗震性能的影响。结果表明:在采用合适的轴压比和纵筋率条件下,桥墩的变形能力和延性水平等在整个服役期内会有明显的下降趋势,最大降幅在10%左右,并未存在因脆性而发生的突变,能够较好地满足由于地震动作用产生的变形要求。

关键词: 桥梁工程;RC墩;材料劣化;抗震性能;时变效应

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0063-06

Influence of Material Performance Deterioration on Seismic Performance of RC Piers

ZHANG Hui

(Shanghai Urban Transportation Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to explore the variation laws of the deformation capacity and ductility level of bridge piers after the long-term performance deterioration of concrete and steel bar materials, taking the sections of circular RC piers under different diameters, different axial compression ratios, different longitudinal reinforcement ratios and different service life conditions as the representatives, the Ucfyber is used to record the initial, equivalent, ultimate bending moments and curvatures of RC pier sections under different conditions. The variation laws of the maximum allowable rotation angle and the maximum allowable displacement of the bridge piers with the increase of service life are studied. The influence of pier diameter, axial compression ratio and longitudinal reinforcement ratio on seismic performance of pier is discussed. The results show that the deformation capacity and ductility level of the piers will decline dramatically in the whole service period under the condition of adopting appropriate axial compression ratio and longitudinal reinforcement ratio. The maximum decline is around 10%. There is no sudden change due to brittleness, which can well meet the deformation requirements caused by ground motion.

Keywords: bridge engineering; RC piers; material deterioration; seismic behavior; time-dependent effects

0 引 言

钢筋混凝土材料的劣化现象是工程结构不可避免的规律,对于长期在腐蚀性环境下服役的桥梁来说尤其如此。在抗震设计和评估中,一般都假定钢筋混凝土结构(RC结构)在遭受地震袭击时仍保持初始的设计状态,这显然与实际情况不符。正如美国ASCE报告^[1]所指出的那样,此时材料劣化是不可避免的。因此,将材料劣化问题纳入桥梁抗震设计是非常必要的。

在梁桥的抗震设计中,RC墩通常作为延性构件设计,要求其具有足够的弹塑性变形能力,以达到“大震不倒”的设防目标^[2-3]。我国抗震规范^[4]对RC墩抗震性能也给出了变形能力的验算方法。然而该规范对RC墩抗震性能指标的规定并未考虑长期服役材料性能劣化的影响。有关材料性能劣化对钢筋混凝土结构抗震性能的影响已有学者进行研究,如赵珺等^[5]在研究连续刚构桥在氯离子环境下的抗震性能后发现,桥梁发生同等损伤程度的风险概率随着服役龄期的增加而不断增大;李立峰等^[6]指出,钢筋锈蚀程度对RC墩的抗震性能有着不可忽略的影响;Biondi等^[7]发现在氯离子侵蚀下,RC桥梁的抗震性能出现了恶化。为了准确评估材料劣化对RC构

收稿日期: 2026-04-29

作者简介: 张辉(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程的设计与研究工作。

件抗震性能的影响,郑山锁等^[8]、李忠献等^[9]、Choe等^[10]、李艺等^[11]研究了考虑材料劣化的RC构件在地震作用下的力学行为及其损伤分析模型,也为长期服役下RC结构抗震评估提供了有效方法。

不过现有学者的研究多从材料劣化导致RC构件刚度和承载力下降的角度展开,缺少在考虑材料劣化条件下RC构件重要抗震性能指标——延性性能下降方面的研究。本文着重分析作为延性构件的RC墩的抗震指标随着材料劣化而变化的规律,以期服役中的桥梁抗震评估和改造提升提供参考。

1 材料性能劣化分析模型

RC结构在长期使用过程中,以混凝土碳化和钢筋锈蚀最为典型。碳化会导致混凝土的碱性降低,随着时间变化其强度不断降低^[12];钢筋锈蚀会使钢筋截面面积减小,延性与强度性能下降,并导致混凝土和钢筋间的黏结能力减弱。本文针对RC墩的材料性能劣化,主要考虑混凝土抗压强度,以及钢筋截面面积、极限强度、极限应变、屈服强度的变化,并探讨由此产生的混凝土与钢筋间黏结能力减弱的原因。

1.1 混凝土抗压强度的经时变化

一般大气环境下,混凝土抗压强度随时间的变化可采用如下公式确定^[13]:

$$\begin{cases} f_c(t) = \eta(t) \cdot f_{c0} \\ \eta(t) = 1.4529e^{[-0.0246(\ln t - 1.7154)^2]} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{c0} 为混凝土抗压强度标准值,MPa; $\eta(t)$ 为随时间变化的函数。

由式(1)可计算出任意龄期的混凝土抗压强度。

1.2 钢筋截面面积的经时变化

钢筋锈蚀导致其直径的变化可采用如下公式确定^[13]:

$$D(t) = \begin{cases} D_0, & t \leq t_i \\ D_0 - \lambda_{e1}(t - t_i), & t_i < t \leq t_{cr} \\ D_0 - \delta_{cr} - \lambda_{e2}(t - t_{cr}), & t_{cr} < t \leq t_s \\ 0, & t > t_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_0 为钢筋的初始直径,cm; λ_{e1} 、 λ_{e2} 分别为混凝土保护层开胀裂前、后的钢筋锈蚀速度; t_i 为钢筋初锈时间; t_{cr} 为从钢筋初锈到混凝土保护层锈胀开裂的时间; t_s 为混凝土保护层开裂后的时间; δ_{cr} 为混凝土保护层开裂时刻的钢筋锈蚀深度,cm。

式(2)中的 λ_{e1} 、 λ_{e2} 、 t_i 、 t_s 、 t_{cr} 、 δ_{cr} 可分别按式(3)至式(8)计算:

$$\lambda_{e1} = 46k_{cr}k_{ce}e^{0.047(RH - 0.45)}d^{-1.36}f_{c0}^{-1.83} \quad (3)$$

$$\lambda_{e2} = \begin{cases} 2.5\lambda_{e1}, & \lambda_{e1} > 0.008 \\ 4.0\lambda_{e1} - 187.5\lambda_{e1}^2, & \lambda_{e1} \leq 0.008 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} t_i = \left[(d - x_0)/k \right]^2 \\ x_0 = 4.86(-RH^2 + 1.5RH - 0.45)(d - 5)(\ln f_{c0} - 2.30) \\ k = 2.56K_{mc}k_jk_{co_2}k_pk_s^4\sqrt{T}(1 - RH)RH(57.94/f_{c0} - 0.76) \end{cases} \quad (5)$$

$$t_s = t_i + \delta_{cr}/\lambda_{e1} + (D_0 - \delta_{cr})/\lambda_{e2} \quad (6)$$

$$t_{cr} = \delta_{cr}/\lambda_{e1} \quad (7)$$

$$\delta_{cr} = k_{crs}(0.008d/D_0 + 0.00055f_{c0} - 0.022) \quad (8)$$

式中: k_{crs} 为钢筋位置的影响系数,一般可取1.0; d 为混凝土保护层厚度,mm; k_{ce} 为小环境条件的修正系数,一般取4.0; T 为环境温度,取值22.4℃;RH为环境相对湿度,取RH=0.8; x_0 为混凝土碳化残量; K_{mc} 为不定性随机变量,取1.0; k_j 为角部修正系数,取1.2; k_{co_2} 为CO₂浓度的影响系数,取1.2; k_p 为浇筑面修正系数,取1.2; k_s 为钢筋工作应力影响系数,取1.0。

1.3 钢筋强度的经时变化

定义钢筋截面面积的损失率 $\eta_s(t)$ 为:

$$\eta_s(t) = [D_0^2 - D^2(t)]/D_0^2 \quad (9)$$

钢筋屈服强度降低系数 $k_y(t)$ 和极限强度降低系数 $k_u(t)$ 因此可表达为^[13]:

$$\begin{cases} k_y(t) = [0.985 - 1.028\eta_s(t)]/[1 - \eta_s(t)] \\ k_u(t) = [0.986 - 1.103\eta_s(t)]/[1 - \eta_s(t)] \end{cases} \quad (10)$$

1.4 钢筋极限应变的经时变化

钢筋的极限应变与钢筋截面面积损失率之间的关系可表示为^[13]:

$$\varepsilon_u(t) = [0.874 - 0.012\eta_s(t)]\varepsilon_{u0} \quad (11)$$

式中: ε_{u0} 为钢筋初始时的极限应变,可取 $\varepsilon_{u0} = 0.15$ 。

1.5 钢-混间黏结性能的经时变化

钢筋与混凝土黏结性能随时间的变化采用协同工作系数 k_{si} 来确定^[13]:

$$k_{si} = \begin{cases} 1, & \delta_e(t) \leq \delta_{cr} \\ 1 - 0.85[\delta_e(t) - \delta_{cr}], & \delta_{cr} < \delta_e(t) \leq 0.3 \\ 0.745 + 0.7\delta_{cr}, & \delta_e(t) > 0.3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\delta_e(t)$ 表示钢筋的锈蚀深度,可通过公式(2)反算确定,其余符号意义同前。

2 RC 墩的抗震性能指标

2.1 截面弯矩-曲率分析

RC 墩的抗震性能主要考虑其抗弯、抗剪、延性能力等,一般抗剪采用能力保护通过合理的构造处理,脆性的剪切破坏是完全可以避免的,因此抗剪能力不作为本文的讨论对象。对于 RC 墩截面的各种等效抗弯能力和曲率,可以通过截面弯矩-曲率分析来确定^[14]。根据材料的非线性本构,采用纤维有限元法,可计算截面在一定轴压下的弯矩-曲率关系,计算公式为:

$$\begin{cases} N = \int \sigma(\varepsilon_y) dA + \sum A_{si} \sigma(\varepsilon_{yi}) \\ M = \int \sigma(\varepsilon_y) y dA + \sum A_{si} \sigma(\varepsilon_{yi}) y_{si} \end{cases} \quad (13)$$

式中:积分项代表混凝土的内力合力;求和项代表钢筋的内力合力。

采用式(13)计算时,应考虑核心混凝土与混凝土保护层应力-应变关系的区别。当钢筋与混凝土的应力-应变关系确定时,便可以采用数值积分方法得到截面的弯矩-曲率曲线。但在实际工程分析应用中,通常按能量等效原则对截面弯矩-曲率曲线进行双折线处理。本文分析时,弯矩-曲率曲线双线性处理采用 Priestley 等效原则^[15]进行,如图 1 所示。图 1 中, ϕ_0 、 M_0 分别表示首根纵筋屈服时截面的曲率和弯矩;等效弯矩 M_y 为实际曲线上 $5\phi_y$ 所对应的弯矩,根据该弯矩可确定截面的等效屈服曲率 ϕ_y ; ϕ_u 、 M_u 分别表示出现材料破坏时截面的极限曲率和极限弯矩。

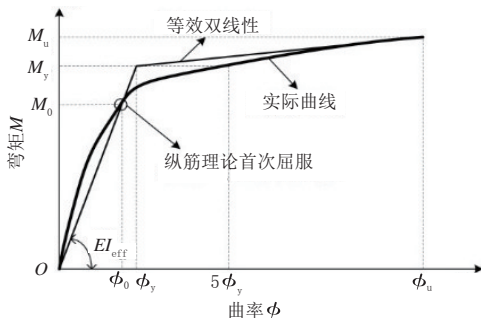


图 1 RC 截面弯矩-曲率曲线及其双线性化

在式(13)的计算中,只要考虑混凝土、钢筋的物理和力学参数的经时变化。即按公式(1)、(2)、(10)、(11)修正钢筋和混凝土相关参数,就可以得到不同服役龄期下 RC 墩柱的弯矩-曲率曲线,然后采用公式(12)修正钢筋和混凝土的协同工作系数,最终得到墩柱截面经时变化后的抗弯性能。

2.2 RC 墩抗震性能指标

我国规范^[4]对 RC 墩柱变形能力的验算主要包括:潜在塑性铰区的塑性转动能力 θ_u 和容许位移 Δ_u , 其表达式分别为:

$$\theta_u = L_p (\phi_u - \phi_y) / K \quad (14)$$

$$\Delta_u = \frac{1}{3} H^2 \phi_y + (H - \frac{L_p}{2}) \theta_u \quad (15)$$

式中: ϕ_y 、 ϕ_u 分别为 RC 墩塑性铰区域截面屈服曲率和极限曲率, cm^{-1} , 按图 1 的方法计算; K 为延性安全系数,规范^[4]建议取 2.0; H 为墩高, cm ; L_p 为等效塑性铰长度, cm 。

L_p 可取下式的最小值:

$$\begin{cases} L_p = 0.08H + 0.022f_y d_s \geq 0.044f_y d_s \\ L_p = 2b/3 \end{cases} \quad (16)$$

式中: f_y 为纵向钢筋的抗拉强度标准值, MPa ; d_s 为纵向钢筋直径, cm ; b 为圆墩直径或矩形墩短边尺寸, cm 。

为了便于研究,本文主要对圆形截面 RC 墩进行分析,将公式(14)、(15)作为 RC 墩的抗震性能指标。

3 分析模型与工况

本文针对不同直径的圆形截面 RC 墩在不同配筋率、不同轴压比、不同服役龄期下的抗震性能进行研究。

RC 墩的直径 D 分别取 1.0、1.5、2.0、2.5 m;墩高按 10 m 考虑;纵筋率根据规范^[4]的限值取 1%、2%、3%;轴压比取 0.1、0.2、0.3、0.4;服役龄期取 0、10、20、...、100 年。RC 墩所用混凝土采用桥梁下部结构常规的 C40,钢筋为 HRB400,保护层厚度取 50 mm。假定结构所处环境为一般大气环境,即不按氯离子环境考虑材料的劣化。

4 RC 墩抗震性能指标时变规律

4.1 塑性转动能力 θ_u

以常规工程中直径为 2.0 m 的墩柱进行分析。在不同纵筋率和轴压比下,RC 墩塑性铰区域最大容许转角的经时变化见图 2。由图 2 可知,在相同纵筋率和服役年限下,随着桥墩轴压比的增加,桥墩塑性铰区域的最大容许转角反而减小,其中轴压比为 0.1~0.2 时,其下降幅度相对较大。在轴压比和纵筋率不变的情况下,墩柱塑性铰区域的最大容许转角在服役期限的前 10 年降幅较大,之后随着服役时间的增长,其值会逐步增加,且该增幅会随着轴压比的增大而逐渐减缓。随着桥墩纵筋率的增加,桥墩塑

性较区域的最大容许转角相应减小。随着轴压比的增加,纵筋率对桥墩容许转角的影响也越来越小。

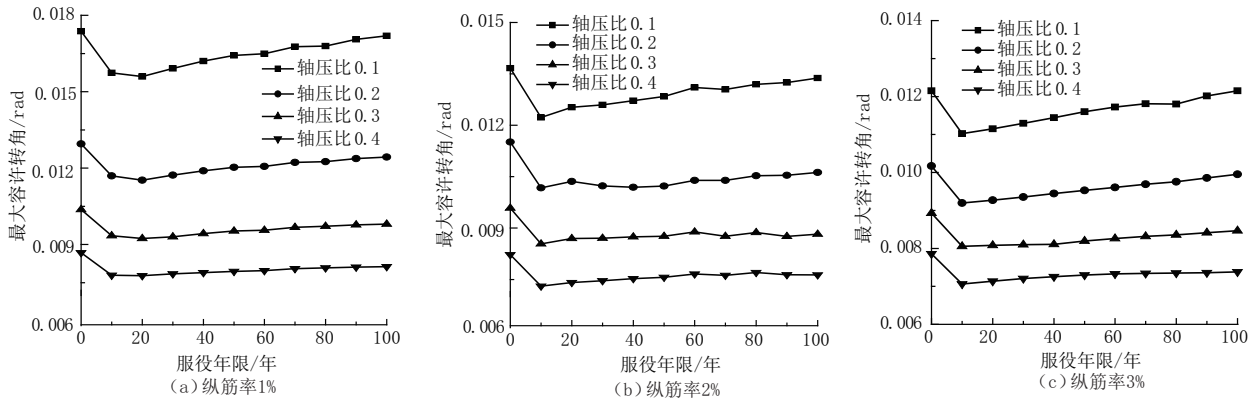


图2 不同纵筋率下,RC墩塑性较区域最大容许转角的经时变化图(墩柱直径2.0 m)

图3为纵筋率限定为2%时,不同墩柱直径和轴压比下,RC墩塑性较区域最大容许转角的经时变化。由图3可知:在相同轴压比和服役年限的情况下,随着墩柱直径的增加,桥墩塑性较区域的最大容许转角逐渐减小;在相同墩柱直径和相同服役年限的情况下,轴压比越大,最大容许转角越小;在相同

墩柱直径和相同轴压比的情况下,桥墩塑性较区域的最大容许转角都表现出先减小后增大的趋势。不同直径的墩柱都表现出在服役年限到10年左右时达到最大容许转角的最低点,后面随着服役年限的增加,其最大容许转角都保持着一定的上升趋势,但随着墩柱轴压比的增大,该上升速率有所下降。

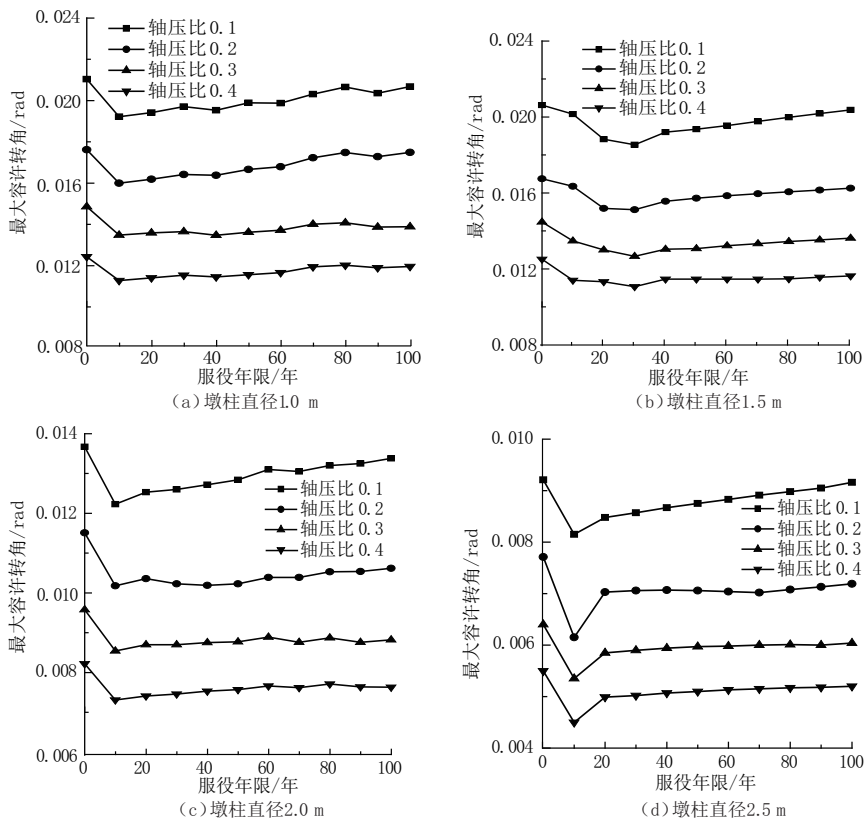


图3 不同墩柱直径下,RC墩塑性较区域最大容许转角的经时变化图(纵筋率为2%)

总之,服役年限前10年左右,主要是由于混凝土保护层性能的快速退化、钢筋初锈、钢-混黏结性能退化等协同作用,导致实际墩柱受力截面面积减小、轴压比增大、钢筋强度下降,最终使墩柱的抗震性能迅速下降。但当服役超过10年以上后,墩柱抗震性能虽有下降,但相对比较稳定。同时轴压比对墩柱

性能的影响较大,随着服役年限的增长,较大的轴压比会导致墩柱的抗震性能下降明显。

4.2 容许位移 Δ_u

同样以直径为2.0 m的墩柱进行分析。在不同纵筋率和轴压比下,RC墩最大容许位移的经时变化见图4。由图4可知:随着墩柱纵筋率的提高,在相

同服役年限和相同轴压比下,墩柱的最大容许位移逐渐减小。在相同纵筋率和服役年限的情况下,随着轴压比的增加,墩柱最大容许位移相应减小,且当轴压比为 0.1~0.2 时,其下降幅度较大。在相同轴压比和纵筋率的情况下,墩柱最大容许位移在服役年限到 10 年左右时达到最低点,后面随着服役年限的

增加,当轴压比为 0.1~0.2 时,其最大容许位移相比最小值时保持一定上升趋势,但随着墩柱轴压比的增大,该上升速率有所下降;当轴压比为 0.3,纵筋率为 1%、2% 时,随着服役年限的增长,墩柱最大容许位移基本保持不变;在轴压比为 0.4 时,随着服役年限的增长,墩柱最大容许位移稍有下降。

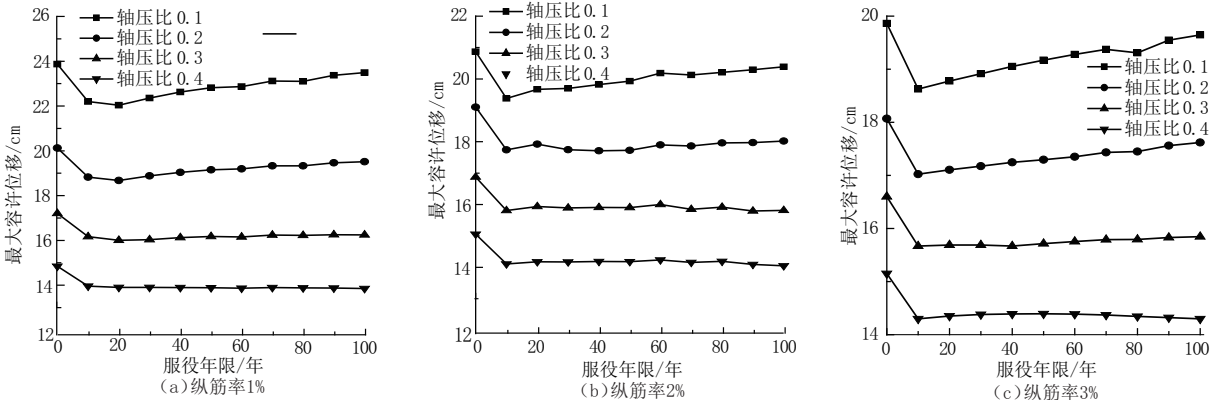


图4 不同纵筋率下,RC墩最大容许位移的经时变化图(墩柱直径2.0 m)

图5为纵筋率限定为2%时,不同墩柱直径和轴压比下,RC墩最大容许位移的经时变化。由图5可知,当定义轴压比为单一变量时,随着轴压比的增加,墩柱最大容许位移相应减小。当定义服役年限为单一变量时,墩柱直径不超过2.0 m的墩柱最大容许位移在0~10年间有一定的降低;10年之后,随着服役年限的增加,其值在整体上保持着平稳的上

升趋势。当墩柱直径达到2.5 m时,墩柱最大容许位移在服役10年时到达顶峰,之后其值在下一个10年的服役时间内有一个较大的降低,接着就保持平稳上升,直到60年左右保持稳定。当定义墩柱直径为单一变量时,在相同轴压比和纵筋率条件下,墩柱最大容许位移随着墩柱直径的增加而相应减小。

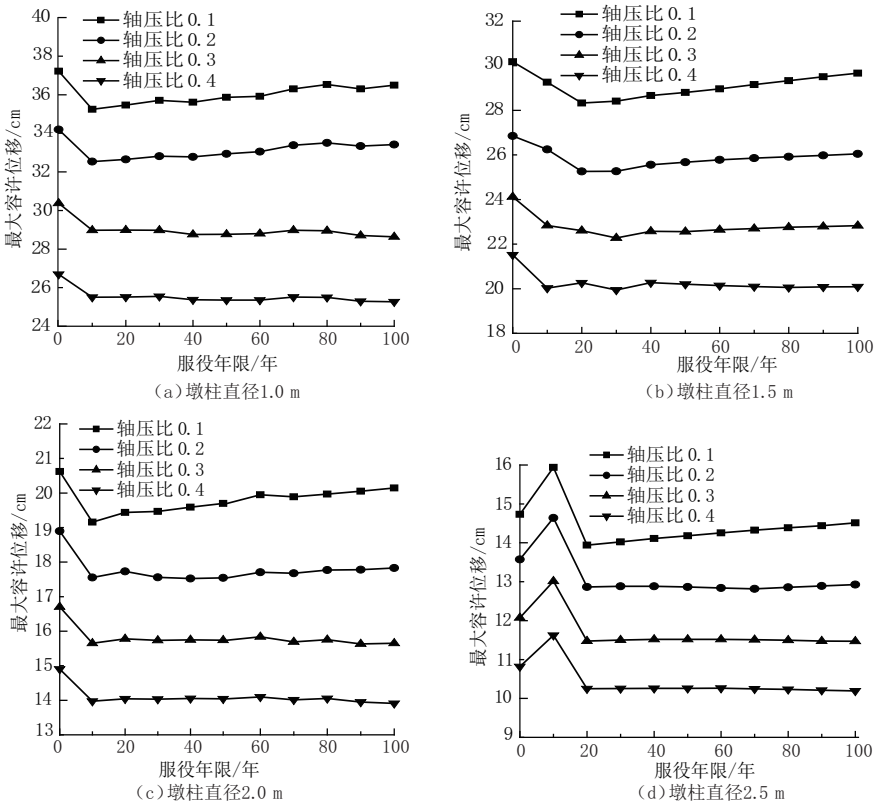


图5 不同墩柱直径下,RC墩最大容许位移的经时变化图(纵筋率为2%)

5 结 语

(1)在相同轴压比和纵筋率下,RC墩变形能力随着时间推移而有着明显变化,表明受材料劣化的作用,RC墩的延性能力下降明显。因此,在对RC墩进行加固维修时,应充分重视材料劣化尤其是混凝土碳化和钢筋锈蚀所带来的不利后果。

(2)在相同轴压比和服役年限下,RC墩的变形能力随着纵筋率的增大有着明显的下降趋势。随着纵筋率的增加,混凝土保护层更容易破坏,屈服过程越发不明显,RC墩的整体变形也发生退化降低,这对其抗震是非常不利的。

(3)在相同纵筋率和服役年限下,适当增加轴压比会增加RC墩的变形能力。但当轴力太大时,受压区混凝土容易先被压碎破坏进而发生脆性破坏,使墩柱延性性能急剧下降。为了平衡高承载力和足够的延性,初步建议一般RC墩轴压比保持在0.2左右为宜。

参考文献:

- [1] Victor R, Baskir G, Camp J, et al. Report card for America's infrastructure[R]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [2] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].3版.北京:人民交通出版社,2017.

- [3] SDC. Caltrans seismic design criteria, version 1.7[S]. Sacramento, California: California Department of Transportation, 2013.
- [4] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].
- [5] 赵珺,牛获涛.在役钢筋混凝土连续刚构桥梁抗震性能评估[J].中国公路学报,2014,27(9):74-81.
- [6] 李立峰,刘守苗,吴文朋.氯离子侵蚀效应对RC桥墩抗震性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2015,32(5):56-64.
- [7] Biondi F, Camnasio E, Palermo A. Life time seismic performance of concrete bridges exposed to corrosion[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2014, 10(7): 880-900.
- [8] 郑山锁,王晓飞,韩言召.酸性大气环境下锈蚀钢框架柱双参数地震损伤模型研究[J].工程力学,2016,33(7):129-135;143.
- [9] 李忠献,陈宇,李宁.基于材料损伤的钢筋混凝土构件损伤模型[J].工程力学,2014,31(6):53-59.
- [10] Choe D E, Gardoni P, Rosowsky D, et al. Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(3): 383-39.
- [11] 李艺,刘斌,阎运起.服役钢筋混凝土结构强度和刚度经时变化分析[J].建筑施工,2002(5):392-394.
- [12] 傅沛瑶,徐略勤,王成,等.考虑材料长期性能劣化的高墩刚构桥抗震性能研究[J].工程抗震与加固改造,2018,40(2):148-155.
- [13] 牛获涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003.
- [14] 徐略勤,刘津成,刘营,等.独塔宽幅斜拉桥基于能力需求比的抗震性能评估[J].桥梁建设,2016,46(4):11-16.
- [15] Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

(上接第34页)

- [4] 李毅,徐超,廖开星,等.手持式三维激光扫描仪在工业构件质量检测中的应用[J].测绘通报,2019(8):102-105.
- [5] 朱凌.地面三维激光扫描标靶研究[J].激光杂志,2008(1):33-35.
- [6] 王烽.FCM聚类算法对平面标靶中心提取精度的探究[J].测绘通报,2019(增刊1):122-125.
- [7] 苍桂华,李明峰,岳建平.徕卡ScanStation2激光扫描仪强度数据影响因素实验研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(7):155-160.
- [8] 官云兰,程效军,陈晓勇,等.地面Lidar平面标靶稳健定位[J].激

- 光杂志,2015,36(1):13-16.
- [9] 薛晓璐,林欢.基于RANSAC的残缺平面标靶稳健定位方法[J].测绘工程,2016,25(4):51-54.
- [10] 何华,李宗春,阮焕立,等.基于凸包算法和抗差最小二乘法的激光扫描仪圆形标靶中心定位[J].测绘工程,2018,27(3):20-24.
- [11] 陈俊杰,闫伟涛.基于激光点云的平面标靶中心坐标提取方法研究[J].工程勘察,2013,41(8):53-57.
- [12] 刘建华.基于迭代最小二乘的平面标靶点云去噪方法初探[J].电子测量技术,2019,42(18):76-80.