

文章编号:1001-4888(2019)03-0509-08

钢筋锈蚀条件下混凝土柱有效弹性模量试验研究^{*}

曹国辉^{1,2}, 韩传昌², 邓昂², 唐皇¹

(1. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南益阳 413000; 2. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105)

摘要:通过对16根钢筋混凝土柱进行腐蚀与长期荷载共同作用的长期试验,研究构件在不同配筋率、钢筋锈蚀率及加载龄期下有效弹性模量的变化规律,配筋率分别为1%、2%、3%,钢筋锈蚀率分别为0%、10%、20%,加载龄期分别为7d和28d。研究表明:配筋率与加载龄期对钢筋混凝土有效弹性模量都有影响,两种影响具有叠加效应,并且这种叠加效应不只是简单的线性叠加;钢筋锈蚀率越大,钢筋混凝土有效弹性模量越小。在试验研究的同时,还提出了考虑配筋率与钢筋锈蚀率的混凝土柱有效弹性模量计算模型,通过模型计算值与试验值的相对误差对比,验证了本文计算模型的有效性和适用性。

关键词:钢筋锈蚀;有效弹性模量;配筋率;混凝土柱;计算模型

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-089

0 引言

混凝土材料性能的研究对于充分发挥构件材料强度、提高工程结构的安全性都具有重要意义,其有效弹性模量是结构分析和设计中的重要参数。混凝土是一种由骨料、砂浆、界面等组成的多相非均质复合材料,各相间的物质组成与体积分数大小对其力学性能有着至关重要的影响^[1]。如何预测复合材料的有效弹性模量是复合材料力学中一个非常重要的基本问题。研究复合材料有效弹性模量主要取决于复合材料中每一组分材料的弹性常数和复合材料内部的微结构特征^[2,3],如夹杂的体积分数、形状、几何尺寸和方向等。许多学者对这类方法进行了大量研究,Hashin 和 Shtrikman^[4-6]根据线性弹性理论的变分原理提出了计算多相复合材料有效弹性模数上限和下限的方法;Mori 等^[7]、Eshelby^[8]研究了有夹杂物之间相互作用的复合材料弹性常数。另一大类方法主要基于等效介质理论^[9-12],具有代表性的方法有 Eshelby 等效夹杂理论、自洽法、Mori-Tanaka 法、微分法等。杜丹旭^[13]基于有效自洽法的基础,提出了相互作用直推法,该方法适用于复杂形状和多相夹杂、各向同性和各向异性的复合材料有效弹性模量。Ju 和 Chen^[14,15]、Lin 和 Ju^[16]以及 Dai 等^[17]利用等效介质理论研究了多相的复合材料的有效弹性模量。目前,国内外对混凝土单一材料多相混合夹杂的有效弹性模量研究较多,对钢筋和混凝土两种不同性质材料组合使用的复合材料有效弹性模量研究较少,考虑钢筋锈蚀条件下混凝土柱承载能力研究较多(如张克波等^[18]、吕毅刚等^[19]),但考虑有效弹性模量变化规律的研究较少。实际工程中,混凝土和钢筋往往一起使用,在荷载和外部环境的作用下,混凝土自身收缩徐变和钢筋锈蚀使得钢筋混凝土构件的有效弹性模量变得更为复杂。因此,本文从钢筋混凝土柱受力平衡出发,探究在钢筋锈蚀条件下混凝土柱有效弹性模量的长期变化规律。

^{*} 收稿日期:2018-04-27;修回日期:2018-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51551801)

通讯作者:曹国辉,博士,教授,主要从事桥梁结构受力性能研究。Email: cgfcivil@163.com

1 试验概况

1.1 材料与试件

试验共制作了 16 个混凝土圆柱试件,其中 4 个素混凝土试件,12 个钢筋混凝土试件,试件截面直径为 150mm,柱高为 600mm。试验用的混凝土强度等级为 C40,采用 P.042.5 硅酸盐水泥;Ⅱ级粉煤灰;骨料为中砂和粒径级配为 5~25mm 的碎石;外加剂采用高效聚羧酸减水剂。具体配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比设计(单位:kg/m³)

Tab. 1 Mixture proportion of concrete (unit: kg/m³)

水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	水	减水剂
350	30	100	730	1020	168	2.8

按各试件中配筋率情况进行分类,共分 4 种情况,分别为配筋率 $\rho=0\%$ 、配筋率 $\rho=1\%$ (纵向钢筋为 4 Φ 6)、配筋率 $\rho=2\%$ (纵向钢筋为 5 Φ 8)和配筋率 $\rho=3\%$ (纵向钢筋为 7 Φ 8)的试件。腐蚀与荷载耦合作用下的试件根据加载龄期不同,分成 7d、28d 两类。

所有试件试验均在室内恒温($20\pm 3^{\circ}\text{C}$)、恒湿(环境相对湿度约为 70%)条件下进行。试验取实测混凝土轴心抗压强度的 40%作为各试件的加载应力。

1.2 试件加载装置

试验采用自行设计的加载装置,具体装置如图 1 所示。纵向钢筋的锈蚀采用恒电流加速锈蚀方法,腐蚀电流的大小根据钢筋质量锈蚀率和通电时间,由法拉第电解定律求解,具体计算过程可参考文献^[20],试验设计腐蚀与荷载耦合时间为 200d,各试件通电的电流密度及相应纵向钢筋实际锈蚀率如表 2 所示。试验时,将需要加载的试件放在自行设计的加载装置上,加载完毕后,在试件周围制作一个腐蚀槽,腐蚀溶液为 5%的 NaCl 溶液,并将试件浸泡于腐蚀溶液中。通电时,直流电源的正极与钢筋导出电线相连,负极与腐蚀溶液中的不锈钢网相连,形成电解电路。在所有圆柱体试件中心处的核心混凝土中已预埋有纵向体内应变计,用来测量试件徐变变形。



(a) 钢筋锈蚀条件下钢筋混凝土柱试件



(b) 钢筋混凝土柱对比试件

图 1 钢筋锈蚀条件下钢筋混凝土柱试件及对比试件

Fig. 1 Reinforced concrete column specimens and contrast specimens under corrosion condition

表2 纵向钢筋锈蚀率
Tab. 2 Corrosion rate of longitudinal steel

组号	配筋率	设计锈蚀率	电流密度/(mA×cm ⁻²)	实际锈蚀率
RC1	1%	0	0	0
RC2	1%	0	0	0
RC3	1%	20%	9.39×10 ⁻²	15.58%
RC4	1%	20%	9.39×10 ⁻²	12.22%
RC5	2%	0	0	0
RC6	2%	10%	6.26×10 ⁻²	7.61%
RC7	2%	20%	12.52×10 ⁻²	20.37%
RC8	2%	20%	12.52×10 ⁻²	17.87%
RC9	3%	0	0	0
RC10	3%	10%	6.26×10 ⁻²	4.53%
RC11	3%	20%	12.52×10 ⁻²	15.71%
RC12	3%	20%	12.52×10 ⁻²	15.07%

2 钢筋混凝土有效弹性模量计算分析

在长期荷载作用下,钢筋混凝土的变形会随着时间的逐渐增大,其受力状态也会发生改变。混凝土收缩、徐变都会影响结构的长期变形,其作用机理十分复杂,精确计算结构的长期变形也变得非常困难。因此,采用钢筋混凝土有效弹性模量计算结构长期变形能够使计算更加简便。

为了更加准确评估钢筋混凝土结构混凝土长期应变的发展,需要根据力学平衡关系推导有效弹性模量发展的计算公式,并与试验结果进行对比。

钢筋混凝土构件由钢筋和混凝土两种材料组成,本研究以轴心受压构件为例,根据胡克定律可知^[21,22],构件截面上混凝土的应力为:

$$\sigma_c(t) = E_c(t, t_0) \epsilon_c(t) \quad (1)$$

式中, $\sigma_c(t)$ 为截面上混凝土随时间的应力; $E_c(t, t_0)$ 为混凝土有效弹性模量; $\epsilon_c(t)$ 为混凝土随时间的应变。

截面上混凝土承受的压力为:

$$N_c(t) = A_c \sigma_c(t) = A_c E_c(t, t_0) \epsilon_c(t) \quad (2)$$

式中, A_c 为截面上混凝土面积。

截面上钢筋的应力为:

$$\sigma_s(t) = E_s(t) \epsilon_s(t) \quad (3)$$

式中, $\sigma_s(t)$ 为截面上钢筋锈蚀后的应力; $E_s(t)$ 为钢筋锈蚀后的弹性模量,根据文献[23]可知锈蚀前后钢筋的弹性模量基本不变,所以 $E_s(t) = E_s$; $\epsilon_s(t)$ 为钢筋的应变。

截面上钢筋承受的压力为:

$$N_s(t) = A_s \sigma_s(t) = A_s E_s \epsilon_s(t) \quad (4)$$

式中, A_s 为截面上钢筋锈蚀后的面积。

假定钢筋锈蚀均匀,则质量损失率与截面损失率的关系可由下式表示:

$$m = \frac{W - W_0}{W} = \frac{D^2 - D_0^2}{D^2} \quad (5)$$

所以,

$$D_0 = D \sqrt{1 - m} \quad (6)$$

式中, m 为钢筋的腐蚀率; W 为锈蚀前的钢筋质量; W_0 为锈蚀后的钢筋质量; D 为初始时钢筋的直径; D_0 为腐蚀结束时钢筋的直径。

截面上钢筋锈蚀后的面积 A_s 为:

$$A_s = \frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi D^2}{4}(1 - m) \quad (7)$$

构件截面承受的总压力为:

$$N(t) = N_c(t) + N_s(t) = A_c E_c(t, t_0) \epsilon_c(t) + A_s E_s \epsilon_s(t) \quad (8)$$

由于长期荷载在加载过程中变化很小, 计算过程中可假设长期荷载不变, 所以 $N(t) = N$ 。

假定钢筋混凝土符合变形协调条件, 即

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_s(t) = \epsilon(t) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得

$$N = N_c(t) + N_s(t) = [A_c E_c(t, t_0) + A_s E_s] \epsilon(t) \quad (10)$$

构件截面上应力为:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{A_c E_c(t, t_0) + A_s E_s}{A_c + A_s} \epsilon(t) \quad (11)$$

故钢筋混凝土有效弹性模量为:

$$E(t) = \frac{A_c E_c(t, t_0) + A_s E_s}{A_c + A_s} \quad (12)$$

整理得钢筋混凝土有效弹性模量为:

$$E(t) = \left[E_s - \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)} \right] \rho + \frac{E_c}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (13)$$

式中, $\varphi(t, t_0)$ 为混凝土徐变系数; ρ 为钢筋锈蚀后的配筋率。

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\epsilon_{cr}(t, t_0)}{\epsilon_{ce}(t_0)} = \frac{\epsilon_{cr}(t, t_0)}{\frac{\sigma_c(t_0)}{E_c}} \quad (14)$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_c + A_s} = \frac{\pi D^2 (1 - m)}{4 A_c + \pi D^2 (1 - m)} \quad (15)$$

式中, $\sigma_c(t_0)$ 为混凝土龄期 t_0 时刻加载引起的混凝土应力; $\epsilon_{ce}(t_0)$ 为 t_0 时刻由加载引起的混凝土弹性应变; $\epsilon_{cr}(t, t_0)$ 为 t_0 时刻加载至 $t(t > t_0)$ 时刻的徐变应变; E_c 为混凝土弹性模量。

3 钢筋混凝土有效弹性模量计算模型精度分析

目前, 现行对混凝土长期变形的计算大都采用按龄期调整有效模量法, 即

$$E(t, t_0) = E_c(t_0) / [1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)] \quad (15)$$

式中, $\chi(t, t_0)$ 为老化系数; $\varphi(t, t_0)$ 为混凝土徐变系数; $E_c(t_0)$ 为混凝土 t_0 时刻的弹性模量, 在通常情况下, 混凝土的弹性模量随时间的改变可以忽略不计, 采用 28d 时的弹性模量 E_c 统一表示。

根据文献[23]给出的混凝土老化系数 χ 的建议公式如下:

$$\chi(t, t_0) = \frac{1}{1 - \alpha e^{-\beta \varphi(t, t_0)}} - \frac{1}{\varphi(t, t_0)} \quad (16)$$

式中, α, β 为常数, 对于继效流动理论, $\alpha = 0.91$, $\beta = 0.686$; 对于老化理论, $\alpha = \beta = 1$ 。文献[24]建议取混凝土老化系数 $\chi = 0.8$ 。试验值与本文方法的对比结果如表 3 所示。

从表 3 的对比结果可以看出, 本文公式与试验值的相对误差在 1% 以内, 因此, 本文公式能精确计算受钢筋锈蚀影响的有效弹性模量, 以及预测复杂环境下混凝土的收缩徐变。

由图 2 可知: 钢筋混凝土柱有效弹性模量在加载初期下降速度较快, 随着时间推移逐渐达到平缓, 这是因为钢筋混凝土体内的水分挥发导致混凝土产生收缩, 混凝土体内水化反应引起的化学收缩及孔隙被压缩等因素导致钢筋混凝土试件在加载初期变形较大, 因此, 钢筋混凝土的有效弹性模量在加载初期下降的较快。本文给出的理论计算公式合理考虑了腐蚀与荷载耦合作用下对钢筋混凝土有效弹性模

量的影响,预测趋势也与试验值结果一致。随着时间的推移会产生一些偏差,这是因为钢筋的实际锈蚀是不均匀的,钢筋的强度与截面锈蚀最严重的地方有关,极端情况是钢筋锈断,但最大差值在10%以内,能够反映腐蚀与荷载耦合作用下对钢筋混凝土有效弹性模量的影响,满足实际工程需求。

表3 钢筋混凝土柱有效弹性模量本文方法计算结果与试验结果对比

Tab. 3 Effective elastic modulus of reinforced concrete columns, the comparison between this method and experimental calculation results

组号	试验值/GPa	本文方法/GPa	相对误差
RC6	23.84	23.93	-0.38%
RC7	22.10	22.16	-0.27%
RC4	21.98	21.82	0.73%
RC8	20.02	20.17	-0.75%

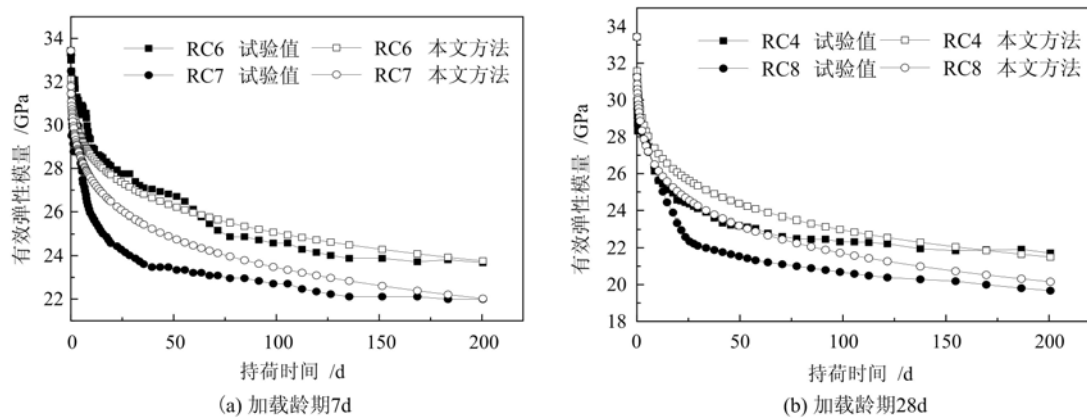


图2 本文方法与试验值的对比

Fig. 2 Comparison of calculate by equation and test value

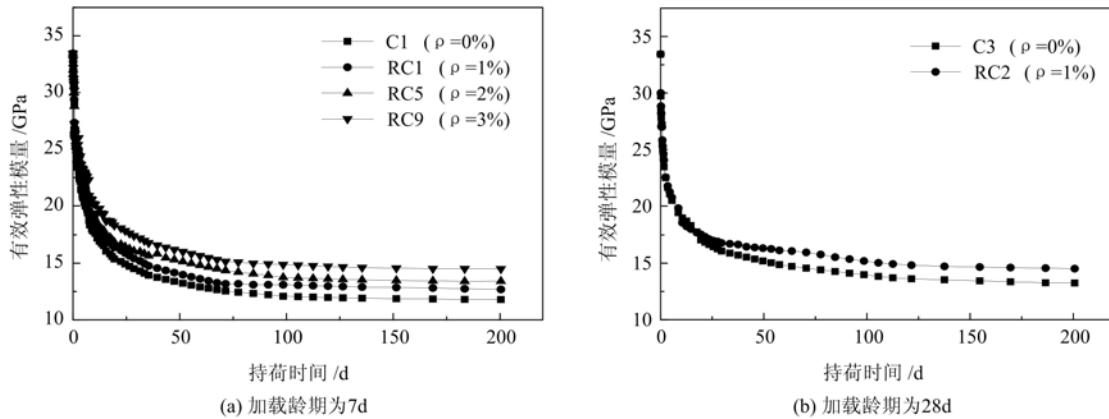


图3 配筋率对有效弹性模量的影响

Fig. 3 Influence of reinforcement ratio on effective elastic modulus

4 钢筋混凝土有效弹性模量计算模型参数影响分析

4.1 不同配筋率对有效弹性模量的影响

由图3可知:配筋率越大,钢筋混凝土柱有效弹性模量越高,相同加载龄期的钢筋混凝土试件有效弹性模量较素混凝土试件的偏大;加载龄期同为7d,配筋率为1%(RC1)、2%(RC5)、3%(RC9)的钢筋混凝土试件最小有效弹性模量分别较素混凝土试件(C1)偏大约8%、14%、23%;加载龄期同为28d,配筋率为1%(RC2)的钢筋混凝土试件最小有效弹性模量较素混凝土试件(C3)偏大约10%,由此可知,配

筋率越大,钢筋混凝土柱有效弹性模量越高。从图 3 中还可以看到,试件 RC5 有效弹性模量增大量(14%)是试件 RC1 有效弹性模量增大量的 1.75 倍,但是试件 RC5 的配筋率是试件 RC1 的 2 倍,这种现象在其他试件中也能体现出来,所以当配筋率相对较小时,钢筋混凝土柱有效弹性模量的减小速度相对缓慢,随着配筋率的增大,钢筋混凝土柱有效弹性模量的下降速度相对较快。因此,计算中合理计入配筋率对钢筋混凝土有效弹性模量的影响,对提高结构分析的精度具有重要意义。

4.2 不同腐蚀率对有效弹性模量的影响

由图 4(a)可知,C2、C4 的有效弹性模量分别大于 C1、C3 的有效弹性模量,这是因为当钢筋混凝土试件(C2、C4)处于溶液浸泡时,溶液中的水分会通过试件内的毛细孔渗入试件内,使试件内部未发生水化反应的胶凝材料继续水化,从而导致钢筋混凝土的有效弹性模量下降速率变小。由图 4(a)(b)(c)可知,配筋率相同,7d 龄期加载试件的有效弹性模量大于 28d 龄期加载试件的有效弹性模量,这是由于 7d 养护时间较短,试件内部毛细孔较多,则进入到试件内的水分越多,胶凝材料水化反应越彻底,钢筋混凝土有效弹性模量下降速率越小。但是当钢筋的配筋率达到一定量时(本试验最大配筋率达 3%),钢筋的约束作用大于毛细孔吸水产生的水化作用,将出现如图 4(d)所示 28d 龄期加载试件的有效弹性模量大于 7d 龄期加载试件的有效弹性模量。因此,配筋率与加载龄期均对钢筋混凝土有效弹性模量的变化有影响,两种影响具有叠加效应,并且这种叠加效应不只是简单的线性叠加。

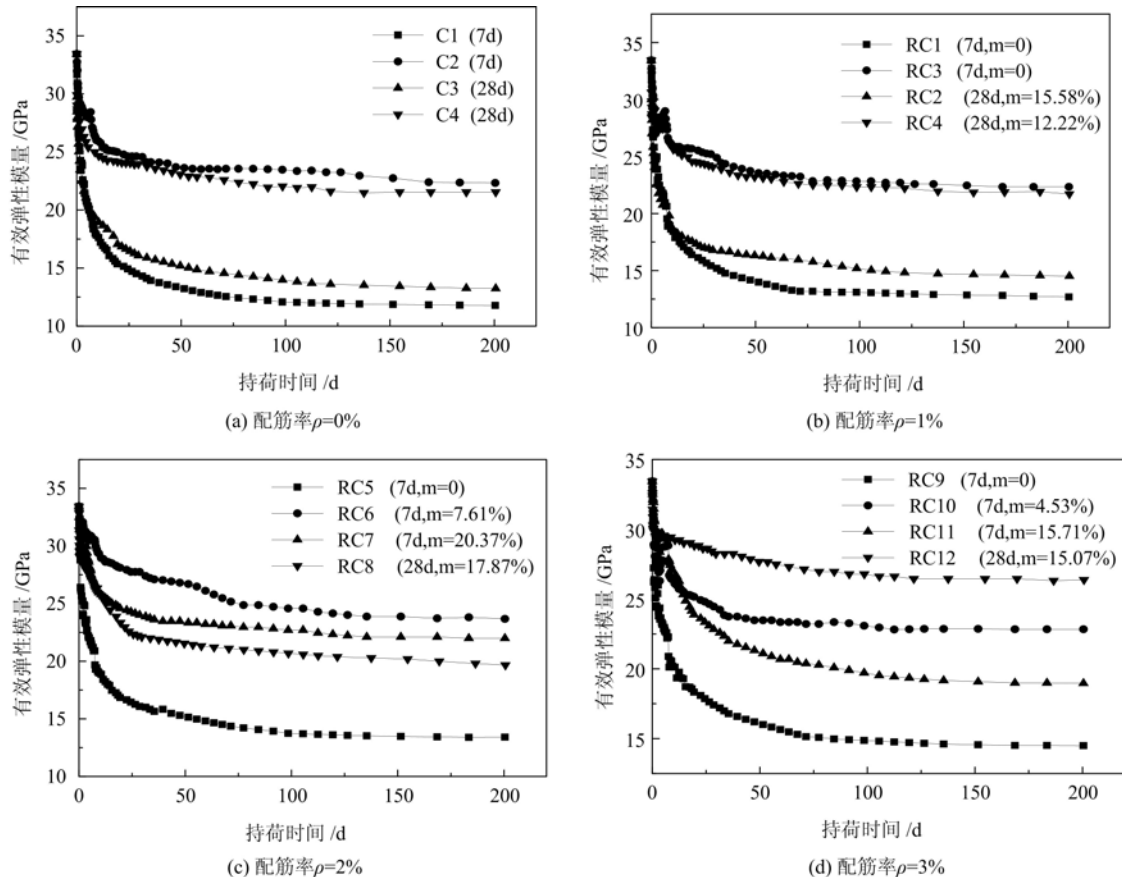


图 4 锈蚀率对有效弹性模量的影响

Fig. 4 Influence of steel corrosion ratio on effective elastic modulus

从图 4(c)各试件的有效弹性模量的变化规律可知,配筋率均为 2%,加载龄期均为 7d,RC7 的有效弹性模量(22GPa)明显小于 RC6 的有效弹性模量(24GPa)。从表 2 可知:试件 RC7 的钢筋实际锈蚀率为 20.37%,试件 RC6 的钢筋实际锈蚀率为 7.61%;这一规律同样适用于配筋率相差不大的试件,加载龄期同为 28d,配筋率为 2%的 RC8 的有效弹性模量(20GPa)明显小于配筋率为 1%的 RC4 的有效弹性模量(22GPa)。从表 2 可知:试件 RC8 的钢筋实际锈蚀率为 17.87%,试件 RC4 的钢筋实际锈蚀率为

12.22%, 这说明钢筋的实际锈蚀率越大, 则该试件的有效弹性模量越小。

5 结论

(1) 本文提出的钢筋混凝土有效弹性模量理论模型, 考虑了配筋率、钢筋锈蚀率对钢筋混凝土有效弹性模量的影响, 通过本文方法值与试验值之间的相对误差表明, 本文理论模型计算结果与试验吻合较好, 计算方法提高了复杂环境下钢筋混凝土有效弹性模量的预测精度。

(2) 加载龄期影响钢筋混凝土柱有效弹性模量, 配筋率与加载龄期对钢筋混凝土有效弹性模量均有影响, 两种影响具有叠加效应, 并且这种叠加效应不只是简单的线性叠加。钢筋锈蚀率越大, 钢筋混凝土有效弹性模量越小。

参考文献:

- [1] 谢超, 王起才, 李盛, 等. 不同水灰比、养护条件下混凝土孔结构、抗压强度与分形维数之间的关系[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12):3695—3702 (XIE Chao, WANG Qicai, LI Sheng, et al. Relations of pore fractal dimension to pore structure and compressive strength of concrete under different water to binder ratio and curing condition [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(12):3695—3702 (in Chinese))
- [2] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 科学出版社, 1998 (DU Shanyi, WANG Biao. Micromechanics of the composite[M]. Science Press, 1998 (in Chinese))
- [3] 胡更开, 郑泉水, 黄筑平. 复合材料有效弹性性质分析方法[J]. 力学进展, 2001, 31(3):361—393 (HU Gengkai, ZHENG Quanshui, HUANG Zhuping. Micromechanics methods for effective elastic properties of composite materials[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(3):361—393 (in Chinese))
- [4] Hashin Z, Shtrikman S. On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1962, 10:335—342.
- [5] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behavior of polycrystals[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1962, 10:343—352.
- [6] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1963, 11:127—140.
- [7] Mori T, Tanaka K. Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusion[J]. Acta Metall, 1973, 21:571—576.
- [8] Eshelby J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems[J]. Proceedings of Royal Society London, Serial A, 1957, 24(1):376—396.
- [9] Budiansky B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1965, 13:223—227.
- [10] Hill R. A self consistent mechanics of composite materials[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1965, 13:213—222.
- [11] Peng X, Hua N, Zheng H, et al. Evaluation of mechanical properties of particulate composites with a combined self-consistent and Mori-Tanaka approach[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41:1288—1297.
- [12] Norris A N. A differential scheme for the effective moduli of composites[J]. Mechanics of Materials, 1985, 4:1—16.
- [13] 杜丹旭. 多相材料有效性质的理论研究[D]. 清华大学, 2000 (DU Danxu. Theoretical studies on the effective properties of multiphase materials[D]. Tsinghua University, 2000 (in Chinese))
- [14] Ju J W, Chen T M. Micromechanics and effective moduli of elastic composites containing randomly dispersed ellipsoidal inhomogeneities[J]. Acta Mechanica, 1994, 103:103—121.
- [15] Ju J W, Chen T M. Effective elastic moduli of two-phase composites containing randomly dispersed spherical inhomogeneities[J]. Acta Mechanica, 1994, 103:123—144.
- [16] Lin P J, Ju J W. Effective elastic moduli of three-phase composites with randomly located and interacting spherical particles of distinct properties[J]. Acta Mechanica, 2009, 208:11—26.
- [17] Dai L H, Huang Z P, Wang R. A generalized self-consistent Mori-Tanaka scheme for prediction of the effective

- elastic moduli of hybrid multiphase particulate composites[J]. *Polymer Composites*, 1998, 19(5):506—513.
- [18] 张克波, 胡俊, 张建仁, 等. 锈蚀钢筋混凝土偏心受压构件实验及其承载力计算方法研究[J]. *实验力学*, 2010, 25(6):625—632 (ZHANG Kebo, HU Jun, ZHANG Jianren, et al. On the experiment and bearing capacity calculation of eccentrically compressed component made of corroded reinforced concrete [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(6):625—632 (in Chinese))
- [19] 吕毅刚, 张建仁, 彭晖, 等. 锈蚀钢筋混凝土双筋矩形梁抗弯承载力分析[J]. *实验力学*, 2011, 26(4):471—477 (LV Yigang, ZHANG Jianren, PENG Hui, et al. Analysis of the flexural bearing capacity of corroded reinforced concrete beams with double reinforced rectangular section[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(4):471—477 (in Chinese))
- [20] Schneider U, Piasta W G. The behaviour of concrete under Na_2SO_4 solution attack and sustained compression or bending[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1991, 43(157):281—289.
- [21] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2003 (GUO Zhenghai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese))
- [22] 屈铁军, 徐荣桓, 石云兴. 配筋率对钢筋混凝土构件弹性模量影响的试验研究[J]. *混凝土学报*, 2014(9):113—119 (QU Tiejun, XU Ronghuan, SHI Yunxing. Experimental study on influence of ratio of reinforcement to modulus of elasticity of reinforced concrete component[J]. *Concrete*, 2014(9):113—119 (in Chinese))
- [23] 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 (ZHANG Weiping, SHANG Dengfeng, GU Xianglin. Stress-strain relationship of corroded steel bars[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2006, 34(5):586—592(in Chinese))
- [24] 孙宝俊. 混凝土徐变理论的有效模量法[J]. *土木工程学报*, 1993, 26(3):66—68 (SUN Baojun. Effective modulus method for concrete creep theory[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1993, 26(3):66—68 (in Chinese))

Study on the effective elastic modulus of reinforced concrete columns subjected to corrosion and load coupling

CAO Guo-hui^{1,2}, HAN Chuan-chang², DENG Ang², TANG Huang¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China;

2. College of Civil Engineering & Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: To investigate the development rule of effective elastic modulus of reinforced concrete structures subjected to corrosion and load coupling, a long-term test on 16 reinforced concrete column specimens was carried out. The development rule of effective elastic modulus of specimens under different reinforcement ratio, steel corrosion rate and loading age was studied. The reinforcement ratio is 1%, 2% and 3% respectively, the corrosion rate of reinforcement is 0%, 10% and 20% respectively, and the loading age is 7 days and 28 days respectively. The result shows that both reinforcement ratios and loading ages have impacts on the effective elastic modulus, while effects of these two parameters are superimposed non-linearly. The effective elastic modulus decreased as steel corrosion rates increasing. A computation model of the effective elastic modulus considering effects of reinforcement ratios and steel corrosion rates is deduced by theoretical analysis methods, and its validity and applicability are proved by contrast between the model theoretical values and measured data.

Keywords: steel corrosion; effective elastic modulus; reinforcement ratio; concrete column; computation model