

高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度分析

梁永朵^{1,2}, 孙治国³, 王东升³, 司炳君⁴, 姜金征⁵

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034;

3. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 4. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

5. 辽宁省铁岭地震台, 辽宁 铁岭 112001)

摘要: 钢筋与混凝土材料的高强化是工程结构发展的重要方向,为研究配置高强钢筋的高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度,整理了37根高强钢筋高强混凝土桥墩试验数据,与 Priestley、Paulay、Telemachos 及我国《公路桥梁抗震设计细则》建议的塑性铰区长度计算公式进行了对比分析,并通过灰色关联方法分析了影响高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度的主要因素。研究表明:与试验结果相比,各公式计算值离散性较大,Paulay 公式、Telemachos 公式偏于不安全, Priestley 公式和我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》建议公式偏于保守,在影响高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度的各影响因素中,纵筋直径影响最大,其次是试件高度和截面宽度,试件轴压比和力学含掺率影响最小,高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度的主要影响因素基本符合目前的认识水平。

关键词: 高强钢筋; 高强混凝土; 桥墩; 等效塑性铰区长度; 灰关联分析

中图分类号: TU528.571 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2011)09-0049-04

Analysis of equivalent plastic hinge length of high strength concrete bridge columns reinforced with high strength rebars

LIANG Yong-duo^{1,2}, SUN Zhi-guo³, WANG Dong-sheng³, SI Bing-jun⁴, JIANG Jin-zheng⁵

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Earthquake Administration of Liaoning, Shenyang 110034, China; 3. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

4. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

5. Liaoning Tieling Seismic Station, Tieling 112001, China)

Abstract: High strength material of reinforcement and concrete is the important orientation of engineering construction development. In order to study the equivalent plastic hinge length of high-strength reinforced concrete bridge columns, 37 test results were collected and contrastive analysis on the formulae which proposed by Priestley, Paulay, Telemachos and JTG/TB 02—01—2008 were done. Influence factors which affect the equivalent plastic hinge length of high strength concrete bridge columns reinforced with high strength rebar through grey-correlation analysis method were analyzed. It is found that, compare to test results, all the proposed formulae show considerable scatter in estimating the plastic hinge of the columns. The expressions proposed by Paulay, Telemachos are not safe. While Priestley proposed formula and JTG/TB 02—01—2008 give conservative result. Among the influence factors, the diameter of longitudinal steel is the most important, secondly is the specimen length and section width. And axial load ratio and mechanical transverse steel ratio of the specimens show small influence. Main influence factors of the equivalent plastic hinge length of high-strength reinforced concrete bridge columns mostly accord with actual level.

Key words: high-strength rebar, high strength concrete, bridge columns, equivalent plastic hinge length, grey-correlation analysis

0 引言

等效塑性铰区长度是联系钢筋混凝土桥墩塑性铰区截面曲率与墩顶侧向位移之间的纽带,是桥梁抗震工程中的重要概念^[1]。由于桥墩的侧向变形能力是实现桥梁基于位移抗震设计思想的关键,因此,准确估计桥墩的等效塑性铰区长度对保证桥梁结构抗震安全至关重要^[2]。桥墩等效塑性铰区长度的系统性研究工作是由 Priestley 与 Park^[3]领导完成的,通过对不同截面形式的桥墩构件试验结果的回归分析,他们建议了与桥墩高度和纵筋直径相关的等效塑性铰区长度计算公式;其后,我国沈聚敏教授等^[4-6]、Bae 等^[7]、以及加拿大多伦多大学^[8-11]也各自进行了大量的桥墩或框架柱等效塑性铰区长度试验研究,并借助

试验结果对影响桥墩等效塑性铰区长度的若干因素进行了广泛分析与讨论。Paulay 等^[12]、Telemachos 等^[13]、以及我国新颁布的 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》^[14]均提出了不同的桥墩等效塑性铰区长度计算公式,以指导桥梁工程的抗震设计。

配置高强钢筋的高强混凝土结构是我国工程结构发展的重要方向^[15-16],注意到目前的桥墩等效塑性铰区长度计算公式都是由普通强度桥墩试件的试验结果分析得出,未涉及高强钢筋高强混凝土桥墩的计算问题。高强纵筋、高强箍筋、高强混凝土的使用均可能对桥墩等效塑性铰区长度产生明显影响并导致桥梁抗震设计的困难。本文在分析整理高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度试验结果的基础上,分析了各公式在计算

收稿日期: 2011-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978042)

高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度的适用性,并通过灰关联分析方法,明确了各影响因素对其等效塑性铰区长度的影响程度。

1 桥墩等效塑性铰区长度试验结果分析

1.1 等效塑性铰模型介绍

Priestley 和 Park^[3]提出了“等效塑性铰区长度”的概念,将图 1(a)中墩柱实际的曲率分布模式简化为图 1(b)所示的沿墩柱高度 L 线性分布的屈服曲率 φ_y 和“等效塑性铰区” L_p 内均匀分布的塑性曲率 φ_p ,并假定墩柱塑性转动集中于等效塑性铰区内,则其总侧向变形 Δ 由屈服位移 Δ_y 和塑性位移 Δ_p 组成,可表达为:

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_p = \Delta_y + (\varphi - \varphi_y)L_p \left(L - \frac{L_p}{2} \right) \quad (1)$$

根据图 1(b)的曲率分布,不难推导出:

$$\Delta_y = \frac{\varphi_y L^2}{3} \quad (2)$$

将式(1)等号两端同时除以 Δ_y ,可得:

$$\mu_\Delta = 1 + 3(\mu_\varphi - 1) \frac{L_p}{L} \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L} \right) \quad (3)$$

式中 μ_Δ ——墩柱位移延性系数,且 $\mu_\Delta = \Delta / \Delta_y$;

μ_φ ——墩柱塑性铰区截面曲率延性系数 $\mu_\varphi = \varphi / \varphi_y$;

φ ——塑性铰区截面曲率。

等效塑性铰区长度 L_p 建立了桥墩塑性铰区截面曲率与墩顶侧向位移之间的桥梁,由于目前通过理论发展桥墩的等效塑性铰区长度非常困难, L_p 值的确定更多的是通过拟静力试验手段进行。在桥墩拟静力试验过程中,通过测量墩底塑性铰区的截面曲率 φ 和墩顶的侧向位移 Δ ,可方便的计算出试件的等效塑性铰区长度 L_p ,借助于对试验结果的统计分析成为等效塑性铰区长度模型发展的重要手段。而在进行实际桥墩的弹塑性分析或抗震设计时,通过对墩柱截面的弯矩-曲率分析计算出截面的曲率值或曲率延性系数,则可由式(1)~(3)方便的计算墩顶侧向位移 Δ 或位移延性系数 μ_Δ 。

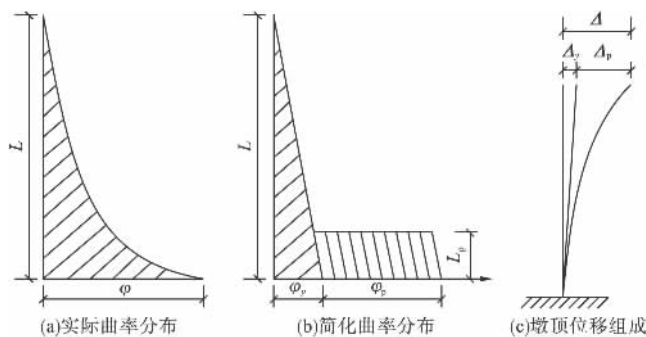


图 1 Priestley 和 Park 提出的等效塑性铰区长度模型

Priestley 和 Park^[3]提出的 L_p 长度计算公式为:

$$L_p = 0.08L + 6d_s \quad (4)$$

式中 d_s ——纵筋直径;

L ——墩柱高度。

Paulay 和 Priestley^[12]提出的 L_p 长度计算公式为:

$$L_p = 0.08L + 0.022d_s f_y \quad (5)$$

式中 f_y ——纵筋屈服强度。

Telemachos 等^[13]建议反复荷载下钢筋混凝土构件 L_p 长度的计算公式:

$$L_p = 0.12L + 0.014d_s f_y \quad (6)$$

我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》^[14]规定的 L_p 长度取以下两式计算结果较小值:

$$L_p = 0.08L + 0.022d_s f_y \geq 0.044d_s f_y \quad (7)$$

$$L_p = \frac{2}{3}b \quad (8)$$

式中 b ——矩形截面桥墩的短边尺寸或圆形截面桥墩直径。

1.2 试验结果整理与比较

选取加拿大多伦多大学^[8-11]完成的 37 个高强钢筋高强混凝土桥墩(柱)等效塑性铰区长度试验数据进行分析。选取的 37 个试验数据中,试件纵筋屈服强度在 400~521 MPa 之间,平均值为 481 MPa;箍筋屈服强度在 427~850 MPa 之间,平均值为 529 MPa;混凝土抗压强度范围为 31.3~120 MPa,平均值为 67 MPa;可以看出,选取试件均为典型的高强钢筋高强混凝土桥墩。

将试验得到的 37 个高强钢筋高强混凝土桥墩的等效塑性铰区长度分别与 Priestley 公式、Paulay 公式、Telemachos 公式及我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》建议公式分别进行对比分析,如图 2 所示。从图中可看出,按 Paulay 公式、Telemachos 公式计算的结果绝大多数大于试验值结果,由于等效塑性铰模型的主要作用在于合理估计桥墩的实际变形能力,如果按这些公式的计算值作为设计依据,将高估桥墩的变形能力,偏于不安全。Priestley 公式和我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》公式计算结果绝大多数小于试验实测值,说明规范计算结果是偏于保守的。同时也说明我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》推荐的计算公式对于高强钢筋高强混凝土桥墩仍然是适用的。

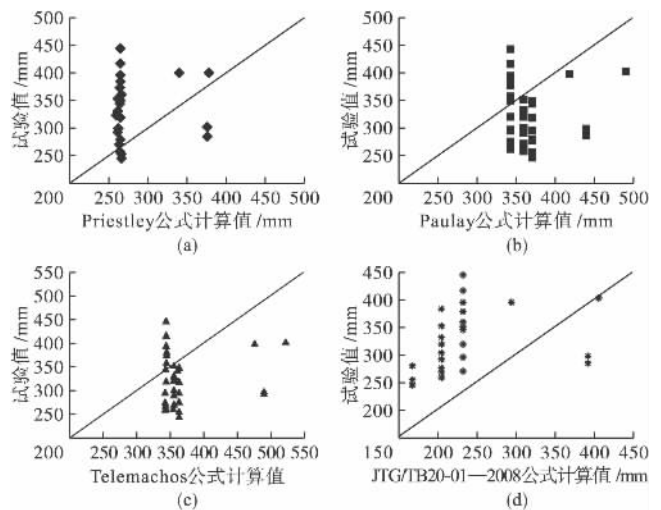


图 2 等效塑性铰区长度试验结果与计算结果的对比

2 高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度影响因素的灰关联分析

2.1 灰关联分析的基本原理及方法

灰色关联是指事物之间的不确定关联,或系统因子之间,因子对主行为之间的不确定关联,简称灰关联^[17]。灰关联分析的基本任务是分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度。描述关联程度的参数有关联系数和关联度。关联度越大,表示子数列对母数列的依赖性越强,两者之间的关系越密切。

计算关联度的步骤如下:

(1) 数列无量纲化。当各数列量纲不相同,需要将其无量

纲化,常用的方法有初值化和均值化。初值化是指所有数据均用第1个数据除,然后得到一个新的数列,而均值化处理则是用平均值去除所有数据得到一个新数列。

(2)计算各点母数列与子数列差的绝对值 $\Delta(k)$,并从中得到 Δ_{\max} 和 Δ_{\min} 。

$$\Delta(k) = |X_i'(k) - X_0'(k)| \quad (i=1, n-1, k=1, m) \quad (8)$$

式中 n ——数列数,且前 $n-1$ 为子数列,第 n 个为母数列;

m ——样本数;

Δ_{\max} —— $\Delta(k)$ 的最大值;

Δ_{\min} —— $\Delta(k)$ 的最小值。

(3)计算关联系数。计算公式采用邓聚龙教授^[7]提出的公式:

$$\xi(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (9)$$

式中 ζ ——分辨系数,一般情况下 $\zeta \in [0, 1]$,此处取 $\zeta=0.5$ 。

(4)计算关联度。计算公式如下:

$$\gamma = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi(k) \quad (10)$$

2.2 主要影响因素与塑性区长度的灰关联分析

从收集的试验数据可以看出高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性铰区长度随试件高度、截面宽度、纵筋配筋、试件轴压比、箍筋配筋等因子的变化而变化,构成了一个动态发展的灰色系统。通过对有限的试验结果的分析,可以从整体上认识各因子对塑性区长度的影响大小。实测数据如表1所示。

以初值化后的塑性区长度为母数列,试件高度、截面宽度、纵筋直径、纵筋屈服强度、试件轴压比、力学含掺率分别为子数列。由式(8)~(10),最终求得各比较数列的关联度分别为:
 $\gamma(L_p, L)=0.743$ $\gamma(L_p, h)=0.743$ $\gamma(L_p, \rho_s)=0.760$ $\gamma(L_p, f_y)=0.695$,
 $\gamma(L_p, \eta_k)=0.517$ $\gamma(L_p, \omega_{st})=0.629$ 。

表1 各因子及等效塑性铰长度实测数据

试件编号	试件高度 L/mm	截面宽度 h/mm	纵筋直径 d_s/mm	纵筋屈服强度 f_y/MPa	试件轴 压比 η_k	力学含掺率 $\omega_{st}/\%$	体积配掺率 $\rho_s/\%$	箍筋屈服强度 f_{yh}/MPa	混凝土抗压强度 f_c/MPa	塑性区长度 L_p/mm
FS-9(文献[8])	1842	305	19.0	508	0.76	26.33	1.68	507.8	32.4	259.1
ES-13(文献[8])	1842	305	19.0	508	0.76	24.07	1.69	464.4	32.6	332.7
AS-3(文献[8])	1842	305	19.0	508	0.60	25.70	1.68	507.8	33.2	292.1
AS-17(文献[8])	1842	305	19.0	508	0.77	27.26	1.68	507.8	31.3	320.0
AS-18(文献[8])	1842	305	19.0	508	0.77	43.33	3.06	464.4	32.8	302.3
AS-19(文献[8])	1842	305	19.0	508	0.47	20.44	1.30	507.8	32.3	353.1
AS-3H(文献[9])	1842	305	19.0	508	0.62	15.74	1.68	507.8	54.2	322.6
AS-18H(文献[9])	1842	305	19.0	508	0.64	25.98	3.06	464.4	54.7	271.8
AS-20H(文献[9])	1842	305	19.0	508	0.64	37.19	4.30	464.4	53.7	330.2
ES-1HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.50	20.23	3.15	463.0	72.1	351.0
AS-2HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.36	21.47	2.84	542.0	71.7	298.0
AS-3HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.50	21.44	2.84	542.0	71.8	276.0
AS-4HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.50	32.97	5.12	463.0	71.9	272.0
AS-5HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.45	19.31	4.02	489.0	101.8	262.0
AS-6HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.46	30.53	6.72	463.0	101.9	321.0
AS-7HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.45	12.29	2.72	542.0	120.0	268.0
ES-8HT(文献[10])	1842	305	19.5	454	0.47	19.44	4.29	463.0	102.2	385.0
RS-9HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.34	26.19	3.44	542.0	71.2	358.0
RS-10HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.50	26.22	3.44	542.0	71.1	444.0
RS-11HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.51	37.50	5.43	489.0	70.8	396.0
RS-12HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.34	13.99	1.83	542.0	70.9	417.0
RS-13HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.35	16.26	3.92	465.0	112.1	296.0
RS-14HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.46	16.26	3.92	465.0	112.1	351.0
RS-15HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.36	22.75	2.75	465.0	56.2	272.0
RS-16HT(文献[10])	1842	350	19.5	454	0.37	15.14	1.83	465.0	56.2	377.0
RS-17HT(文献[10])	1842	350	19.5	521	0.34	20.99	1.83	850.0	74.1	296.0
RS-18HT(文献[10])	1842	350	19.5	521	0.50	20.99	1.83	850.0	74.1	319.0
RS-19HT(文献[10])	1842	350	19.5	521	0.53	40.55	3.54	850.0	74.2	344.0
RS-20HT(文献[10])	1842	350	19.5	521	0.34	21.77	1.90	850.0	74.2	349.0
WRS-21HT(文献[10])	1842	250	19.5	521	0.47	19.96	3.92	465.0	91.3	280.0
WRS-22HT(文献[10])	1842	250	19.5	521	0.31	19.96	3.92	465.0	91.3	279.0
WRS-23HT(文献[10])	1842	250	19.5	521	0.33	25.82	3.44	542.0	72.2	256.0
WRS-24HT(文献[10])	1842	250	19.5	521	0.50	25.82	3.44	542.0	72.2	247.0
S24-2UT(文献[11])	3050	610	22.2	503	0.49	20.07	2.04	427.0	43.4	403.0
S17-3UT(文献[11])	3050	440	15.9	496	0.49	20.11	1.76	496.0	43.4	400.0
S24-4UT(文献[11])	3050	610	22.2	400	0.20	8.98	0.72	455.0	36.5	299.0
S25-5UT(文献[11])	3050	610	22.2	400	0.19	13.63	1.30	434.0	41.4	287.0

注 $\omega_{st}=\rho_s \cdot f_{yh}/f_c$ ρ_s 为体积配掺率, % f_{yh} 为箍筋屈服强度, MPa f_c 为混凝土抗压强度, MPa。

2.3 对关联分析结果的讨论

由以上分析结果所得关联序为 $0.760 > 0.743 > 0.695 > 0.629 > 0.517$ 。即：

$$\gamma(L_p, d_s) > \gamma(L_p, L) = \gamma(L_p, h) > \gamma(L_p, f_y) > \gamma(L_p, \omega_{ct}) > \gamma(L_p, \eta_f)$$

由关联序可以得到 在**高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**的各影响因子中 纵筋直径的影响权重最大 试件高度和截面宽度影响次之 试件轴压比和力学含箍率影响最小。与 Priestley 公式、Paulay 公式、Telemachos 公式及我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》建议公式相比 可以看出 高强钢筋**高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**的主要影响因素基本符合我们目前的认识。

3 结论

钢筋与混凝土材料的高强化是工程结构发展的重要方向，通过对 37 个**高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**的分析 主要结论如下：

(1) 按 Paulay 公式、Telemachos 公式计算的**高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**基本大于试验值 若按这些公式作为设计依据 偏于不安全。Priestley 公式和我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》公式计算值绝大多数小于试验值 若按这些公式作为设计依据 偏于保守。

(2) 我国 JTG/TB 02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》计算公式是适用于**高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**计算的。

(3) 在影响**高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**的各因子中 纵筋直径的影响最大 其次是桥墩高度和截面宽度，构件轴压比和力学含箍率的影响最小。**高强钢筋高强混凝土桥墩等效塑性较区长度**的主要影响因素基本符合我们目前的认识。

参考文献：

[1] 艾庆华,王东升,李宏男,等.基于塑性较模型的钢筋混凝土桥墩地

·上接第 48 页

表 2 水泥浆体组成相的固有力学性能参数^[1]

组分	弹性模量 /GPa	硬度 /GPa
C ₃ S	135.0	8.70
C ₂ S	130.0	8.00
C ₃ A	145.0	10.80
C ₄ AF	125.0	9.50
Alite	125.0	9.20
Belite	127.0	8.80
低密 C-S-J	23.0	0.88
高密 C-S-H	29.7	0.88
CH	29.1	1.00

3 结论

应用本文提出的试件制备技术 可以达到纳米压痕技术所要求的材料表面光洁度要求 并成功测定出了改性前后 C-S-H 凝胶颗粒的弹性模量与硬度 拟合结果与文献报道的结果较为接近 证明弹性模量与硬度等参数为材料的固有性质 同时也说明纳米压痕技术测定 C-S-H 凝胶的微观力学性能的科学性和可靠性。

参考文献：

[1] ZHU W Z, HUGHES J J, BICANIC N et al. Nanoindentation mapping of mechanical properties of cement paste and natural rocks[J]. Materials Characterization 2007, 58(11-12) :1189-1198.

震损伤评价[J].工程力学 2009, 26(4) :158-166.
 [2] 孙治国,王东升,郭迅,等.钢筋混凝土墩柱等效塑性较区长度研究[J].中国公路学报 2011, 24(2) :1-10.
 [3] PRIESTLEY M J N, PARK R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading[J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(1) :61-76.
 [4] 沈聚敏,翁义军,冯世平.周期反复荷载下钢筋混凝土压弯构件的性能[J].土木工程学报,1982, 3(2) :53-64.
 [5] 沈聚敏,刘竹青,翁义军.钢筋混凝土空心柱抗震性能的试验研究[J].建筑结构学报,1982, 3(5) :21-31.
 [6] 翁义军,沈聚敏,马宝民.复合箍对钢筋混凝土柱延性的改善[J].建筑结构学报,1985, 6(1) :41-47.
 [7] BAE S, BAURAK O. Plastic hinge length of reinforced concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(3) :290-300.
 [8] SHEIKH S A, KHOURY S S. Confined concrete columns with stubs[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(4) :414-431.
 [9] SHEIKH S A, SHAH D V, KHOURY S S. Confinement of high-strength concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(1) :100-111.
 [10] BAYRAK O. Seismic performance of rectilinearly confined high strength concrete columns[D]. Toronto: University of Toronto, 1998.
 [11] BAE S, BAYRAK O. Seismic performance of full-scale reinforced concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(2) :123-133.
 [12] PAULAY T, PRIESTLEY M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[M]. New York: John Wiley and Sons, 1992.
 [13] TELEMACHOS B P, MICHAEL N F. Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2) :135-148.
 [14] JTG/T B02—01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 中华人民共和国交通运输部, 2008.
 [15] 司炳君,孙治国,王东升,等.高强箍筋约束**高强混凝土柱抗震性能**研究综述[J].土木工程学报, 2009, 42(4) :1-9.
 [16] 孙治国,司炳君,王东升,等.高强箍筋**高强混凝土柱抗震性能**研究[J].工程力学, 2010, 27(5) :128-136.
 [17] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社, 1992.

作者简介：梁永朵(1978-) 女,博士研究生,工程师,主要从事结构抗震研究。
 联系地址：辽宁省沈阳市黄河北大街 44 号 辽宁省地震局后楼 113 室(110034)
 联系电话：024-86580057

[2] 任明星,李邦盛,杨闯,等.纳米压痕法测定微铸件硬度及弹性模量[J].中国有色金属学报, 2008, 18(2) :231-236.
 [3] ZHU W, BARTOS P J M. Application of depth-sensing microindentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(8) :1299-1304.
 [4] HUGHES J J, TRTIK P. Micro-mechanical properties of cement paste measured by depth-sensing nanoindentation: a preliminary correlation of physical properties with phase type[J]. Materials Characterization, 2004, 53(2-4) :223-231.
 [5] 张泰华,杨业敏.纳米硬度技术的发展和应[J].力学进展, 2002, 32(3) :349-364.
 [6] 张泰华.微/纳米力学测试技术及其应用[M].北京:机械工业出版社, 2005 :20-23.
 [7] 赵庆新,孙伟,郑克仁,等.水泥、磨细矿渣、粉煤灰颗粒弹性模量的比较[J].硅酸盐学报, 2005, 33(7) :837-841.
 [8] 张泰华.微/纳米力学测试技术及其应用[M].北京:机械工业出版社, 2004 :20-23.
 [9] 张泰华,杨业敏.纳米硬度计及其在微机电系统中的应用[J].仪器技术与应用, 2002(1) :32-37.
 [10] VANDAMME M, ULM F J, FONOLLOSA P. Nanogranular packing of C-S-H at substochiometric conditions[J]. Cem. Concr. Res. 2010, 40(1) :14-22.
 [11] KAMALI S, MORANVILLE M, GARBOCZI E G et al. Hydrate dissolution influence on the Young's modulus of cement paste in Li et al., (Eds.) Proc. Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS-V), Ia-FraMCoS, Vail, 2004.

作者简介：周栋梁(1982-) 男,硕士,主要研究方向为水泥基建筑材料。
 联系地址：江苏省南京市江宁区万安西路 59 号(211103)
 联系电话：13951990939