

# 矩形空心墩变形能力及塑性铰区约束箍筋用量

孙治国<sup>1</sup>, 王东升<sup>1</sup>, 郭 迅<sup>2</sup>, 梁永朵<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

**摘要:**为研究空心截面桥墩的变形能力和塑性铰区约束箍筋用量, 整理了71个矩形空心墩的抗震拟静力试验数据, 总结了不同破坏形态下空心墩的变形能力和现有规范对保证空心墩延性抗震能力的可靠性, 基于多元线性回归分析和相关分析讨论了影响空心墩变形能力的主要因素, 基于Caltrans规范给出了矩形空心墩塑性铰区约束箍筋用量计算公式。研究发现: Caltrans规范和ACI规范对保证矩形空心墩的弯曲破坏形态和延性变形能力具有较高的可靠性, 中国JTG/T B02-01-2008规范偏于不安全。矩形空心墩变形能力主要与塑性铰区配箍、纵筋配筋、壁厚和轴压比等因素有关, 随箍筋、纵筋配筋和壁厚增加而增加, 随轴压比增加而减少。

**关键词:**混凝土桥梁; 钢筋混凝土矩形空心墩; 变形; 约束箍筋; 延性; 极限位移角

**中图分类号:** U443.22    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2012)03-0095-08

## Deformation Capacity and Amount of Confining Reinforcement in Potential Plastic Hinge Regions of Rectangular Hollow Bridge Piers

SUN Zhiguo<sup>1</sup>, WANG Dongsheng<sup>1</sup>, GUO Xun<sup>2</sup>, LIANG Yongduo<sup>2</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, P. R. China;  
2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, P. R. China)

**Abstract:** Quasi-static test results of 71 rectangular hollow bridge piers were collected to study the deformation capacity and amount of confining reinforcement in the potential plastic hinge region of the bridge piers. The deformation capacity of the hollow bridge piers with different failure modes were analyzed, and current codes provisions for the amount of confining reinforcement in hollow bridge piers were evaluated. Then, main factors influencing the deformation capacity of the piers were discussed based on multiple linear regression analysis and correlation analysis. At last, design equations based on Caltrans code of required confining reinforcement for rectangular hollow bridge piers were proposed. It is found that both the Caltrans and ACI codes show great reliability for the flexural failure mode and deformation capacity of the hollow bridge piers while the Chinese JTG/T B02-01-2008 code is unsafe. Also, the deformation capacity of the hollow bridge piers increases with the increase of the transverse reinforcement, longitudinal reinforcement, and web width, and decreases with the increase of the axial load ratio.

**Key words:** concrete bridges; reinforced concrete rectangular hollow bridge piers; deformation; confining reinforcement; ductility; ultimate drift ratio

收稿日期: 2011-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008041、50978042); 地震行业科技专项项目资助(200808021); 中国地震局地震工程与工程振动开放试验室基金项目(2009A07); 中央高校基本科研业务费资助项目(2011JC011、2012TD015)

作者简介: 孙治国(1980-), 男, 博士生, 主要从事桥梁与结构工程抗震研究, (E-mail) szg\_1999\_1999@163.com。

王东升(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) dswang@dlmu.edu.cn。

中国已建和在建的众多大型桥梁工程中,空心截面桥墩占有相当大的比重,且较多位于高地震烈度区<sup>[1-3]</sup>,而目前尚缺乏桥梁高墩(空心墩)的震害经验,对其抗震能力认识不足,开展空心墩抗震性能的研究,对保证交通生命线安全,具有极为重要的意义。

钢筋混凝土空心墩抗震性能研究的开创性工作是由著名结构抗震专家 Park 等<sup>[4]</sup>在新西兰领导完成的,他们通过4个矩形空心墩的抗震拟静力试验,发现塑性铰区配箍满足 Caltrans 规范<sup>[5]</sup>要求的试件表现出良好的延性和耗能能力<sup>[6]</sup>。Pinto 等<sup>[7]</sup>、Calvi 等<sup>[8]</sup>、Delgado 等<sup>[9]</sup>以欧洲典型的未经抗震设计桥梁为原型,进行了一系列空心墩的抗震试验,旨在研究旧有桥梁的抗震薄弱环节,探讨空心墩抗震数值分析及抗震加固策略。日本学者 Takahashi 等<sup>[10]</sup>通过矩形空心墩的抗震试验,强调了空心墩的抗剪薄弱性和合理估计其剪切变形的重要性。中国台湾学者和美国学者结合岛内高速铁路计划,对空心墩的抗震能力进行了系统研究<sup>[11-16]</sup>。与此同时,中国宋晓东<sup>[17]</sup>、刘林<sup>[18]</sup>、郝文秀等<sup>[19]</sup>、崔海琴等<sup>[20-21]</sup>、宗周红等<sup>[22]</sup>、孙治国等<sup>[23]</sup>也进行了一系列的空心墩抗震试验研究。

现代桥梁抗震设计思想允许结构在强震下发生弹塑性变形以减少其承受的地震力,准确把握地震作用下桥墩的侧向变形能力是实现基于性能/位移抗震设计思想的重要前提<sup>[24-25]</sup>。而目前对空心墩变形能力及保证措施的研究较少,主要桥梁抗震规范对空心墩的抗震设计主要源于对实心桥墩的研究,对空心墩并无特殊规定,并由此造成了空心墩延性抗震设计的盲目性。本文在广泛总结矩形空心墩抗震试验结果的基础上,分析了不同破坏形态下矩形空心墩的变形能力及主要影响因素,讨论了现有规范对保证空心墩延性抗震能力的可靠性,最后基于 Caltrans 规范给出了不同极限位移角下矩形空心墩塑性铰区约束箍筋用量设计公式。

## 1 空心墩抗震拟静力试验数据整理及空心墩破坏模式分析

### 1.1 空心墩抗震拟静力试验数据整理

收集整理了已完成的71个矩形空心墩抗震拟静力试验数据,主要包括 Mander 在新西兰进行的空心墩抗震试验<sup>[4]</sup>,欧洲学者 Pinto<sup>[7]</sup>、Calvi 等<sup>[8]</sup>、Delgado 等<sup>[9,26]</sup>、Faria 等<sup>[27]</sup>,日本学者 Takahashi 等<sup>[10]</sup>、Kawashima 等<sup>[28-29]</sup>进行的空心墩试验数据,中国台湾学者与美国学者针对台湾高速铁路计划进

行的空心桥墩抗震拟静力试验<sup>[11-16]</sup>,以及同济大学宋晓东<sup>[17]</sup>、长安大学崔海琴等<sup>[20-21]</sup>和中国地震局工程力学研究所孙治国等<sup>[23]</sup>进行的试验数据。

71个矩形空心墩试件中,按破坏形态划分,包括42个弯曲破坏、20个弯剪破坏和9个剪切破坏试件。图1为71个空心墩试件的参数范围,可以看出,试件混凝土抗压强度  $f_c$  在20~70 MPa 之间,平均为34.2 MPa,箍筋屈服强度  $f_{y1}$  在285~700 MPa 之间,平均为415 MPa,纵筋屈服强度  $f_y$  在270~560 MPa 之间,平均为428 MPa,试件体积配箍率(扣除空心部分)为0~6.02%,平均为1.21%,纵筋配筋率  $\rho_t$ (扣除空心部分)范围为0.35%~2.53%,平均为1.74%,试件轴压比  $\eta_k$  在0~0.5 之间,平均为0.12,试件剪跨比  $\lambda$  范围为1.75~8.0,平均为3.9,空心墩壁厚比  $c$ (定义为加载方向壁厚  $t$  与1/2截面宽度的比值)范围为0.14~0.64,平均为0.42。选择的试验数据具有较好的代表性。

### 1.2 不同破坏形态下空心墩的变形能力

定义空心墩试件顶端极限位移  $\Delta_u$  与墩高  $L$  的比值为极限位移角  $DR$ ,极限位移  $\Delta_u$  与屈服位移  $\Delta_y$  之比为位移延性系数  $\mu_\Delta$ 。图2列出了不同破坏形态时空心墩试件的变形能力分布情况,可以看出,随试件由弯曲—弯剪—剪切破坏形态的变化,空心墩试件变形能力呈递减趋势。弯曲破坏试件的极限位移角  $DR$  在1.9%~6.5%之间,平均为3.8%,位移延性系数  $\mu_\Delta$  在3.4~10.3之间,平均为6.04;弯剪破坏空心墩试件  $DR$  在1.3%~4.8%之间,平均为3.0%,位移延性系数  $\mu_\Delta$  在2.5~6.0之间,平均为3.7;剪切破坏空心墩试件  $DR$  在1.3%~2.4%之间,平均为1.8%,位移延性系数  $\mu_\Delta$  在1.9~4.3之间,平均值为3.3。

## 2 现行抗震规范关于桥墩约束箍筋用量的可靠性评价

### 2.1 抗震规范规定的桥墩塑性铰区约束箍筋用量

塑性铰区约束箍筋用量对保证桥墩的弯曲破坏形态和延性变形能力具有重要意义,而目前各主要桥梁抗震设计规范对桥墩塑性铰区的箍筋用量的规定主要来源于对实心桥墩的研究,对空心墩并无特殊规定。Priestley 等<sup>[6]</sup>早期在新西兰领导的空心墩拟静力试验结果表明,塑性铰区配箍满足 Caltrans 规范<sup>[5]</sup>的矩形空心墩表现出良好的延性抗震能力,《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)<sup>[30]</sup>则规定空心墩塑性铰约束箍筋用量仍按照实心桥墩要求进行设计。本文基于试验结果对各规范的适用性进行评价。

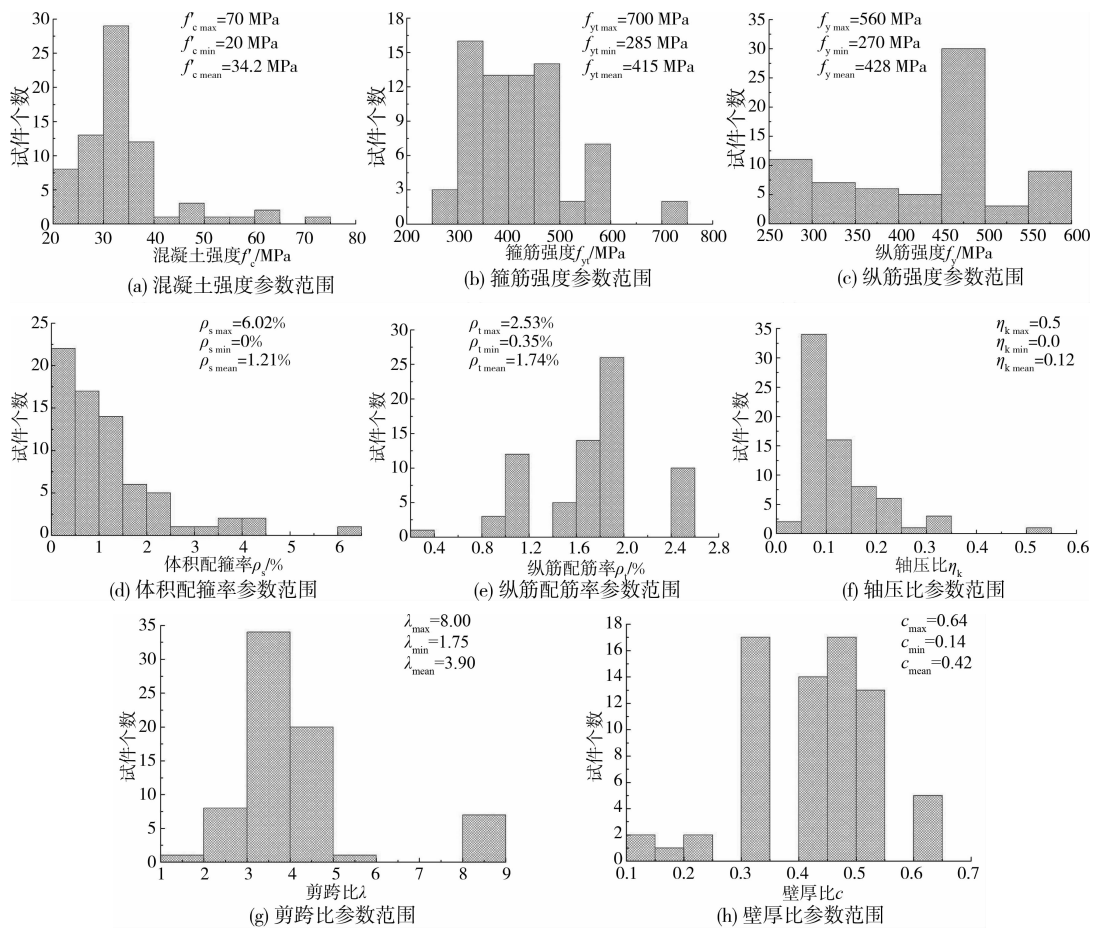


图 1 空心墩试验数据分布

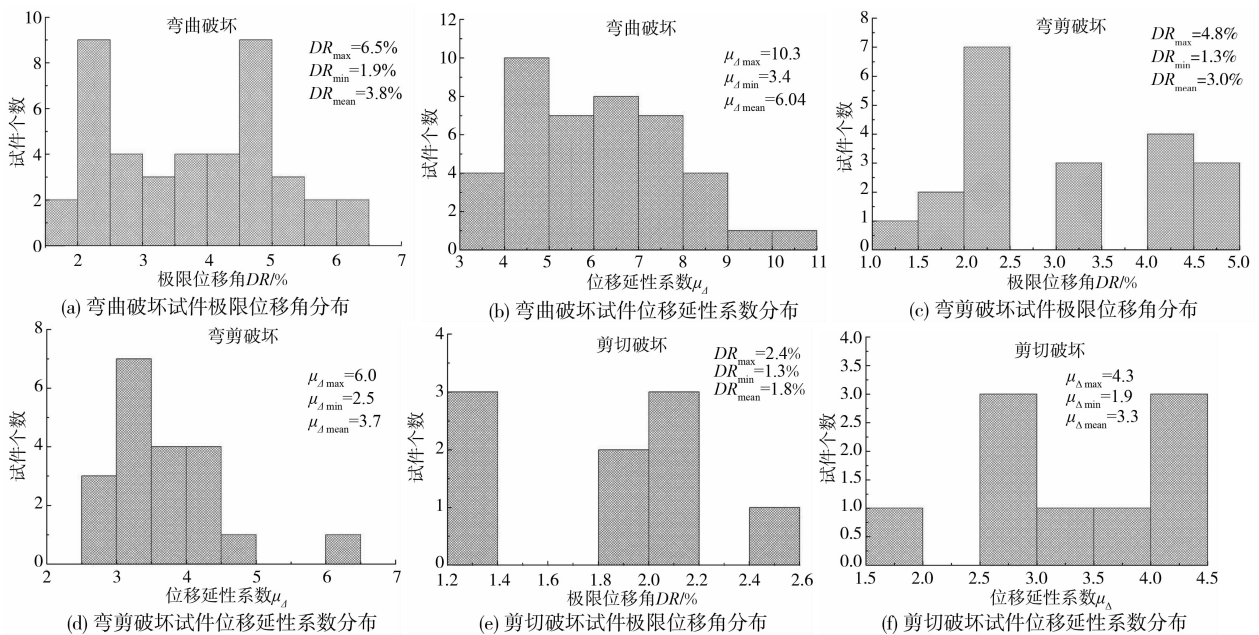


图 2 不同破坏形态下空心墩试件的变形能力

1) 美国 Caltrans 规范<sup>[5]</sup>要求的桥墩塑性铰区最低约束箍筋用量

对矩形截面桥墩,取式(1)、(2)中的大值。

$$A_{sh} = 0.30sh_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \left( 0.5 + \frac{1.25P}{f'_c A_g} \right) \quad (1)$$

$$A_{sh} = 0.12sh_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( 0.5 + \frac{1.25P}{f'_c A_g} \right) \quad (2)$$

且按式(1)、(2)计算的配箍应满足式(3),

$$A_{sh} \geq 0.30sh_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (3)$$

式中,  $A_{sh}$  为  $s$  范围内计算截面上的箍筋面积,  $h_c$  为最外侧箍筋之间的距离,  $s$  为箍筋间距,  $A_g$  为桥墩截面面积,  $A_c$  为从箍筋外缘计算的桥墩核心面积,  $P$  为轴力。

2) 美国 ACI 318-08 规范<sup>[31]</sup>要求

对矩形截面柱, 取式(4)、(5)中的大值。

$$A_{sh} = 0.3sh_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \quad (4)$$

$$A_{sh} = 0.09sh_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (5)$$

3) 《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)<sup>[30]</sup>要求的塑性铰区约束箍筋用量

矩形截面墩式(6)。

$$A_{sh}/(sh_c) = [0.1\eta_k + 4.17(\eta_k - 0.1)(\rho_c - 0.01) + 0.02] \frac{f'_c}{f_{yt}} \geq 0.004 \quad (6)$$

需要说明的是, 由于空心墩截面一般较大, 混凝土保护层对塑性铰区约束箍筋用量的影响较小, 因此对于 Caltrans 规范或 ACI 规范来讲, 决定配箍的

一般为式(2)与式(5)。

### 2.2 各规范的可靠性评价

图 3 列出了空心墩配箍与各规范的比值及各试件的破坏形态和变形能力, 若以 3% 极限位移角或位移延性系数超过 4.0 作为空心墩延性的评价指标, 可以将图 3 中的试件划分为 4 个分区, 其中 A 区中, 配箍不满足规范要求而极限位移角大于 3.0% 或位移延性系数大于 4.0, 表示规范的保守性, 而 B 区中配箍满足规范要求而极限位移角小于 3.0% 或位移延性系数小于 4.0, 表示规范的不安全性。总体来看, Caltrans 规范和 ACI 规范对保证空心墩的弯曲破坏形态和变形能力具有较高的可靠性, 配箍满足 Caltrans 规范或 ACI 规范要求的空心墩试件中, 仅有个别试件发生弯剪破坏或剪切破坏, 且试件的极限位移角和位移延性系数基本能满足延性抗震要求。相比之下, 中国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)对保证空心墩延性抗震能力可靠性偏低, 有较多试件发生弯剪破坏且极限位移角小于 3%。但若以 2% 极限位移角或位移延性系数超过 3.0 作为空心墩变形要求, 则各规范均能对空心墩变形能力提供有效保证。

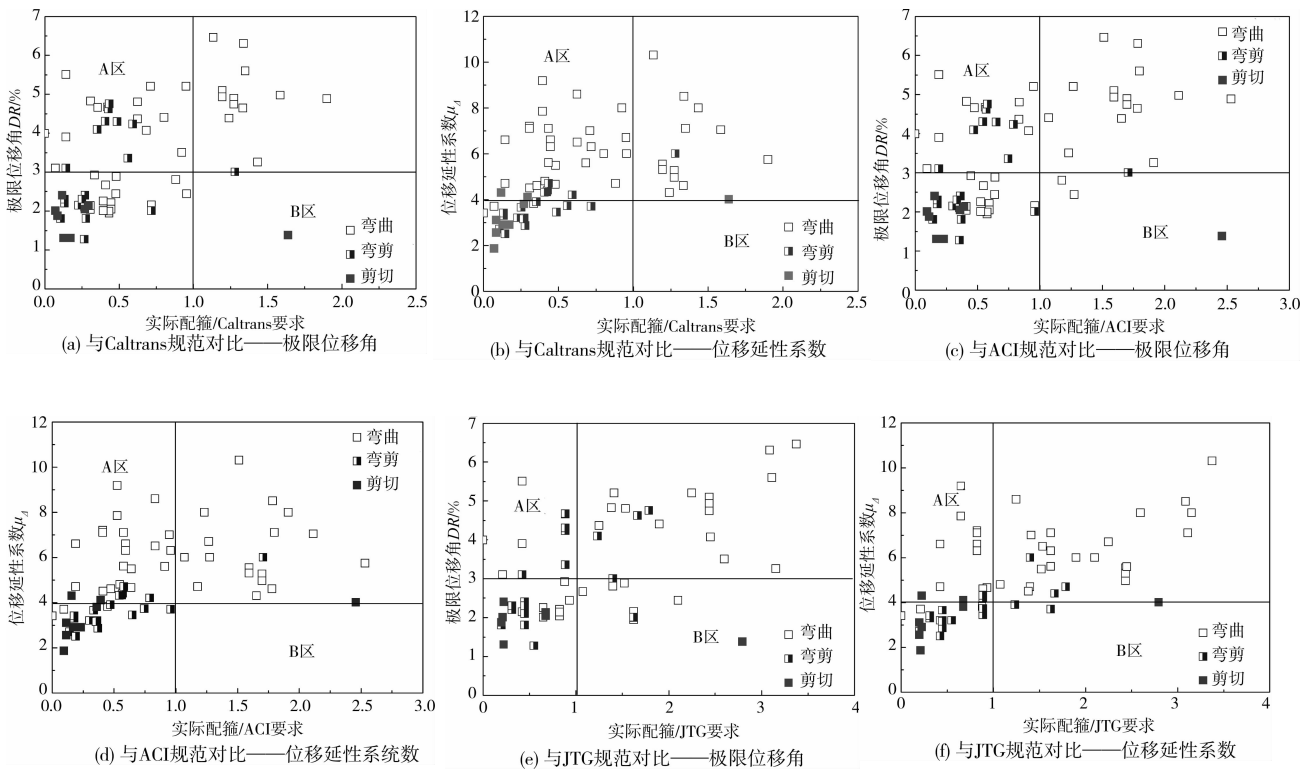


图 3 现行抗震规范对保证空心墩延性的可靠性

### 3 矩形空心墩变形能力的影响因素分析

空心墩变形能力的影响因素较为复杂,大量研究结果形成的一个基本共识为:空心墩延性抗震能力随轴压比增加而降低,随塑性铰区约束箍筋用量增加而增加,这与实心桥墩相比并无特殊之处。对其它影响因素,宋晓东<sup>[17]</sup>的拟静力试验结果表明,增加壁厚可有效提高空心墩的耗能能力和位移延性能力,而 Sheikh 等<sup>[32]</sup>通过对空心墩截面的曲率分析却发现,壁厚大小对空心墩延性几乎没有影响。本文基于多元线性回归分析和相关分析研究各因素对空心墩变形能力的影响。

#### 3.1 矩形空心墩变形能力的多元线性回归分析

回归公式见式(7),

$$DR = \alpha_1 \frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c} + \alpha_2 \rho_t m + \alpha_3 \eta_k + \alpha_4 \lambda + \alpha_5 c + \alpha_6 \quad (7)$$

式中:加载方向力学含箍率  $\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$  表示空心墩塑性铰区约束箍筋用量的影响; $\rho_{sh}$  为加载方向体积配箍率(扣除空心部分); $\rho_t m = \frac{\rho_t f_y}{0.85 f_c}$ ,表示纵筋对空心墩变形能力的影响; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$  分别为回归系数。

利用 71 个空心墩试验结果进行回归分析,结果见式(8)。

$$DR = 14.1 \frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c} + 2.59 \rho_t m - 6.78 \eta_k - 0.1 \lambda + 6.05 c + 0.33 \quad (8)$$

利用 42 个弯曲破坏试件进行回归分析,结果见式(9)。

$$DR = 10.64 \frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c} + 5.11 \rho_t m - 6.52 \eta_k - 0.1 \lambda + 3.9 c + 1.08 \quad (9)$$

式(8)与式(9)表明,尽管空心墩试件表现出不同的破坏形态,但各因素对其侧向变形能力的影响规律是一致的,即矩形空心墩侧向变形能力随加载方向力学含箍率、纵筋配筋和壁厚增加而增加,随轴压比和剪跨比增加而减少。

#### 3.2 矩形空心墩变形能力影响因素的相关分析

相关分析用以研究变量之间的联系程度,可定量描述 2 个变量之间的线性相关程度和相关方向。当相关系数  $r > 0$  时,2 个变量为正相关;当  $r < 0$  时,为负相关;一般  $|r| < 0.3$  时,视为微弱相关;当  $0.3 \leq |r| < 0.5$  时,为低度相关;当  $0.5 \leq |r| < 0.8$  时,为显著相关;当  $|r| \geq 0.8$  时,为极显著相关。对 71 个空心墩试件和 42 个弯曲破坏空心墩试

件,分别进行各影响因素与试件极限位移角间的双变量 Pearson 相关分析和偏相关分析,结果如表 1~4 所示。

从表 1 可以看出,矩形空心墩变形能力主要与壁厚比  $c$  和加载方向力学含箍率  $\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$  相关,Pearson 相关系数分别为 0.505 和 0.477。从表 2 看出,矩形空心墩变形能力主要与加载方向力学含箍率  $\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$ 、壁厚比  $c$  和轴压比  $\eta_k$  相关,偏相关系数分别为 0.686、0.618 和 -0.543。从表 3 看出,弯曲破坏矩形空心墩变形能力主要与纵筋配筋  $\rho_t m$ 、加载方向力学含箍率  $\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$  和轴压比  $\eta_k$  相关,Pearson 相关系数分别为 0.592、0.506 和 -0.410。从表 4 发现,弯曲破坏矩形空心墩变形能力主要与加载方向力学含箍率  $\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$  相关,偏相关系数为 0.606。结合表 1~4 的数据分析,可认为空心墩变形能力主要随加载方向力学含箍率、纵筋配筋和壁厚增加而增加,随轴压比增加而减少。对剪跨比的影响,各相关分析结果表示为微弱相关,可忽略不计。对比回归公式(8)和(9)中剪跨比的回归系数本身较小(均为 0.1),可认为剪跨比对矩形空心墩变形能力的影响可忽略。

对比表 1 与表 2,表 3 与表 4,Pearson 相关分析与偏相关分析结果之间可能存在一定差异,这主要是由于多变量中重叠信息的交叉影响的结果。

表 1 影响因素与极限位移角间的 Pearson 相关系数 (所有试件)

变量	Pearson 相关性	显著性(双侧)	自由度
$\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$	0.477**	0.000	71
$\rho_t m$	0.281*	0.018	71
$\eta_k$	-0.277*	0.019	71
$\lambda$	0.126	0.297	71
$c$	0.505**	0.000	71

\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 2 影响因素与极限位移角间的偏相关系数(所有试件)

变量	相关性	显著性(双侧)	自由度
$\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$	0.686	0.000	65
$\rho_t m$	0.282	0.021	65
$\eta_k$	-0.543	0	65
$\lambda$	-0.159	0.198	65
$c$	0.618	0.000	65

表3 影响因素与极限位移角间的 Pearson 相关系数  
(弯曲破坏试件)

变量	Pearson 相关性	显著性(双侧)	自由度
$\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$	0.506**	0.001	42
$\rho_{tm}$	0.592**	0.000	42
$\eta_k$	-0.410**	0.007	42
$\lambda$	-0.198	0.208	42
$c$	0.322*	0.037	42

\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表4 影响因素与极限位移角间的偏相关系数  
(弯曲破坏试件)

变量	相关性	显著性(双侧)	自由度
$\frac{\rho_{sh} f_{yt}}{f_c}$	0.606	0.000	36
$\rho_{tm}$	0.437	0.006	36
$\eta_k$	-0.49	0.002	36
$\lambda$	-0.171	0.305	36
$c$	0.484	0.002	36

## 4 矩形空心墩塑性铰区约束箍筋用量

### 4.1 建议公式的提出

对桥墩塑性铰区的最低约束箍筋用量,《公路工程抗震设计规范》(JTG 044—89)<sup>[33]</sup>规定为 0.003,汶川地震后颁布的《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)规定为 0.004,图 4 列出了发生弯曲破坏的 42 个矩形空心墩加载方向配箍率的分布情况,可以看出,大多数弯曲破坏试件加载方向的配箍率在 0.000~0.012 之间,且有较多配箍率小于 0.003 的空心墩试件仍发生了弯曲破坏,进一步结合对空心墩变形能力的研究,可认为以 0.003 作为矩形空心墩加载方向最低配箍率要求是能够保证桥墩 2% 极限位移角变形能力的。

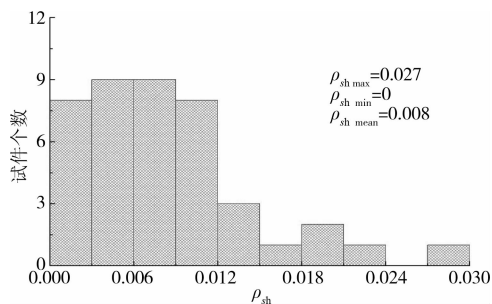
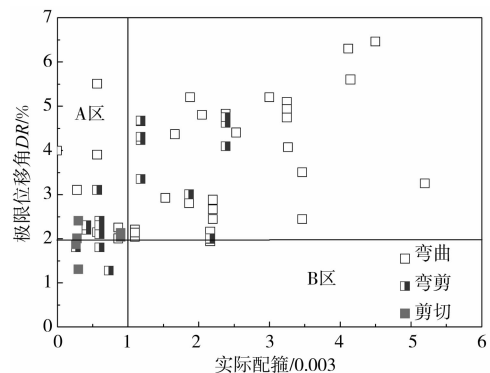


图4 弯曲破坏矩形空心墩加载方向配箍率

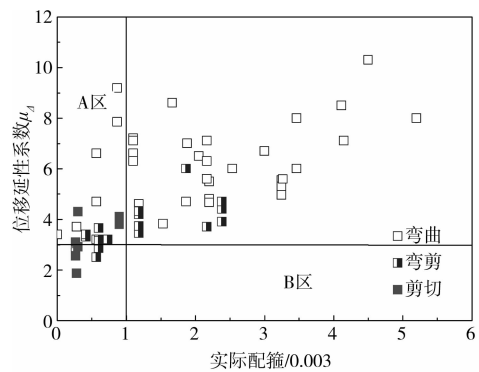
当以 3.0% 极限位移角作为空心墩延性抗震设计目标时,根据本文研究,可直接借助 Caltrans 规范,即本文式(2)进行设计。

### 4.2 建议公式的验证

图 3(a)与图 3(b)充分证实了 Caltrans 规范对保证矩形空心墩 3% 极限位移角变形能力的可靠性。这里主要验证以 0.003 作为配箍要求时,保证矩形空心墩 2% 极限位移角变形能力的可靠性。同样利用整理的 71 个矩形空心墩试验数据进行验证。图 5 为试验结果与 0.003 配箍要求的对比情况,可以看出,配箍满足 0.003 要求的空心墩试件,尽管有部分试件发生弯剪或剪切破坏,但极限位移角基本在 2% 以上,位移延性系数基本在 3.0 以上。



(a) 2% 极限位移角设计公式的验证(极限位移角)



(b) 2% 极限位移角设计公式的验证(位移延性系数)

图5 建议公式的验证

## 5 结语

1) 整理了 71 个矩形空心墩的拟静力试验结果,分析了不同破坏形态下空心墩的变形能力及主要影响因素,讨论了现有规范对保证空心墩延性抗震能力的可靠性,最后分别以 2% 和 3% 极限位移角为延性目标,基于 Caltrans 规范给出了矩形空心墩塑性铰区约束箍筋用量设计公式,可用于不同设防目标下空心墩的抗震设计。

2) 随试件由弯曲—弯剪—剪切破坏形态的变化,空心墩试件变形能力呈递减趋势。弯曲破坏试件的极限位移角在 1.9%~6.5% 之间,平均为 3.8%,位移延性系数  $\mu_{\Delta}$  在 3.4~10.3 之间,平均为

6.04;弯剪破坏空心墩试件  $DR$  在 1.3%~4.8% 之间,平均为 3.0%,位移延性系数  $\mu_{\Delta}$  在 2.5~6.0 之间,平均为 3.7;剪切破坏空心墩试件  $DR$  在 1.3%~2.4% 之间,平均为 1.8%,位移延性系数  $\mu_{\Delta}$  在 1.9~4.3 之间,平均值为 3.3。

3) Caltrans 规范和 ACI 规范对保证矩形空心墩的弯曲破坏形态和延性变形能力具有较高的可靠性,中国 JTG/T B02-01-2008 规范可靠性偏低。矩形空心墩变形能力主要与塑性铰区配箍、纵筋配筋、壁厚、轴压比等因素有关,随配箍率、纵筋配筋率和壁厚比增加而增加,随轴压比增加而减少。

#### 参考文献:

- [1] 刘健新,张伟,张茜. 洛河特大桥抗震性能计算[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 57-62.  
LIU Jianxin, ZHANG Wei, ZHANG Qian. Anti-seismic performance calculation of luohu bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 57-62.
- [2] 李建中,宋晓东,范立础. 桥梁高墩位移延性能力的探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 43-48.  
LI Jianzhong, SONG Xiaodong, FAN Lichu. Investigation for displacement ductility of tall piers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 43-48.
- [3] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1377-1387.  
ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu, JIANG Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1377-1387.
- [4] Mander J B. Seismic design of bridge piers [D]. Christchurch: University of Canterbury, 1983.
- [5] California Department of Transportation. Caltrans-2003, bridge design specifications [S].
- [6] 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.
- [7] Pinto A V, Molina J, Tsionis G. Cyclic tests on large-scale models of existing bridge piers with rectangular hollow cross-section [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(13): 1995-2012.
- [8] Calvi G M, Pavese A, Rasulo A, et al. Experimental and numerical studies on the seismic response of R. C. hollow bridge piers [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2005, 3(3): 267-297.
- [9] Delgado R, Delgado P, Poua N V, et al. Shear effects on hollow section piers under seismic actions: Experimental and numerical analysis [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2009, 7(2): 377-389.
- [10] Takahashi Y, Iemura H. Inelastic seismic performance of RC tall piers with hollow section [C]//The 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, 2000.
- [11] Mo Y L, Jeng C H. Seismic shear behavior of rectangular hollow bridge columns [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 12(4): 429-448.
- [12] Yeh Y K, Mo Y L, Yang C Y. Seismic performance of rectangular hollow bridge columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 60-68.
- [13] Mo Y L, Nien I C. Seismic performance of hollow high-strength concrete bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(6): 338-349.
- [14] Mo Y L, Wong D C, Maekawa K. Seismic performance of hollow bridge columns [J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3): 337-348.
- [15] Cheng C T, Yang J C, Yeh Y K, et al. Seismic performance of repaired hollow - bridge piers [J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(5): 339-351.
- [16] Mo Y L, Yeh Y K, Hsieh D M. Seismic retrofit of hollow rectangular bridge columns [J]. Journal of Composites for Construction, 2004, 8(1): 43-51.
- [17] 宋晓东. 桥梁高墩延性抗震性能的理论及试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [18] 刘林. 高墩大跨铁路桥梁抗震设计与减震控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2004.
- [19] 郝文秀, 钟铁毅. 活性粉末混凝土桥墩延性试验研究与数值分析 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 82-86.  
HAO Wenxiu, ZHONG Tiewei. Experimental study and numerical analysis of the ductility of reactive power concrete piers [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 82-86.
- [20] 崔海琴. 碳纤维约束空心薄壁墩抗震性能试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [21] 崔海琴, 贺拴海, 赵小星, 等. CFRP 约束空心薄壁墩抗震性能试验 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(3): 53-59.  
CUI Haiqin, HE Shuanhai, ZHAO Xiaoxing, et al. Experimental research on seismic behavior of hollow rectangular thin-walled pier confined with CFRP [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 53-59.
- [22] 宗周红, 陈树辉, 夏樟华. 钢筋混凝土箱型高墩双向拟静力试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(4): 369-374.

- ZONG Zhouhong, CHEN Shuhui, XIA Zhanghua. Bi-axial quasi-static testing research of high hollow reinforced concrete piers [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(4): 369-374.
- [23] 孙治国, 王东升, 郭迅, 等. 钢筋混凝土薄壁空心墩抗震性能试验研究[R]. 中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [24] 卓卫东, 范立础. 延性桥墩塑性铰区最低约束箍筋用量研究[J]. *土木工程学报*, 2002, 35(5): 47-51.  
ZHUO Weidong, FAN Lichu. Minimum quantity of confining lateral reinforcement in the potential plastic hinge regions of ductile bridge piers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(5): 47-51.
- [25] 孙治国, 王东升, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰区约束箍筋用量研究[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(3): 48-57.  
SUN Zhiguo, WANG Dongsheng, DU Xiuli, et al. Research on amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of RC bridge columns [J]. *China Journal of Highway and Transport* [J]. 2010, 23(3): 48-57.
- [26] Delgado P, Pouca N V, Arede A, et al. Seismic retrofit of RC hollow-section piers with shear failure [C]// The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, 2008.
- [27] Faria R, Pouca N V, Delgado R. Simulation of the cyclic behaviour of R/C rectangular hollow section bridge piers via a detailed numerical model [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004, 8(5): 725-748.
- [28] Kenmotsu Y, Kawashima K. Seismic performance of hollow reinforced concrete columns with densely confined zones [J]. *Proceeding of Japan Society of Civil Engineers*, 2001, 682: 57-69.
- [29] Kawashima K, Une H, Sakai J. Seismic performance of hollow reinforced concrete arch ribs subjected to cyclic lateral force under varying axial load [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 48A(2): 747-757.
- [30] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [31] ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [32] Sheikh M N, Vivier A, Legeron F. Seismic assessment of hollow core concrete bridge piers [C]// Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, 2007.
- [33] JTJ 004-89, 公路工程抗震设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.

(编辑 胡英奎)