

# 预应力砼 V 形墩刚构桥墩身截面弯矩一曲率分析

陈焰焰<sup>1</sup>, 代锡军<sup>2</sup>, 向天宇<sup>2</sup>

(1. 中铁四院集团西南勘察设计有限公司, 云南 昆明 650206; 2. 西华大学 土木建筑与环境学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 介绍了 V 形墩截面弯矩一曲率分析的基本理论和基本假定, 分析了砼 Mander 本构模型和钢筋应力—应变双折线模型; 以某预应力砼 V 形墩刚构桥为例, 基于砼 Mander 本构模型和钢筋应力—应变双折线模型, 应用有限元软件 MIDAS/Civil 分析 V 形墩截面的弯矩一曲率曲线, 为桥梁墩身的延性计算提供借鉴。

**关键词:** 桥梁; V 形墩刚构桥; 墩身截面; 弯矩一曲率曲线

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0104-04

延性系数是评价截面延性抗震能力的重要指标, 它根据桥墩截面塑性铰的弯矩一曲率曲线推算截面的屈服曲率和极限曲率后计算得出。对于弯矩一曲率曲线的研究, 臧博等采用纤维塑性铰模型计算了钢管砼桥墩截面弯矩一曲率关系, 并分析了套箍系数、轴压比的影响; 王冲等分析了箍筋的体积配筋率和轴压比对圆柱钢筋砼桥墩弯矩一曲率关系的影响; 丁发兴等采用实用计算方法研究了圆钢管砼压弯构件截面轴力—弯矩一曲率关系。该文以某工程为例, 分析 V 形墩截面的弯矩一曲率曲线。

## 1 材料的应力—应变关系

材料应力—应变关系的实质是材料的本构关系, 要确定桥墩截面的弹塑性, 离不开材料的本构关系。对于钢筋砼结构, 其计算结果的可靠度依赖于应力—应变关系取值的正确性和精度。

### 1.1 无约束砼

采用 Hongnestad 提出的无约束砼应力—应变关系(见图 1), 其表达式为:

$$f_c = f_{co} \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (\epsilon_c \leq \epsilon_{co}) \quad (1)$$

$$f_c = f_{co} \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{co}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{co}} \right) \right] \quad (\epsilon_{co} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (2)$$

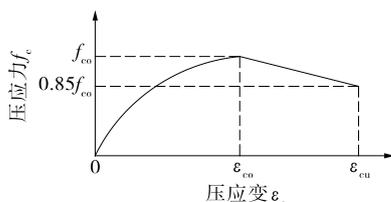


图 1 无约束砼的应力—应变关系

式中:  $f_c$  为无约束砼压应力;  $f_{co}$  为无约束砼峰值压应力, 通常取 0.85 倍立方体抗震强度;  $\epsilon_c$  为无约束砼压应变;  $\epsilon_{co}$  为无约束砼峰值压应变, 通常取 0.002;  $\epsilon_{cu}$  为无约束砼极限压应变, 通常取 0.004。

### 1.2 约束砼

采用 Mander 提出的约束砼应力—应变关系(见图 2), 其表达式如下:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x} \quad (3)$$

式中:  $f'_{cc}$  为砼峰值应力;  $x$  为应变  $\epsilon_c$  与峰值应力时应变  $\epsilon_{cc}$  的比值,  $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$ ;  $\epsilon_{cc}$  按式(4)计算;  $r$  为原点切线模量与割线模量的比值, 按式(5)计算。

$$\epsilon_{cc} = \left[ 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) + 1 \right] \epsilon_{co} \quad (4)$$

式中:  $f'_{co}$  为无约束砼的抗压强度;  $\epsilon_{co}$  为约束砼的峰值压应变。

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{scc}} \quad (5)$$

式中:  $E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}}$ ;  $E_{scc} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$ 。

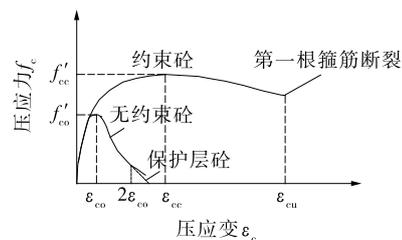


图 2 约束砼的应力—应变关系

### 1.3 钢筋

钢筋的应力—应变关系采用钢筋应力—应变双折线模型(见图 3), 其由两个线性阶段组成, 关系式

见式(6)、式(7)。

$$f_s = E \epsilon_s \quad (0 < \epsilon_s < \epsilon_y) \quad (6)$$

$$f_s = f_y + HE (\epsilon_s - \epsilon_y) \quad (\epsilon_y < \epsilon_s < \epsilon_{cu}) \quad (7)$$

式中:  $f_s$  为钢筋应力;  $E$  为钢筋弹性模量;  $\epsilon_s$  为钢筋应变;  $f_y$  为钢筋屈服应力;  $H$  为钢筋硬化系数;  $\epsilon_u$  为钢筋断裂应变;  $\epsilon_y$  为钢筋屈服应变。

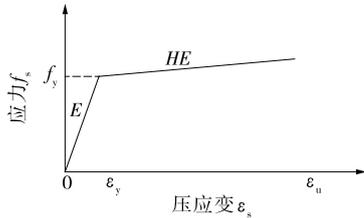


图 3 钢筋的应力—应变关系

## 2 弯矩—曲率分析的基本假定与理论

进行截面弯矩—曲率分析的基本假定:1) 不考虑砼与钢筋之间的相对滑移作用;2) 不计剪切变形的影响;3) 符合平截面假定。

进行桥墩弯矩—曲率分析时,通常认为桥墩是一种压弯构件,并假设轴压一直保持不变,有:

$$N = \int \sigma(\epsilon_y) dA + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma(\epsilon_{yi}) = \int_{core} \sigma_{core}(\epsilon_y) dA + \int_{cover} \sigma_{cover}(\epsilon_y) dA_{cover} + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma(\epsilon_{yi}) \quad (8)$$

$$M = \int \sigma(\epsilon_y) y dA + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma(\epsilon_{yi}) y_{si} = \int_{core} \sigma_{core}(\epsilon_y) y dA_{core} + \int_{cover} \sigma_{cover}(\epsilon_y) y dA_{cover} + \sum_{i=1}^n A_{si} \sigma(\epsilon_{yi}) y_{si} \quad (9)$$

式(8)、式(9)中,积分项表示砼内力的合力;求和项表示钢筋合力。通过数值积分,应用已知的砼和钢筋本构关系编制程序进行计算,即可得出截面的弯矩—曲率曲线。

## 3 工程算例分析

### 3.1 工程概况

以一座预应力砼 V 形墩刚构桥为例进行计算分析。该桥主跨跨径 80 m、边跨 60 m,采用单箱双室直腹板截面,箱梁根部梁高 2.8 m,跨中及边跨端部梁高 1.8 m,底板及梁高按圆曲线变化,半径为 253.63 m。V 腿和墩座截面均为矩形,V 腿截面为

800 cm×130 cm,墩座截面为 800 cm×380 cm。V 腿主筋采用 C28、箍筋和拉筋采用 C16,墩座主筋和箍筋都采用 C20。V 腿立面见图 4,V 腿和墩座截面配筋见图 5、图 6。

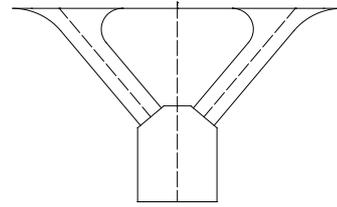


图 4 V 腿立面示意图

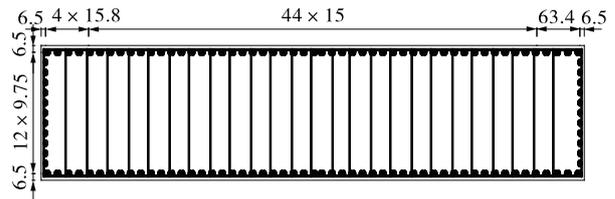


图 5 V 腿截面钢筋配置示意图(单位:cm)

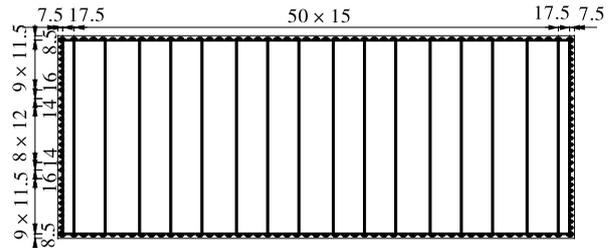


图 6 墩座截面钢筋配置示意图(单位:cm)

建立全桥 MIDAS/Civil 模型,共有 291 个节点、274 个单元(见图 7)。按图 7 所示 X 的正方向依次将桥墩命名为 3# 墩、4# 墩,墩高分别为 9.285 和 10.584 m。

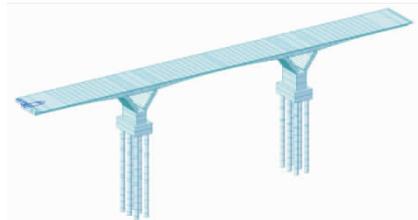


图 7 全桥 MIDAS/Civil 仿真模型

### 3.2 计算结果

墩身在自重作用下的轴力见表 1。运用应力—应变模型,采用 MIDAS/Civil 进行计算,各位置的曲率和弯矩计算结果分别见表 1、表 2,弯矩—曲率曲线见图 8~13,轴力、弯矩与曲率之间的关系分别见图 14、图 15。

表1 曲率分析结果

位置	轴力/kN	开裂曲率/ $m^{-1}$	屈服曲率/ $m^{-1}$	理想化曲率/ $m^{-1}$	极限曲率/ $m^{-1}$
3# V腿左	17 997	$4.02 \times 10^{-4}$	$2.71 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-3}$	$2.71 \times 10^{-2}$
3# V腿右	19 583	$4.05 \times 10^{-4}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{-2}$
3# 墩座	28 754	$2.33 \times 10^{-4}$	$9.49 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-3}$	$6.06 \times 10^{-3}$
4# V腿左	19 635	$4.01 \times 10^{-4}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{-2}$
4# V腿右	17 971	$4.01 \times 10^{-4}$	$2.71 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-3}$	$2.71 \times 10^{-2}$
4# 墩座	29 794	$2.33 \times 10^{-4}$	$9.61 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$	$5.99 \times 10^{-3}$

表2 弯矩分析结果

位置	轴力/kN	开裂弯矩/( $kN \cdot m$ )	屈服弯矩/( $kN \cdot m$ )	理想化屈服弯矩/( $kN \cdot m$ )	极限弯矩/( $kN \cdot m$ )
3# V腿左	17 997	$4.02 \times 10^{-4}$	$2.71 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-3}$	$2.71 \times 10^{-2}$
3# V腿右	19 583	$4.05 \times 10^{-4}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{-2}$
3# 墩座	28 754	$2.33 \times 10^{-4}$	$9.49 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-3}$	$6.06 \times 10^{-3}$
4# V腿左	19 635	$4.01 \times 10^{-4}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$2.93 \times 10^{-3}$	$2.31 \times 10^{-2}$
4# V腿右	17 971	$4.01 \times 10^{-4}$	$2.71 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-3}$	$2.71 \times 10^{-2}$
4# 墩座	29 794	$2.33 \times 10^{-4}$	$9.61 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-3}$	$5.99 \times 10^{-3}$

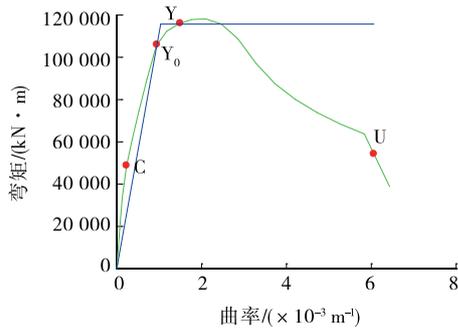


图8 3#墩墩座的弯矩—曲率曲线

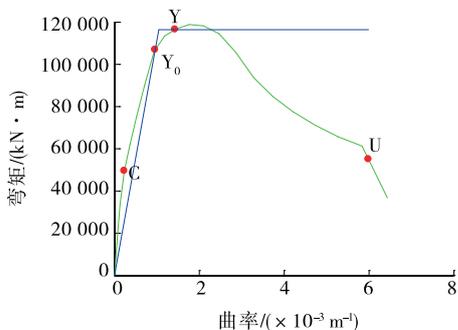


图9 4#墩墩座的弯矩—曲率曲线

曲率曲线。结果表明:轴力为 19 000 kN 左右时,V形腿截面的屈服弯矩、屈服曲率随轴力增大而增大;轴力为 29 000 kN 左右时,墩座截面屈服弯矩、屈服

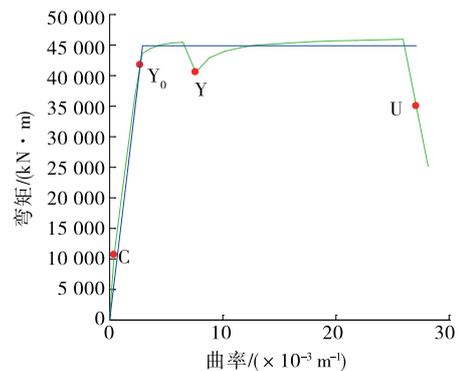


图10 3#墩V腿左的弯矩—曲率曲线

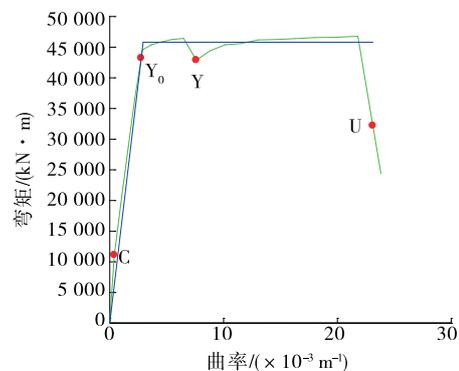


图11 3#墩V腿右的弯矩—曲率曲线

#### 4 结论

该文应用 Mander 本构关系和钢筋双折线模型,以 V 形墩刚构桥墩身截面为例,通过有限元软件 MIDAS/Civil 建立截面在固定轴力下的弯矩—

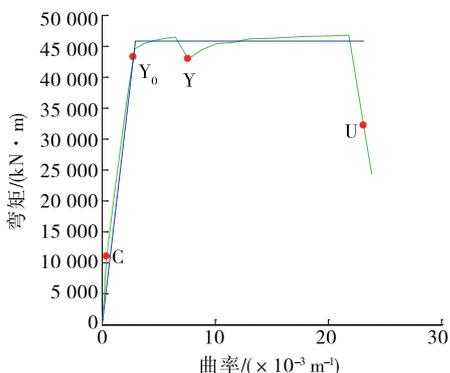


图 12 4#墩 V 腿左的弯矩—曲率曲线

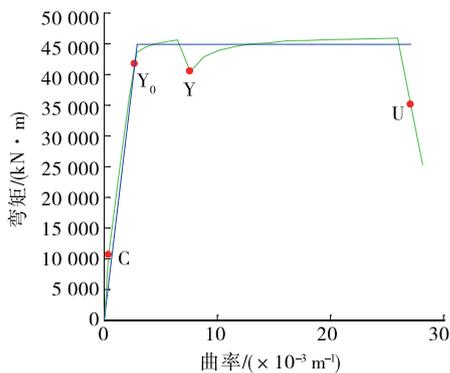


图 13 4#墩 V 腿右的弯矩—曲率曲线

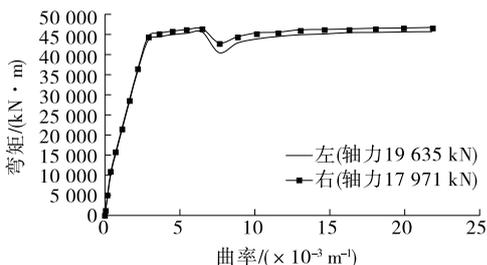


图 14 4#墩 V 腿轴力—弯矩—曲率曲线

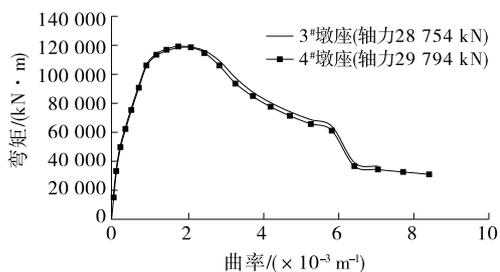


图 15 3#、4#墩墩座轴力—弯矩—曲率曲线

曲率随轴力增大而减少。

参考文献:

[1] 范立础,卓卫东.桥梁延性抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.

[2] 臧博,朱东生,冯长友,等.圆钢管混凝土桥墩弯矩—曲率关系分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(1).

[3] 王冲,胡文哲.圆柱形 RC 桥墩的弯矩—曲率曲线的研究[J].黑龙江交通科技,2015(8).

[4] 丁发兴,张鹏,余志武,等.圆钢管混凝土截面轴力—弯矩—曲率关系实用计算方法[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(12).

[5] 徐军.超高墩大跨度连续刚构桥地震响应研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.

[6] 长安大学桥梁工程系.MIDAS 抗震帮助[R].西安:长安大学,2015.

[7] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].北京:人民交通出版社,2011.

收稿日期:2018-05-25

(上接第 99 页)

都位于轮迹带处。

(3) 与正常区域相比,欠压实区域基层顶面、路基顶面动土压力偏大,最大值约为正常区域的 5 倍及以上;面层底面动应变偏大,最大值约为正常区域的 2 倍及以上。路基压实度下降对路基路面结构性能的影响较大,导致欠压实区域周围产生板底脱空及唧泥等病害。

参考文献:

[1] 刘东海,巩树涛,魏宏云.基于实时监测的高等级公路路基压实质量快速评估[J].土木工程学报,2014,47(11).

[2] 李筠.路基压实度对路面沉降规律的影响有限元分析[J].交通科技,2016(3).

[3] 单凌志.高路堤欠压实区沉降特性有限元模拟分析[J].路基工程,2012(4).

[4] 孔震宁.压实度及含水率对路基回弹模量影响规律研究[J].公路与汽运,2015(6).

[5] 范佳.路基劣化对路面力学性能影响试验研究[J].公路工程,2017,42(3).

[6] 李振存.在役高速公路路基性能评价及快速检测技术[D].长沙:长沙理工大学,2014.

[7] 李又云,谢永利,刘保健.路基压实黄土动力特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5).

收稿日期:2018-09-05