

中美规范下大跨径梁桥混凝土结合面收缩效应比较

李小祥, 石雪飞, 阮欣, 冯电视

(同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

摘要:基于中国和美国规范,研究了因混凝土龄期不同而带来的收缩特性差异对大跨径连续刚构桥典型结合面部位混凝土应力分布的影响,并分析了 2 种规范下计算结果存在较大差异的原因。结果表明:对于厚度大的混凝土构件,AASHTO 规范的收缩效应计算结果更加合理。当浇筑时间间隔较长时,结合面部位混凝土极易开裂。而依据 JTGD 62—2004 规范,混凝土不同浇筑时间间隔下,结合面的应力始终较小,而截面突变位置的应力相对更为明显。有必要对 JTGD 62—2004 中理论厚度规定一上限,建议 $h \leq 300$ mm。还提出了一些避免此类裂缝的设计和施工对策。

关键词:大跨径连续刚构桥;有限元;混凝土结合面;收缩;浇筑时间间隔;规范

中图分类号:U448.23 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0086-04

Comparison on Shrinkage Effects at Concrete Interfaces in Long-Span Girder Bridges between Chinese and American Codes

LI Xiao-xiang, SHI Xue-fei, RUAN Xin, FENG Dian-shi

(Dept. of Bridge Engineering, Tongji Univ, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Stress, due to shrinkage characteristic difference resulting from different concrete age at typical interface parts in long span rigid-frame bridges, was analyzed based on Chinese and American codes. Reasons for large discrepancy between results under the two codes were also discussed. It was shown that shrinkage stress level calculated under AASHTO was more reasonable than that under Chinese code (JTGD 62—2004) for concrete members with large thickness. Concrete at interface parts was easy to crack when casting time interval was long. According to JTGD 62—2004, stress at interfaces was always small under different casting time intervals, while stress at position with mutation section was more significant. It was necessary to set an upper limit to theoretical thickness in JTGD 62—2004, and 300 mm was recommended. Finally, some design and construction approaches were put forward.

Key words: PC rigid frame bridge; finite element method; concrete interface; shrinkage; casting time interval; codes

随着设计施工水平的不断提升,连续刚构桥正朝着高墩、大跨的趋势发展,墩身、主梁节段混凝土浇筑往往采用分段、分层的方式进行。由于浇筑混凝土龄期不同,在混凝土结合面处就会出现后浇混凝土的收缩变形受到先浇混凝土的约束作用而导致

后浇混凝土产生拉应力。如果该拉应力超过了混凝土的实时抗拉强度,就会造成后浇混凝土的开裂,对箱梁局部受力以及桥梁结构耐久性产生影响。此外,旧桥加固、拓宽改建工程中也出现了许多新旧混凝土结合面位置的开裂现象,甚至出现了加固完成

收稿日期:2009-05-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)专题课题(2007AA11Z103)

作者简介:李小祥(1981-),男,博士研究生,主要从事大跨径桥梁施工控制及结构分析,(E-mail)tjlixiaoxiang@gmail.com。

石雪飞(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)shixf@mail.fongji.edu.cn。

即发现大量裂缝的案例^[1]。对于混凝土结合面开裂问题,国内外学者的研究大都针对墩台等大体积混凝土结合部位^[2-11],而结合大跨径连续刚构桥结构特点开展的系统研究还很少。

然而,笔者在分析时发现,采用中国规范关于收缩的相关规定进行计算时,结合面位置的应力水平并不高,始终无法解释混凝土开裂现象。而采用美国规范中相关规定时的计算结果则明显高于 JTGD 62-2004,与实际情况较为吻合。为此,选取了大跨径连续刚构桥中可能出现此类裂缝的区域(墩身截面变化处、零号块主梁梁体分层处、主梁节段分段处),分别按中国和美国规范的相关规定,研究了收缩特性差异对结合面两侧混凝土应力分布的影响,并分析了2种规范下计算结果差异较大的原因,对中国规范的相关取值问题进行了探讨,最后提出了控制该类型裂缝的设计和施工对策。

1 收缩计算理论及方法

1.1 计算理论

混凝土在时刻 t 由收缩引起的应变一般表达为收缩应变终值与时间函数的乘积^[12-13]

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \epsilon_{sh, \infty} \cdot f(t - t_0) \quad (1)$$

对此,不同国家规范有不同规定,该文章将主要结合美国 AASHTO 规范^[14]与中国公路桥梁 04 规范^[15]进行分析。美国 AASHTO 提出的关于湿养护混凝土收缩应变的计算式如下:

$$\epsilon_{sh} = -k_s k_h \left(\frac{t}{35.0 + t} \right) 0.51 \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: t 表示时间, d; k_h 表示湿度系数; k_s 表示尺寸系数,与体表比 V/S 有关。

中国公路桥梁 04 规范(JTGD 62-2004)采用的计算式如下:

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad (3)$$

其中, ϵ_{cs0} 为混凝土名义收缩系数,与环境年平均相对湿度有关; $\beta_s(t - t_s)$ 与构件理论厚度 h 及混凝土龄期 t_s 有关。

1.2 考虑分段施工的有限元计算方法

对于大跨径连续刚构桥,在考虑其施工过程情况下的收缩效应有限元计算中,混凝土截面上应变变化的路径可近似地描述成如图 1 所示的时段阶梯型曲线。在时段 Δt_{j+1} 内的混凝土收缩应变可表示为:

$$\Delta \epsilon_j(\Delta t_{j+1}) = \epsilon(t_{j+1}) - \epsilon(t_j) \quad (4)$$

在有限元计算中,将每个时段的应变增量折算成温度值,通过对不同时间浇筑区域混凝土降低不

同的温度来模拟混凝土不同龄期的影响。混凝土的先后浇筑过程则采用生死单元法模拟。

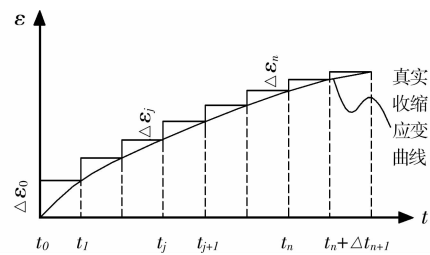


图 1 时段应变变化曲线

2 桥梁结构参数及计算说明

舟山大陆连岛工程金塘大桥东通航孔桥为 122+216+122 m 跨预应力混凝土连续刚构,桥面横向由 2 个分离的单箱单室直腹板箱梁组成,单幅箱梁顶板宽 12.3 m,桥型布置图见图 2。

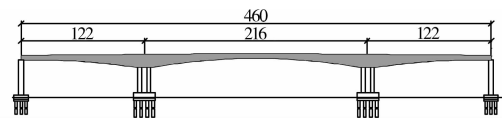


图 2 桥型布置立面图/m

有限元模型采用 ANSYS 程序建立。考虑到普通钢筋对混凝土收缩的约束作用,在建立分析模型时,同时建立普通钢筋网。主梁及墩身混凝土均采用 Solid45 单元模拟,普通钢筋网采用 Link8 单元模拟。图 3、4 为主梁零号块上下分层处和桥墩有限元模型。

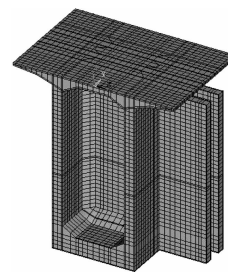


图 3 零号块有限元模型

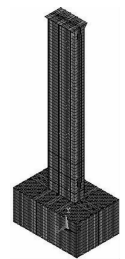


图 4 桥墩有限元模型

3 中国规范下混凝土结合面收缩效应

首先基于中国规范对不同龄期混凝土结合面的收缩效应进行分析。混凝土分段(分层)浇筑间隔时间为 7 d,计算从加载龄期至 3 a 时结合部混凝土的应力分布。计算中仅考虑混凝土收缩单独作用下结合面位置混凝土的应力响应。

3.1 节段整体收缩效应

对典型结合面节段整体效应分析发现,主梁零

号块、主梁节段和桥墩墩身的整体应力水平都不高，大部分区域主拉应力在 1 MPa 以内。这主要是由于背景工程连续刚构桥跨径较大，箱体厚度大，收缩效应相应较小，这可以从 JTGD 62-2004 规范中收缩随时间发展的系数取值中得以体现。

3.2 结合面局部收缩效应

对结合面部位混凝土的收缩效应分析表明：在零号块上下分层处、节段之间分段处等部位，结合面混凝土应力水平略高于整体应力。而对于存在明显截面突变的结合面位置，如桥墩与承台连接部位，结合面混凝土应力水平相对较为显著，主拉应力最大值达 2.4 MPa。可见，混凝土浇筑不同步引起的收缩特性差异对结合面部位应力影响较小，而截面突变的影响相对更为明显。

3.3 浇筑时间间隔对结合面收缩效应的影响

为了研究浇筑时间间隔对混凝土结合面收缩效应的影响，分别对 3 个典型结合面部位在不同浇筑时间间隔下的收缩应力变化规律进行分析。限于篇幅，且各典型部位的影响规律基本类似，该文仅以主梁零号块上下分层处为例加以说明。

图 5 比较了不同时间间隔下结合面部位混凝土的最大应力。由图可知，随着分层浇筑时间间隔的增加，收缩作用产生的结合面混凝土应力增幅不大：对比时间间隔为 3 d 和 90 d 种工况，主梁零号块上下分层处混凝土主拉应力增加仅为 10%。

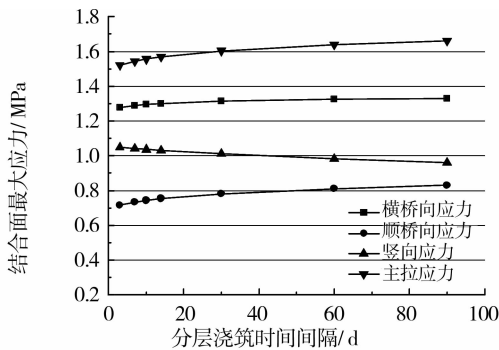


图 5 不同时间间隔下收缩应力比较

这进一步说明，依据 JTGD 62-2004 规范，混凝土不同浇筑时间间隔对结合面的应力影响较小。这一结果很难解释实际工程中在龄期差异较大的混凝土结合面位置常出现裂缝的现象，有必要对中国规范相关规定的合理性进行探讨。

4 不同规范下结合面收缩效应的比较

基于以上分析，该文将中国和美国规范下结合面混凝土的收缩应力状态进行了比较。图 6 为在

同分层浇筑时间间隔时 2 种规范下桥墩与承台结合面位置最大主拉应力比较图。

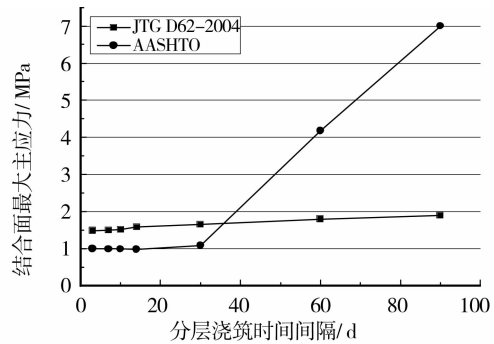


图 6 桥墩与承台结合面最大主拉应力比较

由图可见，采用 AASHTO 规范计算时，随着分层浇筑时间间隔的增加，结合面混凝土应力持续迅速增长，极易达到开裂容许应力。而采用 JTGD 62-2004 规范则增幅很小。通过对式(2)、式(3)中相关参数的分析表明：2 种规范下计算结果出现较大差异的原因主要与尺寸系数及构件理论厚度的规定不同有关。AASHTO 中规定体表比 v/s 取值不超过 150 mm，相当于 JTGD 62-2004 中构件理论厚度取为 300 mm。而在大跨径连续刚构桥结合面混凝土收缩效应分析中，当采用 JTGD 62-2004 规范计算时，构件理论厚度 ($h = 2A/u$) 取值要远远高于 300 mm。图 7 比较了 2 种规范下理论厚度取值对收缩效应计算结果的影响。由图可以看出，当混凝土构件的厚度较小时，2 种规范的计算结果相对比较接近。当厚度较大时，AASHTO 认为收缩不再随厚度的增加而减小，而按 JTGD 62-2004 计算时，收缩则随厚度的增加一直减小，这就造成 2 种规范下计算结果的差异随构件厚度的增大越来越大。因此，对于厚度较大的混凝土构件，按 JTGD 62-2004 计算的结果将偏于不安全。笔者认为，有必要对 JTGD 62-2004 中理论厚度 h 的取值规定一上限，建议规定 $h \leq 300$ mm。

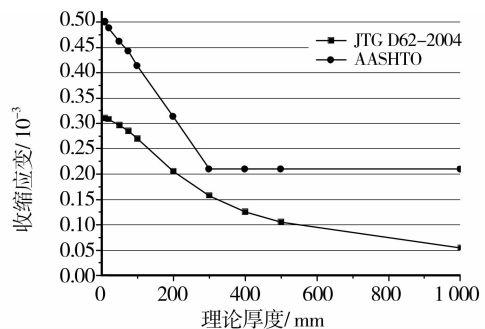


图 7 不同规范下理论厚度-收缩应变关系比较

5 结 论

针对大跨径连续刚构桥,在采用分段、分层浇筑施工时的结合面收缩效应进行了研究,并对规范取值问题进行了探讨。通过研究主要得出如下结论:

1)对于大跨径连续刚构桥,箱体厚度较大,按照 JTGD 62-2004 规范算得的结合面部位混凝土的应力水平较小,而截面突变的影响较为明显。

2)按照 AASHTO 规范计算得到的结合面混凝土应力水平要明显高于 JTGD 62-2004,这主要是因为 2 种规范对构件理论厚度取值的不同规定。对于厚度很大的混凝土构件,按 JTGD 62-2004 计算的结果将偏于不安全。笔者认为有必要对 JTGD 62-2004 中理论厚度取值的规定加以修正,建议规定 $h \leq 300$ mm。

3)在设计和施工中,对于分层、分段浇注混凝土,应尽量缩短前后浇筑时间间隔,并加强结合面部位的钢筋构造。在施工允许的情况下,将截面突变位置与混凝土分层浇筑位置错开,从而减小结合面收缩应力。

4)通过加强对先浇混凝土的养护,延滞其收缩进程或减小其收缩量,从而减小先后浇注混凝土的收缩特性差异,达到降低结合面收缩效应的目的。

参考文献:

- [1] 林宝珠. 大跨径连续箱梁加固新浇混凝土裂缝原因及控制[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 63-65, 82. LIN BAO-ZHU. Cause analysis and treatment measure on cracks in new reinforced concrete restricted by old web concrete [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5): 63-65, 82.
- [2] 孙衍福, 郭治胜, 吴大宏. 大体积混凝土桥墩裂缝分析及整治及建议[J]. 铁道工程学报, 2006(5): 67-69, 112. SUN YAN-FU, GUO ZHI-SHENG, WU DA-HONG. The reason analysis of the mass concrete Pier's crack and maintain measures and suggestions[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(5): 67-69, 112.
- [3] 刘三元, 曹阳, 王波, 等. 薄壁墩混凝土水化热及收缩徐变分析[J]. 世界桥梁 2006(3): 42-44. LIU SAN-YUAN, CAO YANG, WANG BO, et al. Analysis of concrete hydration heat, shrinkage and creep of thin-wall piers[J]. World Bridges, 2006(3): 42-44.
- [4] 李建斌, 石现峰. 预应力混凝土连续梁桥的收缩徐变分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16(2): 15-18. LI JIAN-BIN, SHI XIAN-FENG. Shrinkage and creep analysis of continuous prestressed concrete bridge[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2003, 16(2): 15-18.
- [5] 王文伟, 翁昌年, 杨威. 新老混凝土组合梁混凝土收缩徐变试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 505-510. WANG WEN-WEI, WENG CHANG-NIAN, YANG WEI. Experimental study on creep and shrinkage of old and new concrete composite beams[J]. Dongnan Daxue Xuebao, 2008, 38(3): 505-510.
- [6] SHI XUE-FEI, LI XIAO-XIANG, RUAN XIN, et al. Analysis of structural behaviour in widened concrete box girder bridges [J]. Struct Eng Int J Int Assoc Bridge Struct Eng., 2008, 18(4): 351-355.
- [7] WOLLMANN, GREGOR P, ANDERSON, ROBERT B, ROBERTS-WOLLMANN, CARIN L. Creep and shrinkage effects in spliced prestressed concrete girder bridges[J]. PCI Journal, 2003, 48(6): 92-105.
- [8] SAADEGHVAZIRI, M ALA, HADIDI, RAMBOD. Transverse cracking of concrete bridge decks; Effects of design factors[J]. J Bridge Eng., 2005, 10(5): 511-519.
- [9] TANG FANG-FU. Overlay for concrete segmental box-girder bridges[J]. J Bridge Eng, 2000, 5(4): 311-321.
- [10] KWAK, HYO-GYOUNG, SEO, YOUNG-JAE. Numerical analysis of time-dependent behavior of pre-cast pre-stressed concrete girder bridges [J]. Constr Build Mater., 2002, 16(1): 49-63.
- [11] B BARR, S B HOSEINIAN, M A BEYGI. Shrinkage of concrete stored in natural environments[J]. Cem. & Concr. Composites, 2003, 25: 19-29.
- [12] 周履, 陈永春. 收缩-徐变[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [13] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [14] The American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. 2004.
- [15] JTGD 62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

(编辑 胡 玲)