

# Optimal Selection of Loading Age for Concrete Slab of Composite Beam Bridge in Ningxia Area

Zhenye Yu

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

**Abstract:** In order to study the effect of shrinkage and creep of concrete deck on the structure of bridges in Ningxia area, the finite element model of Curved Steel-Concrete Composite continuous beams is established by using Midas/civil. The deformation, internal force and stress caused by shrinkage and creep effect under different loading ages were analyzed, and the optimum loading age was discussed. The results show that with the increase of loading age, the shrinkage and creep deflection, bending moment and beam stress decrease gradually, and the decreasing trend becomes gentle with the increase of age, and the influence of shrinkage and creep on deflection, bending moment and beam stress is not obvious from 100 days of age; the influence of loading age of concrete bridge deck on the bending moment of steel beam is small. For steel-concrete composite girder bridges in Ningxia, under the condition of limited construction period, the maintenance time of concrete deck can be reduced to about 3 months.

**Keywords:** Ningxia area; Composite beam; Shrinkage and creep; Loading age

## 宁夏地区组合梁桥混凝土板加载龄期的优化选取

余振业

重庆交通大学土木工程学院, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 为了研究混凝土桥面板收缩徐变效应对宁夏地区桥梁结构的影响, 以曲线钢混组合连续梁为工程背景, 采用 Midas/civil 建立有限元模型, 分析了不同加载龄期下收缩徐变效应产生的变形、内力和应力情况, 探讨了合理加载龄期的优化选取。研究表明: 随着加载龄期增加, 收缩徐变挠度、弯矩和梁体应力逐渐减小, 且减小趋势随龄期变化趋于平缓, 且从龄期 100d 起收缩徐变对挠度、弯矩和梁体应力的影响变化不再明显; 混凝土桥面板的加载龄期对钢梁弯矩影响较小, 但桥面板正弯矩受加载龄期的影响更为显著; 对于宁夏地区的钢混组合梁桥, 在施工工期有限的条件下, 可以考虑将混凝土桥面养护时间适当减少至 3 个月左右。

**关键词:** 宁夏地区; 组合梁; 收缩徐变; 加载龄期

### 1 引言

钢, 混凝土组合梁桥一般通过抗剪连接部件将上部混凝土桥面板与下部钢结构主梁相连, 对于双工字钢-混组合板梁桥, 在双工字钢主梁间横向通过布置一定规律的钢横梁, 以保证桥梁结构的整体受力性能。这种桥型具备钢结构和混凝土的综合优点: 自重轻、施工工期短、抗弯、抗扭刚度大、在新建桥梁和旧桥改造领域应用极其广泛, 特别适用于曲线桥、城市高架桥和立交桥等; 宁夏地区冬季长, 施工窗口期短, 按照常规预制混凝土 180 天的存梁期进行加载会导致施工周期太长, 建设成本增加, 因此需要通过分析收缩徐变对结构变形和内力以及应力的影响规律, 寻找比较合适的加载龄期, 从而提高施工效率, 节省费用,

对工程建设具有指导意义。

关于混凝土收缩徐变效应对桥梁结构的影响, 许多专家学者从不同方面也进行了相关研究。2004 年, 邱文亮等人提出了一种考虑滑移效应的组合梁收缩徐变分析的简化有限元模型, 用 ANSYS 软件运行分析, 计算结果与已有的理论计算结果和实验结果吻合, 证明了模型的可行性<sup>[1]</sup>。2008 年, 雷自学等人采用 Sap2000 商用软件仿真模拟, 分析了混凝土收缩徐变效应对曲线钢-混凝土结合箱形梁桥的影响, 发现考虑普通钢筋作用时, 收缩徐变效应使负弯矩区桥面板压应力增大, 对防止负弯矩区开裂是有利的<sup>[2]</sup>。2015 年, 卫建军等人采用 Midas/civil 有限元分析软件, 以某三跨变截面预应力混凝土连续箱梁桥为工程依托, 对连续箱梁混凝土收缩徐变效应进行参数分析, 得到

相应结论：混凝土收缩徐变所引起的连续梁的竖向位移及截面弯矩均随环境相对湿度的增大而减小；随着加载龄期的延长，混凝土收缩作用引起的连续梁竖向位移与截面弯矩总体呈增长趋势，而混凝土徐变作用引起的连续梁竖向位移与截面弯矩变化较小<sup>[3]</sup>。

当前，关于桥梁结构混凝土的收缩徐变效应在国内外已经开展了广泛研究，涉及收缩徐变模式和计算方法的机理研究也相对较完善<sup>[5] [6] [7]</sup>，但在实桥研究过程中需要考虑特定桥型和所处的自然环境，如本文所要讨论宁夏地区的钢混组合板梁桥收缩徐变效应，地理和气候特点都相对独特，地势起伏大、冬寒长、降水量少等各种环境因素均会增加收缩徐变效应的复杂性，对曲线工字钢-混组合梁有关收缩徐变的相关研究也较少。因此，本文以宁夏地区某变截面双工字钢-混组合板梁桥为工程依托，考虑在当地环境下收缩徐变对桥梁结构受力性能的影响规律，为同地区相似工程设计提供一定参考。

## 2 宁夏地区桥梁工程建设条件

宁夏回族自治区位于北纬 35°14~39°23，东经 104°17~107°39 之间，深居西北内陆高原，处于黄土高原、蒙古高原和青藏高原的交汇地带。气候类型为典型的大陆性半湿润半干旱气候，基本气候特点是：冬寒长、干旱少雨、蒸发强烈、日照充足、昼夜温差大，独特的气候、地理环境造成宁夏地区桥梁的施工建设和后期管理养护困难较多。

参照《宁夏气象》2013 年统计数据来看，宁夏全区冬季平均气温为-5°左右，冬季平均最低气温为-10.5°，冬季平均最高气温为 3°，整个冬季从 12 月到次年 2 月，持续时间大约为 3 个月<sup>[12]</sup>。按照《混

凝土结构工程施工规范》规定，混凝土拌合物入模温度不应低于-5℃，且不应高于 35℃，当室外日平均温度连续五天低于 5℃和最低气温低于-3℃时，为冬季施工，浇制混凝土应按冬季施工要求进行<sup>[15]</sup>。宁夏地区冬季平均气温明显超出规范要求，因此应尽量减少混凝土预制周期，避免冬季施工造成施工难度和成本增加。

依据中国国家统计局主编的《中国统计年鉴》中 8-8 “主要城市平均相对湿度”指标，宁夏地区 10 年间平均相对湿度约为 49%<sup>[13]</sup>，且降水量少，蒸发量大，造成相对湿度减小不利于混凝土自然养护，因此应尽量减少混凝土预制周期，降低相对湿度对收缩徐变的影响。

以上通过对宁夏地区桥梁工程建设条件的分析，宁夏地区在原有气候条件下施工建造不够合理。因此，需要采取必要的措施来优化加载龄期，从而为该地区桥梁建设创造出更大的经济效益和社会效益。

## 3 工程背景及有限元模型

大涧沟大桥为钢-混组合连续梁桥，位于宁夏海原县，主桥跨径布置为：5×30+5×30m，桥平面位于 R=400m 的右偏圆曲线上；桥面横坡为单向 4%，纵断面纵坡为-1.52%，上部结构形式采用组合钢板梁，其中钢梁采用双工字钢，桥面板采用预制钢筋混凝土板，两片工字型纵梁中心间距 5.8m，钢梁中心线处的梁高为 1.55m（标准横断面如图 1 所示）。桥面板采用钢筋混凝土结构，板厚 28cm，由预制混凝土板、横向湿接缝和纵向湿接缝三部分构成，各块预制混凝土板吊装就位后，在工地现场浇筑横向湿接缝、纵向湿接缝，通过剪力钉与钢纵梁形成组合体系。

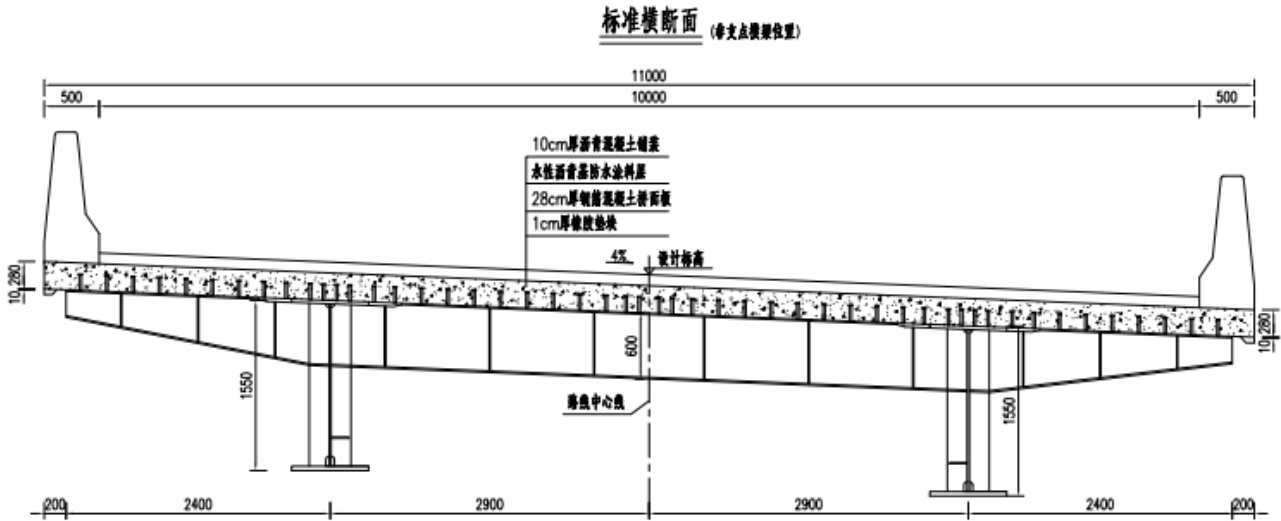


Figure 1. Standard cross section (Unit:mm)

图 1. 标准横断面 (单位: mm)

由于结构整体和荷载均对称分布, 故取第 1 联为研究对象, 采用 Midas/Civil 建立有限元模型。总体坐标系以顺桥向为 x 轴, 竖向为 z 轴, 横桥向为 y 轴; 各单元局部坐标系以单元轴向为 1 轴(从 I 节点指向 J 节点), 3 轴保持水平且垂直于 1 轴, 2 轴按右手螺旋准则确定; 钢梁、桥面板、湿接缝、均采用空间三维梁单元进行模拟; 计算模型中第 1 联结构离散为 258 个节点, 305 个单元。剪力钉和湿接缝分别用刚性连接和弹性连接模拟; 荷载主要考虑恒载和收缩徐变, 其中恒载包括构件自重、二期桥面铺装及护栏(取值 56.4kN/m), 参考海源当地气象局 2017-2018 年湿度统计数据, 将 49% 作为相对湿度, 收缩徐变计算模式参照公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2004)。

为检验 Midas/Civil 模型的正确性, 将不同施工阶段下钢梁、桥面板应力和 ANSYS 模型计算结果进行对比分析。按照施工工序, 分为四个施工阶段对进行模拟: 1) 顶推施工简化成一次落架形成连续钢梁; 2) 桥面板施工; 3) 浇筑湿接缝; 4) 施加二期荷载。图 2~3 分别给出了 Midas/Civil 和 ANSYS 模拟条件下第 1 施工阶段(钢主梁施工)钢梁顶、底缘处应力沿顺桥向的分布情况。从图中可以看出, 两者计算结果吻合度均较高。

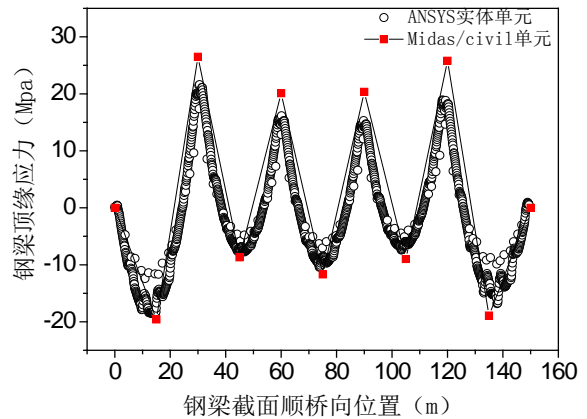


Figure 2. Stress distribution diagram at the top edge of steel main girder

图 1. 钢主梁顶缘应力分布图

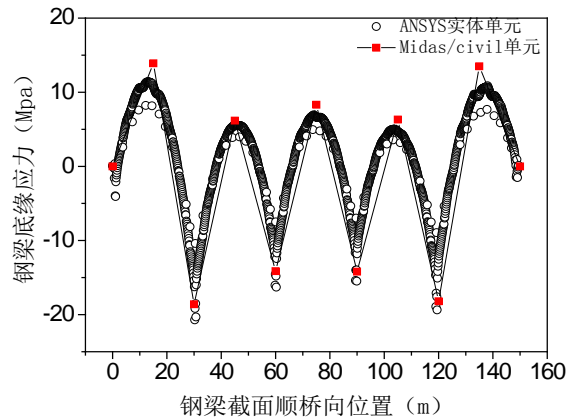


Figure 3. Stress distribution map of the bottom edge of steel main girder

图 2. 钢主梁底缘应力分布图

浇筑湿接缝后形成连续钢板组合梁，之后施加二期荷载，表 1 给出了 Midas/Civil 和 ANSYS 模拟的大涧沟大桥第 4 施工阶段(施加二期荷载)支点处湿接缝顶缘的应力结果。从表 1 中可以看出两者相差较小，最大应力误差为 10%，数值差别在合理范围内。

Table 1. Stress on the upper edge of concrete slab  
表 1. 混凝土板上缘应力

| 计算方法  | 1,2 跨支点 | 2,3 跨支点 | 3,4 跨支点 | 4,5 跨支点 |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| Midas | 1.75    | 1.60    | 1.60    | 1.80    |
| ANSYS | 1.82    | 1.76    | 1.72    | 1.86    |
| 相对误差  | 4%      | 10%     | 7.5%    | 3.4%    |

以上通过提取不同施工阶段恒载效应下的钢梁和混凝土板应力结果，与 ANSYS 分析结果形成对比，且误差均在较小范围内，进一步验证了本模型的正确性。

### 4 混凝土板加载龄期对组合梁收缩徐变效应的影响

收缩徐变在现代混凝土结构桥梁设计中是必须考虑的问题，混凝土徐变变形随时间逐渐增大，当受到外部约束，内力重分布的现象更加明显。加载龄期作为影响混凝土收缩徐变效应的主要外部因素之一，会直接影响徐变系数的取值，随着加载龄期增大，收缩徐变效应会随之减小。

为了研究不同加载龄期的混凝土板收缩徐变效应对钢混组合连续梁桥的影响，得出适应宁夏地区桥梁建设条件的合理加载龄期，在 Midas 施工阶段中定义 7 种混凝土板加载龄期，分别为：15d、30d、60d、90d、120d、150d、180d，依据《公路桥涵钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土设计规范》中规定计算徐变系数随时间的变化，得出不同龄期下混凝土板收缩徐变效应对双工字钢-混组合梁主梁挠度、内力以及应力的影响。

#### 4.1 徐变变形

为了研究不同龄期下混凝土板收缩徐变对大涧沟

大桥整体变形的影响，图 4 给出了不同龄期下主梁整体挠度变化情况，从中可以看出：随着混凝土加载龄期增加，收缩徐变产生的结构竖向位移逐渐减小，且对应截面竖向位移减小的程度逐渐降低，收缩徐变效应逐渐趋于稳定；最大负挠度对应截面为第 1 跨跨中，最大正挠度对应截面为第 2 跨跨中，其中 90 天龄期对应的最大正挠度和最大负挠度约为 15 天龄期的 81%、84%，180 天龄期下对应的位移约为 15 天龄期的 70%、74%。

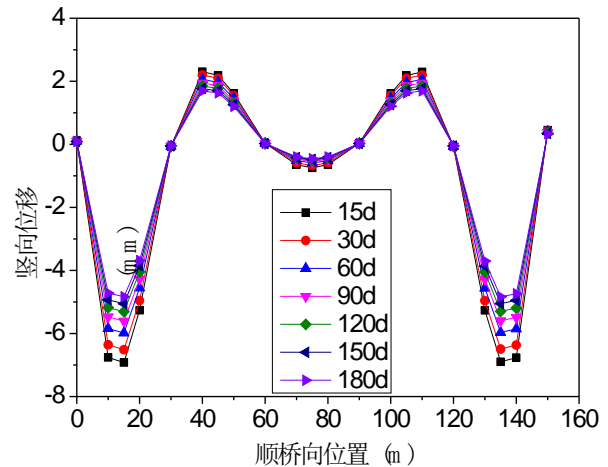


Figure 4. Deflection diagram of main girder under different loading ages

图 4. 不同加载龄期下主梁挠度变化图

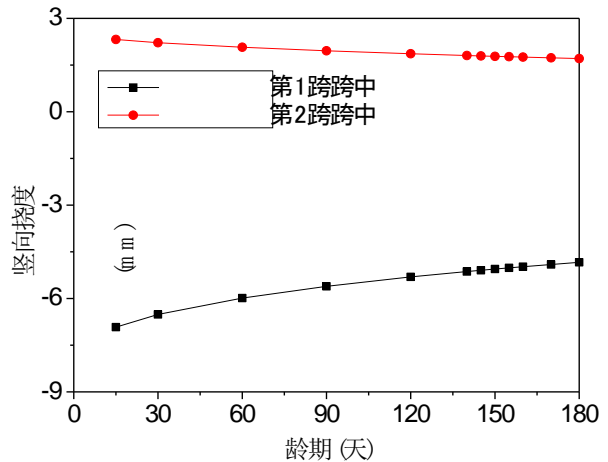


Figure 5. Curve of deflection extremum of continuous beam with loading ages

图 3. 连续梁挠度极值随加载龄期变化曲线图

为了更加准确分析收缩徐变稳定时对应的加载龄期，在 140d 和 160d 之间以 5d 的增速来加密龄期取

值,连续梁挠度最大值结果如图 5 所示,第 1 跨跨中和第 2 跨跨中的挠度均随加载龄期的增加而减小,且减小趋势随龄期变化趋于平缓,当加载龄期超过 100 天后,梁体收缩徐变挠度已趋于稳定,受加载龄期的影响已不再明显。

### 4.2 徐变内力

为了研究不同加载龄期下混凝土板收缩徐变对大涧沟大桥截面内力的影响,图 6~图 7 给出了不同龄期下钢梁、桥面板截面弯矩变化情况,从中可以看出:混凝土桥面板的加载龄期对钢梁弯矩影响较小,但随着龄期增加,混凝土桥面板收缩徐变弯矩逐渐减小,且桥面板正弯矩受加载龄期的影响更为显著。

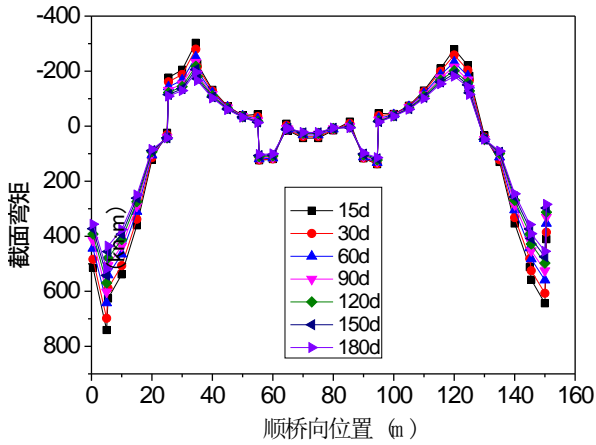


Figure 6. Bending moment changes of steel beams under different loading ages

图 4. 不同加载龄期下钢梁弯矩变化图

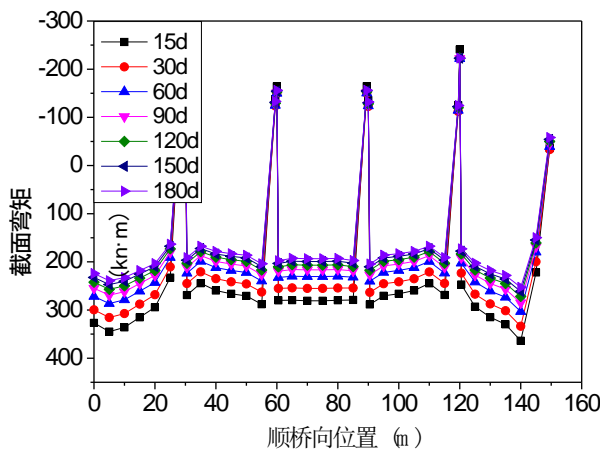


Figure 7. Bending moment changes of bridge deck under different loading ages

图 5. 不同加载龄期下桥面板弯矩变化图

为了更加准确分析收缩徐变稳定时对应的加载龄期,在 140d 和 160d 之间以 5d 的增速来加密龄期取值,结果如图 8 所示,钢梁和桥面板的内力最值均随加载龄期的增加而减小,且加载龄期从 100d 开始,梁体收缩徐变弯矩已趋于稳定,随加载龄期变化不再明显。

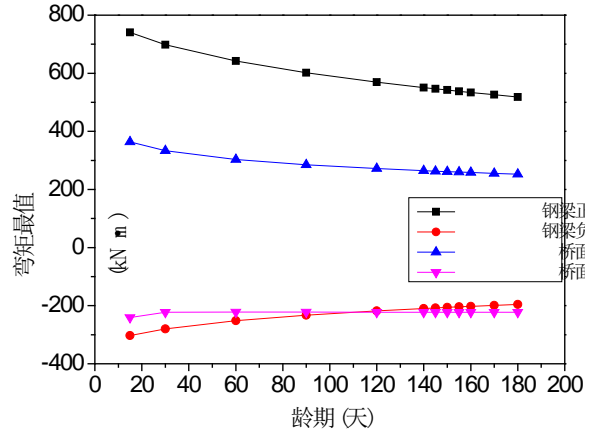


Figure 8. Curve of moment extremum of girder with loading ages

图 6. 梁体弯矩最值随加载龄期变化曲线图

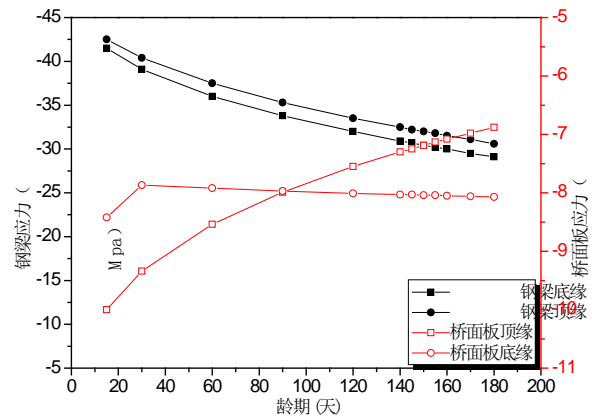


Figure 9. Diagram of variation of stress extremes with loading ages

图 9. 应力极值随加载龄期变化曲线图

### 4.3 徐变应力

为了研究不同龄期下混凝土板收缩徐变对大涧沟大桥结构应力的影响,图 9 给出了不同加载龄期条件下钢梁和混凝土板收缩徐变应力极值,从中可以看出:收缩徐变效应用于钢梁和桥面板产生的结构应力均为压应力;随着龄期增加,收缩徐变效应产生的结构应力逐渐减小,且结构应力减小的程度逐渐降低;加载龄期从 100d 开始,梁体收缩徐变应力已趋于稳

定, 随加载龄期变化不再明显。

## 5 结论

通过对宁夏地区大涧沟钢混组合梁收缩徐变效应的分析研究, 可以得到以下结论:

随着加载龄期增加, 收缩徐变挠度、弯矩和梁体应力逐渐减小, 且减小趋势随龄期变化趋于平缓, 且从龄期 100d 起收缩徐变对挠度、弯矩和梁体应力的影响变化不再明显;

混凝土桥面板的加载龄期对梁弯矩影响较小, 但桥面板正弯矩受加载龄期的影响更为显著;

对于宁夏地区的钢混组合梁桥, 在施工工期有限的条件下, 可以考虑将混凝土桥面养护时间适当减少至 3 个月左右。

## References (参考文献)

- [1] Qiu Wenliang, Jiang Meng, Zhang Zhe. Finite element method for analysis of shrinkage and creep of steel-concrete composite beams. *Engineering Mechanics*. 2004, 21(04), 162-166.  
邱文亮, 姜萌, 张哲. 钢-混凝土组合梁收缩徐变分析的有限元方法. *工程力学*. 2004, 21(04), 162-166.
- [2] Lei Zizhi, Yan Xingwei, Dong Sansheng. Effect of concrete shrinkage and creep on Curved Steel-Concrete box girder bridge. *Journal of Chang'an University*. 2008, 28(05), 77-80.  
雷自学, 晏兴威, 董三升. 混凝土收缩徐变效应对曲线钢-混凝土箱形组合梁桥的影响. *长安大学学报*. 2008, 28(05), 77-80.
- [3] Wei Jianjun. Shrinkage and creep effect of three-span prestressed concrete continuous girder bridge with variable cross-section. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*. 2015, 35(02), 192-196.  
卫建军. 三跨变截面预应力混凝土连续梁桥的收缩徐变效应. *西安科技大学学报*. 2015, 35(02), 192-196.
- [4] Liu Muyu, Cheng Tao. Effect of concrete shrinkage and creep at different ages on cable-stayed bridges with three-tower composite beams. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*. 2010, 27(03), 6-10.  
刘沐宇, 程涛. 不同龄期混凝土收缩徐变对三塔结合梁斜拉桥的影响. *华中科技大学学报*. 2010, 27(03), 6-10.
- [5] Zheng Jiang, Tong Fengfa. Comparison and analysis of the influence of loading age and humidity on concrete shrinkage and creep. *Communications Technology*. 2014, (06), 119-122.  
郑江, 童锋发. 加载龄期及湿度对混凝土收缩徐变影响比较分析. *交通科技*. 2014, (06), 119-122.
- [6] Zhang Yunbo, Song Jijun, Chen Wei. Study on shrinkage, creep and long-term deflection of continuous beam of high-speed railway. *Journal of Railway Engineering*. 2015, 32(05), 49-53.  
张运波, 宋基军, 陈伟. 高铁连续梁收缩徐变及长期挠度变化研究. *铁道工程学报*. 2015, 32(05), 49-53.
- [7] Li Xianpu. Analysis of creep effect of steel-concrete composite continuous box girder. *Shijiazhuang Railway University*. 2013.  
李献泼. 钢—混凝土双面组合连续箱梁的徐变效应分析. 石家庄铁道大学. 2013.
- [8] Yan Zhonglin. Analysis of mechanical behavior of variable cross-section steel-concrete composite continuous girder bridges. *Lanzhou JiaoTong University*. 2014.  
严忠林. 变截面钢—混凝土组合连续梁桥受力特性分析. 兰州交通大学. 2014.
- [9] Zou Zhibo. Effect of concrete shrinkage and creep on redistribution of internal forces in CFST arch-beam composite structures. *Chongqing Jiaotong University*. 2014.  
邹智波. 混凝土收缩徐变对钢管混凝土拱梁组合结构内力重分布的影响. 重庆交通大学. 2014.
- [10] Xiang Haifan. Theory of higher bridge structure. Beijing: People's transport press. 2002.  
项海帆. 高等桥梁结构理论. 北京:人民交通出版社. 2002.
- [11] Shao Xudong. Bridge engineering. 4 edition. Beijing: People's Communications Press. 2016.  
邵旭东. 桥梁工程. 4版.北京:人民交通出版社. 2016.
- [12] Dong Guoqing, Zhang Hui, Zhu Tingyan. The variation trend and abrupt change characteristics of winter temperature in recent 53 years in Ningxia. *Ningxia Meteorology*. 2017, 174(03), 28-35.  
董国庆, 张慧, 朱婷艳. 宁夏近 53 年冬季气温变化趋势及突变特征. *宁夏气象*. 2017, 174(03), 28-35.
- [13] State Statistical Bureau. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Publishing House. 2008 - 2017.  
国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2008-2017.
- [14] General specification for design of highway bridges and culverts (JTG D60-2015). Beijing: People's Communications Press. 2015.  
公路桥涵通用设计规范 (JTG D60-2015). 北京:人民交通出版社. 2015.
- [15] Technical specifications for construction of highway bridges and culverts (JTG/T F50-2011). Beijing: People's Communications Press. 2011.  
公路桥涵施工技术规范(JTG/T F50-2011). 北京: 人民交通出版社. 2011.