

Mix Design of High Performance Concrete Continuous Rigid Frame

Xinjie Jia

China Railway 15th Bureau Co., Ltd., Luoyang
Email: JXJLYL@163.com

Received: Jul. 9th, 2013; revised: Jul. 30th, 2013; accepted: Aug. 10th, 2013

Copyright © 2013 Xinjie Jia. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: High performance concrete is a new concept of concrete. It is designed and proposed on the basis of durability of concrete structures by some developed countries in the late 1980's and early 1990's. The primary design index is the durability. Different from the traditional concrete, high performance concrete with high durability, high workability, high strength and high volume stability of many excellent properties, is considered to be the development direction of concrete technology in the future. By using the method of cantilever casting, continuous rigid frame concrete not only has the above performance, but also has the early strength and pumpability. Combining the construction practice of continuous rigid frame high-performance concrete of Banshigou viaduct in Tumen-hunchun Expressway of Jilin Province, this paper introduced high-performance concrete mix design methods and design process, and put forward a number of recommendations and views about high-performance concrete mix design.

Keywords: Continuous Rigid Frame; High Performance Concrete; Mix Proportion; Design

连续刚构高性能混凝土配合比设计

贾新杰

中铁十五局集团有限公司, 洛阳
Email: JXJLYL@163.com

收稿日期: 2013年7月9日; 修回日期: 2013年7月30日; 录用日期: 2013年8月10日

摘要: 高性能混凝土是20世纪80年代末90年代初, 一些发达国家基于混凝土结构耐久性设计提出的一种全新概念的混凝土, 它以耐久性为首要设计指标。区别于传统混凝土, 高性能混凝土由于具有高耐久性、高工作性、高强度和高体积稳定性等许多优良特性, 被认为是今后混凝土技术的发展方向。连续刚构采用悬臂浇注法施工, 混凝土不仅要考虑以上性能, 还要具有早强性、可泵性。文章结合吉林省图珲高速公路板石沟高架桥连续刚构高性能混凝土的施工实践, 介绍了高性能混凝土配合比设计方法和设计过程, 并对高性能混凝土配合比设计提出了一些建议和看法。

关键词: 连续刚构; 高性能砼; 配合比; 设计

1. 引言

1.1. 总体概况

吉林省图珲高速公路板石沟高架桥为双幅分离

式桥, 左幅跨径 $(1 \times 30 + 4 \times 40) + (80 + 120 + 80)$ 米, 桥梁全长479.02米; 右幅跨径 $(3 \times 40) + (80 + 120 + 80)$ 米, 桥梁全长405.42米。上部结构主桥为 $80 + 120 + 80$ 米预应力混凝土连续刚构, 下部结构主桥主墩为双薄

壁墩，主桥边墩为 2.2×1.9 米双柱墩。板石沟高架桥连续钢构采用挂篮悬浇法施工，泵送混凝土施工工艺。主跨跨度在吉林省已建成的同类桥梁工程中跨度最大，被业主列为全线重点控制工程。

1.2. 设计标准^[1]

荷载等级：公路-I级。

设计洪水频率：1/100。

桥梁净宽：该桥位于分幅路基段落内，单幅桥梁全宽： $0.65 \text{ 米} + \text{净} 10.95 \text{ 米} + 0.65 \text{ 米} = 12.25 \text{ 米}$ 。

桥面横坡：单向横坡 2.0%。

混凝土标号：连续刚构 C50。

2. 泵送高性能 C50 混凝土的技术要求

2.1. 泵送混凝土坍落度要求

为达到高效快速浇筑混凝土，满足混凝土和易性、泌水性、保水性等施工性能；同时为满足泵送混凝土施工工艺要求，在配置高性能 C50 泵送混凝土时，坍落度设计为：160~180 mm。

2.2. 泵送混凝土强度要求

板石沟高架桥连续刚构混凝土强度等级为 C50。根据《现代混凝土配合比设计手册》一书^[2]可知，在配制 C50 高性能泵送混凝土时，掺入高效减水剂，使混凝土在保证坍落度要求的前提下大幅降低水灰比，从而起到提高混凝土强度的要求。

2.3. 混凝土耐久性基本要求

根据《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000)^[3]，结合设计要求，预应力混凝土构件中的最大氯离子含量为 0.06%，最小水泥用量为 350 Kg/m^3 ，最大水泥用量不宜超过 500 Kg/m^3 ，最低混凝土强度等级为 C50。特大桥和大桥(以单孔跨径确定)混凝土中最大碱含量不宜大于 1.8 Kg/m^3 。

2.4. 混凝土早强性要求

板石沟高架桥是图珲高速公路控制工期的工程。主跨设计为 $80 + 120 + 80$ 米连续钢构，采用挂篮悬臂浇筑法施工。其施工进度快慢，除了合理安排平行及流水作业外，缩短节段施工周期至关重要。设计要

求，混凝土达到设计强度 100%时，方可进行预应力钢绞线张拉。为此，在进行配合比设计时，需提高混凝土早期强度，要求 7 d 强度达到 50 Mpa 以上。

3. 泵送高性能混凝土配合比设计

板石沟高架桥连续刚构采用挂篮悬臂浇筑法施工，采用 C50 高性能预应力混凝土，泵送混凝土施工工艺。在进行配合比设计时，不仅要考虑混凝土强度、塌落度、工作性(和易性、保水性、泌水性)等基本指标，根据本项目的特点，还要着重考虑混凝土可泵性、耐久性、早强性。在原材料选择、配合比设计上要围绕这些特点进行。

3.1. 原材料的选择

1) 水：在配置高性能泵送混凝土过程中，对于水的选择很关键，如果选择的水中含有过量的酸、碱、盐都会对混凝土及其中的钢筋起到不利的影响。在施工前，对工地现场的水进行水质分析，经检验得 $\text{PH} = 7.2$ ，表现为极弱碱性，其中的活性钙、镁等离子含量符合高性能混凝土配合比设计用水要求。

2) 砂：在配置高强度混凝土过程中，对于砂子的要求是选择细度模数 $M_s = 2.3 \sim 3.0$ 的中砂。为了减少混凝土表面的细微裂纹，提高混凝土稳定性，选择图们江中砂，经试验室检验：细度模数 $M_s = 2.7$ ，含泥量 0.7%(<2%)，坚固性测试值为 4(<8)。集料满足《公路工程集料试验规程》(JTJ E42-2005)^[4]要求。

3) 石子：碎石采用图们市庆荣碎石厂生产的石子，石子为玄武岩破碎制得，其中碎石保水抗压强度为： $135 \text{ Mpa} > 1.5 \times 50 = 75 \text{ Mpa}$ ，符合碎石抗压强度大于 1.5 倍 C50 混凝土强度值。根据高强混凝土性能规范要求，碎石最大粒径不大于 25 mm，碎石采用 4.75~9.5 mm，9.5~19 mm 两个粒级掺配而成。根据碎石筛分曲线，确定碎石掺配比例为： $(4.75 \sim 9.5):(9.5 \sim 19) = 4:6$ 。碎石进行碱集料反应试验，测试值为 0.05(小于 0.1)，无潜在碱-硅酸反应危害。碎石含泥量小于 1%，针片状颗粒含量小于 5%，满足高强混凝土的要求。

4) 水泥：汪清庙岭水泥厂位于延边自治州境内，离图珲高速公路最近，一般都采用庙岭水泥。但经试验对比发现，庙岭高标号水泥性能不稳定，早期强度低，强度富余系数低，碱含量较高，不满足耐久性指

标及工期要求。为了缩短连续梁节段施工周期，尽早进行悬臂浇筑节段张拉作业，水泥采用了性能相对稳定、早期强度高的长春亚泰鼎鹿牌 P·II 52.5 硅酸盐水泥。经试验检验水泥的富余系数 $R_c = 1.12$ 。

5) 外加剂：外加剂采用北京奥通高效减水剂 (JFL-5) 型，经试验室取样检测，碱含量为 3.67%。

3.2. 配合比设计

3.2.1. 按强度要求确定水灰比

施工中各项原材料的质量能否保持稳定，混凝土拌和、运输、振捣及养护等工序是否到位，都会影响混凝土的质量。考虑到实际施工条件与试验室条件的差别，混凝土试配强度 ($f_{cu,o}$) 应比设计有所提高，可按下式计算：

$$f_{cu,o} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (3-1)$$

式中： $f_{cu,o}$ —混凝土配制强度(Mpa)； $f_{cu,k}$ —混凝土立方体抗压强度标准值(Mpa)； σ —混凝土强度标准差(Mpa)，当无统计资料计算标准差时，参考^[5]表 1 取值。

因此有上式(3-1)得：

$$f_{cu,o} = 50 + 1.645 \times 6 = 59.87(\text{Mpa})$$

根据 $f_{cu,o}$ 水泥实际强度及粗集料种类，对于采用碎石配制的高强度混凝土公式计算水灰比，可按下列关系式计算。

碎石混凝土：

$$f_{cu,o} = 0.304 f_{ce} \left(\frac{C}{W} + 0.62 \right) \quad (3-2)$$

其中水泥实际强度：

$$f_{ce} = r_c f_{ce,g} \quad (3-3)$$

式中： $f_{ce,g}$ —水泥强度等级值； r_c —水泥强度等级值的富余系数，亚泰水泥富余系数取 1.12。

由上(3-2)、(3-3)式可知灰水比

$$\frac{C}{W} = \frac{59.87}{0.304 \times 1.12 \times 52.5} - 0.62 = 2.7293 \quad (3-4)$$

Table 1. Standard deviation values
表 1. 标准差取值

混凝土强度等级(Mpa)	C10~C20	C25~C40	C50~C60
标准差 σ (Mpa)	4	5	6

所以得：

$$\frac{W}{C} = 1/2.7902 = 0.37 \quad (3-5)$$

3.2.2. 确定用水量(m_{w0})

在满足施工和易性的条件下，当水泥用量维持不变时，用水量越少，水灰比越小，混凝土的质量越好；当水灰比保持不变，用水量越少，水泥用量越少，同时混凝土的体积变化越小。因此，在混凝土配合比设计时，应力求用水量最少。对于配制高性能混凝土的用水量可参考^[5]表 2。

石子最大粒径为 20 mm，坍落度为 160~180 mm，以表 2 中坍落度 90 的用水量为基础，按坍落度每增大 20 mm 用水量增加 5 Kg，初步确定用水量为 235 Kg。经试验确定，掺入 1.8% 外加剂，减水率为 22.5%，根据公式

$$m_{wa} = m_{w0} (1 - \beta)$$

其中： m_{wa} —掺外加剂混凝土每立方混凝土用水量； β —外加剂减水率； m_{w0} —未掺外加剂混凝土每立方混凝土用水量；

$$m_{wa} = m_{w0} (1 - \beta) = 235 \times (1 - 22.5\%) = 182 \text{ Kg} \quad (3-6)$$

3.2.3. 计算水泥用量(m_{c0})

根据上式水灰比值及用水量可以算出 C50 高性能混凝土水泥用量 m_{c0} ：

$$m_{c0} = m_{w0} \frac{W}{C} \quad (3-7)$$

由上式(3-7)可得水泥用量：

$$m_{c0} = 182/0.37 = 492 \text{ kg} \quad (3-8)$$

根据《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041-2000)^[3]，对于配制高性能混凝土要求水泥用量不宜超过 500

Table 2. The amount of water recommend
表 2. 推荐用水量

拌合物稠度		碎石最大粒径 (mm)			
项目	指标	16	20	31.5	40
坍落度 (mm)	10~30	200	185	175	165
	35~50	210	195	185	175
	55~70	220	205	195	185
	75~90	230	215	205	195

Kg/m³，水泥与混合材料的总量不超过 550~600 Kg/m³。水泥用量满足耐久性要求。

$$\frac{m_{so}}{m_{so} + m_{go}} = \beta_s \quad (3-11)$$

式中： β_s —砂率(%)； m_{so} —混凝土中砂子用量(Kg/m³)； m_{go} —混凝土中石子用量(Kg/m³)。

解此联立方程组，求得砂子、石子的用量。

查找工地试验室资料可知：水泥的视密度： $\rho_c = 3.1\text{g/cm}^3$ 、水的视密度： $\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$ 、砂子的视密度： $\rho_s = 2.51\text{g/cm}^3$ 、石子的视密度： $\rho_g = 2.69\text{g/cm}^3$ 。有上式(3-10)、(3-11)及试验数据可作如下方程组(3-12)，其中 C50 高性能预应力混凝土为不加引气剂，所以有 $\alpha = 1.0$ 。由下式可得砂子、石子用量：

$$\begin{cases} \frac{492}{3.1} + \frac{182}{1.0} + \frac{m_{so}}{2.51} + \frac{m_{go}}{2.69} + 10 \times 1.0 = 1000 \\ \frac{m_{so}}{m_{so} + m_{go}} = 0.4 \end{cases} \quad (3-12)$$

所以：

$$\begin{cases} m_{so} = 679(\text{Kg}) \\ m_{go} = 1018(\text{Kg}) \end{cases} \quad (3-13)$$

3.2.6. 得出初步配合比

由式(3-6)、(3-8)、(3-12)、(3-13)可得 C50 高性能预应力混凝土个原材料用量：

$$m_{co} : m_{wo} : m_{so} : m_{go} : \text{外加剂} = 492 : 182 : 679 : 1018 : 8.8 \quad (3-14)$$

或

$$m_{co} : m_{wo} : m_{so} : m_{go} : \text{外加剂} = 1 : 0.37 : 1.38 : 2.07 : 1.8\% \quad (3-15)$$

为提高混凝土强度达到密实效果，石子采用两种

3.2.4. 确定砂率(β_s)

1) 砂率是砂子质量与砂石质量的百分数，按《普通混凝土配合比设计规程》^[5]要求，可按集料品种、规格及水灰比值，通过查表^[5]表 3 确定。

连续钢构采用 C50 高性能预应力混凝土，塌落度为 160~180 mm，碎石最大粒径 20 mm。塌落度大于 60 mm 混凝土，在表 3 的基础上，按塌落度每增加 20 mm，砂率增加 1%的幅度予以调整。水灰比 0.4、碎石最大粒径 20 mm，查表得砂率 29%~34%。以塌落度 60 mm、砂率 34%为基础，C50 泵送混凝土塌落度 160~180 mm，经计算对应砂率 39%~40%。

2) 可按下列确定原则经试验确定合理砂率值。

混凝土拌和物的合理砂率是指在一定用水量及水泥用量的情况下，能使混合物获得最大流动性，且能保持粘聚性及保水性能良好时的砂率值。根据《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041-2000)^[3]，对于泵送高性能 C50 预应力混凝土砂率宜控制在 40%~50%。

综合以上两方面，考虑到连续钢构预应力混凝土要求早期强度高、碎石最大粒径为 19.5 mm 等关系，在配置主桥悬浇段 C50 高性能预应力混凝土时砂率宜采用低值：

$$\beta_s = 40\% \quad (3-9)$$

3.2.5. 确定砂和石子用量

用体积法计算时，可以用以下两个关系式

$$\frac{m_{co}}{\rho_c} + \frac{m_{so}}{\rho_s} + \frac{m_{go}}{\rho_g} + \frac{m_{wo}}{\rho_w} + 10a = 1000 \quad (3-10)$$

Table 3. Concrete sand ratio
表 3. 混凝土的砂率

水灰(W/C)	卵石最大粒径(mm)			碎石最大粒径(mm)		
	10	20	40	10	20	40
0.4	26~32	25~31	24~30	30~35	29~34	27~32
0.5	30~35	29~34	28~33	33~38	32~37	30~35
0.6	33~38	32~37	31~36	36~41	35~40	33~38
0.7	36~41	35~40	34~39	39~44	38~43	36~41

注：1) 本表数值系中砂的选用砂率，对细砂或粗砂，可相应地减少或增大砂率；2) 只用一个单粒级粗集料配制混凝土时砂率应适当增大；3) 对薄壁构件砂率取偏大值；4) 本表中的砂率系指砂与集料总量的质量比。

粗集料进行掺配。其中石子粒径为(4.75~9.5): (9.5~19.5) = 4:6。

3.3. 试配与调整, 得出试验室配合比

根据上式计算得出的C50高性能泵送预应力混凝土进行试配, 作为基准配合比。同时, 根据要求上下调整水灰比 0.02, 配制一个水灰比为 0.35 和一个水灰比为 0.39 的 C50 配合比, 并适当调整砂率保证混凝土的体积不变。水灰比为 0.35 的坍落度的水泥用量超过 500 Kg, 不符合规范要求, 不予配制。对水灰比为 0.37 和 0.39 进行试配, 进行混凝土坍落度、泌水性及棍度试验。结果如下:

水灰比为 0.37: 坍落度 170 mm, 满足 160~180 mm 要求, 工作性满足要求。

水灰比为 0.39: 坍落度 175 mm, 满足 160~180 mm 要求, 工作性也满足要求。分别对水灰比为 0.37 和 0.39 的混凝土各制作 2 组标准试块, 进行 7 天和 28 天抗压强度试验, 结果得表 4。

根据连续钢构节段施工工期的要求, 7 d 混凝土强度大于设计强度方可进行预应力张拉。由表 4, 确定 C50 高性能泵送混凝土配合比采用水灰比 0.37, 混凝土中各原材料用量如表 5 所列。

3.4. 碱含量验证计算

根据规范和设计规定, 特大桥和大桥(以单孔跨径

Table 4. The compressive strength of cement concrete value
表 4. 水泥混凝土抗压强度值

混凝土水灰比值	7d(Mpa)	28d(Mpa)	坍落度(mm)
0.37	51.7	63.3	170
0.39	48.8	58.6	175

Table 5. The table of material usage amounts
表 5. 材料用量表

材料名称	材料型号	1 m ³ 砼材料量(Kg)	配合比比例
亚泰水泥	P · II 52.5	492	1
饮用水	-	182	0.37
砂子	M _s = 2.7	679	1.38
石子	4.75~9.5	407	0.83
石子	9.5~19.5	611	1.24
高效减水剂	JFL-5	8.8	1.8%

确定)预应力混凝土中最大碱含量不宜大于 1.8 Kg/m³。

经试验室取样检测, 长春亚泰水泥 P · II 52.5 硅酸盐水泥碱含量为 0.29%, 北京奥通 JFL-5 型高效减水剂碱含量为 3.67%, 总碱含量 = 0.29% × 492 + 3.67% × 8.8 = 1.75 < 1.8, 满足碱含量耐久性要求。

3.5. 施工配合比确定

试验室所得的配合比是在原材料完全理想状态下拌制的。而在实际施工过程中, 配合比所用砂、石料本身的含水量不可能为 0, 因此, 在施工过程中, 所用原材料数量根据砂石的含水量要根据实际情况进行调整。假定现场实际测定砂子的含水量为: a%、石子的含水量为: b%, 为使实际施工的配合比与试验室设计配合比达到基本一致。所以实际施工配合比所用水泥: m'_{w0}、砂子: m'_{so}、石子: m'_{go}、用水量: m'_{go} 与试验室配合比所用水泥: m_{co}、砂子: m_{so}、石子: m_{go}、用水量: m_{w0} 有如下关系(3-17):

$$\begin{cases} m'_{co} = m_{co} \\ m'_{so} = m_{so} \times (1 + a\%) \\ m'_{go} = m_{go} \times (1 + b\%) \\ m'_{w0} = m_{w0} - m_{so} \times a\% - m_{go} \times b\% \end{cases} \quad (3-16)$$

4. 总结与建议

1) 连续钢构高性能泵送预应力混凝土配合比设计不同于普通混凝土, 在考虑混凝土强度、工作性(坍落度、和易性、可泵性)等指标的同时, 还要考虑耐久性。混凝土总碱含量必须要控制在规范允许范围内。为此, 水泥、减水剂必须选择碱含量低的品种; 砂、碎石必须无碱集料反应。否则, 总碱含量控制在规范允许范围内非常困难。

2) 连续钢构采用挂篮悬臂浇筑法逐段施工, 预应力张拉必须在混凝土强度达到 100%时才能进行。故施工进度快慢, 取决于混凝土的早期强度。为此, 配合比设计比选应充分考虑这一因素, 在配合比设计中, 试配强度在成本允许的情况下, 尽量提高。在选材上, 宜采用稳定性好、有一定强度富余系数的早强水泥, 宜选择减水性能好的外加剂, 从而减小水灰比; 在砂率的确定上, 选择较低的砂率, 适当提高碎石用量, 从而提高混凝土早期强度。

3) 连续刚构高性能混凝土优化后的配合比,经配料检测,总碱含量刚刚满足规范要求。如要大幅度降低碱含量,必须减少水泥用量,采用粉煤灰混凝土是优化配合比的途径之一。但经取样试验,该地区粉煤灰碱含量及稳定性不符合要求。同时,粉煤灰混凝土早期强度较低,不满足连续刚构节段张拉工期要求。

参考文献 (References)

[1] 吉林省公路勘测设计院. 同江至三亚国道主干线长春至琿春

- 支线图们至琿春段高速公路两阶段施工图设计[Z]. 2005.
- [2] 现代混凝土配合比设计手册. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 交通部重庆公路科学研究所. 公路桥涵施工技术规范 (JTJ041-2000)[Z]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程 (JTG E42-2005)[Z]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [5] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土配合比设计规程 (JGJ55-2000)[Z]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.