

# Research on Rational Width of Post-Casting Temperature Band in Construction of Super-Long Reinforced Concrete Structures

Li Pan

Institute of Building Structures, China Academy of Building Research, Beijing  
Email: panli535482@sohu.com

Received May. 21<sup>st</sup>, 2013; revised: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2013; accepted: Jun. 11<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Li Pan. 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:** In construction of super-long concrete structures, the width change of reserved post-casting temperature band is limited generally by the steel bars across through the band, thus its design efficacy is weakened or disappeared. In this case, the lost efficacy can be compensated by increasing width of the post-casting band moderately. For the case of steel bars are not truncated or not overlapped at the band, based on the known principle of cross-section balance and coordination deformation, the new method to determine the rational width of post-casting band is proposed, then the analysis process and the calculation sample are shown as reference for structure design and construction.

**Keywords:** Super-Long Concrete Structure; Post-Casting Temperature Band of Concrete Structure in Construction; Concrete Shrinkage Stress; Cross-Section Balance; Coordination Deformation; Rational Width of Post-Casting Band

## 超长混凝土结构温度后浇带合理宽度的研究

潘立

中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 北京  
Email: panli535482@sohu.com

收稿日期: 2013年5月21日; 修回日期: 2013年6月3日; 录用日期: 2013年6月11日

**摘要:** 在超长混凝土结构施工中, 结构配筋通常连续横穿预留温度后浇带, 使其宽度变化受阻并导致设计效能减弱或消失, 此时如增加后浇带宽度可对其受损效能进行补偿。针对横穿后浇带钢筋不截断情况, 基于截面平衡与变形协调原理, 提出了确定温度后浇带合理宽度范围的新方法, 推导了技术分析过程, 给出了计算例题, 可供超长混凝土结构设计与施工参考。

**关键词:** 超长混凝土结构; 温度后浇带; 混凝土收缩应力; 截面平衡; 变形协调; 后浇带合理宽度

### 1. 引言

在国内近些年的大规模城市建设与改造中, 出现了较多超长/超宽的混凝土结构, 其连续长度明显超过设计规范限定的伸缩缝间距, 见文[1]第 8.1.1 条, 主要为大中型体育场馆、航站楼候机楼、大型展馆与超市,

地下车库、高层建筑的裙房等。为满足正常使用或建筑外观的需要, 这些结构的连续长度通常为 150~200 m, 且有继续增大的趋势。为避免超长混凝土结构在施工期间出现收缩裂缝, 设计与施工单位采取了多种有效措施, 如: 增配“温度筋”或预应力钢筋; 使用

外加剂减小混凝土收缩变形；在混凝土中掺入高强纤维；避免选用过高的混凝土强度等级；加强混凝土养护；合理设置温度后浇带等。大量工程经验表明，其中合理设置温度后浇带(以下简称后浇带)不但效果明显、成本较低，而且更简单易行，多年来已成为降低超长结构混凝土收缩拉应力不利影响的首选技术措施。

目前绝大多数情况下，为方便施工，超长结构中梁、板、墙内的纵筋均横穿后浇带布置，仅将该部位的混凝土临时断开。这些横穿配筋使后浇带宽度增大变化时受阻，对后浇带降低混凝土收缩拉应力的设计效能有明显不利影响。研究表明，该不利影响随横穿钢筋配筋率增加而增大、随后浇带宽度增大而减小。作者在文[2,3]中，给出了可导致后浇带失效的横穿钢筋最小配筋率。本文针对横穿钢筋未截断情况，根据截面平衡与变形协调原理，对后浇带的合理宽度又进行了分析研究。

## 2. 规范/规程相关要求

文[1]第 8.1.1 条给出了混凝土结构伸缩缝的最大间距，第 8.1.3 条将混凝土楼盖/屋盖采用后浇带分段施工作为可适当增大伸缩缝间距的重要措施之一。第 8.1.3 条说明指出：“后浇带是避免施工期收缩裂缝的有效措施，但间隔期及具体做法不确定性很大，难以统一规定时间，由施工、设计根据具体情况确定。应该注意的是：设置后浇带可适当增大伸缩缝间距，但不能代替伸缩缝。”

文[4]第 3.4.12 条给出了高层建筑混凝土结构伸缩缝的最大间距，第 3.4.13 条要求：“每 30 m~40 m 间距留出施工后浇带，带宽 800 mm~1000 mm，钢筋采用搭接接头，后浇带混凝土宜在 45 d 后浇筑”，该条说明指出：“通过后浇带的板、墙钢筋宜断开搭接，以便两部分的混凝土各自自由收缩；梁主筋断开问题较多，可不断开。”

文[1]删除了旧版<sup>[5]</sup>中关于后浇带宽度、适宜间距与封堵时间的具体要求，在要求后浇带将混凝土截面全部临时断开时，未明确是否需同时断开横穿后浇带钢筋。文[4]中要求横穿板、墙后浇带的钢筋宜临时断开，但框架梁的纵筋可连续横穿后浇带，这些要求同旧版<sup>[6]</sup>。由此可见，文[1,4]关于后浇带构造规定的表述有所不同。

## 3. 后浇带应用现状

在超长混凝土结构中，无论后浇带间距大小、先期浇筑构件约束强弱、横穿后浇带钢筋多少、结构类别与混凝土强度的差异，目前后浇带宽度一般按文[1,4]统一取 800~1000 mm。横穿后浇带的结构配筋基本正交于后浇带，也有少量斜交情况。同层楼盖与墙体的后浇带相连接，宽度相同或大致相同，间距通常为 30~60 m。后浇带部位通常不增加或仅增加少量构造筋，但封堵混凝土的强度等级常提高一级，部分工程还要求在封堵混凝土中掺加膨胀剂。为施工方便，在后浇带部位，梁、板、墙内的配筋通常全部横穿后浇带。

在钢梁-混凝土板超长组合楼盖中，施工中先安装钢梁、压型钢板，然后现浇混凝土板，当钢梁、压型钢板与现浇板配筋均横穿后浇带时，设计与施工均较少考虑这些钢材约束后浇带宽度变化的不利影响。

在多数工程中，后浇带呈直线带状，数量与位置大致凭经验或参照类似工程确定；在结构温度应力分析中较少考虑后浇带作用，即使计算模型中含后浇带，也极少考虑横穿钢筋是否全部或部分临时断开。结构施工中为缩短工期，经常出现提前(相对于设计要求)封堵后浇带的情况。因受技术手段限制，后浇带的实际效能目前尚难以通过结构检测予以确认。混凝土结构中钢筋横穿后浇带的情况见图 1。

图 1 中左上、右下两图片分别为俯视与仰视混凝土板后浇带的情景，右上图片为混凝土墙体上的后浇带，由左下角图片可见后浇带断开框架梁的情况，这些配筋横穿混凝土板、墙、梁的局部构造通常作为施工图要求，已近乎成为约定俗成的惯例，在目前超长混凝土结构施工中普遍存在。

## 4. 后浇带计算宽度

当结构配筋连续横穿后浇带时，钢筋对后浇带宽度的约束作用随其宽度减小而增加，随其宽度增大而减弱。混凝土成型收缩时，如其它条件不变仅增大后浇带宽度  $b_c$ ，横穿后浇带钢筋外露部分的弹性伸长  $\Delta_s$  随之增加。取单位长度后浇带进行分析，设与后浇带正交的横穿钢筋拉应力为  $\sigma_s$ ，可列出：

$$\Delta_s = \varepsilon_s b_c = \frac{\sigma_s}{E_s} b_c \quad (1)$$



Figure 1. Steel bars across through the post-casting band in reinforced concrete structures  
图 1. 横穿混凝土后浇带的结构配筋

式中  $\varepsilon_s$ 、 $E_s$  分别为钢筋的拉应变与弹性模量。在后浇带两侧，设结构混凝土的平均收缩应变分别为  $\varepsilon_{cl}$ 、 $\varepsilon_{cr}$ ，后浇带两侧对增大  $\Delta_s$  有贡献的混凝土结构长度分别为  $l_l$ 、 $l_r$ ，先期浇筑构件对后浇带两侧混凝土收缩变形的约束影响系数分别为  $\xi_l$ 、 $\xi_r$ ，横穿钢筋对后浇带两侧混凝土收缩变形的约束影响系数分别为  $\lambda_l$ 、 $\lambda_r$ ，在计算长度  $l_l + l_r$  范围内，结构混凝土的收缩变形  $\Delta_c$  可记为：

$$\Delta_c = \xi_l \lambda_l \varepsilon_{cl} l_l + \xi_r \lambda_r \varepsilon_{cr} l_r \quad (2)$$

系数  $\xi_l$ 、 $\xi_r$  均大于 0，且随先期浇筑构件约束的增大而减小，当结构无此项约束(如下部设有理想滑动层的混凝土基础底板)，或忽略此项约束时， $\xi_l = \xi_r = 1.0$ 。系数  $\lambda_l$ 、 $\lambda_r$  均大于 0，且随横穿后浇带钢筋截面  $A_s$  的增大而减小，如无横穿钢筋(在后浇带部位搭接连接)，或忽略此约束时， $\lambda_l = \lambda_r = 1.0$ 。由变形协调关系，有  $\Delta_s = \Delta_c$ ，联立(1)(2)两式可解出：

$$b_c = \frac{\xi_l \lambda_l \varepsilon_{cl} l_l + \xi_r \lambda_r \varepsilon_{cr} l_r}{\sigma_s} E_s \quad (3)$$

混凝土收缩变形受约束后，所产生的拉应力大于材料实际抗拉强度时，结构出现裂缝。此时如仅增大

$b_c$ ，该宽度内钢筋的弹性伸长变形增大，使  $A_s$  对后浇带两侧混凝土收缩变形的约束也随之减小。 $\Delta_s$  值增大时  $\Delta_c$  值不变，使  $\varepsilon_{cl}$ 、 $\varepsilon_{cr}$  有所降低，这是在不截断横穿后浇带钢筋条件下，仅增大  $b_c$  便可延缓或避免后浇带两侧混凝土收缩开裂的主要原因。因此当  $A_s$  较大时，增大  $b_c$  可成为降低其约束的重要手段。反之当  $A_s$  较小时，其约束也较小。

横穿后浇带钢筋不截断、且其它条件不变时，根据后浇带两侧混凝土收缩应力随  $b_c$  增减而变化的规律可认为，当  $b_c$  减小到某一特定值时，混凝土收缩拉应力可增大至  $f_{tk}$  (混凝土标准抗拉强度)，有

$\varepsilon_{cl} E_c = \varepsilon_{cr} E_c = f_{tk}$ ，这时横穿后浇带钢筋的拉应力  $\sigma_s = \alpha_s f_y$ ，系数  $\alpha_s \leq 1.0$ ， $f_y$  为钢筋强度设计值，满足该条件的  $b_c$  应为后浇带最小计算宽度。后浇带两侧混凝土开裂后，如果横穿裂缝与横穿后浇带的钢筋  $A_s f_y$  相同，两处钢筋的拉应力也应相同。

设单位长度后浇带任一侧截面积为  $A_c$ ，该处受拉开裂后，原作用于  $A_c$  的拉力转由横穿钢筋  $A_s$  承担，有  $(A_c - A_s) f_{tk} = A_s \sigma_s$ ，可导出：

$$\alpha_s = \frac{(A_c - A_s) f_{tk}}{A_s f_y} \quad (4)$$

将  $\varepsilon_{cl}E_c = \varepsilon_{cr}E_c = f_{tk}$ ,  $\sigma_s = \alpha_s f_y$  及式(4)代入式(3)后可解出:

$$b_c = (\xi_l \lambda_l l_l + \xi_r \lambda_r l_r) \frac{E_s A_s}{E_c (A_c - A_s)} \quad (5)$$

$$= (\xi_l \lambda_l l_l + \xi_r \lambda_r l_r) \frac{\alpha_E \rho_s}{1 - \rho_s}$$

式中  $\alpha_E = E_s/E_c$ ,  $\rho_s = A_s/A_c$ 。已知  $\frac{1}{1-\rho_s} \approx 1 + \rho_s$ ,

误差  $< \rho_s^2$ , 代入式(5)并忽略高阶小量后有:

$$b_c = (\xi_l \lambda_l l_l + \xi_r \lambda_r l_r) \alpha_E \rho_s \quad (6)$$

再设  $l_l = \eta_l (l_l + l_r) = \eta_l l_a$ ,  $l_r = \eta_r (l_l + l_r) = \eta_r l_a$ , 代入式(6)后可解出

$$b_c = (\xi_l \lambda_l \eta_l + \xi_r \lambda_r \eta_r) \alpha_E \rho_s l_a \quad (7)$$

其中  $l_a = l_l + l_r$ ,  $\eta_l + \eta_r = 1.0$ 。由式(7)可见, 后浇带合理宽度  $b_c$  随变量  $l_a$ 、 $\alpha_E$ 、 $\rho_s$  成正比变化。

分析表明, 当先期浇筑构件与横穿钢筋对后浇带两侧混凝土收缩变形的约束增大时,

$\xi_l \lambda_l \eta_l + \xi_r \lambda_r \eta_r \rightarrow 0$ , 反之有  $\xi_l \lambda_l \eta_l + \xi_r \lambda_r \eta_r \rightarrow 1.0$ 。由此可定义  $0 < \xi_l \lambda_l \eta_l + \xi_r \lambda_r \eta_r < 1.0$ , 考虑施工现状后有  $800 \sim 1000 \text{ mm} \leq b_c < \alpha_E \rho_s l_a$ 。即可暂将其通常宽度  $800 \sim 1000 \text{ mm}$  作为  $b_c$  的下限, 忽略先期浇筑构件和横穿钢筋约束影响后的  $\alpha_E \rho_s l_a$  作为  $b_c$  的上限。对于超长混凝土结构, 宜在上述  $b_c$  的合理范围内, 适当取一整数值即可。

## 5. 技术说明

1) 当混凝土结构的连续长度明显大于文[1]第 8.1.1 条要求时, 可谓绝对超长, 此时如先期浇筑构件的约束较弱, 水平构件的成型收缩拉应力未必较大。当其连续长度小于文[1]第 8.1.1 条要求, 但因先期浇筑构件的约束较强, 水平构件仍存在较大的成型收缩拉应力, 可谓相对超长。因此设置后浇带时, 应同时考虑结构长度与收缩约束程度两个因素。

2) 为使横穿钢筋的混凝土后浇带能够充分发挥设计效能, 需控制其合理宽度  $b_c$  在上下限值范围内。当  $b_c$  的取值较大时, 后浇带可变为“后浇段”或“后浇区”。

3) 在确定  $b_c$  的合理范围时, 限  $\alpha_E \rho_s l_a \geq 800 \sim 1000 \text{ mm}$ 。当不利于控制混凝土收缩拉

应力的因素较多, 或施工期间结构抗裂控制标准较高时,  $b_c$  的取值宜尽量接近上限, 反之可在上下限范围内近似取中间值。

4) 在型钢—混凝土组合楼盖中,  $A_s$  应为穿越单位长度后浇带的板内配筋、钢梁、压型钢板的截面之和。在钢筋混凝土梁板楼盖中,  $A_s$  应为横穿单位长度后浇带的板内配筋面积与梁内纵筋折算面积之和。

5) 当后浇带边沿无张拉端锚具时,  $b_c$  不应小于 800 mm; 有张拉端锚具时,  $b_c$  不宜小于 1000 mm。为方便设计与施工,  $b_c$  的取值宜为整数, 同层或各层结构所有后浇带的宽度宜尽量统一。

6) 计算  $b_c$  的上限值时,  $E_c$  可按文[1]第 4.1.5 条确定, 或取实测值。

7) 式(7)中引入变量  $l_a$  (后浇带两侧对增大  $\Delta_s$  有贡献的混凝土结构长度之和,  $\Delta_s$  为横穿后浇带钢筋外露部分的弹性伸长值)后, 可认为本文方法已考虑了相邻后浇带数量对  $b_c$  的影响。

8) 对每个超长混凝土结构及所设后浇带, 理论上均存在相应的  $\xi_l \lambda_l \eta_l + \xi_r \lambda_r \eta_r$  值。如设计确有需要, 可根据具体工程的实际工况建立有限元结构分析模型, 通过当量温度应力计算近似确定系数  $\xi_l$ 、 $\xi_r$ 、 $\lambda_l$ 、 $\lambda_r$ , 以便在更小范围内确定  $b_c$ 。

9) 通常情况下,  $l_l$ 、 $l_r$  值可近似取相应后浇带两侧连续单元长度的一半。

## 6. 计算实例

某工程地下室为普通钢筋混凝土结构, 纵向总长 130 m, 施工中设 2 条后浇带将其分割成 40 m、50 m、40 m 三段。顶板(梁板楼盖)混凝土强度 C35, 截面折算厚度 260 mm, 横穿单位长度后浇带的钢筋折算面积  $A_s = 1539 \text{ mm}^2$ , 钢筋类别 HRB335, 求后浇带宽度  $b_c$  的合理值。

**解:** 近似取  $l_l = 0.5 \times 40 = 20 \text{ m}$ ,  $l_r = 0.5 \times 50 = 25 \text{ m}$ , 有  $l_a = 20 + 25 = 45 \text{ m}$ , 计算截面  $A_c = 1000 \times 260 = 260000 \text{ mm}^2$ ,  $E_c = 3.15 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,  $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,  $\alpha_E = E_s/E_c = 6.349$ ,  $\rho_s = A_s/A_c = 0.592\%$ 。由式(7)求出  $b_c$  的上限值为  $\alpha_E \rho_s l_a = 6.349 \times 0.00592 \times 45000 = 1691 \text{ mm}$ ,  $b_c$  的合理取值范围为  $800 \sim 1691 \text{ mm}$ , 2 条后浇带的合理宽度可在该范围内酌情确定。

如果此例中地下室顶板纵向连续长度为 100 m, 2 条后浇带将其分割成 30 m、40 m、30 m 三段, 其它条件不变, 可解出  $b_c$  的上限值为 1316 mm,  $b_c$  的合理取值范围为 800~1316 mm, 2 条后浇带的合理宽度可在该范围内酌情确定。

## 7. 结语

多年来, 用后浇带代替伸缩缝降低超长结构混凝土收缩裂缝不利影响的工程屡见不鲜, 尽管其中不乏较成功实例, 但因其控制结构连续长度(伸缩缝间距)上限主要依靠经验, 还是难以避免出现不理想情况。基于此现状, 本文提出了合理增大后浇带宽度及计算确定其上限的方法, 应用该结果可进一步提高确定结构伸缩缝最大间距的合理性, 及控制混凝土收缩裂缝的可靠性, 并得出以下结论:

1) 在超长混凝土结构施工中, 连续横穿后浇带的钢筋对后浇带设计效能有不利影响, 其合理宽度  $b_c$  随变量  $\alpha_E \rho_s l_a$  成正比变化, 不应在任何情况下均取相同或相近值。

2) 分析表明,  $b_c$  的上限值为  $\alpha_E \rho_s l_a$ , 下限值可

暂按现行常规取 800~1000 mm, 其合理取值应在该范围内根据具体工程酌情确定。

3) 研究表明,  $b_c$  的取值越接近其上限, 后浇带消纳混凝土成型收缩不利影响的作用越强, 反之则越弱。

4) 因后浇带宽度对施工程序、难度、工期与结构成本的影响很小、可忽略不计, 除特殊情况外, 精确计算  $b_c$  无实际意义, 因此一般没有必要先求解  $\xi_l \lambda_l \eta_l + \xi_r \lambda_r \eta_r$  再确定  $b_c$ 。

## 参考文献 (References)

- [1] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 潘立. 横穿混凝土后浇带配筋对后浇带效能不利影响的计算分析[J]. 建筑结构, 2007, 37(7): 13, 14-16.
- [3] 潘立. 导致混凝土后浇带失效的横穿钢筋最小配筋率研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(11): 1-4.
- [4] JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [6] JGJ3-2002, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.