

文章编号: 1005-0523(2008)05-0021-07

梁侧钢筋对混凝土收缩的影响及其构造要求

胡淑兰 徐海燕

(华东交通大学 土木建筑学院 江西 南昌 330013)

摘要: 分析了混凝土梁侧出现温度收缩裂缝的原因, 进而分析了梁侧构造钢筋对混凝土开裂的有利作用, 验证了混凝土规范对梁侧构造钢筋的有关规定, 最后采用 ANSYS 软件分析了降温时钢筋混凝土梁的应变云图, 以此进一步验证了上述结论。

关键词: 温度应力; 构造钢筋; 温度收缩

中图分类号: TU375.1

文献标识码: A

某县某建筑工程为上部五层砖混底部两层框架的底框结构, 在楼房刚封顶还未进行全面装修时, 因气温突降, 气候温差较大, 梁侧面出现较多的裂缝。出现这种情况的原因主要是, 降温使混凝土内部产生较大的温度收缩拉应力。本文就此问题, 以其中一根框架梁为算例, 研究钢筋混凝土结构在温度降低和混凝土收缩时, 梁侧构造钢筋配置对抗裂的有利作用。

1 梁侧裂缝出现的原因

梁截面为 350 mm × 800 mm, 混凝土强度等级为 C30。该梁于 2004 年 12 月份下旬浇筑成型, 大气平均气温 (T_q) 取 20 °C。配合比见表 1:

表 1 C30 混凝土配合比

砼强度	水用量 (kg)	水泥用量 (kg)	粉煤灰用 量(kg)	YQ-H 用量 (kg)	砂用量 (kg)	碎石用量 (kg)	外加剂用 量(kg)
C30	176	306	76	7.83	753	1 012	5.98

(1) 混凝土绝热温升^[1]

C30 混凝土每公斤 28 天水泥发热量取 289 KJ/kg, 龄期 28 天的绝热温升为

$$T(t) = \frac{Wq}{cp} (1 - e^{-mt}) = \frac{306 \times 289 \times 10^3}{0.96 \times 10^3 \times 2400} \times (1 - e^{-0.3 \times 28}) = 38.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(2) 混凝土拌合温度 T_c ^[2]

表 2 混凝土拌合温度

材料名称	重量(kg) W_i	比热(KJ/kg·K) C_i	$W_i \times C_i$ kg/°C	材料温度 T_i (°C)	$C_i \times W_i \times T_i$
水	176	4.2	739	15	11 085
水泥	306	0.84	257	45	11 565
砂子	753	0.84	633	25	15 825
石子	1 012	0.84	850	25	21 250

收稿日期: 2008-06-18

基金项目: 华东交通大学科研基金资助项目(01305109)

作者简介: 胡淑兰(1971-)女, 江西南昌人, 硕士, 讲师。

材料名称	重量(kg) W_i	比热(KJ/kg·K) C_i	$W_i \times C_i$ kg/°C	材料温度 T_i (°C)	$C_i \times W_i \times T_i$
砂石含水量	61	4.2	256	25	6 400
合计					66 125

$$T_c = \sum C_i W_i T_i / \sum C_i W_i = 66\ 125 / 2\ 735 = 24.2\ ^\circ\text{C}$$
(3) 混凝土浇筑温度 T_j ^[1]

混凝土装卸料两次: $A_1 = 0.032 \times 1 = 0.032$

封闭式自卸汽车运输时间 45 分钟: $A_2 = 0.001\ 7 \times 45 = 0.076\ 5$

浇捣完毕需 20 分钟: $A_3 = 0.003 \times 20 = 0.06$

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = 0.032 + 0.076\ 5 + 0.06 = 0.168\ 5$$

$$T_j = T_0 + (T_q + T_0) (A_1 + A_2 + \dots + A_{11}) = 24.2 + (20 - 24.2) \times 0.168\ 5 = 23.5\ ^\circ\text{C}$$

(4) 混凝土收缩应力计算^[3]

混凝土收缩变形不同条件影响修正系数取值如下:

M_1 为水泥品种,用矿渣水泥,取 1.25;

M_2 为水泥细度,值为 5 000 孔,取 1.35;

M_3 为骨料,用花岗岩,取 1.00;

M_4 为水灰比,为 0.7,取 1.62;

M_5 为水泥浆量,为 0.2,取 1.00;

M_6 为自然养护,为 28 d,取 0.93;

M_7 为环境相对湿度,为 70%,取 0.77;

M_8 为水力半径倒数($r = L/F$, 单位/cm, F 为截面面积, L 为包罗周长) 此时 $L/F = (35 + 35 + 80 + 80) / (35 \times 80) = 0.082/\text{cm}$, 取 0.72;

M_9 为振岛方式,用机械振岛,取 1.00;

M_{10} 为配筋率,为 0.4%,取 0.9;

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0 M_1 M_2 \dots M_n (1 - e^{-bt})$$

$$= 3.24 \times 10^{-4} \times 1.25 \times 1.35 \times 1.00 \times 1.62 \times 1.00 \times 0.93 \times 0.77 \times 0.72 \times 1.00 \times 0.9 \times (1 - e^{-0.01t})$$

$$= 4.1 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01t})$$

(5) 各龄期混凝土收缩当量温差^[3]

$$T_{y(t)} = \frac{\varepsilon_y(t)}{\alpha} \quad \alpha = 1 \times 10^{-5}$$

表 3 混凝土收缩当量温差

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\varepsilon_{y(t)} (\times 10^{-5})$	10.62	9.69	8.76	7.77	6.75	5.71	4.64	3.53	2.39	1.21
$T_{y(t)} (^\circ\text{C})$	10.62	9.69	8.76	7.77	6.75	5.71	4.64	3.53	2.39	1.21

(6) 各龄期混凝土降温的综合温差^[3]

混凝土在龄期 t 时的水化热温差

$$T_1(t) = T_j + T_1(t) - T_q = 23.5 + 38.4 - 20 = 41.9\ ^\circ\text{C}$$

取各时间段平均温度起始值与终止值差为 4.2 °C(每天降约 1.4 °C)

各龄期混凝土降温的综合温差^[3]

$$\Delta T = \Delta T_{1(t)} + T_{y(t)} = 4.2 + T_{y(t+3)} - T_{y(t)}$$

表 4 混凝土综合温差

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\Delta T_{(t)}$	4.77	5.13	5.13	5.19	5.22	5.24	5.27	5.31	5.34	5.38

(7) 各龄期的松弛系数

根据文献[3]的表 5-2 得到下面数据.

表 5 各龄期松弛系数

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$H(t, \sigma)$	0.327	0.339	0.352	0.368	0.386	0.41	0.44	0.48	0.52	0.57

(8) 各龄期的混凝土最大拉应变^[3]——梁侧 $x = \pm b (\nu = 0.2)$

$$\varepsilon_{(t) \max} = \frac{\alpha \cdot \Delta T_{(t)} \cdot H(t, \sigma)}{1 - \nu} \left(\frac{x^2}{b^2} - \frac{1}{3} \right) \Big|_{x = \pm b} = \frac{2}{3} \frac{\alpha \cdot \Delta T_{(t)} \cdot H(t, \sigma)}{1 - \nu}$$

表 6 各龄期的混凝土最大拉应变

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\varepsilon_{(t) \max} \times 10^{-4}$	0.13	0.145	0.15	0.159	0.168	0.179	0.193	0.212	0.231	0.256
累计值	1.823	1.693	1.548	1.398	1.239	1.071	0.892	0.699	0.487	

由于混凝土抗拉性能很弱,对于 C15 ~ C40 强度等级的混凝土,其极限拉应变 ε_{lu} 取为 $1 \sim 1.51 \times 10^{-4}$ 。总降温与混凝土最大拉应变

$$\varepsilon_{\max} = \sum_{t=3}^{30} \varepsilon_{(t) \max} = 1.823 \times 10^{-4} > 1 \sim 1.51 \times 10^{-4}$$

可见梁侧在 30 天以前就可能出现裂缝,而当温度骤降时任意龄期都可能出现裂缝。若混凝土不开裂,则允许的降温差为:(因温度骤降,松弛系数 $H(t, \sigma) = 1$)

$$\varepsilon_{(t) \max} = \frac{2}{3} \frac{\alpha \cdot \Delta T_{(t)}}{1 - \nu} = 1.25 \times 10^{-4} \Rightarrow [\Delta T_{(t)}] = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_{(t) \max} (1 - \nu)}{\alpha} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

只要混凝土内温度与大气温度之间骤降 15°C ,梁侧必会出现大量裂缝。

2 梁侧裂缝的避免

假定混凝土经过较好的施工养护,混凝土内外温差控制在 $\Delta T \leq 25^\circ\text{C}$ 范围内,即取各时间段平均温度起始值与终止值差为 2.5°C (每天降约 1°C)。拉应变会有所缓解,重新来计算一下,综合温差计算为

$$\Delta T = \Delta T_{1(t)} + T_{y(t)} = 2.5 + T_{y(t+3)} - T_{y(t)}$$

表 7 混凝土综合温差 ($\Delta T \leq 25^\circ\text{C}$)

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\Delta T_{(t)}$	3.07	3.43	3.43	3.49	3.52	3.54	3.57	3.61	3.64	3.68

相应的各龄期的混凝土最大拉应变——梁侧 $x = \pm b$ 为

表 8 各龄期的混凝土最大拉应变 ($\Delta T \leq 25^\circ\text{C}$)

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\varepsilon_{(t) \max} \times 10^{-4}$	0.084	0.097	0.10	0.107	0.113	0.121	0.131	0.144	0.158	0.175
累计值	1.23	1.146	1.049	0.949	0.842	0.729	0.608	0.477	0.333	

总降温和混凝土最大拉应变

$$\varepsilon_{\max} = \sum_{t=3}^{30} \varepsilon_{(t) \max} = 1.23 \times 10^{-4} < 1.25 \times 10^{-4} \text{ 满足要求。}$$

表 6、表 8 数据整理得混凝土最大拉应变曲线见图 1,由此可知,只要施工合理,浇筑和养护很好,混凝土内外温差控制在 $\Delta T \leq 25^\circ\text{C}$ 范围内,一般不会出现裂缝。遇到骤降温差时,需做好保温防护准备。

3 梁侧构造钢筋的抗裂作用

配置梁侧构造钢筋对各龄期混凝土极限拉伸值的影响公式为^[4]

$$\varepsilon_{p(t)} = 7.5 f_t \left(0.1 + \frac{\mu}{d} \right) \times 10^{-4} \times \frac{\ln t}{\ln 28}$$

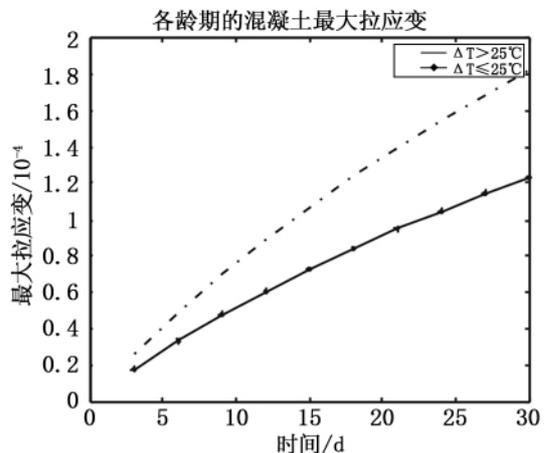


图 1 各龄期的混凝土最大拉应变曲线

(1) 梁两侧设置各一根 $d = 10$ 构造钢筋, 断面为去除上下钢筋配置的影响, 在求配筋率时, 不考虑梁上下 200 范围以内的混凝土面积和钢筋面积, 从而得混凝土面积为

$$F_c = 350 \times (800 - 200 \times 2) = 350 \times 400$$

$$\mu = \frac{F_a}{F_c} \times 100 = \frac{157}{350 \times 400} \times 100 = 0.112, \quad \text{取 } f_t = 2.0 \text{ N/mm}^2 \text{ 得}$$

$$\varepsilon_{p(t)} = 0.5 \times 10^{-4} \ln t$$

表9 梁侧配置各1根构造钢筋时各龄期的混凝土极限拉伸

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\varepsilon_{p(t)} (\times 10^{-4})$	1.7	1.65	1.59	1.52	1.45	1.35	1.24	1.1	0.9	0.549

与表6对照可见, 梁侧只配置各一根构造钢筋不能起到抗裂的作用, 易形成裂缝。

(2) 梁两侧设置各两根 $d = 10$ 构造钢筋

$$\mu = \frac{F_a}{F_c} \times 100 = \frac{314}{350 \times 400} \times 100 = 0.224,$$

$$\text{取 } f_t = 2.0 \text{ N/mm}^2 \text{ 得}$$

$$\varepsilon_{p(t)} = 0.55 \times 10^{-4} \ln t$$

表10 梁侧配置各2根构造钢筋时各龄期的混凝土极限拉伸

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\varepsilon_{p(t)} (\times 10^{-4})$	1.87	1.81	1.74	1.67	1.59	1.49	1.37	1.21	0.99	0.60

与表6对照可见, 当梁侧配置各两根构造钢筋, 间距为 250 时, 各龄期的混凝土极限拉伸值分别略大于各龄期混凝土最大拉应变值, 能起到抗拉的作用, 但他们的差值不大, 抵抗裂缝的可靠度较小, 而且混凝土是多元材料, 随机性较大, 裂缝的形成难免。

(3) 梁侧设置各三根 $d = 10$ 构造钢筋

$$\mu = \frac{F_a}{F_c} \times 100 = \frac{471}{350 \times 400} \times 100 = 0.336,$$

$$\text{取 } f_t = 2.0 \text{ N/mm}^2 \text{ 得}$$

$$\varepsilon_{p(t)} = 0.6 \times 10^{-4} \ln t$$

表11 梁侧配置各3根构造钢筋时各龄期的混凝土极限拉伸

时间(天)	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3
$\varepsilon_{p(t)} (\times 10^{-4})$	2.04	1.97	1.9	1.78	1.73	1.62	1.49	1.32	1.08	0.61

将以上各表数据整理得梁侧配置不同构造钢筋间距时混凝土极限拉伸应变曲线, 见图2, 当梁侧配置三根构造钢筋, 即间距 < 200 时, 各龄期的混凝土极限拉伸值最大, 并大于各龄期混凝土最大拉应变值, 不但能起到抗拉的作用, 而且可靠度较大, 形成裂缝的可能性小得多。

4 ANSYS 分析比较

钢筋混凝土结构由钢筋与混凝土两种材料组成, ANSYS 分析时采用下列假设:

(1) 仅考虑纵向分布筋与混凝土的咬合作用, 横向箍筋的咬合作用不考虑;

(2) 钢筋混凝土构件左右对称, 取其半结构研究;

(3) 钢筋与混凝土之间的咬合作用通过插入联结单元来模拟钢筋和混凝土之间的粘结与滑移关系。

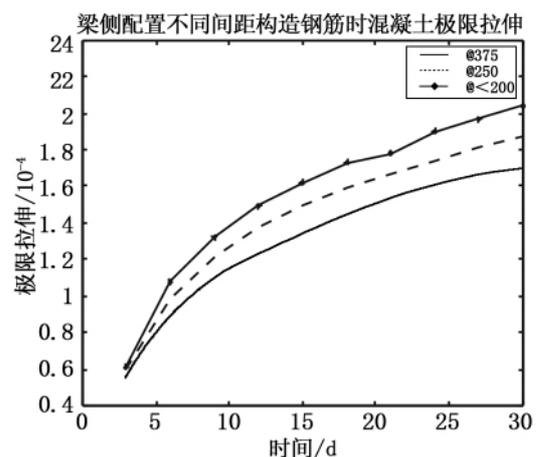


图2 混凝土的极限拉伸应变曲线

4.1 混凝土有限元模型

本文采用单元内部分布裂缝模型处理混凝土裂缝,其优点是由于裂缝发生在单元体内,开裂后就不需重新确定有限元模型,能自动连续计算,裂缝不受单元形状和相邻单元边界的限制。

混凝土本构关系单轴受拉采用规范 GB5001—2002 给定应力-应变的方程,非线性应力应变关系采用 Mises 屈服准则,其函数表达式为^[5]

$$f = \sqrt{J_2} - k = 0$$

式中: J_2 为应力偏量第二不变量; k 为硬化参数。

混凝土塑性变形,采用相关流动法则的 Mises 塑性位势理论^[5]

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$$

其中: $g(\sigma_{ij})$ 为塑性等势能函数; $d\lambda$ 为非负比例系数,即认为塑性势面 $g=0$ 与屈服面 $f=0$ 相同。本文采用等向强化模型处理混凝土强化问题,表 12 给出了 C30 混凝土材料性能参数。

表 12 C30 混凝土材料性能参数

f_t	τ	E_c	ν	α	β_t	β_c
单轴抗拉强度 N/mm ²	单轴抗压强度 N/mm ²	弹性模量 N/mm ²	泊松比	膨胀系数/°C	裂缝间剪力传递系数 张开	裂缝间剪力传递系数 闭合
2	20	30 000	0.20	1.0E-5	0.5	0.9

关闭压碎开关

4.2 钢筋的弹性本构关系

本文只考虑钢筋处于弹性阶段的受力状态,钢筋作为线形单元 LINK8 处理,设钢筋为单向拉伸受力的双线性随动硬化材料,其参数见表 13。

表 13 钢筋材料性能参数

	受拉 II	受压 I	横向箍筋 I
膨胀系数/°C	1.2E-6	1.22E-5	1.22E-5
弹性模量 E_s (N/mm ²)	2E5	2E5	2E5
强度 f_y (N/mm ²)	360	210	210
泊松比	0.3	0.25	0.25

4.3 钢筋与混凝土粘结应力-滑移本构模型^[6]

本文在钢筋和混凝土之间插入联结单元(COMBIN39 弹簧单元)来模拟钢筋和混凝土之间的粘结和滑移,采用 3 段式 $\tau-S$ 曲线模型,见图 3。

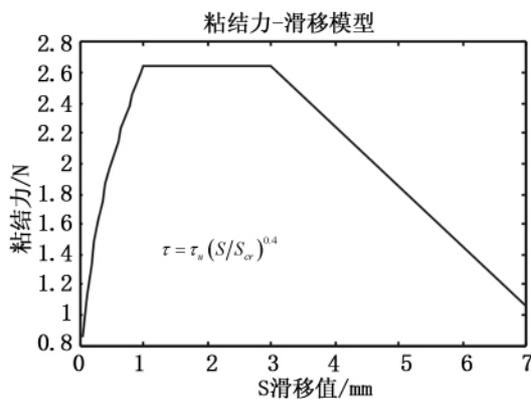


图 3 钢筋和混凝土粘结力-滑移模型

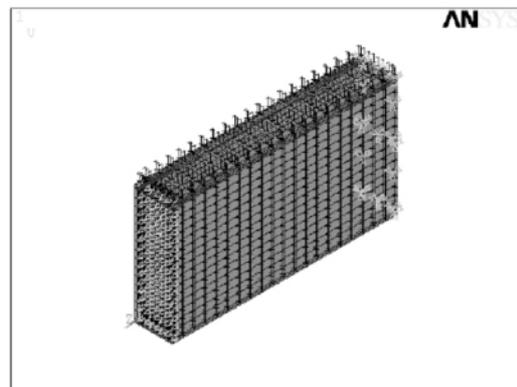


图 4 梁有限元模型

4.4 ANSYS 实例分析

考虑梁长为 3 000 mm,混凝土强度等级 C30。取一半的对称模型,梁顶部施加向下的均布自重荷载,模型图如图 4。

当梁侧配置各 1 ϕ 10 钢筋(ϕ 10@350)时,钢筋单元划分模型见图 5,由 ANSYS 软件分析了梁在降温时的应

变云图 如图 6~8,可见 X 、 Y 方向应变很小,而 Z 方向应变较大区域呈均匀分布。

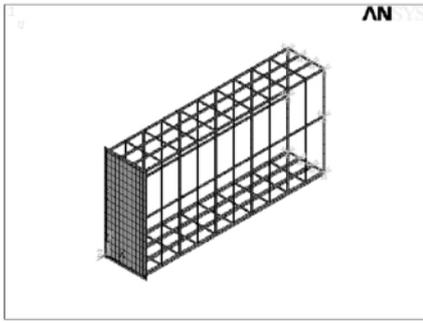


图5 钢筋单元划分($\phi 10@350$)

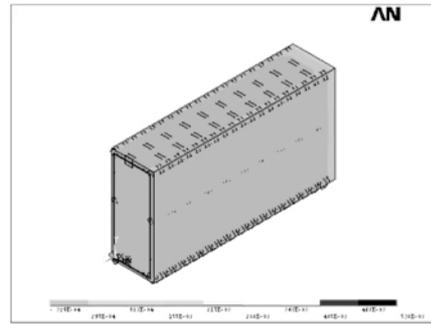


图6 X 方向的应变云图($\phi 10@350$)

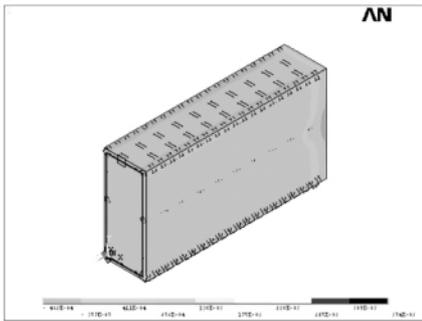


图7 Y 方向的应变云图($\phi 10@350$)

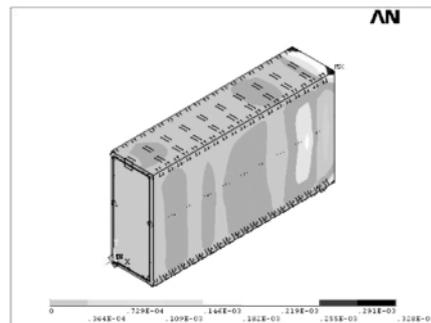


图8 Z 方向的应变云图($\phi 10@350$)

当梁侧配置各 3 $\phi 10$ 钢筋($\phi 10@180$)时,钢筋单元划分模型见图 9,

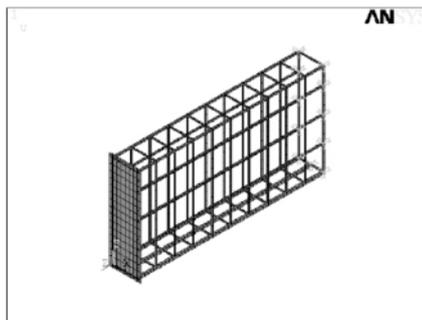


图9 钢筋单元划分($\phi 10@180$)

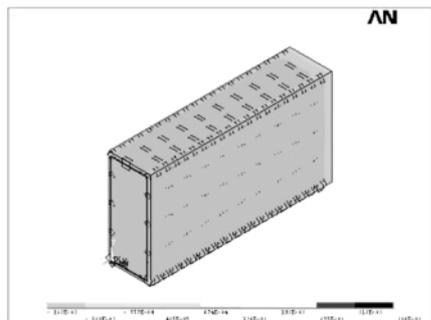


图10 X 方向的应变云图($\phi 10@180$)

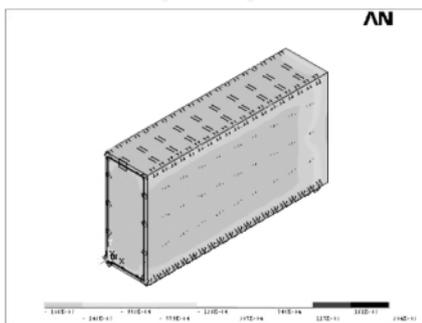


图11 Y 方向的应变云图($\phi 10@180$)

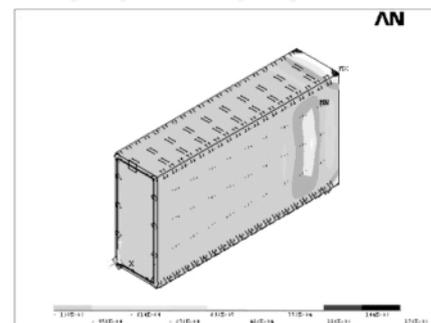


图12 Z 方向的应变云图($\phi 10@180$)

将图 10、11、12 与图 6、7、8 应变云图相比, X 、 Y 方向应变的变化不大, Z 方向应变较大区域的分布明显减少,而且只出现在梁的两端。此时易形成裂缝,这与工程实际中裂缝更多出现在梁两端相符。梁侧构造钢筋间距加密后,应变得到缓和,出现裂缝的可能性降低。

5 结论

通过对结果进行分析比较,作出下面结论:

(1) 梁侧配置构造钢筋对混凝土抗拉能力具有较大的改善,且梁侧配置构造钢筋间距加密至 <200 时,提高了混凝土抗裂性能,因此规范将构造钢筋间距控制在 200 mm 以内是必需的。

(2) 大气温度骤降,梁侧易出现大量表面裂缝,遇到骤降温差时,需做好保温防护准备。

(3) 施工时应做好保温工作,施工合理,浇筑和养护很好,混凝土内外温差控制在 $\Delta T \leq 25^\circ\text{C}$ 范围内,一般不会出现裂缝。

参考文献:

- [1] 江正荣. 建筑施工计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 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.
- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 缪军. 超长大面积混凝土箱型基础无缝施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [5] 江见颢. 钢筋混凝土非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [6] 过振海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Influence of Steels in Both Sides of Beam on the Concrete Shrinkage and Construction Requirements of the Steels

HU Shu - Lan, XU Hai - yan

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The reason why the temperature - shrinkage crack occurs in the reinforced concrete beam is researched, then the beneficial influence of the construction steel in the both sides of the beam on resistance crack is analyzed. The relevant requirements in the concrete code to the construction steels are verified. Finally, according to the ANSYS software, the strain clouds of the reinforced concrete beam are discussed when dropping the temperature, from which the research conclusions are further tested.

Key words: temperature stress; construction steel; temperature - shrinkage

(责任编辑: 王建华)