

# 钢筋混凝土低温下粘结和滑移的数值分析<sup>\*</sup>

王 全 凤

(土木工程系)

**摘要** 本文利用 DIANA 有限单元软件包对低温下钢筋与混凝土之间的粘结应力和滑移关系进行数值分析. 一个新的计算模型在这里被深入研究. 与低温下相同试件拉拔实验的结果比较, 数值分析的预见性在这里得到充分的体现. 因此, 本文提出的数值分析方法是非常有效的.

**关键词** 粘结, 滑移, 数值分析

## 0 前言

钢筋与混凝土之间的粘结力是实现钢筋混凝土功能的最重要条件之一. 对许多结构, 在破坏荷载下, 甚至在正常的工作荷载下, 裂缝会出现在混凝土的受拉区, 这些开裂的混凝土部分会被穿过裂缝的钢筋联成一体, 保证了混凝土构件各个部分的连续性. 这个联结作用的刚度和强度取决于穿过裂缝两边混凝土的钢筋锚固性能. 在这个联结作用中, 粘结力就是钢筋和混凝土之间荷载传递机理的代名词. 在钢筋混凝土中, 所有的力通过这个联结从钢筋传递给混凝土, 或者反之. 在混凝土界面的高应力区, 也就是靠近裂缝处, 或者构件端部锚固区, 粘结应力与混凝土和钢筋之间的相对位移有很大的关系. 这个相对位移, 通常称为滑移, 是由于混凝土与钢筋各自不同的平均应变引进的. 钢筋与混凝土之间的粘结和滑移的关系一直是许多土木工作者研究的目标. 50年代之前, 研究主要集中在粘结力总的方面. 其后, 更多的注意力已经被吸引到粘着力机理、界面应力和滑移上. 最近, 许多新的研究已经涉及到在各种荷载条件和工作环境下, 不同级配混凝土和不同类型钢筋试件的粘结应力和滑移之间的关系.

目前, 在寒冷地区, 类似寒带或靠近寒带地区, 气温可下降到零下40℃, 在那里的结构工程已经成为一个新的、重要的研究领域. 在世界上其它地区, 低温下的结构物已被广泛地运用. 例如, 在极低温-165℃下贮存液态天然气的贮罐. 钢筋混凝土在这样一些结构物中的应用完全取决于我们对低温下材料性能完全的了解.

本文就是致力于利用 DIANA 有限单元软件包分析钢筋与混凝土之间的粘结应力和滑移之间的关系. 一个有效的数学方法——有限单元法在这里被开发, 使得有可能从量和质两方面

本文1990-10-04收到.

\* 本课题系福建省自然科学基金资助项目.

来研究钢筋混凝土的粘结特性.同时,希望看到 DIANA 有限单元软件包对描述和分析复杂的高度非线性工程问题是十分有效的.特别值得一提,一个新的、合适的材料模型和计算模型在这里被广泛地检验.

### 1 实验程序

钢筋混凝土的粘结特性已经研究了许多年.通常,它是借助于易于完成的拉拔试验进行的.本节主要描述试件、实验装置和实验步骤.其它有关实验的更详细资料请见参考文献[4].

#### 1.1 试件

通常,直径20mm的变形钢筋中心锚固长度60mm,也就是3倍的钢筋直径  $d_s$ . 根据 RILEM-CEB-FIP 规范规定,试件的直径应等于10倍的钢筋直径,以及为了在粘着区得到一个常量的温度分布,在钢筋两端3.5倍钢筋直径范围内不考虑粘结作用.所以,直径200mm高200mm的圆柱体混凝土试件用在同心轴拉拔实验中.图1表明试件的几何尺寸.

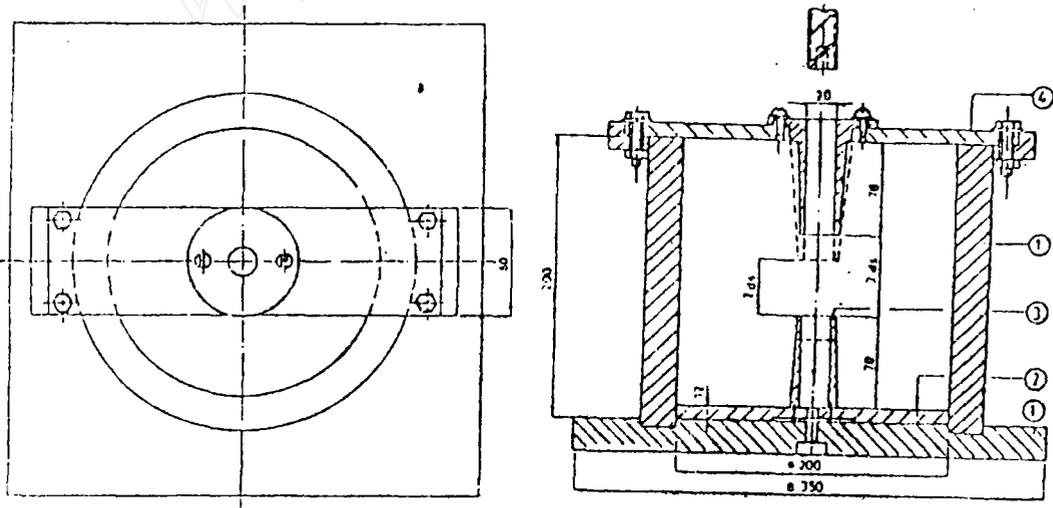


图1 拉拔试件模子的平面和剖面图

①刚性合成材料;②钢板;③钢管;④钢板

五种不同温度下所测量和换算的混凝土材料性质列在表1.其中,  $f_c$  是混凝土圆柱体压缩强度;  $f_t$  是单轴拉伸强度;  $E_c$  是混凝土的弹性压缩模量.

表1 测量和换算的混凝土性质(龄期90天)

温度(°C)	+20.0—0.0	-40.0	-80.0	-120.0	-165.0
$f_c$ N/mm <sup>2</sup>	2.6636	6.4000	8.0955	7.9682	7.5362
$f_t$ N/mm <sup>2</sup>	36.240	60.384	78.216	91.164	93.152
$E_c$ N/mm <sup>2</sup>	34,050	—	52,425	—	66,675

#### 1.2 实验装置

实验前,拉拔试件顶部的混凝土表面用磨床打光.然后,试件放在如图2所示的实验装置

上,此装置保证拉力施加在与浇注方向相反的方向上,也就是所谓的垂直位置.实验设备包括量程400kN的液压千斤顶和一个装有冷却罐D的钢框架.在冷却罐中,拉拔试件是放在100mm厚绝缘材料制成的承载圆盘上.在受力钢筋的一端,离开它的中心部分,套有大于100mm 丝扣.这样,螺帽J能旋在此钢筋上.钢筋的这一端就是借助于这个螺帽固定在千斤顶的夹片H上.钢筋的轴力是用量程400kN的压力盒K测得.

### 1.3 实验步骤

该实验是利用图2所示的传感器G在位移速率1mm/min的位移控制条件下完成.拉拔杆杆端的滑移值是用放置在锚固钢筋自由端的线性电压位移传感器A测量.因为大部分的实验是在低温下进行,这个位移传感器是放在冷却罐外部的膨胀计E上.力和端位移的测量信号是用最大测量频率每秒二百脉冲信号和4k内存的双频道瞬时记录器放大和测量.该实验所用的脉冲时率是5s.每当实验完毕,实验数据存储在软盘上,随后用HP21MX实验室计算机处理.在得到所需的力和滑移的同时,画出粘结应力和滑移关系的曲线,并且分析.有关的实验结果示于图5-9.

## 2 数值模型

本文采用建立在轴对称基础上的滑移层段法<sup>(6)</sup>.这种方法把围绕着钢筋的混凝土层,称为滑移层,与外包混凝土进行区分(图3).滑移层的厚度是这样选择,使得在钢筋罗纹处发生的非线性特征全部落在这个层内.在层内表面,荷载传递将通过粘结和摩擦实现,以及由钢筋罗纹承担,作用在滑移层外表面的剪力和轴向应力与作用在外包混凝土内表面的剪力和轴向应力相平衡.滑移层本身分为若干段,每段的宽度等于钢筋罗纹之间的距离.为了在非线性的有限元分析中确定滑移层段的基本特性,一个联结钢筋和混凝土单元的滑移层单元被用来概括这个基本特性.滑移层段的基本方程组仅仅在轴对称情况下能被使用,意味着要假设钢筋罗纹与它的轴线互相垂直,以及滑移层段外表面的应力和滑移沿着切线方向是常数.同时,在分析滑移层段时,认为环绕钢筋罗纹的混凝土是匀质材料.从学者 Stocki 的研究表明,由于几何边界效应,靠近模子这一边大滑

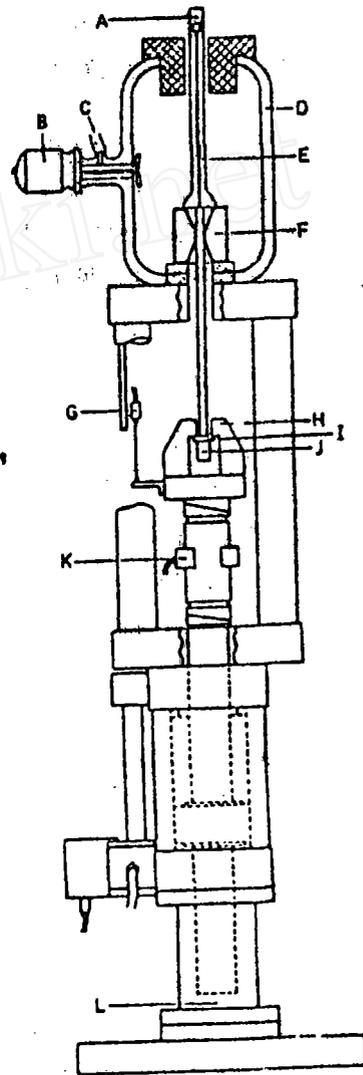


图2 实验装置图

- A—位移传感器; B—鼓风机马达;  
 C—LN<sub>2</sub>喷射口; D—冷却罐;  
 E—膨胀计; F—拉拔试件;  
 G—位移传感器; H—千斤顶的夹片;  
 I—球接头; J—螺帽;  
 K—压力盒; L—位移传感器.

的数量会比离开  
 笼子这一边只几  
 mm大骨料的数量  
 少得多,所以假设  
 环绕钢筋的第一层  
 主要是由砂浆组  
 成,即在一个比较  
 大的距离内采用混  
 凝土的一般性质。

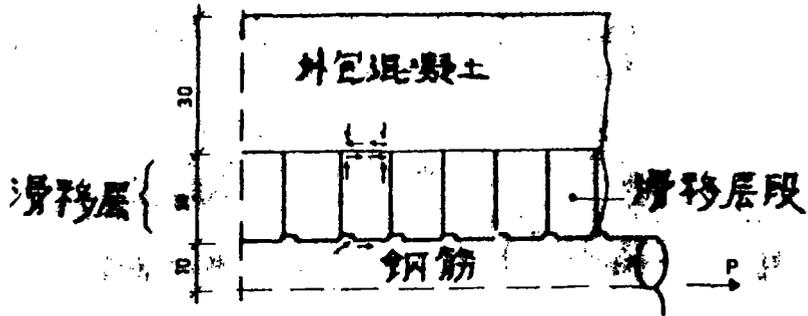


图3 滑移层段法的轴对称图形

这是表明上述的滑移层段法成功的条件。本文假设垂直于钢筋的边界以相同的形式变形,是通过右边界所有结点的位移等于左边界相应结点的位移来处理。外包混凝土的边界刚性平行位移是借助于把这个边界上所有结点的轴向位移和径向位移与这个边界上左角结点相应的位移联系在一起。一个模拟外包混凝土径向刚度的弹簧也被联结在这个滑移层段上述的左角结点上,这个弹簧的刚度值根据参考文献6计算。由学者 Stockl 建议,在钢筋罗纹上部选择2mm厚的砂浆层。又根据学者 GoTo 和 Qtsuke 的研究表明,内部锥形裂缝仅仅在离钢筋表面0.5-1.0倍的钢筋直径内扩展,以及注意到拉拔试件是放置在如图2实验装置所示的承载圆盘上,所以本文取滑移层的厚度等于一半钢筋的直径。加载条件是通过预计的左角结点的轴向位移实现。图4表示滑移层段的有限单元网络划分。

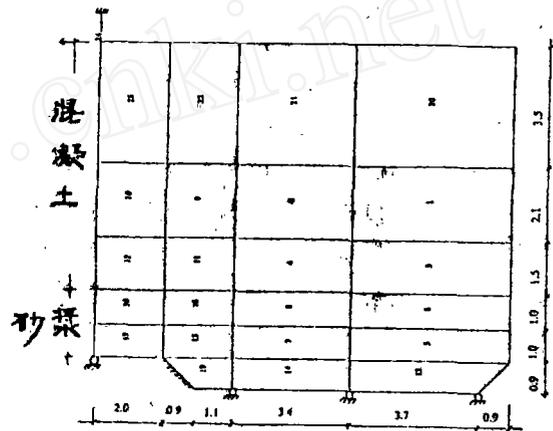


图4 有限单元的网络划分

### 3 计算程序和材料的理想化

DIANA 有限元程序用来进行结构的几何和物理非线性分析。本文单元采用有九个 Gauss 积分点的八结点等参单元。在数值分析的过程中,尽管荷载是逐步增加,最终考虑了总荷载和低温对计算结果的影响。为了研究材料模型特性和迭代过程,最好把荷载分成若干级。对每一个荷载级,迭代一直进行到满足建立在内能基础上的收敛条件。在 DIANA 程序中,有五种非线性分析方法可供选择,它们是线弹性刚度法、常数刚度法、切线刚度法、Newton-Raphson 迭代法和本文选用的修正 Newton-Raphson 迭代法。

建立在非线性弹性基础上的混凝土材料基本模型运用起来非常简单。考虑温度影响的材料模型取决于来自实验结果的弹性模量  $E$ 。对已知的混凝土材料模型还需下列四个参数定义:泊松比  $\mu$ ;在不同温度下,单轴实验提供的拉伸强度  $f_t$  和压缩强度  $f_c$ ;决定应变软化程度的极限拉应变  $\epsilon_s$ 。拉伸软化标准采用线性拉伸软化标准。为了计算极限拉应变的实际值,断裂区想

象由两条纵向劈裂缝分为两个,以及它们都与裂缝的能量有关.因为极限拉应变的值是与在破坏时假设的劈裂缝的数量有关,所以决定对不同的断裂区取相同的极限拉应变值.本文取与参考文献[5]一样的平均极限拉应变值0.001.

正如所预料的那样,拉应力的传递会发生在绝大部分的裂缝处,所以决定不减少裂缝产生后的剪切刚度,即抗剪因子取为1.0.混凝土材料遵循着 Mohr-Coulomb 屈服标准.这个标准用三个参数刻画:粘着系数  $c$ 、摩擦角  $\theta$  和扩散角  $\varphi$  的正弦值.拉伸补偿标准包含着一个裂缝标准为  $\sigma_t = f_t$ ,其中,  $\sigma_t$  为劈裂应力.

## 4 数值分析的结果和比较

### 4.1 粘结应力和滑移的关系

图4表示数值分析拉拔试件的计算简图和一个弹簧单元组成的轴对称有限元网络.采用表1所示的混凝土弹性模量  $E_c$ .在  $-40^\circ\text{C}$  和  $-120^\circ\text{C}$  时,  $E_c$  的值是通过内插求得.根据学者 Stockl 和 Schickert 报道的结果,砂浆层的刚度在室温条件下应该折减到60%,原因是由于相对小的骨料靠近在钢筋表面,以及这种骨料具有小的刚度导致初始的混凝土弹性模量比同样水灰比砂浆的弹性模量大,而且砂浆的弹性模量随着混凝土强度的增加而增加.考虑到  $-40^\circ\text{C}$  和  $-80^\circ\text{C}$  时,混凝土的弹性模量分别是室温下的1.33和1.55倍,所以在这些温度下,砂浆层的刚度取80%混凝土刚度,而不是60%.基于同样原因,在  $-120^\circ\text{C}$  及  $-165^\circ\text{C}$  极低温下,不折减砂浆层的刚度.在数值分析的过程中,为了阐明试件的特征,根据学者 E. Vos 得出结论而提出混凝土材料的下列数据应该说是具有代表性和合理的,即  $\mu=0.2, \theta=30^\circ, \varphi=15^\circ$  以及列在表2的其它数据.其中,  $k$  是模拟外包混凝土的弹簧刚度.

表2 输出数据

温度( $^\circ\text{C}$ )	+20.0—0.0	-40.0	-80.0	-120.0	-165.0
$E_c, \text{N/mm}^2$	34,050	43,2375	52,425	59,131	66,675
$c$	8.1520	14.041	19.930	22.156	24.660
$k \cdot 10^4 \times \text{N/mm}$	1.6239	2.0620	2.5000	1.8200	3.1798

利用上述数据形成 DIANA 程序的数据文件,运行 DIANA 程序,得到了分别画在图5—9的5种不同温度下粘结应力和滑移的关系图(实线表示实验值,虚线表示计算值).

数值分析的结果和实测得到的结果分别比较在图5—9.从上面这些图形,可以看到数值分析的结果在低温下都与实验结果吻合得较好.在室温下,这两种方法的结果有较大的误差.但是,这个差值对数值分析来说是个可以接受的.根据上述五个图形数值分析的结果,还可以看到粘结应力随着温度下降而增加,而且温度愈低,温度的影响愈明显.原因是在低温时,混凝土的刚度和压缩强度同步增加.

### 4.2 扩散角对数值分析结果的影响

图中,虚线、实线和短划线分别表示扩散角取  $10^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $20^\circ$  时的计算值.扩散角在地球力学中的重要性是个众所周知的事实.如果扩散角取零,意味着在屈服时没有体积变化,这是极端的情况.图10表明了  $-120^\circ\text{C}$  下取不同的扩散角对粘结应力和滑移关系的影响.从图中可以看出,扩散角对数值分析结果的影响在大轴向位移条件下是非常灵敏的.反之,在小轴向位移

条件下几乎没有影响.

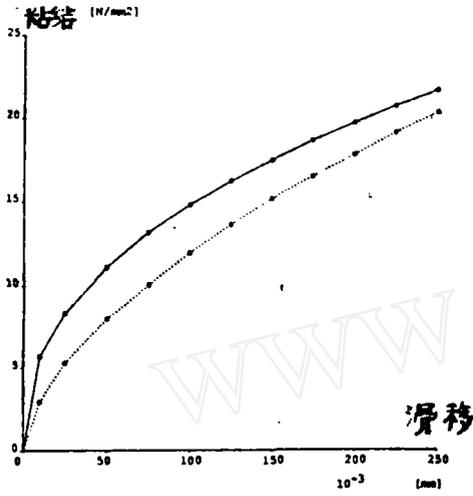


图5 室温下粘结应力和滑移关系的比较

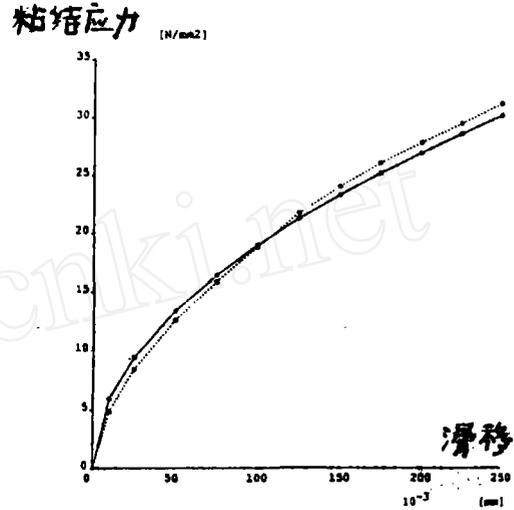


图6 -40°C时粘结应力与滑移关系比较

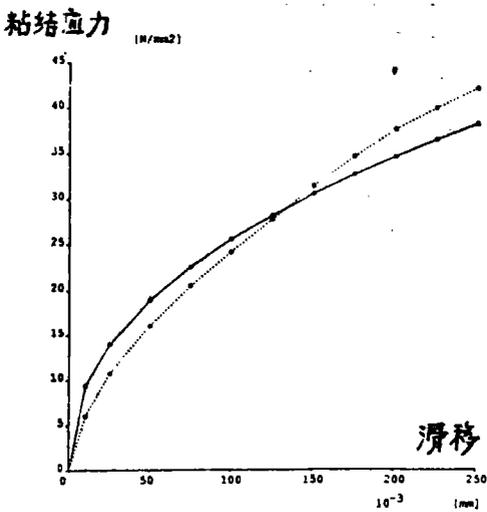


图7 -80°C下粘结应力和滑移关系的比较

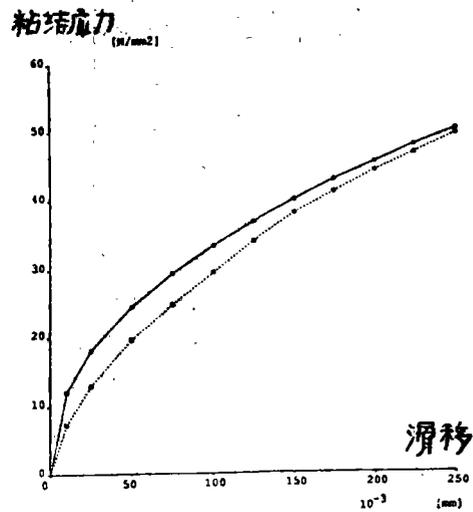


图8 -120°C下粘结应力和滑移关系的比较

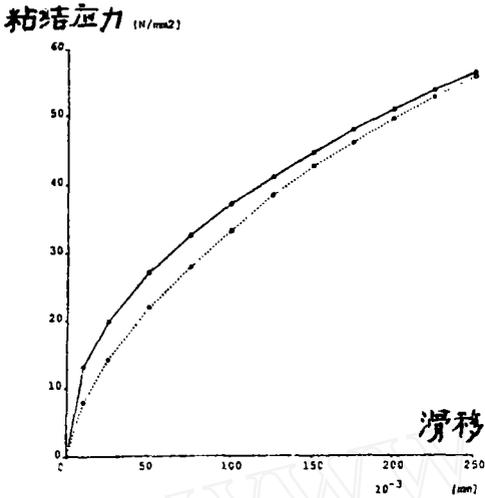


图9 -165℃下粘结应力和滑移关系的比较

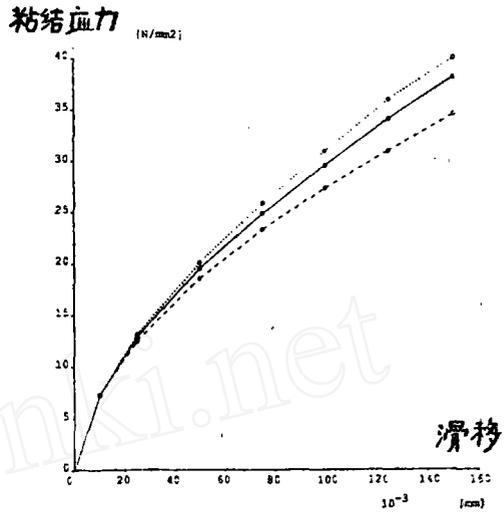


图10 扩散角对数值分析结果的影响

### 4.3 裂缝和塑性区

当温度下降时,锥形裂缝和纵向劈裂缝的预期开展;本数值分析确定的裂缝是根据DIANA混凝土模型的拉伸补偿标准[7],荷载条件是相应于0.025mm轴向位移发生的荷载.在室温和-80℃下裂缝开展的情况如图11、12所示.图中线条代表锥形裂缝,方块代表纵向劈裂缝;线条的长短及方块的大小表示裂缝的大小.

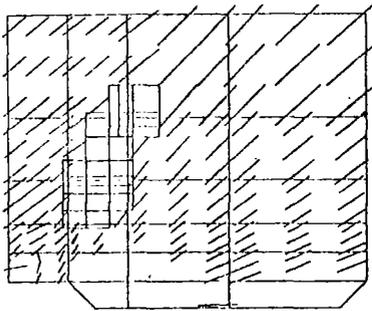


图11 室温下裂缝的类型

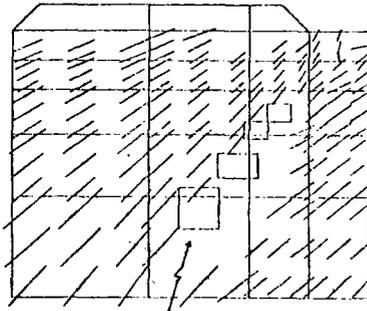


图12 零下80℃下裂缝的类型

从图11、12可以看出,裂缝的类型和塑性区的位置在室温和低温下没有什么本质上的不同.内部锥形裂缝穿过整个滑移层断面以及纵向劈裂缝在这两种不同温度下都出现.而且随着温度的提高,这两种裂缝都进一步开展.原因是随着温度下降,抗拉劈裂强度增加.从图中可以看出,由于三轴压应力引起的塑性区在室温和零下80℃时,大部分都靠近变形钢筋的罗纹处.

## 5 结论

本文利用 DIANA 有限单元程序详细地研究低温下拉拔实验,得到混凝土材料基本特性和实验结果比较,吻合得较好.同时,阐明了粘结应力随着温度下降而增加,以及扩散角对粘结应

力和滑移关系的影响在大轴向位移情况下是比较明显的. 在室温和低温条件下, 裂缝的类型和塑性区的位置基本上一样, 以及塑性区靠近变形钢筋的罗纹处.

### 参 考 文 献

- [1] Shih, T. S., Lee, G. C., and Chang, K. C., *J. Struct. Engng.*, ASCE, 113, 11(1987), 2278—2289.
- [2] Shih, T. S., Lee, G. C., and Chang, K. C., *J. Struct. Engng.*, ASCE, 114, 3(1988), 717—726.
- [3] RILEM/CEB/FIP Committee, *Research and Testing*, 3, 15(1970), 175—178.
- [4] Veen, C. van der, *Bond Stress—slip Relationship at Very Low Temperatures, Part I—Experimental Results*, Stevin Report No. 25—87—43(1987), Delft University of Technology, The Netherlands.
- [5] Vos, E., *Influence of Loading Rate and Radial Pressure on Bond in Reinforced Concrete*, (1983), The Netherlands.
- [6] Timoshenko S. P. and Dere J. M., *Theory of Elasticity*, McGraw Hill Book Com. Inc., (1966), New York.
- [7] Institute TNO for Building Materials and Building Structures, *Nonlinear Analysis, DIANA Finite Element Analysis User's Manual*, 4, (1988), The Netherlands.

## Numerical Analysis of Bond and Slip Inside Steel Reinforced Concrete under Low Temperature

Wang Quanfeng

(Department of Civil Engineering)

**Abstract** A numerical analysis of bond stress and slip relationship between steel and concrete inside steel reinforced concrete was given under low temperature. It was done by means of DIANA finite element program. A new calculational model was extensively studied. As compared with the results from pull-out test of the same test specimen under low temperature, the foresight of numerical analysis was fully embodied. The method of numerical analysis proposed by this paper was shown to be very effective.

**Key words** bonding, slip, numerical analysis