

超高强混凝土梁抗剪性能的有限元分析*

李立仁, 冯宏

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:结合18根立方体抗压强度为100 MPa以上的超高强混凝土有腹筋约束梁在集中荷载作用下抗剪性能的试验研究,利用超高强混凝土的各种基本物理力学性能参数,以非线性有限元分析为基础,采用较为完善的非线性本构模型和破坏准则,编写了超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度有限元分析程序以模拟试验。在非线形有限元分析模拟试验结果和已有试验实测数据的基础上,统计回归出了超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度计算公式。应用该公式所得结果与试验结果符合较好。

关键词:超高强混凝土;约束梁;抗剪强度;非线性有限元

中图分类号:TU375.1;TU317+.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)05-0097-04

Finite Element Analysis of Shear Behavior of Super High Strength Reinforced Concrete Beam

LI Li-ren, FENG Hong

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: On the basis of testing results of shear behavior from 18 super high strength reinforced concrete restrained beams with web reinforcement, with the cube compressive strength ranging from over 100Mpa, in this paper, the nonlinear finite element analysis procedure was formulated and the analysis of the specimen tests was carried out with the parameters obtained from the experiments and improved constitutive model and failure criteria of materials. Based on the simulated shear resistance test results and practical measured data of eighteen super high strength concrete restrained beams under point load, the equation to compute the shear resistance capacity of such beams was thus obtained by regression. The analytical results agree well with those of experiments.

Keywords: super high strength concrete; restrained beam; shear capacity; nonlinear finite element

现代高强混凝土已不再仅是简单的高强,而是在和易性、流动性和耐久性等综合性能上均有很大改善的高性能混凝土。重庆大学蒲心诚教授研制出了强度等级在C100以上的超高强高性能混凝土^[1,2]。作为由国家自然科学基金和建设部联合资助的重点项目《高强与高性能混凝土的结构与力学性能研究》的研究子项之一,陈永庆曾进行了18根立方体抗压强度为100 MPa以上的超高强混凝土有腹筋约束梁在集中荷载作用下抗剪强度的试验研究^[3]。由于技术上和经济上的原因,进行大批量试件试验是十分困难的。因此,有必要采用非线性有限元分析来模拟超高强混凝土有腹筋约束梁的抗剪试验以弥补试验数据的不足。

利用超高强混凝土的各种基本物理力学性能参数,以非线性平面有限元分析理论为工具,采用较为完善的混凝土非线性本构模型和破坏准则,编制了超高

强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度非线性有限元分析程序,并用该程序对文献[3]的试验研究进行了模拟试验分析,分析结果与试验实测结果吻合良好。

通过在程序中改变参数的方式,系统研究了各因素对超高强混凝土约束梁抗剪强度的影响。利用有限元程序模拟试验的结果,结合已有的试验实测数据,统计回归出了超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度计算公式。应用该公式所得计算结果与试验结果符合较好,为进一步模拟超高强混凝土构件的抗剪试验及深入研究超高强混凝土构件的抗剪性能提供了一条可行的途径和理论分析依据。

1 计算模型

1.1 基本假定

对超高强混凝土有腹筋约束梁的有限元计算模型

* 收稿日期:2006-03-10

作者简介:李立仁(1952-),男,河北人,副教授,主要从事超高强混凝土梁抗剪性能的研究。

作出以下四点假定^[4]：

- 1) 梁在其平面内承受弯、剪共同作用时,是平面应力问题;
- 2) 试验研究表明在荷载作用过程中遵循小变形假定,即不考虑其几何非线性;
- 3) 混凝土是各向异性材料;
- 4) 忽略钢筋与混凝土之间的销栓作用。

1.2 混凝土本构关系及破坏准则

1.2.1 混凝土单轴受压时的应力-应变关系 根据文献[5]对超高强混凝土单轴受压性能及应力-应变曲线的试验研究,由试验数据直接绘出的应力-应变曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,超高强混凝土的应力-应变曲线已不再有所下降段。

根据超高强混凝土的特点,采用不含下降段的公式来描述超高强混凝土应力-应变关系:

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\frac{E_c}{E_0} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_c}{E_0} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)} \quad (1)$$

式中: σ_0 和 ε_0 分别为峰值应力和峰值应变。

初始弹性模量:

$$E_c = E_0 = (0.287 \sqrt{f_{cu,10}} + 1.438) \times 10^4 \quad (2)$$

1.2.2 混凝土单轴受拉时的应力-应变关系 采用图 2 所示的受拉应力-应变关系,即:

$$\sigma = f_t / c \quad (0 < \varepsilon < \varepsilon_{cr}) \quad (3)$$

$$\sigma = f_t (10\varepsilon_{cr} - \varepsilon) / q\varepsilon_{cr} \quad (\varepsilon_{cr} < \varepsilon) \quad (4)$$

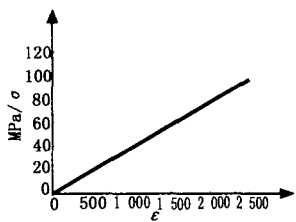


图 1 超高强混凝土受压 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

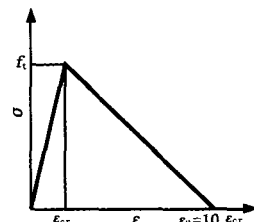


图 2 超高强混凝土受拉 $\sigma - \varepsilon$ 曲线

1.2.3 混凝土双轴压力下的强度准则 取平面有限元分析中应用较广泛的 Kupfer 强度准则。

1.2.4 本构关系模型的建立 为了描述混凝土两轴应力下的变形性能随应力状态和强度等级变化而变化的规律,按正交异性材料考虑的混凝土本构关系采用 Darwin - Pecknold 增量模型。增量模型中引入了排除泊松比效应的等效单轴应变来确定切线弹性模量。考虑材料主轴方向的旋转,混凝土开裂前材料主轴方向与主应力方向一致,开裂后材料主轴方向不再改变,主应力方向取为材料主轴方向。

1.3 钢筋本构关系及屈服准则

钢筋属于理想弹塑性材料,采用理想弹塑性应力-应变关系,引用 Von Mises 屈服准则。 σ_s 按下式计算:

$$\sigma_s = \pm \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

1.4 钢筋和混凝土之间的粘结性能及本构关系

徐有邻等发现高强混凝土的粘结机理与普通强度混凝土有所不同,在同样滑移量条件下,高强混凝土剪切应力 τ 比普通强度混凝土大, $d\tau/ds$ 也较大。采用修正的狄生林公式来表达钢筋与混凝土之间的局部粘结应力(平均值)与滑移之间的关系,即:

$$\tau = (67.2 \times 10^3 S - 21.7 \times 10^6 S^2 + 22 \times 10^9 S^3) \times 1.5 \quad (6)$$

式中: τ 为平均粘结应力, kg/cm^2 ; S 为相对滑移量, cm 。

2 有限元离散模型及单元类型的选择

2.1 有限元离散模型

钢筋混凝土构件由钢筋和混凝土两部分组成。采用分离式有限元离散模型,从而形成三种单元形式:混凝土单元、钢筋(包括纵筋、箍筋)单元和联结单元。图 3 表示钢筋混凝土结构的离散化示意图。

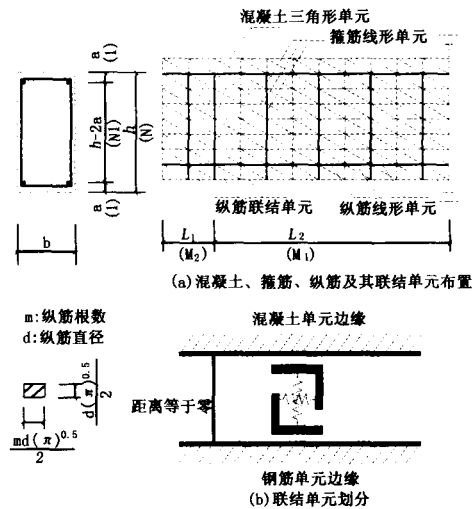


图 3 结构单元离散化示意图

2.2 单元类型选择

2.2.1 混凝土单元 采用三角形常应变单元,图 3a 为单元划分示意图。调整图中的 N_1 、 M_1 、 M_2 就可改变单元尺寸,自动形成不同大小的混凝土单元网格。各单元的基本参数,包括结点编号、结点坐标、单元面积及单元厚度均由程序自动形成。

2.2.2 钢筋单元 纵向受力钢筋划分成线性单元,单元结点与混凝土共享,不考虑箍筋与混凝土之间的相对滑移。具体划分见图 3a。

2.2.3 考虑粘结滑移的联结单元 为模拟纵筋与混凝土之间相对滑移的影响,引入双弹簧联结单元。联结单元一端与混凝土节点联结,另一端与相邻的钢筋单元联结。联结单元的两个结点坐标值相同,但却有不同的结点编号。联结单元的布置方式如图3b所示。

3 单元开裂及破坏(或屈服)后的处理

3.1 混凝土的裂缝模式及受拉硬化

采用分布式裂缝模式来模拟混凝土的开裂。即一旦混凝土单元主拉应力 $\sigma_1 \geq f_t$,则认为该单元沿 σ_2 方向全部开裂。考虑到裂缝截面处钢筋的作用,认为在混凝土开裂后,仍残留一部分刚度。混凝土这部分刚度用来考虑裂缝间混凝土的作用,从而可间接考虑粘结力及骨料咬合力的作用。

在数值分析中,考虑混凝土的受拉硬化就是考虑其受拉应力-应变曲线的下降段。采用图4所示的二折线模型。假设单元开裂,则在开裂的 σ_1 方向对应于 ε_1 的应力为 σ_1' ,可得:

$$\sigma_1' = f_t \left(1 - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{cr}} \right) \quad (7)$$

$$E_1' = \frac{f_t}{\varepsilon_u - \varepsilon_{cr}} \quad (8)$$

式中: ε_{cr} 为对应于单轴抗拉强度 f_t 的应变, E_1' 为开裂后沿 σ_1 方向的弹性模量。

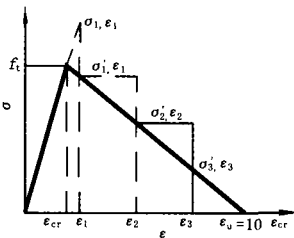


图4 混凝土受拉开裂后应力计算示意图

3.2 混凝土开裂、破坏后的处理

对于混凝土开裂单元,则在开裂方向按式(7)和(8)进行处理,将超额应力转换为等效结点力,并调整单元刚度矩阵;若混凝土单元被压碎,应将该单元的应力全部转换为用整体坐标表示的超额应力 σ_{hex} 和等效结点力。

3.3 钢筋(箍筋)单元屈服后的处理

若单元的 Von Misses 应力大于其单向轴拉屈服强度时,也应将超额应力 σ_{hex} 转换为等效结点力,此时单元刚度矩阵 $[K]^e = [0]$,表示在后续荷载增量下应力不再增大。

3.4 联结单元破坏后的处理

联结单元破坏后的处理分外部弹簧(即在邻近裂缝处)和内部弹簧(离裂缝较远处)两种不同情况。内

部弹簧是认为当粘结力达到最大值后,不会发生粘结破坏,即使进一步发生滑移,粘结力也保持原来峰值。因高强混凝土构件即使产生粘结破坏后,仍有不小的粘结力,采用内部弹簧。

当平行于钢筋滑移面方向的弹簧应变即滑移量 $|\varepsilon_h| > \varepsilon_{max} = 0.03 \text{ mm}$ 时,将超额应力 σ_{hex} 转换为等效结点力。

4 非线性分析方法及计算

4.1 非线性分析方法

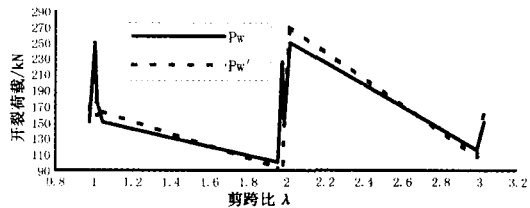
用有限元求解非线性问题有增量法、迭代法和增量迭代法。采用始点刚度增量法,在第 i 级荷载增量计算时采用由第 $i-1$ 级的应力和应变计算得出的刚度矩阵 $[k_{i-1}]$,即第 i 级荷载增量的位移增量 $\{\Delta\delta_i\}$ 可按下式计算:

$$[k_{i-1}]\{\Delta\delta_i\} = \{\Delta P_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

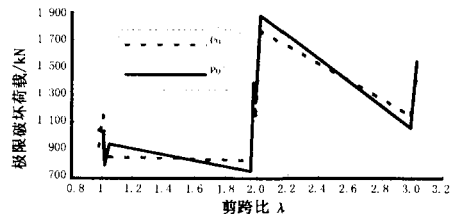
初始刚度矩阵 $[k_0]$ 可根据应力-应变曲线的初始弹性模量等参数计算确定。

4.2 程序验证及分析

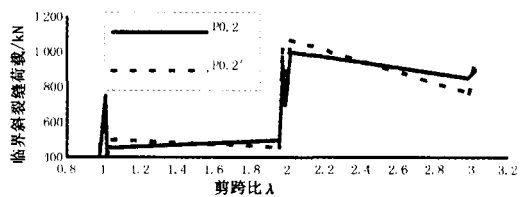
依照上述原理编制了超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度非线性有限元分析程序,程序采用增量法求解。利用该程序对文献[3]中用于抗剪试验研究的梁进行抗剪强度的全过程分析并对试验结果进行了对比。计算结果与试验结果的对比详图5。



a) 开裂荷载对比图



b) 极限破坏荷载对比图



c) 临界斜裂缝荷载对比图

图5 计算结果与试验结果对比图
注:图中虚线均为通过程序计算的结果

从图5中可以看出程序计算结果与试验实测结果符合良好。该程序用于模拟超高强混凝土有腹筋约束

梁抗剪试验是可行的。

5 超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度分析

5.1 抗剪强度影响因素分析

5.1.1 混凝土强度对抗剪强度的影响 混凝土强度越高,钢筋混凝土构件抗剪承载力也越大。前苏联的试验表明,以混凝土抗拉强度表示混凝土强度更符合试验结果。采用混凝土抗拉强度 f_t 代表抗剪强度中的混凝土强度。

5.1.2 配箍特征值对抗剪强度的影响 随配箍特征值增大,抗剪强度显著增大;在剪跨比相近条件下,抗剪强度与配箍特征值接近直线关系。

5.1.3 剪跨比对抗剪强度的影响 剪跨比 $\lambda = M/Vh_0$ 是破坏截面的弯矩、剪力之比,反映了正应力 σ 与剪应力 τ 的比值关系即梁的应力状态。对约束梁而言, $\lambda = \frac{M}{Vh_0} = \frac{a}{h_0} \frac{1}{n+1}$ (n 为最大正负弯矩之比值)。

支座反力及集中荷载作用处会产生竖向压应力 σ_y , σ_y 的存在将减小主拉应力值,提高抗剪强度。当 λ 较小时, σ_y 的影响在整个剪跨区比较明显; λ 较大时, σ_y 的影响只存在于支座及集中荷载作用附近。

以上对各种影响参数的分析,与根据已有试验资料得出的分析结果一致。

5.2 超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度计算

影响混凝土构件抗剪强度的因素很多。根据对模拟试件试验结果的分析,并借鉴有关文献的结论,同时考虑到当其他条件不变时,在 f_t 与 V_{cs}/bh_0 之间及 $\rho_{sv} f_{yv}/f_t$ 与 V_{cs}/bh_0 之间均存在着线性关系,采用如下形式的抗剪强度公式:

$$V_{cs} = V_c + V_s = K_c bh_0 f_t + K_s \rho_{sv} f_{yv} bh_0 \quad (10)$$

式中: K_c 、 K_s 为与剪跨比有关的系数。

考虑到剪跨比对箍筋传递剪力的大小影响,为了使公式尽可能精确,在腹筋承担的剪力项中也考虑剪

跨比的影响。设 $K_s = A + B\lambda$,代入(6)式,经统计回归,给出集中荷载作用下超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度建议计算公式如下:

$$V_{cs} = \frac{1.88}{\lambda + 1} f_t bh_0 + (1.169 + 0.072\lambda) \rho_{sv} f_{yv} bh_0 \quad (11)$$

建议公式与文献[3]的试验结果之比的平均值为0.989,标准差为0.096,变异系数为0.098。

式中: $1.0 \leq \lambda \leq 3.0$, $0.39 \leq \rho_{sv} \frac{f_{yv}}{f_t} \leq 1.28$ 。

6 结语

1)编写的超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度非线性有限元分析程序,分析结果与实测试验结果吻合良好。此程序用以模拟超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度试验是可行的。

2)在模拟试验与试验数据基础上,经回归分析,提出超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度建议计算公式:

$$V_{cs} = \frac{1.88}{\lambda + 1} f_t bh_0 + (1.169 + 0.072\lambda) \rho_{sv} f_{yv} bh_0$$

参考文献:

- [1] 蒲心诚,严吴南. 100~150 MPa 超高强高性能混凝土的配制技术[J]. 混凝土与水泥制品,1998,(6):19-21.
- [2] 蒲心诚,严吴南. 特细砂超高强性能混凝土的配制技术[J]. 重庆建筑大学学报,1999,21(1):1-4.
- [3] 陈永庆. 集中荷载下超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度的试验研究[D]. 重庆建筑大学,1999.
- [4] 江建华,李杰. SRC 构件抗剪性能非线性有限元分析[J]. 结构工程师,2000,(S0):30-34.
- [5] 王志军. 超高强混凝土单轴受压性能及 $\sigma-\epsilon$ 曲线的试验研究[J]. 重庆建筑大学学报,2000,22(S0):27-33.