

高强钢筋混凝土预制弧板井壁力学特性分析

荣传新^{1,2}, 王秀喜¹, 程桦²

(1. 中国科学技术大学中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230026;

2. 安徽理工大学土木工程系, 安徽淮南 232001)

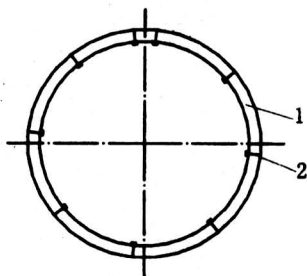
[摘要] 对高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构的研究表明, 实验结果与数值计算结果基本一致。高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构具有很高的承载能力, 影响其承载能力的主要因素依次为混凝土的强度等级、厚径比和配筋率。在均布荷载作用下, 混凝土的强度等级提高 10 MPa, 极限承载力提高 1.26 MPa。厚径比每增加 1%, 极限承载力增加 0.85 MPa。增大配筋率对提高其极限承载力作用不大, 配筋率增大 3 倍, 极限承载力只增加了 0.1 MPa。

[关键词] 高强钢筋混凝土预制弧板井壁; 力学特性; 有限元法; ANSYS

[中图分类号] TD265.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0043-07

1 引言

在矿井建设中, 采用冻结法施工时, 按现行的钢筋混凝土外层井壁形式及设计计算方法, 会造成工程费用增加, 施工速度受到严重影响。同时, 由于地压值的增加, 很难保证外壁的安全。高强钢筋混凝土预制弧板井壁由弧形钢筋混凝土构件及构件间可缩接头组成^[1,2], 图 1 是其横截面示意图, 其构件强度高, 能立即承受压力。根据井筒直径不同和提升能力大小, 井壁通常由 6~10 块构件组成。根据可缩性和冻结壁抗力要求, 可缩接头可选择不同的材料, 混凝土强度等级一般应大于 C60。



1—高强钢筋混凝土预制弧板构件; 2—可缩接头

图 1 高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构示意图

Fig.1 The whole structure sketch map of high strength reinforced concrete arc shaft wall

对于高强钢筋混凝土结构, 一般是通过实验和有限元分析方法对钢筋混凝土或钢纤维混凝土梁或板的力学特性进行研究^[3-8]。姚直书^[9]、程桦^[10]等分别对高强钢筋混凝土井壁和高强混凝土钢板井壁结构进行了试验研究, 而关于对高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构的力学特性研究尚未见报导。笔者用 ANSYS 程序建立了这种弧板井壁结构的三维有限元模型, 力学特性分析结果与实验结果吻合良好, 为其设计提供了依据。

2 计算方法

2.1 基本假定

1) 钢筋混凝土选用分离式模型; 用杆件单元 (ANSYS 的 Link8 单元) 模拟钢筋, 用混凝土单元 (ANSYS 的 Solid65 单元) 模拟混凝土^[11], 并通过混凝土单元和钢筋单元共用节点实现位移协调。

2) 假定混凝土材料为初始各向同性材料, 除了含有塑性性能外, 能够在积分点上允许出现开裂和压碎, 且塑性发生在开裂和压碎之前。

3) 在每个积分点的 3 个正交主方向上都允许开裂, 开裂的裂缝通过调整混凝土材料的应力应变矩阵来模拟, 并将裂缝作为模糊开裂区域对待。

4) 如果在某个积分点上出现压碎破坏, 则忽略该点对单元刚度的贡献。

[收稿日期] 2004-09-14; 修回日期 2004-11-09

[作者简介] 荣传新 (1968-), 男, 安徽六安市人, 中国科学技术大学博士生, 安徽理工大学副教授, 主要从事岩土工程和结构工程方面的教学与科研工作。

2.2 屈服和破坏准则

结合高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构的主要力学特性，混凝土材料的屈服模型选用多线性随动强化模型，钢筋材料选用双线性各向同性强化模型。复杂应力状态下的混凝土破坏准则可表示为^[12]

$$F/f_c - A \geq 0 \tag{1}$$

式中： F 为主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的函数； A 为用主应力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 和 5 个材料参数 $f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2$ 表示的破坏面； f_t, f_c, f_{cb} 分别为单轴抗拉、单轴抗压和双轴抗压的极限强度； f_1, f_2 分别为静水压力下的双轴和单轴压应力状态的极限抗压强度。

如果方程式 (1) 不满足，则高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构中不发生拉裂和压碎。反之，如果某个方向的主应力为拉应力，弧板井壁结构中将出现拉裂破坏；当三个方向的主应力均为压应力时，则弧板井壁结构中将出现压碎破坏。

根据不同的应力状态，混凝土的破坏准则可分为如下四个区域^[11]：

2.2.1 在 $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 区域

$$F = F_1 = 15^{-1/2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \tag{2}$$

$$A = A_1 = \{2r_2(r_2^2 - r_1^2)\cos\eta + r_2(2r_1 - r_2) \cdot [4(r_2^2 - r_1^2)\cos^2\eta + 5r_1^2 - 4r_1r_2]^{1/2} / [4(r_2^2 - r_1^2)\cos^2\eta + (r_2 - 2r_1)^2]\} \tag{3}$$

A_1 表示破坏面，如图 2 所示^[11]，且有如下关系：

$$\cos\eta = (\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) / 2^{1/2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2};$$

$$r_1 = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2;$$

$$r_2 = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2; \xi = \sigma_m / f_c$$

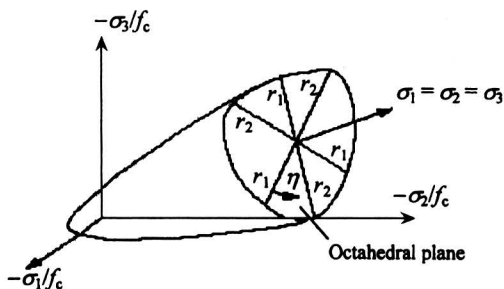


图 2 主应力空间中的破坏面

Fig.2 3-D failure surface in principal stress space

r_1 表达式中的 a_0, a_2 和 a_3 可由下式得到：

$$\begin{bmatrix} \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = f_t, \sigma_2 = \sigma_3 = 0) \\ \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 = -f_{cb}) \\ \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = -\sigma_m, \sigma_2 = \sigma_3 = -\sigma_m - f_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \xi_1^2 \\ 1 & \xi_{cb} & \xi_{cb}^2 \\ 1 & \xi_1 & \xi_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $\xi_1 = f_t/3f_c, \xi_{cb} = -2f_{cb}/3f_c, \xi_1 = -\sigma_m/f_c - 2f_1/3f_c, \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 为平均应力。

r_2 表达式中的 b_0, b_2 和 b_3 可由下式得到：

$$\begin{bmatrix} \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -f_c) \\ \frac{F_1}{f_c}(\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma_m, \sigma_3 = -\sigma_m - f_2) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{9} \\ 1 & \xi_2 & \xi_2^2 \\ 1 & \xi_0 & \xi_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 $\xi_2 = -\sigma_m/f_c - f_2/3f_c, \xi_0$ 为方程 $a_0 + a_1\xi_0 + a_2\xi_0^2 = 0$ 的正根。

r_1 和 r_2 与 ξ 之间的关系如图 3 所示^[11]， r_1, r_2 分别为相似角 $\eta = 0^\circ$ 和 60° 时的破坏面，且 $0.5 < r_1/r_2 < 1.25$ 。若破坏准则被满足，则材料发生压碎破坏。

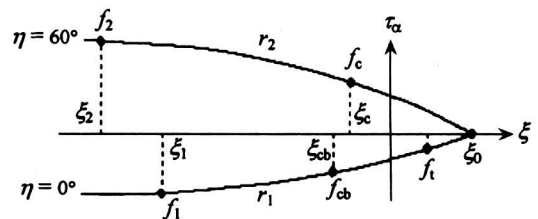


图 3 破坏面的剖面图

Fig.3 A profile of the failure surface as a function of ξ

2.2.2 在 $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 区域

$$F = F_2 = 15^{-1/2} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2]^{1/2} \tag{6}$$

$$A = A_2 = (1 - \sigma_1/f_t) \{2p_2(p_2^2 - p_1^2)\cos\eta + p_2(2p_1 - p_2) [4(p_2^2 - p_1^2)\cos^2\eta + 5p_1^2 - 4p_1p_2]^{1/2} / [4(p_2^2 - p_1^2)\cos^2\eta +$$

$$(p_2 - 2p_1)^2] \quad (7)$$

式中 $p_1 = a_0 + a_1\chi + a_2\chi^2$; $p_2 = b_0 + b_1\chi + b_2\chi^2$; $\chi = (\sigma_2 + \sigma_3)/3$; 其他符号同前。

2.2.3 在 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ 区域

$$F = F_3 = \sigma_i; i = 1, 2 \quad (8)$$

$$A = A_3 = (1 + \sigma_3/f_c)f_t/f_c \quad (9)$$

2.2.4 在 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ 区域

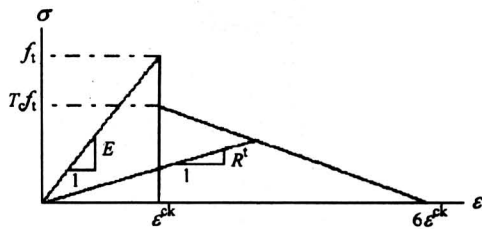
$$F = F_4 = \sigma_i; i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

$$D^{ck} = \frac{E}{1 + \nu} \begin{bmatrix} R'(1 + \nu)/E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1 - \nu) & \nu/(1 - \nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu/(1 - \nu) & 1/(1 - \nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_t/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_t/2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

若此裂缝闭合后，裂缝闭合的判据为开裂应变小于零^[11]，混凝土的本构矩阵为

$$D^{ck} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c(1 - 2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c(1 - 2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中： R' 是割线模量(见图 4^[11])， β_t 为裂缝张开时剪力传递系数， β_c 为裂缝闭合时剪力传递系数，且 $0 < \beta_t < \beta_c < 1$ 。其中上标 ck 表示应力应变关系适用于平行于主应力方向的坐标系且 x^{ck} 轴垂直于裂缝面， E, ν 为混凝土的弹性模量和泊松比。



T_c —multiplier for amount of tensile stress relaxation (defaults to 0.6)

图 4 张开裂缝控制强度

Fig.4 Strength of cracked condition

3 几何模型及参数

数值计算和模型实验采用的几何模型如图 5a 所示，这是一个典型的高强钢筋混凝土预制弧板构件。材料的物性参数见在表 1，其中 f_{cb} 为极限双

2.3 裂缝处理

出现裂缝后，假定材料是连续的，仍用连续介质力学的方法来处理。如果某一计算单元内的某个积分点的应力状态满足开裂的条件，则认为该积分点周围的一定区域开裂，并认为是在垂直于引起开裂的应力方向形成无数平行裂缝，把开裂单元处理为正交异性材料单元。当单元某个积分点 x 轴方向出现裂缝且裂缝张开时，混凝土的本构矩阵为

轴抗压强度， f_1 为静水压力下的双轴压应力状态的极限抗压强度， f_2 为静水压力下的单轴压应力状态的极限抗压强度，取 ANSYS 中的默认值^[11]。混凝土的应力应变关系如图 6 所示。

4 力学特性分析

利用 ANSYS 有限元分析软件对 7 种不同混凝土材料、4 种不同厚径比和 6 种不同配筋率的高强钢筋混凝土预制弧板构件进行了数值模拟，共划分 2 006 个单元，其中 Solid65 单元 1 856 个、Link8 单元 150 个(见图 5b)，边界条件处理如图 7 所示。高强钢筋混凝土预制弧板构件实验进行了 2 次(见图 8)，浇筑预制弧板构件混凝土单轴抗压强度为 81.28 MPa (混凝土材料编号为 6)，配筋率为 0.873%。

4.1 有限元计算与实验结果对比

图 9 为高强钢筋混凝土预制弧板构件(混凝土单轴抗压强度为 81.28 MPa，配筋率为 0.873%) A 点(见图 7)环向应力 σ_θ 与荷载 P 之间的关系，图 10 为该构件 A 点径向位移 u_r 与荷载 P 之间的

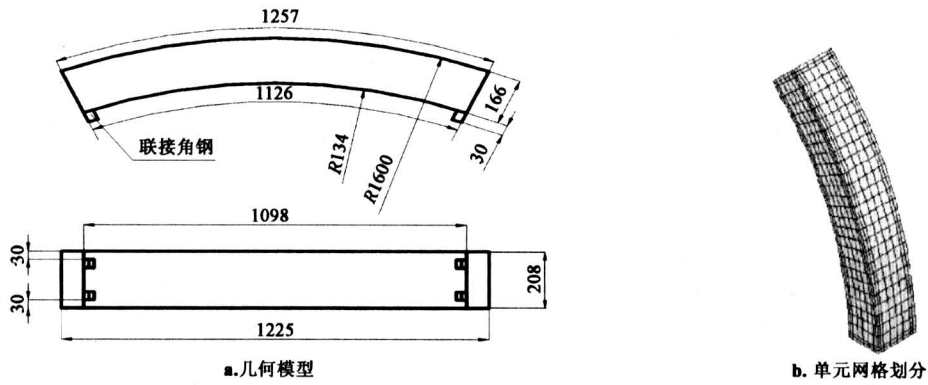


图 5 几何模型和单元网格划分 (mm)

Fig.5 Geometry model and element mesh (mm)

表 1 计算模型物性参数

Table 1 Physical parameter of calculation model

材质	编号	弹性模量 E/MPa	泊松比	单轴抗压 强度 f_c/MPa	单轴抗拉 强度 f_t/MPa	裂缝张开剪力 传递系数 β_t	裂缝闭合剪力 传递系数 β_c
混凝土	1	35 300	0.23	54.28	6.38	0.45	0.9
	2	38 600	0.23	59.45	6.54	0.45	0.9
	3	42 410	0.23	65.28	7.18	0.45	0.9
	4	40 600	0.23	71.82	7.90	0.45	0.9
	5	44 400	0.23	77.98	8.43	0.45	0.9
	6	44 800	0.23	81.24	8.58	0.45	0.9
	7	48 820	0.23	85.62	9.42	0.45	0.9
钢筋		210 000	0.285	240			

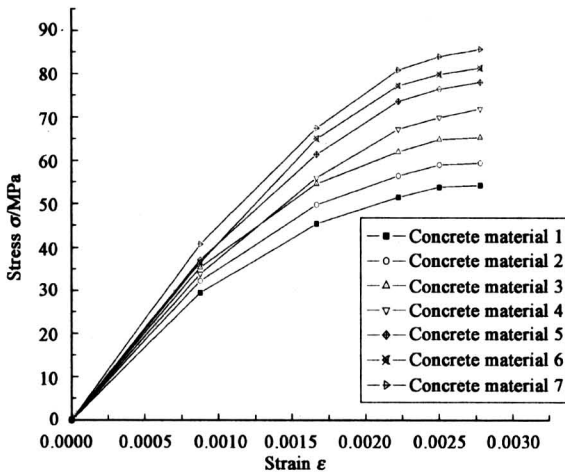


图 6 混凝土材料的单轴受压的应力应变关系

Fig.6 Uniaxial compressive stress-strain curves for concrete

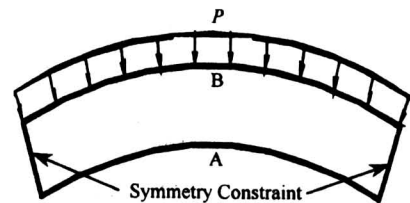


图 7 边界条件示意图

Fig.7 Illustration of boundary conditions

实验结果与数值计算结果基本一致, 在荷载超过 4 MPa 时, 实验得到的环向应力 σ_θ 和径向位移 u_r 均大于有限元计算值, 但差别不大; 第一次实验, 高强钢筋混凝土预制弧板构件的破坏荷载为 8.95 MPa, 对应的 A 点环向应力 σ_θ 为 80.98 MPa, 径向位移 u_r 为 5.4 mm; 第二次实验, 其破坏荷载为 9.25 MPa, 对应的 A 点环向应力 σ_θ 为 82.12 MPa, 径向位移 u_r 为 5.82 mm; 而 ANSYS 计算的破坏荷载为 10.439 MPa, 对应的 A 点环向应力

关系。

由图 9 和图 10 可见, 在荷载小于 4 MPa 时,

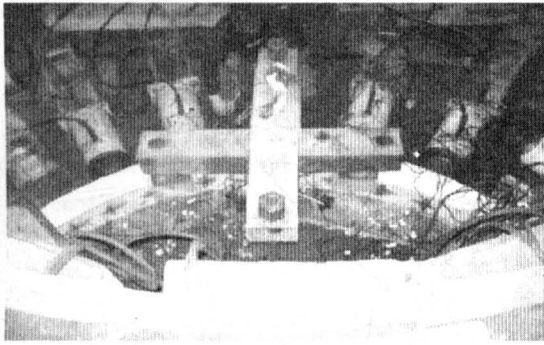


图 8 高强钢筋混凝土预制弧板
构件实验装置图

Fig.8 The test of high strength reinforced
concrete arc component

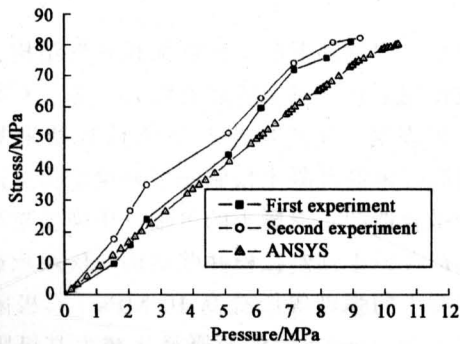


图 9 构件 A 点混凝土环向应力
 σ_0 与荷载 P 关系

Fig.9 Pressure $P - \sigma_0$ plot at
point A for concrete

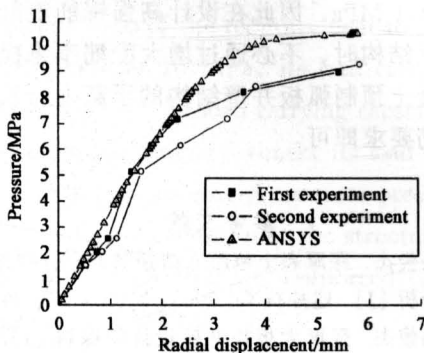


图 10 构件 A 点径向位移 u_r 与荷载 P 关系

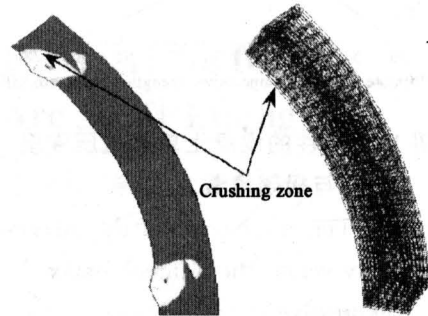
Fig.10 Pressure $P - u_r$ plot
at point A for concrete

σ_0 为 81.022 MPa, 径向位移 u_r 为 5.79 mm。实验结果 (2 次实验结果平均) 与计算结果之间相差

的百分比分别为: 环向应力 σ_0 相差 0.652%, 径向位移 u_r 相差 -3.11%, 破坏荷载相差 -12.83%。图 11 为高强钢筋混凝土预制弧板构件破坏图。可以看出, 实验的破坏位置与有限元计算的破坏位置吻合良好。这表明, 对高强钢筋混凝土预制弧板构件选用的计算模型是合适的。



a. 实验破坏图



b. 数值计算破坏图

图 11 高强钢筋混凝土预制弧板构件破坏图

Fig.11 The crashing patterns of high strength
reinforced concrete arch board component at failure

4.2 有限元计算结果分析

图 12 为混凝土的单轴抗压强度与高强钢筋混凝土预制弧板构件 (配筋率为 0.873%) 的极限承载力之间的关系曲线, 图 13 为不同的配筋率 (配筋率分别为: 0.491%, 0.668%, 0.873%, 1.105%, 1.364%, 1.65%) 与高强钢筋混凝土预制弧板构件 (混凝土单轴抗压强度为 81.28 MPa) 的极限承载力之间的关系曲线。由图 12 和图 13 可见, 混凝土的单轴抗压强度越高其极限承载力越大, 配筋率越大其极限承载力也有所提高, 但混凝土的单轴抗压强度对高强钢筋混凝土预制弧板构件的极限承载力起着决定作用, 混凝土的强度等级提高 10 MPa, 高强钢筋混凝土预制弧板构件的极限承载力提高 1.26 MPa。增大配筋率对提高高强钢筋混凝土预制弧板构件的极限承载力作用不大, 配

筋率由 0.491% 增大到 1.65%，高强钢筋混凝土预制弧板构件的极限承载力从 10.386 MPa 增大到 10.485 MPa，即配筋率增大了 3 倍左右，高强钢筋混凝土预制弧板构件的极限承载力只增加了 0.1 MPa，这是由于高强钢筋混凝土预制弧板井壁在均布荷载作用下是受压结构，钢筋对提高高强钢筋混凝土预制弧板构件的极限承载力作用不大。因此在设计高强钢筋混凝土预制弧板井壁时，无需提高配筋率来提高高强钢筋混凝土预制弧板井壁承载力。

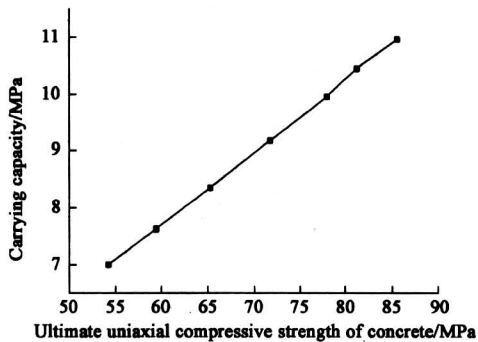


图 12 构件的混凝土单轴抗压强度与极限承载力关系

Fig. 12 The relationship of the carrying capacity versus the ultimate uniaxial compressive strength of concrete

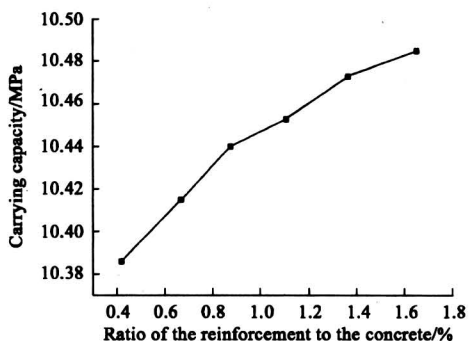


图 13 构件中配筋率与极限承载力关系

Fig. 13 The plot of the carrying capacity versus the ratio of the reinforcement to the concrete

图 14 为高强钢筋混凝土预制弧板构件（配筋率为 0.873%，混凝土单轴抗压强度为 81.28 MPa）的极限承载力与其厚径比之间的关系曲线，通过计算可知，构件的厚径比越大其极限承载力越大，构件的厚径比每增加 1%，其极限承载力增加 0.85 MPa。

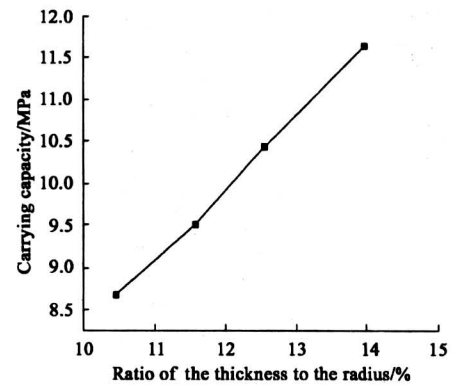


图 14 构件的厚径比与极限承载力关系

Fig. 14 The plot of the carrying capacity versus the ratio of the thickness to the radius

5 结论

对于高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构，在均布荷载作用下，通过实验和有限元计算，对其力学特性分析表明，实验结果与数值计算结果基本一致，对高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构选用的计算模型是合适的；混凝土的单轴抗压强度越高，则高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构的极限承载力越大，混凝土的强度等级提高 10 MPa，其极限承载力提高 1.26 MPa。构件的厚径比越大其极限承载力也越大，构件的厚径比每增加 1%，其极限承载力增加 0.85 MPa。但增大配筋率对提高高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构的极限承载力作用不大，配筋率从 0.491% 到 1.65% 增大了 3 倍左右，其极限承载力从 10.386 MPa 增大到 10.485 MPa，仅增加了 0.1 MPa，因此在设计高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构时，不必通过增大配筋率来提高高强钢筋混凝土预制弧板井壁结构的承载力，只需满足构造配筋要求即可。

参考文献

- [1] 杨俊杰. 深厚表土地层冻结井筒外层井壁结构选型分析 [J]. 建井技术, 2003, 24(5): 27~29
- [2] 杨俊杰. 弧形大板井壁设计的探讨 [J]. 煤炭工程, 2003, 50(2): 35~38
- [3] Kachlakev D, Miller T, Yim S. Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates [R]. Civil and Environmental Engineering Department, California Polytechnic State University, May, 2001

- [4] Padmarajaiah S K, Ramaswamy A. A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fiber reinforcement [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2002, 24: 229~241
- [5] Barzegar, Maddipudi, Srinivas. Three-dimensional modeling of concrete structures, I: Plain concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123 (10): 1339~1346
- [6] Samir A A, Khalid M, Faisal F W. Influence of steel fibers and compression reinforcement on deformation of high-strength concrete beams [J]. *ACI Struct J*, 1997, 94 (6): 611~624
- [7] Ramzi B A A, Omer Q A. Flexural strength of reinforced concrete T - Beams with steel fibers [J]. *Cem Concr Compos* 1999, 21 (2): 263~268
- [8] Samir A A, Faisal F W. Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams [J]. *ACI Struct J*, 1993, 90(3): 279~286
- [9] 姚直书, 程 桦, 孙文若. 深厚表土层中高强复合井壁结构的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2003, 24 (5): 739~743
- [10] 程 桦, 孙文若, 姚直书. 高强钢筋混凝土井壁模型试验研究 [J]. *建井技术*, 1995, 16 (6): 26~27
- [11] Kohnke P. ANSYS Theory Reference [M]. ANSYS, Inc December, 2000
- [12] Willam K J, Warnke E D. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete [J]. *Proc Int Association for Bridge and Struct Eng Bergamo, Italy*. 1975, 19: 1~30

Assessment of Mechanical Characteristic for Reinforced Concrete Precast Arc Shaft Lining

Rong Chuanxin^{1,2}, Wang Xiuxi¹, Cheng Hua²

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

[Abstract] Assessment of mechanical characteristic for reinforced concrete precast arc shaft lining is achieved by experiment and finite element analysis. The finite element results agree well with measurements from laboratory, which validate the calculation model. At the same time, the load carrying capacity of the high strength reinforced concrete precast arc shaft lining is very high. The factors which influence its load carrying capacity are, in turn, the ultimate uniaxial compressive strength of concrete, the ratio of the thickness to the radius and the ratio of the reinforcement to the concrete. Under the load of uniformity, with the strength grade of concrete increases 10 MPa, its load carrying capacity raises 1.26 MPa. The ratio of the thickness to the radius increases 1%, its load carrying capacity raises 0.85 MPa. However, when the ratio of the reinforcement to the concrete is enlarged 3 times, its load carrying capacity increases only 0.1 MPa. Therefore for designing the high and strong reinforced concrete precast arc shaft lining, the ratio of the reinforcement to the concrete needs only to be considered from the structural point of view rather than improving the load carrying capacity.

[Key words] high strength reinforced concrete precast arc shaft lining; mechanical characteristic; finite element method; ANSYS