

反复荷载下内配 PVC 管约束高强混凝土柱 受力性能及其影响因素分析

薛建阳, 李海博, 翟磊, 柯晓军, 郑文豪, 门博宇

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 以 5 根内配 PVC 管约束高强混凝土柱(PVC-RHC)和 1 根钢筋高强混凝土短柱(RHC)水平拟静力试验为基础, 分析了 PVC 管径、轴压比和剪跨比对内配 PVC 管约束高强混凝土柱受力性能的影响。利用有限元软件 ABAQUS 对试验柱构件进行非线性有限元模拟, 除剪跨比 $\lambda=2.5$ 柱构件外, 模拟结果与试验结果吻合较好, 验证了有限元模型建立的有效性。在此基础上, 以 PVC 管径高比 D/h 、PVC 管径壁厚和混凝土强度参数为目标参数, 对内配 PVC 管约束高强混凝土短柱进行有限元模拟。结果表明: 随着 PVC 管径高比的增加, 构件初始刚度变化幅度较小, 而峰值荷载和延性呈增加的趋势, 当 D/h 控制在 0.5 左右时, 构件综合受力性能相对较好; 增加 PVC 管径壁厚, 构件的初始刚度和峰值荷载变化不明显, 后期强度衰减减慢, 延性略有改善; 随着混凝土强度的提高, 构件的初始刚度和峰值荷载提高显著, 但延性变差。

关键词: PVC; 高强混凝土; 柱; 抗震性能; ABAQUS; 有限元分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0024-05

Analysis on influence parameters and mechanical behaviors of embedded PVC pipe confined with reinforced high-strength concrete columns under cyclic reversed loading

XUE Jianyang, LI Haibo, ZHAI Lei, KE Xiaojun, ZHENG Wenhao, MEN Boyu

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the test results of five embedded PVC pipe confined reinforced high-strength concrete (PVC-RHC) columns and one reinforced high-strength concrete (RHC) short column under quasi-static loading, design parameters such as PVC pipe diameter, axial compression ratio and shear span ratio which influence the mechanical behavior of PVC-RHC columns were discussed. Nonlinear finite element models with analytical software ABAQUS was analyzed for PVC-RHC columns, and after comparison of test result, the feasibility of nonlinear finite element models of short columns were validated. On the basis of this model, the parameters of the diameter-height ratio and thickness of PVC pipe, concrete strength influencing on the behavior of PVC-RHC short columns were simulated. Results show that with the increasing of the diameter-height ratio of PVC pipe, the initial stiffness is not obvious, but ultimate capacity and ductility both have the increased trend. When the diameter-height ratio of PVC pipe is about 0.5, the comprehensive mechanical behaviors are relatively good. As the thickness of PVC pipe increases, the initial stiffness and ultimate capacity have small changes, and the ductility improves. With the increasing of concrete strength, the initial stiffness and ultimate capacity improve significantly, but the ductility decreases.

Key words: PVC; high-strength concrete; column; seismic performance; ABAQUS; finite element analysis

高强混凝土具有强度高、变形小、耐久性好等特点, 能适应现代工程结构向大跨、重载、高耸发展的需求^[1]。但高强混凝土存在的脆性特征显著, 为改善高强混凝土构件的变形能力, 加密箍筋是常用手段, 但这样会导致施工困难, 钢材用量大, 工程造价高等问题^[2-3]。为此, 寻求更为有效、并且经济合理的新手段, 很有必要。基于国内外对组合结构领域的相关研究成果, 提出一种内配聚氯乙烯(Polyvinyl chloride, 简称 PVC)管材的新型约束高强混凝土柱。设想是在普通钢筋高强混凝土柱中, 配置适量 PVC 管, 一方面 PVC 管外围混凝土保护层能隔离其与外界接触

避免老化, 另一方面内配的 PVC 管对芯柱部位混凝土起到一定的约束作用, 与外围的箍筋形成双重约束作用, 这对减少箍筋密度, 提高构件的延性, 避免结构柱在地震作用下因混凝土开裂脱落造成纵筋屈曲而导致结构倒塌都十分有利。

国外 Kurt C E^[4]和 Toutanji H^[5-6]通过试验发现, PVC 塑管能约束核心混凝土, 改善柱延性, 可应用于工程中。在国内, 许多的高校和科研单位^[7-11]对 PVC 管约束混凝土柱进行了一定量的试验研究, 结果表明: PVC 管约束混凝土能改善构件的破坏特征, 多呈塑性破坏, 提高构件的承载能力、抗震变形能力以及耐久性能等, 还具有造

价低廉、节能环保等优点. 然而目前尚未见有关内配 PVC 管构件的研究报道. 基于此, 将通过对内配 PVC 管约束高强混凝土柱的低周反复加载试验和有限元分析, 研究其抗震性能及变形能力.

1 试验概况

1.1 试验设计

设计了 5 根内配 PVC 管约束高强混凝土柱和

1 根钢筋高强混凝土短柱对比试件进行低周反复荷载试验, 考虑了 PVC 管径、轴压比和剪跨比对内配 PVC 管约束高强混凝土柱受力性能的影响, 设计参数如表 1 所示. 柱截面尺寸为 200 mm×200 mm, 纵筋采用 4 Φ 18 HRB400 钢筋进行对称配筋, 箍筋采用直径为 6 mm 的 HRB335 钢筋, 间距 60 mm, PVC 管有 Φ 110×3 和 Φ 75×2.3 两种规格.

表 1 试件设计参数
Tab.1 Design parameters of specimens

试件编号	H/mm	$b\times h/\text{mm}$	λ	n	增强措施	规格	纵筋	箍筋	f_{cu}/MPa	延性系数
PVC-RHC-1	300	200×200	1.50	0.25	PVC 管	Φ 110×3	4 Φ 18	Φ 6@60	75.01	3.35
PVC-RHC-2	500	200×200	2.50	0.42	PVC 管	Φ 110×3	4 Φ 18	Φ 6@60	75.01	2.27
PVC-RHC-3	300	200×200	1.50	0.45	PVC 管	Φ 110×3	4 Φ 18	Φ 6@60	79.44	3.28
PVC-RHC-4	500	200×200	2.50	0.27	PVC 管	Φ 110×3	4 Φ 18	Φ 6@60	79.44	2.24
PVC-RHC-5	300	200×200	1.50	0.25	PVC 管	Φ 75×2.3	4 Φ 18	Φ 6@60	75.01	4.61
RHC	300	200×200	1.50	0.25	普通箍筋	Φ 6	4 Φ 18	Φ 6@60	75.01	1.94

注: H 为柱高度; b 、 h 分别为柱截面的宽度和高度; 剪跨比 $\lambda=H/h$; 轴压比 $n=N/(f_cA_c)$, f_{cu} 、 f_c 分别为混凝土的立方体抗压强度和轴心抗压强度, $f_c=0.73f_{cu}$, A_c 为截面面积.

所有钢筋和 PVC 管均按照现行国家试验标准测得的力学性能指标如表 2 所示. 试件制作完成的骨架如图 1 所示. 试验采用悬臂式的拟静力加载装置, 按照荷载-位移混合控制的加载制度进行加载. 试件屈服前采用荷载控制, 当试件屈服后, 改用位移控制, 逐级增大柱顶位移, 直至荷载下降至极限荷载的 85%时结束试验.



图 1 内部骨架
Fig.1 Internal skeleton

表 2 材料力学性能指标

Tab.2 Mechanic performance indexes

材料类型	规格	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa
钢筋	Φ 6	277	380	1.80×10^5
	Φ 18	465	644	2.02×10^5
PVC 管	Φ 110×3	—	19.56	3315
	Φ 75×2.3	—	20.20	3075

注: f_y 为屈服强度; f_u 为抗拉强度; E_s 为弹性模量.

1.2 试件的破坏形态

所有柱试件在反复水平荷载作用下均发生剪切斜压破坏, 且受 PVC 管径、轴压比和剪跨比参数的影响不明显, 试验破坏现象的详细描述见文献 [12], 图 2 给出了部分试件的破坏形态. 图中除钢筋高强混凝土短柱 RHC 外, 都呈现出“X 形”交叉斜裂缝, 其中剪跨比大的试件还会存在明显的黏结裂缝, 混凝土剥落严重, 清晰可见内部 PVC 管.



图 2 试件破坏形态
Fig.2 Failure pattern

1.3 试验骨架曲线

骨架曲线是指将荷载-位移滞回曲线中每级荷载第一次循环的峰值相连得到的包络线, 试验实测骨架曲线如图 3 所示. 表 1 中给出了各试件的位移延性系数. 由图 3 和表 1 可见,

(1) 钢筋高强混凝土短柱(RHC)的位移延性系数为 1.94, 内配 PVC 管约束高强混凝土柱剪跨比分别为 1.5 和 2.5 对应的位移延性系数在 3.28~4.61、2.24~2.27 范围变化, 可见内配 PVC 管能改善钢筋

高强混凝土柱的延性;随着PVC管径、轴压比和剪跨比增加,内配PVC管约束高强混凝土柱延性越差。

(2) 钢筋高强混凝土短柱达到峰值荷载后承载力稳定性较差,强度衰减快,变形能力弱;内配PVC管约束高强混凝土短柱试件PVC-RHC-1($\Phi 110 \times 3$)较试件RHC的峰值荷载提高8.0%,骨架曲线下降段平缓,极限位移增大,延性改善。

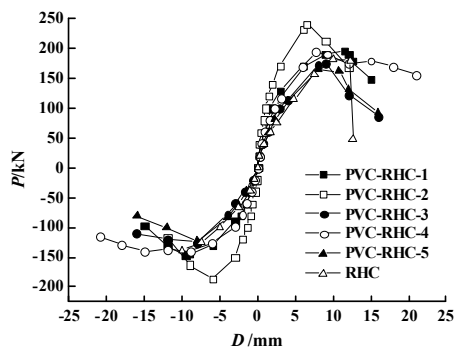


图3 试件的骨架曲线

Fig.3 Skeleton curves of specimens

(3) 随着PVC管径的增大,试件PVC-RHC-1($\Phi 110 \times 3$)较试件PVC-RHC-5($\Phi 75 \times 2.3$)的初始刚度增大,峰值荷载提高约1.5%,但峰值过后下降陡峭,强度衰减加快,刚度退化明显,变形能力变差。这可能是由于PVC管壁光滑与混凝土的黏结力小,增大PVC管径会使混凝土保护层厚度变薄,容易引起PVC管与混凝土产生黏结滑移效应,管内外两部分混凝土协同工作能力降低,导致混凝土保护层薄的试件PVC-RHC-1较早开裂,但因其管径大约束的核心混凝土区域较大,初始刚度仍较大;水平荷载达到峰值过后,核心混凝土横向变形急剧增大,PVC管壁膨胀,挤压外围混凝土保护层,导致腹部棱形混凝土块凸鼓被压溃脱落而发生破坏,这与PVC-RHC-1大面积混凝土掉落的破坏现象相吻合。

(4) 在近似同强度混凝土条件下,剪跨比较大试件PVC-RHC-4与试件PVC-RHC-1相比,峰值荷载及对应的位移减小,后期承载力衰减加快,极限变形减小;轴压比较高试件PVC-RHC-3较PVC-RHC-1的峰值荷载提高了22.6%,刚度退化及强度衰减加快,极限变形小,延性变差,这可能是适当提高轴压比时,能延缓和限制内部微细黏结裂缝的出现和发展,改善骨料咬合作用,增强纵筋的销栓力,从而提高构件的抗剪承载能力;但裂缝发展被抑制后内部积蓄的能量无法耗散,加载后期因变形大而产生的 $P-\Delta$ 效应更加显著,使得混凝土的主压力和主压应变急剧增大,削弱混凝土塑性变形能力的同时,内部能量会突然释放导致构件破坏迅

速,延性差。

2 有限元模型建立

本文采用有限元软件ABAQUS对内配PVC管约束高强混凝土柱进行非线性分析。

混凝土采用C3D8R单元,即8节点减缩积分格式的三维实体单元。PVC管采用S4R单元,即4节点减缩积分格式的壳单元。钢筋采用T3D2单元,即2节点三维桁架单元。研究表明,忽略钢筋与混凝土之间黏结滑移影响得到的计算结果仍然能满足一般的精度要求,考虑PVC管与混凝土之间的黏结滑移研究尚属空白,建立有限元模型时将钢筋和PVC管与混凝土之间的相互作用都采用embed定义,按以上方法建立的有限元模型如图4所示。

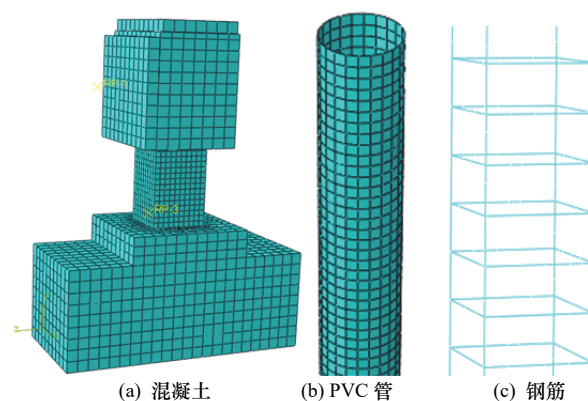


图4 ABAQUS有限元模型

Fig.4 ABAQUS finite element model

混凝土本构关系遵循以下规定:箍筋外认为混凝土处于单轴受压应力状态,采用课题组基于试验拟合得到的单轴受压本构模型(公式1)。箍筋内混凝土为多轴受力状态,考虑PVC管约束混凝土本构关系不够成熟而忽略其约束作用,采用Kent-Park提出的横向箍筋约束混凝土本构模型^[13]。混凝土单轴受拉本构关系采用GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》建议的应力-应变曲线。

$$y = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & 0 \leq x < 1 \\ \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

课题组基于试验得到的无量纲高强混凝土应力-应变曲线如图5所示,图中粗实线为拟合结果。由图可见,当上升段的控制参数 α_a 随混凝土强度的提高,逐渐从0.6变化到1.5时,上升段拟合曲线与试验曲线的吻合较好;下降段由于高强混凝土脆性显著,随强度等级的提高而变得陡峭,且离散性大,建议下降段控制参数 α_d 的取值范围为

4~15 之间, 强度等级越高取值越大。

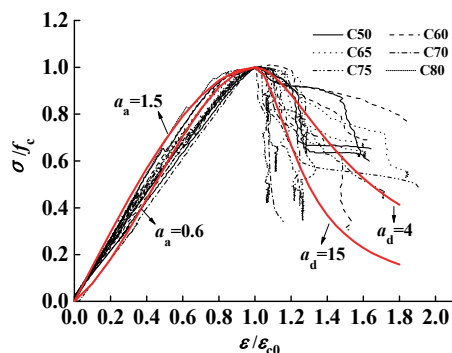


图5 混凝土实测无量纲应力-应变曲线

Fig. 5 Measured stress-strain curves of concrete

纵筋和箍筋的本构模型采用双折线强化模型。PVC 管本构模型根据试验实测应力-应变关系曲线确定, 如图6所示。

图7给出了内配PVC管约束高强混凝土柱骨架曲线的数值模拟结果和试验结果, 图中实线为试验结果, 虚线为 ABAQUS 模拟结果。由图可见, 除剪跨比 $\lambda=2.5$ 柱构件外, 模拟结果与试验结果吻合

较好, 表明建立的 ABAQUS 有限元模型能用于 PVC 管与混凝土之间黏结滑移现象不够突出的短柱静力弹塑性分析。如想要较好地模拟剪跨比大的试件, 还需完善 PVC 管与混凝土之间黏结性能方面的研究。

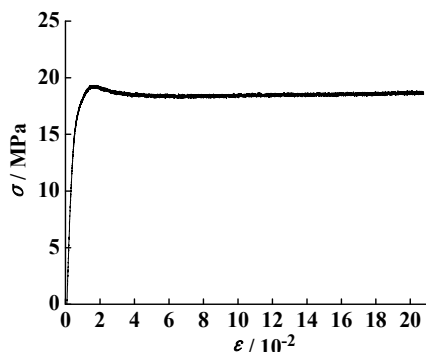


图6 PVC 管实测应力-应变曲线

Fig. 6 Measured stress-strain curves of PVC pipe

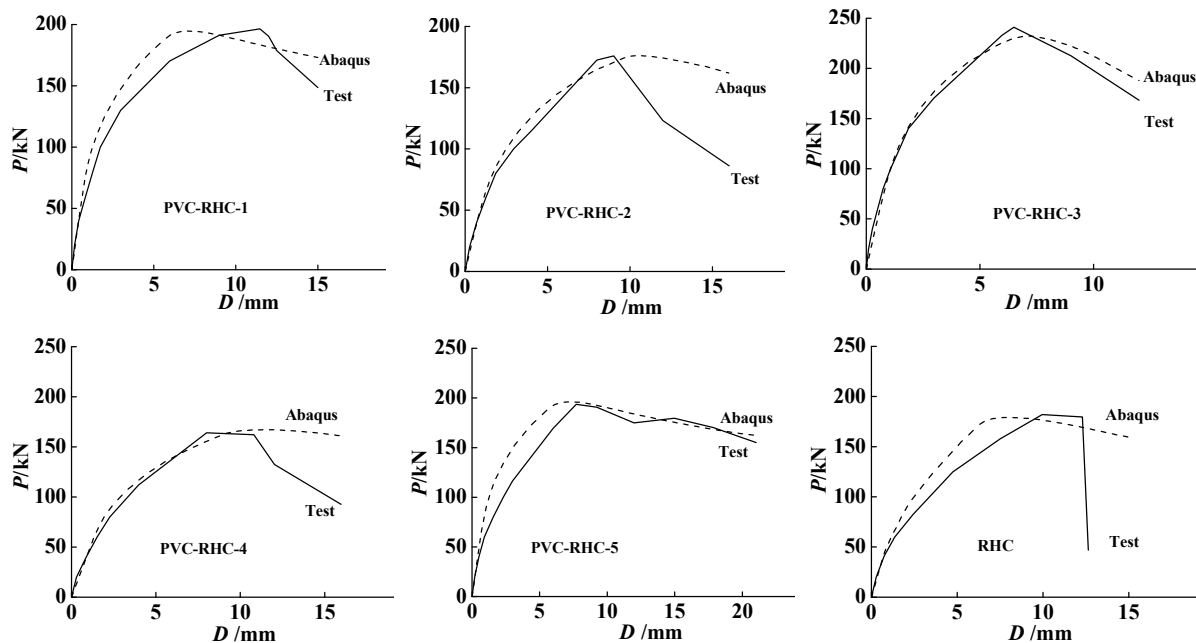


图7 试验结果与有限元结果对比

Fig. 7 Comparison between test results and finite element results

3 骨架曲线影响参数分析

内配 PVC 管约束高强混凝土柱受力性能的影响因素很多, 如 PVC 管径高比 D/h 、PVC 管壁厚和混凝土强度等参数, 本文采用 ABAQUS 仅对上述参数进行模拟, 以掌握内配 PVC 管约束高强混凝土短柱单调水平荷载作用下的力学性能。

3.1 PVC 管径高比 D/h

在试验模型 PVC-RHC-1 基础上改变 PVC 管

外径 D (保持 PVC 管截面积不变), 分别取 PVC 管径高比 D/h 为 0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70 和 0.78 进行有限元分析。图8为 PVC 管径高比对构件荷载-位移曲线的影响。由图可见, 随 PVC 管径高比的增加, 构件水平承载力增大, 与 PVC 管径高比 $D/h=0.2$ (峰值荷载 $P_u=180.76$ kN 和破坏荷载 $P_m=159.30$ kN) 比较, 构件峰值荷载依次提高 1.4%、3.7%、6.0%、7.7%、7.9%、8.0%, 加载结束时的破坏荷载依次增加 1.7%、4.3%、

7.2%、8.7%、8.7%、8.9%；增大PVC管径高比，曲线的初始刚度提高，下降段变得缓慢，加载结束时的荷载 P_m 分别降至相应峰值荷载 P_u 的88.1%、88.4%、88.6%、89.1%、88.9%、88.8%、88.9%，位移延性改善。通过分析发现，内配PVC管约束高强混凝土短柱中PVC管径高比 D/h 如控制在0.5左右，构件承载力提高稳定、强度衰减缓慢等综合受力性能相对较好。

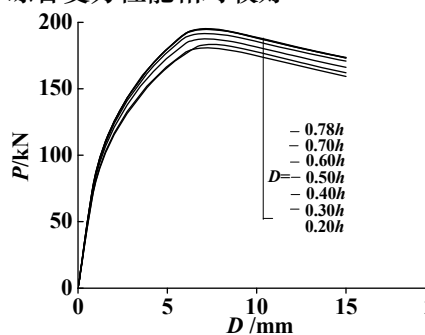


图8 PVC管径高比的影响
Fig.8 Influencing of diameter-height

3.2 PVC管壁厚 t

在试验模型PVC-RHC-1基础上将管壁厚度 t 由3 mm变为10 mm进行有限元分析。图9为PVC管壁厚对构件荷载-位移曲线的影响。

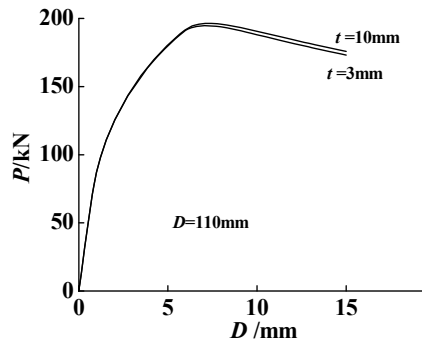


图9 PVC管壁厚的影响
Fig.9 Influencing of thickness of PVC pipe

由图可见，PVC管壁厚的增加，构件初始刚度几乎是重合的，峰值荷载变化不明显， $t=10$ mm的峰值荷载较3 mm ($P_u=194.70$ kN) 的增幅为0.9%；构件峰值荷载对应的变形值增大些，曲线下降幅度变慢，加载结束时 $t=10$ mm的荷载较3 mm ($P_m=173.18$ kN) 的增幅为1.6%。综上，若要通过增加PVC管壁厚度的方法来提高构件极限承载力是不够理想的，而变形能力的改善稍好些，这可能与PVC管材强度低、塑性能力强的材料特性有关。

3.3 混凝土强度

通过改变试验模型的混凝土强度来研究其对内配PVC管约束高强混凝土短柱受力性能的影响，混凝土强度分别取30 MPa、50 MPa和70 MPa，图10为混凝土强度对构件荷载-位移曲线的影响。由图可见，混凝土强度对构件初始刚度和水平承载力均有一定的影响，随着混凝土强度提高，构件的初始刚度和峰值荷载均增大，其中混凝土强度为50 MPa和70 MPa的峰值荷载较30 MPa ($P_u=130.02$ kN) 的提高24.4%和44.9%，增幅逐渐变慢；构件峰值荷载对应的位移减小，说明构件随着混凝土强度提高而越早达到峰值；加载结束时的荷载分别降至峰值荷载的96.1%、92.8%和90.0%，说明强度衰减随混凝土强度的提高而加快，延性变差。综上所述，随混凝土强度提高，构件的水平承载力提高，延性变差。

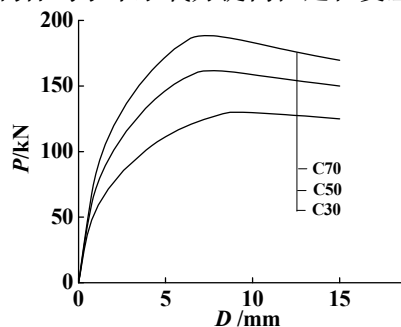


图10 混凝土强度的影响
Fig.10 Influencing of concrete strength

4 结论

通过内配PVC管约束高强混凝土的试验及有限元分析，得到以下结论：

(1) 所有柱试件的破坏形态均为剪切斜压破坏，受PVC管径、轴压比和剪跨比的影响不明显，但黏结现象会随剪跨比的增加而逐渐突出。

(2) 建立的有限元模型对内配PVC管约束高强混凝土短柱模拟的结果与试验结果吻合较好，而剪跨比大的试件存在较为明显黏结裂缝的模拟结果不够理想，如想获得更理想的结果还需完善PVC管与混凝土之间黏结滑移性能的研究。

(3) 随着PVC管径高比 D/h 的增加，内配PVC管约束高强混凝土短柱的初始刚度变化幅度较小，而峰值荷载和延性呈增加的趋势，当 D/h 控制在0.5左右时，构件综合受力性能较好。

(下转第35页)