

一种UHPC预应力传递装置承载力试验及有限元分析研究

唐振兴^{1*}, 陈少玉¹, 陈赛国², 刘培林¹

¹湖南弘兴抗浮工程技术有限公司, 湖南 长沙

²湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年11月18日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

针对预应力抗浮锚杆, 提出了一种新的UHPC预应力传递装置。为了研究该装置在预应力张拉过程中的轴压受力性能, 对4个不同型号的足尺装置试件分别开展了物理试验研究及有限元验证, 分析了不同型号装置在轴心压力作用下的轴向位移变化与极限承载力的变化规律。结果表明: 各型号试件的上板部分均发生了弯曲破坏现象, 短柱靠近上板部分出现横向裂缝。各试件的轴压极限承载力都超过了设计值。其中, HM18装置的轴压极限承载力相对设计值提高最多, 增加了87%; HM45装置的轴压极限承载力相对设计值提高得最少, 只增加了2%。该新型UHPC传递装置在预应力抗浮锚杆中具有较好的适用性。

关键词

UHPC预应力传递装置, 轴心受压试验, 有限元分析, 弯曲破坏, 位移变化, 极限承载力

Study on Bearing Capacity Test and Finite Element Analysis of a UHPC Prestressing Transfer Device

Zhenxing Tang^{1*}, Shaoyu Chen¹, Saiguo Chen², Peilin Liu¹

¹Hunan Hongxing Anti-Floating Engineering Technology Co., Ltd., Changsha Hunan

²Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: November 18, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

A new UHPC prestressing transfer device is proposed for prestressing anti-floating anchors. To

*通讯作者。

文章引用: 唐振兴, 陈少玉, 陈赛国, 刘培林. 一种UHPC预应力传递装置承载力试验及有限元分析研究[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3065-3078. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412328

analyze the axial pressure stressing performance of this device during prestressing tensioning, physical tests and finite element verification were conducted on four different models of foot-size device specimens. The changes in axial displacement and the rule of change of ultimate bearing capacity under the action of axial pressure of different models of devices were analyzed. The results indicate that the bending damage phenomenon occurred in the upper plate part of each model's specimen, and transverse cracks appeared in the short column near the upper plate part. Additionally, the axial compressive ultimate bearing capacity of each specimen exceeded the design value. The axial compressive ultimate load capacity of the HM18 device increased by 87% relative to the design value, while the HM45 device had the smallest increase of only 2%. The new UHPC transfer device is highly applicable for prestressed anti-floating anchors.

Keywords

UHPC Prestressing Transfer Device, Axial Compression Test, Finite Element Analysis, Bending Damage, Displacement Change, Ultimate Bearing Capacity

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着城市地下空间不断的开发利用，建筑物的基础埋深增加，地下水会对建筑物产生较大的浮力。在一些地下水位较高的城市，当结构自重不能抵抗地下水浮力时，抗浮设计问题就变得尤为重要。相比于降排水、抗拔桩等抗浮技术，抗浮锚杆具有经济性好、地层适应性强、施工方便等优点，在地下工程中得到了广泛的应用[1]-[3]。根据《建筑工程抗浮技术标准》(JGJ476-2019) [4]的规定，对于建筑抗浮工程设计等级为甲级和乙级的工程，普通的抗浮锚杆不容易满足裂缝控制的要求，因此预应力抗浮锚杆就成为了最佳选择。

在抗浮锚杆中施加预应力对控制裂缝有着天然的优势。但是常规预应力抗浮锚杆构造复杂、造价较高、施工工艺较为繁琐、质量隐患不可控，因此亟需一种安全可靠、施工便捷、经济合理的新型预应力抗浮锚杆。谭光宇等[5]介绍了一种全长压力型后张预应力抗浮锚杆。该锚杆通过在其顶端设置球墨铸铁预应力传递装置，在预应力装置上张拉预应力筋并锁定。通过无粘结钢绞线，将张拉力传递给锚杆底部的锚固端板和锚具，确保锚杆全长范围内均受压，从而有效控制锚杆在水浮力作用下的开裂。该预应力抗浮锚杆使用的球墨铸铁预应力传递装置造价较高，且容易被仿制，其知识产权很难得到保障。因此，有必要采用成本更低的材料代替球墨铸铁作为抗浮锚杆的预应力传递装置。

超高性能混凝土，即 UHPC (Ultra-High Performance Concrete) [6]，主要是以硅灰、水泥、细骨料还有钢纤维组成的一种新型混凝土材料[7]。该材料具有良好的抗拉强度、耐久性、环保性等优点；近年来广泛应用于我国的各种工程项目中[8]。国内外学者对 UHPC 材料的抗压强度、抗拉强度、韧性、弹性模量、尺寸效应、体积稳定性以及耐久性等[9]-[16]进行了一系列研究。这些研究成果表明，UHPC 材料的制备技术已经较为成熟，可以尝试将其作为替代球墨铸铁预应力传递装置的材料，但是还需要对其受力性能进行分析。因此，本文设计并制造了 4 个不同型号的 UHPC 预应力传递装置试件，分别开展了轴心压力试验及有限元分析，研究 UHPC 预应力传递装置在预应力张拉过程中的轴向受力机理及极限承载能力。

2. 试验设计

2.1. 试件设计

UHPC 中钢纤维的体积分数通常在 1%~3% 之间，体积分数在 1%~2% 的 UHPC 常用于对韧性和抗裂性能有较高要求，但不过分追求极限抗拉强度的场合，例如建筑外墙挂板、装饰构件等，体积分数在 2%~3% 的 UHPC 能充分发挥 UHPC 的高韧性和高抗拉性能，常用于主梁结构、桥梁铰缝及需要承受较大荷载或冲击的构件。考虑到预应力传递装置需要承受较大的压力，压力还会使上板受弯，对材料抗拉要求较高，综合考虑工作性能、成本因素及纤维结团风险，在进行 UHPC 配合比设计时，确定钢纤维掺有体积分数为 3%，抗压强度为 120 MPa。

为了满足工程应用中不同地下水浮力的需求，本文设计并制作了 4 个不同型号的 UHPC 预应力传递装置试件，分别编号为 HM18、HM27、HM36 和 HM45。以 HM18 为例，其中 HM 是对 UHPC 传递装置试件的统一编号，数字 18 则表示抗压承载力的设计值为 180 kN。图 1 给出了 HM18 试件的造型及具体尺寸。整个传递装置由上板、下板和 4 根短柱组成。根据不同的型号，上板的平面尺寸为 160 mm~250 mm，下板的平面尺寸为 180 mm~280 mm，短柱的平面尺寸为 40 mm~65 mm，试件总高度为 250 mm~300 mm。每个型号的试件都配有不同尺寸的 T 型锚具，为了防止试件在预应力张拉过程中出现局部破坏，在试件上板锚具的作用范围内预埋中间镂空的正方形 Q235 钢垫板，垫板的厚度均为 10 mm。HM18 以及其他各型号的具体参数见表 1。

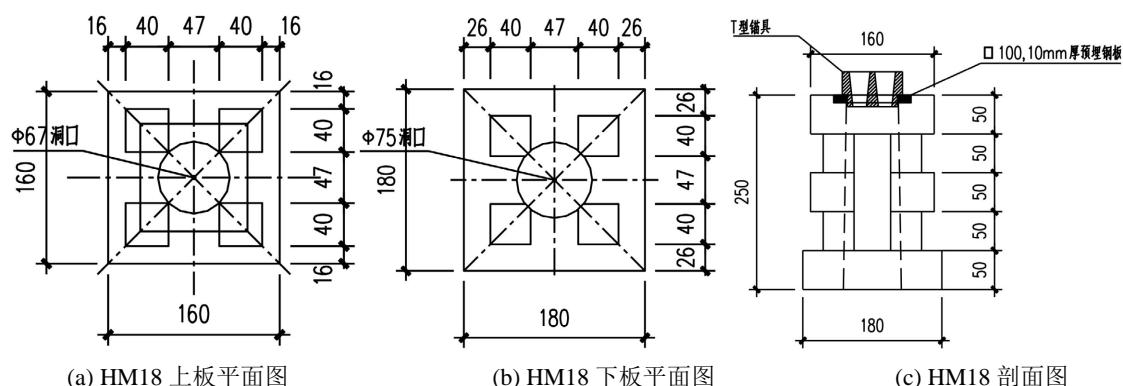


Figure 1. Detailed dimension drawing of specimen HM18

图 1. HM18 试件详细尺寸图

Table 1. Specifications and parameters of specimens with different models
表 1. 不同型号试件规格参数

编号	上板长 × 宽 × 高/ mm	短柱长 × 宽 × 高/ mm	下板长 × 宽 × 高/ mm	预埋钢板长 × 宽×高/ mm
HM18	160 × 160 × 50	40 × 40 × 150	180 × 180 × 50	100 × 100 × 10
HM27	200 × 200 × 50	50 × 50 × 150	220 × 220 × 50	120 × 120 × 10
HM36	220 × 220 × 50	60 × 60 × 180	250 × 250 × 50	150 × 150 × 10
HM45	250 × 250 × 50	65 × 65 × 200	280 × 280 × 50	150 × 150 × 10

2.2. 加载方案

本次实验在长沙理工大学公路工程试验中心进行，采用 200 吨万能试验机对试件进行轴压静力加载。加载过程中，通过电脑自动采集压力。在正式加载之前，先取预估承载力的 10% 对试件进行预加载，确

定加载装置以及测量仪器是否正常工作。加载方式采用位移控制加载，加载速率为 0.2 mm/min。当试件进入荷载位移曲线的下降段，荷载随着位移的增加变化缓慢时停止加载。为保证试件底部不被压碎，在试件底板的下方设置了 10 mm 厚度的钢垫板垫。具体加载装置如图 2 所示。

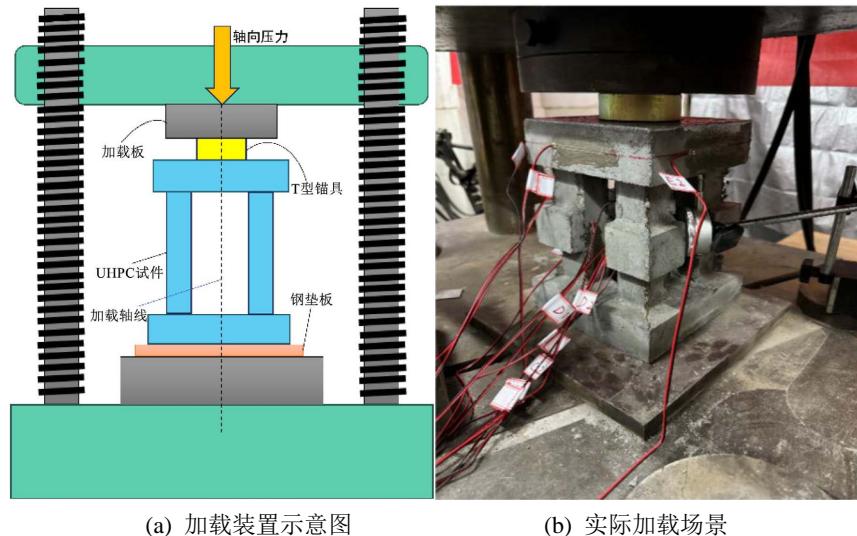


Figure 2. Loading schematic of axial compression test for UHPC prestressing transfer device
图 2. UHPC 预应力传递装置轴压试验加载示意图

2.3. 测点布置

为了提高 UHPC 传递装置试件在轴心压力下竖向位移的测量精度，在试件上板的侧边以及后方的 1/2 处都布置了精度为 0.01 mm 的百分表，取两个百分表读数的平均值作为竖向位移结果。

在开展试验之前对各型号试件进行了有限元模拟，通过应力云图与位移云图判断应力以及变形较大的位置。因此在正式开展试验时，为测量 UHPC 传递装置试件在轴心压力下的应变分布情况，在试件上板正面的 1/2 位置处布置横向应变片，在柱子下部靠近内侧的两边分别布置纵向应变片。定义以测点 E1 位置为试件上板的正表面，逆时针在各表面布置另外三个测点 E2、E3、E4；相应地在正表面下方左边第一个短柱的内侧两个面分别布置 A1、A2 然后再逆时针布置另外三个短柱。应变数据由 TDS-530 静态应变测试系统采集。以 HM18 型号的试件为例，其具体的百分表以及应变片布置如图 3 所示。

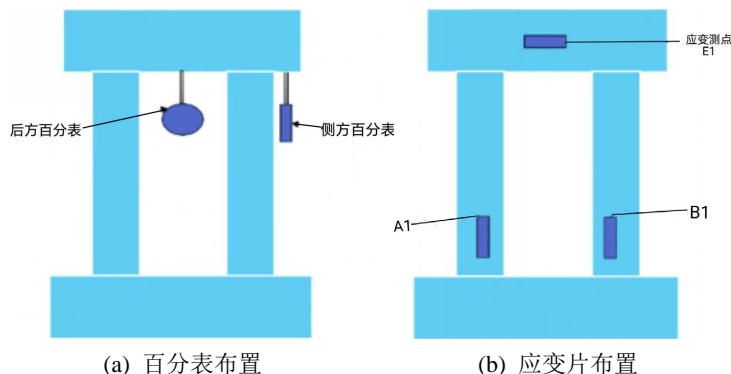


Figure 3. Measuring point layout of axial compression test for UHPC prestressing transfer device
图 3. UHPC 预应力传递装置轴压试验测点布置

3. 试验现象及分析

3.1. 破坏过程及破坏特征

在试验的初始阶段，轴向荷载和竖向位移基本上成比例增加，试件没有发生明显的变形。在继续加载至听到轻微地一声异响后，观察到试件的下板部分出现了第一条微裂缝，万能试验机显示的荷载读数也在加载到既定的荷载后会往下降一些。随着荷载的继续增加，构件的内部不时会传来异响且声响会变得越来越大，此时观察到有新的裂缝出现且之前出现的裂缝缝隙变大。当荷载逼近到极限状态时，万能试验机的位移还在增加，荷载增加的速度变缓，直至发生下降，试件达到了极限承载力。**图 4** 给出了不同型号的 UHPC 传递装置试件在轴心压力下的最终破坏形态。可以看到：试件上的破坏主要有试件上板的受弯破坏以及短柱斜压破坏。试件的上板部分出现从下表面圆孔蔓延至正面 1/2 处的裂缝，柱子在与上板相连接的位置附近出现了横向裂缝，下板靠近柱子的地方发现从正面蔓延至圆孔附近的裂缝，导致试件失去承载能力。试件的破坏形态如**图 4** 所示。



Figure 4. Typical failure modes of UHPC prestressing transfer device
图 4. UHPC 预应力传递装置典型破坏模式

从**图 4(a)**中可以看出 4 个不同型号的 UHPC 传递装置试件均在上板的 1/2 位置处发生了受弯破坏，分析其原因是由于锚具与预埋钢板嵌固接触的部分为环状，当轴向荷载通过万能试验机直接作用于锚具

上时，锚具传递到预埋钢板上的力为环状轴向压力，而由于上板下表面连接着短柱，因此若将上板的每个侧面看做二维平面的长方形，那么可以得到长方形的上边压应力较大，而长方形的下边又因为有短柱的约束就会在短柱与长方形下边中间的位置产生较大的拉应力，最终就会导致上板正表面在 1/2 位置处出现裂缝。HM45 和 HM36 型号的试件上板部分能够看到较为明显的弯曲现象，而 HM18 型号的试件相较于其他三个型号的试件的破坏形态不够明显。通过参考文献[17]-[20]，分析其原因是大尺寸的 UHPC 试件其内部往往会有更多的孔隙以及微观裂缝，其初始缺陷相比于小尺寸的试件要更多，更容易发生强度下降。因此 HM45 与 HM36 型号的 UHPC 预应力传递装置更容易出现弯曲破坏，其裂缝也更为明显。

通过图 4(b)可以发现各个型号 UHPC 传递装置试件在短柱上端靠近上板位置处均出现了横向裂缝，短柱部分的破坏模式比较一致。分析其原因是短柱的上下表面均为正方形并未做凹角处理，因此在短柱与 UHPC 传递装置上板下表面连接的位置会出现局部应力集中的现象，应力集中的位置更容易引发裂缝出现。又因为 UHPC 传递装置的上板发生弯曲破坏导致短柱上部的位置承受了一定的弯矩，而且上板的弯曲变形也会使得短柱上部区域的收到不均匀的斜向荷载，短柱上端部应力分布不均匀，综合以上原因导致短柱上段倾向于发生斜压破坏产生从短柱内侧向短柱外侧发展的横向裂缝。

从图 4(c)中可以看出各型号 UHPC 传递装置试件下板处的裂缝基本沿着某一边柱的侧边，从下板的正表面一直蔓延到圆孔处。分析其原因可能是随着轴向荷载的不断施加，荷载通过上板传递给短柱，由于泊松比的原因短柱在受到轴向压缩时会产生横向变形。又因为 4 根短柱都被上板和下板约束住，因此短柱的横向变形会被上板和下板的横向变形所约束，下板与钢垫板之间会产生横向摩擦力从而使得下板的下表面拉应力较大，导致 UHPC 传递装置的下板出现从正表面蔓延至下板圆孔的裂缝。其中 HM45 型号 UHPC 传递装置的裂缝形态最明显，是因为在试件的制备过程中，本身由于相对尺寸大就容易有更多的孔隙再加上下板表面做工不够好就导致其裂缝更容易开展。

3.2. 荷载 - 位移曲线

根据实验中读取两个百分表读数的平均值作为试件的竖向位移，万能试验机的读数作为轴向荷载，绘制了 4 个不同型号试件的荷载 - 位移曲线，如图 5 所示。其中横坐标为试件在各级荷载作用下的竖向位移平均值，纵坐标为加载过程中的轴向荷载。图中对各曲线的极值点进行了标记。

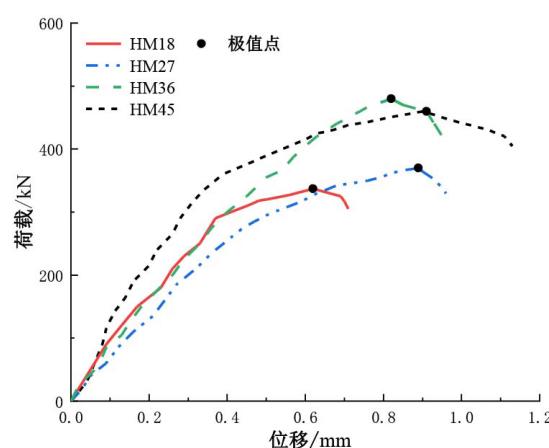


Figure 5. Load-displacement curves of UHPC prestressing transfer device specimens
图 5. UHPC 预应力传递装置试件的荷载 - 位移曲线

从图 5 中可以看出在试验的初始阶段，荷载和位移之间基本呈线性关系，在达到极限承载力的

70%~90%之后，荷载-位移曲线的斜率变小，荷载上升的趋势明显变缓，当荷载达到极值点后，曲线出现下降的趋势，位移却依然在增加。**表 2** 中给出了不同型号试件极值点对应的位移和荷载。

Table 2. Axial compression test results of UHPC prestressing transfer device
表 2. UHPC 预应力传递装置轴压试验结果

试件编号	极值点荷载/kN	极值点位移/mm
HM18	337	0.62
HM27	370	0.89
HM36	480	0.85
HM45	460	0.90

从**表 2** 中可以发现，相较于不同型号 UHPC 传递装置试件所设计的极限承载力来看，各个型号试件的极限承载力基本都超过了设计值。在设计造型相同，各型号试件设计尺寸不同的情况下。其中 HM45 试件的极限承载力为 460 kN 相比于设计值提高了 10 kN，只增加了 2%；HM36 试件的极限承载力为 480 kN 相比于设计值提高了 120 kN，增加了 33%；HM27 试件的极限承载力为 370 kN 相较于设计值提高了 100 kN，增加了 37%；HM18 试件的极限承载力为 337 kN 相较于设计值提高了 157 kN，增加了 87%。

3.3. 应变分析

在**图 6** 中给出了典型试件的荷载-应变曲线，其中应变片的编号如**图 3** 所示。上板部分处于受拉区混凝土开裂，试件短柱测点的位置处于受压区，混凝土应变随着荷载增加而增加；当荷载增加到极限承载力的 75%~90%时，部分型号试件的短柱上测点的应变值反而开始减少，出现混凝土应变的卸载现象；4 个试件短柱部分受压区的压应变最大值均小于混凝土极限受压应变 $-3300 \mu\epsilon$ 。

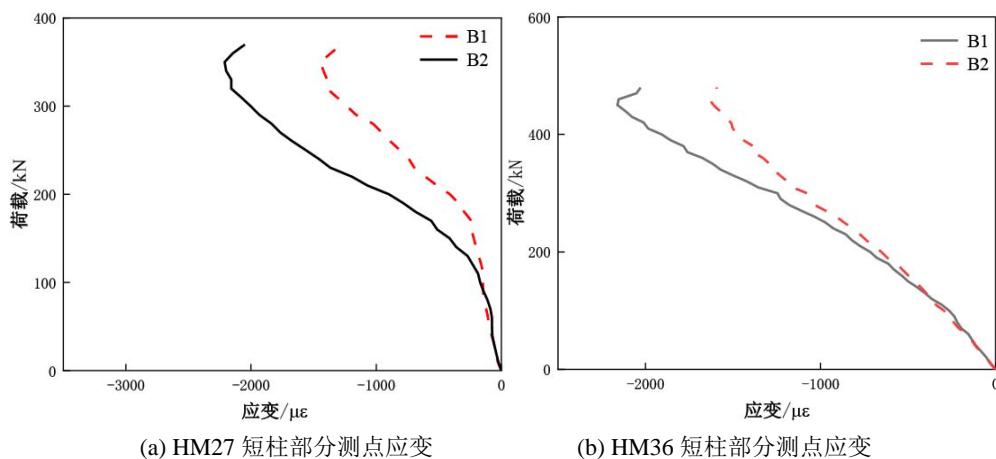


Figure 6. Strain of measuring points in the short column part of typical specimens

图 6. 典型试件短柱部分测点应变

从**图 6** 中可以看出试件中部分短柱上的测点均出现了应变卸载的现象，在同一型号试件短柱处的不同测点位置发生应变卸载的时间比较接近。参考 Guandalini S [21]的研究内容，应变出现卸载现象可能的原因是 UHPC 传递装置的短柱上端与上板连接，上板的下表面的拉应力较大使得短柱在受压的同时也受到了局部弯曲的影响，导致短柱的混凝土表面出现了卸载减压的现象。随着裂缝的不断发展，应力传递

路径发生了改变，短柱受压区域的混凝土损坏导致弹性模量出现变化，受压区应力可能发生了重分布等因素所导致的。

四个试件的上板从板底的圆孔附近到上板的正表面都出现了随着荷载增加而产生的弯曲裂缝，上板部分混凝土拉应变增长速率较大，上板部分倾向于发生弯曲破坏，这也与实际的破坏情况相吻合。

4. 数值模拟分析

4.1. 材料本构关系

国内外众多学者对 UHPC 材料进行了大量的实验，在这基础上拟合了多种 UHPC 单轴受压的本构模型，并将其在 ABAQUS 的材料属性中应用。本文在数值模拟中的 UHPC 单轴受压应力 - 应变关系采用文献[22]中的全曲线模型：

$$y = \begin{cases} Ax + (5-4A)x^4 + (3A-4)x^5 & (0 \leq x \leq 1) \\ \frac{x}{\alpha(x-1)^2 + x} & (x \geq 1) \end{cases} \quad (1)$$

其中： $y = \frac{\sigma_c}{f_c}$ ， σ_c 为压应力， f_c 为棱柱体轴心抗压强度； $x = \varepsilon_c / \varepsilon_{ck}$ ， ε_c 为压应变， ε_{ck} 为峰值应力时的压应变；参数 A 为零点处的弹性模量 E_0 与峰值点处割线模量 E_p 的比值，文献作者根据实验结果确定 $A=1.2$ 时模型理论曲线能与试验结果较好地吻合；对于抗压强度小于 150 MPa 的 UHPC， α 的取值范围应当为： $6.0 \leq \alpha \leq 10.0$ 。

本文 UHPC 单轴受拉应力 - 应变关系采用文献[23]中的双线性模型，可以较好地体现 UHPC 材料的硬化特性：

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{f_{ct}}{\varepsilon_{ca}} & 0 < \varepsilon < \varepsilon_{ca} \\ f_{ct} & \varepsilon_{ca} < \varepsilon < \varepsilon_{cp} \end{cases} \quad (2)$$

其中： f_{ct} 为材料抗拉强度； ε_{ca} 为初裂应变； ε_{cp} 为极限应变。

参考文献[24]和 ABAQUS 使用手册，给出了 UHPC 在 ABAQUS 材料属性模块的其他参数取值，见表 3 和表 4。

Table 3. Elastic parameters of UHPC material properties in ABAQUS
表 3. ABAQUS UHPC 材料属性弹性参数

材料	密度	弹性模量	泊松比
UHPC	2.65e-09	42,000	0.19

Table 4. Plastic parameters of UHPC material properties in ABAQUS
表 4. ABAQUS UHPC 材料属性塑性参数

材料	膨胀角	偏心率	σ_{b0}/σ_{c0}	K_c	粘性系数
UHPC	40	0.1	1.16	0.6667	0.005

通过本节介绍的 UHPC 单轴受压/拉应力 - 应变关系可得到 UHPC 的本构关系曲线如图 7 所示。其中 UHPC 材料的损伤因子通过 Sidoroff 能量等价原理计算得到，通过文献[25]的计算方法可以得到 UHPC 材

料的峰值应变。

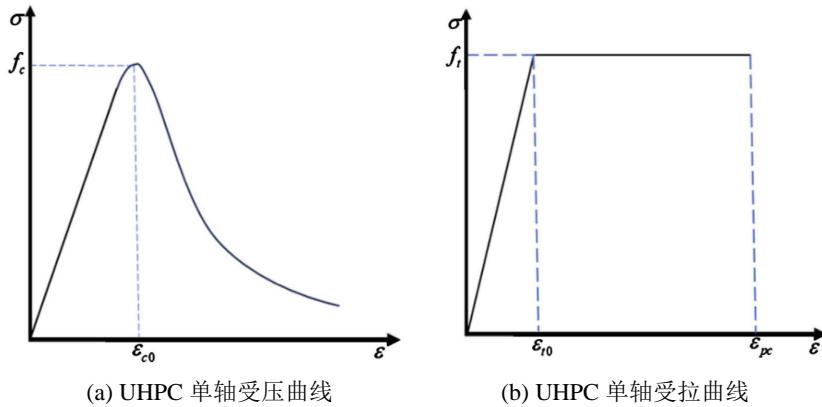


Figure 7. Constitutive relation curve of UHPC
图 7. UHPC 本构关系曲线

试件所使用的 Q235 钢材是一种碳素结构，《碳素结构钢标准》(GB/T700-2006) [26] 规定了其化学成分、机械性能和技术要求等。在《钢结构设计标准》(GB50017-2017) [27] 中给出了 Q235 钢材的物理性能，见表 5。Q235 材料的应力 - 应变曲线一般可分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段、强化阶段、二次塑流阶段五个阶段。为了便于计算，采用钢材的等向强化理想弹塑性模型，将 Von Mise 准则作为屈服准则。其应力 - 应变曲线表达式见公式(3)，应力 - 应变曲线如图 8 所示。

Table 5. Physical performance indicators of Q235 steel
表 5. Q235 钢材的物理性能指标

弹性模量	剪变模量	质量密度	泊松比 ν
206×10^3	79×10^3	7850	0.3

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases} \quad (3)$$

式中： σ_s 为钢材拉应变为 ε_s 时的钢材压应力； E_s 为钢材的弹性模量； f_y 为实测钢材的单轴抗拉强度； ε_y 为钢材拉应力达到 f_y 时的屈服应变。

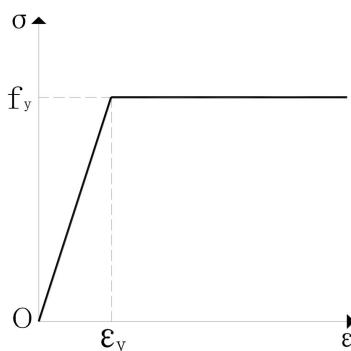


Figure 8. Ideal elastic-plastic stress-strain relationship of Q235 steel
图 8. Q235 钢材的理想弹塑性应力 - 应变关系

4.2. 单元类型的选择

本文模型中的 UHPC、Q235 钢板均采用实体单元模拟。根据 ABAQUS 超级学习手册中的描述，采用六面体单元不影响计算精度，相比于四面体单元以及楔型单元计算代价最小。因此本文使用六面体实体单元。在 ABAQUS 软件中提供了完全积分单元、线性(完全积分)单元、二次(完全积分)单元、缩减单元、修正单元、非协调模式单元、杂交单元。其中最常用的单元类型为 C3D8R、C3D20R、C3D8、C3D20，C3D20 和 C3D20R 作为二阶实体单元，虽然应力计算精确，但是常用于模拟集中问题的求解，对于接触分析并不适用。C3D8 作为低阶实体单元，在进行完全积分和有弯曲荷载时容易发生剪切自锁现象，导致材料的弯曲强度变大，弯曲程度变小。而 C3D8R 作为缩减积分单元，其位移求解精确，不易发生剪切自锁现象，适用于复杂应力(接触)分析，且当网格发生较大变形时对分析的精度不会有太大影响。虽然在使用时可能会发生沙漏问题(零能量)，但可以通过细化网格来解决，一般当沙漏能占内能的比值不超过 5% 时，计算结果就较为精确[28]。综上所述，本文选择 C3D8R 作为实体单元建立模型。

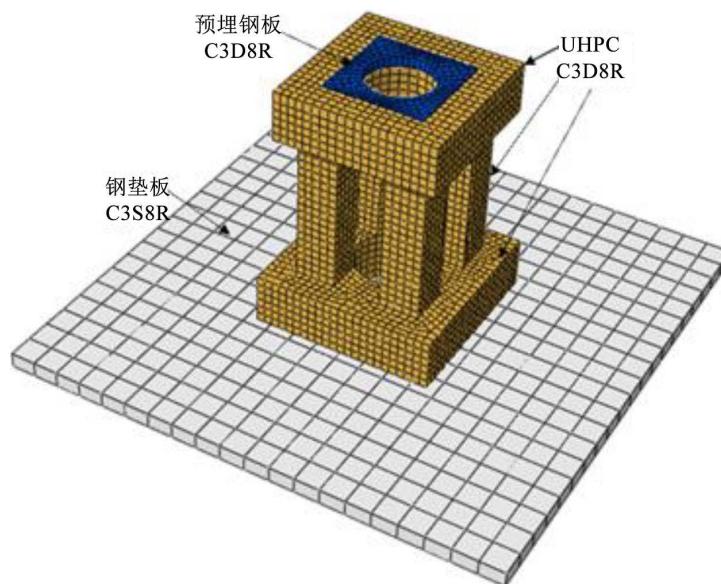


Figure 9. Refined finite element model of the UHPC transfer device
图 9. UHPC 传递装置的精细化有限元模型

4.3. 相互作用与边界条件

本文利用软件中的装配模块将各部件装配为整体后，利用 Interaction(装配)模块定义各个部件之间的相互作用以及约束，主要是对嵌入 UHPC、Q235 钢板，以及模型下方的钢垫板这几个部分进行定义。取 HM18 型号的有限元模型如图 9 所示。其中 UHPC 部分、预埋钢板以及钢垫板部分均用实体单元 C3D8R 进行模拟。鉴于在实际试验中试件中的预埋钢板是和 UHPC 浇筑于一起的，需要考虑预埋钢板与 UHPC 之间的摩擦力，因此将预埋钢板与 UHPC 接触的部分设置为面对面接触，其中法向行为定义为硬接触，切向行为采用罚函数设置摩擦系数为 0.45。为了方便施加位移荷载，在模型上板圆孔上方部分建立参考点并施加耦合约束。考虑到要与试验过程尽量相同，将试件下板部分的下表面与钢垫板之间同样设置面对面接触，接触属性与预埋钢板和 UHPC 的接触属性一致。对钢垫板的下表面施加完全固定约束即约束 U1、U2、U3、UR1、UR2、UR3 各方向自由度；对上板的参考点仅释放 U3 方向自由度，并施加轴向荷载。实际模型的边界条件以及加载如图 10 所示。

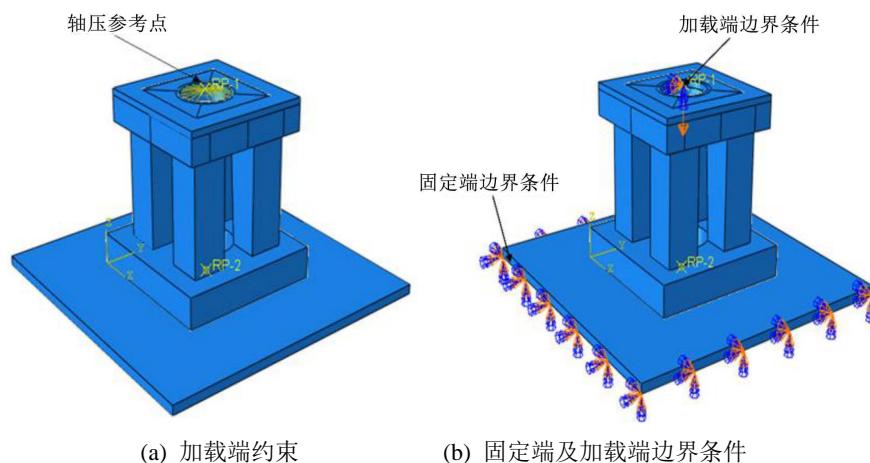


Figure 10. Constraints and boundary conditions of the finite element model
图 10. 有限元模型约束及边界条件

4.4. 有限元验证

为了验证有限元模型的准确性，将模拟所得到的结果与试验结果进行比对，典型试件试验结果与有限元模拟的破坏形态对比如图 11 所示。

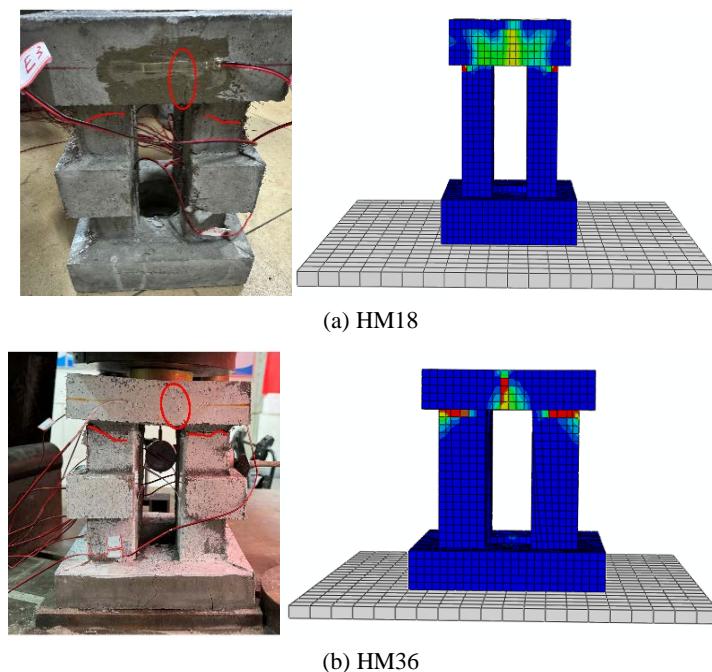


Figure 11. Comparison of failure modes between typical test specimens and finite element models
图 11. 典型试验试件与有限元破坏模式对比

从图 11 中可以看出，有限元的破坏模式也是上板有从下底面延伸至正表面的裂缝，倾向于发生弯曲破坏；柱子靠近上板的位置出现横向裂缝。与试验的荷载 - 位移曲线对比如图 12 所示。

通过图 12 可以看出，利用 ABAQUS 对试件进行有限元分析，可以很好地模拟出 UHPC 预应力传递装置的受力性能，具有一定的参考价值。

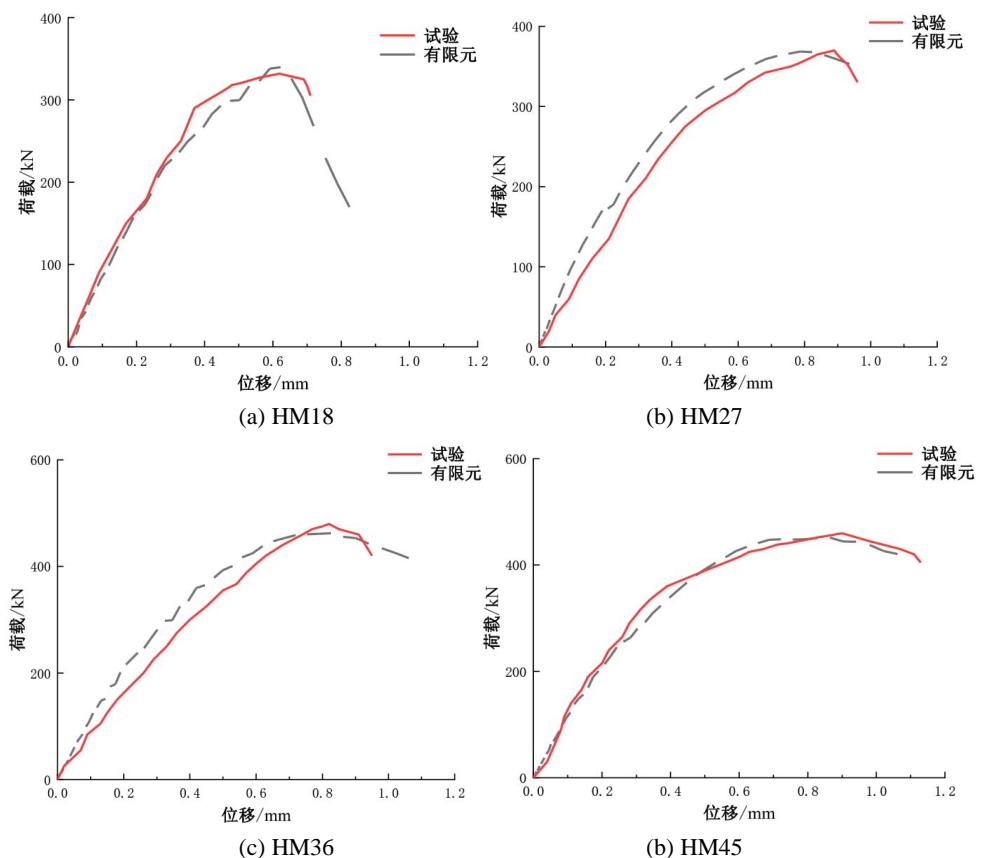
**Figure 12.** Comparison of load-displacement curves

图 12. 荷载 - 位移曲线对比

5. 结论

(1) 本文通过对四个不同型号的 UHPC 预应力传递装置的轴心受压试验发现，在轴向荷载的作用下各型号 UHPC 传递装置试件的破坏形式基本一致，均为试件的上板从底部圆孔边缘 $1/2$ 位置处开裂延伸至正表面，短柱上部靠近上板下底面位置出现横向裂缝，下板靠近柱子的地方发现从正面蔓延至圆孔附近处的裂缝。通过裂缝的位置以及发展情况可以发现，各型号试件的上板主要发生了弯曲破坏，短柱上端部分发生倾向于斜压破坏，下板倾向于被拉裂。

(2) 各 UHPC 传递装置试件的位移 - 荷载曲线趋势也基本一致，在加载初期至极限承载力的 70%~90% 之前基本呈线性增加；在到达极限承载力的 70%~90% 之后，荷载与位移呈非线性变化，曲线的斜率明显变缓；在到达极值点之后，荷载下降，试件被破坏退出工作状态。各型号的 UHPC 传递装置试件都达到了受压承载力设计值的要求。

(3) 4 个不同型号的 UHPC 传递装置试件中，在达到各自抗压承载力设计值的条件下；HM45 型号试件设计尺寸最大，其极限承载力相比于设计值增加了 2%；HM18 型号试件设计尺寸最小，其极限承载力相比于设计值增加了 87%；在进行试件的设计时，应充分考虑尺寸变化带来的影响。

(4) 通过 ABAQUS 进行有限元分析对试验结果进行比对，发现有限元结果能够合理地反映其结构性能和破坏模式并能较为准确地预测试件的极限承载力。

以上结论均根据本次试验结果的规律给出，UHPC 传递装置的尺寸设计、预埋钢板厚度以及材料强度等方面均限于本次试验的条件，其适用性具有一定的范围。本文只对 UHPC 传递装置轴心受压的力学

性能进行了分析，对于该装置在混凝土底板中的锚固机理还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 白晓宇, 张明义, 闫楠. 两种不同材质抗浮锚杆锚固性能的现场对比试验研究与机理分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 38-46, 59.
- [2] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001(3): 7-12, 34.
- [3] 张明义, 张健, 刘俊伟, 等. 中风化花岗岩中抗浮锚杆的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 2741-2746.
- [4] 康景文, 沈小克, 戴一鸣, 等. JGJ476-2019 建筑工程抗浮技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 谭光宇, 蒋耀华, 方伟明, 等. 全长压力型后张预应力抗浮锚杆结构设计研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(21): 6-10.
- [6] de Larrard, F. and Sedran, T. (1994) Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model. *Cement and Concrete Research*, **24**, 997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- [7] 邵旭东, 邱明红, 晏班夫, 等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 33-43.
- [8] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1-24.
- [9] An, M., Zhang, L. and Yi, Q. (2008) Size Effect on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete. *Journal of China University of Mining and Technology*, **18**, 279-282. [https://doi.org/10.1016/s1006-1266\(08\)60059-0](https://doi.org/10.1016/s1006-1266(08)60059-0)
- [10] Prabha, S.L., Dattatreya, J.K., Neelamegam, M., et al. (2010) Study on Stress-Strain of Reactive Powder Concrete under Uniaxial Compression. *International Journal of Engineering Science and Technology*, **2**, 6408-6416.
- [11] Graybeal, B. and Davis, M. (2008) Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 KSI) Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, **105**, 603-609.
- [12] Kamen, A., Denarie, E. and Brühwiler, E. (2007) Thermal Effects on Physico-Mechanical Properties of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, **104**, 415-423.
- [13] Garas, V.Y., Kahn, L.F. and Kurtis, K.E. (2009) Short-Term Tensile Creep and Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.002>
- [14] Graybeal, B.A. (2007) Compressive Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, **104**, 146-152.
- [15] 冯磊, 刘红彬, 彭培火, 等. 高强与活性粉末混凝土尺寸效应的分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(3): 191-197.
- [16] 国爱丽, 赵福君, 巴恒静, 等. 活性粉末混凝土配比优化及收缩性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 20-24.
- [17] Yoo, D., Banthia, N., Kang, S. and Yoon, Y. (2016) Size Effect in Ultra-High-Performance Concrete Beams. *Engineering Fracture Mechanics*, **157**, 86-106. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.02.009>
- [18] Li, Y., Pimienta, P., Pinoteau, N. and Tan, K.H. (2019) Effect of Aggregate Size and Inclusion of Polypropylene and Steel Fibers on Explosive Spalling and Pore Pressure in Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) at Elevated Temperature. *Cement and Concrete Composites*, **99**, 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.016>
- [19] Pan, R., Song, X., He, W. and Qin, L. (2023) Direct Shear Strength of UHPC Considering Size Effect: Theoretical Model and Experimental Verification. *Journal of Building Engineering*, **71**, Article ID: 106381. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106381>
- [20] Zhang, X., Lu, Y., Wu, X., Wang, P., Li, R., Liu, Y., et al. (2023) Constitutive Model for Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Considering the Size Effect under Cyclic Compressive Loading. *Construction and Building Materials*, **368**, Article ID: 130499. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130499>
- [21] Stefano, G., Oliver, B., Aurelio, M., et al. (2009) Punching Tests of Slabs with Low Reinforcement Ratios Discussion. *ACI Structural Journal*, **106**, 911-912.
- [22] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [23] 张哲, 邵旭东, 李文光等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
- [24] 蔺志一. UHPC 壳局部增强装配式混凝土预制柱的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.
- [25] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 369-376.
- [26] 唐一凡, 栾燕, 王丽萍, 等. GB/T700-2006 碳素结构钢标准[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

- 局与中国国家标准化管理委员会, 2006.
- [27] 施设, 王立军, 余海群, 等. GB50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [28] 华岩松. UHPC 加固既有桥梁 RC 柱式桥墩性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.