

# 考虑桩 - 土间相互作用的分离式承台双肢空心墩拟静力试验研究

陈洪泉<sup>1</sup>, 赵卓<sup>1</sup>, 黎家玮<sup>2</sup>, 齐勇强<sup>3</sup>, 孙玉龙<sup>4</sup>, 周大兴<sup>4</sup>, 国庆闯<sup>4</sup>, 汪成<sup>4</sup>, 潘可明<sup>5</sup>,  
田纲<sup>6</sup>, 许维炳<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学建筑工程学院, 北京

<sup>2</sup>北京市公路事业发展中心, 北京

<sup>3</sup>北京构力科技有限公司, 北京

<sup>4</sup>中铁建设集团有限公司, 北京

<sup>5</sup>北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京

<sup>6</sup>中铁一局集团第二工程有限公司, 河北 唐山

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月11日

## 摘要

为研究桩 - 土相互作用条件下分离式承台双肢空心桥墩的抗震性能, 以某桥梁下部结构为原型, 设计并制作了能够考虑桩 - 土相互作用的分离式承台双肢空心桥墩缩尺模型试件, 开展其低周反复拟静力试验, 从破坏现象、滞回曲线、骨架曲线、延性性能、耗能能力及桩身变形特征等方面对其抗震性能进行了分析。结果表明: 低周往复荷载作用下试件经历弹性、屈服和破坏三个阶段; 其滞回曲线较为饱满, 骨架曲线下降段平缓, 位移延性系数达到4.3, 表明结构具有较好的耗能能力和变形能力。相关成果可为分离式承台双肢空心桥墩的抗震设计与基础构造优化提供参考。

## 关键词

桩 - 土间相互作用, 分离式承台, 双肢空心墩, 拟静力试验, 抗震性能

# Experimental Study on Quasi-Static Test of Double-Leg Hollow Piers with Separated Pile Caps Considering Pile-Soil Interaction

Hongquan Chen<sup>1</sup>, Zhuo Zhao<sup>1</sup>, Jiawei Li<sup>2</sup>, Yongqiang Qi<sup>3</sup>, Yulong Sun<sup>4</sup>, Daxing Zhou<sup>4</sup>,  
Qingchuang Guo<sup>4</sup>, Cheng Wang<sup>4</sup>, Keming Pan<sup>5</sup>, Gang Tian<sup>6</sup>, Weibing Xu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

\*通讯作者。

文章引用: 陈洪泉, 赵卓, 黎家玮, 齐勇强, 孙玉龙, 周大兴, 国庆闯, 汪成, 潘可明, 田纲, 许维炳. 考虑桩-土间相互作用的分离式承台双肢空心墩拟静力试验研究[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 62-72. DOI: 10.12677/hjce.2026.155116

<sup>2</sup>Beijing Highway Development Center, Beijing

<sup>3</sup>Beijing Construction Power Technology Co., Ltd., Beijing

<sup>4</sup>China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

<sup>5</sup>Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing

<sup>6</sup>China Railway First Group 2nd Engineering Co., Ltd., Tangshan Hebei

Received: April 9, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 11, 2026

## Abstract

To investigate the seismic performance of double-leg hollow bridge piers with separated pile caps under pile-soil interaction conditions, a scaled specimen of such a pier system was designed and fabricated based on the substructure of a prototype bridge. Quasi-static cyclic loading tests were conducted to evaluate its seismic behavior in terms of failure mode, hysteretic curves, skeleton curves, ductility, energy dissipation capacity, and pile deformation characteristics. The results show that the specimen experienced three stages—elastic, yield, and failure—under low-cycle reversed loading. The hysteretic curves were relatively full, and the descending branch of the skeleton curve was gentle. The displacement ductility coefficient reached 4.3, indicating favorable energy dissipation and deformation capacity. The findings can serve as a reference for the seismic design and foundation optimization of double-leg hollow piers with separated pile caps.

## Keywords

Pile-Soil Interaction, Separated Pile Cap, Double-Column Hollow Pier, Quasi-Static Test, Seismic Performance

Copyright © 2026 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

双肢空心桥墩因其自重轻、材料用量省、受力性能良好等优点，在高墩大跨桥梁结构中得到了广泛应用[1]，但其在强震作用下，墩身易出现开裂、刚度退化、残余位移增大甚至局部失稳等问题[2]。桩-土相互作用是影响桥梁下部结构动力响应的重要因素。在地震作用下，桩基与周围土体之间会发生复杂的变形协调与非线性相互作用，进而改变墩柱、承台及桩基的受力分配与变形模式[3]。因此，考虑桩-土相互作用的双肢空心桥墩抗震性能研究具有重要意义。

近年来，国内外学者在相关领域取得了丰富的研究成果。在空心桥墩抗震性能方面，杜修力和韩强等[1]通过拟静力试验揭示了钢筋混凝土空心墩的破坏模式与延性特征。在桩-土相互作用方面，王海东等[4]和黄福云等[5]通过拟静力试验揭示了群桩-土-墩柱体系的协同工作机理；唐亮等[6]通过振动台试验分析了液化场地群桩基础的地震响应。在分离式承台方面，杨浩林等[7]提出了自复位分离式承台的摇摆抗震概念；龚永灿[8]总结了分离式承台在工程实践中的应用经验；胡彪等[9]对比分析了不同承台结构形式对大跨刚构桥抗震性能的影响，指出分离式承台在位移需求方面具有优势。然而，现有研究仍存在以下空白：一是针对“纵离横联”这一新型承台构造形式的双肢薄壁空心桥墩，考虑桩-土相互作用的抗震性能研究尚属空白；二是缺乏试验与数值模拟相结合的系统验证；三是分离式承台在桩-土作用下

的滞回性能、延性及耗能能力影响机制尚不明确[10]。

基于此, 本文以某原型桥下部结构为原型, 设计并制作考虑桩-土相互作用且采用分离式承台-双肢空心桥墩体系缩尺模型试件, 开展低周反复拟静力试验, 从破坏现象、滞回曲线、骨架曲线、延性性能、耗能能力及桩身变形特征等方面系统分析该结构体系的抗震性能。

## 2. 试验概况

### 2.1. 模型设计

本试验缩尺模型依托北京市某座跨河桥进行设计, 试件为考虑桩-土相互作用且采用分离式承台连接形式的中墩-承台-桩基础下部结构体系单幅桥缩尺试件(以下简称为试件)。依据试验室条件及设备能力, 试件几何相似比取 1:20, 试验轴压比为 0.12, 竖向恒载由千斤顶施加, 实际轴力为 60 t。试件墩柱、加载梁与其余试件保持一致, 以便于对比分析, 试件试验设计依据相似理论开展, 如下表 1。

Table 1. Similarity relationships for the static test model

表 1. 静力试验模型相似关系

序号	静力模型相似设计主要物理量	相似常数
1	几何尺寸 $L$	$C_L$ 1:20
2	质量密度 $\rho$	$C_\rho$ 1:1
3	弹性模量 $E$	$C_E$ 1:3
4	力 $P$	$C_P$ 1:1200
5	静力响应应力 $\sigma$	$C_\sigma$ 1:3
6	静力响应角位移 $\theta$	$C_\theta$ 1:1
7	静力响应线位移 $S$	$C_S$ 1:20
8	静力响应应变 $\varepsilon$	$C_\varepsilon$ 1:1

依据量纲分析中的 Buckingham  $\pi$  定理建立模型与原型的相似关系。在桩-土相互作用体系中, 主要涉及以下物理量: 几何尺寸  $L$ 、弹性模量  $E$ 、密度  $\rho$ 、加速度  $a$ 、力  $P$ 、位移  $S$ 、时间  $t$  等。选取几何尺寸  $L$ 、弹性模量  $E$ 、密度  $\rho$  为基本物理量, 由  $\pi$  定理推导可得:

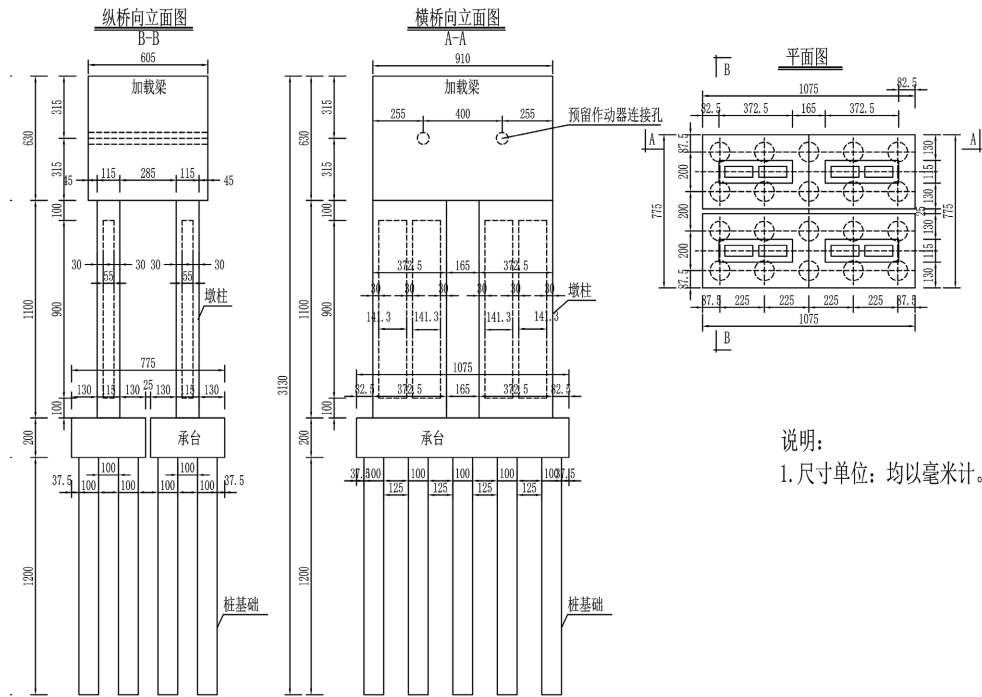
长度相似比  $C_L = 1:20$ , 弹性模量相似比  $C_E = 1:3$  (由于微粒混凝土与原型 C50 混凝土的弹性模量比), 密度相似比  $C_\rho = 1:1$  (模型材料密度与原型相近)。由此推导出:

$$\text{力相似比 } C_P = C_E \times C_L^2 = 1/3 \times (1/20)^2 = 1:1200$$

位移相似比  $C_S = C_L = 1:20$ , 上述相似关系确保了模型与原型在静力响应层面的可比性。

试件几何尺寸如下: 加载梁尺寸为 910 mm  $\times$  605 mm  $\times$  630 mm; 墩柱共 4 片, 单片尺寸为 372.5 mm  $\times$  115 mm  $\times$  1100 mm, 采用双空腔型空心截面, 内设一道隔断将截面分为两个独立空腔, 空腔尺寸为 141.25 mm  $\times$  55 mm  $\times$  900 mm; 承台为两个分离式承台, 尺寸为 1075 mm  $\times$  375 mm  $\times$  200 mm。具体形制如图 1 所示。

加载梁与承台的钢筋网采用 4 mm 镀锌铁丝, 网格间距 30 mm  $\times$  30 mm, 用量为 6.64 kg/m<sup>2</sup>。加载梁与承台混凝土均采用 C50 微粒混凝土, 保护层厚度为 5 mm。试件墩柱的配筋布置如图 2 和图 3 所示。试件纵向受力钢筋采用 8 mm 和 6 mm 的 HRB500 级钢筋, 辅以 4 mm 镀锌铁丝, 考虑空心墩柱截面特点, 纵筋采用内外两层布置; 桩内纵筋采用直径 6 mm HRB500 钢筋如图 4 所示。箍筋均采用镀锌铁丝, 其中桩内采用直径 4 mm 镀锌铁丝如图 4 所示; 墩柱采用 2 mm 镀锌铁丝如图 5 所示, 间距为 33 mm, 采用多层嵌套布置, 确保各层具备必要的横向约束, 满足抗震设计要求。



说明：  
1. 尺寸单位：均以毫米计。

Figure 1. Geometric dimensions of the specimen  
图 1. 试件几何尺寸图

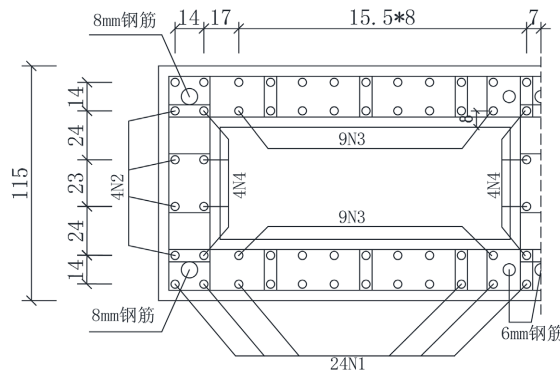


Figure 2. Reinforcement layout of half pier column  
图 2. 1/2 墩柱钢筋配筋平面图

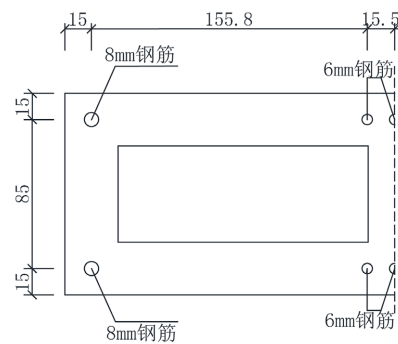


Figure 3. Reinforcement layout of half pier column with 6 mm and 8 mm bars  
图 3. 1/2 墩柱 6 mm, 8 mm 钢筋配筋平面图

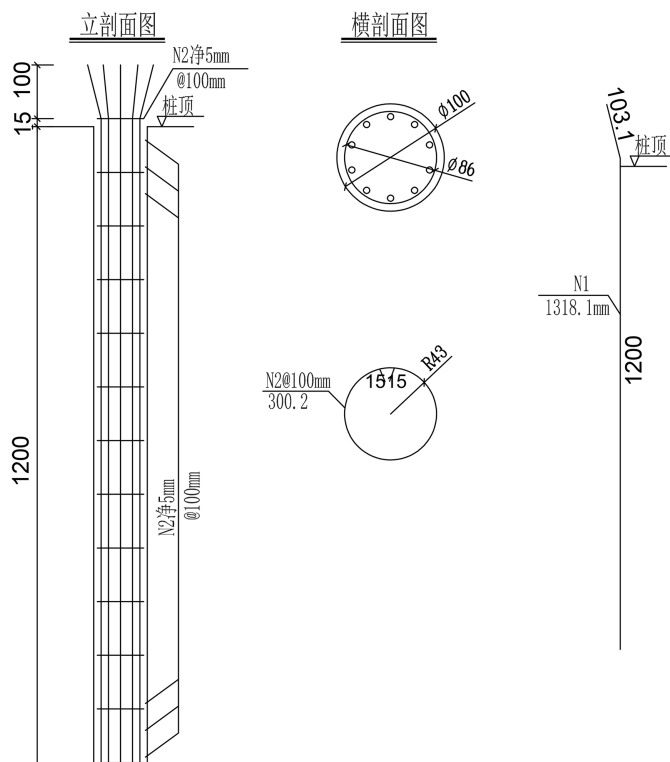


Figure 4. Reinforcement layout of pile  
图 4. 桩内钢筋配筋图

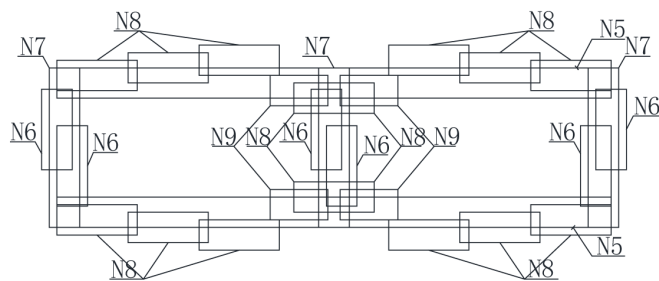


Figure 5. Stirrup layout of pier column  
图 5. 墩柱箍筋配筋平面图

## 2.2. 材料性能

本试件采用的主要材料包括普通混凝土(C50)、HRB500 热轧带肋钢筋以及镀锌铁丝。为测试材料性能，制作了 RC 试块，并与桥墩模型在相同条件下养护 28 天。共制备 75 个 100 mm 立方体试块、14 个 150 mm 试块及 15 个 100 × 100 × 300 mm 棱柱体试块，混凝土材料性能如表 2 所示。

Table 2. Material properties of concrete  
表 2. 混凝土材料性能表

试块种类	材料性能
抗压强度	50.70 MPa
弹性模量	30257 MPa

钢筋方面, 选取 2 mm 箍筋 5 根及 4、6、8 mm 纵筋各 4 根(共 12 根)在北京工业大学工程结构试验中心进行拉伸试验, 钢筋与铁丝的力学性能满足试验中受力和构造需求, 保证了试件整体结构性能的稳定性和一致性。钢筋材料力学性能测试结果详见表 3。

**Table 3.** Material properties of steel reinforcement

**表 3.** 钢筋材料性能表

钢筋类别	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
箍筋	2	481.53	560.51
纵筋	4	342.75	400.08
	6	519.2	704.18
	8	519.97	676.09

### 2.3. 土箱及砂土条件

试验采用刚性土箱模拟地基环境, 土箱尺寸为 3.5 m × 2.0 m × 1.9 m。试验所用砂土取自海河, 土工试验表明其含水率约为 6%, 平均标准贯入击数 N 为 16, 属中粗砂。装砂过程中每铺设 20 cm 进行一次压实, 最终入土深度为 1.6 m, 土箱、砂土以及夯实后的土体如图 6、图 7 所示。



**Figure 6.** Test soil box

**图 6.** 试验土箱



**Figure 7.** Test sand

**图 7.** 试验砂土

试验采用的海河砂土属中粗砂(含水率 6%，内摩擦角  $36^\circ$ ，平均标准贯入击数  $N = 16$ )。该砂土的物理力学参数与原型桥址处地基土的基本特性具有较好的对应性，能够合理模拟实际地基土体的承载特性与排水条件。从砂土的动力特性相似角度分析，模型砂土与原型土体的主要力学指标(内摩擦角、压缩模量等)满足相似比例关系。通过控制砂土的有效粒径、不均匀系数和相对密度等参数，可以有效实现模型土与原型土在动剪切模量比 - 剪应变曲线和阻尼比 - 剪应变曲线等动力特性上的相似。本试验砂土的中粗砂特性使其在颗粒级配和力学行为上与原型地基土具有较好的相似性，能够合理反映桩 - 土相互作用中的土体侧向抗力分布规律和非线性演化特征。此外，砂土作为无黏性土，其均匀性和土工参数易于控制，可避免黏性土黏聚力不均对试验结果的干扰，保证了试验的可重复性和数据可比性。

## 2.4. 土箱边界效应讨论

本试验采用刚性土箱模拟地基边界条件。为减小边界反射效应，土箱长边侧壁内衬 2 cm 厚木板，短边侧壁内衬 3 cm 厚木板，利用柔性材料吸收部分侧向边界反射波。模型桩直径 100 mm，距土箱侧壁最小距离约 0.6 m (6 倍桩径)，满足通常认为的边界效应可忽略的距离条件(一般认为大于 3 倍桩径即可)。

然而，刚性土箱仍存在一定的局限性：其一，刚性侧壁无法完全模拟半无限地基的辐射阻尼效应，可能导致地震能量在边界处反射，使结构响应被一定程度放大；其二，土体侧向变形受到箱壁约束，可能在一定程度上高估浅层土体的侧向抗力，从而影响桩身变形绝对值的准确性。

上述边界效应对本试验结论的主要影响在于：桩身变形量值、承载力数值等定量结果可能存在偏差。因此，本研究结论主要适用于刚性边界条件下的缩尺模型试验，对于实际自由场地条件下的定量外推需谨慎。后续研究可采用层状剪切变形土箱以更好地模拟自由场地边界条件。

## 2.5. 加载制度

试验轴压比为 0.12，千斤顶施加轴力 600 kN。水平加载采用位移控制模式，由液压伺服作动器通过锚杆与加载梁连接实现。水平位移加载幅值按序列逐级递增，依次为 3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、36、45、52.5、60、67.5、75、82.5、90、97.5、105、112.5、120、127.5、135、150、165、180 mm，当水平荷载下降至峰值的 85% 以下时，判定试件破坏并停止加载。

## 2.6. 测量内容及测量仪器

试验的主要测试内容包括：(1) 墩顶加载梁处的荷载值及水平位移；(2) 试件的裂缝长度、分布及发展状况，其中，墩顶水平荷载通过作动器系统自动采集，位移通过加载梁上布置的顶杆位移计采集。

## 3. 试验现象

### 3.1. 弹性阶段

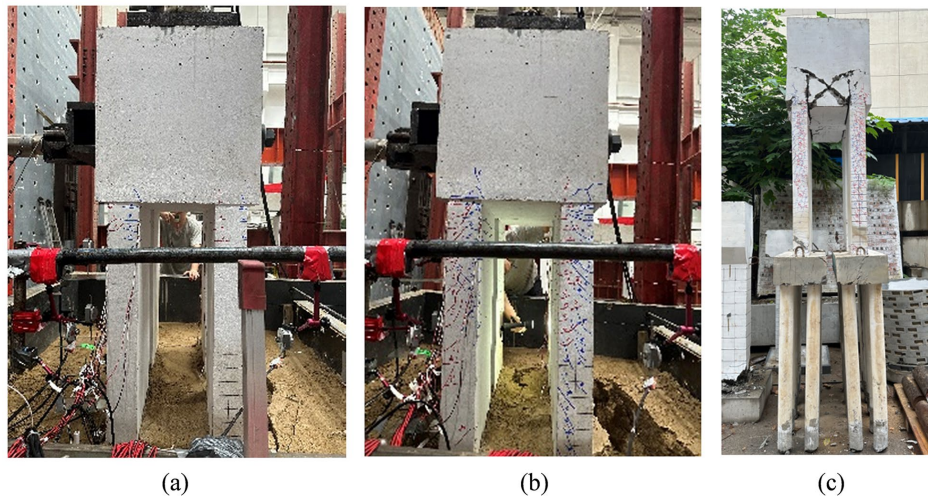
加载初期，结构处于弹性状态，荷载-位移基本呈线性。位移达 15 mm 时，墩柱出现水平裂缝，墩柱顶部出现细微裂缝，西侧土体沿承台边缘产生弧形开裂。裂缝数量少、宽度小，结构整体性良好。

### 3.2. 屈服阶段

位移增至 45 mm 后，墩柱裂缝加速扩展，斜裂缝与水平裂缝交错发展。加载至 60 mm 时，加载梁连接部位出现裂缝，土体沉陷加剧，裂缝向纵深发展。

### 3.3. 破坏阶段

位移达 165 mm 后，加载梁裂缝逐渐贯穿，墩柱裂缝加密、局部混凝土剥落，土体塌陷加剧，结构承载力明显下降。试验于 195 mm 终止，破坏过程呈渐进特征。试件加载各阶段示意图如图 8 所示。



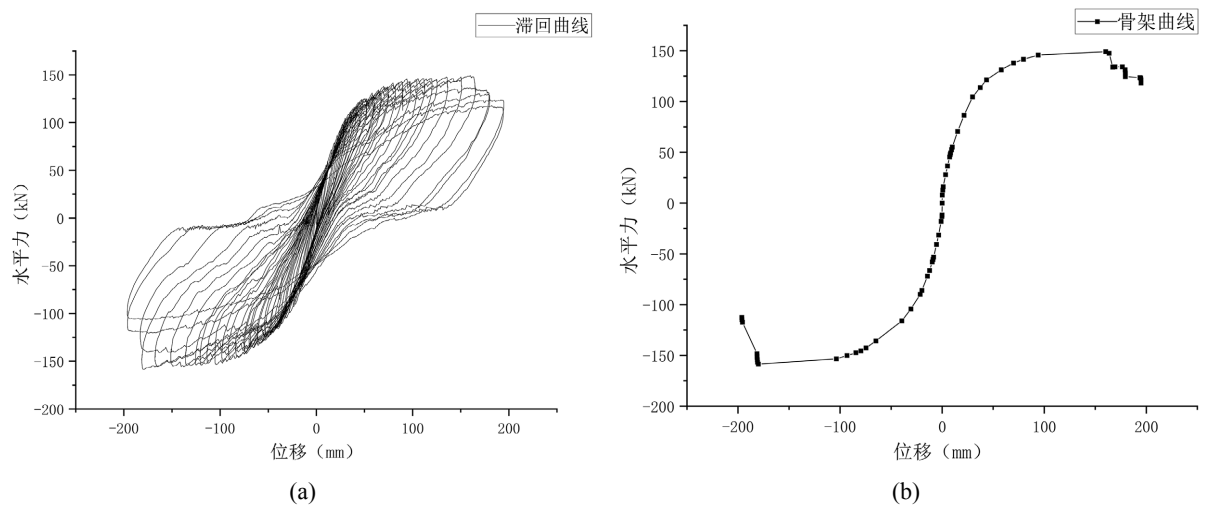
**Figure 8.** Schematic diagrams of specimen at different loading stages. (a) Elastic stage; (b) Yield stage; (c) Failure stage

**图 8.** 试件加载各阶段示意图。(a) 弹性阶段；(b) 屈服阶段；(c) 破坏阶段

## 4. 试验结果分析

### 4.1. 水平力 - 位移滞回特性

试件的滞回曲线和骨架曲线如图 9 所示：



**Figure 9.** Hysteresis and skeleton curves of specimen. (a) Hysteresis curves; (b) Skeleton curve

**图 9.** 试件滞回曲线及骨架曲线。(a) 滞回曲线；(b) 骨架曲线

低周反复荷载作用下，试件骨架曲线整体表现为明显的三阶段特征，初始阶段试件的加载与卸载路径基本重合，表现出良好的弹性特征；随着位移水平提高，滞回环逐渐向外扩展，曲线面积不断增大，说明试件非线性变形和耗能能力逐步增强。同时，试件残余位移控制较好，表现出一定的自恢复能力。试件峰值承载力约为 153.8 kN，峰值位移约为 170.17 mm，试件峰值后骨架曲线下降段较为平缓。总体来看，试件滞回曲线较为饱满，中后期仍保持较高承载力，表明考虑桩 - 土相互作用及分离式承台形式后，结构具备较好的抗震耗能能力。

## 4.2. 延性性能分析

本文以位移延性系数[10]作为延性性能的评价指标,其中,屈服位移 $\Delta_y$ 采用等效弹塑性能量法确定,极限位移 $\Delta_u$ 取承载力下降至峰值荷载85%时对应的位移值。延性系数如表4所示:

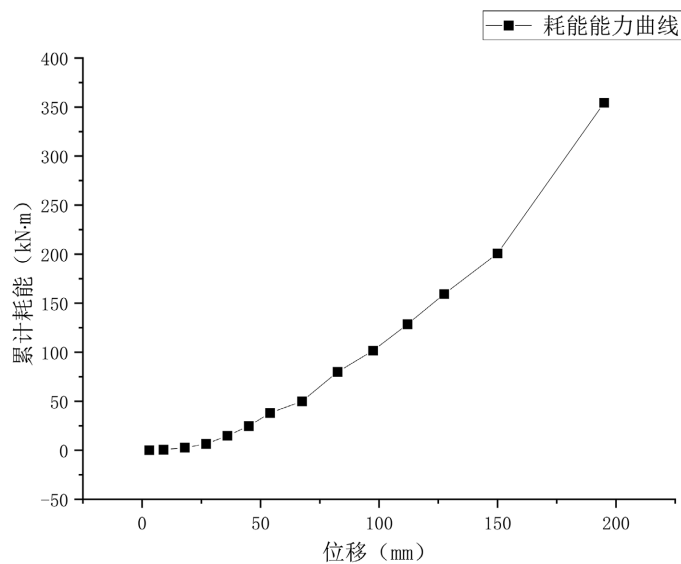
**Table 4.** Ductility coefficients of specimen  
**表 4.** 试件延性系数表

试件	加载方向	屈服点		极限点		峰值点		延性系数
		$P_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$P_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$P_m$ /kN	$\Delta_m$ /mm	
分离式承台空心墩	正向	126.1	43.36	126.7	189.9	149.1	160.23	4.38
	负向	130.9	45.11	134.8	187.65	158.5	180.1	4.17
	均值	128.5	44.21	130.73	188.775	153.8	170.165	4.27

由表可知,该试件在达到屈服后仍具有较大的塑性变形储备,表明考虑桩-土相互作用的分离式承台形式能够有效改善桥墩体系的延性性能,使其具备较强的抗倒塌潜力。

## 4.3. 耗能能力分析

累积耗能数据为各试件的能量耗散能力提供了定量化评价依据。如图10所示:



**Figure 10.** Energy dissipation capacity curve of specimen  
**图 10.** 试件耗能能力曲线

试件的累积耗能随位移增加而持续提高,且在峰值位移后仍保持较高增长速率,说明其在进入塑性变形与破坏演化阶段后,依然具备较强的能量吸收与耗散能力。这表明分离式承台桥墩体系在大震作用下具有较好的延展性和抗震韧性。

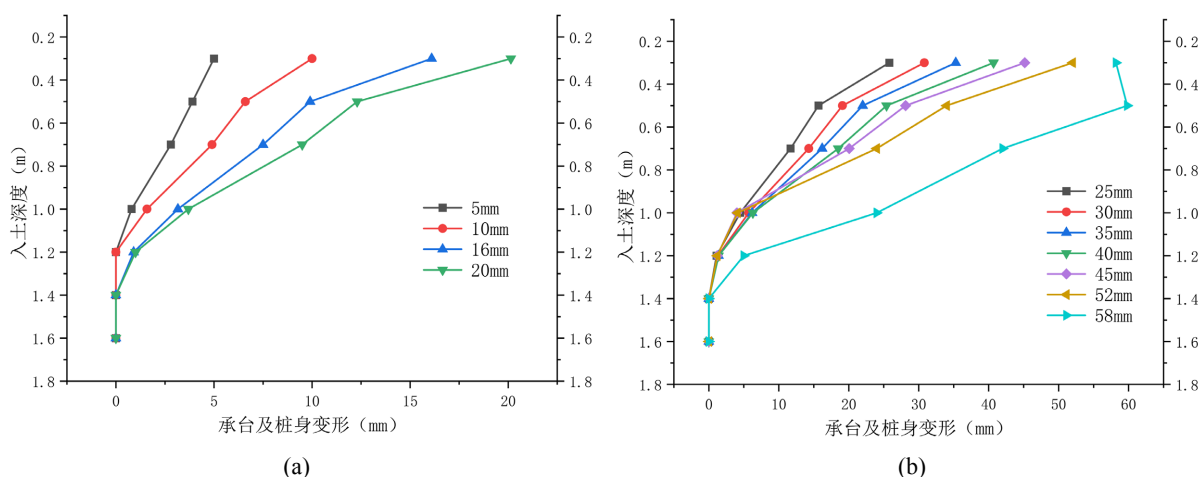
## 4.4. 桩身变形特征

由于试验加载往复位移对称且正、负向加载桩身变形一致,篇幅有限,本文仅给出正向加载位移荷载作用下的承台及桩身变形结果。承台及桩身变形测点位置如表5所示。

**Table 5.** Locations of deformation measurement points for pile cap and pile shaft  
**表 5.** 承台及桩身变形测点位置

试件	0.3 m	0.5 m	0.7 m	1.0 m	1.2 m	1.4 m	1.6 m
分离承台 - 试件 2	承台中心	距桩顶 0.1 m	距桩顶 0.3 m	距桩顶 0.6 m	距桩顶 0.8 m	距桩顶 1.0 m	距桩顶 1.2 m

图 11 给出了试件的最外侧桩身变形曲线。由图 11 可知, 在各级水平位移作用下, 桩身变形的变化趋势是一致的, 随着入土深度的增大, 桩身变形不断减小, 与弹性长桩的弯曲变形规律相似。



**Figure 11.** Pile deformation curves of specimen with separated pile cap. (a) 5 mm~20 mm; (b) 25 mm~58 mm  
**图 11.** 带桩分离承台试件桩身变形曲线。(a) 5 mm~20 mm; (b) 25 mm~58 mm

通过对比图 11(a)与图 11(b)可知, 加载前期与后期桩身变形规律存在差异。加载前期(5~20 mm), 变形主要集中在入土深度 1.2 m 以上, 随深度增加而递减, 1.2 m 以下变形接近零, 后随位移增大略有发展。加载后期(25~58 mm), 变形仍集中于 1.4 m 以上, 下移不明显。破坏阶段(58 mm), 桩身最大水平位移并非出现在桩顶, 而是在入土深度约 0.5 m 处出现明显变形拐点, 表明桩身弯曲模式发生变化。该现象与上部结构刚度约束及土体侧向抗力非线性分布有关, 揭示了上部结构刚度对桩基变形模式的影响, 提示抗震设计中应关注桩身中上部的强度与配筋。

## 5. 结论

基于考虑桩 - 土相互作用的分离式承台双肢空心桥墩拟静力试验结果, 可得到以下结论:

(1) 破坏过程与形态: 试件在低周反复荷载下经历了弹性、屈服及破坏三个典型阶段。裂缝扩展与刚度退化过程较为平缓, 整体破坏形态表现出良好的延性特征与变形能力。

(2) 滞回特性与承载能力: 试件滞回曲线饱满, 试件累计耗能随加载位移的增加持续提高, 骨架曲线下降段较为平缓, 表明其在峰值荷载后仍具备良好的残余承载能力与延展性能。

(3) 延性与变形能力: 试件位移延性系数达到 4.27, 表明在考虑桩 - 土相互作用后, 结构进入塑性阶段后仍保有较大的变形储备。

(4) 桩 - 土相互作用机制: 桩身变形主要集中于桩顶附近土层, 破坏阶段在入土深度约 0.5 m 处出现明显变形拐点。表明分离式承台桩 - 土 - 结构协同变形作用显著。

## 参考文献

- [1] 杜修力, 陈明琦, 韩强. 钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 254-259.
- [2] 韩强, 杜修力, 赵彦, 等. 双向压弯状态下矩形空心桥墩循环试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 58-66.
- [3] 王晓伟, 赫中营, 叶爱君. 桥梁高桩承台基础地震破坏机理试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 1313-1320.
- [4] 王海东, 邓沛航, 曾裕林. 群桩-土-墩柱相互作用体系抗震性能试验及数值模拟研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(6): 47-55.
- [5] 黄福云, 何凌峰, 单玉麟, 等. 整体式桥台-混凝土桩-土相互作用拟静力试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1803-1814.
- [6] 唐亮, 凌贤长, 徐鹏举, 等. 可液化场地桥梁群桩基础地震响应振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 672-680.
- [7] 杨浩林, 袁万城. 分离式承台摇摆抗震及其有限元模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(6): 759-764.
- [8] 龚永灿. 分离式承台塔柱下横梁大跨度支架设计与施工[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(8): 113-114.
- [9] 胡彪, 徐德标, 潘可明, 等. 不同承台结构形式对大跨刚构桥抗震性能的影响分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(2): 61-71, 12-13.
- [10] Park, R. (1989) Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **22**, 155-166. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.22.3.155-166>