

本文引用格式: 吕文龙,许勇,沈仁良.埋入式振弦传感器的埋设影响研究[J].自动化与信息工程,2023,44(1):15-21.

LYU Wenlong, XU Yong, SHEN Renliang. Research on the influence of embedded vibrating wire sensor[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(1):15-21.

# 埋入式振弦传感器的埋设影响研究\*

吕文龙<sup>1</sup> 许勇<sup>2</sup> 沈仁良<sup>2</sup>

(1.广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510000

2.广州大学土木工程学院, 广东 广州 510000)

**摘要:** 针对埋入安装的振弦式传感器设计传感器变异性试验, 研究直接绑扎法、预制块嵌入法、8 字型扣件法、接长杆安装法、焊接法 5 种混凝土应变计和钢筋替换法、姐妹杆等效法 2 种钢筋应力计埋设方法的埋入影响, 并对埋入安装的振弦式混凝土应变计和振弦式钢筋应力计的测量情况。结果表明: 1) 在 5 种振弦式混凝土应变计的埋设方法中, 预制块嵌入法埋设效果最好, 单位荷载下的应变变异系数为 4.97%; 接长杆安装法、焊接法埋设效果较好, 单位荷载下的应变变异系数约为 10%; 直接绑扎法、8 字形扣件法埋设效果相对较差, 单位荷载下的应变变异系数在 20% 以内, 可作为补充或相互验证手段; 2) 2 种振弦式钢筋应力计埋设方法钢筋替换法和姐妹杆等效法, 单位荷载下的应力变异系数分别为 -5.48% 和 -5.55%, 埋设效果比较理想; 3) 振弦式混凝土应变计的预制块嵌入法和振弦式钢筋应力计的钢筋替换法、姐妹杆等效法埋设效果最佳, 但预制块嵌入法操作繁琐, 在工程上难以广泛应用, 故振弦式钢筋应力计更适用于桩身内力的测试。

**关键词:** 振弦式传感器; 变异系数; 埋设方法; 混凝土应变计; 钢筋应力计; 变异性试验

中图分类号: TU67

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)01-0003-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.01.003

## Research on the Influence of Embedded Vibrating Wire Sensor

LYU Wenlong<sup>1</sup> XU Yong<sup>2</sup> SHEN Renliang<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** In view of the sensor variability test of the embedded vibrating wire sensor design, the paper studies the embedding effect of five concrete strain gauges, namely, the direct binding method, the prefabricated block embedding method, the 8-shaped fastener method, the extension bar installation method, the welding method, and the reinforcement replacement method, and the sister bar and other effective methods, and compares the measurement of the embedded vibrating wire concrete strain gauge and the vibrating wire reinforcement stress gauge. The results show that: 1) Among the five embedding methods of vibrating wire concrete strain gauge, the embedding method of prefabricated block has the best effect, and the strain variation coefficient under unit load is 4.97%; The installation method of extension rod and welding method have good embedding effect, and the strain variation coefficient under unit load is about 10%; The burying effect of the direct binding method and the 8-shaped fastener method is relatively poor, and the strain variation coefficient under unit load is within 20%, which can be used as a supplementary or mutual verification method; 2) Two kinds of vibrating wire reinforcement stress meter embedding methods, reinforcement replacement method and sister bar equivalent method, the stress variation coefficient under unit load is -5.48% and -5.55% respectively, and the embedding effect is relatively ideal; 3) The precast block embedding method of vibrating wire type concrete strain gauge, the reinforcement replacement method of vibrating wire type reinforcement stress gauge and the sister bar equivalent method have the best embedding effect, but the precast block embedding method is cumbersome and difficult to be widely used in engineering, so the vibrating wire type reinforcement stress gauge is more suitable for the test of pile internal force.

**Keywords:** vibrating wire sensor; coefficient of variation; embedding method; concrete strain gauge; steel bar stress meter; variability test

## 0 引言

埋入安装的振弦式传感器具有稳定性好、精度高、抗干扰能力强等特点，被广泛应用于检测等领域。目前，其在桩身内力测试中的应用是较为热门的研究方向，研究手段主要有模型试验、数值模拟、工程试验等。杨文生等<sup>[1]</sup>通过工程实例总结性地介绍了电阻应变式传感器、振弦式传感器、光纤光栅传感器在桩身内力测试中的适用性及数据分析过程。范玉明等<sup>[2]</sup>通过在桩身全长范围内布置振弦式钢筋应力计，对2根抗拔试验桩进行了内力测试，结果显示2根试验桩的数据具有较好的一致性。吴跃东等<sup>[3]</sup>基于某试验桩测试工程，从保护钢筋应力计不受成桩过程破坏的角度出发，介绍一套适用于预应力管桩成桩过程中钢筋应力计的安装工艺。张松等<sup>[4]</sup>使用钢筋应力计测量桩基内力，列举可能产生误差的因素，并通过消除引入的物理常量、估测孔径和设置应力计位置等方法，对试验结果误差进行分析和适当修正，得出较为客观、准确的桩身内力图。以往文献对振弦式传感器在桩身内力测试中的应用研究较多<sup>[5-7]</sup>，但在传感器选用及埋设安装方面<sup>[8]</sup>，仍缺乏深入讨论。

本文针对埋入安装的振弦式混凝土应变计和钢筋应力计设计传感器变异性试验，研究不同振弦式传感器多种埋设安装方法的测量效果。

## 1 传感器埋设方法

常用的振弦式传感器有混凝土应变计和钢筋应力计。其中，混凝土应变计常用的埋设方法有直接绑扎法、预制块嵌入法、8字型扣件法、接长杆安装法、焊接法等；钢筋应力计常用的埋设方法有钢筋替换法和姐妹杆等效法等。

### 1.1 振弦式混凝土应变计埋设方法

#### 1.1.1 直接绑扎法

直接绑扎法将振弦式混凝土应变计用扎带或细扎丝捆绑在结构钢筋上，如图1所示。扎带或细扎丝

捆绑在应变计两端，切勿捆绑在应变计套管上；捆绑力度宜适中，勿使用蛮力。

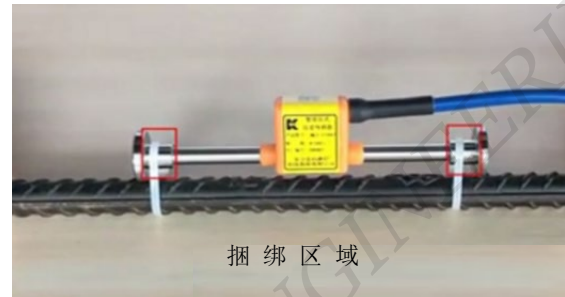
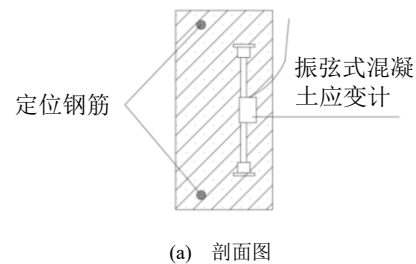


图1 直接绑扎法

#### 1.1.2 预制块嵌入法

预制块嵌入法将振弦式混凝土应变计提前浇筑在合适尺寸的混凝土中，制成预制块，并固定在待测位置。在制作预制块时，设好定位钢筋，以便准确固定预制块，如图2所示。



(a) 剖面图



(b) 实物图

图2 预制块嵌入法

### 1.1.3 8 字型扣件法

8 字型扣件法在振弦式混凝土应变计的埋设位置，将应变计和受力主筋用扣件直接固定，扣件固定的位置用一层自硫化橡胶带缠绕包裹，用于缓冲悬挂系统的振动，如图 3 所示。



图 3 8 字型扣件法

### 1.1.4 接长杆安装法

接长杆安装法在振弦式混凝土应变计两端焊接一段钢筋作为接长杆，埋设时直接将接长杆固定即可，如图 4 所示。这种安装方法适用于比较复杂的工程状况，如在待测位置附近没有能够固定应变计的物体时，接长杆能接触到更远位置的固定物。



图 4 接长杆安装法

### 1.1.5 焊接法

为避免焊接时高温损坏传感器，首先，将特制的安装模管两端平齐地装入安装座；然后，将带有模管的安装座焊接到待测部位；最后，焊接冷却后，拆下

模管，装上振弦式混凝土应变计。此外，模管的安装长度与传感器的标距相同，以便较好地定位 2 个安装座之间的距离，防止距离不合适导致振弦式混凝土应变计无法安装的情况，如图 5 所示。



(a) 安装模管齐平装入安装座



(b) 焊接冷却后，拆下模管，装上应变计

图 5 焊接法

## 1.2 振弦式钢筋应力计埋设方法

### 1.2.1 钢筋替换法

钢筋替换法是将受力主筋部分截断，采用焊接的方法把振弦式钢筋应力计替换上去，如图 6 所示。



图 6 钢筋替换法

### 1.2.2 姐妹杆等效法

姐妹杆等效法在钢筋应力计两端用一小段钢筋作为垫块，先将垫块焊接在主筋上；再将钢筋垫块与钢筋应力计焊接，如图 7 所示。

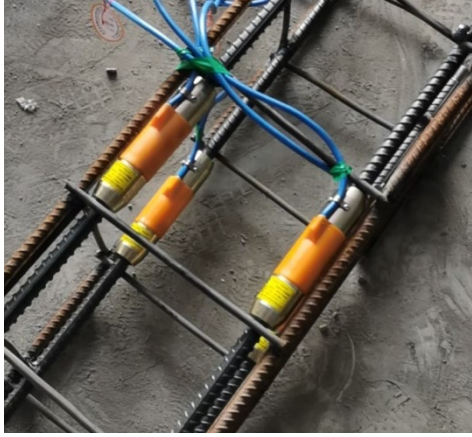


图7 姐妹杆等效法

## 2 试验方法

本试验采用 C30 混凝土和 HRB335 钢筋制备 7 个  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 900\text{ mm}$  的钢筋混凝土试件，钢筋弹性模量为 200 GPa。分别采用上述埋设方法，在试件中间截面均匀布置 4 个振弦式传感器。试验装置如图 8 所示。



图8 试验装置图

试验在广州大学抗震中心进行，采用 200 吨液压伺服加载装置对试件进行轴心受压试验，试验分级加载。为减小混凝土刚度变化对试验结果的影响，试验最大压应力控制在抗压强度的 0.5 倍以内。本试验的最大荷载为  $1\ 120\text{ kN} < 0.5 \times 30 \times 10^3 \times 0.3 \times 0.3\text{ kN} = 1\ 350\text{ kN}$ 。考虑到传感器量程的前 10% 部分误差较大，对试验前两级荷载分级进行一定地调整，最终荷载分级为 280、560、700、840、980、1 120 kN。

试验开始，首先，对试件进行预压，仪器调零，读取初始读数；然后，按设计荷载加载，每级需维持荷载至试件 5 min 不发生变形且不少于 30 min；最后，读取并记录传感器数据。

为验证混凝土试件的材料属性，制作 3 个尺寸为  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的标准混凝土棱柱体试件进行混凝土弹性模量试验，如图 9 所示。



图9 试验用标准棱柱体

本试验混凝土的弹性模量值，取试验测得的 3 个混凝土棱柱体弹性模量的平均值，结果如表 1 所示。本次试验的混凝土材料弹性模量取值为 30.3 GPa。

表 1 混凝土弹性模量试验结果

试件编号	1	2	3	均值
弹性模量/GPa	29.9	30.6	30.4	30.3

## 3 试验结果及数据分析

取每级试验 4 个振弦式传感器测量数据的平均值为本级读数，以消除试件受压时因偏心产生的偶然误差。根据公式(1)、(2)，计算混凝土理论应变和钢筋理论应力，试验数据如表 2、表 3 所示，试验数据折线图如图 10、图 11 所示。

$$\varepsilon_0 = \frac{F}{AE} \quad (1)$$

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 E_s \quad (2)$$

式中： $\varepsilon_0$  为混凝土理论应变值， $F$  为试验荷载， $A$  为试件受压面积， $E$  为试件弹性模量，可近似取试

件混凝土弹性模量， $\sigma_0$  为钢筋理论应力值， $E_s$  为钢筋弹性模量。

表 2 混凝土应变计试验数据及理论应变值

荷载/kN	直接绑扎法测量应变/ $\mu\epsilon$	预制块嵌入法测量应变/ $\mu\epsilon$	8字形扣件法测量应变/ $\mu\epsilon$	接长杆安装法测量应变/ $\mu\epsilon$	焊接法测量应变/ $\mu\epsilon$	理论应变值 $\epsilon_0/\mu\epsilon$
280	-74	-103	-83	-92	-92	-103
560	-154	-208	-166	-191	-193	-205
700	-194	-257	-203	-236	-246	-257
840	-225	-313	-251	-279	-289	-308
980	-272	-368	-305	-321	-340	-359
1 120	-323	-419	-357	-372	-381	-411

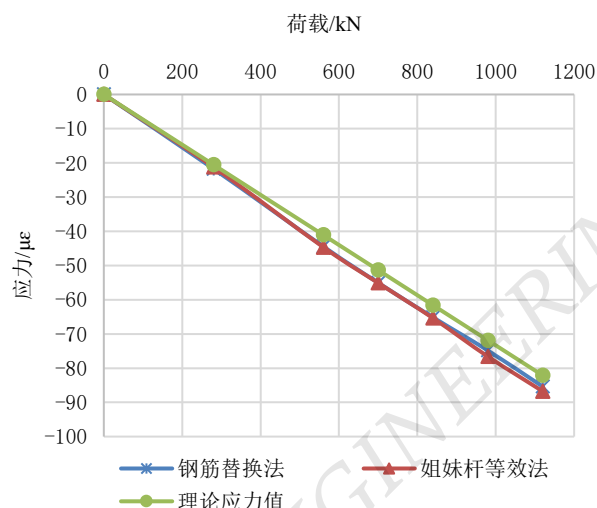


图 11 钢筋应力计试验数据折线

表 3 钢筋应力计试验数据及理论应力值

荷载/kN	钢筋替换法测量应力/MPa	姐妹杆等效法测量应力/MPa	理论应力值 $\sigma_0$ /MPa
280	-21.75	-21.23	-20.54
560	-44.44	-44.64	-41.07
700	-55.04	-55.09	-51.34
840	-65.16	-65.39	-61.61
980	-74.85	-76.61	-71.87
1 120	-85.41	-86.78	-82.14

试验荷载相邻两级间的差值有 280 kN 和 140 kN 两种情况。为方便数据处理，将表 2、表 3 中数据进行换算。根据公式(3)计算其单位荷载下 (kN) 的应变/应力值，结果如表 4、表 5 所示。

$$\zeta = \frac{\xi_i - \xi_{i-1}}{F_i - F_{i-1}} \quad (3)$$

式中： $\zeta$  为单位荷载下应变/应力， $\xi_i$  为本级测量应变/应力， $\xi_{i-1}$  为上级测量应变/应力， $F_i$  为测量本级试验荷载， $F_{i-1}$  为测量上级试验荷载。

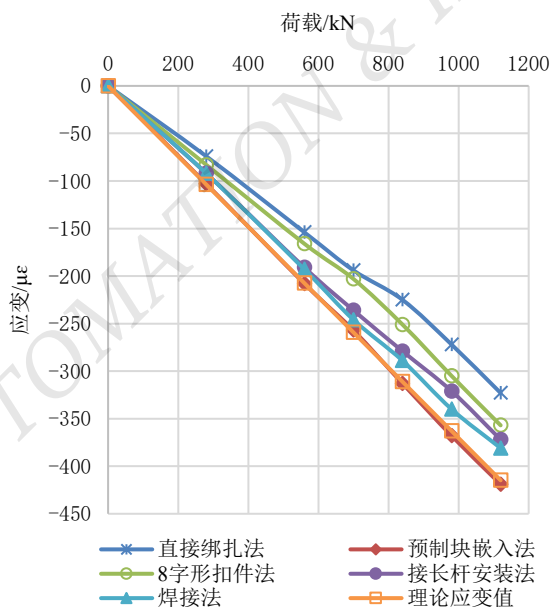


图 10 混凝土应变计试验数据折线

表 4 单位荷载下的应变及单位理论应变值

荷载/kN	直接绑扎法单位应变/( $\mu\epsilon$ /kN)	预制块嵌入法单位应变/( $\mu\epsilon$ /kN)	8字形扣件法单位应变/( $\mu\epsilon$ /kN)	接长杆安装法单位应变/( $\mu\epsilon$ /kN)	焊接法单位应变/( $\mu\epsilon$ /kN)	单位理论应变值/( $\mu\epsilon$ /kN)
280	-0.26	-0.37	-0.30	-0.33	-0.33	
560	-0.29	-0.38	-0.30	-0.35	-0.36	
700	-0.29	-0.35	-0.26	-0.32	-0.38	
840	-0.22	-0.40	-0.34	-0.31	-0.31	-0.37
980	-0.34	-0.39	-0.39	-0.30	-0.36	
1 120	-0.36	-0.36	-0.37	-0.36	-0.29	
均值	-0.29	-0.38	-0.33	-0.33	-0.34	

表 5 单位荷载下的应力及单位理论应力值

荷载/kN	钢筋替换法单位应力/(MPa/kN)	姐妹杆等效法单位应力/(MPa/kN)	单位理论应力值/(MPa/kN)
280	-0.078	-0.076	-0.073

续表

荷载/kN	钢筋替换法 单位应力/ (MPa/kN)	姐妹杆等效法 单位应力/ (MPa/kN)	单位理论 应力值/ (MPa/kN)
560	-0.081	-0.084	
700	-0.076	-0.075	
840	-0.072	-0.074	
980	-0.069	-0.080	-0.073
1 120	-0.075	-0.073	
均值	-0.075	-0.077	

将表 4、表 5 中的数据按公式(4)、(5)处理后,得到 7 种埋设方法的振弦式混凝土应变计和振弦式钢筋应力计在单位荷载作用下的相对偏差及变异系数,如表 6、表 7 所示,试验结果汇总如图 12 所示。

$$\delta = \frac{\bar{\delta} - \delta_0}{\delta_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$cv = \frac{\delta_{SD}}{\delta_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$\delta_{SD} = \sqrt{\frac{\sum(\delta_i - \bar{\delta})^2}{N-1}} \quad (6)$$

式中:  $\delta$  为相对偏差,  $cv$  为变异系数,  $\bar{\delta}$  为传感器单位荷载下测量数据的均值,  $\delta_0$  为单位理论计算应变/应力,  $\delta_{SD}$  为单位荷载下试验测量数据的标准偏差,  $\delta_i$  为单位荷载下测量应变/应力,  $N$  为计算采用数据的个数。

表 6 混凝土应变计相对偏差和变异系数

	直接绑 扎法	预制块 嵌入法	8 字形 扣件法	接长杆 安装法	焊接法
相对偏差/%	-20.93	1.25	-11.93	-11.13	-8.55
变异系数/%	-17.38	-4.97	-14.68	-7.72	-10.17

表 7 钢筋应力计相对偏差和变异系数

	钢筋替换法	姐妹杆等效法
相对偏差/%	2.57	4.63
变异系数/%	-5.48	-5.55

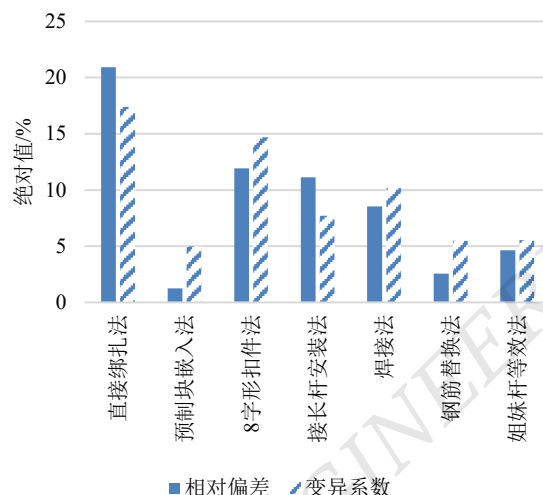


图 12 试验结果汇总表

由图 12 可以看出: 预制块嵌入法埋设的振弦式传感器测量效果最好, 其单位荷载下的应变相对偏差为 1.25%, 变异系数为 4.97%, 但由于其操作繁琐, 在工程上难以广泛应用; 接长杆安装法和焊接法单位荷载下的应变相对偏差和变异系数约为 10%, 其安装方便, 能较好地应用于桩身内力测试; 直接绑扎法和 8 字形扣件法单位荷载下的应变变异系数相对较大, 但也在 20% 以内, 满足工程应用允许的误差, 可作为补充或相互验证手段; 振弦式钢筋应力计 2 种埋设方式单位荷载下的应力相对偏差和变异系数约为 5%, 埋设效果比较理想。与振弦式混凝土应变计相比, 振弦式钢筋应力计整体受埋设方式的影响较小, 具有更高的稳定性。

## 4 结论

1) 从试验结果来看, 5 种振弦式混凝土应变计埋设方法的变异性较大, 受埋设方法的影响较为显著。使用时可根据实际需要选择合适的埋设方法。

2) 2 种振弦式钢筋应力计受埋设方法的影响较小, 钢筋替换法和姐妹杆等效法的变异系数与振弦式混凝土应变计埋设效果最好的预制块嵌入法相接近, 约为 5%, 效果较为理想。

3) 综合考虑各方面因素, 相比于振弦式混凝土应变计, 振弦式钢筋应力计整体具有较好的埋设效果

和较为简单的埋设操作,更适用于工程上的桩身内力测试。

### 参考文献

- [1] 杨文生,李晓勇,张松,等.常用桩身内力测试方法数据分析过程与实例[J].建筑结构,2019,49(14):122-125.
- [2] 范玉明,邓鑫,赵亮.抗拔桩内力测试现场试验研究[J].建筑结构,2020,50(S1):963-967.
- [3] 吴跃东,罗如平,瞿洪利,等.振弦式钢筋计在预应力管桩成桩过程中的安装工艺研究[J].施工技术,2015,44(13):19-22.

### 作者简介:

吕文龙,男,1981年生,博士,教授级高级工程师,一级注册结构工程师,注册岩土工程师,主要研究方向:地基基础方面检测的研究。E-mail: midworm@163.com

(上接第5页)

### 参考文献

- [1] 方凌智,沈煌南.技术和文明的变迁——元宇宙的概念研究[J].产业经济评论,2022(1):5-19.
- [2] 方巍,伏宇翔.元宇宙:概念、技术及应用研究综述[J/OL].南京信息工程大学学报(自然科学版),2022:1-25[2023-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1801.N.20221207.1946.001.html>.
- [3] 陈吉栋.超越元宇宙的法律想象:数字身份、NFT与多元规制[J].法治研究,2022(3):43-54.
- [4] 赵思超,赵伦,赵雪波.超主权传播生态:面向元宇宙的国际传播秩序重构[J].对外传播,2023(1):25-29.
- [5] 白云怡,任重.元宇宙将如何影响国际政治[N].环球时报,2021-12-14(7).
- [6] 罗有成.元宇宙的应用困境及其法律规制[J/OL].北京航空航天大学学报(社会科学版),2022:1-13[2023-02-02]. <https://doi.org/10.13766/j.bhsk.1008-2204.2022.1640>.
- [7] 何波.元宇宙的法律难题与规制思路研究[J].大数据,2023,9(1):87-102.
- [8] 苟尤钊,季雪庭,叶盈如,等.元宇宙技术体系构建与展望[J].电子科技大学学报,2023,52(1):74-84.
- [9] 古炬贤,黄嘉,田延泰.“米诺斯迷宫”的六根支柱——元宇宙

### 作者简介:

李利,男,1989年生,硕士,助理研究研究,主要研究方向:科技情报、产业研究。E-mail: lichil2306@163.com  
康立文,女,1997年生,本科,研究实习员,主要研究方向:产业技术研究。

- [4] 张松,江书超,郭金雪,等.钢筋应力计在桩身内力测量试过程误差及修正方法[J].建筑结构,2017,47(S2):473-475.
- [5] 魏广庆,施斌,贾建勋,等.分布式光纤传感技术在预制桩基桩内力测试中的应用[J].岩土工程学报,2009,31(6):911-916.
- [6] 史永强,赵俭斌,郭卉.静压管桩内力测试技术研究[J].工程勘察,2012,40(1):20-22.
- [7] 倪晓荣,潘建伟,郭金武.预埋钢筋计在桩基内力检测中的应用[J].施工技术,2014,43(6):15-17.
- [8] 赵晨.压电智能骨料的混凝土预制块嵌入方法研究[D].广州:华南理工大学,2021.

的六大技术支撑及军事应用[J].军事文摘,2023(1):33-37.

- [10] 赵丹文.浅谈元宇宙及其技术基础[J].中国传媒科技,2022(12):124-126.
- [11] 卫敏,雷波,赵倩颖.元宇宙的信息基础设施发展挑战与建议[J/OL].无线电通信技术,2023:1-5[2023-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1099.TN.20230104.1343.013.html>.
- [12] 马梦婕,杨佳妮.重构与变革:元宇宙在新闻传播业的应用[J].今传媒,2023,31(1):111-114.
- [13] 尹元慧,姚加,葛金国.元宇宙视域下教育发展的机遇和挑战[J].现代教育科学,2023(1):18-24.
- [14] 纪超.元宇宙时代图书馆的“喜”与“忧”[J].大学图书馆学报,2023,41(1):94-99.
- [15] 赵越.元宇宙背景下动画领域的启示、挑战和风险防范[J].互联网周刊,2023(1):64-66.
- [16] 周继洋.关于上海元宇宙新赛道布局的调研与思考[J].科学发展,2023(1):83-91.
- [17] 赵飞.加快发展云南元宇宙产业的对策思考[J].社会主义论坛,2023(1):27-28.
- [18] 王陈慧子,蔡玮.元宇宙数字经济:现状、特征与发展建议[J/OL].大数据,2022:1-13[2022-05-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1321.g2.20220401.1030.002.html>.
- [19] 清华大学.2020—2021年元宇宙发展研究报告[R].北京:清华大学,2021.