

# 基于压电技术的劲钢混凝土缺陷检测方法试验研究

于亦龙<sup>1</sup>, 姜玉龙<sup>1</sup>, 罗兴国<sup>1</sup>, 吴建林<sup>1</sup>, 董聿霖<sup>2</sup>

(1. 中建宏达建筑有限公司, 北京 100016; 2. 天津城建大学, 天津 300384)

**[摘要]** 针对劲钢混凝土结构内部复杂工况下其内部缺陷无损检测难的问题, 选用压电波动法, 基于频带能量比和熵值归一化提出综合修正系数方法对原始检测信号能量进行数据处理, 针对不同损伤因子对振动响应谱特征改变呈现不同变化规律, 提出基于损伤因子权重影响系数的线性回归模型作为缺陷评判指标, 量化分析损伤程度。通过型钢混凝土模型柱缺陷检测试验, 验证压电传感器在结构内部复合工况下损伤识别的准确性。试验结果表明, 基于压电技术的劲钢混凝土内部缺陷检测方法适用于不同强度等级混凝土; 随着检测距离和损伤程度的增大, 信号能量减小, 缺陷评判指标 DI 逐渐增大; 3 道障碍工况下的小波包能量值相较于无障碍工况下降 85.42%, 损伤指标 DI 由 0 逐渐增大至 0.86。最后利用提出的缺陷检测方法对一实际工程项目结构柱进行缺陷检测评估, 验证了所提缺陷检测方法在实际结构中的适用性。

**[关键词]** 劲钢混凝土; 压电波动法; 小波包能量; 无损检测; 试验

**[中图分类号]** TU398<sup>+</sup>.9      **[文献标识码]** A      **[文章编号]** 2097-0897(2025)24-0148-10

## Experimental Study on Defect Detection Method of Steel Reinforced Concrete Based on Piezoelectric Technology

YU Yilong<sup>1</sup>, JIANG Yulong<sup>1</sup>, LUO Xingguo<sup>1</sup>, WU Jianlin<sup>1</sup>, DONG Yulin<sup>2</sup>

(1. China State Construction Hongda Engineering Co., Ltd., Beijing 100016, China;

2. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of difficult non-destructive inspection of internal defects in steel reinforced concrete structures under complex working conditions, this paper selects the piezoelectric wave method and proposes a comprehensive correction coefficient method based on the frequency band energy ratio and entropy value normalization to process the data of the original detection signal energy. In view of the different variation patterns of vibration response spectrum characteristics caused by different damage factors, a linear regression model based on the influence coefficient of damage factor weights is proposed as a defect evaluation index to quantitatively analyze the degree of damage. Through the defect detection test of the steel reinforced concrete model column, the accuracy of damage identification of the piezoelectric sensor under the composite working conditions inside the structure is verified. The test results show that the defect detection method for steel reinforced concrete based on piezoelectric technology is applicable to concrete of different strength grades. With the increase of detection distance and damage degree, the signal energy decreases, and the defect evaluation index DI gradually increases. The wavelet packet energy value under the three-obstacle condition decreases by 85.42% compared with the barrier-free condition, and the damage index DI gradually increases from 0 to 0.86. Finally, the proposed defect detection method is used to conduct defect detection and evaluation on the structure columns of an actual engineering project, verifying the applicability of the proposed defect detection method in the actual structure.

**Keywords:** steel reinforced concrete; piezoelectric wave method; wavelet packet energy; non-destructive inspection; testing

## 0 引言

劲钢混凝土因其刚度大、抗变形能力强,可被用于超高层建筑承重,但由于其内部劲性钢骨的设计,其翼缘与腹板形成腔室及混凝土材料硬化收缩等原因,尤其是型钢肋板下的盲区混凝土等区域可能出现混凝土与型钢肋板、腹板间的剥离缺陷,进而降低其力学性能<sup>[1-2]</sup>。传统建筑结构健康检测方法有钻芯取样法、冲击回波法和超声波检测法<sup>[3-4]</sup>。然而钻芯取样法是一种有损检测,不能满足建筑施工要求。冲击回波法所使用的冲击回波仪器检测较深部位缺陷时效果不佳,且受结构构件尺寸和形状影响较大,不适用于现场针对劲钢混凝土巨柱多腔室情况的密实度检测。超声波检测法则只能针对核心混凝土缺陷进行检测,对于混凝土与劲钢肋板胶结不良存在脱离缺陷情况无法判断。

压电陶瓷(piezoelectric ceramics, PZT)是一种能将机械能和电能相互转换的信息功能陶瓷材料,具有响应快、灵敏度高、传感和驱动双重功能的优点<sup>[5-7]</sup>。基于压电陶瓷的健康检测方法相较于传统方法具有实时、敏感、不受被测试件几何外形限制等优点,国内许多学者将压电陶瓷制成压电传感器应用于多种工程结构中。其中,针对钢管混凝土的质量缺陷检测方法被国内外学者重点研究。杨俊涛等<sup>[8]</sup>探索了一种基于应力波的对在役混凝土使用过程中内部缺陷的探测方法。杨映泉等<sup>[9]</sup>基于在钢板中的兰姆(Lamb)波和结构表面的瑞利(Rayleigh)波提出一种矩形截面钢管混凝土界面剥离缺陷的检测方法。庄志有<sup>[10]</sup>通过试验研究和数值模拟分析论证了缺陷对外贴式压电陶瓷片所产生应力波场的影响。许斌等<sup>[11]</sup>利用自制嵌入式压电功能元件验证了压电材料可通过接收应力波在混凝土构件中传播的衰减与损耗判断是否存在缺陷,同时提出基于幅值绝对值偏差和小波包能量变异系数共同对损伤程度进行量化分析。Zhang

等<sup>[12]</sup>基于嵌入式压电陶瓷实现对L形钢管混凝土柱在循环荷载下的损伤识别。柯钧豪等<sup>[13]</sup>对矩形钢管混凝土核心空洞与界面剥离2种内部缺陷在不同测试路径上对压电材料响应的影响进行试验,并得出健康混凝土模型的拟合曲线。黄斌聪等<sup>[14]</sup>通过工程案例阐述了压电陶瓷智能骨料在检测钢管混凝土柱脱空率上的优越性。上述研究说明压电波动法可广泛应用于混凝土结构的材料性能评估和损伤识别。然而,目前基于压电技术的结构健康检测大多侧重于钢管混凝土的界面剥离缺陷识别和仅考虑核心混凝土单一影响因素的主动健康检测,而针对劲钢混凝土柱内部多腔室复杂情况的混凝土损伤识别研究尚少。

基于压电技术的劲钢混凝土缺陷检测方法研究路线如图1所示。本文旨在通过压电波动法提出基于子频带能量比和熵值归一化的综合修正系数方法对原始检测信号小波包能量值进行数据处理,以能量值反映不同工况下信号衰减程度。通过引入层次分析法提出基于权重影响系数的缺陷评判指标。并将压电传感器应用于工字型劲性型钢混凝土试验模型柱中,分析不同检测路径下的应力波信号,验证基于压电陶瓷的结构健康检测方法与新损伤指标在结构柱中缺陷检测的可行性与有效性。并利用提出的劲钢混凝土缺陷检测方法对一实际工程项目结构柱进行混凝土内部缺陷检测评估。

## 1 压电波动法缺陷检测原理

### 1.1 压电波动法检测分析

基于压电波动法的结构缺陷识别原理如图2所示,即将2个及以上压电陶瓷传感器贴于试件表面或埋入内部形成传感阵列,通过分析结构损伤前后应力波信号差异提取携带损伤信息的特征参数,即可掌握结构状态信息,实现结构缺陷检测。

### 1.2 基于综合修正系数的信号处理方法

由正交小波基础上发展而来的小波包变换可

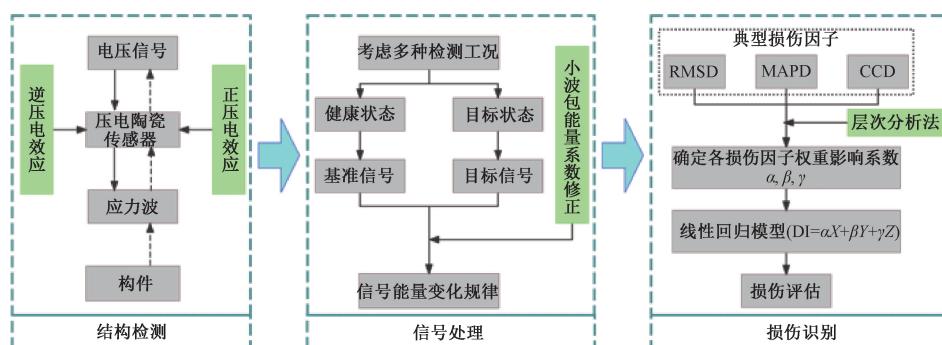


图1 研究技术路线

Fig. 1 Research technical route



图 2 压电波动法结构缺陷识别原理

Fig. 2 Principle of structure defect identification by piezoelectric wave method

同时对信号低频和高频部分进行分解,根据目标信号特征对首层分解的 2 个高频与低频子带节点进行递归分解得到 4 个子节点,经过  $N$  次小波包分解重构后得到末层有  $2^N$  个不同频带的子信号。经小波包分解后末层各频带子信号能量向量定义为:

$$\mathbf{S}_K = [e_{k,1}, e_{k,2}, \dots, e_{k,2^{N-1}}, e_{k,2^N}] \quad (1)$$

$$e_{k,i} = \sum_{j=1}^M |s_{k,i,j}|^2 \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{S}_K$  为经小波包分解后末层各频带子信号能量向量;  $e_{k,i}$  为原信号在经过多次小波包分解后每个子信号所产生的能量值;  $M$  为对原信号的采样次数;  $s_{k,i,j}$  为不同节点处最底层信号的幅值数据。

故而原始检测信号的小波包能量值为:

$$E_{\text{total}} = \sum_{k=1}^{2^N} e_{k,i} \quad (3)$$

然而在高频噪声能量较高场景中,直接计算原始检测信号的小波包能量值有可能造成对其中包含的损伤信号特征提取的误判。为更合理反映不同频带子信号的贡献度和衡量频带能量分布程度,本文针对小波包能量分析提出基于频带能量比和熵值归一化的综合修正系数方法对原始检测信号进行信号处理。首先通过式(4)、式(5)计算子频带能量占比与基于频带能量比的归一化修正系数:

$$\rho_{j,k} = \frac{\sum_{j=1}^M |s_{k,i,j}|^2}{\sum \mathbf{S}_K} \quad (4)$$

$$\rho'_{j,k} = \frac{\rho_{j,k}}{\sum_{j=1}^M \rho_{j,k}} \quad (5)$$

式中:  $\rho_{j,k}$  为经小波包分解的子频带信号能量占比;  $\rho'_{j,k}$  为基于频带能量比的归一化修正系数。

引入能量熵衡量频带能量分布的混乱程度。先计算子频带能量分布熵,然后对能量熵进行逆加权处理,降低因高频噪声造成的信号能量权重,抑制噪声干扰。基于熵值归一化得出修正系数,如下所示:

$$H_S = - \sum_{k=1}^{2^N} \left( \frac{\mathbf{S}_K}{\sum \mathbf{S}_K} \lg \frac{\mathbf{S}_K}{\sum \mathbf{S}_K} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{j,k} = e^{-\lambda H_{j,k}} (\lambda > 0) \quad (7)$$

$$\varepsilon'_{j,k} = \frac{\varepsilon_{j,k}}{\sum_{j=1}^M \varepsilon_{j,k}} \quad (8)$$

式中:  $H_S$  为经小波包分解的子频带信号能量熵;  $\varepsilon'_{j,k}$  为基于信号能量熵值归一化修正系数。

结合能量占比与熵值的混合方法提出复合修正系数的数学表达式为:

$$\sigma_{j,k} = \rho'_{j,k} \varepsilon'_{j,k} \quad (9)$$

$$\tilde{E} = \sigma_{j,k} E_{\text{total}} \quad (10)$$

式中:  $\sigma_{j,k}$  为结合能量占比与熵值归一混合方法的能量修正系数;  $\tilde{E}$  为修正后的小波包能量值。

通过频带能量占比和熵值归一化设计复合修正系数实现信号多维特征融合,在如施工现场的噪声能量较高但分布混乱场景下,复合系数突出应力波冲击的关键频带和抑制高频噪声,通过熵逆加权降低噪声频带权重,避免单纯依赖能量占比导致的误判,同时结合熵值反映能量分布特征,在增强抗噪性的同时优化因电压波动敏感性导致的信号能量异常变化情况。

### 1.3 基于权重影响系数的损伤识别方法

在基于谱分析的结构健康监测技术中,结构损伤的识别可通过对比损伤状态与健康状态下的振动响应谱变化实现。为对结构损伤程度进行定量评估,众多学者采用统计指标计算应力波时域信号特征的相对变化量。目前已提出并常用的典型损伤指标包括平均绝对百分比偏差(MAPD)、均方根偏差(RMSD)和互相关系数偏差(CCD),分别表示为:

$$\text{MAPD} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - E_i^H}{E_i^H} \right| \quad (11)$$

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - E_i^H)^2}{\sum_{i=1}^N (E_i^H)^2}} \quad (12)$$

$$\text{CCD} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E}_i) (E_i^H - \bar{E}_i^H)}{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E}_i)^2 \sum_{i=1}^N (E_i^H - \bar{E}_i^H)^2}} \quad (13)$$

式中:  $E_i^H$  为健康状况下的第  $i$  个采样信号能量值;

$E_i$  为目标状态的第  $i$  个采样信号能量值;  $\bar{E}_i$  为  $i$  个采样信号能量平均值。

这些损伤因子通过系统比较“健康参考谱”与“损伤状态谱”的差异获得,其数学本质是量化 2 个谱曲线间的相关性和偏离程度。当结构健康状态发生改变时,应力波时域信号响应谱中谐振频率的偏移、谱峰分裂及出现新的谐振点等各种响应谱特征的改变都将改变损伤因子的值。因此,本文引入权重影响系数建立从压电陶瓷传感器的应力波信号计算所得小波包能量值与损伤指标的回归模型。回归模型数学表达式如下所示:

$$DI = \alpha X + \beta Y + \gamma Z \quad (14)$$

式中:  $DI$  为所定义的综合缺陷损伤指标;  $X$  为目标检测路径基于小波包能量值与健康状态间的均方根偏差值;  $Y$  为检测目标能量值与健康状态能量值的平均绝对百分比偏差值;  $Z$  为检测目标能量值与健康状态能量值的互相关系数偏差值;  $\alpha, \beta, \gamma$  为待定权重影响系数。

回归模型建立后引入层次分析法,将多个损伤因子分解为相互独立且逻辑关联的子目标,综合定性和定量分析,通过对层次结构权重化,确定每个损伤因子在结构检测损伤识别中的权重。以 1~9 标度法设定比较标度并构造对比矩阵,如表 1 所示。

表 1 损伤因子权重对比判断矩阵

Table 1 Damage factor weight comparison

judgment matrix

项目	MAPD	RMSD	CCD
MAPD	1	1/3	3
RMSD	1/3	1	2
CCD	1/5	1/2	1

对判断矩阵行向量计算其特征向量和特征值,并对特征值进行归一化处理:

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda_i} \quad (16)$$

式中:  $a_{ij}$  为权重对比判断矩阵中的元素;  $\lambda_i$  为行矩阵元素几何平均值;  $\lambda$  为各损伤因子归一化权重值。

由式(15)、式(16)求得损伤因子 MAPD, RMSD, CCD 对应权重系数分别为 0.648, 0.230, 0.122。为了确保决策过程的客观性和全面性,避免人的主观性和片面性导致决策失误,取最大特征值  $\lambda_{\max}$  计算随机一致性指标 CI 和一致性比例指标 CR, 在每个层次进行单准则排序时进行一致性检

验,标定一致性检验阈值为 0.1,如式(17)~式(19)所示:

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 1 \\ 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.648 \\ 0.230 \\ 0.122 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.994 \\ 0.704 \\ 0.368 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{3.073 - 3}{2} = 0.0365 \quad (18)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0365}{0.58} = 0.063 < 0.1 \quad (19)$$

式中:  $RI$  为随机一致性指标修正值,1~7 阶对应  $RI$  取值分别为 0, 0, 0.58, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32。

由式(19)计算得出一致性比例指标  $CR < 0.1$ , 则可将计算并归一化后得到的特征向量视为各损伤因子权向量,即  $\alpha = 0.648, \beta = 0.230, \gamma = 0.122$ 。

## 2 应力波传播衰减特性研究

### 2.1 压电陶瓷传感器构造及制备

试验中驱动和传感器选用尺寸为  $\phi 25 \times 2.5$  A 型翻面电极压电陶瓷圆片,其具体性能参数如表 2 所示。压电陶瓷圆片存在正负极的那一面的正负极分别与双芯屏蔽导线相连,导线另一端引出接线端头,与信号采集仪和信号发生器相连形成具有激励和接收功能的传感器。导线与压电陶瓷正负极用电烙铁进行焊接连接,为避免因进水造成电路短路,在预埋前需用环氧树脂将压电陶瓷传感器和焊接点等通电部位包裹起来作防水处理,其制作流程如图 3 所示。

表 2 PZT-5A 型压电陶瓷圆片性能参数

Table 2 Performance parameters of PZT-5A

piezoelectric ceramics discs

性能参数	取值	性能参数	取值
机电耦合系数	0.70	密度/ $(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7.6
介电常数( $\epsilon_{33}/\epsilon_0$ )	2 000	机械品质因数	75
介质损耗/%	2	泊松比	0.36



图 3 压电陶瓷传感器制作流程

Fig. 3 Manufacturing process of piezoelectric ceramic sensors

### 2.2 损伤检测方案

损伤检测系统如图 4 所示。采用线性扫频信号

对压电陶瓷传感器施加激励,激励信号频率为 1~30kHz,电压幅值为 10V。为提高信噪比、增大应力波传播强度,对激励电压信号进行放大处理,电压放大倍数设为 5 倍。设置采样频率为  $1 \times 10^6$  次/s,采用连续采样模式以获得完整、准确的电信号数据。并将各工况下压电陶瓷传感器应力波输出信号以 db3 为小波基分解为多个节点小波包能量,经重构计算得到对应检测路径的小波包能量值,以小波包能量值表征传感器接收的信号强度。对所有检测路径均采样 3 次,取 3 次应力波信号检测结果的平均值进行数据分析。

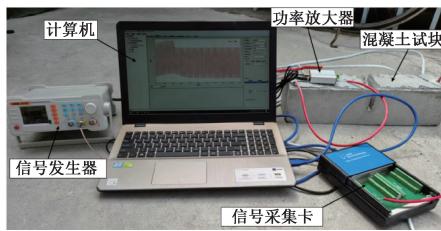


图 4 压电陶瓷主动损伤检测系统

Fig. 4 Piezoelectric ceramic active damage detection system

### 2.3 压电陶瓷应力波衰减规律

劲钢混凝土内部涉及多种因素对压电陶瓷传感器信号传播造成影响,为探究各工况对信号传播的影响,本文共设计 5 种工况,工况 H1 为不同混凝土强度等级的无缺陷试块,工况 H2 为不同检测距离的无缺陷试块,工况 H3 为存在钢板阻隔情况下不同检测距离的缺陷试块,工况 H4 为不同测点布置形式的无缺陷试块,工况 D5 为不同缝隙宽度的缺陷试块。各工况详细情况如图 5 所示(其中, JL 为激励端, CG 为采集端)。除工况 H4 中存在外贴式压电传感器,其余传感器均提前作防水处理预埋至混凝土试块中。

### 2.4 试验结果分析

各工况传感器采集应力波时域信号层叠如图 6 所示。

由图 6a 可看出,在不同强度等级混凝土下的应力波信号变化趋势与幅值大小相差不大,层叠范围几乎重叠,说明混凝土强度等级对压电陶瓷应力波的传播影响程度不大。

工况 H2 传感器采集应力波时域信号如图 6b 所示,在传播间距为 100mm 时可检测到明显的应力波有效信号,在距离为 400mm 时仍可采集到幅值为 0.044 2V 的应力波信号,综合抗干扰能力和信号采集敏感度考虑,压电陶瓷传感器激励端和采集端间距控制在 400mm 以内。通过 MATLAB 小波包工具

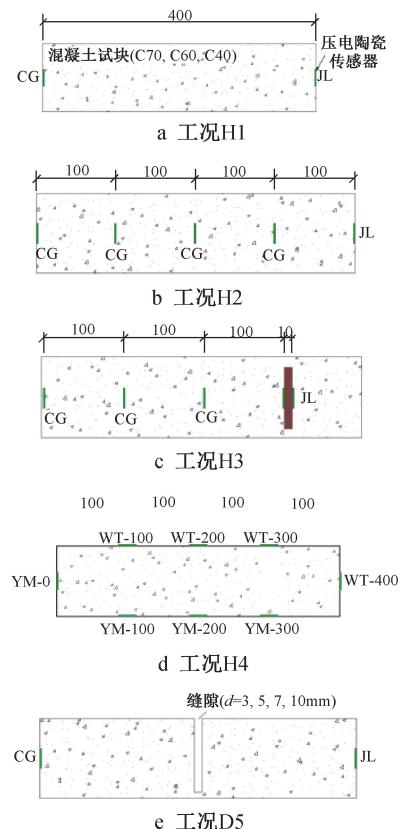


图 5 试件截面及工况设置

Fig. 5 Specimen cross section and working conditions setting

箱定制函数计算不同检测距离各应力波信号的小波包能量值并进行曲线拟合。拟合结果如图 7 所示,其信号能量值随检测距离增大的衰减趋势与电压幅值保持一致,得到曲线拟合公式为:

$$E = 3.3156 \times 10^4 e^{-0.0189d} + 180.2248 \quad (20)$$

式中: $d$  为压电陶瓷传感器激励端与采集端间距;  $E$  为不同检测距离下应力波信号的小波包能量值。

工况 H3 所采集到的应力波时域信号层叠如图 6c 所示,可见在存在钢板阻隔的情况下随着检测距离增大应力波信号幅值随之衰减。将不同距离下信号小波包能量值进行曲线拟合,得到如图 8 所示拟合曲线。

能量变化曲线拟合公式为:

$$E = 456.1759 e^{-0.0124d} + 7.11523 \quad (21)$$

式中: $d$  为在钢板阻隔情况下压电陶瓷传感器激励端与采集端间距;  $E$  为不同检测距离下应力波信号的小波包能量值。

由式(20)、式(21)可知,信号能量值会随检测距离增大呈指数减小,在钢板阻隔情况下,应力波信号强度衰减趋势与在素混凝土中的变化趋势大致相同。

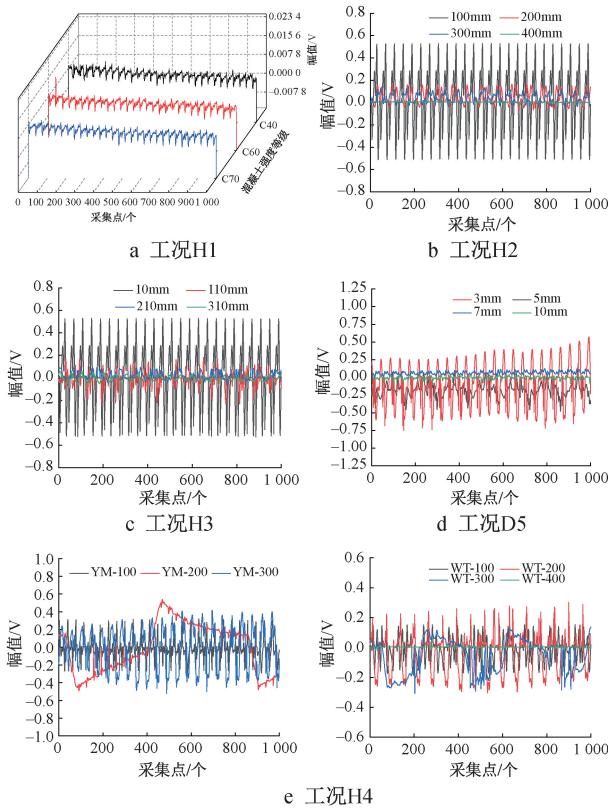


图 6 各工况下应力波时域信号

Fig. 6 Time-domain signals of stress waves under various working conditions

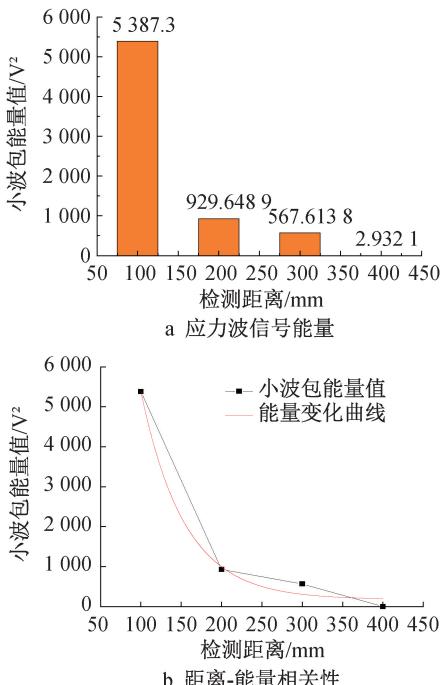


图 7 信号变化规律(工况 H2)

Fig. 7 The variation law of signals (condition H2)

工况 H4 各输出信号的能量值如图 9 所示。由图 9 可知,在相同激励条件下,预埋式压电陶瓷传感

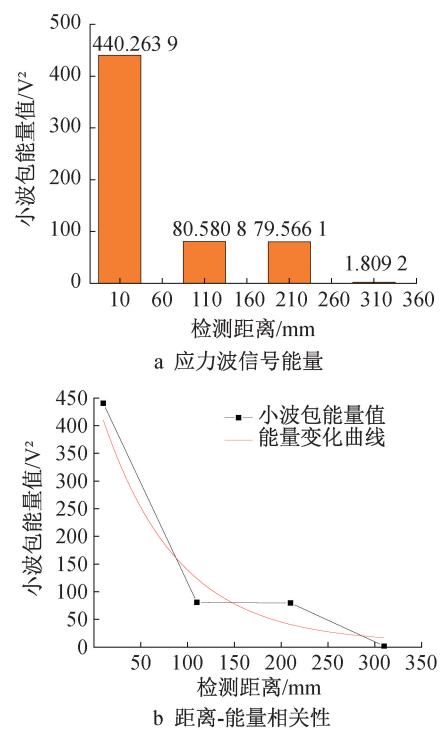


图 8 信号变化规律(工况 H3)

Fig. 8 The variation law of signals (condition H3)

器与外贴式输出的信号能量值及能量衰减规律大致相同,将外贴式传感器(检测距离 400mm)WT-400 的能量值与检测距离为 400mm 工况对应的能量值进行对比,发现两者输出的应力波能量较接近,说明当应力波传播距离与波入射角均相同时,预埋式和外贴式传感器对激励信号的响应效果相同。但对比不同波入射角对应的信号能量,入射角为 45°的能量相较于 0°有所减小,这是由于压电陶瓷传感器沿厚度方向接收应力波与长宽方向的响应机理不同导致,说明压电陶瓷圆片制成的压电陶瓷传感器沿厚度方向将比长宽方向对外部荷载或变形产生更显著的电压响应<sup>[15]</sup>。

工况 D5 应力波时域信号如图 6d 所示,可见随着缝隙宽度的增大应力波信号幅值衰减,其中缝隙宽度为 7mm 和 10mm 对应的信号电压幅值范围较接近。计算各应力波信号的对应小波包能量值如图 10 所示。

结果显示信号能量值随缝隙宽度增大呈指数减小,与上述应力波在混凝土中传播的衰减规律相吻合。由图 10 可知,缝隙宽度为 7mm 和 10mm 的应力波信号能量值较接近,这与电压幅值变化趋势相同,说明当缝隙宽度>7mm 时,结构属于严重破坏,激励信号在混凝土中无法投射更多应力波信号被压电陶瓷传感器接收。

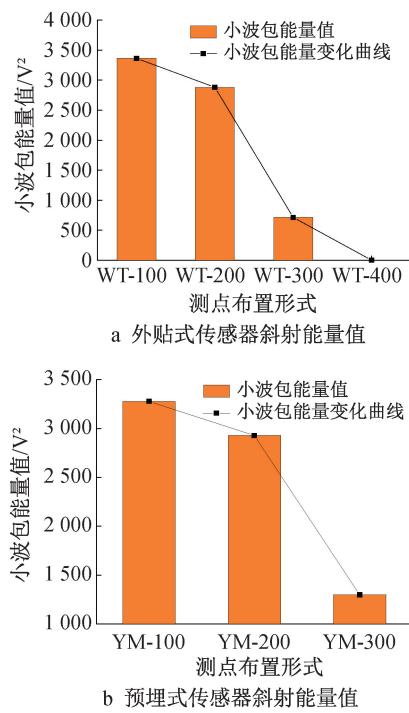


图 9 不同距离和角度下信号能量值

Fig. 9 Energy values of signals at different distances and angles

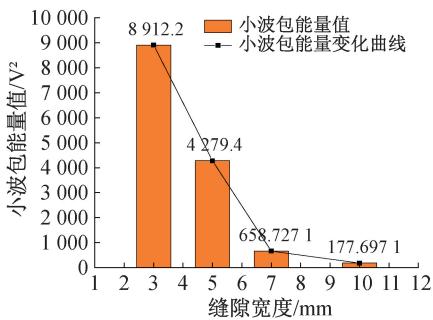


图 10 信号能量值

Fig. 10 Energy values of signals

### 3 劲钢混凝土柱缺陷检测试验

#### 3.1 试件设计与测点布置方案

试验选用截面尺寸  $0.8m \times 0.8m$  的方形混凝土柱,柱高 1m,内部混凝土强度等级为 C70。其中,在混凝土柱中间放置 1 根  $H300 \times 150 \times 7 \times 10$  工字型钢,柱高 1m。沿柱高方向设有 2 道肋板,肋板距型钢底端 400mm。柱内设有 1 层纵向钢筋,  $\phi 25$  钢筋呈环向布置,选用  $\phi 12$  篦筋间隔 0.2m 排列,与纵筋形成整体钢筋骨架。肋板将工字型钢分成上、下 2 个区域,在肋板的上下、左右分别设置压电陶瓷片,在浇筑混凝土前,在模具内的标定位置悬挂木板,用细钢丝拉紧固定,使混凝土内部出现介质不均匀区域,以此模拟混凝土内部缺陷。

压电陶瓷测点布置如图 11 所示,测试路径记为

a-b,其中 a 为驱动端,b 为传感端。在 1-4 路径上设置钢筋阻碍,2-4 路径上不设置任何障碍,3-4 路径上设置 1 道木板障碍,7-5,8-5,9-5 路径分别设置数量不一的木板障碍,同一路径上障碍间隔为 100mm。其中,在肋板的下部设置点位 15、上部设置点位 16,10-15,11-15,16-17 间不设置任何障碍,16-14 间中间设置肋板障碍。

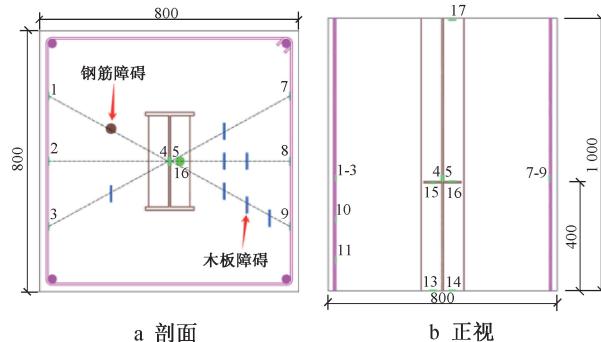


图 11 工字型钢劲性柱试验点位布置

Fig. 11 Layout of test points for I-shaped steel stiffened columns

#### 3.2 试验检测结果

针对构件模型中各工况下的检测,对所获取的应力波信号进行预处理后通过小波包工具箱计算对应的小波包能量。以检测路径 2-4,10-15,11-15,16-17 的电压信号为例,4 种检测路径对应的能量值及变化曲线如图 12 所示。试验结果显示,压电陶瓷传感器在不同入射角和传播距离的复合工况下,应力波能量值随波入射角度和传播距离的增大呈指数减小,与单一工况的试块检测数据变化规律相吻合。由图 12 可知,当检测距离为 400mm、波入射角为  $0^\circ$ (检测路径 2-4)时,压电陶瓷传感器接收信号小波包能量值为  $394.270V^2$ ;当检测距离为 447.21mm、入射角为  $27^\circ$  及距离为 565.69mm、入射角为  $45^\circ$ (分别为检测路径 10-15 和 11-15)时,小波包能量值大幅度衰减至  $26.415V^2$  和  $22.041V^2$ 。这与混凝土试块中入射波斜射试验结果相吻合,说明压电陶瓷圆片制成的压电陶瓷传感器在工字型钢混凝土模型柱中依然表现出其沿厚度方向对外部荷载或变形产生更显著电压响应的特点。

#### 3.3 劲钢混凝土内部缺陷识别

为探究基于权重影响系数的多损伤因子综合缺陷评判指标在型钢混凝土结构内部损伤识别性能,通过分析检测路径 1-2,7-6,8-6,9-6 的信号能量值,揭示劲钢混凝土模型柱中不同缺陷程度下应力波的变化规律及量化损伤严重程度。对缺陷工况下应力波信号能量值进行损伤因子计算和缺陷损

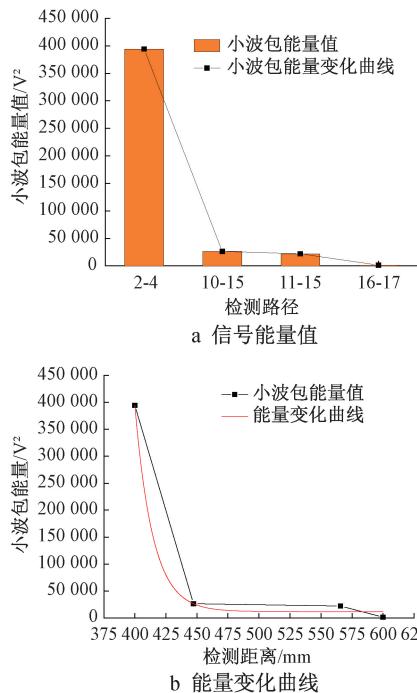


图 12 不同入射角和传播距离下应力波变化规律

Fig. 12 The variation law of stress waves under different incident angles and propagation distances

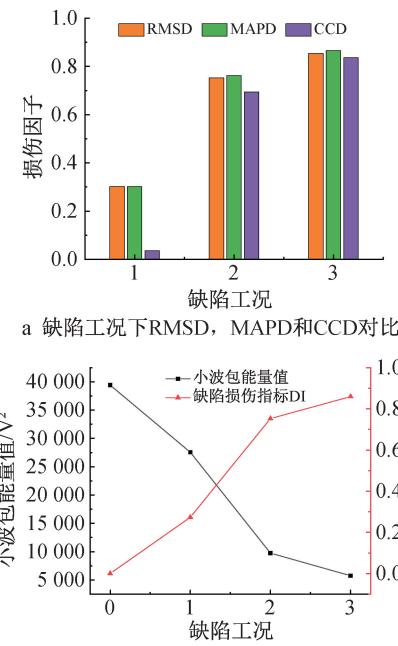
伤指标转换,转换后的效果如表 3 和图 13 所示,将健康状态下检测路径的损伤指标定义为 0,由表 3 与图 13a 可发现,1 道障碍工况下,CCD 计算值仅为 0.035,与 DI 值相差 87.1%,说明仅采用互相关系数偏差作为缺陷损伤指标不能很好地识别微小损伤情况,这与上述应力波信号衰减特性研究试验中工况 D5 试验结果相吻合,表明基于 PZT 的劲钢混凝土内部缺陷检测方法在结构构件中同样表现出良好的检测性能。由图 13b 可看出,随着木板障碍数目增加,压电陶瓷传感器获取的应力波信号不断减弱,3 道障碍工况下的小波包能量值相较于无障碍工况下降 85.41%,DI 随障碍数目增加有所增大,即 DI 值由 0 逐渐增大至 0.86,表明该检测路径上已存在较严重缺陷。所以建立基于权重影响系数的多损伤因子综合回归模型可有效表征试件损伤状态、评估试件损伤水平。

表 3 不同缺陷程度下对应的损伤因子与缺陷损伤指标

Table 3 Damage factors and defect damage index

corresponding to different defect degrees

障碍工况	MAPD	RMSD	CCD	DI
0	0	0	0	0
1	0.301	0.310	0.035	0.271
2	0.762	0.752	0.694	0.751
3	0.865	0.854	0.836	0.859



a 缺陷工况下 RMSD, MAPD 和 CCD 对比

b 能量值与缺陷损伤指标 DI 随障碍数目变化趋势

图 13 DI 变化关系

Fig. 13 Change relationship of DI

## 4 劲钢混凝土缺陷评估方法在实际结构中的应用

### 4.1 试验概况

选取天津市某超高层建筑外框结构柱梁柱节点处作为试验对象,劲钢混凝土结构柱及测点布置如图 14,15 所示。其中,柱截面尺寸为  $1.0m \times 1.05m$ ,内部型钢为对称十字形劲性钢骨柱,尺寸为  $650mm \times 600mm \times 25mm \times 20mm$ ,其翼缘厚 25mm,腹板厚 20mm。通过分析混凝土浇筑薄弱区和内部脱空最可能出现部位,将缺陷检测测点布置于十字形劲性钢骨柱梁柱节点处的其中 1 个腔室。

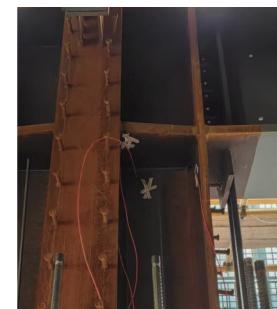


图 14 劲钢混凝土缺陷检测试验

Fig. 14 Defect detection test of steel reinforced concrete

测点布置完成后在养护 28d 后进行劲钢混凝土内部缺陷检测试验。试验激励信号采用峰值为 10V、功率放大倍数为 5、频率范围为 1~30kHz 的正弦扫频信号。

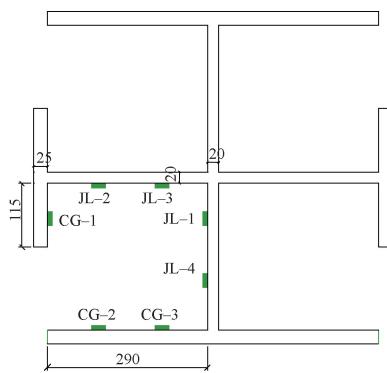


图 15 压电陶瓷传感器测点布置

Fig. 15 The measuring points arrangement of piezoelectric ceramic sensors

## 4.2 试验检测结果分析

试验检测各检测路径下接收信号幅值大小如图 16 所示。由图 16 可看出,在实际结构中压电陶瓷传感器采集的电信号幅值峰值范围在 0.058~0.063V,各信号幅值相差约 7.9%,说明各检测路径上混凝土内部质量状况相近。

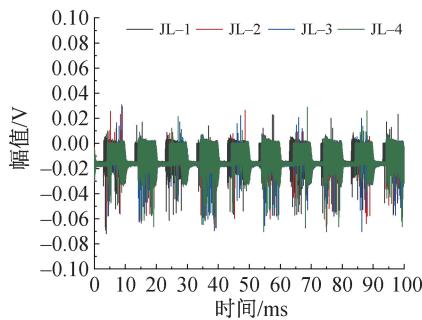


图 16 结构柱缺陷检测时域信号

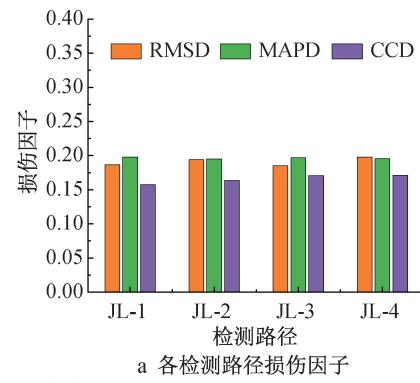
Fig. 16 Time-domain signal for defect detection of structure columns

利用式(3)~式(14)对各检测路径上信号能量值及对应 DI 计算结果如图 17 所示,在 1~30kHz 扫频信号作用下,JL-1~JL-4 接收信号的损伤指标分别为 0.19, 0.191, 0.191, 0.194, 均 < 0.2, 说明该部位混凝土浇筑质量良好,无内部脱空缺陷。

## 5 结语

1) 应力波在混凝土结构中的传播效果主要受检测距离、钢材、传感器布置形式和内部缺陷的影响,但混凝土强度等级对应力波的传播影响程度不大。

2) 混凝土对压电陶瓷传感器输出的应力波信号传递具有削弱作用,信号能量强度随检测距离的增大呈指数减小。在钢板阻隔情况下,信号能量衰减规律与素混凝土情况相近,且近似满足倍数关系。



a 各检测路径损伤因子

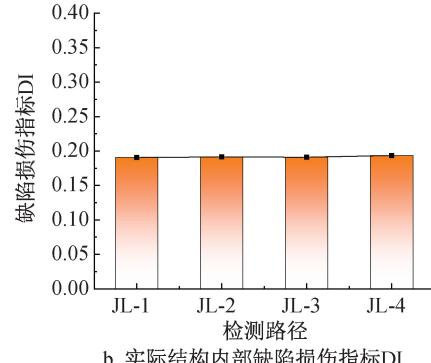


图 17 结构柱缺陷检测、损伤识别

Fig. 17 Defect detection and damage identification of structure columns

3) 随着缺陷严重程度加剧,信号能量值不断降低,对应 DI 不断增大。这说明基于压电技术的劲钢混凝土内部缺陷检测评估方法,能较精确地实现结构损伤量化分析。

4) 利用改进的 DI 值评估实际劲钢混凝土结构的内部损伤情况,结果显示结构内部无损伤存在,验证了本文提出的基于压电技术的劲钢混凝土内部缺陷检测方法在实际结构中应用的可行性和适用性。

## 参考文献:

- [1] 杨世聪,王福敏,渠平.核心混凝土脱空对钢管混凝土构件力学性能的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(3):360-365,486.  
YANG S C, WANG F M, QU P. Brief introduction to the core concrete's empty influence on the mechanical performance of concrete filled steel tube components [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2008, 27 ( 3 ) : 360-365, 486.
- [2] 潘群,王腾飞,郑寒英,等.钢管混凝土缺陷成因分析及其检测方法综述[J].重庆建筑,2023,22(6):60-62.  
PAN Q, WANG T F, ZHENG H Y, et al. Cause analysis of defects in concrete-filled steel tube and a review of its detection methods [J]. Chongqing architecture, 2023, 22 ( 6 ) : 60-62.
- [3] 李平军.超声波法在混凝土密实度检测中的应用[J].建材发展导向,2023,21(16):54-56.  
LI P J. Application of the ultrasonic method to detect the

compactness of concrete [J]. Development guide to building materials, 2023, 21(16): 54-56.

[4] 李红民, 王健, 闫凯. 基于多传感器数据融合的空间结构健康状态评估方法 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(S1): 364-371.

LI H M, WANG J, YAN K. Health state evaluation method of spatial structure based on multi-sensor data fusion [J]. Journal of building structures, 2023, 44(S1): 364-371.

[5] FENG Q, LIANG Y B. Development of piezoelectric-based technology for application in civil structural health monitoring [J]. Earthquake research advances, 2023, 3(2): 100154.

[6] 陆林军, 余海帆, 乔丕忠. 基于应力波传播机理的混凝土无损检测研究综述 [J]. 力学季刊, 2021, 42(2): 197-216.

LU L J, YU H F, QIAO P Z. Nondestructive evaluation of concrete based on stress wave propagation mechanism: a review [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2021, 42(2): 197-216.

[7] 牛彦平, 高宇甲, 刘闯. 基于 PZT 传感器的粉煤灰混凝土强度监测及预测研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1399-1404.

NIU Y P, GAO Y J, LIU C. Study on strength monitoring and prediction of fly ash concrete based on PZT sensor [J]. Building structure, 2023, 53(S2): 1399-1404.

[8] 杨俊涛, 左文建, 张文龙, 等. 压电陶瓷传感器监测混凝土内部缺陷的可行性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 111-122.

YANG J T, ZUO W J, ZHANG W L, et al. Feasibility study on internal defect monitoring of concrete structure based on piezoceramics transducer [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2023, 42(1): 111-122.

[9] 杨映泉, 许斌, 栾乐乐, 等. 基于表面压电波动测量的钢管砼剥离检测试验 [J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 437-441.

YANG Y Q, XU B, LUAN L L, et al. Experiment on interface debonding detection for concrete-filled steel tubular structure using surface wave measurement [J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2018, 40(3): 437-441.

[10] 庄志有. 基于外贴压电陶瓷的钢管混凝土内部缺陷检测方法研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2019.

ZHUANG Z Y. Study on internal defects detection method for concrete filled steel tube with surface-mounted piezoceramics patches [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019.

[11] 许斌, 蔡萍, 周宇, 等. 基于嵌入压电技术的钢管核心混凝土缺陷检测 [J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 489-492, 496.

XU B, CAI P, ZHOU Y, et al. Experimental study on defect detection of concrete core of concrete-filled steel tubular with embedded PZT [J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2015, 37(3): 489-492, 496.

[12] ZHANG J, LI Y, DU G F, et al. Damage detection of L-shaped concrete filled steel tube (L-CFST) columns under cyclic loading using embedded piezoceramic transducers [J]. Sensors, 2018, 18(7): 2171.

[13] 柯钧豪, 罗晓生, 张国文, 等. 矩形钢管砼截面内缺陷对不同路径波动测量的影响 [J]. 压电与声光, 2022, 44(6): 990-997.

KE J H, LUO X S, ZHANG G W, et al. Effect of internal defects in the cross section of concrete-filled rectangular steel tubes on stress wave measurement along different path [J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2022, 44(6): 990-997.

[14] 黄斌聪, 林佳铭, 蔡广福. 基于压电陶瓷法的巨型多腔钢管混凝土柱检测 [J]. 建筑施工, 2022, 44(9): 2264-2267.

HUANG B C, LIN J M, CAI G F. Detection of giant multi cavity concrete filled steel tubular columns based on piezoelectric ceramic method [J]. Building construction, 2022, 44(9): 2264-2267.

[15] 康永乐, 邱雷. 导波结构健康监测中损伤因子的研究和应用 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6): 113-119.

KANG Y L, QIU L. Research and application of damage indexes in guided wave based structural health monitoring [J]. Foreign electronic measurement technology, 2021, 40(6): 113-119.

(上接第 133 页)

[5] 邓帅, 张晨光, 李明广, 等. 基于三维精细化模型的 PC 工法桩支护体系刚度研究 [J]. 特种结构, 2019, 36(6): 83-87.

DENG S, ZHANG C G, LI M G, et al. Study on stiffness of PC engineering pile support system based on 3D fine model [J]. Special structures, 2019, 36(6): 83-87.

[6] 建研地基基础工程有限责任公司. 钢板桩支护技术规程: T/CECS 720—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.

CABR Foundation Engineering Co., Ltd. Technical specification for retaining and protection of steel sheet piling: T/CECS 720—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[7] 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 杭州环宸基础工程有限公司. 组合钢管桩连续墙技术规程: T/ZS 0340—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Huachen Foundation Engineering Co., Ltd. Technical specification for composite steel pipe pile continuous wall: T/ZS 0340—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.

[8] 刘涛, 陈允斌, 刘浩. 滨海软土筑岛围堰超深基坑工程实例分析 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 773-778.

LIU T, CHEN Y B, LIU H. Case study of ultra-deep foundation pit by island and cofferdam construction in soft soils in coastal areas [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 773-778.

[9] 柯灵潮. PC 工法桩在地下车库基坑工程中的应用 [J]. 建筑施工, 2018, 40(7): 1092-1094.

KE L C. Application of PC construction method pile to foundation pit engineering of underground garage [J]. Building construction, 2018, 40(7): 1092-1094.

[10] 陈赟. PC 工法支护桩在某深厚软土地区基坑中的应用及分析 [J]. 浙江建筑, 2018, 35(5): 32-35.

CHEN Y. Application and analysis of PC pile support method in a deep soft soil foundation pit [J]. Zhejiang construction, 2018, 35(5): 32-35.