

小直径芯样检测预制薄壁构件混凝土抗压强度研究

杜凤阁

(廊坊市水利局,河北 廊坊 065000)

摘要:为提高小直径芯样检测农田水利工程薄壁预制构件混凝土抗压强度的检测精度,文章收集整理国内现有相关钻芯法试验数据,分析了混凝土中的粗骨料类型对不同直径芯样抗压强度以及其与标准尺寸立方体试件抗压强度间拟合线的影响,采用最小二乘法回归了小直径芯样法测强公式。结果表明:骨料类型对直径40 mm芯样抗压强度及其相关性曲线基本无影响,但对直径60 mm芯样抗压强度及其强度相关性曲线影响显著;基于文献试验数据,拟合得到的小直径芯样法测强公式均具有较高检测精度,可结合具体检测条件选取应用。研究成果可为水利与土木工程结构混凝土强度质量控制提供参考。

关键词:混凝土抗压强度;小直径芯样;预制薄壁构件;钻芯法

中图分类号:TU528.1;TU528.31

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)12-0029-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.12.157

Research on the compressive strength of precast thin-walled concrete components detected by small diameter core samples

DU Fengge

(Langfang Water Resources Bureau, Langfang 0650001, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of detecting the compressive strength of thin-walled precast concrete components in agricultural water conservancy projects using small-diameter core samples, this article collects and organizes relevant drilling core method test data in China, analyzes the influence of coarse aggregate types in concrete on the compressive strength of different diameter core samples and their fitting lines with the compressive strength of standard size cubic specimens, and uses the least squares method to regress the strength measurement formula of small-diameter core samples. The results showed that the type of aggregate had little effect on the compressive strength and its correlation curve of the 40 mm diameter core sample, but had a significant impact on the compressive strength and its correlation curve of the 60 mm diameter core sample; Based on literature experimental data, the fitted small diameter core sample method strength measurement formula has high detection accuracy and can be selected for application according to specific detection conditions. The research results can provide reference for the quality control of concrete strength in water conservancy and civil engineering structures.

Key words: concrete compressive strength; small diameter core sample; prefabricated thin-walled components; core drilling method

随着装配式混凝土结构在农田水利工程领域中推广,渠道、渡槽和分水闸等薄壁预制构件得到广泛应用,其质量控制的重要性逐渐凸显,尤

其是混凝土抗压强度^[1-2]。

目前,已有学者通过试验探究了预制薄壁构件混凝土抗压强度现场检测方法,并建立了相应

收稿日期:2024-06-18

作者简介:杜凤阁(1975—),女,工程师,从事水利工程管理研究。

混凝土测强曲线模型。祝小靓等^[3-4]以预制薄壁 U 形槽混凝土为试验对象,研究建立了相应的回弹法、超声回弹综合法测强曲线。孙金标^[5]针对辽宁省薄壁构件自拟的超声-回弹测强曲线更适用于本地区农田水利薄壁构件的抗压强度检测。张景奎等^[6]初步验证了后锚固检测方法在农田水利装配式薄壁混凝土结构强度检测中的可行性和有效性,建立了适用于该类薄壁结构的后锚固法测强曲线,但该方法对仪器检测精度要求较高。白军营等^[7]对水运码头薄壁结构混凝土抗压强度试验方法的研究表明,薄壁小型构件的特殊性致回弹仪弹击能量损失过大,从而造成回弹法及超声回弹综合法均不适用的结果,而在薄壁构件混凝土中钻取直径小于 70 mm 芯样的小直径钻芯法试验结果令人满意,数据较常规直径的钻芯法^[8]更为准确。

针对薄壁结构的质量检测无有效检测方法的问题,曹俊峰等^[9]为探讨农田水利工程预制薄壁构件 28 d 标准立方体试件与小直径芯样抗压强度间的拟合关系,取得了 C20~C40 细石混凝土的边长 150 mm 立方体试件与直径 40 mm 芯样的抗压强度试验数据。原有芬^[10]分别以 C20~C40 卵石混凝土和碎石混凝土为研究对象,较为系统的获取了边长 150 mm 立方体试件与高径比为 1.0、直径 30, 40, 60 mm 芯样抗压强度数据,并采用最小二乘法建立了相关曲线,用于推定农田水利工程预制薄壁构件混凝土抗压强度。谭弘等^[11]研究了中小直径钻芯法在水利薄壁预制构件强度检测中的应用,提出采用高径比为 0.71 的 D70H50 芯样试件的检测结果具有可靠性,能够较为准确地

反映薄壁构件的强度,并减轻钻芯引起的薄壁构件损伤。但类似相关文献颇少。

本文收集小直径芯样检测农田水利工程预制薄壁构件混凝土抗压强度试验数据,并以此试验数据研究其抗压强度换算公式,分析粗骨料类型对混凝土强度相关性曲线的影响,拟合直径 40, 60 mm 芯样抗压强度换算公式,并与相关文献试验结果对比,验证拟合公式的检测精度,通过拟合收集到的全部试验数据得到新的换算公式,进一步拓展和完善了小直径芯样检测农田水利工程预制薄壁构件混凝土抗压强度方法。

1 数据收集

表 1 为收集到的文献 [10] 中不同粗骨料类型的 C20, C25, C30, C35, C40 混凝土立方体抗压强度与相应的不同直径芯样抗压强度试验数据。该表中, $f_{30,i}$ 为高径比为 1.0 的直径 30 mm 芯样抗压强度, MPa, 其他符号含义类同; $f_{cu,i}$ 为边长 150 mm 立方体试件抗压强度, MPa。

2 结果分析

2.1 骨料类型对混凝土强度相关性的影响

图 1 为粗骨料类型对标准尺寸立方体试件与小直径芯样的抗压强度相关性的影响程度。

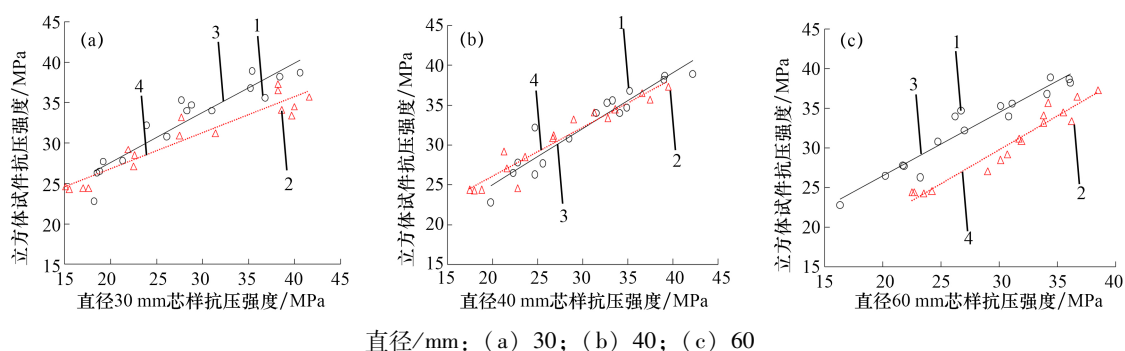
从图 1 中可看出,标准尺寸立方体试件与小直径芯样抗压强度间的相关性较好,均表现出随小直径芯样抗压强度增大,其所对应标准尺寸立方体试件抗压强度增大。

由图 1(a)可知,以直径 30 mm 芯样抗压强度表征的粗骨料为卵石与粗骨料为碎石的混凝土抗

表 1 不同形状及尺寸的试件混凝土抗压强度试验数据

MPa

类型	指标	混凝土试件抗压强度															
卵石混凝土	$f_{30,i}$	36.8	40.6	23.9	38.4	18.5	19.2	18.2	35.2	31.0	28.8	35.4	27.7	21.3	26.1	28.3	18.8
	$f_{40,i}$	33.3	39.1	24.7	39.0	24.7	25.6	19.8	35.2	34.1	34.9	42.2	32.7	22.8	28.5	31.5	22.3
	$f_{60,i}$	31.1	36.0	27.0	36.1	23.2	21.8	16.3	34.1	30.8	26.7	34.4	30.1	21.7	24.7	26.2	20.2
	$f_{cu,i}$	35.6	38.7	32.2	38.2	26.3	27.7	22.8	36.8	34.0	34.7	38.9	35.3	27.8	30.8	34.0	26.5
碎石混凝土	$f_{30,i}$	27.7	21.9	17.0	15.1	41.6	38.2	38.6	38.2	39.7	40.0	31.4	27.5	22.6	22.5	15.5	17.6
	$f_{40,i}$	29.0	21.3	17.5	22.8	37.5	36.6	31.3	39.5	32.8	33.6	26.8	26.7	23.6	21.6	18.0	18.8
	$f_{60,i}$	33.8	30.7	22.5	24.2	34.2	36.7	33.8	38.5	36.2	35.5	31.7	31.9	30.1	29.0	23.5	22.7
	$f_{cu,i}$	33.2	29.2	24.4	24.6	35.7	36.5	34.1	37.3	33.4	34.5	31.2	30.9	28.5	27.1	24.3	24.4



1—卵石混凝土；2—碎石混凝土；3—相关性曲线（卵石）；4—相关性曲线（碎石）。

图 1 骨料品种对立方体试件与不同直径芯样抗压强度相关性的影响

压强度散点在低强度阶段的数值较为接近，但随着混凝土抗压强度增大，前者抗压强度逐渐高于后者，表现为卵石骨料混凝土的小直径芯样抗压强度拟合线的斜率高于碎石骨料混凝土；由图 1(b)可知，当采用直径 40 mm 芯样度量混凝土抗压强度时，两种骨料类型的混凝土抗压强度散点相互融合，且拟合线基本重合，这表明采用直径 40 mm 芯样抗压强度为自变量所建立的相关性曲线对骨料类型不敏感或骨料类型对该相关性曲线基本无影响；由图 1(c)可知，卵石混凝土与碎石混凝土抗压强度散点差别较大，前者抗压强度明显高于后者；两类混凝土采用直径 60 mm 芯样抗压强度为自变量所建立的相关性曲线基本平行，其中卵石混凝土抗压强度拟合线位于碎石混凝土拟合线的上方。

2.2 直径 40 mm 芯样抗压强度换算公式

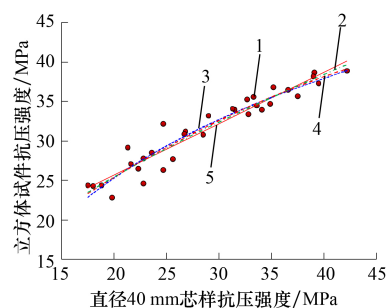
2.2.1 数据回归

由第 2.1 节可知，当采用直径 40 mm 芯样抗压强度为自变量建立相关性曲线时，可忽略粗骨料类型对混凝土抗压强度影响。据最小二乘法原理，以直径 40 mm 芯样抗压强度为自变量，对应立方体试件抗压强度为因变量，采用线性函数、对数函数、抛物线函数和幂函数 4 种数学模型由 Excel 软件进行回归，相应模型拟合线见图 2。为评价回归曲线方程的优劣，引入平均相对误差 δ 和相对标准差 e_r 指标，其相应计算公式如式(1)、(2)所示。若统计得到的指标数值越小，则表明该回归曲线方程的检测精度越高。

$$\delta = \pm \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}} - 1 \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$e_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{cu,i}^c}{f_{cu,i}} - 1 \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $f_{cu,i}^c$ 为测点混凝土抗压强度换算值，MPa； $f_{cu,i}$ 为对应测点立方体试件抗压强度实测值，MPa。



1—试验数据；2—线性拟合式；3—对数拟合式；

4—抛物线拟合式；5—幂函数拟合式。

图 2 立方体试件与直径 40 mm 芯样的抗压强度关系

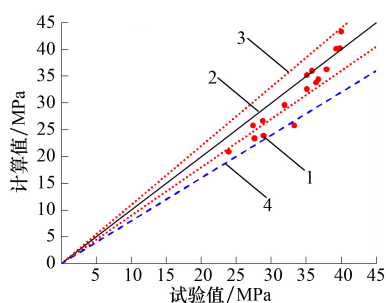
由图 2 可知，各拟合线基本重合，计算结果相近。选取线性函数模型式(3)作为拟合结果，该式的相关系数 r 为 0.96， δ 为 $\pm 3.6\%$ ， e_r 为 5.0%。

$$f_{cu,i}^c = 0.650 3 f_{40,i} + 12.70 \quad (3)$$

式中： $f_{40,i}$ 为测点处直径 40 mm 芯样抗压强度实测值，MPa。

2.2.2 数据验证

为验证直径 40 mm 小直径芯样抗压强度换算公式的准确性与可靠性，选取文献 [9] 中 16 组直径 40 mm 芯样及其对应立方体试件的抗压强度试验数据，其与式(3)计算结果对比如图 3 所示。由图 3 可知，计算值与试验值吻合较好，大部分检测数据的相对误差在 $\pm 10\%$ 内，且大部分散点均位于 $y=x$ 线下方，计算值小于试验结果，说明基于直径 40 mm 小直径芯样抗压强度的换算公式方法可靠，精度较高。

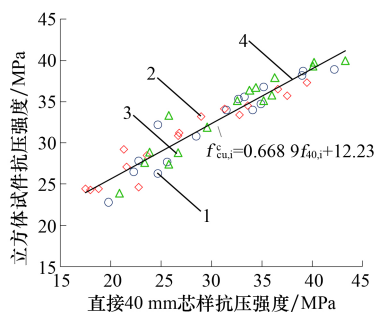


1—试验数据；2— $y=x$ 线；3— $\pm 10\%$ 线；4— -20% 线。

图 3 式 (3) 计算值与试验值对比

2.2.3 公式拓展

为提高换算公式的适用范围,采用回归分析法对文献 [9, 10] 中直径 40 mm 小芯样及其对应立方体试件抗压强度数据拟合,数据散点图如图 4 所示,拟合式及其相应统计指标如表 2 所示。图 4 所示数据间的相关性较好。



1—卵石混凝土；2—碎石混凝土；3—细石混凝土；
4—线性拟合线（全部数据）。

图 4 立方体试件与直径 40 mm 芯样抗压强度关系

表 2 中各拟合式的误差指标值相差不多,选取线性函数的直径 40 mm 芯样抗压强度换算式作为本文推荐测强曲线:

$$f_{cu,i}^c = 0.668 9 f_{40,i} + 12.23 \quad (4)$$

上式相关系数 r 为 0.95, 平均相对误差 δ 为 $\pm 3.7\%$, 强度相对标准差 e_r 为 5.0%, 与式 (3) 技术指标基本相同, 均满足专用测强曲线规定。

表 2 拟合式及其相应统计指标

序号	拟合式	r	$\delta/\%$	$e_r/\%$
1	$y = 16.84e^{0.021 3x}$	0.94	± 3.96	5.24
2	$y = 0.668 9x + 12.23$	0.95	± 3.72	4.96
3	$y = 19.255 \ln(x) - 32.64$	0.96	± 3.80	5.00
4	$y = -0.007 8x^2 + 1.13x + 5.56$	0.96	± 3.70	4.88
5	$y = 3.972 9x^{0.617 7}$	0.95	± 3.72	4.86

2.3 直径 60 mm 芯样抗压强度换算公式

由于骨料类型对直径 60 mm 芯样抗压强度为

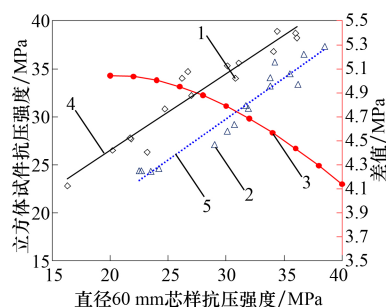
自变量拟合的相关性曲线影响显著,故其小直径芯样抗压强度换算公式应单独拟合。由图 1(c)可知,变量间线性相关关系较好。经实际回归比较,择优选取线性拟合式 (5)、(6) 作为直径 60 mm 芯样检测粗骨料分别为卵石和碎石的混凝土抗压强度换算公式,下式相关系数 r 依次为 0.96、0.97, 平均相对误差 δ 依次为 $\pm 3.1\%$ 、 $\pm 4.4\%$, 强度相对标准差 e_r 依次为 2.8%、3.7%。

$$f_{cu,i}^c = 0.798 5 f_{60,i} + 10.54 \quad (5)$$

$$f_{cu,i}^c = 0.853 9 f_{60,i} + 4.16 \quad (6)$$

式中: $f_{60,i}$ 为测点处直径 60 mm 芯样抗压强度实测值, MPa。

图 5 为粗骨料分别为卵石和碎石的混凝土立方体试件抗压强度与相应混凝土中直径 60 mm 芯样抗压强度散点图及其线性拟合式间关系。由图 5 可知,相同芯样抗压强度时,卵石骨料混凝土抗压强度拟合式的计算值较碎石骨料混凝土拟合式的约高 4~5 MPa, 拟合线接近平行关系。



1—卵石混凝土；2—碎石混凝土；3—差值；
4—拟合线（卵石）；5—拟合线（碎石）。

图 5 直径 60 mm 芯样抗压强度换算公式及其差值

2.4 不同骨料混凝土小直径芯样抗压强度换算公式

分别以卵石、碎石混凝土立方体试件抗压强度为因变量,不同直径芯样抗压强度 $f_{D,i}$ 及其相应试件直径 D_i 为自变量,采用回归分析法拟合得到的不同骨料混凝土小直径芯样抗压强度换算公式为

(1) 卵石混凝土:

$$f_{cu,i}^c = 4.191 973 D_i^{0.0147 09} f_{卵石,D,i}^{0.595 396} \quad (7)$$

该式相关系数 r 为 0.93, 平均相对误差 δ 为 $\pm 4.5\%$, 相对标准差 e_r 为 5.9%。

(2) 碎石混凝土:

$$f_{cu,i}^c = 8.313 689 D_i^{(-0.099 297)} f_{碎石,D,i}^{0.499 532} \quad (8)$$

该式相关系数 r 为 0.92, 平均相对误差 δ 为

$\pm 4.9\%$, 相对标准差 e_r 为 6.0% 。

为验证所建模型的检测精度, 对式(7)、(8)的计算值与试验值进行对比, 如图 6 所示。图中横坐标为立方体试件抗压强度实测值, 纵坐标为式(7)、(8)的计算值, $y=x$ 线为计算值与试验值的等值线, 若数据点越靠近等值线, 则模型计算值越准确; $+10\%$ 与 -10% 线分别为模型计算值与试验值比值为 1.1 和 0.9 的集合。由图 6 可知, 式(7)、(8)的计算值与试验值吻合较好, 散点接近对称的分布在等值线 $y=x$ 两侧, 且均在等值线的 $\pm 10\%$ 范围内, 这说明所建立公式模型的预测精度较高。

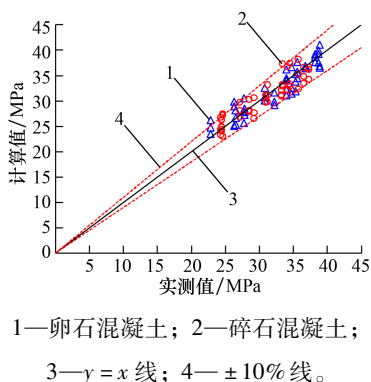


图 6 不同直径芯样抗压强度换算公式计算结果对比

2.5 讨论与建议

对直径 40、60 mm 芯样抗压强度换算公式的评价指标统计结果进行比较可知, 式(4)和式(5)、(6)的平均相对误差 δ 数值相当, 但相对标准差 e_r 数值为后两式的偏低, 且其离散性相对更小。

考虑取芯对构件安全的影响, 建议结合具体工程检测条件合理选择: 当采用在构件混凝土中钻制直径 40 mm 芯样试件抗压强度的方法定量估计结构混凝土抗压强度时, 可利用式(4)进行测点混凝土抗压强度换算; 当有条件在构件混凝土中钻制直径 60 mm 芯样试件时, 应区分混凝土中粗骨料品种, 选择相应的式(5)或式(6)进行测点混凝土抗压强度换算, 以减小试验数据离散性, 提高检测精度。考虑实际工程检测的通用性, 可采用本文给出的不同骨料类型的不同小直径芯样抗压强度换算公式[式(7)、(8)]估计预制薄壁构件实体混凝土抗压强度, 此时对应的所取芯样的直径应在 40~60 mm 范围内。

3 结 论

针对预制薄壁构件混凝土抗压强度检测的难题, 提出了基于不同直径芯样检测混凝土抗压强度的定量评估方法, 通过分析收集的试验数据得出如下结论:

(1) 骨料类型对标准尺寸立方体试件与不同直径芯样的抗压强度间相关性曲线的影响程度不尽相同, 对直径为 40 mm 芯样的抗压强度相关性曲线基本无影响; 但对直径为 60 mm 芯样的抗压强度相关性曲线影响显著, 需单独拟合曲线。

(2) 本文建立了检测精度较高的直径为 40 mm 芯样抗压强度线性换算公式, 通过与文献试验结果对比, 验证了该公式的检测精度与可靠性, 并利用文献试验数据更进一步拓展拟合了直径 40 mm 小直径芯样抗压强度新型换算公式预测薄壁结构构件现场混凝土抗压强度, 使其在安全性、可靠性以及适用范围方面均得到有效提升。

(3) 基于直径 60 mm 芯样抗压强度试验数据建立了区分骨料类型的、检测精度相对更高的抗压强度换算公式, 以便具备相应取芯条件时应用, 以提高检测精度。

(4) 基于试验数据采用回归分析法建立的不同骨料混凝土小直径芯样抗压强度换算专用公式具有足够的检测精度, 可供农田水利工程预制薄壁构件混凝土抗压强度质量检测与控制参考。

参考文献:

- [1] 郭俊利, 赵川, 王筱红, 等. 黑龙滩灌区毛家河渡槽安全检测与结构计算分析[J]. 工程建设, 2024, 56(1): 14-17.
- [2] 冯航, 姜福香, 郭新新, 等. 海滨城市排水暗渠常见病害及其整治[J]. 工程建设, 2017, 49(10): 43-48.
- [3] 祝小靓, 高江林, 傅琼华等. 回弹法检测农田水利薄壁构件混凝土强度研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 40-43.
- [4] 祝小靓, 高江林, 戴国强, 等. 超声-回弹法检测农田水利薄壁构件强度研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(4): 50-54.
- [5] 孙金标. 农田水利工程薄壁构件的超声回弹法强度检测分析[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(12): 15-19.

- [6] 张景奎,刘长顺,罗居刚,等. 农田水利工程装配式薄壁混凝土结构强度检测方法研究[J]. 混凝土世界, 2021(6):61-63.
- [7] 白军营,高颀. 薄壁小型构件混凝土强度试验方法及影响因素试验研究[J]. 混凝土世界,2020(2):79-83.
- [8] 钻芯法检测混凝土强度技术规程:JGJ/T 384—2016 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [9] 曹俊峰,徐利剑,戴国强. 钻芯法检测农田水利工程预制薄壁构件混凝土强度探讨[J]. 江西水利科技, 2019,45(6):425-427;434.
- [10] 原有芬. 小直径钻芯法在检测薄壁构件强度中的应用[J]. 东北水利水电,2019,37(1):58-60.
- [11] 谭弘,孙圣. 中小直径钻芯法在水利薄壁构件强度检测中的应用[J]. 科学技术创新,2024(7):128-131.

(上接第 28 页)

- [6] 侯本伟,徐倩怡,张亚波,等. 土体参数随机场中承插式地下直线管道地震响应分析[J/OL]. 工程力学, 1-13[2024-05-16].
- [7] 韩阳,李冠潮,李东桥,等. 管道承插式柔性接口轴向力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2020, 40(5):8.
- [8] 李冠潮,韩阳,任雪振. 往复荷载下管道承插式柔性接口力学性能试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2020,29(1):5.
- [9] HAN Y, DUAN JF, CHEN JH (2016). An experimental study on the mechanical capability of a rubber gasket joint in a ductile cast iron pipeline under stretch-bending [J]. Pipelines 2016; ASCE, 23-30.
- [10] WHAN, BRAD PARKER, O'ROURKE, et al. Jointed pipeline response to large ground deformation[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2016, 7(1):1-11.
- [11] 钟紫蓝,张亚波,李锦强,等. 球墨铸铁管道接口弯曲性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(9): 143-150.
- [12] 钟紫蓝,赵鑫,张亚波,等. 强震作用下跨断层管道柔性接口抗震加固研究[J]. 世界地震工程,2024, 40(1):25-33.
- [13] 张亚波,钟紫蓝,李锦强,等. 球墨铸铁供水管道承插式接口力学性能试验及失效概率预测模型[J]. 工程力学,2024,41:1.
- [14] ZHONG Z, FILIATRAULT A, AREF A. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation. Earthquake Engineering & Structural Dynamics[J], 2017, 46(5):811-829.