DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250583

冻融环境下混凝土的损伤规律试验研究

姚聪超[1],王　瑞[1],张亚博[2],张旭东[3],董林航[3],陈　峰[3]
(1.河北通力公路管理有限公司,河北 唐山 063700; 2.上海市政工程设计研究总院集团第六设计院有限公司,安徽 合肥 230000; 3.长安大学 公路学院,陕西 西安 710000)

摘　要: 针对混凝土冻融损伤问题开展了相关冻融试验研究,分析损伤沿试件深度方向的变化特征以及尺寸效应对混凝土损伤的影响。结果表明:在冻融循环作用下,混凝土损伤发展呈现表层损伤严重、内部损伤较轻的不均匀损伤与混凝土整体均匀损伤并存的模式。其中,混凝土内部损伤沿深度方向差异显著,靠近核心区域损伤较小;试件尺寸对试件冻融损伤发展影响显著,在冻结最低温度相同和温度变化幅度近似的条件下,试件体积越大,冻融损伤越严重。

关键词: 混凝土桥梁;冻融循环;深度效应;均匀损伤;不均匀损伤;尺寸效应
中图分类号: TU528　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0095-06

Experimental Research on Damage Patterns of Concrete Under Freeze-thaw Conditions

YAO Congchao[1], WANG Rui[1], ZHANG Yabo[2], ZHANG Xudong[3], DONG Linhang[3], CHEN Feng[3]
(1. Hebei Tongli Highway Management Co., Ltd., Tangshan 063700, China; 2. SMEDI Sixth Design Institute Co., Ltd., Hefei 230000, China; 3. College of Highway Engineering, Changan University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Related freeze-thaw experimental research is carried out on the freeze-thaw damage problem of concrete. The variation characteristics of damage along the depth direction of the specimen and the influence of size effect on the concrete damage are analyzed. The results show that under the action of freeze-thaw cycles, the development of concrete damage presents a pattern where uneven damage with severe surface damage and relatively minor internal damage coexists with uniform damage to the entire concrete, in which the internal damage of the concrete shows significant differences along the depth direction, but the damage near the core area is smaller. The size of the specimen has a significant influence on the development of freeze-thaw damage to the specimen. Under the conditions of the same minimum freezing temperature and similar temperature variation range, the larger the volume of the specimen, the more severe the freeze-thaw damage.

Keywords: concrete bridge; freeze-thaw cycle; depth effect; uniform damage; non-uniform damage; size effect

0　引　语

桥梁作为交通基础设施的命脉工程,其耐久性直接关乎交通运输安全和社会经济发展。造成桥梁耐久性问题的因素复杂多样,不同地域的桥梁面临的主要耐久性威胁有所差异。在我国北部季节性冻土地区,冻融循环造成的结构损伤是影响桥梁耐久性的重要因素。实际工程中,北方地区桥梁频繁遭受冻害侵袭,冻融循环作用下,混凝土冻碎剥落、钢筋外露锈蚀等病害屡见不鲜[1]。钢筋混凝土桥梁,在冻融循环作用下,混凝土内部结构会逐步劣化,其力学性能也会降低[2-3],随着病害程度不断加剧,桥梁结构的正常使用功能受到严重影响,甚至威胁到交通运输安全。因此,深入研究冻融环境下桥梁结构的耐久性,对优化北方地区桥梁设计方案、提升桥梁在恶劣环境下的服役性能和使用寿命具有重要的理论和工程实践意义。

本文针对混凝土冻融损伤问题开展相关冻融试验研究,分析混凝土在冻融循环过程中的劣化发展规律,研究冻融损伤影响因素。

收稿日期: 2025-06-07
基金项目: 超重载交通下除冰盐使用环境桥梁结构耐久性研究(2018SF-400)
作者简介: 姚聪超(1982—),男,学士,高级工程师,从事桥梁结构工程研究工作。
通信作者: 陈 峰(1977—),男,博士,副教授,从事桥梁结构分析及耐久性研究工作。电子信箱 854775553@qq.com

1　混凝土冻融损伤试验

为研究试件尺寸对混凝土冻融损伤的影响，设计了3种尺寸的混凝土立方体试件（其分组编号见表1），并使用气冻法[4]对试件进行冻融循环。在冻融循环试验启动前，将养护完成的试件浸泡于清水中7 d，确保试件充分吸水至饱水状态[5]，然后开始实施冻融循环程序。鉴于环境实验室采用空气循环制冷方式，为避免空气对流作用导致各混凝土试件水分蒸发散失，试验时均用透明薄塑料袋密封包裹各混凝土试件，以维持试件的饱水状态[6]。当环境实验室内温度达-20 ℃后开始计算冷冻时间，当冷冻时间达13 h时结束冷冻，此时混凝土中心温度达-15 ℃；再将试件浸没于清水中，环境温度设为25 ℃，持续5.5 h使试件升温；如此反复，直至达到试件预设冻融循环次数[7]。

表1　试件编号及对应工况

试件编号	试件尺寸/mm	冻融循环次数	试件个数
A1	150×150×150	0	9
A2	150×150×150	20	3
A3	150×150×150	40	3
A4	150×150×150	60	3
A5	150×150×150	80	9
B1	200×200×200	0	12
B2	200×200×200	20	12
B3	200×200×200	40	12
B4	200×200×200	60	12
B5	200×200×200	80	12
C1	250×250×250	0	12
C2	250×250×250	40	3
C3	250×250×250	60	3
C4	250×250×250	80	12

2　试验结果及分析

在试件达到预设的冻融循环次数后清洗试件表面浮渣，并将其置于干燥通风处。风干后测定试件表层损伤和深层损伤，探究混凝土试件损伤的深度效应以及不同尺寸试件损伤的差异性。

2.1　混凝土表层损伤

2.1.1　表观状态

冻融循环后，各组试件的表观状态见表2。

2.1.2　质量变化状况

为测量冻融循环导致的混凝土质量损失，将冻融后的试件烘干，测量试件冻融前后的质量变化。按式（1）计算第i个试件经过n次冻融循环后的质量变化率ΔW_{ni}，再按式（2）计算各编号试件经过n次冻融循环后的平均质量变化率ΔW_n，并绘制冻融循环次数-ΔW_n曲线，如图1所示。

表2　冻融试件的表观状态

试件编号	冻融循环次数	表观状态
A1	0	无变化
A2	20	无明显变化
A3	40	轻微剥落、细微孔洞
A4	60	剥落、孔洞、少量骨料外露
A5	80	剥落、孔洞密集、骨料外露
B1	0	无变化
B2	20	无明显变化
B3	40	微孔洞、微裂缝
B4	60	孔洞、裂隙
B5	80	密集孔洞、网状裂缝
C1	0	无变化
C2	40	细微孔洞
C3	60	孔洞半径变大
C4	80	孔洞进一步发展、无剥落与裂缝

$$\Delta W_{ni}=\frac{W_{0i}-W_{ni}}{W_{0i}}\times 100\% \tag{1}$$

$$\Delta W_{n}=\frac{\sum_{i=1}^{a}\Delta W_{ni}}{a}\times 100\% \tag{2}$$

式中：W_{0i}、W_{ni}分别为第i个试件未经过冻融循环、经过n次冻融循环后的质量，kg；a为各组试件的个数。

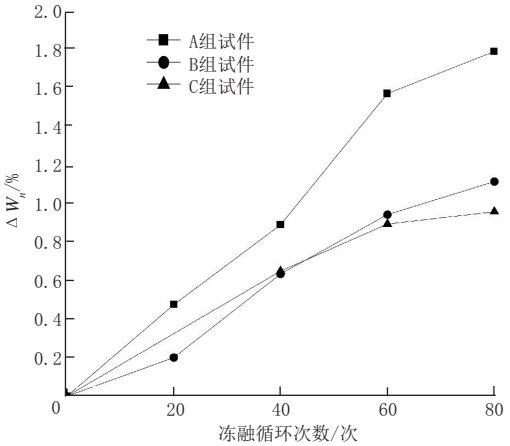

图1　各组试件质量损失率

2.1.3　回弹值变化状况

本试验采用回弹法[8]测试混凝土强度，并绘制各组试件在冻融循环前后的回弹值变化曲线，见图2。

2.1.4　混凝土表层损伤规律分析

综合上述结果，混凝土表层损伤的表现形式主要有细微孔洞、表层剥落和裂隙开展3种状态。

分析图1、图2可得：混凝土表层损伤随冻融循

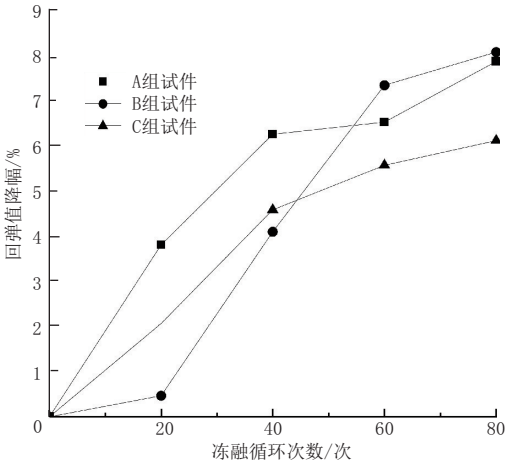

图2　各组试件回弹值降幅

环次数的变化呈现3阶段发展规律：第1阶段为冻融初期，混凝土损伤发展较慢；第2阶段为冻融中期，混凝土表面损伤开始快速发展；第3阶段为冻融后期，混凝土表层损伤发展速率开始逐渐减慢并趋于稳定。

各组试件质量损失率曲线在冻融循环60次时出现明显拐点（降速减缓至初始值的44%）；回弹值降幅曲线在冻融循环60次时出现明显拐点（降速减缓至初始值的36%）。说明混凝土表面损伤在冻融循环60次时出现阈值。当损伤达到该阈值时，损伤的发展速率便会逐渐趋于稳定。

2.2　混凝土内部损伤

本试验使用超声波测试混凝土内部损伤，主要方法有平测法和对测法[9]。

2.2.1　对测法测量混凝土波速值

采用对测法测试发射探头与接受探头间冻融前后混凝土波速变化值，并绘制波速变化曲线，见图3。

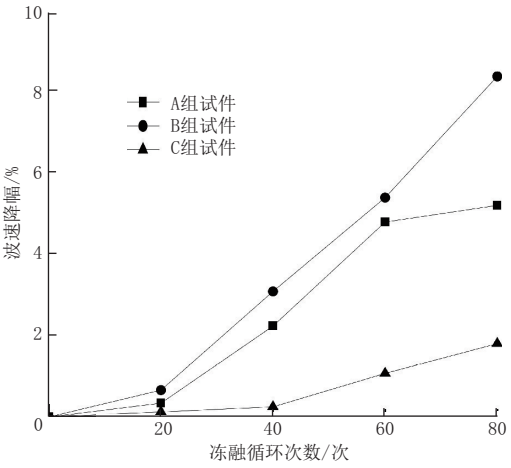

图3　对测法波速降幅

2.2.2　平测法测量混凝土波速值

采用平测法测量混凝土的损伤厚度。发射探头与接受探头之间的距离（探头间距）和声波传递路径如图4所示；不同探头间距下，距试件表面不同深度的对应符号见表3。

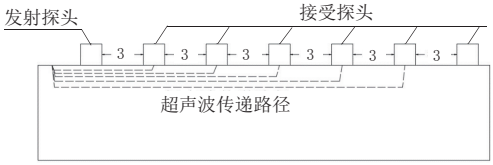

图4　平测法超声波传递路径（单位：cm）

表3　不同探头间距下，距试件表面不同深度的对应符号

探头间距/cm	对应符号
3	X1
6	X2
9	X3
12	X4
15	X5
17	X6

B组、C组试件在距试件表面不同深度处的声时值变化曲线见图5、图6。

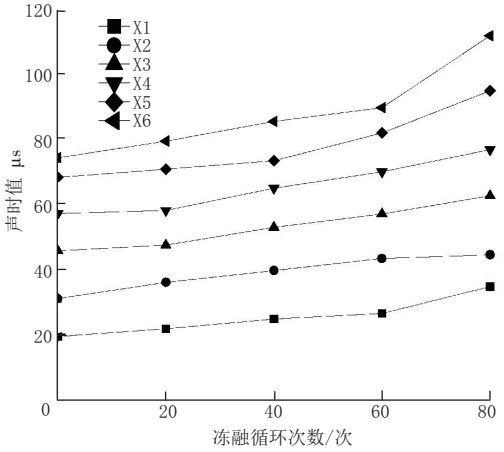

图5　B组试件声时图

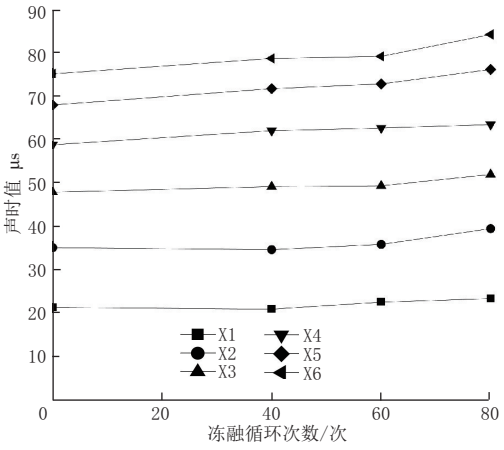

图6　C组试件声时图

2.2.3　混凝土内部损伤规律分析

分析对测法所得各组试件波速变化规律可知，在冻融循环20次之内，各组试件的波速降幅比例均

处于较低水平，可推测此时试件内部损伤尚处于缓慢发展状态；冻融循环20~60次中，各组试件的波速值均开始加速下降，可推测此时试件内部损伤已经进入快速发展阶段；在冻融循环60~80次中，B组、C组试件的波速维持原有速率继续下降，而A组试件的波速下降速率开始放缓，这代表该组试件的损伤发展速率开始降低。

从声时值的变化规律看，对B组试件，X1、X2深度处的声时值在冻融循环80次之内基本呈线形发展，这表示这2个深度处的试件内部损伤发展速率基本不变；X3、X4深度处的声时值随冻融循环次数的变化不再呈现为标准的线性关系，而是在冻融循环20次处出现了明显的突变点，这表示在冻融循环20次后X3、X4深度处的试件冻融损伤发展速率突然开始加剧；同样的，X5、X6深度处的声时值变化曲线也分别在冻融循环40、60次后出现了斜率的突变点，这表明在冻融循环40次后深度为X5处的试件损伤发展速率突然开始加快，而深度为X6处的试件损伤发展速率则在冻融循环60次后突然开始加快。

综合各组试件的对测法波速值和平测法波速值的变化规律可得出以下结论：

（1）在冻融循环过程中，混凝土内部损伤发展表现为3阶段：冻融初期，混凝土内部损伤发展较为缓慢；冻融中期，损伤达到某个阈值时，损伤的发展速度开始加快并维持快速发展；冻融后期，当损伤达到另一个阈值点时，损伤的发展速率开始减缓。

（2）在冻融循环过程中，混凝土损伤发展存在2种模式：一种是在试件整体范围内均匀损伤发展，另一种是沿试件深度方向不均匀损伤发展，两者在冻融循环过程中同步进行。

2.3　混凝土内部损伤的深度效应

为探究混凝土冻融损伤沿深度方向的发展规律，将达到不同冻融循环次数的B组试件进行切割，观察切片的冻融表观损伤状态，并对核心混凝土进行力学性能测试[10-11]。

2.3.1　切片表观状态

不同冻融循环次数下，距试件表面1.5、2.5、3.5 cm的切片表观状态见表4。

2.3.2　混凝土波速变化

采用对测法测量距试件表面3.5、2.5、0 cm处的混凝土经历不同冻融循环次数后的波速变化，并绘制波速变化曲线，见图7。

表4　切片表观状态

冻融循环次数/次	距试件表面深度/cm		
	1.5	2.5	3.5
0	无变化	无变化	无变化
40	孔洞	细微孔洞	细微孔洞
60	孔洞密集、联通裂缝	孔洞、微裂缝	孔洞
80	孔洞密集、裂缝密集	较多孔洞、裂缝	孔洞、微裂缝

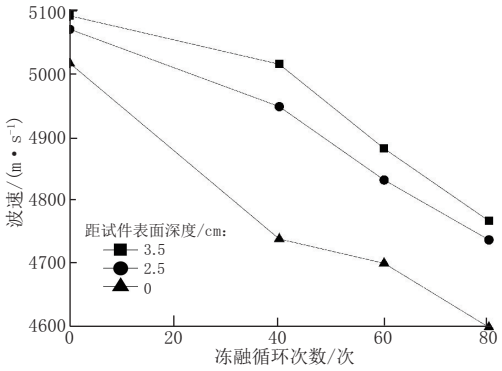

图7　距试件表面不同深度的混凝土波速变化

2.3.3　混凝土抗压强度变化

为定量确定冻融损伤沿试件深度的变化规律，测试距试件表面3.5、2.5、1.5、0 cm处的混凝土经历不同冻融循环次数后的抗压强度，其变化曲线见图8。

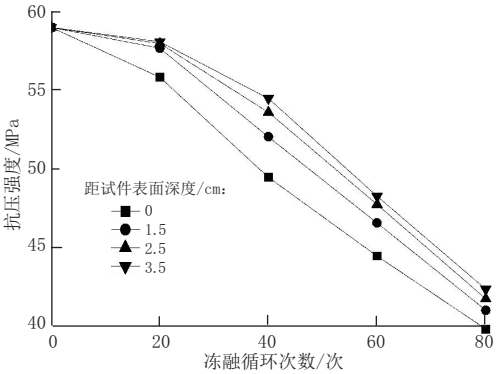

图8　距试件表面不同深度的混凝土抗压强度

2.3.4　切片混凝土抗压强度变化

测试经历不同冻融循环次数后的各切片抗压强度，其变化曲线见图9。

由图9可见，切片抗压强度的衰减规律也基本符合先慢后快的发展顺序[12]，即冻融前期混凝土损伤较小，抗压强度的降低速率较慢，随着冻融循环次数的增加，后期混凝土损伤的发展速率逐渐加快，混凝土抗压强度开始快速下降。

对比分析来看，试件尺寸越大，冻融初期损伤越小，在冻融循环20~40次中，边长为200 mm的B组试件强度降幅最高，边长150 mm的A组试件强度降幅次之，边长为250 mm的C组试件强度降幅最小。在

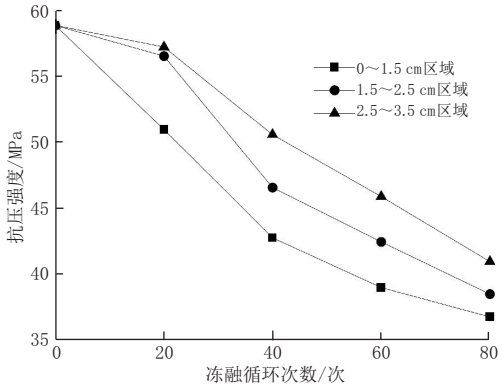

图9　切片抗压强度衰减规律

冻融循环40~60、60~80次中，B组试件的强度降幅始终最大。

2.3.5　冻结过程中不同尺寸混凝土温度变化

冻融循环过程中，混凝土的损伤是由于冻结过程中混凝土内部温度降低、孔隙水不断结晶膨胀而使得孔隙壁受拉破坏所引起的[13]。因此测量同尺寸混凝土在冻结过程中的温度变化，对于分析不同尺寸混凝土的损伤差异性尤为重要。

本文采用Comsol Multiphysics软件的传热模块对冻融循环中的冻结过程进行模拟，计算得到的各尺寸试件在冻融后的温度分布见表5至表7。

表5　A组试件温度计算值

距试件表面深度/mm	冻后温度/℃	融后温度/℃
5	−19.04	15.43
15	−19.02	15.42
30	−19.00	15.42
45	−18.98	15.42
60	−18.96	15.42
75	−18.95	15.42

表6　B组试件温度计算值

距试件表面深度 mm	冻后温度/℃	融后温度/℃
5	−16.74	14.31
15	−16.65	14.31
30	−16.56	14.31
45	−16.48	14.30
60	−16.40	14.30
75	−16.33	14.30
90	−16.27	14.30

2.3.6　不同尺寸混凝土的损伤差异性分析

（1）综合上述不同尺寸混凝土试件冻融后的表观状态、质量损失试验结果可得：冻融前期大体积混凝土表层损伤的发展要滞后于小体积混凝土表层损伤；随着冻融循环次数的增加，大体积混凝土与小体积混凝土损伤速率的差异逐渐减小。

（2）分析不同冻融循环次数下混凝土波速值变化以及核心混凝土抗压强度变化可得：在冻融循环过程中，小尺寸混凝土的内部损伤率先达到某种阈值，其损伤速率会逐渐减缓。

表7　C组试件温度计算值

距试件表面深度/mm	冻后温度/℃	融后温度/℃
5	−5.93	9.02
15	−5.85	9.02
30	−5.70	9.02
45	−5.55	9.02
60	−5.40	9.02
75	−5.26	9.02
90	−5.12	9.02
105	−4.99	9.02
125	−4.88	9.02

（3）分析不同尺寸混凝土抗压强度变化可得：混凝土冻融损伤分为3个阶段，在冻融前期小体积混凝土损伤速率较快，在中后期损伤到一定程度后速率逐渐下降并趋于稳定。

（4）分析不同尺寸混凝土在冻结过程中温度变化可得：在冻结时间较短的情况下，大体积混凝土内部温度更高，孔隙液的结晶比例更低，因此在冻融前期大体积混凝土冻融损伤的发展要滞后于小体积混凝土；在冻结时间较长的情况下，试件达到的最低温度可使孔隙液完全结晶，小体积混凝土在冻融循环过程中从外界吸水的能力弱于大体积混凝土，因此在冻融中后期小体积混凝土的损伤速率低于大体积混凝土，随着冻融时间的增加，大体积混凝土的损伤会比小体积混凝土的损伤更严重。

3　结　语

（1）混凝土的冻融损伤可分为3个阶段，小体积混凝土在冻融前期的损伤发展要快于大体积混凝土，在冻融中后期小体积混凝土的损伤会达到某一阈值，其速率会有所下降，并趋于稳定。随着冻融时间的增加，体积越大的混凝土所受到的损伤越严重。

（2）冻融循环作用下混凝土损伤发展呈现内重外轻的不均匀损伤与混凝土整体均匀损伤并存的模式。表层混凝土主要承受均匀损伤与不均匀损伤2种损伤模式，距离混凝土核心越近，其损伤越弱。

（3）在相同冻结最低温度与近似温度变化幅度条件下，随着冻融循环次数的增加，混凝土体积越大，冻融损伤越严重。因此在北方等严寒地区，大体积混凝土桥梁构件应适当增大混凝土保护层厚度，从而提高桥梁结构耐久性。

参考文献：

[1] 朱伟庆，张亚飞，张丽华，等.盐冻环境下混凝土桥梁服役性能演变规律及耐久性评价指标综述[J].长安大学学报(自然科学版)，2025，45(1)：69-91.

[2] 范立础.桥梁工程安全性与耐久性展望设计理念进展[C]//第二届全国公路科技创新高层论坛，2004：113-122.

[3] 范立础.桥梁工程安全性与耐久性——展望设计理念进展[J].上海公路，2004(1)：1-7.

[4] 唐睿志，赵瑞，张传振，等.泡沫混凝土力学性能研究及应用[J].广东建材，2023，39(7)：5-9；51.

[5] 祝发珠.橡胶集料混凝土抗盐冻性能试验研究[D].天津：天津大学，2007.

[6] FAGERLUND G. Critical moisture contents at freezing of porous materials[J]. EM Symposium on Moisture Problems in Buildings, 1974 (II)：1-17.

[7] 安永昌，刘祺，谭波，等.赤泥-钢渣-水泥协同制备路面基层材料试验研究[J].公路交通科技，2023，40(5)：35-43.

[8] 孙胜.公路混凝土耐久性检测指标体系的构建与应用研究[J].城市建筑空间，2024，31(增刊2)：305-307.

[9] 侯海龙，屈锋，石卫华，等.冻融循环作用对海砂粉煤灰混凝土的损伤研究[J].公路交通科技，2023，40(5)：28-34.

[10] 陈帅.矿渣基碱激发混凝土冻融循环试验研究[D].西安：西京学院，2024.

[11] 吉延峻，陈帅，刘文瑾，等.冻融循环后矿渣基碱激发混凝土力学性能试验研究[J].混凝土，2025(3)：40-45；50.

[12] GB/T 50081—2019，普通混凝土力学性能实验方法[S]..

[13] 罗昕，朱锦章，卫军，等.冻融条件下混凝土破坏的无损判断[C]//沿海地区混凝土结构耐久性及其设计方法科技论坛与全国第六届混凝土耐久性学术交流会论文集.长沙：华中科技大学，2004：172-176.

(上接第94页)

[10] JTG D60—2004，公路桥涵设计通用规范[S].

[11] JTJ D60—2015，公路桥涵设计通用规范[S].

[12] JTG 3362—2018，公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[13] 交通运输部.装配式先张法预应力混凝土简支空心板桥上部构造通用图(跨径10米)[M].北京：人民交通出版社，2008.