

# 钢筋混凝土圆管涵管壁混凝土强度的试验研究

马运朝<sup>1</sup>, 李修坤<sup>2</sup>, 王双喜<sup>2</sup>

(1.湖北交通职业技术学院, 湖北 武汉 430079; 2.湖北省交通投资集团有限公司)

**摘要:**为探究不同制作工艺对钢筋混凝土圆管涵管壁混凝土强度的影响,对混凝土管涵切割弧形板式构件进行了弯曲抗拉试验、回弹试验和柱体抗压试验,分析了人工浇捣管涵、一次投料离心管涵和两次投料离心管涵的内外壁混凝土强度差异。试验结果表明:离心管涵的混凝土强度与人工浇捣管涵有较大的差异;离心法制管的投料方式对管涵内壁的混凝土强度有明显的影 响;管涵内外壁混凝土强度的差异随着管涵内径和壁厚的增加而显著增大。基于试验数据分析与理论计算验证,对内外壁混凝土强度差异产生的原因进行了机理分析,并提出了钢筋混凝土管涵内外壁混凝土抗压强度和抗拉强度的调整系数。该系数考虑了不同制作工艺对管涵混凝土强度的影响,可应用于此类混凝土管涵的结构设计分析中。

**关键词:**钢筋混凝土;圆管涵;抗拉强度;抗压强度

钢筋混凝土圆管涵一般采用离心悬辊工艺或人工浇捣法制作成型,其中离心悬辊工艺因具有设备简单、生产便利、预制周期短等特点而得到了更为广泛的应用。采用离心悬辊工艺生产时,混凝土可采用一次成型或两次成型的方法进行浇注。一次成型法即为一次性连续投料直至管涵成型;两次成型法需在投料至2/3壁厚时暂停浇筑并采取排水措施,在积水排尽后再继续浇筑。采用离心法制管时,混凝土平均强度相比于人工浇捣管涵会有所提高,但离心作用使混凝土混合料产生离析,导致管涵混凝土强度沿壁厚方向的分布极不均匀,外壁的混凝土强度显著高于内壁,内壁混凝土强度有可能低于人工浇捣的管涵。然而,现行的钢筋混凝土圆管涵计算公式均未考虑离心管涵内外壁混凝土强度的差异,其内外壁混凝土设计强度取为一致,

这样便高估了离心管涵内壁的混凝土强度,并且未充分利用离心管涵外壁的混凝土强度。

在中国高等级公路中广为应用的、按现行规范设计的钢筋混凝土圆管涵中,在施工和运营阶段,离心管涵的开裂现象比较普遍。而管涵壁混凝土强度是影响管涵抗裂能力和极限承载能力计算的主要因素,因此合理确定离心管涵管壁混凝土强度显得极为重要。此外,离心管涵可沿壁厚方向将混凝土分为多层,每层混凝土强度均不相同,而现行的诸多混凝土测试方法,如回弹法、超声波法、拔出法和钻芯法等,或测试精度有限、或只能评定离心管涵混凝土的平均强度,均无法准确测量混凝土强度沿管涵壁厚方向的变化。因此,为合理确定离心管涵内外壁混凝土强度的真实取值,该文对不同工艺制作的管涵和管涵切割试块进行试验测

过对混凝土空心板预应力筋断裂加固前、后的极限承载力的计算分析,验证了这3项指标对于桥梁结构承载性能评估的合理性。

## 参考文献:

- [1] 陈淮,张云娜.施加横向预应力加固装配式空心板桥研究[J].公路交通科技,2008(10).
- [2] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 葛俊颖.桥梁工程软件 Midas Civil 使用指南[M].北京:人

民交通出版社,2013.

- [4] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S].
- [5] 戴公连,李建桥.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 江林祥,易汉斌,俞博.体外预应力加固桥梁技术与工程实例[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [7] JTG/T J21—2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [8] 交通部第二公路勘察设计院.公路旧桥承载能力鉴定方法(试行)[M].北京:人民交通出版社,1991.

收稿日期:2018-09-17

作者简介:马运朝,男,高级工程师,E-mail:117236439@qq.com

试,以期比较采用不同工艺制作时管涵内外壁混凝土强度的差异,并对其合理取值提出建议。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作

试件取自 6 节管涵模型,除管长不同外,模型管涵的制作工艺和参数均与所研究的实际管涵完全一致,可以真实地反映实际管涵的力学性能。模型管涵的管长  $L=500\text{ mm}$ 、内径  $D=1\,250\text{ mm}$ 、管壁厚  $\delta=120\text{ mm}$ 。模型管涵共 6 节,根据其制作成型工艺的不同(两次投料离心成型、一次投料离心成型和人工立式浇注成型)分为 3 组,每组 2 节,配筋管涵和不配筋的素混凝土管涵各 1 节。每节管涵均同时制作 6 个边长为  $100\text{ mm}$  的混凝土立方体试块,立方体试块采用常规方法制作,非离心成型,混凝土强度按 C30 配制。配筋管涵的配筋情况如图 1 所示,均采用双层配筋,纵向钢筋为  $32\phi 6$ ,螺旋主筋 5 圈,直径为  $\phi 10$ ,钢筋保护层厚度为  $20\text{ mm}$ 。

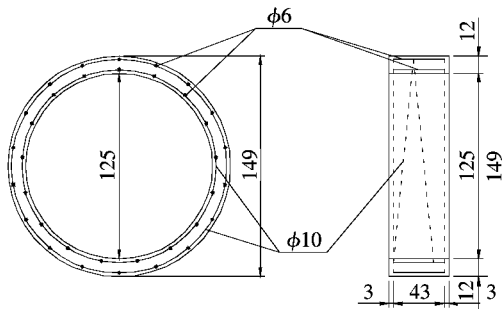


图 1 配筋管涵截面示意图(单位:cm)

离心成型管的成型过程与相应的延续时间为:投料过程  $5\sim 7\text{ min}$ ,转速为  $80\sim 110\text{ r/min}$ ;初(慢)速过程  $4\sim 5\text{ min}$ ,转速为  $120\sim 170\text{ r/min}$ ;中速过程  $4\sim 5\text{ min}$ ,转速为  $200\sim 280\text{ r/min}$ ;快速过程  $25\sim 35\text{ min}$ ,转速为  $350\sim 450\text{ r/min}$ 。所有管涵以及立方体试块均采用坑式蒸气湿热养护,浇筑成型后静置  $2\text{ h}$ ,然后按以下阶段养护:升温过程至温度为  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,耗时  $2\text{ h}$ ;恒温过程温度  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,持续  $4\text{ h}$ ;降温过程至温度  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,持续  $45\text{ min}$ 。管涵养护达到强度要求以后,使用混凝土切割机分别将 6 节管涵按图 2 所示在环向按六等分沿管纵向切割,制作成弧形板式构件用以进行加载试验。无筋弧形板式构件进行弯拉强度试验破坏后,每一试件均从板跨中部断裂成两块,因而将断裂后的每一块混凝土试件边缘磨平后再做抗压强度试验。

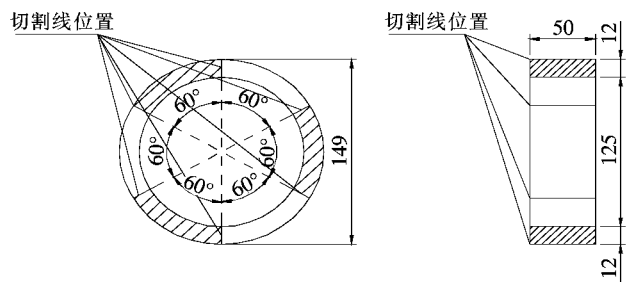


图 2 管涵切割位置图(单位:cm)

### 1.2 试验加载方式及测点布置

为测出管涵内外壁混凝土弯曲抗拉强度,采用如图 3、4 所示的方法进行试验。图 3 为管涵内壁受拉的试验装置,图 4 为管涵外壁受拉的试验装置。弧形板式构件的应变测点布置在试件跨中的顶面和底面。

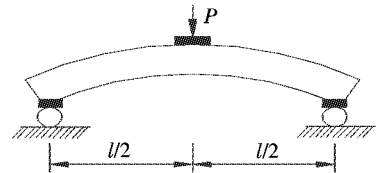


图 3 弯拉试验装置(管内壁受拉)

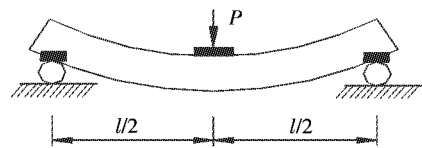


图 4 弯拉试验装置(管外壁受拉)

## 2 试验结果及分析

### 2.1 弯拉试验结果及分析

根据试验测得的各试件开裂荷载  $P_{cr}$ ,可由式(1)~(3)计算出相应部位混凝土的弯曲抗拉强度  $f_t$ ,其中截面塑性抵抗矩系数  $\gamma_m$ 为考虑截面受拉区混凝土的塑性影响。

$$f_t = \frac{M}{\gamma_m W} \quad (1)$$

$$M = \frac{P_{cr} l^2}{4} \quad (2)$$

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (3)$$

式中: $l$ 为试验装置中管涵试件两支撑点之间的距离; $h$ 为管涵壁厚; $b$ 为管涵的截面宽度; $\gamma_m$ 为截面塑性抵抗矩系数,此处取 1.75。

弯拉试验结果列于表 1 中。为便于比较,表中还

表 1 试件的抗拉强度测试结果

加载方式	配筋情况	成型方法	管壁混凝土抗拉强度平均值/MPa	换算为立方体抗压强度 34.39 MPa 对应的抗拉强度/MPa	与人工浇捣试件的结果之比	立方体试块强度/MPa
管内壁混凝土受拉	无筋	离心两次投料	2.63	2.84	1.11	30.59
		离心一次投料	2.56	2.56	0.99	34.39
		人工浇捣	2.57	2.57	1.00	34.39
	配筋	离心两次投料	2.71	2.93	1.08	30.59
		离心一次投料	2.61	2.61	0.96	34.39
		人工浇捣	2.72	2.72	1.00	34.39
管外壁混凝土受拉	无筋	离心两次投料	2.99	3.23	1.27	30.59
		离心一次投料	3.30	3.30	1.28	34.39
		人工浇捣	2.57	2.57	1.00	34.39
	配筋	离心两次投料	3.02	3.26	1.20	30.59
		离心一次投料	3.30	3.30	1.21	34.39
		人工浇捣	2.72	2.72	1.00	34.39

列出了混凝土立方体抗压强度为 30.59 MPa 的两次投料离心管涵试件的结果,并根据混凝土抗拉强度和立方体抗压强度之间的统计关系,换算成混凝土立方体抗压强度 34.39 MPa 的相应值。

由表 1 可知:采用不同工艺制作时管涵的内、外壁混凝土抗拉强度均有所不同,可以得到以下结论:

(1) 离心法制管的投料方式对管涵内壁的混凝土抗拉强度影响不明显。离心两次投料时管涵内壁的混凝土抗拉强度比人工浇捣时高 8%~11%,而离心一次投料时管涵内壁的混凝土抗拉强度比人工浇捣时低 1%~4%。

(2) 离心法制管的投料方式对管涵外壁混凝土抗拉强度的影响较大,但两种投料方式的离心管涵外壁混凝土抗拉强度均高于人工浇捣管涵。离心管涵的外壁混凝土抗拉强度比人工浇捣时高 20%~28%。

(3) 钢筋的配置对管涵混凝土抗拉强度的影响不明显。采用离心法制管时,无筋试件的混凝土抗拉强度与配筋试件相差均不超过 3%;采用人工浇捣时,无筋试件的混凝土抗拉强度与配筋试件相差均不超过 6%。

基于抗拉强度试验结果,该文建议在管内径  $D=1\,250\text{ mm}$ 、管壁厚  $\delta=120\text{ mm}$  的管涵结构设计计算中,可按表 2 中的调整系数对管涵内、外壁混凝土的抗拉强度予以折算。

表 2 混凝土抗拉强度调整系数

离心两次投料		离心一次投料		人工浇捣	
内壁	外壁	内壁	外壁	内壁	外壁
1.10	1.25	0.95	1.25	1.00	1.00

2.2 抗压试验结果及分析

2.2.1 回弹试验结果及分析

为比较采用不同工艺制作时不同管径的管涵内外壁混凝土强度的差异,采用回弹仪测试了采用不同工艺制作的两种管径管涵内外管壁混凝土的抗压强度,对比结果见表 3。

由表 3 可知:采用不同工艺制作的不同管径的管涵内外壁混凝土抗压强度均有所不同。对比不同工艺制作的管涵内外壁混凝土抗压强度,可以得到以下结论:

(1) 离心法制管的投料方式对管涵内壁的混凝土抗压强度有显著的影响,但对管涵外壁混凝土抗压强度的影响较小。两次投料离心管涵的内壁混凝土抗压强度比一次投料时提高了 35%,而两种投料方式的离心管涵外壁混凝土抗压强度相差不超过 3%。

(2) 离心管涵的混凝土抗压强度与人工浇捣管涵有较大的差异。相比于采用人工浇捣的制作工艺,两次投料离心管涵的内壁混凝土抗压强度提高了 18%,而一次投料离心管涵的内壁混凝土抗压强度降低了 13%。离心管涵的外壁混凝土抗压强度比人工浇捣管

表 3 回弹法测定的混凝土抗压强度值比较

制作工艺	管涵内 径/mm	管涵壁 厚/mm	回弹值推定的抗压强度			立方体试块抗压 强度 $f_{cu}$ /MPa	$f_{cu1}/f_{cu}$	$f_{cu0}/f_{cu}$
			内壁 $f_{cu1}$ /MPa	外壁 $f_{cu0}$ /MPa	$f_{cu0}/f_{cu1}$			
离心两次投料	2 400	240	14.00	29.20	2.10	22.80	0.61	1.28
	1 250	120	40.20	56.00	1.40	30.59	1.31	1.83
离心一次投料	1 250	120	29.80	57.30	1.90	34.39	0.87	1.67
人工浇捣	1 250	120	34.20	34.70	0.96	34.39	0.99	1.01

涵提高了 61%~65%。

(3) 对比不同管径的管涵内外壁混凝土抗压强度,可以发现:当  $D>1\,250\text{ mm}$  时,管涵内外壁混凝土抗压强度的差异随着管涵内径和壁厚的增加而显著增大。当管涵内径为  $1\,250\text{ mm}$ 、壁厚为  $120\text{ mm}$  时,内外壁混凝土抗压强度分别比立方体抗压强度提高了 31%和 83%,管涵内外壁混凝土抗压强度相差 40%。当管涵内径为  $2\,400\text{ mm}$ 、壁厚为  $240\text{ mm}$  时,相比于立方体抗压强度,管涵内壁混凝土抗压强度降低了 39%,而外壁混凝土抗压强度提高了 28%,管涵内外壁混凝土抗压强度相差 110%。

2.2.2 柱体抗压强度试验结果及分析

在弯拉试验中,无筋弧形板式构件均表现为跨中混凝土劈裂,原构件被均分为两个部分。劈裂后形成的两个混凝土试块的长宽高之比大约为 30 : 12 : 50,其高宽比与棱柱体试块较为接近,可认为其抗压强度

与棱柱体抗压强度相当。因此,对受拉劈裂后的混凝土构件进行打磨并开展了轴心受压性能试验。试验测得的抗压强度与回弹法试验数据的比较列于表 4,其中回弹法棱柱体强度推定值  $f_{c1}$  是由回弹法测得的管涵内外壁混凝土抗压强度平均值乘以 0.76 的折算系数得到的,此系数考虑了回弹仪精度的影响;而表中切割试块柱体强度试验值  $f_{c2}$  所反映的亦是整个管壁混凝土抗压强度的均值。

由表 4 可知:回弹法测得的棱柱体强度  $f_{c1}$  均大于切割试块柱体强度试验值  $f_{c2}$ ,两者之比均保持在 1.10 左右。因此,回弹法虽受回弹仪精度限制而不能给出足够精确的测量数据,但其测得的采用不同制作工艺时管涵混凝土抗压强度变化趋势和规律与切割试块柱体强度试验基本一致,回弹法测量结果仍能体现出不同制作工艺以及不同管径对管涵内外壁混凝土抗压强度差异的影响。

表 4 管壁混凝土抗压强度试验值比较

制作工艺	回弹法测试结果				切割试块柱 体强度试验 值 $f_{c2}$ /MPa	$f_{c1}/f_{c2}$	立方体强 度/MPa
	内壁强 度/MPa	外壁强 度/MPa	内外壁强度 平均值/MPa	棱柱体强度推 定值 $f_{c1}$ /MPa			
离心两次投料	40.2	56.0	48.10	36.556	31.523	1.16	30.59
离心一次投料	29.8	57.3	43.55	33.098	29.105	1.14	34.39
人工浇捣	34.2	34.7	34.45	26.182	23.871	1.09	34.39

基于对管壁混凝土回弹测试数据和弧形板式构件的抗压强度试验结果的综合分析,该文建议在管内径  $D=1\,250\text{ mm}$ 、管壁厚  $\delta=120\text{ mm}$  的管涵结构设计计算中,可按表 5 中的调整系数对管壁混凝土抗压强度进行调整。

表 5 混凝土抗压强度调整系数  $\alpha$ 。

离心两次投料		离心一次投料		人工浇捣	
内壁	外壁	内壁	外壁	内壁	外壁
1.25	1.50	0.85	1.50	1.00	1.00

3 机理分析及结果验证

3.1 机理分析

由上述试验研究可以发现,管涵的制作工艺对其内外壁的混凝土强度有着显著的影响。人工浇捣管涵一般采用立式支模,混凝土混合料基本沿管壁均匀分布,因此管涵内壁和外壁的混凝土强度均为一致。离心制作工艺采用的是悬辊机,利用悬辊轴转动产生的离心力使管涵成型。在离心过程中,混凝土混合料中

的大颗粒会逐渐向管涵外壁聚集,在管涵内壁留下水泥浆和细颗粒。使得离心管涵的混凝土强度沿壁厚方向由内向外逐渐增大,外壁混凝土强度明显高于内壁。针对管涵制作过程中的离心现象,混凝土的投料方式可采用两次投料技术,即在投料达到 1/3 壁厚时采取管内排水措施,使得管涵内壁混凝土的水灰比减少。而一次投料技术即为一次性投料成型,未采取任何排水措施。因此,二次投料离心管涵的内壁混凝土强度会比采用一次投料技术和人工浇捣技术时更高,一次投料离心管涵的内壁混凝土强度会稍低于人工浇捣管涵。但由于悬辊机的离心作用,两种投料方式的离心管涵外壁混凝土均较为密实,管内排水措施亦对外壁混凝土无明显影响。因此,两种投料方式的离心管涵外壁混凝土强度较为接近,且均高于人工浇捣管涵。

3.2 结果验证

为进一步验证该文提出的抗拉强度和抗压强度调整系数的合理性,对抗压强度与抗拉强度调整系数之间的关系进行了分析。混凝土抗压强度与抗拉强度之间的对应关系按式(4)进行计算:

$$f_t=0.26f_{cu}^{2/3} \tag{4}$$

根据式(4)可由抗压强度调整系数  $\alpha_c$  计算出相应的抗拉强度调整系数  $\alpha_{t0}$ ,再将  $\alpha_{t0}$  与该文提出的抗拉强度调整系数  $\alpha_t$  进行对比,计算结果列于表 6 中。

表 6 抗压强度与抗拉强度调整系数比较

混凝土强度调整系数	离心两次投料		离心一次投料	
	内壁	外壁	内壁	外壁
表 5 中混凝土抗压强度调整系数 $\alpha_c$	1.25	1.50	0.85	1.50
由 $\alpha_c$ 确定的抗拉强度调整系数 $\alpha_{t0}$	1.16	1.31	0.90	1.31
表 2 中混凝土抗拉强度调整系数 $\alpha_t$	1.10	1.25	0.95	1.25
$\alpha_{t0}/\alpha_t$	1.05	1.05	0.95	1.05

由表 6 可以发现: $\alpha_{t0}/\alpha_t$  保持在 0.95~1.05 之间,表明该文提出的抗拉强度和抗压强度调整系数基本符合混凝土抗拉强度与抗压强度之间的统计关系。

4 结论

对管涵试件进行了弯曲抗拉试验、回弹试验和抗

压强度试验,得到以下结论:

(1) 离心管涵的混凝土强度与人工浇捣管涵有较大的差异;离心法制管的投料方式对管涵内壁的混凝土强度有显著的影响。

(2) 基于对试验结果的综合分析,针对内径为 1 250 mm、壁厚为 120 mm 的混凝土管涵,提出了管涵混凝土抗拉强度和抗压强度调整系数。该系数考虑了不同制作工艺对管涵混凝土强度的影响,可应用于此类混凝土管涵的结构设计分析中。

(3) 当管涵内径  $D>1\ 250\text{ mm}$  时,管涵内外壁混凝土强度的差异随着管涵内径和壁厚的增加而显著增大。对于大直径管涵内外壁混凝土强度的差异有必要进行进一步的深入研究。

(4) 采用一次投料技术或二次投料技术时,离心管涵外壁混凝土强度差异不大,且两种离心管涵的外壁混凝土强度均高于人工浇捣管涵。但采用二次投料技术可以明显提高离心管涵的内壁混凝土强度。对于大直径管涵的生产,建议采用两次或两次以上的投料工艺,以保证管涵具有较高的强度和较好的抗裂抗渗性能。

参考文献:

[1] 阮起楠,曾少霞.离心混凝土抗压强度试件分析[J].混凝土与水泥制品,1999(1).

[2] 钮新强,汪基伟,章定国.新编水工混凝土结构设计手册[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[3] GB 50069—2002 给水排水工程构筑物结构设计规范[S].

[4] 顾克明,苏清洪,赵嘉行.(公路桥涵设计手册)涵洞[M].北京:人民交通出版社,1997.

[5] TB 10002—2017 铁路桥涵设计规范[S].

[6] 辛济平,万国朝,张文,等.美国公路桥梁设计规范[M].鲍卫刚,译.北京:人民交通出版社,1994.

[7] Buried Structures.Canadian Highway Bridge Design Code [S].CSA Standard,2014.

[8] 沈蒲生.混凝土结构设计原理[M].北京:高等教育出版社,2012.

[9] JGJ/T 23—2011 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S].

[10] 魏连雨,陈兆南,郑彦军.公路路基 FRPM 管涵洞受力变形特性研究[J].中外公路,2018(1).

[11] 彭立,张阳,穆程,等.高填土大跨钢波纹管涵力学性能分析与测试[J].中外公路,2016(6).