

排水管道非开挖原位固化法修复内衬优化设计

安关峰¹, 刘添俊¹, 梁 豪¹, 李占伟²

(1.广州市市政集团有限公司, 广州 510060; 2.中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

摘要:目前我国排水管道采用原位固化内衬(CIPP)进行非开挖修复的设计理论并不完善,主要参考《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》CJJ/T210-2014,存在的主要问题是未考虑CIPP内衬出现的各种几何缺陷,包括褶皱、环状间隙等对圆周支撑系数 K 值的影响。通过总结已有的研究成果认为:内衬的尺寸比 DR 、褶皱和环状间隙等参数对 K 值有重要影响,建议在CIPP修复设计中,引入褶皱和环状间隙等几何缺陷的强度折减系数;在进行CIPP内衬修复设计时,应该通过施工前CCTV检查结果,结合施工经验预测几何缺陷尺寸,综合确定相应的圆周支撑系数 K 值。

关键词:排水管道;原位固化内衬;圆周支撑系数;几何缺陷

中图分类号:U175

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2016)02-0001-04

对于出现破坏和缺陷的地下排水管道,目前主要采用非开挖的方式对现有缺陷管道进行修复和更新,其中最典型的方法就是紫外光固化内衬(CIPP)修复技术,这种技术对周围交通、环境影响小,具有较低的社会成本^[1]。但是目前非开挖修复内衬的设计理论并不完善,如北美地区使用的AST_MF1216标准^[2],是由结合早期相关试验得到的经验性设计公式,被认为过于保守^[3-6],欧洲使用的Glock公式^[7-8]考虑CIPP内衬缺陷不充分,可能存在风险等问题。目前我国采用非开挖修复的设计方法主要参考《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》CJJ/T210-2014^[9],同样也存在较多的问题,主要是未考虑CIPP内衬出现的各种几何缺陷,包括褶皱、环状间隙等^[3-5,10]对圆周支持率 K 值的影响。鉴于此,针对CJJ/T210-2014标准中的修复设计方法进行研究,分析该设计方法存在的问题和不足,并对当前的修复设计方法提出相关的修订建议。

1 《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》CJJ/T210-2014 设计理论

作为一种薄壁壳体结构,CIPP内衬的主要破坏方式为屈曲破坏,是一种典型的稳定性破坏。由于屈曲破坏可能在截面应力未达到屈服强度时发生,因此其常被用来作为结构设计的标准,尤其是在管道和

内衬管一样的细长结构中^[11]。因此《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》中的内衬修复设计主要涉及内衬结构的外压稳定性问题,例如对于半结构性修复,规程作出了如下的假设:外部管道结构完好,并且周围土体荷载完全由外部管道承担,内衬只承担外部静水压力;原有管道对新的内衬管有一个限制性的环向支撑作用。其基本设计公式如下:

$$t = \frac{D_0}{\left[\frac{2KE_L C}{PN(1-\mu^2)} \right]^{\frac{1}{3}} + 1} \quad (1)$$

$$C = \frac{\left[\left(1 - \frac{q}{100} \right) \right]^3}{\left[\left(1 + \frac{q}{100} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

$$q = 100 \times \frac{(D_E - D_{\min})}{D_E} \quad \text{或}$$

$$q = 100 \times \frac{D_{\max} - D_E}{D_E} \quad (3)$$

式中: t 为内衬管壁厚(mm); D_0 为内衬管管道外径(mm); K 为圆周支持率,推荐取值为7.0; E_L 为内衬管的长期弹性模量(MPa),宜取短期模量的50%; C 为椭圆度折减系数; P 为内衬管管顶地下水压力(MPa),地下水位的取值应符合现行国家标准《给水排水管道结构工程设计规范》GB 50332中的有关规定; N 为安全系数,取2.0; μ 为泊松比,原位固化

收稿日期:2015-11-10

编辑:杨 勇

基金项目:国家科技支撑计划课题项目(2015BAK11B03);广州市市政集团有限公司项目“城镇排水管道检测评估方法的研究”(2012B050300005);“光固化玻璃纤维内衬修复技术在地下管道非开挖修复中的应用”(2012B091100052)

作者简介:安关峰(1970—),男,教授级高级工程师,主要从事市政工程技术工作。E-mail:13318898238@126.com

法内衬管取 0.3, PE 内衬管取 0.45; q 为原有管道的椭圆度(%), 可取 2%; D_E 为原有管道的平均内径(mm); D_{\min} 为原有管道的最小内径(mm); D_{\max} 为原有管道的最大内径(mm)。

该设计方法主要参考了 Timoshenko 等^[11]提出的弹性压曲破坏的临界外压计算公式, 为了弥补 Timoshenko 屈曲方程的缺点和不足, 规程通过引入一个圆周支持率 $K=7$, 体现原有管道对内衬的支撑作用, 但是该设计方法仍然存在很多问题和不足, 主要是由于 K 值选取的试验依据并不合理, 以及没有充分考虑 CIPP 施工形成的几何缺陷对 K 值的影响。

2 圆周支持率 K 值的起源

CIPP 内衬在置入旧管道内部后, 在液压作用下压曲时会发生径向扩展, 这样就会获得原有破损管道对内衬的径向支撑作用^[6]。因此内衬修复设计理论中引入了圆周支持率 K , 用于补偿外管结构的增强作用^[2]。 K 值必须通过专门的内衬试样进行实验获得。Aggarwal 等^[12]对受刚性约束的内衬进行了 49 组外压屈曲试验, 然后结合试验数据和 Timoshenko 的自由环屈曲公式得到圆周支持率 K 。从图 1 可以看出, 当 $K=7$ 时, 试验数据和计算结果较为接近, 所以推荐采用 $K=7$ 进行结构设计。

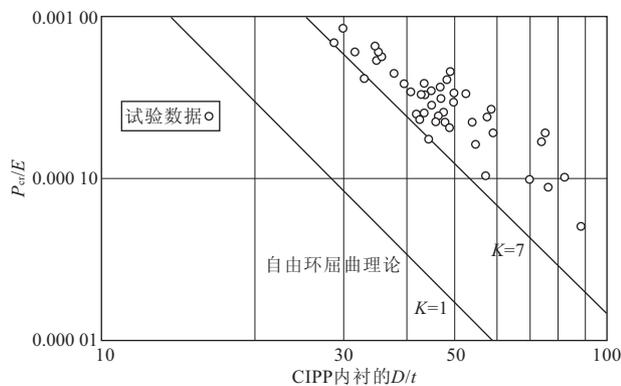


图1 自由环屈曲试验数据和理论计算对比

Fig.1 Contrast of testing data of free ring buckling vs. theoretical calculations

但是已有研究指出上述研究存在一定的问题, 其中最主要的包括其试验设计的合理性。Straughan 等^[13]指出试验采用的 CIPP 内衬的长度 L 与直径 D 比值是影响内衬外压屈曲性能的主要因素, 内衬两端部的夹具和密封法兰会对结构起到一定的约束作用, 阻止内衬端部沿着轴向、环向和横向发生变形。实际情况下, 内衬除了受到外部刚性管道的约束作用, 不会受到其他约束的影响。因此, 试验条件的端

部固定会提高内衬结构的外压稳定性。为了最大程度上减小这种端部效应对结构的影响, 应该选择尽可能大的长径比。但是 Aggarwal 等^[12]进行的试验的内衬长径比 $L/D=3.5\sim 4.5$ 。Straughan 等^[13]专门针对试验的长径比对内衬的外压屈曲强度进行了研究, 提出最小的 L/D 比值应该为 6。因此可以看出, L/D 的比值为 $3.5\sim 4.5$ 并不足以消除端部效应, 这样会导致试验结果不准确。另外, 由于研究并没有考虑内衬与外部管道之间的环状间隙尺寸对外压稳定性的影响, 进一步降低了试验数据的可靠性。因此, 这种选取 $K=7$ 的做法, 一直受到很多研究学者的批评^[3-5]。

3 K 值的变化规律

3.1 K 值随着内衬的 DR 变化规律

大量研究证实, K 值根据内衬的尺寸比 (DR) 和材料性质的变化而不断变化^[4,6,10]。为了得到不同尺寸比的内衬受到外管的圆周支持率 R_k , Moore 等^[6]定义发生外压屈曲破坏时的临界压力为 P_{\max} , 结合 Timoshenko 等^[11]的自由环屈曲公式, 通过公式 (4) 定义 K 值, 得到了不同 DR 的内衬对应的圆周支持率 K 的关系曲线, 如图 2 所示。

$$K = \frac{P_{\max}}{P_{cr}} = \frac{4P_{\max}(1-v^2)R^3}{Et^3} \quad (4)$$

式中: P_{cr} 为自由环屈曲破坏时的临界力; v 为泊松比; E 为弹性模量; R 为半径; t 为壁厚。

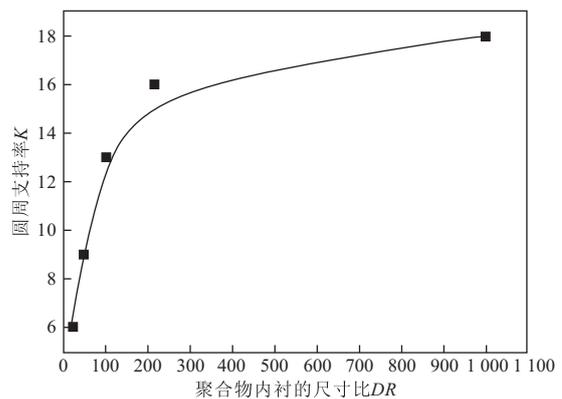


图2 圆周支持率 K 随内衬尺寸比变化曲线

Fig.2 Curve of variation of circumferential support rate (K) with dimension ratio (DR)

从图 2 可以看出, 随着 DR 的增大, 几何刚度减小, 原有管道对内衬结构的 K 增大。对于薄的内衬, K 值甚至可以达到 18 以上。这是由于, 随着内衬变薄, 进一步的自身刚度研究发现, 更复杂的情况下, 相对柔性的内衬与刚性的内衬^[4], 外管对内衬

的稳定性增强也会不同。因为相对刚度会影响环的应变集中和应变极限。

因此,在 CIPP 内衬设计选取圆周支持率 K 值时,需要具体考虑 DR ,以及外管和内衬之间的相对刚度比值,选取合理的支持率,避免设计过于保守,造成内衬过厚,降低管道过流能力和浪费材料。

3.2 几何缺陷对 K 值的影响

规程中对原位固化内衬修复设计只考虑了椭圆度对临界屈曲强度的影响,没有考虑由于一些重要的常见几何尺寸缺陷造成的内衬稳定性降低。此类缺陷对内衬性能具有重要影响。Falter^[10]指出内衬的几何缺陷包括下列 3 种:①局部突起/曲率翻转,在周长方向上局部出现;②椭圆度,在整个周长方向上都出现;③环状间隙,内衬与支持外管脱离,出现局部应力。

这些几何缺陷已经从理论上、数值模拟和实验方面被广泛研究,但是此类缺陷并没有被纳入设计考虑之中,以下将根据已有的研究经验,分析褶皱和环状间隙对圆周支撑系数 K 值的影响。

(1)褶皱对 K 值的影响 根据实际的内衬施工经验,在 CIPP 内衬施工过程中内衬会沿着轴向或者径向上形成波幅为 Δ_0 的褶皱(图 3),导致内衬出现局部的反曲,并且与外管出现脱离。文献[7]研究证实,当内衬外径大于旧管道内衬时,或者由于施工精度不够,在加压固化过程中,内衬会不可避免地形成褶皱,这种几何缺陷对内衬结果的外压屈曲性能影响很大。首先,内衬在褶皱处会出现显著的应力集中现象,Moore 等^[6]以及 El-Sawy 等^[14]分析了局部波浪形褶皱的内衬非弹性稳定性,证明随着褶皱的半波长和振幅增大,褶皱处的应力集中越明显,更容易出现局部屈曲破坏。说明这种几何缺陷对内衬结构的外压稳定性具有重要影响。

Moore 等^[6]定义褶皱顶部中心截面距离旧管道内壁距离为波幅 Δ_0 ,研究了 $\Delta_0/\pi R$ 与 K 值之间的关系,如图 4 所示。对于 $t/R=0.02$ 的内衬, $\Delta_0/\pi R$



图 3 CIPP 固化后形成的褶皱

Fig.3 Wrinkles after CIPP

从 0 增大到 0.05, K 值从 20 左右降低到 12.5 左右,大约降低至原来的 60%,而对于 $t/R=0.05$ 的内衬, $\Delta_0/\pi R$ 从 0 增大到 0.05, K 值从 10 左右降低到 8 左右,大约降低至原来的 80%。说明对于 t/R 很小的内衬,即更薄的内衬,褶皱尺寸 $\Delta_0/\pi R$ 对 K 值的影响更加明显;同时也说明随着褶皱波幅的增大,圆周支撑系数 K 值急剧减小。

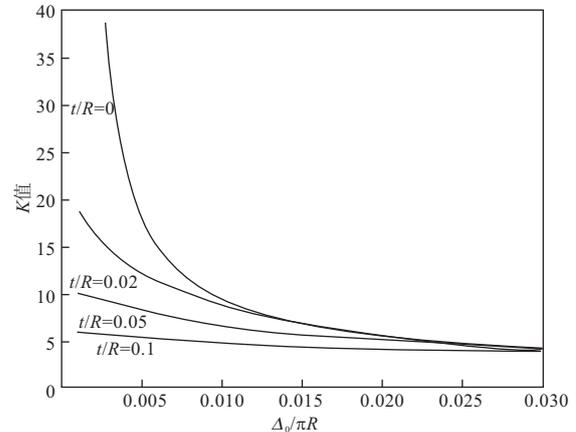


图 4 $\Delta_0/\pi R$ 与 K 值的关系曲线

Fig.4 Curve of $\Delta_0/\pi R$ with K

(2)环状间隙对 K 值的影响 由于 CIPP 内衬施工环境较为复杂,待修复的管道可能出现各种类型的问题,都会影响内衬的施工质量。研究表明^[15],即使是在理想的试验环境下,CIPP 内衬的施工工艺也很难保证理想的固化效果。在实际工程中,主要由于以下几点原因会导致内衬与原有管道之间出现局部脱离,形成环状间隙:①由于 CIPP 内衬制作精度误差,固化后的内衬外径 R_1 小于旧管道的内径 R_2 ;②旧管道发生变形、管节错位,CIPP 内衬无法完全贴合旧管道管壁;③CIPP 内衬在外部静水压力下发生径向收缩,脱离旧管道内壁。内衬与旧管道之间的环状间隙如图 5 所示。这种环状间隙必然会影响到原有管道对内衬结构的圆周支撑效果,从而影响 K 值。环状间隙对 K 值的影响与褶皱类似。Lo 等^[16]最早针对这种环状间隙尺寸对内衬临界屈曲强度的影响进行了理论研究,考虑内衬在外部压力作用下发生环向收缩,并假设内衬变形后分为 2 个部分,上部的贴合部分和下部的脱离部分,如图 5 所示,再根据 Timoshenko 弹性稳定性理论,假设下部脱离部分的内衬为固定端拱形屈曲模型,得到了圆周支撑系数 K 值与环状间隙尺寸 d 之间的表达式。

通过对比理论公式与试验数据,发现该模型计算结果普遍大于试验数据,可能导致设计结果偏于不安全。Moore 等^[6]指出上述的研究假设存在一定



图5 环状间隙示意图

Fig.5 Schematic diagram of annular gap

问题,最主要的是假设为固定端约束并不合理,因为实际的拱形结构末端约束效果并不满足固定端约束条件,这样的假设必然会导致理论解偏大。Moore等^[6]在考虑内衬与原有管道间隙尺寸 d 的前提下,通过有限元模拟得到与原有刚性管道存在环状间隙的内衬临界屈曲强度曲线,如图6所示。从图6可以看出,随着环状间隙尺寸 d 与内衬半径 R_1 的比值增大, K 值不断减小,并且对于尺寸比 DR 较小的内衬, d/R_1 的比值影响更加明显,说明薄壁内衬结构对环状间隙的影响更加敏感。结果表明,环状间隙对 K 值的影响与褶皱造成的影响是十分类似的。

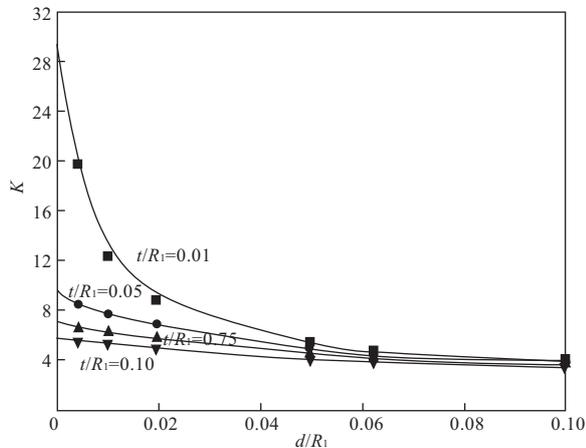


图6 K 与 d/R_1 关系曲线

Fig.6 Curve of d/R_1 with K

4 结论和建议

现行的《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》CJJ/T210-2014标准以Timoshenko等^[11]提出的自由环屈曲理论为依据,结合Aggarwal和Cooper的实验数据,经验性地选取圆周支持率 $K=7$,并考虑椭圆度折减系数,形成了半理论、半经验的CIPP内衬设计标准,该标准虽然广泛应用于设计实践,但是由于大量的研究表明,该圆周支撑系数

受到内衬的尺寸比 DR 、褶皱以及环状间隙等多种因素的影响,其取值范围变化很大,并且对于薄壁内衬,由于几何缺陷对 K 值的影响更加重要,可能导致设计存在风险,需要从以下方面修正。

(1)结合已有的研究结论,在CIPP修复设计中加入褶皱和环状间隙等几何缺陷的强度折减系数,并且根据设计的内衬尺寸率 DR 选取合适的圆周支撑系数 K 值,保证CIPP修复设计理论上的正确性和完整性。

(2)褶皱和环状间隙会极大地影响圆周支撑系数 K 值。在进行CIPP内衬修复设计时,应该通过施工前CCTV检查,预先估计损坏的刚性管道的缺陷量级(具体的 Δ_0),然后根据内衬的尺寸比 DR 和几何缺陷量级,结合施工经验预测可能出现的几何缺陷尺寸,综合确定相应的圆周支撑系数 K 值。尤其壁厚较薄的内衬结构,必须严格控制几何缺陷的大小,防止结构的外压屈曲强度不足,导致设计失效。

参考文献:

- [1] 马保松.非开挖管道修复更新技术[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [2] 2009 ASTM F1216.Standard practice for rehabilitation of existing pipelines and conduits by the inversion and curing of a resin-impregnated tube[S].
- [3] Straughan W T,Guice L K,Mal-Duraipandian C.Long-term structural behavior of pipeline rehabilitation systems[J].Journal of Infrastructure Systems,1995,1(4):214-220.
- [4] Zhao W Z,Whittle L G.Liner buckling design using critical buckling strain[C]//ASCE Pipeline Technology Conference,2007.
- [5] Boot J C.Elastic buckling of cylindrical pipe linings with small imperfections subject to external pressure[J].Tunnelling and Underground Space Technology,1997,12:3-15.
- [6] Moore I D,El Sawy K.Buckling strength of polymer liners used in sewer rehabilitation[J].Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board,1996,1541:127-132.
- [7] 2000 ATV-M127.Structural design of liner pipes and segments for rehabilitation of sewers and drains[S].
- [8] Glock D.Critical behavior of liners of rigid pipeline under external water pressure and thermal expansion[J].Der Stahlbau,1977,7:212-217.
- [9] 2014 CJJ/T210-2014.城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S].
- [10] Underground Infrastructure Research: Municipal, Industrial and Environmental Applications;Proceedings of the International Conference on Underground Infrastructure Research,Kitchener,Ontario,11-13 June 2001[M].Balkema,2001.
- [11] Timoshenko S P,Gere J M.Theory of elastic stability[M].[S.L.]: Courier Corporation,2009.
- [12] El-Sawy K,Moore I D.Stability of loosely fitted liners used to rehabilitate rigid pipes[J].Journal of Structural Engineering,1998,124(11):1350-1357.

(下转第9页)