

PHC管桩劈裂试验裂缝开展特征

岳著文^{1,2}, 李镜培^{1,2}, 邵伟^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 200092 上海; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 200092 上海)

摘要: 为研究预应力高强度混凝土管桩(PHC)受环向压力时裂缝开展特征, 针对PHC300型管桩, 设计一种裂缝生成劈裂试验方法, 该方法能够在钢筋附近生成裂缝, 为该型管桩最不利裂缝生成方式, 通过对该型号PHC管桩进行劈裂试验, 研究其裂缝开展特征。结果表明: PHC管桩受劈裂产生裂缝时, 外表面混凝土层裂缝呈现较好的V型特征, 裂缝深度随裂缝宽度增大而增大, 当裂缝宽度达到0.18 mm时, 即形成贯穿裂缝; 内表面水泥浆层和砂浆层则易发生整层断裂, 裂缝延伸性较好, 当裂缝宽度达到0.1 mm时, 裂缝贯穿管壁; 与实心混凝土相比, PHC管桩空心结构造成混凝土之间有效粘结面积较小, 裂缝恢复能力较低, 外表面裂缝恢复值随裂缝宽度增大而增大, 但裂缝恢复率随裂缝宽度增大而减小, PHC管桩外表面裂缝宽度(COD)恢复率一般在50%以下。

关键词: PHC管桩; 劈裂; 裂缝; 裂缝恢复

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)10-0081-06

Crack development characteristic of PHC pipe pile in splitting test

YUE Zhuwen^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}, SHAO Wei^{1,2}

(1. Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 200092 Shanghai, China)

Abstract: A special splitting test method has been introduced for PHC300 (prestress high concrete) pipe pile to research the characteristics of crack development due to the toroidal pressure. This crack generation method is considered to be the most negative situation for PHC300 pipe pile since the crack around steels can often be observed. The results show that crack depth increases with crack width in outer surface of PHC. The crack runs through the wall thickness of PHC as the measured crack width reach to 0.18 mm in outer concrete surface and 0.1 mm in inner surface, respectively. This is probably due to the crack extensibility, i.e., inner surface has a better extensibility than outer surface because cement paste layer and mortar layer tend to integral fracture in inner surface. Compared with a solid concrete structure, the crack in PHC is seemly difficult to recovery due to a relatively small bonding area in outer concrete surface contributed by the hollow structure. Crack recovery values increase with the increase of crack widths in outer surface, while crack recovery rates is opposite. The recovery rates of crack open displacement (COD) in outer surface are generally below 50%.

Keywords: PHC pipe pile; splitting test; crack; crack recovery

PHC管桩自上世纪80年代引入中国以来, 已被广泛应用于各种建筑工程中, 将不可避免地在侵蚀环境中使用, 其耐久性问题日益引起人们关注^[1-2]. 国内外研究表明, 混凝土表面裂缝将加

快侵蚀介质输运速率, 缩短钢筋锈蚀时间, 从而减少钢筋混凝土服役寿命^[3-7]. 因此, 裂缝将会对钢筋混凝土耐久性产生重大影响, 研究PHC管桩裂缝开展特征具有重要工程意义. 针对混凝土裂缝对侵蚀介质输运影响的研究, 目前主要有两种裂缝生成方式: 一种是通过使混凝土构件受弯产生弯曲裂缝^[8], 该方法主要用于梁板等受弯构件裂缝开展研究; 另一种采用劈裂试验制作混凝土裂缝^[4]. Wang等^[9]通过改进劈裂试验设计一种裂

收稿日期: 2014-02-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178341).

作者简介: 岳著文(1986—), 男, 博士研究生;

李镜培(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 岳著文, yuezhuwen@126.com.

缝反馈控制装置,通过对圆柱混凝土劈裂生成单一裂缝,研究裂缝开展特征及其对混凝土渗透性能的影响,但并未对环形混凝土构件进行相关研究. Ismai 等^[10]设计一种核心扩展机制,制作环形混凝土构件裂缝,但与实际环境中管桩受力不符. 因为,对于近海工程,尤其是港口码头工程,PHC 管桩主要受水平力作用,而对于受径向力作用的 PHC 管桩,最为不利的受力状况为由碰撞导致的两点劈裂^[11]. 由于通常情况下码头桩外侧一般有混凝土或土保护,受到撞击时,PHC 管桩表现为两侧挤压. 对于混凝土耐久性研究而言,在挤压状态下,最为不利的状况为钢筋附近产生应力集中,由于钢筋与混凝土接触面为薄弱面,很容易在该处产生裂缝. 对于应用于侵蚀环境中的 PHC 管桩,由于受到内外侧侵蚀物同时作用,其耐久性问题更为突出,相关研究也更为关注其钢筋附近裂缝开展情况. 然而,目前对于 PHC 管桩受挤压时裂缝开展特征的相关研究较少. 为此,本文通过设计一种特殊劈裂方式,同时于 PHC 管桩内、外表面钢筋附近生成裂缝,研究这种不利裂缝生成方式条件下裂缝开展特征.

1 试验过程

1.1 试件制作

试验选用 PHC300AB 型管桩,混凝土入模后,依次经过离心(低速 3.5 min,中速 3.0 min,高速 5.0 min)、施加预应力(控制应力 10.98 MPa)、常压蒸养(温度 90~100℃,养护时间 4~8 h)等工艺后脱模,入高压釜高温蒸汽养护(温度 180~200℃,饱和蒸汽压力 1.0 MPa,养护时间 8~12 h),出釜后混凝土强度等级可达 C80^[12]. 该批次 PHC 管桩配料,见表 1. 将制作好的 PHC 管桩沿纵向每隔 100 mm 进行切割,得到 300 mm×70 mm×100 mm(外径×壁厚×宽度)试验用试件.

表 1 PHC 管桩配料表

材料名称	品种规格	配合比	每 m ³ 混凝土材料用量/kg
水泥	P.052.5	1	420
砂	中砂	1.748	734
石子	5~25	2.852	1 198
水	饮用水	0.28	118
外加剂	DN-IIIIV 型	0.018	7.56

1.2 裂缝生成装置

以往针对裂缝对混凝土耐久性影响的研究大多基于素混凝土^[5-6, 9-10, 13],并未考虑钢筋存在对裂缝产生的影响,由于钢筋与混凝土接触面相对薄弱,受力时容易在此处发生破坏,因此,研究钢筋附近裂缝生成机制,对研究钢筋混凝土耐久性

十分必要.

本文针对 PHC300 型管桩钢筋分布特征,设计一种劈裂裂缝生成装置,该装置通过增加两个 U 型板可在 PHC 管桩每根钢筋附近产生裂缝,为 PHC 管桩劈裂或受挤压时不利裂缝生成状态,见图 1.

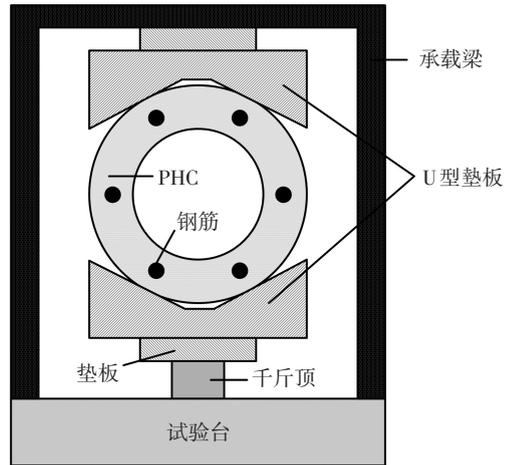


图 1 劈裂试验示意

加载过程中,采用 ZBL-F103 裂缝观测仪(精度 0.01 mm)实时观测裂缝宽度. 压力机最大压力 3 MN,采用位移控制法加载,加载速率 0.04 mm/min,达到预定裂缝宽度,维持荷载 30 min,测量裂缝宽度(COD). 卸载后再次测量裂缝恢复后宽度 w ,得到 0~1.2 mm 系列裂缝. 裂缝深度采用数显卡尺测定,测量精度 0.01 mm.

2 受力分析

2.1 受力弹性分析

对于圆环形构件受径向 1 对集中力压缩问题,文献[11,14]进行了相应解答,其计算过程非常复杂,为更好地描述本文劈裂方式对 PHC 管桩受力的影响,采用有限元软件对 PHC 管桩劈裂进行弹性计算(U 型垫板按刚体考虑),研究其劈裂受力特征. PHC 管桩出釜强度高达 C80,根据规范[15]和文献[16]选取计算参数,见表 2. 由于混凝土抗拉强度远低于抗压强度,根据第一强度理论(或第二强度理论),混凝土内某点处最大主应力(或主应变)达到其极限抗拉强度时,混凝土发生脆断. 当竖向位移 1 mm 时,PHC 管桩劈裂时最大主应力、最大主应变云图,见图 2(为区别主应力图,主应变图采用反彩虹颜色). 内外表面最大主应力、最大主应变环向分布,见图 3、4,其正负号与弹性力学规定相符,以拉为正,其中阴影部分为压应力或压应变区.

表 2 计算参数选取

PHC 分层	厚度/mm	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ
混凝土层	57	38	0.20
砂浆层	10	32	0.25
水泥浆层	3	18	0.25

图 3 最大主应力分布图显示,PHC 管桩受劈裂作用时,外表面受力点处将出现应力集中现象,其应力值约为其他部分的 6 倍,结合图 2 可知,由于应力集中主要发生在表面处,因此,劈裂后仅在受力点局部表面观察到破损现象,该处并未产生裂缝.另外,处于 U 型板作用点之间的部分,外表面受压(负应力)而内表面受拉(正应力),其余部分正好相反.由于混凝土抗拉能力较弱,4 处受力点内表面处于受拉区,2 处水平位置外表面受拉,同时该 6 处恰好是内、外表面拉应力极值出现位置,因此,容易在该 6 处钢筋附近产生裂缝.结合图 4 主应变分布图可知,虽然水平位置处拉应力稍大于受力点处,但由于内表面水泥浆层弹性模量较小,受劈裂作用时,受力点内表面拉应变反而大于水平位置外表面拉应变值.

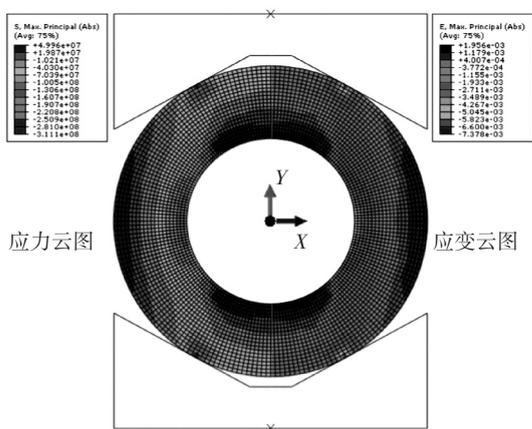


图 2 应力和应变云图

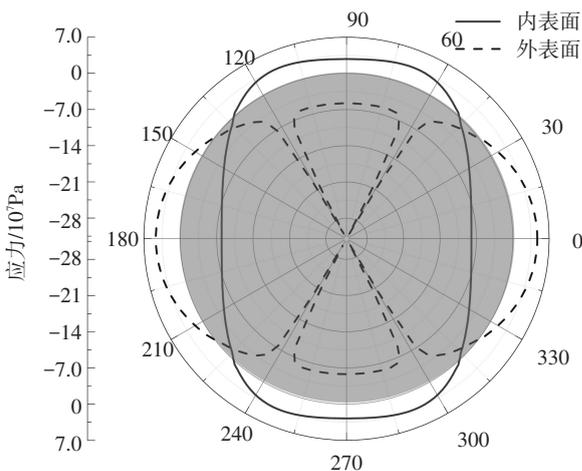


图 3 内外表面最大主应力分布

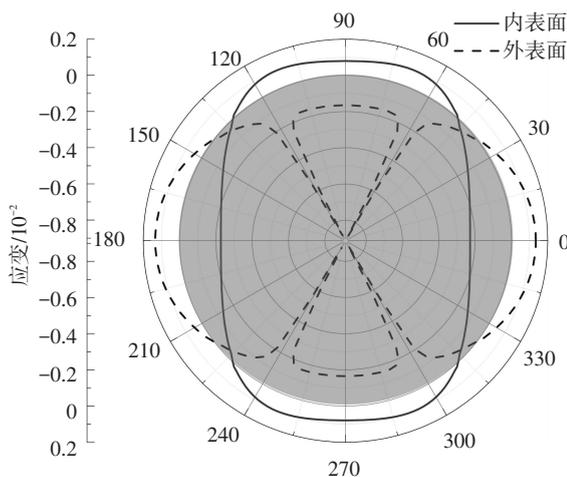


图 4 内外表面最大主应变分布

劈裂试验结果同时也证明,PHC 管桩主要在内表面受力点附近和外表面水平位置处产生 6 处裂缝,见图 6.该 6 处位置正处于钢筋附近,表明该劈裂裂缝生成方式对该型管桩耐久性极为不利.在劈裂过程中,由于内表面拉应变大于外表面拉应变,同时两者所承受的拉应力相差不大,因此,内表面往往较外表面首先产生裂缝,大多数试验结果亦得出证明(图 6).然而,由于 PHC 管桩内外材料属性并不相同(图 5),外侧混凝土层刚度远高于内侧水泥浆层和砂浆层,其极限拉应变较低,因此,内表面首先产生裂缝并不是绝对的,需根据成桩后三种材料强度进一步确定.

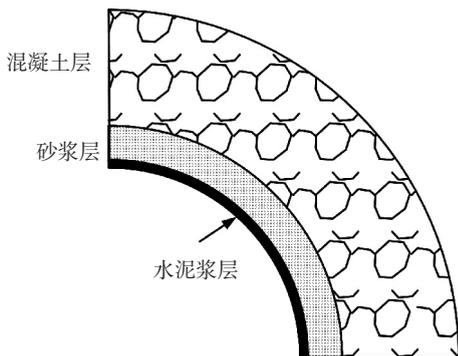


图 5 PHC 管桩横截面

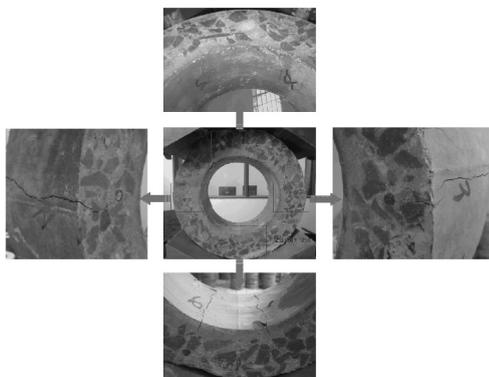


图 6 劈裂裂缝

2.2 试验实测分析

对 PHC 管桩分别进行 2 点(不使用 U 型垫板)、3 点(使用一个 U 型垫板)和 4 点(使用两个 U 型垫板)劈裂试验,其受力和位移曲线见图 7.可以看出,劈裂接触点越多,开裂前试样所允许的压缩位移值越大,开裂所需要的压力也越大.说明 PHC 管桩在受到挤压、劈裂和大变形时,多点接触更有利于防止裂缝的发生.

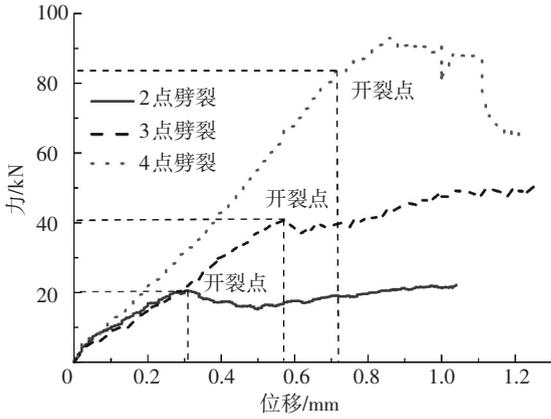


图 7 劈裂受力与位移

3 裂缝开展特征

3.1 裂缝开展特征

混凝土裂缝最为常见的是 V 型裂缝^[4],理想情况下,某一裂缝宽度 w 对应唯一的裂缝深度,但实际上量测表明,即使相同的裂缝宽度,也可能产生多种不同的裂缝深度(见图 8、9).因此,很难建立准确的裂缝计算模型.

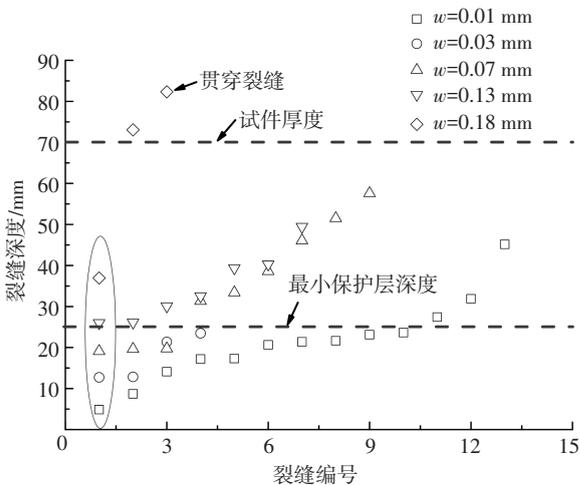


图 8 外表面裂缝特征

图 8 显示,外表面裂缝具有较好的 V 型特征,表现为裂缝深度随裂缝宽度增大有增大的趋势,尤其不同裂缝宽度条件下,最小裂缝深度随裂缝宽度增大呈现明显增大的趋势.规范^[12]规定,试验所用 PHC300AB 型管桩最小保护层厚度为 25 mm,劈裂试验显示,裂缝宽度 $w \leq 0.03$ mm

时,裂缝深度一般不会超过保护层厚度,但大于该值后,绝大多数裂缝深度超过了保护层厚度,即到达钢筋表面.此外,少数 $w = 0.01$ mm 的微小裂缝深度也超过保护层厚度,这就可以解释为何规范^[12]规定 PHC 管桩表面不得出现环向和纵向裂缝.然而,由于混凝土具有一定的自愈性能^[17],一般认为当裂缝宽度小于某一临界宽度时,对侵蚀元素迁移影响不大^[3,10].因此,规范对 PHC 管桩不出现裂缝的规定是否过于保守有待进一步研究.

图 9 显示,相对于外表面裂缝,内表面裂缝并未表现出明显的 V 型特征.值得关注的是,不同裂缝宽度的内表面最小裂缝深度一般为 10 ~ 15 mm.对于内侧裂缝,即使 $w = 0.01$ mm 这样的微小裂缝,裂缝深度超过 25 mm 最小保护层厚度的数量已达总数的 57%.相比外表面裂缝,表现出更强的裂缝延伸性能.因此,当内表面裂缝宽度达到 0.1 mm 时,即量测到贯穿现象,而外表面裂缝宽度则需达到 0.18 mm 时才贯穿管壁.

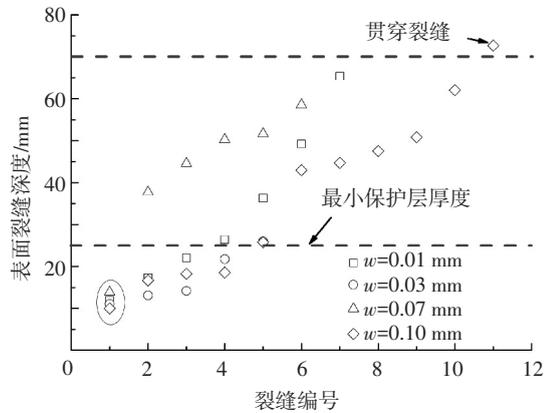


图 9 内表面裂缝特征

PHC 管桩内外表面之所以表现出不同的裂缝延伸性能,根本原因在于其独特的离心成桩工艺.由于离心力作用,PHC 管桩径向一般分为明显的三层,由内而外分别为水泥浆层、砂浆层和混凝土层,见图 5.外侧的混凝土层,由于粗细骨料和水泥水化产物之间相互作用,粘结性能强,抵抗开裂和开裂延展性能好.因此,外表面裂缝贯穿壁厚时需要较大的裂缝宽度.中间层为砂浆层,厚度一般为 10~20 mm.最内侧一层为厚度仅 2~3 mm 的水泥浆层.内表面产生裂缝时,水泥浆层首先断裂,拉应力传递到砂浆层.然而,砂浆层抗拉强度相对较低,较小的拉应力即可将该层拉裂.因而,内表面一旦产生裂缝(即使宽度较小的微小裂缝),往往表现为砂浆层和水泥浆层层层破坏(如图 9 所示),即表现为不同裂缝宽度的最小裂缝深度均

处于 10~15 mm 范围,此深度恰好是砂浆层和水泥浆层厚度.同时,由于薄弱的水泥浆层和砂浆层极易产生开裂,内侧裂缝相比外表面裂缝具有较强的延伸性,表现为较小的裂缝宽度(0.1 mm),即可贯穿整个壁厚.

由于 PHC 管桩管壁较薄,相关耐久性研究更加关注的是裂缝深度是否已达到或超过保护层厚度,到达钢筋表面.通过劈裂试验,统计裂缝深度超过保护层厚度概率,见图 10.可以看出,当裂缝宽度 $w \leq 0.03$ mm 时,裂缝深度超过保护层厚度概率 δ 在 40% 以下,而当裂缝宽度 $w > 0.03$ mm 后,内外表面裂缝深度超过保护层厚度概率均超过 50%,表明绝大多数裂缝已延伸到钢筋表面.此外,当 $w \leq 0.1$ mm 时,内表面裂缝 δ 值大于外侧,内表面裂缝表现出较好的延伸性,但由于内侧砂浆层和水泥浆层呈整体断裂,不同裂缝宽度时,最小裂缝深度一般为 10~15 mm,这部分裂缝深度并未超过保护层厚度,因而,内表面裂缝超越概率 δ 值波动较大.外表面裂缝 δ 值随裂缝宽度增大,大致呈上升趋势,说明裂缝深度随裂缝宽度增大而增大,再次表明外表面裂缝呈现较好的 V 型特征.当内外表面裂缝宽度分别超过 0.15、0.13 mm 后,全部裂缝深度超过保护层厚度 ($\delta = 100%$).

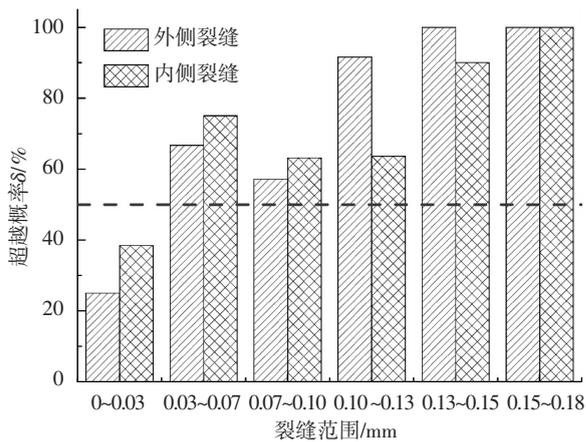


图 10 裂缝深度超过保护层厚度概率统计

3.2 裂缝恢复特征

对于内表面裂缝,一般水泥浆层和砂浆层呈整体断裂,因而裂缝贯穿于水泥浆层、砂浆层和混凝土层,属于复合材料裂缝,研究其裂缝恢复性能意义不大.本文通过测定持荷时 PHC 管桩外表面最大裂缝宽度 COD 和卸荷后裂缝宽度 w ,重点研究 PHC 管桩外表面裂缝恢复性能.

Djerbi 等^[7]认为,普通混凝土较高性能混凝土产生的裂缝更加曲折,因此表现为较小的裂缝恢复性能.PHC 管桩混凝土强度高达 C80(抗压强

度 > 90 MPa),其恢复性能理应比普通混凝土(46 MPa)和高性能混凝土(75 MPa)好很多,但由图 11 可得,与实心普通混凝土和高性能混凝土相比,PHC 管桩裂缝恢复能力反而小很多,且 COD 越大,差异有增大趋势.这是因为,与实心混凝土构件相比,PHC 管桩空心构造使得混凝土之间有效粘结面积较小,造成裂缝恢复能力较低,遭受外部短时荷载后,裂缝愈合能力较差,不利于抵抗外部侵蚀介质向混凝土内部运输.

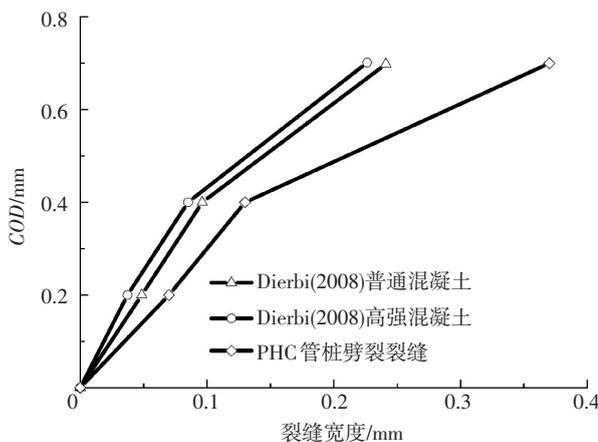


图 11 裂缝恢复对比

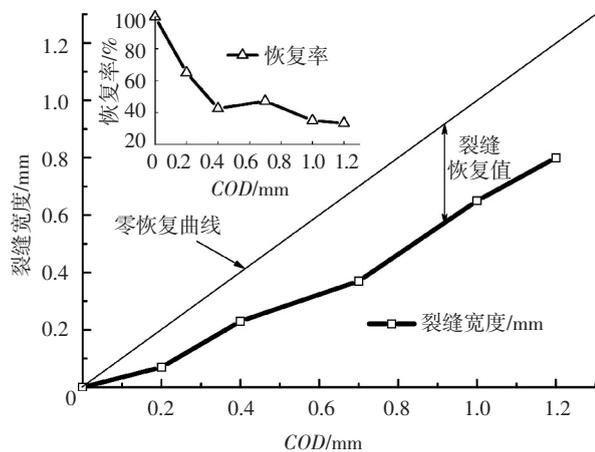


图 12 外表面裂缝恢复特性

Aldea 等^[13]对实心普通混凝土(36 MPa)和高性能混凝土(69 MPa)劈裂试验显示,高性能混凝土恢复率为 62%~66%,普通混凝土恢复率约为 56%,而对 PHC 管桩劈裂试验表明,劈裂裂缝恢复率一般在 50% 以下(见图 12),说明 PHC 管桩劈裂裂缝较低的恢复能力.此外,由图 12 还可得出,虽然 PHC 管桩裂缝恢复值随裂缝宽度增大而增大,但恢复率却随裂缝宽度增大而逐渐减小.分析认为,PHC 管桩壁厚较薄,裂缝宽度越大,裂缝延伸深度越大,造成剩余非开裂部分混凝土有效粘结部分减少,粘结部分恢复力较小,因此表现出较小的裂缝恢复性能.

4 结 论

1) 受劈裂作用时, 多点接触可有效提高 PHC 管桩抗变形能力, 实际工程中应加强 PHC 管桩周围防护, 避免其遭受直接撞击。

2) 一般情况下, PHC 管桩受挤压劈裂时, 内表面先于外表面开裂。

3) 经离心作用后, PHC 管桩由内向外分为明显的三层。外侧混凝土层裂缝具有较好的 V 型特征, 裂缝深度随裂缝宽度增大呈增大趋势, 当 $w = 0.18 \text{ mm}$ 时, 即产生裂缝贯穿现象。

4) PHC 管桩内侧管壁水泥浆层和砂浆层抗拉强度较低, 开裂时表现为整层破坏, 与外表面裂缝相比, 表现出较强的裂缝延伸性, $w = 0.1 \text{ mm}$ 时, 内侧裂缝贯穿管壁。

5) PHC 管桩壁厚较薄, 内、外表面裂缝宽度分别超过 0.15 、 0.13 mm 时, 裂缝深度将超过保护层厚度。

6) 与实心混凝土构件相比, PHC 管桩空心构造减少了混凝土之间的有效粘结面积, 裂缝恢复能力较低, 外表面裂缝恢复值随裂缝宽度增大而增大, 但裂缝恢复率随裂缝宽度增大而减小, PHC 管桩外表面裂缝恢复率一般在 50% 以下。

由于 PHC 管桩受劈裂挤压时, 内表面较外表面更易开裂且具有较强的裂缝延伸性能, 应用于严重侵蚀环境中时, 应对 PHC 管桩内部做密封处理, 避免内部侵蚀物质通过裂缝锈蚀钢筋。此外, 由于外表面裂缝恢复性能较差, 在侵蚀性环境中使用 PHC 管桩时, 应慎重考虑其抗侵蚀能力。

参 考 文 献

- [1] 邵伟, 李镜培, 岳著文. 氯离子侵蚀混凝土管桩寿命预测理论模型[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(5): 575-581.
- [2] 李镜培, 岳著文, 邵伟, 等. 海工环境 PHC 管桩设计寿命计算[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(4): 476-485.
- [3] JANG S Y, KIM B S, OH B H. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(1): 9-19.
- [4] RODRIGUEZ O G, HOOTON R D. Influence of cracks on chloride ingress into concrete [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(2): 120-126.

- [5] WIN P P, WATANABE M, MACHIDA A. Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7): 1073-1079.
- [6] 金祖权, 赵铁军, 庄其昌, 等. 劈裂裂缝混凝土在海洋潮汐区的氯离子传输 [J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(2): 52-57.
- [7] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6): 877-883.
- [8] GOWRIPALAN N, SIRIVIVATNANON V, LIM C C. Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(5): 725-730.
- [9] WANG K J, JANSEN D C, SHAH S P, et al. Permeability study of cracked concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.
- [10] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9): 1106-1111.
- [11] CHIANESE R B, ERDLAC R J. The general solution to the distribution of stresses in a circular ring compressed by two forces acting along a diameter [J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1988, 41(2): 239-247.
- [12] GB 13476—2009 先张法预应力混凝土管桩 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] ALDEA C M, SHAH S P, KARR A. Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 181-187.
- [14] TIMOSHENKO S. On the distribution of stresses in a circular ring compressed by two forces acting along a diameter [J]. Phil Mag, 1922, 44: 1014-1019.
- [15] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] BOUMIZ A, VERNET C, TENOUDJI F C. Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages: evolution with time and degree of hydration [J]. Advanced Cement Based Materials, 1996, 3(3): 94-106.
- [17] JACOBSEN S, MARCHAND J, BOISVERT L. Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(6): 869-881.

(编辑 赵丽莹)