

建模时主要考虑土体、桩基和配重块。桩基直径为 1.5 m, 为满足柔性桩的要求, 桩长设置为 10 m。为考虑土对桩基的约束作用, 在桩基四周设置

土体,考虑土体的边界效应,建立  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$  土体。考虑主梁、桥台对桩基的作用,在桩基顶部设置配重块。土体、桩基和配重块采用三维实体单元模拟,钢筋使用线单元的桁架来模拟。土体采用黏土,使用摩尔-库伦本构模型;砼采用砼损伤本构模型;钢筋采用 PQ-Fiber 中的 USteel02 本构模型。有限元模型见图 2。

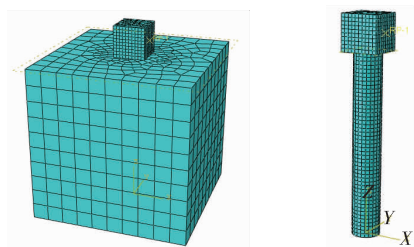


图 2 UHPC 桩有限元模型

## 2.2 装配和分析步

部件中建立钢筋纤维,在装配中将钢纤维合并组装成钢筋笼(见图 3)。设置 2 个分析步:第一步对土体进行地应力平衡,第二步进行加载。

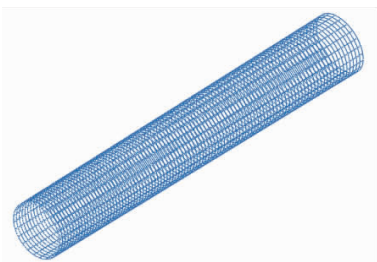


图 3 钢筋笼

## 2.3 边界条件与相互作用

土体沿  $X$  方向的前后两面约束  $X$  方向位移,沿  $Y$  方向的作用两面约束  $Y$  方向位移,土体底面约束  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  3 个方向的位移。桩底面、土体底面的边界设置相同,约束  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向的位移。相互作用使用面一面接触模拟,主要设置桩基外表面与土的接触。为模拟钢筋笼与砼桩基的作用效应,建立内置约束,将钢筋笼内置于桩基中。

## 2.4 模型加载

整体桥的梁端位移一般最大不超过  $16\text{ mm}$ 。为分析 UHPC 桩基的性能,加载至  $50\text{ mm}$ ,第一次加载  $2\text{ mm}$ , $20\text{ mm}$  前每次加载增加  $2\text{ mm}$ , $20\text{ mm}$  后每次加载增加  $5\text{ mm}$ 。

## 3 UHPC 桩基性能分析

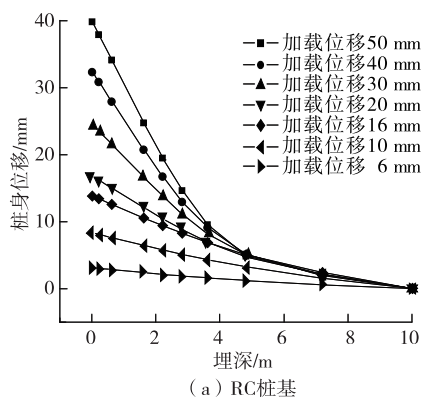
整体桥在温度、地震等荷载作用下沿纵桥向发

生的位移主要由下部结构来吸收,而桩基是吸收变形的的主要结构。目前国内多使用 RC 桩基作为基础,其变形效果不好,需采用承受变形能力更好的桩基来吸收变形。下面通过 RC 桩基与 UHPC 桩基的对比,分析 UHPC 桩基的性能。

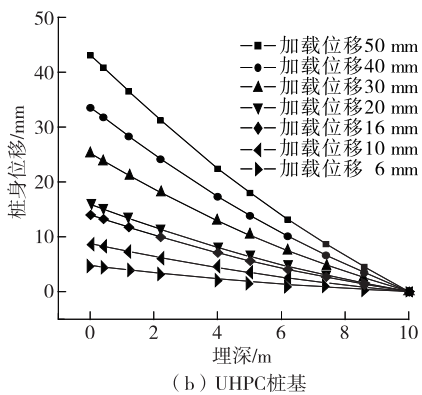
### 3.1 桩基位移变形

如图 4(a)所示,加载位移为  $0 \sim 20\text{ mm}$  时,RC 桩基的水平位移随着埋深的增大而逐渐减小,桩底位置位移为零,桩基的变形弯曲较圆滑;加载位移为  $30 \sim 50\text{ mm}$  时,在距离桩底  $5.2\text{ m}$  处位移曲线出现折点,表明上半部桩基发生了很大变形,桩基发生了破坏。

如图 4(b)所示,UHPC 桩基的  $0 \sim 50\text{ mm}$  位移曲线都较连续和圆滑,体现了 UHPC 桩基的高强度、高耐久性,在大位移加载下结构也不会发生破坏,充分发挥了其吸收变形的能力。



(a) RC 桩基



(b) UHPC 桩基

图 4 桩身位移

从图 4 来看,加载位移为  $16\text{ mm}$  时,RC 桩基和 UHPC 桩基的桩顶位移相差无几,桩基变形规律也类似,这是因为加载位移较小,在桩基的变形承载范围内;而在大位移加载( $50\text{ mm}$ )时,桩顶的最大位移,UHPC 桩基大于 RC 桩基,表明 UHPC 桩基适应大位移变形的能力比 RC 桩基强。

### 3.2 桩身弯矩

如图5所示,在水平位移荷载作用下,RC桩基和UHPC桩基的桩身弯矩都呈两端小、中间大的凸起状。由于有限元模拟时在桩底采取铰约束,桩底弯矩为零;模型在桩底上设置配重块,加载位置位于配重块上,桩基顶部亦产生弯矩。在加载位移为20 mm时,RC桩基在距离桩底6.67 m处弯矩最大,为 $1.109 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;UHPC桩基在距离桩底5.55 m处弯矩最大,为 $1.501 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。在加载位移为50 mm时,RC桩基和UHPC桩基的桩身最大弯矩分别为 $1.579 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $3.467 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。表明在相同加载位移下,UHPC桩基的最大弯矩更接近于桩基中点位置,UHPC桩基的受力性能优于RC桩基,其水平承载能力也更好,能更好地满足整体桥对桩基变形的要求。

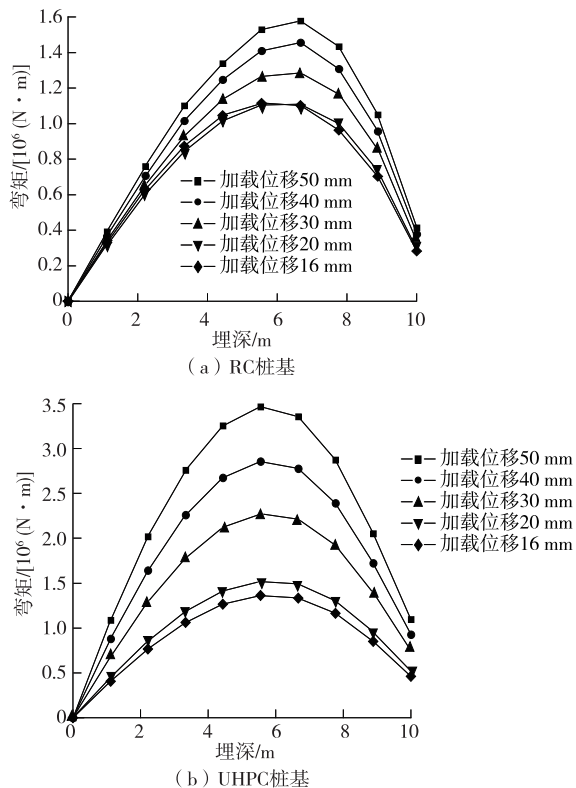


图5 桩身弯矩

### 4 桩径对UHPC桩基性能的影响

四九桥的桩径为1.5 m。分别建立桩径为1.2 m、1.5 m、1.8 m的UHPC桩基模型,分析桩径对UHPC桩基性能的影响,结果见图6。

由图6可知:在加载位移为20 mm时,不同桩径UHPC桩基的变形规律基本一致,直径1.2 m时

桩基变形曲率最大,桩径1.8 m变形曲率最小,接近于直线。在加载位移为50 mm时,1.5 m、1.8 m桩径桩基的变形相似,1.2 m桩径桩基的变形则明显不同,1.8 m桩径桩基的弯曲变形最小,接近直线。可见,桩径减小,可增加桩基的柔性,增强其变形能力;增大桩径,会增大桩基的刚度,降低其变形能力。因此,桩基的直径不宜过大。

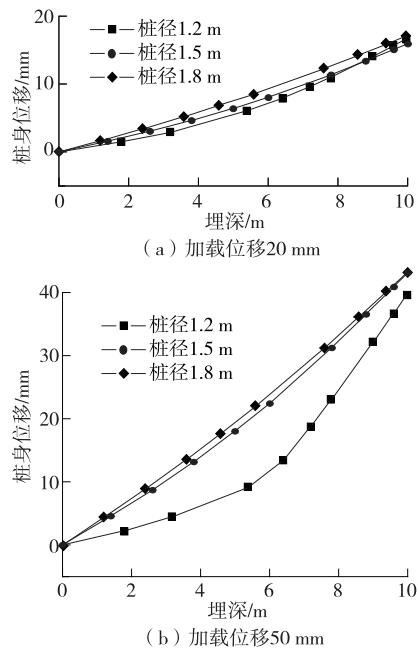


图6 不同桩径下UHPC桩身位移

### 5 结论

(1) 相比RC桩基,UHPC桩基具有更好的变形能力,且能适应主梁在荷载作用下产生的更大位移。在大位移(大于20 mm)作用下,RC桩基易发生开裂破坏,而UHPC桩不会发生开裂破坏。

(2) 增大UHPC桩基的直径,会增大桩基的刚度,降低其变形能力;减小UHPC桩基的直径,能增大其柔性,提高其吸收变形能力。UHPC桩基的直径不宜过大。

### 参考文献:

- [1] PETURSSON H, KEROKOSKI O. Monitoring and analysis of abutment-soil interaction of two integral bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(1): 54-64.
- [2] MITOULIS S A, TEGOS I A, STYLIANIDIS K C. Cost-effectiveness related to the earthquake resisting system of multi-span bridges[J]. Engineering Structures, 2010, 32

- (9):2658—2671.
- [3] HUNTLEY S A, VALSANGKAR A J. Behaviour of H-piles supporting an integral abutment bridge[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(7):713—734.
- [4] GAMA D, ALMEIDA J F. Concrete integral abutment bridges with reinforced concrete piles[J]. Structural Concrete, 2015, 15(3):292—304.
- [5] 项海帆. 世界大桥的未来趋势:2011 年伦敦国际桥协会议的启示[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第二届全国桥梁学术会议论文集(上册). 北京:人民交通出版社, 2012.
- [6] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3):1—24.
- [7] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2):1—97.
- [8] 邵旭东, 詹豪, 雷薇, 等. 超大跨径单向预应力 UHPC 连续箱梁桥概念设计与初步实验[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8):83—89.
- [9] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬, 等. 正交异性钢板—薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2):40—45.
- [10] SHAO X, YI D, HUANG Z, et al. Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(5):417—428.
- [11] 罗小桦, 陈宝春, 黄福云, 等. 不同类型桩基支撑的整体桥力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(5):151—160.
- [12] 张永涛, 李刚, 郑和晖. 预制 UHPC-灌注 RC 组合桩基方案设计及试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(增刊):45—51+65.
- [13] 陈宝春, 陈国栋, 苏家战, 等. 采用 UHPC-RC 阶梯桩的整体桥试设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(1):1—8.
- [14] 戴沂新. 整体桥 h 型 UHPC 桩基本结构受压性能试验研究[D]. 福州:福州大学, 2018.
- [15] 彭俊杰. 基于数值模拟的非预应力 UHPC 管桩基承载力分析[D]. 湘潭:湘潭大学, 2020.
- 收稿日期:2021—06—24

\*\*\*\*\*

(上接第 117 页)

- [27] YOKOZEKI Koichi, TOMONORI Tominaga, CHITOSHI Miki. The effects of rib shape and slit on fatigue properties of orthotropic steel decks[J]. Welding in the World, 2021, 65(4):601—609.
- [28] 祝志文, 黄炎, 向泽, 等. 货运繁重公路正交异性板钢桥弧形切口的疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):104—112.
- [29] 渠昱, 曾勇, 顾安邦, 等. XFEM 及其在正交异性钢桥面板疲劳裂纹扩展中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(4):21—27.
- [30] CHEN Z Y, LI C X, HE J, et al. Retrofit fatigue cracked diaphragm cutouts using improved geometry in orthotropic steel decks[J]. Applied Sciences, 2020, 10(11):3983.
- [31] 崔海军. 桥面构造及铺装层对正交异性钢桥面板力学性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5):454—461.
- [32] CONNOR Robert J. Influence of cutout geometry on stresses at welded rib-to-diaphragm connections in steel orthotropic bridge decks[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1892:78—87.
- [33] 童乐为, 沈祖炎. 开口纵肋的正交异性钢桥面板疲劳试验研究[J]. 中国公路学报, 1997, 10(3):62—68.
- [34] 向泽, 祝志文. 切口型式对正交异性钢桥面板应力特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2):399—407.
- [35] 张清华, 刘益铭, 卜一之, 等. 大纵肋正交异性组合桥面板疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3):226—235.
- [36] 邵旭东, 郑晗, 黄细军, 等. 钢—UHPC 轻型组合桥面板横向受力性能[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9):70—77+85.
- [37] 梅大鹏, 廖贵星. 新型嵌边 U 肋与面板连接焊缝切口应力分析[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1):65—70.
- [38] 吴文清, 张炯. 基于波形钢板的钢箱梁正交异性桥面板静力特性研究[J]. 钢结构, 2019, 34(1):49—55.
- [39] 王仁贵, 欧阳, 徐秀丽, 等. 新型半开口纵肋正交异性钢桥面板疲劳性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6):64—69.
- [40] 张清华, 余佳, 田启贤, 等. 新型承托式纵肋与横肋交叉构造细节疲劳性能研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6):29—34.
- [41] 张清华, 程震宇, 廖贵星, 等. 波形顶板—UHPC 组合桥面板优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4):670—678.
- [42] 吴方向, 杨美良, 刘东. 双波形钢—RPC 组合正交异性桥面板受力性能分析[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(2):138—142.
- [43] 顾萍, 张志强, 胡雨蛟, 等. 设置 U 肋内隔板的钢桥面板疲劳性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3):19—24.
- 收稿日期:2021—07—11