

目次

应用研究

| | | |
|---------------------------------|-----------------|----|
| 钻孔地质雷达在富水地层中探测微风化球状孤石的试验研究..... | 龙桂华 江 建 | 3 |
| 大掺量的厂拌热再生沥青路面设计与施工实例研究 | 江 建 刘 涛 | 9 |
| 节段预制拼装UHPC桥梁发展现状与应用前景 | 李有志 高钟伟 任 勇 李立峰 | 15 |
| 建筑垃圾CFG桩单桩承载力特性分析 | 张建同 于 芳 刘铁军 张伯发 | 25 |
| 公路软基水泥搅拌桩帷幕病害数值分析研究 | 张建同 宁培淋 田卿燕 钱尼贵 | 32 |

工程实践

| | | |
|--------------------------|-----------------|----|
| 天健公馆B座装配式建筑施工实践 | 刘艾轩 冯志远 刘家琪 李孝军 | 39 |
| 坡地高层住宅筏基埋深设计探讨 | 李有志 刘艾轩 吴武松 | 46 |
| 浅谈铝合金模板二次深化设计及施工要点 | 徐亚非 冯志远 梁志峰 谭因刚 | 50 |

简 讯

| | |
|---------------------------------|----|
| 国家发改委批复立项：世界最大地震工程模拟研究设施..... | 53 |
| 世界上跨度最大全漂浮体系斜拉桥主跨首节钢梁架设成功 | 53 |
| 沪深开展工程总承包企业编制施工图设计文件试点 | 54 |
| 北京住宅装配式装修标准10月起实施 | 54 |
| 广东建全球流量最大的调水工程 | 55 |
| 我国工程建设项目审批制度改革试点正在稳步推进 | 56 |
| 征稿通知..... | 8 |



2018年10月出版 Vol.02
2018年 第2期 第02卷

(内部资料 业内交流)

《天健技术》杂志编辑委员会

主 任：韩德宏
副 主 任：宋 扬 王培先 林婵波 方东红 何云武 尹剑辉 陈 强 张心亮
编 委：江 建 袁立群 于 芳 朱兴龙 罗燕山 陈 俭 胡鹰志 罗 诚
洪绍友 李 锋 赵晓宜 袁 平 杨建平 李文成 揭选松 李春雷
贾 彬 郭永平 杨益涛 侯 挺 彭晓钢 张宪彬 周保生 盛 宴
龙桂华 任 勇 范璐璐 郑志刚 黄小芳

主 编：江 建

副 主 编：刘艾轩

主 办：深圳市天健（集团）股份有限公司

编辑出版：《天健技术》编辑部

地 址：广东省深圳市福田区滨河大道5020号同心大厦2406

邮政编码：518033

电 话：0755-83541874

排 版：深圳市新鸿兆文化传播有限公司

印 刷：深圳市长江印刷公司

登记证号：（粤B）L018010008

0 引言

地质雷达是一种高效的浅层地球物理探测技术,它通过向地下发射高频电磁波,利用其在介质电性差异面上反射波的运动学和动力学信息来分析和推断地下介质构造特征^[1]。地面雷达探测深度有限,在富水地层中表现得尤为明显。钻孔雷达不受深度限制,其径向探测范围与周围岩土的电性参数相关,在电导率较低的岩层中可达数百米,是岩体深部探测的有效手段^[2-4]。

微风化花岗岩球状孤石主要分布在残积层中,具有一定的隐蔽性和随机性,通过钻探很难完全查明其分布情况^[5],需要佐以其它物探手段联合验证。微风化花岗岩岩体致密,内多无节理裂隙,决定它与围岩之间存在明显的电性差异,因此可用钻孔雷达加以探测。对于微风化球状孤石的地质雷达探测问题,王俊茹等^[6]在地表做过一些尝试,用50MHz的雷达能找到深度10m左右厚度为4~5m大小的孤石,但分辨能力有限。对于含水裂隙的钻孔雷达探测,国内外学者对其做过较多的数值模拟,多基于Yee网格的有限差分法^[7-9]和基于快速Fourier变换的伪谱法^[10-11]。在应用方面,Johnson和Joesten对Machiasport地区的钻孔雷达反射数据进行分析,勾勒出了该地区多条裂隙的产状,并和其它地球物理测井数据和水文数据进行了比较^[12]。对微风化球状孤石的钻孔地质雷达探测,除在深圳和东莞地铁盾构区间做过尝试外^[13],其余地方少见报道。

微风化球状孤石事关地铁隧道盾构机刀盘磨损以及基建过程中桩基础的承重和稳定性问题,因此提前探测就显得尤为重要。地质雷达作为一种高效高分辨率的探测工具,能分辨岩土介质的细微电性差异,因此需要在场地实验之前结合实际地质情况对钻孔雷达的探测能力做一些理论方面的研究,分析电磁波在各种富水地层中的传播距离、不同径向深度孤石在雷达剖面上的特征响应,以及层状地层和套管充填物对孤石识别的影响,同时结合场地实验验证钻孔地质雷达在富水地层中探测微风化球状孤石的分辨能力。

1 控制方程

地质雷达是用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法,主要借助于电磁波在介质阻抗差异面上的反射来勾勒和判断地下介质的形状和属性。它通过发射天线向地下介质发射

高频电磁波,遇到电性差异界面发生散射回到接收天线。电磁波在复杂介质中的传播满足Maxwell方程。对于井中雷达,由于天线设置在探测平面内,一般采取横电模式(TE)。带PML边界条件的二维频域TE控制方程在扩展坐标系下可以表示为^[14-15]:

$$\begin{aligned} \sigma E_x + j\omega \epsilon E_x &= \frac{1}{S_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ \sigma E_z + j\omega \epsilon E_z &= -\frac{1}{S_x} \frac{\partial H_y}{\partial x} \\ j\omega \mu H_y &= \frac{1}{S_z} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{1}{S_x} \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{aligned}$$

其中, $j = \sqrt{-1}$, E_x 、 E_z 和 H_y 分别为电场与磁场沿坐标轴方向的分量。 S_x 和 S_z 为扩展坐标变量^[16]。

对上述方程的求解可采取递归褶积^[17]并结合有限差分的方式, Irving和Knight^[18]给出了详细的离散方法,这里不再赘述。算法的整体精度和微分算子的精度紧密相关,在本文中我们采用 $\partial(2, 4)$ 有限差分交错网格格式。

2 数值模拟

2.1 层状介质模型

为了模拟真实地质情况,研究层状地层对微风化球状孤石在钻孔雷达反射剖面上的影响,我们根据某地野外地质钻孔及区域地质资料,建立如下地层模型,如表1所示。上覆地层主要由表层填土、冲洪积粉质粘土、砾砂及残积砾质粘性土等组成,下伏基岩由震旦系开云群混合岩和燕山期花岗岩组成。岩石构造裂隙较发育,由浅至深风化程度依次减弱。

表1 岩土勘察参数

| 名称 | 深度(m) | 含水量(%) | 饱和度(%) | 孔隙比 |
|--------|-------|--------|--------|------|
| 素填土 | 3.80 | 25.1 | 90.0 | 0.78 |
| 粉质粘土 | 5.00 | 26.3 | 87.8 | 0.82 |
| 砾砂 | 6.80 | 17.2 | 87.2 | 0.53 |
| 砾质粘性土 | 16.8 | 28.5 | 86.2 | 0.85 |
| 全风化花岗岩 | 23.2 | 27.6 | 84.7 | 0.65 |
| 中风化花岗岩 | 30.0 | | | |

大部分土壤在干燥情况下介电常数小于等于 $4\epsilon_0$,其具体值随孔隙率的变化又略有不同。假定表1中干燥素填土、粉质粘土、砾质粘性土的相对介电常数为3,砾砂和全风化花岗岩相对介电常数为

4,根据土壤的孔隙比和含水饱和度,可利用CRIM公式计算混合介电常数:

$$\epsilon = [(1-\Phi)\epsilon_s + S_w\Phi\epsilon_w + (1-S_w)\Phi\epsilon_a]^\alpha$$

其中, Φ 和 S_w 分别为土壤孔隙率和含水饱和度, ϵ_s 、 ϵ_w 和 ϵ_a 分别为土颗粒、水和空气的介电常数。 α 是一个与电场方向相关的因子,对于各向同性介质,其值取0.5)

由于地层富含水,且水的介电常数较高,因此所计算地层平均混合介电常数大于 $15\epsilon_0$ 。电导率是制约电磁波在地层中传播远近的重要参数,考虑到电法测量该地区平均电阻率小于等于 $50\Omega \cdot m$,结合资料中给的一些经验参数,这里我们设定素填土电导率为0.02S/m、粉质粘土电导率为0.05S/m、砾砂电导率为0.002S/m、砾质粘性土电导率为0.01S/m、全风化花岗岩电导率为0.001S/m和微风化花岗岩电导率为0.0001S/m。

在该组模型参数中,两风化球分别位于砾质粘性土顶和底部,另一风化球位于全风化和中风化交界处且落于中风化岩层顶端,风化球粒径约为1m,且位于砾质粘性土、全风化和中风化花岗岩中,距离左井壁分别为1m、6m和8.8m,距离右井壁分别为1.2m、5m和10m。两钻孔(#1和#2)相聚11m,且距离模型边界为2m,分别位于微风化球两侧(如图1所示)。地质雷达采用100MHz钻孔天线,在两孔中采用单天线分别测量,点距为0.2m。

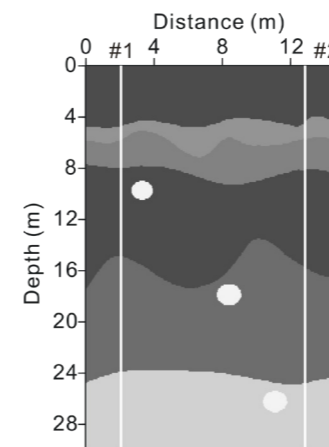


图1 界面起伏层状地层模型

三个微风化球状孤石分别位于砾质粘性土、全风化和中风化花岗岩中,两钻孔在地表上坐标分别为(2m, 0m)和(13m, 0m),且垂直于地表向下。

图2为界面起伏层状介质中微风化球在钻孔雷

达反射剖面上的特征响应。相比于水平层状介质模型雷达剖面中只存在简单干净的线状反射,起伏界面模型的界面反射则更加复杂,随界面起伏具有一定的曲率,表现为曲率较大的点会分叉,通常其下还伴随着一些列羽状绕射。这些绕射与阻抗较小的孤石反射波幅度相近,易引起误判。好在这些羽状绕射并不单一,其多少跟界面起伏程度紧密相关,因此可以根据它来判断界面的弯曲程度。界面的复杂程度增加了反射波回到接收天线的几率,如图2中300ns以下的多次波,增加了解译难度,因此需要在采集过程中设置合理的时间窗口。

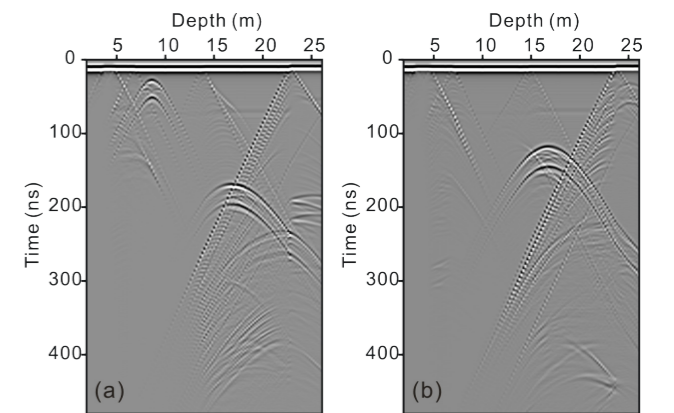


图2 界面起伏层状介质中微风化球状孤石在钻孔雷达反射剖面上的特征响应

2.2 钻孔中有无水充填情况

实际测量中,井壁对雷达剖面的影响也需考虑。通常情况下,我们会在钻孔中布设PVC套管,以防止井壁坍塌卡住天线。这里,我们考虑两种情况:一种是套管中无水,天线周围充填空气,这需要在下套管时密封底端以及管间的连接处,防止水渗入;另一种为套管中充填水,套管底端和连接处可不作要求。模型参数和采集设置如起伏界面模型,套管直径为 $\Phi 75mm$ PVC管,整个模拟在#1中进行。

当天线位于(2m, 8m)且套管中充填空气和水时,雷达波在介质中传播240ns时刻的波场快照如图3所示。从图中可以知道,空气充填套管对雷达波能量传入井壁外围介质影响不大,而水充填套管把大部分能量集中在套管内,改变了电磁波的辐射花样。Ernst(2007)[19]通过对柱坐标下无限半空间中TE模式的电磁波方程的模拟,对其做了比较详细的分析,如图4所示。其中,蓝色线表示无限全空间Wu-King类型偶极天线辐射花样,红色线表示

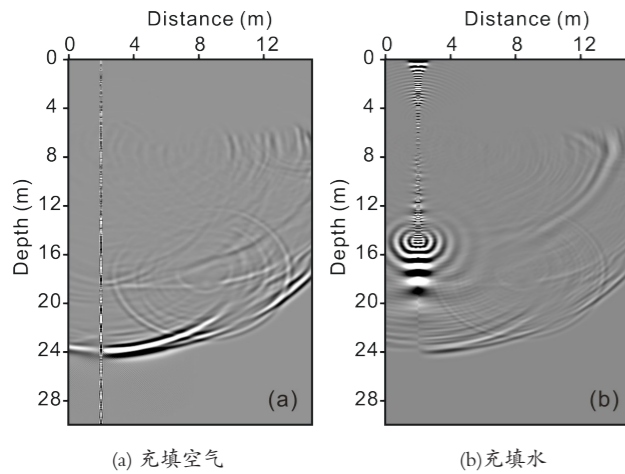


图3 套管中不同充填物且传播时长为240ns时雷达波场快照
无限半空间Wu-King类型偶极天线辐射花样，黑色虚线为解析解，辐射花样为散射能量 $\langle S \rangle = E \times H$ 时间平均沿径向方向的分量^[20]。

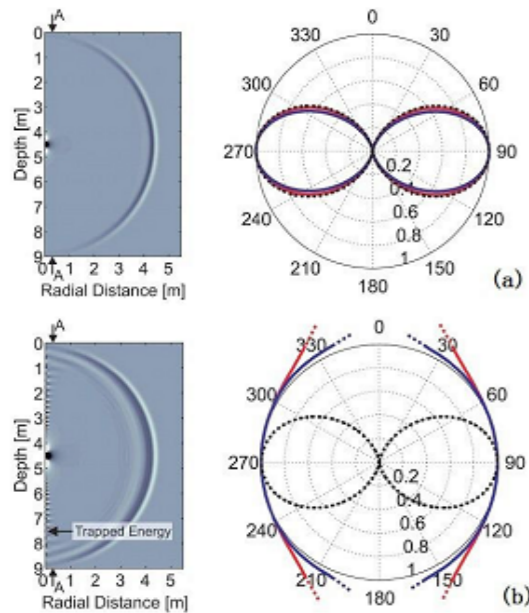


图4 套管中充填不同介质时波场快照和辐射花样（自Ernst (2007)^[19]）

从图中可以看出，套管中充填空气时，电磁波的能量主要集中在 $60 \sim 120^\circ$ 和 $240 \sim 300^\circ$ 范围内；而套管中充填水时，电磁波沿套管形成导波，主要能量汇集在套管内，并形成二次源散射到周围介质中。对于固定收发距的单孔天线来说，接收到的信号主要为导波能量，在辐射花样上表现为更宽的能量分布范围。对于距离套管较远的反射体，则会因为反射能量太弱在雷达剖面上不能呈现或淹没在导波造成的干扰中。

如图5(b)所示，相比于空气充填套管，雷达波在微风化球B处的绕射在水充填套管情况下更弱，其反射在雷达剖面上也更不明显。一方面是由于水的存在屏蔽了大部分能量的出射造成异常体反射能量的减弱，另一方面则是因为近管壁导波的干扰，这一干扰频率同有效反射信号，很难直接通过带通滤波方法从雷达反射剖面上去除掉。

未经滤波处理前，雷达波在空气套管中频率不损失，能经过多次管壁反射到达接收天线。由于其延续周期长，且幅度较大，各个到时都有，很难从雷达反射剖面上直接看到微风化球反射（如图5(a)）。根据充填空气套管中雷达波这一特点，经过简单的低通滤波，就可将空气充填套管中雷达波多次反射滤除干净，得到与无套管时一致的雷达图像（如图5(c)）。但是，充水套管却不尽然，套管中的水衰减了雷达波部分能量，使得无论滤波前后微风化球状孤石在雷达剖面上的反射都很弱（如图5(d)），通过指数增益也无法有效提高。

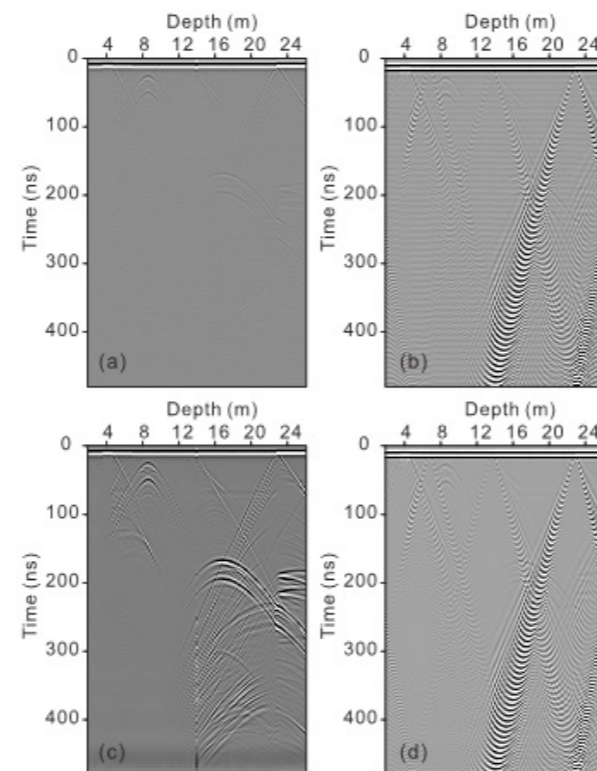


图5 套管不同充填物情况下滤波前后钻孔雷达反射剖面上的特征响应

(a)和(b)为低滤波前；(c)和(d)为低滤波后。
其中：(a)和(c)的套管中充填空气；
(b)和(d)套管中充填水。
所有反射剖面均经过指数增益。

3 场地试验

通过对补勘资料分析，结合详勘资料成果我们知道，东莞地铁某标段盾构法施工段隧道穿越冲洪积软土层、砂层，且局部基岩面突起，残积层、全风化岩中有球状风化体发育。图6为某钻孔地质取芯试样，从上到下分别为 $0 \sim 5.2$ m的素填土、 $5.2 \sim 12.6$ m的淤泥质粉质粘性土、 $12.6 \sim 15.0$ m的砂质粘性土、 $15.0 \sim 20.0$ m的混合片麻岩，其中 $18.6 \sim 20.0$ m处呈微风化状。



图6 补勘钻孔芯样

为确定孤石发育方位，随后在距离孤石3m位置进行了加密钻孔，同一深度未发现微风化球。后经跨孔超高密度电法确证了其发育方向，如图12反演的电阻率剖面所示。为进一步验证钻孔地质雷达效果，在既有补勘钻孔中用地质雷达做全方位扫描，处理后的反射剖面如图12所示。结合取芯结果分析，由于钻孔位置处于道路中间绿化带，素填土层较为疏松且潮湿含水丰富，对雷达波吸收影响较大。 5 m处素填土层和淤泥质粉质粘性土层界面清晰，中间淤泥层存在多次反射，且幅度大，较易分辨，夹杂类抛物线反射，对应于电阻率剖面同一深度 $1200 \Omega \cdot m$ 处的高阻。这一反射直至 13 m结束，和取芯结果对应较好。 $12.6 \sim 15.0$ m砂质粘性土含水丰富，且该地层较为均匀，导致在雷达剖面上未见异常反射。底层两个反射对应孤石的上下表面，从图上拾取深度可以看出钻头在孤石上从 17.5 m深度进入从 20.0 m深度穿出，与地质取芯结果一致。

4 结论

地下水富集增加了土壤介电常数和电导率，使得钻孔地质雷达探测井壁周围微风化球状孤石等不良地质体范围受到较大影响。为了防止井壁坍塌，我们还考虑了实际测量过程中所下PVC套管中充填

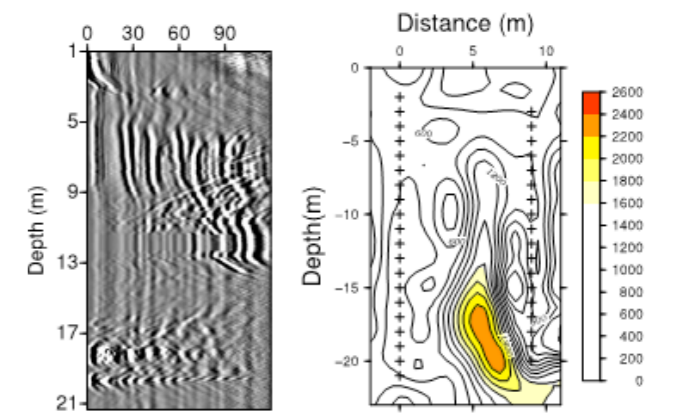


图7 井中雷达和跨孔超高密度电法探测结果

物对测量结果的影响。从模拟结果看，套管中充填空气的效果对整个测量效果影响不大，充填水使得微风化球状孤石反射的电磁波回到地质雷达天线的幅度降低，识别困难加大。从实际探测结果看，只要满足地质雷达天线在富水地层的探测范围，微风化球状孤石在地质雷达剖面上均有较好的反应，可作为钻孔周边判断有无孤石的基础。但由于试验钻孔地质雷达天线为非极化天线具有无方向性的特点，探测出来的微风化球状孤石只能确定其与井壁的距离，要确定其空间位置，需要佐以其他物探手段（如电磁波跨孔CT或者超高密度电法跨孔CT等）来定量分析微风化球状孤石的空间分布。钻孔地质雷达和跨孔超高密度电法联合探测在深圳地铁和东莞地铁微风化球状孤石的探测上已取得初步成功，预示着进一步进行理论深化和实践研究将作为盾构区间孤石探测的一条有效途径。

参考文献

- [1] David J. Daniels. Ground penetrating radar—2nd edition[M]. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2004
- [2] 刘四新, 曾昭发, 徐波. 利用钻孔雷达探测地下水裂隙[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 620~624
- [3] 曾昭发, 刘四新, 冯晖, 等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010
- [4] 陈建胜, 陈从新. 钻孔雷达技术的发展和现状. 地球物理学进展, 2008, 23(5): 1634~1640
- [5] 刘建国. 深圳地铁盾构隧道技术研究与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011
- [6] 王俊茹, 吕继东. 地质雷达在环境地质灾害探测中的应用. 地质与勘探, 2002, 38(3): 70~73
- [7] 刘四新, 佐藤源之. 时间域有限差分(FDTD)对井中雷达的数

- 值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 545~550
- [8]周俊峰, 刘四新, 吴俊军. 跨孔雷达探测地下异常体的数值模拟. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(Suppl.): 147~149
- [9]Liu L B. Fracture characterization using borehole radar: numerical modeling[J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2006, 6: 17~34
- [10]李振辉, 黄清华, 王彦宾. 三维错格时域伪谱法在频散介质井中雷达模拟中的应用[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1915~1922
- [11]Huang Q H, Li Z H, Wang Y B. A parallel 3-D staggered grid pseudospectral time domain method for ground-penetrating radar wave simulation[J]. J. Geophys. Res., 115: B12101
- [12]Johnson C D, Joesten P K. Analysis of borehole-radar reflection data from machiasport, Maine, December 2003[C]. USGS Scientific Investigations Report 2005-5087, 2005
- [13]龙桂华, 深圳市盾构隧道地质超前预报技术研究[D]. 博士后研究报告, 2013
- [14]Chew W C, Weedon W H. A 3-D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates[J]. IEEE Microwave and Optical Technology Letters, 1994, 7: 599~604
- [15]Gedney S. The perfectly matched layer absorbing medium. In: Taflove, A. (Ed.), Advances in Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method[M]. Artech House, Norwood, MA, 1998, pp. 263-343
- [16]Kuzuoglu M, Mittra R. Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1996, 6: 447-449
- [17]Roden J, Gedney S. Convolution PML (CPML): an efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media[J]. IEEE Microwave and Optical Technology Letters, 2000, 27: 334-339
- [18]Irving J, Knight R. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 1247-1258
- [19]Ernst J R. 2-D finite-difference time-domain full-waveform inversion of crosshole georadar data[D]. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007
- [20]Lampe B, Holliger K. Resistively loaded antennas for ground-penetrating radar: A modeling approach[J]. Geophysics, 2005, 70: K23-K32

征稿通知

本刊为深圳市天健(集团)股份有限公司学术性科技期刊。旨在促进学科理论和实践的发展、促进行业内学术交流、加速科研成果向现实生产力转化。欢迎同行企事业单位积极投稿。

来稿应符合科技论文写作惯例和基本要求, 理论和技术观点明确、数据准确可靠、内容充实、结构严谨、文字简明扼要、通顺易懂。作者自留底稿, 并优先采取电子邮件投稿(liuyixuan.tagen@qq.com), 如有不明事项, 请通过电话联系(刘艾轩: 0755-83541874,18025402121), 确认投稿相关信息。

应用研究

大掺量的厂拌热再生沥青路面设计与施工实例研究

江建¹ 刘涛^{1,2}

(1. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 深圳 518033; 2. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要 本文改进了沥青回收的方法, 包括采用油浴加热方式、持续加热时间的标准化和空白沥青标定。提出了考虑沥青粘附与设备误差的集料有效密度测量方法; 以体积法设计大掺量的厂拌热再生沥青路面, 并进行了使用性能验证, 为工程界提供具有可操作性的设计与施工方案。

关键词 厂拌热再生沥青路面; 沥青回收; 集料密度; 大掺量设计

Research on the design and construction of the Hot Mix Recycling Asphalt Pavement

Jiang Jian¹, Liu Tao^{1,2}

(1. Shenzhen Tagen <Group> Co., Ltd., Shenzhen, 518033; 2. College of Transportation engineering at Tong Ji University, Shanghai, 201804)

Abstract: This article improves the recycling work of the used asphalt include oil bath heating method, continuous heating time standardization and blank asphalt calibration. Then enhances the testing accuracy of the density of the aggregate by square up asphalt adheres and equipment error. It designs hot mix recycling asphalt pavement with large amount of admixture using volume method and tests the stability. This article provides a typical design and construction plan of the hot mix recycling asphalt pavement for the engineering field.

Keywords: Factory mix hot recycled asphalt pavement; recycled asphalt pavement; aggregate density; design of large amount of admixture

0 前言

近年来, 我国的沥青路面建设有着长足的发展。随着使用年限的增长, 相当一部分的沥青路面的路用性能将不能满足使用要求, 若对其铣刨并废置填埋, 则会造成较大的环境污染。沥青路面的再生利用技术可以节约资源并显著的降低公路建设成本。厂拌热再生沥青是公认的相对稳定的再生利用技术, 能够为工程界提供及时的和良好性能的道路养护与修复。一般而言, 旧沥青混合料的掺量为10%到30%。应用的范围包括道路路面、机场跑道等。

国内外学者对厂拌热再生沥青路面技术进行了大量的研究, 朱成、徐伟等借助红外光谱和扫描电镜技术研究了新旧沥青胶浆的融合状态, 并阐述了厂拌热再生沥青混合料的配合比设计过程, 旧回收料掺量达到30%, 并进行了高低温性能、水稳定性等指标的验证^[1]。方杨、刘宇以国内高速公路工程为依托, 采用车辙试验、GTM设计方法和单轴贯入试验, 评价了AC-25和AC-20型的厂拌热再生沥青混合料的高温稳定性, 发现混合沥青针入度与混合料动稳定性具有良好的相关关系^[2]。杨成对旧沥青混合料的掺量比例对其路用性能的影响进行了

研究,随着掺量的增加,其抗车辙性能逐渐提高,而低温性能、抗水损害性能和抗疲劳性能则会下降^[3]。王真、黄文婷对比研究了温拌再生沥青混合料与热拌沥青混合料在疲劳性能、高温性能、低温性能和水稳定性的对比关系,确定了旧混合料的最优掺配比例^[4]。马煜纓研究了掺加纤维后的再生沥青混合料的压实特性,分析了纤维种类、纤维掺量和旧回收料对再生沥青混合料的作用机理^[5]。陈强对再生集料用于半刚性基层进行了研究,提出了三阶段设计方法,明确了再生集料的半刚性基层沥青路面结构层的路面使用状况^[6]。Prashant Shirodkar提供了一个新的方法用来确定高掺量的厂拌热再生沥青混合料中新旧材料的局部混合程度,可以更为准确的决定旧回收料在厂拌热再生沥青路面中的比例^[7]。Gonzalo Valdés研究了RAP高掺量的沥青混合料的行为特征,分析了旧回收料的变化性对设计工作的影响,通过合理的量化和处理旧回收料掺量可以很好的将其融入再生沥青混合料^[8]。RK Veeraragavan曾经在实验室对掺有旧回收料的沥青混合料的力学性能进行研究,包括线性粘弹性行为和疲劳性能,采用专用设备和六个不同疲劳试验标准分析测试结果,提供了旧沥青混合料的不同掺量对其力学性能的影响量化指标^[9]。Kai Su研究了在飞机跑道上使用再生沥青混合料的可能性,提出了旧回收料掺加比例的限制,主要是由于疲劳性能不满足要求^[10]。Clara Celauro提出通过控制旧回收料的均匀性和掺加足够的具有良好流变学特征的沥青能够生产出具有良好使用性能的沥青路面^[11]。Joel R. M分析了不同生产条件下的再生沥青混合料的质量状况,认为设计环节至关重要^[12]。

厂拌热再生沥青路面作为多工序、单一工业产品,其质量必定受到多种因素的影响:旧回收料(又称RAP材料、旧沥青混合料,英文全称为 Reclaimed Asphalt Pavement)、新集料、沥青、设计方法、拌合工艺、运输、摊铺、碾压、自然环境等。为了提高厂拌热再生沥青路面的设计与施工质量可靠性,本文指出了沥青回收试验、集料密度试验的具体方法,并设计旧回收料产量比例为50%的沥青混合料,提出了施工技术要点,具有较为明显的方法创新性和工程实用性。

1 改进的旧沥青回收工艺

在进行厂拌热再生沥青路面设计时,需要明确旧沥青的路用性能,进而为新旧沥青掺配比例和选用

新沥青等级提供基础数据。目前,常用的沥青回收试验方法为阿普森法,主要是通过蒸发溶剂(三氯乙烯等)来回收沥青,仪器简单,价格低廉,其主要问题是溶剂不能彻底清除。采用油浴加热代替加热套加热,可以提高清除效率。同时,采用空白沥青标定的方法来明确回收溶剂对沥青性能的影响,比较原状沥青与回收沥青的针入度等指标差异。

表1 空白沥青标定试验

| 项目名称 | 密度 (g/cm ³) | 针入度 (0.1mm) | 软化点 (°C) | 60℃粘度 (Pa·s) |
|------|-------------------------|-------------|----------|--------------|
| 空白沥青 | 1.027 | 75 | 47.3 | 191 |
| 回收沥青 | 1.022 | 93 | 47.8 | 156 |

由表1可知,与原状沥青相比,回收沥青的针入度偏大、软化点较低、密度减少、粘度降低。说明三氯乙烯溶剂没有完全蒸发。

针对以上问题,改进了试验步骤,适当延长加热时间,检查二氧化碳通气量是否充足。最佳的持续加热时间为25分钟到30分钟,沥青质量与溶剂质量比值为1:6,选取两个不同的试验人员和设备,进行了对比试验。

表2 沥青回收试验针入度值比较

| 编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|----|----|---|----|----|---|
| 针入度(1) 0.1mm | 12 | 19 | 7 | 7 | 17 | 8 |
| 针入度(2) 0.1mm | 12 | 20 | 8 | 14 | 19 | 9 |

由表2可知,在持续加热时间为25分钟,保证二氧化碳通气量的稳定和持续条件下。两个试验的结果较为类似,其中,编号为4的沥青试验出现了测量误差,可见,该方法有效可靠的,推荐采用以上方法进行沥青回收试验。

2 集料有效密度试验

沥青路面是由沥青胶浆、集料和空气等组分构成。不同规格的集料级配在一定范围内波动,这就使得目标配合比与生产配合比之间存在差异。换言之,集料的级配波动和质量不稳定是造成沥青路面施工质量控制困难的重要因素之一。同时,旧回收料的来源、沥青含量、原材料质量要比新集料更加复杂,因此,又进一步加大了再生沥青混合料的质量控制难度。

对于厂拌热再生沥青混合料的设计过程而言,其设计标准由空隙率V、沥青饱和度VFA和集料间隙率VMA三部分组成。众所周知,空隙率V的测量与评定方法已经较为成熟。确定空隙率V后,若能确定集料间隙率VMA,就可以获得沥青饱和度VFA,后者又是决定沥青用量的关键因素。可见,沥青饱和度VFA是依存于集料间隙率VMA的。而旧回收料的集料密度对集料间隙率VMA的计算有着重要影响。

总之,集料有效密度(用 ρ_e 表示)是准确设计沥青用量的关键参数,也是沥青混合料体积设计方法的基本指标。所谓的集料有效密度是指在规定的条件下集料的单位有效体积的质量。有效体积为集料的闭口孔隙、未被填充的开口孔隙和实体体积。

计算过程如下:

$$\rho_e = \frac{m_s}{v_e} = \frac{m_s}{v_s + v_n + v_{ie}} \quad \text{公式1}$$

式中: m_s ——集料的实体质量(等价于集料质量 $m=m_s$);

v_s ——集料的实体体积;

v_n ——集料的闭口孔隙体积;

v_{ie} ——集料表面未被填充的开口孔隙体积。

上述试验方法用于厂拌热再生沥青路面设计具有一定的局限性,这是由于旧回收料存在的粘附沥青会对集料间隙率(VMA)的测量产生重要影响,在进行测量试验时,旧回收料在使用三氯乙烯进行溶解后,集料表面的粘附沥青基本可以去除。可是,由于三氯乙烯几乎不溶于水,会使得处理后的集料吸水率下降很大,进而会造成集料的毛体积密度测量出现误差。这也是困扰工程界的难题之一。

本文论述了一种集料有效密度测量的改进方法,主要试验步骤为:1)在25℃条件下,测量沥青的相对密度;2)对容器+钢制搅拌勺的空中质量和水中质量进行测量,分别记为 m_1 和 m_1' ;3)选取有代表性的各档粒径集料1200g左右,称量其烘干后的重量 m ,然后,和搅拌勺一起加热至160℃。4)取两份沥青,分别加热至160℃和120℃。5)取出装有集料的容器置于加热电炉上,滴入160℃的沥青5g,用钢勺搅拌均匀,重复5次左右,直到沥青搅拌均匀、无花白料和多余沥青沉积在容器底部,钢勺留置在容器内;6)在室温条件下将沥青混合料温度降至120℃,加入大量温度为120℃的沥青,均匀搅拌3分钟,用吹风机将气泡清除干净;7)冷却至室温,测量沥青混合料试样(沥青+集

料)+容器+搅拌钢勺的空中质量 M ;8)在水中恒重2小时,测量沥青混合料试样(沥青+集料)+容器+搅拌钢勺的水中质量 M' ;集料有效密度的改进计算方法如下:

$$\rho_e = \frac{m}{\frac{(M-m_1) - (M' - m_1')}{\rho_w} - \frac{M - m_1 - m}{\rho_b}} \quad \text{公式2}$$

式中: ρ_w ——25℃条件下水的密度;

ρ_b ——25℃条件下沥青相对水的密度。

(10)按下式计算改进后的集料毛体积密度:

$$\rho_{sb} = \frac{m}{(M - M') - (m_2 - m_2')} \quad \text{公式3}$$

式中: m_2 ——沥青+容器+搅拌钢勺的空中质量;

m_2' ——沥青+容器+搅拌钢勺的水中质量。

在上述试验方法中,分次、分温度(160℃和120℃)加入沥青,是为了确保气体的顺利排出,保证流动性,减少试验步骤,降低系统性误差。试验结果如表4所示。

表4 沥青混合料最大理论密度实测结果对比

| 试验方法 | 最大理论密度 (g/cm ³) | |
|-----------|-----------------------------|-------|
| | A 混合料 | B混合料 |
| 真空法(实测) | 2.74 | 2.548 |
| 表干法(常规) | 2.726 | 2.58 |
| 改进的密度试验方法 | 2.736 | 2.54 |

采用真空法测量的集料有效密度更为接近真实值,能够最大限度的将集料表面和开口孔隙中的空气抽除干净。因此,可将其作为基准值。以A混合料为例,其真空法测得的最大理论密度为2.74 g/cm³,表干法测得的最大理论密度为2.726 g/cm³,相差了0.014 g/cm³,改进后的密度试验方法测得值为2.736 g/cm³,可见,与真空法实测值更为接近。需要说明的是,改进后的密度试验方法适用于多孔隙或少孔隙的各种集料类型。这样,也就从原理上保证了厂拌热再生沥青混合料设计的科学性与合理性。

3 大掺量的厂拌热再生沥青路面设计

本文以马歇尔设计方法进行了大掺量(旧回收料)的厂拌热再生沥青混合料的配合比设计,近十年来,在原理和操作方法上并没有大的改变和

突破，更多的是关注设计方法的精细性和流程正确等。其设计步骤为：1) 选取有代表性的旧沥青混合料；2) 实试验室分析。确定旧沥青混合料的组成与性能，新旧沥青混合料的掺配比例，选择新沥青、新集料，在试验室试配、拌和、压实与性能验证。

表5 集料的筛分试验结果

| 集料类型 | 方孔筛的通过率 (%) | | | | | | | | | | | | |
|------|-------------|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|-------|
| | 31.5 | 26.5 | 19 | 16 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 1号 | 100 | 55.6 | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2号 | 100 | 100 | 83 | 64 | 22 | 2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 3号 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 48 | 3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 4号 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 61 | 3 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| 5号 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 98 | 66 | 45 | 28 | 13 | 9 | 5 |
| 粗铣刨料 | 100 | 100 | 96 | 89 | 76 | 28 | 11 | 9 | 7.2 | 6.1 | 5 | 3.5 | 2 |
| 细铣刨料 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 83 | 64 | 49 | 38 | 28 | 16 | 11 |

粗铣刨料和细铣刨料的油石比分别为1.8%和6.2%，采用改进的有效密度试验方法测量其毛体积密度，对于粗铣刨料，粒径大于4.75mm的旧回收料有效密度为2.71 g/cm³，粒径小于4.75mm的旧回收料有效密度为2.714 g/cm³。对于细铣刨料，粒径大于4.75mm的旧回收料有效密度为2.723 g/cm³，粒径

表6 AC-25型（旧回收料掺量50%）沥青混合料级配结果

| 级配类型 | 通过下列筛孔（方孔筛，mm）的质量百分率 (%) | | | | | | | | | | | | |
|------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|
| | 31.5 | 26.5 | 19.0 | 16.0 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 设计级配 | 100 | 96.0 | 84.6 | 80.3 | 74.3 | 61.5 | 38.1 | 23.3 | 17.1 | 14.0 | 9.7 | 7.5 | 5.4 |

对成型后的沥青混合料试样进行体积指标测定，试验结果均能满足技术要求。测得的马歇尔残留稳定度为89%（技术要求为大于80%），冻融劈裂试验结果为86%（技术要求为大于75%），动稳定度试验结果为2132次/mm（技术要求为大于1000）。

4 厂拌热再生沥青路面施工

与普通热拌沥青混合料有所不同，厂拌热再生沥青路面有以下关键技术需要加以控制。

3) 确定厂拌热再生沥青混合料的最佳配合比。

沥青为AH-70（密度为1.05 g/cm³），新集料为石灰岩。1号、2号、3号、4号和5号集料的毛体积密度分别为2.691 g/cm³，2.69 g/cm³，2.688 g/cm³，2.66 g/cm³和2.649 g/cm³。

小于4.75mm的旧回收料有效密度为2.729 g/cm³。

通过对掺加旧回收料的沥青混合料进行试配，得到表6的级配，对应的生产配合比为：1号集料、2号集料、3号集料、4号集料、5号集料、粗铣刨料、细铣刨料的百分比分别为15、11、7、12、5、25、25。油石比为3.8%。

旧沥青混合料的破碎与筛分：本文按尺寸进行分级，采用10mm×10mm的振动筛将旧沥青混合料筛分成粗细两部分。这样就能保证生产级配能够得到有效的控制。

旧沥青混合料的储存：堆放在坚硬的场地上，具有良好的排水、防雨和通风条件，禁止明火并远离易燃物品。并采取放置二次硬化现象的堆放措施，材料堆高不超过2m，在进料仓中增加破拱装

表7 沥青混合料体积性质指标

| 沥青混合料指标 | 试验结果 | 技术要求 |
|---------------|-------|---------|
| 毛体积相对密度 | 2.451 | / |
| 最大理论相对密度（真空法） | 2.553 | / |
| 空隙率VV (%) | 4.00 | 3.0~6.0 |
| 矿料间隙率VMA (%) | 12.6 | ≥12.01 |
| 饱和度VFA (%) | 68.1 | 65~75 |
| 稳定度 (kN) | 12.8 | ≥8 |
| 流值 (0.1mm) | 35 | 15~40 |

置，在拌合结束后将旧沥青混合料材料仓放空。

拌制：采用独立的旧沥青混合料加热装置，当旧沥青混合料经过加热进入拌缸后，先和热的新集料搅拌一段时间（10秒钟），然后，对旧沥青混

合料进行二次提温，再加入新沥青，搅拌30到45秒钟。质量要求为无花白料、搅拌均匀等，总体拌合时间要比普通热拌沥青混合料延长20秒钟左右。

表8 厂拌热再生沥青混合料的施工温度

| | | |
|-------------|------------------------|---------|
| 新沥青的加热温度 | 165-175℃ | |
| 旧回收料的加热温度 | 65-85℃ | |
| 沥青混合料的出厂温度 | 正常范围155-170℃，严禁超过190℃。 | |
| 沥青混合料到达现场温度 | 不低于150℃ | |
| 摊铺温度 | 正常条件 | 不低于145℃ |
| | 低温条件 | 不低于155℃ |
| 开始碾压内部温度 | 正常条件 | 不低于135℃ |
| | 低温条件 | 不低于150℃ |
| 碾压终了表面温度 | 不低于75℃ | |

运输：除了严格按照规范和技术标准控制各个环节的温度外，对于出厂温度和到场温度可比普通热拌沥青混合料高5-15℃，一般控制在155-170℃，运输车辆在出料口处接收沥青混合料时，应采用分堆装料的方式，注意前后移动，以避免离析。同时，需要使沥青混合料的生产量充足，确保施工现场的连续性。

保温：为使厂拌热再生沥青混合料的到场温度合格，应有良好的保温措施（篷布覆盖等），卸料过程中继续覆盖直到卸料结束取走篷布，避免污染

环境。

摊铺：摊铺过程中运输车辆禁止撞击摊铺机，卸料时运输车辆需要挂空档，由摊铺机推动前进，这样，就可以提高铺筑后沥青路面的平整度。

碾压：检查松铺厚度，摊铺前熨平板预热至规定温度，且拼接良好，无缝隙，摊铺速度、碾压工艺、找平、纵横施工缝由试验段确定。

5 结论

本文通过对厂拌热再生沥青路面全过程设计与施工的研究，在对旧沥青回收、集料密度测量进行

改进的基础上,进行了旧回收料大掺量的再生沥青混合料设计研究,结论如下:

(1) 针对沥青回收方法对其性能和新旧沥青混合比例有着重要影响,采用空白沥青标定、规范加热方式与时间,能够提供较为稳定的试验结果。

(2) 为了准确测量集料的有效密度,采用考虑试验设备的密度测量方法,并给出了计算公式,通过与真空法对比,改进后的密度测量结果与实测值更为接近。

(3) 设计了旧回收料掺量比例为50%的厂拌热再生沥青混合料,明确了相应的级配、油石比、设计控制指标和体积指标,经过性能试验证明可以满足实际工程要求。

(4) 阐述了厂拌热再生沥青路面的施工要点,包括旧沥青回收料的破碎和筛分、储存、拌和、温度控制、运输、保温、摊铺和碾压等关键环节。

参考文献:

- [1]朱成. 高比例 RAP 热再生沥青混合料性能试验研究. 广州, 华南理工大学硕士论文 2012.
- [2]方杨, 刘宇, 张国民. 高掺量 RAP 厂拌热再生混合料高温稳定性能研究. 公路, 2013 (4): 99-102.
- [3]杨成. RAP 掺量对再生沥青及再生沥青混合料性能的影响. 公路工程, 2016, 41(6): 299-302.
- [4]王真, 黄文婷, 李振, 等. 温拌再生沥青混合料性能的试验研究. 科学技术与工程, 2014 (1): 273-276.
- [5]马煜纓. 纤维加强再生沥青混合料的压实特性研究. 科学技术与工程, 2014 (8): 256-259.
- [6]陈强, 吴文亮, 王端宜, 等. 耐久性再生集料半刚性基层沥

青路面三阶段结构设计. 科学技术与工程, 2014 (2): 247-251.

- [7]Shirodkar P, Mehta Y, Nolan A, et al. A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 150-155.
- [8]Valdés G, Pérez-Jiménez F, Miró R, et al. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1289-1297.
- [9]Veeraragavan R K, Mallick R B, Tao M, et al. Laboratory Comparison of Rejuvenated 50 Percent Reclaimed Asphalt Pavement and Hot-Mix Asphalt with Conventional 20 Percent RAP Mix. 2017.
- [10]Su K, Hachiya Y, Maekawa R. Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 54(1): 37-44.
- [11]Su K, Hachiya Y, Maekawa R. Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 54(1): 37-44.
- [12]Celauro C, Bernardo C, Gabriele B. Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(6): 337-347.

应用研究

节段预制拼装UHPC桥梁发展现状与应用前景

李有志¹、高钟伟²、任勇²、李立峰³

(1. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 深圳518033; 2. 深圳市市政工程总公司, 深圳 518034, 3. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

【摘要】 节段预制拼装UHPC桥梁综合了最新节段预制拼装施工技术和最新UHPC材料技术, 具有结构更轻薄、施工更便捷、更具安全性和全寿命更长久等特点, 近年来引起了更多的关注和应用。为了对节段预制拼装UHPC桥梁的发展现状与应用前景有一个更深入的认识, 本文主要介绍了节段预制拼装技术的应用和发展状况和UHPC的材料力学性能; 并阐述了节段预制拼装UHPC桥梁在应用过程中的几个关键技术: 材料选择与配比、结构体系选择、接缝构造及抗剪性能、节段预制梁的抗弯和抗剪性能进行了介绍和探讨; 文中最后对节段预制拼装UHPC桥梁的发展前景进行了分析, 在我国大力发展装配式建筑的环境下, 节段预制拼装UHPC桥梁值得大力推广和应用。

【关键词】 UHPC; 节段预制拼装; 桥梁工程; 关键技术; 前景分析

Development Status and Prospect Analysis of Precast UHPC segmental Bridges

Li Youzhi¹, Gao Zhongwei², Ren Yong², Li Lifeng³

(1. Shenzhen Tagen <Group> Co., Ltd., Shenzhen, 518033; 2. Shenzhen Municipal Engineering Corporation, Shenzhen, Guangdong, 518034 ; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: Precast UHPC segmental bridges have combined the latest construction techniques of segmental bridges with the latest UHPC material technology. They have lighter structural weight, more convenient and safe construction process and longer service life. Therefore, they have a widely application in recent years. In order to have a deeper understanding of the development and application of this kind of bridges, the application status of precast segmental technology and the material properties of UHPC are introduced in this paper. Then, several critical technologies of this kind of bridges, include material selection and proportion, structural scheme, bending performance, joint structure and shear resistance are introduced and discussed. At last, the development prospects of this kind of bridges are analyzed. The result shows that the precast UHPC segmental bridges should be promotion and application with the fast development of prefabricated buildings in China.

Keywords: UHPC; precast segmental bridges; bridge engineering; critical technology; prospect analysis

0 概述

经过30年大规模的基础设施建设,桥梁数量、跨径和类型跃居世界前列,建设成就斐然。但现有桥梁建设在资源消耗、环境保护、使用寿命以及安全可靠等方面尚存在诸多亟待解决的问题,而这已成为我国桥梁工程发展面临的重要挑战。随着城

镇率的提高和国民经济的飞速发展,桥梁建设依然存在巨大的发展空间和社会需求,如何突破现有技术限制和资源环境瓶颈,是桥梁工作者面临的难题。

预制拼装施工技术在加快施工进度、大幅提高工程质量等方面具有突出优点,是我国桥梁发

展的一个重要方向，并且装配式建筑是我国建筑业“十三五”期间转型升级与战略性新兴产业方向。2016年9月国务院总理李克强主持召开国务院常务会议，决定大力发展装配式建筑；同月国务院发布《关于大力发展装配式建筑的指导意见》。国务院相关文件提出争取用10年左右时间，使装配式建筑占新建建筑的比例由2015年的2%-3%达到30%。2018年3月，深圳市发布了《深圳市装配式建筑发展专项规划（2018-2020）》，文中指出到2020年，全市装配式建筑占新建建筑面积的比例达到30%以上；到2025年，全市装配式建筑占新建建筑面积的比例达到50%以上，装配式建筑成为深圳主要建设模式之一。到2035年，全市装配式建筑占新建建筑面积的比例力争达到70%以上，建成国际水准、领跑全国的装配式建筑示范城市。目前，预制拼装技术（主要是上部结构）在常规混凝土桥梁上应用较多，特别是国外，且设计理论成熟；在国内，钢混组合结构应用非常普遍。

但在目前，普遍应用的高强混凝土存在自重大、抗拉强度低等不足，而超高性能混凝土（Ultra-high Performance Concrete, UHPC）具有超高抗压和抗拉强度、超高韧性、超高耐久性等突出优点，可大幅减小结构尺寸、降低结构自重，且水胶比低，显著降低对水泥用量的需求并降低CO₂的排放。以上诸多优点使UHPC材料技术成为我国桥梁发展的另一个方向。项海帆院士在《世界大桥的未来趋势—2011年伦敦国际桥协会议的启示》中明确指出“未来的大桥应采用高性能、高强度材料，这将是桥梁发展的主要方向”。据统计，到目前为止，国外已修建UHPC桥梁100余座、而国内数量仅2座。当今我国仍处于土木工程大建设时期，随着对节能减排、可持续发展要求的不断提高，对混凝土性能的要求也随之提高，因此，UHPC具有非常广阔的应用前景。

作为一种新型材料，UHPC材料需要通过蒸汽养护以激化材料活性、以期获得更好的超高力学性能，因而难以采用现场浇筑施工。已建UHPC桥梁普遍采用节段预制、现场拼装的施工技术。和常规混凝土桥梁一样，预制UHPC节段之间的接缝由于细部构造、普通钢筋和钢纤维均不连续，其刚度、强度和延性都比临近截面要小，是整个桥梁受力较为薄弱的环节；更为重要的是UHPC构件尺寸小（仅为常规混凝土的1/3左右）、应力水平高，导致某些力

学问题较常规混凝土桥梁更为突出。对节段预制拼装UHPC桥梁展开接缝构造和关键受力性能的研究，将为这类桥梁的发展提供技术保障，对促进我国桥梁技术的进一步发展具有重要的理论意义和推广价值。

1 节段预制拼装技术的应用现状

1.1 国外应用现状

节段预制拼装技术最早由法国预应力之父 Freyssinet 开发，于1945~1948年间采用预制分节段施工方法在马恩河上先后建起5座预应力混凝土梁桥。法国人 Jean Muller 在1954年在设计美国纽约州 Shelton 桥时，首次提出节段预制匹配技术，并采用干接缝进行拼装，同时在1962年设计法国巴黎 Choisy-Le-Roi 桥时，首次使用节段悬臂拼装的方法，并开发出环氧树脂接缝拼装技术。1966年建设的法国 Oleron 海峡大桥，首次用到了上行式移动拼装架桥机进行节段悬臂拼装施工。

20世纪70年代以后，节段预制拼装的施工方法逐渐在全世界普及开来，欧美是这项技术应用的先行者。特别是在80年代，由于体外预应力技术重新焕发生机，节段预制拼装桥梁在欧美得到了广泛的应用，期间建成了节段预制拼装桥梁的成名作 Long Key 桥和 Seven Mile 桥。Long Key 桥长约3.7km，跨径布置为101×35.9m+2×35.6m，得益于预制拼装和体外预应力技术，此桥施工速度达到了每星期2.5跨。

1989年美国成立了节段预制拼装桥梁协会 (ASBI)，并编写了《节段拼装混凝土桥梁设计和施工指导规范》。

2000年，Jean Muller 国际公司和德国 Bilfinger Berger 公司在泰国曼谷建成了世界上最长及最大预制拼装桥梁—曼纳高速公路桥，全长达到55km，由于采用了用短线匹配预制、节段拼装、干接缝和体外预应力技术，建成仅用时26个月。此后，亚洲国家泰国、日本、澳大利亚的许多桥梁采用了节段预制拼装技术。

1.2 国内应用现状

我国预制节段拼装预应力混凝土桥梁的研究与应用始于上个世纪60年代。1965年建成了节段预制悬臂拼装的连续刚构试验桥—盐河公路桥。1966年竣工的成昆铁路旧庄河一号桥采用预制节段悬臂拼装施工法；孙水河4号桥等7座桥采用预制节段逐跨拼装施工法，津浦线子牙河大桥和九江长江大桥

引桥中应用了节段逐跨拼装施工法。1997年石长线湘江铁路大桥是我国首次采用专用移动式拼装支架进行节段悬臂拼装施工。而公路桥梁中最早采用预制节段逐跨拼装施工法是1990年通车的福建洪塘大桥引桥，采用了与 Long Key 桥类似的体外预应力结构。随后在闽江大桥、珠海淇澳大桥、夷陵长江大桥等采用预制节段悬臂拼装施工法，体内束、单键胶接缝。2001年建成的嘉浏高速公路新浏河大桥是我国首次采用专用移动支架实现预制节段逐跨拼装法施工，部分体外束。上海沪闵高架桥二期和北京跨四环高架桥也将采用部分体外束和预制节段逐跨拼装法施工。2008年苏通大桥、厦门集美大桥也都采用了节段拼装施工工艺。近年来，北京、上海、长沙等许多地方采用预制拼装技术修建了大量的桥梁结构。应该说，节段预制拼装技术在我国应用已日趋广泛。

2 UHPC的材料性能及应用现状

UHPC首先在1993年首先由法国研制成功。UHPC不使用粗骨料，基于最大堆积密度理论进行配置（见图2），水胶比低，易于施工，掺加体积比约1~3%的高强钢纤维，是一种具有超高力学性能、超高韧性、超高耐久性的水泥基复合材料，表1是其典型配合比，可以看出其水胶比非常小，一般在0.16~0.2之间。

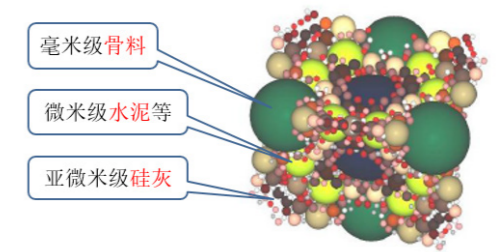


图2 细骨料最大密实度理论级配

表1 典型UHPC配合比（质量比）

| 胶凝材料 | 水胶比 | 砂 | 硅灰 | 石英粉 | 减水剂 | 粉煤灰 | 钢纤维 |
|------|-----------|----------|---------|-----|--------|-----|------|
| 1 | 0.18~0.22 | 0.88~1.1 | 0.2~0.4 | 0.3 | 2.5~3% | 0.2 | 1~3% |

2.1 UHPC的力学性能

UHPC力学性能方面主要指抗压强度、抗拉强度、抗折强度、弹性模量、韧性、应力-应变曲线、极限应变、泊松比、平均断裂能、延性、热膨

胀系数等。目前，关于UHPC的力学性能的研究成果非常多，将成果汇总得到UHPC各力学性能指标，并将其与高性能混凝土（HPC）和普通混凝土（NC）进行对比，如表2所示。

表2 UHPC材料性能

| 材料性能 | UHPC | HPC | NC |
|------------------------------|---------|---------|-----------|
| 抗压强度 (MPa) | 140-200 | 60-100 | 20-50 |
| 抗拉强度 (MPa) | 6-10 | 2.7-3.5 | 1.54-2.64 |
| 抗折强度 (MPa) | 30-60 | 6-10 | 2-5 |
| 弹性模量 (GPa) | 40-70 | 35-40 | 25-35 |
| 泊松比 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 热膨胀系数 (10 ⁻⁵ /°C) | 1-1.5 | 1 | 1 |
| 徐变系数 | 0.2-0.8 | 1.2-2.7 | 1.5-3.3 |
| 总收缩应变 (με) | 900 | - | 310-530 |
| 材料断裂韧性 (kJ·m ⁻²) | 20-40 | 0.14 | 0.12 |

由表中数据可以看到：UHPC的抗压强度可以达到HPC的2-3倍以上；因为掺入了钢纤维，UHPC在初裂后仍能保持抗拉能力，其抗拉强度可以达到普

通混凝土的2-5倍，抗折强度可达5-10倍，材料断裂韧性为30倍左右；热养护后的UHPC的徐变系数可以低至0.2，仅为普通混凝土的1/10左右。相比于

HPC、NC，UHPC具有更佳的力学性能，因此在进行结构设计时，构件尺寸可以大大减小，结构自重也得以大幅度减小（40%以上）。

2.2 UHPC的耐久性性能

根据已有试验研究成果，法国UHPC设计指南对

UHPC的耐久性进行了总结，主要包括透水性、抗氯离子渗透、氧气渗透、抗冻融循环、抗碳化、耐磨性、纤维腐蚀以及耐火性等方面，这些耐久性指标与HPC、NC的对比结果如表3所示。

表3 UHPC耐久性性能

| 耐久性指标 | UHPC | HPC | NC |
|-------------------------------|---------|-------------|-----------|
| 氯离子扩散系数 (m ² /s) | 10-13 | 10-12~10-11 | >10-11 |
| 氧气渗透率 (%) | <10-19 | 10-17 | 10-16 |
| 冻融循环质量损失 (kg/m ²) | 0.005 | 0.12 | 3.12~3.32 |
| 耐磨率 (%) | 1.3-1.7 | 2.8 | 4 |
| 普通钢筋腐蚀速率 (μm/年) <0.01 | 0.25 | 1.2 | |

此外，研究表明：当UHPC的拉应变小于0.0015时，可认为UHPC没有开裂，不透水，对耐久性没有任何影响；UHPC具有极强的抗碳化能力，经受5%或100%二氧化碳气流的UHPC梁，在两年后没有明显的碳化发生；UHPC的耐火性与其配合比有密切联系，Heinz等人研究结果显示，钢纤维掺量3.05%和聚丙烯纤维掺量0.6%的UHPC的耐火性最好。

3 UHPC在桥梁工程中的应用

3.1 UHPC在国内外桥梁工程的应用情况

UHPC作为一种具有超高的力学性能和超高的耐久性能的水泥基复合材料，自研发成功后便引起了桥梁界的极大兴趣和高度重视，并广泛应用于主梁结构、拱桥主拱、华夫板桥面结构、桥梁接缝及

旧桥加固等多方面。据不完全统计，到2016年底为止，世界各国已有超过400座桥梁采用UHPC作为主要或部分建筑材料，超过150座桥梁采用UHPC作为主体结构材料。

图3给出了世界各国采用UHPC作为主要或部分建筑材料的桥梁分布图（不完全统计）。从图可以看出，这些桥梁主要分布在亚洲（东亚、东南亚）、欧洲、北美洲和大洋洲，主要包括马来西亚、中国、日本、韩国、越南、缅甸、法国、德国、瑞士、荷兰、奥地利、捷克共和国、意大利、斯洛文尼亚、西班牙、加拿大、美国、澳大利亚、新西兰等国家。其中马来西亚、美国、加拿大、中国、日本等国家应用UHPC材料的桥梁均在20座以上。

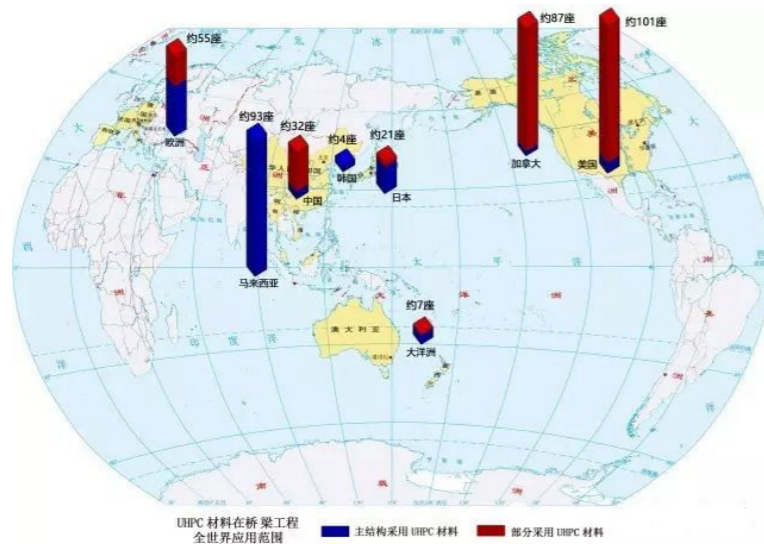


图3 UHPC在国内外桥梁应用情况不完全统计图



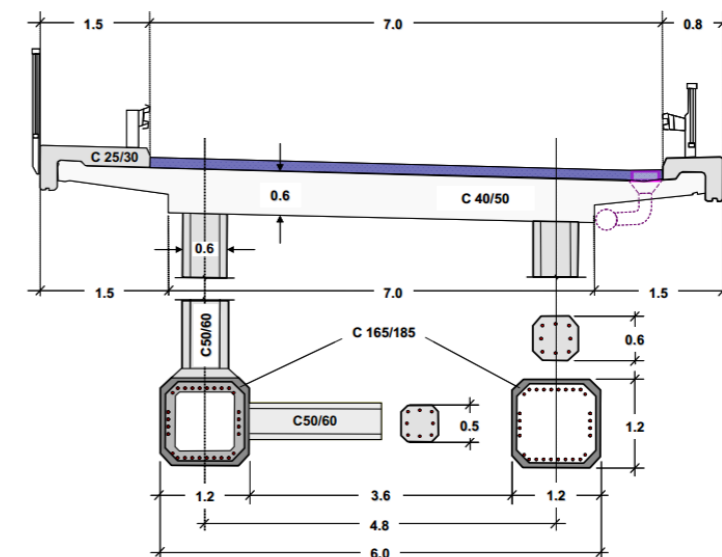
图4 加拿大Shebrooke人行桥



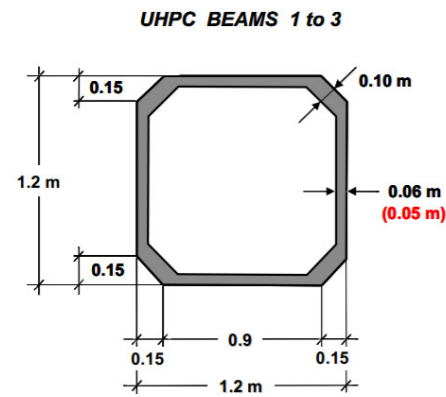
图5 奥地利Wild桥——里程碑意义的桥梁

图4所示的世界上首个UHPC工程——加拿大Shebrooke人行桥。图5所示是奥地利Wild桥Wild桥是一座里程碑式的桥梁，是世界上第一座UHPC公路

拱桥，主拱圈由UHPC构成，主拱圈之外的上部结构由普通混凝土构成，永久荷载作用下的理想拱轴线基本为一个多边形，其截面如图6所示：



(a) 全桥横截面



(b) 空心拱截面

图5 奥地利Wild桥截面图

在UHPC桥梁结构的应用和推广方面，马来西亚目前已经处于世界领先水平，到2016年底已建成93座UHPC桥梁，均为主梁结构采用UHPC材料。北美洲（加拿大和美国）主要将UHPC材料应用于桥梁接缝，约有188座采用UHPC材料的桥梁，其中约有10座为主体结构（主梁）采用UHPC材料，其余178座主要将UHPC应用于桥面板接缝等局部构造。

在中国，目前约有32座桥梁采用了UHPC材料，其中约有5座桥梁主体结构（主梁、拱圈）采用

UHPC材料，其余27座主要用于钢-UHPC轻型组合桥面板结构、现浇接缝、维修加固等方面。

3.2 马来西亚的UHPC桥梁

自2010年，马来西亚建成第一座UHPC桥Kampung Linsum桥以后，UHPC桥梁在马来西亚迅速推广，并取得了举世瞩目的成就。图6分别给出了2010年以来马来西亚UHPC桥梁建成通车的座数和面积变化图。

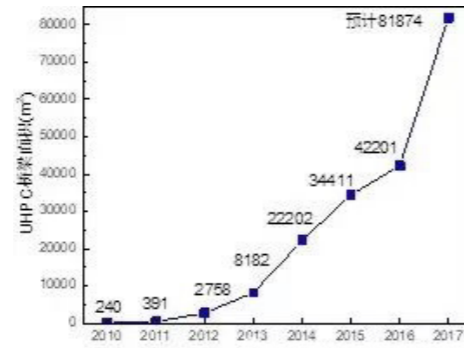
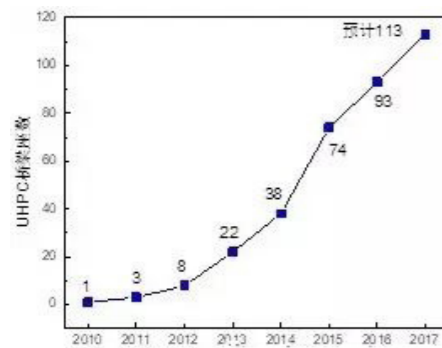


图6 马来西亚历年UHPC桥数量和面积变化图

由图6可以看出，经过2010~2013四年左右的时间，UHPC桥梁在马来西亚逐渐得到认可，进而得到迅速推广，到2016年底建成93座UHPC桥梁。到2017年底，马来西亚建成约113座UHPC桥梁，累计应用面积将突破80000m²，几乎是2010~2016七年应用面积的两倍。

此外，由于节段式梁具有方便运输和吊装的优点，马来西亚已建成的UHPC桥梁中以节段式梁为主，比例达到68%，如图7所示；而整体式梁比例仅

约32%，主要适用于跨径较小的UHPC桥梁。

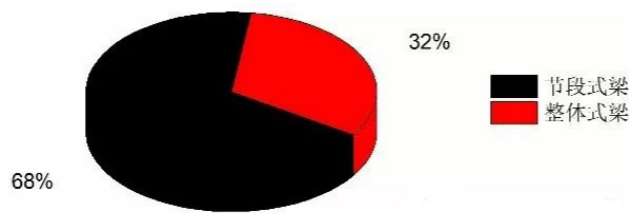
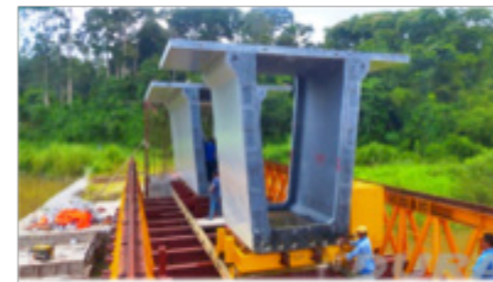


图7 马来西亚UHPC主梁节段式梁与整体式梁比例

3.3 典型全预制拼装UHPC桥梁介绍

2015年建成通车的马来西亚Batu6桥是目前世界上单跨最大的全预制拼装UHPC箱形梁公路桥，

如图8所示，并获得了美国预制、预应力混凝土协会2016年Best International Transportation Structure奖。



(a) 施工中图片

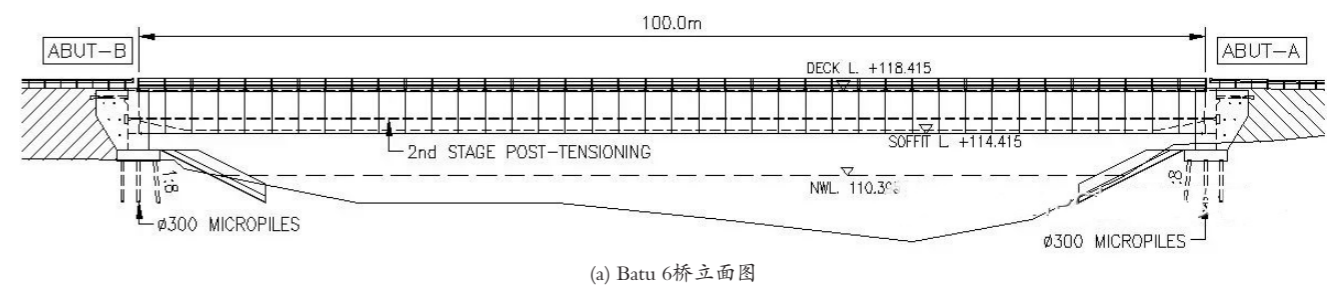


(b) 竣工后图片

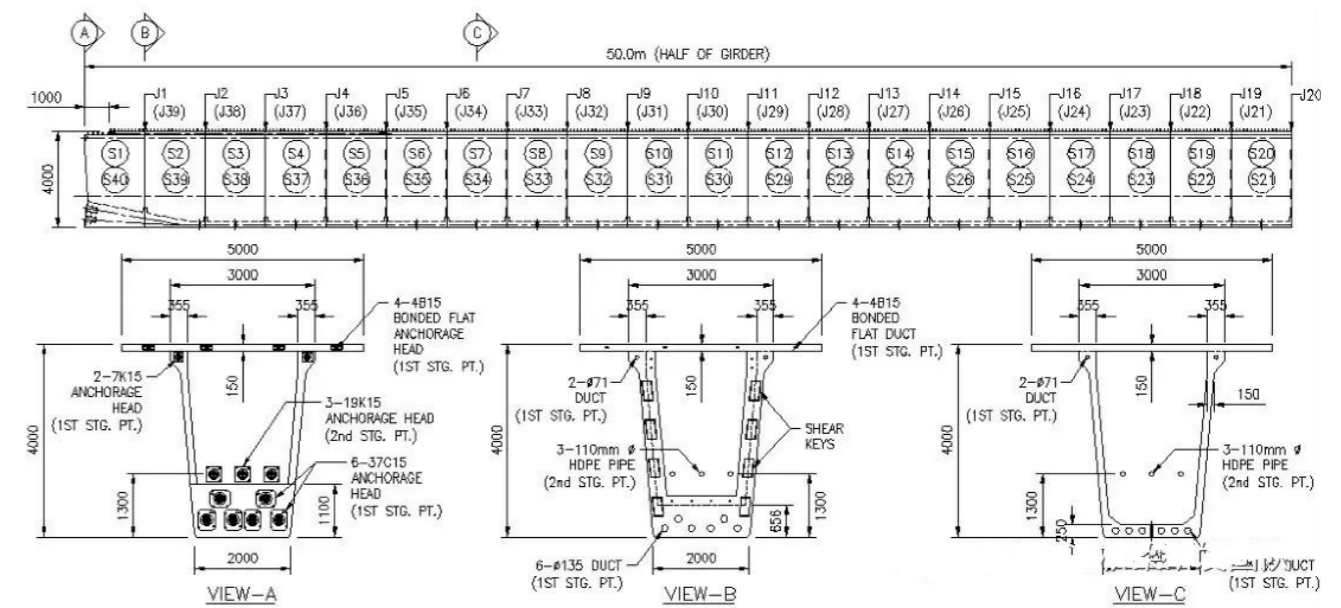
图8 Batu 6桥

Batu6桥单跨100m，桥宽5m，梁高4m，高跨比1/25，顶板厚15cm，底板厚25cm，腹板厚15cm，如图9所示。为便于布置体内束和充分保证腹板与顶板的连接，腹板在顶板相接处加厚至35.5cm。此外，为便于布置腹板和底板剪力键，腹板和底板在接缝附近局部加厚，形成横隔板构造，如图9所

示。全桥分为40个节段，标准节段长2.5m，主梁采用短线预制，长线拼装方法施工，主梁节段在工厂预制，然后运至现场吊装。全桥UHPC主梁重670t，其中标准节段中16.5t。全桥仅设置纵向体内、体外预应力，预应力束分两阶段张拉。



(a) Batu 6桥立面图



(b) 箱梁节段划分及关键断面图

图9 Batu 6桥设计要点

4 节段预制拼装UHPC桥梁关键技术

节段预制UHPC桥梁结合了预制拼装技术和UHPC材料的优势，具有很好的应用前景，可充分利用UHPC材料超高力学性能和耐久性能，实现标准化、快速化生产，可望解决常规混凝土桥梁自重大、结构病害多（主因是常规混凝土的抗拉强度低）、资源消耗大等不足。由于UHPC具有超高强度，构件尺寸明显减小、且应力水平明显高于混凝土结构，明显区别于常规混凝土桥梁结构，在采用预制拼装施工方法时，需要对节段预制UHPC如下的一些关键技术问题进行系统深入的研究：

- (1) UHPC配比与养护（结合当地材料）；
- (2) UHPC梁合理结构布置方案（跨径选择、结构体系选择、截面形式选择、预应力体系选择）
- (3) UHPC节段梁接缝结构与构造布置；
- (4) UHPC接缝结构的抗剪性能研究；
- (4) UHPC整体结构的抗剪与抗弯性能研究。

4.1 UHPC配比与养护

4.1.1 材料选择与配比

UHPC材料在力学性能和耐久性指标等各方面有着如此优异的性能，主要是因为其扬长避短的设计理念 and 合理的配制原理。UHPC各组成材料粒径非常小（mm级），材料配合比不同，UHPC的力学性能也将发生变化，因此应重视UHPC材料的配比问题。此外，UHPC的材料选择与配比还要因地制宜，与当地的实际情况结合起来，在尽量使用当地现有材料的基础上，更具经济优势。另外，还有一个要提及的是，UHPC需要进行蒸汽养护，这样做的目的主要是激活材料活性、使UHPC具有更高强度，还有一个目的就是大幅度减小材料的收缩应变。

4.1.2 蒸养方式

UHPC的力学性能和耐久性与养护方法密切相关。一般而言，UHPC有自然养护、蒸汽养护、蒸压养护和高温热养护等四种养护方法。从UHPC的抗压强度角度来看，这四种养护方法的效果依次为：高温热养护>蒸压养护>蒸汽养护>自然养护。

养护条件对UHPC收缩有至关重要的影响，延长养护时间有利于改善混凝土的收缩性能。大量的研究表明，UHPC蒸汽养护之后几乎不会再产生较大的收缩，即UHPC收缩主要在蒸汽养护阶段基本完成，另外，UHPC材料在蒸汽养护后徐变系数不到常规混凝土的1/5，这一点对预应力结构也是非常有利。

4.2 UHPC梁合理结构方案

4.2.1 结构受力形式

从结构受力体系上看，在已建UHPC桥梁中，基本上全为梁式桥。除此以外，拱桥2座、斜拉桥1座。UHPC桥梁建设数量较多的日本、马来西亚和法国中，基本采用梁式桥，为了减小主梁截面高度，梁底配置大量的预应力筋，保证结构的跨越能力和承载能力。2座UHPC拱桥分别为Wild桥和Seonyu桥。拱桥以受压为主，采用UHPC作为主拱圈材料，能充分利用其超高抗压强度，截面壁厚更薄，Wild桥拱圈厚度仅为5cm，这样主拱圈更加纤细。因此，UHPC拱桥具有很好的发展潜力。唯一建成的UHPC斜拉桥为韩国的Super Bridge I桥。韩国在2000年后提出了一个“超级桥梁200”计划，该计划以UHPC斜拉桥为主要对象，2011年完成了一座主跨200m、边跨90m的三塔四跨斜拉桥（Joba1桥）。从构件受力特点上看，斜拉桥主梁承受较大压力，将UHPC应用于斜拉桥更能发挥其材料优势。

此外，高跨比直接影响结构的承载能力和刚度。对于预应力UHPC梁，可以通过配置足够的预应力筋以及合理的构造措施，保证结构在高跨比很小的情况下具有足够的承载力，因此，其高跨比较预应力普通混凝土梁要小。但是过小的跨高比会使结构刚度降低，影响结构的变形和使用性能，因此，UHPC梁的高度也不宜过小。

图10 统计了全世界范围内已建的41座预应力UHPC公路桥和人行桥的高跨比分布情况，绝大部分在1/20~1/28之间。

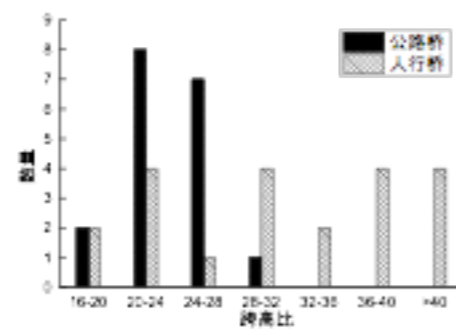


图10 已建UHPC桥梁跨高比分布图

4.2.2 截面形式

从截面形式上看，UHPC桥梁结构主要采用I形、T形、U形、π形和箱形等，如图11所示，其中，I形梁和U形梁多结合普通混凝土板，形成T形和箱型组合截面。

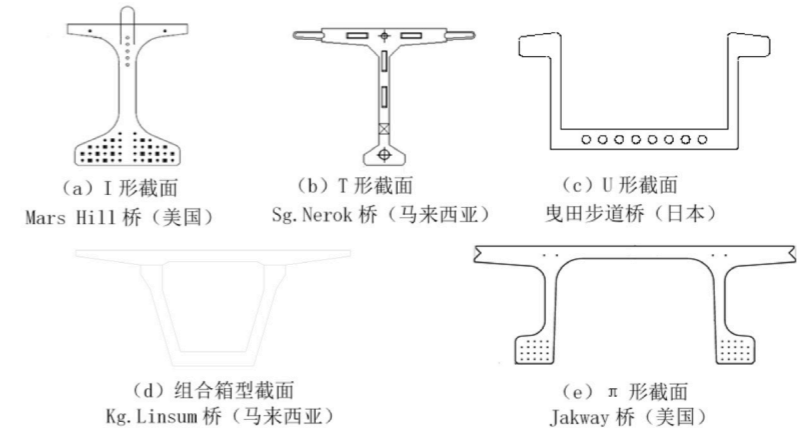


图11 UHPC桥梁常用截面

截面形式的选取与跨径的大小有关：40m跨径以下，基本采用I形和T形截面，40m~60m跨径采用U形截面，更大跨径时宜采用箱型截面，如Batu 6桥。采用I形和U形截面与普通混凝土板形成组合截面，能降低工程造价，为UHPC的推广应用提供优势。UHPC桥梁向大跨发展时，因箱型截面稳定性好，将会是UHPC桥梁的主要截面形式。

4.2.3 配束方式

UHPC桥梁结构轻巧，其预应力配束方式通常有体内束、体外束以及体内体外相结合等方式。特别是体外预应力技术，能够与节段预制拼装技术完美结合，使结构在保留节段拼装的施工速度较快、施工质量较好以及对场地和周边环境影响较小等优势的基础上，同时具备了体外配束方式的一些优势，如无需考虑预埋孔道、维护方便、预应力损失较小等。

很显然，UHPC梁的结构形式选择也是推广应用UHPC材料技术的一个关键。

4.3 预制拼装UHPC梁结构抗弯性能

节段预制拼装UHPC梁与整体浇筑梁的主要区别是节段预制拼装UHPC梁的普通钢筋在接缝处不连续，同时，钢纤维也不连续，但预应力筋（包括体内有粘结筋和体外无粘结筋）与整体浇筑梁一致，这样节段间与接缝处的配筋不一致。结构受力性能在没有开裂前相差不大，开裂后接缝处的裂缝应比节段间的裂缝开展要迅速，进入极限状态后的受力情况应相差较大。预制拼装UHPC桥梁的整体抗弯性能的研究也是关键技术之一。

4.4 预制拼装UHPC接缝结构及抗剪性能

接缝构造形式主要如图12所示，影响其性能的主要因素有接缝类型（干、胶）、接缝表面面积、键数、齿深、齿高等。

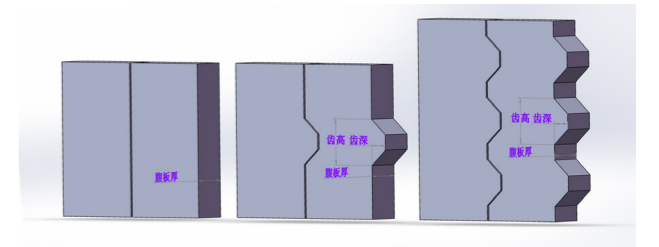


图12 主要的接缝构造布置形式（以矩形截面为例）

4.4.1 接缝的抗剪性能

混凝土抗剪问题非常复杂，抗剪能力和破坏形态与结构布置、材料类型（常规混凝土或UHPC）、剪跨比等多个因素有关，且破坏类型复杂，目前研究主要以试验为主，通过提炼试验结果建立抗剪经验计算公式或者建立抗剪力学模型（主要有拱传力模型和桁架模型等）。当然，基于试验获得的计算公式虽有一定的精确度、但难以解释破坏机理。已有抗剪研究主要集中于整体式常规混凝土桥梁；作为一个新型结构，整体式UHPC桥梁的抗剪研究主要借鉴整体式混凝土梁，同样以试验为主。

由于节段式梁与整体式梁布置不同，同时UHPC材料和常规混凝土两者的力学性能差别很大，节段预制UHPC桥梁荷载大、尺寸小、应力水平高，且截面内完全取消纵向钢筋和箍筋，其抗剪问题更值得关注。

(1) 结构整体抗剪性能

接缝的存在对节段预制UHPC梁整体抗剪性能的影响。UHPC材料力学性能明显高于常规混凝土，尺寸减小，并在取消腹筋和纵筋后，其抗剪力学模型、特别是剪切破坏模式与常规混凝土梁有很大的不同。常规混凝土节段预制梁的抗剪性能研究成果，是否适用于预制UHPC桥梁，这需要深入研究。

(2) 接缝局部抗剪性能

一般认为接缝的抗剪能力主要由接缝表面面积和正应力水平、摩擦力、剪力键提供的剪切能力等几个部分组成。节段UHPC梁接缝面积小，材料强度和正应力水平均远高于常规混凝土，其抗剪受力模式与常规混凝土差别很大，不能简单地套用常规混凝土接缝的抗剪计算公式，需要深入研究，但目前这部分研究不多。

节段预制UHPC构件尺寸小，腹板厚度仅为5~12cm左右、甚至更小，而大跨径UHPC桥梁荷载大、剪应力大，接缝位置的剪应力分布模式不明确，因此，接缝的直接抗剪性能及其对节段预制梁的整体抗剪的影响，是节段预制UHPC桥梁受力的关键。

5 节段预制拼装UHPC桥梁推广前景

5.1 国家战略及行业建设的发展方向

装配式建筑是用预制部件在工地装配而成的建筑，相对于传统现浇钢筋混凝土结构，装配式建筑可有效实现“四节一环保”的绿色要求，是建造方式的重大变革。也是我国建筑业“十三五”期间转型升级与战略性新兴产业发展方向。国外的经验证明，与混凝土现浇结构体系建设模式相比，装配式建筑能够提高劳动生产率，提升建筑的质量和性能，减少资源浪费和环境污染。

“节段预制拼装UHPC桥梁”正是一项既符合国家战略发展方向也符合传统行业转型需要的新技术，能够在极大程度上减少能耗和污染物排放，从而提高生产生活方式的绿色、低碳水平。因此，节段预制拼装UHPC桥梁应配合我国目前基础设施建设的发展趋势，加以大力推广。

5.2 UHPC材料与预制拼装技术的完美结合

UHPC被认为是过去三十年中最具创新性的水泥基工程材料，具有超高力学性能（超高抗压、抗拉强度和超高耐久性），结合蒸养更能体现其力学优势，采用UHPC材料的结构具有受力性能优异、自重小、设计自由度大、韧性好、耐久性高，同时不仅能大幅度减小上部结构的材料用量（40%以上），也由于上部结构重量的减轻，下部结构工程量得以减少，绿色环保、符合可持续发展的优点，更适合于节段预制拼装技术。

节段预制拼装UHPC桥梁将最新材料技术和施工技术结合起来，甚至会得到一加一大于二的效果，具有十分广泛的应用前景。

6 结论及建议

目前，工业化技术和新材料技术的应用是我国桥梁领域发展的方向。节段预制拼装UHPC桥梁，结合预制拼装施工工艺和UHPC新型材料技术，能够很好满足当前经济社会快速发展的需要，主要优点如下：

(1) 管理和质量优势：管理高效、工厂预制使构件质量得到保证

(2) 成本优势：UHPC材料具有超强的材料性能以及耐久性，确保桥梁的力学性能及耐久性，桥梁的全寿命周期成本具有优势

(3) 技术优势：采用工业化、标准化、快速化的施工工艺，技术先进合理

但关键技术还需进一步研究，因此建议增加相关投入，从而推动节段预制拼装UHPC桥梁的发展与应用。

参考文献

- [1]李立峰, 范昕, 石雄伟等. 大比例预应力UHPC-T形梁抗弯性能试验研究. 土木工程学报, 2018.
- [2]Russell H G, Graybeal B A. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. FHWA-HRT-13-060. McLean: Federal Highway Administration, 2013.
- [3]Voo L Y, Foster S J, et al. The Current State of Art of Ultra-High Performance Concrete Bridge Construction in Malaysia. International Conference on Concrete Engineering & Technology. 2014.
- [4]上田 多門. 超高強度纖維補強コンクリートに関する 小委員会報告書. 北海道土木技術会: コンクリート研究委員会. 2014
- [5]Sparowitz L, Freytag B, Reichel M, et al. Wild Bridge - A Sustainable Arch Made of UHPFRC. 3rd Chinese - Croatian Joint Colloquium, 2011.
- [6]Voo Y L, Tadros M K. Taking Ultra-High-Performance Concrete to New Heights The Malaysian Experience. ASPIRE, 2016: 36-39.
- [7]Rabbat B G, Sowlat K. Testing of segmental girder with external tendons[J]. PCI Structural Journal, 1987, 32(2):86-107
- [8]Aimin Yuan, Hangs Dai, Dasong Sun, Junjun Cai, Behaviors of segmental concrete box beams with internal tendons and external tendons under bending[J]. Engineering Structures, 48(2013):623-634

应用研究

建筑垃圾CFG桩单桩承载力特性分析

张建同, 于芳, 刘铁军, 张伯发
(深圳市市政工程总公司, 深圳518109)

【摘要】 目前建筑垃圾的再生利用已受到世界各国建筑行业 and 环境保护部门的高度重视, 本文对建筑垃圾的基本特性进行研究, 分析了建筑垃圾再生骨料的影响因素, 并且对CFG桩复合地基的作用机理、工程特性等重要内容进行了分析。运用数值模拟方法研究影响建筑垃圾作骨料CFG桩复合地基的承载力、变形特性的各种因素, 分析建筑垃圾作骨料CFG桩复合地基的桩土共同作用特性、加固机理、破坏模式和工程性质等, 为该技术的发展提供了参考和依据。

【关键词】 CFG桩; 建筑垃圾; 承载力; 工程特性; 再生骨料

Analysis of bearing capacity of CFG pile in construction waste

Zhang Jiantong, Yu Fang, Liu Tiejun, Zhang Bofa
(Shenzhen municipal engineering corp., Shenzhen, 518109)

Abstract: At present, the recycling of construction waste has been highly valued by the construction industry and environmental protection departments all over the world. In this paper, the source of construction waste classification, composition and basic characteristics will be researched and analyze the factor of construction waste recycled aggregate. This paper also analyzes the action mechanism and engineering characteristics of CFG pile composite foundation. Various factors affecting the bearing capacity and deformation characteristics of CFG pile composite foundation with construction waste as aggregate are studied by numerical simulation method. The pile-soil interaction characteristics, reinforcement mechanism, failure modes and engineering properties of CFG pile composite foundation with construction waste as aggregate are analyzed, which provides reference and basis for the development of this technology.

Keywords: CFG pile; construction waste; bearing capacity; engineering characteristics; recycled aggregate

0 前言

CFG(cement-fly ash-gravel)桩复合地基成套技术是中国建筑科学研究院地基所20世纪80年代末开发的一项地基加固技术。1992年由建设部组织鉴定, 专家们一致认为:该成果具有国际领先水平^[1]。CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩)复合地基是由水泥、粉煤灰、碎石或中砂加水拌合形成的高粘结强度桩, 详见图1。CFG桩复合地基由于成本低、污染小、工作性能可靠、施工速度快等优点, 使其运用范围越来越广^[2]。为了改善并提高CFG桩复合地基

的承载力, 一般要设置一定厚度的褥垫层与基础连接, 褥垫层通常由卵(碎)石, 级配砂石或粗砂, 中砂等组成, 是CFG桩和桩间土形成复合地基的必要条件。

我国旧建筑物拆除垃圾占城市垃圾的10%~20%, 每年的产生量达 2×10^7 t, 建筑垃圾中绝大多数组分具有回收和再生利用价值, 对建筑废料中的废弃混凝土进行回收处理, 作为循环再生骨料, 可解决大量的废弃混凝土的排放及其造成的生态环境日益恶化等问题, 且可减少天然骨料的消

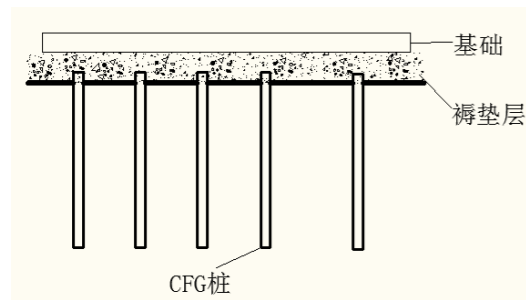


图1 CFG桩复合地基框架图

耗。目前建筑垃圾作CFG桩骨料的研究基本还处于试验、谨慎使用阶段,需要进一步分析桩承载力特性。因此,本文通过研究建筑垃圾作骨料的CFG桩承载力特性,为建筑垃圾再利用提供一定的理论参考意义。

1 建筑垃圾骨料性质分析

1.1 密度

再生骨料的表观密度比天然骨料的表观密度低,主要原因是再生骨料表面还包裹着一定量的硬化水泥砂浆,而这些水泥砂浆较岩石空隙率大,使得再生骨料的表观密度比天然骨料低。再生骨料较天然骨料堆积密度小而空隙率高。根据相关规范(GB/T14685—2001)规定骨料的松散堆积密度必须大于 $1350\text{kg}/\text{m}^3$,空隙率小于47%。再生骨料各个粒级的堆积密度不相同,整体规律是颗粒越大,堆积密度越高,空隙率的变化规律则相反。

1.2 颗粒级配

再生骨料的加工方法主要是将切割破碎设备、传送机械、筛分设备和清除杂质的设备有机地组合在一起来完成建筑垃圾的破碎、筛分和除去杂质等工序,最后得到的再生骨料一般带有若干棱角,孔隙较多,表面粗糙,表面附着30%左右的水泥砂浆,但是粘结力好。在破碎过程中往往不但会产生一些片状颗粒和有裂缝的颗粒,而且也会混入

一些有害物质,粘结在表面,妨碍水泥和细骨料的粘结,降低混凝土强度,同时也增加再生骨料混凝土的用水量。因此在使用前,有必要对再生骨料进行冲洗、过筛等处理将有害杂物清除。原始混凝土级配等级越高,则再生骨料表面包裹砂浆的程度越大,碎石程度比卵石要高。再生粗骨料优先选择连续级配,考虑到目前的破碎工艺所形成的再生骨料一般不可能达到连续级配,所以将现有的粒径不同比例的组合,测试其堆积密度,堆积密度最大的即为最优的自然级配。一般在实际应用中再生骨料和天然骨料按照一定比例的组合,比较易达到最优的级配。所以再生混凝土的配合比设计要根据不同的再生骨料掺加比例,达到不同的吸水量大小。

1.3 吸水率

再生粗骨料的吸水率明显大于天然粗骨料^[2]。原因主要是天然骨料结构坚硬致密、空隙率低,所以吸水率和吸水速率都很小;而再生骨料表面粗糙、棱角较多,且骨料表面包裹一定数量的水泥砂浆(水泥砂浆空隙率大、吸水率高),再加上混凝土块在解体、破碎过程中由于损伤累积,内部存在大量微裂纹,这些因素都使其吸水率和吸水速率大大提高。再生骨料的颗粒粒径越大,吸水率越低。

1.4 坚固性

再生骨料的坚固性反映了集料的耐腐蚀能力。通过标准硫酸盐腐蚀试验,可以看出再生骨料的抗硫酸盐腐蚀能力有所降低,表明再生骨料的耐久性比较差^[3]。

1.5 压碎指标

由于再生粗骨料表面水泥砂浆含量较高,导致其容易破碎,而且破碎过程中粗骨料会产生微裂缝,因此,再生粗骨料的压碎指标值显著大于天然粗骨料,表明其强度较低。

表1 粗骨料的基本性能

| 项目 | 堆积密度/(Kg/m^3) | 表观密度/(Kg/m^3) | 吸水率/% | 含泥量/% | 针片状颗粒含量/% | 压碎指标/% |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-------|-----------|-------------|
| 天然粗骨料 | 1453 | 2818 | 0.48 | 1.80 | 3.76 | 4.02 |
| 再生粗骨料 | 1260~1267 | 2479~2520 | 5.56~6.25 | 3.45 | 4.88 | 13.20~17.10 |

综上所述,建筑垃圾再生骨料CFG桩的强度取决于粗骨料的性能,天然粗骨料与再生粗骨料基本性能如表1所示。由表1可见,再生骨料的表观密度和堆积密度比天然骨料低;吸水率明显高于天然骨

料;再生粗骨料的压碎指标明显高于天然粗骨料,表明其强度较低;2种骨料针片状颗粒含量相差不大,表明再生粗骨料的形状不会对再生混凝土的工作性和强度产生显著的不良影响。

2 CFG桩承载力特性分析

2.1 桩复合地基的承载力

CFG桩复合地基具有较高的承载力,且可调性强,已成功在30多层民用建筑中使用。CFG桩长可以从几米到20多米,可全桩发挥桩的侧阻力,且有明显的端承作用,可承担的荷载占总荷载一半以上。CFG桩复合地基适用于粘性土、粉土、砂土、人工填土等土性及条形、独立基础等,在全国各地成功地得到推广至各类工业与民用建筑及铁路桥涵等工程^[4-5]。

CFG桩复合地基由于桩对桩间土有约束作用,使桩间土挤密,从而使复合地基的压缩模量增大,复合地基沉降变形减小。大量工程实践表明,建筑物沉降一般可控制在2~5cm。对于上部和有软弱土层的地基,用CFG桩加固,将桩端放在下面好的土层上,可以获得模量很高的复合地基,建筑物的沉降都不大^[6-7]。

2.2 承载力特性分析

再生桩体材料分为两类,即将混凝土块和块石(强度等级大于C10)合并为一体,命名为I类建筑垃圾;将废砖块和砂浆砌体(强度等级小于C10)合并为一体,

命名为II类建筑垃圾^[8]。由I类建筑垃圾经过加工破碎形成的再生骨料称作I类再生骨料;由II类建筑垃圾经过加工破碎形成的再生骨料称作II类再生骨料。由I类再生骨料取代石子配制的再生混凝土称作I类再生混凝土,由II类再生骨料取代石子配制的再生混凝土称作II类再生混凝土。CFG桩是由水泥、粉煤灰、石子三种材料加水拌制而成的,用再生骨料取代石子形成的桩称作再生骨料CFG桩,由I类再生骨料取代石子形成的CFG桩称作I类CFG桩,由II类再生骨料取代石子形成的CFG桩称作II类CFG桩。

单桩问题的研究是研究此类桩复合地基的基础,单桩模型简单,各影响因素之间相互干扰较

少,能直接反应各影响因素的作用,有利于加深对复合地基沉降性能的理解^[9]。通过数值模拟分析CFG桩承载力特性,模拟的过程中主要考虑桩间距变化、褥垫层厚度变化、桩半径变化、桩长变化、桩身刚度、褥垫层厚度及模量来分析桩的受力及变形、破坏特性、桩土应力分担比、桩身轴力传递规律和桩侧负摩擦阻力分布规律。模型中的桩采用桩单元模拟。桩单元是梁单元加介质或者锚索相互作用的联合体,有塑性矩,但没有轴向屈服,可考虑法向应力对桩身或者介质的摩擦效应,模拟排桩之间土体相互作用的三维效应。

计算域在xy平面以 $15.5\text{m} \times 15.5\text{m}$,z方向 16.5m 的范围作为单桩研究对象,桩居于土体中心。考虑地层单元参数取值的方便,取土体为粉质粘土并加入褥垫层和筏基。用FLAC3D软件中实体单元模拟土体、垫层、筏基,用结构单元桩单元(pile)模拟桩段。筏基和垫层间模量相差较大,需加入FLAC3D软件中接触面单元(interface)以加速收敛。桩单元(pile)中已经结合了接触面单元(interface)以考虑桩土相对位移。本次计算中,共划分了29818个单元,32816个节点,32个结构单元。建立的模型如图2所示,模型参数见表2。

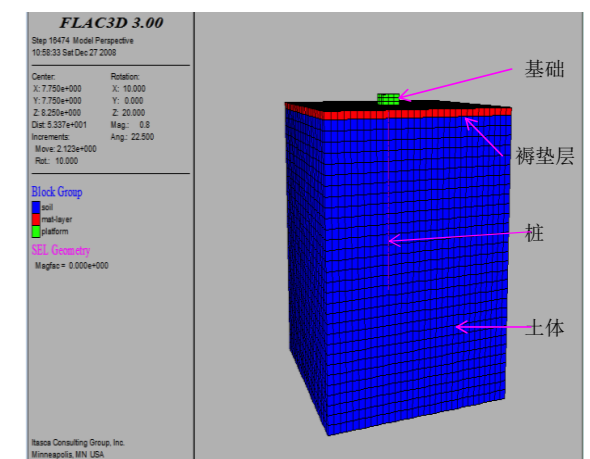


图2 加桩、垫层、筏基计算模型

表2 桩、基础有关参数

| 指标 | 单位体积质量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 直径/mm | 桩长/m | 杨氏模量/MPa | 泊松比 | 剪切模量/MPa | 体积模量/MPa |
|---------|---|-------|------|----------|------|----------|----------|
| I类CFG桩 | 2421 | 400 | 10.7 | 9300 | 0.20 | 3875 | 5166.67 |
| II类CFG桩 | 2321 | 400 | 10.7 | 6975 | 0.20 | 2906.25 | 3875 |
| 常规CFG桩 | 2500 | 400 | 10.7 | 12000 | 0.20 | 5000 | 6666.67 |
| 基础 | 2500 | / | / | 22752 | 0.20 | 9480 | 10800 |

2.2.1 桩土应力比

图3是桩土应力比图，荷载在100KN~200KN时，桩土应力比几乎保持在2，荷载在200KN之后，桩土应力比曲线呈上升形态，即桩土应力比随荷载的增加而增大。这是因为荷载增加时，桩应力增大，土应力也增大，但是桩应力较土应力增长快，所以桩土应力比随荷载增加而增大。由图4可知，桩土应力比在垫层厚度10cm时为14.78；垫层厚度在20cm到50cm时，桩土应力比在6~8之间，垫层厚度在50cm以上，桩土应力比逐渐变小。因为垫层较小时，桩分担了大部分上部荷载，故桩土应力比较大，随着垫层厚度的增大，桩间土承担上部荷载的比例增大，故桩土应力比减小。

2.2.2 褥垫层对承载力的影响

图5是桩长10.5m，在500KN荷载作用下，不同褥垫层厚度所对应的轴力分布图。模拟结果表明褥垫层厚度在10cm、60cm、70cm、80cm其桩轴力较

小，在20cm、30cm、40cm、50cm厚度下，桩轴力较大；桩轴力最大所对应的褥垫层厚度是40cm。桩身轴力最大部位不在桩顶，而在桩5m到7m之间。这是由于褥垫层的存在，使得桩间土也承受相当一部分上部荷载，并且在某一深度范围内，桩间土的位移大于桩的位移，对桩身产生负摩阻力，因此桩轴力最大值出现在桩顶下一定深度范围内。褥垫层技术是CFG复合地基的一个核心技术，也是建筑垃圾作骨料CFG复合地基的一个核心技术，复合地基的许多特性都与褥垫层有关。若褥垫层厚度过小，桩对基础将产生很显著的应力集中，当褥垫层厚度等于0时，就和桩基础一样了。而随着褥垫层厚度增大，应力集中也就不明显了。这是因为褥垫层厚度过小，导致桩间土承载能力不能充分发挥；而褥垫层厚度过大，会导致桩、土应力比等于或接近1，对减少沉降量没有多少帮助，此时桩承载的荷载太少，实际上复合地基中桩的设置已失去了意义。

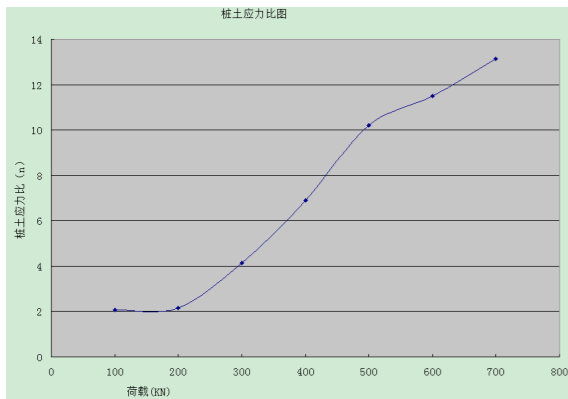


图3 桩土应力比图

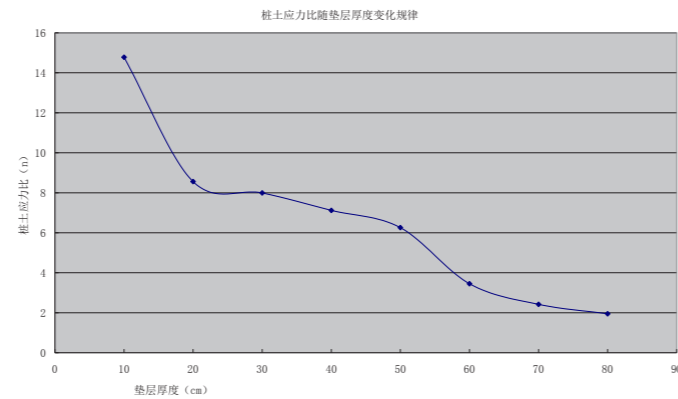


图4 桩土应力比随垫层厚度变化图

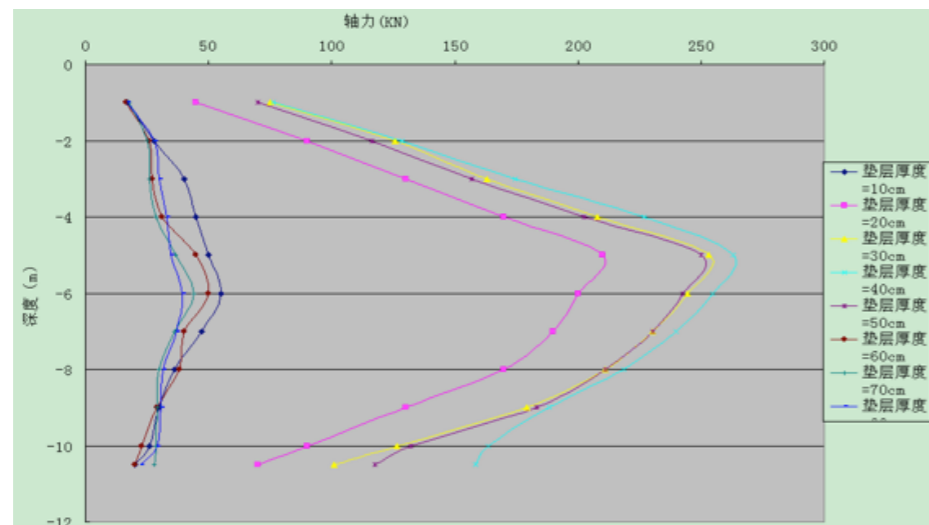


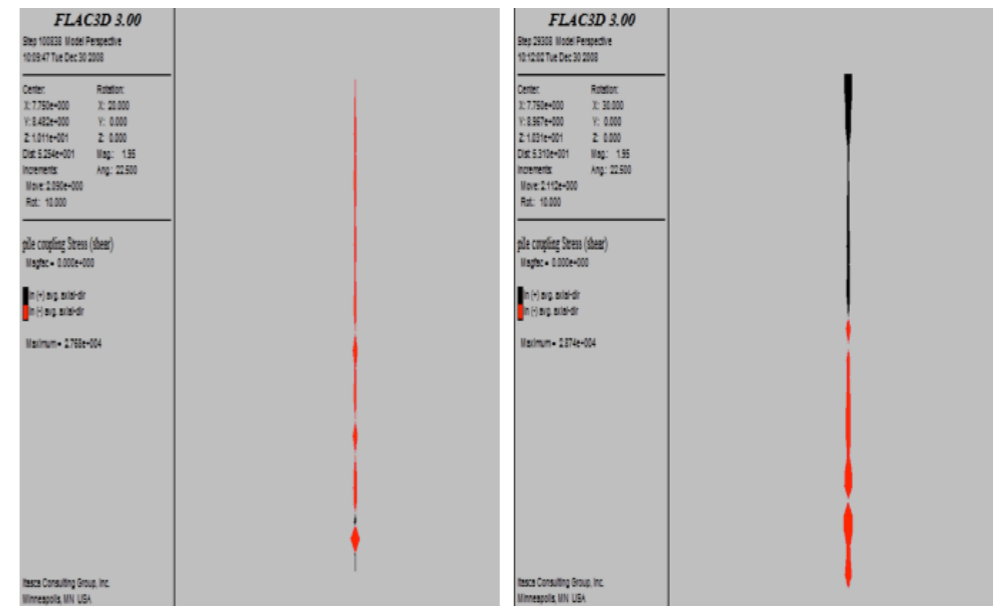
图5 不同垫层厚度的桩轴力分布

2.2.3 桩身摩阻力随褥垫层厚度变化规律

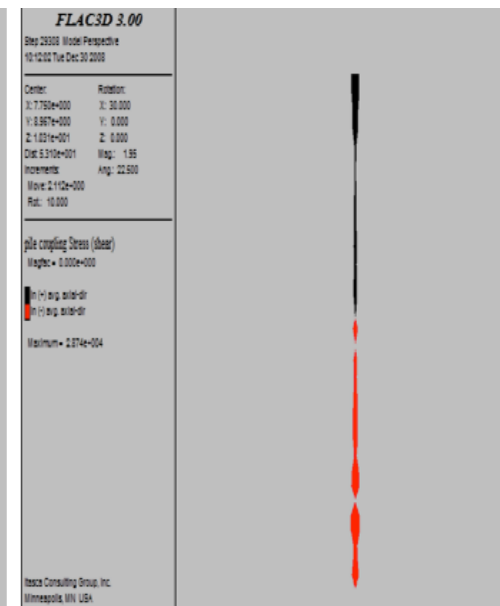
由于褥垫层的存在，从一加荷载开始就存在一个负摩阻区。图6桩身摩阻力随褥垫层厚度变化分布图，其中黑色代表负摩阻力，红色代表正摩阻力。加载后，桩的沉降量较少，土的沉降量大，产生负摩阻力，使得桩身轴力随着埋深不断增大。随着埋深增大，桩的位移和土的位移相等，该点称为中性点。由图6所示，中性点在桩中点以下；中性点以下桩的位移大于土的位移，土对桩产生的是正摩阻力，相应桩身轴力随埋深增大而减小。桩身轴

力随荷载增加而增大。

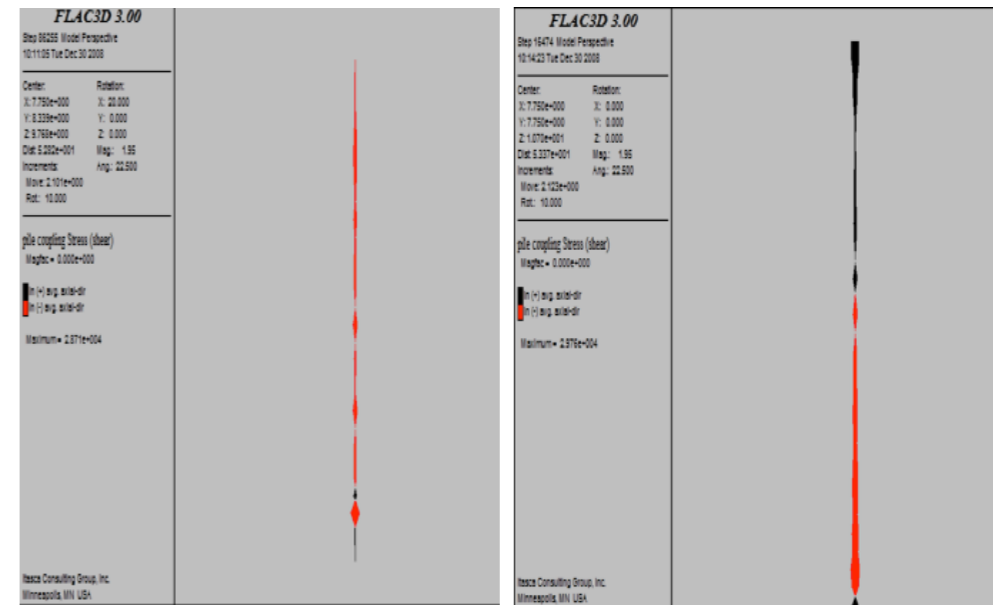
垫层厚度在10cm、20cm、60cm、70cm和80cm时，产生的负摩阻力较小，或几乎不产生负摩阻力；垫层厚度在30cm才40cm和50cm时，很明显产生较大的负摩阻力，其中中性点在桩身中点附近。垫层厚度过小，桩土应力比很大，垫层不能起到保证桩、土共同承担荷载；垫层厚度过大，则桩发挥的作用变小，失去了主要功能。合理的垫层厚度能保证一部分荷载通过褥垫层作用在桩间土上，所产生的负摩阻力是有益的。



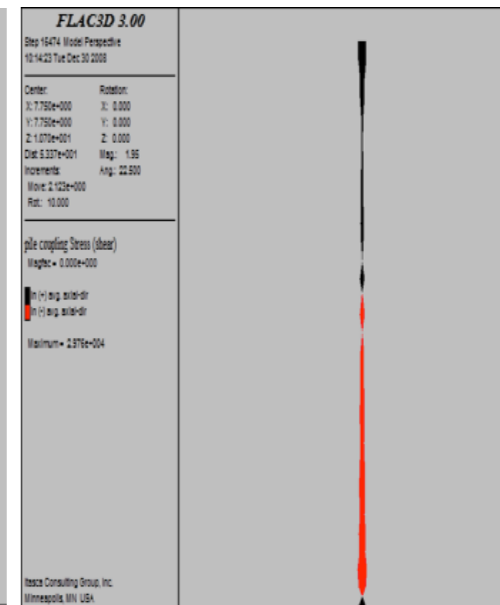
(a) 褥垫层厚度为10cm



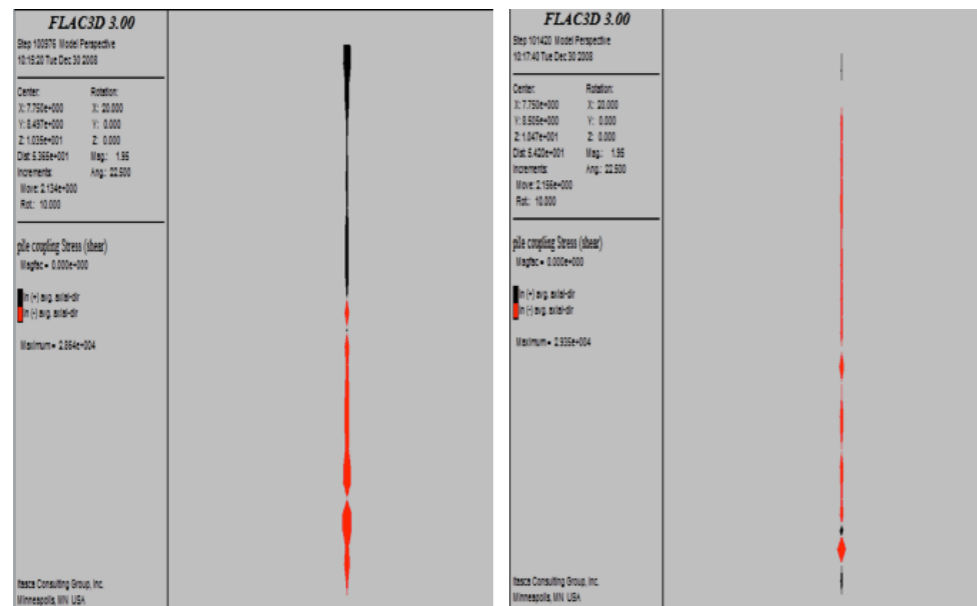
(c) 褥垫层厚度为30cm



(b) 褥垫层厚度为20cm

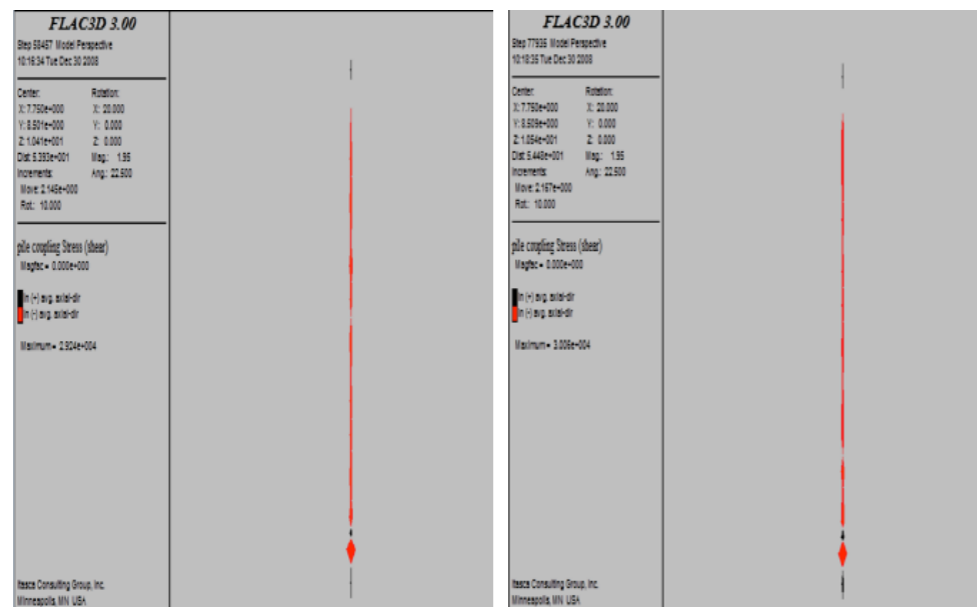


(d) 褥垫层厚度为40cm



(e) 褥垫层厚度为50cm

(g) 褥垫层厚度为70cm



(f) 褥垫层厚度为60cm

(h) 褥垫层厚度为80cm

图6 桩身摩阻力随褥垫层厚度变化

通过对比图7可看出, I类CFG桩的轴力接近普通CFG桩的轴力, II类CFG桩的轴力比普通CFG桩的轴力要小100KN左右。若用I类CFG桩来代替普通CFG桩是可行的; II类CFG桩的承载力也不低, 在实践中也有一定的适用范围。

3 结束语

结合CFG桩复合地基的作用机理、工程特性等及实际工程, 采用CFG桩复合地基, 承载力得到大

幅度的提高, 地基变形得以很大程度的降低。因此, CFG桩复合地基具有良好的推广价值。

1. I类CFG桩和II类CFG桩模拟的轴力, 与文献^[10]和^[11]对应单桩承载力特征值很相近。建筑垃圾骨料的CFG桩的数值模拟与室内试验值较相近, 说明这种数值模拟方法是可行的。

2. I类CFG桩的轴力接近常规CFG桩的轴力, II类CFG桩的轴力比常规CFG桩的轴力要小100KN

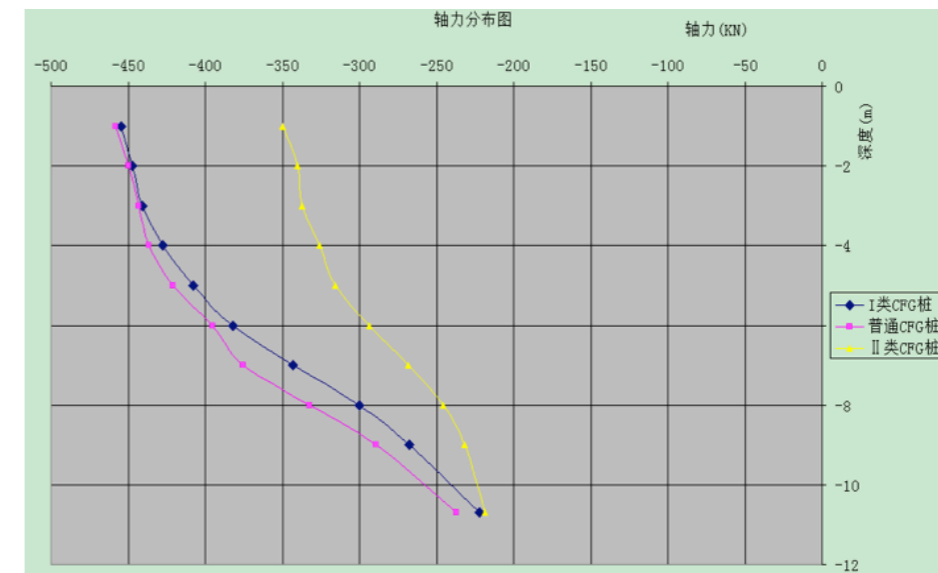


图7 轴力分布图

左右。在适用范围上, I类CFG桩与常规的CFG桩相近; II类CFG桩比常规CFG桩适用范围要小。在工程实践中, 应充分发挥桩端承载力, 以提高其桩的承载力。

3. 建筑垃圾再生骨料的坚固性较好, 再生骨料替代新鲜石子形成的再生混凝土的强度损失很小, 模量损失20%左右^[12], 建筑垃圾做CFG桩的骨料是可行的。

4. 在灾后重建、旧城改造等类工程中发挥重要作用。我国旧建筑物拆除垃圾占城市垃圾的10%~20%, 每年的产生量达 2×10^7 t^[13]。比如四川汶川大地震中将产生建筑垃圾5亿吨左右^[14]。如何充分利用建筑垃圾, 提高建筑垃圾的资源化利用率, 减少废弃物的产生和排放, 是发展循环经济所需要解决的重要现实问题。

参考文献

- [1] 阎明礼, 张东刚. CFG桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [2] 张建同. 用建筑垃圾做骨料CFG桩复合地基综合性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009
- [3] 蒋桦. CFG桩复合地基的工程特性及其在工程中的应用[J]. 四川建筑, 2002, 22(4): 49-50
- [4] 何结兵, 洪宝宁, 丘国锋. 高速公路CFG桩复合地基褥垫层作

用机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25, (10): 1663-1666.

- [5] 董必昌, 郑俊杰. CFG桩复合地基沉降计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, (07).
- [6] 郭呈祥, 黄慧. CFG桩复合地基变形计算方法探讨[J]. 安阳工学院学报, 2008, (06).
- [7] 许岳周, 石建光. 再生骨料及再生骨料混凝土的性能分析与评价[J]. 混凝土, 2006(7): 41-46
- [8] 许岳周, 石建光. 再生骨料及再生混凝土的性能分析与评价[J]. 混凝土, 2006, 7: 41-46
- [9] 胡敏萍. 不同取代率再生粗骨料混凝土的力学性能[J]. 混凝土, 2007, 2: 52-54
- [10] 李德胜, 肖祥. 再生混凝土的骨料性能[J]. 中国科技信息, 2007, 17: 39-40
- [11] 王健, 李懿. 建筑垃圾的处理及再生利用研究[J]. 环境工程, 2003, 21(6): 49-52.
- [12] 王健, 李懿. 建筑垃圾的处理及再生利用研究[J]. 环境工程, 2003, 21(6): 49-52.
- [13] 王罗春, 陈梦龙. 建筑垃圾作建筑渣土桩填料加固软土地基的机理与工艺[J]. 上海电力学院学报, 2006, 22(2): 163-166.
- [14] 左传长. 四川汶川地震灾区建筑垃圾资源化利用设想[J]. 再生资源与循环经济, 2008, 1(9): 27-29.

公路软基水泥搅拌桩帷幕病害数值分析研究

张建同¹, 宁培淋², 田卿燕³, 钱尼贵³

(1. 深圳市市政工程总公司, 深圳518109; 2. 广东交通职业技术学院土木工程学院 广州510640 3. 广东华路交通科技有限公司 广州510420)

【摘要】 运营期间高速公路软基路段路基下沉、路面开裂等病害问题日益严重, 针对高速公路改扩建工程软土路基路段, 本文提出在新老路堤交界面设置水泥搅拌桩帷幕。运用PLAXIS弹塑性有限元软件分析工程实例软基在施工过程和工后的沉降, 通过与实测结果对比验证PLAXIS数值模型的正确性。然后, 应用该模型分析扩建工程中设置水泥搅拌桩帷幕对既有运营公路变形问题, 结果证明能有效减少既有运营公路路基沉降变形, 并讨论帷幕弹性模量、帷幕厚度和帷幕位置等参数对既有运营公路地基变形影响。通过数值分析表明水泥搅拌桩帷幕能够有效预防运营公路软基沉降导致的病害问题, 具有较好工程应用前景。

【关键词】 软基; 水泥搅拌桩; 软土变形; 数值分析

Numerical analysis of curtain disease of cement mixing pile in soft soil foundation of highway

Zhang Jiantong¹, Ning Peilin², Tian Qinyan³, Qian Nigui³

(1. Shenzhen municipal engineering corp., Shenzhen, 518109; 2. School of civil engineering, Guangdong Communication Polytechnic., Guangzhou, 510640; 3. Guangdong China Road Traffic Technology Co., Ltd., Guangzhou, 510420)

Abstract: During the operation period, the problems of subgrade subsidence and pavement cracking are becoming more and more serious. Aiming at the soft soil subgrade section of expressway reconstruction and expansion project, this paper puts forward setting cement mixing pile curtain at the interface of new and old highways. The settlement of soft foundation during construction and after construction is analyzed by PLAXIS elastic-plastic finite element software. The correctness of PLAXIS numerical model is verified by comparing with the measured results. Then, the model is applied to analyze the deformation of existing operating highway caused by cement mixing pile curtain. The results show that the settlement deformation of existing operating highway subgrade can be effectively reduced, and the influence of curtain elastic modulus, curtain thickness and curtain position on the deformation of existing operating highway subgrade is discussed. The numerical analysis shows that the cement mixing pile curtain can effectively prevent the disease caused by the settlement of soft foundation of operating highway, and has a good prospect of engineering application.

Keywords: Soft ground; Cement mixing pile; soft soil deformation; numerical analysis

0 引言

运营期间高速公路目前面临日益频繁病害问题, 特别高速公路改扩建工程软土路基路段, 路基下沉、路面开裂、和桥头跳车等病害直接影响到高速公路运营期间的使用^[1], 广东珠三角地区高速公

路病害调查显示运营公路病害原因多为软土地基侧向变形较大和地下水位变化^[2], 以太沙基单向固结理论为基础, 公路沉降计算方法只考虑竖向沉降, 而实际工程侧向位移引起的沉降量占总沉降量的25%以上^[3-4]。

针对运营高速公路软土路基病害问题, 本文通过在高速公路两侧设置帷幕挡墙, 避免软土路基地下水变化而引起软土路基的不均匀沉降, 同时通过减少软土侧向变形, 大幅增加路基稳定性。本文通过PLAXIS分析软件计算工程实例软基工后沉降, 通过与实测沉降结果进行对比, 验证数值模型的正确性, 然后分析水泥搅拌桩帷幕对运营公路变形影响以及帷幕弹性模量、帷幕厚度和帷幕位置等设计

参数影响分析。

1 工程案例

某高速公路线路软土地基分布广泛, 路堤顶宽26m, 路堤填筑高度为5.5m, 坡度为1:1.5, 路堤底部宽度为42.5m。各土层物理力学性质指标如表1所示。软基处理采用堆载预压排水固结法, 袋装砂井打设间距1.0 m, 直径70 mm, 梅花形布置, 打设深度10m。

表1 各土层的物理力学指标

| 土层 | 厚度/m | γ/kNm^{-3} | E_s/MPa | c/kPa | $\Phi/(\text{°})$ | v | K_v/md^{-1} | K_h/md^{-1} | K_{ve}/md^{-1} |
|------|------|--------------------------|------------------|----------------|-------------------|------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 粉质粘土 | 0.7 | 18.6 | 4.0 | 34.0 | 5.0 | 0.20 | 8.3E-3 | 8.3E-3 | 0.249 |
| 淤泥 | 8.0 | 15.0 | 0.43 | 11.7 | 11.4 | 0.35 | 2.85E-4 | 4.23E-4 | 8.7E-3 |
| 中粗砂 | 2.3 | 19.2 | 10.2 | 2.0 | 28.0 | 0.30 | 1.0 | 1.0 | - |
| 粉质粘土 | 15 | 18.8 | 6.68 | 26.6 | 13.4 | 0.30 | 5.5E-4 | 5.5E-4 | - |
| 路堤填土 | 5.5 | 20.0 | 30.0 | 10 | 28 | 0.3 | 1.0 | 1.0 | - |

2 数值分析

2.1 数值模型

由于路堤具有对称性, 有限元计算中, 取路堤的一半建立有限元模型(图1为该高速公路的数值模型)。有限元计算范围为: 地面向下深度26m, 水平方向100m。地基和路堤土均采用理想弹塑性模型, 各参数的具体取值见表1。边界条件: 左边界为对称轴, 竖向自由, 水平向约束, 不排水; 下边界为竖向和水平向均固定, 排水; 右边界为竖向自由, 水平向固定, 不排水; 上边界为竖向和水平向均自由, 排水。对砂井进行单元划分会给有限元计算带来较大的难度, 本文采用Chai. J. C提出的等效竖向渗透系数法, 将砂井地基等效转化成渗透系数较大的天然地基进行计算, 等效竖向渗透系数 K_{ve} 可见

表1最后一列^[5]。

该路堤施工采用薄层轮加法, 本文提出的路堤施工过程尽可能模拟现场实际施工情况, 具体施工过程见表2。

表2 路堤加载历时

| 加载过程 | 施工时间(天) | 预压时间(天) |
|-----------|---------|---------|
| 第一级(2m) | 15 | |
| 第二级(1m) | 55 | |
| 第三级(1m) | 60 | |
| 第四级(0.7m) | 65 | |
| 第五级(0.8m) | 5 | 300 |

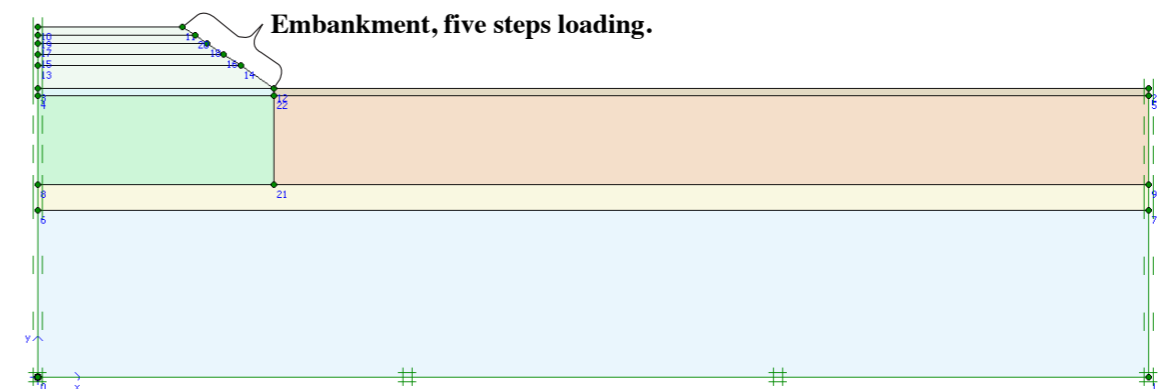


图1 数值模型

2.2 数值分析成果

从图2可以看到路堤中心沉降量最大,朝两边逐渐减小,沉降等值线呈U形分布,坡顶处略微隆起,该理论分析结果与实际情况相符;从图3可以看到路堤坡顶处软土的侧向变形较大,路堤中心处软土

的侧向变形较小。

路堤中心地面沉降-时间曲线见图4。由图4可以看出,本文的计算曲线与实测曲线较为接近,理论分析结果表明数值模型能够较好地预测软基的沉降随时间的变化过程。

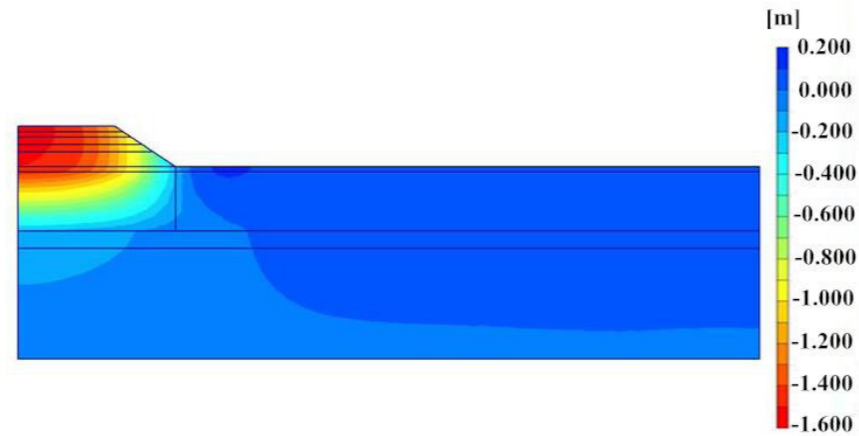


图2 路堤施工的竖向位移云图

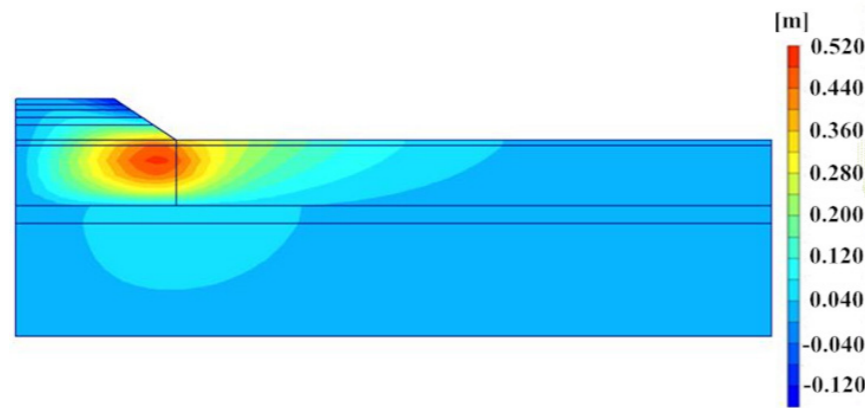


图3 路堤施工的水平位移云图

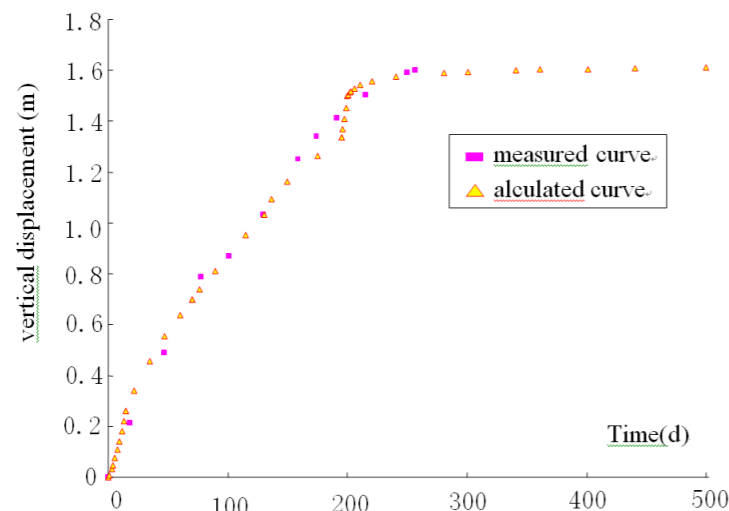


图4 路基中心的实测竖向位移和计算竖向位移的比较

3 水泥搅拌桩帷幕应用于公路扩建的案例分析

3.1 高速公路扩建工程数值模型

由上节分析可知,本文建立的数值模型可以较好的预测软土路基的变形。本节将采用该数值模型研究水泥搅拌桩帷幕在营运高速公路扩建工程中的应用,各土层和路堤的物理力学参数同上节,可见表1。假定该高速公路完成10年后进行既有道路

来1:1.5变为1:0.5,然后进行加宽路堤的施工。路堤加宽后边坡的坡度为1:1.5。扩建工程路堤填土与原路堤填土物理力学性状相同施工过程见表3。采用板单元模拟水泥搅拌桩帷幕,水泥搅拌桩帷幕宽度为0.7m。假定帷幕为线弹性体,弹性模量为100MPa,泊松比为0.2,容重为10kg/m³。水泥搅拌桩帷幕位于离有限元模型中心线15.75米处(即削坡后的老路堤坡顶),搅拌桩和土体之间设置界面单元。扩建高速公路数值模型详见图5。

表3 扩建工程路堤的加载历时

| | 原有道路 | | 原有道路+拓宽部分 | | |
|-----------|---------|--------|-----------|--------|--------|
| | 施工时间(天) | 预压时间/天 | | 施工时间/天 | 预压时间/天 |
| 第一级(2m) | 15 | | 原路堤削坡 | 15 | |
| 第二级(1m) | 55 | | 帷幕施工 | 1 | |
| 第三级(1m) | 60 | | 第一级(2m) | 15 | |
| 第四级(0.7m) | 65 | | 第二级(1m) | 15 | |
| 第五级(0.8m) | 5 | 3650 | 第三级(1m) | 15 | |
| | | | 第四级(0.7m) | 15 | |
| | | | 第五级(0.8m) | 15 | 3650 |

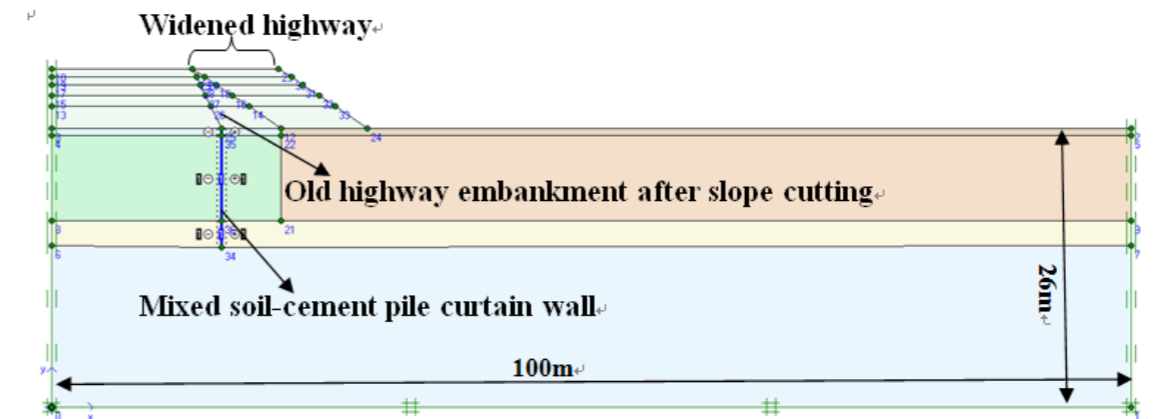


图5 高速公路扩建的数值模型

3.2 搅拌桩帷幕对扩建公路变形的影响

图6为路堤顶部竖向位移横向分布曲线,图7为路基顶部竖向位移横向分布曲线,表4为加宽工程中是否设置帷幕对老路横坡比变化率的影响。由图6、图7和表4可以看出:

1、公路加宽会导致老路路肩附近地基产生较大的附加沉降,随着离路肩距离的增大而减少,同时使得老路中心部分地基会产生向上的位移。随着

工后时间不断增长,老路路肩附近的沉降继续增大,而老路中心部分向上的位移将减少。

2、由于水泥搅拌桩帷幕可以减少新路堤加载对老路堤的影响,设置水泥搅拌桩帷幕后,老路路肩附近地基的沉降较少,并且减缓了老路中心部分地基的上拱。而且扩建工程工后十年内老路地基的变形较少,这个现象说明设置水泥搅拌桩帷幕可以较好的避免拓宽边载对老路基的影响。

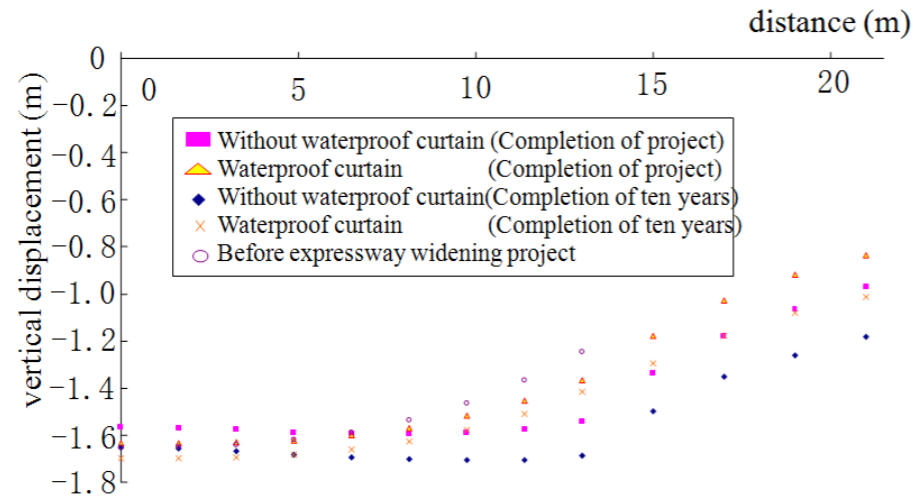


图6 路堤顶部竖向位移横向分布

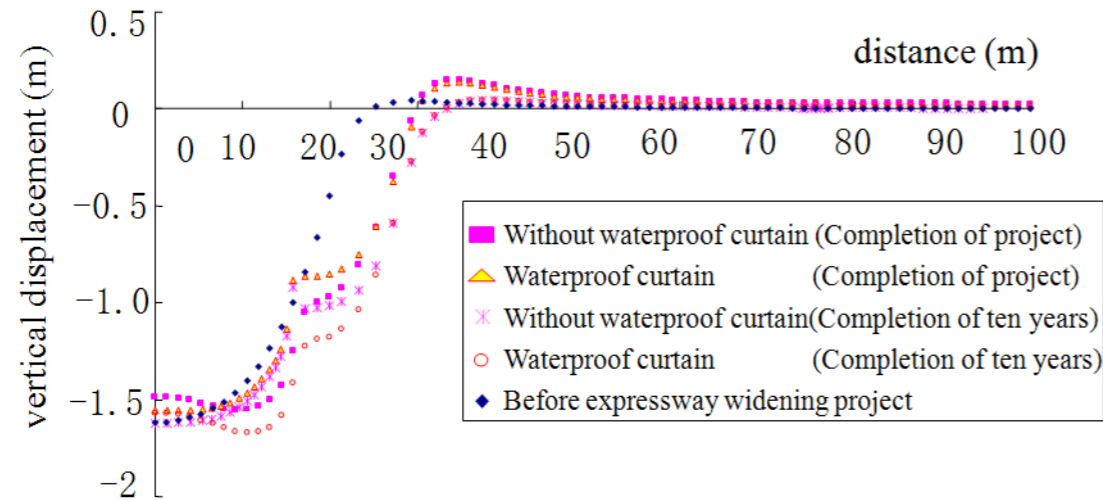


图7 路基顶部竖向位移横向分布

3、公路加宽会引起老路横坡比发生变化，从而导致路面发生开裂。加宽工程完成后，未设水泥搅拌桩帷幕时，加宽使得老路横坡比变化2.977%左右，设置水泥搅拌桩帷幕后为1.238%。工后十

年后，未设水泥搅拌桩帷幕时，老路横坡比变化3.402%左右，设置水泥搅拌桩帷幕为0.973%。因此，设置水泥搅拌桩帷幕可以有效的减缓老路横坡比的变化。

表4 老路横坡比变化率

| 处治方式 | 老路地面中点 | | 老路路肩 | | 横坡比变化率/% |
|------------|--------|--------|-------|--------|----------|
| | 沉降/m | 沉降增量/m | 沉降/m | 沉降增量/m | |
| 加宽前 | 1.654 | | 1.246 | | |
| 无帷幕 | 1.567 | -0.087 | 1.545 | 0.300 | 2.977 |
| 有帷幕 | 1.624 | -0.030 | 1.376 | 0.131 | 1.238 |
| 无帷幕(工后10年) | 1.652 | -0.002 | 1.686 | 0.441 | 3.402 |
| 有帷幕(工后10年) | 1.689 | 0.035 | 1.407 | 0.161 | 0.973 |

3 搅拌桩帷幕的参数分析

3.1 帷幕弹性模量对扩建公路变形的影响

图8为扩建工程施工完成后，不同弹性模量帷幕时路基顶部竖向位移横向分布曲线，由图8可知，弹性模量的变化对扩建公路的路基变形影响较

小，帷幕弹性模量为100MPa和10000MPa的路基顶部竖向位移横向分布曲线非常接近。究其原因是因为帷幕主要不是用来承载，而是减少拓宽路基的侧向位移对老路基的影响。因此本文认为采用水泥搅拌桩作为帷幕结构是合适的。

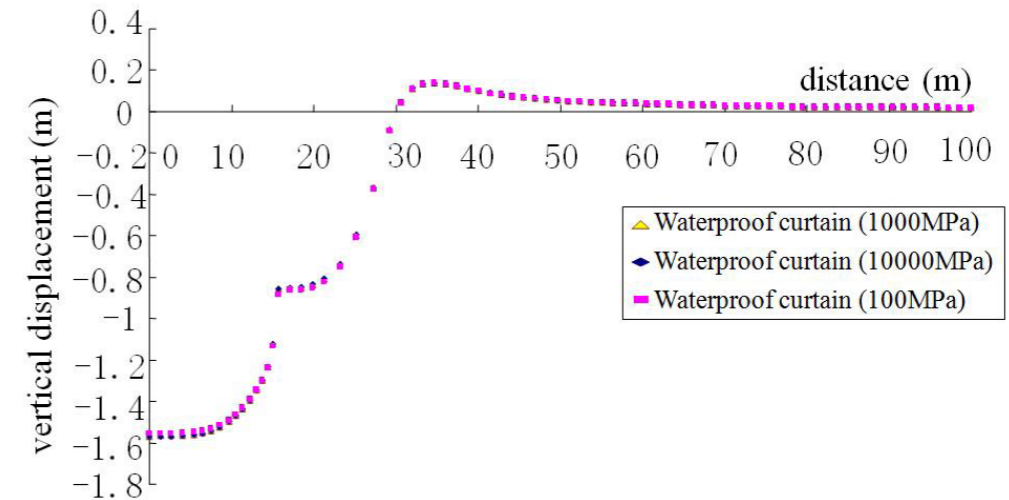


图8 不同弹性模量帷幕时路基顶部竖向位移横向分布

3.2 帷幕厚度对扩建公路变形的影响

图9为扩建工程施工完成后，不同帷幕厚度时路基顶部竖向位移横向分布曲线，由图9可知，帷幕厚度的变化对扩建公路的路基变形影响较小。这

是因为厚度增大时，水泥搅拌桩帷幕的重量将会增加，产生较大的竖向沉降，从而抵消了厚度增加减少软土路基沉降的影响。因此，采用单排水泥搅拌桩帷幕就可以起到减少拓宽荷载对老路基的影响。

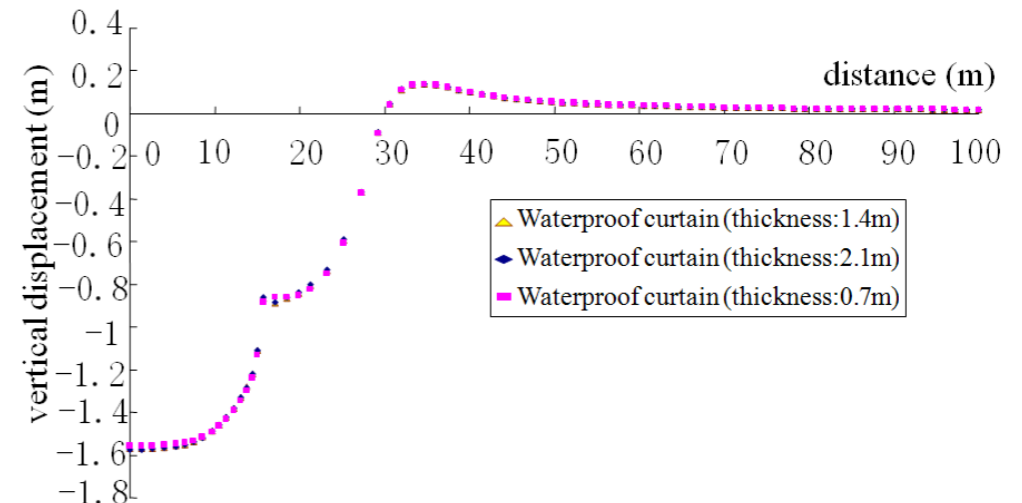


图9 不同帷幕厚度时路基顶部竖向位移横向分布

3.3 帷幕位置对扩建公路变形的影响

图10为不同帷幕厚度时路基顶部竖向位移横向分布曲线，由图10可知，帷幕位置对扩建公路变形的影响较大，具体表述如下：

1. 水泥搅拌桩帷幕位于削坡后路堤坡顶时，新路路肩(距离路中心处21m)附近地基沉降逐渐增大。这是因为水泥搅拌桩帷幕的设置使得水泥搅拌桩帷幕附近的地表沉降显著减少，水泥搅拌桩帷幕

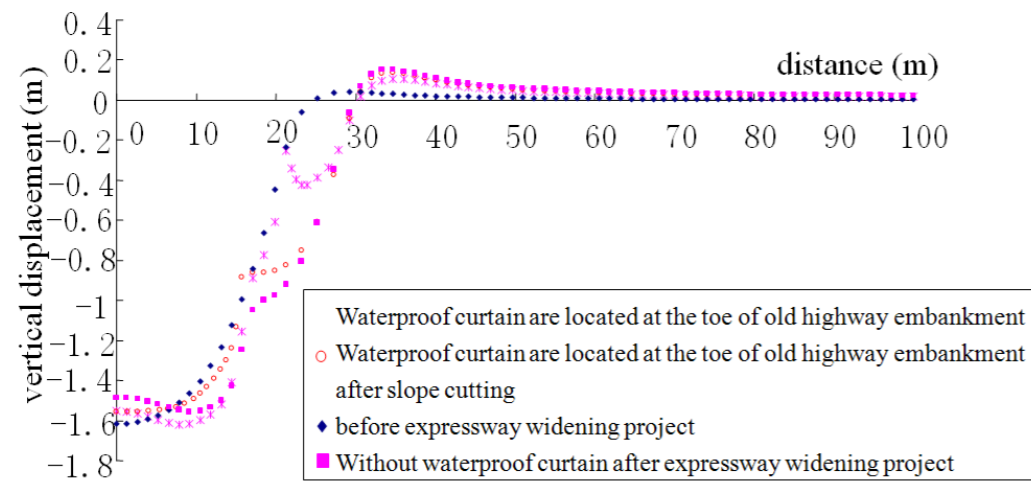


图10 不同帷幕位置时路基顶部竖向位移横向分布

离新路路肩处距离越大，新路路肩处地表沉降也就越大。

2. 水泥搅拌桩帷幕位于削坡后路堤坡顶时，老路路肩处地基沉降逐渐减少，老路路肩处地基沉降较不设置水泥搅拌桩帷幕时沉降减少9%。水泥搅拌桩帷幕位于老路路堤坡顶时，老路范围内的地基沉降较大。

3. 水泥搅拌桩帷幕位置的变化对路中心点变形影响很小，路中心处地基都出现上拱现象，并且向上变形量大致相同。

根据上述分析，同时考虑到软土地基变形对路面损坏的影响程度，本文认为水泥搅拌桩帷幕设置在削坡后路堤坡顶处为宜。

4 结论

本文以高速公路软基路段为工程案例，利用数值分析软件PLAXIS建立软土路基的数值模型，各层土体和路堤采用莫尔-库仑本构模型，并将砂井地基等效为竖向渗透系数增大的地基。数值分析结果表明，该数值模型可以较好地预测运营期高速公路软土地基的变形，验证了数值模型的可靠性，可作

为后续研究的理论模型。

根据对帷幕的参数分析可知，帷幕的弹性模量和厚度对扩建公路地基的变形影响较小，采用搅拌桩帷幕可以较好的减少新老路堤的不均匀沉降。帷幕的位置对公路变形的影响较大，通过理论结果比较，帷幕设置在削坡后路堤坡顶处为宜。

参考文献:

- [1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1):96-115.
- [2] DB33T 904—2013 公路软土地基路堤设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [3] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 陈子扬. 不同方式处理后软土地基侧向变形规律[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1):340-347.
- [4] 孙晓立, 谢宏云, 杨军. 水泥搅拌桩连续墙应用于高速公路软土地基处治的数值分析[J]. 广东公路交通, 2010, 113(4):6-9.
- [5] Chai J C, Shen S L, Miurra N, et al. A simple method of modeling PVD improved subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, 127 (11):965-972.

工程实践

天健公馆B座装配式建筑施工实践

刘艾轩¹, 冯志远², 刘家琪², 李孝军²

(1. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 深圳518033; 2. 深圳市天健建筑工程有限公司, 深圳518034)

[摘要] 本项目从管理出发, 建立了由建设单位统筹协调参建各方的工作机制, 在项目设计阶段就编制了装配式建筑预制构件验收制度、装配式标准层结构联合验收制度以及分部分项工程验收制度。各项工作的前置考虑, 有效地降低了装配式工程现场实施的难度, 并对装配式工程的质量提升有更好的保证。通过BIM技术对构件吊装及节点连接的模拟, 全面提升了建筑施工阶段的效率和质量, 降低了现场施工管理人员的管理难度。

[关键词] 装配式建筑; 验收制度; 装配化施工; 吊装; BIM

Prefabricated building practice on Tagen Kungkuan Building B

Liu Yixuan¹, Feng Zhiyuan², Liu Jiaqi², Li Xiaojun²

(1. Shenzhen Tagen Group Co., Ltd., Shenzhen, 518033; 2. Shenzhen Tagen Construction Co. Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: From the perspective of management, this project has established the work mechanism for the construction unit to coordinate and coordinate all parties involved in the construction. In the project design stage, the acceptance system of prefabricated building components, the joint acceptance system of prefabricated standard layer structure and the acceptance system of partial and itemized projects have been redacted. The preposition of all the work can effectively reduce the difficulty of field implementation of the prefabricated building engineering, and better guarantee the quality improvement of the prefabricated building engineering. The simulation of component hoisting and joint connection by BIM technology has comprehensively improved the efficiency and quality of the construction stage, and reduced the management difficulty of on-site construction management personnel.

Keywords: prefabricated building; acceptance system; construction assembly manner; hoisting; BIM

0 项目概述

本项目位于深圳市福田区的香蜜湖街道办内的安托山片区, 项目B座为政府配套公共租赁住房, 建筑高度99.35米, 共计400户。

本项目建筑户型的标准化设计参考《深圳市保障性住房标准化设计图集》完成, 为预制构件的设计奠定了很好的基础。结构设计执行《装配式混凝土结构技术规程》JGJ1-2014相关规定, 核心筒区域、底部加强区全部采用现浇, 7-31层采用内浇外挂的“深圳体系”。并结合铝合金模板系统和自升式爬架系统, 既提升了项目的质量和安全性, 又节

能环保。

1 工作机制

根据深圳市装配式建筑设计阶段技术认定要求, 建立了由建设单位统筹协调参建各方的工作机制。根据装配式建筑工程的特点, 总体协调本项目监理、装配式建筑设计、预制构件生产、铝模、爬架、施工等全面工作。较早确定了相关合作单位和专业配合单位, 各单位提前介入到施工图设计工作和装配式建筑认定方案编制工作过程中。通过定期会议、专题会议、微信群等方式建立各单位协同合作的工作机制, 促进了各方之间的紧密协作。

2 验收制度

本项目在装配式技术认定准备初期，就由建设单位统筹编制了装配式建筑验收制度，根据装配式建筑施工特点，在首批预制构件样板和首个装配式标准层结构联合验收制度的基础上，建立了分部分项工程验收制度。

2.1 预制构件验收制度

1) 首个预制构件生产前，建设单位组织设计、监理、施工总承包、构件生产单位等参建各方进行样板验收，主要验收模具及各类构件的成型质量。模具的精度和强度直接影响到后期预制构件的质量和安装，因此，模具应具有足够的承载力、刚度、稳定性及良好的操作性能，并对模具尺寸和预埋着重检查。模具验收合格之后方可开始构件的生产，待首批构件验收合格后方可进行后续生产。

2) 构件生产期间，建设单位安排1名监理工程师驻场，总包单位安排1名工程师驻场，负责材料验收、见证送检、隐蔽验收、构件质量检查与验收。构件浇筑前经构件厂自检通过后报总包单位驻场工程师验收，驻场工程师验收合格后，通知驻场监理进行验收，监理验收通过后方可浇筑，验收记录影像资料及表格留档。驻场工程师、驻场监理、项目现场管理人员密切交流，检查构件生产是否满足工地现场施工进度计划，否则及时要求厂家增加模具。

3) 构件出厂前，构件厂做好自检工作，核查内容为：构件批次、成品保护措施、标识标牌、外观质量、运输保护。

4) 构件到现场后，由总包及现场监理进行验收，验收内容为：外观质量、出厂合格证明、隐蔽验收记录、材料送检报告、混凝土强度报告。验收通过后填写验收表格方可安装。

2.2 铝模样板验收制度

1) 建设单位组织铝模生产及安装施工单位、设计单位、监理单位、施工总承包单位、幕墙单位等各参建单位组成深化小组，对铝模进行深化设计。在确认深化设计成果后，方可通知铝模生产及安装施工单位进行铝模生产及预拼装。

2) 铝模完成试拼装后，验收小组前往铝模厂进行联合验收。验收内容包括节点验收、结构尺寸复核、支撑固体系检查、材料及拼装质量检查、铝模排板情况、拼缝是否过大等。

3) 验收完成后由验收小组形成验收意见报告，



图1 模具验收



图2 预制构件验收

驻场监理跟进整改情况，确保铝模出厂前将问题整改完成并要求铝模厂家对验收意见形成书面回复。

2.3 装配式标准层结构验收制度

1) 首个装配式标准层结构施工前，建设单位组织监理、设计、施工等单位对下部现浇过渡层的浇筑质量、预埋件数量、位置、以及结构标高等进行验收，验收合格后方可进行标准层结构施工。

2) 首个装配式标准层结构浇筑混凝土之前，建设单位组织监理、设计、咨询、厂家、施工单位等进行联合验收，重点检查预制构件安装和连接节点、标高、垂直度以及铝模安装的加固措施等。

3) 首个装配式标准层拆模后，建设单位组织监理、设计、厂家、施工等各参建单位进行结构验收，对工程设计、施工进行阶段性总结和和改进，提高后续生产施工的效率 and 水平。

3 预制构件生产和运输

本项目预制构件供应企业为广东中民筑友科技有限公司惠阳分公司，在项目前期技术认定准备过程中，就参与完成了构件深化设计、运输及施工总平面布置等前期规划工作。

为保证构件的及时供应，工程开工前，根据项

(12) 缺陷修补；(13) 装饰装修；(14) 包装；(15) 产品标示；(16) 检验出货。

3.1 成品保护

采用专用吊具对预制构件进行起吊，预制构件翻身采用液压翻身机，转向轻缓，预制构件在任何时候都搁落在柔性材料上：如橡胶、垫木等；堆放时两块预制构件之间保持一定的间距；预制构件在吊运、堆放、装卸时有专人指挥。同时外墙板采用塑料薄膜包裹保护，铝窗窗框采用专用的“U”型胶合板保护，楼梯采用钉胶合板进行有效保护。具体如下：



图3 铝模验收



图4 预制构件进场验收



图5 预制外墙存放



图6 预制楼梯保护措施

目总体进度计划编制构件总体需求计划，并以此确定模板配置方案，指导构件生产。施工过程中，总包单位至少提前15天发送构件进场计划表，标明构件名称、类型、数量、使用部位和到场时间，考虑到运输条件限制，预制构件的生产应保证现场有一层标准层的库存量。还应定期将构件实际供应情况与总体需求计划进行比对，以便及时调整构件生产安排，避免造成延误。工厂的生产、验收均制定了相应的操作手册和工作制度。在生产过程中，由总包单位与监理单位各派一名驻场管理人员负责生产现场的全程监管并及时反馈生产情况。

同时，本工程预制构件100%进行产品标示，标示方法为：构件名称-构件编号-构件图号-构件尺寸-生产日期-构件重量等。构件质量进行全过程管理，对厂家要求其构件质量终身负责。

3.1 生产流程

预制构件生产^[1]总体流程如下：(1) 清理模具；(2) 绑扎钢筋；(3) 模具安装；(4) 预留预埋配件安装；(5) 浇筑前检查；(6) 浇筑混凝土；(7) 表面收光；(8) 成品养护；(9) 构件脱模；(10) 翻转起吊；(11) 转至存货架堆放；

3.2 构件运输

为了保证本项目预制构件的顺利供应，制定了运输方案，方案内容包括构件装车标准、运输车辆选型、运输路线、承运人员配置、运输过程构件保护等措施。并由建设单位提前组织司机、安全员、监理、总包等相关人员对拟定运输路线的道路情况进行查勘，(包括沿途上空有无障碍物，公路桥的允许负载量，所经涵洞净空尺寸等)以确保构件能够按时到场。

4 装配化施工

装配式项目的施工是一个系统工程，在熟悉施工图纸，掌握关键连接节点技术细节的同时，还应根据装配式工程特点编制施工组织设计及专项施

工方案。专项施工方案的内容包括：塔吊布置及附墙、预制构件吊装及临时支撑方案、后浇部分钢筋绑扎及混凝土浇筑方案、构件安装质量及安全控制方案、铝模安装方案、爬架方案等等。除此之外，还要编制装配式吊装工程的安全预案。

本项目的总包单位深圳市市政工程总公司，在A座和B座分别布置了两台塔吊，B座附近的是台TC7020塔吊，塔吊半径为35m，根据施工场地平面布置图的运输路线所示，塔吊旋转半径能完整覆盖B座塔楼和满足构件运输车停放处的现到现吊。除此之外，为了防止后期预制构件由于某些突发情况不能准时运达现场而影响现场吊装工作正常运行，在B座西侧布置一块预制构件堆场，堆场面积足够满足堆放一层预制构件的需求。

预制构件吊运的安全性在施工过程中至关重要，相关规范条文中均从起重机械设备选型、吊



图7 施工场地平面布置图

具、吊绳的选择，吊装人员配备及吊运技术措施做了详细的规定，确保吊运过程安全可靠，下图为本项目对最不利构件的吊装验算。

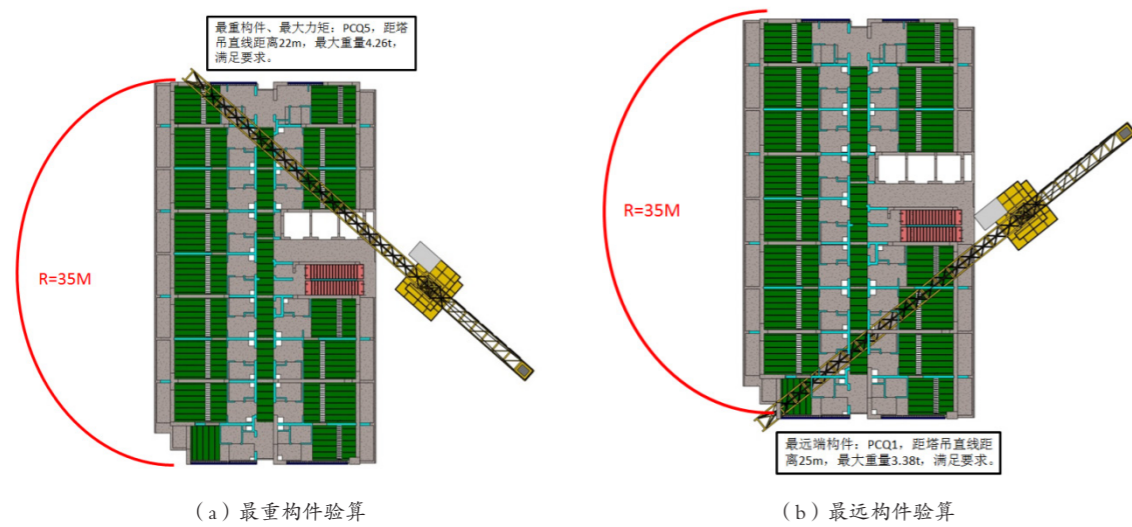


图8 预制构件吊装验算

4.1 预制外墙施工安装

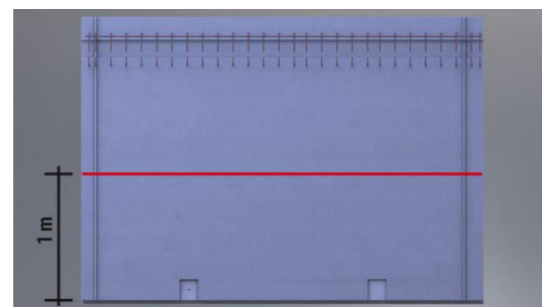
4.1.1 施工工序

测量放线→弹出标高线→安装定位螺栓→安装

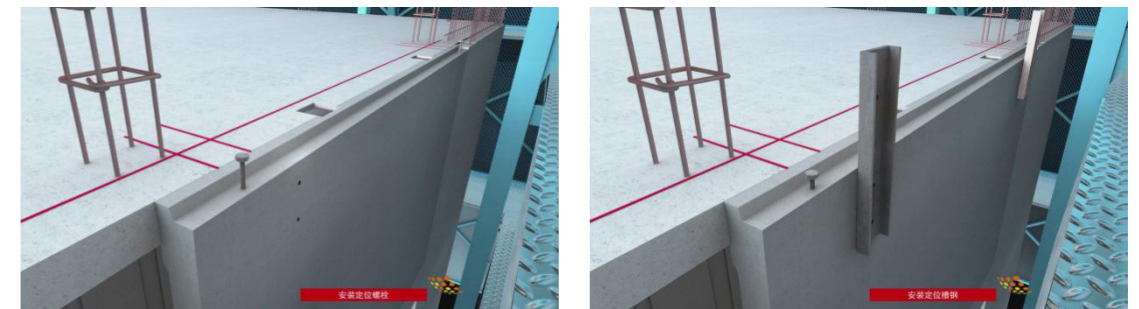
辅助固定槽钢→外墙吊装→安装临时斜支撑→安装底部连接角铁→安装构造柱连接螺栓→梁钢筋绑扎→梁铝模安装→混凝土浇筑→下一层施工



(a) 测量放线

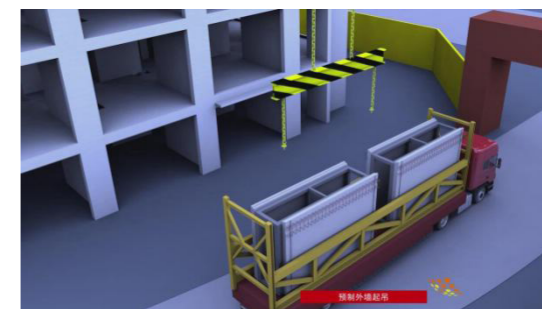


(b) 弹出标高线



(c) 安装定位螺栓

(d) 安装辅助固定槽钢



(e) 外墙吊装



(f) 安装临时斜支撑



(g) 安装构造柱连接螺栓



(h) 安装铝合金模板

图9 预制外墙吊装模拟



图10 预制外墙安装现场

4.2 叠合楼板施工安装

4.2.1 施工工序

测量放线→叠合楼板临时支撑搭设→现浇梁铝

模底模安装→现浇梁钢筋绑扎→现浇梁铝模侧模安装→叠合楼板吊装→水电管线敷设→板面层钢筋绑扎→混凝土浇筑

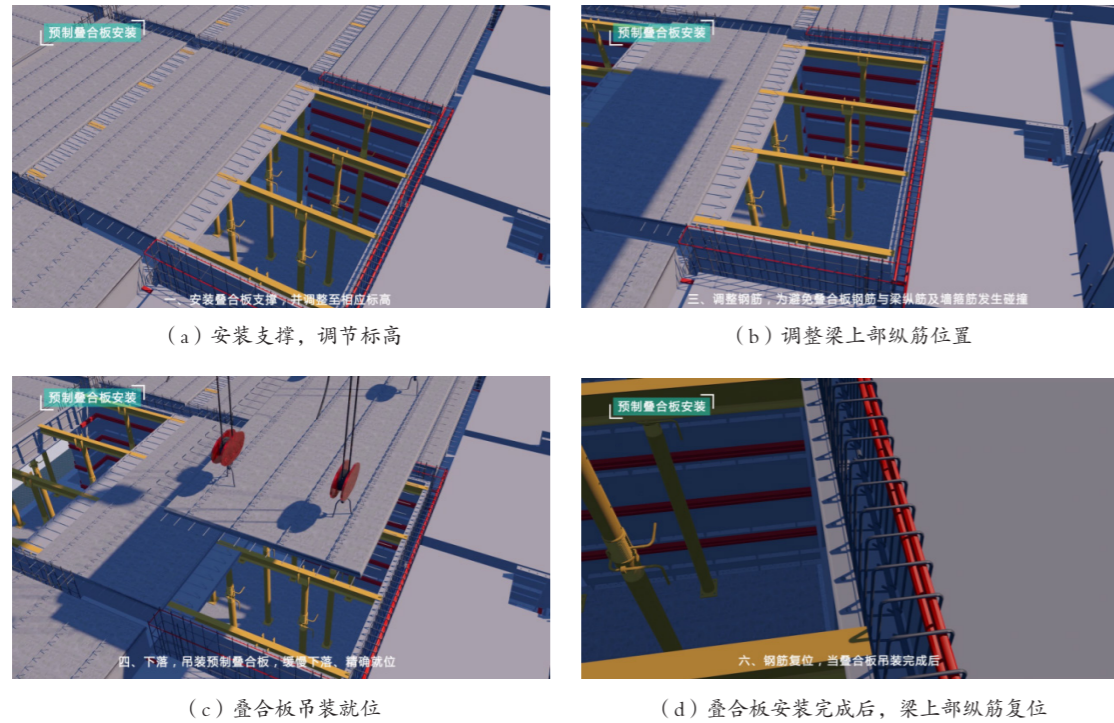


图11 叠合楼板吊装模拟



图12 叠合楼板吊装现场

4.3 预制楼梯施工安装

预制楼梯的吊装时间是N-1层标准层结构浇筑完成, 拼装N层墙柱铝模时吊装N-1层预制楼梯。N层工人通过可周转使用的钢楼梯上下通行。

4.3.1 施工工序

预制楼梯安装流程: 测量放线→主体施工砂浆找平层, 放置苯板→楼梯起吊→楼梯就位→封堵预留孔。预制楼梯安装应注意成品保护, 防止对周边的污染, 结合部位达到受力要求前楼梯禁止使用。

5 总结及改进建议

天健公馆B座采用内浇外挂体系, 质量与安全方面均有可靠保障, 设计及施工均符合满足深圳市相关装配式规范相关要求。并综合应用铝合金模板、自升式爬架和BIM等技术, 形成一套系统的装配式体系。在项目实施过程中, 吊装、铝模和爬架等工程皆为专业团队在实施, 专业队伍拥有丰富的装配式相关施工经验, 对装配式工程实践起到了很好的质量控制效果。通过BIM技术对构件吊装及节

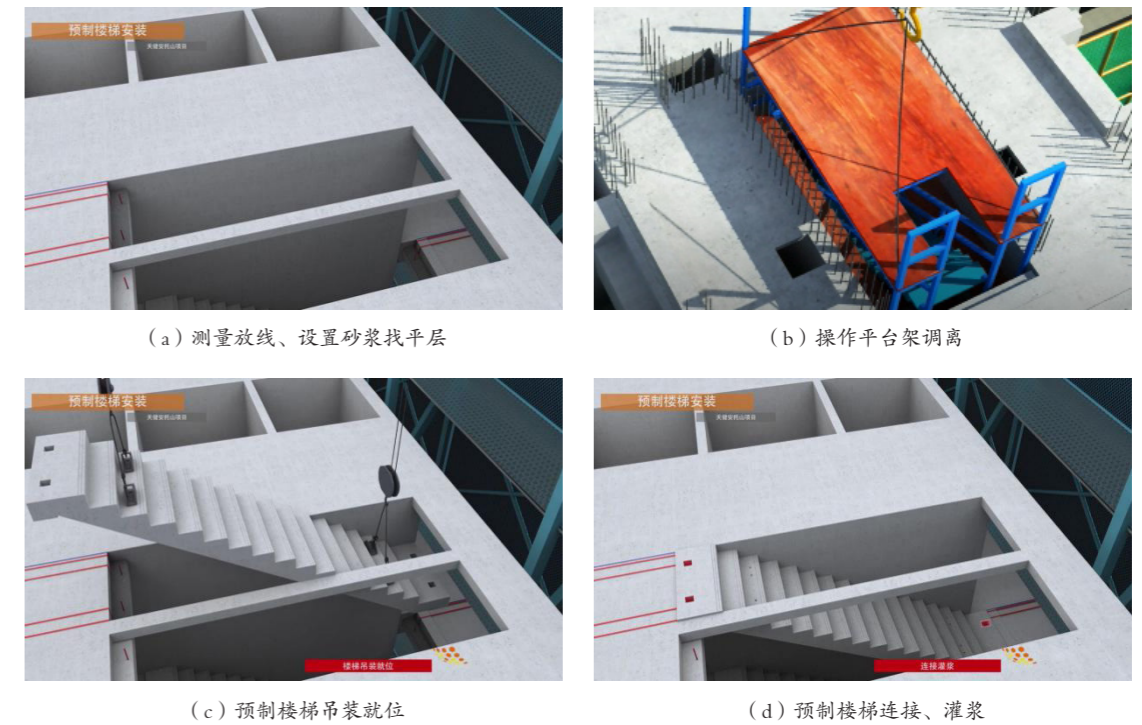


图13 预制楼梯吊装模拟



图14 预制楼梯吊装现场

点连接的模拟, 全面提升了建筑施工阶段的效率和质量, 降低了现场施工管理人员的管理难度。

但现场实施过程中还是有许多过程需要改进:

- 1) 由于工期紧张, 对预制构件的进场验收程序没有做到严格把控, 部分预制构件质量观感不佳, PC墙边角破损未修补;
- 2) 由于主体设计方和PC设计为不同设计单位, 造成部分交叉节点的设计不够精细, 以至于部分吊装过程中的连接节点施工需现场开凿, 影响项目质量和工期;

3) 根据叠合板现场施工情况来看, 部分水电预埋位置, 现浇层厚度不足以覆盖完全, 建议优化此类构件, 确保钢筋保护层厚度。

4) 在装配式施工中更多的结合BIM技术, 如与驻场人员加大沟通, 在构建生产、运输、到场堆放、安装等节点对每一块装配式构件进行数据录入。

参考文献

[1]张仲华, 蒋杰. 装配式高层剪力墙住宅分析——深圳裕馨幸福家园[J]. 动感(生态城市与绿色建筑) 2017, 02:68-77

坡地高层住宅筏基埋深设计探讨

李有志¹, 刘艾轩¹, 吴武松²

(1. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 深圳 518033; 2. 深圳市天健地产集团有限公司, 深圳 518033)

【摘要】 在坡地住宅建筑竖向设计中, 为降低工程成本, 加快施工进度, 建筑竖向设计应充分利用场地高差减小土方开挖量, 因此高层建筑基础埋深在满足地基承载力、抗滑移、抗倾覆稳定性验算及地基整体稳定性验算的前提下, 结合适当的设计措施, 基础埋深可以适当放松。

【关键词】 坡地高层住宅; 基础埋深; 筏形基础

Discussion on the design of embedded depth of raft foundation of tall housing on the slopes

Li Youzhi¹, Liu Yixuan¹, Wu Wusong²

(1. Shenzhen Tagen <Group> Co., Ltd., Shenzhen, 518033; 2. Shenzhen Tagen Real Estate Group Co., Ltd.)

Abstract: In order to reduce the project cost and speed up the construction progress, the vertical design of housing on the slopes should make full use of the site height difference to reduce the amount of earthwork cut. Therefore, under the premise of satisfying the foundation bearing capacity, anti-slippage, anti-overturning stability checking and foundation overall stability checking, considering appropriate design measures, the foundation burial depth can be properly relaxed.

Keywords: tall housing on the slopes, embedded depth of foundation, raft foundation

0 背景概述

在坡地住宅建筑竖向设计中, 保护环境, 减小土方开挖量, 充分利用场地高差进行建筑竖向设计已成为趋势。在此背景下, 在建筑竖向设计中, ± 0.000 的标高一般会抬高, 场地的最高点确定为设计的 ± 0.000 标高, 由此低标高位置的住宅楼地下室底板标高经常会高于室外地坪, 按照规范的要求, 高层住宅的基础埋置深度取建筑高度的 $1/15 \sim 1/18$, 100米的高层住宅, 埋置深度约为7米, 一般会设置地下室。由于高层住宅剪力墙较多且长, 结构不转换时, 直接落入地下室内, 严重影响地下室的空间使用, 在控制成本及单车位面积的要求下, 建筑一般不设置地下室。即使不设置地下室, 按埋置深度7米的要求, 施工组织上要求进行大开挖设计及深基坑支护设计, 势必造成工程成本

及进度的增加, 因此, 坡地高层住宅的基础埋深就是值得设计探讨的问题。

1 规范规定

《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010)(以下简称《高规》)第12.1.8条明确规定:“基础应有一定的埋深, 在确定埋深深度时应考虑建筑的高度, 基础埋置深度可从室外地坪算至基础底面, 并符合下列规定:天然地基或复合地基, 可取房屋高度的 $1/15$;桩基础, 不计桩长, 可取房屋高度的 $1/18$ 。当建筑物采用岩石地基或采取有效措施时, 在满足地基承载力、稳定性要求及《高规》第12.1.7条规定的前提下, 基础的埋深可比本条第1、2款的规定适当放松。当基础可能产生滑移时, 应采取有效的抗滑移措施。

《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》(JGJ-2011)5.1.1条规定高层建筑筏形与箱形基础的地基应进行承载力和变形计算, 当基础埋深不符合本规范第5.2.3条的要求或地基土层不均匀时应进行基础的抗滑移和抗倾覆稳定性验算及地基的整体稳定性验算。

《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》(JGJ-2011)5.2.1条高层建筑筏形与箱形基础的埋置深度, 应按下列条件确定:

- 1、建筑物的用途, 有无地下室、设备基础和地下设施, 基础的形式和构造;
- 2、作用在地基上的荷载大小和形状;
- 3、工程地质和水文地质条件;
- 4、相邻建筑物基础的埋置深度;
- 5、地基土和融陷的影响;
- 6、抗震要求。

综上所述, 高层建筑的埋深在满足地基承载力、基础的抗滑移和抗倾覆稳定性验算的前提下, 基础埋深可以适当放松。

2 设计分析

本次设计分析的惠州阳光花园二期1#楼为32层高层住宅, 主体结构为剪力墙结构, 基础为钢筋混凝土筏板基础, 筏板厚1600mm, 埋深为7.03米, 基础持力层为强风化, 抗震设防烈度为6度, 设计地震分组为第一组, 地震加速度为 $0.05g$;建筑物高度为99.000m。该场地14号楼(图1三角形处)室外绝对标高26.500m, 1号楼室外绝对标高21.800m, 场地高差约5米。1号楼(图1中圆圈处)地下一层标高与室外地坪一致, 无地下二层, 按规范要求基础埋深约7米, 施工组织上要求进行大开挖设计及深基坑支护设计, 造成工程成本及进度的增加。

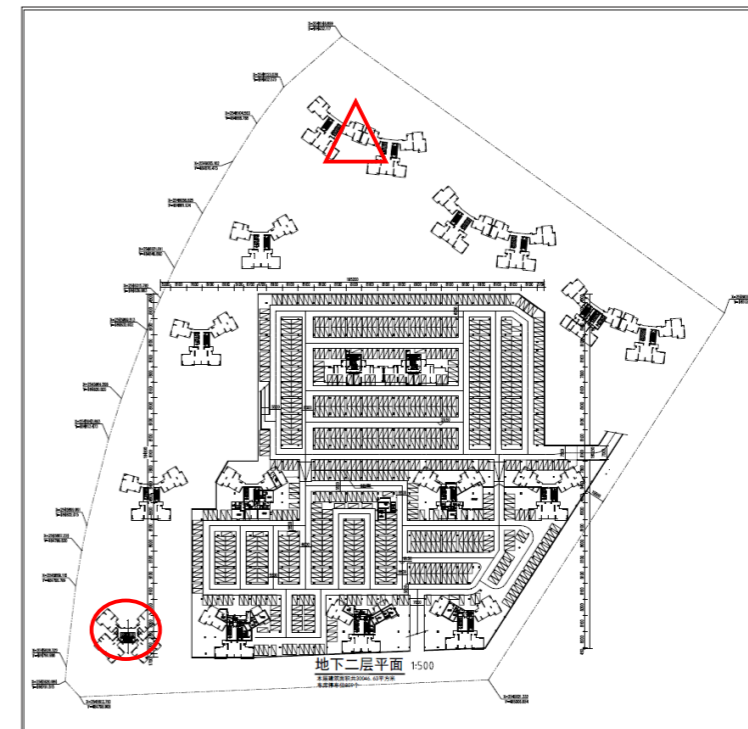


图1 二期平面图

2.1 地基承载力验算

根据该工程地质报告, 基础持力层为③-2层强风化泥质粉砂岩, 埋藏深度浅、强度高、工程性质良好, 地基承载力特征值 $f_{ak}=600$ kPa, 修正后 $f_a=672$ kPa, 计算结果显示的基础底板下基底平均压力值(含基础自重)为 $p_k=548$ kPa, 地基承载力满足设计要求。

2.2 结构的抗倾覆验算

根据PKPM2010版系列结构软件satwe计算结果, 结构整体抗倾覆验算数据如表1所示。

依据以上计算结果及《高规》第12.1.7条之条文解释, 即高宽比大于4的高层建筑, 基础底面不宜出现零应力区, 本工程高宽比约3.5, 该工程结构的抗倾覆能力具有足够的安全储备, 不需再验

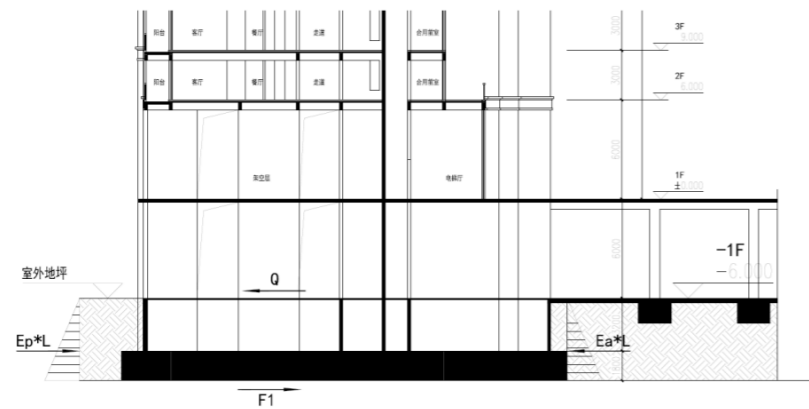


图2 1栋基础埋深剖面图

表 1 1号楼结构整体抗倾覆数据

| | 抗倾覆力矩Mr | 倾覆力矩Mov | 比值Mr/Mov | 零应力区(%) |
|------|-----------|----------|----------|---------|
| X风荷载 | 4596062.5 | 174857.1 | 26.28 | 0.00 |
| Y风荷载 | 3752065.2 | 212627.8 | 17.65 | 0.00 |
| X地震 | 4490785.5 | 145631.4 | 30.84 | 0.00 |
| Y地震 | 3666121.0 | 145616.2 | 25.18 | 0.00 |

算结构的整体倾覆。

2.3 结构的抗滑移验算

高层建筑在承受地震作用、风荷载或其他水平荷载时，筏形基础的抗滑移稳定性应符合下式的要求：

$$K_s Q \leq F_1 + F_2 + (E_p - E_a)L$$

式中： K_s ——抗滑移稳定性安全系数，取1.3；

Q ——作用在基础顶面的风荷载、水平地震作用或其他水平荷载(KN)；

F_1 ——基底摩擦力合力(KN)；

F_2 ——平行于剪力方向的侧壁摩擦力合力(KN)；

E_a, E_p ——分别为垂直于剪力方向的地下结构外墙面单位长度上主动土压力(KN/m)、被动土压力(KN/m)；

L 为垂直于剪力方向的基础边长(m)。

2.3.1 基础顶面处的风荷载、水平地震作用力(Q)

根据该工程基础四周嵌固条件，最不利抗滑移方向为Y向，依据结构软件SATWE计算结果得出，作用在基础顶面Y向的风荷载、水平地震作用总合力 $Q=4943.8\text{KN}$ 。

2.3.2 基础底面摩擦力合力(F_1)

$$F_1 = \mu (F_k + G_k) = 0.4 (255500 + 62745) = 127298 \text{ KN}$$

式中： μ ——基底与岩石地基的摩擦系数，本工程持力层为强风化软质岩，取0.4；

F_k ——上部结构恒载传至基础顶面的竖向力，根据PKPM2010版系列结构软件SATWE计算结果为255500KN；

G_k ——基础自重及基础上土重之和，本工程筏基底面积 705m^2 ，基础埋深5米，其值为62745KN。

2.3.3 平行于剪力方向的侧壁摩擦力合力 F_2 (KN)

$$F_2 = q_s a A_s = 8 \times 300 = 2400 \text{ KN}$$

式中： $q_s a$ ——侧壁回填土摩擦系数，取值为8kPa；

A_s ——平行于剪力方向的侧壁面积，取值为 $30 \times 5 \times 2 = 300\text{m}^2$ 。

2.3.4 结构两侧主动土压力、被动土压力计算

垂直于剪力方向的地下结构外墙面单位长度上主动土压力 E_a 、被动土压力 E_p 、计算式分别为：

$$E_a = 0.5 \psi a \gamma h^2 k_a$$

$$E_p = 0.5 \gamma h^2 k_p$$

式中： ψa 为主动土压力增大系数，本工程取1.0； γ 为填土的重度，本工程取18.0； h 为基础埋深，本工程为5m； k_a 为主动土压力系数，本工程取0.2； $k_p = \tan^2(45^\circ + \Phi/2)$ 为被动土压力系数，本工程取2.0。

经计算， $E_a = 45 \text{ KN/m}$ ； $E_p = 450 \text{ KN/m}$ 。

2.3.5 本工程抗滑合力

本工程抗滑合力为： $F_1 + F_2 + (E_p - E_a)L = 127298 +$

$$2400 + (450 - 45) \times 30 = 141848 \text{ (kN)}$$

2.3.6 该工程的抗滑移验算

该工程的抗滑移验算式为： $K_s = 141848 / 4943.8 = 28.7 > 1.3$ 。

本工程的抗滑移验算满足《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》5.5.1条要求。

2.3.7 设计措施

为提高高层建筑物地下室周边回填土的嵌固作用，且提高建筑物的抗震、抗滑移及抗倾覆能力，应采用以下设计措施：1、回填材料宜选择级配砂石、砂土，并分层夯实，压实系数大于0.94；2、室外地坪以下，建筑物周边外墙连成一体。

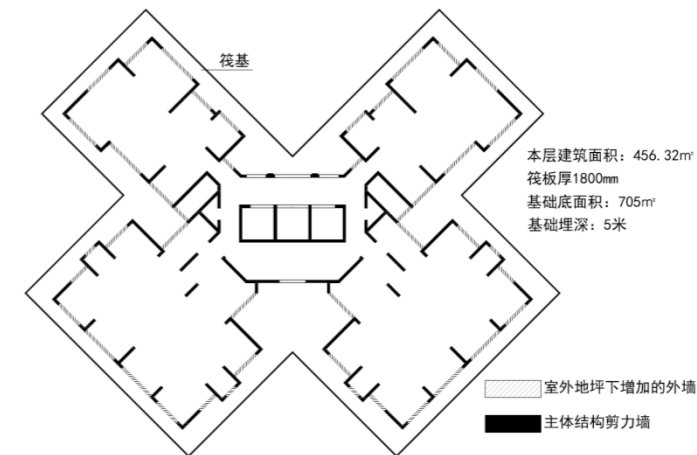


图3 1栋基础平面图

3 结论

1、由于高层建筑的重要性较大，荷载较大，地基基础失效造成的危害非常严重，因此基础设计在满足地基承载力、结构抗倾覆验算、结构抗滑移验算的前提下，基础的埋深是重要的考虑因素，基础的埋深不仅受以上因素的影响，而且受场地外后期工程建设的影响，因此应慎重考虑。

2、在满足计算的前提下，应加强设计构造措施，提高建筑物稳定性，确保结构的安全。

3、岩石基础上高层建筑筏板基础的埋深在满

足地基承载力、抗倾覆验算、抗滑移验算的情况下，埋深可以适当放松，建议埋置深度不小于建筑物高度的二十分之一。在本文案例中，基坑深度减少了2米。

参考文献

- [1]《高层建筑筏形与箱形基础技术规范》(JGJ-2011)
- [2]《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010)
- [3]《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)
- [4]《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)
- [5]《土力学与基础工程》同济大学 高大钊 主编

浅谈铝合金模板二次深化设计及施工要点

徐亚非, 冯志远, 梁志峰, 谭因刚
(深圳市天健建筑工程有限公司, 深圳 518034)

【摘要】 本文对铝合金模板的二次深化设计进行了总结, 并根据实际工作经验, 提出铝合金模板深化设计时构造柱、门垛、下挂板、墙体压槽、反坎、滴水线、企口留设等不同部位的做法; 同时对铝合金模板施工应提前考虑的问题进行总结, 对同行业采用铝合金模板施工的工程具有较好的借鉴意义。

【关键词】 铝合金模板, 二次深化设计

Discussion on the second deepening design and construction point of aluminum alloy template

Xu Yafei, Feng Zhiyuan, Liang Zhifeng, Tan Yingang
(Shenzhen Tegen Construction Co.Ltd., Shenzhen, 518034)

Abstract: This paper summarizes the secondary deepening design of aluminum alloy template, and puts forward the practice of different parts such as structural column, door stack, lower hanging board, wall pressure groove, anti-ridge, drip water line, and enterprise port setting. At the same time, the problems that should be considered in advance in the construction of aluminum alloy template are summarized, and it has a good reference significance for the construction of aluminum alloy template in the same industry.

Keywords: aluminum alloy template, secondary deepening design

0 概述

随着建筑业的快速发展, 建筑施工中对节能环保的要求越来越高。传统木模板施工中, 由于材料周转次数较少, 对资源造成浪费, 同时加工噪声、木屑、废模板等垃圾的产生也不符合节能环保的要求。铝模板不仅具有周转次数多、施工效率高、安全系数高、成型质量好的优点, 而且可以在工厂预制加工、拼接, 减少资源浪费; 同时, 也可以在工厂加工前对结构进行二次深化设计, 使部分二次结构随主体一次成型, 极大的提高了施工效率, 因此铝模板的应用越来越广泛。

但是, 在铝模板深化设计及施工过程中, 如果只会按图纸的内容进行深化设计, 不考虑施工操作及后续工作的展开及材料选择, 很难充分利用铝模板可塑性强的特点, 有时会起到反面作用。鉴于

此, 天健公馆项目在充分利用铝模板高精度和可塑性的前提下, 充分考虑施工操作及后续施工, 对模板进行深化设计, 取得了良好的效果。本人根据工程实际经验, 将铝模板二次深化设计及施工要点总结如下。

1 铝模板二次深化设计

对铝模板的深化设计主要体现在构造柱、门垛、下挂板、墙体压槽、反坎、滴水线、企口留设等方面。

1.1 构造柱、门垛

构造柱的深化设计主要是考虑与混凝土结构距离较近的构造柱, 当构造柱与混凝土墙距离小于500mm时, 可与剪力墙一次成型浇筑。

门垛主要是考虑后期砌体施工难度较大的部位, 比如门垛部位与混凝土的距离小于500mm, 可

以直接与混凝土结构连接一次成型。

1.2 下挂板

门窗洞口上部设置挂板至洞口顶, 从而减少二次过梁的施工。挂板厚度按墙体厚度设置, 挂板高度=层高-梁高度(或板高度)。鉴于施工的安全性考虑, 当门洞距梁(板)底高度 $\leq 500\text{mm}$ 的做下挂板, 与主体结构一次成形浇筑; 当门洞距梁(板)底高度 $> 500\text{mm}$, 不建议做下挂板。

1.3 墙体压槽

墙体压槽与主体一次成型, 避免后期在墙体开凿, 建议铝模板压槽板采用斜口(内窄外宽), 便于拆模; 如不采用斜口压槽板, 拆模时易损伤槽口边角。

1.4 反坎

将卫生间反坎与主体一次成型, 免于二次浇注的困难, 而且成型质量好, 不易渗漏。但是如果卫生间内有墙体隔断, 如做反坎应考虑沉箱部位管道的走向, 建议内隔断墙体不做反坎。如图1。



图1 卫生间内隔墙反坎未考虑沉箱管道

1.5 滴水线

滴水线与主体一次成型, 不但成型效果好, 而且减少后期滴水线施工难度。滴水线可采用滴铝铝条镶嵌在铝模板中。

1.6 企口留设

考虑的后期抹灰施工, 建议在门窗洞口、砌体与混凝土交接部位设置企口。企口宽度可取100~150mm宽, 厚度以10mm为宜, 可采用加设企口板条的方式设置, 也可直接将铝模板直接在此部位做成企口形状。

但企口的留设需与后期砌体施工相结合, 如果混凝土结构面不抹灰, 可采用定制的普通蒸压加气混凝土砌块, 此时留设企口, 砌块厚度比墙体小20mm, 两边企口各厚10mm。如采用高精砌体, 砌体与混凝土面均为薄抹灰, 无需留设企口。

2 铝模板施工注意事项

2.1 工作空间的要求

与木模板相比, 应多考虑铝模板足够的加固空间, 板面的预留洞口、预埋套管应大于墙边至少

600mm, 否则存在操作空间不足的问题。

2.2 脱模剂的使用

为了便于拆模, 也为了铝模板的清理方便, 在铝模板施工前应在其表面涂刷脱模剂。值得注意的是脱模剂应涂刷均匀、适量。过量涂刷会导致混凝土观感变差, 少量涂刷会造成拆模困难。

2.3 洞口的留设

铝模板洞口的留设最好为梯形洞口, 方便拆模; 墙体的预留压槽也应为梯形(内窄外宽)。

2.4 井道位置

如井道位置四面均为混凝土墙体, 采用铝合金模板加固和拆模均存在较大困难, 建议井道位置至少一面墙体采用砌体。

2.5 线盒

混凝土结构面线盒部位如采用方形铝合金模板预埋, 将会造成拆模困难。建议混凝土部位线盒采用后期开凿的方式进行。

2.6 斜撑预埋件

墙柱斜撑预埋件定位应准确, 但预埋后容易受

到扰动,建议同一部位多留几个预埋件。

2.7 飘板位置混凝土

飘板位置如采用封闭式模板,应考虑混凝土的流动性和浮力。流动性差的混凝土会造成此部位的堵塞,而且如果加固不到位,混凝土的浮力会使表面模板上浮,导致混凝土观感质量较差。

2.8 混凝土浇捣



图2 管线绕弯避开传料口

由于铝合金模板的封闭性较好,混凝土浇筑时对振捣的要求比木模板更高,振捣棒应快插慢拔、振捣均匀,否则很容易出现气泡。

2.9 传料口的预留

铝合金模板传料口的位置应考虑板面水电管线的走向,如果布置不当会造成管线绕弯路,增加预埋管线的施工难度。如图2。

3 结论

(1) 铝模板的深化设计主要体现在构造柱、门垛、下挂板、墙体压槽、反坎、滴水线、企口留设等方面。

(2) 二次设计应考虑后续施工材料的选择,主要是砌体、抹灰材料,同时应考虑施工的安全性、便利性。

(3) 铝模板施工对工作空间要求大于木模板,应考虑足够的加固空间;同时铝模板使用前应

涂刷脱模剂,脱模剂的使用应适量。

(4) 铝模板洞口的留设应考虑便于拆模,建议为梯形洞口;传料口的预埋应考虑管线走向。

(5) 铝合金模板施工对混凝土振捣要求较高,否则容易出现气泡。

参考文献:

刘爱武,徐辉,张寿祺,腾颖.高层建筑中铝模板深化设计与工程应用.施工技术.,2017,1:120-123.

褚浩存.建筑物二次结构深化设计浅议.2014,10:70-72.

简讯

国家发改委批复立项:世界最大地震工程模拟研究设施

近日,我国地震工程领域首个国家重大科技基础设施——大型地震工程模拟研究设施由国家发改委批复立项。建成后,将成为目前世界最大、功能最强的重大工程抗震模拟研究设施,这对于保障土木、水利、海洋、交通等重大工程的安全具有重要意义。

该装置将建设在天津大学北洋园校区内,总建筑面积7.7万平方米,建设周期为5年。据项目首席科学家、天津大学校长钟登华院士介绍,该设施建设内容主要包括三大系统:地震工程模拟试验系统、高性能计算与智能仿真系统、试验配套与共享系统;该系统的建设涉及众多领域和多学科交叉,如:水利工程、土木工程、船舶与海洋工程、力学、控制科学与工程、机械工程、精密仪器科学、计算机科学、材料科学与工程、防灾安全等多个学科领域。

随着国家发展,高层建筑、跨海大桥、超长隧道、海底管线、大型核电等重大工程越来越多,这些工程的抗震安全对大型地震工程模拟研究设施提出了迫切需求。“工程结构的失效和倒塌是造成地震中人员伤亡、财产损失和发展受阻的最重要的原因,搞清工程结构的抗震薄弱环节,提升其抵御地震破坏的能力是最根本措施。”中国工程院院士、中国地震局工程力学研究所名誉所长谢礼立研究员表示。

地震模拟振动台是开展抗震模拟研究的有效试验平台,天津大学牵头建设的大型地震工程模拟研究设施将建设尺寸和载重量更大的地震模拟振动台、能同时模拟地震与水下波流耦合作用的振动台阵列试验装置。该设施建成后,可大幅提升我国工程技术领域的创新能力和水平。

人民网

世界上跨度最大全漂浮体系斜拉桥主跨首节钢梁架设成功

武汉青山长江大桥工地南岸边跨钢梁上,一台由中铁大桥局自主研发的CQ500型全自动桅杆式架梁吊机齐齐伸出吊臂,将一节重近500吨的钢箱梁从江面平稳吊起,在钢梁吊至桥面高度时,进行纵、横坡调整。与已架设梁段精准匹配后进行临时连接,标志着这座世界上跨度最大的全漂浮体系斜拉桥主跨首节钢梁架设成功,大桥建设取得阶段性进展。

武汉青山长江大桥是武汉市长江上的第十一座大桥,也是长江上最宽的大桥。大桥位于武钢外贸码头下游1公里处,建成后将成为长江新城的璀璨明珠和地标性建筑。为满足大桥荷载重、车流量大、航道宽等需求,大桥设计为全漂浮体系斜拉桥,主跨938米,双向8车道高速公路,桥宽48米。据中铁大桥院副院长庄勇介绍,全漂浮体系斜拉桥即承重索塔不设下横梁,主梁依靠斜拉索的拉力处于全悬浮状态,整座大桥的荷载就全部通过斜拉索传到了索塔,再由索塔垂直传递至基础。全漂浮体系斜拉桥可以很好适应运营工况及温差、大风、地震等外力作用下的位移变形,避免结构共振,达到抗震消能的作用。

武汉青山长江大桥主跨钢箱梁采用预制吊装架设,共有63个吊装梁段,全宽48米,约为一个标准泳池的长度,是目前长江上最宽的整体式钢箱梁。钢箱梁高4.5米,标准梁长15米,箱梁最大重量为532吨,相当于300多辆小轿车的重量。

武汉青山长江大桥作为武汉四环线跨越长江的通道，是四环线跨越长江的控制性工程之一。大桥预计在2019年底建成通车，建成后将进一步优化武汉“环线+射线”路网结构，对缓解武汉过江交通压力、增强武汉国家综合交通枢纽地位具有重要意义。

中国桥梁网

沪深开展工程总承包企业编制施工图设计文件试点

住建部于2018年7月4日发出了《关于同意上海、深圳市开展工程总承包企业编制施工图设计文件试点的复函》（建办市函〔2018〕347号），表示“同意在上海、深圳市开展工程总承包企业编制施工图设计文件试点，同步开展建筑师负责制和全过程工程咨询试点。试点期限为3年，自2018年8月1日起至2021年7月31日止。”

这是工程建设领域与国际接轨的一大步，这改变了我国施工单位和施工图设计单位不是同一家单位的现状，改变与国际惯例的差异，推动工程建设领域的对外开放，促进工程领域企业提高综合竞争力。

住房城乡建设部要求，试点工作要贯彻落实《国务院办公厅关于促进建筑业持续健康发展的意见》（国办发〔2017〕19号），要求要改进工程建设组织方式，加快完善工程总承包相关的招标投标、施工图设计审查、施工许可、竣工验收等制度规定，实施工程总承包企业负总责；要积极试点建筑师负责制，明确建筑师的权利和责任，提高建筑师的地位，推进全过程工程咨询服务，促进工程建设提质增效，推动建筑业和工程勘察设计咨询业高质量发展。

同时住房城乡建设部还要求上海、深圳两个试点城市的住房城乡建设主管部门，要加强对试点项目的指导监督，严格实施施工图设计文件审查制度，监督有关试点单位执行工程建设强制性标准，确保工程质量和安全。

要加强组织领导，确保试点项目落地，及时协调解决试点工作中出现的问题；发挥工程总承包模式的优势，积极稳妥推进试点工作，形成在全国可复制、可推广的经验和改革创新成果。并要求及时做好评估总结。

中华建设网

北京住宅装配式装修标准10月起实施

据北京市保障房中心消息，北京市第一个住宅装配式装修地方标准已发布，《居住建筑室内装配式装修工程技术规程》将从10月1日起实施，并将从公租房推广到普通商品房项目。这也标志着，一套50平方米的住宅，从毛坯到完成全装修，只用6天时间，这样的装修速度正在北京市多个公租房项目上演。

装配式装修是一种全新装修方式，全部采用干式工法施工。在传统装修作业中，第一步是砸墙砸地改水电，但装配式装修需要装修各种部件，也就是说，只需将隔断墙、地板、墙面、橱柜、卫浴等成品，在现场组装即可，不需要时可直接卸下。从毛坯到完成全装修，一套50平方米住宅仅用6天时间，这样的装修速度正在北京多

个公租房项目落地。与传统施工作业相比，装配式装修现场彻底告别了大量扬尘和噪音，施工速度和用工成本大幅降低，“过去装修一套50平方米公租房需要30天，装配式结构施工情况下，6个工人仅需6天就能装完。插座少、管线难改、卫生间漏水堪称三大“装修后遗症”，这些在装配式装修中也得以较好地克服。

目前，由北京市保障房中心投资建设的公租房项目已基本采用装配式装修技术，涉及8万多套公租房，其中已竣工的达到4万套以上。相比传统装修的公租房，返修率下降了80%，后期维护也更便捷。今后所有市级公租房项目也将按照这种方式装修，一些实现装修交房的普通商品房项目，未来也可执行这份标准。

北京建设

广东建全球流量最大的调水工程

日前，珠江三角洲水资源配置工程可行性研究报告获国家发改委批复。这标志着这项国务院确定的重大水利工程迈入全面建设新阶段。工程建成后将逐步实现西江、东江水源互补、丰枯调剂，退还东江流域及沿线城市生态用水，并为香港等地提供应急备用水源。

珠江三角洲水资源配置工程是从西江水系向珠三角东部地区引水，解决广州、深圳、东莞缺水问题，提高供水保证程度，同时为香港等地提供应急备用供水条件。工程由一条干线、两条分干线、一条支线、三座泵站和一座新建调蓄水库组成。工程西起西江干流鲤鱼洲，东至深圳公明水库，以深层管道输水方式穿越珠三角核心城市群。该工程输水线路约113公里，如同113公里深层“地下长河”。工程沿线将新建鲤鱼洲、高新沙、罗田等3座泵站，并新建一座库容529万立方米的高南沙调蓄水库。

据了解，珠三角水资源配置工程建成后，年引水量17.87亿立方米，年供水量17.08亿立方米，将覆盖和影响珠三角数千万人群，对生活生产、环境保护、生态恢复、水资源科学配置等各个方面产生深远影响。该工程不仅是广东史上投资规模最大、输水线路最长、受水区域最广的水利工程，还将是世界上流量最大的长距离有压管道调水工程。作为人口最多、经济总量居前的全球最大湾区，以珠三角为腹地的粤港澳大湾区面临着水资源分布不均、开发利用不平衡、应急备用水源不足等问题。特别是自2004年以来越发凸显的东江流域缺水问题，制约着珠三角及大湾区未来可持续发展。

在人口、经济集中的东江流域，水资源开发利用率已达38.3%，逼近国际公认的40%警戒线，但仍不能满足沿线用水需求。而水资源总量是东江近10倍的西江水系，开发利用率却仅有1.3%。优化东西部水资源配置，成了珠三角亟待破解的问题。为此，国务院、广东省相继作出战略部署，将珠三角水资源配置工程列入《珠江流域综合规划（2012-2030年）》及全国172项节水供水重大水利工程之列，并要求加快推进。

考虑到工程特点及施工难度等因素，该工程总工期约为60个月，估算总投资339亿元，其中中央投资安排34亿元，预计将于今年底至明年初全面开工。按国家及广东省有关要求，该工程在规划、设计及今后的施工、运营等各环节践行绿色发展理念，全线采用地下深埋盾构施工与深埋管道输水方式，最大限度保护区生态环境，为未来发展预留出大量宝贵地表和浅层地下空间。该工程设计建设面临诸多挑战，特别是位于珠江口狮子洋段约10公里长海底隧洞，水文地质环境异常复杂，需攻克诸多技术高地。

人民网中华建设网

我国工程建设项目审批制度改革试点正在稳步推进

针对当前工程建设项目审批存在的效率低、环节多、时间长等问题，国务院要求今年16个试点地区实现工程建设项目审批时间压缩一半以上。住房城乡建设部于10月10日表示，目前试点工作正在稳步推进，已对18部法律法规和政策文件提出了具体修改建议。

工程建设项目审批制度改革领导小组办公室主任常青在住建部举行的通气会上表示，此次工程建设项目审批制度改革的最突出特点是全流程、全覆盖，是在认真总结国内外经验基础上的一次系统性顶层设计，是一次刀刃向内的自我革新，最终目标是要在全国范围内，构建科学、便捷、高效的工程建设项目审批管理体系。

常青说，法律法规和政策文件的修改是改革的一项重要工作，第一批拟修改的18部法律法规和政策文件中，涉及住建部规章、规范性文件、标准规范共8部。这一批法律法规和政策文件的修改，将有效优化审批流程，减少审批事项及其前置条件，提高审批效率。

工程建设项目审批管理系统是工程建设项目审批制度改革中完善审批体系的重要内容。住建部法规司副司长周韬说，这次改革提出要在国家和地方现有信息平台基础上，整合形成“横向到边、纵向到底”的工程建设项目审批管理系统，覆盖各部门和市、县、区、乡镇(街道)各层级，实现统一受理、并联审批、实时流转、跟踪督办、信息共享。

据介绍，工程建设项目审批制度改革的主要目标是，2018年试点地区审批时间由目前平均200多个工作日压减至120个工作日，2019年上半年全国实现这一目标，2020年基本建成全国统一的工程建设项目审批和管理体系。

新华社