

超缓凝混凝土在钻孔咬合桩施工中的应用

王恒, 赵志刚, 徐云华, 聂志超

(中交一航局第二工程有限公司)

摘 要: 青岛地铁香江路车站采用钻孔咬合桩施工工艺, 该工艺对混凝土凝结时间要求严格, 要求素混凝土桩混凝土的初凝时间达到 60 h 以上, 属于超缓凝混凝土。为了配制满足要求的超缓凝混凝土, 通过 3 种不同超缓凝剂拌合物凝结时间的监测, 选择出初凝时间适宜, 且初凝后能迅速水化的苏博特超缓凝剂来配制超缓凝混凝土; 同时通过分析缓凝剂作用机理, 揭示了超缓凝剂的掺入没有形成新的水化产物, 不会影响混凝土的最终强度。实际施工时, 配制出的超缓凝混凝土施工和易性好, 缓凝时间能满足咬合桩施工切桩要求, 且后期强度发展良好, 可供大规模超缓凝混凝土应用时参考借鉴。

关键词: 钻孔咬合桩; 超缓凝混凝土; 地铁工程

0 引言

混凝土易于成型, 施工简单方便, 已成为世界上使用数量最多、应用范围最广的工程材料, 人们对于普通混凝土的性能已较为了解, 而近年来混凝土结构日趋复杂, 对混凝土性能提出了新的要求。如青岛地铁 13 号线在香江路车站 B 出入口因其临近马濠河, 为了保证车站防水抗渗要求, 计划采用钻孔咬合桩施工工艺。钻孔咬合桩是一种新型的围护结构, 由于其桩芯相互咬合, 解决了传统的桩芯相切桩防水效果差的毛病, 且具有对环境影响小、质量可靠、造价低等优点。而要实现咬合桩施工, 必须配制初凝时间 60 h 以上的超缓凝混凝土, 普通混凝土初凝时间一般为 8~10 h, 由于该混凝土比一般混凝土初凝时间长 5 倍以上, 故属于超缓凝混凝土。香江路车站 B 出入口一共 210 根灌注桩, 其中 105 根为超缓凝混凝土桩, 这是超缓凝混凝土在青岛地区的首次较大规模应用, 为了顺利完成此次超缓凝混凝土浇筑, 联合施工单位 and 商品混凝土搅拌站进行了材料比选、配合比优化设计, 最终成功配制出了各项性能均满足设计施工要求的超缓凝混凝土。

1 超缓凝混凝土应用研究现状

超缓凝混凝土是当今混凝土技术的一个重要研究方向, 最早是由日本于 20 世纪 80 年代中末期首先开发研究出来的一种新型混凝土外加剂, 它是一种能够长时间内(例如超过 24 h 甚至 36 h 之内)任意调剂混凝土的凝结时间而不致破坏混凝土性能的外加剂, 世界上研究和使用的超缓凝混

土较多的是美国、日本和欧洲等国家和地区, 目前应用较多的为凝结时间在 50~80 h 之间的超缓凝混凝土。

在国内, 宋笑^[1]在长沙地铁中研究应用的超缓凝混凝土终凝时间为 60~80 h, 且 72 h 内混凝土强度 ≤ 3 MPa; 王亚强^[2]在杭州地铁中研究应用的超缓凝混凝土的凝结时间为 50~80 h; 以上两项研究未区分混凝土初凝和终凝时间, 实际上混凝土初凝时水化产物已初步联接具有一定的强度, 这时扰动混凝土就将会影响混凝土强度发展; 陈清志^[3]在深圳地铁中研究应用的超缓凝混凝土初凝时间不得早于 60 h, 终凝时间不宜迟于 72 h, 并且要求 3 d 强度不大于 3 MPa, 5 d 强度不大于 10 MPa, 陈清志的研究对于 3 d 和 5 d 龄期强度要求没有实际意义, 实际上希望混凝土切割完成后强度能迅速发展, 提升施工进度效率; 同时灌注桩桩身全部处于地下区域不存在散热问题, 限制 3 d 和 5 d 强度没有实际意义。

综合以上考虑, 青岛地铁超缓凝混凝土超缓凝混凝土初凝时间应不得早于 60 h, 终凝时间不宜迟于 72 h, 并且混凝土最终强度应不受影响。这种材料学上的矛盾性给超缓凝混凝土的研究带来了一定的困难。

2 咬合桩施工工艺及其质量保证措施

2.1 咬合桩施工工艺

钻孔咬合桩采用旋挖钻成桩, 桩与桩之间相互咬合排列, 桩径 1 000 mm, 桩间距为 750 mm。一序桩采用超缓凝混凝土(初凝时间不少于 60 h)。

咬合桩分为2种,素混凝土一序桩和钢筋笼混凝土桩二序桩。施工顺序:先施工一序桩,再施工二序桩,一序桩的施工须确保垂直精度满足要求;二序桩的施工除了确保垂直精度,还须要保证套管能顺利切割两侧相邻的先施工桩的部分桩身混凝土,然后在套管内下钢筋笼,浇筑二序桩钢筋笼混凝土,以达到相邻桩相互咬合的目的,关键

技术是先施工桩的桩身混凝土初凝时间要长,以保证能被后施工桩的钻孔套管下沉时切割。这涉及施工过程中切割的挤压、摩擦等产生对已成一序桩的损害。因此采用在混凝土中加入超缓凝剂,使一序桩混凝土处于未初凝状态时就施工二序桩,从而消除对一序桩的危害。钻孔咬合桩施工顺序见图1。

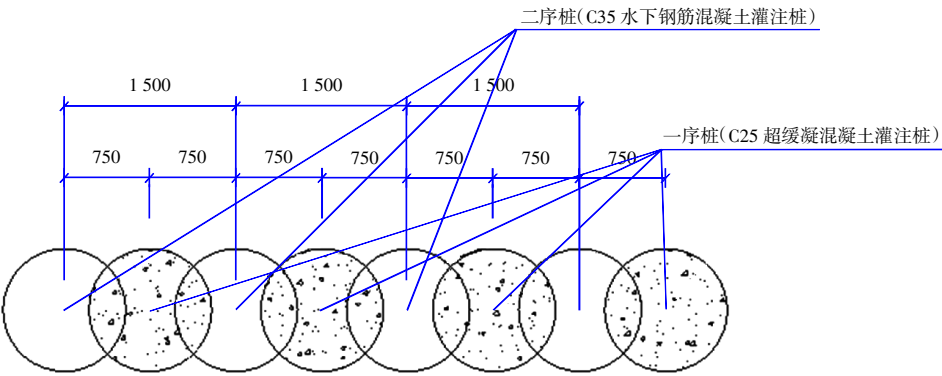


图1 钻孔咬合桩施工顺序

2.2 缓凝时间异常时质量保证措施

1) 平移桩位单侧咬合

如图2平移桩位单侧咬合示意图所示,B桩成孔施工时,其一侧A1桩的混凝土已经凝固,护筒不能按正常要求切割咬合A1、A2桩。在这种情况下,宜向A2桩方向平移B桩桩位,使护筒单侧切割A2桩施工B桩,并在A1桩和B桩外侧另增加1根旋喷桩作为防水处理。

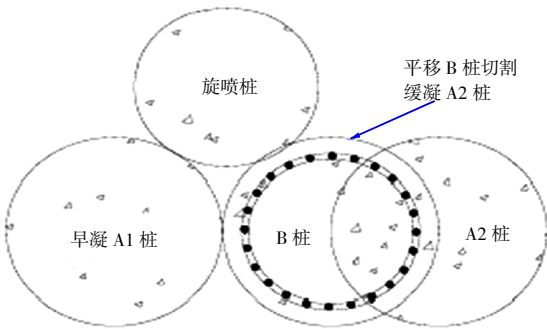


图2 平移桩位单侧咬合示意图

2) 背桩补强

如图3套管咬合桩背桩补强示意图所示,B1桩成孔施工时,其两侧A1、A2桩的混凝土均已凝固,在这种情况下,放弃B1桩的施工,调整桩

序继续后面咬合桩的施工,以后在B1桩外侧增加3根咬合桩及2根高压旋喷桩作为补强、防水处理。

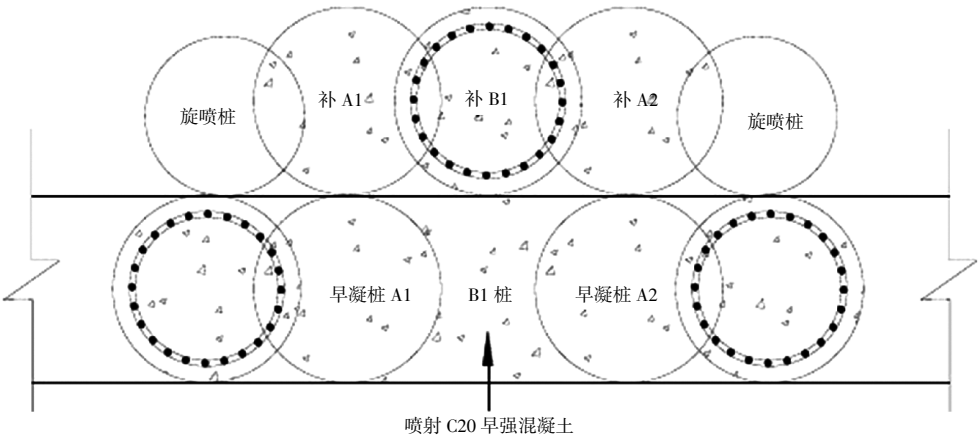


图3 套管咬合桩背桩补强示意图

3 超缓凝混凝土配合比设计

由上述咬合桩施工工艺及其质量保证措施可以看出,凝结时间控制不好会导致至少 1 根桩被废弃,因此凝结时间的控制在咬合桩施工中至关重要,所以选择合适的超缓凝剂对于本次咬合桩施工的成功与否具有重要作用,下面优选了在国内具有类似工程实践经验的 3 家外加剂厂家提供的超缓凝剂分别进行了混凝土配合比设计。

3.1 试验用原材料

1) 胶凝材料:本次工程所用胶凝材料为青岛山水水泥有限公司生产的 P.O42.5 等级水泥、

青岛润亿丰泰建材有限公司的 S95 矿粉和青岛热力发电有限公司生产的 II 级粉煤灰,具体性能指标见表 1~表 3。

表 1 水泥主要性能指标

比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准稠度/ %	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d
360	28.2	140	240	21.2	45.3

表 2 矿粉的物理力学性能

比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	流动度比/%	烧失量/%	活性指数/%	
			7 d	28 d
418	99	0.8	84	99

表 3 粉煤灰的物理力学性能

细度模数 (45 μm 方孔筛)/%	需水量比/ %	烧失量/%	28 d 活性指数/ %
5.2	97	2.8	88

2) 骨料:骨料的级配和强度直接影响新拌混凝土的工作性和硬化混凝土的性能,如强度、变形、热学性能等,也会影响混凝土的成本。本工程采用大沽河优质水洗砂,细度模数 2.9,含泥量 2.1%,泥块含量 0.3%,粗骨料采用符合国标 5~25 mm 连续粒径级配的碎石,含泥量小于 1%;压碎值小于 10%。

3) 外加剂:采用青岛金瑞泰建材有限公司生产的 GJ-01 型高效减水剂,与青岛山水水泥适应好、减水率高、混凝土拌合物具有良好的黏聚性;分别采用江苏苏博特、西卡中国和江苏弗克这 3 家外加剂厂家提供的超缓凝剂进行混凝土试拌和相关性能试验。

4) 混凝土拌合用水采用自来水。

3.2 确定混凝土配合比

混凝土技术要求:强度等级为 C25,凝结时间要求是初凝不得早于 60 h,施工要求坍落度为 180~220 mm,混凝土和易性、黏聚性、保水性好,混凝土浇筑前后不得有明显离析、泌水现象。C25 属于中低强度等级混凝土,商品混凝土搅拌站施工经验已非常丰富,需要注意的是,本次超缓凝混凝土为 C25 水下混凝土,根据 TZ210—2005《铁路混凝土工程施工技术指南》要求,水下混凝土试配强度应为普通混凝土试配强度的 1.1~1.2 倍,结合商品混凝土搅拌站的生产质量控制水平及水下桩基混凝土的施工特点,确定本次超缓凝混凝土的试配强度为 $f_{\text{cu},0} \geq 1.1 \times (f_{\text{cu},k} + 1.645 \times \sigma) = 36.5 \text{ MPa}$,综合高效减水剂的减水率、混凝土坍落度、碎石粒径,选定混凝土单方用水量为 180 kg/m^3 ,水胶比、砂率、矿物掺合料的掺量及外加剂的掺量根据以往工程经验确定,得出试验室配合比见表 4。

表 4 试验室配合比

水泥	矿粉	粉煤灰	砂	5~25 mm 碎石	水	减水剂	超缓凝剂
264	80	56	820	889	180	8	4.00

3.3 混凝土拌合物凝结时间试验

室内 20℃环境,小型混凝土搅拌机按上述配合比多次拌制混凝土,经调整 3 种超缓凝剂拌制的混凝土初始坍落度和坍落度 1 h 经时损失均能满足设计和规范要求。分别进行凝结时间试验,3 种超缓凝剂混凝土总体凝结情况见图 4,试验结果表明苏博特超缓凝剂初凝时间为 66 h、72 h;西卡超缓凝剂初凝时间为 68 h、88 h;弗克超缓凝剂初凝时间为 65 h、87 h。3 种超缓凝剂初凝时间均能满足设计要求,但明显江苏苏博特提供的超缓凝剂初凝后更能迅速反应,最早达到终凝时间。同时还进行了 30℃环境下凝结试验,3 种超缓凝剂混凝土总体凝结情况见图 5,具体试验结果为:苏博特超缓凝剂初凝时间为 62 h、70 h;西卡超缓凝剂初凝时间为 57 h、71 h;弗克超缓凝剂初凝时间为 56 h、69 h。由上述试验结果来看,苏博特提供的超缓凝剂初凝时间适宜,且初凝后能迅速反应很快达到终凝,这对于现场施工进度具有重要意义,且苏博特缓凝剂对于温度变化适应性更好,因此最终选用江苏苏博特外加剂进行最终混凝土强度验证。

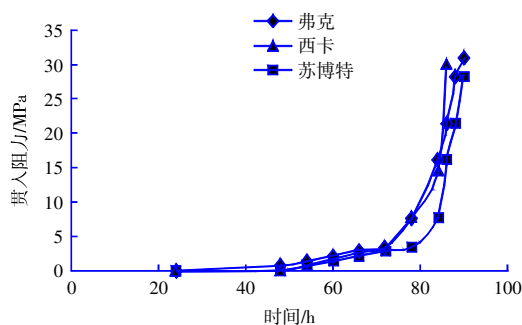


图4 20 °C时3种超缓凝剂混凝土总体凝结情况

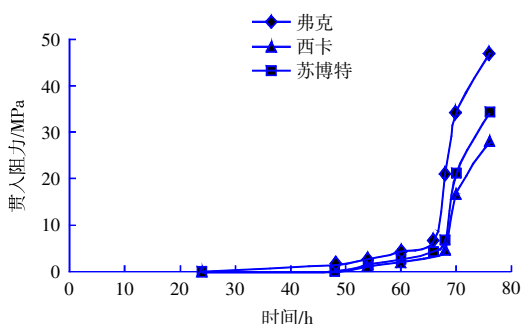


图5 30 °C时3种超缓凝剂混凝土总体凝结情况

3.4 混凝土强度发展规律

混凝土各组分材料中,胶凝材料一般都是大型企业生产,质量相对稳定,外加剂掺量小,一批次生产出来的产品足够较长时间使用,波动性也小,唯有砂石料即便是同一供应商供应存储在料仓内,其上部和底部的颗粒级配、含泥量都有差别,这也是商品混凝土质量波动的主要因素。因此,为了更接近实际生产情况,在料仓的不同部位分别取样按照上述配合比进行试拌,并分别成型了不同龄期立方体抗压强度试件来验证混凝土强度是否能满足设计要求。经试验可知,不同部位的砂石骨料拌制的混凝土强度确实有区别,但是偏差并不大,从试配结果看,超缓凝混凝土与普通混凝土强度发展规律有较大区别,根据经验普通混凝土3 d龄期强度一般能达到标准强度的35%~45%、7 d龄期强度能达到标准强度的80%~90%,而超缓凝混凝土3 d龄期强度基本为0,7 d强度虽然有所增长,但也只能达到标准强度的40%左右,远低于普通混凝土早期强度表现,但是从7 d龄期开始强度迅速增长28 d强度能达到并超过设计强度,也就是说超缓凝混凝土强度不受超长凝结时间的影响,28 d强度可以和普通混凝土一样满足规范要求。

4 超缓凝剂作用机理

混凝土凝结是水泥矿物的选择性水化引起的,铝酸三钙和硅酸三钙首先反应,而石膏会延缓铝酸三钙的反应,故早期水泥浆体结构主要是由硅酸钙水化物确定,硅酸二钙和铁铝酸四钙在硅酸三钙水化物形成的构架内水化,迅速形成结晶产物,而普通缓凝剂会吸附在水泥水化快速形成的薄膜上,从而改变晶体的生长和形貌,以上作用能有效阻止水泥的进一步水化。但目前这些普通缓凝剂均存在一些缺陷:一是适用范围小,只能在较短时间内保持混凝土塑性,二是过量掺入缓凝剂时,混凝土会长时间处于塑性状态,骨料下沉塑性收缩增大,混凝土水分大量蒸发,导致水泥水化前失水太多使得混凝土出现粉化现象,强度下降等问题。苏博特超缓凝剂采用的是近年来欧洲广泛使用的液体型超缓凝剂,其主要成分是三聚磷酸盐和木质素,缓凝基本原理是螯合钙离子阻止钙盐晶体的形成,它们的分子结构中含有络合物形成基,能在碱性环境下与二价钙离子形成不稳定的络合物,在水化初期控制了液相中钙离子浓度,因此可以阻止水泥的水化,产生较强的缓凝作用,随着水化过程的进行,这种不稳定的络合物将自行分解,水化将继续进行,不影响混凝土后期强度的正常发展。加拿大学者Khalil和Ward验证了掺入缓凝剂后水化热和非挥发水的质量之间的线性关系不会改变,说明了超缓凝剂的掺入没有形成新的水化产物,不会影响混凝土的实际水胶比,也就是说对混凝土最终强度的形成没有影响^[9]。

5 实际施工应用情况

第一根咬合桩于2019年10月20日开始施工,实际生产开始前要求混凝土搅拌站提前进行备料,确保所有水泥和掺合料均为同一批次出厂;砂石料优选含泥量低、质地坚硬、颗粒级配良好的材料单独成仓存放;高效减水剂和超缓凝剂分罐存放,储存罐配有气泵每次生产前对罐内液体吹气循环避免长时间存放导致沉淀,影响使用效果。施工完成的105根超缓凝混凝土桩的混凝土拌合物性能良好,凝结时间满足设计与施工要求,桩均能顺利切割,取得了较好的效果。混凝土入桩情况如图6所示,切割超缓凝混凝土桩情况如图7所示。

每台班浇筑混凝土时,试验人员全程现场查



图6 混凝土入桩



图7 切割超缓凝混凝土桩

看,并成型至少4组立方体抗压强度试件,试件拆模后及时移入标准养护室养护,各龄期混凝土试件到期后及时试验以掌握混凝土强度情况。

对超缓凝混凝土28d龄期立方体抗压强度数据进行统计分析,具体数据见表5,根据GB/T 50107—2010《混凝土强度检验评定标准》规定,混凝土强度同时满足 $m_{f_{cu}} - \lambda_1 S_{f_{cu}} \geq f_{cu,k}$; $f_{cu,min} \geq \lambda_2 f_{cu,k}$,故本批超缓凝混凝土强度合格。

表5 超缓凝混凝土28d立方体抗压强度评定表

试块 组数 n	强度标准值 $f_{cu,k}/\text{MPa}$	平均值 $m_{f_{cu}}/\text{MPa}$	标准差 $S_{f_{cu}}/\text{MPa}$	最小值 $f_{cu,min}/\text{MPa}$	合格判定系数	
					λ_1	λ_2
105	25.0	32.4	2.5	30.5	0.95	0.85

6 结语

本次青岛地铁咬合桩实际施工中,配制出的超缓凝混凝土施工和易性好,缓凝时间能满足咬合桩施工切桩要求,且后期强度发展良好,为超缓凝混凝土在青岛地区的推广应用奠定了基础,因此只要精心设计、严控细节,大规模超缓凝混凝土应用完全可以实现。超缓凝混凝土在大体积混凝土等领域施工中应用也有着广泛的前景,下一步还需研究其性能变化规律,实现更多施工领域和混凝土性能创新发展。

参考文献:

- [1] 宋笑.超缓凝混凝土的性能研究[C]//2011中国与亚洲混凝土可持续发展论坛论文集.南宁:2011.
- [2] 王亚强.超缓凝混凝土在深钻孔咬合桩中的配合比设计及应用[J].浙江建筑,2006(11):40-42,48.
- [3] 陈清志.深圳地铁工程钻孔咬合桩超缓凝混凝土的配制与应用[J].工程科技,2002(3):55-58.
- [4] A M 内维尔.混凝土的性能[M].刘数华,冷发光,李新宇,等译.北京:中国建筑工业出版社,2011.