

南干渠工程二衬混凝土气泡成因及控制技术

郑艳侠¹, 樊博², 赵晓芳¹, 赵晓维¹

(1. 北京市南水北调工程建设管理中心, 北京 100195; 2. 北京市南水北调工程建设委员会办公室, 北京 100086)

摘要: 针对北京市南水北调配套工程南干渠二衬混凝土表面存在不同程度气泡的问题, 从混凝土配合比、浇筑过程控制和脱模剂等方面进行了试验研究, 发现了气泡产生的主要原因, 提出了一套成熟的、有效的控制措施, 解决了南干渠二衬混凝土浇筑外观质量的问题。

关键词: 南干渠; 二衬混凝土; 气泡; 混凝土配合比; 浇筑工艺; 南水北调配套工程; 北京市

混凝土表面气泡的产生和存在, 不仅影响了工程的美观, 更重要的是它反映了该工程的质量还没有达到规范标准。如何消除混凝土表面气泡是许多技术人员和监理工作者常遇到而又感到棘手的问题^[1]。但引起混凝土结构表面气泡的原因较多, 也较复杂^[2]。本文针对北京市南水北调配套工程南干渠二衬混凝土表面存在不同程度气泡的问题, 通过试验深入分析了气泡产生的原因, 提出解决二衬混凝土浇筑外观质量的措施和方法。

1、工程概况

北京市南水北调配套工程南干渠工程输水隧洞浅埋暗挖段总长11.302km, 为两条直径3400mm钢筋混凝土现浇圆涵; 盾构段总长15.98km, 为一条直径4700mm钢筋混凝土现浇圆涵。一衬(暗挖初期支护或盾构管片)完成后均需进行厚度为350mm标号为C30W10二衬钢筋混凝土施工, 二衬结构中环向钢筋间距100mm, 纵向钢筋间距200mm。施工中采用钢模台车、自密实混凝土一次浇筑成型。南干渠工程沿线共设二衬施工竖井32座, 竖井间距约800~1000m, 竖井深约15~20m。

在施工过程中, 发现二衬浇筑断面下部混凝土表面存在不同程度的气泡、麻面, 这种现象在类似工程中也普遍存在。为提高二衬混凝土浇筑的外观质量, 形成一套成熟的、有效的控制措施, 从混凝土配合比、脱模剂、浇筑过程控制等方面开展了试验研究。

2、试验安排

本试验共分为三组, 分别针对混凝土配合比、浇筑过程控制和脱模剂的应用效果进行分组试验研究。

(1) 混凝土配合比

针对C30W10混凝土配合比、模具及混凝土自密性能指标等选用和调整, 配合比选用分为单掺和双掺两种。共试验34组。

(2) 浇筑过程控制

按照不同标段不同浇筑入料方式，在2个标段分别进行现场实体实验，主要针对混凝土入仓方式、浇筑速率、辅助振捣措施、自密性能指标等进行组合试验。混凝土配合比相同。

(3) 脱模剂

分别选用机油、油脂脱模剂、食用色拉油和透气性模布四种方式进行对比试验。

3、二衬混凝土配合比试验结果分析

本试验通过系列试配循序渐进、逐步淘汰的试验方式，重点考虑了矿物掺合料比例、自密性能比对和脱模材料三个因素对混凝土气泡的影响^[3-5]。

3.1 矿物掺合料掺合比例试配试验

通过单掺、双掺两种方式以及不同掺合比的试验，进行混凝土自密性能变化的对比，其性能指标主要是T50、坍落扩展度两项性能的中限和上限的对比。根据已选出的外加剂种类，在南水北调总干渠（西四环暗涵工程）使用混凝土配合比的基础上进一步优化，采取不同比例的单掺、双掺配合比，比较试验对混凝土实体表面气泡分布的影响，具体见下表1。

表1 矿物掺合料掺合比例试配

| 配合比代号 | W/C | 各材料用量/kg.m ⁻³ | | | | |
|-------|------|--------------------------|-----|-----|-----|------|
| | | 水 | 水泥 | 粉煤灰 | 矿渣粉 | 胶材总量 |
| E | 0.46 | 175 | 265 | 113 | 38 | 416 |
| F | 0.46 | 175 | 247 | 106 | 57 | 410 |
| G | 0.46 | 175 | 265 | 86 | 57 | 408 |
| H | 0.46 | 175 | 304 | 107 | | 411 |

试验结果发现E~H试块大气泡比较多，主要是底部全部及部分腰线，气泡占整个圆洞面积5.0%左右，气泡连接近直线，质量差，其中由于E、F拆模时间早（6h），严重粘模；G、H试件气泡占整个圆洞面积2.0%左右，质量一般，G试件底部有填充未到的大孔，H试件气泡质量相对小，但数量太多接近直线。

由此得出：单掺配合比粉煤灰掺量过高，新拌混凝土和易性较好，性能指标随时间损失小，但更容易产生气泡，混凝土浆体中粉煤灰上浮。随着含气量增高，不规则气泡上浮更多，受底部模板阻碍，气泡紧贴底模板部位，须要更重的侧压力逸散气泡。双掺配合比中若矿渣粉掺量过多，新拌混凝土粘度增加，性能指标损失较大，且有效气泡引入困难，含气量越低分布于底部气泡的混凝土质量越差，需要很好把握掺量比例，以上试验表明矿物掺合料双掺比例为（15%：15%）较好。

3.2 矿物掺合料的不同取代率试验达到最佳自密性能指标配合比改进试验

在选用G号配合比双掺比例基础上，通过降低水胶比、提高单方用水量，增加胶结材料的用量和新拌混凝土稠度及悬浮力，来改善混凝土的流动性，使其达到最佳自密性能指标来比较试验对混凝土实体表面气泡分布的影响。

表2 自密性能指标改进配合比对比试验

| 配合比代号 | W/C | 各材料用量/kg.m ⁻³ | | | | |
|-------|------|--------------------------|-----|-----|-----|------|
| | | 水 | 水泥 | 粉煤灰 | 矿渣粉 | 胶材总量 |
| G | 0.46 | 175 | 265 | 86 | 57 | 408 |
| X-2 | 0.45 | 180 | 260 | 112 | 60 | 432 |
| X-4 | 0.45 | 180 | 280 | 90 | 60 | 430 |
| M | 0.42 | 180 | 279 | 84 | 86 | 449 |
| N | 0.42 | 180 | 300 | 84 | 64 | 448 |

试验结果显示X-2试件大气泡多，主要分部在底部全部及部分腰线范围，气泡占整个圆洞面积2.0%左右，混凝土质量一般；X-4试件底部分布细小气泡，气泡占整个圆洞面积1.0%左右，混凝土质量相对较好；M试件大气泡相对小气泡多，主要是底部全部及部分腰线，气泡占整个圆洞面积1.0%左右，混凝土质量好；N试件底部两端有1mm左右大小的气泡，小气泡较多分布在腰线及底部均匀分布，气泡占整个圆洞面积0.7%左右，混凝土质量优。

随着胶凝材料的增加，新拌混凝土的流动明显好于以往配合比，气泡的数量和气泡大小有明显改善，未出现砂线情况。随着矿物掺合料的增加，对混凝土表面气泡有影响，矿物掺合料中粉煤灰掺量越高，含气量越高，混凝土表面气泡的较多；矿粉掺量越高，新拌混凝土较粘，含气量不容易引入，混凝土表面气泡较大。

以上试验表明矿物掺合料双掺比例为（15%：15%）较好，同一配合比比较，含气量最好介于3.5%~4.0%，对混凝土外观质量改善明显，X-4为最优配合比。

3.3 脱模材料的对比试验

根据以上选定配合比及确定外加剂引气的引入量，对使用不同稀释比例脱模剂、机油、色拉油及透气性模布等不同材料进行试块试验，来观察对混凝土实体表面气泡分布的影响。

共试验9组，组号分别为X-4（1~9）。其中X-4（1~4）试件与X-4（6~7）试件采用不同稀释比例的油性脱模剂；X-4（5）试件使用普通机油；X-4（8）试件使用色拉油；X-4（9）试件使用透气性模布。脱模剂稀释比例比：X-4（1、2、6）为1：0.5；X-4（3）为1：0.4；X-4（4）为1：0.2；X-4（7）两侧面分别为1：0.2（1：0.4）。

试验结果显示X-4（1）试件气泡较少，零星地分布于腰线两侧中部，X-4（3）与X-4（4）试件少量气泡分布于底部及腰线靠后端。X-4（7）试件大气泡几乎无，少量小气泡分

布于上部，X-4（8）试件底部与腰线下部有少量大小不均气泡，分布均匀；X-4（9）试件左腰线中下部及端头集中三个2.5mm左右气泡，其它部位无气泡，腰线有少量折皱纹，整体外观非常光洁。

试验表明，对模具表面进行精细清洁保养，增加表面光洁度可以减少气泡的吸附，以利于气泡排出；因试验结构实体较小，只要脱模剂涂刷均匀，其油性脱模稀释比例对外观影响不大，通过综合比较色拉油脱模效果较好。透气性模布对混凝土外观质量影响非常大，对气泡的吸附有利，结构整体光洁度高，但在模具上贴模布要求整体平整度高，粘结力强，成型后不慎容易有皱纹。

4、二衬混凝土浇筑工艺研究

现场浇筑工艺研究与配合比试验同步进行，优化配合比完成前，采用原配合比对现场浇筑施工工艺进行总结；完成优化配合比后，进行混凝土浇筑工艺研究。

4.1 原混凝土配合比施工工艺现场实验

二衬混凝土产生气泡浇筑过程控制方面的主要影响因素有：混凝土工作性能、混凝土入仓方式、混凝土浇筑速率、辅助振捣措施应用情况等。在现场浇筑过程中重点进行上述因素的对比试验，总结各项施工参数，指导现场施工操作，力求达到混凝土表面气泡控制的最佳效果。脱模材料的选择和使用也是混凝土外观质量控制的重要一环，脱模材料的对比研究与现场工艺优化实验同时进行。

4.1.1 浇筑工艺控制研究

现场实验阶段，单车混凝土运输时间在30~50min，浇筑入仓温度20℃，泵送距离50~150m。浇筑过程控制如下：

（1）混凝土工作性能：依据规范要求，自密实混凝土坍落坍落扩展度应控制在 $650\pm 50\text{mm}$ ，试验采用上、中、下限三种性能，即坍落坍落扩展度分别控制在700mm、650mm、600mm左右进行对比。

（2）混凝土入仓方式：台车在拱顶正上方沿隧洞顺水流方向共设置了3个灌注口，正中设置一个，距端头板2m左右各设置一个。采用中间灌注口入仓和端部入仓两种方式进行对比研究。

（3）混凝土浇筑速率：采用快速不间断浇筑实验一仓，此时混凝土坍落扩展度控制在中限（650mm左右），不振捣，避免混凝土过稠或过稀出现其他缺陷；其余各实验仓均放慢混凝土浇筑速率，采用分车控制：每仓混凝土理论方量46m³左右，分6车运输浇筑，控制各车浇筑速率、配合不同辅助振捣进行浇筑。

（4）辅助振捣措施：台车共设置6台附着式振捣器（380v，1.5kW，震动力为500kg），布设在断面腰线下45°角位置两侧，每侧3台，纵向平均分布。每台振捣器单独设置开关，可独立工作、单侧工作、全仓工作。实验过程中，三种方式全部采用，每种实验一仓。

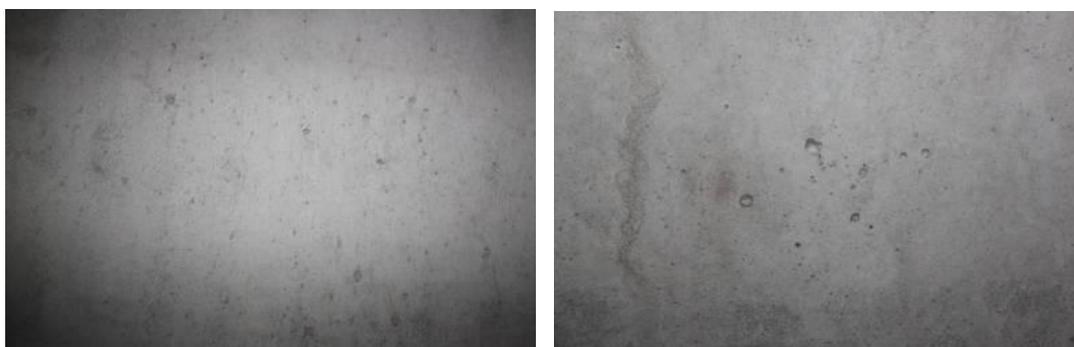
表3 实验组合方式划分表

| 影响因素 | | 振捣 | | |
|------|------------|-----|-----|-----|
| | | 单机 | 单侧 | 全仓 |
| 砼性能 | 上限 (700mm) | 1 仓 | 1 仓 | 1 仓 |
| | 中限 (650mm) | 1 仓 | 1 仓 | 1 仓 |
| | 下限 (600mm) | 1 仓 | 1 仓 | 1 仓 |

成型后混凝土外观质量分析显示：中间入仓与端部入仓浇筑混凝土对其外观质量影响不大，两种入仓方式均可采用；坍落扩展度为上限的混凝土成型后气泡较小，但在施工中易产生其他混凝土缺陷如砂线、翻砂等；坍落扩展度为下限的混凝土成型后气泡较大；采用全仓振捣较单机及单侧气泡少，分部较为均匀，且单机或单侧振捣后易出现气泡集中现象。综合比较认为控制混凝土坍落扩展度为中限，且浇筑时采用全仓振捣方式为优，振捣时间应控制在10~15s。

4.1.2 脱模材料试验研究

经过市场调查与施工经验，选取反应良好的机油、油脂脱模剂、水质脱模剂和食用色拉油等四种脱模剂进行对比试验。共进行三组实体浇筑试验，分别为使用机油与油脂脱模剂脱模对比；使用机油与食用色拉油脱模对比和使用油脂脱模剂与食用色拉油脱模对比。脱模后效果见图2。



(a) 涂刷机油脱模后混凝土表面

(b) 涂刷油性脱模剂脱模后混凝土表面



(b) 涂刷色拉油脱模后混凝土表面

图2 脱模后效果

经过对几种脱模剂的综合比较，可以看出使用色拉油作为脱模材料涂刷操作性较好、混凝土表面气泡相对较少、表面光泽度较好，建议使用色拉油作为二衬混凝土浇筑脱模材料。

4.2 新混凝土配合比施工工艺现场试验

通过混凝土搅拌站对配合比所作研究，提出了采用双掺的推荐配合比。为进一步验证在实体浇筑中使用效果，在施工二标进行五仓浇筑试验，通过对成型混凝土的质量总结，对新配合比的浇注工艺进行优化调整，达到与新配合比相适应的浇注工艺。

为保证混凝土质量采用双向监督方式：浇注前施工方技术人员同现场监理在搅拌站旁站，搅拌站的技术人员到浇注现场进行旁站。双方都检测坍落扩展度、T50、含气量、U型箱填充高度、V漏斗通过时间等，记录检测结果，到场时间、开始浇注时间、完成浇注时间及车牌号，并与驻搅拌站的技术人员数据核对。在浇注期间发现由于白天温度较高，实测混凝土坍落扩展度损失较大、较快，不能保证试验的准确性，为此试验浇筑时间选择在傍晚，同时可以错开路段拥堵高峰期，保证混凝土罐车能在30~50min内到场。

(1) 第一仓（浇注混凝土量共计51m³，剩余约0.5m³，浇注用时4h，坍落度损失5mm~20mm，坍落扩展度损失30mm~60mm，台车上浮5mm。期间浇注混凝土按照技术要求执行，浇注顺利，未发现异常。具体各车混凝土检测结果见下表。

表4 混凝土检查记录表

| 车次 | 方量 m ³ | 出机 时间 | 到场 时间 | 浇注时间 mm | | 坍落度 mm | | 坍落扩展度 mm | | T50 | | V漏斗通 过时间 s | | U型箱填充 高度 mm | | 含气量% | |
|----|----------------------|----------|----------|---------|-------|--------|-----|-------------|-----|-----|----|---------------|----|----------------|-----|------|-----|
| | | | | 开始 | 完成 | 出场 | 到场 | 出场 | 到场 | 出场 | 到场 | 出场 | 到场 | 出场 | 到场 | 出场 | 到场 |
| 1 | 8 | 20:07 | 20:40 | 21:05 | 21:23 | 280 | 260 | 710 | 650 | 3 | 5 | 7 | 10 | 335 | 340 | 3.6 | 3.0 |
| 2 | 8 | 20:16 | 20:45 | 21:29 | 22:00 | 275 | 260 | 700 | 670 | 5 | 4 | 8 | 10 | 340 | 340 | 2.9 | 3.7 |
| 3 | 8 | 20:19 | 21:05 | 22:05 | 22:24 | 260 | 260 | 680 | 620 | 6 | 5 | 10 | 10 | 330 | 330 | 3.8 | 3.4 |
| 4 | 8 | 21:11 | 22:10 | 22:27 | 23:16 | 265 | 260 | 690 | 650 | 5 | 5 | 9 | 10 | 330 | 340 | 3.4 | 3.6 |
| 5 | 8 | 22:17 | 22:52 | 23:18 | 23:56 | 260 | 260 | 690 | 660 | 5 | 5 | 9 | 10 | 335 | 340 | 3.3 | 3.5 |
| 6 | 8 | 23:07 | 23:50 | 23:59 | 00:20 | 275 | 260 | 710 | 670 | 4 | 4 | 7 | 10 | 340 | 340 | 3.3 | 3.2 |
| 7 | 3 | 00:21 | 00:55 | 00:56 | 01:05 | 280 | 260 | 720 | 660 | 4 | 4 | 7 | 10 | 340 | 340 | 3.1 | 3.4 |

拆模后，通过实际现场量测，腰线以下存在气泡，气泡最大长4mm、宽4mm、深3mm，气泡面积占总面积4%。表面平整度实测值1mm~4mm<10mm；中心线位移1mm~4mm<10mm；底坡高程1mm~4mm在±10mm之间；其余检测项目均符合技术及规范要求。

(2) 第二仓（浇注混凝土量共计53m³，剩余约1m³，浇注用时4:48，坍落度损失5mm~25mm，坍落扩展度损失25mm~70mm，台车上浮4mm。期间浇注混凝土按照技术要求执行，浇注顺利，未发现异常。

拆模后，通过实际现场量测，腰线以下存在气泡，气泡最大长4mm、宽4mm、深3mm，气泡面积占总面积3%。表面平整度实测值1mm~5mm<10mm；中心线位移1mm~5mm<10mm；底坡高程-2mm~3mm在±10mm之间；检测项目均符合技术及规范要求。



图3 第二仓拆模后混凝土表面效果

同样，第三仓、第四仓和第五仓拆模检测项目均符合技术及规范要求。

现场试验结果表明，成型混凝土表面缺陷主要集中在腰线以下，主要集中在第二车后半车、第三车、第四车，而对台车上浮影响较大的同样集中在第三、四车。为此在浇筑过程中，第一车、第二车上半车正常浇筑；第二车后半车、第三车、第四车，浇筑1m³左右需要停滞2-3min，总时间控制在2~2.5h；其余车混凝土正常浇筑。每仓浇筑时间在3~4h全部完成，浇筑过程保证混凝土连续、不间断，一次性完成浇筑。

5、结论与建议

本试验从混凝土配合比和浇筑过程控制及脱模剂使用等方面进行深入研究，提出了减少南水北调配套工程南干渠二衬混凝土表面起泡的控制措施。

(1) 混凝土配合比

经过对混凝土配合比选用的比对试验，建议配合比采用70%（280水泥）+15%×1.5（粉煤灰）+15%（矿粉），外加剂使用某厂家的聚羧酸高性能减水剂外掺引气剂，强度可以满足设计要求且浇筑混凝土外观效果较好。

(2) 浇筑过程施工工艺

经过多仓试验，从混凝土入仓方式、浇筑速度、辅助振捣措施、自密性能指标等方面提出了浇筑工程施工工艺。

a、混凝土入仓方式及灌注孔的位置，对浇筑后混凝土外观质量影响不大；

b、单掺配合比混凝土浇筑采用全仓振捣效果较好。浇筑时第一车正常浇筑，第二车浇筑前开始全仓振捣，6个振捣器同时开动，振捣时间5秒；第二至第五车分别在浇筑1/3方量、2/3方量和浇筑完后，采用上述振捣方式振捣；第六车正常灌注。自密混凝土性能指标建议

到场坍落扩展度650mm~700mm之间。

c、双掺配合比混凝土浇筑免振捣效果较好。成型混凝土表面缺陷主要集中在腰线以下，主要集中在第二车后半车、第三车、第四车，而对台车上浮影响较大的同样集中在第三、四车。为此在浇注过程中，第一车、第二车上半车正常浇注；第二车后半车、第三车、第四车，浇注1m³左右需要停滞2-3min，总时间控制在2~2.5h；其余车混凝土正常浇注。每仓浇注时间在3~4h全部完成，浇注过程保证混凝土连续、不间断，一次性完成浇注。

(3) 经过对几种脱模方式的综合比较，考虑透气性模布使用虽然对混凝土气泡的吸附有利，可提高结构整体光洁度，但在模具上贴模布要求整体平整度高，稍有不慎容易产生皱纹，施工难度大，不推荐采用。使用色拉油涂刷操作性较好，且脱模后混凝土表面气泡相对较少，表面光泽度较好。推荐优先选择色拉油作为脱模剂使用，试验过程显示模板的清洁度对于浇筑混凝土外观质量影响较大，建议施工过程中严格控制保证模板使用前平整、光洁。

参考文献

[1] Ramaehandran VS, Feldman R F. 混凝土科学[M]. 黄士元, 孙复强, 王善拔, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社. 1986: 63-66.

[2] 杨勇, 吴峥嵘, 马成刚. 浅论混凝土起泡成因分析与控制技术[J]. 四川水利发电, 2010,29增刊(2): 1-4.

[3] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003,12: 104-105.

[4] 范沈抚. 硬化混凝土起泡结构性质的试验研究[M]. 混凝土与水泥制品, 1993(2): 24-26.

[5] 杨钱荣, 朱蓓蓉, 杨全兵, 等. 高频振捣对引气混凝土气泡特征参数的影响[J]. 建筑材料学报, 2007,(3): 331-332.