



龙溪口航电枢纽工程混合砂的 质量控制要素分析

田军涛¹, 邢小军², 黄攀³, 崔凤奕³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000;
3. 北京中水科海利工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要: 岷江龙溪口航电枢纽工程的混凝土全部使用混合砂, 其质量是混凝土质量控制的重要环节。本工程混合砂的技术要求需兼顾水运和电力行业规范的要求, 混合砂的质量控制目标为质量合格且品质稳定。讨论了混合砂使用中的实际问题和两个行业规范对混合砂要求的细微差异, 将质量控制重点放在天然砂和人工砂的生产管理环节, 提出天然砂和人工砂生产的质量控制要素, 控制混合砂的品质, 保证了工程的混凝土质量, 实际应用效果良好。

关键词: 混合砂; 航电枢纽; 质量控制

中图分类号: U61; TV42+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0119-05

Quality control elements for mixed sand of Longxikou Navigation-power Junction project

TIAN Juntao¹, XING Xiaojun², HUANG Pan³, CUI Fengyi³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;
2. Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China;
3. Beijing Zhongshui Kehaili Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Mixed sand is completely used in the concrete of Longxikou Navigation-power Junction project in Minjiang River, and its quality is an important part of concrete quality control. The technical requirements of mixed sand in this project should take into account the requirements of water transportation and power industry specifications, and the quality control goal of mixed sand is qualified and stable quality. This paper discusses the practical problems in the use of mixed sand and the subtle differences between the two industry codes for mixed sand. The quality control of mixed sand focuses on the production management of natural sand and artificial sand, several quality control elements of natural sand and artificial sand production in this project are proposed to control the quality of mixed sand. The concrete quality of the project is guaranteed and the practical application effect is good.

Keywords: mixed sand; navigation-power Junction; quality control

由于工程条件的限制, 岷江龙溪口航电枢纽工程的混凝土用砂全部使用混合砂。该工程为平安百年品质工程示范项目, 各项工作均高标准、严要求, 混凝土质量是工程质量控制的重点, 也是品质工程的基石。混凝土质量控制必须把控好原材料, 工程用水泥、粉煤灰、外加剂和钢筋均为工厂化的标准产品, 对外部采购有明确的质量

要求和检测参数指标。砂石骨料用量在混凝土中占比最大, 其质量直接影响现场新拌混凝土的性能和后期混凝土质量, 其中砂的影响更大。

工程使用的混合砂是在工地料场生产的, 但所谓的混合砂只是概念上的混合, 即在生产和使用环节仍以天然砂和人工砂的形式分开存在, 在进入搅拌站的搅拌仓前分别生产、存放、运输和

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 田军涛 (1971—), 男, 高级工程师, 从事水工材料研究与应用。

计量。天然砂和人工砂的混合比例在一定范围内可调，给混合砂的质量控制和评定带来影响。航电枢纽工程施工同时涉及水运、电力行业，混凝土及混凝土用砂需分别满足两个行业规范的要求。因此，混合砂的质量控制是本工程混凝土用原材料最复杂、最需要加强现场管理的重要环节。

1 混合砂使用情况

岷江龙溪口航电枢纽工程位于乐山市犍为县新民镇境内，为乐山—宜宾河段推荐的第4个梯级航电枢纽工程，工程开发任务以航运为主，航电结合，兼顾防洪、供水、环保等综合利用，是四川省重点工程。枢纽工程等别为二等，工程规模为大(2)型，船闸级别为Ⅲ级。工程主体混凝土用量278万m³，库区防护工程混凝土用量104万m³。

工程附近河道和河滩内的天然砂石料比较丰富，是混凝土骨料的主要来源，但是开采出的天然河砂细度模数在1.2~1.9范围内，属于细砂(细度模数1.6~2.2)或特细砂(细度模数0.7~1.5)，不宜直接使用。因此提出混合砂方案，即将河道和河滩的卵碎石清洗、破碎，制成人工砂，与天然砂混合使用。

与单独使用细度模数较小的天然砂相比，混合砂方案能够改善混凝土的配合比，有效降低胶材用量，减少混凝土收缩和降低温度应力造成的不利影响，大大提高整体工程质量。此外，天然砂相对人工砂不仅开采成本低，且颗粒形状也优于机制砂。混合砂方案可以使用一部分天然砂，避免过度浪费又合理经济。

2 混合砂控制目标和实际问题

近十几年，混合砂在多个工程中得到应用^[1-6]，取得了良好效果，但是对混合砂的现场质量控制研究较少，标准中也较少提及如何实现混合砂的总体质量控制，缺乏相应的、具有可操作性的混合砂质量控制方案。以岷江龙溪口航电枢纽工程为例，混合砂在使用过程中遇到以下实际问题。

1) 理论上天然砂和人工砂应合并为混合砂统

一进行品质评价，但在实际应用中它们是分开生产、检测的，单独评价时可能存在不合格项目如细度模数和含泥量。

2) 混合砂检测、评价标准未能确定，目前电力标准未将混合砂内容和名称列入。

3) 天然砂和人工砂的细度模数是动态变化的，混合砂参数受两者相关参数和比例的影响，必要时需调整两者的比例。

4) 水运、电力行业规范在砂料要求和质量控制上存在细微差异，适用不同行业标准的混凝土会面临同时在一个搅拌站生产的情况。岷江龙溪口航电枢纽工程的船闸及船闸附属建筑物使用水运行业规范，24孔泄洪闸、地面发电厂房、重力接头坝和护坡工程等使用电力行业规范，两个行业规范要求有细微差别，本工程用砂涉及的两个主要规范为JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》和DL/T 5144—2015《水工混凝土施工规范》。

5) 用河道和河滩的卵碎石生产人工砂的过程中含泥量可能超标，必须加强监测。电力行业标准对人工砂含泥量检测(亚甲蓝MB值试验)没有要求，也没有列入验收控制指标，因此有可能导致不合格的人工砂进入搅拌站。

6) 岷江龙溪口航电枢纽工程需要配制的混凝土主要有C15、C20、C25、C30、C35、C40和C50，不同标号混凝土同时施工时，需要按高标号混凝土标准要求进行质量控制。

基于以上问题，制定适应岷江龙溪口航电枢纽工程现场的混合砂质量控制措施是十分必要的。混合砂的品质稳定也是有效保证现场新拌混凝土性能和后期混凝土质量的重要因素之一。

3 混合砂生产主要影响参数和标准差异

3.1 细度模数

水运工程使用国家新标准方孔砂石筛进行砂料细度模数检测，水工工程使用国家标准砂石筛(水利系列)，两种筛尺寸不同，但测得的细度模数数值基本一致，砂料细度模数的检测可以忽略不同标准的影响。

细度模数的生产控制是生产出合适细度模数的砂料, 使混凝土配合比达到最优。综合各类规范要求和混凝土配制经验, 岷江龙溪口航电枢纽工程细骨料混合砂的细度模数宜控制在 2.3~2.8 中砂范围内。从合理掺配比例看, 天然砂掺配比例不宜太小。天然砂细度模数受料源影响不易控制, 多为 1.2~1.9。人工砂细度模数相对易于调整和控制, 经计算用于掺配的人工砂细度模数在 3.0 左右较合适, 实际生产中人工砂细度模数一般为 2.8~3.2。

混合砂细度模数的计算比较复杂, 表 1 为不同细度模数的人工砂和天然砂按照 60:40、65:35、70:30、80:20 比例混合后的混合砂细度模数。如表 1 所示, 当料源稳定、天然砂的细度模数在 1.5~1.9 时, 可采取 65:35 或 60:40 的比例; 当天然砂细度模数小于 1.5 或波动比较大时, 可采取 70:30 的比例, 人工砂和天然砂的细度模数在一定范围波动时依然可以满足混合砂细度模数控制要求。工程右岸采用 70:30 的比例, 工程左岸采用 65:35 的比例, 应用效果均较好。

表 1 不同比例混合砂的细度模数

天然砂(细度模数)		混合砂(40%天然砂+60%人工砂)细度模数							
A ₈ (1.76)	2.25	2.30	2.34	2.35	2.37	2.44	2.46	2.51	2.61
A ₇ (1.62)	2.19	2.24	2.28	2.29	2.32	2.38	2.40	2.46	2.55
A ₆ (1.58)	2.18	2.23	2.26	2.28	2.30	2.37	2.39	2.44	2.53
A ₅ (1.49)	2.14	2.19	2.23	2.24	2.26	2.33	2.35	2.40	2.50
A ₄ (1.42)	2.11	2.16	2.20	2.21	2.23	2.30	2.32	2.37	2.47
A ₃ (1.35)	2.08	2.13	2.17	2.18	2.20	2.27	2.29	2.34	2.44
A ₂ (1.24)	2.03	2.09	2.12	2.14	2.16	2.22	2.24	2.29	2.39
A ₁ (1.20)	2.02	2.07	2.11	2.12	2.14	2.21	2.23	2.28	2.38
人工砂(细度模数)	B ₁ (2.60)	B ₂ (2.67)	B ₃ (2.74)	B ₄ (2.77)	B ₅ (2.81)	B ₆ (2.91)	B ₇ (2.97)	B ₈ (3.07)	B ₉ (3.19)
天然砂(细度模数)		混合砂(35%天然砂+65%人工砂)细度模数							
A ₈ (1.76)	2.29	2.34	2.39	2.40	2.43	2.50	2.52	2.58	2.68
A ₇ (1.62)	2.24	2.30	2.34	2.35	2.38	2.45	2.47	2.53	2.63
A ₆ (1.58)	2.23	2.28	2.32	2.34	2.36	2.43	2.46	2.51	2.61
A ₅ (1.49)	2.19	2.25	2.29	2.31	2.33	2.40	2.42	2.48	2.58
A ₄ (1.42)	2.17	2.22	2.26	2.28	2.30	2.37	2.40	2.45	2.56
A ₃ (1.35)	2.14	2.20	2.24	2.25	2.28	2.35	2.37	2.43	2.53
A ₂ (1.24)	2.10	2.16	2.20	2.21	2.24	2.31	2.33	2.38	2.49
A ₁ (1.20)	2.09	2.15	2.19	2.20	2.23	2.30	2.32	2.37	2.48
人工砂(细度模数)	B ₁ (2.60)	B ₂ (2.67)	B ₃ (2.74)	B ₄ (2.77)	B ₅ (2.81)	B ₆ (2.91)	B ₇ (2.97)	B ₈ (3.07)	B ₉ (3.19)
天然砂(细度模数)		混合砂(30%天然砂+70%人工砂)细度模数							
A ₈ (1.76)	2.33	2.39	2.44	2.45	2.48	2.55	2.58	2.65	2.75
A ₇ (1.62)	2.29	2.35	2.39	2.41	2.44	2.51	2.54	2.60	2.71
A ₆ (1.58)	2.28	2.34	2.38	2.40	2.43	2.50	2.53	2.59	2.70
A ₅ (1.49)	2.25	2.31	2.35	2.37	2.40	2.47	2.50	2.56	2.67
A ₄ (1.42)	2.23	2.29	2.33	2.35	2.37	2.45	2.48	2.54	2.65
A ₃ (1.35)	2.20	2.26	2.31	2.32	2.35	2.43	2.45	2.51	2.62
A ₂ (1.24)	2.17	2.23	2.27	2.29	2.32	2.39	2.42	2.48	2.59
A ₁ (1.20)	2.16	2.22	2.27	2.28	2.31	2.38	2.41	2.47	2.58
人工砂(细度模数)	B ₁ (2.60)	B ₂ (2.67)	B ₃ (2.74)	B ₄ (2.77)	B ₅ (2.81)	B ₆ (2.91)	B ₇ (2.97)	B ₈ (3.07)	B ₉ (3.19)

续表1

天然砂(细度模数)		混合砂(20%天然砂+80%人工砂)细度模数							
A ₈ (1.76)	2.42	2.48	2.54	2.56	2.59	2.67	2.71	2.79	2.90
A ₇ (1.62)	2.39	2.46	2.51	2.53	2.56	2.64	2.68	2.76	2.87
A ₆ (1.58)	2.38	2.45	2.50	2.52	2.55	2.63	2.67	2.75	2.86
A ₅ (1.49)	2.36	2.43	2.48	2.50	2.53	2.62	2.65	2.73	2.84
A ₄ (1.42)	2.35	2.41	2.47	2.48	2.52	2.60	2.64	2.71	2.83
A ₃ (1.35)	2.33	2.40	2.45	2.47	2.50	2.59	2.62	2.70	2.81
A ₂ (1.24)	2.31	2.38	2.43	2.45	2.48	2.56	2.60	2.67	2.79
A ₁ (1.20)	2.30	2.37	2.42	2.44	2.47	2.56	2.59	2.67	2.78
人工砂(细度模数)	B ₁ (2.60)	B ₂ (2.67)	B ₃ (2.74)	B ₄ (2.77)	B ₅ (2.81)	B ₆ (2.91)	B ₇ (2.97)	B ₈ (3.07)	B ₉ (3.19)

注: 1. A₁~A₈、B₁~B₉ 分别为不同细度模数的天然砂、人工砂样品; 2. 灰色部分表示混合砂细度模数在 2.3~2.8 范围。

3.2 含泥量和石粉含量

不同规范对天然砂含泥量的相关规定见表 2。本工程混凝土有 F50 的抗冻要求, 若只使用天然砂, 《水工混凝土施工规范》要求含泥量≤3.0%; 而《水运工程混凝土施工规范》要求较高, 混凝土强度≤40 MPa 时, 需控制含泥量≤3.0%, 混凝土抗压强度>40 MPa 时, 需控制含泥量≤2.0%。

表 2 不同规范对天然砂含泥量的要求

规范名称	抗冻要求	设计混凝土抗压强度/MPa	混凝土强度等级	含泥量/%
《水工混凝土施工规范》	有	≥30	-	≤3.0
	-	<30	-	≤5.0
《水运工程混凝土施工规范》	有	>40	-	≤2.0
	-	≤40	-	≤3.0
	无	-	≥C60	≤2.0
	-	-	C30~C55	≤3.0
	-	-	<C30	≤5.0

人工砂主要控制石粉含量, 两个规范对石粉定义不同, 《水工混凝土施工规范》的石粉指≤0.16 mm 颗粒, 石粉含量要求 6%~18%, 经试验论证可适当放宽。《水运工程混凝土施工规范》的石粉指≤0.075 mm 颗粒, 石粉含量根据亚甲蓝值 MB(试验获得, 用以判定细微颗粒的吸附性能)和混凝土强度综合决定。

不同规范对人工砂石粉含量的要求不同。《水工混凝土施工规范》要求人工砂(机制砂)石粉含量(≤0.16 mm 颗粒)6%~18%, 经试验论证可适当放宽; 对混合砂无要求。《水运工程混凝土施

工规范》对人工砂和混合砂要求相同, 见表 3。

表 3 水运规范对人工砂石粉含量的要求

MB 值	混凝土强度等级	石粉含量/%
<1.4	≥C60	≤5.0
	≥C55~C30	≤7.0
	≤C25	≤10.0
≥1.4	≥C60	≤2.0
	C55~C30	≤3.0
	≤C25	≤5.0

岷江龙溪口航电枢纽工程制砂用的卵碎石经过清洗, 含泥量比较低, 成品人工砂的含泥量也很少, 用亚甲蓝值试验方法检测人工砂, MB 值一般在 0.8~1.2, 表明微细颗粒主要以石粉为主, 当有 C30 以上强度混凝土施工时, 按水运工程要求≤0.075 mm 颗粒含量应≤7.0%。电力行业的水工混凝土工程使用的人工砂均是在特定勘探设计的料场由新鲜岩石破碎生产, 不会有泥质成分混入, 所以不做泥质含量的检测, 也未列入验收控制指标。但使用河道和河滩的卵碎石生产人工砂可能存在卵碎石清洗不干净或运输过程中带入的含泥量超标, 除加强生产环节的控制以避免超量泥质的带入, 还可以参考水运规范进行不定期的亚甲蓝值试验检测。

综合岷江龙溪口航电枢纽工程的实际施工情况, 不同规范要求的混凝土部位同时施工、不同部位不同强度标号的混凝土同时施工, 应按照严格的质量控制措施执行。混合砂中人工砂比例较多, 天然砂带入的含泥量占比会被人工砂稀释,

但低含泥量有利于混凝土的长期耐久性, 天然砂含泥量仍按 $\leq 3.0\%$ 要求, 留有一定的富余, 有C50混凝土生产时按水运规范宜控制 $\leq 2.0\%$ 。同样, 混合砂中人工砂占比 $60\% \sim 70\%$, 经计算按水运规范人工砂的 $\leq 0.075\text{ mm}$ 颗粒含量范围可以放宽一点, 由 $\leq 7\%$ 放宽到 $\leq 8\%$, 但 $\leq 0.16\text{ mm}$ 颗粒控制范围不宜放宽, 为 $9\% \sim 15\%$ 。

4 生产质量控制要素

4.1 天然砂

1) 考虑规范要求、骨料加工供应情况和不同标号混凝土可能同时供应的因素, 从控制工程混凝土质量出发, 整理优化后提出天然砂品质控制的4个现场生产质量控制要素: 1) 细度模数宜控制在 $1.5 \sim 1.9$, 最低不低于 1.2 。2) 含泥量按 $\leq 3.0\%$ 要求, 留有一定富余; 有C50混凝土生产时宜控制 $\leq 2.0\%$ 。3) 表面含水率不宜超过 6.0% 。4) 根据检测的天然砂细度模数, 结合人工砂的细度模数, 使用比例宜控制在 $30\% \sim 40\%$ 。

在质量检测时, 天然砂的细度模数和含泥量只在检测报告中列出数值, 不做合格性评判。在控制范围内的可正常使用; 超出控制范围内的, 应单独加以分析评定。

4.2 人工砂

对于机制人工砂, 优化后提出5个现场生产质量控制要素: 1) 细度模数宜控制在 $2.8 \sim 3.2$ 。2) 石粉含量。人工砂 $\leq 0.16\text{ mm}$ 的颗粒宜控制在 $9\% \sim 15\%$, 水运工程部分要求 $\leq 0.075\text{ mm}$ 颗粒范围应 $\leq 8\%$ 。3) 亚甲蓝MB值按 < 1.4 控制。4) 表面含水率不宜超过 6.0% 。5) 配合天然砂的细度模数, 使用比例宜为 $60\% \sim 70\%$ 。

人工砂用以调整天然砂的级配不合理, 且掺量相对较多, 所以人工砂的稳定对于混合砂的稳定供给尤为重要, 要定期检测并及时反馈至生产系统。在质量检测时, 人工砂的细度模数和石粉含量同样只在检测报告中列出检测数值, 不做合格性评判。在控制范围内的可正常使用; 超出控制范围内的, 应单独加以分析评定。

4.3 混合砂

混合砂的控制目标是质量好并保持稳定品质。从生产实践看, 应从最初的生产环节加强管理和要求, 严格控制天然砂和人工砂的生产质量控制要素, 同时建立稳定可靠的生产和检测系统, 最终得到品质稳定的混合砂。

混合砂的最终质量控制是通过合格的天然砂和人工砂的比例来调整的, 不再进行单项参数指标的控制。天然砂和人工砂的生产也会存在波动, 尤其是细度模数变化较大时, 要及时调整混合比例。只要用于混合的人工砂和天然砂按照质量控制要素生产, 混合砂在各个参数上经计算应是满足规范要求的。

按质量控制要素要求生产得到的人工砂和天然砂质量较好, 品质稳定。定期抽样检测的混合砂样品细度模数均在 $2.3 \sim 2.6$, 满足 $2.3 \sim 2.8$ 的控制目标, 混合砂的亚甲蓝MB值实测在 $1.0 \sim 1.3$ 范围。混合砂的细度模数和含泥量(或石粉含量)均可认为是合格的, 满足工程混凝土高质量要求, 有效保证了混凝土的质量稳定。

5 结论

1) 混合砂只是概念上的混合, 因此混合砂的质量控制要从人工砂和天然砂的生产控制抓起, 建立稳定可靠的生产和检测系统, 目标是既要保证质量合格, 也要保持品质稳定。

2) 针对工程实际情况, 整理优化后提出天然砂和人工砂生产控制的几个主要生产质量控制要素, 在天然砂和人工砂生产环节加强重点管理, 以此控制混合砂的品质, 实际应用效果良好。供应的混合砂品质稳定, 确保了岷江龙溪口航电枢纽工程混凝土的质量。

3) 岷江龙溪口航电枢纽工程因地制宜合理使用混合砂, 在绿色环保和经济方面的带动作用和示范意义重大。从国内混合砂使用情况看, 岷江龙溪口航电枢纽工程是在大型重点工程中使用混合砂的典型案例, 横跨水运和电力行业对混凝土用砂的质量控制和检测要求, 对后续航电枢纽工程或兼顾不同行业要求的工程有一定借鉴意义。