机制砂河砂掺配 C50 预制混凝土适用性研究

雷思豪
（中交一航局城市交通工程有限公司）

摘　要：为解决高速公路工程天然河砂资源紧缺、造价偏高，且单一机制砂混凝土性能不足、C50 预制箱梁易出现外观质量缺陷的问题，依托兰沈高速兰考至太康段工程，采用正交试验法优化混凝土配合比。试验设置 3 种机制砂与河砂掺配比例及 3 种梯度水灰比，设计 9 组配合比，系统测试新拌混凝土工作性能与各龄期抗压强度，分析参数对混凝土性能的影响规律。试验结果表明：相同水灰比下，混凝土工作性能随机制砂掺量增加逐步下降，大水灰比会显著降低混凝土抗压强度；最优配比为机制砂掺 40%、河砂掺 60%、水灰比 0.33，该配比混凝土工作性能与力学性能最佳，可满足 C50 预制箱梁施工及设计要求，有效节约天然砂石资源、降低工程成本。研究成果可为类似工程提供技术参考。

关键词：机制砂；河砂；C50 混凝土；预制箱梁；配合比优化；工作性能

0　引言

近年来我国高速公路建设快速发展，预制预应力 C50 箱梁已成为高等级公路桥梁主流结构形式，其混凝土性能对细集料品质高度敏感。天然河砂因流动性佳长期作为首选骨料，但受生态管控与资源枯竭影响，豫东地区河砂供应紧张、成本居高不下[1-2]。机制砂来源广、成本低，是替代河砂的绿色建材，但棱角多、石粉高，单独配制 C50 混凝土易出现工作性差、外观质量差(存在水波纹现象)，强度波动大等问题，难以满足预制箱梁施工要求。机制砂与河砂复掺可优势互补，成为高强混凝土用砂的主流技术方向。

现有研究表明，复掺砂可改善混凝土性能，机制砂适宜掺量多为 40%~70%，但相关成果多针对普通混凝土，针对 C50 预制箱梁高泵送、早强、低水化热等专用工况的研究不足，且以单因素分析为主，缺少掺量与水灰比耦合的正交研究。为此，本文依托兰沈高速兰考至太康段工程，采用现场原材料开展正交试验，研究机制砂掺量与水灰比对 C50 混凝土工作性能及强度的影响，选择最优配合比并经箱梁回弹验证。研究创新在于贴合豫东料源特性，采用双因素正交设计，形成“试配—优选—施工—检测”全流程验证，为类似工程提供参考。

1　工程概况

兰沈高速兰考至太康段整体呈南北走向，路线全长 112.101 km，起点衔接日兰高速，终点与盐洛高速互通。项目全线采用双向四车道高速公路技术标准建设，设计行车速度 120 km/h，路基宽度 27 m，桥涵设计荷载等级为公路-Ⅰ级，桥梁工程占比高，上部结构以预制预应力混凝土箱梁为主，混凝土设计强度等级为 C50。

根据预制箱梁施工工艺与设计要求，C50 混凝土需满足核心指标：新拌混凝土坍落度控制在 160~200 mm，拌合物不离析、少泌水、黏聚性良好，适配梁场集中拌和、长距离泵送、快速振捣浇筑施工；硬化混凝土早期强度增长稳定，满足预应力张拉工期要求，28 d 抗压强度达标且富余适中，同时具备优异的密实度、抗渗性与抗碳化性能，降低桥梁结构长期服役耐久性病害风险。

本项目施工标段位于河南省周口市，地处豫东平原，天然河砂资源极度匮乏，周边无合规采砂点，外购河砂运输距离超 150 km，材料成本与运输成本居高不下，且受季节、政策影响，供应稳定性难以保障。而项目周边南阳、平顶山等地区石灰岩资源丰富，机制砂生产企业众多，运距短、供应充足、成本优势显著。结合项目绿色施工、降本增效的建设目标，开展机制砂与河砂复掺 C50 预制箱梁混凝土适用性研究，破解用砂难题、保障施工进度、控制工程成本，具备极强的现实必要性与工程应用价值。

2　试验材料及方法

2.1　原材料性能指标

试验所用原材料均取自项目预制梁场实际进

场主材，各项性能指标均符合 JTG/T 3650—2020《公路桥涵施工技术规范》[3]、JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》[4] 要求，经实验室抽检全部合格。

2.1.1 细集料

细集料选用河砂与机制砂。其中，河砂采购自唐河县鑫淼砂石有限公司，颗粒圆润、杂质少，无风化颗粒与草根等杂物；机制砂采购自方城县盛祥砂石有限公司，由石灰岩破碎筛分制成，颗粒棱角分明，表面粗糙，级配连续性良好，无软弱颗粒，符合机制砂混凝土用骨料技术要求。

细集料性能指标试验结果见表 1。

表 1　细集料性能检测结果

集料类型	品种	表观密度/(g·cm^{-3})	细度模数	孔隙率/%	关键指标
河砂	中砂	2.638	2.7	43.6	含泥量 1.2%；泥块含量 0.3%
机制砂	石灰岩中砂	2.594	2.8	39.1	石粉含量 7.2%；亚甲蓝(MB)值 0.8

2.1.2 粗集料

粗集料采用两级配碎石复掺模式，选用 5~10 mm 与 10~20 mm 两种粒径碎石，通过两级配组合优化粗骨料级配，减少骨料空隙率。其中 5~10 mm 碎石产自禹州鑫基建材，10~20 mm 碎石产自禹州国泰建材，2 种碎石均质地坚硬、无风化、杂质含量低，压碎值、针片状颗粒含量等指标均满足高强度混凝土粗骨料要求，试验结果见表 2。

表 2　粗集料性能检测结果

材料名称	表观密度/(g·cm^{-3})	含泥量/%	泥块含量/%	压碎值/%	针片状颗粒含量/%
5~10 mm 碎石	2.811	0.4	0.1	8.2	3.5
10~20 mm 碎石	2.737	0.8	0	7.6	4.1

2.1.3 胶凝材料

胶凝材料选用新乡平原同力水泥有限责任公司生产的 P·O52.5 级普通硅酸盐水泥，该水泥的早期强度高、安定性好，可适配高强度预制混凝土。

水泥性能检测试验结果见表 3。

表 3　水泥性能检测结果

材料名称	型号	密度/(kg·m^{-3})	标准稠度用水量/%	初凝时间/min	终凝时间/min	3 d 抗压强度/MPa	3 d 抗折强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa	安定性
普通硅酸盐水泥	P·O52.5	3 150	28	195	251	28.6	5.2	58.1	8.4	合格

2.1.4 拌合用水与外加剂

拌合用水采用预制梁场自来水，水质洁净无杂质，不含有害杂质与腐蚀性物质，完全符合 JGJ 63—2006《混凝土用水标准》要求，可直接用于混凝土拌和。外加剂选用山西黄河新型化工有限公司生产的 HJSX-A 高性能聚羧酸系高效减水剂，该减水剂减水率高、坍落度损失小、与水泥相容性好，适配 C50 高强度混凝土，可有效降低水灰比，提升混凝土工作性能与力学强度。试验结果见表 4。

表 4　拌合用水及外加剂性能检测结果

材料名称	规格型号	检测指标	指标值
拌合用水	地下水	碱含量/(mg·L^{-1})	102.28
		氯化物含量/(mg·L^{-1})	78.94
		pH 值	7.96
外加剂	HJSX-A 高性能聚羧酸系高效减水剂	减水率/%	30
		含气量/%	2.70
		固含量/%	21.62
		氯离子含量/%	0.02

2.2 机制砂对混凝土性能的影响

本试验所用机制砂为水洗机制砂，具有颗粒棱角多、比表面积大、细度模数 2.8、石粉含量 7.2%、MB 值 0.8 的典型特征，与项目所用天然河

砂物理特性差异显著。将该机制砂与河砂复掺配制 C50 预制箱梁混凝土，其性能影响机理及针对性技术保障措施如下。

1）工作性能方面：本文所用机制砂棱角突出、比表面积大，拌和时需更多胶凝浆体包裹骨料表面，同等浆体用量下会降低混凝土流动性，使坍落度、扩展度下降；机制砂中 7.2% 的适量石粉可发挥微集料填充效应，优化骨料空隙结构，提升保水性、减少泌水离析。河砂颗粒圆润、比表面积小、流动阻力小，可显著提升拌合物流动性。为适配 C50 混凝土泵送施工要求，本次研究控制机制砂掺量≤50%、优选 40% 机制砂+60% 河砂复掺比例、采用聚羧酸高效减水剂等技术措施，平衡混凝土流动性、黏聚性与保水性，解决单一机制砂和易性差的问题。

2）力学性能方面：本文所用机制砂表面粗糙、棱角清晰，可与水泥形成更强机械咬合作用，提升界面粘结强度；石粉填充骨料间隙可降低内部孔隙率、提高密实度，有利于 C50 混凝土 7 d 与 28 d 抗压强度发展。当机制砂掺量过高时，石粉富集导致需水量大幅上升，浆体包裹不足、界面劣化，容易出现泌水现象，强度呈先上升后下降规律。为此，本次研究通过正交试验确定最优水灰比 0.33、严控水灰比不大于 0.33、采用两级配碎石优化骨架结构，保证混凝土强度达标且富余适中，满足预制箱梁预应力张拉与受力要求。

3）耐久性方面：本文所用机制砂与河砂复掺可优化细骨料级配，提升 C50 混凝土密实度，对外观质量有显著提升，减少有害孔隙并细化孔径，阻断水分、氯离子等有害介质侵入，提升抗渗、抗冻、抗碳化性能，延长箱梁服役寿命，保障结构长期耐久性。

2.3　试验设计与测试方法

2.3.1　配合比设计

试验严格依据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》[5]设计 C50 混凝土配合比，设定坍落度控制在 160~200 mm，采用双因素正交试验设计，选取 2 个核心变量：1）机制砂与河砂质量掺比设置 30%:70%、40%:60%、50%:50%三个方案；2）水灰比设置 0.28、0.33、0.38 三个方案，共设计 9 组正交配合比，固定砂率为 40%，粗集料复掺比例不变，配合比参数见表 5。

表 5　试验配合比参数

试件编号	机制砂:河砂	砂率/%	水灰比	水泥/（kg·m^{-3}）	机制砂/（kg·m^{-3}）	河砂/（kg·m^{-3}）	碎石总量/（kg·m^{-3}）	水/（kg·m^{-3}）	外加剂/（kg·m^{-3}）
PHB1	30%:70%	40	0.28	554	201.9	471.1	1 053	155	7.215
PHB2	40%:60%	40	0.28	554	269.2	403.8	1 053	155	7.215
PHB3	50%:50%	40	0.28	554	336.5	336.5	1 053	155	7.215
PHB4	30%:70%	40	0.33	475	216.6	505.4	1 083	155	5.821
PHB5	40%:60%	40	0.33	475	288.8	433.2	1 083	155	5.821
PHB6	50%:50%	40	0.33	475	361.0	361.0	1 083	155	5.821
PHB7	30%:70%	40	0.38	408	230.4	537.6	1 104	155	5.315
PHB8	40%:60%	40	0.38	408	307.2	460.8	1 104	155	5.315
PHB9	50%:50%	40	0.38	408	384.0	384.0	1 104	155	5.315

2.3.2　测试方法

试验过程严格遵循 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》[6]相关要求，混凝土拌和采用强制式搅拌机，先将粗细骨料干拌均匀，再加入水泥、外加剂继续干拌，最后加入拌合用水搅拌至均匀，拌合时间控制在 3~5 min。

1）新拌混凝土工作性能测试：混凝土拌和完成后，立即采用坍落度筒测试坍落度，采用扩展度板测试扩展度，同时观察并记录混凝土的保水性、棍度、黏聚性，各项指标测试完成后及时记录，确保结果精准。

2）力学性能测试：每组配合比制作 3 组 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试块，试块制作完成后在室内静置 24 h 拆模，拆模后放入标准养护室（温度 20±2 ℃，相对湿度≥95%）养护，分别养护至 7 d、28 d 后，采用液压压力试验机进行抗压强度测试，加载速率控制在每秒 0.5~0.8 MPa，取 3 块试块强度的平均值作为该组试块的抗压

强度结果。

3　试验结果与分析

3.1　工作性能结果分析

9 组试验混凝土工作性能测试结果见表 6，通过对测试数据的对比分析，可明确机制砂掺量与水灰比对新拌混凝土工作性能的影响规律。

表 6　混凝土工作性能测试结果

试件编号	坍落度/mm	扩展度/mm	保水性	棍度	黏聚性
PHB1	185	475	无泌水	中	良好
PHB2	180	460	少量泌水	中	一般
PHB3	165	455	少量泌水	下	较差
PHB4	195	495	无泌水	上	良好
PHB5	190	485	无泌水	中	良好
PHB6	160	475	少量泌水	下	较差
PHB7	200	530	无泌水	上	良好
PHB8	195	510	少量泌水	中	一般
PHB9	160	495	大量泌水	下	差

由表 6 数据可知，相同水灰比条件下，新拌混凝土的坍落度与扩展度均随机制砂掺量的增加呈逐步降低趋势，黏聚性与保水性也随之变差。当机制砂在细集料中占比为 30%时，河砂占比高，混凝土流动性优异，保水性好，无泌水现象，黏聚性达标，完全满足预制箱梁施工要求；机制砂在细集料中占比提升至 40%时，混凝土坍落度、扩展度略有下降，但坍落度仍处于 160~200 mm 的设计范围内，保水性与黏聚性良好，无明显泌水，施工适用性强；当机制砂在细集料中占比达到 50%时，混凝土坍落度降至 160~165 mm 以下，扩展度大幅下降，出现泌水、黏聚性差等问题，不利于混凝土泵送与振捣施工，易导致箱梁外观出现蜂窝、麻面等质量缺陷。

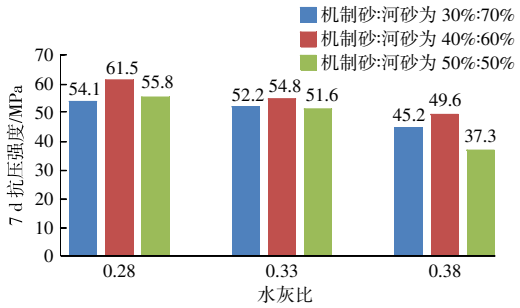
从水灰比方面分析，相同机制砂比例下，水灰比越大，混凝土坍落度与扩展度越高，这是因为水灰比增大，拌合用水量增加，浆体流动性提升，但水灰比过高会导致混凝土黏聚性下降，泌水现象加重，尤其是 PHB9 组（水灰比 0.38、机制砂在细集料中占比 50%）出现大量泌水，工作性能完全不达标。综合来看，PHB5 组（机制砂在细集料中占比 40%、水灰比 0.33）工作性能各项指标均衡，最适配 C50 预制箱梁施工要求。

3.2　抗压强度结果分析

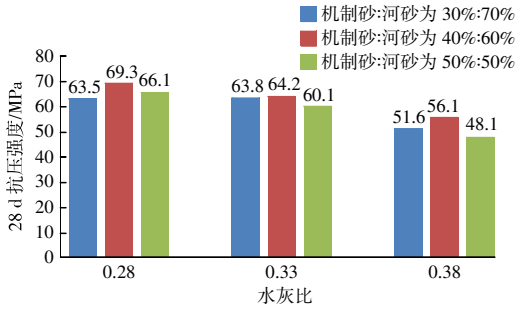
各组混凝土 7 d、28 d 标准养护抗压强度测试结果见表 7，不同配合比混凝土抗压强度变化趋势见图 1，直观反映机制砂掺量与水灰比对混凝土力学强度的影响。

表 7　各组混凝土 7 d、28 d 标准养护抗压强度测试结果

试件编号	7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	满足试配强度情况
PHB1	54.1	63.5	满足，富余强度大
PHB2	61.5	69.3	满足，富余强度大
PHB3	55.8	66.1	满足，工作性差
PHB4	52.2	63.8	满足，经济性一般
PHB5	54.8	64.2	满足，性能均衡
PHB6	51.6	60.1	满足，富余强度小
PHB7	45.2	51.6	不满足
PHB8	49.6	56.1	不满足
PHB9	37.3	48.1	不满足



（a）7 d 抗压强度随机制砂掺量变化曲线



（b）28 d 抗压强度随机制砂掺量变化曲线

图 1　不同配合比 C50 混凝土抗压强度变化曲线

由表 7 与图 1 可知，水灰比对混凝土抗压强度的影响极为显著，水灰比从 0.28 提升至 0.38 时，混凝土 7 d、28 d 抗压强度呈大幅下降趋势，水灰比 0.38 的 3 组配合比，混凝土 28 d 抗压强度均远低于 C50 试配强度 59.9 MPa，无法满足设计要求，主要原因是水灰比过大，水泥浆体孔隙率升高，密实度下降，骨料与浆体界面黏结力减弱，导致强度大幅降低。

在相同水灰比条件下，混凝土抗压强度随机制砂掺量增加呈先上升后下降的趋势，机制砂在

细集料中占比 40%时，抗压强度达到峰值。水灰比 0.28 时，PHB2 组（机制砂在细集料中占比 40%）28 d 抗压强度69.3 MPa，远高于 PHB1 组与 PHB3 组；水灰比 0.33 时，PHB5 组（机制砂在细集料中占比 40%）28 d 抗压强度 64.2 MPa，强度达标且富余度适中，经济性优于低水灰比组；机制砂在细集料中占比 50%时，因石粉含量过高、工作性差，混凝土内部结构密实度降低，强度开始下降。综合力学性能与经济性，PHB5 组配合比最优，既满足强度要求，又减少水泥用量，降低工程成本。

3.3　最优配比工程验证

基于试验结果，优选机制砂∶河砂=40%∶60%、水灰比 0.33 的 PHB5 组配合比作为 C50 预制箱梁施工推荐配合比，材料用量见表 8，将该配合比应用于项目 2 号综合预制梁场，开展预制箱梁施工，并采用回弹法对箱梁混凝土进行无损检测，检测依据 JGJ/T 23—2011《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》[7]，检测结果见表 9。

表 8　机制砂与河砂 C50 混凝土配合比

kg/m³

材料名称	水泥	机制砂	河砂	碎石（5~10 mm）	碎石（10~20 mm）	外加剂	水
掺量	475	288.8	433.2	217	866	5.821	155

表 9　预制箱梁混凝土无损检测（回弹法）结果

MPa

箱梁腹板测区	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区	6 区	7 区	8 区	9 区	10 区
测区强度换算值	58.6	56.6	58.2	59.2	54.6	56.6	57.8	56.2	58.4	56.5

由表 9 检测结果可知，结合回弹法强度修正系数，预制箱梁混凝土回弹检测强度平均值为 57.3 MPa，推定值为 55.0 MPa，混凝土实际强度完全满足 C50 设计要求，箱梁外观质量良好，无蜂窝、麻面、裂缝、泌水等缺陷，证明该推荐配合比具备良好的工程实用性，可大规模推广应用。

4　结语

本文通过开展机制砂与河砂复掺 C50 预制箱梁混凝土正交试验，系统研究了砂料掺配比例、水灰比两大关键参数对混凝土工作性能以及力学性能的影响规律，结合现场实体工程验证，明确了适配豫东地区的最优混凝土配合比，主要结论如下：

1）相同水灰比条件下，C50 预制箱梁混凝土坍落度、扩展度随机制砂在细集料中占比增加逐步降低，黏聚性与保水性变差，机制砂在细集料中占比超过 50%时，混凝土工作性能无法满足现场外观质量要求。

2）水灰比是控制 C50 混凝土抗压强度的核心参数，水灰比超过 0.33 后，混凝土 28 d 抗压强度大幅衰减，无法满足设计要求，高强度混凝土施工需严格把控水灰比。

3）机制砂与河砂掺比 40%∶60%、水灰比 0.33 为最优配合比，该配比下混凝土工作性能均衡、28 d 抗压强度达标且富余度适中，兼顾力学性能、施工性与经济性，完全适配 C50 预制箱梁施工。

4）现场预制箱梁回弹检测结果证实，机制砂与河砂复掺技术应用于 C50 预制箱梁混凝土完全可行，可有效缓解天然河砂短缺难题，降低工程成本，符合绿色施工要求，具备大范围推广价值。

参考文献：

[1] 孙俊崇. 机制砂与河砂掺配用于 C50 T 梁混凝土适用性研究[J]. 新材料·新装饰科技，2023，5（13）：5-7.
[2] 王俊锋. 机制砂和河砂掺配在混凝土中的运用及质量控制研究[J]. 科技创新导报，2018，15（13）：36-37.
[3] JTG/T 3650—2020 公路桥涵施工技术规范[S].
[4] JGJ 52—2006 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S].
[5] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S].
[6] JTG 3420—2020 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S].
[7] JGJ/T 23—2011 回弹法检测混凝土抗压强度技术规程[S].