

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222474

全风积沙混凝土抗压强度试验研究

彭 傲^{1a,1b}, 陈国新², 史阳光^{1a,1b}, 刘德军²

(1. 新疆农业大学 a. 水利与土木工程学院; b. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 嘉兴学院建筑工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: 为探究水胶比、粉煤灰、矿粉掺量、龄期对全风积沙混凝土抗压强度的影响,开展了全风积沙混凝土抗压强度试验,结合 XRD 衍射结果对其物象成分进行微观表征,并通过多元线性回归建立全风积沙混凝土抗压强度预测模型。结果表明,全风积沙混凝土抗压强度随水胶比增大先增加后减小,当水胶比为 0.4 时,抗压强度最大;粉煤灰对全风积沙混凝土抗压强度增长效应不及矿粉增长效应显著;粉煤灰和矿粉的掺入更易将 AFt 转化为 AFm;建立的抗压强度预测模型精度较高,适用于细砂混凝土。研究结果可为全风积沙混凝土的工程应用提供理论依据和技术支持。

关键词: 全风积沙混凝土; 辅助胶凝材料; 抗压强度; 强度预测模型

中图分类号: TV431⁺.9; TU528.56

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0159-04

1 引言

2022 年联合国规划署指出,全球砂石消费量每年高达 500×10^8 t,我国存在着丰富的风积沙资源,合理利用风积沙有利于缓解我国砂石紧缺的局面。吴俊臣^[1]研究了风积沙混凝土力学性能,结果表明混凝土的抗压强度随风积沙的掺入量呈先增后减的趋势,当风积沙替代率为 20% 时对抗压强度贡献最大,适量风积沙会改善孔结构,优化颗粒级配以提高混凝土的密实度;HUA C 等^[2,3]提出骨料仅由沙构成的砂混凝土,这种混凝土通常由沙、水泥、水、填充料还有外加剂组成,与普通砂浆的区别在于砂混凝土的水胶比更低,从而达到较高的抗压强度。研究发现,以石灰粉和矿粉作为填充料可减少离析和沉降,且矿粉的掺入有助于提高砂混凝土后期抗压强度。目前,国内采用风积沙制备混凝土主要集中于风积沙部分替代河沙的层面,而关于全风积沙混凝土(FASC)鲜有报导。鉴此,本文以 FASC 为例,探究了利用粉煤灰和矿粉作为辅助胶凝材料制备 FASC 的可行性,并对 FASC 的抗压强度及物象组成进行研究,以期 FASC 的工程应用提供理论支持。

2 试验材料及设计

2.1 试验材料

①风积沙。新疆生产建设兵团农二师 32 团的风积沙,表观密度 $2\ 677\ \text{kg}/\text{m}^3$,紧密堆积密度 $1\ 513\ \text{kg}/\text{m}^3$,松散堆积密度 $1\ 329\ \text{kg}/\text{m}^3$,粒径分布和风积沙成分见表 1、2。②水泥。P·O 42.5R 硅酸盐水泥。③粉煤灰。二级粉煤灰。④矿粉。高炉矿渣微粉(S95 矿粉)。⑤减水剂。聚羧酸高效减水剂,减水率 25%。⑥水。饮用水。

表 1 风积沙粒径分布

Tab. 1 Aeolian sand particle size distribution

粒径尺寸/mm	含量/%	粒径尺寸/mm	含量/%
0.3	0	0.075	93.0
0.15	2.04	<0.075	4.6

表 2 风积沙化学成分

Tab. 2 Chemical constituents of aeolian sand

成分	含量/%	成分	含量/%
SiO ₂	58.33	CaO	10.40
Al ₂ O ₃	16.74	MgO	2.28
Fe ₂ O ₃	7.37	SO ₃	1.26

2.2 试验设计

通过预制试验找出满足工作性能及抗压强度

收稿日期: 2022-11-24, 修回日期: 2022-12-24

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划(XJEDU2020I011); 嘉兴学院启动基金项目(CD70522018)

作者简介: 彭傲(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为建筑材料, E-mail: pengao2022@163.com

通讯作者: 陈国新(1978-), 男, 博导, 研究方向为建筑材料与建筑结构, E-mail: xjbnchgx@163.com

要求的配合比,设计 17 组 FASC 试件(100 mm×100 mm×100 mm)。试验过程参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[4]的相关规定,FASC 试件的配合比见表 3。

表 3 FASC 试件配合比

Tab. 3 Mix proportion of FASC specimen

试样 编号	水胶比	材料用量/(kg·m ⁻³)					
		风积沙	水	水泥	粉煤灰	矿粉	减水剂
A1	0.35	1 200	282	804	0	0	16
A2	0.40	1 200	300	750	0	0	15
A3	0.45	1 200	316	702	0	0	14
A4	0.50	1 200	330	660	0	0	13
B1	0.40	1 200	300	600	150	0	15
B2	0.40	1 200	300	525	225	0	15
B3	0.40	1 200	300	450	300	0	15
B4	0.40	1 200	300	413	337	0	15
B5	0.40	1 200	300	375	375	0	15
C1	0.40	1 200	300	600	0	150	15
C2	0.40	1 200	300	525	0	225	15
C3	0.40	1 200	300	450	0	300	15
C4	0.40	1 200	300	413	0	337	15
C5	0.40	1 200	300	375	0	375	15
D1	0.40	1 200	300	450	180	120	15
D2	0.40	1 200	300	450	150	150	15
D3	0.40	1 200	300	450	120	180	15

3 抗压试验结果与分析

3.1 破坏形态

为探究 FASC 的破坏模式,设置相同设计强度下的普通混凝土对比组。图 1 为 FASC 和普通混凝土抗压下的破坏形态。

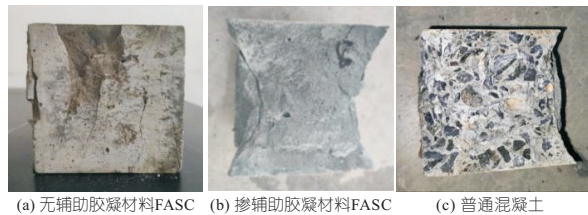


图 1 破坏形态

Fig. 1 Failure mode

由图 1 可看出:①FASC 由于不含粗骨料,其破坏过程与普通混凝土有较大差异,在轴向荷载作用下,试件侧表面出现细微竖向裂缝,随荷载增大裂缝数量及宽度随之增加,并向边角处延伸,达到极限荷载时在试块表面出现若干条主裂缝,试块出现爆裂声,混凝土丧失承载力。此现象与文献^[5]破坏模式类似。②对普通混凝土,其骨料分布不均匀,浇筑模底粗骨料含量多,而表面层砂浆和气孔含量多,在竖向荷载作用下,首先在粗骨料表面的砂浆中出现粘结裂缝,随应力增大,粘结裂缝延伸为宏观主裂缝,从而切断与粗骨料的联系,

结构失效^[6]。③在抗压试验过程中,FASC 主要出现两种破坏形态,一种是混凝土四周出现若干条竖向裂缝,试件基本保持完整(图 1(a)),这种破坏形态多出现在不掺辅助胶凝材料的 FASC 中。另一种试件沿斜向 45°发生破坏,表现为侧面压碎脱落(图 1(b)),这种破坏形态类似于普通混凝土(图 1(c))。

3.2 抗压强度

3.2.1 水灰比对 FASC 抗压强度的影响

无辅助胶凝材料 FASC 的抗压强度与水灰比和养护龄期的关系见图 2。由图 2 可知,无辅助胶凝材料的 FASC 在前期(3、7 d)具有较高的抗压强度,且随水灰比增大抗压强度先增加后降低,当水灰比为 0.4 时,28 d 抗压强度分别较水灰比为 0.35、0.45、0.50 时提高了 20.5%、9.6%、30.8%。这是由于风积沙颗粒较细小,对水泥的需求量较大,水泥水化前期形成强度较高的 C-S-H,随水灰比增加,水泥中的熟料水化充分,当水灰比过大时,过量的水在风积沙颗粒周围形成水囊,水蒸发后风积沙颗粒表面形成疏松层,风积沙骨料与水泥石粘结作用减小,表现出抗压强度降低。当水灰比为 0.4~0.5 时,水泥水化较为完全,混凝土力学性能较优。试验表明在合适的水灰比下可配置出力学性能优越的全风积沙混凝土。

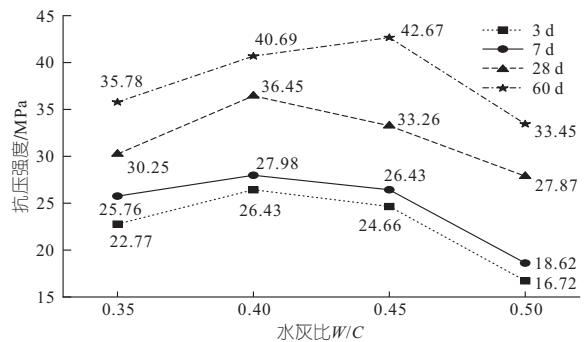


图 2 水灰比对 FSAC 抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of W/C on compressive strength of FSAC

3.2.2 粉煤灰对 FASC 抗压强度的影响

FASC 的抗压强度与粉煤灰掺量和养护龄期的关系见图 3。由图 3 可知,单掺粉煤灰时,前期抗压强度(3、7、28 d)较基准组混凝土偏低,随粉煤灰掺量增加抗压强度逐渐减小,后期强度(60 d)有了较好的发展,60 d 抗压强度在粉煤灰掺量 40%以内和基准组相持平,当粉煤灰替代水泥量为 20%、30%、40%时,60 d 抗压强度较 28 d 分别提高了 32.7%、37%、42.9%。

由于粉煤灰中含有活性 SiO₂、Al₂O₃ 等颗粒,可与水泥水化后的 Ca(OH)₂ 发生二次水化反应生成 C-S-H。且粉煤灰的掺入有效延缓裂缝

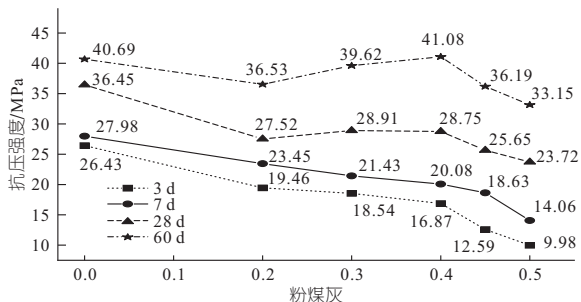


图 3 粉煤灰掺量对 FSAC 抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of fly ash content on compressive strength of FSAC

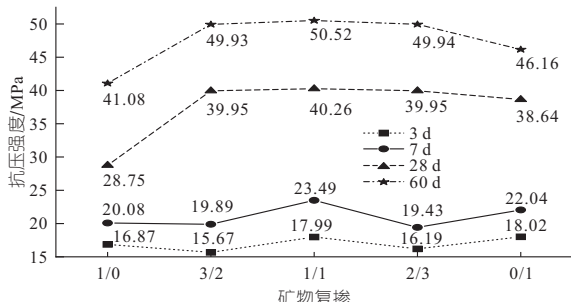


图 5 矿物复掺对 FSAC 抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of mineral admixture on compressive strength of FSAC

的出现^[7]。

3.2.3 矿粉对 FASC 抗压强度的影响

FASC 的抗压强度与矿粉掺量和养护龄期的关系见图 4。由图 4 可知,单掺矿粉时,早期抗压强度(3、7 d)比基准组混凝土偏低,28 d 抗压强度有较高的发展,矿粉掺量小于 0.4 时,抗压强度已大于基准组。当矿粉替代水泥量为 20%、30%、40%时,28 d 抗压强度相比于同掺量的粉煤灰分别提高了 39.7%、30.1%、34.4%;60 d 抗压强度相比于同掺量的粉煤灰分别提高了 24.1%、11.1%、12.4%,由此可见矿粉的火山灰效应优于粉煤灰。随粉煤灰和矿粉掺量的增加,当矿物掺量大于 40%时,抗压强度出现不同幅度的下降。

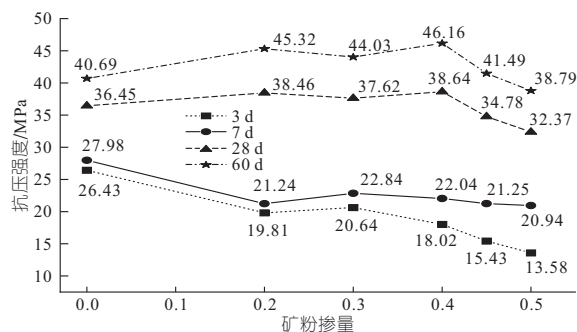


图 4 矿粉掺量对 FSAC 抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of slag powder content on compressive strength of FSAC

相比于粉煤灰,矿粉团聚效应更小,有更多的玻璃体被释放,且矿粉中含有大量的 CaO、Al₂O₃ 等活性物质,当二次水化时,溶液的碱性更大,因此同比例替代水泥的条件下,掺矿粉的 FASC 力学性能优于粉煤灰。但当矿粉掺量过多时,溶液中无足够的 Ca(OH)₂ 产物与其反应,二次水化减弱,表现为抗压强度降低。

3.2.4 粉煤灰与矿粉复掺对 FASC 抗压强度的影响

FASC 的抗压强度与粉煤灰矿粉复掺比例和养护龄期的关系见图 5。由图 5 可知,当复掺粉煤灰与矿粉时,3、7 d 抗压强度较低,28、60 d 抗压强度均大于单掺矿物的 FASC,粉煤灰与矿粉

1 : 1 复掺时,28 d 抗压强度较单掺粉煤灰提高了 40%,60 d 抗压强度较单掺粉煤灰提高了 23%,且二者复掺比例对 FASC 抗压强度影响不显著。

UCHIKAWA H 等^[7]发现,矿物掺料的填充作用可抑制 Ca(OH)₂ 的沉积,从而减小孔隙大小,提高混凝土的力学性能。通过分析可知,由粉煤灰和矿粉构成多元胶凝材料的 FASC 力学性能最优,矿粉的火山灰效应优于粉煤灰,辅助胶凝材料对 FASC 后期强度影响显著。

3.3 微观分析

采用型号德国 Bruker D8 Advance 的 X 射线衍射仪(XRD)对破坏后 28 d 的 FASC 样品进行物象测试,测试结果见图 6。由图 6 可知,养护 28 d 的 FASC 物象中主要包括原始矿物晶体和胶凝材料水化产物,原始矿物成分主要包括风积沙中的石英、方解石和水泥中的硅酸二钙(C₂S)。水化产物主要含有钙矾石(Aft)、单硫型水化硫铝酸钙(AFm)和氢氧化钙(CH)晶体。且随胶凝材料组分的变化,产物中晶体的种类基本相同,但物象峰值强弱有所不同。这与胶凝材料水化过程及化学组分有关。通过 XRD 物相分析,不论是单掺粉煤灰或矿粉,AFt 的衍射峰均较弱,二者复掺时,物象中未发现 AFt,这说明复掺胶凝材料中

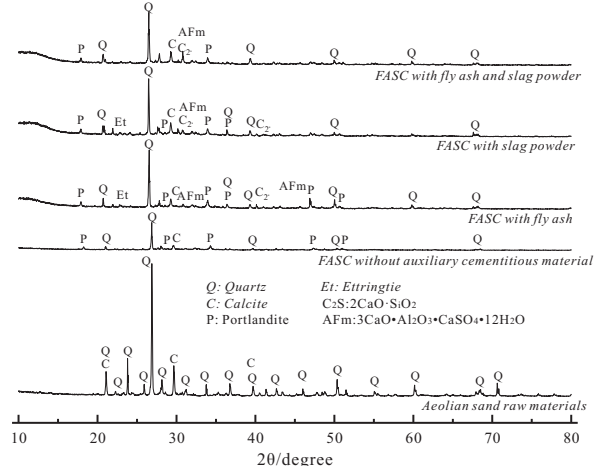


图 6 全风积沙混凝土 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of FASC

SO₄²⁻ 离子含量较少,AFt 与铝酸三钙(C₃A)发生反应转换成 AFm。粉煤灰和矿粉前期强度较低,在于生成了较多的钙 AFt 晶体,其结构较为疏松。后期 AFt 转化为 AFm,从而构成网架结构,使其结构致密、强度增加。

4 全风积沙混凝土抗压强度预测模型

研究表明^[8],混凝土抗压强度与辅助胶凝材料之间存在线性关系。因此以水胶比、粉煤灰掺量、矿粉掺量、龄期四种因素为变量,建立 FASC 抗压强度多元线性回归预测模型,即:

$$f_{cu} = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 \quad (1)$$

式中, f_{cu} 为混凝土抗压强度; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 均为回归系数; x_1, x_2, x_3, x_4 分别为水胶比、粉煤灰掺量、矿粉掺量、养护龄期。

利用 SPSS 软件中多元线性回归分析模块,对抗压强度按式(1)进行回归分析,得到预测模型中各回归系数值、决定系数 R^2 及方差膨胀系数 V_{VIF} (表 4)。由表 4 可知,各种因素下 V_{VIF} 均小于 5,说明四种因素不存在多重共线性。

表 4 预测模型中回归系数、决定系数 R^2 及 V_{VIF}

Tab. 4 Regression coefficient, determination coefficient R^2 and V_{VIF} in forecasting model

回归系数	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
值	34.371	-33.721	-13.088	-0.885	0.404
V_{VIF}		1.116	1.388	1.388	1

注: $R^2=0.814$ 。

为进一步验证模型的适用性,引用文献[3,9-11]的砂混凝土抗压强度,并用本文模型进行验证,数据参数见表 5,结果见图 7。

表 5 其他文献砂混凝土试验结果

Tab. 5 Other documents sand concrete test results

文献	水胶比	抗压强度/MPa	文献	水胶比	抗压强度/MPa
[3]	0.45	12.0~36.2	[10]	0.45~0.70	6.06~42.68
[9]	0.691~0.775	6.7~15.6	[11]	0.733	6.50~14.90

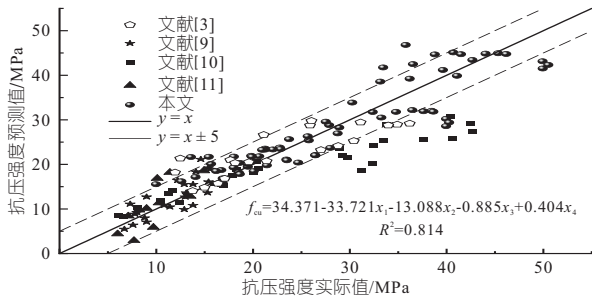


图 7 强度预测模型验证

Fig. 7 Verification of compressive strength prediction model

由表 5、图 7 可知,本文模型在抗压强度小于 30 MPa 时预测较好,大多数点均在实际强度范

围附近,当抗压强度大于 35 MPa 时^[11],本文模型预测值比实际值偏高,通过原材料的对比发现砂混凝土抗压强度与砂颗粒的粒径有关,相同条件下细砂混凝土抗压强度高于粗砂。本文模型可为优化试验室砂混凝土的配合比提供技术支持,亦可为 FASC 的工程化应用提供参考。

5 结论

- a. 本文研究的 FASC 与既有的风积沙混凝土的区别在于骨料全采用风积沙,在合适的水灰比和辅助胶凝材料的掺入下可配置出力学性能较优的 FASC。
- b. 本文建立的抗压强度预测模型精度较高,适用于细砂混凝土。
- c. 因仅对 FASC 的抗压强度进行了探讨,关于 FASC 的碱骨料反应未来尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 吴俊臣. 复杂环境下风积沙混凝土的耐久性能研究与寿命预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018:1-3.
- [2] HUA C, GRUZ X, EHRLACHER A. Thin sand concrete plate of high resistance in traction[J]. Materials and structures, 1995, 28: 550-553.
- [3] JIANG C, GUO W, CHEN H, et al. Effect of filler type and content on mechanical properties and microstructure of sand concrete made with superfine waste sand[J]. Construction and building materials, 2018, 192: 442-449.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T50081-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 王爱国, 石妍, 刘开伟, 等. 高炉重矿渣作为细骨料对水泥砂浆性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(12):121-125.
- [6] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013:7-12.
- [7] UCHIKAWA H, HANEHARA S, HIRAO H. Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate[J]. Cement and concrete research, 1996, 26(1):101-111.
- [8] 梁凯, 陈正, 朱惠英, 等. 基于正交试验的机制砂混凝土抗压强度线性预测模型[J]. 混凝土, 2019(11): 98-101, 110.
- [9] 马蕾, 梁栋, 樊晓鹏, 等. 沙漠砂作为建筑砂浆细骨料可行性研究[J]. 低温建筑技术, 2012, 34(4):9-10.
- [10] 元强, 邓德华, 张文恩, 等. 粉煤灰掺量、水胶比对砂浆流动度和强度的影响[J]. 粉煤灰, 2005(1):7-9.
- [11] 林天津. 粉煤灰、矿粉、石灰石粉在湿拌砂浆中的对比试验及应用[J]. 福建建材, 2020(6):33-34.

过考核范围,部分时段偏差为 0,能够确保水电站经济效益,并且各典型年均迭代 20 次左右达到最优值,使得发电计划与交易计划得到平衡。结果表明,基于偏差考核的水电站双层优化模型能够为水电企业参与电力市场交易提供决策参考,使得企业尽可能在各交易时段免受偏差控制,争取发电效益最大化。

5 结 论

a. 随着电力市场的逐步放开,电力交易由于各种不可控的原因会产生实际与计划的偏差,水电站收益会受到其影响,为争取在电力市场中获得更多利益,建立发电量最大与考虑电量交易偏差最小的双层优化模型,提供了应对偏差考核机制的一种方法和思路。

b. 在实际交易过程中,还需考虑跨省区交易、电价、不同交易组合等其他因素,进行优化交

易决策。在后续工作中,将重点研究不同区域交易结果等多市场因素对水电站参与电力市场发电收益的综合影响。

参 考 文 献:

[1] 郭曼兰,陈皓勇,张聪,等. 偏差电量考核机制下售电公司的最优经营策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(20):17-25.

[2] 迟元. 电力中长期交易中的合同电量偏差考核机制分析[J]. 投资与合作,2020(12):173-174.

[3] 孙波,李思敏,樊亚南,等. 电力市场环境下的风—储混合发电商的偏差电量考核模型[J]. 电力建设,2019,40(7):107-114.

[4] 孙波,樊亚南,李志恒,等. 偏差电量考核下风光储混合发电商的市场均衡博弈研究[J]. 水电能源科学,2020,38(2):202-205.

[5] 湖北省发展和改革委员会. 湖北省发展和改革委员会关于印发 2021 年湖北省电力市场化交易实施方案的通知[J]. 湖北省人民政府公报,2021(1):11-15.

A Bi-level Optimization Model for Hydropower Plants Based on Deviation Assessment

PENG Jing-ping¹, ZHANG Chao¹, LIU Yi-xuan^{2a,2b,2c}, YANG Xu^{1,3}, HE Xing-yao¹, MO Li^{2a,2b,2c}

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 2a. School of Civil and Hydraulic Engineering; 2b. Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology; 2c. Institute of Water Resources and Hydropower, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze River and Hydropower Science, Yichang 443002, China)

Abstract: Currently, the electricity market is undergoing a new round of reform, and deviation assessment mechanisms have been introduced in various places to promote fair competition. In the face of the new market rules, the traditional dispatching model with maximum generation cannot be applied, and hydropower companies need to take market factors into account to control deviations. In order to save hydropower companies from paying costs, a study was conducted on the deviation control rules, and a bi-level optimization model with the objective of maximizing generation capacity and minimizing deviation was established to facilitate trading decisions. Taking the Three Gorges hydropower plant and Hubei province electricity market as examples, the Harmonic Search algorithm was used for analysis. The results show that the deviation rate in each interval is within the deviation control range, and the hydropower plant is exempt from deviation control. Thus, the bi-level optimization model mentioned above is feasible.

Key words: electricity market; deviation assessment; bi-level model; optimal dispatch

(上接第 162 页)

Experimental Study on Compressive Strength of Full Aeolian Sand Concrete

PENG Ao^{1a,1b}, CHEN Guo-xin², SHI Yang-guang^{1a,1b}, LIU De-jun²

(1a. College of Water Conservancy and Civil Engineering; 1b. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Project Safety and Water Disaster Prevention, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. School of Architectural Engineering, Jiaying University, Jiaying 314001, China)

Abstract: In order to explore the influence of water-binder ratio, fly ash, slag powder content and age on the compressive strength of full aeolian sand concrete, the compressive strength test of full aeolian sand concrete was carried out. The microscopic characterization of its physical composition was implemented in combination with XRD results. The compressive strength prediction model of full aeolian sand concrete was established by multiple linear regression. The results show that the compressive strength of full aeolian sand concrete increases first and then decreases with the increase of water-binder ratio. When the water-binder ratio is 0.4, the compressive strength is the largest. The growth effect of fly ash on compressive strength of aeolian sand concrete is not as significant as that of slag powder. The incorporation of fly ash and slag powder is easier to convert AFt into AFm. The established compressive strength prediction model has high accuracy and is suitable for sand concrete. The research results can provide theoretical basis and technical support for the engineering application of full aeolian sand concrete.

Key words: full aeolian sand concrete; auxiliary cementitious materials; compressive strength; strength prediction model