

掺石灰石粉降低混凝土渗透性及吸水性方法研究

陈嘉健

(佛山科学技术学院 土木工程系, 广东 佛山 528000)

摘要: 目前石灰石粉掺加于混凝土中用法主要为置换水泥或置换细骨料, 前者会影响强度, 后者主要作用仅为解决细骨料短缺问题. 应用石灰石粉更合理方法为填充混凝土骨料颗粒之间的空隙, 以减少需要填充骨料空隙的水泥浆量从而提高耐久性. 本研究探讨了石灰石粉置换水泥浆方法对混凝土渗透性和吸水性的影响, 配制了一系列混凝土试样作强度、渗水性、吸水性和孔隙率测试. 结果表明, 掺加石灰石粉置换水泥浆能减小混凝土可渗透孔隙, 在相同水灰比下或相同强度下有效减少混凝土的渗水性和吸水性.

关键词: 渗透性; 石灰石粉; 填充密度; 吸水性

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)01-0045-06

Adding limestone fines in concrete for permeability and sorptivity reduction

CHEN Jiajian

(Department of Civil Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: The present use of limestone fines in concrete is replacement materials of either cement or fine aggregate. The former type of replacement would impair the strength, while the latter type of replacement is mainly adopted where fine aggregate is not enough. The limestone fine shall be better used as cement paste replacement to reduce the cement paste volume required to fill the voids for durability improvement. To study the effect of this strategy of using limestone fines in concrete to durability, concrete specimens with different limestone fines dosage at different W/C ratio were made and their strength, permeability and sorptivity were measured. Results proved that use of limestone fines as cement paste replacement could reduce the permeable porosity, and significantly lower the permeability and sorptivity at the same W/C ratio and at the strength basis.

Key words: limestone fines; packing density; permeability; sorptivity.

掺加石灰石粉改善混凝土性能及降低成本的做法中并非新尝试. 山西省交通科学研究院邓亮亮^[1]总结道在用水量相同的条件下, 掺入超细石灰石粉取代部分水泥对混凝土力学性能影响不大, 而在相同坍落度要求下, 可通过掺入石灰石粉使得用水量降低的方式来提高混凝土性能. 中国矿业大学贾福萍等^[2]试验表明, 石灰石粉置换水泥会削弱混凝土的抗碳化能力. 内蒙古工业大学霍俊芳等^[3], 石灰石粉掺和量不大于 15% 时, 抗冻性能均比基准混凝土高, 但随着石灰石粉的进一步提高, 抗冻性能变差. 邯郸金隅太行水泥公司王进军^[4]指出, 石灰石粉置换天然砂为解决细骨料紧缺的好方法并能满足混凝土耐久性要求. 在石灰石粉的应用上, 大部分学者和工程人员^[5-6]利用石灰石

粉置换水泥, 小部分^[4]则利用石灰石粉置换细骨料. 前者应用石灰石粉方法能降低水泥熟料消耗而且水化热^[6], 但会降低强度, 尤其是后期强度^[7], 实际应用中往往需要调低水灰比使强度得到补偿^[8], 给抗渗等耐久性性能带来较复杂的影响^[9]. 由于对于调高水灰比引致的耐久性、强度影响的忧虑, 工程人员往往不愿意采用石灰石粉直接置换水泥, 掺加石灰石粉置换水泥或许并非最佳使用石灰石粉的方法. 后者应用石灰石粉方法对混凝土强度没有或几乎没有不利影响^[10], 有学者研究表明应用石灰石粉置换骨料还有助于减少混凝土收缩^[11], 降低透水性^[12]. 然而, 此方法无助于降低混凝土的水泥熟料消耗量, 仅为解决细骨料短缺问题之法, 但并不能作为改善混凝土性能

收稿日期: 2016-06-14

修改稿日期: 2017-11-15

基金项目: 2014 年广东省自然科学基金项目(2014A030310273); 2016 佛山市科技计划项目(2016AB000031)

第一作者: 陈嘉健(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事混凝土材料研究. E-mail: chenjiajian@fosu.edu.cn

及行业可持续性的方法.

由于混凝土骨料颗粒之间的空隙必须完全充满水泥浆, 否则空气会在混凝土拌合料搅拌时存在于新拌混凝土中造成强度和耐久性降低. 石灰石粉为一种惰性固体, 可以充当填充物以增加水泥浆、砂浆或混凝土填充密度. 相比于上述两种石灰石粉在混凝土材料中的应用方法, 更合理的应用方法为用于填充混凝土骨料颗粒之间的空隙, 使石灰石粉与水泥浆混合成粉浆来填充骨料间空隙, 以减少需要填充骨料空隙的水泥浆量. 为探索石灰石粉置换水泥浆对混凝土抗渗性、吸水性等耐久性能的影响, 本研究展开了系统的实验, 探索石灰石粉置换水泥浆应用方法对混凝土耐久性的影响.

1 实验方案

1.1 材料

水泥采用 52.5N 水泥, 实验测得该水泥 28

天强度测得为 59.0 MPa. 水泥和石灰石粉的密度分别测得为 3.11 和 2.64 g/cm³. 通过激光粒度分析仪的分析, 水泥和石灰石粉的平均粒径大小分别为 11.4 μm 和 14.5 μm. 粗细骨料最大颗粒分别为 20 mm 和 5 mm, 密度分别测得为 2.61 和 2.52 g/cm³, 吸水率分别测得为 1.01% 和 1.89%.

1.2 实验配比

本研究中, 共配制 16 组水灰比、石灰石体积不同的混凝土配比试件作测试, 具体配比列于表 1. 每一混凝土配比以 LF-A-B 形式命名, 其中 LF 代表石灰石粉混凝土, A 代表水灰比, B 代表石灰石粉占混凝土体积比. 所有混凝土配比的粉浆体积百分比固定为 34%, 粗细骨料量分别固定为 672 和 100 8 kg/m³. 当掺加石灰石粉时, 水泥浆量随着石灰石粉量的增加而降低, 石灰石粉是水泥浆的置换物而非水泥的置换物. 本项目减水剂采用聚羧酸减水剂, 以水剂形式掺加至坍落度达到 200 mm 以上. 减水剂掺量随石灰石粉掺量的增加而显著增加.

表 1 实验混凝土配比

Tab. 1 Mix design of concrete specimens

配比编号	水灰比	石灰石粉 体积/%	水泥浆 体积/%	水量/kg · m ⁻³	水泥量 /kg · m ⁻³	石灰石粉量 /kg · m ⁻³
LF-0.4-0	0.40	0	34	188	470	0
LF-0.4-4		4	30	166	415	106
LF-0.4-8		8	26	144	359	211
LF-0.4-10		10	24	133	332	265
LF-0.5-0	0.50	0	34	207	413	0
LF-0.5-4		4	30	182	364	106
LF-0.5-8		8	26	158	315	211
LF-0.5-10		10	24	146	292	265
LF-0.6-0	0.60	0	34	221	368	0
LF-0.6-4		4	30	195	325	106
LF-0.6-8		8	26	169	281	211
LF-0.6-10		10	24	156	260	265
LF-0.6-0	0.70	0	34	233	333	0
LF-0.6-4		4	30	206	294	106
LF-0.6-8		8	26	178	255	211
LF-0.6-10		10	24	164	235	265

1.3 测试方法

1.3.1 渗透性测量

每一组混凝土配比以渗透深度作渗透性测量. 混凝土试件在 27±2 °C 环境中养护至 28 d 龄期后, 施加 500±50 kPa 水压力施加于试件底部 72 h. 其

后把试件从测试仪器中取出, 施加线荷载使试件劈裂为两半, 根据水痕量度其渗透深度. 为保证结果的精确度, 渗透深度结果采用三个同期同步测试试件的平均值.

1.3.2 吸水性测量

每一组混凝土配比以吸水系数作吸水性测量^[13]。混凝土试件在 $27 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中养护至 28 d 龄期后，置于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 3 d，随后降温至室温。在吸水性测试前，把混凝土试件四周用环氧树脂密封，浅浸于水中使试底部与水接触。其后在不同时段对试件的质量进行测量，根据由于吸水导致试件增加的质量(m_a)，每单位表面积吸水体积可由式(1)求出。

$$I=\frac{m_a}{A\times\rho}\tag{1}$$

式中： A 为与水接触表面的面积； ρ 为水的密度。

测试结果表明，单位与水接触面积的吸水量会随时间增加，关系式如式(2)所示。

$$I=k\sqrt{t}\tag{2}$$

式中： k 为混凝土试件的吸水系数； t 为时间平方根。

为确定吸水系数 k ，把 I 为纵坐标， t 平方根为横坐标作回归分析，斜率则为吸水系数 k 。

1.3.3 可渗透孔隙量测量

由下文中所得实验结果和分析可知，掺加石灰石粉置换水泥浆会显著减少渗透性和吸水性。为了验证渗透性和吸水性的减少是否是由于石灰石粉填充效应引致的孔隙减小所致，本研究作了混凝土配比试件的可渗透空隙量测量。每混凝土配比制作三个 100 mm 立方体试件，在 28 d 龄期后，每一试件于高温炉中加热至恒重，然后浸于水中

并加热煮水，最后浸于水中测量水中表观重量。该方法获得的可渗透孔隙为可被水填充的空隙量，表示为混凝土体积的百分比。

1.3.4 强度测量

混凝土试件强度测量采用 150 mm 试件，养护温度为 $27\pm2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，龄期为 28 d。强度结果采用三个同期同步测试试件的平均值。

2 实验结果

2.1 强度

混凝土试件的 28 d 龄期立方体强度列于表 2 的最后一列。强度结果表明，在相同的水灰比下，掺加石灰石粉置换水泥浆显著增加混凝土的 28 d 龄期抗压强度。掺加石灰石粉带来的强度提高，一方面是由于掺入石灰石后粉体颗粒量增加，可形成更多微粒核心作为水泥水化附着物，提高了水泥水化率；另一方面是由于石灰石粉的掺入降低了混凝土泌水量，强化了骨料-水泥浆过渡区域。

2.2 渗透性

渗透性结果列于表 2 的第二列，其与水灰比的关系图示于图 1。在相同水灰比下，渗透性随着石灰石粉体积的增加而显著减少，而此效果在高水灰比下更为明显。由此可见，掺加石灰石粉置换水泥浆会降低渗透性对水灰比的敏感度。然而，随着石灰石粉掺加量的增加，继续增加石灰石粉所能进一步降低渗透性的效果将会减少。

表 2 渗水性、吸水性和强度结果
Tab. 2 Permeability, sorptivity and strength results

配比编号	渗水深度/m	吸水系数/mm·s ^{-0.5}	可渗透孔隙/%	28 d 立方体抗压强度/MPa
LF-0.4-0	0.031 0	0.015 9	10.1	74.8
LF-0.4-4	0.019 5	0.009 1	8.4	80.5
LF-0.4-8	0.018 5	0.007 4	7.8	85.1
LF-0.4-10	0.017 9	0.007 1	7.7	82.6
LF-0.5-0	0.056 0	0.019 4	14.3	56.0
LF-0.5-4	0.026 5	0.016 1	10.4	62.0
LF-0.5-8	0.023 0	0.009 7	8.8	68.7
LF-0.5-10	0.020 0	0.007 6	8.6	70.4
LF-0.6-0	0.075 0	0.029 3	16.2	44.3
LF-0.6-4	0.036 0	0.021 2	12.5	49.2
LF-0.6-8	0.029 0	0.016 8	10.9	51.5
LF-0.6-10	0.025 0	0.016 1	10.2	53.2
LF-0.6-0	0.093 0	0.029 4	19.0	32.3
LF-0.6-4	0.045 0	0.022 1	15.0	43.6
LF-0.6-8	0.033 0	0.020 5	13.2	47.3
LF-0.6-10	0.032 0	0.019 6	12.1	48.2

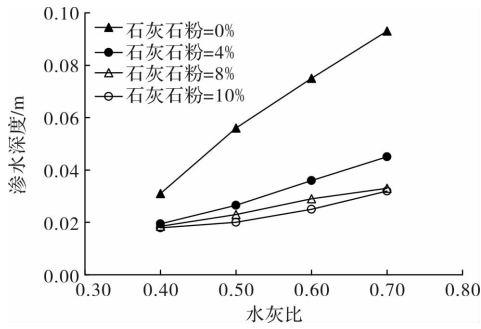


图1 渗透深度随水灰比变化情况

Fig. 1 Variation of penetration depth with W/C ratio

掺加石灰石粉置换水泥而不改变水灰比不仅降低渗透深度,也增加混凝土的强度.如果工程上并不需要一个更高的强度,我们可以调高水灰比来增加流动性及进一步降低水泥用量.为揭示掺加石灰石粉在相同强度下减少渗透性的效果,渗透深度与28 d强度的关系示于图2.结果表明,掺加石灰石粉置换水泥浆能在相同强度要求下有效降低混凝土的渗透性.

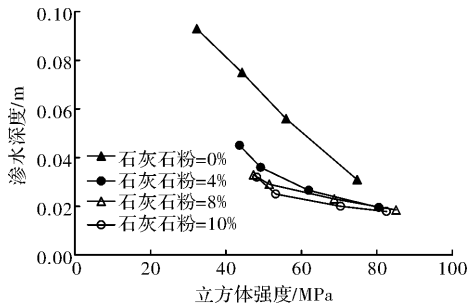
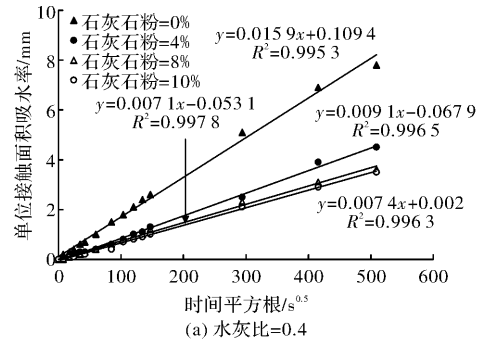


图2 渗透深度与立方体强度关系

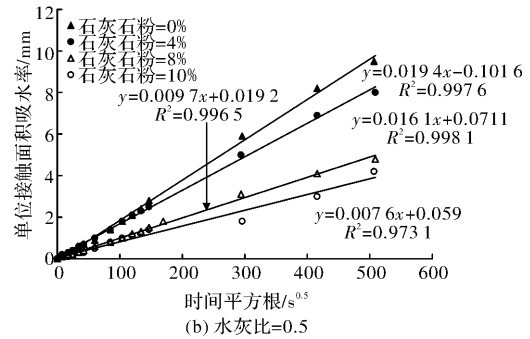
Fig. 2 Variation of penetration depth with cube strength

2.3 吸水性

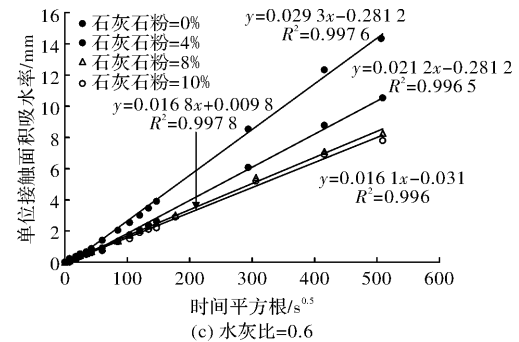
单位接触面积吸水率随时间平方根的变化情况示于图3(a)~(d).从图中可以看出,单位接触面积吸水率与时间平方根成线性关系,此结果与Kubissa和Jaskulski^[14]报导的结果一致.单位接触面积吸水率-时间平方根直线的斜率即为式(2)中的吸水系数 k ,得到的吸水系数列于表2的第三列,其随水灰比的变化情况示于图4.结果清晰表明,石灰石粉的掺加显著降低了吸水系数,可见掺加石灰石粉置换水泥浆可稳定地提高混凝土的抗渗性.值得一提的是,Tasdemir^[15]通过掺加石灰石粉置换骨料,亦得到吸水系数的显著减小,并把吸水性的减小归因于石灰石粉在水泥浆孔隙中和水泥浆与骨料间空隙中的填充效应.在掺加石灰石粉置换水泥浆时,填充效应减少了混凝土的孔隙和空隙,此为渗透性和吸水性减小的主要原因.



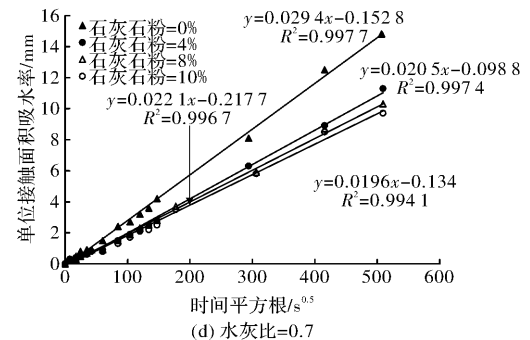
(a) 水灰比=0.4



(b) 水灰比=0.5



(c) 水灰比=0.6



(d) 水灰比=0.7

图3 各配比混凝土试件单位面积渗水量随时间平方根变化情况

Fig. 3 Variation of water penetration amount at unit surface area with square of time

实验结果表明,在不改变水灰比情况下,石灰石粉置换水泥浆不仅可以减少吸水系数,而且能增加混凝土的强度.如果工程上并不需要一个更高的强度,可以调高水灰比来增加流动性及进一步降低水泥用量.图5显示了在相同强度要求下掺加石灰石粉置换水泥浆减少吸水系数的效果,结果表明,掺加石灰石粉能在相同强度要求下显著降低混凝土的吸水系数.

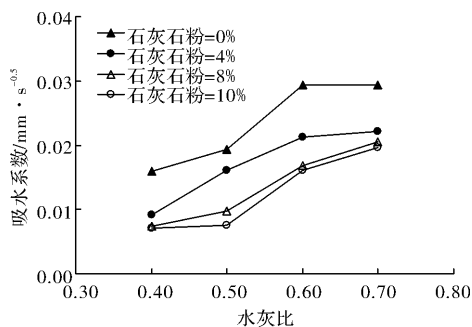


图4 吸水系数随水灰比变化情况

Fig. 4 Variation of sorptivity with W/C ratio

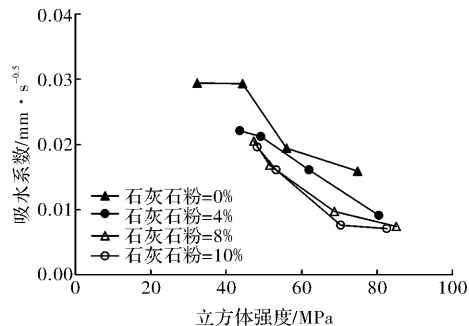


图5 吸水系数与立方体强度关系

Fig. 5 Variation of sorptivity coefficient with cube strength

3 可渗透空隙对抗渗性能的影响

可渗透孔隙结果列于表2第四列. 每一结果为三个平行试件测试结果的平均数. 为更好展示结果, 在0%, 4% 和8%石灰石粉掺量情况下可渗透空隙量与水灰比的关系示于图6. 可以看到, 在相同的水灰比下, 可渗透孔隙随着石灰石粉掺量的增加而减小, 证明了石灰石粉填充了混凝土中孔隙从而减小混凝土的空隙率.

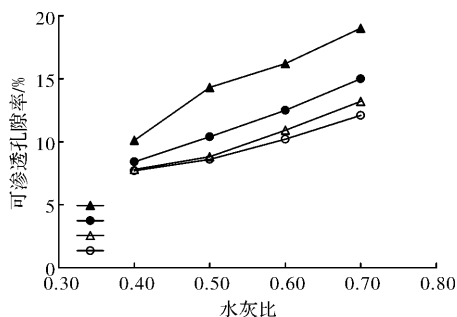


图6 可渗透孔隙随水灰比变化情况

Fig. 6 Variation of permeable pore with W/C ratio

图7描述了混凝土可渗透孔隙对渗透性的影响. 线性回归分析得到渗透高度与可渗透系数的关联系数 R^2 高达 0.887, 证明了可渗透孔隙高度决定了混凝土渗透性能.

类似地, 为探讨可渗透孔隙如何影响吸水性, 吸水系数与可渗透孔隙的关系示于图8. 回归分析

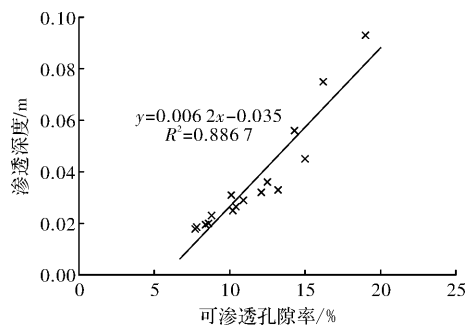


图7 渗水深度与可渗透孔隙关系

得到吸水系数与可渗透孔隙存在线性关系, 其关联系数 R^2 为 0.910, 证明了可渗透孔隙高度决定了混凝土吸水性能. 超过 0.9 的关联系数 R^2 表明, 渗透深度和吸水系数与可渗透孔隙高度关联, 掺加石灰石粉置换水泥浆减少渗透性和吸水性的主要原因为填充混凝土中孔隙使可渗透孔隙得到减小.

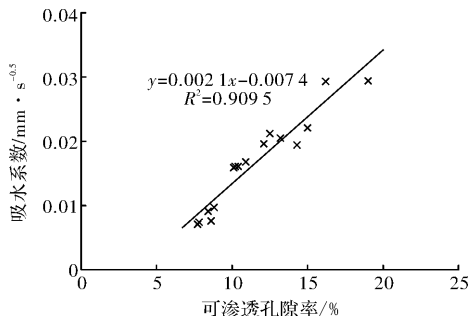


图8 吸水系数与可渗透孔隙关系

Fig. 8 Variation of sorptivity coefficient with permeable pore

4 结论

石灰石粉长期以来主要用于置换水泥或置换细骨料, 本项目提出了应用石灰石粉置换水泥浆的方法并探讨了此应用方法对混凝土渗透性和吸水性的影响. 根据实验结果得出以下结论:

- (1) 在相同水灰比下, 掺加石灰石粉置换水泥浆能有效减少混凝土的渗水性和吸水性;
- (2) 在相同强度要求下, 掺加石灰石粉置换水泥浆能显著减少混凝土的渗水深度和吸水系数;
- (3) 掺加石灰石粉置换水泥浆会减小混凝土可渗透孔隙;

(4) 渗水深度和吸水系数均与可渗透孔隙高度线性相关. 掺入石灰石后获得的渗水深度和吸水系数的减小可归因于掺加石灰石粉达致的可渗透孔隙减小.

参考文献 References

- [1] 邓亮亮. 超细石灰石粉掺量对中等强度等级混凝土性

- 能的影响[J]. 混凝土, 2014(8):101-103,106.
DENG Liangliang. Effects of ultrafine limestone powder on middle-grade strength concrete. Concrete, 2014 (8):101-103+106.
- [2] 贾福萍, 杨柯红, 尚永浩, 等. 石灰石粉混凝土抗碳化性能因素分析[J]. 混凝土, 2015(7):61-62,70.
JIA Fuping, YANG Kehong, SHANG Yonghao, et al. Analysis on carbonation performance of limestone concrete. Concrete, 2015(7):61-62,70.
- [3] 霍俊芳, 宋茂祥, 佟震, 等. 石灰石粉掺合料对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2015(5):70-72.
HUO Junfang, SONG Maoxiang, TONG Zhen, et al. Effects of limestone powder on concrete performance. Concrete, 2015(5):70-72.
- [4] 王进军. 石灰石碎屑配特细砂作细骨料在混凝土中的应用[J]. 混凝土世界, 2013(8):70-72.
WANG Jinjun. Use of limestone fine sand as fine aggregate in concrete. World of Concrete, 2013(8):70-72.
- [5] 明阳, 王军, 陈景, 等. 沸石粉-石灰石粉混凝土的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(12):20-23.
MING Yang, WANG Jun, CHEN Jing, et al. Research on zeolite-limestone powder concrete. Concrete and Cement Production, 2013(8):70-72.
- [6] POPPE A M, De SCHUTTER G. Cement hydration in the presence of high filler contents[J]. Cem Con Res 2005, 35(12): 2290-2299.
- [7] NEHDI M, MINDESS S, AITCIN P C. Optimization of high strength limestone filler cement mortars[J]. Cem Con Res 1996; 26(6): 883-893.
- [8] BENTZ D P, IRASSAR E F, BUCHER B E, et al. Limestone fillers conserve cement; Part 1: An analysis based on Powers' model[J]. Concrete International 2009; 31(11): 41-46.
- [9] TSIVILIS S, TSANTILAS J, KAKALI G, et al. The permeability of Portland limestone cement concrete[J]. Cem Con Res, 2003, 33(9): 1465-1471.
- [10] KENAI S, MENADI B, ATTAR A, et al. Effect of crushed limestone fines on strength of mortar and durability of concrete [C]//Proceedings, International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT). Malaysia, Kuala Lumpur, 2008:205-216.
- [11] AQUINO C, INOUE M, MIURA H, et al. The effects of limestone aggregate on concrete properties [J]. Constr Build Mater 2010; 24(12): 2363-2368.
- [12] MENADI B, KENAI S, KHATIB J, et al. Strength and durability of concrete incorporating crushed limestone sand[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(2): 625-633.
- [13] ASTM. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes ASTM C1585-04: [S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 2004.
- [14] KUBISSA W, JASKULSKI R. Measuring and time variability of the sorptivity of concrete[J]. Proc Eng, 2013, 57: 634-641.
- [15] TASDEMIR C. Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete[J]. Cem Con Res, 2003, 33(10): 1637-1642.

(编辑 桂智刚)

(上接第12页)

- [6] 郑山锁, 邓国专. 型钢混凝土结构粘结滑移本构关系研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(S1): 524-527.
ZHENG Shansuo, DENG Guozhuan. Study on bond-slip constitutive relationship of steel reinforced concrete composite structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(S1):524-527.
- [7] 郑山锁, 邓国专, 杨勇, 等. 型钢混凝土结构粘结滑移性能试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5):63-69.
ZHENG Shansuo, DENG Guozhuan, YANG Yong, et al. Experimental study of bond-slip performance between steel and concrete in SRC structures[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(5):63-69.
- [8] 薛建阳, 赵鸿铁, 杨勇, 等. 型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5):8-16.
XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, YANG Yong, et al. Research on the bond-slip behavior and numerical simulation of steel reinforced concrete columns by ANSYS program[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(5):8-16.
- [9] 詹建敏, 吴炎海. 压型钢板-混凝土组合楼板剪切粘结承载力试验研究[J]. 福建建筑, 2002(3):27-30.
ZHAN Jianmin, WU Yanhai. A test research on the horizontal shear-bond capacity of composite slabs[J]. Fujian Architecture & Construction, 2002(3):27-30.
- [10] 史庆轩, 郝家欢, 张兴虎. 压型钢板-混凝土组合楼板剪切粘结滑移性能的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(S1): 329-332.
SHI Qingxuan, HAO Jiahuan, ZHANG Xinghu. Experiments on shear-bond-slip behavior of steel deck and concrete composite slabs[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(S1):329-332.
- [11] 白力更, 赵辉, 史庆轩. 压型钢板-混凝土组合楼板剪切-粘结试验研究[J]. 钢结构, 2005, 20(3):30-34.
BAI Ligeng, ZHAO hui, SHI Qingxuan. Shear-bond experimental study of cold-formed steel deck and concrete composite floors[J]. Steel Construction, 2005, 20(3):30-34.
- [12] 郝家欢. 压型钢板-混凝土组合楼板剪切粘结滑移性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
HAO Jiahuan. Experimental study on shear bond-slip behavior of profiled sheeting concrete composite slabs [D]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [13] 徐芝伦. 弹性力学(上册)[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2006.
XU Zhilun. Elasticity Mechanics(Vol. 1)[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

(编辑 桂智刚)