

Study on Properties of Lime-Fly Ash Stabilized Macadam Recycled Cement Concrete Base Material

Zhongmin Liu¹, Chenghao Gu², Enbo Zhang^{3*}

¹Qilu Transportation Development Group Company Limited, Jinan Shandong

²Shandong Provincial Department of Transportation, Jinan Shandong

³School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

Email: *17096471393@163.com

Received: Sep. 7th, 2018; accepted: Sep. 20th, 2018; published: Sep. 27th, 2018

Abstract

The performance of lime-fly ash stabilized gravel regenerated as cement concrete base material was studied in laboratory. The properties of lime-fly ash gravel recycled material were analyzed, and the mix proportion of recycled concrete was designed to study the mechanical characteristics, durability, shrinkage and fatigue. The results showed that the recycled aggregate of lime-fly ash gravel had better shape and surface characteristics. Compared with the new aggregate, the recycled aggregate had lower apparent density and bulk density, higher water absorption, faster water absorption rate and lower crushing value. The strength of recycled concrete using recycled fine aggregate was obviously lower than that using recycled coarse aggregate. The increase of recycled coarse aggregate resulted in the decrease of the compressive strength and the growth of the flexural strength. The design mix proportion of cement:recycled coarse aggregate:crushed stone:sand is recommended as 1:2.24:1.49:1.92. The lime-fly ash gravel recycled cement concrete had higher temperature shrinkage and dry shrinkage coefficients, especially for the dry shrinkage coefficient, which increased rapidly during the curing age in the first 14 days. The lime-fly ash gravel recycled aggregate concrete permeability grade was S10 with the antifreeze number up to 90 cycles, which met the concrete durability requirements in general engineering. The fatigue performance of lime-fly ash gravel recycled concrete was similar to that of ordinary cement concrete.

Keywords

Lime-Fly Ash Gravel, Regeneration, Cement Concrete, Rigid Base, Material Properties

二灰稳定碎石再生水泥混凝土基层材料的性能研究

*通讯作者。

文章引用: 刘忠民, 古成浩, 张恩博. 二灰稳定碎石再生水泥混凝土基层材料的性能研究[J]. 土木工程, 2018, 7(5): 757-764. DOI: 10.12677/hjce.2018.75091

刘忠民¹, 古成浩², 张恩博^{3*}

¹齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

²山东省交通运输厅, 山东 济南

³山东大学, 土建与水利学院, 山东 济南

Email: *17096471393@163.com

收稿日期: 2018年9月7日; 录用日期: 2018年9月20日; 发布日期: 2018年9月27日

摘要

室内试验研究了二灰稳定碎石再生用作水泥混凝土基层材料的性能,分析了二灰碎石再生料的材料特性,设计了再生混凝土的配合比,分析了其力学特性、耐久性、收缩特性和疲劳特性。结果表明,二灰碎石再生集料具有较好的形状特征和表面特性,与新集料相比,其表观密度、堆积密度低,吸水率高且吸水速率快,压碎值低;利用再生细集料的再生混凝土强度明显低于仅利用再生粗集料,增加再生粗集料用量,材料抗压强度降低而抗折强度提高,推荐设计配合比为水泥:再生粗集料:碎石:砂 = 1:2.24:1.49:1.92;二灰碎石再生水泥混凝土具有较高的温缩系数与干缩系数,尤其养生前14天的干缩系数增加迅速;二灰碎石再生集料混凝土的抗渗等级为S10,最大抗冻循环次数为90次,满足一般工程混凝土耐久性要求;二灰碎石再生混凝土疲劳性能与普通水泥混凝土相近。

关键词

二灰碎石, 再生, 水泥混凝土, 刚性基层, 材料特性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着生态环保压力的不断加大,道路改扩建以及养护维修工程中废旧材料的再生利用成为工程的关键问题之一。作为传统的基层材料,二灰碎石在我国路面结构中应用较为广泛,其再生利用问题也十分突出。

半刚性路面基层材料的再生利用主要采用冷再生技术,这一技术的研究与应用在国外起步较早,我国主要于2000年后开始相关技术的研究,其中关于水泥稳定碎石基层材料再生利用的研究相对较多,技术较成熟,而二灰稳定碎石基层材料的再生利用研究相对较少。目前,二灰碎石再生利用的常用方法是采用水泥稳定进行就地再生,也有采用乳化沥青稳定再生、泡沫沥青稳定再生以及水泥沥青复合稳定再生等方法。汪京、王保群、朱开方、李志、孙正等在分析公路二灰碎石基层废料性能的基础上,研究了水泥冷再生废料的材料特性,并在工程中成功应用[1]-[6]。汪超、韦武举等分析了二灰碎石铣刨料的级配特征,研究了泡沫沥青再生二灰碎石的设计方法、路用性能等,并与水泥稳定再生二灰碎石做了对比分析[7][8]。常成刚、杜少文等则开展了乳化沥青再生、水泥乳化沥青二灰碎石基层的研究并铺筑了试验路[9][10]。关于再生水泥混凝土的研究也是近年来国内外研究的热点,相关研究主要集中于采用废建筑材料,如砖渣、砂浆、水泥混凝土及其混合料的再生利用,特别是将再生集料应用于路面基层[11][12][13][14]。利用二灰碎石再生用作刚性基层材料的研究很少。

本文结合京台高速公路山东某路段大修工程,通过室内试验,分析了二灰碎石再生水泥混凝土的力学性能、收缩特性、疲劳特性与耐久性,为二灰碎石基层材料再生用作刚性基层材料提供参考,也为二灰碎石基层材料再生利用提供一个新的途径。

2. 二灰碎石再生集料的性能分析

2.1. 再生集料的物理性质

2.1.1. 再生集料颗粒表面特征

将 4.75 mm 作为粗、细集料的分界粒径。再生粗集料颗粒大部分为表面包裹有部分灰浆的石子,少部分为与灰浆完全脱离的石子,还有很少一部分为灰浆。再生细集料主要包含有灰浆体破碎后形成的二灰颗粒以及破碎过程中产生的少量石屑,其强度非常低。

粗集料的颗粒形状及表面特征会影响其与水泥的粘结及拌和物的流动性。取一组粒径在 4.75 mm~31.5 mm 之间再生粗集料,测试其颗粒形状系数见表 1。由表 1 可见,再生粗集料的形状特征系数良好,优于天然集料。

2.1.2. 再生集料颗粒表面特征

再生粗集料的原始级配见图 1。由图 1 可见,筛分试验表明,颗粒尺寸在 16mm~31.5mm 之间的集料仅占 20%,再生集料的原始级配不良。

通过筛分试验,调整粗集料级配,获得两种粗集料设计级配见图 1。

2.1.3. 再生集料的密度与吸水特性

试验测得面干状态下再生集料与新集料的表现密度,对比如表 2。

再生集料的堆积密度与堆积状态下的孔隙率见表 3。

再生集料的吸水率见表 4,吸水速率见表 5。

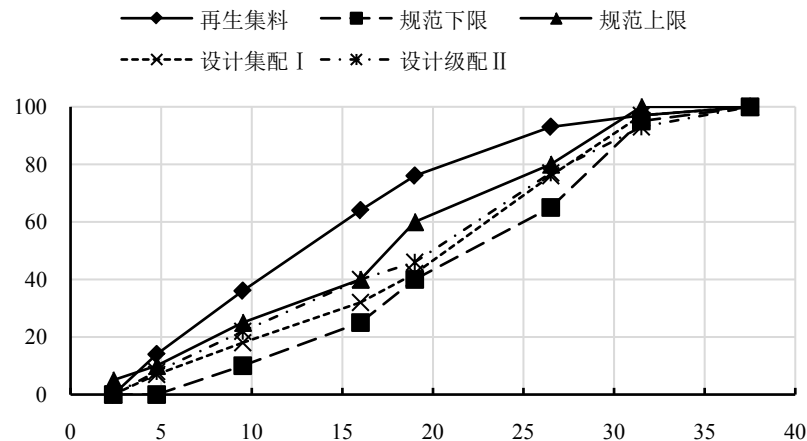


Figure 1. Design gradation of recycled coarse aggregate

图 1. 再生粗集料的设计级配

Table 1. Particle shape coefficient of recycled aggregate

表 1. 再生集料的颗粒形状系数

细长率	细长率扁平率	方形率
2.25	37.2	1.43

Table 2. Apparent density of recycled aggregate**表 2.** 标准试验系统结果数据集料面干状态下的表观密度(g/cm^3)

集料种类	新集料	再生集料
细集料	2.50	2.14
粗集料	2.61	2.43

Table 3. Bulk density and porosity of recycled aggregate particle size**表 3.** 再生集料各粒径的堆积密度与孔隙率

粒径(mm)	4.75	9.5	16	19	26.5	31	再生粗集料	天然粗集料
堆积密度(kg/m^3)	1190	1290	1321	1340	1370	1419	1410	1540
空隙率(%)	50	46	45.2	45.1	44.3	43.1	44	42

Table 4. Water absorption rate of recycled aggregate and new aggregate in dry state**表 4.** 再生集料和新集料面干状态下的吸水率(%)

集料种类	天然集料	再生集料
细集料	1.17	6.72
粗集料	1.04	3.91

Table 5. Water absorption rate test data of recycled aggregate**表 5.** 再生集料的吸水速率试验数据

时间(min)	10	20	30	60	
吸水率(%)	细集料	6.25	6.28	6.47	6.69
	粗集料	3.32	3.41	3.60	3.88

由表 2~表 5 可见,再生集料的表观密度比普通碎石的要低,其中面干状态下再生粗集料的表观密度为 $2.43 \text{ g}/\text{cm}^3$,略小于规范所要求的下限 $2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$;再生集料较之天然集料堆积密度小而空隙率高,且再生集料各个粒级的堆积密度不相同:颗粒越大,堆积密度越高;空隙率的变化规律则相反;再生粗集料的吸水率高,吸水速度快,且再生细集料的吸水速率较粗集料快接近一倍。这主要是因为再生集料表面附有旧二灰浆,颗粒表面粗糙,且破碎过程中其颗粒内部可能产生微裂缝,因此其表观密度低而吸水率偏高。

2.2. 再生集料的力学性质试验

室内测试再生集料的洛杉矶磨耗、压碎指标及针片状颗粒含量等指标见表 6。

再生集料的压碎性不仅与原二灰碎石材料的强度有关,而且还与集料的级配有关。由表 2 可知:该再生集料的针片状颗粒含量满足规范要求,而原始级配的再生集料其压碎值为 33.1%,大于基层 III 级集料压碎值 25% 的规范要求,必须通过掺加新集料调整级配以提高二灰碎石再生集料的强度。其洛杉矶磨耗值则超出规范要求较多,但考虑到本次试验是将二灰碎石再生混凝土用作沥青路面基层,再生集料的磨耗值可不予考虑。

3. 再生二灰碎石水泥混凝土配合比设计

根据依托大修工程建设方案,拟采用再生二灰碎石水泥混凝土刚性基层设计方案。根据相关规范[15][16]进行混凝土的配合比设计,混凝土的设计标号为 C20。

考虑图 1 中两种粗集料的设计级配,以及是否使用再生细集料的情况,设计了四种配合比方案。按

照高速公路水泥混凝土路面，通过初步试验确定水灰比 $W^*/C = 0.43$ 。其强度指标见表 7。

由表 7 可见，4 种再生集料水泥混凝土在强度指标上均能满足高等级公路基层路用性能要求，并且随着龄期的延长，强度提高；利用再生细集料的两种配合比的强度明显低于仅利用再生粗集料的两种配合比；试验条件下，增加再生粗集料用量，材料抗压强度降低而抗折强度提高。考虑材料综合性能，推荐设计配合比为：水泥:再生粗集料:碎石:砂 = 1:2.24:1.49:1.92。

4. 再生二灰碎石水泥混凝土的收缩特性

采用上述推荐配合比，制备 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的小梁试件，采用温湿度环境箱进行再生混凝土的温度收缩和湿度收缩测试。

4.1. 再生二灰碎石水泥混凝土的温度收缩特性

不同龄期的再生集料水泥混凝土温度收缩系数见图 2。由图 2 可见，再生混凝土的温缩系数介于 $10.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 14.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 之间，略高于普通混凝土的温缩系数，这是因为温缩系数主要取决于温降大小和混凝土的线胀系数，后者主要受控于集料的线胀系数，而在再生混凝土中，再生集料表面还额外包裹一部分旧水泥砂浆，新旧砂浆的比例高于普通混凝土，热胀系数有所增大，致使再生混凝土的温缩系数略高于普通混凝土。

Table 6. Main road indexes of recycled aggregate

表 6. 再生集料主要路用指标

性质指标	实测结果
压碎值/%	33.1
洛杉矶磨耗值/%	42
针片状颗粒含量/%	3.65

Table 7. Strength of four mix proportions

表 7. 四种配合比再生集料混凝土强度

配合比	7 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa		28 d 抗压弹性模量/MPa
	抗压	抗折	抗压	抗折	
水泥:再生粗集料:碎石:砂 = 1:1.87:1.87:1.92	13.4	2.4	20.2	4.1	2.3×10^4
水泥:再生粗集料:碎石:砂 = 1:2.24:1.49:1.92	12.9	2.7	19.3	4.5	2.5×10^4
水泥:再生粗集料:碎石:砂:再生细集料 = 1:1.87:1.87:1.49:0.37	12.8	2.0	17.8	3.7	2.2×10^4
水泥:再生粗集料:碎石:砂:再生细集料 = 1:2.24:1.49:1.49:0.37	12.0	2.1	17.5	3.9	2.1×10^4

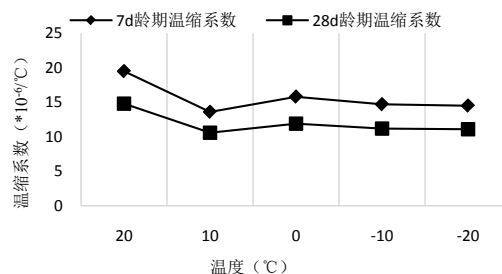


Figure 2. Relationship between temperature shrinkage coefficient and temperature of recycled concrete

图 2. 再生混凝土温缩系数与温度的关系

7 d 龄期与 28 d 龄期再生集料刚性基层的温缩系数规律相似,再生混凝土 28 d 平均温缩系数要比 7 d 温缩系数低 30%左右,表明延长养生龄期有利于改善再生刚性基层的温缩性能。

4.2. 再生二灰碎石水泥混凝土的温度收缩特性

2 种湿度条件下的再生集料水泥混凝土干缩系数见图 3。

由图 3 可见,再生混凝土的干缩系数随养护时间的延长而增大,并且干缩系数在试验初期增长较快,14 天以后,增长放缓,因此,龄期 14 天是再生二灰碎石混凝土干缩特性的临界点,前 14 天的养生十分重要。

湿度为 90%时的干缩系数与湿度 60%时的干缩系数变化规律相似,但略小于 60%湿度时的温缩系数;养生湿度对再生集料混凝土前 14 天的干缩系数影响不大,14 天后,养生湿度对干缩影响较前期养生更为明显。这是因为再生二灰碎石表层的灰浆层及其一定的裂隙构造使得材料本身具有一定保水特性,这有利于材料的初期养生。

再生集料混凝土干缩稳定期为 90 d, 120 d 的收缩增量非常小,而普通混凝土的干缩稳定期一般为 180 d,由此可见再生集料混凝土的干缩稳定期较普通混凝土短。普通混凝土 90 天的干缩系数为 315×10^{-6} ,而再生混凝土同期的干缩系数为 340.25×10^{-6} ,由此可见,再生集料混凝土比天然集料混凝土的干缩量明显偏大,主要是由集料的差别所引起,再生集料的颗粒棱角多,表面粗糙,集料表面包裹着部分硬化灰浆,砂浆中水泥石本身的空隙率较大,且在破碎过程中其内部往往会产生大量有一定尺寸的裂纹,因此与天然集料相比,再生集料的吸水率高得多,吸水率高,必然会导致失水后再生混凝土的干缩量增大。

综上所述,由于再生集料水泥混凝土具有较高的温缩系数与干缩系数,尤其是养生龄期在前 14 天的干缩系数增加迅速,而温缩系数随养护时间增长而减小。因此,再生集料刚性基层施工后 14 天内的保温、湿养十分关键。

5. 再生二灰碎石水泥混凝土的耐久性

5.1. 再生二灰碎石水泥混凝土的抗渗性

以透水性抗渗标号作为抗渗性指标。在 1.1 MPa 时,4 块试件均未出现透水现象,劈开后 4 块试件的渗水高度见表 8。

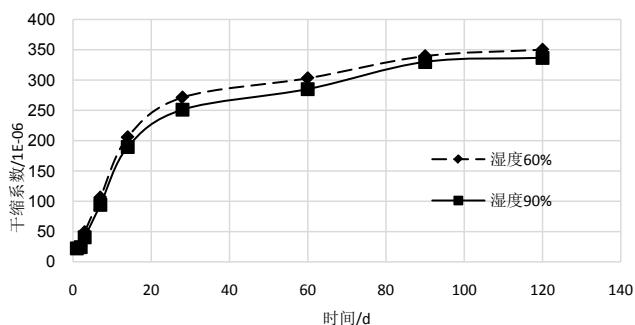


Figure 3. Shrinkage deformation of recycled concrete under different humidity conditions
图 3. 再生混凝土在不同湿度条件下干缩变形

Table 8. Water seepage height of recycled aggregate concrete/mm

表 8. 再生集料混凝土的渗水高度/mm

试件编号	1	2	3	4	5	6
渗水高度	141	132	135	透水	透水	146

根据表 8, 计算得再生集料混凝土的抗渗等级为 P10, 能够满足一般混凝土工程对抗渗性的要求, 抗渗性一般, 二灰碎石再生集料的表面特性对再生混凝土的初期抗渗性具有不利的影响。但再生混凝土在硬化过程中, 集料吸附界面水, 降低局部的水胶比, 随水化的深入, 水分释放出来, 对界面形成良好的养护, 再者胶凝材料用量较多, 能够填补再生粗集料表面的孔隙, 阻止水分渗透, 从而提高了再生集料混凝土的抗渗性。

5.2. 再生二灰碎石水泥混凝土的抗冻性

再生集料混凝土冻融试验结果见表 9。

由冻融试验可见, 再生集料混凝土的冻融循环次数达到 90 次时, 试件的质量变化率为 5.1%, 即试件的最大抗冻循环次数为 90 次, 满足一般工程混凝土抗冻 50 次的要求。

6. 再生二灰碎石水泥混凝土的疲劳特性

采用标准养生 28 d 的小梁试件(150 mm × 150 mm × 550 mm), 进行二灰碎石再生混凝土的疲劳试验。试件按三分点法加载, 疲劳试验采用 INSTRON8500 疲劳试验机。采用正弦波加载, 荷载的循环特征值 $\sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$, 加载频率选用 10 Hz, 相当于 60 km/h 的行车速度。疲劳试验结果见表 10。

按双对数疲劳方程对表 10 中的数据进行回归, 得到再生二灰碎石水泥混凝土的疲劳方程如式(1)。

$$\lg S = \lg 1.072 - 0.0422 \lg N \quad (R^2 = 0.9887) \quad (1)$$

与贫混凝土的疲劳特性[17]对比如图 4。由图 4 可知, 再生集料混凝土的疲劳性能与贫混凝土相当。

Table 9. Freeze-thaw test results of recycled aggregate concrete freeze-thaw

表 9. 标准试验系统结果数据再生集料混凝土冻融试验结果

循环次数	相对动弹性模量 P (%)	质量变化率 Wn (%)	相对耐久性指数 Kn (%)
30	21.3	1.4	
60	32.3	2.6	
90	59.9	5.1	18.1

Table 10. Fatigue test results of recycled concrete

表 10. 再生混凝土疲劳试验结果

应力水平	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
疲劳寿命	879,969	136,596	22,592	5357	797

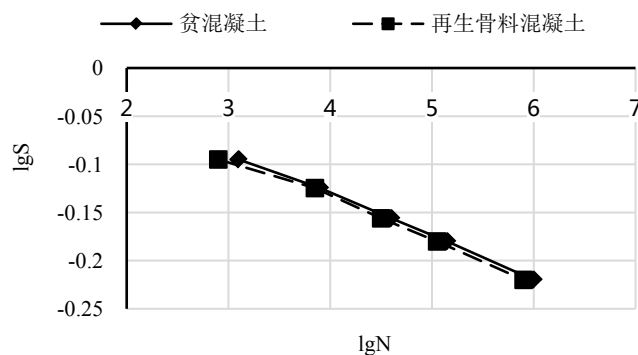


Figure 4. Comparison of fatigue equation of recycled aggregate concrete and lean concrete

图 4. 再生集料混凝土疲劳方程与贫混凝土混凝土疲劳方程的对比

7. 结论

1) 二灰碎石再生集料原始级配不良, 压碎值偏高, 再生粗集料的表观密度低而吸水率偏高, 但再生粗集料的形状特征系数良好。以再生粗集料为基础, 通过掺加部分新集料调整二灰碎石再生集料级配, 并合理的控制用水量, 可以获得满足高等级公路基层强度要求的再生刚性基层材料, 其适宜的配合比为水泥:二灰碎石再生粗集料:碎石:砂 = 1:2.24:1.49:1.92。

2) 二灰碎石再生水泥混凝土具有较高的温缩系数与干缩系数, 与普通混凝土相比, 二灰碎石再生水泥混凝土干缩量略大而干缩稳定期短; 其前 14 天的干缩系数增加迅速, 因此, 再生集料刚性基层施工后 14 天内的保温、湿养十分关键。

3) 二灰碎石再生集料混凝土的抗渗等级为 P10, 能够满足一般混凝土工程对抗渗性的要求; 再生混凝土的最大抗冻循环次数为 90 次, 满足一般工程混凝土抗冻 50 次的要求。

4) 试验获得了二灰碎石再生混凝土疲劳方程, 表明再生集料混凝土的疲劳性能与贫混凝土相当, 具有相近的疲劳规律。

参考文献

- [1] 汪京. 废旧基层材料水泥稳定再生利用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [2] 王保群, 李志, 郝志刚. 高速公路二灰碎石废料的再利用[J]. 山东交通学院学报, 2007, 15(3): 34-37.
- [3] 季长玲, 张帅. 二灰碎石水泥就地冷再生基层应用探讨[J]. 上海公路, 2016(4): 30-32 + 98.
- [4] 朱开方. 二灰碎石冷再生在旧沥青路面维修养护中的应用[J]. 北方交通, 2015(5): 93-96.
- [5] 季杰, 陈喻军, 黄亚琴. 二灰碎石基层水泥就地冷再生利用技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(10): 122-123.
- [6] 孙正, 沈鞠南, 苏东兰, 等. 水泥稳定废二灰碎石再生基层干缩特性[J]. 粉煤灰综合利用, 2017(5): 36-40.
- [7] 汪超. 泡沫沥青再生二灰碎石关键书研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [8] 韦武举, 郑炳锋, 等. 泡沫沥青冷就地再生二灰碎石混合料设计方法优化研究[J]. 公路, 2015(8): 260-264.
- [9] 常成刚. 改性乳化沥青再生试验段设计及施工方案[J]. 中国公路, 2014(19): 134-135.
- [10] 杜少文. 水泥乳化沥青再生水泥稳定碎石基层材料研究[J]. 公路, 2012(7): 250-253.
- [11] Wang, X.F. (2006) Application of Reclaimed Concrete in Road Repair. *Municipal Engineering Technology*, **24**, 435-450.
- [12] Xiao, J.Z., Wang, J.L., Sun, Z.P., et al. (2005) Investigation on Recycled Coarse Aggregate Applied in Concrete Pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, **22**, 52-55.
- [13] Xiao, J.Z. and Wang, J.L. (2005) Research on the Optimized Mix Proportion of Recycled Concrete Aggregate Stabilized by Lime and fly Ash. *Journal of Building Materials*, **8**, 299-303.
- [14] 刘数华, 冷发光. 再生混凝土技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007: 23-39, 50.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. JTG F30-2003 公路水泥混凝土路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. JTG D40-2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [17] 刘伟, 王秉纲. 贫混凝土基层混凝土路面结构设计研究[M]. 西安: 长安大学, 2005: 20-39.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org