

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0052-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.012

粒化高炉矿渣代砂混凝土性能的试验研究

李明轩, 王浩, 赵杰鹏

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 试验利用粒化高炉矿渣取代部分砂(特细砂)作为细骨料拌制混凝土, 以不同的矿渣代砂率为主要变量, 对10组不同配合比混凝土的流动性, 立方体抗压强度进行研究。试验结果表明, 混凝土的流动性随矿渣代砂率的增加逐渐降低, 混凝土立方体抗压强度随矿渣代砂率的增加先增大后减小, 矿渣的最优代砂率为60%; 矿渣细骨料对混凝土后期强度的增长有促进作用。同时拟合出适合于矿渣代砂混凝土抗压强度的预测模型。

关键词: 混凝土; 粒化高炉矿渣; 抗压强度; 特细砂; 计算模型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Experimental study on properties of granulated blast furnace slag as fine aggregate concrete

LI Mingxuan, WANG hao, ZHAO Jiepeng

(College of Civil Engineering, Hebei University of engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The granulated blast furnace slag can be used to replace partial sand(extra fine sand) to prepare concrete. The influence of different rates of slag replacing partial sand on the properties of concrete is studied. The results show that the fluidity of concrete containing granulated blast furnace slag decreases with the increase of slag replacement rates. With the increase of slag replacement rates, the compressive strength of concrete increases at first and then decreases, optimal levels of granulated blast furnace slag replacement rates is 60%. The granulated blast furnace as fine aggregate has positive effect on the later strength of concrete. Meanwhile, based on the test results, the formula to predict the compressive of granulated blast slag as fine aggregate concrete is proposed.

Key words: granulated blast furnace slag; compressive strength; calculation model

粒化高炉矿渣^[1]是高炉冶炼生铁时所产生的固体副产物, 其化学成分类似于普通硅酸盐水泥, 具有潜在的水硬性, 但与天然砂相比结构疏松, 孔隙率较大, 各级压碎指标值均远大于天然砂^[2-5]。国外已有很多关于将电弧矿渣作为混凝土骨料性能的研究^[6-7]。研究利用矿渣代替天然砂作为混凝土细骨料不仅可以拓展高炉矿渣的利用途径, 还可以缓解建设用砂的供需矛盾, 保护有限的天然砂资源^[8]。本试验利用邯郸本地特细砂及矿渣拌制混凝土, 分析矿渣代砂率对混凝土抗压强度和流动性的影响规律, 找出矿渣的最优代砂率, 并且拟合出适合矿渣代砂混凝土抗压强度的预测模型。

1 实验设计

1.1 试验原材料

水泥: 采用河北太行水泥股份有限公司生产的太行牌 32.5 级矿渣硅酸盐水泥; 矿渣: 邯钢集团水淬粒化高炉矿渣(化学成分见表 1); 粗骨料: 粒径 5~25 mm 连续级配碎石; 天然细骨料: 邯郸本地特细砂, 细度模数为 1.3; 外加剂: FDN 高效减水剂, 减水率 18.6%。

1.2 粒化高炉矿渣与天然砂性能测定

本试验所用的天然砂为邯郸本地特细砂, 由表 2

收稿日期: 2017-12-10

作者简介: 李明轩(1992-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 从事土木工程材料的研究。

表 1 矿渣的主要成分 (单位: %)

Tab.1 Chemical composition of granulated blast furnace slag

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	烧失量
33.2	14.1	1.4	8.2	36	0.3	—	3.68

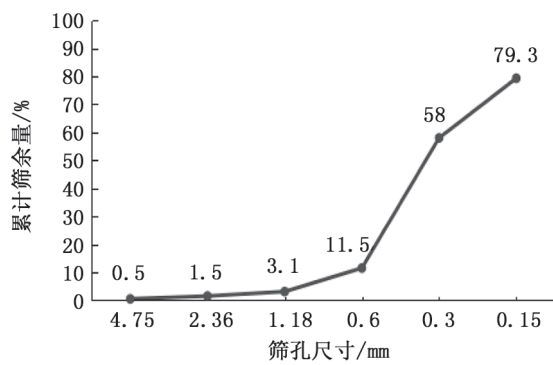
表 2 矿渣与天然细骨料的性能指标对比

Tab.2 Comparison of performance indexes between slag and natural fine aggregate

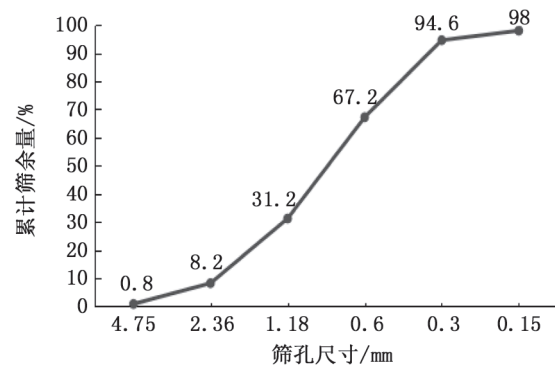
测试项目	细度模数	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%
天然砂	1.3	2 680	1 575	7.7
矿渣	3.0	2 523	1 390	14.3

可知,天然砂和矿渣的表观密度都大于 2 500 kg/m³,符合 GB/T14684-2011 中对细骨料表观密度的要求。且天然砂的堆积密度和表观密度均比矿渣大,说明了矿渣存在有较多的孔隙结构,孔隙率较大。同时也使得矿渣的压碎指标大于天然砂。

本文对所用天然砂和矿渣进行了筛分试验,级配曲线见图 1。天然砂细度模数 1.3;矿渣细度模数 3.0,属中砂。试验又将矿渣与砂按照不同的比例混合后进行骨料的筛分试验(图 2)。通过试验结果可知:随着矿渣代砂率的提高,细骨料的细度模数也随之提高。当矿渣代砂率达到 60% 时,细骨料细度



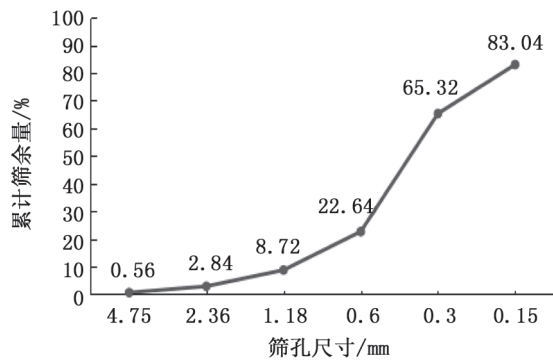
(a) 天然砂



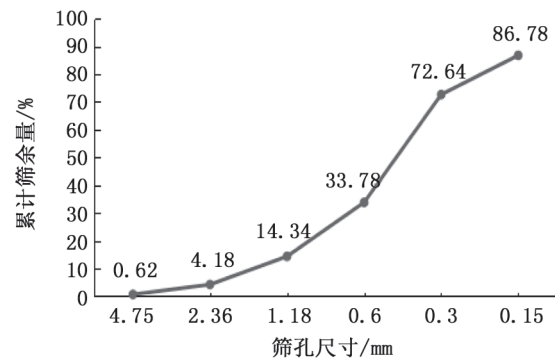
(b) 粒化高炉矿渣

图 1 细骨料筛分曲线

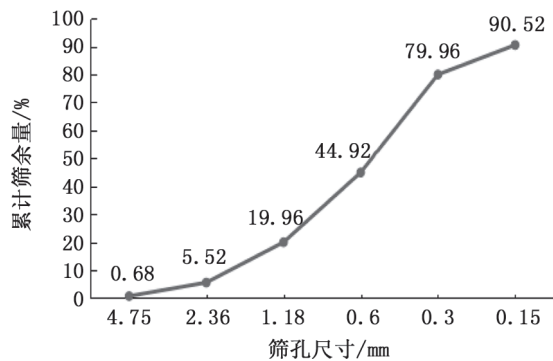
Fig.1 Sieve curve of fine aggregate



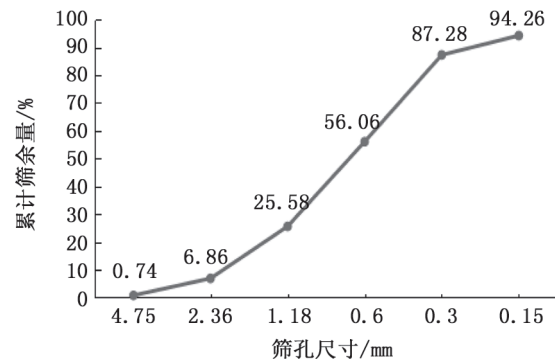
(a) 矿渣代砂率 20%



(b) 矿渣代砂率 40%



(c) 矿渣代砂率 60%



(d) 矿渣代砂率 80%

图 2 混合细骨料筛分曲线

Fig.2 Sieve curve of mixed fine aggregate

模数为 2.5; 当矿渣代砂率达到 80% 时, 细骨料细度模数为 2.7, 都属于中砂且级配合格。从图 2 可以看出, 级配曲线随矿渣代砂率的增加越来越趋于平缓, 说明将特细砂与粒化高炉矿渣掺配使用, 能有效地改善特细砂细骨料的颗粒级配情况, 从而提高混凝土的和易性。

1.3 配合比设计及实验方法

试验所用天然砂为邯郸本地特细砂, 以矿渣代砂率 0%、20%、40%、60%、80%; 水胶比为 0.41、0.36; 砂率为 32%、30%; 为变量拌制混凝土。混凝土搅拌机采用 30 L 强制式单卧轴搅拌机, 试件成型后用不透水的薄膜覆盖表面, 以防止水分蒸发, 并在温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 情况下静置一昼夜, 然后拆模。试件拆模后放置在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 湿度为 95% 以上的标准养护室养护。进行立方体抗压强度试验时, 加荷速度控制到 0.3~0.5 MPa/s。配合比设

计方法参照 JGJ/T 55-2011《普通混凝土配合比设计规范》。抗压强度试块尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 实际配合比见表 3。

2 实验结果及分析

2.1 抗压强度

由图 3 和表 4 可知, 随着矿渣代砂率的增加, 矿渣代砂混凝土的抗压强度先增大后减少。矿渣的最优代砂率为 60%。7 d 时, 矿渣代砂率 60% 的混凝土抗压强度比未掺矿渣的普通混凝土平均高出 17.0%。28 d 时, 抗压强度比未掺矿渣的普通混凝土平均高出 14.5%。60 d 时, 抗压强度比未掺矿渣的普通混凝土平均高出 15.6%。产生这种情况的主要原因是: 矿渣与天然特细砂相互掺配使用, 改善了细骨料的级配情况, 减少了混凝土的孔隙率, 使混凝土内部结构更加密实, 抗压强度增加。当矿渣

表 3 混凝土配合比各材料用量

Tab.3 Concrete Mix ratio of each material

组别	水胶比 W/B	砂率 /%	原材料 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				石子	矿渣代砂率 /%	减水剂 /%
			水	水泥	天然砂	矿渣			
GBFCA-0	0.41	0.32	176	429	574	0	1 221	0	0.7
GBFCA-1	0.41	0.32	176	429	459.2	114.8	1 221	20	0.7
GBFCA-2	0.41	0.32	176	429	344.4	229.6	1 221	40	0.8
GBFCA-3	0.41	0.32	176	429	229.6	344.4	1 221	60	0.9
GBFCA-4	0.41	0.32	176	429	114.8	459.2	1 221	80	0.9
GBFCB-0	0.36	0.30	176	489	521	0	1 214	0	0.7
GBFCB-1	0.36	0.30	176	489	416.8	104.2	1 214	20	0.7
GBFCB-2	0.36	0.30	176	489	312.6	208.4	1 214	40	0.8
GBFCB-3	0.36	0.30	176	489	208.4	312.6	1 214	60	0.9
GBFCB-4	0.36	0.30	176	489	104.2	416.8	1 214	80	0.9

表 4 混凝土坍落度及抗压强度试验结果

Tab.4 Test results of slump and compressive strength

组别	坍落度 /mm	7 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa	60 d 抗压强度 /MPa	7~60 d 强度增长率 /%
GBFCA-0	174	34.71	42.12	44.11	27.1
GBFCA-1	162	37.12	45.88	48.98	31.9
GBFCA-2	164	39.71	46.14	50.93	28.3
GBFCA-3	163	40.03	47.84	51.63	29.0
GBFCA-4	133	32.82	42.96	48.21	47.0
GBFCB-0	188	39.24	47.49	50.77	29.4
GBFCB-1	155	43.90	52.02	53.85	22.7
GBFCB-2	157	44.42	52.42	55.82	26.7
GBFCB-3	152	46.55	54.78	57.97	24.5
GBFCB-4	130	36.92	51.77	54.21	46.8

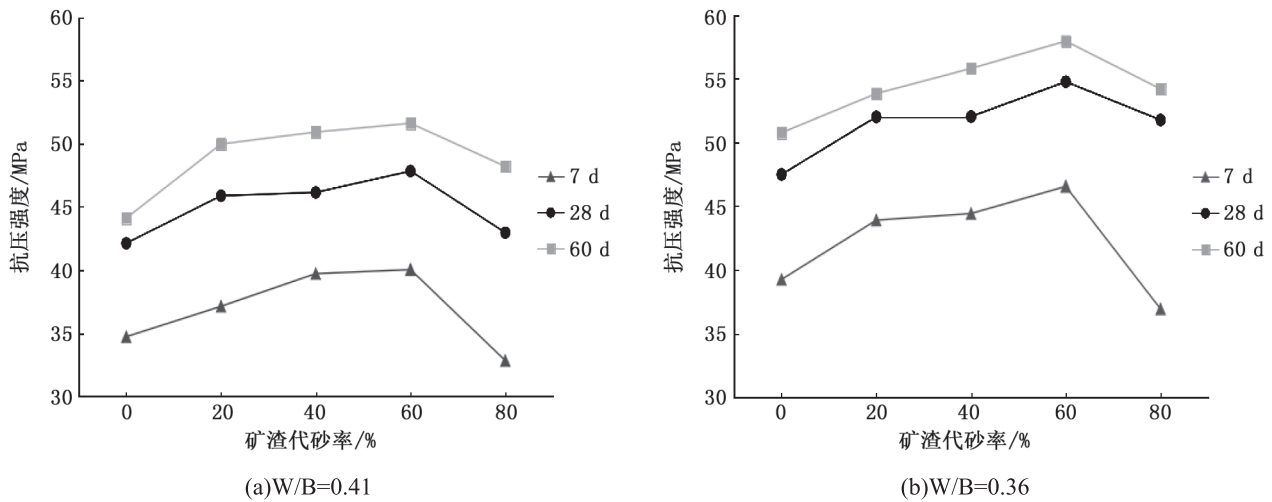


图 3 矿渣代砂率对混凝土抗压强度的影响

Fig.3 The effect of slag replacement rates on the strength of concrete

代砂率达到 80% 时，由于矿渣本身孔隙率高，吸水率大，矿渣掺量过高会对混凝土强度产生不利影响。

由表 4 可以看出，矿渣代砂混凝土的强度增长率均大于未掺矿渣的普通混凝土，并且当矿渣代砂率为 80% 时，混凝土 7 ~ 60 d 强度增长率达到了 47%。这是因为矿渣代砂率较大时，虽然粒化高炉矿渣的物理缺陷会对混凝土的强度产生不利影响，但粒化高炉矿渣属火山灰性质，具有一定的化学活性，矿渣中的活性 SiO₂ 和活性 Al₂O₃ 能够缓慢地在混凝土中发挥活性，生成水硬性胶凝物质，这对混凝土后期强度的增长起到了促进作用。

2.2 流动性

由表 4 可知，随着矿渣代砂率的增加，混凝土的流动性逐渐降低，在相同的水胶比下，矿渣代砂混凝土在达到与普通混凝土相同程度的坍落度时需水量增加。主要是因为粒化高炉矿渣为多孔结构，结构疏松，导致矿渣细骨料的吸水率比天然细骨料要大，使得混凝土中自由水减少，流动性降低。

3 粒化高炉矿渣代砂混凝土抗压强度回归方程

本次试验用水量是固定的。采用非线性回归模型，考虑矿渣代砂率、水胶比、砂率、龄期等各个变量与粒化高炉矿渣代砂混凝土抗压强度之间的关系，建立出适合于矿渣代砂混凝土抗压强度的预测模型。回归方程的建立：

$$\begin{cases} f_{c, cu} = Z + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \\ X_3 = \beta(W/B) \end{cases} \quad (1)$$

式中：X₁—混凝土龄期，d；X₂—矿渣代砂率，×100；W/B—水胶比；β—砂率，×100；Z、a₁、a₂、a₃—回归系数。

由表 3 和表 4 可知：共 30 组原始数据， $\bar{X}_1=36.7$ ， $\bar{X}_2=40$ ， $\bar{X}_3=12$ ， $\bar{f}_{c, cu}=46.51$ 。又有

$$\begin{cases} L_{11} = \sum_{i=1}^{30} X_{1i}^2 - 30(\bar{X}_1)^2 = 44\ 330 - 40\ 406.7 = 3\ 923.2 \\ L_{22} = \sum_{i=1}^{30} X_{2i}^2 - 30(\bar{X}_2)^2 = 48\ 000 - 48\ 000 = 0 \\ L_{33} = \sum_{i=1}^{30} X_{3i}^2 - 30(\bar{X}_3)^2 = 4\ 362.2 - 4\ 320 = 42.2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} L_{21} = L_{12} = \sum_{i=1}^{30} X_{1i} X_{2i} - 30\bar{X}_1\bar{X}_2 = 38\ 000 - 44\ 040 = -3\ 480 \\ L_{23} = L_{32} = \sum_{i=1}^{30} X_{2i} X_{3i} - 30\bar{X}_2\bar{X}_3 = 14\ 352 - 14\ 400 = -48 \\ L_{31} = L_{13} = \sum_{i=1}^{30} X_{1i} X_{3i} - 30\bar{X}_1\bar{X}_3 = 11\ 360 - 13\ 212 = -1\ 852 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_{1y} = \sum_{i=1}^{30} X_{1i} y_i - 30\bar{X}_1\bar{y} = 47\ 292.5 - 51\ 207.5 = -3\ 915 \\ L_{2y} = \sum_{i=1}^{30} X_{2i} y_i - 30\bar{X}_2\bar{y} = 56\ 491.8 - 55\ 812 = 679.8 \\ L_{3y} = \sum_{i=1}^{30} X_{3i} y_i - 30\bar{X}_3\bar{y} = 16\ 584.9 - 16\ 743 = -158.1 \end{cases} \quad (4)$$

所以方程组为

$$\begin{cases} Z = \bar{f}_{c, cu} - a_1 \bar{X}_1 - a_2 \bar{X}_2 - a_3 \bar{X}_3 \\ L_{11} a_1 + L_{12} a_2 + L_{13} a_3 = L_{1y} \\ L_{21} a_1 + L_{22} a_2 + L_{23} a_3 = L_{2y} \\ L_{31} a_1 + L_{32} a_2 + L_{33} a_3 = L_{3y} \end{cases} \quad (5)$$

解得：Z=265.1，a₁=0.223，a₂=-14.772，a₃=30.345。

粒化高炉矿渣代砂混凝土抗压强度回归方程为
 $f_{c, cu} = 265.1 + 0.223 X_1 - 14.772 X_2 + 30.345 X_3$ (6)

4 结论

1) 随着矿渣代砂率的增加, 混凝土的流动性逐渐降低。在相同的水胶比下, 矿渣代砂混凝土在达到与普通混凝土相同程度的坍落度时需水量增加。

2) 用粒化高炉矿渣部分代替特细砂, 能够明显改善混凝土细骨料的颗粒级配。随着矿渣代砂率的增加, 矿渣代砂混凝土的抗压强度先增大后减少, 矿渣的最优代砂率为 60%。

3) 粒化高炉矿渣作为细骨料对混凝土后期强度的增长起到促进作用。矿渣代砂率为 80% 时, 混凝土 7~60 d 强度增长率最高达到了 47%。

4) 建立出了适合于矿渣代砂混凝土抗压强度的预测模型, $f_{c, cu} = 265.1 + 0.223X_1 - 14.772X_2 + 30.345X_3$ 。

参考文献:

- [1] 贾青. 水淬粒化高炉矿渣拌制混凝土抗压强度性能的试验研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009.
- [2] 朱蓓蓉, 於林峰, 张树青, 等. 矿渣代砂水泥砂浆及混

凝土物理力学性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2008(4): 386-391.

- [3] 石东升, 王安. 矿渣细骨料混凝土孔隙结构对抗压强度的影响 [J]. 混凝土, 2016(3): 80-83.
- [4] 於林峰, 杨全兵, 朱蓓蓉, 等. 矿渣代砂对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2008(6): 14-17.
- [5] 石东升, 王安. 粒化高炉矿渣代砂混凝土力学性能试验 [J]. 混凝土, 2015(7): 92-96.
- [6] FLORA Faleschini, ALEJANDRO M. High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties [J]. Construction and Building Materials, 2015(101): 113-121.
- [7] SAVERIA Monosi, MARIA Letizia Ruello. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production [J]. Cement and Concrete Composites, 2016(66): 66-72.
- [8] 石东升, 丁晓宇. 粒化高炉矿渣代砂混凝土冻融试验 [J]. 混凝土与水泥制品, 2015(5): 7-10.

(责任编辑 王利君)

(上接第 51 页) 此关系模型为含砖粒再生混凝土的可靠度分析提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 左祥祥. 再生砖骨料混杂纤维混凝土剪切性能 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [2] 安新正, 易成, 赵长彪, 等. 硫酸盐环境下再生混凝土的损伤演化研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(2): 1-6.
- [3] 王倩, 崔启兵, 徐海群. 海水侵蚀环境下再生混凝土的损伤劣化研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(4): 49-53.
- [4] 安新正, 易成, 姜新佩, 等. 海水环境下再生混凝土的腐蚀研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(1): 5-9.
- [5] 汪振双, 苏昊林. 冻融条件下再生橡胶混凝土损伤演变与强度相关性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4286-4291.
- [6] GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTINEZ-ABELLA F, EIRAS-LOPEZ, et al. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete [J]. Mater Struct, 2011,

44: 1759.

- [7] LIU Yixiang. Study on Recycled-Concrete-Filled Steel Tube and recycled concrete based on damage mechanics [J]. Journal of constructional steel research, 2012 (71): 143-148.
- [8] 安新正. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- [9] 陈爱玖, 章青, 王静, 等. 再生混凝土冻融循环试验与损伤模型研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(11): 102-107.
- [10] 安新正, 王小学, 姜新佩, 等. 单轴受压下再生混凝土的损伤特性研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(4): 1-4.
- [11] 陈宗平, 陈宇良. 三向受压状态下再生混凝土的变形性能及损伤分析 [J]. 应用力学学报, 2016, 33(5): 799-805.
- [12] 张磊. 再生混凝土单轴受压力学性能及其损伤模型研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [13] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].

(责任编辑 王利君)