

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.03.009

塑性混凝土强度和尺寸效应的试验研究

宋帅奇^{1,2} 高丹盈¹ 胡良明¹ 严克兵¹

(1. 郑州大学新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 河南城建学院交通工程系, 河南 平顶山 467044)

摘要 通过对 12 个配合比、3 个龄期共 405 个塑性混凝土试块的强度试验,研究了塑性混凝土相关强度之间的关系,塑性混凝土抗压强度和劈拉强度的尺寸效应,以及塑性混凝土抗压强度与龄期之间的关系。试验结果表明,塑性混凝土抗压强度、劈拉强度、抗折强度之间具有良好的统计关系,相比边长为 150 mm 的立方体试块,边长为 100 mm 的塑性混凝土立方体试块的抗压强度和劈拉强度的尺寸效应系数分别为 0.9375 和 0.8616,龄期对塑性混凝土的抗压强度有较大的影响。在此基础上,建立了相关强度指标之间的换算关系式以及轴心抗压强度与龄期的对数关系式。

关键词 塑性混凝土;强度指标;尺寸效应;试验研究

中图分类号:TU528.01 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)03-0032-05

Experimental study on strength and size effect of plastic concrete//SONG Shuai-qi^{1,2}, GAO Dan-ying¹, HU Liang-ming¹, YAN Ke-bing¹ (1. Research Center of New Building Materials and Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Department of Traffic Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467044, China)

Abstract: Based on the strength tests on 405 specimens of plastic concrete with 12 mix proportions and 3 curing ages, the relationship among relevant strengths, the size effect of compressive strength and splitting tensile strength and the relationship between compressive strength and curing age were systematically investigated. The test results show that the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength of the plastic concrete exhibit a good statistical relationship. The cubic specimens with the side length of 100 mm have size effect coefficients of the compressive strength and splitting tensile strength of 0.9375 and 0.8616 respectively compared with those with the side length of 150 mm. The curing ages have great influences on the strength of plastic concrete. On such a basis, the conversion formulae among relevant strength indices and the logarithmic relationship between the axial compressive strength and the curing age were established.

Key words: plastic concrete; strength index; size effect; experimental study

塑性混凝土是以膨润土、黏土等掺合材料取代普通混凝土中的部分水泥配制而成的柔性材料,通常被用作防渗墙材料,广泛应用于大坝工程、大坝围堰工程、大坝除险加固工程及结构基础工程^[1]。近年来,塑性混凝土在我国三峡大坝围堰、小浪底水库上游围堰、丹江口水库副坝、册田水库等水利工程中广泛应用。我国对塑性混凝土的研究始于 20 世纪 80 年代,中国水利水电基础工程局、长江科学院、清华大学、郑州大学等单位开展了塑性混凝土的试验研究^[2-7]。研究发现塑性混凝土具有强度低、弹性模量低、极限变形大、弹强比(弹性模量与强度的比值)小、渗透系数合适并可控等特点,是较为理想的防渗墙材料。然而,针对塑性混凝土的研究大多侧重于工程应用,缺乏较系统的理论研究,对塑性混凝土强

度的研究集中在有关因素对某个或某些强度的影响上,缺乏相关强度间关系的统计分析。由于塑性混凝土的组成材料复杂、影响因素较多,从总体上把握强度指标之间的关系十分重要。笔者进行了 12 个配合比、3 个龄期共 405 个试块的强度试验,研究塑性混凝土抗压强度和劈拉强度的尺寸效应,并通过试验结果的统计分析,建立塑性混凝土相关强度指标之间的关系式。

1 试验概况

试验采用 42.5 号普通硅酸盐水泥、郑州郑东新区龙湖区粉质黏土(以 350 目的粒度标准磨细至粉状)、钙基一级膨润土、粒径为 5~20 mm 的碎石、细度模数为 3.3 的砂子(其级配曲线位于Ⅰ区,属粗

表 1 塑性混凝土的配合比

配合比 编号	水胶比/ %	砂率/ %	水泥质量 分数/%	黏土质量 分数/%	膨润土 质量分数/%	材料用量/kg					
						水	水泥	黏土	膨润土	砂子	石子
S04	100	40	32	49	19	370	120	180	70	524	786
S05/C120	100	50	32	49	19	370	120	180	70	655	655
S06	100	60	32	49	19	370	120	180	70	786	524
WB075	75	50	38	45	18	300	150	180	70	675	675
WB087	87	50	38	45	18	348	150	180	70	651	651
WB100/C150	100	50	38	45	18	400	150	180	70	625	625
C90	100	50	26	53	21	340	90	180	70	685	685
CL180/B70	87	50	32	49	19	322	120	180	70	679	679
CL220	87	50	29	54	17	357	120	220	70	642	642
CL260	87	50	27	58	16	392	120	260	70	604	604
B40	87	50	35	53	12	296	120	180	40	707	707
B100	87	50	30	45	25	348	120	180	100	651	651

砂)。参照前期货塑性混凝土试验结果以及为确定用水量而提前进行的纸杯试验的结果,配置满足坍落度要求的 12 种塑性混凝土的配合比(表 1),用以研究水胶比、砂率、水泥用量、黏土用量、膨润土用量、龄期等对有关强度指标的影响。每组配合比均考虑 28 d 和 90 d 这 2 个龄期,对水胶比系列还考虑了 180 d 龄期。

立方体抗压强度和劈拉强度试验均采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 和 150 mm × 150 mm × 150 mm 这 2 种立方体试块,抗折强度试验采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试块,轴心抗压强度试验和单向受压下的变形试验采用尺寸为 150 mm × 150 mm × 300 mm 的棱柱体试块。每种情况下制作 3 个试块,共计 405 个试块。塑性混凝土采用机械拌和,人工或振动台振捣,试模成型静置 48 h 后拆模,并移至标准养护室养护至目标龄期后按照 DL/T 5150—2001《水工混凝土试验规程》进行相关试验。由于塑性混凝土弹性模量低、泊松比大,其纵向压应变受横向拉应变的影响较大,按照常规混凝土弹性模量的测试方法难以准确测出塑性混凝土的纵向变形,因此,单向受压下纵向应变测试的测量标距为 300 mm,即试块全长。在试块顶端加钢盖板,将电子位移计用磁性表座固定于试验机下压板上,测试试块全长的变形并通过自动数据采集仪采集数据。轴向荷载由荷载传感器通过自动数据采集仪采集,并将自动数据采集仪得到的轴向荷载和轴向应变数据输入计算机,绘制出塑性混凝土的应力~应变曲线。

2 塑性混凝土强度指标之间的关系

2.1 劈拉强度与抗压强度的关系

试验表明,对于边长分别为 100 mm 和 150 mm 的塑性混凝土立方体试块,28 d 龄期的抗压强度分别在 1.1 ~ 3.27 MPa 和 1.27 ~ 3.26 MPa 范围内变化,

90 d 龄期的抗压强度分别在 1.74 ~ 4.59 MPa 和 1.71 ~ 4.26 MPa 范围内变化;28 d 龄期的劈拉强度分别在 0.14 ~ 0.43 MPa 和 0.16 ~ 0.4 MPa 范围内变化,90 d 龄期的劈拉强度分别在 0.2 ~ 0.5 MPa 和 0.25 ~ 0.49 MPa 范围内变化。塑性混凝土的抗压强度和劈拉强度均随水胶比的增大而明显减小,随砂率的增大先增大后减小,砂率为 50% 时和 60% 时相差不明显,合适砂率在 50% 左右;随水泥用量的增大而增大,但是增大的幅度趋缓,水泥用量以 120 kg/m³ 为宜;随黏土用量的增大而明显减小,随膨润土用量的增大先增大后减小。原因在于水胶比增大,塑性混凝土凝结硬化后内部空隙增大,导致强度降低,砂率增大使细骨料表面积增大,一方面导致实际水胶比减小,有利于强度增大,另一方面砂率过大导致胶凝材料不能充分包裹骨料,对强度增长不利;水泥用量的增加在一定程度上增强了胶凝材料与骨料的胶结,从而使强度得到提高,但胶凝浆体不能过多;黏土和膨润土的掺入降低了材料间的胶结力,同时由于膨润土吸水率大又能提高强度。

拉压比是指在同一配合比下混凝土抗拉强度与抗压强度的比值,是衡量混凝土力学性能的一个重要指标。国内外已有的研究资料^[8]表明:普通混凝土拉压比为 0.058 ~ 0.125,且强度越高,拉压比越小,脆性越大;高强混凝土拉压比仅为 0.042 ~ 0.050。对试验结果分析可知,塑性混凝土拉压比为 0.106 ~ 0.181,比普通混凝土和高强混凝土的拉压比大得多,反映了塑性混凝土变形大的特点。同时,塑性混凝土劈拉强度随抗压强度的增大而增大,见图 1,两者之间的关系可用式(1)(2)表示:

$$f_s = 0.1385f_{cu} \quad (R = 0.9237) \quad (1)$$

$$f_s = 0.1522f_{cu}^{0.89} \quad (R = 0.9407) \quad (2)$$

式中: f_s 为塑性混凝土的劈拉强度,MPa; f_{cu} 为塑性混凝土标准立方体抗压强度,MPa; R 为相关系数。

塑性混凝土劈拉强度试验值与式(1)计算值之

比的均值为 1.039 7,均方差为 0.115 8,变异系数为 0.111 4;试验值与式(2)计算值之比的均值为 1.005 6,均方差为 0.105 0,变异系数为 0.104 4,试验值与式(1)和式(2)计算值均吻合较好。

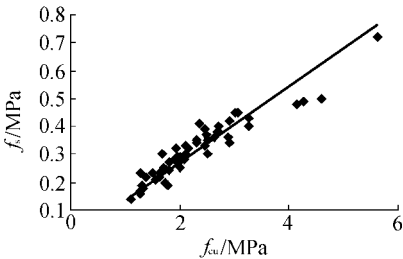


图 1 劈拉强度与抗压强度的关系

2.2 抗折强度与抗压强度和劈拉强度的关系

试验表明 28 d 龄期和 90 d 龄期的塑性混凝土的抗折强度分别在 0.38 ~ 0.99 MPa 和 0.48 ~ 1.15 MPa 之间变化,并且抗折强度、抗压强度、劈拉强度随各试验参数变化的规律基本一致。分析可知,塑性混凝土的抗折强度为抗压强度的 26% ~ 44%,且随抗压强度的增大而增大(图 2),两者之间的关系可用下面 2 个公式表示:

$$f_{tm} = 0.3912 f_{cu}^{0.7206} \quad (R = 0.9051) \quad (3)$$

$$f_{tm} = 0.2175 f_{cu} + 0.208 \quad (R = 0.9173) \quad (4)$$

式中 f_{tm} 为塑性混凝土的抗折强度,MPa。

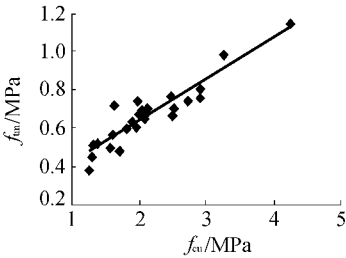


图 2 抗折强度与抗压强度的关系

塑性混凝土抗折强度试验值与式(3)计算值之比的均值为 1.004 6,均方差为 0.098 1,变异系数为 0.097 7;试验值与式(4)计算值之比的均值为 0.999 3,均方差为 0.099 5,变异系数为 0.099 6。试验值与式(3)和式(4)所得计算值均吻合较好。

劈拉强度和抗折强度均能反映材料的抗拉性能,区别在于前者是剪拉、后者是弯拉,两者之间有一定的相关性。根据试验结果,塑性混凝土抗折强度随劈拉强度的增大而增大,见图 3,图中劈拉强度为边长为 150 mm 的立方体试块的试验值。塑性混凝土抗折强度与边长分别为 100 mm 和 150 mm 的立方体试块劈拉强度的比值在 1.66 ~ 3.79 和 1.81 ~ 3.27 范围内变化。对试验结果进行统计分析得出,塑性混凝土的抗折强度与边长为 150 mm 的立方体试块和边长为 100 mm 的立方体试块的劈拉强度的

关系分别如式(5)、式(6)所示:

$$f_{tm} = 1.76 f_{sl}^{0.7707} \quad (R = 0.8754) \quad (5)$$

$$f_{tm} = 1.4963 f_{s2}^{0.7046} \quad (R = 0.8752) \quad (6)$$

式中 f_{sl} 和 f_{s2} 分别为边长为 150 mm 的立方体试块和边长为 100 mm 的立方体试块的劈拉强度。

试验值与式(5)计算值之比的均值为 1.006 1,均方差为 0.111 4,变异系数为 0.110 8;试验值与式(6)计算值之比的均值为 1.008 9,均方差为 0.143 6,变异系数为 0.142 3。由此可知,试验值与计算值吻合较好。

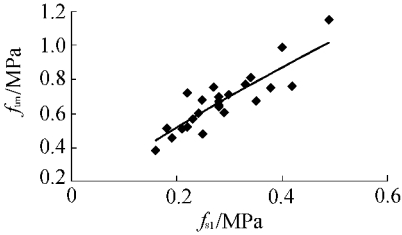


图 3 抗折强度与劈拉强度的关系

2.3 轴心抗压强度与抗压强度的关系

塑性混凝土轴心抗压强度较低,28 d 龄期和 90 d 龄期的轴心抗压强度分别在 1.11 ~ 2.75 MPa 和 1.44 ~ 3.77 MPa 之间,180 d 龄期最高,也才达到 5 MPa,并且轴心抗压强度与立方体抗压强度、劈拉强度随各试验参数变化的规律基本一致。对于普通混凝土,轴心抗压强度随标准立方体抗压强度的增大而增大,前者与后者的比值在 70% ~ 92% 之间。根据本文结果及文献[9]龙湖试验数据,塑性混凝土轴心抗压强度与标准立方体抗压强度之间存在良好的线性关系(图 4),通过统计分析,两者之间的线性关系式如下:

$$f_c = 0.863 f_{cu} \quad (R = 0.9821) \quad (7)$$

式中 f_c 为塑性混凝土轴心抗压强度,MPa。

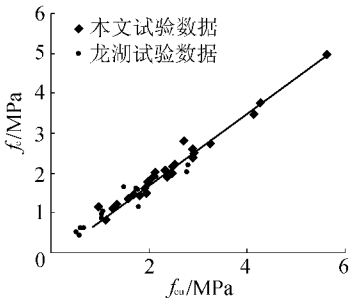


图 4 轴心抗压强度与抗压强度的关系

塑性混凝土轴心抗压强度试验值与式(7)计算值之比的均值为 1.012 3,均方差为 0.115 8,变异系数为 0.114 4。由此可知,式(7)计算值与试验结果吻合较好。

2.4 峰值应力与轴心抗压强度的关系

峰值应力与轴心抗压强度非常相近,轴心抗压

强度稍高于峰值应力,两者的差别主要是由加载速度不同引起的。测轴心抗压强度的加载速度快于测单向受压变形的加载速度。28 d 龄期和 90 d 龄期的峰值应力分别在 1.06 ~ 2.79 MPa 和 1.54 ~ 3.85 MPa 之间,180 d 龄期的峰值应力最高才达到 4.6 MPa。根据试验结果(图 5),峰值应力与轴心抗压强度具有明显的线性关系:

$$f_{cp} = 0.9571f_c + 0.0715 \quad (R = 0.9932) \quad (8)$$

式中: f_{cp} 为塑性混凝土的峰值应力,MPa。

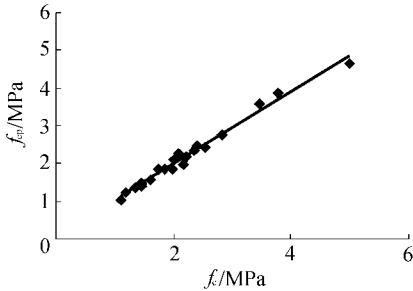


图 5 峰值应力与轴心抗压强度的关系

峰值应力试验值与式(8)计算值之比的均值为 1.0027,均方差为 0.045,变异系数为 0.045,计算值与试验值吻合较好。

3 塑性混凝土强度的尺寸效应及其与龄期的关系

3.1 强度的尺寸效应

尺寸效应对试验结果的影响不容忽视,试块较小时受外界的约束较大,测到的结果偏大,试块尺寸较大时测到的值偏小。普通混凝土抗压强度以标准立方体试块为准,边长分别为 100 mm 和 200 mm 的立方体试块应分别乘以 0.95 和 1.05 的转换系数。试验得到的塑性混凝土立方体抗压强度和劈拉强度的尺寸效应分别见图 6 和图 7。结果表明,以边长为 150 mm 的标准立方体试块为准,边长为 100 mm 的立方体试块抗压强度的尺寸效应系数为 0.9375,边长为 100 mm 的立方体试块劈拉强度的尺寸效应系数为 0.8616。从图 6 ~ 7 可以看出,边长为

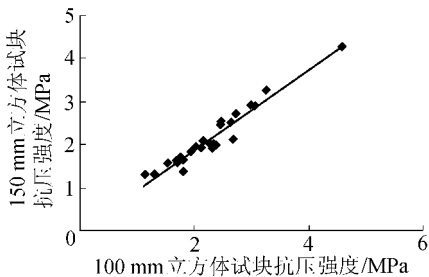


图 6 抗压强度尺寸效应

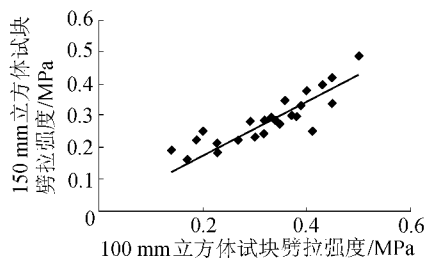


图 7 劈拉强度尺寸效应

100 mm 的立方体试块抗压强度的尺寸效应系数与普通混凝土的相近,这主要是因为根据圣维南原理,在相同的试验条件下,试验机对相同尺寸试件端部的约束的影响范围基本相同,试件尺寸对尺寸效应的影响超越了材料对尺寸效应的影响。

3.2 强度与龄期的关系

由于影响塑性混凝土强度的因素非常复杂,为了简化计算,参照普通混凝土强度与龄期的经验公式并根据塑性混凝土强度的特点加以修正,得到龄期为 n ($n \geq 90$ d) 的塑性混凝土轴心抗压强度 f_{cn} 与 28 d 龄期时的轴心抗压强度 f_{c28} 的关系如下:

$$f_{cn} = 1.051f_{c28} \frac{\lg n}{\lg 28} \quad (9)$$

式中: f_{cn} 为龄期为 n ($n \geq 90$ d) 时的塑性混凝土的轴心抗压强度,MPa; f_{c28} 为 28 d 龄期时塑性混凝土的轴心抗压强度,MPa。

龄期为 90 d 和 180 d 时的塑性混凝土轴心抗压强度试验值与按式(9)计算值之比的均值为 1.0063,均方差为 0.0851,变异系数为 0.0846,计算值与试验值吻合较好。

4 结 语

a. 塑性混凝土抗压强度、劈拉强度、抗折强度均随水胶比的增大而明显减小,随砂率的增大先增大后减小,合适砂率在 50% 左右;随水泥用量的增大而增大,但增长的幅度趋缓,水泥用量以 120 kg/m³ 为宜;随黏土用量的增大明显减小,随膨润土用量的增大先增大后减小。

b. 塑性混凝土相关强度之间具有良好的统计关系,根据对本文试验结果的统计分析,劈拉强度与立方体抗压强度之间、抗折强度与立方体抗压强度之间具有线性函数或幂函数的关系,抗折强度与劈拉强度之间具有幂函数关系,立方体抗压强度、峰值应力与轴心抗压强度具有线性关系。

c. 相比边长为 150 mm 的立方体试块,边长为 100 mm 的塑性混凝土立方体试块抗压强度和劈拉强度的尺寸效应系数分别为 0.9375 和 0.8616。龄期为 n ($n \geq 90$ d) 时的塑性混凝土轴心抗压强度 f_{cn}

与 28 d 龄期时的轴心抗压强度 f_{c28} 具有对数关系。

参考文献：

[1] 李青云, 张建红, 包承刚. 风化花岗岩开挖弃料配制三峡二期围堰防渗墙材料[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 114-118.

[2] 宋帅奇. 塑性混凝土单向受压应力应变关系的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2008.

[3] 严克兵. 塑性混凝土基本性能的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2008.

[4] 张鹏. 塑性混凝土材料性能研究及其应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.

(上接第 19 页)

[11] TARSHISH M. Combined mathematical model of flow in an aquifer horizontal well system[J]. Ground Water, 1992, 30(6) 931-935.

[12] ZHAN Hong-bin, WANG Li-hong, PARK E. On the horizontal well pumping tests in anisotropic confined aquifers[J]. J of Hydrol, 1994, 252(1/2/3/4): 37-50.

[13] 郭尚平, 张盛宗, 桓仁仁, 等. 渗流研究和应用的一些动态[C]//渗流力学进展. 北京: 石油工业出版社, 1996: 1-12.

[14] 孔祥言, 卢德唐. 渗流力学的理论应用及其前沿研究[J]. 中国科技大学学报, 2007, 37(10): 1262-1266.

[15] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999: 1-7.

[16] 邓英尔, 刘慈群, 黄润秋, 等. 高等渗流理论与方法[M].

(上接第 27 页)

参考文献：

[1] NOBARI E S, DUNCAN J M. Movements in dams due to reseervoir filling[C]//ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures. Pbrdue: Purdue University, 1973: 32-54.

[2] NOBARI E S, DUNCAN J M. Static analysis of embankment dams: a finite element perspective[J]. Dam Engineering, 1973, 1(21): 79-99.

[3] 左元明, 沈珠江. 坝料土的浸水变形特性研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院土工研究所, 1989.

[4] 沈珠江, 左元明. 堆石体流变试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院土工研究所, 1983.

[5] 沈珠江, 赵魁芝. 堆石坝流变变形反馈分析[J]. 水利学报, 1998, 29(6): 1-6.

[6] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. J of the Soil Mech and Found, 1970, 96(5): 1629-1653.

[5] 李清富, 张鹏. 塑性混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2006, 19(5): 75-79.

[6] 李文林. 塑性混凝土防渗墙技术综述[J]. 水利水电工程设计, 1995, 14(3): 54-59.

[7] 程瑶, 张美霞. 塑性混凝土配合比试验研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(5): 62-64.

[8] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

[9] 高丹盈, 朱海堂, 赵军, 等. 郑州市郑东新区龙湖水系成湖工程塑性混凝土防渗墙性能试验研究报告[R]. 郑州: 郑州大学新型建材与结构研究中心, 2006.

(收稿日期 2009-08-01 编辑 骆超)

北京: 科学出版社, 2004: 1-15.

[17] DENG Ying-er, LIU Ci-qun. Numerical simulation of unsteady flow through porous media with moving boundary[C]//ZHANG Feng-gan. Proceedings of the Third International Conference on Fluid Mechanics. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998: 759-765.

[18] DENG Ying-er, XIE He-ping, HUANG Run-qiu, et al. Law of nonlinear flow in saturated clays and radial consolidation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(11): 1427-1436.

[19] MUSKAT M. The flow of homogeneous fluids through porous media[M]. New York: McGraw-Hill, 1937.

[20] 李, 王卫红, 苏彦春. 分支水平井产能的计算[J]. 石油学报, 1998, 19(3): 89-92.

(收稿日期 2009-06-01 编辑 骆超)

[7] 朱晟, 梁现培, 冯树荣. 基于现场大型承载试验的筑坝原级配堆石料力学参数反演研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1138-1143.

[8] 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板堆石坝[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.

(收稿日期 2009-06-09 编辑 骆超)

