

地下工程三维地质力学模型制作逆向控制技术 研究与应用

李仲奎, 王爱民, 王克忠, 廖 宜, 付圣尧

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 地质力学模型试验是研究岩体工程和地下工程的一种重要手段, 而模型的制作方法很大程度上决定试验的可行性和结果的可靠性。以2个地下工程三维模型试验为背景, 对模型制作中压实密度控制问题进行研究。根据在已建实际模型不同深度取得的实测数据, 对采用等容控制夯筑法制作模型时产生的同一种材料密度不能保持恒定, 而是随深度的增加产生变化的现象进行分析; 提出基于击实功复合作用系数、密度随填筑深度非线性逆向控制的模型制作方法, 并应用于一个实际三维模型试验模型制作中。原位取样测试结果表明, 按照这种方法设计制作的模型, 最终能达到模型中同一类型材料所要求的密度整体相对一致的效果, 从而提高了物理模型中材料力学性质的稳定性。

关键词: 地下工程; 地质力学模型试验; 击实功; 逆向控制

中图分类号: TU 761

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)09-1729-06

STUDY AND APPLICATION OF INVERSE CONTROLLING TECHNOLOGY FOR 3D GEOMECHANICAL MODEL CONSTRUCTION OF UNDERGROUND ENGINEERING

LI Zhongkui, WANG Aimin, WANG Kezhong, LIAO Yi, FU Shengyao

(State Key Laboratory of Hydrosiences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As an important research method, geomechanical model test is used to analyze the deformation and stability state of rock engineering and underground engineering. Construction technologies of the model often determine the feasibility of the model test and the credibility of the result to large extent. The controlling technology for 3D geomechanical model has been researched, through introducing two three-dimensional geomechanical model tests; how the bulk density grows as the depth increases in the inner model was studied by taking samples on in-situ tests with different depths, which were constructed and controlled by the fixed volumes of the materials of the models. A design and construction method is suggested; the bulk density of model material reduces as the depth increases by the so called inverse controlling method, which was carried out in another three-dimensional model test of the subway station extended from shield tunnel. The results of sampling taken from in-situ of the model test show that constructing model by this design method is available; and the density and property of the model material are uniform and stable.

Key words: underground engineering; geomechanical model test; compactive effort; inverse controlling

收稿日期: 2009-02-14; **修回日期:** 2009-06-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目雅砻江水电联合开发基金项目(50539090); 国家自然科学基金面上项目(50779025)

作者简介: 李仲奎(1946-), 男, 博士, 1970年毕业于清华大学水利工程系河川枢纽及水电站建筑专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事水利水电工程、地下工程、岩石力学试验研究和数值分析方面的教学与研究工作。E-mail: lzk-dhh@tsinghua.edu.cn

1 引言

地质力学模型试验又称岩石力学模型试验^[1~3], 是一种从力学观点出发, 根据一定的相似原理, 采用试验的手段研究特定工程地质条件对工程影响的方法。它与普通结构模型试验的区别在于, 这种试验不仅需要模拟建筑物, 而且还需要在模型中模拟建筑物基岩或围岩的重力以及地质构造, 包括岩体中的断层、破碎带、软弱夹层、节理和裂隙等, 尽可能体现出岩体非均匀性、各向异性、非弹性及非连续性以及多裂隙体的岩石力学特征。同时, 在模型的几何尺寸、边界条件及作用荷载、模型材料的密度、强度和变形特性等方面满足相似理论的前提下, 尽可能使模型符合实际情况, 从而研究围岩或基岩的稳定条件、变形状态及其对建筑物的影响^[4~6]。地质力学模型试验中模型的制作技术直接影响到模型试验的准确性^[7~9]。与采用浇注和砌筑方法不同^[10~12], 采用夯实法填筑模型时^[13, 14], 如何控制材料密度准确达到设计要求, 则会直接影响模型材料的力学性质。本文以 2 个三维物理模拟模型试验为背景对该问题进行研究, 提出了一种新的压实密度的控制方法。

2 试验基本情况

2 个试验均为地下工程施工过程模拟试验^[10]。试验几何比尺为 1/10, 材料密度比尺为 1。由于密度比尺为 1, 故应力比尺及与应力有相同量纲的物理量均有与几何比尺相同的相似比尺, 即材料弹性模量、剪切模量、抗压强度、抗拉强度、黏聚力, 初始地应力和面力荷载的相似比尺均为 1/10; 位移的量纲与几何尺度相同, 相似比尺也相同; 量纲一的物理量如应变、泊松比、摩擦角的相似比尺均为 1。

模型模拟隧道开挖外径为 6.0 m, 隧道内径为 5.4 m, 2 个隧道的中心距离为 14.6 m, 这样两洞开挖外边线间距为 20.6 m。结合试验台实际情况, 模型最终尺寸为 5.7 m×1.8 m×2.7 m(长×宽×高), 如图 1 所示。模型中模拟开挖的隧道为连接 2 个盾构隧道的渡线段, 如图 2 所示。

第二个模型 2 个隧道的中心距离为 23 m, 隧道

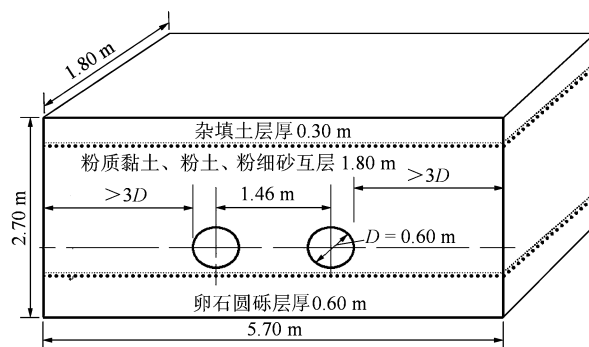


图 1 试验模型体形与尺寸

Fig.1 Dimensions and shape of the physical model

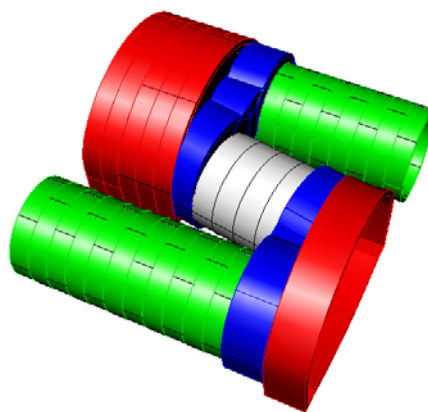


图 2 模拟双盾构隧道间渡线段的开挖

Fig.2 Simulation of excavation of a bifurcation between two existing tunnels constructed by shield TBM

内径为 5.4 m, 开挖外径为 6.0 m, 两洞开挖外边线间距为 29 m。结合试验台的实际情况, 模型最终尺寸确定为 6.50 m×1.80 m×2.88 m(长×宽×高), 与模型 1 略有不同。试验目的是研究在 2 个盾构隧道之间采用浅埋暗挖法开挖地铁车站的可行性、开挖支护的具体工艺措施以及防止地表沉降的方法。

3 传统模型填筑方法分析

由于模型高度较大, 往往同一种材料也无法一次填筑到位, 必须分层填筑夯实。传统模型夯实法是等容控制夯实法, 即按照分层厚度、面积和设计压实容重值, 计算出填筑每一层模型材料所需填入的材料质量, 然后夯实到规定的层厚。这样虽然便于操作, 计算简便, 但实际上每夯实一层一定厚度的模型, 由于击实功的传递作用, 对其压实的时候总是会对下面一层模型材料产生压实效果, 故当前夯筑的这层模型的实际密度必然会小于设计密度, 而下层模型材料可能会大于设计密度^[5]。按这

样分析,随着模型往上填筑,位置在底层的模型材料总会受到上面各层击实功的复合累积作用,导致模型底部的密度比上部的大,模型的密度随着埋深的增加而增大,从而也会对材料的力学性质产生影响。为了克服这一缺点,作者考虑了击实功的传递和积累,从逆向思维角度出发,提出了按不同深度设计当前层位材料填筑的“虚拟密度”,经过多层击实功的复合作用后,最终达到理想密度的模型制作方法,进而使模型中同一材料整体上密度均匀一致。

3.1 模型原位试验

模型试验 1 是采用传统等容控制法进行填筑的,在其填筑完成后,进行了干密度的原位取样试验。将取样数据作图并进行拟合(见图 3)。

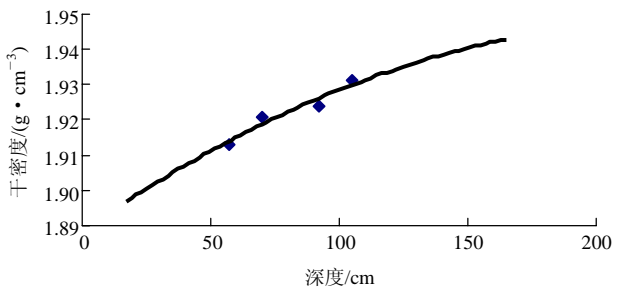


图 3 干密度随深度变化拟合曲线
Fig.3 Curve between bulk density and depth

由拟合数据可见,模型的干密度从上到下逐渐增大的规律是明显的,可用二次多项式进行拟合:

$$\rho_d = -7 \times 10^{-7} h^2 + 5 \times 10^{-4} h + 1.8884 \quad (R^2 = 0.9317)$$

(1)

式中: ρ_d 为模型内部的干密度(g/cm^3), h 为深度(cm)。

定义 $(\rho_d - \rho_0) / \rho_0$ 为相对压缩量 β (ρ_0 为理论控制密度),由于模型是分层填筑而成,根据曲线拟合数据,可以得到不同深度填筑的层的相对压缩量(见表 1)。

3.2 用击实功分析传统填筑方法

假设现在填筑第 n 层模型,由于下方 $n+1$ 层的被压缩导致该层实际厚度比理论上要求的相对厚度多了 S_1 ;当填筑到第 $n-1$ 层时,这个过程对第 $n+1$ 层的相对压缩量为 S_2 。假设一个分 7 层压实填筑的地质力学模型,每层的填筑厚度为 h ,则填筑到最顶层时,整个过程对最底层模型材料产生的相对压缩量总和为 $(S_1+S_2+S_3+\cdots+S_6+S_7)$ 。最顶层则由于其下每层都产生压缩作用,相对压缩量值等于

表 1 由拟合曲线得到的不同深度相对压缩量

Table 1 Relative compression with depth by fitting curve	
深度/cm	相对压缩量/%
15	-1.7
45	-1.0
75	-0.5
105	0.0

$-(S_1+S_2+S_3+\cdots+S_6+S_7)$ 。根据表 1 中相对压缩量的数据,预测 $S_1 \sim S_6$ 的值,从而试算模型填筑过程不同深度干密度的变化,列于表 2。将预测数据与实测数据进行比较,预测数据点的数值和变化趋势与实测点基本一致,说明这种相对压缩的假设基本符合模型填筑的真实情况。下面根据该模型材料的击实功-干密度变化关系,按照上面的等容填筑法填筑过程,将干密度与击实功相对应,求得每一层填筑所用的击实功,分析等容控制填筑法过程中击实功的变化以及对干密度的影响。击实功为采用击实方法将一定量的松散材料压实至预定干密度时,平均到单位体积压实材料上所需要作的功。击实功的计算可以通过击实夯锤的质量、下落高度、下落次数的乘积得到。

表 2 7 层模型填筑过程不同深度干密度变化表

Table 2 Bulk density changes with different depths(model constructed with 7 layers)								
相对压 缩量 /%	深度 /cm	干密度/(g·cm ⁻³)						
		1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层
0.85	195	1.930	1.946	1.956	1.961	1.963	1.963	1.963
0.50	165		1.914	1.930	1.940	1.944	1.946	1.946
0.23	135			1.904	1.921	1.930	1.935	1.937
0.12	105				1.900	1.916	1.926	1.930
0.00	75					1.898	1.914	1.924
0.00	45						1.898	1.914
	15							1.898

模型材料击实功-干密度曲线如图 4 所示。将模型材料从拌和好的堆积状态击实至控制密度 $1.93 \text{ g}/\text{cm}^3$,所需的击实功为 $168 \text{ kJ}/\text{m}^3$ 。根据表 2 所示的等容控制夯筑法分层填筑过程和模型材料的击实功-干密度曲线,建立填筑过程的击实功累积变化(见表 3, 4)。

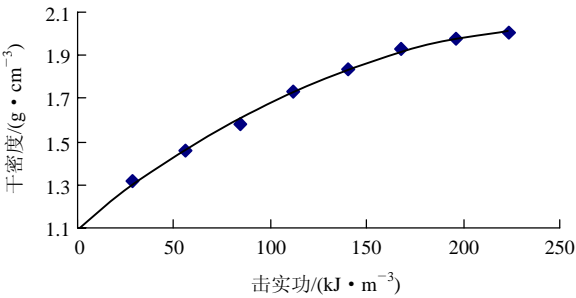


图4 模型材料击实功 - 干密度曲线

Fig.4 Relation curve between bulk density and compactive effort

表3 填筑过程击实功分层统计表(等容控制)

Table 3 Compactive effort acting on different layers (controlled by fixed volume)

深度/cm	击实功/(kJ·m ⁻³)						
	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层
195	168.0	174.0	178.0	180.0	180.5	180.5	180.5
165		162.0	168.0	171.0	172.0	173.0	173.0
135			158.0	163.0	168.0	169.0	169.0
105				156.0	161.0	165.0	168.0
75					155.0	161.0	164.0
45						155.0	161.0
15							155.0

表4 各填筑层击实功总量表(等容控制)

Table 4 Total compactive effort for each layer(controlled by fixed volume)

土层号	击实功/(kJ·m ⁻³)	
	总传递值	总消耗值
1	0.0	168.0
2	6.0	168.0
3	10.0	168.0
4	10.0	166.0
5	11.5	166.5
6	12.0	167.0
7	12.0	167.0

研究每填筑一层材料所消耗的击实功对其下各层的传递时, 将向下传递的击实功按层分解, 由表 3, 4 逐层分解得表 5。例如表 5 中 3 层这列数据, 表示填筑第 3 层时传递给第 1, 2 层的击实功各为 4.0, 6.0 kJ/m³。由传递给下卧第一层的击实功的变化来看, 在填筑的过程中所有已填筑层的实

表5 填筑过程击实功逐层传递(等容控制)

Table 5 Compactive effort transfer on different layers (controlled by fixed volume)

深度/cm	击实功各层传递值/(kJ·m ⁻³)						
	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层
195	0.0	6.0	4.0	2.0	0.5	0.0	0.0
165			6.0	3.0	1.0	1.0	0.0
135				5.0	5.0	1.0	0.0
105					6.0	4.0	3.0
75						6.0	3.0
45							6.0
15							

际干密度是不断变化的, 而传递的击实功却相对比较稳定, 可以据此建立击实功在填筑过程中向下传递的数学模型。

4 基于击实功作用函数的干密度控制方案设计

定义填筑某层材料时, 对应于某个深度, 作用在该深度以上的击实功与填筑该层所消耗的总击实功的比值为相对于这个深度以上的击实功作用系数为 A 。由表 3 第 1 行数据为例可得, 击实功作用系数 $A_1 = 0.931$, $A_2 = 0.964$, $A_3 = 0.986$, $A_4 = 0.997$, $A_5 = 1.000$, $A_6 = 1.000$, $A_7 = 1.000$ 。易知当填筑深度不断增大时, $A \rightarrow 1$ 。即击实功向下传递有一定范围。可以假设, 击实功作用系数 A 随着深度 h 变化函数的形式为

$$A_h = 1 - \exp(-h^a) + c \tag{2}$$

式中: a 为和材料特性有关的常数, c 为误差调节常数。经过拟合可得

$$A_h = 1 - \exp(-h^{0.25}) + 0.022 \tag{3}$$

在模型试验 2 中, 试验了基于击实功作用函数的干密度随深度减小的模型制作干密度控制方案。

试验的控制干密度是 1.93 g/cm³。该试验只需要填筑 1.8 m 厚的模型材料, 计算层厚仍取 30 cm, 拟求每层的控制填筑干密度(填筑干密度的单位为 g/cm³)。

已知填筑该种材料且计算层厚为 30 cm 时, 总击实功中传递给下卧第 1 层的比例为 0.036, 传递给

下卧第 2 层的比例为 0.024, 传递给下卧第 3 层的比例为 0.012, 传递给下卧第 4 层的比例为 0.003。可以由最后密度均匀状态反推回去, 得到填筑每一层所消耗的击实功, 然后通过图 5 曲线求得相应的控制干密度, 计算过程如表 6 所示, 由表的最后一行往上计算。

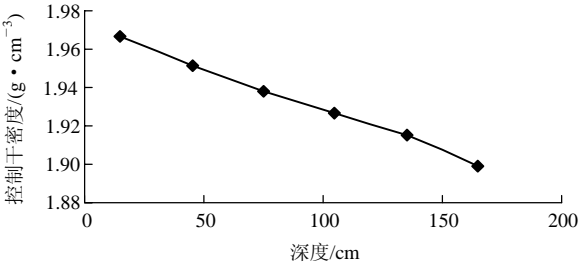


图 5 模型填筑控制干密度 - 深度曲线

Fig.5 Relation curve between bulk density control and depth

表 6 不同填筑层击实功计算表(基于表 3 与式(3))
Table 6 Compactive effort calculated for different layers (based on Table 3 and Eq.(3))

深度/cm	击实功/(kJ·m ⁻³)					
	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
180	155.7	161.5	165.4	167.5	168.0	168.0
150		155.3	161.3	165.4	167.5	168.0
120			155.5	161.6	165.8	168.0
90				157.4	163.6	168.0
60					161.5	168.0
30						168.0

表 7 给出了每一层填筑时根据虚拟密度计算得到的总击实功, 和可能向下传递的击实功的量值。

表 7 逆向控制各填筑层击实功总量表
Table 7 Total compactive effort for different layers by inverse control method

土层号	击实功/(kJ·m ⁻³)	
	总传递值	总消耗值
1	0.0	155.7
2	5.8	161.1
3	9.9	165.5
4	12.2	169.6
5	13.1	174.6
6	13.6	181.6

根据图 4 曲线, 第 1 层填筑结束时, 对应的击

实功累积值为 155.7 kJ/m³, 传递到下卧层的总击实功为 0.0, 所消耗的总击实功为 155.7 kJ/m³, 控制密度为 1.899 g/cm³。

第 2 层填筑结束时, 对应的击实功累积值为 155.3 kJ/m³, 传递到下卧层的总击实功为 5.8 kJ/m³, 所消耗的总击实功为 161.1 kJ/m³, 控制密度为 1.915 g/cm³。

第 3 层填筑结束时, 对应的击实功累积值为 155.5 kJ/m³, 传递到下卧层的总击实功为 9.9 kJ/m³, 所消耗的总击实功为 165.5 kJ/m³, 控制密度为 1.927 g/cm³。

第 4 层填筑结束时, 对应的击实功累积值为 157.4 kJ/m³, 传递到下卧层的总击实功为 12.2 kJ/m³, 所消耗的总击实功为 169.6 kJ/m³, 控制密度为 1.938 g/cm³。

第 5 层填筑结束时, 对应的击实功累积值为 161.5 kJ/m³, 传递到下卧层的总击实功为 13.1 kJ/m³, 所消耗的总击实功为 174.6 kJ/m³, 控制密度为 1.951 g/cm³。

第 6 层填筑结束时, 对应的击实功累积值为 168.0 kJ/m³, 传递到下卧层的总击实功为 13.6 kJ/m³, 所消耗的总击实功为 181.6 kJ/m³, 控制密度为 1.967 g/cm³。

模型试验 2 开挖过程中, 现场取样深度为地表以下 130 cm, 测得原位干密度值为 1.926 g/cm³, 与控制密度 1.930 g/cm³ 相比偏差不大, 误差率为 0.2%, 说明这种模型制作干密度的设计方法是可行的。

基于击实功作用函数的密度设计方法同样也能应用于填筑其他材料的模型制作, 但需要获得材料的击实功 - 干密度曲线, 并合理确定击实功作用函数中的 a 和 c 值。

5 结 论

本文通过原位试验, 研究了实际三维模型试验中, 按等容控制方法制作模型的密度随深度增加而增大的特点, 分析了击实功与材料密度的关系。按照击实功的累积过程分析了等容控制的模型填筑方法, 提出了击实功复合作用系数的概念, 并建立了击实功复合作用函数。

提出了基于击实功复合作用函数的逆向“虚拟

密度”控制技术,该“虚拟密度”随填筑深度增加而减小。通过在另一三维模型试验中采用这一控制方法,并进行原位取样,结果表明,采用基于击实功复合作用函数的密度设计方案,实现了模型各深度密度基本一致的目的,证明了这种密度控制方法在模型制作中应用的合理性。

参考文献(References):

- [1] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 173 - 188, 200 - 202.(ZHOU Weiyan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990: 173 - 188, 200 - 202.(in Chinese))
- [2] 谷兆祺, 彭守拙, 李仲奎. 地下洞室工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.(GU Zhaoqi, PENG Shouzhuo, LI Zhongkui. Underground caverns engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.(in Chinese))
- [3] 沈 泰, 邹竹荪. 地质力学模型材料研究和若干试验技术的讨论[J]. 长江科学院院报, 1988, 5(4): 12 - 23.(SHEN Tai, ZOU Zhusun. Discussion on some modeling techniques and materials for geological model test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1988, 5(4): 12 - 23.(in Chinese))
- [4] 杜应吉. 地质力学模型试验的研究现状与发展趋势[J]. 西北水资源与水利工程, 1996, 7(2): 64 - 67.(DU Yingji. State of the art and development uptrend of the geological model test study[J]. Chinese Northwest Water Resources and Water Engineering, 1996, 7(2): 64 - 67.(in Chinese))
- [5] 沈 泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(5): 32 - 36.(SHEN Tai. Development of technology for geological model test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(5): 32 - 36.(in Chinese))
- [6] 蒋树屏, 黄伦海, 宋从军. 利用相似模拟方法研究公路隧道施工力学形态[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 662 - 666.(JIANG Shuping, HUANG Lunhai, SONG Congjun. Study on the mechanical features of highway tunnel by using physical simulation modeling methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 662 - 666.(in Chinese))
- [7] 李仲奎, 卢达溶, 中山元, 等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 430 - 1 436.(LI Zhongkui, LU Darong, NAKAYAMA H, et al. New technology and application of 3D model test for large scaled underground group caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 430 - 1 436.(in Chinese))
- [8] 马芳平. NIOS 新型地质力学模型材料力学特性试验研究[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2003.(MA Fangping. Experimental study on the mechanical properties of new modeling material NIOS for geological model test[M. S. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.(in Chinese))
- [9] 马芳平, 李仲奎. 新型地质力学模型试验相似材料 NIOS 及其应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48 - 51.(MA Fangping, LI Zhongkui. Study on new physical simulation modeling material NIOS for application in geological model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48 - 51.(in Chinese))
- [10] 张 林, 何显松, 胡成秋, 等. 碾压混凝土与石膏的断裂特性在拱坝模型开裂相似中的应用[J]. 四川大学学报, 2001, 33(3): 5 - 8.(ZHANG Lin, HE Xiansong, HU Chengqiu, et al. Application of fracture property of RCC and gypsum in the cracking similarity of arch dam model[J]. Journal of Sichuan University, 2001, 33(3): 5 - 8.(in Chinese))
- [11] 杜 青, 毕 佳, 谭跃虎, 等. 石膏相似材料的模型试验[J]. 施工技术, 2005, 34(11): 71 - 72.(DU Qing, BI Jia, TAN Yuehu, et al. Model test of similar material gypsum[J]. Construction Technology, 2005, 34(11): 71 - 72.(in Chinese))
- [12] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1 805 - 1 808.(ZUO Baocheng, CHEN Congxin, LIU Caihua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1 805 - 1 808.(in Chinese))
- [13] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 842 - 1 847.(WANG Hanpeng, LI Shucai, ZHANG Qiangyong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 842 - 1 847.(in Chinese))
- [14] 廖 宜. 地下工程三维地质力学模型试验新技术研究[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2007.(LIAO Yi. Study on new technology of the 3D geomechanical model test for underground engineering[M. S. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.(in Chinese))