

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0109-08

IV 级软弱围岩相似材料的试验研究

武伯弢^{1,2,4}, 朱合华^{1,2}, 徐前卫^{1,2,3}, 明娟⁵

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 同济大学 城市轨道交通与铁道工程系, 上海 200092; 4. 越南水利科学研究院 水工院, 河内, 越南;
5. 上海理工大学 土木工程系, 上海 200093)

摘 要: 以 IV 级围岩为参照对象, 研制可用于隧道围岩稳定性物理模型试验的软弱围岩相似材料。采用的 5 种原材料 (重晶石粉、石膏、细砂、洗衣液和水), 通过直剪试验、无侧限抗压强度试验及三轴压缩试验测得所配相似材料的强度特征和物理力学参数, 包括黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、单轴抗压强度 R_c 、弹性模量 E 和泊松比 ν 。首先, 通过试验分析每种原材料的不同比例对所配相似材料强度特征及物理力学参数的影响, 选择适合于模拟 IV 级围岩相似材料的原材料配比; 其次, 针对优选的材料配比所配制的相似材料, 开展大量的三轴压缩试验, 研究在不同围压下该相似材料的强度及其破坏特征。结果表明, 含水率减少或石膏含量增加导致 R_c 、 E 和 c 明显增大, 而 φ 降低不明显; 增加砂含量可增大 E 和 φ , 但 R_c 值减少; 石膏含量对相似材料的脆性和延性影响最明显, 而含水率对相似材料的强度影响最为突出。试验结果还表明, 相似材料在低围压时呈现脆性, 在高围压时呈延性; 就破坏准则而言, 试验所得结果小于 Mohr-Coulomb 准则, 略大于 Hoek-Brown 准则, 但更符合 Hoek-Brown 准则。研制软岩相似材料的试验数据可为下一步拟开展的隧道围岩稳定性模型试验和数值模拟提供重要的参考和依据。

关 键 词: 软弱围岩; 相似材料; 物理模型试验; 破坏准则。

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Experimental study of similar material for weak surrounding rock mass of class IV

VU Ba Thao^{1,2,4}, ZHU He-hua^{1,2}, XU Qian-wei^{1,2,3}, MING Juan⁵

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Urban Rail Transit and Railway Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Hydraulic Construction Institute, Vietnam Academy for Water Resources, Hanoi, Vietnam; 5. Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: This study aimed to develop an appropriate similar material for weak surrounding rock mass which can be used in physical model test of tunnel surrounding rock mass stability. The weak surrounding rock mass of class IV has been chosen as reference prototype for our research. Five raw materials, namely, barite powder, gypsum, fine sand, laundry detergent, and water were used to produce the similar material. Direct shear tests, uniaxial compression tests and triaxial compression tests were performed to obtain strength characteristics and physico-mechanical parameters of the material, including cohesive strength c , internal friction angle φ , uniaxial compressive strength R_c , elastic modulus E , Poisson ratio ν . Firstly, a large number of the above mentioned tests were carried out to analyze the impact of various proportions of each raw material on strength characteristics and physico-mechanical parameters of the similar material; thus selecting appropriate raw material proportion to simulate the weak surrounding rock mass of class IV. Secondly, strength characteristics and failure behavior of the similar material which had been developed with selected raw material proportion, is further studied by a large numbers of triaxial compression tests under various confining pressures. The results indicate that, either decreasing water content or increasing gypsum content can lead to an obvious increase in R_c , E and c , along with a slight decrease in φ . On the other hand, the mounting of fine sand content resulted in an increase of E and φ , while R_c value decreased. In addition, while gypsum content turned out to be the most important factor affecting the brittle and ductile characteristics of similar

收稿日期: 2012-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.41130751); 西部交通建设科技项目资助 (No.2011ZB04); 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放实验基金资助 (No.KLE-TJGE-B1108)。

第一作者简介: 武伯弢, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事隧道围岩稳定性、地质力学物理模型试验、砂土液化及软土地基加固等领域的研究。
E-mail: vubathao@yahoo.com

material; water content affected the strength of such material significantly. The results also show that the developed material presents brittleness under low confining pressure, and becomes more ductile with the increase of confining pressure. Furthermore, failure data of the material are smaller than that calculated from linear Mohr-Coulomb failure criterion and slightly higher than that of nonlinear Hoek-Brown failure criterion. However, similar material obeys far better the Hoek-Brown criterion. The results of this study will be very useful for future research on tunnel surrounding rock mass stability in physical model tests, as well as in numerical simulations.

Key words: weak surrounding rock mass; similar material; physical model test; failure criterion

1 前言

物理模型试验能较好地模拟复杂工程的施工工艺、荷载作用方式及时间效应等,适于研究工程的受力全过程,从弹性到塑形,直至破坏。与数值模型相比,其区别在于不仅已知荷载条件下的某一状态,更重要的是研究在渐增荷载作用下直至破坏的整个变化过程^[1],为此,相似材料的力学性能必须与原型岩体的力学参数相似。

龚召熊等^[2]、沈泰等^[3]均指出,地质力学模型试验研究的范围,从弹-黏-塑性一直到破坏阶段。因而其相似材料必须严格满足模型相似率的要求,即非线性阶段也必须满足模型与原型变形全过程相似。但大多学者^[4-11]研制相似材料只通过直剪试验、单轴抗压强度、三轴压缩等试验,得到相似材料的基本力学指标如重度、抗压强度、弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角,以满足相似关系为目标进行筛选配比,而未深入分析相似材料破坏全过程的特征,对物理模型试验结果分析有所欠缺。

本文以前人研究成果为基础,采用重晶石粉、石英砂、石膏、洗衣液和水为原料,进行 IV 级软弱围岩相似材料的配制。首先,开展了大量直剪试验、单轴抗压强度试验和三轴压缩试验,分析每种原材料的不同比例对所配相似材料强度特征和物理力学参数的影响,从而选择适合于模拟 IV 级围岩相似材料的原材料配比。其次,针对优选的材料配比所配制的相似材料,开展了大量的三轴压缩试验,详细地研究了相似材料在不同围压下的破坏特征、峰值强度-残余强度关系、弹性模量-围压关系并探讨了其破坏准则。

试验所获得相似材料的力学性能、强度和破坏特征的数据较为完整,便于与自然软岩对比,且为隧道围岩稳定性的模型试验和数值模拟提供了重要和完整的参考和依据。

2 相似材料研制试验

2.1 模型试验相似理论

岩体破坏的模型试验属于地质力学模型试验的范畴,其模型的几何尺寸、边界条件及作用荷载、

模拟岩体的相似材料的重度、强度及变形特性等方面均须满足式(1)所表达的地质力学相似性要求:

$$\left. \begin{aligned} C_{\sigma} &= C_l C_{\gamma}; C_{\sigma} = C_E C_{\varepsilon}; C_{\mu} = 1; \\ C_{\delta} &= C_l C_{\varepsilon}; C_{\bar{\sigma}} = C_{\sigma} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C_{σ} 、 C_l 、 C_{γ} 、 C_E 、 C_{ε} 、 C_{μ} 、 C_{δ} 、 $C_{\bar{\sigma}}$ 分别为应力、几何、重度、弹性模量、应变、泊松比、变形及面力相似比。

据此选定模型的几何比例,再寻找合适的相似材料,使其满足强度和变形的要求。本试验主要是针对 IV 级围岩开展研究,因此,其对应参数可根据《公路隧道设计规范》^[12]选取。根据模型试验设备,确定几何相似比 $C_l=30$,根据式(1)可计算出: $C_{\gamma}=1$; $C_{\mu}=1$; $C_{\varepsilon}=1$; $C_{\varphi}=1$; $C_{\sigma}=C_E=30$ 。原型围岩与模型相似材料的物理力学参数见表 1。

表 1 原型围岩与相似材料的物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of prototype rock mass and similar material

IV 级围岩	重度 (kN/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
原型	20~23	1 300~6 000	0.3~0.35	200~700	27~39
模型	21~23	43~200	0.3~0.35	6.7~23.3	27~39
相似材料	21	90	0.32	16	35

2.2 试验设备及试样制作

由于相似材料强度低、变形大,其力学特性更接近土,因此采用直剪试验测得黏聚力和内摩擦角。无侧限抗压强度试验测得的单轴抗压强度,常规不排水不固结三轴压缩试验测得的得内摩擦角、黏聚力、弹性模量以及在压缩情况下材料力学特性。

制作试件时,首先根据材料的配比称取所需的石英砂、重晶石粉和石膏,将其放入仪器内,然后再加入洗衣液和水并不断搅拌,使之混合均匀。再按以下顺序制作单轴试验和三轴试验的试样:首先,选用尺寸为 $\phi 39.5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 重塑筒,分 4 层加入材料,用击实仪夯击,每层夯约 5~6 次即可达到设计密度。相邻两层土料间需打毛以使其更好地接触,最后一层则需刮平,装好土料之后 30min 及可脱模、贴标。另外,为脱模方便,装样前需在模

具内表面涂一层凡士林。每组试验需做 3 个样, 共有 680 个试样。试件制好后根据高度、直径和重量计算出其重度, 放置于试样保管箱以保持含水率。

2.3 原材料选取

本文在参考前人研究成果的基础上, 采用重晶石粉、石英砂、石膏、洗衣液和水作为原材料, 研制出相似比为 1:30 的 IV 级围岩相似材料。本次试验不再考虑洗衣液和重晶石粉的影响, 只着重考虑石膏、石英砂及不同含水率对相似材料的影响。各类原材料比例见表 2。

表 2 原材料比例

Table 2 The proportion of raw materials		
原材料	重量比	百分比/%
重晶石粉	12(不变)	43~83
石英砂	1、3、5、10	7、17、26、41
石膏	0.5、1、2、4	3、6、11、20
洗衣液	0.33(不变)	1.2~2.3
水	0.7、1、1.4、1.8	4、6、8、10

3 原材料对相似材料的影响分析

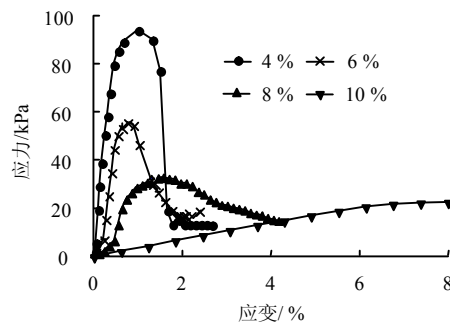
通过单轴试验测得 R_c , 并取得试件破坏性状及应力-应变曲线, 通过三轴试验测得 c 、 φ 、 E 以及围压 σ_3 为 70 kPa 时的应力-应变曲线, 分析不同含水率、石膏含量及石英砂含量对相似材料力学性能的影响规律, 从而筛选适合于 IV 围岩力学指标的配比。

3.1 含水率的影响

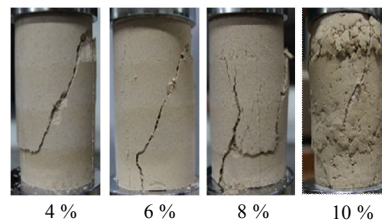
图 1 为不同含水率下单轴试验应力-应变曲线及试件破坏形状。由图可见, 单轴抗压强度显著随含水率增大而降低, 且相似材料也随含水率增大而逐渐由脆性向延性发展。其中, 含水率为 4% 和 6% 的试样破坏性状与自然软岩的破坏性状较相似。

图 2 为围压为 70 kPa 时不同含水率的三轴压缩试验的应力-应变曲线。由图可以看出, 当含水率为 10% 时, 初始段的压应变较大, 达约 2.4%。是由于较高含水率将导致相似材料在受压时存在压缩过大现象, 故在进行隧道模型试验时, 难以控制相似材料体积的稳定性。当含水率为 4% 时, 应力-应变曲线出现应变软化现象。虽然含水率降低可增大材料的脆性以及应变软化程度, 但如含水率小于 4% 时则相似材料难以搅拌均匀。因此, 含水率宜在 4% 至 8% 范围内。

图 3 为相似材料在不同含水率的主要物理力学参数。随着含水率增大, 弹性模量、单轴抗压强度和黏聚力均减少, 而内摩擦角只微小改变。



(a) 应力-应变曲线



(b) 破坏试件

图 1 不同含水率下单轴试验应力-应变曲线及试件破坏形状

Fig.1 Stress-strain curves and specimen failure form of UCS test under various water contents

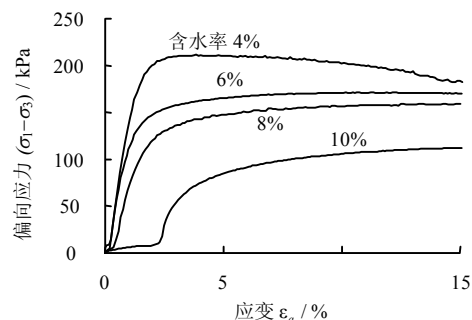


图 2 $\sigma_3 = 70$ kPa 时不同含水率下三轴试验应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of triaxial test under various water contents when $\sigma_3 = 70$ kPa

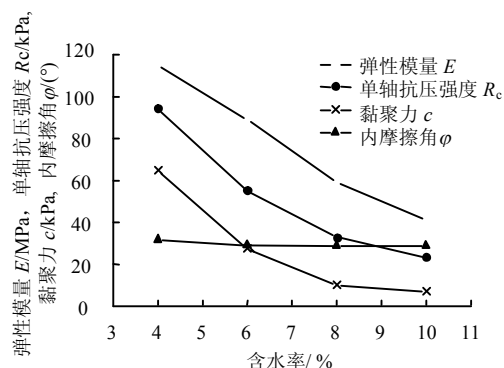


图 3 含水率与强度指标关系

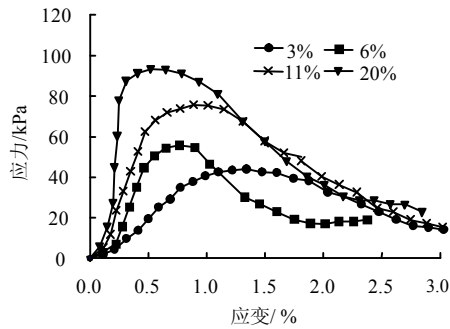
Fig.3 Relationships between water contents and strength parameters

3.2 石膏含量的影响

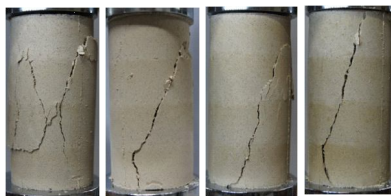
图 4 为不同石膏含量的单轴抗压强度试验的应

力-应变曲线及试件破坏形状。由图可见,单轴抗压强度随石膏含量增大而显著增加,相似材料脆性随石膏含量增大而增强。

图 5 为围压为 70 kPa 时不同石膏量的三轴试验应力-应变曲线。由图可见,当石膏含量达到 11% 时,应变软化才出现;石膏含量达 20% 时,软化应变更加显著,并呈现脆性破坏。



(a) 应力-应变曲线



(b) 破坏试件

图 4 不同石膏含量下单轴试验应力-应变曲线及试件破坏形状

Fig.4 Stress-strain curves and specimen failure form of UCS test under various gypsum contents

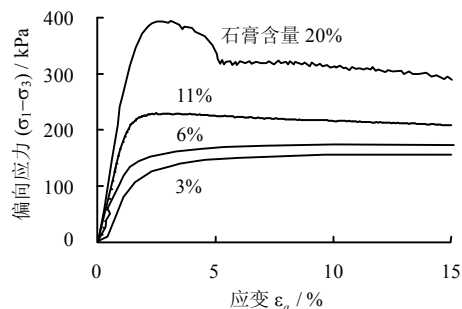


图 5 $\sigma_3 = 70 \text{ kPa}$ 时不同石膏含量的三轴试验应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of triaxial test under various gypsum contents when $\sigma_3 = 70 \text{ kPa}$

图 6 为不同石膏含量时的相似材料主要物理力学参数。由图可见,随着石膏含量增大,弹性模量、黏聚力及单轴抗压强度均增加,但内摩擦角呈逐渐减少的趋势。

以上情况说明了石膏对相似材料的强度有显著

的影响,增加石膏含量不但能增大相似材料的强度,而且也会增加材料的脆性。

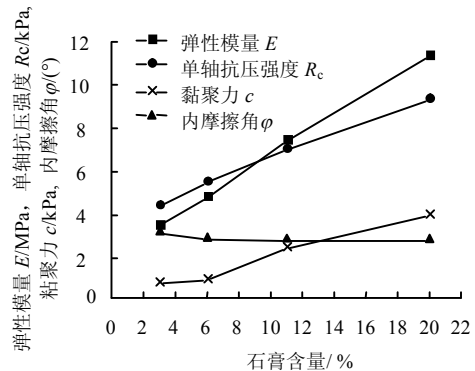
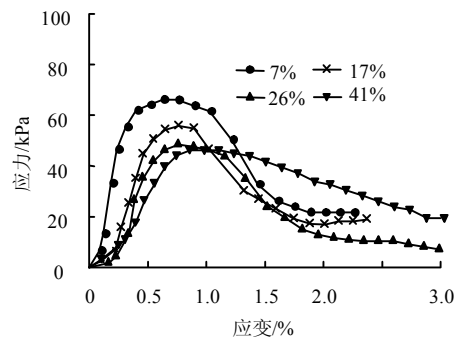


图 6 石膏含量与强度指标关系

Fig.6 Relation between gypsum content and strength parameters

3.3 砂含量的影响

图 7 为不同砂含量时单轴抗压强度试验的应力-应变曲线及试件破坏形状。可以看出,单轴抗压强度随砂含量增大而降低,表明石英砂对本相似材料的强度影响不大。



(a) 应力-应变曲线



(b) 破坏试件

图 7 不同砂含量下单轴试验应力-应变曲线及试件破坏形状

Fig.7 Stress-strain curves and specimen failure form of UCS test under various sand contents

图 8 为围压为 70 kPa 时不同砂含量的三轴试验应力-应变曲线。由图可见,当砂含量为 26% 和 41% 时,应力-应变曲线初始阶段的压应变较大,达到

2%~4%。这是由于砂的孔隙率较大,导致相似材料在受压时变形过大,这使得在进行隧道模型试验时,难以控制相似材料体积的稳定性。因此,砂含量应该控制在小于 17%范围内。此外,由图 8 还可见,砂含量达到 41%相似材料呈现应变软化现象,即呈脆性破坏,说明石英砂对提高材料的脆性作用极少。

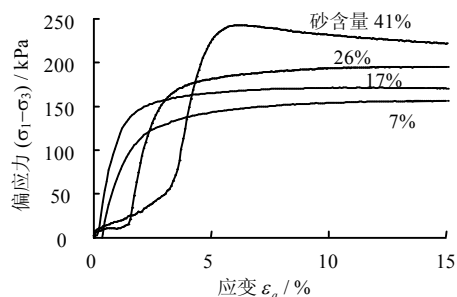


图 8 不同砂含量 $\sigma_3 = 70$ kPa 下三轴试验应力-应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves of triaxial test under various sand contents when $\sigma_3 = 70$ kPa

如图 9 (图中纵轴强度指标分别为弹性模量 E 、单轴抗压强度 R_c 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ) 所示,含砂量对黏聚力和内摩擦角的影响较小,即含砂量增加时黏聚力和内摩擦角有所增大,但增量极小。需注意的是,含砂量增大导致弹性模量迅速增大,但单轴抗压强度迅速降低,此规律与含水率和石膏含量的影响有所不同。

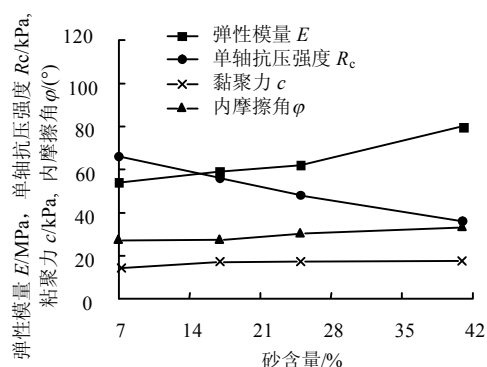


图 9 砂含量与强度指标关系
Fig.9 Relations between sand content and strength parameters

4 相似材料强度及其破坏的特征

根据上节分析各类原材料对相似材料的强度以及破坏特征,最终选出适合于 IV 级围岩的配比为,重晶石粉:石英砂:石膏:洗衣液:水=12: 4: 1.8: 0.33: 1。

试验取得这相似材料的力学参数见表 1。图 10

为三轴试验取得的摩尔圆包络线。为进一步分析相似模型试验材料的力学特征,并为开展下一步隧道围岩模型试验储备更多资料,本节针对选定的配比,通过三轴试验取得的在不同围压下应力-应变全曲线以及循环加载的应力-应变曲线。在此基础上分析了相似材料的应力-应变全过程力学特征,包括脆性与延性、峰值强度、残余强度、弹性模量、并探讨其破坏准则。

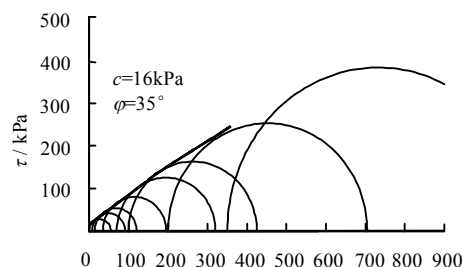


图 10 摩尔圆包络线
Fig.10 Mohr's circle envelope

4.1 不同围压下强度特征

如图 11 所示,随围压的增加,相似材料逐渐由脆性转化为延性,其间存在着一个临界围压为 200 kPa,称为脆-延转化临界值。当围压小于临界值时,相似材料应力-应变全过程曲线上有一个最高点,即峰值强度点,过了最高点后应力开始下降,呈应变软化,最后降到一定水平后应力保持不变,这时的应力称为残余强度。由于本相似材料具有强度低、变形大的特点,性状上更加接近土,故在围压低于临界值时,残余强度的取值是取相应于应变为 15% 处的应力值。当围压等于临界值时,峰值后应力保持不变,呈现出延性流动状态。当围压大于临界值时,应力-应变曲线上没有明显的峰值强度,而始终往上延伸,呈应变硬化。

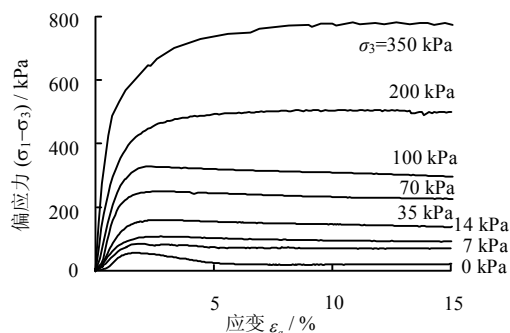


图 11 不同围压下三轴试验应力-应变全曲线
Fig.11 Stress-strain curves of triaxial test under various confining pressure

本相似材料的应变软化现象随围压的增大而有减弱的趋势。围压达到临界围压之后,材料呈现应变硬化,这趋势与自然软岩力学属性特征一致,同时,也与 Nishimura^[13] 对人造软岩相似材料(包括砂、石膏、高岭土和水)的研究结果相同。

图 12 为循环三轴试验应力-应变曲线。由图可见,每个加卸载循环,弹性应变恢复较小,而主要应变为塑性应变。当围压小于脆-延转化临界值时,相似材料峰值强度和残余强度都随围压增加而增大,如图 13 所示。但残余强度增加的速度比峰值强度快。当围压达到脆-延转化临界值时,残余强度等于峰值强度;当围压继续增加,岩石中出现硬化现象,残余强度不存在。

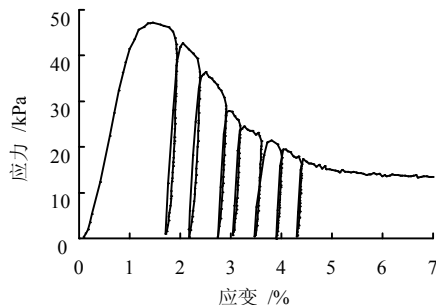


图 12 循环三轴试验应力-应变曲线
Fig.12 Stress-strain curve of cyclic triaxial test

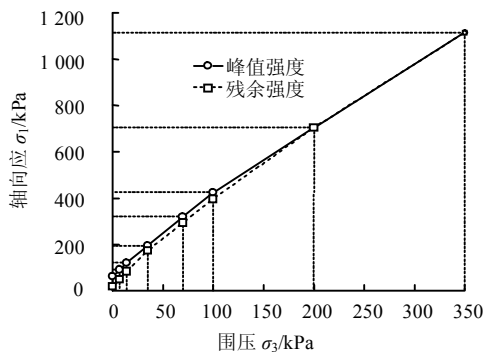


图 13 残余强度与峰值强度
Fig.13 Residual strength and peak strength

4.2 不同围压下弹性模量特征

在隧道模型试验中,由于受到室内模型试验模拟尺寸的限制,只能通过加载模拟隧道埋深。在实际的岩体工程中,岩体的弹性模量与深度基本为线性关系,即随着岩体深度增大弹性模量也增大。因此,根据三轴试验研制相似材料时,研究不同围压下弹性模量的变化是必要的。

相似材料三轴试验测得的弹性模量与围压关系如图 14 所示。由图可见,弹性模量随着围压增大而增大。为便于换算,弹性模量与围压线性拟合关系

为

$$E = 40 + 0.42\sigma_3 \quad (2)$$

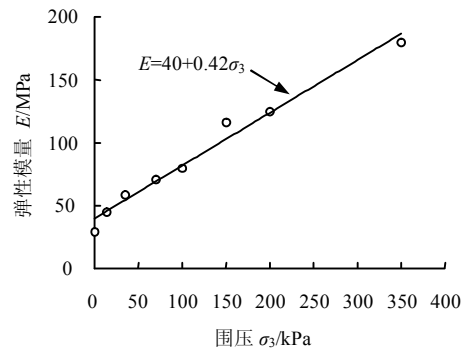


图 14 弹性模量与围压的关系
Fig.14 Elastic modulus and confining pressure relation

4.3 破坏准则探讨

在岩体工程中 Mohr-Coulomb(M-C) 准则和 Hoek-Brown (H-B) 准则使用最广泛。Johnston 等^[13] 对软岩进行常规三轴压缩试验,结果表明,软岩破坏是非线性破坏,而破坏准则在上述两个准则之间。

M-C 准则表达为

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3)$$

或

$$\sigma_1 = \sigma_c + q\sigma_3 \quad (4)$$

式中: τ 为抗剪强度; σ_n 为正应力; σ_1 为最大主应力(轴向应力); σ_3 为最小主应力(径向应力或围压); σ_c 为单轴抗压强度,其他符号意义同前。

σ_c 和 q 可通过黏聚力和内摩擦角表达:

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

完整岩石 H-B 破坏准则表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1} \quad (7)$$

式中: m 为完整岩石经验常数,与岩石类型有关,主要反映岩石的软硬程度取值为 5~40,岩石越硬取值越大。

根据式(4)~(6),对每 σ_{3i} 算出 M-C 准则的 σ_{1i} ,并画出虚线如图 15 所示。根据式(5),对每一组三轴试验的 $(\sigma_{1i}, \sigma_{3i})$ 算出 m_i 系数值和所有三轴试验的 m 系数平均值。把 m 系数平均值代入式(7)则算出 H-B 准则的 σ_{1i} 。图 15 上的连续曲线为 H-B 准则值,散点为三轴试验所得的 $(\sigma_{1i}, \sigma_{3i})$ 。

4.3.1 M-C 准则

M-C 准则是线性的。由图 15 可见,在径向应力小于 100 kPa 的情况下,强度呈现线性规律,并接近于 M-C 准则。而在径向应力大于 100 kPa,强

度是非线性的,并小于 M-C 准则。Ghazvinian 等^[15]通过常规三轴压缩试验研究泥灰岩(属于软岩)的破坏准则,结果表明试验值也小于 M-C 准则值。

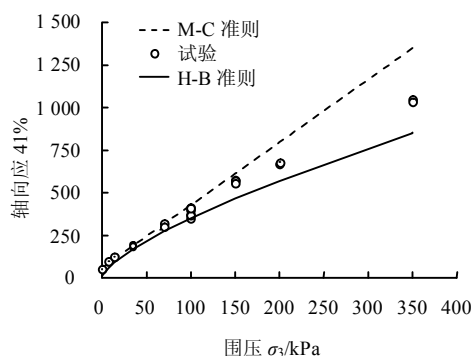


图 15 破坏准则对比

Fig.15 Comparison of failure criteria

4.3.2 Hoek-Brown 准则

H-B 准则属于非线性准则,估算的 m_i 范围为 10.75~33.12,平均为 17.59。由图 15 可见,当径向应力小于 100 kPa 时,试验结果接近 H-B 准则;当径向应力大于 100 kPa 时,试验结果大于 H-B 准则。因此,相似材料破坏属于非线性破坏的,破坏准则在 M-C 准则和 H-B 准则之间,破坏准则更接近 H-B 准则。

5 结 语

以重晶石粉、石膏、石英砂、洗衣液和水为原材料,成功研制了 IV 级软弱围岩相似材料。试验所获得的相似材料物理力学性质更近似于实际情况,且为隧道围岩稳定性的模型试验和数值模拟提供了重要和完整的参考和依据。

根据本文所获得每种原材料含量对相似材料强度特征和物理力学参数的影响,可调整材料配比以模拟其他围岩级别或实际工程软岩,将大量减少类似的材料配置试验工作量。

本文所研制的相似材料曾在 5 个二维隧道围岩稳定性模型试验中使用^[16-20],试验结果表明该材料的性能优越能较好的满足试验要求。

相似材料没有考虑流变相似性,即时间效应。因此,它只适合用于二维模型试验,开挖和围岩破坏时间较短,如应用在三维模型试验,需要进一步考虑流变相似性。

参 考 文 献

- [1] 杜应吉. 地质力学模型试验的研究现状与发展趋势[J]. 西北水資源与水工程, 1996, 7(2): 64—67.
- [2] 龚召熊, 郭春茂, 高大水. 地质力学模型材料试验研究[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1984, 1(1): 32—46.
- [3] 沈泰, 邹竹荪. 地质力学模型材料研究和若干试验技术的探讨[J]. 长江科学院学报, 1988, 4(4): 12—23.
- [4] 韩伯鲤, 陈霞龄, 宋一乐. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 6—9.
- [5] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48—51.
- [6] 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): 1805—1808.
- [7] 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): 1842—1847.
- [8] LIU Qin, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Development of geomechanical model similar material for soft rock tunnels[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168: 1842—1847.
- [9] DU Ying-ji. Research status and development trend of geomechanics model test[J]. Northwest Water Resources and Water Engineering, 1996, 7(2): 64—67.
- [10] GONG Shao-xiong, GUO Chun-mao, GAO Da-shui. The experimental studies of the geomechanical model material[J]. Journal of Yangzi Water Conservancy & Hydroelectric Power Research Institute, 1984, 1(1): 32—46.
- [11] SHEN Tai, ZOU Zhu-sun. A study on geomechanical model materials and exploration of some experimental techniques[J]. Journal of Yangzi Research Institute, 1988, 4(4): 12—23.
- [12] HAN Bo-li, CHEN Xia-ling, SONG Yi-le. Research on similar material of rock mass[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997, 30(2): 6—9.
- [13] MA Fang-ping, LI Zhong-kui, LUO Guang-fu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48—51.
- [14] ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua, et al. Research on similar material of slope simulation experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1805—1808.
- [15] WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHANG Qiang-yong, et al. Development of a new geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842—1847.
- [16] LIU Qin, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Development of geomechanical model similar material for soft rock tunnels[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168: 1842—1847.

- 2249—2253.
- [9] 李宝富, 任永康, 齐利伟, 等. 煤岩体的低强度相似材料正交配比试验研究[J]. 煤炭工程, 2011, 58(4): 93—95.
- LI Bao-fu, REN Yong-kang, QI Li-wei, et al. Study on orthogonal mixing rate experiment with low strength similar material of coal and rock mass[J]. **Coal Mine Engineering**, 2011, 58(4): 93—95.
- [10] 董昌周, 曲晨. 隧道围岩体相似材料试验研究 [J]. 浙江科技学院学报, 2011, 23(6): 499—502.
- DONG Chang-zhou, QU Chen. Study of similar material in rock mass[J]. **Journal of Zhejiang University of Science and Technology**, 2011, 23(6): 499—502.
- [11] 刁心宏, 刘士雨, 官伟. 软岩隧道围岩压力模型试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(5): 1—7.
- DIAO Xin-hong, LIU Shi-yu, GUAN Wei. Research on model test of wall rock stress of tunnel in soft rock[J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2008, 25(5): 1—7.
- [12] 重庆交通科研设计院. JTG D70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [13] NISHIMURA M, MIURA K. Failure mechanism in soft rock ground observed in model footing test[C]//International Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics. [S.l.]: IS-Nagoza, 1997.
- [14] JOHNSTON I W, NOVELLA E A. Soft rock in the geotechnical spectrum[C]//Proceedings of the Geotechnical Engineering Hard Soils Soft Rocks. [S.l.]: Balkema, 1993: 177—83.
- [15] GHAZVINIAN A H., FATHI A., MORADIAN Z A. Failure behavior of marlstone under triaxial compression[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45: 807—814.
- [16] 汪成兵, 朱合华. 埋深对软弱隧道围岩破坏影响机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2442—2448.
- WANG Chengbing, ZHU Hehua. Experimental study of influence mechanism of buried depth on surrounding rock failure of tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2442—2448.
- [17] 朱合华, 黄锋, 徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1113—1122.
- ZHU He-hua, HUANG Feng, XU Qian-wei. Model test and numerical simulation for progressive failure of weak and fractured tunnel surrounding rock under different overburden depths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1113—1122.
- [18] 徐前卫, 马静, 朱合华, 等. 软弱破碎隧道围岩开挖面稳定性的拟三维模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 465—470.
- XU Qian-wei, MA Jing, ZHU He-hua, et al. Pseudo-three-dimensional experimental study on tunnel face stability in weak and fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(1): 465—470.
- [19] WANG Cheng-Bing, ZHU He-Hua, WANG Hua-Lao. Model test study on failure mechanism of unsupported tunnels constructed in soft rock masses at different cross section [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 90—93, 2282—2285.
- [20] HUANG Feng, ZHU He-hua, XU Qian-wei, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel-Scaled model tests and numerical analysis[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2012-12-13, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012-06-14>.