

厦门海底隧道强风化花岗岩力学特性研究

于洪丹¹, 陈卫忠¹, 郭小红², 贾善坡¹, 曹俊杰¹, 梁 巍²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 厦门海底隧道海域隧道地段存在多处风化深槽, 岩体主要为全、强风化花岗岩。由于该类岩石强度低, 压缩性高, 自稳和自承能力差, 在隧道衬砌结构的设计和施工工艺的选择方面会遇到一系列特殊的问题。主要通过天然和重塑强风化花岗岩岩样进行一系列的室内试验, 在掌握其基本物理力学特性的基础上, 重点对其流固耦合作用下的力学特性进行研究, 并建立该类强风化花岗岩的力学模型, 通过反演分析对力学模型进行验证。研究成果对风化花岗岩类工程的力学参数取值有重要借鉴意义, 对该类岩体中隧道的设计施工具有指导作用。

关键词: 隧道工程; 海底隧道; 强风化花岗岩; 力学模型

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)02 - 0381 - 07

RESREACH ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STRONGLY WEATHERED GRANITE FOR XIAMEN SUBSEA TUNNEL

YU Hongdan¹, CHEN Weizhong¹, GUO Xiaohong², JIA Shanpo¹, CAO Junjie¹, LIANG Wei²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Second Highway Consultants Co., Ltd., China Communications Construction Corporation, Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: The underwater section of the Xiamen subsea tunnel will encounter many weathered strata, and the main rock of the weathered strata is fully or strongly weathered granite. The main mechanical characteristics of this kind of rock is low strength, high compressibility; its self-stability, and its bearing capacity is low; and it brings many unexpected problems to the liner design and the tunnel construction technology. A series of laboratory tests for the strongly weathered granite have been performed to study the hydro-mechanical coupled behavior; and a new mechanical model has been suggested; and corresponding parameters have been identified by back analysis. The results obtained from the research work are useful for soft rock engineering especially for weathered granite engineering; it has guiding effect on the tunnels' design and construction in this kind of rocks.

Key words: tunnelling engineering; subsea tunnel; strongly weathered granite; mechanical model

1 引 言

厦门海底隧道工程是我国建设的第一条海底公路隧道^[1], 是连接厦门市本岛和翔安区陆地的重要通道, 也是我国大陆第一座采用钻爆暗挖法修建的

大断面海底隧道, 兼具高速公路和城市道路双重功能。该隧道长 5.948 km, 两岸接线长 2.747 km。隧道主要穿越第四系覆盖层及燕山期侵入岩两大类地层, 洞口陆地及浅滩约有 1 100 m 位于全、强风化地段且处于地下水位以下, 海域隧道地段存在多处风化深槽。在海域内, 左线有 10 处以上位于风化槽

收稿日期: 2009 - 08 - 31; **修回日期:** 2009 - 10 - 26

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金资助项目(40772184); 交通运输部行业科技攻关项目的资助

作者简介: 于洪丹(1981 -), 女, 2005年毕业于河海大学土木工程系工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事地下工程、岩土工程及工程力学等方面的研究工作。E-mail: yuhd_1013@163.com

地段，其中有 3 处在风化槽内穿过；右线有 9 处以上位于风化槽地段，其中有 4 处在风化槽内穿过。每处风化槽长 50~100 m，岩体主要为全、强风化花岗岩，静水压力 0.5~0.7 MPa。风化槽地段围岩条件较差，一般为 IV，V 级围岩。

全、强风化花岗岩强度低、压缩性高、自稳和自承能力差，使得衬砌结构的设计和施工工艺选择上会遇到一系列特殊性问题^[2~6](见图 1, 2)。为了保证设计结构的合理和施工工艺的正确选择，保障全、强风化花岗岩区域隧道工程建设的安全，必须对该类岩石的力学特性进行深入研究。



图 1 厦门海底隧道风化槽段 CRD 工法施工^[2~6]

Fig.1 CRD construction in weathered strata in Xiamen subsea tunnel^[2~6]



图 2 厦门海底隧道强风化槽掌子面注浆施工^[2~6]

Fig.2 Tunnel surface grouting in weathered strata in Xiamen subsea tunnel^[2~6]

本文主要通过对天然和重塑强风化花岗岩岩样进行一系列的室内试验，重点对其流固耦合作用下的力学特性进行研究，并建立该类强风化花岗岩的力学模型，通过反演分析对力学模型进行验证。本文研究成果对风化花岗岩类工程的力学参数取值有重要借鉴意义。

2 厦门海底隧道 F4 风化槽强风化花岗岩流固耦合试验

2.1 岩样制备

试验所用岩样取自厦门海底隧道风化槽地段，所取岩芯的组织结构大部分已破坏，浸水即成散砂状；岩石大部分变色，为棕红色杂灰白色；除石英外，长石，云母和铁镁矿物已风化蚀变，为强风化花岗岩。由于岩体的破碎性，所取岩芯(见图 3)极易发生破坏，且不能浸水，所以天然岩样的制备采用人工切削、打磨的方式，将其制成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的岩样(见图 4(a))。重塑岩样采用原有破碎的强风化花岗岩碎料，不做任何其他配料添加，保持原有含水量，将其按照一定密度加工制成 $\phi 38 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 的岩样(见图 4(b))。表 1 给出了强风化花岗岩岩样的基本物理参数，天然岩样的密度约为 2.06 g/cm^3 ，重塑岩样的密度约为 2.08 g/cm^3 ，2 种岩样的天然含水量约为 13%。天然岩样与重塑岩样的基本物理参数见表 1。



图 3 强风化花岗岩岩芯

Fig.3 Rock core of strongly weathered granite



(a) 天然岩样



(b) 重塑岩样

图 4 强风化花岗岩岩样

Fig.4 Strongly weathered granite samples

表 1 强风化花岗岩流固耦合试验岩样参数
Table 1 Parameters of strongly weathered granite samples for hydro-mechanical coupled test

岩样编号	直径/mm		直径平均值/mm	高度/mm		高度平均值/mm	质量/g	密度/(g · cm ⁻³)		
天然岩样 1	50.30	49.80	50.80	50.30	96.7	96.60	96.50	96.600	404.4	2.11
天然岩样 2	48.69	47.11	47.67	47.82	97.0	97.00	97.33	97.107	353.5	2.03
天然岩样 3	50.27	49.71	49.98	49.99	96.3	96.14	96.39	96.283	400.5	2.12
重塑岩样 1	38.09	38.02	38.10	38.07	76.6	76.48	76.55	76.540	180.0	2.07
重塑岩样 2	38.06	38.02	38.12	38.07	76.7	76.56	76.59	76.623	182.0	2.09

2.2 试验条件及仪器

强风化花岗岩流固耦合试验在双联动软岩渗流应力耦合三轴试验仪上进行, 该仪器的主要功能特点和试验原理参见陈卫忠等^[8]的研究。

为使试验结果更接近工程的实际情况, 采取在三轴室内对岩样施加一定的围压后, 施加反压, 保持在一定的有效应力下对岩样进行饱和。这对试验设备具有很高的要求, 软岩渗流应力耦合三轴试验仪完全能够满足要求。此外, 为减少温度对试验结果的影响, 试验中对室内温度进行了控制。试验的具体操作过程如下:

(1) 在环境温度(19±0.5)℃下, 系统稳定后, 对岩样施加 1.0 MPa 的各向相等压力, 同时通过轴向变形传感器和径向变形传感器对岩样变形进行监测。

(2) 对岩样顶部和底部同时抽真空 5 min, 而后将顶部和底部透水石浸泡在水溶液中。

(3) 关闭阀门, 在岩样顶部和底部施加 0.5 MPa 的反压, 同时进行进水检测。

(4) 每天检查孔压系数(即 Skempton 系数)B, 通过以下方法: ① 关闭排水阀; ② 将各向相等压力增加 0.2 MPa; ③ 测量相应的孔隙压力增量; ④ 将各向相等压力减小到 1.0 MPa。直到孔压系数 B 满足要求。

(5) 岩样饱和后, 以 20 μm/min 的压缩速率对强风化花岗岩岩样进行固结排水压缩直至岩样破坏, 同时监测岩样变形情况, 并通过流量计监测岩样排水体积变化。

2.3 试验结果

2.3.1 岩样三轴室饱和过程

图 5(a), (b)分别给出了强风化花岗岩岩样在饱和过程中的轴向和径向变形变化情况。在岩样饱和过程中监测到了明显的膨胀现象: 施加水压力后,

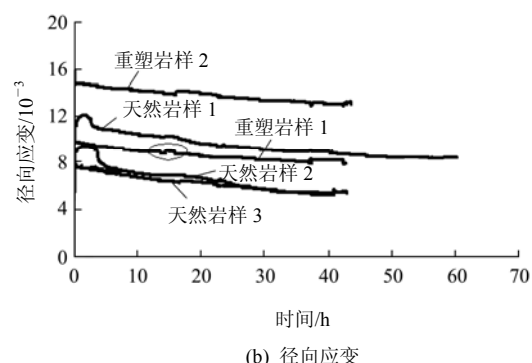
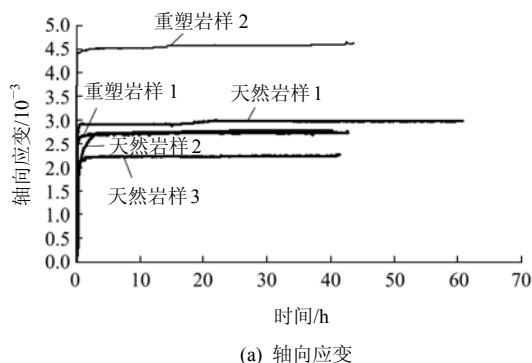


图 5 强风化花岗岩岩样饱和过程中变形变化情况
Fig.5 Deformation variation curves of strongly weathered granite samples during saturated process

岩样与水开始接触, 在 1.0 MPa 的各向相等压力作用下, 岩样吸水, 径向应变迅速增大, 岩样发生膨胀; 在接下来的饱和过程中, 岩样继续吸水并逐渐饱和, 而其径向应变逐渐增大。

试验过程中通过检查岩样的孔压系数 B^[9]来了解饱和过程中岩样的饱和情况。对孔压系数 B 的研究, 国内外很多学者做了这方面的研究工作。G. Mesri 等^[10]曾在不同的有效应力下对饱和 Barre 花岗岩、Vermont 大理岩、Salem 石灰石和 Berea 砂岩的孔压系数 B 进行测量, 发现在低有效压力下 B 接近 1.0, 但是在有效压力增加时 B 迅速减小; R. K. Drope 等^[11]曾对部分饱和的 Kayenta 砂岩在加载时

对孔隙水压力进行了量测，他们的试验数据也表明随着有效压力的增加孔压系数 B 逐渐降低；曾国熙^[12]用归一化方法研究了孔隙水压力的发展，指出孔隙水压力系数并非常数；卢应发等^[13]给出了典型岩石和土的 Skempton 系数的理论形式，并对 Skempton 系数进行了试验论证。

图 6 给出了饱和过程中岩样孔压系数 B 的变化情况(岩样 $i-j$ 代表岩样 i 第 j 次饱和和检查)。由图 6 可以看到，在施加 0.2 MPa 的各向相等压力增量后，孔隙压力先迅速增长，而后增长逐渐缓慢，最后趋于稳定。在一定的时间内，孔隙压力是时间的函数。此外，从孔压系数 B 值的情况来看，天然岩样的孔压系数 B 较大，在 0.85~1.00 之间，通过孔压系数 B 来推算的岩样饱和情况较好；而对于重塑土样，在经过几次饱和和情况检查后，孔压系数均在 0.6 左右。从天然岩样的饱和和情况看，一般 1 d 之内均能很好地饱和，与天然岩样相比，重塑岩样胶结程度较差且渗透率较大，因此，重塑岩样的饱和和速度应该较天然岩样饱和和速度快。D. G Fledlund 和 H. Rahardjo^[14]曾指出有些土的孔压系数 B 虽小于 1，但因其土骨架的压缩性特别低，也可能已经饱和。在对重塑岩样饱和 3 d 后，考虑到天然岩样 1 d 即饱和，且孔压系数没有增长的趋势，因此，对重塑岩样进行了压缩试验。在试验结束后，打开岩样，发现有很多水流出，表明岩样已经饱和。由此可以初步推断，有些岩样的孔压系数 B 在饱和时可能不能达到 1.0。

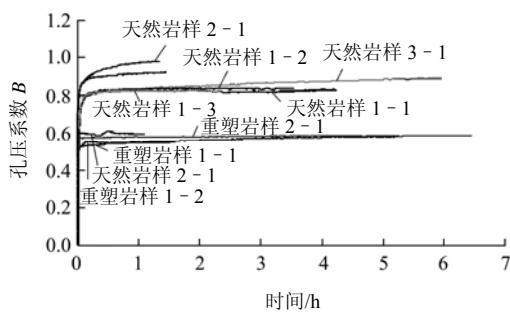


图 6 强风化花岗岩岩样饱和过程中孔压系数 B 变化情况
Fig.6 Pore pressure coefficient B variation curves of strongly weathered granite samples during saturated process

2.3.2 三轴压缩试验

强风化花岗岩固结不排水压缩试验以压缩速率 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ 对岩样进行压缩。图 7(a), (b)分别给出了试验结束时天然岩样和重塑岩样的破坏情况。无



(a) 天然岩样



(b) 重塑岩样

图 7 岩样破坏情况

Fig.7 Damage of rock samples after test

论是天然岩样还是重塑岩样，从其破坏情况看，并未发现明显的剪切带，其破坏形式与泥岩相似。

图 8, 9 分别给出了在 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ 压缩速率下强风化花岗岩天然岩样和重塑岩样应力随轴向应变、径向应变、传感器量测体应变以及排水体应变变化的变化曲线。在试验的开始阶段，岩样体积被压缩，应力随轴向应变、径向应变和体应变线性增长；从排水体积情况来看，岩样在压缩初期，排水很快，通过变形传感器和排水法测得的岩样变形情况在试验初始时(弹性变形阶段)较一致，而后排水逐渐缓慢，排水体应变与量测体应变结果差异逐渐增大；随着压缩的进行，岩样不再排水，岩样内部结构重新调整，应力随轴向应变、径向应变和体应变的增长逐渐缓慢，而岩样体积的变化逐渐由压缩转变为膨胀，应力逐渐增长到最大值；此后，岩样膨胀越来越迅速，应力不再继续升高，而是逐渐降低到一定值后，发生塑性流动，岩样发生破坏。从图中曲线可以初步得到：在围压 1.0 MPa 时，天然岩样排水压缩强度为 1.7~2.9 MPa(由于岩芯本身较破碎，岩样排水强度离散性较大)，重塑岩样压缩强度约为 2.5 MPa。通过分析岩样的排水体应变和量测体应

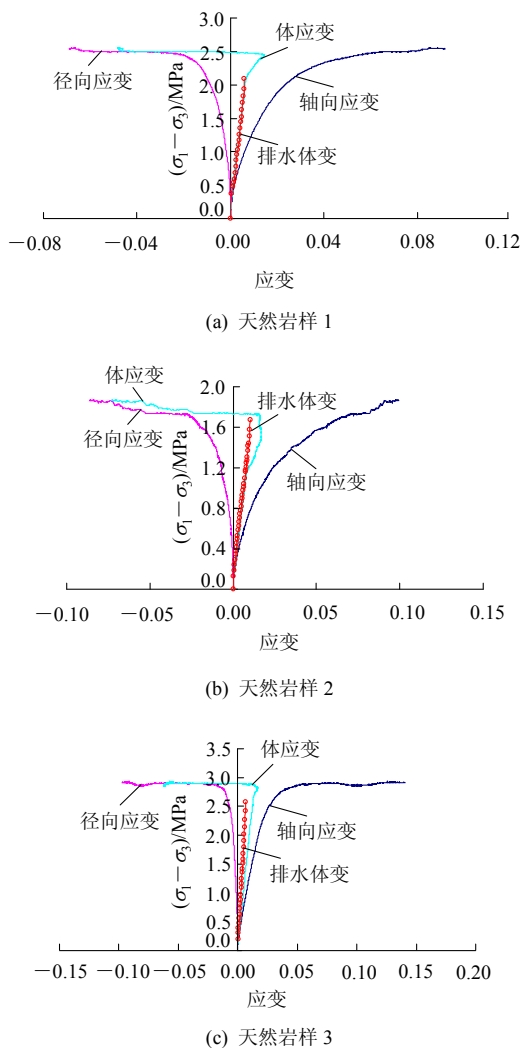


图 8 天然岩样压缩过程中应力 - 应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves of natural rock samples

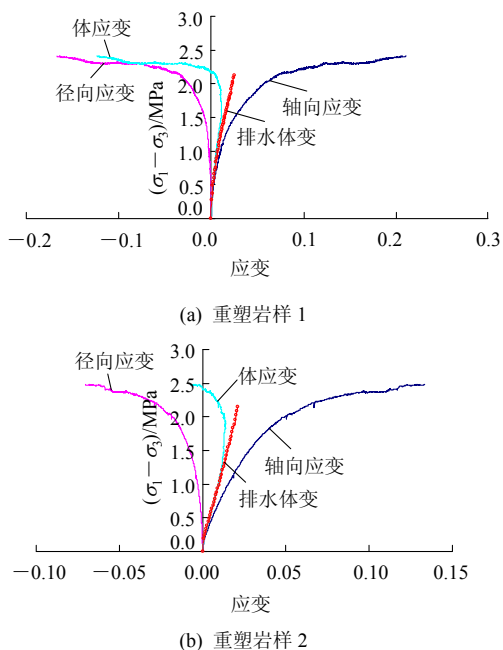


图 9 重塑岩样压缩过程中应力 - 应变曲线
Fig.9 Stress-strain curves of remolded rock samples

变, 可以发现: 用排水法测量体应变在岩样变形的弹性阶段是可靠的, 而进入塑性以后, 岩样体积逐渐发生膨胀, 岩样内部的水逐渐不再排出, 用排水法测此时的体应变误差较大。

由于强风化花岗岩岩样在压缩前期的变形是弹性变形, 通过岩样的排水体积可估算岩样的渗透系数。图 10(a), (b)分别给出了强风化花岗岩天然岩样和重塑岩样在压缩初期测得的渗透系数变化曲线, 天然岩样渗透系数在开始压缩时出现了跳跃, 可能是因为岩样内部缺陷引起的, 在轴向荷载作用下岩样内部缺陷发生调整, 而后渗透系数变化趋于稳定。从图 10 中可看到, 天然岩样渗透系数较重塑岩样低, 天然岩样的渗透系数为 6×10^{-7} m/s 左右, 而重塑岩样的渗透系数为 1×10^{-6} m/s 左右。另外, 通过强风化花岗岩岩样固结排水试验, 估算得到强风化花岗岩天然岩样的弹性模量和泊松比分别约为 250 MPa 和 0.25, 重塑岩样的弹模和泊松比分别约为 100 MPa 和 0.20。重塑岩样的渗透系数之所以较天然岩样高, 同时其弹性模量较天然岩样低, 是因为尽管重塑岩样在密度和含水量方面与天然岩样基本相同, 但较天然岩样相比重塑岩样在制作过程中内部结构连接形式已经遭到了破坏, 胶结程度变差。

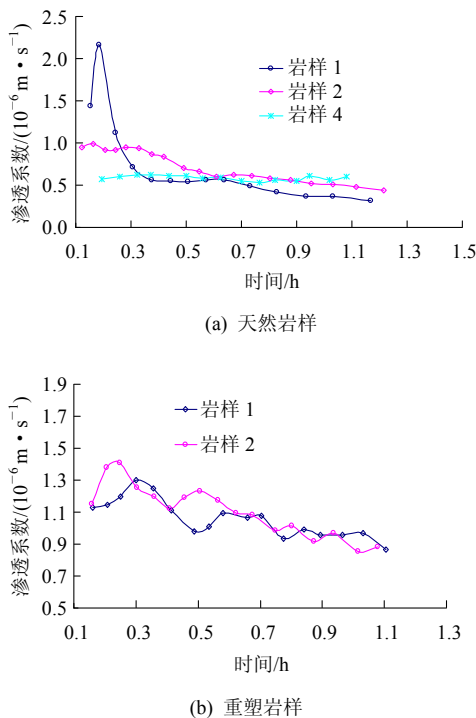


图 10 强风化花岗岩渗透系数变化
Fig.10 Permeability variation of strongly weathered granites

3 强风化花岗岩围岩力学模型研究

在三轴应力状态下，岩石应力 - 应变关系(见图 11)很难直接用一个明确的函数关系来表示。为了描述强风化花岗岩复杂的应力 - 应变关系，可构建如下的弹塑性硬化模型：*OA* 段采用线弹性模型；在 *AB* 段，硬化现象开始时，岩体的屈服强度满足 Drucker-Prager 强度准则；在 *BC* 段，理想塑性流动阶段也满足 Drucker-Prager 强度准则。

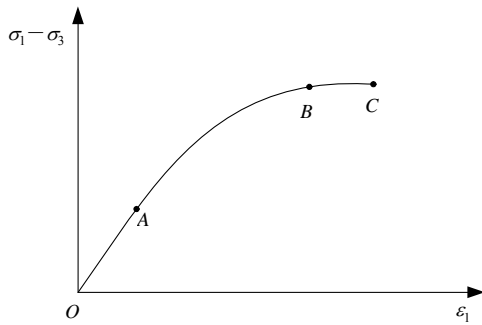


图 11 强风化花岗岩简化应力 - 应变关系图

Fig.11 Simplified stress-strain curve of strongly weathered granite

采用 Drucker-Prager 模型来描述强风化花岗岩的弹塑性行为，其屈服函数的表达式为

$$F = q - p \tan \varphi - c = 0 \tag{1}$$

式中：*q* 为 Mises 等效应力，*p* 为静水压力， φ 和 *c* 分别为 Drucker-Prager 模型的内摩擦角和黏聚力。

为了描述强风化花岗岩的硬化行为，根据试验曲线形状假设黏聚力 *c* 与等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_{pl}$ 的关系满足一阶指数衰减函数，*c* 的演化方程为

$$d = d_0 m \eta = d_0 m [A_0 e^{-\bar{\epsilon}_{norm}/t_0} + B_0] \tag{2a}$$

其中，

$$A_0 = \frac{1}{e^{-1/t_0} - 1} \tag{2b}$$

$$B_0 = -\frac{1}{e^{-1/t_0} - 1} \tag{2c}$$

$$\bar{\epsilon}_{norm} = \bar{\epsilon}_{pl} / \max(\bar{\epsilon}_{pl}) \tag{2d}$$

式中：*t*₀ 和 *m* 均为待定参数， $0 < t_0 < 1$ ， $m \geq 1$ 。

岩样所受到的应力 σ_{ij} 和应变 ϵ_{ij} 均是弹性模量 *E*、泊松比 μ 、黏聚力 *c*、摩擦角 φ 、剪胀角 ψ ，硬化方程中的 *m* 和 *t*₀ 的函数，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(E, \mu, c, \varphi, \psi, m, t_0) \\ \epsilon_{ij} &= \epsilon_{ij}(E, \mu, c, \varphi, \psi, m, t_0) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

若变量 (*E*, μ , *c*, φ , ψ , *m*, *t*₀) 发生变化，那么将会导致应力和应变发生改变。

在上述理论分析的基础上，本文作者开发了一个用于三维本构验证的数值反演程序，其原理可以描述为：给定轴向应变载荷的加载历史 $\epsilon_{11} = \epsilon_{11}(t)$ 和定常围压 $\sigma_{22} = \sigma_{33}$ ，根据施加的轴向应变载荷增量以及应力应变历史，按照上述的弹塑性本构，迭代计算轴向应力增量以及侧向应变增量。并建立有限元模型，将试验获得的应力 - 应变曲线与数值计算所得的应力 - 应变曲线的差值作为目标函数，采用最优化方法获得了所建立的力学模型各参数。由于文章篇幅的限制，具体计算过程及结果分析将另文进行详细介绍。表 2 和图 12 分别给出了根据天然强风化花岗岩岩样 1 的试验曲线所建立的力学模型各参数的反演值及试验结果与反演结果的对比曲线。研究表明所建立的力学模型及通过反演所获得的本构参数可以较好地拟合试验曲线，能够为进一步研究隧道施工过程水力耦合特性问题提供理论基础。

表 2 通过反演得到的力学模型各参数值

Table 2 Parameters of mechanical model gained from back analysis

参数	<i>E</i> /MPa	μ	<i>c</i> /MPa	φ	ψ	<i>m</i>	<i>t</i> ₀
反演结果	300.06	0.264 2	0.274 86	30.028 4	15.01	3.563 4	0.152

注：黏聚力和摩擦角为 D-P 准则下的参数。

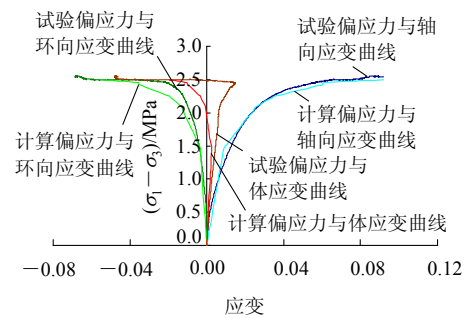


图 12 试验结果与反演结果的对比曲线

Fig.12 Contrast curves between test results and back analysis results

4 结 论

强风化花岗岩强度低、压缩性高、自稳和自承能力差，其物理力学特性对工程设计和施工工艺的

选择具有十分重要的影响。为此, 本文主要通过通过对厦门海底隧道天然和重塑强风化花岗岩进行一系列的室内试验, 研究了强风化花岗岩在流固耦合作用下的力学特性, 在试验分析的基础上, 建立了强风化花岗岩的力学模型, 并通过反演分析对力学模型进行了验证, 研究结果表明本文所建立的力学模型与试验结果较一致, 说明模型合理, 可用于该类岩体稳定性分析计算。由于全、强风化花岗岩力学性质的特殊性, 作者已对厦门海底隧道风化槽段围岩稳定性^[1]及潮汐对隧道衬砌稳定性影响^[15]进行了研究, 近期还将继续开展全、强风化花岗岩不同围压下的三轴抗压强度特性研究, 进行全、强风化花岗岩的流变试验, 同时还将进行厦门海底隧道围岩参数的反分析及隧道长期稳定性分析等。

参考文献(References):

- [1] 陈卫忠, 于洪丹, 郭小红, 等. 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 873 - 884. (CHEN Weizhong, YU Hongdan, GUO Xiaohong, et al. Research on stabilities of the surrounding rock through the weathered strata for Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 873 - 884.(in Chinese))
- [2] 梁巍, 朱光仪, 郭小红. 厦门东通道海底隧道土建工程设计[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 99 - 103.(LIANG Wei, ZHU Guangyi, GUO Xiaohong. Civil engineering design of Xiamen Dongtongdao subnazine tunnel[J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 99 - 103.(in Chinese))
- [3] 郭衍敬, 张明聚. 海底隧道穿越风化深槽施工方案[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(6): 520 - 525.(GUO Yanjing, ZHANG Mingju. A construction solution to tunneling through the deep weathered rock trough of subsea tunnels[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(6): 520 - 525.(in Chinese))
- [4] 厉顺荣. 厦门翔安海底隧道在施工中应注意的几个方面[J]. 隧道建设, 2006, 26(4): 43 - 45.(LI Shunrong. Several aspects to which attention should be paid during construction of Xiang'an subsea tunnel in Xiamen[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(4): 43 - 45.(in Chinese))
- [5] 李光耀, 夏支埃. 厦门东通道海底隧道风化深槽的岩土工程特征研究[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(1): 23 - 28.(LI Guangyao, XIA Zhi'ai. The characteristics of the weathering grooves in the seabed tunnel of the east Xiamen passageway[J]. Resources Environment and Engineering, 2006, 20(1): 23 - 28.(in Chinese))
- [6] 胡文涛. 厦门海底隧道风化深槽全断面帷幕注浆方案设计[J]. 石家庄铁道学院学报, 2007, 20(2): 130 - 134.(HU Wentao. Full face curtain grouting for the weathered ditch in the construction of sea tunnel in Xiamen[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2007, 20(2): 130 - 134.(in Chinese))
- [7] 齐明山, 徐正良, 崔勤, 等. 风化破碎类花岗岩三轴流变试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 914 - 917.(QI Mingshan, XU Zhengliang, CUI Qin, et al. Study of rotten and cracked granite by triaxial rheological experiment[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 914 - 917.(in Chinese))
- [8] 陈卫忠, 于洪丹, 贾善坡, 等. 双联动软岩渗流-应力耦合流变仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2 176 - 2 183.(CHEN Weizhong, YU Hongdan, JIA Shanpo, et al. Development of a double linkage triaxial testing machine for hydro-mechanical coupling in soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2 176 - 2 183.(in Chinese))
- [9] SKEMPTON A W. The pore pressure coefficient A and B [J]. Geotechnique, 1954, 4(4): 143 - 147.
- [10] MESRI G, ADACHI K, ULLRICH C.R. Pore-pressure response in rock to undrained change in all-round stress[J]. Geotechnique, 1976, 26(10): 317 - 330.
- [11] DROPEK R K, JOHNSON J N, WALSH J B. The influence of pore pressure on the mechanical properties of Kayenta sandstone[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83(6): 2 817 - 2 824.
- [12] 曾国熙. 正常固结黏性土不排水剪切的归一化性状[C]// 软土地基学术讨论会论文集. 北京: 水利出版社, 1980: 13 - 26.(ZENG Guoxi. Normalized characteristics of normally consolidated clay under consolidated undrained shearing[C]// Academic Symposia Proceedings of Soft Ground. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980: 13 - 26.(in Chinese))
- [13] 卢应发, 郑俊杰, 柴华友. 典型岩石和土的Skempton系数特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1 847 - 1 851.(LU Yingfa, ZHENG Junjie, CHAI Huayou. Characteristics of Skempton coefficient of respective rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1 847 - 1 851.(in Chinese))
- [14] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Translated by CHEN Zongyi. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [15] 于洪丹, 陈卫忠, 郭小红, 等. 潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 2 905 - 2 914.(YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on the effect of tide to the stabilities of channel tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 905 - 2 914.(in Chinese))