

基于影响因子修正的岩石损伤力学模型探讨

王 康, 刘佑荣, 胡 政, 牛超颖, 温 韬

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对现有岩石损伤模型的局限性与不足, 在深入探讨岩石变形损伤机制的基础上考虑岩石损伤的过程, 提出损伤部分可分为损伤材料和因材料损伤而变化的微缺陷。在该基础上提出新的损伤定义, 还提出了损伤材料与因材料损伤而变化的微缺陷之间的影响因子 γ , 同时提出其参数确定方法, 研究其基本性质。通过岩石微观受力分析, 建立了岩石损伤模型。通过深入研究岩石有效应力与名义应力的关系, 并引进统计损伤理论, 建立岩石损伤统计本构模型。该模型能够充分地反映岩石的应变软化特性和应变硬化特性, 且参数物理意义明确, 应用将较为方便。最后, 与实测结果及前人成果的比较分析, 验证了该模型的合理性、可行性。

关 键 词: 损伤; 影响因子; 岩石力学; 本构模型

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)增2-0171-07

Discussion on rock damage mechanical model based on impact factor modification

WANG Kang, LIU You-rong, HU Zheng, NIU Chao-ying, WEN Tao

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Considering the insufficiency of the present theory of rock damage model, this paper presents that the rock damage can be divided as damage materials and the rock microdefects caused by the materials damage on the basis of the study of the mechanism of rock deformation and the process of rock damage. Then a new definition of rock damage and impact factor γ between the damage materials and the microdefects is presented. Meanwhile, ascertain parameters, the basic properties of γ , and a rock damage model is established according to micro rock force analysis. Furthermore, a statistical constitutive model is established by introducing the statistical damage theory and lucubrating the relationship between effective stress and normal stress. The model well reflected the strain-softening characteristics of rock and strain-hardening of rock and had the definite physics meaning parameters. Therefore, it is easy to be applied. Finally, the model is proved to be rational and feasible by comparing with the existing research results and measured data.

Keywords: damage; impact factor; rock mechanics; constitutive model

1 引 言

损伤力学从 1958 年 Kachanov 提出损伤因子发展到今天, 形成了细观损伤力学、宏观损伤力学以及准宏观损伤力学三大理论^[1-2]。其研究方法是选取合适的损伤变量, 利用连续介质力学的唯象方法或细观力学、统计力学的方法, 导出含损伤的材料损伤演化方程, 形成损伤力学的初、边值问题的提法, 并求解物体的应力场、变形场和损伤场(对于岩石损伤力学而言即为岩石损伤本构模型)。

根据研究的特征尺度不同, 损伤的研究方法总

体上可分为微观方法、细观方法和宏观方法。近年来研究表明^[3-12]损伤统计理论是研究岩石损伤本构模型的一种重要方法, 其理论建立岩石变形的全过程模拟主要有两种方法, 一种是基于 Lemaitre^[13]应变等价理论建立岩石损伤模型, 另一种是基于破损理论和岩土材料力学性态的改变程度建立岩土损伤模型。

无论采用何种理论或何种方法研究损伤力学, 最根本的一点是对“损伤”的理解和定义, 对于具体的方法而言最重要的就是“损伤变量”的定义。简言之, “损伤”的定义是整个研究体系的基础。在

以往的研究^[3-6, 14-15]中, 损伤多定义为岩石材料中的微裂纹与微空洞, 且形成则不具有承载力。近些年来曹文贵等^[10]指出, 实际上岩石的损伤除这种直观的情况外, 损伤部分仍能承受一定应力。

长期以来损伤部分作为一个整体进行简化探索, 并不能把损伤的实际状态真实地反映出来。随着研究的发展, 微、细、宏观结合是未来研究的发展方向, 本文结合前人不同类型的损伤定义, 根据损伤演变的过程, 将微、细、宏观三者结合起来提出了新的定义, 探讨新定义下损伤部分的内部关系对整个岩石损伤过程的影响, 最后建立新型损伤定义下的岩石损伤本构模型。

2 新型损伤定义下的本构模型

由上述可知对损伤进行重新定义是首要问题。需要在前人的基础^[3-6, 10, 13]上对损伤进行重新定义。

2.1 新的损伤定义

岩石的损伤破坏过程实际上是从微观的结构破坏到细观上缺陷的形成最后发展成为宏裂纹的贯通破坏, 整个过程是一个量变质变的过程。

微观上: 损伤破坏机制^[1]定义 (1) 某些材料结构发生分裂, 在晶粒之间或穿过晶粒聚集为微裂纹, 接着微裂纹发展和汇合形成宏裂纹, 构成脆性损伤破坏过程; (2) 大多数弹塑性材料较易变形的基体首先在刚度较大的杂质周围塑性流动并引起微空洞形核使基体与杂质的界面破坏或使杂质本身断裂而成空洞, 空洞随变形长大使应力场更不均匀, 导致新的空洞形核或产生局部剪切带, 最后空洞成片聚合成宏裂纹, 构成韧性损伤破坏过程。

根据上述损伤破坏机制可知, 损伤部分从微观层次概化分解为损伤材料和因材料损伤而变化的微缺陷, 其中上述的晶粒或杂质等为具体的损伤材料, 而微裂纹和空洞形核等则为具象的微缺陷。这里“因材料损伤而变化的微缺陷”是指非固体材料部分, 例如, 考虑微裂纹时即为两微裂纹面之间的部分, 微裂纹闭合时可承受压应力, 这时承受压应力的为微裂纹面的固体材料, 即本文所说的损伤材料部分。

细观上: 谢和平^[2]指出意外断裂事故的发生有 2 个因素: (1) 缺陷(特别是裂缝)的存在; (2) 材料对于缺陷的敏感性。缺陷的存在是否会导致断裂主要决定于材料本身的性质及材料对缺陷的存在是否敏感。

上述定义可理解为损伤部分可分解为两部分, 且这两部分之间有重要的作用关系。宏观上是通过引进内部变量, 将细观结构变化映射到宏观力学变化上加以分析, 即在本构关系中引入损伤变量, 采用带有损伤变量的本构关系真实地描述受损材料的宏观力学行为。

综上, 岩石损伤过程中部分岩石材料受损导致微裂隙、微空洞的发展, 损伤部分可以分为损伤的材料部分和因材料损伤而变化的微缺陷, 见图 1。因此, 损伤定义不拘泥于材料损伤的具体形态, 定义材料的损伤分为不能承担应力的微缺陷和可承受一定应力的损伤材料, 这样更合乎实际。在此基础上可以建立新的损伤模型。

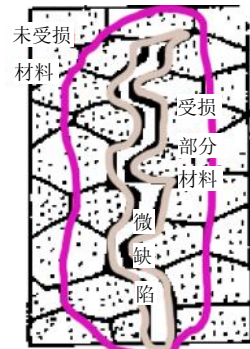


图 1 岩石损伤的微观形态^[2]

Fig.1 Microstructure of rock damage^[2]

2.2 损伤模型

上述损伤定义本质上认为岩石损伤部分的材料仍能够承受一定应力, 而由材料损伤导致的微缺陷不能承受应力。假设在应力作用下产生损伤的岩石由三部分组成, 即未损伤材料、损伤材料和因材料损伤而变化的微缺陷, 岩石材料的总荷载由两部分岩石材料共同承担, 由图 1 抽象成图 2 所示模型。设岩石材料所受应力即名义应力为 σ_i , 其作用面积为 A , 未受损伤材料部分应力为 σ'_i , 相应的作用面积为 A_1 , 损伤的材料部分所受应力为 σ''_i , 相应的作用面积为 A_2 , 损伤的微缺陷部分面积为 A_3 , 且微缺陷部分由材料损伤导致, 故其与损伤材料有一定关系, 并提出其影响因子为 γ , 公式为

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 + A_3 &= A \\ A_3 &= \gamma A_2 \\ \sigma_i A &= \sigma'_i A_1 + \sigma''_i A_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

令 $D = \frac{A_2 + A_3}{A}$, 定义为岩石材料损伤变量, 则

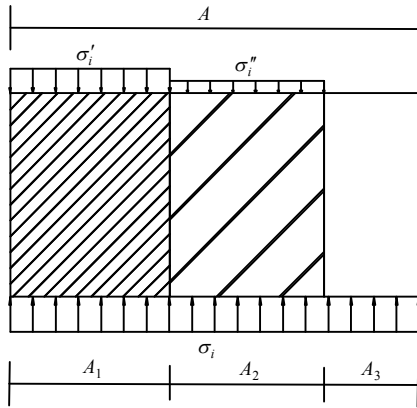


图 2 岩石损伤模型
Fig.2 Rock damage model

$$\sigma_i = \sigma'_i \frac{A_1}{A} + \sigma''_i \frac{A_2}{A} = \sigma'_i (1-D) + \sigma''_i \frac{D}{1+\gamma} \quad (2)$$

即为本文建立的新型岩石损伤模型。由此建立岩石的损伤本构模型应先建立起 σ'_i 与 σ''_i 和应变的关系。

2.3 有效应力和损伤应力

采用文献[10]的方法建立岩石损伤本构关系, 作如下假定:

$$\left. \begin{aligned} \sigma''_3 &= k \\ \sigma''_1 &= \tan^2 \alpha k + 2c \tan \alpha \\ \sigma'_i &= E \varepsilon_i + \mu(\sigma'_j + \sigma'_k) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{[(1+\mu)\sigma_c^2 \sin \alpha / (3E\varepsilon_1) - c] \cot \varphi - 2c \sin \alpha}{\sin \alpha (1 + \tan \alpha)} \\ \alpha &= \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

c 、 φ 分别为岩石材料的黏聚力与内摩擦角。利用式 (2) 可得

$$\sigma_3 = (1-D)\sigma'_3 + \frac{D}{1+\gamma} \sigma''_3 \quad (5)$$

由式 (2)、(3)、(5), 并考虑假三轴条件 $\sigma'_2 = \sigma'_3$, 可得

$$\sigma_1 = (1-D)E\varepsilon_1 + 2\mu\sigma_3 + \frac{D}{1+\gamma} (\tan^2 \alpha k + 2c \tan \alpha - 2\mu k) \quad (6)$$

由此建立了岩石损伤本构模型。

3 岩石损伤统计本构模型的建立

岩石损伤统计演化方程的建立采用文献[3-4]

的方法。引进岩石微元强度的概念, 以岩石微元强度服从 Weibull 分布确定岩石统计损伤演化方程, 再由式 (6) 建立岩石损伤统计本构模型。由两个文献[3-4]可知岩石微元强度 F 可表示为

$$F = I'_1 + \beta(J'_2)^{0.5} \quad (7)$$

考虑假三轴条件可得

$$\left. \begin{aligned} I'_1 &= \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 = \sigma'_1 + 2\sigma'_3 \\ J'_2 &= \frac{1}{3}(\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 \\ \beta &= \frac{\sin \varphi}{3\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式 (2)、(3)、(6) 可得

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_1 &= (\sigma_1 - \lambda' \sigma''_1) / (1 - \lambda') \\ \sigma'_3 &= (\sigma_3 - \lambda' \sigma''_3) / (1 - \lambda') \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:

$$\lambda' = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3 - E\varepsilon_1}{(\sigma''_1 - 2\mu\sigma''_3) / (1 + \gamma) - E\varepsilon_1} \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (7) 即可得到由有效应力表示的微元强度。假定岩石微元强度 F 服从 Weibull 分布, 其概率密度函数为

$$P(F) = \frac{m}{F_0} (F / F_0)^{m-1} \exp[-(F / F_0)^m] \quad (11)$$

式中: m 、 F_0 为 Weibull 分布参数, F_0 、 m 可参照文献[3]类似的方法确定。由此可得岩石的损伤变量即统计损伤演化方程:

$$D = \int_0^F P(x) dx = 1 - \exp[-(F / F_0)^m] \quad (12)$$

将式 (9) 代入式 (7) 第一式即可得到模拟岩石破裂全过程的损伤统计本构模型:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp[-(F / F_0)^m] + 2\mu\sigma_3 + \frac{1 - \exp[-(F / F_0)^m]}{1 + \gamma} (\tan^2 \alpha k + 2c \tan \alpha - 2\mu k) \quad (13)$$

式 (13) 中, 若认为损伤的岩石材料仍以整体分析, 即 $\gamma = 0$, 则该式可蜕化为岩石损伤统计本构模型^[10], 表明本文岩石损伤统计本构模型适用范围更广。

此时, 本模型中的影响因子的分析与推导是需要解决的重要问题。

4 影响因子的建立

4.1 影响因子

本文提出了新的损伤定义, 定义的关键是受损材料与因材料受损而变化的微缺陷之间的关系, 即本文所提出的影响因子 γ 。本文思路: 取出模型中的 A_1 、 A_2 部分作为整体分析, 此时 (A_1+A_2) 部分所受名义应力为 σ_i^* , 则

$$\sigma_i^* = \frac{A_1 + A_2}{A} \sigma_i \quad (14)$$

此时 (A_1+A_2) 部分符合文献[10]的情形, 按照其方法可得

$$\sigma_i^* = (1 - D^*) \sigma_i^{**} + D^* \sigma_i^{***} \quad (15)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} D^* &= \frac{A_2}{A_1 + A_2} \\ \sigma_i^{**} &= \sigma_i'; \sigma_i^{***} = \sigma_i'' \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

由式 (2)、(6)、(14)、(15) 可得

$$\gamma = 2 \left(\frac{\tan^2 \alpha k + 2c \tan \alpha - 2\mu k - E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3 + E\varepsilon_1} \right) \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (13) 即为本文岩石损伤本构模型。

4.2 影响因子的基本性质分析

影响因子 γ 反映了损伤材料与因材料损伤而变化的微缺陷之间的相互关系。一方面, 按照理论分析, 两部分之间的关系会受到岩石材料本身的影响以及在外荷载的等因素的制约; 另一方面, 从式 (17) 可知 μ 、 E 、 σ_c 等岩石力学参数及 σ_1 、 σ_3 等外部荷载参数共同决定影响因子 γ 的趋势。具体而言, 影响因子 γ 受到外部因素 (ε_1 , σ_1 , σ_3)、内部因素 (c , μ , σ_c , E) 七方面的制约。

为了研究各因素对 γ 的影响形式及程度, 结合所做试验, 选取基本参数见表 1, 以黏聚力 c 为例, 将其他参数固定, 变化 c 的大小得到不同的 γ , 拟合所得结果, 可得图 3 及拟合公式 (18), 得到其他因素与影响因子 γ 的拟合曲线。

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 4.524\varepsilon_1^{-1.29} - 2, \quad (R^2 = 0.999) \\ \gamma &= 18.07\sigma_1^{-0.45}, \quad (R^2 = 0.962) \\ \gamma &= 0.019\sigma_3 + 2.785, \quad (R^2 = 0.991) \\ \gamma &= 0.001c + 2.937, \quad (R^2 = 1) \\ \gamma &= 0.001\mu + 3.736, \quad (R^2 = 0.960) \\ \gamma &= 0.071\sigma_c - 4.856, \quad (R^2 = 0.997) \\ \gamma &= 1.232E^{-1.45}, \quad (R^2 = 0.961) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

表 1 用于影响因子分析的基本参数

Table 1 Basic parameters of analysis of impact factors

$\varepsilon_1/10^{-3}$	c/MPa	μ	σ_c/MPa	σ_1/MPa	σ_3/MPa	E/GPa
1	25	0.3	110	60	10	65

从图 3 中可以看出, 各因素与 γ 之间有很强的规律性: (1) 随着轴向应变 ε_1 或轴压 σ_1 的增加, 影响因子 γ 呈现下降的趋势, 且下降的趋势在 ε_1 、 σ_1 较小时 ($\varepsilon_1 < 5 \times 10^{-3}$ 或 $\sigma_1 < 50 \text{ MPa}$) 下降速度远远大于其较大时; ε_1 与 σ_1 之间有一定的相关性, 其对 γ 的影响规律也相似, 随着 σ_1 逐渐增大岩石破坏, 是其材料损伤累加的结果。换句话说, 岩石材料的损伤随着 σ_1 增加逐渐积累, 岩石的微缺陷相对来说增加较慢, 相应的 γ 的值将降低。当 σ_1 增加到一定程度后, 岩石处于屈服破坏状态时, 其材料的损伤及微缺陷的增加基本处于稳定, 此时 γ 也趋向于定值。

(2) γ 随围压 σ_3 增加而增加, 但总体上增加的幅度较小, 相对而言围压比轴压的影响小些。(3) 在岩石自身因素中, 黏聚力 c 及泊松比 μ 的影响较小, 其中 c 与 γ 两者之间呈现了明显的线性关系, 但 c 增加 100 MPa 时 γ 仅仅变化 0.1, 几乎可忽略不计。

(4) γ 单轴抗压强度 σ_c 的增加而变大。这是因为随着 σ_c 变大, 岩石材料损伤的难度增大, 即相比于 σ_c 较小的岩石, 产生大小相同的裂纹时其损伤的材料更少, 也符合实际。(5) 弹性模量 E 对 γ 的影响较大, 特别是当 E 值较小时, γ 对 E 值的变化非常敏感 (E 表示岩石的抗变形能力), 而岩石的变形包括裂纹的开合、岩石材料的弹性及塑性变形。当 E 较大 ($E > 20 \text{ GPa}$) 时, 其抗变形能力较强, 岩石产生变形的难度增大, 即裂纹的开合、岩石材料的弹性及塑性变形等现象的发展相较于 E 较小时将微弱 (γ 将较小) 且趋于稳定。

5 实例与验证

试验岩样为锦屏某高边坡区厚 70 m、青灰色的厚层~块状变质石英细砂岩 ($T_{2-3z}^{3(1-1)}$)。岩石由砂粒 (85%±) 和胶结物 (15%±) 组成, 为孔隙式胶结。砂粒组成: 主要是石英 (70%±)、次之方解石 (12%±)、少量长石砂 (<1%)、铁质砂 (2%±) 及微量的云母片。胶结物主要为黏土胶结物, 有少量碳酸盐胶结物, 经过变质作用。绢云母约占胶结物的 85% 左右, 微观结构见图 4。

对试样进行三轴压缩试验, 通过相应的数据处理, 可得到其岩石弹性模量 $E=65.37 \text{ GPa}$, 泊松比

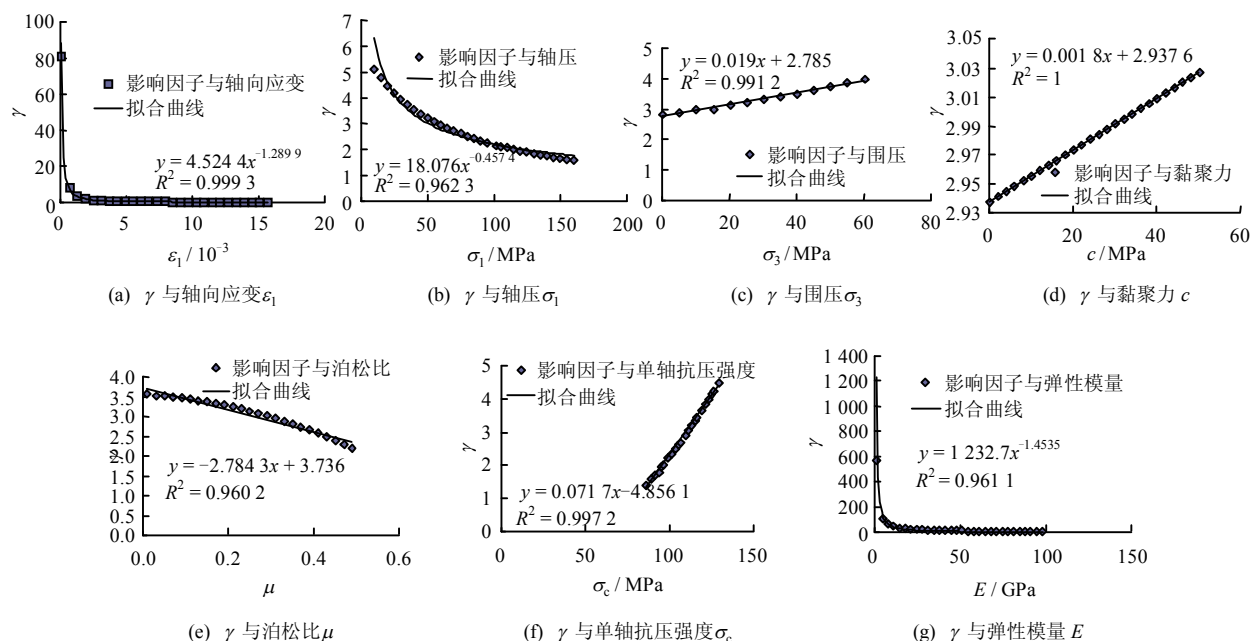
图 3 各因素对影响因子 γ 的影响Fig.3 Influence of various factors on impact factor γ 

图 4 砂岩的微观结构

Fig.4 Microscopic structure of sandstone

表 2 Weibull 分布参数

Table 2 Parameters of Weibull distribution

σ_3 / MPa	m	F_0
10	0.422	126
20	1.235	443
30	1.483	600
40	1.073	2 227

$\mu = 0.29$, 内摩擦角 $\varphi = 39.3^\circ$, 黏聚力 $c = 25.9$ MPa, 单轴抗压强度 $\sigma_c = 109.1$ MPa。

分别考察不同围压下模型参数 m 、 F_0 与 σ_3 的关系, 拟合可得式 (19)。

$$\left. \begin{aligned} m &= -0.003\sigma_3^2 + 0.178\sigma_3 - 1.049 \\ F_0 &= 67.36\sigma_3 - 904 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (13) 中第一式, 即可得到

模拟不同围压下岩石变形破裂全过程的损伤统计本构方程。其模型理论曲线如图 5 所示。通过与试验曲线及文献[10]曲线进行对比可以看出, 本文模型有如下特点: (1) 本文模型能与试验曲线相匹配, 反映岩石的软化特性和硬化特性, 很好地反映出岩石变形破裂全过程; (2) 随着围压的增加模型的极限荷载逐渐增大, 符合岩石力学的一般规律。模型表现了岩石的脆延转换特性, 即低围压时岩石脆性特征明显, 在围压为 40 MPa 时已经表现出相当的延性特征; (3) 将图 5 与曹文贵等^[10]模型理论曲线相比, 本文模型理论曲线与实测曲线吻合程度更高; (4) 模拟岩石屈服破坏后的过程本文模型具有一定的优势, 岩石屈服破坏宏观表现为裂缝扩张、贯通, 岩石材料损伤加剧。另外, 应力也在此过程中发生跌落现象, 应力跌落快慢也是表现岩石脆延性质的特征之一。本文模型利用影响因子 γ 调整了模型后期应力-应变关系, 使之更为符合实际。

6 结 论

(1) 提出新的损伤定义 W 损伤部分可分为损伤材料和因材料损伤而变化的微缺陷。

(2) 损伤定义中的两部分之间相关性以影响因子 γ 表征, 而 γ 与岩石材料参数及外部荷载等之间呈现出较好的规律性。

(3) 通过岩石微观受力分析, 建立的岩石损伤模型能够充分反映出岩体的应变软化特性和应变硬

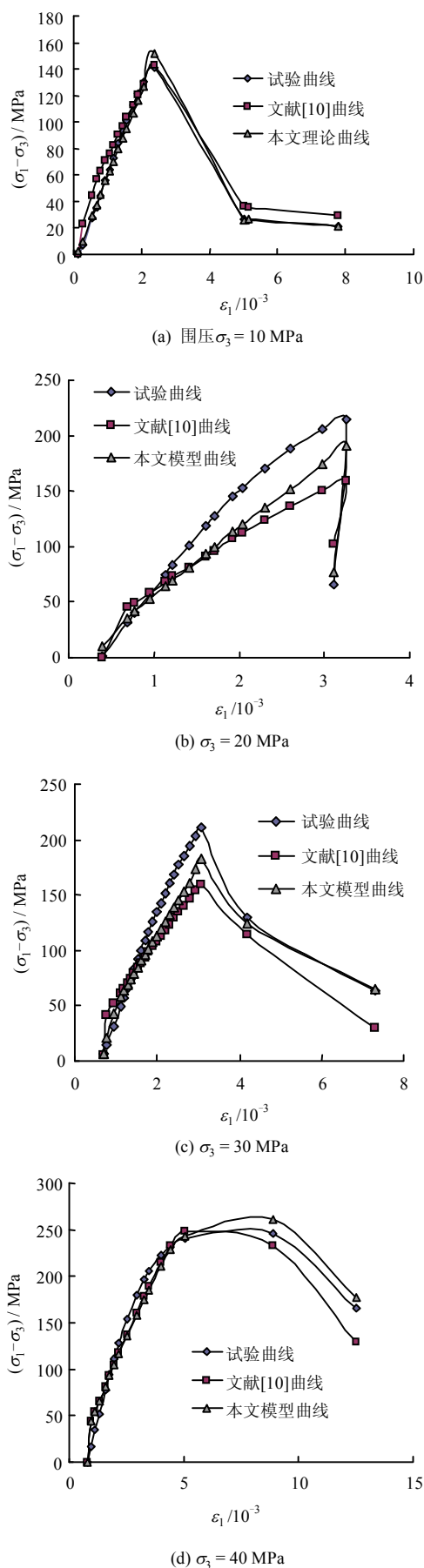


图5 试验曲线与理论曲线的比较

Fig.5 Comparison between theoretical and measured curves

化特性, 且参数物理意义明确, 应用将较为方便。

与实测结果以及前人成果的比较分析结果表明本文模型更为合理可行。由于各种因素的影响, 本文模型仍有不足之处, 希望在后续研究中获得新的突破, 使得损伤模型更为符合客观实际。

参考文献

- [1] 沈为. 损伤力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995.
- [2] 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学[M]. 江苏: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [3] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 628—633.
CAO Wen-gui, FANG Zu-lie, TANG Xue-jun. A study of statistical constitutive model for softening and damage rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(6): 628—633.
- [4] 曹文贵, 赵明华, 唐学军. 岩石破裂过程的统计损伤模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 184—187.
CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, TANG Xue-jun. Study on simulation of statistical damage in the full process of rock failure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 184—187.
- [5] 秦跃平, 张金峰, 王林. 岩石损伤力学理论模型初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 646—650.
QIN Yue-ping, ZHANG Jin-feng, WANG Lin. Preliminary discussion on theoretical model of rock damage mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 646—650.
- [6] KRAJCINOVIC D. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1982, 18(7): 551—562.
- [7] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787—791.
XU Wei-ya, Wei Li-de. Study on statistical damage constitutive model of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 787—791.
- [8] 康亚明, 刘长武, 贾延, 等. 岩石的统计损伤本构模型及临界损伤度研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(4): 42—47.
KANG Ya-ming, LIU Chang-wu, JIA Yan, et al. Research on statistical damage constitutive model and critical damage for rock subjected to triaxial stress condition[J]. **Journal of Sichuan University(Engineering Science)**,

2009, 41(4): 42—47.

- [9] 曹文贵, 李翔, 刘峰. 裂隙化岩体应变软化损伤本构模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2488—2494.

CAO Wen-gui, LI Xiang, LIU Feng. Discussion on a strain softening damage constitutive model for fissured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2488—2494.

- [10] 曹文贵, 张升, 赵明华. 基于新型损伤定义的岩石损伤统计本构模型探讨[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 41—46.

CAO Wen-gui, ZHANG Sheng, ZHAO Ming-hua. Study on statistical damage constitutive model of rock based on new definition of damage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 41—46.

- [11] 曹文贵, 赵衡, 张玲, 等. 考虑损伤阈值影响的岩石损伤统计软化本构模型及其参数确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1148—1154.

CAO Wen-gui, ZHAO Heng, ZHANG Ling, et al. Damage statistical softening constitutive model for rock considering effect of damage threshold and its parameters

determination method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1148—1154.

- [12] 曹文贵, 莫瑞, 李翔. 基于正态分布的岩石软化损伤统计本构模型及其参数确定方法探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 671—675.

CAO Wen-gui, MO Rui, LI Xiang. Study on damage softening and hardening statistical constitutive model based on normal distribution for rock and method of determining its parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 671—675.

- [13] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992: 29—30.

- [14] 任建喜. 三轴压缩岩石损伤扩展细观机制及其本构模型[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 578—583.

REN Jian-xi. Rock meso-damage propagation law in the triaxial compression loading and its constitutive model[J]. **Journal of China Coal Society**, 2001, 26(6): 578—583.

- [15] KACHANOV M, TSUKROV I, SHAFIRO B. Effective modulus of solids with cavities of various shapes[J]. **Applied Mechanics Review**, 1994, 47: 151—174.

上接第 170 页

- [9] 刘青松, 张春雷, 汪顺才, 等. 淤泥堆场人工硬壳层地基极限承载力室内模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 667—670.

LIU Qing-song, ZHANG Chun-lei, WANG Shun-cai, et al. Laboratory simulation study of the ultimate bearing capacity of the man-made crust over dredged wastes dump sites[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Supp.): 667—670.

- [10] 艾卫平, 王玉梅, 王宁伟. 人造硬壳层扩散作用的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(4): 88—91.

AI Wei-ping, WANG Yu-mei, WANG Ning-wei. On the diffusion of artificial dry crust[J]. **Journal of Shenyang Aerospace University**, 2011, 28(4): 88—91.

- [11] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

- [12] 卢正, 姚海林, 程平, 等. 非均匀列车荷载作用下软土路基的振动分[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3286—3294.
LU Zheng, YAO Hai-lin, CHENG Ping, et al. Ground vibration of soft subgrade subjected to a non-uniformly distributed train load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3286—3294.

- [13] LU Zheng, YAO Hai-lin, LIU Jie, et al. Dynamic response of a pavement-subgrade-soft ground system subjected to moving traffic load[J]. **Journal of Vibroengineering**, 2014, 16(1): 195—209.

- [14] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(11): 907—916.

- [15] 刘霞. 路堤下软土硬壳层地基的破坏模式及承载力研究[硕士学位论文 D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

- [16] JAMES W, YOSHIKI O, KUNIHITO M. Linear elastic analysis of pavement structure under non-circular loading[J]. **Road Materials and Pavement Design**, 2012, 13(3): 403—421.

- [17] ALIREZA B, MARK K. Field evaluation and analysis of flexible pavement structural responses under dynamic loads[J]. **Road Materials and Pavement Design**, 2012, 13(1): 26—37.

- [18] UCHIDA I. Road engineering[M]. Tokyo: Morikita Publisher, 1988.