

不同支护参数下锚杆锚固效果的等效数值模拟研究

邵凌, 李宁, 李程, 代鹏, 陈瑛

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 杨浦 200093)

摘要: 为了研究支护参数(锚杆长度, 锚杆环向间距)对数值模拟中围岩等效岩性参数的影响, 以宁波将军山隧道为研究对象, 进行了不同支护参数下的隧道开挖和加载的模型试验, 得到锚杆长度和锚杆间距的改变对隧道拱顶位移的影响规律。通过对模型试验进行数值反演分析, 得到数值模拟中围岩等效岩性参数(弹性模量、黏聚力和内摩擦角)的变化规律, 依此得到不同支护参数下锚杆锚固效果的等效数值模拟方法。结果表明: 在数值分析中, 锚杆长度每增加0.5m, 锚固区岩体弹性模量提高约3%, 黏聚力提高约0.8%, 内摩擦角几乎不变; 锚杆间距每减小0.5m, 锚固区岩体弹性模量提高约17%, 黏聚力提高4%~5%, 内摩擦角提高约3.4%。

关键词: 锚杆锚固; 模型试验; 支护参数; 锚固效果; 等效岩性参数

中图分类号: TV554; TV314

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0207-05

Equivalent numerical simulation study on bolt anchoring effects of different supporting parameters

SHAO Ling, LI Ning, LI Cheng, DAI Peng, CHEN Ying

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To research the influences of supporting parameters (e.g., bolt length and bolt circular spacing) on surrounding rock's equivalent lithological parameters in numerical simulation, the model tests tunnel's excavation and loading with different supporting parameters were conducted for Ningbo General mountain tunnel, the influences of changing bolt length and bolt spacing on tunnel vault displacement were studied. Through the numerical inversion analysis of model tests, the variation of surrounding rock equivalent lithological parameters (modulus of elasticity, cohesion and angle of internal friction) in numerical simulation, and the method of equivalent numerical simulation of bolt anchoring effects in different supporting parameters were obtained, respectively. The results showed that, in numerical analysis, when the bolt length increased 0.5 m, the anchorage zone rock's elastic modulus increased by about 3%, the cohesive force increased by about 0.8%, but the angle of internal friction were almost unchanged; when the bolt spacing decreased 0.5 m, the anchorage zone rock's elastic modulus increased by about 17%, the cohesive force increased by about 4% to 5%, and the angle of internal friction increased by about 3.4%.

Key words: bolt anchoring; model test; supporting parameters; anchoring effect; equivalent lithological parameters

1 研究背景

锚杆锚固技术现已被广泛应用于隧道工程中, 这种主动支护技术的支护效果也已被大量工程实践

所证实^[1-6]。锚杆对围岩的支护效果, 主要体现在增强围岩的整体性和提高围岩的刚度和抗剪强度。但是, 如何在数值分析过程中有效地反映锚杆对围岩的支护效果仍是一个需要深入讨论的问题。针对

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872179); 上海市自然科学基金项目(16ZR1423300)

作者简介: 邵凌(1992-), 男, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究。

这一问题,目前主要有以下两种解决途径:一是建立加锚后锚固区岩体新的本构关系,如朱训国等^[7]在一定的假设条件下,推导出了锚杆与注浆岩体耦合情况下的解析本构模型,并在此基础上建立了非耦合状态下锚杆的解析本构方程;杨松林等^[8]将节理岩体视为等效连续介质推导出了多参数的加锚层状岩体的本构方程。二是利用等效数值计算方法,将锚杆的锚固效果等效为施锚后锚固区岩体岩性参数的提高,如孟强等^[9]提出了圆形隧洞锚杆支护后的等效弹性模量、等效黏聚力、等效内摩擦角的表达式;马刚等^[10]通过对散粒体模型中不同围压下锚杆加固效果的研究,得到施锚后岩体初始模量提高37.4%~93.2%,内摩擦角提高13.3%~24.2%的结论;蔡小林等^[11]提出通过提高锚杆作用区围岩参数弹性模量、黏聚力和内摩擦角各40%可以较好地达到模拟锚杆控制位移作用;陈浩等^[12-13]在对锚杆支护作用的数值模拟研究中,采用对施锚区岩体的弹性模量、黏聚力、内摩擦角均提高10%来模拟锚杆加固效果。但是,通过提高一定量的围岩岩性参数并不能完全反映各种支护参数下锚杆的锚固效果。笔者在前人研究的基础上,以将军山隧道工程为背景,进行了不同支护参数条件下的隧道开挖和锚杆施作的模型试验,并采用改变施锚区岩体岩性参数的方法数值模拟了模型试验,研究了不同支护参数下锚杆锚固效果的等效数值模拟方法。

2 模型试验

为了研究不同支护参数下锚杆加固效果的等效数值模拟方法,本文首先进行了不同支护参数下的模型试验。模型试验采用力学上与原型材料相似的人工材料,按一定相似比建造出与原型相似的力学结构系统,并在该系统上施加相同的工况,借以研究原型系统的力学过程及结果。

本试验选取将军山隧道V级围岩段作为试验研究对象,配制出隧道围岩和锚杆的相似材料,模拟了隧道的开挖和锚杆支护过程。由于施锚后锚固区岩体新的力学性能不能由该试验直接测得,因此在隧道开挖和支护后继续进行超载试验,即在模拟隧道开挖支护后对模型进行逐级加载并监测模型拱顶位移收敛值。超载试验可得到拱顶位移随加载量增加的变化曲线。通过对加载过程进行数值反演分析,即可得到锚固区岩体新的力学性能。

2.1 相似比及相似材料

本次试验以将军山隧道工程为背景,隧道全长

达1400 m,最大埋深140 m,隧道断面高度为10.85 m,开挖毛跨大于16 m,因此须对实际工程进行缩尺试验。根据模型试验的基本要求,本试验选定各相似比如下:

$$C_l = C_c = C_E = 50 \quad (1)$$

$$C_\gamma = C_\varphi = C_\nu = 1 \quad (2)$$

式中: C_l 为几何相似比; C_c 为黏聚力相似比; C_E 为弹性模量相似比; C_γ 为容重相似比; C_φ 为内摩擦角相似比; C_ν 为泊松比相似比。

岩土体相似材料选用重晶石粉、粉煤灰、细砂和机油进行配比,通过大量配比试验,最终确定按重量百分比17:10:66:7配制出的材料比较符合相似材料的理论力学性能要求。岩土体原型及模型的物理力学参数见表1。锚固体由于可近似看成是受拉构件,其相似材料则通过等效抗拉刚度EA相似的方法进行模拟。经过筛选,采用直径为3 mm竹条可满足实际工程所用中空注浆锚杆的相似要求。锚固体原型及模型的物理力学参数见表2。试验时构件均用机油作胶结剂,以增加锚杆与围岩间的相互作用能力,模拟砂浆的效果。

表1 岩土体原型及模型物理力学性能

材料类型	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν	容重 γ /(kN·m ⁻³)
原型	200	29	400	0.2	20
模型	3.70	29.1	8	0.2	19.29

表2 锚杆原型及模型物理力学性能

材料类型	弹性模量 E /MPa	横截面积/ mm ²	容重 γ /(kN·m ⁻³)
原型	4000	615	27
模型	1500	28	15

2.2 试验设计

锚杆支护参数包括锚杆长度,锚杆环向间距,锚杆纵向间距,锚杆直径,锚杆布置角度等,本试验只选取了锚杆长度和锚杆环向间距这两个因素进行研究。其中锚杆长度取值选取60 mm,70 mm,80 mm和90 mm(对应实际锚杆长度为3 m,3.5 m,4 m和4.5 m),锚杆环向间距取值选取10 mm,20 mm,30 mm,40 mm和50 mm(对应实际锚杆间距为0.5 m,1 m,1.5 m,2 m和2.5 m)。将4种锚杆长度和5种锚杆环向间距进行两两组合可得20种不同试验工况。为了确定相似材料的初始岩性参数以及作为其他有锚杆组试验的对比,本试验还添加了一组无锚

杆工况试验。

2.3 试验装置

根据模型几何相似比尺 $C_l = 50$, 以及截面高和宽均采用三倍原隧道洞高的要求, 选定整个相似模型的尺寸为: 高 \times 宽 = 0.6 m \times 0.6 m。模型试验在专门制作的试验台架内进行, 由于试验尺寸定为 0.6 m \times 0.6 m \times 0.2 m (长 \times 高 \times 宽), 为了便于加工和试验, 台架尺寸制作为 0.6 m \times 0.6 m \times 0.6 m。框架由三角铁焊接而成, 四周及底部采用钢化玻璃封闭, 便于观察模型的破坏部位和破坏过程, 同时钢化玻璃能减小摩擦, 更准确地模拟隧道开挖效果。试验台架一侧钻隧道洞口, 洞口形状为直径 0.2 m 的圆, 圆心距顶部 0.35 m。此洞口用于模型试验隧道的开挖。隧道开挖后按施工设计图布置锚杆, 洞周方向锚杆以隧道竖向对称轴对称布置, 洞纵长方向锚杆为梅花形布置如图 1。

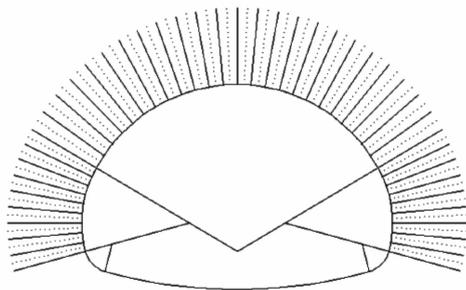


图1 锚杆布置图

2.4 试验过程及数据监测

模拟隧道开挖及支护的模型试验分为“先开挖后加载”和“先加载后开挖”两种, 在这两种不同的试验过程中, 围岩的应力场几乎一致, 但位移场是不同的。本试验主要研究开挖支护后的锚杆锚固效果, 因此“先开挖后加载”试验加载后的洞周应变更符合试验要求。试验过程主要分为两部分, 第一部分为模拟隧道开挖及支护, 即在制备好的相似材料模型上进行一定尺寸的隧道模拟开挖, 然后将相似锚杆材料安放至施锚区; 第二部分为试验加载, 加载为分级加载, 每级加载为 0.2 kN, 加载平面为试样上表面。

试验中监测数据为隧道开挖处的拱顶位移, 将百分表安装在已开挖隧洞内的拱顶处, 每次加载后静置 5 min, 待拱顶位移稳定后记录百分表读数。

3 试验结果及分析

图 2 为不同锚杆支护参数下的均布力 - 拱顶位移关系图, 其中均布力是由作用在模型上表面的加

载量转化而来。从图 2 可以看出, 在不同的支护参数下, 锚杆的锚固效果都不相同。随着锚杆间距的增大, 拱顶位移逐渐增大, 锚固效果逐渐减小, 当锚杆间距为 50 mm 时, 均布力 - 拱顶位移曲线与无锚杆组曲线十分接近, 说明此时锚固效果几乎为零。同样, 随着锚杆长度的减小, 拱顶位移逐渐增大, 锚固效果也在逐渐减小。

图 2 (a) ~ 2 (d) 中锚杆长度分别 90 mm、80 mm、70 mm 和 60 mm, 在图 2 (a) 中, 当均布力为 6 kPa 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆间距为 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm 组的拱顶位移分别减小了 82.1%, 69.9%, 65.5%, 37.5%, 30.3%; 在图 2 (b) 中, 当均布力为 6 kPa 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆间距为 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm 组的拱顶位移分别减小了 77.4%, 60.9%, 48.3%, 32.4%, 25.1%; 在图 2 (c) 中, 当均布力为 6 kPa 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆间距为 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm 组的拱顶位移分别减小了 74.6%, 57.7%, 47%, 29.8%, 19%; 在图 2 (d) 中, 当均布力为 6 kPa 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆间距为 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm 组的拱顶位移分别减小了 71.4%, 51.4%, 43.3%, 27.7%, 12.9%。可以看出, 锚杆锚固效果会受锚杆间距的影响, 在一定的均布力下, 随着锚杆间距的增加, 拱顶位移的增加量在逐渐减小。这主要是因为锚杆的加固作用体现为将破碎的岩土体串联夹持在一起, 防止其相对转动、滑移, 当锚杆间距大过一定的范围, 锚杆与锚杆间的破碎岩土体单位数量增多, 这种串联夹持的作用效果将大大减小。

另外, 在所施加的均布力都为 6 kPa 的情况下, 对比分析图 2 中拱顶位移随锚杆长度的变化可以得到: 当锚杆间距为 10 mm 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆长度为 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm 组的拱顶位移分别减小了 71.4%, 74.5%, 77.4%, 82%; 当锚杆间距为 20 mm 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆长度为 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm 组的拱顶位移分别减小了 51.4%, 57.7%, 60.9%, 69.8%; 当锚杆间距为 30 mm 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆长度为 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm 组的拱顶位移分别减小了 43.4%, 47%, 48.3%, 55.4%; 当锚杆间距为 40 mm 时, 与无锚杆组试验相比, 锚杆长度为 60 mm, 70 mm, 80 mm, 90 mm 组的拱顶位移分别减小了 27.7%, 29.8%, 32.4%, 37.4%; 当锚杆间距为 50 mm 时, 分别减小了 12.9%, 19%, 25.1%,

30.3%。由此可知锚杆锚固效果也会受锚杆长度的影响,这是由于锚杆穿过的围岩依次为变形区、过渡区和稳定区,锚杆在稳定区锚固的长度越长,锚杆对

围岩的变形约束效果越好。对比锚杆长度和锚杆间距对锚杆锚固效果的影响情况,可以看出锚杆间距比锚杆长度对拱顶位移的影响大。

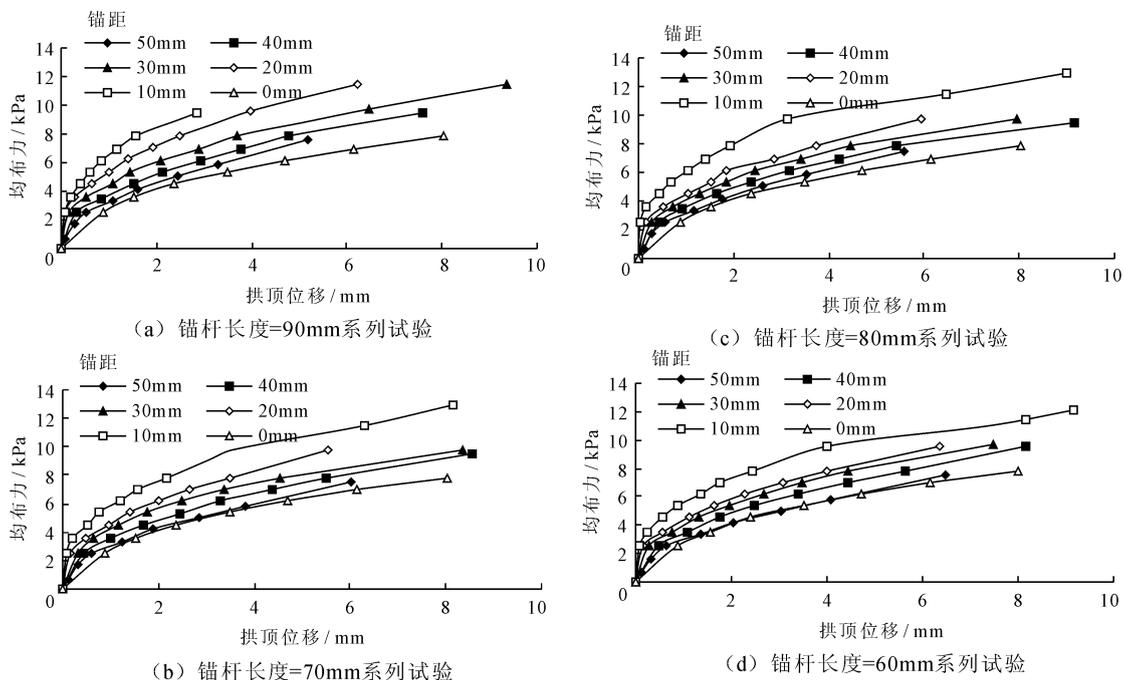


图2 不同锚杆长度、锚距条件下,加载对拱坝位移的影响曲线

4 数值模拟反演

在锚杆的作用下,岩体得以挤压加固,表面的裂隙闭合,抑制了洞周围岩的变形,提高了围岩的整体性和刚度,因此这一锚固效果在数值模拟中可以通过提高锚固区岩体的参数来实现。通过对模型试验得到的不同支护参数下的拱顶位移变化曲线进行数值模拟反演,可以得到各支护参数下施锚后锚固区的等效材料参数。

4.1 计算模型

利用数值分析软件 ABAQUS 对所做模型试验进行数值模拟,计算模型与模型试验尺寸一致,如图 3 所示,为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 。所施加的边界条件为前、后、左、右面均只约束法向位移,模型底面则约束 x, y, z 三个方向的位移,该边界条件能很好反映试验真实边界条件。

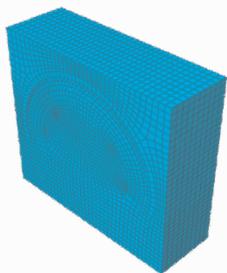


图3 数值计算模型

计算所采用的单元类型为 C3D8 实体单元,岩土体所用本构模型为 M-C 模型。

4.2 计算参数

无锚杆组试验中,在不加模拟锚杆的情况下,土体开挖后的承载力比较低,荷载对拱顶的位移影响比较大,当加到第 7 次荷载时,拱顶便出现了塌方现象,数值模拟情况与实际情况相一致。数值模拟结果与试验监测数据的对比如图 4,模拟过程中各参数的取值为:泊松比 $\nu = 0.2$,弹性模量 $E = 8.0\text{ MPa}$,黏聚力 $c = 3.70\text{ kPa}$,剪切角 $= 29.1^\circ$ 。数值模拟与试验结果基本吻合,说明该组数值模拟反演所得参数符合实际情况。

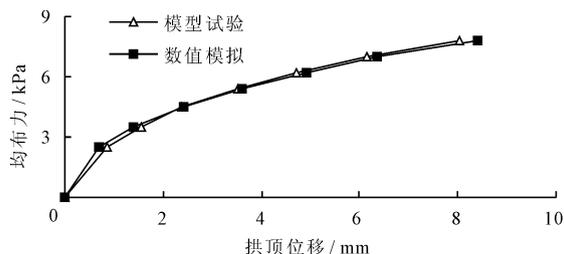


图4 荷载对拱顶位移的影响

数值模拟模型试验中,锚杆间距为 50 mm 的 4 组试验结果与无锚杆十分接近,因此只对锚杆间距分别为 10 mm 、 20 mm 、 30 mm 和 40 mm 以及锚杆长

度分别为60 mm、70 mm、80 mm和90 mm的16组试验进行数值模拟。每组试验的材料参数(弹性模量、黏聚力和内摩擦角)皆是经过多次试算后,取多种组合模拟所得该工况的最优解。

4.3 弹性模量、黏聚力和内摩擦角

表3为数值模拟16组模型试验反演所得锚固后锚固区材料参数,通过表中数据可以看出,随着锚杆间距的增大,弹性模量、黏聚力和剪切角均在减小;随着锚杆长度的增加,弹性模量和黏聚力也逐渐增大,剪切角的变化却不明显。

通过数据分析可知:(1)无锚杆组的弹性模量为8.0 MPa,黏聚力为3.70 kPa,内摩擦角为29.1°;锚杆长度为60 mm,锚杆间距为40 mm组的弹性模量为8.6 MPa,黏聚力为4.07 kPa,内摩擦角为32°;锚杆长度为90 mm,锚杆间距为10 mm组的弹性模量为13.0 MPa,黏聚力为4.72 kPa,内摩擦角为35°。因此在数值分析中,锚固后锚固区岩土体的弹性模量提高了8%~63%,黏聚力提高了10%~28%,内摩擦角提高了10%~20%。

(2)锚杆长度每增加10 mm(实际锚杆长度增加0.5 m),弹性模量增加3%左右,黏聚力增加0.8%左右,内摩擦角几乎不改变。

表3 数值模拟材料参数

组别	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 E/MPa
61	4.63	35	12.0
62	4.40	34	10.9
63	4.22	33	9.8
64	4.07	32	8.6
71	4.65	35	12.4
72	4.43	34	11.0
73	4.24	33	9.9
74	4.09	32	8.7
81	4.68	35	12.7
82	4.46	34	11.5
83	4.27	33	10.1
84	4.11	32	8.9
91	4.72	35	13.0
92	4.49	34	11.8
93	4.30	33	10.4
94	4.15	32	9.0

注:表中组别61表示锚杆长度为60 mm,锚杆间距为10 mm组试验,其他组别依此排序。

(3)锚杆间距每减小10 mm(实际锚杆间距减小0.5 m),弹性模量增加17%,黏聚力增加4%~5%,内摩擦角增加3.4%。

以上数据结论可以说明,锚固后锚固区岩体的弹性模量、黏聚力和内摩擦角均得到了提高。从数值模拟中也可以看出,锚杆对围岩的加固效果,主要体现在增强围岩的整体性和提高围岩的刚度和抗剪强度。

5 结论

以将军山隧道为背景,采用模型试验和数值模拟相结合的分析方法,研究了不同支护参数下的锚杆锚固效果,得出以下结论:

(1)锚杆对围岩的加固效果,主要体现在增强围岩的整体性和提高围岩的刚度和抗剪强度。因此,在数值模拟中,锚杆的锚固效果可以等效为对锚固区岩体岩性参数的提高。

(2)数值模拟中锚固后围岩的弹性模量可提高8%~63%,黏聚力可提高10%~28%,内摩擦角可提高10%~20%。

(3)不同支护参数下,锚杆的锚固效果不同,在数值模拟中的等效岩性参数也不同。锚杆长度每增加0.5 m,弹性模量增加约3%,黏聚力增加约0.8%,内摩擦角几乎不变;锚杆间距每减小0.5 m,弹性模量增加约17%,黏聚力增加4%~5%,内摩擦角增加约3.4%。

(4)数值分析中该方法能较好地模拟锚杆对围岩的加固效果,其计算结果可以作为隧道支护和施工设计的参考依据。

参考文献:

- [1] 朱浮声,郑雨天. 全长粘结式锚杆的加固作用分析[J]. 岩石力学与工程学报,1996,15(4):333-337.
- [2] 张向阳,顾金才,沈俊,等. 全长粘结式锚索对软岩洞室的加固效应研究[J]. 岩土力学,2006,27(2):294-298.
- [3] 李新平,宋桂红,刘巍,等. 岩体隧道锚固作用分析[J]. 岩土力学,2005,26(s2):131-135.
- [4] 姚显春,李宁,陈蕴生. 隧洞中全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(13):2272-2276.
- [5] 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):1430-1436.

(下转第216页)

少。在土体不发生振动的情况下,不同的固结应力比土体静强度改变较大,这与吴怀忠等^[14]针对不同砂砾料的动强度大小随着固结应力比增大而逐渐递增的结论基本吻合。

(3)由于影响砂土液化强度的因素很多,其中围压、振动频率、相对密度、细砾含量、固结应力比等为主要影响因素。本文只采用了控制变量法进行分析,而这些因素之间的相互影响没有给出定性分析,因此在以后的研究中可采用正交试验设计方案对含砾砂土进行试验,以便得出更加准确的结论。

参考文献:

- [1] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 1-50.
- [2] 凌华, 傅华, 蔡正银, 等. 坝料动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1920-1924.
- [3] 洪小星, 陈国兴, 孙田, 等. 砂砾土动力特性的室内试验研究进展[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 47-53.
- [4] 刘凯, 张远芳. 饱和含细砾砂孔隙水压力特性三轴试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 19: 283-287.
- [5] 陈宇龙, 张宇宁. 非塑性细粒对饱和砂土液化特性影响

的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 507-516.

- [6] 王海东, 陈曦, 李建文, 等. 大应变作用下含水率对非饱和砂土动力特性影响的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(1): 193-199.
- [7] 张凌凯. 新疆头屯河流域饱和砂砾土动三轴试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(3): 260-264.
- [8] 曹振中. 汶川地震液化特性及砂砾土液化预测方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- [9] 曹振中, 刘荟达, 袁晓铭. 砾性土液化特性与机理[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1165-1174.
- [10] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [11] 陈国兴, 孙田, 王炳辉, 等. 循环荷载作用下饱和砂砾土的破坏机理与动强度[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2140-2148.
- [12] 王炳辉, 陈国兴, 孙田, 等. 砂砾土抗液化强度的小型土箱振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2094-2100.
- [13] 杨永香, 贾景超, 黄志全. 饱和非纯净砂土液化特性研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2012, 33(2): 111-115.
- [14] 吴怀忠, 王汝恒. 围压和固结应力比对砂卵石土动力特性的影响[J]. 山西建筑, 2006, 32(7): 11-12.

(上接第 211 页)

- [6] 题正义, 王卓识, 王振, 等. 采动影响下松软煤巷锚杆支护技术研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 176-179.
- [7] 朱训国, 杨庆, 栾茂田. 岩体锚固效应及锚杆的解析本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 527-532.
- [8] 杨松林, 朱焕春, 刘祖德. 加锚层状岩体的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 427-430.
- [9] 孟强, 赵洪波, 茹忠亮. 锚杆支护圆形隧洞的等效强度参数及可靠度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊): 437-442.
- [10] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 锚杆加固散粒体的作用机制

研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1577-1584.

- [11] 蔡小林, 赵德安. 隧道计算中提高围岩参数模拟锚杆作用的探讨[J]. 兰州交通大学学报, 2004, 23(1): 10-14.
- [12] 陈浩, 任伟中, 李丹, 等. 深埋隧道锚杆支护作用的数值模拟与模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(s1): 719-724.
- [13] 陈浩, 任伟中, 舒中根, 等. 不同支护条件下锚杆支护作用的模型试验研究与数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(s1): 277-282.