

# 钻孔灌注型土钉抗拔性能的室内模型试验研究

苏立君<sup>1</sup>, 张宜健<sup>1</sup>, 殷建华<sup>2</sup>, 刘漫博<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055;  
2. 香港理工大学, 香港 九龙 红磡; 3. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 介绍了一种新型的土钉抗拔试验装置, 对抗拔试验箱的设计、传感器布置以及实验步骤等进行了详细地阐述。试验主要研究了上覆土压力、土样饱和度和灌浆压力对土钉抗拔性能及抗拔强度的影响。试验结果表明钻孔灌注型土钉的抗拔强度与上覆土压力基本无关; 随着土样饱和度的增加, 土钉的抗拔强度呈先增加后减小的模式; 土钉抗拔强度受灌浆压力影响很大, 随灌浆压力的增加而显著增大。

**关键词:** 土钉; 抗拔强度; 完全风化花岗岩

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)03-0342-05

土钉是一种用于稳定土体的原位加筋技术, 并且在过去的 30 年里由于其技术和经济上的优点而广泛应用于世界各地。在我国, 土钉支护技术 1980 年首次应用于山西柳湾煤矿的边坡支护工程<sup>[1]</sup>, 之后开始在全国范围内推广使用。

钉-土界面的抗剪强度, 亦即土钉的抗拔强度是设计土钉支护体系的一个重要参数。影响钉-土界面的抗剪强度的因素有很多, 比如压力条件、土壤性质以及土钉表面的状况。在土钉的设计中, 钉-土界面的抗剪强度一般假定为与土壤的抗剪强度相同, 通常由现场施工阶段抗拔试验来验证<sup>[2]</sup>。但是通过现场验证试验得到的土钉界面抗剪强度参数依然有相当多的不确定性。例如, 现场土钉抗拔试验要受到实际场地条件的影响, 而这些场地局部变化较大, 因此, 在很多情况下测试的结果是离散的, 即便是同一位置相邻的两个测试土钉也是如此; 另外一个问题是, 现场抗拔实验通常没有设计条件严格(比如土壤不饱和), 因此现场抗拔强度可能并不代表最不利的场地条件。因而, 在可控条件下进行的室内土钉抗拔试验能够使我们更好地理解 and 更准确地评价不同场地条件下的抗拔强度。

鉴于土钉抗拔强度的重要性, 很多学者都对这一参数进行过研究<sup>[3-10]</sup>。研究发现, 抗拔强度取决于土体强度、土钉的刚度和粗糙度以及土壤的剪胀性大小。饱和条件下的土钉抗拔强度要比最佳含水量土样中测得的抗拔强度小很多。然而上覆土压力对土钉抗拔强度的影响目前还存在争议。饱和度和灌浆压力对土钉抗拔强度的影响还没有得到很好的研究。为了系统的研究上覆土压力、饱和度和灌浆压力对土钉抗拔强度的影响, 作者专门设计了两个土钉抗拔试验箱, 并利用重塑的完全风化花岗岩土(CDG)进行了一系列的土钉抗拔实验。在每一个抗拔试验箱里都装有土压力盒、吸力计和孔隙水压力传感器等, 用来检测土钉周围土体中的应力变化情况。

## 1 材料的物理力学性质

在试验中使用的是完全风化的花岗岩(CDG)土。土的颗粒级配是由湿筛法和比重计法测定的。CDG 土呈棕黄色, 属于粘质砂土, 含 9.33%砾石、62.51%的沙子、24.97%的淤泥、3.19%的黏土。其塑限和液限分别是 27.3%和 35.5%, 由标准击实试验获得的干密度是  $1.668 \text{ Mg/m}^3$ , 最佳含水率为

收稿日期: 2010-09-29 修改稿日期: 2011-04-12

基金项目: 西安建筑科技大学基础研究基金(JC0702); 人才研究基金(RC0709)

作者简介: 苏立君(1976-), 男, 辽宁清原人, 博士, 副教授, 主要研究方向为岩土的本构关系及土工试验技术。

19%, 比重是 2.645.

试验中所用的水泥浆的水灰比是 0.42, 水泥试块的干密度是  $1.886\text{ mg/m}^3$ . 水泥式样 5 d 单轴抗压强度平均约为 32 MPa, 割线杨氏模量和相应的泊松比分别是 12.59 GPa 和 0.21, 土样和水泥的性质见表 1.

2 试验装置及试验过程

2.1 抗拔试验箱和相关设备

抗拔试验箱的内部尺寸为长 1 000 mm、宽 600 mm、高为 830 mm. 抗拔试验箱顶盖的下方固定了一块橡胶膜, 橡胶隔膜与顶盖之间形成了一个液体室, 里面充满蒸馏水以提供顶部土样表面所需要的竖向压力. 为了使土样表面变形均匀, 在土样上表面放置了一块木板. 土样大小为  $600\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 1\,000\text{ mm}$ , 试验箱的上方留出了 30 mm 的空间用于放置橡胶膜和木板. 抗拔试验箱及相关传感器布置如图 1 所示.

表 1 CDG 土样和水泥试块的物理力学参数

Tab. 1 Properties of the CDG fill and cement grout

CDG		
Specific gravity $G_s$		2.645
Maximum dry density $\rho_{dmax}$	mg/ m <sup>3</sup>	1.668
Optimum moisture content	%	19
Plastic limit $\omega_p$	%	27.3
Liquid limit $\omega_l$	%	35.5
Cement grout		
Density $\rho_d$	mg/ m <sup>3</sup>	1.886
Uniaxial compression strength $\sigma_c$	MPa	32.09
Tangent Young' s Modulus $E_{30}$	GPa	12.59
Poisson' s ratio $\nu$		0.21

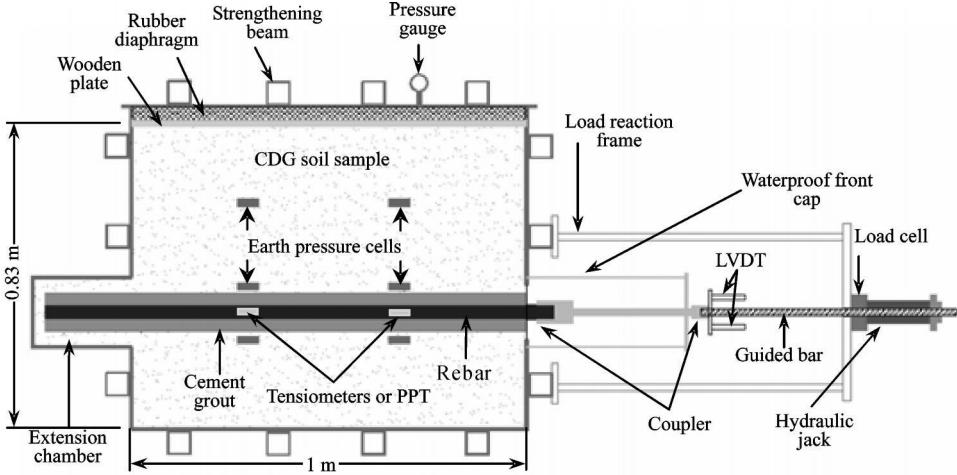


图 1 抗拔试验箱及传感器 布置图

Fig. 1 Layout of transducers and pull-out equipments

抗拔试验箱要满足两个基本要求, 即在试验荷载下保持其刚度和在饱和状态下的水密性. 为了达到这些目的, 抗拔试验箱由 8 mm 厚的高强度钢板加工而成, 且外围焊接钢管加固. 压力室橡胶膜是由框型铁板通过螺丝固定在顶盖上的. 顶盖上连接有两个阀门, 一个用来向压力室充水, 另外一个用来排气. 试验箱顶部焊接了 4 块约 18 mm 厚的钢板作为加劲边来固定顶盖. 在试验过程中顶盖用 M16 螺栓固定到加劲边上.

抗拔试验箱的末端设置了一个长为 250 mm、直径 180 mm (内部尺寸) 的延长筒以容纳土钉的延长部分. 该部分的作用是为了确保土钉在整个拔出过程中都能够与试验土体相接触, 从而土钉尾部不会留下空洞, 使得钉-土接触面受力比较均匀. 在抗拔试验箱的前面安了一个密封的压力室覆盖土钉端部, 以防止在饱和试验中试验箱在反压作用下而漏水.

在箱体前面板和侧面板共打有 10 个孔, 孔径均为 8 mm, 作为土压力和吸力 (或空隙水压力) 传感器导线的出口. 孔口用不透水螺栓密封. 不透水螺栓是由 2 部分组成的空心螺栓, 中间用橡胶圈来密封穿过它的导线. 在试验箱的每个侧面板上还留有施加反压饱和土体以及排气的孔道.

土钉孔用电动钻机成孔, 直径 100 mm. 钻机的上下两端用螺栓分别固定在地板和试验箱上, 以确保钻孔时能准确定位并保持钻筒水平. 一个土样压出机被改装为灌浆泵用来灌浆. 灌浆时通过压土机的马达和装在框架上的活塞将有机玻璃圆筒里的水泥砂浆泵送至钻孔里. 试验箱及钻孔和抗拔装置见图 2.

2.2 试验步骤

(1)将原状土击碎并重新搅拌均匀, 然后按 95%的击实比分层压实到试验箱里. 将试验按土样饱和度分为几个系列, 对每个系列的试验, 都需要在击实前给土样配水以使其达到预期的饱和度和. 在三个不同的高度上, 即土钉孔上下各 40 mm 处以及土壤表面下 200 mm 处, 埋置 6 个土压力盒.

(2)土样上的上覆土压力是利用顶盖和橡胶隔膜构成的液室以水压形式加载的. 在加压过程中, 测量了进出液室的水的体积, 而水体积的变化即代表了土样体积的变化.

(3)加压大约 24 h 之后, 土样的变形基本上趋于稳定. 然后在土壤中钻一个直径 100 mm 的孔, 将一根带有 4 个应变片的螺纹钢放入孔中. 螺纹钢在孔中与洞同轴放置, 并将其端部固定在抗拔试验箱的前端. 钻孔最后用水灰比为 0.42 的水泥净浆灌注. 对于饱和试验, 在水泥浆硬化后对土样注水并加反压使其饱和.

(4)养护 5 d 之后, 立方体水泥试块抗压强度可达到约 30 MPa, 即可使用千斤顶将土钉拔出.

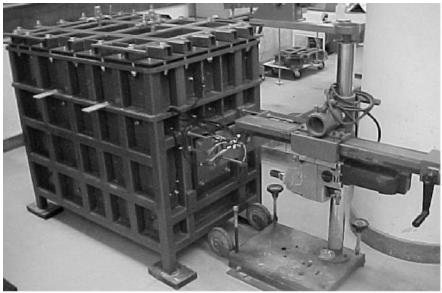
3 试验结果与讨论

在不同的上覆土压力 and 不同饱和度下, 进行了一系列的抗拔试验. 上覆土压力范围从 40 kPa 到 300 kPa, 土壤的饱和度分别为 38%、50%、75%和 98%. 在饱和度为 38%时, 测试得到土壤的平均吸力为 87 kPa, 在饱和度为 50%和 75%时土壤的平均吸力为 68 kPa 和 6 kPa. 在饱和试验中, 在施加反压的情况下, 饱和度可以达到 98%. 下文将对上覆土压力和饱和度对土钉抗拔强度的影响进行分析和讨论. 为了研究灌浆压力对土钉抗拔强度的影响, 在 50%的饱和度下进行了不同灌浆压力的抗拔试验. 灌浆压力分别为 80 kPa 和 130 kPa, 上覆土压力分别为 80 kPa 和 200 kPa.

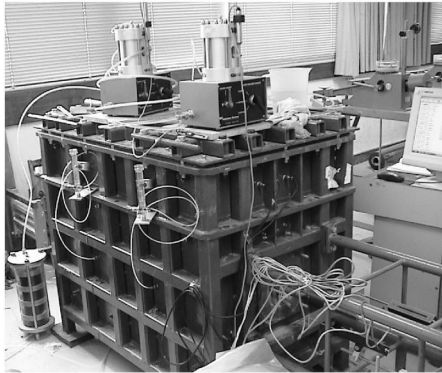
3.1 上覆土压力的影响

图 3 反映了饱和度为 38%和 75%时不同上覆土压力下土钉平均抗拔应力与位移之间的关系. 平均抗拔应力是将抗拔力除以土钉表面积计算得到的. 由图 2 可知, 当饱和度为 38%时, 在不同上覆土压力作用下抗拔剪切强度的峰值基本不变, 而当于饱和度为 75%时, 在不同上覆土压力作用下, 抗拔剪切强度峰值则变化很大. 饱和度为 75%时, 钻孔的钻进过程很困难, 而且经常产生剧烈震动. 钻头的震动对孔壁产生较大扰动, 从而导致孔壁粗糙度发生变化, 从而导致试验结果比较分散.

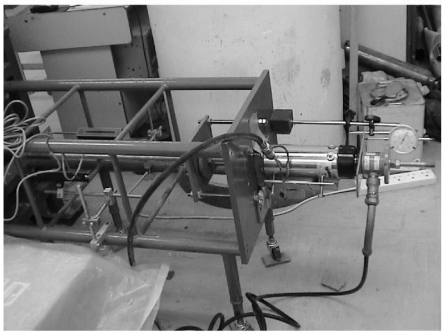
试验结果表明, 抗拔强度与上覆土压力的大小并没有明显的关系. 不同上覆土压力下抗拔强度的变化主要是由于一些扰动因素导致的, 比如, 拔出力偏离土钉轴线、土壤中应力条件发生变化、土钉表面的粗糙程度以及钻孔导致的钻孔表面的扰动等等.



(a) Pull-out box with drilling machine



(b) Box with instrumentation



(c) Pullout device

图 2 试验箱及抗拔装置

Fig. 2 Pull-out box and related device

3.2 土样饱和度的影响

图 4 所示的是在上覆土压力为 300 kPa, 不同饱和度下, 平均抗拔应力与拔出位移之间的关系. 从图中可以看出, 在饱和度较高时, 峰值后抗拔应力一般下降较快. 与之相关的一个现象是, 当湿度逐渐增大时, 剪切面会从钉-土界面逐渐向土体内部移动. 饱和度为 38% 时, 破坏主要发生在钉-土界面上, 说明此时钉-土界面剪切强度要小于土钉周围的土壤的强度. 随着土壤饱和度从 50% 增加到 98% 时, 可以看到土钉表面附土有明显的增加. 表明随着含水量的增加, 剪切面将发生移动, 这也反映了随着含水量的增加钉-土界面及周围土体本身之间强度关系的变化. 就抗拔应力-位移曲线而言, 可以看出随着土壤饱和度的变化, 土钉的平均抗拔应力-位移曲线也在渐渐变化, 即从开始表现出的应变硬化特征到最后明显应变软化特征.

从图 4 可以看出, 饱和度为 50% 和 75% 时的峰值抗拔强度比处于饱和状态和饱和度为 38% 时要大. 对于饱和度为 75% 的土样, 含水量基本接近最佳含水量. 饱和度为 75% 时的峰值抗拔强度是饱和状态下峰值抗拔强度的 2 倍. 峰值抗拔强度对应的拔出位移随着饱和度的下降而上升, 饱和度为 75% 时所测得位移是饱和状态的 2 倍. 其他上覆土压力的试验也观察到类似的现象. 这些结果与 1991 年 CLOUTERRE<sup>[11]</sup> 的研究结果类似, CLOUTERRE 的研究结果表明当含水量从饱和状态到最佳含水量时最大抗拔力会增大 2 倍, 并且与最大力相对应的位移也增大 3 倍. 文献[4]和[9]的研究也发现饱和度由最佳含水量增加到饱和状态的过程中抗拔强度有所下降. 文献[9]的作者认为这是因为土壤粘聚力随饱和度的增加而下降.

饱和度为 75% 时测得的峰值抗拔强度是饱和状态下的 2 倍. 对于有些饱和度为 50% 的土样, 所得的抗拔强度甚至更高. 这就表明饱和度对土钉抗拔强度的影响是非常重要的, 故在土钉系统设计时是必须认真考虑的.

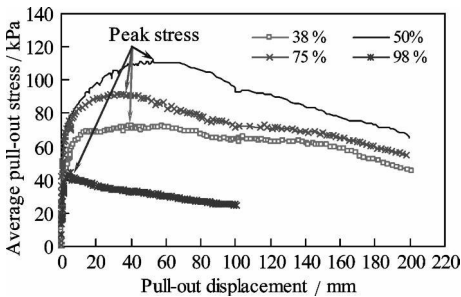


图 4 上覆土压力为 300 kPa 时不同饱和度下的平均抗拔应力-拔出位移关系曲线

Fig. 4 Average pull-out stress vs displacement for different degrees of saturation under the overburden pressure of 300 kPa

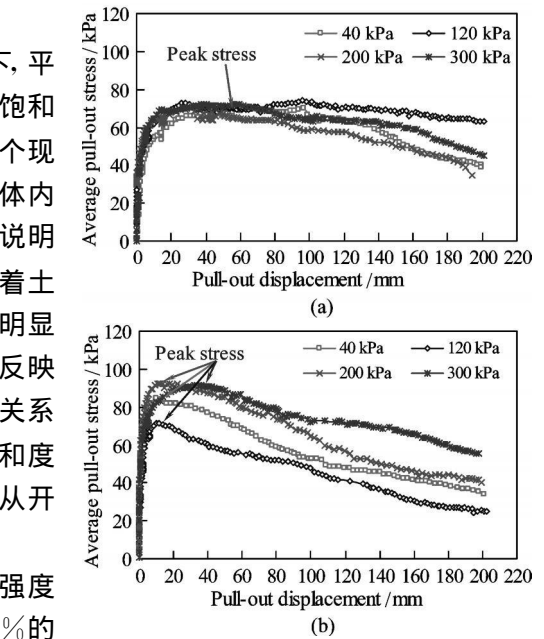


图 3 饱和度为 (a) 38% 和 (b) 75% 时的不同上覆压力下的平均抗拔应力和拔出位移关系曲线

Fig. 3 Relationship between the average pull-out stress and displacement for degrees of saturation of (a) 38% and (b) 75%

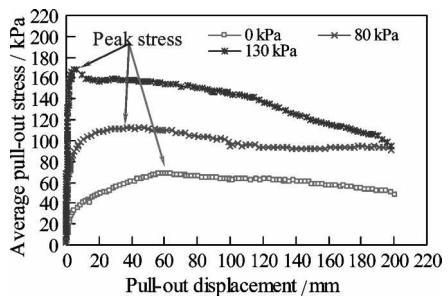


图 5 上覆土压力为 200 kPa 时不同灌浆压力下的平均抗拔应力-拔出位移关系曲线

Fig. 5 Average pullout stress vs. displacement for tests with different grouting pressure under the overburden pressure of 200 kPa

3.3 灌浆压力的影响

图 5 显示的是在上覆土压力均为 200 kPa、土壤饱和度为 50% 时, 灌浆压力 GP 分别为 0 kPa、80 kPa、130 kPa 时的平均抗拔强度与拔出位移之间的关系曲线. 很明显平均抗拔强度随着灌浆压力的增

加而增加。灌浆压力为 130 kPa 的实验中, 曲线显示出明显的波峰以及峰值后的软化过程; 灌浆压力为 80 kPa 的实验中曲线显示出一定的延性, 而没有十分明显的抗拔强度峰值。灌浆压力为 0 时, 曲线也显示了一定得延性, 只是抗拔强度值低了很多。不同灌浆压力下不同的荷载位移曲线反映了在试验中灌浆压力对周围土体和钉-土界面的影响。

## 4 结 论

本文介绍了一个新型的土钉抗拔试验箱, 对其设计、加工以及安装等都做了简要介绍。文中对试验步骤以及典型的结果进行了介绍、分析和讨论。下面是从试验结果中得出的主要结论:

(1) 对于完全风化花岗岩这类自稳能力较好, 剪胀性较大的土中的钻孔灌注型土钉, 抗拔强度与上覆土压力作用没有明显的关系, 换句话说, 上覆土压力对土钉抗拔强度几乎没有影响。对于软土, 由于土钉灌注后孔周土体还会有较大变形, 应力会有所恢复, 抗拔强度会表现出与上覆压力有一定关系。

(2) 随着饱和度的增加, 抗拔强度呈现增加后减小的趋势, 且不同饱和度抗拔强度相差很大。说明饱和度对土钉抗拔强度的影响是非常重要的, 因而在土钉系统设计时应认真考虑。

(3) 土钉抗拔强度随着灌浆压力增大而显著增大, 说明压力灌浆对提高土钉抗拔强度效果显著。

## 参考文献 References

- [ 1 ] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
CHEN Zao-yuan, CUI Jing-hao. Application of soil nailing in foundation excavation supporting[ M ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [ 2 ] 曾宪明, 黄久松, 王作民, 等. 土钉支护设计与施工手册[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
ZENG Xian-ming, HUANG Jiu-song, WANG Zuo-min, et al. Manual for soil nailing design and construction[ M ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.
- [ 3 ] CHANG K T, MILLIGAN G W E. Effects of the transition zone in a nailed wall model test[ C ] //Proceeding of Earth Reinforcement, Ochiai, Yasufuku & Omie (eds.), Balkema, Rotterdam, 1996: 333-338.
- [ 4 ] CHU L M, YIN J H. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests[ J ]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 2005, 131(9): 1097-1107.
- [ 5 ] CHU L M, YIN J H. A laboratory device to test the pull-out behavior of soil nails[ J ]. Geotechnical testing journal, 2005, 28(5): 1-15.
- [ 6 ] HONG Y S, WU C S, YANG S H. Pull-out resistance of single and double nails in a model sandbox[ J ]. Canadian geotechnical journal, 2003, 40(5): 1039-1047.
- [ 7 ] MILLIGAN G W E, CHANG K T, MORRIS J D. Pull-out resistance of soil nails in sand and clay[ C ] //Proc. 3rd Int. Conf. On Ground Improvement Geosystems, London, United Kingdom, 1997: 414-422.
- [ 8 ] MILLIGAN G W E, TEIK. The pull-out resistance of model soil nails[ J ]. Journal of soils and foundations, 1998, 38(2): 179-190.
- [ 9 ] PRADHAN B, YUE Z Q, THAM L G, LEE C F. Laboratory study of soil nail pull-out strength in loosely compacted silty and gravelly sand fills[ C ] //12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 39th U.S. Rock Mechanics Symposium, Germany, Verlag Gluckauf Essen, 2003: 2139-2146.
- [ 10 ] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁. 型钢混凝土异形柱的受剪机理及承载力影响因素分析[ J ]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 450-456.  
CHEN Zong-ping, XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie. Analysis on the mechanism and shearing capacity influence factors of steel reinforced concrete special-shaped column[ J ]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 450-456.
- [ 11 ] PLUMELLE C, SCHLOSSER F, DELAGEP, et al. French national project on soil nailing; CLOUTERRE[ C ] //Design and performance of Earth Retaining Structures. Geotechnical Special Publication, No. 25; New York, 1990: 660-675.

(下转第 366 页)

the joint and internal force, the greatness of load, and the difficulty of loading. Meanwhile, the finite element model is generated to inspect the performance of the beam-column joint under the test loads for verification. Through comparisons of test results with FEM results, properties and the load transfer mechanism of the ring-stiffened beam-column joint are analyzed. It is verified that the joint is reliable under 1.3 times of the design load. Due to the effect of large-cantilevered beams, the upper end of the CFT column is subjected to the eccentric compression. For this reason, the strength of the upper column should be enhanced in practice. The intersection of the CFT column and the ring stiffeners is subjected to high tensile stress, which can result in the failure in this region. According to FEM results, stress on the inner ring stiffeners is low. Therefore, inner stiffener exerts a limited impact on the mechanism of the joint.

**Key words:** *large cantilever; concrete filled steel tube; beam-column joint; load transfer mechanism*

**Biography:** WANG Fei, Candidate for Ph. D., Shanghai 20092, P. R. China. Tel: 0086-13636687804, E-mail: flywang007@126.com

(上接第 346 页)

## Lab physical modeling investigation on the pull-out resistance of grouted soil nail

SU Li-jun<sup>1</sup>, ZHANG Yi-jian<sup>1</sup>, YIN Jian-hua<sup>2</sup>, LIU Man-bo<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XA UAT), Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. The Hong Kong Polytech. Univ., Hung Hom Kowloon Hong Kong, China; 3. School of Metallurgical Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract** An innovative laboratory pull-out box is introduced in this paper. The design of the pull-out box, instrumentations and test procedures are described in detail. Parameters that influence the pull-out behavior and pull-out resistance of soil nails such as overburden pressure, soil degree of saturation and grouting pressure were investigated in the tests. Test results showed that the pull-out resistance of a soil nail was not directly related to the overburden soil pressure. With the increase in soil degree of saturation, the pull-out resistance firstly increased and then decreased and the soil nail pull-out resistance increased significantly with the increase in grouting pressure.

**Key words:** *soil nail; soil nail pull-out resistance; CDG*