

# 兰州地区红砂岩工程物理特性及就地利用研究

朱武权<sup>1</sup>, 蔡全辉<sup>1</sup>, 杨玉艳<sup>1</sup>, 张宁<sup>1</sup>, 曹程明<sup>2</sup>, 吴平<sup>1</sup>

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃中建市政工程勘察设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 随着兰州城区不断北拓和地铁、地下广场等地下工程的大力建设, 兰州地区红砂岩的利用成为工程建设和场地开发关注的重要问题之一。以兰州地区红砂岩的工程物理特性为主要研究对象, 通过大量室内试验分析发现兰州地区红砂岩单轴抗压强度低, 易软化, 易崩解, 开挖后呈砂状, 粒径较均匀, 级配不良, 在填方工程中建议按无黏性砂土对待。在工程物理特性研究的基础上, 探究了兰州地区红砂岩的压实特性, 提出了掺黏土加低能级强夯的压实工艺, 在城市道路高填方路基工程中成功应用, 为兰州地区红砂岩的就地利用提供了应用思路和工程借鉴。

**关键词:** 红砂岩; 工程物理特性; 低能级压实; 就地利用

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2025)05-0320-05

## Research on Engineering Physical Characteristics and In-situ Utilization of Red Sandstone in Lanzhou Area

ZHU Wuquan<sup>1</sup>, CAI Quanhui<sup>1</sup>, YANG Yuyan<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, CAO Chengming<sup>2</sup>, WU Ping<sup>1</sup>

(1. Northwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. Gansu CSCEC Municipal Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** With the continuous north expansion of urban area and the construction of underground projects such as subway and underground square in Lanzhou, the utilization of red sandstone in the area of Lanzhou becomes one of the important issues for attention in the engineering construction and site development. Taking engineering physical characteristics of red sandstone in the area of Lanzhou as the main research object, through a large quantity of laboratory tests and analysis, it is found that the red sandstone in the area of Lanzhou has the characteristics of low uniaxial compressive strength, easy to soften, easy to disintegrate, sand state after excavation, uniform particle size and poor grading. It is recommended to be treated as non-cohesive sandy soil in the fill project. On the basis of studying the engineering physical characteristics, the compaction properties of red sandstone in Lanzhou are explored. The compaction process of mixing clay plus low-level dynamic compaction is proposed, which has been successfully applied in the high-fill roadbed projects of urban areas, and provides the application insights and engineering references for the in-situ utilization of red sandstone in the area of Lanzhou.

**Keywords:** red sandstone; engineering physical characteristics; low-level dynamic compaction; in-situ utilization

## 0 引言

本文所述兰州地区主要指兰州盆地, 兰州盆地属于新生代盆地, 位于黄土高原西部, 青藏高原东北部, 东西约40 km, 南北长约3~10 km。兰州地区红砂岩广泛分布于西至西固东至雁滩的主城四区和

黄河南北两山山区, 系第三系风化红砂岩, 常下伏于由黄河阶地卵石和黄土层构成的第四系松散土层, 覆土深度从几米至几十米不等。兰州地区红砂岩易崩解, 遇水易软化, 属于不良地基和不良填料, 在工程建设中往往采用换填处理或按弃方处理。但近年来随着兰州城区不断北拓和地铁、地下广场等地下工程的大力建设, 在红砂岩分布地区和深度范围内开展的工程数量和规模急剧增大, 产生的红砂岩挖方量以千万方计, 红砂岩的利用成为工程建设和场地开发的限制因素之一, 也是水土保持和绿色建设的必然要求。

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 中国市政工程西北设计研究院有限公司科技研发项目(XBSZKY2228)

作者简介: 朱武权(1988—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路工程设计研究工作。

通信作者: 蔡全辉(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路工程设计研究工作。电子信箱: 591597221@qq.com

国内对红砂岩的研究主要分为 3 个方面:一是对红砂岩物理化学及工程特性的研究,主要是针对红砂岩崩解特性和承载能力研究,如赵明华等<sup>[1]</sup>对红砂岩崩解特性及有效工程分类方法的研究,王文斌<sup>[2]</sup>对兰州地区红砂岩工程特性及承载力的研究;二是对红砂岩在路基工程中的应用的研究,主要是采用水泥、石灰等对红砂岩进行改良及改良后性能的研究,如王帅等<sup>[3]</sup>对怀芷高速公路红砂岩填料改良试验的研究,罗恒等<sup>[4]</sup>关于红砂岩碎石土高填方强夯加固效果的研究;三是对红砂岩路基力学模型和变形监测的研究,如李雪连等<sup>[5]</sup>对红砂岩路基土动态模量影响因素及预估模型的研究,李宇杰等<sup>[6]</sup>对兰州地区红砂岩基坑支护和变形监测的研究。上述研究的红砂岩主要集中在湖南、江西等中部地区,而对兰州地区红砂岩的研究主要是将其作为建筑基础持力层和基坑的研究,对兰州地区红砂岩作为路基填料改良方面的研究较少。本文结合兰州经济技术开发区起步区城市道路工程建设,对兰州地区红砂岩工程物理特性进行分析,研究其压实特性,并就其在城市道路工程中的改良利用展开研究。

1 兰州地区红砂岩工程分类及物理特性

兰州地区红砂岩为河湖相红色碎屑岩,其时代新、成岩程度低、胶结差,一般呈红棕色或红褐色。本次研究红砂岩共选取了 19 个取样点,每个取样点取样 7~9 个,部分取样点照片如下所示。

1.1 兰州地区红砂岩物理化学特性分析

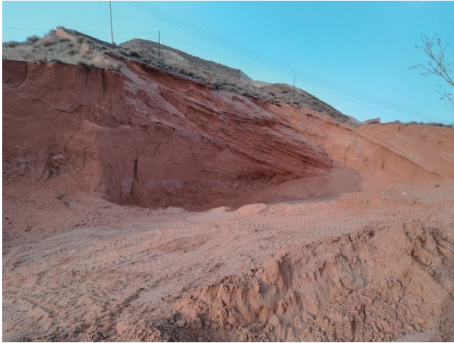
(1) 兰州地区红砂岩的形成及风化

兰州地区红砂岩属陆相湖盆及山间凹地沉积,在新构造运动中抬升,经受长期风化剥蚀及黄河的冲蚀切割作用,形成了表面起伏很大的风化剥蚀面,随后在其表面沉积了黄河各级阶地卵石和黄土状粉土。

兰州地区红砂岩分布场地地层的典型组成为种植土或表土—黄土—砂岩或黄土—卵、砾石层—砂岩。本次取样场地砂岩层上部沉积的黄土或卵砾石层厚度为 1~25 m。兰州地区红砂岩为第三系风化红砂岩,风化程度为中风化~强风化,埋深越浅,风化越严重。

(2) 兰州地区红砂岩的矿物成分

对本次红砂岩试样通过 X 射线衍射试验分析岩土矿物成分与晶体结构,进行岩石矿物成分鉴定,得到的岩样矿物成分鉴定结果如下表 1 所列。



(a)



(b)

图 1 红砂岩取样现场地点照片

表 1 兰州地区红砂岩矿物成分 单位: %

| 岩样  | 石英      | 钾长石     | 斜长石     | 黏土    | 方解石   | 其他     |
|-----|---------|---------|---------|-------|-------|--------|
| 红砂岩 | 57 ~ 68 | 10 ~ 15 | 11 ~ 16 | 2 ~ 9 | 1 ~ 4 | 3 ~ 11 |

(3) 兰州地区红砂岩密度及含水率

通过室内土工试验测得本次红砂岩试样密度、孔隙率、含水率等结果如表 2 所列。

表 2 兰州地区红砂岩密度、孔隙率、含水率

| 岩样                         | 红砂岩         |
|----------------------------|-------------|
| 块体密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.79 ~ 2.02 |
| 颗粒密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 2.65 ~ 2.72 |
| 孔隙率/%                      | 31.3 ~ 46.5 |
| 含水率/%                      | 2.2 ~ 8.6   |

(4) 兰州地区红砂岩土腐蚀性

兰州地区红砂岩试样易溶盐试验和视电阻率测试结果如表 3 所列,呈弱碱性,易溶盐含量低,依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)(2009 年版)兰州地区红砂岩对混凝土具有弱腐蚀性,对钢结构也具有弱腐蚀性。

表 3 兰州地区红砂岩易溶盐及视电阻率结果

| 岩样  | pH 值        | 易溶盐总量/%     | 视电阻率/(Ω·m)   |
|-----|-------------|-------------|--------------|
| 红砂岩 | 8.05 ~ 8.32 | 0.07 ~ 0.09 | 82.9 ~ 113.1 |

1.2 红砂岩工程分类

(1) 红砂岩的岩石分类

根据《岩土工程勘察规范(2009 版)》3.2.2 条规

定,对岩石坚硬程度根据饱状态下单轴抗压强度分为五类。兰州地区红砂岩的力学性能指标如表4所列,其饱状态下单轴抗压强度平均值为0.06 MPa,小于5 MPa,属于极软岩。本次研究兰州地区红砂岩的软化系数为0.165,小于0.75,属于软化岩石。

| 表4 兰州地区红砂岩岩石力学性能           |           |
|----------------------------|-----------|
| 岩体                         | 红砂岩       |
| 岩体密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 1.84~2.07 |
| 天然单轴抗压强度/MPa               | 0.11~0.68 |
| 饱和单轴抗压强度/MPa               | 0.01~0.11 |
| 干燥单轴抗压强度/MPa               | 0.19~0.47 |
| 软化系数                       | 0.04~0.29 |

根据《公路工程岩石试验规程》(JTG 3431—2024)崩解性试验的规定,红砂岩岩块在试验过程均发生崩解,无法按规定完成崩解性试验,大部分岩块在第一次烘干浸水过程中发生了崩解,崩解后呈砂状。可见兰州地区红砂岩崩解性强,极易崩解。根据红砂岩浸水崩解特性的工程分类,兰州地区红砂岩属于I类红砂岩。

兰州地区红砂岩具有独特性,相对于湖南、江西、湖北、鄂尔多斯等地的红砂岩<sup>[7-11]</sup>,其单轴抗压强度明显低于其他区域红砂岩,软化性较强,极易崩解。以上区域的红砂岩由于强度较高,开挖后岩块较大较多,需进行二次破碎或耙压。兰州地区红砂岩在机械挖掘过程中就已发生破碎和崩解,挖掘后的红砂岩呈松散砂土状,很少有岩块的存在。

(2)红砂岩砂粒土的分类

兰州黄河两岸阶地河谷出露的砂岩,一般不受地下水影响,含水量低,出露的岩体由于温度变化和雨水下渗,浅表层岩体胶结程度相对较弱,力学性质变差,在一定程度上类似于砂土。因此对兰州地区红砂岩工程性质分析时按岩石对待,还是按砂土对待,在工程界一直饱有争议。由于本文研究的目的之一是讨论红砂岩在道路工程中作为路基填料的可行性,因此有必要研究其作为砂土的工程物理特性。

以现场开挖过程破碎崩解的红砂岩砂粒为试样进行室内土工试验,试验结果如表5所列。

| 表5 兰州地区红砂岩土工试验数据     |           |
|----------------------|-----------|
| 试样                   | 红砂岩       |
| 0.075~0.25 粒径占比/%    | 69.2~75.8 |
| 黏粒占比/%               | 0~1       |
| 内聚力 C/kPa            | 0.05~0.23 |
| 内摩擦角 φ/(°)           | 29.6~39.7 |
| 不均匀系数 C <sub>u</sub> | 0.9~3.95  |
| 曲率系数 C <sub>c</sub>  | 0.85~0.94 |

兰州地区红砂岩的颗粒均匀,如图2所示,粒径主要分布在0.075~0.25 mm区间,其工程分类属于砂土中的粉砂。黏粒占比极小,内聚力较小,符合无黏性砂的特性。

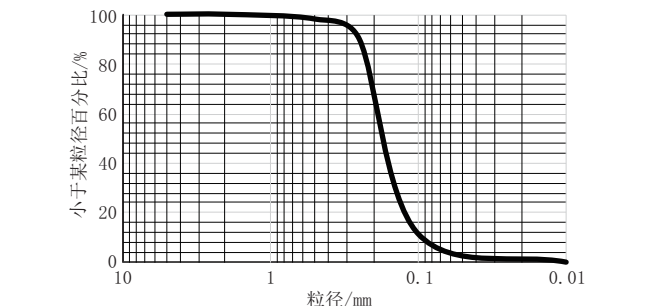


图2 红砂岩颗粒分析曲线

兰州地区红砂岩颗粒组成单一,级配不良,不均匀系数C<sub>u</sub>小于5,属于均匀土,曲率系数C<sub>c</sub>小于1,从工程观点看,属于不良级配的土。

2 兰州地区红砂岩在城市道路中的就地利用研究

2.1 兰州地区红砂岩填筑工艺研究

兰州地区红砂岩在开挖和碾压过程中基本成为散沙状,根据岩石试验成果,天然含水率平均值为5.4%,易溶盐含量平均值为0.08%,为非盐渍岩土。以现场开挖过程破碎崩解的红砂岩砂粒为试样进行重型击实试验和承载比(CBR)试验,试验结果如表6所列,建议最优含水率为9.6%,最大干密度为1.89 g/cm,承载比(CBR)值较大,因此砂岩可以作为填方料使用

| 表6 击实试验和承载比(CBR)试验数据        |        |      |
|-----------------------------|--------|------|
| 土样                          |        | 红砂岩  |
| 最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) |        | 1.89 |
| 最佳含水率/%                     |        | 9.6  |
| CBR/%                       | 2.5 mm | 40.6 |
|                             | 5 mm   | 35.3 |

兰州地区红砂岩作为路基填方料使用在施工过程除了常规加水增湿外,还需要解决不易压实和遇水软化的问题。

2.1.1 改良及压实工艺研究

根据室内土工试验结果分析可知,兰州地区红砂岩不易压实的主要原因有二:一是内聚力极小,颗粒之间黏聚效应弱;二是颗粒不均匀系数小,即粒径较为均匀,级配不良,颗粒之间不易形成骨架密实结构。本文针对以上原因,提出了掺黏土改良加低能级压实的工艺。

在红砂岩中掺加黏土可以有效地改善级配,增

加颗粒之间的黏结性。本文就红砂岩掺黏土的改良工艺进行了现场试验验证,按最大程度利用红砂岩的原则,现场试验的黏土掺量分别为 20%、30% 和 40%,摊铺层厚为 250 mm,用 15 t 光面压路机进行碾压,碾压后取样进行了压实度和承载比检测,检测结果见表 7。

表 7 压实度检测数据

| 土样                          | 掺 20% 黏土<br>红砂岩 | 掺 30% 黏土<br>红砂岩 | 掺 40% 黏土<br>红砂岩 |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 2.00            | 2.08            | 1.98            |
| 最佳含水率/%                     | 8.6             | 8.0             | 7.5             |
| 压实度/%                       | 92.3            | 94.5            | 93.6            |
| CBR/%                       | 22.6            | 19.8            | 15.7            |

随着黏土掺量的增加,黏土改良红砂岩的最大干密度先增大后减小,最佳含水率减小,压实度先增大后减小,CBR 值减小,因此建议黏土的掺量为 30%。

为了进一步增加红砂岩高填方路基的稳定性,减少沉降和不均匀沉降,本课题研究在高填路基填筑时采用了补强加土工格栅的工程措施。根据工程相关经验,高填路基填筑时补强可以采用冲击碾压和强夯。本文对冲击碾压和强夯从补强深度、作业面、工期和工程造价等方面进行了比选,比选结果如表 8 所列。

表 8 补强措施比选表

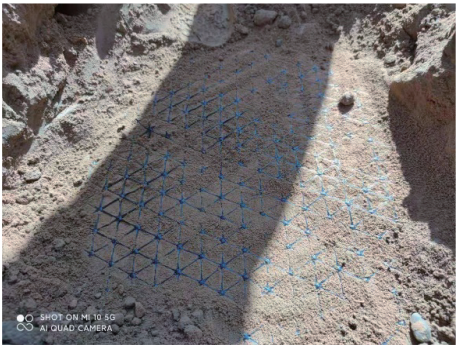
| 比选<br>项目 | 冲击碾压<br>(25 kJ, 20 遍)                                  | 强夯(1000 kN·m,<br>2 击 1 遍)                             | 备注                                       |
|----------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 补强<br>深度 | 2 m                                                    | 4 ~ 6 m                                               | 根据《公路路基施工技术规范(JTG/T 3610—2019)》第 4.7.4 条 |
| 作业面      | 作业面长度大于<br>100 m                                       | —                                                     | 冲击压路机作业需要的最小长度                           |
| 工期       | 5 d/20 000 m <sup>2</sup><br>(4 000 m <sup>2</sup> /d) | 25 d/20 000 m <sup>2</sup><br>(800 m <sup>2</sup> /d) | 参考广东省工程工期定额                              |
| 工程<br>造价 | 6.14 元/m <sup>2</sup>                                  | 9.84 元/m <sup>2</sup>                                 | 根据兰州市 2023 年第一期建设工程信息指导价                 |

对于高填方路基,考虑补强深度后冲击碾压的处理面积是强夯的 2 ~ 3 倍,因此冲击碾压的工程费用高于强夯。而且兰州地区红砂岩分布区域多山岭沟壑,高填方段施工作业面受限。根据工程经验,对于高填方路基强夯处理在防止工后沉降和提高承载力方面优于冲击碾压。综合考虑,对于兰州地区红砂岩高填方路基补强措施本课题研究中选择采用强夯。现场对低能级强夯后土工格栅的完整性进行了试验,在满夯 1 000 kN·m 能级夯击 2 下,土层厚度为

4 m 下的土工格栅未见破损,如图 3 所示。



(a)



(b)

图 3 土工格栅完整性现场试验照片

2.1.2 防水设计研究

根据室内土工试验结果分析可知,兰州地区红砂岩具有遇水软化、失水崩解的特点,因此防水设计对红砂岩高填路基的稳定性和耐久性至关重要。

由于兰州红砂岩分布地区地下水较深,对填方路基基本没有影响,因此防水设计的重点是地表水。对红砂岩高填路基而言,地表水的影响包括路基范围内地表水的下渗和路基两侧地表水浸入。对于路基范围内地表水的下渗,本次研究采用了增设防水土工布、水泥土防水层及路床填料提高黏土比例等方法,防止地表水渗入路基。对于路基两侧地表水,本次研究采用了设置排水沟、排水盲沟等措施,将地表水尽快排走。由于水对红砂岩高填方路基危害较大,为保证防渗效果和施工过程中的破损,防水土工布建议采用采用两布一膜,质量厚度要求为(250 g/m<sup>2</sup>)/0.5 mm/(250 g/m<sup>2</sup>),其中土工布为无纺土工布,纵、横向拉伸断裂伸长率≤50%,握持强度≥1 100 N,CBR 顶破强度≥2 750 N,纵、横向梯形撕破强度≥400 N。

2.2 兰州地区红砂岩在城市道路中的就地利用工程实践

结合本次研究,在兰州经开区起步区 S1502#路

修建过程中对红砂岩在高填方路基中的就地利用进行了实践探索。S1502#路共有4处高填方路段,路基宽度为56 m,最大填方高度为46.696 m,填方量为145.9万 $\text{m}^3$ ,红砂岩高填方路基设计如图4所示。为了保证路基的整体稳定性,每4 m满夯补强一遍,每4 m加铺三向土工格栅,路基底和路床顶加铺防水土工布。

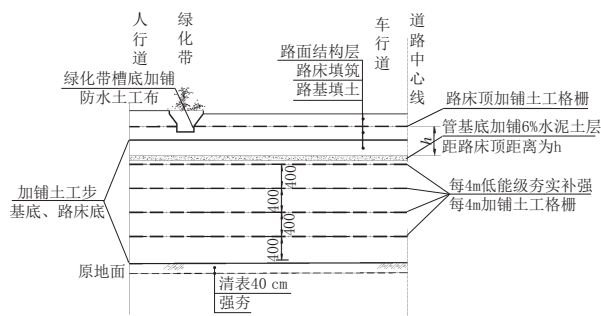


图4 红砂岩高填方路基设计图

S1502#路红砂岩高填方路基2020年10月填筑完成。根据压实土密实度检测报告,全路段4处高填方路段分层压实度均大于92%,满足设计要求。根据路面回弹弯沉检测报告,全路段4处高填方路段路床顶的代表弯沉值(0.01 mm)分别为151.2、175.7、186.5、198.8,满足设计要求(小于207)。经过3个月沉降观测,全路段4处高填方路段的累计沉降量平均值为38.6 mm,最大累计沉降量为56 mm,满足要求。截止2023年10月,经过3个完整雨季的运营,S1502#路基表现良好,未发现明显沉降与病害,后续还在持续观测中。

### 3 结 语

本文以兰州地区红砂岩工程物理特性研究为基础,从兰州地区红砂岩作为城市道路路基填料的缺点改良着手,提出了掺黏土改良加低能级压实的工艺,并在工程实践中进行了应用,得出了以下结论。

(1)兰州地区红砂岩岩块单轴抗压强度低,易软

化,易崩解,属于极软岩和软化岩石,开挖后基本呈散沙状,砂土属粗粒土,CBR值较高,可以作为路基填料,按无黏性砂土对待。

(2)兰州地区红砂岩可以通过掺黏土改良其压实性,30%黏土掺量红砂岩填料的压实性可以满足路基路床的要求。

(3)为了保证兰州地区红砂岩高填方路基的稳定性,建议采用低能级压实补强和加铺土工格栅,夯实能级1 000  $\text{kN}\cdot\text{m}$ ,土层厚度4 m,可以保证格栅的完整性。

(4)本课题对兰州地区红砂岩改良后的沉降机理和力学特性研究不够,需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 赵明华,邓颢宇,曹文贵.红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J].中国公路学报,2003,16(3):1-5.
- [2] 王文斌.兰州地区第三系风化红砂岩工程地质特性研究[J].兰州铁道学院学报,1997,16(1):24-28.
- [3] 王帅,邹静蓉,雷润杰,等.怀芷高速公路红砂岩路基填料改良试验研究[J].路基工程,2018,201(6):145-149.
- [4] 罗恒,邹金峰,李亮,等.红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土地变形试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1):2701-2706.
- [5] 李雪连,陈宇亮,周志刚,等.红砂岩路基动态模量影响因素及预估模型研究[J].试验力学,2014,29(5):627-634.
- [6] 李宇杰,冯忠居,朱彦鹏.兰州特殊红砂岩地层深基坑支护监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):236-240.
- [7] 董天雄.东昌高速公路红砂岩改良路基填料固结沉降特性分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [8] 喻雅琴.湘西地区路用红砂岩改良土力学特性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [9] 杨梁.衡桂高速红砂岩路基填筑技术及沉降变形研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [10] 王志会.红砂岩路基填筑技术研究[D].西安:长安大学,2018.
- [11] 刘亚洲,庞建成.武汉地区红层分布及其工程特性研究[J].土工基础,2022,36(1):51-56.
- [12] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].
- [13] CJJ 194—2013,城市道路路基设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

