

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230970

土工膜单向拉伸力学评价方法试验研究

宋永嘉, 唐 源, 张宪雷, 田林钢

(华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 针对土工合成材料轴向拉伸试验结果分析方法对力学特性真实性的影响, 分别开展聚氯乙烯(PVC)土工膜和高密度聚乙烯(HDPE)土工膜材料的力学特性研究, 获取两种材料在两种不同分析方法下的关系曲线, 并对比两种分析方法下材料抗拉指标的误差。结果表明, 考虑厚度变化的真应力应变分析方法所得试验曲线能更真实地反映材料拉伸变形过程; 在材料不同时, 两种分析方法下材料模量误差也截然不同, 但真应力应变曲线变化规律相较于规范方法更具一致性, 能更真实地评价材料适应荷载变形的能力。

关键词: 土工膜; 轴向拉伸试验; 力学特性; 应力—应变关系

中图分类号: TV41

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0152-04

1 引言

土工膜因具有渗透系数低、便于施工和造价低廉等特点而应用广泛^[1]。我国土工膜用于工程防渗可追溯至 1980 年代水利除险加固工程^[2], 1990 年代推广应用到新建低坝永久工程和围堰临时工程^[3], 随着技术进步和材料生产工艺改良, 面膜堆石坝筑坝技术取得快速发展。面膜堆石坝坝体受水体荷载后产生向下游方向位移或两岸坝体向河心位移及坝体/坝基产生不均匀沉降时, 坝面土工膜产生拉伸变形^[4], 土工膜拉伸力学特性和质量控制关系着大坝的安全运行。MERRY S M 等^[5-6]使用 PVC 和 HDPE 土工膜进行了单向拉伸测试, 从测试数据中得出不同假设条件下计算应力和应变的方程; GIROUD J P 等^[7]指出单向狭窄的条状拉伸试验中哑铃型试样产生的应力应变不均匀, 并且样品的狭窄中间部分产生的拉伸应变大于两端较宽部分, 与土工膜的实际应力状态不一致; FOCATHIS D S A D 等^[8]通过拉伸测试研究了不同温度和拉伸速率对 ETFE 膜的应力影响; HU J 等^[9-10]开发了一个 Matlab 程序, 对 ETFE 膜拉伸试验后的试验数据进行数学分析, 并确定了第一屈服应力和弹性模量等力学性能。目前土工膜拉伸力学特性研究主要为单向拉伸和双向拉伸, 而现行技术标准主要为单向拉伸测试。如《土工合成材料测试手册》和《土工合成材料测

试规程》部分内容主要参考美国标准(ASTM)、国家标准(ISO)和德国标准(DIN)。现行土工膜测试方法和技术参数存在一定差异, 且因缺乏统一的表征量进行力学特性比对分析, 造成土工膜力学指标选用多样性, 难以统一评价土工膜质量。鉴于此, 本文分别用 PVC、HDPE 土工膜进行单向拉伸试验, 依据试验数据分析了 PVC、HDPE 土工膜单向拉伸试验的真应力应变, 旨在为土工膜质量评价提供一定的理论指导。

2 试验

2.1 试验材料

试验采用国内某土工合成材料厂家提供的 HDPE 和 PVC 土工膜, 其主要技术指标见表 1。

表 1 试验材料主要指标

Tab. 1 Main indexes of experimental materials

技术指标	种类	
	PVC	HDPE
平均厚度/mm	2.100	0.66
单位面积质量/(g·cm ⁻²)	0.294	0.24
单位体积质量/(g·cm ⁻³)	1.400	3.64
泊松比 u_y	0.540	0.53

2.2 试样形式

《水工合成材料测试规程》(SL235-2012)^[11]土工膜拉伸试验中, 试样形式与《塑料拉伸性能的测定 第 3 部分: 薄膜和薄片的试验条件》(GB/T 1004.3-2006)^[12]、《高分子防水材料 第 1 部分: 片

收稿日期: 2023-06-15, 修回日期: 2023-07-23

作者简介: 宋永嘉(1968-), 女, 教授, 研究方向为水工结构, E-mail: songyongjia@ncwu.edu.cn

材》(GB 18173.1-2006)^[13]、《聚氯乙烯防水卷材》(GB 12952-2003)^[14]基本一致,并且明确试样形式为哑铃型,试样受拉部分的宽度为 6 mm,见图 1。

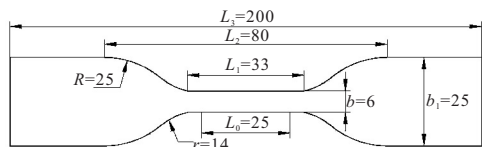


图 1 哑铃型试样示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of dumbbell type sample

2.3 试验方法

温度为 22 ± 2 °C,湿度为 $50 \pm 10\%$,设定试验机位移加载速率为 5 mm/min,将两夹具的初始间距调至 100 mm,将试样放入夹具中间以防受到偏心力(图 2)。土工膜拉伸过程中,因需准确获取试样平行部分 L_0 的伸长量,在试样上标记特征线,试验机持续施加拉伸荷载,数码相机设置为 30 s/次,与试验机同步开始,对于真应力应变分析方法,采用测厚仪采集厚度变化值,设置为 30 s/次,与数码相机同步采集数值。

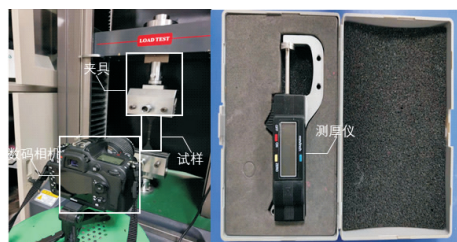


图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

3 规范分析法与真应力应变分析法

3.1 规范拉伸分析方法

条带拉伸试验规定土工膜条带试样拉伸强度的表达式为:

$$T = F/B \quad (1)$$

式中, T 为拉伸强度,kN/m; F 为最大拉力,kN; B 为试样宽度,m。

土工膜拉伸试验规定土工膜拉伸强度的计算公式为:

$$P = F/(B\delta) \quad (2)$$

式中, P 为拉伸强度,MPa; B 为试样中间部位宽度,mm; δ 为试样厚度,mm。

条带拉伸和土工膜拉伸试验选用的伸长率计算公式为:

$$\epsilon = (\Delta L/L_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中, ϵ 为伸长率,%; L_0 为试样计量长度,mm; ΔL 为最大拉力时试样计量长度的伸长量,mm。

3.2 真应力应变分析方法

工程设计时一般将式(2)描述为工程应变,在试样轴向拉伸过程中,轴向变形增大,横向和纵向(厚度方向)变形减小,横截面面积不断变化。确定截面应力需要横截面面积与轴向应变之间的关系,轴向应变研究表明工程应变仅适用于小变形,大变形时工程应变与真实应变存在较大差异。试样标距范围内的应变 ϵ_{aT} 理论计算公式^[15]为:

$$\epsilon_{aT} = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_f}{L_0} =$$

$$\ln[(L_0 + \Delta L)/L_0] = \ln(1 + \epsilon_{aE}) \quad (4)$$

式中, L_f 、 L_0 分别为拉伸试验时间为 $t + \Delta t$ 、 t 时试样计量长度,mm; L 为某一拉伸时刻试样计量长度,mm; ϵ_{aE} 为拉伸时刻 t 至 $t + \Delta t$ 时试样伸长量与拉伸试验时间 t 时试样计量长度的比值,%。

试样在轴向拉伸过程中横向尺寸是关于轴向应变动态变化的,其计算公式为:

$$W_{\epsilon_a} = W_{\epsilon_a=0} (1 - \mu_y \epsilon_a) \quad (5)$$

式中, $W_{\epsilon_a=0}$ 为拉伸试样初始宽度,mm; μ_y 为拉伸土工膜的横向泊松比,PVC 土工膜取 0.5,HDPE 土工膜取 0.47; ϵ_a 为试样的轴向理论计算真应变,%。

截面面积计算公式为:

$$A_u = W_{\epsilon_a} T \quad (6)$$

式中, T 为试样厚度,mm。

考虑泊松比情况下,计算应力公式为:

$$\sigma_u = F/A_u = F/(W_{\epsilon_a} T) \quad (7)$$

土工膜模量表达式为:

$$E = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad (8)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为变化时间内的应力变化值,MPa; $\Delta\epsilon$ 为变化时间内的应变变化值,%。

4 土工膜单向拉伸力学分析

4.1 土工膜单向拉伸厚度变化

土工膜拉伸试验在对 PVC 土工膜的拉伸曲线处理之前,需要对哑铃型试样拉伸过程中的厚度进行曲线拟合。图 3 为 PVC、HDPE 土工膜哑铃型试样厚度一时间变化拟合曲线。由图 3 可知,试样厚度在 $t=0$ 时为初始厚度,厚度随着试样拉伸逐渐趋于零,但根据试样破坏方式(脆性破坏),厚度只可能无限趋近于零,基于此,采用指数函数进行曲线拟合,结果见表 2。指数函数表达式为:

$$T = a e^{-bt} \quad (9)$$

式中, a 、 b 均为待定系数; t 为时间。

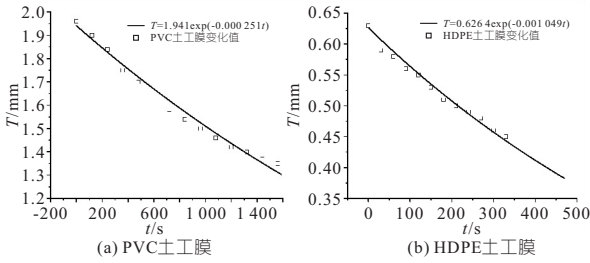


图 3 厚度—时间关系曲线

Fig. 3 Thickness-time curve

表 2 土工膜厚度—时间曲线拟合表

Tab. 2 Fitting table of geomembrane thickness time curve

指标	材料	
	PVC	HDPE
待定参数 a	1.941 000	0.626 400
待定系数 b	0.000 251	0.001 049
拟合度	0.968 000	0.976 000

4.2 PVC 土工膜拉伸试验结果分析

根据试验结果(表 3)可发现序号 1 与序号 3 最大拉力偏差值仅 0.7 N,位移量偏差值仅 0.2 mm;序号 2 与序号 1、3 拉力偏差值较大,达到 20 N 左右,位移量偏差值达到 14 mm 左右,因此认为序列 2 误差偏大,试验采用序列 1 与序列 3 平均值进行处理。

表 3 PVC 膜试验结果

Tab. 3 PVC geomembrane test results

序号	最大拉力/N	位移量/mm
1	219.32	133.82
2	240.33	148.77
3	220.01	134.02

根据规范公式(式(2)、(3))可得到 PVC 土工膜拉伸强度—延伸率关系图(图 4)。同理,根据式(4)、(7)可得到 PVC 土工膜轴向真应力—应变关系曲线(图 5)。图 4 的曲线比图 5 光滑,且由图 5 可大致分为四个阶段:①第 1 阶段(AB 区间段),土工膜形变量很小;②第 2 阶段(BC 区间段),线性变形阶段,应力与应变呈线性变化;③第 3 阶段(CD 区间段),在变化区间段中,PVC 土工膜延伸率从 30% 增加到 80%,应力从 6 MPa 增加到 27 MPa;④第 4 阶段(DE 区间段),土工膜的应力与应变又呈线性变化趋势。

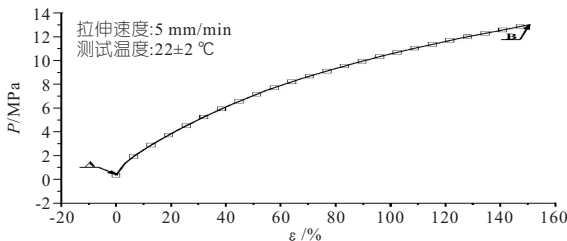


图 4 PVC 土工膜拉伸强度—延伸率关系对比

Fig. 4 Comparison of tensile strength elongation relationship

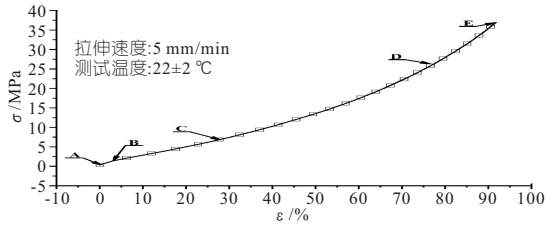


图 5 PVC 土工膜真应力—应变关系

Fig. 5 True stress-strain relationship of tensile strength

根据图 4、5 可以获得 PVC 土工膜试样的断裂强度、断裂延伸率、初始切线模量和割线模量,见表 4,其中割线模量(E_{S10})、(E_{S2})由伸长率为 10%、2% 时对应的曲线点计算得出。在真应力应变分析法下,PVC 膜断裂强度是规范拉伸分析法的 2 倍,而断裂延伸率是规范拉伸分析法的 60% 左右,相差很大,这是由于真应力应变分析法公式代入厚度变化导致的,且初始切线模量和割线模量两者偏差不大,在 10% 左右。

表 4 PVC 土工膜两种分析方法下材料抗拉指标

Tab. 4 Tensile index of materials under two analysis methods of PVC geomembrane

指标	真应力应变分析法	规范拉伸分析法
断裂强度/MPa	36.94	13.01
断裂延伸率/%	91.81	150.45
初始切线模量/MPa	0.28	0.31
割线模量(E_{S10})/MPa	0.25	0.22
割线模量(E_{S2})/MPa	0.21	0.25

4.3 HDPE 土工膜拉伸试验结果分析

根据试验结果(表 5),可以发现序号 1 与序号 2 最大拉力偏差值仅 0.04 N,位移量偏差值仅 0.04 mm,而序号 3 与序号 1、2 拉力偏差比较大,达到 9 N 左右,位移量偏差值达到 8 mm 左右,因此认为序列 3 误差偏大,试验采用序列 1 与序列 2 平均值。

表 5 HDPE 膜试验结果

Tab. 5 HDPE geomembrane test results

序号	最大拉力/N	位移量/mm
1	70.98	10.07
2	71.02	10.11
3	80.83	18.49

HDPE 土工膜拉伸强度—延伸率关系比对及真应力—应变关系,见图 6、7。由图 6、7 可知,HDPE 土工膜拉伸过程关系曲线也可视为四个阶段。由图 5 与图 7 对比可知,HDPE 膜与 PVC 膜真应力应变曲线变化趋势几近一致。

同理可得,HDPE 土工膜试样的断裂强度、断裂延伸率、初始切线模量和割线模量,见表 6。在真应力应变分析法中,HDPE 膜断裂强度是规范拉伸分析法的 5 倍左右,而断裂延伸率只有规

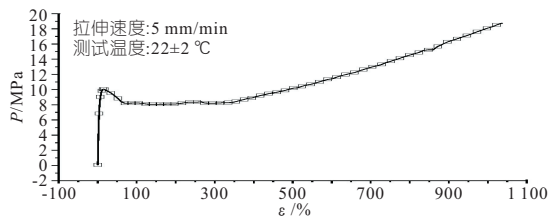


图 6 HDPE 土工膜拉伸强度—延伸率关系比对

Fig. 6 Comparison of tensile strength elongation relationship

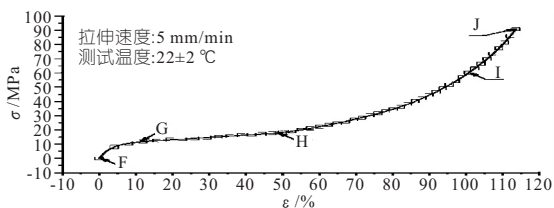


图 7 HDPE 土工膜真应力—应变关系

Fig. 7 True stress-strain relationship

表 6 HDPE 土工膜两种分析方法下材料抗拉指标

Tab. 6 Tensile index of materials under two analysis

methods for HDPE geomembrane

指标	真应力应变分析法	规范拉伸分析法
断裂强度/MPa	90.68	18.73
断裂延伸率/%	113.67	1 036.22
初始切线模量/MPa	2.56	1.26
割线模量($E_{S_{10}}$)/MPa	1.11	0.96
割线模量(E_{S_2})/MPa	2.01	1.12

范拉伸分析法的 10%；真应力应变分析法下的初始切线模量和割线模量($E_{S_{10}}$)与规范拉伸分析法相差 1 倍左右,无法忽略,而割线模量(E_{S_2})相差不大。

综上所述,在采用规范拉伸分析方法时,HDPE、PVC 土工膜单向拉伸均视为平面拉伸,厚度不变假设导致断裂强度及断裂延伸率与实际情况有不可忽视的误差;单向拉伸时,两种材料情况截然不同,即 PVC 土工膜的模量在两种分析方法下误差可控制在 10%左右;而 HDPE 土工膜的初始切线模量和割线模量($E_{S_{10}}$)相差很大,割线模量(E_{S_2})相差仅 5%左右。由此可知,造成真应力应变分析结果与规范分析结果差异的原因为土工膜在轴向拉伸时产生大变形,工程应变不再适用,且试样厚度与宽度的变化量很大,无法忽视对应力计算的影响。评价土工膜能否适应面膜堆石坝位移拉伸变形条件应从试验过程中归纳表征量进行分析比对,才更具有合理性,因此通过真应力应变分析方法处理后的应力应变关系图比规范分析方法的拉伸强度延伸率关系图更有意义,在进行土工膜材料比对测试过程中,可采集材料变化厚度,运用真应力应变分析方法对土工膜材料分析评价更为有效。

5 结论

a. 针对目前土工合成材料拉伸试验中试样选择和方法分析是否合理有效,参考相关设计规范和规程,选用 HDPE 土工膜和 PVC 土工膜,并对试验结果进行理论分析和评价,发现在拉伸性能上,若条件不允许,PVC 膜初始切线模量和割线模量可采取规范拉伸分析法,忽略厚度变化,但 HDPE 膜初始切线模量和割线模量不建议采取规范拉伸分析法,因厚度变化对其结果影响很大,不建议忽视。

b. 相比规范中土工膜拉伸试验分析,真应力应变方法的 HDPE 膜与 PVC 膜真应力应变曲线变化趋势一致,利于两种材料的强度分析与比较,后续其他土工合成材料拉伸试样分析可以参考该方法。

参考文献:

- [1] 束一鸣. 我国水库大坝土工膜防渗工程进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 20-26.
- [2] 赵志清. 土工膜在我国水利防渗的首次应用[J]. 中国建材防水材料, 1991(3): 16-18.
- [3] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝实例述评[J]. 水利规划设计, 2002, 33(2): 26-32, 72.
- [4] 束一鸣, 吴海民, 姜晓桢, 等. 高面膜堆石坝周边的夹具效应机制与消除设计方法——高面膜堆石坝关键技术(二)[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 10-15.
- [5] MERRY S M, BRAY I D, BOURDEAU P L. Axisymmetric tension testing of geomembranes [J]. Geotechnical testing journal, 1993, 16(3): 384-392.
- [6] MERRY S M, BRAY I D. Size effects for multi-axial tension testing of HDPE and PVC geomembranes [J]. Geotechnical testing journal, 1995, 18(4): 441-449.
- [7] GIROUD J P, MONROE M, CHARRON R. Strain measurement in HDPE geomembrane tensile tests [J]. Geotechnical testing journal, 1994, 17(1): 65-71.
- [8] FOCATIIS D S A D, GUBLER L. Uniaxial deformation and orientation of ethylene-tetrafluoroethylene films[J]. Polymer testing, 2013, 32(8): 1423-1435.
- [9] HU J, CHEN W, LUO R, et al. Uniaxial cyclic tensile mechanical properties of ethylene tetrafluoroethylene(ETFE) foils[J]. Construction & building materials, 2014, 63(8): 311-319.
- [10] HU J, CHEN W, ZHAO B, et al. Uniaxial tensile mechanical properties and model parameters determination of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils[J]. Construction & building materials, 2015, 75: 200-207.

石力学与工程学报,2019,38(10):2126-2137.

[2] 李甜果,孔令伟,王俊涛,等.基于核磁共振的季冻区膨胀土三峰孔隙结构演化特征及其力学效应[J].岩土力学,2021,42(10):2741-2754.

[3] 潘振兴,杨更社,叶万军,等.干湿循环作用下原状黄土力学性质及微观损伤研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1186-1192.

[4] 冯上鑫,柴军瑞,许增光,等.基于核磁共振技术研究渗流作用下土石混体微观结构的变化[J].岩土力学,2018,39(8):2886-2894.

[5] 赵俊宇,许增光,柴军瑞,等.干湿循环条件下重塑黄土强度与持水特性的试验研究[J].水电能源科学,2021,39(9):169-172,139.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局

管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[7] 白松涛,程道解,王金彬,等.砂岩岩石核磁共振 T_2 谱定量表征[J].石油学报,2016,37(3):382-391,414.

[8] CHAPUIS R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review[J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2012,71(3):401-434.

[9] AHMADI M M, MOHAMMADI S, HAYATI A N. Analytical derivation of tortuosity and permeability of monosized spheres: a volume averaging approach[J]. Physical review E, statistical, nonlinear, and soft matter physics,2011,83(2):026312.

Quantitative Analysis and Application of NMR T_2 Spectrum of Loess Under Dry-wet Cycles Conditions

MA Jian-hong, SUN Wen, XU Na, XING Jin-wen, MA Wen-dong, SUN Hao-chen

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the impact of moisture change on the pore structure of reshaped loess, different times of humidification-dehumidification cycle tests were carried out for remodeled loess with different dry densities, and the pore structure inside the soil under different cycles was tested by nuclear magnetic resonance technology. The results show that the NMR T_2 pattern of reshaped loess presents a bimodal structure, that is, the sample contains two pore structures; The dry and wet cycles have an impact on the change of the pore structure of the loess, and the pore structure shows different laws under different times of dry and wet cycles. Finally, based on the quantitative parameters extracted from the T_2 pattern, the permeability of reshaped loess under different cycles were calculated by SDR permeability model, and the permeability mechanism of loess was explained from the microscopic aspect.

Key words: dry-wet cycle; NMR; quantitative parameters; pore structure; SDR permeability model

(上接第 155 页)

[11] 中华人民共和国水利部.土工合成材料测试规程:SL/T235-1999[S].北京:中国水利水电出版社,2012.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料拉伸性能的测定第3部分:薄膜和薄片的试验条件:GB/T 1004.3-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.高分子防水材料第1部分:片材[S].2012.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局:GB 12952-2003[S].北京:中国标准出版社,2003.

[15] MERRY S M, BRAY J D. Geomembrane response in the wide strip tension test. Geosynthetics international,1996,3(4):517-536.

Experimental Study of Unidirectional Tensile Mechanical Evaluation Method for Geomembranes

SONG Yong-jia, TANG Yuan, ZHANG Xian-lei, TIAN Lin-gang

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Henan 450046, China)

Abstract: In view of the influence of the analysis method of geosynthetics axial tensile test results on the authenticity of mechanical properties, the mechanical properties of PVC geomembrane and HDPE geomembrane materials were studied respectively, and the relationship curves of the two materials under different analysis methods were obtained. Then the error of material tensile index under the two analysis methods was compared. The results indicate that the experimental curves obtained by the true stress-strain analysis method considering thickness changes can more accurately reflect the tensile deformation process of materials. When the materials are different, the modulus errors of the materials under the two analysis methods are also completely different. However, the variation law of the true stress-strain curve is more consistent compared to standard methods for processing, which can more accurately evaluate the material's ability to adapt to load deformation.

Key words: geomembrane; axial tensile test; mechanical property; stress-strain relationship