

FRP-混凝土界面粘结性能有限元方法研究

俞裕果¹ 黄炎生^{1,2}

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641; 2. 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

【摘要】分析FRP-混凝土界面的粘结性能,是研究FRP外贴加固钢筋混凝土结构的基础问题。本文根据已有的面内剪切试验研究结果,采用大型通用有限元程序MSC. Marc建立有限元模型并导入裂面剪力模型子程序,进行了非线性计算分析。引入了“裂缝带模型”、“界面粘结承载力”、“有效锚固长度”等概念,对混凝土单元开裂软化模量以及裂面剪力模型进行了优选。得到了FRP应变分布规律和界面粘结应力分布规律,提出了全新的“粘结屈服平台”概念,建议相关的界面性能非线性有限元分析采用本文的方法。

【关键词】FRP; 混凝土结构加固; 界面粘结性能; 非线性有限元分析; 子程序

【中图分类号】TU528.572 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1674-7461(2013)02-0056-06

1 引言

FRP与混凝土结构能够共同受力工作,主要是通过二者界面间的良好粘结性能(以下简称:界面性能)实现的。加固后的构件在使用中的任何剥离破坏情况,都将导致加固失效以及构件破坏,且该破坏形式具有显著的脆性性质^[1]。

国内外已有众多学者对FRP加固混凝土结构构件性能进行研究,其中针对界面性能的研究多数采用试验手段^[2]。由于界面破坏为脆性破坏,常规试验手段难以有效观察、测量和分析FRP-混凝土的界面性能,所以必须借助数值手段以辅助研究。在数值模拟方面,陆新征提出的“精细有限单元法”^[3]是分析界面问题最为有效的方法。但是经过本文研究,该方法在应用的过程中有众多的因素需要同时加以控制,才能保证精细有限单元法的有效性。

本文以文献[2]的面内剪切试验为基础,采用精细有限单元法进一步展开非线性有限元模拟分析,主要目的有:

(1) 以混凝土断裂能、时间步长和混凝土软化模量同时作为控制因素,讨论单元尺寸效应对精细单元法的影响,提出软化模量的具体取值方法,并与试验结果进行对比;

(2) 通过MSC. Marc的二次开发功能^[4],采用

Fortran编程语言引入多个混凝土裂面剪力模型进行计算,并与试验结果进行对比,从而进行模型优选。

(3) 在确定了混凝土受拉软化模型以及裂面剪力模型之后,对界面剥离破坏全过程的粘结应力进行观察和分析,讨论粘结应力分布规律。

2 有限元分析

2.1 有限元模型建立

本文采用大型通用有限元软件MSC. Marc进行分析计算^[5],有限元模型采用精细有限单元法(混凝土单元尺寸为0.5mm),针对文献[2]中所有加固试件进行建模分析,试件材料信息见表1。充分考虑试件特征和有限元计算能力后,将有限元分析简化为平面问题进行研究,有限元模型简图如图1所示。有限元模型中,混凝土和FRP分别采用各自独立的本构关系和单元类型建立。FRP采用四节点平面应变加筋Rebar单元(143号单元)建模,本构模型按线弹性材料输入。混凝土采用四节点平面应变完全积分单元(11号单元)建模^[6],混凝土认为是连续均匀材料,其单轴受压应力应变关系采用Saenz的建议公式^[7],极限应变取0.00372,多轴强度准则采用MSC. Marc中自带的Buyukozuturk准则^[8]。

表1 FRP力学性能表

GFRP 厂家检测数据		GFRP 实际测得数据		CFRP 厂家检测数据		混凝土检测数据	
拉伸强度/Mpa	弹性模量/Gpa	拉伸强度/Mpa	弹性模量/Gpa	拉伸强度/Mpa	弹性模量/Gpa	轴压强度/Mpa	弹性模量/Gpa
2801.5	102.1	2777	97	3500	235	37.6	32.5

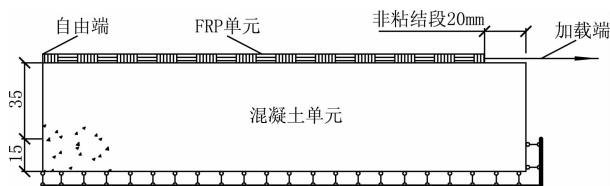


图1 有限元模型示意图

由于混凝土是一种存在大量受拉软化的材料,其受拉开裂和单元尺寸大小关系明显,因此精细模型的单元尺寸效应的影响显著。本文解决单元尺寸效应的方法是采用 Bazant 提出的裂缝带模型 (crack band model)^[9]。即混凝土的受拉软化模型采用应力-裂缝宽度曲线定义,曲线下方所包围面积为混凝土断裂能。经过比较发现,无论是采用线性软化模型,还是双线性软化模型,都可以较好地模拟界面剥离的混凝土,因此为了节省计算资源,降低模型非线性程度,本分析混凝土均采用受拉线性软化模型,混凝土软化模量的取值将在后文进行讨论。混凝土断裂能公式采用欧洲模式规范 MC90 建议^[10]:

$$G_f^I = \alpha \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.7} \quad (1)$$

式中: f_c : 混凝土抗压强度; α : 对于普通粒径混凝土取 0.03

关于混凝土裂面受剪行为,本文将先后应用恒定剪力传递系数模型、ABAQUS 模型、Al-Mahaidi 模型、以及大连理工大学模型^[11]进行分析试算,以讨论模拟界面性能最优的裂面剪力模型。其中恒定剪力传递系数模型可用于常规钢筋混凝土结构中,而其余模型则可针对素混凝土结构构件进行模拟。在素混凝土结构的应用中,固定裂面剪力模型依经验取值,取剪力传递系数 $\beta = 0.035$,其余各个模型具体形式如下所示:

(1) ABAQUS 模型:

$$\beta = \beta_0 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{nn}^{cr}}{\varepsilon_{nn}^0}\right) \quad (2)$$

ε_{nn}^{cr} : 开裂正应变; β_0 建议取为 0.4; ε_{nn}^0 建议取为 0.015

(2) Al-Mahaidi 模型:

$$\beta = \frac{0.4}{\frac{\varepsilon_{nn}^{cr}}{\varepsilon_{nn}^0}} \quad (3)$$

ε_{nn}^{cr} : 开裂正应变; ε_{nn}^0 建议取为 $200\mu\varepsilon$

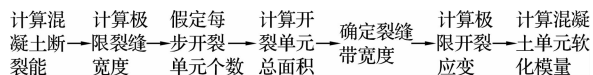
(3) 大连理工大学模型:

$$\tau_{cr} = [0.543 \cdot (\varepsilon_{nn}^{cr} \cdot b_{cr})^{-0.585} + 0.199] \cdot \sqrt{f_c} (\varepsilon_{nn}^{cr} \cdot b_{cr})^{0.72} \quad (4)$$

τ_{cr} : 裂面剪力值; ε_{nn}^{cr} : 开裂正应变; b_{cr} : 裂缝带宽度; ε_{nn}^{cr} : 开裂剪应变

2.2 混凝土单元软化模量对承载力的影响

由于单元尺寸效应主要出现于素混凝土或少筋混凝土单元之中^[12],故本文的有限元模拟就必须考虑混凝土开裂软化的单元尺寸效应。运用 Bazant 提出的裂缝带模型 (crack band model) 以考虑单元尺寸效应影响,其具体计算步骤流程如下所示:



有限元计算中需要注意步长设置和裂缝带宽度取值之间的关系,才能较好地将预先估计的软化模量应用于实际计算之中。否则会出现以下两种情况从而严重影响计算结果:

(1) 若实际计算中每一步开裂的混凝土单元数大于预估数量,将造成计算断裂能偏小,混凝土开裂破坏速度将大于预计值,且裂缝集中、裂宽较大,并最终导致有限元模型提前破坏,计算承载力将小于试验结果;

(2) 若实际计算中每一步开裂的混凝土单元数小于预估数量,将造成计算断裂能偏大,混凝土开裂破坏速度将小于预计值,但裂缝分散、裂宽较小。此情况对于承载力没有显著影响,但显著影响界面粘结应力的分布。

由于文献[2]给出了 T-9(10) 试件的 FRP 应变

分布曲线数据,故本文运用裂缝带模型(crack band model)试算了三种不同的软化模量情况下,T-9(10)试件FRP-混凝土面内剪切试验承载力值,发现软化模量的确对于素混凝土构件的破坏承载力起到明显的控制作用,现将T-9(10)试件有限元计算结果列于表2,并将FRP应变分布曲线绘制于图2:

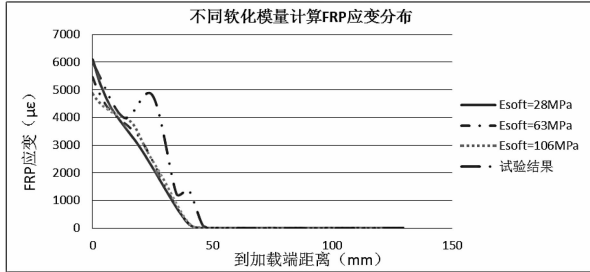


图2 不同软化模量计算T-9(10)试件FRP应变分布图

根据上述有限元结果,可以直观地看出混凝土软化模量的选取严重影响有限元计算承载力值。过大的软化模量导致混凝土断裂能较实际值偏小,

使得混凝土提前发生大量开裂从而破坏。经过与试验结果对比,本文选取混凝土单元开裂软化模量 $E_{soft} = 28\text{MPa}$ 进行分析计算与试验结果最为吻合。

2.3 有限元结果分析及裂面剪力模型优选

如前文所述,文献[2]给出了T-9(10)试件的FRP应变分布曲线数据,故本节有限元模拟针对文献中的T-9(10)试件展开。虽然T-9和T-10两个试件实际上是完全相同的一组试件,但二者试验承载力值却相差了1kN有余,且测量得到的有效锚固长度也不相等。该现象说明,FRP与混凝土界面之间的粘结破坏除具有显著脆性之外,还具有较明显的离散型。试件制作、加载条件、以及试验测量方法等都对界面粘结承载力有较大影响。本文运用MSC. Marc二次开发功能导入各个裂面剪力模型,运用各裂面剪力模型计算的T-9(10)试件结果与试验对照列于表3,相应的FRP应变分布发展规律对比见图3。

表2 T-9(10)试件有限元计算信息表

E_{soft}/MPa	项目	混凝土断裂能/ N/mm	极限裂缝宽度/ mm	开裂单元面积/ mm^2	裂缝带宽度/ mm	计算承载力/ kN	T-9(10)试件承载力/ kN
28		0.075 814	0.051 96	0.25	0.5	7.96	
63		0.075 814	0.051 96	1.25	1.118	7.12	7.97(9.19)
106		0.075 814	0.051 96	3.75	1.936	6.35	

表3 T-9(10)有限元计算结果对照表

项目	试件/模型	固定剪力模型	ABAQUS模型	Al-Mahaidi模型	大连理工大学模型	T-9试件	T-10试件
承载力/ kN		8.48	7.93	7.96	7.92	7.97	9.19
有效锚固长度/ mm		31	58.5	58.5	58	45~65	50~70

表4 采用Al-Mahaidi模型计算结果对照表

项目	试件编号	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-5a	T-6	T-6a	T-7	T-8	T-9	T-10
试验承载力/ kN		7.78	9.19	10.11	13.95	6.87	9.2	6.46	6.66	10.49	11.43	7.97	9.19
计算承载力/ kN		7.44		9.89		6.63		6.7		10.54		7.96	
试验有效锚固长度/ mm		45~65	45~65	45~65	40~60	40~60	40~60	30~50	30~50	50~70	60~80	45~65	50~70
计算有效锚固长度/ mm		62.4		52.5		52		38.5		83.5		58.5	

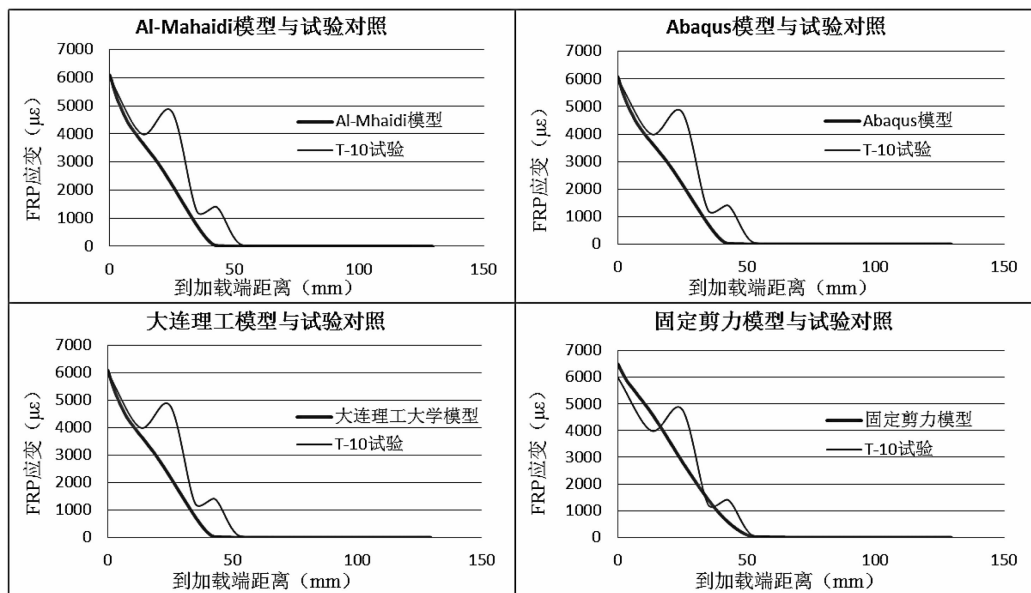


图3 有限元计算FRP应变分布发展规律对照图

由上述有限元分析结果可以得出以下结论：

(1) 采用固定裂面剪力模型计算的承载力高于其他三组模型,其余三组模型承载力接近一致,且与试件T-9的承载力极为相近,但四组有限元算得的构件承载力均小于试件T-10结果;

(2) 除固定剪力模型计算得到的有效锚固长度偏小以外,其余三组模型所得有效锚固长度均较为合理,都落于试验T-9和T-10所得有效锚固长度范围之内;

(3) 四组模型所得的FRP应变由加载端向自由端的发展趋势一致,且均与试验结果较为相符。

综上所述,由于固定裂面剪力模型计算有效锚固长度严重不足,故认为其不能很好地模拟FRP-混凝土的界面性能。其余三组模型中,Al-Mahaidi模型所算得的界面剥离承载力与试验T-9最为接近,且FRP应变发展趋势以及计算有效锚固长度也与试验结果较为符合,因此下文均选取Al-Mahaidi裂面剪力模型进行进一步分析研究,采用Al-Mahaidi模型计算的其余试件界面粘结承载力值及锚固长度与试验结果对比见表4。

3 界面粘结应力分布发展规律分析

根据有限元得到的FRP的应变分布,取FRP微

元段进行分析,容易通过FRP的正应力分布值差分得到界面粘结剪应力^[13]:

$$\tau = \frac{d\sigma_f}{dx} \cdot t_f \quad (5)$$

式中, σ_f 为FRP轴向应力; t_f 为FRP片材厚度

由上式分别计算得到在构件受力为10% P_U ~100% P_U 不同状态下(P_U 为极限承载力)的界面粘结应力分布,并将计算结果绘制于图4,采用上式直接计算得到的结果在图4中称为“原始差分结果”。由于界面受力后,混凝土存在大量的局部裂缝,加之差分计算会放大误差,因此原始差分结果波动的极为厉害,且随着受力趋于极限状态,这一波动将逐渐增大。为了去除这一局部波动对于结果分析的影响,对原始差分结果用周期为4的移动平均法进行数据平滑处理^[14],处理结果在图4中称为“平滑结果”。从“平滑结果”中可以清晰地显示出不同荷载下的粘结应力大小、发展和有效锚固区分布。图4所示的6个受力状态下的粘结应力分布状况分析描述如下:

10% P_U :处于加载初期,粘结应力分布集中于加载端,数据线无波动情况;

20% P_U :曲线较前一阶段相比有一定发展,粘结应力幅值增大,数据线开始出现轻微波动,说明粘结界面下混凝土开始出现局部开裂;

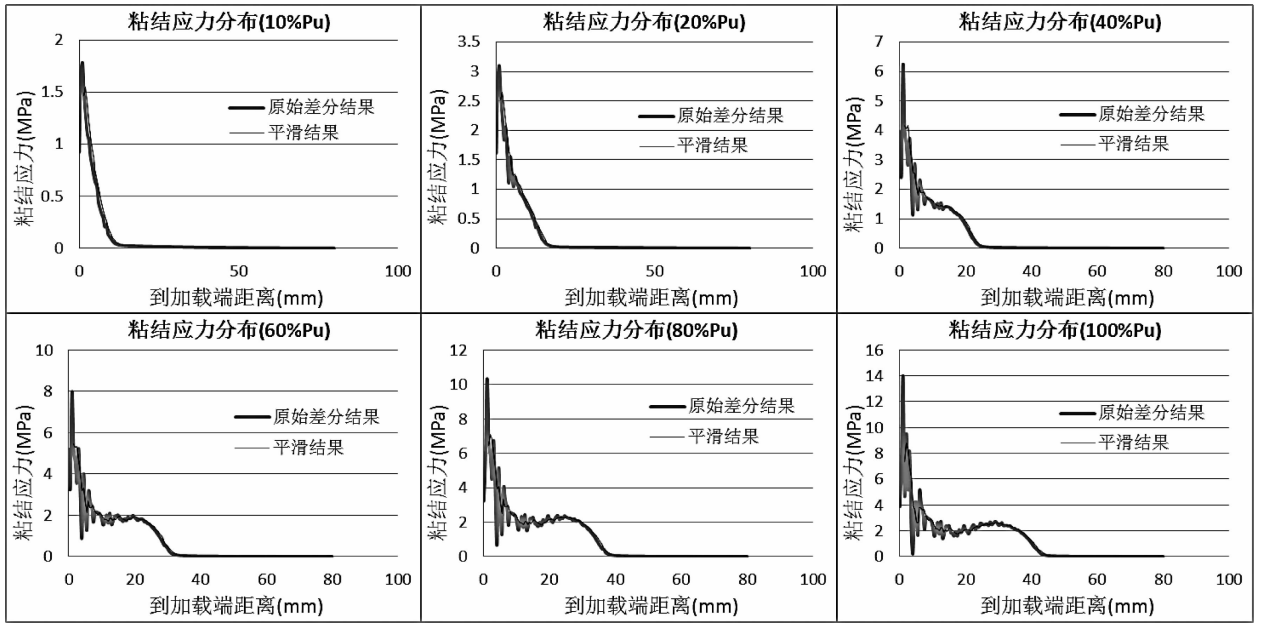


图4 不同受力状态下T-10(T-9)界面粘结应力分布发展规律图

40% P_u : 粘结应力向自由端开始出现较为明显发展趋势, 数据线波动加剧, 说明混凝土进一步开裂, 且局部裂缝逐渐贯通, 即将进入下一阶段的界面状态;

60% P_u : FRP-混凝土界面粘结性能进入稳定发展阶段, 形成一个水平区段, 粘结应力数值在此区段趋于稳定(本文称此区段为“粘结屈服平台”), 并进一步往自由端发展;

80% P_u : “粘结屈服平台”继续向自由端发展, 同时有效锚固长度也进一步扩大, 但是屈服平台区域内的粘结应力值无明显变化, 曲线波动剧烈;

100% P_u : 曲线图形形状与前一阶段无明显区别, 有效锚固长度进一步扩大, 但扩大幅度降低, “粘结屈服平台”内的粘结应力值依然无明显变化, 曲线波动极为剧烈, 构件即将破坏。

4 结语

本文根据已有试验研究, 采用非线性有限元方法对FRP-混凝土界面粘结性能进行了分析。分析结果表明, 所采用的非线性有限元模型合理有效, 可用于界面性能数值试验。根据非线性有限元的

分析结果, 对应用裂缝带理论预估混凝土开裂软化模量提出了具体计算方法, 并对裂面剪力模型进行了优选, 认为Al-Mahaidi模型最适合用于该类素混凝土构件的界面有限元研究。同时, 对FRP-混凝土界面粘结应力发展全过程进行了分析, 揭示了界面粘结应力在承载力中期阶段开始形成“粘结屈服平台”这一受力特征。在屈服平台区段内, 粘结应力大小基本保持恒定, 有效锚固区不断扩展, 直至发生剥离破坏。关于FRP-混凝土界面性能中“粘结屈服平台”这一全新的发现, 有助于更加精确的界面本构模型的推导工作。

参考文献

- [1] 杨勇新, 岳清瑞, 阳涛, 张宁. 碳纤维布与混凝土粘结机理的初步分析[C]//第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会论文集. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 谭壮. GFRP布加固混凝土梁受力性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [3] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [4] 陈火红, 尹伟奇, 薛小香. MSC. Marc 二次开发指南[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 39-40.

- [5] MARC Analysis Research Coporation. Mentat 3. 3-MARC K7. 3; New Features [M]. U. S. A; MARC Analysis Research Coporation, 1998 ;212-216.
- [6] MSC. Software Coporation. MSC. Marc Volume B; Element Library, Version 2010 [M]. U. S. A; MSC. Software Coporation, 2010; 146-149.
- [7] 朱伯龙,董振祥. 钢筋混凝土非线性分析 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1985; 138-139.
- [8] MSC. Software Coporation. MSC. Marc Volume A; Theory and User Information, Version 2010 [M]. U. S. A; MSC. Software Coporation, 2010; 7-52.
- [9] Z. P. Bazant et al. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete [M]. 南京: 河海大学出版社, 1988. 12; 107.
- [10] CEB-FIP. Model Code 90 [M]. Lasusanne, 1993.
- [11] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [12] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005; 219-221.
- [13] 冯鹏, 陆新征, 叶列平. 纤维增强复合材料建设工程应用技术 - 试验、理论与方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011; 100-103.
- [14] 林盘生. Excel 2010 SQL 完全应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011; 38-39.
- [15] 范幸义, 白代春. 钢筋混凝土框架结构限额设计的优化方法 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2010, 2(4) : 5-8.
- [16] 胡理, 梁博, 汤学宏. 合理考虑梁受压钢筋的配筋设计方案 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(3) : 6-10.
- [17] 芮继东, 姚刚. 简洁高效的钢筋优化下料方法 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(3) : 87-92.
- [18] 王丽, 邓思华. 基于 ABAQUS 的混凝土梁受弯破坏实验非线性分析 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2010, 2(1) : 64-67.

FEM Research of Bonding Behavior of the Interface between FRP and Concrete

Yu Yuguo¹, Huang Yansheng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, 510641, China)

Abstract: For RC structures strengthened with FRP, debonding failure may occur before the FRP rupture strength is reached, and the strengthening effect is accordingly declined. It's believed that the research of RC structures strengthened with FRP is found on the analysis of bond behavior of the interface between FRP and concrete. Based on the experimental research of Tan Zhuang, the finite element method is used to analyze the bond behavior in the interface by using MSC. Marc program. The concept of "crack band model", "interface bonding capacity" and the "effective anchorage length" are introduced, the optimization of concrete element softening modulus and the shear model over crack is carried out. The FRP strain and the anchorage bonding stresses along the extensional bond length are obtained, and the distribution law is investigated, a brand new concept of "bonding yield deck" is proposed, the method is recommended for relative nonlinear FEM analysis of bonding behavior.

Key Words: FRP; Strengthening RC Structure; Interface Bonding Behavior; Nonlinear FEM Analysis; Sub-routine