

基于反应谱设计的公路桥梁抗震性能研究

陈壮壮^{1,2}

(1. 连云港市铁路事业发展中心, 江苏 连云港 222006; 2. 连云港市高速公路建设指挥部, 江苏 连云港 222006)

摘要:《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T2231-01—2020)、《公路工程抗震规范》(JTG B02—2013)、《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/B02-01—2008)、《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)为高速公路桥梁设计的主要参考规范,但其在反应谱曲线定义公式、参数取值和强度验算相对安全性上存在差异。通过工程案例,分析各规范在E1、E2地震水平下的地震动输入水平,评估强度验算时各规范的相对安全性。研究表明:在E1、E2地震水平下,《公路桥梁抗震设计规范》反应谱曲线数值高于《公路工程抗震规范》《公路桥梁抗震设计细则》和《城市桥梁抗震设计规范》。规范均采用极限状态设计法,以 $M-\phi$ 曲线作为强度验算指标。采用《公路工程抗震规范》荷载组合方式,结构强度验算结果相对安全性更高。

关键词: 高速公路; 抗震规范; 反应谱; 强度验算

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0154-05

Study on Seismic Performance of Highway Bridge Based on Response Spectrum Design

CHEN Zhuangzhuang^{1,2}

(1. Lianyungang Railway Development Center, Lianyungang 222006, China; 2. Lianyungang Expressway Construction Command, Lianyungang 222006, China)

Abstract: The *Code for Seismic Design of Highway Bridges*, *Code for Seismic Resistance of Highway Engineering*, *Detailed Rules for Seismic Design of Highway Bridges* and *Code for Seismic Design of Urban Bridges* are the main reference specifications for the design of expressway bridges. However, there are differences in the definition formula of the reaction spectrum curve, the parameter values, and the relative safety of intensity verification. Through an engineering case, the ground motion input level of each code at the level of E1 and E2 earthquake is analyzed, and the relative safety of each code is evaluated. The study shows that under the E1 and E2 seismic level, the response spectrum curve value of *Code for Seismic Design of Highway Bridges* is higher than that of *Code for Seismic Resistance of Highway Engineering*, *Detailed Rules for Seismic Design of Highway Bridges* and *Code for Seismic Design of Urban Bridges*. All the specifications adopt the limit state design method, and the $M-\phi$ curve is used as the strength verification index. The load combination method of *Code for Seismic Design of Highway Engineering* is adopted, and the results of structural strength verification are relatively safer.

Keywords: expressway; code for seismic resistance; response spectrum; strength verification

0 引言

目前高速公路桥梁抗震设计采用的规范主要有《公路工程抗震规范》(JTG B02—2013)^[1](以下简称“13公路抗规”)《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[2](以下简称“20公桥抗规”)《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[3](以下简称“08公路抗震细则”)和《城市桥梁抗震设计规

范》(CJJ 166—2011)^[3](以下简称“11城桥抗规”)^[4]。

设计人员通常采用的设计方式是:单独采用4本规范进行抗震设计验算^[5-6]或是抗震设计性能优化评价^[7]。部分研究人员虽然对规范之间的地震动参数、修订内容等进行了比较^[8-10],但地震动水平差异以及强度验算指标的相对安全性尚未可知。

基于反应谱的抗震验算是保证结构设计安全的重要阶段,影响结构的配筋。因此,本文以新建连宿高速公路徐圩—灌云段仲集南互通主线桥53.5 m+85 m+53.5 m的悬浇连续梁为背景,研究比较各规范在E1、E2地震水平下的地震动输入水平、设防水准

收稿日期: 2024-05-04

作者简介: 陈壮壮(1993—),男,硕士,工程师,从事高速公路建设工作。

差异和强度验算时的相对安全性。

1 工程概况

连宿高速公路徐圩—灌云段是《江苏省高速公路网规划(2017—2035年)》“十五射六纵十横”中“横三线”的重要组成部分,编号S16,采用双向4车道高速公路标准建设,设计速度为120 km/h。仲集南互通主线桥为53.5 m+85 m+53.5 m的悬浇连续梁,上部结构为单箱单室变截面预应力混凝土连续箱梁,下部结构中墩为薄壁墩,边墩为单盖梁双柱墩,基础为钻孔灌注桩。设计基本地震峰值加速度为0.1g,抗震设防烈度为Ⅶ度,Ⅲ类场地,特征周期为0.45 s,结构阻尼比为0.05。

2 各规范设防分类、设防标准及反应谱

2.1 设防标准和设防类别

各规范对于该工程高速公路桥梁抗震设防水准的规定见表1。

表1 高速公路桥梁设防类别和设防水准的规定

规范名称	设防类别	E1设防水准	E2设防水准
20公桥抗规	B类	50 a超越概率10%	50 a超越概2.5%
13公路抗规	B类	50 a超越概率10%	50 a超越概2.5%
08公路抗震细则	B类	50 a超越概率10%	50 a超越概2.5%
11城桥抗规	乙类	50 a超越概率10%	50 a超越概2.5%

由表1可知:4本规范在E1、E2地震水平的年超越概率一致,从概念上未见差异,超越概率决定了地震强度等级,下面从规范反应谱曲线定义角度继续研究各规范之间在地震动输入水平上是否存在差异。

2.2 规范反应谱曲线

规范反应谱是地震输入水平的图形表达,决定了结构在抗震设计时的配筋形式是采用构造配筋还是强度配筋。虽然各规范均采用加速度反应谱(S),但各自在反应谱公式的定义上存在差别。结合该工程,20公桥抗规、13公路抗规、08公路抗震细则和11城桥抗规对于反应谱值规定分别见式(1)~式(4):

$$S(T) = \begin{cases} S_{\max}(0.6T/T_0 + 0.4) & T \leq T_0 \\ S_{\max} & T_0 < T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T_g < T \leq 10s \end{cases} \quad (1)$$

$$S(T) = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T < 0.1s \\ S_{\max} & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T > T_g \end{cases} \quad (2)$$

$$S(T) = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T < 0.1s \\ S_{\max} & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T > T_g \end{cases} \quad (3)$$

$$S(T) = \begin{cases} 0.45S_{\max} & T = 0s \\ S_{\max} & 0.1s < T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T)^{0.9} & T_g < T \leq 5T_g \\ [0.235 - 0.02(T - 5T_g)]S_{\max} & 5T_g < T \leq 6s \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_g 为特征周期,s; T 为结构自振周期,s; T_0 为反应谱直线上升段最大周期,取0.1 s; $S_{\max}$ 为水平设计加速度反应谱最大值。

对于 $S_{\max}$ 的规定分别见式(4)~(8):

$$S_{\max} = 2.5C_iC_sC_dA \quad (5)$$

$$S_{\max} = 2.5C_iC_sC_dA_h \quad (6)$$

$$S_{\max} = 2.25C_iC_sC_dA \quad (7)$$

$$S_{\max} = 2.25A \quad (8)$$

式中: C_i 为抗震重要性系数; C_s 为场地系数; C_d 为阻尼调整系数; A 和 A_h 为水平向基本地震动峰值加速度。

现以该工程为例,统一以加速度谱形式列出各规范的反应谱 $S(T)$ 曲线如图1所示。

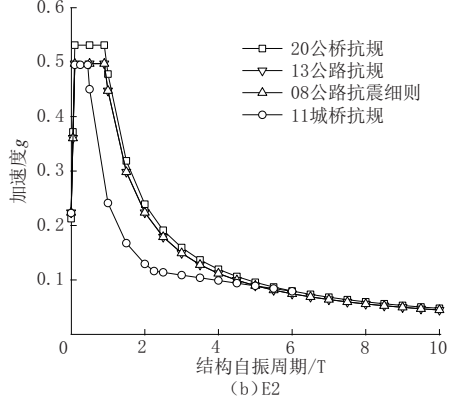
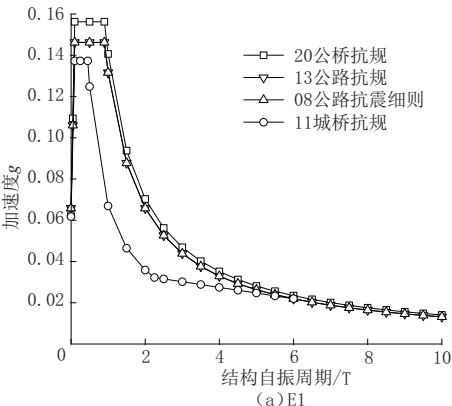


图1 E1、E2地震水平规范反应谱曲线

由图1可以看出:结构周期处于0.1~10 s范围内反应谱谱值,20公桥抗规最大,13公路抗规、08公路抗震细则反应谱曲线完全重合,11城市桥梁抗震设计规范最小,四本规范反应谱峰值E1地震水平

由大到小依次为0.156g、0.146g、0.146g、0.137g, E2地震水平由大到小依次为0.531g、0.497g、0.497g、0.495g。在同一地震水平下,分析原因主要如下。

(1) 20公桥抗规对于公式 S_{max} 中的常数取值为2.5,而其他3本规范取值为2.25,前者是后者的1.1倍。

(2) 对于峰值加速度A,规范考虑了 C_i 、 C_s 、 C_d 系数的影响,其中11城桥抗规只考虑 C_i 地震调整系数。四本规范调整系数各自乘积分别为0.625、0.65、0.65、0.61,其差异较小。

由此可见,同一地震水平下,在 S_{max} 公式定义的常数值和系数的综合影响下,20公桥抗规反应谱谱值最大,其结构抗震设防标准及安全性更高。因此,在进行高速公路桥梁抗震设计地震动反应谱输入时,建议以20公桥抗规为准。

3 规范验算指标对比分析

3.1 强度指标内在关系剖析

3.1.1 构件承载力

桥梁墩柱构件的强度验算,实质是截面受弯构件的承载能力极限状态设计,理论依据为弯矩—曲率($M-\phi$)曲线中的初始屈服弯矩点。

在重力荷载与地震荷载组合下进行墩柱正截面受弯承载力强度验算时,要求结构处于弹性状态。首先是根据响应轴力 N 确定 $M-\phi$ 曲线,当响应弯矩 M 小于初始屈服弯矩 M_{y0} ,即钢筋的受拉屈服点时,整个截面保持弹性。

3.1.2 规范公式及指标

13公路抗规采用式(9)验算其承载能力极限状态下地震作用偶然组合时的承载能力,其中,对于永久作用风险系数 γ_{Gi} 或结构构件的抗力函数 $R(\cdot)$ 的取值规定按现行《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)(以下简称“公路圬工桥规”)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(以下简称“公路混规”)为标准:

$$\gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} S_{GiK} + \sum_{j=1}^n S_{QjK} + Q_e \right) \leq R(\gamma_I, f_K, \gamma_a, \alpha_K) \quad (9)$$

20公桥抗规和08公路抗震细则规定,按照现行公路圬工桥规和公路混规采用式(10)验算其承载能力极限状态下地震作用偶然组合时的承载能力:

$$\gamma_0 S \leq R(f_d, a_d) \quad (10)$$

式中:作用效应组合设计值 S 按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)采用式(11)计算:

$$S \left(\sum_{i=1}^m G_{ik}, A_d, (\psi_{f1} \text{ 或 } \psi_{q1}) Q_{1k}, \sum_{j=2}^m \psi_{qj} Q_{jk} \right) \quad (11)$$

11城桥抗规规定:“采用A类抗震设计方法设计的桥梁,顺桥向和横桥向EI地震作用进行效应最不利组合,按公路混规采用式(10)验算桥墩强度”。

3.1.3 荷载组合

该工程 γ_0 结构重要性系数取1.1,仅考虑重力与地震荷载进行组合,荷载分项系数如表2所列。

表2 规范荷载组合分项系数

规范名称	重力荷载分项系数	地震荷载分项系数
20公桥抗规	1.0	1.0
13公路抗规	1.2	1.0
08公路抗震细则	1.0	1.0
11城桥抗规	1.0	1.0

荷载分项系数是对荷载概率水平以及结构重要性在响应角度上的综合考虑,由表2可知:13公路抗规将重力荷载放大了1.2倍,原因是其赋予了永久作用分项系数 γ_{Gi} 。当与地震荷载组合时,重力荷载为不利荷载,其自重越大,结构响应越大,对结构的安全性要求越高。

结构的安全性是由响应和能力的比值决定,由于规范反应谱曲线及荷载组合分项系数之间均存在差异,导致墩柱响应弯矩 M 和初始屈服弯矩 M_{y0} (即抗力 R)不同,结构相对安全性无法确定,需要结合本工程进行下一步研究。

3.2 工程实例校验

本节以连宿高速公路徐圩至灌云段仲集南互通主线桥53.5 m+85 m+53.5 m悬浇连续梁为例,分别按照20公桥抗规、13公路抗规、08公路抗震细则和11城桥抗规各自规范反应谱进行地震动输入,进一步观察规范在验算指标 $M-\phi$ 曲线相对安全性的差异。

采用有限元软件建立双支座空间有限元模型,活动盆式支座采用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟,不考虑相邻简支梁的影响,建立3跨连续梁全桥模型并将桥墩编号为1#~6#(见图2),边墩及中墩标准断面图如图3所示。桥墩、主梁、盖梁采用空间梁单元,采用弹簧刚度矩阵模拟钻孔灌注桩基础(即根据地勘资料得到各墩底桩基础长度范围内非岩石类土层 m 值,采用桩基设计软件求得 x 、 y 、 z 三向位移及转角的柔度矩阵,进而转化成刚度矩阵,并通过有限元软件节点弹性支承施加于承台底)。

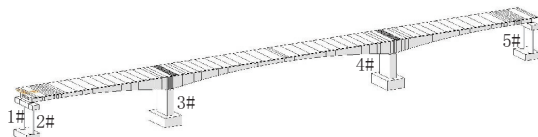


图2 悬浇连续梁全桥模型

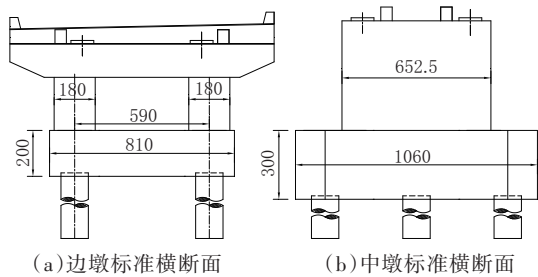


图3 边墩及中墩标准断面图(单位:cm)

以1#边墩为例,其截面尺寸及材料:直径1 800 mm圆形截面,HRB400钢筋,墩身C35混凝土,钢筋抗拉强度设计值 f_{sd} 为330 MPa,无约束混凝土厚度为45 mm,钢筋直径28 mm(纵筋)、10 mm(箍筋)。利用截面分析软件进行截面配筋,并计算E1地震水平下 E_x 及 E_y 地震工况下弯矩—曲率曲线如图4所示,正截面抗弯承载力计算结果如表3所列。

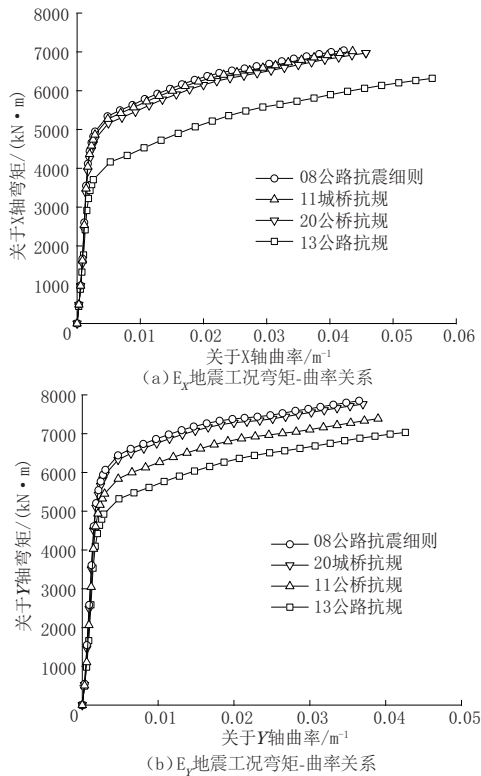


图4 1#边墩 E_x 及 E_y 地震工况弯矩-曲率曲线图

由表3可以看出,在E1地震水平 E_x 、 E_y 地震工况下,对于1#边墩:

(1)最不利弯矩 $M <$ 初始屈服弯矩 M_{y0} ,结构处于弹性范围内。

(2)对于最不利轴力 N 和最不利弯矩 M 值,13公路抗规最大,08公路抗震细则最小。通过前述“规范公式及指标对比”,原因是13公路抗规自重荷载永久作用分项系数 γ_G 是另外其他规范的1.2倍,自重越大,相同地震水准的响应越大;20公桥抗规反应谱曲线峰值是其他规范的1.1倍,在自重荷载相同的情

表3 承载力验算

项目	地震 工况	最不利 轴力 N / kN	最不利弯矩 $M /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	初始屈服 弯矩 M_{y0}	响应/ 能力
20 公桥 抗规	E_x	3 218.7	1 274.8	3 357.0	0.38
	E_y	1 381.7	2 745.4	4 493.0	0.61
13 公路 抗规	E_x	4 699.0	1 193.5	2 414.0	0.49
	E_y	2 951.3	2 685.4	3 531.0	0.76
08 公路 抗震细则	E_x	2 919.0	1 193.5	3 549.0	0.34
	E_y	1 199.7	2 565.5	4 610.0	0.56
11 城桥 抗规	E_x	3 034.0	1 122.1	3 476.0	0.32
	E_y	2 148.0	1 452.6	4 031.0	0.36

注:表格中“响应”是指“最不利弯矩 M ”;“能力”是指“初始屈服弯矩 M_{y0} ”;“最不利弯矩 M ”是依据有限元软件输出得到;“初始屈服弯矩 M_{y0} ”依据弯矩曲率—曲线得到。

况下,反应谱输入等级越大,响应越大;而08公路抗震细则,无论是反应谱峰值还是自重荷载均小于其他规范,以致其响应最小。

(3)对于初始屈服弯矩 M_{y0} 值,08公路抗震细则最大,13公路抗规最小。原因是在一定范围内,弯矩—轴力($M-N$)曲线为反比例曲线,最不利轴力 N 越大,初始屈服弯矩 M_{y0} 越小。

按照1#桥墩弯矩—曲率曲线所得方式,绘制1#~6#桥墩的响应—能力比曲线见图5。

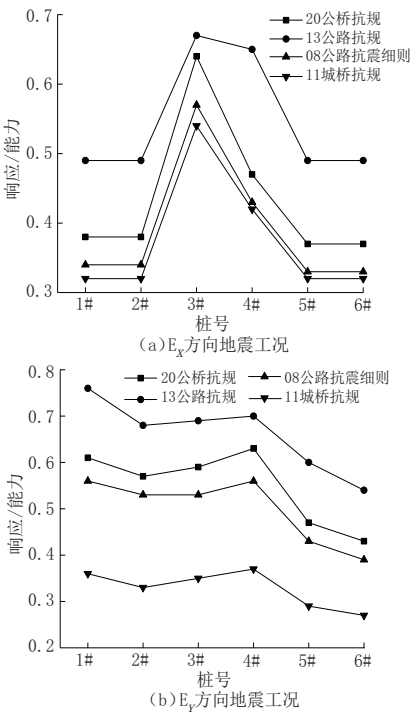


图5 1#~6#桥墩强度指标下响应/能力

由图5(a)、5(b)可以看出:

在E1地震水平 E_x 、 E_y 地震工况下,各规范的响应能力比值,13公路抗规最大,11城桥抗规最小,符合弯矩—轴力($M-N$)曲线反比例曲线规律。

同理,得到E2地震水平下1#~6#桥墩的响应/能力比曲线如图6所示。

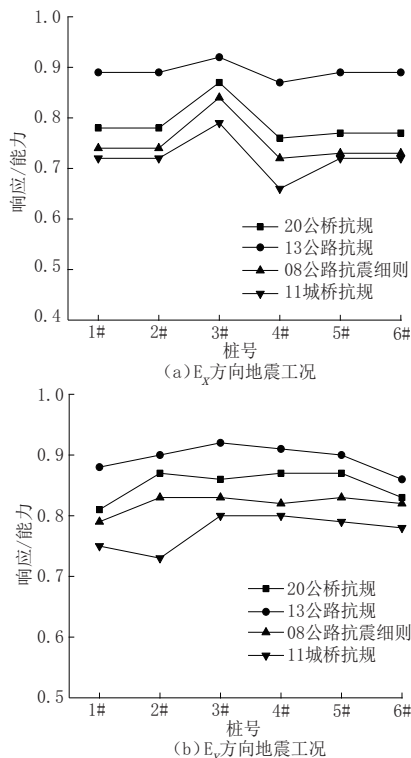


图6 1#~6#桥墩强度指标下响应/能力

由图6(a)、6(b)可以看出:在E2地震水平 E_x 、 E_y 地震工况下,各规范的响应能力比值均小于1,该工程设计保守,结构处于弹性范围内。其响应能力比与E1地震水平下一致,依旧为13公路抗规最大,11城桥抗规最小。

因此,在以 $M-\phi$ 曲线作为强度验算指标时,建议直接采用13公路抗规进行E1地震下桥墩强度验算,其响应能力比更接近于1,结构相对安全性高。

4 结 语

本文通过对比公路桥梁E1、E2地震水平设计时主要采用的规范在反应谱曲线定义方式、地震动输

入水平的差异和结构强度验算时的相对安全性,得出以下结论。

(1)13公路抗规、20公桥抗规、08公路抗震细则和11城桥抗规在E1、E2地震水平下的年超越概率均分别为50年超越概率10%和50 a超越概率2.5%。

(2)对于反应谱谱值,20公桥抗规最大,在该工程实例中,其峰值约是其他3个规范的1.1倍。反应谱取值决定地震动输入水准和结构在地震作用下的响应值,从结构验算的相对安全性角度出发,地震动输入应以20公桥抗规反应谱曲线为准。

(3)在结构处于弹性范围内的强度验算时,抗震规范均采用以 $(M-\phi)$ 曲线(对应钢筋达到初始屈服状态)为验算指标的承载能力极限状态设计法,其中13公路抗规考虑了1.2倍的永久作用分项系数 γ_{Gi} 。通过工程实例分析,可直接采用13公路抗规进行桥墩强度验算,其响应能力比最接近于1,结构验算更安全。

参考文献:

- [1] JTG B02—2013,公路工程抗震规范[S].
- [2] JTG/T2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [3] JTG/B02-01—2008,公路桥梁抗震设计细则[S].
- [4] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
- [5] 陈浩.8度地震区高速公路桥墩抗震设计分析[J].山东交通科技, 2022(3):57-61.
- [6] 王迎法,刘朝福,何能.高烈度区桥梁工程地震动参数取值分析与抗震设计[J].建筑结构,2023,53(增刊2):758-762.
- [7] 王雪玮,康斌锴,徐胜乐.公路桥梁设计及其抗震优化分析[J].内蒙古公路与运输,2023(6):35-38.
- [8] 李延,闫桂豪.桥梁抗震规范地震动参数与结构响应对比分析[J].四川建筑,2022,42(3):219-221.
- [9] 唐光武,郑万山,刘海明.JTG/T 2231-01—2020《公路桥梁抗震设计规范》修订简介[J].公路交通技术,2021,37(6):103-107.
- [10] 肖飞.公路桥梁抗震设计规范的分析与研究[J].黑龙江交通科技,2017,40(11):104-106.

《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

