

地震动竖向设计反应谱研究综述

马 慧*, 石邦宇, 罗中民, 雷 真[#]

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年2月21日; 录用日期: 2025年3月13日; 发布日期: 2025年3月25日

摘 要

近年来, 竖向地震动的影响越来越被人们重视。特别是对于大跨度及超高层结构来说, 其抗震设计中需要考虑到竖向地震动影响。国内外各个学者也对竖向地震动进行了深入的研究。目前普遍认为竖向加速度反应谱统计平均值在与水平加速度反应谱的 $1/2 \sim 2/3$ 之间。但实际上影响竖向加速度反应谱的因素众多且关系复杂, 在某些特定的地质以及震源条件下甚至会超过规范规定的50%。本文回顾了国内外对竖向设计反应谱的研究现状, 对目前的研究进行了总结, 发现竖向设计反应谱的基本研究方式是从竖向地震动的预测方程和V/H谱比值两方面入手。同时比较了各个方法的优劣, 并给出了竖向设计反应谱的数据处理过程, 为以后的竖向地震设计反应谱的深入研究提出一些参考。

关键词

地震动, 竖向设计反应谱, 数据处理

Review of Vertical Response Spectrum of Earthquake

Hui Ma*, Bangyu Shi, Zhongmin Luo, Zhen Lei[#]

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Feb. 21st, 2025; accepted: Mar. 13th, 2025; published: Mar. 25th, 2025

Abstract

In recent years, people pay more and more attention to the influence of vertical ground motion. Especially for large-span and super high-rise structures, the vertical seismic effect should be considered in the seismic design. Scholars at home and abroad have also conducted in-depth research

*第一作者。

[#]通讯作者。

on vertical ground motion. At present, it is generally considered that the statistical average value of vertical acceleration response spectrum and horizontal acceleration response spectrum is between $1/2 \sim 2/3$. But in fact, there are many factors that affect the response spectrum of vertical acceleration, and the relationship is complex. In some specific geological and focal conditions, it will even exceed 50% of the standard. This paper reviews the research status of vertical design response spectrum at home and abroad, summarizes the current research and finds that the basic research methods of vertical design response spectrum are from the prediction equation of vertical ground motion and V/H spectrum value ratio. At the same time, the advantages and disadvantages of each method are compared, and the data processing process of the vertical design response spectrum is given, which provides some references for the further study of the vertical seismic design response spectrum.

Keywords

Ground Motion, Vertical Design Response Spectrum, Data Processing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震是危及人民生命和财产安全的突发性自然灾害。随着社会的发展越来越快,城市化的进程加快,楼层的不断加高,地震对建筑物和构筑物的影响越来越大。

地震引起的地面震动分为水平运动和竖向运动。地震工程的传统观点都认为是水平力对地震破坏起着决定性作用[1][2],而认为竖向地震动在地震作用中对建筑物的影响甚微。因此,在进行建筑物的抗震设防设计时,需在考虑构件竖向刚度、强度和稳定性的同时,确保其能够承受竖向地震动加速度(通常取水平向加速度的 $2/3$)与重力荷载同时作用。并未对结构的竖向抗震设防做过多的考虑。

在 1999 年台湾地区集集地震和 1995 年日本的 Kobe 地震的震害调查中,研究人员发现了竖向地震力的破坏痕迹[3]-[7]。在高烈度区尤其是震中区和近断层区,竖向地震动的作用显著。唐山地震中,9 度区内徐家楼的一座约 100 t 的变压器,跳出轨道外 0.4 m 依然站立;在 1985 年四川自贡的 4.8 级地震中,陈念英[8]在对震区进行震害调查后发现,此次地震竖向地震力对破坏起了主导作用。种种研究表示:竖向地震动的作用在抗震设防中是不可忽视的因素。

早期地震动研究中对竖向地震动特性进行过统计分析[9],认为应以两个水平加速度分量中的较大值作为基数,则竖向峰值加速度的数值等于这个基数的 $1/3 \sim 1/2$ 之间,同时竖向地震反应谱和水平向反应谱谱型相似。

反应谱的概念由 BIOT (1932 年)[10]提出,用其表示在地震作用下,一系列具有相同阻尼比不同自振周期的弹性单自由度体系的最大反应随体系自振周期的变化关系曲线。在中国抗震设计规范中,刘恢先[11]将反应谱理论应用于抗震设计中。如图 1 所示,我国采用的设计反应谱是以地震影响系数 $\alpha(T)$ 形的形式给出的,水平地震影响系数最大值按表 1 取用,主要由地震烈度控制(括号中数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15 g 和 0.30 g 的地区);特征周期根据场地类别和设计地震分组按表 2 取用;在计算罕遇地震作用时,特征周期应增加 0.05 g。

随着对竖向地震动研究的深入,学者们的共同观点是竖向反应谱与场地条件、周期、震级、断层角以及震源距有着密切的关联。

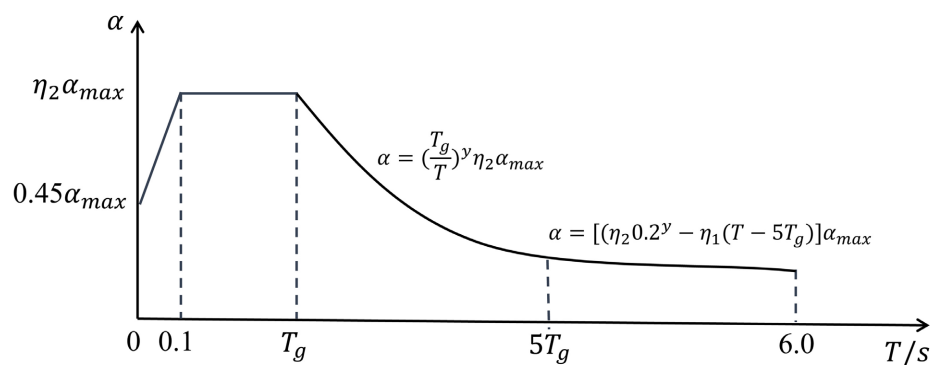


Figure 1. Building code design response spectrum curve. Note: α is the seismic impact factor; α_{max} is the maximum value of the seismic impact factor

图 1. 建筑规范设计反应谱曲线。注: α 为地震影响系数; α_{max} 为地震影响系数最大值

Table 1. Maximum horizontal seismic impact factor α_{max}

表 1. 水平地震影响系数最大值 α_{max}

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	0.04	0.08 (0.12)	0.16 (0.24)	0.32
罕遇地震	0.28	0.50 (0.72)	0.90 (1.20)	1.40

Table 2. Characteristic period T_g (s)

表 2. 特征周期 T_g (s)

设计地震分组	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
第一组	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

为了进一步研究竖向地震动对建筑物的影响,国内外研究学者对其进行了深入的研究,竖向反应谱的研究方向主要目的就是建立竖向设计反应谱,研究表明建立竖向设计反应谱的方法有两个:第一种是利用竖向地震动预测方程(GMPEs)进行概率地震的危险性分析(PSHA);第二种是利用 V/H 的谱值比,将水平向反应谱调整为竖向反应谱。使用水平向 GMPEs 来执行 PSHA,将水平谱缩放为竖向谱;方法一对于某一特定区域的地震动预测会较为准确,其局限性在于数据的局限,缺少一些特定区域的 GMPEs。同时在此方法下的预测方程可能存在竖向和水平向反应谱的不匹配性。第二种方法则可以很好地解决方法已存在的两种缺陷。两种方法皆可为工程结构抗震和竖向设计反应谱的制定提供一定的依据。经过笔者的总结,竖向设计反应谱的研究方法基本概括如图 2 所示。

概率地震危险性分析方法(PSHA)是地震危险性分析最为常用的方法,其基本思路和计算方法概括如下:

1) 确定地震统计单元,以此作为考虑地震活动时间非均匀性,对每个统计单元采用分段的泊松过程模型。令地震带的震级上限为 M_{uz} , 震级下限为 M_0 , t 年内 $M_0 \sim M_{uz}$ 之间地震年平均发生率 ν_0 , 则未来 t 年发生 n 次地震的概率为:

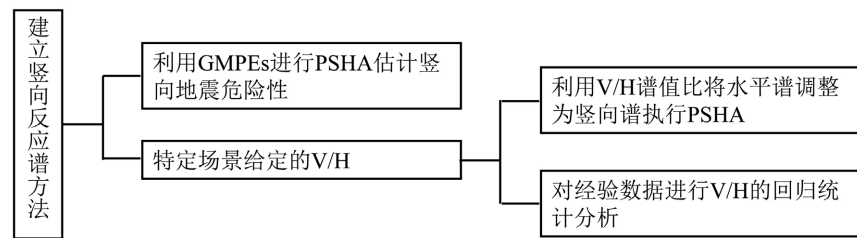


Figure 2. The establishment method of response spectrum in vertical design
图 2. 竖向设计反应谱建立方法

$$P(N=n) = \frac{(v_0 t)^n}{n!} e^{-v_0 t}$$

同时统计单元内地震活动遵从修正的震级 - 频度关系:

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(M-M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_{\max}-M_0)}}$$

其中 $\beta = b \ln 10$, b 为震级频度关系的斜率。震级 m 分为 N_m 档, m_j 表示震级范围为 $(m_j \pm \frac{1}{2} \Delta m)$ 的震级档。则地震带内发生 m_j 档地震的概率:

$$p(m_j) = \frac{2}{\beta} f(m_j) \text{Sh}\left(\frac{1}{2} \beta \Delta m\right)$$

- 2) 在地震带内部划分潜在震源区, 假定地震带内共划分出 N_s 个潜在震源区。
- 3) 利用分段泊松分布模型和全概率公式, 计算统计单元内地震动值 A 超越给定值 a 的概率:

$$P_k(A \geq a) = 1 - \exp \left\{ -\frac{2v_0}{\beta} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iiint P(A \geq a | E) f(\theta) \frac{f_{i,m_j}}{A(s_i)} \text{sh}\left(\frac{1}{2} \beta \Delta m\right) dx dy d\theta \right\}$$

式中, $A(s_i)$ 为地震带内第 i 个潜在震源区的面积, $P(A \geq a | E)$ 为地震带内第 i 个潜在震源区内发生特定事件时 A 超越给定值 a 的概率, $f(\theta)$ 为破裂方向的概率密度函数。

2. 竖向地震动预测方程谱型分析

2.1. 竖向反应谱特征

国内学者周正华[12]在用国内外 18 次地震的 436 条竖向地震动加速度记录作为数据基础进行统计分析, 对谱型的直接研究结果表明: 竖向地震动的反应谱受到场地条件的影响很大, 并且与地震强度是有相互关联的, 是周期的函数; 其后在与水平谱进行对比发现在中高频竖向地震动反应谱小于水平向反应谱, 长周期部分竖向反应谱接近水平向反应谱。

齐娟、罗开海[13]依据 171 次地震 3462 组分量的地震记录, 从定性的角度分析了竖向地震动反应谱的曲线特征: 竖向地震动反应谱曲线形状也水平地震动曲线相似, 不同于竖向曲线更贴近于 β 轴, 下降段衰减指数较小; 与国外一些学者类似的结论是震级震中距和地面运动的强度对竖向曲线影响较大。

国外学者 Bozorgnia, Yousef 和 Niazi, Maryam [14]在对美国 California 的 Loma Prieta 地震竖向地震动反应谱进行研究发现反应谱的形状变化既与距离有关同时与震级也有关联性。

2.2. 竖向地震动设计反应谱

为了更进一步对竖向加速度反应谱进行研究, 并且以为工程结构设计反应谱的制定提供理论依据为

目的,在上文统计了各个分组的竖向地震动反应谱基础上,学者们使用与研究水平反应谱相类似的方法对竖向地震动反应谱进行标定拟合,以确定出竖向地震动设计反应谱。通常竖向地震反应谱标准曲线涉及到的参数有四个:平台值 C 、特征周期 T_g 、衰减指数 γ 。以下是一些国内外学者对这些特征参数的详细研究结论。

2.2.1. 竖向加速度设计谱平台值 C

高跃春和林淋[15]以平均竖向加速度反应谱为基础,对不同的场地、不同强度的竖向地震动反应谱,用最小二乘法对不同分组的统计数据的平均竖向加速度进行拟合:

$$Q = \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S}_i)^2$$

其中 $\bar{S}_i$ 为统计平均竖向加速度反应谱值, S_i 为拟合谱值。令

$$S_i = \begin{cases} C, & 0 \leq T_i < T_g \\ C \left(\frac{T_g}{T_i} \right)^\gamma, & T_g \leq T_i < 6 \end{cases}$$

求 C 、 γ 和 T_g , 使 Q 取最小值, 既满足

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial C} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \gamma} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial T_g} = 0 \end{cases}$$

式中: C 为竖向设计反应谱平台值, γ 为衰减指数, T_g 为特征值。

得到了竖向设计反应谱的平台值 C 受场地条件和地震动的强度影响较大的结论。

赵培培[16]在对川滇甘陕地区不同场地类别、不同震级和不同震中距地震记录进行统计分析,取 II 类场地和同震中距的 142 条记录进行研究,给出了放大系数谱平台值与震级的拟合公式。

$$\beta_{max} = 0.39M + 0.25$$

式中, β_{max} 是放大系数谱平台值, M 是震级。

得出结果表示,相同场地类比而下,无论近场远场,规准反应谱的平台值有随震级的增大而增大的趋势。

对汶川主震(M8.0) II 类场地的放大系数谱平台值随震中距 R 分布的离散点图进行拟合:

$$\beta_{max} = -0.00124R + 2.96$$

在加速反应谱平台中,平台值随着场地类别的提高而增大,随震中距增大而减小,随震级增大而增大。

2.2.2. 竖向加速度设计谱特征周期 T_g

赵培培[17]对汶川主震(M8.0)分别进行震级、震源距和场地条件的分类统计分析,得到 II 类场地的特征周期 T_g 与震级 M 的拟合方程:

$$T_g = 0.035M + 0.076$$

特征周期 T_g 与震中距 R 的拟合方程:

$$T_g = 0.0028R - 0.048$$

得到以下结论:

- 1) 随着场地类别的提高,无论是在大震、小震还是近场远场,特征周期都呈现增大的趋势;
- 2) 随着震级的增大在同一场地条件下的特征周期也随之增大;
- 3) 特征周期随震中距增大而增大。

Elnasshai、Elgamal 等根据不同的资料提出在各种阻尼下的近场地震设计反应谱[18][19]。Elgamal 等建议由 Elnashai 等提出的参考设计谱可以用于阻尼为 2% 的近场地震设计,建议远场地震设计反应谱的 T_0 、 T_g 分别为 0.05 s 和 0.20 s。

2.2.3. 竖向加速度设计谱衰减指数 γ

周正华[20]以国内外 18 次地震的 436 条竖向地震动加速度记录作为基础,对竖向地震动的反应谱特性进行了统计和分析,采用最小二乘拟合法分别对统计分组的平均竖向加速度反应谱进行拟合,拟合结果表明:竖向设计反应谱的衰减指数 γ 均为 0.8 不受场地类别和震动强度的影响。

齐娟和罗开海[13]根据 3462 组三分量地震记录,对竖向地震动记录进行分组分析,得出对衰减指数的结果:竖向反应谱衰减指数是小于水平方向的标准反应的。因此,采用和水平反应谱同样的衰减指数是不合理的,应根据将来更多的强震记录进行统计回归分析,得到合理可供设计使用的衰减指数参数。

3. 竖向加速度反应谱与水平向加速度谱谱值比 V/H 的分析

传统来说,研究者们开发 V/H 谱值比通常有两种方式,方法一是通过相同的数据库和函数来独立开发 V/H 的地震动模型(GMMS)再去估计 V/H 的中值,其优点在于保留了竖向,水平向反应谱的全部特征;缺点是难以计算残差和标准差;方法二是直接对 V/H 进行经验回归统计分析,优点在于此方法可以直接计算事件间和事件内的残差以及 V/H 比的标准差,缺点在于可能会导致由此方法导出的竖向反应谱与直接从经验数据开发出来的竖向反应谱并不一致;但总的来说,两种方式皆可用来研究竖向地震动设计反应谱的影响因素,其主要分为震级、震中距、上下盘、断层距、发震机制等等复杂影响因素。

3.1. 不同震级对竖向反应谱谱值比的影响

李恒、秦小军[7]采用全球范围内的 128 次地震的 3235 组三分量强震记录,通过先拟合经验衰减公式,然后计算谱值比的方法,减少拟合经验衰减模型的误差。研究发现震级对谱比的影响在长周期处影响明显,表现出震级越大,谱比比值越大的规律,在短周期段变化尚不明显。

贾俊峰、欧进萍[6]在研究近断层竖向与水平向地震动反应谱比值特征中。研究了竖向与水平向加速度谱谱值比与震级的关系,发现短周期处逆断层进场处震级的影响较大,大于一般抗震规范所规定的 2/3 比值;在中长周期,逆断层较大震级时反应谱比值也会大于 2/3。

3.2. 震中距对竖向反应谱谱值比的影响

耿淑伟、陶夏新[21]利用水平向 444 条,竖直向 228 条的实际强震记录,统计在不同震级下的加速度反应谱竖向与水平向分量(V/H)的平均值,发现震中距对 V/H 的比值影响很大,在近场处,竖向反应谱几乎等同于水平向反应谱;李恒分析在不同震级多因素的影响下,得出在大震中,长周期段的 V/H 随震中距增大而减小;中强震中, V/H 在近场时,震中距越大, V/H 比值越大;远场时, V/H 随震中距增大而减小。

Bozorgnia 和 Niazi [22]在对美国北岭地震进行研究时,其研究结果发现:北岭地震的竖向与水平向

谱比值是周期和震源距离的函数，并且在近场处超过 2/3。

3.3. 不同场地条件对竖向反应谱谱值比的影响

周锡元、徐平[23]在对 1999 年台湾地区集集地震近断层的竖向和水平反应谱比值的研究中，得到在长周期部分(>0.4 s)，硬土上的谱比值 V/H 略大于软土上的相应比值的结论。

Y. Bozorgnia 等人[24]在 1999 年基于 36 次地震的 443 条近场加速度记录，对 V/H 比进行了一系列的研究，发现：在短短周期结构中 V/H 最大值在近场的软土地场中出现，甚至在 0.1 s 处超过了 1.5，可能对结构破坏造成大的影响；在长周期结构中，最大值则出现在硬土基岩场地，最大为 0.7。以上研究结果认为美国 UBC-97 规范对于短周期结构在软土地场上的规定并不安全，反之长周期段硬土地场则过于保守。

3.4. 结构周期对竖向反应谱谱值比的影响

耿淑伟等[21] 2004 年以美国西部 254 个有钻孔资料太的强震记录为基础，统计出 444 条水平向和 228 条竖向记录，对地震动加速度反应谱的竖向和水平向反应谱比值进行了研究，发现结构的周期长短对谱比值是有一定影响的。短周期结构时，有一个 1.0 的峰值，且在 0.2~1 s 处有一个 0.4 的低谷；长周期结构时，谱比值趋于稳定，趋近于 0.6，具体研究结果如图 3 所示：

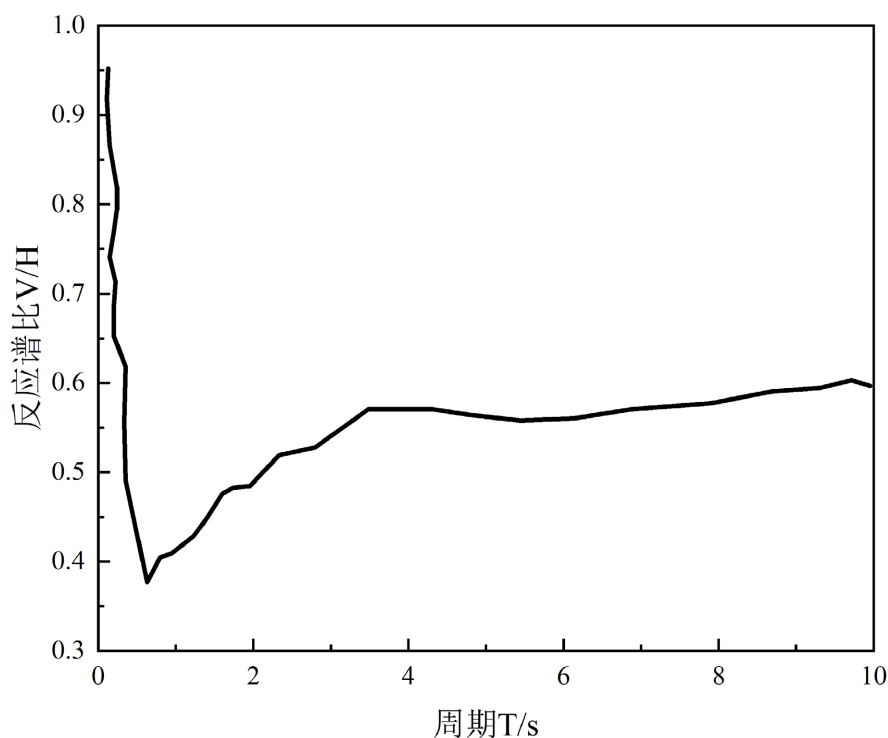


Figure 3. The relationship between the ratio of V/h response spectrum value and structure period

图 3. V/H 反应谱谱值比与结构周期关系

Campbell 和 Bozorgnia [25]对周期处于 0.04 到 3 s 之间的竖向和水平向加速度反应谱比值进行了研究，结果表明，短周期内(<0.1 s)竖向与水平向加速度反应谱比值有时会超过 1，甚至最高达到 1.8，高于 65%数倍，而在周期 0.3~1 s 内，比值则低于 50%很多。

4. 竖向反应谱加速度峰值比统计分析

4.1. 不同震级对竖向反应谱峰值比的影响

周正华[26]等人研究发现震级对峰值比有明显影响；赵培培在设计反应谱拟合方法研究及特征参数统计中对震级与竖向反应谱峰值比的关系进行了统计分析，综合来看可得结论：① 随着场地类别的提高，小震峰值比表达，大震峰值比较小；② 峰值比随震级增大而增大，变化平缓。

4.2. 震中距对竖向反应谱峰值比的影响

韩建平、周伟[27]对国家强震台网中心收集发布的 2008 年的汶川大地震在四川、山西、甘肃分布的 94 个站台所记录到的各个分量加速度进行了统计拟合。震中距对竖向与水平峰值加速度由一定影响。在震源附近，竖向地震动峰值加速度较大，但震中距越大，其竖向与水平向的地震动加速度峰值比衰减的也越快。

周正华、周雍年[26]在强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析一文中，给出了近场加速度峰值比和震中距的关系。呈现出随着震中距的增大，峰值比逐渐减小的关系。

4.3. 不同场地条件对竖向反应谱峰值比的影响

周正华、周雍年[20]在收集 1999 年台湾地区集集地震的竖向与水平向加速度反应谱后，得出反应谱比与场地的软硬程度有关，且呈现出周期性。短周期处，场地越软， V/H 越小；长周期处，场地越硬， V/H 越大。

耿淑伟[21]同样发现 V/H 与场地条件有十分密切的联系，并给出了精确的数值，I 类场地条件下，在短周期时比值峰值为 0.7，II、III 类场地条件下 V/H 峰值增大到 1.1；在长周期时，随着场地由 I、II、III 分类下， V/H 呈现由大到小的趋势变化。

4.4. 上盘效应对竖向反应谱峰值比的影响

谢俊举、温增平[28]在对 I 汶川地震的近断层竖向和水平地震动特征进行了分析。研究表明地震动的加速度峰值有明显的上盘效应，距地表破裂的 3~60 km 范围内，龙门山附近的断层上盘侧竖向和水平加速度峰值比正常场地的衰减模型平均值增大 30%~40%。上盘处的加速度峰值整体大于下盘，在竖向地震动中表现尤为显著，部分地震动加速度峰值比可达到 1.4。

4.5. 断层距对竖向反应谱峰值比的影响

周正华、周雍年[23]统计出 1999 年台湾地区集集地震结果表示： V/H 与震源距离相关，呈现出随着震源距离的增大而减小的趋势。

贾俊峰、欧进萍[6]研究了世界范围内的 M5.4~7.6 之间的地震动记录，分析出断层距在 0~40 km 范围内竖向与水平向峰值加速度比值大于一般抗震规范设计的比值 0.65，其结果为进场区域的结构抗震设计和分析地震动危险性提供了参考。

Bozorgnia 等[29]对断层距与谱值比之间关系的研究结果与其他一些国外学者[30]-[32]研究结果十分类似(Niazi *et al.*, 1992; Borzornia, 1993; Borzorgnia *et al.*, 2004)，基本结论是，在段周期处，谱值比的曲线随着断层距的减小而增大，不同断层的峰值出现在 0.05~0.1 s 之间，图 4 是 1994 年对 Northridge 地震的一个研究结果。

4.6. 竖向加速度谱的规范化分析

影响地震动的因素众多且十分复杂，且竖向地震动的记录数量有限所以再采用传统的分类方法对竖

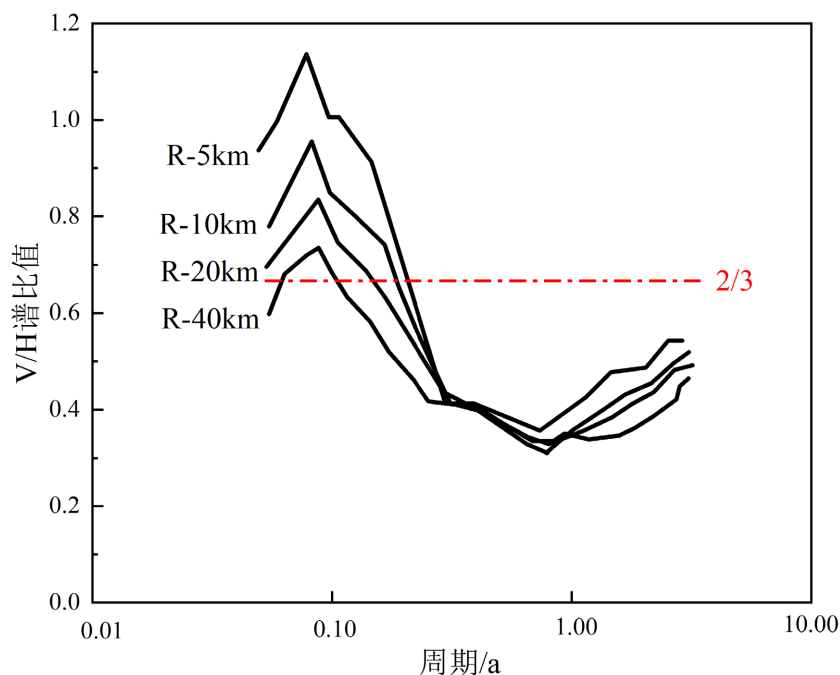


Figure 4. The relationship between the ratio of spectrum values of Northridge earthquake in 1994 and the fault distance [29]

图 4. 1994 年 Northridge 地震谱值比与断层距关系[29]

向反应谱进行研究所得到的抗震设计谱在不同国家、时期有了很大的差别，并不具有良好的统一性。因此，另辟蹊径的规准化方法处理反应谱能够让反应谱的自身具有规律性。由此产生的统一抗震设计谱理论也是现在竖向反应谱理论研究的一个方向。

竖向地震动反应谱的规准化可以分为规准化和双规准化。规准反应谱就是讲地震动加速度反应谱的谱值除以对应的地震动峰值的比值，将其纵坐标转化成无量纲的放大系数消除不同地震强度给谱值带来的影响；双规准反应谱则是更进一步用规准反应谱的峰值对应周期去除相应反应谱的横坐标，即自规准反应谱的基础上将横坐标无量纲化，其目的是为消除不同地震动的卓越周期对反应谱形状的影响。

徐龙军、谢礼立[33]以 33 此次地震动记录为基础，在考虑了震级、距离和场地条件的影响下，分别对竖向地震动的加速度规准化和双规准化反应谱进行研究。从平均意义上得出结论：震中距、震级和场地条件对竖向规准反应谱的影响较大，而在双规准反应谱，场地条件和震中距对其影响较小，震级对双规准反应谱的长周期段影响较大，且有随震级增大而减小的趋势。

5. 竖向反应谱数据处理

5.1. 数据处理技术路线图

经过对国内外研究的综合归纳总结，对竖向设计反应谱的基本处理技术路线包括了从竖向反应谱特征研究，关系式的确定，到最后的数据修正等等步骤，最终路线如图 5 所示。

5.2. 反应谱的标定方式

为了反映结构在地震时受到的竖向作用，更合理地确定竖向地震作用，最好的方法就是对竖向反应谱的特征进行直接研究。而实际的强震记录直接研究则会十分复杂，因此，学者们利用强震记录将其平滑标准化为较为简单的抗震设计谱形式，此过程就称之为反应谱的标定。

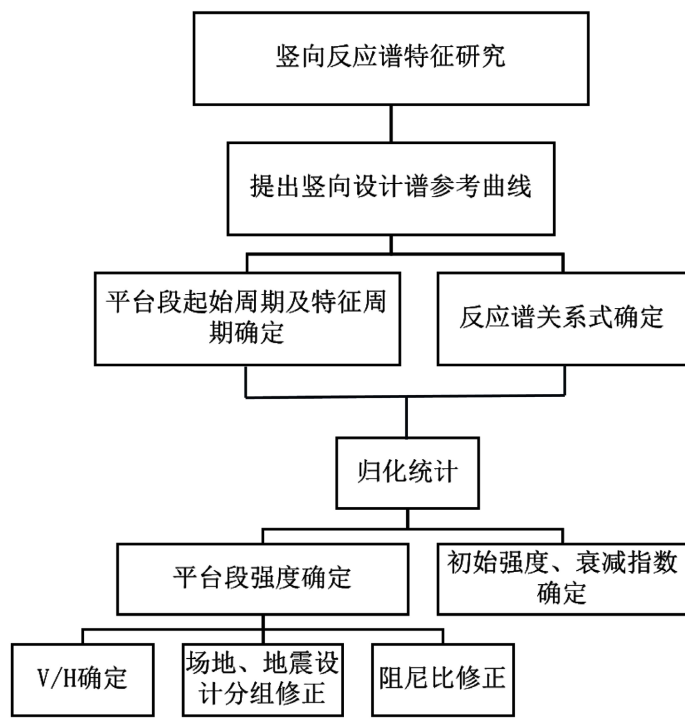


Figure 5. Data processing technology route
图 5. 数据处理技术路线

5.2.1. 双参数标定法

1978 年颁布的抗震设计规范中, 使用了我国学者周锡元[34]和刘恢先[35]先提出的用场地类别和地面峰值加速度对设计反应谱进行标定。该方法在对比单一参数地面峰值加速度对绝对加速度反应谱进行标定的方法, 补足了其不能反映出震级、距离和场地条件等因素的影响。从而可以深入研究地震环境和场地条件等因素对竖向反应谱的影响。

5.2.2. Newmark-Hall 标定法

1969 年 Newmark 等[36]提出了用地面峰值加速度 a 、峰值位移 d 和峰值速度 v 三个参数对抗震设计反应谱中的高频、中频和低频分别标定。这种方法称之为 Newmark-Hall 标定法。使用这种方法确定地震设计反应谱的关键是合理确定其中的标定常数: 低频段放大系数 K_d 、中频段放大系数 K_v 和较高频放大系数 K_a 。

5.2.3. 基于坐标变换的最小二乘法分段拟合标定法

最小二乘法作为如今地震无论竖向或是水平向反应谱的最普遍的标定方法, 是一种具有十分明确数学意义, 且易于实现的标定方法。

2008 年, 由于汶川地震的发生, 获得了大量的强震记录, 我国学者郭晓云[37]通过对汶川大地震不同场地类型的典型反应谱的标定, 提出了基于坐标变换的最小二乘法分段拟合标定法, 此法简单易行, 将多参数拟合的问题转化成线性拟合问题, 数学意义十分明确。与实际强震的反应谱十分接近, 是一种合理的反应谱标定方法。通常用最小二乘拟合法对统计分组的平均竖向加速度进行拟合, 令:

$$Q = \sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s}_i)^2 \quad (1)$$

其中 $\bar{s}_i$ 为平均竖向加速度反应谱值, s_i 是为拟合数值, 令

$$S_i = \begin{cases} C & 0 \leq T_i < T_g \\ C \left[\frac{T_g}{T_i} \right]^\gamma & T_g \leq T_i < 6 \end{cases} \quad (2)$$

求 C 、 T_g 和 γ ，使 Q 为最小值，即满足方程的解：

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial C} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \gamma} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial T_g} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

即由上述公式可确定反应谱的平台值 C ，周期 T_g 和衰减指数 γ 。

符圣聪[38]等则假设下降段指数为随机变量，依据数学模型，采用最小二乘法和方差最小原则确定出设计谱的特征参数和特征周期。给出下降段具有明确累积概率的设计加速度谱表达式，提出一种只采用震级和场地类别来决定设计加速度反应谱的简化方法。

5.2.4. 多参数拟合法

多参数拟合法包括基于遗传算法的多参数拟合法和基于标准差最小的多参数拟合法。夏江等学者[39]利用遗传算法标定反应谱。遗传算法是一种解决非线性规划问题十分有前景的方法，用地面峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)、峰值位移(PGD)三个参数去标定设计反应谱的模型。遗传算法在全局优化、非线性优化、多参数优化等方面表现出一些优势：

刘红帅[40]则提出基于小生境遗传算法的标定，将遗传算法进行了改进，将标定问题看成了多个设计反应谱特征参数的优化问题，对遗传算法进行了优化。

综上所述，我国通常使用的反应谱标定方法有 Newmark-Hall 标定法、双参数标定法、基于坐标变换的最小二乘法分段拟合标定法和多参数拟合法。标准化的反应谱形式也主要受反应谱的平台值 C 、特征周期 T_g 、和衰减指数 γ 的三个参数控制。

至此，竖向设计反应谱的三个主要参数都可拟合得出。

5.3. 竖向反应谱 V/H 关系分析过程

目前对于多组记录求谱值比 V/H 的方法有两种：一种是现计算竖向和水平向的平均反应谱，再求出二者的比值关系，Niazim [41]、Bozorgnia [42]、Campbell [43]、石树中[44]等人先对衰减经验关系进行拟合，之后再计算 V/H 比值的计算，这属于第一种方式；另一种方式是对每组记录的数据进行计算 V/H 比值，之后对谱值比进行平均[21][26]。在进行两种方法的对比之后发现，第一种方法虽具有比值上的稳定性，但一方面在拟合经验衰减关系时可能会有误差，另一方面可能由于先计算竖向和水平反应谱，一些波动可能会被掩盖。所以使用第二种方式可能会更加具有代表性。

V/H 关系式采用 Bozorgnia 和 Campbell (2016) [45]的方法，利用回归的竖向和水平向衰减关系，应用以下式子进行计算：

$$\ln(V/H) = \ln Y_v - \ln Y_h \quad (4)$$

其中， $\ln Y_v$ 和 $\ln Y_h$ 为拟合的竖向解水平向地震动衰减关系。

随后进行标准差分析和残差分析，标准差计算按如下过程进行：

$$\sigma_{\ln V/H} = \sqrt{\varphi_{\ln V/H}^2 + \tau_{\ln V/H}^2} \quad (5)$$

式中,

$$\begin{aligned} \varphi_{\ln V/H} &= \sqrt{\varphi_{\ln Y_v}^2 + \varphi_{\ln Y_h}^2 - \rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^W \varphi_{\ln Y_v} \varphi_{\ln Y_h}} \\ \tau_{\ln V/H} &= \sqrt{\tau_{\ln Y_v}^2 + \tau_{\ln Y_h}^2 - \rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^B \tau_{\ln Y_v} \tau_{\ln Y_h}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\sigma_{\ln V/H}$ 为 V/H 关系式的总标准差; $\varphi_{\ln Y_v}$, $\tau_{\ln Y_v}$ 分别为事件内和事件间的竖向地震动回归标准差; $\varphi_{\ln Y_h}$, $\tau_{\ln Y_h}$ 分别为事件内和事件间的水平地震动回归标准差; $\varphi_{\ln V/H}$, $\tau_{\ln V/H}$ 分别为事件内和事件间的 V/H 标准差; $\rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^W$, $\rho_{\ln Y_v, \ln Y_h}^B$ 分别为事件内和事件间竖向和水平向地震动衰减关系式的相关系数。

以上就是, 竖向设计反应谱的所有数据处理过程。

6. 结论与展望

目前, 本文通过详细介绍各种竖向地震动反应谱的分析方法, 以及国内外学者围绕竖向地震动特征的特征值、加速度峰值比、反应谱谱值比、规准化分析的研究结果, 让我们对于竖向地震动对构筑物或建筑物的影响不可忽视。为此笔者对研究结果也做出如下总结:

1) 以上多种分析方法均表明了一个直接的观点, 一般抗震设计规范中仅按水平加速度的一个固定比例(2/3)来计算竖向地震动是不合适的。在某些特定场地条件以及多种影响因素的作用下, 竖向地震动甚至达到了水平地震动的 1.8 倍。特别是大跨度和核电站等构筑物, 竖向地震动的影响力更是不可忽视。

2) 目前 V/H 谱比值法是设计分析竖向地震动的主流方法, 震级、震中距、场地条件、上下盘效应, 断层距、断层走向等等均影响着谱比值的大小。因此, 通过系统考虑多因素影响的回归分析方法, 开展竖向地震动谱值的定量对比研究, 是现今研究的一个趋势。

3) 竖向地震动的双规准反应谱的研究中, 其在震中距、场地条件和震级中都表现出了良好的统一性, 其得到的部分结论可以作为竖向反应谱的预测的参考。在日后的竖向地震动反应谱研究中具有前景。

4) 关于反应谱的标定方法, 关键在于如何合理地给出反应谱的最佳谱型三个控制特征参数: 平台值 C、特征周期 T_g 、衰减指数 γ , 使其既能反映真实的地震动频谱特性, 又能在工程抗震设计中方便地使用, 也是值得继续研究的问题。

5) 基于反应谱理论的研究方式是建立在统计学基础之上, 数据库是否具有代表性, 地震动记录数据的质量高低对研究结果也有很大的影响。因此, 随着我国地震站台日益增多, 地震数据的增多, 观测技术的进步, 应建立更加完备的数据库, 为以后竖向地震动的研究提供在各个影响因素中更为丰富稳定的数据。

基金项目

国家自然科学基金(52268038); 云南省应用基础研究计划面上项目(202201A070159); 云南省兴滇英才支持计划青年人才专项项目。

参考文献

- [1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 第2版. 北京: 地震出版社, 2006: 96-136.
- [2] 辛娅云. 竖向地震作用的重要性[J]. 工程抗震与加固改造, 2005(S1): 54-56.
- [3] Yan, J. and Lee, C.M. (2009) Characteristics of Vertical and Horizontal Ground Motions Recorded during the Niigataken Chuetsu. *Japan Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **29**, 44-49.
- [4] Jia, J.F. and Ou, J.P. (2009) Peak Amplitude Characteristics of Vertical Seismic Ground Motions in Near-Fault Regions.

Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 29, 44-49.

- [5] Kim, S.J. (2008) Seismic Assessment of RC Structures Considering Vertical Ground Motion. Master's Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [6] 贾俊峰, 欧进萍. 近断层竖向与水平向加速度反应谱比值特征[J]. 地震学报, 2010, 32(1): 41-50.
- [7] 李恒, 秦小军. 竖向与水平向地震动加速度反应谱比特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 8-14.
- [8] 陈念英. 竖向地震力对建筑物破坏的工程实例[J]. 工程力学, 1985(4): 130-133.
- [9] GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [10] Biot, M.A. (1932) Transient Oscillations in Elastic System. Ph.D. Thesis, California Institute of Technology.
- [11] 刘恢先. 论地震力[J]. 土木工程学报, 1958(2): 86-106.
- [12] 周正华. 竖向地震动反应谱[C]//第三届全国防震减灾工程学术研讨会论文集. 中国地震局工程力学研究所, 2005: 39-42.
- [13] 齐娟, 罗开海. 竖向地震标准设计反应谱曲线研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(5): 44-49.
- [14] Bozorgnia, Y. and Niazi, M. (1993) Distance Scaling of Vertical and Horizontal Response Spectra of the Loma Prieta Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22, 695-707. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290220805>
- [15] 高跃春, 林淋. 房屋抗震设计的竖向地震动反应谱研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2006, 20(3): 23-25.
- [16] 赵培培. 设计反应谱拟合方法研究及特征参数统计[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.
- [17] 赵培培, 王振宇, 薄景山. 竖向设计反应谱特征参数的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(3): 159-166.
- [18] Elnashai, A.S. and Papazoglou, A.J. (1997) Procedure and Spectra for Analysis of RC Structures Subjected to Strong Vertical Earthquake Loads. *Journal of Earthquake Engineering*, 1, 121-155. <https://doi.org/10.1080/13632469708962364>
- [19] Elgamel, A. and Liangcai, H.E. (2008) Vertical Earthquake Ground Motion Records: An Overview. *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 663-697.
- [20] 周正华, 周雍年, 卢滔, 杨程. 竖向地震动特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 25-29.
- [21] 耿淑伟, 陶夏新. 地震动加速度反应谱竖向分量与水平分量的比值[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(5): 33-38.
- [22] Bozorgnia, Y. and Niazi, M. (1993) Distance Scaling of Vertical and Horizontal Response Spectra of the Loma Prieta Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22, 695-707. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290220805>
- [23] <https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4967.2006.03.001>
- [24] Bozorgnia, Y. and Campbell, K.W. (2016) Ground Motion Model for the Vertical-To-Horizontal (V/H) Ratios of PGA, PGV, and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 32, 951-978. <https://doi.org/10.1193/100614eqs151m>
- [25] Bozorgnia, Y. and Campbell, K.W. (2016) Vertical Ground Motion Model for PGA, PGV, and Linear Response Spectra Using the Nga-West2 Database. *Earthquake Spectra*, 32, 979-1004. <https://doi.org/10.1193/072814eqs121m>
- [26] 周正华, 周雍年, 赵刚. 强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 15-18.
- [27] 韩建平, 周伟. 汶川地震竖向地震动特征初步分析[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 211-219.
- [28] 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 等. 2008 年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1796-1805.
- [29] Bozorgnia, Y., Niazi, M. and Campbell, K.W. (1996) Relationship between Vertical Andhorizontal Ground Motion for the Northridge Earthquake. *Eleventh World Conferenceon Earthquake Engineering*, Acapulco, 23-28 June 1996, 23-28.
- [30] <https://doi.org/10.1002/eqe.4290210103>
- [31] Bozorgnia, Y. and Niazi, M. (1993) Distance Scaling of Vertical and Horizontal Response Spectra of the Loma Prieta Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22, 695-707. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290220805>
- [32] Bozorgnia, Y. and Campbell, K.W. (2004) The Vertical-to-Horizontal Response Spectral Ratio and Tentative Procedures For Developing Simplified V/H and Vertical Design Spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 8, 175-207. <https://doi.org/10.1080/13632460409350486>
- [33] 徐龙军, 谢礼立. 竖向地震动加速度反应谱特性[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 17-23.
- [34] 周锡元. 土质条件对建筑物所受地震荷载的影响[C]//中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告集. 北京: 科学出版社, 1965: 73-95.
- [35] 刘恢先. 关于设计规范中地震荷载计算方法的若干观点和建议[C]//中国科学院力学研究所地震工程研究报告集.

- 北京: 科学出版社, 1965: 147-159.
- [36] Newmark, N.M. and Hall, W.J. (1969) Seismic Design for Nuclear Reactor Facilities. *Building Practices for Disaster Mitigation*, **II, B-4**, 37-50.
- [37] 郭晓云, 薄景山, 巴文辉, 田启文, 李平. 最小二乘法分段拟合标定反应谱方法[J]. 世界地震工程, 2012, 28(3): 29-33.
- [38] 符圣聪, 江静贝, 黄世敏. 设计加速度谱的标定[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 43-48.
- [39] 夏江, 陈清军. 基于遗传算法的设计地震反应谱标定方法[J]. 力学季刊, 2006, 27(2): 317-322.
- [40] 刘红帅. 基于小生境遗传算法的设计地震反应谱标定方法[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 975-979.
- [41] <https://doi.org/10.1785/bssa0810030715>
- [42] Bozorgnia, Y. and Niazi, M. (1993) Distance Scaling of Vertical and Horizontal Response Spectra of the Loma Prieta Earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **22**, 695-707. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290220805>
- [43] Campbell, K.W. (1997) Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismological Research Letters*, **68**, 154-179. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.154>
- [44] 石树中, 沈建文, 楼梦麟. 基岩场地强地面运动加速度反应谱统计[J]. 同济学报, 2002, 30(11): 1300-1304.
- [45] Bozorgnia, Y. and Campbell, K.W. (2016) Ground Motion Model for the Vertical-To-Horizontal (V/H) Ratios of PGA, PGV, and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, **32**, 951-978. <https://doi.org/10.1193/100614eqs151m>