

构筑物的 坚固性设计

Design
for Robustness

[加]弗朗茨·诺尔 著
[瑞]托马斯·沃格尔 译
张德祥 校
张大文 校

中国建筑工业出版社

构筑物的 坚固性设计

Design
for Robustness

[加]弗朗茨·诺尔 著
[瑞]托马斯·沃格尔
张德祥 译
张大文 校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2012-9011号

图书在版编目（CIP）数据

构筑物的坚固性设计 /（加）诺尔，（瑞）沃格尔
著；张德祥译．—北京：中国建筑工业出版社，2014.7
ISBN 978-7-112-16836-1

I. ①构… II. ①诺…②沃…③张… III. ①建筑设
计 IV. ①TU2

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第097270号

Design for Robustness, Franz Knoll and Thomas Voge

Copyright © 2009 by

International Association for Bridge and Srtuctural Engineering (IABSE).

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Reprinted in Chinese by China Architecture&Building Press (CABP).

Translation copyright © 2014 China Architecture & Building Press

本书经瑞士 IABSE 授权我社翻译出版

责任编辑：白玉美 率 琦

责任设计：董建平

责任校对：陈晶晶 刘梦然

构筑物的坚固性设计

Design for Robustness

[加] 弗朗茨·诺尔 著

[瑞] 托马斯·沃格尔

张德祥 译

张大文 校

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

各地新华书店、建筑书店经销

北京京点图文设计有限公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：5¼ 字数：140 千字

2014 年10月第一版 2014 年10月第一次印刷

定价：22.00 元

ISBN 978-7-112-16836-1

(25628)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）



前 言

坚固性是一种性能，其内容变化如此之大，以至于难以就其复杂多样性、相互关联性 & 交叉关系等进行说明，就更不用说把它上升为一种协调一致的通用理论了。

本书试图在结构体系的框架下，至少就坚固性的重要因素进行切合实际的审视，收集一些处理结构设计方面的某些典型情况的思路或方式方法，从而使结构体系得到更好的存续，或减轻不可预知事件对结构体系的不良影响。

本书分两部分：

- 审视坚固性要素及由设计确定的坚固性对策（第 1 ~ 8 章）。希望该部分足够简短明确，而不至于使读者过早感到枯燥乏味。

- 审视具体案例，试图用某些典型的或众所周知的实例来说明：坚固性的确立必须突破教科书上的结构设计程序（第 9 ~ 10 章）。

写书是个孤独寂寞的事情。更重要的是有人在其付梓之前对结果的关注。作者希望对以杰夫·塔普林（Geoff Taplin）及米卡埃尔 W. 布雷斯洛普（Mikael W. Braestrup）为主席的国际桥协结构工程文献编委会，以及他们指定的审稿人小劳瑞 A. 怀利（Loring A. Wyllie, Jr）表示感谢，他们花费了宝贵时间来审阅书稿，并反馈意见来改进本书。最后，要特别感谢国际桥协及其总部，正是因为有了他们的支持，向尊贵的读者传播我们的经验和思想才成为可能。

加拿大魁北克省蒙特利尔尼可莱·沙特朗·诺尔公司

弗朗茨·诺尔

瑞士苏黎世瑞士联邦理工学院结构工程学院

托马斯·沃格尔

目 录

第 1 章 导论.....	1
1.1 什么是坚固性?	1
1.2 系统.....	1
1.3 存续.....	2
1.4 结构规范中的坚固性.....	2
第 2 章 可预见的不可预见性.....	4
2.1 普通结构设计.....	4
2.2 缺点.....	4
2.3 从我们的祖先那里寻找答案.....	5
第 3 章 通过坚固性存续.....	7
第 4 章 灾害情况.....	9
4.1 内部缺陷及其他.....	9
4.2 外部原因.....	10
4.3 后果.....	11
第 5 章 分级要领.....	12
5.1 破坏方式分级, 瞄准质量控制.....	12
5.2 一种可能的方法分类.....	13
第 6 章 坚固性要素.....	14
6.1 强度.....	14
6.2 结构完整性和一致性.....	15
6.3 第二道防线.....	15
6.4 多荷载路径或冗余.....	16

6.5 延性与脆性破坏.....	18
6.5.1 材料性状.....	20
6.5.2 局部削弱（孔隙、缺口、腐蚀破坏等）.....	20
6.5.3 连接薄弱（比相邻构件薄弱）.....	20
6.5.4 疲劳.....	20
6.5.5 因纤细引起失稳.....	21
6.6 渐进破坏与拉链刹.....	21
6.7 能力设计与保险丝.....	21
6.8 牺牲与防护装置.....	22
6.9 分离情况.....	23
6.10 刚度要领.....	24
6.11 应变硬化的益处.....	26
6.12 后压曲抗力.....	28
6.13 报警、主动干预及救援.....	29
6.14 试验.....	31
6.15 监测、质量控制、修正及预防.....	31
6.16 机械装置.....	33
6.17 小结.....	33
 第 7 章 维护坚固性.....	 35
 第 8 章 结论.....	 37
 第 9 章 一般应用.....	 38
9.1 平板冲剪破坏（强度、延性、第二道防线）.....	38
9.2 无粘结预应力.....	39
9.3 高层建筑，高强混凝土，一个棘手的问题.....	40
9.3.1 强度方法.....	41
9.3.2 改进的延性.....	41
9.3.3 第二道防线.....	41
9.4 角柱的问题（强度分级）.....	42
9.5 热变形，适应性和耐受性.....	43
9.6 防冲支撑（一致性中的强度）.....	46

9.7	外墙与幕墙.....	47
9.8	地震及未加筋圯工（第二道防线）.....	49
9.9	钢结构组件.....	51
9.10	点支撑上的空间桁架（多荷载路径及其问题）.....	55
9.11	悬挂构件（多荷载路径）.....	58
9.12	结构玻璃.....	59
9.13	织物结构.....	61
9.14	模板支架及脚手架——常见的破坏类型.....	62
9.15	破坏行动，如何减小其影响.....	66
第 10 章 实例.....		69
10.1	历史建筑的结构完整性.....	69
10.2	岩溶环境下的明挖法.....	70
10.3	受列车运行影响的防雪崩坑道.....	72
10.4	车挡后面设置的柱子（分离与防护构件）.....	75
10.5	斜拉桥的例子.....	76
10.6	输电线路.....	77
参考文献.....		80
书中提到的文献.....		80
其他文献.....		81

第1章 导论

1.1 什么是坚固性？

坚固性是各体系的性状、能使各体系渡过不可预见的或不寻常的情况。

一个系统的设计，不论是自然或是人工的，都是典型的为了导向正常使用，即在系统的理想使用寿命期内必须或能够预料到所存在的各种情况。然而，受此局限，设计可能会受预料情况之外的各事件的影响而不堪一击。这些影响可能会具有非常多样化的特征，并可能会与设计中所预料的特征相关联，但其强度却超出了预料，或者它们可能是与设计前提完全无关的一种类型。

第一种情况可以用一种结构来示范说明，尽管其设计是要抵抗一组自然条件（例如气候或地震影响），但却屈服于这些条件，原因在于其结果大大超出了所预想的数量级。

第二种情况的一个例子可能会在自然系统中看到，例如，由于人为造成的逆境或类似情况，栖息地遭受毁灭的某些物种正在消失。当然，大自然将会始终存在，而绝大多数情况下，这将会通过系统的扩张出现：当一个物种作为系统消失时，其他物种将作为一个更大的系统的一部分来取代它——大自然能将系统扩张至一个行星和超出行星范围——“大自然将会让人类存续”。当然，我们的问题是人类是否将会存续，以及如何用人类的力量去扩展自身及人类所创造的各种有限的系统。

为了对坚固性的性状有合理和协调一致的说明，必须尽可能地阐述和澄清某些基本概念——尽管一个严格的定义可能会遥不可及，但它在某种程度上可能对其他众所周知的概念造成缩减。首要的需要澄清的两个概念与上述简要的引言中所用的两个术语有关，即系统和存续。

1.2 系统

就系统来说，容易看出该术语可指极广变化范围的任何东西。从不同范围的自然生态系统到个体生物的消化器官，从一个国家的政治体制到一件工具比如计算机或厨房用具，到精神产物比如哲学，或那件厨房用具的使用说明。考虑到这种多样性，限制应用范围似乎会对找出系统可控的描述提供唯一希望。那就是：由于本书的目标是要找到使结构更坚固的方法，系统的概念应该限定在：什么东西可以被合理地称为结构体系。该术语仍然还包括多种东西，从建筑物的现浇混凝土框架到模板的支撑方法，再到单个结构构件比如桥的大梁或焊接的钢节点。所有这些，构成了一个总体结构系统的子系统，而各子系统的坚

固性对于系统的存续将起重要作用。

与大自然不同的是,所有结构系统在时间、空间和目的上都有限制。在自然系统中,一个个体的消失并不重要,而这也不属于人类文物,人类文物是针对一项独特功能所创造和购买的。如果我房子的屋顶在50年一遇的暴风雪期间被压垮了,求助更换屋顶也是不可接受的,因为其建造目的是明确和有限的,即给我提供一处躲避风雪寒冷的庇护所。

1.3 存续

探讨坚固性的另一个基本概念是存续。存续不是绝对的,其描述可能因所处环境而变化。通常,它指功能的存续,即通过其坚固性,结构系统必须继续提供其被创造、修正或保存时的功能,而且,无论发生什么情况,它都必须能这么做,即不受外界环境影响。这些环境可能包括对结构系统的有限破坏,或许是在有限时间内对整体功能的减少或中断,但从根本上来说,在结构系统设定的使用寿命期内,必须能维持其功能。一幢遭受了地震影响的建筑物,留下某些裂痕、破碎的玻璃或其他类似情况,但能在合理时间内以可接受的费用加以修复,就已经是存续下来了,即使暂时必须疏散某些住户或给其造成了不便。对另外一幢建筑则不是这样,尽管它仍然还树立着,但必须报废和拆除,因为要修复它可能会耗时太久、耗费太贵或过于危险。

对于上述探讨,术语“结构”也需要更具体化。结构的功能通常包括:抵抗荷载效应或化学侵蚀,躲避气候现象,容纳各种物质,有时是为了达到更专业化的目的,比如提供视觉效果,设防,以及安全、遮阳等等。

1.4 结构规范中的坚固性

尽管某些建筑规范要求结构物必须坚固,但仅仅只有最新的规范才在突出位置规定了坚固性。例如,在欧盟各国,欧洲规范必须取代各国建筑规范,而在其他一些国家,比如挪威、瑞士、冰岛、塞浦路斯等,则仅仅明确要求在基础设计中需要有坚固性([3]第2.1条基本要求):

“[3] 结构物应以这样的方式设计和施工,它不会因诸如下列情况导致的破坏达到与原始动因不成比例的程度:

- 爆炸
- 冲击
- 人为错误造成的后果

[4] 应适当选择下列一种或多种对策以避免或限制潜在的破坏:

- 避免、消除或减小结构物可能遭受的危害;
- 选择一种结构形式,它对所考虑到的危害敏感性较低;
- 选择一种结构形式和设计,它能在意外拆除了单根构件或结构物有限的一部分或

出现了可承受的局部破坏后，还能充分存续；

- 尽量避免无预警坍塌的结构系统；
- 将结构构件缚在一起。”

在关于偶然作用的欧洲规范 1-7 中，最后将坚固性定义为：“结构承受像火灾、爆炸、冲击或人为错误的后果这类事件的能力而不会使破坏达到与原始动因不成比例的程度。”（[4]，第 1.5.14 条）

委员会要把这种范围要求写进规范里当然很容易。然而，如果在提此要求的同时没有提供帮助，就会使工程师感到相当尴尬。目前还没有哪种规范以任何有用的方式在这样做，而是让工程师们自行解决。本书试图提供某种帮助。

第2章 可预见的不可预见性

2.1 普通结构设计

今天，结构系统设计最常见的是以数学模型为根据用于分析的目的，而数学模型由将来的真实结构所代替。所模拟的内容，除了结构（几何形状，拓扑结构，刚度，质量，重量，等等）的物理描述外，还要考虑在使用寿命期（荷载效应，化学退化，磨损等等）的结构所暴露的环境。有时候，通过验证载荷或其他代表性的试验，物理模型比如按比例缩小的复制品、足尺模型或最终结构本身，都会用来证明其设计的合理性。

证明结构系统的合适性必须通过采用某种形式的替代品来实现，且极少是仅针对最终产品¹进行论证的，该事实已被工程艺术（regles de l'art）所认同并加以合理化，且以建模规程的形式在建筑规范和手册中进行了表述，并规定了最小安全边际量。安全边际量旨在补偿用于分析、实际等量值、真实结构以及其环境的理想模型之间预计会存在的差额。当建筑规范中预计出现50年一遇的最大降雪荷载取2.5kPa时，令人满意的设计必须提供一种结构，它能承受更高的（例如1.5倍）荷载。同时，所模拟的结构支撑力则会成问题，而在设计中会假定支撑力值略低，设计者会认为：真实结构的形成可能不会很圆满周到，从而可能会导致支撑力系统比文件规定的略小。

主要通过大量实际结构的经验以及通过实验室的许多研究，现已推导出了安全边际量。其值通常由专门指定的委员会达成共识而确立。这些值会定期作调整，以反映出其数值与其形式的合适性相关的新信息。然而，对于大多数的应用情况，最近还没有作实质性调整（例如大于10%），反映出的都是些本该如此的一般印象。

2.2 缺点

只要安全边际量的数值与形式存在，就更是这种情况。但另一方面，事故仍然发生，不仅直接参与其中的人很懊恼，也会造成经济损失，因为人们将不得不用物资去弥补损失。

在事故后的法医调查中，通常公认的是：事故的环境与过去用于已破坏的结构系统设计中的安全边际量数值关系不大，但在设计和分析的时间及背景下又必须归因于某件过去完全未曾预料到的事情。换句话说，仅仅放大安全边际量可能并不会防止事故发生。

¹ 与工业产品不同，结构系统常常独一无二，以致不可能有试验模型或连续试验，特别是破坏性试验。

由于在很多时候不能消除导致事故的外部原因（在结构系统之外）——从极端的自然事变到人类某些个体或群体偶然的或敌对行动——目标都是要找到给予结构体系坚固性的方法，从而渡过这些不可预见的事变。我们还不要忘了：结构体系本身可能会含有缺陷，从而会导致事故，而外部环境纯然处于其正常的预料范围内。通常来说，人为错误被看做是这些缺陷的根源，人为错误始终与我们相伴，并且将不会终结；而假定是必须的。于是又回到刚才说的：必须找出让结构体系度过不可预见事变的方法，即便这可能就是方法本身的一个缺陷。

2.3 从我们的祖先那里寻找答案

从历史上来看，结构设计未利用数学模型和解析计算，更不用说计算机了。而传统上，建筑者们——那些“纯粹的”实践者，在某种程度上获得了安全结构体系的令人印象深刻的项目单，而其中绝大部分都提供了足够的坚固性，以使它们经久耐用。相反，还有众所周知的大量结构物遭到惨败的例子，尽管对结构的分析极其谨慎小心，设计也采用了当时最先进的理论。究其原因，是当时的理论或模型没有反应出导致失败的情形到底是什么。

那么是什么使得某些结构物在形成之初并未借助任何合理的理论却经久耐用，而其他一些结构物，尽管采用了专用于设计并为之付出巨大努力创立和应用的理论，却失败了——当然，即便如此，难道我们可以忘记早期的失败不复存在，而去说明什么……？

对该问题的回答是多种多样的：

我们的钢结构老师过去常说：“一个螺栓等于没有螺栓。”所以即使一个理论告诉你：单个螺栓的强度足以传递从一个结构物构件到下一结构物构件预期的力，那我们至少也要提供两个螺栓，因为单个螺栓可能恰巧是那批螺栓中的一个残次品，出现破裂却未经预告。破裂的后果是增加一个螺栓的成本所无法比拟的，因此非常值得为增加一个螺栓投资。该规则必须追溯到有一个世纪之久的工程实践，那时，每个建设者都知道提供某些额外强度是值得的，为的是“以防万一”，并且不会“孤注一掷”。

历史上就有这样的故事，即该规则被忽略、然后就出现惨痛失败（古罗马的贫民窟建筑、巴黎的博韦大教堂、建于20世纪六七十年代的现代混凝土桥梁）的实例。这些都是设计被刻意最小化或“优化”成了干骨架，或已经达到极限了，但人们仍然还假装它是可信的，那结果只能招致惨败。究其原因，只要出现一点小状况，产生的后果就如同谚语所说的稻草压断了骆驼的背。

我们现在有工具来模拟所有这类情况并评估实际后果（力，变形，强度降低）和相同情形的概率，以及分析我们正在设计的结构物的响应——条件是在分析中一切都得到了正确的考虑，且未遗漏任何重要事项。

某些结构体系的设计旨在承受预期情况下的破坏，但却还要继续发挥其功能。作为这种情况的一个例子，可以引证沿汽车道的护栏，在强有力的碰撞下，它们将会产生弯曲与

扭转，但必须阻止车辆离开车道。

作为特定情况的后果，某些结构体系甚至会改变功能：车祸中的小汽车会从交通工具变成防护工具，使乘客免受身体伤害。同样的，在极端地震情况下，建筑物被允许承受某些破坏，甚至损害其作为房屋或工作场所的主要功能，只要它们继续提供安全出口或起阻挡坠落的残骸、火灾等等掩体的作用就行。

第3章 通过坚固性存续

对于度过意外事件或情况且其应有的功能又未受损的结构体系，它必须拥有足够的备用能力以便承受发生意外事件期间和意外事件之后的各种状况。因此一个坚固的结构体系具有：

$$\text{剩余容量} \geq \text{剩余需求} \quad (3.1)$$

通常来说，容量会与支撑力（即强度）有关，但是，它也许还意味着可变形性、延性、稳定性、重量、质量或刚度，因为这些特性中的任何一种都可能是很关键的，这要随情况而定。术语“剩余”或“意外事件之后”在字面意义上并不总是指暂时情况，但如果暗有暗伤或弱点存在，那就意味着：意外事件的情况（缺陷在起作用）已经出现了。

在出现意外事件期间或由于意外事件的发生，特别是在说明荷载路径时，一个结构体系可能会改变其性状。该术语可被定义为受内力和外力影响的系统的所有构件的整体。它可以用应力、内力、反力等来描述，这些力都出现在那些构件上，而且可以通过计算或测量从力的施加点到系统的边界的那些数量而把它们绘制出来。用一根挂有重物的链子就可以提供一个简单的实例：荷载路径会从钩子通过所有链节传到悬挂点（甚至之外，如果之外的构件被包括在系统内的话）。

沿着道路的护栏的例子非常能说明荷载路径的改变：当碰撞冲击较轻时，栏杆将抵抗冲击而弯曲，但变形不会太严重。较大的冲击将会受到膜式（membrane fashion）抵抗，护栏变弯曲脱离原位，并主要以吊带形式起作用。这第二种荷载路径代表第二道防线，是坚固性的主要策略之一。

如上所述，由于意外事件的结果，结构体系还可能改变其功能，正如车祸中车的例子，或极端地震后的建筑物那样。然而，情况并不总是这样，在意外事件后，结构的设计可能不得不使其主要功能不受损，或者所赋予的类似功能不受损。这种情况的重要例子是：除了军事设施外，打算用作避难所的医院，学校或类似场所，供遭受意外事件而无家可归的人员使用。同样，进入受灾地区所需的道路、桥梁和机场必须在意外事件后还保留其原始功能而发挥作用。如果不能的话，通常的后果是大量生命的丧失。

必须安然度过意外事件且其主要功能又不受损的另一类结构包括含有危险物质的所有设施，其泄漏或起火的后果会是灾难性的。这涉及核能设施，易燃或有毒液体或气体的油罐和储存罐，爆炸物或水坝（其破坏将导致洪水泛滥）。对于所选情况，现代建筑规范和设计手册对此都规定了更为严格的设计参数。

因此，结构体系的坚固性就成了处理意外事件的问题，而坚固性设计和分析则必须适

应于特定情况。在缺乏意外事件信息比如暗伤的情况下，考虑到结构体系任何构件可能的弱点，将不得不遵循鸟枪法（shot gun approach），并且一般来说，都必须提供坚固性。

历史上留下了大量臭名昭著的例子，现代的技术至今都无法（或者社会愿意）想出办法设置足够的结构坚固性。这些情况现在仍然在导致灾难性事故，比如列车和飞机碰撞，船舶失事，或在脱轨、火灾、爆炸或撞击后有毒材料的溢出。

特别是在富饶国家，现正着手减缓灾难性地震的影响，但是这些影响在地球的某些地区仍然在充分发挥作用，在这些地区，要么是因为社会没有足够资源，要么是技术知识欠缺，以致无法采取补救行动和淘汰易受损建筑。

由于强风的作用（龙卷风，特别是台风和飓风），较轻的建筑物会发生巨大损失。当建筑物外围护结构由风造成缺口时，水（即雨）也会造成重大破坏。这常常是由于缺少紧固件造成的，这就更加凸显了坚固的外围护结构的必要性。

第4章 灾害情况

要求有坚固性的情况为：就强度、变形性、耐久性等方面而言，临界的物理条件超出了结构物所具备的抗力极限，或者是结构物的实际抗力低于预期，或者是上述两者的组合。

灾害情况的本质是：结构物的抗力已被克服，从而处于一种受损害、受破坏或被改变的状态。这类例子种类繁多，包括系统中的某些构件断裂、屈服、失稳、位移、横断面缩小等。大的变形常常伴随着这类情况，因此，在对已被改变的结构物进行分析时，必须对此予以考虑。

由于不同的情况类别要求的坚固性方法各不相同，所以对事件进行非常笼统的分类也许会有帮助。我们应把一类事件称为内部缺陷或简称缺陷，事件的起源在于结构体系范围内。第二类事件则归结为外部原因。事故的法医调查常常发现：与上述两类事件都有关的原因的组合作用导致了不幸事故的发生，即被削弱的结构所承受的荷载超过了设计荷载。可能的情况是：两个或多个事件之一也不足以导致事故，只有当它们累积时才导致事故发生。

4.1 内部缺陷及其他

结构特性比如强度、稳定性、刚度、耐久性等都是可变量。对于结构物的设计与分析，当把假定值替换为真实值时，真实值只有在结构物存在时（即使这样，可能也有困难，因为涉及复杂或间接试验过程）才能确定。因此在假定值和真实值之间存在着一个变差。该变差一直是众多研究的主题，并且，将给定值（或期望值）与试验值或实际值相比较时，存在着大量概率数据和取证数据。这些数据被用来确定安全系数（为考虑因素之一），并且一定数量的变化被看做是正常、惯常或合理的，换句话说，为了减小它，没有多少合理的事情可做。对于随机数据，变差大约呈高斯分布，但对于极端偏差，需要有一些特殊考量——通过试验，检验或质量管理程序等手段尽量消除这些极端偏差，同时识别出：即使概率论允许有大的变差存在，其合理性也较弱。

从哲学上来说，容易看出为什么会这样，原因有三：

第一：正常值或平均值得到的结构抗力的大的变差，现实中比理论（高斯分布，等）分布所允许的大的变差更多见。换句话说，“它们本该罕见却不那么罕见”。

第二：由人所实施或指导的某一过程的产品特性的变差，是参与者行为的产物，包涵有可能滋生在这些行为中的各种错误，其产生原因可归结为疏忽、缺乏沟通等等。这一点可由以下事实证明：在发现了性状的大的变差的地方时，通常可以找出已犯有人为错误的

该对此负责的某个人。

第三：认为大变差不合理的原因是：变差越大，通常对于那些理解它并能采取纠正措施的观察者而言，就越可见和明显。研究已经表明：在（设计）信息创作中的严重（人为）错误起初非常频繁。然而，在这些错误起作用之前，绝大多数错误都将会被一种过滤程序消除。当原始数据以不同形式（计算成图、照图制造及安装工艺等）进行解读后，该过滤程序就开始发挥作用。在该过程中，信息由大量个人进行审查，他们将抓住在模式上出现的奇怪和奇异之处，或将应用有针对性的检查程序。然而，即使采用了过滤程序，人为错误仍然还是导致结构体系性状出现大的及致命变差的头号原因。总的来说，人为错误要对超出理论破坏频率（基于合理概率变差）多个量级的结构破坏的真正频率负责。因此，人为错误是产生缺陷情况的一个重大要素。

这就意味着：由于人为重大错误的性质，从一开始，其形式或量级可能都是不定的，所以过滤程序具有极大的重要性。它将消除绝大多数明显而严重的错误，留下某些量级较小的错误。迄今为止还未发现对于人为的严重错误的概率律，但与合理偏差相类似，较小的错误比起较大的错误要多出许多。然而，较小的错误可能会与其他事件组合，从而导致出现紧急情况。其后果只能由坚固性来补偿。

4.2 外部原因

在超出设计抗力及必须依赖坚固性的情况下，可能影响结构体系的外部事件清单会很冗长且种类繁多。

它包括：瓦斯爆炸或车辆碰撞，其概率和强度可根据过去的经验进行合理评估。它还包括极端自然灾害的影响，因为有数据存在，可以预测出概率和强度的关系——尽管仍然让人倍感惊讶，就像 2004 年 12 月发生在印度洋海域的海啸所证实的那样。它也包括恐怖分子的行动，这很难预测，因为最近的经验也表明了这一点。人为的情况是很难预测的，因为它们主要取决于未来的技术、经济以及大自然与人类行为的相互作用。

这类情况中最为常见的是：必须预料到的事件强度，其变化范围非常大。有时候，一个最大可信事件的某些参数可基于已知的物理限制做出估算，例如卡车的最大质量。但运行的卡车速度则相当难评估；此外，冲击能量将会与速度的平方成正比，使得事情更加不确定。这与地震导致的地面运动相类似，烈度呈一条非常陡的曲线分布，随着重现期（稀有）的增加，释放的能量会呈几个量级的变化。

在很多时候，外部事件的影响是以结构物将遭受的力或变形的术语来表示的。对于坚固性评估，非常重要的一点是：这两者中哪一个对结构物施加的影响占主导地位：

- 运行的卡车将施加一个力，一个冲击力和相撞时在结构物上的大量能量。
- 基础移动（可能会被认为是内部缺陷，如果结构体系包括了邻近基础的土体的话）将施加变形。
- 地震将施加动态位移，由结构放大或衰减，同时伴有内力产生。