

EFFECT OF WELDMENTS
ON THE FATIGUE STRENGTH OF STEEL BEAMS

焊接钢梁的疲劳抗力

——无加劲肋、无焊连板者

原著 [美]NCHRP第102号报告

钱冬生 强士中 李亚东 等编译

焊接钢梁的疲劳抗力

——无加劲肋、无焊连板者

原著 [美] NCHRP 第102号报告

钱冬生 强士中 李亚东 等编译

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图进字 21-2012-18

出版者 Transportation Research Board of the National Academic, U.S. 1970 年出版

图书在版编目 (C I P) 数据

焊接钢梁的疲劳抗力: 无加劲肋、无焊连板者 /
(美) 费希尔 (Fisher, J W) 等编著; 钱冬生等编译.
—成都: 西南交通大学出版社, 2012.1

书名原文: NCHRP Report102: Effect of Weldments
on the Fatigue Strength of Steel Beams

ISBN 978-7-5643-1472-9

I. ①焊… II. ①费… ②钱… III. ①焊接梁: 钢梁
—疲劳寿命—抗力—研究 IV. ①TU323.302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 221465 号

焊接钢梁的疲劳抗力

——无加劲肋、无焊连板者

原著 [美] NCHRP 第 102 号报告

钱冬生 强士中 李亚东 等编译

责任编辑	高平
特邀编辑	胡晗欣
封面设计	原谋书装
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	210 mm × 285 mm
印 张	11.75
字 数	322 千字
版 次	2012 年 1 月第 1 版
印 次	2012 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1472-9
定 价	47.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

This report is translated and distributed with permission from the Transportation Research Board. Original English language edition published by the Transportation Research Board of the National Academies, National Research Council, Washington, D.C., USA copyright 1974. All rights reserved.

此报告是在获得运输研究委员会的许可下进行翻译并传播的。英文原版是由美国科学院-国家研究委员会-运输研究委员会发行，它在美国华盛顿特区，1974 年取得美国版权。保留所有权利。

《焊接钢梁的疲劳抗力》

编 委 会

翻译 任伟平 叶华文 周尚猛
李翠娟 肖 林 诸葛萍
侯苏伟

校订 钱冬生 强士中 李亚东
刘自明 沈锐利

对钢桥疲劳的认识，以及对此译本的介绍

一、对钢桥疲劳的认识

人们对事物的认识，是动态的。随着社会生产和科学技术的发展，认识也应发展，而且应该为社会生产及科学技术发展服务。

我国近代的建设事业，只是在中华人民共和国成立之后，方才进入正规。1952年，我国对高等院校进行了调整；隶属于铁道部的铁道学院方才呈现。向苏联的专业设置学习，在某些铁道学院之内设立了桥梁和隧道工程专业。1956年，提出了“向现代科学进军”的号召。当时，唐山铁道学院搞钢桥的教师曾与山海关桥梁工厂商量，应当在焊接结构方面开展合作研究。那时，苏联铁路钢桥设计规范对焊接构造的疲劳有不少规定，使人不易搞清楚。由于我国的铁道科学研究所与苏联铁道建筑研究院（ЦНИИС）是兄弟单位，苏联关于焊接构造的疲劳研究文献，我们都可以从铁道科学研究所图书馆查到。在这基础上，再对美国和德国文献翻阅一下。1963年，我们就写出了《低碳钢焊接桥的耐劳强度》一文，在铁路界交流起来。1971—1974年，我国对各种工程技术规范进行了一次大修订。为使1974年版的《铁路工程技术规范·第二篇 桥涵》在疲劳方面有所改进，我们在1973年发表了《怎样对待钢结构疲劳试验所提供的三条经验律》一文。

那时，我们对铁路桥焊接构造的疲劳问题是这样理解的。结构对拉力的抗力，可以仅用其在一次张拉时所能提供的最大拉应力表达，而该最大拉应力就叫做钢材的拉力强度（tensile strength）。但疲劳开裂则是多次受力所引起的裂缝扩展，那就应该为其所受的应力及次数提出一个标准计算规则，这样才能够给疲劳强度（fatigue strength）一个定义，以利对比。多次承受应力，则在每次受力之中，其名义应力当有一个极大值 $S_{\max}$ 及一个极小值 $S_{\min}$ ，其大小当以代数值表达，并取拉应力为正，压应力为负；应该让每次加载所取的 $S_{\max}$ 及 $S_{\min}$ 都是常值，也就是常幅疲劳试验，这才可以进行比较。在加载达某值时，开始出现微裂，不过，这很容易逃过试验人员的监视。因此，应该将疲劳开裂按较大值来定义。当裂纹达到较大值，且使疲劳试验应该停止时，记录其加载次数，称之为破坏次数，也叫寿命，用 N_f 或 N 表示。这样，对疲劳现象的研究，就是用常幅疲劳试验为各种构造决定其 $S_{\max}$ - $S_{\min}$ - N 关系。按拉力试验的习惯，可将名义应力最大值 $S_{\max}$ 叫做疲劳强度。若是将 $S_{\min}/S_{\max}$ 的值，叫做应力比，用 ρ 表示，这样， $S_{\max}$ - $S_{\min}$ - N 关系，又可写作 $S_{\max}$ - ρ - N 关系。在进行试验研究时，先让 ρ 为某常值（例如：-1, 0, 0.5），找出其 $S_{\max}$ - N 关系。经发现， $S_{\max}$ 与 N 的3次方大致呈反比。这就是第一条经验律。其次，让 N 为常数（习惯上，取 $N = 2 \times 10^6$ ），找 $S_{\max}$ - ρ 关系；该关系可用 $S_{\max}$ 与 $(1 - k\rho)$ 呈反比（且 k 大致等于 0.6）表达，这是第二条经验律。我们也知道：铁路钢桥因列车而受到的各次 $S_{\min}$ 和 $S_{\max}$ 不是常值，钢桥的疲劳必然要由变幅疲劳来决定。所以，将线性积伤律（即 Palmgren-Miner Rule）作为第三条经验律来引用。只对于疲劳抗力下功夫探讨，对于铁路列车所致的变幅作用应力则稀里糊涂地照套外国人的见解。这就是那个时候的水平。

1971年，唐山铁道学院迁到四川峨眉。不久，改名为西南交通大学。在改革开放潮流的大好形势之下，1979年我们见到了美国钢结构学会（AISC）出版的 *Bridge Fatigue Guide, Design and Detail*；

该书是 Fisher, J. W 所著。从这书我们知道：1968—1974 年，美国曾用 531 根钢梁进行了疲劳试验。它已用试验结果证实：

(1) 就同一种构造的疲劳抗力讲，所有钢种的行为基本一样。

(2) 对于焊接钢梁讲，疲劳抗力可以用 S_r-N 关系表示，其中， $S_r = S_{\max} - S_{\min}$ 。同时还知道：在 1977 年，美国铁道、公路、钢结构设计规范都已改版，其疲劳设计亦已改按新的认识来制订。这对我们是一震动。所以，立即将它译出并赶在 1980 年出版。

1985 年，铁道部基建总局以开展“铁路工程结构可靠性科研工作”的名义，在吉林市召开工作会议。在会上，大家都认为英国桥梁规范 BS5400 最为先进，应该译印，供大家参考。西南交通大学承担了这项工作，并及时完成。1986 年，我们推出了一本仅 10 万字的小册子，即《钢桥疲劳设计》。这本小册子阐述了我们对于钢桥疲劳的认识。

我们赞同 BS5400 第 10 篇关于从铁路列车荷载谱推算钢桥各个疲劳敏感点（验算点）在桥梁整个寿命期内的疲劳应力历程，再用雨流法（或蓄水池法）将应力历程转换成变幅应力，而后再用线性积伤律将它转换为常幅应力，借能与各该敏感点的疲劳抗力（即 S_r-N 关系）相比，判断它是否安全。这便是对钢桥在其活荷载作用下的疲劳问题的认识。

在设计采用极限状态法的情况下，对于可能发生的各种极限状态，都应该纳入在规范所考虑的范围内。这样，凡是不止一次加载的破坏、腐蚀环境使微裂的扩展，都应列在疲劳损坏之中，虽然它们并不是由使用活荷载所产生。例如，振动就会使构件在其周边产生数量不大但次数很多的应力。根据经验，适当增加构件的刚度，在其边界处的应力就会降低；开裂也就会防止。而在设计规范之内，这却是无法列成具体条文的。

按照我们的经验，需要提倡的是勤学深思、务实求索。重要文献，不管它的厚薄，也不管它是否容易掌握，总要耐下心来，认真阅读；外文的，则应摘优译成中文。对于道理，要弄明白，要真正吃透。要联系实际，让知识能够解决我们所遇到的问题，回答同志们的疑问。对于现今没有办法解决的问题，要积极探索；对于同行所提的办法或意见，要认真探讨，使其逐步完善起来。每一个做学问的人，都应该志存高远，淡泊名利。要反对浅尝辄止，仅在形式上学会如何做之后，就停滞下来。

二、对此译本的介绍

20 世纪 30~40 年代，在第二次世界大战前后，美国已是世界各国之中的首富。钢产量多，汽车也多，它曾用焊接修建了不少公路钢桥。在 40 年代，它已经有公路焊接钢桥设计规范。到 60 年代，其用盖板加强的焊接梁发生不少疲劳开裂。于是，美国国家公路合作研究计划（NCHRP，见附录 1）批准了项目 12-7，其课题是“Effects of Weldments on Fatigue Strength of Steel Beams（焊接对钢梁疲劳抗力的影响）”。1970 年，在其第一期研究工作完成后，美国科学院之下的公路研究委员会出版了 NCHRP 第 102 号报告（见附录 2），报告的名称就用项目 12-7 的课题。1974 年，该课题的第二期工作完成，又出版了第 147 号报告，为标明第二期工作的特点，该报告乃以“Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments（有加劲肋及焊连板的钢梁的疲劳抗力）”为标题。由于这两个报告对我国桥梁界都很有用，我们决定都予以译出。为了显豁，今将两个译本都叫“焊接钢梁的疲劳抗力”，但对第 102 号报告加注“无加劲肋、无焊连板者”，对 147 号报告加注“有加劲肋及焊连板者”。

这两本报告的主要贡献，在于：

(1) 证实钢种对疲劳抗力的影响不大。

(2) 证实 S_r 对焊接构造疲劳抗力影响很大，而 $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 则影响不大。

(3) 在论证钢种、 S_r 、 S_{min} 、构造细节等因素对 N_f 的影响时，在试验的安排之中使用了因素组合法，在对试验结果（即 N_f ）的分析中使用了方差分析、回归分析等法；在为设计规范决定 S_r 的容许值时，不是用主观决定的安全系数，而是用保证率为 95% 的 95% 置信下限为容许值。

(4) 将往昔试验结果同现在的试验结果合起来考虑，借以论证它们能不能作为一个总体对待。

(5) 将疲劳裂纹的扩展与断裂力学关于裂纹扩展的算式联系起来，用于解释 N_f 与 S_r^3 呈反比是合理的。

(6) 将试件制造、试件尺寸、材料性能、试验详细经过、试验结果（包括对开裂的观测及记录）、对结果的分析等进行详细记录并写成报告，经由国家科学院、工程院派人审阅、出版，并让报告永久地保存。这也是一种值得认真学习的做法。

近四十年来，各国规范中关于钢桥疲劳设计的内容，虽然不断更新改进，特别是最新的欧洲规范，更是受到广泛的推崇，但其基础仍然包括美国 NCHRP 第 102 号和 147 号报告在内。系统地弄明白这两个报告，仍是正确理解和使用新规范的关键，也是进一步提高钢桥疲劳设计方法的起点。

三、致 谢

这本书的翻译是西南交通大学和中铁大桥局集团有限公司合作进行钢桥疲劳研究的一部分，对于刘自明高级工程师对这一研究工作的支持和帮助表示衷心的感谢。在翻译出版过程，得到了 T. Y. Lin 国际（重庆）桥梁总工程师尹德兰博士的极大关心和帮助，在她的沟通支持下本书才得以顺利出版，在此表示诚挚的谢意。本书的文整工作是由王美媛女士完成的，也一并表示感谢。同时对西南交通大学出版社表示感谢。

钱冬生 强士中 李亚东

2011 年 5 月 30 日

附录 1：对 NCHRP 的说明

公路管理者及工程师所面对的许多问题，其最为有效的解决办法，往往需要由系统的、规划良好的研究来提供。不少场合，公路问题曾经作为地区小事，由公路管理部门自行处理；或者，联合州内高校及其他单位共同解决。但是，随着公路运输的高速发展，公路主管就会遇到许多影响深远、越来越复杂的问题。这些问题，最好是由一协调的、由计划管理着的合作研究项目来回答。

在对这一需要有了共识之后，在 1962 年，AASHO 管理层设立了这样的研究计划。所需资金则由 AASHO 的会员州及联邦运输部公路局提供。

由于美国科学院和工程院之下的公路研究委员会（Highway Research Board）对于现代科研实践的管理有经验，而且，它拥有现成的委员会，从中可以挑选公路运输各个方面的权威人士；它

有现成的渠道可以与联邦、各州、各级政府机构、各高校、各产业部门沟通；它的上级即科学院，是一个非营利机构，这可以保证它的客观性；它有一批专职人员，其任务就是将公路研究中的新成果直接送到那些需要使用它们的人的手中；AASHO 乃请求公路研究委员会对这项研究计划进行全权管理。（注：公路研究委员会，现改称运输研究委员会。）

计划中的项目，来自公路各部门主管人员和 AASHO 各委员会。每年都由 AASHO 将新的项目报送科学院及公路研究委员会。公路研究委员会由此确定项目名称及其内容，再从这些项目的原提出人员之中挑选出合适的研究单位。关于研究合同的监督及管理，则是科学院及其公路研究委员会的职责。

NCHRP 是 National Cooperative Highway Research Program（国家公路合作研究计划）的缩写。对公路研究的需要，是众多的。NCHRP 只能对许多负责单位所共同关心的公路运输问题的解决，提出一些有意义的贡献。对于其他公路研究计划，NCHRP 无意取代或重做，只是愿作其补充。

附录 2：关于 NCHRP 第 102 号报告

（项目 12-7）

本报告是一连续的研究项目在其进行时所出版的报告之一。这项研究计划开始于 1962 年 6 月，由下列三方签订：科学院国家研究委员会（National Academy of Sciences-National Research Council），美国各州公路工作者协会（AASHO），联邦公路局（U.S. Bureau of Public Roads）。关于所涉及的各个财务协议，则是由国家研究委员会、联邦公路局、参与各该项目的州公路局及 AASHO 的会员按年度签订并执行的。

本报告是由研究单位提出。为了措词明确、符合文献要求、满足合同规定，本报告曾由相应的审阅小组审订。它业已通过公路研究委员会（Highway Research Board）验收，并予以出版，以利传播，借能在政策、程序、实施细则的制订之中，提供参考。

由这些报告所阐述的意见和结论，是完成各该研究的单位提出的。它们并不代表公路研究委员会、科学院、联邦公路局、AASHO 以及参与各该项目的州公路局。（注：公路研究委员会，现改称运输研究委员会。）

NCHRP 的各本报告，可按下开地点及单位购买：
公路研究委员会（Highway Research Board）
科学院
2101 Constitution Avenue
Washington, D.C. 20418

目 录

NCHRP 第 102 号报告的前言	1
全书综述	3
1 引言和研究方法	4
1.1 对课题的介绍	4
1.2 目标和范围	5
1.3 设计参数	5
1.4 试验（考虑因素组合的）设计	8
1.5 试件梁的制造	10
1.6 试验程序	12
1.7 术语和符号	14
2 本次研究的成果	15
2.1 文献回顾	15
2.2 本次试验研究的成果	15
2.3 设 计	18
3 疲劳抗力的试验结果及评价	20
3.1 盖板中断梁的疲劳抗力	20
3.2 单纯焊接梁的疲劳抗力	28
3.3 翼缘有对接焊的梁的疲劳抗力	35
3.4 单纯轧制梁的疲劳抗力	42
3.5 裂纹扩展的应力分析	46
3.6 对有缺口的对接焊进行常幅和变幅疲劳加载	51
4 建议与应用	55
5 结 论	58
5.1 盖板中断梁	58
5.2 单纯焊接梁	59
5.3 在翼缘板宽度过渡处有对接焊的梁	59
5.4 单纯轧制梁	60
5.5 变幅加载	60
6 对进一步工作的建议	61
6.1 建议的研究项目	61
外文参考文献目录（本文所引用的参考文献及其编号目录）	63

附录 A 历史和往昔文献小结 67

 A.1 盖板中断梁 67

 A.2 单纯轧制梁 68

 A.3 单纯焊接梁 69

 A.4 翼缘有对接焊的梁 70

附录 B 试验的因素组合设计 71

附录 C 试件梁的制造 79

附录 D 材料性能及试件梁特征 83

 D.1 横截面性能 83

 D.2 钢材的力学性质 86

 D.3 钢厂所提供的试验报告 86

 D.4 残余应力测量 88

附录 E 试验和分析技术 91

 E.1 试验程序和技术 91

 E.2 对疲劳试验结果的统计分析 92

附录 F 盖板中断梁 97

 F.1 试验结果及分析 97

 F.2 裂纹扩展的应力分析 121

附录 G 单纯焊接梁 126

 G.1 试验结果 126

 G.2 分 析 133

附录 H 翼缘有对接焊的梁 141

 H.1 结果与分析 141

 H.2 对试验结果的阐释 142

 H.3 对试验结果的分析 153

附录 I 单纯轧制梁 161

 I.1 试验结果 161

 I.2 分 析 162

附录 J 变幅加载的先驱性研究 168

 J.1 对变幅加载的开发 168

 J.2 对试件和试验的设计 169

 J.3 试验步骤 169

 J.4 结果和讨论 170

 J.5 结 论 171

附录 K 对名词、术语、代号的解释 173

NCHRP 第 102 号报告的前言

公路研究委员会秘书处

对 AASHTO（美国各州公路工作者协会）公路桥梁标准规范中的疲劳允许应力章节，本报告提出了修订建议。这些修订内容，也适用于美国焊接学会（AWS）和美国铁道工程学会（AREA）所颁布的有关规范。对于使用焊接钢梁的工程师、研究人员和规范编写人员，这份报告是有用的。虽然这份报告最直接的重要性是在规范修订方面，但对于搞焊接钢梁设计的所有工程师来讲，它所包含的大量信息，仍是很有价值的。

在 AASHTO 实路实桥试验（AASHTO Road Test，见第 1 章）中所观察到的盖板中断钢梁桥的疲劳开裂，以及类似结构情况，均表明：焊接和焊接细节，对公路梁桥的使用寿命有着重要影响。而其他有重要影响的因素有：结构所承受的荷载历程、所用钢材的种类、设计细节和制造质量。所说的设计细节是指盖板、加劲肋、焊连件和对接焊。由于试验数据有限，往昔只能给设计提供一些粗略的算式。但是，在进行进一步研究，对影响疲劳的因素进行分析和评价的基础上，使焊接钢桥达到预期使用寿命的合理的基本设计方法，是能够提得出来的。

在这个进一步研究中，Lehigh 大学和其二包单位 Drexel 理工学院，业已迈开了第一步。为了使试验结果能够用来辨别某些重要因素对疲劳行为影响（效应）的显著性（重要性），他们进行了因素组合试验的设计，对 374 根试件梁在受控制条件下进行了试验。对于试验误差，在这一套试验之中也能决定。

这一细致的研究方法，为融合和对比往昔的有关研究提供了一个坚实的基础。通过整理分析本次和往昔的研究成果，为更加清楚地了解焊接钢梁的疲劳行为提供了依据。这就可以为修订更加切合实际的规范提出建议。

为了明确加劲肋、焊连件、侧向支撑细节，以及变幅加载疲劳行为（它最具挑战性），还有很多工作要做。作为这项工作的后续研究，美国 Lehigh 大学将对前三项（加劲肋、焊连件、侧向支撑）对疲劳的影响开展研究，该项工作的研究报告将在 1973 年底出版。（注：在 1974 年，出版了 NCHRP 第 147 号报告：有焊接加劲肋及焊连件的钢桥疲劳抗力。）

致 谢

这份研究报告，是在美国公路合作研究计划（National Cooperative Highway Program，简称 NCHRP）项目 12-7 的资助下，由 Lehigh 大学土木工程学院 Fritz 工程实验室和 Drexel 理工学院土木工程系完成的。Lehigh 大学是承包单位，Drexel 学院是其二包。

Lehigh 大学土木工程学院的 John W. Fisher 教授是主研人员。这报告的其他作者是：Lehigh



大学 Fritz 工程实验室的 Frank, K. H 和 Hirt, M. A 助理研究员, 以及 Drexel 学院土木工程系的 McNamee, B. M 教授。

本研究是在项目主要研究人 Fisher 教授的全面领导下完成的。Drexel 学院的研究工作是在 McNamee 教授的领导下, 由 Fred Schmitt 助理研究员和 Allen Yerger 技术员协助完成的。Lehigh 大学所做的研究工作, 在土木工程学院的 Fisher 教授和 Yen, B. T 副教授的领导下, 由 Frank, K. H, Hirt, M. A, Thomas Gallagher, Minuro Ohta 助理研究员和 Paul Nowaczek 技术员协助完成的。

附录 F 由 Frank 和 Fisher 教授编写; 附录 G 和附录 I 由 Hirt 和 Fisher 教授编写; 附录 H 由 McNamee 教授和 Schmit 编写; 附录 J 由 Yen 和 Gallagher 编写。

Lehigh 大学和 Drexel 学院都将本研究列为公共服务项目, 用降低收费标准的方式对工作进行支持。

此外, 作者非常感激伯利恒钢铁公司以较低的价格提供试件梁。

真诚感谢将本报告录入计算机的 Fritz 工程实验室成员 Charlotte Yost, Shirley Labert, Joanne Mies 和 Karen Philbin, 出色完成了摄影工作的 Richard Sopko, 以及具有专业绘图经验的 John, M. Gera 和 Sharon Balogh。实验室负责人 Kenneth Harpel 和他的工作人员, 在试验过程中也提供了很大帮助。

对 Fritz 工程实验室主任 Beedle, L. S 教授, Lehigh 大学土木工程学院院长 VanHorn, D. A 教授, 以及 Drexel 学院前任土木工程系主任 Rumpf, J. L 教授所给予的支持和鼓励, 一并表示衷心感谢。

全书综述

通过本次试验,我们发现:所有试件梁和细节的疲劳寿命,几乎都是由 S_r 决定。这一个结论,应该纳入在 ASSHO 公路桥梁标准规范的条款之中。

对设计而言,本研究认为:各种指定焊接细节的疲劳抗力与钢的种类无关。试验表明,A36 和 A441 轧制梁的疲劳抗力也近于完全相同。对于轧制梁、焊接梁、翼缘有对接焊的梁,以及盖板中断梁,ASSHO 规范均应反映这一情况。

由于往昔研究未能对影响疲劳抗力的因素进行控制,这就导致对应力参数和材料特性的效应提出看起来冲突和相反的要求。

研究表明,我们对其他细节疲劳行为,以及对本次研究所未涉及的领域的认识,还存在很大的空白。为了有助于确定疲劳抗力的上界和下界值,还需要对更高和更低的 S_r ,以及其他水平的 S_{min} 进行更多研究。此外,对于其他构造细节和缺口状况,也需要研究。这可以促进公路桥梁综合性设计准则的发展。

除盖板宽于梁的翼缘且在盖板端头没有横向角焊缝的梁之外,盖板几何尺寸及其端头细节的变化,对疲劳抗力没有显著影响。现行规范限制盖板厚度(或多层盖板总厚度)不超过 1.5 倍翼缘板厚度的规定,可以放宽。采用单层或多层盖板,对疲劳抗力也没有什么影响。

当盖板宽于其梁的翼缘板时,若在盖板端头不使用横向角焊缝,将使疲劳抗力降低。因此,对于宽盖板,应要求其端头有横向角焊缝。横向角焊缝的端可以绕过梁的翼缘板边缘,也可以中止在翼缘板边缘之前。当盖板窄于其翼缘板时,可以按需要省去横向角焊缝。

单纯焊接梁与单纯轧制梁的疲劳抗力不同,这是与 AASHO 现行规范的规定不一样的。应增加一条,以表明单纯焊接梁疲劳抗力较低。应该注意焊接梁翼缘板边缘的光顺;若翼缘板边缘有看得见的缺口,必须打磨光顺,这是因为从边缘缺口发生的裂纹扩展更为严重。

对于所有钢种,在宽度不同的翼缘板的对接焊处,都可以采用 2 ft (500 mm) 半径圆弧过渡;对于 A36 和 A441 钢,在对接焊处也可采用 1:2.5 斜坡过渡,它们的疲劳抗力没有显著差别。它们与(不需要因翼缘板宽度不同而设置对接焊及过渡段的)单纯焊接梁疲劳抗力相同。磨去余高的对接焊,应采用与单纯焊接梁相同的疲劳设计抗力。(注:对 A36、A441 等钢种的解释,见 1.3 节。)

对 A36 和 A441 梁,由于以 1:2.5 的斜坡过渡和以半径为 2 ft 的圆弧过渡具有相同的疲劳抗力,考虑到经济因素,应当以斜坡过渡代替目前所要求的以半径为 2 ft 的圆弧过渡。

在缺乏进一步研究的情况下,A514 梁仍应采用半径为 2 ft 的圆弧过渡。

单纯轧制梁的研究结果与已有的钢板试件的疲劳抗力不一样,这大致是由于轧制梁会有更多的缺陷,而且,在其腹板和翼缘板交汇处会有应力集中现象。

S_r 和 N 之间的经验性指数关系,对所有类型梁的试验结果都最为吻合。从这个 S_r - N 函数,可以给设计提出合适的计算式。(注: S_r 的定义,见附录 K。)

用断裂力学理论的裂纹扩展应力分析,可以论证与所有试验结果最为吻合的 S_r - N 指数模型。此外,理论分析也为合理解释所观察到的试验结果提供了一种方法。

先驱性的变幅加载研究表明,疲劳损伤主要由于其高值应力的加载决定。几个高值 S_r 的 RMS (root mean square, 均方根),就和同样试件的常幅疲劳试验相关联。对于实桥,所假定的设计应力可视为其几个高值 S_r 的 RMS 估计值。因此,将常幅疲劳试验数据用于设计,是有理由的。

1 引言和研究方法

对于许多公路钢桥，焊接梁的疲劳抗力是其重要的设计项目。由于认识到这一点，AASHTO 开始了它的实路实桥试验（AASHTO Road Test）^[12]，进行了对桥梁的研究，由此而形成了本研究课题。

1.1 对课题的介绍

疲劳的定义：在应力的重复作用下，材料从其微观开裂，经过裂纹扩展，直至形成宏观破坏。虽然作用的应力值不大，它的单次作用不足以造成静力破坏，但若容许它重复作用，且容许裂纹不断扩大，那么，随着有效承载截面积的减小，构件就会损坏。

曾经有许多焊接结构发现疲劳开裂，其中包括 ASSHO 实路实桥试验^[12]中的盖板中断钢梁桥。但就总体而言，焊接公路钢桥还是令人满意的。大多数破坏是由设计或者制造中的错误造成的。正如 ASSHO 实路实桥试验所表明：在桥梁设计中，必须考虑疲劳。对公路桥疲劳寿命有重要影响的，还有其所承受的荷载、所用的钢种、设计细节和制造质量等因素。采用合理的设计和制造方法，可以保证疲劳损坏不会发生。在这一领域需要有更多的知识，使公路桥在其设计寿命期内可以正常运营。

往昔的试验工作^[11, 22, 40]表明，影响疲劳抗力和寿命的主要因素是三点：

- （1）焊接细节；
- （2）应力条件；
- （3）钢种。

加载速率、停歇时间、温度、表面光洁度、环境腐蚀和其他因素，也会影响疲劳抗力和寿命。但在实际情况中，可以认为影响不大，可以不考虑。如果进行合理控制，例如，采用合适的焊接制造工艺及工厂检查，对实桥进行检查，对桥上活荷载进行控制等，还能进一步减少其影响。

附录 A 对往昔工作进行了简要回顾。经发现：从不同来源所获得的数据存在很大差异。由于这些研究没有对影响疲劳抗力的因素进行控制，也就无法对各该因素影响的显著性进行判断。而且，因为往昔的试验缺乏重复件，对试验误差也无法确定。

文献^[11]是 ASCE（The American Society of Civil Engineers，美国土木工程师学会）一个委员会对盖板中断梁研究的一个述评。它指出：“迫切的需要是搞一个试验设计（注：指采用因素组合

的试验安排),借使试验结果可以用来决定各个因素对盖板中断梁疲劳抗力影响的显著程度和重要性。”对于其他焊接细节,这一迫切需要也同样存在。

目前的钢桥疲劳设计,是采用基于有限试验数据而得到的某些近似数学式。本项目的研究是对设计因素进行分析和评价,并提出修订,借使焊接公路钢桥的设计规范有所改进。

1.2 目标和范围

本项目的的主要目标是建立一数学关系,以便对单纯轧制梁、单纯焊接梁、盖板中断梁(基本梁为轧制或焊接)、翼缘板有对接焊的梁,在多次加载之下的疲劳抗力表达清楚。

研究内容如下:

(1)对具有这些细节钢梁的已有疲劳数据和描述其疲劳行为的数学关系进行一次审阅。

(2)按统计原理提出疲劳试验的安排,并完成这些试验,借能从试验结果得到一套表达各种梁疲劳行为的表达式,将设计细节、作用应力和钢种这些因素包括在其内。

为实现这一目标,制造了374根试件钢梁,并进行疲劳试验。一共有204根为盖板中断梁。盖板是通过在其两侧的纵向角焊缝以及在其一端有横向角焊缝、在其另一端则没有横向角焊缝的方式,焊在梁的翼缘板之上。这样,每一盖板的两端就可提供两种焊接细节。参见图1.1(a)及图1.1(b)。再看,在图1.1(b)内,盖板是两层,其内层盖板长度与全梁相同,外层盖板则与图1.1(a)的布置相同。(注:对图1.1(a)及1.1(b)内所注的尺寸,那是用英制,附录K第5条对此有解释。)

一共有86根单纯轧制梁和单纯焊接梁进行疲劳试验,借能确定没有盖板、翼缘无对接焊的基本梁的疲劳抗力。这些试验结果不仅可以用于与盖板中断梁进行对比,还可以扩充现有的(关于单纯轧制梁及单纯焊接梁的)疲劳试验数据。

一共制造了84根在翼缘板有对接焊的焊接梁,并进行了疲劳试验。每根梁各在两处有翼缘板的对接焊,每个对接焊都是布置在宽度不相等的翼缘板之间,宽度的过渡则采用两种形式。如图1.2所示。对所有的对接焊缝,都是将其余高打磨平顺。在本课题中,没有对带有余高的对接焊的试件梁进行疲劳试验。

本项目对于试件梁都是按常幅加载来进行疲劳试验的。往昔的试验也是采用这种加载,而且规范条款的制订也是根据这种加载情况。另外,对运营结构的现有研究和AASHO实路实桥试验均表明,高值应力循环是导致疲劳损坏的主因^[1, 2, 12, 22, 40, 61, 63]。

除此以外,为了模拟公路钢桥实际运营状况,还对变幅加载进行了先驱性试验。这一研究所选用的试件,为在其对接焊缝有一处缺口的条形板。

1.3 设计参数

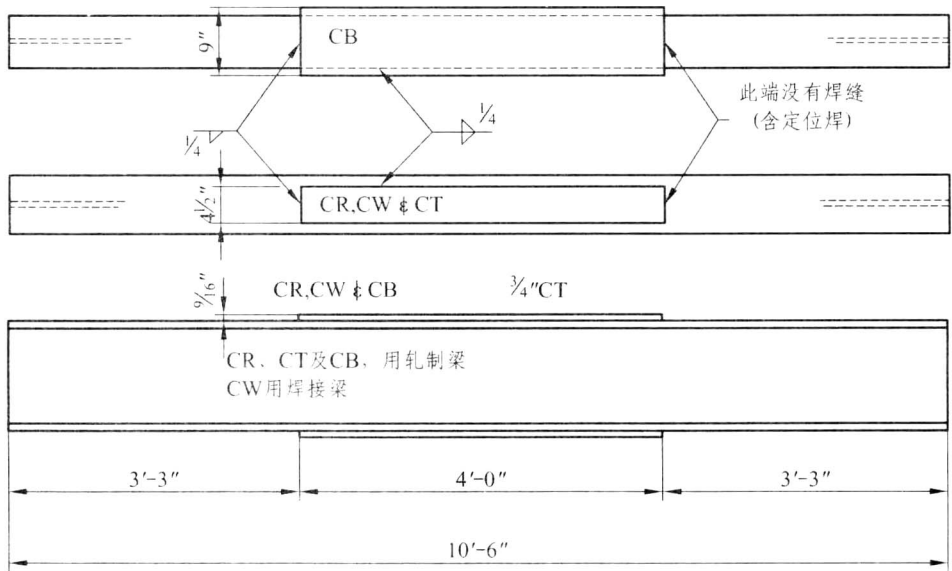
在本次研究中,主要设计参数(因素)可以分为三类——细节类型、应力水平、钢种。

由于对盖板中断梁的评价十分迫切,乃将这一细节作为研究的重点。对往昔研究成果和现行

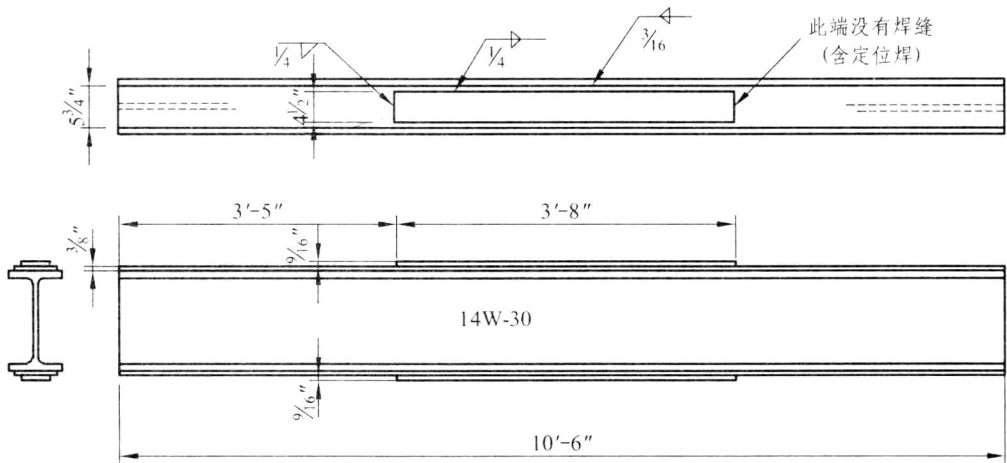


规范条文的审阅表明，具有研究意义的两种基本细节是：盖板在端头有横向角焊缝者和没有横向角焊缝者（注：盖板端头都取直角形）。

对这两种基本细节的进一步变化进行了检验。它们是：盖板厚度变化、盖板宽度变化、盖板在层数上的变化。图 1.1 给出了盖板研究中所考虑的各种细节。为了判定盖板中断梁的行为是否受所附着的基本钢梁的影响，分别让基本梁为单纯轧制梁（CR）和单纯焊接梁（CW）。尽管有资料指出此影响可以忽略^[11]，但仍有必要在应力和钢种变化的情况下进行证实。对于这一系列的试验，盖板厚度均按 1.5 倍翼缘板厚度采用；因为，这是 1969 年 AASHO 公路桥梁标准规范所许可的盖板最大厚度。



(a) 上下翼缘都有单层盖板的试件梁（CR、CW、CT、CB）明细图



(b) 上下翼缘都有两层盖板的试件梁（CM）明细图

图 1.1 试件梁明细图

CT 系列梁的盖板厚度为 2 倍翼缘厚度。这可以为翼缘板厚度对盖板厚度的比值对疲劳行为的影响进行评估，也可为超出当前设计规范限值以外的情况提供一些信息。

CB 系列梁是用来评估盖板宽于翼缘板情况对疲劳行为的影响。虽然目前这种情况使用的还很少，但由于高强钢材的容许应力随板厚的增加而降低，宽而薄的盖板将更具经济性；这也许会成为一种可取的细节。