

Qiaokua Jiegou Jianhua Fenxi

桥跨结构简化分析

Hezai Hengxiang Fenbu

——荷载横向分布

胡肇滋 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书提出以桥梁荷载横向分布为中心的桥跨结构各种简化计算方法。该书理论与实用并重,是作者多年来从事桥梁荷载分布研究的成果总结。

本书对偏压修正法、弹性支承连续梁法、正交异性板公式法、差分有限元法等荷载横向分布理论作出了较大的改进,并有所创新;书中给出了简便公式,计算用表及电算程序。

本书可供桥梁研究、教学、设计工作者使用,也可供各大专院校桥梁专业学生参考。

桥跨结构简化分析 ——荷载横向分布

胡肇滋 著

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:20 字数:532千

1996年12月 第1版

1996年12月 第1版 第1次印刷

印数:0001— 册 定价: 元

ISBN 7-114-02420-7

U·01688

序

《桥跨结构简化分析》一书,是我的老师胡肇滋教授,自 60 年代以来从事桥梁荷载横向分布研究主要成果的总结。际此专著问世之际,遵师之嘱将余学习之一点心得,略赘数语以为介绍。

吾师之研究成果,大多已见诸有关专业书刊,其代表作偏压修正法普遍公式之创立,在国内已广为流传,故其专著之学术价值已有公论,不待赘言。我想仅就在 CAD 技术日益普及的今日,这一专题的实用意义,发表一点浅见,公诸同好。

桥梁结构静力分析可以分为三个部分,首先是桥梁荷载横向分布系数的计算,其次是按平面杆系结构力学进行主梁、横梁及桥面板内力计算,最后是按建筑结构原理作构件的结构设计。就桥梁荷载横向分布理论在整个桥梁设计中地位而论,相当于结构设计原理与广义的结构力学之间的结合部。因此,在桥梁工程教材及其他各种专著中论述桥梁设计,大多均以荷载横向分布计算为主。

随着计算机技术的发展,近年来在公路桥梁设计上 CAD 技术也逐步得到普及。当前桥梁结构分析软件大致分为两大类。第一类是有限元一至三维结构分析通用程序。第二类是以平面杆系为主的桥梁结构专用分析程序,配合荷载横向分布子程序结合应用。

有限元结构分析通用程序,可作桥梁三维空间整体分析。它具有通用性强的一面,但又不可避免地带来自由度多,工作量大的不利的一面。特别有限元法仅能提供离散的数值解,不能给出对结构作用机制规律性认识的闭式解,以实现理论指导实践。而且由于有限元分析程序只能进行应力分析。对混凝土桥梁来说,“靠应力分析很难进行配筋设计”。特别对复杂几何形状断面,由于刚

度计算的困难,其精度也难以保证。重庆长江大桥(8跨 PC.T 构)实验证实,用华东水院薄壳程序作空间整体分析之电算值的准确度却低于偏压修正法计算值于此可见一斑。

由以上分析可见用电算程序 CAD 作空间结构分析,存在问题很多。正因为如此,我国新近出版的《90 年代国内外公路桥梁技术水平动向分析》一书指出:“当前我国桥梁结构分析是有限元法与简化计算并存,一般用横向分布系数考虑,并将结构化为平面问题处理,不作复杂的空间计算。”这是当前的实际情况,但也是合情合理的。

从国外情况来看:1. 美国 AASHTO 桥规(1977 年版及 1978, 1978 两年的修订条文)对早年基于手算的第三章荷载分布系数,基本未动。2. 英国 BS5400 桥规虽未给出荷载分布系数公式,但在第二篇荷载规范中却明确给出了荷载分布的定义:“荷载在直接受载构件和非直接受载构件之间的分配;在前者和后者之间所设置的连接构件(在纵梁间之隔板、桥面板等),当依靠其自身刚度决定这一作用”可见所指亦为适于手算之方法。3. 日本“国有铁道混凝土结构设计标准解说”(1974 年)对 T 梁桥的荷载分布系数规定:窄桥按偏压修正法,宽桥按 G.M. 法计算。在附录中还给出求荷载分布系数的 GM 法及德国 Leorhardt 法的用表。

从所见以上各国桥规来看,其用 CAD 作桥梁结构分析显然仍以荷载分布系数和平面杆系一维有限元电算相结合为主,与我国的情况大致相似。

以下我们再从计算结构力学的角度来论证一下,这一现状绝非桥梁结构分析技术滞后于数值计算理论的发展,而是具有重要现实意义和广阔发展前景的解析法与数值计算相结合的结合法(AN 法又称半解析数值方法),在桥梁结构分析上应用的大势所趋。

就力学而论,它是一门与数学相结合的古老而比较成熟的科

学。由于数学上的困难,使得纯理论方法已解决不了近代大量复杂的工程力学问题。50年代兴起的有限元法及相应的电算技术则为工程力学的发展开创了一个崭新的局面。

在有限元法发展的初期,由于其具有的网格、材料、边界、荷载的灵活性和程序的通用性,即解题能力广泛,适用于电算实现两大优点。在工程界取得了巨大进展,但由实际应用的研究和深入,也暴露了以上所提及的问题,在工程应用上,造成原则上有限元法什么都能解决,而实际上由于结构多维性和经费、计算机条件所限,在工程应用上往往又处于难以实现的状态。

由于数值计算技术的发展,对经过百年来发展具有良好基础的应用数学解析力学有所偏废,其应有的应用未能充分发挥。而有限元法分析复杂问题并不十分经济有效,两者结合起来正是解决问题的有效途径。就此而言,结合法所包括的方法和种类相当广泛。凡是数值分析中采用部分解析解或解析函数,而最终得到的是一系列离散化数值计算结果的分析方法均属此类。结合法的研究重点是处理好解析法与数值法两者的作用,互相取长补短,发展各自特长。一般来说,在结合法中将通过解析手段来帮助数值计算降维,从三维变为二维、一维。而同时又通过数值离散手段来弥补手算无法取解析函数之不足,以逼近真实解。结合法则将诸如一维解函数、基本解、通解等较为规则、简单情况下的理论分析工作由手算来完成;而将降维后的低维的离散化方程的求解工作由计算机来进行。这种人机之间恰当分工将会取得以前纯用解析方法或纯计算机数值计算所不能达到的预期效果。从以上结合法的内容和定义来看,桥梁的荷载横向分布系数是一维解函数,可由手算完成,而平面杆系是一维有限元法,是结构力学矩阵位移法之应用,借助电算可求得数值解。两者结合的桥梁结构分析方法,应该属于结合法的实际应用,故亦应视为先进的 AN 法在 CAD 方面的应用。它与三维空间分析的纯数值方法相比,在同样精度下可以节省工作量一至二个量级,提高效率几倍至几十倍。使复杂的桥梁结构分析有可能在微机上实现,这特别适合我国国情,对普及

桥梁 CAD 技术,提供一个切实可行的手段。

自 80 年代桥跨结构分析推广 CAD 技术以来,易于给人以错觉,认为荷载横向分布理论的手算方法是形将为先进的三维空间有限元法所取代的落后的方法。从而对其理论上明显的不当之处,对如变截面连续体系及复杂的组合体系桥梁所沿用的偏载增大系数法(平均分布乘以 1.15)杠杆法、偏压法等与工程实验出入很大的经验方法,取其简便,均不深究,一仍其旧。事实上,从以上对计算结构力学的结合法的综述来看,桥梁荷载横向分布计算是结合法两个重要组成部分之一,不但不会被淘汰,而且具有很高的研究和实用价值。源远流长,有广阔的发展前景。

总之,桥跨结构的荷载横向分布理论和有限元法的空间分析是其结构分析的相互促进的两翼,在研究上不应该有所偏废。

可以想见,这本专著的出版必将使结合法在桥梁结构分析上的应用和完善有所裨益,对很多桥梁结构设计得更加合理、安全、经济作出它应有的贡献。

牛和恩

1996.1.29

前 言

本书是以作者多年来在从事桥梁设计和教学实践中学习和研究桥梁荷载分布的心得和体会写成的。全书共分十一章,部分内容曾在《公路技术资料(3)》(人民交通出版社,1976年)和各种期刊上发表过,有些内容引自给桥梁工程研究生开课的讲义,这次均重新增订,并增加较多新的内容,有的是第一次发表。

第一章桥面板及板桥的计算,除介绍各国桥规及通用的计算方法外,重点推导出视桥跨为一整体的相应桥面板内力的计算方法,冀以能充分发挥桥面板的潜力,使设计更加合理、安全、经济。

第二章修正偏压法。该法的简支梁桥公式系德国舒根(Schöttgen)所创(1947),得到各国普遍重视,并收入日本国铁桥规(1970)。1965年作者受郑孝达、史尔毅有关论文的启发,将该公式发展为一可适用于各种静力体系桥跨的普遍公式,于1976年发表于《公路技术资料(3)》(人民交通出版社,以后简称资料(3)),这次增订,进一步将薄壁杆件理论引入,可供考虑约束扭转和翘曲之计算。这一公式在国内引起广泛的重视,不少桥梁专著均有引用和阐发,不少连续梁、刚构及斜拉桥设计均用过此法。

第三章弹性支承连续梁法,根据载于资料(3)之论文增订,发展了Leonhardt的简化梁格法,增补了计算用表。

第四章考虑抗扭的弹性支承连续梁法,这次增订增加了针对适用性更广的边、内主梁刚度不等桥跨,导出的2~5根主梁桥的荷载分布公式。

第五章正交构造异性板刚度之计算,系根据作者对板的边界条件的论文及分别与研究生钱寅泉、吴宜凤合作的T梁、箱梁桥比拟正交构造异性板刚度计算的论文汇编增订而成。根据对板理

论剪力计算的研究,发现相应边界条件以采用梁式条件为优。众所周知,无论采用梁格法或比拟板法作结构分析,其精确度在很大程度上决定于对模型结构刚度之计算合理与否。文中对构造异性板的刚度系根据几何构造导出较一般近似沿用材料异性板或任意假定组合断面中性轴的位置为符合实际,且导出了无内横梁的 T 梁桥的虚拟同性板的刚度,及箱梁桥考虑剪切变形的虚拟板的刚度。这样不仅使 T 梁桥荷载分布计算值更为准确,而且使 T 梁桥的公式亦能适用箱梁桥的计算,凡此均给出了实验验证。这一刚度计算,对采用有限元法在 CAD 中的应用,也特别有效。

第六章正交构造异性板公式法原载资料(3),这次是与刘岩工程师合作,对原作加以修订的,较原作精度有所提高。与同类的 G.M. 法或顿钦柯法对比,优点在于不用图表直接用简捷的公式计算,且可求出主、横梁及桥面板的内力,特别是无计算用表在参数上的限制,应用范围更广。为了计算便捷,刘岩还编制了电算程序。

第七章横梁内力的计算,用习用的各种荷载分布理论计算横梁内力,都是将全跨的横向弯矩全部汇集由横梁承载,忽视了在大部分跨径范围内桥面板是独立承载 M_y 的主要构件,从而造成横梁肋布筋过密和困难,这是不合理的。对此,作者提出按局部荷载设计横梁的新方法,使设计趋于合理、经济。

第八章桥跨结构剪力计算,根据作者主持的同名科研项目发表的论文汇编增订写成。1. 根据理论研究、模型试验和有限元电算分析,论证了前苏联波氏提出的桥梁支点断面剪力的刚性杠杆法分布是不合理的,应仍属于弹性分布,并导出相应实用、简化计算公式。2. 活载剪力验算临界断面位置,我国公路、铁路桥规一直沿用前苏联鲍氏法,经作者研究发现该法,在理论上的疏误,根据钢筋混凝土结构的剪跨比理论,用泛函求驻值的方法导出与

项目合作者有胡肇滋、熊家才、钱寅泉、吴宜凤,曾获 1990 年林业部科技二等奖。

实验的临界断面位置相符的理论公式。为此,建议剪力验算临界断面位置近似可取距支点一倍梁高处,已为林业部公路桥规(1990)所采纳。3. 采用林同炎的荷载平衡法结合剪跨比理论,推导出精确的预应力钢筋混凝土梁剪压破坏的临界断面位置。这一项目成果经国内公路、铁路、市政、林业部门 15 名桥梁专家评审确认达到国内先进水平和国际水平。

第九章连续梁及刚构桥梁的荷载分布。当前我国桥梁设计,对变截面连续梁、刚构桥,在荷载分布上仍多沿用 50 年代引自前苏联的增大系数法及杠杆法等经验性方法计算,本章根据 R. Bars 的主梁变、常截面变换的能量法,导出各种变截面主梁变换为等效常截面公式,提出了适用于连续梁及刚构桥的荷载分布的二次刚度法和偏压修正法,并对国外广泛应用的反弯点法作了修正和改进。

第十章斜拉桥荷载分布。斜拉桥活载的横向分布,国内外普遍采用不计结构抗扭的偏压法或杠杆法计算,似不尽合理。作者与姚丽、胡晓旭合作结合斜拉桥受力特点应用偏压修正法普遍公式导出斜拉桥的荷载分布公式,远较习用方法为经济、安全和合理。

第十一章简支梁-板桥的有限差分计算,是根据研究生钱寅泉与作者(导师)合作的同名论文编写的。将简支梁-板桥以考虑弹性支承的广义简支的正交构造异性板模型比拟,用差分有限元法求解,为提高计算精度,将这一比拟板变换为虚拟同性板与加劲肋的组合板结构。虚拟加劲肋的刚度在肋的所在位置加入,这较习用的肋的刚度均摊的方法能更好地反映结构实际。为了便于设计应用,特将研究生吴宜风用 Fortran 语言编写的电算程序一并纳入。

本书以实用为主,但又不局限于应用,对一种方法尽可能讲明其来龙支脉,知其然,而重在说明其所以然。为此,常将各家公式

或方法并列加以评述。有很多问题没有定论,则留待读者去思考,决择,去补充,修订。另外,作者认为任何方法或公式,都不应全恃理论或全凭经验决定一切,都应通过实验加以验证,做到理论与实践相结合。

由于作者水平所限,书中内容难免有不当与错误之处,希望读者批评指正。

作者在从事桥梁荷载横向分布的研究工作中,除合作科研立项,及合作撰写论文的同志在文献中列名者外,还有一些桥梁工程界的专家、高工、教授对作者的科研工作给予了热情的鼓励、赐教和支持,他们是:牛和恩、王伯惠、方锺、史尔毅、朱培京、刘效尧、何忠友、何福照、肖振群、吴德心、李德寅、郑孝达、周履、倪元增、袁国干、张士铎、张金根、张树仁、曾威、程翔云等(以姓氏笔画为序)。

本书得以写成,与他们的惠助是分不开的。在此谨致深切的谢意。

本书在写作过程中,承黄守华、杨学春两位同学热情相助,描制了大部分插图,老伴杨德旭自始至终给予了大力支持,子女们也付出了不少精力,在此一并表示衷心的感谢。

目 录

第一章 桥面板及板桥设计.....	(1)
第一节 荷载有效分布宽度法.....	(2)
第二节 威氏(Westergarrd)的单向板法	(13)
第三节 对当前桥面板设计评述	(29)
第四节 连续单向板的整体计算	(32)
第五节 板桥的内力计算	(66)
第六节 少筋微弯板的计算	(83)
第二章 修正偏心受压法	(90)
第一节 概述	(90)
第二节 抗扭修正偏压法的概念	(91)
第三节 修正偏压法之普遍公式	(92)
第四节 简支梁桥考虑自由扭转之	(94)
第五节 各种梁式体系考虑自由扭转之	(100)
第六节 简支梁桥开口截面考虑约束扭转之	(103)
第七节 简支梁桥闭口截面考虑约束扭转之	(110)
第八节 实验验证.....	(116)
第九节 简短小结.....	(119)
第十节 薄壁杆件扭转计算.....	(120)
第三章 弹性支承连续梁法.....	(126)
第一节 概述.....	(126)
第二节 弹性支承连续法公式推导.....	(127)
第三节 弯曲刚度参数 的计算及评述	(133)
第四节 桥跨横向结构的计算受压板宽 l_0	(136)
第五节 弯曲刚度参数 的正确计算	(139)

第六节	验证.....	(143)
第七节	木桥跨 的计算	(147)
第八节	公式中 的计算原则	(148)
第九节	弹支连梁法求荷载横向分布系数.....	(150)
第十节	弹性支承连续梁支点反力公式及数值表.....	(155)
第四章	考虑抗扭的弹性支承连续梁法.....	(167)
第一节	概述.....	(167)
第二节	修正弹性支承连续梁法.....	(168)
第三节	刚结梁法与弹支连续梁法比较.....	(179)
第四节	考虑抗扭及边、内梁刚度不等的弹性支承连续 梁法.....	(184)
第五节	不等刚度主梁的荷载分布影响线之计算.....	(200)
第六节	弹性支承连续梁在铰接板(梁)桥中的应用.....	(206)
第五章	桥跨结构比拟正交构造异性板的刚度计算.....	(210)
第一节	概述.....	(210)
第二节	各向同性板.....	(210)
第三节	正交材料异性薄板.....	(214)
第四节	板的边界条件.....	(216)
第五节	桥跨剪力精确计算的边界条件.....	(220)
第六节	正交构造异性板的刚度计算.....	(229)
第七节	箱梁正交构造异性板比拟的虚拟刚度计算.....	(241)
第八节	箱梁虚拟板(梁)比拟法刚度公式之验证.....	(245)
第九节	箱梁桥跨虚拟板(梁)法刚度公式评述.....	(248)
第十节	T(I)梁的正交构造异性板比拟的刚度公式 ...	(251)
第十一节	刚度计算中的 T 梁翼缘宽度的取值问题 ...	(258)
第十二节	无内横肋 T 梁桥虚拟加劲同性板法刚度 计算.....	(259)
第六章	正交构造异性板公式法.....	(266)
第一节	概述.....	(266)
第二节	挠曲面方程基函数的选定及求解.....	(267)

第三节	弯矩、剪力、扭矩公式之导立.....	(276)
第四节	纵梁挠度、弯矩、剪力荷载横向分布系数.....	(278)
第五节	横梁内力和桥跨扭矩的计算.....	(279)
第六节	叠加法的应用.....	(281)
第七节	荷载的最不利布置及最大内力.....	(283)
第八节	验证.....	(285)
第九节	应用示例.....	(290)
第十节	小结.....	(303)
第十一节	正交构造异性板公式法程序.....	(305)
第七章	多梁式桥跨横梁内力计算的研究.....	(313)
第一节	概述.....	(313)
第二节	对文献模型桥跨横梁实验的分析.....	(314)
第三节	多梁式桥跨横梁的荷载纵向分布.....	(320)
第四节	T型横梁的计算宽度.....	(324)
第五节	实验与各种理论方法值比较.....	(326)
第六节	横梁计算示例.....	(334)
第七节	小结.....	(336)
第八章	主梁剪力荷载横向分布.....	(339)
第一节	对支点断面剪力杠杆分布学说的评述.....	(339)
第二节	有关剪力横向分布的几个问题.....	(350)
第三节	混凝土梁斜截面剪压破坏的临界截面位置 及抗剪计算.....	(353)
第四节	对混凝土梁抗剪计算有关规定的评述.....	(382)
第五节	桥跨结构主梁剪力横向分布实用计算.....	(391)
第六节	桥跨主梁支座反力横向分布的实验研究.....	(429)
第九章	不等刚度主梁及各种体系的常、变截面梁桥 荷载分布.....	(447)
第一节	主梁刚度不等时的荷载横向分布.....	(447)
第二节	常截面非简支桥跨的等效简支梁法.....	(452)
第三节	变截面静定结构变换为等效常截面之计算.....	(464)

第四节	变截面连续梁、刚架桥跨荷载分布计算概述 ...	(482)
第五节	一次刚度换算法.....	(485)
第六节	二次刚度换算法.....	(509)
第七节	反弯点分割的静定梁法.....	(513)
第八节	修正偏压法之应用.....	(525)
第九节	增大系数法.....	(527)
第十节	实验验证.....	(529)
第十一节	变截面刚架桥荷载横向分布计算.....	(542)
第十二节	连续桥跨结构荷载分布及内力计算.....	(552)
第十章	斜拉桥荷载横向分布.....	(555)
第一节	斜拉桥构造简介.....	(555)
第二节	主梁与拉索作用机制.....	(557)
第三节	偏压修正法在斜拉桥上的应用.....	(560)
第四节	实验验证.....	(574)
第十一章	简支梁板桥的有限差分计算.....	(580)
第一节	薄板微分方程和边界条件.....	(580)
第二节	结点差分系数的推导.....	(582)
第三节	板肋组合结构的刚度.....	(588)
第四节	实验验证.....	(590)
第五节	结论.....	(593)
第六节	简支 T 型梁桥有限差分结构分析程序	(594)

第一章 桥面板及板桥设计

正确地选择桥面板结构,在桥梁设计中占有重要意义。这是因为桥面是平面结构,厚度增加 1cm(厘米),全桥增加的体积就很可观。它在桥跨总恒载中占有很大比例,对大跨度桥桥面板的经济尤为重要,故国内外对于桥面板新型化、轻型化的研究都不遗余力。

就板肋桥跨(图 1-1)而论,板、肋之间在经济上是互相制约的。肋的体积 V 主要决定于

图 1-1 板肋桥断面

纵向 M_x 和桥的跨径 L ,而横向 M_y 与板跨 l 的影响是次要的。以主要矛盾分析,肋横向每米的体积为 V/l ,设其单价为 a ;桥面板设计以活载为主,其体积近似假定与 l 成正比为 Kl ,单价为 b ,故单位长度 T 梁构造的造价:

$$T = a \frac{V}{l} + bKl \quad (1-1)$$

由 $dT/dl = 0$ 可得

$$aV = bKl^2 \quad (1-2)$$

式(1-2)表明,当一个梁肋的造价等于一肋间板的造价时为最经济的设计。推而广之,即全部肋的总造价与整跨桥面板的总造价相等时为最经济的设计。

就板、肋的经济而论,又以板的经济居于主导地位,第二次世界大战以来,原联邦德国在公路钢桥上最早获得成功的轻型桥面板,就是面层用沥青铺装的加劲钢板(又称正交异性刚板)桥面。它给桥梁结构带来划时代的革新,其重量为钢筋混凝土(R.C.)桥

面的 $1/3 \sim 1/7$ 。在我国公路桥梁中,预应力钢筋混凝土(P.C.)空心板已逐渐得到应用和发展,少筋微弯板问世以来,曾得到广泛应用,已显示具有比平板远为优越的经济效益。1983年交通部公路研究所又推出少筋混凝土肋腋板,由于采用肋条加腋,故混凝土较微弯板省 30%,承载能力与之相当。

第一节 荷载有效分布宽度法

一、单向板有效分布宽度

各国桥梁设计规范为了简化计算,对公路混凝土桥面板的计算一般都给出一种极其简便的近似法——有效分布宽度法。这些方法大多是基于试验的粗略的分析,使板简支于不发生弯曲和下沉的纵(横)梁格之上,根据板的跨中断面的弯应力等效原则,求出轮载在垂直于板跨方向的分布宽度,称为板的计算有效宽度。这样就把复杂的二维板的计算,简化为等效宽度的梁的计算。

(一) 混凝土桥面板有效分布宽度的实验

1. Coldbeck 和 Smiu 在三个 $9.75 \times 4.88(\text{m})$ [32×16 (英尺)] 的钢筋混凝土板上的试验得出结论:

有效宽度随板厚增大而减小。实验荷载的有效宽度,当板厚为 26.7(10.5), 21.6(8.5) 和 15.2(6)cm(英寸)时,分别为跨径 l 的 75.7%、81.1% 和 109.3%,故有效宽度可取 $b_e = 0.7l$ 。

2. Ketchum 制定的美国混凝土公路桥及基础通用规范(1920年),通过研究不同的试验和各州规范,建议采用图 1-2 所示的计算钢筋混凝土桥面板的集中轮载弯矩的分布。

根据图 1-2 给出:

(1) 对附属于纵梁的桥面板〔图 1-2a〕

Ketchum .The Design of Highway Bridges of steel, Timber and Concrete .1920, 120 ~ 124

$$b_e = \frac{1}{2}(e_1 + e_2) = (l + c) \text{tg}$$

(1-3)

式中: C ——轮胎宽度;

l ——板的跨径, 单位 cm(英尺)。

图 1-2 钢筋混凝土(R.C.)桥面板集中轮载分布

(2)对附属于横梁的桥面板〔图 1-2b)〕

$$\begin{aligned} b_e &= \frac{1}{2}(e_1 + e_2) = l \text{tg} + c \\ &= \frac{2}{3}l + c \quad 182.9(6) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中符号意义同上式。

(3)计算以支承梁担负集中轮载时,板的剪力分布有效宽度与弯矩计算相同,用式(1-3)、(1-4)计算。最小的 b_e 值为 91.4(3)cm(英尺),最大为 182.9(6)cm(英尺)。

(二)混凝土桥面板有效分布宽度的理论分析