

Y1527215

分类号: U44,U45

10710-20060639



長安大學

硕士学位论文

T形梁桥整体刚度研究

徐建炜

导师姓名职称	黄平明教授 孙胜江副教授		
申请学位级别	工学硕士	学科专业名称	桥梁与隧道工程
论文提交日期	2009年4月28日	论文答辩日期	2009年5月30日
学位授予单位	长安大学		
答辩委员会主席	杨炳成教授		
学位论文评阅人	马保林教高 宋一凡教授		

摘 要

在建成的桥梁中，中小跨径的桥梁占据了大多数。T形梁桥由于其独特的优点，而在中小跨径桥梁中被广泛采用。但是T形梁桥在其使用过程中出现了各种各样的病害，其中T形梁桥横向联结造成的病害表现的尤为突出，对桥梁的使用产生了不利影响。为此，本文以河北省交通厅《提高预应力T形梁桥整体刚度应用研究》的科研项目（课题编号Y-050246）为依托，对T形梁桥不同的横向联结所表现出来的整体刚度特性进行深入研究，为以后的设计及旧桥加固提供一些参考。本文的主要研究内容如下：

1) 以河北省廊坊市廊泊公路的永定河大桥为背景，考虑现有T形梁桥的不同横向联结方式，如铰接联结、半刚半铰联结、半刚半铰加整体层联结、湿接联结、湿接联结加整体铺装层等，建立了不同联结方式的简支梁及六跨简支变连续的ANSYS实体模型，分析其横向分布影响线及模态，得到了一些有意义的工程结论。

2) 通过有限元程序ANSYS建立T形梁桥的铰接、湿接及湿接加整体层三种不同联结方式的空间杆单元模型，结合课题组自行开发的桥梁动力分析程序BDANS，编制接口程序，计算其在随机车流下的动挠度，分析了T形梁桥动力响应横向分布等。

3) 对永定河大桥进行静动力测试，分析比较实测值与理论值，结果表明实测值与理论值符合得很好，论证了有限元计算模型的正确性。

关键词：T形梁桥，横向联结，横向分布，整体刚度，随机车流，动力响应

Abstract

Among the built bridges, Medium-small Span Bridges occupied the leading position. T-beam Bridge has been widely used in Medium-small Span Bridges due to its outstanding advantages. In its using process, many kinds of diseases have appeared. Bridge diseases caused by transverse connection is the most prominent which produces prodigious influence in service performance of bridges. Therefore, the integral rigidity of T-beam bridge will be studied in the paper which bases on the project entitled “Study on Improving The Whole Rigidity of T-beam Bridge”, which is supported by the hebei provincial transportation department. Some references can be provided for designs of newly-built bridges or reinforcement of the old bridges. The main research of this paper are as follows:

1) Backgrounding on the project of the Yongding River Bridge in Langbo Road, in Langfang city, Hebei province, finite element solid models of simply supported beams and six-span continuous beams are established by ANSYS, which consider different transverse connection condition such as hinge, semi-rigid, semi-rigid with integral layer, wet grafting and wet grafting with integral layer. Then transverse load-distributing influence lines and modal are calculated. Some significant conclusions are obtained from the calculation results.

2) ANSYS program is used to establish space bar element models of T-beam bridge with three different combining methods, such as hinge, wet grafting and wet grafting with integral layer. Then the **BDANS** which programmed by our assignment group is used to calculate the dynamic deflection in random traffic flow. Some significant conclusions are obtained from the results.

3) The correctness of the calculation model is verified by dynamic and static tests of Yongding River Bridge. So the calculated value is credible.

Key Word: T-beam bridge, Transverse connection, Transverse distribution, The whole rigidity, Random traffic flow, Dynamic response

论文独创性声明

本人声明：本人所提交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：徐建伟

2009年4月28日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：徐建伟

2009年4月28日

导师签名：[Signature]

2009年4月28日

第一章 绪论

1.1 课题研究的意义及背景

改革开放后全国公路桥梁建设取得了长足发展。据统计，2007年年底，全国公路桥梁达 57.00 万座、2319.18 万延米，其中特大桥梁 1254 座、208.58 万延米，大桥 35816 座、782.24 万延米，中桥 12.58 万座、648.50 万延米，小桥 40.71 万座、679.86 万延米^[1]。由此可见，其中除去少量特大桥、大桥外（3.707 万座，990.82 万延米）绝大多数为单孔跨径小于 40 米、总长小于 100 米的中小桥。

装配式 T 形截面由于肋与肋之间处于受拉区域的混凝土得到很大程度的挖空，显著减轻了结构自重；同时对于主要承受正弯矩的简支梁和简支变连续梁而言，既充分利用了扩张的混凝土桥面板的抗压能力，又有效地发挥了集中布置在梁肋下部的受力钢筋的抗拉作用，从而使结构构造与受力性能达到理想的配合。由于 T 形截面受力合理，经济性好，预制—装配施工方便，是中等跨径桥梁（13 米~40 米）较多采用的截面形式。随着时代的推移，T 形梁桥的设计也越来越规范化、标准化。由上世纪 60 年代中、后期的无横隔板的 T 形梁桥，发展到 08 年推出的装配式预应力混凝土 T 梁桥标准图。在这些 T 形梁桥中，具体的横向连接方式主要有以下几种形式：铰接联结、介于铰接与湿接之间的半刚半铰联结、半刚半铰联结加整体层、湿接联结、湿接联结加整体铺装层。

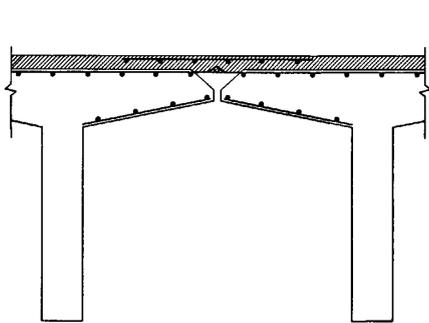


图 1.1 铰接联结

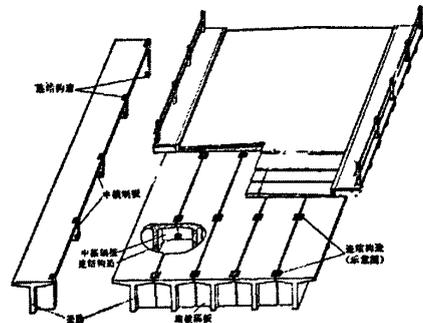


图 1.2 半刚半铰联结

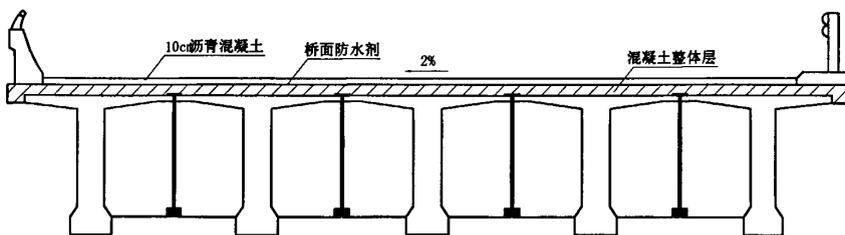


图 1.3 半刚半铰联结加整体层

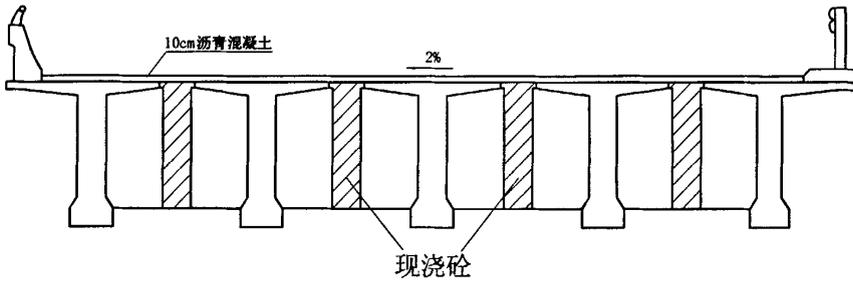


图 1.4 湿接联结

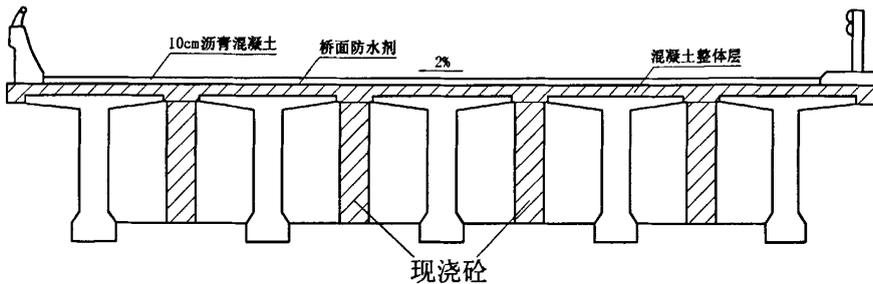


图 1.5 湿接联结加整体铺装层

在我国公路建设事业蓬勃发展，公路面貌日新月异的同时，许多桥梁随着时间的推移，慢慢地成为旧桥。桥梁和其他建筑物一样，其“生命周期”亦不外乎经历以下三个阶段：建造、使用和老化。桥梁在其使用期间内，由于车辆，特别是超重车辆的行驶，以及长期在自然环境（大气腐蚀、温度、湿度变化）和使用环境（荷载作用与频率的增加、材料与结构的疲劳）的作用下，导致桥梁结构产生病害、出现缺陷，严重影响到桥梁正常使用。当然作为比较常用的 T 形梁桥，在其使用过程中也出现了各种各样的病害，其中 T 形梁桥横向联结造成的病害表现地比较突出，主要表现为以下几种情况：

①在车辆荷载作用下，结构表现出“单梁受力”的受力缺陷，即直接承受车轮压力的梁片受力较大，没有直接承受车轮压力的梁片分配的荷载较小；

②受力较大的 T 梁在荷载作用下挠度较大，而相邻 T 梁挠度较小，使得 T 梁接缝处钢筋混凝土或沥青混凝土桥面及防水层开裂、破坏，桥面渗水侵蚀主梁；

③湿接缝较宽，承受的荷载较大，引起接缝开裂渗水，进而导致钢筋锈蚀，混凝土胀裂、脱落等等。

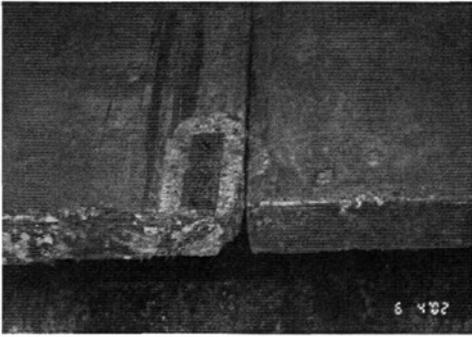


图 1.6 横隔梁连接钢板漏焊

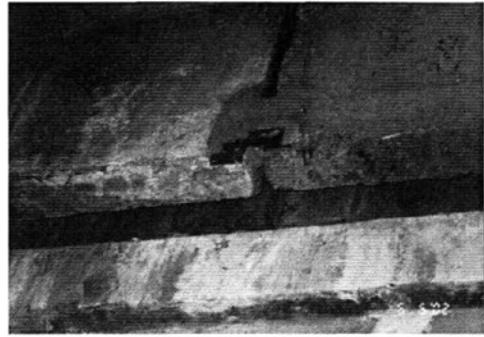


图 1.7 横隔梁连接钢板锈蚀，混凝土剥落

图 1.6、1.7 为湖北武（汉）—黄（石）高速公路某桥横向联结缺陷资料，由于横向联结钢板的漏焊、生锈、松动，导致 T 梁受力超过设计的计算值，造成 T 梁损伤。

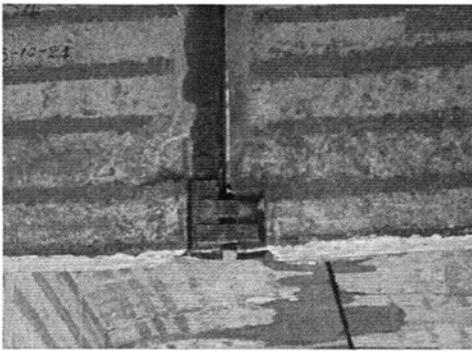


图 1.8 联结钢板锈蚀

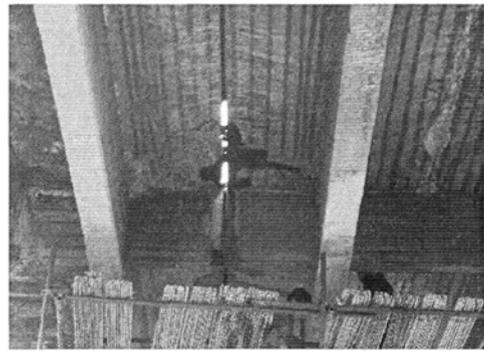
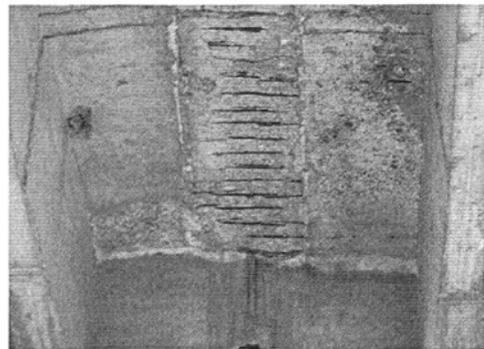


图 1.9 桥面沥青混凝土破坏

图 1.8、1.9 为陕西富县 309 国道干线某桥横向联结缺陷资料，由于横向联结刚度的不足，使得 T 梁之间接缝处桥面破损严重，从桥下可以看到接缝处桥面沥青混凝土已完全破坏。



(a)



(b)

图 1.10 湿接缝混凝土脱落、露筋

图 1.10 为浙江长兴县某桥横向联结缺陷资料，接缝开裂渗水，进而导致钢筋锈蚀，

混凝土胀裂、脱落。

由此可见,不同横向联结方式的 T 形梁桥表现出了不同的病害,对桥梁的使用也产生了不同的影响。对于在中小桥中广泛使用的 T 梁桥,我们很有必要对不同的横向联结所表现出来的整体刚度特性作一些研究,为以后的设计及旧桥的加固提供一些参考价值。

1.2 研究现状

1.2.1 T 形梁桥整体刚度静力特性研究现状

理论上说, T 梁之间的联结由铰接、刚接两种,目前工程实际中又发展出联合使用两种联结方式的半刚半铰连接。不同的联结方式结构的受力有所不同,所表现的整体刚度也不同,主要体现在结构承受的活载横向分配有所不同,也就是我们常说的横向分布系数不同。

T 梁桥上部结构由承重结构(主梁)及传力结构(横梁、桥面板等)两大部分组成。多片主梁依靠横梁和桥面板联成空间整体结构。由于结构的空间整体性,当桥上作用荷载 P 时,各片主梁将共同参与工作,形成了各片主梁之间的内力分布。梁桥的这种受力特性实际上已属于空间结构的力学分析范畴。作为空间计算理论的共同点是直接求解结构上任一点的内力或挠度,并且也可像单梁计算中应用影响线那样,借助理论分析所得的影响面来计算某点的内力值。

如果结构某点截面的内力影响面用双值函数 $\eta(x, y)$ 来表示,则该截面的内力值可表示为 $S = P \cdot \eta(x, y)$ 。但是,鉴于作用于桥上的车辆荷载系是沿纵横向都能移动的多个局部荷载,用影响面来求解最不利的内力值仍然是非常繁重的工作,因此上述这种空间计算方法实际上很难推广应用。

目前广泛使用的一种方法,对梁式桥结构除一些特殊荷载或环境因素(如地震)外,一般结构内力计算采用近似理论,即引入荷载横向分布系数。

荷载横向分布计算一直是公路桥梁设计中的一个重要内容。利用内力或荷载的横向分布系数分析桥梁结构,实质上是在一定的误差范围内寻求一个近似的影响面来代替精确的影响面,把一个复杂的空间问题转化成平面问题来进行求解,即把影响面 $\eta(x, y)$ 分解成两个单值函数的乘积,即 $\eta(x, y) = \eta_1(x) \times \eta_2(y)$,即把空间结构的内力计算问题合理

地转化为两类平面问题来解决。

50 多年来, 国内外学者在大量试验研究的基础上对 $\eta_2(y)$ 的计算提出了各种方法, 目前常用的有: (1) 按梁格系法, 把桥梁按主梁和横梁的布置当作纵横相交的梁格系来分析。(2) 按板梁系法, 把可能设置的横隔梁的刚度近似的连续分摊给桥面板, 按主梁的布置将桥梁作为板梁系来分析。(3) 按各向异性板法, 把主梁和横梁的刚度都近似的连续分摊, 从而形成各向刚度不同的异性板, 以此作为桥梁的力学模型进行分析^[2]。

梁格系法是以 Leonhardt-Homberg 为代表的^[3], 此法假定桥梁结构为主梁与横梁处于弹性支承梁关系上的格构, 由节点的挠度和扭角关系找出节点力, 确定对应的 $\eta_2(y)$, 刚性横梁法就是这种体系的一个特例。在国内, 胡肇滋^[4]在这方面有较为深入的研究。胡肇滋在学习郑文及史尔毅论文中提及的德国人 schottgen 公式之启发下导出了适用范围广泛的公式, 并根据其力学原理命名为刚性横梁法的普遍公式, 该公式于 1976 年在史尔毅主编的《公路技术资料》中发表。胡肇滋还考虑了桥跨结构弯扭耦合作用, 通过平衡关系, 导出的修正刚性横梁法的普遍公式, 不仅适用于简支梁桥, 而且可以适用于各种静力体系的桥梁, 同时, 他也对这一公式在曲线梁桥及斜拉桥上的应用做了论述。程翔云在《梁桥理论与计算》一书对胡肇滋的普遍公式在连续梁桥的应用上做了一些记述。金成隶在《结构静力学》一书中, 对修正刚性横梁法在拱桥的应用做了论述。

铰接板法属于典型的板梁系法。这一方法最早是由 Hundry-Jarger 提出的^[3]。他将桥面沿纵向划分成各个主梁单元, 而横梁的抗弯刚度均摊在桥面上, 主梁之间的连接用赘余力(弯矩和剪力)表示, 可用力法求解。这一方法已被公认是最具有较高实用价值的近似计算方法。

以 Guyon-Massonnet 为代表的各向异性板法^[3], 它是把主梁与横梁的刚度分别在桥的纵、横向均摊, 将桥梁结构模拟为正交各向异性板, 用板的挠曲微分方程式为基础求解 $\eta_2(y)$ 。早在 1914 年, Huber 就考虑加劲板为正交两向具有不同弹性性质的板, 首次提出理想化的正交异性板的概念。在他以后的著作中推导了材料正交异性板的理论, 引起了桥梁工程师的注意。然而由于其刚度计算的困难, 它的应用是受到限制的。1946 年 Guyon 考虑板肋的结构加劲板为一静力等效的开截面梁格, 或理想化的梁格系, 这是一个简单的近似方法。Guyon 考虑的是无扭结构, 他的方法后来为 Massonnet 所扩充, 在分析中导入了扭矩的效应, 统称为 G—M 法, 即比拟正交异性板法。

由于计算机技术的快速发展, 可以应用各种理论的方法来分析计算空间结构在不同

荷载作用下以及各种物理环境不同因素的影响下的内力（或应力）分布状态。较精确的空间结构分析是采用有限元理论，将空间结构分成板、壳或其他单元联接成的整体结构。至今，可应用各种通用程序，如国外开发的有 ANSYS、MIDAS、SAP2000、ADINA、ALGOR 等等，国内也开发了各种专用程序。

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），是桥梁结构分析应用的大势所趋。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。由于有限元算法具有网格、材料、边界、荷载灵活性和通用性的优点，故其在工程界取得了巨大进展，但随着实际应用的研究和深入，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。故解决问题的有效途径是将有良好的应用数学力学和数值计算技术结合起来，这样才最经济实用。结合法的研究重点是处理好解析法与数值法，互相取长补短，发挥各自特长。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，提高效率几倍甚至几十倍。

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，都具有很高的研究和实用价值^[5]。

1.2.2 T 形梁桥整体刚度动力特性研究现状

T 形梁桥整体刚度动力特性最明显体现在桥梁的固有频率上。在质量相同的条件下，固有频率是动刚度的直观反映。固有频率是桥梁本身固有振动所产生的频率。所谓固有振动是指弹性系统在没有外部动力的作用下形成的振动。它是研究一切振动问题的基础，固有振动的系统在弹性力和惯性力的作用下以其固有频率和相应的固有振型进行往复的振动，此时系统的动能和位能往复交换，若存在阻尼，固有振动将随时间衰减。由于桥梁的固有振动只涉及桥梁本身一个因素，所以，桥梁的固有振动相对比较简单，研究成果也比较成熟。

而另一方面，桥梁在车辆移动荷载作用下，将产生振动、冲击等动力效应。如何从理论上确定移动车辆荷载下公路和铁路桥梁的动力响应，一直为工程界所关注。

车辆以一定的速度通过桥梁，桥梁受到车辆荷载的激励会产生振动，反过来桥梁的振动对于车辆来说也是一种反激励，因此车辆和桥梁的振动是一个相互影响，相互耦合的过程，我们称之为车桥耦合振动问题^[6]。

桥梁车辆振动问题的研究始于铁路桥梁，人类自 1825 年建成第一条铁路以来，便开始了对列车下桥梁相互作用研究探索的历史过程^{[7][8]}。1844 年法国和英国桥梁工作者对著名的 Britannia 桥进行了模型试验。在英国的一些铁路桥梁失事以后，R·Willis^[9]于 1847 年导出了在移动荷载下忽略质量的桥梁振动方程，并从 1849 年起系统地开始了模型试验。1896 年 G.G.Stockes 获得了 Willis 方程的幂级数解。考虑到中小跨度铁路桥梁的重量和铁路列车荷载相比较小可以忽略，这一理论结果被近似地应用于铁路桥梁。对于大跨度的桥梁，1905 年俄国学者考虑了另一种极端情况，导出了忽略车辆荷载质量的移动常量力作用下桥梁的振动方程，并获得了精确解。以后 1911 年 S.Timoshenko 和 1928 年 C.E.Inglis 进一步讨论了移动周期作用力的动力响应问题。1941 年李国豪继 Inglis 之后研究了悬索桥在铁路列车荷载作用下的强迫振动问题。此后，又研究了拱桥的车辆振动问题^[10]。在这近一个世纪里，人们对车桥共振问题作了大量的理论和实验研究，各种理论体系不断涌现，对弄清车桥共振机理，揭示激励的原因和车桥共振的特点都有了较为深入的了解，具有一定的实践价值。这些理论，我们一般称其为车桥振动的古典理论。

实际上，由于实际桥梁和车辆耦合振动系统本身的复杂性，并且车型和桥型又种类繁多，以及引起振动的各种激振源的随机性，古典理论显然不能全面合理的模拟车桥耦合振动问题。随着电子计算机的应用以及有限元技术的发展，使得车桥耦合振动的研究有了飞速的进步。

随着有限元法的广泛应用，Mulcahy、Hutton 和 Cheung 以及 Gupta^[11]先后用有限元（条）法并结合模态分析技术研究了公路桥梁在双轴车辆通过时的动力响应。他们将简支梁桥理想化为有限条的集合，用广义模态坐标表示桥梁响应，将车辆理想化为两轴模型，并且在模型中考虑了桥面不平顺对车桥振动的影响。G.Diana^{[12][13]}探讨了大跨度悬索桥的列车走行问题（以及列车在已经发生变形的大跨度悬索桥上运行时的动力响应），M.Olsson^[14]采用有限元——模态技术求解车桥动力响应。1988 年，Kawatani^{[15][16]}采用随机振动理论，介绍了一个同时考虑移动车辆和桥梁结构的非平稳振动的分析方法，并提出了冲击系数的计算公式。T.L.Wang^[17]研究了一座公路斜拉桥的车辆动力荷载作用，采用振型叠加法求解车辆桥梁系统的振动反应以及冲击系数。Yeong-Bin Yang^{[18][19]}采用动态凝聚法求解车桥系统的动力响应问题，由于将所有与车体有关的自由度在单元级进行凝聚，使得计算效率大为提高。

国内有关科研院校从上世纪 70 年代末 80 年代初开始，对车桥耦合振动理论进行了

较系统的研究工作。

谭国辉^[20]把桥梁和车辆视为一个相互作用的系统,以模拟桥梁在汽车行驶时的动态性能与反应。该系统将桥梁结构理想化为二维的格排梁,可以包括扭转和横向振动等高阶振型的效应。三维的汽车模型,具有竖向位移与纵向摇摆的振动自由度,可以有各样的非线性支悬装置与轮胎。盛国刚,彭献,李传习^[21]将作用在桥上的车辆荷载简化为与实际情况接近的移动振动系统模型,将简支梁桥简化为平面梁模型,当车辆参数变化到特定情况,系统可简化为两种模型(移动力和移动质量),并比较了三种模型在不同车辆参数情况的结果,分析讨论了跨径和移动速度变化时冲击系数的变化规律。张宏杰、曹艳梅、G.DeRoock^[22]等通过建立随机激励下的车—桥耦合系统的空间动力模型,根据实测的轮对加速度,由时间序列自回归模型生成随机激励作为系统的输入,对列车通过桥梁的全过程进行了计算机模拟,得到桥梁的动力响应,并对计算结果进行了统计分析。严志刚^[23]等根据随机硬化理论和钢管混凝土组合材料恢复模型,提出了复杂应力状态下钢管混凝土组合材料的弹塑性应力应变关系,采用非线性有限元法,对一钢管混凝土拱桥进行移动车辆荷载作用下车桥系统的动力响应分析,并进一步研究钢管混凝土组合材料进入塑性后对体系振动的影响。张军^[24]等将车辆和桥梁系统看成一个整体耦合运动学系统的两个分支,并引入模态综合法来分析其动力响应。黄华^[25]编制了车辆荷载谱模拟程序,构造不同运营状态下的车辆荷载谱,利用有限元程序将模拟所得荷载谱加载到混凝土简支 T 形梁桥上,分析了不同行车情况下的空间动力响应,并研究了车速对冲击系数的影响,同时建立了 T 形梁有限元实体模型,分析了车辆荷载谱作用下梁的疲劳开裂、压区混凝土以及拉区钢筋的应力时间历程等问题。许峰炜^[26]将板梁桥简化为欧拉伯努利梁,分别采用移动荷载及车桥振动模型进行板梁的动力响应及冲击系数分析。最后,通过对移动荷载的简化,提出了板梁桥动力响应横向分布的概念,应用有限单元法和解析法分析了窄桥和宽桥的动力响应。杨建荣^[27]研究了车、桥相互作用条件下,混凝土箱梁桥桥面板局部振动规律以及系杆拱桥吊杆的车致振动等问题。

目前的车桥振动研究由对列车通过铁路桥的研究,慢慢发展到公路桥梁。同时,研究也由对桥梁的整体振动分析发展到对桥梁的局部振动分析。所以对公路桥梁上应用较为广泛的 T 形梁桥的车桥振动分析,研究其在不同横向联结下所体现的动力响应也变得越来越有意义。

1.3 本文主要的研究内容

针对上述存在问题，本文拟从以下几方面着手进行研究：

第二章桥梁荷载横向分布及动力学基本理论。通过对国内外大量文献的阅读，了解桥梁横向分布系数及桥梁动力学的基本理论。

第三章 T 形梁桥整体刚度静力分析。以河北省廊坊市廊泊公路改扩建工程永定河大桥的设计资料为背景，同时针对现有 T 形梁桥所采取的横向联结方式，建立不同的 ANSYS 实体模型，从静力方面分析桥梁在不同的横向联结方式下整体刚度。

第四章 T 形梁桥整体刚度动力分析。建立 ANSYS 建立 T 形梁桥的不同联结方式的实体模型计算其模态；建立 ANSYS 建立 T 形梁桥的不同联结方式的杆单元模型，并结合课题组自行开发的桥梁动力分析程序 BDANS(Bridge Dynamic Analysis System)计算其在随机车流下的动挠度，分析 T 形梁桥动力响应横向分布，从动力方面分析桥梁在不同的横向联结方式下整体刚度。

第五章实桥试验。通过对永定河大桥实桥的静动力测试，分析比较实测值及理论值，验证计算模型的正确性。

第二章 桥梁荷载横向分布及动力学基本理论

2.1 桥梁荷载横向分布理论^[2,4,28]

2.1.1 荷载横向分布理论

对于图 2.1a)所示的单梁来说, 如以 $\eta_1(x)$ 表示梁上某一截面的内力影响线, 则该截面的内力值 S 可表示为 $P \cdot \eta_1(x)$ 。这里 $\eta_1(x)$ 是一个单值函数, 梁在 xoz 平面内受力和变形, 它是一种简单的平面问题。对于如图 2.1b)所示的一座梁式板桥或者由多片主梁通过桥面和横隔梁组成的梁桥来说, 情况就完全不同了。当桥上作用荷载 P 时, 由于结构的横向刚性必须使荷载在 x 和 y 方向内同时发生传布, 并使所有主梁都以不同程度参与工作。鉴于结构受力和变形的空间性, 故求解这种结构的内力属于空间计算理论问题。如果用一个双值函数 $\eta(x, y)$ 来表示结构的内力影响面, 则某截面的内力值 S 就可以表示 $P \cdot \eta(x, y)$ 。

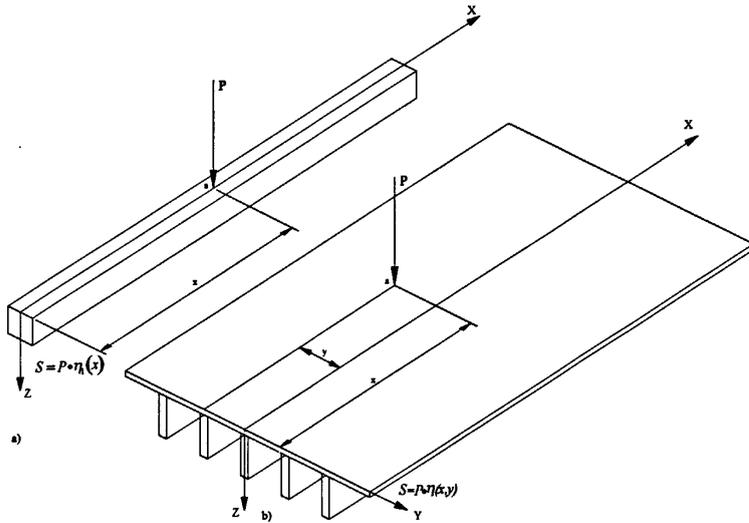


图 2.1 荷载作用下的内力计算

但是, 鉴于作用于桥上的车辆荷载系沿纵横向都能移动的多个局部荷载, 用影响面来求解最不利的内力值仍然是非常繁重的工作, 因此上述这种空间计算方法实际上很难推广应用。现在广泛使用的一种方法, 是将复杂的空间问题合理的转化成图 2.1a)所示简单的平面问题来求解。这种方法的实质是将前述的影响面 $\eta(x, y)$ 分离成两个单值函数的

乘积，即 $\eta_1(x) \cdot \eta_2(y)$ ，因此，对于某根主梁某一截面的内力值就可以表示为

$$S = P \cdot \eta(x, y) \approx P \cdot \eta_2(y) \cdot \eta_1(x) \quad (2.1)$$

在上式中 $\eta_1(x)$ 就是单梁某一截面的内力影响线，如果我们将 $\eta_2(y)$ 看作是单位荷载沿横向作用在不同位置时对某梁所分配的荷载比值变化曲线，也称作对于某梁的荷载横向分布影响线，则 $P \cdot \eta_2(y)$ 就是当 P 作用于 $a(x, y)$ 点时沿横向分布给某梁的荷载，暂以 P' 表示，即 $P' = P \cdot \eta_2(y)$ ，这样，就可完全像图 2.1a) 所示的平面问题一样，求得某梁上某截面的内力值，这就是荷载横向分布原理。

$\eta_2(y)$ 表示单位荷载 $P=1$ 在空间结构上沿某截面横向移动时，该截面内力在横向的比例关系。所以，实质上 $\eta_2(y)$ 应该代表内力横向分布。按照荷载横向分布的概念，在桥跨纵向任一截面上应有如下关系成立：

$$\frac{w_i(x)}{w_j(x)} = \frac{M_i(x)}{M_j(x)} = \frac{Q_i(x)}{Q_j(x)} = \frac{P_i(x)}{P_j(x)} = C \quad (2.2)$$

式中 $w(x)$ 、 $M(x)$ 、 $Q(x)$ 和 $P(x)$ 分别为 i, j 号梁某截面的挠度、弯矩、剪力和所分配到的力或荷载。

根据梁的挠曲理论，主梁的弯矩 M_x 和剪力 Q_x 等于其挠度在桥孔方向 (x) 的二阶和三阶的微商乘以它的截面抗弯刚度 EI ，即

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -EIw'' \\ Q_x &= -EIw''' \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

将(2.3)代入(2.2)，并设 EI 为常量，则有

$$\frac{w_i(x)}{w_j(x)} = \frac{w_i''(x)}{w_j''(x)} = \frac{w_i'''(x)}{w_j'''(x)} = \frac{P_i(x)}{P_j(x)} = C \quad (2.4)$$

实际上，无论对于集中轮重或分布荷载的作用情况，都不能满足上式的条件，如图 2.2 中的 1 号和 2 号梁，1 号边梁受的荷载是从里边桥面板传递来的沿桥跨连续分布的荷载(竖向剪力)，而 2 号梁受的是一个集中荷载 P 和从左右桥面板传递来的沿桥跨连续分布的荷载。彼此的荷载分布不同，因而，彼此的挠度、弯矩、剪力的比例也是互不相同的，但都是沿桥跨 x 变化的函数：

$$\frac{w_1(x)}{w_2(x)} = f(x) \qquad \frac{w_1''(x)}{w_2''(x)} = g(x) \qquad \frac{w_1'''(x)}{w_2'''(x)} = h(x)$$

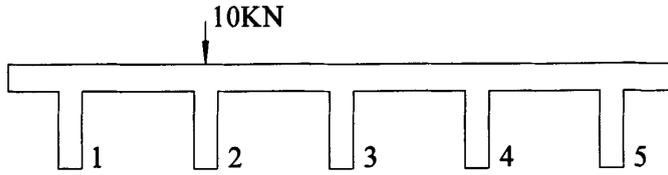


图 2.2 2号梁作用集中荷载

但是，在等截面的简支梁桥承受按半波正弦曲线沿桥跨分布的荷载时，主梁挠度分布、内力分布和荷载分布是一致的，存在确切的荷载横向分布。因此，运用荷载横向分布理论计算空间桥梁结构的挠度及内力的方法是一种近似计算方法。桥梁空间计算的简化问题，只要能够保证在近似内力影响面的峰值区域内的精度，则总的内力的精度也就有了保证。

2.1.2 荷载横向分布计算方法

对于由梁和板组成的桥梁结构，解决内力计算问题的方法有三类：

- (1) 按梁格系法，即把桥梁按主梁和横梁的布置当作纵横相交的梁格系来分析。
- (2) 按板梁系法，即把可能设置的横隔梁的刚度近似地连续分摊给桥面板，以板为主梁翼缘，按主梁的布置将桥梁作为板梁系来分析。

(3) 按各向异性板法，即把主梁和横隔梁的刚度都近似地连续分摊，从而形成各向刚度不同的异性板，以此作为桥梁的力学模型进行分析。

按方法(1)可直接计算出主梁和横隔梁的内力，方法(2)和(3)则比较适合于计算主梁的荷载横向分布，同时也能给出较好的横隔梁弯矩近似值。

目前，国内 T 形梁桥荷载横向分布的计算方法主要有刚性横梁法、刚（铰）接梁法等。

刚性横梁法

刚性横梁法是梁格系法中的一个特例，即把梁桥视作由主梁和横梁组成的梁格系，荷载通过横梁由一片主梁传到其他主梁上去，同时主梁又对横梁起弹性支承作用。根据试验测试结果和理论分析，在具有可靠横向联结的桥上，且在桥的宽跨比 B/l 小于或者接近 0.5 的情况时（一般称为窄桥），车辆荷载作用下中间横隔梁的弹性挠曲变形同主梁的相比微不足道。也就是说，中间横隔梁像一根刚度无穷大的刚性梁一样保持直线的形状。这种把横梁当作支承在各片主梁上的连续刚体计算荷载横向分布系数的方法称为

“刚性横梁法”。

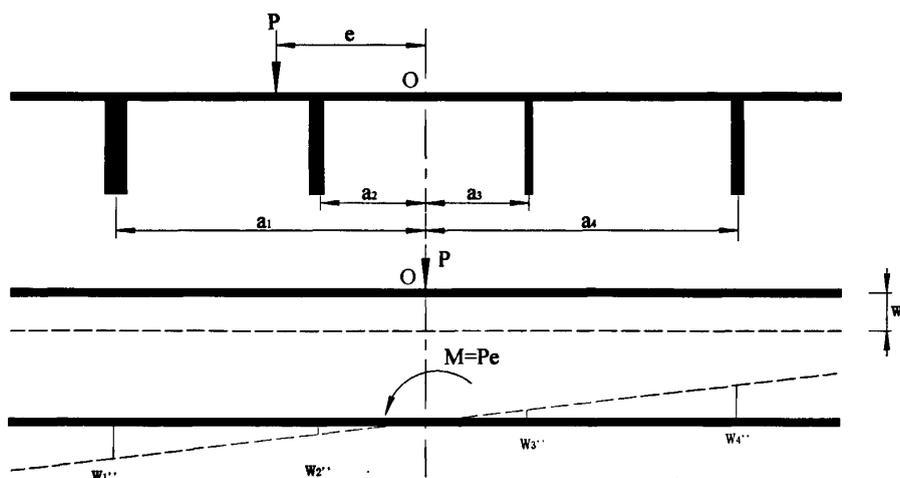


图 2.3 刚性横梁法示意图

由于刚性横梁法假定横梁是刚体，所以可以按刚体力学关于力的平移原理将图中荷载 P 移动到 O 点，用一个作用在扭转中心 O 上的竖向力 P 和一个作用于刚体上的偏心力矩 $M = Pe$ 代替。偏心荷载 P 的作用应为 P 和 M 作用的叠加。

在竖向力 P 的作用下，由于作用力通过扭转中心，而且假定横梁是刚性的，因此横梁只作平行下挠，各片梁的挠度相等，即

$$w_1' = w_2' = \dots = w_n' \quad (2.5)$$

根据材料力学简支梁荷载与挠度的关系式为

$$w_i' = \frac{R_i' l^3}{48EI} \quad \text{或} \quad R_i' = a I_i w_i' \quad (2.6)$$

式中： $a = \frac{48E}{l^3}$

由静力平衡条件并代入式 (2.6) 得

$$\sum_{i=1}^n R_i' = a w_i' \sum_{i=1}^n I_i = P \quad a w_i' = \frac{P}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (2.7)$$

将上式代入式 (2.6) 即得

$$R_i' = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \cdot P \quad (2.8)$$

在偏心力矩 $M = Pe$ 的作用下，横梁绕扭转中心 o 转动一微小的角度 θ 。因此各片主梁产生的竖向挠度 w_i 可表示为

$$w_i'' = a_i \cdot tg\theta \quad (2.9)$$

由式 (2.6)，主梁所受荷载与挠度的关系为

$$R_i'' = aI_i w_i'' \quad (2.10)$$

将式 (2.9) 代入 (2.10) 即得

$$R_i'' = aI_i a_i tg\theta = \beta \cdot a_i \cdot I_i \quad (\beta = atg\theta) \quad (2.11)$$

从力矩平衡条件可知：

$$\sum_{i=1}^n R_i'' \cdot a_i = \beta \sum_{i=1}^n a_i^2 I_i = Pe \quad (2.12)$$

从式 (2.11) 得出：
$$\beta = \frac{R_i''}{a_i I_i}$$

将 β 代入式 (2.12) 得

$$R_i'' = \frac{Pe a_i I_i}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_i} \quad (2.13)$$

偏心荷载 P 对各主梁产生的总作用力，即各片主梁所分配到的荷载为

$$R_i = R_i' + R_i'' = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} P + \frac{a_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i a_i^2} Pe \quad (2.14)$$

式 (2.14) 是在不等间距、不等刚度的结构中推导出来的，但大多数的梁桥还是做成等间距、等刚度的，从式 (2.14) 中很容易得到这种梁桥的主梁荷载分配表达式：

$$R_i = R_i' + R_i'' = \frac{P}{n} + \frac{Pe}{\sum_{i=1}^n a_i^2} a_i \quad (2.15)$$

当 $P=1$ 时， R_i 即为影响线坐标 η ，
$$\eta = \frac{1}{n} + \frac{e}{\sum_{i=1}^n a_i^2} a_i。$$

刚（铰）接梁法

对于相邻两片主梁的接合处可以承受弯矩的，或虽然桥面系没有经过构造处理，但设有多片内横隔梁的，或桥面浇成一块整体板的桥跨结构，都可用刚接梁法来进行荷载横向分布计算。刚接梁法属板梁系法，该法将桥跨结构在纵向沿主梁连接处切开，代之以超静定剪力 g 与弯矩 M （忽略桥面板内纵向剪力 t ，由于相邻主梁弯曲后不同曲率引起的横向扭矩 m_T 以及由于扭转中心不在桥面上而引起邻梁对它的阻力 n ），通过求解超静定正则方程直接求得横向分布影响线。

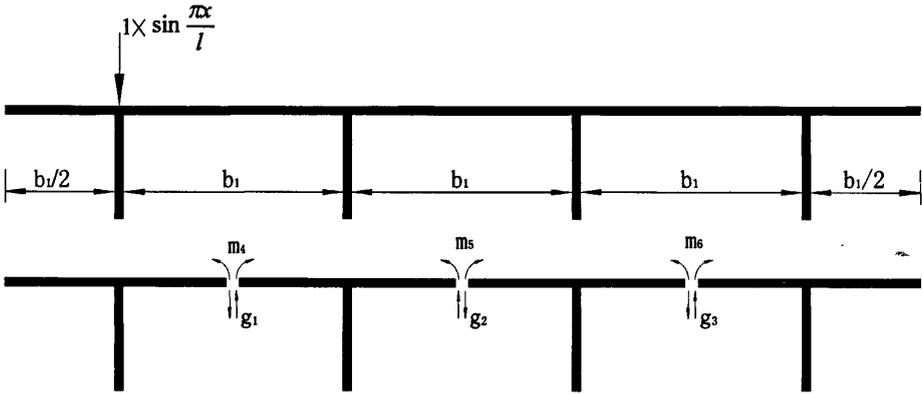


图 2.4 刚接梁法示意图

如图 2.4，由弹性变形协调条件可得到六个超静定正则方程，简写为：

$$\sum_{m=1,2,3} \delta_{im} g_m + \sum_{n=4,5,6} \delta_{in} M_n + \delta_{ip} = 0, \quad i=1,2,\dots,6 \quad (2.16)$$

分别求出 δ_{im} 、 δ_{in} 和 δ_{ip} 后，即可解超静定正则方程。

1#梁荷载横向分布影响线（荷载作用于 1#梁轴）： $\eta_{11} = 1 - g_1$ ， $\eta_{12} = g_1 - g_2$ ，

$$\eta_{13} = g_2 - g_3, \quad \eta_{14} = g_3$$

2#梁荷载横向分布影响线（荷载作用于 2#梁轴）： $\eta_{21} = -g_1$ ， $\eta_{22} = 1 + g_1 - g_2$ ，

$$\eta_{23} = g_2 - g_3, \quad \eta_{24} = g_3。$$

刚接梁法推导采用的是换算的半波正弦荷载，计算的是跨中的荷载横向分布影响线。但是，由于外荷载是按正弦曲线变化的，内力和位移沿桥跨也是正弦函数，即荷载横向分布沿桥跨的规律与跨中相同。

铰接梁法与刚接梁法原理相同，只是假设各主梁连接处仅传递剪力不传递弯矩。如图 2.4，四梁式桥梁，则其正则方程为：

$$\sum_{m=1,2,3} \delta_{im} g_m + \delta_{ip} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.17)$$

2.2 桥梁动力学基本理论

2.2.1 梁桥的振动^[10,29,30,31,32]

在研究梁桥的竖向振动特性时，可以不考虑桥宽的影响，而简化为一维结构，即梁的质量、刚度等物理性质可用单一的、沿梁轴线的位置来描述，振动方程中只包含两个独立变量——时间 t 和沿梁轴线的距离 x 。

建立梁桥振动的力学原理常用的有达朗伯（D'Alembert）原理、拉格朗日（Lagrange）方程和哈密尔顿（Hamilton）原理。前者是后两者的基础，是动力学的普遍原理。拉格朗日方程对于多自由度体系振动分析比较方便，而哈密尔顿原理则常用于连续的真实桥梁结构振动分析。

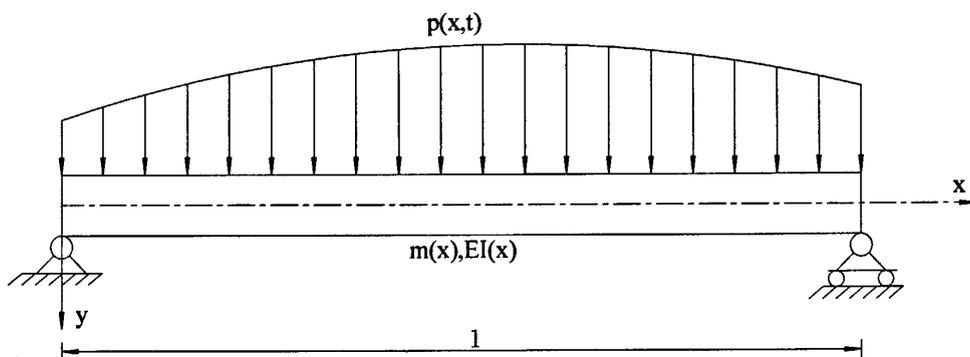


图 2.5 初等梁

图 2.5 表示一变截面的简单支承初等梁，抗弯刚度为 $EI(x)$ ，单位长度的质量为 $m(x)$ ，假定不计梁横向剪切变形的影响和阻尼作用，在 xy 对称面内的横向荷载 $P(x,t)$ 的作用下，梁产生自静平衡位置计起的动挠度 $y(x,t)$ ，以向下为正。则可以得到艾勒—伯努利（Euler—Bernoulli）梁初等弯曲振动方程为

$$m(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] = P(x,t) \quad (2.18)$$

将式 (2.18) 中，令 $P(x,t) = 0$ 且 EI 与 m 均为常量时，则有

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (2.19)$$

这是一个常系数的线性齐次偏微分方程，可用变量分离法求解，令

$$y(x, t) = \varphi(x)q(t) \quad (2.20)$$

代入式 (2.19)，则有

$$\frac{\varphi^{(4)}(x)}{\varphi(x)} + \frac{m}{EI} \frac{\ddot{q}(t)}{q(t)} = 0 \quad (2.21)$$

因为上式的第一项仅是 x 的函数，第二项仅是 t 的函数，所以只有每一项都等于一个常数时，对于任意的 x 和 t ，式 (2.21) 才能满足，即

$$\frac{\varphi^{(4)}(x)}{\varphi(x)} = C = -\frac{m}{EI} \frac{\ddot{q}(t)}{q(t)} \quad (2.22)$$

由振动学可知， C 是个正实数，即令 $C = \alpha^4$ ，式可分成

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^4 \varphi(x)}{\varphi(x)} - \alpha^4 \varphi(x) &= 0 \\ \ddot{q}(t) + \omega^2 q(t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

式中

$$\omega^2 = \frac{\alpha^4 EI}{m} \text{ 或 } \alpha^4 = \frac{\omega^2 m}{EI} \quad (2.24)$$

从中可以解得

$$\varphi(x) = A_1 \sin \alpha x + A_2 \cos \alpha x + A_3 \sinh \alpha x + A_4 \cosh \alpha x \quad (2.25)$$

上式中四个常数 $A_i (i=1,2,3,4)$ 由边界条件确定。

以简支梁为例，根据边界条件可以求得梁的振动固有频率为

$$\omega_n = \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.26)$$

相应地，振型函数为

$$\varphi_n(x) = A_1 \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.27)$$

固有振动方程 (2.19) 的一般解为各阵型的线性叠加。把式 (2.27) 中的 A_1 归入 C_n ，则得

$$y(x, t) = \sum_n C_n \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (2.28)$$

其中，第一振型 $C_1 \sin \frac{\pi x}{l}$ 和与其相应的第一阶固有频率 $\omega_1 = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$ ，具有重要的工程意义。

2.2.2 梁桥在移动荷载下的强迫振动^[10,29,33,34]

2.2.2.1 车辆振动分析的古典理论

(1) 匀速移动常量力的作用

1905年，俄国学者 Крылов，首先研究了在匀速常量力作用下简支梁的振动问题。图 2.6 表示以匀速 v 向右运动的常量力 F ，假设在时间 $t=0$ 时，常量力 F 位于左边支承处，在时间 t 时，移动到距离左边支承 vt 处。

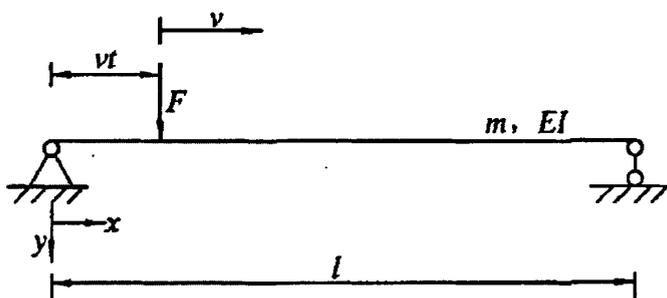


图 2.6 匀速移动常量力的作用模型

简支梁在外荷载的作用下的微分振动方程可表示为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (2.29)$$

式中 EI ——梁的抗弯刚度，假定为常数；

m ——梁单位长度的质量，假定亦为常数。

其解耦的强迫振动方程为

$$\ddot{A}_n + \omega_n^2 A_n = \frac{\int_0^l F(x, t) \cdot \phi_n(x) dx}{m \int_0^l \phi_n^2(x) dx} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (2.30)$$

$$\omega_n^2 = \frac{EI \int_0^l \left(\frac{\partial^2 \phi_n}{\partial x^2}\right)^2 dx}{m \int_0^l \phi_n^2 dx} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (2.31)$$

对于匀速移动的常量力，强迫振动方程可简化为

$$\ddot{A}_n + \omega_n^2 A_n = \frac{2F}{ml} \cdot \sin \frac{n\pi vt}{l} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (2.32)$$

注意到简支梁的 $\phi_n = \sin \frac{n\pi x}{l}$ ，则动力响应的表达式为

$$y(x, t) = \frac{2F}{ml} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\omega_n^2 - \Omega_n^2} \cdot \left(\sin \Omega_n t - \frac{\Omega_n}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (2.33)$$

式中 $\Omega_n = \frac{n\pi v}{l}$ ，可以理解为移动常量的广义扰动频率。

(2) 匀速移动简谐力的作用

1922年，S. Timoshenko 研究了一个匀速移动的简谐力通过简支梁的情况。图 2.7 表示简谐力 $F_1 \cos \Omega_p t$ 以匀速 v 通过简支梁情况。

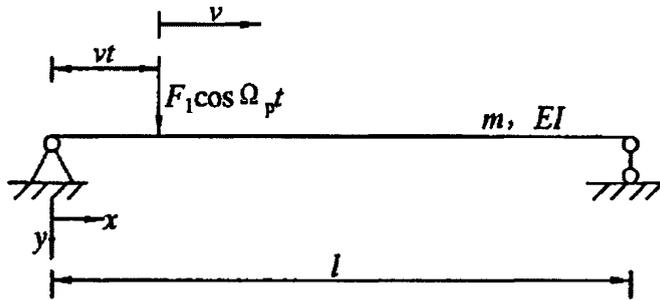


图 2.7 匀速移动简谐力的作用模型

此时，各阶振型的强迫振动方程为

$$\begin{aligned} \ddot{A}_n + \omega_n^2 A_n &= \frac{2F_1}{ml} \cos \Omega_p t \cdot \sin \Omega_n t \\ &= \frac{F_1}{ml} [\sin(\Omega_p + \Omega_n)t - \sin(\Omega_p - \Omega_n)t] \quad (n = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (2.34)$$

式中 Ω_n ——与移动速度有关的各阶广义频率；

Ω_p ——简谐力的扰动频率；

ω_n ——简支梁各阶固有频率。

动力响应为

$$y(x,t) = \frac{F_1}{ml} \sum_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{\omega_n^2 - (\Omega_p + \Omega_n)^2} \left[\sin(\Omega_p + \Omega_n)t - \frac{\Omega_p + \Omega_n}{\omega_n} \sin \omega_n t \right] - \frac{1}{\omega_n^2 - (\Omega_p - \Omega_n)^2} \left[\sin(\Omega_p - \Omega_n)t - \frac{\Omega_p - \Omega_n}{\omega_n} \sin \omega_n t \right] \right\} \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (2.35)$$

(3) 匀速滚动质量的作用

1937年, Schallenkamp 第一次提出了考虑移动荷载本身质量惯性力影响的简支梁的动力响应问题, 得出了比较精确的解答。图 2.8 所示移动质量在简支梁上匀速通过的情况。

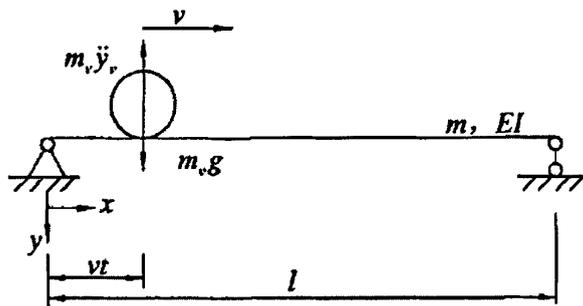


图 2.8 匀速滚动质量的作用模型

在任一时间 t , 荷载对梁的作用力等于其重力减去质量的惯性力, 即

$$F = m_v g - m_v \ddot{y} \quad (2.36)$$

假设荷载的质量在移动过程中始终与梁保持接触, 则 \ddot{y}_v 也是质量作用点处梁的加速度。将式 (2.36) 的 F 代入 (2.32), 各阶振型的强迫振动方程可表示为

$$\ddot{A}_n + \omega_n^2 A_n = \frac{2m_v}{ml} (g - \ddot{y}_v) \cdot \sin \frac{n\pi vt}{l} \quad (n=1,2,\dots,N) \quad (2.37)$$

代入 $\ddot{y}_v = \sum_{n=1}^N \ddot{A}_n \sin \frac{n\pi vt}{l}$ 得

$$\ddot{A}_n + \left(\frac{2m_v}{ml} \sin \frac{n\pi vt}{l} \right) \sum_{n=1}^N \ddot{A}_n \sin \frac{n\pi vt}{l} + \omega_n^2 A_n = \frac{2m_v g}{ml} \sin \frac{n\pi vt}{l} \quad (2.38)$$

(4) 匀速移动弹簧——质量的作用

1954年, Biggs 在 Inglis 所发展的理论基础上研究了更为接近实际的车辆模型, 即讨论了一个匀速移动的弹簧——质量对简支梁桥的作用, 并得出了便与计算的近似解。主要假设如下:

- a. 只考虑简支梁桥的第一阶振型。这样，桥梁模型就简化为一个单自由度系统。
- b. 车辆模型也处理成单自由度系统。
- c. 桥梁和车辆都假定具有粘性阻尼。

车辆模型由两个质量组成，一个由刚度为 k_v 的弹簧支撑着的跳动质量 M_{vs} 和一个假定与梁始终保持接触的不跳动质量 M_{vu} ，如图 2.9 所示。

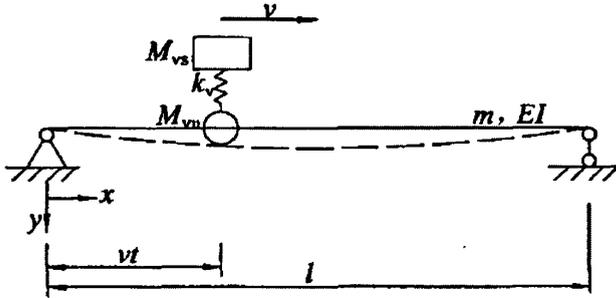


图 2.9 匀速滚动质量的作用模型

此时，车辆对梁的作用力可表示为

$$F = M_{vu}(g - \ddot{y}_v) + [k_v(z - y_v) + M_{vs}g] \quad (2.39)$$

其中 z —弹簧上质量 M_{vs} 的绝对位移，从中性位置算起；

y_v —弹簧下质量 M_{vu} 的位移，也是梁的位移。

式 (2.39) 中第一项与前面式 (2.36) 相同，第二项是弹簧上质量项。把上式代入桥梁各阶振型的强迫振动方程式，并令

$$y_v = \sum_{n=1}^N A_n \sin \frac{n\pi vt}{l}, \quad \ddot{y}_v = \sum_{n=1}^N \ddot{A}_n \sin \frac{n\pi vt}{l}$$

即得

$$\begin{aligned} & \frac{ml}{2} \ddot{A}_n + \left(M_{vs} \sin \frac{n\pi vt}{l} \right) \sum_{n=1}^N \ddot{A}_n \sin \frac{n\pi vt}{l} + \frac{ml}{2} \omega_n^2 A_n \\ & = \left[(M_{vs} + M_{vu})g + k_v \left(z - \sum_{n=1}^N A_n \sin \frac{n\pi vt}{l} \right) \right] \sin \frac{n\pi vt}{l} \quad (n=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (2.40)$$

从上式中可以看出，对应于每一个振型有一个方程，共有 N 个方程。但是，对于附加的自由度 z 还需要一个附加方程，即弹簧上质量的动力平衡方程

$$M_{vs}\ddot{z} + k_v \left(z - \sum_{n=1}^N A_n \sin \frac{n\pi vt}{l} \right) = 0 \quad (2.41)$$

式(2.40)和式(2.41)共提供了 $N+1$ 个方程,可通过数值方法求解。

以上虽然是早期用来解决车桥耦合问题的理论计算,在今天的研究中仍有利用价值。

2.2.2.2 车辆振动分析的现代理论^[10]

随着计算机和有限元法的问世,自70年代起的现代桥梁车辆振动分析理论以考虑更加接近真实的车辆模型和将桥梁理想化为多质量的有限元或有限模型为主要特点,同时着重研究公路桥面平整度对荷载动力效应的影响。

(1) 多轴车辆模型的作用

1970年, Veletsos 和 Huang 提出了一种较为精确的分析方法。他们将桥梁理想化为具有集中质量和粘性阻尼的有限自由度的梁,载重货车则理想化为带有摩擦装置的平面二自由度(双轴车辆)或三自由度(三轴车辆)模型。

A. 对于桥梁中每一个非零位移的集中质量都可列出一个方程,共有 N 个动力平衡方程。

$$m_r \ddot{y}_r + C_r \dot{y}_r = \sum_{i=1}^N Q_{ri} P_i + \sum_{j=1}^N R_{rj} y_j \quad (r=1,2,\dots,N) \quad (2.42)$$

式中: R_{rj} —刚度影响系数,即 j 节点施加单位位移,其余节点的位移均为零,而在 r 节点所产生的反力。

Q_{ri} —在 i 轴的荷载 P_i 作用点施加单位力,所有节点的位移均为零,而在 r 节点所产生的反力。

B. 对于车辆的每一个轴可以列出其运动方程。

$$-\frac{\omega}{g_n} [a] \{\ddot{z}_i\} = \{P_i - P_{st,i}\} \quad (2.43)$$

式中: z_i —从车辆各轴的静力平衡位置起算的位移;

$P_{st,i}$ 和 P_i —分别为车辆各轴在其静力平衡位置时的作用力和运动后的作用力($i=1,\dots,K$,为车轴数);

$[a]$ —车辆各轴之间的影响矩阵。

C. 位移协调方程。

$$u_i = z_i - d_{pi} - y_{pi} \quad (i = 1, 2, \dots, K) \quad (2.44)$$

式中: z_i —各轴由静力平衡位置算起的位移;

d_{pi} —桥梁外形 $d(x)$ 在 P_i 作用点处的坐标。桥梁的预拱度和不平整都可以通过这一外形函数考虑;

y_{pi} —在荷载 P_i 作用点, 梁振动的瞬时变位;

u_i —各轴弹簧的相对位移, 可通过 $P_i - u_i$ 的关系曲线确定 P_i 值。

上述 $2N + K$ 个方程组成车辆—桥梁耦合振动系统的全部运动方程, 可通过数值方法迭代求解。

(2) 有限条法和模态分析法

70 年代末, 随着有限元法的广泛应用, Mulcahy、Hutton 和 Cheung 以及 Gupta 先后用有限元(条)法并结合模态分析技术研究了公路桥梁在双轴车辆通过时的动力响应。

简支梁桥理想化为有限条的集合, 用广义模态坐标表示桥梁的响应。车辆理想化为两轴模型。用下列五个车辆坐标表示车辆所在的位置和状态。

z_1, z_2 分别为车辆在前后轴处(弹簧上)的竖向变位, 由此可算出车辆重心处的变位 z_v 和转角 θ_v 。

$$\left. \begin{aligned} z_v &= a_2 z_1 + a_1 z_2 \\ \theta_v &= (z_2 - z_1)/s \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

v_1, v_2 分别为车辆在前后轮(弹簧下)的竖向变位。

x_1 前轴水平位置, 由此可算出后轴位置 x_2 和车辆重心位置。

$$x_v = (x_1 - a_1 s) + b_v (z_1 - z_2) \quad (2.46)$$

应用拉格朗日方程, 桥梁—车辆系统的动能和位能分别为

$$\left. \begin{aligned}
 T &= \sum_m \frac{1}{2} U_m^T \cdot M \cdot U_m + \frac{1}{2} M_v x_v^2 + \frac{1}{2} (M_{a1} + M_{a2}) x_1^2 \\
 &+ \frac{1}{2} M_v z_v^2 + \frac{1}{2} I_v \theta_v^2 + \frac{1}{2} M_{a1} v_1^2 + \frac{1}{2} M_{a2} v_2^2 \\
 V &= \sum_m \frac{1}{2} U_m^T K_m U_m - M_v \cdot g [a_1 (\omega_1 + d_1) + a_2 (\omega_2 + d_2)] \\
 &- M_{a1} g (\omega_1 + d_1) - M_{a2} g (\omega_2 + d_2)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

式中: M —桥梁的质量矩阵;

K_m 、 U_m —分别是 m 阶模态的刚度矩阵和位移向量;

ω_1 、 ω_2 —车辆前后轴处梁的竖向变位;

d_1 、 d_2 —车辆前后轴处桥面的不平度。

桥梁阻尼力, 车辆轴压力和牵引力所做的虚功为

$$\delta W = - \sum_m \delta \dot{U}_m^T C_m \dot{U}_m - P_{s1} \delta u_{s1} - P_{s2} \delta u_{s2} - P_{t1} \delta u_{t1} - P_{t2} \delta u_{t2} + F_v \cdot \delta x_1 \quad (2.48)$$

式中: C_m — m 阶模态的桥梁阻尼矩阵;

$P_{sj} = k_{sj} u_{sj} + C_j u_{sj}$, 悬挂弹簧作用力;

$P_{yj} = k_y u_{yj}$, 轮胎作用力;

$u_{sj} = z_j - v_j$, 悬挂系统的变形;

$u_{yj} = v_j - (\omega_j + d_j)$, 轮胎的变形;

F_v —牵引力, 沿 x 方向作用在车辆上, 当 F_v 为负时, 引起车辆制动。

桥梁位移可表示为广义坐标 q_m 的函数

$$U_m = \Phi_m q_m \quad (2.49)$$

式中: Φ_m — m 阶模态。

在第 j 个车辆前后轴的平均桥梁位移为

$$\omega_j = \sum_m \Phi_{jm}^0 q_m \left(\frac{a}{m \pi e_j} \sin \frac{m \pi x_j}{a} \sin \frac{m \pi e_j}{a} \right) \quad (2.50)$$

式中: Φ_{jm}^0 — j 个车辆的前后轴位置处所对应的 m 阶模态的平均值;

a —简支梁的跨度;

e_j —第 j 个车辆前后轴距之半;

x_j —第 j 个车辆的中心坐标, 前后轴位置分别为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_j - e_j \\ x_2 &= x_j + e_j \end{aligned} \right\}$$

运用拉格朗日运动方程

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_m} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_m} + \frac{\partial V}{\partial q_m} = Q_m \quad (2.51)$$

通过以上各式可得车桥耦合系统的运动方程, 最后用数值积分方法求解响应的时程。

2.3 本章小结

本章主要介绍本文所需要用到的静力和动力两个方面一些理论。在静力方面: 对荷载横向分布理论作了详细阐述, 并介绍了 T 形梁桥常用的荷载横向分布计算方法, 如刚性横梁法、刚(铰)接梁法等等。在动力方面: 首先, 介绍了梁桥的振动理论。然后, 从车辆振动分析的古典理论和现代理论介绍了梁桥在移动荷载下的强迫振动。

第三章 T形梁桥整体刚度静力分析

3.1 概述

随着我国公路建设事业蓬勃发展，公路面貌日新月异，T形梁桥的发展也经历着一代代的变化。由上世纪60年代中、后期的无横隔板的T形梁桥，发展到08年推出的装配式预应力混凝土T梁桥标准图。这期间T梁之间的联结也有了新的改进。较早些的T梁桥，由于横隔板数量较少，为加强相邻块件翼缘板的接头强度，通常预先在主梁翼缘板内伸出连接钢筋，在接缝处再安放局部的 $\phi 6$ 钢筋网，并将它们浇注在桥面混凝土铺装层内，这种联结方式通常称为铰接，见图3.1。随后的T梁桥在横隔板的下方和顶部翼缘板边缘处设有焊接钢板的连结构造，借此将各根主梁连成整体，这样就能使作用于行车道板上的局部荷载分布给各根主梁共同承受，这种联结方式就是介于铰接和刚接之间的半刚半铰的联结方式，见图3.2。之后推出了主梁、横隔板在预制的时在接缝处伸出钢筋扣环，安装时在相邻构件的扣环两侧再安上腰圆形的接头扣环，在形成的圆环内插入分布筋后现浇混凝土封闭接缝的T形梁桥，见图3.3~图3.4。现在做的比较多的是在湿接的基础上再加上一层钢筋网现浇层，见图3.5。同时，对于建造年代比较老的铰接及半刚半铰T形梁桥，在大中修中经常凿除原来的桥面铺装，在T梁顶加铺一层钢筋网现浇层，而形成了半刚半铰联结加整体层的联结方式，见图3.6。

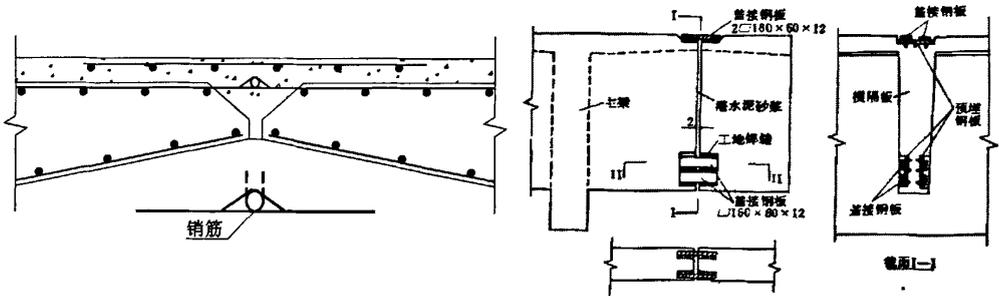


图 3.1 铰接联结构造

图 3.2 半刚半铰联结构造

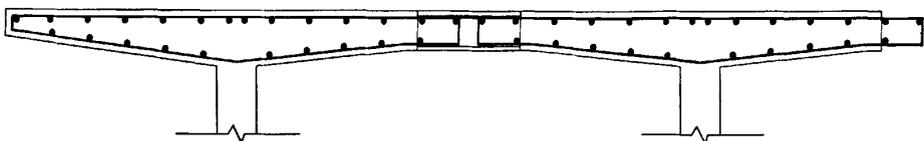


图 3.3 湿接联结主梁构造

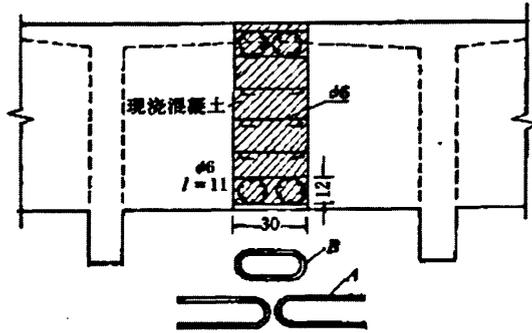


图 3.4 湿接联结横隔板构造

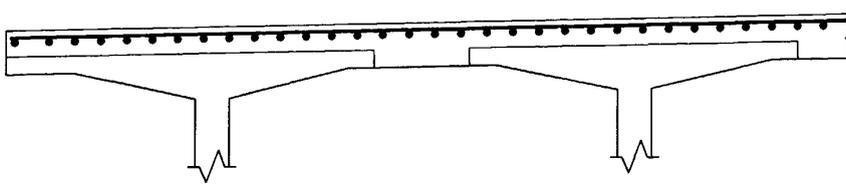


图 3.5 湿接联结加桥面现浇层构造

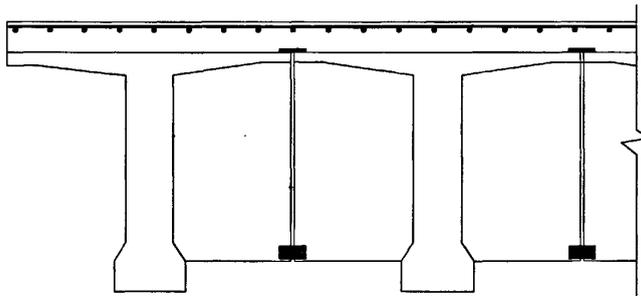


图 3.6 半刚半铰联结构造加整体层

针对以上的不同联结方式，本文将采用有限元程序 ANSYS 对结构进行空间结构的仿真分析，充分考虑结构铰接、刚接的不同情况。通过对不同联结方式结构的横向分布影响线、某种布载方式下各梁横向分配系数的计算，以比较不同联结方式对结构的使用效果的影响。

3.2 不同横向联结整体刚度的分析

3.2.1 ANSYS 软件的介绍^[36,37,38]

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 公司开发，它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer, NASTRAN, Alogor, I-DEAS, AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。软件主要包括三个部分：前处

理模块，分析计算模块和后处理模块。前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型；分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力；后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了 100 种以上的单元类型，用来模拟工程中的各种结构和材料。该软件有多种不同版本，可以运行在从个人机到大型机的多种计算机设备上。

3.2.2 有限元模型建立

本文算例桥梁为河北省廊坊市廊泊公路改扩建工程永定河大桥，单跨标准跨径 $L=25.0\text{m}$ ，单幅桥面净宽为 12 米，主梁间距 2.2 米，单幅共 6 片梁，上部结构采用先简支后连续预应力混凝土 T 梁，预制吊装施工，每孔设置 6 道横隔梁，采用 6 孔一联，全桥共 3 联。下部结构为钻孔灌注桩基础，双柱式墩，桩直径 1.5 米，柱直径 1.3 米。T 梁混凝土采用 C50，钢绞线采用高强度低松弛 270 级 $\phi^s 15.24\text{mm}$ 的钢绞线。本文将分别从不同的横向联结（铰接联结、半刚半铰联结、半刚半铰联结加整体层、湿接联结、湿接联结加整体铺装层）来分析简支一跨及连续六跨的 T 形梁桥的横向分布影响线及横向分布系数，进而比较分析其结果。为了使结果具有可比性，本文将以永定河大桥尺寸假定出五种联结方式。永定河大桥结构尺寸见图 3.7。

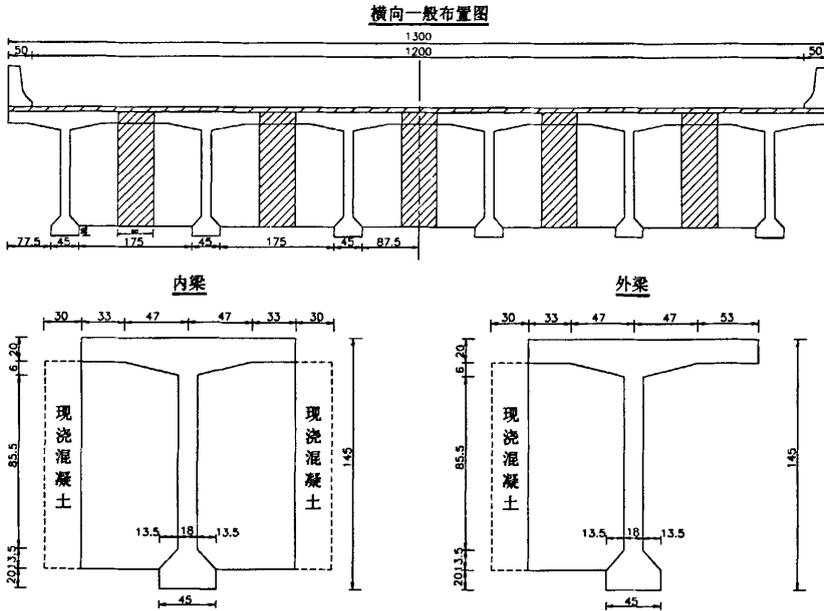


图 3.7 永定河大桥结构尺寸图

1. 单位选取^[39]

T 梁桥的空间结构在 ANSYS 中可以采用梁单元、实体单元来模拟，为精确模拟 T 梁的四种联结方式，同时分析各种联结对结构横向分布的影响，实际计算时采用实体单元（SOLID65 单元）。

SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。该单元具有八个节点，每个节点有三个自由度，即 x ， y ， z 三个方向的线位移。

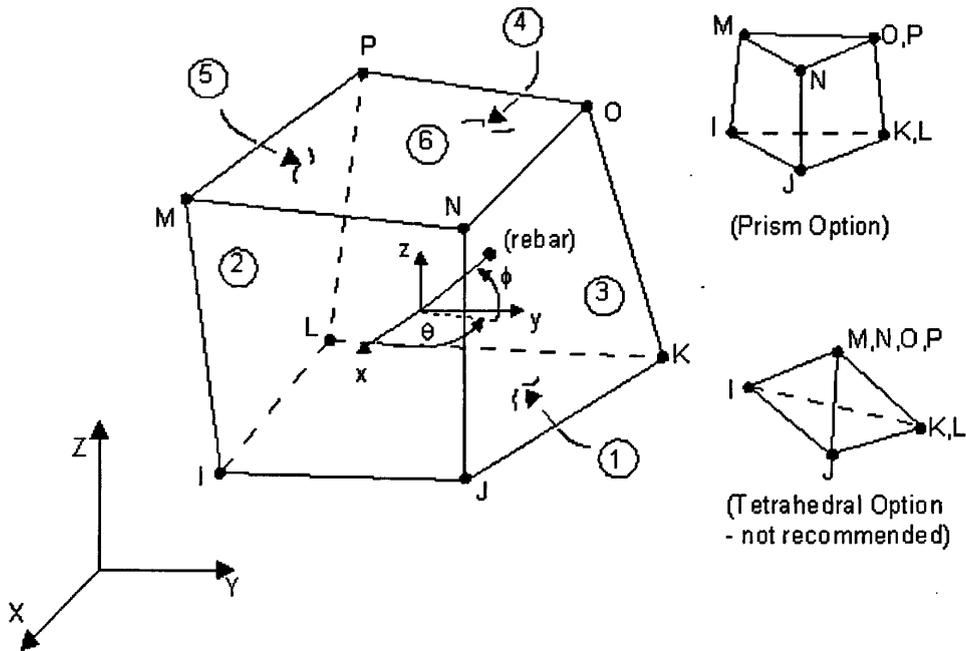


图 3.8 SOLID65 的几何模型图

2. 有限元模型

为了各种联结方式具有可比性，五种模型均采用相同的尺寸，通过改变其横向联结方式来比较其不同的整体受力性能。通过主梁翼缘板内伸出连接钢筋将各片 T 梁联结起来的铰接联结方式，由于其联结刚性比较薄弱，其实际受力接近与数根并列而相互横向铰接的狭长梁，故在建立模型时，将相邻梁在翼缘处通过节点耦合其平动自由度来实现，该联结方式的简支 T 梁模型共有 12480 个单元，23268 个节点，连续 T 梁模型共有 74880 个单元，139608 个节点，见图 3.9。对于在横隔板的下方和顶部翼板边缘处设有焊接钢板将各根主梁联结起来的介于铰接和刚接之间的半刚半铰的联结方式，在有限元模型中通过在相邻 T 梁翼缘顶和横隔板下方的节点耦合其平动自由度，该联结方式的简支 T 梁

模型共有 12480 个单元, 23268 个节点, 连续 T 梁模型共有 74880 个单元, 139608 个节点, 见图 3.10。在半刚半铰联结的 T 梁顶加铺一层钢筋网现浇层, 整体层和 T 梁间通过节点耦合来实现, 该联结方式的简支 T 梁模型共有 15840 个单元, 30222 个节点, 连续 T 梁模型共有 95040 个单元, 181332 个节点, 见图 3.11。主梁通过在接缝处伸出钢筋扣环浇注而成的湿接缝联结起来的湿接联结方式, 在有限元模型中通过共用节点来实现, 该联结方式的简支 T 梁模型共有 12480 个单元, 22298 个节点, 连续 T 梁模型共有 74880 个单元, 133788 个节点, 见图 3.12。在湿接的基础上再加上一层钢筋网现浇层的联结方式, 在模型中通过在湿接模型的基础上再建立一层混凝土整体层, 整体层和 T 梁间通过节点耦合来实现, 该联结方式的简支 T 梁模型共有 15840 个单元, 29252 个节点, 连续 T 梁模型共有 95040 个单元, 175512 个节点, 见图 3.13。

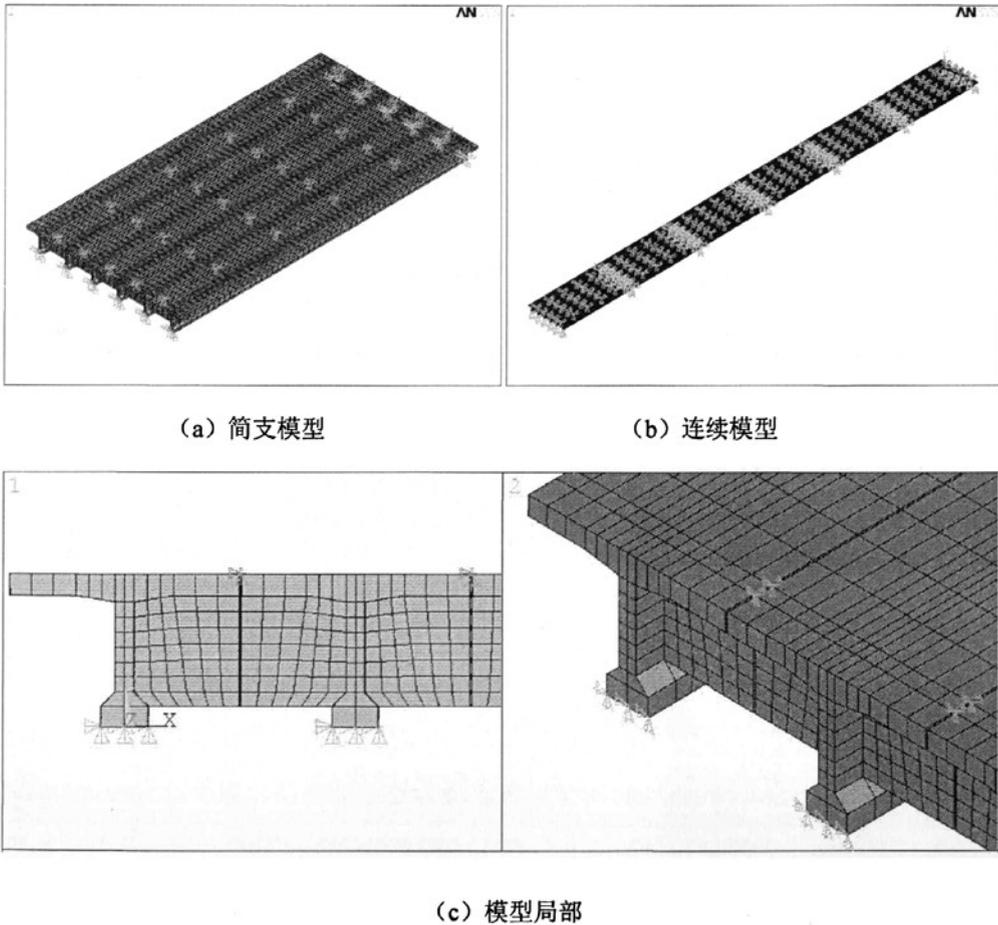
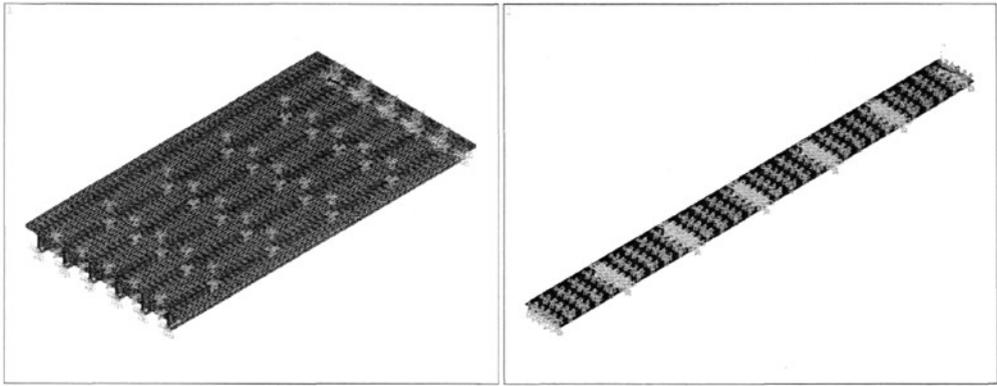
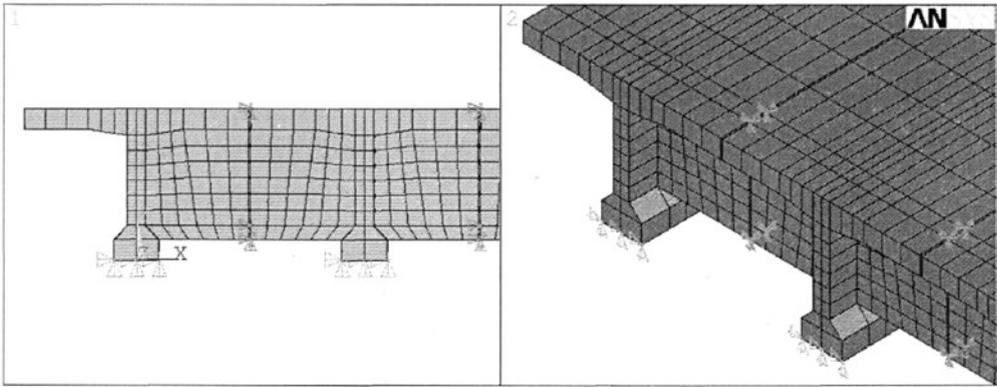


图 3.9 T 梁铰接联结有限元模型



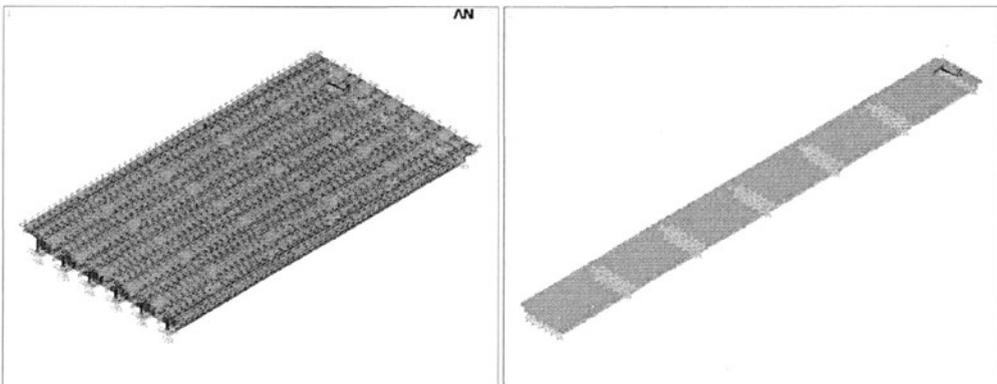
(a) 简支模型

(b) 连续模型



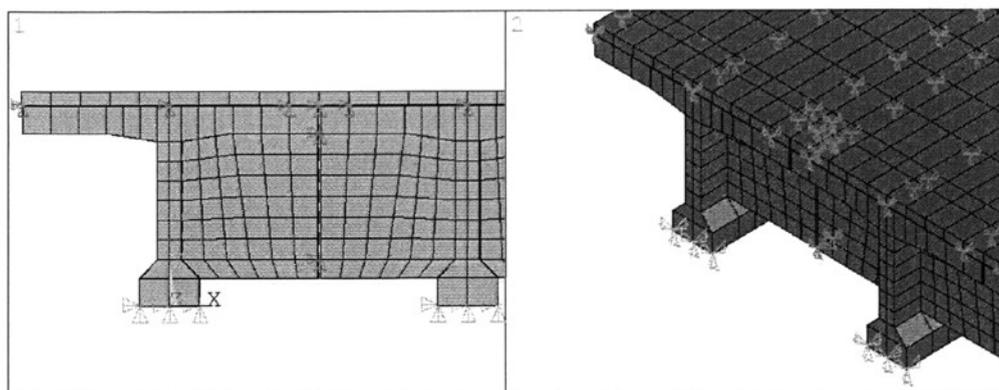
(c) 模型局部

图 3.10 T 梁半刚半铰联结有限元模型



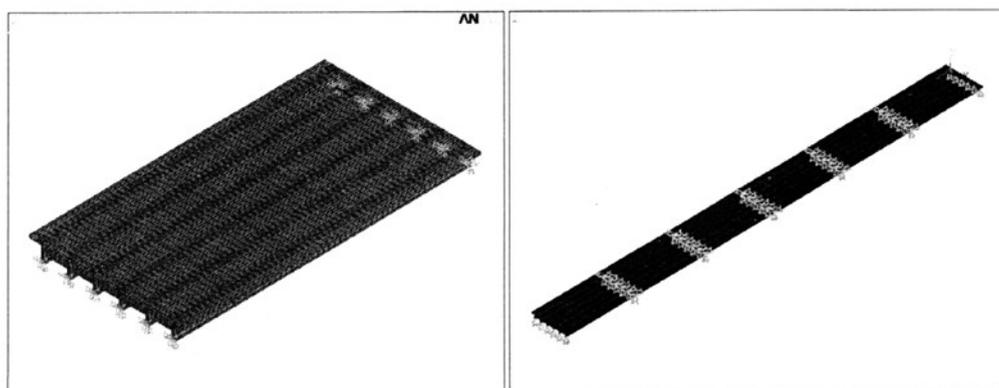
(a) 简支模型

(b) 连续模型



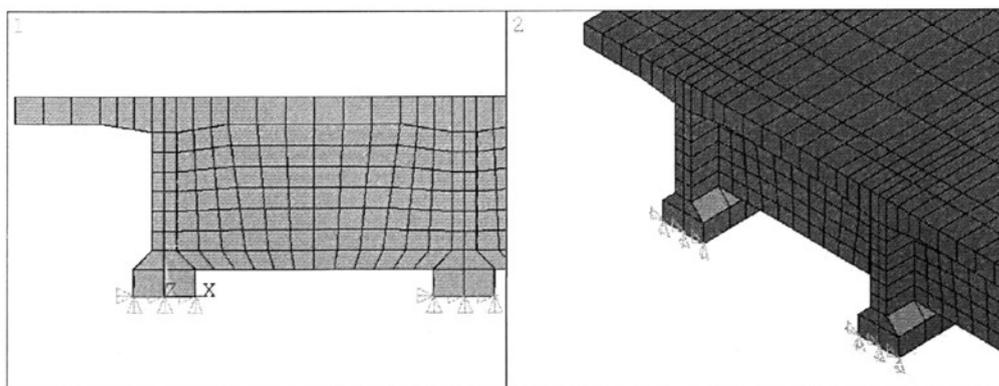
(c) 模型局部

图 3.11 T 梁半刚半铰联结加整体层有限元模型



(a) 简支模型

(b) 连续模型



(c) 模型局部

图 3.12 T 梁湿接联结有限元模型

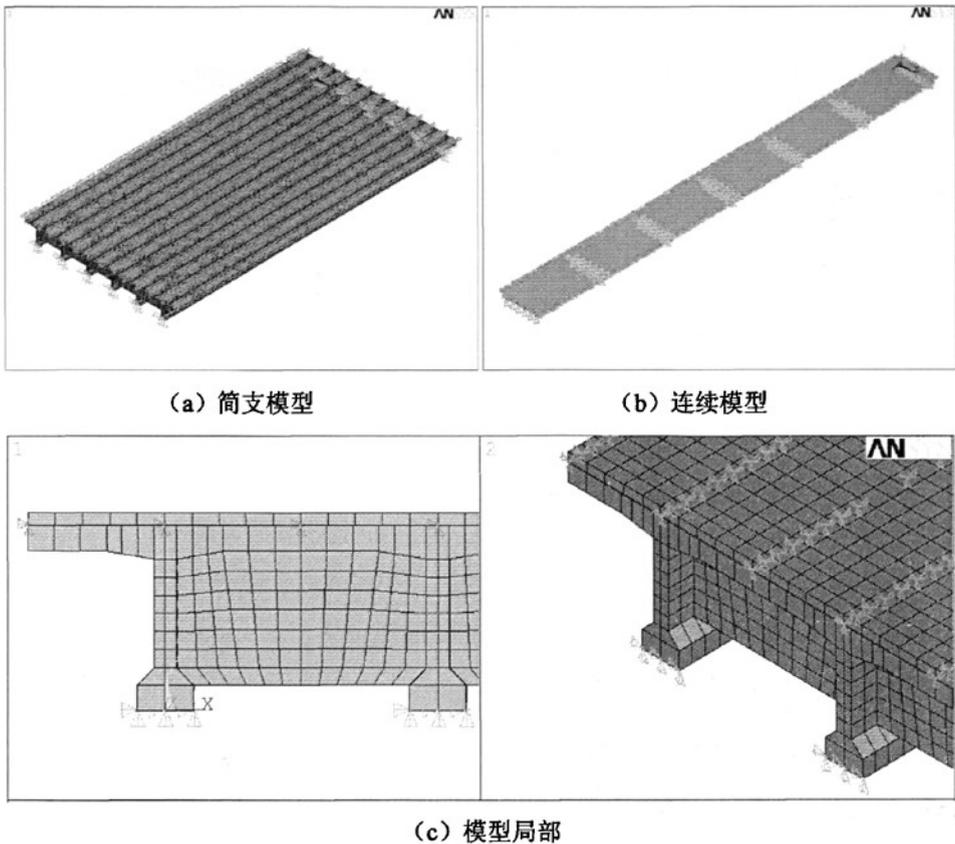


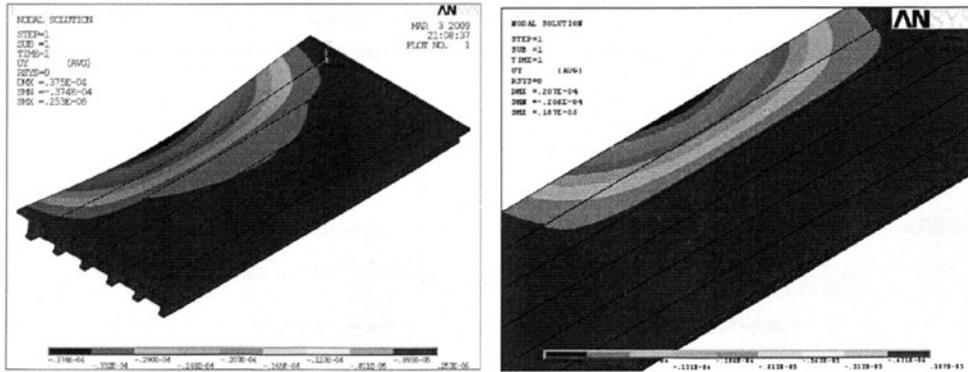
图 3.13 T 梁湿接联结加整体层有限元模型

3.2.3 不同横向联结的计算结果

不同的联结方式结构的受力有所不同，所表现的整体刚度也不同，主要体现在结构承受的活载横向分配有所不同，也就是我们常说的横向分布系数不同。为了求得各片梁的荷载横向分布影响线和荷载横向分布系数，我们将在某片梁上作用一个单位力，然后将用光滑的曲线将各片梁的竖坐标连接起来，就得到了该片梁的横向影响线，进而求得横向分布系数。

1. 铰接联结

将单位力分别作用在铰接方式联结的简支梁和连续梁有限元模型的 1#梁~6#梁，然后计算出横向分布影响线坐标。图 3.14 给出了单位力作用 1#梁时各梁的挠度云图。表 3.1，表 3.2 分别给出了简支梁和连续梁的影响线坐标值。



(a) 简支模型

(b) 连续模型

图 3.14 单位力作用于 1#梁各片梁挠度云图

表 3.1 铰接联结简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.532247	0.238520	0.086116	0.060800	0.044932	0.037385	1.000000
2	0.238545	0.372683	0.215376	0.072849	0.055620	0.044928	1.000000
3	0.085969	0.214995	0.355679	0.209943	0.072720	0.060694	1.000000
4	0.060694	0.072720	0.209943	0.355679	0.214995	0.085969	1.000000
5	0.044928	0.055620	0.072849	0.215376	0.372683	0.238545	1.000000
6	0.037385	0.044932	0.060800	0.086116	0.238520	0.532247	1.000000

表 3.2 铰接联结连续 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.767421	0.218883	0.008281	0.012824	-0.001219	-0.006190	1.000000
2	0.219173	0.547734	0.225971	-0.002725	0.011067	-0.001220	1.000000
3	0.008273	0.225474	0.531245	0.224913	-0.002719	0.012813	1.000000
4	0.012813	-0.002719	0.224913	0.531245	0.225474	0.008273	1.000000
5	-0.001220	0.011067	-0.002725	0.225971	0.547734	0.219173	1.000000
6	-0.006190	-0.001219	0.012824	0.008281	0.218883	0.767421	1.000000

铰接联结简支 T 梁及连续 T 梁主梁横向分布影响线见图 3.15。

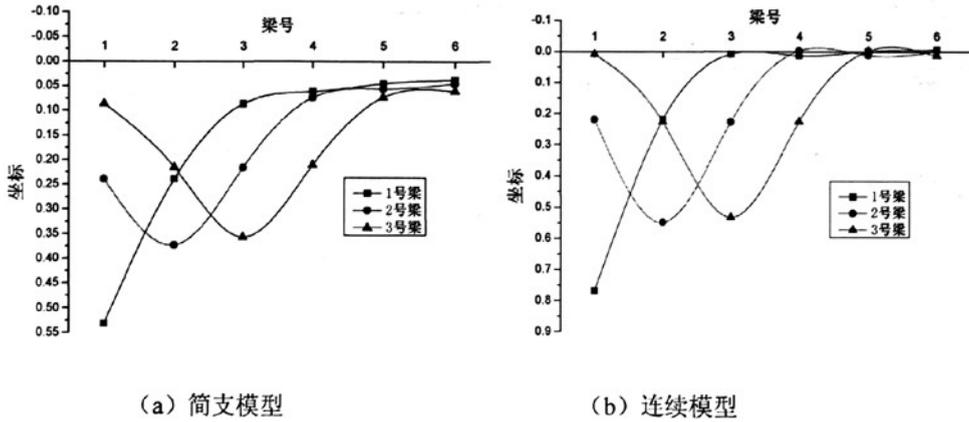


图 3.15 铰接联结 T 梁桥主梁横向分布影响线

2. 半刚半铰联结

将单位力分别作用在半刚半铰方式联结的简支梁和连续梁有限元模型的 1#梁~6#梁，然后计算出横向分布影响线坐标。图 3.16 给出了单位力作用 1#梁时各梁的挠度云图。表 3.3，表 3.4 分别给出了简支梁和连续梁的影响线坐标值。

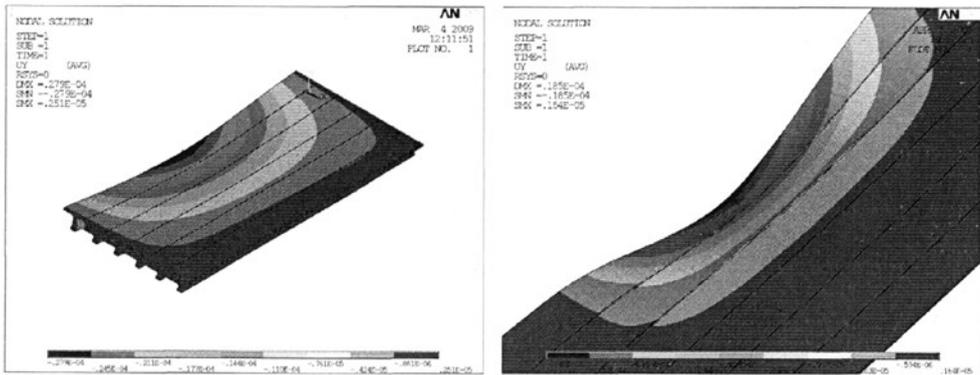


图 3.16 单位力作用于 1#梁各片梁挠度云图

表 3.3 半刚半铰联结简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.483457	0.259811	0.122494	0.063371	0.041372	0.029495	1.000000
2	0.260613	0.296836	0.212581	0.119792	0.069836	0.040341	1.000000
3	0.122816	0.212480	0.273016	0.205720	0.122998	0.062970	1.000000

表 3.3 半刚半铰联结简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表 (续)

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
4	0.062970	0.122998	0.205720	0.273016	0.212480	0.122816	1.000000
5	0.040341	0.069836	0.119792	0.212581	0.296836	0.260613	1.000000
6	0.029495	0.041372	0.063371	0.122494	0.259811	0.483457	1.000000

表 3.4 半刚半铰联结连续 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.704122	0.273938	0.055348	-0.003385	-0.012929	-0.017094	1.000000
2	0.274789	0.412410	0.244636	0.073183	0.008821	-0.013839	1.000000
3	0.055438	0.244231	0.389191	0.236871	0.080037	-0.005767	1.000000
4	-0.017094	-0.012929	-0.003385	0.055348	0.273938	0.704122	1.000000
5	-0.013839	0.008821	0.073183	0.244636	0.412410	0.274789	1.000000
6	-0.005767	0.080037	0.236871	0.389191	0.244231	0.055438	1.000000

半刚半铰联结简支 T 梁及连续 T 梁主梁横向分布影响线见图 3.17。

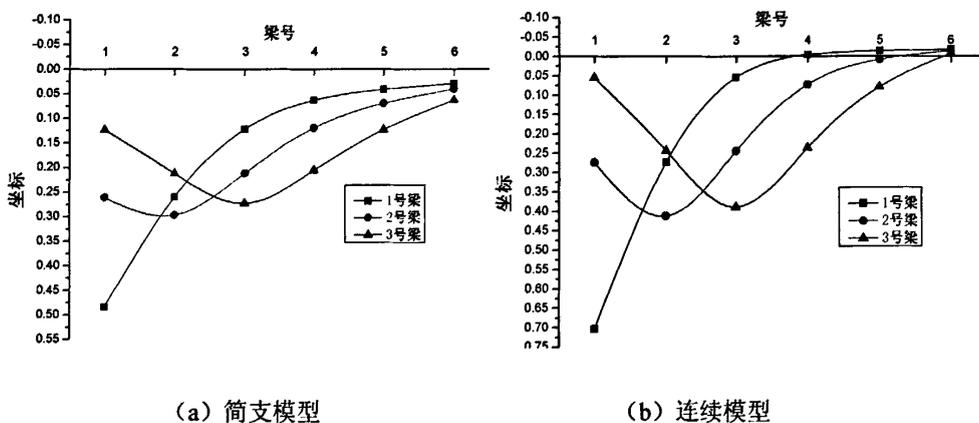


图 3.17 半刚半铰联结 T 梁桥主梁横向分布影响线

3. 半刚半铰联结加整体层

将单位力分别作用在半刚半铰方式联结的简支梁和连续梁有限元模型的 1#梁~6#梁, 然后计算出横向分布影响线坐标。图 3.18 给出了单位力作用 1#梁时各梁的挠度云

图。表 3.5, 表 3.6 分别给出了简支梁和连续梁的影响线坐标值。

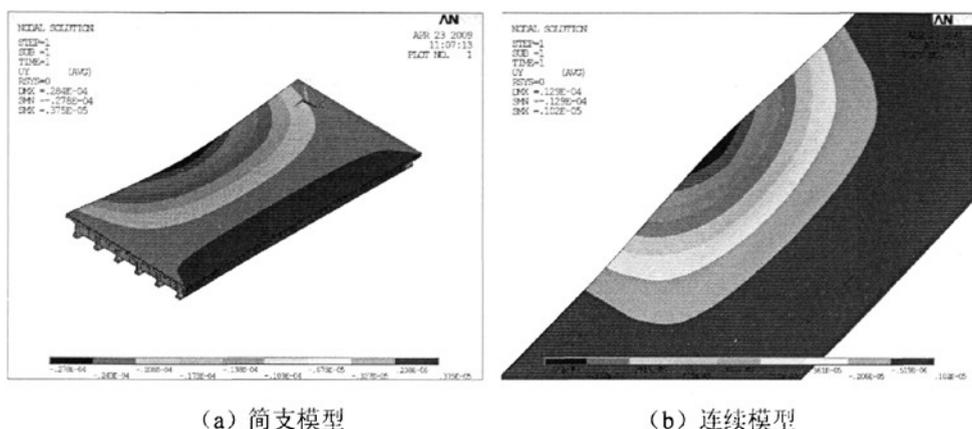


图 3.18 单位力作用于 1#梁各片梁挠度云图

表 3.5 半刚半铰联结加整体层简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.513264	0.313745	0.164335	0.065620	-0.001224	-0.055741	1.000000
2	0.315941	0.297640	0.212623	0.122600	0.053815	-0.002619	1.000000
3	0.165713	0.212933	0.241042	0.190090	0.124064	0.066158	1.000000
4	0.066158	0.124064	0.190090	0.241042	0.212933	0.165713	1.000000
5	-0.002619	0.053815	0.122600	0.212623	0.297640	0.315941	1.000000
6	-0.055741	-0.001224	0.065620	0.164335	0.313745	0.513264	1.000000

表 3.6 半刚半铰联结加整体层连续 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.637074	0.298932	0.096077	0.011688	-0.015876	-0.027895	1.000000
2	0.300547	0.355598	0.231807	0.101646	0.028033	-0.017631	1.000000
3	0.096491	0.231596	0.328780	0.227717	0.104700	0.010715	1.000000
4	0.010715	0.104700	0.227717	0.328780	0.231596	0.096491	1.000000
5	-0.017631	0.028033	0.101646	0.231807	0.355598	0.300547	1.000000
6	-0.027895	-0.015876	0.011688	0.096077	0.298932	0.637074	1.000000

半刚半铰联结加整体层简支 T 梁及连续 T 梁主梁横向分布影响线见图 3.19。

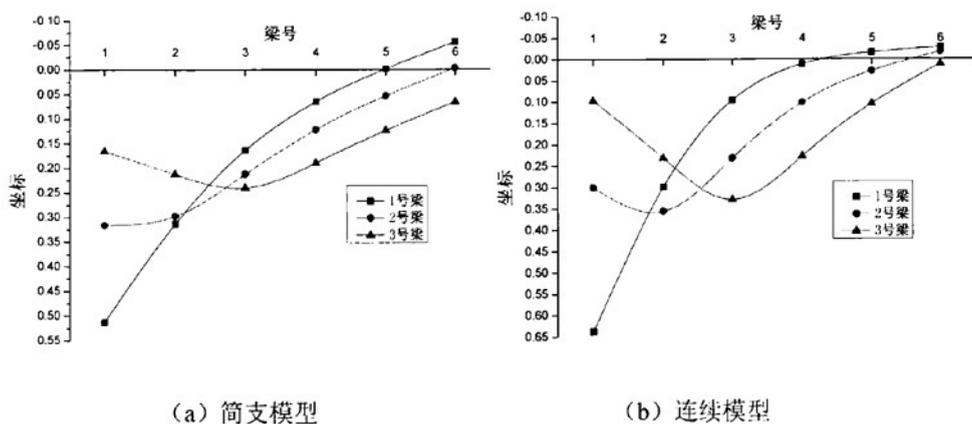


图 3.19 半刚半铰联结加整体层 T 梁桥主梁横向分布影响线

4. 湿接联结

将单位力分别作用在湿接方式联结的简支梁和连续梁有限元模型的 1#梁~6#梁, 然后计算出横向分布影响线坐标。图 3.20 给出了单位力作用 1#梁时各梁的挠度云图。表 3.7, 表 3.8 分别给出了简支梁和连续梁的影响线坐标值。

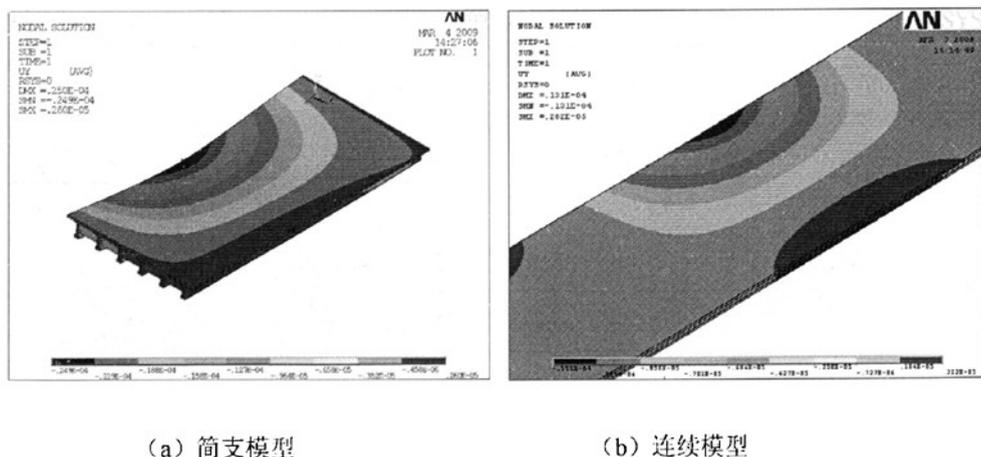


图 3.20 单位力作用于 1#梁各片梁挠度云图

表 3.7 湿接联结简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.388716	0.276401	0.186517	0.112317	0.048039	-0.011989	1.000000
2	0.279657	0.248936	0.190701	0.139396	0.092711	0.048599	1.000000
3	0.189720	0.191705	0.196658	0.167534	0.140139	0.114244	1.000000

表 3.7 湿接联结简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表 (续)

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
4	0.114244	0.140139	0.167534	0.196658	0.191705	0.189720	1.000000
5	0.048599	0.092711	0.139396	0.190701	0.248936	0.279657	1.000000
6	-0.011989	0.048039	0.112317	0.186517	0.276401	0.388716	1.000000

表 3.8 湿接联结连续 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.551692	0.328547	0.176891	0.065264	-0.022228	-0.100165	1.000000
2	0.333460	0.320240	0.204449	0.119070	0.045342	-0.022561	1.000000
3	0.180595	0.205655	0.250774	0.176574	0.119772	0.066631	1.000000
4	0.066631	0.119772	0.176574	0.250774	0.205655	0.180595	1.000000
5	-0.022561	0.045342	0.119070	0.204449	0.320240	0.333460	1.000000
6	-0.100165	-0.022228	0.065264	0.176891	0.328547	0.551692	1.000000

湿接联结简支 T 梁及连续 T 梁主梁横向分布影响线见图 3.21。

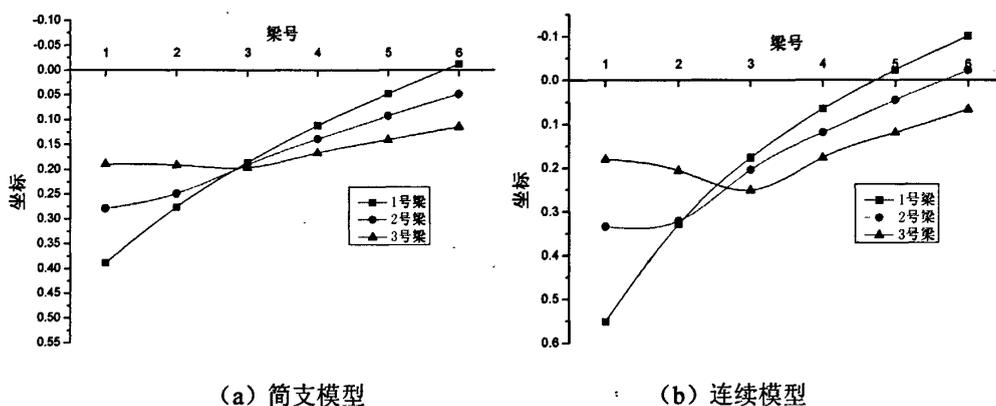
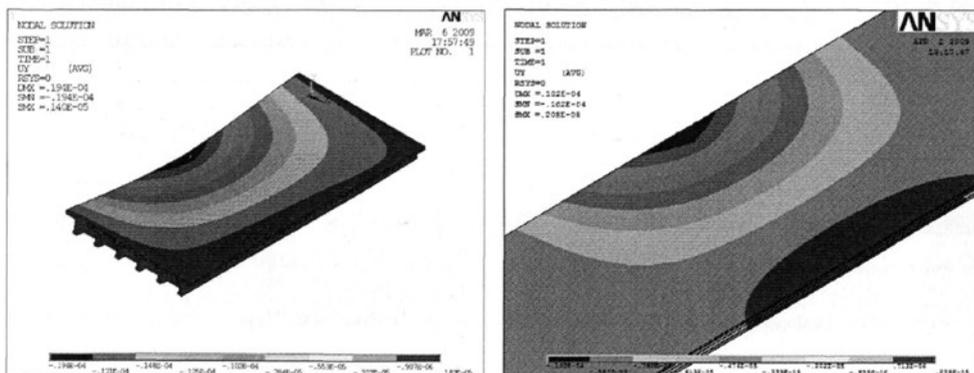


图 3.21 湿接联结 T 梁桥主梁横向分布影响线

5. 湿接联结加整体层

将单位力分别作用在湿接联结加整体层方式联结的简支梁和连续梁有限元模型的 1#梁~6#梁, 然后计算出横向分布影响线坐标。图 3.22 给出了单位力作用 1#梁时各梁的挠度云图。表 3.9, 表 3.10 分别给出了简支梁和连续梁的影响线坐标值。



(a) 简支模型 (b) 连续模型

图 3.22 单位力作用于 1#梁各片梁挠度云图

表 3.9 湿接联结加整体层简支 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.373545	0.268502	0.184437	0.115477	0.05632	0.00172	1.000000
2	0.271486	0.243708	0.189197	0.141074	0.097597	0.056939	1.000000
3	0.187419	0.190136	0.195454	0.167875	0.141775	0.117341	1.000000
4	0.117341	0.141775	0.167875	0.195454	0.190136	0.187419	1.000000
5	0.056939	0.097597	0.141074	0.189197	0.243708	0.271486	1.000000
6	0.00172	0.05632	0.115477	0.184437	0.268502	0.373545	1.000000

表 3.10 湿接联结加整体层连续 T 梁主梁横向分布影响线坐标表

梁号	P=1 的位置 (主梁梁轴)						效验
	1	2	3	4	5	6	
1	0.544488	0.323212	0.175070	0.066539	-0.017671	-0.091638	1.000000
2	0.327681	0.320188	0.203117	0.119378	0.047550	-0.017915	1.000000
3	0.178460	0.204227	0.253165	0.176290	0.120030	0.067828	1.000000
4	-0.091638	-0.017671	0.066539	0.175070	0.323212	0.544488	1.000000
5	-0.017915	0.047550	0.119378	0.203117	0.320188	0.327681	1.000000
6	0.067828	0.120030	0.176290	0.253165	0.204227	0.178460	1.000000

湿接联结加整体层简支 T 梁及连续 T 梁主梁横向分布影响线见图 3.23。

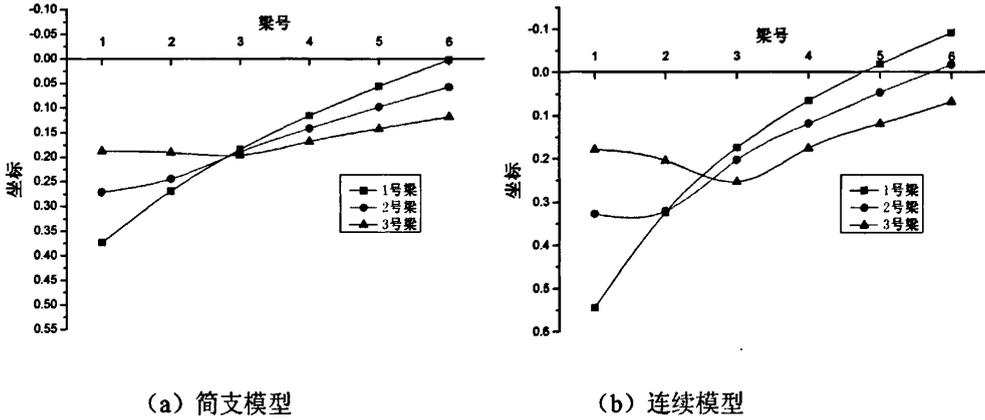


图 3.23 湿接联结加整体层 T 梁桥主梁横向分布影响线

3.2.4 各种联结方式的比较与评价

为了比较和评价各种联结方式，将 1#梁、2#梁、3#梁在四种联结方式下的横向分布影响线分别绘制于图 3.24~图 3.26，进行比较。

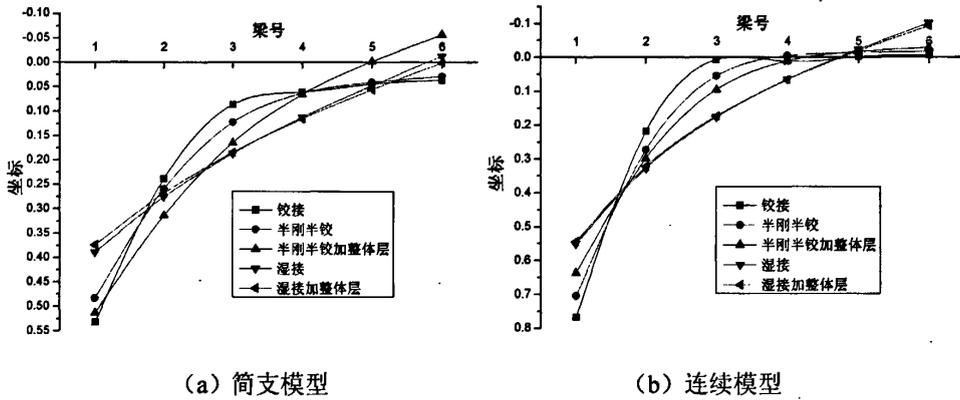


图 3.24 1#梁在各联结方式下的横向分布影响线比较

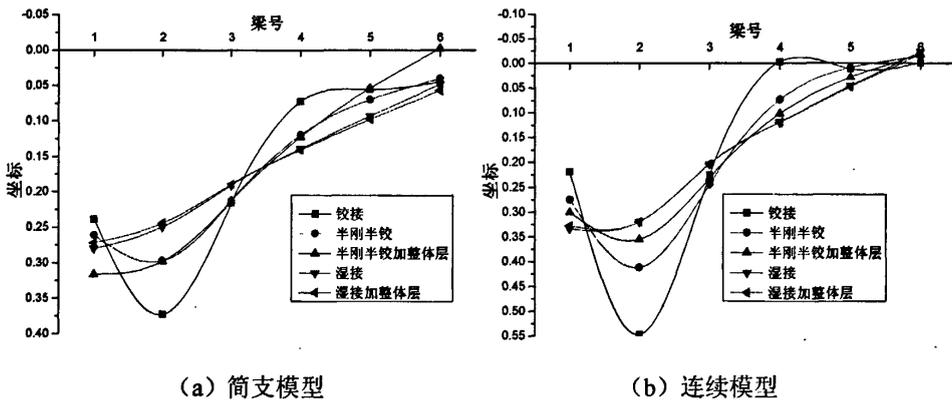


图 3.25 2#梁在各联结方式下的横向分布影响线比较

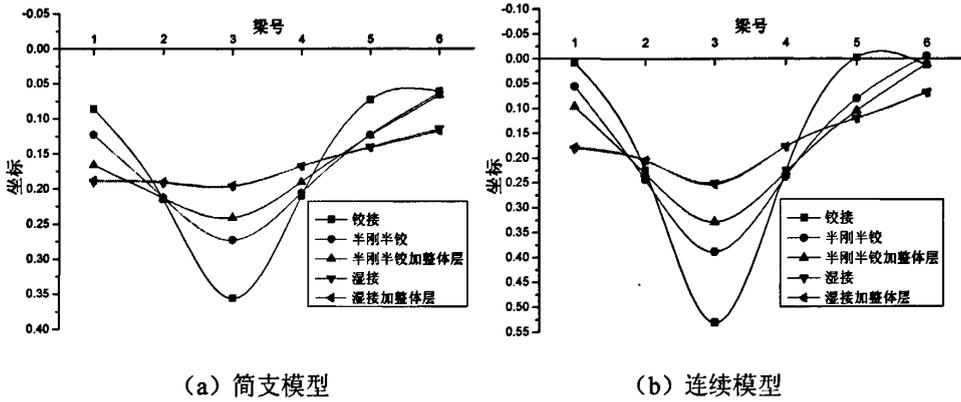


图 3.26 3#梁在各联结方式下的横向分布影响线比较

从图 3.24~图 3.26 可以看出，铰接联结、半刚半铰联结、半刚半铰联结加整体层、湿接联结及湿接联结加整体层的五种联结方式的横向分布影响线存在较大的差别，从而说明各种联结方式对应的 T 形梁桥整体刚度是不一样的。为了进一步直观地说明各种联结的 T 形梁桥整体刚度，本文将在横向分布影响线基础上分别算出一排车和两排车在中载和偏载情况下的各片梁的分配系数，进而比较不同联结方式的 T 形梁桥整体刚度。

表 3.11 一排车中载下简支 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.0735	0.0929	0.1150	0.1495	0.1500
2 号梁	0.1441	0.1662	0.1676	0.1651	0.1651
3 号梁	0.2828	0.2394	0.2156	0.1821	0.1817
4 号梁	0.2828	0.2394	0.2156	0.1821	0.1817
5 号梁	0.1441	0.1662	0.1676	0.1651	0.1651
6 号梁	0.0735	0.0929	0.1150	0.1495	0.1500

表 3.12 一排车中载下连续 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.0106	0.0260	0.0539	0.1211	0.1208
2 号梁	0.1117	0.1589	0.1668	0.1618	0.1613
3 号梁	0.3781	0.3130	0.2783	0.2137	0.2148
4 号梁	0.3781	0.3130	0.2783	0.2137	0.2148
5 号梁	0.1117	0.1589	0.1668	0.1618	0.1613
6 号梁	0.0106	0.0260	0.0539	0.1211	0.1208

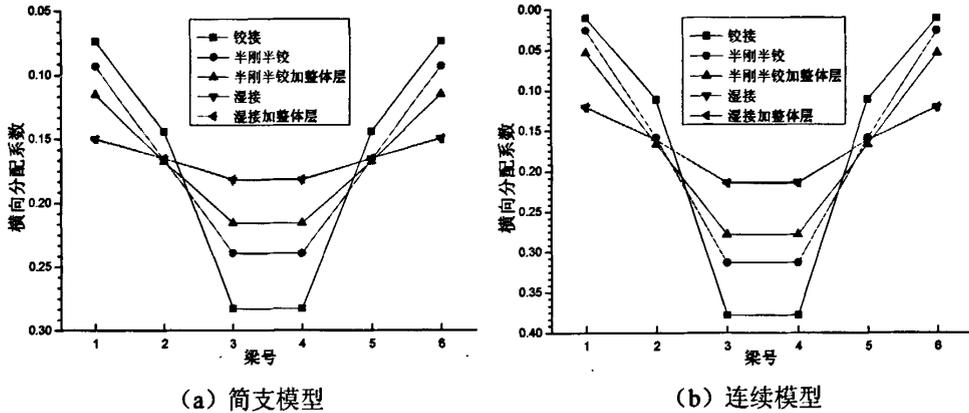


图 3.27 一排车中载下各种联结方式各片梁横向分配系数曲线

表 3.13 一排车偏载下简支 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.4121	0.3920	0.4317	0.3428	0.3306
2 号梁	0.2934	0.2755	0.3085	0.2671	0.2602
3 号梁	0.1388	0.1595	0.1850	0.1905	0.1885
4 号梁	0.0656	0.0875	0.0899	0.1248	0.1273
5 号梁	0.0493	0.0524	0.0205	0.0667	0.0736
6 号梁	0.0405	0.0344	-0.0334	0.0126	0.0241

表 3.14 一排车偏载下连续 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.5430	0.5282	0.4988	0.4604	0.4540
2 号梁	0.3536	0.3311	0.3231	0.3281	0.3247
3 号梁	0.0972	0.1327	0.1518	0.1909	0.1890
4 号梁	0.0065	0.0293	0.0492	0.0884	0.0892
5 号梁	0.0038	-0.0046	0.0011	0.0052	0.0089
6 号梁	-0.0042	-0.0154	-0.0230	-0.0682	-0.0614

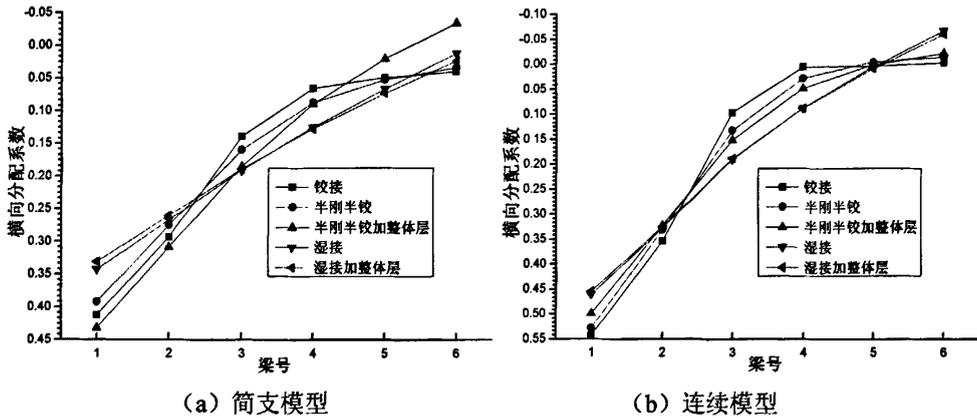


图 3.28 一排车偏载下各种联结方式各片梁横向分配系数曲

表 3.15 两排车中载下简支 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.0944	0.1107	0.1277	0.1534	0.1536
2 号梁	0.1656	0.1715	0.1701	0.1668	0.1668
3 号梁	0.2402	0.2174	0.2012	0.1771	0.1769
4 号梁	0.2402	0.2174	0.2012	0.1771	0.1769
5 号梁	0.1656	0.1715	0.1701	0.1668	0.1668
6 号梁	0.0944	0.1107	0.1277	0.1534	0.1536

表 3.16 两排车中载下连续 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.0407	0.0581	0.0808	0.1310	0.1307
2 号梁	0.1631	0.1748	0.1745	0.1682	0.1682
3 号梁	0.2963	0.2667	0.2445	0.1981	0.1986
4 号梁	0.2963	0.2667	0.2445	0.1981	0.1986
5 号梁	0.1631	0.1748	0.1745	0.1682	0.1682
6 号梁	0.0407	0.0581	0.0808	0.1310	0.1307

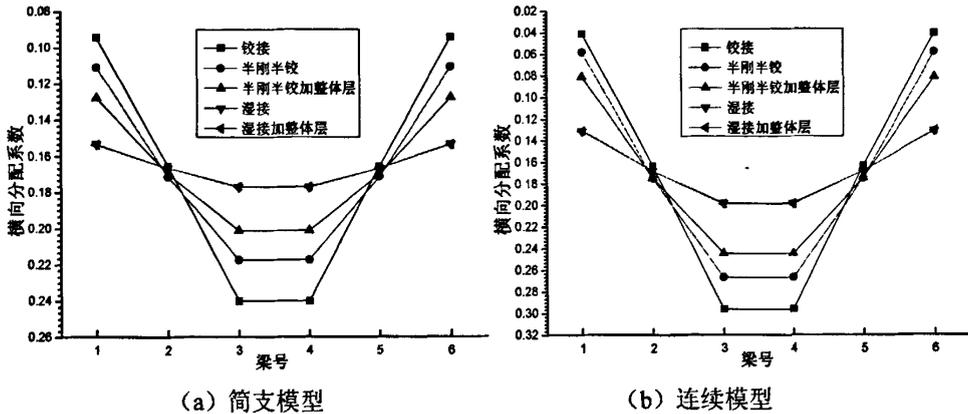


图 3.29 两排车中载下各种联结方式各片梁横向分配系数曲线

表 3.17 两排车偏载下简支 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.2702	0.2742	0.3145	0.2737	0.2660
2 号梁	0.2696	0.2512	0.2680	0.2346	0.2300
3 号梁	0.2182	0.2035	0.2060	0.1912	0.1897
4 号梁	0.1258	0.1382	0.1331	0.1438	0.1453
5 号梁	0.0667	0.0840	0.0665	0.0991	0.1037
6 号梁	0.0498	0.0490	0.0237	0.0572	0.0650

表 3.18 两排车偏载下连续 T 梁桥各种联结方式各片梁横向分配系数

联结方式 梁位	铰接联结	半刚半铰联结	半刚半铰联结 加整体层	湿接联结	湿接联结 加整体层
1 号梁	0.3070	0.3207	0.3226	0.3347	0.3303
2 号梁	0.3244	0.3030	0.2883	0.2785	0.2765
3 号梁	0.2517	0.2309	0.2202	0.2100	0.2095
4 号梁	0.0995	0.1186	0.1260	0.1283	0.1288
5 号梁	0.0156	0.0346	0.0479	0.0561	0.0583
6 号梁	0.0020	-0.0075	-0.0099	-0.0081	-0.0037

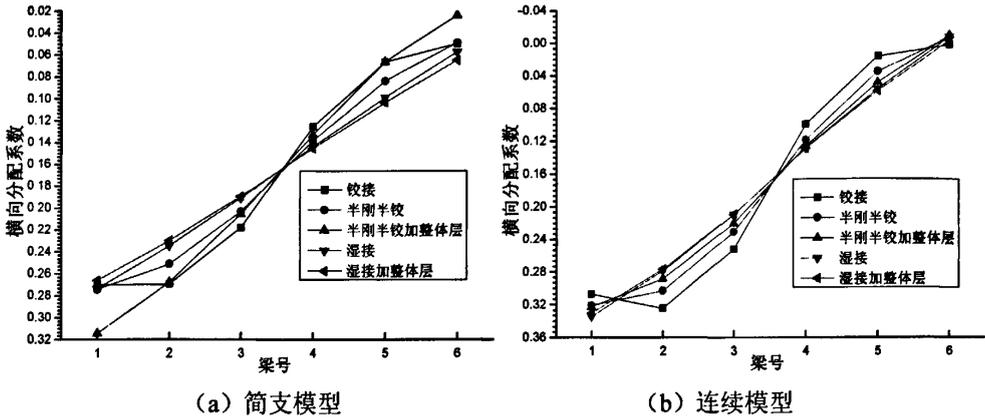


图 3.30 两排车偏载下各种联结方式各片梁横向分配系数曲线

由表 3.11~表 3.18 可以看出，除了半刚半铰加整体层这种联结方式在偏载作用下外，由铰接联结，到半刚半铰联结，到半刚半铰联结加整体层，再到湿接联结，最后到湿接联结加整体层的五种联结方式中，各片梁间的横向分配系数越来越均匀，体现在图 3.27~图 3.30 上，曲线变得越来越平缓，说明 T 形梁桥的整体刚度越来越好。铰接联结在一排车及两排车的中、偏载的作用下，结构表现出“单梁受力”的受力缺陷，承受车轮压力的梁片受力较大，没有直接承受车轮压力的梁片则分配的荷载较小。半刚半铰的联结方式则对“单梁受力”有了很大的改善，整体刚度相对于铰接联结方式要大得多，但这种通过在横隔板的下方和翼板顶部边缘处设置焊接钢板的联结构造，在实际工程中，经常出现横隔板下方的钢板漏焊以及钢板锈蚀，混凝土剥落等病害，而使整体刚度下降。在半刚半铰联结的 T 梁顶加一层整体层能提高 T 形梁桥的整体刚度，并且对于连续结构以及简支结构的中载作用而言，效果非常明显，而对于简支结构的偏载作用下，效果就不是很明显了。湿接联结方式相对于前三种方式，分配系数更均匀，横向分配系数曲线更平缓，整体刚度有了更进一步地提高。湿接联结加整体层相对于湿接联结，整体刚度有一定提高，但效果不是特别明显，并且连续结构要比简支结构更不明显，同时，布载方式的不同，表现的效果也不同，偏载作用下要比中载作用下效果明显。

综上所述，以湿接及湿接加整体层横向联结的 T 形梁桥的整体刚度很好，能有效的改善 T 形梁桥的“单梁受力”的受力缺陷，故在现行 T 形梁桥的设计图纸中基本都采用这两种形式。但是，早期建设的 T 形梁桥，受到当时财力、物力及技术的限制，而基本都采用了铰接或者是半刚半铰的横向联结方式。这些桥梁由于横向联结薄弱而形成单梁受力，主梁裂缝过大导致钢筋的锈蚀，成为了病、危桥梁，阻碍了交通畅通，成为公路交通的“瓶颈”。对于这些桥梁全部拆除重建既不经济也不科学，实际工程中经常凿除

原来的桥面铺装，在 T 梁顶加铺一层钢筋网现浇层进行加固，这种加固方式对于连续结构而言可以起到不错的效果，桥梁的整体刚度有较大的提高，对于简支结构，荷载作用在桥梁中心范围内也可以收到不错的效果，荷载作用在边梁范围内效果就不是很明显。故本文更建议将这些桥梁的翼缘板和横隔板重做湿接头，变铰接为刚接。参考一些加固文献^[40]，具体做法通常为：将翼缘板纵缝两侧各一定距离（一般为 30cm）内的混凝土凿除，保留原有钢筋，将新钢筋与原有钢筋间隔绑扎或者焊接后，吊模板浇注微膨胀混凝土，如图 3.31 所示；横隔板做法基本相似，如图 3.32 所示。

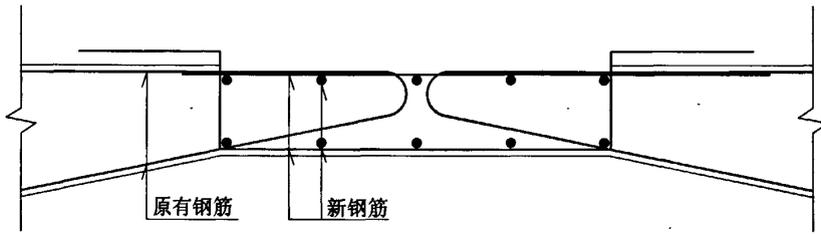


图 3.31 铰接变刚接加固方法示意 (1)

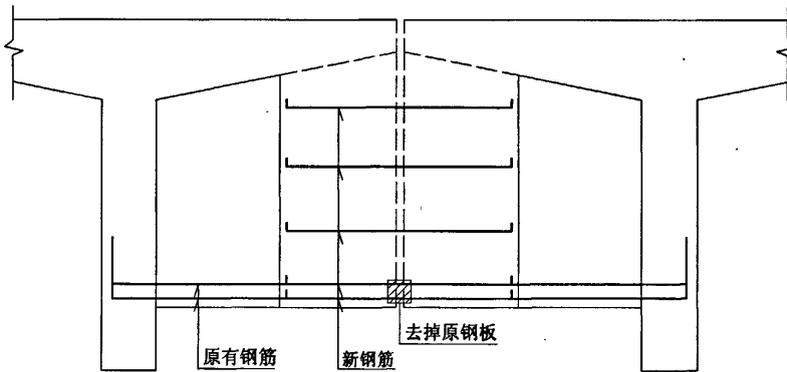


图 3.32 铰接变刚接加固方法示意 (2)

3.3 本章小结

本章利用大型有限元程序 ANSYS 建立了 25m 简支 T 形梁桥及六跨连续 T 形梁桥的有限元模型，分析了桥梁在不同的横向联结方式下整体刚度。分析表明：

(1) 铰接联结的 T 形梁桥的整体刚度比较差，结构表现出“单梁受力”的受力缺陷，承受车轮压力的梁片受力较大，没有直接承受车轮压力的梁片则分配的荷载较小，湿接联结加整体层的联结方式整体刚度最好，其他三种方式介于其中。

(2) 湿接联结加整体层相对于湿接联结，整体刚度有一定提高，但效果不是特别

明显，并且连续结构要比简支结构更不明显，同时，布载方式的不同，表现的效果也不同，偏载作用下要比中载作用下效果明显。

(3) 在半刚半铰联结的 T 梁顶加一层整体层能提高 T 形梁桥的整体刚度，并且对于连续结构以及简支结构的中载作用而言，效果非常明显，而对于简支结构的偏载作用下，效果就不是很明显了。

(4) 现行 T 形梁桥的设计图纸基本都采用湿接及湿接加整体层的横向联结。对于早期建设采用了铰接或者是半刚半铰的横向联结的病、危 T 形梁桥，实际工程中经常凿除原来的桥面铺装，在 T 梁顶加铺一层钢筋网现浇层进行加固，这种加固方式对于连续结构而言可以起到不错的效果，桥梁的整体刚度有较大的提高，对于简支结构，荷载作用在桥梁中心范围内也可以收到不错的效果，荷载作用在边梁范围内效果就不明显。故本文更建议将这些桥梁的翼缘板和横隔板重做湿接头，变铰接为刚接。

第四章 T形梁桥整体刚度动力分析

在移动车辆、人群、风或地震等动力作用下，桥梁结构会产生振动，这种振动不仅会增大按静力计算所得到的结构内力，也可能会影响行车舒适和安全，甚至有可能致使结构破坏，因此桥梁结构的动力性能也是影响桥梁使用与安全的重要因素之一。

桥梁结构振动，是伴随着外作用输入（车辆动荷载、风力、地震波）和摩擦损耗（材料内摩擦和连接及支承的摩擦），结构体系的变形能量和运动能量相互转换的周期过程。体系受外作用输入的多少，或者说感应程度，与它的固有频率和输入作用的频率之比，即共振程度，密切相关。因而对桥梁的固有频率的计算分析有着重大的理论意义，也是其它动力响应分析的基础。故本文将从固有频率和随机车流下动力响应两个方面来分别评价不同横向联系的 T 形梁桥的整体刚度。

4.1 自振特性分析

桥梁结构自振特性参数包括固有频率、振型和阻尼比，它对评价桥梁现有运营状况和承载能力有着重要意义。它只与结构本身的固有性质有关，如结构的组成形式、刚度、质量分布、支撑情况和材料性质等，而与荷载等其他条件无关。因此，准确地求得结构的固有频率及振型非常重要。基于 ANSYS 软件，采用子空间迭代法对不同横向联结的实体模型进行了模态分析，得出各种联结方式的前 10 阶固有频率列于下列表格，并且给出一些典型的振型图。

表 4.1 铰接联结简支 T 梁桥前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	4.189	竖弯	6	7.814	局部扭转
2	5.287	扭转	7	7.964	局部扭转
3	6.234	局部扭转	8	12.309	横向平动
4	6.884	局部扭转	9	14.831	竖弯
5	7.476	局部扭转	10	16.253	局部扭转

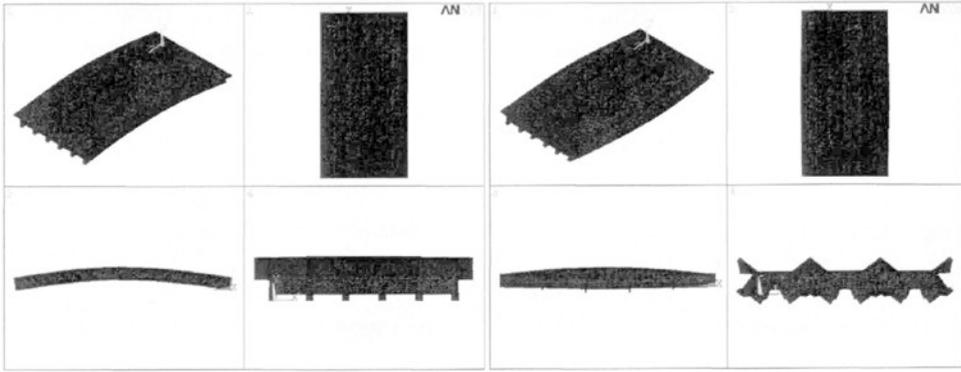


图 4.1 铰接联结简支 T 梁第 1 阶振型

图 4.2 铰接联结简支 T 梁第 7 阶振型

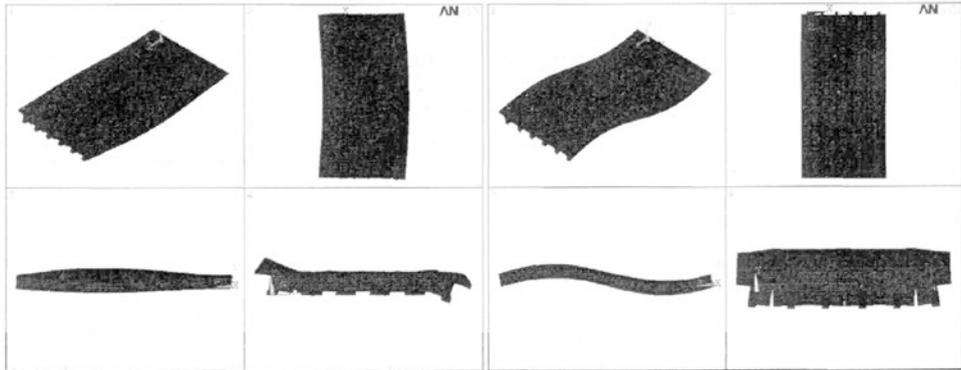


图 4.3 铰接联结简支 T 梁第 8 阶振型

图 4.4 铰接联结简支 T 梁第 9 阶振型

表 4.2 铰接联结连续 T 梁桥前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	4.5325	边跨、次边跨扭转	6	6.4646	边跨局部扭转
2	4.5326	边跨、次边跨扭转	7	6.5645	边跨局部扭转
3	5.3995	边跨、次边跨竖弯	8	6.5649	边跨局部扭转
4	5.4010	边跨、次边跨竖弯	9	7.0142	整体竖弯
5	6.4627	边跨局部扭转	10	7.0464	整体扭转

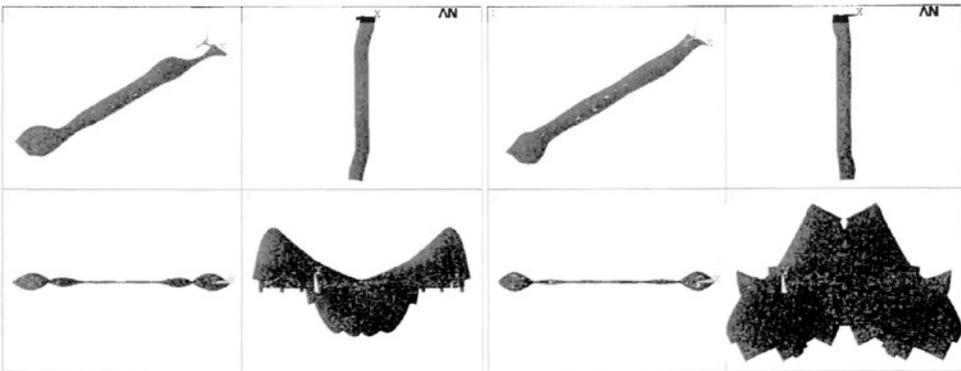


图 4.5 铰接联结连续 T 梁第 1 阶振型

图 4.6 铰接联结连续 T 梁第 5 阶振型

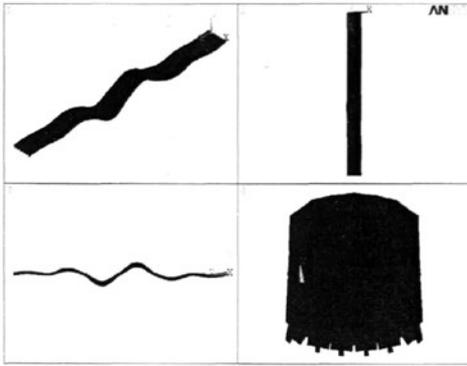


图 4.7 铰接联结连续 T 梁第 9 阶振型

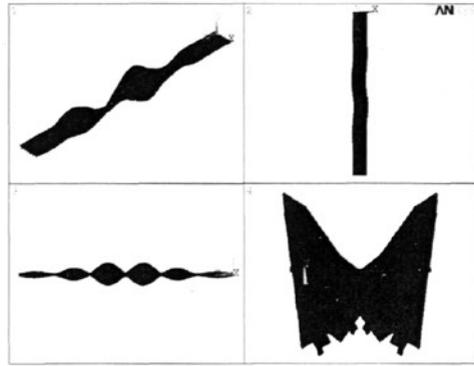


图 4.8 铰接联结连续 T 梁第 10 阶振型

表 4.3 半刚半铰联结简支 T 梁前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	4.191	竖弯	6	17.120	扭转
2	5.385	扭转	7	21.006	弯扭
3	11.966	扭转	8	24.344	竖弯
4	12.302	横向平弯	9	24.999	横向平弯
5	14.845	竖弯	10	25.369	局部扭转

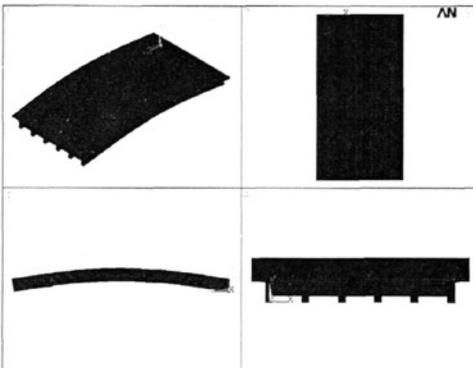


图 4.9 半刚半铰联结简支 T 梁第 1 阶振型

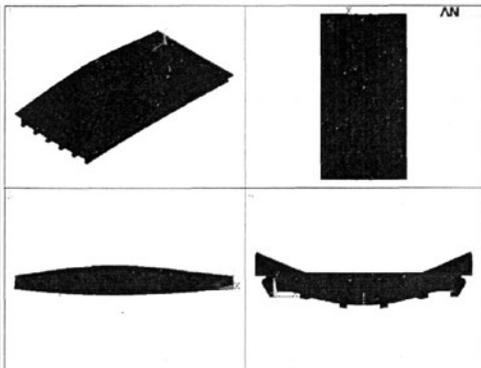


图 4.10 半刚半铰联结简支 T 梁第 3 阶振型

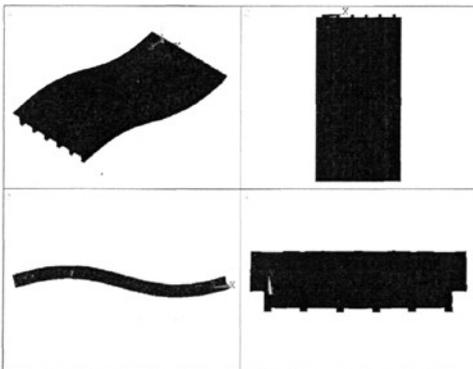


图 4.11 半刚半铰联结简支 T 梁第 5 阶振型

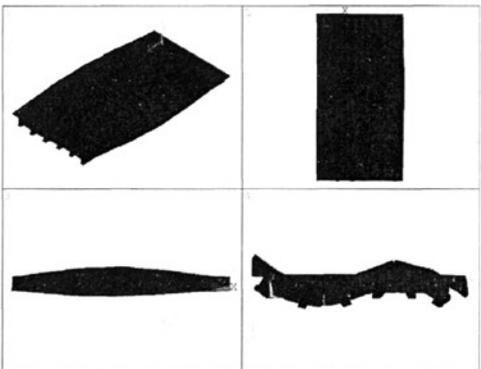


图 4.12 半刚半铰联结简支 T 梁 10 阶振型

表 4.4 半刚半铰联结连续 T 梁桥前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	4.5539	边跨、次边跨扭转	6	6.5311	边跨局部扭转
2	4.5541	边跨、次边跨扭转	7	6.6441	边跨局部扭转
3	5.4001	边跨、次边跨竖弯	8	6.6445	边跨局部扭转
4	5.4016	边跨、次边跨竖弯	9	7.0153	整体竖弯
5	6.5288	边跨局部扭转	10	7.0619	整体扭转

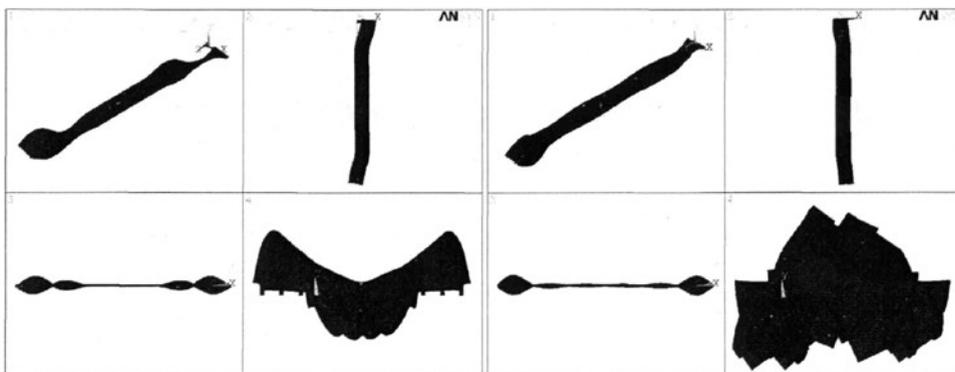


图 4.13 半刚半铰联结连续 T 梁第 1 阶振型 图 4.14 半刚半铰联结连续 T 梁第 5 阶振型

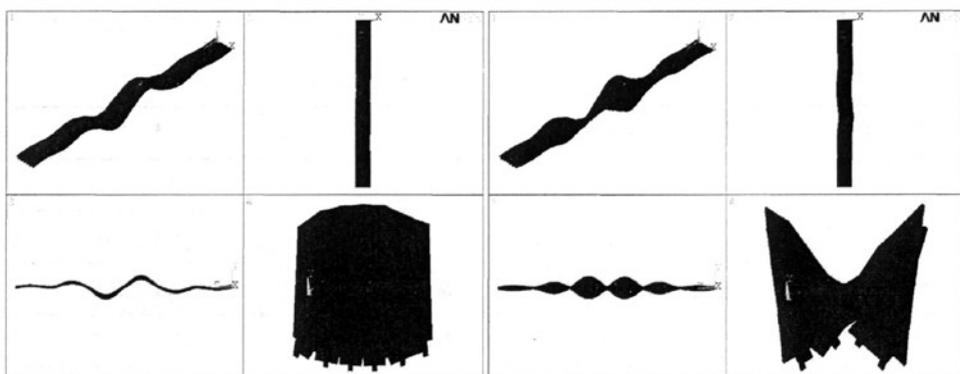


图 4.15 半刚半铰联结连续 T 梁第 9 阶振型 图 4.16 半刚半铰联结连续 T 梁第 10 阶振型

表 4.5 半刚半铰加整体层联结简支 T 梁前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	3.148	扭转	6	15.354	扭转
2	4.110	竖弯	7	17.813	扭转
3	7.197	扭转	8	19.535	扭转
4	8.697	扭转	9	22.504	横向平弯
5	14.264	竖弯	10	23.180	竖弯

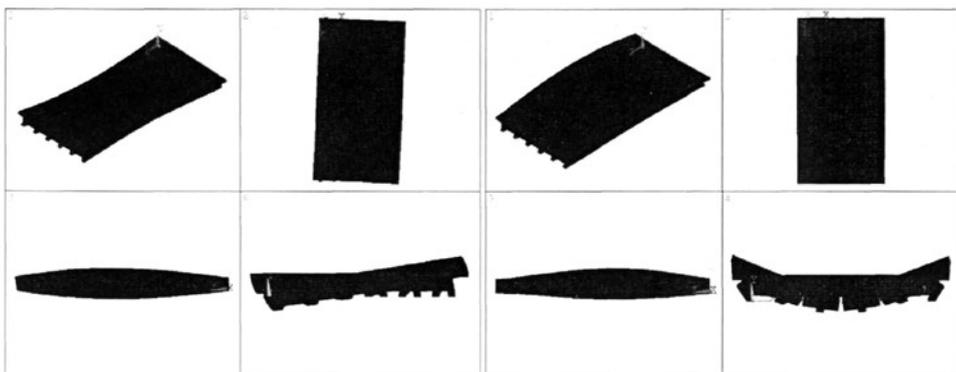


图 4.17 半刚半铰联结简支 T 梁第 1 阶振型

图 4.18 半刚半铰联结简支 T 梁第 4 阶振型

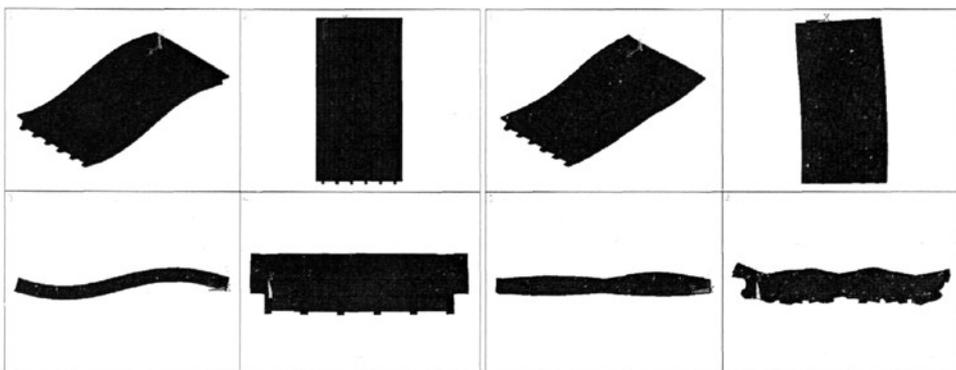


图 4.19 半刚半铰联结简支 T 梁第 5 阶振型

图 4.20 半刚半铰联结简支 T 梁第 9 阶振型

表 4.6 半刚半铰加整体层联结连续 T 梁桥前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	5.287	边跨、次边跨扭转	6	7.299	整体扭转
2	5.288	边跨、次边跨扭转	7	7.439	整体竖弯
3	5.377	边跨、次边跨竖弯	8	7.556	整体扭转
4	5.381	边跨、次边跨竖弯	9	7.691	整体扭转
5	7.083	整体竖弯	10	7.968	整体竖弯

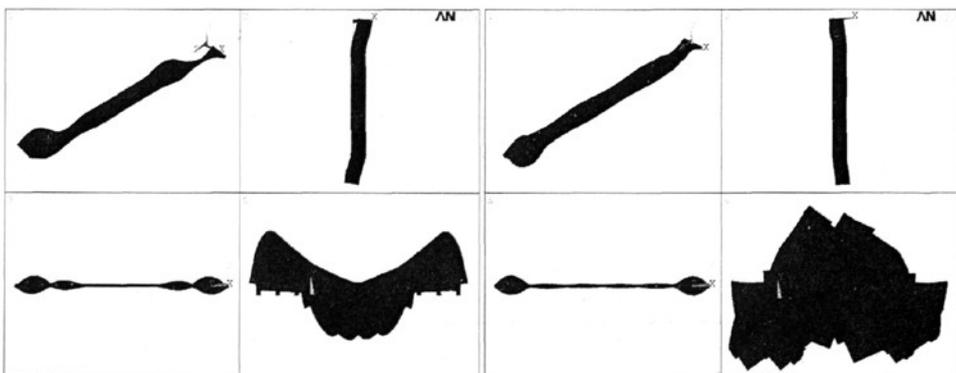


图 4.21 半刚半铰联结连续 T 梁第 1 阶振型

图 4.22 半刚半铰联结连续 T 梁第 5 阶振型

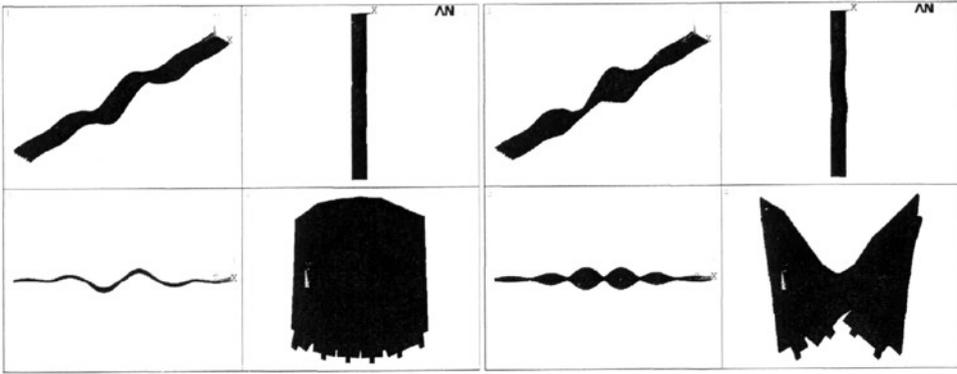


图 4.23 半刚半铰联结连续 T 梁第 9 阶振型 图 4.24 半刚半铰联结连续 T 梁第 10 阶振型

表 4.7 湿接联结简支 T 梁前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	4.192	竖弯	6	18.753	扭转
2	5.696	扭转	7	24.381	竖弯
3	14.866	竖弯	8	25.712	弯扭
4	16.830	扭转	9	31.052	横向平弯
5	17.531	扭转	10	35.596	弯扭

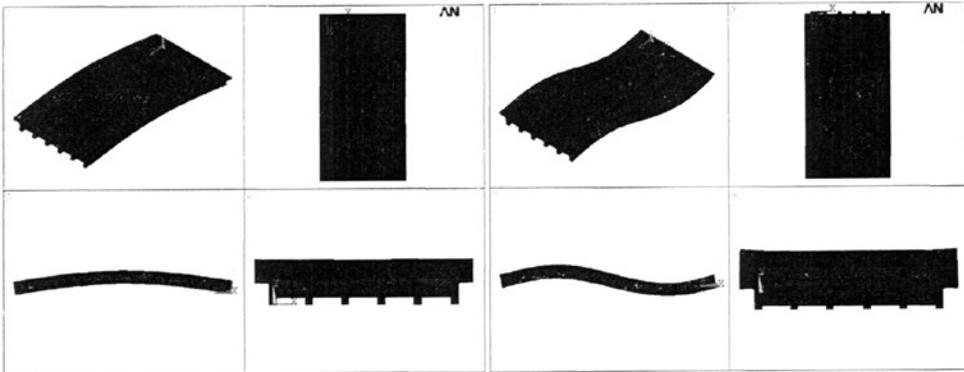


图 4.25 湿接联结简支 T 梁第 1 阶振型

图 4.26 湿接联结简支 T 梁第 3 阶振型

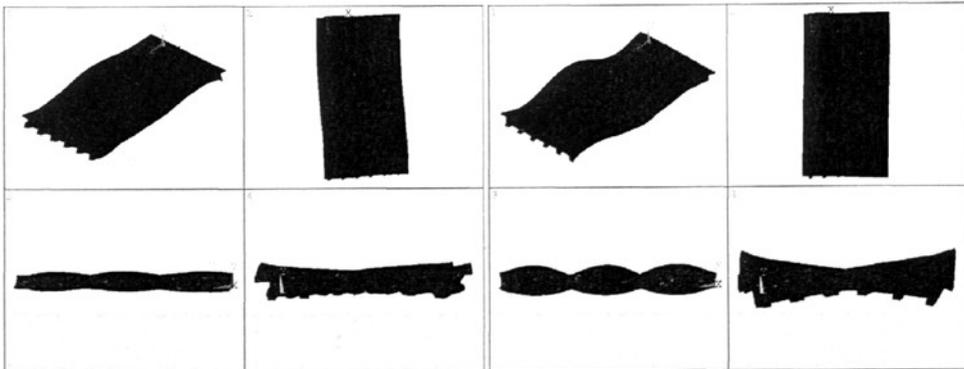


图 4.27 湿接联结简支 T 梁 9 阶振型

图 4.28 湿接联结简支 T 梁第 10 阶振型

表 4.8 湿接联结连续 T 梁桥前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	5.2413	边跨、次边跨扭转	6	7.1898	整体扭转
2	5.2434	边跨、次边跨扭转	7	7.4531	整体竖弯
3	5.4081	边跨、次边跨竖弯	8	7.6481	整体扭转
4	5.4096	边跨、次边跨竖弯	9	7.9262	整体扭转
5	7.0333	整体竖弯	10	8.0733	整体竖弯

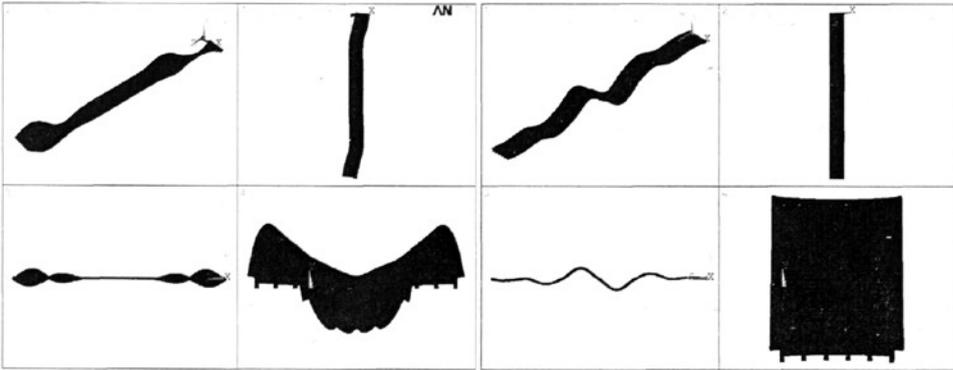


图 4.29 铰接联结连续 T 梁第 1 阶振型

图 4.30 铰接联结连续 T 梁第 5 阶振型

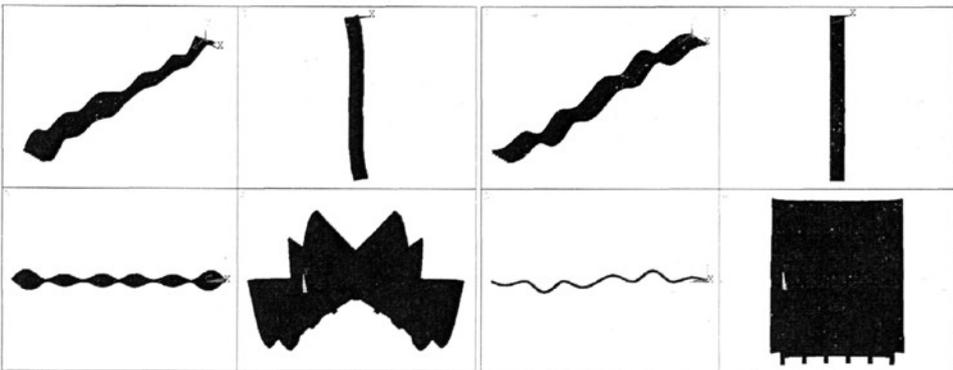


图 4.31 铰接联结连续 T 梁第 9 阶振型

图 4.32 铰接联结连续 T 梁第 10 阶振型

表 4.9 湿接联结加整体层简支 T 梁前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	4.110	竖弯	6	18.249	扭转
2	5.840	扭转	7	23.150	竖弯
3	14.255	竖弯	8	25.520	弯扭
4	16.135	扭转	9	28.795	横向平弯
5	17.525	扭转	10	34.762	弯扭

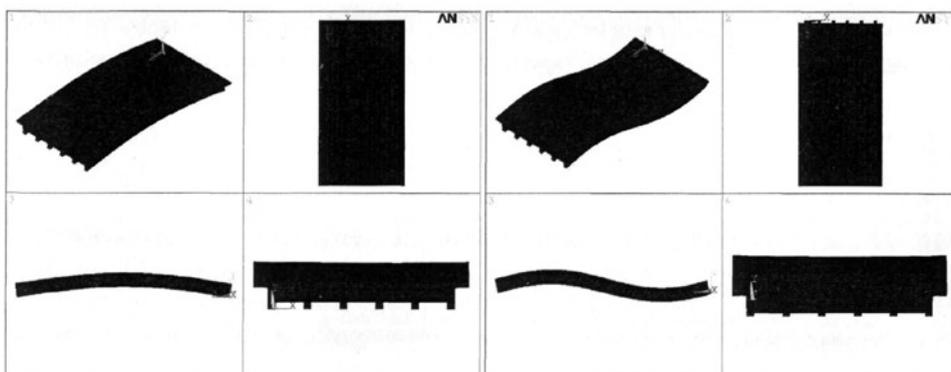


图 4.33 湿接加整体层简支 T 梁第 1 阶振型 图 4.34 湿接加整体层简支 T 梁第 3 阶振型

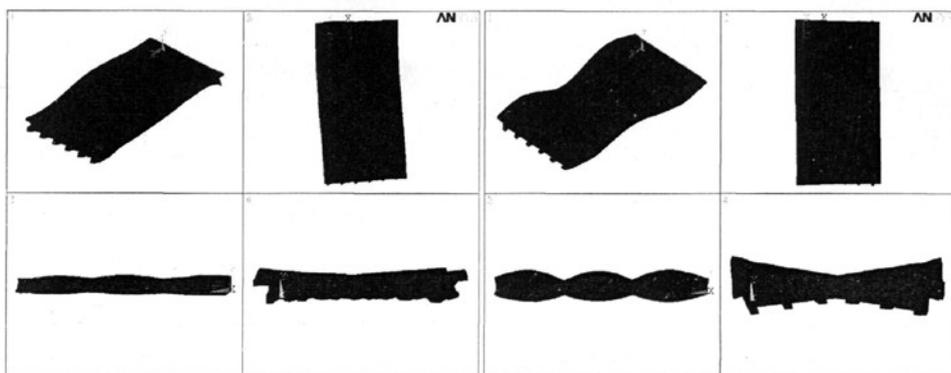


图 4.35 湿接加整体层简支 T 梁第 9 阶振型 图 4.36 湿接加整体层简支 T 梁第 10 阶振型

表 4.10 湿接联结加整体层连续 T 梁前 10 阶模态频率

阶次	频率 (Hz)	振型	阶次	频率 (Hz)	振型
1	5.3791	边跨、次边跨竖弯	6	7.3525	整体扭转
2	5.3833	边跨、次边跨竖弯	7	7.4417	整体竖弯
3	5.3867	边跨、次边跨扭转	8	7.6274	整体扭转
4	5.3875	边跨、次边跨扭转	9	7.8100	整体扭转
5	7.0859	整体竖弯	10	7.9724	整体竖弯

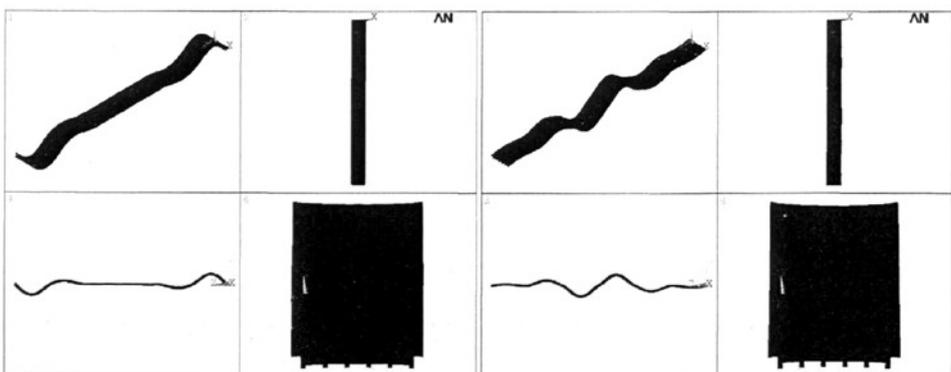


图 4.37 湿接加整体层连续 T 梁第 1 阶振型 图 4.38 湿接加整体层连续 T 梁第 5 阶振型

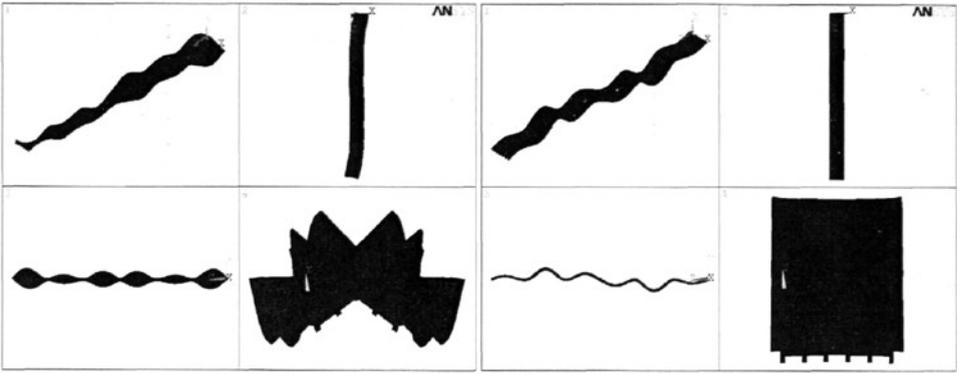


图 4.39 湿接加整体层连续 T 梁第 9 阶振型 图 4.40 湿接加整体层连续 T 梁第 10 阶振型

我们知道，当结构某方面的约束比较薄弱时，在结构发生振动时会最先出现这方面的振动。由上述表格数据及振型图可以看出，对于简支结构而言，铰接联结的 T 形梁桥，第 1 阶及第 2 阶模态为整体竖弯和整体扭转，而从第 3 阶开始，出现了各片梁各自的弯扭振动，到第 8 阶和第 9 阶才出现整体的平弯和竖弯，说明其横向联系很薄弱，整体刚度很差；半刚半铰联结的 T 形梁桥，在一、二阶振型和铰接差不多，到了第 4 阶和第 5 阶就出现整体的平弯和竖弯，但到了第 10 阶出现了各片梁各自的弯扭局部振动，说明其横向联系及整体刚度有了提高，但总体来说，其横向联系及整体刚度还是比较薄弱的，因为到了第 10 阶出现了各片梁各自的弯扭局部振动；在半刚半铰联结的基础上再加一层整体层，其整体刚度有了更进一步地提高，前 10 阶中均没有出现各片梁各自的弯扭局部振动；湿接联结和湿接联结再加整体层的 T 形梁桥，前两阶振型和铰接联结及半刚半铰联结方式的基本一致，但到第 3 阶，就出现了整体的竖弯，并且一直到第 10 阶也没有出现各片梁各自的弯扭局部振动，说明其横向联系有了很大的提高，整体性很好，结构在前 10 阶振动中不会因为横向联系的破坏而破坏。

对于连续结构而言，铰接联结的 T 形梁桥，第 1 阶至第 4 阶模态为边跨、次变边跨的扭转和竖弯，从第 5 阶开始，出现了边跨各片梁各自的弯扭振动，到 9 阶才出现整体的竖弯，说明其横向联系很薄弱，整体刚度很差，并且边跨更明显；半刚半铰联结方式的 T 形梁桥，其振动形式和铰接联结的基本相似，说明其横向联系及整体刚度和铰接联结差不多，整体性比较差；半刚半铰加整体层联结、湿接联结及湿接加整体层联结的 T 形梁桥，第 1 阶至第 4 阶模态为边跨、次变边跨的扭转和竖弯，从第 5 阶开始，均为整体的竖弯和扭转，在前 10 阶振型中没有出现各片梁各自的弯扭振动，说明其横向联系有了很大的提高，整体性很好，和简支结构一样，结构在前 10 阶振动中不会因为横向联系的破坏而破坏。

4.2 不同横向联系的 T 形梁桥在随机车流下动力响应

多年来人们一直对于移动荷载作用下桥梁与车辆的动态响应十分关注,从古典的弹簧质点体系到现代的车桥相互作用理论,已经进行了不少研究。由于目前车桥耦合的研究都还停留在杆系单元,本文通过有限元程序 ANSYS 建立 T 形梁桥的铰接、湿接及湿接加整体层三种不同联结方式的空间杆单元模型,编制接口程序以及随机车流荷载谱计算其在随机车流下的动力响应。

4.2.1 BDANS 简介

BDANS (Bridge Dynamic Analysis System) 软件系统是课题组研究人员多年来科研实践的总结。该系统适用于桥梁结构风致振动分析、车桥耦合分析、非线性静力分析、风—车—桥、地震—车—桥等多种因素交互作用下的桥梁结构行为分析。BDANS 系统是在 FORTRAN 高级编程语言下开发的,具有良好的人机交互界面,体现了 Windows 程序可视性、交互性及互动性的特点。BDANS 软件的启动画面如图 4.41 所示。

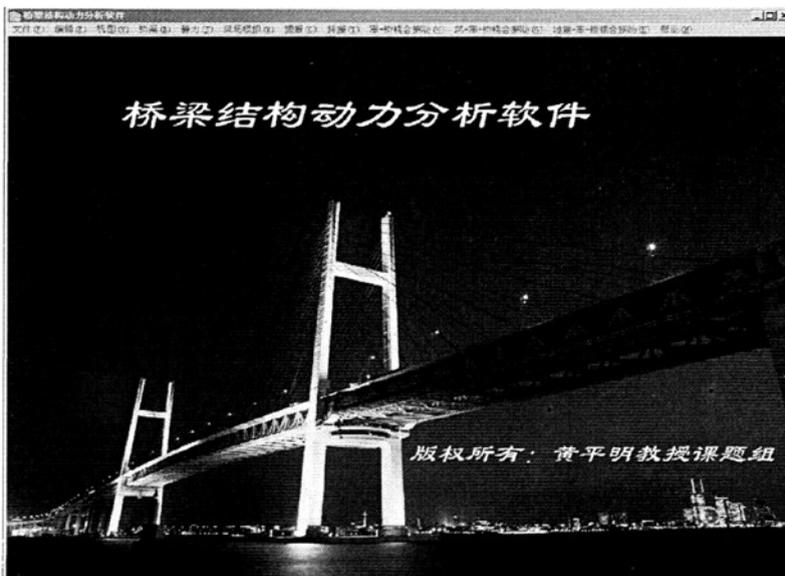


图 4.41 BDANS 程序启动画面

BDANS 系统是一集成化的软件包,从软件结构上可分为三大模块。

1. 视窗相关模块

它的功能是生成应用程序的菜单窗口界面,通过对话框接收相关参数,创建、编辑、保存、读入并检验计算输入数据文件;查看计算结果数据文件;显示计算分析过程的进度及相关信息。

2. 计算分析相关模块

它的功能是完成桥梁结构的相关计算分析，其具体功能如下。

- 1) 静力分析（线性、非线性、风载内力）；
- 2) 自振特性（兰索斯子空间迭代）；
- 3) 风场模拟（改进谐波合成法）；
- 4) 颤振分析（多模态、线性时域、非线性时域）；
- 5) 抖振分析（多模态、线性时域、非线性时域）；
- 6) 车桥耦合（线性、非线性、轮轨几何、路面粗糙度模拟、随机车流模拟）；
- 7) 风—车—桥耦合（线性、非线性）；
- 8) 地震—车—桥耦合（线性、非线性）。

3. 前后处理模块

BDANS系统前后处理模块设置了与大型商业结构分析软件ANSYS 的接口，便于两者间的比较，在ANSYS中建立模型后，BDANS直接调入作为输入文件。

本文所用到的车桥耦合的计算分析相关模块程序框图如图4.42，图4.43所示。

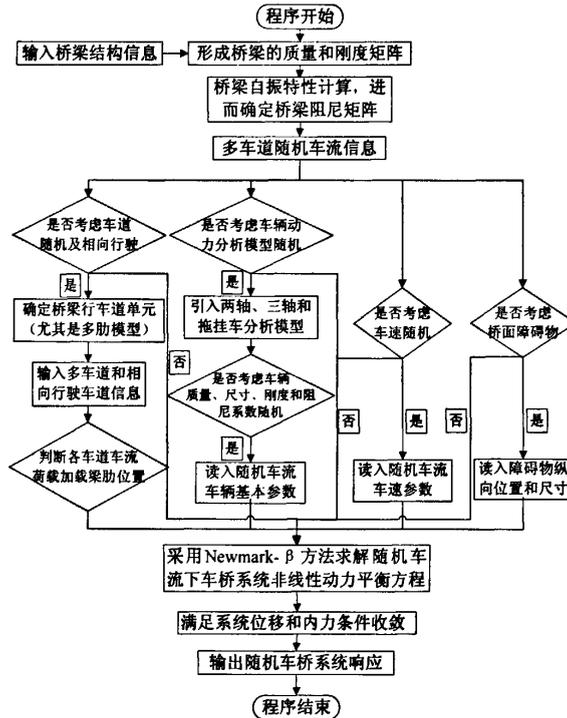


图 4.42 汽车—桥梁系统空间耦合振动分析程序框图 (1)

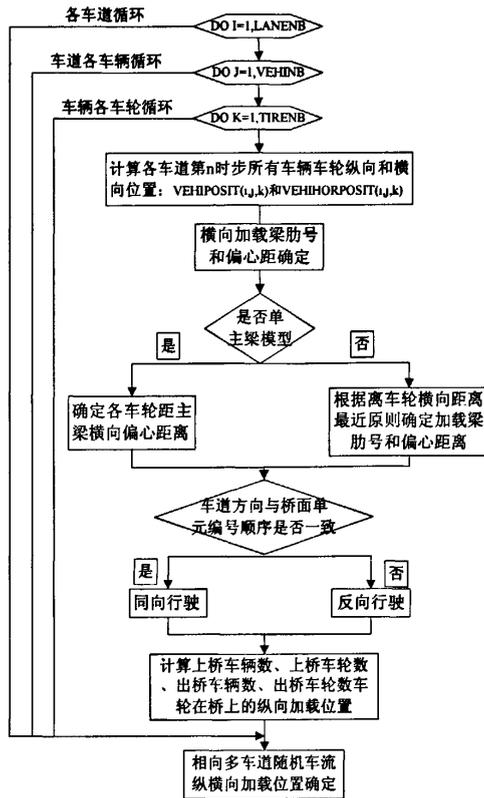


图 4.43 汽车—桥梁系统空间耦合振动分析程序框图 (2)

4.2.2 随机车流的模拟

日常运营过程中，桥梁通行的车流是一随机过程，车型、车重、车间距均随时间的变化而变化，根据国内外的统计数据(李扬海, 1997)^[41]，车型一般服从均匀分布，一般运营状态的车间距和密集运营状态下的车间距服从对数正态分布，一般运营状态的时间间隔和密集运营状态下的时间间隔服从伽马分布。为了准确模拟一天内的交通流，本文依据课题组成员于 2007 年 3 月 6 日对西宝高速漆水河大桥进行了交通量的初步调查数据，利用 MATLAB 编程语言及统计工具箱编制了程序抽取随机数列，建立与交通量调查结果之间的相互对应关系，建立了随机车流模拟程序 RTF(Random Traffic Flow Stimulate)模拟了各个时段内的随机交通流荷载，其具体流程如图 4.44 所示，下面简要介绍一下其内容：

1. 根据交通量调查结果建立典型的车型库，根据交通观测结果，确定每个时段内各车型所占比例，它们均服从均匀分布，然后利用 MATLAB 统计工具箱按每个时段各车型不同的比例分别抽取随机样本。

2. 车辆间距的模拟。参考有关资料[41]，车辆间距符合对数正态分布，一般运行状态

的参数为 4.828 和 1.116，密集运行状态下的参数为 1.561 和 0.280。由交通量调查结果可知，交通量高峰期主要集中上午 9：30 到 10：30 和下午 4：00 到 5：00 时间内，因此车辆间距在 9：00 到 10：00、10：00 到 11：00 和下午 4：00 到 5：00 三个时段内采用密集运行状态下的分布参数，其余时段均采用一般运行状态下的分布参数，然后在利用 MATLAB 统计工具箱得到每个时段内的车流车间距的随机抽样。

3.将步骤 1 和 2 中的随机抽取随机样本，组合产生随机车辆荷载谱。

4.各种车型的在各个时段内的平均速度是不同的，本文将模拟一个一般运行状态（8:00~9:00 时段）和一个密集运行状态（16:00~17:00 时段），模拟结果见图 4.45 和图 4.46。

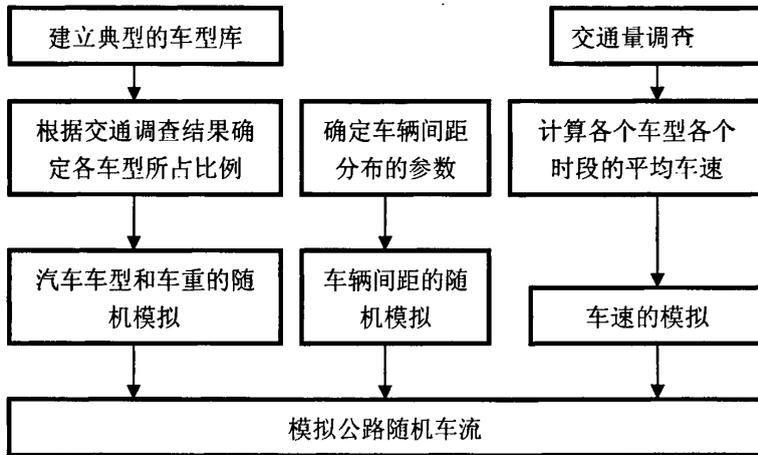


图 4.44 程序 RTF 模拟流程图

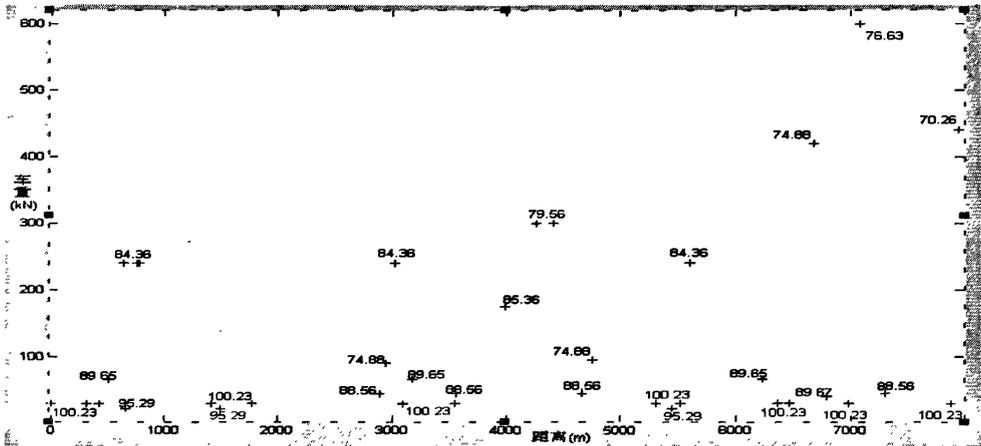


图 4.45 8：00~9：00 时段随机车流的模拟结果

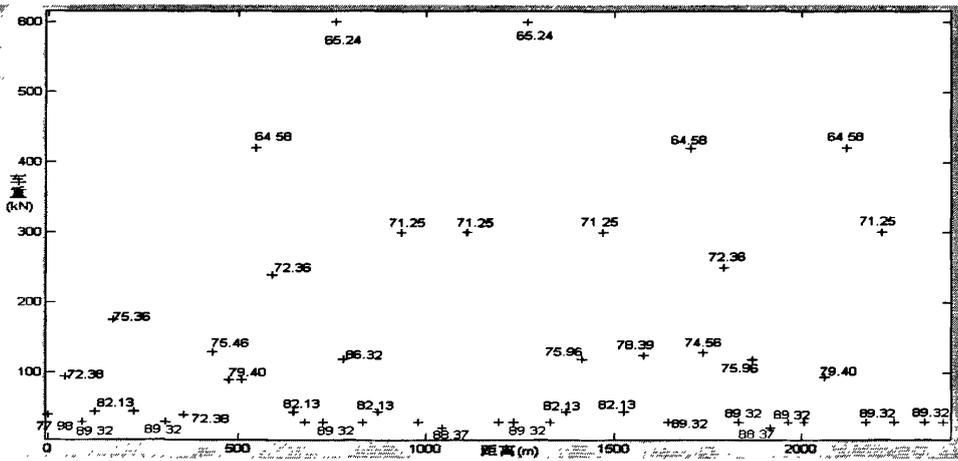


图 4.46 16: 00~17: 00 时段随机车流的模拟结果

4.2.3 不同横向联系的 T 形梁桥在随机车流下动挠度

桥梁运营过程中车辆不断通过，车辆运行的轨迹、车速、车型等都是随机变化的，桥梁的空间动力响应是一个复杂过程，考虑荷载谱作用下桥梁空间动力响应对分析桥梁的性能起着重要作用。本文接下来将以永定河大桥为工程背景，从一般运营和密集运营两种状态，比较简支 T 梁桥跨中及连续六跨 T 梁桥第四跨跨中的动挠度曲线，分析出不同横向联系方式的 T 梁桥的整体刚度的好差。永定河大桥是双向六车道标准建设，图 4.47 给出了车道布置示意图。车道一中心线距 1#中心 9.375m，车道二中心线距 1#中心 5.625m，车道三中心线距 1#中心 1.875m。通过对该桥的车流观察发现：车道二车流比较密集为主车道，车道一车流一般为超车道，而车道三则车流很少。故本文以车道二单车道布载和车道一、车道二同向双车道布载两种方式，计算随机车流下的 T 梁桥动挠度曲线。

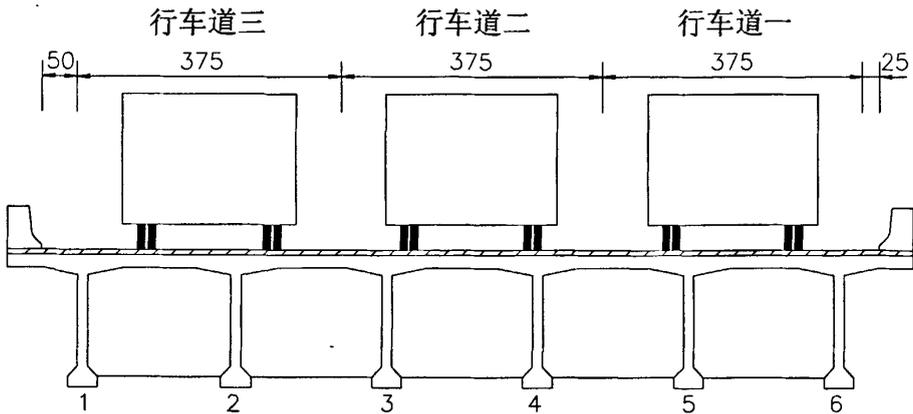


图 4.47 车道布置示意图

4.2.3.1 一般运营状态下桥梁动挠度分析

一般运营状态下, 随机车辆在单车道布载作用下不同横向联系的简支 T 形梁桥跨中动挠度曲线及连续 T 形梁桥第四跨跨中动挠度曲线如下列图形所示, 同时提取了个别典型时刻的动挠度数据列于下列表格。

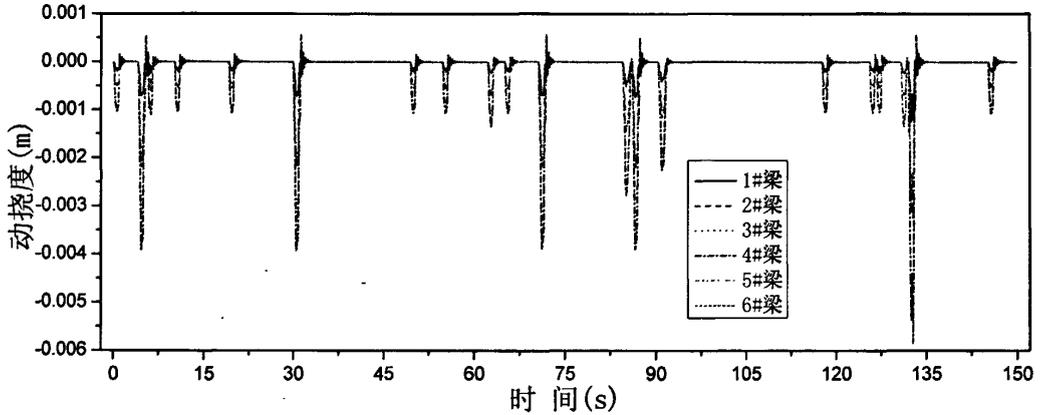


图 4.48 简支 T 梁桥铰接联结一般运营下单车道布载动挠度曲线

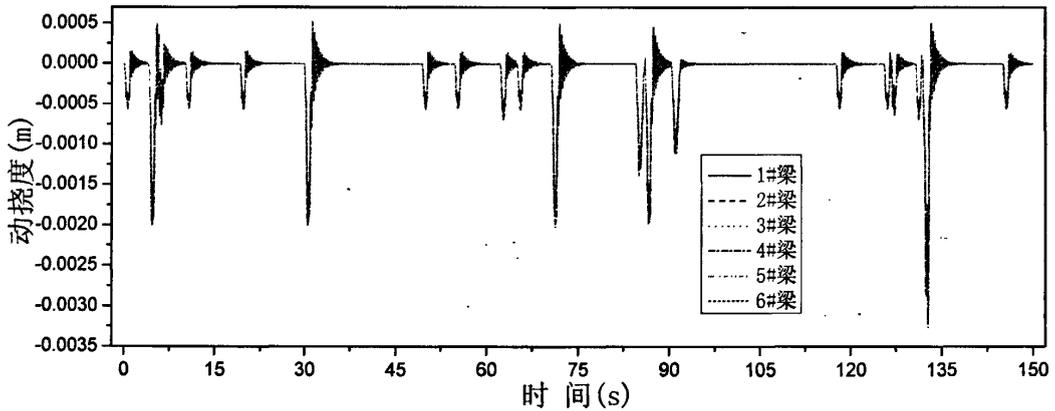


图 4.49 简支 T 梁桥湿接联结一般运营下单车道布载动挠度曲线

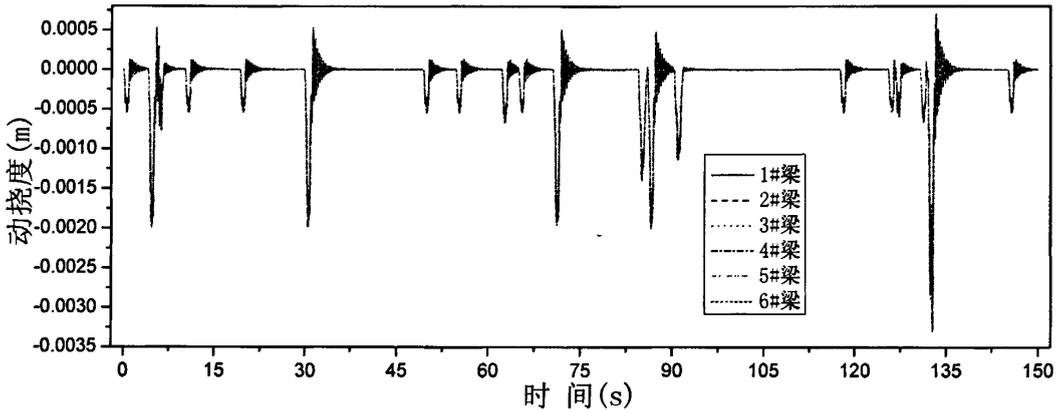


图 4.50 简支 T 梁桥湿接加整体层联结一般运营下单车道布载动挠度曲线

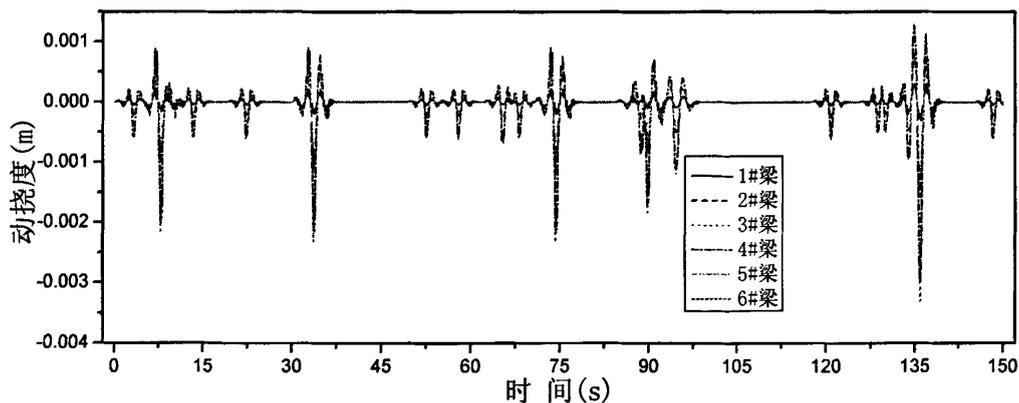


图 4.51 连续 T 梁桥铰接联结一般运营下单车道布载动挠度曲线

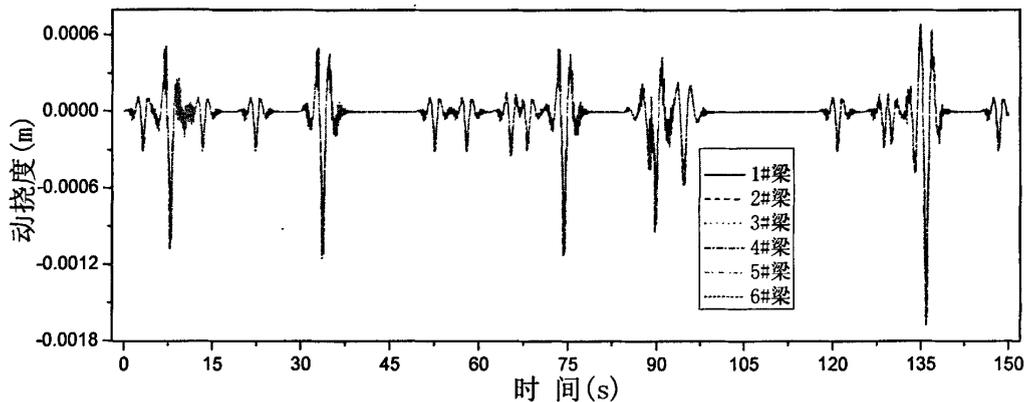


图 4.52 连续 T 梁桥湿接联结一般运营下单车道布载动挠度曲线

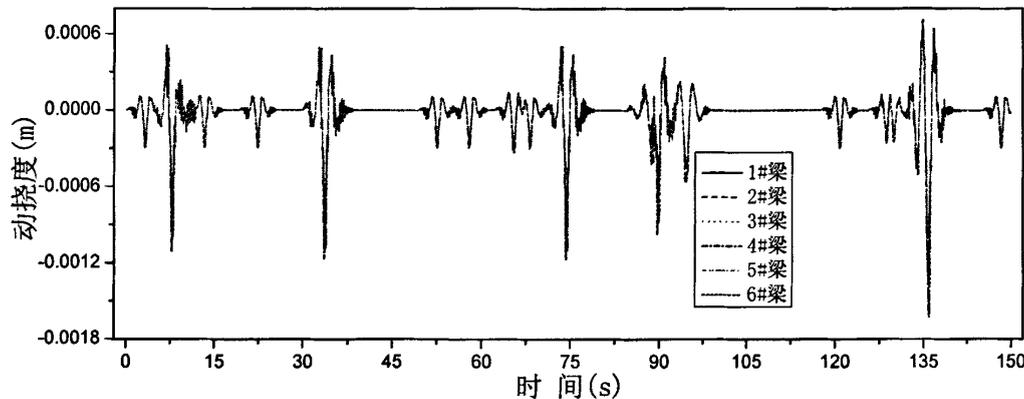


图 4.53 连续 T 梁桥湿接加整体层联结一般运营下单车道布载动挠度曲线

表 4.11 50S 时刻简支 T 梁桥一般运营下单车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动 位移(\times 10^{-3} m)	铰接	-0.200	-0.548	-1.050	-1.040	-0.535	-0.195
	湿接	-0.471	-0.510	-0.536	-0.529	-0.490	-0.440
	湿接加整体层	-0.496	-0.526	-0.547	-0.540	-0.507	-0.466

表 4.12 132.85S 时刻简支 T 梁桥一般运营下单车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-1.210	-3.240	-5.570	-5.510	-3.170	-1.190
	湿接	-2.560	-2.740	-2.850	-2.810	-2.630	-2.380
	湿接加整体层	-2.810	-2.950	-3.020	-2.990	-2.850	-2.650

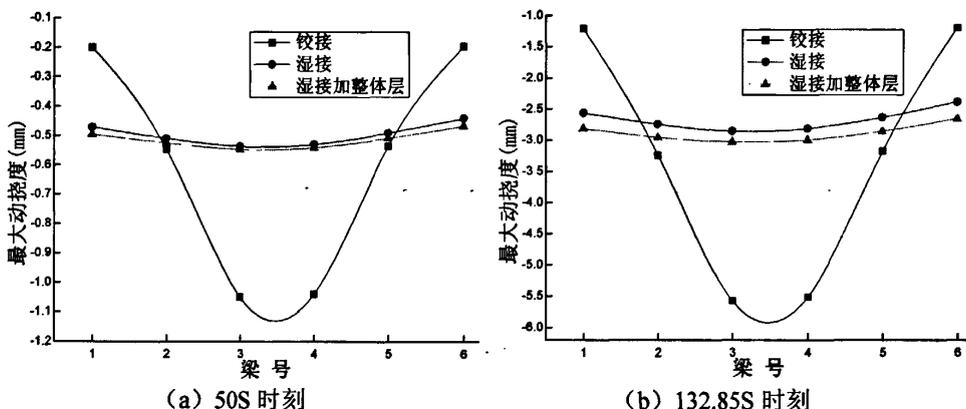


图 4.54 典型时刻简支 T 梁桥一般运营下单车道布载动挠度比较

表 4.13 22.3S 时刻连续 T 梁桥一般运营下单车道布载第四跨梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.049	-0.256	-0.611	-0.575	-0.213	-0.044
	湿接	-0.238	-0.281	-0.313	-0.308	-0.268	-0.218
	湿接加整体层	-0.238	-0.273	-0.298	-0.294	-0.261	-0.220

表 4.14 135.9S 时刻连续 T 梁桥一般运营下单车道布载第四跨梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.237	-1.570	-3.300	-2.990	-1.360	-0.218
	湿接	-1.300	-1.530	-1.700	-1.670	-1.450	-1.180
	湿接加整体层	-1.310	-1.490	-1.630	-1.610	-1.420	-1.200

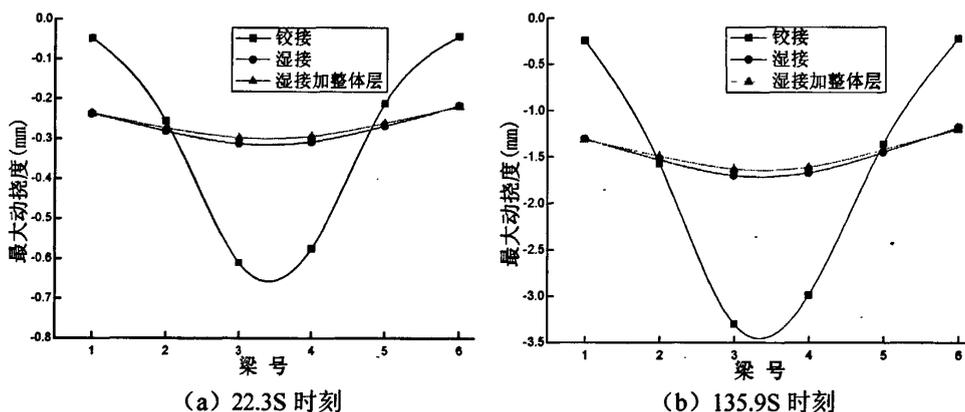


图 4.55 典型时刻连续 T 梁桥一般运营下单车道布载动挠度比较

一般运营状态下, 随机车辆在双车道同向行驶作用下不同横向联系的简支 T 形梁桥跨中动挠度曲线及连续 T 形梁桥第四跨跨中动挠度曲线如下列图形所示, 同时提取了个别典型时刻的动挠度数据列于下列表格。

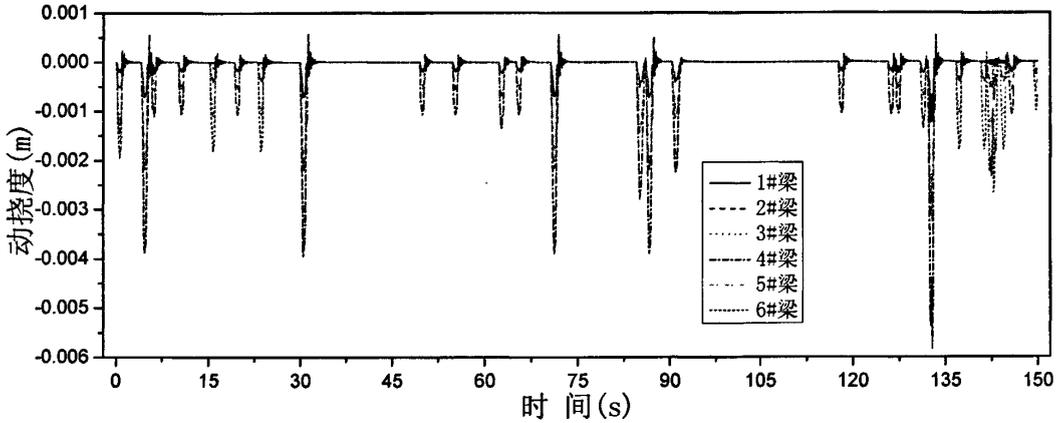


图 4.56 简支 T 梁桥铰接联结一般运营下双车道布载动挠度曲线

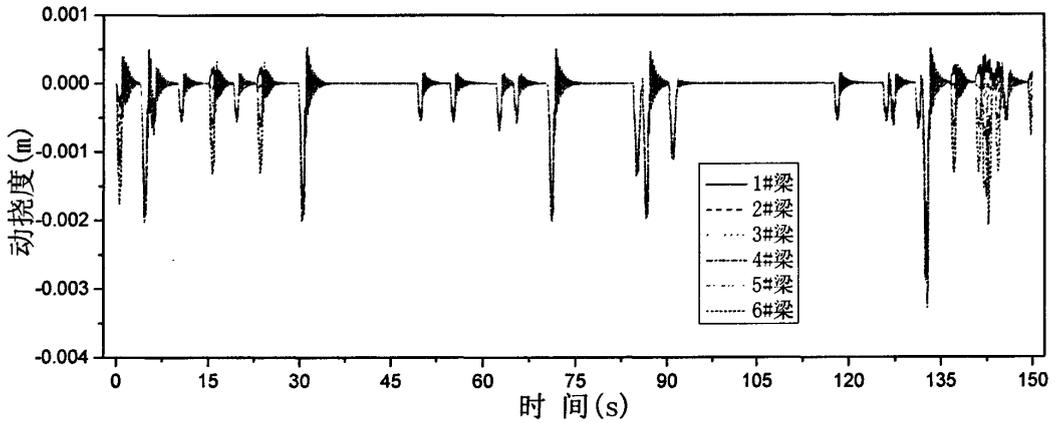


图 4.57 简支 T 梁桥湿接联结一般运营下双车道布载动挠度曲线

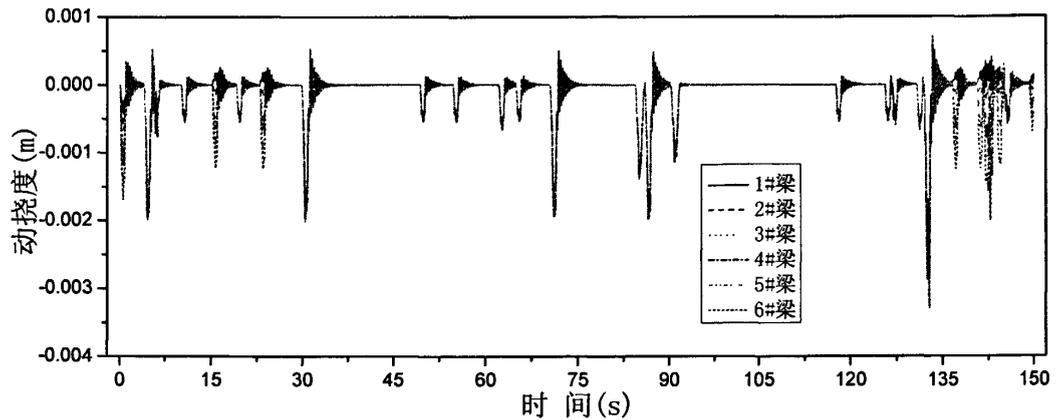


图 4.58 简支 T 梁桥湿接加整体层联结一般运营下双车道布载动挠度曲线

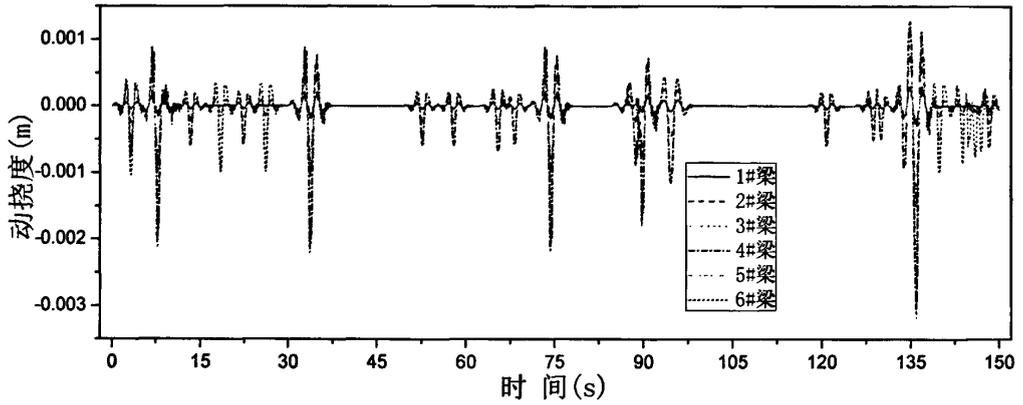


图 4.59 连续 T 梁桥铰接联结一般运营下双车道布载动挠度曲线

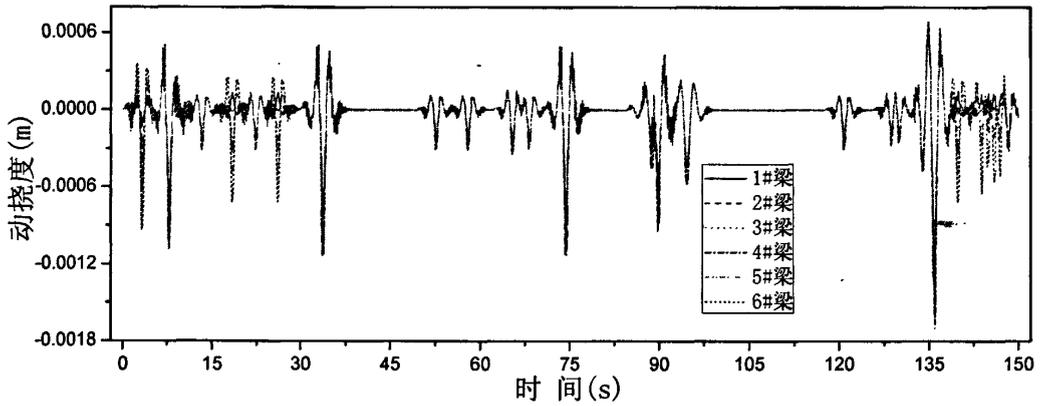


图 4.60 连续 T 梁桥湿接联结一般运营下双车道布载动挠度曲线

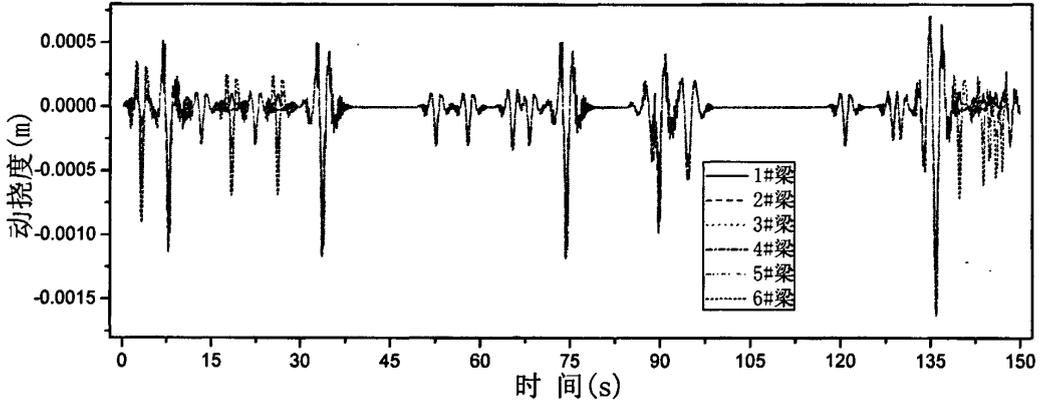


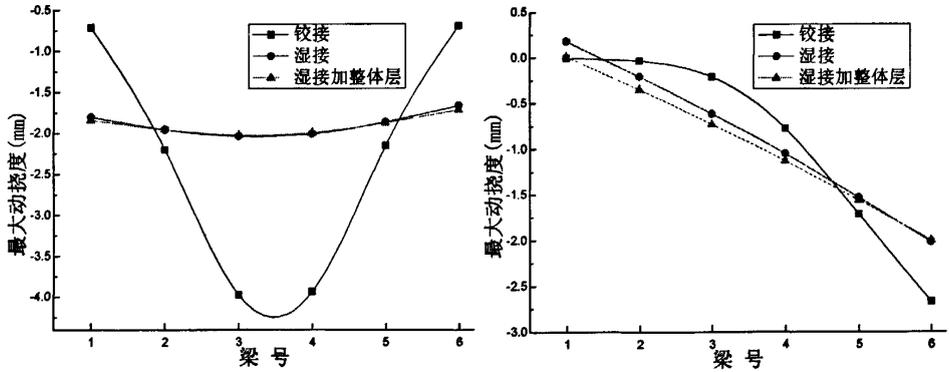
图 4.61 连续 T 梁桥湿接加整体层联结一般运营下双车道布载动挠度曲线

表 4.15 30.5S 时刻简支 T 梁桥一般运营下双车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.711	-2.200	-3.970	-3.930	-2.150	-0.694
	湿接	-1.800	-1.950	-2.030	-2.000	-1.860	-1.670
	湿接加整体层	-1.840	-1.950	-2.020	-1.990	-1.870	-1.720

表 4.16 142.8S 时刻简支 T 梁桥一般运营下双车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.004	-0.038	-0.210	-0.775	-1.710	-2.670
	湿接	0.180	-0.209	-0.615	-1.050	-1.530	-2.020
	湿接加整体层	0.012	-0.351	-0.728	-1.130	-1.560	-2.000



(a) 30.5S 时刻

(b) 142.8S 时刻

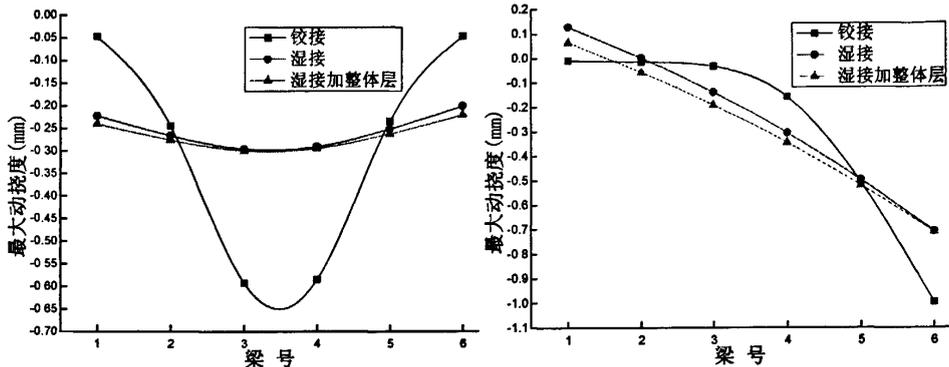
图 4.62 典型时刻简支 T 梁桥一般运营下双车道布载动挠度比较

表 4.17 52.6S 时刻连续 T 梁桥一般运营下单车道布载第四跨梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.048	-0.246	-0.593	-0.586	-0.236	-0.048
	湿接	-0.222	-0.267	-0.297	-0.292	-0.253	-0.202
	湿接加整体层	-0.240	-0.276	-0.300	-0.296	-0.264	-0.222

表 4.18 139.85S 时刻连续 T 梁桥一般运营下单车道布载第四跨梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.009	-0.015	-0.033	-0.157	-0.509	-0.995
	湿接	0.129	0.0004	-0.140	-0.305	-0.498	-0.706
	湿接加整体层	0.066	-0.058	-0.192	-0.345	-0.520	-0.707



(a) 52.6S 时刻

(b) 139.85S 时刻

图 4.63 典型时刻连续 T 梁桥一般运营下双车道布载动挠度比较

由上述图表可见,单车道布载作用下各片梁的竖向挠度有较大的差别,其中铰接联结差别最大,其次是湿接联结,再次是湿接加整体层。这种差别在动挠度曲线上反映的非常清晰,由于车道二单车道布载的车道中心线位于3#、4#梁间,在铰接方式联结的T梁桥动挠度曲线图上,可以清楚的看到3#、4#梁动力响应非常明显,1#、6#梁的动力响应则相对要弱得多,它们之间的响应差值很大,而湿接方式联结及湿接加整体层方式联结的T梁桥动挠度曲线图上,各片梁的动力响应都比较明显,响应差值比较小。提取的个别典型时刻的动挠度数据表格及图形更加直观地说明了这一点,对铰接联结而言其荷载主要由作用车道附近的个别梁分担,其他远离车道的梁影响很小,而湿接及湿接加整体层联结的T梁桥,各片梁分担的荷载要相对均匀些,体现在图4.54及图4.55上,其曲线要平直得多,并且湿接加整体层联结的T梁桥动挠度曲线要比湿接联结的略微平直些,说明湿接加整体层联结方式的T梁桥其整体层要比湿接联结的略强些,但效果不是非常明显。

双车道同向布载作用下,由于车道1和车道2上的车辆是随机的,即车道1有车过桥时,车道2可能没有车,或者是车道2有车过桥时,车道1可能没有车,或者是车道1和车道2都有车过桥,但车重不一样,故在动挠度曲线上某些时刻和单车道的动挠度曲线一样,某些时刻比单车道数值大,同时响应比单车道密集。在这种双车道荷载作用下,各种联结方式表现出了与单车道荷载作用下一样的情况,铰接联结的T形梁桥整体性最差,湿接联结的整体性比较好,湿接加整体层联结的整体性最好,但相比于湿接联结其效果不是非常明显。

由上述分析可知,铰接联结的T形梁桥整体刚度比较差,而湿接联结和湿接加整体层联结的T形梁桥整体刚度要好得多,桥面现浇混凝土整体层可以提高T梁的整体刚度,但提高的效果不是很明显。

4.2.3.2 密集运营状态下桥梁动挠度分析

密集运营状态下,随机车辆在单车道偏载作用下不同横向联系的T形梁桥各梁跨中动挠度曲线如下列图形所示,同时提取了个别典型时刻的动挠度数据列于下列表格。

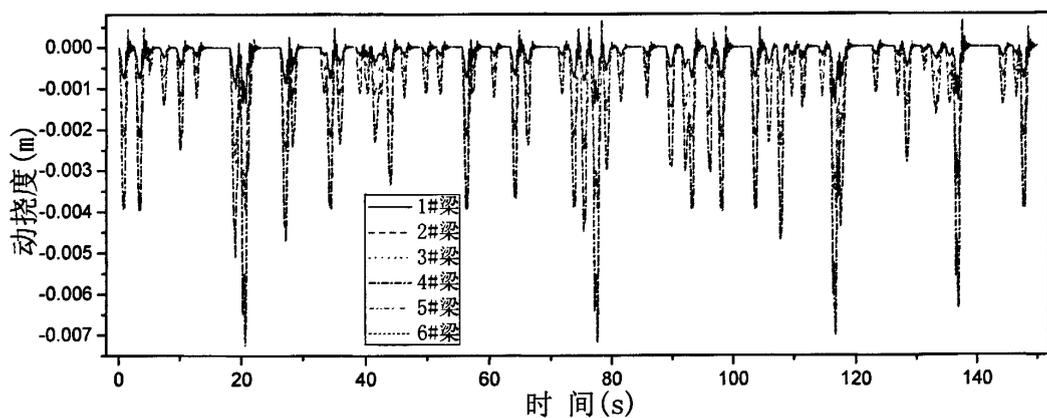


图 4.64 简支 T 梁桥铰接联结密集运营下单车道布载动挠度曲线

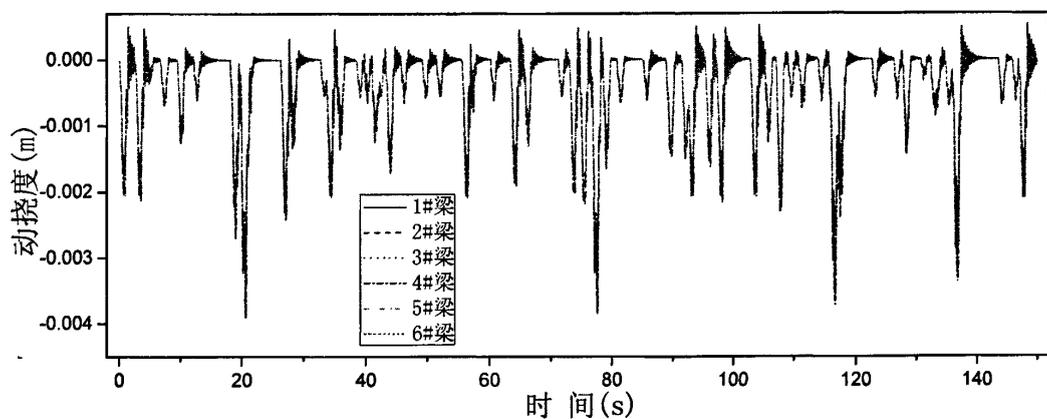


图 4.65 简支 T 梁桥湿接联结密集运营下单车道布载动挠度曲线

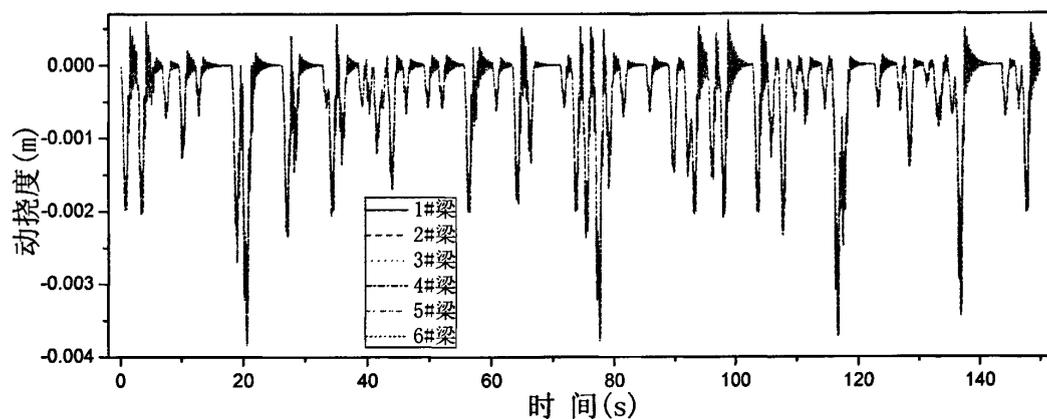


图 4.66 简支 T 梁桥湿接加整体层联结密集运营下单车道布载动挠度曲线

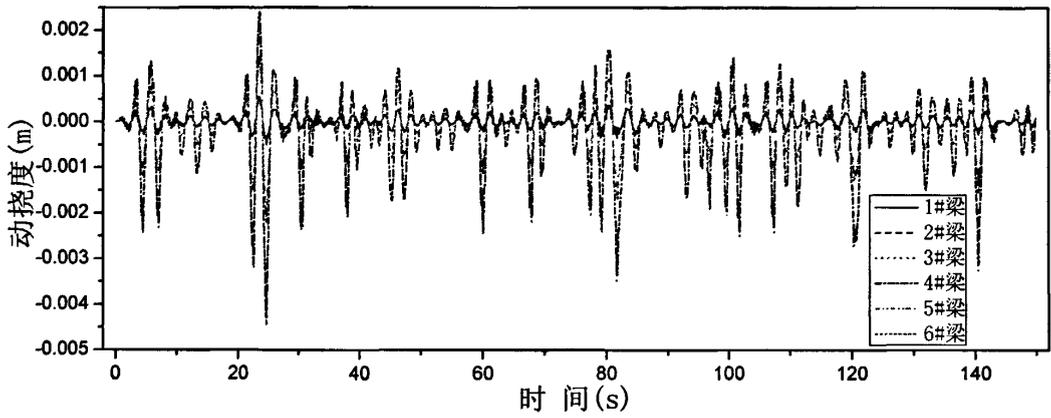


图 4.67 连续 T 梁桥铰接联结密集运营下单车道布载动挠度曲线

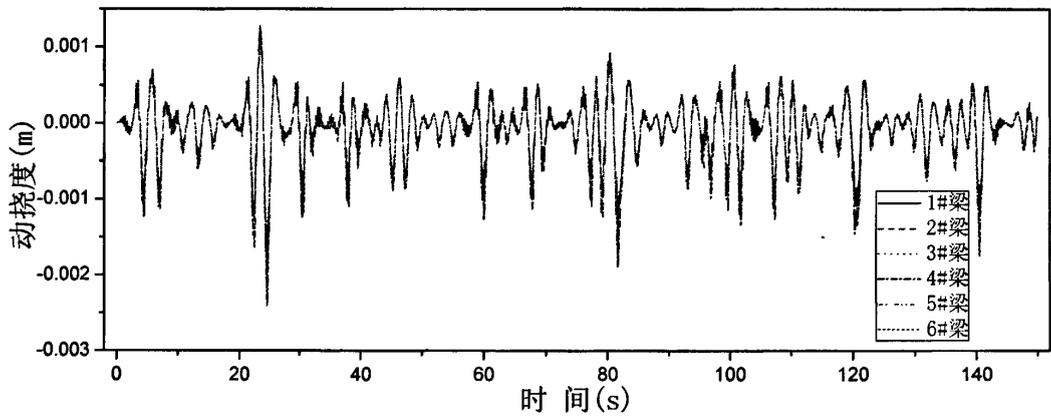


图 4.68 连续 T 梁桥湿接联结密集运营下单车道布载动挠度曲线

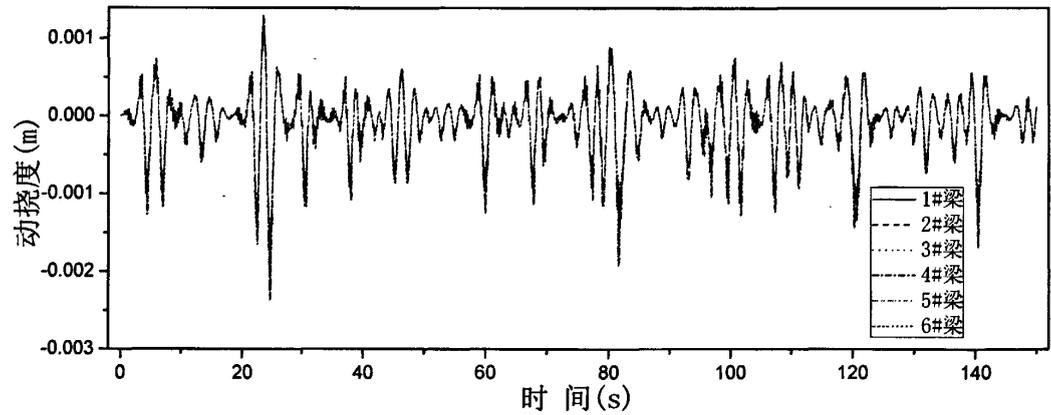


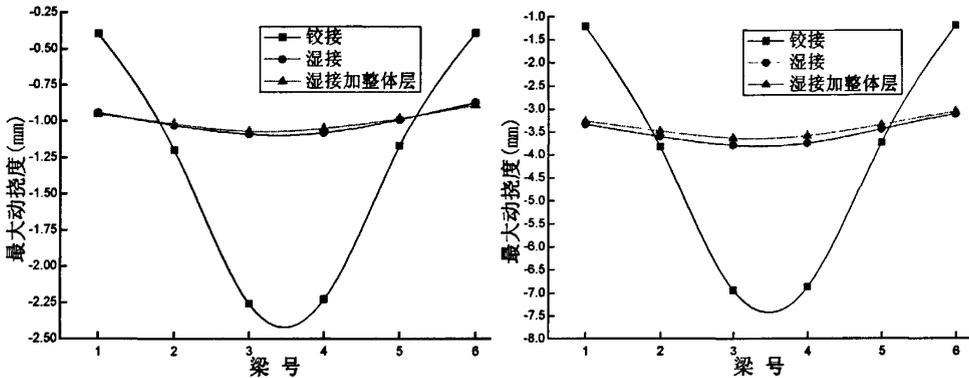
图 4.69 连续 T 梁桥湿接加整体层联结密集运营下单车道布载动挠度曲线

表 4.19 10.15S 时刻简支 T 梁桥密集运营下单车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动 位移(\times 10^{-3} m)	铰接	-0.398	-1.200	-2.260	-2.230	-1.170	-0.390
	湿接	-0.943	-1.030	-1.090	-1.080	-0.986	-0.871
	湿接加整体层	-0.952	-1.020	-1.070	-1.050	-0.980	-0.886

表 4.20 77.6S 时刻简支 T 梁桥密集运营下单车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动 位移(\times 10^{-3} m)	铰接	-1.210	-3.830	-6.950	-6.880	-3.740	-1.190
	湿接	-3.330	-3.600	-3.800	-3.750	-3.450	-3.110
	湿接加整体层	-3.260	-3.480	-3.640	-3.590	-3.350	-3.060



(a) 10.15S 时刻

(b) 77.6S 时刻

图 4.70 典型时刻简支 T 梁桥密集运营下单车道布载动挠度比较

表 4.21 24.6S 时刻连续 T 梁桥密集运营下单车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动 位移(\times 10^{-3} m)	铰接	-0.470	-2.190	-4.470	-4.290	-2.160	-0.464
	湿接	-1.920	-2.220	-2.420	-2.380	-2.120	-1.750
	湿接加整体层	-1.960	-2.210	-2.370	-2.330	-2.110	-1.810

表 4.22 55S 时刻连续 T 梁桥密集运营下单车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动 位移(\times 10^{-3} m)	铰接	-0.071	-0.274	-0.621	-0.614	-0.264	-0.070
	湿接	-0.252	-0.296	-0.326	-0.321	-0.282	-0.232
	湿接加整体层	-0.261	-0.295	-0.319	-0.314	-0.282	-0.241

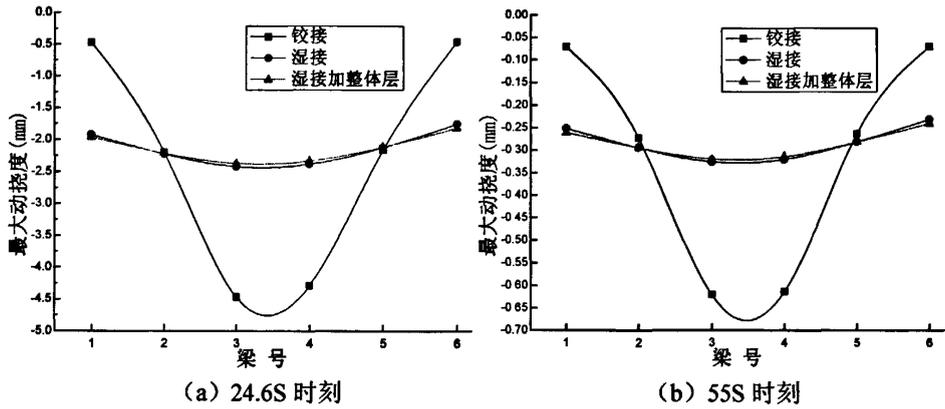


图 4.71 典型时刻连续 T 梁桥密集运营下单车道布载动挠度比较

密集运营状态下, 随机车辆在双车道中载同向作用下不同横向联系的 T 形梁桥各梁跨中动挠度曲线如下列图形所示, 同时提取了个别典型时刻的动挠度数据列于下列表格。

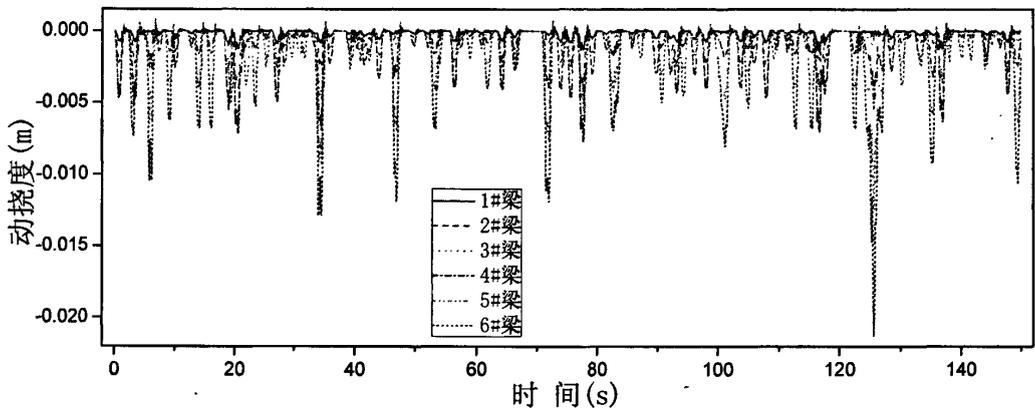


图 4.72 简支 T 梁桥铰接联结密集运营下双车道布载动挠度曲线

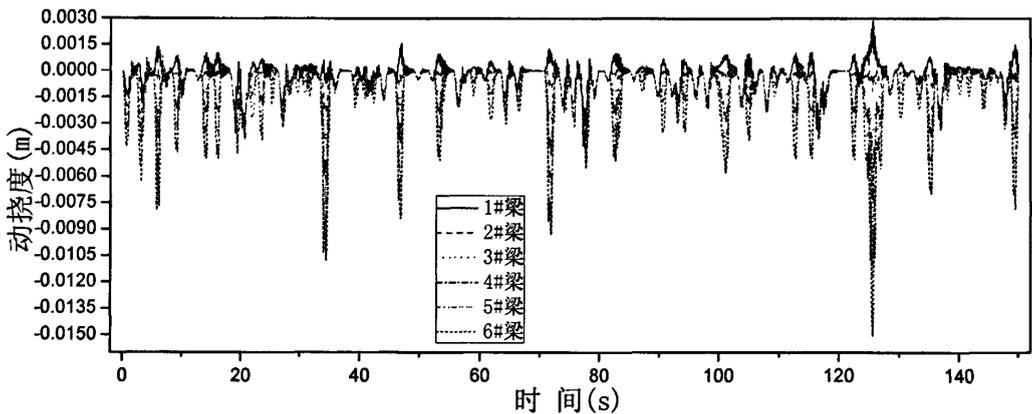


图 4.73 简支 T 梁桥湿接联结密集运营下双车道布载动挠度曲线

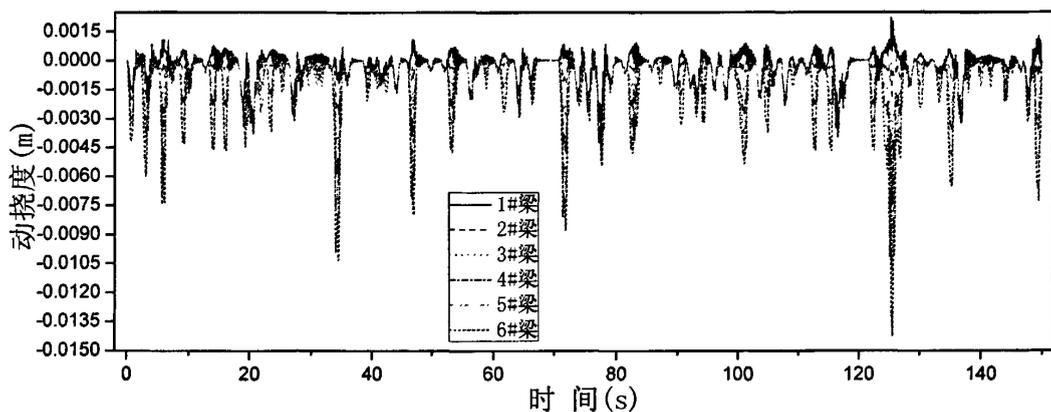


图 4.74 简支 T 梁桥湿接加整体层联结密集运营下双车道布载动挠度曲线

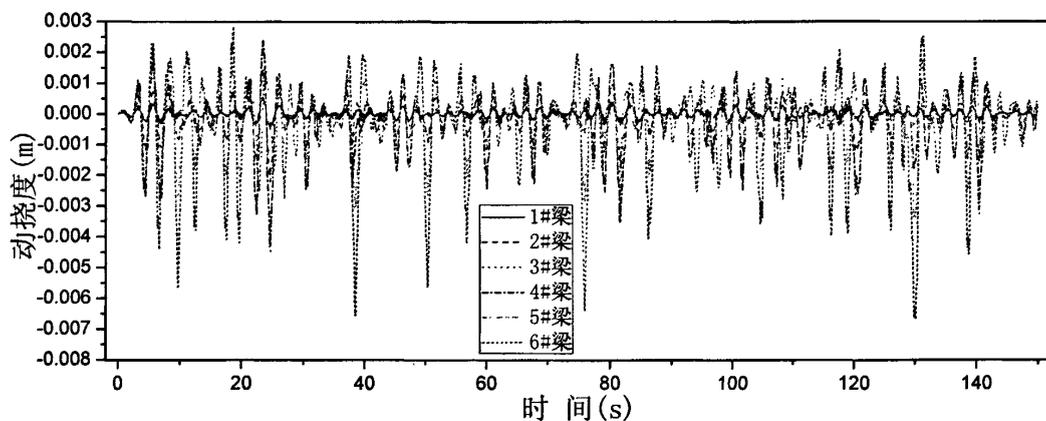


图 4.75 连续 T 梁桥铰接联结密集运营下双车道布载动挠度曲线

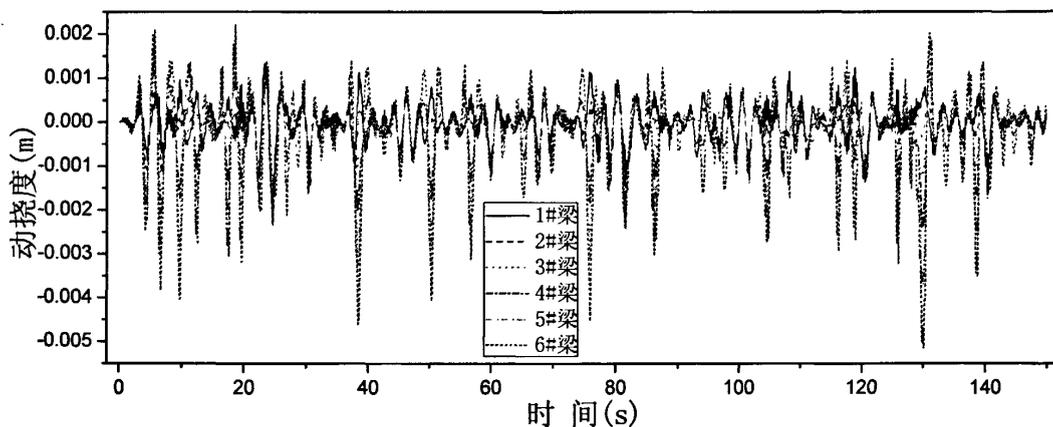


图 4.76 连续 T 梁桥湿接联结密集运营下双车道布载动挠度曲线

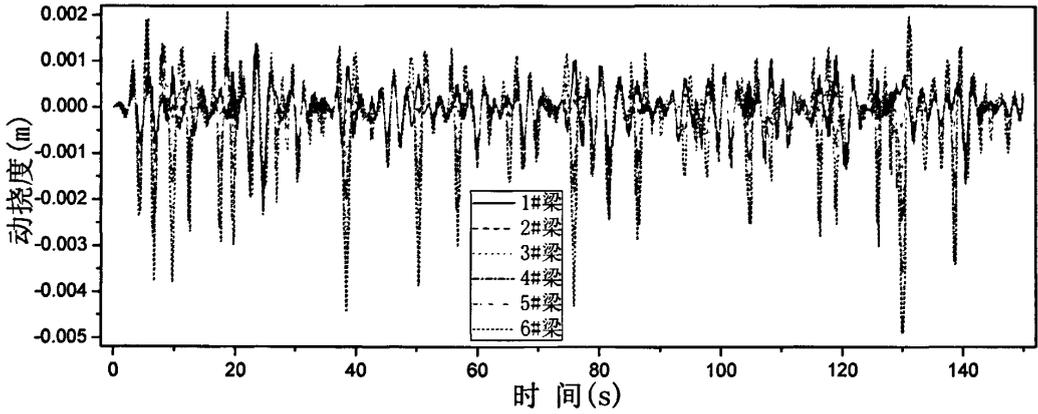


图 4.77 连续 T 梁桥湿接加整体层联结密集运营下双车道布载动挠度曲线

表 4.23 56.3S 时刻简支 T 梁桥密集运营下双车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.744	-2.140	-3.770	-3.730	-2.090	-0.727
	湿接	-1.730	-1.870	-1.960	-1.930	-1.780	-1.590
	湿接加整体层	-1.800	-1.910	-1.970	-1.950	-1.820	-1.670

表 4.24 125.5S 时刻简支 T 梁桥密集运营下双车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.144	-0.477	-1.670	-5.420	-12.100	-20.600
	湿接	1.560	-1.170	-4.060	-7.250	-10.800	-14.510
	湿接加整体层	0.439	-2.040	-4.660	-7.510	-10.640	-13.890

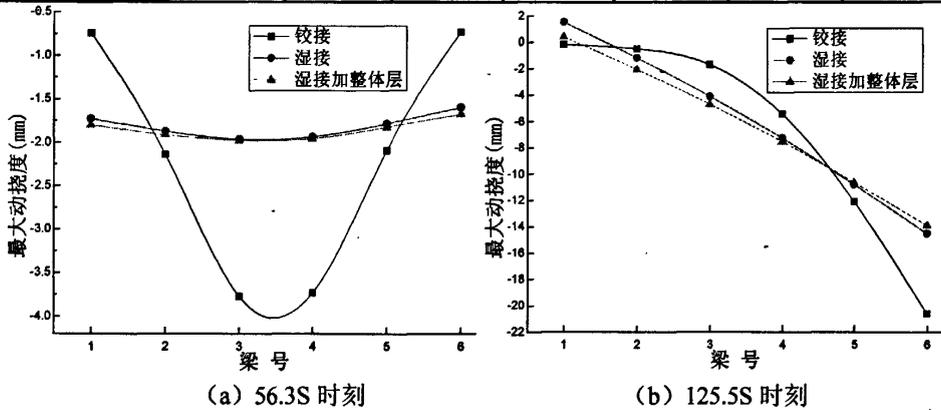


图 4.78 典型时刻简支 T 梁桥密集运营下双车道布载动挠度比较

表 4.25 22.5S 时刻连续 T 梁桥密集运营下双车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.265	-1.490	-3.270	-3.290	-1.960	-1.230
	湿接	-1.190	-1.520	-1.820	-1.950	-1.930	-1.860
	湿接加整体层	-1.290	-1.580	-1.820	-1.930	-1.920	-1.870

表 4.26 126.1S 时刻连续 T 梁桥密集运营下双车道布载各片梁跨中最大动挠度

梁号		1#	2#	3#	4#	5#	6#
最大动位移 ($\times 10^{-3}m$)	铰接	-0.035	-0.208	-0.566	-1.200	-2.190	-3.760
	湿接	0.222	-0.340	-0.933	-1.580	-2.300	-3.050
	湿接加整体层	0.320	-0.269	-0.886	-1.540	-2.260	-3.010

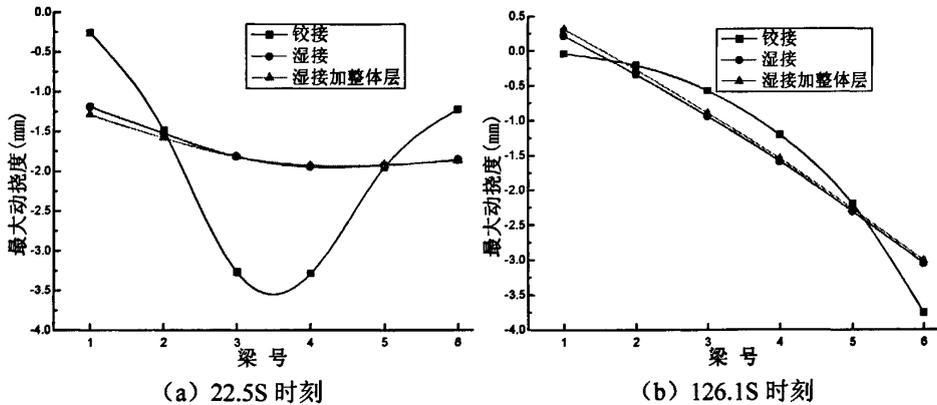


图 4.79 典型时刻连续 T 梁桥密集运营下双车道布载动挠度比较

由上述图表可见,密集运营状态和一般运营状态有相同的规律,即湿接加整体层联结的 T 形梁桥整体刚度最好,其次是湿接联结的 T 形梁桥,最差的是铰接联结的 T 形梁桥。在湿接联结的 T 形梁桥上现浇整体层可以提高整体刚度,但提高的效果不是很明显。并且在密集运营状态桥梁的动力响应要比一般运营状态强烈。

提取一般运营及密集运营下程序所计算的 150S 时间内 T 形梁桥的最大动挠度,见表 4.27。

表 4.27 150S 时间内 T 形梁桥的最大动挠度

荷载形式	结构型式	最大动挠度 (mm)		
		铰接联结	湿接联结	湿接联结加整体层
一般运营单车道	简支	-5.87	-3.28	-3.32
	连续	-3.30	-1.70	-1.63
一般运营双车道	简支	-5.87	-3.28	-3.32
	连续	-3.19	-1.70	-1.63
密集运营单车道	简支	-7.27	-3.95	-3.86
	连续	-4.47	-2.42	-2.37
密集运营双车道	简支	-21.31	-15.06	-14.27
	连续	-6.71	-5.17	-4.90

从表中数据可以发现,在一般运营单车道作用下,简支结构而言,铰接联结的 T 形梁桥的最大挠度均是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.77 倍,连续结构而言,铰接联

结的 T 形梁桥的最大挠度分别是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.94 倍和 2.02 倍，湿接联结的 T 形梁桥的最大挠度是湿接联结加整体层的 1.04 倍；在一般运营双车道作用下，简支结构而言，和单车道一样，连续结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大挠度分别是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.88 倍和 1.96 倍，湿接联结的 T 形梁桥的最大挠度是湿接联结加整体层的 1.04 倍；在密集运营单车道作用下，简支结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大挠度分别是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.84 倍和 1.88 倍，湿接联结的 T 形梁桥的最大挠度是湿接联结加整体层的 1.02 倍，连续结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大挠度分别是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.85 倍和 1.87 倍，湿接联结的 T 形梁桥的最大挠度是湿接联结加整体层的 1.02 倍；在密集运营双车道作用下，简支结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大挠度分别是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.42 倍和 1.49 倍，湿接联结的 T 形梁桥的最大挠度是湿接联结加整体层的 1.06 倍，连续结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大挠度分别是湿接联结及湿接联结加整体层的 1.30 倍和 1.37 倍，湿接联结的 T 形梁桥的最大挠度是湿接联结加整体层的 1.06 倍。

从各个运营状态比较来看，简支结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大动挠度要比湿接联结及湿接联结加整体层大 1.42 倍以上，其中在密集运营单车道作用下更达到了 1.88 倍；连续结构而言，铰接联结的 T 形梁桥的最大动挠度要比湿接联结及湿接联结加整体层大 1.3 倍以上，其中在一般运营单车道作用下更达到了 2.02 倍。我们知道，当结构的跨径、截面尺寸及材料相同时，挠度大则承受的力也大，所以，铰接联结所分配的力将大大高于其他两种联结方式，即铰接联结的“单梁受力”的受力缺陷非常明显。湿接联结的 T 形梁桥最大动挠度与湿接联结加整体层的相比，发现在密集运营状态下，湿接联结的 T 形梁桥的动挠度比湿接联结加整体层的大比较明显（能达到 1.06 倍），在湿接联结的 T 形梁桥上现浇整体层可以提高整体刚度，并且在密集运营状态下提高的效果比较明显。所以，在车流比较密集的线路上，在 T 形梁桥上现浇整体层还是有必要的。

4.3 本章小结

本章首先利用大型有限元程序 ANSYS 计算分析简支 T 形梁桥及六跨连续 T 形梁桥的前 10 阶模态，从模态的分析结果可以知道，铰接联结的横向联系很薄弱，整体刚度很差，其次是半刚半铰联结，以半刚半铰加整体层、联结湿接及湿接加整体层方式联结的 T 形梁桥的整体性非常好，整体刚度比较大。简支 T 形梁桥从铰接联结到半刚半铰联结，其横向联系及整体刚度有很明显的提高，而连续 T 形梁桥则不是很明显。

其次，在 ANSYS 中建立铰接联结、湿接联结及湿接联结加整体层的空间杆单元模型，BDANS 程序直接调入作为输入文件，计算分析了不同横向联结的 T 形梁桥在随机车流下的动力响应，分析发现：动力响应也存在横向分布，并且分布规律和静力问题基本一致。从不同联结的 T 形梁桥的动力响应横向分布可以看出，铰接联结的 T 形梁桥整体刚度比较差，即“单梁受力”的受力缺陷非常明显，湿接联结和湿接加整体层联结的 T 形梁桥整体刚度要好得多，桥面现浇混凝土整体层可以提高 T 梁的整体刚度，但提高的效果不是很明显，但对于在车流比较密集的线路上，在 T 形梁桥上现浇整体层还是有必要的。

第五章 实桥试验

5.1 试验方案及现场测试实施过程

本文试验实桥为前文算例所采用的河北省廊坊市廊泊公路改扩建工程永定河大桥，单跨标准跨径 $L=25.0\text{m}$ ，单幅桥面净宽为 12 米，主梁间距 2.2 米，单幅共 6 片梁，上部结构采用先简支后连续预应力混凝土 T 梁，预制吊装施工，每孔设置 6 道横隔梁，采用 6 孔一联，全桥共 3 联。下部结构为钻孔灌注桩基础，双柱式墩，桩直径 1.5 米，柱直径 1.3 米。T 梁混凝土采用 C50，钢绞线采用高强度低松弛 270 级 $\phi^s 15.24\text{mm}$ 的钢绞线。

5.1.1 试验的内容

通过对实桥的全面调查，选取了第二联的第四跨为试验跨。根据前文静动力的计算内容，本次试验主要进行以下内容的测试：

1、通过静载试验，测定桥梁各片 T 梁的静挠度，然后分析各片 T 梁间的分配系数，并与大型有限元程序算得的结果比较，从而验证理论计算的正确性；

2、通过动载试验，测试桥梁结构的自振频率、动力响应曲线，并与理论计算对比，验证理论计算的正确性。

5.1.2 测点布设及试验工况

1. 静载试验

在选取的试验跨（第二联第四跨）的跨中布设机电百分表，见图 5.1 所示。然后以一列车偏载、一列车中载、两列车偏载和两列车中载四个工况进行加载（具体加载位置见图 5.2），通过 DH3815 静态应变测试系统采集这些工况下的静载数据。

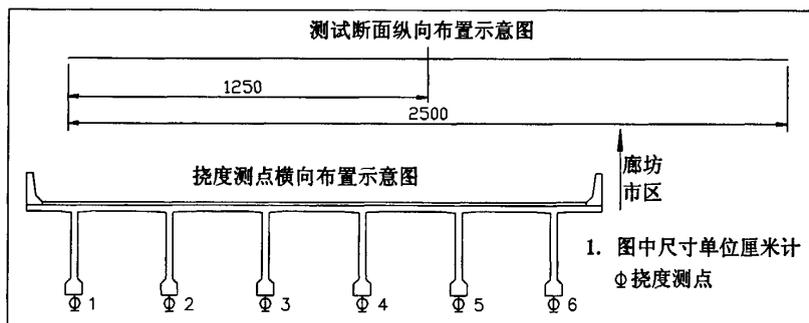


图 5.1 静载测点布设

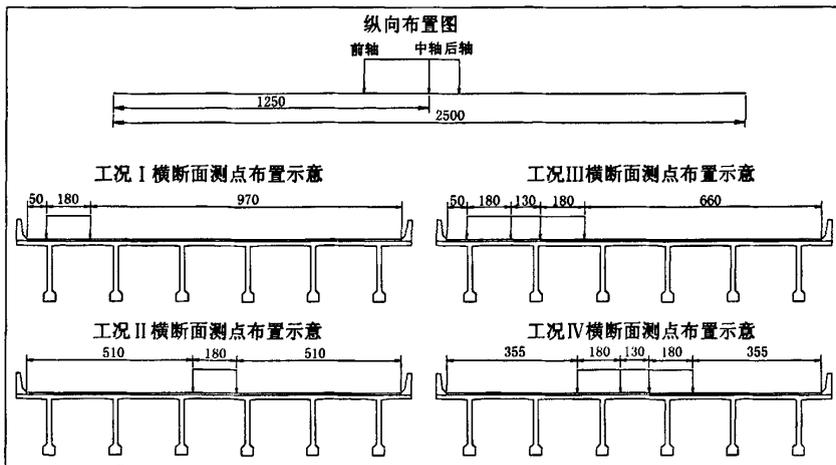


图 5.2 具体加载布载图

2. 动载试验

在选取的试验跨（第二联第四跨）的跨中桥面用橡皮泥粘贴东华 DH610 高灵敏度速度传感器测试桥梁的竖向振动频率，在跨中 1#，2#，5#，6#主梁底架设机电百分表测试桥跨结构在行车动荷载作用下的动态挠度增大效应，见图 5.3。然后进行以下工况的动力测试：

1) 单列车偏载（车辆中心线距 1#梁中心线 2.85 米）以 20km/h、40km/h 匀速通过桥梁，用 DH5920 动态信号测试分析系统采集出 1#，2#梁的动力响应；

2) 在跨中桥面上设置高度为 5cm 的障碍物，模拟桥面铺装局部损伤状态，用一辆载重汽车（车辆中心线距 1#梁中心线 2.85 米），以 20km/h、40km/h 匀速通过桥梁，用 DH5920 动态信号测试分析系统采集出 1#，2#梁的动力响应；

3) 两列车（车辆中心线分布距 1#梁中心线 2.85 米和 8.4m）同时以 20km/h、40km/h 匀速通过桥梁，用 DH5920 动态信号测试分析系统采集出 1#，2#梁的动力响应；

4) 开放交通，在随机车流下，采用 DH5920 动态信号测试分析系统采集 2#、6#T 梁的动力响应。

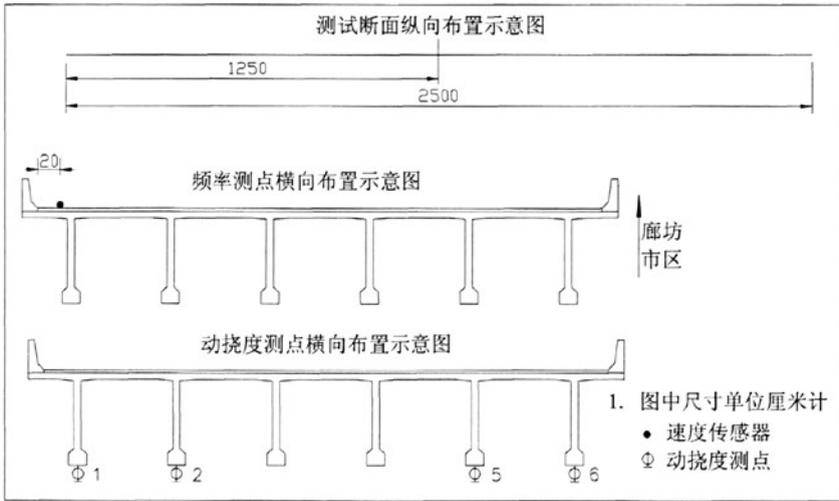


图 5.3 动载测点布设

5.1.3 现场测试实施过程



图 5.4 测点布设



图 5.5 测试仪器



图 5.6 速度传感器

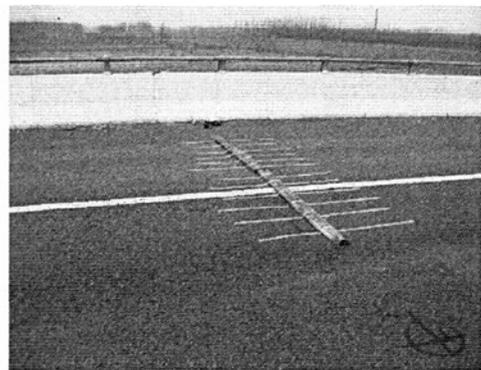


图 5.7 高度为 5cm 的障碍物



图 5.8 静载加载 (1)



图 5.9 静载加载 (2)



图 5.10 单列车无障碍行车



图 5.11 单列车有障碍行车



图 5.12 两列车无障碍行车 (1)



图 5.13 两列车无障碍行车 (2)

5.2 实测与理论比较

1. 静载数据比较

通过载重车加载得到各工况下各梁的挠度数据，见下列表格。

表 5.1 工况一作用下各梁挠度

梁号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
挠度 (mm)	2.67	1.95	1.20	0.52	0.14	-0.26

表 5.2 工况二作用下各梁挠度

梁号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
挠度 (mm)	0.72	1.04	1.41	1.4	0.98	0.68

表 5.3 工况三作用下各梁挠度

梁号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
挠度 (mm)	3.83	3.36	2.66	1.57	0.84	0.02

表 5.4 工况四作用下各梁挠度

梁号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
挠度 (mm)	1.49	2.11	2.56	2.58	2.14	1.61

为了与理论计算比较, 将各工况下各梁的挠度分别除以各自的挠度总和, 得到某种布载方式下各梁的实测分配系数, 并和理论分配系数 (湿接联结加整体层模型) 绘于同一图形中。

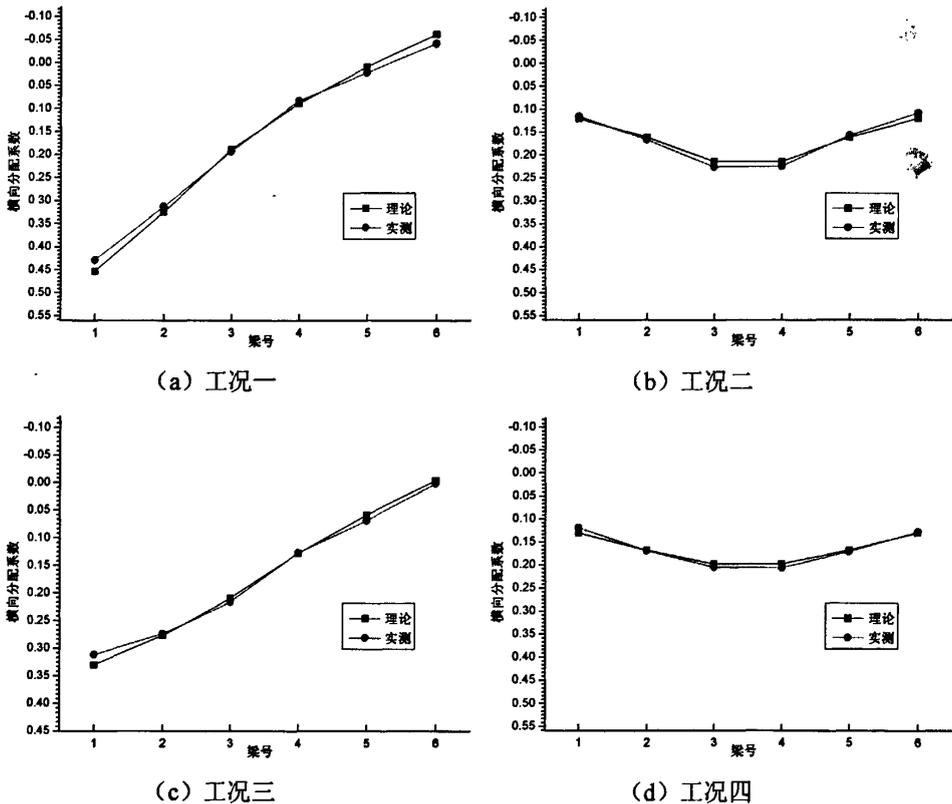


图 5.14 横向分配系数理论与实测的比较

由上述比较结果可以看出，理论计算与实测结果符合得很好，说明有限元实体计算模型是正确的，前文的理论计算是比较可靠的。同时，实测数据的曲线相比于理论计算曲线略微平缓一些，说明实际结构整体性要略好些，分析其原因是理论计算中没有考虑桥面铺装及护栏的作用等。

2. 动载数据比较

实测第四跨竖向一阶为 $f=7.42\text{Hz}$ ，理论计算第四跨竖向一阶为 $f=7.086\text{Hz}$ ，分别见图 5.15 和图 5.16 所示。由于模型计算中没有考虑桥面铺装及护栏的作用，故实测频率略大于理论计算值，通过计算误差仅为 4.5%，说明理论计算的有限元实体模型是正确的。

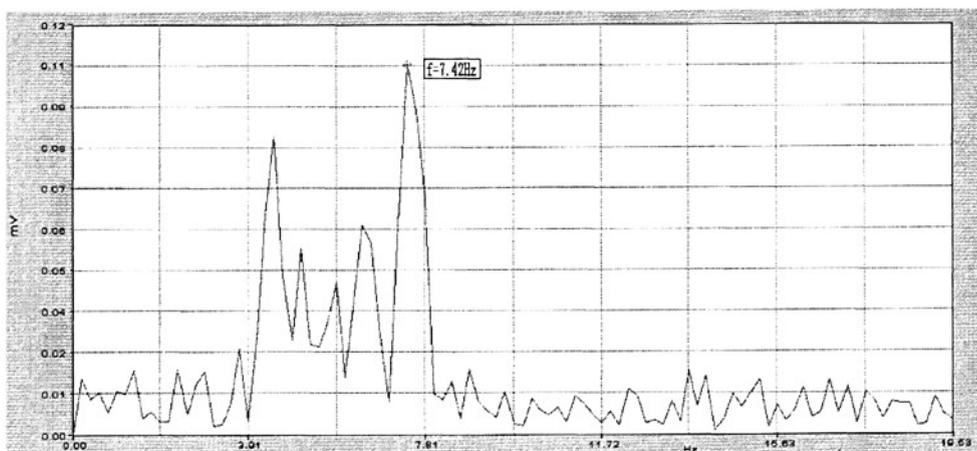


图 5.15 第四跨竖向一阶实测频率

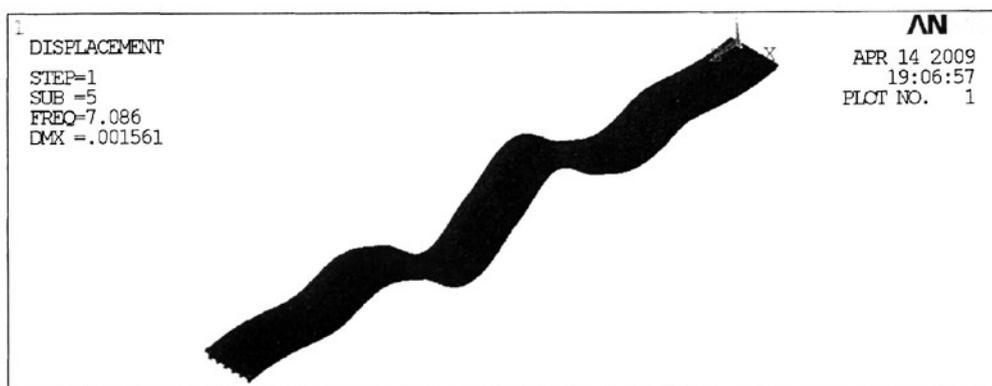


图 5.16 第四跨竖向一阶理论频率

跑车试验各工况实测动挠度数据及理论计算数据分别列于下列图表。

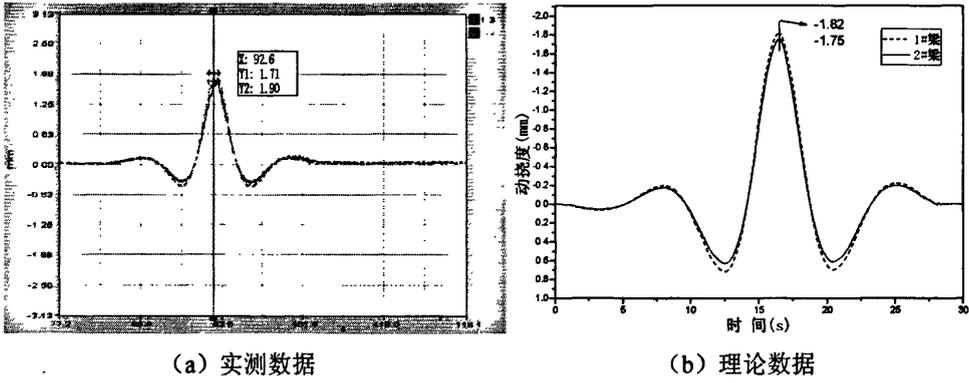


图 5.17 1#、2#梁单列车跑车动挠度曲线比较 (20km/h)

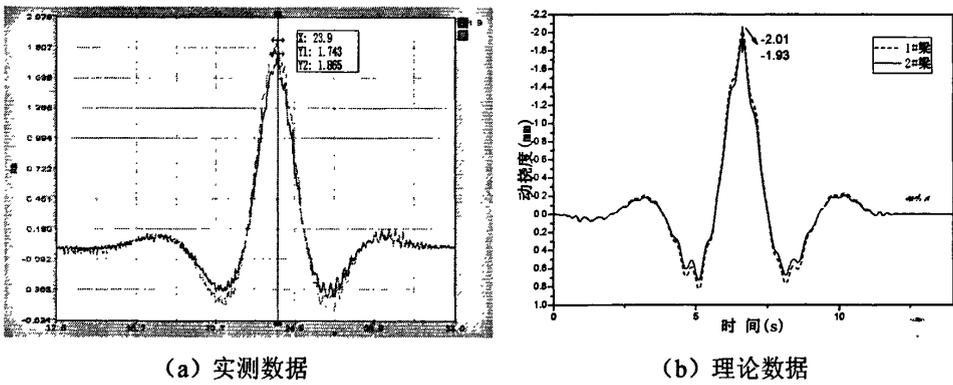


图 5.18 1#、2#梁单列车跑车动挠度实测曲线 (40km/h)

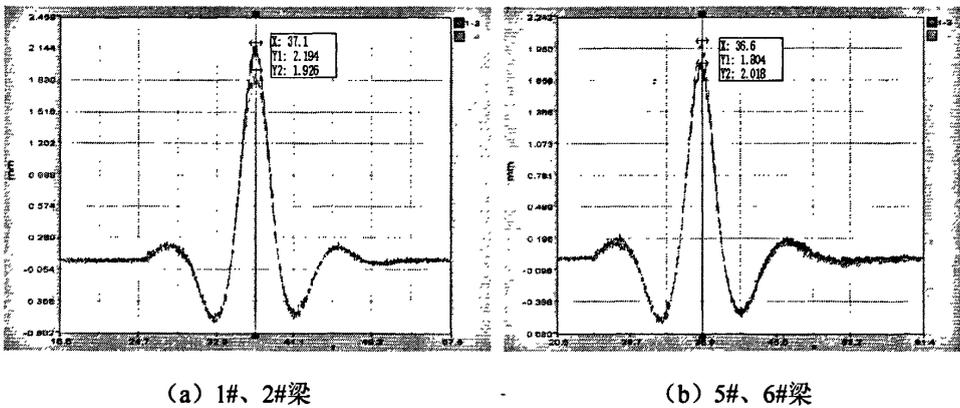


图 5.19 两列车跑车动挠度实测曲线 (20km/h)

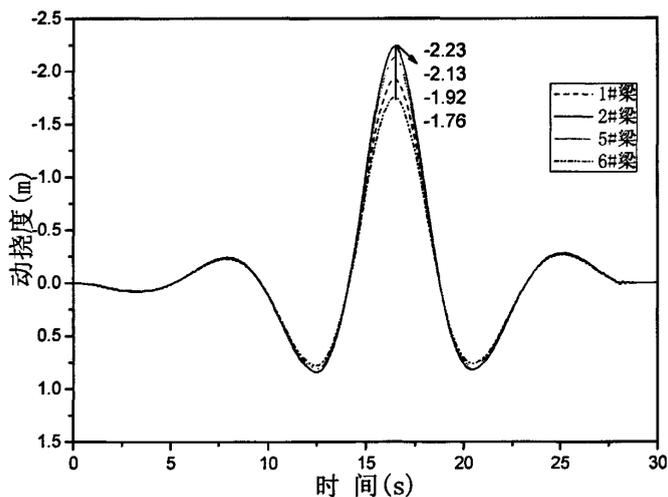
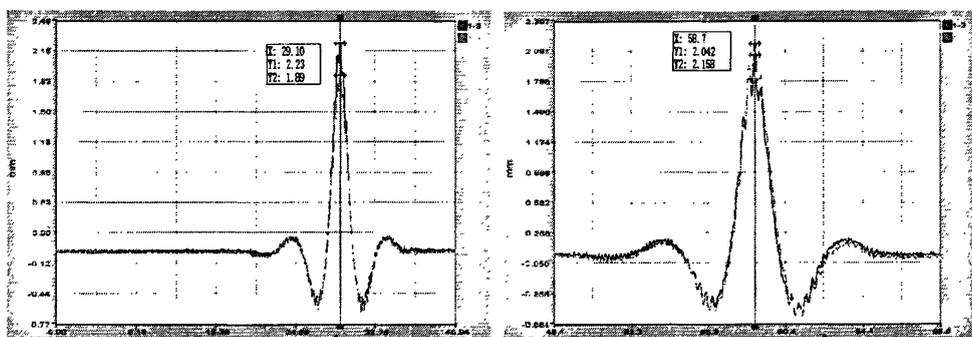


图 5.20 1#、2#、5#、6#梁两列车跑车动挠度理论曲线 (20km/h)



(a) 1#、2#梁

(b) 5#、6#梁

图 5.21 两列车跑车动挠度实测曲线 (40km/h)

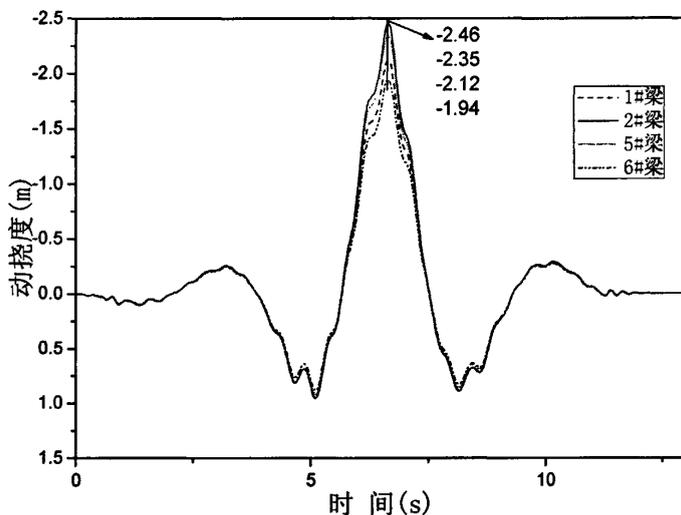


图 5.22 1#、2#、5#、6#梁两列车跑车动挠度理论曲线 (40km/h)

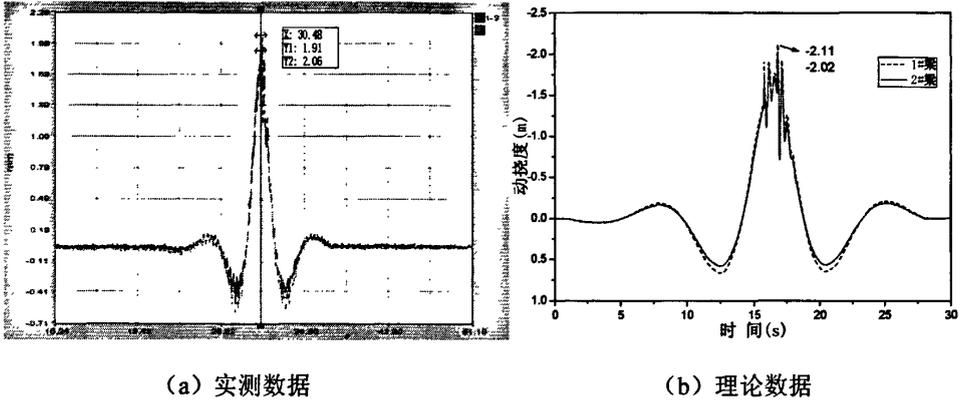


图 5.23 1#、2#梁单列车有障碍跑车动挠度曲线比较 (20km/h)

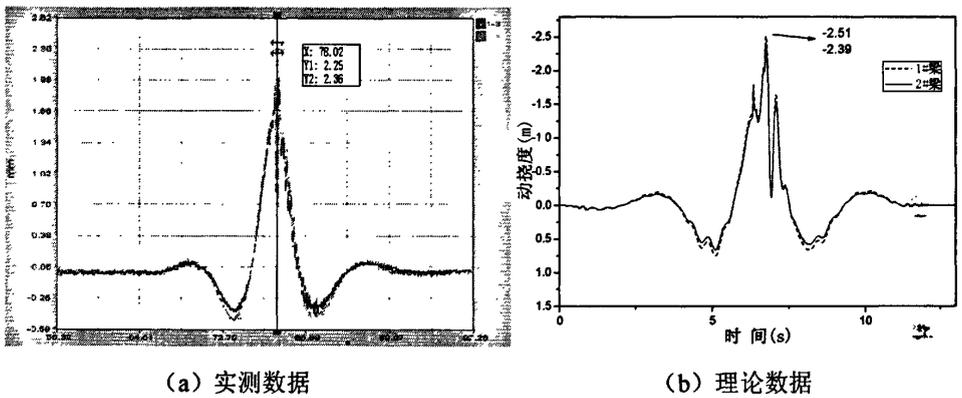


图 5.24 1#、2#梁单列车有障碍跑车动挠度曲线比较 (40km/h)

由图 5.17~图 5.24 可以看出：桥梁动力分析程序 BDANS 计算的动挠度曲线与实测曲线吻合的得很好。单列车以 20km/h 过桥时，1#、2#梁的最大动挠度分别为 1.82mm 和 1.75mm，实测值为 1.91mm 和 1.71mm，误差分别为 4.9%和 2.29%；单列车以 40km/h 过桥时，1#、2#梁的最大动挠度分别为 2.01mm 和 1.93mm，实测值为 1.87mm 和 1.74mm，误差分别为 6.97%和 9.84%；两列车以 20km/h 过桥时，1#、2#梁及 5#、6#梁的最大动挠度分别为 1.92mm、2.23mm 和 2.13mm、1.76mm，实测值为 1.93mm、2.19mm 和 2.02mm、1.80mm，误差分别为 0.52%、1.79%和 5.16%、2.27%；两列车以 40km/h 过桥时，1#、2#梁及 5#、6#梁的最大动挠度分别为 2.12mm、2.46mm 和 2.35mm、1.94mm，实测值为 1.89mm、2.23mm 和 2.04mm、2.16mm，误差分别为 10.8%、9.34%和 13.2%、11.3%；单列车以 20km/h 有障碍过桥时，1#、2#梁的最大动挠度分别为 2.11mm 和 2.06mm，实测值为 2.02mm 和 1.91mm，误差分别为 4.27%和 7.28%；单列车以 40km/h 有障碍过桥时，1#、2#梁的最大动挠度分别为 2.51mm 和 2.39mm，实测值为 2.36mm 和 2.25mm，误差分别为 5.98%和 5.86%。理论与实测的误差除了三个大于 10%外，其余都在 10%以

内，并且大部分在 5%以内。由此可见，说明理论计算模型是正确的，前文的理论计算是比较可靠的。同时，由于计算程序是以拟静力编写的，当车速比较低时，程序就把动力当成静力加载了，所以从图中可以发现，当车速以 20km/h 行驶时，理论计算的动挠度曲线基本没有振动，但车速到了 40km/h 时，动挠度曲线就有了振动。

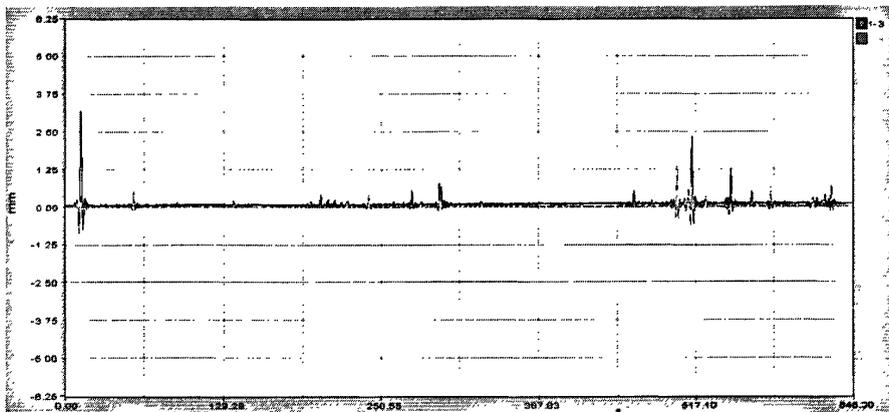


图 5.25 2# (1-4 通道)、6#(1-3 通道)梁随机车流下动挠度曲线

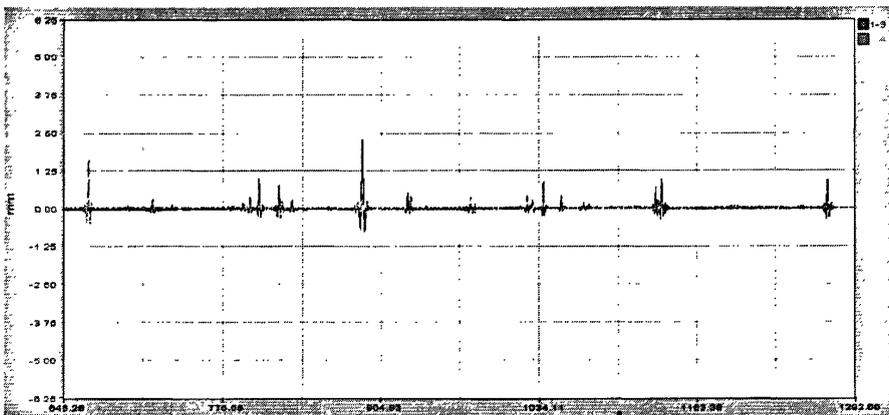


图 5.26 2# (1-4 通道)、6#(1-3 通道)梁随机车流下动挠度曲线续 1

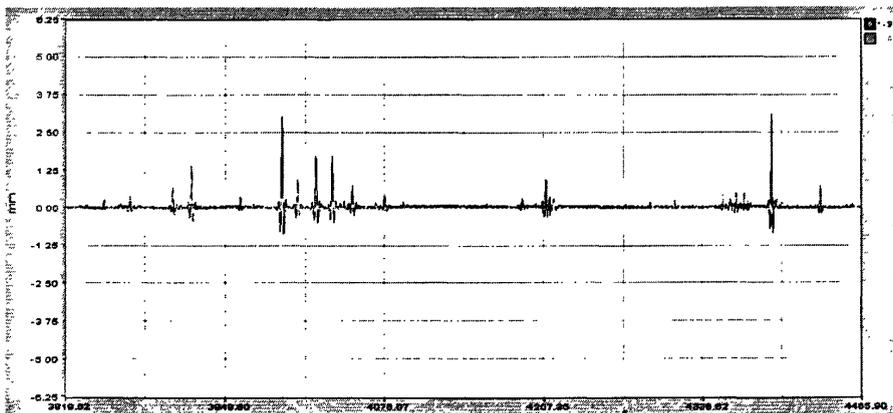


图 5.27 2# (1-4 通道)、6#(1-3 通道)梁随机车流下动挠度曲线续 2

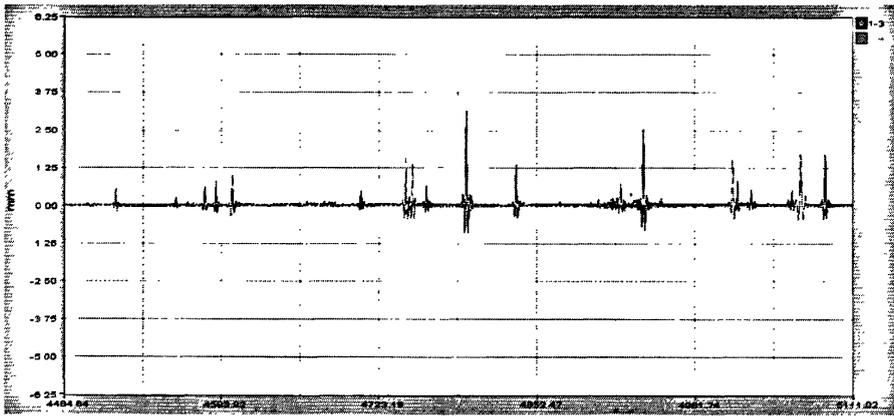


图 5.28 2# (1-4 通道)、6#(1-3 通道)梁随机车流下动挠度曲线续 3

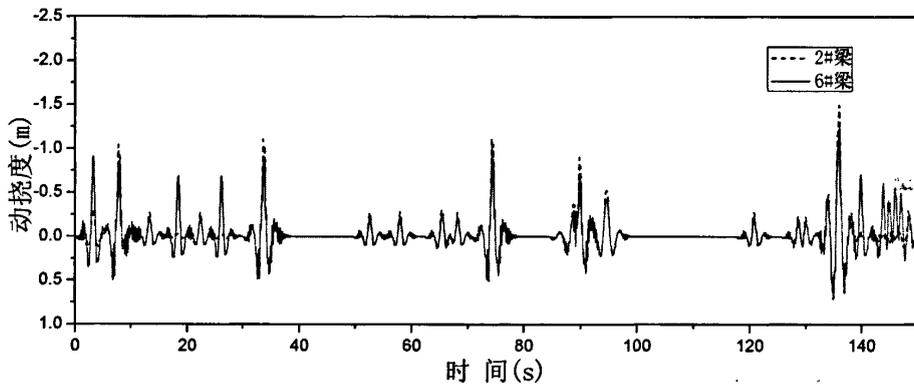


图 5.29 连续 T 梁桥湿接加整体层联结一般运营下双车道布载 2#、6#梁动挠度曲线

由图 5.25~图 5.28 给出了 2#、6#梁的部分随机车流下的动挠度时程曲线，图 5.29 提取了前文计算的连续 T 梁桥湿接加整体层联结一般运营下双车道布载 2#、6#梁的动挠度曲线。从图上看，实测动挠度曲线与理论计算的动挠度曲线在总体变化趋势上是比较相似的，即某些时刻 2#梁的挠度大，某些时刻则是 6#梁的挠度大，由于实测与理论计算的随机车流不是相同的，所以出现峰值的时间及最大幅值是不一样的，但总体来说，理论计算是可信的。

5.3 本章小结

本章对论文的依托工程进行了实桥试验，通过实测数据与理论数据的对比可以得出：

(1) 静力 ANSYS 理论计算模型与实测结果符合得很好，说明有限元实体计算模型是正确的。

(2) 实测第四跨竖向一阶为 $f=7.42\text{Hz}$ ，理论计算第四跨竖向一阶为 $f=7.086\text{Hz}$ ，实测频率略大于理论计算值，但误差仅为 4.5%，说明理论计算的有限元实体模型是正确的。

(3) 桥梁动力分析程序 BDANS 计算的动挠度曲线吻合实测曲线吻合得很好，理论计算与实测的误差基本都在 10%以内，并且大部分在 5%以内，说明理论计算模型是正确的。

(4) 在随机车流作用下，桥梁实测动挠度曲线与理论计算的动挠度曲线在总体变化趋势上是比较相似的，理论计算是可信的。

结论与展望

通过阅读大量国内外的文献，了解了桥梁横向分布系数及桥梁动力学的基本理论，论文利用大型有限元程序 ANSYS 建立不同横向联结的 T 形桥梁的实体模型，进行 T 形梁桥整体刚度的静力及模态分析，建立 ANSYS 空间杆单元模型，编制接口文件，结合桥梁动力分析程序 BDANS，计算其在随机车流下的动挠度，分析 T 形梁桥动力响应横向分布，并进行了实桥试验，验证了计算模型的正确性。现将结论总结如下：

1. 静力方面

(1) 在各种联结方式中，铰接联结的 T 形梁桥的整体刚度比较差，结构表现出“单梁受力”的受力缺陷，承受车轮压力的梁片受力较大，没有直接承受车轮压力的梁片则分配的荷载较小，湿接联结加整体层的联结方式整体刚度最好，而半刚半铰联结、半刚半铰联结加整体层及湿接联结的整体刚度依次介于其中。

(2) 湿接联结加整体层相对于湿接联结，整体刚度有一定提高，但效果不是特别明显，并且连续结构要比简支结构更不明显；同时，布载方式的不同，表现的效果也不同，偏载作用下要比中载作用下效果明显。

(3) 在半刚半铰联结的 T 梁顶加一层整体层能提高 T 形梁桥的整体刚度，并且对于连续结构以及简支结构的中载作用而言，效果非常明显，而对于简支结构的偏载作用下，效果就不是很明显了。

2. 动力方面

(1) 从模态的分析结果可以知道，铰接联结的横向联系很薄弱，整体刚度很差，其次是半刚半铰联结，以半刚半铰加整体层、湿接及湿接加整体层方式联结的 T 形梁桥的整体性非常好，整体刚度比较大，结构在前 10 阶振动中不会因为横向联系的破坏而破坏。

(2) 通过 BDANS 程序计算分析发现：动力响应也存在横向分布，并且分布规律和静力问题基本一致。从不同联结的 T 形梁桥的动力横向分布可以看出，铰接联结的 T 形梁桥整体刚度比较差，即“单梁受力”的受力非常明显；湿接联结和湿接加整体层联结的 T 形梁桥整体刚度要好得多，桥面现浇混凝土整体层可以提高 T 梁的整体刚度，但提高的效果不是很明显，但对于在车流比较密集的线路上，在 T 形梁桥上现浇整体层还是有必要的。

静力和动力两个方面的研究结果说明：铰接联结的 T 形梁桥的整体刚度比较差，湿

接联结加整体层的联结方式整体刚度最好，其他的介于其中，并且铰接联结到湿接联结其整体刚度有非常明显的提高，而湿接联结加整体层相对于湿接联结，其整体刚度提高的效果不是特别明显。对于早期采用了铰接或者是半刚半铰的横向联结方式的病、危 T 形梁桥，实际工程中经常凿除原来的桥面铺装，在 T 梁顶加铺一层钢筋网现浇层进行加固，这种加固方式对于连续结构而言可以起到不错的效果，桥梁的整体刚度有较大的提高；对于简支结构，荷载作用在桥梁中心范围内可以收到不错的效果，荷载作用在边梁范围内效果就不明显。故本文更建议将这些桥梁的翼缘板和横隔板重做湿接头，变铰接为刚接，并且对于车流比较密集的线路，在 T 形梁桥上现浇整体层。

本文在分析计算过程中还存在以下不足之处，需作进一步的探索和研究，比如：

(1) 本文湿接加整体层模型中，只模拟了加 10cm 整体层的一种情况，没有得出加多厚的整体层是最经济合理的结论，今后可对整体层的厚度的经济性做进一步研究，从而更好的指导设计。

(2) 本文动力方面只对模态及动挠度的做了研究，而没有对桥梁动力分析中的另一个重要参数——冲击系数，在不同联结方式桥梁中的分布情况进行分析，这方面在今后需进一步的研究。

(3) 本文没有对实测随机车流的车速、车型、车重等作统计，不能计算出该桥的实际车流下的各梁的动力响应，与实测随机响应作对比，今后需进一步深入交通调查的工作，完成对交通调查资料的不断积累，建立研究背景桥梁实际作用的随机车流荷载谱。

参考文献

- [1] 交通部规划司. 2007 年公路水路交通行业发展统计公报[R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2008.4
- [2] 李国豪, 石洞. 公路桥梁荷载横向分布计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.6
- [3] 范立础. 桥梁工程(上册). 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] 胡肇滋. 桥梁结构简化分析—荷载横向分布[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996
- [5] 雷晓红. 荷载横向分布系数在混凝土梁桥加固检测中的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [6] 李小珍. 高速铁路列车—桥梁系统耦合振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [7] IM Biggs. Introduction to Structural Dynamics[M]. McGraw-Hill Book Co., Inc, New York, 1964.
- [8] Lryba. Vibration of Solids and Structures under Moving Loads[M]. Noordhoff international, Publishing, Groningen, the Netherlands, 1972.
- [9] Timoshenko 著, 胡人礼译. 工程中的振动问题[M]. 北京: 中国铁道出版社出版, 1978.
- [10] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动(修订版)[M]. 北京: 中国铁道出版社出版, 1996.
- [11] Gupta R K. Dynamic Loading of Highway Bridges. Proc ASCE V 106 EM2, 1980.
- [12] Wird H.S. Traffic Generated Vibrations and Bridge Integrity, Journal of Structural Engineering. ASCE, 1984, 110(10), 2487-2498
- [13] Wiryachi A. Impact and Fatigue in Open-deck Railway Truss Bridge. Ph.d Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois, 1980.
- [14] M Olsson. Finite Element Model Co-ordinate Analysis of Structures Subjected to Moving Loads, Journal of Sound & Vibration, 1985, 99(1): 1-12
- [15] Kawatani, M. and Komatsu, S. Nonstationary random response of highway bridges under a series of moving vehicles[J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, JSCE, 1988, No.2, 285-292
- [16] Kawatani, M. and Shimada, T. Nonstationary random response and impact of girder bridge under moving vehicles[J], proceeding of JSCE, 1988, 398/I-10, 303-309

- [17] Wang T.L., Huang,D.Z., Cable-stayed bridge vibration due to road surface roughness[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, 118(5): 1354-1373
- [18] Yeong-Bin Yang, Bing-Houng Lin. Vehicles-Bridge Interaction Analysis by Dynamic Condensation Method[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(11): 1636-1643
- [19] Yeong-Bin Yang, Shu-Shyan Liao, Bing-Houng Lin. Impact Formulas for Vehicles Moving over Simple and Continuous Beams[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(11): 1644-1650
- [20] 谭国辉. 桥梁与车辆相互作用的系统模拟[J]. 土木工程学报, 1996, 29(3): 34-41
- [21] 盛国刚, 彭献, 李传习. 车桥耦合系统的动力特性分析[J]. 长沙铁道学院学报, 2003, 19(4): 10-13
- [22] 张宏杰, 曹艳梅, G.DeRoeck. 车桥耦合系统在随机激励下的动力分析及其应用[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 142-149
- [23] 严志刚, 陈彦江, 盛洪飞. 钢管混凝土拱桥在车辆荷载作用下的非线性动力响应分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 58-62
- [24] 张军, 江克斌, 胡业平. 车桥耦合动力学系统模态综合分析[J]. 解放军理工大学学报, 2003, 20(3): 142-149
- [25] 黄华. 钢筋混凝土梁桥在车辆荷载谱作用下的动力性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [26] 许峰炜. 简支板梁桥车桥振动的横向分布特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [27] 杨建荣. 车—桥耦合作用下公路桥梁局部振动研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [28] 贺拴海, 谢仁物. 公路桥梁荷载横向分布计算方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [29] 宋一凡. 公路桥梁动力学. 北京: 人民交通出版社出版, 2000.
- [30] R.克拉夫, J.彭津著. 王光远译, 结构动力学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [31] 徐赵东, 马乐为编著. 结构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [32] 俞载道. 结构动力学基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.
- [33] 罗维刚. 基于匀速跑车的公路桥梁动力响应分析及性能测试方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.

[34] 田苗苗. 公路桥梁在行车荷载作用下的振动研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.

[35] 姚玲林, 程翔云. 钢筋混凝土梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982

[36] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.4

[37] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.10

[38] 张立明. Algor、Ansys 在桥梁工程中的应用方法与实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.9

[39] ANSYS Element Reference [M], Electronic Release SAS IP Inc, 1998.

[40] 刘真岩 周建斌. 旧桥维修加固施工方法与实例[M], 北京: 人民交通出版社, 2005.

[41] 李扬海, 鲍卫刚, 郭修武等. 公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.

致 谢

本论文是在导师黄平明教授和孙胜江副教授悉心指导下完成的。黄老师严谨的治学态度、渊博的学识、丰富的工程实践经验是我一生学习的典范。在过去的近三年的时光里，黄老师除了给我的学习和生活无微不至地关怀外，还给我创造了许多工程实践的机会，使我的实际工作能力得到了锻炼，为我在今后的工作中打下了坚实的基础。作者谨向黄老师致以诚挚的敬意和深深的感谢！

特别感谢孙胜江副教授，在论文写作的过程中，他从百忙之中抽出时间指导我做了实桥试验，并且总是不厌其烦地为我解答各种疑难问题，并提出了很多宝贵的意见。同时，在我的硕士研究生期间，孙老师在我的学习和生活上给予了极大的关心和帮助。在此表示衷心的感谢。

感谢课题组梅葵花副教授、许汉铮副教授以及王蒂老师，他们不仅给我在论文上进行无私地指导，而且在精神上给我极大的鼓励。特别感谢韩万水老师，在我的论文写作初期一直到成稿，给了我许许多多的指导以及宝贵的建议。在此向他们表示衷心的感谢！

感谢课题组的诸位同门及师兄弟，正是在与他们朝夕相处的日子里，大家相互帮助，相互学习，不但使生活中充满了乐趣，在学习上也让我掌握了更多的知识，在参与课题组的工作过程中，让我更深刻地体会到团队合作精神的力量。

最后，感谢评阅本论文和出席论文答辩的各位专家、教授在百忙中给予本人的指导。

徐建炜

2009年4月于长安大学