

铁路新型轨下基础应力计算

王其昌 陆银根 编

中国铁道出版社

1987年·北京

序

为了适应铁路新的运营条件,加强铁路轨道的承载能力,提高运行的稳定性和确保安全,近年来,在国内外一些铁路上采取了一系列加强和改善传统铁路轨道结构型式的技术措施。在这种情况下,以少维修为目的的新型轨下基础结构得到了迅速发展。随着轨下基础新结构的出现,其设计理论与计算方法也自然随之有所发展。

本书在第1章中概括地介绍了国内有关新型轨下基础结构方面的情况,以使读者了解其历史演变、现状和发展,并注意把实际工程结构与简化抽象的地基模型紧密地联系起来;第2、3、4章,则针对各种不同状态下的新型轨下基础的结构型式,给出了各种受载条件下的弹性地基梁、弹性地基叠合梁的微分方程解析法、初始参数法和链杆法等具体解法,以便读者了解利用不同的弹性地基模型,用弹性地基梁法计算新型轨下基础的各种不同途径。

为了进一步完善计算方法,使地基模型更为接近于工程结构物的实际(钢筋混凝土板体),在第5章里,还编入了弹性地基板双垫层系数法。采用双垫层系数的弹性地基模型,这是对文克勒模型的推广,而文克勒模型则是双垫层系数地基模型的特例。

第6章中介绍了用有限元法计算新型轨下基础的内容。有限元法是利用电子计算机,根据变分原理求解数理问题的一种数值计算方法。它不仅易于处理复杂的边界条件,而且特别适用于结构形状以及载荷方式任意的情况。因此,有限元法是计算新型轨下基础的一种有效方法。

本书内容在编写上既考虑到作为铁道工程、隧道及地下铁道等专业的教学参考书,又顾及现场工程技术人员和科研人员的需要。在着重阐述基础理论的同时,力求做到便于自学,便于实际工程的具体应用。此外,我们还希望它能作为铁路工程技术人员深入研究新型轨下基础结构设计与计算方法的入门。本书编写分工:第2章的2.1~2.3,2.5,第4章的4.1~4.6以及第6章的6.3等节内容由王其昌编写;第1章,第2章的2.4,2.6,第3章,第4章的4.7,4.8,第5章,以及第6章的6.1,6.2等节内容由陆银根编写。由于编者的水平所限,书中的不当之处以至谬误在所难免,希读者指正。

本书的编写,承蒙铁道工程教材编审委员会的指导,长沙铁道学院赵方民、王远清、张圻宇等教授的仔细审阅和热情帮助,在此深表感谢。

编 者

1986年2月

内 容 简 介

本书较详细地介绍了铁路新型轨下基础结构的应力计算方法。讲述了各种受载条件下的弹性地基梁、弹性地基叠合梁的微分方程解析法、初始参数法和链杆法的具体解法,以及各种不同的计算途径、假定条件和理论基础,并辅以必要的算例。

为便于利用电子计算机进行计算,书中还介绍了有限元法计算的内容,并对各种计算方法给出了计算流程图。

本书可供铁道线路、隧道及地下铁道专业技术人员、科研人员、铁路大专院校师生和研究生参考。

铁路新型轨下基础应力计算

王其昌 陆银根 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 陈 健 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京市华东印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 11 字数: 237 千

1987年11月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3,000册 定价: 2.50元

目 录

1. 新型轨下基础	1
1.1 概 述	1
1.2 结构类型	1
1.3 结构应力计算分析	11
2. 弹性地基梁文克勒解	15
2.1 文克勒模型基本原理	15
2.2 集中荷载作用时的无限长梁	17
2.3 分布荷载作用时的无限长梁	19
2.4 电子计算机计算钢轨压力的流程图	21
2.5 有限长梁的微分方程解析法	23
2.6 有限长梁的初始参数法	45
3. 弹性地基梁链杆法解	63
3.1 链杆法原理	63
3.2 系数项 δ_{K_i} 的确定	64
3.3 用链杆法解平面问题	69
3.4 用链杆法解空间问题	69
3.5 边荷载的影响	69
3.6 粘合梁的计算	70
3.7 链杆法计算流程图及习题	73
4. 弹性地基叠合梁的计算	78
4.1 弹性地基叠合梁的挠曲线微分方程	78
4.2 弹性地基叠合梁的文克勒解	78
4.3 微分方程组的代入法解	80
4.4 各种荷载条件下的解	81
4.5 轨道连接条件	89
4.6 板式轨道纵向变形算例	90
4.7 弹性地基叠合梁计算流程图	97
4.8 弹性地基叠合梁的链杆法解	98
5. 弹性地基板双垫层系数法解	100
5.1 基本假设	100
5.2 双垫层系数弹性地基模型	102
5.3 双垫层系数弹性地基板的挠曲微分方程式	106
5.4 具有自由边的弹性地基矩形板在对称荷载下的近似计算	112
5.5 具有自由边的弹性地基矩形板的一般加载情况的近似解	116

- 5.6 算 例134
- 6. 新型轨下基础有限元法解140
 - 6.1 有限元法的应用140
 - 6.2 用有限元法解平面问题141
 - 6.3 板式轨道有限元法应力分析161
- 参考文献169

1. 新型轨下基础

1.1 概 述

铁路轨下基础，一般是指轨道中位于钢轨以下的轨枕和道床两个组成部分。自1957年开始，我国铁路大量铺设钢筋混凝土轨枕以来，轨道有了进一步地加强。然而，它仍保留着传统轨道结构轨下基础的特征。随着铁路运输事业的迅速发展，运量、轴重和行车速度的不断增长，传统轨下基础的变形积累过程急剧加快，使修理周期日益缩短。为了保持轨道的经常良好状态，必须不断地进行维修作业，由于这种作业大多与扰动碎石道床有关，因此，频繁的维修作业不但会影响轨道的稳定性，而且在行车密度相当高的线路上，行车间隔时间越来越短，靠行车间隔完成轨道养护作业就越发难以实现，这给铁路行车与工务部门的工作造成很大困难。日益繁忙的运输任务迫切地需要轨道结构的加强和更新。

此外，随着山区铁路长大隧道以及大都市地下铁道的修建，也极需改善长大隧道内维修作业的工作条件，尽量缩短洞内作业的停留时间和减轻劳动强度。因此，自1966年开始，在长大山岭隧道内大量采用整体道床，在地下铁道内也几乎全部采用整体道床，在运输繁忙的干线和重轨轨道上，则采用宽混凝土枕等新型轨下基础。

宽混凝土枕线路与混凝土枕线路相比，其板底道床覆盖面积约增加一倍，从而大大降低道床变形积累的速度；整体道床则是将由松散道碴堆筑的道床代之以混凝土整体，并且将轨枕与道床联成一体，而从根本上改变了轨下基础的受力变形过程。由此，统称之为新型轨下基础。随着轨道新结构的发展，新型轨下基础的结构还将不断得到发展。

目前，铁路新型轨下基础主要是指宽混凝土枕（以下简称轨枕板线路）、隧道及地下铁道整体道床。此外，还有沥青道床、沥青道床板式轨道、道岔整体道床，以及车站、厂矿、大型仓库专用线整体道床、港口码头整体道床等。

1.2 结构类型

1.2.1 轨枕板线路

轨枕板线路是用预应力混凝土宽轨枕密排铺设在碎石道床上的一种新型轨道结构。它是由钢轨、宽混凝土枕、橡胶垫板、弹性扣件以及普通碎石道床所组成。

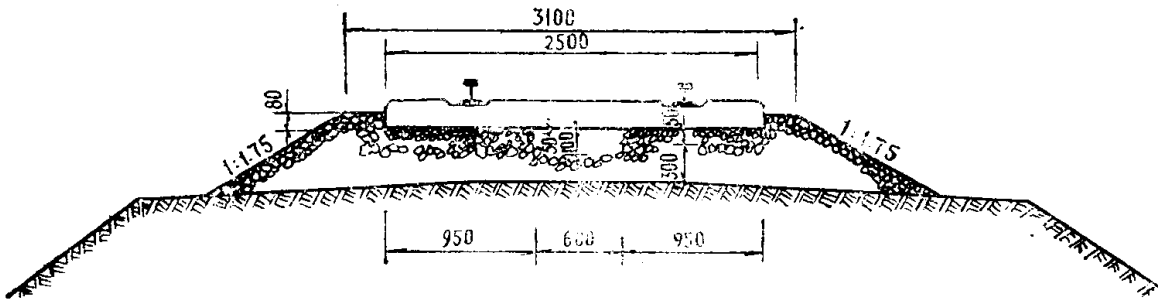


图 1—1

宽度为55cm, 轨下断面高度为15~17cm, 中间断面高度为15cm。

弦76型宽混凝土轨枕的断面尺寸及总重与筋76型相同。预应力钢丝按两种方式配置, 一种为60根直径3mm, 极限强度为1470MPa的钢丝, 重8.25kg。另一种为64根直径3mm, 极限强度为1372MPa的钢丝, 重8.8kg。箍筋10根直径6mm (3号钢) 重2.32kg。总用钢量为10.57kg或11.12kg。

65—A型为预应力钢弦宽混凝土轨枕, 采用直径3mm极限强度为1470MPa的高强度钢丝56根, 3号钢直径6mm箍筋10根; 65—B型为预应力钢筋宽混凝土轨枕, 采用冷拉3%直径12mm极限强度 $\sigma_p=88260\text{MPa}$ 的高强度钢筋8根, 3号钢直径6mm箍筋12根; 筋76型采用直径8.2mm极限强度 $\sigma_p=1470\text{MPa}$ 的高强度钢筋8根, 3号钢直径6mm箍筋10根。

(b) 轨枕板线路道床

预应力宽混凝土枕线路采用碎石道床, 其厚度在土质路基上无垫层时, 应不小于350mm, 有垫层时应不小于250mm。在石质路基上、隧道内及有碴桥面上, 应不小于200~250mm。

道床的顶面宽度, 应不小于3.1m, 边坡应不陡于1:1.75。道床两侧碴面应与预应力宽混凝土枕端部顶面齐平。

道床必须清筛洁净, 并充分碾压坚实。底碴粒径为25~70mm。底碴上铺设两条宽900~1000mm, 厚50mm, 粒径为20~40mm的面碴带。

(2) 轨枕板线路扣件

轨枕板线路采用弹条I型扣件 (见图1—4)。

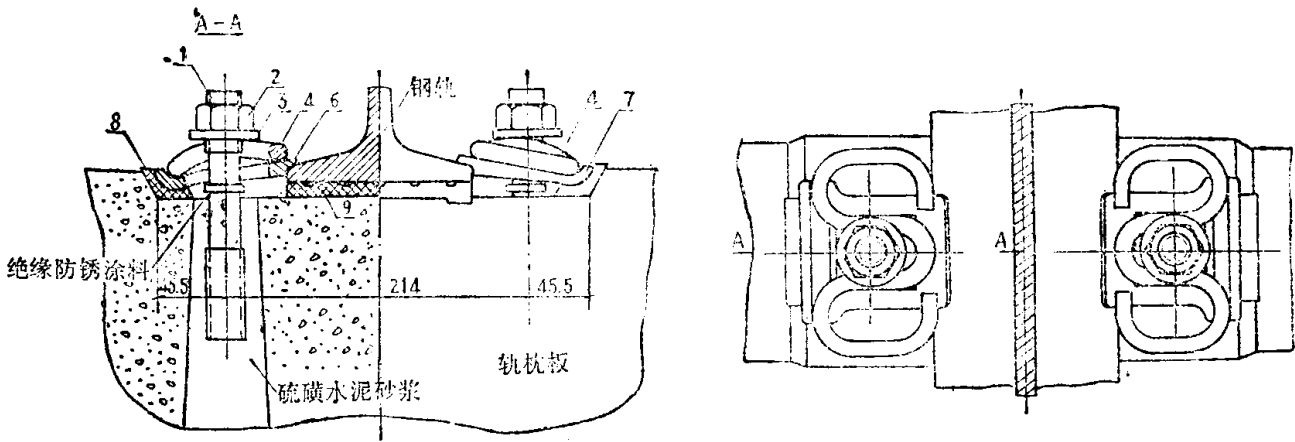


图1—4

- 1——螺纹道钉; 2——螺母; 3——平垫圈; 4——8号弹条; 5——2号弹条; 6——8号轨距挡板;
7——2号轨距挡板; 8——挡板垫; 9——绝缘缓冲垫板。

弹条呈 ω 形, 用13mm直径的弹簧圆钢制成。配合使用10mm厚的橡胶垫板, 使得扣件具有良好的弹性和足够的扣压力, 钢轨与轨枕板联结牢固。当螺帽拧紧到正常工作状态时, 弹条对钢轨的扣压力可达7305N, 而当弹条松弛1.5mm时, 仍可保持6374N的扣压力。弹条扣件具有良好的防爬性能。

由于宽轨枕的承轨槽宽度、道钉孔距以及轨底坡等尺寸均与混凝土枕相同, 故扣件可两者通用。宽轨枕亦可使用70型扣板式扣件。

1.2.2 整体道床线路

整体道床是一种在坚实基底上直接灌筑混凝土以取代道碴层的新型轨下基础。由于它取消了传统轨道的薄弱环节——道碴层，所以不仅能保持线路的持久稳定性、平顺性，还能大幅度地减少线路的养护维修工作量，并在很大程度上能减轻劳动强度，改善劳动条件。

(1) 隧道整体道床的结构型式

隧道整体道床的结构型式，按排水沟的设置方式分为中心沟式及侧沟式；按钢轨支承的方式分为钢筋混凝土支承块式、短木枕式及与混凝土道床直接联结式。

(a) 预埋钢筋混凝土支承块式

它由钢筋混凝土支承块、混凝土道床、隧道底部构造及排水沟等组成。

预埋钢筋混凝土支承块中心水沟式整体道床示于图 1—5。

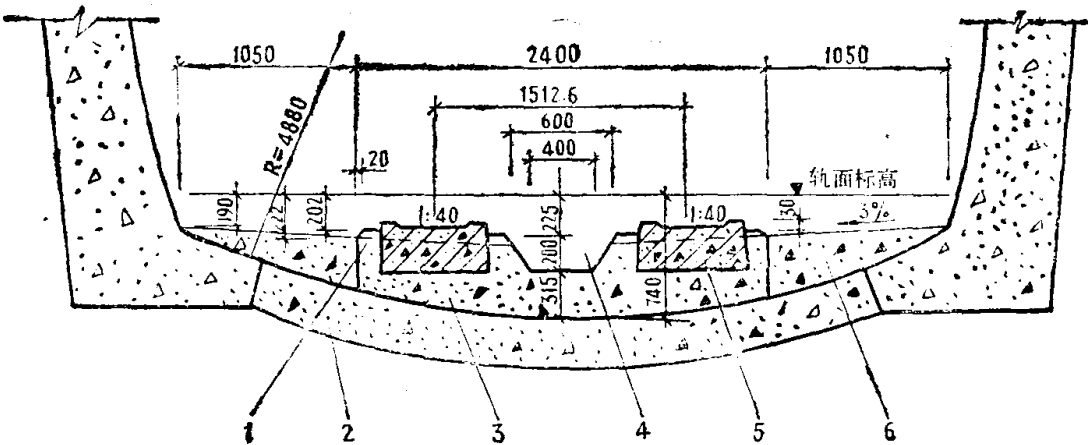


图 1—5

1——道床表面排水小沟；2——150号混凝土仰拱；3——300号混凝土道床；4——中心沟；5——500号钢筋混凝土支承块；6——150号混凝土人行道。

预埋钢筋混凝土支承块双侧水沟式整体道床示于图 1—6。

(b) 短木枕式

这种型的整体道床与混凝土支承块式的区别在于用短木枕作为钢轨支承。

(c) 直接联结式

钢轨与混凝土道床的联结，不是通过在道床中预埋混凝土支承块或短木枕，而是把钢轨扣件的螺纹道钉，直接与预埋在道床混凝土中的联结套管相联，或锚固于预留在道床混凝土内的锚固孔中。

直接联结式整体道床，它取消了道床体内与钢筋混凝土支承块或短木枕的粘结问题，从而大大提高了混凝土道床的整体性。

(2) 特殊作业线整体道床的结构型式

特殊作业线不但供机车车辆走行，而且在其上进行着多种技术作业。例如，车站作业线（机车车辆库段的准备作业线、加冰线、酸洗线、洗罐线），厂矿、大型库栈以及港口码头的作业线（散粒货物、液体油类以及粉末状毒品货物装卸线），为了使生产人员走行方便，提高劳动效率，保证生产安全，普遍修筑整体道床。特殊作业线大多位于土质路基上，土质路基承载力较低，对动力荷载及水侵蚀的反应敏锐。因此，土质地基上整体道床的修建，必需特别重视土质地基的加强处理和排水设施的设置。

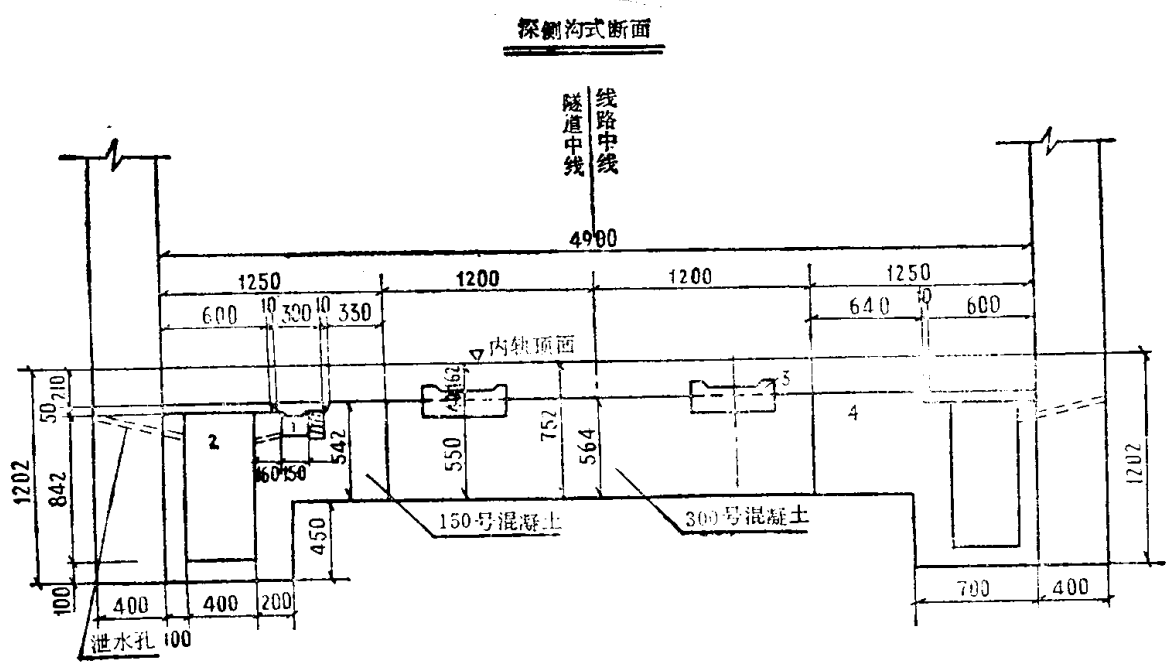
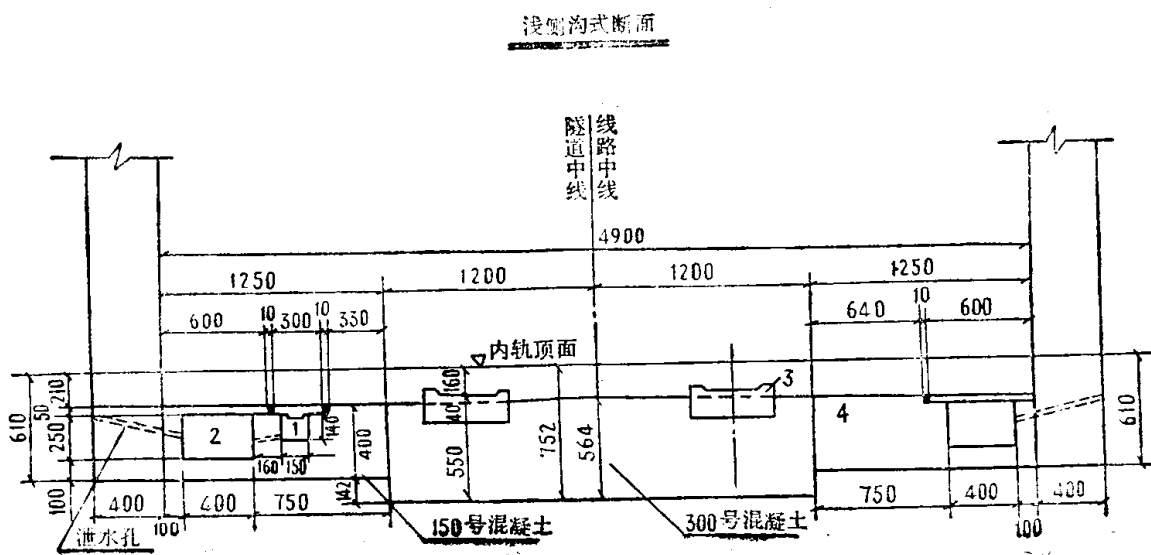


图 1—6
1——电缆槽；2——侧沟；3——500号混凝土支承块；4——人行道。

在我国铁路上，业已建成的有：丰台站货车洗刷线整体道床（图 1—7）；西安站客车洗刷线整体道床（图 1—8）；上海吴泾化工厂卸油线整体道床（图 1—9）及上海石化总厂仓库线整体道床（图 1—10）等类型。

1.2.3 沥青道床线路

沥青道床，是用沥青材料作为粘合剂，将散粒道碴固结为一体，或用沥青混凝土、沥青砂代替碎石道床。它和混凝土整体道床具有共同的优点。此外，沥青材料便于再加工。因此，沥青道床更宜铺设于土质路基上，一旦发生路基下沉变形，道床产生病害，修复也较容易。

沥青道床和钢筋混凝土轨枕配合使用，称为钢筋混凝土轨枕无碴线路；它和混凝土宽轨

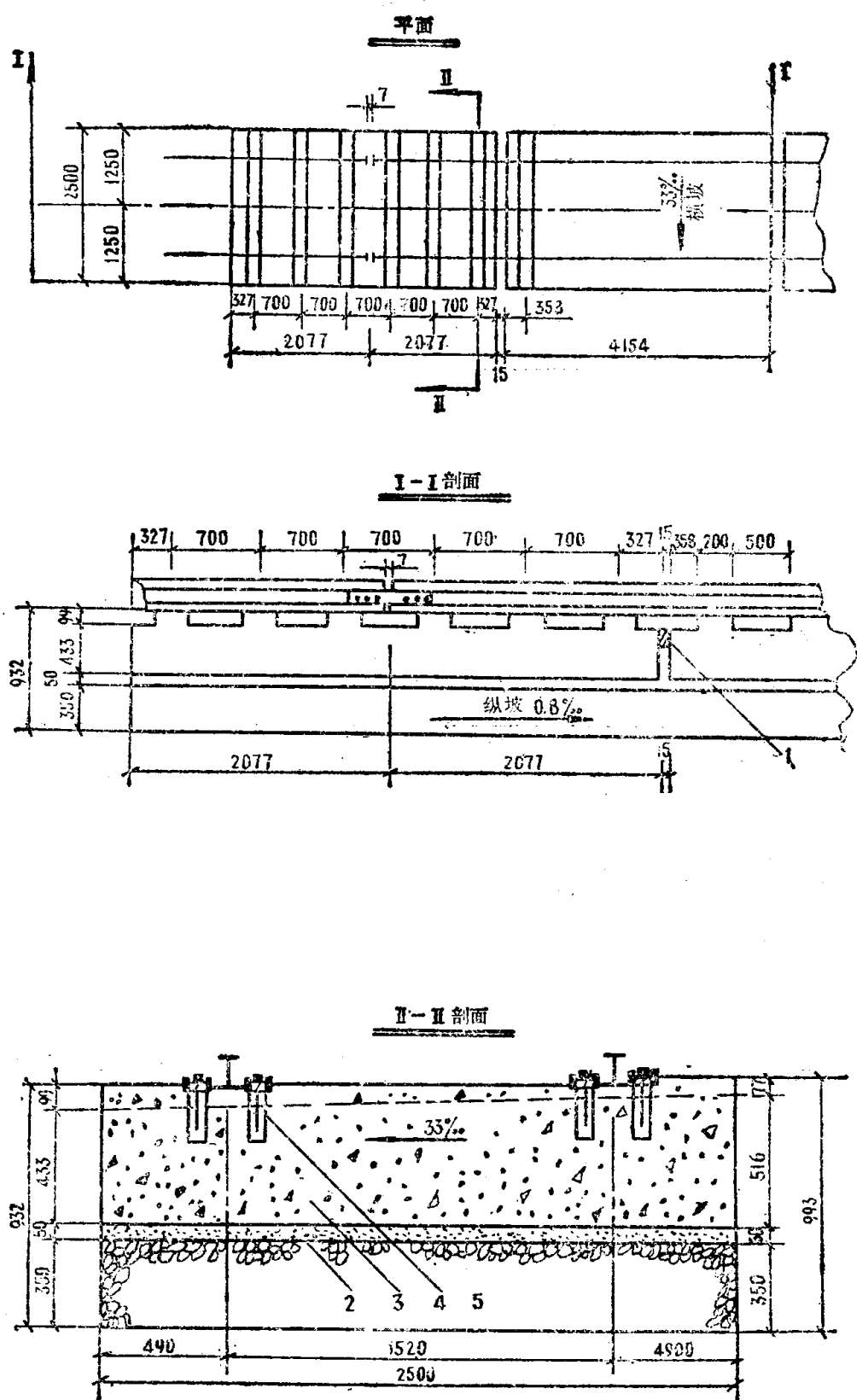


图 1-7
1——伸缩缝；2——粗砂垫层；3——混凝土道床；4——硫磺锚固；5——砂夹卵石垫层；6——土壤。

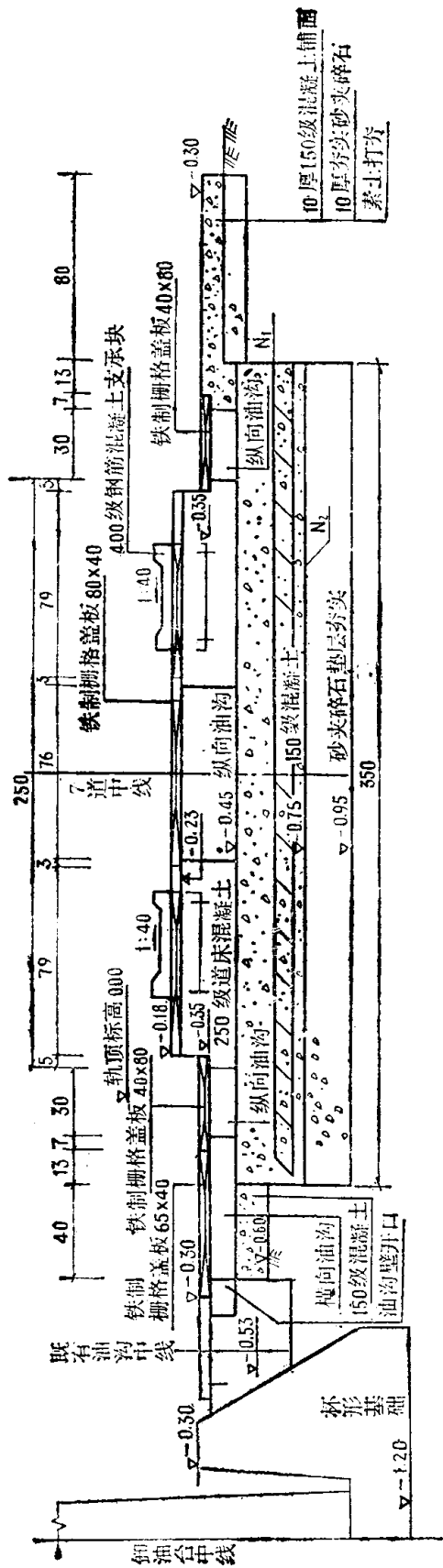


图 1-9

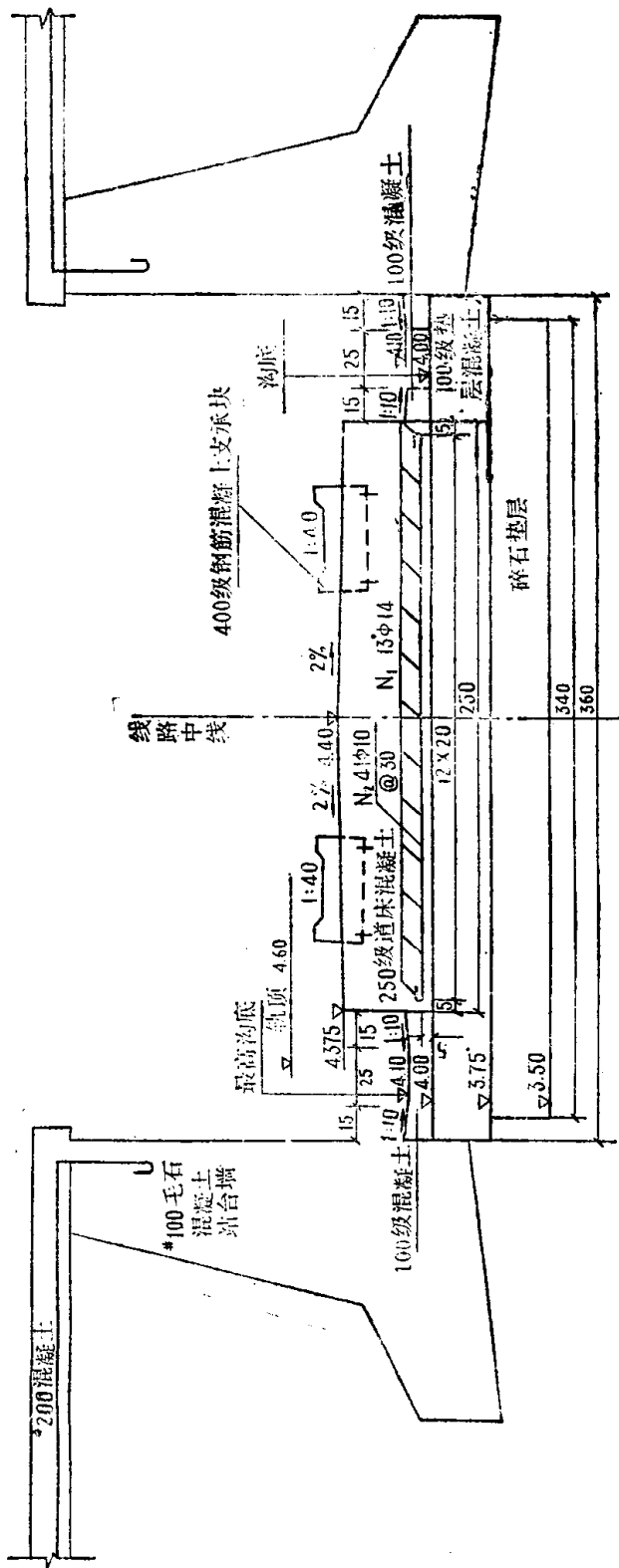


图 1-10

枕配合使用，称为宽轨枕无碴线路；和混凝土轨道板（大板）配合使用，称为轨道板无碴线路。

（1）混凝土宽轨枕无碴线路的结构型式

混凝土宽轨枕无碴线路有：郑州客站宽轨枕无碴线路（图 1—11），柳州、桂林客站宽轨枕无碴线路（图 1—12），成都站客车作业线宽轨枕无碴线路（图 1—13）及隧道内宽轨枕无碴线路（图 1—14）等结构型式。

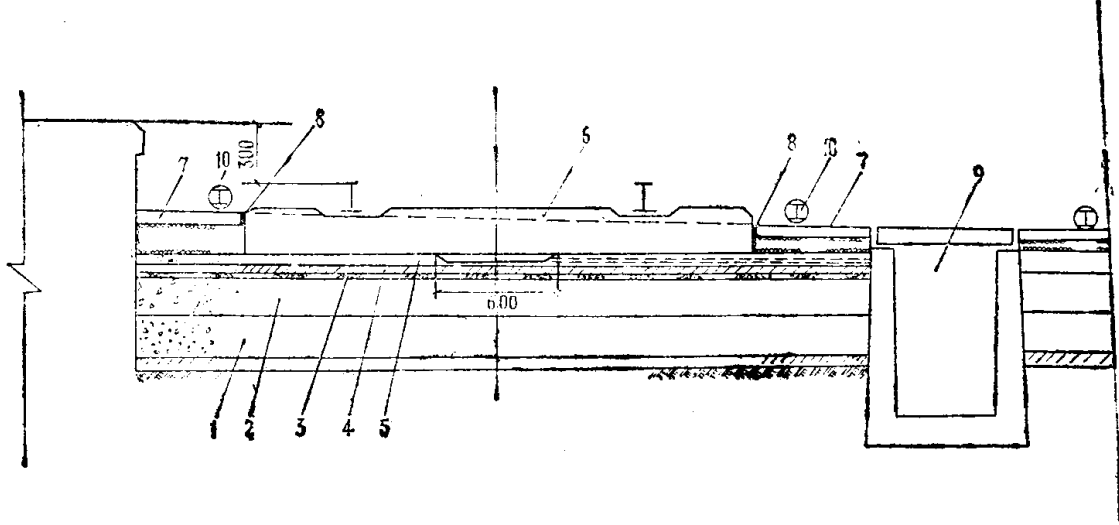


图 1—11

1——粗砂垫层；2——碎石垫层；3——热浇沥青层；4——沥青混凝土层；5——小碎石碴带；6——76型混凝土宽轨枕；7——钢筋混凝土封面板；8——沥青砂勾缝；9——股道间纵向水沟；10——客车上水管道。

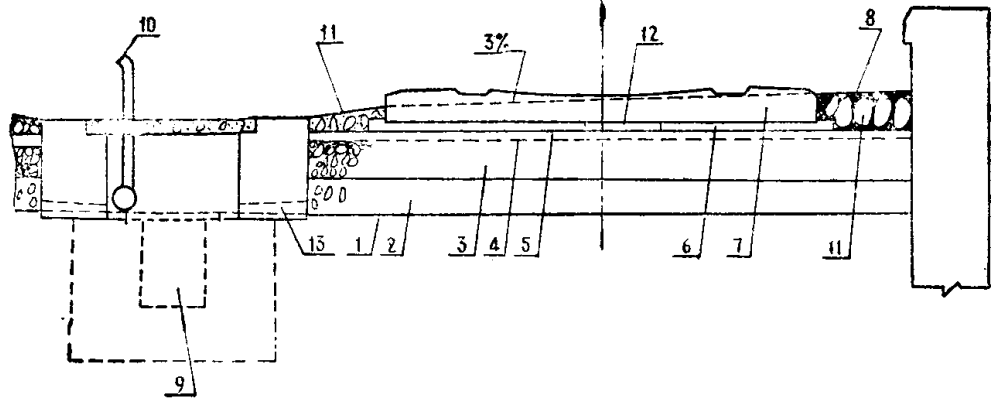


图 1—12

1——基底；2——碎石砂垫层；3——碎石垫层；4——热沥青贯入层；5——沥青混凝土层；6——乳化沥青水泥砂层；7——筋76型宽混凝土枕；8——混凝土铺面；9——股道间纵向水沟；10——客车上水管道；11——码砌小片石；12——锯末；13——泄水孔。

（2）混凝土轨道板无碴线路的结构型式

图 1—15表示隧道内轨道板无碴线路的断面图。

1.2.4 整体道床用钢轨扣件

整体道床扣件，除应具有一般传统轨道钢轨扣件的性能，诸如保证钢轨与轨下基础的可靠联结，有效地固定钢轨的位置，在行车过程中将钢轨所承受的车轮荷载有效地传递给轨下

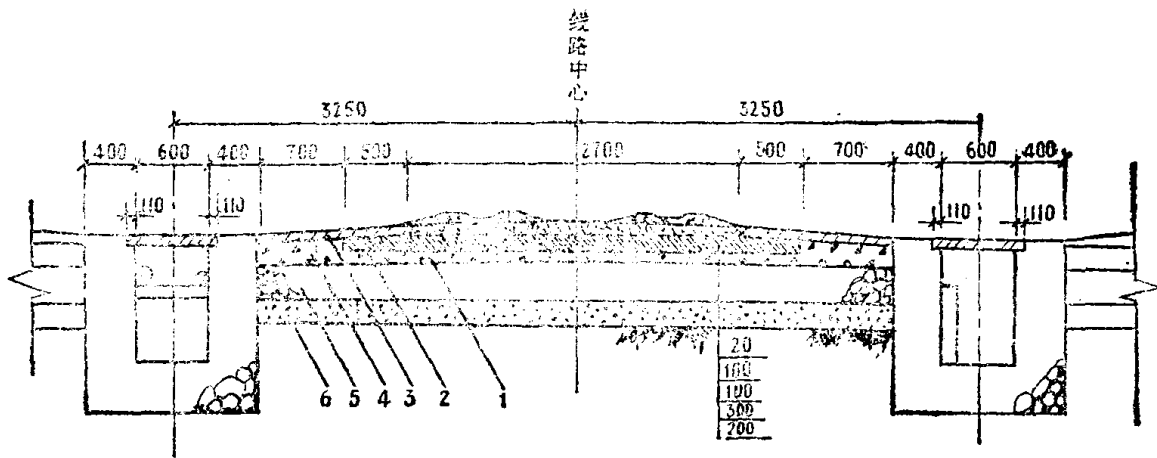


图 1-13

1——热拌沥青砂；2——热拌沥青混凝土道床；3——沥青人行道；4——碎石层；5——黄泥浆灌卵石；6——砂垫层。

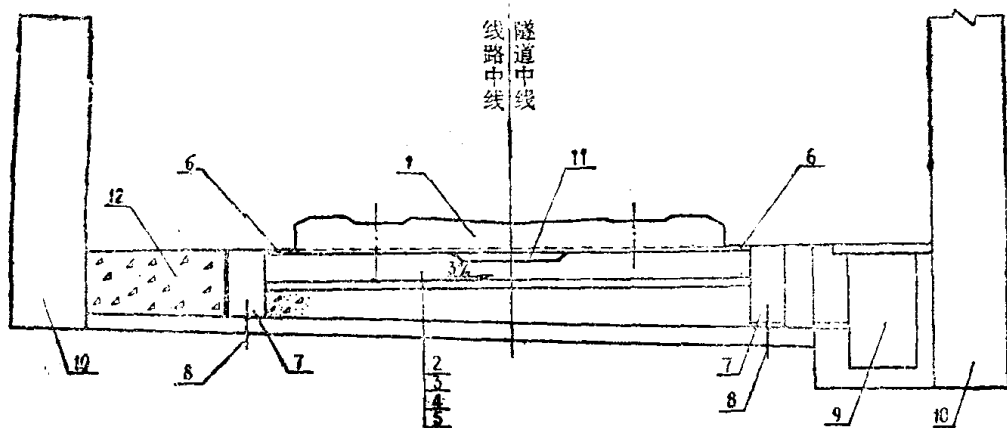


图 1-14

1——预应力混凝土轨枕板；2——沥青水泥砂浆固结道床；3——细石碴隔离层；4——粗砂夹石压实层；5——隧道铺底；6——沥青水泥砂浆封面；7——150号混凝土挡渣墙；8—— $\phi 22$ 锚杆；9——水沟；10——边墙；11——塑料袋装锯末；12——碎石填充。

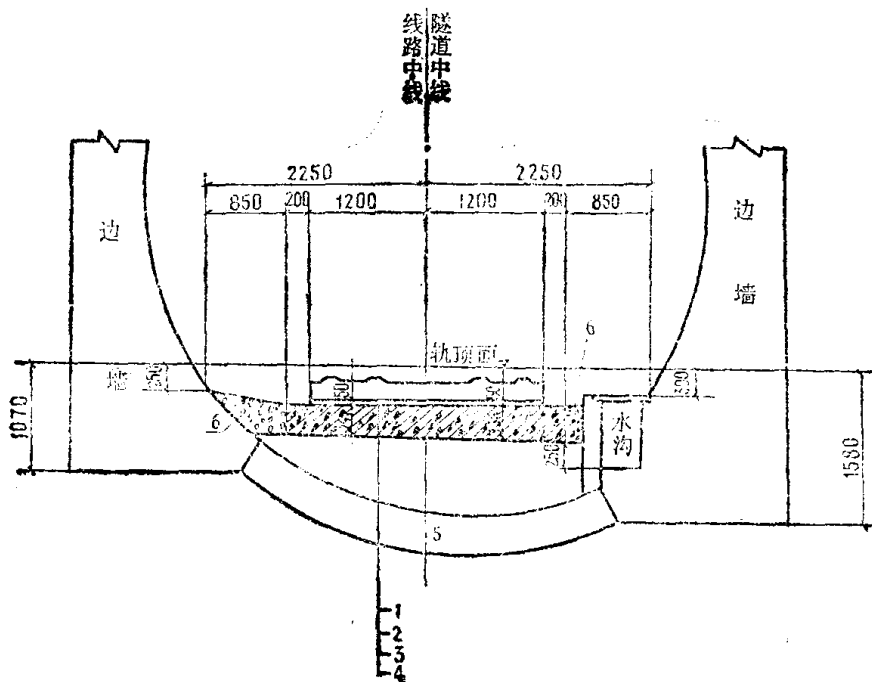


图 1-15

1——钢筋混凝土轨道板；2——沥青水泥砂浆调整层；3——混凝土基础；4——隧底回填层；5——隧道仰拱；6——碎石填充。

基础，保证行车安全等条件外，还应克服因道床混凝土的脆硬性所带来的不良影响。为此，整体道床的钢轨扣件，应能补偿由于混凝土道床代替碎石道床所损失的那部分弹性，使得混凝土整体道床获得与有碴线路大体相当的轨道垂直刚度与横向刚度，以改善刚性道床的轨道在轮轨相互作用下的工作状态。

其次，由于道床混凝土一经灌筑成型，其空间位置在尔后的使用过程中就不易改变，所以混凝土道床的施工误差将长期影响其运营效果。由于钢轨及其扣件在使用中会不断地磨损、变形以及在曲线地段，常因行车条件的改变而要求修正外轨的超高等原因，而要求整体道床的钢轨扣件应具有较大范围调整钢轨位置的性能。

整体道床钢轨扣件的类型，与道床的结构型式、线路平面条件等因素有关。

对于钢筋混凝土支承块式整体道床，在直线地段可采用弹条 I 型扣件或 70 型扣板式扣件，在曲线地段可采用 TF-Y 型弹条扣件（图 1—16）。

TF-Y 型扣件调整轨距的范围为 $\pm 8\text{mm}$ ；调整超高量为 40mm。

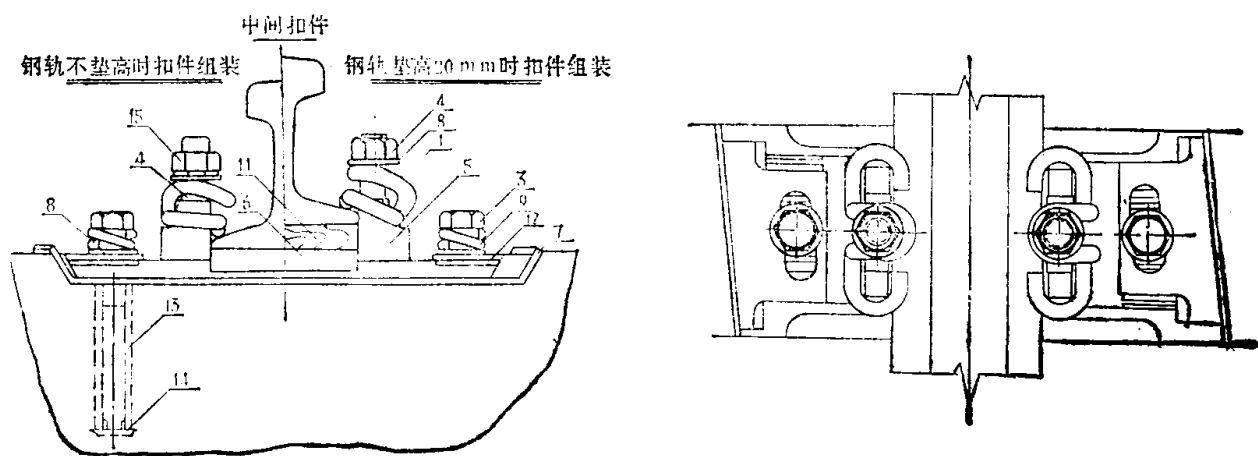


图 1—16

1——中间弹条；2——接头扣板；3——螺纹道钉；4——轨卡螺栓及螺母；5——铁垫板；6——轨下绝缘缓冲垫板；7——塑料垫板；8——平垫圈；9——弹簧垫圈；10——接头垫块；11——调高轨下垫板；12——楔形轨距块；13——塑料套管；14——橡胶塞；15——防锈帽。

1.3 结构应力计算分析

1.3.1 概述

新型轨下基础的应力计算，通常可按地基梁或地基板进行，也可用有限元法进行。

地基梁或地基板，它与刚性支承的梁或板不同，无法用梁或板的平衡方程式来求解地基反力的分布规律，所以必须再建立一个附加方程，将梁的挠度与地基反力联系起来，以便求解地基梁挠曲微分方程中所包含的挠度和地基反力两个未知变量。

梁或板的地基，通常是由土壤或岩石类组成。随着地基材料的物性以及其中所产生的应力应变状态的不同，地基可分为弹性地基、弹塑性地基和塑性地基三类。

当地基属于弹性体，且在外荷载作用下，其中产生的应力完全处于弹性阶段时，这类地基属于弹性地基。

若地基同样是属于弹性体，但当受载时，某些部分中产生的应力超出了弹性阶段，则称之为弹塑性地基。

塑性地基是由塑性材料构成，地基受载后，其中主要产生塑性变形，弹性变形很小而可以忽略不计。

铁路工程结构物的地基，许多情况是属于弹性地基。

弹性地基梁或板的计算，由于连续支承的特点，必须着重分析地基反力的分布规律。

在计算中，常认为地基梁或板承受荷载以后，它和地基共同产生变形，梁或板的底面与地基始终保持接触，不产生任何脱离或错开的现象。

在工程计算中，常将各种各样的天然地基简化抽象，以某种具有实际地基主要性质的理想化地基作为计算对象。这种理想化地基通称地基模型。

1.3.2 文克勒模型

这种地基模型基于文克勒的假定地基每单位面积上所受的壓力与地基沉陷成正比，即

$$p(x, y) = k \cdot w(x, y) \quad (1-1)$$

式中 $p(x, y)$ ——地基顶面单位面积上的压力；

$w(x, y)$ ——地基沉陷；

k ——地基沉陷系数 (N/m^3)，或称基床系数或称垫层系数。

模型将地基视作由无穷个互不联系的竖直弹簧构成的弹簧体系，故又称弹簧地基，如图 1—17 所示。

弹簧地基梁或板受载后，地基的变形仅发生在梁底或板底范围内；此外，还认为地基不但能承受梁或板传来的压力，而且也能承受拉力。

这种地基模型，当然能充分满足对于水面上漂浮板体结构的计算。同时，它也能符合对于粘结力较弱的土壤地基梁板的计算要求，因为在这类地基上，不易产生梁板承压范围以外的地基沉陷。弹性地基模型至今仍在实际工程计算中得到应用。

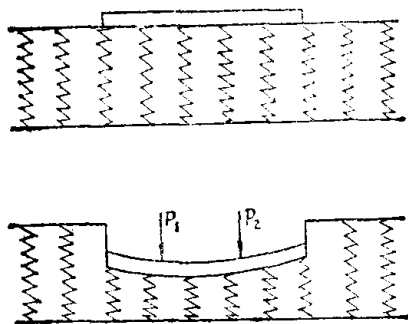


图 1—17

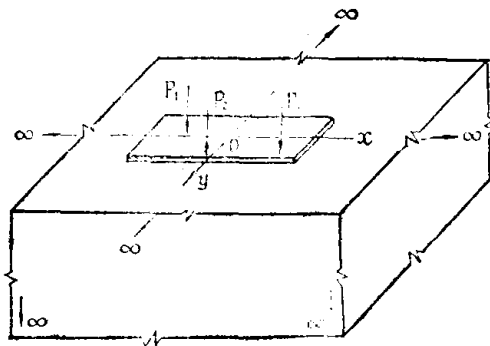


图 1—18

1.3.3 弹性半空间体地基模型

这类地基模型假设地基是半无限大的理想弹性体，它的厚度远大于梁板平面上的最大构造尺寸，如图 1—18 所示。

模型考虑了梁或板承压范围以外的地基沉陷和影响，因之它能更好地反映岩石类和粘性土质地基的性质。

当地基表面承受集中荷载 P 时，如图 1—19 所示，根据弹性理论，地表的变形可按布希尼斯克 (J. Boussinesq) 公式计算*：

* 徐芝纶：《弹性理论》，人民教育出版社，1960.4。