

近代道路路面设计

——节译自日本岸田正一、安孙子幸雄合著
《道路工学》

东北林学院道桥系 译

人民交通出版社

近代道路路面设计

Jindai Daolu Lumian Sheji

——节译自日本岸田正一、安孙子幸雄合著
《道路工学》

东北林学院道桥系 译

人民交通出版社

道 路 工 学

岸 田 正 一 共 著
安 孫 子 幸 雄

コロナ社昭和48年3月

近代道路路面设计

——节译自日本岸田正一、安孙子幸雄合著
《道路工学》

东北林学院道桥系 译

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092 1/32 印张：3.375 字数：71 千

1984年7月 第1版

1984年7月 第1版 第1次印刷

印数：0001—13,050 册 定价：0.54 元

内 容 提 要

本书根据日本《道路工学》五、六、七章节译。内容有近代道路设计理论、近代道路路面的合理设计法、土质道路及加固。

本书阐述了由于交通车辆的重型、高速、频繁，而使路面产生弯曲疲劳和膨胀，引起磨损和沉降等破坏的基本理论，及针对这些破坏的合理设计法，并介绍了欧美一些国家提高路面塑性的措施。

本书可供公路工程专业技术人员及有关专业院校师生学习参阅。

本书由东北林学院道桥系赵怀珍、万刚、王汉新译，黑龙江省交通局王治中校。

目 录

第一章 近代道路设计的基础理论	1
第一节 布辛尼斯克公式的意义与等压线.....	2
第二节 膨胀和磨损.....	6
第三节 材料配合设计上的必要原理.....	7
第四节 破坏强度与塑性的关系.....	7
第五节 破坏强度理论的新观点.....	9
第六节 分子概念的“粘弹性”.....	10
第七节 结构物破坏的两个基本概念.....	13
第八节 物性的根本理论.....	14
第九节 影响路面破坏及经济的因素.....	25
第二章 近代道路路面的合理设计法	31
第一节 路基、基层的破坏强度理论.....	31
第二节 水泥系充填组织的强度理论与设计施工.....	44
第三节 沥青系充填组织的强度理论与设计施工.....	58
第三章 土路及加固土路	84
第一节 土路.....	85
第二节 级配方法.....	88
第三节 底基层、基层的稳定处理及配合设计.....	89

第一章 近代道路设计的基础理论

作用在路面上的交通荷载，经过直接作用的面层和基层、底基层，而传递给路基，最后到达地基。交通荷载在各个层上产生应力，以往一直认为只要这些应力比各层的强度（即承载力）小，就是安全的。近代道路设计，只这样简单考虑已十分不足。

实际道路设计和施工当中必须考虑的问题是：路面以下各个部分既要能承受各个部分的应力，还要能将其应力广泛分布并传到下部。

为此有的主张将路面全厚沥青铺筑，这是因为未经处理的底基层不仅不能扩散荷载，反而使之集中，并产生弯曲疲劳和膨胀等所谓两重现象，以致引起磨损下沉。至于底基层以下，软土地基采用换土、石灰处理、砂桩（井）加固，填方选择最大密度的土，还有选择路基或基层材料，必要时还要把这些材料配合成理想级配，拌合成粘土混凝土加以压实，或者是掺入水泥或沥青做稳定处理。这些都是为达到上述目的而采取的必要措施。

此外经常在填挖方交界处发生严重不均匀下沉和挖方或填方坡面被破坏，均能使道路的功能遭到破坏。还有因骨料奇缺，碎石的试验正在更加重视。

再有路面的防滑已成为高速公路避免撞车事故的重要条

件，忽视这一点则交通事故将激增。

过去的道路工程学不叙述道路的寿命问题，这也是交通事故的根源。本章将叙述近代道路设计的基础理论，并结合实际叙述与道路的合理性、经济性及耐久性有关的种种理论。

第一节 布辛尼斯克公式的意义^①与等压线

一、布辛尼斯克公式的意义

作用在路面上的车辆荷载可以看为圆形均布荷载，对载荷面中心下的任意点上所产生的应力可作如下分析：

图1-1中，如以 σ_z 、 σ_x 、 σ_y 、 $\tau_{\max}$ 分别表示 N 点上的垂直应力、水平应力及最大剪应力，则可按下式求得各值

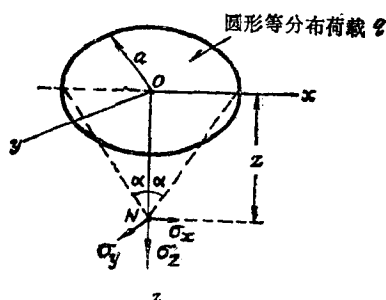


图1-1 圆形荷载作用下的应力

① 岸田，中野：土质工学（p.208～218参照），ユロナ社。

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_z &= q(1 - \cos^3 \alpha) = q \left\{ 1 - \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{a}{Z} \right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \\
 \sigma_x = \sigma_y &= -\frac{q}{2} \{ (1 + 2\mu) - 2(1 + \mu) \cos \alpha + \cos^3 \alpha \} \\
 &= -\frac{q}{2} \left\{ (1 + 2\mu) - 2(1 + \mu) \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{a}{Z} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right. \\
 &\quad \left. + \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{a}{Z} \right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \\
 \tau_{\max} &= \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} = q \left\{ \frac{1 - 2\mu}{4} + \frac{1 + \mu}{2} \right. \\
 &\quad \left. \times \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{a}{Z} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{3}{4} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{a}{Z} \right)^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中: q ——圆形均布荷载;

a ——载荷面半径。

$$\text{如令 } \frac{d\tau_{\max}}{dZ} = 0$$

则当 $\tau_{\max}$ 为最大值时 Z 值可按式求得

$$Z = \sqrt{\frac{2(1+\mu)}{7-2\mu}} a \quad (1-2)$$

此时 $\tau_{\max}$ 值为

$$\tau_{\max} = \frac{q}{2} \left\{ \frac{1-2\mu}{2} + \frac{2}{9} (1+\mu) \sqrt{2(1+\mu)} \right\} \quad (1-3)$$

设 $\mu = 0.5$, 根据式(1-2)、(1-3)求使 $\tau_{\max}$ 成为最大值

的 Z 值及 $\tau_{\max}$ 的最大值如下

$$Z = 0.707a$$

$$\tau_{\max} = 0.289q$$

八吨双轮胎的 a 值可由 $a = 14 \sim 18 + P$ 式计算得

$$a = 22 \sim 26 \text{ cm}$$

代入式(1-3)则当 $\tau_{\max}$ 成为最大值时的 Z 值为 $10.6 \sim 18.4$ cm, 可见 $\tau_{\max}$ 在相当浅的地方, 一般是在基层或上底基层内产生最危险的剪力。设 $\mu = 0.5$, 按式(1-1)计算 σ_z 及 $\tau_{\max}$, 据此可绘出图1-2。

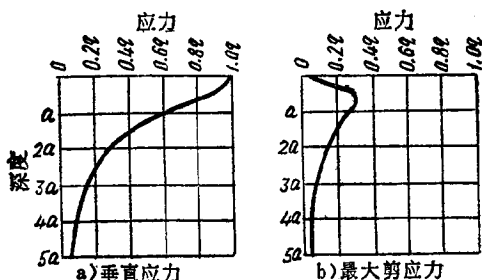


图1-2 在圆形均布荷载的载荷面中心下的应力分布

因 σ_z 是压应力, 如有充分的稳定性就是安全的。由垂直应力产生的弯拉应力的重复作用而产生的弯曲疲劳将在以后详细叙述。式(1-1)是表面荷载在地层中 N 点所产生的应力的表达式。当求此 N 点上所产生的全部应力时, 除受此表面荷载影响外, 还必须同时考虑土的自重影响, 土自重 N 点产生的应力可按下式求得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= Z\gamma \\ \sigma_y &= \sigma_t = K_0 Z\gamma \\ \tau_{zy} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中： K_0 ——土压力系数；

γ ——土的容重。

二、塑性度、应力集中同等压线以及 基础面下的压力分布

原有的路基及底基层因没有拌成粘土混凝土而塑性不足，引起应力集中，荷载不扩散，且材料也不均匀，因此由下面即将叙述的原因而脆化、细粒化、下沉以及产生无数龟裂。基于最近的交通状况在基层及上底基层上所产生的弯拉应力有日益加大的趋向。

基础面以下的压力分布在前面虽已稍加叙述，由于基础板刚度的原因，显示的反力分布也不完全一致，即粘性大的土即使在压力低的地方也有一定的抗剪强度，并有一定的抗拉应力，所以显示出板体强度，有接近弹性理论的倾向。

当考虑承受均布荷载平板下的反力分布时则有：

(1)假设平板的刚性象沥青混凝土那样小，则中央附近的压力大；

(2)假设板的刚性象水泥混凝土那样大，则接近边缘部分的压力大。

因而下沉量也是在(1)的情况下中央附近大，在(2)的情况下边缘附近大。

对有抽吸作用^①的混凝土路面，则(1)是混凝土板边缘的压力大，下沉量也大；与此同时(2)是因接缝下面的底基层材料含水量的关系底基层的下沉量也是边缘附近大，这就使下面的路基土的承载力减弱，下沉量则更加增大，致使抽吸作用也随之加大。以上两条是引起抽吸作用的主要理由。

① 校者注：抽吸作用即混凝土路面板的抽吸冒泥作用。

第二节 膨胀和磨损

膨胀是较大粒料的糊剂，在急剧的水平外力作用下将液体吸入孔隙，使整个体积膨胀，由紧密排列变成疏松排列，为此液体不能充满全部孔隙，粒子之间相互摩擦，而成为难于流动的现象。但如解除外力就立即恢复流动。

根据立体几何的计算，紧密排列（六方晶体排列）的孔隙率为 25.95%，如能有足够的水充满孔隙则能做静的塑性流动。可是现在如施加剧烈外力则粒料向疏松排列位置移动。疏松排列即等轴晶系排列，其孔隙率为 47.64%，所有水被全部吸入之后还不够用，在缺乏水分的状态下出现相互摩擦的粒子，构成絮状结构。为此不能流动，从而，应力得不到缓和，这种现象如重复出现，则粒料将脆化，以致产生磨损，称此现象为磨损。

磨损原来只认为发生在面层，并且认为由交通荷载所产生的应力越接近表面越大，因而认为越是下层越使用劣质材料是合理的。但是，根据布辛尼斯克公式及应力集中理论，即使在路面下超过 10cm 的深处仍传递着较强的外力，特别是水平剪力在路面下 10~18^①cm 处产生最大值，引起膨胀现象，以致引起骨料粒子的刚脆化及磨损下沉。美国各州公路工作者协会（AASHO）^②的道路试验发现施工的砂石底基层在 10~20cm 最先磨损下沉。碎石路盘关于这方面也有明显弱点，虽然施工的碎石底基层在 20~30cm 多少强一点，但

① 校者注：原书 15~18cm 应为 10~18cm。

② 编辑注：1973年11月11日起该组织改称为美国各州公路与运输工作者协会（AASHTO），以下同。

也有关于这方面的破坏报道。由这一事实可知，不能只根据 CBR^①或 K 值决定路面厚度，还必须考虑因膨胀而产生的磨损。

在日本虽然废除了 CBR 设计法^②，而采用了 AASHO 的结构顺序号，但仍有必要查明材料配合比设计中的“材料的耐久性、材料的疲劳性能、材料的极限抗拉强度”等原理。

第三节 材料配合设计上的 必要原理

为了合理的决定材料配合，首先必须掌握发现材料破坏强度的基本原理；其次是由交通荷载重复作用引起的材料早期破坏疲劳，从耐久性的角度必须搞清楚其性能。由此势必需要塑性理论，特别是象水泥混凝土那样的填充式混合料的粘结强度理论，所有这些都将在以下各节加以叙述。

第四节 破坏强度与塑性的关系

物质基于下述理由免于破坏：

(1) 由外力所产生的破坏力，可用外力引起的材料内部弹性势能来表示，这个破坏力通过被称为弹性模量这个物理量所表示的材料的斥力来抵消——即以弹性消耗来防止破坏。

(2) 由外力引起的材料内部弹性势能，可由表现为粘性流动状态的材料固有塑性变形所作的功来消耗掉，这也能防

① 译者注：CBR 是加州承载比的英文缩写；

② 译者注：CBR 设计法是设计柔性路面厚度的一种方法。

止破坏。

(3)由(1)与(2)的混合状态而将弹性势能消耗掉以防止破坏。

不论什么物质,免于外力破坏的基因不外上述三点。大部分物质都是由于(3)而免于破坏的,因为由(1)或(2)的任何一方而免于破坏的,不是外力很小,就是玻璃、橡胶之类特别脆或弹性特别大的物质。所以免于破坏的物质绝大部分都是属于(3)的情况。即外力相当大则物质在弹性变形的同时伴有塑性流动,由于这两方面的变形消耗掉外力引起的材料内部的弹性势能,因而才有可能免于破坏。

物质如承受强大外力,都是在一瞬间引起弹性变形及塑性流动的,一旦排除外力,弹性变形能迅速恢复,而塑性变形的恢复是缓慢的。此时,如象玻璃物质那样有微量塑性流动,外力所引起的弹性势能几乎直接反映为玻璃物质的应力强度,因强大应力而产生脆性破坏。可是象橡胶那样弹性强的物质塑性流动极大,由外力产生的弹性势能的大部分被流动所消耗,从而大大降低了橡胶物质内部的应力强度,个别情况甚至应力等于零,这时为了切断它就不得不加上强大的外力。

因而远比橡胶强度高的玻璃首先破坏,而比玻璃强度低的橡胶在同一断面上即使加上比这更大的外力也不致于破坏。这种现象仅用上述应力大小是说明不了的,用弹性模量的大小也不能说明,这是因为玻璃的弹性模量^①大致为 10^{11} kgf/cm²,而橡胶的弹性模量仅仅是 10^7 kgf/cm²。

由此可知,物质对破坏的抗力,不论是用该物质的材质内所表现的破坏强度的大小,或是用其弹性模量的大小来说

① 弹性模量的国际单位为 N/m^2 , $1\text{kgf/cm}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{N/m}^2$ 。

明，都是不可能的。

所以过去所做的物质破坏强度和弹性模量的测定，只能掌握物质的物理量，实际上并不能真实地反映物质对破坏的抗力。主要论述这个问题的是塑性学。

高弹性物质易于免受破坏的理论之一就是塑性理论。

最近世界各国分别用自己的试验方法进行了公路破坏强度的试验（实际性能试验），结论是构成公路各层的实际性能，受各层原有的破坏强度所支配，为了最经济地增大公路的破坏强度，必须确保最经济地增大各层的破坏强度。

而且最近在各层的实地性能的基础上，增加各个层之间的差别，从而进展到使整个路面的设计能最经济。

这些实验数据将在以后详细叙述。这里将首先说明破坏强度在整体上究竟是什么，即“物质的破坏强度大致可以根据物质的塑性来确定”，并叙述这一塑性到底根据什么来测定。

如同以下所述，在理论上来说，可以说是根据抗拉强度来测定的。

第五节 破坏强度理论的新观点

这里所谓的新观点，例如梁受外力作用时，梁断面内弹性应力分布计算是属于弹性力学领域，但在解决梁同桥面板设计安全系数等实际问题时，只用弹性力学是解决不了的。

材料的屈伏、破坏、蠕变、疲劳等塑性的变动和性质，以及有关破坏强度等问题，只有在物性学、材料组织学、应用力学等科学理论基础上，从有关塑性材料的物理性质和机械活动的学科领域的角度上来分析才能得到解决。近代塑性学，特别是关于强度以及破坏强度的理论，是在许多精练的

实验基础上才日益建立和发展起来的。根据公路路面最近 AASHO 的实验，提供了与水泥混凝土及沥青混合料的耐荷载耐久力以及破坏强度等有关宝贵资料，其目的都是为了对专门领域及公共经济作重大贡献的。所以为了理解这些资料，首先必须了解塑性学理论。另外是在理解这些新资料的基础上，进而消除浪费。以这样新观点来论述强度理论概念当然也是必要的。

第六节 分子概念的“粘弹性”

沥青混合料及水泥混凝土与普通金属或晶体不同，势能 U 的峰高及谷深不象图 1-3a) 那样的高和深，而象图 1-3b) 所示那样峰低和谷深不规律的交织着。结晶性物质的原子或分子象图 1-3a) 那样深，势能 U 很规律的位于谷低。

如加大应力，分子从平衡位置的谷底稍许变位，则势能升高。晶体的势能的峰值都是非常高的，因而应力必须提高到相当程度，才能越过这一峰头而移向次一谷底，即流动是相当困难的。

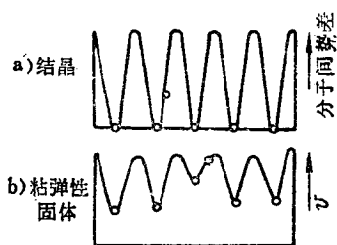


图 1-3 物体的内部结构

如果能够越过，则分子之间的间距变形消失，弹性应力趋于缓和，分子所持有的多余弹性势能（这是外力做功而供给的）变成分子的热动能，即由粘性流动而产生了热耗。

结晶体则很难引起上述现象。可是多数物体都有塑性流

动，例如虽然是金属晶体，如施加强大的外力也流动，但不是这里所说的粘性流动，而是以变位为媒介而产生的晶体表面的滑动所引起的塑性流动。

呈现显著粘性流动的物质，一般称为无定形物质的非结晶物质。特别是在分子之间的结合是共价键和离子键更弱的范德瓦尔斯力的有机高分子固体（沥青、塑料等）中，这种现象更为显著。

这些物质，势能的峰高及谷深，越不是结晶，低峰和浅谷不规则交错的情况越比水泥混凝土明显。水泥混凝土如图1-3b)所示，因应力而各分子首先作弹性变位，但也有轻易越过势能峰头而移往下一谷底的分子。该分子数目在常温情况下，沥青混凝土比水泥混凝土的数目多，但在低温情况下则沥青混凝土的分子数目减少，而不能作粘性流动。

一般，分子如向下一个平衡状态移动完了时，弹性应力缓和而变成粘性流动。这是水泥混凝土及沥青混凝土分子的性能。

弹性应力缓和的性能，从上述那样的分子概念，进一步在宏观上象后面将要叙述的那样，骨料同粘结料的粘性强度只由粘性流动（滑动）所决定。最近根据纳巴罗的滞变理论（由重复荷载引起的初期疲劳阶段的滞变）和基于变形硬化的塑性体内应力上升而导致破坏的奥罗旺理论，在水泥混凝土和沥青混凝土中添加橡胶可塑剂来增进粘结强度，或者是即使在低温情况下也使之发生充分的粘性流动，借以缓和塑性体内的应力上升，进行了试图防止破坏的试验。

由于最近世界范围内建设了高速公路，水泥混凝土桥梁修的也越大越长，另一方面由于荷载的加大与重复次数的激增，产生了超过相当于耐久性限度的应力振幅。为此在纳巴

罗的蠕变的重复中产生了残留变形，依次形成变形硬化的积累，根据奥罗旺理论塑性体内的应力上升，以致最终破坏的可能性显著增大。

可是水泥混凝土的这种试验比较昂贵，现在还未达到实用阶段，只好根据下述的研究来改善水泥混凝土的质量。

一、水泥混凝土的粘弹性

水泥混凝土可以认为，水泥浆的弹性部分是以结晶性物质所组成，而塑性部分是以非结晶性物质组成的。

根据过去的许多试验，结晶性物质多时，弹性模量高，压缩强度也大，非结晶性分子锁被紧缩，塑性流动小。如果象水泥凝胶那样非晶性物质多，或有象橡胶那样的可塑剂作为增塑剂或胶结剂，则使同骨料等其它无机微粒子的粘结加强，从而密实地包围着骨料的全部表面，使骨料间的内部摩擦减小，作为水泥混凝土整体的内部摩擦也减小，其结果是导致塑性流动增大。

其次就“含水凝胶多时，根据胶态离子理论^①能改善混凝土的塑性流动”的研究，认为加大水泥混凝土的延伸能力，对增强水泥混凝土的极限抗拉强度或抗弯强度都会起作用。其理由^②是这些强度只决定于材料的塑性。

二、热可逆性凝胶的凝胶化功能

热可逆性凝胶的凝胶化功能是复杂的。沥青在软化点（50~70℃）附近，内部的结合状态起变化，在此点以下，随着温度的下降，粘结系数 η 急剧上升而凝固，到 0℃ 以下

① 岸田，中野：土质工学，ニロナ社

② 横堀武夫：（材料强度学 p.63 参照）