

ISO/TC 221/WG 6

Design using geosynthetics

土工合成材料设计

Email of convenor: Derek.Smith@coffey.com Convenorship:

BSI (United Kingdom)

召集人邮箱: Derek.Smith@coffey.com

召集人: BSI (英国)

ISO TC 221 WG 6 N 314 PG 5 Stabilisation TR 18228-5

ISO TC 221 WG 6 N 314 PG 5 稳定 TR 18228-5

Replaces: N 290

替换: N 290

Document type: Working draft

文件类型: 工作草案

Date of document: 2019-10-03

文件日期: 2019-10-03

Expected action: INFO

预期行动: 信息

Background: This version of TR 18228-5 takes account of all of the changes that were discussed and agreed during the ISO TC 221 WG 6 PG 5 meeting in Tel Aviv. Some significant changes have been made to the document as a result of rewrites to many sections. All members are therefore requested to review this document carefully and provide comments to the PG 5 Leader, Derek Smith on the bottom of the comments sheet provided at N 315. Note that N 315 contains a number of comments that have not yet been addressed from the Tel Aviv meeting and still need to be addressed. All comments received by 8th November 2019 will be collated and circulated prior to the meeting of PG 5 in Beijing, where the comments will be reviewed.

背景: 本版本的 TR 18228-5 考虑了在特拉维夫召开的 ISO TC 221 WG 6 PG 5 会议上讨论和商定的所有变更。由于对许多章节进行了重写, 对文件作了一些重大修改。因此, 请所有成员仔细审查本文件, 并在 N 315 提供的意见表底部向 PG 5 领导人德里克·史密斯提供意见。请注意, N 315 包含了一些特拉维夫会议尚未讨论的意见, 但仍需要讨论。2019 年 11 月 8 日前收到的所有意见将在北京第五次 PG 5 会议之前整理并分发, 届时将对意见进行审查。

Committee URL: <https://isotc.iso.org/livelink/livelink/open/tc221wg6>

委员会网址: <https://isotc.iso.org/livelink/livelink/open/tc221wg6>

Error! Reference source not found.TC Error! Reference source not found.

Date: 3rd October 2019

Error! Reference source not found.

Error! Reference source not found.TC Error! Reference source not found./WG Error! Reference source not found.

Secretariat: Error! Reference source not found.

Design Using Geosynthetics: Part 5 – Stabilisation

Conception utilisant géosynthétiques - Partie 5: Stabilisation

土工合成材料设计：第 5 部分-稳定

WD stage (WD 阶段)

Warning for WDs and CDs

This document is not an ISO International Standard. It is distributed for review and comment. It is subject to change without notice and may not be referred to as an International Standard.

Recipients of this draft are invited to submit, with their comments, notification of any relevant patent rights of which they are aware and to provide supporting documentation.

本文件不是 ISO 国际标准。分发以供审查和评论。本标准如有更改，恕不另行通知，不得称为国际标准。
请本草案的接收者连同他们的评论一起提交他们所知的任何相关专利权的通知，并提供支持性文件。

© ISO 2019

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized otherwise in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, or posting on the internet or an intranet, without prior written permission. Permission can be requested from either ISO at the address below or ISO's member body in the country of the requester.

ISO copyright office
Case postale 56 · CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Published in Switzerland.

© ISO 2019

保留所有权利。除非另有规定，否则未经事先书面许可，不得以任何形式或通过任何方式（电子或机械方式）复制或使本出版物的任何部分，包括影印或张贴在互联网或内联网上。可向以下地址的 ISO 或请求国的 ISO 成员机构请求许可。

ISO 版权局
邮政信箱 56• CH-1211 日内瓦 20
电话+41 22 749 01 11
传真+41 22 749 09 47
电子邮件 copyright@iso.org
网址 www.iso.org

在瑞士出版。

前言	7
导言	8
1 范围	9
2 术语与定义	9
3 概念和基本原则	9
3.1 概述	9
3.2 优势	11
3.3 限制/约束	11
3.3.1 内部约束-机构描述	12
3.3.2 外部限制-机构说明	13
3.4 车辆行动	14
3.5 荷载条件（循环/静态）	15
3.6 多部件系统	15
4 典型应用	16
4.1 交通区的稳定颗粒层	16
4.2 铁路中的稳定颗粒层	16
4.3 工作平台中的稳定颗粒层	17
5.0 设计原则	18
5.1 概述	18
5.2 未铺砌道路	18
5.2.1 Giroud-Han（2004）方法	18
5.2.2 Leng - Gabr（2006）方法	19
5.2.3 Pokharel（2010）土工格室方法	21
5.3 铺砌道路	22

5.3.1 修改后的美国州公路和运输官员协会(AASHTO) (1993 年) 方法 22

5.3.3 MEPDG 方法 25

5.3.4 土工格室力学-经验方法 26

5.4 工作平台和负荷转移平台 27

5.4.1 粘土基床静力法 28

5.4.2 软砂路基 BCR 法 30

5.5 铁路 31

5.5.1 美国联邦铁路局 31

5.5.2 网络轨道（英国）设计规范 31

5.5.3 Ev2 方法 32

5.5.4 铁路道碴 35

5.5.5 土工格室铁路稳定设计方法 35

5.6 土工合成材料布局设计 37

5.7 静态荷载-沉降控制/限制 39

5.8 减少贩运造成的变形 39

5.9 减少未结合集料的降解 39

5.10 延长设计寿命 40

5.11 地面和地下水条件 40

5.12 气候条件 41

5.13 可持续性 41

5.14 过滤/分离/排水要求的影响 41

6.0 设计因素和方法

6.1 设计因素 42

6.2 设计方法 43

7.0 材料 44

7.1 集料性质 44

7.2 土工合成材料的关键特性----内部约束 44

7.3 土工合成材料的关键特性-外部限制 45

8.0 测试 46

参考资料 48

附录 A-张紧膜设计 52

A1 机械说明 52

A2 设计因素和方法

A3 土工合成材料的主要特性 52

前言

ISO（国际标准化组织）是一个世界性的国家标准机构联合会（ISO 成员机构）。制定国际标准的工作通常是通过 ISO 技术委员会进行的。对已为其设立技术委员会的主题感兴趣的每一成员机构都有权派代表参加该委员会。政府和非政府国际组织与标准化组织联络，也参加了这项工作。ISO c

与国际电工委员会(IEC)就电工标准化问题进行密切合作。[ISO/IEC 指令第 1 部分描述了用于开发本文件的程序和用于进一步维护本文件的程序。特别是，应注意到不同类型的 ISO 文件所需的批准标准。本文件是根据 ISO/IEC 指令第 2 部分的编辑规则起草的。](#) www.iso.org/directives

www.iso.org/directives 提请注意本文件的某些内容可能是专利权的主题。ISO 不承担任何或所有此类专利权的识别责任。在文件编制过程中确定的任何专利权的细节将在导言和/或 ISO 收到的专利声明清单中。www.iso.org/patents

www.iso.org/patents

本文件中使用的任何商品名称都是为方便用户而提供的信息，并不构成背书。[有关 ISO 与合格评定有关的特定术语和表述的含义的解释，以及有关 ISO 在技术性贸易壁垒\(TBT\)中遵守 WTO 原则的信息，请参阅以下 URL:前言-补充信息](#)

前言-补充资料

负责本文件的委员会是 ISO/TC221，土工合成材料，WG6，使用土工合成材料的设计。

— ISO/TR 18228 由以下部分组成。

- 第 1 部分:概述
- 第 2 部分:分离
- 第 3 部分:过滤
- 第 4 部分:排水
- 第 5 部分:稳定
- 第 6 部分:保护
- 第 7 部分:加固
- 第 8 部分:表面腐蚀控制
- 第九部分:障碍

第 10 部分:沥青路面

ISO TR 18228-5

导言

ISO/TR 18228 使用土工合成材料的设计是一份技术报告，其中载有在与天然土壤，填土，沥青和/或其他材料接触的土壤和地下结构中使用土工合成材料的设计指南。技术报告分为 10 个单独的部分。第 1 部分载有与 10 个单独部分有关的一般指导。第 2 至第 10 部分涉及使用土工合成材料的设计，包括使用材料的特性和影响设计的其他因素的指南

以及各部分特有的系统性能。

该系列通常以极限状态格式编写，并在适当的情况下，根据各种应用和设计寿命的部分材料系数和负载系数提供指南。

TR 18228-5 包括与稳定功能相关的信息。

土工合成材料改善颗粒层性能的主要机制有两种:约束机制和张拉膜机制。必须理解这两种机制之间的区别及其相关应用。

第一种机制通过粒子约束或横向约束的方式提供稳定性。通过最小化集料颗粒的运动，约束增加了抗剪能力并拓宽了荷载分布角，改善了集料层的力学性能，从而控制荷载作用下的变形（使用极限状态-SLS）。

第二机构通过土工合成材料提供加强，该土工合成材料通过摩擦和/或互锁锚定在负载区域的每一侧，在负载下变形出平面以产生张紧膜。在这样做时，它为集料层提供支撑，从而减少变形(SLS)和增加承载力（极限状态-ULS）。

8©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

1 范围

技术报告的这一部分概述了一些文件中关于土工合成材料设计的指导意见，以使土工合成材料在与天然土壤，填土，沥青和/或其他材料接触时起到稳定土壤的作用。

本指南的概念始终基于已安装的土壤，安装过程以及土工合成材料的强度和/或变形特性。

本文件包含使用土工合成材料稳定功能的铺面和未铺面道路，工作平台和基础的无粘结层的设计指南。这通常是针对可服务性极限状态(SLS)。 极限状态(ULS)设计，如某些应用所要求的，如板式基础设计，工作平台设计等，可能需要单独证明。本技术报告是实践状况报告，并根据应用程序提供指导方针

机构和设计方法的介绍。关于土工合成材料所涉及的分离，过滤和其他相关工程问题的讨论在单独的技术报告中述及。

2 术语和定义

本文件适用 EN ISO 10318-1 中给出的术语和定义以及 EN ISO 10318-2 中的符号和象形图。

本节将在文件的剩余部分完成后完成。

表面回弹模量？

等效标准轴载荷(ESAL's):单胎 80kN。

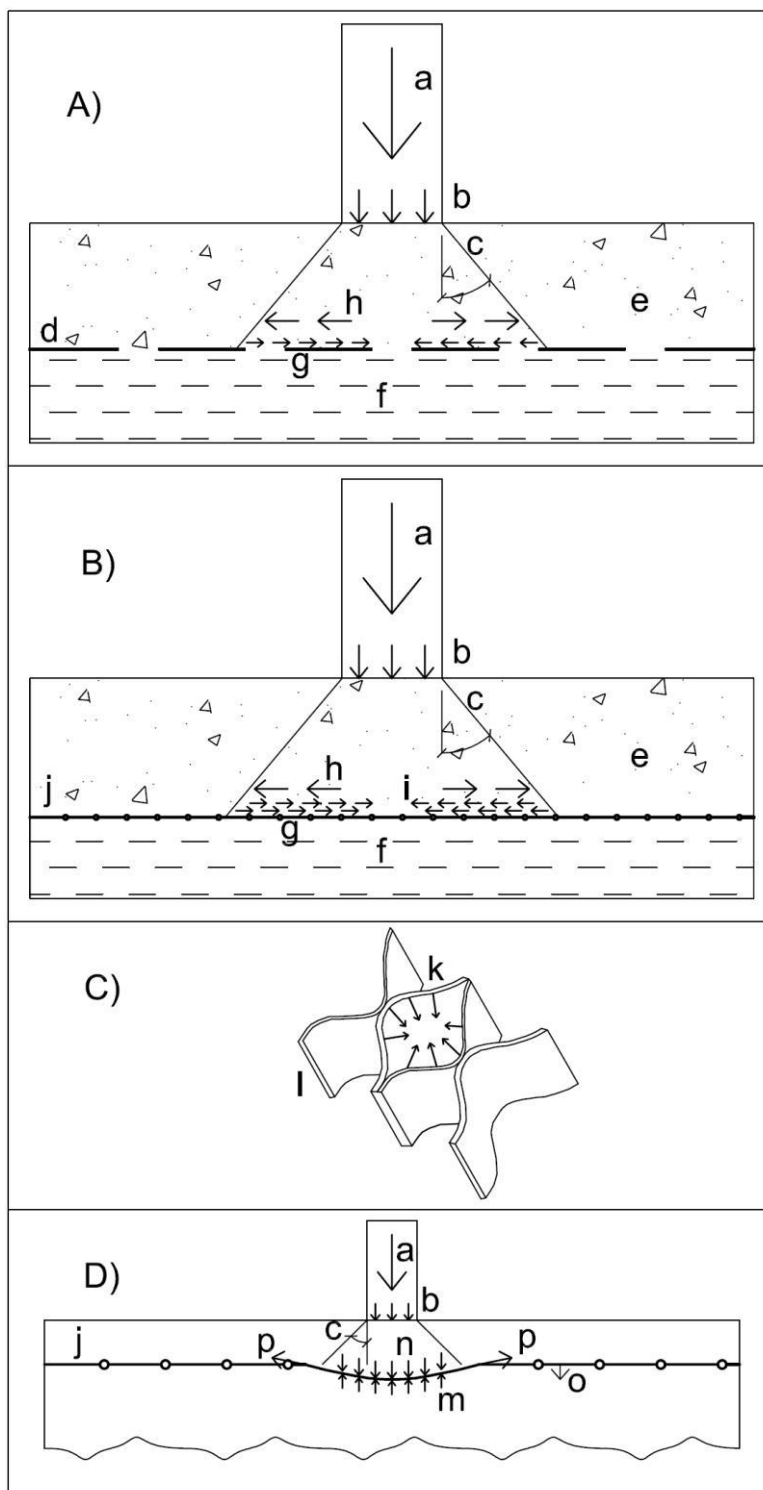
图 1:土工合成材料改善颗粒层性能的主要机理

A) 仅通过直接剪切进行约束；

B) 直接剪切约束和连锁约束；

C) 三维结构约束； 和

D) 张紧膜机构



在稳定（约束）中，土工合成材料在相对较低的应变水平下最有效地运行。在预期高应变水平的设计中，稳定性影响较小。在预计高度应变的情况下，张力膜效应（加固）将占主导地位。

关于稳定和加固机制中土工合成物内应变的相对大小，文献中有相当多的讨论。这两种机制的工作应变包络之间的边界，以及它们之间的任何转变的性质，迄今还没有得到任何研究的充分界定。这在一定程度上是因为测量埋藏的土工合成物的应变水平极为困难。这意味着一个普遍认可的

基于此参数的 sed 设计方法尚不具备。

在此基础上，还建议将工程的设计寿命作为一个关键考虑因素，因此，变形速率也是一个重要的考虑因素。土工合成物稳定设计的结果是成功地控制系统变形的速率和水平，使其在项目的设计寿命内是可容忍的。

张紧膜机制可能需要大的变形来调动土工合成材料的抗拉强度，使其有效。这取决于土工合成材料的抗拉刚度。因此，土工合成物执行加固功能。ISO TR18228-7 中涉及加强。然而，为便于用户参考，本文件附件 a 提供了张拉膜加固机制的讨论。

3.2 福利

土工合成材料用于促进施工，并改善不同强度路基上的无粘结集料层的性能。土工合成材料的好处在许多案例历史中都有很好的记载。这些包括全尺寸实验室实验到仪器化现场研究的范围。本报告的参考部分重点介绍了其中许多问题。在这些情况下，土工合成材料和集料一起形成一个稳定层。

- (1) 此外，未粘结集料的这种稳定化导致未粘结层和/或路基的表面弹性模量和稳定化层的承载能力两者的增强。集料填土，土工合成材料和路基的复合结构必须:-
- (2) 有效地承受服务负载压力，
- (3) 将路基和未粘结集料层变形控制在适合于使用要求的范围内，以及

这样做不会随着时间的推移，由于集料变形，破裂和/或污染而逐渐恶化。

在现场条件要求提供分离和过滤的相应功能时，也可有助于改进性能。

3.3 禁闭/约束

土工合成材料的稳定要求通过约束最大限度地减少颗粒运动。颗粒运动的最小化是通过粒子约束实现的。为了使土工合成材料能够提供颗粒约束，它们通常具有足够的抗拉刚度和与土的充分相互作用。

ISO TR 18228-5

在粒状材料中土工合成物的低应变水平（通常小于 1%，但可能高达 2%）下，约束是主要的稳定机制，这也取决于稳定系统的重要性（例如公路相对于运输道路）和土工合成物在稳定系统中的位置（通常在较低的水平下，较高的应变是可以接受的）。如果应变值预期高于此值，则设计者可以考虑是否其他机构需要

e 包括在内。为了本文件的目的，考虑了两种类型的禁闭，并将其命名为内部禁闭和外部禁闭。

3.3.1 内部约束----机构说明

内约束是指二维土工合成材料与压实颗粒层中的集料的紧密相互作用，从而产生了一种提高了抗剪强度和刚度的假复合材料。相互作用可以通过互锁和/或表面摩擦发生。为了使互锁有效，土工合成材料必须有孔（例如土工格栅），使颗粒能够渗透其中。

当垂直加载时，附加剪应力从集料传递到土工合成材料，这反过来导致土工合成材料的变形（应变）。摩擦和机械互锁引起的剪切阻力产生了对集料颗粒的物理约束。土工合成材料提供的刚度降低了在土工合成材料之上的限定高度（稳定或“限制区”）上基层集料中横向拉伸应变和应力的发展，其方式如下

防止骨料明显位移的发展。

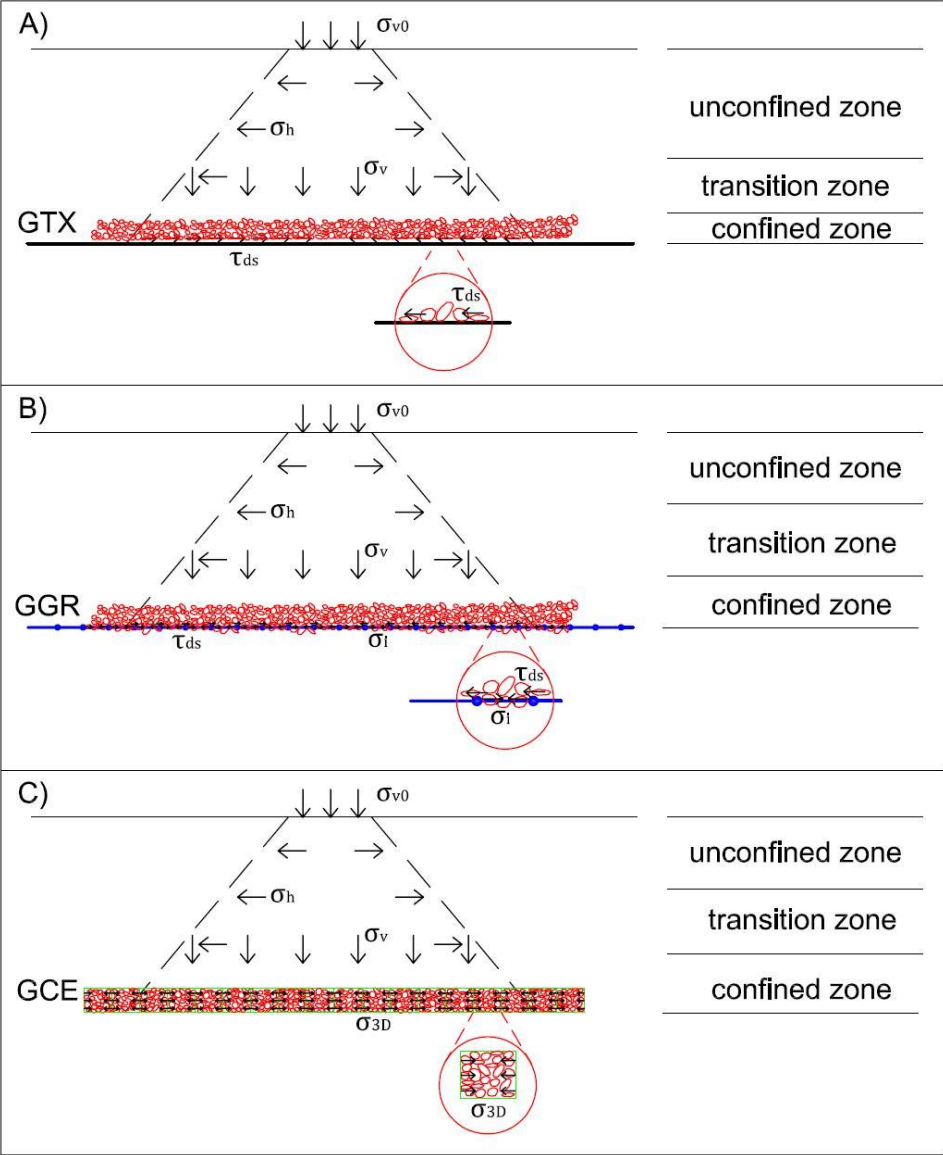
限制区具有有限的厚度。在其上方，发展了一个过渡区，该过渡区一直延伸到没有土工合成物对颗粒层的影响为止（无约束区），图 2 示出了(a)平面二维无孔土工织物的不同区域； (B)带有孔的平面二维土工格栅； 和(C)三维土工合成材料。

不同的土工格栅和土质类型，限制区和过渡区的限制效率和厚度也不同。因此，必须为每种土工格栅单独定义细节。

集料层中水平和垂直应变能减小的大小取决于复合层的刚度。这又是应力平衡（特别是在低应变水平下）所需的土工合成材料拉伸刚度以及集料/土工合成材料相互作用效率的函数。

在对颗粒层施加载荷（例如运输或压实）期间，上述相互作用将应力分布在稳定的颗粒层和土工合成物中，从而减少了传递到下垫路基的任何应力。通过土工合成材料以这种方式提供的在负载下的运动限制称为提供横向约束。

有限颗粒运动的约束区的产生自然地限制了颗粒层作为一个整体的变形。由此产生的向路基传递的应力减小，限制了路基的变形。通常，下卧路基是施工区段中最薄弱的材料，开发约束和稳定的颗粒层的主要目的之一是限制应力和应变传递到该薄弱层。



12©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

图 2:禁闭区

a) 3.3.2 外部约束-机械装置说明

b) 外部约束是指一定体积的材料受到三维土工合成材料系统的约束。三维土工合成材料系统可以由土工合成材料的任何组合形成，它们共同作用以有效地发挥单一系统的作用。本节其余部分具体提到被称为地穴的三维土工合成系统。

c) 原理土工格室稳定机制通过土工格室墙限制水平填充土变形，从而限制填充土。水平变形的限制基于三个因素：

细胞壁上的环张力，

来自周围细胞的抗性，以及

在竖向荷载作用下，水平土压力受到细胞壁的限制，从而激活环向拉力（图 3）。在细胞壁中产生的应变调动了负载细胞内的环应力。这个

©ISO 2019-保留所有权利 13

ISO TR 18228-5



1) 外部垂直应力

2) 细胞壁上的侧向应力

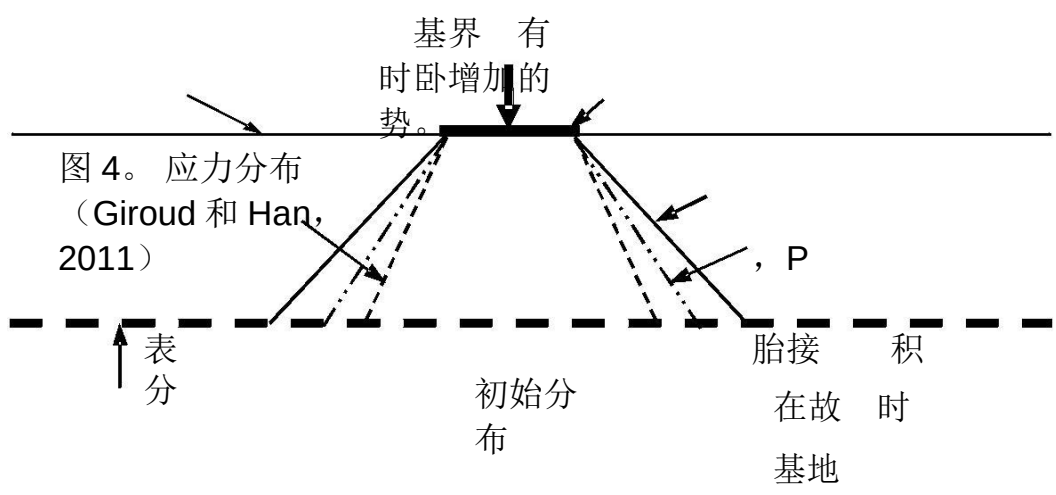
3) 细胞壁的侧向约束/约束环拉应力

摩擦和互 两种相互作用机制中的一种或两种是 制土工合成物 料 粒横向 动的先决条件。在安 土工合成材料的初始 段，当土工合成材料上方的填土材料被压实时，土工合成材料可能被施加拉力，从而引 相应的应变和应力的发展。 应变的大小取决于几个因素；主 影响因素是地基的刚度，相互作用的程度和效率

料与土工合成材料之卧的关系以及土工合成材料的固有特性，特别是刚度。

3.5 加 条件（循环/ 态）

对于所 的一些系统，紧 表 之下的加 条件是循环的。当 继续在 无粘结 料的上行 时，由于循环荷 的作用，无粘结 料内的应力分布 常会减小（图 4）。由于加 和卸 循环引 的塑性变形的积累 常导致基层材料抗剪强度的压低。其结果是，在基座/基座/基座上 的最大应力



分

N 次 后

土工合成材料 基

当应力分布 减小到界 处应力 基动员抗剪强度的点时， 基的承 力破坏就 发生了（Giroud 和 Han, 2011）。 基的使用抗剪强度取决于 基的不排水抗剪强 度，表 变形或 深度， 胎接 积和基底厚度（Giroud 和 Han, 2011 年）。

在 态加 条件下，对于未受污染的未粘结 料层， 荷分布 时卧保持不变。

3.6 多组分体系

多组分土工合成系统 常会增加稳定层的厚度，并提供更好的 制。因此，多成分土工合成系统 常会提 性 能。

多组分系统可以是同一土工合成材料的多层，其仅提供内 或外 约束，或者是包含不同土工合成材料的层，从而在单个系统内提供内 和/或外 约束。

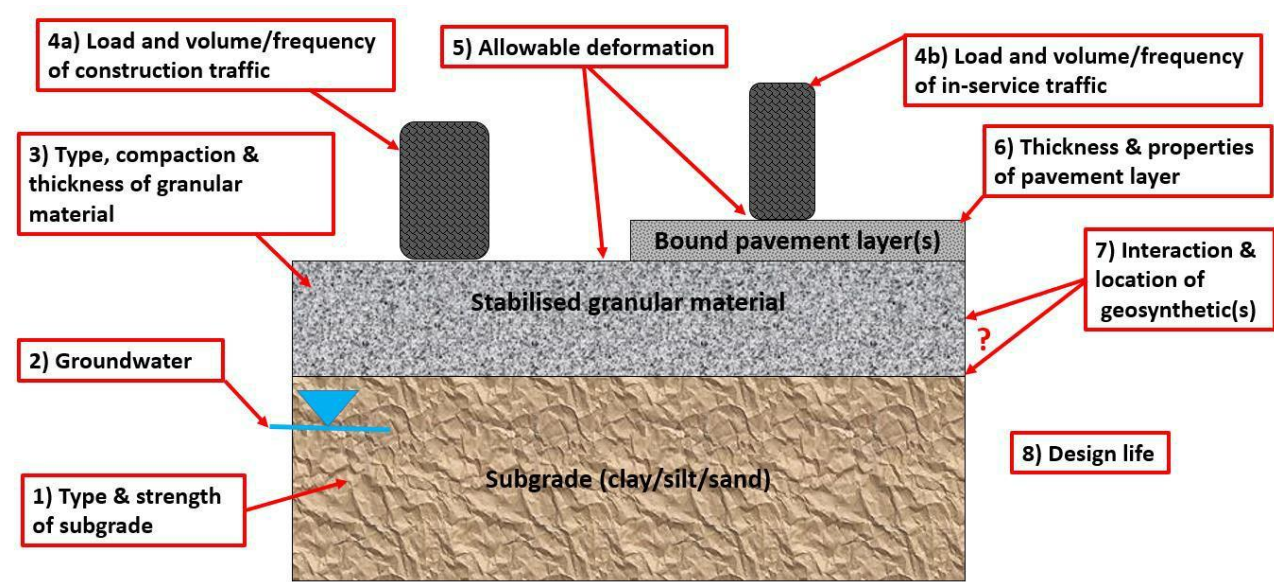
©ISO 2019-保留所有权利 15

ISO TR 18228-5

4 种典型应用

- A. 4.1 被 地区的稳定 粒层
- B. 典型地，当考虑在动态 荷的交 地区和公 中使用稳定 粒层时，有三种主 的方案。
- C. 层 用于承 来自施工 和在役交 的荷 ，而不 外的粘合或 粘合 层。
方 的例子包括拖 公 和小型（也 是农村地区）未 和未 的公 。

层 为仅承 施工 的荷 ，上 层 为承 所有使用中的交 ，且不受假 的稳定性影响。实例包括公 ，其中稳定的 粒层构成 基础（基层和底基层）的一 分，并在上 建 有粘结的 层（ 常是沥 或水泥）。



与上 B 相同，但在分析 整体性能及其承 行 荷 的能力时，考虑了 粒层稳定度的影响。

图 5. 稳定 粒层--影响交 地区和性能的关键因素:方案 A, B 和 C--在无粘结和上 粘结 层上的交

D. 4.2 稳定 粒层

常，当考虑在动 床应用中使用稳定 粒层时，有五种原则 方案。

稳定的次 碴或基础层， 用于承 来自施工 的荷 ， 并作为放置上 碴或约束层的工作平 台，支撑 枕和 ， 并容纳服务 的荷

E. 16©ISO 2019-保留所有权利

F. ISO TR 18228-5

G. 如上所 ， 但稳定性的影响包括在对 床的总体性能及其承 在役交 荷 的能力的分析 中

H. 直接建 在 基上的稳定 床层，因此 用于 应施工交 和使用中的 。

副 流器层和结合/ 流器层 得到稳定。
稳定 床层，以减少 床 粒在使用条件下的移动，但不考虑 效益。

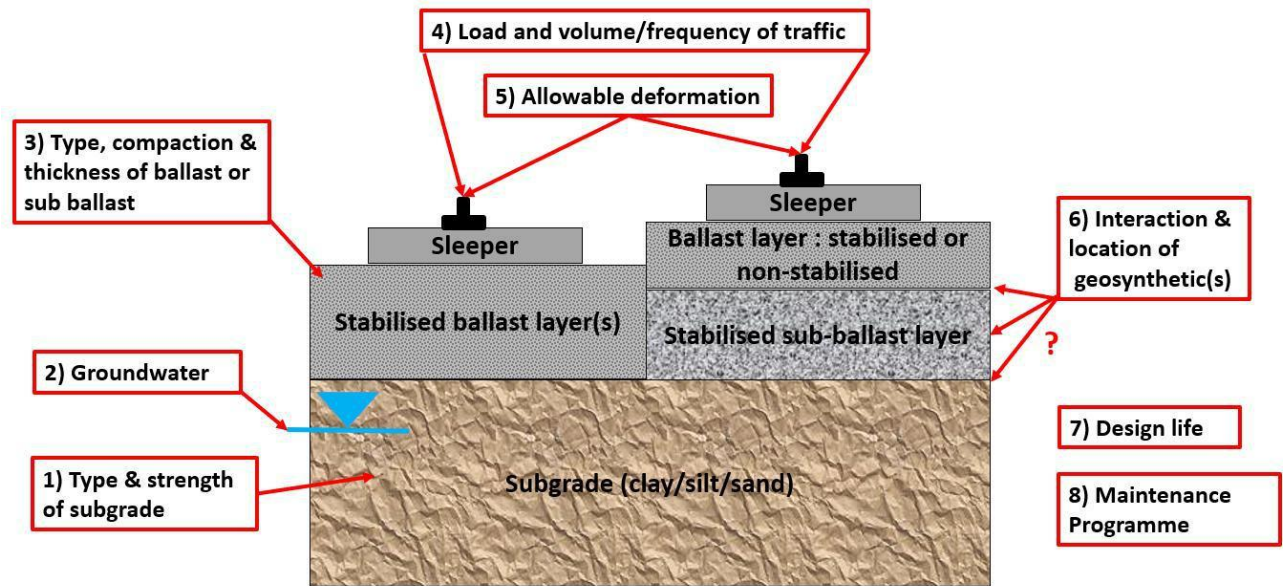


图 6。稳定 粒层--影响 床性能的因素:

方案 D, E, F 和 G-稳定的副 流器和/或 流器层

I. 4.3 工作平台的稳定 粒层

J. 常，考虑在稳定工作平台上使用稳定 粒层时，所 承受的 类型如下:-

K. 与施工交 相关的动态 荷，如前 的情景。

与大型 备和机械缓慢穿 场地相关的缓慢移动的 幅值低 动态 荷（有效地为 态 荷），可能 在 的时卧内（数天或数周）处于 止状态。

与大型 备（如打桩机和 机）操作相关的 幅值中 动态 荷。 些 荷 常 履带，垫板或支腿施加， 可能是极 的点 荷。

板式基础和/或工作平台的 常是在极 状态(ULS)下根据局 和整体稳定性 行 。

©ISO 2019-保留所有权利 17
ISO TR 18228-5

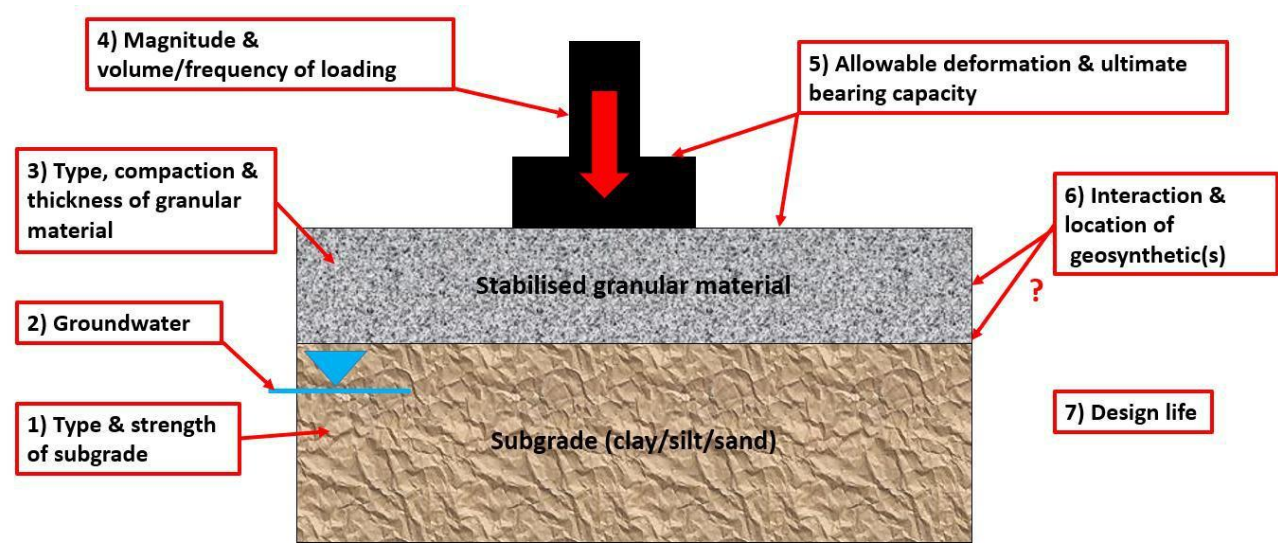


图 7。稳定 粒层-影响工作平台性能的因素:

情景 H- 幅值伪 荷

5.0 原则

5.1 概

多 约束层（如 ）的 方法的特点是它们的经 来源基于世界各地的特殊性 的经 。 多 方法 是基于应用，并提供各种 料层的标准厚度。另一些则提供经 或半径 的 则和方程式。

到目前为止，在大多数 化土工合成物对结构的稳定作用的方法中，不可能包括土工合成物的 用产品特性。土工合成材料已被包括在一些 中，以提供经 获得的系统参数的改 ，例如模数的改 。系统参数改 的 据也可替代地 在 当的 料和 loa 中对特定产品 行现场和全尺寸实 室测 来提供

应用程序的 ding。

本节的其余 分将 细介绍各种应用中 用的一些 方法。

5.2 未

Giroud 和 Han(2004)的方法提供了一个合理的经验框架,使得有可能量化所有类型的土工合成材料对稳定松散颗粒层的好处。对于土工格栅,方法需要进行校准,而对于土工织物,则不需要进行校准。必须指出,为了有效使用和确保可靠的结果,Giroud-Han 方法对所考虑的每种具体类型的土工格栅进行校准。它已经

仅对土工格栅进行校准,使用孔径稳定模(由 ASTM D7864 测试)作为土工格栅的特性。其他属性或属性组可用于校准所有类型土工格栅的方法。在过去的几年,数百条未校准的测试和

$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{[1 + 0.204(R_E - 1)]} \left(\sqrt{\frac{P/\pi r^2}{\frac{s}{f_s} \left[1 - 0.9e^{-\left(\frac{r}{h}\right)^2}\right] N_c f_c s_u}} \right) r$$

18©ISO
2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

美国,加拿大和拉丁美洲的区域使用 Giroud-Han 方法以一致的方式进行校准;并且在使用该方法的目的上没有出现性能问题。Giroud-Han 方法最近被添加到 FHWA(美国联邦公路管理局)土工合成材料培训手册中,作为推荐的方法。Giroud-Han 方法不同于其他方法,它可以量化土工格栅和土工织物的影响。

Giroud-Han 方法提供了计算未粘结颗粒层所需厚度的如下公式:

(1)

h = 材料基层厚度(m)

J =孔径稳定模 (n-m/deg)

P = 荷载 (kN)

r = 轮胎半径(m)

N =ESAL 数 (单胎等效标准 80 kN)

N_c =承载力系数

3.14 (未稳定)

5.14 (土工织物)

5.71 (土工格栅)

s = 深度(m)

f_s = 深度系数 (0.075 米)

s_u = 基不排水抗剪强度(kPa)=30·CBR

注意,基底厚度 h 出现在上方方程的两侧,因此必须迭代求。

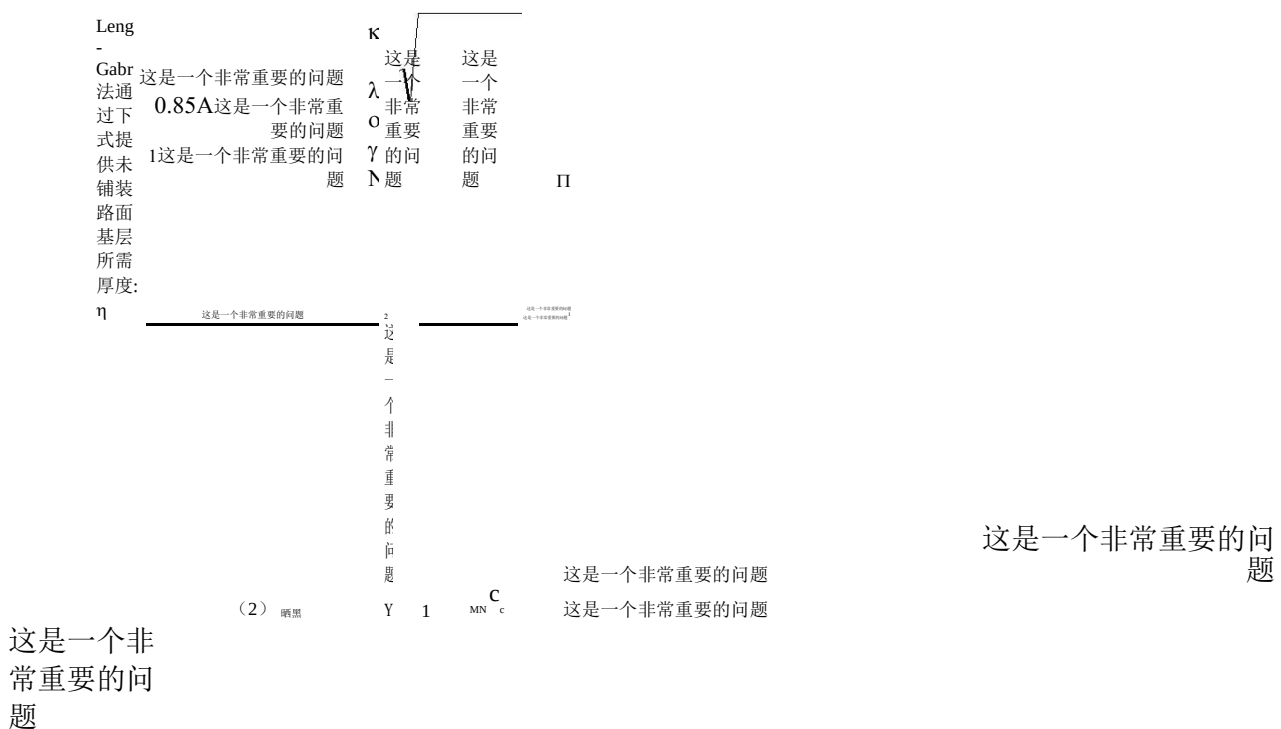
原来的 Giroud-Han 方法,即上方所报的方程所提到的方法,已经发展用于土工织物和双向挤压土工格栅;因此,在推广到其他类型的稳定土工合成材料的情况下,方法需要进行校准。

应变为 2% 的土工合成材料（用 ISO 10319 测量）。实验结果验证了该方法的有效性。

在过去几年中，世界各地数百条未铺装道路和地区采用 Leng-Gabr 方法一致地进行了设计，迄今报告的使用该方法设计的项目没有出现性能问题。

通过板载试验和现场试验，证明了在基层中加入稳定土工合成材料可以延缓并最大限度地减小随着通道数增加荷载扩展角的下降。基于上述实验测试和经验准则，土工格栅的影响是通过 2% 伸长率下的抗拉强度 $T_{2\%}$ （由 ISO 10319 测量）引入的。如果 $t_{2\%}$ 在纵向和横向之间不同，则 a_v

假设 e_{rage} 值。



$$\text{与: } k_2 = (A/H) \cdot 0.81 \cdot \max[(0.58 - 0.000046T) \cdot 2\%, 4.5] \quad (0.125 \log N + 1.5)$$

$$c \cdot r_r \cdot CR = 0.025 \cdot (0.125 \log N + 1.5)$$

(5)
其中:
 h =集料基层厚度(m)
 J =孔径稳定模量 (n-m/deg)

p =轮胎压力 (kPa)

a =轮胎足迹半径(m)

N =标准 80 kN 轮轴通过次数

= N_c =路基承载力系数

= 3.80 (未稳定基底)

= 5.69 (土工织物稳定基层)

6.04 (土工格栅稳定基层)

C_u =路基不排水抗剪强度 (kPa)

a_1 =初始负载扩展角 (对于 $N=1$)

k_2 =定义负载扩展角随通道数增加而降低的系数。

$T_{2\%}$ =稳定土工合成物在 2%应变下的抗拉强度 (kN/m)

r =车辙深度(m)

r_{cr} =临界车辙深度, 当充分承载能力调动时达到(m)

注意, 基底厚度 h 出现在上述方程的两侧, 因此必须通过迭代求解。

Leng-Gabr 方法的局限性和适用性可以在 Leng&Gabr(2006)中找到, 参考文献中有报道。

ISO TR 18228-5

5.2.3 Pokharel(2010 年)土壤层方法

在对土工格室稳定机理研究的基础上,对土工合成材料设计的数值模拟和现场试验方法进行了改进,并使之适用于土工格室。修改包括将土工合成材料相关参数(如扭转刚度和 2%应变下的抗拉强度)改为土工格室相关参数(如弹性刚度,小于 2%的蠕变抗力和抗拉强度)。

$$h = \frac{\left(0.868 + 0.52 \left[\frac{r}{h}\right]^{1.5} \log N\right)}{\{1 + 0.204(R_E - 1)\}} \times \left(\sqrt{\frac{P}{\pi r^2 m 5.14 c_y}} - 1\right) r$$

Pokharel(2010 年)修改了 Giroud 和 Han(2004 年)关于非铺装道路土工合成物稳定的设计方法,将平面二维土工合成物相关参数(如孔径模数)改为土工格室相关参数。通过 NPA (Novel Polymeric

设定 ing （连同所有其他参数），路面厚度由以下参数确定：

(6)

其中：

h =所需基层厚度(m)

r =轮胎接触面积半径(m)

N =等效标准轴重(ESAL)数

P =车轮载荷 (kN)

c_u =路基土的不排水粘聚力 (kPa)

RE =基层与路基土的模量比

m =承载能力动员系数

Gabr(2001 年) 在土工格栅稳定试验中观察到，由于在实验室反复加载下基层材料的劣化，荷载分布角随通过次数的减少而减小。最近的研究表明，NPA 土工格栅显著减缓了基础质量恶化的速度。这种现象归因于三维土工格栅约束，以增加和保持基层的模量。Han

等人（2007 年）提出了模数改进因子 If 来解释这一益处： $r = E_{BCS}$

BCU

(7)

其中 E_{bcs} 和 E_{bcu} 分别为稳定基层和未稳定基层的模量。考虑 If, Pokharel 公式中的模量比 R_E 可以表示为: $r_e = I_f \cdot (E_{BCU}/E_{SG}) = \text{最大值} (7.6; \text{我} f. [(3.48^{CBR_{BC0.3}}) / CBR$

SG

D)

(8)

其中 CBRbc 和 CBRsg 是未稳定基层和路基的加州承载力比值。

©ISO 2019-保留所有权利 21

ISO TR 18228-5

$$m=\left(\frac{s}{f_s}\right)\left\{1-0.9\exp\left[-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]\right\}=\left(\frac{s}{75mm}\right)\left\{1-0.9\exp\left[-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right]\right\}$$

Han 等人 (2207) 报道，具有土工格室稳定的模量比范围在 4.8 到 10.0 之间。无论如何，根据循环平板加载试验和加速移动车轮试验，Pokharel 建议将 NPA 土工格室稳定基层的 RE 值限制在 7.6。

承载力动员系数(m)由下式给出:

(9)

其中

s=稳定基层顶部极限车辙深度(mm)

f_s=车辙系数=75 mm。由于通常在土工格室下面放置一个分离的非织造土工织物，所以承载力系数

C 根据 Giroud 和 Han(2004 年)，土工格室稳定的非铺装路面基层假定为:n

c

=5.14 (土工织物)

$$\left(0.868 + 0.52 \left[\frac{r}{h} \right]^{1.5} \log N \right) \quad (10)$$

Giroud-Han(2004 年)用于控制载荷分布角降低率的系数(该系数取决于土工格栅的孔径稳定模量 J)，用于基于 NPA 的土工格室稳定，已被以下术语取代: (11) Pokharel 方法的参数包括 MIF, R

e

，载荷扩展角的降低率，承载能力等，已针对 NPA 地穴进行了校准 (Pokharel, 2010 年; Pokharel 等人, 2011 年; Pokharel 等人, 2015 年; Pokharel 等人, 2016 年)。

将该方法推广到其他类型的土工格室需要不同的参数，这些参数可以通过对特定土工格室进行的实验室循环板加载试验和足尺动轮试验来标定。

5.3 铺面道路

5.3.1 美国州公路和运输官员协会(AASHTO)(1993 年)修正方法

在北美，基层采用土工格栅稳定的柔性铺面道路的设计实践状况符合 AASHTO《路面结构设计指南》(AASHTO 1993)，该指南已与 AASHTO 标准实践文件 R50-09 (AASHTO 2013)的要求保持一致。AASHTO 设计方法是在六十年代早期基于 AASHO 路测开发的，后来经过多次修订，直到 1993 年最终版本。AASHTO R 50-09 报告称，工程师可能希望根据以往成功的应用和长期性能，开发一份被认为适合特定路面应用的经批准的产品清单 (AASHTO, 2010 年)。AASHTO R50-09 文档引用了 GMA White

©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

文件二（GMA，2000 年），详细介绍了与将土工合成材料纳入路面有关的设计过程。与寿命延长相关联的路面稳定的好处可以被纳入经验设计（例如 AASHTO'93），使用交通效益比(TBR)或修正的层系数比(LCR)，其精确地表示可由稳定的路面承载的 ESAL 的额外数量。作为等同物提交的产品应具有已记录的等同物

nt 或在全尺寸加速路面试验(APT)中的路面稳定性能更好，以及根据项目条件（基层材料和厚度，破坏标准，路基强度等）的已完成项目经验得出的结果。来自现场性能的结果可以包括但不限于静态和重复板载荷测试，以确认施工时的材料性能以及国际粗糙度指数(IRC)和 p 的读数

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log(Sn + 1) - 0.2 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{2.7}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

路面
使用
寿命
的改
进状
况指
数
(PCI)。

加速路面测试(APT)应是主要的手段，用于收集数据，以开发稳定层（TBR 或 LCR）所需的设计输入，并验证稳定层延长路面寿命的能力。至少应按照 NCHRP 报告 512“加速路面测试:数据指南”（Saeed and Hall，2003）或 oth 中定义的协议建造和测试三个全尺寸加速路面测试(APT)路段适当的指导。APT 试验应计划涵盖不同范围的路基强度，路面和基层厚度的变化，不同类型的土工格栅及其在路面段内的位置。此外，试验段的设计和构造应使得在 APT 程序期间，能够以 12.5 毫米或更小的永久变形实现至少 200,000 当量标准轴荷载（ESAL）。还应包括一个非稳定控制部分，用于比较和校准目的。然而，如果控制段的层厚和/或模量与土工格栅稳定路面的层厚和/或模量不相同，则可通过计算 Tingle 等人描述的有效基层系数来确定设计中使用的参数。Al.(2017)或通过机理分析。有效基本系数将用于确定 tes 的特定条件的 LCR_{tGMA} 白皮书 II（GMA 2000）和 Tingle 等人报告的此类测试结果。Al.(2017)证明 TBR 和 LCR 都不是固定的数字。因此，在设计中使用这些数值时，必须进行工程判断。AASHTO 方法采用基于多层弹性理论的经验方程来模拟路面横截面。该结构的特征在于结构数(SN)，该结构数反映柔性路面承载预定交通荷载的组合结构能力。在设计过程中，SN 的选择应使路面横截面能够承受预期的交通负荷，而不会出现不超过项目要求。通过求解以下性能方程确定所需 SN:

(12) 其中 w_{18}

=路面设计寿命内 80 kN 等效单轴荷载(ESAL)应用的次数，Z

r

=标准法线偏差，S

0

=标准偏差， σ PSI=本使用性能指标允许损耗和 M_r =路基的回弹模量。 ©ISO 2019-保留所有权利 23 ISO TR 18228-5 一旦确定了所需的 SN，就可以通过一系列求解 EQ 的迭代来设计路面结构。（13）： $SN=a_1 \cdot D_1$

$+a_2 \cdot D_2 \cdot m$

2

$+a_3 \cdot D_3 \cdot m^3$ （13） 其中 a_1 ， a_2 和一个 a_3 =分别为表面，基层和底基层的层系数（层的相对强度）， D_1 ， D_2

和 D_3

1) D_3

2) =表面，基层和底基层分别的厚度，m

3) D_2

和 m

3

=基层和底基层排水系数。

根据 GMA 白皮书（Berg 等，2000），土工合成材料对路面结构整体结构能力的结构贡献可通过三个因素纳入设计：交通承载比 (TBR):具有相同几何形状，材料和相同规定破坏状态的土工合成材料稳定段的荷载施加次数与未稳定段的荷载施加次数之比。基层减薄系数(BCR):土工合成材料稳定基层的厚度与未稳定基层相比减少的百分比。层系数比(LCR):土工合成材料稳定基层的层系数与未稳定基层的层系数之比。

这三个因素中的每一个都是从每种土工合成物特有的经验数据中得出的。它意味着这些参数中的每一个都需要从每个制造商进行的实验室和现场测试中确定。具体而言，一般需要进行独立核证的全面测试试验，以适当证明数据的合理性，并确定土工合成材料的益处。

在设计土工合成材料稳定路面结构时，AASHTO R50-09 建议的首要步骤之一是评估使用土工合成材料在使用寿命，减少基层厚度或两者方面的目标效益。这导致设计人员选择是应用 TBR，LCR 还是 BCR 方法。

使用 TBR 时，等式。（12）可按等式所示进行修改。（14）评估由于土工合成材料的有益作用而增加的 ESAL 总数:

(14) 土

$$W_{18, \text{稳定}} = \frac{W_{18, \text{未稳定}} \cdot \left(\frac{\text{土工织物的典型 TBR 值在 1.5 至 10 之间, 土工格栅的典型 TBR 值在 1.5 至 70 之间 (Shukla, 2002 年)}}{1} \right)}{\text{另一方}}$$

面, 如果设计目标是减少基层厚度, 那么可以遵循 BCR

这是一个非常重要的问题

1

方法，
其中BC
R定义为
：

BCR

这是一个非常重要的问题

这是一个非常重要的问题

这是一个非常重要的问题

$\alpha 2$

这是一个非常重要的问题

这是一个非常重要的问题

稳定的d 不稳
定的埃德 (15)
因此EΘ。
1 (12)可修改为:
M 3序号 (16)

a_1

这是一个非常重要的问题

这是一个非常重要的问题

1 d₂ BXP

d 3, BCR

这是一个非常重要的问题

a 3

M2 这是一个非常重要的问题

这是一个非常重要的问题

©ISO 2019-保留所有权利

当仅稳定基层时，减小的基层厚度可 算如下：

$$d_{2, BCR} = \frac{a_1 \cdot d_1 + (LCR_2 \cdot a_2) \cdot d_2 + (LCR_3 \cdot a_3) \cdot d_3}{LCR_1}$$

(17)

典型的基层厚度节省范围为:土工织物 20%至 30%，土工格栅 30%至 50%，因此土工织物 BCR=0.2÷0.3，土工格栅 BCR=0.3÷0.5。

在 LCR 方法中，系数直接应用于 EQ。（13）将土工合成材料的效益落实到压低基层厚度的方法中。然而，LCR 是根据现场测试结果 算的，作为层系数的比值而不是层厚度。因此，它表示特定土工合成物对土工合成物所在层的层系数的影响。因此，在以下方 实现了业绩效益：

方法如下:

$$SN = a_1 \cdot d_1 + (LCR_2 \cdot a_2) \cdot d_2 + (LCR_3 \cdot a_3) \cdot d_3$$

(18)

LCR 常是作为下 层 CBR 的函数来获得和绘制的，因此对于同一土工合成材料，基层（下 有底基层）和底基层（下 有 基）应使用两个不同的 LCR 值。

按照 种方法， 者可以 增加使用寿命（即 ESAL 的数 ）和减少所 层厚来 化土工格栅加固的性能效益。所有 三种方法的标准实 本 上 是 常经 性的，并依 于 者的经 和制 商公布的满尺寸测 结果数据来确定性能效益系数。

很容易推导出 LCR 和 BCR 之卧的关系:

$$LCR = \frac{1}{BCR}$$

(19)

1 BCR

因此，LCR 和 BCR 方法只是一个硬币的两 ，因为对于相同的土工合成物和下 层的相同 CBR，LCR 和 BCR 值 简单的相关关系直接联系在一 。然而，LCR 或 BCR 与 TBR 之卧不能建立直接关系。最 有研究表明（Isola 等人，2018 年），TBR 和 LCR 方法可以独立使用，但 LCR 方法导致更保守的结果。

5.3.3 MEPDG 方法

2008 年，AASHTO 正式 用了机械经 指南(MEPDG)。 方法利用力学原理，最小化对经 测的 依 ，最大 度地提 可 性。在 方法中 入了 各层材料的力学特性。因此，应当 为 MEPDG 平 台更 合纳入土工合成物稳定化的惠益。在现有的 MEPDG 模型中，常常考虑土工合成物的稳定作用

用等效回弹模量₀和泊松比表示。然而，根据沥青层的厚度，土工合成物的贡献已被纳入基层的性质

©ISO 2019-保留所有权利 25

ISO TR 18228-5

程也作为疲劳裂纹开始的等效延迟。因此，土工合成材料加固的好处一直没有得到一致的界定（Zornberg, 2012 年）。当使用土工合成材料的 MEPDG 方法进行稳定，确定稳定的和疲劳定律，对稳定段进行广泛的测试。由于方的工作尚未开展，MEPDG 在稳定中的应用仍是一个很大的

可判的。

- 5.3.4 土工格室力学-经验方法
- 对于或稳定基上的，用土工格室的方法可以根据结构的弹性特性，循环机械-经验程序（Kief, 2015b）。将各层的厚度，弹性模量和泊松比纳入商用分层弹性分析程序，可以建立各层的力学模型；力学模型产生拉伸和压缩应力的弹性响应
- 分别用于疲劳和破坏模式。

应用于土工格室稳定的力学-经验方法常利用以下参数:

基回弹模量₀ 寿命内 ESAL (80 kN 当量单轴荷载) 的数 模 改 因子(MIF) 用土工格室稳定的层的 MIF 与层模 (基层和/或底基层) 的改善有关，其由下式表示:

$$MIF=E$$

带有细胞约束系统

/E

无细胞约束系统

(20)

其中:

- E =土工格室稳定基层/底基层的模
- e 无蜂窝约束系统=未稳定基底/底基底的原始模
- 土工格室的 MIF 是性能测试获得的，包括寿命内的具体土工格室特性（Rajagopal 等人, 2014 年），具体填充类型和基的弹性模数。
- MIF 在以下情况下：
 - 小的单元格大小
 - 的单元格度

更 的单元格度与单元格大小的比率

填充材料的低模

的 基/支护回弹模

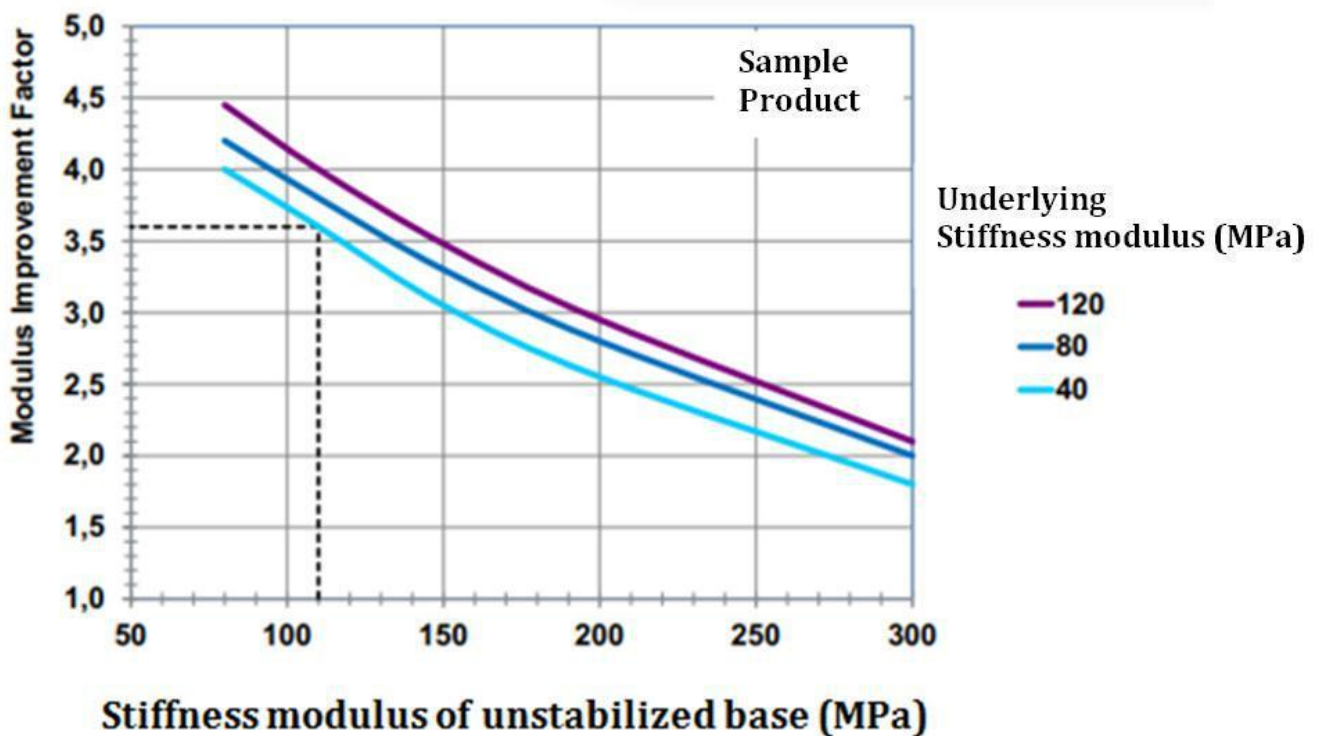
- NPA（新型聚合合 ）土工格室的测 MIF 值 常在 1.8-4.5 范围内，取决于上 因素。
- 未稳定基层/底基层的原始模 取决于:

26©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

下卧层和 基的承 力；

底基层的层厚。



随着下垫层承 力的增大和底基层厚度的增加，底基层在不稳定状态下的刚度增大。

图 8 可用于初步 估 MIF 值， 值是未稳定基层/底基层模 和下 层模 的函数。 根据 ASTM D6992，在 44:C，51:C 和 58:C 的三个等温步 下，根据 ASTM D6992，从图表中得出的 MIF 基于具有拉伸强度（ISO 10319） 于 16 千牛/米，累积永久变形低于 3%的穿孔条的土工格室（Vega 等人，2018 年）。

如果在土工格室稳定层之上放置 外的未稳定层，则由于土工格室稳定层提供了更强的支撑，其模 也可能得到改善。

图。8.提供 NPA（新型聚合合 ）土工格室稳定层的 MIF 值与未稳定基层/底基层的模 和下 层的模 的函数关系的图表（根据 Vega 等人，2018 年修改）。

5.4 工作平台和 荷 移平台

当处理用于 型机械的工作平台或用于停 甲板， 箱堆场和类似应用的 移平台时， 可
以被 为是 态的。

- 在 些应用中，土工合成材料仍然发挥稳定作用，即提供约束机制，有时 提供张拉
膜机制，但其参考极 状态是极 承 力的 ULS。
- ©ISO 2019-保留所有权利 27

ISO TR 18228-5

有两种典型的土壤条件会使工作平台或荷 移平台承受能力不 ：

的淤泥或粘土；

松散的沙子。

用两种不同的 方法，即 力法和 BCR 法
来处理 两种土层条件。5.4.1 粘土 基 力法当竖向
荷作用于包含碎石 料-粘土 基系统的荷
传 平台时，产生水平和竖向应力。 料中的
水平应力在 基表 产生向外剪应力。 些剪
应力可使粘土的承 力压低到纯竖向荷 值的一
半。如果存在稳定的土工合成物，则 些剪应
力可由土工合成物承 （取决于界 摩擦），使粘土的全 承
能力得以 动。

Rodin(1965)，Barenberg(1980)和其他研究
人员的研究表明， 粘土 基-未稳定 粒层
系统的承 力可以 似为：

Q

而 土 基稳定 粒层体系的承 力可 似
为：

$$U = ? c U \quad (21)$$

Q

r

=2? c

U

(22)

当的安全系数 FS，压低容承能力，可以有效地制散体平台的和变形:FS=2 已能很好地减小变形和位移；当允许变形最小时，应择值 FS=3:

$$q_{ua}=q_u/FS; \quad Q_{Ra}=q_r/FS \quad (23)$$

力法是在上 基础研究的基础上发展 来的，用于 粘土上荷 传 平台的 。力法是基于 粒层圆形或矩形加 区 平 二维稳定土工合成物在 粘土层表 产生的压力分布。方法保 了 基 的压力小于 基土体的允 承 压力 以 当的安全系数。技术假定垂直压力在平台土层中的分布与平台土层的垂直压力分布与平台土层的垂直压力分布一致

用 Boussinesq 理 算圆形或矩形加区域。如果在均匀弹性半空卧的圆形或矩形区域上施加均匀分布的垂直压力 q ，由于上 应力是恒定的，施加压力 q 在介的每一点 产生平衡条件。因此，垂向应力与介 特性无关。Boussinesq 理 给出了沿垂直线各点的应力分

圆形区域的中心或矩形区域的一 。

28©ISO 2019-保留所有权利 ISO TR 18228-5 施加的 荷 P 似等效于一个圆形区域上的均匀垂直应力， 应力等于 胎压力 P ， 圆形区域的等效半径为: $r_e = (P/\pi P)^{0.5}$ (24) 引入情商。(24) 对于圆形区域上均匀垂直应力的 Boussinesq 方程，求 深度 z ，所 的不稳定层厚度为: z

U

$$=r/[1-q$$

$$UA$$

$$/p)$$

-2/3-1]1/2 (25) 其中: z_u =平台的厚度(m)，在 平台处，承 能力 q_u 变得等于由 胎压力 p 在半径 R 的圆形区域上引 的垂直应力。未稳定层的所 厚度为: z

r

$$=r/[1-q \text{ 拉 } /p) -2/3$$

$$-1]^{1/2} \quad (26) \quad u \text{ 和 } z$$

r

在 和 承垫等矩形 荷的情况下 (Rimoldi&Simons, 2013 年)。

z 的比

r

和 z

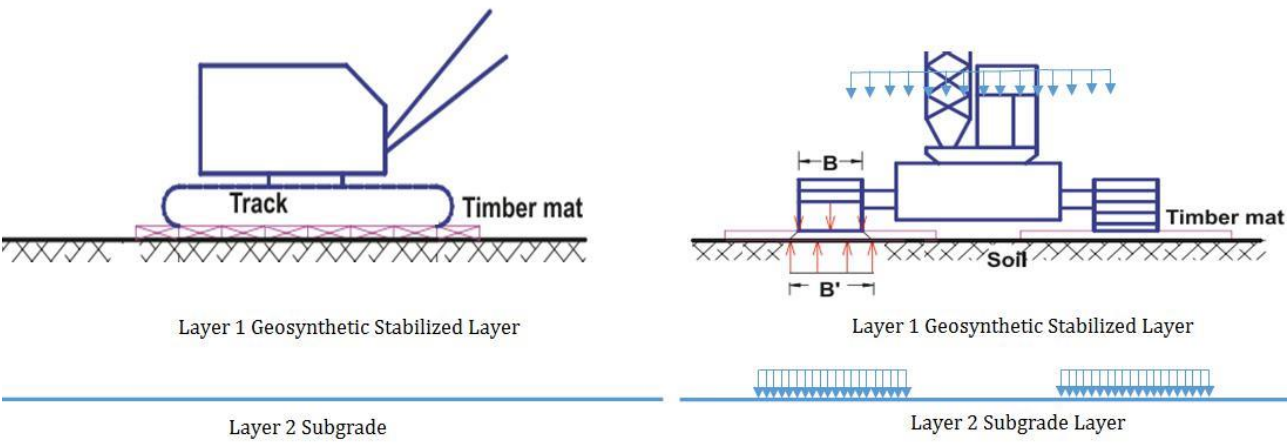
U

结果表明，在竖向应力和受力 积相等的情况下， 用平 二维土工合成材料加固平台，可使平台厚度减小 30%~50%。

在确定平台厚度后， 行稳定土工合成材料布置 。第 5.5 节提供了实 可用的 方法。

在垂直中心 150-300 毫米处， 用 2-3 层等卧 稳定土工合成材料 常可获得最佳效果。

图 9。矩形负载区域示例:履带式起重机（侧视图和前视图）， 可选地停留在木垫上



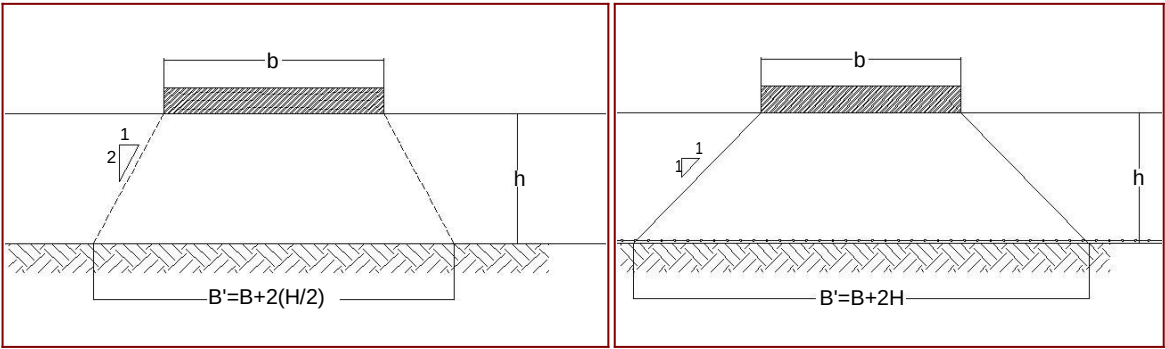
5.4.2 软砂路基 BCR 法

BCR 方法基于这样的假设，即由均匀加载的圆形或矩形区域传递的静载荷分布在平台结构中向下直到松散的砂层。

在颗粒层中插入稳定土工合成材料可以通过扩大荷载分布区域来提高承载力，如图所示。 10。

试验研究表明，加入稳定土工合成材料可使荷载扩展角从约为 $2V/1h$ 增加到约为 $1V/1h$ 。至面糊约。 $1V/1H$ ，如图所示。 10。

图。 10-当载荷扩展角从 $2V/1h$ 的面糊增大到 $1V/1h$ 的面糊时，载荷分布区域变宽



将稳定颗粒层假定为半刚性地基，其承载力可用经典的太沙基方程计算。

荷载扩展角改变了路基顶面荷载区的宽度 B' 和长度 L' ，如图 1 所示。 10。

然后使用众所周知的太沙基方程计算承载力，就像对于具有尺寸 b' 和 l' 的基础：

$$Q_{林} = 1/2 \gamma B' N_{\gamma s} + C' N_{cs} + Q' N_{qs} \quad (27)$$

其中 N_q , N_c , N_r 是承载力系数， s_q , s_c , s_r 是形状系数（比值 b'/l' 的函数）。

注：对于圆形或方形加载区域， $B'=L'$ ，因此： $B'/L'=1.0$

使用 Terzaghi 方程（20），对于未稳定和稳定的颗粒层条件，对于甲板厚度 h_u 和 H_r 的任意值，可以计算承载力 q_u 和 q_r 。

安全系数计算如下：

$$\text{-未加固甲板:} \quad FS_u = q_u / v_u \quad (28)$$

$$\text{-加固甲板:} \quad FS_r = q_r / v_r \quad (29)$$

承载力系数 BCR 的计算公式为：

$$BCR = FS_r / FS_u = (q_r / q_u) \cdot (v_u / v_r) \quad (30)$$

当 BCR 为 1，60-1，75，FSR=2.0-3.0 时，通常得到最佳结果。

更多细节可参见 Rimoldi&Scotto(2014)。

5.5 铁路

5.5.1 美国联邦铁路管理局

美国联邦铁路局开展的一项综合实地案例研究表明，土工格室稳定性能延长了维护周期（Palese 等人，2017 年）。

5.5.2 网络轨道（英国）设计规范

如 Das 报告（2016 年）所述，土工格栅的使用正开始被纳入若干国家，特别是欧洲国家的铁路设计规范。作为一个例子，以下是网络铁路（2005 年）通过的准则摘要。根据导则，要求的动轨枕支承刚度(K)在表中给出。1。

表 1-最大轴重为 25 吨时所需的动态轨枕支撑刚度(K)（2005 年网络轨道之后）

		Minimum dynamic sleeper support stiffness (K) kN/mm/sleeper end
Absolute value		30
Existing main lines	With geogrid	30
	Without geogrid	60
New track	Up to 100 mph	60
	Above 100 mph	100

动轨枕支撑刚度(K)定义为“峰值载荷除以在每个轨座处承受近似正弦脉冲载荷的未夹持轨枕的轨座区域下侧的峰值挠度；因此，图 11 可用于在已知 K 值和不排水路基模量 E（或不排水 cohes）的情况下获得所需的道床厚度

离子 Cu)。

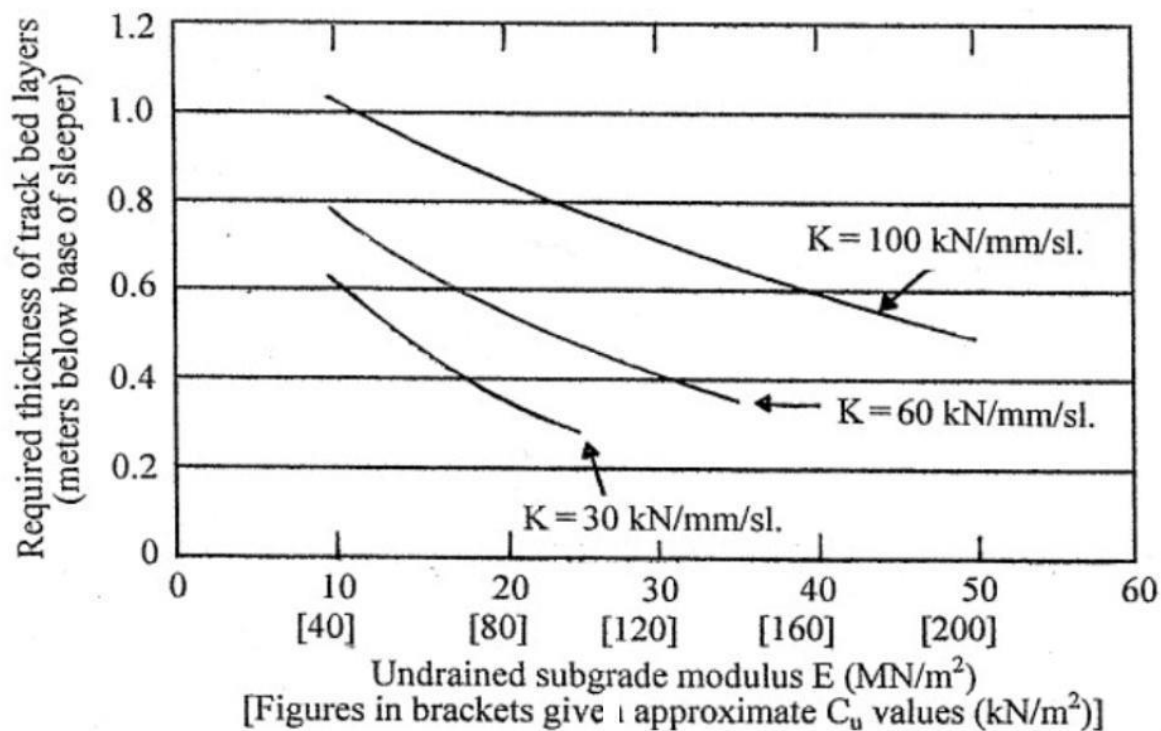


图 11。确定道床层厚度（网络铁路，2005 年）。

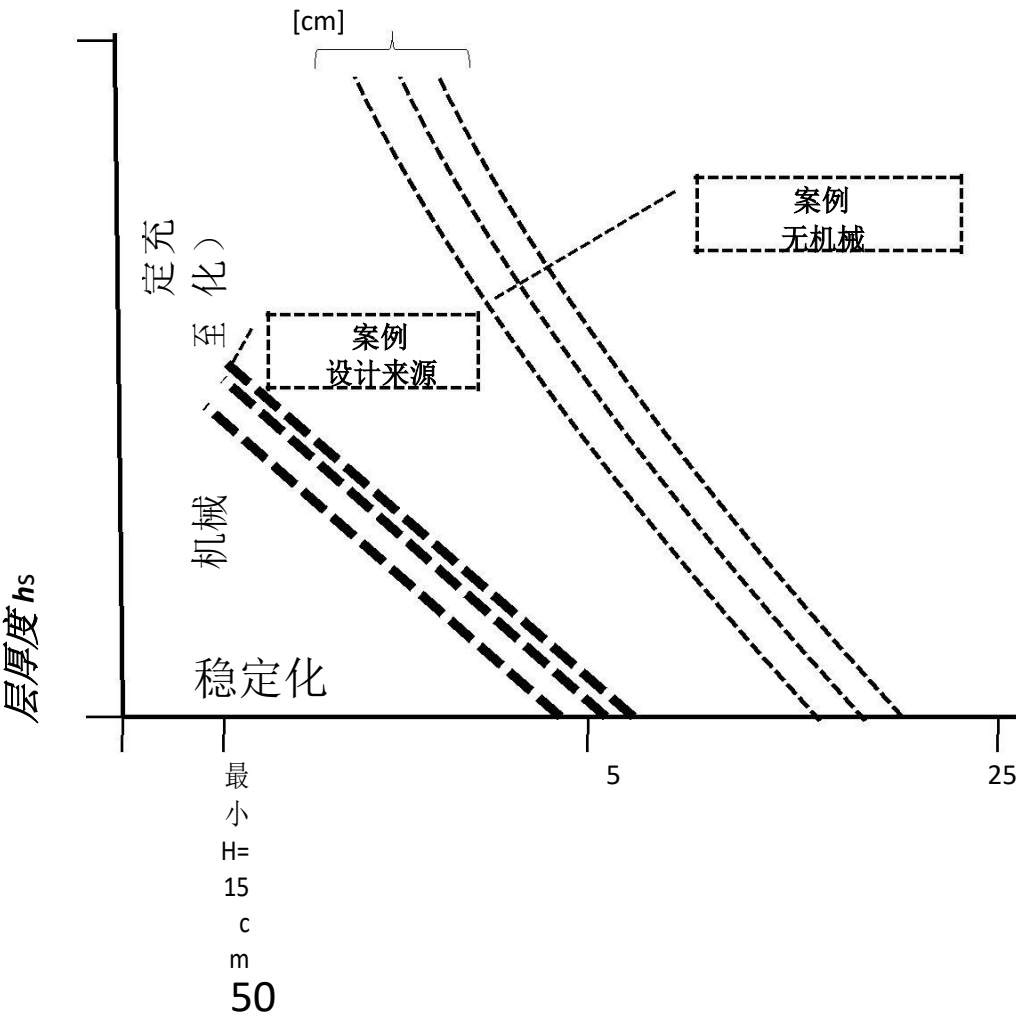
5.5.3 Ev2 方法

路基上的模量 E_o 和选定的施工层水平上的模量 E_c 通过承载板试验等方法进行测量。

- 设计程序通常如下:
- 测量了路基 E_o 模量
- 根据铁路/公路类别, 定义了所选施工水平上的 E_c 模量 (标准范围 20-180MPa)
- **E 填充材料的模量应已知 (通常为 50-90 兆帕)**
- **未稳定层的 h_s 厚度由以下设计图表导出**
- 机械稳定层的 h_s 厚度是从下面的设计图表中推导出来的, 合理地较小, 但它不是通用的, 必须由制造商在独立研究的基础上定义

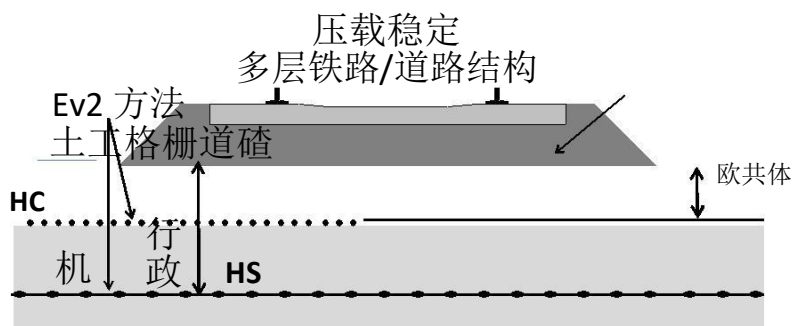
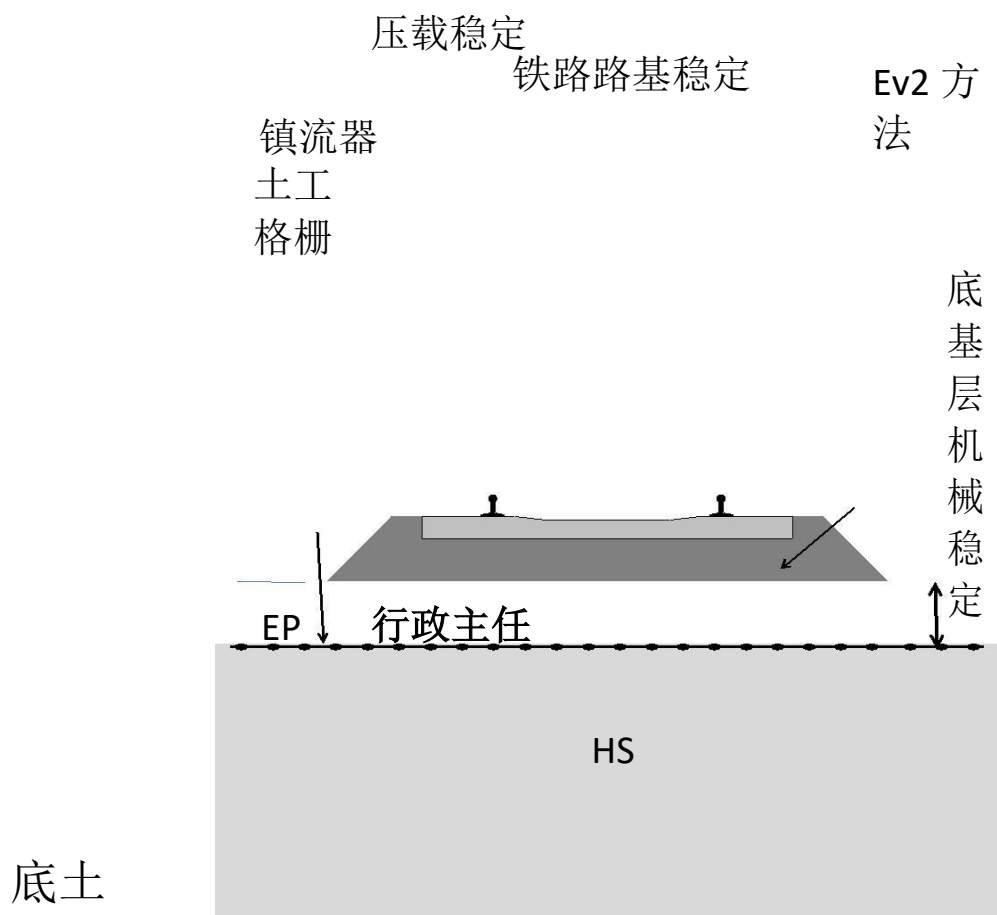
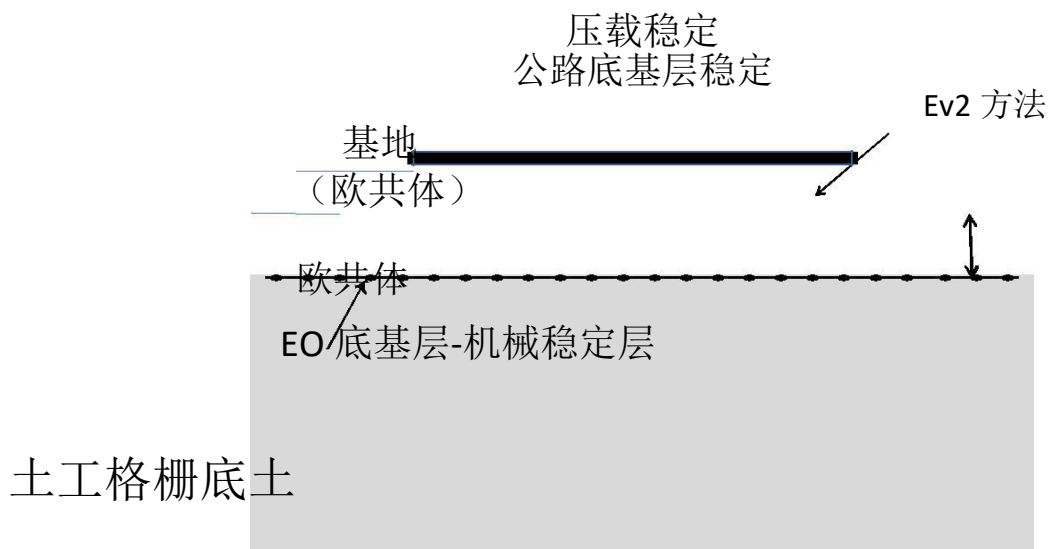
施工层 h_c 用于例如达到防霜厚度

ISO TR 18228-5



路基模量 E_0 [MPa]

ISO TR 18228-5



主任

机械稳定层施工层

机械稳定层

底土

5.5.4 铁路道碴

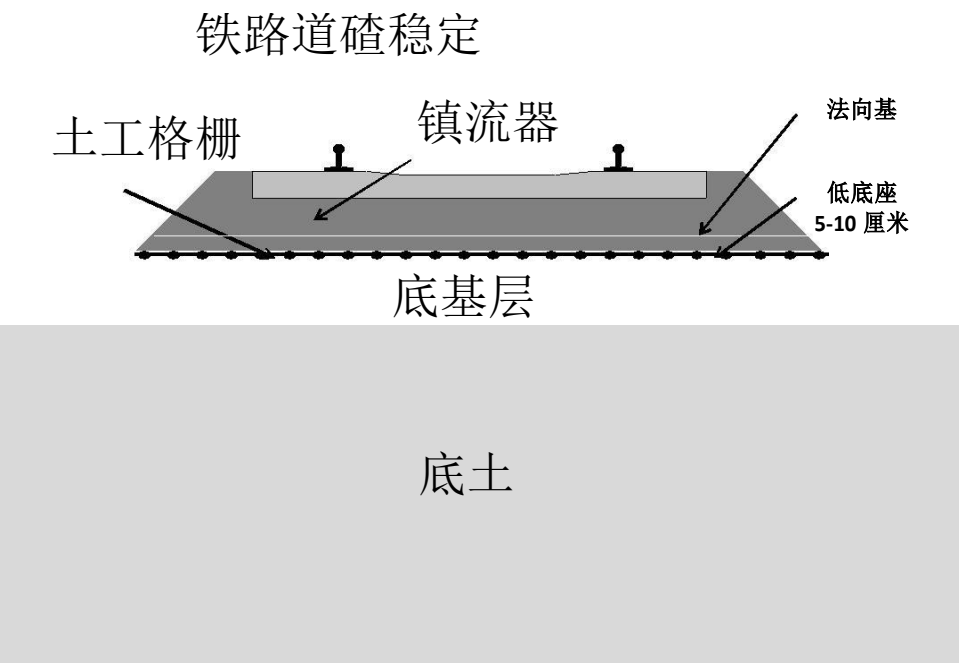
铁路道碴机械稳定设计尚无直接方法。然而，有一些参数会影响设计。

可应用的设计原则如下:-

- 由于受颗粒位移的限制，颗粒的磨蚀性较小，道床层的使用寿命可延长数年，
- 土工格栅应放置在道床层的底部
- 必须选择具有足够孔径尺寸的土工格栅

建议将道床层厚度增加 5-10 厘米（图 14），以避免在夯实或清理作业中损坏土工格栅。

图 14。典型的 铁路道碴稳定布置



5.5.5 土工格室加固铁路设计方法

土工格室对铁路结构的一个主要贡献是提高了稳定层的模量(MIF)，如果存在的话，则提高了稳定层上的层的模量。本概念详见 5.3.4 节。

基于 MIF 值，土工格室稳定可提高副道床结构的整体刚度。然后，稳定的次压载层可以在减小厚度和/或使用较低质量/边缘材料方面进行优化。这种结构中的设计标准可以包括根据铁路标准（典型地在 20 和 100 MP 之间）在副道碴结构顶部上所需的 EV2 模量（在板加载试验中测量的路基反应模量 a）。

可以定义不同的层模量，考虑到每一层的模量依赖于它下面的层，如 tab 中所列。 2（来自 Livneh，2013 年），其中：

ISO TR 18228-5
hsb=底基层厚度[mm]
hb=颗粒基层厚度[mm]
Esg=路基弹性模量[MPa]
Esb=底基层弹性模量[MPa]
Eb=颗粒基弹性模量[MPa]

vb, vsb, vsg 分别=基层，底基层和路基的泊松比

	Elasticity Parameters	Notes
Base	$E_b = E_{ab} \times (1+0.0067 \times h_b \text{ [mm]})$ $\nu_b = 0.35$	$E_b \text{ [MPa]} \leq 700$
Sub-base	$E_{sb} = E_{sg} \times (1+0.003 \times h_{sb} \text{ [mm]})$ $\nu_{sb} = 0.35$	$E_{sb} \text{ [MPa]} \leq 300$
Subgrade	$E_{sg} \text{ [MPa]} = 14 \times \text{CBR} \text{ [%]}$ $\nu_{sg} = 0.40$	$2 < \text{CBR} \text{ [%]} < 12$

表 2。不同层模量公式（以色列公路管理局，2003 年）
使用表 2 中的公式计算 Esg 和 Esb 后，可以使用图 1 中的图表评估 MIF 值。13（仅对 NPA 土工格
室有效）或与文献中可获得的其他图表一起使用。

如果用土工格室稳定底基层，则稳定底基层 ESB 的
模数为: eSBS =E 某人

·MIF

(40)

一旦设置了未稳定和土工格室稳定的铁路副道床的层厚和模量，就可以使用铁路设计标准应力/应变
软件计算稳定和未稳定铁路结构的副道床表面上的垂直沉降和轨枕中心以下路基表面上的垂直应力。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^\lambda$$

铁路下部结构的应力-应变特性取决于单个轴载施加的频率和大小。因此，路基上的荷载与加载循环次数成反比，加载循环次数上升到 1 次，公式如下：

(41)

其中：

分别对应于 N1，N2 加载循环的垂直应力指数平均值为 0.2

$$\sigma = \left(T / P \right)^\lambda$$

如果 P 表示
每轴的载荷，
 T 表示每天
的运输吨位，
则上式为：

(42)

对于恒定轴载， $P_1=P_2$ ，上式为：

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^\lambda$$

ISO TR
18228-5

(43)

其中:

T1, T2=分别对应 N1, N2 个装车周期的日运量吨位。

公式 (41), (42) 和 (43) 允许计算土工格室稳定设计所提供的装载周期和日交通吨位的改进。

5.6 土工合成材料布置设计

以上所示的设计方法通常假定仅用一个土工合成材料层来稳定颗粒土基层, 但实际所需的土工合成材料布置需要进一步设计。

- 土工合成材料提供以下稳定机制:
- 土体自重水平应力的基层侧向约束机理;
- 动/循环荷载 (典型为车轮) 产生水平应力的基层侧向约束机理;

基层或底基层-路基界面处的张拉膜机构。

这三种机制中的每一种都在土工格栅层中产生拉力。

/ 在现有的计算方法 (AASHTO 法, Giroud-Han 法, Leng-Gabr 法等) 中, 都考虑了车轮荷载的动力/循环效应, 因此, 地基和地基的厚度

或底基层已经适合于提供道路的结构能力, 以在道路或铁路的整个设计寿命内抵抗设计数量的车轮通道。

当所施加的载荷为静态 (如工作平台) 或准静态 (如履带起重机) 时, 可采用静态法, BCR 法等计算所需的平台厚度, 以防止轴承失效。

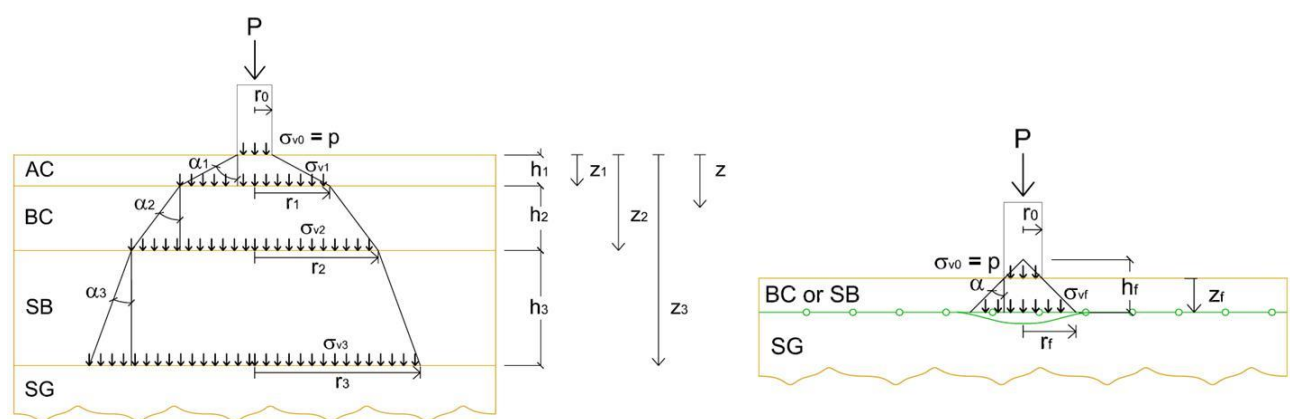
在给定基层/底基层或平台厚度的情况下, 通过分别考虑静力荷载 (施加的静力或准静力荷载, 土自重和张拉膜机制) 的影响以及车轮荷载的瞬时影响, 可以计算出水平拉力在整个道路结构中的分布以及在每层土工合成材料中产生的总拉力, 然后根据极限值为每层土工合成材料选择合适的土工合成材料

t 应变准则。

这三种作用机制对土工合成物层产生的拉力需要确定。

Rimoldi&Scotto(2012 年) 开发了一个由四个土层和任意数量的土工合成材料层组成的模型, 用于平面二维稳定土工合成材料的设计 (图 20): 沥青层(AC); 基层(BC); 底基层(SB); 和路基(SG)。

该模型假定荷载作用在圆形或矩形区域上为均匀的垂直压力；该荷载在平台结构的3层（AC，BC 和 SB）中按荷载扩展角 α_1 ， α_2 ， α_3 分布。



©ISO 2019-保留所有权利 37

ISO TR 18228-5

- 图 20。四层模型的总体方案及第一层土工合成材料在路基界面的布置

该模型提供了每种土工合成物中由以下机制产生的拉力的计算:

子
这
是
一
个
非
常
重
要
的
问
题
力因横
土托曰:
th_GSY
T
(44) (我这是
一个非常重要的问
题
1) 这是一个非常重
要的问题
这是一个非常重要的问题 土壤 (

Z

$\Gamma\Sigma\Psi$

式中: T_i 为土推力在第 i 个土工合成物中产生的拉力; z 为参考深度; σ 是由土壤信托产生的水平应力, 由顶部表面的均匀圆形或矩形荷载产生的水平应力引起的力: 我这是一个非常重要的问题 剪

III

这

是

一

个

非

常

重

要

的

问

题

th_GSY
T

(45) (我这是
一个非常重要的问
题
第

这是一个非常重要的问题 荷载 (

这是一个非常重要的问题 这是一个非常重要的问题 h

Z

-

- GSY

式中: T_{pi} 为顶部圆形或矩形均布荷载在第 i 层土工合成材料中产生的拉力; Z 为参考深度; 荷载是指顶部圆形或矩形均布荷载所产生的水平应力。

在与路基接触面处由膜机制引起的力:第一土工合成材料层(在与路基接触面处)最容易受到由于软路基上的第一层土的压实而引起的平面外变形(图 20), 而土工合成材料上层受到的竖向位移要小得多。 钢筋中的张力由下式确定(Giroud 等人, 1990 年): $T_M = WTCJ \cdot \text{欧姆}$ 。

f

(46)

式中: T_m 为土工合成材料中的张拉膜力; γ 是的无量纲因子

张拉膜理论, 土工合成材料应变的作用; WTC 是均匀竖向荷载, 它是荷载区以下荷载锥体积, 填土密度, 车轮荷载, 路基回弹模量 R 和土工合成材料荷载区的函数。

M

(47)

其中，如上所述， T_m 仅适用于与路基接触面处的第一土工合成材料层，既可以是基层，也可以是底基层。

第 i 层土工合成材料层应能在设定的最大应变极限下提供等于或大于 T_{tot-I} 的拉力。

对于重要结构，土工合成材料应变应限制在 1-2%，而对于不太重要的结构（或当设计条件能提供稍大的变形时），3%，4%或 5%的极限应变是可以接受的。

关于平面二维土工合成材料布局设计所需的更多细节和所有公式，请参见 Rimoldi 和 Scotto(2012 年)中关于圆形加载区域的信息，以及 Rimoldi 和 Simons(2013 年)中关于矩形加载区域的信息。

5.7 静载荷-沉降控制/限制

荷载从稳定层表面传递到下伏地基土的程度和范围直接关系到结构使用寿命期间将发生的总沉降量。对于建筑荷载和在路堤上建造的铺装或非铺装道路，本文件的使用者应参考适当的国家标准，该标准强调了估算沉降的设计方法和该方法的局限性。对于每个 CA

设计人员通常会考虑荷载面积和传递到路基上的荷载量。然而，对于铺装或未铺装的道路，车辙的潜在性或表面变形的减少通常是更大的关注。

5.8 减少搬运造成的变形

层与未稳定颗粒结构的控制段的比较。基于对寿命延长的观察，在全面研究中使用未稳定和稳定的骨料层对骨料行为进行的评估显示了寿命延长和骨料性能（Han 等人，2011 年）。与稳定的试验段相比，控制段通常发生更多的集料降解（Leshchinsky 和 Ling，2013 年）。

人们公认，颗粒材料的降解增加了细粒的含量，降低了透水性，并增加了颗粒材料对含水量和孔隙水压力增加而降低的承载力的敏感性。除侧向约束外，分离和过滤效应的积极影响可能变得显著。

5.10 延长设计寿命

根据前几节讨论的逻辑，通过侧向约束，必要时通过分离和过滤，可以保持未结合的集料颗粒的形状，大小和级配，并最大限度地减少颗粒的移动。横向约束是由颗粒与颗粒以及颗粒与土工合成物的相互作用提供的。相互作用程度受集料质量，土工合成特性，铺筑条件和压实程度等因素的影响

提恩。

对于反映在具体设计方法中的某些设计情况，有证据表明一个或多个土工合成材料特性和性能之间存在直接关联。对于其它设计情况，o 对于与特定方法中的设计条件不同的设计条件，可以通过对土工合成物和集料组合在特定应力条件下的性能进行全尺寸和/或实验室规模的验证和校准来确定设计寿命的延长。这可能是卡尔

根据地方和国家关于路面的指导，并通过使用全面测试，使用简易爆炸装置。然而，世界上有许多设计方法来完成这一任务。

5.11 地面和地下水条件

为了稳定，土工合成材料必须与骨料填充物结合（作为一种复合物），以支持所施加的负载（Anderson，2006 年）。关于软土上的建筑，基于承载能力的设计方法（USACE，2003 年；EBGEO，2011 年；SVG，2003 年）或基于使用性能的设计方法（Giroud 和 Han，2004 年，2006 年；EBGEO，2011 年；SVG，2003 年）对于给定的一组输入参数产生适当的集料填土厚度。同样，假定路基因潮湿而松软

通常重要的是要记住，集料填充物必须是干净的（无粘结性的，最好是个位数的细粒）和可排水的（Skorseth 和 Selim，2000 年）。厚度不足和/或质量差会损害土工合成材料的有益功能，并危及系统的稳定性（Anderson，2006 年）。

在路面结构中加入土工合成物稳定层的所有情况下，地下水通常需要尽可能地保持在结构层内表面荷载的影响之下。路面的自由排水通常是必不可少的。如果地下水在层内上升，则集料传递剪力，从而保持承载力的能力就会受到损害。因此，适当的排水和侧向排水的包含是 n

通常对路面系统的正常运行是必不可少的。

为确保集料填料不受损害，通常考虑包括一个正确设计的分离/过滤土工织物，该土工织物不会堵塞并允许水自由移动。排水土工合成物也可用于提供分离，过滤和排水功能。

40©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

5.12 气候条件

关于环境和气候条件，Henning, et. Al.(2014 年)审查了 140 个铺设道路长期路面性能(LTPP)站点的性能，这些站点涵盖了新西兰全境的环境和气候条件。研究结果表明，与气候较为稳定的地区相比，气候较为敏感地区的道路车辙率将增加（大约增加 0.1 毫米/年）。例如，在每天 400 轴的 ESAL 下，车辙率为 0.16mm/年

低敏感度（较稳定的地质构造上较干燥的区域）和高敏感度（较不稳定的地质构造上较潮湿的区域）区域分别为 0.28 毫米/年（差 0.12 毫米）。然而，这项研究确定了这样一个事实，即在需要的地方，排水的条件和存在比仅仅环境条件重要得多。数据观测表明，低流量路面的车辙率是排水不良路段的 2.5 倍

与在整个路面路段提供充足排水的路段相比。研究人员还确定了这样一个事实:排水不良或不充分的路段在交通流量大的情况下会更快地恶化（Henning, et.al., 2014）。

5.13 可持续性

可持续性通常被描述为考虑三个主要原则:社会，环境和经济。可持续性的目标是满足当前和未来的基本社会和经济需求，负责任地使用自然资源，同时维护或改善生命赖以生存的环境的福祉（FHWA 可持续公路倡议，2015 年）。

用土工合成材料建造的铺面和非铺面道路可通过减少建造时间，建造这些结构所需的资源以及延长使用时间或缩短维修间隔来达到所有这些目标。

此外，由于稳定层的作用之一是保护路基，这些道路的未来修复应限于波特兰水泥混凝土(PCC)或沥青层的修复。重要的是，不应将采用土工合成材料的碳排放和体现的能源成本视为项目的附加因素。设计师通常需要考虑土工合成材料的影响并计算净影响。例如，包括用于刺伤的土工合成材料

IL 化可能会减少集料的使用和/或能够使用边缘质量或再循环土壤和/或延长道路的使用寿命（Album, 2014 年），（Pokharel, 等人, 2016 年）。联合王国废物回收和包装组织（WRAP, 2010 年）和欧洲土工合成材料制造商协会（Elsing 等人, 2012 年）报告了关于土工合成材料使用的案例研究。

就经济可持续性而言，土工合成材料的稳定降低了集料成本，增加了路面使用寿命，从而降低了维护成本（Han, 等人, 2012 年）。当使用土工合成材料时，一条道路的建造，包括维护等，直到设计寿命结束时的总碳排放量要少得多。因此，土工合成材料是减少碳足迹的有效方法。

5.14 过滤/分离/排水要求的影响

实际上，无法防止水渗入未铺设的道路结构，甚至是铺设的道路结构（USDOT-FHWA, 1992 年）。因此，通常谨慎的做法是假定饱和或

©ISO 2019-保留所有权利 41

- ISO TR 18228-5
- 路基上游存在高架，潮湿条件，尤其是当路基 CBR 值小于 3 时。
- 在直接将土工合成材料置于路基顶部的情况下，上覆的集料填土（即基层或底基层材料）应具有足够的级配，以提供路基过滤和防止土壤迁移（Christopher 等人, 2001 年）。过滤可定义为允许水自由流入或穿过土工织物，而分离则意味着防止相邻不同土壤和/或填土材料的混合。对于分离和过滤，土工织物或与土工织物相关的产品
- 可以使用管道。然而，通常要对邻近土层进行过滤器稳定性计算。
- 在土工细胞的情况下，沿着和横跨整个细胞壁的具有适当直径的半均匀穿孔是排水的一个基本因素。孔的尺寸应该足够小，以防止聚集物跨细胞分配，穿孔的模式应该是半均匀的，以允许自由排水。
- 6.0 设计因素和方法
- 6.1 设计因素
- 在考虑稳定颗粒层的设计时，通常会考虑许多因素，而土工合成材料的相互作用只是其中之一。以下设计因素是特定于产品和项目的，通常会在适当的情况下根据性能测试进行评估:-
- 路基类型及强度
- 地下水条件
- 散体材料的类型，压实度，密度和厚度
- 载荷的大小，类型和频率
- 允许变形

层设计寿命与整体施工

- 施工中其他层的性质
- 气候条件

土工合成材料的抗拉刚度

土工合成材料的类型和形态（如土工格栅或土工格室，孔洞大小，孔洞高度和直径等）

土工合成材料与散体材料的相互作用及侧向约束能力

在稳定层中的位置:-

42©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

浅谈路基稳定土层系统的路基改善承载力 在底基层/基层-提高系统的弹性刚度

6.2 设计方法

因此，任何设计模型都是复杂的。到目前为止，这种复杂性意味着没有被广泛接受的与土工合成材料的一般稳定性能相关的特性，也没有精确地量化任何土工合成材料的个别特性，这些特性可以输入到理论计算中以令人满意地设计这些系统。在此背景下，内部约束颗粒层的设计通常是基于完全的经验来进行的

- 适当时进行装载和运输试验。然而，如果土工合成材料在实际载荷，变形和应力条件下的特性是已知的，则这些特性可用于表征整个系统中独特层的性能。
- 经过正确设计，监测和重复的全尺寸试验，包括个别土工合成材料，并可能通过实验室测试和数值模拟加以加强，从而能够为这些土工合成材料制定具体产品的经验性设计规则。
- 对于非铺装路面，可以采用 Giroud 和 Han(2004)的方法设计稳定层厚度。采用冲压和拉伸土工格栅对原始方法进行了校准。如 Giroud 和 Han(2012 年)所述，其他土工合成材料的使用可通过校准实现。

对于铺装路面，设计方法将取决于当地路面设计师所选择的方法。目前，既有经验设计方法，也有机械经验设计方法。在北美，AASHTO(1993)提出了路面设计的经验方法。在 AASHTO(1993)中，根据 AASHTO R 50-09 (2009) 中描述的协议修改了与未结合集料相关的结构系数，以考虑土工合成物的影响。对其他经验 de 的调整

世界范围内使用的标志方法可以遵循 AASHTO R 50-09 (2009) 中概述的类似方法。在与稳定集料回弹模量，路基回弹模量和永久变形相关的力学-经验设计参数内，迄今已进行了检验。然而，需要进行全面的实验室和实地测试，才能对每种土工合成物进行校准。

对于软路基上的未铺装公路和铁路集料:Giroud-Han(2004 年)或 Leng-Gabr(2006 年)或 Rimoldi(2012 年)土工合成材料设计方法可以根据土工格室进行修改和调整。根据修正的 Giroud-Han 方法，将与土工合成材料有关的参数（如扭转刚度和 2%应变下的抗拉强度）改为与土工格室有关的参数（如弹性刚度，小于 2%的蠕变抗力和抗拉强度）（

Pokharel 等人，2015 年）。

对于软路基上的铺面道路:纳入土工格室的设计方法可能基于路面结构的弹性行为，并遵循机械-经验设计程序（Kief, 2015b）。采用土工格室的道路设计可以采用层弹性模型的柔性路面力学-经验设计方法。每个路面层力学模型可以通过将其厚度，弹性模量和泊松比包括到商业上可获得的层中来创建

路面的红色弹性分析程序。机械-经验方法通常使用以下参数:-

机械-经验设计

©ISO 2019-保留所有权利 43

ISO TR 18228-5

路基回弹模量（弹性反应模量）

用于校准 TBR, BCR 或 LCR 的试验必须尽可能代表实地的实际情况。确定特定土工合成材料的设计参数可以使用足尺动轮试验,并辅以循环板加载试验。此外,记录的案例历史可以提供有价值的信息,补充全尺寸试验的数据,从而有助于验证特定的设计参数

ic 土工合成材料。

为了向集料颗粒提供横向约束或约束,这些与颗粒位移方向交叉或对角线定位的土工合成元件(棒,肋,束,纤维等)受到剪切力的作用。然后,这些剪切力必须通过元件连接处的剪切力传递到能够抵抗这些力的相邻元件中。连接区域连接的强度和刚度取决于制造技术

使用手艺。产品的整体刚度和完整性通常需要满足稳定结构的可使用性极限状态的要求。

侧向约束或约束的大小与土工合成材料在低应变时的刚度有关。由于土工合成材料与土的相互作用的好坏对封闭带的发展起着关键作用,因此必须考虑土/土工合成材料的相互作用。

7.3 土工合成材料的关键特性-外部约束

- a) 通过实验室测试和大规模实地测试,对地穴的影响进行了量化(Pokharel 等人, 2011 年 & Yang 等人, 2011 年)。土工格室通过三维约束使颗粒材料层变硬,从而提高了稳定层的模量。此效益量化为“MIF”,“模数改进因子”,详见第 6.2 节。
- b) 土工格室通过以下方式提供外部限制:-
- c) 细胞壁上的环张力,

来自周围细胞的抗性,以及

细胞壁与填充材料之间的摩擦

土工格室的几何形状和材料特性是最大限度地提高机械稳定性的关键特性,并在项目的设计寿命内对其进行验证。这两个基本属性详述如下:

土工格室的主要材料特性是弹性刚度和抗永久变形能力，与土工格室壁的环向拉力有关；这些特性有助于提高设计寿命的机械稳定性。其他关键特性包括连接强度，摩擦等，土工格室越硬，环向拉应力就越高，因此，MIF 也就越高。材料性能可通过环向拉伸试验（宽幅穿孔）测量

土工格室的蠕变试验应采用宽幅穿孔的土工格室壁，在固定载荷下模拟施加的环向拉力，根据土工格室层在路面结构中的位置来进行。土工格室稳定层在整个设计寿命内的改善取决于土工格室材料的性能（拉伸，动态）。土工格室的蠕变试验应采用宽幅穿孔的土工格室壁（ISO 6721-1/ASTM E2254）和加速蠕变试验（ASTM D6992

刚度和蠕变），以确保限制细胞壁的变形非常低，即在整个设计寿命内累积的变形小于 2%（较高的值可能使稳定性失效）。

©ISO 2019-保留所有权利 45

ISO TR 18228-5

土工格室的几何形状，包括格室的大小，高度，纹理和穿孔模式，影响机械稳定性的大小。细胞的大小（直径）决定了囚禁的密度。具有较高细胞壁（深度）的小直径细胞尺寸比具有较低细胞壁高度的大直径细胞尺寸提供更大的 MIF。穿孔模式应尽可能均匀地分布，以最大限度地提高土壤-细胞摩擦相互作用，允许水以 w

从而防止细胞间的颗粒迁移。土工格室面板的连接方式应能抑制连接的横向和节点旋转。

- 8.0 测试
- 土工合成材料的许多参数，如拉伸性能或相互作用，可以通过实验室试验来评价，这相当于所谓的指数试验，对此已有试验标准。然而，这些指标测试并不能完全反映土工合成物/土壤系统复杂的原位行为。如有必要，应对土工合成材料以及土工合成材料与土的相互作用进行所谓的性能测试。
- 应根据标准测试方法验证前面章节（7.2 和 7.3）中定义的土工合成材料的关键性能，以确保在项目设计寿命期间的设计性能，例如：土工合成材料的抗拉强度和刚度/模量。
- 土工格室应确保与路面设计中的改善因素相对应的低水平变形，即稳定层（如 MIF）的刚度增加（低变形）。具有较高预测变形（大于 2%）的土工格室可能无法提供合适的改善因子。
- 土工格室可进行的典型测试如下:-
- 单条抗拉强度:包括穿孔（ISO 10319）和接合强度（ISO 13426-1 第 1 部分，方法 C）在内的墙全宽屈服强度的试验

动态刚度:用动态机械分析法测试储能模量（DMA，ISO 6721-1/E2254）

累积蠕变变形:在固定载荷下模拟基层和下层环向应力的宽幅穿孔细胞壁阶梯等温法的试验(ASTM-D6992)

UV 测试以确定
用土壤覆盖
GSY 之前的最
长暴露时间

适用于土工格室特定聚合物的耐久性测试，例如抗氧化性:高压氧化诱导时间测试--HPOIT (ASTM D5885)@150°C

土工格室面板连接强度（ISO 13426-1）和抗节点旋转，横向和垂直移动的抗相对移动能力

土工格室和土壤相互作用的性能测试应包括各种实验室试验，包括大型动轮试验和现场监测的现场试验。路面设计中的改进因素是基于这些试验，针对特定的试验土工格室类型（材料和几何特性）。

46©ISO 2019-保留所有权利

ISO TR 18228-5

©ISO 2019-保留所有权利 47

ISO TR 18228-5

参考文献

AASHTO(2010 年)。 柔性路面结构集料基层土工合成物增强的标准实施规程， R50-09， 运输材料标准规范及取样和试验方法， 第 31 版， 美国州公路和运输官员协会， 华盛顿特区， 4 页。

Arnold, G. “Proof Testing Pavement Materials in the Laboratory the New Zealand Experience [http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.476.4910](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.476.4910http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/versions?doi=10.1.1.476.4910)

陈家德（1993）“路面结构设计指南”，美国州公路交通官员协会，华盛顿特区。

奥地利（2012 年）。 路面技术指南，第 2 部分，路面结构设计。 澳大利亚悉尼 Austroads 有限公司， 275 页。

艾伯塔交通部（2010 年）公路建设标准规范，由加拿大艾伯塔省艾伯塔交通部专业服务部门制定。

Anderson, R.P., Molina, F.G., Salazar, R.Z., Diaz, A.L.和 Sanchez, J.A.N. （2003 年）。 土工合成材料在亚马逊盆地雨林促进道路建设和减轻环境影响--10 年业绩。 国际生态与交通会议文集。 普莱西德湖，纽约。 597-606。

Anderson, R.P., （2006）土工格栅分离，地质环境和岩土工程新发展国际会议论文集，2006 年 11 月 9-11 日，仁川大学，仁川，大韩民国

履带式设备的工作平台:地面支撑平台的设计，安装，维护和修理的良好实践指南。

H.R.塞德格伦。（1989）渗流，排水和流网。 纽约。 John Wiley and Sons Inc., 153-156。

Christopher, B.R., Berg, R.R.和 Perkins, S.W. （2001）巷道段土工合成材料加固。 NCHRP 项目 20-7，任务 112 的综合。

Cook, J., Dobie, M.和 Blackman, D.(2016)《道路设计中土工合成物效益的应用和推导中 APT 方法学的发展》，《加速路面测试在路面可持续性中的作用》，DOI 10.1007/978-3-319-42797-3_17, Springer International 出版。

CROW 出版物 157 (荷兰)

EBGEO(2011 年):关于使用土工合成增强材料设计和分析地球结构的建议(EBGEO)。德国岩土工程学会(DGGT), Ernst&Sohn, 埃森-柏林。

Emmersleben, A.(2009 年)。Lastabtragungsverhalten von Geozellen zur Stabilisierung mineralischer Tragschichten unter Statistischen und zyklischen Belastungen (地球单元的承载特性

48©ISO 2019-保留所有权利

FHWA (2015) Sustainable Highways Initiative website. Quote extracted July 2015 at <https://www.sustainablehighways.dot.gov/overview.aspx#quest1><https://www.sustainablehighways.dot.gov/overview.aspx#quest1>

ISO TR 18228-5

静态和循环载荷下矿物承载层的稳定, 德文), 德国克劳斯塔工业大学博士论文, 237

林志军, (1998), 路面设计中的寿命周期成本分析, 公开号:FHWA-SA-98-079, FHWA(2001), 浅基础参考手册, 出版物号 FHWA-NHI-01-023, 222p。

联邦卫生福利协会 (2008 年)。土工合成材料设计和施工指南, Holtz, R.D., Christopher, B.R. 和 Berg, R.R., 美国交通部, 联邦公路管理局, 华盛顿特区, FHWA-HI-07-092, 2008, 460 页。

全球环境状况评估 (2000 年)。路面结构集料基层/底基层的土工合成材料加筋--GMA 白皮书二; 作者:Berg, R.B., Christopher, B.R.和 Perkins, S.; 为美国公路和运输官员委员会 4E, 土工合成材料协会编制, 明尼苏达州罗斯维尔, 176 页。 Giroud, J.P., Ah-Line, C.和 Bonaparte, R.

(1985)。“用土工格栅设计非铺装道路和交通地区”, 《聚合物格栅加固》, Thomas Telford Limited, 伦敦, 116-127。

Giroud, J.P. 2000 年。从土工合成材料的成功和失败中吸取的经验教训。

第二届欧洲土工合成材料会议论文集 (EuroGeo 2000)。意大利博洛尼亚。77-118。

Giroud, J.P. Han J.(2004)土工格栅加筋非铺装路面的设计方法: I.设计方法的发展。校准和应用。岩土工程与地质环境工程杂志。卷。130, 第 8,775-797 号。

Giroud, J.P. 和 Han, J.2006。

土工格栅加筋非铺装路面设计方法的封闭; 我。

设计方法的发展。岩土工程与地质环境工程杂志。卷。

132, 第 4,549-551 号。

Holtz, R.D., Christopher, B.R., Berg, R.R. (1998 年) 土工合成材料设计和施工准则。美国交通部联邦公路管理局 (USDOT-FHWA), 公布号 FHWA HI-95-038。

Jas, H., Stahl, M., Kamp, L.te, Konietzky, H.和 T.Oliver(2015)《离散单元模拟:平板载荷模拟的建模和校准》被接受出版爱丁堡会议

Kief, O.(2015a)“膨胀粘土上铁轨的混合土工合成物解决方案”,《土工合成物 2015 会议论文集》。俄勒冈州波特兰, 二月。

Kief, O.(2015b)。用新型聚合合金制成的土工格室的结构路面设计, 土工合成材料 2015 会议论文集。俄勒冈州波特兰, 二月。

Koerner, R.M. (2012) 土工合成材料设计, 第六版。上鞍河, 新泽西州。普伦蒂斯-霍尔公司。

Kwon, J., Kim, S., Tutumluer, E. (2015) 考虑物理和形态特性的未结合集料材料的表征, 国际路面工程杂志, Taylor&Francis。

林志军 (2006), “土工格栅加筋非铺装路面之抗变形模型”, 国立台湾大学交通研究所硕士论文, 国立台湾大学交通研究所硕士论文, 国立台湾大学交通研究所硕士论文, 国立台湾大学交通研究所硕士论文, 国立台湾大学交通研究所硕士论文, 国立台湾大学交通研究所硕士论文, 国立台湾大学交通研究所硕士论文。

Leshchinsky, B.和 Ling H.(2013)“具有土工格室约束的铁路有碴结构行为的数值模拟”, 土工织物和土工膜, 第卷。36, 2 月, 第 33-43 页。

海军设施工程司令部(NAVFAC)。(1982 年)设计手册(DM)7.1。271-274。

Palese, J.W., Zarembski, A.M., Thompson, H., Pagano, W.和 Ling, H.I. (2017)《在高速铁路上使用土工格室进行路基加固的生命周期效益--案例研究》, 获 AREMA 会议 (美国铁路工程和道路维护协会) 认可, 9 月。

Parson, R., Jokar, M., 和 Han, J. (2012) 动态加载下土工格栅加筋道床的性能, 运输研究委员会, 第 92 届年会, 2013 年 1 月, 华盛顿特区。

S.K.Pokharel. (2010 年)。土工格室加筋地基在静力及动载作用下之试验研究, 博士论文, 土木, 环境, 建筑工程及堪萨斯大学研究生院。

Pokharel, S.K., Han, J., Manandhar, C., Yang, X.M., Leshchinsky, D., Halahmi, I.和 Parsons, R.L. (2011 年)。“土工格室加筋非铺装路面在软弱路基上的加速路面试验”, 交通研究委员会期刊, 第十届低流量道路国际会议, 7 月 24-27, 美国佛罗里达州布埃纳维斯塔湖

Pokharel, S.K., Martin, I., Norouzi, M.和 Breault, M.(2016)。使用高强度聚合土工格室进行重载交通的可持续道路建设, 弹性基础设施会议论文集, 伦敦。118-1 至 9。重型公路可持续建设使用高强度聚合土工格室的交通, 弹性基础设施会议论文集, 伦敦。

Pokharel, S.K., Martin, I., Norouzi, M.和 Breault, M.(2015)。“非铺装道路土工格室设计的验证”，《土工合成材料会议论文集》，美国俄勒冈州波特兰，2015年2月15-18号。第711-719页。

Rajagopal, K., Chandramouli, S., Parayil, A.和 Iniyar K., (2014年)。“土工合成材料加筋路面结构之研究”，国际岩土工程学报，8:3,287-298, DOI:10.1179/1939787914Y.0000000042。

Ruegger, R., Hufenus, R.:土工合成材料建筑-土工合成材料用户手册，瑞士土工合成材料协会 SVG，圣加仑，2003年6月。

Saeed, A.和 Hall, J.W. (2003年)加速路面测试:数据指南。人权委员会第512号报告。美国国家科学院运输研究委员会，华盛顿特区，2003年。

Skorseth, K.和 Selim, A.A. (2000年)《碎石路养护和设计手册》。美国交通部联邦公路管理局 (USDOT-FHWA)。

Tingle, J.S., Norwood, G.J., Robinson, W.J., Wayne, M.H. 还有权。 J.(2017)“土工格栅稳定道路的全尺寸加速路面测试”，第十届国际公路，铁路和机场承载能力会议论文集 (BCRRA 2017)，2017年6月28-30日，希腊雅典。

美国陆军工程兵部队 (美陆军工兵部队)。(2003年)土工格栅在路面施工中的使用。ETL 1110-1-189。

美国交通部联邦航空局 (USDOT-FAA)。(1994)工程简报第49号，土工格栅加强基层。

美国交通部联邦公路管理局 (USDOT-FHWA)。(1992)可排水路面系统；参与者笔记本，示范项目87。公开号 FHWA SA-92-008。

Walbaum H(2014年)使用土工合成材料施工方法的环境效益。第十届导航卫星委员会，柏林

WRAP(2010年)土木工程应用中的可持续地理系统。Geosystems 报告 2010年废物回收和包装。

Yang, X., Han, J., Pokharel, S.K., Manandhar, C., Parsons, R.L., Leshchinsky, D.和 Halahmi, I. (2011)，“土工格室加筋砂基之非铺装道路加速路面测试”，交通研究委员会年会，华盛顿特区，1月23-27。

附录 A-张拉膜设计

A1 机制说明

在张力膜效应中，土工合成材料起到了增强作用。假设路面设计要求能够容纳超出通常与稳定相关的变形程度，那么张拉膜效应的调动可能会对设计过程做出有价值的贡献。

根据内外约束原理，基层集料中较低的侧向剪应变和较大的侧向应力状态使集料/巷道表面的竖向和水平变形较小。集料层中水平和竖向应变减小的幅度取决于应力平衡所需的土工合成材料拉伸刚度以及土/土工合成材料相互作用效率。

由于反复的交通荷载，集料内部以及底土内部的塑性变形累积到增加的应变，因此张拉土工合成材料的应力状态增加。在地基土/骨料界面的挠度和不规则的表面条件下，受拉和挠度的土工合成材料的垂直载荷分量有助于垂直载荷平衡，这是由于增加的垂直剪力和增加的侧向应力状态所导致的

从而降低传递到路基上的局部竖向荷载强度。

A2 设计因素和方法

由于张力膜效应提供了一种加固功能，关于加固土工合成材料的设计指南可以在 [TR 18228-7](#) 中找到。

A3 土工合成材料的关键性能

土工合成材料的移动强度取决于土工合成材料的刚度-模量和侧向变形量。假设土工合成物与土壤完全接触，则动员强度与土工合成物的刚度模量线性相关。由于荷载的作用方向不同，约束条件下的径向抗拉强度以及纵向和横向抗拉强度成为产生侧向约束效应的决定性因素

以达到应力平衡。