

新无筋式预应力路面（续）

李 然
(美国丹尼波工程公司 休斯顿)

摘要 本文是载于《公路交通科技》1996 年第 1 期“新无筋式预应力路面”一文的续篇。继该文提出了新无筋式预应力路面的基本概念、基本结构后，本文给出了新无筋式预应力路面的部分基本理论、基本计算和技术细节——包括蓄压器容积的计算方法，直板在路基约束和自重作用下的临界（失稳）荷载，高级型缝-压装置，新约束件，新减摩层等。

关键词 预应力水泥混凝土路面 无筋式 蓄压器 失稳 减摩层

Introdution to A New Tendon-Free Prestressed Pavement (Continued)

Li Ran
(Dannenbaum Engineering Corporation, Houston, USA)

Abstract This paper is a continuation of “Introdution to A New Tendon-Free Prestressed Pavement” published in the《Journal of Highway and Transportation Research and Development》, the 1st issue in 1996. After the basic concepts and structures of the new pavement were introduced, this paper presents some basic analyses, computations, and technical details of the new pavement including accumulator volume computation, bucking analysis of a straight slab under base restraining and dead weight load, advanced prestressing apparatus, a new restraint, new friction-reducing medium, etc.

Key words Prestressed Portland cement concrete pavement Tendon-free Accumulator Buckling
Friction-reducing medium

1 新式接缝系统

水泥混凝土路面（包括一些桥面板）有多种接缝结构，其中几种典型形式如图 14 所示。这些接缝结构有一个共同特点，即都是局限在路面板的轮廓内来执行它们的接缝功能。这种局限性限制了接缝的结构形式，影响了接缝的功能和质量，或增加了接缝的造价。其给路面带来的主要缺点是接缝处板边的应力很大，路面在接缝处的连续性差，接缝处容易进水等。“新无筋式预应力路面”（以下简称 [1]）则提出了一种新的接缝设计思想，即将可流动材料输入进路面板轮廓之内或输出到轮廓之外，以适应路面板长的变化，如图 15 所示。实现这一思想的接缝结构即为 [1] 中介绍的缝—压装置和蓄压器。这种新接缝结构

可以有效地解决当前接缝结构的很多问题。
缝-压装置中的压力一般在 1.5 至 3.5 MPa。设为 2.0 MPa，则它相当于黄河牌载重卡车轮胎压力的 3

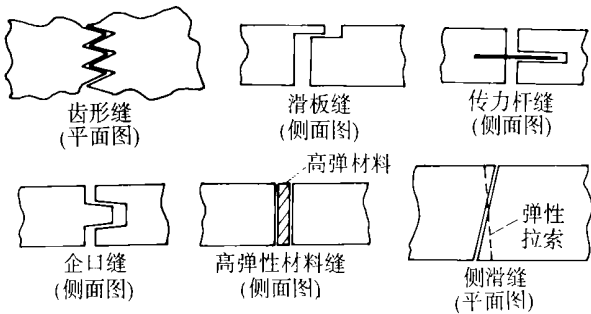


图 14 几种典型的接缝结构

倍，也相当于该轮胎在自由板边产生的拉应力。这样大的压力将板紧紧推挤在一起，使相邻板之间产生很

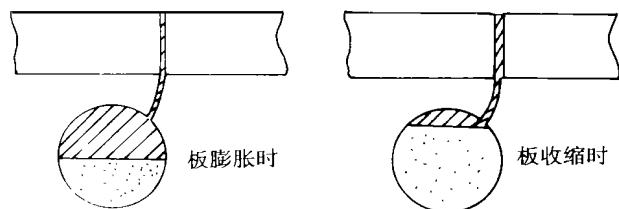


图 15 新接缝思想示意图 (路面侧面图)

大的相互约束。分析文 [1] 图 2, 可看出缸-活塞式的缝-压装置可以将其一侧板的所有内力: 轴力 (纵向力), 剪力, 弯矩, 传给另一侧的板; 或说板的所有内力在缝-压装置处是连续的; 也可说缝-压装置一侧的板就象几乎没有缝存在似的帮助另一侧的板承受荷载。因此板的连续性得以大大提高, 车辆驶过缝-压装置时的颠簸大大减小; 同时板边的应力也大大减小。文 [1] 图 4 (a) 所示液压囊式的缝-压装置也可以传递轴力、很大部分剪力和部分弯矩。因此, 它也可以使板的连续性得以大大提高。同时由于液压囊沿板全宽紧密贴压在板壁上, 降水也无法进入板下危害基层。

2 蓄压器容积计算

蓄压器是液压系统中常见的一种平抑、补充压力的装置, 但未见采用在预应力路面中。文 [1] 中图 6 所示的蓄压器位于浅地表, 事实上它应当被埋在大约两三尺深的地下。在这样深的土中, 蓄压器周围的土体温度将不会随季节变化而显著变化。由于路面板长随地表气温变化而变化是一个很慢的过程, 所以蓄压器中的气体体积的变化也很慢。这意味着该气体有足够的时间与周围土体交换热量。因为周围土体的温度基本不变, 且其质量远大于蓄压器中的气体, 所以该气体的温度也基本不变。换句话说, 蓄压器中气体的变化过程是等温过程, 因此可应用波义耳定律 ($PV=\text{常量}$) 设计蓄压器的容积。

当板的平均温度从 t_1 变化到 t_2 时, 板长从 L_1 变化到 L_2 , 板中预应力从 p_1 变化到 p_2 。相应于板长变化, 板长 L_1 范围内的各条缝-压装置中的液体体积也变化 (参阅 [1] 图 1), 其总体积从 V_1 变化到 V_2 ; 蓄压器内的气体体积和压力也变化, 分别从 V_1' 、 p_1' 变到 V_2' 、 p_2' 。

由材料力学知, 板长变化

$$\Delta L = L_2 - L_1 = (\Delta \epsilon) L_1 = \left[\alpha (t_2 - t_1) + \frac{1}{E} (p_2 - p_1) \right] L_1 \quad (1)$$

式中, α 和 E 分别为板材的线热膨胀系数和弹性模

量。

相应地, 在一般情况下, 各缝压装置中液体的总体积变化 (参阅 [1] 图 2, 4) 为

$$\Delta V = V_2 - V_1 = -(\Delta L)(A_2 + A_1)/2 \quad (2)$$

式中, 负号源于 V 的变化趋向与 L 的变化趋向相反, 即板长增加时, 缝-压装置中的液体体积减小, 反之亦然; A_1 、 A_2 是一条代表性缝-压装置, 分别在 t_1 、 t_2 时压迫板的液体面积。

显见蓄压器内的气体体积变化 $\Delta V'$ 与 ΔV 相等

$$\Delta V' = V_2' - V_1' = \Delta V$$

忽略液体的重量, 则缝-压装置中的压力与蓄压器中的相等。根据波义耳定律, 蓄压器中的气体状态在体积变化前后应满足

$$p_2' V_2' = p_1' V_1' = p_1' (V_2' - \Delta V) \quad (3)$$

解得

$$V_2' = \frac{-\Delta V}{p_2'/p_1' - 1} \quad (4)$$

对于 [1] 图 2、4 所示的路面接缝, 缝-压装置中的压力与板中预应力有关系

$$p_j Wh = p_j A_j$$

W 和 h 分别是板的宽度和厚度, $j=1, 2$ 。

$$\text{于是有} \quad \frac{p_2'}{p_1'} = \frac{p_2 A_1}{p_1 A_2}$$

故式 (4) 成为

$$V_2' = \frac{-\Delta V}{\frac{p_2 A_1}{p_1 A_2} - 1} \quad (5)$$

将式 (1) 和 (2) 代入 (5)

$$V_2' = \frac{A_2 + A_1}{2 \left(\frac{p_2 A_1}{p_1 A_2} - 1 \right)} \left[\alpha (t_2 - t_1) + \frac{1}{E} (p_2 - p_1) \right] L_1 \quad (6)$$

设计蓄压器容积要考虑最不利情况, 故取情况 1 为最高温度情况, 情况 2 为最低温度情况, 即将式 (6) 中脚标 1 换为脚标 h , 脚标 2 换为脚标 l

$$V_l' = \frac{A_l + A_h}{2 \left(\frac{p_l A_h}{p_h A_l} - 1 \right)} \left[\alpha (t_l - t_h) + \frac{1}{E} (p_l - p_h) \right] L_h \quad (7)$$

V_l' 是温度最低时蓄压器中气体的体积, 若设此时蓄压器中的液体被恰好完全排出 (参阅 [1] 图 6), 则 V_l' 就是蓄压器的理论容积。算例将在后续文章中给出。

3 高级型缝-压装置

文 [1] 介绍的缝-压装置 16a、b、d, 结构简单,

造价低，但工作范围（宽度）也较小。当路面板较长，使得板间缝隙宽度的变化范围较大时，这些缝—压装置就不能很好适应了。但只要对其加以改进、发展，就可以增大它们的工作范围。

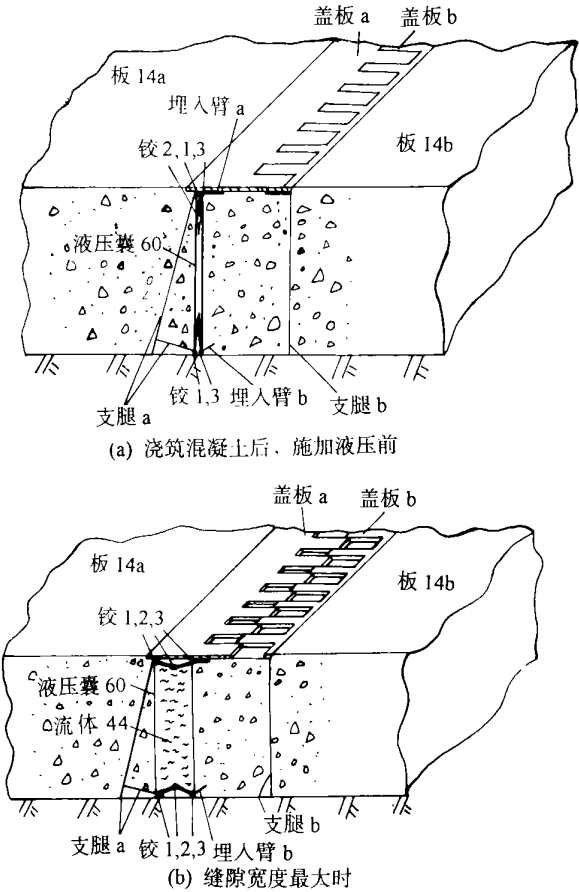


图 16 高级型液压囊式缝—压装置

图 16 所示的缝—压装置 16 (e) 是 16 (b) ([1] 图 4) 的高级型。它包括折叠式液压囊，带齿伸缩盖板 a、b 和支腿 a、b。液压囊的折叠部分外有铰接杆以导引折展运动；铰 1 借支腿 a 固定在板 14a 上，铰 3 借埋入臂固定在板 14b 上。折叠式液压囊可以使其压迫板的面积，在缝隙宽度变化时保持不变，从而提高接缝质量的均衡性并减小蓄压器的容积。盖板 a、b 分别靠支腿 a、b 固定在路面板 14a、14b 上。盖板 a 的齿为梯形截面，故可被齿截面为倒梯形的盖板 b 的齿所约束，而不上翘。

图 16 (a) 是浇筑混凝土以后，施液压以前的情形。由于盖板 a 和 b 较宽，所以浇筑混凝土时须用弯曲形振捣棒伸入盖板下振捣，以防止空洞。图 16 (b) 是缝隙宽度最大时的情形。这种缝—压装置可以适应缝隙宽度的变化达 7cm，还可以防止砂土侵及到液压囊顶面损坏液压囊。

4 稳定性分析

长路面板承受纵向压力，有可能发生失稳。但由于板下路基的约束和板自重的作用，其稳定性分析与普通立直杆很不相同。设一路面板在临失稳前如图 17 所示，它的拱起段的力学模型可用图 18 表示。由于板为矩形，且预压应力 p 沿横向均匀分布，图 18 只研究宽度为 b 的一窄条板，并改称此板为梁，以避免与通常意义的板混淆。梁的重量被看作作用于梁上面的集度不变的均布荷载 q 。

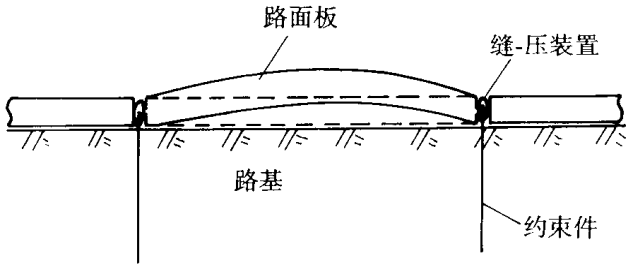


图 17 路面板失稳时的纵断面图

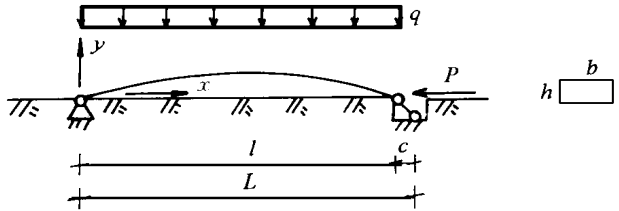


图 18 图 17 的力学模型

图中， $q = \gamma bh$ ， γ 为梁的单位体积重， h 为梁厚； $P = pbh$ ； L 为梁未弯曲时的长度； l 是梁弯曲时在未弯曲梁上的投影长度； $c = L - l$ 为梁发生弯曲时其端点的水平位移之和。

图中梁的弯矩

$$M(x) = -Py(x) + \frac{1}{2}qlx - \frac{1}{2}qx^2$$

其中， P, q 为标量。

梁的小挠度微分方程为 $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$

$$\text{或 } \frac{d^2y}{dx^2} + k^2y = -\frac{qx^2}{2EI} + \frac{qlx}{2EI} \quad (10)$$

$$\text{其中, } k^2 = P/EI \neq 0 \quad (11)$$

E 为梁材的弹性模量， $I = \frac{bh^3}{12}$ 为梁的惯性矩。

式 (10) 是常系数非齐次线性微分方程，它的通解为

$$y = A' \cos kx + B' \sin kx - \frac{q}{2P}x^2 + \frac{ql}{2P}x + \frac{q}{Pk^2} \quad (13)$$

其中 A', B' 为由位移边界条件确定的待定常数。

图 18 中梁的位移边界条件为 I $y|_{x=0} = 0$, II

$y|_{x=l}=0, \quad \text{III}y|_{0<x<l}>0$, 由边界条件 I 解得 $A' = -\frac{q}{Pk^2}$, 由边界条件 II 得

$$-\frac{q}{Pk^2}\cos kl + B' \sin kl + \frac{q}{Pk^2} = 0 \quad (14)$$

先设 $\sin kl \neq 0$, 即

$$(n-1)\pi < kl < n\pi, \quad n=1, 2, 3 \dots \quad (15)$$

则 $B' = -\frac{q}{Pk^2} \operatorname{tg} \frac{kl}{2}$, 即在条件 (15) 下满足边界条件

I、II 的特解的形式为

$$y = \frac{q}{Pk^2} \left[-\cos kx - \operatorname{tg} \frac{kl}{2} \sin kx - \frac{1}{2}(kx)^2 + \frac{1}{2}kl(kx) + 1 \right] \quad (16)$$

根据分析和数值运算, 当取式 (15) 中的 $n=1$, 即 $0 < kl < \pi$ 时, 边界条件 III 不能满足。当取式 (15) 中的 $n=2$, 即

$$\pi < kl < 2\pi \quad \text{时} \quad (17)$$

边界条件 III 能够满足。即在条件式 (17) 下, 式 (16) 满足全部位移边界条件。但式 (16) 仅为位移函数的形式, 并不是完整或确切的位移函数, 因为 kl 的确切 (点) 值还未确定。

确定 kl 的确切值要应用临界条件: 临界纵向压力应是能使梁保持弯曲的最小纵向压力, 即 $P = P_{\min}$ 。

$$\text{由式 (11) 有 } P = k^2 EI \quad (18)$$

$$\text{但} \quad k = \frac{kl}{l} = \frac{kl}{L-c} \quad (19)$$

$$\text{于是} \quad P = \left(\frac{kl}{L-c} \right)^2 EI \quad (20)$$

参照图 18, 由数学分析知对小挠度曲线有

$$c = \frac{1}{2} \int_0^l (y')^2 dx$$

将式 (16) 代入此式, 求导、平方、积分, 得

$$c = \frac{q^2 EI}{kP^3} F(i) \quad (21)$$

$$\text{或} \quad c = \frac{q^2 (EI)^{1.5}}{P^{3.5}} F(i) \quad (22)$$

$$\text{式中 } F(i) = \frac{1}{3} i^3 + \frac{5}{2} i + \frac{1}{2} \operatorname{tg} i (i \operatorname{tg} i - 5 + \frac{1}{2} \sin^2 2i);$$

$$i = \frac{kl}{2}, \text{ 由式 (17) 应有 } \pi/2 < i < \pi.$$

将式 (22) 代入 (20), 得

$$P = \frac{4i^2 EI}{\left\{ L - \frac{q^2 (EI)^{1.5}}{P^{3.5}} F(i) \right\}^2} \quad (23)$$

显见当 q 、 E 、 I 、 L 一定时, P 是由式 (23) 所确定的 i 的函数

$$P = P(i) \quad (24)$$

求出式 (24) 在 $\pi/2 < i < \pi$ 时的极小值 $P_{\min}$, 就是本稳定问题的解。

分析式 (23) 可以证明, 在一定范围内 $P_{\min}$ 和 L 是一一对应的。从物理意义上看, 这是显见的。在一定范围内临界压力与梁长是一一对应的, 梁较长时临界压力较小, 梁较短时临界压力较大。因此临界条件也可用临界梁长表达: 当纵向压力等条件一定时, 临界梁长应是能使梁保持弯曲的最小梁长, 即 $L = L_{\min}$ 。这一临界条件表达式可使得求解运算简化并具有明显的物理意义。

由图 18 有 $L = l + c$, 乘 k 以消去量纲

$$kL = kl + kc \quad (25)$$

将式 (21) 代入, 并注意到 $kl = 2i$, 得

$$kL = 2i + \frac{q^2 EI}{P^3} F(i) \quad (26)$$

显见当 q 、 E 、 I 、 P 一定时, kL 只是 i 的显函数, $kL = kL(i)$ 。求出其在 $\pi/2 < i < \pi$ 时的极小值

$(kL)_{\min}$, 并注意到 $k = \sqrt{\frac{P}{EI}}$ 已被确定, 则 $L_{\min} =$

$$\frac{(kL)_{\min}}{k} = \frac{(kL)_{\min}}{\sqrt{\frac{P}{EI}}}$$

就是本稳定问题的解。

现给出一个算例: 已知图 17 中的水泥混凝土板厚 $h=0.18\text{m}$, 板宽 $b=1\text{m}$; 水泥混凝土的容重 $\gamma=0.02354\text{MN/m}^3$, 模量 $E=30\,000\text{MPa}$; 预应力 $p=2.3\text{MPa}$ 。求临界板长。

由所给资料有

$$q = \gamma hb = 0.004237\text{MN/m},$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = 486 \times 10^{-6} \text{m}^4$$

$$P = phb = 0.414\text{MN}.$$

于是 $\frac{q^2 EI}{P^3} = 0.003689$ 。将此量代入式 (26), 求极值得

$$(kL)_{\min} = (kL)_{i=1.726} = 3.663.$$

$$\text{因为 } k = \sqrt{\frac{P}{EI}} = 0.1685/\text{m},$$

$$\text{所以, 临界板长 } L_{\min} = \frac{(kL)_{\min}}{k} = 21.74\text{m}$$

下面给出几组 $\frac{q^2 EI}{P^3} - (kL)_{\min}$ 值

$\frac{q^2 EI}{P^3} (\times 10^{-3})$	$(kL)_{\min}$
3.000	3.622

3. 689	3. 663
3. 996	3. 679
5. 000	3. 732
6. 077	3. 782

现回到由边界条件Ⅱ得到的式（14），并设 $\sin kl = 0$ ，则由式（14）解得 $kl = 2\pi n$ ， $n = 0, 1, 2, \dots$ ；显见 $n \neq 0$ 。若取 $n = 1, 2, 3, \dots$ ，则有

$$kl = 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots \tag{27}$$

与前面 $\sin kl \neq 0$ 条件下的几组解相比，式（27）导出的 $kL \gg kl$ 显著的大。于是若式（27）也是本稳定问题的解，它没有实际或工程上的意义；若它不是本稳定问题的解，前面求得的解就是唯一的解了。

5 新约束件

文 [1] 介绍了两种约束件，这里再给出一种新约束件。它利用大气压力来阻挡板的拱起。图 19（a）、（b）是含有这种约束件的路面的平面图和纵断面图

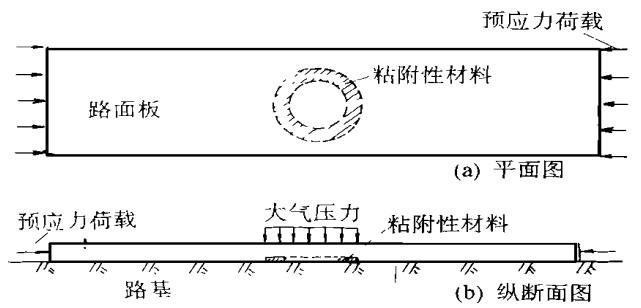


图 19 粘附性材料约束件

面图。在路面板与基层之间的一个圆形区内的环形上，设置有延性的粘附性材料，将路面板和基层粘结在一起。当圆形区的路面板因受纵向压力等原因有拱起倾向时，环性粘附材料阻止大气进入板与基层之间的圆形区内，使这一区域产生一定程度的真空。也就是板上的大气压力要大于板下的气体压力，从而阻止了板的拱起。大气压力是很可观的，仅 10% 的真空度产生的气体压力差就相当于在圆形区上压上了 43cm 厚的水泥混凝土板。

圆形区应设在板的中线（对称轴）附近，以减少对板收缩位移的妨碍，避免板的早裂。为产生较大的真空度和抵抗向上的拉力，基层应密实并有足够的内聚力。若不是这样，可用沥青灌入等方法加强圆形区及其附近的基层。粘附材料可以是树脂类膏状材料。虽然它把路面板和基层粘结在一起，但它的延性允许板与基层之间的相对切向位移（沿板面方向），从而不阻碍预应力传导；也允许缓慢的相对法向位移，从

而在路面板因温差翘曲时仍保持阻绝大气的作用。
这种约束件不仅结构简单，施工也容易；在准备好的基层的一定区域上，铺一层粘附材料；其上压置一块有粗糙面的薄板；再照常规摊铺水泥混凝土板。薄板应选用与粘附材料有亲和力，即有较大粘结力的材料。薄板上表面有伸出臂以与混凝土板相固结。这种约束件的另一个优点是没有防锈蚀问题。而它的老化问题可以通过调整组分加以解决。例如对树脂类粘附材料，可以加入抗氧化剂。

6 减摩层

水泥混凝土路面板浇筑以后，会因化学作用、湿度降低而收缩。这一收缩被板与基层之间的摩擦力所阻挡，从而在板中产生拉力，使得抗拉强度还未完全生成的板开裂。这是一个困扰很多水泥混凝土路面的问题。由于预应力路面板远长于普通水泥混凝土路面板，这一问题尤为突出。解决这一问题的办法之一是在路面板与基层之间设置减摩层，如两层聚氯乙烯薄膜，或还可在薄膜间打润滑蜡。塑料薄膜减摩层有两个主要缺点：在浇筑水泥混凝土板之前，薄膜很易被风吹起皱；薄膜的减摩作用会增加行车荷载在路面板中产生的应力。

为克服这些缺点，本文提出一种糊膏状减摩层。它隔开路面板与基层，使它们不直接接触，而糊膏本身的粘度很小，故对板的收缩位移不产生很大的阻力。糊膏主要由水基胶糊组成，它的粘度很容易由调整配方加以控制。粘度应尽可能小，但应保证在浇筑水泥混凝土板 12 小时以内，糊膏在板重作用下不被大量挤出。糊膏层可由喷涂车喷涂，之后铺盖一层起保护作用的薄纸，以防止浇筑混凝土时对其的损坏。由于薄纸粘附在糊膏层表面，而糊膏层粘附在基层上，且有相当的重量和很小的厚度，所以它们抵抗风吹的能力很大。适当调整配方可使糊膏层表面在空气作用下形成有一定韧性和张力的连续或不连续的薄层。这一薄层可以象薄纸一样保护糊膏层，从而薄纸可以省去。

当水泥混凝土板的强度基本生成后，减摩层就不需要了。而糊膏层在板的长期压迫下会被逐步地从板下挤出。剩余的部分在水份逐步转移后也会失去大部分体积和功能。薄纸也会在几个月内腐烂、消失。这种新糊膏减摩层不仅可以克服塑料薄膜层的缺点，其成本也明显低于后者。若将它应用在非预应力水泥混凝土路面的建筑中，也可望解决板的早裂问题。