

旧水泥混凝土路面 MHB 碎石化后强度机理分析

王松根¹, 李 昶², 张玉宏¹, 黄晓明²

(1. 山东省交通厅公路局 济南市 250002; 2. 东南大学 南京市 210096)

摘 要: 多锤头破碎机(Multiple-Head Breaker, 简称 MHB), 是我国近年来日益广泛应用的一种旧水泥混凝土路面碎石化设备, 其相应工艺也越来越完善。但经 MHB 碎石化后, 碎石化层的粒径分布状况及其强度形成原理仍没有被深入分析。首先, 从碎石化层的成型开始, 通过外观界定, 分析了碎石化后水泥混凝土板块各粒径分布层的强度形成原理, 提出了咬合嵌挤理论。最后, 对碎石化后水泥混凝土层的路面结构功能定位提出了对比分析结论, 认为碎石化层可以直接作为新加铺沥青混凝土路面结构的基层或底基层, 能满足新加铺路面结构的要求。

关键词: 多锤头破碎机; 水泥混凝土路面; 碎石化; 强度机理; 咬合嵌挤理论

碎石化是在路面状况较差时, 采用多锤头破碎机(Multiple-Head Breaker, 简称 MHB)类设备或共振式设备进行破碎的一种旧水泥混凝土路面处治方法, 因破碎后颗粒粒径相对较小, 甚至类似于碎石, 故称之为碎石化。

MHB 是通过重锤下落产生低频高幅的波动冲击力来进行破碎, 破碎时的能量会传播到较大的深度范围。同时, 由于水泥混凝土板块吸收能量满足从近到远递减的规律, 因而碎石化层并不是一个均匀的层次。破碎后的水泥混凝土颗粒粒径沿深度方向递增, 可以根据物理特性沿板块厚度方向, 将其简化为松散层、碎石化层上部和碎石化层下部等 3 个子层次, 如图 1 所示。

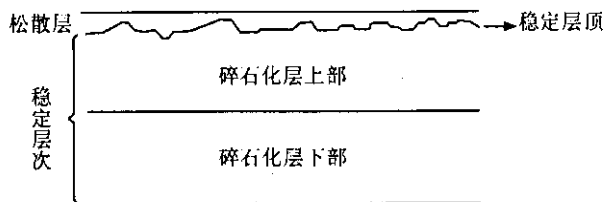


图 1 碎石化层

研究表明: 顶层颗粒吸收的能量最充足, 水泥混凝土板块震裂成片状颗粒, 且由于其与重锤锤刃直接接触, 所受到的扰动很大, 水泥混凝土颗粒无法形

成嵌锁, 而在表面形成一个松散层; 碎石化层上部的颗粒亦十分接近顶面, 碎石化裂纹能吸收到充分扩张连通所需的能量, 这些裂纹将水泥混凝土板分割成尺寸较小的颗粒; 碎石化层下部的颗粒离顶面较远, 碎石化裂纹数量远小于上部层次, 且由于吸收不到充分的能量扩张连通, 大部分都存在于水泥混凝土颗粒内部, 在预压应力的作用下无法继续扩张。从微观上讲, 碎石化层下部的水泥混凝土颗粒粒径较大, 而大颗粒间缺乏充足的次级颗粒来填充空隙, 可以认为该层次属于骨架—空隙结构; 从宏观上讲, 碎石化层下部的水泥混凝土颗粒粒径甚至大于该层次的厚度, 其在结构上更近似于块料路面。

总之, 旧路面经 MHB 类设备破碎后, 颗粒粒径在不同深度处是不同的, 板块上部破碎成粒径更小的颗粒, 而下面部分粒径则较大(达到 30 cm 左右), 破碎后形成的裂纹不是竖向贯穿, 水泥混凝土板块碎裂后除表面局部厚度范围(小于 2~5 cm)外, 在其原位形成了裂而不碎的嵌挤效果。本文着重分析碎石化层的松散层、碎石化层上部和碎石化层下部 3 个层次的强度来源和形成机理。

1 松散层的强度形成机理

碎石化后洒布的乳化沥青, 一定程度上增强了

水泥混凝土颗粒之间的粘结力,但其更主要的作用是加强与下面稳定层次的联接,而松散层仍按嵌挤的原则形成强度。其强度的形成原理类似于纯碎石材料,属于松散粒料材料。

由于缺乏胶结材料,松散层是按嵌挤原则产生强度,它的抗剪强度主要取决于剪切面上的法向应力和材料的内摩擦角。松散层的抗剪强度由 3 个因素构成。

(1) 剪切面上粒料表面间的相互滑动摩擦。

当受到剪力作用时,松散层内部剪切面上的粒料颗粒间将产生相对滑动的趋势,粒料颗粒抵抗这种相对滑动的趋势从而产生滑动摩擦。剪切面上粒料表面间的相互滑动摩擦,是纯碎石粒料抗剪强度的直接来源。

(2) 因剪切时体积膨胀而需克服的阻力。

如图 2 所示,对于松散层中碎石颗粒排列相对紧密的区域,剪切时颗粒 1 将要向上移动到颗粒 1' 的位置,否则颗粒 1 会被卡住,不能发生剪切位移。颗粒 1 向上移动到 1' 的位置,即是纯碎石粒料受剪时的体积膨胀现象。



图 2 剪切膨胀示意图

当受到剪力作用时,纯碎石粒料有体积膨胀的趋势,由于周围颗粒对这种膨胀的约束,将在颗粒间产生接触面法向上的正应力。约束力的存在提高了纯碎石粒料的抗剪强度。

(3) 因粒料重新排列而受到的阻力。

松散层的受剪过程,也是碎石颗粒的结构在进行着重新排列或调整的过程。对于相对紧密的区域将发生剪胀现象,而对于相对松散的部分,碎石颗粒在剪力作用下将移动到更为稳定的位置,从而使材料整体发生剪缩现象。不论剪胀或是剪缩,都会导致碎石颗粒的重新排列,从而在碎石颗粒的接触面上产生摩阻力,该力沿材料滑移面方向的分量构成材料抗剪强度的一个部分。

上述 3 个因素对松散层抗剪强度的贡献最终都体现为碎石颗粒间的滑动摩擦,因而,纯碎石粒料内摩擦角的大小是其抗剪强度最重要的指标。

单一粒料在另一有粗糙面但表面平整的粒料上

滑动,其内摩擦角大多在 30° 以下。当许多粒料相互紧密接触并沿某一剪切面相互变位时,因体积膨胀和粒料重新排列而多消耗的功,可使内摩擦角增大至 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。

毋庸讳言,松散层是一个相对薄弱的层次。水泥混凝土破碎后颗粒的强度很高、有棱角、表面粗糙,是获得较大内摩擦角有利的一面。然而其形状偏于扁平,没有良好的级配,也阻碍了嵌锁的形成。如果将其单独作为一个层次,其组成是难以满足路用要求的。另一方面,由于 MHB 破碎时,重锤落点在路面上的分布是不连续的,因而,松散层的厚度在平面上的分布也是不一致的。实践表明,破碎完毕后清除松散层可发现其下稳定面呈明显的肋骨状,重锤落点下的松散层厚度较大。而正常破碎情况下,松散层的厚度是相当小的,也就是说,正常破碎后松散层基本镶嵌在其下稳定层顶面。

稳定层顶面的约束将松散层的不稳定面上移,增强了其稳定性。松散层作为一个薄弱层次,其厚度宜薄不宜厚。在进行碎石化施工时应调整 MHB 机械运作参数,在充分破碎旧水泥混凝土板块的前提下,不要施加冗余的破碎功,以避免造成过厚的松散层。

从正反两个方面来考虑松散层的作用,其负面影响主要有:(1)虽其下卧层表面凹凸,能形成一定程度嵌锁作用,但如果不作处理直接加铺沥青混凝土层,此层可能产生滑动面;(2)松散层未作处治时,其颗粒粒径较小,同时破碎后裂缝呈开放状态,容易受到降雨影响;(3)松散层需要经过 Z 型压路机碾压,以加强其本身密实程度并与下层形成较强嵌挤,压实后易受到行车影响。

基于以上原因,推荐对松散层进行处理。这在试验段工程中也已应用,主要通过洒布乳化沥青,使松散层的整体性和防水性都有所提高。在进行处理后,松散层也有一定正面作用,这主要体现在其颗粒较小,易吸收下层破碎层的不均匀沉降和自适应调整的变形,起到应力吸收层的作用,对消除反射裂缝有辅助作用。

2 碎石化层上部的强度形成机理

如前所述,碎石化层上部颗粒间具有较大的预压应力,如果将其比拟为粘结力,则该层结构强度的形成类似于沥青混凝土。不同之处在于,由于碎石化层上部内的水泥混凝土颗粒与该层层厚具有可比性

(公称最大粒径:层厚 $\geq 1:2$),其结构强度已开始呈现出由微观向宏观的过渡。

英国的布朗教授提出,不同集料的公称最大粒径会显著影响沥青混合料的性能,使用较大公称最大粒径的集料,在减少沥青用量的同时,能提高沥青混合料的稳定性和抗滑性能。

根据上述结论,碎石化层上部水泥混凝土颗粒的粒径越大,则该层次的内摩擦角 φ 越大;而水泥混凝土颗粒的粒径越小,则膨胀产生的预压应力 c 越大,也即粘结力越大。从宏观的角度讲,颗粒粒径越小,则旧水泥混凝土板块结构强度降低越多,且过小的颗粒粒径将使得碎石化层在不可避免的扰动面前显得脆弱。因此,在碎石化施工中,应在保证碎石化层下部充分破碎的前提下,使上部水泥混凝土颗粒粒径尽可能得大。

3 碎石化层下部的强度形成机理

碎石化层下部是由粒径 23 cm 左右的水泥混凝土碎块体组成的,由于块体很小,该层次无法像原水泥混凝土路面板那样靠板体的挠曲来扩散荷载;由于连通裂缝的存在,也不能像其上层那样靠结构层的连续性来扩散荷载。连通裂缝是碎石化层下部的不连续部位,它们的存在使水泥混凝土块体间不能传递弯拉应力。但块体间的嵌锁咬合使连通裂缝产生了“拱效应”,从而具备传递剪力的可能。

在 MHB 破碎完毕时,碎石化层下部大部分水泥混凝土块体即能稳固在基层上,部分脱空较严重的区域内的块体未完全稳固的,在行车荷载作用下,经自适应调整亦能得到稳固。此时,块体间获得稳定的嵌锁,形成一个稳定的弹性工作层。

标准荷载 BZZ—100 的荷载直径为 21.3 cm,传递到碎石化层下部顶面时,由于双圆荷载的叠加以及其上层次的扩散,其直径远大于 23 cm。可以断定,当加铺层顶面作用标准荷载时,碎石化层下部的受荷面积覆盖多块碎块体。当该层次在荷载作用下产生弯沉时,这些受荷块体必然发生微小的转动。由于该层内块体已处于稳定的嵌挤平衡状态,任何块体的微小转动都受到其周围块体的约束,从而产生了水平向的挤压力,如图 3 所示。

正是水平向的挤压力、碎石块间的预压应力和荷载作用下碎石块间的竖向相对移动趋势,使得碎石块接触面上产生了竖向抗力,从而提升了块体间竖向抗剪强度。荷载越大,弯沉就越大,碎石块转动

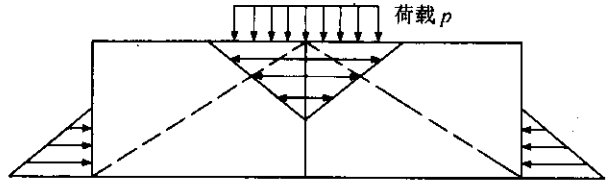


图3 水平挤压力的产生

角度越大,相应水平挤压力就越强,荷载也就被扩散到更大的范围。

实际上水泥混凝土碎块间存在一定的拱度,这样石块间的挤压将更强。如图4所示,在一定荷载作用下,A在发生微小的位移后至A'点,产生的弯沉 $l = \Delta h$,那么斜边也随之变化,有:

$$\Delta L = L - L_1 = \Delta h \cdot \sin \alpha \approx \Delta h \cdot \alpha$$

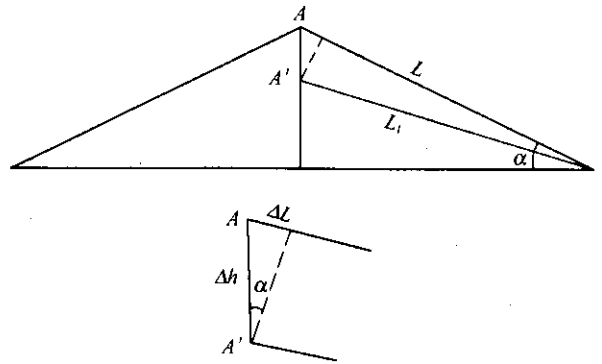


图4 拱效应示意

这个由弯沉 l 引起的侧向变形 ΔL ,必然受到相邻碎石块的限制而产生侧向挤压力 f ,拱度(即 α 角)越大, ΔL 就越大,相应的侧向力 f 也就越大。

由此可见,碎石化层下部具有明显的“拱效应”,能将竖向压力变为水平推力,借以扩散荷载。

块体间竖向抗剪强度的糙面摩擦部分,则是由块体间的嵌锁咬合形成的。由于碎石化层下部颗粒是由板底裂缝扩展与上部裂缝贯通形成的,裂缝的扩展总是沿着材料的薄弱面,即粗骨料的界面,因此,块体间的接触面是不平整的,这种不平整的表面就形成了块体间竖向抗剪强度的糙面摩擦部分。

另外,由于碎石化层下部是由原本为整体的水泥混凝土板破碎后形成的裂而不碎的一层,竖向裂纹并没有贯穿。因此,该层中邻近的水泥混凝土碎块在形状上有较好的契合度,伴随着收敛位移的发生,呈交错咬合状排列,处于联锁咬合状态,形成所谓的“联锁咬合块体”结构,具体表现为各种形式的咬合梁、拱结构。在外力作用下邻近的水泥混凝土碎块

间,会产生强于一般嵌挤作用的咬合嵌挤作用。

通常来说,联锁咬合结构有一定的承载能力与自稳能力,以常见的自然咬合拱结构为例(图5),设结构中咬合水泥混凝土碎块数为 n ,则结构水泥混凝土碎块间的内部咬合点为 $n-1$ 个,支承链杆数为 $n-1+3$ 个,于是结构的自由度 W 为:

$$W=3n-2(n-1)-(n-1+3)=0$$

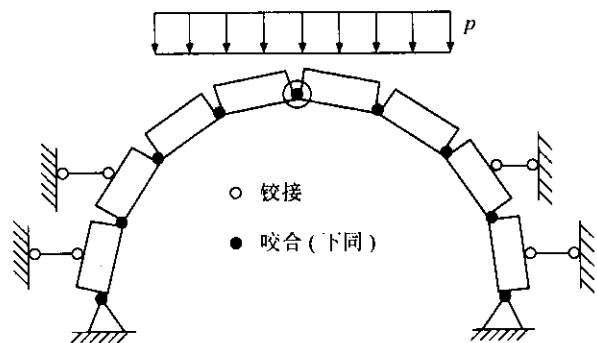


图5 自然咬合拱结构模型

由结构分析可知,如果结构自由度 $W>0$,结构为不稳定结构;如果 $W<0$,则结构为稳定超静定结构;如果 $W=0$,则结构为稳定静定结构。故自然咬合拱结构为稳定静定结构。自然咬合拱结构的稳定性取决于结构中的一个(或多个)“关键咬合面”(图5中带圈者,“关键咬合面”又连接着“关键块体”),一旦“关键咬合面”脱咬,结构就会失去平衡,在外力及自重作用下,邻近的水泥混凝土碎块会迅速移动过来,同原位置的水泥混凝土碎块契合,重新形成咬合面,再次形成静定结构,这也是其自稳能力的来源。

由于破碎机械破碎的随机性,碎石化下层形成的咬合结构也是多种多样的。在水平方向上可能形成如图6所示的水平向咬合梁结构,图中黑色实心点为咬合点。

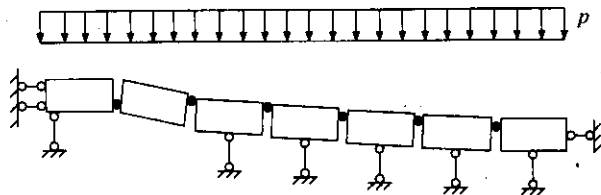


图6 咬合梁结构模型

设咬合梁结构中咬合水泥混凝土碎块数为 n ,则结构水泥混凝土碎块间内部咬合点为 $n-1$ 个,支承链杆数为 $n-1+3$ 个,于是结构的自由度 W 为:

$$W=3n-2(n-1)-(n-1+3)=0$$

这说明咬合梁为稳定静定结构。如果由路面层传来的力超过咬合点的承载力,那么咬合点将脱落,结构不再静定,水泥混凝土碎块可以移动,所以邻近的水泥混凝土碎块会在力的作用下迅速补充过来,重新咬合在一起形成新的咬合点,重新形成一个静定的咬合梁结构。在碎石化后的碾压过程中,此咬合式梁结构本身将处于不断平衡→不平衡(咬脱)→再平衡的周而复始的发展过程中,直到可移动的水泥混凝土碎块越来越少,结构趋于稳定。

在竖直方向上,对于上面先断裂的水泥混凝土碎块,如咬合点处形成的应力小于水泥混凝土碎块的抗压强度,且先断裂的水泥混凝土碎块厚度又能保证梁中点断裂处咬合点的位置在梁两端断裂处咬合点的连线之上,则能形成3个咬合点的三咬拱式平衡,称为三咬拱结构(图7)。

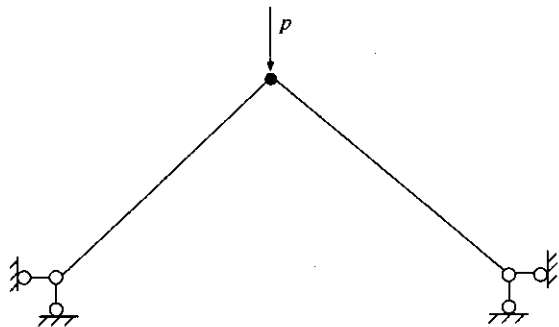


图7 三咬拱结构模型

图7结构中咬合水泥混凝土碎块数 $n=2$,结构水泥混凝土碎块间内部咬合点为 $n-1=1$ 个,支承链杆数为 $n-1+3=4$ 个,于是结构的自由度 W 为:

$$W=3n-2(n-1)-(n-1+3)=0$$

故这种三咬拱也是静定结构。

根据上面的分析,如果碎石化层下部水泥混凝土碎块厚度能保证水泥混凝土碎块内部咬合点的位置在两边咬合点的连线之下,且内部咬合点处形成的应力小于水泥混凝土碎块的抗压强度,则碎石化层下部水泥混凝土碎块还可能形成3个咬合点的反三咬拱结构(图8)。同理,反三咬拱为静定结构。

综上所述,由于水泥混凝土板破碎前的整体性,而破碎后碎石化层下部又处于裂而不碎的状态,因此碎石化层下部相邻水泥混凝土碎块间在形状上具有非常好的契合度,容易形成“联锁咬合块体”结构,如水平咬合梁结构、三咬拱结构、反三咬拱结构等。此类结构通常为静定结构并具有一定的自稳能力,能够提供比普通嵌锁作用更强的咬合嵌挤作用。

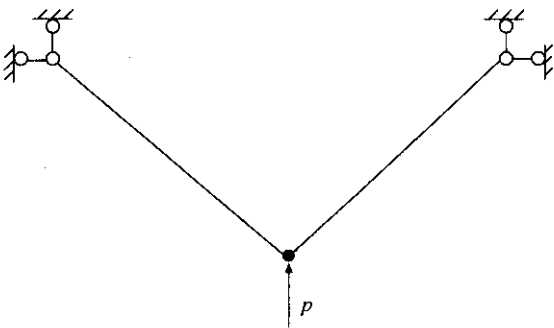


图 8 反三咬拱结构模型

4 碎石化层的强度检测和功能定位

碎石化后,水泥混凝土路面板可以作为新路面结构的基层、底基层,还是只能作为垫层来使用,是必须澄清的问题。

根据国外实际工程应用,一般将其作为基层来直接使用,常用加铺层为沥青混凝土层。本课题试验段中,水泥混凝土板碎石化后顶面回弹模量的部分测定结果见表 1。

表 1 正常碎石化施工情况下回弹模量

测点编号	测点桩号	回弹模量/MPa
1	K18+920	196.06
2	K18+940	158.37
3	K18+960	164.11
4	K18+995	205.92
5	K19+010	171.54
平均值/MPa	179.20	
标准差	20.73	

测点位置是随机的,测试方法参考了土基回弹模量的测试方法。根据表 1 测试结果可知,碎石化后顶面回弹模量最小值大于 150 MPa,综合其他位置测试数据,其最大值可接近 300 MPa。将这个模量与一般旧沥青混凝土路面加铺工程相对照,相当的旧沥青混凝土路面加铺前代表弯沉为:

$$l_0=1\,000\frac{2p\delta}{E_t}m_1m_2=\frac{2\,000\times0.7\times10.65}{E_t}\times1.1\times1.0=\frac{16\,401}{E_t}$$

当取回弹模量为 150 MPa 和 300 MPa 时,对应

的旧沥青混凝土路面代表弯沉分别为 55、110(单位: 0.01 mm)。这样的强度作为加铺结构的基层是完全满足要求的。

另外,碎石化后的松散层因颗粒粒径较小,其变形所占总变形的比例较高,而其下 2 个分层具有更高的强度特性。

根据以上分析可知,碎石化后水泥混凝土板作为加铺结构的基层是合适的,可以在其上直接加铺沥青混凝土结构层。

5 结语

(1)碎石化层不是一个均匀的层次,其组成颗粒粒径从上到下由细向粗过渡。

(2)因体积膨胀受到约束,碎石化层内颗粒处于“预压应力”的状态。而由于材料内裂缝沿粗骨料颗粒发展,水泥混凝土破碎后颗粒间呈现出复杂的咬合嵌挤状态。

(3)碎石化层沿深度的强度形成原理并不相同:表面松散层类似于沥青稳定粒料;碎石化层上部有较大的内摩擦角;碎石化层下部处于联锁咬合嵌挤状态,并形成“拱效应”传递荷载。

(4)碎石化后,水泥混凝土板碎石化层可以作为新加铺沥青混凝土路面结构的基层或底基层。

参考文献:

[1] Thompson M R, et al. HMA Overlay Construction with One Pass/lane-Width with PCCP Rubblization [J]. Asphalt Paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, 1997, 66.

[2] AI. Asphalt Overlay for highway and street rehabilitation[Z]. MS-17, 2000.

[3] Rehabilitation of Jointed Portland. Cement Concrete Pavement on I - 35 [Z]. (Southbound) in Kay County, Oklahoma, J.F. Daleiden, D.a. Ooten, M.D. Sargernt, Transportation Research Record 1513, Skokie, IL, 1990.

[4] Guidelines for Unbonded Concrete Overlays [Z]. TB005P, American Concrete Pavement Association, Skokie, IL, 1990.

文章编号: 0451—0712(2006)12—0100—04

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

复合式路面中夹层对旧水泥混凝土板荷载应力影响分析

祝海燕^{1,2}, 王选仓¹, 曹宝贵³

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 吉林交通职业技术学院 长春市 130012; 3. 吉林大学交通学院 长春市 130025)

摘 要: 为考察旧水泥混凝土路面加铺沥青混凝土层时,设置夹层对旧水泥混凝土板应力的影响,结合 G104 徐州机场路改造工程,利用 ANSYS 三维有限元计算工具,对比分析了单夹层及复合夹层结构中旧水泥混凝土板荷载应力变化规律。结果表明,两种夹层设置方式对水泥混凝土板荷载应力影响规律几乎相同。

关键词: 复合式路面; 有限元方法; 荷载应力; 夹层; 旧水泥混凝土路面

旧水泥混凝土路面加铺沥青混凝土面层时,沥青混凝土加铺层对降低旧水泥混凝土板荷载应力的效果很有限,加铺层下的旧水泥混凝土路面仍起关键的承载作用。因此,现行水泥混凝土路面设计规范以旧水泥混凝土板的应力和水泥混凝土弯拉强度作为加铺结构的设计指标^[1],但未考虑加铺时设置夹层对旧水泥混凝土板应力的影响。已有的文献^[2~4]

就设置夹层对沥青混凝土加铺层应力的影响进行了深入的研究,但关于夹层对旧水泥混凝土板应力影响的分析鲜见报导。实际工程中为预防和减缓反射裂缝的发生,常常在旧水泥混凝土面层与沥青混凝土加铺层之间设置夹层,而且经过工程实践和试验研究^[5~7]证明,设置夹层是减缓反射裂缝的有效技术措施,可以说夹层几乎成了旧水泥混凝土路面加

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(2005 3188 1213)

收稿日期: 2006—06—23

Analysis of Intensity Mechanism of Old CCP Slab Rubbled by Multiple-Head Breaker

WANG song-gen¹, LI chang², ZHANG yu-hong¹, HUANG xiao-ming¹

(1. Highway Bureau of Communications Department of Shandong Provice, Jinan 250002, China;

2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The multiple-head breaker is a new type of equipment which is introduced into China for several years and used increasingly on highway projects, its technics is more and more mature. But the intensity principle of rubblized slab is still not analyzed and unclear. The formation of rubbled slab is analyzed firstly, through distinguishing of profile, the layers are divided by particle size, their intensity principles are explained, and the theory of embedding and occluding is put forward. Last, the function of rubbled slab is ascertained, it shows that rubbled slab can be taken directly as base layer or under base layer, and meet the needs of new pavement.

Key words: MHB (Multiple-Head Breaker); CCP (Cement Concrete Pavement); rubble; intensity mechanism; theory of embedding and occluding