第 26 卷 第 3 期
2006 年 5 月

长安大学学报(自然科学版)
Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)

Vol. 26 No. 3
May 2006

文章编号:1671-8879(2006)03-0005-05

石灰粉煤灰类基层材料早期强度的可恢复性

张 超[1],杜新科[2],胡长顺[1]

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室,陕西 西安 710064;
2. 陕西省高速公路建设集团公司,陕西 西安 710086)

摘 要:通过室内试验和理论分析,认为石灰、粉煤灰之间通过形成空间网格结构、凝胶结构和凝胶结晶缩合结构促使二灰产生相应的结构强度。由于这些结构在形成的时间顺序和对强度贡献的程度上存在较大的差异,使石灰、粉煤灰类材料在早期(3 d 左右)强度形成上表现出一定的独特性。研究结果表明,在保证结构完整的基础上,二灰材料具有显著的早期强度可再生恢复性,初期的结构破坏不会影响这类材料最终强度的形成。

关键词:道路工程;半刚性基层;二灰材料;强度可恢复性;微观结构

中图分类号:U414.1 **文献标识码**:A

Recoverability of Strength Formation of Mixture of Lime and Fly-Ash at Early Stage

ZHANG Chao[1], DU Xin-ke[2], HU Chang-shun[1]

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Expressway Construction Group Company, Xi'an 710086, Shaanxi, China)

Abstract: Through laboratory experiment and theoretical analysis, it is found that the structural strength of the mixture of lime and fly-ash can be promoted by the formation of space network structure, gelatin structure and gelatin-crystal structure among lime and fly-ash. Because of the quite differences that these structures developing at the time sequence and their contribution to strength formation, the mixture of lime and fly-ash presents certain characteristics on strength formation during the initial time. The results indicate that lime and fly-ash has significant strength recoverability at early stage (about 3 d) if the mixture is compacted well. The structural damage in the mixture of lime and fly-ash at early stage rarely affects the final strength of the mixture. 1 tab, 7 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; semi-rigid base course; mixture of lime and fly-ash; recoverability of strength formation; micro-structure

0 引 言

长期的工程实践经验证实,路面半刚性基层材料结构受到破坏后,材料的强度一般是无法再恢复的。因此,半刚性基层材料施工碾压成型之后,要封闭养护,尽可能避免重型机械车辆行驶,以免造成基

收稿日期:2005-03-12
作者简介:张 超(1956-),男,河南洛阳人,教授,博士研究生.

层结构的早期破坏,影响最终强度的形成[1]。

然而实践中发现,石灰和粉煤灰(简称二灰)材料与其他半刚性基层材料相比,具有一定的早期强度再恢复性[2],但这一特性尚未见到有关的研究报告。本文从试验和理论上进行全面分析,验证粉煤灰的这种独特性质,以促进粉煤灰的路用实践和理论研究。

1 二灰类材料早期强度可恢复性规律

二灰类材料早期强度可恢复能力首先通过材料结构自愈试验得到验证。以标准方法将不同的基层材料成型为抗压试件,脱模后在反力架下进行侧向加载,试件在外力的作用下受压开裂,再重新合并。随后在标准条件下养生,最终检测相应的无侧限饱水抗压强度。表 1 为这一试验结果。

从试验结果可以看出,采用石灰、粉煤灰的材料有着明显的结构愈合能力,在几个龄期中二灰材料的自愈程度都超过对照组强度的 96%,当加入碱性激发剂后强度恢复更是达到百分之百(相应的正超差可能来自于试验自然偏差),而石灰土组几个龄期都有较大的强度损失。自愈试验说明二灰类材料的确具有一定的强度可恢复性[3-4]。

表 1 二灰材料自愈能力的验证

龄期/d		7	14	28
二灰(20∶80)	正常强度/MPa	0.89	1.75	3.01
	压裂强度/MPa	0.88	1.69	2.91
	变化/%	−1.12	−3.42	−3.32
二灰+1%碱(20∶80)	正常强度/MPa	2.38	4.30	5.85
	压裂强度/MPa	2.43	4.25	5.86
	变化/%	+2.10	+1.16	+0.17
石灰土(12∶88)	正常强度/MPa	1.07	1.25	1.37
	压裂强度/MPa	0.70	0.82	0.98
	变化/%	−34.6	−34.4	−28.5

为系统了解和掌握二灰材料早期强度可恢复性规律,这种强度的可恢复特点通过室内系统试验得到进一步证实。将二灰材料首先以正常方式成型,经过不同养生时间之后彻底粉碎破坏,再重新充分拌和成型养护一定时间,然后测出结构再恢复后强度形成结果。试验结果见图 1。

试验结果显示,在两种比例和不同的压实度条件下,二灰材料都表现出一定程度的强度可恢复性。虽然成型养生一段时间之后受到破坏,但再成型仍然会继续形成强度,且初次破坏的时间(3 d 左右)及再次成型形成的强度与正常条件下的结果很接近。

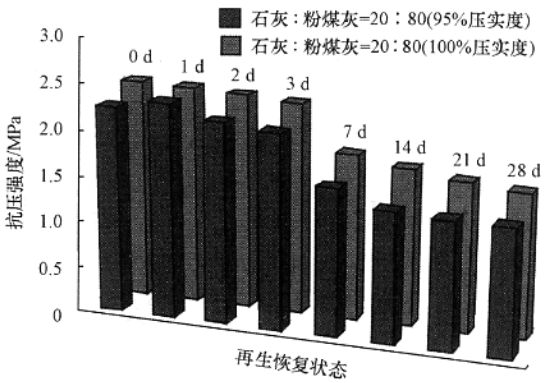

图 1 二灰材料强度可恢复性试验结果

这些试验结果说明,二灰材料早期强度的破坏并不会影响最终强度的形成,也就是说,当二灰基层在初期经历各种原因造成结构破坏时,只要保证它的整体性,其损失的强度在一定程度上可以得到再生恢复[5-6]。

出乎意料的是,二灰材料这种强度可恢复性可以反复进行。将两种不同比例的二灰成型养生 7 d 后破坏,拌和均匀再成型养护,每 7 d 为一个周期。破坏周期达 4 次之多时,石灰比例较高的二灰仍可形成强度(图 2)。这说明适宜的石灰、粉煤灰比例有着极强的强度可恢复性,只要能保持材料的整体性,被破坏的结构强度在一定的条件下完全有可能得到一定程度的恢复。可以设想,二灰基层施工期间因不同原因对基层早期结构造成一定程度的破坏,如果采取措施重新成型,或松散的表层翻松再碾压,就有可能使基层的性能在相当程度上得到恢复。

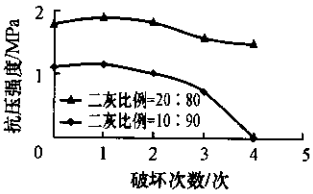

图 2 二灰材料多次破坏后强度恢复结果

这种可恢复性在其他类型的基层材料上则难以形成。对于水泥稳定类材料成型养生若干龄期破坏后再成型,已很难形成强度,其根本原因在于快速水化硬化的水泥一旦初期形成的结构受到破坏,不仅强度无法恢复,而且会影响到水泥水化硬化的进程。尽管石灰土结构破坏后强度可以恢复,但却与正常状况的强度结果有较大差别。图 3 为石灰土进行强度可恢复性试验所得的结果。

由石灰土(石灰∶西安黄土=12%∶88%)所进行的强度可恢复性试验可看出,当石灰土的结构强度受到破坏后,对其后强度的再形成造成无法弥补的不利影响,1 d 的强度再恢复值就已下降 20%以上。随着再生恢复时间的延长,不利影响愈加明显,

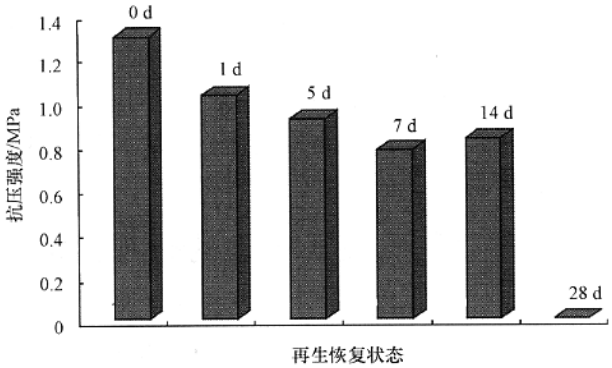

图 3　石灰强度可恢复性试验

其中已养生 28 d 再破坏后早期 7 d 龄期已无法形成强度。试验中所用的是西安地区黄土，该土的矿物组成和粒度分布都比较适宜，多年实践证实这种土的工程性质较好，利于石灰加固稳定，显示出一定的强度可恢复性，如采用其他类型的土，如粉性土或砂性土，其强度可恢复性会更差。

2　二灰类材料早期强度可恢复性机理

上述试验结果显示，石灰、粉煤灰材料在初期结构强度受损后，仍具有相当明显的强度可恢复性，这种强度再生特性必定与二灰材料在强度形成过程中所具有的内在特征密切相关。

2.1　二灰材料结构强度的形成

石灰和粉煤灰之间之所以形成结构强度，取决于一系列外因和内因的综合作用，这些作用包括力学、物理化学和化学等方式。

在压实成型状态下，二灰之间发生一系列物理化学和化学作用，即石灰的重结晶反应、石灰的碳酸化反应、石灰与粉煤灰之间的离子交换和二灰之间的火山灰反应。经过这些作用过程，二灰材料内部形成了新的结构，并伴随着这些结构的积累和完善，逐渐构成二灰基层材料的强度。这类新的结构形式主要有：空间网格结构、凝胶结构和凝胶晶体缩合结构等。

所谓的空间网格结构来自于水中溶解的石灰，当水中所溶解的钙离子浓度达到饱和时，石灰重新形成晶体状的石灰——含结晶水的 $Ca(OH)_2$，该过程可简明地表示为

$$Ca(OH)_2 \xrightarrow{H_2O} Ca^{2+} + 2OH^- \xrightarrow{H_2O} Ca(OH)_2 \cdot nH_2O$$

其中，$Ca(OH)_2 \cdot nH_2O$ 外观上是片状结晶体，通过空间格体形式将材料颗粒团聚在一起形成二灰材料的初期强度。随着时间变化，原状石灰和晶体石灰通过溶解于水中或与空气中的 CO_2 反应，生成立方形的 $CaCO_3$ 方解石晶体

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O$$

因为方解石 $CaCO_3$ 晶体的溶解度远远小于 $Ca(OH)_2$ 晶体，使得这种空间格体结构的强度和水稳性有了明显提高。

随着火山灰反应的进行，二灰内部开始产生水化硅酸钙（$CaSiO_3$）和水化铝酸钙（$CaO \cdot Al_2O_3$）物质，这些水化产物外观象是“糨糊”的凝胶体，该凝胶体与水泥水解后的产物相类似。由于是在不断吸收水分的情况下逐渐产生的，因此该凝胶具有水硬性质。在这种凝胶物的胶连下，二灰材料被胶结在一起形成凝胶结构。这种结构具有一些特点：①无定形性。凝胶物外观上不具有晶体物质的有序形状，表现出形貌毫无规则的各向同性特点；②连续性。随着火山灰反应的进行，凝胶物质可以覆盖整个材料，形成一个连续整体；③密实稳定性。由于火山灰反应是粉煤灰类材料中最主要的一类化学反应，经过持续不断的作用，所形成的凝胶物质积累密致，相应的密实程度很高，因此这种凝胶结构具有良好的结构稳定性和显著的结构承载力。

随着龄期的延长，在生成凝胶物的同时，开始出现一些纤维状或棒状的结晶体。结晶体的来源一方面是二灰之间进一步反应的结果；另一方面是原有凝胶物的转化，从而在二灰材料中又产生了第三种结构——凝胶晶体缩合结构。由于依附于凝胶物质的纤维和棒状晶体能够相对远程的相互交织、缔结，构成了网架结构的结晶体，因而在进一步强化材料相互连接性的同时，又提高了凝胶结构的密实性。依赖于上述的 3 种结构，二灰材料的强度开始形成，并随着这些结构的不断积累和发展，表现出材料的各种力学性质相应的产生和提高。但由于粉煤灰结构上的稳定性、与石灰反应的缓慢长期性，要形成和完善这 3 种结构，并随之达到较高的强度，必然需要经历较长的一段时间，所以实践中普遍认为二灰材料早期强度较低。

2.2　二灰材料结构强度可恢复机理

二灰基层材料结构的形成和强度的发展是一个连续、长期的过程，在这期间 3 种主要新生结构既相互独立又互为关联，共同为二灰材料结构强度的形成和发展起着促进作用。

之所以二灰材料强度得以恢复，而且是彻底破坏后的再恢复，根本原因在于当原有的结构强度破坏后，再成型后的材料是否还能产生新的有助于强度形成的结构。如前所述，构成二灰材料强度的结

构主要有空间网格结构、凝胶结构和凝胶晶体缩合结构等。有助于这些结构形成的因素有很多,归纳起来可分为外因和内因两类。外因是充分的外力使材料紧密的集结为一体、较高的温度、适宜的湿度等;内因主要是充足的有效成分和良好的反应介质(如保证火山灰反应的碱性条件)等。当具备了这些内外因条件,应该说强度的形成是不存在什么问题的,然而对于粉煤灰材料能否形成充分的强度,还取决于另一个条件,即要有一定的龄期。由于粉煤灰自身结构上的稳定性和与石灰之间的火山灰反应相对滞后的特点,使得形成凝胶结构和凝胶晶体网架结构需要持续一定时间后才能充分产生。虽然主要由石灰形成的空间网格结构在初期即可生成,但这一结构在所有类型的结构中所发挥的作用最小,原因是所形成的石灰晶体网格与其他结构相比仍有着较大的溶解度。另外该结构最终大多要发生变化,转变成为其他结构的一部分,所以在较短龄期里结构破坏所造成的强度损失主要集中在石灰形成的空间网格结构上,此时火山灰反应所形成的凝胶结构和凝胶结晶结构还非常有限,因此在受到破坏时这些结构的损失对强度的影响必然很小。可见,在粉煤灰发生充分的火山灰反应之前,结构的破坏,甚至是极彻底的破坏,只要有一定的 $Ca(OH)_2$ 存在,破坏后就能够在一定程度上重新恢复整体性,最终都能产生新的结构,达到或接近结构破坏前能够形成的强度。因此从这一试验现象和分析上看,二灰强度的可恢复性应被认为是二灰材料强度长期持续发展的必然结果。而材料强度可恢复的效果主要取决于剩余 $Ca(OH)_2$ 物质含量的多少,同时取决于材料重新恢复整体性的程度和未来强度发展对结构破坏所造成损失的弥补程度,而原始破坏的程度不是关键因素[7-8]。

对于水泥稳定土,它的结构强度主要依靠水泥自身水化反应所生成的水泥石物质,且水化速度很快。根据水泥水化速率的规律,水泥加水后 1 h 多初凝,3~4 h 就可终凝。2~3 d 所形成的强度就可达 28 d 强度的 50%以上,7 d 强度已达到 28 d 强度的 80%。在任何时候一旦结构受到破坏,其强度损失都是无法弥补的,因此水泥稳定土不具有类似二灰材料的强度再恢复性。对于石灰稳定土,虽然土与石灰的反应缓慢,这一点类似于二灰的作用过程,但由于土中的硅铝氧化物大多是原生矿物,其活性很低,几乎不具有参与反应形成强度的可能性,所以石灰土最终能够达到的强度是很有限的。这一点从石灰土经过长时间的养生后强度仍然普遍不高的试验结果就可看出。对石灰土来说,无论哪一龄期结构受到破坏,对强度造成的损失都是不可忽视的,因此一定程度上可以说强度的再生性是二灰类材料的特有性质[9-10]。

3 二灰材料强度再恢复的微观结构

通过上述分析得知,由于早期结构的破坏只涉及到对结构强度贡献有限的空间网格结构,而并未影响到起决定作用的凝胶结构和凝胶晶体网架结构的形成,因此在保证了火山灰反应充分进行的前提下,早期受到破坏的二灰材料结构,最终仍可以形成较高整体强度。这种试验现象通过电子显微镜的观察会有直观的验证。

图 4~图 6 分别是比例为 20∶80 的二灰材料,成型 3 d 破坏再成型养生 7 d 和 28 d 的凝胶结构以及 14 d 的纤维晶体的微观结构。通过这 3 张图可知,尽管初期二灰材料形成的强度受到破坏,但随后仍有一定的结构强度形成空间,在不长的破坏期间,二灰有相当的能力使强度恢复到一定程度。但当经历了早期结构破坏再恢复整体的二灰材料内部,已经很难找到石灰结晶所形成的空间网格结构,原因是早期结构的破坏影响到这种结构的形成。正如前述分析,由于该结构对强度形成贡献的局限性,并不会对最终强度的形成造成实质性的影响。

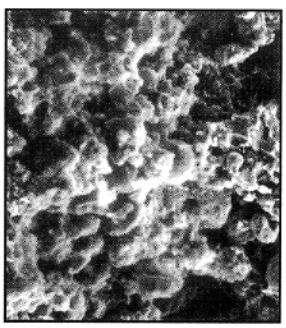

图 4 3 d 破坏再成型养生 7 d 的凝胶结构

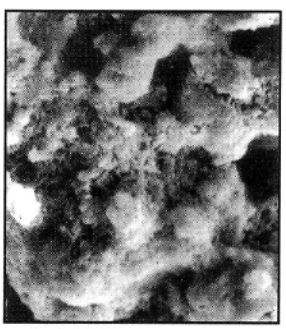

图 5 3 d 破坏再成型养生 28 d 的凝胶结构

通过对强度再恢复的微观结构仔细观察,发现了生成物在经历破坏前后分阶段形成的微观现象。在图 7 中有一颗粉煤灰颗粒,显微取样时将表面的凝胶物揭掉一块,但内部露出的并不是粉煤灰颗粒原有的表面结构,而是另一层凝胶物质,显然这些凝胶物是在破坏前形成的。这一现象一方面说明经历了破坏过程将造成一定的结构损失;另一方面说明粉煤灰仍有相当的强度可恢复性,只要保证材料的整体性和良好的养生条件,早期二灰材料的结构破

图 6　3d 破坏再成型养生 14 d 的凝胶纤维晶体结构

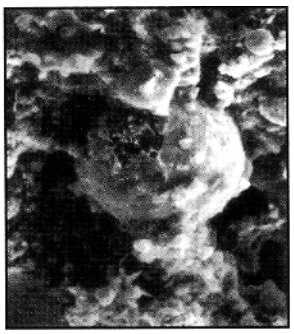

图 7　粉煤灰二次生成物的微观现象图

坏能够在很大程度上得到再生恢复。

4　结　语

(1)在成型后较短的时间里(约 3 d)，结构受到破坏的石灰粉煤灰材料具有一定的强度可恢复性，再生恢复的强度与正常条件下产生的强度基本相同。

(2)二灰类材料的强度可恢复性具有多次反复的能力，当二灰中石灰比例适宜、压实程度较高时，将有助于材料的强度可恢复性。

(3)二灰材料早期强度可恢复的原理是：早期结构的破坏和强度的损失只是二灰材料在力学、物理作用过程的影响下形成的初期结构和强度，而这种结构强度对整个强度的贡献有限。只要随后措施有保障、条件适宜，石灰粉煤灰之间充足的后期反应能力完全有可能很大程度弥补前期强度的大部分损失，或者使早期出现的结构缺陷得以自行愈合。

参考文献：

References：

[1]　JTJ034-2000. 公路路面基层施工技术规范[S].
JTJ034-2000. Technical Specification for Construction of Highway Roadbases[S].

[2]　张登良. 加固土原理[M]. 北京：人民交通出版社，1990.
ZHANG Deng-liang. Stabilization Principle on Soil [M]. Beijing：People's Communications Press，1990.

[3]　刘红瑛，戴经梁. 骨架密实二灰稳定碎石混合料配合比设计方法. 长安大学学报：自然科学版，2003，23(3)：11－16.
LIU Hong-ying，DAI Jing-liang. Design Method of Mixture Skeleton Densed with Lime-fly-ash and Crushed Rock[J]. Journal of Chang'an University：Natural Science Edition，2003，23(3)：11－16.

[4]　陈拴发，郑木莲，王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[J]. 中国公路学报，2005，18(3)：14－17.
CHEN Shuan-fa，ZHENG Mu-lian，WANG Bing-gang. Experimental Research on Stress Corrosion Character of Fly-ash-cement Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport，2005，18(3)：14－17.

[5]　钱觉时. 粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M]. 北京：科学出版社，2002.
QIAN Jue-shi. Fly-ash Characteristics and Fly-ash Concretes[M]. 2002.

[6]　景宏君，张　斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报，2004，4(2)：14－18.
JING Hong-jun，ZHANG Bin. Loess Subgrade Strength Law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2004，4(2)：14－18.

[7]　李炜光，申爱琴，张　超，等. 粉煤灰活性测试方法[J]. 长安大学学报：自然科学版，2004，24(5)：16－19.
LI Wei-guang，SHEN Ai-qin，ZHANG Chao，et al. Measuring of Fly-ash's Activity Peculiarity[J]. Journal of Chang'an University：Natural Science Edition，2004，24(5)：16－19.

[8]　高英力，周士琼，尹　健. 复合超细粉煤灰高性能道路混凝土的试验研究[J]. 公路交通科技，2005，22(8)：15－19.
GAO Ying-li，ZHOU Shi-qiong，YIN Jian. Experimental Investigation of High Performance Highway Concrete with Composite Ultra-fine Fly Ash[J]. Journal of Highway and Trasportation Research and Development，2005，22(8)：15－19.

[9]　张洪亮，胡长顺，刘保健，等. 压实石灰黄土力学特性试验[J]. 交通运输工程学报，2003，3(4)：13－16.
ZHANG Hong-liang，HU Chang-shun，LIU Bao-jian，et al. Mechanical Properties Experiment of Compacted Loess-lime[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2003，3(4)：13－16.

[10]　梁乃兴，萧　赓. 水泥粉煤灰碎石基层力学性能对沥青路面结构的影响分析[J]. 中国公路学报，2003，16(3)：18－22.
LIANG Nai-xing，XIAO Geng. Effect Analysis of Mechanical Performance of Cement FA-bound Hoggin for Roadbase on Asphalt Pavement Structure[J]. China Journal of Highway and Transport，2003，16(3)：18－22.