

# 探索表面涂层剂对混凝土强度恢复的效果

Hyeok Jung Kim<sup>1</sup>, Nam Wook Kim<sup>2,\*</sup>

1. 韩京国立大学 456-456 韩国
2. Jeonnam State University 517-517 韩国

**摘要:** 混凝土的裂缝和空隙会导致耐久性的损失。当裂缝到达钢筋混凝土结构表面时, 可以用各种方法进行修补, 但对于荷载重复作用引起的潜在缺陷或微裂缝, 由于无法通过表面状态进行检测, 目前还没有有效的修补方法。在本研究中, 我们使用用于修复的涂层材料检测了掺有外加剂的混凝土的自修复性能的存在与否, 该涂层材料已经使用了很长时间。由此, 通过试验确定了掺外加剂混凝土的基本特性, 证实了其自修复性能。考虑到受损混凝土强度的恢复, 掺有表面涂层剂的混凝土比掺有非混合混凝土的混凝土显示出更大的恢复效果。随着受损材料的老化, 这种影响更大。这表明, 即使将修复涂层材料作为掺合剂混合, 也保持了晶体增殖效果, 并且证实了混合有掺合剂的混凝土具有自修复性能。

**关键词:** 强度恢复率; 表面涂层剂; 自修复; 维护; 耐久性

## Evaluation on the Strength Recovery Rate of Concrete Using Surface Coating Agent

Hyeok Jung Kim<sup>1</sup>, Nam Wook Kim<sup>2,\*</sup>

1. Industry-Academic Cooperation Foundation Center, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
2. Department of Civil and Environmental Engineering, Jeonnam State University, Damyang, Republic of Korea

**Abstract:** Cracks and voids of concrete cause the loss of durability. When the cracks reach to the surface of reinforced concrete structures, they can repair by various methods, but there are no effective repairing methods for latent faults or microcracks caused by load repetition because they cannot detect by surface state. In this study, we examined the presence or absence of self-repair performance of concrete mixed with the admixture using the coating material for repair, which has been used for a long time. Thus, the basic characteristics of concrete mixed with admixture were identified and self-repair performance was confirmed through experiments. As a result of considering the recovery of the strength of damaged concrete, concrete mixed with a surface coating agent showed a greater recovery effect than concrete mixed with non-mixed concrete. This effect is greater with the age of the damaged material. This shows that even if the repair coating material is mixed as an admixture, the crystal proliferation effect is maintained, and it is confirmed that the concrete mixed with the admixture has self-repairing performance.

**Keywords:** Strength Recovery Rate, Surface Coating Agent, Self-repairing, Maintenance, Durability

### 1. 引言

混凝土中的裂缝和空隙会导致混凝土结构的耐久性下降。由于揉捏时混入的夹带空气、沁水、由新拌混凝土中的水分损失而产生的缝隙以及潜在的破坏(如塑性收缩和沉陷裂缝), 固化的混凝土具有缝隙[1-3]。由于使用过程中的重复载荷, 在硬化的混凝土内部会形成微

裂纹。水和二氧化碳进入这些裂缝和空隙, 导致耐久性的损失, 例如混凝土的中和、盐损害、冰冻损害、碱骨料反应的加速和水密性的缺乏[4-6]。其中, 塑性收缩裂缝和沉陷裂缝用砂浆或环氧树脂修补。此外, 环氧树脂被应用于表面或压入有裂纹的部分, 即使它们引起对耐久性的关注。这些修补被认为是对表面裂纹的修补结构

和零件。

在最初的起皮阶段,对于混凝土内部潜在的缺陷或表面看不到的重复应力导致的内部微裂缝的出现,没有有效的处理方法。当出现新的裂缝时,需要再次处理开裂部分的表面应用和压配合,这增加了维护成本[7, 8]。因此,如果开发出可以自行修复裂缝和空隙的混凝土,就可以降低维护成本。

关于自修复混凝土的开发,可考虑将修复剂限制在胶囊中并将其包含在混凝土中而不发生反应的方法。然而,这种方法不起作用,除非所包含的胶囊被裂缝撕裂。近年来,氢氧化钙和未水化水泥,其存在于混凝土中,已经被用于开发能够修补空隙和裂缝的修补材料。这种修补材料被施加到有裂缝的混凝土构件的表面,但它不是用来填充有裂缝的表面,而是通过在混凝土中增殖新的晶体来进行修补。本研究旨在通过将这种修复材料作为掺合料(以下简称表面涂层剂)预先掺入新拌混凝土中,研制出具有抗裂自修复性能的混凝土[9-12]。为此,通过试验对以下两项进行了检验,即使用涂层修复材料作为掺合料的混凝土的基本特性的确认和自修复性能的确认。

## 2. 表面涂层剂

本研究中用作特殊混合物的材料是作为涂层修复材料开发的,并且是无机粉末。其化学成分类似于波特兰水泥,如图1所示,但它比波特兰水泥含有更少的CaO和更多的SiO<sub>2</sub>[13-14]。原材料是波特兰水泥硅砂,含有促进混凝土中晶体增殖的催化剂。由于水合反应,水泥产生水泥水合物,如钙矾石、氢氧化钙和C-S-H晶体。在这些水合物中,C-S-H晶体与混凝土强度高度相关,而氢氧化钙晶体填充空隙,但对强度贡献不大。如图1所示,特殊外加剂中含有的催化剂利用硬化混凝土中残留的未水化水泥生成C-S-H晶体。

该过程概述如下。首先,催化剂与混凝土中的钙离子反应生成钙络合物,易于在混凝土中扩散。其次,复合物扩散到微裂纹表面,当存在未水合水泥时释放钙离子,并返回到催化剂中。第三,释放的钙离子与水或未水合的水泥反应,形成C-S-H晶体。第四,释放钙离子的催化剂与混凝土中的钙离子再次反应,形成钙络合物。如果有水和未稀释的水泥存在,这个反应过程会重复发生。当用作修补的涂层材料时,将其与水混合,并将其应用于开裂的混凝土表面。所施加的修复材料渗透裂缝并在裂缝表面上引起上述反应以修复裂缝。用于修复的涂层材料已经被使用进行实际的维修工作[15-16]。



图1 表面涂层剂

## 3. 掺表面涂层剂混凝土的力学性能

表面涂层剂是作为修补用涂层材料开发的,从未有过将其混入混凝土中的情况。因此,在本研究中,我们通过实验检测了特殊外加剂对新拌混凝土坍落度、空气量和硬化混凝土抗压强度、弹性模量和透水性的影响。

### 3.1 所用材料和配合比

实验中使用的混凝土通常是波特兰水泥,把山砂作为细骨料,用减水剂作为掺合料,用碎石作为粗骨料。粗骨料最大粒径为25 mm,确定目标坍落度的配合比为100±10mm,风量为5±0.5%。对于使用表面涂层剂的混凝土(SCA-Con),混合的表面涂层剂的量设定为水泥量的3%。为了比较,还制备了没有表面涂层剂的混凝土(NA-Con)。各混合比例如表1所示。

表1 混合比例

种类	水灰比 (%)	单位重量 (千克/米 <sup>3</sup> )					
		水	水泥	细集料	粗骨料	普通外加剂	表面涂层剂
纳孔	50	170	340	730	1035	1.7	0
SCA-Con	50	170	340	730	1035	1.7	11.9

### 3.2 新拌混凝土的特性

检验表面涂层剂对以下方面的影响进行了新拌混凝土的稠度、坍落度和风量试验。这两种测试通常都是在六批NA-Con和SCA-Con上进行的。根据坍落度测试的结果,所有批次的SAC-Con的平均坍落度值增加了约30毫米。另一方面,在风量方面,所有批次的混凝土都有所减少。

因此,SCA-Con中的一致性趋于降低。这被认为是因为特殊外加剂是球形颗粒,滚珠轴承的作用提高了流动性。因此,通过混合表面涂层剂,可以进一步减少单位水体积。

一般来说,1cm的坍落度值的差异对应于1.2%的单位水量的差异,因此根据该实验的结果,即使减少3.6%的单位水量,也可以获得相同的坍落度值。普通减水剂的单位减水效果为4-8%,表面涂层剂可能具有与此相同的减水效果。如果单位水泥量相等,单位用水量的减少

将降低水灰比, 从而提高混凝土的强度。因此, 通过使用表面涂层剂可以获得高强度混凝土。此外, 单位水体积的减少减少了渗出水的质量, 减少了潜在的缺陷如水通道, 并有效地减少了干缩。

另一方面, 由于包含了表面涂层剂, 空气量减少。

### 3.3 硬化混凝土的性能

#### (1) 耐压强度

抗压强度测试是基于一个标准的  $\phi 100 \times 200$  毫米圆柱样品。测试样品在放置的一天内脱模, 并在  $20^\circ\text{C}$  的水温水下固化, 直到测试。测试材料的年龄为 7、14、28、91 天、6 个月和 1 年。

#### (2) 弹性模数

应变测量与抗压强度测试同时进行, 以确定弹性模量。每个材料年龄的测试次数为五次。

为了将应变仪附加到应变测量上在试验前两天, 将样品从养护水箱中取出, 风干至试验日期。

#### (3) 渗透系数

混凝土的水密性是大坝和水工建筑物的一项重要性能。此外, 即使在其他结构中, 水的渗透也会促进混凝土的劣化, 这与耐久性密切相关。因此, 在本研究中, 我们测量了渗透系数并检查了 SCA-Con 和 NA-Con 的水密性。在这项研究中, 用于测试的测试样品是中空的圆柱形测试样品, 其高度方向直径为 15 cm, 高度为 30 cm, 中心直径为 2 cm。图 2 显示了渗透性测试。通过从侧面施加 3.5 MPa 的水压, 该试样的上表面和下表面是不透水的和透水的。渗透过混凝土的水从中心的中空部分排出。



图 2 渗透率测试

### 3.4 试验法

为了证实特殊外加剂的自修复效果, 我们进行了一个实验, 通过在固化一段时间后压缩和再压缩曾经受到压缩应力的样品来检查压缩强度的变化。根据硬化混凝土的试验结果, 我们可以看出, SAC-Con 的强度、弹性模量和水密性超过了 NA-Con, 混凝土的性能通过掺入表面涂层剂得到了改善。另外, 关于水密性的实验结果表明 SAC-Con 比 NA-Con 具有更少的内部空隙并且更致密这可以从弹性模量测试的结果中看出。因为由于表面涂

层剂的作用, 晶体增殖比 NA-Con 进行得更快, 并且内部细空隙已经被填充。此外, 认为由 SAC-Con 获得的较高抗压强度证明 C-S-H 晶体由于这种晶体增殖而增殖。另一方面, 由于包含表面涂层剂, 新鲜混凝土空气的量减少了。由于空气量会影响混凝土的耐久性, 因此必须单独考虑这一点。从关于混凝土基本特性的实验中发现, 通过混合修补涂层材料, 新拌混凝土和硬化混凝土的性能都得到了改善。

### 3.5 强度恢复率

在压缩材料的初始龄期为 14 天的情况下, 在所有测试条件下, SAC-Con 的恢复率都超过了 NA-Con。即使在初始压缩材料年龄为 28 天的情况下, SAC-Con 的恢复速率也超过了 NA-Con, 除非在 14 天后进行再压缩。此外, 在再压缩的情况下, 普通混凝土和 SAC-Con 之间的恢复率差异比再压缩的情况下更明显。在 NA-Con 中, 强度通过固化后恢复再压缩, 但强度不再通过再压缩恢复。另一方面, 即使在重新压缩中, SAC-Con 的强度也得到了恢复。即使在 F28-T56-3 的样品中, 其显示出很小的强度恢复, 在再次压缩中强度的降低也很小, 并且强度几乎等于初始压缩中的强度。

在再压缩 (3<sup>rd</sup>-压缩) 的情况下, 强度在材料龄期的第 14 天之后不能恢复, 而材料龄期的第 28 天比再压缩 (2<sup>nd</sup>-压缩) 的强度高得多。另一方面, 在 NA-Con 的情况下, 即使延长固化时间, 强度也不会恢复。还发现初始压缩龄期影响 SAC-Con 强度的恢复。与 28 天的初始压缩材料龄期相比, 14 天的强度恢复率更高。也就是说, 推测早期造成的裂缝更容易修复。在普通混凝土中没有明显观察到这种趋势。

### 3.6 自我修复的评估

如上所述, 已经发现掺有特殊外加剂的混凝土将修复由初始压缩引起的裂缝并恢复强度。通常在混凝土中观察到强度恢复, 但使用特殊外加剂时恢复程度更大。水泥的水化反应迅速进行到大约 28 天龄, 并逐渐继续。因此, 在材料老化早期出现的裂缝和其他损伤在某种程度上通过水泥的水合作用得以修复。这个实验的结果显示了这一点。然而, 如果造成进一步的损害, 这是不可能的 (无表面涂层剂) 与相同的材料混合, 水密性也得到了提高。以上说明, 使用修补涂层材料作为掺合料对改善混凝土的性能是非常有效的。然而, 由于新拌混凝土的空气体积因包含表面涂层剂而减少, 因此应进一步考虑混凝土的耐久性。

考虑到受损混凝土的强度恢复率, 掺有表面涂层剂的混凝土比掺有非混合混凝土的混凝土显示出更大的恢



复效果。随着受损材料的老化, 这种影响更大。这表明, 即使将修复涂层材料作为掺合剂混合, 也保持了晶体增殖效果, 并且证实了混合有掺合剂的混凝土具有自修复性能。

为了获得更深入的研究结果, 有必要进行长期耐久性评估研究, 并开发一种化学外加剂。仅通过水泥的水化来修复, 而强度不能被恢复。另一方面, 如果使用特殊的外加剂, 强度通过再次压缩得到恢复, 表明特殊外加剂对损伤的恢复有很大贡献。在本实验中检查的材料的龄期内, 发现即使修补涂料用作外加剂, 也能保持适当的晶体生长促进效果, 并且可以修补掺有外加剂的混凝土。这种影响在年轻人中尤其明显, 但它甚至在大约三个月大时仍保持其能力。在本研究中, 养护条件为水养护, 对混凝土强度的发展和特殊外加剂促进晶体生长的效果最好。因此, 需要进一步考虑在实际施工的固化条件下的自修复性能。

此外, 对于超过一年的长期材料, 需要考虑自我修复能力的保持。

#### 4. 小结

在本研究中, 对掺有修补涂料的混凝土的基本性能以及混凝土具有自修复性能的可能性进行了检验。结果揭示了该表面涂层剂具有减水作用, 通过搅拌可以改善新拌混凝土的流动性, 且与NA-Con相比, 掺有表面涂层剂的混凝土的强度提高了约28%。

#### 参考文献:

[1] Alrifile, M., et al, (2017), "Effect of Epoxy in Reducing Concrete Cracks" *Journal of Environmental Science*, 39 (2), 53-68.

[2] Lau, I., et al, (2018), "Critical Crack Depth in Corrosion induced Concrete Cracking" *ACI Structural Journal*, 115 (4),

[3] Yu, C., et al, (2014), "The Effect of Concrete Cracks on Chloride Erosion" *Applied Mechanics and Materials*, 711 (1), 473-476.

[4] Beushausen, H., et al, (2019), "Performance-based approaches for Concrete Durability: State of the Art and Future Research Needs" *Cement and Concrete Research*, 119, 11-20.

[5] Moodi, F., et al, (2019), "Investigation on Mechanical and Durability Properties of Polymer and Latex-Modified Concretes" *Construction and Building Materials*, 191, 145-154.

[6] Onoue, K., et al, (2019), "Energy Consumption Characteristics of Concrete using Granulated Blast-

Furnace Slag Sand related to Nucleation and Propagation of Microcracks" *Construction and Building Materials*, 218, 404-412.

[7] Abyaneh, S. D., et al, (2016), "Simulating the Effect of Microcracks on the Diffusivity and Permeability of Concrete using Three-Dimensional Model" *Computational Material Science*, 119, 130-143.

[8] Narayanan, A., et al, (2016), "Experimental Evaluation of Load induced Damage in Concrete from Distributed Microcracks to Localized Cracking on Electro-Mechanical Impedance Response of Bonded PZT" *Construction and Building Materials*, 105, 536-544.

[9] Faber, M. H., et al, (2002), "Indicators of Inspection and Maintenance Planning of Concrete Structures" *Structural Safety*, 24 (2-4), 396.

[10] Lu, Y., et al, (2018), "Study on the Effect of Chloride Ion on the Early Age Hydration Process of Concrete by a Non-Contact Monitoring Method" *Construction and Building Materials*, 172, 499-508.

[11] Wang, X., et al, (2018), "Analysis of Hydration and Strength Optimization of Cement - Fly Ash - Limestone Ternary Blended Concrete" *Construction and Building Materials*, 166, 130-140.

[12] Dung, N. T., et al, (2018), "Development of MgO Concrete with Enhanced Hydration and Carbonation Mechanisms" *Cement and Concrete Research*, 103, 160-169.

[13] Ghoddousi, P., et al, (2017), "Study on Hydration Products by Electrical Resistivity for Self-Compacting Concrete with Silica Fume and Metakaolin" *Construction and Building Materials*, 154, 219-228.

[14] Schepper, M. D., et al, (2014), "The Hydration of Cement Regenerated from Completely Recyclable Concrete" *Construction and Building Materials*, 60, 33-41.

[15] Geraldo, R. H., et al, "Study of Alkali-Activated Mortar used as Conventional Repair in Reinforced Concrete" *Construction and Building Materials*, 165, 914-919.

[16] Li, X., et al, (2019), "Modeling the Effects of Microcracks on Water Permeability of Concrete using 3D Discrete Crack Networks" *Composites Structures*, 210, 262-273.

[17] Han, B. Y., et al, (2005), "An Experimental Study on the Permeability of Reinforcement Concrete on Consideration of Pre-Loading" *Journal of KSMI*, 9 (3), 87-92.