

세균에 의한 콘크리트의 자체수복특성

라영복, 김영조

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리가 건설하는 건축물들은 형식뿐아니라 매 요소가 다 세계적수준이 되여야 합니다.》

지금 세계적으로 친환경건축재료, 지속가능한 건축재료에 대한 연구와 개발이 심화되고있는 가운데 미생물을 리용한 자체수복콘크리트가 사람들의 관심을 모으고있다.

이 자체수복콘크리트는 콘크리트에서 발생한 균열을 콘크리트가 자체로 수복하는 콘크리트이다.[2, 5, 7, 9, 16, 17]

콘크리트는 시공하기 쉽고 압축세기가 강하지만 당김세기가 약할뿐아니라 굳어지는 과정에 일어나는 구조적수축 및 건조수축현상으로 하여 균열이 생긴다.

콘크리트균열은 건설분야에서 보편적으로 제기되는 문제이며 이 균열을 수복하기 위하여 에폭시수지와 같은 합성재료들이 리용되였다. 그러나 이 재료들은 값이 비싸고 미적가치를 떨어뜨릴뿐아니라 환경에 해로운 영향을 주기때문에 널리 리용되지 못하고있다.[27, 28]

이로부터 세계적으로 균열이 생기는 즉시 메우는 특성을 가진 자체수복콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고있다.

우리 나라에서는 콘크리트균열수복능력이 있는 우레아제생성균인 *Bacillus pasteurii*를 자연계에서 분리육종하여 최적배양조건을 확립하였으며 콘크리트균열수복특성을 확인하였다.[1]

론문에서는 자체수복콘크리트의 개념과 연구정형, 앞으로의 응용전망에 대하여 론의하였다.

1. 자체수복콘크리트의 개념과 균열수복물림새

자체수복콘크리트는 이름에서 볼수 있는바와 같이 콘크리트에 균열이 생기면 자체로 메울수 있는 성질을 가진 특수한 형태의 콘크리트이다.[1, 5, 16, 27-29]

자체수복콘크리트는 일반콘크리트에 균열을 메우는 미생물을 섞어 만든다. 이로부터 자체수복콘크리트를 세균콘크리트라고도 부른다.[16, 18]

자체수복콘크리트에는 생체모방기술이 적용되었으며 균열을 자체로 메우는 원리는 금이 가거나 부러진 뼈조직의 자체수복과정과 비슷하다.

그러면 자체수복콘크리트의 균열수복물림새에 대하여 구체적으로 보자.

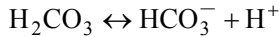
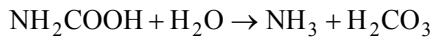
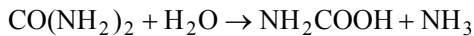
세멘트혼합물에 칼시움영양원과 함께 *Bacillus pasteurii*, *Bacillus subtilis*를 비롯한 우레아제생성균을 첨가하면 콘크리트안에 탄산칼시움과 같은 방해석이 형성되게 되는데 이것이 콘크리트의 균열을 메우게 된다.[3, 4, 6]

세균에 의한 방해석형성과정은 다음과 같다.[4, 12, 14]

일부 세균들은 뇨소분해효소인 우레아제를 가지고있는데 이 효소는 뇨소($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)가 CO_3^{2-} 과 NH_4^+ 으로 분해되는 과정을 촉진하여 국부pH상승을 일으키며 이어 탄산칼시움의 침전을 유도한다.

우레아제에 의해 뇨소가 탄산염(CO_3^{2-})과 암모니아(NH_4^+)로 물작용분해되는 과정

은 다음과 같다.[1, 8, 16]



한편 세균의 세포벽은 음전하를 띠므로 세균은 주위로부터 Ca^{2+} 을 끌어당겨 세포겉면에서 CO_3^{2-} 과 반응하여 탄산칼슘이 침전되게 한다.[2, 3]

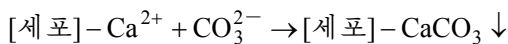
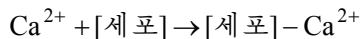


그림 1에서는 세균세포벽위에 탄산칼슘이 침전되는 과정을 보여주었다.

이와 같이 세균은 알칼리 환경을 조성하는데서 매우 중요하며 또 세균세포벽은 CaCO_3 침전에서 핵으로서의 중요한 역할을 수행한다.[2]

콘크리트에서는 균렬의 크기가 0.2mm이하이면 콘크리트 자체에 의하여 균렬이 메워질수 있지만 0.2mm이상이면 자체로 수복되지 못한다. 균렬크기가 0.8mm 이상이면 어떤 방법으로도 균렬 수복이 힘들지만 세균을 리용하면 방해석침전으로 하여 균렬을 제때에 수복할수 있다.[1]

자체수복콘크리트에서는 균렬이 생기면 세균이 휴면단계에서 벗어나 활성화되면서 CaCO_3 을 형성함으로써 균렬을 메우게 된다. 일단 균렬이 CaCO_3 으로 완전히 메워지면 세균은 다시 휴면상태로 되돌아간다. 그후에 균렬이 형성되면 세균은 다시 활성화되어 균렬을 메운다.

세균에 의한 균렬수복과정을 미생물학적방법에 의한 탄산칼슘침전과정(MICCP: Microbiologically Induced Calcium Carbonate Precipitation)이라고 부른다.[1, 3, 14]

미생물학적방법으로 형성된 CaCO_3 침전물은 콘크리트안에서 모래, 자갈과 같은 다른 재료들과 결합하면서 균렬을 메우게 된다. CaCO_3 침전에서 미생물유기체의 결합은 콘크리트의 수명을 증가시킨다.[11, 12, 14]

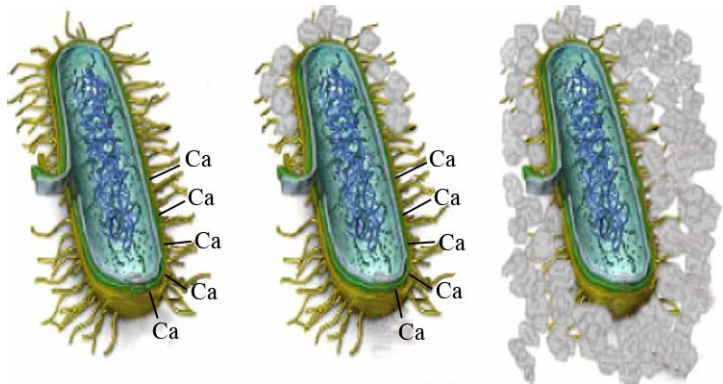


그림 1. 세균세포벽에서의 탄산칼슘형성과정

2. 자체수복콘크리트의 특성과 세균첨가방법

1) 자체수복콘크리트의 특성

일반적으로 콘크리트혼합물은 강알칼리성을 띠는데 대부분의 미생물들은 강알칼리성 환경에서 생존하지 못한다. 때문에 광물질화과정을 촉진시킬수 있는 능력이 뛰여날뿐 아니라 강알칼리성환경에서도 생존할수 있는 미생물이 필요하다.[2, 16]

Bacillus pasteurii, *B. subtilis*, *B. megaterium*, *B. cohnii*, *B. aerius*, *Sporosarcina pasteurii*, *Shewanella species*를 비롯한 많은 세균들은 CaCO_3 을 형성하는 능력을 가지고 있다.[1, 4, 14, 15]

벼겨재콩크리트에 *Bacillus aerius*균을 넣으면 CaCO_3 형성에 의한 콩크리트의 세기특성이 변화되면서 콩크리트의 수명이 늘어나게 되며 콩크리트의 세기는 최대 24%까지 증가한다.[18]

또한 연재콩크리트는 *Sporosarcina pasteurii*에 의해 다공성과 투과성이 낮아지면서 콩크리트의 세기가 증가된다는 것이 밝혀졌다. 이때 압축세기가 최대 22%까지 증가되며 물 흡수능력은 일반콩크리트의 4배로 감소된다.

*Bacillus subtilis*는 경량골재와 흑연나노박편을 리용하여 만든 콩크리트의 수명[3]을, *Bacillus megaterium*은 콩크리트의 압축세기를 24% 증가[19]시키며 *Bacillus sphaericus*는 콩크리트결면에 형성된 균렬을 수복하여 콩크리트의 수명을 늘인다.[20, 21]

2) 세균첨가방법

콩크리트에 세균을 첨가하는 대표적인 방법들[3]을 보면 다음과 같다.

콩크리트모탈에 미생물배양액의 직접 첨가 이 방법은 간단하고 경제적으로 효과적이며 생물학적가능성도 높으나 압축세기나 수명증가가 적은것이다. 그 원인은 콩크리트에 미생물 배양액을 직접 첨가할 때 세균의 수명이 짧아지기때문이다.

경량골재(LWA: Light Weight Aggregates)와 흑연나노박편(GNP: Graphite Nano Platelets)을 세균과 함께 수복제로 콩크리트에 첨가하는 경우 LWA와 GNP가 세균에 있어서 좋은 담체로 되며 이때 균렬이 더 잘 메워진다.[22]

수복제의 직접적용방법은 콩크리트의 세기를 높이기 위한 세균의 가장 합리적인 최적 농도를 찾는데 리용되었으며 그 최적농도는 $30 \times 10^5 \text{CFU/mL}$ 였다.[23]

*Shewanella*를 콩크리트에 직접 적용하는 방법을 연구한 결과 28일동안에 세멘트모탈의 압축세기는 25%로 증가되었다.[24]

활성탄이나 실리카겔에 의한 고정화 미생물이나 아포를 활성탄이나 실리카겔에 부착시켜 첨가하는 방법이다.[3, 13]

이때 미생물의 수명은 늘어나지만 콩크리트의 수명과 세기, 투과성에 대한 효과는 그리 높지 못하다. 또한 콩크리트에서 미생물에 대한 보호가 매우 약한 결함을 가지고 있다. 그러나 생물학적가능성은 높다.

교감화 미생물을 교감형태로 콩크리트에 직접 첨가하는 방법이다.[1, 25]

이때 미생물의 수명은 길지만 콩크리트의 수명과 세기, 투과성에 대한 효과는 적으며 생물학적가능성은 높다. 또한 원가가 많이 들고 방법이 복잡하다.

그러나 이 방법은 직접적용방법에 비해 더 효과적이다.

그림 2에서는 미소교감방법에 의한 균렬수복과정을 보여주고있다.

그림 2에서 보는바와 같이 파문힌 미소교감들이 균렬에 의해 파괴되자마자 수복제는 실판현상에 의해 균렬면으로 로출되게 된다. 이 수복제는 파문힌 촉진제들과 반응하여 방해석을 형성함으로써 균렬을 메운다.

미소교감을 리용한 자체수복과정은 균렬이 일어나기 시작하는 초기단계에서 높은 수준으로 균렬을 수복할수 있다.

이외에도 히드로겔교감방법을 리용하여 균렬을 메울수 있다는 자료도 제기되었다.[26]

미소교감은 알칼리성환경속에서 세균의 균일분포와 보호에서 큰 역할을 한다.

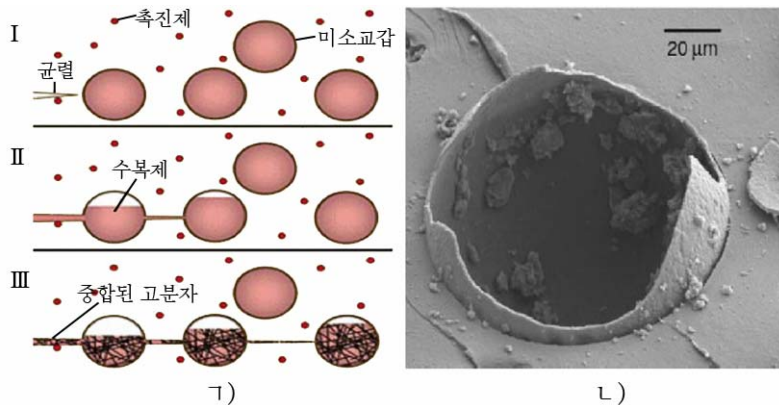


그림 2. 미소교잡방법에 의한 균열수복과정

ㄱ) 간단한 미소교잡방법 I - 콘크리트에서 균열형성, II - 수복제방출과정, III - 균열수복과정, ㄴ) 파괴된 미소교잡의 SEM사진

3. 자체수복콘크리트의 응용

다른 나라와 지역에서도 미생물을 리용한 자체수복콘크리트를 개발하기 위한 연구가 활발히 벌어지고있다.

지속적으로 균열이 발생할수 있고 유지관리가 어려우며 구조가 특수한 다리와 철도시설, 고속도로, 차굴, 지하주차장, 원자력발전소, 지하배수로, 하수처리시설 등에 미생물을 리용한 자체수복콘크리트를 적용하면 효과적이다.[12, 14]

미생물을 리용한 자체수복콘크리트는 일반콘크리트에 비해 여러가지 우점을 가지고있다.[7, 10, 11]

우선 외적인 보수작업을 하지 않아도 미세한 균열들이 생기는 즉시 메워지므로 건축물과 구조물의 내구성이 높은 수준에서 보장된다. 결과적으로 건축물의 사용수명을 50% 정도 더 늘일수 있다.

다음으로 균열을 자체로 메우기때문에 건물의 유지관리주기가 길어지고 보수비용이 30% 정도 적게 든다.

또한 보수작업에 드는 세멘트를 많이 절약할수 있으며 따라서 세멘트를 생산하는 과정에 방출되는 이산화탄소량을 줄일수 있으므로 친환경적인것으로도 된다.

미생물을 리용한 자체수복콘크리트는 이러한 우점들이 있는 반면에 일반콘크리트에 비하여 제작원가가 비싼것이 결함이다. 또한 미생물의 물질대사가 온도의 영향을 많이 받기 때문에 균열회복속도가 온도에 따라 차이나는 약점도 가지고있다.

현재 연구사들은 미생물을 리용한 자체수복콘크리트의 이러한 약점들을 극복하기 위해 한데 중점을 두고 연구사업을 심화시키고있다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성 종합대학학보 자연과학; 57, 12, 97, 주체100(2011).
- [2] M. S. Vekariya et al.; International Journal of Engineering Trends and Technology, 4, 9, 4128, 2013.
- [3] P. G. Student et al.; International Journal of Civil Engineering and Technology, 7, 5, 43, 2016.

- [4] S. S. Banga et al.; Enzyme and Microbial Technology, **28**, 404, 2001.
- [5] J. K. Galinat et al.; Soil Biology and Biochemistry, **31**, 1563, 1999.
- [6] S. Krishnapriyaa et al.; Microbiological Research, **174**, 48, 2015.
- [7] W. D. Muyncka et al.; Ecological Engineering, **36**, 118, 2010.
- [8] X. Jing et al.; Applied Microbiology and Biotechnology, **102**, 3121, 2018.
- [9] V. Wiktor et al.; Cement & Concrete Composites, **33**, 763, 2011.
- [10] A. Varenym et al.; Construction and Building Materials, **48**, 1, 2013.
- [11] Huaicheng Chen et al.; Construction and Building Materials, **126**, 297, 2016.
- [12] A. B. Gawande et al.; International Journal of Civil Engineering and Technology, **7**, 5, 275, 2016.
- [13] W. Jianyun et al.; Construction and Building Materials, **26**, 532, 2012.
- [14] Qian Chunxiang et al.; Materials Science and Engineering, **C 29**, 1273, 2009.
- [15] V. Achal et al.; J. Ind. Microbiol. Biotechnol., **36**, 981, 2009.
- [16] V. Ramakrishnan et al.; Proceedings of SPIE, **4234**, 168, 2001.
- [17] K. L. Bachmeier et al.; Journal of Biotechnology, **93**, 171, 2002.
- [18] R. Siddique et al.; Constr. Build. Mater., **121**, 112, 2016.
- [19] R. Andalib et al.; Constr. Build. Mater., **118**, 180, 2016.
- [20] J. Wang et al.; Cem. Concr. Compos., **53**, 289, 2014.
- [21] W. D. Muynck et al.; Constr. Build. Mater., **22**, 875, 2008.
- [22] W. Khaliq et al.; Constr. Build. Mater., **102**, 349, 2016.
- [23] R. Andalib et al.; Constr. Build. Mater., **118**, 180, 2016.
- [24] M. Wu et al.; Constr. Build. Mater., **28**, 571, 2012.
- [25] W. D. Muynck et al.; Cem. Concr. Res., **38**, 1005, 2008.
- [26] J. Qiu et al.; Constr. Build. Mater., **57**, 114, 2014.
- [27] 李中锡; 工程质量, **6**, 60, 2007.
- [28] 西脇智哉; コンクリート工学, **45**, 12, 52, 2007.
- [29] 細田暁 等; コンクリート工学, **45**, 11, 3, 2007.

주체109(2020)년 7월 5일 원고접수

Self-Healing Property of Concrete by Bacteria

Ra Yong Bok, Kim Yong Jo

Self-healing concrete senses the cracks in concrete and repairs by itself.

Microbiologically induced calcium carbonate precipitation helps itself to fill the micro cracks and bind the other materials such as sand and gravel in concrete.

Use of bacterial concrete can enhance the durability, mechanical and permeation aspects of concrete.

Keywords: self-healing, MICCP, bacterial concrete