

JUHÁSZ PÉTER

Építő mikroorganizmusok

Számos állatfaj egyedei hoznak létre kisebb-nagyobb építményeket – ilyenek például a természetes várai, a madárfészkek, a vakondok alagútrendszerei –, mégis kevesen gondolnák, hogy a legpárányibb élőlények, a mikroorganizmusok is képesek maradandó, időálló struktúrák létrehozására. Pedig ezek a néhány mikrométer nagyságú egyedek a rendelkezésükre álló idő és tápanyag függvényében képesek finom kristályszemcséket, vékony bevonatokat, de akár több száz méter vastag mészkőrétegeket is létrehozni. Mindezt azért, hogy a baktériumok a környezetükben feldúsuló szerves tápanyag felhasználásával karbonátionokat (CO_3^{2-}) gyártanak, melyek reakcióba lépnek a jelenlévő alkáli fémek ionjaival (például: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). A reakció eredményeként különböző kristályok, így például arago-

A biomineralizáció és a kristályképződés

A baktériumok kristályépítő képességéről elsőként egy amerikai kutató, *G. Harold Drew* számolt be (Drew, 1911). Az Atlanti-óceán vizéből vett mintákból denitrifikáló baktériumokat izolált, melyek képesek voltak folyékony tápoldatban apró kalcium-karbonát-kristályok előállítására. Ezt követően több kutató is foglalkozni kezdett a mikrobiális eredetű kalcium-karbonát kicsapódásának vizsgálatával, köztük a spanyol *Boquet*, aki kimutatta, hogy a talajbaktériumok is képesek kalcium-karbonát-kristályokat termelni (Boquet és társai, 1973). A biomineralizáció mikrobiológiai hátterét végül a francia *Sabine Castanier* és munkatársai tisztázták, leírva annak aktív és passzív módjait, a szükséges környezeti körülményeket, valamint a

(pH, hőmérséklet, egyéb mikrobák jelenléte stb.), valamint a táplálék hozzáférhetősége és mennyisége határozzák meg.

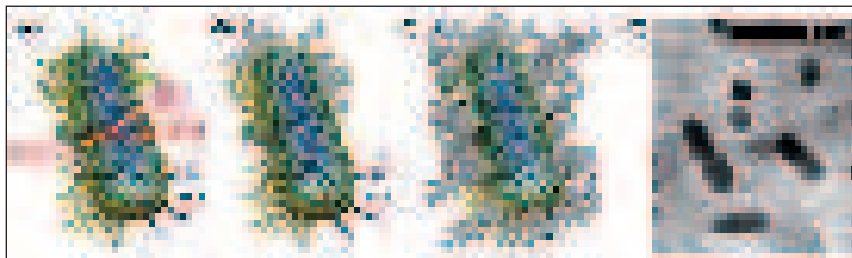
Kőépités

Már *G. Harold Drew* is beszámolt arról a jelenségről, hogy tápoldatban keletkezett lebegő, le nem ülepedő kalcium-karbonát-kristályok lerakódnak az oldatba belekevert homokszemcsék felületére (Drew, 1911). Ebből arra a következtetésre jutott, hogy a bakteriális eredetű kristályok fontos szerepet játszhatnak a kalcium-karbonát-kötésű, vagy teljes egészében kalcium-karbonátból álló kőzetek (például mészkövek) kialakulásában. A kísérletben leírt módon, tehát szemcse felületén történő folyamatos megkötődéssel keletkeznek az ooidos szövetű durvamész-kő szemcséi, melyek apró, gyöngyszerű gömböcskékre hasonlítanak (**2b–c. ábra**). Ilyen folyamat zajlik jelenleg például a Bahama-szigetek sekélyvízű tengerpartján (**2a. ábra**), melynek langyos vize és magas szervesanyag-tartalma kedvez a bakteriális tevékenységnek.

Annak eldöntésére, hogy eme kőzetek képződése mennyiben függ a baktériumok tevékenységétől, mérési adatokból francia kutatók kiszámolták, hogy különböző környezeti körülmények között (óceáni, tengerparti és zátonyok menti, illetve sekélyvízi) mennyi szerves anyag képződik az évek során, s ebből milyen vastagságú kalcium-karbonát réteg kristályosodhat ki (Castanier és társai, 1999). Számításaik szerint egymillió év alatt a bakteriális úton keletkező kőzetréteg vastagsága a sekélyebb vizekben 200 m és 2000 m között változhat, míg a nyílt tengeren ez a vastagság csak 4 méter körüli értéket vehet fel. A legnagyobb fokú mészkőképződés a homokpadokon és zátonyokon tapasztalható. Mivel ezen a helyeken a szerves anyag kicsapódása elméletileg csak 30–200 m vastagságú réteget tudna képezni egymillió év alatt, így valószínűsíthető, hogy a baktériumok aktív részvevői a mészkőrétegek képződésének.

Kötőanyag

Mivel a baktériumok szilárd kristályokat hoznak létre, melyek jól kötődnek egymáshoz és más szemcsékhez, kézenfekvő

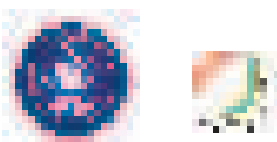


1. ábra. A mikrobiális eredetű kalcium-karbonát képződésének folyamata
(Forrás: *De Muynck W., De Belie N., Verstraete W. (2010), „Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review”, Ecological Engineering, Vol. 36, pp. 118–136.*)

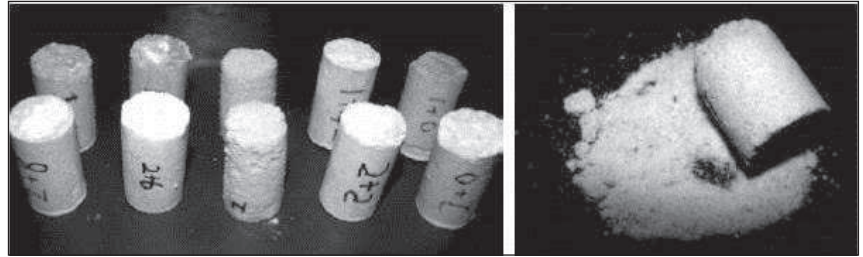
nit, kalcit, vaterit, dolomit jönnek létre. A biológiai úton történő kristályképződést a szakirodalom biomineralizációnak hívja. Ezen belül megkülönböztetik a mikrobiális úton történő kristályképződést, a MICP-t (*microbially induced carbonate precipitation*). A kristályképződéshez szükséges reakciók a természetben lejátszódó folyamatok, de őket lemásolva, kiegészítve, a szükséges körülményeket mesterségesen megteremtve, lehetőség nyílik a célzott, gyakorlati alkalmazásra is. Míg a baktériumok a természetben kőzeteket építenek, addig mesterséges körülmények között talajt szilárdítanak, repedéseket hidalnak át, és védőréteget hoznak létre porózus kőanyagokon.

baktériumokban lezajló metabolikus folyamatokat (Castanier és társai, 1999).

A mikrobiális eredetű kalcium-karbonát képződésének folyamatát az **1. ábra** szemlélteti. A folyamat a következő lépésekből áll (**1. ábra**): (A) A szerves anyag bekebelezése (itt karbamid) és az oldott karbonátionok és egyéb metabolikus termékek (itt ammónia) kibocsátása a sejten kívüli térbe; (B) a baktérium környezetében lévő Ca^{2+} -ionok reakciója az oldott karbonátionokkal – kristályképződés; (C) a baktérium elkristályosítja környezetét; (D) az újonnan keletkezett kristályok elektronmikroszkópos felvételen, bennük a baktériumok lenyomatai (De Muynck és társai, 2010). A képződő kristályok mennyiségét és minőségét a környezeti körülmények



ötletnek látszott, hogy ezt a kötőképeséget szemcsés anyagok összeragasztására is felhasználják. Egyes építőmérnöki és bányászati feladatok során felmerül az igény, hogy a laza szemcsés talajt valamilyen módon szilárdabbá tegyék. Építőmérnöki területen rézsúk állékonyosságának biztosítására (például vágatban haladó autópálya két oldalán), illetve a talaj teherhordó képességének javítására (a szemcsék összeragasztásával); míg bányászat esetében folyékony és gázne-mű ásványkincsek felszínre hozatalakor a talaj porozitásának csökkentésére és tömörségének növelésére lehetne alternatív megoldásként alkalmazni a biológiai alapú cementálást. Mivel a természetes körülmények mesterségesen is biztosíthatóak, ezért több kutató is kísérleteket folytatott szemcsés anyagok, így homok, vagy a beton adalékanyagaként szolgáló homokos kavics mikrobiológiai módszerrel való összeragasztására. Példaként kínai kutatók laboratóriumi körülmények között mészkötésű homokkővet állítottak elő. *Qian Chun Xiang* és csapata 18,50 mm átmérőjű csövekbe homokot töltöttek, és rajta keresztül baktériumok és a kristályképződéshez szükséges szerves és szervetlen anyagok keverékéből álló oldatot áramoltattak keresztül. A kezelés ered-



3. ábra. Hengerré összecementált homokszemcsék (balra); nyomás hatására széttörött henger (jobbra). (Forrás: *Qian, C., Pan, Q., & Wang, R. (2010).*

Cementation of sand grains based on carbonate precipitation induced by microorganism. Science China Technological Sciences, Vol. 53 (8), pp. 2198–2206.)

250 kN/m² (=0.25 N/mm²), egy normálbeton nyomószilárdsága 25–30 N/mm², a szerkezeti acél pedig körülbelül 250 N/mm²).

Repedések összeforrasztása

Egyes szerkezeti anyagok, mint például a kő és a beton, könnyedén elviselik a nyomó terhelést, azonban jóval kisebb mértékben (nagyjából tízedannyira) képesek elviselni a húzásból származó igénybevételt. Hajlításhoz kitett szerkezeti elemekben (például vasbeton födékek, gerendák, ablak fölötti kő áthidalók) mind húzó, mind nyomó igénybevétel ébred, s a húzó igénybevétel miatt ezek a szerkezeti elemek az alsó oldalukon sok esetben beropadnak. Ez egyrészt csökkenti a szerkezeti elem teherbírást, másrészt nedveségnek kitett környezetben a szerkezet belsejébe bejutó víz további roncsoló hatást válthat ki, mely végeredményben az elem tönkremenetelét is okozhatja. A repedések továbbterjedésének megakadályozására és azok eltömítésére számos kezelő-szer kapható, de ezek mind utólag, a repedés létrejöttét követően kerülnek „bevetésre”, s felvitelük igen munkaigényes. A folyamatos karbantartási igény megszüntetésének érdekében megkezdődött az önjavító, „öngyógyító” anyagok (elsősorban betonok és kerámiák) létrehozását célzó kutatási folyamat. Az „öngyó-

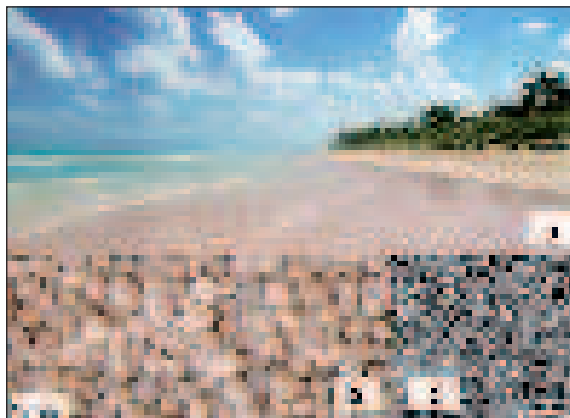
gyógyító beton esetében a legelőrehaladottabb és legtöbbet ígérő kutatási eredmények a holland *Henk Jonkers* nevéhez fűződnek. Kutatócsoportja olyan betont állított elő, mely önmagától képes viszonylag nagy, 0,15 mm szélességű repedéseket áthidalni és lezárni oly módon, hogy az új kapcsolat még 0,51 bar-os víznyomásnak is szivárgásmentesen ellenállt.

Szemben a normál betonnal, mely adalékanyagból (homokos kavics), vízből és cementből (esetleg adalékszerekből) áll, az öngyógyító beton speciális összetevőket igényel. A baktériumok az önjavítás képességének elérésében kapnak szerepet, ugyanis a mikrobiológiai úton képződő kristályok „fércelik össze” a keletkezett repedéseket. Az ehhez szükséges anyagokat (pl. kalcium-formát), valamint a mikroorganizmusok spóráit a holland kutatók duzzasztott agyagkavics golyócskába itatták bele, melyet a vízzel, cementtel és zúzott kővel együtt összekevertek (**4. ábra**). A megszilárdult betonban repedések keletkezésekor (megnyílásakor) az agyaggolyók átrepednek, s a levegővel érintkezve megindul a kristályosítási folyamat, mely kitölti a keletkezett repedést.

Az öngyógyító betonnal kapcsolatos további érdekesség, hogy a friss beton magas pH-ja (pH = 13) miatt olyan speciális baktériumokra van szükség, melyek spórái lúgállóak. Mivel a legtöbb élőlény 10-es pH feletti környezetben elpusztul, a szükséges alkalofíl mikroorganizmusokat magas pH-jú természetes környezetben keresték. Ennek megfelelően, a felhasznált baktériumokat oroszországi és egyiptomi szóda-tavakból izolálták.

Védőréteg létrehozása

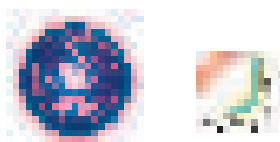
Épületeink külső térrel érintkező szerkezeti- és díszítőelemeit számos káros környezeti hatás éri. Azok az épületek, melyek homlokzata porózus kőanyagból készült, vagy tagozatait, díszítőelemeit vakolatból, gipszből formálták meg, városi környezetben igen hajlamosak a pusztulásra. A fizikai, kémiai



2. ábra. A Bahama-szigetek Pink Sand tengerpartja (a), gyöngyszerű ooidok (b), ooidos mészkő csiszolatának fénymikroszkópos képe (c). (Forrás: a) *the-bahamas.net* (2014.03.30), b) *wikis.fu-Berlin.de* (2014.03.30), c) *Török, Á., (2007), „Morphology and detachment mechanism of weathering crusts of porous limestone in the urban environment of Budapest”, Central European Geology, Vol. 50 (3) pp. 225–240*)

ményeként sikerült szilárd homokhengereket előállítani, melyeket terhelési vizsgálatnak is alávetettek (**3. ábra**). A megszilárdított hengereken 1,21–1,91 N/mm²-es nyomószilárdságot sikerült elérniük, mely meghaladja az átlagos talajok teherbírást (összehasonlításképpen példa egy talaj nyomószilárdságára:

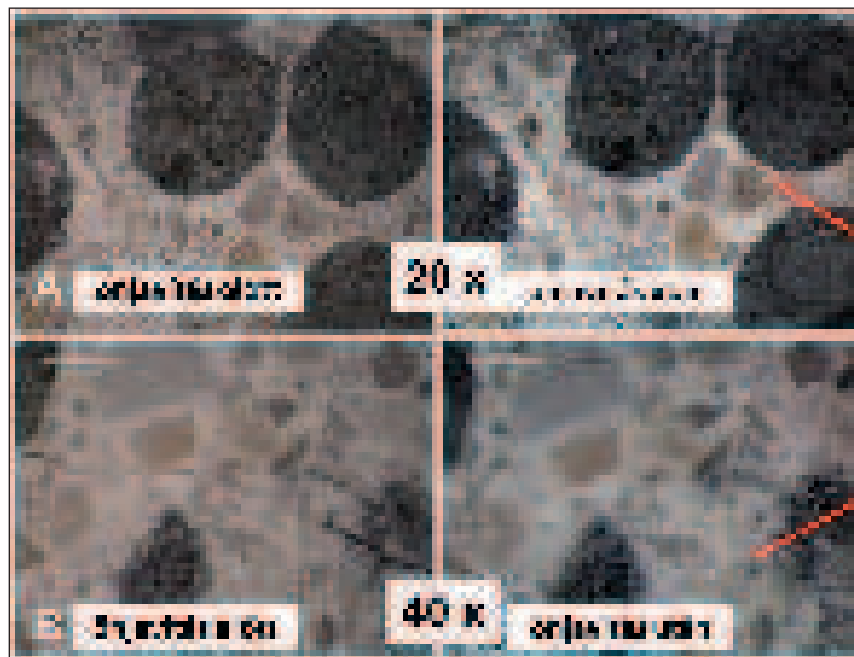
gyító” anyag lényege, hogy alapanyagában olyan „kapszulákat” tartalmaz, melyek az anyag repedésekor szintén átrepednek, s a belőlük kijutó oldat vagy anyag kémiai vagy fizikai reakciót követően (vízzel vagy levegővel való érintkezés útján) eltömiti a repedést – mindez külső beavatkozás nélkül, az anyag belsejében zajlik le.



és biológiai hatások, köztük a felszivott víz megfagyásakor, valamint a bejutó sók kristályosodásakor keletkező feszítőhatás, a savas esők maró hatása, és a hőingadozás az érintett anyag gyors ütemű mállásához, tönkremeneteléhez vezet. Jellemző mállási formák például a mikrorepedések megjelenése, a szemcsékipergés, a kéregképződés, valamint annak lehámlása. Ezen károsodások megelő-

modelleken, majd „élesben” a franciaországi Thouars-ban lévő, XII. századi Saint Médard-templom délkeleti tornyának nagy porozitású mészkőven vizsgálták. A kezelés kedvező hatása a vízfelvétel csökkenésében és a felületi keménység növekedésében mutatkozott meg, valamint abban, hogy a kezelt felület minősége egy év elteltével nem mutatott romlást, eltelétben a kezeletlen felületekkel.

ket építő baktériumok ezáltal – többek között – talajt szilárdíthatnak, repedéseket javíthatnak, és védőréteget hozhatnak létre porózus felületeken. A biomineralizációval kapcsolatos mikrobiológiai és biokémiai kutatások korábbi és legújabb vívmányai azonban további orvosi, anyagtechnológiai, bányászati és geológiai felhasználási lehetőségekkel kecsegtetnek. A biológiai alapon történő kezelések emellett alternatíváit jelentenek a mesterséges, sok esetben szintetikus szerek felhasználásával történő kezelésekkal szemben, természetes alapanyagokkal helyettesítve azok környezetre káros összetevőit. Ezek tükrében feltételezhető, hogy a jövőben az építő jellegű baktériumok egyre nagyobb szerephez jutnak majd az alkalmazott tudományok kutatási területein.

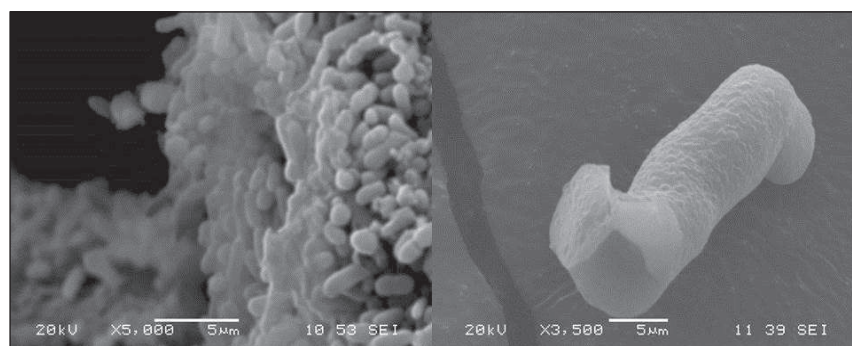


4. ábra. Az önjavító beton a repedés keletkezésekor (balra), és a repedés lezárását követően, önjavítás után (jobbra). A piros nyilak a fehér, kalcitkristályok által kitöltött repedéseket mutatják. (Forrás: Jonkers, H., (2010), „Bioconcrete: A novel bio-based material”, Materials & Environment Research Group Delft University of Technology 2010 EU-US Frontiers of Engineering Symposium, 1–3. Szeptember – előadás)

zésére, illetve stabilizálására fejlesztették ki a kőszilárdító, hidrofobizáló és impregnáló szereket, melyek elsősorban a károsodásnak leginkább kitett külső felület időállóságát javítják. Abban az esetben azonban, ha az alkalmazás eredményeként túl homogén, a pára áramlását akadályozó kéreg keletkezik a külső felületen, a kívánt hatással ellentétes módon, ezek a szerek felgyorsítják az anyag tönkremenetelét.

Francia kutatók fejében fogant meg először az ötlet, hogy a baktériumok termelte kalcium-karbonát-kristályokat a kőanyag felületi pórusainak részleges eltömítésére használják fel (Le-Métayer Levler és társai, 1999). Így mészkövek, vagy meszes kötésű a kőanyagok felületén egy anyagban is azonos (kalcium-karbonát), vékony, de porózus védőréteget lehet létrehozni, mely a vízfelvétel csökkentése mellett elősegíti a lepergő szemcsék visszaragasztását, stabilizálását is (5. ábra).

A francia kutatócsoport eme lehetőség gyakorlati létjogosultságát először miniatűr fal-



5. ábra. Apró, kapszulálódott baktériumokból álló porózus réteg mészkőszemcsén (balra), és a réteg egyik eleme, egy baktérium köré kivált kalcium-karbonát váz (pásztazó elektronmikroszkópos felvételek) (A szerző felvételei)

Összefoglalás

A természetben lejátszódó mikrobiális kristályképződési folyamatok mesterséges előidézésével lehetőség van a biomineralizáció célzott, gyakorlati alkalmazásra. A természetben köze-

Irodalom

Boquet, E., Boronat, A., Ramos-Cormenzana, A., (1973), „Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon”, Nature, 246, pp. 527–529.
 Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., Perhuisot, J-P., (1999), „Ca-carbonates precipitation and limestone genesis – the microbiogeologist point of view” Sedimentary Geology, 1999, Vol.126 pp. 9-23.
 Drew, G. H., (1913), „On the Precipitation of Calcium Carbonate in the Sea by Marine Bacteria, and on the Action of Denitrifying Bacteria in Tropical and Temperate Seas”, Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, Vol. 9 (4), pp. 479-524.

Le Métayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubiere, J. F., & Perhuisot, J. P. (1999). „Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony”. Sedimentary Geology, Vol. 126 (1), pp. 25-34.