

3D betonnyomtatás – anyag és szerkezet

3D concrete printing – material and structure

*Prof. Dr. habil BALÁZS L. György¹, THAJEEL Marwah Manea¹, KOVÁCS Izabella¹,
Dr. SÓLYOM Sándor¹*

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
balazs.gyorgy@emk.bme.hu

Abstract

Invention of portland cement and then the concrete empowered development of reinforced concrete and prestressed concrete for wider and wider use. Nowadays we already reached to high and ultra high performance concrete.

There is a rapid technological increase. The development of reinforced concrete and Prestresses concrete enabled us to create complicated structures.

With the use of automatization and digitalization, in our time we can already speak about concrete products without using any formwork.

Present paper intends to give an overview about our first steps of research after launching 3D concrete printing in our Laboratory at BME, Budapest, Hungary.

Kivonat

A portland cement és a beton megjelenése rohamos fejlődést tett lehetővé a beton és vasbeton, majd feszített beton szerkezetek a vonatkozásában.

Jelenleg ugrásszerű fejlődésnek vagyunk részesei. A vasbeton és a feszített vasbeton lehetővé tette az egyre összetettebb szerkezetek építését.

A vasalás helyes kialakításának és elhelyezésének kezdeti keresésétől a vasbeton mellett kialakult a feszített vasbeton, a szálerősítésű beton, az ultra nagy teljesítő képességű beton, öntömörödő beton. Mindezen betontípusok előnyösek új szerkezetek építéséhez, valamint szerkezetek rekonstrukciójához.

Ma már arra készülünk, hogy zsaluzat alkalmazása nélkül készítsünk betonszerkezeteket a 3D betonnyomtatás technológiájával.

Jelen cikk keretein belül szeretnénk ízelítőt adni, milyen irányú törekvéseink voltak lehetségesek a betonnyomtatás beindítását követően a BME-n, Budapesten.

Kulcsszavak: 3D betonnyomtatás, betonzás zsalu nélkül, nyomtathatóság, stabilitás, anizotropia, automatizálás, digitalizáció

1. BEVEZETÉS

Előző cikkünkben még csak előkészítő gondolatainkról számolhattunk be 3D betonnyomtatással kapcsolatosan: *Öntöttvas hidaktól a 3D betonnyomtatásig* címmel (Balázs, 2021). Megállapíthattuk, hogy az ipari forradalom kezdetén a gőzgép és megjelenése rohamos fejlődést váltott ki az acéliparban. Majd a cement, a beton és a vasbeton megjelenése folyamatos fejlődése, valamint napjaink automatizációs és digitalizációs törekvései arra vezettek, hogy nyomtatott betonról és betonszerkezetekről beszélhetünk a robot technika és a számítástechnika eszközeit felhasználva.

A VKE 2018-1-3-1_0003 *“Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése”* című projekten keresztül tudtuk megvalósítani a 3D betonnyomtató beszerzését. Ezzel pillanatnyilag egyedülállóak vagyunk a magyarországi felsőoktatásban. Célunk ezzel a fejlesztéssel az iparosítható betongyártás megvalósíthatóságának elősegítése.

A 3D betonnyomtató fő részekből áll (1. ábra): robot(kar) a vezérlőegységgel és keverő-szivattyú. A keverő-szivattyú, amely előkevert száraz anyagból készíti el a betont (valójában habarcs) és továbbítja a nyomtatófejhez. A nyomtatófej a robotkarra van szerelve, egy előre programozott útvonal mentén szállítja a robot a nyomtatófejet a tervezett elem nyomtatásának megvalósításáért. A vezérlőegység felelős a robot működésének irányításáért.



1. ábra

BME Építőanyagok és Magasépítés – első 3D betonnyomtatója a felsőoktatásban

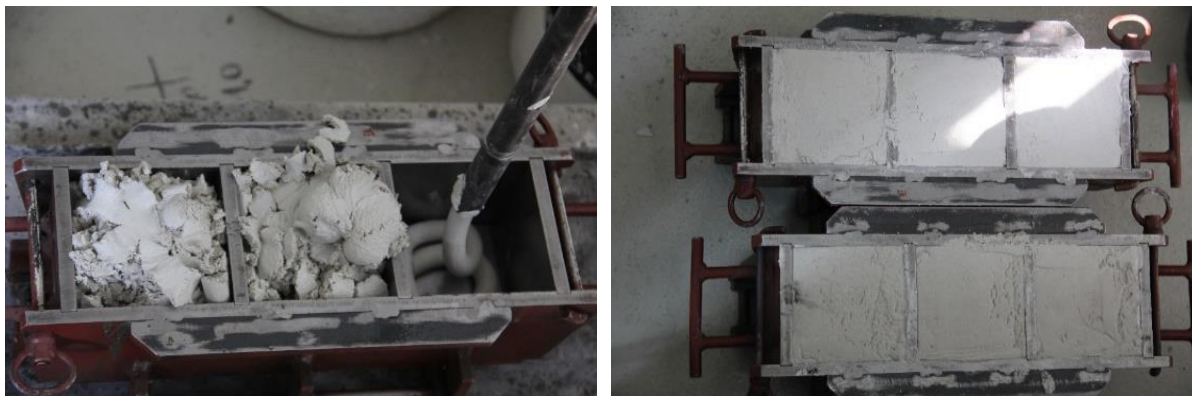
2. ANYAGVISELKEDÉS

A friss beton anyagviselkedése kritikus fontosságú a 3D betonnyomatás megvalósíthatósága érdekében. Kutatások egyik legújabb fókuszja az anyagviselkedés optimalizálásán van. A pumpálhatóság, extrudálhatóság és összeépíthetőség jellemzi az anyagkeverék teljesítményét a nyitott idő mellett. Az extrudálhatóság a fúvóka (nyomtatófej utolsó eleme) alakjától függ, és korrelál a szivattyúzhatósággal, ami az a nyomást, amely az anyag nyomtatófejbe történő továbbításához szükséges. Nagyobb teljesítményű keverőszivattyú alkalmazása javíthatja ezeket a tulajdonságokat, de ez az építhetőség kárára történhet. A friss beton anyagviselkedésének (elvárt) sokrétűsége miatt, komplex berendezésekre segítségével érhetjük el a kívánt célt.

Az építhetőség a nyomtatási kritikus magasságot jelöli, azaz azt a magasságot, ami tönkremenetel (vagy instabilitás) nélkül nyomtatható, valamint a megfelelő nyomószilárdság kialakulása ahhoz, hogy túlzott deformáció nélkül elviselje a következő rétegek okozta terhelést. Erre az egyik megoldás, ha a kötőanyagot adalékszert alkalmazunk (keverőben vagy a nyomtatófejben, ez utóbbival érhetünk el jelentősebb hatást).

2.1 Anyagtulajdonságok

Vizsgáltuk nyomtatott, illetve azonos összetételű bedolgozott betonok szilárdsága közötti különbségeket (Kovács, 2023). A kísérletek célja volt annak megállapítása volt, hogy maga a nyomtatási technológia hatása hogyan vehető figyelembe a szilárdság definíciója során (2. ábra).



2. ábra
Nyomatott, illetve azonos összetételű bedolgozott betonok közötti különbségeket

2.2 Anizotrópia és tönkremenetelim mód hatása a szilárdsági jellemzőikre

Vizsgáltuk nyomtatott beton eltérő irányokban (Thajeel, Sólyom, Balázs, 2024) jelentkező szilárdságokat (3. ábra).



3. ábra
Nyomatott beton nyomóvizsgálatai eltérő irányokban (a nyomtatási irányhoz képest)

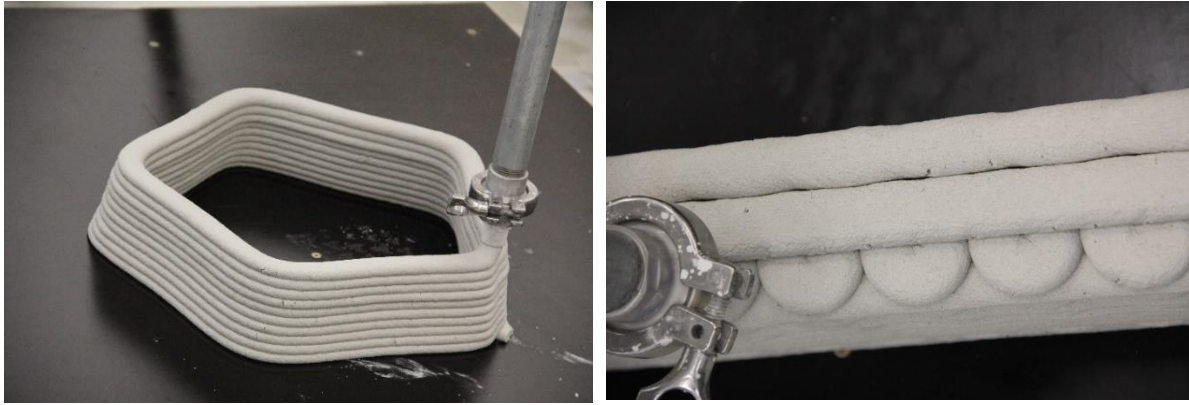
3.SZERKEZETI VISELKEDÉS

3.1 Szerkezeti elemek betétek nélkül

- A 4. ábrán 3D betonnyomatással készült egyszerű szerkezeti elemekre mutatunk be példát egyrészt
- folyamatosan változó keresztmetszet formájában, másrészt
 - gerenda formájában, ahol példát mutatunk a nyomtatási irány megváltoztatásának lehetőségére is.

A keresztmetszet folyamatos változásának természetesen a korlátja, hogy a nyomtatott beton extrudálás után állékony kell, hogy maradjon.

A jobba oldali gerenda arra mutat példát, hogy nyomtatás során, az egymást követő rétegek iránya megváltoztatható.



4. ábra
Egyszerű, nyomtatott szerkezetek

Az 5. ábra egy 600 mm hosszúságú gerenda központos terheléssel végrehajtott vizsgálatát mutatja. A vizsgálat során értelemszerűen a repesztő szilárdság kimérésére volt lehetőség.



5. ábra
3D nyomtatott betongerenda hajlítási vizsgálata betétek nélkül

3.2 Szerkezeti elemek betétekkel

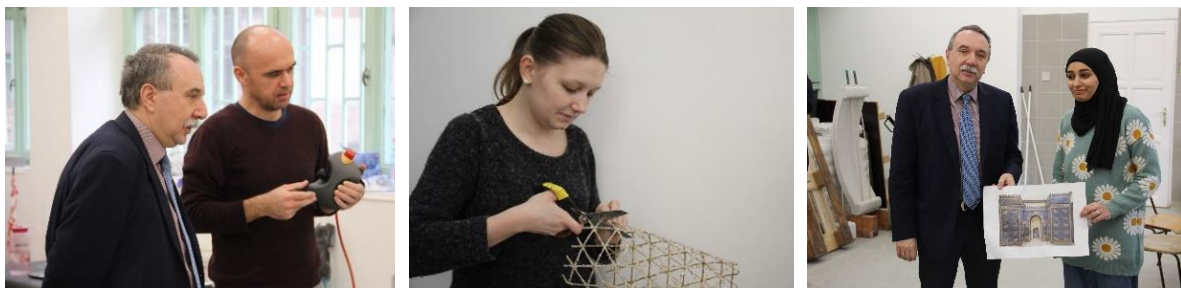
Betétek elhelyezése kimondott nehézségeket jelent 3D betonnyomtatás esetén. A 6. ábrán bemutatunk példát nem-acél anyagú betét alkalmazására a 3D nyomtatott betonban húzott betétként. E nyomtatás során a húzott oldalon Aramid hálót helyeztünk el.



6. ábra

3D nyomtatott beton gerenda Aramid hálóval és hajlítási vizsgálata

Külön öröm volt számunkra, hogy Czigány Tibor, Rektor Úr folyamatos figyelmet fordít ránk, aminek keretében a megnyitókör és azt követően is látogatást tett laborunkba (7. ábra).



7. ábra

*A BME rektorának látogatása laborunkba 3D betonnyomtatás közben
(Prof. Czigány Tibor, Rektor, Dr. Sólyom Sándor, Kovács Izabella, MSc hallgató,
Thajeel M. Marwah, PhD hallgató)*

4. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Napjaink automatizálás és digitalizációs törekvései tekinthetők a fejlesztés új állomásainak. Jelen cikkben be szeretnénk mutatni a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Laboratóriumában közelmúltban beszerzett robotkaros 3D betonnyomtatót és az első kísérleti tapasztalatainkat, melyek kiterjedtek a:

- szilárdság értelmezésére 3D nyomtatott beton és azonos összetételű öntött beton esetén, anizotrópia hatásának értelmezésére,
- lehetséges geometriai formáknak értelmezésére, és
- betétek elhelyezésének lehetőségeire.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak a VKE 2018-1-3-1_0003 *“Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése”* című projekt keretein belül részesült kutatási támogatásért. Köszönjük továbbá a segítséget a következő kollégáknak: Burai Balázs, Marwah M. Thajeel és Kovács Izabella.

HIVATKOZÁSOK

- Balázs L. Gy. (2021) „Öntöttvas hidaktól a 3D betonnyomtatásig.”, XXV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia – ÉPKO 2021 (Ed. Köllő G.), pp. 7 – 14.
- Balázs L. Gy., Nehme S., Lublós É., Kopecskó K., Balogh T., Kasik T., Sólyom S.
„3D betonnyomtatás – korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztés a BME-n”,
VASBETONÉPÍTÉS 2020/4, pp. 113-117., <https://doi.org/10.32969/VB.2020.4.3>
- Kovács Izabella, „3D nyomtatott beton – anyagszerkezeti tulajdonságok”, MSc Diplomamunka, BME 2023, Konzulensek: Balázs L. Gy., Haris I., Thajeel M. M.
- Thajeel M. M., Sólyom S., Balázs L. Gy., *Impact of Printing Directions and Printing Paths on the Compressive Strength of 3D Printed Concrete*, építőanyag JSBCM, 2024/1, 76(1), pp. 31-38, <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2024.4>