

시공표면평탄에 따른 3D 프린팅 적층형상 정량분석

박진수* · 김경택**

Park, Jin Su*, Kim, Kyung Taek**

Quantitative Analysis of 3D Printing Layered Shape according to the Flatness of Construction Surface

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM, also known as 3D printing) applied to the construction industry is implemented and verified for various effects since advantages such as high design freedom, improving worker safety, and predictable construction period. However, due to the low maturity compared to the existing technology, studies are underway to solve new problems that occur in the overall of AM technology. In this paper, we confirm the effect of low construction surface flatness on the stacked features in the process of on-site AM construction. In particular, unstable AM features are determined through quantitative analysis by laser scanning, and a construction strategy is proposed for the surface flattening.

Key words : 3D printing, Additive manufacturing, AM feature, Mortar feedstock, Construction surface flatness

초록

건축물의 디자인 자유도 향상, 작업자 안전 향상, 비교적 쉬운 납기예측 등의 이점으로 건설 산업에 적용된 3D 프린팅 기술(Additive manufacturing, AM)은 각종 효과성의 검증과 산업적용이 진행되고 있다. 다만, 기존기술대비 낮은 성숙도로 인해, 건축AM기술의 전주기에 발생하는 새로운 문제들을 해소하기 위한 연구들이 진행 중이다. 본 논문에서는 이러한 문제점 중에서도 현장 환경에 건축물을 적층 시공하는 과정에서, 낮은 시공표면평탄이 적층 제조 형상물에 미치는 영향을 확인한다. 특히 레이저 스캐닝을 통한 3차원 재구성 및 정량 분석을 통해, 낮은 평탄도로 인한 불균일한 적층형상물을 분석하고, 이를 해소하기 위한 적층시공전략을 제안한다.

검색어 : 3D 프린팅, 적층제조, 모르타르, 적층형상, 시공표면평탄

1. 서론

적층제조기술(Additive Manufacturing, AM, 3D printing) 활용한 건축제품 제조방법이 최근 작업자 안전 향상, 납기 정확도 향상, 비정형 디자인 구현효율성 등에 의해 새로운 시공기술로 주목받고 있다(Buswell et al., 2018; Choi and Park, 2020; Ghaffar et al., 2018). 건축물을 적층 제조하는 경로는 건축제품의 중간형태 및 구현방법에 따라, 현장 환경에서 직접 제조하는 방법과(Duballet et al., 2017) 공장 환경에서 분할된 파트를 제조하여(Choi et al., 2016) 설치현장에서 재조립하는 방법으로 구분할 수 있다. 특히 소재활용의 자유도가 높은 압출식 적층제조기술(Material Extrusion Additive Manufacturing)이 높은 인건비로 인해 시공비용 상승이 발생하는 유럽과 미국에서 적용되는 것이 확인되고 있다. 실제로, 주거목적의 주택을 건축 3D프린팅 기술을 적용하여 제조하여, 작업비용과 작업자 안전등의 이슈를 해소한 사례가 보고되고 있다(ALL3DP, 2021). 하지만, 제조과정에 투입되는 장비의 X-Y이송평면 평탄도가

* 정회원 · 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소 연구원 (Korea Institute of Industrial Technology · npjs9621@kitech.re.kr)

** 교신저자 · 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소 수석연구원 (Corresponding Author · Korea Institute of Industrial Technology · kkt@kitech.re.kr)

Received October 26, 2021/ revised December 24, 2021/ accepted December 30, 2021

건축물의 설치가 이뤄지는 현장 환경의 시공표면보다(Hong et al., 2015) 높기 때문에, 두 평면 사이의 평행도 불일치가 발생한다. 극단적인 예로, 공장 환경에서 제조한 건축제품의 현장 설치과정에서 평행도 불일치로 인해, 제품의 일부가 허공에 뜨고, 하중에 의한 균열 및 절단이 발생하기도 한다. 또한 현장 환경에서 첫 번째 층을 적층하는 과정에서 계획된 변수에 적합하지 않은 적층이 이뤄지기도 한다. 본 연구에서는 현장에서 직접 건축물을 적층 제조하는 조건을 모사하여 시공표면과 장비의 평행도불일치문제를 정량 분석한다. 또한, 낮은 평탄도 문제를 해소하기 위한 건축물 적층제조전략을 제안한다.

2. 연구방법

2.1 건축 적층제조 적용소재

시멘트 기반의 건축소재는 시간에 따라 기계적 특성이 변화한다. Roussel(2018)에 의하면, 이러한 변화는 시멘트입자 간의 수화반응으로 인해 입자가 점차커지는 현상으로 설명할 수 있다. 적층제조 과정에서 수화반응 및 강도변화는 층간접합강도와 형상유지의 적합성을 평가할 수 있는 범위를 예측하기 위해 활용될 수 있다. 특히 적층모드의 변화(Park et al., 2020) 및 Suiker(2018) 좌굴현상 예측은 건축제품의 적층 시공과정에서 사고 및 비용낭비를 예방하기 위해, 예측되고 제어되어야한다. 본 연구에서는 Lee et al.(2019)에 의해 기계적 특성이 설계된 모르타르 소재를 적용하여 실험을 진행한다.

2.2 건축 적층제조시스템

적층시공을 위한 갠트리(Gantry) 장비는 Fig. 1과 같이 10 × 10 × 3 m³ 작업공간을 갖고 랙-파니언(Rack-Pinion) 방식으로(KITECH and Gudel, Korea)구성되었다. 구동부에 적용된 주요부품은 대형의 공간에서 0.08 mm의 반복위치정밀도를 갖고 있어, 적층과정에서 발생 가능한 위치 및 치수오차를 최소화 할 수 있다. 구체적인 설계사양은 250 kgf의 수직방향의 하중조건에서 최대 1000 mm/s²의 가속도와 400 mm/s 등속이송속도를 견딜 수 있다.

믹서로 혼합된 모르타르는 Fig. 2(a)와 같이 오거펌프(auger pump)와 호스를 통해 25 mm 노즐로 압출된다. 오거펌프는 최대 25 bar의 압력으로 토출이 가능하며, 수평 150 m 수직 70 m의 이송이 가능하다. 압출된 소재는 60초 동안 무게를 측정하고, 단위시간당 압출무게($V_{extrusion}$, kg/s)로 환산된다. 압출 적층된 형상물은 사각형의(형상물의 폭: width, 두께: thickness, 단위길이: length) 단면으로 단순화하고, 확인된 압출무게와 밀도를 환산하여 요구형상물의 사각형 단면을 만족할 수 있도록 갠트리 장비의 압출 이송속도($v_{traveling}$, mm/s)로 Eq. (1) 계산된다.

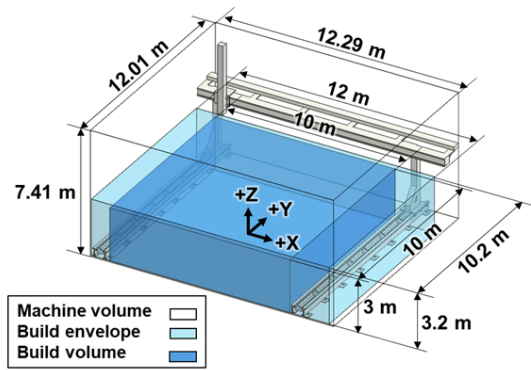


Fig. 1. Gantry System for Construction Scale Material Extrusion Additive Manufacturing

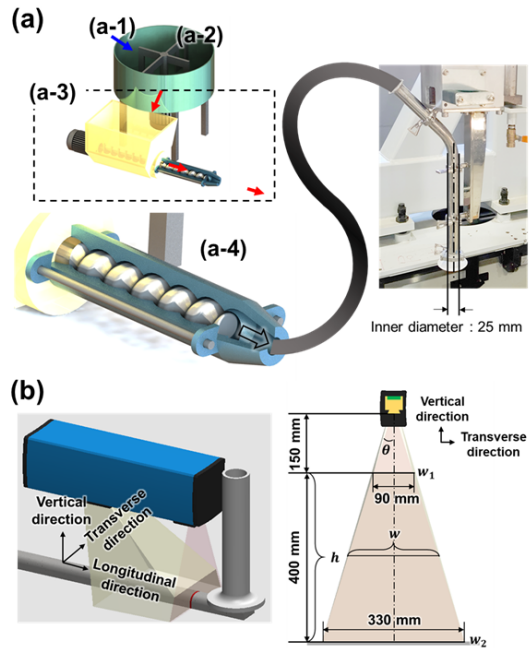


Fig. 2. (a) Extrusion System, (b) Inspection System (Laser Triangulation)

$$V_{extrusion} = width \times thickness \times v_{traveling} \quad (1)$$

Fig. 2(b)와 같은 계측장비가 작업표면(Build surface)의 표면 정보를 취득하여 평가한다. 또한 압출 형성된 형상물의 단면을 측정

Table 1. Specification of Inspection System

Specification	Value
Scan rate	5000 / sec
Vertical Resolution	0.28~0.04 mm
Transverse Resolution	0.215 mm

하기 위해 압출기 끝단에 부착되어 형상물의 정량적인 데이터를 취득한다(laser triangulation, TrisectorP1030, SICK, Germany). 계측장비는 데이터 취득과정의 신뢰성을 향상하기 위해 연마된 계측장비표면을 기준으로 레이저 수평기를 이용하여 중력방향에 수직하도록 설치했다. 상세한 사양은 Table 1과 같이 확인할 수 있으며, 계측진행방향(Longitudinal direction)의 정밀도는 센서(sensor)의 측정주기(Scan rate)와 이송속도를 조정하여 조절될 수 있다. 본 연구에서는 데이터 처리와 형상물의 정밀도를 확인할 수 있는 정밀도가 선정되었다. 진행방향으로 50 mm, 수직방향으로 0.04 mm, 가로방향으로 0.215 mm의 정밀도를 갖는다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 작업표면 평탄도

갠트리 장비의 제한된 적층 공간(Build volume)내에서 작업표면과 장비의 X-Y평면사이 높이편차분포를 계측장비를 통해 측정하였다. Fig. 3은 계측결과로, 최고점(a-1)을 기준으로 작업표면 최저점과 44.64 mm의 높이 차이를 갖고 있다. 확인된 높이편차는

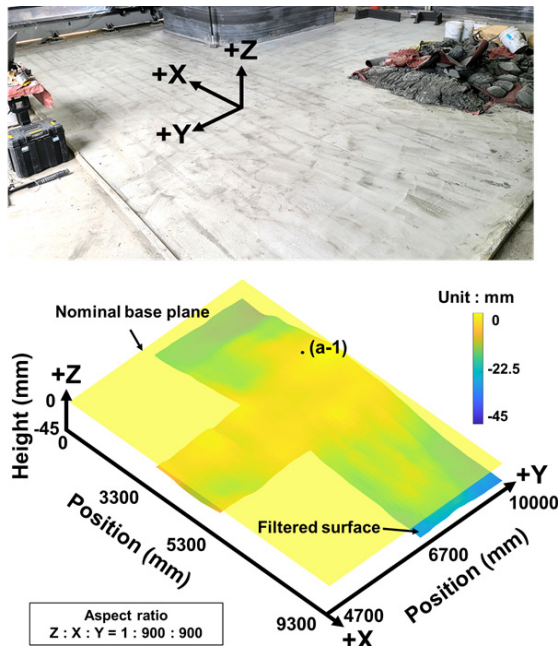


Fig. 3. Build Surface Scanning Result

경험적으로 최적화된 적층두께(thickness) 10 mm를 적용할 경우, 부적합한 적층형상을 예상할 수 있다. 특히, 압출볼륨이 부족하여 형상물구현과정에 불가하다. 이러한 문제를 해소하기 위해 형상물의 폭(width)을 60 mm로 지정하고, Eq. (1)에 의해 높이 편차별 갠트리 장비의 이송속도를 조정한 적층경로설계가 요구된다.

3.2 적층경로형성방법 및 적용 결과

높이편차를 극복하기 위한 적층경로를 생성하기 위해, 갠트리 장비와 작업표면평탄도 데이터를 기반으로 Fig. 4와 같은 알고리즘을 적용했다. 제한된 갠트리 장비의 가속도(a_g , 400 mm/s^2)를 적용하여 생성된 적층경로 Fig. 4(a)에서 높이편차 변화에 따른 등속이송속도구현을 위해 형성되는 가/감속도의 적용을 판단하는 방법을 적용했다. 적층경로와 시공비대면의 높이편차를 Fig. 4(a-1)와 같이 추출하고, 최대이송속도와 관련된 저주파 주기를 감소시켜 Fig. 4(a-2)와 같이 표현된다. 또한, 저주파의 추세가 제거된 Fig. 4(a-2) 값에는 이송속도 구현을 위한 가속도의 분포가 확인되며, 가속도분포가 a_g 의 범위 내에서 만족할 수 있도록, 그래프 평활을 적용했다. 결과적으로 측정값 Fig. 4(a-1)에 적용된 평활화변수를 적용하여 갠트리 장비의 이송속도구현 가능하도록 Fig. 4(a-3)와 같은 높이편

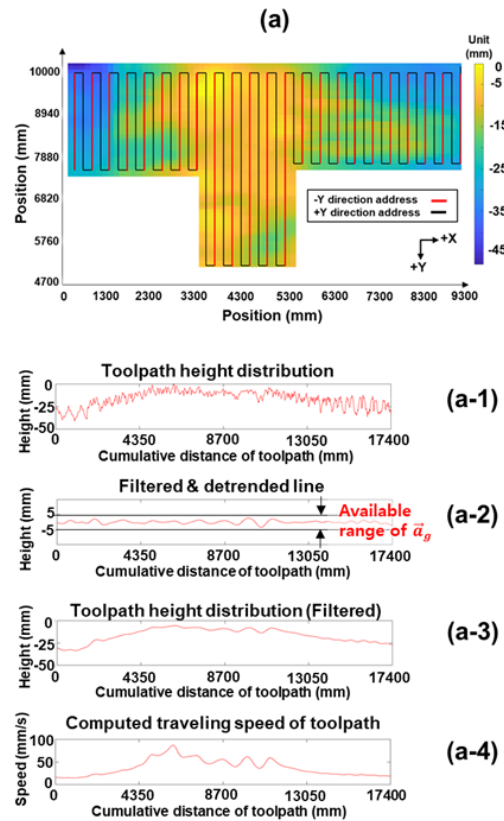


Fig. 4. (a) Build Surface Flattening Tool-Path, (a-1), (a-2), (a-3), (a-4) Process and Results of Flattening Tool-Path Generation

차를 확보했다. 확인된 높이편차는 형상물의 폭과 함께 Eq. (1)에 적용되어 Fig. 4(a-4)와 같이 갠트리 장비의 이송속도 분포로 계산 되어, 적층제조경로를 형성한다.

3.3 적층형성결과

앞서 설계된 적층경로를 적용하여, 시공 바닥면에 평탄한 층을 형성한 결과 Fig. 5와 같이 3가지 대표적인 형상물(a-1), (a-2), (a-3) 확인했다. 특히, 앞선 Fig. 4 과정에 의해 높이편차가 적층높이 (10 mm)보다 낮아지고(a-1), 적층높이보다 2배 이상 확인되는 구간(a-3)에서 부적합형상이 도드라지게 확인된다.

각 대표형상의 분류를 위한 기준을 생성하기 위해 평탄영역과 형상의 최외각 폭의 비율을 취득된 데이터로부터 추출했다. 확인된 데이터들은 Fig. 6과 같이 적층두께와 함께 경향을 확인할 수 있다. 높이편차가 클수록 평탄면을 형성하는 비율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, 17 mm이상의 높이편차부터는 적층형상물의 50 %이하 평탄표면이 생성되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 편차가 20 mm 이상일 경우, 30 % 이하의 비율을 확인했다. 이러한 결과는 충분한 강도를 갖지 못하는 모르타르가 중력에 의해 형상이 변화하고, 적층 모드변경이 발생하는 것을 나타낸다.

적층형상의 평탄표면 평균높이를 Fig. 7(a-2)와 같이 확인할

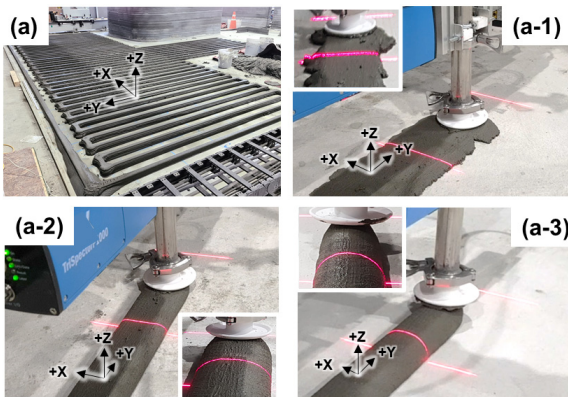


Fig. 5. (a) Layered Features, (a-1) Torn Boundary Feature, (a-2) Well-Formed Feature, (a-3) Convex-Surface Feature

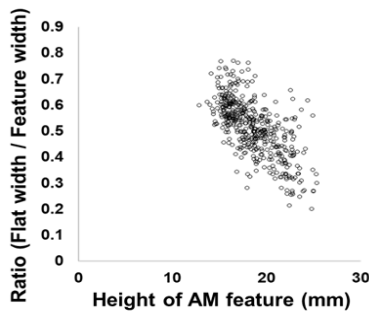


Fig. 6. Flat Surface Ratio Result

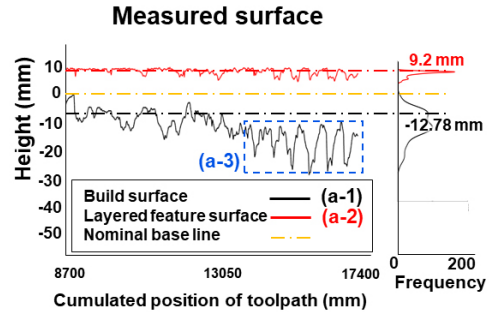


Fig. 7. Surface Height Distribution Results

수 있다. 작업표면(a-1)과 적층표면(a-2)의 높이표준편차를 확인한 결과, 작업표면(a-1)의 경우 약 19.15 mm를 갖고 있으나, 적층표면(a-2)은 약 0.45 mm의 값을 확인할 수 있다. 하지만, 적층표면의 높이편차가 큰 구간 Fig. 7(a-3)에서는 전체적층표면의 높이표준편차보다 높은 4.13 mm의 표준편차를 확인했다. 이러한 결과는 적층형상물의 변형과 관련하여, 형상물의 단면적 증가에 따른 수화시간 증가(Wolfs et al., 2018) 및 강도 감소로 발생한 현상으로 예상할 수 있다.

3.4 적층 건전성을 위한 분할 적층경로 형성방법

Fig. 8에는 앞서 확인된 실험결과들을 통해 낮은 표면평탄을

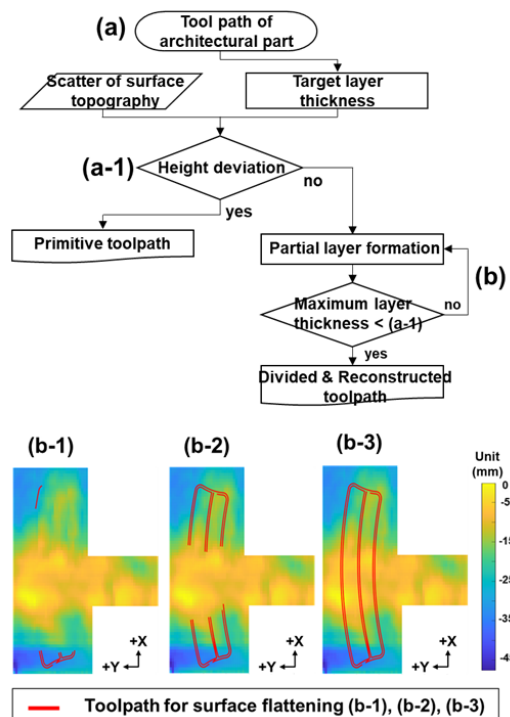


Fig. 8. (a) Flow Chart of Layer Dividing, (a-1) Build Surface Height, (b) Tool-Path Split Loop, (b-1), (b-2), (b-3) Tool-Path Division Results

갖는 시공바닥표면에 적층제조를 위한 적층경로 형성전략을 제안했다. Fig. 8(a)와 같은 흐름으로 적층 경로는 시공표면의 높이편차가 적층두께 보다 낮은 가용범위에서 단일의 경로로 생성된다. 하지만, 시공바닥표면의 낮은 평탄도로 인해, 적층높이보다 큰 편차가 확인될 경우, 앞서 Fig. 6과 같이 실험으로 확인된 허용높이를(Fig. 8(a-1)) 기준으로 Fig. 8(b)와 같이 분할된 적층경로를 형성하는 흐름을 갖고 있다. Fig. 8(b-1), 8(b-2), 8(b-3)과 같이 적용결과는 앞서 확인한 17 mm를 기준(평탄표면 50 % 이하)으로 확인된 시공표면의 최대 높이 편차(44.64 mm)를 보상하기 위해 총 3개의 분할된 레이어가 형성했다. 제안된 방법은 국부적인 영역에서 발생한 높이편차를 보상하기 위해, 적층경로를 형성하는 방법으로, 시공표면의 낮은 평탄도를 극복하여 치수 정합도가 높은 벽체를 적층 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

건축물의 적층시공과정에서 시공표면과 갠트리 장비의 평행도 불일치문제를 정량화하고 가용가능한 적층높이를 확인하기 위한 실험이 진행했다. 실험결과, 적층모드의 변화를 나타낼 수 있는 형상물의 표면평탄 분포를 정량적으로 확인했다. 또한 해당실험에서 적용된 소재와 적층제조 시스템을 기준으로, 50 % 이하의 평탄도가 확인된 적층높이 17 mm를 적용하여, 시공표면 평탄적층 경로형성 방법을 제안했다. 본 논문에서 제안된 적층형상물의 정량화 및 분석 과정은 현장 환경에서 낮은 시공표면의 평탄도를 해소할 수 있는 적층 시공방법으로 활용 가능할 것이다.

감사의 글

본 논문은 도시건축사업 21AUDP-B121595-06‘소형 건축물 및 비정형 부재 대상 3D 프린팅 설계, 재료 및 장비 개발 과제’ 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.

References

- ALL3DP (2021). Available at: <https://all3dp.com/2/best-companies-building-3d-printed-houses> (Accessed: Sep 9, 2021).
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z. and Dirrenberger, J. (2018). “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research.” *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 37-49.
- Choi, H. S. and Park, J. S. (2020). “Technology trend of additive manufacturing standardization.” *Journal of Powder Materials*, Vol. 27, No. 5, pp. 420-428 (in Korean).
- Choi, H. S., Byun, J. M., Lee, W. S., Bang, S. R. and Kim, Y. D. (2016). “Research trend of additive manufacturing technology - A= B+C+D+E, add innovative concept to current additive manufacturing technology: Four conceptual factors for building additive manufacturing technology -.” *Journal of Powder Materials*, Vol. 23, No. 2, pp. 149-169 (in Korean).
- Duballet, R., Baverel, O. and Dirrenberger, J. (2017). “Classification of building systems for concrete 3D printing.” *Automation in Construction*, Vol. 83, pp. 247-258.
- Ghaffar, S. H., Corker, J. and Fan, M. (2018). “Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution.” *Automation in Construction*, Vol. 93, pp. 1-11.
- Hong, S. H., Cho, H. S., Kim, N. H. and Sohn, H. G. (2015). “3D indoor modeling based on terrestrial laser scanning.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 35, No. 2, pp. 525 (in Korean).
- Lee, H. J., Kim, J. H. J., Moon, J. H., Kim, W. W. and Seo, E. A. (2019). “Evaluation of the mechanical properties of a 3D-printed mortar.” *Materials (Basel)*, Vol. 12, No. 24, pp. 1-13.
- Park, J. S., Lee, H. J. and Choi, H. S. (2020). “Buildability of mortar feedstock in material extrusion additive manufacturing.” *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 65, No. 3, pp. 1069-1072.
- Roussel, N. (2018). “Rheological requirements for printable concretes.” *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 76-85.
- Suiker, A. S. J. (2018). “Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments.” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 137, pp. 145-170.
- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P. and Salet, T. A. M. (2018). “Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing.” *Cement and Concrete Research*, Vol. 106, pp. 103-116.