

Czynniki wpływające oraz metoda prognozowania przepływu wytłaczania betonu do druku 3D

Effective factors and a prediction method on extrusion flow of 3D printed concrete

Jiehang Zhou¹, Longyu Du¹, Kai Wu¹, Jianzhong Lai^{*1}, Xinzheng Zhao¹

¹School of Material Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

*Corresponding author: J. Lai, e-mail: jzh-lai@163.com

Streszczenie

Kontrola wymiarów filamentu czyli strugi wytłaczanego materiału w betonie drukowanym 3D stanowi istotne ograniczenie dla szerokiego zastosowania tej technologii. Precyzja druku 3D betonu jest ściśle zależna od stabilności przepływu w czasie ekstruzji. Z tego względu konieczne jest dogłębne zbadanie czynników wpływających na ten przepływ. W niniejszym artykule przedstawiono analizę wpływu płynności mieszanki oraz masy początkowego załadunku w zasobniku materiałowym na charakterystykę przepływu w trakcie ekstruzji. Odkryto i opisano unikalne zjawiska mające wpływ na przepływ podczas procesu druku, które nazwano odpowiednio „kolapsem” oraz „obciążeniem krytycznym”. Zaobserwowano również liniową korelację pomiędzy płynnością mieszanki a przepływem ekstruzyjnym w przeliczeniu na jednostkę masy początkowego załadunku w zasobniku. Na podstawie uzyskanych wyników matematycznych zaproponowano metodę predykcji przepływu ekstruzyjnego. Ponadto, sformułowano zestaw zaleceń opartych na doświadczeniach zgromadzonych w trakcie prowadzonych badań.

Słowa kluczowe: beton drukowany, płynność, przewidywanie przepływu wytłaczania, obciążenie

Summary

The size control of 3D printed concrete filament limits application of 3D printed concrete technology. The accuracy of 3D printed concrete will benefit from stability of extrusion flow. Therefore, it is necessary to study the effective factors on extrusion flow. In this paper, the effects from fluidity and mass of loading in material tank on extrusion flow were discussed. The special phenomenon effective on extrusion flow during the printing process was discovered and named as ‘collapse’ and ‘critical loading’. Meanwhile, the linear relationship between fluidity and extrusion flow per unit mass of initial loading in material tank was observed. A feasible method for extrusion flow prediction was proposed based on mathematical results in this study. And some advices were provided according to the experience from this research.

Keywords: 3D printed concrete, fluidity, extrusion flow prediction, loading

1. Wprowadzenie

Beton drukowany 3D stanowi zautomatyzowaną i proekologiczną technologię dla przemysłu budowlanego. Badania nad drukarkami 3D osiągnęły już zaawansowany poziom. Istotnym sygnałem jest fakt, że w niektórych przypadkach beton drukowany wykazuje lepszą wydajność w porównaniu z betonem wytwarzanym tradycyjnymi metodami (1). Oznacza to, że zalety betonu drukowanego nie ograniczają się jedynie do samej technologii, ale wynikają również z właściwości użytkowych osiąganych dzięki strukturze tworzonej przez druk 3D. Naukowcy koncentrują swoje wysiłki

1. Introduction

3D print concrete is an automatic and environmental technology for the construction industry. The research on 3D printers has been well developed. A significant signal is that some 3D printed concretes perform better than traditionally prepared concrete in some situation (1). It means that the advantages of 3D printed concrete are not limited in technology but also in the performance with 3D printed structure. Scientists are trying to develop the 3D printed concrete from rheology, porosity distribution, interlayer structure and macro characterization point of view (2-5). Some

na udoskonalaniu betonu drukowanego 3D w zakresie reologii, struktury porowatości, struktury międzywarstwowej oraz charakterystyki makroskopowej (2–5). W technologii betonu drukowanego stosowane są również innowacyjne rozwiązania, takie jak na przykład torkretowanie (6). Wspólnym celem wszystkich badań nad betonem drukowanym 3D jest rozszerzenie zakresu jego zastosowań. Zatem kluczowym zadaniem dla badaczy jest uzyskiwanie lepszych właściwości użytkowych tego materiału.

Metody poprawy właściwości betonu drukowanego w technologii 3D obejmują modyfikację materiałową. Jednym z najbardziej niezawodnych rozwiązań jest zastosowanie betonu drukowanego zbrojonego włóknami. Efekty zbrojenia włóknami węglowymi, polimerowymi, szklanymi oraz stalowymi były przedmiotem licznych badań (7–10). Spośród tych materiałów, beton zbrojony włóknem stalowym lub beton o ultrawysokowartościowy (UHPC) wykazują najwyższą wytrzymałość w porównaniu z innymi rodzajami betonu drukowanego zbrojonego włóknami. Wykazano, że wytrzymałość na ściskanie drukowanego UHPC przekracza 150 MPa i jest wyższa niż w przypadku UHPC formowanego tradycyjnie przy zachowaniu tego samego składu mieszanki (11). Równocześnie w technologii druku 3D zastosowano inżynierskie kompozyty cementowe [ECC]. Zhu i in. (12) przygotowali belkę ECC metodą druku 3D, a uzyskane wyniki wykazały, że charakterystyczny dla tego materiału ciągły mechanizm zniszczenia utrzymuje się również w przypadku elementów wytwarzanych addytywnie.

Oprócz zbrojenia włóknami, skutecznym kierunkiem poprawy właściwości materiału jest także optymalizacja składu kruszywa. Xiao i in. (13) opracowali beton drukowany 3D z różnymi kombinacjami kruszyw, w tym z zastosowaniem kruszyw recyklingowych i drobnych frakcji. Ji i in. (14) badali parametry wytłaczania betonu drukowanego 3D zawierającego kruszywo grube. Dodatek kruszywa grubego może przyczynić się do obniżenia kosztów materiału oraz zwiększenia potencjału zastosowań technologii druku 3D w budownictwie.

Badania prowadzone są również nad modyfikacją składu mieszanki betonu drukowanego. Markin i in. (15) analizowali proces druku pianobetonu o gęstości od 800 do 1200 kg/m³, natomiast Ye i in. (16) wprowadzili do betonu drukowanego 3D granulaty gumowy, uzyskując poprawę ciągliwości materiału.

Podsumowując, modyfikacje materiałowe stanowią kluczowy kierunek badań nad poprawą właściwości mechanicznych i użytkowych betonu drukowanego w technologii 3D.

Niektóre prace badawcze koncentrują się na konstrukcji i typie drukarki 3D w zależności od rozmiaru wytwarzanego elementu. W warunkach laboratoryjnych stosowane są stołowe drukarki 3D, wykorzystywane do przygotowywania próbek w małej skali oraz o dużej precyzji wykonania (17). Z kolei drukarki typu suwnicowego znajdują zastosowanie w drukowaniu większych struktur, a nawet całych budynków (18). W celu zwiększenia przestrzeni roboczej, opracowano również drukarki 3D instalowane na robotach mobilnych z systemem gąsienicowym (19). Niezależnie jednak od

exciting technologies, for example shotcrete, are applied in 3D printed concrete (6). The common aims of all 3D printed concrete researches are pushing the applications of 3D printed concrete. Thus, the better performance of 3D printed concrete is the key for researchers.

A method for improving the performance of 3D printed concrete is the material reform. Fiber reinforced 3D printed concrete is a reliable method. The reinforcement effect of carbon fiber, polymer fiber, glass fiber and steel fiber has been researched (7-10). Steel fiber reinforced concrete or ultra-high performance concrete [UHPC] show best strength among fiber reinforced 3D printed concrete. The compressive strength of 3D printed UHPC is over 150 MPa and better than the mold-cast UHPC with same proportion (11). Meanwhile, engineered cementitious composite [ECC] was applied in 3D print. Zhu et al. prepared the ECC beam by 3D printed concrete (12). The result showed that the special ductile failure mode of ECC still existed in 3D printed beam.

Beside fiber reinforcement, the optimizing of aggregate is also effective. Xiao et al. prepared the 3D printed concrete with different aggregate combinations including the recycle aggregates and fine aggregates (13). Ji et al. discussed the extrusion parameters for 3D printed concrete with coarse aggregates (14). The addition of coarse aggregates may cut the cost for 3D printed concrete and is beneficial for application of 3D printed concrete technology. Supplement on proportion of 3D printed concrete is also researched. Markin et al. studied the 3D printed foam concrete with the density of 800 kg/m³ to 1200 kg/m³ (15). Ye et al. added the crumb rubber in 3D printed concrete for better ductility (16). In conclusion, the improving on material is significant for better performance of 3D printed concrete.

Some works concentrate on the 3D printer according to size of 3D print sample. In laboratory, table-type 3D printer was used in preparation of small scale sample with higher accuracy (17). The gantry type 3D printer was used for printing larger structure or even complete buildings (18). To extend the printable space, 3D printer installed on robot with track system was developed (19). However, all types of 3D printers have a common question on filament accuracy, including the size and continuity of 3D print filament. Some scientists are developing 3D printers which are able to achieve special structure. Ramakrishnan et al. proposed a special nozzle with hollow core or U shape to printing the filament with hollow structure, which was helpful for reducing the cost of raw material and made it easier to design the composite structure (20). Tay et al. achieved the self-support structure of 3D print material for overhanging structure by optimization on printing parameter and 3D printer (21). Naturally, higher accuracy of 3D print filament is necessary for all previous studies.

Researchers have been trying to use various methods to change the rheological properties of 3D printing concrete, so as to improve the printability of 3D printing concrete. Zhang et. al. optimized the amount of aggregate to affect the fluidity of 3D printed concrete, where constructability of 3D printed concrete can be fixed at a

typu urządzenia, wszystkie drukarki 3D borykają się z problemem dokładności wytłaczanego filamentu, obejmującym zarówno jego wymiary, jak i ciągliwość. W odpowiedzi na te ograniczenia prowadzone są prace nad rozwojem drukarek zdolnych do tworzenia specjalnych struktur geometrycznych. Ramakrishnan i in. (20) zaproponowali specjalną dyszę o rdzeniu pustym lub w kształcie litery U, umożliwiającą drukowanie filamentu o strukturze pustej w środku, co pozwala na ograniczenie zużycia surowca oraz ułatwia projektowanie struktur kompozytowych. Tay i in. (21) osiągnęli samonośność struktur nawieszonych drukowanych w technologii 3D dzięki optymalizacji warunków druku oraz modyfikacji konstrukcji drukarki. Podsumowując, zwiększenie dokładności i stabilności filamentu drukowanego 3D stanowi kluczowy warunek rozwoju wszystkich dotychczasowych oraz przyszłych zastosowań technologii druku przestrzennego w budownictwie.

Naukowcy podejmują próby zastosowania różnorodnych metod w celu modyfikacji właściwości reologicznych betonu do druku 3D, mając na celu poprawę jego drukowalności. Zhang i in. (22) zoptymalizowali zawartość kruszywa, aby wpłynąć na płynność betonu, wykazując, że użyteczność betonu drukowanego 3D może być utrzymana na stabilnym poziomie poprzez skoordynowaną regulację płynności zaczynu i zawartości kruszywa grubego. Ma i in. (23) wprowadzili do betonu do druku 3D włókna PVA oraz 1,2-propanediol jako domieszki poprawiające właściwości reologiczne, notując zwiększenie lepkości materiału i zmniejszenie napięcia powierzchniowego. Rajeev i in. (24) zbadali możliwość zastosowania odpadów z masek ochronnych w betonie do druku 3D. Pocięli zużyte maski na fragmenty i wykorzystali jako dodatek do materiałów betonowych przeznaczonych do druku 3D, co znacząco poprawiło drukowalność materiału. Badanie to wnosi istotny wkład w recykling zasobów. Sun i in. (25) dodali wielowarstwowe nanorurki węglowe [MWCNTs] do betonu, co znacząco zmieniło jego właściwości reologiczne i pozytywnie wpłynęło na zakres stosowalności betonu drukowanego. Qian i in. (26) stwierdzili, że dodatek około 10% żużla stalowniczego do betonu efektywnie poprawia użyteczność materiału, co jednocześnie sprzyja ponownemu wykorzystaniu odpadów stałych.

Wzrost liczby badań dotyczących konstrukcji wytwarzanych technologią betonu drukowanego 3D stanowi obiecujący sygnał dla komercjalizacji tej metody. Asprone i in. (27) wykonali belkę o długości 3 m złożoną z kilku segmentów drukowanych 3D, które połączono systemem zbrojenia instalowanym w przewidzianych do tego celu wnękach. Vantghem i in. (28) wydrukowali betonowy dźwigar o złożonej geometrii i poddali analizie jego naprężenia przy użyciu trójwymiarowej metody elementów skończonych. Możliwość wytwarzania skomplikowanych struktur jest kluczową zaletą technologii betonu drukowanego 3D. Zhu i in. (29) przygotowali kolumnę z betonu drukowanego 3D zbrojoną stalą podłużną. W drukowanej kolumnie zanotowano wklęsło-wypukły kształt, który miał wpływ na nośność elementu. Costanzi i in. (30) opracowali technologię drukowania betonu na tymczasowych powierzchniach i wytworzyli strukturę powłokową. Zrealizowany element miał korzystne walory artystyczne, a granica między dwoma próbkami miała formę złożonej krzywizny. Podsumowując, zarówno efektyw-

stable level through the coordinated regulation of mortar fluidity and coarse aggregate content (22). Ma et. al. added PVA fiber and 1,2-propanediol as rheological improvement admixture to 3D printed concrete and observed the increase of material viscosity and the decrease of surface tension (23). Rajeev et al. (24) studied the feasibility of adding mask waste in 3D printed concrete. They cut waste masks into fragments and used them as an additive to concrete materials for 3D printing, where the printability of the materials have been significantly improved. This study is of great help to the recycling of social resources. Sun et al. (25) added multi-layer carbon nanotubes [MWCNTs] to 3D printed concrete, where the rheological properties have been significantly changed and benefited the constructability of 3D printing concrete after the addition of MWCNTs. Qian et. al. (26) found that adding about 10% steel slag to concrete can effectively improve the constructability of materials, which is also conducive to the reuse of solid waste.

The increase on researches of structure made by 3D printed concrete technology is an exciting signal for application of 3D printed concrete. Asprone et al. prepared a 3 m beam made by several 3D printed concrete segments constrained by rebar system installed in the reserved places on segments (27). Vantghem et al. printed a concrete girder with complex design and analyzed the stress of the 3D printed girder by the 3D finite element method (28). The ability for preparing complex structure is an important advantage for 3D printed concrete technology. Zhu et al. prepared a 3D printed concrete column reinforced by longitudinal steel (29). A concave-convex shape was observed in 3D printed column, which had influence on bearing capacity on 3D printed column. Costanzi et al. developed the temporary surface printing technology for concrete and fabricated a shell structure (30). The realized sample showed great artistry and the boundary between 2 sample was complex curve. In conclusion, the effectiveness and artistry of 3D printed concrete structure are closely related with the size of 3D print filament.

Researches on reinforced 3D printed concrete and structure of 3D printed concrete proved importance on better size control of 3D print filament. Some scientists have discussed the topic from material's mechanical theory (31-33). However, there is few research concentrated on the extrusion flow which has significant influence on size of 3D print filament. Actually, scientists are concentrated on the simulation on extrusion process (34). Wei et. al developed compared the cross section of 3D printed filament on simulation and experimental results (35). Moreover, Reinold et. al. compared the numerical simulation and experimental results of 3D printing process, where the expanded 3D printed filaments were observed (36).

Honestly, it is easy to control the extrusion flow by adjusting the extrusion power of 3D printer. But it is hard and inaccurate to adjust the extrusion power with the situation that many of 3D printers are controlled by G-code which is a normal program language in numerical control machine, especially in laboratory. Ahi et. al. developed an automated flow control system, which still not available on true 3D printer (37). Meanwhile, a reliable prediction on

ność, jak i walory estetyczne struktur z betonu drukowanego 3D są ściśle powiązane z wymiarem wytłaczanego filamentu.

Badania nad zbrojonym betonem drukowanym 3D oraz strukturami z niego wykonanymi potwierdziły kluczowe znaczenie lepszej kontroli wymiarowej filamentu wytłaczanego w druku 3D. Niektórzy naukowcy podjęli dyskusję nad tym zagadnieniem, opierając się na teoretycznych aspektach mechaniki materiału (31–33). Niemniej jednak, wciąż brakuje badań koncentrujących się bezpośrednio na przepływie ekstruzyjnym, który ma istotny wpływ na wymiar filamentu do druku 3D. Obecnie naukowcy skupiają się głównie na symulacji procesu ekstruzji (34). Wei i in. porównali przekrój poprzeczny filamentu drukowanego 3D uzyskany w symulacji z wynikami eksperymentalnymi (35). Ponadto, Reinold i in. porównali symulację numeryczną i wyniki eksperymentalne procesu druku 3D, notując przy tym ekspansję wytłaczanego filamentu (36). Prawdę mówiąc, najprostszym sposobem kontrolowania przepływu ekstruzyjnego jest regulacja mocy ekstruzji drukarki 3D. Jest to jednak trudne i niedokładne w sytuacji, gdy wiele drukarek 3D, zwłaszcza w warunkach laboratoryjnych, jest sterowanych za pomocą kodu G [G-code], który jest standardowym językiem programowania dla maszyn sterowanych numerycznie. Ahi i in. opracowali automatyczny system kontroli przepływu, który jednak nie jest jeszcze szeroko dostępny w rzeczywistych drukarkach 3D (37). Jednocześnie, wiarygodna predykcja właściwości filamentu jest korzystna dla programowania kodu druku, oferując lepsze rezultaty niż poleganie wyłącznie na doświadczeniu.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

W badaniach użyto następujących surowców: cement portlandzki, pył krzemionkowy, piasek rzeczny, superplastifikator oraz opóźniacz. Skład chemiczny cementu i pyłu krzemionkowego został przedstawiony odpowiednio w tablicach 1 i 2. Wytrzymałość na ściskanie zaprawy z cementu portlandzkiego po 28 dniach przekraczała 52,5 MPa, zgodnie z chińską normą GB175-2020 (38). Piasek rzeczny poddano przesiewaniu przez sito z kwadratowymi otworami o boku 2,5 mm. Jako opóźniacz zastosowano glukonian sodu.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU, % MASOWY.

CHEMICAL COMPOSITION OF THE CEMENT, % BY MASS.

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	S ₂ O ₃	Alkali	Cl ⁻	Straty prażenia / LOI	Pozostałe / Others
20.4	3.25	5.51	1.09	64.0	2.49	0.5	0.02	2.32	0.34

Badania obejmował dwa główne etapy, oznaczone jako #1 i #2, w których zastosowano różne proporcje materiałów. Ponadto, każdy z tych głównych etapów składał się z szeregu mniejszych eksperymentów, oznaczonych od #A do #S.

Składy mieszanek betonowych użytych w eksperymentach #1 i #2 zestawiono w tablicy 3. Najpierw stałe surowce wprowadzono do

3D print filaments is beneficial to program the printing code, which is better than design the code by experience only. Therefore, in this paper, we discussed the effective factors related to material on extrusion flow. Some phenomenon which is effective to extrusion flow was observed. Meanwhile, several equations were proposed for estimating the extrusion flow and size of 3D print filament.

2. Material and method

2.1. Raw material

Raw materials were as follows: Portland cement, silica fume, river sand, superplasticizer and retarder. The chemical composition of the cement and silica fume is listed in Tables 1 and 2. The 28-day compressive strength of Portland cement mortar was greater than 52.5 MPa according to China standard GB175-2020 [38]. The river sand was selected by using a 2.5 mm square hole sieve. The retarder was sodium gluconate.

The 3D print experiment was consisted of 2 major experiments tagged as #1 and #2 with different material proportions. Meanwhile, major experiments are consisted of several minor experiments tagged from #A to #S. The proportions for 3D printed concrete in Experiment #1 and #2 were listed in Table 3. The solid raw materials were added in mixer and mixed for 10 min. Subsequently, the pre-mixed liquid raw material was added in mixer later and mixed for 15 min. Then, the 3D printed concrete was prepared for the experiments. The proportion named C1 in Experiment #1 was designed for 3D printed concrete, and its printability has been proved in previous study. The proportion named C2 in Experiment #2 added extra retarder to keep the fluidity with high level during the printing process, which could be used in experimental situation only.

A vibration platform showed in Fig. 1 was used for fluidity test based on Chinese standard GBT2419-2005 (39). The concrete was cast into a cone mold with the 100 mm bottom diameter. The platform vibrated 25 times with a frequency of 1 Hz and 10 mm of moving distance. The diameter of the concrete was measured and defined as fluidity. The fluidity of 3D printed concrete was tested before a minor experiment to discuss the effect of fluidity on extrusion flow.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY PYŁU KRZEMIONKOWEGO, % MASOWY.

CHEMICAL COMPOSITION OF SILICA FUME, % BY MASS.

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Pozostałe / Others
97.75	0.03	0.36	0.41	0.09	1.36

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH DO DRUKU.

MIX PROPORTIONS FOR 3D PRINTED CONCRETE.

Oznaczenie / Name	Spoiwo, % masowy / Binder, % by mass		s/b, -	w/b, -	Sp/b, -	Re/b, -
	Cement	Pył krzemionkowy / Silica fume				
C1	90	10	1	0.25	0.0015	0.001
C2	90	10	1	0.25	0.0015	0.002

Uwaga: symbole 's', 'b', 'w', 'Sp' oraz 'Re' oznaczają odpowiednio masę piasku, spoiwa, wody, superplastyfikatora oraz opóźniacza wiązania.

Note: 's', 'b', 'w', 'Sp', 'Re' represents the mass of sand, binder, water, superplasticizer, retarder respectively.

mieszarki i mieszano przez 10 minut. Następnie dodano wcześniej przygotowane płynne surowce i kontynuowano mieszanie przez 15 minut. Tak przygotowany beton drukowany 3D był gotowy do badań.

Mieszanka o składzie C1 w eksperymencie #1 została zaprojektowana specjalnie dla betonu drukowanego 3D, a jej drukowalność potwierdzono w poprzednich badaniach. Mieszanka o składzie C2 w eksperymencie #2 zawierała dodatkowy opóźniacz w celu utrzymania odpowiedniej płynności podczas procesu drukowania, co jest rozwiązaniem przeznaczonym wyłącznie do warunków eksperymentalnych.

Do badania płynności wykorzystano stół potrząsający przedstawiony na rys. 1, zgodnie z normą chińską GB/T 2419–2005 (39). Mieszanke wlewano do stożkowej formy o średnicy dolnej podstawy 100 mm. Platforma wykonywała 25 drgań z częstotliwością 1 Hz i amplitudą przemieszczenia 10 mm. Po zakończeniu wstrząsów zmierzono średnicę rozpląwu, którą przyjęto jako wartość płynności. Badanie płynności betonu przeznaczonego do druku 3D przeprowadzano przed rozpoczęciem każdego eksperymentu cząstkowego, w celu analizy wpływu płynności mieszanki na charakterystykę przepływu podczas ekstruzji.

2.2. Drukarka 3D

Jak przedstawiono na rys. 2, w niniejszych badaniach wykorzystano drukarkę 3D typu suwnicowego opracowaną przez autorów. Urządzenie umożliwia druk w przestrzeni roboczej o wymiarach 2 m × 3 m × 4 m. W trakcie procesu drukowania zastosowano



Rys. 2. Drukarka 3D.

Fig. 2. 3D printer.



Rys. 1. Układ pomiarowy do badania płynności.

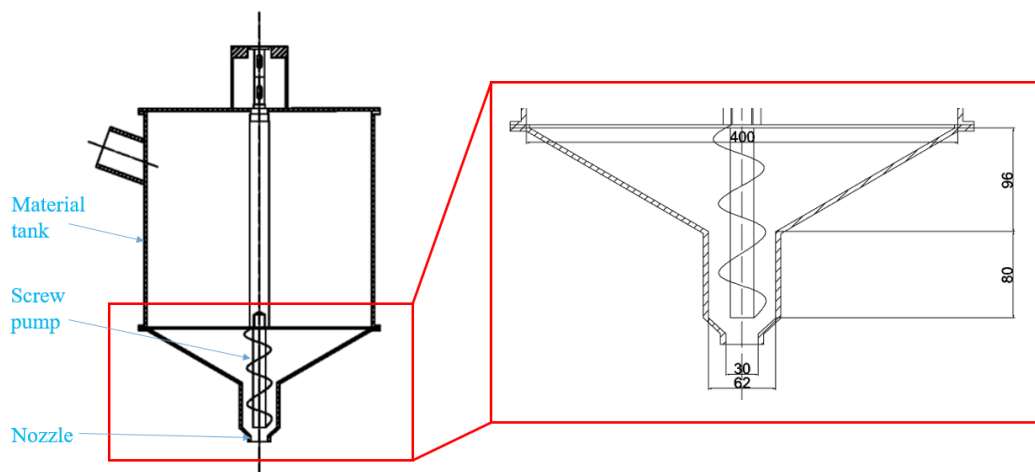
Fig. 1. Fluidity measuring setup.

2.2. 3D printer

As shown in Fig. 2, A gantry-type 3D printer developed by ourselves was used in this research. The 3D printer provides a 2 m × 3 m × 4 m printable space. A print platform was placed during the printing process. As shown in Fig. 3, the extrusion system consists of a screw pump, a material tank and a nozzle. The structure of material tank is basically consistent with the commonly used extrusion 3D printer. The 3D printed concrete was added into material tank manually for accurate statistics on mass of loading in material tank. The radius of the nozzle was 30 mm. The moving velocity of 3D printer nozzle was settled as 3000 mm/min for the extrusion experiment. The radius velocity of screw pump was kept on 40 r/min for all experiments.

2.3. Extrusion flow

Extrusion flow of 3D printer was measured by extrusion experiment. As shown in Fig. 4, several liner-type samples were printed at the 3D print platform. Each long sample was printed independently and discontinuously as a minor experiment. These samples were cut into pieces after 2 days. As shown in Fig. 5, the pieces are about 10 cm long and numbered after cutting from #0 to #x. A cut sample is shown in Fig. 6. The mass, length, width and thickness of the



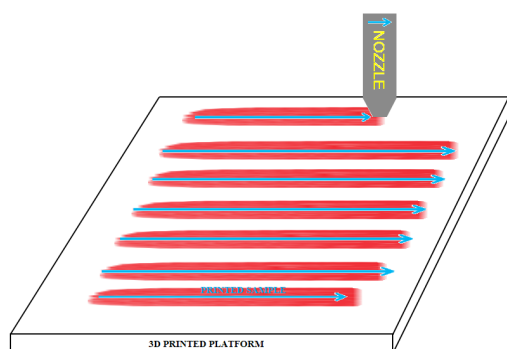
Rys. 3. Schemat system drukowania.

Fig. 3. Extrusion system scheme.

platformę roboczą, na którą nanoszono materiał. Jak pokazano na rys. 3, układ ekstruzji składał się ze ślimakowej pompy dozującej, zbiornika materiałowego oraz dyszy wylotowej. Budowa zbiornika materiałowego jest zasadniczo zgodna z konstrukcjami powszechnie stosowanymi w drukarkach 3D z wytłaczaniem materiału. Beton przeznaczony do druku 3D był ręcznie wprowadzany do zbiornika, co umożliwiało dokładne określenie masy załadowanego materiału. Promień dyszy wynosił 30 mm. Prędkość ruchu dyszy podczas badania ekstruzji ustalono na 3000 mm/min, natomiast prędkość obrotowa pompy ślimakowej była we wszystkich badaniach utrzymywana na poziomie 40 obr./min.

2.3. Przepływ podczas ekstruzji

Przepływ wytłaczania w drukarce 3D został określony na podstawie eksperymentu ekstruzyjnego. Jak przedstawiono na rys. 4, na platformie roboczej drukarki 3D wydrukowano kilka próbek o kształcie liniowym. Każda z długich próbek była drukowana niezależnie i z przerwami, stanowiąc odrębny eksperyment cząstkowy. Po dwóch dniach od wydruku próbki zostały pocięte na fragmenty. Jak pokazano na rys. 5, otrzymane fragmenty miały około 10 cm długości i zostały ponumerowane kolejno od #0 do #x. Przykładową próbkę po przecięciu przedstawiono na rys. 6. Dla każdego fragmentu zmierzono jego masę, długość, szerokość



Rys. 4. Schemat badania.

Fig. 4. 3D print experiment.

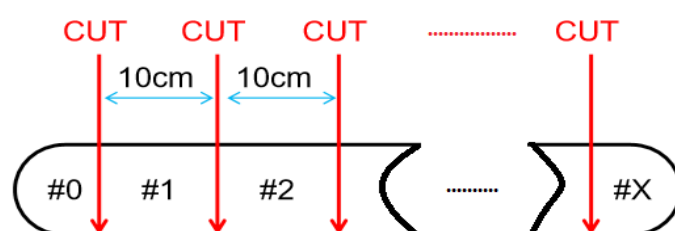
cut sample were measured. The extrusion flow at the place of cut sample can be quantitatively calculated by dividing the masses of pieces by time of printing because of the settled moving velocity of 3D printer, which can be written as:

$$f_{ni} = m_{ni} \div \frac{L_{ni}}{V_p} \quad [1]$$

where the f represents the extrusion flow of the 3D printed concrete at the cutting samples' places, the m represents the mass of cut sample, L represents the length of the cut sample. The ' n ' and ' i ' represent the minor experiment tag and cut sample tag respectively. V_p represents the velocity of the 3D printed nozzle.

2.4. Loading in material tank

Limited by equipment, it is hard to measure the mass of loading in material tank directly. Therefore, mass of loading in material tank was measured by a designed process showed in Fig. 7. At the beginning of the major experiment, a bit of the concrete was added in material tank. Then, the screw pump kept working until there is no concrete extruded, which we named this situation of material tank as 'Wet'. The 3D printed concrete was loaded in material tank and then printed. The rest of 3D printed concrete was extruded to make the material tank wet again, where a minor experiment was finished and then reloaded for the next minor experiment. The masses of the added 3D printed concrete were named as ' M_a '. And extruded concrete from the end of printing process to the



Rys. 5. Sposób cięcia strugi.

Fig. 5. Cut method.



Rys. 6. Pocięte próbki.

Fig. 6. Cut sample.

oraz grubość. Natężenie przepływu materiału podczas ekstruzji w miejscu odpowiadającym danej próbce można było ilościowo wyznaczyć, dzieląc masę poszczególnych fragmentów przez czas ich drukowania, przy założonej stałej prędkości ruchu dyszy drukarki 3D. Zależność tę można zapisać w postaci:

$$f_{ni} = m_{ni} \div \frac{L_{ni}}{V_p} \quad [1]$$

gdzie f oznacza natężenie przepływu betonu drukowanego 3D w miejscu odpowiadającym danej próbce po cięciu, m – masę próbki po przecięciu, natomiast L – długość tej próbki. Symbole ' n ' i ' i ' odnoszą się odpowiednio do oznaczenia eksperymentu cząstkowego oraz numeru próbki po cięciu. Z kolei V_p oznacza prędkość ruchu dyszy drukarki 3D.

Tablica 4 / Table 4

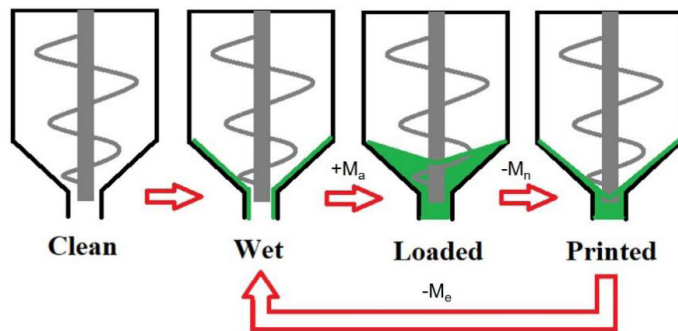
ZAŁADUNEK ZASOBNIKA I PLAN DRUKU.

LOADING AND PRINT PROJECT.

Eksperyment #1 / Experiment #1			Eksperyment #2 / Experiment #2		
C1			C2		
Próbka Sample	Załadunek Added loading, g	Długość druku Print length, mm	Próbka Sample	Załadunek Added loading, g	Długość druku Print length, mm
#A	6034	1000	#J	3960	1800
#B	4967	1500	#K	5054	1800
#C	6100	1500	#L	6014	1800
#D	5118	1500	#M	3951	1800
#E	5002	1800	#N	5007	1800
#F	4107	1800	#O	5981	1800
#G	4124	1800	#P	3989	1800
#H	5427	1800	#Q	5034	Błąd / Failure
#I	3939	1800	#R	5019	1800
-	-	-	#S	5911	1800

Uwaga: Długość wydruku została zaprogramowana w oprogramowaniu sterującym. Podczas procesu drukowania próbki nr #Q wystąpiła awaria mechaniczna, która spowodowała niepełne wykonanie wydruku tej próbki.

Note: The print length is programmed in the control software. There was a mechanical failure during the printing process of sample #Q, which led to an incomplete 3D print on sample #Q.



Rys. 7. Zmiany wypełnienia zasobnika.

Fig. 7. Change of loading in material tank.

wet was named as ' M_e '. ' M_a ' and ' M_e ' are measured and recorded. Meanwhile, the mass of 3D printed concrete sample was named as ' M_n ' and can be calculated by

$$M_n = \sum_0^X (m_{ni} + m_{loss}) \quad [2]$$

where the ' m_{ni} ' represents the mass of cut sample tagged ' i ' in print sample ' n '. The m_{loss} represents the loss mass during the cutting process, which was equal to 4 g according to the sampling measuring. M_n represent the total mass of 3D printed sample tagged ' n '.

The mass of concrete left in material tank when it is wet can be calculated by comparing the mass of initial loadings, added loading, printed loading and extruded loading, which can be written as:

$$M_{in} = M_{l(n-1)} + M_a - M_n - M_e \quad [3]$$

where the M_{in} represents the mass of 3D printed concrete left after wet situation, the $M_{l(n-1)}$ represents the mass left in material tank in the previous 3D printed process. M_{l0} was equal to 0. The masses of loadings in material tank were calculated by Equations [2] and [3].

2.4. Ładunek materiału w zasobniku

Z uwagi na ograniczenia sprzętowe, bezpośredni pomiar masy materiału znajdującego się w zbiorniku jest utrudniony. Dlatego opracowano procedurę pomiarową, przedstawioną na rys. 7. Na początku głównego eksperymentu do zasobnika wprowadzano niewielką ilość mieszanki betonowej. Następnie uruchamiano pompę ślimakową do momentu, aż wytłoczono całą mieszankę – stan ten określono jako „Wet” [stan wilgotny zbiornika]. Po tym etapie do zbiornika wprowadzano nową porcję mieszanki przeznaczonej do druku 3D, która następnie była wydrukowana zgodnie z planem eksperymentu. Po zakończeniu drukowania pozostała w zbiorniku mieszanka była ponownie wytłaczana do momentu osiągnięcia stanu „Wet”, co oznaczało zakończenie danego eksperymentu cząstkowego i przygotowanie systemu do ponownego załadunku w kolejnym teście. Masę dodanego betonu oznaczono symbolem M_a , natomiast masę betonu wytłoczonego po zakończeniu drukowania do stanu „Wet” – symbolem M_e . Obie wartości, M_a i M_e , były mierzone i rejestrowane. Jednocześnie masa próbki betonu drukowanego, oznaczona jako M_n , mogła zostać obliczona na podstawie następującej zależności:

$$M_n = \sum_0^X (m_{ni} + m_{loss}) \quad [2]$$

gdzie m_{ni} oznacza masę przeciętej próbki oznaczonej symbolem i w ramach wydrukowanej próbki o oznaczeniu n . m_{loss} odnosi się do utraty masy w trakcie procesu cięcia, która – zgodnie z pomiarami kontrolnymi – wynosiła 4 g. Z kolei M_n oznacza całkowitą masę wydrukowanej próbki oznaczonej symbolem n . Masę betonu pozostającego w zbiorniku materiałowym w stanie „Wet” można obliczyć poprzez porównanie masy początkowego załadunku, masy materiału dodanego, masy wydrukowanego materiału oraz masy materiału wytłoczonego po zakończeniu drukowania. Zależność tę można zapisać w postaci:

$$M_{in} = M_{l(n-1)} + M_a - M_n - M_e \quad [3]$$

gdzie oznacza masę betonu drukowanego 3D pozostającego w zbiorniku materiałowym po osiągnięciu stanu „Wet”, natomiast $M_{l(n-1)}$ odnosi się do masy pozostającej w zbiorniku po poprzednim procesie drukowania 3D. Wartość M_0 była równa 0. Masy za-

The project of loading added into material tank was listed in Table 4. The loadings added for one time were divide into 4000 g, 5000 g and 6000 g basically. And there is a slight fluctuation caused by limited experiment equipment.

3. Results and analysis

3.1. Fluidity of 3D printed concrete

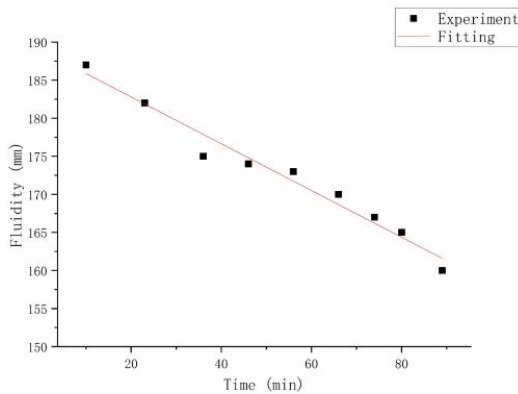
Fluidity was considered as a reliable factor to recognize the printability for 3D printed concrete. 2 types of 3D printed concrete proportions was developed for the extrusion experiment. As shown in Fig. 8, the fluidity of 3D printed concrete C1 and C2 started with 187 mm and 198 mm and end with 160 mm and 182 mm during the 90 minutes respectively. Higher fluidity might damage to the buildability of 3D printed concrete, which has no influence to the printed sample with only one-layer structure however. Meanwhile, the relationship between time and fluidity of 3D printed concrete was near linear, which can be written as:

$$FD_1 = 188.9 - 0.31T \quad [4]$$

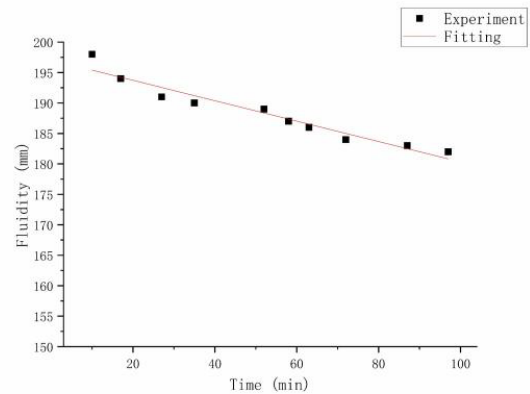
$$FD_2 = 197.1 - 0.17T \quad [5]$$

where the FD_1 and FD_2 represent the fluidity of 3D printed concrete in Experiment #1 and #2 respectively. The T represents the time from the end of mixing in a major experiment.

According to the results, the addition of retarder improved the fluidity and slow the decreasing rate of fluidity meanwhile. The initial fluidity increased by 4.3 % and the descent slope decreased by 45 %. It came from the significantly improved fraction of retarder in Experiment #2. It means that the water-binder ratio could be decreased for 3D printed concrete by adding extra retarder. However, we observed serious delay for solidification of 3D printed concrete for higher fraction of retarder. Thus, it has not been provided feasible for extra addition of retarder.



(a) Experiment #1



(b) Experiment #2

Rys. 8. Płynność mieszanek w czasie.

Fig. 8. Fluidity of 3D printed concrete vs. time.

ładunków w zbiorniku materiałowym zostały obliczone zgodnie z równaniami [2] i [3].

Projekt załadunku zasobnika przedstawiono w tablicy 4. Jednorazowe porcje załadunku wynosiły zasadniczo 4000 g, 5000 g oraz 6000 g. Niewielkie odchylenia wartości wynikały z ograniczeń zastosowanego sprzętu eksperymentalnego.

3. Wyniki i analiza

3.1. Płynność mieszanki do druku

Płynność uznano za wiarygodną miarę umożliwiającą ocenę drukowalności betonu stosowanego w technologii druku 3D. W celu przeprowadzenia eksperymentu wytłaczania opracowano dwa rodzaje mieszanek betonu do druku 3D. Jak przedstawiono na rys. 8, początkowa płynność mieszanek C1 i C2 wynosiła odpowiednio 187 mm i 198 mm, a po 90 minutach zmniejszyła się do 160 mm i 182 mm.

Większa płynność może niekorzystnie wpływać na stabilność geometryczną [ang. buildability] betonu drukowanego, choć nie ma to znaczenia w przypadku próbek o strukturze jednowarstwowej. Jednocześnie zależność pomiędzy czasem ekstruzji a płynnością mieszanki była niemal liniowa i może zostać opisana równaniami:

$$FD_1 = 188,9 - 0,31T \quad [4]$$

$$FD_2 = 197,1 - 0,17T \quad [5]$$

gdzie FD_1 i FD_2 oznaczają płynność mieszanki w eksperymentach nr 1 i nr 2, natomiast T oznacza czas liczony od zakończenia procesu mieszania w ramach danego eksperymentu głównego.

Zgodnie z uzyskanymi wynikami, dodatek opóźniacza przyczynił się do zwiększenia płynności mieszanki oraz jednocześnie spowolnił tempo jej spadku. Początkowa płynność zwiększyła się o 4,3%, natomiast nachylenie krzywej spadku zmniejszyło się o 45%. Efekt ten wynikał z istotnego zwiększenia udziału opóźniacza w eksperymencie nr 2. Oznacza to, że poprzez dodatek dodatkowej ilości opóźniacza można potencjalnie zmniejszyć stosunek woda/spoiwo w betonie do druku 3D. Jednakże zanotowano znaczne opóźnienie procesu wiązania betonu przy wyższej zawartości opóźniacza, co wskazuje, że nadmierne jego dozowanie nie jest rozwiązaniem praktycznym.

3.2. Wyniki badania wydruku 3D

3.2.1. Przepływ podczas ekstruzji

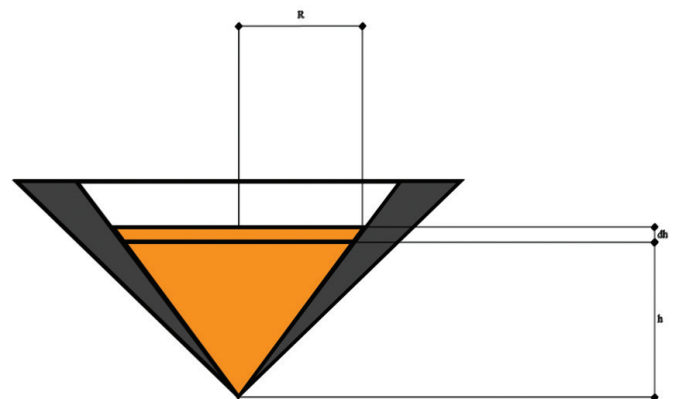
Przepływy mieszanek betonowych stosowanych w druku 3D w eksperymentach pomocniczych przedstawiono na rys. 9. Czas na osi poziomej odpowiadał długości trwania danego eksperymentu. Na podstawie krzywych zależności przepływu od czasu stwierdzono, że przepływ mieszanki do druku 3D początkowo wzrastał, osiągając wartość maksymalną, po czym następował jego spadek. W szczególności, dla większości próbek w eksperymencie nr 1 oraz próbki S zależność między przepływem a czasem druku

3.2. 3D Print experiment result

3.2.1. Extrusion flow

The extrusion flows of 3D printed concrete in the minor experiments are shown in Fig. 9. The time is the duration of the minor experiment. According to the flow-time curves, the flow of 3D printed concrete increased to the maximum value and then decreased. Specially, the relationship between flow and printing time satisfied quadratic relationship for most of the samples in Experiment #1 and sample #S. But there was a liner relationship in most of samples in Experiment #2. Specially, the boundary between liner and quadratic relationship was not obvious. A mathematic method was used to discuss the problem.

As shown in Fig. 10, the extrusion process was simplified as a process of the level decreasing in the material tank. The material tank was simplified as a cone. The grey area represents the loadings left in the material tank after printing. The yellow area represents the 3D printed concrete which was printed during the 3D printing process. The area setting was based on phenomenon observed in experiment. 'h' is the distance from the upper surface of yellow area to the bottom of the material tank. 2 hypotheses were proposed. First, there is no movement in the grey area during the printing process. Second, the upper surface of yellow area kept levelled during the 3D printing process.



Rys. 10. Rozkład materiału w zasobniku.

Fig. 10. Loadings distribution in material tank.

The decrease of the mass of loading in material tank is equal to the material extruded, which can be written as

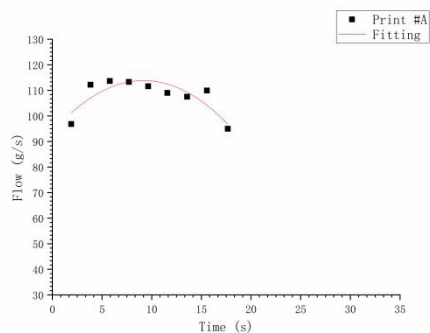
$$dM = f dt \quad [6]$$

Where the M represents the mass of loading in yellow area, f represents the extrusion flow, t represents the printing time in the minor experiment.

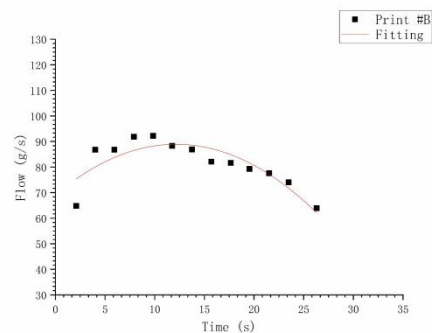
The extrusion flow of screw pump is related to the pressure on nozzle tagged as P and the effective length of screw tooth tagged as L (40). The relationship can be written as

$$f = K_1 PL \quad [7]$$

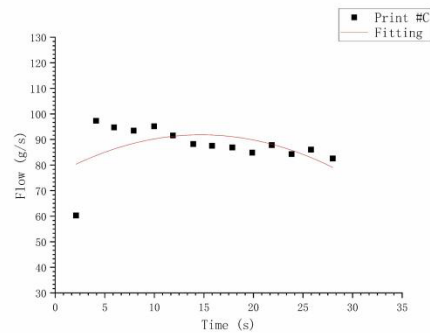
For the structure of the 3D printer, the P and L are proportional to the h [40]. Thus, the equation can be rewritten as



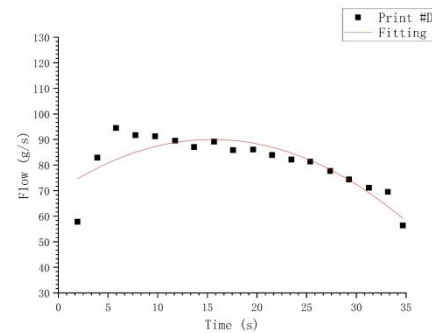
A



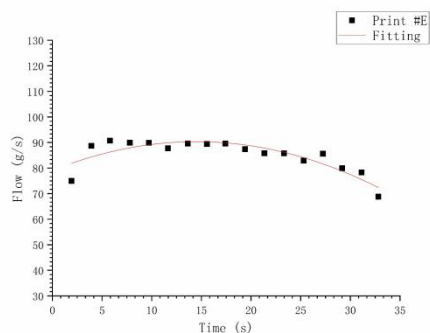
B



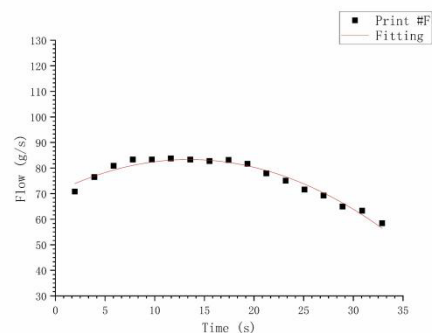
C



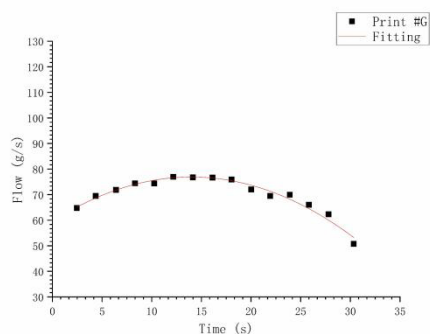
D



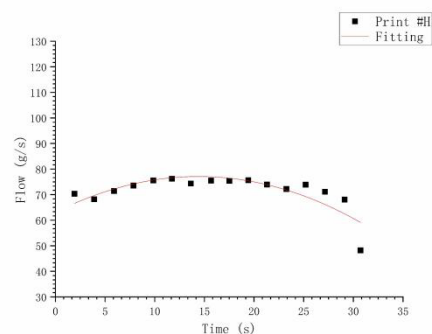
E



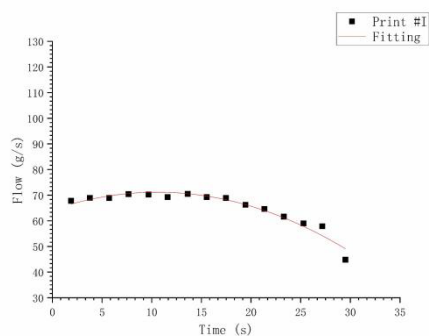
F



G

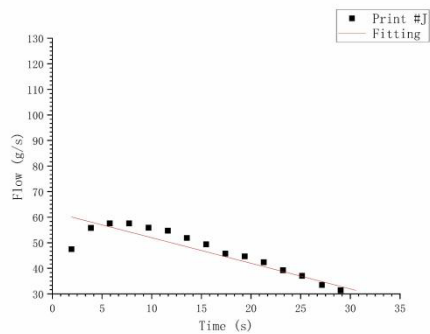


H

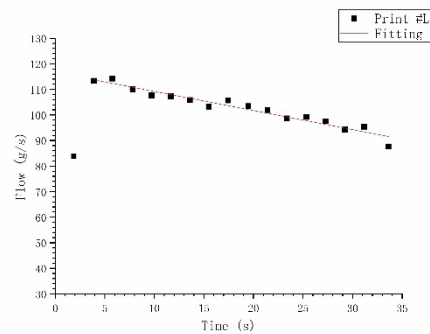


I

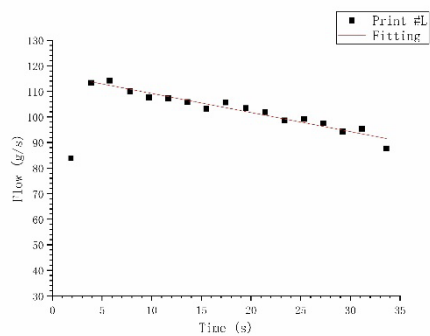
(a) Experiment #1



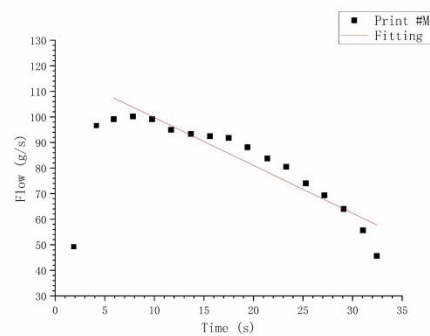
J



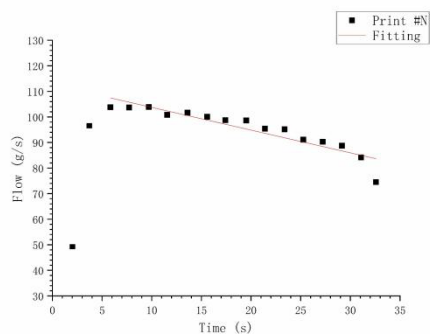
K



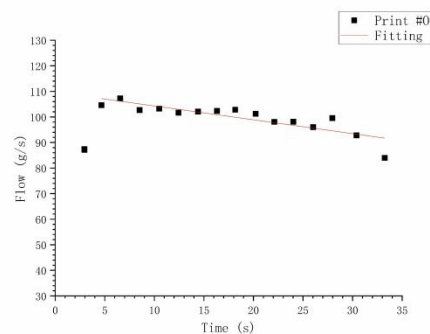
L



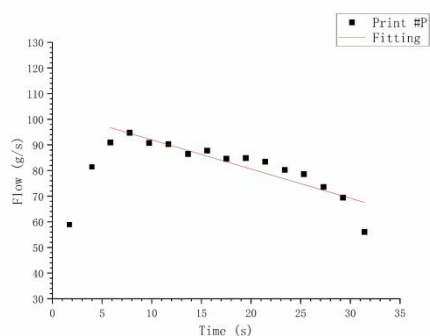
M



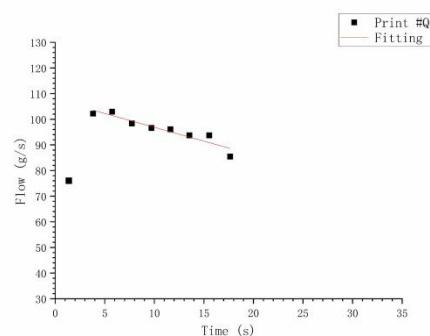
N



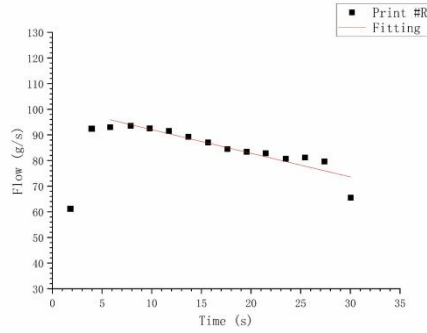
O



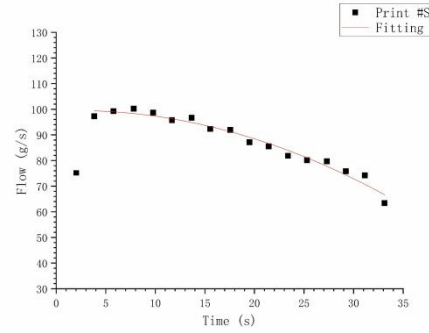
P



Q



R



S

(b) Experiment #2

Rys. 9. Krzywe przepływ-czas.

Fig. 9. Flow-Time curve.

miała charakter kwadratowy. Natomiast w przypadku większości próbek z eksperymentu nr 2 zależność ta była liniowa. Granica pomiędzy zależnością liniową a kwadratową nie była jednak wyraźnie zaznaczona. W celu dokładniejszej analizy tego zjawiska zastosowano metodę matematyczną.

Jak pokazano na rys. 10, proces ekstruzji został uproszczony do zjawiska obniżania się poziomu materiału w zasobniku, który przyjęto w uproszczeniu jako stożek. Szary obszar przedstawia ilość mieszanki pozostałej w zbiorniku po zakończeniu procesu druku, natomiast żółty obszar odpowiada objętości mieszanki do druku 3D, która została wytłoczona podczas drukowania. Układ tych obszarów został oparty na zjawiskach zanotowanych w trakcie eksperymentu. Symbol „ h ” oznacza odległość od górnej powierzchni żółtego obszaru do dna zbiornika materiału. W celu uproszczenia analizy przyjęto dwa założenia: po pierwsze, w szarej strefie nie zachodzi przemieszczenie materiału w trakcie drukowania; po drugie, górna powierzchnia żółtej strefy pozostaje pozioma w czasie całego procesu druku 3D.

Ubytek masy materiału w zbiorniku jest równy ilości materiału wytłoczonego, co można zapisać równaniem:

$$dM = f dt \quad [6]$$

gdzie:

M – masa materiału w żółtym obszarze,

f – natężenie przepływu (wydajność ekstruzji),

t – czas drukowania w eksperymencie pomocniczym.

Natężenie przepływu pompy śrubowej zależy od ciśnienia w dyszy, oznaczonego jako P , oraz efektywnej długości zwoju śruby, oznaczonej jako $L(40)$. Zależność tę można wyrazić równaniem:

$$f = K_1 PL \quad [7]$$

Ze względu na konstrukcję drukarki 3D, zarówno P , jak i L , są proporcjonalne do h [40]. W związku z tym równanie można przekształcić do postaci:

$$f = K_2 h^2 \quad [8]$$

$$f = K_2 h^2 \quad [8]$$

The mass of the yellow area can be written as

$$M = \frac{1}{3} \pi \rho h R^2 \quad [9]$$

Where the ρ represents the density of 3D printed concrete, R represents the cone radius of the yellow area. Thus, Equation [6] can be rewritten as

$$\frac{1}{3} \pi \rho h R^2 dh = K_2 h^2 dt \quad [10]$$

Meanwhile, the R satisfy

$$R = K_3 h \quad [11]$$

Thus, the relationship between h and t can be written as

$$K_4 h^2 dh = h^2 dt \quad [12]$$

An equation integrated from Equation [12] can be written as

$$h = K_5 t + C_1 \quad [13]$$

Substituted the Equation [13] into Equation [8], the relationship between t and f can be written as

$$f = K_6 t^2 + K_7 t + C_2 \quad [14]$$

where the K_1 to K_7 are unknown constant.

Therefore, the relationship between time and flow is quadratic basically. The high fluidity might make the 3D printed concrete in grey area moveable, especially at the second half of 3D printed process as the level of yellow area was significantly decreased. Some of the concrete in grey area was extruded at the later process of 3D printing, which increased the extrusion flow at the later time points. Therefore, it shows like liner relationship between print time and extrusion flow on 3D printed process with high fluidity.

A factor ‘average flow’ was proposed to characterize the extrusion flow in a minor experiment. The first and last cut samples were not taken into calculation for their low calculation accuracy. The equation for calculating the average flow can be written as

Masa materiału w żółtym obszarze może być wyrażona jako:

$$M = \frac{1}{3} \pi \rho h R^2 \quad [9]$$

gdzie:

ρ – gęstość betonu do druku 3D,

R – promień stożka odpowiadającego żółtemu obszarowi.

Podstawiając to wyrażenie do równania [6], otrzymujemy:

$$1 \frac{1}{3} \pi \rho h R^2 dh = K_2 h^2 dt \quad [10]$$

Jednocześnie promień R spełnia zależność:

$$R = K_3 h \quad [11]$$

Wówczas zależność między h a t można zapisać jako:

$$K_4 h^2 dh = h^2 dt \quad [12]$$

Całkując równanie [12], otrzymuje się:

$$h = K_5 t + C_1 \quad [13]$$

Podstawiając równanie [13] do równania [8], zależność między czasem t a przepływem f przyjmuje postać:

$$f = K_6 t^2 + K_7 t + C_2 \quad [14]$$

gdzie $K_1 - K_7$ są stałymi.

Zatem zależność pomiędzy czasem a przepływem ma zasadniczo charakter kwadratowy. Wysoka płynność mieszanki może jednak powodować, że beton w szarej strefie staje się podatny na przemieszczenie, szczególnie w drugiej połowie procesu druku 3D, gdy poziom żółtej strefy ulega znacznemu obniżeniu. W rezultacie część betonu z szarego obszaru mogła zostać wytłoczona w późniejszej fazie drukowania, co prowadziło do zwiększenia natężenia przepływu w końcowych etapach procesu. W efekcie, w przypadku mieszanki o dużej płynności, zależność pomiędzy czasem drukowania a przepływem ekstruzji może przyjmować pozornie liniowy charakter.

W celu opisu przepływu podczas eksperymentu pomocniczego wprowadzono współczynnik „średniego przepływu” [ang. average flow]. Pierwsze i ostatnie odcięte próbki nie zostały uwzględnione w obliczeniach ze względu na ich małą dokładność pomiarową. Równanie służące do obliczania średniego przepływu można zapisać jako:

$$FA_n = \frac{\sum_{i=1}^{x-1} (m_{ni} \times l_{ni})}{\sum_{i=1}^{x-1} l_{ni}} \quad [15]$$

gdzie:

FA_n – średni przepływ dla próbek n ,

m_{ni} – masa odciętego fragmentu oznaczonego jako i w próbce n ,

l_{ni} – długość odciętego fragmentu.

Ponieważ prędkość przesuwu dyszy drukującej pozostaje stała, ważenie względem długości jest równoważne ważeniu względem czasu.

$$FA_n = \frac{\sum_{i=1}^{x-1} (m_{ni} \times l_{ni})}{\sum_{i=1}^{x-1} l_{ni}} \quad [15]$$

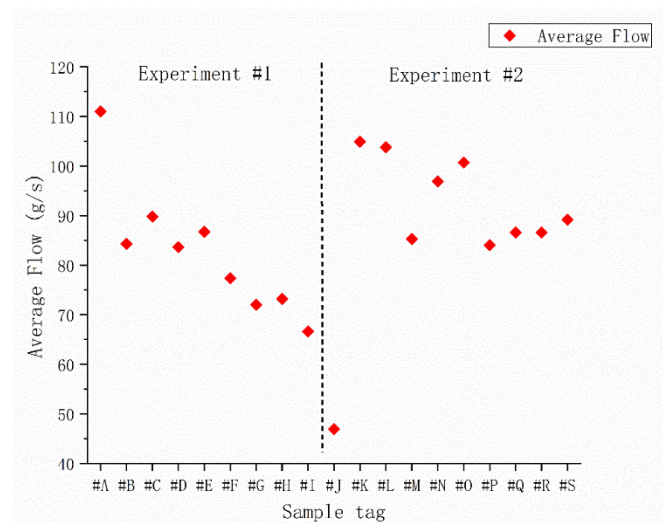
where the ' F_n ' represent the average flow of sample ' n ', ' m_{ni} ' represents the mass of cut sample tagged ' i ' in print sample ' n '. ' l_{ni} ' represents the length of the cut sample. As the velocity of print nozzle is constant, the flow weighting on length equal to the flow weight on time.

By weighting on time, the average flow is able to describe the flow in a minor experiment, which is shown in Fig. 11. The relationship of average flow, fluidity and loadings in material tanks will be discussed in Chapter 3.3.

3.2.2. Loadings in material tank

The change of loading in material tank during the extrusion experiment was shown in Fig. 12. The loading in material tank was changed by 3 actions, including printing, adding loading and extruding to make the material tank wet. These behaviors were tagged as L [for adding loading], P [for 3D printing], and B [for being wet] respectively. In Fig. 12, the data point represented the mass of loading in material tank after finishing the behavior tagged. At the end of the whole 3D print process, the material tank was wet again and tagged as 'end'. In experiment #1, the time from stage P1 to the stage P9 was 79 min. In experiment #2, the time from stage P1 to the stage P10 was 87 min. Because of the higher fluidity of 3D printed concrete in Experiment #2, the loading left in wet material tank was less than that of Experiment #1 significantly. Moreover, based on similar reason from fluidity, the loading left in wet material tank was increased after several samples printed in one experiment. Thus, if determined the 'left rate' as dividing the mass of inactive loading to the mass of all loading, there would be a highly related negative relationship between left rate and fluidity of 3D printed concrete.

As discussed in Chapter 3.2.1, the 3D loadings in material tank can be divide into 2 parts including the grey and yellow area. The



Rys. 11. Średni przepływ mieszanki.

Fig. 11. Average flow of the mix.

Dzięki temu uśrednieniu w czasie, współczynnik średniego przepływu umożliwia ilościowy opis charakteru przepływu w danym eksperymencie pomocniczym, co przedstawiono na rys. 11. Zależność pomiędzy średnim przepływem, płynnością a monomery AMPS, HPA i DEGVE skutecznie uczestniczyły w procesie polimeryzacji.

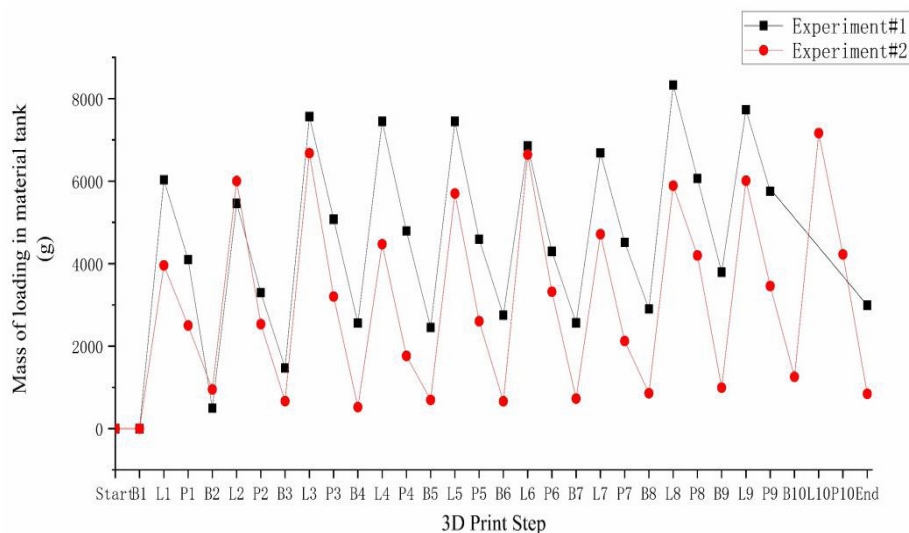
3.2.2. Załadunek zasobnika

Zmiany masy materiału w zasobniku podczas eksperymentu ekstruzyjnego przedstawiono na rys. 12. Masa załadunku w zbiorniku ulegała zmianom w wyniku trzech rodzajów działań: drukowania, dodawania materiału oraz wytłaczania w celu zwilżenia wnętrza zbiornika. Czynności te oznaczono odpowiednio symbolami: **L** [dodanie materiału – z ang. *Loading*], **P** [druk 3D – z ang. *Printing*] oraz **B** [zwilżenie zbiornika – a ang. *being wet*]. Na rys. 12 punkty danych przedstawiają masę materiału w zbiorniku po zakończeniu danego etapu oznaczonego jednym z powyższych symboli. Po zakończeniu całego procesu druku 3D zbiornik został ponownie zwilżony i oznaczony jako „end”. W eksperymencie nr 1 czas trwania od etapu P1 do etapu P9 wynosił 79 minut, natomiast w eksperymencie nr 2 – od etapu P1 do P10 – 87 minut. Ze względu na większą płynność mieszanki betonowej w eksperymencie nr 2, ilość materiału pozostającego w zwilżonym zbiorniku po zakończeniu drukowania była istotnie mniejsza niż w eksperymencie nr 1. Ponadto, z podobnych przyczyn związanych z płynnością, masa materiału pozostającego w zwilżonym zbiorniku stopniowo wzrastała po wydrukowaniu kolejnych próbek w ramach tego samego eksperymentu.

Jeśli zdefiniować współczynnik *pozostałości* [ang. *left rate*] jako stosunek masy nieaktywnego materiału do całkowitej masy załadunku, można stwierdzić istnienie silnie ujemnej zależności między tym współczynnikiem a płynnością betonu stosowanego w druku 3D.

Jak omówiono w rozdziale 3.2.1, załadunek w zbiorniku materiałowym można podzielić na dwie części: szarą strefę i żółtą strefę. Materiał znajdujący się w szarej strefie określono jako nieaktywny załadunek, natomiast w żółtej – jako aktywny załadunek. Po zakończeniu procesu druku 3D w zbiorniku pozostaje zwykle jedynie materiał nieaktywny. Choć nieaktywny załadunek nie bierze bezpośredniego udziału w drukowaniu, zajmuje on przestrzeń w zbiorniku, powodując podniesienie górnej powierzchni obszaru aktywnego. W rezultacie prowadzi to pośrednio do zwiększenia natężenia przepływu podczas ekstruzji.

Jednakże podczas eksperymentu zanotowano pewne szczególne zjawiska. Jak pokazano na rys. 12, masa materiału pozostającego w zbiorniku po zakończeniu procesu drukowania uległa zmniejszeniu w przypadku próbek: #F [nr 6, eksperyment nr 1], #I [nr 9, eksperyment nr 1], #K [nr 2, eksperyment nr 2], #L [nr 3, eksperyment



Rys. 12. Masa ładunku w zasobniku.

Fig. 12. Mass of loading in material tank.

loading in grey area was named as inactive loading, and the loading in yellow grey area was named as active loading. There is only inactive loading left after 3D print process normally. Although the inactive loading was not printed in 3D print experiment, it took the space of material tank which increased the upper surface of active area. Thus, the extrusion flow was increased indirectly from the inactive loading.

However, we observed some special phenomenon during the 3D print experiment. As show in Fig. 12, the loading left in material tank decreased after 3D print experiment in sample #F [NO.6, Experiment #1], #I [NO.9, Experiment #1], #K [NO.2, Experiment #2], #L [NO.3, Experiment #2], #N [NO.5, Experiment #1] and #S [NO.10, Experiment #1]. We named this phenomenon as 'collapse'. The inactive loading came from the stacking structure at the bottom surface of cone material tank. It was not a stable structure, especially on the process making the material tank wet. The process needs to lift up the nozzle and move the nozzle out of 3D print platform. Thus, the inactive structure might collapse and make the loading active in the process. Meanwhile, as said in Chapter 3.2.1, the collapse is more possible to happened after active loading printed. Therefore, the collapse usually happened at the end of 3D printed process or wetting process, which led to the insignificantly effective to extrusion flow in the minor experiment. However, it is still worth attention on continues 3D printing process, for example industry 3D printing.

Meanwhile, we believed the exist of the contrary phenomenon named as 'critical loading'. 'Critical loading' means the added loading was placed at the edge of material tank. When the added loading was concentrated at the edge, the part of inactive loading was active for the uneven distribution of stress and the dynamic impact on inactive loading. Moreover, the activation effect was happened at the early process of 3D print, which has significant effect on extrusion flow. The critical loading disappeared quickly as the structure was return to stable structure. We determined that there was critical loading phenomenon happened on samples

nr 2], #N [nr 5, eksperyment nr 1] oraz #S [nr 10, eksperyment nr 1]. Zjawisko to określono mianem „kolapsu”. Nieaktywny załadunek powstaje w wyniku gromadzenia się materiału u podstawy stożkowego zbiornika, co tworzy niestabilną strukturę, szczególnie podczas procesu zwilżania zbiornika. W tym etapie konieczne jest uniesienie dyszy oraz jej przemieszczenie poza platformę roboczą drukarki. W rezultacie niestabilna struktura nieaktywnego załadunku może ulec zapadnięciu, powodując jego aktywację. Jak wspomniano w rozdziale 3.2.1, zjawisko kolapsu jest bardziej prawdopodobne po zakończeniu drukowania materiału aktywnego. Z tego względu kolaps zwykle występuje pod koniec procesu drukowania lub podczas etapu zwilżania, przez co jego wpływ na przepływ w eksperymencie pomocniczym jest nieznaczny. Niemniej jednak zjawisko to wymaga uwagi w przypadku procesów druku ciągłego, takich jak druk przemysłowy.

Równocześnie zidentyfikowano zjawisko o charakterze przeciwnym, określone jako „krytyczny załadunek”. Termin ten odnosi się do sytuacji, gdy dodany materiał został umieszczony przy krawędzi zbiornika. W takim przypadku, ze względu na nierównomierny rozkład naprężeń oraz dynamiczne oddziaływania, część materiału nieaktywnego mogła zostać chwilowo aktywowana. Co istotne, efekt ten występował we wczesnej fazie procesu druku, wywierając znaczący wpływ na przepływ ekstruzyjny. Struktura krytycznego załadunku szybko jednak zanikała, gdy układ materiału powracał do stanu stabilnego. Stwierdzono wystąpienie zjawiska krytycznego załadunku w próbkach #P oraz #M, których krzywe zależności przepływu od czasu miały charakter kwadratowy, w przeciwieństwie do liniowych krzywych obserwowanych dla próbek o podobnej płynności. Zanik zjawiska krytycznego załadunku powodował dodatkowy spadek natężenia przepływu w późniejszej fazie drukowania w próbkach #P i #Q, co skutkowało pojawieniem się kwadratowej charakterystyki krzywych przepływu w funkcji czasu.

W związku z tym, niektóre wyniki dotyczące przepływu zostały wyłączone z analizy relacji między przepływem, płynnością a załadunkiem.

Z dyskusji wyłączono:

- próbki #A i #J, ze względu na niestabilne warunki zwilżania [pierwsze próbki drukowane w eksperymentach nr 1 i nr 2],
- próbki #M i #P, z uwagi na wystąpienie zjawiska krytycznego załadunku,
- próbki #B i #Q, które miały zbyt krótką długość druku do wiarygodnego obliczenia średniego przepływu — jednak wartości ich maksymalnych przepływów uznano za miarodajne.

3.2.3. Wymiary próbek po ekstruzji

Wymiary próbek po procesie ekstruzji, obejmujące długość, grubość oraz szerokość, zostały zmierzone przy użyciu suwmiarki. W celu oceny stabilności kształtu zdefiniowano parametr S , określony jako stała wymiarowa:

#P and #M, as their flow-time curves showed quadratic characteristic compared with the liner characteristic with similar fluidity. The disappearance of critical loading led to the extra decrease on extrusion flow at the later printing process on samples #P and #Q, which led to the quadratic characteristic of flow-time curves.

Hence, some extrusion flows will be out from discussion of flow-fluidity-loading relationship. samples #A and #J were out of discussion for their unreliable situation on wet as they are the first samples printed in Experiment #1 and #2. Samples #M and #P were out of discussion for critical loading phenomenon. Sample #B and #Q were out of discussion on average flow for their too short print length, but their maximum flows were still reliable.

3.2.3. Size of extruded samples

The sizes of extruded samples after cutting, including lengths, thicknesses and widths, were measured by a caliper. A parameter S named size constant was defined as:

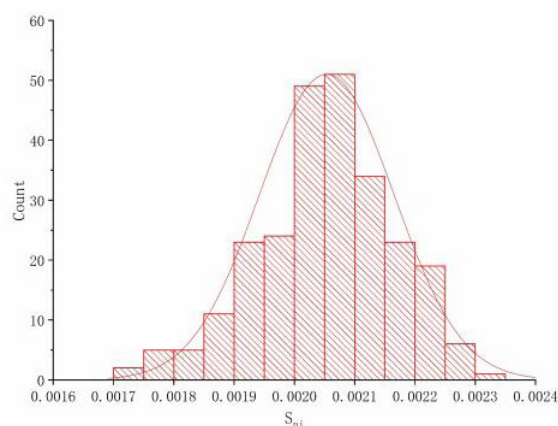
$$S_{ni} = \frac{f_{ni}}{a \times b \times V_p} = \frac{f_{ni} \times t_{ni}}{a \times b \times L} \quad [17]$$

where the f_{ni} is the flow on the cut sample 'i' in sample '#n'. And the a and b represent the width and thickness of cut sample. V_p is the nozzle velocity, L is the length of cut sample, t_{ni} is the print time of cut sample. Therefore, the S_{ni} was near the density of 3D printed concrete if we simplified the shape of cut sample as a cuboid. Thus, the numerical stability of S_{ni} could represent the shape stability of 3D printed concrete.

The parameters of all cut samples were calculated and showed in Fig. 13, which satisfy the normal distribution. It recommends that the shape of 3D printed concrete is stable. Moreover, it can be concluded that the widths of 3D printed concrete can be estimated because of the settable thickness of the printed samples and the extrusion flow predicted.

3.3. Relationship of fluidity, loadings and flow

The average flows FA_n and the max flows FM_n in a print experiment for all 3D print experiment were listed in Table 5. To balance the



Rys. 13. Rozkład wartości S_{ni} .

Fig. 13 Distribution of S_{ni} .

$$S_{ni} = \frac{f_{ni}}{a \times b \times V_p} = \frac{f_{ni} \times t_{ni}}{a \times b \times L} \quad [17]$$

gdzie:

f_{ni} – natężenie przepływu odpowiadające fragmentowi i próbki n ,

a i b – szerokość i grubość odciętej próbki,

V_p – prędkość przesuwu dyszy,

L – długość odciętego fragmentu,

t_{ni} – czas drukowania danego fragmentu.

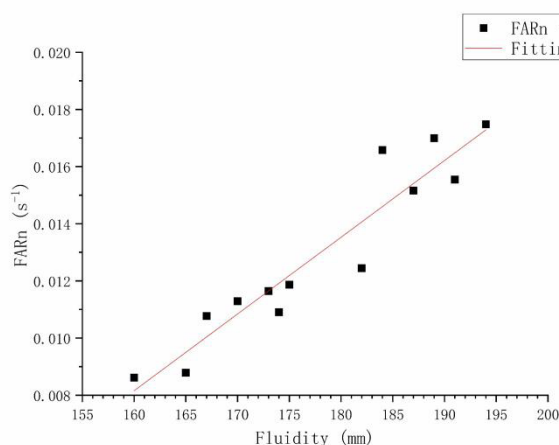
Jeśli przyjąć uproszczony kształt próbki w postaci prostopadłościanu, wówczas wartość S_{ni} odpowiada w przybliżeniu gęstości mieszanki do druku 3D. Tym samym stabilność numeryczna parametru S_{ni} może być traktowana jako wskaźnik stabilności kształtu wytłaczanego betonu.

Wartości parametru S_{ni} dla wszystkich odciętych próbek zostały obliczone i przedstawione na rys. 13. Wyniki te wykazują rozkład normalny, co wskazuje na stabilność kształtu próbek drukowanych w technologii 3D. Ponadto można stwierdzić, że szerokości elementów drukowanych można oszacować na podstawie zadanej grubości próbek oraz przewidywanego natężenia przepływu podczas ekstruzji.

3.3. Zależność pomiędzy płynnością, ładunkiem i przepływem

Średnie wartości przepływu FA_n oraz maksymalne przepływy FM_n uzyskane w poszczególnych eksperymentach druku 3D zestawiono w tablicy 5. W celu zrównoważenia wpływu początkowej ilości ładunku, wprowadzono pojęcie przepływu odniesionego do jednostki masy początkowego ładunku. Obliczenia te opisano następującymi równaniami [18] i [19]:

$$FAR_n = FA_n / MI_n \quad [18]$$



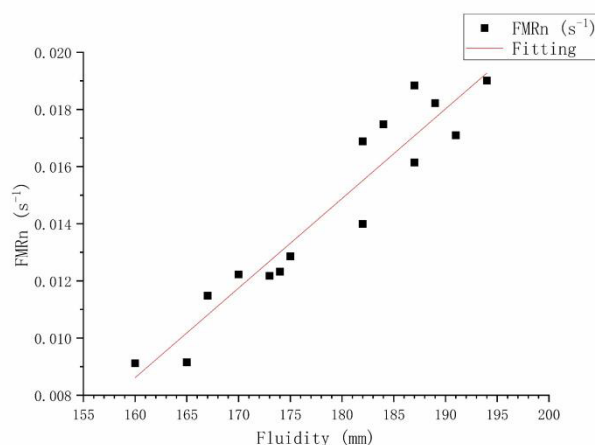
(a) FAR_n -fluidity

effect of initial loading, the flows per unit mass of initial loading can be calculated by equations which can be written as:

$$FAR_n = FA_n / MI_n \quad [18]$$

$$FMR_n = FM_n / MI_n \quad [19]$$

where the FAR_n and FMR_n are the average flow per unit mass of initial loading and max flow per unit mass of initial loading on



b) FMR_n -fluidity

Rys. 14. Zależność pomiędzy płynnością oraz przepływem.

Fig. 14. Relationship between fluidity and flow.

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI DOŚWIADCZENIA Z DRUKIEM.

PRINT EXPERIMENT RESULT.

Próbka Sample Tag	Średni przepływ Average flow, g/s	Maksymalny przepływ Max flow, g/s	Płynność Fluidity, mm	Masa ładunku Mass of Initial Loading, g
#A	[111.02]	[113.66]	187	6034
#B	[84.31]	92.22	182	5462
#C	89.81	97.33	175	7568
#D	83.67	94.52	174	7673
#E	86.75	90.74	173	7452
#F	77.39	83.79	170	6854
#G	72.01	76.78	167	6686
#H	73.19	76.22	165	8329
#I	66.62	70.50	160	7732
#J	[46.93]	[57.58]	198	3960
#K	104.92	114.11	194	6003
#L	103.81	114.20	191	6679
#M	[85.28]	[100.21]	190	4472
#N	96.91	103.89	189	5702
#O	100.73	107.26	187	6644
#P	[84.04]	[94.74]	186	4716
#Q	[97.67]	102.97	184	5891
#R	86.59	93.54	183	6013
#S	89.18	100.25	182	7165

Uwaga: Dane ujęte w nawiasy zostały wyłączone z analizy ze względu na ich niską wiarygodność.

Note: The data parenthesized were out of discussion for their unreliability.

$$FMR_n = FM_n / MI_n \quad [19]$$

gdzie:

FAR_n – średni przepływ przypadający na jednostkę masy początkowego załadunku dla próbki n ,

FMR_n – maksymalny przepływ przypadający na jednostkę masy początkowego załadunku dla próbki n ,

MI_n – masa początkowego załadunku w danym eksperymencie druku 3D.

Zgodnie z ustaleniami przedstawionymi w rozdziale 3.2.2, próbki **#A**, **#J**, **#M** oraz **#P** zostały wyłączone z analizy ze względu na opisane wcześniej zjawiska. Ponadto próbki **#B** i **#Q** pominięto przy analizie średniego przepływu z powodu nienormalnej [zbyt krótkiej] długości wydrukowanych elementów.

Jak pokazano na rys. 14, przepływ odniesiony do jednostki masy początkowego załadunku wykazuje zależność liniową względem płynności mieszanki, co można zapisać jako:

$$FAR_n = 2,68 \cdot 10^{-4} FD - 0,035 \quad [20]$$

$$FMR_n = 3,14 \cdot 10^{-4} FD - 0,041 \quad [21]$$

gdzie FD oznacza płynność betonu stosowanego w technologii druku 3D.

Punkty przecięcia z osią X dla równań [20] i [21] wyniosły 130,6 mm. Punkty te odpowiadają granicznej płynności mieszanki betonowej, przy której możliwa jest jeszcze jej ekstruzja. Zbliżone wartości potwierdzają wiarygodność zastosowanej metody dopasowania.

Tymczasem równanie [17] można przekształcić do postaci:

$$a \times b = \frac{FR_n}{S \times V_p} \quad [22]$$

gdzie:

S – parametr wymiarowy,

FR_n – przepływ betonu do druku 3D,

a i b – szerokość i grubość wytłaczanego filamentu betonowego,

V_p – prędkość przesuwu dyszy.

Ponieważ grubość filamentu betonu drukowanego w technologii 3D może być ustalana w projekcie, jego szerokość można oszacować na podstawie równania [22].

4. Wskazówki dotyczące druku 3D z betonu

W niniejszym badaniu przeanalizowano zależności pomiędzy przepływem, załadunkiem a płynnością betonu stosowanego w technologii druku 3D. Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące zalecenia dotyczące projektowania, doboru materiałów, strategii załadunku oraz dalszych kierunków badań:

sample #'n' respectively, the MI_n is the mass of initial loading for 3D print experiment. Specially, as the discussed in Chapter 3.2.2, the flows of samples **#A**, **#J**, **#M**, and **#P** were out of discussion. Meanwhile, the samples **#B** and **#Q** were out of discussion for average flow as their abnormal length of printed sample.

As shown in Fig. 14, the flow per unit mass of initial loading and fluidity satisfied liner relationship, which can be written as:

$$FAR_n = 2,68 \cdot 10^{-4} FD - 0,035 \quad [20]$$

$$FMR_n = 3,14 \cdot 10^{-4} FD - 0,041 \quad [21]$$

where the FD represents the fluidity of 3D printed concrete.

The intercepts on X axis for 2 equations were 130.6. The intercept on X axis represent the able-extruded limited fluidity of 3D printed concrete. Therefore, the closing results prove their reliability of fitting method. Meanwhile, Equation [17] can be transformed as:

$$a \times b = \frac{FR_n}{S \times V_p} \quad [22]$$

where the S is the size parameter, FR_n is the flow of 3D printed concrete, a and b are width and thickness of 3D printed concrete filament, V_p is the nozzle velocity. As the thickness of 3D printed concrete filament can be set by filament design, therefore the width of 3D printed concrete can be estimated.

4. Some advices for 3D printed concrete

In this study, the relationship of flow, loadings and fluidity were discussed on 3D printed concrete. Here are some advices on design, material, loading strategy and further research on 3D printed concrete.

(1) Inactive loading is a potential problem on 3D printed process. The space of material tank will be occupied by inactive loading, which will enlarge the uncertainty of extrusion flow. The collapse and critical loading phenomena will increase the flow suddenly, which will damage the artistic quality and stability of 3D printed concrete. Both of the phenomenon come from the over stack of inactive loading. Material tank with larger taper of bottom on 3D printer could be a reliable measure for reducing inactive loading.

(2) According to the Equations [20] and [21], the extrusion flow was influenced by fluidity of 3D printed concrete. Thus, the control on fluidity is an important problem for 3D printed concrete. The additive with the ability to keep the fluidity stable during the whole printing process is suitable for 3D printed concrete. Meanwhile, the adjustment on loading for variable fluidity is necessary. For laboratory 3D printer, the loading in material tank should be increased as the fluidity decreased. For industry 3D printer, the supply of 3D printed concrete by mortar pump should be adjustable and tightly monitoring especially on huge 3D printed sample for its long printing process.

(1) Nieaktywny załadunek stanowi potencjalny problem w procesie druku 3D. Materiał zalegający w zbiorniku zajmuje jego objętość, zwiększając niepewność w zakresie natężenia przepływu. Zjawiska kolapsu oraz krytycznego załadunku mogą powodować nagły wzrost przepływu, co negatywnie wpływa na estetykę i stabilność wydruku betonowego. Oba te zjawiska wynikają z nadmiernego gromadzenia się nieaktywnego materiału. Jednym z możliwych rozwiązań ograniczających ten problem może być zastosowanie zbiornika materiałowego o większym kącie nachylenia stożkowego dna w drukarce 3D.

(2) Z równań [20] i [21] wynika, że przepływ ekstruzyjny zależy od płynności mieszanki betonowej. Dlatego kontrola płynności jest kluczowym zagadnieniem w technologii druku 3D z betonu. Dodatki zapewniające stabilność płynności w trakcie całego procesu drukowania są szczególnie korzystne. Niezbędna jest również odpowiednia regulacja załadunku w zależności od zmian płynności:

- w przypadku drukarek laboratoryjnych – masa materiału w zbiorniku powinna być zwiększana w miarę spadku płynności,
- w przypadku drukarek przemysłowych – podawanie betonu przez pompę powinno być regulowane i ściśle monitorowane, zwłaszcza przy dużych elementach wymagających długiego czasu drukowania.

(3) Strategia dynamicznego równoważenia procesu dodawania materiału jest skutecznym podejściem w eksperymentach druku 3D. Kluczową technologią w dalszym rozwoju druku betonowego, zwłaszcza o charakterze artystycznym, będzie monitorowanie przepływu w czasie rzeczywistym. Równie istotne jest monitorowanie masy materiału w zbiorniku, aby ograniczać ryzyko wystąpienia zjawisk *kolapsu* oraz *krytycznego załadunku*, szczególnie w drukarkach wymagających dużej precyzji drukowania.

(4) W dalszych badaniach należy rozważyć wpływ dodatków, takich jak włókna czy środki zagęszczające [np. HMPC], powszechnie stosowane w betonach do druku 3D. Warto zbadać, czy wpływają one bezpośrednio na przepływ ekstruzyjny, czy też jedynie pośrednio poprzez zmianę płynności mieszanki.

5. Wnioski

Zależność pomiędzy przepływem wytłaczania a czasem drukowania ma charakter kwadratowy, gdy płynność mieszanki do druku 3D spełnia wymagania procesu drukowania. Wraz ze wzrostem płynności zależność ta zbliża się do liniowej.

Ładunek mieszanki w zasobniku można podzielić na ładunek nieaktywny oraz ładunek aktywny. Część nieaktywna mieszanki wynika z jej małej płynności i pozostaje w zbiorniku po zakończeniu druku. Jednakże zaobserwowano dwa szczególne zjawiska – „*zapaść*” oraz „*obciążenie krytyczne*” – które mogą aktywować obciążenie i wpływać na stabilność przepływu wytłaczania. Zjawiska te wynikają z niestabilnej struktury ładunku mieszanki do druku w zasobniku materiałowym.

(3) The dynamic balance on adding-loading strategy is credible in 3D print experiment. The flow monitor will be a key technology for further 3D printing especially on artistic 3D print concrete. The monitor on loading in material tank to resistance the risk from ‘collapse’ and ‘critical loading’ is also important especially in 3D printer with demand of high print accuracy.

(4) For further research, the extrusion flow might be influenced by addition of fibers or thicken agent, for example HMPC, which are commonly applied in 3D printed concrete. It is a valuable question that whether it is effective directly or just influence the extrusion flow by fluidity.

5. Conclusions

The relationship between extrusion flow and printing time was quadratic when the fluidity of 3D printed concrete satisfied the demand of 3D printing. The relationship between extrusion flow and printing time approached to liner with increased fluidity.

The loadings in material tank could be divided into inactive loadings and active loadings. The inactive loadings came from the lower fluidity and left in material tank after 3D print finished. However, there are 2 special phenomenon named ‘collapse’ and ‘critical loading’ which could active the loading and influence the stability of extrusion flow. The phenomenon came from the unstable structure of 3D printed concrete in material tank.

There is a liner relationship between the fluidity and the extrusion flow per unit mass of initial loading in material tank. The average flow and maximum flow satisfied this relationship both.

Size parameter was proposed to describe the shape stability of 3D printed concrete filament. The width of 3D printed concrete could be estimated with predicted extrusion flow and settled printed velocity filament thickness.

Acknowledgement

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China [52078253, 51678308].

Data statement

Some or all data, models, or code that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Występuje liniowa zależność pomiędzy płynnością a przepływem wytłaczania przypadającym na jednostkę masy początkowego obciążenia w zbiorniku materiałowym. Zależność tę spełniają zarówno średni, jak i maksymalny przepływ.

Wprowadzono parametr wymiarowy opisujący stabilność kształtu wytłaczanego pasma mieszanki do druku 3D. Szerokość włókna może być oszacowana na podstawie przewidywanego przepływu wytłaczania oraz ustalonej prędkości druku i grubości włókna.

Podziękowania

Praca została sfinansowana przez Narodową Fundację Nauk Przyrodniczych Chin [National Natural Science Foundation of China] w ramach grantów nr 52078253 oraz 51678308.

Oświadczenie dotyczące danych

Niektóre lub wszystkie dane, modele oraz kody źródłowe wspierające wyniki przedstawione w niniejszym badaniu są dostępne u autora korespondencyjnego na uzasadnioną prośbę.

Literatura/ References

1. S. Dai, H. Zhu, M. Zhai, Q. Wu, Z. Yin, H. Qian, S. Hua, Stability of steel slag as fine aggregate and its application in 3D printing materials. *Constr. Build. Mater.* **299**, 123938 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123938>
2. J. Kruger, A. Plessis, G. Zijl, An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete. *Addit. Manuf.* **37**, 101740 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101740>
3. M.V. Tran, Y.T.H. Cu, C.V.H. Le, Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing. *J. Build. Eng.* **44**, 103400 (2021).
4. Y. Weng, M. Li, D. Zhang, M.J. Tan, S. Qian, Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process. *Cem. Concr. Res.* **143**, 106386 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103400>
5. A. Singh, Q. Liu, J. Xiao, Q. Lyu, Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction. *Constr. Build. Mater.* **323**, 126616 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126616>
6. H. Kloft, H.W. Krauss, N. Hack, E. Herrmann, S. Neudecker, P.A. Varady, D. Lowke, Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP). *Cem. Concr. Res.* **134**, 106078 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106078>
7. D. Yang, H. Zhang, J. Wu, et al., Fibre flow and void formation in 3D printing of short-fibre reinforced thermoplastic composites: An experimental benchmark exercise. *Addit. Manuf.* **37**, 101686 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101686>
8. J. Ye, C. Cui, J. Yu, et al., Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete. *Constr. Build. Mater.* **281**, 122586 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122586>
9. L.G. Li, B.F. Xiao, Z.Q. Fang, et al., Feasibility of glass/basalt fiber reinforced seawater coral sand mortar for 3D printing. *Addit. Manuf.* **37**, 101684 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101684>

10. J. Zhou, J. Lai, L. Du, K. Wu, S. Dong, Effect of directionally distributed steel fiber on static and dynamic properties of 3D printed cementitious composite. *Constr. Build. Mater.* **318**, 125948 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125948>
11. A.R. Arunothayan, B. Nematollahi, R. Ranade, et al., Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing. *Cem. Concr. Res.* **143**, 106384 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106384>
12. B. Zhu, J. Pan, Z. Zhou, J. Cai, Mechanical properties of engineered cementitious composites beams fabricated by extrusion-based 3D printing. *Eng. Struct.* **238**, 112201 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112201>
13. J. Xiao, Z. Lv, Z. Duan, S. Hou, Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations. *J. Build. Eng.* **51**, 104282 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104282>
14. G. Ji, J. Xiao, P. Zhi, Y.C. Wu, N. Han, Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates. *Constr. Build. Mater.* **325**, 126740 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126740>
15. V. Markin, M. Krause, J. Otto, C. Schröfl, V. Mechtcherine, 3D-printing with foam concrete: From material design and testing to application and sustainability. *J. Build. Eng.* **43**, 102870 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102870>
16. J. Ye, C. Cui, J. Yu, K. Yu, J. Xiao, Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber. *Compos. Part B Eng.* **211**, 108639 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108639>
17. V. Mechtcherine, V.N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto, M. Krause, Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Autom. Constr.* **107**, 102933 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
18. L. Wang, H. Ma, Z. Li, G. Ma, J. Guan, Cementitious composites blending with high belite sulfoaluminate and medium-heat Portland cements for largescale 3D printing. *Addit. Manuf.* **46**, 102189 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102189>
19. S. Ramakrishnan, S. Muthukrishnan, J. Sanjayan, K. Pasupathy, Concrete 3D printing of lightweight elements using hollow-core extrusion of filaments. *Cem. Concr. Compos.* **123**, 104220 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104220>
20. Y.W.D. Tay, M.Y. Li, M.J. Tan, Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures. *J. Mater. Process. Technol.* **271**, 261-270 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.007>
21. C. Zhang, Z. Hou, C. Chen, et al., Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content. *Cem. Concr. Compos.* **104**, 103406 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103406>
22. G. Ma, T. Hu, F. Wang, et al., Magnesium phosphate cement for powder-based 3D concrete printing: Systematic evaluation and optimization of printability and printing quality. *Cem. Concr. Compos.* **139**, 105000 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105000>
23. P. Rajeev, A. Ramesh, S. Navaratnam, et al., Using Fibre recovered from face mask waste to improve printability in 3D concrete printing. *Cem. Concr. Compos.* **139**, 105047 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105047>

24. X. Sun, Q. Wang, H. Wang, et al., Influence of multi-walled nanotubes on the fresh and hardened properties of a 3D printing PVA mortar ink. *Constr. Build. Mater.* **247**, 118590 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118590>
25. Q. Yu, B. Zhu, X. Li, et al., Investigation of the rheological and mechanical properties of 3D printed eco-friendly concrete with steel slag. *J. Build. Eng.* **72**, 106621 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106621>
26. D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, V. Mercuri, 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Constr. Build. Mater.* **165**, 218-231 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018>
27. G. Vantighem, W. De Corte, E. Shakour, O. Amir, 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Autom. Constr.* **112**, 103084 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103084>
28. B. Zhu, B. Nematollahi, J. Pan, Y. Zhang, Z. Zhou, Y. Zhang, 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction. *Cem. Concr. Compos.* **121**, 104039 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104039>
29. C.B. Costanzi, Z.Y. Ahmed, H.R. Schipper, F.P. Bos, U. Knaack, R.J.M. Wolfs, 3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure. *Autom. Constr.* **94**, 395-404 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.013>
30. P. Carneau, R. Mesnil, N. Roussel, O. Baverel, Additive manufacturing of cantilever - From masonry to concrete 3D printing. *Autom. Constr.* **116**, 103184 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103184>
31. C. Liu, X. Wang, Y. Chen, C. Zhang, L. Ma, Z. Deng, C. Chen, Y. Zhang, J. Pan, N. Banthia, Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete. *Cem. Concr. Compos.* **122**, 104158 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104158>
32. V. Nguyen-Van, H. Nguyen-Xuan, B. Panda, P. Tran, 3D concrete printing modelling of thin-walled structures. *Structures* **39**, 496-511 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.049>
33. K. El Abbaoui, I. Al Korachi, M. El Jai, B. Seta, M.T. Mollah, 3D concrete printing using computational fluid dynamics: Modeling of material extrusion with slip boundaries. *J. Manuf. Process.* **118**, 448-459 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.042>
34. Y. Wei, S. Han, Z. Chen, J. Lu, et al., Numerical simulation of 3D concrete printing derived from printer head and printing process. *J. Build. Eng.* **88**, 109241 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109241>
35. J. Reinold, V.N. Nerella, V. Mechtcherine, G. Meschke, Extrusion process simulation and layer shape prediction during 3D-concrete-printing using the Particle Finite Element Method. *Autom. Constr.* **136**, 104173 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104173>
36. O. Ahi, Ö. Ertunç, Z.B. Bundur, Ö. Bebek, Automated flow rate control of extrusion for 3D concrete printing incorporating rheological parameters. *Autom. Constr.* **160**, 105319 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105319>
37. Chinese National Testing Standard, Common Portland cement, GB175-2007.
38. Chinese National Testing Standard, Test method for fluidity of cement mortar, GBT2419-2005.
39. J.L. White, H. Potente, Screw extrusion. Chemical Industry Press, Beijing, 2005.