

Auxetisch cementgebonden composiet

Xu, Y.; Schlangen, E.; Šavija, B.

Publication date

2020

Document Version

Final published version

Published in

Cement: vakblad voor de betonwereld

Citation (APA)

Xu, Y., Schlangen, E., & Šavija, B. (2020). Auxetisch cementgebonden composiet. *Cement: vakblad voor de betonwereld*, 6 (2020), 52-57. <https://www.cementonline.nl/auxetisch-cementgebonden-composiet>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

Auxetisch cementgebonden composiet

Onderzoek naar auxetisch gedrag van cementgebonden cellulaire composieten onder éénassige druk en cyclische belasting

Door toepassing van 3D-printtechnieken kunnen cementgebonden materialen worden ontwikkeld met een bijzondere, niet-homogene interne structuur. Deze materialen kunnen auxetisch gedrag vertonen: ze zetten zijdelings uit (worden dikker) wanneer ze worden uitgerekt en ze trekken zijdelings samen als ze worden samengeperst. Aan de TU Delft is onderzoek verricht naar het mechanische gedrag van deze materialen.

BRON

Dit artikel is een vertaalde bewerking van de paper *Auxetic Behavior of Cementitious Cellular Composites under Uniaxial Compression and Cyclic Loading* van Yading Xu, Erik Schlangen en Branko Šavija (allen TU Delft, fac. CiTG). De paper is geschreven voor de RILEM-conferentie *Digital Concrete 2020*. Deze conferentie is georganiseerd door de TU Eindhoven en vond digitaal plaats van 6 tot 9 juli 2020. De bewerking is gedaan door ir. Jacques Linssen (Aeneas Media / redactie *Cement*).

Mechanische eigenschappen van composieten worden beïnvloed zowel door mechanische eigenschappen van de samenstellende fasen als door de manier waarop deze fasen geometrisch zijn verdeeld over het materiaal. Dankzij de 3D-printtechniek is het ook voor cementgebonden materialen mogelijk deze ruimtelijke verdeling aan te passen en een op maat gemaakte mesostructuur te realiseren. Met het juiste ontwerp van de materiaalmix kunnen daarmee ongekende mechanische eigenschappen worden bereikt, zoals breuktaaiheid [6, 7], hoge relatieve sterkte [8, 9] en auxetisch gedrag. Auxetische materialen kenmerken zich door een negatieve poisson-verhouding.

Eerder al is er gerapporteerd over cementgebonden cellulaire composieten (CCC's) vervaardigd met 3D-prints, met een negatieve poisson-verhouding [10, 11]. Daarbij is echter de invloed van de structuur en materiaaleigenschappen op het gedrag onder druk niet volledig onderzocht.

Aan de TU Delft worden nu de mechanische eigenschappen van dit materiaal getest onder éénassige druk. De ductiliteit van het materiaal is bepaald aan de hand van een vierpuntsbuigproef. Ook het vermoeingsgedrag is meegenomen.

In deze studie is uitgegaan van een celstructuur vergelijkbaar met de eerdere studies [10, 11]. Voor het maken van proefstukken zijn mallen vervaardigd met 3D-printtechniek. Daarbij zijn verschillende

structuren toegepast met verschillende mengselsamenstellingen.

Onderzoeksopzet

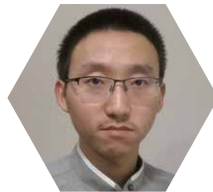
In dit onderzoek zijn drie soorten geometrieën gebruikt: P0, P25 en P50. P0 had symmetrische cellen, P25 en P50 asymmetrische ovaalvormige cellen met variërende maten. De vorm en de afmetingen van de proefstukken zijn getoond in figuur 1 en tabel 1.

Storten en nabehandelen Voor het vervaardigen van de proefstukken zijn dezelfde technieken gebruikt als in [10, 11]: mallen zijn geprint door een commerciële op *fused deposition modeling* (FDM) gebaseerde 3D-printer. Voor de CCC's is gebruikgemaakt van mortel met én zonder kunststofvezels (PVA-vezels, PolyVinyl-Alcohol). De samenstelling staat in tabel 2. Voor het mengsel is portlandcement (CEM I 42,5 N), vliegas (FA), zand (0,125 µm ~ 0,25 µm) en VMA, een viscositeitsmodificerend middel gebruikt. Deze werden gewogen en 4 minuten gemengd met behulp van een Hobart-machine. Daarna werden superplastificeerder (SP) en water toegevoegd, gevolgd door weer 2 minuten mengen. Vervolgens werden vezels toegevoegd en werd er nog 2 minuten gemengd. De gemengde verse mortel werd in de mallen gegoten en gedurende 40 seconden getrild.

De proefstukken werden bedekt met plastic folie en bewaard bij kamertemperatuur. Na één dag werden ze uit de mal gehaald en bewaard in geacclimatiseerde omstandigheden (20 °C, 96% RV) tot 28 dagen oud. De proefstukken zijn getest op eenassige druk bij 28 dagen. Er zijn ook balkjes gemaakt met piepschuimmallen en getest met een vierpuntsbuigproef op 28 dagen.

Mechanische proeven Alle mechanische proeven zijn uitgevoerd met behulp van een hydraulische pers INSTRON 8872 met een belastingsnelheid van 0,01 mm/s. Tijdens de proeven werden de belasting en verplaatsing gemeten en geregistreerd. Er zijn foto's gemaakt met een camera die vóór het proefstuk is geplaatst.

auteurs



YADING XU

TU Delft, fac. CiTG



ERIK SCHLANGEN

TU Delft, fac. CiTG



BRANKO ŠAVIJA

TU Delft, fac. CiTG

Voor de vierpuntsbuigproef is de verplaatsing in het midden van het proefstuk gemeten. Een weergave van de proefopstellingen staat in figuur 2.

Resultaten

Ductiliteit Zoals eerder vermeld, worden de mechanische eigenschappen van cellulaire materialen bepaald door zowel de materiaaleigenschappen van de toegepaste materialen als de geometrie van de structuur. Daarom helpen gekoppelde analyses van de materiaaleigenschappen en de structuur van de CCC's om het mechanisme van het auxetische gedrag te begrijpen.

De buigkrommen van gewone mortel en vezelversterkte mortel zijn weergegeven in figuur 3. Zoals verwacht vertoont de gewone mortel een nogal brosse respons: een snelle daling na de piekbelasting, wat wijst op snel bezwijken van het belaste proefstuk. Omdat dezelfde cementmatrix is gebruikt, hebben gewone mortel en vezelversterkte mortel een vergelijkbare scheursterkte bij de eerste piek. Echter na de eerste piek vertoont de vezelversterkte mortel een ductiele respons: in plaats van snel bezwijken begint de spanning te stijgen, als gevolg van het scheuroverbruggende gedrag van de PVA-vezels. Zo wordt een tweede piek bereikt. Vanwege deze tweede piek is de ductiliteit van het vezelversterkte materiaal veel hoger dan van de gewone mortel. Hierdoor kan de celstructuur auxetisch gedrag vertonen, zoals hierna wordt toegelicht.

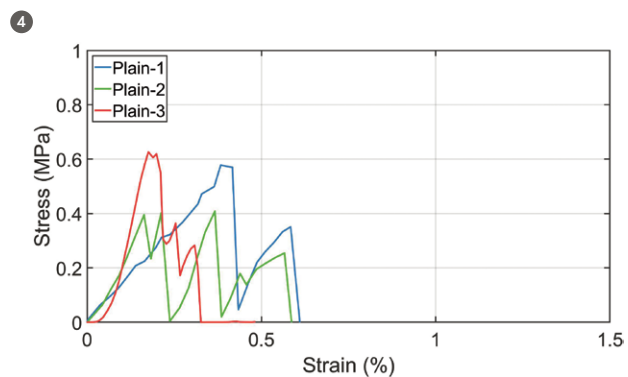
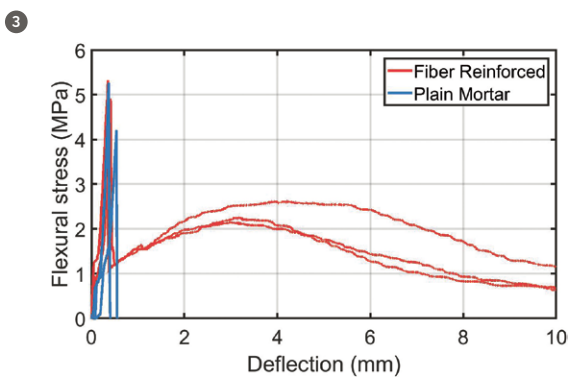
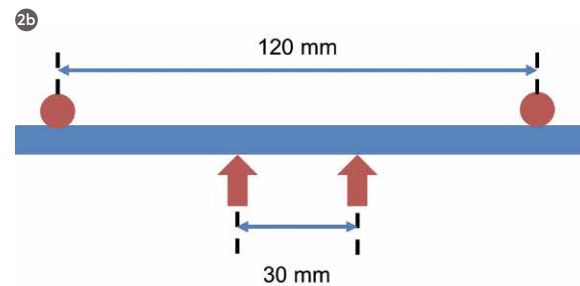
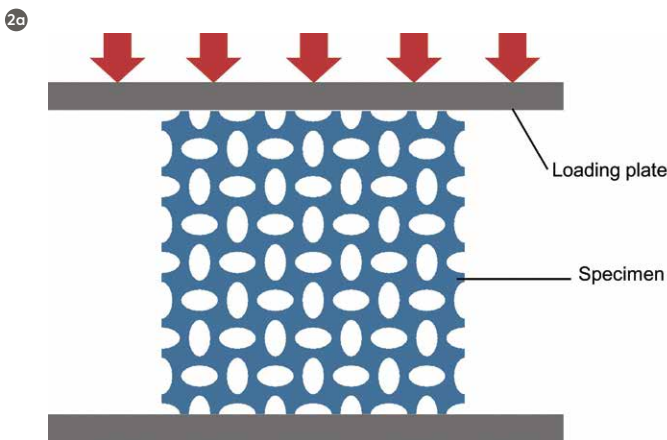
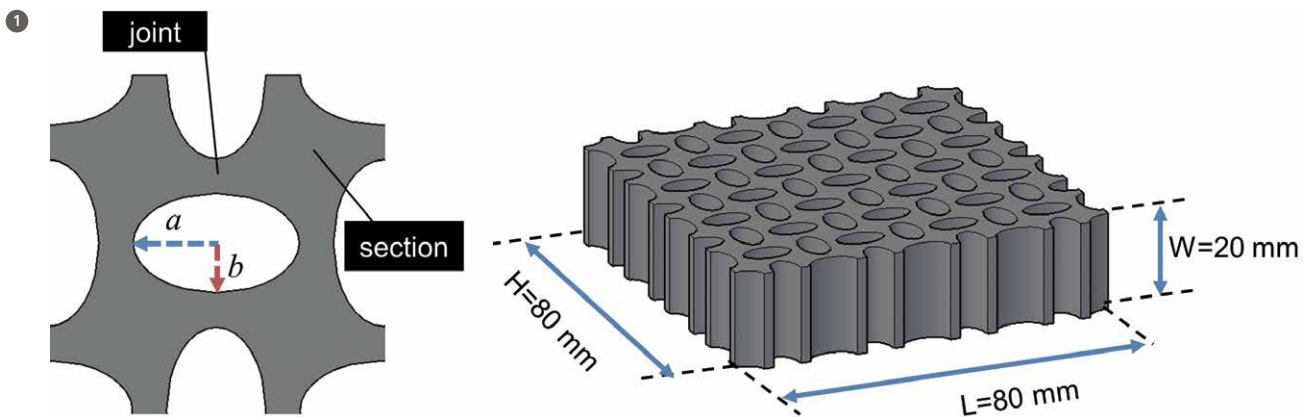
Gedrag onder druk Figuur 4 toont het spannings-rekdiagram van celstructuur P25 met gewone mortel, zonder PVA-vezels. Tijdens de drukproeven werd brosse breuk waargenomen: nadat de piekbelasting was bereikt, ontstonden snel microscheurtjes die uiteindelijk leidden tot bezwijken. Dit is te zien aan een scherpe daling in de curve. Vanwege de celstructuur ontwikkelden zich in sommige gevallen scheurtjes laag voor laag door de celstructuur heen, zodat meerdere scherpe dalingen in de curven zijn waar te nemen. →

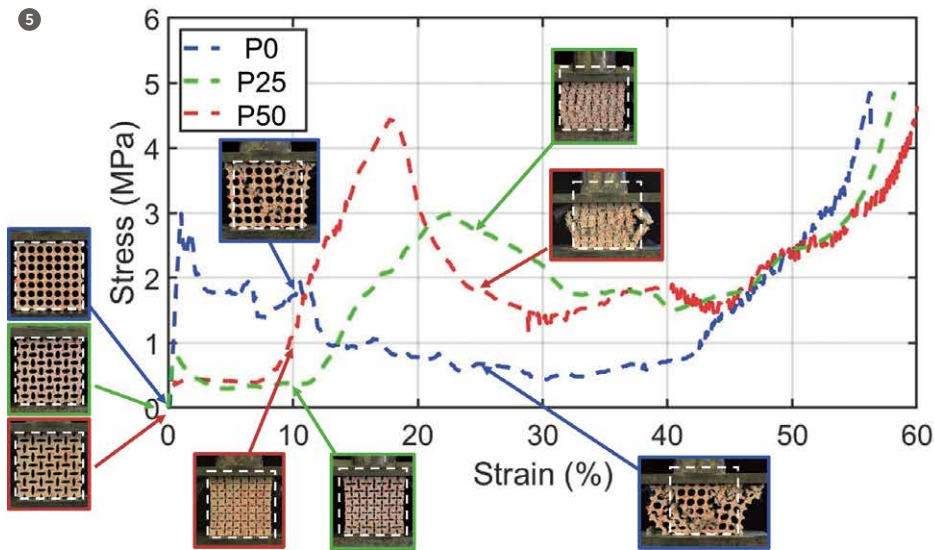
Tabel 1 Proefstukken met verschillende ontwerpparameters

proefstukken	as 'a' [mm]	as 'b' [mm]	volume [cm ³]
P0	4	4	63,7
P25	5	3	67,7
P50	6	2	79,8

Tabel 2 Materiaalsamenstelling [kg/m³]

CEM I 42.5 N	FA	zand	water	SP	VA	(PVA-vezel)
471	556	385	428	0,86	0,3	(-25,6)





Bij toepassing van vezelversterkte mortel, is een meer ductiel bezwijkmechanisme waar te nemen in het spanning-rekdiagram (fig. 5, P25). Dit diagram kan grofweg worden verdeeld in drie fasen.

In de eerste fase (van ongeveer 0% rek tot 11% rek), is de mechanische respons onder druk vergelijkbaar met die van traditionele cementgebonden materialen: een stijgende tak bij toenemende spanning. Nadat de piekbelasting werd bereikt (bij ongeveer 1 MPa), begonnen microscheurtjes te ontstaan in de 'balkjes' tussen de cellen (*joints* in fig. 1). Omdat vezelversterkte mortel werd gebruikt, was er sprake van scheuroverbrugging. Hierdoor nam de scheurwijdte langzaam toe in plaats dat snel bezwijken optrad. Als gevolg hiervan begonnen de 'knopen' tussen de cellen (*sections* in fig. 1) te draaien. Ondertussen was laterale contractie zichtbaar: in dit stadium werd auxetisch gedrag bereikt.

In de tweede fase (van 11% tot 40%) werd de celstructuur min of meer opgeheven en verdicht tot een 'massief' volume. Zoals te zien is in figuur 5, werd de holle ellipsstructuur samengedrukt. Hierdoor vond er meer contractie in laterale richting plaats bij toenemende druk. In de spanning-rekrelatie werd hier een strain-hardeningeffect waargenomen. Een soortgelijk strain-hardeninggedrag is gevonden bij andere auxetische materialen [12, 13].

Na de tweede piek (bij ongeveer 3 MPa) begonnen zich scheuren te vertonen in de knopen tussen de cellen, die zich zelf ontwikkelen tot afschuifvlakken. Dit is te zien aan een afnemende tak na de tweede piek in de spannings-rekrelatie. In die zin lijkt deze tweede piek sterk op het gedrag van een gewoon vezelversterkt materiaal.

De derde fase (na 40% rek) laat een snelle spanningstoename zien, omdat het materiaal sterker is samengedrukt.

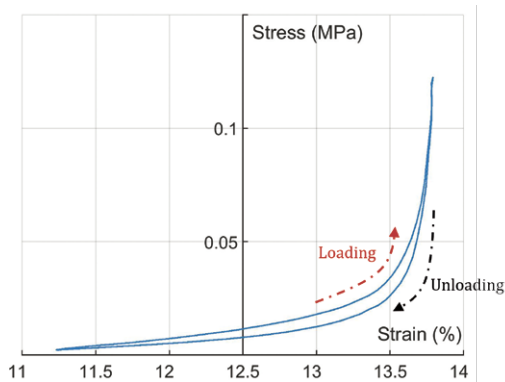
Net als de hypothese in [11] wordt het auxetische gedrag van het CCC sterk beïnvloed door de materiaaleigenschappen en door de asymmetrie van de celstructuur. In deze studie is dezelfde samenstelling gebruikt als in [11] en is de invloed van het materiaal geëlimineerd. Daarom kan de invloed van de geometrie op het vervormingsgedrag duidelijk worden bepaald.

Te zien is dat het proefstuk P0 geen auxetisch gedrag vertoont vanwege de symmetrie in de celstructuur. P50 vertoont vergelijkbaar auxetisch gedrag als P25. Ook de spannings-rekrelatie, inclusief de drie fasen, is P50 vergelijkbaar met P25. Wel is de tweede piek bij P50 duidelijk hoger omdat het volume met $79,4 \text{ cm}^3$ groter is dan dat van P25 ($67,8 \text{ cm}^3$).

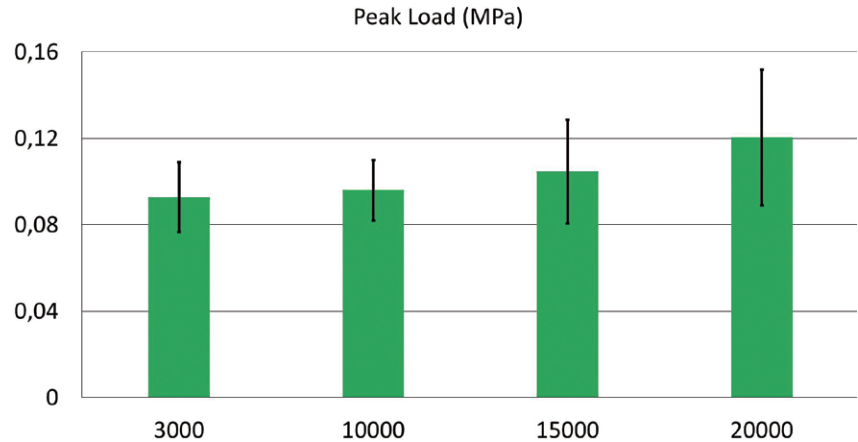
Voor P0 was het vervormingsgedrag vergelijkbaar met dat van gewoon vezelversterkt materiaal, namelijk één piek en →

Als gevolg van langzame toename in de scheurvorming begonnen de 'knopen' tussen de cellen te draaien

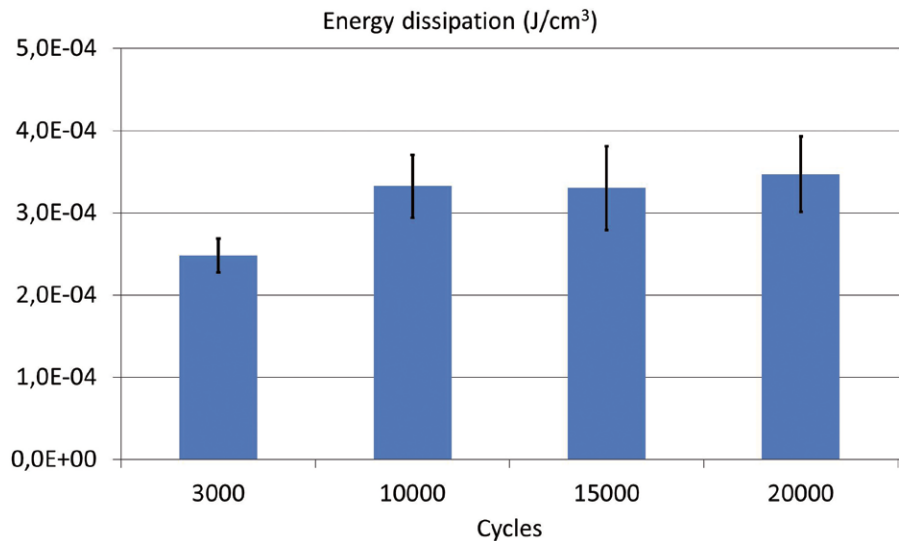
6



7



8



Het auxetische gedrag wordt sterk beïnvloed door de materiaaleigenschappen en de asymmetrie van de celstructuur

een lange afnemende tak als gevolg van de ductiliteit van het materiaal.

Dymanische belasting De spannings-rekrelatie van P25 onder dynamische belasting (3000 cycli) is weergegeven in figuur 6. Er wordt typisch hysteresegedrag gevonden in de relatie (van 11,25% tot 13,75% rek): de tak van het belasten en ontlasten komen niet volledig overeen.

Opvallend is dat na 3000 cycli de maximale belasting langzaam toeneemt bij een toename van het aantal cycli (van 0,1 MPa tot 0,14 MPa, fig. 7). Een vergelijkbare trend is te zien in de gedissipeerde energie in een cyclus (berekend door het gebied omgeven door de belasting- en ontlastingtak in iedere

cyclus, gedeeld door het volume van het proefstuk, fig. 8).

De toename van het scheuroverbruggende gedrag van de vezels en de taaiheid is het gevolg van slijp-hardeninggedrag, als de vezels worden uitgetrokken uit de cementmatrix (zoals ook is aangegeven in eerdere studies [15,16]). Dit slijp-hardeninggedrag kan worden verklaard uit het fenomeen fibrillatie van de PVA-vezel: bij spanning in de vezels wordt het oppervlakte ruwer door het uittrekken van moleculen van het PVA-polymeer. En hierdoor neemt de wrijving tussen de PVA-vezel en de cementmatrix toe. Deze fibrillatie is sterker bij dynamische belasting en de toename in de wrijving kan de reden zijn van de toename

De maximale belasting neemt langzaam toe bij een toename van het aantal cycli

van de maximale belasting en van de energiedissipatie na 3000 cycli.

In het algemeen heeft het CCC een pseudo-elastische van 2,5% omkeerbare rek, zelfs tot 20.000 cycli, wat betekent dat CCC een veelbelovend materiaal is als het gaat om energiedissipatie.

Conclusie

In het onderzoek zijn cementgebonden cellulaire composieten (CCC's) met auxetisch gedrag ontwikkeld, gebruikmakend van 3D-printtechnieken. De mechanische eigenschappen van CCC's zijn onderzocht onder eenassige druk en dynamische belasting, alsmede de invloed hierop van de materiaaleigenschappen en ontwerpparameters. Uit het onderzoek zijn diverse conclusies te trekken:

→ Zowel de materiaaleigenschappen als de geometrie van de celstructuur bepalen het gedrag onder druk. Hierbij is auxetisch gedrag mogelijk, afhankelijk van het

scheuroverbruggende gedrag van de vezels en de asymmetrie in de celstructuur.

→ Auxetisch gedrag is zichtbaar bij proefstukken P25 en P50. Deze proefstukken vertonen strain-hardeninggedrag onder druk: na een eerste piek ontstaat een tweede piek.

→ Voor P25 wordt een pseudo-elastisch gedrag gevonden tussen de 11,25% en de 13,75% rek (in totaal 2,5% omkeerbare vervorming) bij 20.000 cycli. P25 biedt daarmee uitstekende mogelijkheden tot energiedissipatie.

→ Het vermoeiingsgedrag van P25 onder dynamische belasting vertoont herstelbare schade. Van 3000 tot 20.000 cycli neemt de maximale belasting in elke cyclus toe, als gevolg van de fibrillatie van de PVA-vezels. De toename van de maximale belasting en energiedissipatie duidt op een interessant toepassingsgebied voor trillingsbestendig materiaal. ●

LITERATUUR

- 1 Zhang, M.-H., J. Islam, and S. Peethampanan, Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. *Cement and Concrete Composites* 34(5), 2012: p. 650-662.
- 2 Qiao, M., et al., Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete. *Cement and Concrete Research* 100, 2017: p. 40-46.
- 3 Özcan, F. and M. Emin Koç, Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials* 187, 2018: p. 382-393.
- 4 Xu, Y., Schlangen, E. and Šavija, B., Creating strain hardening cementitious composites (SHCCs) through use of additively manufactured polymeric meshes as reinforcement. 2019.
- 5 Xu, Y. and Šavija B., Development of strain hardening cementitious composite (SHCC) reinforced with 3D printed polymeric reinforcement: Mechanical properties. *Composites Part B: Engineering* 174, 2019: p. 107011.
- 6 Fleck, N.A., V.S. Deshpande, and M.F. Ashby, Micro-architected materials: past, present and future. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 466(2121), 2010: p. 2495-2516.
- 7 Fleck, N.A. and X. Qiu, The damage tolerance of elastic-brittle, two-dimensional isotropic lattices. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 55(3), 2007: p. 562-588.
- 8 Dong, L., V. Deshpande, and H. Wadley, Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures. *International Journal of Solids and Structures* 60-61, 2015: p. 107-124.
- 9 Messner, M.C., Optimal lattice-structured materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 96, 2016: p. 162-183.
- 10 Xu, Y., Šavija, B. and Schlangen, E., Compression Behaviors Of Cementitious Cellular Composites With Negative Poisson's Ratio. in *FramCos*. 2019. France.
- 11 Xu, Y., et al., Cementitious cellular composites with auxetic behavior. *Cement and Concrete Composites* 111, 2020: p. 103624.
- 12 Meena, K. and S. Singamneni, A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects. *Materials & Design* 173, 2019: p. 107779.
- 13 Yang, H., B. Wang, and L. Ma, Mechanical properties of 3D double-U auxetic structures. *International Journal of Solids and Structures*, 2019.
- 14 Xu, Y., et al., Cementitious cellular composites with auxetic behavior. Mechanical behavior of Auxetic Cementitious Cellular Composites (CCCs) Under Uniaxial Compression: Experiments and Simulations. (submitted to *Materials & Design*).
- 15 Li, V.C., From micromechanics to structural engineering—the design of cementitious composites for civil engineering applications. 1993.
- 16 LIN, Z. and V.C. LI, Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1997.
- 17 SeokLyoo, W. and W. ShikHa, In situ fibrillation of poly(vinyl alcohol) during saponification of poly(vinyl ester) (I).