

Modellering av nedbrytningsprocesser i betong

Daniel Eriksson

KTH Avdelningen för Betongbyggnad

SVC - Vattenkraftens FoU-dagar

2020-10-06





Bakgrund

- Gamla betongkonstruktioner i vattenkraftsanläggningar
- Nedbrytningsmekanismer
 - Frostsprängning, urlakning, erosion, temperatursprickor, ASR, etc.
 - Fuktförhållandena är ofta viktiga
- Synergieffekter
 - Samverkande mekanismer accelererar varandra: $\dot{m}_{interaction} > \sum_{i=mechanism}^{N} \dot{m}_i$
- Mål och syfte med doktorandprojektet
 - Förbättra kunskapsläget om hur enskilda nedbrytningsprocesser i betong kan modelleras
 - Hur kan interaktion mellan olika mekanismer modelleras?
 - Sammanställa vilka skadetyper som vanligen observeras
- Arbetet med modeller har primärt inriktats på frostsprängning och urlakning







Frysning av betong

- Vatten expanderar med ca 9 % vid fasomvandling till is
 - Högt hydrauliskt tryck uppstår om utrymme ej finns i porsystemet
- Orsakar ytskador samt inre sprickbildning
- Vatten fryser successivt i mindre och mindre vattenfyllda porer med sjunkande temperatur
 - Inneslutningen av porväggarna sänker den kemiska potentialen
- Frysning av betong uppvisar tydlig hysteres
 - Mer is i porsystemet vid samma temperatur under tining
 - Frystemperatur Poröppningens storlek
 - Smälttemperatur Porkroppens storlek





Frysning av lufttillsatt betong

- Lufttillsatt betong används för att öka frostbeständigheten
 - Luftporerna fungerar som reservoarer för överskottsvatten
 - Luftporer (r>10 µm) fylls långsamt med vatten även vid direkt kontakt med en extern vattenreservoar
- Delvis vattenmättad lufttillsatt betong
 - Kontraktion större än den rena temperaturkontraktionen
- Cryo-suction
 - Vatten fryser i gradvis mindre och mindre porer
 - Termodynamisk jämvikt mellan is i luftporer och ofruset vatten → undertryck
 - Luft porer suger/pumpar vatten \rightarrow kontraktion



Frystest av cementpasta, Powers och Helmuth (1953)





Frysning av lufttillsatt betong – Modell

- Modeller i litteraturen ofta begränsade till luftporssystemets skala
 - Elementarceller enskild luftpor omsluten av fullt vattenmättat finporigt material
- Multifasmodell för strukturskala
 - Faser: Vatten, is, gas, solid
 - Kapillärmättad lufttillsatt betong
- Ramverk som möjliggör vidare utveckling för modellering av samverkan mellan olika nedbrytningsmekanismer

Massbalans: Vatten + is

$$S^{w}\rho^{w}\frac{D^{s}\varepsilon}{Dt} + S^{i}\rho^{i}\frac{D^{s}\varepsilon}{Dt} + \varepsilon\rho^{w}\frac{D^{s}S^{w}}{Dt} + \varepsilon\rho^{i}\frac{D^{s}S^{i}}{Dt} + \varepsilon S^{w}\frac{D^{s}\rho^{w}}{Dt} + \varepsilon S^{i}\frac{D^{s}\rho^{i}}{Dt} + \varepsilon S^{w}\rho^{w}\nabla \cdot \boldsymbol{v}^{s} + \varepsilon S^{i}\rho^{i}\nabla \cdot \boldsymbol{v}^{s} + \nabla \cdot \left(\varepsilon S^{w}\rho^{w}\boldsymbol{v}^{ls}\right) = 0$$

Massbalans: Gas

$$S^{g}\rho^{g}\frac{D^{s}\varepsilon}{Dt} + \varepsilon\rho^{g}\frac{D^{s}S^{g}}{Dt} + \varepsilon S^{g}\rho^{g}\nabla \cdot \boldsymbol{v}^{s} = -\frac{M_{\exp}^{w \to i}}{\rho^{i}}\rho^{g}$$

Massbalans: Solid

$$\frac{D^{s}\varepsilon}{Dt} = \frac{(1-\varepsilon)}{\rho^{s}} \frac{D^{s}\rho^{s}}{Dt} + (1-\varepsilon)\nabla \cdot \boldsymbol{v}^{s}$$

Energibalans: Summa alla faser

$$\left(\rho C_p\right)_{\text{eff}} \frac{D^s T}{Dt} = -\nabla \cdot \boldsymbol{q} - \left(\rho^l C_p^l \boldsymbol{v}^{ls}\right) \cdot \nabla T + \rho^i \Delta H \varepsilon \frac{D^s S^i}{Dt}$$

Rörelsemängdsbalans: Summa alla faser

$$\nabla \cdot \boldsymbol{t} + \rho \boldsymbol{g} = 0$$



Simuleringsexempel fryscykel – Deformationer

- Deformationsförsök genomförda av Sun & Scherer (2010)
 - w/c 0.55
 - Porositet 0.333
 - Lufthalt 0.06
 - Powers avståndsfaktor 250 µm
 - Dimensioner 5x5x15 mm
- Fryshastighet 0.25 °C/min
 +5 °C (-15 °C)
- Deformationer i längsriktning





Frysning av betongvägg i vattenväg





Modell för kalkurlakning

- Kombinationen kalkurlakning-frysning viktig
 - T.ex. Rosenqvist (2017), Liu et al (2018),
- Synergieffekter
 - Förändrad porstorleksfördelning av båda processerna
 - > Ökad isbildning
 - > Ökad urlakning
 - Sprickor
- Implementering av urlakningsmodell baserad på Gawin et al (2008) i samma ramverk som frysmodellen multifasmodell
 - Möjlighet att koppla nedbrytningsmekanismer och transportprocesser
 - > Förenklade kopplingar t.ex. Envägskopplingar
 - > Fullt kopplade nedbrytningsmekanismer
 - Saknas adekvat indata för vattenbyggnadsbetong Förändringen av porstorleksfördelningen måste mätas experimentellt

Massbalans: Löst kalcium

$$\frac{\varepsilon}{c_{ca}}\frac{D^{s}c_{ca}}{Dt} + \frac{\varepsilon}{S_{w}}\frac{D^{s}S_{w}}{Dt} + \frac{D^{s}\varepsilon}{Dt} + \frac{n}{\rho^{w}}\frac{D^{s}\rho^{w}}{Dt} + \varepsilon\nabla\cdot\boldsymbol{v}^{s} + \frac{1}{c_{ca}S_{w}\rho^{w}}\nabla\cdot\boldsymbol{J}^{ca} + \frac{1}{c_{ca}S_{w}\rho^{w}}\nabla\cdot\left(c_{sa}\varepsilon S_{w}\rho^{w}\boldsymbol{v}^{ls}\right) = \frac{m_{diss}}{c_{ca}S_{w}\rho^{w}}$$

Massbalans: Solid

$$\frac{(1-\varepsilon)}{\rho^s}\frac{D^s\rho^s}{Dt} - \frac{D^s\varepsilon}{Dt} + (1-\varepsilon)\nabla \cdot \boldsymbol{v}^s = -\frac{\dot{m}_{diss}}{\rho^s}$$



Jämviktskurva som beskriver koncentration Ca i solidskelettet (s_{ca}) som funktion av $\tilde{c_{ca}}$ vid tre olika temperaturer. Kurvan är uttryckt enligt ekvation föreslagen av Gérard (1996).



Urlakningsförsök

- Modellering av synergieffekter Frysning-Kalkurlakning
 - Indata saknas avseende hur porstorleksfördelningarna förändras
- Accelererade urlakningsförsök
 - Provkroppar Representativ vattenbyggnadsbetong från Rosenqvist et al (2017)
 - > w/c 0.54
 - > Med och utan luft
 - > Ø50x50 mm
 - Elektrokemisk migration av Babaahmadi (2015)
 - > Elektrisk potential över provkroppen
 - Porstorleksfördelningar vid olika urlakningsgrad
 - > Mätning med lågtemperaturkalorimeter Kapillärporer (r<50 nm)
 - > EN 480-11 Luftporer (r>10 µm)
- Simulering av samverkande nedbrytningsmekanismer







Slutsatser

- Nedbrytningsprocesser i betong är komplexa att modellera

 - Utvecklat modell för frysning på strukturskala
- Modellering av synergieffekter Frysning-Kalkurlakning
 - Viktig indata saknas för vattenkraftsbetong
 - > Porstorleksfördelningar viktiga mätningar pågår
 - Simulering av samverkande nedbrytningsmekanismer



Tack för er uppmärksamhet!

Frågor?