

Betonin vaurioitumismekanismien yhteisvaikutukset DuraInt-projektissa

Markku Leivo

Teknologian tutkimuskeskus VTT

Johdanto

Kylmissä olosuhteissa betonirakenteet voivat vaurioitua esimerkiksi kulutuksen, sisäisen pakkasvaurioitumisen, pakkas-suolarapautumisen sekä kloridien tai karbonatisoitumisen aiheuttaman raudoitteiden korroosion vuoksi. Kaikkia vaurioitumismekanismia ei täysin tunneta, mutta materiaalien perusominaisuuksien kuten lujuuden, vesi-sideainesuhteen, ilmamäärän ja sen laadun vaikutukset kuitenkin pääosin tunnetaan. Myös ympäristötekijöiden kuten lämpötila- ja kosteusvaihteluiden sekä betonin vedelläkyllästysasteen vaikutukset tunnetaan. Eri vaurioitumismekanismien yhteistoiminnat yleensä lyhentävät käyttöikää, mutta suurelta osin ne ovat suhteellisen huonosti tunnettuja.

Tämä laboratoriotutkimuksia käsittelevä artikkeli perustuu Teknologian tutkimuskeskuksessa VTT ja Aalto yliopistossa toteutettuun DuraInt-hankkeeseen.

Yhteisvaikutusten laboratoriokeheet

Tavoitteena oli selvittää laboratoriokekein, miten vaurioitumismekanismien yhteistoiminta vaikuttaa säilyvyyteen. Laboratoriokeikeissa tutkittiin seuraavia yhdistettyjä vauriomekanismeja:

- karbonatisoituminen ja suola-pakkasrasitus (pinnan rapautuma)
- karbonatisoituminen ja pakkasvaurioituminen (sisäiset pakkasaröt)
- karbonatisoituminen ja kloridien tunkeutuminen
- pakkasrasitus ja kloridien tunkeutuminen

- kloridien tunkeutuminen ja kosteuspitoisuus.

Laboratoriokekein pyrittiin selvittämään, miten eri vaurioitumismekanismit vaikuttavat toisiinsa. Osa näistä vaikutuksista on tunnettuja, mutta pääosin yhteisvaikutuksista ei ole selvää käsitystä. Useimmiten oletetaan, että betonia vaurioittavat tekijät ovat toisistaan riippumattomia tai niille oletetaan jokin toisiaan vahvistava vaikutus. Kokeellisesti niitä tutkitaan lähes järjestään toisistaan riippumattomina rasituksina.

Lisäksi tutkittiin, miten karbonatisoituminen ja kloridit vaikuttavat sementtikiven kemiallisiin ominaisuuksiin eri CO₂-pitoisuuksissa. Tavoitteena oli selvittää erilaisten kiihdytettyjen karbonatisoitumisen tutkimusmenetelmien soveltuvuutta.

Laboratoriokeikoiden koko sisältö on esitetty kuvassa 1.

Suola-pakkasrasitus ja karbonatisoituminen

Tavoitteena oli selvittää miten karbonatisoituminen ja ikääntyminen vaikuttavat suola-pakkasrapautumiseen. Muuttujina olivat vesi-sementtisuhte ja sideainetyyppi. Tällaista vanhennuksen ja suola-pakkasrasituksen tutkimusta on tehty Suomessa ja ulkomailla aiemminkin, mutta tulosten tulkinnassa on ollut myös selviä eroja.

Koejärjestely on esitetty kuvassa 2. Koesarja jakautuu kahteen pääosaan. Ensimmäisessä osassa vanhennettuihin kappaleisiin

kohdistettiin suola-pakkasrasitus ja mitattiin rapautumaa (testaukset 2 ja 3). Toisessa osassa samat jo rapautuneet kappaleet karbonatoitiin kiihdytetyssä olosuhteissa (suuri hiilidioksidipitoisuus) ja sitten niihin kohdistettiin toinen sarja suola-pakkasrasitusta (testaukset 4 ja 5). Kumpaankin osaan tuli kaksi sarjaa koekappaleita. Ensimmäisessä sarjassa ensimmäinen vanhennus oli yli vuoden kuivuminen ja karbonatisoituminen (testaus 2). Toisessa sarjassa ensimmäinen vanhennus oli vain kuivuminen (testaus 3). Karbonatoitunut kerros poistettiin koekappaleista ennen suola-pakkasrasitusta. Toinen vanhennuskierros oli kummallekin kiihdytetty karbonatisointi.

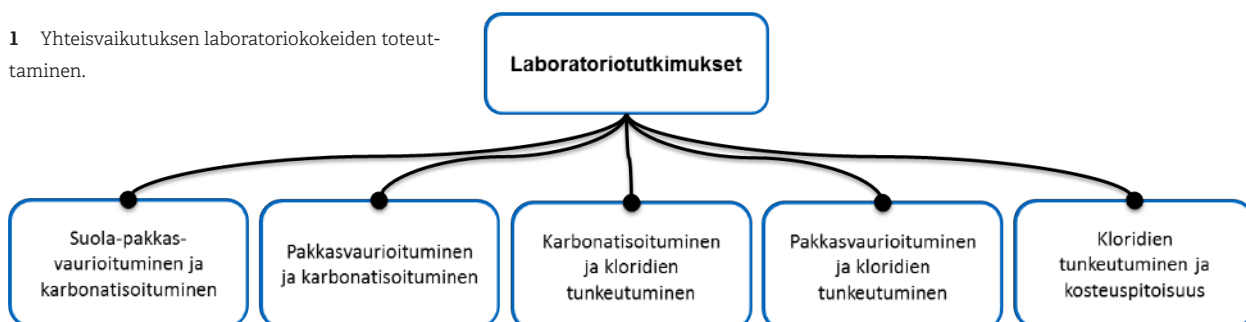
Karbonatiasoitumisen pakkasrapautumista kiihdyttävästä vaikutuksesta saatiin osin ristiriitaisia tuloksia. Koesarjoissa vaikutus oli selvä, mutta sideaineen vaikutus oli osin ristiriitainen aikaisempiin oletuksiin nähden. Kuonan vaikutus ei näissä kokeissa ollut erilainen muihin sideaineisiin verrattuna.

Karbonatisoituneiden koekappaleiden rapautumat olivat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta suuremmat kuin standardimenetelmällä mitatut suola-pakkasrapautumat.

Jos jo karbonatoidut kappaleet olivat olleet suola-pakkasrasituksessa, ei toinen karbonatisoitumiskierros ja sitä seuraava suola-pakkasrasitus juurikaan lisännyt rapautumaa. Rapautumisnopeus oli huomattavasti hitaampi kuin ensimmäisellä suola-pakkaskierroksella.

Kun koekappaleet olivat ennen ensimmäistä suola-pakkasrasitusta vanhennettuja, mutta

1 Yhteisvaikutuksen laboratoriokeikoiden toteuttaminen.



eivät karbonatsoituneita, rapautuma oli varsin vähäinen. Kun näiden kappaleiden annettiin karbonatsoitua ja sen jälkeen ne laitettiin suola-pakkasrasitukseen, kasvoi rapautuma merkittävästi.

Kuvassa 3 esitetään rapautumatuloksia eri vanhennuskäsittelyillä.

Koekappaleiden ikääntymisellä on erittäin suuri vaikutus suola-pakkasrapautuman määrään. Tulosten mukaan merkittävin tekijä näyttäisi olevan pinnan karbonatsoituminen, joka selvästi lisäsi rapautuman määrää. On huomattava, että hyvin huokostetuilla massoilla, joilla rapautuma on vähäistä, tämä lisääntynyt rapautuma on myös vähäinen. Tässä tutkimuksessa eri sideaineiden välillä ei havaittu olevan suurta eroa.

Pakkasvaurioituminen ja karbonatsoituminen

Tavoitteena oli selvittää sisäisen pakkasvaurioitumisen ja karbonatsoitumisen yhteistoimintaa. Vaikutusta tutkittiin kumpaankin suuntaan eli tutkittiin sekä karbonatsoitumisen vaikutus pakkasvaurioitumiseen että pakkasvaurioitumisen vaikutus karbonatsoitumismäärään.

Pakkasvaurioitumisen (sisäisen) vaikutus karbonatsoitumiseen oli yllättävän vähäinen. Vaikka betoniin syntyy pakkasvaurioitumisessa sisäistä säröilyä, karbonatsoituminen lisääntyy vain vähän. Ilmeisesti pakkasväröily oli pääsääntöisesti pinnassa sen suuntaista eikä näin ollen lisännyt oleellisesti karbonatsoitumista. Kuvassa 4 esitetään mikroskooppikuva sisäisen säröilyn suuntautumisesta. Eri sisäisen vaurioitumisen asteet on saatu aikaan kohdistamalla kappaleisiin eri määrä jäädytysulatuskierroksia.

Karbonatsoitumisella ei juurikaan havaittu olevan vaikutusta pakkasvaurioitumiseen (sisäiseen). Pinnassa tapahtuvalla karbonatsoitumisella ei ollut vaikutusta sisälle betoniin.

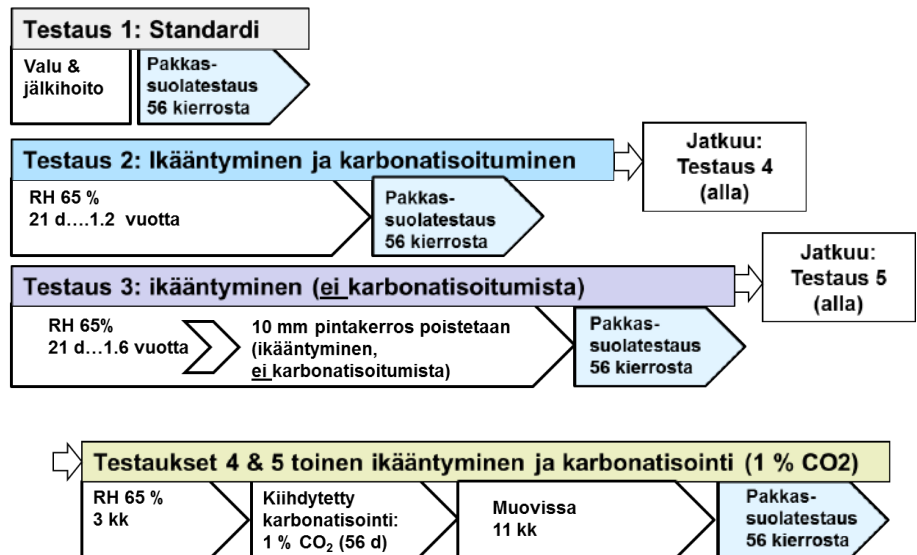
Pakkasvaurioitumisen aiheuttama karbonatsoitumisen kiihtyminen on mitattavissa olevaa ja käyttöikämitoituksessa huomioon otettavaa, mutta sen merkitys on kuitenkin suhteellisen pieni.

Karbonatsoituminen ja kloridien tunkeutuminen

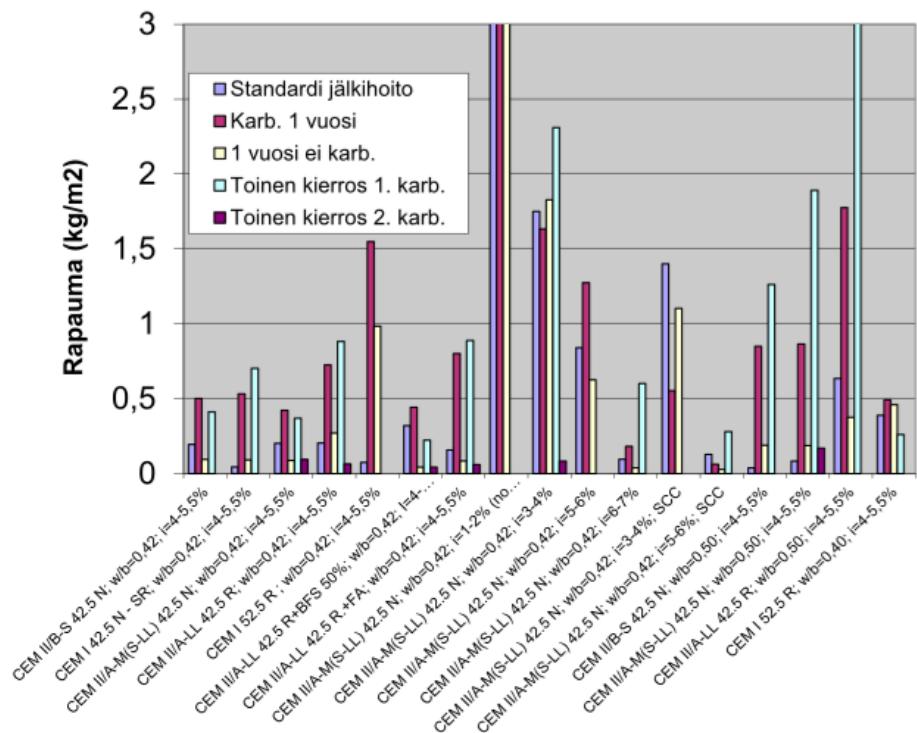
Tavoitteena oli selvittää kloridien tunkeutuman ja karbonatsoitumisen yhteistoimintaa.

Lisäksi selvitettiin, miten karbonatsoituminen ja kloridit vaikuttavat sementtikiven kemiallisiin ominaisuuksiin eri CO₂-pitoisuuksissa. Tavoitteena oli varmistaa, etteivät käytetyt nopeutetut karbonatsoitumiskoejärjestelyt vaikuta sementtikivessä tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin.

Betoniin tunkeutuneilla klorideilla näytti olevan karbonatsoitumista hidastava vaikutus.



2 Ikääntymisen, karbonatsoitumisen ja suola-pakkasrasituksen koesarjan toteutus.



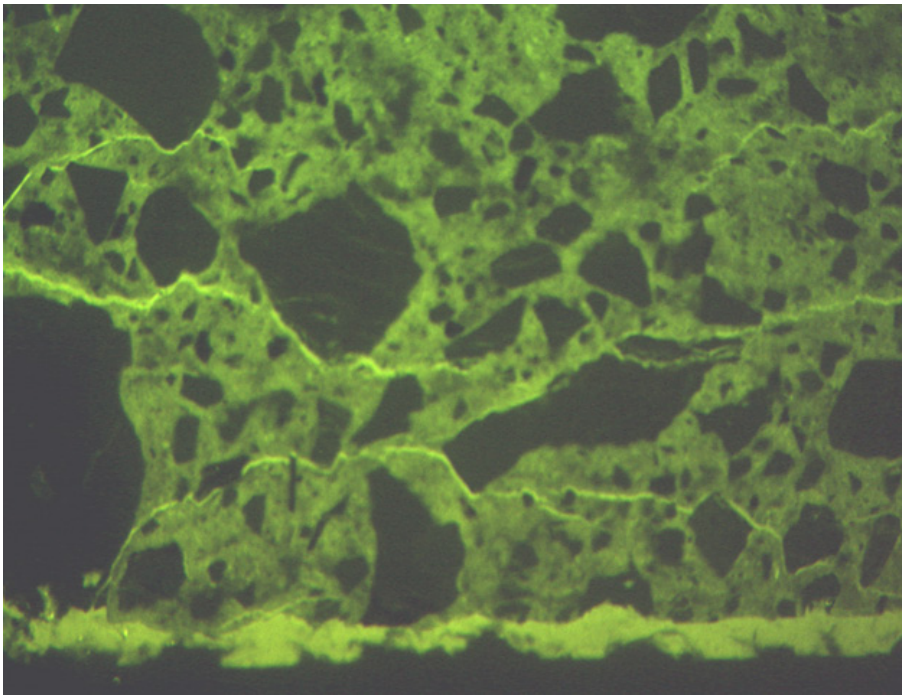
3 Koekappaleiden vanhennuksen vaikutus suola-pakkasrapautumaan.

tus. Ilmeisesti tämä vaikutus johtui lähinnä tasapainokosteuspitoisuuden kasvusta (vrt. jäljempänä kuvat 7–9). Kosteammassa kappaleissa karbonatsoituminen etenee hitaammin.

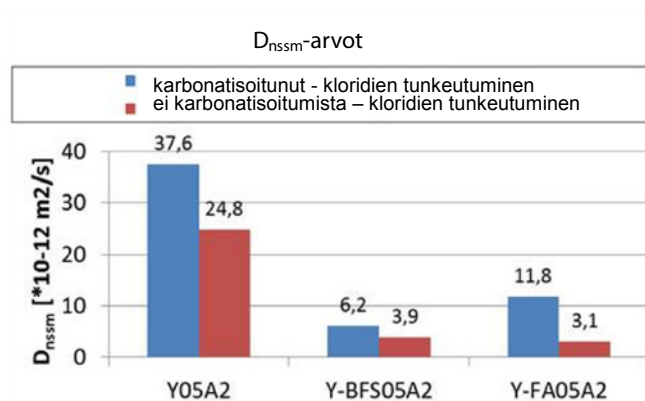
Karbonatsoituminen vaikutti merkittävästi kloridien tunkeutumiseen. Karbonatsoituneen betonin kloridivastus heikentyi selvästi. Kuvassa 5 esitetään tuloksia tästä vaikutuksesta. Koetulosten mukaan karbonatsoituneen betoniker-

roksen kloriditunkeutumavastus näytti olevan lähes olematon. Kuvassa kloridien tunkeutumaa kuvataan tunkeutumakertoimella (non-steady state migration coefficient, D_{nssm}).

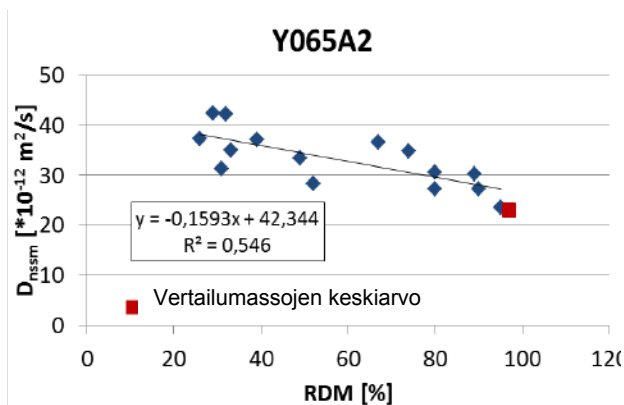
Karbonatsoitumisen kloridien tunkeutumavastusta heikentävä vaikutus on merkittävä. Tämä rasitusyhdistelmä tulee kyseeseen rakenteissa, jotka ovat jäänsulatussuoloille alttiina talvella ja kesäisin kuivuvat karbonatsoitu-



4 Esimerkki pakkasröilyn suuntautumisesta pinnan lähellä. Kuvan korkeus 2,7 mm.



5 Esimerkki karbonisoitumisen vaikutuksesta kloridin tunkeutumakertoimeen (D_{nssm}).



6 Pakkasvaurioitumisen vaikutus kloridin tunkeutumaan. Ylissementtimassa, w/c=0,65 ja 2% ilmaa. RDM on dynaaminen kimmokerroin.

miselle edulliseen kosteustilaan. Merirakenteissa suuri kosteuspitoisuus usein hidastaa karbonisoitumista merkittävästi.

Termogravimetria- (TG) ja röntgendiffraktio- (XRD) kokein voitiin todeta, että kiihdytetyissä karbonisoitumiskokeissa käytetyt 1 % ja 4 % CO_2 -pitoisuudet eivät muuttaneet merkittävästi kemiallisia reaktioita tai mineralogaa karbonisoitumisessa verrattuna luonnollisessa olosuhteissa tapahtuvaan karbonisoitumiseen. Tutkimuksissa saatujen tulosten voidaan siis olettaa olevan samanlaisia kuin ne olisivat, jos karbonisoituminen olisi ollut luonnollista.

Kemiallisten kokeiden mukaan vaikuttaa siltä, että nopeutetuissa kokeissa voidaan käyttää jopa 4 % CO_2 -pitoisuuksia ilman, että kemialliset reaktiot muuttuvat merkittävästi muuten kuin nopeutumalla.

Pakkasvaurioituminen ja kloridien tunkeutuminen

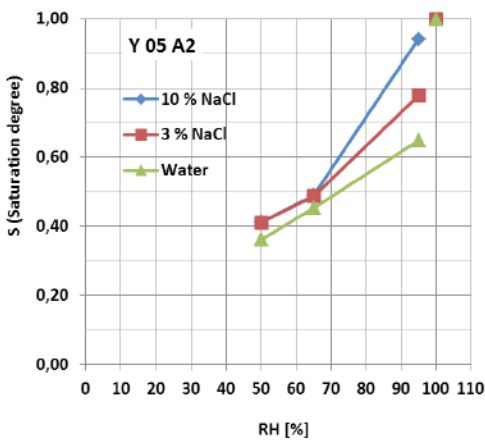
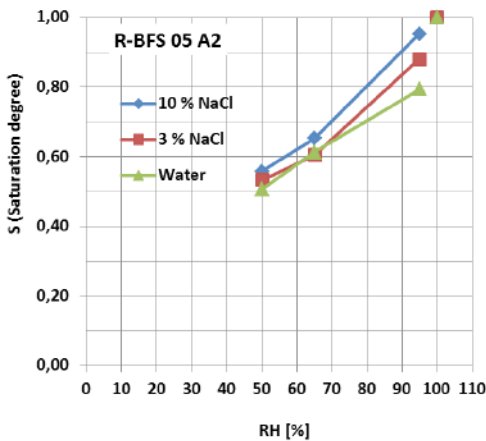
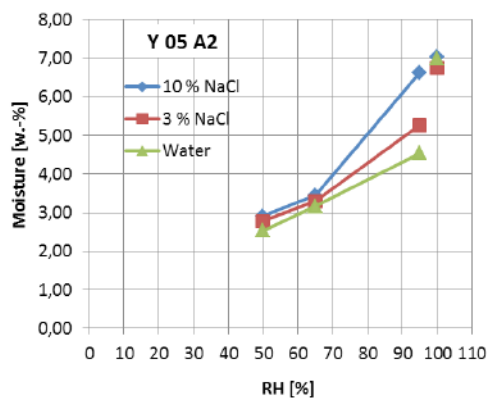
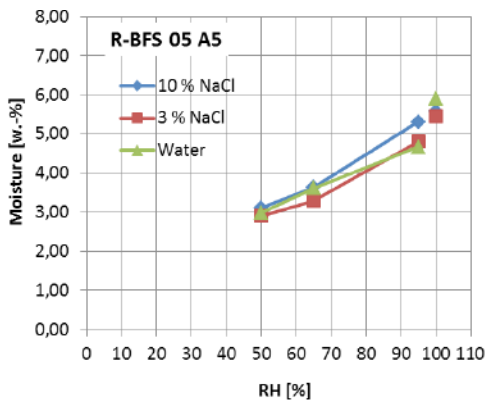
Tavoitteena oli selvittää sisäisen pakkasvaurioitumisen vaikutus kloridien tunkeutumiseen. Pakkasrasitus aiheuttaa betoniin sisäistä pakkasröilyä, jonka merkityksestä kloridien tunkeutumiseen oltiin kiinnostuneita.

Pakkasvaurioitumisella oli suhteellisen lievä vaikutus kloridien tunkeutumiseen. Ilmeisesti tässä vastaavasti kuin karbonisoitumisessakin sisäisen halkeilun orientoituminen betonin pinnassa sen suuntaisesti lievensi vaikutusta. Vaikutus oli kuitenkin kloridien tunkeutumista kiihdyttävä. Kuvassa 6 esitetään esimerkki pakkasvaurioitumisen vaikutuksesta kloridien tunkeutumaan. Eri sisäisen vaurioitumisen asteet on saatu aikaan kohdistamalla kappaleisiin eri määrä jäädäytys-sulatuskierroksia. Kuvassa kloridien tunkeutuma kuvataan tunkeutumakertoimella (non-steady state migration coefficient, D_{nssm}).

Kloridien tunkeutuman lisääntyminen pakkasvaurioitumisen vaikutuksesta on mitattavissa olevaa ja käyttöikämitoituksessa huomioon otettavaa, mutta merkitykseltään suhteellisen pientä. Tämä lievä vaikutus oli osin yllättävää.

Kloridien tunkeutuminen ja kosteuspitoisuus

Tavoitteena oli selvittää kokeellisesti, miten kloridit vaikuttavat betonin tasapainokosteuskäyrään (desorptioisotemi; $T = 20\text{ °C}$). Tavoitteena oli saada myös tietoa siitä, onko tässä vaikutuksessa eroja, kun betonin koostumus kuten erityisesti sideaine ovat erilaisia. Tavoitteena oli saada tuloksia kolmella eri kloridipitoisuudella. Tulokset haluttiin sekä ilmaistuna betonin säilytysolosuhteen suhteellisen kosteuden (RH-%) ja betonin kosteuspitoisuuden (p.-%) että säilytysolosuhteen RH-%:n ja betonin vedelläkyllästysasteen (S) välisenä yhteytenä. Vedelläkyllästysaste ilmaisee, kuinka suuri



7 Kahden betonin desorptiokäyrät 'RH-% – kosteuspitoisuus (p.-%)' kolmella eri kloridipitoisuudella. Kloridipitoisuudet vastaavat alkuvaiheen imeytys-kuivatus-sykleissä käytettyjä liuoksia. Vastaavat arvioidut betonien kloridipitoisuudet olivat 0,02 p.-%, 0,53 p.-% ja 0,77 p.-%.

8 Kahden betonin desorptiokäyrät 'RH-% – vedelläkyllystysaste (S)' kolmella eri kloridipitoisuudella. Kloridipitoisuudet vastaavat alkuvaiheen imeytys-kuivatussykleissä käytettyjä liuoksia. Vastaavat arvioidut betonien kloridipitoisuudet olivat 0,02 p.-%, 0,53 p.-% ja 0,77 p.-%.

osuus betonin kokonaishuokostilavuudesta on täyttynyt vedellä.

Kokeissa oli mukana 6 erilaista vesi-sideainesuhteen 0,50 betonikoostumusta, 3 sideainekoostumusta ja 3 ilmamäärää. Koekappaleiden (3 rinnakkaiskoekappaletta, à 100×100×10 mm³) kloridipitoisuudet aikaansaatiin imeytys-kuivatussyklein (16, à (5 + 2) d), jossa käytettiin liuoksia, joiden kloridipitoisuudet (NaCl) olivat n. 0 % (vesijohtovesi), 3 % ja 10 %. Tasapainokosteudet aikaansaatiin säilyttämällä koekappaleita ensin suhteellisissa kosteudessa RH 95 % ja tämän jälkeen suhteellisissa kosteuksissa RH 65 % ja RH 50 % niin kauan, että koekappaleiden paino tasaantui (yhteensä n. 1,5 vuotta). Lopuksi määritettiin koekappaleiden huokostilavuudet, kuivapainot ja kloridipitoisuudet. Kuvissa 7 ja 8 on esitetty esimerkkejä saaduista desorptiokäyristä ja kuvassa 16 on esitetty tasapainokosteudet suhteellisissa kosteuksissa RH 95 %, RH 65 % ja RH 50 % arvioidun betonin kloridipitoisuuden funktiona. Kuva sisältää tulokset tutkimuksen kaikkien betonien (6) osalta. Kloridit vaikuttivat betoniin muodostuvaan kosteuspitoisuuteen (Kuva 7) ja vedelläkyllystysasteeseen (Kuva 8). Suurinta tämä vaikutus oli ympäristön suuressa suhteellisissa kosteudessa. Vaikutuksen suuruus oli jossain määrin betonikohtaista (sideainetyyppi, ilmamäärä).

Tulosten mukaan betonin kosteuspitoisuudella ja vedelläkyllystysasteella on merkitystä

mm. betonin karbonatisoitumisen ja pakkasen aiheuttaman vaurioitumisen kannalta. Kloridit vaikuttavat betoniin tietyssä kosteusolosuhteessa muodostuvaan kosteuspitoisuuteen. Tuloksia voidaan hyödyntää käyttöikämallinnuksessa.

Nämä tulokset olivat linjassa kirjallisuustietojen kanssa, mutta kosteuspitoisuuden kasvu kloridien vaikutuksesta oli oletettua suurempi silloin, kun suhteellinen kosteus oli suuri.

Yhteenveto

Tässä artikkelissa esitetään DuraInt-projektissa saatujen laboratoriotutkimusten tuloksia. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää laboratoriokeihin, miten vaurioitumismekanismien yhteistoiminta vaikuttaa säilyvyyteen. Tässä artikkelissa esitetään vain keskeiset päätelmät ilman kattavaa tulosten ja niiden merkityksen tarkastelua:

- Ikäänymisen vaikutus pakkas-suolarapautumiseen on merkittävä. Karbonatisoitumisella näyttäisi olevan suuri negatiivinen vaikutus kaikilla sideaineilla. On huomattava, että hyvin huokostetulla betonilla rapautuminen oli aina vähäistä. Lisäksi on huomattava, että tässä karbonatisoituminen sisältää aina pitkäaikaisen kuivumisen.
- Pakkasvaurion (sisäisen) vaikutus karbonatisoitumiseen oli pieni, mutta mitattavissa ja on siten otettava huomioon käyttöikä-

laskelmissa. Lisätutkimukset ovat tarpeen tulosten toistettavuuden ja luotettavuuden selvittämiseksi.

- Tulokset osoittivat, että karbonatisoitumisella ei ollut vaikutusta sisäiseen pakkasvaurioitumiseen mitattuna dynaamisen kimmokertoimen muutoksella. Tämä oli yhdenmukaista kirjallisuustietojen ja odotusten kanssa.
- Karbonatisoituminen vähensi betonien kestävyttä kloridien tunkeutumista vastaan. Tällainen yhdistetty karbonatisoitumisen ja kloridien tunkeutumisen rasitus on oleellinen rakenteissa, jotka voivat kuivua kesäisin ja ovat tiesuolalle alttiina talvisin.
- Pakkasvaurioituminen vaikuttaa selvästi, mutta ei kovin voimakkaasti, kloridien tunkeutumiseen. Huolimatta suhteellisen lievästä vaikutuksesta tulisi se kuitenkin ottaa huomioon käyttöikälaskelmissa.
- Näyttää siltä, että betonin huokokset voivat täyttyä vedellä huomattavasti enemmän, jos betoniin on tunkeutunut klorideja kun ilman niitä.

Vauriomekanismien vuorovaikutuksella voi olla merkittävä vaikutus betonirakenteiden käyttöikäen kylmillä alueilla. Kokonaisuudessaan vaikutukset ovat monimutkaisia ja ovat suhteessa myös olosuhteisiin ja mikroilmastoon (jäätulatussuolat, merivesi, ilmassa kulkeutuvat kloridit). Kvantitatiivista dataa on tällä hetkellä



Summary

This article presents the laboratory test results of the DuraInt project. Only a limited amount of data and discussions are presented here. Tests were done to investigate the coupled interaction of deterioration mechanisms. Compiled here are the main conclusions:

- Effect of aging on frost-salt scaling is remarkable. It appears that carbonation has a major negative effect with all binders. It should be noticed that with well air entrained concretes the scaling was insignificant. Also it should be noted that carbonation always included long term drying.
- The effect of frost on carbonation was low but measurable and must thereby be taken into account in service life calculations. More experimental work is needed to show repeatability and reliability.
- The results showed that carbonation did not have an impact on frost damage with respect to internal damage as measured by RDM. This is in agreement with literature and expectations.
- Carbonation decreased the resistance of concretes against chloride penetration. This kind of combined carbonation and chloride penetration strains structures that can be dried during the summer time and have de-icing salts during the winter time.
- Clear and measurable but not a strong correlation between increased chloride migration and frost damage with the non-air entrained concrete was found. Despite the moderate intensity, the interaction must be taken into account with service life calculations.
- Based on the results it seems that pores can be filled with water to a much higher degree when exposed to chlorides than without chlorides.

9 Ylismäentien betoninen melumuuri Espoossa.

käytettävissä rajoitetusti. Lisätutkimuksille on edelleen tarvetta ilmiöiden ymmärtämiseksi, selittämiseksi ja mallintamiseksi.

Kiitokset

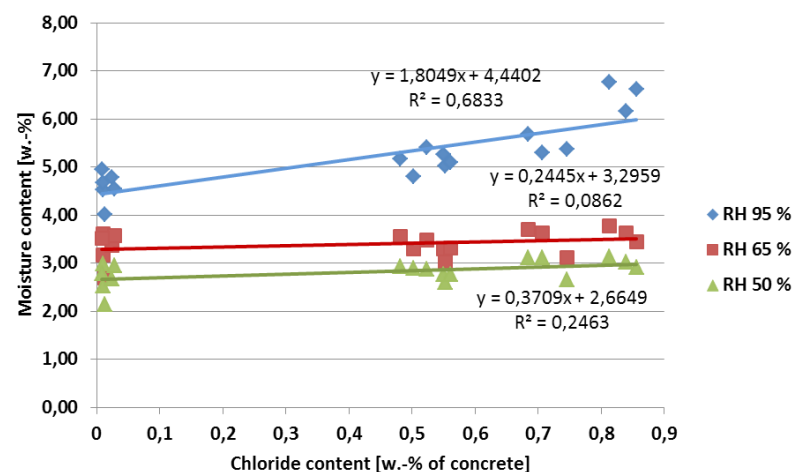
Tutkimus toteutettiin Aalto Yliopiston ja VTT:n yhteistyönä. Suomessa hanketta rahoittivat TEKES, Tiehallinto/Liikennevirasto, Ratahallintokeskus, Finnsementti Oy, Parma Oy, Rudus Oy, SBK-säätiö, Helsingin kaupunki, Tampereen kaupunki, Suomen Betoniyhdistys ry sekä TKK/Aalto-yliopisto. Tutkimuksen tätä osuutta ovat olleet tekemässä Esko Sistonen, Fahim Al-Neshawy, Jukka Piironen ja Cecilia Nordqvist Aalto-yliopistosta sekä Hannele Kuosa, Erika Holt, Pertti Koskinen ja Markku Leivo VTT:ltä.

Viitteet

Leivo, M., Sistonen, E., Al-Neshawy, F., Piironen, J., Kuosa, H., Holt, E. & Nordqvist, C. 2011. Effect of interacted deterioration parameters on service life of concrete structures in cold environments, Laboratory test results 2009–2011. VTT Research Report VTT-R-004799-11.

Holt, E. & Leivo, M. 2011. Concrete Durability Based on Coupled Laboratory Deterioration by Frost, Carbonation and Chloride. Nordic Concrete Research NCR 2011. The Nordic Concrete Federation 1/2011 Publication No. 43. p. 239–242.

Ferreira, R. M., Leivo, M., Kuosa, H. 2012. The effect of by-products on frost-salt durability of aged concrete. Nordic workshop “Durability aspects of fly ash and slag in concrete”, February 2012, Norway, Oslo.



Interacted deteriorations can have a remarkable effect on the service life of concrete structures in cold environments. Overall, the effects are very complex and depend on the circumstances and the microclimate (de-icing chlorides, sea water, airborne chlorides). Very limited quantitative data is still available. More studies are needed to understand, explain and model the interactions.

10 Tasapainokosteudet suhteellisissa kosteuksissa RH 95%, RH 65% ja RH 50% arvioidun betonin kloridipitoisuuden (p.-%) funktiona. Kuva sisältää tulokset tutkimuksen kaikkien betonien (6) osalta.