

Käyttöiän mallinnus DuraInt-projektissa

Erkki Vesikari & Miguel Ferreira

Teknologian tutkimuskeskus VTT

Johdanto

Kansallisen DuraInt-projektin (2009–11) yhtenä tavoitteena oli kehittää käyttöikämitoituksen laskentamalleja. Tutkimuksessa analysoitiin laboratorioissa ja kentällä tehtyjä pakkaskokeiden tuloksia, tutkittiin eri turmeltumistekijöiden keskinäisiä vuorovaikutuksia ja kehitettiin näiden havaintojen pohjalta turmeltumisen ja käyttöiän laskentamalleja. Tavoitteena oli parantaa erityisesti pakkasrapautumisen käyttöikämallien luotettavuutta kenttäkokeista saatujen kokemusten perusteella ja selvittää sekä sisäisen pakkasrapautumisen että pinnan rapautumisen vuorovaikutuksia raudoituksen korroosion aktivoitumisaikaan.

Koska DuraInt -kenttäkokeet oli käynnistetty vasta projektin aikana, koekappaleiden kentällä oloaika oli liian lyhyt, jotta niistä olisi voinut tehdä luotettavia päätelmiä pakkasrapautumisesta pitkällä aikavälillä. Siksi analysoitavana tulosaaineistona käytettiin Ruotsissa vuonna 1996 käynnistettyjen BTB-kokeiden tuloksia, joista viimeisimmät oli 12 talvikauden jälkeen mitattuja. Koekenttä on moottoritien varrella lähellä Boråsia. Osassa BTB-koebetoneista oli käytetty suomalaisia sideaineita.

Pakkasrapautumisen vuorovaikutuksia muihin turmeltumismekanismeihin, kuten karbonatisoitumiseen ja kloridien tunkeutumiseen tutkittiin laboratoriokokein ja teoreettisin laskelmin. Laboratoriokokein osoitettiin, että sekä karbonatisoituminen että kloridien tunkeutuminen nopeutuvat, jos betonissa tapahtuu samanaikaisesti sisäistä tai ulkoista pakkasrapautumista. Teoreettisilla laskelmilla määritettiin raudoituksen korroosion aktivoitumisaajan vuorovaikutuskertoimet pakkasrapautumisen suhteen. Vuorovaikutuskertoimilla arvioidaan korroosion aktivoitumisaajan lyhentyminen pakkasrapautumisen johdosta.

Pakkasrapautuminen

Kenttäkokeiden tulosten alustava analysointi osoitti, että betonipinnan rapautuminen oli likimain lineaarinen ajan suhteen, verrannollinen vesi-sideainesuhteen potenssiin ja kääntäen

verrannollinen ilmapitoisuuden potenssiin. Lisäksi huomattiin, että rapautumisnopeus on vahvasti riippuvainen sideainelaadusta. Näiden havaintojen perusteella päädyttiin seuraavaan rapautumismalliin, jossa muuttujina ovat betonin vesi-sideainesuhde, ilmamäärä ja sideaine-kerroin [1].

$$d = 0,75 \times k_{cem} \times B \times \frac{(w/c)^{n_1}}{a^{n_2}} \times t$$

missä

d on betonin pakkasrapautuma, mm;
 t aika, vuosina;
 w/c vesisideainesuhde;
 a ilmapitoisuus, %;
 k_{cem} sideainekerroin, ja
 B vakiokerroin.

Toinen betonipinnan rapautumisen malleista perustui P-lukuun. Koska P-luvun oletetaan sisältävän itsessään kaikki vaikuttavat materiaalitekijät ja sen oletetaan olevan kääntäen verrannollinen betonipinnan rapautumisnopeuteen, lähdettiin liikkeelle yhtälöstä 2 [1].

$$d = \frac{K}{P} \times t$$

missä

K on vakiokerroin.

P-luvun laskentaperiaatteet on esitetty yksityiskohtaisesti Liikenneviraston julkaisussa [2].

BTB-kenttäkoetulosten ja tilastollisten analyysien perusteella tutkittiin, miten parametrit B , n_1 , n_2 ja K riippuvat iästä (Kuva 1). Parametrien arvot muuttuivat selvästi käyttöiän alussa, mutta tasoittuivat myöhemmin. Vesi-sideaineen eksponentilla oli hieman nouseva ja ilmamäärän eksponentilla hieman laskeva trendi, mikä tarkoittaa, että vesi-sideaineen merkitys kasvaa ja ilmamäärän merkitys hieman vähenee iän mukana. B -kerroin hieman kasvoi ja K -kerroin pieneni iän mukana, mikä saattaa merkitä, että rapautuminen ei olekaan täysin lineaarista, kuten malleissa on oletettu. Kuitenkin koska B - ja K -kertoimien muutokset olivat toistensa

suhteen vastakkaisia ja suhteellisen pieniä, lineaarisuusoletus pidettiin toistaiseksi voimassa. Rapautumisen kehitystä on kuitenkin syytä seurata jatkossa.

Sideainetyypillä on suuri vaikutus rapautumisnopeuteen käyttöiän alussa, mutta senkin merkitys näyttäisi iän mukana heikkenevän. Kaikista tutkituista sideainetyypeistä masuunisementti oli selvästi heikoin.

Käyttöikämalli voidaan johtaa rapautumismallista, kun tiedetään, mikä on rapautumisen rajatila ts. suurin sallittu rapautumissyvyys. Käyttöikämallissa on sovellettava myös varmuuskerrointa, joka muuntaa keskiarvokäyttöiän 95%:n varmuutta vastaavaksi käyttöiäksi. Olettaen että käyttöiän jakauma on log-normaallinen ja variaatiokerroin 0,6, käyttöiän varmuuskerroin on 2,9. Vaadittu käyttöikä on siis lähes kolminkertainen keskiarvokäyttöikä verrattuna.

Lopulta käyttöikämalli muunnettiin kerroinmuotoon (Kaava 3), missä materiaali-, rakenne-, olosuhde- ja muut tekijät on eroteltu. Kerroin A sisältää kaikki materiaalitekijät. Kaavaan 1 perustuvassa käyttöiän mallissa materiaalikerroin riippuu vesi-sideainesuhteesta, ilmamäärästä ja sideainelaadusta. Kaavaan 2 perustuvassa mallissa kerroin A riippuu ainoastaan P-luvusta.

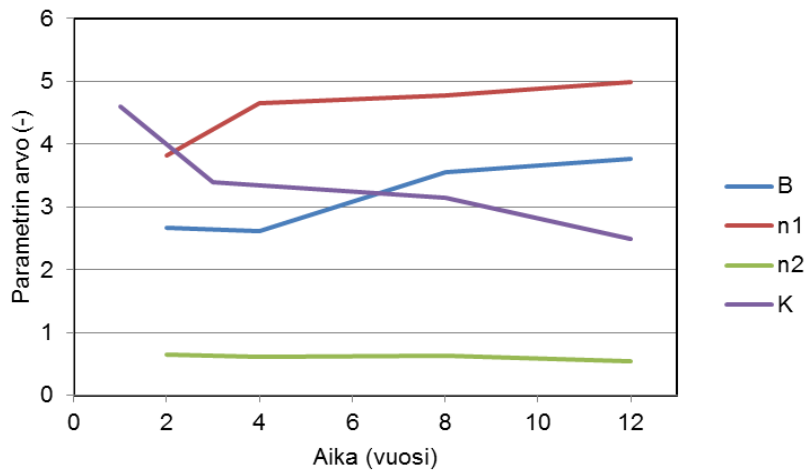
$$t_L = A \times B \times C \times D \times F \times G \times t_{Lr}$$

missä

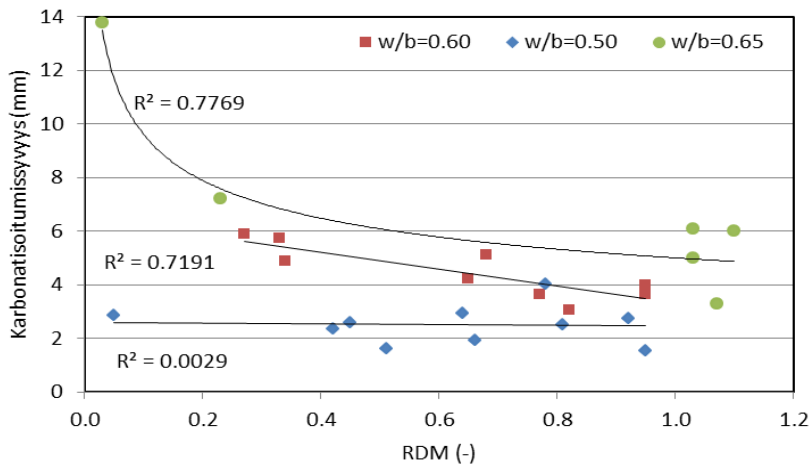
t_L on ennakoitu käyttöikä, vuosi,
 t_{Lr} vertailukäyttöikä vuosina, vuosi
 $A...G$ eri tekijät huomioonottavat käyttöiän kertoimet

Pakkasrapautumisen vaikutus karbonatisoitumiseen ja kloridien tunkeutumiseen

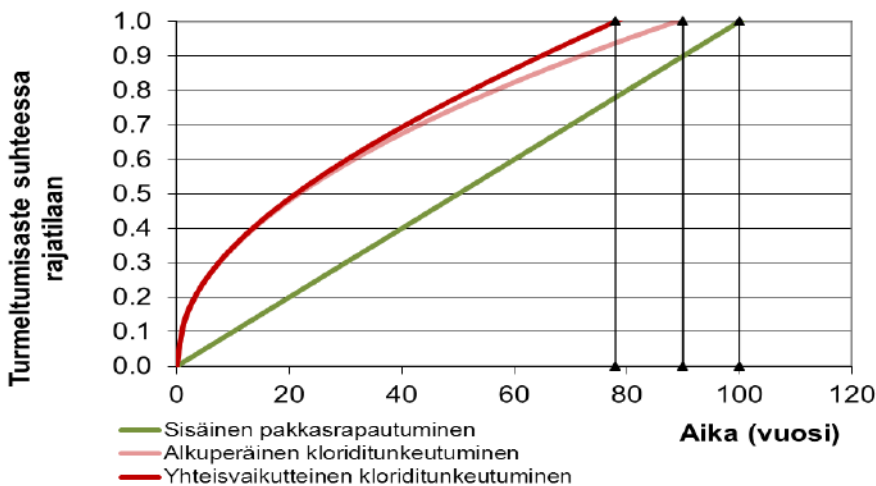
Tavoitteena oli selvittää millä tavoin sisäinen pakkasrapautuminen ja betonipinnan pakkasrapautuminen vaikuttavat raudoituksen korroosion aktivoitumisaikaan karbonatisoitumisen ja kloridien tunkeutumisen suhteen. Käytännössä pyrittiin selvittämään vuorovaikutuskerroin I aktivoitumisaajan yhtälöstä 4 [3]:



1 Yhtälöiden 1 ja 2 parametrien B, n1, n2 ja K muutokset iän mukana.



2 Sisäisen pakkasvaurioitumisen (RDM) vaikutus karbonatisoitumisvyvyyteen.



3 Sisäisen pakkasrapautumisen vaikutus kloridien tunkeutumismopeuteen.

$$t_0 = A \times B \times C \times D \times F \times G \times I \times \alpha_{0r}$$

missä

t_0 on korroosion aktivoitumisaika, vuosi,
 t_{0r} vertailuaktivoitumisaika, vuosi, ja
 I pakkasrapautumisesta johtuva vuorovaikutuskerroin

Sisäisen pakkasräöilyn vaikutusta karbonatisoitumisnopeuteen ja kloridien tunkeutumismopeuteen tutkittiin sisäisesti rapautuneilla betonikoekappaleilla. Betonin sisäinen vauriotuminen sovitettiin määrättyyn asteeseen ultraäänimittauksella. Karbonatisoitumiskoe tehtiin kiihdytetynä kammiossa, jonka CO₂-pitoisuus oli 1%. Kloridimigraatiokoe tehtiin standardin NT Build 492 mukaisesti.

Kuvassa 2 on esitetty karbonatisoitumisvyvyys sisäisen pakkasvaurioitumisen (RDM = residual dynamic modulus) funktiona [1]. Koetulosten pohjalta voitiin määrittää pakkasrapautuneen betonin karbonatisoitumiskertoimen suhde alkuperäiseen karbonatisoitumiskertoimeen RDM:n funktiona. Vastaavasti koetulosten perusteella voitiin laatia kaava pakkasrapautuneen betonin kloridien tunkeutumiskertoimelle.

Vuorovaikutuskertoimien määrittämiseksi oletettiin, että pakkasrapautuminen etenee lineaarisesti rajatilaan vastaavaan arvoonsa samalla kun karbonatisoituminen tai kloridien tunkeutuminen etenee betonissa (Kuva 3). Vuorovaikutuskertoimet laskettiin pakkasrapautumisen ja karbonatisoitumisen/kloridien tunkeutumisen yhteisvaikutuksesta määritetyn aktivoitumisaian ja ilman pakkasrapautumisen vaikutusta määritetyn aktivoitumisaian suhteena.

Betonipinnan rapautumisen vuorovaikutuskertoimet suhteessa korroosion aktivoitumisaikaan määritettiin myös. Tällöinkin oletettiin, että betonipinta rapautuu lineaarisesti ajan suhteen. Tässä tapauksessa vuorovaikutuskertoimet olivat samat sekä karbonatisoitumisen että kloridien tunkeutumisen suhteen. Kuitenkin vuorovaikutuskertoimet riippuvat betonipeitepaksuudesta. Kuvassa 4 esitetään esimerkkinä vuorovaikutuskertoimet betonipeitteen ollessa 50 mm [1]. Redusoitu korroosion aktivoitumisaika saadaan kertomalla alkuperäinen aktivoitumisaika kuvasta luettavalla vuorovaikutuskertoimella.

Simulointi

VTT:ssä 1990-luvulla kehitettyä simulointiohjelmaa käytettiin havainnollistamaan eri turmeltumistyyppien vuorovaikutusta. Simulointiohjelman pakkasrapautumisen, karbonatisoitumisen ja kloridien tunkeutumisen mallit päivitettiin uusilla vuorovaikutus-malleilla.

Simulointiohjelma jäljittelee todellisia ilmasto-olosuhteita, laskee lämpötilat ja kosteuspitoisuudet rakenteen poikkileikkauksessa

4 Betonipinnan rapautumisen vaikutus raudoituksen korroosion aktivoitumisaikaan. Vuorovaikutuskertoimet graafisesti esitettynä kun betonipeite on 50 mm.

5 Karbonatisoitumisen simulointi yhdessä sisäisen pakkasrapautumisen ja betonipinnan rapautumisen kanssa.

(säärasituksille altistuneena), ja soveltaa vauriomalleja, joissa vaurioituminen riippuu betonin sisäisestä lämpötilasta ja kosteuspiitoisuudesta. Pakkasrapautumisen eteneminen arvioidaan kriittisen vedelläkyllästys-asteen menetelmään perustuen. Simuloinnin aika-askel oli yksi tunti. Laskelmaa voidaan jatkaa, kunnes käyttöikä saavutetaan.

Kuvassa 5 nähdään, miten sekä sisäinen pakkasrapautuminen että pinnan rapautuminen kiihdyttävät betonin karbonatisoitumista [1].

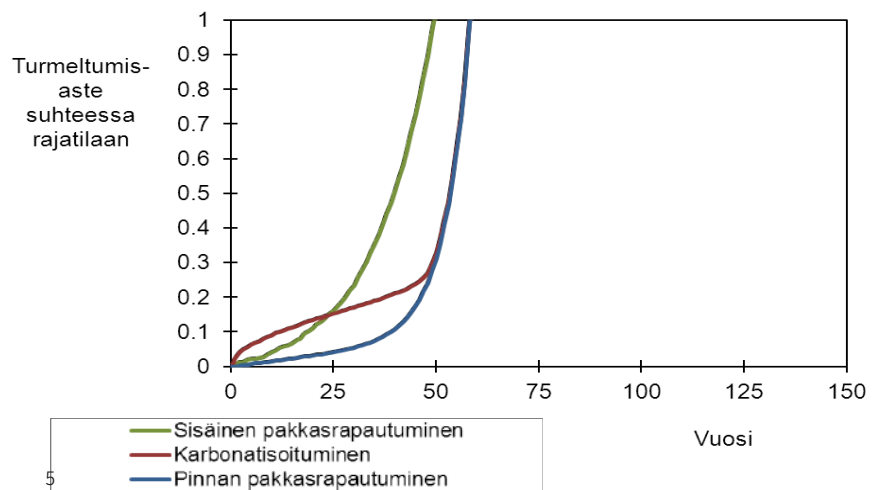
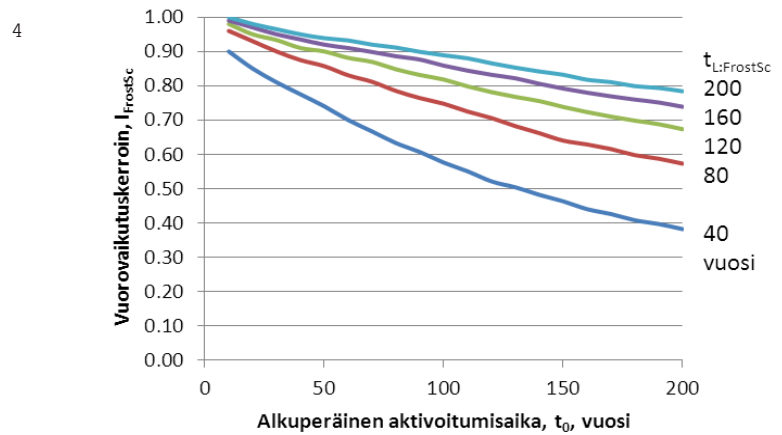
Loppupäätelmät

Kenttäkoetulosten perusteella vesi-sideainesuhteen merkitys betonin pakkas-suolarapautumiseen on suurin ja sen merkitys jopa kasvaa iän mukana. Ilmapitoisuudella on kohtalaisen suuri vaikutus pakkasrapautumiseen, mutta sen merkitys näyttää hieman vähenevän iän mukana. Sideaineista masuukuonasementti osoittautui selvästi heikoimmaksi pakkas-suolakestävyyden suhteen.

Pakkasrapautumisen vaikutus karbonatisoitumiseen ja kloridien tunkeutumiseen voi olla merkittävä ja se tulisi ottaa huomioon pakkasrasitukselle altistuvan betonirakenteen käyttöikää arvioitaessa. Yhteisvaikutus voidaan arvioida simulointiohjelmalla tai käyttöikämitoituksen kaavoilla, joissa turmeltumisen keskinäiset vuorovaikutukset otetaan huomioon vuorovaikutuskertoimilla.

Viitteet

- 1 Vesikari, E., Ferreira M. 2011. "Frost Deterioration Process and Interaction with Carbonation and Chloride Penetration – Analysis of Test Results". VTT Technical Research Centre of Finland. Research report .
- 2 Siltabetonien P-lukumenettely. Toteuttamisvaiheen ohjaus. Tiehallinto. Helsinki 2000
- 3 Vesikari, E. 2009. Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach. VTT Technical Research Centre of Finland. Research report VTT-R-04771-09. 38 p.



Part 3. Modelling of service life. Summary

The overall objective of this research was to analyse the frost test results from both field and laboratory, to study the effects of frost attack on other types of degradation, such as carbonation and chloride penetration, and, based on these findings, to develop service life models for the design of concrete structures. The service life models were developed according to the Finnish concrete code based on the "factor approach".

The field test measurement results from BTB test field in years 1996–2008 were used for analysing the phenomena of frost scaling. A model taking into account the principal concrete parameters such as the water-cement ratio, the air content and the cement type was created. Another model was developed based on the traditional P-factor.

According to field test results the significance of water-cement ratio is very high and it seems even to grow with age. The significance of air content is also noticeable but it seems to decrease with time. The significance of binder type is high at the beginning but it tends to reduce with time. However, slag cement sticks out from the group of other binders and its frost scaling resistance was clearly worse.

The effect of internal frost attack on the rate of carbonation and on the rate of chloride was

studied using "coupled" tests first causing concrete to crack internally by freezing tests and then starting an accelerated carbonation test or chloride penetration test. A calculation model for the rate of carbonation and for the penetration of chlorides with increasing internal damage in concrete was developed. Interaction factors for the effect of internal damage on the initiation time of corrosion based on carbonation or chloride penetration were developed.

The effect of frost scaling on the rate of carbonation/chloride penetration was also studied. Interaction factors for the effect of frost scaling on the initiation time of corrosion based on carbonation or chloride penetration were derived. These interaction coefficients are applicable to both carbonation and chloride penetration but they are dependent on the thickness of concrete cover.

Lastly the interaction of different degradation mechanisms was demonstrated using computer simulation. An edge beam made of non-frost resistant concrete was studied. By computer simulation the influence of both internal frost attack and frost scaling on the process of carbonation and chloride penetration could be illustrated.