

Diplomityö Aalto-yliopistossa Korkealujuusbetonin pakkasenkestävyys alhaisilla ilmamäärillä

Toni Makkonen

Diplomi-insinööri
Sweco Rakennetekniikka Oy
toni.makkonen@sweco.fi

Fahim Al-Neshawy

Staff Scientist, Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
fahim.al-neshawy@aalto.fi

Jouni Punkki

Professori (POP), Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
jouni.punkki@aalto.fi

Tausta

Hyvät säilyvyyssominaisuudet ja pitkä käyttöikä ovat tärkeä osa betonirakenteiden ympäristöystävällisyyttä. Erityisesti pakkasenkestävyys on tärkeässä roolissa pohjoismaissa, jossa ulkobetonirakenteet altistuvat jäätymis-sulamissykleille. Betonin pakkasenkestävyys määräytyy pitkälti vesi-sementtisuhteen (v/s) ja ilmamäärän perusteella. Käytännössä betonin pakkasenkestävyys on varmistettu betonin huokostamisella jo vuosikymmenien ajan. Huokostuksen ansiosta betoniin muodostuu pieniä suojahuokosia, jotka eivät normaalipaineessa täyty vedellä, ja ne estävät siten betonissa olevan veden jäätymisestä aiheutuvia sisäisiä jännityksiä.

Kiinnostus korkealujuusbetonia kohtaan on ollut viime vuosina nousussa. Korkea rakentaminen ja pitkät käyttöiät asettavat betonin säilyvyydelle uusia haasteita myös pakkasenkestävyyden osalta. Korkealujuusbetonin v/s-suhde on alhainen puristuslujuuden vuoksi. Alhainen v/s-suhde vähentää betonin kapillaarista huokoisuutta, mikä osaltaan parantaa myös pakkasenkestävyyttä. Siten betonin v/s-suhteen ollessa riittävän alhainen, betoni voi teoreettisesti olla pakkasenkestävää ilman huokostamistakin. Normien vaatimukset vähimmäisilmamäärän suhteen eivät kuitenkaan salli huokostamattoman betonin valmistusta pakkasenkestävyyttä vaativiin kohteisiin. Huokostus on erittäin tehokas

Kiinnostus korkealujuusbetonia kohtaan on noussut viime vuosina. Korkea rakentaminen ja pitkät käyttöiät asettavat betonin säilyvyydelle uusia haasteita myös pakkasenkestävyyden osalta. Korkealujuusbetonin v/s-suhde on alhainen puristuslujuuden vuoksi. Tulosten perusteella nykyiset pakkasenkestävyyden vaatimukset v/s-suhteen ja ilmamäärän osalta vaikuttavat edelleen toimivilta. F-luku toimii hyvin mitoitusmenetelmänä, mutta sen toimivuutta pitää hienosäätää alhaisimmilla v/s-suhteilla ja pienillä ilmamäärillä.

keino pakkasenkestävyyden lisäämiseen, mutta toisaalta lisääntynyt ilmamäärä alentaa merkittävästi betonin puristuslujuutta. Runsaan huokostuksen käyttäminen korkeaa lujuutta vaativissa kohteissa on jokseenkin epäkäytännöllistä, sillä sen lujuutta alentava vaikutus lisää myös sementin tarvetta ja siten aiheuttaa lisäkustannuksia, sekä lisää betonin ympäristökuormituksia.

Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella tehtiin vuoden 2019 aikana diplomityö, jossa tutkittiin korkealujuusbetonin pakkasenkestävyyttä alhaisilla v/s-suhteilla ja ilmamäärillä. Työn päätavoitteena oli arvioida eri tasoisten ilmamäärien vaikutuksia betonin pakkasenkestävyyteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Lisäksi tavoitteena oli vertailla eri testimenetelmiä betonin pakkasenkestävyyden määrittämiseksi. Työ keskittyi puhtaaseen pakkasrasitukseen ilman suolarasitusta (rasitusluokat XF1 ja XF3).

Koejärjestelyt

Laboratoriokokeita varten suunniteltiin koesarja, joka sisälsi 12 eri betonimassaa. Testibetonien väliset tärkeimmät muuttujat olivat vesi-sementtisuhteet ja ilmamäärä. Valitut vesi-sementtisuhteet olivat 0,35, 0,40 ja 0,45. Betonien tavoiteilmamäärät suunniteltiin vastaamaan kolmea testattavaa huokostuksen tasoa. Ensimmäisellä tasolla betoneita ei huokostettu ollenkaan, toinen taso oli tavan-

1 Helsingin Kruunuvuoren sillassa tullaan käyttämään korkealujuusbetonia.

2 Betonin pakkasenkestävyys määräytyy pitkälti vesi-sementtisuhteen (v/s) ja ilmamäärän perusteella. Käytännössä betonin pakkasenkestävyys on varmistettu betonin huokostamisella jo vuosikymmenien ajan.



1



2

omaista kevyempi huokostus, ja kolmas taso suunniteltiin vastaamaan tavanomaista huokostuksen tasoa. Tavoiteilmamääräksi valittiin 1%, 3% ja 5%. Massojen muut ominaisuudet pyrittiin vakioimaan, esimerkiksi kaikkien betonien tavoite painuman suhteen oli 150–200 mm. Notkistin- ja huokostinannokset säädettiin kohdalleen ennakkokokein, ilmamäärissä sallittiin noin 1% vaihteluväli. Myös sekoitusaika oli vakioitu.

Vaihtelevat v/s-suhteet valmistettiin käyttäen sideaineena Finnsementin SR-sementtiä (CEM I 42,5 N-SR3), mutta v/s-suhteella 0,35 valmistettiin betonit lisäksi myös Finnsementin Pikasementillä (CEM I 52,5 R). Lisäaineina käytettiin BASF Oy:n tuotteita. Notkistimia oli kaksi, MasterGlenium SKY 600 SR-sementille ja MasterGlenium ACE 544 Pikasementistä valmistetuille massoille. Huokostin, MasterAir 100, oli sama kaikille betoneille. Betonit nimettiin käytetyn sementin, v/s-suhteen ja tavoiteilmamäärän mukaan, tyyliin ”PK-035-1” (Pikasementti, v/s 0,35, tavoiteilmamäärä 1%).

Betoneista tutkittiin lujuudenkehitystä ja pakkasenkestävyyttä. Lisäksi tehtiin sovellettu dilaatiokoe jäätymislaajeneman määrittämiseksi. Betonin pakkasenkestävyyden määrittämiseksi ei ole yhtä ja oikeaa testimenetelmää, vaan eri testeillä mitataan hieman eri ominaisuuksia. Tekemällä useampia testejä samalle betonille, saadaan kattavampi arvio sen pakkasenkestävyydestä, sekä voidaan vertailla eri testimenetelmien välisiä eroja. Testibetonien pakkasenkestävyyksiä arvioitiin seuraavilla menetelmillä:

- V/s-suhteen ja ilmamäärän avulla laskettu F-luku
- Kovettuneesta betonista painekyllästyksellä määritetty suojahuokossuhde
- Laattakoe ilman suolarasitusta (CEN/TR 15177)
- Palkkikoe, 100 jäädytys-sulatussykliä (SFS 5447)
- Ohuthieanalyysi (VTT TEST R003-00-2010)

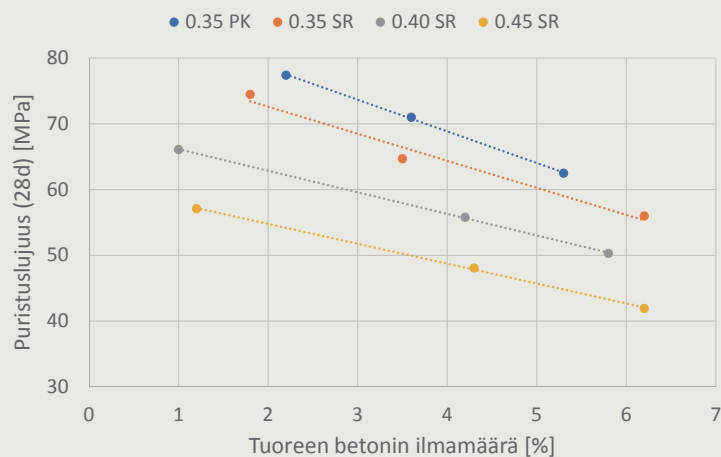
Taulukko 1. Testibetonien koostumukset

Tunnus	Sementti- tyyppi	Sementti, (kg/m ³)	v/s-suhte	Tavoite-ilma- määrä, (%)
PK-035-1	Pika	440	0,35	1,0
SR-035-1	SR	440	0,35	1,0
SR-040-1	SR	410	0,40	1,0
SR-045-1	SR	380	0,45	1,0
PK-035-3	Pika	440	0,35	3,0
SR-035-3	SR	440	0,35	3,0
SR-040-3	SR	410	0,40	3,0
SR-045-3	SR	380	0,45	3,0
PK-035-5	Pika	440	0,35	5,0
SR-035-5	SR	440	0,35	5,0
SR-040-5	SR	410	0,40	5,0
SR-045-5	SR	380	0,45	5,0

Taulukko 2. Testibetonien puristuslujuudet (MPa) 28 vrk iässä mitattuna 100 mm:n kuutioilla.

Ilmamäärä (%)	v/s-suhte (Sementtityyppi)			
	0,35 (PIKA)	0,35 (SR)	0,40 (SR)	0,45 (SR)
1–2 %	77	75	66	57
3–4 %	71	65	56	48
5–6 %	63	56	50	42

Kuva 1. Ilmamäärän vaikutus testibetonien puristuslujuuksiin. Betonin puristuslujuus aleni 4,7–5,5 % ilmamäärä-%:a kohden.



F-luku on Betoninormeissa BY65 määritetty laskennallinen työkalu pakkasenkestävän betonin suunnittelun avuksi. Suojahuokos-suhteen määrittämiseen käytettiin yksinkertaistettua painekyllästystestiä, joka mukailee vanhaa suomalaista testimenetelmää. Eurofins Expert Services Oy toteutti laatta- ja palkkiko- keet, sekä ohuthieanalyysit.

Tulosten arviointi

Puristuslujuus

Testibetonien puristuslujuudet määritettiin 7, 28 ja 91 päivän iässä. Kokeissa käytettiin 100 mm:n kuutioita ja esitetyt tulokset ovat keskiarvolujuuksia. Siten arvot eivät ole suoraan verrannollisia tavallisten lujuusluokkien kanssa. Taulukko 2 esittelee betonien keskimääräiset puristuslujuudet 28 päivän iässä. Suurin mitattu arvo oli 77 MPa. Korkealujuusbetonin määritelmälle ei ole Suomessa virallista raja-arvoa, mutta puolet testibetoneista ylittivät 60 MPa:n lujuuden, jota voidaan pitää jonkinlaisena epävirallisena rajana. Toisaalta käytännössä lujuusluokan C55/67 vaatimukset

täyttäisivät vain huokostamattomat betonit, joiden v/s-suhde oli 0,35.

Puristuslujuudet laskivat odotetusti v/s-suhteen ja ilmamäärän kasvaessa. Vertaamalla lujuuksia tuoreesta betonista mitattuihin ilmamääriin huomattiin, että kasvava ilmamäärän vaikutus oli melko johdonmukainen. Kuvasta 1 nähdään, että mittauspisteisiin sovitut lineaariset regressiokäyrät ovat jokseenkin yhdensuuntaisia. Tulosten perusteella prosentoin lisäys ilmamäärässä laski lujuutta melko tarkasti viidellä prosentilla kaikilla v/s-suhteilla. Tästä syystä liian korkeat ilmamäärät ovat epäedullisia varsinkin kohteissa, joissa vaaditaan korkeaa lujuutta.

Pakkaskokeet

Suorissa pakkaskokeissa koekappaleet altistetaan toistuville jäädytys- ja sulatussykleille, ja seurataan betonin ominaisuuksissa tapahtuvia muutoksia suorittamalla mittauksia tietyin väliajoin. Kokeissa lämpötila vaihtelee +20 ja -20 °C välillä. Laattakokeissa mitattavat ominaisuudet ovat pinnan rapauma ja sisäinen vaurio. Sisäistä vauriota kuvataan suhteel-

lisen dynaamisen kimmokertoimen (RDM) avulla, joka lasketaan joko ultraäänipulssin etenemisnopeudesta tai koekappaleen ominaistaajuudesta. Ilman suolarasitusta pinnan rapauma on merkittävästi pienempää, joten makealla vedellä testattuna sisäinen vaurio on yleensä määräävä. Myös palkkikokeissa mitataan sisäisen vaurion kehittymistä, mutta lisäksi siinä määritetään näytteiden taivutusvetolujuudet koestuksen jälkeen. Palkkikoetta varten valmistetaan myös referenssikappaleet, joita ei altisteta pakkasrasitukselle. Vertaamalla referenssi- ja koepalkkien lujuuksia koestuksen lopuksi, voidaan nähdä pakkasvaurioiden vaikutus betonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Betoninormin BY65 mukaiset vaatimukset pakkasenkestävyydelle eri testimenetelmillä on esitetty taulukossa 3. Lukuarvon puuttuminen merkitsee, että kyseinen koemenetelmä ei sovellu rivin osoittamaan rasitusluokkaan.

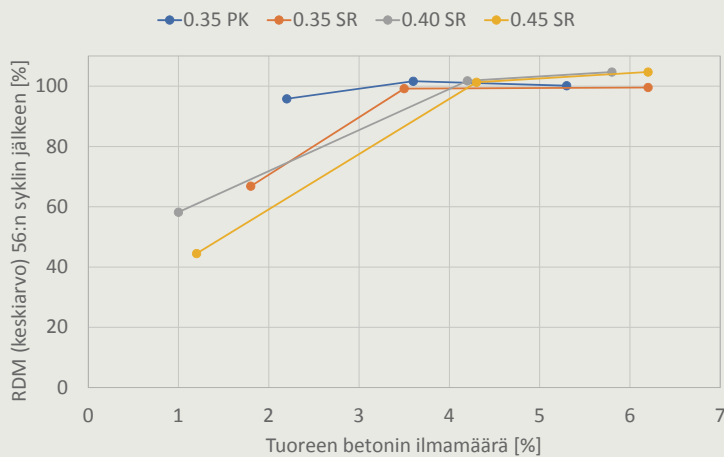
Laattakokeiden tuloksista nähtiin, että pinnan rapauma oli hyvin vähäistä. Suurin mitattu rapauma oli 52 g/m², kun tiukimman vaatimuksen mukaan vielä 100 g/m² on hyväksyttävä arvo. Tästä huolimatta kaksi

Taulukko 3. Pakkaskokeiden vaatimukset eri rasitusluokissa (BY65).

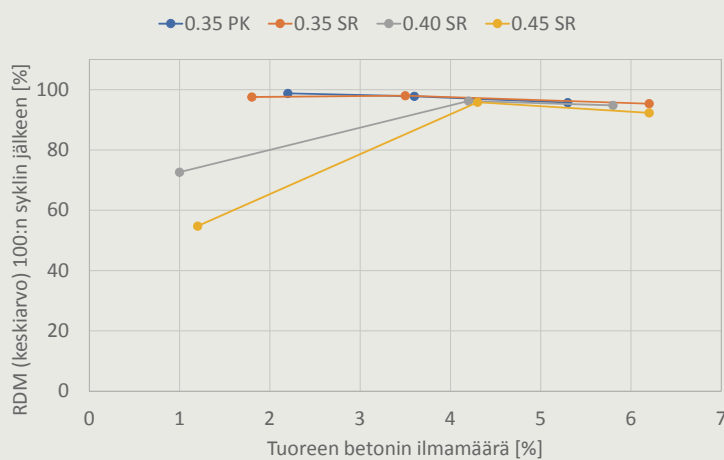
Käyttö-ikä (a)	Rasitus-luokka	Palkkikoe, SFS 5447 ^(a)			Laattakoe, CEN/TR 15177 ^(b)	
		Syklien määrä	Taivutuslujuuksien suhde	Suhteellinen kimmokerroin	Pinnan rapauma [g/m ²]	Suhteellinen kimmokerroin
50	XF1	100	≥ 67 %	≥ 75 %	≤ 500	≥ 67 %
	XF3	300	≥ 67 %	≥ 75 %	≤ 200	≥ 75 %
100	XF1	300	≥ 67 %	≥ 75 %	≤ 200	≥ 75 %
	XF3	–	–	–	≤ 100	≥ 85 %

a) Toisen vaatimuksen tulee täyttyä

b) Kummankin vaatimuksen tulee täyttyä



Kuva 2. Laattakokeen suhteellinen dynaaminen kimmokerroin ja tuoreen betonin ilmamäärä.



Kuva 3. Palkkikokeen suhteellinen dynaaminen kimmokerroin ja tuoreen betonin ilmamäärä.

huokostamatonta betonia erottui selkeästi joukosta muita korkeamman rapauman takia. Täytyy kuitenkin muistaa, että pieni pinnan rapauma ei yksin riitä takaamaan pakkasenkestävyyttä, vaan laattakokeen vaatimusten mukaan myös suhteellisen kimmokertoimen vaatimus tulee täyttyä. Lisäksi rapauma on varsin huono mittari pakkasenkestävyyden arvioinnissa rasitusluokissa XF1 ja XF3.

Suhteellisen kimmokertoimen arvoissa huokostuksen vaikutus näkyy selkeämmin. Sisäinen vaurio oli huomattavasti suurempaa ilman huokostusta, kun taas kaikki huokostetut betonit voitiin todeta pakkasenkestäviksi laattakokeen perusteella. Lisäksi Pikasementistä valmistettu betoni selvisi laattakokeesta verrattain hyvin myös ilman huokostusta. Sillä oli kuitenkin huokostamattomista betoneista suurin ilmamäärä, mikä on helppo huomata kuvassa 2, jossa suhteellisen kimmokertoimen arvoja on verrattu betonien ilmamääriin.

Palkkikokeessa alhaisen v/s-suhteen betonit pärjäsivät selvästi paremmin myös ilman huokostusta. Suoritettu palkkikoe oli kuitenkin aikataulusyistä rajattu 100 pakkassykliin, joka

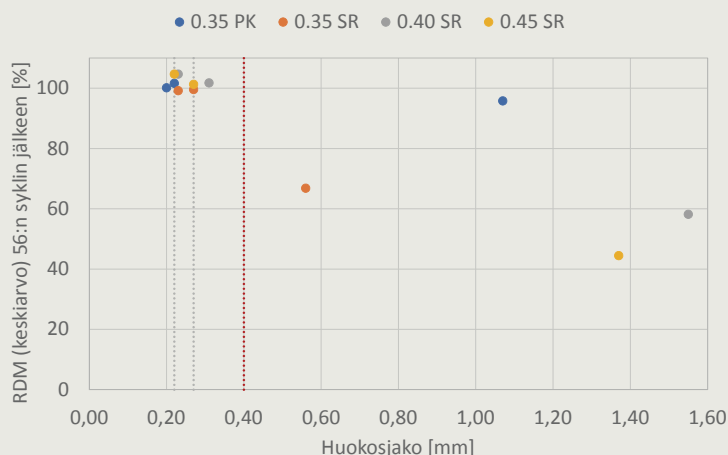
betoninormien vaatimusten mukaan riittää arvioimaan pakkasenkestävyyttä vain luokassa XF1 50 vuoden käyttöiällä. Vaativampien suunnitteluluokkien arviointiin vaadittaisiin 300 sykliä. Kuitenkin, kyseisillä parametreilla ainoastaan kaksi huokostamatonta betonia alitti pakkasenkestävyyden vaatimukset.

Ohuthieanalyysi

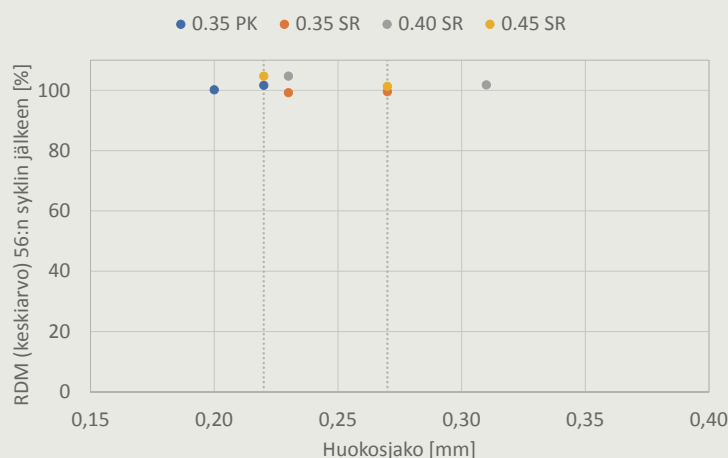
Ohuthieanalyysillä voidaan tutkia betonin mikrorakennetta. Tutkimusta varten ohuthieet valmistettiin palkkikokeesta jäljelle jääneistä kappaleista taivutuslujuustestin jälkeen. Jokaisesta betonista valmistettiin kaksi hietää VTT-TEST-R003-2010 testiohjeen mukaisesti. Ohuthieanalyysit tehtiin Eurofinsin laboratoriossa.

Huokostamattomat betonit erottuivat ohuthieanalyysissä selkeästi. Niissä ei näkynyt lainkaan pieniä ilmakuplia ja tiivistyshuokosia-kin oli vähän. Siten myös huokosjaon arvot kasvoivat epätarkalle alueelle. Huokosjaon tulosta ei yleensä ilmoiteta tarkkana lukuarvona sen ollessa yli 0,40 mm. Tutkimuksessa lukuarvoja käytettiin kuitenkin suuntaa antavina vertailussa pakkaskokeiden tuloksiin. Ne betonit,

Kuva 4. Laattakokeen sisäinen vaurio suhteessa huokosjakoon. Punainen katkoviiva kuvaa huokosjaon hyväksyttävää ylärajaa.



Kuva 5. Laattakokeen sisäinen vaurio huokosjaon hyväksytyllä alueella ($\leq 0,40$ mm). Katkoviivat kuvaavat BY65:n mukaisia vaatimuksia eri rasitusluokissa.



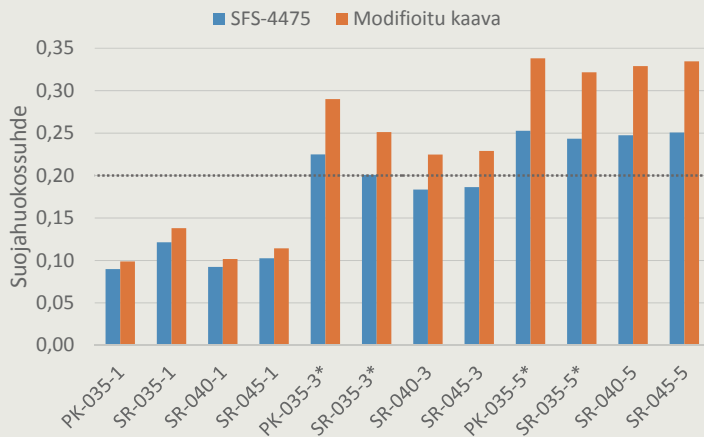
joiden huokosjako oli hyväksytyllä alueella, pärjäsivät myös suorissa pakkaskokeissa selvästi paremmin. Joissakin tapauksissa betoni täytti vaatimukset suorassa pakkaskokeissa, vaikka huokosjakovaatimus ei täytynytäkään. Osa betoneista suoriutui siten pakkaskokeista paremmin kuin huokosjaon vaatimukset olisivat antaneet ymmärtää. Kokeiden perusteella ohuthieanalyysi on toimiva menetelmä riittävän pakkasenkestävyyden osoittamiseksi, mutta betonin pakkasenkestävyyttä ei kannata hylätä pelkästään huokosjaon perusteella. Huokosjaon vaatimukset vaikuttavat olevan varmalla puolella pakkasenkestävyyden suhteen, joten myös vaatimukset alittava betoni voi olla pakkasenkestävää suoran pakkaskokeen perusteella.

Vaikka kaikkien huokostettujen betonien huokosjaot olivat hyväksytyllä alueella, iso osa tuloksista sisälsi huomattavan suurta hajontaa. Testausohjeen mukaan huokosjaon tulosta ei hyväksytä, mikäli kahden rinnakkaisen tuloksen välinen poikkeama on 0,10 mm tai enemmän. Viidellä kahdeksasta huokostetusta betonista poikkeama ylitti kyseisen rajan, joten

normaalitilanteessa kokeet tulisi uusilla näytteillä. Tutkimuksessa nämäkin tulokset kuitenkin hyödynnettiin suuntaa-antavina arvoina. Suurin osa merkittävästi poikkeavista tuloksista liittyi kevyesti huokostettuihin betoneihin (kokonaisilmamäärä 3–4 %). Voi olla, että huokosanalyysi on kehitetty toimimaan hyvin normaaleilla ilmamäärillä, mutta tarkkuus on selvästi huonompi kevyemmällä huokostuksella. On toki myös mahdollista, että tavallista pienempi huokostinannos voi johtaa epähomogeenisempään huokosrakenteeseen.

Painekyllästystesti

Kovettuneen betonin huokosrakennetta tutkittiin myös painekyllästystestin avulla. Koe on suunniteltu mukaillen vanhaa suomalaista testimenetelmää (SFS-4475:1988), jossa betonin suojahuokossuhde määritetään hyödyntäen painekyllästystä. Standardin mukaan suoja-huokossuhde lasketaan kaavan (1) mukaisesti. Standardi poistettiin käytöstä vuonna 2009, sillä se antoi virheellisiä tuloksia tiiviimmillä betonilaaduilla. Vanhasta standardista poiketen tutkimuksessa käytettiin kuitenkin



Kuva 6. Betonien suojahuokossuhteet laskettuna vanhan ja modifioidun kaavan mukaisesti.

merkittävästi pienempiä koekappaleita, niin että betoni voitaisiin saada täysin kyllästettyä kapillaarisesti. Tutkimuksessa kokeiltiin myös modifioitua kaavaa (2) suojahuokossuhteen laskemiselle, jolloin kaava saatiin reagoimaan herkemmin ilmahuokosten määrän muutoksiin.

$$p_r = \frac{P_a}{P_w + P_a} \quad (1)$$

$$p_{r2} = \frac{P_a}{P_w} \quad (2)$$

Jossa:

p_r = suojahuokossuhde

P_a = painekyllästyksessä absorboitunut vesi

P_w = normaalipaineessa imeytynyt vesi

Ohuthieanalyysin tapaan, myös painekyllästystesti erotteli huokostetut ja huokostamattomat betonit selkeästi. Huokostettujen betonien suojahuokossuhteet olivat tasaisesti korkeampia kuin huokostamattomien. Suojahuokossuhteen ja suorien pakkaskokeiden välillä oli voimakas korrelaatio. Vanhan koemenetelmän aikaan pakkasenkestävyyteen riittävänä rajana suojahuokossuhteelle on pidetty arvoa 0,20. Kaikki huokostettujen betonien arvot olivat lähellä tätä rajaa, mutta tehtyjen kokeiden perusteella raja voisi olla jopa hieman alhaisempi.

Koe jouduttiin uusimaan huokostetuille betoneille, joiden v/s-suhde oli 0,35 kun huomattiin tulosten olevan merkittävästi odotettuja pienempiä esimerkiksi kokonaisilmamäärän osalta. Menetelmän toimivuutta erittäin alhaisilla v/s-suhteilla tai muuten todella tiiviillä betoneilla pitäisi siis tutkia lisää, mutta koe olisi todennäköisesti käyttökelpoinen menetelmä riittävän pakkasenkestävyyden osoittamiseksi. Painekyllästystesti on myös merkittävästi nopeampi ja vaivattomampi

testimenetelmä kuin suorat pakkaskokeet. Samoin ohuthieanalyysiin verrattuna painekyllästystesti vaatii selvästi vähemmän työtä.

Johtopäätökset

Kokeiden perusteella huokostuksen käyttö on perusteltua pakkasenkestävän betonin valmistuksessa, ainakin vesi-sementtisuhteen ollessa 0,35 tai suurempi. Pakkaskestävyyteen vaadittava ilmamäärä käytetyillä v/s-suhteilla vaikuttaa kuitenkin olevan verrattain alhainen, sillä kaikki huokostetut betonit pärjäsivät pakkaskokeissa hyvin. V/s-suhteella 0,35 ilman huokostusta valmistetut betonit pärjäsivät osittain muita huokostamattomia paremmin, mutta niissä oli myös suuremmat tuoreen betonin ilmamäärät. Joissain tapauksissa v/s-suhde 0,35 voi siis tuottaa pakkasenkestävää betonia huokostamattomanakin, mutta ei välttämättä kaikissa tapauksissa. Kyseinen v/s-suhteen arvo on kuitenkin lähellä v/s-suhdetta, jolla betonin pakkasenkestävyys on riittävä XF1 ja XF3 rasitusluokissa myös ilman huokostusta.

Kasvava ilmamäärä vaikutti betonin mekaanisiin ominaisuuksiin johdonmukaisesti, prosentoin lisäys ilmaa vastasi melko tarkasti viiden prosentin puristuslujuuden menetystä kaikilla yhdistelmillä. Korkeaa lujuutta tavoitellessa maltillinen ilmamäärän lisäys ei siis laske lujuutta merkittävästi, mutta parantaa pakkasenkestävyyttä huomattavasti.

Epäsuorilla testimenetelmillä pystyttiin arvioimaan suorien pakkaskokeiden tuloksia melko tarkasti, etenkin onnistuneesti huokostetuilla betoneilla. Epäsuorilla kokeilla kyetään osoittamaan riittävä pakkasenkestävyys, mutta joissain tapauksissa betoni pärjasi suorassa pakkaskokeessa paremmin kuin epäsuoran kokeen tulosten perusteella olisi arvioitu. Pakkaskestävyyttä ei siis aina kannata hylätä pelkästään epäsuoran kokeen

perusteella, vaan jatkotutkimusta voi tehdä suoran pakkaskokeen avulla. Jäätymisdilatio vaikutti tulosten perusteella riippuvan enemmän v/s-suhteesta kuin ilmamäärästä, toisin kuin kaikkien muiden pakkaskokeiden tulokset.

Tulosten perusteella nykyiset pakkasenkestävyyden vaatimukset v/s-suhteen ja ilmamäärän osalta vaikuttavat edelleen toimivilta. F-luku toimii hyvin mitoitusmenetelmänä, mutta sen toimivuutta voitaisiin vielä hienosäätää alhaisimmilla v/s-suhteilla ja pienillä ilmamäärillä.



Tiedot työstä, tekijästä, valvoja yms.

Työn nimi: Frost resistance of high strength concrete with low air contents

Tekijä: Toni Makkonen

Koulutusohjelma: Building Technology, Aalto-yliopiston Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Valvoja: Professori (PoP) Jouni Punkki

Ohjaaja: TkT. Fahim Al-Neshawy

Lisätietoa työstä: <https://aaltodoc.aalto.fi>

Toni Makkonen on alun perin Joensuu kotoisin oleva diplomi-insinööri. Hän valmistui vuonna 2019 Aalto-yliopiston Insinöörیتieteiden korkeakoulusta, rakennustekniikan laitokselta.

Yhteystiedot: toni.makkonen@sweco.fi

Abstract

Frost resistance is an essential part of durability and service life of concrete structures, especially in the Scandinavian countries. Frost resistance of concrete is mainly dependent on water to cement ratio (w/c) and air content. Low w/c-ratio provides more strength, whereas entrained air provides frost protection, but too high air content will also significantly decrease the strength and other mechanical properties of concrete. In this thesis, the effects of air entraining on the frost resistance properties of concrete were studied. Main objective was to investigate what level of air content would be enough to provide sufficient frost resistance with low w/c-ratios.

Research included a compact literature review and comprehensive experimental testing in laboratory. Total of 12 concrete mixes with varying w/c-ratios and air contents were designed and produced. W/C-ratios and air contents were chosen to be relatively low compared to typical concrete production. Both direct and indirect test methods were used to evaluate the frost resistance of the test concretes. Testing was focused on pure frost attack without de-icing solutions (exposure classes XF1 and XF3).

Based on the experiments, it was concluded that use of air entraining seems justified when producing frost resistant concrete, at least when water to cement ratio is 0.35 or higher. All the air entrained concretes performed well in the freeze-thaw tests, which indicates that the required level of air entraining to reach adequate frost resistance is relatively low. Concretes with w/c of 0.35 performed somewhat better in the freeze-thaw tests even without air entrain-

ing, but they also had the highest initial air contents. Increasing air content due to air entraining affects the mechanical properties of similar concrete mixes rather consistently. In these tests one additional percent of air decreased the compressive strength of concrete by approximately 5% in all cases.

Indirect test methods, such as thin section analysis seem to predict the results of freeze-thaw tests quite accurately, especially with well air-entrained concretes. Indirect testing could be used as accepting criteria for frost resistance, but in some cases concrete performed well in direct frost exposure even though indirect results indicated the opposite. Freezing dilation results seemed to be more connected to w/c-ratio than air content, which was inconsistent with the results of other freeze-thaw tests.

The results indicate that the present Finnish requirements for air content and w/c-ratio are still sensible when it comes to the frost resistance of concrete. F-factor works well as a design tool, but the equation could be revised for very low w/c-ratios and air contents.