



Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

YAPI MALZEMESİNDE ÖZEL KONULAR

-5-

Prof. Dr. Halit YAZICI
Yüksek Performanslı
betonlar

<http://halityazici-deu.com>

-
- YÜKSEK PERFORANSLI BETON TASARIMI ve ÜRETİMİ NORMAL BETON YAPIMINDAN DAHA KARMAŞIKTIR
 - ÇÜNKÜ YÜKSEK PERFORMANSLI BETONDA DAYANIM SADECE SU/BAĞLAYICI ORANINA BAĞLI DEĞİLDİR

-
- Yüksek performanslı betonda:
 - DAYANIM SİLİKATLARIN HİDRATASYONUNA BAĞLI İKEN,
 - TAZE BETON REOLOJİSİ KALSİYUM Ve SÜLFAT İYONLARI VARLIĞINDA INTERSTITIAL (C3A ve C4AF) fazın HİDRATASYONUNA BAĞLIDIR

-
- ÇIPLAK GÖZLE BASINÇ YÜKLEMESİNDE KIRILMIŞ ÖRNEK İNCELENİRSE:
 - KIRILMANIN ARAYÜZEYDE ve HARÇTA OLUŞTUĞU GÖZLENİR
 - ZAYIF İRİ AGREGALAR VARSA KIRILMA DÜZLEMİ BUNLARIN İÇİNDEN DE GEÇEBİLİR

-
- GÖÇME ÜÇ FAZIN EN ZAYIF KISIMNDA OLUŞUR
 - DAYANIM ve KIRILMA İÇ YAPIDAKİ ZAYIFLIKLARA BAĞLIDIR
 - NORMAL BETONDA EN ZAYIF BÖLGE ARAYÜZEYDİR
 - BUNU HARÇ KISMI TAKİP EDER

- 
-
- BİR ZİNCİRİN MUKAVEMETİ EN ZAYIF HALKANIN MUKAVEMETİ KADARDIR
 - GÖÇME EN ZAYIF HALKADA OLUŞUR

-
- YÜKSEK PERFORMANSLI BETONDA HİDRATE ÇİMENTO PASTASI KIRILGAN KATILARIN TEMEL PRENSİPLERİNE UYAR
 - İÇYAPI VE DAVRANIŞ AÇISIDAN SERAMİKLERE BENZER

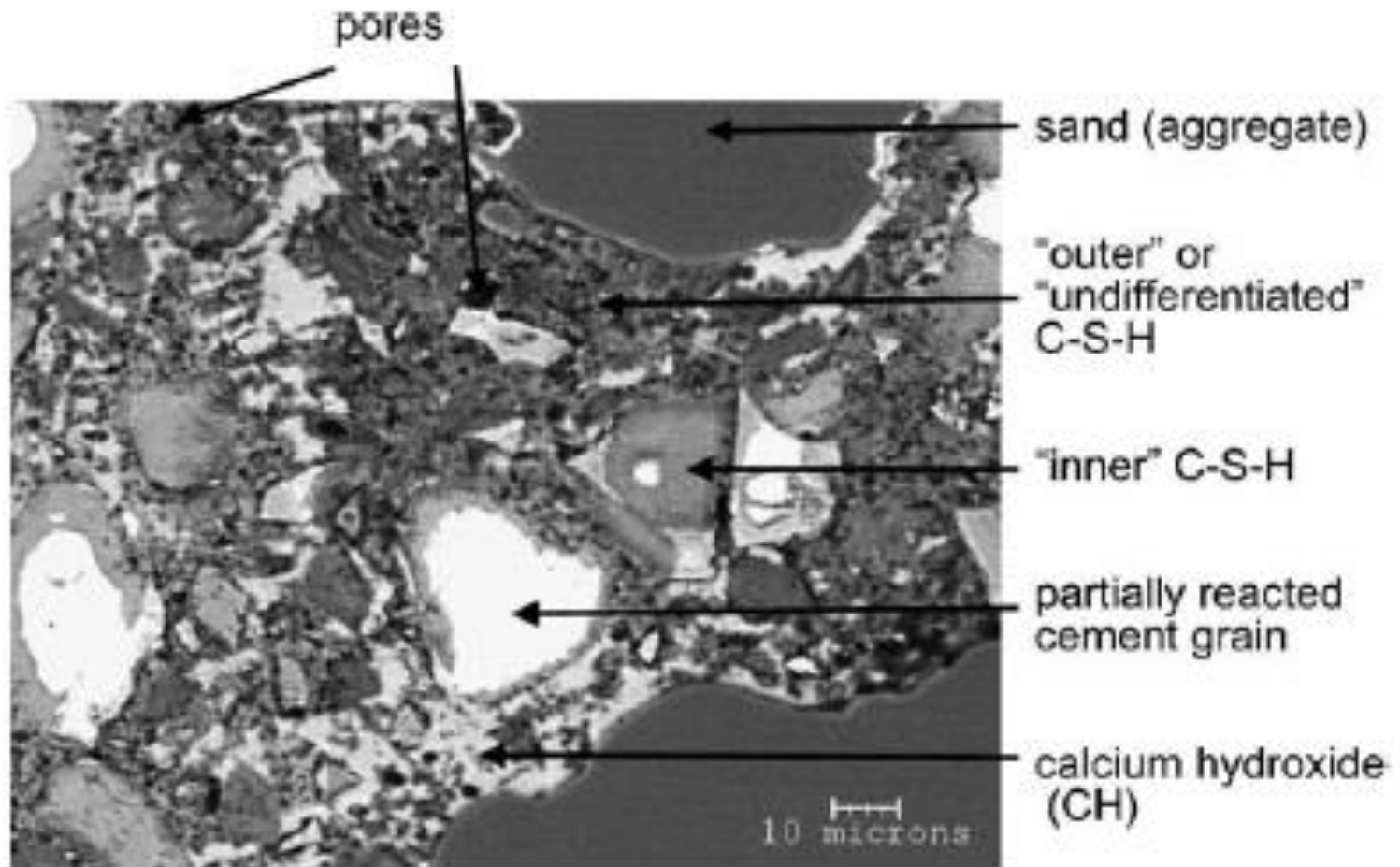
-
- KIRILGAN MALZEMELERİN BASINÇ DAYANIMLARI ÇEKME DAYANIMLARINDAN YÜKSEKTİR
 - Çekme yüklemesinde bir kusur veya mikro-çatlağın çok hızlı ilerlemesi ile göçme oluşur
 - Basınç yüklemesinde ise göçme oluşması için birçok çekme çatlağının birleşmesi gerekir. Mikro-çatlak oluşması ve ilerlemesi için çok daha fazla enerji gereklidir

-
- $f_c = f_o (1-p)^m$
 - f_c : basınç dayanımı
 - f_o : sıfır porozitede gerçek basınç dayanımı
 - p : porozite
 - m : kristaller arası bağlara, kusur ve gözeneklerin sayısına ve boyutuna, safsızlıklara bağlı katsayı

-
- Basınç dayanımı genellikle boşluk boyutunun artmasıyla azalırken, tane boyutunun küçülmesi ile artmaktadır.
 - Hidrate çimentonun dayanımı Şu faktörler dikkate alınırsa geliştirilebilir:
 - Porozite: çok sayıda büyük boşluk veya gözenek (>50 nm) özellikle bir bölgede toplanırsa dayanım düşer

-
- Tane boyutu: kristal fazların mukavemeti azalan tane boyutu ile artar
 - Homojen olmayan yapı: çok fazlı malzemelerde homojen olmayan içyapı dayanım kaybına sebep olur

SEM (TARAMALI ELEKTRON MIKROSKOBU) FOTOĞRAFI

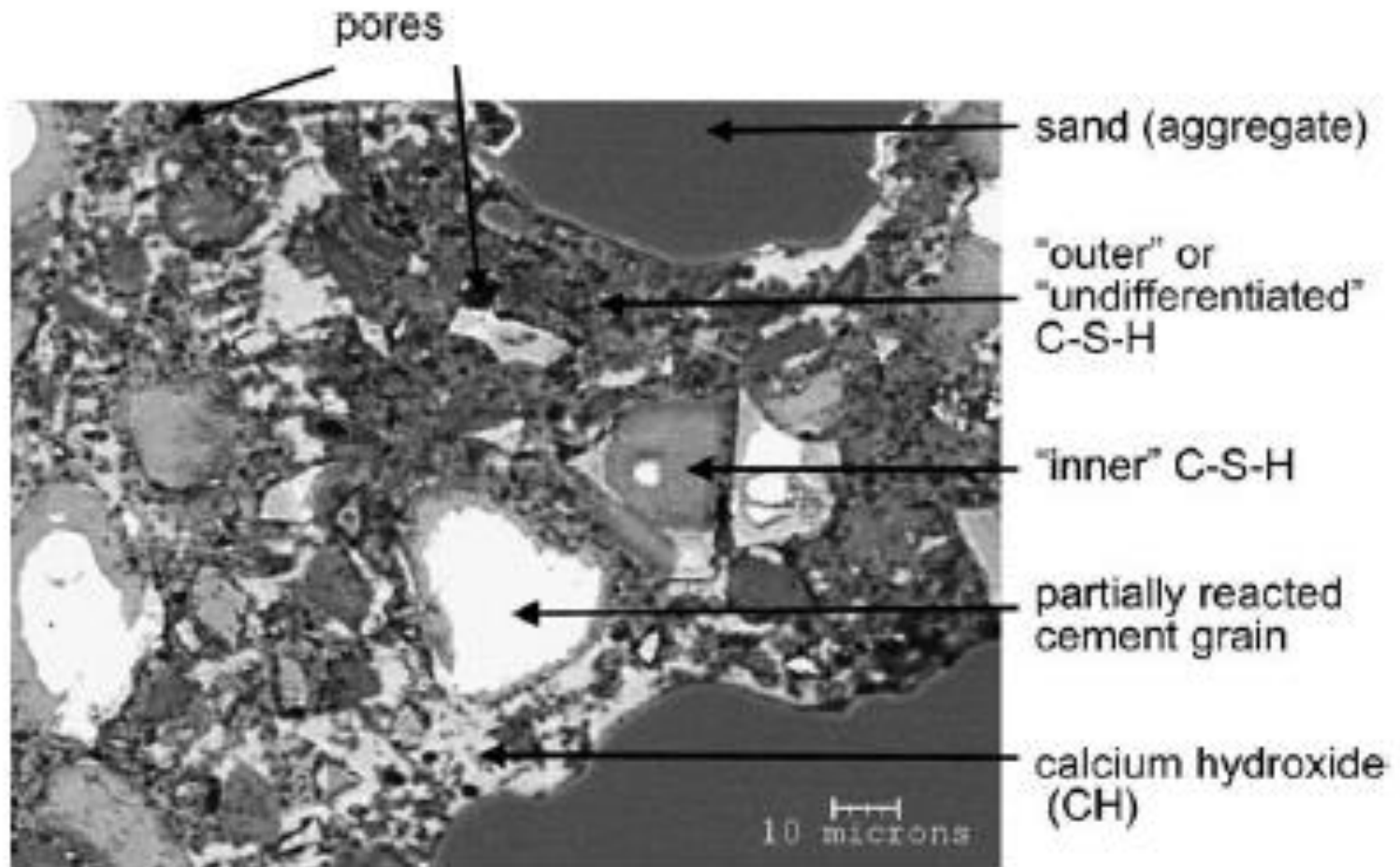


İÇ VE DIŞ ÜRÜN

- Çimento tanelerinin etrafındaki “inner product” iç ürün daha sıkı ve zayıf kristalleşmiş yapıdadır
- Çimento tanelerinin etrafındaki su dolu boşlukta kristalize olan ürün ise “outer product” dış üründür. Boşluk arttıkça daha büyük kristaller oluşur
- Bu nedenle kırılma yolu iç üründen çok genelde dış üründen geçer

-
- Dış ürünü azaltarak iç ürünü artırarak hidrate çimentonun dayanımı artırılabilir
 - Düşük su/çimento oranı (Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı)
 - Puzolonik katkılar

SEM (TARAMALI ELEKTRON MIKROSKOBU) FOTOĞRAFI



-
- Kimyasal büzülme silikat fazlarının hacimlerinin hidrate olmamış silikat fazının hacminden %8-10 az olması nedeniyledir. Hidratasyonla ilerler, özellikle yeterli kr yapılmazsa
 - Büzülme agrega iskeletince engellenince hamurda çok ince mikro çatlak ađı oluşur
 - Çatlak ağının büyüklüğü Hidrate olmakta olan silikat fazının miktarına ve agreganın kısıtlamasına bağlıdır

-
- Basınç dayanımı>>>> porozite: su hacmi, hidrate çimento hacmi, hava hacmi
 - $f_c = k(c/(c+w+a))^2$
 - Feret
 - f_c :hidrate çimento basınç dayanımı
 - c,w, a çimento, su, hava hacmi
 - $f_c = k(1/(1 + w/c + (a/c)^2))$
 - a/c ihmal edilebilir hava içeriği düşükse

-
- Su/çimento oranı azalınca çimento taneleri birbirine yaklaşır
 - Kapiler boşluk oranı düşer
 - Outer product oluşumu için boşluk azalır
 - Sistemde daha az su olduğu için outer product oluşumu için iyon konsantrasyonu kısa sürede artar
 - Az boşluklu outer product çimento taneleri arasında köprü oluşturur
 - Bu nedenle su/çimento oranı düşünce dayanım kazanma hızı artar

-
- Çimento partikülleri birbirlerine yakın ve iyi bağlı oldukları için su hareketi azalır inner product daha iyi gelişir
 - Yüksek basınç (350 MPa) ve yüksek basınçlı otoklav küründe (250 C) Roy ve ark., 1972 su/bağlayıcı oranını 0.09'a indirerek basınç dayanımını 470 MPa olan çimento hamuru üretmişlerdir

-
- Bache, 1981 yüksek miktarda akışkanlaştırıcı, silika dumanı, çok yüksek mukavemetli agrega ile 270 MPa basınç dayanımı olan beton üretmiştir (su/bağlayıcı: 0.16)
 - Young, 1994 “Macro Defect Free Concrete”
 - 70 MPa çekme mukavemeti
 - Çimento, selüloz hydroxypropylmetil veya hydrolysed polyvinylacetat ve su karışımı ile

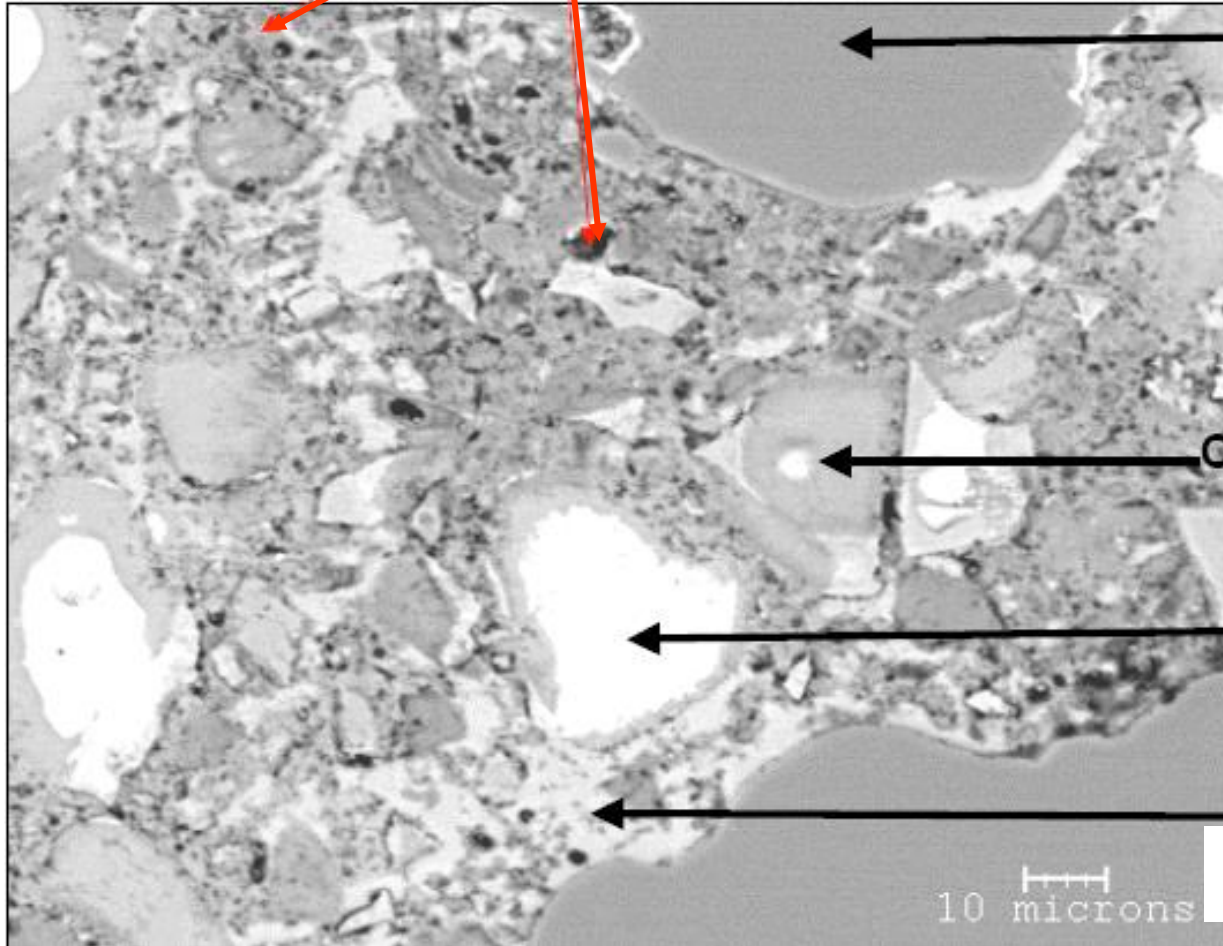
-
- DEÜ Malzeme Laboratuvarında
 - Su/bağlayıcı oranı 0.15 olan reaktif pudra betonlarında 403 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. (kalıpta iken basınç altında sıkıştırma + otoklav kürü)

-
- Bu özel uygulamalar, teorik bilgilere uygun olarak özel önlemlerle çimento matrisinin örneklere uygulanmasıyla çok çok yüksek mukavemetli betonlar üretilebileceğini göstermektedir.
 - Yüksek performanslı beton üretiminde anahtar faktör su/bağlayıcı oranını mümkün olan en düşük seviyeye çekmektir.

-
- Hidratasyon ürünlerinin tane boyutlarının küçültülmesi
 - Su/bağlayıcı oranının düşürülmesi çok ince yüzeyli inner product oluşumunu arttırır
 - inner product (CSH) SEM analizinde çok yoğun camsı bir yapı gibi görünür
 - Çok düşük su/bağlayıcı oranında hidrate çimento hamurunda hekzogonal büyük CH tabakaları, uzun etrenjit iğnecikleri veya uzun CSH lifçikleri yoktur

Beton: Karmaşık iç yapı

Gözenekler




Kum tanesi

C-S-H

Çimento tanesi

Kalsiyum hidroksit

10 microns


- 
-
- Heterojenliđi azaltma
 - Yüksek mukavemet elde edebilmek için iyi bir sıkıştırma yapılarak hapsolmuş hava boşlukları azaltılmadır.
 - Akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak çimentonun dağılması sağlanmalı, topaklaşma engellenmelidir

-
- Arayüzeyin kuvvetlendirilmesi
 - Çimento ve harç ile kıyaslandığında betonda su/bağlayıcı oranınının 0.4'ten 0.70'e çıktığında basınç dayanımı-porozite ilişkisinden hesaplanandan daha düşük mukavemet elde edilmektedir.
 - Bu durum agreganın boyutu, şekli ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak suyun taze betonda homojen dağılmayarak agrega tanelerinin etrafında toplanması (lokal duvar etkisi), terleme suyunun bu bölgede toplanma eğilimi gibi faktörlerle ara yüzeyde su/çimento oranınının artması ile açıklanabilir

-
- Ara yüzeyde göreceli olarak daha büyük boşluklar ve büyük kristaller bulunur
 - Bu bölge en zayıf halka
 - Beton gerilmeye maruz kaldığında ilk önce arayüzeyde mikro-çatlaklar oluşur
 - Normal betonda (s/b 0.5-0.7) yüklemmeden önce bile termal büzülme veya kuruma büzülmesi nedeniyle oluşan birim şekil değiştirmeler arayüzeyde mikroçatlak oluşturacak kadar büyüktür


-
- Betonun mukavemeti yük altında mikroçatlakların yayılması ve birleşmesi tarafından kontrol edilir
 - Çimento hamurunun zamanla hidrate olmasıyla özellikle arayüzeydeki boşluklar azalır
 - Kireçtaşı ve bazı silisli kayalar, kalsine kil veya seyl gibi agregalar kullanıldığında Van der Waals bağının yanında kimyasal bağ oluşması da mikroçatlakları azaltır


-
- Normal betonda (S/ç 0.5-0.7) arayüzeyin zayıf olması agreganın dayanıma etkisi önemli mertebede değildir. Çimento hamuru agrega arasında gerilme aktarımı azdır.

- 
-
- Arayüzeyin kuvvetlendirilmesi ile birlikte agreganın elastik özellikleri ve mukavemeti önem kazanır



□ GÜÇLÜ AGREGALAR


- 
-
- Normal beton üretimi için çok kuvvetli agregaya ihtiyaç yoktur
 - Agreganın standart koşulları sağlaması yeterlidir
 - Yüksek performanslı betonda ise özellikle iri agrega yeterince güçlü değilse bu bölge en zayıf halka haline gelir

- 
-
- Doğal agreganın dayanımı kökenine bağlıdır
 - Kullanım boyutuna doğal yıpranma süreçleri ile gelmiştir
 - Dayanımını geliştirme imkanı yoktur
 - Yüksek performanslı betonda kırılma yüzeyine bakılarak performansı hakkında fikir edinilebilir

-
- Kırmataş agregalarda kullanılacaksa agregada zayıf bölgenin en alt düzeyde olması önemlidir
 - Agreganın kırılma yöntemi mikro-çatlak oluşturabilir
 - Petografik inceleme zayıflıkları tespit için kullanılabilir
 - İnce dokulu, kuvvetli, kırıldığında minimum zayıflık, mikro-çatlak içermeyenen agrega tercih edilmeli
 - Kireçtaşı, granit

Düşük Su/bağlayıcı ve Reoloji

- Beton reolojisi fiziksel ve kimyasal faktörlere bağlıdır
- Yüksek performanslı beton normal inşaat teknikleriyle taşınabilmeli, yerleştirilebilmeli ve sıkıştırılabilmelidir
- Partikül tane dağılımı, agrega şekli, çok düşük s/b oranlarında çimento çimento tane dağılımı ve şekli fiziksel faktörlerdir
- Kimyasal faktör: su ile karışınca reaksiyon hızı ve dormant period uzunluğu (ölü bölge)

- 
-
- Reolojiyi etkileyen diğer faktörler;
 - Mikser türü, karıştırma etkinliği, mikserin kesme (döndürme) etkisi, beton sıcaklığı ve ortam sıcaklığı

Tane boyutu optimizasyonu

- Normal betonda olduğu gibi maksimum doluluk elde edilmeye çalışılır
- Bağlayıcının optimizasyonu için silis dumanı gibi çok ince taneler kullanılır

-
- Yüksek performanslı betonlarda kullanılan puzolanik katkıları çimentodan daha yavaş reaksiyon gösterir. Bağlayıcılık özellikleri çimento kadar da olmayabilir. Yüksek oranda kullanılırlar
 - Bu nedenle
 - Su/Çimento, Su/(bağlayıcı :çimento+puzolan), Su/Toz(Çimento+puzolan+çimento inceliğindeki tozlar)
 - Hesaplamaları yapılır. Sadece Su/Çimento oranının hesaplanması ve verilmesi genellikle yeterli olmaz

-
- Puzolanların etkinliğini dikkate alan önerilerde vardır
 - Su/Bağlayıcı ($\text{çimento} + k_1 * \text{puzolan1} + k_2 * \text{puzolan2}$)
 - k_1 ve k_2 puzolanların etkinlik katsayısı

Yüksek performanslı beton dizaynı (Aitcin, 1995)

- Adım 1: Su/Bağlayıcı Oranı
- Adım 2: Su miktarı
- Adım 3: Akışkanlaştırıcı miktarı
- Adım 4: Kaba agrega miktarı
- Adım 5: Hapsolmuş hava tahmini

-
- 1.Su/bağlayıcı oranı
 - Farklı puzolanların farklı etkinlik oranları olduğu için su/bağlayıcı oranı basınç dayanımı ilişkisi geniş bir aralıkta seyrederek

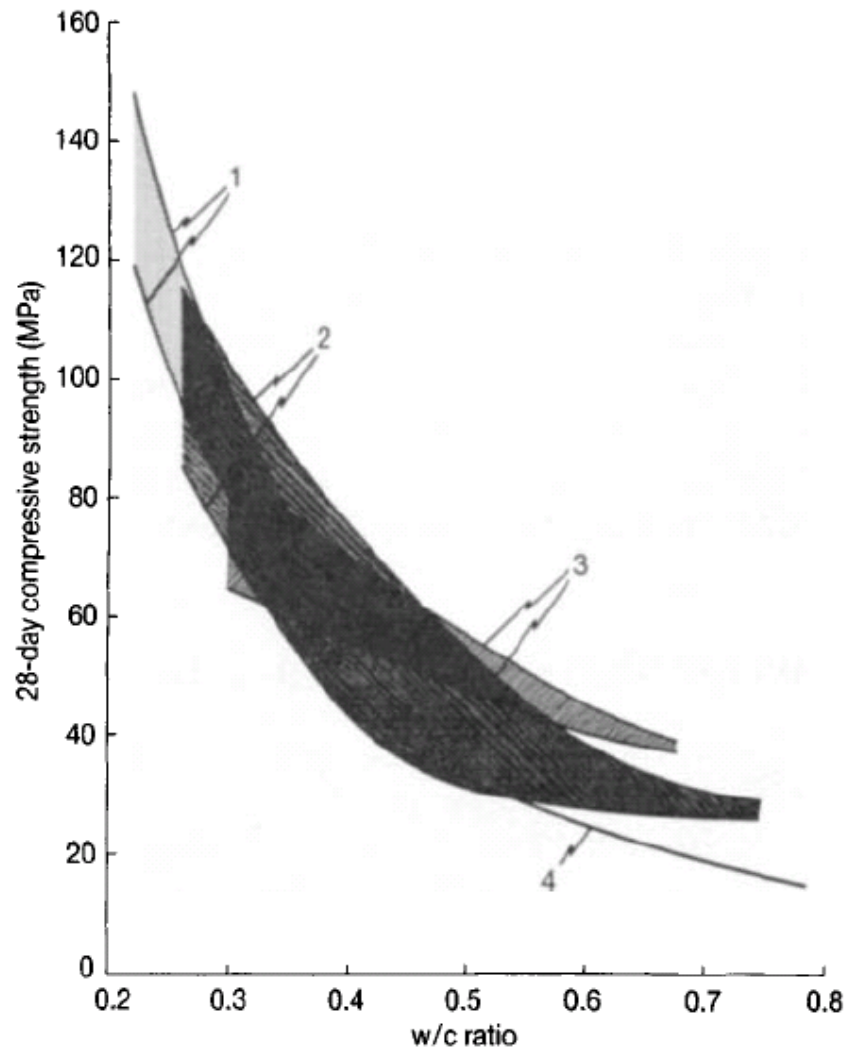


Fig. 1.1 Compressive strength versus w/c material ratio: (1) after Aitcin⁷; (2) after Fiorato²⁵; (3) after Cook¹⁵; (4) normal strength concrete from CPCA²⁴

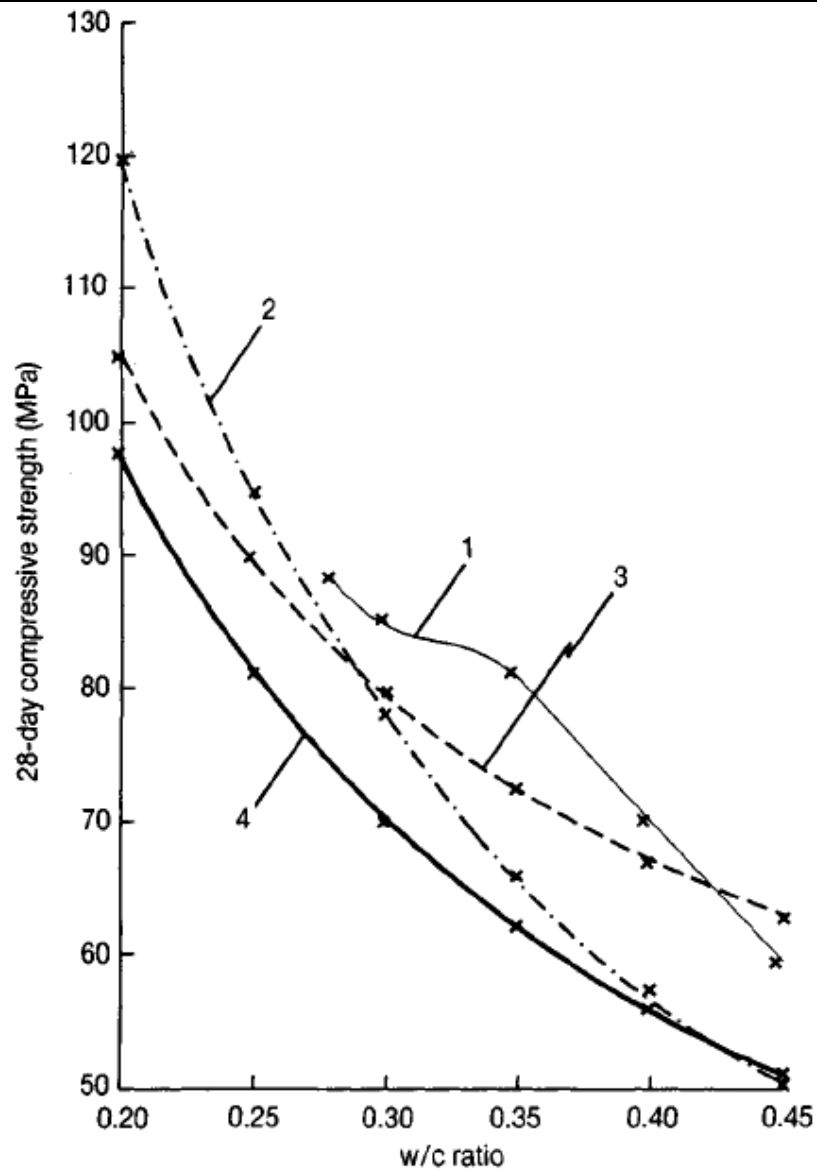


Fig. 1.2 Compressive strength versus w/c material ratio: (1) high early strength cement, after Addis and Alexander²³; (2) after Hattori²⁶; (3) ordinary Portland cement, after Suzuki²⁷; (4) high early strength cement after Suzuki²⁴

Su Miktarı

- Su miktarı ile SP miktarı etkileşimlidir
- Hedef 200 mm çökme değeri ise bu hedefe düşük su miktarı ve yüksek SP ile ulaşılabileceği gibi göreceli olarak yüksek su oranı ve düşük SP ile de ulaşılabilir. Ekonomik olarak iki çözüm arasında büyük farklar olmayabilir

-
- aşırı düşük miktarda su kullanılırsa karışım çok hızlı kıvam kaybedip aşırı yapışkan hale gelebilir. Bu durumu dengelemek için aşırı SP kullanımını priz gecikmesine yol açabilir

Akışkanlaştırıcı Miktarı

- Doygunluk noktası deneyi ile önceden belirlenebilir. Marsh Konisi kullanılarak sabit su miktarında SP arttırılır. Akış süresinin sabit kaldığı nokta doygunluk noktasıdır.
- SP doygunluk noktası bilinmiyorsa 145 l/m³ su başlangıç noktası olarak alınabilir

D. Noktası >> 0.6 >>>> 0.8 >>>>> 1.0 >>>>> 1.2 >>>>> 1.4 %

Su >> 120-125 > 125-135 >> 135-145 >> 145-155 > 155-165 l/m³

Kaba agrega miktarı

- Agreganın yüzey şekline göre karar verilebilir
1000 kg/m³ ilk deneme için uygun
- 950>>>1000>>>1050>>>1100>>>1150
- Uzun ve Yassı>>Orta>>Kübik>>Yuvarlak

Hapsolmuş Hava Miktarı

- Karışım oranlarına bağlı
- Her SP-çimento bileşimi aynı havayı hapsetmez
- Bazı mikserler daha fazla hava sürükler
- %1'in altına inmek zor %3'e kadar çıkabilir
- Denemede Ortalama %1.5 alınabilir

Örnek: 100 MPa basınç dayanımı olan beton üretilecek

- CEM I 42.5 çimento, Ö.Ağırlık:3.1

- Katı madde oranı %40 olan ve özgül ağırlığı 1.21 olan Naftalin esaslı Süper Akışkanlaştırıcı (doygunluk %1)
- Dolomitik kireçtaşı $D_{maks}= 10$ mm, Özgül Ağırlık $d_{ky}=2.80$, Su emme=%0.8, Mevcut Su=%0, taneler kübik vb.
- Silisli doğal kum Ö.A. $d_{ky}=2.65$, Su emme=% 1.2, Mevcut Su=% 3.5
- Toplam bağlayıcının %10'unu silika dumanı kullanılacak, Ö.A.=2.20

Çözüm

- Su/bağlayıcı oranı
- 100 MPa hedef dayanım için Daha önceki şekilden 0.25-0.30 okunabilmektedir. Farklı araştırmacıların deney sonuçlarından da faydalanılabilir
- 0.27 seçilsin

Su miktarı

- Önceki şekilden Doygunluk noktası %1 için 135-145 l/m³ su okunabiliyor
- 140 l/m³ alınsın

Bağlayıcı miktarı

- $B=140/0.27 = 518.5 \text{ kg}$
- 520 kg/m^3 ' yuvarlayalım
- %10 silika dumanı $= 520*0.10 = 52 \text{ kg}$
- SD 50 kg alınsın (yuvarlatma)
- Çimento $520 - 50 = 470 \text{ kg/m}^3$
- Silika dumanı $= 50 \text{ kg/m}^3$

Kaba agrega, hava içeriği

- Kaba agrega (ortalama ve kübik şekilli)
- Daha önceki şekilden 1075 kg/m^3 seçilsin
- Hava içeriği %1.5 kabul edilsin

Akışkanlaştırıcı hesabı

- SP hacim ve kütle hesapları yapılır
- $M_{katı} = 520 * (1/100) = 5.2 \text{ kg}$ (bağlayıcının %1'i)
- $V_{sıvı} = 5.2 / (40/100) = 13 \text{ kg} / 1.21 = 10.74 \text{ l/m}^3$ (katı madde %40, Ö.A=1.21)
- $V_{su} = 10.74 * 1.21 = 13 \text{ kg} * (100-40)/100 = 7.8 \text{ l/m}^3$
- (yuvarlatma $V_{su} = 8 \text{ l/m}^3$)
- $V_{katı} = 10.74 - 7.80 = 2.94 \text{ l/m}^3$
- Yuvarlatma $V_{katı} = 3.0 \text{ l/m}^3$

Hacim Hesapları

- Çimento = $470/3.1=149.7$ l/m³
- Yuvarlatma: 150 l/m³ çimento hacmi
- Silis dumanı= $50/2.2 = 22.7$ l/m³
- Yuvarlatma: 23 l/m³ silis dumanı hacmi
- İri agrega hacmi: $1075/2.80= 383.9$ l/m³
- Yuvarlatma : 384 l/m³ İri agrega hacmi
- Hava hacmi: $1.5 \times 10= 15$ l/m³

Toplam Hacim

- Su: 140
- Çimento: 150
- Silis dumanı: 23
- İri agrega: 384
- Hava: 15
- Akışkanlaştırıcı (katı): 3
- Toplam 715 l/m³



□ Kum hacmi= 1000-toplam hacim

□ Kum hacmi= 1000-715= 285 l/m³

□ Kum miktarı, kyd = 285*2.65= 755 kg/m³

□ Teorik Birim Hacim Ağırlık:

$$140 + 470 + 50 + 1075 + 755 + 5 = 2495 \text{ kg/m}^3$$

Su düzeltmesi

- Agregalar kyd konuma göre hesaplandı ama kyd değiller, su düzeltmesi yapılmalı
- Katkıdan gelen su hesaba katılmalı
- İri agrega kuru durumda
- M iri, kuru= $1075 (1-0.8/100)= 1066$ kg
- İri agrega $1075 - 1066 = 9$ lt su emecektir


-
- Kum da $(3.5-1.2) = \%2.3$ fazla yüzey suyu var
 - Kum ıslak durumda olduğundan 755 kg dan fazla tartılmalı
 - $M_{\text{kum, ıslak}} = 755(1+2.3/100) = 772$ kg
 - Kumdan karışıma gelen fazla su
 - $772-755 = 17$ lt/m³

Su düzeltmesi

- Toplam fazla veya eksik su
- Katkıdan 8 lt/m³ su geliyor
- Agregalarla birlikte
- $+9-17-8= - 16 \text{ kg/m}^3$
- Karışım suyu
- $140 - 16= 124 \text{ kg/m}^3$ olmalı

Karışımın düzenlenmiş hali

- Karışım suyu = 124 l
- Çimento= 470 kg
- Silis dumanı= 50 kg
- Kaba agrega= 1066
- İnce agrega= 772 kg
- Akışkanlaştırıcı= 10.7 lt

- 
-
- Laboratuvar ölçęğinde 93 dm³ karışım hazırlanacak ve örnekler hazırlanacaktır
 - Gerekli malzeme miktarlarını hesaplayınız

Karışımın düzenlenmiş hali

- Karışım suyu = $124 \text{ litre} * 93/1000 = 11.5 \text{ l}$
- Çimento = $470 \text{ kg} * 93/1000 = 43,7 \text{ kg}$
- Silis dumanı = $50 \text{ kg} * 0.093 = 4.7 \text{ kg}$
- Kaba agrega = $1066 \text{ kg} * 0.093 = 99.1 \text{ kg}$
- İnce agrega = $772 \text{ kg} * 0.093 = 71.8$
- Akışkanlaştırıcı = $10.7 \text{ lt} * 0.093 = 1 \text{ litre}$



Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

YAPI MALZEMESİNDE ÖZEL KONULAR

-5-

Prof. Dr. Halit YAZICI

*Yüksek Performanslı
betonlar*

<http://halityazici-deu.com>