

Çimentolu malzemelerin otojen deformasyonu ve kırılma parametreleri: Agregata tür ve boyutunun etkisi

Burcu AKÇAY*, **Mehmet Ali TAŞDEMİR**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yüksek performanslı çimentolu malzemelerde erken yaşlarda oluşan otojen deformasyonu önlemek için önceden suya doyurulmuş hafif agregalar su rezervuarı olarak kullanılabilir. Sabit bir düşük su/çimento oranına sahip silis dumani katkılı çimento hamurunun otojen deformasyonunu önlemek için, hacimce %30'u normal veya hafif agregata ile yer değiştirildi. Kullanılan agregata cins ve tane boyutunun oluşturulan kompozitlerin kırılma enerjisi, karakteristik boy ve kırılma açıklık ortası en son sehime olan etkileri incelendi. Sonuçlar, normal agregaların rijitliğinin çimento hamuruna göre yüksek olması sayesinde otojen deformasyonu bir miktar kısıtlarken, hafif agregaların çimento hamuruna su sürükleyerek otojen deformasyonu önlediğini gösterdi. Çimento hamuruna hafif agregata ilave edilmesiyle hidrasyon derecesi özellikle erken yaşlarda arttı. İnce hafif agregata ilavesiyle su rezervuarları hamur fazı içerisinde daha yakın dağılarak iyi bir içsel kürlenme sağladı. Böylece, ince hafif agregata ile çimento hamurunun hidrasyon derecesi iri hafif agregata ilavesine göre daha yüksek bulunmuştur. Aynı zamanda içsel kürlenmenin çimento hamurunun hidrasyon derecesini de artırdığı bulundu. Ayrıca, ince hafif agregata kullanımının iri hafif agregata göre belirgin şekilde çimento hamurunun otojen deformasyonunu azalttığı belirlendi. İnce hafif agregata kompozitlerin kırılma enerjisi, kırılmanın açıklık ortasındaki son sehime değeri, yarılmada çekme dayanımı ve basınç dayanımının iri hafif agregata kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu görüldü. Normal agregata kullanımı ile kompozitlerin kırılma ve mekanik özellikleri artarken hafif agregata kullanımı ile azalmalar görüldü. Diğer yandan hafif agregata kompozitlerin sünekliği çimento hamuruna göre daha yüksek bulundu.

Anahtar Kelimeler: *Agregata tane boyutu, hafif agregata, içsel kürlenme, kırılma enerjisi, otojen deformasyon, süneklik.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Burcu AKÇAY. akcayburcu@hotmail.com; Tel: (212) 285 3770.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Effects of Lightweight Aggregates on Autogenous Deformation and Fracture of High Performance Concrete" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 11.01.2007 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 25.01.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.02.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Autogenous deformation and fracture properties of cementitious materials: Effect of size and type of aggregates

Extended abstract

Since high strength/high performance concretes (HSC/HPCs) are produced using rich mixes with high cement contents and low water/cement ratios, they are denser and more homogeneous than normal strength concretes. Low porosity and non-connected capillary pore structures are the most important properties of these concretes. There is an insufficient amount of water in concrete to complete the hydration process, and also the water income is prevented because of the impermeable character of concrete. Concurrent with the production of hydrates, after de-moulding (also before) time dependent volume changes of cement paste occur. Development of the empty pores due to chemical shrinkage is the main reason for diminishing the radii of menisci. This decrease causes self-desiccation by increasing capillary stress in the pore water. The absorption of free water into pores by the hydrates and formation of fine pores is driven by the chemical shrinkage. At later ages, however, self desiccation becomes the major drive mechanism. The development of empty pores continues during self-desiccation and it affects the hydration kinetics. This effect limits the ultimate degree of hydration and consequently the strength of cement paste. Since the tensile strain capacity of concrete at early ages is not sufficient enough to resist stresses caused by the external and internal restraints, autogenous deformation leads to the formation of cracks. These early age cracks may induce durability problems. Conventional curing techniques are not effective in mitigating this decrease of relative humidity (RH) in the hardened cement paste. Using pre-soaked fine lightweight aggregate (LWA) for preventing the decrease of RH in the hardened cement paste matrix was first recommended by Philleo (1991). It is known that the bond between lightweight aggregate and matrix is stronger than that of normal aggregate. This enhanced interfacial zone prevents the length changes developed under RH and/or thermal conditions.

In application, concrete is usually designed on the basis of compressive strength theory, in which the brittleness of concrete is ignored. For this reason, fracture parameters of concrete have to be defined along with its brittleness. Because the LWAs pro-

duce more microcracks, the concrete containing these aggregates behaves more ductile (i.e., less brittle) than normal cementitious materials. On the other hand, the use of LWA instead of dense aggregate is expected to result in a lower strength. It is obvious that the amount of LWA for internal curing must be optimized according to the mechanical and fracture properties of cementitious materials.

This study presents the results of experimental studies conducted for determining the restraining effect of both LWAs and normal weight aggregates (NWAs) on autogenous deformation and fracture properties of composites containing 70% paste and 30% aggregate by volume. It has been shown that the size of NWAs has no significant effect on autogenous deformation at 28 days, while the autogenous deformation of cement paste with 0-2 mm size fraction of NWA has been found higher than that with 2-4 mm and 4-8 mm at the age of 360 days. At early ages, the finer NWAs (0-2 mm) restrained the autogenous deformation of cement paste, because the modulus of elasticity of cement paste was not too high. On the other hand, addition of coarser size NWAs easily restrained the shrinkage of cement paste at later ages. The fine size LWAs, as expected, has been found to be more effective in mitigating the autogenous deformation of cement paste than coarse LWAs. The addition of LWAs to paste phases increased the degree of hydration, especially at early ages. The use of fine LWAs causes the water reservoirs to be distributed in proximity and results in a better internal curing, hence the degree of hydration of cement paste with finer LWAs is greater compared to that with coarser LWAs. While the compressive strength of composites slightly increases with the increasing size of NWA, the size of LWAs has no significant effect on compressive strength. Also, the moduli of elasticity along with the bending and splitting tensile strengths were not affected significantly by the size of aggregates (both NWA and LWA). Addition of fine sand aggregate at the size fraction of 0-2 mm increased the characteristic length significantly compared to the cement paste. Although the fracture energies of cement pastes with LWAs were found smaller than that of reference cement paste the addition of LWAs caused an increase in the characteristic length of cement paste.

Keywords: *Autogenous deformation, fracture energy, internal curing, lightweight aggregate, particle size of aggregate, toughness.*

Giriş

Son yıllarda yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılar ve silis dumanı gibi puzolanların yaygın kullanımı ile su/çimento oranı büyük ölçüde düşürülmüş ve yüksek dayanımlı/yüksek performanslı betonlar (YDB/YPB) üretilmeye başlanmıştır. YDB/YPB'lar yüksek miktarda çimento kullanılarak üretilmektedir. Bundan dolayı böyle malzemeler normal betona göre daha yoğun ve homojen olmaktadır. Bu betonlarda hidratasyon sürecini tamamlayacak miktarda su bulunmadığı gibi betonun geçirimsiz karakteri nedeniyle dışarıdan su girişi de önlenir (Weber ve Reinhardt, 1997). Hidratasyon ürünlerinin oluşmasıyla birlikte çimento hamurunda zamana bağlı hacim değişimleri çok erken yaşta başlar (Sadouki ve Wittmann, 2001). Suyla dolu olmayan boşlukların kimyasal rötre ile oluşması menisklerdeki çapın düşmesinin ana sebebidir. Bu azalma, boşluk suyundaki kapiler gerilmenin artmasına sebep olarak kendiliğinden kurumaya neden olur. Suyla dolu olmayan boşlukların oluşması ve kendiliğinden kuruma boyunca devam etmesi hidratasyon kinetiğini etkiler. Bu etki, hidratasyonun en son derecesini ve dolayısıyla son dayanımı kısıtlar. Geleneksel kür yöntemleri ortamdaki bu bağıl nem kaybını azaltmada etkili olmaz. Yeni kuşak yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonların en önemli sakıncaları erken yaşlarda oluşan otojen deformasyon ve kendiliğinden kuruma olarak görülmektedir. Betonun şekil değiştirme kapasitesi erken yaşlarda iç ve dış kısıtlamalarla oluşan gerilmeleri karşılamak için yeterli olmadığından, otojen deformasyon çatlak oluşturma eğilimindedir. Erken yaşlarda oluşan bu çatlaklar dürabilite problemlerine yol açar. Bu deformasyonu önlemek için önceden suya doyurulmuş hafif agregaların su rezervuarı olarak kullanılması ilk olarak Philleo tarafından önerilmiştir (Philleo, 1991). Bu teknik ile ilgili gelişmeler birçok araştırmacı tarafından tartışılmıştır (Bentz ve Snyder, 1999; Kohno vd., 1999; Takada vd., 1999; Bentur vd., 2001; Lura, 2003; Akçay vd., 2005). Öte yandan hafif agrega ve matris ara yüzeyinin normal agregadan daha iyi olduğu bilinmektedir. Bu iyileştirilmiş ara yüzey bağıl nem ve sıcaklık etkileri altındaki boy ve hacim değişimlerini önler (Kayali vd., 1999).

Uygulamada, genellikle betonun çekme dayanımı ve gevrekliği ihmal edilir ve beton basınç dayanımı esas alınarak tasarlanır. Öte yandan, tasarımda beton dayanımının boyuttan bağımsız olduğu varsayılır. Bu nedenle, beton kırılma parametrelerinin boyut etkisi de dahil gevrekliği ile ifade edilmesi gerekir. Otojen deformasyonu önlemek için kullanılacak hafif agregaların boyut ve miktarının betonun kırılma parametrelerini göz önünde bulundurarak optimize edilmesi gerekmektedir.

Çimento esaslı malzemelerde bulunan agregalar malzemenin deformasyonunu kısıtlarlar. Bu kısıtlama agrega etrafında çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Bu etkileri otojen deformasyon ve kırılma parametreleri ile birlikte irdeleyebilmek için hacimce %70 çimento hamuru, %30 agrega içeren kompozitler hazırlandı. Agregalar farklı boyutlardaki normal ve ponza hafif agregaları kullanıldı.

Materyal ve yöntem

Su/bağlayıcı malzeme oranı 0.28 olan, çimento ağırlığının %10'u kadar silis dumanı içeren kompozitlerin karışım oranları ve bazı taze hal özellikleri Tablo 1'de verildi. Tabloda görüldüğü gibi 2-4 ve 4-8 mm boyutlarında hem normal hem de hafif agrega kullanılırken 0-2 mm boyut aralığında sadece normal agrega kullanıldı. Hafif agregaların suya doyurulma miktarı 30 dakikalık su emme değerlerine göre yapıldı. Hazırlanan bu karışımlar üzerinde otojen deformasyon ve mekanik deneyler yapıldı. Ayrıca, hazırlanan kompozitlerin çimento hamuru fazının hidratasyon ısı ve hidratasyon derecesi (buharlaşmayan su miktarına göre) ASTM C186 (1998) standardı kullanılarak belirlendi. Hidratasyon ısı belirlenmesi sırasında silis dumanının asit çözeltilisinin sıcaklığına etkisini belirleyebilmek için silis dumanı içermeyen ve ağırlıkça %10 silis dumanı içeren çimento hamurları üzerinde yapılan deneyler, bu miktardaki silis dumanının çözeltili sıcaklığını değiştirmediği görüldü.

Otojen deformasyon

Otojen deformasyon hacimsel ve lineer olmak üzere iki farklı yöntemle ölçülebilir. Hacimsel

Tablo 1. Üretilen kompozitlerin $1m^3$ 'ünün bileşimleri

	PN0-2	PN2-4	PN4-8	PL2-4	PL4-8
Çimento, kg	1005	1005	1018	1010	1007
Silis dumanı, kg	101	101	102	101	101
Su, kg	309	309	314	311	310
İçsel kütleme suyu, kg	0	0	0	73	71
Süper akışkanlaştırıcı, kg	6.3	5	3.7	5	3.7
Silis unu , kg	0	0	0	0	0
Doğal kum (0-2), kg	765	0	0	0	0
Kırma kum (2-4), kg	0	765	0	0	0
Kırma taş No.1 (4-8), kg	0	0	805	0	0
Hafif agrega 2-4 mm, kg	0	0	0	222	0
Hafif agrega 4-8 mm, kg	0	0	0	0	215
Hava %	2.3	2.4	1.7	2	2.3
Birim ağırlık, kg/m^3	2186	2185	2243	1722	1708

otojen deformasyon deneyinde, taze halde elastik bir membran içine yerleştirilen numune su dolu bir kapta Arşimet prensibine göre tartılarak, hacim değişiklikleri elde edildi. Her 15 dakikada bir alınan ölçümler 48. saatte sonlandırıldı. Aynı anda numunelerin sıcaklık değişimleri $0.1^\circ C$ hassasiyetle yarı-adiyabatik ortamda kaydedildi. Lineer yöntemde ise döküm anından itibaren ortamdaki izole edilen numuneler üzerinde ölçü boyu 200 mm ve hassasiyeti 0.001 olan şekil değiştirme ölçerlerle bir yıl boyunca yapıldı ve sunulan sonuçlar dört numunenin ortalaması alınarak bulundu.

Kırılma enerjisi

Kırılma enerjisinin belirlenmesinde RILEM TC 50-FMC Teknik Komitesince (1985) önerilen çentik açılmış $100 \times 100 \times 500$ mm'lik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi kullanıldı. Standartta öngörülen 50 mm'lik çentiğin yerine daha çok iri agreganın etkin alanda bulunmasını sağlamak amacıyla kiriş numuneler elmas testere ile kesilerek 40 mm derinlikte bir çentik açıldı ve etkin kesit alanının 60×100 mm olması sağlandı. Kiriş numunelerde 28. günde maksimum kapasitesi 100 kN olan kapalı çevrimli sehim kontrollü deney makinesi ile yükleme hızı 0.7 mm/dak. olan eğilme deneyi yapıldı. Kirişin ortasına yerleştirilen bir adet sehim transdüser (LVDT) ve çatlak ağzı açılma ölçer (CMOD) ile sırasıyla sehim ve çatlak ucu açılması ölçüldü ve her bir kiriş numune için yük-kiriş ortasındaki sehim eğrisi elde edildi. Betonun kırılma enerjisi yük-sehim eğrisinin altın-

daki alan (W_0) yardımıyla RILEM TC 50-FMC'nin (1985) önerisine göre aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$G_F = \frac{W_0 + mg \frac{S}{L} \delta_0}{B(h-a)}, \text{ [N/m veya J/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Burada, B, h, a, S, L ve m sırasıyla, kiriş numunenin genişliği, derinliği, çentik uzunluğu, mesnetler arası uzaklığı, uzunluğu ve deney numunesinin ağırlığıdır. Ayrıca, g yerçekimi ivmesi, δ_0 ise göçme anında açıklığın ortasında ölçülen en son sehimdir. Kiriş numuneler üzerinde net eğilme dayanımı, silindir numuneler ($\varnothing 100$ mm \times 200 mm) üzerinde elastisite modülü ile basınç dayanımı ve disk numuneler ($\varnothing 150$ mm \times 60 mm) üzerinde ise yarılmada çekme dayanımı belirlendi.

Sünekliği belirlemek için, fiktif çatlak modelindeki karakteristik boy değerinin kullanılabileceği birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir (Taşdemir ve Karihaloo, 2001; Lange-Kornbak ve Karihaloo, 1998). Kırılma süreci bölgesinin boyu olarak tanımlanan karakteristik boy (l_{ch}), elastisite modülü (E), kırılma enerjisi (G_F) ve tek eksenli çekme dayanımı (f'_t) büyüklüklerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f'_t{}^2} \quad (2)$$

Yüksek dayanımlı normal agregalı betonda karakteristik boyun azalması, malzemenin daha gevrek hale geldiğini belirtir. Yarı hafif betonun karakteristik boyu normal yüksek dayanımlı betona göre çok yüksek olması malzemenin gevrekliğinin azaldığını gösterir (Akçay ve Taşdemir, 2006a; Taşdemir vd., 2002).

Deneysel çalışma sonuçları

Hacimsel otojen deformasyon

Üretilen kompozitlerin hacimsel otojen deformasyon değerleri ve sıcaklık değişimleri Şekil 1'de görülmektedir. Şekilde verilen sonuçlar iki numunenin çimento hamuru hacmine göre normalize edilmiş ortalamasıdır.

Normal agregalar otojen deformasyonu kısıtlarken hafif agregalar çimento hamuruna su sürükleyerek otojen deformasyon miktarını belirgin bir biçimde azaltmaktadır. Aynı zamanda hafif agregalar dökümden yaklaşık 28 saat sonra kadar hamur fazında şişmeye; daha sonra ise büzölmeye neden olmuştur. Bu şişmenin nedeni, erken yaşlarda çimento hamurunun boşluk yarıçapının ileriki yaşlardan daha büyük olması sebebiyle erken yaşlarda içsel kürlenme suyunun hamur içerisinde kolaylıkla ilerleyebilmesidir. İlerleyen hidrasyonla suyun olası ilerleme mesafesi azaldığından çimento hamurunda büzölme davranışı görülür. Şekil 1'den görüldüğü

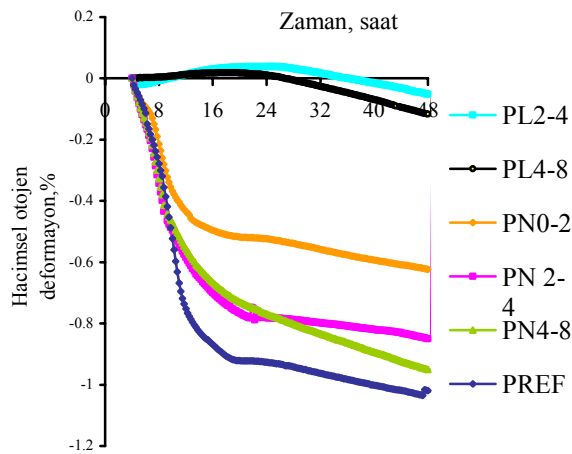
gibi ince hafif agregalar iri hafif agregalara göre hacimsel otojen deformasyonu daha iyi önlemektedir.

Kompozitlerin yarı adiyabatik ortamdaki sıcaklık değişimleri Şekil 1'de görülmektedir. Kompozitlerin en yüksek sıcaklık değerleri kullanılan hafif agreganın tane boyutu azaldıkça düşmektedir. Buna ek olarak, en yüksek sıcaklığa ulaşma zamanı da ince hafif agreganın kullanımı ile hafifçe artarken, farklı boyutlardaki normal agreganın kullanımı bu zamanı değiştirmemektedir.

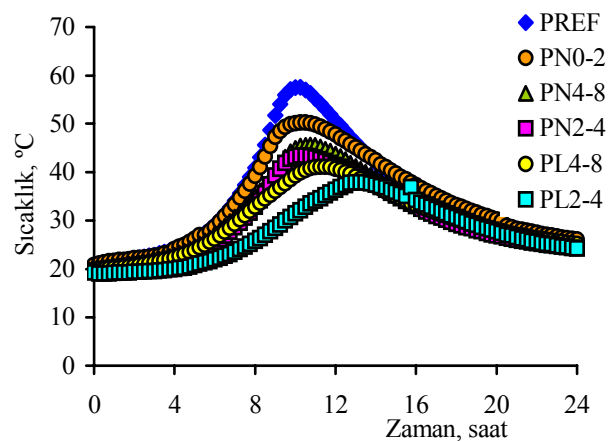
Lineer otojen deformasyon

Kompozitlerin 28 günlük ve bir yıllık lineer otojen deformasyon ölçüm sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Çimento hamurunun otojen deformasyonu 28. günde $-760 \mu D$ ($1 \mu D = 1 \times 10^{-6}$) iken, 0-2 mm, 2-4 mm ve 4-8 mm boyutlarındaki normal agreganın içeren kompozitlerin lineer otojen deformasyonu sırasıyla -453 , -414 ve $-450 \mu D$ olarak belirlenmiştir.

Normal agreganın boyutunun 28 günlük ve bir yıllık lineer otojen deformasyon üzerinde büyük bir etkisi gözlenmezken, 2-4 mm boyutundaki hafif agregalı kompozitlerin otojen deformasyonu 4-8 mm boyutundaki hafif agregalı kompozitlere göre belirgin bir biçimde düşüktür. Normal agregalar çimento hamuruna göre daha rijit olduklarından otojen deformasyonu kısıtlanırlar.

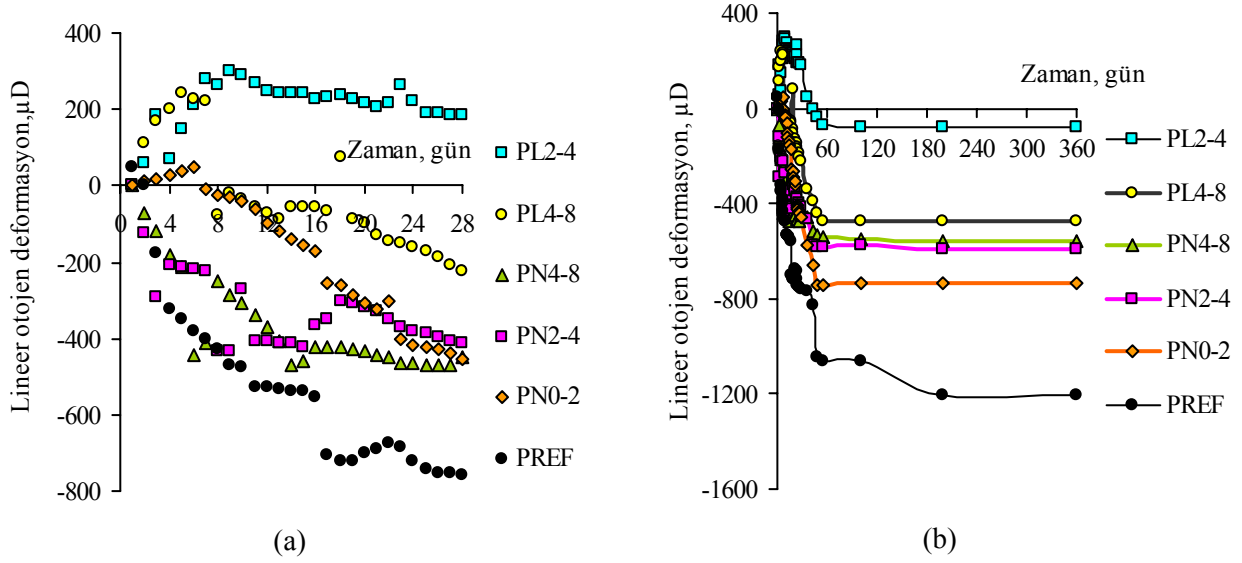


(a)



(b)

Şekil 1. (a) Hacimsel otojen deformasyon ve (b) yarı adiyabatik ortamda sıcaklık değişimleri



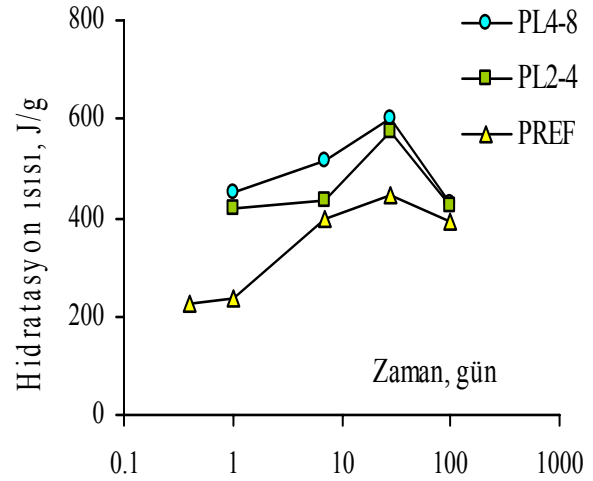
Şekil 2. Agregat tür ve tane boyutunun kompozitlerin 28 günlük (a) ve bir yıllık (b) lineer otojen deformasyonuna etkisi

Erken yaşlarda çimento hamurunun elastisite modülünün yüksek olmamasından dolayı, ince normal agregalar (0-2 mm) otojen deformasyonu kolaylıkla kısıtlayabilirler. Diğer yandan, iri normal agregalar ileriki yaşlarda çimento hamurunun büzülmesini kısıtlayarak, lineer otojen deformasyon sonuçlarının tersine PN0-2 serisinin hacimsel otojen deformasyonu PN2-4 ve PN4-8 serilerinden düşük bulundu. Suya doyurulmuş 2-4 mm ve 4-8 mm boyutundaki hafif agregaların kullanımı ile çimento hamurunun otojen deformasyonu 28. günde sırasıyla -186 ve -221 µD değerine ulaşır. Hacimce %30 ince hafif agregaların kullanımı otojen deformasyonu önlemede beklendiği gibi daha başarılı olduğu gibi özellikle 50 güne kadar şişme görülmesine de neden oldu.

Hidratasyon ısı

İçsel kürelemede hafif agregalar çimento hamuru fazına su sürükleyerek hidratasyonun ilerlemesine neden olurlar (Akçay vd., 2005). Bu ilerleme özellikle agregat-çimento hamuru ara yüzünde olmak üzere hidratasyon ürünlerinde değişikliklere yol açarlar. İçsel kürelemenin hidratasyon üzerindeki etkisini belirlemek için hafif agregalar içeren kompozitlerin hidratasyon ısıları çimento hamuru ile karşılaştırıldı (Şekil 3). Hafif agregaların ilavesiyle çözeltinin hidratasyon ısıları daha çok çimento tanelerinin hidrate olacak

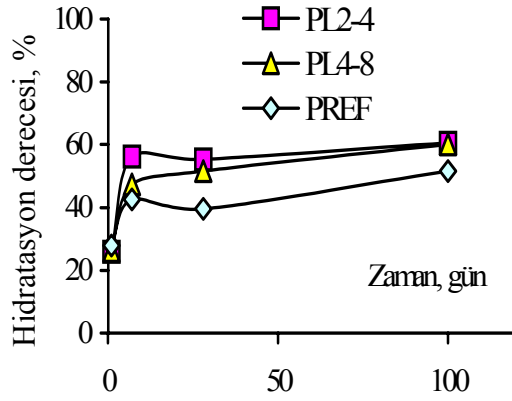
su bulabilmesi nedeniyle zamanla artmaktadır. İri hafif agregalı kompozitlerin hidratasyon ısıları ilginç bir biçimde ince hafif agregalı kompozitlerin hidratasyon ısılarına göre yüksek bulunsalar da bu etki ileriki yaşlarda azaldı.



Şekil 3. Hafif agregat boyutunun çimento hamurunun hidratasyon ısısına etkisi

Buharlaşmayan su miktarı ve hidratasyon derecesi

105°C ve 1000°C sıcaklıktaki su kayıplarından bulunan buharlaşmayan su miktarına göre hesaplanan hidratasyon dereceleri Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Hafif agrega boyutunun çimento hamurunun hidrasyon derecesine etkisi

Şekilden görüldüğü gibi hafif agrega kullanımı ile özellikle erken yaşlarda hidrasyon derecesi belirgin bir biçimde arttı. İnce hafif agrega kullanımı ile su rezervuarları hamur fazı içerisinde birbirine daha yakın dağılarak daha iyi bir içsel kütleme sağlamaktadır (Akçay ve Taşdemir, 2006b). Böylece, ince hafif agregalı kompozitlerin hidrasyon derecesi iri hafif agregalı kompozitlere göre daha yüksek bulundu.

Mekanik özellikler

Tablo 2, üretilen kompozitlerin mekanik deney sonuçlarını özetlemektedir.

Basınç dayanımı ve elastisite modülü

Normal agrega tane boyutu arttıkça kompozitlerin basınç dayanımı hafifçe artarken, hafif agrega boyutunun basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi görülmemektedir. Beklenildiği gibi, hafif agrega kullanımı ile basınç dayanımı hafif agregaların matris fazı içerisinde kusur

olarak davranmasından dolayı azalmaktadır (Taşdemir, 1982; Akçay vd., 2005). Ayrıca, hafif agrega ilavesiyle çimento hamurunun elastisite modülünde belirgin bir değişim olmasına karşın normal agrega ilavesiyle kompozitlerin elastisite modülü artmaktadır. Her iki cins agrega için tane boyutunun elastisite modülü üzerinde bir etkisi olmadığı gösterildi. Daha önceki çalışmalarda kullanılan agrega hacminin elastisite modülü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu belirlenmişti (Akçay ve Taşdemir, 2005).

Eğilme ve yarılmada çekme dayanımı

Normal agrega ilavesiyle eğilme ve yarılmada çekme dayanımı artarken hafif agrega ilavesiyle belirgin bir biçimde azaldı. Hem normal hem de hafif agrega tane boyutunun kompozitlerin bu dayanımları üzerinde belirgin bir etkisi bulunmadı.

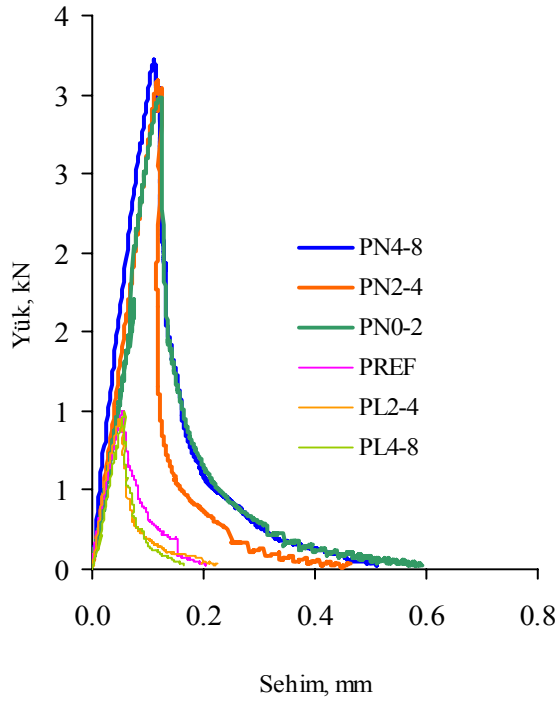
Kırılma enerjisi

Farklı kompozitler için kiriş açıklık ortası tipik yük-sehim eğrileri Şekil 5'te görülmektedir. Tablo 2'de de verildiği gibi sonuçlar çimento hamuruna agrega ilavesiyle açıklık ortası yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın arttığını göstermektedir.

0-2 mm boyutundaki normal agregaların hacimce %30 oranında ilavesiyle eğri altında kalan alan çimento hamuruna göre 3 kat arttı. Diğer yandan, aynı hacimdeki hafif agrega ilavesi kırılma enerjisini azalttı. İnce hafif agregalı kompozitlerin kırılma enerjisinin iri hafif agregalı olanlara göre daha fazla olduğu Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo2. Sertleşmiş çimento hamuru ve kompozitlerin 28 günlük kırılma ve dayanım özellikleri

	PREF	PN0-2	PN2-4	PN4-8	PL2-4	PL4-8
Basınç dayanımı, MPa	68.5	68.4	72.2	74.0	30.2	30.7
Elastisite modülü, GPa	18	28	28	29	17	19
Eğri altında kalan alan (W_0), N/mm	128	371	274	314	78	66
Kırılma enerjisi, N/m	27	70	49	57	16	13
Açıklık ortası son sehim, mm	0.14	0.56	0.38	0.48	0.27	0.22
Üç nokta eğilme deneyinde en büyük yük, kN	1.6	3.1	3.2	3.0	1.0	1.0
Net eğilme dayanımı, MPa	2.7	5.2	5.0	4.6	1.6	1.6
Yarılmada çekme dayanımı, MPa	2.9	4.1	3.7	4.0	1.9	1.9
Karakteristik boy, l_{ch} , mm	55	115	102	104	77	73



Şekil 5. Kompozitlerin ve çimento hamuru için tipik yük-sehim eğrileri

Agrega ilavesiyle kırılma enerjisinin belirgin bir biçimde artmasının ana nedeni kırılma süreci bölgesindeki mikro çatlakların gerilme yoğunluğunu düşürmesidir. Bunun sonucunda, çatlak agreganın içinden veya etrafından dolaşmaya zorlanır ve agreganın engelinin aşılması gerekir. Böylece, sarf edilen enerji artar.

Karakteristik boy

Tablo 2’de görüldüğü gibi 0-2 mm boyutundaki ince kum ilavesiyle üretilen kompozitin karakteristik boyu çimento hamuruna göre artmıştır. 2-4 mm ve 4-8 mm boyutlu normal agregaya içeren kompozitlerin karakteristik boyu 0-2 mm içeren kompozite göre bir miktar küçük bulunmuştur. Bu farkın ana sebebi normal agregaya ile çimento hamuru ara yüzeyinin özellikleridir. Kullanılan kireçtaşlarının rijitliği çimento hamurundan daha fazla olduğu için, çatlak agregaya etrafındaki zayıf ara yüzeyden geçmeye zorlanacağına kırılma için sarf edilen enerji düşecektir. Diğer yandan 0-2 mm boyutundaki silisli kum agregaya daha iyi tutunacağına ara yüzeyde harcanan enerji daha fazla olacaktır. Gevreklik değerleri PN2-4 ve PN4-8 numuneleri için benzer bulun-

sa da; PN4-8 numunesinin kırılma enerjisi PN2-4 numunesinde daha büyüktür.

Çimento hamurunun rijitliği hafif agregaya göre çok yüksek olsa da hafif agregalı kompozitlerin, kırılma enerjisi daha düşük olmasına rağmen, karakteristik boyu çimento hamuruna göre arttı. Hafif agregaya yakın olan çimento taneleri içsel küreleme ile daha iyi hidrate olurlar. Bu iyileştirilmiş ara yüzey daha çok mikro çatlama neden olarak malzemenin sünekliğini artırır. Aynı zamanda ince hafif agregalı kompozitler iri hafif agregalı olanlara göre daha sünek bulundu. Böylece, mikro çatlak miktarının ilave edilen agregaya boyutuna bağlı olduğu ve yük-sehim eğrisindeki uzun kuyruk bölgesinin daha fazla mikro çatlak varlığını belirttiği sonucuna varılabilir.

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Normal agregaya tane boyutunun 28 günlük otojen deformasyon üzerinde belirgin bir etkisi yok iken, 0-2 mm boyutunda normal agregaya içeren kompozitlerin bir yıllık otojen deformasyonu 2-4 mm ve 4-8 mm boyutunda normal agregaya içeren numunelere göre daha fazla bulundu. Lineer otojen deformasyon sonuçlarının tersine 0-2 mm boyutunda normal agregaya içeren kompozitlerin hacimsel otojen deformasyonu iri normal agregaya içeren numunelere göre daha düşük bulundu.
- Beklenildiği gibi ince hafif agregalar otojen deformasyonu önlemede iri hafif agregaya göre daha etkili bulundu.
- Normal agregalar çimento hamurunun otojen deformasyonunu rijitliklerinin yüksek olması sayesinde bir miktar kısıtlarken hafif agregalar içsel küreleme ile ortama su sürükleyerek nem kaybını azaltarak otojen deformasyonu önlemişlerdir.
- Çimento hamuruna hafif agregaya ilave edilmesiyle hidrasyon derecesi özellikle erken yaşlarda arttı. İnce hafif agregaya ilavesiyle su rezervuarları hamur fazı içerisinde daha yakın dağılarak iyi bir içsel küreleme sağladı. Böylece, ince hafif agregaya ile çimento ha-

murunun hidrasyon derecesi iri hafif agrega ilavesine göre daha yüksek bulunmuştur.

- Normal agrega tane boyutu ile kompozitlerin basınç dayanımı bir miktar artarken, hafif agrega tane boyutunun önemli bir etkisi bulunmadı. Normal ve hafif agreganın tane boyutları elastisite modülü ile eğilme ve yarılmada çekme dayanımlarını etkilemedi.
- Hacimce %30 oranında normal agrega ilavesiyle açıklık ortasındaki yük-sehim eğrisinin altında kalan belirgin bir biçimde artarken, aynı hacimde hafif agrega ilavesiyle kırılma enerjisi azaldı.
- 0-2 mm boyutundaki ince kum ilavesiyle kompozitin karakteristik boyu çimento hamuruna göre belirgin şekilde artmıştır. 2-4 mm ve 4-8 mm boyutunda normal agrega içeren kompozitlerin karakteristik boyu 0-2 mm ince kum içerende göre ara yüzey farklılıklarından dolayı bir miktar düşüktür.
- Hafif agrega ilavesiyle kompozitlerin kırılma enerjisi azalsa da sünekliği çimento hamuruna göre arttı.
- Bu çalışmada yüksek performanslı çimento esaslı malzemelerin otojen deformasyonunu önlemek için kullanılacak hafif agrega boyutunun belirlenmesinde kırılma parametrelerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği gösterildi.

Kaynaklar

- Akçay, B. ve Taşdemir, M.A., (2006a). Effects of Lightweight Aggregates on Autogenous Deformation in Concrete, plenary lecture in *Proceedings*, 16th European Conference of Fracture (ECF16), Measuring, Monitoring, and Modeling Concrete Properties: MMMCP in Honor of Surendra P. Shah, Eds. Konsta-Gdoutos, Greece, 163-170.
- Akçay, B. ve Taşdemir, M.A., (2006b). Influence of lightweight aggregates on internal curing and fracture of concrete, *Proceedings*, International RILEM Conference, Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Eds. Jensen, Lura, and Kovler, Lyngby, Denmark, PRO 52, 31-40.
- Akçay, B. ve Taşdemir, M.A., (2005). Yüksek performanslı betonlarda otojen rötrenin önlenmesi,

- XIV. Ulusal Mekanik Kongresi, Hatay, Türkiye, 45-54.
- Akçay, B., Pekmezci, B.Y. ve Taşdemir, M.A., (2005). Utilization of artificial lightweight aggregates in hardened cement paste for internal water curing, *Proceedings*, fib Keep Concrete Attractive, Eds., Balazs and Borosnyoi, **1**, Budapest, 374-380.
- ASTM C186, (1998). Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement.
- Bentur, A., Igarashib, S-I. ve Kovler, K., (2001). Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, *Cement and concrete research*, **31**, 1587-1591.
- Bentz, D.P. ve Snyder, K.A., (1999). Protected paste volume in concrete extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, *Cement and concrete research*, **29**, 1863-1867.
- Kayali, O., Haque, M.N. ve Zhu, B., (1999). Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash, *Cement and concrete research*, **29**, 1835-1840.
- Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T. ve Mori, H., (1999). Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, *Cement and concrete research*, **29**, 611-614.
- Lange-Kornbak, D. ve Karihaloo, B.L., (1998). Design of fiber reinforced DSP mixes for minimum brittleness, *Advanced cement based materials*, **7**, 89-101.
- Lura, P. (2003). Autogenous deformation and internal curing of concrete, *PhD Thesis*, Technical University of Delft, Netherlands.
- Philleo, R., (1991). Concrete science and reality, *Proceedings*, Materials Science of Concrete II, American Ceramic Society, Westerville, 1-8.
- Takada, K., Van Bruegel, K., Koenders, E.A.B. ve Kaptijn, N., (1999). Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete, *Proceedings*, International Workshop Autoshrink'98, Ed. Tazawa, E-I., Hiroshima, 229-239, Japan.
- Taşdemir, M.A., (1982). Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları *Doktora tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taşdemir, M.A. ve Karihaloo, B.L., (2001). Effect of aggregate volume fraction on the fracture parameters of concrete: A meso-mechanical approach, *Magazine of Concrete Research*, **53**, 405-415.

- Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Grimm, R., König, G., (2002). Role of aggregate fraction in the fracture of semi-lightweight high strength concrete, *Proceedings*, 6th Inter. Symp. on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 1453-1466, Leipzig.
- RILEM Technical Committee 50-FMC, (1985). Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, *Materials and Structures*, **18**, 106, 287-291.
- Sadouki, H. ve Wittmann, F.H., (2001). Numerical Investigations on damage in cementitious composites under combined drying and shrinkage and mechanical load, *Proceedings*, 4th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (Framcos), de Borst et al. (Eds), 95-98, Cachan, France.
- Weber S. ve Reinhardt H.W., (1997) A new generation of high performance concrete: Concrete with autogenous curing, *Advanced cement based materials*, **6**, 59-68.