

BETONDA HARÇ-AGREGA ARAYÜZEYİ İÇİN MEZO-MEKANİK MODELLEME*

Canan Taşdemir¹

Özet

Bu çalışmada, silis dumanı içeren ve içermeyen harç disk numuneler kullanıldı. Merkezinde silindirik model kalker agregası bulunan disk numunelerde yapılan modelleme çalışmalarında malzeme; agregası, çimento harcı ve agregası-harç arayüzeyinden oluşan üç fazlı bir kompozit varsayıldı. Bu model yardımıyla arayüzeyde, harçta ve agregası yüzeyinde gerilme dağılımları ile arayüzey bölgesinin kalınlığı hesaplandı. Silis dumanı içeren numunelerde model agregası-harç arayüzeyi kalınlığı daha düşük bulundu. Silis dumanı içeren ve içermeyen karışımlarda agregası-çimento hamuru arayüzeyindeki mikro yapısal incelemeler elektron mikroskop yardımıyla doğrudan gerçek betonda yapıldı. Silis dumanı içermeyen betonlarda agregası-çimento hamuru temas yüzeyi bölgesinin daha heterojen bir yapıya sahip olduğu görüldü. Çimento hamuru içindeki boşluklarda ve temas yüzeyi bölgesinde bol miktarda büyük boyutta kalsiyum hidroksit (CH), monosülfat (Afm) veya etrenjit (Aft) gibi hidrate ürünlere rastlandı.

Meso-Mechanical Modelling of Mortar-Aggregate Interface in Concrete

In this study, mortar disc specimens with and without silica fume were used. In the modelling studies made on disc mortar samples containing model cylindrical limestone aggregate at its center, the material was assumed as a three-phase composite material consisting of aggregate, cement mortar and aggregate-mortar interface. Using this model, the thickness of the interfacial zone and the stress distributions at the interface, mortar and the aggregate surface were calculated. In the samples containing silica fume, the thickness of model aggregate-mortar interface was found to be low. In mixtures with and without silica fume, microstructural analyzes of the aggregate-cement paste interface were performed directly on real concrete using SEM (Scanning Electron Microscope). In concretes without silica fume, a more heterogeneous structure was observed at the interface of the cement paste and the aggregate. Large amounts of hydrated products such as calcium hydroxide (CH) crystals, monosulfate (Afm) or etrenjite (Aft) were detected in the empty spaces of the bulk cement paste and also at the cement paste-aggregate interface.

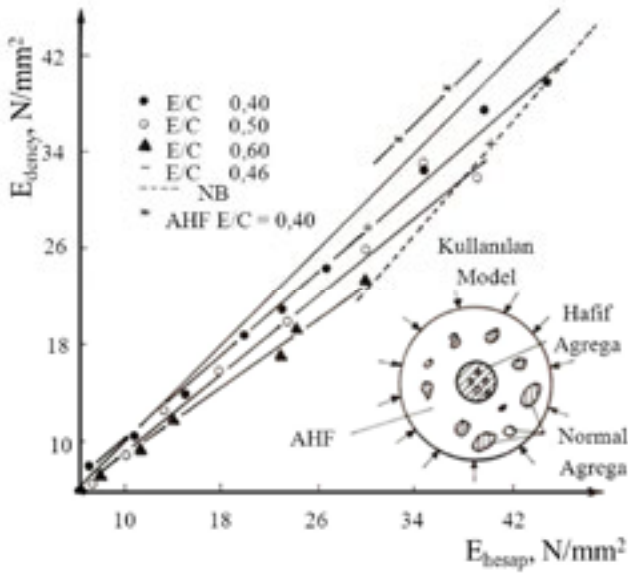
1. GİRİŞ

Beton genellikle agregası ve harçtan oluşan iki fazlı bir kompozit malzeme olarak göz önüne alınmaktadır. Betonun elastik davranışını tahmin etmek amacıyla kullanılan kompozit malzeme modelleri çoğunlukla iki fazlıdır. İki fazlı kompozitlerin elastisite modülü ile ilgili önerilen İdeal Sert Kompozit Malzeme Modeli (Üst Sınır - Paralel Model veya Eş Şekil Değiştirmeli Model) ve İdeal Yumuşak Kompozit Malzeme Modeli'nin (Alt Sınır - Seri Model veya Eş Gerilmeli Model) betona uygulanması Hansen tarafından yapılmıştır. Hirsch, agregası ve harç fazlarındaki gerilme dağılımlarından hareket ederek başka bir model ileri sürmüştür. Daha sonra Dougill, Hirsch'in modelini gözden geçirmiş ve "İdeal Sert" ile "İdeal Yumuşak" kompozit malzeme modellerinin ayrı bir düzenlemesi olduğunu göstermiştir. Bu model literatürde Hirsch-Dougill modeli olarak da adlandırılır. Bu modelin aksayan yönlerini önlemek için Counto başka bir model önermiştir. Hirsch-Dougill ve Counto Modelleri alt ve üst sınırlar arasında kalmaktadır. Bennett, Hansen'in makalesine yazdığı tartışma yazısında mode-

¹) tasdemircanan@gmail.com, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

linin hafif betonun elastisite modülünün tahmininde iyi sonuç verdiğini, elli kadar deney sonucuyla çok iyi uyum sağladığını belirtmiştir. Hansen'in bağıntısına benzer bir basitleştirmeyi Hobbs da yapmıştır. Literatürde Hashin-Hansen bazen de Hashin-Hobbs olarak anılan model agregalar arasında girişim yoksa ve matris ile agregalar arasında mükemmel bir aderans varsa geçerlidir [1]. Bunlardan ilki gerçekçi düşünülse de ikincisi değildir. Hashin-Hansen modelini Taşdemir [2] hafif ve yarı hafif betonlara uygulamıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Deneysel ve tahmin edilen elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması [2]

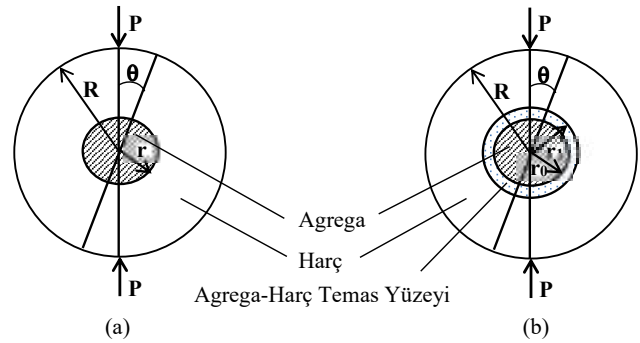
Hesapla bulunan elastisite modülü değerlerinin deneysel olarak bulunan elastisite modülü değerlerinden büyük olduğu Şekil 1'de görülmektedir. Farklar su/çimento oranı arttıkça artmaktadır. Su/çimento oranı yüksek betonlarda hesaplanan değerlerle deneysel değerler arasındaki farkın fazla çıkması agregalar ile harç arasındaki bağın mükemmel olmamasından ileri gelmektedir. Hâlbuki model, yukarıda belirtildiği gibi fazlar arasındaki bağın mükemmel olması esasına dayanır.

Günümüzde yaygın uygulama alanı olan yüksek mukavemetli betonların temas yüzeyi özellikleri ve bu betonların kırılma parametrelerinin mikro yapı ile birlikte incelenmesi daha rasyonel projelendirmeler için gereklidir. Silis dumanının hem puzolanik etkisi hem de filler etkisi nedeni ile betonda kullanımı ve bunun sonucu olarak temas yüzeyi güçlenmesinin mekanik davranışta ve iç yapısal düzeyde kantitatif olarak incelenmesi önemlidir. Sonuçta, normal dayanımlı betondan yüksek dayanımlı betona kadar geniş bir aralıkta değişen bu kompozitlerin ara yüzlerinin üçüncü bir faz olarak ele alınması zorunludur [3].

2. ÜÇ FAZLI BİR KOMPOZİT OLARAK BETON

Betonun özellikleri sadece agregalar ve harçın özelliklerine bağlı olmayıp temas yüzeyinden de etkilenir. Betonda en zayıf halka olarak bilinen agregalar ve çimento hamuru arasındaki geçiş bölgesi geçirimsizlik, dayanım, dayanıklılık ve çatlak yayılması gibi beton özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir işleve sahiptir. Böylece beton, daha gerçekçi bir yaklaşımla agregalar, harç ve agregalar-harç temas yüzeyinden oluşan üç fazlı bir kompozit malzeme olarak ele alınmaktadır.

Önerilen üç fazlı kompozit malzeme modeli iç içe aynı merkezli bir silindirik yapıya sahiptir. Şekil 2.a'da iki fazlı model, Şekil 2.b'de ise en içte silindirik agregalar, bunu çevreleyen ince cidarlı silindirik arayüzey ve arayüzeyi çevreleyen kalın silindirik harç fazından oluşan üç fazlı model şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. Beton disk numunelerinde; iki fazlı ve üç fazlı kompozit malzeme modelleri [1, 4, 5]

Bu modellemenin amacı, betonda aşırı gerilmelerin yerlerini ve mertebelerini hesaplamak, böylece betonun şekil değişimi ve kırılma davranışını anlamaya katkıda bulunmaktır. Düzlem kutupsal koordinat sisteminden yararlanarak, silindirik yarma deneyindeki gibi çap karşıtı noktasal yükler uygulandığında; i) arayüzeyin harç tarafında ve agregalar yüzeyindeki teğetsel gerilmeler, ii) harç tarafında, arayüzeyde ve agregalar yüzeyinde radyal ve iii) harç tarafında arayüzeyde ve agregalar yüzeyinde kayma gerilmeleri elastisite teorisi yardımıyla hesaplandı. Bu hesaplamalarda harç-arayüzey arasında ve arayüzey-agregalar arasında normal ve kayma gerilmeleri ile deplasmanlar eşit varsayıldı. Böylece, her bileşendeki gerilmeler ve deplasmanlar seriler hâlinde elde edildi. Serilerde n sayısına 1, 2, 3,... gibi değerler verilerek sayısallaştırıldı ve gerilme yayılışları bulundu [1, 4, 5].

Temas yüzeyinde ve harçtaki gerilme yayılışları E_1/E_2 ve E_3/E_2 'nin fonksiyonu olarak elde edildi. Burada E_1 , E_2 ve E_3 sırasıyla matrisin (harç), temas yüzeyinin ve agregaların elastisite modülleridir. Hesaplar, izotrop ve küçük deformasyon varsayımıyla elastisite teorisine göre yapıldı. Gerilme dağılımları

$E_1 < E_3$ ve $E_1 > E_3$ hâllerinde bulundu. Şekil 1.b'de r_0 model ağ-reganın yarıçapını, r_1-r_0 temas yüzeyinin kalınlığını R ise disk numunenin yarıçapını göstermektedir. Şekil 1.a ve Şekil 1.b'ye

göre dış yarıçapı R , iç yarıçapı r olan halka bölgeye ait gerilme ve şekil değiştirmeler disk yarma yüklemesi esas alınarak aşağıdaki gibi yazılabilir [1, 4-7]:

i) Radyal (σ_{rr}), teğetsel ($\sigma_{\theta\theta}$) VE kayma ($\sigma_{r\theta}$) gerilmeleri:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}(\theta, r) &= \frac{b_0}{r^2} + 2c_0 - \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n}2n(2n-1)r^{2n-2} + b_{2n}(2n+1)(2n-2)r^{2n} \\ &\quad + c_{2n}2n(2n+1)r^{-(2n+2)} + d_{2n}(2n-1)(2n+2)r^{-2n}\} \cos 2n\theta \\ \sigma_{\theta\theta}(\theta, r) &= -\frac{b_0}{r^2} + 2c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n}2n(2n-1)r^{2n-2} + b_{2n}(2n+1)(2n+2)r^{2n} \\ &\quad + c_{2n}2n(2n+1)r^{-(2n+2)} + d_{2n}(2n-2)(2n-1)r^{-2n}\} \cos 2n\theta \\ \sigma_{r\theta}(\theta, r) &= \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n}2n(2n-1)r^{2n-2} + b_{2n}2n(2n+1)r^{2n} - c_{2n}2n(2n+1)r^{-(2n+2)} \\ &\quad - d_{2n}2n(2n-1)r^{-2n}\} \sin 2n\theta\end{aligned}$$

ii) Radyal (U_{rr}) ve teğetsel ($U_{\theta\theta}$) deplasmanlar:

$$\begin{aligned}U_{rr}(\theta, r) &= \frac{1}{E} \left\{ -\frac{b_0}{r} (1+\nu) + 2c_0(1-\nu)r + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n}2n(1+\nu)r^{2n-1} \right. \\ &\quad \left. + b_{2n}[(2n-2) + \nu(2n+2)]r^{2n+1} - c_{2n}2n(1+\nu)r^{-(2n+1)} \right. \\ &\quad \left. - d_{2n}[(2n+2) + \nu(2n-2)]r^{-(2n-1)} \right\} \cos 2n\theta \\ U_{\theta\theta}(\theta, r) &= \frac{1}{E} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n}2n(1+\nu)r^{2n-1} + b_{2n}[2n(1+\nu) + 4]r^{2n+1} \right. \\ &\quad \left. + c_{2n}(1+\nu)r^{-(2n+1)} + d_{2n}[2n(1+\nu) - 4]r^{-(2n-1)} \right\} \sin 2n\theta\end{aligned}$$

Yarıçapı r olan içteki dolu bölge için gerilme ve deplasman denklemleri de aşağıdaki gibi yazılabilir:

i) Radyal (σ_{rr}), teğetsel ($\sigma_{\theta\theta}$) ve kayma ($\sigma_{r\theta}$) gerilmeleri:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}(\theta, r) &= 2c_0'' - \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n}''2n(2n-1)r^{2n-2} + b_{2n}''(2n+1)(2n-2)r^{2n}\} \cos 2n\theta \\ \sigma_{\theta\theta}(\theta, r) &= 2c_0'' + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n}''2n(2n-1)r^{2n-2} + b_{2n}''(2n+1)(2n+2)r^{2n}\} \cos 2n\theta \\ \sigma_{r\theta}(\theta, r) &= \sum_{n=1}^{\infty} \{a_{2n}''2n(2n-1)r^{2n-2} + b_{2n}''2n(2n+1)r^{2n}\} \sin 2n\theta\end{aligned}$$

ii) Radyal (U_{rr}) ve teğetsel ($U_{\theta\theta}$) deplasmanlar:

$$U_{rr}(\theta, r) = \frac{1}{E} \left\{ 2c_0''(1 - \nu)r + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n}'' 2n(1 + \nu)r^{2n-1} + b_{2n}''[(2n - 2) + \nu(2n + 2)]r^{2n+1}] \cos 2n\theta \right\}$$

$$U_{\theta\theta}(\theta, r) = \frac{1}{E} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n}'' 2n(1 + \nu) r^{2n-1} + b_{2n}'' [2n(1 + \nu) + 4] r^{2n+1}] \sin 2n\theta \right\}$$

Şekil 1.b'de görüldüğü gibi üç fazlı kompozit modelinin iki halka bölge (dış yarıçapı R, iç yarıçapı r_1 olan harç ve dış yarıçapı r_1 , iç yarıçapı r_0 olan arayüz) ve içteki dolu bölgeden (yarıçapı r_0 olan agregata) oluştuğunu kabul ederek sınır koşullarını uygularsak:

$r=R$ 'de;

$$\sigma_{rr} = -\frac{P}{\pi R} \sum_{n=1}^{\infty} \cos 2n\theta$$

$$\sigma_{r\theta} = 0$$

$r=r_1$ 'de;

$$\sigma_{rr}(\text{harç}) = \sigma_{rr}(\text{ara yüz})$$

$$\sigma_{r\theta}(\text{harç}) = \sigma_{r\theta}(\text{ara yüz})$$

$$U_{rr}(\text{harç}) = U_{rr}(\text{ara yüz})$$

$$U_{\theta\theta}(\text{harç}) = U_{\theta\theta}(\text{ara yüz})$$

yazılabilir.

$r=r_0$ 'da;

$$\sigma_{rr}(\text{ara yüz}) = \sigma_{rr}(\text{agrega})$$

$$\sigma_{r\theta}(\text{ara yüz}) = \sigma_{r\theta}(\text{agrega})$$

$$U_{rr}(\text{ara yüz}) = U_{rr}(\text{agrega})$$

$$U_{\theta\theta}(\text{ara yüz}) = U_{\theta\theta}(\text{agrega})$$

E_1, E_2, E_3 ve ν_1, ν_2, ν_3 sırasıyla harç, ara

yüzey ve agreganın elastisite modülleri ve poisson oranları ve deplasman denklemlerindeki katsayılar harç fazı için a, b, c, d , arayüzey fazı için a', b', c', d' ve agregata fazı için a'', b'', c'', d'' olmak üzere sınır koşulları göz önüne alınarak verilen denklem takımından;

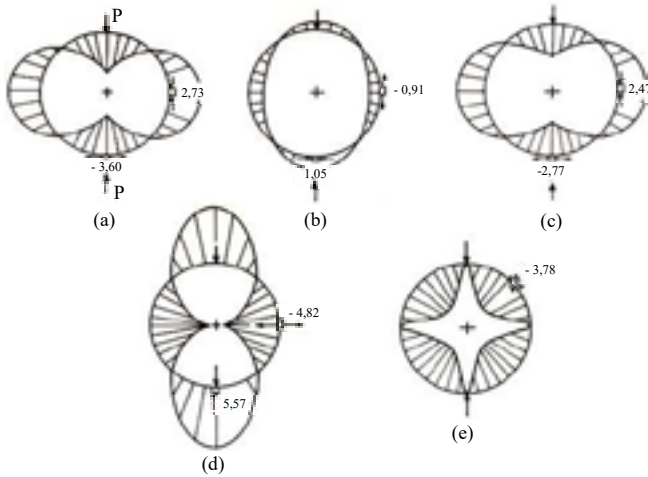
$n=0$ için; b_0, c_0, b_0', c_0' ve c_0''

$n=1$ için; $a_2, b_2, c_2, d_2, a_2', b_2', c_2', d_2', a_2''$ ve b_2''

$n=2$ için; $a_4, b_4, c_4, d_4, a_4', b_4', c_4', d_4', a_4''$ ve b_4'' bulundu.

Bu şekilde n'ye 3, 4, 5, ... değerleri verilerek diğer katsayılar da bulunabilir. θ 'ya 0°'den 90°'ye kadar değerler verilerek ve Şekil 3 ve Şekil 4'teki gerilme yayılışları bulundu [1, 4, 5].

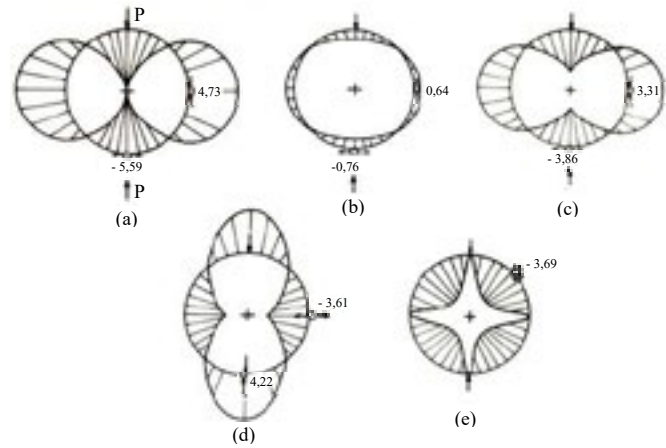
Yumuşak matris içinde sert enklüzyon içeren disk numune (normal beton) için $E_1/E_2=30$, $E_3/E_2=70$, $\nu=0,2$, $R=75$ mm, $r_0=15$ mm, $r_1=15,1$ mm ve $P=1000N/mm$ alınarak elde edilen gerilme dağılımları Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Yumuşak matris içinde sert enklüzyon içeren disk numunelerde (normal beton) tek eksenli basınç altında; a) Arayüzeyin harç tarafında teğetsel, b) Arayüzeyde teğetsel, c) Agregaya yüzeyinde teğetsel, d) Harç tarafında, arayüzeyde ve agregaya yüzeyinde radyal, e) Harç tarafında, arayüzeyde ve agregaya yüzeyinde kayma gerilmeleri dağılımı [1, 4, 5]

Şekil 3.b'de normal betonlarda temas yüzeyinde büyük teğetsel gerilmelerin oluştuğu görülmektedir. Bu, matris ile agreganın elastisite modülleri arasındaki büyük farktan ileri gelmektedir. Şekil 3.a ve 3.c'de görüldüğü gibi normal betonda hem harç tarafında hem de agregaya yüzeyindeki teğetsel gerilmeler hafif betonundakine göre daha düşüktür. Böylece, çatlakların normal betonda agreganın etrafından, hafif betonda ise agreganın içinden geçeceği sonucuna varılır. Aynı biçimde Şekil 3.d'de görüldüğü üzere yüke dik çap doğrultusunda büyük radyal çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu da çatlakların normal betonda agreganın etrafında gelişeceğinin kanıtı sayılabilir.

Sert matris içinde yumuşak enklüzyon içeren disk numune (hafif beton) için $E_1/E_2=4$, $E_3/E_2=3$, $\nu=0,2$, $R=75$ mm, $r_0=15$ mm, $r_1=15,1$ mm ve $P=1000N/mm$ alınarak elde edilen gerilme dağılımları Şekil 4'te gösterilmektedir.



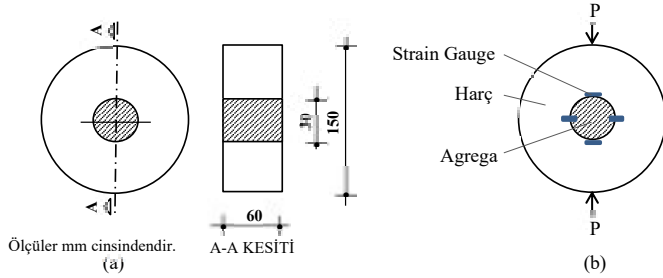
Şekil 4. Sert matris içinde yumuşak enklüzyon içeren disk numunelerde (hafif beton) tek eksenli basınç altında; a) Arayüzeyin harç tarafında teğetsel, b) Arayüzeyde teğetsel, c) Agregaya yüzeyinde teğetsel, d) Harç tarafında, arayüzeyde ve agregaya yüzeyinde radyal, e) Harç tarafında, arayüzeyde ve agregaya yüzeyinde kayma gerilmeleri dağılımı [1, 4, 5]

Hafif betonlarda (Şekil 4.b) ise matrisin elastisite modülü ile agreganın elastisite modülü birbirine yakın olduğundan daha düşük gerilme konsantrasyonları oluşmaktadır. Böylece, elastik olarak yakın özellikteki davranış temas yüzeyindeki gerilmeleri küçültür ve daha az mikroçatlama olabileceği sonucuna götürür. Elde edilen bu sonuçlar Bremner ve Holm [8]'un görüşleri ile uyum içindedir. Aynı şekilde yüksek mukavemetli betonlarda da agregaya ve matrisin rijitlikleri birbirine yakın olduğundan temas yüzeyinde daha üniform gerilme yayılışları elde edilecektir.

3. MODEL DENEYLERİ

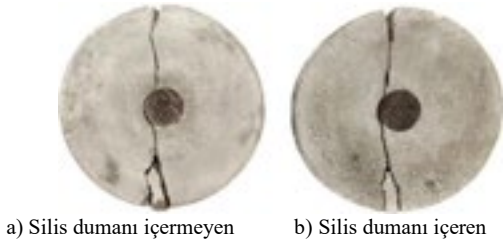
Oluşturulan üç fazlı model için deneysel çalışmalar yapıldı ve arayüzey bileşeninin kalınlığı tahmin edildi. Kalker esaslı 30 mm çapında ve 60 mm yüksekliğindeki silindirik agregaya 150 mm çapında ve 60 mm yüksekliğindeki kalıbın merkezine yerleştirildi. Silindirik agreganın çevresi maksimum agregaya tane çapı 2 mm olan harç ile dolduruldu. Model numune boyutları Şekil 5.a'da verilmektedir. CEM I 32,5 çimentosu, %94,96 oranında silis içeren silis dumanı mineral katkısı ve naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanıldı. Silis dumanı içermeyen harçta bileşenlerin ağırlıkça oranları çimento: 1,0; kum: 2,0; su: 0,36; süper akışkanlaştırıcı: %0,87'dir. Silis dumanı içeren harçta ise bileşenlerin ağırlıkça oranları bağlayıcı (çimento+silis dumanı): 1,0; kum: 2,0; silis dumanı: 0,10, su: 0,36; süper akışkanlaştırıcı: %1,3'tür. Silis dumanı içermeyen harçta elastisite modülü 32400N/mm², basınç dayanımı 59,8N/mm², silis dumanı içeren harçta ise

bu değerler sırasıyla 37800N/mm² ve 64,3N/mm² bulundu. Model silindirik agreganın elastisite modülü 70000 N/mm² ve basınç dayanımı ise 92 N/mm² olarak elde edildi. Yarılma deneyi uygulanan numunelerde, maksimum deplasmanların olduğu bölgelerde strain-gaugeler yapıştirılarak ölçümler yapıldı. Strain-gauge okumalarının yapıldığı noktalar Şekil 5.b'de şematik olarak gösterilmektedir [1, 4, 5].



Şekil 5. (a): Model numune boyutları ve (b): strain-gauge okumalarının yapıldığı noktalar

Arayüzeyin elastisite modülü Wittmann [9]'ın çalışması esas alınıp ekstrapole edilerek 1000N/mm² değeri alındı. Deneylerde elde edilen deplasman değerleri teorik yolla hesaplanan deplasman değerlerine eşitlenerek arayüzeyin kalınlığı tahmin edildi. Elde edilen sonuçlara göre silis dumani içermeyen harçlarda temas yüzeyinin kalınlığı 100µm, silis dumani içerenlerde ise bu kalınlık 80µm olarak bulundu. Arayüzey bölgesinin kalınlığı için bulunan değerlerin literatürdeki değerlerin üst sınırında kaldığı görüldü. Bunun nedeni model agreganın kullanılmış olması ve yeterince iyi yerleşmenin sağlanamaması olabilir. Model agreganın etrafındaki boşluk miktarı azalacak şekilde iyi bir yerleşmenin sağlanması hâlinde arayüzey rijitliğinin artacağı kalınlığının ise azalacağı beklenir. Model numunelerin göçme modları Şekil 6'da verilmektedir.

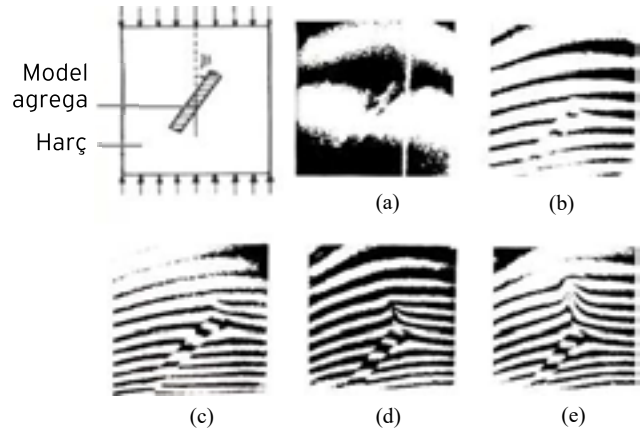


Şekil 6. Model deneylerde göçme modları [1, 4, 5]

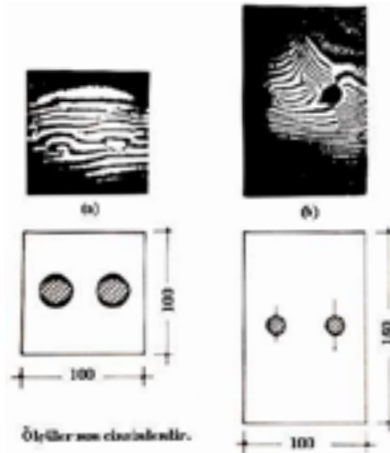
Şekil 6'nın incelenmesinden görüldüğü üzere çatlaklar silis dumani içeren ve içermeyen harçlarda agregamatrix temas yüzeyinde gelişti ve agregaharç ayrılması biçiminde göçme oldu. Silis dumani içermeyen harçlarda agregaharç ayrılması daha belirgin olup çatlak daha uzun bir yol olarak agreganın etrafında yayıldı. Silis dumani ile çimentonun bir kısmının yer

değiştirilmesinin dayanım artışına önemli bir katkısı olmuştur. Öte yandan aynı bir yük için teğetsel doğrultudaki şekil değiştirmeler daima radyal doğrultudakilerden büyük çıkmıştır.

Önce agregamatrix göçmesi gerçekleşmekte sonra yük doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme şekil değiştirmelerinin kritik değere ulaşmasıyla çatlak matrix içinde yayılmaktadır. Bu olayın doğruluğu Northwestern Üniversitesinde yapılan çalışmalarla da ortaya konmuştur [10, 11]. Bu durumu açıklayan aşamalar Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Holografik interferometri frinçleri (Model agreganın uygulanan yük doğrultusu ile yaptığı açı=36°): a) Harç-agrega ayrılması öncesi, b) Harç-agrega ayrılması, c) Matris çatlaması, d) Kanat çatlağının boyu=12mm, e) Kanat çatlağının boyu=23mm [10]

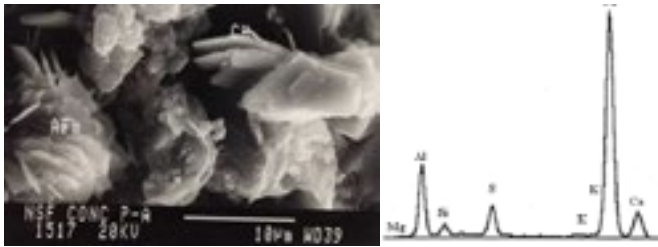


Şekil 8. Merkezinde silindirik model agreganın içeren prizmatik harç a) Model agregaharç ayrılması b) Matris çatlaması başlangıcı [11]

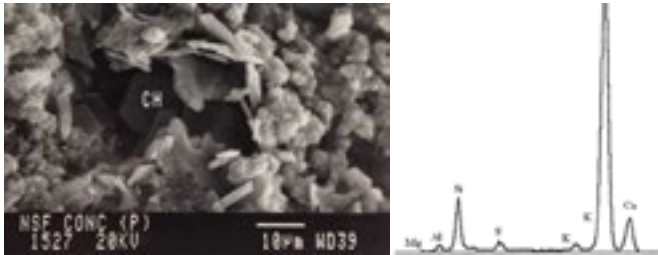
Şekil 8'de deneysel olarak incelenen çift enklüzyon problemi daha önce düzlemde elastisite teorisi yardımıyla Akyüz [12, 13] tarafından incelendi.

4. ARAYÜZEY İLE İLGİLİ MİKROYAPISAL İNCELEMELER

Betonda agrega-çimento hamuru temas yüzeyinin mikroyapısı EDX (Energy Dispersive X-Ray Analyzer) ile donatılmış SEM (Scanning Electron Microscope) yardımıyla incelenmiştir. Şekil 9 ve Şekil 10'da, silis dumanı içermeyen betonların agrega-matris temas yüzeyinde bol miktarda kalsiyum hidroksit (CH), monosülfat (Afm) veya etrenjit (Aft) gözlemlenmekte olup, arayüzeyin daha heterojen ve boşluklu olduğu, hem arayüzeyde hem de çimento hamurundaki boşlukların tabakalar halindeki CH kristalleri ile dolduğu görülmektedir.

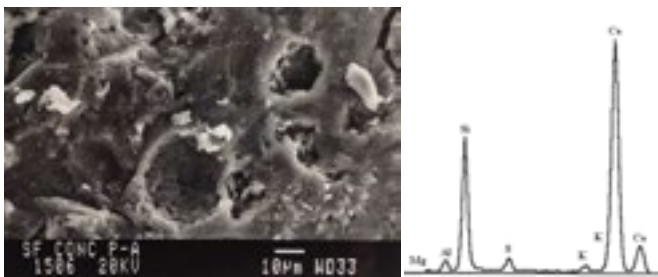


Şekil 9. Silis dumanı içermeyen betonda agrega-çimento hamuru temas yüzeyinde Afm ve CH kristallerini gösteren SEM mikrografı [1, 4]



Şekil 10. Silis dumanı içermeyen betonların hamur fazında boşlukların CH kristalleri ile dolu olduğunu gösteren SEM mikrografı [1]

Silis dumanı içeren betonlarda temas yüzeyinin yoğun C-S-H'den oluştuğu, hava boşluğu ve diğer boş hacimlerin CH, Afm veya Aft kristalleriyle dolu olmayıp boş oldukları Şekil 11'de görülmektedir. Bu betonlarda arayüzeyin çimento hamuruna özdeş bir yapıda olduğu sonucuna varıldı.



Şekil 11. Silis dumanı içeren betonlarda boşlukların CH kristalleri ile dolmadığını tamamen boş olduğunu gösteren SEM mikrografı [1]

Yoğun ve homojen harç-agrega arayüzeylerine sahip olan silis dumanı içeren betonun dayanımının yüksek, buna karşılık göçmesinin de gevrek olacağı beklenir. Yapılan mekanik deneylerden elde edilen bulgular mikro yapıda oluşan değişiklikleri yansıtan niteliktedir [14]

5. SONUÇLAR

Önerilen modelleme ile yapılan hesaplardan ve ölçülen depasmanlardan elde edilen değerlere ve agrega-matris arayüzeyinin mikro yapı incelemelerine dayanarak bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Üç fazlı model yardımıyla temas yüzeyi kalınlığı tahmin edilebilmektedir. Silis dumanı içeren harçlarda model agrega civarındaki temas yüzeyi kalınlığı silis dumanı içermeyenlere göre daha azdır.
- Yüksek dayanımlı beton ile hafif betonlarda agrega ve matrisin elastisite modülleri birbirine yakındır, temas yüzeylerinde daha düşük gerilme konsantrasyonları ve daha üniform gerilme yayılışları oluşur, maksimum yüke kadar daha az mikro çatlama gözlemlenir.
- Normal betonda ise agrega ve matrisin elastisite modülleri birbirinden çok farklıdır, temas yüzeylerinde oluşan büyük gerilme konsantrasyonları tipik agrega-harç göçmesine neden olur.
- Silis dumanı içermeyen model numunelerde agrega-harç göçmesi daha belirgindir, çatlağın agrega etrafında katettiği yol daha uzundur. Silis dumanı içerenlerde ise bu yolun daha kısa olduğu görülmektedir.
- Silis dumanı içermeyen betonlarda harç-agrega temas yüzeyi heterojen ve boşluklu bir yapıya sahiptir, buna karşılık, silis dumanı içeren betonlarda temas yüzeyi daha homojendir ve yapısı daha az boşlukludur.
- Arayüzeyin güçlendirilmesi beton özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle dayanımlar belirgin bir biçimde artmaktadır. Düşük su/çimento oranına sahip yüksek dayanımlı betonların elastisite modülünün tahmininde iki fazlı kompozit malzeme modelleri kullanılabilir.

Kaynaklar

1. Taşdemir, C., "Agrega-Çimento Hamuru Arayüzeyi Mikroyapısının Yüksek Mukavemetli Betonların Kırılma Parametrelerine Etkisi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak 1995.

2. Taşdemir, M.A., "Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları", Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 154 s., 1982.
3. Nilsen, A.U. and Monteiro, P.J.M., "Concrete: A Three Phase Material", Cement and Concrete Research, V.23 (1), pp 147-151, 1993.
4. Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A.D., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G., "Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three Phase Composite Model Approach", Cement and Concrete Composites, 20, pp.301-318, 1998.
5. Taşdemir, C., Akyüz, S. ve Taşdemir, M.A., "Betonda Agrega-Çimento Hamuru Temas Yüzeyinin Mekanik Davranıştaki İşlevi", IX. Ulusal Mekanik Kongresi, Ürgüp, s.674-683, 1995.
6. İnan, M., "Düzlemde Elastisite Teorisi", Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1963.
7. Little, R. W., "Elasticity, Civil Engineering and Engineering Mechanics Series", N.M. Newmark and W.J. Hall (Eds.), Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1973.
8. Bremner, T. W. and Holm, T.A., " Elastic Compatibility and the Behaviour of Concrete", ACI Journal, V.83, pp. 244-250, 1986.
9. Wittmann, F. H., "Estimation of the Modulus of Elasticity of Calcium Hydroxide", Cement and Concrete Research, V.16, pp 971-972, 1986.
10. Taşdemir, M.A., Maji, A.K., and Shah, S.P., "Crack Propagation in Concrete under Compression", Journal of Engineering Mechanics, ASCE Vol.116, No.5, pp.1058-1076, 1990.
11. Maji, A.K., "Study of Concrete Fracture Using Acoustic Emission and Laser Holography, PhD Dissertation, NU, Evanston, 1989.
12. Akyüz, S. "Düzlem Elastisite Teorisi ile Karteziyen Eksenlere Göre Simetrik Çift Enklüzyon Probleminin Çözümü", Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 1971.
13. Akyüz, S. "Düzlemde Altıgen Simetriye Göre Dizilmiş Enklüzyon Probleminin Bir Çözümü Üzerine", VI. Ulusal Mekanik Kongresi, Kirazlıyayla, s.86-101, 1989.
14. Taşdemir, C., Sarkar, S.L., Taşdemir, M.A., Akyüz, S. ve Koca, C., "Effect of Silica Fume on the Brittleness of High Strength Concretes", in ERMCO 95: 11 th European Ready Mixed Concrete Congress, Istanbul, pp.444-452, 1995.