

## AGREGA - ÇİMENTO HAMURU BAĞI ÜZERİNE AN OVERVIEW OF THE CEMENT - AGGREGATE BOND

Ali UĞURLU\*

Kim. Müh

### ÖZET

En az üç farklı malzemeden üretilen bir kompozit olan beton, çimentonun hidratasyon reaksiyonları sonucu meydana gelen yeni ürünler, yeni fazlar ve fiziksel yapılar dikkate alındığında yapısal olarak daha da karmaşıklaşır. Yük altında betonun gerilme - deformasyon davranışı açıklanırken bu değişik malzemeler ve hidratasyon sonucu meydana gelen yeni ürün ve fazlar dikkate alınmadan bir açıklama yapılamaz. Son yıllara kadar, yani duyarlı elektron mikroskopları ile beton iç yapısının incelenme olanakları henüz yokken betonun yük altındaki davranışı çimento matrisi ile çimento hamuru - agrega bağı üzerinde somut 1 anan basit kırılma teorileri ile açıklanmaktaydı. Teknolojideki son gelişmeler, özellikle kırmataş agregalarda mekanik bağlanma gibi basit bir kurama indirgenen çimento hamuru - agrega ara yüzeyi gerçeğinin sadece yüzey dokusu ve tane şekli gibi kavramlar ile açıklanamayacağını ortaya çıkarmıştır.

Bu bildiride, özellikle süreksizlik sınırına kadar olan beton davranışı üzerinde önemli bir etkisi olan çimento hamuru - agrega ara yüzeyi yapısı ve bu yapının yük altındaki davranışı agrega açısından incelenmiştir.

### ABSTRACT

In this paper the causes of the crushing mechanism of concrete are discussed. The shape and surface texture of the coarse aggregate are important, since there may be a considerable amount of mechanical interlocking between the mortar and the coarse aggregate. In addition, there may be some chemical reactions between the cement and aggregate.

Although the water/cement ratio is the most important factor affecting strength, the properties of the aggregate cannot be ignored, especially surface texture and shape of aggregate. Surface texture and shape of aggregate affect both the bond and stress level at which microcracking begins. The surface texture, therefore, may affect the shape of the stress - strain curve but has little effect on the ultimate compressive strength of the concrete or not.

\* DSI Genel Müdürlüğü Teknik Arif (inn a ve Kalite Kontrol Dal Bfk.'lığı 06100 Yü cet epe, Ankara, Türkiye

## 1. GİRİŞ

Beton ve betonarme yapıların hayatın çok değişik alanlarda gittikçe yaygınlaşarak kullanılması sonucu yapı mühendisleri ve malzemeciler betonu tanımlarken artık basınç dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, poisson oranı gibi bilinen karakteristik indeksler yerine betonun yük altındaki davranışı ile ilgili (elastik, tam plastik vs.) tanımlar geliştirilmeye çalışmaktadırlar. Bu görüş betonun dayanımından ve şekil değiştirme özelliğinden daha önceki tanımlamalara göre daha fazla yararlanabilme koşullarını da beraberinde getirmektedir. Bu sayededir ki günümüzde, betonun yük altında doğrusal elastik olmayan davranışı ile iç yapısı arasında çoklu ilişkilerin olduğu, kendisi de kompozit bir malzeme olan betonun daha güçlü malzemelerle takviyesi sonucu gerilme - deformasyon ilişkisinin değişebileceği ortaya çıkmıştır. Beton daha güçlü kompozit elemanlarıyla takviye edilmeden önce betonu oluşturan malzemelerinin her birinin ve birbirleriyle ilişkileri sonucu ortaya çıkan her bir değişik durumun da betonun gerilme - deformasyon ya da kısa süreli İnelastik davranışı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan en çok bilineni çimento hamuru ile agrega arasındaki ilişkidir. Son yıllarda beton teknolojisinde elektron (SEM) mikroskoplarının kullanılması ile birlikte daha önce çimento hamuru ile agrega arasında mekanik, kimyasal, vs. olarak açıklanan bağ teorilerinin bu kadar basit açıklanamayacağı ortaya çıkmıştır.

## 2. KOMPOZİT OLARAK BETON VE BETONUN İÇ YAPISI

Mühendislik malzemeleri iç yapılarına bağlı olarak;

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler

olarak dört ana sınıfa ayrılırlar, [1]. İlk üç malzeme grubu birbirlerine elektron vererek ya da elektronları ortak kullanarak birbirine bağlanmış malzemelerdir. Bu üç sınıfa giren maddelerin beraber veya karışık kullanılmalarından doğan malzemelere de kompozit malzemeler adı verilir. Kompozit malzemelerin faydası iki veya daha fazla ayrı malzeme sınıfına ait faydalı özellikleri birleştirmesi dir. Çok fazla malzemelerin; malzemeyi meydana getiren fazların tek tek Özelliklerinden daha üstün özellikte bir malzeme elde etmek üzere biraraya getirildiği eskiden beri bilinen bir gerçektir. Günümüzde ne kayacın ne de çimento hamurunun tek başına kullanışlı bir yapı malzemesi olmadığı bilinir. Kayaç çok fazla kırılğan olup çimento hamuru da kuruma nedeni ile çatlar. Buna karşın bu iki malzemenin birlikte kullanılması sonucu ortaya çıkan beton bir çok yapıda çok yönlü olarak kullanılan bir malzemedir, [2]. Kompozit malzeme, mekanik ve kimyasal özellikleri itibari ile en az iki tür malzemenin biraraya gelerek birbirine temas yüzeyleri ile bağlanması sonucu ortaya çıkar. Meydana gelen bu çok fazla malzeme kendini oluşturan malzemelerden daha farklı özelliktedir, [2].

Kompozit malzeme anlayışı açısından betona yaklaşıldığında kaba olarak, betonun agrega ve çimento hamuru gibi iki fazdan meydana gelmiş olduğu; daha yakın incelemede ise harç fazının hidrate çimento matrisi içerisine gömülmüş kum taneciklerinden meydana geldiği görülecektir. Mikroskopik düzeyde yapılan incelemede, hidrate çimento pastasının kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidroksitten (CH) meydana geldiği, bu fazın ise (içi su ile dolu yada boş) kılcal boşluklar ve hidrate olmamış çimento taneciklerini içerdiği görülecektir. Daha alt

ölçekte yapılan İncelemede ise kalsiyum-silikat-hidrat jellerinin değişik şekil ve kimyasal yapıda kriztalize olmuş zayıf partiküller ile sürekli ve kesikli jel boşluklarından ibaret olduğu tesbit edilmiştir. Keza agregaların da bir kompozit olarak farklı minerallerin belirli bir porozite ile bir araya toplanmış bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir, [2],

Yukarıda açıklanan özellikler nedeniyle beton yapısal olarak oldukça karmaşık bir kompozittir. Bununla birlikte beton İç yapısı çözümlenirken diğer kompozitler için gözönünde tutulan parçacık şekli, parçacık büyüklük ve dağılımı, parçacık yoğunluğu ve dağılımı, parçacık dizimlenmesi, parçacık dokusu, dağılmış fazın yapısı, sürekli fazın yapısı ile dağılmış ve sürekli faz arasındaki bağ gibi özetlenen parametreler dikkate alınır. Burada beton için parçacık ya da dağılmış faz olarak tabir edilen agregadır. Sürekli faz ise (matris malzemesi) çimento hamurudur.

Bilindiği üzere en az üç farklı malzemeden (agrega, çimento ve su) üretilen bir kompozit olan beton, çimentonun hidrasyon reaksiyonları sonucu meydana gelen yeni ürünler, fiziksel yapı ve fazlar ile daha karmaşık bir iç yapıya kavuşur. Yük altında betonun davranışı açıklanırken bu farklı malzemeler ve hidrasyon sonucu meydana gelen yeni ürün ve fazlar dikkate alınmadan bir açıklama yapılamaz. Son yıllara kadar, yani duyarlı elektron mikroskopları ile beton iç yapısının incelenme olanakları henüz yokken betonun yük altındaki davranışı çimento hamuru - agrega bağ dayanımı ve çimento hamuru matrisi üzerinde somutlanan teorilerle açıklanabiliyordu. İç yapının elektron mikroskoplarıyla ayrıntılı incelenmesinden sonradır ki bu konuda yapılan ayrıntılı açıklamalar sonrası sağlıklı sonuçlara ulaşılabilmektedir.

### 3. ÇİMENTO HAMURU - AGREGA BAĞI

Bazı kaynaklarda, yada betonun kırılma olayının derinlemesine incelenmediği kaynaklarda beton dayanımı; çimento hamuru ve İri agrega dayanımı ile çimento hamuru-agrega bağ dayanımı olgusuyla açıklanmaktadır. Eğer betonu basitçe anlaşılır kılmak adına böyle bir açıklama yapılmışsa bu tespit bir yere kadar doğrudur. Aksi durumda betonun ve betonu meydana getiren malzemelerin diğer özellikleri ve kırılma anında yüklenme durumu, kırılma şekli gözden kaçırılmış olunur. Bununla birlikte bütün araştırmacıların üzerinde anlaşmaya vardığı bir gerçek vardır ki o da çimento hamuru ile agrega arasındaki bağın betonun mekanik davranışını büyük ölçüde etkilediği ve aradaki bu temas yüzeyinin zayıf bir hat olduğu gerçeğidir, [3].

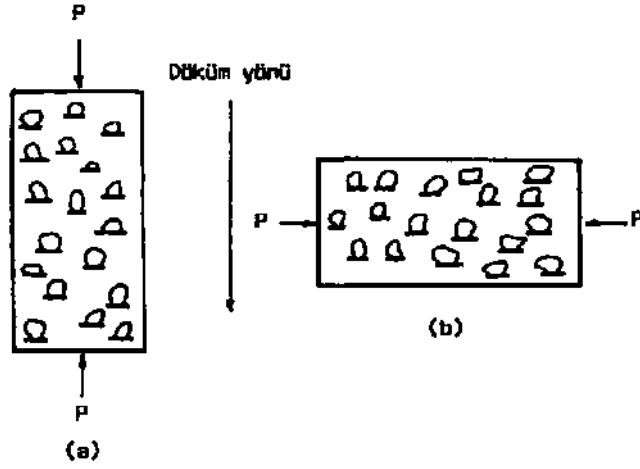
Elektron mikroskobu ile yapılan incelemede; bu geçiş bölgesi ile temas eden agrega yüzeyi üzerinde kalsiyum hidroksitten müteşekkil bir filim tabakası olduğu ve filimin ince bir kalsiyum silikat hidrat (tobermorit) formunda başka bir tabaka ile kaplı olduğu tespit edilmiştir. Bu çift kat filim tabakasının da ara yüzeydeki kalsiyum hidroksit formundaki bir tabakayla kaplı olduğu görülmüştür. Yaklaşık 50  $\mu$ m kesitinde olan bu bölgede ara yüzeyden çimento pastasına doğru azalan bir porozite gözlenmiştir, [4,5]. Yine bir başka araştırmacı da agrega-çimento hamuru bağında agrega kimyasal yapısı ve kalsiyum hidroksit kristallerinin yöneltmesi ile ortaya çıkan agrega yapısının etkisini tespit etmiştir, [6].

Çimento ve agreganın iki farklı malzeme olması (anizotropi) nedeniyle doğaldır ki bu iki malzemenin birbirine temas yüzeyleri boyunca bağlanmaları iç yapıda farklı oluşumlar yaratır. Betonda çimento hamuru - agrega ara yüzeyi zayıftır. Bu zayıflığın nedenlerini kısaca sıralarsak ;

3.1 İşlenebilir bir karışım hazırlama zorunluluğu nedeniyle betona çimento hidratasyonu için gereken su miktarından daha fazla su konur. Beton yerleştirildikten sonra iri taneler yerçekimi nedeniyle dengeyi sağlamak üzere aşağı doğru oturma hareketi yaparken karışımda (henüz) hidratasyona katılmamış olan su ise yukarı doğru hareket eder. İri agrega taneciklerinin altından geçemeyen bu su, burada tutularak, döküm yönüne dik doğrultuda, agrega ile çimento hamuru arasında su/çimento oranı oldukça yüksek zayıf hatlar meydana getirir, Şekil -1. Bu suyun bir kısmı ise *Wim der Walls* kuvvetleri etkisiyle ara yüzeyden harca doğru hareket ederek agrega ile temas eden harç yüzeyinden içeriye doğru azalan bir porozitenin (boşluklu yapı) meydana gelmesine neden olur.

3.2 Bilindiği üzere çimento hidratasyonu sonrasında çimento hamuru hacminde kuruma neticesinde kuruma rötrəsi meydana gelir. Beton kürrü sonrası, agreganın yüksek elastisite modülüne sahip olması nedeniyle agrega da kuruma neticesinde rötre yapar. Bu hareketler sonrası agrega-çimento hamuru bağı zayıflar.

Agrega ile çimento hamuru arasında üç farklı bağlanmadan söz edilir.



Şekil-1 Terleme nedeniyle betonda meydana gelen zayıflık düzlemleri  
(a) düşey eksenli numune (b) yatay eksenli numune

#### i - Mekanik Bağlanma

Agreganın yüzey dokusu nedeniyle ortaya çıkan bir bağlanma şeklidir. Tablo 1- b'de verilen ve tablonun sonuna doğru gittikçe mekanik bağ yapma özeliği artan bu tablo görüleceği üzere agreganın yüzey dokusu esas alınarak hazırlanmıştır. Mekanik bağlanmada agreganın girintilerine çimentoların girmesi agrega çıkıntılarının da çimento hamuruna batması sonucu adeta kamalama şeklinde bir kenetlenme meydana gelir. Mekanik bağlanmada esasen bağlanmayı sağlayan agrega özgül yüzeyinin artmasıdır. Girintili-çıkıntılı bir yüzeye sahip agreganın çimento hamuru ile temas ettiği

alan diğer agregalara göre daha fazladır. Tablo 1-a'da ise agrega tane şekline göre yapılmış bir sınıflama görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere aşağıya doğru inildikçe agreganın özgül yüzeyi artar. Böylece agreganın çimento hamuru ile temas yüzeyi büyür ve mekanik bağlanmada artış meydana gelir.

#### ii- Epitaksial Bağlanma

Bu, daha küçük ölçekte ve ender durumlarda gerçekleşebilen bir aderans türüdür. Çimentonun hidratasyonu sırasında bazı kristal yapıları bileşenler [örneğin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] ilk önce çökerek agrega yüzeyini ince bir tabaka halinde kaplar. Eğer çokelen bu ince tabakanın kristal yapısı ile agreganın kristal yapısının kafes sistemleri birbirine uygunsa, bu yapılar aralarında süreklilik oluşturarak küçük ölçekte bir aderans ortaya çıkmasına neden olurlar, [7]. Bu tip bir bağı kireçtaşı agregaların kolayca gerçekleştirdiğini söyleyebiliriz.

#### iii- Kimyasal Bağlanma

Bazı agregalar kimyasal yapıları (mineralojik yapı) nedeniyle çimento pastası ile reaksiyona girerek aralarında bir bağın oluşmasına neden olurlar. Bu olay daha çok agrega yüzeyinde çokelen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek bağ dayanımını artırır. Buradaki reaksiyon puzolanik bir reaksiyondur, [3]. Bu tip bağlanma bazen epitaksial bağlanma içerisinde de değerlendirilir. Traslı çimento kullanılması durumunda eğer ortamda silisli ve alüminli agrega varsa yine benzer reaksiyonlar sonucu daha iyi bir bağlanma meydana gelir, [3].

### AGREGALARIN TANE ŞEKLİ VE YÜZEY DOKUSUNA GÖRE SINIFLANDIRILMASI (BS 812, Part 1)

**Tablo 1-a Tane Şekli Sınıflaması**

Tane Şekli	Açıklama	Örnekler
Yuvarlak	Tamamen su içerisinde sürtünme nedeniyle yuvarlaklaşmışlardır	Nehir yada deniz kıyısı çakılları, çöl, deniz kıyısı ve rüzgarın serpiştirdiği kumlar
Şekilsiz	Tabii şekilsizdirler veya sürtünme nedeniyle ve kenarları yuvarlanmış biraz şekillidirler	Diğer çakıllar, kum veya adı çakmak taşları
Köşeli	Pürüzlü düzlemsel yüzeylerin kenarlarda kesiştiği bir yapıdır	Kırılmış kayaların bütün çeşitleri, yamaç molozu, camısı cüruf
Yassı	Agrega eninin diğer iki boyuta göre daha küçük olduğu agregalardır	Laminar kayalar
Uzun (Prizmatik)	Genellikle köşeli ve bir boyutun diğer iki boyuttan farkedir şekilde daha büyük olduğu agregalardır	Laminar kayalar
Yassı ve Uzun	Tane uzunluğunun eninden ve eni banyur* şekilde kalınlıktan daha büyük olduğu agregalardır	Laminar kayalar

**Tablo- 1.b** Agrega Yüzey Dokusu Sınıflaması

Grup	Yüzey Dokusu	Özellikler	örnekler
1	Camsı	Konkoidal (midye kabuğu) kırılması sonucu yüzeyler camsı	Siyah çakmaktaşı, obsidiyen camsı, curüf
2	Pürüzsüz (Düzün)	Tanesel veya lamındı kayaçların pürüzsüz kırılması yada su içerisinde sürtünme nedeniyle düzleşmesi sonucu ortaya çıkarlar	Çakıl, çört, sleyt, mermer ve bazı riyolitler
3	Taneli	Kırılma neticesinde yüzeydeki keskinliklerin uniform şekilde yuvarlaklaşması sonucu oluşmuş yüzeylerdir	Kumtaşı, oolit
4	Pürüzlü	Yapısında zorlukla görülebilen, orta ve ince taneli kayaçların kırılması sonucu ortaya çıkan Yüzeylerdir	Bazalt, felsit, porfir, kireçtaşı
5	Kristalin (Kristalli)	Yapısında kolayca görülebilen kristal parçacıkları vardır	Granıl, Gobro, Gnays
6	Petekli	Yüzeyde görülebilen boşluklar ve oyuklar vardır	Tuğla, sünger taşı köpük cüruf, klinker, genişUnumş kıl

#### 4. ÇİMENTO HAMURU AGREGA BAĞINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Çimento hamuru-agrega bağ dayanımına etki eden bir çok faktör vardır. Bu faktörlerin herbiri dayanımını doğrudan etkiler. Başlıcaları;

##### 4.1 Agrega Şekli ve Yüzey Dokusu

Son yıllara kadar, bağ dayanımını etkileyen en önemli öge olarak biliniyordu. Günümüzde elektron mikroskoplarının kullanılması ile agrega-çimento hamuru ara yüzeyinin incelenmesi sonucu kaba bir yaklaşımdan öte gitmeyen ve mekanik bağlanmayı vurgulayan agrega şekli ve yüzey dokusunun etkisinin düşünüldüğü kadar fazla olmadığı, betonun diğer bileşim özellikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Tablo 1 (a) ve (b) agregalan tane şekli ve yüzey dokusu açısından sınıflandırmıştır. Kaba bir yaklaşımla; bu her iki tabloda yukarıdan aşağı inildikçe mekanik bağlanmanın artacağı söylenebilir.

Mındess, su/çimento oranının beton dayanımında en önemli faktör olmasına rağmen agrega özellikleri katkısının görmezlikten gelinemeyeceğini söyler,[2]. Keza yine iri agrega yüzey dokusu ve şeklinin çimento hamuru ite agrega arasındaki kilitlemeyi (bağlanma) önemli ölçüde arttırdığı, yüzeyi pürüzlü agrega kullanılması durumunda betonun eğilme ve çekme dayanımlarında pürüzsüz agrega kullanılan betonlara göre yaklaşık % 30 artış olabileceği belirtilmektedir,[2]. Yine Postacıoğlu'nda aderanstaki düşüklüğü agrega yüzey dokusuna bağlamakta ve bunun betonun gerilme-şekil değiştirme kapasitesini etkileyeceğini ve betonun (basınç dayanımından bağımsız olan) deformasyon yapabilme yeteneğinin azalacağını söylemektedir [8]. Postacıoğlu'nun belirttiği bulgu agrega yüzey ve tane şekline bağlı olarak betonun **kini** ma mekanığının değişebileceğidir. Yani pürüzlü agrega kullanılması durumunda sünek bir kırılma neticesinde deformasyon kapasitesinin artabileceği olgudur.

Agreganın bağ olayında olumlu katkısı olan tane şekli ve yüzey dokusunun bazı beton özelliklerinde olumsuzluğa yol açabileceği durumu ise bu gerçeğin bir diğer yüzüdür. Özellikle; su/çimento oranı, kompasite, çimento gereksinimi, işlenebilirlik, karma suyu miktarı, geçirgenlik, dayanıklılık gibi beton özelliklerinin yukarıda anılan parametrelerden olumsuz etkilenebileceğini göz ardı etmemek gerekir. Normalde agregası seçimi yapılırken yuvarlak agregası seçimi yapılır. Beton kompasitesi ve işlenebilirliği açısından bu gerekli bir işlemdir. {Composite açısından zayıf olan betonlar taşıyıcı iskeleti sağlam olmayan bir yapı meydana getirir. Agregası yığın boşluğunu (y), yuvarlak tane yüzdesini (x) ile gösterirsek

$$y = 0,42 - 0,07 x$$

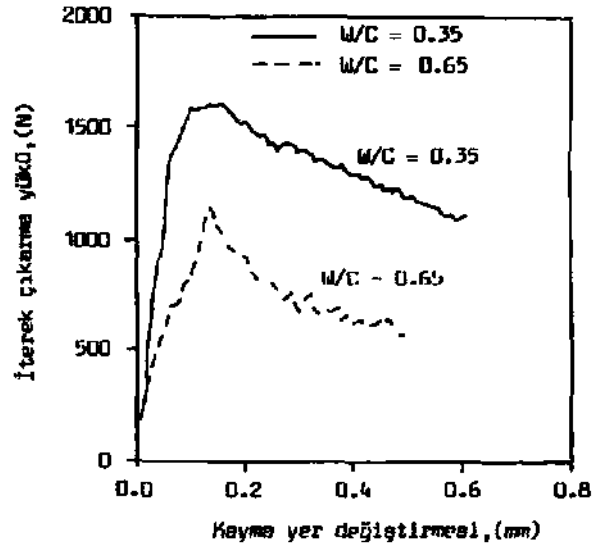
ampirik bağıntısından bahsedebiliriz, [9]. Betonda boşluklu yapının donma - çözülme, geçirgenlik, düşük dayanım, vs. gibi sorunlara yol açtığı bilindiğinden ötürü özellikle agregası seçimi yapılırken tane şekli ve yüzey dokusundan ileri gelebilecek olumsuz etkilenmeler de dikkate alınmalıdır. Bunun yanı sıra tanelerin şekilsiz olması, tanelerin birbiri üzerinde kaymasını zorlaştırarak işlenebilirlikte ciddi problemlere yol açacaktır. Keza yüzey pürüzlülüğü tanenin temas yüzeyini arttırarak (özgül yüzeyin büyümesi) işlenebilirlik için suya duyulan gereksinimi (ya da başka önlemleri gerektirecektir) arttırarak su/çimento oranı yüksek karışımların ortaya çıkmasını zorlayacaktır.

#### 4.2 Su/Çimento Oranının Etkisi

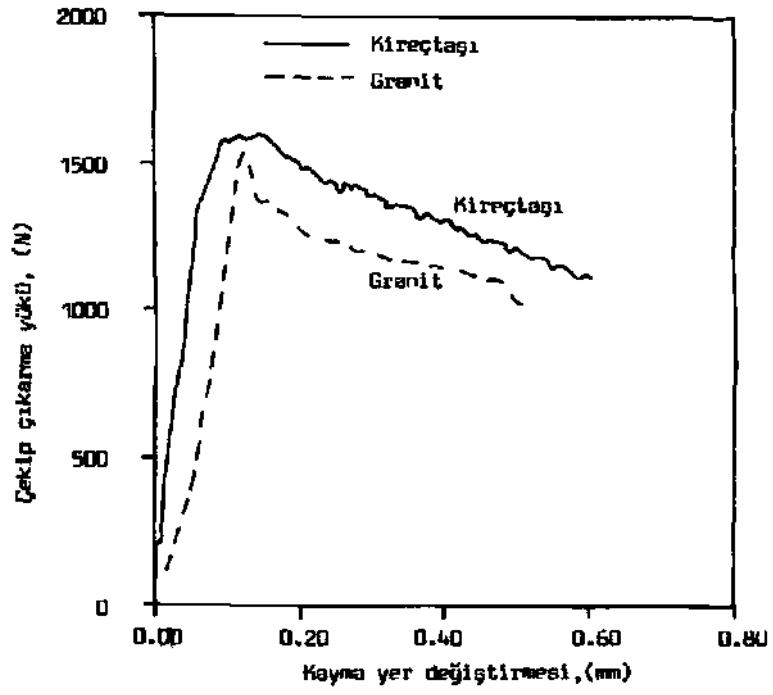
Bilindiği üzere su/çimento oranı betonun bilinen bütün özelliklerini doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Beton dayanım ve dayanıklılığı su/çimento oranından birinci derecede etkilenir. Su/çimento oranı, hem çimento hamuru yapısını hem de agregası-çimento hamuru ara yüzeyini doğrudan etkileyen bir parametredir. Su/çimento oranının büyümesi ile beton içerisinde boşluklu zayıf bir yapı oluşur. Keza yüksek su/çimento oranında betonda terleme artar ve agregası - çimento hamuru ara yüzeyindeki porozite büyür, [10]. Bu şekildeki bir beton dokusunda yüzey enerjisi ve bağ dayanımı azalır, [3]. Elektron mikroskobu ile yapılan incelemede, ara yüzeyin su/çimento oranından büyük ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir, şekil 2, [3].

Yapılan çalışmalarda su/çimento oranının agregası-çimento hamuru bağ dayanımını betonun basınç dayanımından daha çok etkilediği, bağ dayanımının ancak düşük su/çimento oranları için anlamlı olabileceği ve su/çimento oranının artması durumunda kırma agregası kullanılsa bile bağ dayanımında (dolayısıyla da etkilenen diğer dayanım türlerinde) herhangi bir artış meydana gelebileceği ortaya çıkmıştır, [7, 2]-

Bazı araştırmacılar ise yüksek ve orta dayanımı betonlarda (harç dayanımı agregası dayanımından yüksek), süreksizlik sınırının, çözülme sınırı, basınç dayanımı ve süreksizlik sınırındaki bütün şekil değiştirmelerin çimento hamuru mikroyapısı tarafından saptandığını ve zayıf betonlarda ise (agregası dayanımı harç dayanımından yüksek) yukarıdaki ifade aynen geçerli olmak üzere iri agregasının bağ dayanımı ve yük altındaki mekanik kenetlenmesinin etkili olduğunu söylerler, [7,11]. Bu nedenle beton için tek bir kırılma mekaniği tarifi yerine kompoziti meydana getiren malzemelerin durumundan ötürü birden fazla kırılma mekaniği tarifi yapılır, [7,11,12].



Şekil-2 Su/çimento oranının betonun mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi



Şekil 3- Farklı agregaların betonun yük-deformasyon davranışına etkisi



Başta da söylenildiği gibi su/çimento oranının büyümesi ite agrega ile temas eden harcın porozitesi yükselir. Bu, betona işlenebilirlik için katılan ve hidrasyona girmeyen suyun yerleşme sonrası bu bölgelerde tutulması sonucu ortaya çıkmış bir durumdur. Bu oluşum sonrası iri agrega - harç temas yüzeyleri, porozite nedeniyle azalır ve bu bölgede su/çimento oranı hamurun diğer yerlerine göre daha yüksek olduğu için agrega ile temas eden harcın dayanımı düşer. Bütün bunların sonucunda agrega - çimento hamuru bağı zayıflar. Yani, yüzey ve tane şekli açısından bağlanmayı güçlendirecek en iyi kalitede agrega kullanılması durumunda bile eğer su/çimento oranı yüksek ise agrega beklenen etkiyi (bağ dayanımını) gösteremez.

Tersi durumda, yani su/çimento oranının küçülmesi ile harç fazının elastisite modülü büyür. Böylece harç fazı elastisite modülü / iri agrega elastisite modülü oranı da büyümüş olur. Bu değişim iri agrega - çimento hamuru sınırlarında oluşan gerilmeleri küçültücü yönde etki yapar. Bundan dolayı süreksizlik sınırına daha büyük bir kuvvet altında varılır.

Bunun yanısıra su/çimento oranının büyümesi ile yukarıda sırladığımız iri agrega - çimento harcı temas kusurları da ortadan kalkar ve bağ dayanımında önemli artışlar olur, [7].

Yukarıda birinci paragrafta açıklanan durum agrega dayanımının harç dayanımından yüksek olduğu betonlar için geçerli değildir. Buna karşılık ikinci paragrafta açıklanan bağ dayanımının güçlenmesi bu tip betonlar için de anlamlıdır, [7,13].

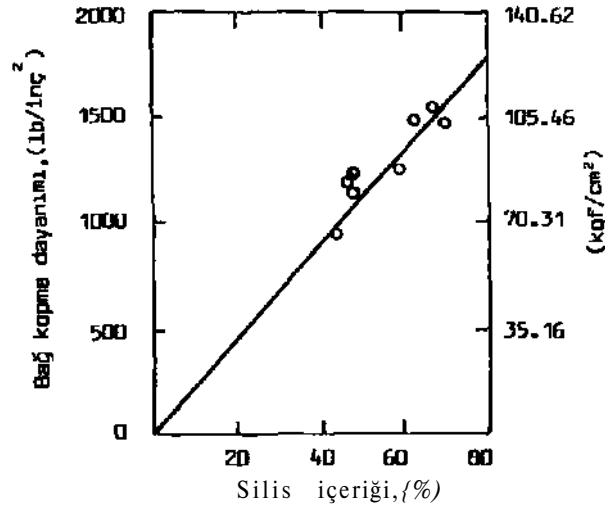
Akman yaptığı bir çalışmada bu durumu doğrular sonuçlara ulaşmıştır, [14]. İri agregalan aynı, harç fazı iki ayrı kalitede (dayanımda) beton üretip bunların dayanımlarını ölçünce harç fazı yüksek kaliteli olan betonların dayanımlarının da yüksek olduğu tespit etmiştir, [14].

### **4.3 Agregaların (Petrografik ve Mineralojik Yapı) Etkisi**

Agregalar görünüşte kaba olarak sınıflanabilmelerine rağmen iç yapılan dikkate alınıp bir tasnif yapılırsa son derece heterojen bir yapıya sahip oldukları görülür.

Agrega cinsinin bağ dayanımı Üzerindeki etkisi çimento harcı ile agrega arasında meydana gelen kimyasal ve epitaksial aderans ile açıklanır. İyi bir bağ için; pürüzlü yüzey dokusu yanında mineralojik olarak heterojen ve poroz taneler gereklidir. Yani agreganın kimyasal ve mineralojik yapısı ile tane yüzeyinin elektrostatik durumu oldukça önemlidir, [15]. Agreganın kimyasal yapısı ile ilgili olan epitaksial aderans harcın su/çimento oranından etkilenmez. Çünkü su/çimento oranının agrega yüzeyine cökelen ince tabakanın kristal yapısını değiştirmesi söz konusu değildir. Harç ile iri agrega arasında; agreganın kimyasal yapısı gereği ortaya çıkan aderans yüzey pürüzlülüğü ile ortaya çıkan bağlanmanın aksine, basınç (ve elastisite) dayanımını artırıcı yönde etki eder, [3].

Bu tip etki daha çok kireçtaşı içerisindeki kalsit mineralleri ( $CaCO_3$ ) ile çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ( $Ca(OH)_2$ ) arasında meydana gelir. Şekil 3' den de görüleceği üzere çalışmada, iki farklı tipte agrega kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada kireçtaşı agrega ile üretilen betonlar yapmış oldukları epitaksial bağ nedeniyle daha iyi performans göstermişlerdir. Kireçtaşı kullanılarak üretilen betonlar dayanım açısından granit agrega ile üretilen betonlara göre daha yüksek olup, kırılma şekli ise daha sünektir. Yalnız, epitaksial bağın kurulabilmesi için uzunca bir zaman gereklidir, [3]. Aynı etki (püskürük) kayaların kullanılması durumunda da görülür, şekil 4, [2].



Şekil 4- Püskürük kayaç kullanılmış betonda bağ dayanımı-agrega silis içeriği oranı

Keza betonda silika tozu kullanılması durumunda da silika tozu ile çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasında meydana gelen puzolanik reaksiyon sonucu harç-agrega ara yüzeyindeki porozite azalır ve bağ güçlenir, şekil 4.

#### 4.4 Diğer Etkenler

Yukarıda sıralanan ana etkenler dışında maksimum tane çapının büyümesi ile tanenin özgül yüzeyinin küçülmesi sonucu ara yüzeye gelen gerilme artar bu nedenle bağ dayanımı da azalır.

Porozitesi yüksek iri agregaya karışıma girmeden önce doymuş kuru yüzeyden daha kuru ise ara yüzeyde biriken terleme suyunu alacağı için bu bölgede çimento harcında meydana gelen yüksek poroziteyi önleyerek bağ dayanımını güçlendirir.

Portland ve katkıli portland çimentosu yerine traslı çimento kullanılması durumunda ara yüzeyde çimento hidratasyonu sonucu meydana gelen kalsiyum hidroksidin tras ile reaksiyona girmesi sonucu bağ dayanımı artar.

Kür starım (3 aya kadar) uzaması da bağ dayanımının artmasına neden olur Buna karşın kur sıcaklığının bağ dayanımına etkisi yoktur

### 5 BETONUN KISA SÜRELİ YÜKLEME ALTINDAKİ ELASTİK OLMAYAN DAVRANIŞI VE BAĞ DAYANIMININ BU DAVRANIŞTAKİ ROLÜ

Bir kompozit olması ve anizotropik yapısı nedeni ile betonun kısa süreli yükleme altındaki davranışını etkileyen pek çok faktör vardır. Özetlersek;

#### Agrega

- Cinsi (mineralojik - petrografik yapı)
- Sağlamlık (dayanım)
- Elastisite modülü
- Tane dağılımı
- İri agregaya/kum oranı

### *Agrega - Çimento Hamuru Bağı*

#### *Çimento*

- Cinsi (KÇ, PC, TÇ, vs)
- Dayanımı (32.5, 42.5, vs.)
- İnceliği

#### *Su/Çimento Oranı*

#### *Betonun İç Yapısı*

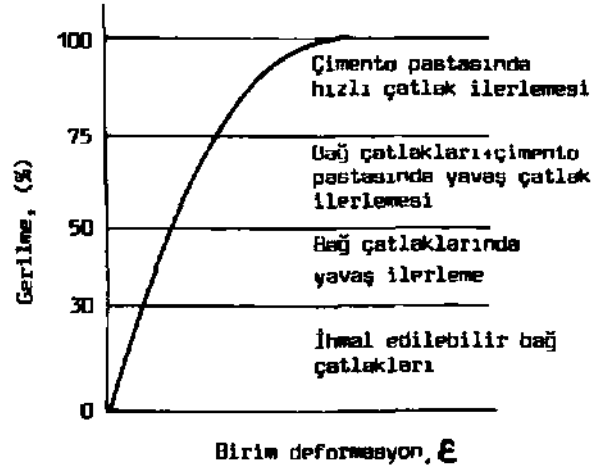
- Boşlukların karakteri ve miktarı
- İçsel çatlaklar
- Yerleştirme ve sıkıştırma kusurları

#### *Takviye Malzemeler (Varsa)*

- Lifler, taşunu, vs.

Betonun yüklemeye altındaki davranışını etkileyebilecek faktörlerin fazla olması nedeniyle doğal olarak farklı özellikleri (kalite) olan betonlar vardır. Bu betonlar basınç, çekme, darbe, vs. dayanımları açısından birbirlerinden ayrılırlar. Bu nedenle pratikte adına beton sınıfı dediğimiz ve betonları karakter itibari ile birbirinden ayırt etmeye yarayan, statik hesaplamalarda esas alınan bir kavram geliştirilmiştir. Bundan dolayı beton için tek bir gerilme - deformasyon davranışı tarif edilemez. Ancak kaba bir yaklaşımla betonun çimento hamuru ve agrega gibi iki fazdan meydana geldiği kabulünden hareketle betonun kısa süreli yüklemeye altındaki davranışı açıklanabilir. Diğer kompozitelerde de olduğu gibi kompozit davranışını, kompoziti meydana getiren malzemeler ve bu malzemelerin birbirleri ile olan etkilenimleri belirler. Bu nedenle betonun yük altındaki davranışı çimento ve agreganın özellikleri ile ilgili olmakla birlikte bu iki malzemenin birbirleri ile olan etkilenimlerinin de bir sonucudur. Kaldığı bu malzemelerin farklı elastisite modülüne sahip olmaları da işin içine girince beton tek eksenli yüklemeye altında büyük ölçüde doğrusal olmayan bir davranış gösterir.

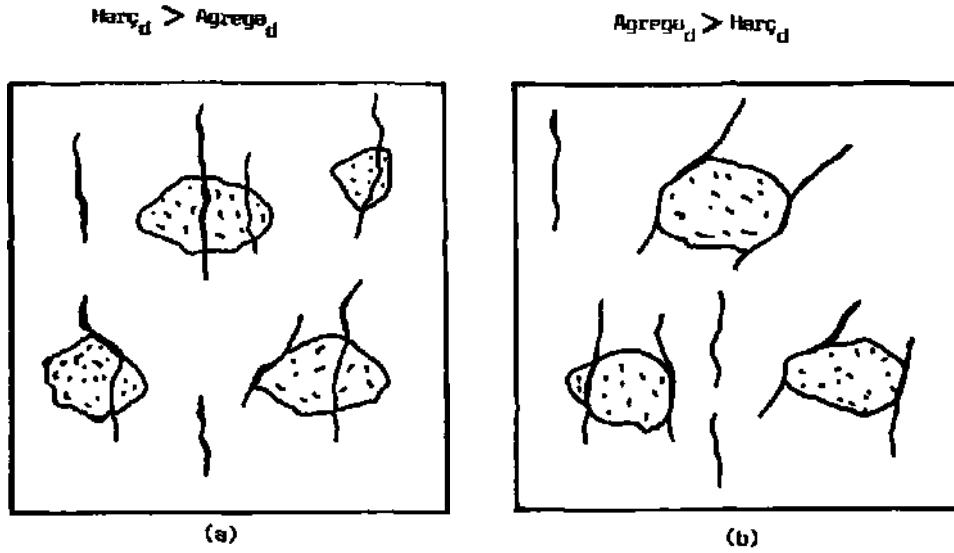
Klasik anlamda, tek eksenli yüklemeye altında betonda kırılma işlemi üç aşamada meydana gelir; çatlakların başlangıcı, çatlakların yavaş büyümesi ve çatlak gelişimi Şekil 5'den de görüleceği üzere kırılma yükünün ilk yüzde 30'luk bölümünde gerilme - deformasyon eğrisi oldukça doğrusaldır. Yüklemenin bu aşamasında agrega-harç bağ çatlakları mevcuttur. Fakat gerilmenin düşük seviyede olması nedeniyle bu çatlakların ilerleme eğilimi çok azdır. Kırılma gerilmesinin % 30 - % 50 arasındaki bölgede, yüklemeye ile birlikte mevcut çatlaklar yavaş yavaş ilerlemeye başlar. Bu aşamada çatlakların çoğunluğu çimento hamuru-agrega ara yüzeyindedir. Artık çatlakların sayısı düzenli olarak artmaya ve çatlaklar büyümeye başlar. Gerilme-deformasyon eğrisi bu bölgede doğrusallıktan belirgin bir şekilde sapmaya başlar. Bu aşamada çimento hamuru içerisinde az miktarda çatlak vardır. Bu gerilme değeri süresizlik sınırı diye tanımlanır. Gerilmenin artırılması ile birlikte yani kırılma gerilmesinin % 50'si geçilince çatlaklar çimento hamuru-agrega ara yüzeyinden çimento hamuru içerisine doğru ilerler ve harç fazı içerisinde bu gerilme düzeyine kadar az sayıda oluşmuş bulunan mikroçatlaklar birden ve Önemli ölçüde artmaya başlar. Kırılma gerilmesinin % 75'i oranına ulaşıldığında ise çimento hamuru içerisinde çatlak oluşumu ve ilerleme hızı artarak beton içerisinde sürekli bir mikroçatlak ağı meydana gelir. Bu gerilme düzeyine kadar hacimsel olarak küçülen numune bu düzeyden sonra hacim artışı gösterir. Bu gerilme değeri küçülme sınırı olarak adlandırılır. Sonunda betonun yapısal stabilitesi bozulur ve göçme olayı meydana gelir, [2,7].



Şekil 5- Tek eksenli basınç yüklemesi altında genleşme-deformasyon eğrisi

Yukarıda çok kaba olarak ifade edilen bu kırılma mekaniği betona yüklerin etkime şekline göre, beton içerisinde çimento hamuru ile agrega arasındaki çatlakların yüklenme yönünde dik veya paralel bulunma durumuna göre ve harç ile agreganın dayanım durumuna göre değişir. Şekil 1'den görüleceği üzere döküm yönüne göre terlemeden ötürü meydana çıkmış bağı çatlaklarının yüklenme durumuna göre beton dayanımındaki etkisi de farklı olacaktır. Birinci durumda, yani yüklenme yönüne dik olan çatlaklar çekme dayanımını basınç dayanımından daha fazla etkiler; bunun karşısı, yüklenme yönüne paralel çatlaklar için geçerlidir, (ikinci durum). Bu nedenle terleme sonucu ortaya çıkmış olan zayıflık düzlemleri birinci ve ikinci örnekte basınç dayanımını nihai olarak azaltacaktır. Deneysel çalışmalar sonucunda döküm eksenine dik yüklemelerde, döküm eksenine paralel yüklemelere göre basınç dayanımının % 8 daha yüksek; çekme dayanımının ise % 8 daha düşük olduğu görülmüştür, [2].

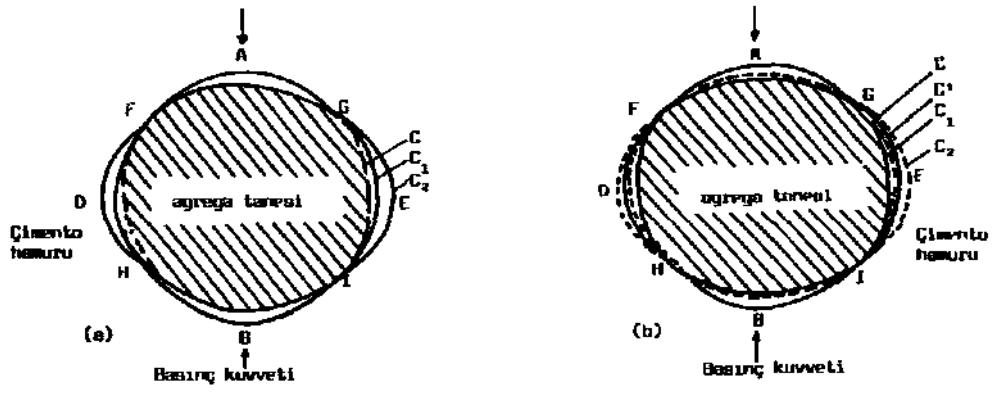
Keza, şekil 6'daki betonda, göçme anında çatlakların oluşumu incelendiğinde birinci durumda (a), yani harç dayanımı agrega dayanımından büyük olduğu taktirde harçta oluşan çatlaklar agregaların içerisinde geçip büyüyerek gelişecek ve numunede boyuna çatlaklar görülecektir. Bu kırılma modu çekme dayanımının aşılması ile ilintili olduğundan betonun gerçek dayanımına ulaşılmadan numune kırılacaktır, ikinci (b) durumunda; agrega dayanımı çimento hamuru dayanımından büyük ise, çatlak matris ile agreganın ara kesit yüzeyinde ilerleyecek ve kırılma harçtan kaynaklanacaktır, [1]. Görüleceği üzere birinci ve ikinci kırılma şeklinde çimento hamuru-agrega bağı dayanımının fonksiyonu değişiktir. Birinci kırılma şeklinde bağı dayanımının işlevi yoktur (yada çok azdır), ikinci kırılma şeklinde ise bağı dayanımının rolü fazladır. Betonun gerçek basınç dayanımı altında kırılabilmesi ve çatlak gelişiminin beton harcı içerisinde oluşması bakımından agrega dayanımı harcın dayanımından büyük olmalıdır, [1].



Şekil 6- Göçme etkisindeki betonda agrega ve harç dayanımına göre çatlakların oluşumu

## 6. BETONUN ÇEKME VE BASINÇ ETKİSİNDE KIRILMA MEKANİZMALARI

Merkezi çekme etkisindeki bir beton numunenin çekme dayanımı; ( $N_t$ ) kırılma yükünü, (A) numunenin kesit alanını göstermek üzere;  $f_a = N/A$  şeklinde hesaplanır. Bu oran gerçek kırılmanın meydana geldiği yüzeyden bağımsız olduğundan, ortalama bir değeri gösterir, [12]. Çekme durumunda kırılma yüzeyi dış kuvvete dik konumdadır. Bu durumda kırılma yüzeyine rastlayan agregalar pratik olarak çimento hamurundan ayrılmaz hiçbir etki altında kalmazlar. Bu durumda iki kabul yapılabilir, ilkinde göre, betonun dayanımı aderans dayanımına ve bu yüzeyde uygulanan gerilmelere bağlıdır. Bu kabul agregaların petrografik yapıları ile yakından ilgilidir. Diğer bir kabule göre ise, beton aderans sökülmesini meydana getiren kuvvetten daha büyük kuvvet taşımaktadır. Bu durumda aderans sökülmesinden sonra dış kuvvetlere sadece sertleşmiş çimento hamuru karşı koymaktadır. Yaptığımız kabullere göre eğer betonun kırılması aderans ya da agrega kırılmasına bağlı değilse; yani beton dayanımı sadece çimento hamuru dayanımı ise bu tür kırılmalar çekme dayanımı düşük, ya da aderansı zayıf agrega içeren veya çok az oranda çekme dayanımı ve aderansı yüksek agrega içeren betonlardakî kırılmaya karşılık gelir, [12]. Eğer aderans ya da agrega kırılması betonun kırılmasına neden oluyorsa bu durumda çimento hamuru kırılma anından hemen önce çatlamamış olduğundan (toplam) dayanıma katkıda bulunur.



Şekil 7- Merkezi basınçta agrega ve çimento hamuru şekil değiştirilmeleri.

Dış yüke paralel doğrultuda oluşan çatlaklar ile kırılan bir beton numune (eğer yanal sıkışma yoksa) merkezi basınç etkisinde kırılıyor demektir. Bu durumda agregalar betonun tamamen parçalanmasına kadar gerilme etkisinde kalırlar. Bu nedenle agregaların mukavemeti betonun basınç dayanımını oldukça etkiler. Olayı daha iyi açıklayabilmek için şekil 7 üzerinde düşünelim. Yüksüz durumda, çimento hamuru ile sarılmış ve ortak çevreleri C olan bir agrega tenesini dikkate alalım. Bu eleman basınç etkisinde kaldığında, çimento hamuru ile agreganın el ast isi te modüllerinin birbirinden çok farklı olması nedeniyle, çimento hamuru agreganın yanal yüzeyleri boyunca agregadan ayrılma eğilimi gösterir. Bu durumda çimento hamuru ile agrega arasında aderans yoksa C çevresi agrega için C|'e ; eğer aderans varsa agrega ve çimento hamuru için ortak C çevresine dönüşür, şekil 7 (a,b). Durum böyle olunca, aderans bölgesi, agrega yüzeyindeki FAG - HBI küresi üzerinde basınç, FDH - GEI yüzeyi üzerinde ise çekme gerilmesi meydana gelir. Yükün belli bir düzeyinde ilk olarak agrega kırılmıyorsa; aderans bölgesine etkiyen çekme gerilmesi aderans (bağ) dayanımına ulaştığı anda bağ (aderans) kırılması meydana gelir. Bu sırada çimento hamuru yanal doğrultuda serbestçe genişler. Eğer agrega kırılma çizgisi ya da FG - HI paralelleri doğrultusunda oluşan enine deformasyon, çimento hamurunun çekmede kırılma deformasyonundan küçükse agrega ya da aderans kırılması betonun kırılmasına neden olur; aksi durumda ise beton kırılmaz. Bu da, çekme için açıklanan iki türlü kırılma şeklinin basınç durumunda da mevcut olduğunu gösterir, [12].

Birinci tip kırılmada, önce agregaların ya da agregalar ile çimento hamuru arasındaki bağların sökülmesi betonun kırılmasına neden olur. Bu durumda çekmede, numunenin dayanımını sadece çimento hamuru sağlamakta ve agrega petrografik yapısı betonun kırılması üzerinde hiç bir rol oynamamaktadır. Basınçta ise agregalar betonun dayanımı üzerinde elastisite modülleriyle etkili olmaktadır.

İkinci tip kırılmada, önce agregaların ya da bunların çimento hamuruyla aderanslarının sökülmesi numunenin kırılmasına neden olmaktadır. Bu durumda agrega petrografik yapısı basınçta olduğu gibi çekmede de beton dayanımına etki eden başlıca etken olmaktadır, [12].

## 7. SONUÇ

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı bir üzere kompozit olması ve anizotropik yapısı nedeniyle betonun iç yapısını açıklamak oldukça zordur. Konunun basitçe anlaşılabilmesi için araştırmacılar şimdiye kadar iç yapı ile ilgili bilgileri hep kabaca tanımlamışlardır. Son yıllarda elektron mikroskoplarının kullanılması ile birlikte beton iç yapısı daha ayrıntılı olarak incelenmiş, kaba yaklaşımlar ve bilinmeyen fakat tahmine dayalı fikirler aşılmıştır.

Kompozit olarak tanımlanan beton iç yapısının anizotrop olması ve değişik yüklemeler altında farklı çalışması (farklı gerilmeler göstermesi) beton iç yapısının önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Günümüzde bir tek agrega ve çimento hamuru ite yapılan çalışmalarda matematiksel modellemeler hariç, iç yapının değişik yüklemeler altında gösterdiği davranışlar ancak ampirik düzeyde açıklanabilmektedir. Beton bileşenleri ile değişik yüklemeler altında farklı varyasyonlar denenerek iç yapının yüklenme durumuna göre davranışı açıklanabilir. Bu konuda yayınlanmış çeşitli kaynaklarda belirtilen değişik çalışmalar incelendiği zaman, beton iç yapısının farklı yüklenme durumlarındaki davranışı artık açıklanabilmektedir. Bu çalışmalar, betonun yüklenme altındaki davranışını; bir kompozit olarak beton bileşenlerinden her birinin nitel ve nicel özellikleri; beton sertleştikten sonra ortaya çıkan matris -agrega, su ve hava boşlukları fazlarının karakteri ve miktarı, agrega - çimento hamuru ara yüzeyinin bağ yapısı, çimento cinsi-miktan ve su/çimento oranı gibi parametrelerin doğrudan etkilediğini ortaya çıkarmıştır.

Özellikle süreksizlik sınırının sonrasındaki gerilmelerin beton davranışını önemli ölçüde etkilediği bilinir. Betonun basınç dayanımı bununla ilgilidir. Süreksizlik sınırının öncesinde betonun davranışı yada bir başka deyişle kuvvetli bir bağ dayanımı genel anlamda çatlakların ortaya çıkmasını ve genişlemeye başlamasını geciktirecek süreksizlik sınırını yükseltebilir.

Yararlanılan kaynaklarda da agrega yüzeyinin pürüzlülüğü sonucu ortaya çıkan çok iyi bir bağ dayanımının, eğilme ve çekme dayanımlarında: % 30'a kadar bir artış sağlayacağından da bahsedilir. Ancak betonun basınç dayanımı ile ilgili herhangi bir gelişmeden bahsedilmez. Postacıoğlu, iyi bir bağ dayanımı neticesinde daha sünek bir kırılmanın meydana gelmesi sonucu betonun deformasyon kapasitesinin (şekil değiştirme yeteneğinin) artacağını söyleyerek bu durumun taşıma gücü hesaplarında faydalı olacağını belirtir, [8].

Konunun ayrıntılı incelenmesi sonucu görülmüştür ki, agrega çimento hamuru bağı basit genellemeler ve kaba yaklaşımlar ile açıklanamayacak kadar karmaşıktır. Betonun bilinen diğer temel karakteristiklerinin kendi aralarındaki ilişkiler; agrega-çimento hamuru bağı için bütünüyle doğru değildir. Dolayısıyla yukarıda izah edilen hususlar göz önüne alınmadan elde edilen sonuçları anlamak ve doğru değerlendirmek oldukça zordur. Bu nedenle bağ dayanımının beton özellikleri ve betonun davranışı üzerindeki etkileri incelenirken kurulacak ampirik bağıntıların sağlıklı olabilmesi için değişik kanşım ve beton bileşeni parametrelerinin kullanıldığı (yeterli sayıda) betonların farklı yüklemeler altında denemesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

## YARARLANILAN KAYNAKLAR

- 1- **Kocataşkın, F.**, Yapı Mühendislerine Malzeme Bilimi, İTÜ Müh.Mim.Fakültesi, İstanbul, 1976
- 2- **Mindess, S., Young, J.F.**, Concrete, Prentice-Hall,İne, New Jersey, 1986
- 3- **Shah, P.S., Lange A.D., Li, Z., Mitsui, K.**, Relationship between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Agregate Interface, ACI Materials Journal, Vol. 91, No.1 P.30-39, January-February 1994
- 4- **Barnes, B.D, Diamond, S., Dolch, W.L.**, Contract Zone between Portland Cement Paste and Glas Aggregate, Cement and Concrete Resarch, V.8, No: 2, P.233-244,1978
- 5- **Diamond, S.**, Microstructures of Cement Paste in Concrete, Proceedings of 8th International Congress on the Chemistry of Cement, V.1,P.122-147,BreziIya, 1986
- 6- **Montiero, P.J.M., Mehta, P.K.**, interaction between Carbonate Rock and cement Paste, Cement and Concrete Resarch, V.b, No.12 P.127-134,1986
- 7- **Oktar, O.N.**, Bağlayıcı Hamurun Yapısının Betonun Kısa Süreli İnelastik Davranışındaki İşlevi, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, 1977
- 8- **Postacıoğlu, B.**, Beton, Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2, İstanbul, Teknik Kitaplar Yayınevi, 1987
- 9- **Akman, M.S.**, Beton Agregalan, Beton Semineri, Ankara, 1984
- 10- **Uchikawa, H.**, Similarities and Discrepancies of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete from the standpoints of Composition and Structure, Journal of Cement and Concrete, Cement Association of Japan No.507, May 1989
- 11- **Arıoğlu, E., Köylü oğlu, O.S., Dondurmacı, A., Manzak, O.**, Yapı Merkezi Prefabrikasyon A.Ş.'de Beton Agregalı Kalite Denetimi ve Değerlendirmesi, I. Ulusal Kırmataş Smpozyumu, İstanbul, 1996
- 12- **Durmuş, A., Pul, S.**, Agregalı Petrografik Yapısının Betonun Kırılma Mekanizmaları Üzerindeki Etkisi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, 1. Teknik Kongre, Gazimagusa KKTC, 1993
- 13- **Akyüz, S.**, Kompozit Malzeme Olarak Betonda Elastik Bölgedeki Fazlar Arası Etkileşiminin Sayısal Bir Yöntemle İncelenmesi, Doçentlik Tezi, İTÜ İnş. Fak., 1976
- 14- **Akman, M.S.**, Kırmataş İri Agregalı Betonlarda Harç-Beton Sının Üzerinde Araştırmalar, İTÜ. İnş.Fak., Teknik Rapor, No.21,1975
- 15- **Neville, A.M.**, Properties of Concrete, Great Britain, Pitman Books Ltd., 1983