

ÇOK YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

François de LARRARD
Dr. Y. Müh.
L.C.P.C.
Paris, Fransa

Yves MALIER
Prof. Dr.
E.N.S. Cachan
Paris, Fransa

ÖZET

Bu bildiri çok -yüksek-mukavemetli-betonlar (ÇYMB) konusundaki güncel bilgileri, bunların mühendislik yapılarındaki kullanım amaçlarına yönelik olarak sunmaktadır. Söz konusu malzemenin ömründeki çeşitli dönemleri, üretimden başlayarak servisteki davranışa ve göçmeye kadar, ölçülen özellikleri ile birlikte ve mümkün mertebe betonun bileşimine ve mikro yapısına bağlı olarak açıklanmıştır. Ardından, zaman zaman kullanımını engelleyen (erişilebilirlik, kırılgenlik, fiat) gibi bazı yakıcı yönleri tartışılmıştır. Son olarak ÇYMB'ların kalıcılığı (dürabilitesi), çok kere uygulanmalarını çekici kılan başlıca niteliklerinden biri olarak gözönüne alınmıştır.

1- GİRİŞ

Yüksek mukavemetli betonların (YMB) gittiçe rutin şekilde kullanıma girdikleri bir çağda, bu strüktür malzemesinin ikinci jenerasyonu olan ve kuzey Amerikadaki birkaç gökdelen [39] dışında henüz laboratuvar araştırması döneminden çıkmakta bulunan çok -yüksek - mukavemetli betonlar, bildirimizin konusu olacaktır. 28 günlük basınç mukavemetlerinin karakteristik değeri 80MPa'ın üstünde olan hidrolik betonlar, genel olarak çok -yüksek mukavemetli beton (ÇYMB) olarak kabul edilmektedir. Bunlar yapıda normal agregalarla ve süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı gibi bazı özel katkılarla iyileştirilmiş bir bağlayıcı hamurla üretilmesi mümkün beton sınıflarının gerçekten en üst

mertebesini oluşturmaktadır. Amacımız, bileşimlerinin mantığından başlayarak ve ana özelliklerini mikroyapılarına bağlayarak bu malzemeler hakkında genel açıklama yapmaktır. Ardından da, son deneysel sonuçların ışığında, bazı olumsuz sorunlar tartışılıp, bazı yanlış anlamalar düzeltilmeye çalışılacaktır.

2- Bileşim Prensipleri

Burada gerçekte yerleşme-yoğunluğu-çok-yüksek olan betonlardan söz etmemiz gerekir, çünkü iç yapılarının ayırıcı niteliği budur. Beton malzemesini üretmede ana fikir, farklı dane boyutları olan bileşenlerden yapay bir yoğun kayaç elde etmedir. Bu şekilde oluşturulan karışımın yerleşme-yoğunluğu, granülometrisinin yayılımı ile belirir, yani en büyük ve en küçük dane boyutlarının oranı ile. Yerleştirme şartları, en büyük dane boyutunu 20 veya 25 mm olarak sınırlar. En küçük dane boyutu ise, çimento danelerinin doğal topaklanmalarına neden olan yüzey fiziği olayları ile sınırlanır. Bu durumun çağrıştırdığı ilk fikir, bazı organik maddelerin [2] topaklanma önleyici özelliklerini kullanarak çimentonun sudaki süspansiyonunda başlangıçtaki granülometriyi (1 ile 80 μ m arasında) geri kazanmak olmuştur. İlâveten karışım granülometrisinin yayılımı, çimento daneleri arasındaki boşlukların bir kısmını doldurmak üzere, son derece ince, atıl maddeler katmak yolu ile, daha da arttırılabilmiştir. Silis ve alaşımlarının elektrometallürjîsinden çıkan atık madde olan silis dumanı, bu işleri en iyi sağladığı saptanabilen madde olmuştur [14].

Bu basit prensiplerin uygulanması, Çizelge 1. de sunulmuş olana benzeyen reçeteler oluşturmıştır. Agregâ ve çimento gibi özgül olmayan bileşenler iyi kaliteli olmalıdır ve 28 günde 100 MPa'lık bir ortalama mukavemet aşılması amaçlanmıyorsa bunların son derece itinalı seçimi zorunludur. Çimento dozajı 400 ile 550 kg/m arasında, silis dumanı miktarı çimento ağırlığının % 5'i ile 15'i arasında ve su-çimento oranı 0,35'in altında bulunmalıdır. Bu son parametreyi daha da azaltacak olursak 28 günlük basınç mukavemeti 50 ile 80 MPa aralığında bulunan YMB'dan ÇYMB'a doğru geçmemiz mümkün olmaktadır.

3- Taze Haldeki Davranış

3.1- İşlenebilme Özelliği

Su içerikleri normalin çok altında olmakla beraber, bu betonlar betoniye terkettikleri anda genellikle 200 mm civarında bir çökme verirler. Süparakışkanlaştırıcı tarafından daneciklerin birbirlerinden ayrılması taze çimento hamurunun kaymadaki akma sınırını çok azaltır ve kendi ağırlığı altında akabilen bir beton verir. Bu akmanın hızı, karışımın viskozitesine, yani biraraya gelmiş daneciklerin su tarafından çözülme derecesine bağlıdır. 0,30'un altındaki su/çimento oranları ile kıvam akıcı olmakla beraber çoğunlukla viskoz ve yapışkandır. Beton iyi bir şekilde yerine yerleştirilebilir, ancak plastik kıvamlı normal bir betonun gerektirdiğine yakın vibrasyona ihtiyacı olur. Kalıpların alınmasında, taze betonun viskozitesinden doğmuş bazı hava kabarcıklarına rastlanmıştır.

Eğer karışım hesabı sonrasında çökme kaybı problemi gözönüne alınmamışsa, işlenebilme özelliği kısa süreli olabilir [15]. Ancak, gerektiğinde (örneğin çimentodaki alüminatlı bileşenlerin oranı yüksekse) bir priz geciktirici kullanılarak işlenebilme süresini bir saatin üzerine çıkarmak pratikte mümkün olur (Şek. 1'e bakınız). Burada dikkat çekmemiz gereken başka bir husus, normal ölçüm metotlarının ÇYMB'ların taze haldeki reolojik davranışlarını değerlendirmeye uygun olmadıklarıdır, çünkü sözkonusu işlenebilme özellikleri normal betonlarınkinin sınırları dışındadır.

3.2- "Uyku Peryodu" İçindeki Beton

"Uyku Peryodu" dediğimiz şey betonun dökülmesi ile prizin başlaması arasında geçen süredir. Bu süre bir ÇYMB'dan diğerine çok değişir. Hidratasyon reaksiyonu kendi kendine oluştuğu için, bunu başlatmaya çok küçük bir sıcaklık artışı yeterli olur. Tersine soğuk hava ve/veya bol miktarda priz geciktirici prizi 48 hatta 72 saat geciktirebilir.

Çok ince danelerin mevcudiyeti, yeter miktarda olmaları şartı ile (çimentonun ağırlıkça % 7'si kadar), betonun taze haldeki stabilizasyonunu sağlar. Bu olay, çimento şerbetinin tiksotropik davranışı ile ilgisi bakımından önemlidir. Karışmadan belirli bir süre sonra çimento şerbeti

"pıhtılaşır" ve bir jel görünümünü alır. Sonra (eğer süperakışkanlaştırıcının etkinliği kaybolmamışsa) tekrar karıştırmada akıcılığını geri kazanır. Normal çimento hamurları, daneli yapılarını yerçekimi etkisi ile yoğunlaştırdıkça fazla suyu dışarı atarlar (terleme). Bunların tersine olarak ÇYMP'ların üst yüzlerinde terleme görülmez.

Yine aynı nedenlerden ÇYMB'larda çözülme diye bir olaya da rastlanmaz. Bir dane gurubunun karışımından ayrılması, bunun iskelet arasından çökmesini ve bağlayıcı daneleri arasındaki aderansın kaybolmasını gerektirir. Vibrasyondan sonra malzemenin son derece katı gözükmesi, bu bağların kuvvetliliğinin belirtisi olmalıdır.

Ancak bu stabilitenin de iki sakıncalı yönü vardır. Birincisi, betonu erken kurumadan koruyacak terleme suyunun olmayışıdır. Bu nedenle betonu plastik rötne çatlaklarından (beton priz yapmadan rötne olmasından) korumak için ihtimamlı bakım gerekir. İkincisi ise dökülmüş betona yerinde kayma gerilmeleri uygulayacak şeklini değiştirmek, örneğin büyük bir döşeme betonunu kalıp içine yaymak zordur.

Diğer taraftan taze betonda suyun ve ince danelerin yer değiştirme imkanları olmayışı, son derece homojen ve arayüzleri kusursuz (Ş.5 ile karş.) bir malzeme sağlanmasını garantiler.

4- Sertleşme

4.1- Priz sırasında dışarı verilen ısı

Bu konuda düşünülen ilk parametre doğal olarak toplam bağlayıcı miktarıdır ki, o da bir reçeteden diğerine önemli miktarda değişir. Ancak önemli olan normal betonlardaki gibi bilhassa çimentonun ısı verme özelliğidir [9].

Silis dumanı reaksiyonun başlangıcında katalizör etkisi yapar [5]. Böylece başlangıçtaki sıcaklık artışı oldukça "hızlı"dır ve ince parçalarda bile önemli bir sıcaklık artışı gözlenir (160 mm çaplı silindirlerde 8°C'e varan sıcaklık artışları gözledik [3]). Laplante ve arkadaşlarının belirttiklerine göre de, kenar boyutu 1 m olan kolonlarda 40°C'lik sıcaklık artışları gözlenmiştir [26].

Bu tür massif yapılarda, termal nedenli çatlama

riskleri çok yüksek değildir. Çünkü çekme mukavemetleri de aynı hızla artmaktadır [9]. Nazik durumlar, sertleşmede parçalar içindeki sıcaklık ve bloke edilmiş şekil değiştirme alanlarının nümerik simülasyonu yolu ile araştırılabilir [11].

4.2- Hidratasyon Rötresi

Bu, bağlayıcının nem alışverişi olmaksızın ve izotermal şartlar altında hidratasyon derecesine bağlı olan rötresidir. Pratikte çok massif parçalar birinci şartı tam olarak yerine getirirlerse de, laboratuarda bile numune sabit sıcaklık sağlanması imkânsızdır, ve bu nedenle bu bünyesel rötire veya iç kuruma rötresi, daima belirli bir ısısal rötire derecesi ile süperpoze edilmiş bulunur.

Yakın zaman önce çeşitli normal, YMB ve ÇYMB'lar üzerinde priz anı ile nümunelerin kalıptan çıkarılma anları arasında yapılmış rötire ölçümleri açıklamıştık [3]. Bu erken şekil değiştirme ÇYMB'lerde yaklaşık olarak 50×10^{-6} ve normal betonlarda ise 30×10^{-6} olarak tesbit edilmişti. Şekil 2 ÇYMB'lardaki bünyesel rötreyi (kalıptan çıkarıldıkları andan itibaren) gösteren bazı eğrileri, aynı çimento ve aynı agregadan, fakat katkılar ve çok ince malzeme kullanılmadan üretilmiş ve bileşimi Çizelge 2. de verilmiş kontrol betonunki ile birlikte göstermektedir. Nümunelere bir alüminyum folyo ile ayrılmış iki reçine tabakası uygulanmıştır. Böylece kurumanın önlenmesinin garanti edildiği, rötrenin 90 gün sonunda bitmesi ile kendini belirtmiştir. Aynı nümunelerin yalıtılmaması halinde ise, kurumalar ve rötire 90 günden sonra da devam etmiştir (bak. Ş6.4)

ÇYMB bu nedenle, kontrol betonuna kıyasla oldukça daha yüksek bir bünyesel rötire göstermektedir. Bu olayın bir açıklaması, sertleşmiş betondaki serbest suyun miktarını düşünerek yapılabilir.

- Başlangıçta ÇYMB hidratasyon reaksiyonlarının gerektirdiği stoikiometrik oranlardaki su miktarı ile üretilmiştir.

- ÇYM'li ve granülometri yayılımı çok geniş bu betondaki boşluk hacmi, en küçük boşluklarında serbest su içermektedir. Bu boşlukların hacmi, silis dumanının inceliği nedeni ile normal betondakilere kıyasla oldukça daha büyüktür (bak. Ş 5). Bu küçük boşluklar

oldukça büyük kapiller (veya diğer) kuvvetlerin doğmasına neden olmakta ve çimento hamurunun rijit agregata tarafından sınırlanmış şekil değiştirmelerini doğurmaktadır.

5- Mikro Yapı [33,34]

Bu yapı, malzemenin formülasyonundaki prensipler, hidratasyon mekanizması hakkındaki bilgilerimiz ve bazı deney teknikleri yardımı ile, görüntülenebilmektedir.

ÇYMB'ler formüle edildiğinde, gördük ki (§2) su miktarı granülometrinin ince bölümünü yaygınlaştırmak yolu ile azaltılıyordu. Bu başlangıç durumu, sertleşmiş betonun mikro-yapısını da geniş bir şekilde açıklamaktadır.

Sertleşmiş betonun katı olmayan (sıvı veya gaz) hacimlerini gözönüne alır ve ölçeğimizi gittikçe küçültürsek şu "boşlukları" görürüz;

- ÇYMB'nın akıcılığı nedeni ile az miktarda (toplam hacmin % 2 sinden az [45]) betonun karılması sırasında sürüklenmiş kapalı hava boşlukları.

- Çimento-agrega arayüzlerinde, iç terleme nedeni ile suyun birikeceği yerler. Ancak silis dumanı nedeni ile pratikte böyle terlemenin olamayacağını gördük (§ 3.2)

- Daneler arası hacimlerin taze hamur tarafından tam doldurulamayan bölümlerinden oluşmuş boşluklar. Bu boşluklar hidratasyon ürünleri tarafından tam doldurulamazlar, çünkü çimento, hidratasyon sonucunda yaklaşık olarak % 10 kadar hacim kaybına uğrar ve suyun bir kısmı da çimento ile birleşemeyip buharlaşma ile kaybolur. Fakat başlangıçtaki beton suyu nedeni ile ÇYMB'de yine de çok az miktarda serbest su vardır. Ayrıca, bu düşük su-çimento oranlarında hidratasyon ürünlerinin miktarı da, aynı çimento dozajlı normal betoninkilerden belki de daha azdır.

- Son olarak, nanometre boyutunda, hidratların kendi yapılarında da boşluklar vardır.

Şimdi sertleşmiş ÇYMB'un birkaç kırıntısını elektron mikroskopu (SEM) ile inceleyecek olursak, mikro yapının çok

yoğun olduğunu, tümünün amorf olduğunu, ve alışılmamış kadar çok hacimde hidrate olmamış danecikler (mevcut suyun yeterli olmaması nedeni ile bileşmemiş çimento kalıntıları) içerdiğini görürüz. Ayrıca, hamur/agrega arayüzleri (geçiş halleri [21]) de çok küçük porozitelidir ve kalsit kristalleri ile doldurulmuş değildir. Tabii silis dumanı ile çimentonun hidratasyonu sırasında açığa çıkan kirecin puzzolanik reaksiyonu düşünülerek bunun nedeni anlaşılabilir. Cıva porozimetresi ölçümleride hemen hemen hiç kapiller porozitesi olmayan bir ince yapıya işaret etmektedir. Son olarak betonun boşluklarında içerdiği nem de [6] malzemenin çeşitli yaşlarında ölçülebilir. Bu nem normal betonlarda (çevreleyen atmosferle alışverişlerin olmaması halinde) daima % 100 iken; ÇYMB'larda 28. günde % 75'e düşmektedir.

Sonuçta bütün bu yaklaşımlar ÇYMB'ların mikroyapısını aşağıdaki şekilde tanımlamaya imkan vermektedir:

- hidrate olmamış çimento danecikleri, sertleşmiş betonun daneli iskeletinin bir parçası olarak kabul edildiğine göre, azaltılmış bir çimento hamuru oranı,
- toplam porozitesi daha düşük bir hamur,
- daha küçük boşluk boyutları (boşluk granülometrisi)
- yalnız en küçük boşluklar su ile dolu oldukları için pek az serbest su,
- çimento hamurunun göbek kısmındakinden farklı olmayan hamur-agrega arayüzleri; böylece hidrolik betonlardaki geleneksel bir zayıflık bölgesinin ortadan kalkması,
- azalmış bir serbest kireç içeriği,
- makroskopik boyuta bünyesel rötire ile akseden bir iç gerilme durumu ki, bu agregada danelerinin daha güçlü şekilde kavranmasına neden olmaktadır.

6- Başlıca Mekanik Özellikler ve Modelleme

6.1- Basınç Mukavemeti

Malzemenin kullanım özelliklerinden en önemlisidir. Bu aynı zamanda en görüntülü şekilde iyileştirilendir. Şekil 1'de belirtilen bileşenlerin, optimum şartlar altında kullanımı ile, laboratuvarında [4] 200 MPa'lık basınç mukavemetini aşan betonlar üretmek mümkün olmuştur! Ancak, amaç normal agregalarla işlenebilir betonlar elde etmek ise, teknolojinin bugünkü seviyesi ile, 28 günlük silindir

nümunelerde '100 ilâ 120 MPa'lık değerlerle iktifa etmek gereklidir. Bu dahi, normal betonlara kıyasla dev bir ilerlemedir.

Mukavemet artışının kinetiği, normal betonlarınkine kıyasla, bariz şekilde hızlıdır [44] (Çizelge 3'e bak). Bu durum taze betondaki çimento daneciklerinin başlangıçta birbirlerine daha yakın olmalarından ve yukarda belirtilen silis dumanının hızlandırıcı etkisinden kaynaklanmaktadır. Mukavemet değerlerinin ne derece erken ortaya çıkacağı pratikte çimentonun miktarına ve cinsine (aluminat içeriği, öğütölme inceliği), priz geciktiricinin bulunup bulunmadığına ve miktarına, ve tabiatile betonun sıcaklığına bağlıdır.

Bu yüksek mukavemet değerlerini açıklamak için, betonun basınçtaki kırılmasının fiziksel bir tanımını da verdik [12]. Bu kırılma sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısının ve ardından daha büyük ölçekte de elemanter daneli yapıyı oluşturan küçük kolonların arka arkaya burkulmaları şeklinde yer alır gibi gözükmetedir. Malzemedeki matrisin modeli olarak çubuklardan oluşmuş bir yapı kullanarak, kolayca gösterilebilir ki, basınç mukavemeti sertleşmiş çimento hamurunun kapasitesinin karesi ile artarken (Féret Kuralı), çekme mukavemeti bu değer in ancak birinci kuvvetli ile orantılı olarak artar. Pratikde gözlediğimiz de kabaca bu olmuştur [11].

6.2- Çekme Mukavemeti

Bu mukavemet (yukarıda açıklanan nedenlerle), basınç mukavemetine kıyasla daha az ölçüde artmıştır ve f_t/f_c oranı, en sağlam betonlarda en küçük değeri olan 1/20 olur. Yine de 6 MPa'ı aşan yarma mukavemetlerine erişilebilir ki, statikçilerin (bilhassa öngerilmeli betonda) hesaba katmayı istedikleri bir sonuçtur. Amerikan yönetmeliklerinde kullanılmış olana benzer ve basınç mukavemetinin karekökü ile lineer ilişkili bir korelasyon kuralı bir evvelki paragrafın açıklamaları ile uyumludur. Ancak deneysel sonuçlar Fransız yönetmeliklerindeki

$$f_{tj} = 0.6 + 0.006 f_{cj}$$

denkleminde daha iyi uyarlar. Burada f_{tj} ve f_{cj} , j günlük betonun sırasile ortalama yarıılma mukavemeti ve karakteris-

tik basınç mukavemetinin MPa cinsinden değerleridir.

Çekme mukavemeti değerleri, basınç mukavemetlerinden daha erken elde edilir (bak. Çizelge 3). Matrisin ve hamur-agrega arayüzünün yoğunlaşması, çekme mukavemetinin iyileşmesini açıklar. Yarıлма deneyinde, kırılma yüzeyleri sistematik olarak, daneleri keserek geçer (silisli agregalarda bile), ve malzemenin mekanik homogenliğini isbat eder. Ancak çekme mukavemetinin neden yaklaşık olarak 14 günden sonra artmamaya başladığı, basınç mukavemetinin ise bundan sonra hâlâ % 10 ilâ % 20 oranında artmaya devam ettiği düşündürücüdür. Matriste, rötresinin agregâ tarafından engellenmesi sonucu meydana gelen çekme hâli bu olayı açıklar. Ayrıca bunda suda saklanan nûmunelerdeki yapısal bir özelliğin de etkisi vardır. Dış kabuk genişlemek isteyerek, iç kısımda zamanda artan çekme gerilmelerine neden olur.

6.3- Elastiklik Modülü

Hashin [22] homogenleştirme teorilerinden geliştirilmiş matematiksel ifadeler önermiştir. Bunlar betonun elastisite modülü (E) üzerine üç ana parametrenin: agregâ hacim oranının (g), çimento hamuru elastiklik modülünün (E_p) ve agregâ elastiklik modülünün (E_a) etkilerini açıklar.

$$E = \frac{E_p[(1-g) E_p + (1+g) E_a]}{[(1+g) E_p + (1-g) E_a]}$$

Çimento hamurunun elastiklik modülü, kompasitesinin bir fonksiyonudur ve çekme mukavemetinde olduğu gibi (şek. 3'e bakınız) 1'e çok yakın bir üsse sahiptir. g, ve E_a değerleri normal betonla, ÇYMB'da fazla farketmez (sert kalker için $E_a = 65$ GPa). Bunun sonucunda elastisite modülündeki artış oldukça mütevazî ölçüde kalarak 40 GPa ile 55 GPa arasında değişir.

Elastiklik modülünün zamanla artışı, çekme mukavemetininkine benzerse de, 14. günden sonraki duraklaması yoktur. Burada da elastiklik modülü ile karakteristik basınç mukavemetini bağlayan ilişki için yönetmeliklerde verilen formül ÇYMB için kolaylıkla genişletilebilir:

$$E_{ij} = 11000 \times (f_{cj})^{1/3} \quad (\text{Bütün deęerler MPa})$$

6.4- Rötre

Burada ilgileneceğimiz kuruma r tresidir. Şekil 4, üretiminden 24 saat sonra kalıbından çıkarılan ve bağıl nemi (50 10%) ve sıcaklık derecesi (20 1 C) olarak sabit tutulan bir odada kurumaya bırakılan bir nümunenin r tresini göstermektedir. Bünyesel rötre ise, tarife göre, bu toplam rötre ile, aynı nümunenin hiç su kaybı olmaksızın (bak. Ő 4.2) yaptığı rötre arasındaki farktır. Deneyde elde edilmiş her iki rötre değerleri ve bunların uzun s redekı ekstrapolasyonları  izelge 4.de verilmiőtir.

Niha  bünyesel rötre kabaca iki kat arttığı halde, kuruma rötresi çok azalmıőtır, çünkü malzemede hidratasyondan sonra çok az serbest su kalmaktadır.  YMB'un 160 mm çaplı nümuneler üzerinden ölçülmüş toplam rötresi, kontrol betonundan yapılmış aynı n munelerinkinin yaklaşık olarak yarısı kadardır.  YMB'ların r trelerinin bilhassa hızlı kinetikleri gözönünde tutulmak gerekir. Çünkü karőılaőtırmalar kısa süreli deneylerle yapılırsa yanlış değerlendirmeler yapılabilir.

Yapısal boyutlarda  YMB'ların bünyesel r trelerinin korkulacak bir etkileri olabilir mi? Köprülerde bu Şekil deęiőtirmelerin büyük kısmı kalıp alındıktan sonra yer alır ve etkileri ısı deęiőmelerinin neden olduğu homogen bir Şekil deęiőtirmeninkine benzer olur. Yapı elemanlarının mesnetleri ele temasta olacak bölümleri, bu tip Şekil deęiőtirmelerden zarar görmeyecek Şekilde boyutlandırılır.

Zemin  zerine dökülmüş yol kaplamaları veya döőemelerde, normal betonlardakine kıyasla kusurlu olabilecek yegane durum, alt tabakaya kuvvetli Şekilde bağlı, kalın ve donatısız döşeme halidir [24]. Bunun dıőındaki bütün hallerde  YMB'la elde edilen özellikler daha yüksektir [Ő6.6 ve 6.7]

6.5- S nme

Bu  zellik daha önce yayınlanmış makalelerde

tartışılmıştır [3,11,13]. Rötreninkilere eş numunelerin şekil değiştirmelerinin zamanla değişimleri Şekil 5'de görülmektedir. ÇYMB'un bileşimi Çizelge 1.dekinin aynıdır, kontrol betonunun ki ise farklıdır (Çizelge 5). Temel sünme, prensip olarak, reçina ile yalıtılmış yüklü numune ile, ona eş yüksüz numunenin şekil değiştirmelerinin farkı olarak saptanmıştır. Aynı hesap, yalıtılmamış (28 gün polyan filmi altında saklandıktan sonra kontrollü bir ortama çıkarılmış) numuneler için yapılırsa, bunlarda temel sünmeye ilaveten bir de kuruma sünmesi adı verilen ilave sünme olduğunu gösterir.

Açıklanan bu deneylerde, rutubet yalıtımı, rötrenin ölçümlerindeki kadar etkili olamamıştır, çünkü reçinenin iki tabakası arasında bir alüminyum folyo kullanılmamıştır. Kontrol numunelerinin temel sünmesi belki fazla olarak kestirilmiştir. Ancak ÇYMB her iki numunede aynı sünmeyi vermiştir. Yukardaki olaydan etkilenmediği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak ÇYMB'un sünmesi şöyle karakterize edilebilir:

- hızlı bir kinetiği vardır (1 yıllık değerin % 67'sine daha 7. günde ulaşılmıştır. Halbuki normal betonda ancak % 41'ine)
- çok küçük bir genliği vardır ($K_{cr} < 0.6$, normal betonunki ise 2'ye yakındır). Ancak çok erken yaşlardaki yüklenmeler için durum böyle olmayabilir. Eski bir araştırmada 1 günlük ÇYMB için $K_{cr} \approx 4$ bulmuştuk [3])
- rutubet etkilerinden ve eleman geometrisi etkilerinden bağımsızlık. Yapı mühendisi için gerçek bir nimet, çünkü artık hesap sonuçlarının doğruluğuna güvenebilir!

6.6- Donatı ile Aderans

Bu konuda yayın azdır. Rosenberg ve arkadaşları [37] biri silis dumanlı iki YMB için bazı çekip çıkarma deneyleri sınırlarını verdiler ve basınç mukavemeti % 50 arttığında ortalama aderans mukavemetinin % 40 arttığını gördüler. Bürge [7], sabit su çimento oranlı, fakat silis dumanlı ve silis dumanlı malzemelerin aderanslarını karşılaştırdı. Aderansların oranları deneylerde saf hamur (W/C+S=0.20), harç (W/C+S=0.30) ve beton (W/C+S=0.35) için 3, 2 ve 1,5 olarak bulundu. Wecharatana ve arkadaşları [42] da ortalama mukavemeti 75 ve 80 MPa olan YMB'lar üzerinde, kontrol

betonu olmaksızın çekip çıkarma deneyleri yaptılar. Yayınlarda açıklanmış deneylerle karşılaştırdıklarında, aderansın daha gevrek davranışını kaydettiler -yani aderans kuvveti azalmaya başlamadan önce daha küçük kaymalar gördüler. Lorrain ve arkadaşları [28] bu konuda en geniş yayını hazırlayan kimseler oldular. Deneylerinde maksimum kuvvetin, rijitliğin ve tersinirlik parametrelerinin betonun yaşı, beton-donatı temas yüzeyinin boyu ve bağlayıcı/su oranı ile aynı yönde arttığını saptadılar.

Prensibi Şek. 6'da görülen tipte kiriş deneyleri son yıllarda Nancy Bayındırlık İşleri Laboratuvarında uygulanmıştır [30]. Bunlar alışlagelmiş tipte deneyler olup, sonuçlarından malzemenin kendine has mekanik parametrelerini çıkarmak mümkün değildir. Fakat yararlı tarafları, arayüzünün aynen bir kirişin eğilmesindeki gibi yüklenebilmesidir. Yanal donatının bulunuşu da, ana donatıyı saran beton geçidin çevrelenmesidir.

Şekil 7 ve 8, kirişin yüklenmemiş yüzündeki donatıda ölçülen ortalama yük/kayma şekil değiştirmesi eğrilerini göstermektedir. ÇYMB'larda erişilen maksimum kayma yükleri, kontrol betonlarıninkilerden çok daha büyüktür. Ayrıca önemli bir boyut etkisi de görülmektedir ki, bu belki bünyesel rötne ile açıklanabilir. Çünkü kirişteki donatı yüzdesi ne kadar küçük olursa, rötrenin oluşturacağı yanal basınç da o kadar büyük olacaktır. Bu nedenle kalın donatı çubuklarının aderansı, incelerinkinden azdır. Normal betonlardan ÇYMB'lara aktarılacak bir sonuç.

Dikkat çekilmesi gereken nokta bu kiriş deneylerinin ÇYMB'daki passif donatı aderansını gevreklik şüphesinden kurtarmasıdır. Wecharatana'nın sonuçları ise şüphesiz uyguladığı deney türünün karakteri (çekip çıkarma deneyi) ile açıklanabilir. O deneyde çekip çıkarma kuvvetinin artması, enine donatılar olmaması halinde, nümunenin yarılmasına yol açabilir.

Artmış aderansın getirdiği ilk sonuç, aderans boylarının kısaltılmasıdır. Ayrıca eğilmeye çalışan betonarme kirişlerin boyutlandırılmasında çatlak oluşumu zararlı veya çok zararlı (mevcut yönetmeliklerdeki terminoloji ile) addediliyorsa, bu durumda da yararlı etki sağlanır. Normal betonda proje mühendisi çatlak genişliğini sınırlamak için donatının emniyet gerilmesini azaltmak zorundadır. Karşılaştırmalı bir hesap [11] göstermiştir ki, bu durumda tek istikamette çalışan ve verilmiş bir yükü

taşıması gereken bir döşeme ÇYMB'den yapılması halinde, donatısının emniyet gerilmelerinin maksimum değerine çalıştırılması halinde dahi, teorik çatlak genişlikleri normal betondakine kıyasla daha küçüktür. Beklenmeyen bir şekilde, ÇYMB'un kullanılması döşeme kalınlığını ve donatı kesitini azaltarak, daha ekonomik sonuç vermiştir.

6.7- Diğer Özellikler

Beton yüzeylerin mekanik aşınma etkilerine dayanımı ile ilgili araştırmalar da birkaç makaleye konu olmuştur. Örneğin Holland [24], baraj çökeltme havuzlarında, feyazan zamanlarında, çökelti maddeleri ile birlikte çok şiddetli su akımları olması halinde kullanılacak bir malzeme üzerinde araştırma yapmıştır (Kimzua barajı, USA). Liflerle donatılı betonlar, normal betondan daha iyi sonuç vermediği için neticede ÇYMB beton seçilmiştir ve kullanıcıya göre, tamamiyle yeterli sonuç vermiştir. Gjörv [19] ise bu malzeme ile yol kaplamaları için ilgilenmiş, ve bir yorulma deney serisinde çeşitli mukavemet değerlerine sahip bir seri bileşim denemiştir. Belirli bir tekrar sayısı için yüzeyden aşınan malzeme kalınlığı kalite ölçüsü olarak alındığında, bu kalınlığın tersinin basınç mukavemeti ile iyi korelasyon verdiği görülmüştür. 150 MPa'lık bir ÇYMB ile gözlenen davranış yoğun granitinkine benzer olmuştur. Çünkü çimento hamuru-agrega aderansı son derece iyidir (≤ 5 ile karşılaştırın).

Belirtmiş olduğumuz gibi [46], ÇYMB'dan üretilmiş yapıların şekil, hafiflik ve fleksibilite yönlerinde metal çerçevelerle karşılaştırılmaları makuldür. O zaman belki yorulma problemini de düşünmek gerekecektir. Bu konuda da bazı makaleler vardır [25,27], ve bilhassa deniz platformları uygulamaları ile ilgilidir. Gerek basınçta gerekse çekmede ÇYMB'ların mukavemeti, aynı (emniyet gerilmesi/kırılma gerilmesi) oranları için normal betonlarınkinden fazla farklı bulunmamıştır.

7- Yakıcı Sorunlar

Bu bölümde genel olarak yüksek mukavemetli malzemeler ve özel olarak ÇYMB konusunda, inşaat mühendisliğinin bu malzemeleri yapılarında 30 yıldan beri neden kullanageldiğini açıklayan bazı temel fikirleri sunmak istiyoruz.

7.1- ÇYMB'un Üretimi Zor mudur?

Normal beton malzemeleri ile 15 ilâ 25 MPa'lık (f_{c28}) karakteristik mukavemet değerlerinin kolayca elde edilebildiğini 30-40 MPa'lık değerlerin ise biraz güçlkle elde edilebildiğini herkes biliyor. En üst sıradaki mukavemet değerleri ise, bir proje süresince ancak çok itinalı bir kalite kontrolü ile sürekli olarak sağlanabilir. Bu durumda dahi bileşenlerden birinin kazara kalitesini kaybetmesi riski olabilir.

Bu şartlar altında binlerce metreküplük ÇYMB'u, adına layık bir şekilde, ve bazılarında süreklilik garantisi olmayan malzemelerle nasıl dökümleriz? Acaba Amerikalılar 130 MPa (ortalama mukavemetli) betonu şantiyede (Seattle'deki yeni gökdelen) nasıl üretebildiler?

Gerçek şu ki, ÇYMB ile inş etmeye karar verildiğinde, yeni silahlarla donatılmayı düşünmemiz gerekir, öyle ki yeni bir malzeme nesline geçilecektir ve bunda B80 bugünkü yapı endüstrisinin B25'ine ve B120 ise ve bugünkü köprülerimizin B35'ine tekabül edecektir.

Bu düşünüşü sayısal olarak sınamak için, laboratuvarında endüstriyel üretim koşullarını kopya eden bir benzeşim uyguladık [10]. İki temel bileşim olarak (biri normal kontrol betonu, diğeri ÇYM'li bir beton) bir hazır beton plantinde yer alması olası hatalara denk değişiklikler uyguladık. Ve gördük ki, ÇYMB'un mukavemeti, su fazlalığına, normal betona kıyasla daha hassas olmakla beraber, çimentonun, akışkanlaştırıcının (temel bileşimi tam olmak şartı ile [15]), veya silis dumanının azalmasından hemen hiç etkilenmemektedir. Zararlı etkiler birbiri üzerine eklenince mukavemet azalmaları her iki malzemede aynı mertebede kalmaktadır (%10 ilâ 15).

Kum/çakıl oranındaki dalgalanmalar bu betonun işlenebilirliği üzerine sınırlı bir etki yapabilmektedir, ancak bileşenler değiştikçe (silis dumanının karbon içeriği ve topaklanma derecesi, çimentonun inceliği, sıcaklık) bu da değişmekte ve beton 200 mm çökme vermesi için önlemler başlangıçta alınmak şartı ile yüksek kaliteli döküm sürdürülebilmektedir.

Görülüyor ki, endüstriyel şartlar altında ÇYMB dökümü güvenilir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Yalnız bunların üretimi, karma süresinin uzatılması gibi bazı ilave

önlemleri gerektirmektedir.

7.2- ÇYMB'lar Gevrek Midir?

Metallerde de bilhassa çelikte, mukavemetin artması gevrekliği beraber getirir. Bu kendisini kırılma kesitlerinin şekli ile, azalmış kırılma tokluğu ile ve azalmış kopma uzamaları ile belli eder. Şimdi çok yüksek mukavemetli betonda bu üç özelliği kısaca inceleyelim.

Kırılma Kesitleri

ÇYMB'da kırılma kesitleri, bu malzemeye has bir görünümüdür. Daha önce de belirtmiş olduğumuz gibi (bakınız şek. 9) çatlaklar hem çimento hamuru hem de agregaya içinden aynı anda geçmektedir. Bu nedenle gevrek malzeme karakterinde bir kırılma kesiti sözkonusudur.

Kırılma Tokluğu

Ancak aynı şeyi kırılma tokluğu veya kritik gerilme şiddet çarpanı için söylemek mümkün değildir. Bu parametreleri biri normal beton, diğeri silis dumanı içermeyen YMB ve üçüncüsü ÇYMB'da ölçtük [11]. Bulduğumuz gerilme şiddet çarpanı değerleri sırasıyla 2.16, 2.55 ve 2.85 $MPa\sqrt{m}$ ve kırılma enerjileri de sırasıyla 131, 135 ve 152 J/m^2 oldu. Yani belirli uzunlukta ve ortamdaki bir çatlağın yayılması için gerekli yük ÇYMB da normal betona kıyasla üçte bir daha fazla idi. Bunun ana nedeni de hamurun daha yoğun ve hamur/agrega aderansının daha yüksek oluşu idi.

Dikkat çekilmesi gereken bir nokta, kırılma tokluğunun diğer "ikinci sınıf" parametrelere (çekme mukavemeti ve elastiklik modülü) kıyasla bile daha yavaş artmasıdır. Bu olayı anlayabilmek için aşağıdaki düşünceden yararlanabiliriz. Kırılma mekaniğinde düzlem gerilme hali için verilen klasik ifade

$$K_{IC} = (E G_{IC})^{1/2}$$

şeklinde dir. (Burada K_{IC} kırılma tokluğu, G_{IC} kırılma enerjisinin kritik değeri ve E 'de elastiklik modülüdür). Farzedelim ki, G_{IC} kırılma enerjisi, hamuru kırmak için gerekli enerji (onun yerleşme yoğunluğu c_p ile orantılı) G_{ICp} ile, agregayı kırmak için gerekli enerji G_{ICa} 'nın hacimleri

hacimleri ile ağırlıklı toplamına eşit olsun. O takdirde

$$G_{Ic} = (1-g) G_{Icp} + g \cdot G_{Ica}$$

yazılabilir (Burada g , agreganın betondaki hacimsel oranıdır). Geçmişte [11] bir ÇYMB'un kırılma tokluğunu ölçmüş ve 0,2 MPa.m½ mertebesinde bulmuştuk. Hamurun § 6.3'de kestirilmiş olan elastiklik modülünü kullanarak, bu betondaki matris için

$$G_{Icp} = 1,2 \text{ j/m}^2$$

değerini hesaplarız ki, agreganın

$$G_{Ica} = 152 \text{ j/m}^2$$

değerine kıyasla, ihmal edilecek mertebededir. Bu nedenle gerek kontrol betonu ve gerekse ÇYMB aynı kırılma tokluğunu vermiştir. Her ikisi için

$$K = (g G_{Ic} \times g E)^{1/2}$$

kuralı uygulanmaktadır. Sabit bir agrega hacim oranı için kırılma tokluğunun beton basınç mukavemetinin altıncı kökü ile orantılı olarak artacağı sonucu buradan çıkarılır (biraz pesimist bir sonuç, zira hamur-agrega aderansındaki artış gözönüne alınmamıştır).

Tek Eksenli Basınç Altındaki Davranış

Bu aşıkarak malzemenin normal çalışma şeklidir. Kırılmadan önce gerilme-şekil değiştirme ilişkisi oldukça lineerdir. (Bak. Şek. 10). Maksimum gerilmede, plastik şekil değiştirme, toplam şekil değiştirmenin ancak % 15'i mertebesinde. Rossi [38] tarafından önerilen tanımlamaya göre ÇYMB oldukça gevrek bir malzeme olmaktadır. Maksimum gerilmedeki toplam şekil değiştirme ise normal betonunkinden

biraz yüksektir (burada 2.1×10^{-3} ile 1.8×10^{-3}). Yanal şekil değiştirmeler kontrol betonunkiler ile hemen hemen aynı tipte, onunkilerden biraz fazladır.

Kısa bir süre önce ÇYMB'un basınç deneyini, basınç presinin başlıklarındaki dönmelerini önleyen ve başlıklardaki hareketi kuvvetle lineer olacak şekilde kontrol eden ve kuvvetin daima artmasını sağlayan bir gereç kullanarak maksimum gerilmeyi aşan bölgede araştırdık [36,43] (Bakınız Şek. 11). Bu deneylerde yük-yer değiştirme eğrisinin tam elastik-gevrek olduğunu gördük. Halbuki numune yüzlerinin dönmelerini engelleyen gereç kullanılmadığı takdirde eğride geri dönme vardı.

Bu davranış en azından iki şekilde açıklanabilir:

- Bir toplam enerji yaklaşımı yönünden malzemenin kırılma enerjisinin basınç mukavemeti ile çok az arttığını gördük. Buradan gerilme-şekil değiştirme eğrisi altındaki alanın, maksimum gerilme ile orantılı olamayacağı anlaşılır. Şu halde tepe noktasından sonraki bölüm gittikçe azalarak bir minimuma inmek zorundadır.
- Bir yerel kırılma yaklaşımı yönünden ise tekrar iki ölçekli burkulma modeline dönelim (bakınız [12] ve § 6.1).

Bu modelde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktası, malzeme yüksekliği doğrultusunda çatladıktan sonra oluşan küçük kolonların burkulma eşiğine tekabül eder. Bu dallara ayrılmadan sonra akma fazı gözlenir. Akma sırasında küçük kolonlardaki eğik çatlaklar boyunca, makaslama çatlaklarına benzer kaymalar oluşur. Kırılma anında, bu çatlakların basınç doğrultusu ile yaptıkları θ açısı yönünde çekme maksimumdur. Mohr düzlemindeki klasik gösteriliş yardımı ile $\theta = \frac{\pi}{4}$. $\text{Arc tg } 2 (f_t / f_c)$ $\frac{\pi}{4}$ verir (f_t ile f_c malzemenin sırası ile çekme ve basınç mukavemetleridir).

Çekme mukavemeti, basınç mukavemetinden daha yavaş arttığı için, f_c 'nin değeri büyüdükçe θ azalır. Diğer yandan, kırılma yüzeyleri çok düzgündür ve bu akma çatlakları bir yanal gerilme altında sürtünme dışında artık başka bir kuvvet taşıyamaz. Bu nedenle tek eksenli basınç altındaki ÇYMB'da küçük kolonların ayrılıp dallanmasına ulaşıldığında, taşıyabilen kuvvet aniden düşer.

Ancak, tepe noktası sonrasındaki bu davranış betonun

gerçek bir yapıdaki kırılmasını gerçekten temsil eder mi? Eğilmeye böyle olmadığı kesindir: aşırı donatılı olan ve betonun basınç kırılması ile göçen kirişler üzerinde deneyler yapan araştırmacılara göre [23,29], ÇYMB ile kontrol betonundan üretilmiş kirişlerin her ikisinde kırılma anını kestiren davranış modelleri benzerdir, yalnız gerilme eksenlerinde, basınç mukavemetleri oranında bir afinite vardır.

Basınç lifinde ölçülen şekil değiştirmenin değeri, deneyin sonunda % 0,4'ü geçtiği halde beton hala parçalanmamaktadır. Ancak, yanıl donatı tarafından korunamayan bölgede bir kapak atmaktadır. Ayrıca, kirişler sünek davranış göstermektedir. Zayıf donatılı kirişlerde ise ÇYMB ek bir süneklik dahi sağlamaktadır. ÇYMB'da, gerekenden daha uzun donatının, adersans mukavemetinde sağlayacağı artış, bu olayı açıklamaktadır.

İki deney türü-silindir basınç deneyi ve kiriş eğilme deneyi arasındaki bu uyumsuzluk muhtemelen iki nedenden kaynaklanmaktadır. Birinci neden, basınçta maksimum şekil değiştirme sınırını aşmış olan bölge üzerinde, yapının geri kalanının gösterdiği tepkidir. Silindirik numunede kırılma bölgesi çok yereldir [43], ve şek. 11'deki eğrinin alçalan bölümü, iki beton blokunun birbiri üzerindeki ardışık kaymalarına işaretler. Kirişte ise böyle bir eğik kayma zorlukla oluşabilir; oluştuğunda yine yük azalmasına yol açar ve kaymalar basınç bölgesi içinde yer almak zorundadır. Mümkün olabilecek yegane şekil, şekil 12. de verilen gibidir.

İşte burada, uyumsuzluğun ikinci nedeni olan yanıl donatı işin içine girer. Şekil 13 ve 14, yük-yerdeğiştirme eğrilerinin hacim oranları gittikçe artan helisel yanıl donatılar nedeni ile uğradıkları başkalaşımaları göstermektedir. Yanıl donatı yüzdesi arttıkça yükteki ani düşüş eğiliminin gittikçe azaldığı görülmektedir.

Sonuç olarak aşağıdaki düşünceleri ortaya atabiliriz:

- basit basınç altındaki bir nümuneden elde edilen ve alçalan kolu olan bir deneysel gerilme-şekil değiştirme diyagramını, beton davranışının yasası olarak kabul eden klasik yaklaşım, eğilme hesapları için fiziksel bakımdan anlamsızdır. Bu yaklaşımı değiştirmek, ve eğilme deneylerinin makroskopik sonuçları ile uyum sağlayan genel kurallar seçmek

gereklidir. Bu yönde, yayınlara göre, § 6.8'de önerildiği gibi, trapez şeklindeki bir gerilme-şekil değiştirme diyagramı uygun olabilecektir. Ancak yapı elemanında belirli bir minimum yanıl donatının bulunması şart koşulacak ve bu minimumun deneylerle saptanması gerekecektir.

- Az eksantrisiteli basınçtaki kırılma nesapları için yeni hesap metotlarının geliştirilmesi, sürekli ortam mekaniği yerine belki blok mekaniği kullanılması gereklidir. Moment etkisi için, alçalan kolu olmayan diyagramlar (alçalan kolu olmayan trapez) kullanmak yolu ile emniyetli tarafta kalmak mümkündür.

7.3 ÇYMB'lar Pahalı mıdır?

Bu sorunun bir araştırma laboratuvarınca ve henüz uygulaması çok az olan bir malzeme için cevaplanması zordur. Yine de ÇYMB ile ilgili bazı ilave masrafları hesaplamaya çalışalım.

Süperakışkanlaştırıcılar çok kere eriyik halinde satılırlar ve katı bileşenin konsantrasyonu ikiye aşan kat oranında değişir (%20'den % 45'e kadar). Etkileri, katı bileşenin aynı konsantrasyonu için bir mamulden diğerine değişik olmakla beraber, rekabet bu katkıların normal fiyatını dar sınırlar içinde tutmaktadır. Katı maddenin kg toptan fiyatı 20 Fransız Fransı mertebesinde (vergi hariç). Silis dumanı ise piyasaya yeni çıkmış bir madde olduğu için henüz dengeli bir fiyatı yoktur. Mertebe olarak vergi hariç ton başına 1000 Fransız Fransı alınabilir.

Betonun metre küpü başına, vergi hariç, ekstra fiyat Tablo 1'de görüldüğü gibi ÇYMB için 200 Frank, YMB için ise 120 Frank mertebesinde. Beton malzemelerine ödenecek bu ekstra fiyat dışında başka ilave masrafları da gözardı etmemek gereklidir, yahutta bu en ince malzeme, sürekli kullanılmıyacaksa, zaman zaman el ile betoniye katılması en basit ve güvenilir yaklaşımdır. Karma süresinin çoğunlukla uzaltılması (toplam süre en az 1'30" olmak üzere) akışkanlaştırıcının kademeli olarak katılması ve mevcut fazların iyi karışımı için gereklidir. Son olarak da, itinalı bakıma olan gereksinim de ilave masraf getirir.

Diğer taraftan, birtakım başka yönlerden de tasarruflar

vardır:

- betonun akıcılığı nedeni ile döküm kolaylaşır, - erken mukavemetin yüksekliği nedeni ile kalıplar çabuk alınır, -sonuçta öyle olur ki, geçenlerde [35] ÇYMB'un normal betondan daha ucuz olacağı bile ileri sürülmüştür.

8- Çıkarılan Sonuçlar

Yukarıda ÇYMB'ların bileşim mantığından başlayarak, buradan mikroyapılarını çıkarıp, oradan da mekanik özelliklerine geçerek tutarlı bir genel tanımlarını vermeye çalıştık. Sonra da bu malzemenin ortaya çıkardığı birkaç yakıcı soruna değindik.

Olabilecek yapım zorluklarını düşünmezsek, teorik bakımdan ÇYMB belirli bir şekilde yüksek davranış (büyük açıklıklar, narinlikler [11] v.b.) elde edilmesine ve kullanılan malzemede gerek miktar ve gerekse de toplam fiat bakımından genel bir azalmaya imkan sağlar.

Halen (gökdelenlerin kolonları, ön germe kabloları ile gerilmiş kirişler, kafes yapılar v.b.) gibi öyle yapılar var ki, bunlarda projede değişim bile yapmadan ÇYMB kullanımının kısa vadeli tasarruflar sağlayacağı kesindir. Fakat en büyük kazançların sağlanması ise, bu yapıların yerine getirmeleri istenen mekanik işlevlere, malzemenin özelliklerine ve uygulanacak yapım tekniklerine göre yeni baştan hesaplanmaları ile mümkündür. İşte bu sonuç günümüzdeki araştırma ve yenilenmelere yapılan yatırımı haklı kılmaktadır.

ÇYMB ile ilgili olarak kalıcılıktan (durability) hiç söz etmedik. Ancak betonun fiziko-kimyasal (bozulma mekanizmalarından çoğu ÇYMB da kalıcılığı artıracak yönde değişmektedir [6]: su ve hava geçirirliğinin azalması, klor iyonu difüzyonunun yavaşlaması, hidratların yabancı iyonları yakalaması difüzyon direncinin yükselmesi, karbonatlaşma derinliğinin azalması, donmaya dayanımın çok iyi olması, ve bunların hepsinin hava sürükleyici katkı kullanılmadan olması (malzeme yeter derecede olgunlaştıktan yani içindeki serbest suyun tümünü pratik olarak sarfettikten sonra), vb. gibi. Betonun kuruması sırasında -plastik rötre dışında- başka yüzey çatlaklarının olmadığı da sanılmaktadır, ve "mekanik" etki çatlakları da, kırık yüzlerin muntazam şekil

nedeni ile daha iyi kapanabilmektedir. Yalnız yangına dayanma bir problem olabilir [17], ve bu konuda günümüzde araştırmalar sürdürölmektedir.

Henüz tüm yönleri ile doğrulanmamış olmakla beraber, ÇYMB'un kalıcılığının (durabilite) inşaat mühendisliği yapılarının ömürlerini arttırıcı yönde olacağını düşünmemize pek çok sebep vardır ve birçok halde yalnız bu sebep, bu yeni malzeme türünün kullanım alanının genişlemesine neden olacaktır.

TEŞEKKÖR

Yazar bildiriği Türkçe'ye çeviren Prof.Dr.Ferruh KOCATAŞKIN'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

1. Acker P.: Comportement mécanique des bétons: apports de l'approche physico-chimique. Doctoral thesis, ENPC, L.P.C. research report N°. 152, 1988.
2. Aitcin P.C., Albinger J.: Les bétons à hautes performances. Expériences Nord-Américaine et Française. Annales de l'ITBTP, N°. 473, March-April 1989.
3. Auperin M., de Larrard F., Richard P., Acker H.: Retrait et fluage de bétons à hautes performances- Influence de l'âge du chargement. Annales de l'ITBTP, N°. 474, pp. 50.75, May-June 1989.
4. Bache H.H.: Densified cement-ultrafine particle-based materials. 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, pp. 185-213, June 1981.
5. Buil M., Paillere A.M., Roussel B.: High-Strength Mortars containing silica fume. Cement & Concrete Research Vol. 14, N°. 5, pp. 693-704, 1984.
6. Buil M.: Des matériaux à très hautes performances pour le Génie Civil grâce aux fumées de silice. Travaux, N°. 624, pp 8-12, September 87.
7. Burge T.A.: Densified matrix improves bond with reinforced steel. MRS Symposium, Boston, 19987.
8. Chardin G.: Private communication. PPB-SARET company, 1988.
9. De Larrard F., Acker P., Lejeune D., Le Maou F.; Contraintes d'origine thermique dans le bétons H.P. Rapport M.R.T. F.O. 379, 1985.

10. De Larrard F., Acker P., Malier Y.: Very-high-Strength Concrete: From the Laboratory to the Construction Site. Conference on "Utilization of high-Strength concrete". Stavanger, June 1987.
11. De Larrard F.: Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances. Doctoral thesis, ENPC-L.P.C. research report N°. 149. March 88.
12. De Larrard F., Torrenti J.M., Rossi P.: Le flambement à deux échelles dans la rupture du bétons en compression. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°.154, pp. 51-55, March-April 1988.
13. De Larrard G., Acker P., Attolou A., Malier Y.: Fluage des bétons à très hautes performances. IABSE congress, Helsinki, 1988.
14. De Larrard F.: Ultrafine Particles for the Making of Very-High-Strength Concrete. Cement and Concrete Research, vd. 19 Jan., 1989.
15. De Larrard F.: A Method for Proportioning High-Strength Concrete Mixes. This book. Also presented at the 3rd International Conference on fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, June 1989, and published in Cement and Aggregates, Summer Issue, 1990.
16. Several authors: UN pont à hautes performances: l'ouvrage expérimental de Joigny. Travaux, N°. 642, pp. 57-65, April 89.
17. Diederichs U., Jumppanen U.M., Penttala V.: Material Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures. IABSE congress, Helsinki, June 1988.
18. Foure B: Etude expérimentale de la résistance du béton sous contrainte soutenue. Annales de l'Institut

Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N°. 435,
June 1985.

19. Gjorv O.E., Baerland T., Rønning H.R.: High-strength concrete for highway pavements and bridge decks. Conference on "Utilization of high-strength concrete", Stavanger, June 1987.
20. Grattesat G. et al.: Ponts de France. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1983.
21. Hanna B.: Contribution à l'étude de la structuration des mortiers de ciment Portland contenant des particules ultra-fines. Doctoral thesis, INSAT, June 1987.
22. Hashin: The moduli of heterogeneous materials. Journal of applied mechanics, March 1962.
23. Hellands S., Einstabland T., Hoff A.: High-strength concrete The Norwegian concrete society, Norsk betongdag, 1983.
24. Holland T.C., Krysa A., Luther M.D., Liu T.C.: Use of silica-fume concrete to repair the abrasion-erosion damage in the Kinzua dam stilling basin. 2nd International conference on fly ash, silica fume, slags and pozzolans in concretes, Madrid, ACI SP 91, April 1986.
25. Lambotte H., Taerwe L.: Fatigue of plain high-strength concrete subjected to flexural tensile stresses. Conference on "Utilization of high-strength concrete", Stavanger, June 1987.
26. Laplante P., Aitcin P.C.: Field study of creep and shrinkage of a very high-strength concrete. 4th International Congress of the RILEM, Z.P. Bazant Ed., Evanston, August 1986.

27. Lenschow R.,: Fatigue of high-strength concrete. Conference on "Utilization of high-strength concrete", Stavanger, June 1987.
28. Lorrain M., Khelafi H.,: Sur la résistance de la liasion armature-béton de haute résistance. Annales de l'ITBTP", N° 470, Décembre 1988..
29. Maro P.: Bending an shear tests up to failure of beams made with high-strength concrete. Congress on "Utilization of high-strength concrete", Stavanger, June 1987.
30. Maton R.: Adhérence acier-béton: propriétés des bétons à hautes et très hautes performances. Degree thesis, Université de Nancy I, December 1988.
31. Paillere A.M., Serrano J.J., Buil M.: Optimisation de la mise en oeuvre du couple ciment-adjuvant. Recherches sur les bétons de plus hautes performances, Rapport Ministère de l'Urbanisme et du Logement. Convention N°. 8371093, July 1984.
32. Pliskin L.: Ouvrage prototype en béton à hautes performances. Engineering memo, Entreprise SGE, May 1985.
33. Regourd M., Mortureux B., Aitcin P.C., Pinsonneault P.: Micro-structure of field concretes containing silica-fume. 4th International conference on Cement Microscopy, Las Vegas, pp 249-260, April 1982.
34. Regourd-Moranville M.: Microstructures des bétons à hautes performances. Formation continue ENPC, March 1989.
35. Richard P.: Journée ATHIL-ITBTP.

36. Rokugo K., Ohno S., Koyanagi W.: Automatical measuring system of load-displacement curves including post-failure regions of concrete specimens. Lausanne Congress, 1987.
37. Rosenberg A.M., Gaidis J.M.: A new mineral admixture for high-strength concrete - Proposed mechanism for strength enhancement. Second International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary paper, Madrid, 1986.
38. Rossi P.: Fragilité et ductilité des matériaux et des structures de Génie Civil. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 1988.
39. Russel H.G.: High-strength concrete in North-America. Congress on "Utilization of high-strength concrete", Stavanger, June 1987.
40. Setra: Ponts mixtes acier-béton bipoutres - Guide de conception. October 1985.
41. Trouillet P.: Private communication, 1989.
42. Wecharatana M., Chimamphant S.: Bond strength of deformed bars and steel fibers in high-strength concrete. MRS Symposium, Boston, 1987.
43. Weber L.: Etude de la ductilité du béton à très hautes performances armé en compression. Degree project, LCPC/ENPC+ June 1988.
44. Wolsiefer: Ultra high-strength field placeable concrete in the range of 10.000 to 18.000 psi (69 to 124 MPa). Concrete International, vol. 6, N° 4, PP.25-31, 1984.
45. Yogendran V., Langan B.W., Haque M.N., Ward M.A.: Silicafume in high-strength concrete. ACI Materials

Journal, pp 124-129, March-April 1987.

46. De Larrard F., Malier Y.: Propriétés constructives des bétons à très hautes performances - De la micro - à la macro-structure. Annales de l'ITBTP, December 1990.

TABLOLAR

Tablo 1. ÇYMB'un Bileşimi [II]

Kalker Kırmataş Agregalar (mm)			Dere kumu	Normal P.Ç.	Silis Dumanı	Süper Akış.	Su	Su/Çi.
12.5/20	3/12.5	0/5	326	421	42.1	7.59	112.3	0.27
854	411	326						

Tablo 2. Bir Kontrol Betonu Bileşimi

Kalker Kırmataş Agregalar (mm)			Dere kumu	Normal P.Ç.	Silis Dumanı	Süper Akış.	Su	Su/Çi.
12.5/25	5/12.5	0/5	-	375	-	3.75	190	0.51
890	208	725						

Tablo 3. Tablo 1.deki ÇMYB'un Mekanik Özelliklerinin Zamanla Gelişimi

Betonun Yaşı (Gün)	1	3	7	14	28	90	360
Ortalama Basınç Mukavemeti (MPa)	27.2	72.2	85.6	92.6	101.0	109.6	114.1
Yarılma Mukavemeti	2.2	5.4	6.4	6.1	6.5	-	-
E-Modülü (GPa)	34.9	48.7	51.2	52.4	53.4	53.6	56.8

Tablo 4. Tablo 2'deki Kontrol ve Tablo 3.deki ÇYMB'ların Rötire (m/m)
değerlerinin Karşılaştırılması
(Kalıp alınmadan önceki hidrasyon rötireleri ile birlikte)

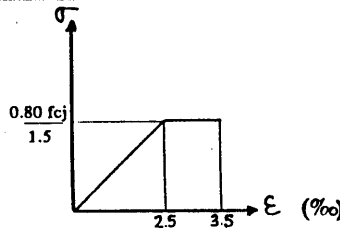
	Kontrol Betonu	ÇYMB
Toplam Rötire (-ekstrapolasyon)	470 650	320 340
Bünyesel Rötire (-ekstrapolasyon)	120 120	210 210
Desikasyon Rötresi (-ekstrapolasyon)	350 530	120 120

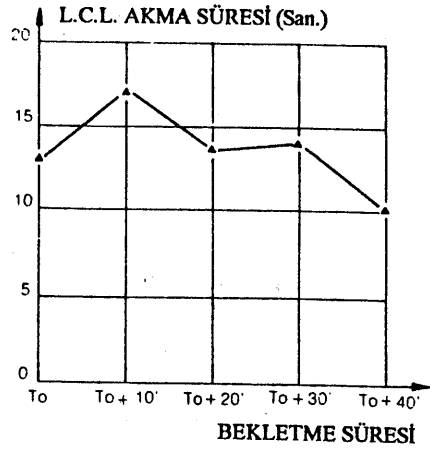
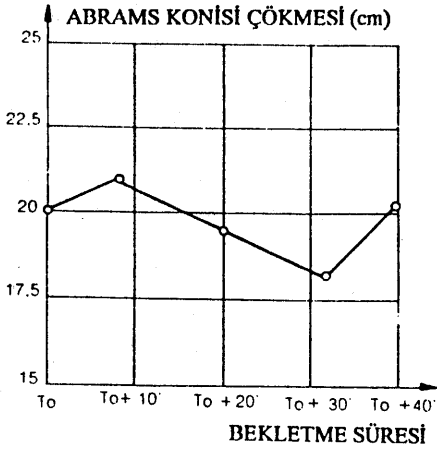
Tablo 5. Başka Bir Kontrol Betonunun Bileşimi [II]

Kalker Kırmataş Agregalar (mm)			Dere kumu	Normal P.Ç.	Silis Dumanı	Süper Akış.	Su	Su/Çi.
12.5/20	3/12.5	0/5	315	410	-	-	181	0.44
826	398	315						

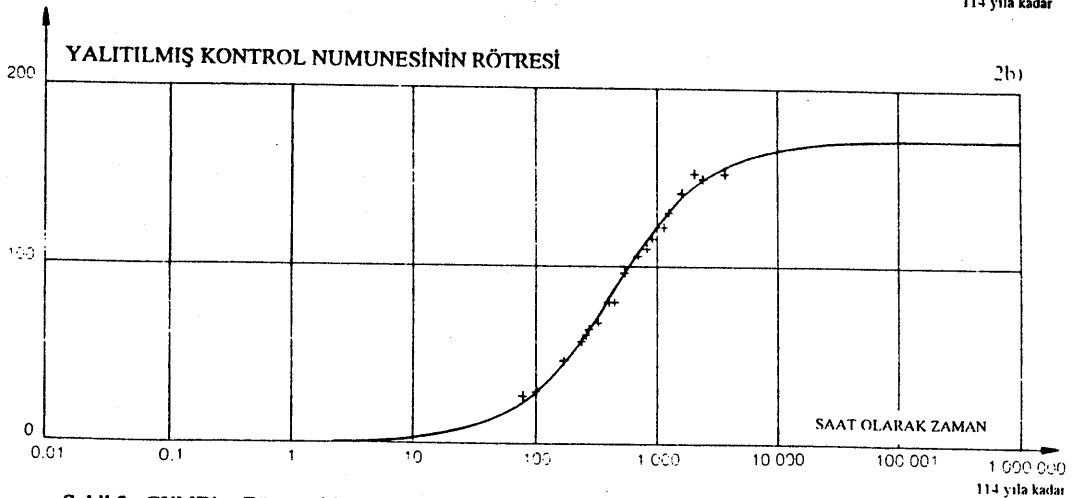
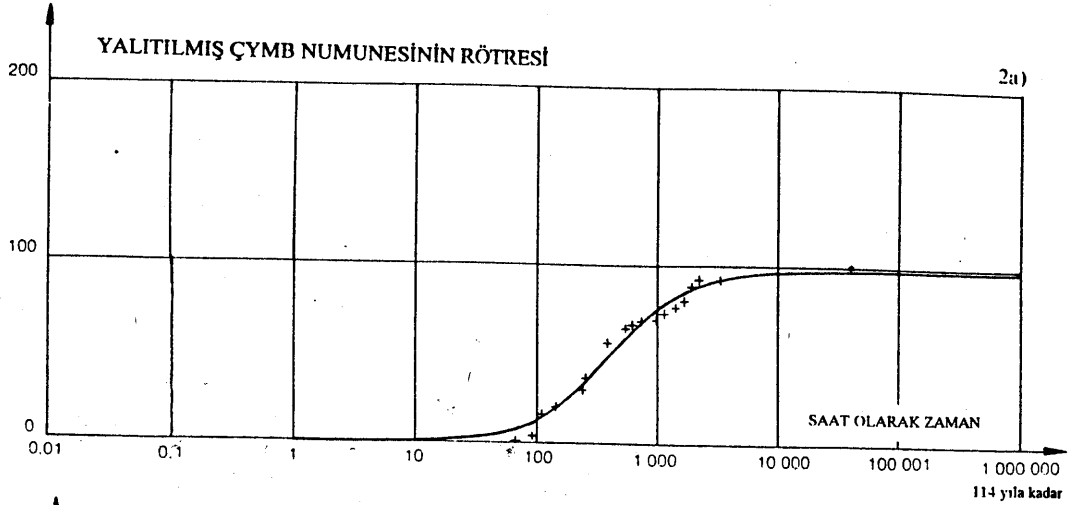
Tablo 6. ÇYMB'un Önemli Mekanik Özelliklerinin Fransız Yönetmeliklerine Uygun Olarak Saptanmış Değerlerinin Özet Tablosu

Çeşitli Yaşlardaki Mukavemet ve E-Modülü (MPa)		
1 Günlük	f_{c1}	20.0
	f_{t1}	2.0
	E_{i1}	35000.0
7 Günlük	f_{c7}	75.0
	f_{t7}	5.5
	E_{i7}	51000.0
28 Günlük	f_{c28}	90.0
	f_{t28}	6.0
	E_{i28}	53000.0

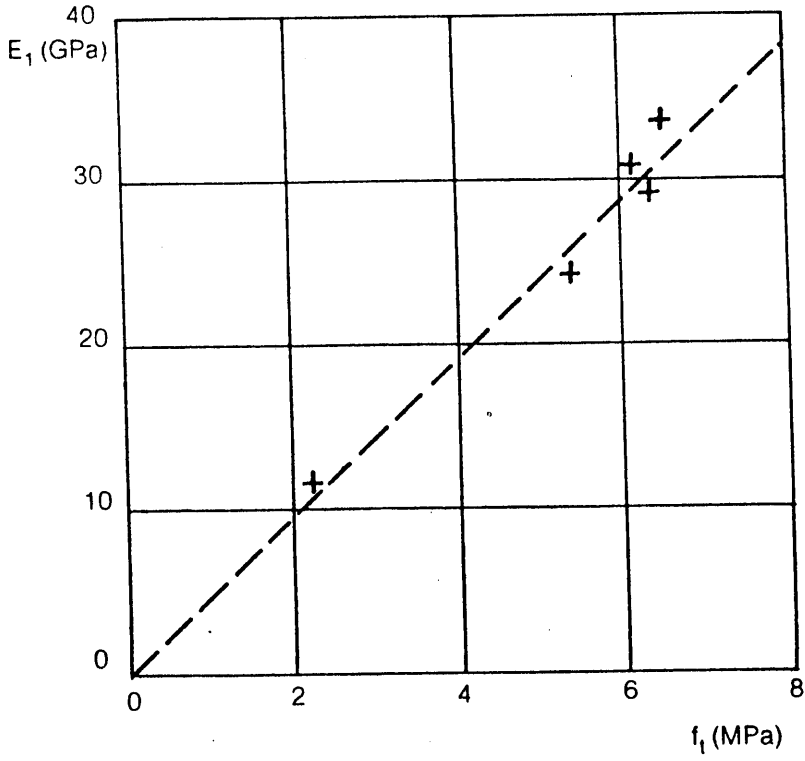
Eksenel Tek Eksenli Basıncıdaki Davranış Modeli	
	
Rötre	
	2 veya 3×10^{-4} (yerel iklimle göre)
Sünme	
$K_{c,r}$	0.8 (28. günde yüklenmeye başlamada sünme şekil değiştirmesi ile elastik şekil değiştirme arasındaki oran)



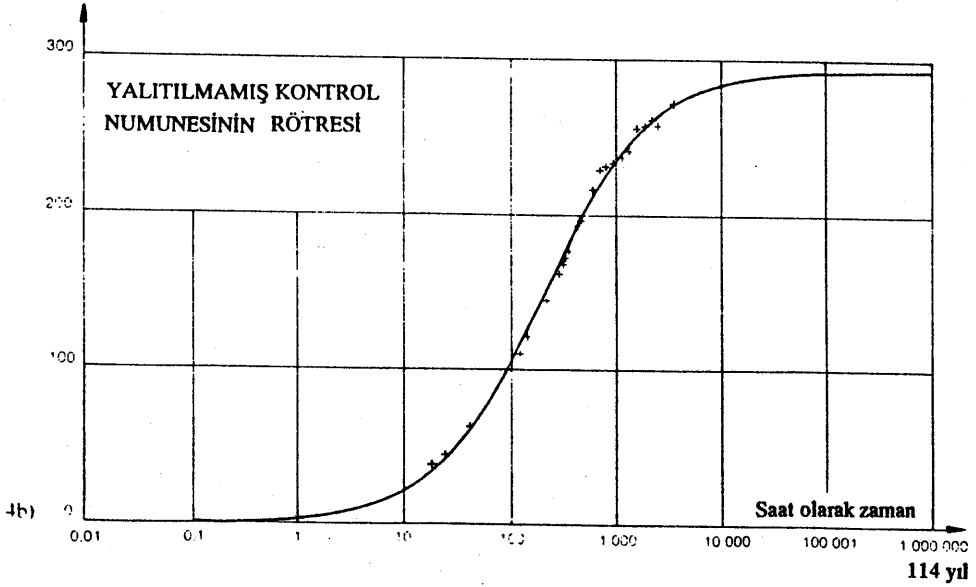
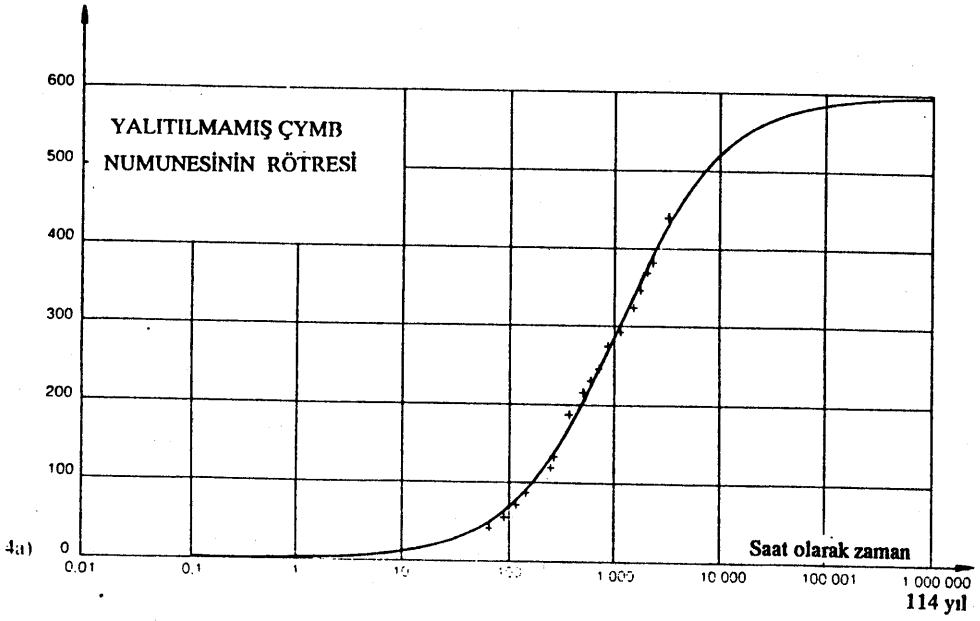
Şekil 1. L.C.L. aleti ile ölçülen akma süresinin ve Abrams çökmesinin ÇYMB'un üretiminden sonraki 1 saat içinde değişimi.



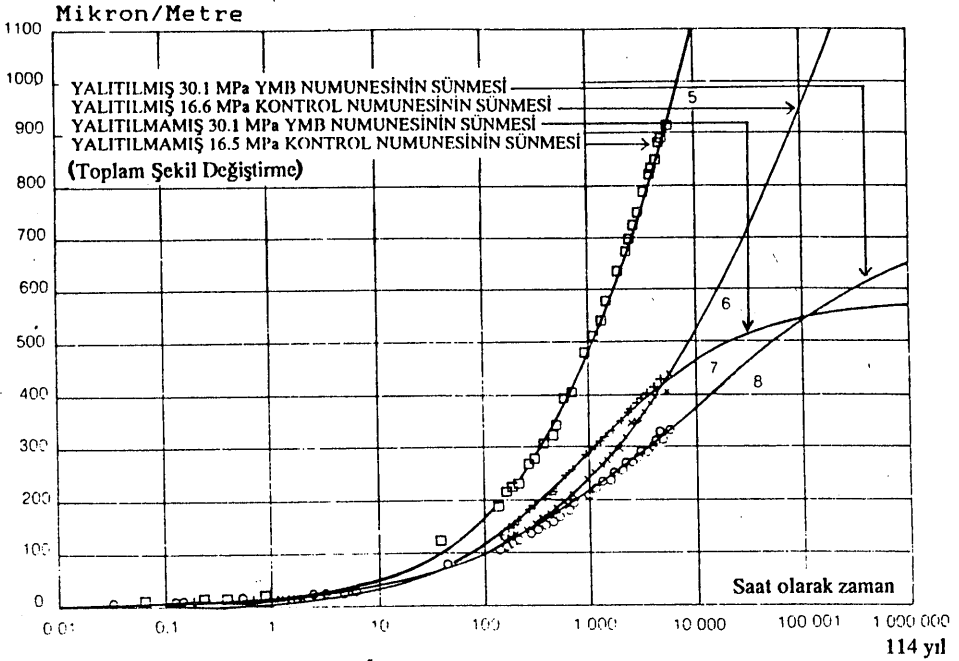
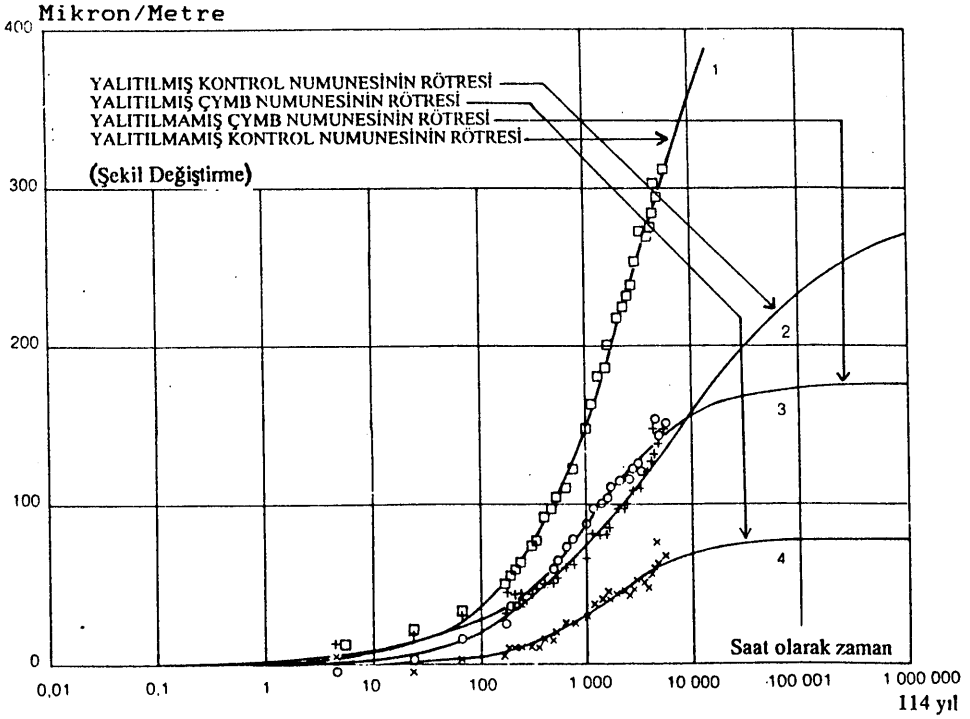
Şekil 2. ÇYMB'un Bünyesel Rötresinin Normal Betonunki ile Karşılaştırılması (160x1000 mm'lik silindirik numunelerin 50'lik mm boyunda 20 C sıcaklık ve %50 bağılnem şartlarında ölçülmüş.)



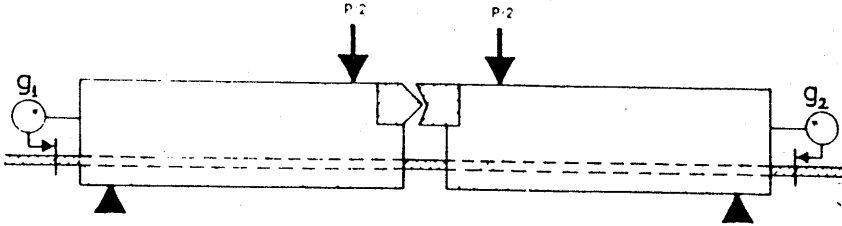
Şekil 3. Hashin Formülü ile Hesaplanmış Hamur Modülü ile Deneysel Olarak Saptanmış Yarılmı Mukavemeti Arasında Korrelasyon (ÇYMB'un çeşitli yaşları için).



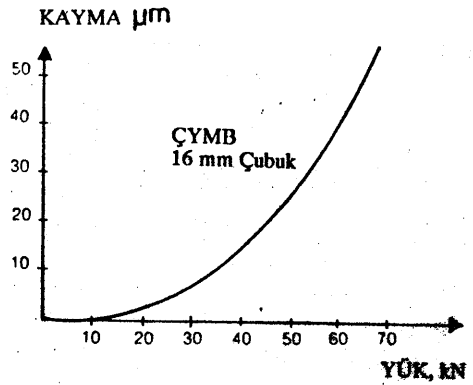
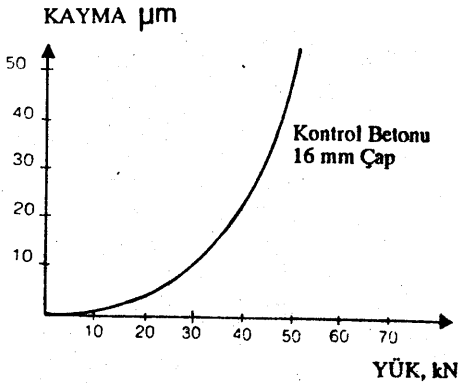
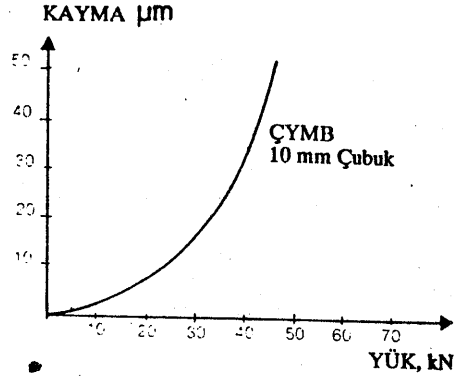
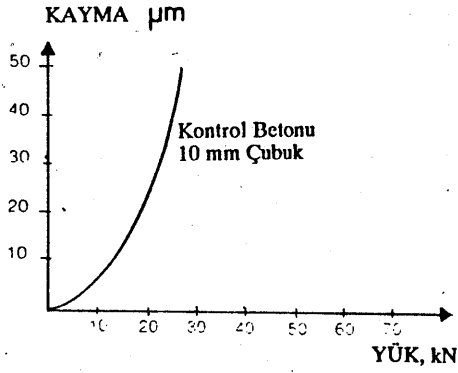
Şekil 4. ÇYMB'un Kuruma Rötresinin Kontrol Betonunki İle Karşılaştırılması (160x1000 mm boyutundaki numunelerin 500 mm'lik boyunda 20 C ve %50 bağıl nem şartlarında ölçülmüş.)



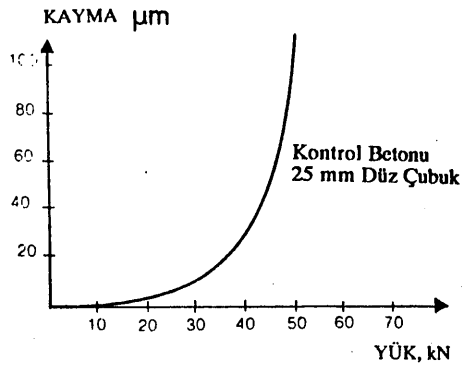
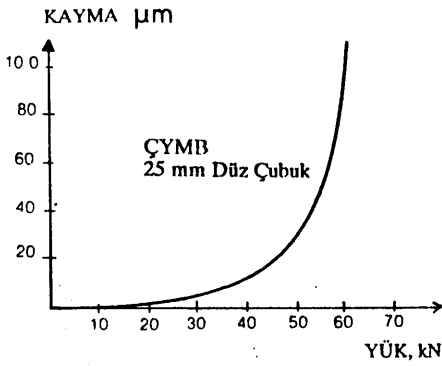
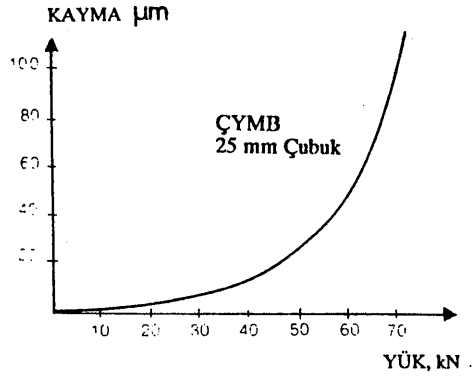
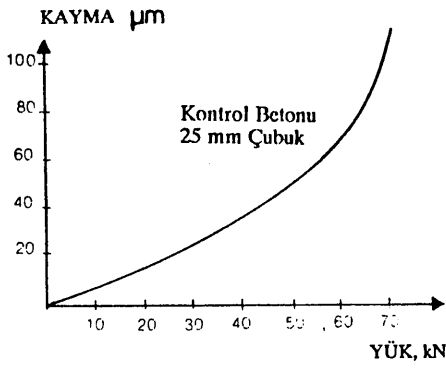
Şekil 5. ÇYMB (Tablo 1) ve Kontrol Betonu (Tablo 5) Rötre ve Sünmeleri Numuneler üretildikleri andan, ölçümlerin başladığı 28.ci güne kadar plastik örtüler altında muhafaza edilmiş, ondan sonra 20 C sıcaklık ve %50 bağıl nemli havada tutulmuştur.



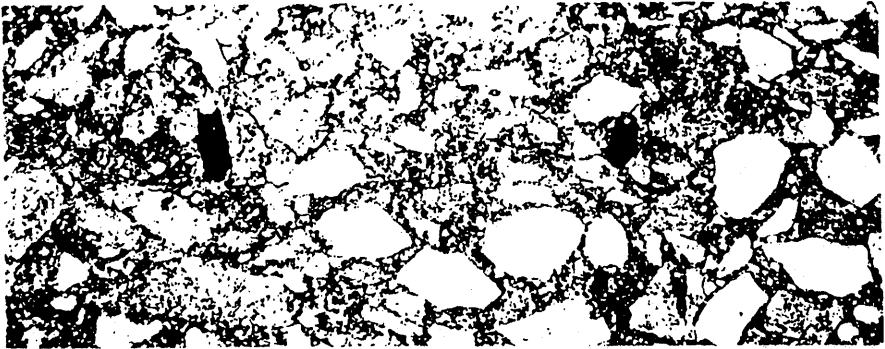
Şekil 6. Kiriş-Deneyinin Prensibi



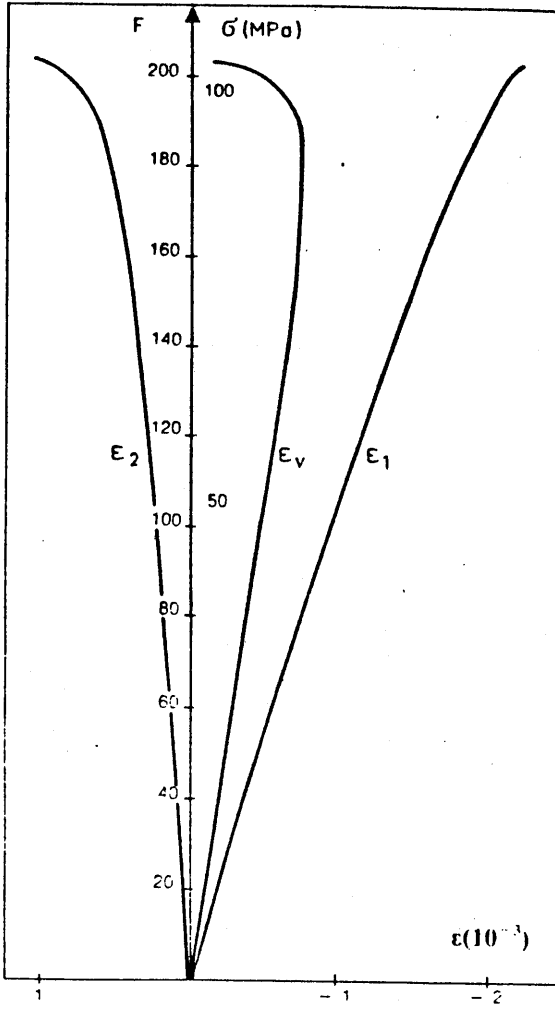
Şekil 7. Her iki Beton için 10 mm ve 16 mm Çubuk Çaplarında Yük-Adanış Kayma İlişkileri



Şekil 8. Her İki Betonda 25 mm Çubuk Çapı İçin Yük-Aderans Kayması İlişkileri

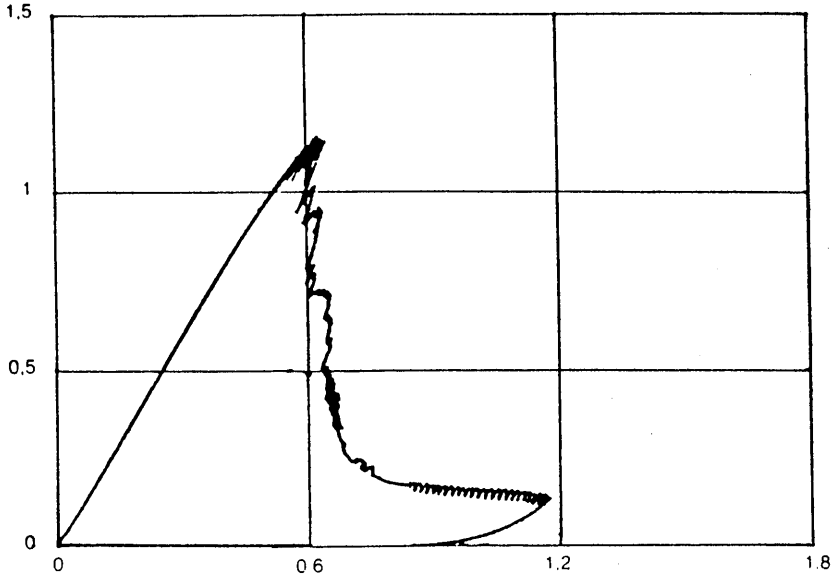


Şekil 9. ÇYMB'da Yarıлма Sırasındaki Kırık Kesitleri



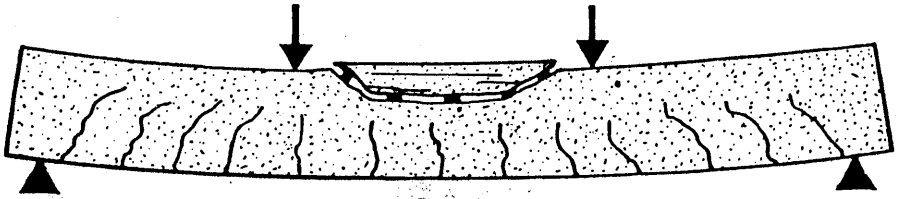
Şekil 10. ÇYMB'un Basınç Gerilmesi Altındaki Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramı

KUVVET, MN



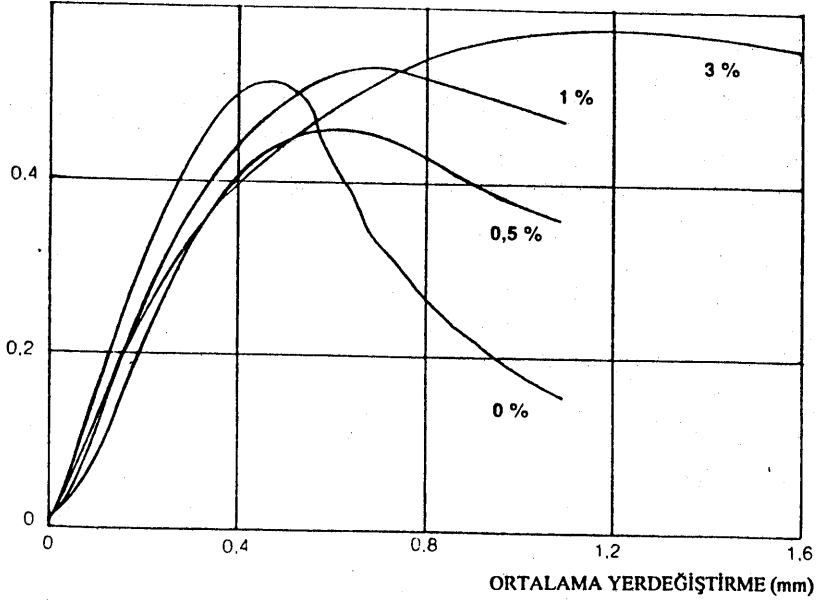
ORTALAMA YERDEĞİŞTİRME, (mm)

Şekil 11. Basınç Tablalarının Dönmesini Engelleyen Özel Gereçli Deney Makinasında (110x220 mm.lik) Numunenin Basınç Deneyinde Yük-Yerdeğiştirme Eğrisinin Tümü



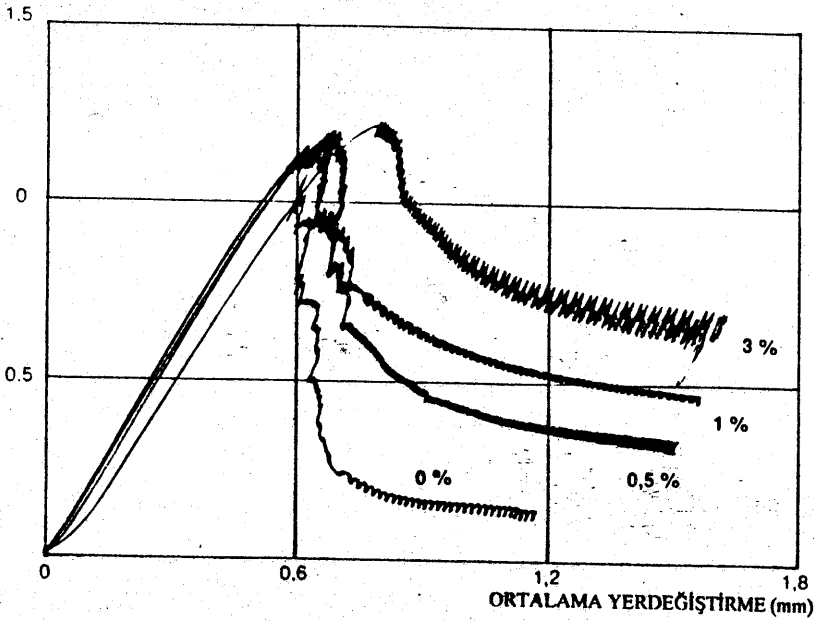
Şekil 12. Aşırı Donatılı Betonarme Kirişin Eğilme Kırılması

KUVVET, MN



Şekil 13. Çeşitli Oranlarda Yanal Donatı İçeren Kontrol Numunelerinin
Yük-Yerdeğiştirme Eğrilerinin Tüm Gidişleri

KUVVET, MN



Şekil 14. Çeşitli Oranlarda Yanal Donatı İçeren ÇYMB Numunelerinin
Yük-Yerdeğiştirme Eğrilerinin Tüm Gidişleri.

