

Sertleşmekte Olan Beton Özelliklerinin Çatlak Riski Açısından Değerlendirilmesi

Yılmaz Akkaya¹

Özet

Yapılardan beklenen taşıma gücü ve servis ömrü, yapıda kullanılan beton kalitesi ile doğrudan ilgilidir. Dolayısıyla yapıda kullanılacak betonun sağlaması gereken dayanım ve dayanıklılık şartları proje tasarım aşamasında belirlenerek şartnamelerde yer alır. Yapının inşası sırasında, proje sırasında tasarlanmış beton özellikleri ile yerinde üretilmiş beton kalitesi arasındaki farklılıklar sürekli ölçülmelidir.

Yapıda yerindeki beton kalitesi üzerinde en önemli etkenler, kullanılan malzemeler, yerleştirme ve kür gibi üretim teknolojisi-ne ve işçilik kalitesine bağlı değişkenlerdir.

Bu değişkenler, betonun özellikle erken yaşlarda maruz kaldığı otojen ve plastik rötre nedeniyle hacimsel kararlılığını, hidrasyon nedeniyle oluşan ısı gerilmeleri, dayanım gelişimini ve boşluk yapısını etkiler. Bunun sonucunda, yapı elemanının şekil değiştirmesinin kısıtlandığı bölgelerde erken yaş çatlakları meydana gelir. Dolayısıyla, yapının erken yaşlarda çatlama riskinin, yerindeki beton kalitesinin yapının tasarlanmış servis ömrü ve dayanıklılığı açısından değerlendirilmesi önem kazanmaktadır.

GİRİŞ

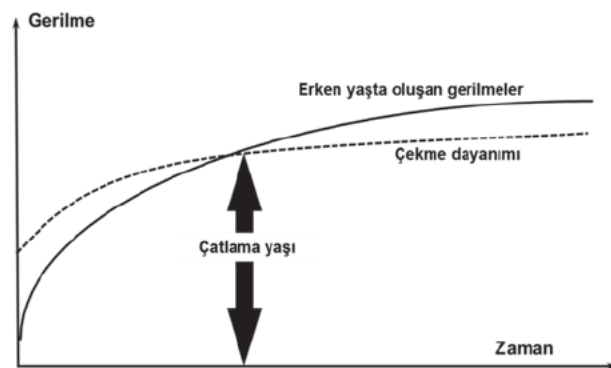
Yapı servis ömrü ve dayanıklılığının sağlanabilmesi için yapı elemanlarının üretiminde kullanılan beton; su, karbondioksit, sülfat ve klor gibi zararlı iyonlara karşı geçirimsiz olmalıdır. Geçirimsiz beton için, boşluk ve çatlak sistemi kontrol edil-

Evaluation of Early Age Concrete Properties With Respect To Risk of Cracking

The load bearing capacity and the expected service life of structures depend on the quality of concrete, used in the construction. Therefore, during the design stage of a structure, the specifications are prepared to describe the strength and durability properties needed for the construction materials. During the production stage of the structure, the designed concrete properties and the in-situ properties of the concrete should be continuously measured and compared.

mesi gereken değişkenlerdir.

Boşluk sistemi betonda kullanılan su/ çimento oranı ve hidrasyon hızı ile yakından ilgilidir. Çatlaklar ise özellikle betonun erken yaşta dayanımı düşük ve hacimsel şekil değiştirmelerin en fazla olduğu erken yaşlarda gerçekleşir. Erken yaşlarda oluşan çatlama riski, gerilme analizi yapılarak hesaplanabilir. Bu süreç içerisinde, ısıl şekil değiştirmeler ve bünyesel rötre, betonu çatlatmaya çalışan gerilmelerdir. Zaman içinde giderek artan bu gerilmeler, betonun gelişmekte olan erken yaş çekme dayanımını aştığı noktada betonun çatlaması ile sonuçlanır (Şekil 1).



Şekil 1. Betonda erken yaşta oluşan gerilmelerin ve dayanım gelişimi

⁽¹⁾ Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

⁽²⁾ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, akkayayil1@itu.edu.tr

Zaman içinde oluşan çatlaklar giderek genişleyerek, betonun hidratasyonla kapatabileceği mikroçatlak genişliklerini aşar ve yapı elemanı geçirimsizliği açısından riskli bir duruma gelmiş olur. Çatlaklar ne kadar erken yaşta olursa ileri günlerdeki genişlikleri de o kadar artar. Bu çatlaklar, ileri yaşlarda dış yüklemeler, oturma, sülfat ve alkali-silika reaksiyonu, donma-çözülme ve korozyon gibi etkenler nedeniyle betonun hasara uğramasına yol açar.

Erken yaş çatlakların oluşumunda en etkin değişkenler rötre, beton içindeki ısı farklılıkları ve ısıl şekil değiştirmelerdir. Özellikle yapı temelleri veya büyük enkesitli perde duvarları gibi kütleli betonların dökümünde beton döküm programı betonun üreteceği ısıyı kontrol altında tutabilecek şekilde ayarlanmalıdır. Rötre, çimento-su kimyasal tepkimesi ile ilgili olan bünyesel rötre ve kür şartlarıyla ilgili olabilecek plastik rötreten kaynaklanır. Dolayısıyla bünyesel rötre kullanılan malzeme ve karışım oranları ile, plastik rötre ise kür koşulları ile ilgilidir.

Isıl ve bünyesel rötre şekil değiştirmeleri sonucunda yapı elemanı içinde ısıl gerilme farklılıkları oluşabilir. Böylece elemanın yüzeyi ve iç bölgesi arasında şekil değiştirme farklılıkları ve çatlaklar meydana gelir. Diğer bir hususta da, birbirine komşu iki yapı elemanı arasında oluşan ısıl farklılıklardır. Bir yapı elemanı soğumaktayken, yanına dökülen yeni eleman ile arasında ısıl şekil değiştirme farklılıkları ve çatlaklar oluşur.

2. YAPI ELEMANI İÇİNDE OLUŞAN ISIL FARKLILIKLAR

Bir yapı elemanı kütleğinde en yüksek sıcaklığa orta bölgede ulaşılır. Yüzeye doğru yaklaşıldıkça, dış ortama verilen kayıplar nedeniyle sıcaklık düşer. Bu sıcaklık farklılıkları yapı elemanının hacmi ile doğrudan orantılıdır ve sıcaklık farklılıkları arttıkça, orta bölgelerde oluşan genleşmeler yüzeylerde çatlamalara neden olur. Yapı elemanının boyutlarının yanısıra, enkesitte oluşan sıcaklık profili de çatlama sırasında etkin bir nedendir.

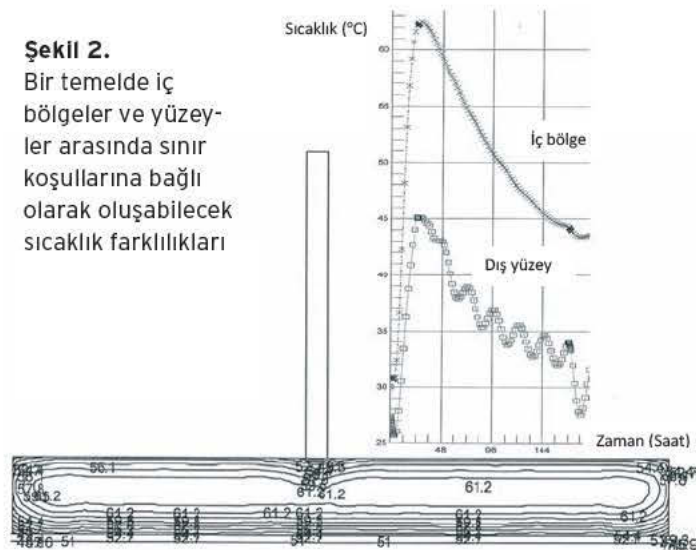
Şekil 2.'de zemin üzerine oturan bir temelde iç ve yüzey kesimleri arasında meydana gelebilecek sıcaklık farklılıklarına bir örnek verilmektedir. Dış ortam şartlarına yakın olan yüzeylerde mevsimsel atmosferik sıcaklıkların etkili olacağı düşünülürse, iç bölgeler ve yüzey kısımlar arasındaki sıcaklık farklılıkları mevsimsel şartlara (rüzgar, gece-gündüz hava sıcaklıkları) ve zeminin cinsi ve sıcaklığına da bağlı olacaktır. Bunun yanısıra, kullanılan kalıbın ısıl iletkenliği, kalınlığı ve izolasyon özellikleri, kalıp sökümünün ne zaman yapıldığı gibi etkenler de ısıl gerilme farklılıklarının oluşumunda değişken olarak göz önünde tutulmalıdır.

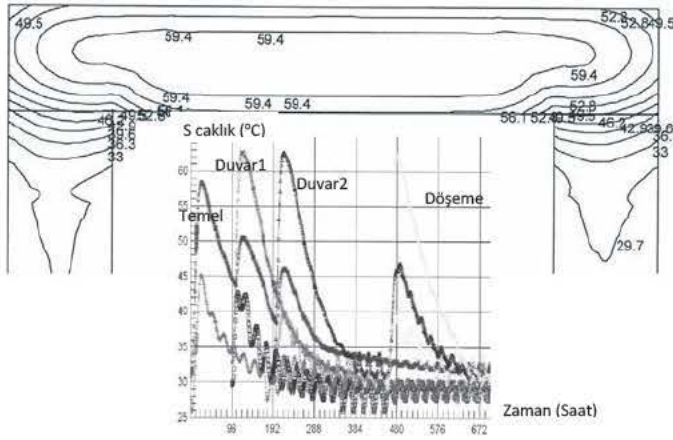
3. YAPI ELEMANLARI ARASINDAKİ ISIL FARKLILIKLAR

Hidratasyon nedeniyle oluşan ısı, ve dolayısıyla sıcaklık artışı, yapı elemanında genleşmeye neden olur. Ancak yapı elemanının yanında bitişik bir başka yapı elemanı varsa, genleşme kısıtlanmış olur (Şekil 3). Böylece basınç gerilmeleri açığa çıkar. Soğuma döneminde ise, beton rijitliğinin artmış olması nedeniyle oluşan çekme gerilmeleri daha önce oluşan basınç gerilmelerinden daha fazladır. Meydana gelen sıcaklık farklılıkları ve gerilmeler komşu elemanların şekil değiştirmeye karşı rijitlik farklılıkları ile doğru orantılıdır. Hidratasyon derecesinin artmasıyla, yapı elemanlarının maruz kaldığı çekme gerilmeleri de artış gösterir ve çatlama gerçekleşir. Oluşan çatlakların genişliği, meydana gelen sıcaklık farklılıklarının yanısıra rötre gerilmelerine ve kesitteki mevcut donatı durumuna da bağlıdır.

Genellikle, yapı elemanı yüzeyinde oluşan çatlaklar ısınma aşamasında, yapı elemanının en kesiti boyunca oluşan çatlaklar ise soğuma aşamasında oluşan derin çatlaklardır. Yapı elemanının soğumasıyla yüzeydeki çatlaklarda bir miktar kapanma meydana gelse de, ileri yıllarda geçirimsizlik açısından zayıf kesitler meydana gelmiş olur. Bazı şartnameler betonun elastisite modülü ve dayanım gelişimini gözönüne almadan bir elemanın içindeki sıcaklık farklılıklarını 15-20°C arasında kısıtlamaktadır.

Şekil 2. Bir temelde iç bölgeler ve yüzeyler arasında sınır koşullarına bağlı olarak oluşabilecek sıcaklık farklılıkları





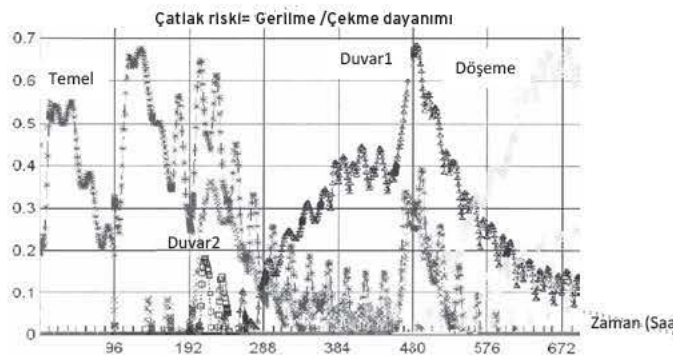
Şekil 3. Komşu elemanlar (döşeme ve duvarlar) arasında oluşabilecek sıcaklık farklılıkları

4. ÇATLAK RİSKLERİNİN HESAPLANMASI

Erken yaşlarda oluşan çatlak risklerinin hesabı için ısııl şekil değiştirmelerin, bünyesel rötre şekil değiştirmelerinin ve beton çekme dayanımının zaman içinde nasıl geliştiklerinin bilinmesi gerekir. Bunun yanısıra yapı elemanının kısıtlılık ve sınır (çevre şartları) koşullarının zaman içindeki değişimleri de gözönüne alınmalıdır. Yapı elemanı kalıp içinde tutulduğu ve kalıp alındıktan sonra kür uygulandığı sürece, rutubet profilindeki değişikliklerin etkisi çok az olarak kabul edilebilir.

Kullanılan betona ait ısı iletkenlikleri, hidratasyon ısısının gelişimine, ısııl kapasite ve ısııl iletkenliğe, birim ağırlığa, ısııl sınır koşullarına (konveksiyon, ısıtma kabloları veya soğutma boruları)'na bağlıdır. Oluşan gerilmelerin analizi sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değişen malzeme özellikleri gözönüne alınarak yapılır.

Erken yaş çatlakların oluşumunda gözönüne alınması gereken diğer bir önemli malzeme özelliği de bünyesel rötre ve ısııl genleşme/büzölme neticesinde oluşan sünme ve gevşeme şekil değiştirmeleridir. Bu tip denklemlerin çözümünün iteratif zaman aralıkları içinde yapılması gerektiğinden sonlu elemanlar yöntemi kullanılır (Şekil 4).



Şekil 4. Çatlak riskinin yapı elemanlarında zamana göre değişimi

5. ERKEN YAŞ BETON ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Çatlak risklerinin doğru olarak hesaplanabilmesi için malzeme özelliklerinin ölçülmesi önem kazanmaktadır. Bu nedenle betonun zaman içindeki,

- Isıl genleşme katsayısı gelişimi
- Erken yaş bünyesel rötre gelişimi
- Erken yaş bünyesel sünme gelişimi
- Çekme dayanımı gelişimi
- Elastisite modülü gelişimi
- Adiyabatik ısı gelişimi
- Betonun ısııl iletkenliği
- Aktivasyon enerjisi

Laboratuvar şartlarında ölçülerek hesaplamalar için veri olarak kaydedilir. Bu ölçülen verilerin yanısıra, betonun Poisson oranı ve özgül ısı da hesaplamalarda kullanılan değerlerdir. Betonda erken yaş rötre, sertleşme süresinin hemen sonrasında başlar. Dolayısıyla taze betonun priz sürelerinin tayin edilmesi de gerekmektedir. En az 28 gün boyunca devam eden rötre ölçümleri, ilk günlerde şekil değiştirmeler daha yüksek olduğu için daha sık ölçülmelidir. Rötre ölçülürken, numunelerin içinde ısııl çiftler yardımıyla sıcaklık da ölçülmeli ve sıcaklık değişiminden kaynaklanan şekil değiştirmeler hesaplanarak yapılan ölçümlerden çıkartılmalıdır. Rötre numunelerinin ölçümler sırasında dışarıyla teması kesilmeli ve kurumadan kaynaklanacak şekil değiştirmelerin oluşması engellenmelidir.

Isıl şekil değiştirmeler, ölçülen sıcaklık farklılıklarının betonun ısııl genleşme katsayısı ile çarpımından hesaplanır. Dolayısıyla, betonun ilk günlerden başlayarak ısııl genleşme katsayısı tesbit edilmelidir. Beton numune sıcak ve soğuk ortamlara yerleştirilerek ne kadar genleştiği ve büzüldüğü ölçülür. Belirli sıcaklık farklılıkları sırasında yapılan şekil değiştirme ölçümleri ile betonun ısııl genleşme katsayısı hesaplanır.

Sünme, betonun sabit yük altında meydana gelen şekil değişimidir ve içyapıdaki kristallerin içsel sürtünmesinden kaynaklanır. Bünyesel rötre, içsel gerilmeler oluşturur ve beton dışarıdan yüklenmese dahi, içsel gerilmeler nedeniyle sünmeye maruz kalır. Erken yaş sünmesi meydana gelen bünyesel rötre şekil gerilmelerini gevşettiğinden dolayı faydalıdır, ve bu nedenle ileri yaşlardaki sünmeden farklıdır. Erken yaş sünme deneyleri beton yaklaşık yarım günlük iken dayanımının belirli bir yüzdesine karşılık gelen (%30-35 gibi) bir sabit gerilme altında yüklendiğinde veya yükün boşaltıldığında (gevşeme) ne kadar şekil değiştirme yaptığı ölçülerek bulunur. Yapılan ölçümden betonun bünyesel rötre ve ısııl şekil değiştirmeleri çıkartılarak bünyesel rötre değeri hesaplanır. 28 gün devam eden deneyler sırasında numunelerin dışarıyla temas ederek kuruması önlenmeli, betonun zaman içinde dayanımı arttıkça, üzerinde

sabit olarak tutulan yük de artırılmalıdır. Zaman içinde yükleme-boşaltma yapılarak betonun sabit yük altındaki şekil değiştirme artışı ve boşaltıldıktan sonraki zaman bağlı gevşemesi ölçülmelidir. Ölçülen şekil değiştirmeler, birbirine paralel olarak bağlanmış bir Maxwell ve Kelvin cismi ile modellenenebilir. Bu model sayesinde, betonun ani elastik şekil değiştirmelerini temsil eden elastisite modülünü ve zamana bağlı şekil değiştirmelerini temsil eden içsel viskozite katsayısını hesaplamak ve birbirinden ayırmak mümkün olur.

Yapı elemanında sıcaklık farklılıkları nedeniyle meydana gelecek şekil değiştirmeleri, betonun sertleşme sürecinde yapılan adiyabatik veya yarı-adiyabatik ısı gelişimlerinin ölçülmesiyle hesaplamak mümkündür. Bu şekil değiştirmelerin oluşmasında ve gelişiminde kullanılan çimento cinsi, miktarı, betonun birim ağırlığı, yapı elemanının boyutları ve çevresel koşullarda (yaz, bahar veya kış şartları gibi) etkilidir.

Isıl, bünyesel rötre ve sünme şekil değiştirmelerinin zaman bağlı olarak ölçülmesinden sonra, bu şekil değiştirmeleri gerilmeye çevirebilmek için betonun elastisite modülünün ölçülmesi gerekmektedir. Betonun erken yaşlardan itibaren elastisite modülü, elastil bölgede kalan yükleme-boşaltma işlemleri ile hesaplanabilir. Çatlama anında betondan yük boşaldığı için, ölçülen şekil değiştirmeleri boşalma sırasındaki elastisite modülü ile çarpmak gereklidir. Yükleme altından bulunan elastisite modülü, boşalma sırasındaki elastisite modülünden daha düşüktür.

Şekil değiştirmeleri elastisite modülü ile çarparak bulunan çatlak oluşturacak gerilmelere, beton çekme dayanımı ile karşı koyar. Bu nedenle betonun erken yaşlardan itibaren çekme dayanımı, yarma deneyi ile tesbit edilebilir. Betonun yerindeki özellikleri, ortam sıcaklığına bağlı olduğundan, beton dayanımının sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği de belirlenmelidir. Bu amaçla betonun sahada karşılaşılmaması muhtemel en küçük ve en yüksek sıcaklıklar arasında dayanım gelişimi ölçülerek aktivasyon enerjisi hesaplanır. Bu değer ve betonun yerindeki sıcaklığı bilindiğinde, arrhenius olgunluk fonksiyonu kullanılarak betonun yerindeki dayanımını tahmin etmek mümkündür.

6. SONUÇ

Betonun erken yaş şekil değiştirmeleri ve mekanik (dayanım ve rijitlik) özelliklerindeki değişimler ölçülerek yapı elemanının kendi içindeki sıcaklık farklılıkları veya komşu elemanlar arasındaki sıcaklık farklılıkları nedeniyle erken yaş çatlama riski hesaplanabilir. Kullanılan malzeme özellikleri, beton özellikleri ve çevresel şartların yanısıra, betonun döküldüğü ve kalıbın söküldüğü günler arasındaki farklar, kullanılan kalıbın kalınlığı ve ısı iletkenlik katsayısı ve, kalıp sökülmesinden sonra eleman yüzeyinde ısı yalıtımı uygulanıp uygulanmadığı, yalıtım uygulanmışsa, bunun kalitesi ve hangi süreyle

uygulandığı da bu risklerin yüklenici tarafından kontrol edilmesine yardımcı olur. Döküm sırasında mevsime bağlı gece-gündüz ortam sıcaklıkları ve rüzgar hızı tahminlerinin doğru yapılması, temel elemanlarında kullanılan kütle betonlarının ısı gelişimlerinin zaman içinde doğru tahmin edilmesi için zemin özgül ısı kapasitesi ($\text{kJ/kg/}^{\circ}\text{C}$) ve zemin ısı iletkenliği ($\text{kJ/m/h/}^{\circ}\text{C}$) değerlerinin uygun seçilmesi gerekmektedir. Elemanların boyutlarının yanısıra, uzama veya kısalma hareketlerinde yapısal sınır koşulları (hareket kısıtlılığı) uygun biçimde seçilmelidir. Özellikle komşu olacak elemanlar arasında çatlak riskini en aza indirecek şekilde döküm tarihlerini belirlemek mümkündür.

Bunların yanısıra, yerindeki betonun ısı gelişimi üzerinde taze beton sıcaklığı önemli rol oynamaktadır. Büyük kütleli elemanların dökümünde, agrega ve suyu soğutmak, çimento tozu dinlendirmek oluşan ısının kontrolünde önemli faydalar sağlar. Karışım agrega granülometrisi ve agrega şekli, en az çimento hamuru kullanacak şekilde seçilmelidir. Su/çimento oranının ve çimento cinsinin ısı gelişiminde önemli rol oynadığı hatırlanmalıdır.

Malzeme ve üretim yöntemleri ile ilgili alınan her türlü önleme rağmen erken yaş sıcaklık farklılıkları yüksek oluyorsa, beton sıcaklığının soğutma boruları veya ısıtma kabloları ile içerden kontrolü sağlanmalıdır.

Bilgisayar programları ile yapı benzeşim modelleri çözülerek betonda çatlak oluşturacak gerilmelerin betonun çekme dayanımına oranı belirlenmelidir. Bu oranının alınacak önlemler ile suyla temas eden yapılarda 0,7'yi, diğer yapılarda 1,0'i aşmaması gerektiği, konuyla ilgili yapı şartnameleri tarafından belirtilmiştir. Betonda oluşacak sıcaklık farklılıklarının öngörülmesi, kontrol altında tutulması ve takip edilmesinin yanısıra, oluşacak en yüksek sıcaklık değeri de kontrol altında tutulmalıdır. Kullanılan malzemelere bağlı olmakla beraber, konuyla ilgili şartnameler bu değerin 65°C'nin üzerine çıkmasını uygun bulmamaktadır. Bu değerin üzerinde betonda oluşması muhtemel gecikmiş etrenjit hasarı (içsel sülfat hasarı) yapının ileri yıllarda kullanım dışı kalmasına neden olabilir.

Alınacak tüm önlemlere rağmen, betonun çatlamasının kaçınılmaz olduğu durumda, çatlak genişliklerinin beton geçirimsizliği ve yapı dayanıklılığı açısından önem taşıdığı hatırlanmalıdır. Çatlak riski kontrolü, oluşan çatlakların yerinin ve zaman içinde genişliklerinin takibini de içermektedir. Çatlak genişliklerinin zaman içinde, betonun kendiliğinden kapanması mümkün değerlerin üzerine çıkması halinde, çatlakların enjeksiyon veya tamir malzemeleri ile onarılması gerekmektedir. Bu durumda, yapının hizmet ömrüne uygun tamir malzemeleri ve yöntemler uygulanmalıdır. Bu yüzden, erken yaş çatlaklarının tamirinde kullanılacak malzeme ve yöntemlerin de öntestleri, yapı üretimine başlamadan önce yapılarak uygunluğu kontrol altına alınmalıdır.