

Alüminyum ve çelik elemanların öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleşimi

S. Gökhan KARAMAN*, Reha ARTAN

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

Özet

Bu araştırmada alüminyum ve çelik iki farklı malzemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonla sürtünme ile yük aktaran birleşimi incelenmiştir. Sürtünme ile yük aktaran birleşimlerin davranışını belirlemek amacı ile, iki farklı grup deney gerçekleştirilmiştir. Bunlar, kısa süreli ve uzun süreli kayma deneyleridir. Kısa süreli kayma deneyleri ile öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde, hem alüminyum ve hem de galvanizli çelik temas yüzeylerine herhangi bir işlem yapılmadan sadece yüzeyler yağdan arındırılmış durum için ve alkali silikat çinko boya ile boyanmış durum için, sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Yukarıda belirtilen iki farklı temas yüzeyi haline ait yük-yer değiştirme diyagramları, kayma yükü ve sonrasında kopma haline kadar incelenmiştir. Deney sırasında yük altında bulonlardaki öngerilme kuvvetindeki değişim araştırılmıştır. Kısa süreli deneylerde sürtünme yüzeylerine boya kullanılmaması durumunda birleşimler ekonomik olmaktan uzaktır. Sürtünme artırıcı alkali silikat çinko boya kullanılması durumunda bir bulonun sürtünme ile taşıyabileceği kuvvet yaklaşık olarak 3.5 kat daha fazladır. Yapılan ondört adet kısa süreli deneyden elde edilen verilerden yararlanılarak uzun süreli deney sistemi hazırlanmış ve toplam onbeş adet uzun süreli birleşim numunesi bir yıl boyunca üç farklı çerçevede 90 kN, 78 kN ve 60 kN'luk sürekli yük altında gözlenmiştir. Bu deney sonuçlarının irdelenmesinde daha önce literatürde rastlanmayan sabit aralıklı ayırıklaştırma uygulanmak suretiyle elli yılsonundaki davranış tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu araştırma ile alüminyum ve çelikten oluşan farklı iki malzemenin birleşimi için alkali silikat çinko boyanın kullanılabilirliği ve sürtünme katsayısını arttırdığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Birleşim, öngerilmeli yüksek mukavemetli bulon, alüminyum elemanlar.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: S. Gökhan KARAMAN. karamang@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 75.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Alüminyum ve çelik elemanların öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleşimi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 08.06.2009 tarihinde dergiye ulaşılmış, 25.06.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Karaman, S.G., Artan, R., (2010) 'Alüminyum ve çelik elemanların öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleşimi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 9: 6, 178-186" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Pre-Loaded high strength bolted connections of aluminium members with steel members

Extended abstract

A certain amount of research and studies has been done on the connections of the same kind of material such as aluminum to aluminum or steel to steel connections. However, as far as the connections of two different materials are concerned, there are no systematic works on the subject. In order to connect hot dip galvanized steel material with aluminum material, it is necessary to use high strength pre-loaded bolts. The use of weld is not possible because of the different properties of materials.

The presented work is the result of the studies conducted on two different materials- aluminium and steel and their friction grip pre-loaded high strength bolted connections. For this reason, two different types of experiments have been done. These tests are the short-term and the long-term tests, performed on four different dimensions of thickness: 10.0 mm, 9.7 mm, 8.0 mm and 5.0 mm, and on three different aluminum alloys: AlMgSi1 (6082), AlMgSi0.5 (6063) and AlZn4.5Mg1 (7020). In each specimen two 10.9 M16 bolts have been used. In the first five tests of the short-term tests, friction surfaces are only treated oil-free and in the latter 9 test specimens are painted with alkali silicate zinc.

In pre-loaded high strength bolted connections, the friction coefficient had been determined for the aluminum and steel specimens with oil-free contact surfaces and also for the alkali silicate zinc painted contact surfaces. For the above mentioned two different cases of treatment of the contact surface, loading-displacement diagrams are studied for shear loads and after it then, up to the occurrence of the rupture. After having subjected the bolts to pre-loading, the loss of pre-load had been studied for 30 min. prior to the beginning of the test. During the test under load, the specimen was monitored to determine whether a sudden loss in pre-load occurred.

In the short-term tests after applying the pre-loading to the bolts, no big loss on the pre-load was noticed, because of the creep behavior of aluminum in time. In the short-term tests, when no paint on the friction surfaces was used, the number of the bolts necessary for the proper connections would be too high to be

considered economical. In case of using the friction-increasing alkali silicate zinc paint, the limit friction force of one bolt increases 3.5 times. A change of the thickness has no effect on the friction coefficient in short-term tests. When the aluminum alloy has lower yield stress than the steel, an indent under the washer will be observed. This observation is valid only for the AlMgSi0.5 (6063) alloy. That's why it is necessary to transfer the pre-load to a greater surface. To prevent the indent from happening, a thicker and wider washer could be used.

After evaluating the short-term test results statistically, it has been noticed that the standard deviation of the distribution of friction coefficient does not exceed 10% limit. With the help of the results of fourteen short-term tests that were conducted, a long-term testing system was prepared and a total of fifteen long-term connection specimens in three different frames with 90 kN, 78 kN and 60 kN of continuous loading was monitored. The loading on each frame was determined so that the friction surface of each specimen was loaded with 75%, 65% and 50% ratios. To prepare the friction surfaces of long-term test specimens, all surfaces were treated with alkali silicate zinc paint. The long-term test had been carried out within one - year time span, during which the loading of each frame, the pre-loading on bolts and the slip between aluminum and steel plates were observed.

The effect of small thickness on friction in the long-term tests causes the slip of contact surfaces in time. By using thinner aluminum plates, contact pressure was distributed on a smaller area of contact surface. This explains the earlier shear observed in the long-term tests under constant tension force. The thinner the specimen, the earlier the slip occurs. For the study of the long-term test results using constant distance separation - a method not found in the literature, an attempt has been made to predict the behavior of specimens within 50 years onwards. Inspecting of the 10 mm thick aluminum plate specimens after the period of one year shows that the predicted displacement in 50 years' time will be within the 0.30 mm slip limit range. The conclusion can be drawn that the alkali silicate zinc paint increases the friction coefficient of connections made of two different materials- aluminum and steel.

Keywords: Connections, high strength bolts, aluminium members.

Giriş

Bulonların görevi farklı kesitlerdeki yapı elemanlarını birbirlerine birleştirmektir. Bulonlu birleşimler noktasal birleşimlerdir. Öngerilmeli bulonlarla birleşen elemanların temas yüzeylerinin sürtünme aktarır hale getirilmesi (Valtinat, 1993) ile bazı yüklemelerde sanal yüzeysel birleşimler oluşturulur. Günümüzde bulonlu birleşimler, perçinli birleşimlerin yerini almıştır.

Mevcut bir yapıya daha hafif bir yapının bağlanması durumunda, galvanizli çelik malzeme ile alüminyum malzemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkar. Literatürde irdelenen araştırmalarda, ince paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımlar için yapılan kaynaklı birleşimlerin aksine (Coelho vd., 2008), yapı çeliğinin galvanizlenmeden alüminyum ile birleşiminde kontak korozyonu oluşmaktadır. Bu ise çeliğin galvanizlenmesi ve birleşimin bulon ile yapılması zorunluluğunu getirmektedir.

Avrupa'da sürtünme ile yük aktaran öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonların kullanımı 70'li yılların ortasında başlamasına rağmen Amerika Birleşik Devletleri'nde 1990'lı yıllarda yer bulmuştur. Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri standartlarında sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler T6 6061 alüminyum malzeme için incelenmiştir (Fortin vd., 2001). Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan deney yöntemi ile yapılan deneylerde okumalar daha değişken olmasına rağmen, Avrupa Birliği yönetmeliğine göre yapılan deneyler ile daha gerçeğe yakın ve bulon gevşemesini de içeren sonuçlar elde edilebileceği belirtilmiştir. Basınç kuvveti etkisi altında yapılan deneylerin kullanılmasının çekme deneylerine göre daha değişken sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Farklı iki malzemenin öngerilmeli bulonlu birleşimleri ile ilgili literatürde çeşitli araştırmalar mevcuttur. Yamada ve Tadao (2001), çalışmalarında alüminyum A6063-T6 ile çelik malzemenin birleşimini incelemişler, birleşim yüzeylerine paslanmaz çelik tozunu anorganik boya ile uygulamak suretiyle sürtünme katsayısını art-

tırmaya çalışmışlardır. Cam cephe elemanlarının sürtünme ile yük aktaran birleşimleri Panait ve diğerleri (2007) tarafından incelenmiş ve alüminyum ve cam arasındaki sürtünme katsayısı birleşimden bağımsız olarak deney ile belirlenmiş ve sayısal analizde kullanılmıştır.

Aşağıda adımları verilen araştırmanın konusu, alüminyum ve çelik iki farklı malzemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu sürtünme ile yük aktaran birleşimi üzerinedir. Literatürde aynı malzemenin birleşimi için araştırmalar mevcut olmasına rağmen farklı iki malzemenin birleşimi ile ilgili sistemli araştırmalara rastlanmamıştır.

Bu araştırma ile:

- Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde, hem alüminyum ve hem de galvanizli çelik temas yüzeylerine herhangi bir işlem yapılmadan, sadece yüzeyler yağdan arındırılmış halde sürtünme katsayısı belirlenmiştir.
- Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu birleşimlerde, hem alüminyum ve hem de galvanizli çelik temas yüzeyleri yağdan arındırıldıktan sonra, alkali silikat çinko boya ile boyanmış halde sürtünme katsayısı belirlenmiştir.
- Yukarıda belirtilen iki farklı temas yüzeyi haline ait yük-yerdeğiştirme diyagramları, kayma yükü ve sonrasında kopma haline kadar incelenmiştir.
- Bulonlara öngerilme kuvveti verildikten sonra deneylere başlamadan önce 30 dakika boyunca, öngerilme kuvvetindeki azalma araştırılmıştır.
- Deney sırasında deney başladıktan sonra yük altında bulonlardaki öngerilme kuvvetindeki değişim araştırılmıştır.
- Öngerilme kuvvetinde anlık düşüş olup olmadığı araştırılmıştır.
- Uzun süreli kayma deneyleri ile uzun süreli sabit yüklemeye etkisinde bulonların sürtünme ile aktarabildiği kuvvet araştırılmıştır.

Deney programı

Çelik elemanların birleşiminde Valtinat ve diğerleri (1993, 2001) tarafından uygulanan yöntem, araştırmada alüminyum ve çelik iki farklı mal-

zemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar ile birleşimi durumu için incelenmiştir. Sürtünme ile birleşimin yük aktarması durumunda davranışı araştırmak için kısa süreli kayma deneyleri ve uzun süreli kayma deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneyler ve sonuçları aşağıda sırasıyla anlatılacaktır.

Deneylerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de verilmiştir (DIN 4113, 1980; DIN 4113, 1993).

Tablo 1. Alüminyum malzeme listesi

Malzeme	Boyutlar
AlMgSi1 (Anticorodal 110), (6082)	400x80x9.7
AlMgSi1 (Anticorodal 110), (6082)	400x80x8.0
AlZn4.5Mg1 (Unidur-102), (7020)	400x80x5.0
AlZn4.5Mg1 (Unidur-102), (7020)	400x80x10
AlMgSi0.5, (6063)	400x80x5.0

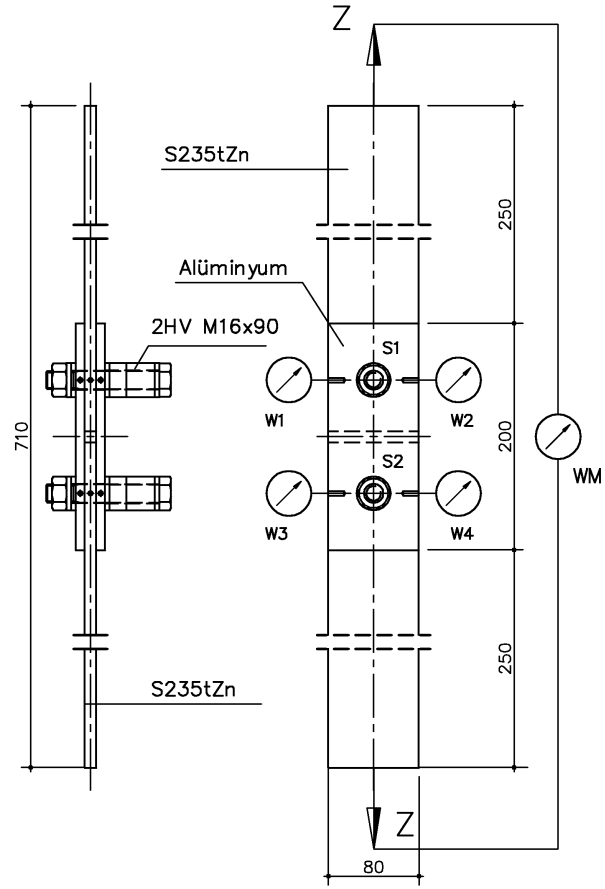
Deneyde kullanılan bütün alüminyum malzeme 80 x kalınlık x 200 boyutlarında olacak şekilde hazırlanmıştır.

Kısa süreli kayma deneyleri

Kısa süreli deneyler ile, birleşimin temas yüzeyinde sürtünme katsayısı ve öngerilme kuvvetindeki değişim belirlenmiştir.

Deneyde kullanılan birleşim, bir adet çelik ve iki adet alüminyum lamadan oluşmaktadır. Birleşim elemanları öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlardır. Bütün deney numuneleri aynı boyuttadır. Sadece alüminyum levhalarda, levha kalınlığı ve malzeme alaşımı farklılık göstermektedir. Böylece malzeme cinsinin farklılığı ve kalınlık değişiminin etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. Her bir numunede iki adet HV M16 öngerilmeli yüksek mukavemetli bulon kullanılmıştır. Birleşim ortasında kullanılan çelik levhanın kalınlığı 10 mm’dir. Numunenin her iki tarafında öngerilmeli bulonlarla aynı hizada yer değiştirme ölçümleri yapmak için yer değiştirme ölçerler kullanılmıştır. Birleşim elemanı ile levhalar arasındaki 1 mm’lik boşluk, yüklenme sırasında kayma kapasitesinin aşılması ile oluşacak hareketin gözlemlenebilmesi için yüklenme doğrultusuna ters yönde olacak biçimde

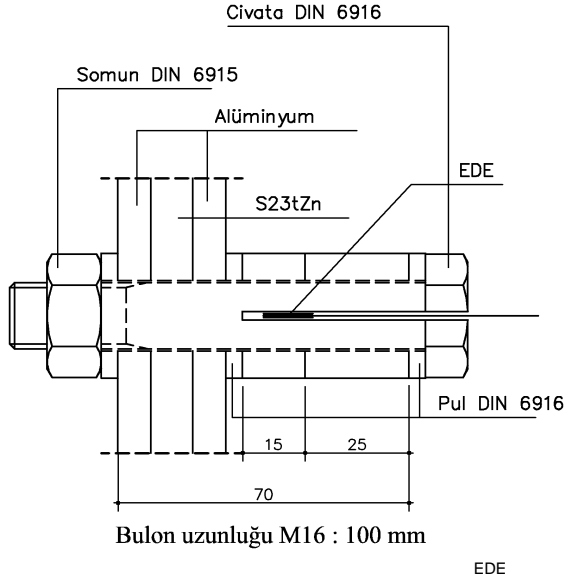
düzenlenmiştir. Şekil 1’de numunenin boyutları gösterilmiştir.



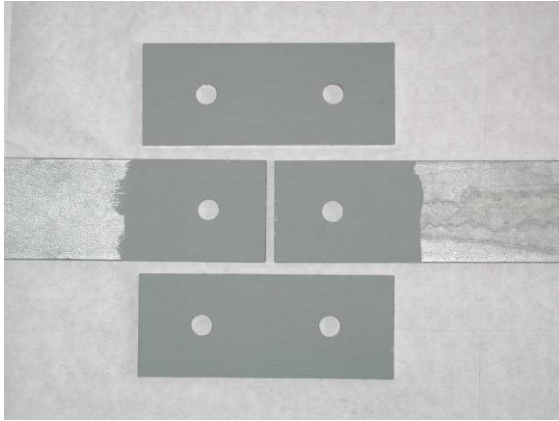
Şekil 1. Kısa süreli deney sistemi

Öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlar DIN 6914 (1989), 6915 (1989) ve 6916 (1989)’ya uygundur. Galvanizli olarak Peiner (Textron) GmbH tarafından üretilmiş 10.9 kalitesinde M16 boyutlarında öngerilmeli bulonlar kullanılmıştır. Bulonların öngerilme kuvvetinin ölçülebilmesi için, bulon merkezine 2 mm çapında bir delik açılmak suretiyle HBM GmbH tarafından üretilmiş 12 mm uzunluğundaki elektriksel dirençli ekstansometre (EDE) kullanılmıştır. Bulonlar hazırlandıktan sonra ayrıca kalibrasyonu yapılmıştır. Hazırlanan bulon Şekil 2’de görülmektedir.

Deneylerde kullanılan birleşim yüzeyleri iki şekilde hazırlanmıştır. Bunlardan birincisinde yüzeylere herhangi bir işlem yapılmamış ve sadece yağdan arındırılıp galvanizli olarak kullanılmıştır. İkinci şekilde ise yüzey temizlendikten sonra alkali silikat çinko boya ile boyanmıştır (Şekil 3).



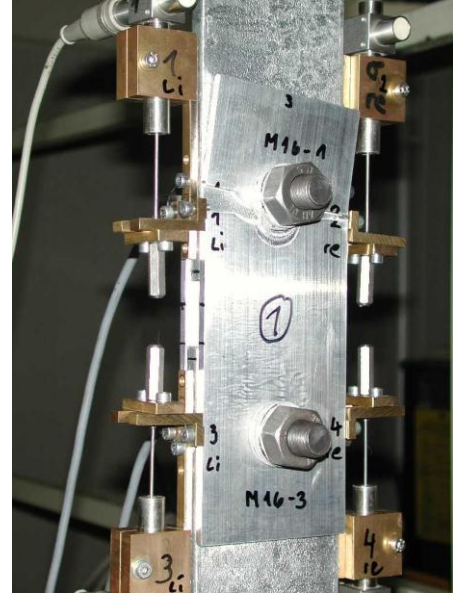
Şekil 2. M16 ölçme bulonu



Şekil 3. Sürtünme yüzeyleri alkali silikat çinko ile boyanmış alüminyum ve çelik elemanlar

Sürtünme yüzeylerinin hazırlanışını tariflemeye sadece yağdan arındırılmış ve herhangi başka işlem yapılmamış durumu, p ise alkali silikat çinko boya ile boyanmış hali ifade eder. Bütün numunelerde M16 HVM16 DIN 6914 (1989) kullanılmıştır. Şekil 4, deney numunesinin deney sonundaki fotoğrafını göstermektedir.

Yapılan deneylerden o anda ölçülen değerler ile aşağıda tanımlanan R gerçek sürtünme katsayısı ile irdelenmiştir. R, gerçek sürtünme katsayısı, $R = Z/(2 \times (S_1))$ olarak hesaplanmıştır. Burada; Z, deney numunesine o an etkiyen yükü, S_1 ise numunenin değerlendirilen yarısında bulonda o an ölçülen öngerilme kuvvetini belirtir.



Şekil 4. Deney sonunda kısa süreli kayma deneyi numunesinde enkesitte çekme kopması

Uluslararası çalışmalarda kabul gören 0.15 mm'lik parçalar arasındaki bağıl yerdeğiştirme durumunda elde edilen anlık sürtünme katsayısı değeri, μ_{st} , birleşimin sürtünme katsayısı olarak değerlendirilmiştir.

Deney sonuçları; numune boyutları, temas yüzeyinin hazırlanışı, alüminyum levhaların kalınlığı ve alüminyum malzemenin özelliği, uygulanan öngerilme kuvveti de dikkate alınarak sonuçlar aşağıdaki Tablo 2 ve Tablo 3'te özetlenmiştir.

Deneylerin ilk kısmında; 30 dakika süre ile bulonda öngerilme kuvvetindeki azalma araştırılmıştır. Bu şekilde alüminyumun elastisite modülünün çeliğe göre azlığı ve alüminyumun yüksek gerilme halinde sünmeye eğiliminin bulona öngerilme kuvveti verildikten sonra öngerilme kuvvetindeki değişime etkisi incelenmiştir.

Bu tür bir ölçümün daha uzun süreli yapılması daha gerçekçi sonuçlar verecek olmasına rağmen, bugüne kadar yapılan araştırmalardan gözlemlenen, bulon öngerilme kuvvetindeki azalmanın ilk 10 dakikalık sürede gerçekleştiğini göstermektedir. En fazla öngerilme kuvvetinin ilk 30 dakikada azalacağı düşünülmüş ve ölçüm

buna uygun olarak yapılmıştır. Bu ölçümlerde öngerilme kuvvetinde meydana gelen değişikliğin kabul edilebilir sınırlar arasında kaldığı gözlenmiştir.

Tablo 2 Kısa süreli deney listesi

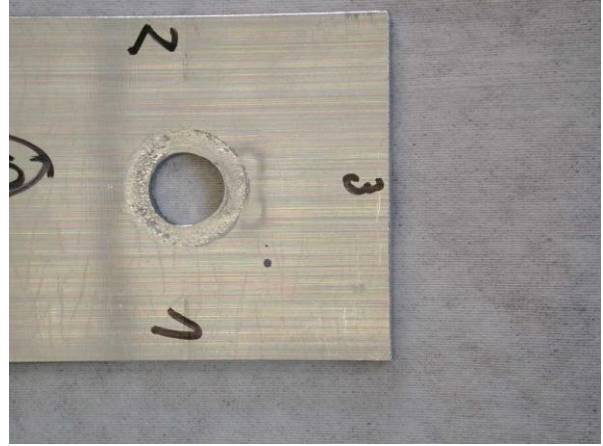
Test No.	t [mm]	glz/ p	F _v	Mat. No.
1-2	5	glz*	100	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
2-2	5	glz	100	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
3-2	5	glz	100	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
4-2	5	glz	100	[5] AlMgSi0.5
5-2	5	glz	80	[5] AlMgSi0.5
6-2	5	p*	75	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
7-2	5	p	75	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
8-2	5	p	75	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
9-2	5	p	50	[5] AlMgSi0.5
10-2	5	p	50	[5] AlMgSi0.5
11-2	10	p	75	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
12-2	10	p	75	[3] AlZn4.5Mg1 (Unidur 102)
13-2	9.7	p	75	[1] AlMgSi1 (Anticorodal 110)
14-2	9.7	p	75	[1] AlMgSi1 (Anticorodal 110)

glz: galvanizli, p: boya uygulanmış

Tablo 3 Kısa süreli deney sonuçları

Test No.	Gerçek sürtünme yerdeğiştirme [150 µm]	
	üst	alt
1-2	0.18	0.19
2-2	0.22	0.24
3-2	0.17	0.21
4-2	0.37	0.31
5-2	0.34	0.37
6-2	0.58	0.58
7-2	0.61	0.62
8-2	0.55	0.59
9-2	0.66	0.68
10-2	0.69	0.69
11-2	0.68	0.70
12-2	0.66	0.68
13-2	0.65	0.73
14-2	0.64	0.66

Birleşim elemanlarının ayrılmasından sonra, alüminyum (AlMgSi0.5) yüzeyindeki bulonda kullanılan pulun altında ezilme olduğu gözlenmiştir (Şekil 5). Bu tür bir ezilme, genelde alüminyum kayma kritik birleşimlerde görülür. Birleşimde daha büyük ve kalın pul kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür.



Şekil 5. Alüminyum malzeme yüzeyinde oluşan ezilme

Kayma deneylerinde toplam dokuz farklı veri okunmuştur. Bunlar; zaman, deney numunesinde çekme kuvveti, test cihazındaki yer değiştirme, iki bulona ait öngerilme kuvveti, ikisi üst diğer ikisi alt olmak üzere, toplam dört adet alüminyum ve çelik lamalar arasındaki yer değiştirmedir.

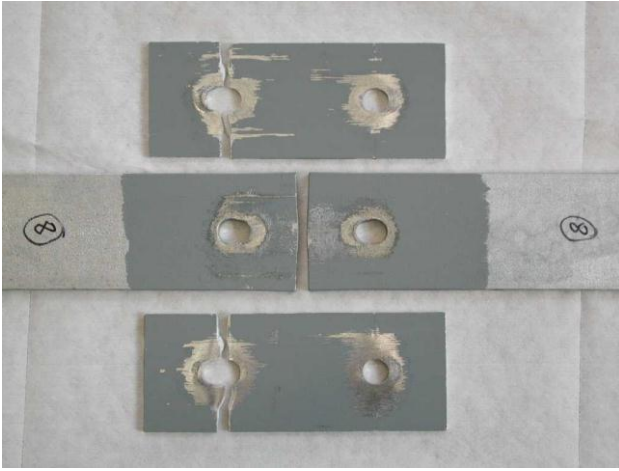
Şekil 6 ve 7'de 5.0 mm kalınlığında alüminyum lamaların kullanıldığı numunedeki sürtünme yüzeyleri, 10.0 mm'lik alüminyum elemanlardaki sürtünme yüzeylerine göre daha küçüktür. Şekillerden ayrıca numunelerin tipik göçme durumları da açıktır. Alkali-silikat çinko boya uygulanmış her yüzeydeki görünüm birbirine yakındır. Sürtünme ile yükün aktarıldığı yüzeylerde boya toz haline gelmiştir.

Uzun süreli birleşim deneyleri

Uzun süreli deneylerde sürtünme ile yük aktaran numunelerin, sürekli olarak etkiyen sabit yük altında davranışı incelenmiştir.

Deney numuneleri ardışık olarak birbirlerine bağlanmış ve sürekli olarak numunelerin belirli

bir kuvvet altında kalması için yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Çerçeve sistemi Şekil 8’de görülmektedir (Valtinat vd., 1993). Deneylerde üç adet yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Herbir çerçeveye beş adet numune yerleştirilmiştir. Çerçeveye ilk yükleme, bir hidrolik veren aracılığıyla yapılmış sonrasında EDE ile hazırlanmış M30 şaft ile ölçülmüştür. M30 şaft, ölçüm bulonlarında olduğu gibi kalibre edilmiştir. Çerçeve yükleri, üç çerçeve için farklı olarak seçilmiştir. Elde edilen statik yükleme deney sonuçlarına bağlı olarak uzun süreli çerçeve yükleri, deney numunelerinde μ_{st} ’nin %75, %65 ve %50’i olacak şekilde, $P_{C1}=90$ kN, $P_{C2}=78$ kN ve $P_{C3}=60$ kN olarak seçilmiştir. Herbir çerçevede kullanılan levha kalınlığı, alaşımı ve sürtünme yüzeyinin yükleme oranı Tablo 4’te verilmiştir.



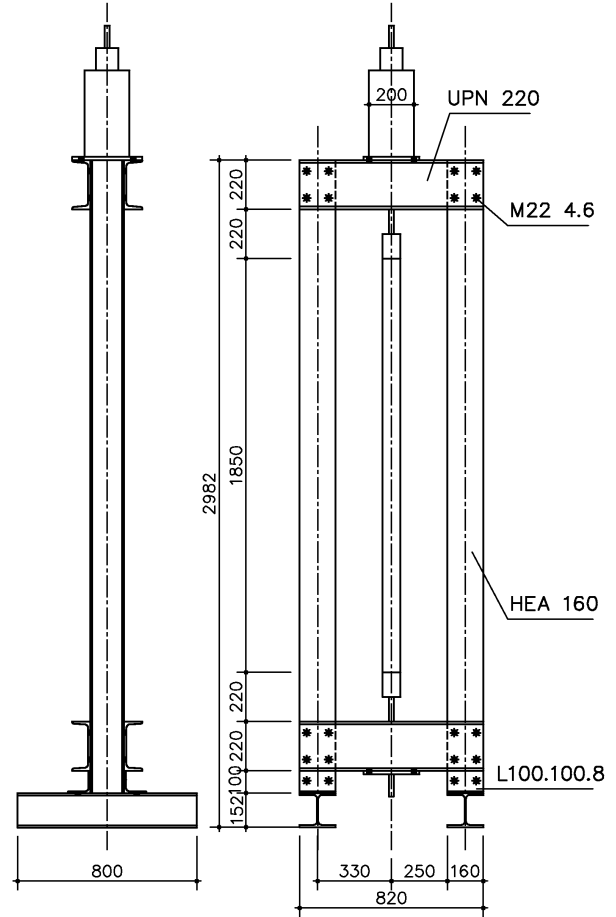
Şekil 6. Deney sonrasında sürtünme yüzeyleri ve alüminyumda çekme kopması ($t_{Al}=5.0$ mm)



Şekil 7. Deney sonucunda çelikte kayma sonucu kopma ($t_{Al}=10.0$ mm)

Uzun süreli deneylerde sürtünme yüzeyinin hazırlanmasında sadece alkali silikat çinko boya kullanılmıştır. Deneylerde kalınlık etkisi temas

yüzeylerinde zaman içerisinde kaymaya sebep olmuştur. Gözlenen bu olay, kalınlığın azalması ile daha kısa sürede meydana gelmiştir. Uzun süreli deney sonuçlarının irdelenmesinde daha önce literatürde rastlanmayan sabit aralıklı ayırıklaştırma uygulanmak suretiyle 50 yılsonundaki davranış tahmin edilmiştir.



Şekil 8. Uzun süreli yükleme çerçevesi

Değerlendirme için maksimum yerdeğıştirme sınırı $v_{lim}=0.30$ mm ve maksimum zaman sınırı $t_{lim}=50$ yıl alınmıştır.

Herbir deney numunesi için toplam dört adet saatten okuma yapılmış ve bir bulon hizasındaki iki yerdeğıştirme saatinden elde edilen okumaların ortalaması alınmıştır. Sürtünme katsayısının hesabında, birleşimde o anki öngerilme kuvveti dikkate alınmıştır.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sistemde kayma gözlemlenmemiş ise regresyon

analizi yapılmıştır. Burada analiz sırasında dik- kat edilmesi gereken, okumaların deney süresi- ne bağlı olarak azalmasıdır. Bu ise regresyon analizinde başlangıçta yapılan okumaların çok- luğu sebebiyle yanlış ve gerçekten uzak sonuç- lar vermektedir. Bu sebeple, deney verisi sabit zaman aralıklı deney verisi haline getirilmiş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 4. Uzun süreli deney özeti

no.	Numune		μ_{st}	R		yükl. ora- mı	
	mat	t [mm]		8.76h	0.001 yıl		
1	AlMgSi1	9.7	0.625	0.459	0.73		
1	AlMgSi1	9.7	0.625	0.461	0.74		
2	AlMgSi1	9.7	0.625	0.459	0.73		
2	AlMgSi1	9.7	0.625	0.460	0.74		
3	AlMgSi1	8.0	0.625	0.463	0.74		
3	AlMgSi1	8.0	0.625	0.465	0.74		
4	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.455	0.73		
4	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.456	0.73		
5	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.457	0.73		
5	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.460	0.74		
6	AlMgSi1	8.0	0.625	0.395	0.63		
6	AlMgSi1	8.0	0.625	0.393	0.63		
7	AlMgSi1	8.0	0.625	0.399	0.64		
7	AlMgSi1	8.0	0.625	0.392	0.63		
8	AlZn4.5Mg1	5.0	0.550	0.386	0.70		
8	AlZn4.5Mg1	5.0	0.550	0.454	0.83		
9	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.389	0.62		
9	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.391	0.63		
10	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.390	0.62		
10	AlZn4.5Mg1	10.0	0.625	0.387	0.62		
11	AlMgSi1	9.7	0.625	0.299	0.48		
11	AlMgSi1	9.7	0.625	0.302	0.48		
12	AlMgSi1	8.0	0.625	0.298	0.48		
12	AlMgSi1	8.0	0.625	0.303	0.48		
13	AlMgSi1	8.0	0.625	0.302	0.48		
13	AlMgSi1	8.0	0.625	0.305	0.49		
14	AlZn4.5Mg1	5.0	0.550	0.303	0.55		
14	AlZn4.5Mg1	5.0	0.550	0.301	0.55		
15	AlZn4.5Mg1	5.0	0.550	0.302	0.55		
15	AlZn4.5Mg1	5.0	0.550	0.304	0.55		

Numunelerde kullanılan farklı kalınlıktaki alü- minyum lamalarda, kayma halinde sürtünme katsayısı, daha ince olan alüminyum lamalarda daha düşüktür. Bulona verilen öngerilme ince

lamalarda daha küçük bir yüzeyden sürtünme kuvvetinin aktarılmasını sağlar. Bu ise, ince la- maların uzun süreli yük etkisinde sürtünme ile taşıyabileceği yükün daha az olduğunu gösterir.

Alüminyum levha kalınlığı 10 mm olan numu- neler için Ç3 çerçevesinde, bir yıl sonunda yapı- lan değerlendirmede, yerdeğiştirmenin 50 yıl içerisinde 0.30 mm'lik kayma sınırı içerisinde kaldığı gözlenmiştir.

Sonuçlar

Bu araştırma ile alüminyum ve çelik iki farklı malzemenin öngerilmeli yüksek mukavemetli sürtünme ile yük aktaran birleşimi deneysel ola- rak incelenmiştir. Bu tür birleşimin ekonomik olarak oluşturulması için sürtünme artırıcı alka- li silikat çinko boyanın gerekliliği yapılan kısa ve uzun süreli deneylerle gösterilmiştir. Deney- lerden alınan sonuçlar ile birleşimlerin davranışı ve hesabında kullanılacak katsayılar belirlen- miştir.

Kısa süreli deneylerde yüklemeye başlamadan önce, bulonlara verilen öngerilme kuvveti 30 dakika boyunca gözlenmiş ve öngerilme kuvve- tindeki azalmanın, kuvvetin %10'undan daha az olduğu ve öngerilme kuvvetinde büyük değişim- ler olmadığı gözlenmiştir. Kısa süreli deneyler sırasında, öngerilme kuvvetinde zaman içerisin- de alüminyum malzemenin sünme özelliğinden dolayı büyük bir azalma gözlemlenmemiştir. Sürtünme artırıcı alkali silikat çinko boya kul- lanılması durumunda bir bulonun sürtünme ile aktarabildiği kuvvet yaklaşık olarak 3.5 kat daha fazladır. Kısa süreli deneylerde sürtünme katsa- yısına kalınlığın azaltıcı etkisi gözlemlenmemiştir. Alüminyum levha kalınlığı 10 mm olan nu- muneler bir yıl sonunda yapılan değerlendirme ile elli yıl içerisinde 0.30 mm'lik kayma sınırı içerisinde kalmaktadır. Kalınlığa bağlı olarak birleşimin uzun süreli yükler altında sürtünme ile yük aktarabileceği gösterilmiştir.

Konu ile ilgili ileride dinamik yükleme duru- munda öngerilmeli yüksek mukavemetli bulonlu alüminyum ve çelik iki farklı malzemenin birleşim deneylerinin yapılması düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazar, bu araştırmanın deneysel ve teorik kısmı için, Technische Universitaet Hamburg-Harburg'da bulunduğu süre zarfında ve sonrasında Prof. Dr. G. Valtinat'a, yürütücülüğünde çalıştığı araştırma projesi verilerini İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora tezi olarak kullanmasına izin verdiği ve kendisine kaldığı süre zarfında sağladığı burs dolayısıyla teşekkürü bir borç bilir.

Kaynaklar

Coelho, R.S., Kostka, A., Sheikhi, S., dos Santos, J.F. ve Pyzalla, A.R., (2008). Microstructure and mechanical properties of an AA6181-T4 aluminium alloy to HC340LA high strength steel friction stir overlap weld, *Advanced Engineering Materials*, **10**, 961-972, Weinheim.

DIN 4113, (1980). Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 1, Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN 4113, (1993). Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung, Teil 2, Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN 6914, (1989). Sechskantschrauben mit großen Schlüsselweiten für HV-Schrauben in Stahlkonstruktionen, Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN 6915, (1989). Sechskantmuttern mit großen Schlüsselweiten für HV-Schrauben in Stahlkon-

struktionen, Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN 6916, (1989). Scheiben, rund für HV-Schrauben in Stahlkonstruktionen Deutsches Institut für Normung, Berlin.

Fortin, D., Beaulieu, D. ve Bastien, J., (2001). Experimental investigation of aluminum friction-type connections, The 8th INALCO, Munich.

Panait, A., He, Q.C., Bary, B., Cossavella, M. ve Morcant, K., (2007). A coupled experimental and numerical approach to the integrity of friction-grip connections in glass structures, *Engineering Failure Analysis*, **14**, 23-35, Amsterdam.

Valtinat, G., (1993). Stahlbau handbuch, Band 1 /T1, Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH, Köln.

Valtinat, G., Albrecht, F. ve Dangelmaier, P., (1993). Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwert erhöhenden Maßnahmen- Teil 1 und Teil 2, TUHH Schriftenreihe, Heft 3, Hamburg.

Valtinat, G., Karaman, S.G. ve Petersen, S., (2001). Bolted connections of aluminium members with steel members, 8th INALCO 2001, International Conference on Aluminium Constructions, Munich.

Yamada, T. ve Tadao, N., (2001). Experimental study on the way of surface treatment of friction joints with high-strength bolts in aluminum alloy structure, the 8th INALCO, Munich.