

624.131.439.5

K 15 K

1996-3644



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURULU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

KAMA KESME DENEYİNİN

DOLGU BARAJ VE DİĞER YAPILARIN

ZEMİN DAYANIMIYLA İLGİLİ SORUNLARINA

UYGULANMASI

PROJE NO : INTAG - 702

İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu

Construction Technologies Research Grant Committee

TÜRKİYE GİLİMSEL ve
TEKNİK MÜJDE TİCİMA
KURUMU KÜTÜPHANESİ

624.131.439.5

K 15 k

1996 - 3644

KAMA KESME DENEYİNİN
DOLGU BARAJ VE DİĞER YAPILARIN
ZEMİN DAYANIMIYLA İLGİLİ SORUNLARINA
UYGULANMASI

PROJE NO : INTAG - 702

PROF.DR.TÜRKER MİRATA

DR.HASAN TOSUN

İSMAIL USTA

ZEYNEP YÜNGÜL

ODTÜ Müh. F.
Inşaat Müh. B.

S-82

R-42

Tr. En

MAYIS 1993

Başarı, 1993
17258

Ö N S Ö Z

İlk denemeleri 1971 yılında yapılmış olan yerinde kama kesme deneyinin geliştirilme çalışmaları, 1972-1975 yılları arasında Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'ncu desteklenmiştir. Bu deneyin, 1974 yılında uluslararası bir dergide yayımlanmasını izleyen yıllarda, İtalya'da bir araştırmacı, aynı deneyi sert kilden, siltli kuma, kumlu çakıla kadar değişik zeminlerde, en az 76 kez uygulamış, bilinen laboratuvar yöntemleriyle uyumlu sonuçlar verdiği göstermiş, deneyin "son derece basit" olduğunu vurgulamıştır.

Bu arada, kama kesme deneyinin ülkemizdeki gelişimi sürdürüş, taşınabilir bir çerçeve yardımıyla, birisi silindirsel örnekler üzerinde, diğer 38 mm'ye kadar taneler içeren çakıl ve kırılmış kayada uygulanabilen iki yeni biçimini geliştirmiştir, bunlar da 1991 Martında, aynı uluslararası dergide yayımlanmıştır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün işbirliği ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun desteğiyle gerçekleştirilen şimdiki projenin amacı, kama kesme deneyinin her üç biçimini ile ülkemizde de, özellikle dolgu barajları ile ilgili zemin dayanımı sorunlarının çözümünde kullanılmaya başlamasını sağlamaktır.

Yazarlar, projenin her aşamasında yardımları dokunan herkese, özellikle çalışmalar sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanı Doç.Dr.Ergün Demiröz'e en içten teşekkür borç bilir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	2
ÖZ	5
ABSTRACT	6
1. GİRİŞ	8
2. KAMA KESME DENEYİNDEKİ GELİŞMELER	11
2.1 Gelişmelerin Özeti	11
2.2 Aygıtlar ve Deney Yöntemi	12
2.2.1 Silindirsel Kama Kesme Deneyi	12
2.2.2 Yanal Yük Uygulanarak Yapılan Yerinde Kama Kesme Deneyi	16
2.2.3 Prizmatik Kama Kesme Deneyi	17
2.3 Hesaplamalar	20
2.3.1 Gerilme ve Ötelenmelerin Hesabı	20
2.3.2 Dikey Gerilmeyi En Yüksek Dayanımdaki Değer Dolayında Tutmak İçin Gerekli Yanal Yükün Hesabı	27
2.3.3 Gerekebilen Değişik Hesaplamalar	29
2.3.4 Bilgisayar Kullanımı	30
3. KAMA KESME DENEYİNİN SINANMASI	31
3.1 Genel Bilgiler	31
3.2 Yerinde Kama Kesme Deneyi	31
3.3 Silindirsel Kama Kesme Deneyi	33
3.4 Prizmatik Kama Kesme Deneyi	34

	Sayfa
4. KAMA KESME DENEYİNİN DOLGU BARAJ VE DİĞER YAPILARIN ZEMİN DAYANIMI SORUNLARINA UYGULANMASI OLANAKLARI	37
4.1 Kaya Dolgu Barajlar, Yol Dolguları	37
4.2 Kıl Dolguların Kısa Süreli Dengeliliği, Sıkıştırma Denetimi	39
4.3 Kılçal Çatlıaklı ya da Taşlı Killerde, Siltli Çakılıda Şev Dengeliliği ve Taşıma Gücü	40
4.4 Kama Kesme Deneyinde Ölçülen Kalıntı Dayanım	41
4.5 Suya Doymamış Killerde Şevlerin Uzun Süreli Dengeliliği	42
5. SONUÇ	42
KAYNAKLAR	44
ÇİZELGE 1	49
ŞEKİLLER	50
EK 1. SİLİNDİRSEL KAMA KESME DENEYİNİN AYRINTILI DEĞERLENDİRMESİ İÇİN DENKLEMLER	71
(a) Düzeltilmiş Kesme Düzlemi Alanı	71
(b) Dikey Gerilmenin Kesme Düzlemi Boyunca Dağılımını	72
(c) Deney Kalıbı ve Zemin Kamasının Ağırlık Merkezi Koordinatları	74
EK 2. MOMENT DENKLEMLERİ	75
(a) Analiz A ve B için	75
(b) Analiz C için	76
EK 3. \bar{u} , \bar{v} VE β 'İNİN ARDIŞIK YAKLAŞIKLIKLARLA ÇÖZÜMÜ	77
EK 4. $\overline{A} \overline{B}$ ve α 'NİN ÇÖZÜMÜ	79
EK 5. ŞEKİL 11'DEKİ EĞRİLERİN ELDE EDİLİŞİ	80
SİMGELERİN TANIM DİZİNİ	81
BİBLİOGRAFİK BİLGİ FORMU	83

Ö Z

Yerinde kama kesme deneyi, suya doymamış killerin belirli bir düzlemdeki kayma dayanımını, kılcal çatlakların etkisini yeterli biçimde yansıtacak ve varsa taşlardan etkilenmeyecek büyülükté bir alan boyunca ölçmek için, yerinde, büyük boyutlu kesme kutusu deneyi yapmaktan daha basit bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Eylül 1974'te uluslararası Géotechnique dergisinde yayımlandıktan sonra İtalya'da bir araştırmacı tarafından da güvenilriği ve basitliği doğrulanın bu deney, son 14 yıl içinde, yüksek kesme ötelenmelerindeki dayanımın en yüksek dayanımdaki dikey gerilmeler dolayında ölçümesini sağlayacak biçimde geliştirilmiştir; sondaj kuyularından alınan silindirsel zemin örnekleri üzerinde, laboratuvara ya da basit, taşınabilir bir çerçeveye yardımıyla, arazide uygulanabilecek biçimde uyarlanmış; sıkıştırılmış zeminlerin, sıkıştırıldıktarı kalıptan çıkarılmadan denenmelerini sağlayan bir kalıp geliştirilmiştir; 38 mm'ye kadar taneler içeren çakıl, kırılmış kaya ya da kılıç kayma dayanımını ölçmekte kullanılabilen kolay taşınabilir bir düzenek geliştirilmiştir; bu gelişmelerin ayrıntıları da Géotechnique'in Mart 1991 sayısında yayımlanmıştır. Bu projenin amacı, kama kesme deneyinin her üç biçiminin de, dolgu baraj ve diğer yapıların zemin dayanımıyla ilgili sorunlarının çözümünde kullanılmaya başlamasını sağlamaktır. Bu raporda, anılan gelişmeler aktarılmakta; değişik deney biçimlerinin sınınaması için bugüne kadar yapılmış olan çalışmaların bulguları özetlenmekte; proje kapsamında, deneyin bir biçimi için Devlet Su İşleri Laboratuvarlarında, 0.19 m çapında 0.38 m yüksekliğinde örnekler kullanılarak yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla yapılan karşılaştırmalar sunulmakta; bugüne kadarki uygulamalarından esinlenerek, kaya dolgu baraj ve yol dolgularının, kıl-

dolguların, suya doymamış, çatlaklı ya da ıri taneler içeren killerin kayma dayanımıyla ilgi sorunlarının çözümünde, kama kesme deneyinin değişik biçimlerinden nasıl yararlanılabileceği açıklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler : çakıl, laboratuvar düzeneği, kesme deneyi, kil, suya doymamış, yerinde deney.

ABSTRACT

The in situ wedge shear test was developed as a simpler test for unsaturated clays than the in situ large shear box test, for measuring the shear strength along prescribed planes on an area large enough to reflect the effect of fissures adequately and to be free from the effects of any stones. After this test was published in the September 1974 issue of Géotechnique, its reliability and simplicity was verified also by a researcher in Italy. In the past 14 years, this test has been developed to enable the shear strength at large strains to be measured over about the same range of normal stresses as at peak strength; the test was adapted to enable cylindrical samples recovered from boreholes to be tested in the laboratory or by the use of a simple, portable frame, in the field; a test mould was developed to enable the soil to be tested in the same mould in which it has been compacted; a portable set-up was devised for testing gravel, crushed rock, or clay, containing particles up to 38 mm; and the details of these developments were published in the March 1991 issue of Géotechnique. The aim of this project was to initiate the application of all three versions of the wedge shear test to the solution of the soil strength problems of embankment dams and other structures. In this report, the mentioned developments are quoted; the findings of studies carried out so far for testing the reliability of the different versions of the test are

summarized; the results of tests performed at the Laboratories of State Hydraulic Works of Turkey, as part of this project, for comparing the results of one version of the test with those of triaxial tests on 0.19 m diameter by 0.38 m high samples are presented; and, based on the previous applications of the test, it is explained how different versions of the wedge shear test can be used in the solution of problems involving the shear strength of rockfill embankments, clay fills, and unsaturated, fissured and/or stony clays.

Keywords : clays, field tests, gravel, laboratory equipment, partial saturation, shear tests.

1. GİRİŞ

Yerinde kama kesme deneyi (Mirata, 1973,1974,1977 (a),1978), kılcal çatıtlaklı ya da iri taneler içeren suya doymamış killerin drenajsız kayma dayanımını, olağan laboratuvar deneylerinden daha büyük bir alan boyunca, yerinde ölçmek için, büyük boyutlu kesme kutusu deneyinden daha basit bir deney gereksiniminden doğmuştu.

Bu deneyin ilkesi, Şekil 1'de gösterilmiştir. Zemin kamاسının üzerine 10 mm'lik çelik sacdan yapılmış bir deney kalıbı (DK) geçirilir. Yük, tek bir hidrolik kriko (HK) ile uygulanır ve aralarında otuz tane 12 mm çaplı çelik bilye taşıyan bir kafes (BK) bulunan oluklu iki plaka (LP1 ve LP2) aracılığıyla deney kalıbına ulaşır. Kriko için gerekli tepki, kriko ile arasında tek bir bilye (TB) bulunan bir tepki plakası (TP) ile sağlanır. Uygulanan P yükü, sayısal bir yükölçer (YO) yardımıyla ölçülür. Değişik deneylerde, kalının α_n açısı değiştirilerek, kayma dayanımının dikey gerilmeye oranı, suya doymamış bir kıl için değiştirilebilmekte, böylece bir kayma dayanımı zarfı elde edilebilmektedir. Deney, dik bir yarmadaki olası şev kayması probleminin bir tür modellemesi olduğu için, deneyde dayanımın ölçüldüğü dikey gerilmeler, incelenen zemindeki kritik bir şevdekiler düzeyinde değişmektedir (Mirata, 1974). Deney, iki kişi tarafından toplam ağırlığı 85 kg'ı geçmeyen aygıtlar kullanılarak, dört ile altı saat arasında değişen bir sürede gerçekleştirilebilir, 1 m çapındaki bir deney çukurunda bile rahatlıkla uygulanabilir. Deneyim arttıkça, kişi sayısı da, deney süresi de azaltılabilir.

Sert, kılcal çatlaklı, suya doymamış Ankara Kılinde, kazıdan kısa süre sonra kaymış üç şev üzerinde başarılı bir biçimde denenmiş (Mirata, 1973, 1974) ve küçük laboratuvar örnekleri üzerinde yapılan deneylerden daha güvenilir ve daha tutarlı sonuçlar verdiği gösterilmiş (Mirata, 1976, 1977(a), 1977(b), 1978, 1979(a), 1980(a)) olan bu deney, bağımsız bir araştırmacı tarafından killerden, siltli kumlara, siltli çakıla kadar değişik zeminler üzerinde denenmiştir (Cascini, 1980, 1983, 1985, 1992). Bu araştırmacı, ince tanelli zeminlerde yerinde uygulanan deneyler ile 60 mm x 60 mm'lik (Cascini, 1988) kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri arasında çok iyi bir uyum, siltli çakılda yerinde uygulanan deney sonuçları ile aynı yerdeki dik yarmalar arasında tutarlılık olduğunu belirtmekte, tek kişisinin 10 saatte dört deney gerçekleştirdiğini anlatmakta, deneyin son derece basit olduğunu vurgulamaktadır.

Kama kesme deneyi, son 14 yılda, taşınabilir bir çerçeve yardımıyla laboratuvara ya da arazide, silindirsel ya da prizmatik örnekler üzerinde ve çakılı, kırılmış kaya gibi tanelli zeminlerde de uygulanacak biçimde geliştirilmiştir (Mirata 1979(b), 1980(b), 1981, 1990, 1991, 1992(b)).

Bu projenin amacı, kama kesme deneyinin her üç biçimile ülkemizde de, özellikle dolgu barajlarla ilgili zemin dayanımı sorunlarının çözümünde kullanılmaya başlamasını sağlamaktı. Bu amaç doğrultusunda şu çalışmalar yapılmıştır:

(a) Yurtdışından getirilen bir hidrolik kriko, bir yük ölçme halkası, yaylı kantar ve ötelenme ölçerler; yurtçi firmalara yaptırılan 15 ton kapasiteli sayısal bir yükölçer ve 800 kgf kapasiteli bir basınçlı hava pistonu bir de deney sırasında krikoyu kaydırma yarayan (zorunlu olmayan) düzenek (Şekil 1) ile

proje süresince deneme aşamasında olan prizmatik kama kesme deneyinin 20 ton kapasiteli çerçevesi ve gerekli diğer parçalar dışında, burada anlatılan aygıtların tümü, gerekli çizimler ve ODTÜ'deki örnekleri sağlanarak, DSİ Atelyelerinde üretilmiştir.

(b) Belirli aygıtların kullanılacağı varsayımlı yazılmış iki ayrı bilgisayar programı, genel kullanımına elverişli duruma getirilmiş, kişisel bilgisayar için uyarlanmış, aynı zamanda deney formu olarak kullanılan bilgisayar veri formu ve bilgisayar çıktılarıyla ilgili iki ayrı kılavuz hazırlanmıştır (Mirata, 1993(b), 1993(c)).

(c) Bilgisayara erişilemediği durumlarda çoğu uygulama amaçları için yeterli doğrulukta sonuçları veren, deneyin basit değerlendirmesi için, bir de yüksek kesme ötelenmelerindeki dayanım ölçümek istendiğinde, díkey gerilmeyi en yüksek dayanımdaki değer dolayında tutmakta gereken hesaplamalar için programlanabilir hesap makinesi programları düzenlenmiştir (Mirata, 1993(a)).

(d) Deneyin ilk biçimini için gerekli bilgiler, önceki bir raporda verilmiştir (Mirata, 1977(a)). Yerinde yapılacak deneylerdeki yeni uygulamalar ve deneyin iki yeni biçimini için deney yönergeleri hazırlanmıştır (Mirata, 1993(d), 1993(e)).

(e) Bu raporda anahatlarıyla açıklanan aygıtların ayrıntılı çizimlerini ve bunlarla ilgili açıklamaları içeren bir rapor tamamlanmak üzeredir (Mirata, 1993(f)).

(f) Kama kesme deneyiyle ilgili kimi sorunlar, bir yandan ODTÜ'de, diğer yandan DSİ'de sürdürülen araştırmalarla açılığa kavuşturulmuştur. İlk Yazının yönetiminde, ODTÜ'de yapılan çalışmalar, iki ayrı yüksek lisans tezinde ayrıntılı olarak anlatılmıştır (Seçkin, 1993; Turp, 1993); burada özetlenecektir. Türkiye'de, ancak DSİ'deki olanaklarla gerçekleştirilebilecek nitelikteki çalışmaların sonuçları da burada verilecektir.

Bu raporda, kama kesme deneyiyle ilgili son gelişmeler, aygıtların ana hatları ve deneyin değerlendirilme biçimleri açıklanacak, deneyin her üç biçiminin de göçmuş şevlere ya da bilinen başka deney yöntemlerine göre sınaması için bugüne kadar yapılmış çalışmalar özetlenecektir. Anılan bilgisayar programlarını içeren bir disket ile kullanım kılavuzları, deney yönergeleri ve aygıtların ayrıntılı çizimleri (Mirata, 1993(a)-(f)), deneyi uygulamak isteyebilecek kişi ve kuruluşlar için çoğaltılmak üzere TÜBİTAK bünyesindeki Türkiye Dökümantasyon Merkezi (TÜRKDOK) kütüphanesine teslim edilecek, gelişmeler oldukça bunlar, son biçimleriyle değiştirilecektir.

2. KAMA KESMEDENEYİNDEKİ GELİŞMELER

Aksi belirtilmedikçe bu bölüm ve bununa ilgili Ek 3-5, çoğunlukla Mirata (1991)'den, Ek 1 ve 2 Mirata (1990)'dan aktarılmıştır.

2.1 Gelişmelerin Özeti

Aktif bir heyelan bölgesinde, yerinde bir deney yapmak için bir deney çukuruna girmenin tehlikesini gidermek amacıyla kama kesme deneyi, laboratuvara getirilen silindirsel örnekler üzerinde denenmek üzere uyarlanmıştı (Mirata, 1979(b), 1980 (b), 1981). Önceleri 'laboratuvar kama

'kesme deneyi' olarak adlandırılan bu deney biçimini, daha sonraki gelişmeler ışığında, 'silindirsel kama kesme deneyi' olarak anılmaya başlanmıştır. Bu deneyde kullanılan yükleme biçimini Şekil 2'de gösterilmiştir.

Yüksek kesme ötelenmelerindeki dayanımın da ölçmek istendiği durumlarda, bu yükleme biçiminde ortaya çıkan bir sorun, en yüksek dayanım aşıldıkten sonra, eksenel yükün ve dolayısıyla kayma düzlemine etkiyen dikey gerilmenin (σ), dayanımla birlikte hızla azalması idi. Daha önce yerinde kama kesme deneyinde de karşılaşılmış olan bu sorun, bir gerdırme (GM) ile bir yaylı kantara (YK) bağlı bir askı (AS) aracılığıyla (Şekil 3), hesaplanabilen bir yanal yük uygulanarak çözülmüştür. Yerinde kama kesme deneyinde yanal yük, Şekil 4(b)'deki gibi yayla yüklenmiş bir piston (YYP) yardımıyla uygulanmıştır.

Yanal yükün uygulanması, sadece σ 'yı, en yüksek dayanım dolayındaki değeri (σ_f) dolayında tutmaya yaramakla kalmamış, başka olanağın yanında, iç yapışkanlığı olmayan gereçte de kama kesme deneyinin yapılabilmesini sağlamıştır. Böylece 38 mm çapa kadar taneler içeren çakıl, kırılmış kaya ya da kilit laboratuvara ya da şantiyede denenmesine olanak veren prizmatik kama kesme deneyi doğmuştur.

2.2 Aygıtlar ve Deney Yöntemi

2.2.1 Silindirsel Kama Kesme Deneyi

Laboratuvardaki bir basınç aygıtından yararlanılarak yapılacak bir silindirsel kama kesme deneyi için gerekli parçalar Şekil 2'de gösterilmiştir. Birı sabit (DK(S)) diğerı hareket edebilen (DK) iki yandan oluşan deney kalıbı, ince çeperli çelik bir boruyu istenilen α_n açısında keserek, ancak kesme

İşlemini tamamlamadan önce, aralarında silindirsel aralayıcılar (AR) ile bir araya vidalanmış üç çift kulağı (K), Şekil 2'deki konumda boruya kaynatarak yapılabilir. DK(S)'nin kesme düzleminin üst ucu ile DK'nin kesme düzleminin alt ucu, deney sırasında, karşı yarındaki zeminin kalıp çeperine değmesini engellemek amacıyla çok az tıraşlanır.

Birinin α_n açısı 45^0 , diğerininki 30^0 dolayında olan, ancak kesme düzlemi alanlarının eşit olabilmesi için farklı çapta iki kalıp, yanal yük uygulanmadığı durumlarda, suya doymamış, homojen killerin drenajsız kayma dayanımını belirlemeye yeter.

Denenecek zemin örneği, aynı çaptaki bir tüple alınmışsa doğrudan deney kalıbına, daha büyük çapta ise önce kalıpla aynı çapta olan bir örnek alıcıya, oradan deney kılıbına aktarılıp uçları düzlenir. Sonra kalıbin üst kesimi DK(S), Şekil 2'deki kelepçenin çeneleri arasına sokulup basınç aygıtının U-kirişindeki yarıklardan geçen dört düşey vida ile iki yatay vida sıkıştırılır. Yerinde kama kesme deneyinde de kullanılan (Şekil 1), aralarında bilye kafesi BK'yi taşıyan oluklu yükleme plakaları (LP1, LP2), sayısal yükölçer (YÖ) (ya da yük ölçme halkası) ve aralarında tek bir bilye taşıyan bilye yatakları (BY), deney kalıbı ile basınç aygıtının yükleme plakası arasına konur. İstenirse, alttaki BY plakası yerine, Şekil 1'in sağında gösterilen, ayrıntıları ayrıca verilmiş (Mirata, 1974, 1977(a)), deney sırasında yükün etkime doğrultusunu kaydırıp kayma düzeme etkiyen momentleri en aza indirmeye yarayan düzenek kullanılabilir.

100 N dolayında küçük bir yük uygulanır, aralayıcılar (AR) ile bunları tutan vidalar çıkarılır, DK'in yükleme doğrultusuna koşut ve dik yönlerdeki ötelenmelerini ölçecek birer ötelenmeölçer yerlerine takılır. Deney sırasında, kalıbin 1^0-2^0 dolayındaki hafif dönmesi (β) ölçülecekse, LP1'nin LP2'ye göre

ötelenmesini ölçecek üçüncü, yükün etkime doğrultusu kaydırılacaksa, bunu ölçecek dördüncü bir ötelenmeölçer kullanılır. Sonucusu yerine, bu kaydirmayı sağlayan vidanın döndürülme miktarı kullanılabilir.

Zemin, 0,3 mm / dakika dolayında bir eksenel ötelenme hızı uygulanarak kesilir. Plastik killerde, yenilmeden sonra deneyi çabuklaştırmak için bu hız, değerler okunurken azaltılmak koşuluyla artırılabilir. Göstergelerdeki değerler 1- 2 dakika ara ile okunur. Zemin örneğinin hazırlanması ve kesilmesi bir saat içinde tamamlanabilir.

İstenirse örnek, bir düzlem boyunca kesildikten sonra, DK(S) ve DK yeniden bir araya vidalanır; örneğin iki yarısı, aşırı sıkışmayı önlemek için, kesme sırasında uygulanmış en yüksek yük altında bir araya itilir; $20 / \sin \alpha_n$ mm kalınlığında, ahşap bir disk D, üstten itilerek, bir önceki kesme düzlemi (KD) aşağıya kaydırılır; örneğin alttan taşan kesimi tıraşlanır ve kesme deneyi yinelenir. Ancak, örneklerdeki su içeriği farklılıklarının, elde edilecek kayma dayanımı zarfı üzerindeki etkisini azaltmak için, yeniden yapılacak bu tür kesme deneylerinin bir bölümünü, başlangıçtan bir yanal yük uygulayarak yapmakta yarar vardır.

Bu son amacı gerçekleştirmek için, istendiğinde arazide de kullanılabilen Şekil 3'teki basit, taşınabilir çerçeve kullanılabilir. Bu durumda, hidrolik kriko, yerinde kama kesme deneyinde (Şekil 1) olduğu gibi, düz ucu üstte olmak üzere, yük halkası ile tek bilye arasına yerleştirilir. Deney sırasında, çerçevenin orta kirişi (OK) ortasındaki açıklık, çıkarılabilen bir diskle (CD) kapatılır. Bu diskl (Şekil 5), kenarındaki karşılıklı iki oyuk (OY), orta kirişe vidalanmış iki dilin (D) uçlarından geçtikten sonra az döndürülerek

yerinde tutulur. ÇD diski yerine, uygun iç çapta halkalar takıldığından, Şekil 3'teki çerçeve, tüplerden zemin örneğini itip ya doğrudan üst kiriş (ÜK) ile OK arasına yerleştirilmiş deney kalıbına ya da, daha sonra deney kalıbına aktarılmak üzere, bununla aynı iç çapta olan bir örnek alıcıya aktarmakta kullanılabilir.

En yüksek dayanım aşıldıkten sonra, dikey gerilmeyi σ_f düzeyinde tutabilmek ya da α_n açısı belirli bir kalıp kullanarak dikey gerilme düzeyini artırmak amacıyla, Bölüm 2.1'de de濂ilen düzenekle bir yanal yük Q uygulanabilir (Şekil 3, 5). Yükleme aygıtlarının yerleştirilmesi sırasında, yanal yük askısı (AS), ortasındaki çubuğu (Ç) yuvarlak ucu, DK(S)'deki bir yuvaya oturtularak kesik çizgilerle gösterilmiş konumda tutulur (Şekil 5). Gerektiinde, bu askı, DK'deki yuvaya aktarılır ve Q değeri, Bölüm 2.3.2'deki yöntemle ayarlanır. Uygulanacak Q değeri yüksekse, DK(S)'nın daha az zorlanması için bunun alt ucu ile çerçeve sütunu (ÇS) arasına çapraz bir çubuk ve uygun tıkaçlar yerleştirilebilir.

Sıkıştırılmış kıl, ya da ince çakılın, sıkıştırıldıkları kalıptan çıkarılmadan denenebilmeleri için Şekil 6'daki kalıp kullanılabilir. Bu kalıp, ince çeperli bir çelik boruyu dört düzlem boyunca keserek yapılabilir. (Kesme düzlemi eğimi ile alanını sabit tutmak için, üst kesiğin, kesik çizgilerle gösterilen konumda olması yeğdir; bu durumda, yapılan deneylerin bir bölümünde deneyin başlangıcından itibaren daha yüksek bir yanal yük uygulamak gerekir.) Böylece ortaya çıkan 6 mm enindeki dilimler (DL), en üst ve en alt uçlarından ikiye bölünüp her bir yarıya, bir çift bağlantı parçası (BP) kaynatılır (Şekil 6(b)). Zeminin sıkıştırılması sırasında, aralayıcı çiftlerinin ikisi de kalıba vidalanır, taneli zemin denenecekse kalıbin alt ucu, sıkı geçme bir takozla tıkanır ve kalıp, iki yanındaki çengelli kulaklar (ÇK) aracılığıyla,

sıkıştırma deneyi taban plakasına vıdalanır. Aralayıcı çiftlerden sırayla biri çıkarılıp açıkta kalan düzlem boyunca zemin örneği kesilir. Taneli zeminlerde, her sıkıştırmadan sonra sadece bir deney yapılabilir. Bir saatte bu tür iki kesme deneyi uygulanıp kayma dayanımı parametreleri, çoğu uygulama amacı için yeterli doğrulukla bulunabilir.

Sıkıştırılmış kıl denenirken, yüksek eksenel yük P altında, zemin örneği ile kalıp arasındaki sürtünme direnci bazen aşılabilir, zemin sıkışmaya ve P düşmeye başlar. Bu durumu, gerçek yenilme ile karıştırmamak için, bu olay sırasında eksenel ötelenme artarken, yanal ötelenmenin hemen hemen hiç değişmediğini gözlemek yeterlidir.

2.2.2 Yanal Yük Uygulanarak Yapılan Yerinde Kama Kesme Deneyi

Şekil 4 (b)'deki yanal yük aygıtının kullanımı dışında, deney aygıtları ile deney yöntemi Bölüm 1'de özetlendiği gibidir. Deney, yer üzerinde yapılacaksa, yanal yük aygıtı, zemin kamاسının iki yanından yaklaşık 80 cm uzaklığa çakılan 60 mm x 60 mm'lik iki köşebente dik olarak vıdalanan aynı boyuttaki bir üçüncü köşebente bağlanabilir. Deney bir çukurda yapılacaksa, çukurun kenarları gerekli desteği sağlamakta kullanılabilir. Yanal yük aygıtı, yayla yüklenmiş bir pistondan (YYP) oluşur. Piston çubuğu ucunda bir yük ölçme halkası (YH), bunun ucunda da, değişik uzunluklarda olabilen, ucu yuvarlak bir çubuk vardır. Piston silindirine vıdalanan çelik borunun ucuna, boru içerisine rahatça girebilen 30 cm uzunlığında bir ayar vidasına uyan bir somun kaynatılmıştır. Ayar vidasanın dış ucunda, destek plakasına bağlı bir mafsal vardır. Bu aygit, deney kalıbı DK'nin üst yüzü ortasındaki konik bir yuvaya dik doğrultuda, ancak gerektiğinde yanal yükün (Q) sıfıra ayarlanabileceği bir açıklık kalacak biçimde takılır. Q uygulanacağında, ayar vidası dışa doğru vıdalananarak yük

halkası ucundaki kısa çubuğun yuvarlak ucu deney kalibindaki yuvaya oturtulur. Q değeri yine bu vîda kullanılarak, Bölüm 2.3.2'deki yöntemle ayarlanır.

2.2.3 Prizmatik Kama Kesme Deneyi

Prizmatik kama kesme deneyi kutusu (Şekil 4), 10 mm'lik çelik sacdan yapılmış olup 300 mm x 300 mm'lik iç boyutlarda birer kesme düzlemi bulunan iki benzer yarıdan oluşmaktadır. Hareket edebilen yarının (DK), çıkarılabilen bir kapağı vardır; diğer yarı DK(S) ise, Şekil 4(b)'deki çerçeveyin alt kırışına vıdalanan. Başlangıçta, kutunun iki yarısı, ortalarına, kutunun her bir yanı için birer aralayıcı (AR) vıdalanmış, dört çift bağlantı parçası (BP) ile bir araya vıdalıdır (Şekil 4(a)). Bağlantı parçalarındaki delikler, zeminin sıkışabilirliğine bağlı olarak değişik kalınlıkta aralayıcıların kullanımına olanak sağlayacak biçimde dar, uzun olarak açılmıştır.

Zemin örneğinin kutu içerisinde sıkıştırılması sırasında kapak yerine, geçici olarak, 70 mm yüksekliğinde bir kılavuz (KZ) takılıp yanlarındaki kulaklılardan (KL) kalıba vıdalıdır. Sıkıştırma işleminden sonra kılavuz çıkarılır, zeminin yüzeyi düzlenir ve kapak yerine vıdalıdır.

Yanal yük aygıtı yerine takılır ve 160 N dolayında bir yük uygulanır. Kılıf zemin denenecekse, çerçeveyi, Şekil 4(b)'deki gibi dik duruma getirmeden önce, Şekil 4(a)'nın solundaki aralayıcı çıkarılır. Bundan sonra, Şekil 1'dekilerin aynı olan yükleme aygıtları yerlerine yerleştirilir.

Taneli zemin denenecekse, özellikle kalıntı dayanımının saptanması isteniyorsa, deneyi çerçeve Şekil 4(a)'daki gibi yatay durumda iken gerçekleştirmek, zeminin yüksek ötelenmelerde kalıptan birdenbire boşalmasını

önler; aksi halde, deneyden önce, 2 mm'lik sacdan yapılmış bir güvenlik kalkanının (GK) alt kırışe vidalanması gereklidir. Yatay durumda kırıko, geçici olarak, düzecleme vidaları olan küçük bir çerçeveye takılı bilye yataklı bir makarayla alttan desteklenir.

Ötelenme ölçerler Bölüm 2.2.1'deki gibi yerlerine takılır ve başlangıç değerleri okunur. Bundan sonra aralayıcılar çıkarılır ve yanal yük Q istenen değere yükseltilir. Özellikle α_n açısı yüksek olan kalıplarda, Q ile birlikte ana yük P 'yi de yaklaşık aynı oranda artırmakta, ters yönde bir kaymayı önleme bakımından yarar vardır. Yaklaşık 1 mm/dakika dolayında bir ötelenme hızı uygulanır. En yüksek dayanım aşıldıkten sonra bu hız, değerler okunurken azaltılmak koşuluyla artırılabilir.

En yüksek dayanıma dek Q , başlangıçtaki değerde tutulur. Bundan sonra Q , Bölüm 2.3.2'de açıklanan yöntemle, dikey gerilmeyi en yüksek dayanımdaki değer dolayında tutacak biçimde ayarlanır. Deney, taneli zeminlerde 2 saat içinde tamamlanabilir. Örneğin hazırlanması dışında, benzeri bir süre de killer için gereklidir.

Olanaklar elverdiğinde, yanal yükü, Şekil 4(b)'deki yayla yüklenmiş piston (YYP) yerine bir basınçlı havâ pistonu ile uygulamak kolaylık sağlar.

Bu projede aynı anda yürütülen bir araştırmada (Mirata, 1992(b)), Şekil 3'teki çerçevenin 20 ton kapasiteli olan bir biçimli ile α_n açıları 35.6^0 ve 39.9^0 olan deney kalıpları kullanılmıştır. Bu çerçevenin Şekil 4'tekine göre bir özelliği, kalıbin sabit yarısı DK(S)'yı tutan çelik U-kırışlarının konumu değiştirilerek (Şekil 7) çerçeve eninin azaltılmış olması; diğer bir özelliği de, DK(S)'nın, destekleyici kırışe, her bir yanında, bu kırışe kaynatılmış çengellere

(CL) geçen ikişer vıdayla tutturulmasıdır. Bu yolla kalıp, değiştirilme ya da içerişine killi zemini, aynı çerçeveyi kullanarak statik yolla sıkıştırma amacıyla, yerinden kolayca çıkarılabilir.

Ayrıntıları daha önce verilmiş (Mirata, 1974, 1977(a)) oluklu plakalar ve bilye kafesi yerine, 70 kN'u aşan yüklerde kullanılmak üzere yenileri yaptırılmıştır. Boyutları, öncekilerden çok az farklı (157 mm x 146 mm x 23 mm) olan bu plakalar, en az 28 Rockwell "C" sertliğindedir; sekizer oluk arasında, 14 mm x 16 mm'lik bir ağıın kesişme noktalarında rahatça dönebilecek biçimde tutulan 64 tane, 12 mm çaplı çelik bilye kullanmaktadır. Yapım sırasında, frezeye yan yana bağlanarak 292 mm boyunca, tek işlemde açılmış, 1 mm derinliğinde, 12 mm çapındaki olukların, kullanım sırasında üst üste gelmesini sağlamak için oluklar, plakanın bir kenarına 24 mm, diğerine 21 mm uzaklıktan başlatılmıştır. Ek bir önlem olarak, deney sırasında krikonun kaydırılamadığı durumlarda bile çelik bilyelerin, oluklu plaka kenarlarına 6 mm'den çok yaklaşmamasını sağlamak için, α_n açısı 30^0 den büyük kalıplara oluklu plaka LP1, kalıbın kesme düzlemi ortası konumunun, Şekil 4(b)'ye göre α_n açısı 35.6^0 olan kalıpta 11.5 mm, α_n açısı 39.9^0 olan kalıpta 23.2 mm sağına vidalanmıştır.

Bu plakalar kullanılarak, 89.5 kN'a kadar yükleme başarıyla gerçekleştirilmiştir (Mirata, 1992(a)). Bu plakaların 140 kN'a kadarki yükleri sorun çıkarmadan aktaracağına inanılmaktadır.

2.3 Hesaplamalar

2.3.1 Gerilme ve Ötelenmelerin Hesabı

Kimi ayrıntılar ve ufak değişiklikler, bir de yanal yük σ uygulandığında bunun hesaplara katılması dışında, deneyin her üç biçiminin de değerlendirilmesi, yerinde kama kesme deneyi için daha önce verilenlerle (Mirata, 1974, 1977(a)) aynıdır. Burada verilecek denklemler, ayrıca belirtilen tanım farklılıklarını dışında, deneyin her üç biçimini için de geçerlidir. Yerinde yapılan deneylerde, zemin kaması altındaki zemin kütlesinin ötelenmeleri, deney kalibinin ötelenmelerine oranla önemsiz varsayılmıştır; böylece, prizmatik kama kesme deneyi için verilen denklemlerde, kalının iki yarısı arasındaki açıklık $\alpha_c = 0$ ve kalının α_m boyutu (Şekil 8) sıfır alındığında, yerinde kama kesme deneyi için geçerli denklemler elde edilmiş olur. Yalnızlık için, çoğunlukla silindirsel kama kesme deneyi ile ilgili çizimlere deephirileceğe de, benzeri varsayımlar prizmatik ve yerinde deneyler için de geçerlidir.

Deneyin değerlendirilmesi, ana hatlarıyla, kayma düzlemine etkiyen yüklerin bu düzleme dik ve koşut doğrultulardaki bileşenlerini alıp bunları, düzletilmiş kesme düzlemi alanına bölmekten oluşmaktadır. Çözümlemedeki farklılıklar, kesme düzleminin varsayılan doğrultusundan ve deney sırasında kalıpta gözlenen ufak dönmenin (β) dikkate alınıp alınmamasından kaynaklanmaktadır. Burada üç çözümleme biçimini anlatılacaktır.

Analiz A. Bu, çoğu uygulama amacı için yeterli sonuçlar veren, basit hesap yöntemidir. Zemin örneğinin Şekil 9(a)'da deney kalibinin iki yarısı DK(S) ve DK'nın ara ortasında kalan AB düzlemi boyunca kırıldığı ve kayma düzleminin alt

kesimi A'B' doğrultusunda olacak biçimde, dönmeksizin ötelendiği varsayılmaktadır. Ortalama, düzeltilmiş kesme düzlemi alanı, AB ile A'B' ara ortasında kalan CD olarak alınmaktadır. O_1 , O_2 ve O_3 sırasıyla AB, A'B' ve CD'nin orta noktalarını göstermektedir. Kesme düzlemine etkiyen kuvvetlerin ana yük P 'ye koşut ve dik yönlerdeki bileşenleri (X Y), şu denklemlerden hesaplanır:

$$X = P - (W + W_{BC} + W_{LP}) \sin \theta + \delta X_q \quad (1)$$

$$Y = \left(W + \frac{M_B}{D} \right) \cos \theta + \mu P + \delta Y_q \quad (2)$$

Burada, δX_q ve δY_q , X ve Y ye yanal yük Q' dan ötürü eklenmesi gereken değerler olup şöylece hesaplanır:

$$\delta X_q = Q \cos \lambda_q - SW_{qn} \sin \lambda_q \quad (3)$$

$$\delta Y_q = Q \sin \lambda_q + SW_{qn} \cos \lambda_q \quad (4)$$

Burada, D = tek bilye TB ile LP1'in olukları arasındaki dikey uzaklık. Bu uzaklık, Şekil 9'daki yükleme biçiminin kullanıldığı deneylerde değişmez; ana yükün hidrolik bir krikoya uygulandığı tüm kama kesme deneylerde, deney sırasında δ_x (ya da Analiz B ve C için δ_{x0}) miktarında artar;

M_B = tek bilye ile LP1'in olukları arasındaki parçaların, $\theta = 0$ olduğu durumda, tek bilyeye göre momenti;

- W = zemin kaması, deney kalıbı ve LP1' in toplam ağırlığı;
 W_{BC} = bilye kafesinin ağırlığı ;
 W_{LP} = oluklu plaka LP2'nin ağırlığı ;
 W_{qn} = Yanal yük biriminin kendi ağırlığından kaynaklanan basit mesnet kuvvetinin Q 'ya dik yöndeki bileşeni;
 θ = P kuvveti ile yatay arasındaki açı (bu açı, bir deney çukuru tabanı ya da iç yanında yapılan yerinde deneylerde 45^0 ile -90^0 arasında kolaylıkla değiştirilebilir (Mirata, 1974, 1977(a)); silindirsel kama kesme deneyinde $\theta = 90^0$; Şekil 4(b)'deki konumda yapılan prizmatik kama kesme deneyinde $\theta = -90^0$, Şekil 8'de ise $\theta = 0$);
 λ_q = P ile Q kuvvetleri arasındaki açı;
 μ = Oluklu plaka LP1 ile LP2'nin, aralarında çelik bilyeler varken birbirine göre hareketine direnen sürtünme katsayısi (yağlanmış durumdaki değişik plaka çiftleri için bu değer 0.004 ile 0.007 arasında ölçülmüştür);

S ise, uygulanan θ açısına göre +1 ya da -1 değerlerini alan ve şu denklemle tanımlanan bir katsayıdır:

$$S = \frac{\theta + 6\theta}{|\theta + 6\theta|} \quad (5)$$

Burada, 6θ = sıfırla bölme durumu yaratmamaya yarayan 0.01^0 gibi küçük bir açı.

Kesme düzlemine etkiyen ortalama dikey gerilme σ ile ortalama kesme gerilmesi τ , şu denklemlerden hesaplanır:

$$\sigma = (X \sin \alpha + Y \cos \alpha) / A_c \quad (6)$$

$$\tau = (X \sin \alpha - Y \cos \alpha) / A_c \quad (7)$$

Burada, A_c = aşağıdaki denklemlerden bulunan düzeltilmiş kesme düzlemi alanı.

Yerinde ve prizmatik kama kesme deneyleri için

$$A_c = b(d - u) \quad (8)$$

Burada, b = deney kalibinin iç eni ;

d = deney kalibinin kesme düzlemi uzunluğu.

Silindirsel kama kesme deneyi için A_c , ± 0.3 'ü aşmayan bir hata ile aşağıdaki denklemden hesaplanabilir. Tam çözüm Ek 1(a)'da verilmiştir.

$$A_c = \pi D_i^2 / 4 \sin \alpha - D_i u \quad (9)$$

Burada, D_i = deney kalibinin iç çapı;

u = aşağıdaki denklemden hesaplanan kesme ötelenmesi.

$$u = \delta_x \cos \alpha + \delta_y \sin \alpha \quad (10)$$

Burada δ_x, δ_y = deney kalibinin yükleme sırasında, sırasıyla X ve Y 'nın

(Şekil 1 ve 9) artı yönlerinde ölçülen ötelenmeleri.

Kesme düzlemine dik yöndeki ötelenme ν , aşağıdaki denklemden hesaplanır ve artı değerler, başlangıçtaki kesme düzlemine göre kabarma anlamını taşır:

$$\nu = \frac{\delta_y}{y} \cos \alpha - \frac{\delta_x}{x} \sin \alpha \quad (11)$$

Yerinde ve prizmatik kama kesme deneylerinde, bir de kırılmanın Şekil 9(a)'daki gibi olduğu silindirsel kama kesme deneylerinde, $\alpha = \alpha_n$ olarak alınır; burada α_n = ana yük P ile kalibernin kesme düzlemi arasındaki anma açısı.

α_n açısı 30° olan silindirsel kama kesme deneyinde, kimi durumlarda yenilme, Şekil 9(b)'deki ya da 9 (c)'deki gibi olmakta, ender olarak da ikisi ortası bir düzlem boyunca kırılma olmaktadır. Bu durumlarda, α açısı, kesme düzleminin deneyden sonra ölçülen doğrultusundan hesaplanır; kesme düzleminin üst kesiminin ötelenmediği varsayılar ve yerinde kama kesme deneyinde olduğu gibi $n = 0$ alınır.

Yenilme ölçütü olarak, Q uygulanmamışsa, P 'nin en yüksek değeri, Q uygulanmışsa, τ/σ oranının en yüksek değeri alınır.

Q uygulanması, hem P 'nin yarattığı momentleri dengeleyici momentler yaratarak, hem de kesme düzleme etkiyen ortalama dikey gerilmenin azalmasını engelleyerek, kesme düzleminde çekme gerilmeleri doğması olasılığını büyük ölçüde gidermektedir. Böylece, denklem (1) - (11), deneyin basit yollarla değerlendirilmesi için yeterlidir. Bu amaçla hazırlanmış hesaplama çizelgeleri ve programlanabilir bir hesap makinesi için programlar Mirata (1993 (a)) tarafından verilmiştir.

Deney sırasında, kesme düzlemine etkiyen momentleri (M) en aza indirmek için, istenirse, Ek 2(a)'da verilen denklemde, $\nu = \beta = 0$, $\lambda_q = 90^0$ varsayıarak M 'yi sıfır yapmak için gerektiği hesaplanan Δy_{MP} (LP2'nin, LP1'e göre y' nin eksi yönündeki ötelenmesi) ile δ_x arasındaki bağıntıyı değişik P ve

Q değerleri için gösteren eğriler kullanılarak P 'nin etkime doğrultusu, Bölüm 2.2.1'de de濂ilen düzenekle kaydırılabilir. Böyle bir ayarlama yapıldığında, P 'nin etkime doğrultusunda, kalıbin daha önce anılan hafif dönmesinden ötürü olusacak kaymaların etkisi kendiliğinden giderilmiş olur.

Analiz B. Bu çözümleme biçiminde, ortalama kayma düzlemi, Analiz A'daki gibi varsayılar, ancak kalıptaki hafif dönemenin (β) etkisi dikkate alınır. Ortalama kesme ötelenmesi ve dikey ötelenme ($\bar{\nu}, \bar{\nu}$) ile β , Ek 3'te belirtildiği gibi hesaplanır. Denklem (1) ve (2)'deki θ açısı, $\theta_r = \theta + \beta$ olarak, denklem (8) ve (9)'daki ν değeri $\bar{\nu}$ olarak değiştirilir. P kuvveti ile ortalama kesme düzlemının, aynı β miktarında döndükleri varsayıldığından α açısı değişmez.

Kesme düzlemi boyunca doğrusal bir gerilme dağılımı kabulüyle, yerinde ve prizmatik kama kesme deneylerinde kesme düzlemine etkiyen dikey gerilmenin en yüksek ve en küçük değerleri önceki yaynlarda (Mirata, 1974; 1977(a)) belirtildiği gibi hesaplanıp, varsa, çekme gerilmesi bölgeleri düzeltilmiş kesme düzlemi alanından çıkarılabilir. Silindirsel kama kesme deneyinde ise, kesme düzlemi alanının eylemsizlik momenti özellikleri yaklaşık olarak, eni $0.9D_1$ alanı ise, denklem (9)'dan hesaplanan A_c 'ye eşit bir dikdörtgeninkile aynı olduğu görülmüştür (Mirata, 1981); daha tam bir çözüm için gerekli denklemler, Ek 1(b)'de verilmiştir.

Analiz C. Kalıbin dönmesi (β), Analiz B'deki gibi hesaplanır ancak, kırılmanın Şekil 9(a)'daki gibi olmadığı silindirsel kama kesme deneyleri (ki bu durumda

Analiz B uygulanır) dışında, kesilmenin, kalının geriden gelen A_1 , ucu ile B_1 noktası arasında oluşturduğu varsayılar. Prizmatik ve silindirsel kama kesme deneylerinde, B_1 noktası kalının sabit yarısı TM(S)'in karşı ucu (Şekil 8 ve 10), yerinde kama kesme deneyinde ise, zemin kamاسının önde giden ucunun, deneyin başlangıcındaki konumu (Şekil 1) olarak alınır. $A_1 B_1$ ile, P' nin başlangıçtaki doğrultusu arasındaki α_r açısı ve $\bar{A}_1 \bar{B}_1$ uzunluğu, Ek 4'teki gibi hesaplanır.

P' nin dönmüş durumu ile $A_1 B_1$ arasındaki α_r açısı ve eşdeğer kesme ötelenmesi \bar{U}_1 şu denklemlerden hesaplanır:

$$\alpha_r = \alpha_i - \beta \quad (12)$$

$$\bar{U}_1 = 2 d_{yb} / \sin \alpha_i - \bar{A}_1 \bar{B}_1 \quad (13)$$

Buradaki d_{yb} değeri, değişik deney biçimleri için Çizelge 1'de tanımlanmıştır.

Denklem (8) ve (9), sırasıyla denklem (14) ve (15) olarak değiştirilir:

$$A_c = b (2 d_{yb} / \sin \alpha_i - \bar{U}) \quad (14)$$

$$A_c = \pi d_{yb}^2 / \sin \alpha_i - D_{11} \bar{U} \quad (15)$$

Denklem (6) ve (7)'deki α açısı, α_r olarak değiştirilir.

En yüksek dayanıma ulaşıldıktan sonra, zemin kamاسının genel ötelenme yönü, en yüksek dayanımdaki kayma düzlemi doğrultusunda olacağı, ancak β açısından ek değişimlerin P yönüne ve kesme düzlemi doğrultusuna eşit olarak yansıyacağı varsayılar. Böylece, denklem (14) ve (15)'teki \bar{U}_1 , Analiz B'

deki gibi hesaplanan $\bar{\sigma}$ ile değiştirilir ve α_i ve α_r açılarının, en yüksek dayanımdaki değerlerini aynen koruduğu varsayılar.

Killerde, bu çözümleme biçiminin geçerli olup olmadığı deney sırasında görülebilmektedir. Tanelli zeminlerde ise, ilk Yazarın Turp (1993) ile birlikte, değişik yükseklikte aralayıcılar kullanarak yaptığı prizmatik kama kesme deneylerinden, Analiz C'nin en tutarlı sonuçları verdiği görülmüştür (Mıralta, 1992 (b)).

2.3.2 DİKEY GERİLMEYİ EN YÜKSEK DAYANIĞDAKİ DEĞER DOLAYINDA TUTMAK İÇİN GEREKLİ YANAL YÜKÜN HESABI

En yüksek dayanım aşıldıkten sonra (ya da kalıntı dayanımı ölçme amacıyla tekrar yükleme sırasında) σ 'yı, en yüksek dayanımdaki dikey gerilme (σ_f) düzeyinde tutmak için, yanal yük Q , $v = 0$, $\lambda_q = 90^\circ$ varsayılarak ve μ terimleri dikkate alınmadan, denklem (I) - (II)'den elde edilen aşağıdaki denklemler uyarınca ayarlanabilir. Bu denklemeler her durum için geçerli kılmak için, yanal yükün, deneyin başından uygulandığı, $P = C_p \delta_p$, $Q = C_q \delta_q$ olduğu varsayılmıştır; burada C_p , C_q sırasıyla P ve Q 'yu ölçmekte kullanılan aygit göstergelerinde okunan δ_p , δ_q değerlerini kuvvete çeviren katsayılardır.

Altındis ya da ek altındis f, en yüksek dayanımdaki değerleri belirlemekte kullanılmıştır. Bu varsayımlarla, $\sigma = \sigma_f$ durumunu sağlamak için gerekli δ_q değeri, bu ayarlama yapıldığında δ_p değeri değişmeyecegi varsayımyyla, şu denklemden hesaplanabilir:

$$\delta_q = K_1 F_a \left(\frac{\delta_{pf} + \delta_{qf} / K_1 - K_3}{F_{af}} - \frac{\delta_p - K_2}{F_a} \right) \quad (16)$$

Burada,

$$F_a = 1 - S \delta_x \quad (17)$$

$$K_1 = (C_p \tan \alpha_n) / C_q \quad (18)$$

$$K_2 = \frac{1}{C_p} \left[(W + W_{BC} + W_{LP}) \sin \theta + SW_{qn} - \frac{(W + M_B / D) \cos \theta}{\tan \alpha_n} \right] \quad (19)$$

$$Q_f > 0 \text{ ise, } K_3 = K_2 \quad (20a)$$

$$Q_f = 0 \text{ ise, } K_3 = K_2 - SW_{qn} / C_p \quad (20b)$$

S_a , deneyin değişik biçimleri için Çizelge 1'de tanımlanmıştır. M/D_B ise, ortalama, değişmez bir değer olarak alınabilir.

Herhangi bir deneyde θ ve α_n değişmediğinden, K_1 , K_2 ve K_3 de değişmez; denklem (16)'da, ayraç içindeki değeri ise, δ_p , δ_q ve δ_x 'ın en yüksek dayanımdaki değerleri için bir kez hesaplamak yeterlidir. (Bu ayarlama amacıyla, en yüksek dayanım ölçütü olarak P' nin en yüksek olduğu durumu almak gereklidir.) En yüksek dayanım aşıldıkten sonra, gerekli δ_q değeri, o andaki δ_x ve δ_p değerleri için kolayca hesaplanabilir. Q değiştirildiği anda, δ_p de değiştiği için, deneyin herhangi bir evresinde, bu hesaplamayı birkaç kez yinelemek gerekebilir. Bu amaçla, programlanabilir bir cep hesap makinesi çok yararlı olur; böyle bir makine için yazılmış programlar Mirata (1993(a)) tarafından verilmiştir. Deneyim kazanıldıkça, δ_p 'deki olası değişiml

dikkate almak için, Q' daki ayarlama, hesaplanandan bir miktar düşük tutularak gerekli hesaplama sayısı azaltılabilir.

2.3.3 Gerekebilen Değişik Hesaplamalar

Zeminin kayma dayanımı parametreleri c ve ϕ kabaca biliniyorsa, deneylerin planlanması için gerekebilecek klimi değerler hesaplanabilir. Örneğin, Ek 5'te ana hatlarıyla açıklanan yöntemle elde edilmiş olan Şekil 11'deki eğriler, P' deki ΔP artımını, eldeki aygıtın kaldırılabileceği düzeye tutabilmek, ya da dikey gerilmede istenen $\Delta\sigma$ artımını sağlayabilmek için Q' daki ΔQ artımının ne olması gerektiğini kestirmekte kullanılabilir. Bu yolla kestirilen Q değeri ile Şekil 11'de buna karşılık olan P değeri, geçmiş deneylerden kestirilen en yüksek dayanımdaki olası kesme ötelenmesi ile birlikte esas alınıp Bölüm 2.3.2' deki yöntemle gerekli ayarlamalar yapılarak, kaya dolgu gerecinin istenen belirli bir dikey gerilme dolayındaki dayanımı ölçülebilir.

Yine Şekil 11'e göre, örneğin, en çok 8 kN uygulayabilen bir yanal yük aygıtı ile, α_n açısı 35^0 , kesme düzlemi alanı 0.09 m^2 olan bir prizmatik kama kesme deneyi kalıbı kullanılarak, etkin içsel sürtünme açısı $\phi' = 50^0$ olan bir çakılda, uygulanabilecek P yükü 100 kN'a, dikey gerilmeler ise 720 kPa' çıkarılabilir. Ancak uygulamada, bu tür gereçte, dikey gerilme arttıkça ϕ' değeri azaldığı için (örneğin, Charles ve Watts, 1980), Şekil 11'le kestirilen dikey gerilmelere tam ulaşılamamaktadır; bu sorun, α_n açısı daha yüksek olan kalıplar kullanarak aşılabilir (Mirata, 1992(b)).

Şekil 11'deki eğriler ayrıca $(\alpha + \phi) > 89.5^0$ olduğunda zemin kamasını, bu deneyde öngörüldüğü biçimde kesmenin olanaksız olduğunu (Mirata, 1974) ve bu

sınırı yaklaşıldıkça, kesme için çok çabuk artan P yükleri gerekeceğini hatırlatmaya da yaramaktadır.

Mirata (1974) tarafından verilen denklem (22) ile Ek 5'teki denklem (72)'den, μ terimleri ve kesme düzlemi alanındaki değişim dikkate alınmazsa, ϕ açısı değişmeyeceği, iç yapışkanlığı, en yüksek dayanımda c , kalıntı dayanımda sıfır olacağı varsayılan bir kilde, $\sigma \approx \sigma_f$ durumunu sağlamak için gerekli yanal yük artımını veren şu denklem elde edilir:

$$\Delta Q = A_n c \sin \alpha_n \quad (21)$$

Burada, A_n = deney kalibinin kesme düzlemi alanı.

2.3.4 Bilgisayar Kullanımı

Bölüm 1'de de濂ilen bilgisayar programlarından biri silindirsel kama kesme deneyinin, di濂eri yerinde ya da prizmatik kama kesme deneyinin Bölüm 2.3.1'de açıklanan her üç çözümleme yöntemiyle değerlendirmesini yapıp seçilen regresyon türüne göre, en yüksek dayanımdaki ve deney sonundaki kayma dayanımı parametrelerini saptamakta kullanılabilir.

3. KAMA KESME DENEYİNİN SINANMASI

3.1 Genel Bilgiler

Aksi belirtilmédikçe, burada verilen kama kesme deneyi sonuçlarında, Analiz C kullanılmıştır. Şekil 12'de, değişik çözümleme yöntemleriyle bulunan dayanım zarflarına örnekler verilmiştir; bu karşılaştırmalar, basit yöntem, Analiz A'nın çoğu uygulama amacı için yeterli sonuçlar verdiğiini doğrulamaktadır.

Tüm ortalama toplam dikey gerilme (σ) - kayma dayanımı (τ_f) bağıntıları, doğrusal regresyonla bulunmuş, temiz çakilda, bu yöntemin kırılma çizgisini orijinden geçiren biçimini kullanılmıştır. Çakıl ve kırılmış kayada, σ 'nın etkin dikey gerilmeye eşit olduğu varsayılmıştır. Üç eksenli basınç deneylerinde, doğrusal regresyon, $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$, $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$, çiftlerine (σ'_1 , σ'_3 = en yüksek ve en küçük etkin asal gerilme) uygulanmış, bunun sonucundan hesapla, Mohr dairelerine ortalama teğet olarak gösterilen kırılma çizgileri bulunmuştur.

Değişik zeminleri tanımlayıcı bilgiler (w = su içeriği; w_L = líkit limit; w_p = plastik límit; C_F = $2 \mu\text{m}$ 'den ince taneler yüzdesi; S_r = suya doygunluk derecesi; w_{otp} = optimum su içeriği; p_d = kuru yoğunluk) ilgili şekiller üzerinde verilmiştir.

3.2 Yerinde Kama Kesme Deneyi

Zeminin içeriği kılcal çatlakların, iri taşların etkisini daha iyi yansıtma amacıyla kayma dayanımını olağan laboratuvar deneylerindekiinden

daha büyük bir alan boyunca ölçme amacıyla geliştirilmiş olan yerinde kama kesme deneyinin sınanması için iki yol vardı: ya benzer boyutlardaki bir kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla karşılaştırmak, ya da geliştirilen deneyde ölçülen kayma dayanımını kullanarak göçmuş şevlerdeki güvenlik sayısını (G_s) hesaplayıp bu değeri gerçek değer olan $G_s = 1.00$ ile karşılaştırmak. Ülkemizde

henüz, bu boyutlarda bir kesme kutusu aygıtı bulunmadığından ikinci yol seçilmiş, yerinde kama kesme deneylerinde ölçülen drenajsız kayma dayanımı parametreleri, toplam gerilmeler türünden bir çözümleme yönteminde kullanılarak, suya doymamış, sert, kılcal çatıaklı Ankara Kilinde, ayrıntıları önceki yaynlarda (Mirata, 1973, 1977(a), 1978) verilmiş olan, derinlikleri 4.1 m - 5.5 m, yataya 66^0 ve 90^0 eğimlerde kazıldıktan kısa sonra göçmuş üç şevin G_s değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra, aynı şevlerin G_s değerleri, üç eksenli basınç deneyleriyle ölçüüp etkin gerilmelerle tanımlanan kayma dayanımı parametreleri ile yine üç eksenli basınç aygıtında yapılan ölçümlerle kestirilen ve arazide yapılan ölçümlerle doğrulanın boşluğ suyu basınçlarını, etkin gerilmeler türünden bir çözümleme yönteminde kullanarak hesaplanmıştır. Son hesaplar, bir kez de, aynı boşluğ suyu basınçları ancak 63 mm çaplı kesme kutusu deneylerinde ölçülen dayanım parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Tüm ayrıntıları (Mirata, 1976), ile daha az ayrıntılı biçimleri (Mirata, 1977(a), 1977 (b), 1978, 1980(a)) önceki tez ve yaynlarda verilmiş olan bu çalışmaların sonuçları, Şekil 13'te, ilgili deneydeki kesme düzlemi alanının logaritmasına göre gösterilmiştir; burada, üç eksenli deneylerdeki kesme düzlemi alanı, deneylerdeki gözlemlere dayanılarak örnek eksenine 42^0 eğimli bir düzlem alanını, bu düzlemin değişik doğrultularda olabileceğini dikkate almak için, uygun gibi gözüken 4 sayısıyla çarparak bulunmuştur (Mirata, 1987). Şekil 13, gerçek değer olan 1.00'e en yakın ve en az dağınlık gösteren güvenlik sayılarını, yerinde kama kesme deneylerinin verdiği göstermektedir. Küçümsenmeyecek bir konu da, yerinde kama kesme

deneylerinin her bir serisi için harcanan toplam sürenin, üç eksenli basınç deneylerinin bir serisi ve gerekli boşluk suyu basıncı ölçümleri için gerekenin yarısından az oluşudur. Diğer, daha önemli bir konu ise, yüzeysel sızıntılarla ıslanmış ve suya doygunluk derecesi %92'nin üzerinde olan bu örneklerde göre daha kuru zeminlerde üç eksenli deneyler ve etkin gerilmeler türünden bir çözümlemenin çok daha karmaşıklaşmakta olduğunu (örneğin, Fredlund v.b., 1978).

Yerinde kama kesme deneyinden bulunan kayma dayanımı zarfları ile küçük (60 mm x 60 mm (Cascini, 1988)) kesme kutusu sonuçları arasında karşılaştırmalar Cascini (1980, 1983, 1992) tarafından yapılmıştır. Bu karşılaştırmalardan sonucusu, Şekil 14'te aktarılmış olup (burada r = korelasyon katsayısı) zeminin küçük laboratuvar örnekleri sonuçlarını etkileyebilecek kılcal çatlak ya da iri taneler içermemiş durumlarda, yerinde kama kesme deneyinin, yerleşmiş yöntemlerle aynı sonuçları verdiği göstermektedir.

3.3 Silindirsel Kama Kesme Deneyi

Silindirsel kama kesme deneyi sonuçları ilk olarak (Mirata, 1980(b), 1991), suya doymamış, kılcal çatlaklı Ankara Kili için, yerinde kama kesme deneyi (β ölçülmediğinden Analiz A ile değerlendirilmiş) ve 63 mm çaplı örnekler üzerinde yapılan kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 15). Kesme düzleminin yataya eğimi, yerinde kama kesme deneylerinde 30° ile 70° arasında, silindirsel kama kesme ile kesme kutusu deneylerinde ise 30° ile 60° arasında idi. Silindirsel kama kesme deneylerinden (başlangıçtaki kesme düzlemi alanı, $A_n^2 = 116 \text{ cm}^2$) bulunan dayanım zarfinin, yerinde kama kesme deneylerinden ($A_n^2 = 900 \text{ cm}^2$) ve kesme

kutusu deneylerinden ($A_n = 32 \text{ cm}^2$) bulunanlar arasında olması, kılcal çatıaklı killerde başka araştırmacılarca (örneğin, Skempton, 1977; Garga, 1988) gözlenmiş olaña uyumludur: Alan arttıkça gözlenen içyapışkanlık azalmakta, içsel sürtünme açısı pek fazla değişmemektedir.

Silindirsel kama kesme deneyi sonuçları daha sonra, sıkıştırılmış killerde 63 mm çaplı kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmış (Öktem, 1984; Seçkin, 1993), deneyin, kıl dolguların sıkıştırma denetimleri için kolay olduğu kadar tutarlı sonuçlar veren bir yöntem olduğu gösterilmiştir (Varan, 1989; Azımlı, 1989). Şekil 16'da, Seçkin'in (1993), 1 mm'lik elekten elenmiş killerde en yüksek dayanım için verdiği karşılaştırmalar özetlenmiştir. Drenajsız kayma dayanımının, zeminin su içeriğine son derece duyarlı olduğu bu tür killerde iki tür deneyin oldukça tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Mirata(1990), Şekil 9(b) ve (c)'deki yenilme biçiminin, sadece daha düşük dikey gerilmelerde ve zeminin yapısında, örnek eksenine α_n 'den daha büyük eğimlerde, daha zayıf bir düzlem bulunduğu durumlarda olası olduğunu göstermiştir. Bu durum, elde edilen ϕ değerlerinin olduğundan yüksek çıkışmasına yol açabilir; bunu engellemek için, kayma dayanımı zarfını saptarken, yenilmenin eksene 32^0 den daha büyük eğimlerde olduğu deneyleri hesaba katmayıp sonradan, bu tür deneylerin belirledikleri daha düşük dayanımı dikkate alacak biçimde dayanım zarfı, ϕ açısını değiştirmeden, bir miktar aşağıya kaydırılabilir (Mirata, 1991).

3.4 Prizmatik Kama Kesme Deneyi

Prizmatik kama kesme deneyinde ölçülen dayanım, ilk olarak İlk Yazarın Çağnan(1990) ile birlikte gerçekleştirdiği bir çalışmada, tane çapı dağılımı

Şekil 17(a)'da kesik çizgiyle gösterilen 5 mm - 10 mm arası, hafif köşeli, orta sıkılıkta çakıl için, 102 mm çaplı örnekler üzerinde yapılan drenajlı, üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Prizmatik kama kesme deneyinde ölçülen en yüksek dayanım zarfı, Şekil 18'de gösterilmiş, karşılaştırma amacıyla, üç eksenli basınç deneyi sonuçlarının gösterildiği Şekil 19'da, kesik çizgilerle yeniden belirlenmiştir. İki tür deney sonucu arasındaki yakınlık açıkça gözükmekle birlikte, 38 mm'ye kadar taneler içeren zeminlerin başarıyla denenmesini sağlayacağı umulan (örneğin, Akroyd, 1957; Head, 1982) 300 mm x 300 mm'lik bir alandaki dayanımın ölçüldüğü prizmatik kama kesme deneyi için, daha iri taneler içeren zeminlerde benzeri karşılaştırmalar yapılması, deneye ilgili kuşkuların giderilmesine büyük katkıda bulunacaktı. Bu da, ülkemizde bir tek DSİ Laboratuvarlarında bulunan, 191 mm çaplı örneklerin denenmesine elverişli bir üç eksenli basınç aygıtı ile olanaklı idi. Böyle bir karşılaştırma, tümüyle DSİ Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş olan aşağıdaki çalışmalar sonunda yapılmıştır.

Kesme deneyleri öncesindeki tane çapı dağılımları Şekil 17'de gösterilen, Şanlıurfa Sulama Kanalları için kullanılan kırılmış kireçtaşısı, (Şekil 17(a), sürekli çizgi), yine Şanlıurfa Sulama Kanalları için kullanılan kırılmış bazalt (Şekil 17(b), sürekli çizgi) ve Arıklıkaş Göleti yapımında kullanılan doğal kumlu çakıl (Şekil 17(b), kesik çizgi) üzerinde dörder prizmatik kama kesme deneyi, 191 mm çaplı örnekler üzerinde de dörder üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Örnekler, prizmatik kama kesme deneyi kalıbine, iki çengelle tutulan 270 mm x 250 mm x 20 mm'lik çelik bir plakanın darbeleriyle sıkıştırılmış, üç eksenli basınç deneyleri de aynı su içeriği ve sıkılıktaki örnekler üzerinde yapılmıştır. Üç eksenli basınç deneylerindeki hacim değişimleri, deney sırasında hücreye giren ve çıkan suyun hacmi ölçülerek hesaplanmış; lastik kılıf delinmesi olasılığına karşı iç içe geçirilmiş iki kılıf

kullanılmış; deneyler, ayrıntıları ayrıca verilmiş (Mirata, 1976) tüm düzeltmeleri yapan bir bilgisayar programı kullanılarak değerlendirilmiştir.

Şanlıurfa Kanalları kırılmış kireçtaşının üzerinde yapılan prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek ve kalıntı dayanım zarfları, Şekil 18' de gösterilmiş, en yüksek dayanım zarfı ayrıca Şekil 19'da (kesik çizgi), üç eksenli basınç deneylerinden bulunan en yüksek dayanım zarfıyla (sürekli çizgi) karşılaştırılmıştır. Şanlıurfa Kanalları kırılmış bazaltı için benzeri sonuçlar Şekil 20 ve 21'de, Arıklıkaş Göleti kumlu çakılı için ise Şekil 22 ve 23'te verilmiştir. Bu karşılaştırmalarda, her örnek üzerinde yapılmış olan üç eksenli basınç deneylerinden, sadece, asal gerilme düzeyi, prizmatik kama kesme deneylerindeki yaklaşık değerler düzeyinde olan ilk üçü dikkate alınmıştır. $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$, $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ çiftlerinin, kPa olarak, anılan üç gereç için sırasıyla (1066, 723), (1085, 742) ve (950, 607) olduğu bu dördüncü deneyler, üç eksenli deneylerden bulunan etkin iç yapışkanlık (c') ve içsel sürtünme açısı (ϕ') değerlerini sırasıyla 13.6 kPa , 41.9° ; 30.4 kPa , 41.7° ve 17.3 kPa 38.6° yapmakta idi.)

Şekil 20-25'teki karşılaştırmalar, prizmatik kama kesme deneyinin 38 mm'ye kadar taneler içeren çakıl ve kırılmış taşın kayma dayanımını ölçmektedir. Üç eksenli basınç deneyiyle tutarlı sonuçlar verdiği göstermektedir. Prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan ϕ' değerlerinin üç eksenli basınç deneylerinden bulunanlardan az büyük oluşu, ilk deneyin düzlemsel boy değişimi koşullarına daha yakın oluşundan kaynaklanıyor olabilir; bu koşullarda yapılan deneylerin üç eksenli deneylerdekinden daha yüksek ϕ' açıları verdiği başka araştırmacılarca da gözlenmiştir (örneğin, Charles ve Watts, 1980; Brown, 1988). Ancak, dolgu barajlarındaki gerilme durumunun da genellikle düzlemsel boy değişimi koşullarına çok yakın olduğu unutulmamalıdır.

Karşılaştırma kolaylığı bakımından burada, doğrusal dayanım zarfları kullanılmıştır. Şimdiki eğilimin ise, bu tür gerekçe görünen c' değerlerinin büyük oranda, düşük dikey basınçlar altında kesme sırasında gözlenen yüksek kabarma hızından kaynaklandığı, bu nedenle dayanımı $\tau_f = a \sigma^b$, türü üslü bir bağıntı ile belirtmenin daha doğru olduğu yolunda olduğuna (Charles ve Watts, 1980) burada dephinmekte yarar vardır (a, b = denenen gerece bağlı katsayılar). Bu tür bağıntıların kullanıldığı şeviden dengeliliği çözümleme yöntemleri geliştirilmiştir (Charles ve Soares, 1984).

4. KAMA KESME DENEYİNİN DOLGU BARAJ VE DİĞER YAPILARIN ZEMİN DAYANIMI SORUNLARINA UYGULANMASI OLANAKLARI

4.1 Kaya Dolgu Barajlar, Yol Dolguları

Bu paragraf, Charles ve Watts'ın (1980) aktardığı bilgilerden derlenmiştir. Kaya dolgu gerecinin kayma dayanımını ölçmekte kullanılmış, 1.1 m çapında 2.5 m yüksekliğinde örneklerin denenmesine olanak sağlayan büyük ölçekli üç eksenli basınç birimleri bile, 1 m ya da daha büyük kaya parçaları içeren kaya dolgular için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, kaya dolgunun, eldeki deney aygıtından denebilecek boyutlara (örnek çapı, denenecek gerekteki en büyük tane boyutunun en az 6 katı; kimi araştırmalarda en az 4 katı) indirilmesinde, tane çapı dağılım eğrisi, yarı-logaritmik bir grafikte, gerçek dolgununkine koşut olan örnekler kullanılmaktadır. Bu yolla, değişik oranlarda küçültülen gerekç üzerinde ölçülmüş ϕ' değerinin kimi araştırmalarda, en büyük tane boyutu arttıkça azaldığı (en büyük tane boyutu 150 mm olan bir gerekte ϕ' , en büyük tane boyutu 12 mm olankinden 4^0 daha küçük), benzeri diğer araştırmalarda ise bunun tersi (en büyük tane boyutu

75 mm olan gereçte ϕ' , en büyük tane boyutu 10 mm olankinden 2^0 daha büyük) gözlenmiştir. Bu tür gereci modellemenin daha kolay bir yolu da, kırılmış gereç içindeki anılan sınırları aşan büyülükteki taneleri ayıklayıp gerisini olduğu gibi denemektir; ölçülen ϕ' değerinin tane çapı dağılım eğrisindeki ufak değişikliklerden önemli oranda etkilendiği kanıtlanmamıştır.

Böylece modellenen kaya dolgu gerecinin dayanımını ölçmekte üç eksenli basınç deneyinin yanısıra, Head'e (1982) göre, 38 mm çapa kadar tanelerin denenmesine olanak veren 300 mm x 300 mm boyutlu kesme kutusu deneyi de kullanılmaktadır (örneğin, Brown, 1988). Ülkemizde, sadece DSİ laboratuvarlarında, 191 mm çaplı örneklerin denenebildiği bir üç eksenli basınç birimi vardır; 300 mm x 300 mm'lik kesme kutusu aygıtı ise hiç bir laboratuvara yoktur. Yurtdışı bir yapımcı firmadan sağlanan bilgiye göre, böyle bir aygıtın Ankara'ya getirilmesi bugünkü fiyatlarla yaklaşık 360.000.000 TL (yaklaşık 36.000 dolar) tutmaktadır; ağırlığı ise 1 ton dolayındadır. Bu proje ile, bu boyuttaki bir kesme kutusu biriminin en çok %15'i maliyetinde, yaklaşık %25'i ağırlığında, tümüyle ülkemizde üretilebilen, kolayca parçalarına ayrılp yeniden toplanabilen basit aygıtlarla yapılan prizmatik kama kesme deneyinin, kaya dolgu gerecinin kayma dayanımını 300 mm x 300 mm'lik bir alan boyunca, güvenilir bir biçimde ölçüdüğü kanıtlanmıştır.

Bu proje ile yaklaşık aynı süre içinde, ilk Yazarin, Turp (1993) ile birlikte sürdürdüğü bir çalışma ile prizmatik kama kesme deneyinin kaya dolgu gerecinin kayma dayanımını 780 kPa'a varan dikey gerilmeler altında ölçüleceği gösterilmiştir (Mirata, 1992(b)). Bu da, 100 m yüksekliğindedeki kaya dolgu bir barajdaki olası kayma yüzeyine etkiyen en yüksek etkin dikey gerilme dolayındadır (Charles ve Watts, 1980). Bu deneyde ulaşılabilen dikey

gerilmeyi daha da artırmak olanaklı gözükmekte, bu yöndeki çalışmalar ODTÜ'de sürdürülmektedir.

Çok sayıda dolgu barajın yapılması planlanan ülkemizde, kaya dolgu gerecinin kayma dayanımı ölçümlerini tek bir laboratuvardaki tek aygittan beklemek yerine, görelî olarak düşük bedelli, kolay taşınabilirliği nedeniyle de inşaat alanında bile kolayca uygulanabilen prizmatik kama kesme deneylerini çok daha fazla ölçüm yapmakta kullanmak; böylece sağlanacak daha güvenli dayanım parametreleri ile belirsizlik oranı azaltılarak baraj yamacında sağlanacak ufak bir dikleştirme ile milyarlarca liralık tasarruf sağlamak olanaklı gözükmektedir.

4.2 Kıl Dolguların Kısa Süreli Dengeliliği, Sıkıştırma Denetimi

Özellikle iklim koşulları nedeniyle oldukça ıslak durumda serilip sıkıştırılma zorunluğu olan durumlarda, baraj ya da yol yapımında kullanılan yol dolgularının en tehlikeli dengelilik durumlarından biri, yapım sırasındaki ve yapım tamamlandıktan hemen sonraki durumdur. Bu durumdaki dengeliliğin hesabı için, 6 mm'ye kadar taneler içeren kıl dolgularda silindirsel kama kesme deneyinde, 38 mm'ye kadar taneler içeren dolgularda prizmatik ya da yerinde kama kesme deneylerinde ölçülen drenajsız kayma dayanımı parametreleri kullanılabilir.

Son yıllarda, kıl dolguların sıkıştırma denetimini doğrudan, drenajsız kayma dayanımı ölçümleriyle sağlamaya eğilimi artmış, ancak bu amaçla, belirlenen tek bir hücre basıncı altında, drenajsız üç eksenli deneylerde ölçülen dayanım kullanılmıştır (örneğin, Kennard v.b., 1978). Böylece, kama dayanımı zarfı üzerinde tek bir nokta elde edilmekte, bu ise, suya

doymamış durumda olan bu tür dolguların kayma dayanımı parametrelerini belirlemeye yetmemektedir. Varan'ın (1989), ilk Yazarın yönetiminde sürdürdüğü çalışmalar, anılan türde tek bir üç eksenli deneyle aynı süre içinde gerçekleştirilebilen iki silindirsel kama kesme deneyi yapıp, hem içyapışkanlık hem de içsel sürtünme açısını yeterli doğrulukla bulabilmenin olaklı olduğunu göstermiştir. Daha iri taneler içeren killerde, prizmatik kama kesme deneyi (Azimli, 1989), ya da yerinde kama kesme deneyi kullanılabilir.

4.3 Kılcal Çatıtlaklı ya da Taşlı Killerde, Siltli Çakılda

Şev Dengeliliği ve Taşıma Gücü

Bölüm 3.2'de özetlenen uygulamalardan, yerinde kama kesme deneyinin, kılcal çatıtlaklı ya da iri taneler içeren, suya doymamış killerdeki şevlerin kısa süreli dengeliliğinin incelenmesindeki yararlılığı açıkça görülmektedir. En büyük tane boyutu 6 mm'yi ya da kılcal çatıtlar arası açıklık 10 mm'yi geçmediği durumlarda aynı amaçla, silindirsel kama kesme deneyi de kullanılabilir.

Her tür yapının taşıma gücü sorunlarında, en tehlikeli durumda, zeminin drenajsız kayma dayanımı parametreleri geçerli olmaktadır. Bu nedenle, kama kesme deneyi, taşıma gücü sorunlarının çözümünde de kullanılabilir.

Cascini (1985), yerinde kama kesme deneyini, siltli çakılın kayma dayanımını ölçmekte kullanmış, sonuçların çevredeki dik yarmaların dengeliliği için gerekli dayanımla tutarlı olduğunu göstermiştir. Bu tür gerechte ölçülen parametreler, drenajlı parametreler olduğundan, böylece bulunan değerler kısa süreli olduğu kadar uzun süreli dengelilik ve taşıma gücü hesaplarında da kullanılabilir.

4.4 Kama Kesme Deneyinde Ölçülen Kalıntı Dayanım

Çakıl, kırılmış kaya gibi taneli zeminlerde, kama kesme deneyinde ölçülen kalıntı dayanım (örneğin, Şekil 20, 22, 24) konusunda, deneyin, kesme düzlemine dik yöndeki ötelenmelerin kesme ötelenmesiyle değişimi sıfıra yaklaşana dek sürdürülülmüş olması koşuluyla, herhangi bir belirsizlik yoktur. Bu dayanım, iyi sıkıştırılmamış, ya da deprem etkisiyle kayma belirtileri göstermiş kaya dolgular için geçerli dayanıma bir alt sınır olarak alınabilir.

Suya doymamış killerde yapılan silindirsel kama kesme deneylerinde, ilk yükleme sonunda ölçülen dayanım zarfının genellikle, dikey gerilmeyi Bölüm 2.3.2'de açıklanan yöntemle, en yüksek dayanımdaki değer dolayında tutarak yapılan deneylerde bile, en yüksek dayanımdakinden yüksek bir içsel sürtünme açısı verdiği görülmüştür (örneğin, Seçkin, 1993). Bunun nedeni, yüksek ötelenmelerde ölçülen dayanımın, girintili çıktınlı iki yüzeyin birbirine göre kaymasını yansıtmasıdır. İlk Yazarın, Aybak'la (1988) birlikte yaptığı yerinde kama kesme deneylerinden, kesme düzlemi alanı büyütükçe, bu etkinin azaldığı görülmüştür. Benzer bir etki, kesme kutusu deneylerindeki ilk yükleme sonunda da gözlendiğinden, kesme kutusunda kalıntı dayanımın ölçülmesi için örneği önce telle kesip sonra, ileri-geri yükleme yolu önerilmektedir (örneğin, Head, 1982). Telle kesme yöntemi silindirsel kama kesme deneyinde de uygulanıp kesilen yüzeyler iyice düzlandıktan sonra yeniden yapılan kesme deneyi sonunda ölçülen dayanımın, Head'in (1982) önerdiği yöntemle 63 mm çaplı kesme kutusu deneylerinde ölçülenlere çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür (Seçkin, 1993).

Uygulamada, bir bölgede heyelan olmuşsa ve aşırı yağışlardan sonra yeniden bir ötelenme gözleniyorsa bu, yüzeysel suların kayma yüzeyine sisliğini

gösterir. Bu durum için geçerli kalıntı dayanımı ölçerken zemin örneğini telle kesip yüzeyleri düzledikten sonra, yeniden kesme işlemine geçmeden önce, bu yüzeyleri suya batırmak daha geçerli sonuçlar verebilir.

4.5 Suya Doymamış Killerde Şevlerin Uzun Süreli Dengeliliği

Mirata(1987), doygunluk derecesi S_r , %93 ile %97 arasında olan killer üzerinde yapmış olduğu boşluk suyu basıncı ölçümlerine dayanarak, kama kesme deneyinde ölçülen drenajsız ϕ değerinin, drenajlı ϕ' değerine çok yakın olacağını savunmuştur. Bu varsayımla, özellikle S_r değerinin daha düşük olduğu, taş ya da kılçal çatılk içeriği için olağan deneylerden daha büyük bir alanın denenmesini gerektiren killerde, Mc Gown v.b.(1977) tarafından vurgulandığı gibi, çatılkların belirli eğimler dolayında yoğunlaşması nedeniyle, dayanımı, incelenen yamaçta geçerli olacak doğrultularda ölçmek gerekiği durumlarda, örneğin, bir baraj gölü çevresindeki yamaçların uzun süreli dengeliliği, yerinde kama kesme deneyinde ölçülen ϕ değerlerini ϕ' olarak alıp, $c' = 0$ varsayıarak incelenebilir. Aynı amaçla, sondaj kuyularından alınan örneklerin denenebileceği, gerekirse burada belirtilenlerden daha büyük çapta örnekler üzerinde yapılacak silindirsel kama kesme deneylerinden yararlanılabilir.

5. SONUÇ

Kama kesme deneyi, tümüyle ya da büyük oranda tek bir krikoyla, benzerlerinden çok daha kolay yollarla, belirli bir düzlem boyunca hem dikey gerilme hem de kesme gerilmesi uygulayan, bu yolla killerde drenajsız kayma

dayanımı parametrelerinin, çakıl ve kırılmış kayada drenajlı dayanımın bulunmasını sağlayan bir yükleme biçimidir. Deneyin, göçmuş şevlerle, yerleşmiş deneylerle tutarlı sonuçlar verdiği kanıtlanmış, bu proje ile de bu kanıtlar artırılmıştır.

Kama kesme deneyinin değişik biçimlerinden, özellikle dolgu barajların, ama bunun yanında başka yapıların zemin dayanımıyla ilgili sorunlarının çözümünde yararlanılabilir. DSİ'de bu yönde ilk uygulamalar, bu proje ile başlatılmıştır. Bundan sonra yapılabilecekler şöylece sıralanabilir:

- (1) Prizmatik kama kesme deneyi aygitının, ODTÜ'de başarıyla denenmiş bulunan 20 tonluk biçimini de üretip, kaya dolgu gereci dayanımının yüksek barajlarda geçerli dikey gerilmeler altında ölçülebilmesini sağlamak; böylece ölçülen değerleri 0.19 m çaplı örnekler üzerinde yapılacak üç eksenli deneylerle denetlemek.
- (2) Sondaj kuyularından, 100 mm'den büyük çapta örnekler alma olanağı varsa, bunları alındıkları çaplarda deneyebilmek için, silindirsel kama kesme deneyi aygitının daha büyük çaplı örneklerde uygun boyutlarda olanını üretmek.
- (3) Kama kesme deneyini bugüne dek suya doygun killerde deneme olanağı doğmamıştır. Bu deneyin, kılcal çatılk ya da İri taneler içeren bu tür killerde de yararlı olacağına inanılmaktadır; bu irdelenebilir.

KAYNAKLAR

Akroyd T.N.W., *Laboratory Testing in Soil Engineering*, Soil Mechanics Ltd., London, (1957).pp: 116, 124.

Aybak T., *Improved Measurement of Residual Strength in the In Situ Wedge Shear Test*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü, Ankara, (1988).

Azimli F., *Influence of Coarse Gravel Content on the Undrained Shear Strength of a Compacted Plastic Clay*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü, Ankara, (1989).

Brown A.J., Use of Soft Rockfill at Evretu Dam, Cyprus, *Géotechnique*, 38, No.3, 333-354, (1988).

Cascini L., Su Alcune Prove Eseguite con l'Iswest, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 14, No.1, 63-69, (1980).

Cascini L., Alcune Osservazioni sulla Tecnica Iswest, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 17, No.1, 19-25, (1983).

Cascini L., Un Esempio di Utilizzazione della Tecnica Iswest, *Rivista Italiana di Geotecnica*, 19, No.3, 161-167, (1985).

Cascini L., KİŞİSEL YAZIŞMA, (1988).

Cascini L., Discussion, *Géotechnique*, 42, No.4, 645-646, (1992).

Charles J.A., Soares M.M., The Stability of Slopes in Soils with Nonlinear Failure Envelopes, *Canadian Geotechnical Journal*, 21, 397-406, (1984).

Charles J.A., Watts K.S., The Influence of Confining Pressure on the Shear Strength of Compacted Rockfill, *Géotechnique*, 30, No.4, 353-367, (1980).

Çağnan Ş., *Measurement of Shear Strength of Coarse Gravels by the Wedge Shear Test*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü, (1990).

Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A., The Shear Strength of Unsaturated Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 313-321, (1978).

Garga V.K., Effect of Sample Size on Shear Strength of Basaltic Residual Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 25, 478-487, (1988).

Head K.H., *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol.2, ELE International Ltd., London, (1982), pp: 562, 570.

Kennard M.F., Lovenbury H.T., Chartres F.R.D., Hoskins C.G., Shear Strength Specification of Clay Fills, *Conf on Clay Fills*, London, (1978), pp: 143-147.

McGown A., Radwan A.M., Gabr A.W.A., Laboratory Testing of Fissured and Laminated Soils, 9th Int.Conf. Soil Mech. and Fndn Engng, Tokyo, (1977), Vol.1, 205-210.

Mirata T., Ankara Kılinde Üç Şev Kaymasının Yeni Bir Teknikle İncelenmesi, *TÜBİTAK IV. Bilim Kongresi*, Ankara, (1973), Yayın No.194, MAG Seri No.12, s:19/1-18.

Mirata T., The In Situ Wedge Shear Test -- a New Technique in Soil Testing, *Géotechnique*, 24, No.3, 311-332, (1974). (Düzeltilmeler: *Géotechnique*, 24, No.4, 698; 25, No.1, 157-158; 36, No.1, 144; 37, No.3, 420; 38, No.1, 163.)

Mirata T., *Short-term Stability of Slopes in Ankara Clay*, (Ph.D.thesis), University of London, (1976).

Mirata T., *Yerinde Kama Kesme Deneyi: Yeni Bir Zemin Deney Tekniği*, TÜBİTAK Yayın No.328, MAG Seri No.42, (1977(a)).

Mirata T., *Yerinde Kama Kesme Deneyinin Yararlılığı*, *TÜBİTAK VI. Bilim Kongresi, Izmir*, (1977(b)), Yayın No.384, MAG Seri No.49, s.681-695.

Mirata T., *Fırsatlı Ankara Kılinde Şevlerin Kısa Süreli Duraylığı, Yerbilimleri Açısından Ankara'nın Sorunları Sempozyumu, Türkiye Jeoloji Kurumu*, Ankara, (1978), s: 78-84.

Mirata T., Strength Parameters for Short Term Stability Problems in Stiff Fissured Unsaturated Clays, *7th European Conf. Soil Mech. Fndn Engng*, Brighton, (1979(a)), Vol.3, 113-114.

Mirata T., Discussion, *7th European Conf. Soil Mech. Fndn Engng* Brighton, (1979(b)), Vol.4, 152-154.

Mirata T., Potential of the In Situ Wedge Shear Test in Landslide Forecasting, *Int. Conf. on Engineering for Protection from Natural Disasters*, Bangkok (1980(a)), pp.593-604.

Mirata T., Laboratuvar Kama Kesme Deneyi, *TÜBİTAK VII. Bilim Kongresi*, Kuşadası, Aydın, (1980(b)), MAG, İnş.Seksiyonu, s:659-671.

Mirata T., *Laboratory Wedge Shear Test*, Research Report, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, Ankara, (1981).

Mirata T., Suya Doymamış Sert Killerde Yamaç Dengesi, *Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi Dayanma Yapıları Semineri*, DSİ, Samsun, (1987), Cilt1, s:17/1-19.

Mirata T., Developments in Wedge Shear Testing of Unsaturated Clays and Gravels, *Géotechnique*, 41, No.1, 79-100, (1991). (Düzeltilmeler: *Géotechnique* 41, No.2, 296; 41, No.4, 639).

Mirata T., *Çakılı ve Kırılmış Taşın Kayma Dayanımının Kama Kesme Deneyinde Yüksek Basınçlar Altında Ölçülmesi*, ODTÜ, Araştırma Fonu Projesi 90-03-03-03, Sonuç Raporu, (1992(a)).

Mirata T., Discussion, *Géotechnique*, 42, No.4, 646-648, (1992(b)).

Mirata T., *Kama Kesme Deneyinin Basit Yöntemlerle Değerlendirilmesi ve İstendiğinde Deney Sirasındaki Hesaplamalar İçin Veri Formları ve Programları*, Rapor No: TM92.2, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, Ankara, (1993(a)).

Mirata T., *Yerinde ya da Prizmatik Kama Kesme Deneyi için Deney/Bilgisayar Veri Formu ve Bilgisayar Çıktısı ile İlgili Açıklamalar*, Rapor No: TM92.1, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, Ankara,(1993(b)).

Mirata T., *Silindirsel Kama Kesme Deneyi için Deney/Bilgisayar Veri Formu ve Bilgisayar Çıktısı ile İlgili Açıklamalar*, Rapor No: TM92.3, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, Ankara, (1993(c)).

Mirata T., *Silindirsel Kama Kesme Deneyi Deney Yönergesi*, Rapor No: TM93.1, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, Ankara, (1993(d)).

Mirata T., *Yerinde ve Prizmatik Kama Kesme Deneyi Deney Yönergesi*, Rapor No: TM93.2, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, (1993(e)).

Mirata T., *Kama Kesme Deneyiyle İlgili Özel Aygıtların Ayrıntılı Çizimleri ve Açıklamalar*, Rapor No: TM93.3, İnş.Müh.Bölümü, ODTÜ, Ankara, (1993(f)).

Ötkem Ü.E., *Laboratory Wedge Shear Test for the Short Term Stability of Clay Fills*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü, (1984).

Seçkin A., *Further Study of Shear Strength Measured in the Cylindrical Wedge Shear Test*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü,(1993).

Skempton A.W., Slope Cuttings in Brown London Clay, *9th Int. Conf. Soil Mech. Engn Engng*, Tokyo, (1977), Vol.3, 261-270.

Turp E.Z., *Measurement of Shear Strength of Coarse Gravels under Higher Stresses in the Prismatic Wedge Shear Test*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü, (1993).

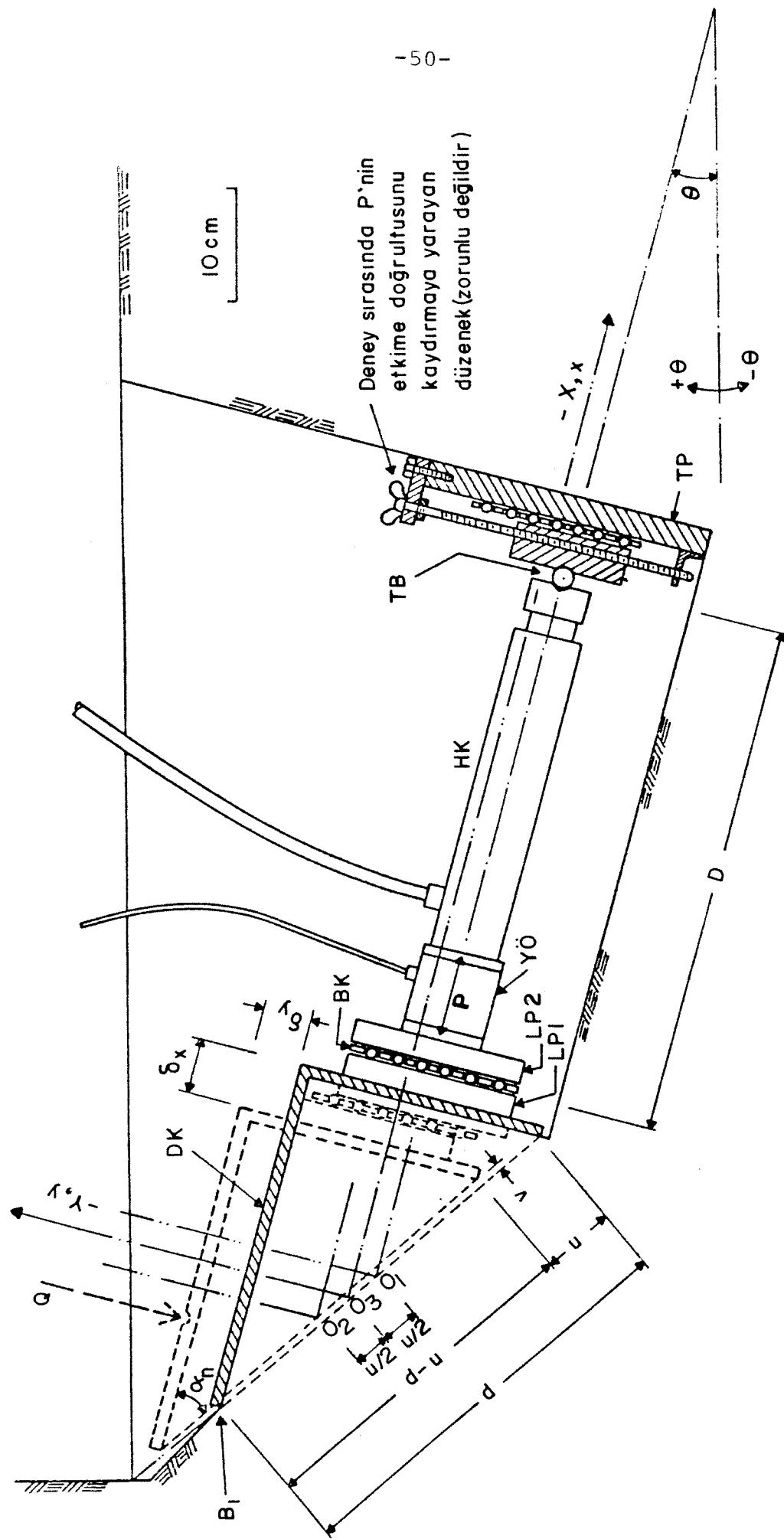
Varan M., *Use of the Cylindrical Wedge Shear Test for the Compaction Control of Clay Fills*, (Yüksek Lisans Tezi), ODTÜ İnş.Müh.Bölümü, (1989).

Çizelge 1. Kimi simgelerin kama kesme deneyinin değişik biçimleri için tanımı

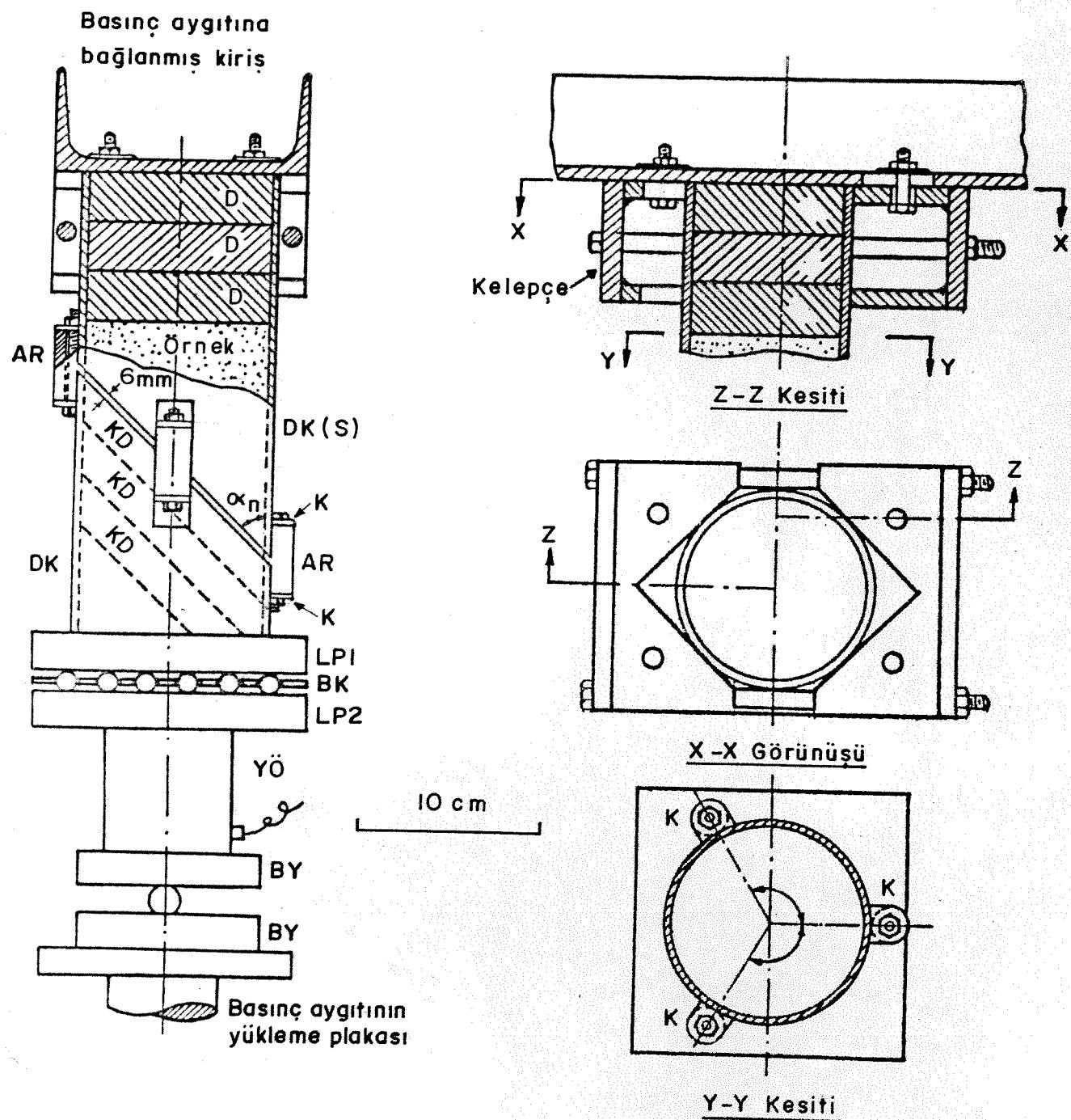
Simge	Silindirsel kama kesme deneyi için* (Şekil 9)	Yerinde ya da prizmatik kama kesme deneyi için** (Şekil 8)
d_{ax}	$D_i / \tan \alpha_n + n_c / \sin \alpha_n$	$d \cos \alpha_n$
d_{mx}	$(D_i / 2) \cot \alpha + h_s$	$(d/2) \cos \alpha_n + t$
d_{my}	$D_i / 2 + t$	$(d \sin \alpha_n + n_c / \cos \alpha_n) / 2 + h_m + t$
d_{yb}	$D_i / 2$	$(d \sin \alpha_n - n_c / \cos \alpha_n) / 2$
h_{np}	$D_i / 2$	$(d/2) \sin \alpha_n$
h_{pp}	$D_i / 2 \tan \alpha_n$	$(d/2) \cos \alpha_n$
S_a	$(4 \tan \alpha_n) / \pi D_i$	$1 / d \cos \alpha_n$

* t = deney kalibinin et kalınlığı.

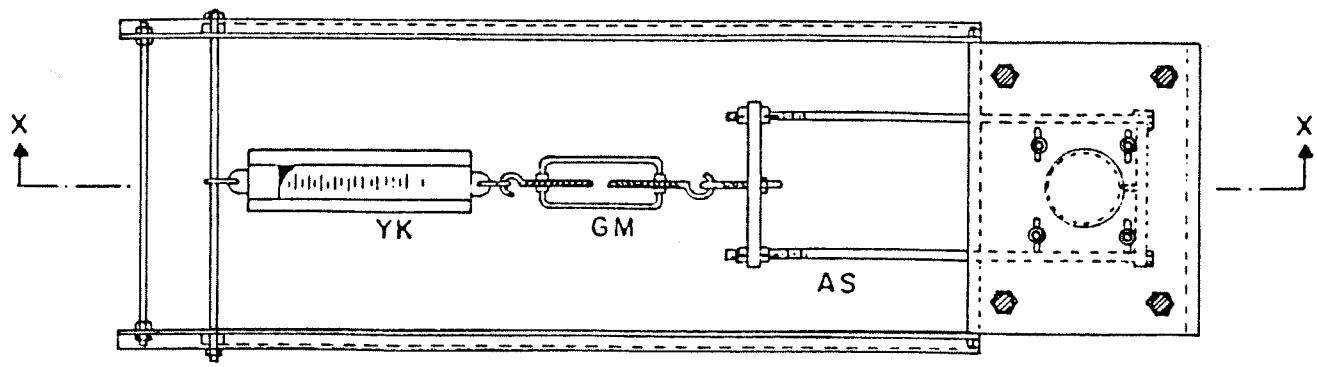
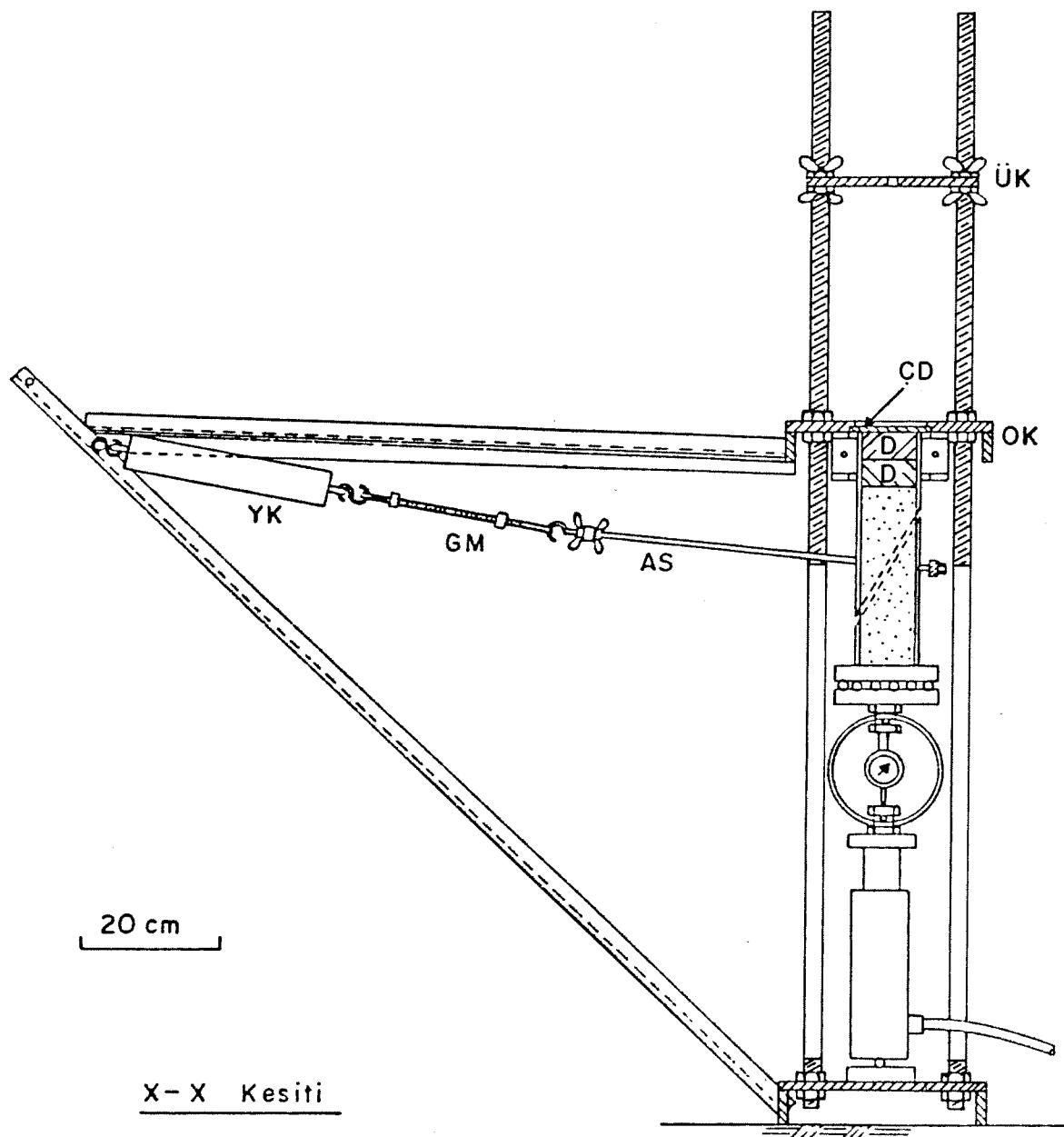
** Yerinde kama kesme deneyi için, $n_c = h_m = 0$.



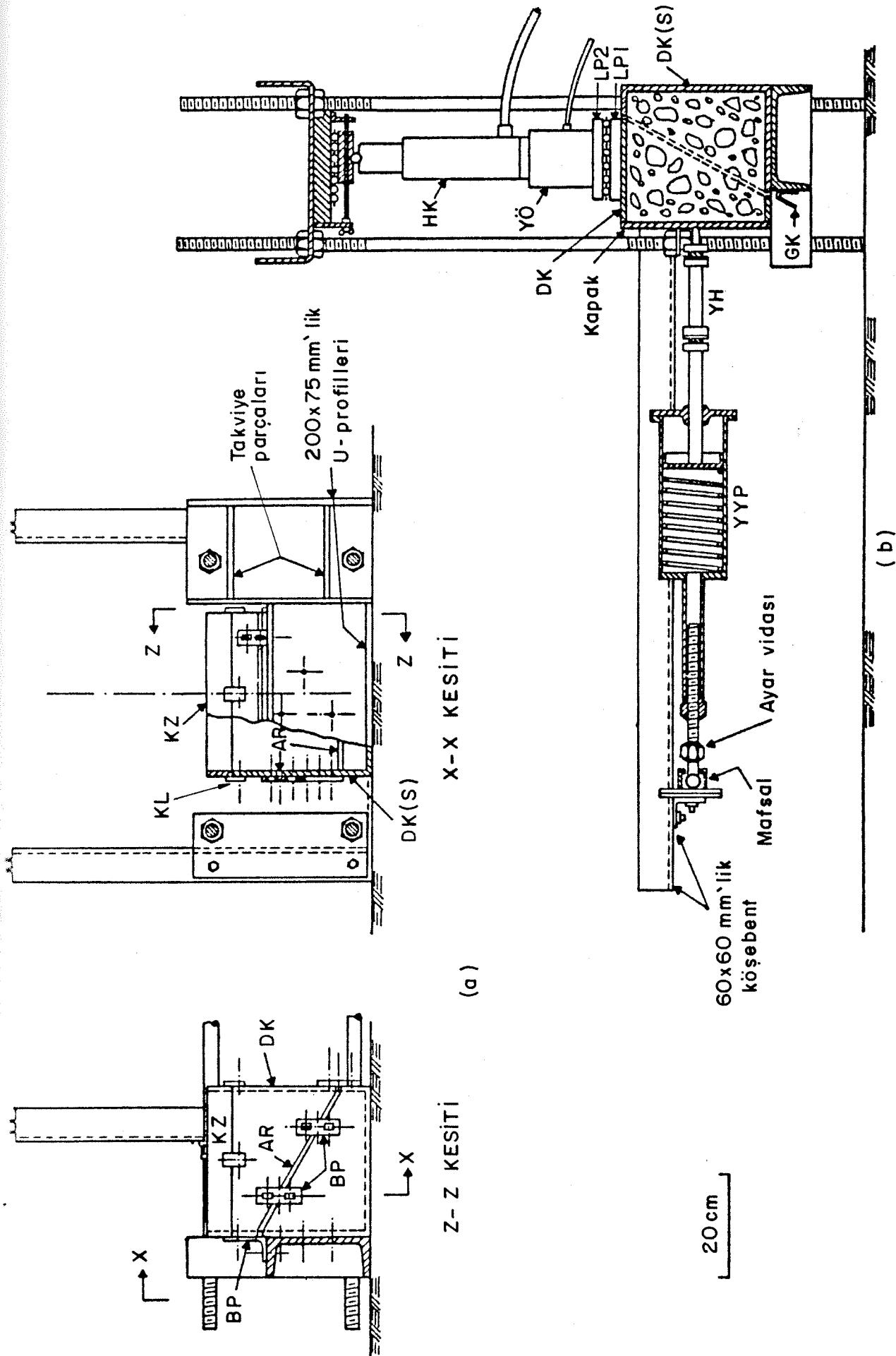
Sekil 1. Yerinde kama kesme deneyinin ilkesi



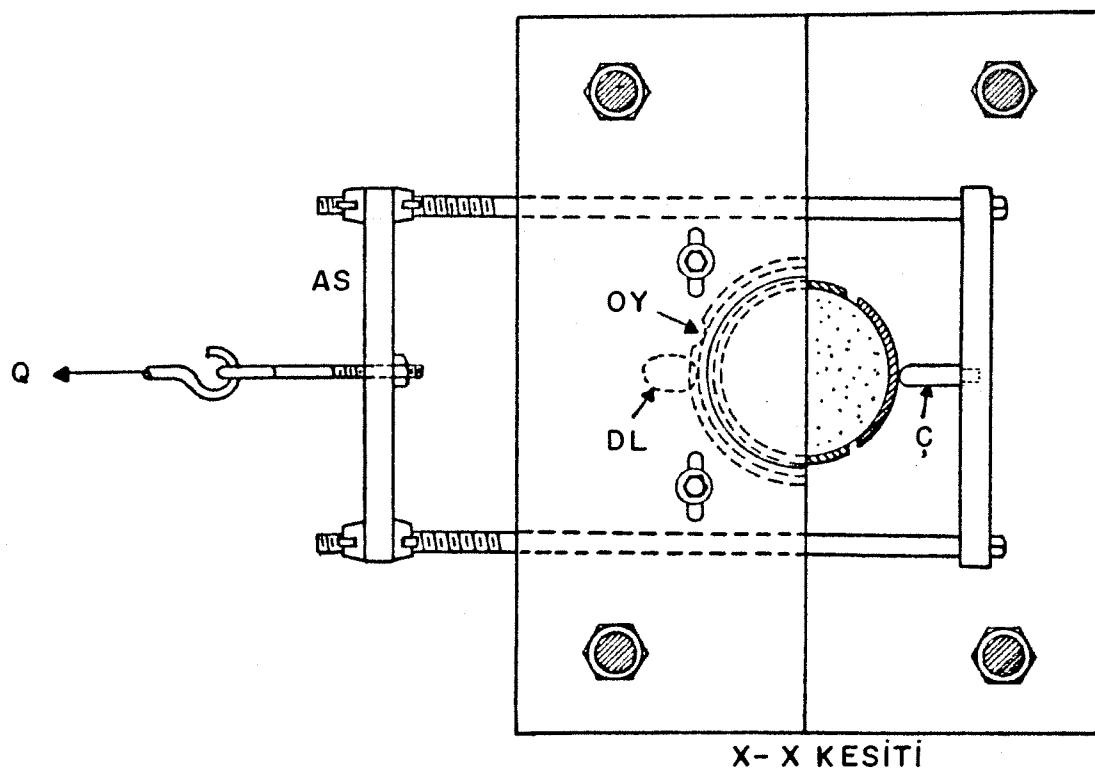
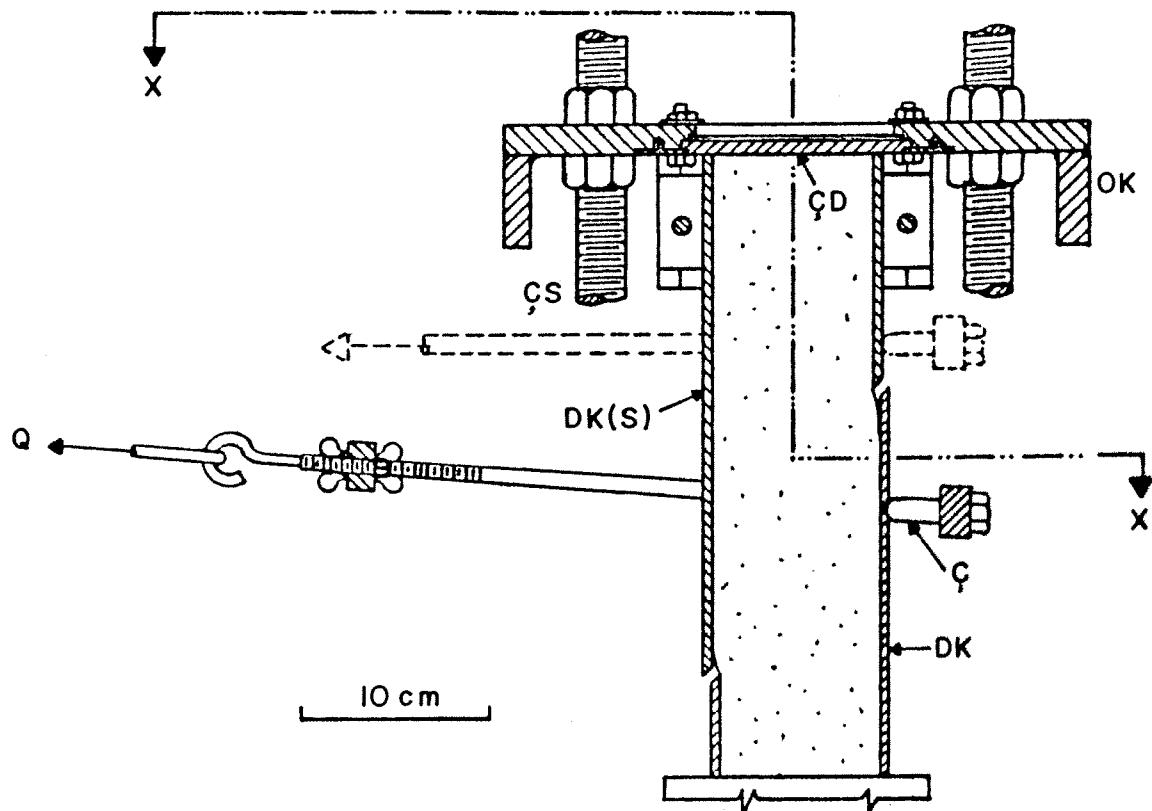
Şekil 2. Basınç aygıtı kullanılarak yapılan silindirsel kama kesme deneyi



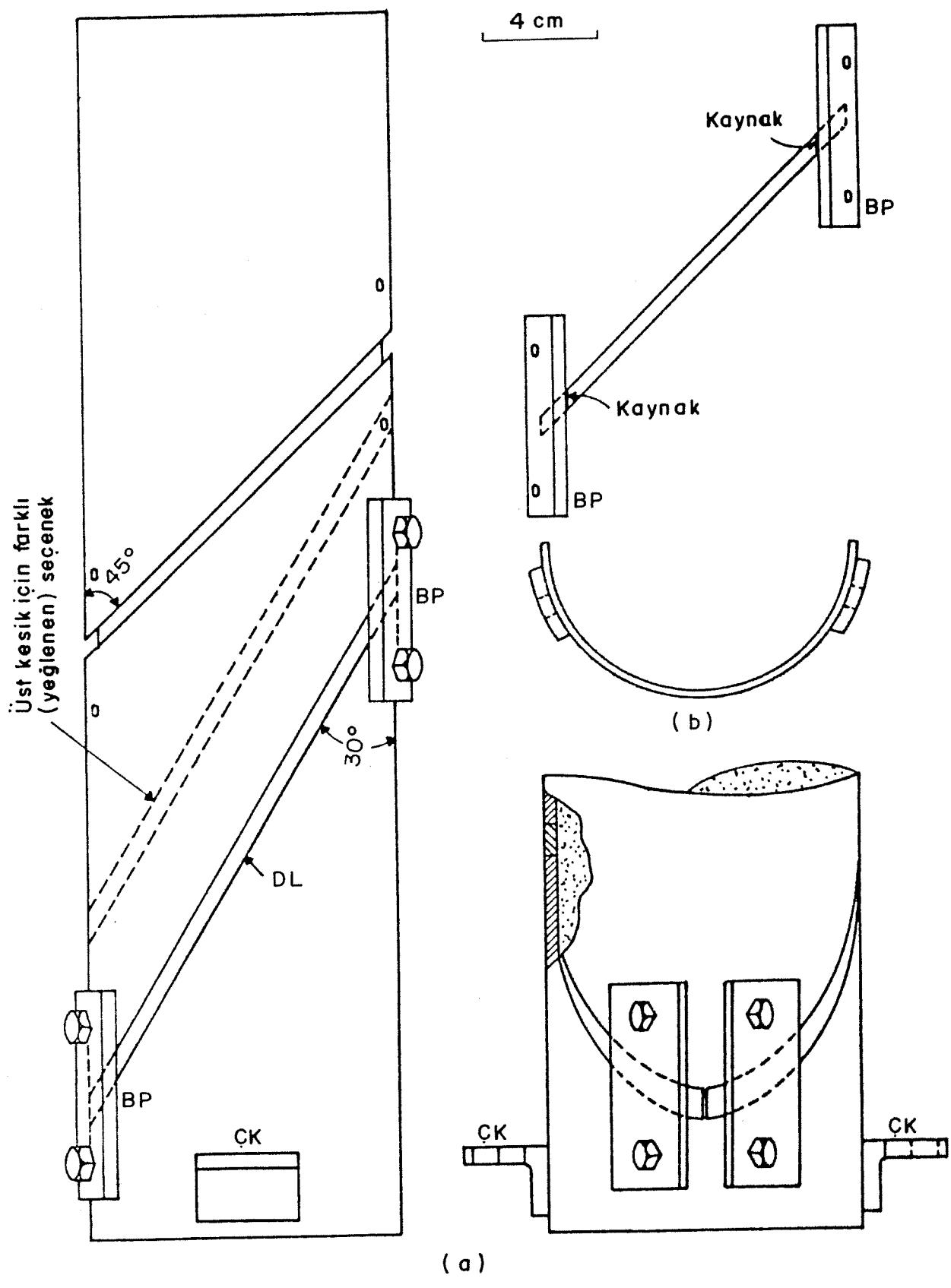
Şekil 3. Taşınabilir çerçeveye kullanılan silindirsel kama kesme deneyi



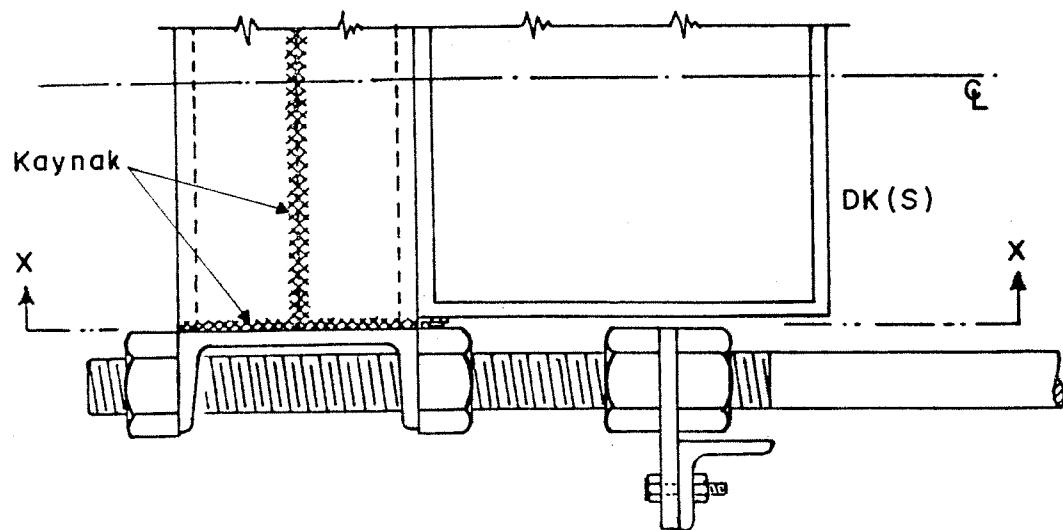
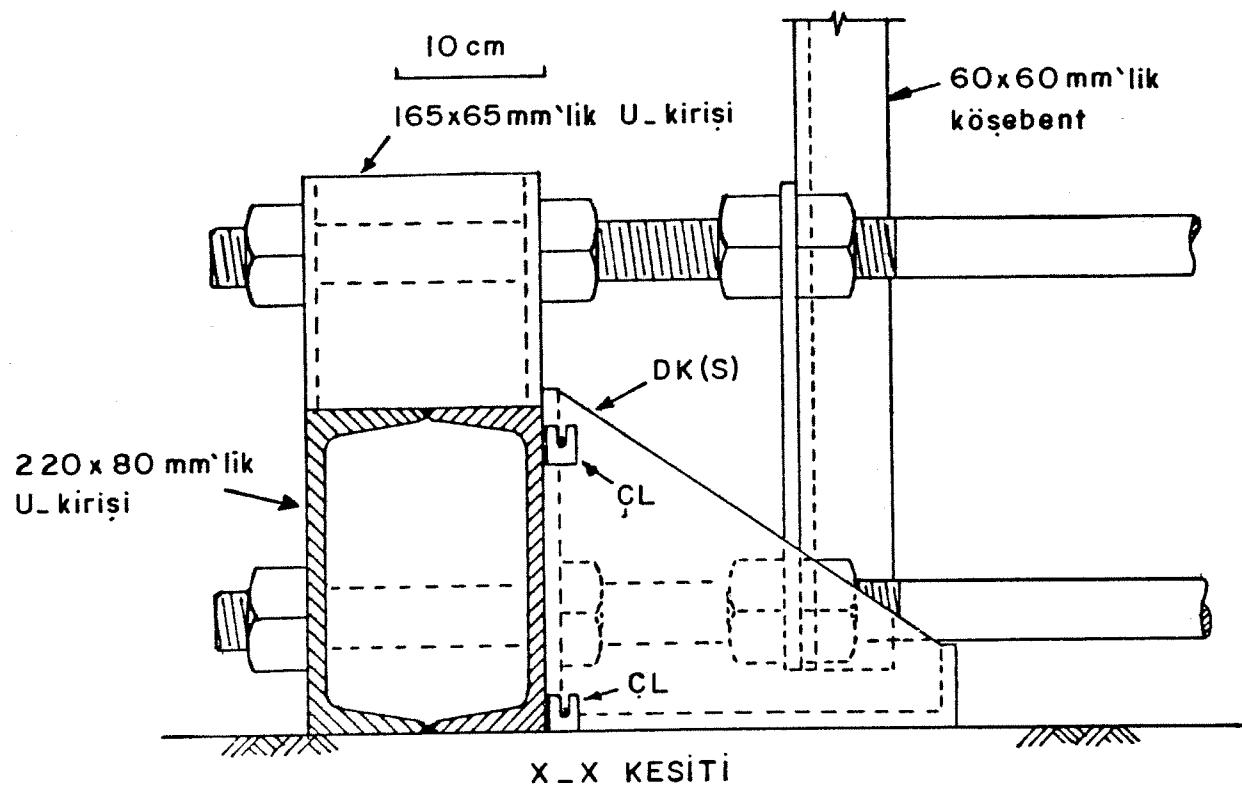
Şekil 4. Prizmatik kama kesme deneyinde kullanılan düzenek:(a) Zeminin sıkıştırılması sırasında;
(b) Deneyin başlangıcında



Şekil 5. Silindirsel kama kesme deneyinde kullanılan taşınabilir çerçeveyin ayrıntıları



Şekil 6. Sıkıştırılmış zeminler için çift kesikli deney kalıbı:
(a) Üst aralayıcıları çıkarılmış durumda kalıp;
(b) Üst aralayıcının bir yarısı



Şekil 7. Yirmi tonluk çerçevede U_kirişlerinin düzeni

DK : Deneysel kalıbı (öftelenen yarı)
DK (S) : Deneysel kalıbı (sabit yarı)

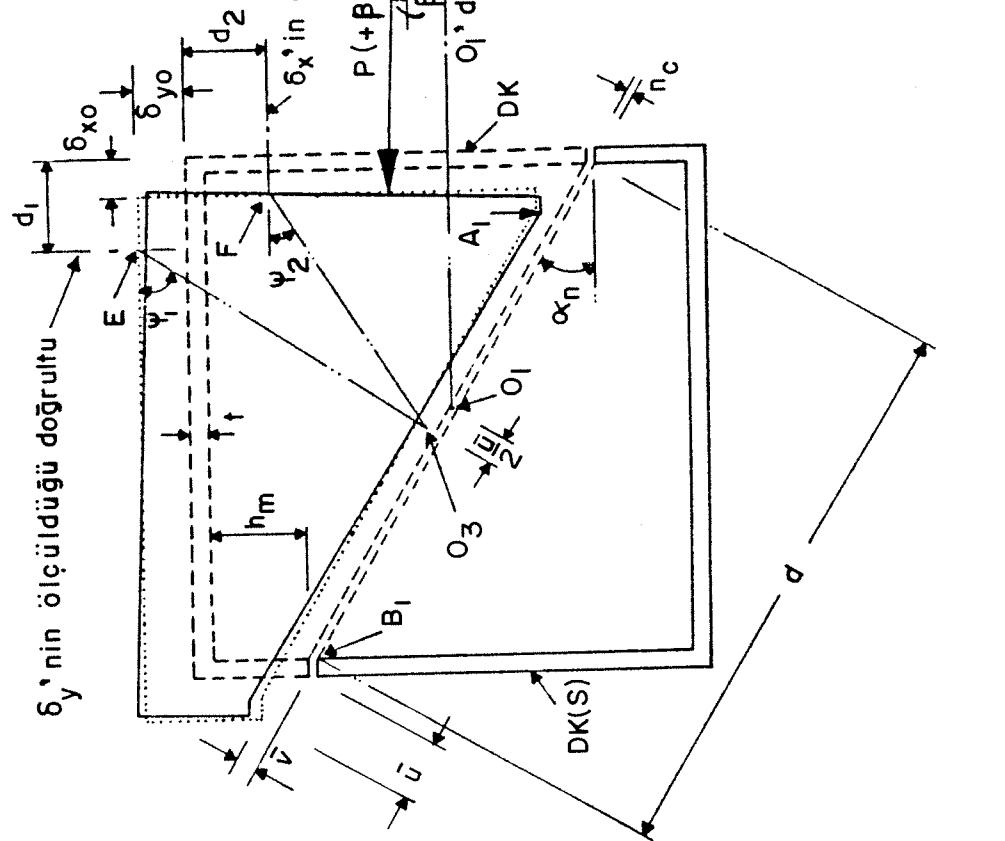
----- DK'nın kesme başlangıcındaki

DK nin ortalaması \bar{u}, \bar{v} (ya da $\bar{o}_{x0}, \bar{o}_{y0}$) ötelenmeleri sonundaki durumu ($\beta = 0$)

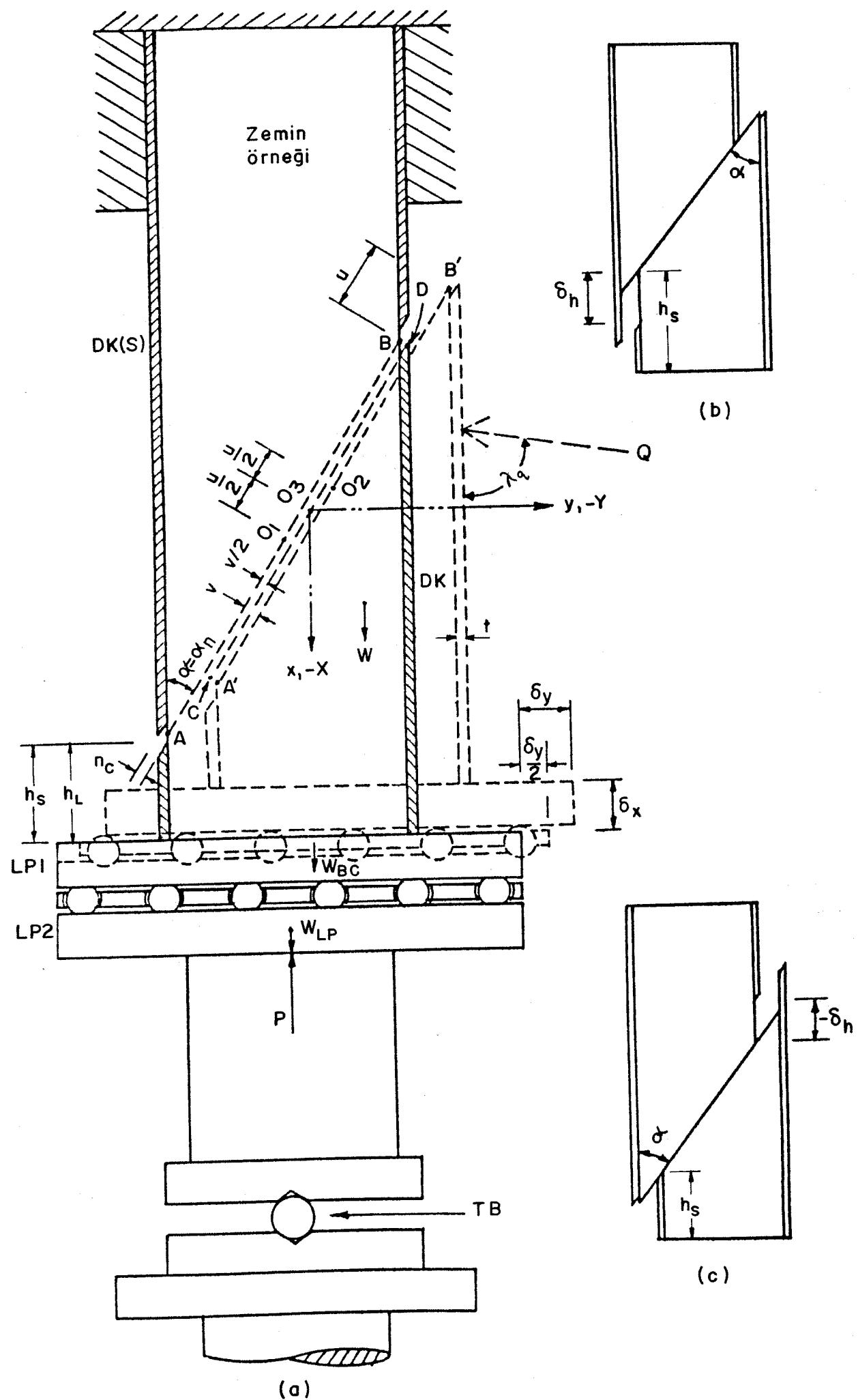
$$\Delta y_p + \Delta y_{RB}$$

ay cizgi

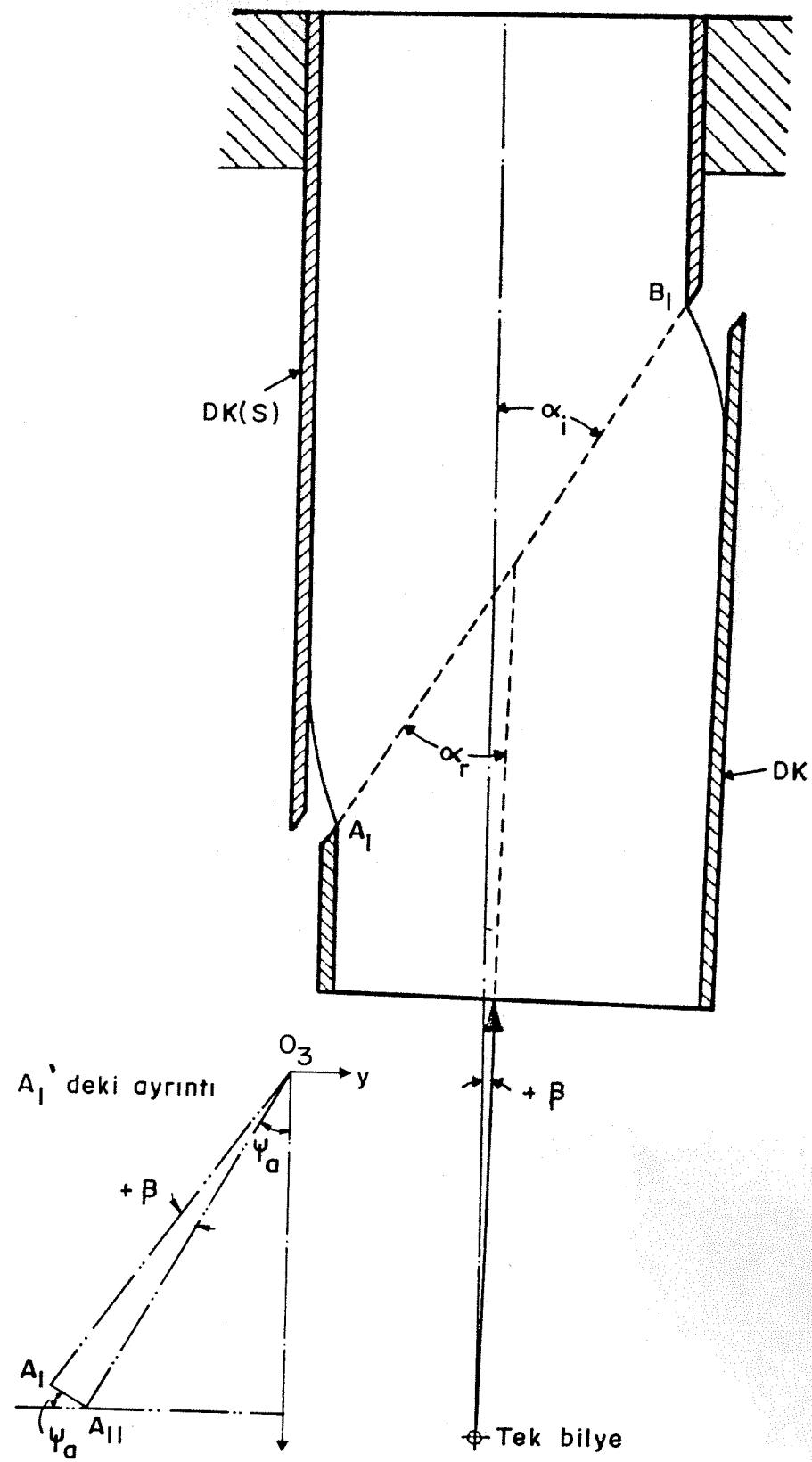
+ β miktarındaki dönmənin
 δ_x ve δ_y 'de yarattığı
 deyşimləri sırasıyla,
 $-E\vec{E}' \cdot \cos \psi_1 v e - \vec{FF}' \cdot \sin \psi_2$
 göstəren ayrıntı



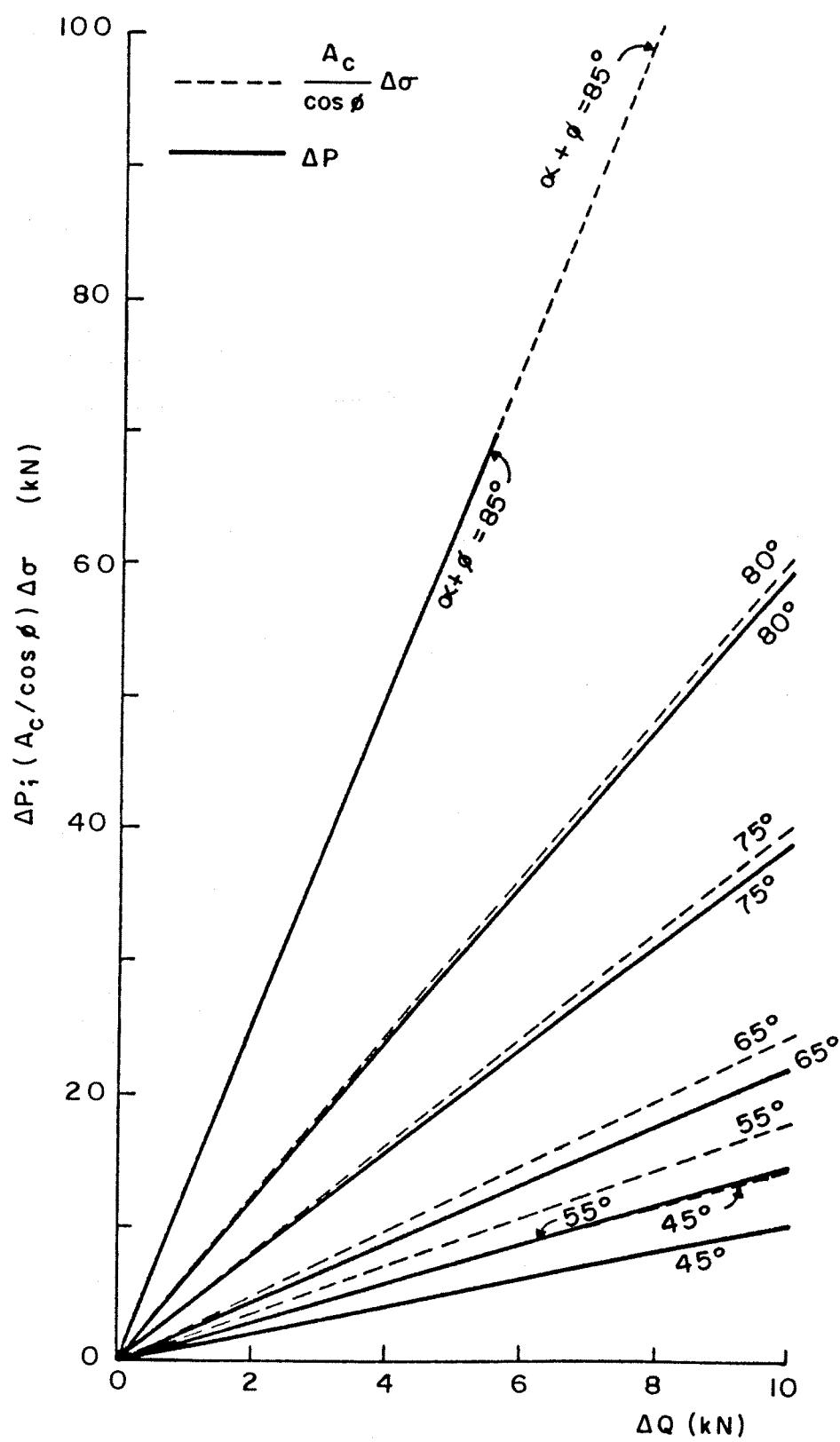
Sekil 8. Prizmatik kama kesme deneyinde kalip dönmesinin ölçülen δ_x , δ_y ötelenmelerine etkisini gösteren sema



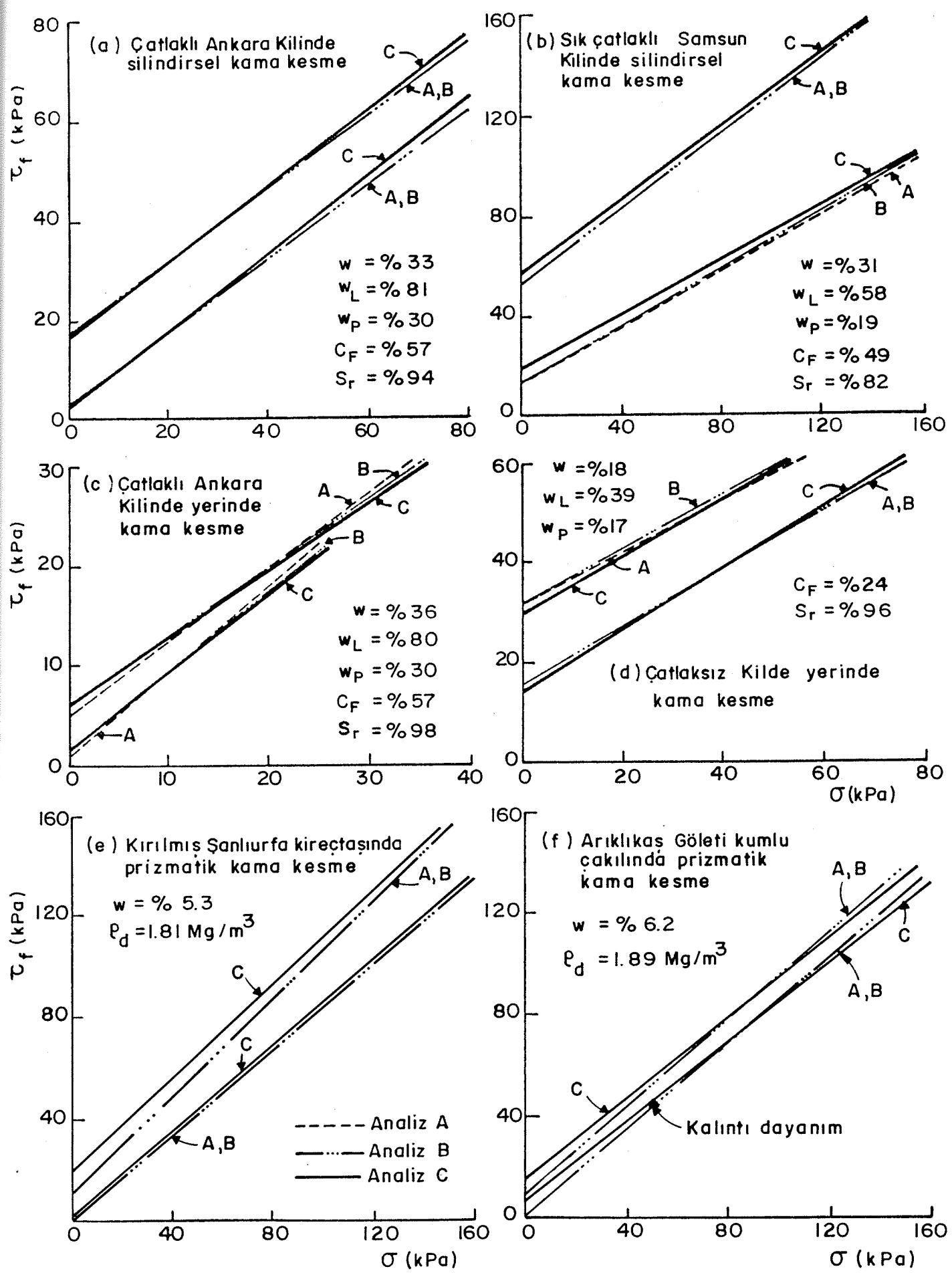
Şekil 9. Silindirsel kama kesme deneyinin basit değerlendirmesinde kullanılan yük, ötelenme ve uzaklıklar:(a) Genellikle oluşan kayma düzlemi;(b) ve (c) Farklı



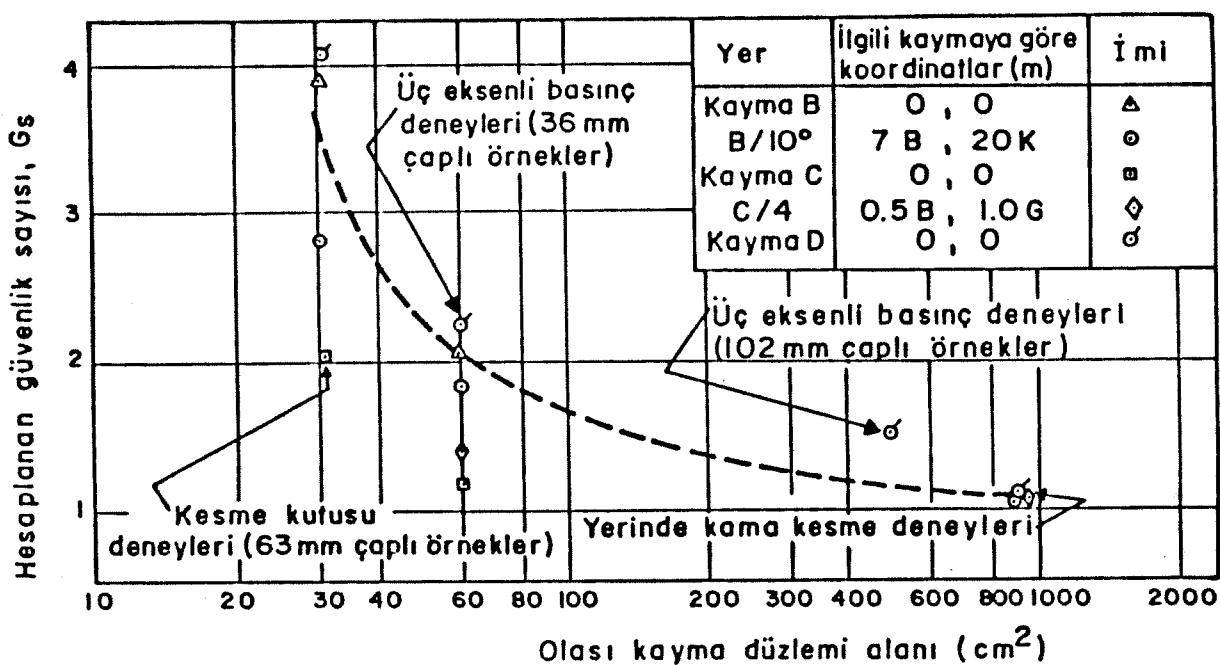
Şekil 10. Silindirsel kama kesme deneyinde plastik bir kilin yenilme öncesi biçim değişimi



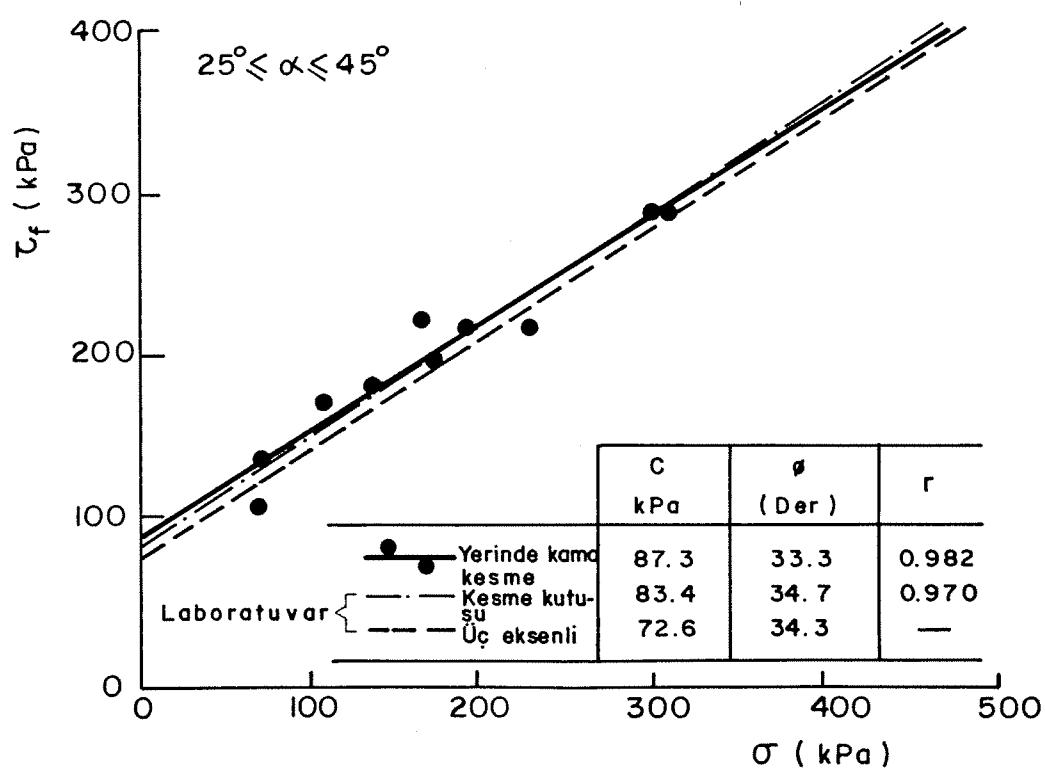
Şekil II. Yanal yükteki artımın ana yük ve dikey gerilmeye yarattığı artış



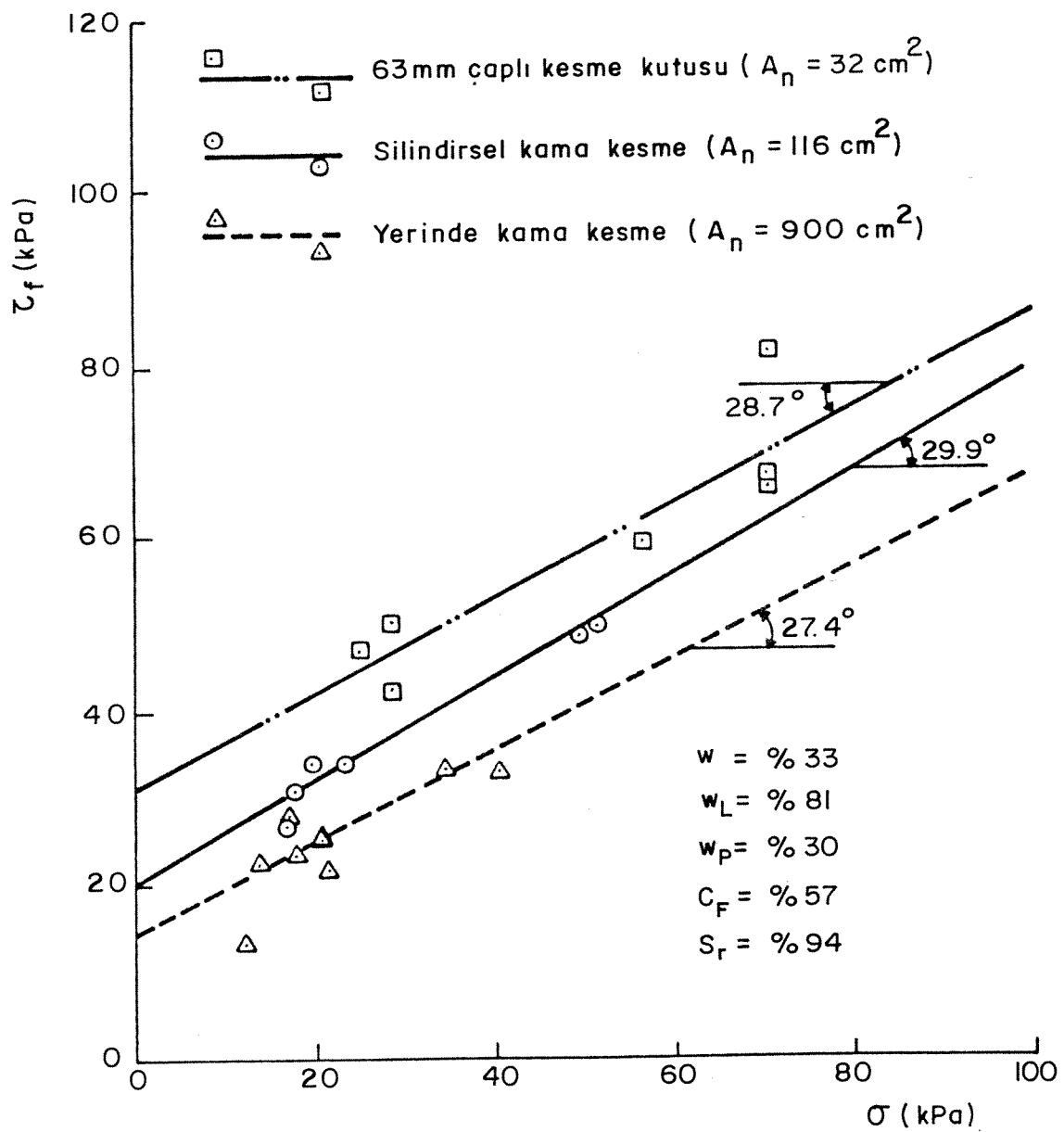
Sekil 12. Analiz A, B ve C ile bulunan en yüksek ve kalıntı kayma dayanımı zarflarının karşılaştırması ((a)-(b):Mirata (1991)'den)



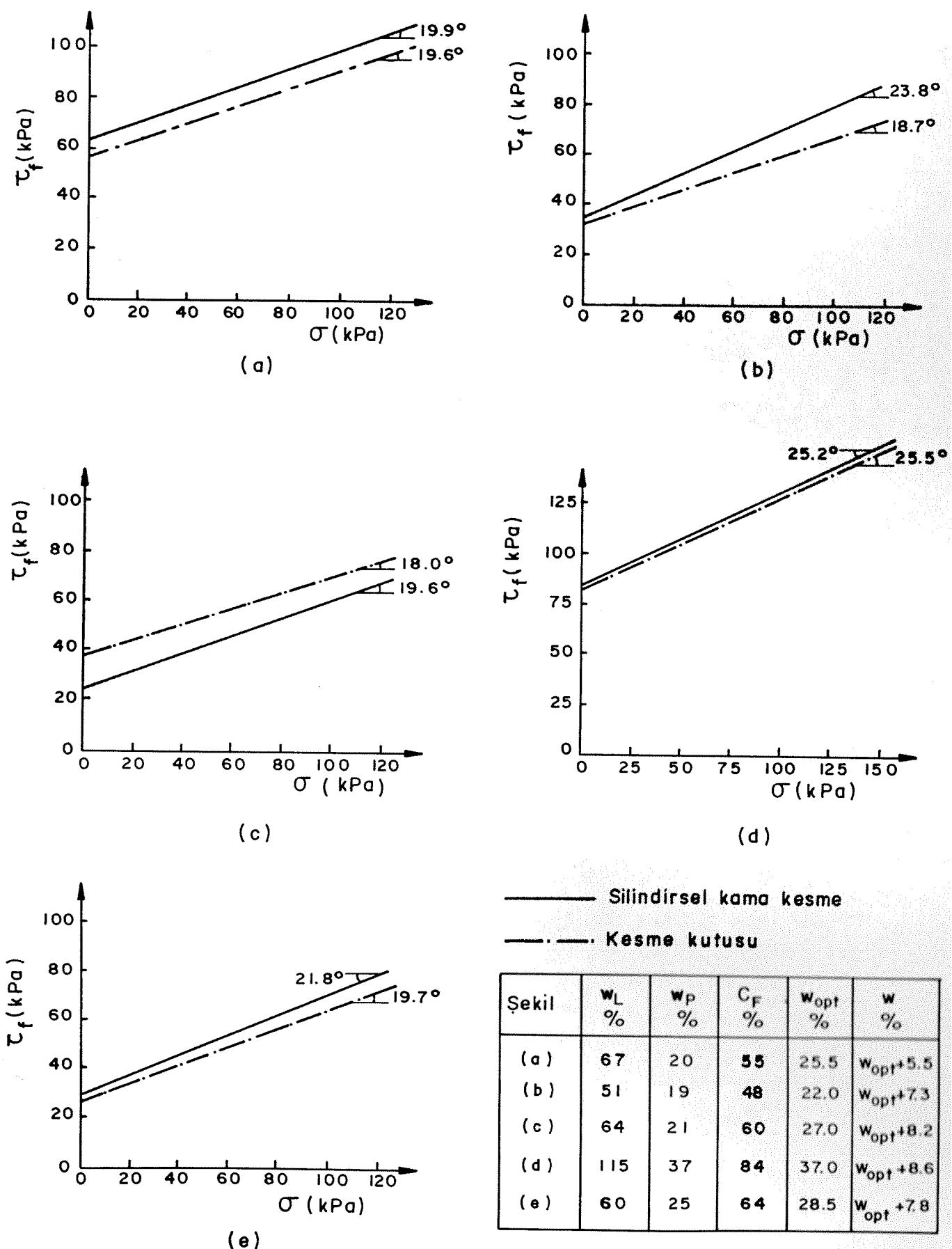
Şekil 13- Ankara kılindeki üç kaymada hesaplanan güvenlik sayısının deneydeki olası kayma düzleme alanıyla değişimi



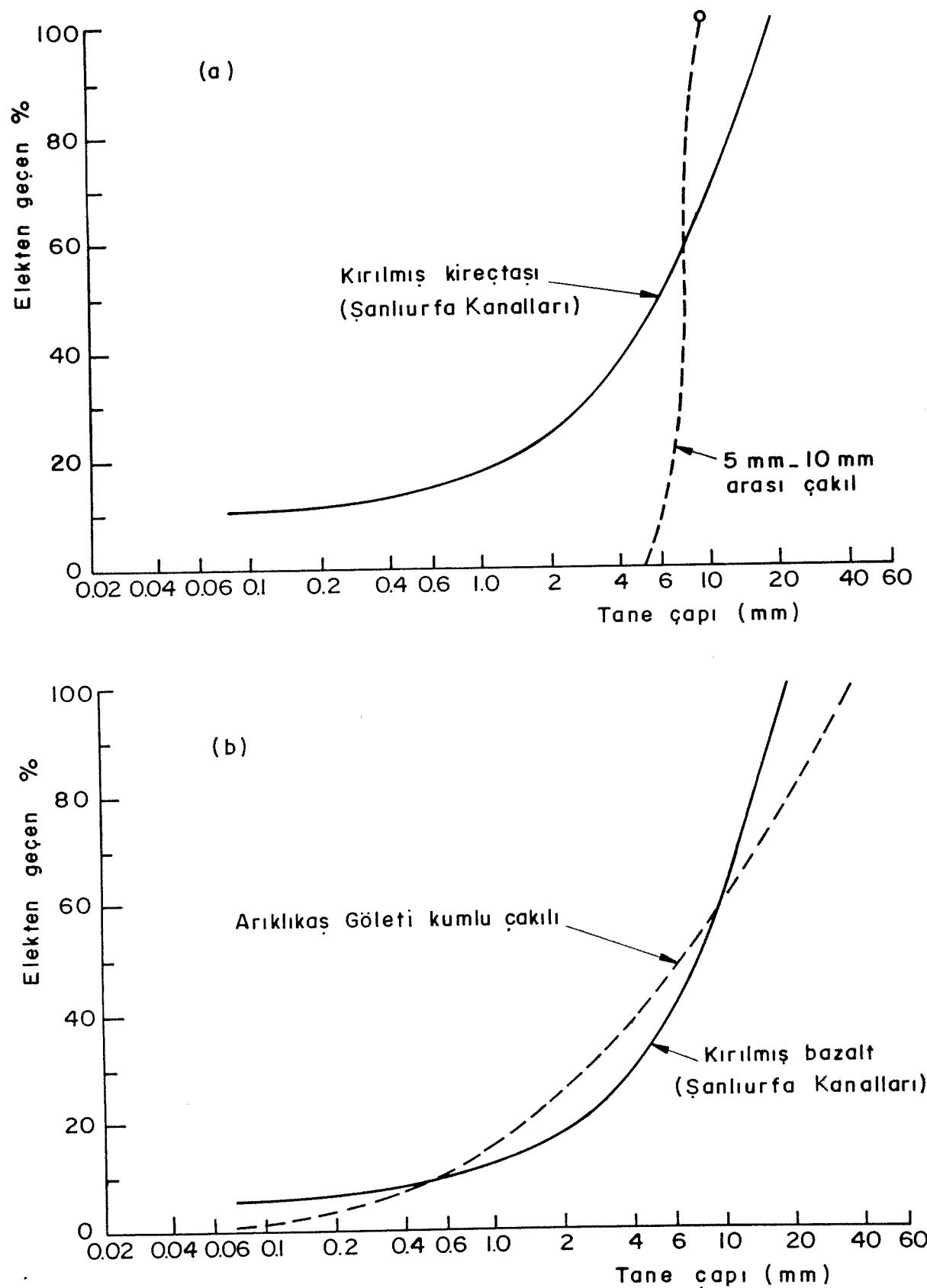
Şekil 14. Suya doymamış kumlu Pompei külü için yerinde kama kesme deneyi ile laboratuvar kesme kutusu ve üç eksenli deney sonuçlarının karşılaştırması (Cascini, 1992)



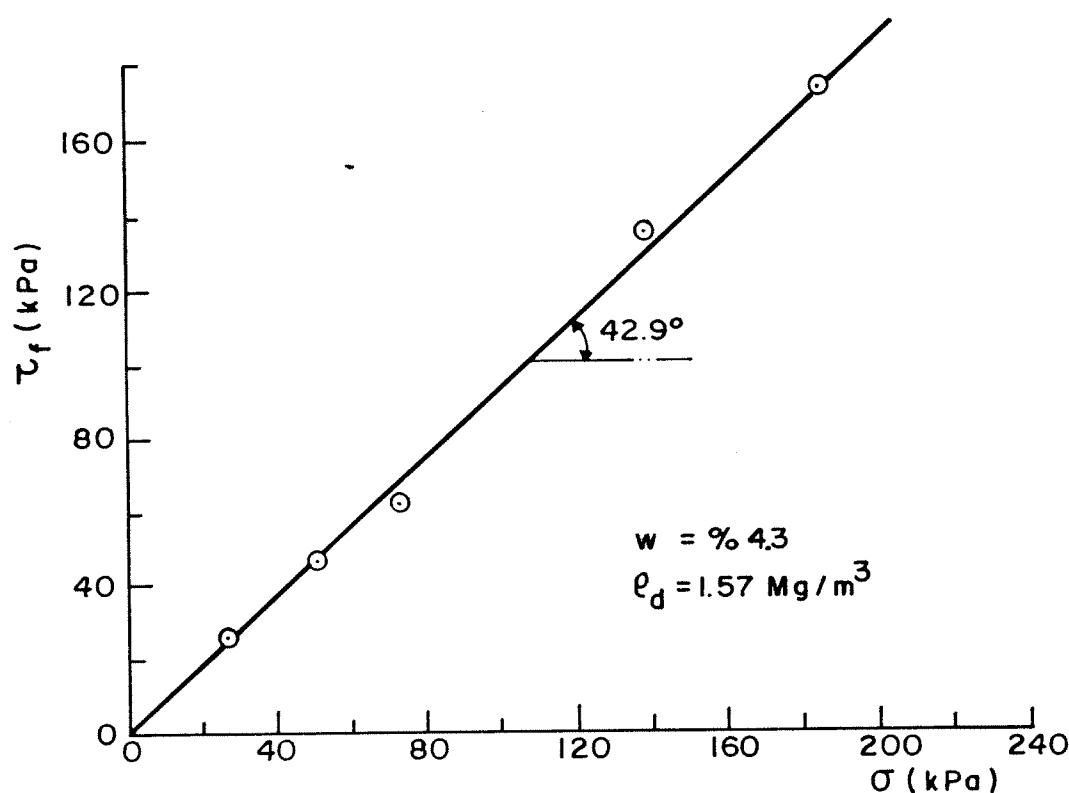
Şekil 15. Suya doymamış, çatıaklı Ankara Kili için değişik kesme düzlemleri alanları olan deneylerden bulunan en yüksek dayanım zarfları



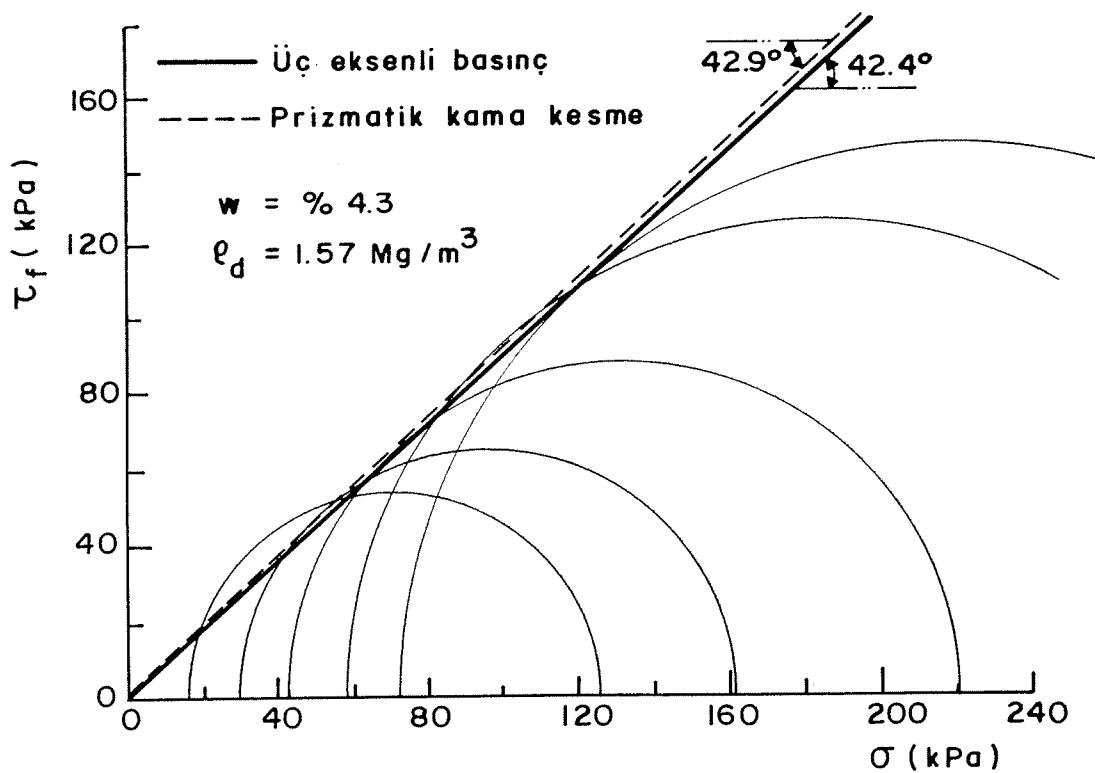
Sekil 16. Sıkıştırılmış değişik killerde silindirsel kama kesme ve kesme kutusu deneylerinden bulunan en yüksek dayanım zarfları



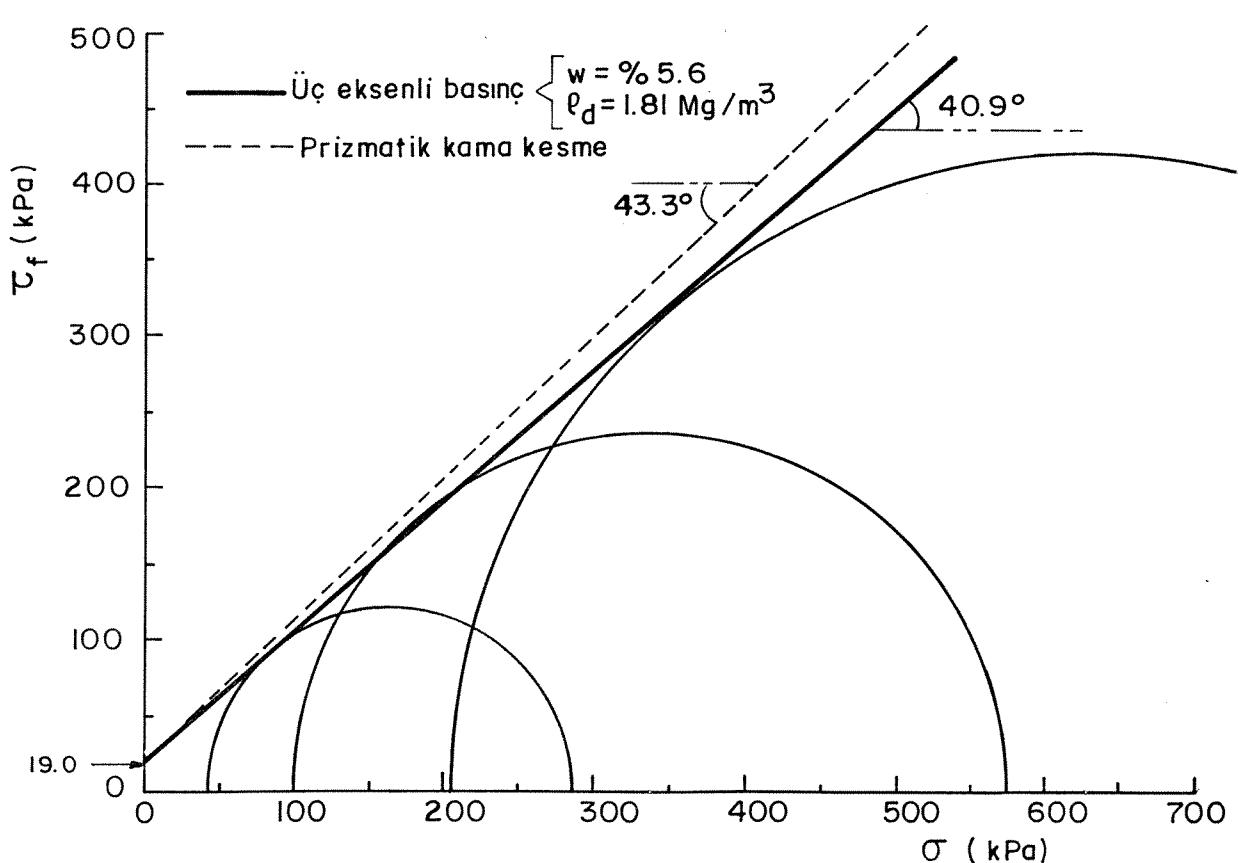
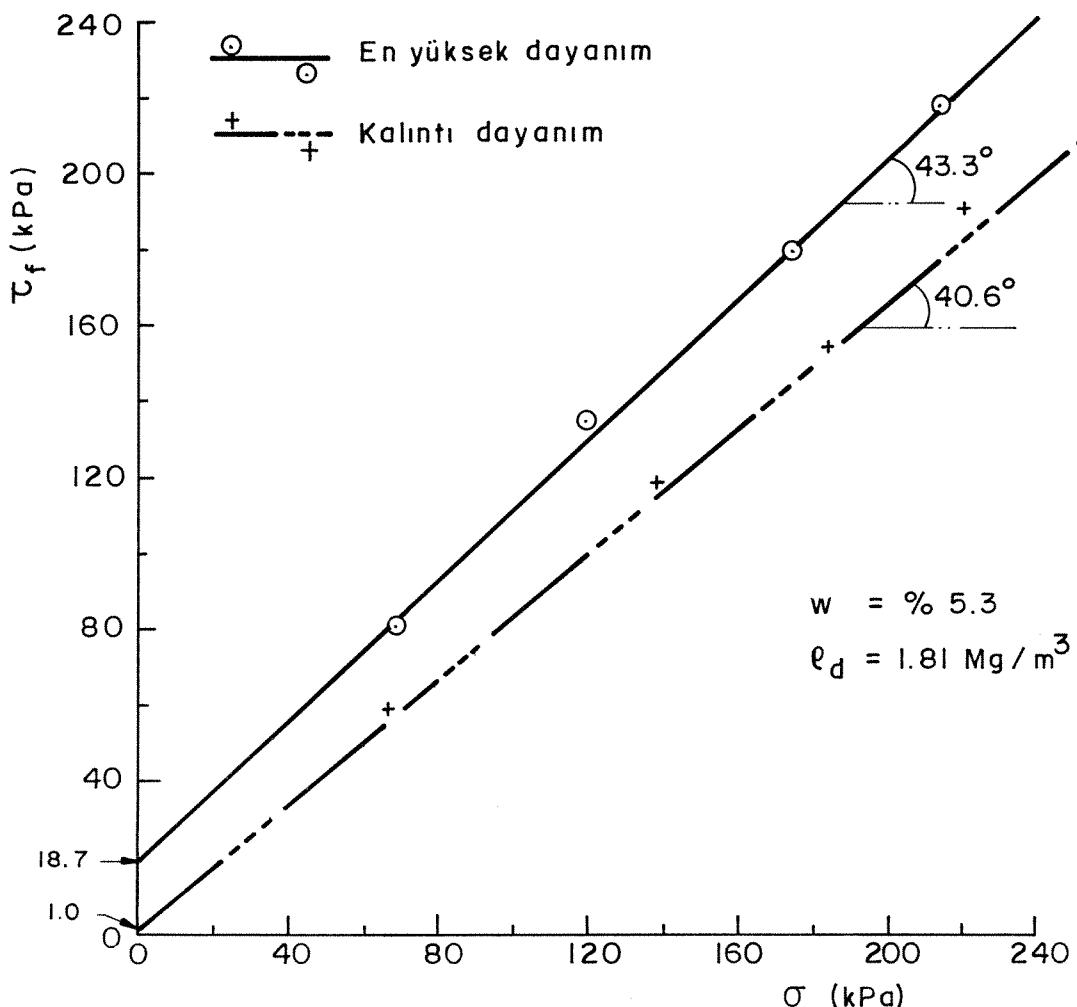
Sekil 17. Prizmatik kama kesme ve üç eksenli basınç deneylerinde denenen çakıl ve kırılmış kayanın tane çapı dağılımları

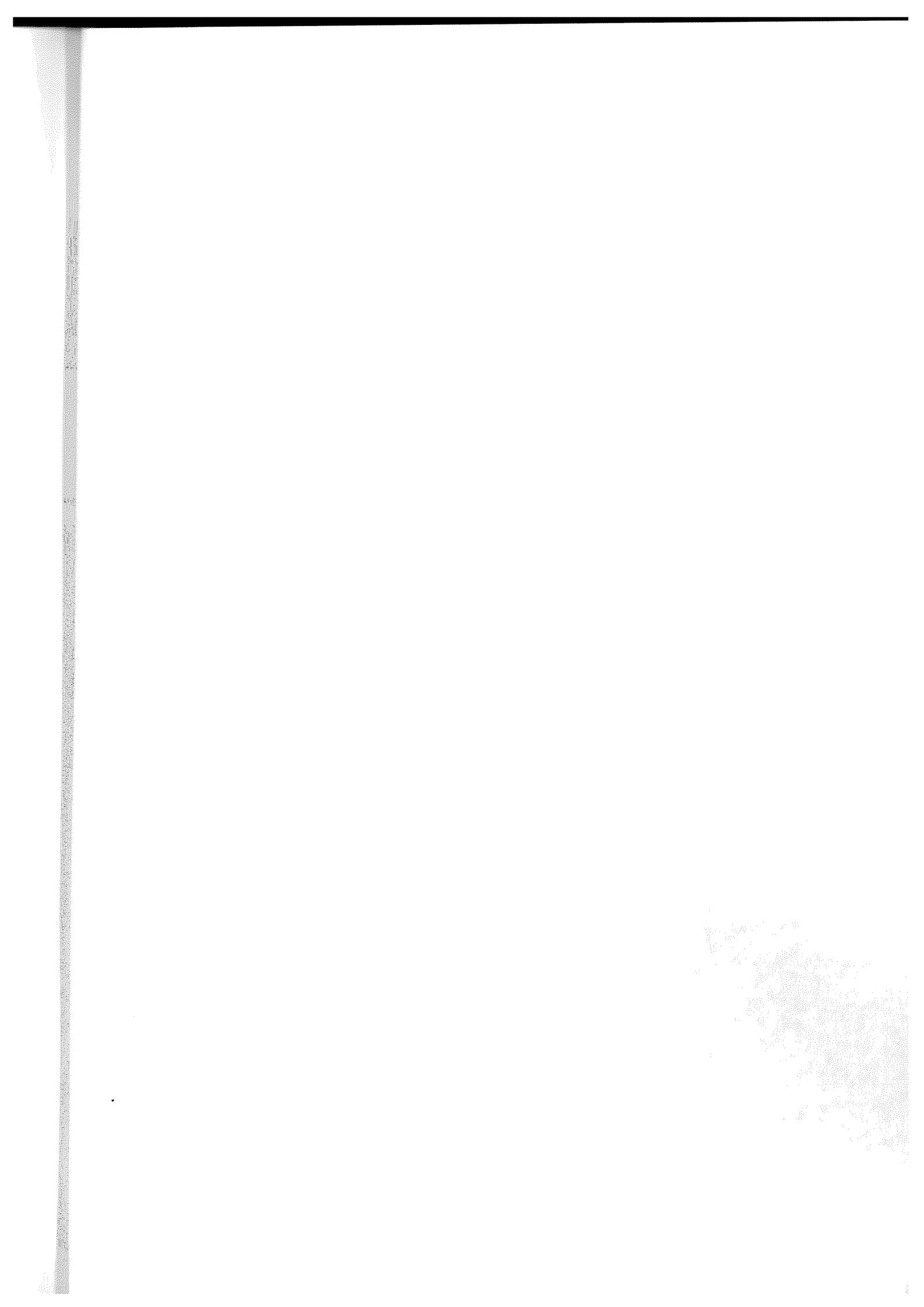


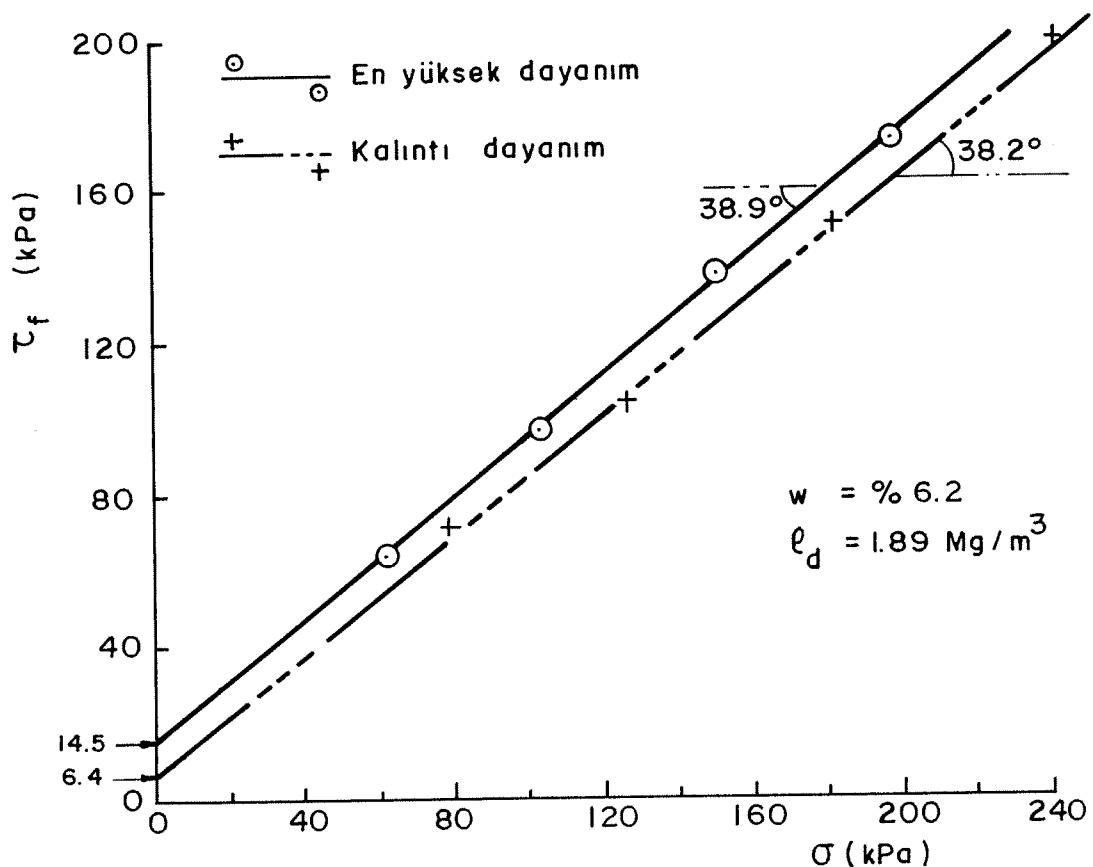
Şekil 18. 5mm-10mm arası çakıl için prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek dayanım zarfı



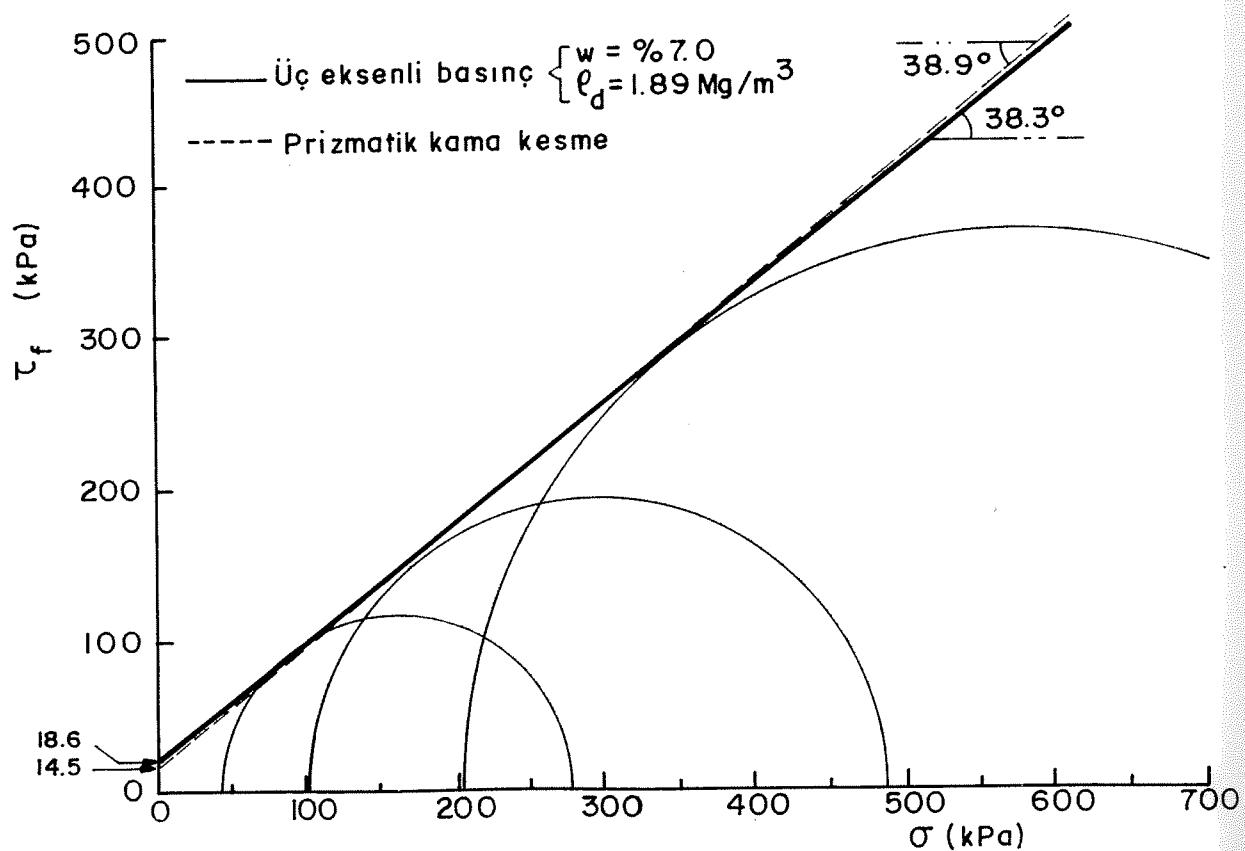
Şekil 19. 5mm-10mm arası çakıl için üç eksenli basınç ve prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek dayanım zarfları



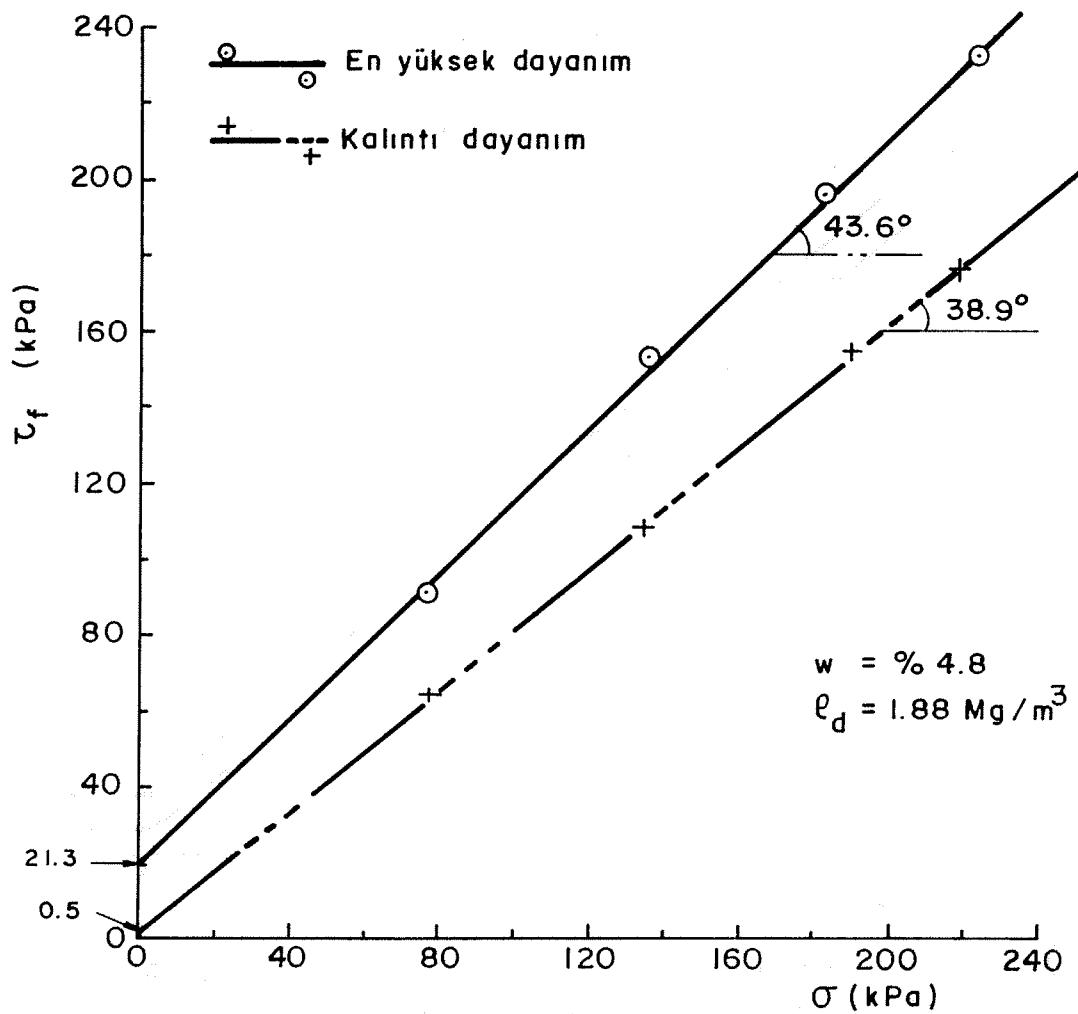




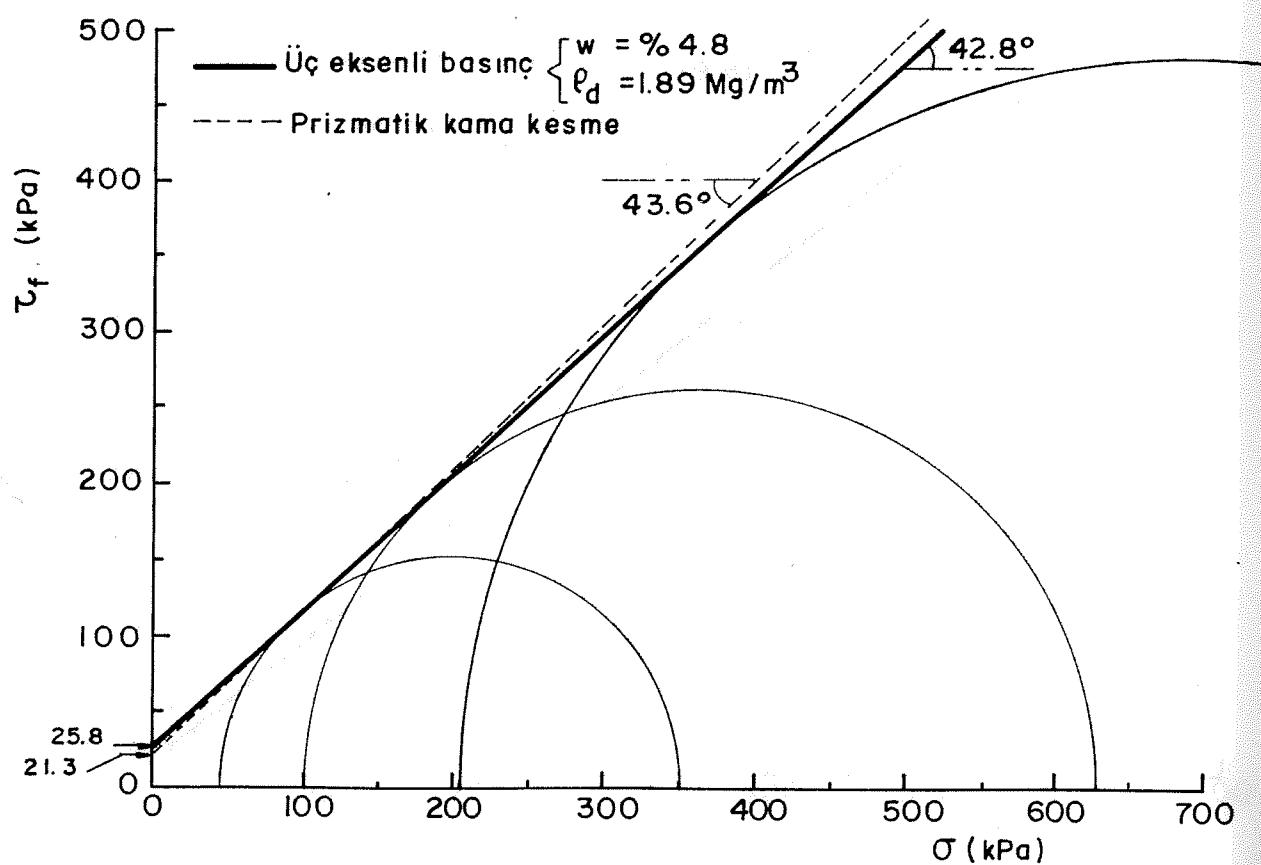
Şekil 24. Arıklıkas kumlu çakılı için prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek ve kalıntı dayanım zarfları



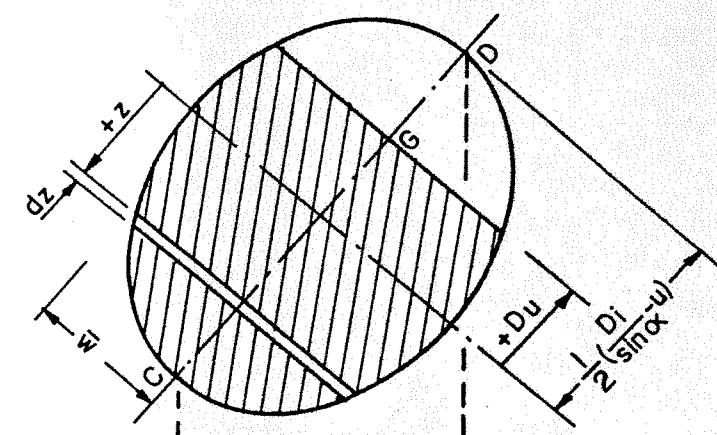
Şekil 25. Arıklıkas kumlu çakılı için üç eksenli basınç ve prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek dayanım zarfları



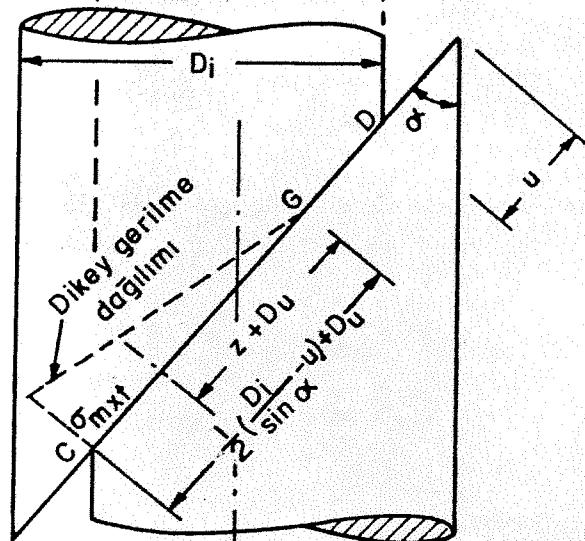
Şekil 22. Şanlıurfa bazaltı için prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek ve kalıntı dayanım zarfları



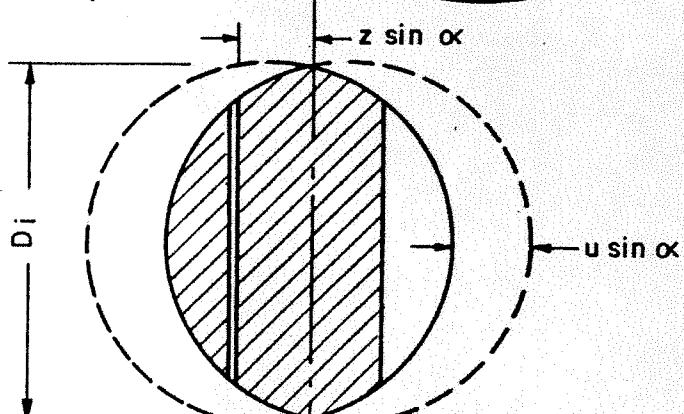
Şekil 23. Şanlıurfa bazaltı için üç eksenli basınç ve prizmatik kama kesme deneylerinden bulunan en yüksek dayanım zarfları



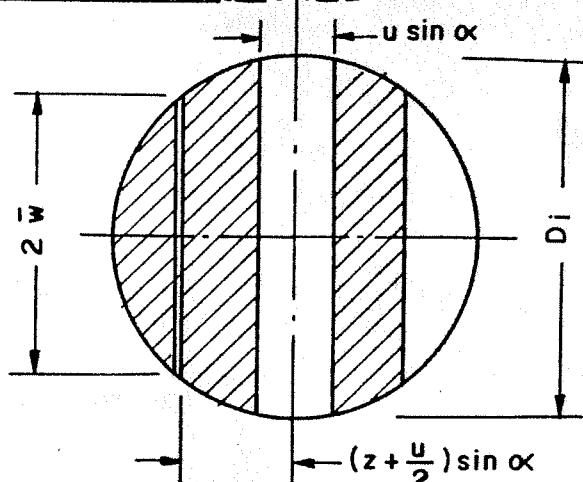
(a) Kesme düzleminin gerçek biçimi
(taranmamış GD kesiminde çekme gerilmesi oluşturduğu varsayılmıştır)



(b) Zemin örneğinin yandan görünüsü



(c) Kesme düzleminin eksene dik düzlemedeki izdüşümü



(d) Şekil (c)'deki taranmış alanın D_i çapındaki daire üzerindeki geometrik yeri

$$\bar{w} = \sqrt{\{(D_i/2)^2 - (z+u/2)^2 \sin^2 \alpha\}}$$

Sekil 26. Silindirsel kama kesme deneyinde, bir kesiminde çekme gerilmesi oluşturduğu varsayılan kesme düzleminin geometrisi

EK 1. SİLİNDİRSEL KAMA KESME DENEYİNİN AYRINTILI DEĞERLENDİRMESİ İÇİN DENKLEMLER

Buradaki denklemler, Şekil 9 ve 26'nın geometrisinden, ana hatları ayrıca açıklanmış (Mirata, 1981) entegrasyonlar yoluyla elde edilmiştir. Bu denklemlerde, Analiz B kullanıldığında ψ yerine $\bar{\psi}$, Analiz C kullanıldığında ise α ve ψ yerine sırasıyla α_i ve $\bar{\psi}_i$ konulması gereklidir.

(a) Düzeltilmiş Kayma Düzleme Alanı

Yenilme düzleminde çekme gerilmeleri olmadığı sürece, düzeltilmiş kesme düzleme alanı A_c , eksen uzunlukları $2f$ ve D_i olan bir elipsin orta kesiminden Şekil 26'daki gibi, ψ eninde bir dilim çıkararak şöylece bulunabilir:

$$A_c = f_{2s} (\pi - \psi_{2s}) \quad (22)$$

Burada,

$$f = D_i / 2 \sin \alpha \quad (23)$$

$$f_{2s} = f^2 \sin \alpha \quad (24)$$

$$\psi_{2s} = 2\psi + \sin 2\psi \quad (\text{rad}) \quad (25)$$

$$\psi = \sin^{-1} (\psi / 2f) \quad (\text{rad}) \quad (26)$$

(b) Dikey Gerilmenin Kesme Düzlemi Boyunca Dağılımı

Kesme düzlemi boyunca doğrusal bir dikey gerilme dağılımı varsayımlıyla, bu düzleme etkiyen dikey gerilmenin en yüksek ve en küçük değerleri sırasıyla şu denklemlerden hesaplanabilir:

$$\sigma_{\max} = \sigma + |M|(r - u/2)/I \quad (27)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma - |M|(r - u/2)/I \quad (28)$$

Burada I , kesme düzleminin eylemsizlik momenti olup şu denklemden bulunur:

$$I = \frac{f}{2s} \left[3f^2 (2\pi - 4\psi + \sin 4\psi) - 32fu \cos^3 \psi + 6u^2 (\pi - \psi) \right] / 24 \quad (29)$$

σ_{\min} eksi ise, zeminin çekme gerimelerini taşıyamadığı genellikle varsayıldığından, denklem (22), (27) - (29) geçerliğini yitirecektir. Bu durumda, kesme düzleminin basınç altındaki kesimi, orta çizgiden D_u uzaklığuna kadar uzanıyorsa (Şekil 26(a)), doğru çözüm, aşağıdaki denklemlerden, ardışık yaklaşıklıklarla bulunabilir.

$$D_u = \left\{ \frac{P_c}{c} \left[3f^2 [4\psi_u - \sin 4\psi_u - 2(4\psi - \sin 4\psi - \pi)] + 32u f (\cos^3 \psi_u - 2 \cos^3 \psi) + 6u^2 J \right] - 4ME \right\} \\ \div (24|M|J - 4PE) \quad (30)$$

Burada P_c , denklem (6)'daki bölünene eşit olan basınç kuvveti;

$$E = 8 f \cos^3 \psi_u - 3 v (\pi - \psi_{2us}) \quad (31)$$

$$\jmath = \pi + \psi_{2us} - 2 \psi_{2s} \quad (32)$$

$$\psi_u = \sin^{-1} \left\{ \left(2 D_u + v \right) \left(\sin \alpha \right) / D_i \right\} \text{ (rad)} \quad (33)$$

$$\psi_{2us} = 2 \psi_u + \sin 2 \psi_u \quad (34)$$

Denklem (33)'te D_u yerine konacak D_u 'nın ilk yaklaşık değeri (D_{u1}), gerçek deney sonuçlarına dayanan aşağıdaki empirik denklemden hesaplanırsa, D_u 'nın son hesaplanan değeri ile bir önceki değeri arasındaki farkı 0.05 mm'nin altında tutmak için 2 - 3 iterasyon genellikle yeterlidir:

$$D_{u1} = 3.6 + 0.9 \left\{ 3 \left(\frac{d}{e} / 2 - |M| / P_c \right) - \frac{d}{e} / 2 \right\} \text{ (mm)} \quad (35)$$

Burada,

$$\frac{d}{e} = A_c / 0.9 D_i \quad (36)$$

Kesme düzleminin, basınç altındaki kesiminin (Şekil 26'da taramılmış kesim) alanı A_{cp} , şu denklemden hesaplanır:

$$A_{cp} = \left[A_c - f_{2s} (\psi_{2s} - \psi_{2us}) \right] / 2 \quad (37)$$

Burada A_c , denklem (22)'den hesaplanan alandır. Ortalama dikey gerilme ile ortalama kesme gerilmesi, denklem (6) ve (7)'de A_c yerine A_{cp} konarak hesaplanır. Dikey gerilmenin en yüksek değeri σ_{mxt} şu denklemden hesaplanır:

$$\sigma_{mxt} = \frac{6(2D_u + 2f - u)}{c} P / (6D_u f + E) f_{2s} \quad (38)$$

Denklem (30) - (38), $D_u > 0$ olduğu sürece geçerlidir. $D_u < 0$ olması durumu için gerekli denklemler ayrıca verilmiştir (Mirata, 1981) ancak, çok uzak bir olasılıkla da olsa, böyle bir durumla karşılaşılırsa, kesme düzleminin yarıdan çoğu çekme gerilmeleri altında olacağından, deneyin yinelenmesi daha doğru olur.

(c) Deney Kalıbı ve Zemin Kamاسının Ağırlık Merkezi Koordinatları

Deney kalıbı DK'nin (Şekil 9) ağırlık merkezinin, kalıbin kendi kesme düzlemi ortasına göre koordinatlarını (\bar{x}_t , \bar{y}_t) veren denklemler şunlardır:

$$\begin{aligned} \bar{x}_t &= \left\{ 8 [2h_L - (D_0^2 - D_i^2) \cot \alpha_n] (h_L + D_i \cot \alpha_n) \right. \\ &\quad \left. + 3(D_0^2 + D_i^2) \cot^2 \alpha_n \right\} / 16 h_{di} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\bar{y}_t = \left\{ (D_0^2 + D_i^2) \cot \alpha_n \right\} / 8 h_{di} \quad (40)$$

Burada,

$$h_{di} = 2h_L + D_i \cot \alpha_n \quad (41)$$

Burada D_0 , D_i , DK'nin dış ve iç çapı, h_L ise, DK'nin en küçük yüksekliğidir.

Zemin kamاسının ağırlık merkezinin, başlangıçtaki kesme düzlemi ortası O_s 'e göre koordinatlarını (\bar{x}_s , \bar{y}_s) veren denklemler şunlardır:

$$\bar{x}_s = [16 h_s (h_s + D_i \cot \alpha) + 3D_i^2 \cot^2 \alpha] / 16 h_{ds} \quad (42)$$

$$\bar{y}_s = (D_i^2 \cot \alpha) / 8 h_{ds} \quad (43)$$

Burada,

$$h_{ds} = 2 h_s + D_i \cot \alpha \quad (44)$$

h_s = zemin kamasının en küçük yüksekliği.

EK 2 . MOMENT DENKLEMLERİ

(a) Analiz A ve Analiz B için

Analiz A'da, zemin kamasının ötelenen kesiminden etkiyen moment M saat yönünde artı olarak, aşağıdaki denklemlerden hesaplanır. Analiz B kullanıldığında, bu denklemelerdeki δ_x , δ_y yerine, Ek 3'teki gibi hesaplanan δ_{x0} , δ_{y0} değerleri konur.

$$\begin{aligned} M &= (\bar{y} + \delta_y - \Delta y_{sh}) W \sin \theta - (D + h_{og} - \bar{x}) W \cos \theta \\ &+ (\delta_y / 2 - \Delta y_{sh}) X' + (D + h_{og} - \delta_x / 2) Y' \\ &+ (\delta_y - \Delta y_{sh}) \frac{W_{BC}}{2} \sin \theta - M_B \cos \theta + \delta M_q \end{aligned} \quad (45)$$

Burada,

$$\delta M_q = -(D + h_{og} - \bar{x}) \delta Y_q - (\bar{y} + \delta_y - \Delta y_{sh}) \delta X_q \quad (46)$$

Burada, Δy_{sh} , P 'nin, artı y yönündeki (Şekil 1, 9) kaydırılma miktarı olup şu denklemden bulunur:

$$\Delta y_{sh} = \delta_y - \Delta y_{MP} \quad (47)$$

h_{og} = LP1 Üzerindeki oluklar ile başlangıçtaki kesme düzlemi ortası O_1 arasındaki uzaklık; X' , Y' sırasıyla X ve Y kuvvetlerine (denklem (1), (2)) eşit ancak bunlara ters yönde, kesme düzlemi ortası O_3 'e etkiyen tepkiler; (\bar{X}, \bar{Y}) , (\bar{X}_q, \bar{Y}_q) sırasıyla W 'nin ağırlık merkezi ve Q 'nun etkime noktasının O_1 'e göre koordinatları.

(b) Analiz C için

X' , Y' tepki kuvvetlerinin, Şekil 8 ve 10'daki A_{11} düzleminin ortasına etkidikleri varsayılırsa, aşağıdaki moment denklemi bulunur.

$$M = -(\bar{Y}_{sx} - \Delta \bar{y} - \bar{y}) W \sin \theta_r - (\bar{X}_{sy} + \Delta \bar{x} - \bar{x}) W \cos \theta_r$$

$$- \bar{Y}_{sx} X' + \bar{X}_{sy} Y' + (\delta_{yo} - \Delta y_{sh}) \frac{W_{BC}}{2} \sin \theta_r$$

$$- M_B \cos \theta_r + \delta M_q \quad (48)$$

Burada,

$$\delta M_q = -(\bar{X}_{sy} + \Delta \bar{x} - \bar{x}) \delta Y_q + (\bar{Y}_{sx} - \Delta \bar{y} - \bar{y}) \delta X_q \quad (49)$$

Bu durumda, daha önce tanımlanan (\bar{x}, \bar{y}) , (\bar{x}_q, \bar{y}_q) koordinatlarının, deney kalibinin kesme düzlemi ortasına göre saptanması gereklidir. Diğer değişkenler ise şu denklemelerle tanımlanır:

$$\bar{x}_{sy} = (D_b - \frac{\overline{A_1 B_1}}{2} \cos \alpha_i) \cos \beta \quad (50)$$

$$\bar{y}_{sx} = \frac{\overline{A_1 B_1}}{2} \sin \alpha_r - [d_{yb} - (\Delta y_p + \Delta y_{RB}) - \beta D_b] \quad (51)$$

$$\Delta \bar{x} = h_{pp} - \frac{\overline{A_1 B_1}}{2} \cos \alpha_r \quad (52)$$

$$\Delta \bar{y} = h_{np} - \frac{\overline{A_1 B_1}}{2} \sin \alpha_r \quad (53)$$

Burada, D_b tek bilye (TB) ile B_1 arasında, x doğrultusunda ölçülen uzaklık olup, hidrolik kriko kullanılan tüm kama kesme deneylerinde deney sırasında değişmez, Şekil 9'daki düzenleme için ise δ_{x_0} miktarında azalır; h_{np} , h_{pp} deneyin değişik biçimleri için Çizelge 1'de tanımlanmıştır.

EK 3. \bar{u} , \bar{v} VE β 'NIN ARDIŞIK YAKLAŞIKLIKLARLA ÇÖZÜMÜ

Deney kalabı DK'nin (Şekil 8), deneyin herhangi bir evresindeki konumuna, önce, dönmeksizin, kesme yönünde ve bu yöne dik olarak sırasıyla, ortalama \bar{u} ve \bar{v} miktarlarında öteleşerek, sonra da Analiz A için tanımlanan O_3 noktası

çevresinde β miktarında dönerken geldiği varsayılmaktadır. (Bu varsayımda yerinde kama kesme deneyi için daha önce verilenden (Mirata, 1974; 1977(a)) az farklıdır.) \bar{u} , \bar{v} ve β 'nın değerleri, aşağıda belirtildiği gibi, ardışık yaklaşıklıklarla bulunur.

Daha önce tanımlanan δ_x ve δ_y ötelenmelerinin kalıptan bağımsız olarak desteklenip deneyin başlangıcında kalının köşesinden Şekil 8'de gösterildiği konumda artı olarak alınan d_1' , d_2' uzaklıklarında kalıba degen ötelenmeölçerlerle ölçüldüğü; δ_{x0} ve δ_{y0} 'ın ise, kalıp hiç dönmemiş olsa, ölçülecek olan ötelenmeler olduğu varsayılırsa, \bar{u} ve \bar{v} ortalama ötelenmeleri şöylece bulunur;

$$\bar{u} = u + (\overline{\partial_3 E} \cos \psi_1 \sin \alpha + \overline{\partial_3 F} \sin \psi_2 \cos \alpha) \beta \quad (54)$$

$$\bar{v} = v + (\overline{\partial_3 E} \cos \psi_1 \cos \alpha - \overline{\partial_3 F} \sin \psi_2 \sin \alpha) \beta \quad (55)$$

Burada,

$$\overline{\partial_3 E} = N_r / \sin \psi_1 \quad (56)$$

$$\overline{\partial_3 F} = D_n / \cos \psi_2 \quad (57)$$

$$\psi_1 = \tan^{-1} \left(N_r / (D_n - d_1' + \delta_{x0}) \right) \quad (58)$$

$$\psi_2 = \tan^{-1} \left((N_r - d_2' - \delta_{y0}) / D_n \right) \quad (59)$$

$$D_n = d_{mx} - \delta_{x0} / 2 \quad (60)$$

$$N_r = d_{my} + \delta_{y0} / 2 \quad (61)$$

$$\delta_{x_0} = \bar{u} \cos \alpha - \bar{v} \sin \alpha \quad (62)$$

$$\delta_{y_0} = \bar{u} \sin \alpha + \bar{v} \cos \alpha \quad (63)$$

$$\beta = (\delta_{y_0} - \Delta y_{MP} - \Delta y_P - \Delta y_{RB}) / (D + h_{og} - \delta_{x_0} / 2) \quad (\text{rad}) \quad (64)$$

d_{mx} , d_{my} = deneyin değişik biçimleri için Çizelge 1'de tanımlanan boyutlar; Δy_p , Δy_{RB} = Şekil 1 ve 9'daki γ 'nın artı yönünde, P yüküne, sırasıyla deney başlamadan önce ve deney sırasında uygulanan kaydırma miktarı.

Başlangıçta, denklem (56) ve (57)'deki \bar{u} , \bar{v} yerine, sırasıyla denklem (10) ve (11)'den hesaplanan u ve v değerleri konur. Genellikle 2 - 3 iterasyon yeterlidir.

EK.4. $\overline{A_1B_1}$ VE α_i 'NİN ÇÖZÜMÜ

A_{11} noktasının kalıp dönenmeden önceki durumu A_{11}' 'ın koordinatları (x_{A11}', y_{A11}') ve böylece $\overline{A_1B_1}$ uzunluğu ile kesme düzleminin, P 'nın başlangıç doğrultusuna eğimi α_i , Şekil 8 ve 10'dan şöylece bulunur:

$$\overline{A_1B_1} = (-2y_{A11}' + \overline{O_3A_{11}} \cdot \beta \cos \psi_a) / \sin \alpha_i \quad (65)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{-2y_{A11}' + \overline{O_3A_{11}} \cdot \beta \cos \psi_a}{2x_{A11}' - \overline{O_3A_{11}} \cdot \beta \sin \psi_a} \right) \quad (66)$$

Burada,

$$\overline{O_3A_{11}} = -y_{A11}' / \sin \psi_a \quad (67)$$

$$\psi_a = \tan^{-1} (-\gamma_{A11} / \chi_{A11}) \quad (68)$$

$$\chi_{A11} = (\sigma'_{ax} - \delta_{x0})/2 \quad (69)$$

$$\gamma_{A11} = -(2\sigma'_{yb} - \delta_{y0})/2 \quad (70)$$

σ' = deneyin değişik biçimleri için Çizelge 1'de tanımlanan boyut.

EK 5. ŞEKİL 11'DEKİ EĞRİLERİN ELDE EDİLİŞİ

Denklem (1) - (7), Mohr - Coulomb yenilme ölçütü ile birleştirilir, $\lambda_q = 90^0$ varsayılar, denklem (6) ve (7)'nin böylece elde edilecek yeni biçimlerinden P ve Q 'yu içeren önemli terimler sırasıyla giderilir, diferansiyeller alınırsa, şu denklemler bulunur:

$$\Delta P = \frac{A_c \Delta \sigma}{\cos \phi} \sin(\alpha + \phi) \quad (71)$$

$$\Delta Q = \frac{A_c \Delta \sigma}{\cos \phi} \cos(\alpha + \phi) - \mu \Delta P \quad (72)$$

Denklem (71) ve (72)'den $\Delta \sigma$ giderilirse,

$$\Delta P = \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\cos(\alpha + \phi) - \mu \sin(\alpha + \phi)} \Delta Q \quad (73)$$

Denklem (71) ve (73)'ten,

$$\frac{A_c}{\cos \phi} \Delta \sigma = \frac{\Delta Q}{\cos(\alpha + \phi) - \mu \sin(\alpha + \phi)} \quad (74)$$

$$\psi_a = \tan^{-1} (-y_{A11} / x_{A11}) \quad (68)$$

$$x_{A11} = (\sigma_{ax} - \delta_{x_0})/2 \quad (69)$$

$$y_{A11} = -(2\sigma_{yb} - \delta_{y_0})/2 \quad (70)$$

σ_{ax} = deneyin değişik biçimleri için Çizelge 1'de tanımlanan boyut.

EK 5. ŞEKİL 11'DEKİ EĞRİLERİN ELDE EDİLİŞİ

Denklem (1) - (7), Mohr - Coulomb yenilme ölçütü ile birleştirilir, $\lambda_q = 90^\circ$ varsayılar, denklem (6) ve (7)'nin böylece elde edilecek yeni biçimlerinden P ve Q 'yu içeren önemli terimler sırasıyla giderilir, diferansiyeller alınırsa, şu denklemler bulunur:

$$\Delta P = \frac{A_c \Delta \sigma}{\cos \phi} \sin(\alpha + \phi) \quad (71)$$

$$\Delta Q = \frac{A_c \Delta \sigma}{\cos \phi} \cos(\alpha + \phi) - \mu \Delta P \quad (72)$$

Denklem (71) ve (72)'den $\Delta \sigma$ giderilirse,

$$\Delta P = \frac{\sin(\alpha + \phi)}{\cos(\alpha + \phi) - \mu \sin(\alpha + \phi)} \Delta Q \quad (73)$$

Denklem (71) ve (73)'ten,

$$\frac{A_c}{\cos \phi} \Delta \sigma = \frac{\Delta Q}{\cos(\alpha + \phi) - \mu \sin(\alpha + \phi)} \quad (74)$$

SİMGELERİN TANIM DİZİNİ

Simge	Sayfa	Simge	Sayfa	Simge	Sayfa	Simge	Sayfa
A_c	24	d	24	h_{og}	76	s	23
A_{cp}	73	d_e	73	h_{np}	77	s_a	28
A_n	30	d_{ax}	80	h_{pp}	77	s_r	31
a	27	d_{mx}	79	h_s	75	t	49
b	24	d_{my}	79	$/$	72	u	23
b_1	27	d_{yb}	26	\cup	73	\bar{u}	25
C_F	31	d_1	77	K_1	28	\bar{v}_1	26
C_p	27	d_2	77	K_2	28	v	24
C_q	27	E	73	K_3	28	\bar{v}	25
c	30	F_a	28	M	75,76	w	22
c'	36	F_{af}	27-28	M_B	21	w_{BC}	22
D	21	f	71	N_r	78	w_{LP}	22
D_b	77	f_{2s}	71	n_c	20	w_{qn}	22
D_i	23	G_s	32	P	16	w	31
D_n	78	h_{di}	74	P_c	72	\bar{w}	70
D_o	74	h_{ds}	75	Q	15	w_L	31
D_u	72	h_L	74	Q_f	27-28	w_{opt}	31
D_{u1}	73	h_m	20	r	33	w_p	31

SİMGELERİN TANIM DİZİNİ (DEVAMI)

Simge	Sayfa	Simge	Sayfa	Simge	Sayfa	Simge	Sayfa
X	21	\bar{X}_t	74	δ_{pf}	27	σ_f	12
X'	76	z	70	δ_q	27	σ_{max}	72
X	50	α	24	δ_{qf}	27	σ_{min}	72
X_{A11}	80	α_i	26	δ_x	23	σ_{mxt}	74
\bar{X}	76	α_n	24	δ_{x_0}	79	σ'_1	31
\bar{X}_q	76	α_r	26	δ_y	23	σ'_3	31
\bar{X}_s	74	β	13	δ_{yo}	79	τ	24
\bar{X}_{sy}	77	ΔP	29	δ_h	58	τ_f	31
\bar{X}_t	74	ΔQ	29	δM_q	75, 76	ϕ	29
Y	21	$\Delta \bar{X}$	77	δX_q	21	ϕ'	29
Y'	76	Δy_{MP}	25	δY_q	21	ψ	71
Y	50	Δy_p	79	$\delta \theta$	24	ψ_a	79
Y_{A11}	80	Δy_{RB}	79	θ	22	ψ_u	73
\bar{Y}	76	Δy_{sh}	76	θ_r	25	ψ_1	78
\bar{Y}_q	76	$\Delta \bar{y}$	77	λ_q	22	ψ_2	78
\bar{Y}_s	75	$\Delta \sigma$	29	μ_{e_d}	22	ψ_{2s}	71
\bar{Y}_{sx}	77	δ_p	27	σ	12	ψ_{2us}	73