

BÜYÜK ÖLÇEKLİ ANİ HEYELANLARIN JEOLojİK ÖZELLİKLERİ VE MEKANİZMALARININ MODELLERİ*

Haydar İLKER - TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Sekreteri, ANKARA

GİRİŞ

Ani heyelanların jeolojik özellikleri, tabaka ve litolojiye, kaya kütlelerinin yapısına, kaymanın özel koşullarına, duraysızlığı teşvik edici faktörler ile heyelanın hareket durumuna bağlıdır. İlgili mekanizma modeli, ani heyelanın esas mekanizmasının yansımasıdır. Ani heyelanın derinliği, gelişimi, ivmesi ve durgunluğunun üzerinde yapılan enerji analizleri esas alınarak ani heyelanlar üç ana tipe ayrılabilir. Birinci tip esas olarak yüksek potansiyel enerjinin neden olduğu heyelanın pozisyonu (konumu) ile ilgilidir. İkinci tip, heyelan deformasyonu ile ilgilidir. Üçüncü tip ise, heyelan üzerinde etkili olan dış kuvvetlerle ilgilidir. Bu çalışmada, yukarıda belirtilen esaslar çerçevesinde, ani hızlı heyelanın mekanizması üzerindeki en güncel analizler sunulmuştur.

Yüksek konumda kayan heyelana tipik örnekler ve duraysızlık mekanizması modelleri

Yüksek Konumda Kayan Heyelan

a) Tipik örnek-Luquan heyelanı

22-23 Kasım 1965'de Çin'in Yunnan Luquan ilinde, Pudu nehri vadisinde meydana gelen Luquan heyelanı, iki ana heyelan ve birçok tali heyelandan oluşmaktadır (Şekil 1). Jeolojik özellikleri Tablo 1 de gösterilmiştir.

b) Yüksek konumlu ani heyelanın duraysızlık mekanizması modeli

Heyelandaki makaslama hareketinin çok yüksek ve kayma düzleminin çok olduğu, Luquan heyelanının jeolojik özelliklerinden bilinmektedir. Yüksek hızın (ani kaymanın) ana nedeni, yoğun yağmurdan dolayı olu-

Tablo. 1

Tabaka	P	Deformasyon	Fisürler
Litoloji	bazalt, kireçtaşı	Oluşum nedeni	Aşırı yağmur
Kaya kütle yapıları	bloklu klastik	Uzaysal koşul	"U" tipi
Eğim	50°	Hız	Yüksek
Kayma düzlemi	Dairesel kayma	Kayma mesafesi	2.5 km
Makaslama konumu	1000 m den yüksek	Benzer heyelanlar	Huang Longxi, Tu jiaba, Frank, vd.

(*) Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Dergisinin 1991 yılında basılan 43'ncü sayısında yer alan ve Wang Xiaoning tarafından yazılan "Geological Properties of large-scale highspeed Landslides and their mechanism models" başlıklı makalenin çevirisidir.

şan, kayma düzleminin düşük sürtünme katsayısına bağlı olarak, yüksek potansiyel enerjinin önemli bir kısmının kinetik enerjiye dönüşmesidir. Şekil 2 üstten kopmalı ani heyelanın, duraysızlık mekanizması modeli olarak önerilmiştir.

Şekil 2 de görüldüğü gibi, heyelanın arka kısımdaki zorlama serbest kalırsa, heyelan düzlem boyunca aşağı kayar ve potansiyel enerji,

$$E = mgH \quad (1)$$

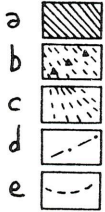
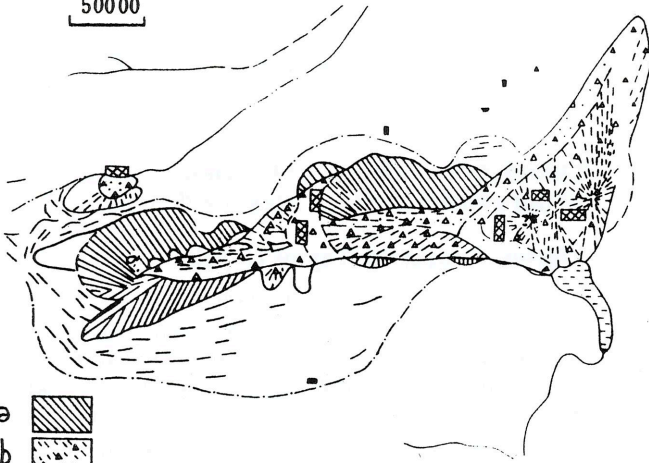
eşitliği ile verilir.

Heyelan düzlemi şekilde kürelerle temsil edilmiştir. Bu da heyelan düzleminin düşük sürtünme katsayısının (f7 ifade etmektedir. h kadar bir mesafede aşağı doğru kayma sonucu heyelan V hızına ulaşır,

$$V = \sqrt{2gh (1-fctg\alpha_1)} \quad (2)$$

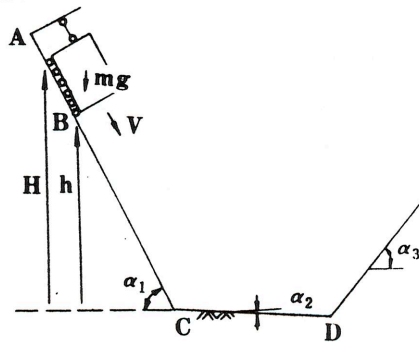
Yüksek makaslama konumundan, yüksek şev açısından α_1 ve daha düşük f değerinden dolayı heyelanın hareketi yüksek hızda olmaktadır.

50000



Şekil 1- Luquan heyelanının jeolojik krokisi

- a) Kayma ve çökme düzlemi
- b) Heyelan kütle eğimi
- c) Yığılmış heyelan kütle
- d) Çatlak sınırı
- e) Çatlaklar



Şekil 2- Yüksek konumlu ani heyelanın mekanizma modeli.

Yüksek Konumlu Çökme-Kayma Türü Heyelan

a) Tipik Örnek - Yanchine Heyelanı

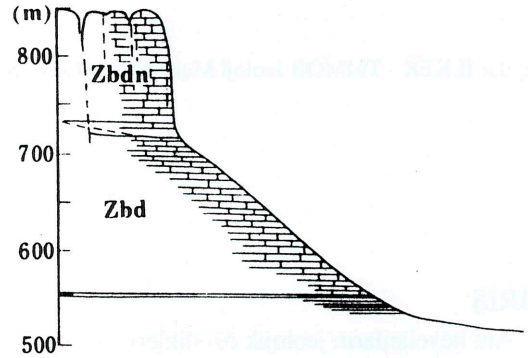
Yanchine heyelanı 3 Haziran 1980'de, Çin'de Yanchi nehrinde olmuştur. Hacmi 1 000 000 m³ civarındadır (Şekil 3). Ana jeolojik özellikleri Tablo 2 de verilmiştir.

b) Tipik Örnek - Nanjiang Heyelanı

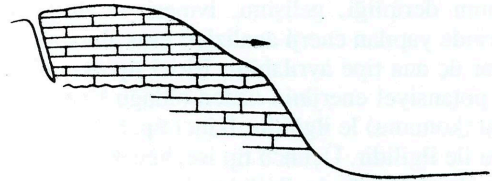
Nanjiang heyelanı Çin'in Nanjiang şehrinde olmuştur. Hacmi yaklaşık 6 000 000 m³ tür. Yanchihe heyelanı ile farkı, önce tabaka düzlemi boyunca olmak üzere kaymış olmasıdır (Şekil 4). Ana jeolojik özellikleri Tablo 3 de gösterilmiştir.

c) Üstten Kopmalı Çökme-Kayma Türü Heyelanın Duraysızlık Mekanizmasının Modeli

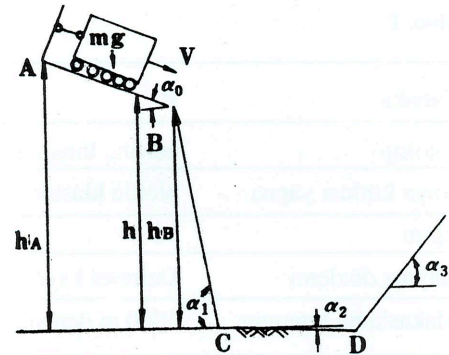
Çökme süreci, üstten kopmalı çökme-kayma türü heyelanın özelliği olup, yüksek hızın da ana kaynağıdır.



Şekil 3- Yanchihe heyelanının jeolojik krokisi.



Şekil 4- Nanjiang heyelanının jeolojik krokisi.



Şekil 5- Üstten Kopmalı Çökme - Kayma heyelanının mekanizma modeli.

Şekil. 5 bu heyelanın duraysızlık mekanizması olarak önerilmiştir.

Baskı ortadan kalkınca kütle, kayma düzlemi boyunca kaymaktadır. B noktasında heyelanın hızı aşağıdaki eşitlikten belirlenir

$$V_B = \sqrt{2g(h-h_B)(1-fctg\alpha_0)} \quad (3)$$

Heyelan BC hattının herhangi bir kısmına düşebilir. C noktasına düşerse düşey hız,

$$V_{cv} = V_B \sin \alpha_0 \frac{gh_B}{V_B \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_1} \quad (4)$$

yatay hız ise,

$$V_{ch} = V_B \cos \alpha_0 \quad (5)$$

olacaktır.

Dolayısıyla, heyelanın hızı ve yönü,

$$V_c = \sqrt{V_{ch}^2 + V_{cv}^2} \quad (6)$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{V_{cv}}{V_{ch}} \quad (7)$$

eşitlikleri ifade edilir. h_B büyük olursa hız artmaya eğilim göstereceği açıktır.

Enerji Boşalımı ve Sürtünme Azalmalı Heyelanların Duraysızlık Mekanizması Modelleri ve Tipik Örnekleri

Makaslama Enerji Boşalımı Yüksek Hızlı Heyelan

a) Tipik örnek-Saleshan heyelanı

7 Mart 1983 de Çin'in Guansu Dongxiang bölgesinde meydana gelmiştir. Hacmi 44 000 000 m civarındadır (Şekil 6). Ana jeolojik özellikler Tablo 4 de verilmiştir.

b) Makaslama enerji boşalımı heyelanının duraysızlık mekanizması modeli.

Saleshan heyelanı, Longyang heyelanı ve diğerleri arasında birçok benzer özellikler vardır. Bunlar aşağıda sunulmuştur;

i) Yatay veya yataya yakın tabakalar,

Tablo. 2

Tabaka	Zb	Deformasyon	Gerilim çatlakları
Litoloji	dolomit, çamur	Oluşum nedeni	madencilik, yağış
Kaya kütlesi yapısı	kalın tabakalı bloklu yapı	Uzaysal koşul	"U" tipi
Eğim	40°	Hız	yüksek
Kayma düzlemi	başlangıç eğim düzlemi	Kayma mesafesi	580 m
Makaslama konumu	225 m yüksekliğinde	Benzer heyelanlar	Elms, vb.

Tablo. 3

Tabaka	T	Deformasyon	Fisürler
Litoloji	kireçtaşı, şeyl	Oluşum nedeni	yoğun yağış
Kaya kütlesi yapısı	tabakalı yapı	Uzaysal koşul	"L" tipi
Eğim	40°	Hız	40 m/s
Kayma düzlemi	tabaka düzlem	Kayma mesafesi	3 km
Makaslama konumu	200 m yüksekliğinde	Benzer heyelanlar	

Tablo. 4

Tabaka	N	Deformasyon	13 yıllık deformasyon
Litoloji	kiltaşı ve şeyl ara tabakalı çakıl	Oluşum nedeni	bilinmiyor
Kaya kütlesi yapısı	tabaka	Uzaysal koşul	"L" tipi
Eğim	üst 33°, alt 35°	Hız	yüksek
Kayma düzlemi	üç yüzeyli	Kayma mesafesi	900 m
Makaslama konumu	200 m yüksekliğinde	Benzer heyelanlar	Chana, Wang, vb.

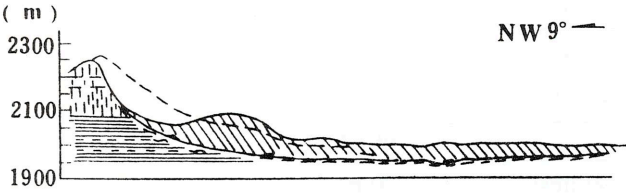
- ii) Heyelan düzlemi 3 kısma ayrılabilir; arka çatlak kısmı, orta kenetleme kısmı, ön kayma kısmı,
- iii) Heyelan tüm kütle halinde hareket eder,
- iv) Herhangi bir oluşum nedeni olmaksızın meydana gelirler.

Bu heyelanların gelişimlerinin analizi, yüksek hızlı heyelanların mekanizmasının aydınlatılmasında yarar sağlar. Şekil 7 de görüldüğü gibi, heyelan düzleminin gelişimi 3 aşamaya ayrılabilir.

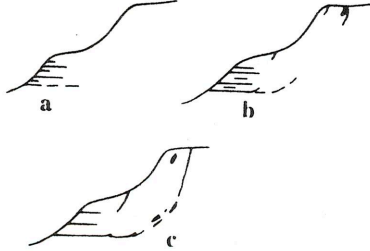
i) Ön kayma aşaması: Vadinin aşınması süreci sırasında, yer çekimine ve artık gerilime bağlı olarak, şev yüzeyi yönünde elastiki bir biçimde deforme olur. Bu deformasyon, kayma düzlemi boyunca vadideki küçük ölçekli kayma deformasyonuna bağlı olarak gözlenir.

ii) Arka çekilim aşaması: Ön geri tepmeli deformasyon, kaymanın ve kriplenenin daha sonraki gelişiminin nedenini oluşturur. Sonra, ön kayma kısmı ve arka gerilim çatlakları derine doğru gelişir.

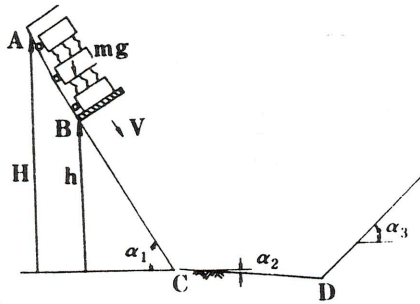
iii) Orta bağlantı aşaması: Kayma ve gerilme kısımlarının gelişimiyle, gerilimler şevin orta bölgesinde yoğunlaşır. Düzlem birleşinceye ve şev stabilitesini kaybedinceye kadar, kenetlenen kısım yenilir.



Şekil 6- Saleshan heyelanının jeolojik krokisi.



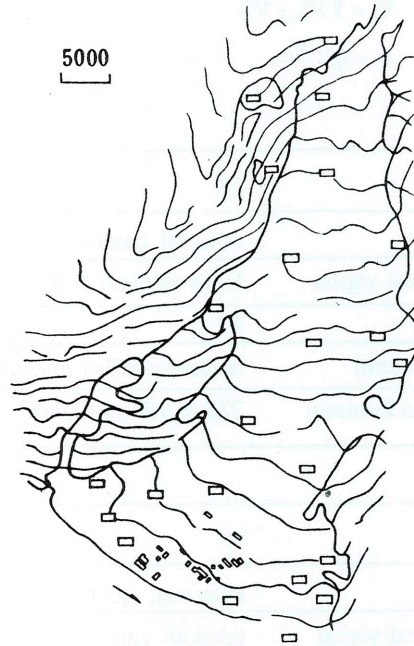
Şekil 7- Heyelan düzleminin üç gelişim evresi.



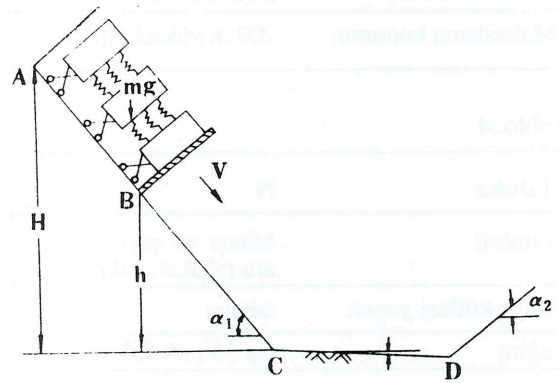
Şekil 8- Makaslama Enerji Boşalımı Ani Heyelanın mekanizma modeli.

Bu süreç, bu türde yüksek hızlı heyelanın özelliklerini gösterir. Doğunluk sürecinde, sürekli deformasyona bağlı olarak, şevde önemli ölçüde gerilim enerjisi toplanır. Kenetlenen kısmın varlığı, gerilim enerjisinin serbest kalmasını engeller. Kenetlenme kısmı yenildiği zaman gerilim enerjisinin ani boşalımı, heyelanı yüksek hızda hareket etmeye sevk eder, bu da sürtünme katsayısının çok azalmasına ve heyelanın yüksek hızla hareket etmesine neden olur. Üç eksenli kaya deney sonuçları bu işlemi kanıtlamıştır (Wang Xiaoning, 1989). Şekil 8, makaslama enerjisi boşalımı yüksek hızlı heyelanın, duraysızlık mekanizması modeli olarak önerilmiş olup, yukarıda belirtilen süreci izah etmektedir.

Bir çok uzman, bu tür heyelanın mekanizması için önerilerde bulunmuşlardır. Bazıları, yüksek hızlı hareketin nedeni olarak, kuvvetin pik etkisini ve sıvılaşmayı düşünmektedir. Fakat deney sonuçları tipik bir örse-



Şekil 9- Xintan heyelanının jeolojik krokisi.



Şekil 10- Yapısal Enerji Boşalımı Ani Heyelanın mekanizma modeli.

lenmemiş zeminin pik ve artık dayanımın aşağıdaki gibi olduğunu göstermiştir.

Pik dayanım: $tg\phi = 0.637$, $c = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

Artık dayanım : $tg\phi = 0.480$, $c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

Doygun artık dayanım: $tg = 0.42$, $c = 0.1 \text{ kg/cm}^2$

5-25 kg/cm^2 arasındaki normal gerilimlerde, artık ve pik dayanım oranı T_f/T_p yaklaşık 0.50 dir. Ancak oluşan yüksek hızı heyelanda ihtiyaç duyulan ortalama sürtünme katsayısı, artık dayanım değerinden çok daha azdır (Chana 0.127, Saleshan 0.178).

Titreşimli sıvılaşma, koşullu ve kısmidir. Her ne kadar sıvılaşma olgusu yüksek hızlı heyelan sınırında bulunursa da, bu olay yaygın değildir. Sıvılaşma kısmi bir olgundur ve yüksek hızlı heyelanın ana nedeni olmaz.

Ayrıca, gaz boşalımı ve moloz akması da bu tür yüksek hızlı heyelanların ana nedenleri olarak öne sürülmüşlerdir. Yanlış bir algılamayla "gaz boşalımı" hareketi ana neden olarak kabul edilir. "Gaz boşalımı" ve moloz akıntısı oluşumu için, yüksek ivmeli heyelan koşulları gerekli olduğundan, heyelanın düşük hızlı hareketi, "gaz boşalımı" ve moloz akıntısı oluşturamaz. Yüksek hız evresi olguları, yüksek hızlı hareketlerin ortaya çıkmasını açıklayamaz.

Çin'in kuzeybatısında yer alan Mefang heyelanı bu konuda iyi bir karşı tez örneğidir. Çünkü Chana yüksek hızlı heyelanı ile aynı şartlarda olmasına rağmen, heyelanın kenetlenme kısmı olmadığından ve yamaç aşağı yavaşça oluşan kayma gibi, büyük miktarda birim deformasyon enerjisi biriktiremediğinden yavaş hareket eder.

Yapısal Enerji Boşalımı Heyelan

a) Tipik örnek-Xintan heyelanı

Xintan heyelanı, Hubei'de (Çin) 12 Haziran 1985 de meydana gelmiştir. Hacmi 30 000 000 m^3 tür (Şekil. 9). Ana jeolojik özellikleri Tablo. 5 de verilmiştir.

b) Yapısal enerji boşalımı duraysızlık mekanizması modeli

Xintan heyelanı, yapısal enerji boşalımı ve yüksek hızlı heyelanın tipik bir örneğidir. Uzun süreli deformasyondan dolayı yeraltı suyu yolları engellenir ve yeraltı suyu basınçlı su şekline dönüşür. Böylece, heyelanın ana blokları moloz akıntısını oluşturarak, kaya blokları ile zeminin üst kesimlerinin kaymasına neden olur. Bu özel mekanizma tamamen, kaya kütlesi yapısı ve diğer jeolojik özelliklerle tayin edilir.

Blok yığınlarının yapısal enerjisi ikiye ayrılır: biri, blokların yığınlanma şekline, diğeri ise blok şekillerinin düzensizliğinden oluşur. Ayrıca, birim deformasyon enerjisi blokların kontak deformasyonuna bağlı olarak da oluşur. Böylece, yığın halindeki bloklarda, yapısal enerji aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$U = U_d + U_n + U_s \quad (8)$$

burada,

U: toplam enerji,

U_d : yığınlanma şekline kaynaklanan yapısalenerji

U_n : blok şeklinin düzensizliğine bağlı yapısal enerji,

U_s : kontak birim deformasyon enerjisidir.

Şekil 10, yapısal enerji boşalımı yüksek hızlı heyelanın duraysızlık mekanizması modeli olarak önerilmiştir.

Tablo. 5

Tabaka	S	Deformasyon	çökme çatlağı
Litoloji	kumtaşı, şeyl ve kil	Oluşum nedeni	yok
Kaya kütlesi yapısı	bloklı klastik yapı	3 boyuttaki konumu	"U" tipi
Eğim	üst 15°, orta 50°-60°, alt 25°	Hız	30 m/sn
Kayma düzlemi	belirgin değil	Kayma mesafesi	üst 100 m, ön 200 m
Makaslama şekli	üst: 30 m. yüksek alt: belirgin değil	Benzer heyelanlar	Shijiaohe, vb.

Tablo. 6

Tabaka	?	Deformasyon	çatlaklar
Litoloji	sleyt	Oluşum nedeni	yoğun yağmur, su birikimi
Kaya kütlesi yapısı	tabakalı	3 boyuttaki konumu	"U" tipi
Eğim	30°	Hız	yüksek
Kayma düzlemi	tabaka düzlemi	Kayma mesafesi	210 m
Makaslama şekli	140 m nin altı	Benzer heyelanlar	Vaiont, vb.

tir. Ana destek açısının değişimi yığılmış blok yapısının değişimini temsil eder. Temel ile kayma yüzeyi arasındaki yaylar çatlak basıncını temsil eder. Ana destek belli bir derecede deforme olunca, yay destek hareketini alır.

Heyelan C noktasına ulaşınca hız,

$$V = \sqrt{\frac{2}{M} (U_d + U_n + U_s) + 2gh (1 - Fctg\alpha_1)} \quad (9)$$

eşitliği ile belirlenir.

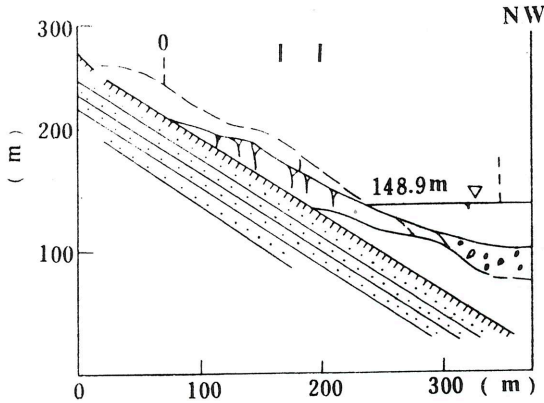
Kayma Zonu Akışlı Heyelan

a) Tipik örnek-Zhexi heyelanı

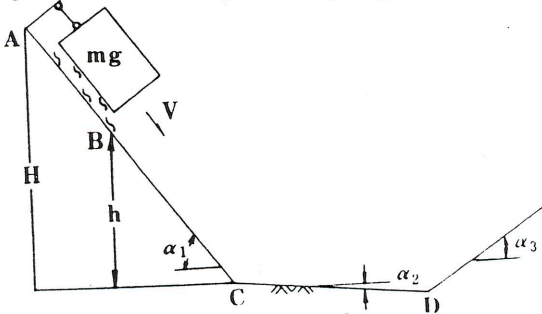
Çin, Hunan, Zhexi rezervuarında yer alan, Zhexi heyelanı, 6 Mart 1961'de meydana gelmiştir. Hacmi yaklaşık 165 000 m³ tür (Şekil 11). Ana jeolojik özellikleri Tablo. 6 da gösterilmiştir.

b) Kayma düzlemlili yüksek hızla akan ani heyelanın, duraysızlık mekanizması modeli.

Zhexi heyelanı yumuşak tabakalı bir düzlem boyunca hareket etmiştir. Heyelanın hızını denetleyen ana faktör, tabaka düzlemlili boyunca etkili olan sürtünme kuvvetidir. Rezervuardaki su birikmesi ve aşırı yağış nedeniyle, yeraltı su seviyesi yükselmiş ve zemin doygun ve plastik hale gelmiştir. Heyelanın düzensiz basıncı ve düz olmayan kayma düzlemlili, kayma işlemi sırasında, toprak zonun plastik olarak akmasını sağlamıştır ve bu durum sürtünme katsayısını çok mekanizması düşürerek, heyelanın yüksek hızlı hareketine neden olmuştur.



Şekil 11- Zhexi heyelanının jeolojik krokisi.



Şekil 12- Deprem Titreşimli Ani Heyelanın mekanizma modeli.

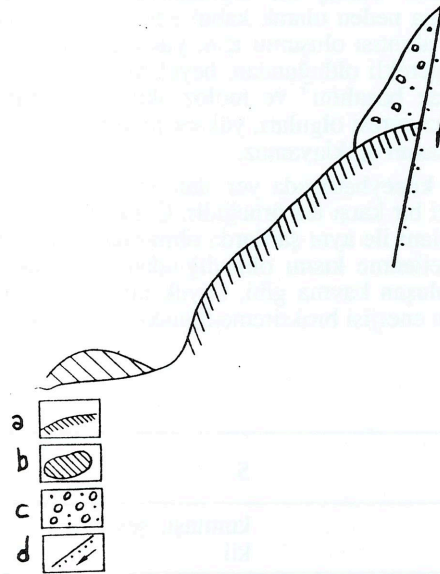
İtalya'daki Vaiont heyelanı, Zhexi heyelanı ile benzer özellikler taşımaktadır. Vaiont heyelanındaki kayma düzlemlili, birkaç milimetre kalınlığındaki şeyden oluşmaktadır. Böyle büyük bir sürtünme değeri ile heyelan 20-30 m/s gibi yüksek bir hızda kaymaz. Bundan dolayı Vaiont heyelanının mekanizması üzerindeki tartışmada, doymun zeminin plastik olarak aktığı şeklindeki olgu ihmal edilmemelidir.

Şekil 12, kayma düzlemlili akan, yüksek hızlı heyelanın duraysızlık mekanizması modeli olarak önerilmiştir.

Heyelan C noktasına ulaştığı zaman hızı,

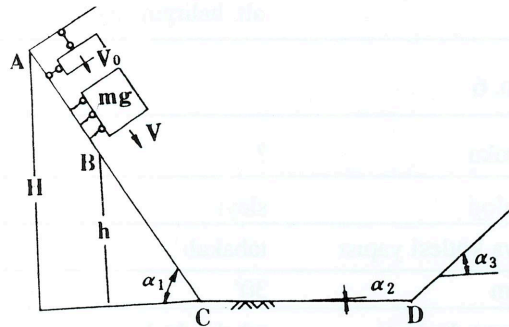
$$V = \sqrt{2gh (1 - fctg\alpha_1)} \quad (10)$$

eşitliği ile verilir. Burada, f akma-sürtünme katsayısıdır.



Şekil 13- Caoyuan Heyelanının krokisi

- a) Duraylı eğim
- b) Heyelanın yığılmış kütlesi
- c) Kalıntı duraysız kütle
- d) Fay



Şekil 14- Deprem Sarsıntılı Heyelanın Duraysızlık mekanizması.

Tablo. 7

Tablo	S	Deformasyon	belli değil
Litoloji	şeyller	Oluşum nedeni	deprem
Kaya kütleli yapısı	klastik yapı	3 boyutta konumu	"L" tipi
Eğim	60°	Hız	yüksek
Kayma düzlemi	üst 75°, alt 25°	Kayma mesafesi	360 m.
Makaslama şekli	160 m yüksek	Benzer heyelanlar	Zhaka,Daba,Huaqiang wan .v.b.

Kuvvet Kökenli Heyelanın Tipik Örnekleri ve Duraysızlık Mekanizması

Deprem sarsıntılı yüksek hızlı heyelanın tipik örneği-Caoyuan heyelanı

Caoyuan heyelanı 6 Eylül 1976 da Çin'in Huangyang vadisinde, Sichuan, Pingwu'da gelişmiştir. Hacmi yaklaşık 750 000 m³ tür (Şekil 13). Tablo 7 de ana jeolojik özellikleri verilmiştir.

Deprem Sarsıntılı Heyelanın Mekanizma Modeli

Çin'de yapılan araştırmalardan elde edilen bilgilere göre, heyelanların % 20 sinin oluşumu, yüksek hızlı harekete bağlı depremlerden kaynaklanmaktadır. Caoyuan heyelanı bunlardan tipik olan bir tanesidir. Deprem süreci sırasında kaymıştır. Deprem enerjisi kaymaya nakletmiştir. Şekil 14 deprem sarsıntılı heyelanın duraysızlık mekanizması modeli olarak önerilmiştir. Şekildeki yay desteği, depremden kaynaklanan enerjiyi heyelana iletir. Hareketin biri, düzleme yüklenen basıncı azaltmak, diğeri kayma kuvvetini yükseltmek içindir. Arka blok sadece heyelanın arkasının genellikle düşen blokların itmesine dayandığı gerçeğinin göz önüne alınması için tasarlanmıştır.

Heyelan C noktasına ulaşınca hız,

$$V = \sqrt{2h [g (1-f \operatorname{ctg}\alpha_1) + a (f+\operatorname{ctg}\alpha_1)]} \quad (11)$$

eşitliği ile verilir ve burada

∂ : Vibrasyon ivmesidir.

$a = \alpha g$ olduğu varsayılırsa (α bir katsayıdır)

$$V = \sqrt{2gh [(1+\alpha \operatorname{ctg}\alpha_1) + f (\alpha-\operatorname{ctg}\alpha_1)]} \quad (12)$$

elde edilir.

Yüksel Hızlı Heyelanın Duraysızlık Mekanizmalarının Kompozisyonu

Yüksek hızlı heyelan, doğal bir olgu olarak oldukça karmaşıktır ve bu nedenle hiç kimse sadece tek bir mekanizmanın etkin olduğuna inanamaz. Her türde yüksek hızlı heyelanlar için enerji birikimi ve büyük ölçekli yüksek hızlı heyelanların dönüşümü ve uygun mekanizma modelinin belirlenmesi analiz edilmiştir. Ancak bu, gerçekte yüksek hızlı heyelanların sadece bir tek mekanizma tarafından meydana geldiği anlamına gelmemektedir. Gerçekte her yüksek hızlı heyelan, her türde mekanizmanın bileşiminden oluşabilir. Belirlenen duraysızlık mekanizması modelleri sadece ana karakterlerini veya diğerlerinden farklılıklarını belirtir.

Bir örnek olarak Caoyuan heyelanı ele alınırsa, bu heyelan deprem etkisiyle oluşan tipik bir örnektir ve bu nedenle, deprem sarsıntılı duraysızlık mekanizması modeli olarak tanımlanır. Ancak, yüksek makaslama konumunun, yüksek hızda kaymaya gerekli olan enerjiyi sağladığı açıktır.

KAYNAKÇA

- Xiaoning, Wang: Study on the mechanism of Largescale Highspeed Landslides and the Prediction of Sliding Velocity and Distance. Dissertation for Doctor of Science 1989.
- Sijing, Wang, Xiaoning Wang: The Whole-process Energy Analyses of Highspeed Landslides. Proc. of ISEG, p. 415-426, 1987.
- Muller, L: New Consideration of Vaiont Slide. Rock Mech. Eng. Geol. v. 6, p. 105-121, 1968.